

國立臺灣大學工學院土木工程學系

碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

軌道車輛運用路徑規劃尋優模式之建立

Development of Optimization Model for

Rolling Stock Utilization Planning



劉國著

Kuo-Chu Liu

指導教授：賴勇成 博士

Advisor: Yung-Cheng Lai, Ph.D.

中華民國101年7月

July, 2012

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

軌道車輛運用路徑規劃尋優模式之建立

Development of the Optimization Model for
Rolling Stock Utilization Planning

本論文係 劉國著 君 (R99521505) 在國立臺灣大學土木工程學系碩士班完成之碩士學位論文，於民國一〇一年七月十一日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

賴 勇 成

(指導教授)

黃 台 生

張 明 煌

林 綦

施 佑 林

呂 良 正

賴 勇 成

黃 台 生

張 明 煌

林 綦

施 佑 林

呂 良 正

(簽名)

系主任

謝辭

兩年的研究所生活有著很多的回憶，在定稿的這瞬間還有點訝異已經走到了這一步，時間真的是走得太快！首先感謝指導教授賴勇成老師，無論在研究、課業以及生活上，這兩年真的給我太多的幫助和機會，學生所見所聞更是橫跨運工機電等豐富背景，所參與的研究計畫絕對能讓學生在未來的進程上，能不枉這交通組的碩士學歷！雖說浩瀚學海，然而我更同意涉筆成趣，期待能以此經驗做為基石，在將來的研究之路更加的努力。

論文的完成亦感謝黃台生教授、張明煌段長、鍾志成博士、林蓁博士以及施佑林博士給予的寶貴意見，無論是在模式建立、演算法開發，甚至是學術用語上給予灼見，以利學生的論文能夠更臻豐富而完整。另外，在此也要特別感謝臺灣鐵路局邱家財科長、何東寶段長，前輩們無私的分享過去的工作經驗，使學生所從事的研究課題的背後，注入了數十年來的實務的寶貴知識。

謝謝我的祖父母、父母親、慶哥、老妹，尤其感謝祖母和母親這兩年給我很多的關心，支持我能夠追順自己的想法求學，慶哥在交通界就學的經驗亦是我就學的明燈，另外還要特別感謝爺爺和在系上客座的叔公，兩位長輩從我錄取之後一路為我操心到畢業，希望這兩年的表現足以證明一開始我所承諾的「能靠自己走下去」。總之，在臺北生活讓我和家人有了更多的互動，謝謝家人的支持。

下定決心到回到臺北念書，也感謝在成大就學時期以來，對學生一路提拔的張有恆院長、蔡東峻主任、導師魏健宏老師，以及專題指導鄭永祥老師給我的支持與諄諄教誨，院長的三千萬大禮、蔡老師的精進觀、魏老師的貼心叮嚀令人難忘，鄭老師則是自大二開啟我研究之路，比起老師甚至更像是一位朋友般的給予鼓勵，即便在臺大的這兩年也備受老師們幫助，給予人生先進的導航。麗山高中時的恩師黃靜寧老師，指導我人生首篇專題研究報告，而後我不再侷限文獻回顧，對自己動手做更有信心和興趣、彭雅琪老師的語文鍛鍊亦為今日奠下重要基石。

感謝這兩年內相遇軌道團隊的各位，能和大家一起做研究是我的福氣。特別是施美成學長，學長總是早先一步為我提點方向，和你坐前後的日子時常可以暢談人生觀，確立了我更多的理想和目標。感謝帶領我入門鐵路車輛研究的微雯學姊，思涵學姊、詠安、允宣學長在我剛進臺大時，給予很多的照顧，讓我能逐漸熟悉這兒的研究環境。謝謝同袍聰明卻愛欺負我的志生、沉默是金的冠廷、資優生姿雅、車輛專家柏文，和大家努力的時光是愉快的，能暢所欲言大談鐵路，同甘共苦激盪出絢爛而不平凡的火花。還要感謝團隊中所有的學弟妹，同為方法組的道中、陳佑、鈞皓，秘書部的軒宇，還有耘禎、倫儒、柏穎以及宣宏。道中和軒宇要對自己有信心一點，凡是可以很淡定，但我認為追求完美的心態是能引領人們扶搖直上的契機；陳佑、鈞皓即將先一步踏上旅外生活，預祝順心順利。

感謝交通組 99 級的各位，特別是和我同班六年的政修，大一和你在寢室捧著會計課本背書的畫面至今歷歷在目，無論在學業、研究、營隊、活動上你都是我

學習抑或切磋的好夥伴，相信未來同在交通運輸界發展的我們，一定還更有相幫相助的機會，套句老話：「光二的我們會一起拚、一起加油！」。小倉雖然個性大條，但你和港仔、小璇面對事情的時候絕對最講義氣！常駐 316 實驗室的家齊是我們最後一道防線，健豪和我在學期間寫了很多部絢麗的鄉土和偵探劇本，黑糖糕小開馬克、牛肉乾小開輝哥是我們重要的點心來源，凡事講求效率的依靜也要好好地照顧我學長，還有未來要留下來工作的哲維和 RA 珮如，也預祝兩位順利！海上男兒小祐爺爺跟宗軒三叔公，恭喜資格考合格，相信你們馬上就能獲得博士學位！316 的過客勝翔、博元學長，謝謝你們從大學以來的照顧，大雨學長身為前輩，未來在軍中請多指教；幫助我最多的是彥向學長，回憶起和你一起修的三門方法論課程，如果沒有你在一旁使力，我絕對不會有這麼多的收穫。

而不遠的 312 學弟妹，五年前的小隊員信宏、曾經合作過的小隻、江江，還有開心果傑理、跳級生翔捷、高個子的奕辰、容易被臨檢的承晏、明日之星鴻軒，去你們那裏打打鬧鬧總讓人相當開心，大家的研究精神讓我感到交通組是如此的人才濟濟，各位未來加油，期待預留下來的旅行可以順利進行。

人親土親的台南一直是我遇到瓶頸時的庇護所，感謝大學以來的好夥伴松鼠古宇翔，沒想到最後竟然和你一起走上 OR 這條不歸路，遠在南北竟然還可以互相聊怎樣去解構模式，所幸都熬過去了！一路相伴的 CC、昌昌、仙女、阿查、大 A、K 立。另外特別感謝近在北交的重光，每月的消夜聚會是我們大聊特聊或交換八卦的重要行程，和朋友們相聚其實甚麼都不用做，靜靜著就很快樂。以前常駐 X09 的夥伴水哥、正賢、侑君前輩，以及葉子家族的各位：文進、阿型、葉子、滌塵、柏瑞、皓皓、宜邦，每每在我回台南時安排超大驚喜，例如交控中心的 LED，我真的很珍惜我們直屬家永遠給我溫暖的容身之處。也謝謝妳，我總說人與人之間不可強求，感謝說長不長說短不短的這段歲月！

感謝成鐵的長輩晚輩，好搭檔兼麻吉孝博兄雖然早一年離開了臺大，卻也即將踏入鐵路的研究行列、開啟未來更多的機會合作，期待一起加油和努力的拚出國進修！吃喝玩樂組的柚子也是，要好好照顧滌塵但不要再把他養胖。此外，炫均、書豪、信雄、冠廷、重仰、泓儒、智傑、半島、育安、仲皓、彥彬、瑞鴻、王易、阿男、守威、宗宏；追本溯源，這裡是我和軌道研究的轉運站、更進一步認識軌道的點滴，各位是我研究幕後很大的動力，就是因為我期待著每一次和各位的出草，所以一定會在那天前拚完我當週所有的研究工作。

最後，要特別感謝我的偶像—亞洲天團浩角翔起，兩位雖然只在電視上散播歡樂，卻實質地在研究生涯中陪我度過了每個煩悶的夜晚，而浩子的名言：「機會不能奢求，但命運永遠是掌握在自己手上的。」這讓我掌握著自己的命運而進入碩士班，腳踏實地而努力地實現自己的夢想，我相信他們還會繼續伴隨著我在未來的生活中邁向更多的期待。

還要謝謝參考這篇論文、讓後續研究更臻完美的你！謝謝上天與文昌！

劉國著 于 花蓮縣秀林鄉崇德車站 2012.08.11

摘要

軌道車輛為其營運所需中最昂貴的設備之一，如何有效的運用此項資產，以達到高效率的實務規劃，對整體系統的營運而言極為重要。本研究旨在探討車輛資源規劃中的「運用路徑規劃」問題，其係在考量路線、場站容量、車輛特性以及維修等諸多限制條件下，透過接續各車次及任務以生成「運用路徑」，再藉由多條運用路徑滿足欲規劃週期內所有車次的需求，而後彙整為「車輛運用表」於時刻表改點間重複使用。實務作業中，有經驗的作業員可透過人工排訂一套良好的車輛運用表，然其僅為一組近似解而無法保障其為全域最佳解。又車輛運用為實務中較細節的課題，過去的學術文獻涉獵較少，且多將問題大幅簡化，以致難以取得一套真正可輔助實務規劃使用的決策系統。

有鑑於此，本研究同時透過文獻回顧並對實務單位進行專家訪談，雙管齊下彙整影響運用路徑規劃決策的目標及因子。而後透過具有週期性的圓形二維時空網路圖作為問題架構，進而建立兩組不同的數學模式輔以求解。為了精進求解時間以為實務支援決策之用，本研究採用變數產生法中的 Gilmore-Gomory 演算流程，再將問題進行解構並發展一個「運用路徑規劃求解演算法」，透過有力的對偶理論為基礎，以建立一套軌道車輛運用路徑規劃的決策工具。

本研究透過求解臺鐵局實務案例，以驗證並測試其正確性與可行性。其規劃時間較人工而言改善許多，在未考量後續人員規劃的情況下，可維繫最低的迴送成本，並有效降低現有的檢修次數，使總成本可減少約 20~25%。研究成果貼近實務並具有顯著績效，適合用以延伸推廣，以作為輔助實務作業員從事運用路徑規劃決策所用。

關鍵字：軌道運輸、運用路徑規劃、運用表、解構技術、變數產生法。

Abstract

Rolling stock is one of the most expensive assets of a railway agency or company. Therefore, efficient utilization of rolling stock is a very important objective pursued in practice. This study proposed a Rolling Stock Utilization Planning Tool to improve the efficiency of rolling stock usage by creating a utilization schedule to cover the trips in the timetable with the consideration of practical requirements, such as inspection regulation, depot capacity, rolling stock characteristics, and most important of all, the idea of schedule circulation.

Past studies usually simplified the problem by ignoring some of the important factors in practices; therefore, most of the railway agencies or companies still rely on experienced planners for this task. These practitioners can generally create an acceptable plan but there is no guarantee of the optimality. Consequently, there is a need for a planning tool which takes all important factors into account and provides optimal solutions to this problem.

In order to develop such tool, this research first identified the appropriate factors by reviewing literatures and interviews with practitioners. Then the Rolling Stock Utilization Planning Model is developed to minimize the deadhead cost and inspection cost in rolling stock utilization planning cycle. This study also presents the column generation method with Gilmore-Gomory algorithm to improve the solution efficiency, especially for large-scale problem.

The practical cases of Taiwan Railways Administration were used to demonstrate the validity and applicability of the proposed tool. The empirical results show that this optimization process can produce more efficient utilization plans with minimal deadhead distance and significant reduced number of inspections compared to the manual process. It's equivalent to successfully reduce the total deadhead and inspection cost by 20%~25%. Using this decision support tool will help railways improve the efficiency of rolling stock utilization so as to provide reliable service to their customers.

Key Words: *Rail Transportation, Rolling Stock Utilization Planning, Utilization Schedule, Decomposition Skill, Column Generation Method*

目錄

口試委員審定書	I
謝辭	II
中文摘要	IV
英文摘要	V
目錄	VI
圖目錄	IX
表目錄	XI
第一章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究動機	3
1.3 研究內容與範疇	5
1.4 研究目的	6
1.5 研究方法	8
1.6 研究流程	8
第二章 文獻回顧	11
2.1 軌道運輸規劃流程	11
2.2 軌道車輛運用路徑規劃問題	13
2.2.1 機車運用路徑規劃	15
2.2.2 非動力車輛運用路徑規劃	18
2.2.3 混合機車與非動力車輛運用路徑規劃	19
2.2.4 車組式車輛運用路徑規劃	23
2.3 文獻回顧綜合討論	30
2.3.1 目標函數	31
2.3.2 限制條件與子問題	31
2.3.3 數學模式建立方法	34
2.3.4 綜合整理	35
第三章 臺鐵車輛運用路徑規劃實務	39
3.1 臺鐵車輛資源規劃實務導論	39

3.2 臺鐵車輛運用路徑規劃實務導論	42
3.2.1 臺鐵車輛運用路徑規劃人員執掌	42
3.2.2 臺鐵車輛運用路徑涵蓋之車輛任務	44
3.2.3 臺鐵運用表之判讀	46
3.3 臺鐵車輛運用路徑規劃實務決策邏輯與流程	48
3.3.1 實務規劃決策因子彙整	50
3.3.2 數學符號定義	55
3.3.3 人工規則與選取機制定義	57
3.3.4 實務運用路徑規劃決策流程	61
3.4 臺鐵運用表更新案例	68
3.4.1 案例一	69
3.4.2 案例二	70
3.4.3 案例三	71
第四章 軌道車輛運用路徑規劃數學模式建立	75
4.1 運用路徑規劃數學模式建立方法回顧	75
4.1.1 多元物流問題法之模式評析	76
4.1.2 指派 (Assignment) 問題法之模式評析	84
4.1.3 數學模式建立方法綜合討論	85
4.2 問題架構定義與決策因子彙整	85
4.3 運用路徑規劃最佳化模式	90
4.3.1 建立網路模式與數學符號說明	90
4.3.2 運用路徑規劃數學模式一：混合整數規劃直觀模式	100
4.3.3 運用路徑規劃數學模式二：二元整數規劃加速模式	108
4.3.4 場站與路線容量延伸模式	118
4.4 數學規劃模式綜合討論	119
第五章 軌道車輛運用路徑規劃求解演算法之研發	123
5.1 各類解構機制應用於運用路徑規劃之評析	123
5.2 變數產生法簡介	126
5.3 基於變數產生法拆解問題	128
5.3.1 受制主問題	130
5.3.2 子問題	136

5.4 車輛運用路徑規劃變數產生法演算流程	141
第六章 實證案例分析	147
6.1 比較基準定義與說明	148
6.2 案例一：小規模虛擬測試案例	150
6.2.1 案例一輸入參數資訊	150
6.2.2 案例一求解結果	152
6.3 案例二：花蓮機務段 DR2900 與 DR3000 型柴聯自強號車隊	156
6.3.1 案例二輸入參數資訊	156
6.3.2 案例二求解結果	158
6.4 案例三：新竹機務段 EMU500 與 EMU600 型電聯區間車車隊	160
6.4.1 案例三輸入參數資訊	160
6.4.2 案例三求解結果	163
6.5 案例綜合討論	164
第七章 結論與建議	167
7.1 結論	168
7.2 研究貢獻	171
7.3 建議	174
7.3.1 實務應用建議	175
7.3.2 後續研究建議	179
參考文獻	181
附錄一 臺灣鐵路管理局各型機車檢修週期表	191
附錄二 案例二求解結果	195
附錄三 案例三求解結果	209
作者簡歷	233

圖目錄

圖 1-1 車輛資源運用規劃決策邏輯圖	2
圖 1-2 運用表使用時程示意圖	3
圖 1-3 研究流程架構圖	9
圖 2-1 軌道運輸規劃作業流程圖)	12
圖 2-2 軌道車輛資源運用規劃決策分層示意圖	15
圖 2-3 車輛運用路徑之時空網路範例圖	21
圖 2-4 列車組概念圖	23
圖 2-5 移動圖之範例	25
圖 2-6 維修運用路徑之範例圖	26
圖 2-7 無方向改變之案例圖	28
圖 2-8 運用路徑規劃之各子問題與因子示意圖	32
圖 3-1 臺鐵現行動力車組運用路徑範例圖	46
圖 3-2 運用路徑規劃三階段作業流程概要示意圖	49
圖 3-3 運用路徑規劃決策邏輯-第一階段規劃流程圖	63
圖 3-4 運用路徑規劃決策邏輯-第二階段規劃流程圖	66
圖 3-5 運用路徑規劃決策邏輯-第三階段規劃流程圖	68
圖 3-6 人工製作運用路徑案例一	70
圖 3-7 人工製作運用路徑案例二	71
圖 3-8 人工製作運用路徑案例三—平日	73
圖 3-9 人工製作運用路徑案例三—假日	73
圖 4-1 運用路徑規劃數學模式建立方式分類	76
圖 4-2 圓形時空圖範例圖	82
圖 4-3 運用路徑規劃決策模式架構示意圖	87
圖 4-4 空間及 (A) 時間 (B) 時間帶 定義節點示意圖	92
圖 4-5 運用路徑規劃網路結構示意圖	92
圖 5-1 變數產生法 GILMORE-GOMORY 演算法求解概念示意圖	127
圖 5-2 依變數產生法之 GILMORE-GOMORY 演算法拆解問題之概念示意圖	129
圖 5-3 車輛運用路徑規劃求解流程圖	142
圖 6-1 案例一網路規劃示意圖	154

圖 6-2 案例一求解結果 155
圖 6-3 以三節為一組的 DR2900、DR3000 型柴聯自強號車組 156
圖 6-4 以四節為一組的 EMU500、EMU600 型電聯車組 160



表目錄

表 2-1 機車運用路徑規劃文獻整理	36
表 2-2 非動力車輛運用路徑規劃文獻整理	36
表 2-3 機車與非動力車輛同時進行運用路徑規劃文獻整理	37
表 2-4 車組運用路徑規劃文獻整理	37
表 3-1 臺鐵車輛資源規劃相關任務執掌彙整	40
表 3-2 臺鐵各車型運用路徑規劃任務執掌與人力配置	43
表 3-3 臺鐵局 1A 級車輛檢修週期表範例（柴聯車部分）	53
表 4-1 運用路徑規劃網路各節線定義彙整	94
表 5-1 各類常見解構演算法應用於運用路徑規劃問題之評析	125
表 6-1 評估比較基準之計算單位	149
表 6-2 案例一基本車站與場站功能資訊	151
表 6-3 案例一輸入參數值	151
表 6-4 採用不同演算機制求解案例一之成果比較	153
表 6-5 案例二基本車站與場站功能資訊	157
表 6-6 案例二輸入參數值	158
表 6-7 案例二求解成果比較	159
表 6-8 案例三基本車站與場站功能資訊	161
表 6-9 案例三輸入參數值	162
表 6-10 案例三求解成果比較	163
表附 1-1 柴電機車、柴液機車、柴聯車、柴油客車檢修週期表	191
表附 1-2 電力機車、推拉式車輛檢修週期表	192
表附 1-3 電聯車車輛檢修週期表	193
表附 2-1 案例二求解結果-週一運用表	195
表附 2-2 案例二求解結果-週二運用表 (1/2)	196
表附 2-3 案例二求解結果-週二運用表 (2/2)	197
表附 2-4 案例二求解結果-週三運用表 (1/2)	198
表附 2-5 案例二求解結果-週三運用表 (2/2)	199
表附 2-6 案例二求解結果-週四運用表 (1/2)	200
表附 2-7 案例二求解結果-週四運用表 (2/2)	201

表附 2-8	案例二求解結果-週五運用表 (1/2)	202
表附 2-9	案例二求解結果-週五運用表 (2/2)	203
表附 2-10	案例二求解結果-週六運用表 (1/2)	204
表附 2-11	案例二求解結果-週六運用表 (2/2)	205
表附 2-12	案例二求解結果-週日運用表 (1/2)	206
表附 2-13	案例二求解結果-週日運用表 (2/2)	207
表附 3-1	案例三求解結果-週一運用表 (1/4)	209
表附 3-2	案例三求解結果-週一運用表 (2/4)	210
表附 3-3	案例三求解結果-週一運用表 (3/4)	211
表附 3-4	案例三求解結果-週一運用表 (4/4)	212
表附 3-5	案例三求解結果-週二運用表 (1/3)	213
表附 3-6	案例三求解結果-週二運用表 (2/3)	215
表附 3-7	案例三求解結果-週二運用表 (3/3)	217
表附 3-8	案例三求解結果-週三運用表 (1/2)	218
表附 3-9	案例三求解結果-週三運用表 (2/2)	219
表附 3-10	案例三求解結果-週四運用表 (1/4)	220
表附 3-11	案例三求解結果-週四運用表 (2/4)	221
表附 3-12	案例三求解結果-週四運用表 (3/4)	222
表附 3-13	案例三求解結果-週四運用表 (4/4)	224
表附 3-14	案例三求解結果-週五運用表 (1/3)	225
表附 3-15	案例三求解結果-週五運用表 (2/3)	226
表附 3-16	案例三求解結果-週五運用表 (3/3)	227
表附 3-17	案例三求解結果-週六運用表 (1/2)	228
表附 3-18	案例三求解結果-週六運用表 (2/2)	229
表附 3-19	案例三求解結果-週日運用表 (1/3)	230
表附 3-20	案例三求解結果-週日運用表 (2/3)	231
表附 3-21	案例三求解結果-週日運用表 (3/3)	232

第一章 緒論

1.1 研究背景

運輸係為衍生性之需求，在工商活動急遽發展之今日，各國的運輸需求隨之遽增，以致運輸系統逐漸趨向飽和。良善的運輸服務將助於有效縮短時間距離，促使各國政府以基礎建設為根基，甫提升運輸系統之效率，以利資源更有效的利用，亦引領著區域經濟的發展與進步，是故「運輸系統」與「經濟發展」兩者間存在相輔相成的關係(Iacono et al.,2008;Wey and Chang, 2009;Blakely and Leigh, 2010)。在過去的數十年內，世界各國的私有運具持有數不斷攀升，連帶促成政府著手興修道路設施並重於公路運輸之發展，然近日隨著地球村逐漸面臨國際能源短缺問題，環境保護以及永續發展(sustainable development)的意識亦日漸抬頭，軌道運輸在這樣的背景下再次嶄露頭角，其兼具安全性、運輸效率、土地使用與環境永續性等優勢，無論在中長程或區域性的客貨運輸，均被視為發展主流之一(Rietveld, 2000; Profillidis, 2006; ASSHTO, 2007; Givoni and Rietveld, 2007; Poudenx, 2008; Alexandersson et al., 2010; Chen and Alexander, 2012)。然軌道運輸之基礎建設係為鉅額投資，具有高沉沒成本的特性(Sahin et al., 2009)，如何善用各類軌道運輸資源，使其最有效率地用以承載客貨，係為今日刻不容緩的議題(Ahuja et al, 2005)。

車輛資源為軌道運輸中最主要卻又昂貴的設備之一，其亦為鐵路運輸服務的基本執行單元，使用週期動輒二、三十年以上，並為高成本的投資(Rus and Nombela, 2007; McCartney and Stittle, 2012)，以我國臺灣鐵路管理局(後文以臺鐵局代稱)近年添購太魯閣自強號一案為例，八節車廂的電聯車組要價台幣六億餘元(日本車輛製造株式会社, 2011)，台灣高鐵列車組每組價格約台幣十七億元。是故依據各營運者的財務能力而論，車輛添購對於軌道運輸單位而言實為不易(Chung et al, 2007; Peeters and Kroon, 2008)。故在中、短期程內探究的規劃課題中，透過妥善

安排既有車輛資產，使其達到最高效率的運作，以滿足逐步擴張的鐵路運輸需求，是為今日軌道運輸業者重視的先決目標之一（Sussman, 2000；Ahuja et al, 2005；Alfieri et al., 2006；Cadarsó and Marín, 2010；Cadarsó and Marín, 2011），是為「車輛資源運用規劃」課題。

「車輛資源運用規劃」實質上承滿足營運需求的時刻表，而後逐步發展出一套兼具「提高作業效率」與「降低作業成本」兩項目標的「運用規劃」架構(Sussman, 2000；Lai et al., 2011)，其為軌道運輸實務作業中較細節的部分。而縱觀國內外各類軌道運輸系統，實務上將「車輛資源運用規劃」，分作兩部分進行，如圖 1-1 所示，分別為（1）運用路徑規劃，以及（2）車輛調配規劃，茲簡介如後。



圖1-1 車輛資源運用規劃決策邏輯圖

「運用路徑規劃」係透過給定時刻表，進行一個「短天期」週期內的路徑規劃作業，以在法令的安全限制之下，透過接續「營運車次」、「站間等待」、「迴送」、「初級檢修」與「油料填充」等不同任務，串聯出週期內車輛所需執行與行駛的任務順序，是為一條「運用路徑」，而透過多條運用路徑涵蓋每日時刻表

中各級列車之服務範圍，則生成肩負中介功能的「運用表」。運用表的功能與使用方式可參考圖 1-2，其詳載了運用路徑規劃所決策各型車輛應執行的運用車次，以及可能需進行的基本檢修與清潔，須於每次時刻表改點後更新，並可適用於兩次時刻表改點間做規劃使用，其將依據時刻表的使用循環選定適當的規劃週期（例如：臺鐵路以七天為規劃週期），連續地於各規劃週期間重複使用，以為後端的調配規劃參考，即具有得以「規劃短期、長期使用」的特質。

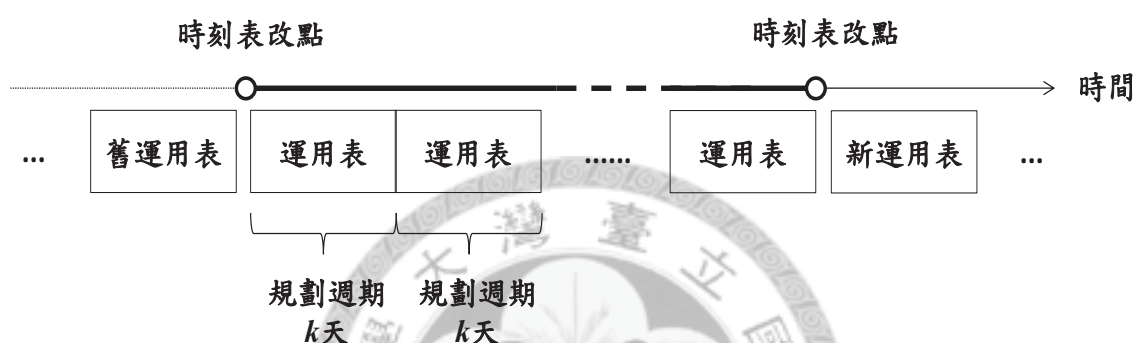


圖1-2 運用表使用時程示意圖

而後續尚需進行「長天期」的規劃運用順序，是為「車輛調配規劃」，並考量實際各級檢修規定之限制，以利作業人員「調配」合宜的車輛去「執行」排定的各條運用路徑，以生成最後的實務運用結果。至於運用路徑規劃及車輛調配規劃，其兩者之間應如何相互搭配設計或協調，依據各業者營業之慣例各有所異，又調配規劃並非本研究所涉及之範疇，在此不另行討論。

1.2 研究動機

在傳統鐵路運輸的營運系統中，悠久的營運歷史與複雜的客貨任務，多半造就其內具有相當多元的車隊結構（Lu and Marsh, 2011），密集度高且分工縝密的儲車與維修基地（陶冶中與劉嵩瀚，民 97），甚至其繁複的檢修與法令規定等特性（Cheng and Tsao, 2010；Sun and Li, 2010），在在是為營運業者面臨的難題。回顧國內過去於軌道運輸規劃相關的研究中，自先導性的運量預測（張學孔，民 88；

Tsai et al., 2009; 鍾慧諭、黃于真, 民 101)、路網設計(姜渝生, 民 94; 張倍瑜等, 民 98; 鍾慧諭等, 民 101)、客貨服務計畫(李治綱、林正章, 民 88; 蘇昭銘等人, 民 90; 李治綱、謝汶進, 民 91; Cheng and Tsao, 2010)乃至末端的組員排班問題(盧宗成, 民 89; Wang and Lin, 2010)等, 均有相當多元且豐富的發展, 國際間的研究亦復如是。

唯獨「車輛資源運用規劃」是為實務作業中較細節的部分(曾微雯, 民 100), 又歸因軌道運輸業本身的對外封閉性較強, 是故各國在過去的研究涉獵相當有限, 其研究對象又以較簡單的捷運系統、高速鐵路、貨運鐵路或結構單純的軌道營運業者為主, 在實務問題細節的處理上亦多有省略, 對於具有複雜限制的傳統鐵路運輸產業, 無法執行有效率的車輛資源規劃, 此舉衍生出一個惡性循環, 乃至許多營運者, 今仍以人工製作或調整所需之運用表。人工作業須仰賴作業員之經驗與熟悉度, 其不但費時、費工且難以確保規劃結果達到全域最佳解(global optimum), 在面對軌道運輸業者進行班次調整, 抑或時刻表變更時, 複雜而龐大的班表及車輛、車種組成, 致使作業員勢必得對現有規劃進行全盤修正。除此之外, 仰賴人力作業在大規模問題的處理上更顯得沒有效率, 以臺鐵局與早年日本國鐵數次大改點的案例而言, 其作業時間多花費數個月以上。而營運者所關注更重要的部分, 其在於作業員之師徒承襲關係, 除了具有限制運用規劃革新之慮外, 亦難以維繫其作業流程之永續使用。

基於車輛資源規劃之其前後端的文獻完整, 本研究相信這些研究已經足以支持良好的時刻表製作及其後端的營收決策, 解決資源規劃作業之前後作業問題, 故本研究在此僅針對「車輛資源運用規劃」部分發展有系統性的決策支援研究。根據圖 1.1, 其中位於後端的「車輛調配規劃」部分, 因其涉及每個營運日的即時更新, 故建議採行人工調整或參佐具有最佳化背景的決策框架(Lai et al., 2011; 曾微雯, 民 100)安台較佳, 然其輸入之依據仍必須取決於其前端的「運用路徑規

劃」成果輸出的「運用表」。運用表將在後續調配作業中循環使用，故倘若運用路徑規劃之成果沒有效率，將造成運用表規劃週期內不必要的成本支出（Cordeau et al., 2000；Cordeau et al., 2001^a；Cordeau et al., 2001^b；Alfieri et al., 2006；Fioole et al., 2006；Chung et al., 2007；Peeters and Kroon, 2008），依此接替使用將導致資源不當浪費的惡性循環，以致無法造就良好的整體規劃結果，可見其重要性不容小覷。

有鑑於上述趨勢，本研究首將著重於「運用路徑規劃」部分作為研究課題，透過已生成的時刻表資訊，安排規劃週期內的營運車次、車輛迴送以及檢修以為路徑，並配合後端調配所需，維繫各場站週期內的進出車輛數守恆，初步免除後續路徑接續間不必要的迴送成本。綜合上述現況，本研究擬發展一套以數學規劃為基礎的自動化「運用路徑規劃」決策支援模式，用以輔助人工作業員執行規劃，相較於過去學術文獻而言，將探討更細部的檢修、油料填充、多天期規劃或多車種反應於模式之可行性等課題，以彌足過去研究於實務問題處理上之不足，以利結構較複雜的傳統鐵路營運系統亦可採用以輔助決策。其數學模式將利於規劃結果達到全域最佳化，以提升軌道車輛使用效率，更進一步而言，所減少營運成本亦有助於軌道營運業者尋求收益最大化。自動化系統透過已排定時刻表，生成各級車種車輛的「運用表」，並輔助決策各車次任務以及初級檢修作業之串聯順序，將各場站欲從事初階的檢修需求、各時間帶留置的車輛數等問題事前規劃，期可大幅節省人工規劃作業時間，更維繫運用路徑規劃作業之永續性。數學模式初以結構極為複雜的我國臺鐵局系統為對象設計，經簡化過後亦可適用於高速鐵路以及區域捷運系統，以從事有效率的規劃。

1.3 研究內容與範疇

本研究旨在解決車輛資源運用規劃中前端作業的「運用路徑規劃問題」，並將發展一套以最小化成本為基礎的自動化決策支援工具，其透過已排定之時刻表作為依據，細膩的考量各運用路徑的安排機制，包含硬體設備的限制、各車次期望

車型以及作業時間等項目，將其內「車次」間的乘務予以串連，並考量車次兼蓄間運用所涵蓋的「站內等待」、「車輛迴送」、「車輛檢修」與「油料填充」等各項可能的任務。其結果可用以輔助軌道運輸業者，自給定的時刻表資訊，安排並決策合理而高效率的車輛運用表。

本研究初步規劃，將先行以我國臺鐵局之傳統鐵路系統，作為發展運用路徑規劃決策之依據。其原因在於，臺鐵局除了班次慎密且各車次的起迄位置不固定之外，其車隊現況係包含有多國籍的各式車輛 (Lu and Marsh, 2011)，又各自擁有所屬的營運範圍、檢修規定以及管理車輛的機務段或檢車段 (Cheng and Tsao, 2010)，且檢修與油料填充時段並無限制可彈性使用，全運用路徑規劃之彈性亦不限於一天 (或某幾天) 以內 (何進郊，民 78)，是故臺鐵局所面臨的決策問題較世界上多數的鐵路公司更甚複雜。具豐富經驗的技術人員可以安排出一組不錯的運用表，然其亦須花費許多時間於規劃上，故本研究以此為基礎，發展用以解決問題的最佳化機制與決策支援模式，將有助於細膩的考量各項運用路徑規劃中的子議題進而輔助規劃決策。而欲將此本研究成果使用於其餘較單純的軌道運輸系統，僅需依其特性簡化既有的數學模式，即可使用以從事有效率的規劃。

1.4 研究目的

本研究依據前述軌道運輸業之發展背景及動機，欲探究「軌道運輸系統之運用路徑規劃」問題，羅列研究目的如下所述：

- (1) **分析與確立「車輛運用路徑規劃」於軌道運輸規劃流程中的定位：**運用路徑規劃問題在過去研究的層級定位不明，本研究將透過文獻回顧與實務訪談雙管齊下，了解該問題所涉及的決策範疇，重新為運用路徑規劃問題給予其於鐵路運輸規劃流程中的定位，並給予後續模式發展與決策因子彙整合理之界線。

- (2) **分析車輛運用路徑規劃決策意涵，並彙整所涉及的決策因子：**本研究將透過回顧國內外軌道車輛運用路徑規劃之相關之文獻，並結合訪談軌道營運單位從事運用表規劃的實務人員，彙整上述的成果收斂運用問題所考評之情境及影響因素等，此將助於本研究以為後續目標函數或限制式之發展基礎。文獻回顧部分亦有助於分析過去構築數學模式的方法，了解車輛運用路徑規劃問題之關鍵決策要素。
- (3) **研發車輛運用路徑規劃最佳化數學模式：**本研究將採用數學規劃法，以最小化成本建立運用路徑規劃之決策數學模式，將給定的時刻表資訊透過自動化技術，以輸出最佳化車輛運用路徑規劃結果，包括運用表及各場站可能的初級檢修時程規劃。此將有助於在滿足各營運車隊、法令規定與基礎建設相關的限制條件下，將既有的車輛資源作最有效的運用。
- (4) **建立車輛運用路徑規劃之尋優演算法以精進求解效率：**運用路徑規劃問題本身的特性屬於一個 NP-hard 問題，隨著規劃週期的增長，其包覆之車次數將隨之增加，致使解題之時間複雜度將呈現指數上升，為了讓大規模的案例得以在可接受的時間內求解完成，以應對實務作業所需，本研究針對問題特性尋找更有效率的求解方式，包括數學模式的改進或可能的求解演算法，以達到減少求解時間之成效。
- (5) **彙整決策支援工具進行實務案例之測試與驗證：**為了提升研究成果的實用性，本研究將以臺鐵局實際資料進行測試，並藉由測試的結果重複修正數學模式之參數值，以提升決策支援模式之準確性與可靠程度，亦將驗證模式分析之正確性，以利未來可作為實務輔助決策之用。
- (6) **輔助實務規劃、提升車輛運用績效：**基於前項實務案例測試之實證，逐步修正良好的運用路徑規劃成果，作為有效率的規劃以提升研究績效。本研究一方面針對實務單位該如何應用本模式輔助作為初步規劃建議作

業程序，另討論延伸將此決策支援工具，應用於輔助其他軌道運輸課題作為決策之適用性與可行性。

1.5 研究方法

本研究將分別透過文獻回顧法、以及對運用路徑規劃實務人員進行深度訪談，以界定運用路徑規劃問題，進而了解運用路徑規劃所著重的關鍵子問題與限制，並洞悉現有數學規劃模式之優劣。而後將透過數學規劃法建立兩套可行的車輛運用路徑規劃之數學模式，其可以直接使用商用軟體進行求解。然而基於問題具有較高的複雜性，本研究亦透過變數產生法為基礎解構問題，並發展一套車輛運用路徑規劃求解演算法。參酌三種模式在小規模問題上驗證其正確性後，在皆可求得最佳解的前提下，遴選求解時間較短者進行實務案例之評估。並將求解結果與人工規劃成果進行分析比較，進而了解本研究所能呈現之成果與未來研究方向。

1.6 研究流程

本研究主旨在於建立一套可適用於不同軌道車輛的「運用路徑規劃」決策支援模式，其研究流程圖與架構，如圖 1-3 所示。

首先基於研究背景與動機，擬定整體的研究目標係發展軌道運輸車輛之「運用路徑規劃」之決策支援工具，並於此建立研究範疇以及後續的研究方向與流程架構，詳如第一章所呈現。

而後透過大量的回顧過去的文獻，以了解研究課題中可能的偏好與目標，或可作為影響決策之因子與限制，乃至各文獻內所呈現同時解答的議題、數學模式的建立方法以及可能的解題技巧，作一完整的回顧，詳如第二章所呈現。

為了更進一步了解實務問題特性，並彌補過去文獻涉獵所不及，本研究將就實務從事軌道車輛運用路徑規劃的「臺鐵局機務處車輛科」，實行專家進行訪談。訪

談成果將可與文獻回顧部分相互參佐，以決策後續重要的因子。另可繪製人工決策流程圖，作為後續研究欲建立其餘演算機制之參考，詳如第三章所呈現。



圖1-3 研究流程架構圖

就前述兩章收斂運用路徑規劃問題中重要的目標、因子與限制，並以相關問題之數學模式架構與邏輯為基礎，發展適合本案輔以決策運用路徑規劃之數學規劃模式，透過最佳化函數的概念以自動化的技術輔助決策，詳如第四章所呈現。

為了確保求解時間可為實務規劃之用，並助於後續發展完整的決策支援框架及工具。本研究亦將就問題結構加以解構，發展合理的演算機制以求更迅速的求解運用路徑規劃問題，詳如第五章所呈現。

數學模式與加速的演算機制，將透過較小的案例反覆測試與驗證模式之可行性，而後選擇其中績效最佳者，以臺鐵局 100 年 9 月 28 日改點後時刻表為例，進行真實的個案測試，以了解模式或演算法之實用績效，進而證實本決策支援工具相較於人工規劃而言可帶來之時間效益及財務效益，詳如第六章所呈現。

最後，本研究將就實證結果進行分析，並就其績效、運用路徑串聯過程之優劣及其可延伸的課題加以考評，俾以評估並研擬此決策支援工具應如何應用於輔助實務規劃，以及其用於輔佐其他軌道運輸決策任務之適合性與可行性，作為應用與後續延伸研究之參考，詳如第七章所呈現。

第二章 文獻回顧

本研究旨在解決軌道運輸系統中的車輛「運用路徑規劃」問題，其隸屬於軌道車輛資源規劃的範疇以內，用以實踐在某個特定的規劃週期中，參照給定的時刻表車次，並考量各類軌道運輸系統營運時，硬體上的基礎建設限制，以及軟體上的作業規範，以串聯各項任務構成完整的「運用路徑」，並彙整所有的運用路徑可作為「運用表」，以預先作為後續調配規劃備用。

本章將於 2.1 節先就「軌道運輸規劃」所涉及的規劃流程以及各階段輸入、輸出與決策活動作為回顧，以理解研究主軸在整體軌道規劃流程中的定位，進而了解後續研究所需設定的問題結構及範疇。其後於 2.2 節則針對過去從事軌道車輛「運用路徑規劃」，相關的文獻盡可能地做到完整的回顧，這將有助於了解過去研究課題中，各國軌道運輸系統所面臨的不同問題與其中的差異，以及他們各自考量與重視的因子，以利作為第四章發展模式之參考。2.3 節將彙整上述研究，整理並收斂決策中重要的目標、因子與必須考其量的子議題作為小結與討論。

2.1 軌道運輸規劃流程

運輸規劃源自滿足來自不同數量、不同起迄組合下的旅客或是貨物需求 (Meyer, 2001 ; Blakely and Leigh, 2010)，軌道運輸亦不例外，隨著規劃之期程由遠至近、決策層級由高至低，可歸類為策略性決策 (strategic decision)、戰術性決策 (tactical decision) 以及營運性決策 (operating decision) (Yu, 1998 ; Sussman, 2000 ; Ahuja et al., 2005)。軌道運輸的策略性決策，其涉及基礎建設之投資、車隊購置計畫、場站更新計畫等，多為較長期程亦較高成本的投資；相對而言，戰術性決策則遷就既有的投資計畫，發展出可行的列車時刻表，並依據列車特性訂定維修計畫 (此處指的是較高級的檢修計畫) 規定，規劃期程較前者略短；最後，營運性決策則為車輛運用、調配以及組員排班作業，是為短期性計畫，其成本較

為低廉，也較快速可看到改善之成效。以上三者可統合為一個完成的鐵路營運決策框架（Sussman, 2000；Ahuja et al., 2005；Ahuja et al. 2006）。

為求更精密的描述研究課題之特性，並配合各國軌道運輸組織實務上的明確分工，Sussman（2000）、Jong et al.（2012）等文獻則是將該問題再做細分探討，如下圖 2-1 所示。

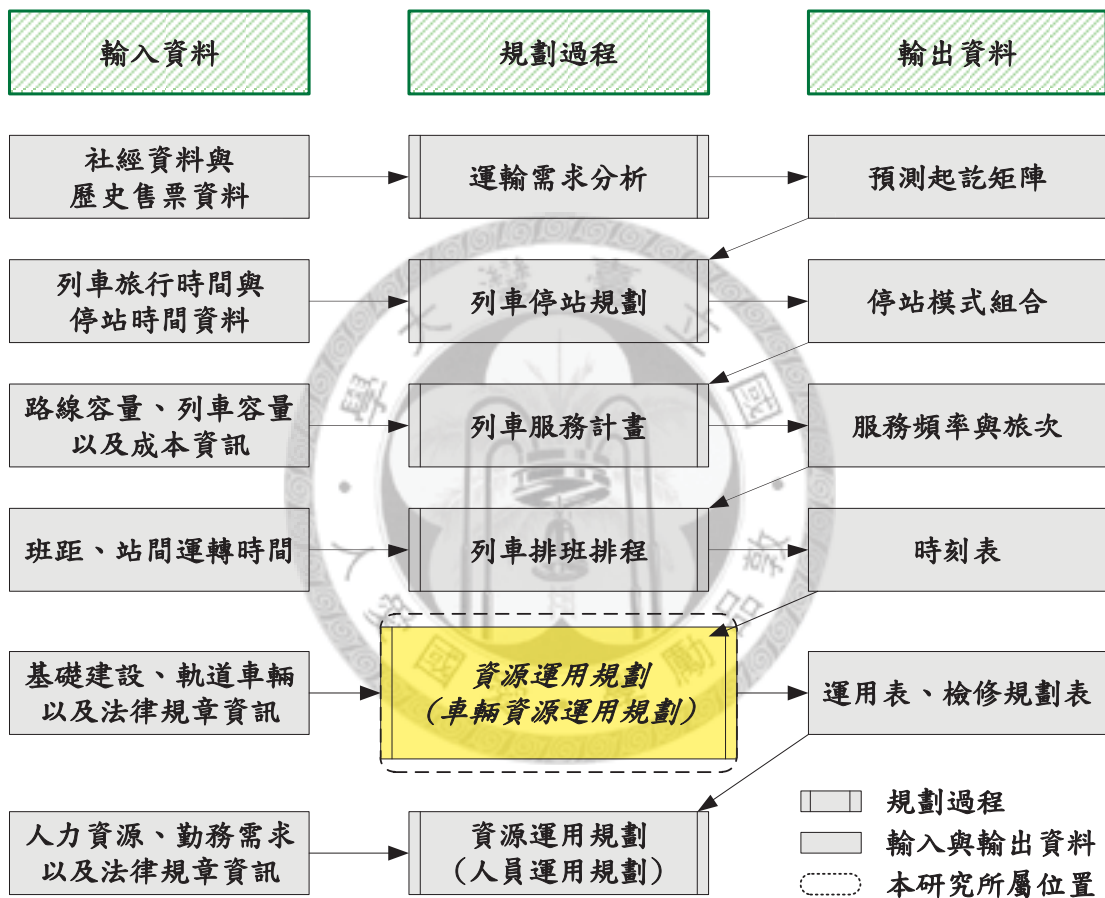


圖2-1 軌道運輸規劃作業流程圖（Sussman, 2000；Jong et al., 2012）

圖 2-1 之程序為傳統上軌道運輸系統營運規劃之作業流程，基於運輸之本務在於滿足各種社經需求（Meyer, 2001），是為規劃之先決與源起，又各階段均包含一個含有執行決策概念的規劃活動（planning activity），相當於其均可以作為發展數學決策工具的子議題，並藉其輸出決策成果（Crainic and Roy, 1988；Ahuja et al., 2005）；又對於前後兩個決策層級而言，上層決策所輸出的結果將與下層額外輸入

的參數資料，共同支援下層的規劃活動，各層級之間依此延續，環環相扣。故營運者可依序獲得屬於戰術性決策的需求預測結果（forecasting OD demand）停站模式（train stopping pattern）、發車率（frequency）與時刻表（timetable）。而後，這些成果將一併作為屬於營運性決策的「資源運用」(resource planning)中的輸入項，以利列車運用、組員排班等作業。

是故，本研究依據 1.3 節所擬定之軌道車輛「運用路徑規劃」研究範疇，若依 Ahuja et al. (2005)、Ahuja et al. (2006) 之定義，實屬營運性決策，所做的規劃期程較短，成果應用亦將能在短期內樹立成效；又若依據 Sussman (2000)、Jong et al. (2012) 以研究課題分類，則包含在廣義的「車輛資源運用規劃」之中，上承時刻表規劃問題，往下則延續人力資源規劃，又根據第 1.1 節中圖 1-1 之深究分類，是為其中的上層問題，對照今日臺鐵局實務作業之決策規劃邏輯，亦復如是，可交互驗證。

雖然本文問題被定位為「營運性決策」層級，然運輸規劃過程本身具有重複評估與循環的特性（凌瑞賢，民 93），因此部分文獻在處理車輛運用問題之餘，亦會考量不同車隊型態下的規劃結果，致使該問題可涉及時刻表變更計畫，故此時該問題亦提升作為戰術性決策。其更甚者，鑒於既有場站容量或車輛資源之建置，權宜長久之計將有利於更有效率之規劃者，則亦可涉及購車計畫或基礎建設之投資與改建，此時該問題亦躍升以為策略性決策。是故，研究課題此一環節對於實務發展亦具有舉足輕重之角色，而本研究即扮演就今日學術文章上之不足之處以為彌補，實有其重要性。

2.2 軌道車輛運用路徑規劃問題

回顧過去從事軌道車輛資源運用規劃的文獻中，根據各研究所面對實務問題的不同，大多會預先設定好欲探究的某個「目標車型」，再根據該車型的特性以及

必須滿足的限制條件加以建立問題架構。其概念源自軌道運輸系統中，其編組形式的不同，將牽制運用規劃的安排，甚至影響其後的調配問題，又於今日各營運系統，其依據各自的軌道線型、車站配置、車輛維護、使用者需求，甚至為營運者愛好等不同的原因，實存有相異的編組形式。彙整前述編組方式，大致可分作考量「機車與非動力車輛」(locomotive and car)的規劃方式，以及「車組式」(train-set)的規劃方式等兩種，茲簡介如下：

(1) 「機車與非動力車輛」運用規劃方式：實為機車(locomotive)牽引不具動力的客貨車輛(passenger car or freight car)，兩者甚至可獨立流通運用，本文在此概括所有非車組式營運的型態皆以此稱之。

(2) 「車組式」運用規劃方式：即使用以數個車輛(carriage)為一組的動車組(Multiple Unit)，視為已經被包覆好的一組車，其非動力車廂不得再為之拆掛為單一或部分車廂使用的系統。

由於「機車與非動力車輛」的規劃方式中，「機車」與「非動力車輛」是為兩個各自獨立的單元，其分別擁有一套決策邏輯，勢必從事運用路徑規劃必須分別考量「機車運用路徑規劃」與「非動力車廂的運用路徑規劃」，本研究將分別於 2.2.1 節與 2.2.2 節分別就上述兩部分進行回顧。然而，亦有文獻係專門討論欲整合上述兩者作業，同時進行「混合機車與車輛運用路徑規劃」，以考量同時受限於兩種決策邏輯下的處理機制，本研究將於 2.2.3 節進行回顧之。對於軌道營運業者而言，近年來較流行的趨勢係以車組式的方式提供營運，其運用規劃範圍，除了傳統的「柴聯列車組」以及「電聯列車組」外，近來使用在支線鐵路的軌道車(railcar)，因其可獨立運轉而不需要混合機車頭進行調度故亦屬此類，又如臺鐵之推拉式(Push-Pull)自強號進行車輛規劃時，亦因不允許再執行拆掛，故於本研究也被定位於車組式的運用當中，共同構成的「車組式運用路徑規劃」，將於本研究 2.2.4 節回顧之。上述的分類亦將影響其後執行調配規劃之輸入值，期間的關係可參考

圖 2-2 所彙整。

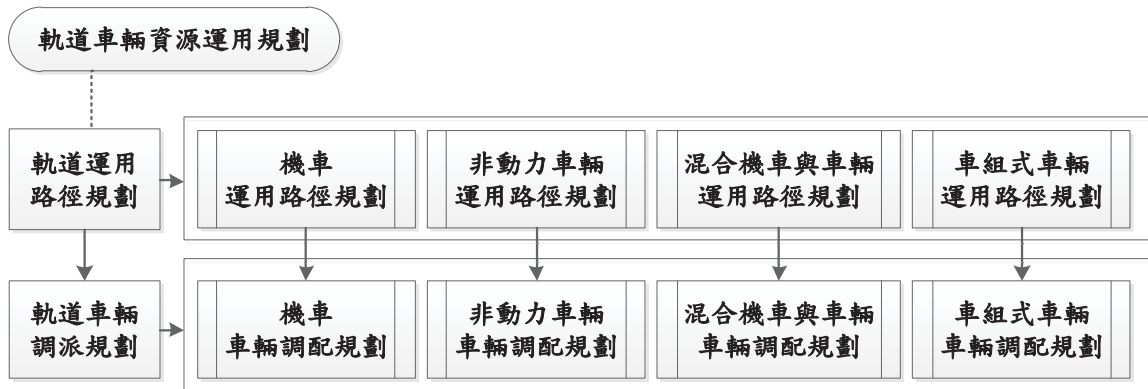


圖2-2 軌道車輛資源運用規劃決策分層示意圖

2.2.1 機車運用路徑規劃

有關軌道運用路徑規劃的研究，最早起源於貨運列車的編組，由於早期列車組、聯結車等概念並不興盛，大多數的牽引形式，係由機車掛載車廂所組成的動力集中式列車為大宗，Thomet (1971) 於發展軌道營運問題時，將機車迴送成本考量於其中，迴送為無收益的 (non-revenue) 營運，並不會對營運者產生任何帳面上的效益，作者亦指出迴送的延車公里數是為影響成本項的重要因素，換言之即為不適當的路徑規劃，所導致過高的迴送成本都是浪費的。

而數學模式的發展，則自 Booler (1980) 處理機車運用問題 (Locomotive scheduling problem)，目標函數設定為最小化機車運用成本。文獻中將時刻表上的各個車次比擬為一個工作 (job)，其成本結構猶如工作排程問題，鐵路公司擁有許多被同類型的機車，而不同的車次均有其合適的機車頭牽引車廂，故本研究將某台列車運用在某個工作上，將具有一個特定的成本參數反映上述適合性。故決策時必須考量如何使用最小的成本安排列車，以應對往來車站與機廠間所有的相互移動，同時完成既定的工作任務。該問題透過二元整數線性規劃 (BILP, Binary integer linear programming) 建立為一個集合分割問題 (Set partitioning problem)，

並設定以一天為研究週期，以機車為基準，將班次「分配」給可提供其最低營運成本的機車，透過每日各班次的起始時間與到達時間之特性，與各型機車特性相互對應，輔以決定固定車隊成本，並求解其最小化目標值。模式僅將有限的各種機車分配到適合的車次上，並未考量到特定天期的車輛調配，故屬於路徑規劃問題之範疇。

在早期的研究中，受限於電腦不發達之故，在求解品質上難有突破，如上述 Boaler 之著作，僅發展出一套基於對偶模式的啟發式演算法，過對偶變數決定可能的縮減成本 (reduced cost)，並逐步改善目標值，在求解的表現上，作者利用一個規模約 20~50 班車的假設情境作為實證，可達到趨近最佳解 5% 以內的解，然其模式大小與解題時間上已經幾乎達到可接受的問題規模的極限 (Boaler, 1980)。然自 1980 年代中葉起，各類新興的演算技術與局部搜尋的概念逐一崛起，1983 年輔提出之模擬退火法 (simulated annealing) 技術，很快的就被使用在求解此類機車運用問題 (Wright, 1989)，該文獻透過局部改善法 (local improvement) 與模擬退火法改善確定行模式在大規模的問題上的計算時間，又以後者表現較佳。然而該文獻無法於實務運用上的最大問題，在於未考量各型機車的可用數量 (availability of each type of locomotives)。

Forbes et al. (1991) 改善 Wright (1989) 之研究，將機車數放入目標函數予以考量，在給定時刻表與不同型態的機車需求下，效法公車排班之研究，將問題定義為多元物流問題 (Multi-commodity flow problem)，其中各機車的移動過程可被視為商品流動，節點 (node) 為列車乘務的車次、節線 (link) 則為為車與車之間的連接，隨著車種的不同給予不同的成本函數矩陣，求解最小化成購車成本、營運成本與迴送成本之和。本研究的求解之週期為一天，並說明在每天時刻表相同的條件下，一天的運用路徑規劃已足夠使用，對於跨夜車或單程旅途即超過一天的車則在求解時另行處理。本研究雖然考量不同種類的機車，但與實務營運上

的最大限制在於不考慮機車頭「重聯運轉」的問題，即便計畫性迴送的重聯運轉在該文獻中也是不允許的。求解過程中首先透過鬆弛部分原有的整數變數為連續變數，然而該問題至此仍是一個 NP-hard 問題，因此多車種的這條限制式亦先為之鬆弛，至此該問題儼然成為一個單純的指派問題，當二元整數再為放鬆後為一個線性規劃問題後，作者透過對偶理論求解，再透過分枝定限法求解整數解，實證研究則透過四個假設的不同情境下求解最佳化問題，皆可解出與最佳解極為接近的答案。

相較於前述文獻均未涉及機車的重聯運轉甚至多車種的重聯運轉，Florian et al. (1976) 首考量或軌道運輸中異質性的機車與車輛組成，由於不同的機車具有不同的牽引能力，該文獻的重點放在最小化成本下，如何有效地提供各級列車足夠的動力，並未詳細的考慮各車次或貨物應有的特性，本文透過混合整數規劃 (mixed integer programming) 與班氏分解法 (Benders decomposition) 求解加拿大國鐵的小區間為例。而後，Ziarati et al. (1997) 指出時刻表上的各種列車因其載運客貨的重量、長度以及行駛的路徑的差異，亦應該分別存在各自的最適牽引力需求，是故本文之目標即在這種固定、且具有異質性車種的時刻表下，提供、滿足足夠的動力以牽引列車，而且所有的貨物都必須準時送達。並透過非線性整數的多元商品流動問題建立數學模型，求解來自機車的營運成本作小化。有關上述各次列車所需的機車數、總馬力、以及載運量等，在本研究均列為模式的限制式。此外，本文亦為首篇在機車指派中考量維修時程，以及地區性調度以及運轉所需的機車需求。本文的規劃週期被放大為七天，雖然仍為一個短期程的規劃，但已經足以反應時刻表上不同日型的運載變化，全文雖未考量週期性，但該問題儼然已形成一個大規模的問題，而且在貼近實務考量下，不同種類的機車頭可以連掛在同一車上的條件，亦造成本研究最大複雜之處，故作者並利用單寧沃爾法 (Dantzing - Wolfe decomposition) 求解，將路徑決定與迴送問題留到子問題決定，最後使用分枝定限法 (Branch and bound) 對回最佳解。在後續的延伸研究中，一個先分枝、後切平

面 (Branch-first, cut-second) 的演算法，被使用在相同的問題上，其做法先透過分枝法尋求一組整數解，而後再用這組整數解加入可行的限制式加以切割，較述方法較能縮短收斂時間 (Ziarati et al., 1999)。

近期 Rouillon et al. (2006) 再次就此議題發展合適的演算法，作者透過分枝定限法的概念，導入三種分枝定限的原則處理運用路徑選擇，並發展出了一個兩階段的解題策略。透過網路問題的概念，首先根據節點的子樹 (subtree) 估計最小的整數值，藉此選擇一個良好的起始節點，下一步則用它發展一個最好的分枝策略，當問題解到最佳解，或達到解題時間上限時即會停止求解，這個方法較 Ziarati et al. 系列的文章能更有效改善求解時間 (Ziarati et al., 1997; Ziarati et al., 1999)。

Kuo and Nicholls (2007) 嘗試將機車運用問題結合場站分配，並分配每個廠站負責特定的車次，並由廠站內所屬的車隊執行被分到的車次，全文以多元商品流動問題建立數學模式，而研究的重點在於讓每天晚上廠站內所擁有的機車數，可以滿足次日總出車數的需求，而就車次的接續問題並沒有再細究，雖然全文被定義為機車運用規劃問題，但與本研究之範疇並未全部相符。然本文另外計算了非常詳盡的成本模式，包括車隊購置、燃油使用、車輛維修以及營運上的種種變動成本等，可作為後續執行成本估算之參考。

2.2.2 非動力車輛運用路徑規劃

前述的文獻所進行之討論，均針對機車的運用路徑規劃，並未涉及其後所牽引的非動力車廂，其實有關非動力車廂的指派與規劃之研究起源亦早，但多數的文獻著重於貨運鐵路運轉上的探討。這些研究均指出早期貨運鐵路，具有管理績效不佳的虧損問題，部分車廂甚至有 70% 以上的時間閒置等候，無法提供合理的效益 (Haghani, 1987)。是故，Dejax and Crainic (1987) 探討空車的存量管理，在已知空車供給、需求以及存貨成本的條件下，決定各場站的最佳空車存量，該文

獻亦探討空車分配計畫，將個別的空車分配各場站滿足營運的需求，以降低作業成本並提高收益。大多數研究車廂管理的文獻，將不同種類的車輛視為多種貨物被運行在各起迄點間，又貨運鐵路本身並不需要嚴謹的執行車輛檢修或緊繃的調度，因此簡潔的多元物流問題模式，是解決空車問題的一項有效策略(Haghani, 1989；Bussieck and Zimmermann, 1997)，至於符合空車流動特性之多元物流問題，存在許多現成的演算法，種類繁多故在此不逐一回顧。

然而本研究所探討的重點在於客運鐵路，相關所涉及的文獻較少，較完整者可為 Lingya et al.(2002)一文，討論客運車廂派遣的實務議題，並以加拿大 VIA Rail 為例，由於客運鐵路在時間上的緊迫性會遠大於貨運列車，故其目標函數相較於前述文獻，另需加入編組的調整時間作為處罰值，機車頭要面臨轉換方向(switch)時也必須要另做限制。此外相對之列車頭拖拉能力、路線容量也在考量的範圍，更提高問題的複雜性，該問題使用變數產生法(Column generation)求解，可為實務客車車廂調度使用，演算過程與 Cordeau et al. (2001^b)一文類似，可參考下段對其方法之回顧。

2.2.3 混合機車與非動力車輛運用路徑規劃

無論在客運鐵路或是貨運鐵路的實務運作上，「機車」與「非動力車輛」的運用路徑設計時常是密不可分的(Ramani, 1981)。有鑑於此，九零年代間印度鐵路系統以及法國 SNCF 的系統，均嘗試研發一套穩健的決策支援系統(Decision support system)用以解決機車與非動力車輛同時進行路徑指派的問題(Ramani and Mandal, 1992；Ben-Khedher et al., 1998)。然而，Ramani and Mandal (1992)所研發的系統，著重於自原有的運用路徑中替換掉不佳的運用路徑，雖然存有優化改善的概念，但並不能為視為一個完整的最佳化策略。Ben-Khedher et al. (1998)的作法則先將合適的機車與車廂結合成一組(module)，雖然表面上看起來是同時指派機車與非動力車輛，但實際上只是在即將提及的列車組式規劃再加了前置作業，

此舉其實限制了調度上的彈性。

Rastke et al. (1996) 指出，軌道車輛常會受到外部因子的擾動 (disturbance) 破壞了原有的派遣計畫，因此針對德國 ICE (Inter City Express) 系統，發展了一套電腦軟體，該系統可在短時間之內達成，輔助鐵路公司進行車輛輪值 (rostering) 以及維修的安排，使之更具效率。該文獻指出系統除了列車接續問題上的考量外，另依運轉規定限制 ICE 每個維修週期內最大旅行距離，但僅能達成最低層級的檢修安排 (L 檢修)。雖然文獻中並未提及演算的數學模式，但描述了決策的概念係先透過電腦自動化建立服務時空圖、處理列車接續、整合維修作業，所得到的結果為一張每日的輪值運用表以及維修時間圖，描述了接下來二十四小時內的所有任務。這意味著在不考量較高級的檢修之下，運用表的結果可讓各車輛達到指派作業之效。

而後直到 Cordeau et al. (2000) 透過混合整數規劃建立多物流網路問題最佳化模式，同時考量機車與非動力車輛的路徑規劃問題，該研究中同時考量多種不同的機車與非動力車輛，某些可支援彼此相互排列組合，構成的不同的列車組成 (train consist)，相異的組成表示不同的運輸能力，亦須擔負不同的營運成本。該問題的網路架構，係藉由同時具有時空單位的節點，以及具有任務性質的節線共同組成，全文存在三種節點是為：出發 (departure)、抵達 (arrival) 與迴送 (reposition) 節點，表示其所在位置的時間與位置；並與三種節線：乘續 (sequence)、停等 (waiting)、迴送 (reposition) 節線，表示依循正時間軸方向的任務。如圖 2-3 所示，透過節點與節線兩者相互配合搭配使用，接續連線構成列車運轉時空網路，並覆蓋所有的列車車次。其中若毋需迴送，則可以不使用迴送節點與節線，其目標函數為最小化營運成本。該問題除了為一個大型且複雜的數學模式外，由於作者尚考量後續實務運作時，有關列車、班次特性的額外限制式，這些都使得原問題更加困難，因此需透過額外的演算法來加速求解，本文嘗試透過班氏分解法先

將原問題鬆弛，建立一個擁有少量變數、大量限制式的模型，由於所面對的變數彼此的互動性並不高，在問題求解上可節省大量的時間，而後將可行的用以決定列車順序與列車組成的變數，代入後續次問題求解所需車輛數與機車數，這個問題被與傳統的分枝定限法、拉氏鬆弛法(Lagrangian relaxation)和單寧沃爾法比較，並有較好的解題結果，以加拿大 VIA Rail 為例，平均可節省四十倍以上的求解時間。

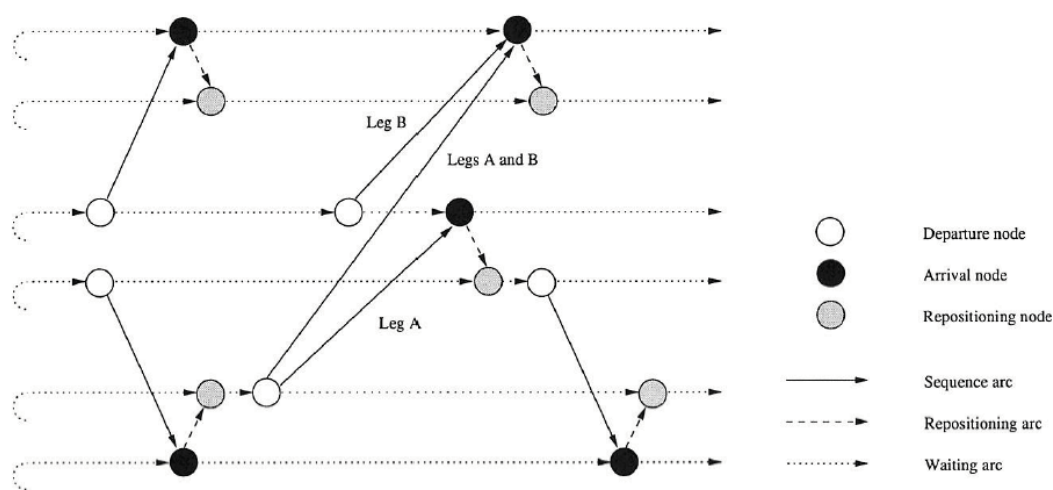


圖2-3 車輛運用路徑之時空網路範例圖 (Cordeau et al., 2000)

上文雖發展出許多解題上的優勢，但仍基於多物流問題的特性考量後續的解構，應用到實務問題的可能性仍有所受限，Cordeau et al. (2001^a) 根據實務特性嘗試幾個延伸模式的概念，考量不同列車組成下可能的維修需求，並將這個模式發展成一個循環性的問題 (cycling problem)，原先的網路結構節點新加入了維修 (maintenance) 節點，又該節點只能出現在具有維修功能的某些車站，若無法配合原先的時刻表上的起迄組合以安排計畫，亦可透過迴送節線重新定位 (reposition)。此外，該研究亦考量牽引形式與非動力車廂組成的轉換，也就是接續著的兩台列車，可以透過不同的牽引形式與非動力車廂組成運轉，例如第一車次使用機車甲、機車乙、非動力車廂甲、非動力車廂乙的運轉配備組合，則接續的列車若僅使用機車甲、車廂甲的配備組合，剩下的機車乙、車廂乙可被拿來在

其他的乘務上使用，該策略雖能使車輛資源做更符合成本效益的運用，但卻因為具有拆解與連掛的處理而增加作業時間，並存有延滯的處罰成本需被考慮其中，此外若無法配合車廂掛載之前後順序亦無法完成調度，即不可做分解，而大多數的軌道運輸公司確實將上述拆解運用的概念廣泛的使用在實務運轉中。最後，不同等級的車廂被替代在本研究中也是被允許的，例如某列車原先應派遣執行高等級的車廂，某日使用低等級的車廂取代運轉，只要加入足夠的處罰成本這是被接受的。該文獻亦使用班氏分解法求解，維修問題可與原來的主問題一起處理，而新增的配備轉換、車廂替代等部分，則加入至對偶問題與次問題，其次問題的特性本身又可以再利用單寧沃爾法拆解，更進一步的節省解題時間。研究再次使用加拿大 VIA Rail 為例，以求解出更貼近實務運作的結果。

Cordeau et al. (2001^b) 再次改善前文，在架設網路結構時更細膩的加入每日的起始節點 (start-of-day) 以及終止節點 (end-of-day) 的考量，節線亦由原來的三種擴增為九種，係因五種不同的節點組合而成，其中最重要的是加入過夜節線並提供跨夜的觀念，該節線係由前一天的終止節點與當日的起始節點組成，也就是說，運用路徑現在不僅被限制在一天裡面，可以為一個短天期的規劃。本研究利用變數產生法求解，首先鬆弛主問題的整數限制，並將原車輛路徑的集合拆解成很多個子集合，而後先透過單行法 (simplex method) 求解出子集合中最佳的各路徑變數值與相對應的對偶函數值，次問題為產生路徑與縮減成本，逐步修正主問題的解，而為了去決定整數解，最後採用一個啟發式的分枝定限法可以協助對回最佳解。該文獻亦透過加拿大 VIA Rail 為例，除了在小問題上更為優越外，尚可較前文求解更大規模的問題，預計可為該公司每年省下四十萬加幣。

上述對於機車的規劃或是運用路徑的規劃，通常為一個既定而不易外界影響的過程，而他們必須有一個良好的起始解才能開始實務作業，設想某日若發生事故或車輛故障等意外，軌道列車將無法依據既有的路徑規劃運轉，短時間之內需

要即時地進行再排班作業 (rescheduling)，Sato and Fukumura (2011) 考量事故發生後貨運鐵路的機車頭重新指派與運用，該問題以整數規劃建模，其中限制式部分採用集合分割問題的概念，最主要的決策變數以二元整數表示是否機車頭選擇到某個預設可行的重排運用路徑，由於再排班的過程其實需要在極短的時機內完成，故本文求解利用變數產生法發展一個啟發式演算，主要破壞掉二元整數變成連續函數，其中覆蓋所有路徑的限制式 (covering constraint) 為最主要加速的地方，相同作法的 Sato and Fukumura (2010) 一文則延伸至考量多機車頭的問題。

2.2.4 車組式車輛運用路徑規劃

在世界各國的軌道運輸中，列車組的概念已經越來越為接受，一般定義的列車組是指以數節車廂構成的一組的動車組，組內的各節車廂不可以再做拆解，然而亦可將兩個列車組聯結 (coupling)，給予調度上的彈性，如圖 2-4 (a) 為臺鐵 DR2800 柴聯自強號以三節車廂構成的列車組，它亦可將兩個列車組聯結呈現圖 2-4 (b) 的六節車廂運轉，在英文上使用 *Train-set*、*Train Unit* 或 *Train series* 等名詞稱之，列車組通常在兩端都具有駕駛室，因此不需要轉車盤協助列車掉頭，在車輛運用路徑的規劃上受限制較小。此外，對於不可拆解的所有營運列車單位，因運用路徑與調度邏輯相似之故，本研究將其視為列車組在此回顧。



圖2-4 列車組概念圖

Erlebach et al. (2001) 曾透過瑞士聯邦鐵路 (Swiss Federal Railways, SBB) 的列車指派實務探討本類問題的求解複雜度，又作列車輪值問題 (Rolling Stock Rostering Problem, RSR)，以路徑 (route) 表示車次，在本文的假設中，所有的路徑以一天為週期，具有來自時刻表的到離站地點及時間的規定，而該文所需解決

的列車指派，其實是在串聯所有的路徑，藉以覆蓋整張時刻表，也就是本研究中提出的「車輛運用路徑規劃」問題，其以最小化所用車輛數為目標。此外，該問題再被延伸出考量加入空車移動（Empty movement）的 RSR-E 問題、加入考量維修限制的 RSR-M 問題，以及綜合兩者的 RSR-ME 問題。結果顯示以最咬效率的方式建立 RSR 問題時，其時間複雜度仍為 $n \log n$ ，而較複雜的 RSR-M 問題與 RSR-ME 問題其實都屬於 APX-complete 問題，即這些問題雖然是 NP-hard 問題，卻可以透過某些多項式時間的近似演算法（Polynomial-time approximation algorithm）求解，而最重要的做法便是在先鬆弛調維修限制式，或將其限制在某一個不至於無限增長的調整幅度之內。而 Eidenbenz et al. (2003)，則承續前文，將其加入彈性列車輪值（Flexible train rostering, FTR）的概念，也就是說即使在時刻表已經擬定的情況下，仍允許至多 ε 分鐘的彈性改變，這個問題被定義為 ε -FTR 問題，與前述問題相同亦屬於 APX-complete 問題，這些基本概念將有助於後續文獻之於演算法與數學模式的發展。

早期研究列車組運用路徑規劃是為了能以最小的車輛數反應需求，故車輛採購乃為營運中主要的成本之一，此概念源自於將有限的車輛資源，作最極致的運用時，勢必能省去過多的購車成本，而找到如何將旅客數量需求與列車供給之容量作最佳配對，隨時隨地的變換列車編組，方可解決現有的問題。Alfieri et al. (2002)、Alfieri et al. (2006) 即在上述概念下，將問題以整數規劃法建立多元物流問題，目標為最小化固定的購車成本、延車公里行駛成本，作者將數學模式分作是否考慮給予可解聯（decoupling）與不可解聯（coupling）之車輛分別求解，並應證前者具有較高的複雜度，該問題係建立在給定的荷蘭 NS Reizigers 客運系統之時刻表上，這是一個尖峰特性明顯的單線鐵路，車廂需求數會依據交通峰性而有極大的改變，且並非所有車站都可以做聯結或解聯，故聯結時考量的作業時間難以忽略，該研究考量兩種不同的車組，分別為三節一組的一等車廂（first class）與四節一組的二等車廂（second class），作者利用如圖 2-5 移動圖（Transition Graph）

將各路段可能的編組型態先行定義，並考量各車組的前後順序，其中任何一個可行的路徑即為一個路徑自始至終的列車組成，所拆解下的車組尚可進行其他的班次派遣，若要聯結其他車組，亦須在該站有滿足需求之車組才可執行，本部分在數學模式中可利用整數切割法將不必要的可行解範圍切除以增進求解速度。

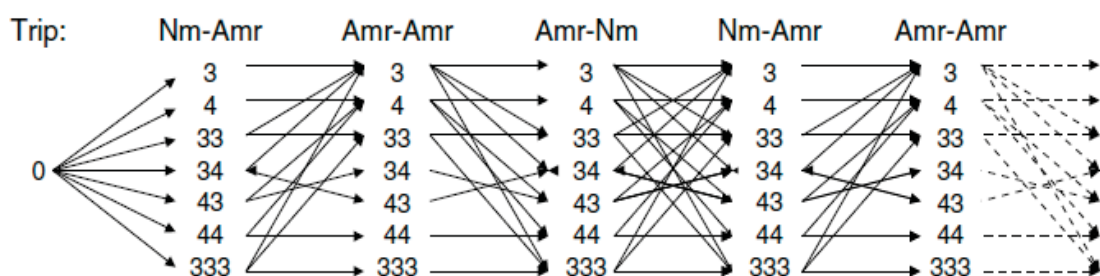


圖2-5 移動圖 (Transition Graph) 之範例圖 (Alfieri et al., 2006)

Fioule et al. (2006) 一文明確的定義出該文獻以七天為規劃週期，希望求得一個理想的運用路徑，承前所述專注於旅客列車的聯結與解聯問題，本文延續 Alfieri et al. (2006) 的限制式，但在目標函數上作了改變，透過象徵效率的最小化延車公里成本、象徵服務指標的座位短缺成本、象徵強健性的迴送成本等三項，由於該問題的複雜性，作者發展出一套啟發式演算法擇優分枝，並採用局部搜尋法以加速求解，其研究結果透過荷蘭 NS Reizigers 鐵路系統實證並實際應用在 2005 年的鐵路時刻表改點後的運用。

Peeters and Kroon (2008) 延伸 Alfieri et al. (2006) 之研究，除了滿足供需的原有限制式外，再加入考量多天期問題，因而模式出現了週期限制式，即一日結束於某站的列車數與次日起始的列車數需相互守恆，而有關車輛連結與解聯問題，在特定的車站加入存貨限制式，將多餘的列車視為貨物儲存在該站中，並給予容量上限，此外，本文亦提及要能提供一個具有穩健性 (robustness) 的數學模式，因此須考慮到列車迴送數與列車再拆解或聯掛時須考量每類車組在列車中的相對位置。研究結果透過荷蘭 NS Reizigers 客運系統分析，首先作者利用單寧沃爾法解構，運算過程中含有變數產生法的解題機制，子問題採用個額外的變數選取移動

圖上的其中一個路徑加入主問題，而後主問題為求解對偶將被放鬆為一個線性鬆弛問題，故判斷主問題的解時，須再利用 branch-and-price 法找出整數解，以利後續將乘子加入子問題以為求解，直到縮減成本無法再行改善主問題時，即決定其在路網中理想的車輛運用。

在上述的文獻中，安排「維修」的概念均未被提及，然而在車輛運用路徑規劃之中，需考量到可能的各級維修時間，特別是預防性的維修任務（preventive maintenance），平均大約每隔幾天就必須執行一次（Maroti and Kroon, 2005；Maroti and Kroon, 2007），有鑑於此，Maroti and Kroon（2005）發展一個運用路徑的數學模式，最小化各車組執行運用路徑的使用成本，而在當列車需要進基地維修時，則跳脫出原本的指派邏輯，會給予比較不同的路徑指派法，這種即將進入維修的車組，被定義為 urgent，如下圖 2-6，每一列為一個既有的運用路徑，粗線象徵某一個車次的任務（task），虛線為兩個任務間的聯結，而當列車需要進行維修時，便藉由交換任務的動作，稱作過渡（transition）模式，將列車調入基地以進行維修作業（maintenance task），該問題以混合整數規劃模式建立數學模式，並將所有可能的 urgent 獨立出來自成一個子集合，串聯運用路徑時，受限於子集合內可能的維修限制。Maroti and Kroon（2007）則更進一步，將多個可能同時進行的交換統合起來，形成一種選擇（alternative），此為交換（interchange）模式，並在此模式下透過一個基於最短路徑邏輯的啟發式演算法進行求解，以完成列車組運用路徑規劃，可惜的是並未與上段文獻有所聯結。

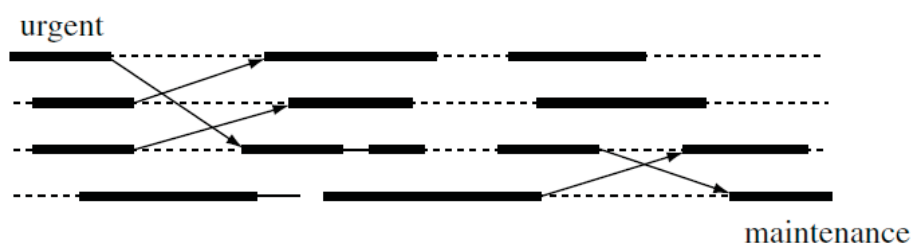


圖2-6 維修運用路徑之範例圖（Maroti and Kroon, 2005）

Zhao and Tomii (2004) 首先介紹中國大陸地區動車組運用計畫意涵，並嘗試整合維修的概念在原有的運用路徑中，全文的基本構成為一個網路問題，網路的節點為運行圖中的各個列車，包含發車時刻、到達時刻與車站等訊息，節線則為前後兩列車之接續，而迴送的過程在本研究中是允許的，研究者首先分配給每一個節線一定的權重質，表示希望某個動車組在執行完車次甲後，接續執行車次乙的一個「希望程度」，其權重越小，希望程度越高。此外，由於該模式已定義完整檢修過程，故依循該模式可直接執行列車組順序規劃作業，作者亦透過這個概念進行不同規模的模式測試。作者認為該問題若以傳統的最佳化模式運算可能太過複雜難以求解，進而直接發展局部搜尋法求解，演算過程可分作兩個階段，初始化後首先確認定期檢修的方案，並求解第一階段的初始解，而第二階段新解的產生則是基於本問題特性所研擬出的一套迴圈機制，透過不斷的產生與評估解的優劣，在迭代過程中逐一替換直到收斂完畢為止。

不同於前面文章所提及的「效率」，Geng (2008) 提出了一個不同的意見，他認為「效率提升」被定義為「每天每輛車可以運轉的里程上限」，如果一個車組每天可以在滿足檢修限制下，完成最極致的運用，那是最有效率的事了，故該文獻設計運用路徑時，使用最小化「站間接續停留時間」作為目標。此外，另提及鐵路維修課題，作者認為維修不應該只有在每日的某個特定時刻，只要可以放入運用路徑中時刻表的空閒時間，都不能被浪費。然本文並未採用數學規劃法，也因此較無求解時間的限制，但文中仍提出算例，以分析性數學與啟發式的流程為解題工具，並證實在這樣的情況下可以最精簡購車，符合京滬鐵路當前所需現況。

Xie et al. (2010) 考量同質的多個列車組運用路徑設計問題，並透時間容忍度 (time tolerance) 為基礎的 STT (Spin Transfer Torque) 法建立數學模式，在某些特定時刻表的規劃情境下，列車的聯掛只有在轉運站時才予以實行與考慮，根據這個概念，列車若有運轉方向改變的可能時需另被限制，如圖 2-7 即為一個不改

變方向性的車次間連結的示例，對於多方向性運轉的營運路網上，可將路網切割成較小的單位。本文以最小化停站時間的方式進行運用路徑規劃，停站時間會受到列車組派遣時間、連結運作情形、時間容忍度、旅行里程、座位短缺比等因素影響，該研究以一個列車組為分析單位；在本研究所分析的多向虛擬路網裡，整體停站時間可因為完善的規劃，大幅減少進出車站與轉轍的時間。

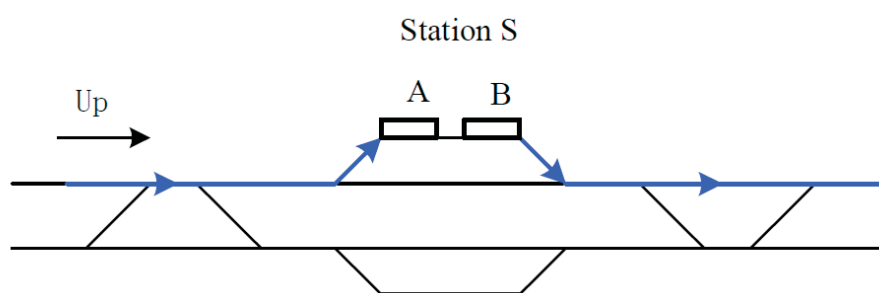


圖2-7 無方向改變之案例圖

Hong et al. (2009) 以韓國高鐵為例，嘗試將檢修任務加入運用路徑規劃的問題中，作者首先鬆弛的所有檢修需求，並以獲取最小成本的路徑接續規劃為目標，相當於前述精簡用車數的概念 (Geng, 2008)，其後將可行的維修路徑透過交配法逐一產生並加入原來的路徑當中，在此啟發式機制下可獲得一組不錯的可行解，以因應每日的時刻表。本文雖然並沒有一個完整的數學模式，然其啟發式作法的過程中，概括了 Maroti and Kroon (2007)、Geng (2008) 兩文邏輯的優點，平均可以縮減 8.8% 的用車數。

Otsuki et al. (2010) 一文將其所闡述之議題定義為軌道列車分配問題 (Rolling stock allocation problem)，然該文獻其實同以設計運用路徑為宗旨，其所面對的問題中，指定某些車次必須被包覆在同一條路徑之中，其與實務上某些車次的運用不得拆解有異曲同工之意。一天當中同樣可存有許多路徑，而路徑本身可以被串成路徑序列 (route sequence)，係由考量無迴送與適當的整備時間接續而成，將被指派給某一個車輛或車輛單元營運，在這個序列中亦會有最初與最末的位置與時

間參數，由於列車存在不同的維修，包括必要的維修須以硬性限制式（hard constraints）表示，可調整的維修可用軟性處罰函數（soft constraints），本文以多元物流問題的概念建立數學模式，目標函數即在前述硬性限制式下，找出軟性限制式的最小值。求解過程首先透過貪婪法流程（Greedy construction process）找出起始解，而後允許在進行列車指派時，調整既有的列車序列以滿足維修限制以降低上述的處罰數，以尋找最佳解。此外，文獻中指出硬性限制式及軟性限制式可依使用者之不同而有所調整。

Cacchiani et al. (2010) 嘗試求解一個真實世界的列車組指派問題，該研究在一個多車種且具有時刻表的情境建立整數線性規劃模式，指派各車次適當的列車種類與車組數，考量車輛接續的限制亦為本文所定義之運用路徑規劃問題。由於不同車種會有不同的載客容量，加入需求函數後問題將更為複雜，目標函數便是求解滿足所有的需求條件下，所使用的最小車組成本，與使用的列車組種類與數量有直接的關聯，該研究考量兩種不同的數學模式建立方式，其一為透過足夠的終點站整備時間下串聯任兩車次所有前後接續的運用，另者則為串聯一整天接續的所有的可能運用，而無論何者均限制其需包攬(covering)所有時刻表上的列車。此外，研究者亦根據問題的特性縮減容量限制式之定義域以簡化問題，而該文獻於延伸模式上亦考量維修限制與迴送限制，前者的作法設定在指定的天數內，將維修也視為列車接續的一環，即某種可行的運用路徑，迴送部分則加入連續兩天的起迄路徑守恆之限制，而後透過以線性規劃為基礎的啟發式演算法求解，兩者因為均同時考量運用路徑之編組，並賦予週期性的維修路徑，實質上而言輸入一組可行的起始參數，即完成了列車組運用順序規劃之任務。

Cadarso and Marín (2011) 一文為探討列車運用表製作的研究，並針對捷運系統做設計，其目標式為最小化成本，項目包括營運成本、購車成本、穩健成本與其餘處罰值。本文透過混合整數規劃建立數學模式，過程中其實利用非線性拆解

為線性的技巧，決策變數包括決定覆蓋各車次與否的二元整數、決定空車迴送的二元整數、決定聯結多少車組的整數變數、另包括新購車輛的考量等，本文另有考量到車子的不同擁擠程度下旅客的感受，透過二元變數與處罰值呈現。其作者假設維修作業都一定可以在檢修週期內完成，其中最低層級的檢修作業則是假設每天晚上都可檢修完成。實證資料採用西班牙馬德里的之捷運路網，其特色在於有著相當高的發車頻率，而且站間距也相對較短，營運者須應付大量且高變化的旅客流，因此，除了以前對於列車聯結與解聯車廂的方法，該研究還加上了空車移動的考量，結論指出，即使在車輛編組變換方面多增加了一些相對的成本，但是所省下的營運成本可以造成整體成本的下降，由此可見要更有效的運用車輛，如何在有效的資源之下提升列車的最大的使用情境才是最重要的課題。

2.3 文獻回顧綜合討論

本研究於 2.2 節在能力所及的範圍之內，回顧近四十年來從事運用路徑規劃相關的各類文獻，其在命名上略有不同，早期的文獻認為其為列車排程問題 (train scheduling problem) 的一部分 (Booler, 1980; Wright, 1989; Forbes et al., 1991)，而基於其週期性亦有作為列車循環問題 (rolling stock circulation) 一說 (Alfieri et al., 2006; Fioole et al., 2006; Peeters and Kroon, 2008; Xie et al., 2010)，而資工領域探討電腦科學的研究者亦就類似的概念以列車輪值問題 (rolling stock rostering; train rostering) 稱之 (Radtke et al., 1996; Elbebach et al., 2001; Eidenbenz et al., 2003)，亦有學者針對其類似指派問題 (assignment problem) 的特性，為某個車次安排特定的機車、車廂或列車組故引已命名 (Ziarati et al., 1997; Ziarati et al., 1999; Cordeau et al., 2000; Cordeau et al., 2001^a; Cordeau et al., 2001^b; Rouillon et al., 2006; Cacchiani et al., 2010; Cacchiani et al., 2012)。然上述處理程序均為自「給定時刻表」製作可供週期性使用的「運用表」，是為本研究所定義之「運用路徑規劃」問題。以下將就所回顧文獻中建議之目標函數(參閱 2.3.1 節)、限制條件(參閱 2.3.2 節)、

數學化模式建立方法（參閱 2.3.3 節）等議題加以討論分析。鑒於後續將彙整總表於 2.3.4 節，故為簡化並提供更清晰的閱讀，本章下列各節將不再逐篇另作引用，請參閱 2.3.4 節所呈現。

2.3.1 目標函數

回顧文獻的目標函數方面，絕大多數的文獻採用最小化成本為計算，誠如第一章實證資料所述，車輛為軌道運輸系統中最昂貴的設備之一，成本動輒台幣數億元的投資，故多數的研究將考量車輛的「購置成本」。而運用規劃中當車次的起迄位置未能達到守恆之時，需要透過迴送策略來做重新定位，由於空車迴送並不能帶來任何的收益，且所耗費的油電與人力資源均為成本上的花費，因此運用路徑規劃內之「迴送成本」亦為考量的重點。除此之外，當車輛空間不足或擁擠時，部分文獻建議加入擁擠處罰成本的考量。又某些文獻在從事運用路徑規劃時，將路徑內重新囊括某些檢修作業，此時必須再加入車輛檢修成本作為考量。

另有少部分文獻涉及可能的預算推估，或營運列車帶來的收入，在扣除其成本項後，採用總獲利（profit）或總效益最大化為目標。此外，較特別者為以中國大陸地區為例之文獻採用最小化站間接續時間作為決策邏輯，而為換算為實際成本的概念，惟該類研究通常可能因此未能達到檢修限制下「最小化檢修成本」的運用方式，這兩者在此類研究中是為一類權衡。

2.3.2 限制條件與子問題

其後，檢閱運用路徑規劃問題所涉及的範圍，以及決策時所考量的限制條件，基於軌道營運業者需求的不同而有所差異。回顧上述文獻所考量之項目，依其議題的重要性與可見性作為排序，主要可略分為「車次間接續問題」、「車次間迴送問題」、「初級檢修問題」、「車種問題」以及「其他問題」等五大類子議題。本研究採用魚骨圖（Fishbone Diagram）的結構，分析並彙整所涉及的因子，如圖 2-8

所示，各問題下又包覆有不同的決策因子，茲如後段所示。

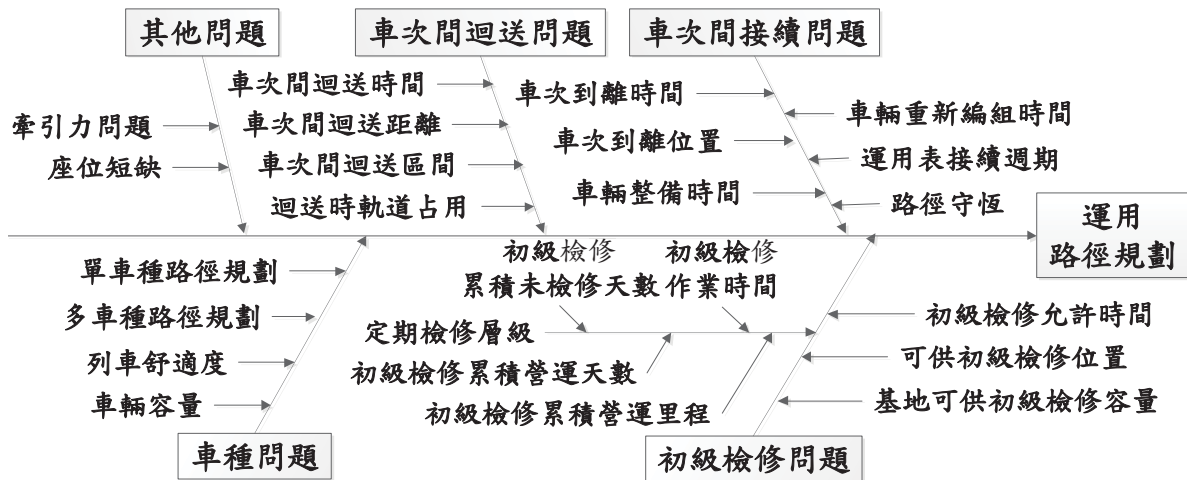


圖2-8 運用路徑規劃之各子問題與因子示意圖

- (1) **車次間接續問題：**此為運用路徑規劃的本體，是為最重要的議題。從事運用路徑規劃時，需透過既有的時刻表作為輸入資料，並考慮前一車次之迄點，需與後一車次之起點完成接續，其中必須保留足夠的折返或整備時間，以及各場站可進行接續的能力 (capacity) 或時間帶 (slot)。最後，所有的列車接續要能覆蓋 (cover) 所選定之週期內既有時刻表上的所有車次。如欲做更細部的考量，基於各次列車所需的車廂數不同，乃致車次接續間可能需要進行重新編組，以達到所需的車輛單位，而各個運用路徑間時空上的守恆亦須確保，即某個特性的收車時間點，各位置所收進的總車輛數，要與其後出車的總車輛數盡可能地達到守恆，以利運用規劃之成果得以循環使用。
- (2) **車次間迴送問題：**承續探討上述接續問題中，由於時刻表上所安排各車次的起迄點，未必坐落於可供待發 (waiting)、儲車或編組的位置，或受限於其他來自軌道容量的問題，車輛須從其他機廠、機務段、基地或可供儲車之車站，以空車的方式透過調度以應付列車接續，是為迴送任務。

而吾人欲安排迴送作業進行時，須考量迴送本身的可能性，除了時空座標上的問題以外，在選定的時段內尚須確認：是否擁有足夠的軌道容量及儲車位置以供實行迴送。基於空車本身不具營運效益，更會造就額外的迴送成本，又迴送主要的成本來自距離，故在理想的情況下，不必要的迴送在運用表內應該要被避免，當車次的安排發現空間上不守恆的情況時，應求取最短距離的迴送。

(3) **初級檢修問題**：一般而言，軌道運輸相當注重營運車輛的安全性，其初級的預防性檢修 (preventive inspection) 大約每隔兩至三天，或某個特定距離便需要執行一次。基於不同車種、車組甚至車型，其各自擁有的預防性維修需求不盡相同，但大致上仍可將各種維修限制加以分類，通常包括檢核「累積未檢修天數」、「累積行駛里程」與「累積行駛天數」三項，最後尚須考量各場站或機廠所擁有的維修能力上限。是故，為滿足軌道車輛的個別特性，其多半被視為資源運用規劃中的限制式以建立數學模式。一般來說，運用路徑規劃應為一短期規劃，因此只會涉及較初階的檢修問題，所探究的規劃週期內，單一車輛的營運累積資訊通常不致達到高級檢修所規定的累積上限值。然而多數的研究雖然提出檢修因子，但多半假設車輛可以在夜間或特定的時間內檢修完畢，或將規劃週期降低到最低檢修週期以下，兩兩均省略或簡化考量本因素。

(4) **車種問題**：在高速鐵路或區域捷運系統系統中，同質性列車營運模式，對於檢修、調度而言是為便利，這類的研究對象，多半毋須考量異質性車種的問題。然而，傳統鐵路運輸具有多種不同的列車服務，就客運列車而言，回顧之對象及包括機車、非動力車廂、混合機車與非動力車廂與列車組等四個作業邏輯，不同的車型車種，有各自用以決策的一套數學規劃模式。此外，即便相同的牽引形式下，車廂內可能也會有不同的

配位數即承載限制，部分文獻甚至涉及不同車輛在不同承載限制下的服務品質。

- (5) **其他問題**：除了上述四項問題外，車輛運用路徑規劃問題，有時也會結合運轉上的某些議題，例如考量不同列車牽引力下的車輛配置。或結合營運管理中，涉及服務品質相位的座位短缺問題，所決策與問題的搭配，將根據各軌道營運業者所需而有所不同。

2.3.3 數學模式建立方法

有關模式架構與建立方面，大多數的文獻採用整數規劃或混合整數規劃建立數學模式，這些方法可分作「以車次為節點，兩車次間的連結為節線」建構網路，或「以時空資訊為節點，車次與其餘任務作為節線」兩種，並以多元物流問題之形式建立模式為其大宗，而詳細的說明與介紹，將於 4.1 節再行詳細分析。另外，由於製作運用表的過程中必須「覆蓋」時刻表中全部的車次，故部分學者認為問題應混合集合覆蓋問題的概念加以建立模式，然而在受限於車隊數的考量，當吾人僅需一組車即可應付需求時，並不需要有兩組車以上運行以增加額外的成本負擔，因此可將「覆蓋」縮減為「分割」，即是要將時刻表上的所有車次，分割給多個運用路徑的集合分割問題。儘管不滿足上述兩種問題形式，採用網路的概念並將問題予以圖示，以尋找適當的解題方法，亦為當今多數文獻的趨勢。其餘尚有使用指派法、旅行推銷員問題、或其他特殊形式近似的模式建立過程。

然而過去的文獻中，無論是將問題模組為某種特定的數學模式，運用路徑規劃問題卻仍為一個難解的 NP-hard 問題 (Erlebach et al., 2001)，當問題所欲決策的車輛數變多、車次數變多，甚至起迄位址的組合越多等狀況發生時，解題時間將隨著問題規模呈現指數成長。此時，傳統的數學規劃法所建構出的模式因規模過大，套裝軟體將難以負荷，故下表中多數文獻另外發展解構法 (decomposition) 或

啟發式演算法 (heuristic) 協助求解，另有少部分的文獻則直接給予決策邏輯，而未用某個特定的數學模式方式表示。本研究將在第五章另行發展合適的解題機制，詳見該章所陳述。

2.3.4 綜合整理

彙整以上本研究所回顧之軌道運用路徑相關之研究，並擷取模式發展較完整、解題敘述較明確者，依車型類別彙整如下表 2-1 至表 2-4，依序為機車、非動力車輛、同時進行機車與非動力車輛、列車組的運用路徑規劃，並透過以下表格陳述各文獻所使用之目標函數、模式建立（即包含數學模式或決策邏輯）、較符合該問題的組合最佳化問題形式，以及所適用之特殊的解題技巧，茲如後所附。

本章針對「運用路徑規劃問題」，回顧過去文獻所考量的目標、限制以及相關的決策因子，並於本節彙整出初步收斂出的重要項目。然而，過去許多的研究單位，多屬工業工程或資訊工程領域，對於軌道運輸產業的特性可能未必涉及到較細微作業的考量，或其在研發數學模式與系統時，省略了某些對於該系統較不重要的條件。過多的問題省略，可能將致使其研究成果僅能使用在特定的軌道運輸系統上，或造成學理的研究成果與實務作業有所誤差。是故，為使本研究於實務上的適用性更臻完善，研究者將再進行實務訪談，期以實務的角度剖析問題，並能與本章結果加以比較，進而收斂適當的決策因子。

表2-1 機車運用路徑規劃文獻整理

參考文獻	目標函數	模式建立方法	問題形式	解題技巧*
Thomet (1971)	最小化成本	無描述	無描述	無描述
Florian et al. (1976)	最小化成本	整數規劃	多元物流問題	班氏分解法
Booler (1980)	最小化成本	二元整數規劃	集合分割問題	基於對偶模式的啟發式演算法
Wright (1989)	最小化成本	整數規劃	指派問題	局部改善法、模擬退火法
Forbes et al. (1991)	最小化成本	混合整數規劃	多元物流問題	分枝定限法
Ziarati et al. (1997)	最小化成本	混合整數規劃	多元物流問題	單寧沃爾法、變數產生法、分枝定限法
Ziarati et al. (1999)	最小化成本	混合整數規劃	多元物流問題	先分枝，後切平面
Rouillon et al. (2006)	最小化成本	混合整數規劃	網路問題	分枝定限法
Kuo & Nicholls (2007)	最小化成本	混合整數規劃	指派問題	

註：本表若遇同篇文獻中採用多種演算技巧者，將最主要或對求解有最大助益的演算機制置於最前

表2-2 非動力車輛運用路徑規劃文獻整理

參考文獻	目標函數	模式建立方法	問題形式	解題技巧
Lingya et al. (2002)	最大化預期效益	混合整數規劃	無特定類型	變數產生法

表2-3 機車與非動力車輛同時進行運用路徑規劃文獻整理

參考文獻	目標函數	模式建立方法	問題形式	解題技巧*
Radtke et al. (1996)	發展可行解	無描述	無描述	局部搜尋法
Cordeau et al. (2000)	最小化成本	混合整數規劃	多元物流問題	班氏分解法、 分枝定限法、 拉氏鬆弛法、 單寧沃爾法
Cordeau et al. (2001 ^a)	最小化成本	混合整數規劃	多元物流問題	班氏分解法
Cordeau et al. (2001 ^b)	最小化成本	整數規劃	無特定類型	變數產生法、 分枝定限法

註：本表若遇同篇文獻中採用多種演算技巧者，將最主要或對求解有最大助益的演算機制置於最前

表2-4 車組運用路徑規劃文獻整理

參考文獻	目標函數	模式建立方法	問題形式	解題技巧*
Alfieri et al. (2002)	最小化成本	混合整數規劃	多元物流問題	
Zhao and Tomii (2004)	最小化成本	非數學規劃	旅行推銷員問題	啟發式演算法
Maroti and Kroon (2005)	最小化成本	混合整數規劃	多元物流問題	啟發式演算法
Alfieri et al. (2006)	最小化成本	混合整數規劃	多元物流問題	整數切平面法
Fioole et al. (2006)	最小化成本	混合整數規劃	多元物流問題	局部搜尋法
Maroti and Kroon (2007)	最小化成本	混合整數規劃	多元物流問題	啟發式演算法
Peeters and Kroon (2008)	最小化成本	混合整數規劃	多元物流問題	單寧沃爾法、 Branch and Price
Geng (2008)	最小化站間 接續時間	非數學規劃	無特定類型	多始點局部搜尋
Hong et al. (2009)	最小化成本	非數學規劃	集合分割問題	交配法
Xie et al. (2010)	最小化成本	混合整數規劃	無特定類型	
Cacchiani et al. (2010)	最小化成本	整數規劃	多元物流問題	啟發式演算法
Otsuki et al. (2010)	最小化成本	混合整數規劃	多元物流問題	貪婪演算法
Cadarso and Marín (2011)	最小化成本	混合整數規劃	多元物流問題	

註：本表若遇同篇文獻中採用多種演算技巧者，將最主要或對求解有最大助益的演算機制置於最前



第三章 臺鐵車輛運用路徑規劃實務

本研究在此將針對我國臺鐵局執行「運用路徑規劃」的機務處車輛科進行專家訪談，希望能自實務規劃者的角度透析研究議題，並進而與所回顧的文獻進行比較，彙整出後續系統開發作業中，最重要的決策要素。臺灣鐵路局為我國歷史最悠久的軌道運輸系統，所具有的車輛設備十分龐大亦相當多元，規範結構與人工排班作業承襲數十年、精煉可觀，在調度作業上亦具有多方彈性，非常適合作為本研究之借鏡與參考典範。

學生於民國 100 年 8 月 22 日前往臺鐵局花蓮機務段，100 年 12 月 10 日、101 年 3 月 5 日兩度前往臺鐵局機務處車輛科，每次各進行三個小時的專家訪談，而後將訪談結果彙整，呈現如後：3.1 節將就臺鐵局現況從事車輛資源運用規劃之實務進行簡介，以了解運用路徑規劃問題的上下游與界定。3.2 節將針對運用路徑規劃的實務作業作一概述，包括其執掌的主要單位以及運用表之判讀。而後於 3.3 節在深入探討其問題核心，包括決策邏輯以及重要的限制問題，另本研究嘗試將作業流程以數學化的語言呈現，除了便於學術研究單位理解以外，更可供後續研究發展啟發式演算機制參考。所導出了邏輯將於 3.4 節以改點前後的實際案例驗證其正確性。

3.1 臺鐵車輛資源規劃實務導論

臺鐵局實務上所施行的軌道運輸規劃，實由多階段的子計畫共同構成，以完備良善且高效率的客、貨運輸營運規劃，為一橫跨機務、運務及其分別管理之各子單位的跨領域作業。而車輛資源規劃相關的任務執掌，茲整理如表 3-1 所呈現。

表3-1 臺鐵車輛資源規劃相關任務執掌彙整

工作執掌單位	主要處理議題
運務處綜合調度所	依據運量需求排定客貨運轉時刻表 處理運用表製作時調整所致額外的軌道容量占用
機務處車輛科	依據時刻表排定機車運用路徑規劃 依據時刻表排定動力車組運用路徑規劃
機務處行車技術科	依據時刻表排定無動力車廂運用路徑規劃
機務處機務段與檢車段	依據運用表排定車輛調配規劃 依據運用表或檢修規則預防性與臨時性車輛檢修

運輸規劃之緣由起於滿足供需，以一般旅客或承運者的觀點視之，其最重視所排定之客貨時刻表。臺鐵局時刻表之安排是為運務作業，屬於綜合調度所之業務，然相關人員實際進行時刻表安排時，使用者需求並非唯一的參考依據，除了成本效益的考量外，尚存在許多營運上的限制，這些限制包括路線上的運轉與閉塞制度、車隊以及各單位轄下的運轉人員。能夠在考慮上述限制下，將受限的基礎設備資源進行最有效的使用，將有助於排班人員更有餘裕排定輔以滿足使用者之班表，以利營運者獲取較高的利益。

「車輛資源運用規劃」。又臺鐵局實務上再將「車輛資源運用規劃」，分作兩部分進行，分別為（1）運用路徑規劃，以及（2）車輛調配規劃，此與國外許多的先進鐵路系統相同，如本文圖 1-1 所呈現。又本研究著重於前者的「運用路徑規劃」，其透過給定時刻表，前者需進行為一個「短天期」的路徑規劃作業，並週期性的持續使用於兩次時刻表改點間，進而達到「短期規劃、長期使用」的效果，實務人員又以「排運用」、「連運用」等詞彙稱之。

臺鐵局總管車輛資源是為機務處之職責，故車輛資源規劃的部分亦隸屬於機務處的作業。檢視車輛的「運用規劃」問題時，首須回歸軌道運輸系統係以「車輛」作為運輸服務的基本單元。由於車輛為軌道運輸投資中最为昂貴的設備之一，

更受限於政府採購法之作業流程，其難以在短時間之內添購或增加，為一組難以放鬆的限制條件。故臺鐵局平時在執行車輛資源規劃時，並不會涉及研擬後續的購車作業，而是在有限的車輛資源下尋求一個最有效的車輛運用，以滿足營運的需求，同時達成「提高作業效率」與「降低作業成本」兩項目標。

藉時刻表之給定與限制下，機務處車輛科、行車技術科、各機務段與各檢車段等單位，需就車輛資源限制進行協調與規劃。在第一階段的「運用路徑規劃」問題中，車輛科主要排定具有動力的車輛單位，包括機車以及動車組的運用路徑規劃；行車技術科則管理非動力車輛，並排定非動力車輛的運用路徑規劃。其作業亦透過「接續車次」串聯出週期內車輛所需行駛的路徑，詳細的製作流程將於3.3節彙整與呈現，規劃者透過同樣的概念生成多條運用路徑，涵蓋每日時刻表中各級列車之服務範圍以生成「運用表」。運用表中載明運用路徑規劃所安排、決策之各級列車的一組可行的運用路徑，並包含可能需進行的初期檢修或清潔工作。最後，位於下層第二階段的「車輛調配規劃」為各機務段與檢車段，依據各個車輛於規劃之時的狀態，以及更細部的各級檢修規範，安排實際的車輛執行特定的運用路徑，維繫軌道運輸系統的正常營運。

「車輛資源運用」本身上承時刻表製作以外，根據前章所回顧之案例，其與後續的「勤務人員資源運用規劃」亦息息相關（Sussman, 2000）。雖然臺鐵局車輛的調配和人員的調配可為獨立的作業，然而因為良好的勤務人員規劃，必須依據車輛資源運用規劃中的「車輛運用路徑規劃」，先行生成後續的「工作班」機制，才可讓兩者進入後續的派遣任務。至此，可見實務上「車輛資源規劃」扮演著重要的中界腳色，上承時刻表設計問題，下至勤務人員資源運用規劃，無論之於哪個決策層級，均不可或缺。

3.2 臺鐵車輛運用路徑規劃實務導論

運用路徑規劃作業，根據係在已知時刻表之情況下，透過串連所有列車車次，使每車次恰好為某個運用囊括的一項作業。臺鐵局機務處的規劃人員多以「排運用」或「作運用」通稱之，在實務上因考量各站、各時間帶運量預測的結果，並受制於歷史背景用車習慣，故在綜合調度所排定時刻表時，多半已經附註其用以滿足需求的「期望車型及編組」，較類似前章文獻回顧中，已給定特定車型作為參數的方式處理。

作業員在安排運用路徑時，所須考量的因子非常廣泛且複雜，舉凡既有的運用車次、車隊大小、路徑內可能囊括的檢修作業、各起迄站的月台股道限制，以及執掌各車隊存放與維修的機務段或檢車段，其各自的容量限制均得嚴加考量，以利所規劃出的運用路徑得以滿足實際營運所需實務排運用時，由於重新安排運用路徑的複雜程度甚高。又臺鐵的時刻表歷經數十年的修正與演進至今，已經大致有了安排的雛型，今日時刻表的變動幅度多半不會太大，規劃者較傾向參考自過去既有的規劃，試圖以「調整」的方式研擬新的運用表。這樣的作業流程對於以手排作業為主的臺鐵局，是一個較快速、並能在短時間之內獲得一組可行解的方法，規劃人員認為這樣的結果亦可免除相關人員需重新熟悉新運用表，而後再進行運用轉換或是調配作業上的難處，然而如遇某些大幅度變動發生時，運用路徑規劃者也會與排班人員協調，以尋求一個合理可行的運用路徑規劃。

3.2.1 臺鐵車輛運用路徑規劃人員執掌

現行臺鐵局的車輛運用路徑規劃，一般可依據車輛型態的不同，分作「機車運用規劃」、「非動力車輛運用規劃」以及「車組運用規劃」這三者規劃方式。由於運用路徑規劃涉及覆蓋完整時刻表之業務，須考量臺鐵全線的車輛使用，以利進行全盤規劃較有彈性，又規劃過程各地方單位（如：機務段或檢車段）內尚有

後續組員運用的規劃課題需做考量，因此必須留意平衡任務量的問題，該作業若由地方執行將惹來非議。鑑於上述因素，該項業務多由中央單位集權負責，除了利於增加運用效率外，亦可避免爭議以求公平。

是故，臺鐵局現行將「機車運用路徑規劃」與「車組運用路徑規劃」交予屬於路局屬於中央單位的「機務處車輛科」負責，較特別者為非電力化區間必須使用「電源車」以提供採用動力集中式客車的基本用電，其因與柴電機車之運用息息相關，其傳統上亦由車輛科負責，現行車輛科共有兩位規劃人員從事路徑規劃之相關業務。而「非動力車輛運用路徑規劃」部分則由同屬機務處的行車技術課所負責，現行亦有兩位規劃人員從事該業務與相關事宜。除此之外，臺鐵局因自民國八十五年引進推拉式自強號後，理應存有「混合機車與車輛之運用路徑規劃」的決策邏輯，惟現行簡化的做法，係由行車技術科協同檢車單位，將無動力車廂排定編組後，與動力車頭視為一個完整的單位，再由車輛科進行運用規劃之編排，因此推拉式自強號目前也被視為車輛科之業務。上述執掌關係以及人力配置彙整如表 3-2 所示。

表3-2 臺鐵各車型運用路徑規劃任務執掌與人力配置

運用路徑規劃車種	執掌單位	人力配置
機車運用路徑規劃	機務處車輛科	} 2 人
車組運用路徑規劃	機務處車輛科	
推拉式自強號運用路徑規劃	機務處車輛科	
電源車運用路徑規劃	機務處車輛科	
無動力車廂運用路徑規劃*	機務處行車技術科	2 人

*註：不包含推拉式自強號車廂與電源車車廂

實務上，運用路徑規劃並不是一個每天都須進行的作業，規劃者僅需在時刻表進行改點前進行調整即可。而現行因臺鐵局實務運作仍為人工作業，故每當時

刻表欲進行改點時，依其內部作業規定，宜預留一百天，以利規劃人員串聯已知的車次，並考量各類來自車種、車型、場站、油耗、維修規定以及各機務段、檢車段的人力等限制進行運用路徑規劃。若時刻表變動較小時，規劃者多半參考過去既有的規劃成果，並試圖以調整的方式進行，並研擬出運用表。然遇時刻表經大幅度的變動，致使規劃者難以透過人工作業規劃出合理之運用路徑時，亦考量重新規劃，或嘗試會同時刻表排定者，修改預排的時刻表。然而實務運作上多半會避免或僅作最微量的調整，因為，研擬與排定時刻表之初，即是有旅客或貨物的基本需求，如貿然調整反而致使客貨運量流失，是不符合經濟效益的。同理，其下層的調配作業，亦可能面臨微調，然該問題多半為考量車隊運用率（實際運用車隊數與可運用車隊數之比值）與運務處進行人員運用之便利性與公平性所致，故不在本研究討論的範圍之內。

3.2.2 臺鐵車輛運用路徑涵蓋之車輛任務

臺鐵局目前對於車輛的管理與養護作業，隸屬於機務處下各地「機務段」或「檢車段」之業務，即局內所轄的所有車輛均有其對應管理的機務段或檢車段。而基於前述介紹負責調配特定車輛執行運用路徑的工作，是為各地機務段與檢車段的業務，故所安排運用路徑之始末，亦為了配合其方便性，選定在車輛所屬之機檢段，故俗有運用路徑「段進段出」之簡稱。

一般而言，臺鐵局對於運用路徑的安排，通常包含有以下須執行的任務：

- (1) **出車**：即車輛自所屬的機務段或檢車段出發，開始執行該運用路徑中的各項任務。
- (2) **收車**：即車輛完成運用路徑中的各項任務後，回到所屬的機務段或檢車段，根據規定車輛收車之後必須執行一次 1A 級檢修，以確保車輛在下次出發執行其他運用路徑之營運安全。

- (3) **營運車次**：即車輛執行某時刻表上安排的車次，並辦理客貨運服務。
- (4) **等待**：即車輛結束前一個任務後，於同一個地點（可能為車站內、機務段或檢車段內或是用以儲車的側線）等待下個任務的開始。
- (5) **迴送**：即車輛為了達成兩任務間的接續必須進行空間上的移動，其並無客貨運服務的安排，但仍有勤務人為值乘以往來兩地的「無利潤營運」。
- (6) **清潔**：為了維繫服務品質所必須執行的車輛清潔作業，包括車輛的「小洗」、於車站執行較簡單的「站掃」或「排糞」工作。
- (7) **1A 級檢修**：表示車輛營運過程中必須要執行檢修作業，通常是因為所行駛的總里程數或天數，已經達到了 1A 級預防性檢修的最低限制，故須執行檢修。此外，臺鐵局亦規定車輛於收車作業後，必須執行一次 1A 級檢修，以確保車輛在下次出車前的累積里程與天數均已歸零，以確保車輛營運之安全。
- (8) **油料填充**：表示車輛營運過程中必須進行油料填充得作業；對於以柴油為動力運轉的車輛，基於其不同的油箱大小，部分車型不須在運用路徑內安排油料的填充，以作後續運轉之用。
- (9) **重新編組**：由於每次列車所要求的車廂數或車組數，依據運量的需求而不盡相同，甚至同一個車次在不同區間所需要的車廂數或車組數也可彈性安排，故於某些車站，將進行重新編組的「聯結」或「拆掛」車廂作業。其餘運用表上多半是為附註事項呈現。

在上述的各項任務中，依據執行任務車型的不同，具有不同的安排與接續，而成本部分亦略有不同。但若對於同一車型，一般而言，營運車次、迴送、油料填充等成本與所行駛的里程相關，營運和迴送的區間越長，所需填充的油料亦越多，所需值乘的組員亦越久，故需要負擔越高的成本項。清潔、檢修等成本則是與其

執行的次數相關，這些作業必須配置特定的人員與器材執行任務，故每執行一次便需要一個特定的固定成本。而出車、收車（不含收車後的維修）、等待或是重新編組，多半並不具有成本：出收車為一個運用特定的起末，並無涉及運行亦無成本之流動；而等待接續的過程中，車輛亦無須維持空調及動力，亦不需要人員看守或值乘，故亦無須擔負成本；重新編組為車站作業，基於執行編組調整的人力是為固定，並無須另外委派其他作業人員，故也不需要計算其成本，惟必須保留給現場人員足以處理「聯結」或「拆掛」車廂的時間。

3.2.3 臺鐵運用表之判讀

完整的運用路徑規劃結果必須被轉換為「運用路徑表」呈現 3.2.2 節中所歸納各運用路徑中包含的細部任務。臺鐵局或台灣高鐵在實務上均將其稱作「運用表」，該表中將載明各個運用路徑其所包覆的行車或維修任務，如下圖 3-1 即結論運用表中的其中一條運用路徑。

運號 用碼	高雄機務段 【EMU1200】 機車運行				編組
	基隆	七堵	高雄		
E1 ABC	17:35	(1020) 山	⊙	12:03	6 組
	17:58 (站)	(1133) 海		23:42	
	12:49	(1006) 海	~	07:05	× 3 車
	13:17 (站)	(1025) 山 週一~六行駛		18:40	
	13:50	(1023) 山 週日行駛		18:40	

圖3-1 臺鐵現行動力車組運用路徑範例圖

有關該路徑之解讀及其必須記載的資訊等，茲如後所示：

- (1) **運用號碼**：又做運用路徑號碼，如範例中「E1ABC」所呈現。對於每條運用路徑皆會有一個專屬的運用號碼，字母「E」表示其編組為電聯車組，編號「1」表示這為本型車的第一組運用路徑，為一個流水編號，「ABC」

表示該運用路徑每日需要三組車（九節）執行該運用路徑。

- (2) **運用配屬段與運用配屬車型**：如文字「高雄機務段 EMU1200 機車運行」所呈現。表示該運用路徑中的各車次為分配為高雄機務段所負責，故串聯之運用亦配屬予高雄機務段的 EMU1200 型自強號車組所執行。
- (3) **運用路徑起迄**：如上圖符號「◎」為運用路徑的第一天、第一個車次自該站該時間開始；符號「|」則是最後一天、最後一個車次自該站該時間結束。一個運用的開始與結束係為同個車站貨機務段，此為滿足臺鐵局對於運用路徑「段進段出」的限制。
- (4) **車次與時間的接續**：如圖中折線的時空接續所呈現。在本案例中，運用路徑自第一天 12：03 擔任 1020 次自強號任務，自高雄出發，抵達基隆時必須進行簡單的站掃作業，站掃作業以「站」字表示；而後，再作 1133 次自強號由基隆出發回到高雄，以符號「~」表示該運用跨夜執行，此處為於高雄過夜；第二天上午作 1006 次自強號前往基隆，經過站掃後，於第二天 18：40 返回高雄。另外，由於山、海線的行駛距離不同將影響累積里程計算上必須作為區別，故運用表上亦須為此額外註記。
- (5) **日型調整**：相較於平日班表，逢假日班表有所調整時，因此運用路徑規劃也要跟著調整，如本例逢週日「停駛」1025 次、「增駛」1023 次，故該運用路徑也作調整延後於基隆站的發車時間。因為需求的不同，而致時刻表的不同，故某些運用中另額外存在不同的子運用，也可以視為兩個不同的運用路徑，一個適用於平日，另者則為假日。
- (6) **編組與車輛使用**：如範例中右側文字載明編組為「6 組 x 3 車」；由於 EMU1200 之自強號以三車為一組，平日係以三組九節車廂編組營運，故為了滿足兩天期的運用路徑，每日必須使用車隊中六組十八節車廂於該運

用路徑上。

- (7) **其他**：依路局運用表製作慣例，舉凡特殊的油料填充、列車清潔、檢修等因子，只要是事先排定於運用表內的工作，均依各車型規定得載於該表之上，惟運用「過程」中不涉及上述作業時，僅在運用結束前執行一次 1A 級檢修，而無須載明。以本範例而論，此處 EMU1200 所涉及的最低層級檢修，是為 1A 級檢修，其規定需在累積營運天數三天內執行作業，由於該路徑確實也在三天以內完成，故僅包括運用於高雄結束前必須執行一次 1A 級檢修，不需要額外加註。

3.3 臺鐵車輛運用路徑規劃實務決策邏輯與流程

有關臺鐵人工執行運用路徑規劃時所採用的決策流程，首先誠如前節所述，現行臺鐵局具有複雜而龐大的車隊，以致時刻表中雖排定某個特定的車種（如自強號），卻尚須就不同車輛型式加以選擇，該任務多由運務單位所促成，由調度總所的排點人員透過歷史背景與供需資訊，考量並未各車次選定期望的執行車型，故機務處須執行運用路徑規劃時，「某車次欲搭配某車型」加以排定，應視為事前已知資訊，然實務上的決策流程仍相當繁雜，大致可依序分為三個階段：(1) 保存不受改點影響的運用路徑、(2) 修正受改點影響的運用路徑、(3) 新建並強化運用路徑。將時刻表自第一階段輸入後，前一階段輸出的成果，將作為其後的輸入資訊，直到第三階段規劃完成後，可以獲得一張可行的運用表，如圖 3-2 之流程。

此三階段作業的概念之所以成立，係源自臺鐵在每次改點的過程中，排點者的邏輯並非破壞整張時刻表的規則，而是將過去不適當、不滿足當前需求的班次停駛，並考量加開合理班次，再對於時刻表、列車行駛區間、停站模式以及停靠時間等參數進行調整，如此可避免切換兩運用表過程中的繁複作業。是故，改點作業完成後部分車次仍承襲過去具有相同排點，或僅針對時間進行微調，仍可以

透過肉眼觀察出其為某個過去的車次演變而來，甚至某些既有的運用接續，在改點後仍為可行。若全部重新安規劃運用路徑，基於人工作業的特性，將會是非常沒有效率的方式，難以在短時間之內求得一組可行解。

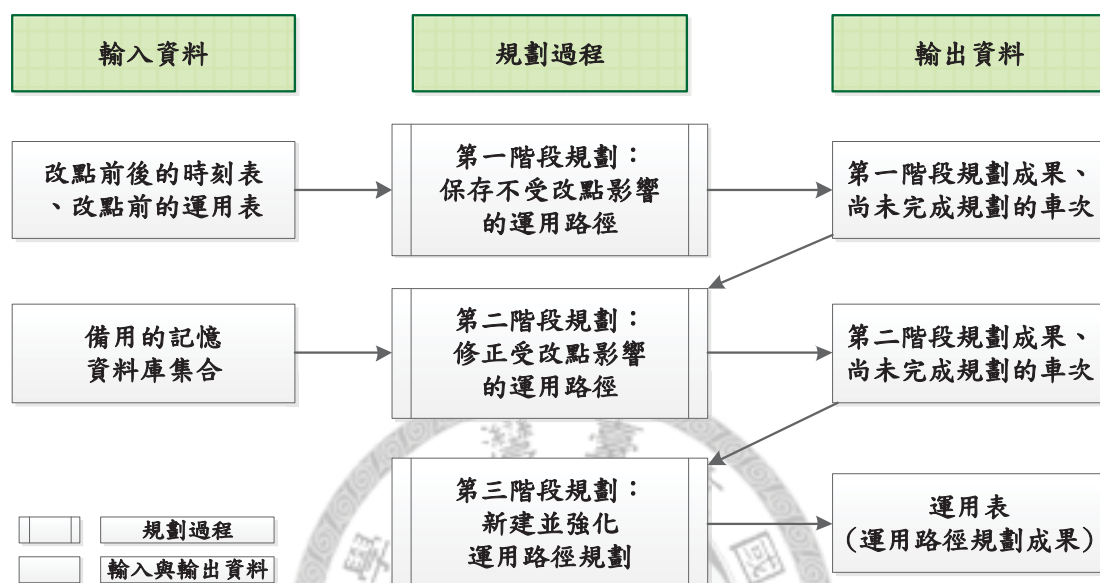


圖3-2 運用路徑規劃三階段作業流程概要示意圖

本研究將先行於 3.3.1 節彙整實務規劃時所考量的五大因素，並針對各因素進行說明，而後節所有的規則、選取機制，甚至人工規劃中的決策流程均源自於該節所彙整之五大因素之延伸。而後為便於後續研究者引為參考，本研究將彙整其作業流程後，以數學化的語言繪製流程圖，首先於 3.3.2 節將先行定義可能會使用的數學符號，包含其指標、參數、集合的意義進行說明。3.3.3 節將針對基於平時人工作業概念所衍生出之慣例，將其定義為「規則」或「機制」逐一說明，鑒於人工進行運用路徑規劃時，所挑選出進行拆解、組合等變更的運用路徑或車次，多半係基於作業員之經驗與作業習慣所為，這些規則未必具有明文規定，在此亦可望透過本節，將上述概念加以做文字化的陳述，以利讀者了解。在完成名詞、代號、規則與流程之定義後，將於 3.3.4 節將就整體運用路徑規劃流程進行說明。

3.3.1 實務規劃決策因子彙整

在執行運用路徑規劃中，無論考量現有的運用路徑可否於改點後持續使用，抑或組合、改良，或甚至新建運用路徑等過程中，皆必須透過人工作業員之經驗「判讀」與「選取」合適的運用路徑與車次進行配對，經其詳細研擬續以調整出合理的運用路徑。本研究彙整實務訪談時，規劃員在執行上述決策過程時，所提出最為重要的五大考量因素，不同於學術文獻回顧的數學語言以子問題方式呈現欲進行決策項目，人工作業所進行的分類為依據各項限制彙整出的「因子」，而再將這些「因子」經後節引入並發展特定的「決策選取機制」或「決策規則」。故本研究在此，必須先行簡介需加以考量的五大因子，分別為(1)空間因子、(2)時間因子、(3)維修規劃因子、(4)車隊運用率因子，以及專門為柴油動力車輛所衍生之(5)油耗因子。茲敘述如下：

(1) 空間因子：

顧名思義，直觀而言空間因子係考量車輛接續之位置，即存在於車次、檢修、油料填充過程間可能的「車輛迴送」。若前一車次的迄點若無法與後一車次的起點守恆，或列車必須於運用中途進入機務段或檢車段完成檢修作業，則必然需擔負額外的迴送成本，而迴送時尚須考量路線容量是否允許其實踐。除此之外，空間因子尚涉及列車「站場容量」限制，當某車輛結束某車次之營運任務時，其多半被安排直接執行下個車次的任務，然而對於一個非常繁忙的車站而言，過久的站內停留時間或過多的留站車輛，除了造成車輛調度時的困擾外，亦會影響旅客辨識列車的能力。

為了解決上述所及來自空間因子的問題，除了仰賴規劃人員排定良好的運用予以破除外，若不得以得佔用路線或站內股道時，規劃員必須與綜合調度所執掌時刻表排定作業之人員溝通，以例調整。以民國 100 年 9 月 28 日改點後，六家支線之案例而言，其車輛之頻繁增班，導致始發過程中，

導致有過多的車輛集中於新竹站，然因站場容量有限，為了紓解車潮，運用排定人員決策將部分西部幹線車輛延駛到竹北（亦即進行類似「迴送」的動作），此舉乃為了要分散集中在新竹站的車輛，可見運用路徑規劃與安排，與空間配置及使用是息息相關的。

(2) 時間因子：

在時間規劃的方面，由於各車次的起迄時間、運轉時隔等因子已經完全依賴已排定時刻表上的時間作為運轉依據。故實務上從事運用路徑規劃的相關人員，其所考量之重點，在於安排兩車次接續時，必須保留合理的接續時間，這個接續時間若為車站內的安排，必須要大於可能會執行的「站掃」或是「排糞」作業時間，以利車輛執行基本的清潔工作。而又當作業員面臨動力集中式的運轉，以機車頭牽引非動力車廂之時，若車次涉及牽引方向的改變，需保留足夠的站內調度時間；同理，在拆掛或解聯時這個時間也必須被保存下來。而時間因子亦受限於各時段車站容量限制之影響，必須在影響到其他車輛前駛離。而當接續時間包含進出機務段或檢車段之車次安排時，必須考量該時段是否有大量列車欲進出或通過相關或鄰近的軌道，其安排之重點在於減低彼此間的干擾與影響。

此外，另一個與時間相關的因子為運用天數（期）長度之擬定，有別於台灣高鐵的單天期運用，臺鐵局允橫跨多日的多天期運用，此舉更增加了運用路徑安排的彈性，惟每個運用路徑選定之期程不宜太長，雖沒有硬性規定，但一般客車與車組以不超過四天、機車以不超過五天為限，過長的運用天數將增加維修與調度上的難度，並減少面臨較高級檢修前調配作業上的調整彈性，因此實務人員多半會在此範圍內進行規劃與安排。

而在臺鐵安排時刻表的邏輯中，有所謂「平日班表」及「假日班表」之別，在運用路徑規劃的安排上也必須與之配合，而完整的運用表循環週期亦因此被拉為「一週」之長。因時刻表中車次的安排參佐旅客需求，故

平日與假日兩班表僅為因應不同日型的增班或減班，鑒於此現象，實務人員多半仍優先排定平日的運用路徑規劃，並確認在平時狀況之下，所有車次均能滿足上述各排班作業邏輯後，再行考慮假日營運中相佐的車次，以修正為不同的運用表。可能的處理包括「增駛」某趟車次，並視情況考量既有的運用內何以因應增駛班次的安排方式；其次尚包括為「停駛」平日的某些車次，這將可能促成兩個運用暫行合併，以騰出一個新的運用路徑用以反應、執行欲加開的車次。這樣的「增駛」與「停駛」的運用變更，意味著即便是同一個車次，在不同的兩天裡依然可以分屬於不同的運用，或是在某些運用路徑中另外存在的子運用路徑。在安排運用之時，某個運用路徑中存有的空檔，恰好可「插入」假日加班車之車次，並滿足運用規劃中的各項建置者，因作業安排簡單，最受作業員之青睞。

(3) 維修規劃因子：

運用路徑規劃問題所須考量的維修因素，一般除了滿足不同車型的各級檢修規定外，規劃者為了維護車輛服務的品質，需安排清潔工作，包含了「洗車」以及「站掃」等作業項目。然檢修作業必須於特定的場站、機務段或機廠所執行，故為三者中最重要之項目。

依據臺鐵局參酌鐵路法第四條所訂定之「車輛檢修週期表」(如表 3-3 所節錄，完整表單詳見附件一)，本研究暫行節錄其第一級檢修的部分作為說明，詳細總表當中實質詳載各車型所需進行各級檢修的特定條件，例如累積天數或累積里程的相關限制等。以下表的柴聯客車為例，一列行駛於樹林、台東的自強號，單程約為 364 公里，當某個運用路徑中欲安排該區間三往返之任務時，由於累積營運里程為 2,184 公里，已經超過 1A 級檢修規定中累積里程的最大極限 (1,800 公里)，故當規劃員處理路徑規劃作業時，必須選擇在該路徑中加入 1A 級檢修，致使這個運用路徑為可行。

表3-3 臺鐵局 1A 級車輛檢修週期表範例（柴聯車部分）

項目	檢修級別		檢修週期	機車型式		實行單位
	名稱	簡稱		柴電機車	柴聯客車	
定期 檢修	一級檢修	1A	行車里程 使用日數	1,500 公里 3 日	1,800 公里 3 日	機務段或 檢車段

1A 級檢修在臺鐵又被稱作日檢、運檢（取自其包覆在運用以內）或簡單保養，大約一個多小時即可完成，又由於檢修作業在實務上臺鐵採三班制的方式進行維修人員的換班輪替，使得場站內二十四小時都隨時皆可以負責作檢修，此舉較其他鐵路系統更有彈性，車輛無論在夜間或是日間有檢修需求時，均可以執行檢修作業，惟尚須考量檢修容量上限的問題。而因為調度關係必要在他段（非車輛所屬的機務段）執行 1A 級檢修的車輛，亦須考量他段的檢修能力以及檢修上限問題。

另外，由於前述單一運用的最長天期，基本上並不會超過四至五天，因此安排運用路徑時，並不會牽涉到 1B 級以上的定期檢修，因此規劃者並不需要對其加以考量限制。而站掃時空之安排必須於某些車次作業結束後進行，然如遇該車次迄站並非站掃人員駐點的車站時，列車除了更改站掃地點或進行迴送外，尚可委請人事單位另行安排暫掃人員，是為一個具有彈性的作法。至於洗車作業部分，現行臺鐵並沒有確切資料規範，係仰賴有經驗之規劃者安排。

(4) 車隊運用率因子：

軌道車輛除了前述所提及的 1A 級檢修外，尚有其他更高級的檢修，有些甚至耗時一日或數日，又或者偶有突發的事故或車輛故障發生，因此並非所有的車輛都可以投入執行運用路徑，是故規劃員在進行運用路徑規劃時，為了維繫各機務段得以正常的出車滿足營運需求，必然需要將各機務段或檢車段的車隊運用率列入考量，其計算方式如式（1）。對於每個機

務段或檢車段 m 而言，其車種 n 的車隊運用率 U_{mn} ，為每日使用之車輛數 (S_{mn}) 與所屬該段之總車隊數 (F_{mn}) 的比值。

$$U_{mn} = S_{mn} / F_{mn} \quad (1)$$

一般來說，理想的運用率依據各機務段之調度彈性而有所差異，大致而言以坐落在 80% 至 90% 最為妥當，高運用率顯示車輛使用上較無不必要的浪費，但相對而言，當事故發生或有較高級的檢修需求時，也會存有較高的車輛不足的風險。在位於中央的車輛科及行車技術科單位完成了路徑規劃後，其將依權責切割至各地機務段或檢車段管轄，集權中央之目的在於讓各段有很好的車輛運用率即很有效率的使用車輛，例如：從臺北（樹林）機務段到宜蘭、蘇澳，所用車輛幾乎均為台北機務段配屬的車輛，在運用表排定過程中，車輛科需要去算個機務段所負責的運用，又其車輛各需要幾組，再加上備用車輛後，再由車輛科統一配予，最後再次檢視正確性外，並維繫可接受的車隊運用率。調整的過程中亦適用於調撥機制，實務上的作法如彰化 EMU500 的運用率訪談之時是 75%，嘉義達到 87%，這樣不平衡的情況之下就需要考慮自彰化多撥一組給嘉義，以作為調整，其運用路徑也會因此調整起迄、營運里程數以及時間。

- (5) **油耗限制因子**：臺鐵局目前存在電氣化與非電氣化兩種不同營運型態的區間，其中不同種類的車輛，適應於不同動力供應形式的區間行駛，除了電力機車與電聯車組僅能行駛電氣化區間外，柴電機車及柴油客車能夠有彈性的在兩種區間內行駛，但由於柴電機車與柴油客車均需面臨「加油」的問題，故燃料的補給是為一個必須列入考量的因子，又各種車型的油箱均不盡相同，其每公里的耗油率亦有所不同，因為並非各路段都設有加油的設備，規劃者勢必須就不同的車輛與行駛的區間分別考量，以臺鐵局柴聯客車組 (DMU) 的油箱為例，其油箱的理論容量為 600 公升，但為使油孔

不落在最低部，實際上將油箱視為僅有 500 公升使用，保守估計約莫可供給 960~1000 公里的里程運轉，實務作業上通常取 600~900 公里為一界線，以確保任何油箱失效、漏油時車輛還可以用剩下的油料以為運轉。此外，臺鐵局系有於緊急情況時規劃採用人工油槍的加油方法，然因其費工費時，在一般作業程序下並不予考慮。

3.3.2 數學符號定義

為便於後文簡介運用路徑規劃實務作業流程，並將其繪製成具有數學意義與德輔助電腦程式撰寫的決策圖示，本研究在此先行定義本章即將使用的數學符號。由於一張「運用表」之中，通常包含有多個「運用路徑」，吾人可將運用表想成多個運用路徑合成的「運用集合」。而單一個「運用路徑」內則是包含有多個「車次」任務的組合，規劃本身即是在尋求運用路徑與車次間的配對。是故，為理解規劃的流程圖，吾人必須先清楚定義出「運用表」(或運用路徑集合)、「運用路徑」以及「車次」等三者之間的關係，故本研究在此將先行定義其所使用的數學代號。

首先，本研究定義運用路徑以參數 p 表示，其 i 為運用路徑的指標，各運用路徑 p_i ，屬於某個運用路徑構成的集合 P 。又定義 k 為車次的指標，故某個運用路徑 p_i 應係由多個車次所組成，這些車次屬於車次集合 T_i 。也就是說，車次集合 T_i 為對應運用路徑 p_i 所用，以為組成 p_i 的所有車次構成之集合。

後續其餘的指標與數學代號，是為此概念之延伸。有關運用路徑部分包括定義 p_i^O 表示改點前的第 i 條運用路徑，其屬於改點前之所有運用路徑的集合 P^O ，即滿足 $p_i^O \in P^O$ 。符號 P^C 為規劃過程中作為暫存可行，或已完成運用路徑規劃之的運用路徑的集合，其中 p_i^C 則用以表示其內的第 i 條運用路徑，並滿足 $p_i^C \in P^C$ ，上述規劃成果，將作為第一階段規劃和第二階段規劃過程中重要的輸出值，將往後傳到下一個階段以為輸入。

而與車次相關的符號定義部分，將 T^O 作為改點前的時刻表中所有車次的集合，相對改點後時刻表內所有車次的集合則以 T^N 呈現。集合 T^E 將作為暫存改點前某運用路徑 p_i^O 內，尚存於改點後時刻表中的車次集合。集合 T^F 則相反作為暫存改點前某運用路徑 p_i^O 內，但已不存在於改點後時刻表中的車次集合。

此外，在第二階段規劃時，另需透過集合 V_i 紀錄第 i 條運用路徑中曾經選過的車次組合，以免重複評估，而影響規劃時間。上述所有指標、參數與集合茲列舉如以下所整理：

◆ 指標部分

i : 為編號為 i 的運用路徑

◆ 參數部分

p_i^O : 為改點前的第 i 條運用路徑

p_i^C : 為改點後重新擬定運用路徑的過程中，暫存的第 i 條運用路徑

◆ 集合部分

P^O : 為改點前時刻表中所有運用路徑的集合

P^C : 為改點後重新擬定運用路徑的過程中，暫存的運用路徑集合，待第三階段結束後，該集中的運用路徑即改點完後安排好的運用路徑

T^O : 為改點前的時刻表中所有車次的集合

T^C : 為改點後重新擬定運用路徑的過程中，暫存於運用路徑集合 P^C 內所包含的所有車次，可視為已為運用路徑包覆的車次集合

$T^{C'}$: 為改點後重新擬定運用路徑的過程中，尚未被運用路徑所包覆的集合，為 T^C 對於 T^N 的補集合

T^E : 為第一階段規劃中，對於某個改點前運用路徑 p_i^O ，表示其改點後尚

存在時刻表中的車次集合

T^F : 為第一階段規劃中，對於某個改點前運用路徑 p_i^O ，表示其改點後已不存在時刻表中的車次集合

T^N : 為改點後時刻表中所有車次的集合

V_i : 為第二階段規劃中，第 i 條運用路徑曾經考慮過的車次組合

3.3.3 人工規則與選取機制定義

本節所列之「規則」與「選取機制」，係基於臺鐵局人工規劃者平時作業之概念，以及其衍生之慣例所彙整，所採用之決策邏輯未必具有明文規定，其為作業員間師徒傳承所留。然而這些被流傳下來的決策邏輯，卻是作為運用路徑規劃實務作業中重要的決策要件，是故本研究在此將先行定義並說明其所含括之意涵。

以下首先將分別簡介並定義食物規劃中所用的「規則」，其包括基於運用路徑規劃規定所研擬之「運用規則」、基於人工決策於第一階段規劃時用以保留舊有運用路徑之「保留規則」、第二階段規劃時用以決策運用路徑之是否兼具合理性與良好績效，並值得保存為其後規劃所用的「保存規則」，以及第三階段規劃用以增進運用路徑效率以降低成本的「效率規則」，茲如以下所述。

- (1) **運用規則**：運用規則為用於檢視「完整的運用路徑」之判讀所定義，其依據為現行運用路徑規劃中，必須滿足前節所述的空間、時間、檢修以及油耗因子等考量，是最強硬而絕對之限制。當吾人欲檢核某個運用路徑是否滿足運用規則時，其空間接續須遵守該運用於所屬機務段或檢車段維繫「段進段出」之限制，且盡量不具有額外的迴送；時間因子部分除了確保兩接續列車中，後車的發車時間晚於前車的抵達時間，亦須斟酌迴送時間的可行性，並保留接續間足以安排基本的站掃時間；檢修安排部分需滿足

所屬車型中，所有檢修規範之累積天數與累積里程限制，又其最後一次檢修必須位於原機務段執行；對於柴油客車而言，必須再多考量油耗限制問題，並確立其須滿足累積里程之限制。綜合以上，通過運用規則檢核的運用路徑，必須為一個「完整的」運用路徑，其可以維繫所有基本書面明文的規範與檢修以及油料填充規則，且在不經任何的調整的情況下足以直接輸出作為運用表的一部分之用者。

- (2) **保留規則**：保留規則為用於檢視「不完整的運用路徑」之判讀所定義，有鑑於時刻表改點前後，並非所有的車次均會延續過去之起迄時安排到開，而對於任意原有的運用路徑所包覆之車次，部分班次或為改點、或為取消，以致其未必滿足前述之運用規則。然在刪除不合理的班次之後，原運用路徑內尚存有車次者，即構成「部分運用路徑」，而欲檢視該運用路徑是否得以保留至下個階段，以進行如「填補」其他車次於其內者，必須滿足本節所定義之「保留規則」。保留規則本身並沒有明確的條文規定其「部分運用路徑」必須呈現某種趨勢，存粹為依據作業員之經驗所擬定。一般而言，被保留下的部分運用路徑可包括以下數種：(1) 經刪除後留下的運用路徑雖與原運用路徑不同，但本身可滿則運用規則者；(2) 該運用路徑係自原有運用路徑後，被刪除部分車次後，導致路徑中的其某些環節，無法達成車次間的接續，即中間有時空上的「空洞」而需迴送需求者，而運用路徑無法完成段進段出，有頭尾時空上的「空洞」，需要安排額外迴送者亦屬此類。通過保留規則檢核的運用路徑，可被視為具有「潛力」在後續規劃階段經由「填補」車次於其內，以構成一個完整的運用路徑，輔以保存備用之。
- (3) **保存規則**：保存規則為用於檢視「完整的運用路徑」之判讀所定義，深究其依據並未有明文規範加以限制，故基本上係依據作業員之經驗所擬定。

有鑑於滿足「運用規則」檢核的運用路徑，有時未必為有效率的規劃路徑，舉例而言：某運用路徑在營運 300 公里後即進行 1A 級檢修，其在接續過程中或許可以滿足運用規則，但其易造就額外的檢修成本及額外的用車數或運用路徑，如此缺乏效率的運用路徑，並不適合作為最後的運用結果引以呈現。故「保存規則」的檢核本身，必須確保其至少須滿足運用規則外，尚須將該路徑於檢修因子與油耗因子中，累積營運里程、天數能具有一定效率的程度，並期達到最低程度的迴送。是故，經由重新更動過或新增之運用路徑，需要經過保存規則的審核方能確保其確立為實質上可用之運用路徑之適宜性。該規則通常用於第二階段、第三階段運用路徑規劃時，檢視被規劃後的「運用路徑」所用。

- (4) **效率規則**：效率規則為用於同時檢視「多條完整的運用路徑」之判讀所定義，當運用路徑規劃作業到達較後端的步驟時，多數的車次接續已經達到某種程度的安排，所選取的運用路徑，多半已可視為一組暫行運用表的「可行解」，因其已包覆了所有新時刻表中的所有車次，並已安排合理的接續、維修與油料填充等任務。此時，採用效率規則便是用來檢核多條完整的運用路徑，彼此拆開重組後，是否有機會經由互換，或組合彼此所包含的車次與任務，以達到更少的用車數，或減少 1A 級檢修次數等，以強化運用路徑之效率。在運用路徑更新的過程中，吾人必須依據效率規則，並應同時確保其調整後是否有足夠的空間可維繫檢修、油料填充以及調度的正常執行。該作業多半用於第三階段運用路徑規劃時使用。

除此之外，在人工進行運用路徑規劃時，所挑選出進行拆解、組合等變更的運用路徑或車次，其亦多為基於作業員之經驗與作業習慣所為，故本研究在此亦針對規劃流程中的三個基於人工規劃的選取機制，輔以文字化陳述如後：

- (1) **選取機制 M_1** ：選取機制 M_1 其為基於作業員之人工經驗與慣例所擬定，將用以同時選擇「已存在的運用路徑」或「不完整的部分運用路徑」與「尚未被運用路徑所包含的車次」進行配對。被選擇的路徑部分，具有位於兩車次接續間時空位置中的「空洞」，或於運用路徑之始末，於車輛所屬機檢段與車次間之頭尾時空「空洞」之特性，又規劃者將選取一個或多個車次，考量其時空關係，在滿足運用規則下將其用以填入並彌補其中的空洞，以免除後續不必要的迴送任務。因此，所選取的某組車次，其起迄時間與空間須與前述空洞處對應，以利其中車次加入並安排後續檢修與油料填充作業。此外，對於已滿足運用規則之運用路徑，亦可於其前後或其中未被使用的時空，加入適合的一組車次於其中，以增進運用路徑之使用效率，或節約可能的用車數等，只要時間與空間上是為允許，亦可作為選取之車次集合。該機制之啟動成立的附帶條件，必須在前個規劃程序結束時，尚有車次不屬於任何一個運用路徑之內，並加以執行直到完成所有車次，或將全數的運用路徑都考量過而無從選取時中止。
- (2) **選取機制 M_2** ：選取機制 M_2 其為基於作業員之人工經驗與慣例所擬定，使用於選取「尚未被運用路徑所包含的車次」，並將其加以拼湊以「新建一條運用路徑」所用，為一個從無至有的過程。在選取時必須考量後續拼湊的過程，得盡量滿足前述之「保存規則」之檢核限制，若無法滿足，則必須至少以滿足「運用規則」之安排為底線，並於後續規劃作業中再行調整。該機制之啟動成立的附帶條件，必須在前個規劃程序結束時，尚有車次不屬於任何一個運用路徑之內，並加以執行直到完成所有車次時中止。
- (3) **選取機制 M_3** ：選取機制 M_3 其為基於作業員之人工經驗與慣例所擬定，使用於選取多組「已完成的運用路徑」所擬定，欲選取的運用路徑，其依據前述效率規則，為具有潛力透過互換或組合其中的車次，以達增進整體規

劃效率之果。該作業執行直到運用效率的檢核認定無法再行改善，或已達到某種一定程度的改善目標為止。

3.3.4 實務運用路徑規劃決策流程

在妥善給予上述數學符號、規則以及選取機制的合理定義後，本研究將在此以較邏輯化的方式呈現，完整的介紹運用路徑規劃之決策流程，並以數學化、程式化的機制繪製為流程圖（如後圖 3-3~3.5 所附）以利了解。另於附件中再行繪製具有虛擬碼特性的流程圖，以利未來研究者欲發展基於人工作業的啟發式求解機制時所用。又承接前文所述，運用路徑規劃的作業大致可被切割為三個部分：(1) 保存不受改點影響的運用路徑、(2) 修正受改點影響的運用路徑、(3) 新建並強化運用路徑。其概念圖已於圖 3-1 所呈現，第一階段規劃的成果將傳遞至第二階段，作為該階段的起始輸入值參考，同理第二階段之成果亦會傳入第三階段，第三階段之成果即為完成之運用路徑規劃之輸出，其各階段規劃之細部流程，將分別於本研究圖 3-3 至圖 3-5 所呈現。

經歸納其決策步驟，實務操作的第一階段工作，首重於「保存不受改點影響的運用路徑」，此階段中實務規劃者先就「新的時刻表」和「舊的運用路徑規劃」逐一相互比對，以了解是否彼此適配，藉此可收斂出無須更動可「完全保留」於改點後使用的舊有運用路徑，以及經刪除改點後無法滿足安排規則之車次，而呈現「部分保留」的舊有運用路徑（例如：原三天期的某運用路徑，經刪除某日後，另兩日經檢核後仍為可行之接續），其作業流程可參考圖 3-3 所示。

根據圖 3-3，規劃者在初始化作業必須先行備妥以下輸入資料，包括由改點前時刻表所彙整之車次集合 T^O 、由改點後時刻表彙整之車次集合 T^N 、改點前運用表所彙整之運用路徑集合 P^O 等，以為第一階段起始之用。

正式進入規劃流程後，規劃者須先自 P^O 中選取出一條舊有的運用路徑 $p_i^O \in P^O$ ，

並從中比對該路徑內的所有車次，判斷其是否皆存在於改點後的車次集合 T^N 之中。經比對後兩兩存在的車次儲存於集合 T^E 中，反之則儲存於集合 T^F 中。存在於 T^E 集合中之車次，其起迄時間與位置，可能也會因改點前後而有所修正，故規劃者須參考 T^N 集合，以修改 T^E 中各車次的起迄時空資訊。

完成上述分類後，若 T^E 為空集合者，表示其舊有運用路徑中的車次，在改點後已經全部取消，故可直接檢視下一條運用路徑，無須再行作業。然當 T^E 非空集合時，該運用路徑可望暫時保留，又無論其中 T^E 所涵蓋車次數的多寡，此時須先參考原選取的運用路徑 p_i^O 安排之檢修、油料填充、接續或迴送等任務，將 T^E 中的所有車次規劃為一個完整的運用路徑 p^E 。而後依據集合 T^F 中所含有之車次數，可再分作兩種情境：其一係當 T^F 為空集合時，我必須依靠前述的運用規則檢核所安排的運用路徑 p^E ，若其通過運用規則檢核， p^E 可為完全保留的舊有運用路徑，可直接重新將其建立，並存於暫存運用路徑的集合 P^C 之中，以為下階段規劃之輸入值使用；倘若運用規則檢核不成立，規劃者應將未滿足運用規則之特定車次予以刪除，並與原 T^F 不為空集合者（相當於已自舊有運用路徑中刪除部分車次）進行保存規則之檢核。通過保存規則檢核者，可視為部分保留的舊有運用路徑，亦可暫時新建運用路徑，並將其儲存於 P^C ，作為下階段規劃之輸入值。而未通過保存規則檢核者，亦可棄卻此類不具保存價值的任意一組車次，並保留接續良好的部分，存於 P_I 作為下階段規劃的輸入資料。

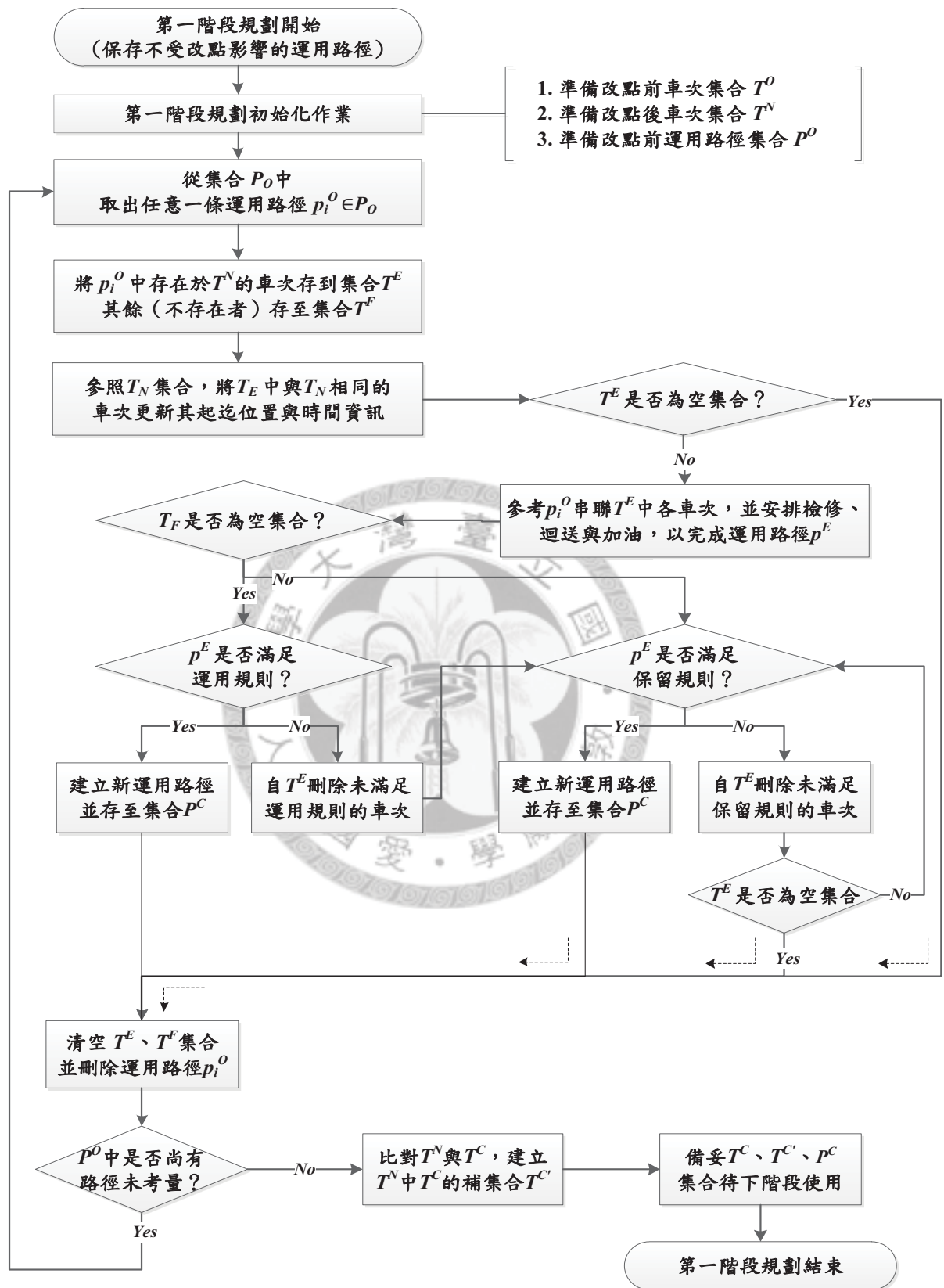


圖3-3 運用路徑規劃決策邏輯-第一階段規劃流程圖

前述作業逐步將所有 P^O 中的舊有運用路徑全數檢閱一次後，吾人亦已將所有可保留之運用路徑與其中的車次，分別存於集合 P^C 與 T^C 之中。然而並非所有的車次都可以順利透過上述程序被規劃至某個運用路徑之中，在此通稱 T^C 集合對於 T^N 之補集合 $T^{C'}$ 為規劃中尚未被運用路徑所包含之車次，其將與集合 T^C 、 P^C 共同保留至下階段作為規劃之輸入資料。

實務操作的第二階段的工作在於「修正受改點影響的運用路徑」，其規劃流程可參考圖 3-4，在結束上階段作業後，規劃者可彙整出此時尚待規劃的車次集合 $T^{C'}$ 。此外，於第一階段完成的集合 P^C 可被視為一個「既有的運用路徑」集合，此兩者將作為本階段之輸入資料，又改點後時刻表彙整之車次集合 T^N 在本階段亦將再次使用。此外，由於本階段在改善運用路徑的過程中，可能將涉及「填補」或「新增」車次於運用路徑當中，又更新運用路徑的過程中必須存在對應各運用路徑 $p_i^C \in P^C$ 的記憶用集合 V_i ，需事先備妥以為備用。

完成初始化作業後，吾人將正式進入第二階段運用路徑規劃，首先欲將 $T^{C'}$ 中的車次，尋求「填補」或「新增」至既有運用路徑之內的机会。故吾人必須先對 $T^{C'}$ 中所包含的車次數作為判斷，倘若 $T^{C'}$ 已為空集合，即表示於第一階段規劃中，所有的車次均分別已排入某個既有的運用路徑之內，無須執行後續填補或新增策略，可直接結束本階段之規劃。然大多數的情況下， $T^{C'}$ 不為空集合，故須依據前節定義之選取機制 M_I ，從集合 P^C 中選出「任意一條運用路徑 p_i^C 」、自 $T^{C'}$ 中選取「具有潛力填補或新增進運用路徑的一組車次」，此時須經由人工檢核這些被選定的車次加入運用路徑 p_i^C 後，是否得以找出滿足運用規則之規劃方式。若上述假設是為成立，則將被選的各車次自 $T^{C'}$ 中選取出並存入 T^C ，經由調整與安排 p_i^C 中接續、迴送、檢修與加油的作業時間與地點後，再將 p_i^C 與其對應的車次集合重新存回集合 P^C 之中。而無論上述更新作業是否成功，對於所選的 p_i^C 路徑均有一個記憶其配對過程的集合 V_i ，用以存取車次與路徑間配對的紀錄，並作為後續規劃之

參考。重複以上步驟，直到 $T^{C'}$ 已為空集合，或 $T^{C'}$ 中所有的運用路徑均被檢視過一次為止。

此時，吾人將檢核目前已規劃的所有運用路徑 $p_i^C \in P^C$ 中，是否滿足保存規則，即已相當完整且可達到規劃者所認定具有某程程度效率的運用路徑。未通過保存規則檢核者，即規劃者認定其安排是無效率的，該運用路徑將會被打散，並將其其中所包含之車次，重新自 T^C 取出並加入集合 $T^{C'}$ 。待考量完所有的運用路徑後，若沒有任何的運用路徑被打破，即可將規劃成果暫時存入。若有任何的運用路徑被打破者，必須重複前述作業，透過選取機制 M_I 重新考量現有未規劃之車次集合 $T^{C'}$ 中是否可作為新增或填補的可行性，基於集合 V_i 經驗之參考，將可避免規劃者重複不必要的考量，並加快人工作業效率，其停止條件亦與前段相同直到 $T^{C'}$ 已為空集合，或 P^C 中所有的運用路徑均被檢視過一次為止，此時的運用路徑將被重複檢核其保存規則是否被滿足，如前述流程規劃者將未通過檢核者刪除後，另就其餘規劃成果作為第三階段之輸入值。

經由以上規劃作業所保留至此的各條運用路徑 $p_i^C \in P^C$ ，基本上皆已滿足保存規則，可作為最後輸出之運用表之路徑使用，並具有作業員認可一定程度之效率性，而同第一階段最後的步驟，於第二階段規劃結束前亦須 P^C 集合、 T^C 集合以及 $T^{C'}$ 集合儲存，將其作為下階段作為規劃之輸入資料。此時 P^C 集合為對應本階段運用路徑規劃成果， T^C 為其中完成規劃的車次集合， T^C 對於 T^N 之補集合 $T^{C'}$ 則為本規劃中尚未被運用路徑所包含之車次。



圖3-4 運用路徑規劃決策邏輯-第二階段規劃流程圖

最後，實務作業的第三階段規劃著重在「新建並強化運用路徑」，其流程如下圖 3-5 所示。於第二階段作業結束後，規劃者可彙整出滿足保存規則之各運用路徑 P^C ，以及尚未被運用路徑所包含的車次集合 $T^{C'}$ ，兩者將共同作為本階段之輸入資料。由於本階段為實務規劃中最後一部份的作業，其結束規劃後的結果極為整個人工運用路徑規劃作業的成果，作為運用表以為輸出。

本階段首先需就前兩階段結束後，仍尚未被運用路徑所包含的車次（位於集合 $T^{C'}$ 中的各車次），透過建立新的運用路徑陸續將其包覆，直到時刻表中所有的車次均恰為任意一運用路徑所包覆為止，此時的 $T^{C'}$ 應為一個空集合。故結束起始化作業以進入正式規劃流程後，首先亦需先檢視 $T^{C'}$ 是否已為空集合，因當其為空集合時，表示所有的車次已經分別被運用路徑所包覆，可直接進入後續作業。否則，須依據選取機制 M_2 自集合 $T^{C'}$ 中取出一組車次，並參酌運用規則與保存規則，安排其接續、迴送、檢修以及油料填充之時間地點，使其成為一個可行的運用路徑，而後再將該運用路徑與其對應之各車次存至 P^C 與 T^C 中。陸續重複以上步驟，直到 $T^{C'}$ 為空集合為止，即必須完成所有原改點後車次集合 T^N 中的所有車次的運用路徑規劃。

其後，規劃者會另將所有的運用路徑進行重新考評，以人工尋求任何有助於提升營運績效的選擇，故運用路徑集合中，倘若為規劃者發現有任何改善運用效率或縮減用車數之可能性者，其可依據選取機制 M_3 自集合 P^C 中選取出一組運用路徑，並依據效率規則之檢核，將所選的該組運用路徑進行修正與重組，包括車次的交換或重新拼貼，重複逐一修正完成所有運用路徑規劃集合，可能的做法尚包括將多組運用路徑合併，以減少運用總累積天數，或調整運用能助於檢修、油料填充的作業次數減少等更低成本的規劃，待無法再行改善時，即結束本階段作業。此時 P^C 即為規劃結果之運用表，其中的各條運用路徑 $p_i^C \in P^C$ 即表示運用表中的各條運用路徑規劃成果。將其輸出即可結束整體運用路徑規劃作業。

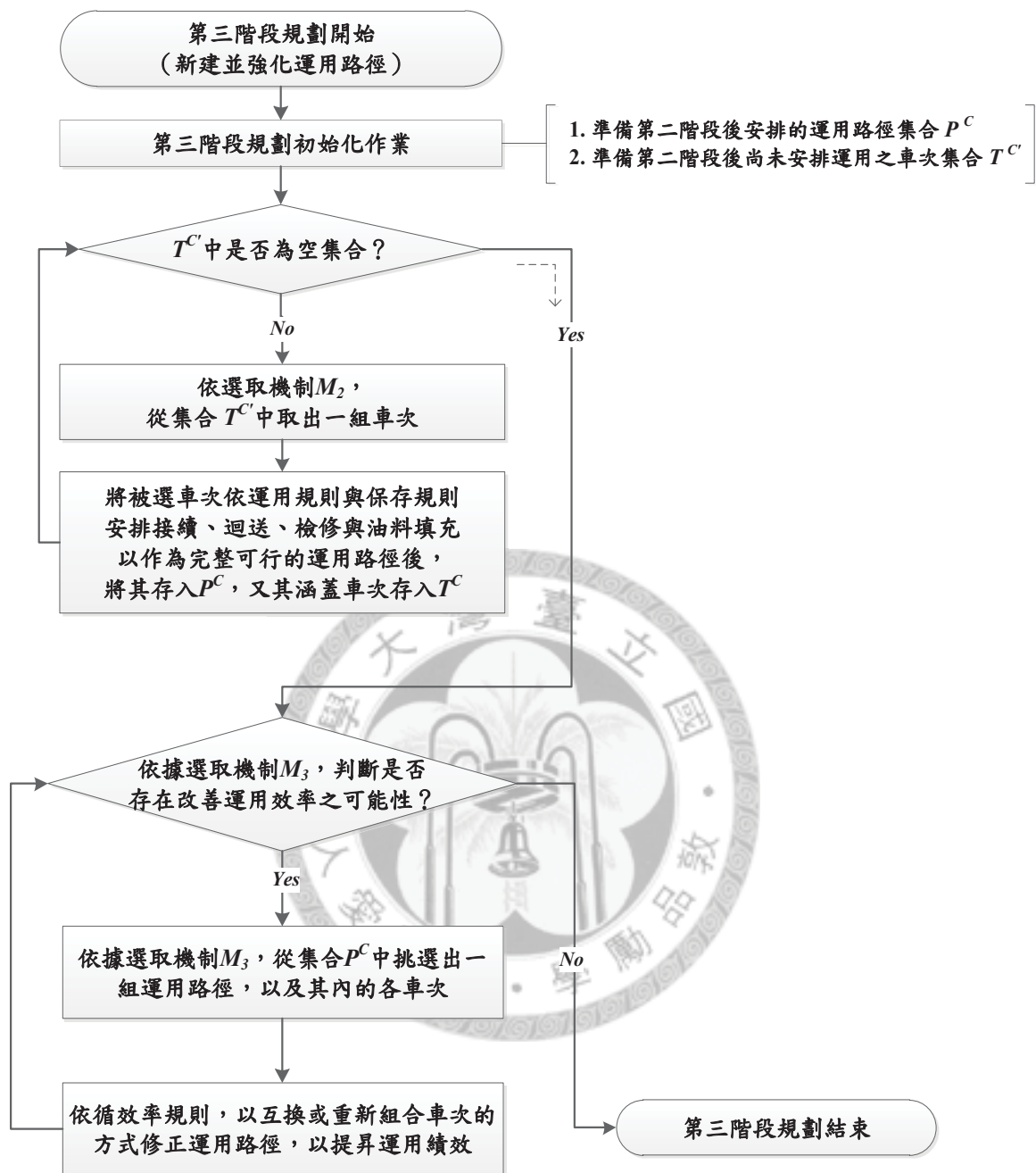


圖3-5 運用路徑規劃決策邏輯-第三階段規劃流程圖

3.4 臺鐵運用表更新案例

由於運用表的製作過程較為複雜，故為了更明確了解運用表修正的過程，本研究在此藉由對照民國 99 年 8 月 18 日改點前後之運用表，選出幾個運用路徑作

為範例，一方面確認 3.3 節中所彙整運用路徑規劃流程之正確性以及實用性，另一方面亦可作為參考案例以利讀者閱讀。

由於完全相同保留的運用表其概念清晰易懂，故本研究在此不將其遴選作為解說。在該次的大改點中，調度總所針對營運績效對於部分車型的使用作簡單的微調，改點過程中亦包括有取消或加開部分車次，乃至運用表上亦有較大幅度的調整，由於調整前後的車次編碼未必統一，為了避免疑義在此均重新編號：案例中以英文字母「O」字頭開始的紅色細線車次，表示改點前的車次；英文字母「N」字頭開始的黑色粗線車次，表示改點後的車次。

3.4.1 案例一

案例一可參考圖 3-6 之運用路徑，該路徑由 DR3100 型自強號柴聯車組擔任，檢核原運用路徑內的車次 O1，其在改點後僅作到開時間上的修訂，以為新車次 N1 呈現於時刻表中，又新舊車次具有相同的起迄車站位置。然而，原有的 O2 車次在改點後改由其他車型擔任，故該運用路徑至第一階段規劃結束後，僅剩 N1 車次，其此並不被視為一個合宜可用的路徑，無法通過保留規則之檢核，故運用路徑被取消，而 N1 車次被棄卻之。

而後，規劃者於第二階段規劃中，試圖將 N1 車次重組未成。直到進行第三階段規劃時，恰好 N1 與新增的車次 N3 車次，可以在時空上成為一組有效率的配對，故依據選取機制 M_2 將兩車次選取後，新增該運用路徑。參考運用規則與保存規則，安排並確認欲建立之運用路徑內，其總里程數小於加油及 1A 級檢修最小累積里程數，故於新左營站僅作接續，直到車輛返回車輛所屬的花蓮機務段，再執行 1A 級檢修與油料填充即可，相較於原來被刪除的運用路徑其過程省去了兩趟不必要的迴送成本。

花蓮機務段(DR3100型) 機車運用表

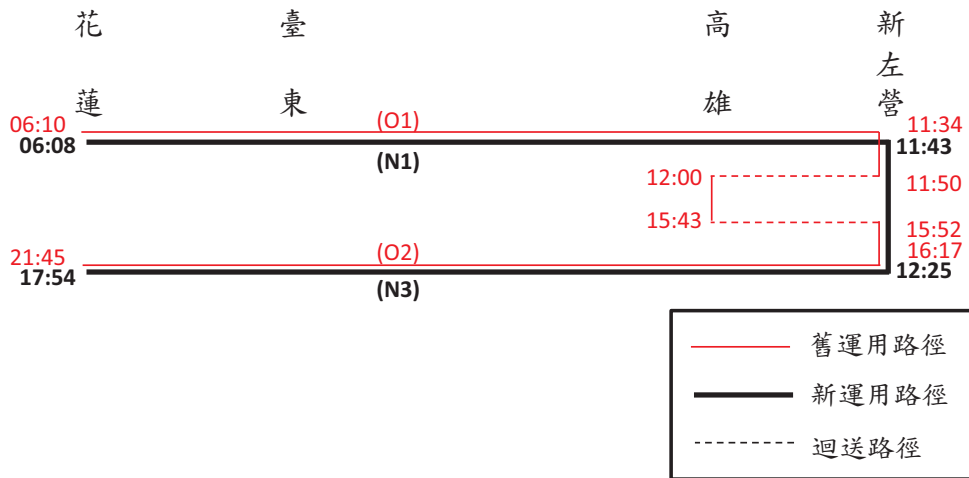


圖3-6 人工製作運用路徑案例一

3.4.2 案例二

案例二可參考圖 3-7 之運用路徑，該路徑由 DR2800 型自強號柴聯車組擔任，在第一部分規劃中，檢視原運用表中的各車次得知，O1、O3、O5 與 O6 車次，於改點後其行駛區間部分均未做更動，僅做了時間上的微調後作為 N1、N3、N5 與 N6 車次，而 O2 車次在變更為 N2 車次後，雖行駛區間、時間的調整上較大，但仍可接續其後的 O3 車次，故經第一階段規劃之判讀，上述車次需就改點後時刻表更新各車次的時刻資訊。其後檢核該路徑是否滿足保存規則，又本例中因 O4 車次在改點過程中，被調整使用其他車型的車輛擔任，而其餘多數的車次均未做調整，故「刪除 O4 車次」後被判定為通過檢核而值得保留的運用路徑，作為「部分保留的既有運用路徑」，具有經填補或新增車次而完整運用路徑之潛力。

在第二階段規劃中，依據選取機制 M_1 發現恰好尚未被納入運用路徑的車次 N7，其時間可配合「填補」進原 O4 車次的時段，但由於 N7 車次較 O4 車次略晚到達終點的台東車站。故無法配合執行 1A 檢修，必須修正至執行完 O4 車當日，於樹林機務段再執行檢修，依此執行填補並更新檢修時間後，更新「既有運用路

徑資料庫」。在第三階段規劃中，作業員希望強化運用之效率，又改點後的 N2 車次與 N3 車次間有了較大的時間帶，可於台東機務段作為 1A 檢修之用，且經檢核後並不違背檢修規定，故修正檢修的時間設定為 N2 車次結束後執行，提早於台東機務段進行檢修。

花蓮機務段(DR2800型) 機車運用表

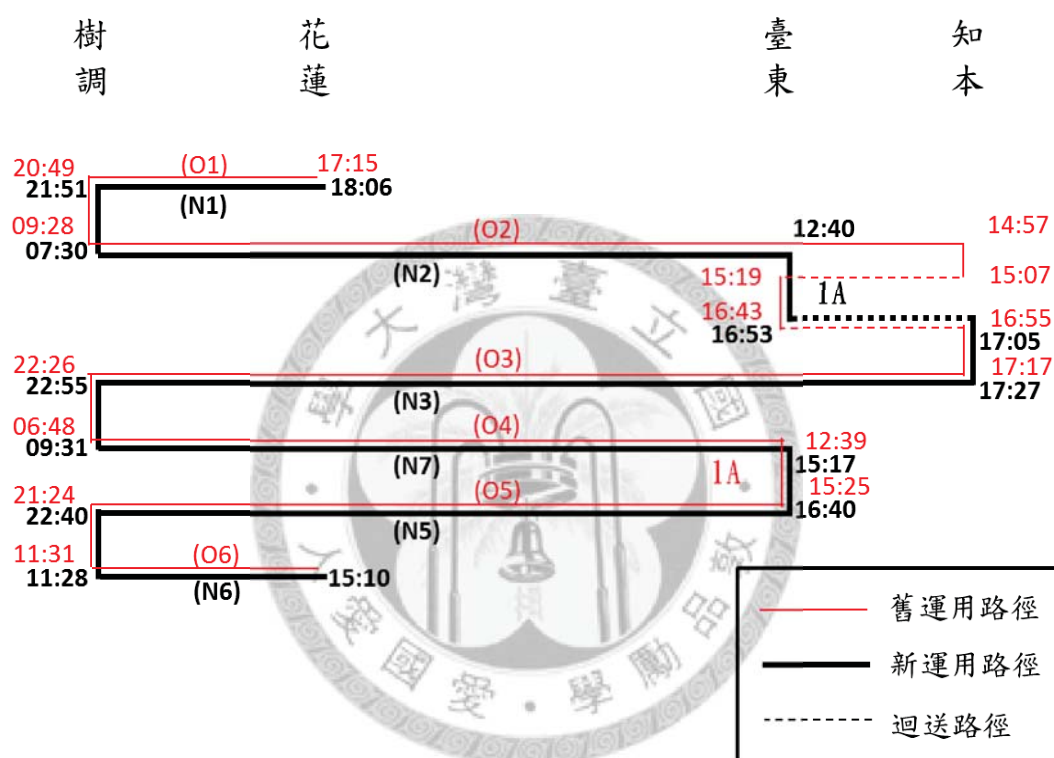


圖3-7 人工製作運用路徑案例二

3.4.3 案例三

案例三可參考圖 3-8 與 3.9 的運用路徑，該路徑由 DR2900 型或 DR3000 型自強號柴聯車組擔任，可分為平日（圖 3-8）與假日（圖 3-9）使用兩部分。該運用內所包含部份的車次具有較大的車組需求量，故其並未全部由本運用路徑提供的車組所包含。在第一部分規劃中，檢視原運用表中的各車次均存在，其中，O1、O3、O4、O5、O6 在行駛區間部分均未做更動，僅做了時間上的微調後分別作為

N1、N3、N4、N5、N6 車次暫行保存。而 N2 車次在改點後，變更行駛日型並調整原行駛區間，於平常日時，較原 O2 車次截短行駛至台東站止，而原迴送路徑可以予以刪除以完成與後續車次的接續；然在假日則較原車次延駛至新左營站（以 N2' 車次作為區別代稱之），故將上述的改點後資訊更新到運用路徑中的各車次之上。此時，無論是平日的運用路徑或假日的運用路徑，其車次的安排組合都可以完全滿足接續，彼此串聯以為路徑，故第一階段結束時，平日與假日兩組運用路徑均可作為「全部保留」的舊有運用路徑予以保存。

在第二階段規劃中，平日的運用路徑是為完整，且迴送的部分亦因為 N2 車次較 O2 車次截短行駛以為刪除，此時恰好沒有其他適合的車次可被加入而改變該運用路徑，檢核 1A 級檢修之排定時間與地點，確實維持其可行性，故不需要再進行調整，運用路徑將維持原貌不做更動。然例假日運用路徑部分，在改點後則新增了 N7 車次，此時參酌運用表中 N2' 車次與 N3 車次之間，包含一個來自原 O2 和 O3 車次之間就存在於高雄至台東的迴送車次，根據選取機制 M_1 ，該時段恰好可為 N7 車次加入填補之，可省去不必要的迴送成本，重新檢核 1A 級檢修之排定時間與地點，亦維持其可行性毋需再行調整，至此兩運用路徑均結束其第二階段規劃。

最後於第三階段規劃中，作業員透過選取機制 M_3 期望強化運用之效率，由於兩個運用路徑在最後一天的上午至 10:40 才開始當天的第一個任務，故作業員調整試圖將原先以串連的 N8、N9 車次所構成的運用路徑加入本運用路徑之中，以節省用車數達到更有效率的營運。此時，由於 N9 車次與 N5 車次無法在台東站順利完成接續，故同時須調整原 N5、N6 車次與其他的運用路徑調換，改為執行 N10、N11 車次。由於 1A 及檢修時間發生在第二日晚上，故不需更動，而第三天全天的運用亦不至於超過 1A 級檢修總累積里程。此強化作業的結論，相當於新的運用路徑可將運用路徑的第三天全天做完整的使用，其 1A 級檢修的累計里程也較無浪費，可節省了一個運用路徑（一組車）的使用，致使車輛運用得以更具效率。

花蓮機務段(DR2900, 3000型) 機車運用表

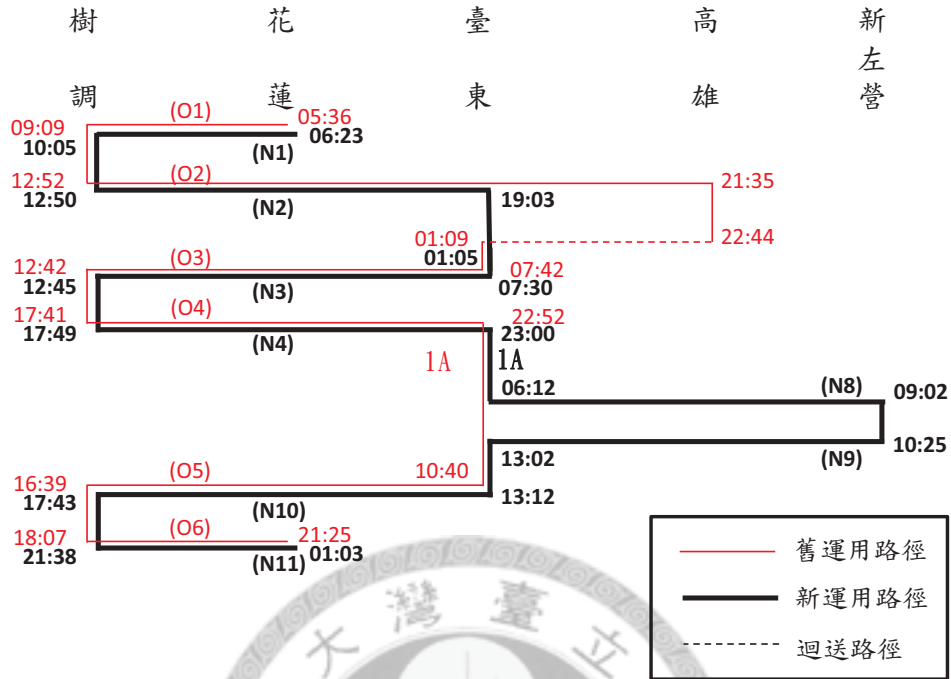


圖3-8 人工製作運用路徑案例三—平日

花蓮機務段(DR2900, 3000型) 機車運用表

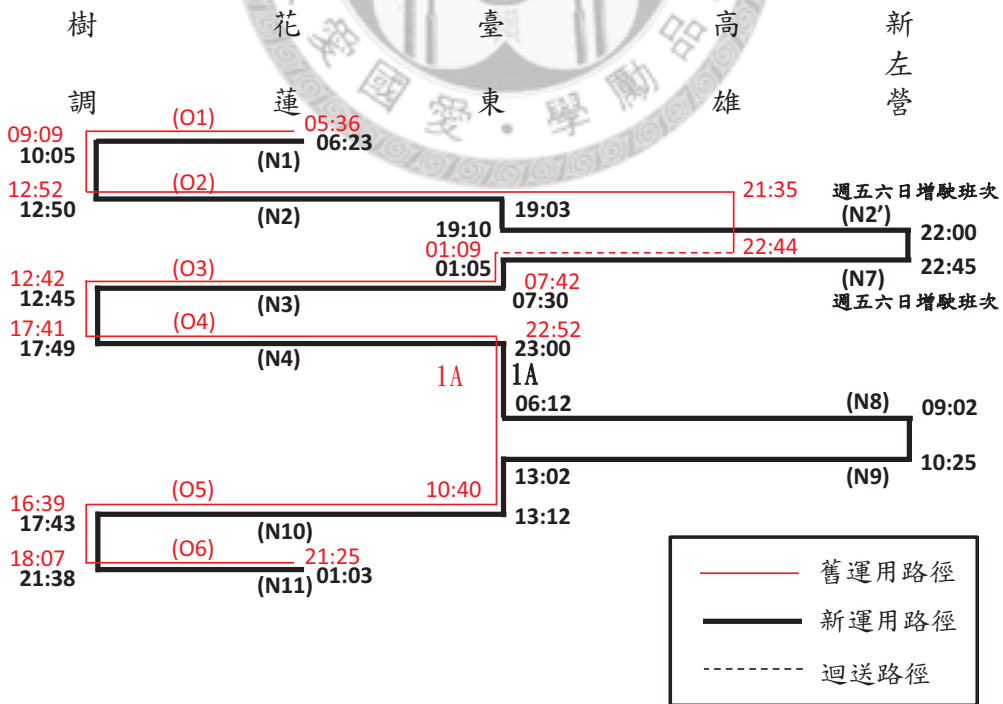


圖3-9 人工製作運用路徑案例三—假日



第四章 軌道車輛運用路徑規劃數學模式建立

本研究欲發展軌道車輛運用路徑規劃決策支援模式，然決策框架之擬訂以及數學模式之建立，均必須參酌前章於文獻回顧及實務訪談中之資訊，以利後續發展成果可於真實世界中支援實務決策所用。故本章於 4.1 節先行回顧過去用於建立運用路徑規劃問題之相關研究，並研擬數學模式的結構及組成，以及其中所包含的問題特性與可能元素。而後透過 4.2 節彙整文獻回顧以及實務訪談之結果，以收斂並擬定本研究之決策框架。4.3 節將集前兩節之大成，選定正確的規劃模式結構搭配已研擬之決策框架，以建立本研究之車輛運用路徑規劃數學模式。4.4 節則將就所發展出模式之優缺點，以及後續推廣於實務使用之適合性與可行性進行評析，以認定後續另覓求解演算法的需求與方向。

4.1 運用路徑規劃數學模式建立方法回顧

承第二章所述，軌道運用路徑規劃相關的研究，多以數學規劃法進行求解，由於車輛本身不可分割，故文獻中透過整數規劃法或混合整數規劃法建立數學模式者為其大宗，部分文獻而後亦透過其他的解構法（decomposition method）或啟發式演算法（heuristic algorithm）加強其求解效率，進而尋找最佳的目標值。

在過去的文獻中，依據數學模式架構的背景不同，大致可將歸類為兩種方式，如圖 4-1 所示，分別為：

- (1) 以多元物流問題建立數學模式：其處理方式是針對其運用問題特性，建立滿足特定時刻表的網路模式（network structure），並將車輛本身視為網路中的貨物（流量）以建立數學模式。又根據其結構的特性，可以再細分為「將每個任務定義為節點」，或是「將每個任務定義為節線」等兩種。
- (2) 以指派問題建立數學模式：指派問題建立數學模式的過程又可稱作路徑模

式法 (path formulation)，以該方法建立數學模式者，並不需要考量上述的網路特性，而是透過先行考量成本效益因素，將多個任務予以串連，並將可行的串連方式視為一個集合，其後再考慮是否得以「指派數個串聯好的路徑」於某週期內營運，輔將所有營運車次需求任務加以包覆，相當於利用集合包覆問題的特性求解。

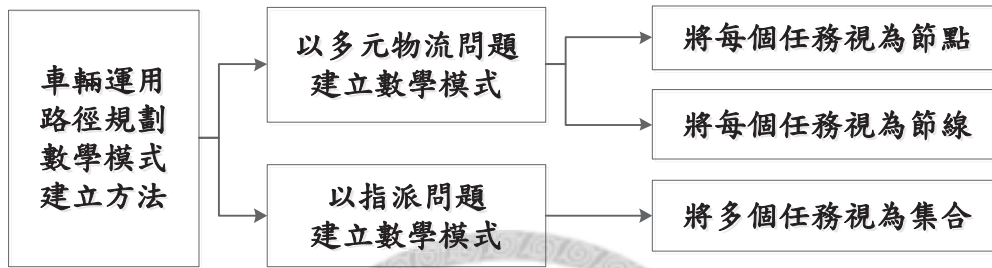


圖4-1 運用路徑規劃數學模式建立方式分類

上述兩種數學模式的建立方式，前者為限定通過節點或節線的流量必須洽為各車次的車廂（組）需求數，後者則透過集合包覆問題的特性，考慮所有車次中的各需求量，是否已被選入的路徑涵蓋服務。而本研究將透過後續 4.1.1 與 4.1.2 節分別對各模式建立的方式進行回顧，並於 4.1.3 節比較歸納出適用於本研究方法，進而建立滿足問題結構的「軌道車輛運用路徑規劃模式」。

4.1.1 多元物流問題法之模式評析

以多元物流問題建立運用路徑規劃，首先必須建立可供商品流動的網路，再依據問題的特性，考量其內所包含的因子類別，藉以區別並定義網路中各節點、節線所代表的意義，以及商品於網路中流動的方向性，以建立對應目標問題之欲求解網路維度、形狀與結構。當其應用於軌道運輸運用路徑規劃問題時，因為涉及車輛維修以及油料填充等額外的規範，又在某些路線或儲車基地必須考慮運輸容量上的限制，上述因子並不滿足原多元物流問題的基本形式，因此必須就原有的網路問題進行延伸，進而尋找適合的處理條件，根據過去文獻所及這些可能導

致網路問題被破壞的限制，實為致於其所研擬出之數學模式較為傳統網路問題更為複雜的主因。稍後，本節將先簡介過去文獻中所定義節點與節線的方式，與其架構問題的網路結構，並於最後針對前文所述不屬於網路問題特性的額外限制進行討論，以完備模式建立前的背景知識。

網路問題係由節點與節線組成，在過去探討運用路徑規劃問題之中，採用此概念建立數學模式者，大致可以分作兩種不同對其節點與節線的定義方式，這將造成問題架構與後續求解過程中所衍生出的差異。參考圖 4-1，早期的文獻多將「每個任務視為節點」，而兩節點間的節線表示任務與任務間的接續 (Booler, 1980; Wright, 1989; Forbes et al., 1991)，然近期大多數的文獻，係將「每個任務視為節線」，各節線其兩端的節點係代表任務之開始與結束，也就是在一系列任務的連線中，前一個任務的迄點與後一個任務的起點將會是同一個節點，並依此逐步描述任務與任務間的接續 (Haghani, 1989; Schrijver, 1993; Ziarati et al., 1997; Cordeau et al., 2000; Cordeau et al., 2001^a; Cordeau et al., 2001^b; Alfieri et al., 2002; Ahuja, 2005; Alfieri et al., 2006)。

將「每個任務視為節點」的文獻，多係源自於早期的文獻，其使用工作排程問題 (Job-shop Scheduling Problem) 的概念建構數學模式的方法 (Booler, 1980)。工作排程問題通常係依循時間的先後，將各個工作安排至特定的機台上進而完成製程。對應該問題至運用路徑規劃課題中，同個機台上前後的任務接續即相當於處理車次間的接續，而時刻表中的各個車次可被視為一個工作 (job)，以 x_{ij}^k 為一組二元的決策變數，決策任務 j 是否係接續在任務 i 之後，並使用第 k 種車開行，決策過程有如安排貨物從起點運送到終點的過程，其中貨物所經之處即為一個必須被滿足的任務。成本函數的建立係基於不同的接續方式或用車方式，然早期研究的重點在用車之選定部分仍佔有較高的權重，並以考量最小化總成本為目標。此外，本類的研究中有針對單日評估週期 (Booler, 1980; Wright, 1989) 或多日的

評估週期 (Forbes et al., 1991) 求解的文獻，由於運用問題涉及跨翌日問題時，必需給予總用車數一個適合的統計機制，以免不慎重複計算而錯估車隊需求數，故將 Forbes et al. (1991) 將「跨天」之意涵另設定為一個「任務」，即將其視為節點，並給予一個跨夜的參數予以表示，吾人透過計算通過跨天節點的路徑總數，可協助其統計運用規劃結果所需要的車隊數。

然而，以任務為節點的做法，對於各個節點給定的資訊過於繁複，決策者在整理輸入資料的過程將必然相當費時，並難以一目了然的得到所需資訊，使用一個節點表現多種不同的意義 (多個時點、地點甚至時段)，往往也容易造成決策者的困擾，又該模式亦無法直接反應接續過程中軌道容量限制的問題。是故，過去文獻的做法，必須事前決定可能同時存在的多種接續方式後再行決策 (Booler, 1980)。由於迴送本身為「節線」代表之故，其並不視為一個工作，故需從時間的角度檢核接續方式的可行性，當節線越來越複雜時，避免來自各組路徑彼此之間的衝突性，與空間因子所造成之不可行解，勢必將各加混淆而須透過工作業克服，故容量問題通常在此會被遺漏。是故該方法並不適合用於本研究作為運用路徑規劃之參考。

有鑑於上述缺失，Haghani (1989) 一文開啟了時空網路圖 (time-space graph) 之採用，以構建運用路徑規劃問題的網路模式，其透過一個具有時間、空間兩向量的座標軸建立問題網路，而後基於該網路建立數學模式。此時，網路中的各個節點同時由時空兩座標軸定義，使其均同時擁有「時間意義」以及「空間意義」，例如今可將某節點 A 定義為 (臺北站, 07:00)。而節線是為兩節點間的連線，故其可用以表示各種不同的任務，每個任務均有其起始的時間、起始的位置、終止的時間、終止的位置，即滿足節線兩端點之座標所定義，又網路上的所有節線，均為有方向性的 (directional) 節線，依循正時間座標接續連線。而網路問題中多元的貨物即表示運用路徑過程中「車輛的流動」，當貨物流經某一條節線時，即代

表某個運用本身將執行該節線所代表的任務，又各起迄組合的需求量參數則可視為車輛數（亦可能為車廂數或車組數）之需求。今欲判斷其解是否滿足所有營運車次時，即將所有表示營運車次的節線視為一個集合，判別其中各節線的流量是否有達到各通過的總流量，即可檢核問題是否已滿足集合包覆之限制。至於來自多條不同路徑的貨物是否可允許其通過同一條節線，則視決策者之需求所擬定。

前段中提及網路中貨物的流動，代表其為運用路徑中安排車輛執行任務接續的過程。其大致上的概念與流動過程，係由一個虛擬的節點（dummy node）出發，連結到代表不同任務的節線，最後再回到某個虛擬的節點結束。而各類文獻中均包含最基本構成接續的節線，包括營運載客的「車次節線」（trip arc / routing arc / outpost arc / sequence arc）、在同個地點等候接續下個任務的「等待節線」（waiting arc），以及為了滿足不守恆或特殊限制的時刻表安排，所衍生出無收益營運的「迴送節線」（deadhead arc / reposition arc）等。其中，「車次節線」的兩端分別為離開節點（departure node）與抵達節點（arrival node）、「等待節線」的頭端可為重新定位節點（reposition node）或抵達節點，尾端為離開節點、「迴送節線」的兩端分別為抵達節點與重新定位節點。透過上述方式，限定各種節線的產生，是基於某些具有特定性質之節點的相互接續，此舉更有利於後續研究者採用較自動化的方式技術，考量節線的方向性以處理節點間的連結（Haghani, 1989；Schrijver, 1993；Ziarati et al. 1997；Cordeau et al., 2000）。

然上述定義的問題網路，其實更具有發展各類考量因子的彈性，吾人可以在基礎的網路模式上，配合其所面臨之軌道營運業者不同的管理與規劃方式，變化出許多代表不同任務或目的的節點與節線，如前述「每個任務視為節點」的方式無法考量場站容量之限制，在本例中可安排車輛接續自各抵達節點後，得連結到具有儲存車輛意義的抵達存貨節點（arrival ground node），直到要再次出車時，再連結到離開存貨節點（departure ground node），以進行發車任務的方式管理車輛，

如此不但可以統計各時段的用車數，另加入對於存貨之限制後亦可給予車隊數上限的決策考量，又基於此架構中存貨機制的使用，故無需建立等待節線 (Ahuja, 2005)。而跨夜的問題，則可以對於每天設定出車節點 (start-of-day node) 以及收車節點 (end-of-day node)、並以出、收車節線連結首、末班營運車次建構之 (Cordeau et al., 2001^a; Cordeau et al., 2001^b)。甚至車組間的拆掛與聯結與否，亦可發展自兩點間加入多條車次節線，並分別代表不同的車輛組成，並設定僅可選擇其中的某條節線即可 (Alfieri et al., 2002; Alfieri et al., 2006)。諸如上述多種問題與任務，均可以透過該網路架構進行模式化與後續求解，可見本方法無論考量其使用上的彈性與靈活程度，均有助於本研究之後續發展。

在了解網路問題中各節點與節線之定義後，尚須考量欲建立之網路本身的「形狀」結構，研究者回歸運用表的製作目的，根據鐵路營運業者的需求不同，大致可分為兩種，其一僅要求在週期內建構出所需的運用路徑，並達成各場站「流進」與「流出」之總車輛數守恆，結束一個週期的規劃後，其可在下個週期產生另組不一樣的運用路徑，在這種情境下各週期所生成的運用表可以是不同的，而多數採用上述概念之文獻被使用在同時處理運用與調配問題，並考量車況作為輔助決策，然因其涉及的決策問題較為複雜，故有許多因子通常為之省略。另種則為可重複使用的循環式 (circulation) 運用表，該運用表的生成須有一個特定的週期，且吾人必須確定各個獨立的週期內，採用完全相同的路徑 (任務) 與連續時間間隔 (time section) 接續的結構，其是否可滿足所有車次的營運需求。此時，僅需要找出其中一組包覆某一週期內所有營運車次的運用路徑，其所生成之運用表可以長期於各週期內持續不斷的使用，以利其後執行調配作業時，係建立在相同的基礎上，擁有一組循環使用的運用表，相當於週期內每日所使用的車輛數是為定值，亦可便於調配人員穩定的安排實際車輛執行該運用路徑。本研究便是要創造這樣的一組運用表。

深究上述概念，採用第二種方式建立運用表的文獻較為普遍，且與目前實務規劃之慣例相同，然由於執行運用路徑規劃時尚須考量下一步為車輛調配計畫，故處理路徑間的接續，為了避免前端不當的路徑規劃而導致調配過程中無謂的迴送成本，過去的文獻多考慮將路徑內第一個任務的起點，以及最後一個任務的迄點，在連續的兩個出車天期內達到位置的守恆，即前一天於某站結束運用路徑的總車輛數，與今日該站開始執行運用路徑之總車輛數相等，如此一來可期許車輛依據該邏輯進行循環式輪值(rostering)運用(Rastke et al., 1996; Fioole et al., 2006; Peeters and Kroon, 2008; Xie et al., 2010)。

由於運用路徑的開始並未限制在週期內的某天或某個特定時段，在規劃其覆蓋所有車次的路徑時，必須考量某個週期內的最後一個時間點，與下個週期最初的時間點其實是相連的，此歸因於各週期內的營運車次結構是為相同，故以一週為週期的運用表為例，週期內最後一個時間點應為「星期日晚上」，最初的時間點應為「星期一上午」，然在實際情況下，星期日晚上至星期一上午為一個連續的時間軸，若在安排運用路徑時，限制運用路徑不得自星期日晚上接續至星期一上午，此將影響了規劃的彈性，並縮減了可行解區間。因此當運用路徑允許跨天期的規劃時，應考量將週期最後一天的任務，得以接續回週期第一天的任務並彼此相連（表示下一週期的第一天），其同樣可達到包覆整個時刻表中的所有車次的效果。至於週期的選定，基本上是以時刻表的循環作為依據，如 Ziarati et al. (1997) 一文以七日為週期，Schrijver (1993) 以一日為週期。又我國臺鐵局的時刻表安排，雖然具有加班車的機制，但正常情況下係以一週為單位循環使用，故應以七日作為本研究之週期。

為了解決上述問題，直觀的想法係建立虛擬的「重疊網路」，以考量兩相同週期間相互接續的問題，其概念運用在人工規劃上十分簡單，僅需將兩張滿佈週期內各車次的時空網路圖相接，而後繪製運用路徑並將選定者加以上色，將兩張圖

重疊後檢視其不會有重複著色之區域即可。然此舉應用於數學規劃時，將產生額外的路網，進而增加決策變數的數量，更大幅增加求解上之複雜性，其次還必須確認前後週期所重疊的部份具有相同的網路流動，將生成額外的限制式。是故 Schrijver (1993) 透過圓形時空圖首先解決這個問題，這個概念廣泛地受到後續數學模式建構者的青睞(Cordeau et al., 2000; Cordeau et al., 2001^a; Cordeau et al., 2001^b; Ahuja, 2005; Alfieri et al., 2006)，該方法基於軌道運輸業者規劃之時刻表可於各週期間循環使用的特性，創造連結週期內最末節點與週期最初節點的節線，以消弭額外建構的重疊網路。如圖 4-2 即為 Schrijver 學者所應用的圓形時空圖，該案例之每個節點為一個半徑座標與一個角度座標所構成，半徑座標代表位置（如：車站、機廠），角度座標代表時間，連結不同半徑的同心圓間的節線即為車次節線（Schrijver 學者一文中案例中洽無迴送節線之設定），而連結於同個圓中的弧線，則為等待接續其後發車的節線（Schrijver, 1993；Cordeau et al., 2000）。

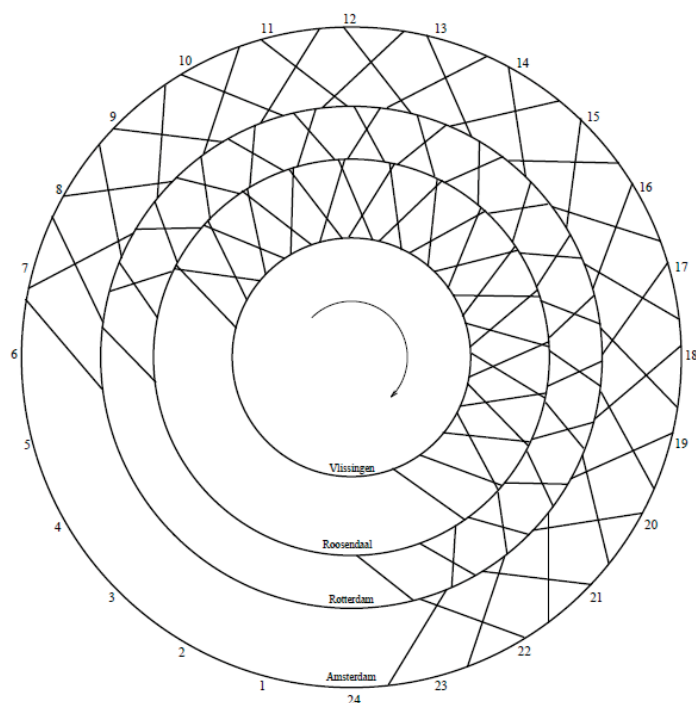


圖4-2 圓形時空圖範例圖 (Schrijver, 1993)

本方法將能確保每個運用路徑所安排之出車與收車，其並非侷限於某個特定的時間點或日期開始進行，如此一來將大量增加了車輛使用的彈性，並更符合實務狀況所需。然吾人仍必須需確認所有的車次節線（即本例中連結不同半徑的同心圓間的節線）都有被指定數量的車輛數所連過，即完成車次集合的覆蓋問題。而圓形的時空圖在處理跨夜問題尚亦可採用前述的各種方式，故不至於影響其接續的過程。近期的文獻為了更貼近實務上的使用，故開始考量運用路徑中可能出現的檢修問題。然而，檢修問題本身因涉及檢修時間、容量限制，以及可能具有累積營運里程或天數等法令、政策上的問題，並不符合傳統多元物流問題之型態。其為各類限制式中最困難的部分之一，部分文獻假設所有的維修作業都是在夜間或特定時段進行，且這些作業都可以確定車輛可於發車前全部完成，故可以將檢修忽略（Alfieri et al., 2006；Cadarso and Marín, 2011）。

在本研究所回顧採用以多元物流處理運用路徑規劃的文獻中，面臨檢修問題的處理大致可分做兩種解決方式，其一係將運用的總天數設定為不超過某個累積天數以上，而在該運用的最後安插一次檢修，亦即對每個運用所能跨越的每日收車節點做上限規範，本方法如前所述，僅是將問題留置其後的調配規劃而已（Cordeau et al., 2000；Cordeau et al., 2001^a；Cordeau et al., 2001^b）。另一種作法為採用代換路徑的方式處理，這類的方法係於網路圖中安排一個代表空間的檢修位置，如在圓形的時空圖中再加入一個同心圓表示檢修，其中具有多組可存在的檢修路徑，而這類模式的輸入資料係為已決策妥當的運用路徑規劃結果，再將不滿足檢修規定的部分「交換」出路徑，在同時進行運用與調配的作業中亦可採用之（Maróti and Kroon, 2005；Maróti and Kroon, 2007），然二階段的作業流程破壞了原有的運用路徑結構，並不能確定其所求解出的檢修任務，實質起源於已規劃之具有高效率的運用路徑，其即削減了可行解區間，所計算出之結果未必為全域的最佳解。

4.1.2 指派 (Assignment) 問題法之模式評析

以指派問題為基礎從事運用路徑規劃的方式，又作路徑模式法 (path formulation)。該方法較前者不同處在於其輸入資料中，已經蒐集某些可行的車次構成運用路徑 p^{ka} (k 為車輛的型態， a 為運用路徑之編號)，即前述所及將多個車次的接續過程視為一個組合 p^{ka} 。又 p^{ka} 其為 P^{ka} 的子集合， P^{ka} 中蒐集多種不同的運用路徑 p^{ka} ，並以此完成其接續作業。這些運用路徑 p^{ka} 中均有一定的配車數，其內亦可能包含有某些同樣的車次，加總包含某個任務 (車次) 同時成立的運用路徑變數，即可確定該車次所需的車輛數是否已有合乎需求。故該問題簡言之，即吾人須指派對於某一種車輛型態 k 中，有哪些車次集合是必須同時成立，以滿足覆蓋所有車次的需求 (Cacchiani et al., 2010)。不同於多元物流問題之處理方式，車次之接續已經在輸入資料建立的過程當中處理完成，毋須再考量物品流動 (Cacchiani et al., 2012)。此外，既有的路徑中也可以包含多種不同的任務，如迴送亦可參酌之，讓路徑本身更有代表性。

面對檢修的限制，在本類模式的發展中目前僅處理到累積天數上限而已，Cacchiani et al. (2010) 透過分枝出所有可以插入維修時間的子集合 M (包括平常時段的檢修或是跨夜的檢修)，並與車次集合組合成一種新的包含有檢修的車次集合 Q^{ka} ，假設某種車輛檢修累積天數之上限為 m 天，某原先需要選定 e 組車次集合的運用路徑，此時限制其中必須確保其有 $\lceil e/m+1 \rceil$ 條運用路徑，以涵蓋附有檢修車次的集合 Q^{ka} ，以確保有足夠的檢修路徑可用，然該方法僅為一個較粗糙的作法，用以限制某個特定週期內至少得有特定次數的檢修存在而已。

指派問題得以透過已完成部分接續的運用路徑集合，加以改善多元物流問題於路徑接續間的求解時間，在處理較小或單天期運用問題時，可為一個不錯的方式。然當問題規模逐步擴大時，包括可接受多天期或週期內包含的車次數遽增，甚至是多種檢修、燃油填充的任務的安排，其模式所生成的 P^{ka} 集合會呈現階乘性

的擴大，故需推廣至實務使用前，必須確保並將其問題規模的大小被控制在一定範圍之內。

4.1.3 數學模式建立方法綜合討論

本研究考慮軌道運輸營運業者常見的實務現況，並以軌道系統的時刻表週期作為運用路徑規劃週期，並建立循環式的運用路徑規劃滿足作業所需，又對於研究成果之適用性而言，非循環式班表的使用者，亦可藉由刪除循環班表接續兩週期之連結，以應用本研究開發出的決策支援模式。

綜合以上回顧與模式評析，本研究將採用 4.1.1 節的採用多元物流方式建立軌道車輛運用路徑規劃最佳化數學模式，並以二維的圓形時空圖作為網路形狀結構，以滿足週期性時刻表下的運用路徑規劃問題。在網路問題結構中的各節線表示各種任務，透過節線間彼此連結以串聯網路，並建立循環式的運用路徑規劃。本研究另將就後節所收斂之決策因子（可參考下圖 4-3），根據網路問題的特性，建立表示其任務的節線，彈性的擬訂適當的流量需求與限制。

另 4.1.2 節所採用模式建立的構想，因其需透過事先接續好某些特定的運用路徑，以消除求解接續過程中所帶來的時間複雜度，在小規模的案例中確實有較好的表現，然面臨較大的車隊規模或較複雜的時刻表結構時，其進行窮舉尚有實務資料生成之困難，又即便順利生成，可能的選擇組合數量將過於龐大，在思考出破除此限制的方法前，並更不利於發展數學模式或對應的求解。故本研究仍採用 4.1.1 節建議之方式建立最佳化數學模式，如後節所呈現。

4.2 問題架構定義與決策因子彙整

本研究於第二章先行回顧近年來從事運用路徑規劃的各類文獻，了解各國鐵路系統之特性，並進一步探究過去學界對於本問題的破題方式與處理邏輯。第三

章部分走訪實務單位，藉以了解其從事運用路徑規劃的工作項目，包括規劃過程中可能的目標與限制，以及人工安排運用表的整體決策流程。是故，本節將就前述兩章所汲取之經驗與結論，以彙整運用路徑規劃問題中重要的決策因子，以開發一個具有數學規劃之學理背景，並可為實務單位接受並使用的決策邏輯暨電腦輔助支援模式。另鑑於輸入資料無法再行改變或再生，故本節因子彙整將著重於決策過程中各子問題所帶來的目標與限制。

在學術文獻回顧中，本研究透過整理之圖 2-8 歸納了五項將影響運用路徑規劃成果的子問題項，分別為「車次接續問題」、「車次迴送問題」、「初級檢修問題」、「車種問題」以及「其他問題」。其中，包括車次的接續與迴送等子問題，其內所考量的各項時空與容量因素，亦為實務規劃中具有高度影響力且重要的決策因子。而初級檢修部分則亦為實務作業中必須被考量的限制，惟實務規劃所考量的檢修問題應更具有時空上的彈性，並且應以「每輛車的行駛狀況」判定其是否該執行檢修。總體而言，文獻所統整出的前三項問題同為實務規劃所接受之重要因子，僅處理上檢修問題的考量應以放寬，並加以考量各車輛的行駛情況。另實務訪談中提及「油料填充問題」在過去的研究中並未被細作深究，推估其為他國鐵路運輸業具有較密集的加油設備，或其所擁有的柴油車輛油箱，足以應對長運用路徑營運之故，然一般的柴聯車組不若柴電機車故並不滿足上述情境，故本研究加入油料填充問題之考量，同檢修問題的處理方式，亦就「每輛車的行駛狀況」判定其是否須執行油料填充之任務。

除此之外，前述彙整所及文獻多考量不同的「車種問題」，並且根據其目標中特定的「車型」或「營運型態」建立其專屬的數學規劃模式，然而這樣的做法將大大侷限模式發展的彈性，故本研究將目標將其設定為，發展一個得以應用在不同軌道運輸環境下的決策支援模式，以省去營運者為了不同車型而須分別購置其他系統的成本與麻煩，能更為實務規劃者所接受。又文獻中所考量的「其他問題」

中，包括牽引力與座位短缺的應對機制，實質上其與運用路徑規劃可為獨立決策項目，它們可以在前端作業先行被解決，處理方式即發展一套分配機制，將運量預測的結果給予各車次排定適合的車廂數，進而決策其最適合的牽引力後，再將這些期望的車型車種輸入運用路徑規劃流程，部分文獻對上述的分配已具有良好的績效（Cacchiani et al., 2010），在本研究所回顧臺鐵局的實務規劃中，亦採行相同的處理機制。故綜合以上，本研究在此將發展可應用於各軌道運輸條件的決策支援模式，以消弭文獻所及之「車種問題」；另假設「其他問題」先行在前端作業完成後作為運用規劃過程之輸入值。縱觀以上，本研究擬定圖 4-3 呈現本研究之決策架構，如下圖所示。

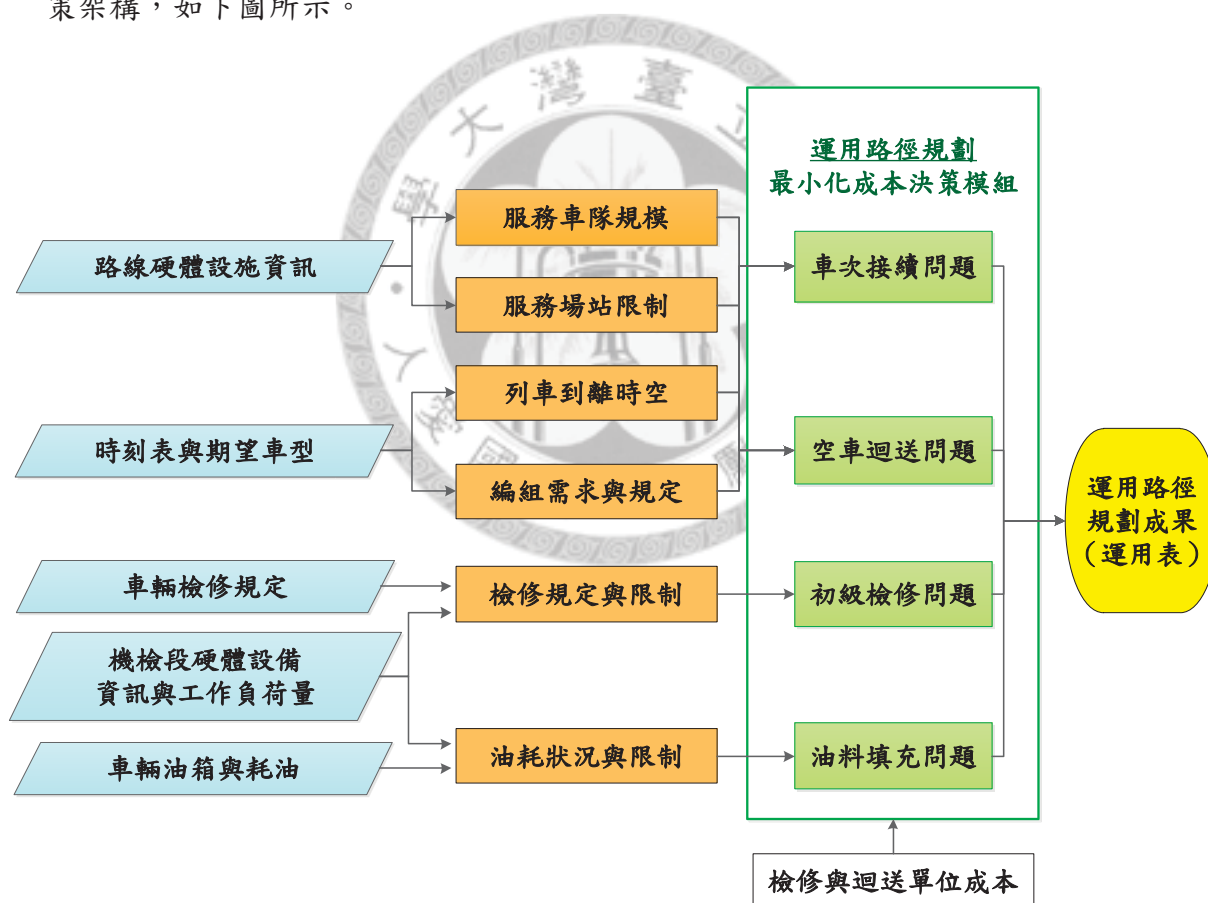


圖4-3 運用路徑規劃決策模式架構示意圖

圖 4-3 呈現本研究之決策架構，決策者透過輸入路線硬體設施資訊、時刻表與期望車型、車輛檢修規定、車輛油箱與耗油情況及機檢段硬體設備資訊及工作負

荷量等原始資料。上述資料可推演出為第二層各類需求與限制，包括服務車隊規模大小、服務場站限制、列車到離時空、編組需求與規定、檢修規則與限制、油耗狀況與限制等。其後，可在彙整於決策模組之四項重要的課題，本研究之目標函數設定為最小化成本，其中包括總檢修成本以及總迴送成本兩部分，期望透過最佳化模式與靈活的調度，在有限的資源下，決策一組滿足時刻表需求的運用路徑。經第二章與第三章回顧後修正決策模組中所囊括的子問題，其各自又包含以下項目：

- (1) **車次接續問題**：考慮前一車次之迄點，需與後一車次之起點完成接續，並保留期望車型所需足夠的折返或整備時間，及各場站可進行接續的能力或時間帶，又所有的車次接續必須要覆蓋週期內既有時刻表上的所有車次，並考量運用路徑整體的長度。此外，所擬定之運用表每日的總用車數必須在配車的上限範圍之內，以避免無車可用之境。
- (2) **空車迴送問題**：為前述問題之延伸，由於車次接續未必可確保其過程中均由同站進出，故有執行空車迴送以滿足前述接續的可能。迴送部分除了車次接續問題其內所包含的各項因子亦須作為限制外，因迴送所造成時空位置的佔用亦須加入考量。又空車本身不具營運效益，且會造成額外的能源耗費與人事花費，故在本研究中將迴送里程數將結合單位迴送成本，用以計算總迴送成本。
- (3) **初級檢修問題**：基於不同軌道車組或車輛，其各自擁有不同的預防性維修規定，本研究將同時考量「累積未檢修天數」、「累積未檢修里程」兩部份，並以「單一車輛」為基礎作為判斷其是否應進行檢修的依據，以安排車輛在可供檢修的位置及時段進行檢修。又檢修作業本身需要特定的耗材與人事花費，故在本研究中將總檢修次數結合單位檢修成本，用以計算總檢修成本。

- (4) **油料填充問題**：對於柴電車輛而言，必須依靠柴油作為動力，故規劃長運用路徑時，需考量各車型油箱的大小是否可以承擔安排的油耗，同前述檢修問題，需以「單一車輛」為基礎作為判斷其是否應進行加油的依據，以安排其在可供加油的位置及時段填充油料。由於油料填充成本係與營運里程相關，故其應已內化在距離相關的迴送成本項以內，故毋需再行計算。

研究架構與過去文獻所考量之異同，與就現況衍生出對於問題結構的改善與研究突破，茲彙整並羅列如下：

- (1) 本研究所擬定之決策模組，保有過去研究彙整出的重要子問題，包括「車次接續問題」、「空車迴送問題」以及「初級檢修問題」。另根據實務訪談，新增「油料填充問題」於決策模組予以考量。
- (2) 本研究將發展一個可適用於不同軌道車輛特性的決策支援模式，故使用者並不需要再行考量特定的「車種問題」，更便於實務規劃時輔助決策。
- (3) 本研究所擬定之「檢修問題」，係基於機檢段硬體設施及工作負荷量所限制，也就是各機務段只要有多餘的能力或時間負荷檢修，便可以加以排定相關時程，包括運用路徑內也因此在非車輛所屬段插入檢修。其做法較過去僅提供特定時段（如夜間）或空間（如車輛所屬機務段）檢修之文獻，將更能展現其彈性。又油料填充任務的考量概念亦同。
- (4) 本研究所考量之「檢修問題」係以單一車輛為基礎，並同時考量其「累積未檢修天數」或「累積未檢修里程」是否已經達到檢修規定的基本要求。該作法可同樣套用到處理「油料填充問題」，或限制某條運用路徑的總天期。過去的文獻部分忽略檢修問題，在有限考量檢修的文獻中，基本上僅採取先進先出法（同理為先開始營運者先進行檢修）或只考量總天數的方式安排檢修，非以單一車輛作為考量的基礎，然根據各國鐵路業者實務之

檢修規定，多以考量單一車輛所設，故本研究所使用的方法以實務邏輯而論較為合理。

- (5) 本研究假設輸入的需求量已經被轉換為所需的車廂數或車組數，且排班作業已經為前端研究所完成。故決策過程只涉及「運用路徑規劃」問題本身，著重在從時刻表中各車次的需求量串聯出所需運用的過程，不考量車種間與行駛區間的調整。
- (6) 為了確保後續調配作業的彈性，本研究假設所有的運用路徑結束前，車輛回到所屬的機檢段必須執行初級檢修並將油料填滿，以應對其下次出車執行其他運用路徑前可以維持一個完備的狀態。

4.3 運用路徑規劃最佳化模式

本研究基於 4.1.3 節之綜合評比後，將採用網路問題結構，並搭混合整數規劃法建立數學模式，研究所涉及的規劃決策模式架構如前章所呈現。本研究將成本最小化作為決策目標，其決策架構如前節圖 4-3 所呈現。以下 4.3.1 節將先就本研究建立出來的網路結構進行定義與說明，並簡介相關將被使用的數學符號。此外，由於代數符號已不敷使用，故本節所用之數學符號與第三章及第四章前節使用部分完全獨立，但與後續第五章發展求解演算法相同。4.3.2 節與 4.3.3 節將分就問題特性，利用相同的網路結構建立兩組不同的數學模式，惟涉獵不及之處將於 4.3.4 節透過延伸模式加以弭足，以求數學規劃成果之完整性，亦更貼近輔助實務作業決策之用。

4.3.1 建立網路模式與數學符號說明

從事軌道運輸系統之運用路徑規劃問題，必須同時考量時空兩項元素，以建立滿足週期性時刻表的循環式運用規劃。本研究針對前述分析結果，將修正後採

用 Schrijver (1993) 所提出之二維圓形時空網路圖，作為數學模式建立之基礎，以從事具有週期性功能的循環式運用路徑規劃。透過該網路圖中節點與節線之關係，將軌道營運規劃過程中所涉及的時空關係予以呈現。

過去 Schrijver (1993) 所提出之二維圓形時空網路圖，其係多由時間元素與空間元素作為定義節點的兩軸。空間元素的概念本研究將在此持續沿用，然有關其時間元素的部分，本研究將改以「時間帶」(slot) 元素呈現時間軸座標上各節點的關係，其作法如以下圖 4-4 之比較，圖 4-4 (a) 為 Schrijver 學者之作法，定義前車到站時間 a 與後車到站時間 b ，再透過節線 ab 以為接續。然時間元素本來就是相對的關係，只要於相同位置的兩個任務本身，已經沒有其他接續方式的考量，或僅具有不衝突的任務以供選擇時，可以將其節點合併如圖 4-4 (b) 所表示，以時間帶 $[a,b]$ 表示 a 時間到 b 時間之間，如此除了可節省節點數外，亦免去過多站內等候節線的使用，吾人只要能維繫時間帶接續的正方向性，便可以確保模式之正確性 (Peeters and Kroon, 2008)。然又若後車的發車時間與前車過於相近時，則不給予接續或合併節點的機會，亦不設定兩點之間的等候節線。其他於各車站 (位置) 可進行節點且不衝突的案例，在接續時間允許的情況下，共包括「前車到站、後車到站」、「前車到站、後車發車」、「前車離開、前車離開」，其可再行推廣到三車以上的情況作為考慮。又上述「離站」與「到站」的陳述亦不僅相連到車次節線上，例如迴送、檢修或油料填充，在執行作業之初亦須先行離站，而其回到常態運轉時，則可視為列車到站。本研究的作法將可減少不必要的節點和節線，進一步能加速數學模式整體的求解效率。

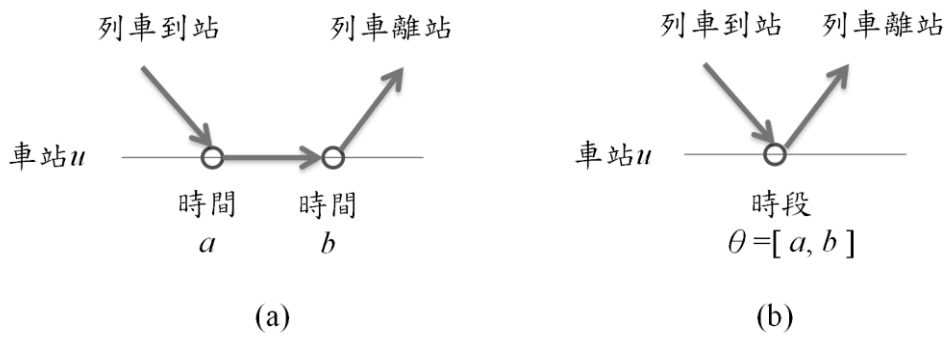


圖4-4 空間及 (a) 時間 (b) 時間帶 定義節點示意圖

本研究定義 $G(N,S)$ 表示一個完整運用週期的虛擬網路，其型態為二維圓形時空網路， G 為網路中所有物件集合之總體，如圖 4-5 左下之所呈現之形狀，又擷取其中一段網路以呈現其所定義之節點與節線如下圖 4-5 所附。網路主體係由「時間帶元素 θ 」及「空間元素 u 」共同構成的二維座標，其中 N 為代表網路中所有節點所構成的集合， S 則為網路中所有節線所構成的集合。

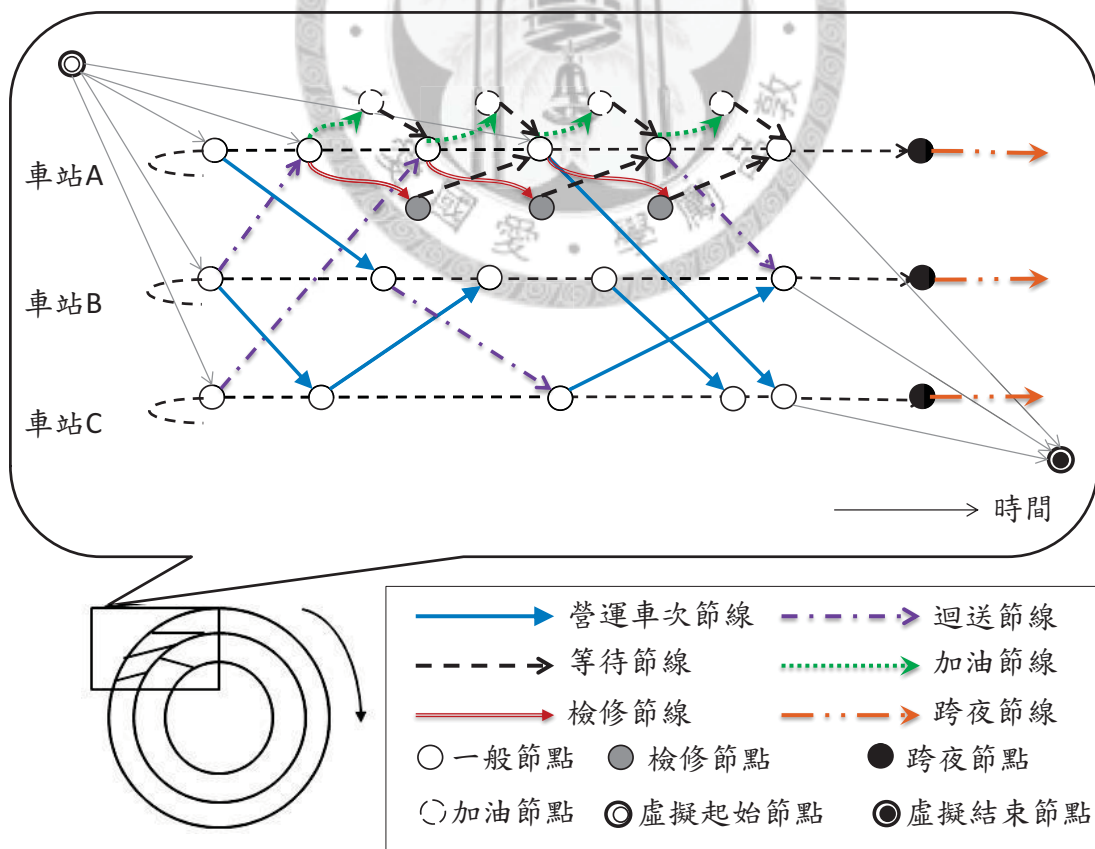


圖4-5 運用路徑規劃網路結構示意圖

令其網路中的任意節點以 i, j 或 h 表示，即滿足 $i \in N, j \in N$ 與 $h \in N$ ，每個節點 i 由其時間帶元素與空間元素所決定，如 $i(\bar{\theta}, \bar{u})$ 。將上述概念轉換至以「極座標法」之定義，即每個座標是由一個角度以及一個半徑距離所決定。依水平座標軸定義 0 度角為運用週期的第一個時間點，並以其為基準線，定義各個與基準線的夾角 θ （主幅角）表示時間帶座標，主幅角範圍 $[0, 2\pi)$ 的角度集合描述整個週期，而所有時刻表與實際運行狀況可能產生的夾角集合，即相當於所有時間帶的集合 Θ ，其中 $\theta \in \Theta$ 。至於空間元素 u 則是透過網路中之節點與其圓心之連線表示，概念同於丈量圓的半徑距離，以同一個半徑所描繪之圓上各點，即表示不同時間內同個車站或機檢段內的情境，故網路中擁有的多個同心圓，即多種決策相關的場站位置，在本研究以集合 U 表示運用過程中涉及之所有位置的集合，其中 $u \in U$ 。

網路中的節線則為由不同義的兩座標點 (i, j) 決定，又 S 表示為所有節線的集合，即 $(i, j) \in S$ 。又所有節線皆為依循正時間軸方向的「有方向性節線」。網路 G 中並非任意的兩節點之連線即可作為節線，各節線的定義皆需事先依時空組成考量其隱含於車輛運轉任務中的意義，其合理的接續方式才可以再行加以描繪。這些任務包括了營運車次 (trip)、等待 (waiting)、迴送 (deadhead)、檢修 (inspection)、跨夜或跨翌日營運 (overnight) 以及油料填充 (refueling) 等，誠如圖 4-5 所示。本研究所建立之運用路徑規劃成果，即將上述各類可能出現於各運用情境中的任務定義為節線，以表示該運用路徑自機務段出車，直到其收車的完整過程，透過網路結構無間斷地連結各類任務節線以完成完整的規劃。

定義 p 表示任意一條運用路徑，其屬於所有運用路徑的集合 P ，即 $p \in P$ 。完整的運用路徑 p 必須由車輛所屬的機檢段發出，經過並執行所排定的任務後，最後路徑的終點收歸回原機檢段。然而以數學模式的觀點視之，起初吾人並不能得知某運用路徑將從哪個時間開始執行，故本研究在此定義虛擬起始節點 i^+ ，與虛擬迄點節點 i^- 作為路徑 p 之首尾以作為啟動路徑之用，其各自屬於虛擬始點節點集

合 N_{P+} ，及虛擬迄點節點集合 N_{P-} ，並滿足 $i^+ \in N_{P+}$ 與 $i^- \in N_{P-}$ ，又 N_{P+} 與 N_{P-} 皆為集合 N 的子集合。除了上述兩種節點位於運用路徑之首尾外，其餘的各節點 i 應同時被視為前一個任務節線 (h,i) 的迄點節點，以及其後的任務節線 (i,j) 的始點節點。

本研究另以集合 S 表示所有節線，各節線依據其涉及任務之不同，如圖 4-5 所示，可分作營運車次節線 (trip arc) 子集合 S_T 、等待節線 (waiting arc) 子集合 S_W 、檢修節線 (inspection arc) 子集合 S_I 、油料填充節線 (refueling arc) 子集合 S_O 以及跨夜節線 (overnight arc) 子集合 S_A 與迴送節線 (deadhead arc) 子集合 S_R 等六大類。其定義整理如表 4-1 所示，而以下將提供更詳盡的解釋。

表4-1 運用路徑規劃網路各節線定義彙整

節線類型	節線定義之任務描述
營運車次節線	為各車次出發離開車站，直到其抵達另一個車站的過程
等待節線	為輔助連結兩任務於同一個地點，不同時間帶之接續所用
檢修節線	為自車站離開並執行檢修作業，直到其結束的過程
油料填充節線	為自車站離開並執行油料填充作業，直到其結束的過程
跨夜節線	為車輛於某車站暫置，跨翌日以作為隔日任務的接續
迴送節線	為輔助連結兩任務於不同地點，不同時間帶的接續，而必須產生的無收益營運所用

- (1) **營運車次節線子集合 (S_T)**: S_T 為所有節線集合 S 的子集合，滿足 $S_T \in S$ 。
對於每個排定的營運車次 t 而言，其具有固定的起始發車位置與發車時間帶，待到達終點站後亦存在抵達位置與抵達時間，透過此兩點相互連接可構成有方向性的連線，用以表示特定營運車次之節線。此外，本研究另定義 $S_T(j)$ 表示以 j 為終止節點之所有車次節線的子集合，滿足 $S_T(j) \in S_T$ 。
- (2) **等待節線子集合 (S_W)**: S_W 為所有節線集合 S 的子集合，滿足 $S_W \in S$ 。此類節線表示當某個營運車次任務被完成時，當車輛無法在該節點所代表的

時間帶內離開車站，又其前個任務的迄點位置恰好可與下個任務的節線起點位於相同的車站，且沒有跨夜的情況出現時，該車輛僅須在站內、側線或在該站旁的機檢段進行較短時間的等待，此時的等待過程即透過等待節線表示。此外，當車輛進入機檢段進行維修或油料填充後欲「重新回到車站」升火待發的調度，也被視為等待的過程。上述各類業務因其不涉及長距離的迴送，故僅須透過沒有成本的等待節線以作為前後任務節線之連結即可，是為沒有成本的有方向性節線。

(3) **檢修節線子集合 (S_I):** S_I 為所有節線集合 S 的子集合，由於時刻表的規劃週期循環並不長，故運用路徑內僅會包含較初階的檢修工作， S_I 集合內即囊括運用週期內可供執行初階檢修的時空，滿足 $S_I \in S$ 。其中所含之各節線表示車輛離開車站到機務段執行檢修完畢的過程，雖然大多數的機檢段均設置在車站的附近，可以不必考量迴送問題，然兩者仍分屬不同的空間座標，且時間帶維度卻不相同，故在本研究的網路結構中仍視為兩個不同的節點，當結束檢修後，可再透過自機務段送回車站的「等待節線」重新定位，以回復正常營運狀態，或就此結束該運用路徑。此外，另定義 $S_I(j)$ 表示以 j 為終止節點之所檢修節線的子集合，滿足 $S_I(j) \in S_I$ 。

(4) **油料填充節線子集合 (S_O):** S_O 為所有節線集合 S 的子集合，滿足 $S_O \in S$ 。各節線表示自車輛離開車站到油料填充結束的過程。對於每次油料填充作業而言，雖然其始末位於同個位置（如機務段、機廠或某些具有加油管的特殊車站），然其時間帶維度上卻不相同，故在本研究的網路結構中仍視為兩個不同的節點，連接為有方向性連線。另油料填充的任務僅對於使用柴油作為動力的機車頭或車組所必須，今日使用電力的車輛已經毋須額外的油料填充，故其網路可將本類節線先行忽略以節省解題時間。此外，本研究另定義 $S_O(j)$ 表示以 j 為終止節點之所有油料填充節線的子集合，滿足

$S_0(j) \in S_0$ 。

(5) **跨夜節線子集合 (S_A)**: 為了增加跨天期運用路徑的使用彈性, 定義表示每日跨夜時間的節點為跨夜節點, 所有跨夜節點可構成子集合 N_A , 以 N_A 中的各點作為起始節點的節線即作跨夜節線, 所有跨夜節線的集合以 S_A 稱之, 又其為集合 S 的子集合, 滿足 $S_A \in S$ 。另定義 $S_A(j)$ 表示以 j 為終止節點之所有跨夜節線的子集合, 又滿足 $S_A(j) \in S_A$ 。然上述仍無法區別所跨夜的「日期」為週期中特定的某一天, 故又令 k 作為日期的代稱, 滿足自規劃週期第 $k-1$ 天跨越至第 k 天之跨夜節點作為起始節點, 用以連結第 k 天中任意任務節點之始點為終止節點者, 其中的各節線組成之集合, 以 $S_A(k)$ 表示之, 是為 S_A 的子集合, 即滿足 $S_A(k) \in S_A$ 。凡是運用路徑規劃無法在一天以內完成者, 均須經由可行的跨夜節線, 以利累積未檢修天數或運用的累積營運天數計算。

(6) **迴送節線子集合 (S_R)**: S_R 為所有節線集合 S 的子集合, 滿足 $S_R \in S$ 。本研究定義的迴送節線均為「有成本」的車輛迴送, 由於對於綜合調度總所所排定的時刻表, 係依據歷史運量資料以及特殊需求而來, 未必能確保任意車站的總進站車輛與出站車輛得以守恆, 故期間必然會涉及無收益的營運的迴送作業, 如車站與車站間、與車站不同位置的維修基地間等。這些迴送除了無法製造營運效益外, 尚需擔負車輛行駛的成本, 對於檢修前的累積里程與天數亦有影響, 同時迴送成本的估算係源自單位迴送成本與總迴送距離之積, 是故本研究需另行給定各節線 $(i,j) \in S_R$ 其迴送距離 R_{ij} 。另定義 $S_R(j)$ 表示以 j 為終止節點之所有迴送節線的子集合, 滿足 $S_R(j) \in S_R$ 。

除了上述的節線集合設定以外, 鑑於網路問題之形式須考量網路中各點流入以及流出之情形。故定義 $\Omega^+(j)$ 表示以節點 j 為起始節點的所有可能節線所匯集之集合、 $\Omega^-(j)$ 表示以節點 j 為終止節點的所有可能節線之集合, 兩者皆為 S 的子

集合，即滿足 $\Omega^+(j) \in S$ 、 $\Omega^-(j) \in S$ 。另為了方便處理累積維修限制問題，另定義以 $\Phi^-(j)$ 表示以節點 j 為終止節點的所有節線 $(i, j) \in \Omega^-(j)$ 中，其所有可能存在的起始節點 i 所構成之集合，為 N 的子集合，即 $\Phi^-(j) \in N$ 。

此外，在建立最佳化數學模式時，本研究必須考量以下已知的參數：與成本項相關者，包括車輛（組）每次執行檢修的單位成本 C^I 與每公里迴送成本 C^R ，本部分將於後節從事最佳化數學建模的過程中，最小化成本之目標函數所用。

而有關各級車輛檢修前的「累積營運里程」（累積未檢修里程）計算方式，係包括該運用內的所有營運與迴送里程之加總。本研究以 T_{ij} 表示各營運車次節線 $(i, j) \in S_T$ 中，車輛由節點 i 營運到節點 j 所行駛的里程數；承上，若執行迴送作業者，亦必須列入累積里程的計算，故另以 R_{ij} 表示車輛由節點 i 迴送到節點 j 所行駛的里程數，其中 $(i, j) \in S_R$ 。此外，對於運用路徑本身，實質含有其他基於法規或實務作業習慣的限制，以下定義其上限值參數，包括運用累積天數上限以 B^{Ap} 表示，累積未檢修天數上限以 B^{At} 表示，累積未檢修里程上限以 B^{Ll} 表示，累積未執行油料填充之上限以 B^{Lo} 表示。而又對於同個時間帶而言，所能使用執行任務的車隊數不能超過既有的車隊數 H 。對於每個車次 $(i, j) \in S_T$ 而言，運量預測的結果將給予其最適的車廂數或車組數目標，本研究以 D_{ij} 表示該車次的需求量，其必須被運用所包含。最後，其他用以輔佐最佳化模式之參數，包括極大值 M 及極小值 ε 的設定。

本研究以下彙整並條列出後續用以發展最佳化模式之索引、集合以及參數之數學符號與定義，以方便閱讀與參考，茲如後所列：

◆ 索引部分

h, i, j ：節點；由二維座標所定義，分別表示其存在的時間帶 θ 與空間 u ，節點的構成如 $h(\theta, u)$ ，又 $h \in N$ 、 $i \in N$ 、 $j \in N$ 恆成立

(i, j) ：節線；所有節線均具有指向正時間方向之方向性，由起始節點 i 至

終止節點 j 所組成，又 $(i,j) \in S$

k : 日期，為規劃週期內所包含的某一天； $k \in K$

p : 運用路徑，為規劃週期內可能包含的某個運用路徑； $p \in P$

u : 節點的位置，為車輛營運相關的起迄車站、機務段或檢車段； $u \in U$

θ : 時間帶，為規劃週期內所包含的某個時間帶； $\theta \in \Theta$

◆ 集合部分

K : 包含週期內所有日期 k 的集合

N : 所有節點 i 所構成的集合

N_A : 所有「跨夜節點」的集合，為 N 的子集合，即 $N_A \in N$

N_{P+} : 所有「虛擬運用路徑始點節點」的集合，為 N 的子集合，即 $N_{P+} \in N$

N_{P-} : 所有「虛擬運用路徑迄點節點」的集合，為 N 的子集合，即 $N_{P-} \in N$

P : 所有運用路徑 p 的集合

S : 所有節線 (i,j) 所構成的集合

S_A : 所有「跨夜」節線的集合，為 S 的子集合，即 $S_A \in S$

S_I : 所有「檢修」節線的集合，為 S 的子集合，即 $S_I \in S$

S_O : 所有「油料填充」節線的集合，為 S 的子集合，即 $S_O \in S$

S_R : 所有「迴送」節線的集合，為 S 的子集合，即 $S_R \in S$

S_T : 所有「營運車次」節線的集合，為 S 的子集合，即 $S_T \in S$

S_W : 所有「等待」節線的集合，為 S 的子集合，即 $S_W \in S$

- $S_A(j)$: 以跨夜節點為起始節點，並以 j 為終止節點之各節線所組成的集合，為 S_A 的子集合，即 $S_A(j) \in S_A$
- $S_A(k)$: 為以跨越規劃週期中第 $k-1$ 天與第 k 天之跨夜節點為起始節點、第 k 天中任意節線為終止節點，其中所有節線所組成之集合，為 S_A 的子集合，即 $S_A(k) \in S_A$
- $S_I(j)$: 以 j 為終止節點之各檢修節線的集合，為 S_I 的子集合，
即 $S_I(j) \in S_I$
- $S_O(j)$: 以 j 為終止節點之各油料填充節線的集合，為 S_O 的子集合，
即 $S_O(j) \in S_O$
- $S_R(j)$: 以 j 為終止節點之各迴送節線的集合，為 S_R 的子集合，即 $S_R(j) \in S_R$
- $S_T(j)$: 以 j 為終止節點之各營運車次節線的集合，為 S_T 的子集合，
即 $S_T(j) \in S_T$
- $S_{P^+}(k)$: 為所有節線 (i,j) 中，所有滿足 i 為運用路徑之虛擬起始節點、 j 為週期內第 k 天任意任務的起始節點，所構成的節線集合，為 S 的子集合，即 $S_{P^+}(k) \in S$
- U : 規劃週期內所有存在的空間位置 u 所構成的集合
- θ : 規劃週期內設計所有相關的時間帶 θ 的集合
- $\Omega^+(j)$: 表示以節點 j 為起始節點的所有可能節線之集合，為 S 的子集合，
即 $\Omega^+(j) \in S$
- $\Omega^-(j)$: 表示以節點 j 為終止節點的所有可能節線之集合，為 S 的子集合，
即 $\Omega^-(j) \in S$

$\Phi^-(j)$ ：表示以節點 j 為終止節點的所有節線 $(i, j) \in \Omega^-(j)$ 中，其所有可能存在的起始節點 i 所構成之集合，為 N 的子集合，即 $\Phi^-(j) \in N$

◆ 參數部分

B^{Ap} ：運用路徑之累積天數上限

B^{At} ：檢修累積天數上限（累積未檢修天數上限）

B^{Ll} ：檢修累積里程上限（累積未檢修里程上限）

B^{Lo} ：油料填充累積里程上限（累積未執行油料填充之里程上限）

C^d ：車輛（組）每次執行檢修之單位成本

C^R ：車輛（組）迴送每公里之單位成本

D_{ij} ：由節點 i 營運到節點 j 所需要的車組或車輛數， $(i, j) \in S_T$

H ：可用車隊數

M ：極大值

R_{ij} ：車輛由節點 i 迴送到節點 j 所行駛的里程數， $(i, j) \in S_R$

T_{ij} ：車輛由節點 i 營運到節點 j 所行駛的里程數， $(i, j) \in S_T$

ε ：極小值

4.3.2 運用路經規劃數學模式一：混合整數規劃直觀模式

本研究首先透過混合整數規劃模式，以最直觀的方式建立最小化目標函數之線性數學模式。就實務者直觀的概念而論，除了保持各節點進出總車輛（路徑）數的流量守恆限制外，本模式亦就車輛所經之各節點逐步計算其營運里程、營運

天數等累積數值，藉以反應該時的車輛狀態以為決策評估。用以輸出給定車次需求下的最小成本運用路徑規劃成果，期望得以支援軌道運輸業者於實務上決策循環式的運用路徑規劃。

在本節的數學模式中，共包含有九類決策變數，其中包含有一組二元變數，以及八組整數變數，以下將依據各決策變數符號的使用及其代表之意義進行說明。變數 x_{ijp} 為一組二元整數變數，當運用路徑 p 包含任務節線 (i, j) 時為 1，否則為 0，對於 S 集合中的任意節線 (i, j) 以及各運用路徑 p ，均會進行配對以決定其是否執行該任務決策。 w_{ip}^{Ap} 與 λ_{ip}^{Ap} 為兩組非負整數，其中 w_{ip}^{Ap} 表示運用路徑 p 於節點 i 時的運用累積天數，由於數學模式考量接續過程中各點的累積狀態不超過設定之營運天數限制，故對於網路中的每個節點 i 及可能通過該節點的運用路徑 p 都必須加以檢視；然而，由於流入同一節點 i 的節線可能來自多種不同的可能路徑，因此需另使用輔助變數 λ_{ip}^{Ap} ，以確立接續的過程中得以傳入前個任務（節線）中正確的運用累積天數以作計算。同理可採用相同的方式，透過兩組非負整數變數完成累計資訊之計算者，尚包括以輔助變數 λ_{ip}^{Ai} 協助運用路徑 p 以傳入節點 i 前正確的檢修累積天數，以利於變數 w_{ip}^{Ai} 累加運用路徑 p 於節點 i 時的檢修累積天數。以及以輔助變數 λ_{ip}^{Li} 協助運用路徑 p 以傳入節點 i 前正確的檢修累積里程、以變數 λ_{ip}^{Lo} 協助運用路徑 p 傳入節點 i 前正確的油料填充累積里程值，以利於變數 w_{ip}^{Li} 、 w_{ip}^{Lo} 累加正確的數值。

◆ 彙整本節所採用之決策變數羅列如下：

x_{ijp} ：二元整數，當運用路徑 p 選定通過節線 (i, j) 時為 1，否則為 0

w_{ip}^{Ap} ：非負整數，表示運用路徑 p 於節點 i 時的運用累積天數

w_{ip}^{Ai} ：非負整數，表示運用路徑 p 於節點 i 時的檢修累積天數（累積未檢修天數）

- $w_{ip}^{L_I}$: 非負整數，表示運用路徑 p 於節點 i 時的檢修累積里程（累積未檢修里程）
- $w_{ip}^{L_O}$: 非負整數，表示運用路徑 p 於節點 i 時的油料填充累積里程（累積未執行油料填充里程）
- $\lambda_{ip}^{A_P}$: 非負整數，協助變數 $w_{ip}^{A_P}$ 用以給定運用路徑 p 於節點 i 前，正確的累計的運用累積天數，以供其作為後續累加計算
- $\lambda_{ip}^{A_I}$: 非負整數，協助變數 $w_{ip}^{A_I}$ 用以給定運用路徑 p 於節點 i 前，正確的檢修累積天數（累積未檢修天數），以供其作為後續累加計算
- $\lambda_{ip}^{L_I}$: 非負整數，協助變數 $w_{ip}^{L_I}$ 用以給定運用路徑 p 於節點 i 前，正確的檢修累積里程（累積未檢修里程），以供其作為後續累加計算
- $\lambda_{ip}^{L_O}$: 非負整數，協助變數 $w_{ip}^{L_O}$ 用以給定運用路徑 p 於節點 i 前，正確的油料填充累積里程（累積未執行油料填充里程），以供其作為後續累加計算

透過混合整數規劃法，建立處理運用路徑規劃問題之直觀模式，其詳細數學模式如下所示：

目標函數：

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & C^R \sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in S_R} R_{ij} x_{ijp} + C^I \sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in S_I} x_{ijp} + \\ & \varepsilon \left(\sum_{p \in P} \sum_{i \in N} w_{ip}^{A_P} + w_{ip}^{A_I} + w_{ip}^{L_I} + w_{ip}^{L_O} + \lambda_{ip}^{A_P} + \lambda_{ip}^{A_I} + \lambda_{ip}^{L_I} + \lambda_{ip}^{L_O} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

限制式：

$$\sum_{(h,i) \in \Omega^-(i)} x_{hip} - \sum_{(i,j) \in \Omega^+(i)} x_{ijp} = \begin{cases} -1 & i \in N_{P^+} \\ 1 & i \in N_{P^-} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall p \in P \quad (3)$$

$$w_{ip}^{A_p} \leq (1 - x_{ijp})M + \lambda_{jp}^{A_p} \quad \forall (i,j) \in S, p \in P \quad (4)$$

$$w_{ip}^{A_i} \leq (1 - x_{ijp})M + \lambda_{jp}^{A_i} \quad \forall (i,j) \in S, p \in P \quad (5)$$

$$w_{ip}^{L_i} \leq (1 - x_{ijp})M + \lambda_{jp}^{L_i} \quad \forall (i,j) \in S, p \in P \quad (6)$$

$$w_{ip}^{L_o} \leq (1 - x_{ijp})M + \lambda_{jp}^{L_o} \quad \forall (i,j) \in S, p \in P \quad (7)$$

$$w_{jp}^{A_p} \geq \lambda_{jp}^{A_p} + \sum_{(i,j) \in S_A(j)} x_{ijp} \quad \forall j \in N, p \in P \quad (8)$$

$$w_{jp}^{A_i} \geq \lambda_{jp}^{A_i} + \sum_{(i,j) \in S_A(j)} x_{ijp} - \sum_{(i,j) \in S_I(j)} Mx_{ijp} \quad \forall j \in N, p \in P \quad (9)$$

$$w_{jp}^{L_i} \geq \lambda_{jp}^{L_i} + \sum_{(i,j) \in S_T(j)} T_{ij}x_{ijp} + \sum_{(i,j) \in S_R(j)} R_{ij}x_{ijp} - \sum_{(i,j) \in S_I(j)} Mx_{ijp} \quad \forall j \in N, p \in P \quad (10)$$

$$w_{jp}^{L_o} \geq \lambda_{jp}^{L_o} + \sum_{(i,j) \in S_T(j)} T_{ij}x_{ijp} + \sum_{(i,j) \in S_R(j)} R_{ij}x_{ijp} - \sum_{(i,j) \in S_O(j)} Mx_{ijp} - \sum_{(i,j) \in S_I(j)} Mx_{ijp} \quad \forall j \in N, p \in P \quad (11)$$

$$\sum_{p \in P} x_{ijp} = D_{ij} \quad \forall (i,j) \in S_T \quad (12)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in \{S_A(k) \cup S_{P^+}(k)\}} x_{ijp} \leq H \quad \forall k \in K \quad (13)$$

$$w_{ip}^{A_p} \leq B^{A_p} - 1 \quad \forall i \in N, p \in P \quad (14)$$

$$w_{ip}^{A_i} \leq B^{A_i} - 1 \quad \forall i \in N, p \in P \quad (15)$$

$$w_{ip}^{L_I} \leq B^{L_I} \quad \forall i \in N, p \in P \quad (16)$$

$$w_{ip}^{L_O} \leq B^{L_O} \quad \forall i \in N, p \in P \quad (17)$$

$$w_{ip}^{A_I} = 0 \quad \forall i \in N_{P-}, p \in P \quad (18)$$

$$w_{ip}^{L_I} = 0 \quad \forall i \in N_{P-}, p \in P \quad (19)$$

$$w_{ip}^{L_O} = 0 \quad \forall i \in N_{P-}, p \in P \quad (20)$$

$$x_{ijp} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in S, p \in P \quad (21)$$

$$w_{ip}^{A_P} \geq 0, w_{ip}^{A_P} \in integer \quad \forall i \in N, p \in P \quad (22)$$

$$w_{ip}^{A_I} \geq 0, w_{ip}^{A_I} \in integer \quad \forall i \in N, p \in P \quad (23)$$

$$w_{ip}^{L_I} \geq 0, w_{ip}^{L_I} \in integer \quad \forall i \in N, p \in P \quad (24)$$

$$w_{ip}^{L_O} \geq 0, w_{ip}^{L_O} \in integer \quad \forall i \in N, p \in P \quad (25)$$

$$\lambda_{ip}^{A_P} \geq 0, \lambda_{ip}^{A_P} \in integer \quad \forall i \in N, p \in P \quad (26)$$

$$\lambda_{ip}^{A_I} \geq 0, \lambda_{ip}^{A_I} \in integer \quad \forall i \in N, p \in P \quad (27)$$

$$\lambda_{ip}^{L_I} \geq 0, \lambda_{ip}^{L_I} \in integer \quad \forall i \in N, p \in P \quad (28)$$

$$\lambda_{ip}^{L_O} \geq 0, \lambda_{ip}^{L_O} \in integer \quad \forall i \in N, p \in P \quad (29)$$

目標式 (2) 為本研究所期望之最小化成本函數，其中最主要的部份包括運用
 規劃週期內的所有迴送成本 ($C^R \sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in S_R} R_{ij} x_{ijp}$) 與所有檢修成本 ($C^I \sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in S_I} x_{ijp}$)
 兩部分，而車輛的用油現象本身與填充次數無關，其並不會依據填充油料的次數
 增加而有明顯的影響，反而會循總迴送距離增加而上升，然與距離相關的成本項

均已納入單位迴送成本 C^d 之中計算完畢，故在上式中不應再附加於目標函數。此外，數學模式在執行輔助決策運用路徑總累積天數、檢修累積天數、檢修累積里程以及油料填充累積里程等變數的過程中，需確保其得以順利於各節點累加而不致高估，並反應執行檢修或油料填充作業後將累計變數歸零的實務狀態，在此另

設處罰成本項 $\left(\varepsilon \left(\sum_{p \in P} \sum_{i \in N} w_{ip}^{A_p} + w_{ip}^{A_i} + w_{ip}^{L_i} + w_{ip}^{L_o} + \lambda_{ip}^{A_p} + \lambda_{ip}^{A_i} + \lambda_{ip}^{L_i} + \lambda_{ip}^{L_o} \right) \right)$ ，以確保其傳回直接

為可接受的最低累積數值，其中參數 ε 為一個大於 0 的極小值，以避免處罰成本項影響到主要成本項所制定出的決策。

限制式 (3) 為流量守恆限制式，又其中 x_{ijp} 為二元變數，當其值為 1 時，表示運用路徑 p 通過任務節線 (i,j) ，本研究假設每個運用路徑 p 均洽為一組 (節) 車輛運行之，基於為滿足需求限制，其路徑之始必然會有流量自「虛擬始點」中流出，同理各個運用路徑末端亦存在表次運用結束的「虛擬迄點」，猶如多元物流問題中各需求項的起迄點設定。除了上述兩種節點 (虛擬起點、虛擬迄點) 外，對於每條運用路徑，各節點應滿足流量守恆原則，有車輛流入者亦應有相對的流量流出，以確保節線間的接續得以完成並構成路徑。此外，若運用路徑 p 所選到之節線 (i,j) 同時滿足 $i \in N_{p+}$ 與 $j \in N_{p-}$ 兩項條件時，即表示該路徑內並不包含任何任務，相當於其為不存在的運用路徑 (即運用路徑為空集合)；反之，運用路徑 p 內存在多個接續的組合，即可視為其構成某個可利用的運用路徑規劃組合。

限制式 (4)、(8) 為對於各運用路徑 $p \in P$ 計算其通過之各節點 i 的累積天數所用。根據前文對於決策變數之定義， $w_{ip}^{A_p}$ 表示對於某條路徑 p 於節點 i 的累積營運天數，其受到目標函數中處罰成本項的影響，起始的運用累積天數將從 0 開始計算，限制式將誘使同一條路徑 p 所選定之任意節線，其兩端節點間的累計天數關係得以承續，故限制式 (4) 需針對 $(i,j) \in S$ 、 $p \in P$ 逐一判斷。然而，在本研究交錯而複雜的網路結構中，任意節點 j 可作為多條節線之迄點，故吾人無法直接確定

其接續過程中的上個節點為何，而必須借助其相關的節線 (i,j) 獲取資訊，當運用路徑 p 安排節線 (i,j) 作為其中所欲接續之任務時(即 $x_{ijp}=1$)，本研究另行設定變數 λ_{jp}^{Ap} 用以存取其於節點 i 的運用累積天數 w_{ip}^{Ap} 之值，否則(即 $x_{ijp}=0$)基於右端值中的極大參數值 M ，將不會影響 λ_{jp}^{Ap} 的計算，其概念同義於運用路徑 p 並未經過該節線，此二限制式可確保所有將進入節點 j 的可能節線 $(i,j) \in \Omega^-(j)$ 中，僅傳入一組正確的 λ_{jp}^{Ap} ，而當該節線完全不涉及車輛的流動時，即滿足 $w_{ip}^{Ap}=\lambda_{jp}^{Ap}=0$ ，。而後的限制式(8)則基於上述機制所選定「對於進入節點 j 前正確的運用累積天數值 λ_{jp}^{Ap} 」，將其計入自任務開始的節點 i 出發經節線 (i,j) 後，傳回結束後節點 j 的累積天數 w_{jp}^{Ap} 之值，其累加方式為設定當運用路徑所通過的節線為跨夜節線 $(i,j) \in S_A$ 時，必須將 w_{jp}^{Ap} 的累積天數加1，反之則維持不變。

同理，上述的概念可以使用在限制式(5)與(9)處理檢修累積天數的計算需求，在限制式(5)的輔助下，考量所有可進入節點 j 的節線，其可以傳回於節點 j 以前已累加檢修累積天數的正確值 $\lambda_{jp}^{A_l}$ 。而後透過限制式(9)計算節點 j 正確的檢修累積天數，不同於限制式(8)僅以經由跨夜節線逐步累加天數，在計算檢修累積天數的限制式右端值，另有一 $-\sum_{(i,j) \in S_l(j)} Mx_{ijp}$ 項，表示當該運用路徑執行完檢修任務後，藉由極大值 M 迫使檢修累積天數 $w_{jp}^{A_l}$ 歸零，以利於檢修結束後欲安排其後的接續時，可以從0日開始計算下一輪的檢修累積天數，以反應實務操作現況。

限制式(6)與(10)處理檢修累積里程計算，其問題與檢修累積天數的計算大略相同，限制式(6)輔助考量所有可進入節點 j 的節線，並傳回於節點 j 以前已行駛之檢修累積里程的正確值 $\lambda_{jp}^{L_l}$ 。而後透過限制式(10)計算經由選定的節線 (i,j) 後，其檢修累積營運里程之遞延，當該節線屬於營運車次節線 $(i,j) \in S_T$ 時，須累加其營運的里程數 T_{ij} 、執行屬於迴送節線 $(i,j) \in S_R$ 之任務時，則必須加入其額外運行的迴送里程數 R_{ij} 。又承續前段用於處理檢修累積天數計算的方法，當運用路徑執行完檢修任務節線 $(i,j) \in S_l$ 後，其檢修的累積營運里程可透過極大值 M 迫使其歸

零，以利進行後續的接續任務或收車。同理，上述的概念可以使用在限制式 (7) 與 (11) 處理油料填充累積里程的計算問題，惟列車進廠維修時，可以同時執行油料填充作業，故歸零的機制除了通過油料填充節線 $(i,j) \in S_O$ 以外，通過檢修節線 $(i,j) \in S_I$ 者亦可填充油料並將其累積里程值歸零。

根據運量預測的結果，時刻表中不同時段和起迄的車次，將可對應不同的旅客須流量，將這些需求的概念以車組數（車輛數）表達，即為給定每車次的需求車組數（車輛數），限制式 (12) 為本研究擬定之車組需求限制式，對於各車次節線 $(i,j) \in S_T$ ，其必須滿足對應之需求矩陣 D_{ij} 以滿足營運所需。前述已定義本研究之路網架構中，每個運用路徑 p 均僅代表一組（節）車輛，故限制式 (12) 之左端透過加總所有運用路徑 p ，以獲得行經該營運車次節線之總車組數（節數），並期望能同時達到滿足需求且無多於的車組浪費，故式 (12) 在本研究中暫採用等式作為限制，基於軌道業者的經營觀點不同，亦可加入浪費不必要之車輛數處罰值，將該限制式延伸為不等式，以作為判斷之參考。

限制式 (13) 為針對車隊大小所制定之限制式，以規劃週期中每日可用的總車組（廂）數作為上限。設集合 $S_{p_+}(k)$ 用以表示滿足以虛擬起點為起始節點、規劃週期第 k 日中任意節線之始點為終止節點的所有節線，其所組成之子集合。故 $\sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in S_{p_+}(k)} x_{ijp}$ 為所有以週期內的第 k 天為運用路徑首日的所需車組（廂）數。另根據前述定義， $\sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in S_A(k)} x_{ijp}$ 則表示所有以週期內的第 k 天為運用路徑第二日以上的所需車組（廂）數，將兩者相加即可得到第 k 天所需的總車輛數，其必須小於某個給定的每日可供使用車隊大小 H ，以利後續調配時能有足夠的車輛，用以執行所研擬出的運用路徑。

限制式 (14) ~ (17) 為逐點確認其各累積值是否有滿足運用、檢修或油耗規則之上界限制式。其中，限制式 (14) 維繫運用總累積天數不大於上界值 B^{4p} ，其

右端值除了給定之總日數上限以外，需另外扣除運用起始日之一日，表示確認各點自虛擬節點流出後，應僅能經過 $B^{Ap}-1$ 個跨夜節點。限制式 (15) 為確保檢修累積天數之上界限制，其右端值亦須扣除運用起始日，表示其應僅能經過 $B^{Al}-1$ 個跨夜節點。限制式 (16) 確保檢修累積里程上界值，不違背檢修規定上限值 B^{Lo} 。限制式 (17) 為限制油料填充累積里程不違背該車型所能負擔的上限值 B^{Lo} 。又鑑於後續調配作業，車輛在結束運用路徑後，將被派遣行駛另一個運用路徑，然兩運用路徑間的累積資訊無法持續延續，故必須先行確保上述四項限制值在該運用路徑結束時，已經順利歸零，限制式 (18)、(19) 為限制車輛必須在結束運用時執行檢修，故維修之累積天數、累積里程於最後的虛擬迄點應被歸零，限制式 (20) 為維護車輛必須在結束運用時車廂中之油量是為滿油狀態（即執行加油），並將虛擬迄點的油料填充累積里程歸零，以確保其隨時可以應對其後的運用路徑調配出車使用。

最後，限制式 (21) ~ (29) 為本研究各決策變數之定義域，本研究包含一組二元整數決策變數以及八組非負整數決策變數，為一個混合整數規劃的線性數學模式，其各變數定義之陳述可參考前文所描述。

4.3.3 運用路經規劃數學模式二：二元整數規劃加速模式

本研究於 4.3.2 節透過混合整數規劃法，以直觀的概念串聯運用路徑以滿足各項限制，其透過逐點累計營運里程、營運天數等資訊，並搭配大 M 法 (Big M method) 輔以進行歸零作業。然而，採用大 M 法對可行解區間進行切割的過程對於商用軟體的計算邏輯而言實為繁瑣，又整數變數的逼近過程亦較傳統連續變數或二元變數更為複雜，上述缺點將可能導致求解時間隨著變數量增加而有巨增之慮。是故，本節在此另行提出另一個具有較高效率的數學模式，其仍利用 4.3.1 節定義之二維圓形時空網路 G 為背景，然本節不再採取混合整數規劃法，而是透過二元整數規劃 (Binary integer programming, BIP) 之邏輯建立數學模式，當問題規模相當時，

二元整數規劃之求解效率普遍認為較混合整數規劃為佳，且更有利於後續發展適合的解構方法或啟發式演算機制，故本研究期望透過二元整數規劃法建立模式，以達整體規劃求解時間能有顯著的改善。

本研究透過逐步測試鬆弛直觀模式中的各類限制，得知造成模式複雜且難解的複雜性限制式 (complaint constraint) 為第 (4) ~ (11) 式，由於其以逐節點、逐運用路徑計算累積里程或天數的機制，導致常見的數學規劃商用軟體執行求解時，無法有效率的對其整數限制之求解區間加以切割，此與上段之猜想大致吻合。是故，本研究需要將處理「運用累積天數」之限制式 (4) 與限制式 (8)、處理「檢修累積天數」之限制式 (5) 與限制式 (9)、處理「檢修累積里程」之限制式 (6) 與限制式 (10) 以及處理「油料填充累積里程」之限制式 (7) 與限制式 (11) 另作考量，以泯除整數變數與大 M 法對於求解效率的負面影響。

為了消弭逐節點檢查累積資訊的繁複，本研究除了前述以指標 $p \in P$ 表示運用路徑以外，另定義新的指標 q ，代表運用路徑在一次檢修週期範圍內的「子運用路徑」(sub path)，又以 Q 為子運用路徑之集合，其滿足 $q \in Q$ 。舉例而言：某運用路徑包含兩次檢修作業，從運用開始自虛擬節點出發後，直到其第一次進行檢修當中的過程，為其中一條子運用路徑 q_1 ；而後自其檢修後下個任務開始直到運用路徑結束前的第二次檢修為另一條子路徑 q_2 。由本例可了解子運用路徑可視為運用路徑的一部分，又一個運用路徑內可包含一個或多個子運用路徑，只要其仍滿足原規劃概念中對運用路徑本身長度的限制即可。依循相同的概念，本研究亦定義新的指標 o ，代表運用路徑在一次油料填充範圍內的「油耗路徑」(refueling path) 又以 O 為油耗路徑之集合，並滿足 $o \in O$ 。

設定上述子集合之優勢，在於可「直接加總」所定義之某個運用路徑 p 、子運用路徑 q ，或油耗路徑 o 內所包含的所有任務節線，以計算各類所需設限的累積數值。對於「運用累積天數」之限制而言，吾人僅需於各運用路徑 $p \in P$ 結束前，檢

視累積之總天數是否超過作業規定之值即可；同理對於「檢修累積里程」以及「檢修累積天數」亦僅需對於各子運用路徑 $q \in Q$ 於最後收車前，檢核其是否各自滿足作業規定；該作法亦可應用於油耗運用路徑，檢視油料填充累積里程之值的限制。上述的過程中破除了逐點檢查，並採用多個整數變數累加的缺點，藉由改採用累積檢查的機制，以二元變數決策運用路徑、子運用路徑以及油耗路徑與其始末，並將各節線之整數變數轉換為參數與二元變數之積，進而一次累計總數值即可，故於此可將所有的決策變數皆轉為二元整數，以利求解。

除此之外，在前節所發展出的模式中，限制式 (3) 係採用節線以及對於虛擬節點的方式求取各運用路徑之始末，然而現在虛擬節點可依據運用路徑、子運用路徑以及油耗路徑，可再分作三類。分別為可作為運用路徑之始末的虛擬起始節點集合以 $N_{P+} \in N$ 表示，作為終點的節點集合以 $N_{P-} \in N$ 表示；可作為子運用路徑之始末的虛擬起始節點集合以 $N_{Q+} \in N$ 表示，其虛擬終點的節點集合以 $N_{Q-} \in N$ 表示；可作為油耗路徑之始末的虛擬起始節點集合以 $N_{O+} \in N$ 表示，其虛擬終點節點集合以 $N_{O-} \in N$ 表示。

彙整以上新加入的指標以及集合，如下所示，其餘各指標、集合以及參數均沿用 4.3.1 節與 4.3.2 節之設定不再另做更動：

◆ 新加入的指標部分：

q ：子運用路徑，為規劃週期內所包含的某個檢修週期內的路徑； $q \in Q$

o ：油耗路徑，為規劃週期內所含的某次油料填充範圍內的路徑； $o \in O$

◆ 新加入的集合部分：

N_{Q+} ：可作為子運用路徑之虛擬起始節點集合， $N_{Q+} \in N$

N_{Q-} ：可作為子運用路徑之虛擬終止節點集合， $N_{Q-} \in N$

N_{O+} : 可作為油耗路徑之虛擬起始節點集合, $N_{O+} \in N$

N_{O-} : 可作為油耗路徑之虛擬終止節點集合, $N_{O-} \in N$

S_{Q+} : 以子運用路徑之虛擬起始節點為始點的節線集合, $S_{Q+} \in S$

S_{Q-} : 以子運用路徑之虛擬終止節點為迄點的節線集合, $N_{Q-} \in N$

S_{O+} : 以油耗運用路徑之虛擬起始節點為始點的節線集合, $N_{O+} \in N$

S_{O-} : 以油耗運用路徑之虛擬終止節點為迄點的節線集合, $N_{O-} \in N$

Q : 所有子運用路徑 q 的集合

O : 所有油耗路徑 o 的集合

在本節的數學模式中，共包含八類決策變數，均為二元整數變數，其中延用變數 x_{ijp} 作為決策，當運用路徑 p 包含任務節線 (i,j) 時滿足 $x_{ijp}=1$ ，不成立則 $x_{ijp}=0$ ，對於 S 集合中的任意節線 (i,j) 以及各運用路徑 p ，均會進行考量以決定是否路徑 p 需執行該節線所代表之任務。而由於本節的二元加速模式中，其加入了子運用路徑以及油耗路徑之決策，是故某些節線本身除了分屬於一個運用路徑以外，亦可能同時屬於另條子運用路徑或油耗路徑，故以 y_{ijpq} 決策是否節線 (i,j) 同時被運用路徑 p 以及子運用路徑 q 所包含，當上述兩條件均成立時為 $y_{ijpq}=1$ ，其中有任一部分不成立時 $y_{ijpq}=0$ ；同理以 δ_{ijpo} 決策節線 (i,j) 是否同時被運用路徑 p 以及油耗路徑 o 所包含，當上述兩條件均成立時為 $\delta_{ijpo}=1$ ，其中有任一部分不成立時 $\delta_{ijpo}=0$ 。而運用路徑 p 以及子運用路徑 q 之間必須再透過變數 z_{pq} 作為兩者之連結開關，因為一個運用路徑可能包含多個子運用路徑，而一個子運用路徑則僅能屬於一個運用路徑，故當子運用路徑 q 被運用路徑 p 所包含即 $z_{pq}=1$ 成立，反之則致使 $z_{pq}=0$ ；同理以變數 v_{po} 作為運用路徑 p 與油耗路徑 o 之間的開關，當油耗路徑 o 被運用路徑 p 所包含即 $v_{po}=1$ 成立，反之則致使 $v_{po}=0$ 。

而前述用以決策各運用路徑 p 以及各子運用路徑 q 之起迄點的部分。由於吾人並不知道欲滿足時刻表中所有的車次需求，共需要多少條運用路徑 p ，亦無法確認集合 P 合理的大小應為何是，故採用較保守的方式設定多條運用路徑 p 以為備用，此時為確定運用路徑 p 本身是否為空集合，故設定決策變數 τ_p 以表示運用路徑 p 是否有被啟用並包含某些運轉任務，當上述假設情況時則變數為 1，不成立時為 0。子運用路徑及油耗路徑部分，亦設定以 η_q 與 μ_o 決策子運用路徑 q 、油耗路徑 o 是否被啟用並包含某些運轉任務，上述假設成立時變數輸出 1，不成立時為 0。上述做法可以避免產生選擇滿足 i, j 皆為虛擬節點之節線 (i, j) 之「空」的運用路徑，而花費更多不必要的決策時間。

以下彙整本節數學模式將使用的各類決策變數。

◆ 本節將使用的決策變數：

x_{ijp} ：二元整數，當運用路徑 p 選定通過節線 (i, j) 時為 1，否則為 0

y_{ijpq} ：二元整數，當節線 (i, j) 同時被運用路徑 p 、子運用路徑 q 所包含時為 1；其中有任一部分不成立者則為 0

δ_{ijpo} ：二元整數，當節線 (i, j) 同時被運用路徑 p 、油耗路徑 o 所包含時為 1；其中有任一部分不成立者則為 0

z_{pq} ：二元整數，用以作為子運用路徑 q 與運用路徑 p 之連結。當子運用路徑 q 被運用路徑 p 所包含時為 1；不成立則為 0

v_{po} ：二元整數，用以作為油耗路徑 o 與運用路徑 p 之連結。當油耗路徑 o 被運用路徑 p 所包含時為 1；不成立則為 0

τ_p ：二元整數，當運用路徑 p 被啟用，並包含某些運轉任務時為 1；不成立則為 0

η_q : 二元整數，當子運用路徑 q 被啟用，並包含某些運轉任務時為 1；
不成立則為 0

μ_o : 二元整數，當油耗路徑 o 被啟用，並包含某些運轉任務時為 1；不
成立則為 0

透過二元整數規劃法建立處理運用路徑規劃問題之加速模式，其詳細數學模
式如下所示：

目標函數：

$$\text{Min } C^R \sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in S_R} R_{ij} x_{ijp} + C^I \sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in S_I} x_{ijp} \quad (30)$$

限制式：

$$\sum_{(h,i) \in \Omega^-(i)} x_{hip} - \sum_{(i,j) \in \Omega^+(i)} x_{ijp} = \begin{cases} -\tau_p & i \in N_{p+} \\ \tau_p & i \in N_{p-} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall p \in P \quad (31)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{(h,i) \in \Omega^-(i)} y_{hipq} - \sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in \Omega^+(i)} y_{ijpq} = \begin{cases} -\eta_q & i \in N_{Q+} \\ \eta_q & i \in N_{Q-} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall q \in Q \quad (32)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{(h,i) \in \Omega^-(i)} \delta_{hipo} - \sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in \Omega^+(i)} \delta_{ijpo} = \begin{cases} -\mu_o & i \in N_{O+} \\ \mu_o & i \in N_{O-} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall o \in O \quad (33)$$

$$\sum_{p \in P} z_{pq} \leq 1 \quad \forall q \in Q \quad (34)$$

$$\sum_{p \in P} v_{po} \leq 1 \quad \forall o \in O \quad (35)$$

$$\sum_{(i,j) \in S} y_{ijpq} \leq M \cdot z_{pq} \quad \forall p \in P, q \in Q \quad (36)$$

$$\sum_{(i,j) \in S} \delta_{ijpo} \leq M \cdot v_{po} \quad \forall p \in P, o \in O \quad (37)$$

$$\sum_{q \in Q} y_{ijpq} = x_{ijp} \quad \forall (i,j) \in S \setminus \{S_W, S_{Q^+}, S_{Q^-}, S_{O^+}, S_{O^-}\}, p \in P \quad (38)$$

$$\sum_{o \in O} \delta_{ijpo} = x_{ijp} \quad \forall (i,j) \in S \setminus \{S_W, S_{Q^+}, S_{Q^-}, S_{O^+}, S_{O^-}\}, p \in P \quad (39)$$

$$\sum_{q \in Q} y_{ijpq} \geq x_{ijp} \quad \forall (i,j) \in \{S_{Q^+}, S_{Q^-}\}, p \in P \quad (40)$$

$$\sum_{o \in O} \delta_{ijpo} \geq x_{ijp} \quad \forall (i,j) \in \{S_{O^+}, S_{O^-}\}, p \in P \quad (41)$$

$$\sum_{p \in P} x_{ijp} = D_{ij} \quad \forall (i,j) \in S_T \quad (42)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in \{S_A(k) \cup S_{P^+}(k)\}} x_{ijp} \leq H \quad \forall k \in K \quad (43)$$

$$\sum_{(i,j) \in S_A} x_{ijp} \leq B^{A_p} - 1 \quad \forall p \in P \quad (44)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in S_A} y_{ijpq} \leq B^{A_q} - 1 \quad \forall q \in Q \quad (45)$$

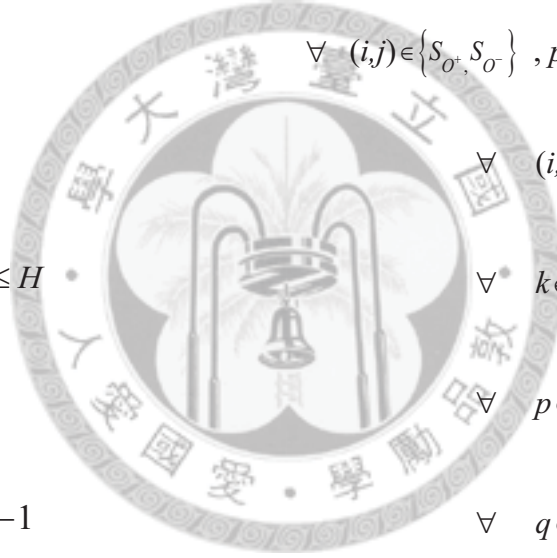
$$\sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in S_T} T_{ij} y_{ijpq} + \sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in S_R} R_{ij} y_{ijpq} \leq B^{L_q} \quad \forall q \in Q \quad (46)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in S_T} T_{ij} \delta_{ijpo} + \sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in S_R} R_{ij} \delta_{ijpo} \leq B^{L_o} \quad \forall o \in O \quad (47)$$

$$x_{ijp} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in S, p \in P \quad (48)$$

$$y_{ijpq} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in S, p \in P, q \in Q \quad (49)$$

$$\delta_{ijpo} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in S, p \in P, o \in O \quad (50)$$



$$z_{pq} \in \{0,1\} \quad \forall \quad p \in P, \quad q \in Q \quad (51)$$

$$v_{po} \in \{0,1\} \quad \forall \quad p \in P, \quad o \in O \quad (52)$$

$$\tau_p \in \{0,1\} \quad \forall \quad p \in P \quad (53)$$

$$\eta_q \in \{0,1\} \quad \forall \quad q \in Q \quad (54)$$

$$\mu_o \in \{0,1\} \quad \forall \quad o \in O \quad (55)$$

目標式 (30) 為本研究所期望之最小化函數，其中包括規劃週期內的總迴送成本 ($C^R \sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in S_R} R_{ij} x_{ijp}$) 總與檢修成本 ($C^I \sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in S_I} x_{ijp}$) 兩部分，在本數學模式中油料填充問題已經先行內化，然而有關於迴送所需之油料成本，亦考量至單位迴送成本 C^I 之中計算完畢，故不需要進行額外的修正或增加其他的決策變數與參數。此外，本式與直觀模式不同的是，此處因為不再逐點計算累積資訊，亦無需對其歸零過程設定處罰值，此舉亦造就所求取之目標函數即為反應所需考量之所有成本之正確數值，並減少最佳化收斂時因極小的處罰值所致可能的長尾效應。

限制式 (31)、(32) 與 (33) 分別為處理運用路徑、子運用路徑以及油耗路徑之流量守恒限制式。由於三者所涉及之節線並不全然相同，整體的集合 P 內之節線數亦較集合 Q 、 O 不同，例如運用路徑 p 內具有串聯兩子運用路徑 q 或兩油耗路徑 o 之額外的等候節線，子運用路徑或油耗路徑的結束前連結至其分別虛擬迄點之節線也未必被運用路徑 p 所包覆，故在此勢必得分開進行決策。限制式(31) 為處理運用路徑部分，其做法與限制式 (3) 相同，惟其將運用路徑啟動之決策改以二元決策變數 τ_p 呈現，以決策其運用路徑 p 被安排與否，其起始與結束之節點必須分屬 N_{P+} 與 N_{P-} 兩子集合。限制式 (32) 為處理子運用路徑部分，其中 y_{ijpq} 為二元變數，當 $y_{ijpq}=1$ 時，表示子運用路徑 q 被運用路徑 p 所包含，且通過任務節

線(i,j)，又每個子運用路徑均洽為一組(節)車輛運行之，且路徑之始必然自 $i \in N_{Q+}$ 之節點流出，路徑之終亦須流入節點 $j \in N_Q$ ，又當有流量存在時決策變數 η_q 必須對其對應的子運用路徑 q 反應正確的二元變數值即 $\eta_q=1$ ，而不涉及起終性質之各節點，則必須滿足流入的總量與流出的總量相等的流量守恆原則。限制式(33)為處理油耗路徑部分，其中 δ_{ijpo} 為二元變數，當 $\delta_{ijpo}=1$ 時，表示油耗路徑 o 被運用路徑 p 所包含，且通過任務節線(i,j)，又每個油耗路徑均洽為一組(節)車輛運行之，且路徑之始必然自 $i \in N_{O+}$ 之節點流出，路徑之終亦須流入節點 $j \in N_O$ ，又當有流量存在時決策變數 μ_o 必須對其隸屬的油耗路徑 o 反應正確的二元變數值即 $\mu_o=1$ ，而不涉及起終性質之各節點，則必須滿足油耗路徑之流入的總量與流出的總量相等的流量守恆原則。

限制式(34)、(36)、(38)以及(40)可作為運用路徑 p 與子運用路徑 q 兩者間之重要連結，並確保其合理性，其中最重重要的部分係透過決策變數 z_{pq} 作為子運用路徑 q 被運用路徑 p 包含之開關。其中限制式(34)透過對於所有子運用路徑加總 z_{pq} ，以限制各條子運用路徑至多僅被一條運用路徑所包含，即子運用路徑不分屬兩個不同的運用路徑以不失合理性。限制式(36)則透過大 M 法對變數 y_{ijpq} 之值以為限定，當每個運用路徑 p 、子運用路徑 q 的組合，沒有被同時選到並確立時，限定 y_{ijpq} 僅能為 0，無法進行其他賦值，反之不在此限。限制式(38)、(40)限制除了等待節線以及起終點為虛擬節點之節線以外，所有將子運用路徑 q 包覆的節線(i,j)，都必須被其所對應的運用路徑 p 所包覆，例如營運車次節線、跨夜節線、等待節線、檢修節線、油料填充節線等均為其是。連結子運用路徑的虛擬節點至網路中任何一點時，其象徵為一個子運用路徑的開始或結束，其與運用路徑本身無關，可以不被運用路徑 p 的所包覆，故限制式(38)為等式限制式、限制式(40)為不等式限制式。又等候節線的概念與上述相反，惟其不具影響成本項之性質，在滿足流量守恆的限制下，其多選或少選並不會影響成本項，在此可不對其加以限制。

呈上段，限制式 (35)、(37)、(39) 以及 (41) 則用以作為運用路徑 p 與油耗路徑 o 兩者間之重要連結，並確保其合理性。其做法大致與前文相同，決策變數 v_{po} 作為油耗路徑 o 被運用路徑 p 包含之開關。限制式 (35) 限制各油耗路徑至多僅被一條運用路徑所包含、限制式 (37) 限制變數 δ_{ijpo} 僅在 $v_{po}=1$ ，即油耗路徑 o 被運用路徑 p 包含時才得以賦值。限制式 (39)、(41) 限制除了等待節線以及起終點為油耗路徑之虛擬節點之節線以外，所有被油耗路徑 o 包覆的節線 (i, j) ，都必須被其所對應的運用路徑 p 所包覆，連結油耗運用路徑的虛擬節點至網路中任何一點時，其象徵為一個油耗運用路徑的開始或結束，其與運用路徑 p 本身無關，其餘節線都須兩兩相同於運用路徑 p 與油耗路徑 o 。故限制式(39)為等式限制式、限制式 (41) 為不等式限制式。同上段觀念，等候節線其不具影響成本項之性質，故在滿足流量守恆的限制下，多選或少選並不會影響成本項，在此可不對其加以限制。

限制式 (42) 作為各營運車次節線之需求量限制、限制式 (43) 則作為每日用車上限數之限制，其兩者之概念同於 4.3.2 節中直觀模式的限制式 (12)、(13)，故在此不再加以說明，可參考上節所闡述之概念。

限制式 (44)、(45)、(46) 與 (47) 即主要用以滿足各運用路徑規劃問題中，必要的運用、檢修、油耗之累積里程或累積天數限制。此處亦為改善原限制式 (4) ~ (11) 最主要的部份，其不再以逐點累加的方式逐點限制，而採用一次累加某個路徑內的所有節線。限制式 (44) 維繫運用總累積天數不大於上界值 B^{Ap} ，其相當於不能經過 $B^{Ap}-1$ 個跨夜節點，故對於各運用路徑 p 所經由的所有跨夜節點數一次加總，以獲得該運用路徑最終的累積天數值，其大幅減少在進行逐點累加過程中的決策變數，以及逐點判斷過程中的限制式。相同的概念可應用於限制式 (45) 確保各子運用路徑 q 內的檢修總累積天數，不違背檢修規定上限值 B^{Aq} ；限制式(46) 確保各子運用路徑 q 內的檢修總累積里程，不違背檢修規定上限值 B^{Lq} ；限制式(47)

確保保各油耗運用路徑 o 內的油料填充總累積里程，不違背該車型所能負擔的上限值 B^{Lo} 等均能有相當的成效。

最後，限制式 (48) ~ (55) 為上述模式中各決策變數之定義域，本節數學模式共包含八組決策變數，並全為二元整數變數，如前文所定義。

4.3.4 場站與路線容量延伸模式

除了上述兩節所擬定之數學模式以外，當時刻表內所包含的車次與車輛數較多，且為集中安排在某些特定的時段時，又有限的維修作業人員未必能擁有足夠的時間執行檢修，而相同道理可推論出，油料填充部分亦可能有相同的難題。因此，本研究在此將發展延伸之限制式，用以給予各時段、各機務段的檢修與油料填充作業，某個合理的工作負載量上限。

定義 $S_{IC}(\theta, u)$ 表示所有於位置 u 執行檢修任務、同時滿足跨越時間帶 θ 的所有檢修節線集合，其中 u 屬於所有可供檢修作業之機檢段位置集合 U_I ， θ 屬於所有檢修節線發生之起迄時間所涉及的時間帶的集合 Θ_I 。另以 $S_{OC}(\theta, u)$ 表示所有於位置 u 執行油料填充任務、且跨越時間帶 θ 的所有油料填充節線集合，其中 u 屬於所有可以提供油料填充的地點集合 U_O ， θ 屬於所有涉及油料填充節線中發生之起迄時間帶集合 Θ_O 。另以 B_u^O 表示同一個時間內在位置 u 的油料填充負荷量上限， B_u^I 表示同一個時間內在位置 u 的檢修負荷量上限。

為考量上述各場站位置之檢修負荷量以及油料填充負荷量，其延伸模式僅須加入限制式 (56)、(57) 即可，如下所示：

$$\sum_{p \in P} x_{ijp} \leq B_u^I \quad \forall (i, j) \in S_{IC}(\theta, u), \theta \in \Theta_I, u \in U_I \quad (56)$$

$$\sum_{p \in P} x_{ijp} \leq B_u^O \quad \forall (i, j) \in S_{OC}(\theta, u), \theta \in \Theta_O, u \in U_O \quad (57)$$

限制式 (56) 為確保相同時間帶 θ 內，其執行檢修任務的總車輛數，少於位置 u 的檢修席位總數 B_u^I 。限制式 (57) 為確保同一個時間帶 θ 內，其執行油料填充任務之總車輛數，少於位置 u 的加油席位總數 B_u^O 。透過原數學模式中，再加入這兩條限制式，即可以考量各時段、位置之容量問題，以利求解結果更能滿足實務作業需求。此外，鑑於上述模式係考量在各時段、各位置所設的限制，故可將兩代表上限值之參數，另行加入時間帶指標 θ 以及位置指標 u ，即可更彈性的給予其容量方面的限制以供使用。

4.4 數學規劃模式綜合討論

本研究於 4.2 節彙整並擬定研究欲解決的重要因子與子問題，進而於 4.3 節提出兩種線性的數學規劃模式，用以求解運用路徑規劃問題，其中 4.3.2 節所擬定之混合整數規劃法，其概念相當的簡單好懂，透過流量守恆的觀念自虛擬起點逐點接續運用任務，並逐點累計各種運用路徑規劃涉及之累積資訊(如檢修累積里程、檢修累積天數等)，然該模式因大量使用整數變數與大 M 法，將可能導致商用軟體中所包含的某些解題機制，無法給予有效的切割以協助求解，又模式本身之複雜性使其在問題規模擴張時，決策變數與限制式之總數將無限成指數增加而增長解題時間，以致其難以推廣為實務使用。

為了化解上述問題，本研究於 4.3.3 節透過二元整數規劃的方式，消弭了採用混合整數規劃模式中，所擁有過多整數變數的問題，並解決大 M 法切割可行解空間的過程中，種種造成對問題求解時間的巨大影響。該數學模式透過一次累加的方式，同時決定欲使用的運用路徑總數，並安排各運用路徑內的所有任務的接續，一次累加的概念可用於維繫運用所需之各類累積資訊限制，較前節有大幅的改善。然其在發展為實務使用之際，仍無法避免變數數量的無限增加，在推廣上仍有其困難性。以下將就其現有的二元整數規劃模式所具有的缺失進行分析，以利於後章發展適合的演算機制，以達研究者欲研發可支援實務使用「運用路徑規劃決策

支援模式」之目的。

其一，在二元整數規劃數學模式中，其同時決定欲使用的運用路徑總數，並安排各運用路徑內的所有任務的接續，然由於任務接續的安排可長可短，僅依時間維度之先後，自 n 個營運車次節線隨選並排列其先後，便至少有 2^n 種以上可考量的選擇 (Cacchiani et al., 2010; Cacchiani et al., 2012)。又本研究欲研發完整的運用路徑規劃系統，必須深究其中包括等待、檢修、加油、迴送等額外的任務，故可能的組合方式將更加複雜，據其定義只要更換組合中的任何一部分，又可以是另外一條運用路徑，是故其組合方式不勝枚舉。

其二，二元整數規劃數學模式在採用套裝軟體求解時 (GAMS Development Corporation, 2008)，程式所涵蓋之解題方式通常依循單行法或分枝定限法，其搜尋方向幾乎均自鄰近的角點逐步搜尋，然今若將解出的兩運用路徑 $p1$ 以及 $p2$ 交換時，即造就一組平行的可行解，如此退化解的個數將隨著 P 集合、 Q 集合與 O 集合的擴大，對模式的求解效率存在嚴重的影響，今若為求更大的運用彈性，加入油料填充集合的考量，求解時間將更加難以負擔。

故綜合以上概念，發展加速解題演算機制以利求解時間之縮短，其關鍵在於：

- (1) 運用路徑內任務的安排與接續可長可短、組合多樣，故須減少求解時窮舉過多運用路徑組合的機會。
- (2) 避免退化解的數量隨運用路徑集合 P 、子運用路徑集合 Q 與油耗路徑集合 O 無限制的擴張，或減少上述三集合所含的元素數量。

除此之外，融合網路問題與實務決策的角度來看，透過合理的餘裕安排以簡化問題，亦可能給予解題時間上的改善，例如考量臺鐵局的柴聯車隊中，柴電機車的油箱可擔負 4000 公里以上的營運，即油料填充的累積里程已經大於檢修累積里程的限制，故在該車隊於本研究模式的使用上，可忽略油料填充問題。同理，

不使用柴油為動力的電聯車隊亦可將本問題先行忽略。數學模式在這些不同車種的使用上具有很大的彈性，然此為應用系統進行輔助決策時之實務建議，而非就學理觀點對數學模式本體改善方法之分析，但亦可於後續使用者予以參佐。





第五章 軌道車輛運用路徑規劃求解演算法之研發

為了妥善處理前章所提出的兩個問題，本研究需針對問題之特性設計或套用一個適合的演算流程。傳統上尋求加速的求解策略時，可考量透過解構法或啟發式演算法進行改善，相較於啟發式演算法，解構法的學理背景具有作業研究中較深厚的理論基礎，因此於通用模式的設計上略較穩健，故本研究在此將採用解構法的機制進行問題拆解，以作為車輛運用系統開發之雛形。然基於不同案例的不同，適當的啟發式機制於後續研究逐步加入本研究所擬定之求解過程，研究者亦認為對於其對於車輛運用路徑規劃的求解，是具有正面貢獻的。

以下本研究將於 5.1 節針對各類解構機制，將其應用於運用路徑規劃問題可能的特性進行評析，並予以測試其可行性，並決定本研究將採用的求解策略。5.2 節簡介 5.1 節所決定使用的「變數產生法」其所應用的概念與相關意涵。5.3 節將就問題依照運用路徑規劃的模式特性進行解構，以滿足變數演算法所需要的型態，而後於 5.4 節提出整體的求解演算流程機制。

5.1 各類解構機制應用於運用路徑規劃之評析

參佐過去文獻對於混合整數規劃問題所採用的解構機制，常用者大致包括拉式鬆弛法 (Everett, 1963)、班式分解法 (Benders, 1962)、整數 L 型演算法 (Laporte and Louveaux, 1993) 以及變數產生法 (Dantzig and Wolfe, 1960) 等。其中，本研究經分析與測試得知前三者較不適用於本研究之問題結構，其各自的問題茲陳述如後，並彙整為表 5-1 呈現。

拉式鬆弛法可藉由鬆弛一部分限制式，而後多數的研究再行採用次梯度法 (Subgradient method) 策略收斂最佳解，既有模式對目標解影響最大的複雜限制式，為連結運用路徑與子運用路徑 (或油耗路徑) 之限制或需求限制式，然無論鬆弛何者，均會破壞問題結構，雖然在被鬆弛問題的求解時間上能有大幅地的改

進，然採用具有數學意義的次梯度法對回時，沒有一個適合給予步幅 (step size) 的特定機制，又將原始問題部分對偶化的過程並沒有大量的減少的解題時間，最後在尋找下界的 Lagrangian dual 問題時，又要再耗費另一段解題時間，故綜合以上概念，其並不適用於本研究。

班式分解法適用於求解「複雜限制式」類問題，其需透過對偶子問題，於主問題中逐步加入可行切割與 (feasibility cut) 最佳切割 (optimal cut)，基於本研究之問題特性並不滿足 Totally Unimodular 的特性，故於對偶子問題計算時須將整數限制先行鬆弛，然此舉將難以獲得較佳的切割，且加入切割的機制並未將原問題的數學模式結構縮小，又自本問題所拆解出的子問題在求解時間上反而不若原問題。此外，且採用該法的最佳切割並不能化解僅差一、兩條等候節線的平行解，而致目標值的改善有限，故不適用於本研究。

整數 L 型演算法應用於本研究時，其在給予問題加入可行切割與最佳切割的過程中，與班式分解法的概念類似，亦較適用於複雜限制式類的問題，其亦優先考量平行解的機會，然依循本研究的問題結構，任意將兩條運用路徑的內容交換後就是一組平行解、單一條運用路徑在途中更替等候的時間長短亦為一組平行解，此項問題特性致使在改善目標值的過程中缺乏效率，亦不適用於本研究。

變數產生法適用於求解「複雜變數」類問題，其將原問題中複雜的變數空間先行剔除，求解過程中亦透過對偶理論有效傳遞具有改善可能之限制，再透過各個迭代求解縮減成本將有用的變數逐步加回，此舉將能限制欲求解變數之總數，並減少不必要的變數使用，雖然縮減成本亦可同時存在多個平行解，但吾人可透過限制各迭代可傳回的變數上限，即能避免過多的平行解影響整體速度。

表5-1 各類常見解構演算法應用於運用路徑規劃問題之評析

解構演算法	應用於本研究之特性評析
拉式鬆弛法 (Lagrangian Relaxation)	鬆弛部分限制式雖可以給予原問題求解時間上的改善，然而採用次梯度法收斂原問題目標值的過程，反而較直接求解二元整數規劃模式的時間更久，故透過鬆弛原問題限制式所造就於求解時間之節省，顯得沒有意義。
班式分解法 (Benders Decomposition)	對於原問題數學模式的縮小成果有限，其對偶問題的求解時間過程亦過長，又加入切割的過程中，會受到平行解的牽制，致使多次迭代後才能對目標值有較大的改善，故於求解時間上亦缺乏效率。
整數 L 型演算法 (Integer L-shaped Algorithm)	對於原問題數學模式的縮小成果有限，又加入切割的過程中，會受到平行解的牽制，致使多次迭代後才能對目標值有較大的改善，故於求解時間上亦缺乏效率。
變數產生法 (Column Generation Method)	透過先行剔除掉複雜的變數集合，根據對偶理論輔以縮減成本之判讀，於各個迭代逐步加回，若能尋求有效拆解問題的方式，控制各迭代的求解時間，實具有改善求解效率的潛力。

總評以上各類求解機制，拉式鬆弛法、班式分解法以及整數 L 型演算法等三種解構技術，其無法給予更多解題時間上改善的原因，在於尚未化解前章所討論的兩大問題，無法破除運用路徑內的接續方式基於窮舉再逐一決策，另退化解的數量與求解空間，仍隨運用路徑集合 P 、子運用路徑集合 Q 與油耗路徑集合 O 擴張而增加，可見這三種方式並不適合應用於運用路徑規劃問題。

故對於複雜變數問題具有改善成效的變數產生法，其首先剔除複雜的變數集合，再基於對偶理論與縮減成本之特性，逐步擴充新的變數空間以加入主問題，此舉以致每回合所傳入的各條運用路徑已完成定義，且皆具有一定的使用效率，而非窮舉多條所致，將可對於上述第一項問題給予改善；又變數集合隨問題規模

逐步擴張的問題，亦可在子問題內給予限制。類似的作法在過去面臨大型排班問題的求解文獻 (Desrosiers et al. 1984 ; Desrosiers and Soumis, 1989 ; Barnhart et al., 1998 ; 盧宗成, 民 89 ; 王國琛, 民 91 ; Holmberg and Yuan, 2003 ; Haase et al., 2007 ; 葉珮婷, 民 98 ; Nishi et al., 2011) , 多篇文章均有採用變數產生法 (Column generation method) 分解問題之建議，其在鐵路列車規劃相關的文獻中亦有採用變數產生法之文獻 (Lingaya et al. 2002 ; Peeters and Kroon, 2008) , 故本研究在此將回顧變數演算法相關之文獻，進而研擬適合的求解解機制、建立車輛運用路徑規劃問題之求解演算法，此舉是為一個合宜的做法。

5.2 變數產生法簡介

變數產生法 (column generation) 是由 Dantzig 和 Wolfe 於 1960 年所發展出的演算機制，其概念是透過線性規劃中的對偶理論 (dual theory) 來產生 (generate) 足以改善目標值的變數 (column)，以避免求解數學模式時，浪費時間於窮舉對問題沒有貢獻的變數 (Dantzig and Wolfe, 1960)。過去的文獻指出，變數產生法對於大規模問題求解，實具有良好的績效。是故，本研究將透過變數產生法過去應用於切紙問題中的 Gilmore-Gomory 演算流程 (Gilmore-Gomory Algorithm) (Gilmore and Gomory, 1961 ; Gilmore and Gomory, 1963 ; Kalvelagen, 2003) 以為參考，進而研擬於運用路徑規劃問題上的解題機制。

變數產生法中 Gilmore-Gomory 的演算流程，可參考以求解概念如圖 5-1 所示。原有的大規模問題在該演算流程中，將被切割成主問題 (master problem) 與子問題 (sub problem)，然此時的主問題將被暫時被拿掉一部份可行解區間，俟後續求解過程中逐步加回，故又稱作受制主問題 (restricted master problem)。將受制主問題鬆弛整數限制後，透過某些機制以確保其存在一組基本的可行解，此時其對偶問題必定也存在一組可行解，故求解對偶問題將可得到一組對偶變數向量，其相當於來自主問題限制式的餘裕 (slack) 或影子價格 (shadow price)，將這組對偶向

量傳入子問題後可視為乘子 (multiplier)。又依據對偶理論，子問題將可藉由求解縮減成本 (reduce cost)，同時產生對目前受制主問題目標值最有貢獻之新變數以加入受制主問題，其作法含有增加受制主問題之可行解選擇之意，該解亦會被存入受制主問題的可行解集合。而後持續循環執行上述步驟，逐步擴充可行解集合，藉由受制主問題與子問題間的互動逐步增加可行解區間，並修正受制主問題之目標值，依據對偶可行性 (dual feasibility) 直到子問題所產生的變數無法再改善受制主問題時則停止求解。此時，亦代表所求解之大規模問題已經求解到線性規劃的最佳解 (Barnhart et al., 1998 ; Alvelos, 2005)。

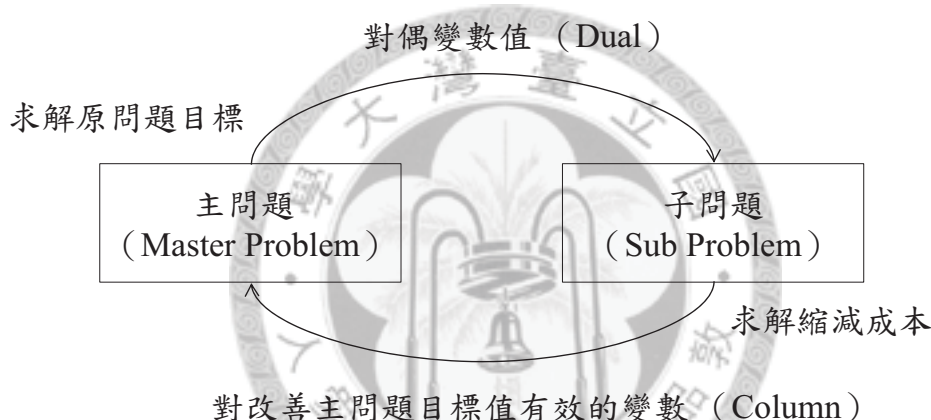


圖5-1 變數產生法 Gilmore-Gomory 演算法求解概念示意圖 (Kalvelagen, 2003)

由於子問題的目標值相當於是縮減成本，故根據對偶可行性可知，受制主問題為最小化問題時，縮減成本為負值表示主問題的解尚有改善空間，故欲回傳之變數對於改善目前受制主問題之目標值尚有幫助，故應將變數加入受制主問題進行求解 (Dumas et al., 1991 ; Berger et al., 2007)。當縮減成本非負值時，表示所產生之變數以無法再行改善受制主問題目標值，抑或所產生的變數可能對受制主問題而言將生成退化解，因此無須再花時間求解 (Desrosiers and Soumis, 1989 ; Barnhart et al., 1998 ; Alvelos, 2005 ; Chen et al., 2010)。

上述求得的最佳解僅為線性規劃的最佳解，若原問題的設計本身為一個整數

規劃問題時，則必須確認其是否符合整數性。最常見的方法是透過分枝定限法求得一組整數解，部分文獻期望確保最後求得的整數解亦為整數規劃的最佳解，故將原線性規劃的結果當作一組下界解，而後在分枝的過程中，於各點再行求解子問題並對受制主問題再行加入一組組的變數，在這類文獻中子問題又作利潤問題 (pricing problem)，直到無法再改善主問題之目標值時停止。上述過程不斷地在分枝的過程加入切割 (cut) 並透過求解利潤問題逐步加入變數以擴張解空間，故被稱作 Branch-and-price-and-cut 演算法 (Branch-and-price-and-cut Algorithm)，這個概念亦可延伸發展單寧沃爾法的求解機制 (Barnhart et al., 1998; Alvelos, 2005; Chen et al., 2010)。

變數產生法與 Gilmore-Gomory 演算流程，其具有紮實的對偶理論依據，並能夠有效率的求解大型規模的問題，該作法使得原欲求解之大規模問題，僅需考慮規模較小的受制主問題，且其中所包含的可行解空間 (變數) 係源自已經由子問題檢核過、且對目標解改善有一定幫助的變數集合。在求解過程中具有極高的效率，就整數規劃問題之求解品質而言，大多可對回差距極小的最佳整數解，若無法在可接受的範圍以內，尚可採用 Branch-and-price-and-cut 演算法持續進行求解，方為一個有效的解題機制 (王國琛, 2002; Alvelos, 2005; Haase et al., 2007; Chen et al., 2010)。

5.3 基於變數產生法拆解問題

探究本研究於前章所分析之結果，直接採用套裝軟體對線性規劃模式進行求解，將無法提供一個高效率的演算過程，為了改善求解績效，必須控制 4.4 節提出的缺點加以改善。本研究根據變數產生法與 Gilmore-Gomory 演算流程，將問題進行拆解，經拆解後各問題所包含的決策範疇如下：

- (1) **受制主問題**：求解子問題傳回可行的各組運用路徑是否被選入使用，及其

選入後需執行該路徑的車組數或車輛數。受制主問題將盡量滿足各車次的車輛需求限制，並確保每日預定要執行運用的總車輛數在允許的範圍內。

- (2) **子問題**：透過主問題車輛需求相關的限制，對子問題傳入其對偶變數向量作為乘子，求解縮減成本。並產生出一組對主問題目標函數最具改善性的一組「運用路徑」，該運用路徑須滿足運用過程中的營運車次接續、迴送、檢修與油料填充等相關規則限制。

上述的做法若對應圖 5-1 的求解概念，可將其改繪製為圖 5-2 之流程說明之，其透過子問題決策可行的運用路徑選擇，又每次迭代過程只從子問題將回傳一條最佳的運用路徑，而主問題則將子問題傳回的路徑集合做遴選，並決定每條運用路徑需由多少車輛所負責，並透過主問題之決策，輔以滿足所有營運車次節線之車輛需求，逐步修正其目標值。

求解原問題目標—滿足車輛需求之最小化檢修與迴送成本

對應需求限制式的對偶變數值

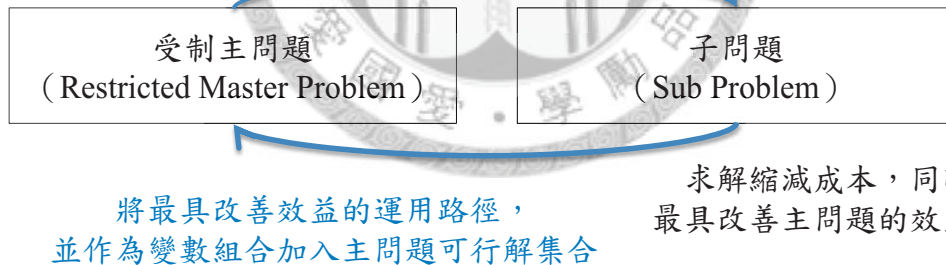


圖5-2 本研究依變數產生法之 Gilmore-Gomory 演算法拆解問題之概念示意圖

本文獻採用變數產生法進行解題，將同時讓求解過程中除了「以多元物流法建立數學模型」外，亦整合了「以指派法建立數學模型」之優點。由於 4.3.2 節中逐步完成接續的數學模式乃透過多元物流法構成，故決策路徑接續的子問題仍可保有多元物流法的網路結構與特性，並維持前述二元整數規劃模式的問題結構；而主問題的作法較類似 Cacchiani et al. (2010)、Cacchiani et al. (2012) 等文獻以

指派法（路徑模式法）建立數學模型，透過事先生成所有可行的運用路徑，再從中挑選所需，以滿足該集合覆蓋問題。惟本研究更進一步透過變數產生法逐步生成對主問題目標值具有最大改善效益的路徑集合，透過對偶理論對偶可行性，相較前述文獻能提供一個夠堅定的學術基礎，又變數產生的過程係有以問題最佳化縮減成本的支持，能逐步更有效率的產生所需的運用路徑，其亦較啟發式流程更通用在不同形式的運用路徑規劃問題內，俾以在短時間之內有效的改善目標值。

5.3.1 受制主問題

承 5.2 節所回顧，本研究採用變數產生法求解的過程將解構問題，並對問題進行數學模式上的些微調整，而對於受制主問題而言，並需確保其在起始狀態亦存在一組基本的可行解，方可啟動後續演算機制。故採用變數產生法求解的過程，將會使用到與先前不同的決策變數，本研究均在本節先行定義。

首先，由於受制主問題將決定每條運用路徑需由多少車輛所負責，故定義決策變數 f_p 表示第 p 個運用路徑所使用的車輛數，另以整數決策變數 v_{ij} 表示在受制主問題求解的該回合內，對於每個營運車次節線 $(i,j) \in S_T$ ，尚未滿足其需求量 D_{ij} 的車輛數。而相對受制主問題的限制式數量，亦定義其對偶問題中相對應的對偶變數 σ_{ij} 、 π_{ij} 、 θ_k 。至於子問題部分，其將決策一組對改善主問題目標值有最大成效的一組特定的運用路徑，本部分可採用第四章所擬定之網路結構特性將二元整數規劃模式略做修改即可，令二元變數 ρ_{ij} 表示子問題決策之運用路徑內是否包覆網路中的某條任務節線 $(i,j) \in S$ ，當 $\rho_{ij}=1$ 表示節線 (i,j) 被選入這條即將加入主問題的運用路徑，反之若 $\rho_{ij}=0$ 則上述不成立，即節線未被包含在運用路徑之中。又由於主問題將獲得來自子問題產生的特定運用路徑，其變數自子問題傳遞至主問題後，可將其視為參數，並以 $\overline{x_{ijp}}$ 的集合作為主問題儲存子問題產生的變數資料庫，以逐步擴張受制主問題的解空間，故當每經一個迭代之子問題解出的縮減成本為負值

時， $\overline{x_{ijp}}$ 將被更新進某組可行的運用路徑 p ， $\overline{x_{ijp}}$ 可定義為在第 p 個迭代中被加入的運用路徑是否包含節線 (i,j) 。參數 B^T 為求解之該型車輛可作為連掛的上限。

◆ 新增加之參數：

B^T ： 某個車次節線內所能連掛車廂數或車組數的上限

$\overline{x_{ijp}}$ ： 儲存各迭代來自子問題傳入受制主問題的運用路徑所用的資料庫，其為一個二元參數；當其值為 1 時，表示第 p 個迭代所傳回受制主問題的運用路徑內包含節線 (i,j) ；當其值為 0 時，表示第 p 個迭代所傳回受制主問題的運用路徑內不包含節線 (i,j)

於受制主問題中，共需使用兩組非負整數決策變數。其一決策各迭代傳入受制主問題的運用路徑，所需使用的車輛數；另者則檢視營運車次節線中尚未滿足給定之車輛需求量的部分，茲彙整如下所示：

◆ 主問題所需之決策變數：

f_p ： 非負整數，表示第 p 個運用路徑所使用的車組數或車輛數

v_{ij} ： 非負整數，表示營運車次節線 $(i,j) \in S_T$ 中尚未滿足需求量的車組數或車輛數

綜合以上簡介，建立受制主問題數學模式如下所示：

目標函數：

$$\text{Min } C^R \sum_{(i,j) \in S_R} \sum_{p \in P} R_{ij} \overline{x_{ijp}} f_p + C^I \sum_{(i,j) \in S_I} \sum_{p \in P} \overline{x_{ijp}} f_p + M \sum_{(i,j) \in S_T} v_{ij} \quad (58)$$

限制式：

$$\sum_{p \in P} \overline{x_{ijp}} f_p + v_{ij} = D_{ij} \quad \forall (i, j) \in S_T \quad (59)$$

$$v_{ij} \leq B^T \quad \forall (i, j) \in S_T \quad (60)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{(i, j) \in \{S_A(k) \cup S_{p^+}(k)\}} \overline{x_{ijp}} f_p \leq H \quad \forall k \in K \quad (61)$$

$$f_p \geq 0, f_p \in \text{integer} \quad \forall p \in P \quad (62)$$

$$v_{ij} \geq 0, v_{ij} \in \text{integer} \quad \forall (i, j) \in S_T \quad (63)$$

目標函數 (58) 期望最小化運用路徑規劃成本，其中可包含三個部分，首先包括有迴送成本 ($C^R \sum_{(i, j) \in S_R} \sum_{p \in P} R_{ij} \overline{x_{ijp}} f_p$)、檢修成本 ($C^I \sum_{(i, j) \in S_I} \sum_{p \in P} \overline{x_{ijp}} f_p$)，而當目前所產生之路徑集合所決策的解，未能滿足營運車次節線之車輛需求數時，將給予處罰成本值 ($M \sum_{(i, j) \in S_T} v_{ij}$)，三者之和即為目標函數。上述做法將 4.3.3 節二元整數

規劃模式中之需求限制式(42)，以處罰值的概念改寫成軟性限制式(soft constraint)的型態已加入目標函數，將可確保在任意情況下，目標函數 (58) 皆可以反應本數學模式以生成一組可行解。又基於上述給定極大值的設定，當其於各迭代逐步求解時並降低目標值時， $\sum_{(i, j) \in S_T} v_{ij}$ 之值應該也會越來越小，直到 $\sum_{(i, j) \in S_T} v_{ij} = 0$ ，此時所選定之路徑對於目標函數 (58)，應反應出與 4.3.3 節定義之目標函數 (30) 具有相同的目標值。

限制式 (59) 為需求限制式，對於每條車次節線 $(i, j) \in S_T$ 而言，其可以被多條

不同運用路徑之車輛共同負責，故對於各節線加總所有運用路徑 p 所使用的車輛數 f_p ，而未滿足給定各車次的總車輛數需求 D_{ij} 者，將在各回合中以變數 v_{ij} 呈現不足的車輛數，並在目標函數中加入處罰值，並期待後續傳出的對偶變數，能在下一輪迭代對目標函數有所改善。又對某個車次而言，多餘的車輛是不符合經濟效益且在實務作業中不允許的，故本研究另將 v_{ij} 設定為非負整數，以避免其產生不必要的浪費。

限制式 (60) 為對於每個營運車次節線 $(i,j) \in S_T$ ，限制其所使用之車組數上限，此係基於該車型服務區間的月台長度、營運考量或檢修位置容量等規定反應出的限制條件。例如台鐵 EMU500 型電聯車，通常限制其由兩組八節以下的編組行駛，而又由於限制式 (59) 的存在，給予非負整數變數 v_{ij} 作為限制已相當於達到限制此項。

限制式 (61) 為每日使用總車輛數的上限，係包含以下兩部分之總和，分別為以規劃週期之第 k 天為運用路徑起始日的車輛數總和 $(\sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in S_{p^+}(k)} \overline{x_{ijp}} f_p)$ ，與非以規劃週期之第 k 天為起始日，但會在該日營運的車輛數（即通過跨越第 $k-1$ 日到第 k 日之跨夜節線者）總和 $(\sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in S_A(k)} \overline{x_{ijp}} f_p)$ ，兩者之和不得超過可使用的總車隊數 H 。

限制式 (62)、(63) 為決策變數的定義域，在本問題中共有兩類決策變數，且兩者均為非負整數， f_p 表示第 p 個運用路徑所使用的車輛數，另以 v_{ij} 表示在主問題求解的該回合內，對於每個營運車次節線 $(i,j) \in S_T$ ，尚未滿足需求量 D_{ij} 的車輛數，詳細規範與簡介已於前文所羅列。

根據變數產生法中 Gilmore-Gomory 演算流程的概念圖 5-2，其程序中必須基於受制主問題尋找傳入子問題的對偶向量，並作為乘子的腳色輔以在子問題求解最小化縮減成本，然而整數規劃形式無法直接求取對偶，即便修改為混合整數規

劃模式，其原有的整數限制部分，仍將造就所解出之目標值含有些微誤差，故本研究在此必須先行放鬆主問題的整數限制，即將第 (62)、(63) 式的整數部分鬆弛，改以以下第 (64)、(65) 式替代，而目標函數 (58) 與限制式 (59) ~ (61) 則維持原貌不作改變，即可得到一個鬆弛的受限主問題 (relaxed and restricted master problem) 如下所示：

目標函數：

$$\text{Min } C^R \sum_{(i,j) \in S_R} \sum_{p \in P} R_{ij} \overline{x_{ijp}} f_p + C^I \sum_{(i,j) \in S_I} \sum_{p \in P} \overline{x_{ijp}} f_p + M \sum_{(i,j) \in S_T} v_{ij} \quad (58)$$

限制式：

$$\sum_{p \in P} \overline{x_{ijp}} f_p + v_{ij} = D_{ij} \quad \forall (i,j) \in S_T \quad (59)$$

$$v_{ij} \leq B^T \quad \forall (i,j) \in S_T \quad (60)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in S_d(k) \cup S_{p^+}(k)} \overline{x_{ijp}} f_p \leq H \quad \forall k \in K \quad (61)$$

$$f_p \geq 0 \quad \forall p \in P \quad (64)$$

$$v_{ij} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in S_T \quad (65)$$

此時，對上述被鬆弛的受限主問題，求解其對偶問題，數學模式如以下第 (66) 到 (70) 式所示。其相關將採用的決策變數如以下定義。

◆ 鬆弛後受限主問題之對偶問題所需新加入之決策變數：

σ_{ij} ：自由變數，對應受制主問題於需求限制式 (59) 的對偶變數

π_{ij} ：非正整數，對應受制主問題於各運用路徑可掛車輛數上限限制式 (60) 的對偶變數

ϑ_k ：非正整數，對應受制主問題於每日總用車量上限限制式 (61) 的對偶變數

鬆弛後主問題之對偶問題如下所示：

目標函數：

$$\text{Max} \sum_{(i,j) \in S_T} D_{ij} \sigma_{ij} + \sum_{(i,j) \in S_T} B^T \pi_{ij} + \sum_{k \in K} H \vartheta_k \quad (66)$$

限制式：

$$\sum_{(i,j) \in S_T} \overline{x_{ijp}} \sigma_{ij} + \sum_{k \in K} \left[\sum_{(i,j) \in \{S_A(k) \cup S_{P^*}(k)\}} \overline{x_{ijp}} \right] \vartheta_k \quad \forall p \in P \quad (67)$$

$$\leq C^R \sum_{(i,j) \in S_R} \sum_{p \in P} R_{ij} \overline{x_{ijp}} + C^I \sum_{(i,j) \in S_I} \sum_{p \in P} \overline{x_{ijp}}$$

$$\sigma_{ij} + \pi_{ij} \leq M \quad \forall (i,j) \in S_T \quad (68)$$

$$\pi_{ij} \leq 0 \quad \forall (i,j) \in S_T \quad (69)$$

$$\vartheta_k \leq 0 \quad \forall k \in K \quad (70)$$

目標式 (66) 為對應前述受制主問題是為最大化函數，其中所包含的決策變數 σ_{ij} ，為相對原受制主問題中計算使用車輛數之限制式 (59) 所生成，基於其為等式，故 σ_{ij} 並無限制其正負號 (free variable)，決策變數 π_{ij} 則相對各運用所含車輛數上限之限制式 (60) 所設，決策變數 ϑ_k 為對應每日可用車輛數限制之限制式 (61) 所擬定。其定義域如限制式 (69)、(70) 所表示。限制式 (67)、(68) 則分別為相對原被鬆弛之受制主問題中的變數 f_p 、 v_{ij} 所設，藉此共同求解該對偶問題。又對偶問題的 σ_{ij} 即反應原受制主問題中需求限制的情況，故可作為主問題與子問題之間得連結，以期待主問題之目標值可為逐步改善，故將傳入子問題做為依據。

5.3.2 子問題

關於本研究的子問題，其將於每迭代求解一組對受制主問題目標值最具有改善效益的運用路徑，該運用路徑必須滿足運用過程中舉凡接續、等待、迴送、檢修、油料填充等基本任務，數學模式的架構概念類似前述二元整數規畫法採用網路模式，並直接加總運用接續後之成果。為了維繫子問題與受制主問題的互動，各迭代由受制主問題傳入基於需求限制式所衍生之對偶變數向量 $\overline{\sigma_{ij}}$ 。

本研究所定義之子問題共包含五組二元決策變數，在此將先行定義。首先，由於子問題每次僅決定一條運用路徑，故在子問題部分可將區別運用路徑的指標 p 先行移除，此舉將能有效減少前章模式總評所及，關於兩運用路徑交換所導致之平行解對於求解改善時間的負面影響，在主問題中具有決策變數 f_p 的影響下，重複的運用路徑對主問題而言亦沒有效益，故意不致對子問題之路徑選擇造成影響。定義決策變數 ρ_{ij} 表示子問題決策之運用路徑內，是否包覆網路中的某條節線 $(i,j) \in S$ ，當 $\rho_{ij}=1$ 表示節線 (i,j) 被選入本次迭代即將加入主問題的運用路徑；反之若 $\rho_{ij}=0$ 則上述不成立，即節線未被包含在運用路徑之中。決策變數 y_{ijq} 決策節線 $(i,j) \in S$ 是

否被子運用路徑 q 所包含，其成立時 $y_{ijq}=1$ ，反之 $y_{ijq}=0$ 。決策變數 δ_{ijo} 決策節線 (i,j) 是否被油耗路徑 o 所包含，成立時 $\delta_{ijo}=1$ ，反之 $\delta_{ijo}=0$ 。決策變數 η_q 與 μ_o 之作用與前章概念相同，其用以決策子運用路徑 q 、油耗路徑 o 是否被啟用並包含某些運轉任務，上述假設成立時變數輸出 1，不成立時為 0。

◆ 子問題所需之決策變數：

ρ_{ij} ：二元整數，當任務節線 (i,j) 被子問題選入，作為該迭代將加入主問題之運用路徑的一部分時為 1，否則為 0

y_{ijq} ：二元整數，當任務節線 (i,j) 被子運用路徑 q 所包含時為 1；否則為 0

δ_{ijo} ：二元整數，當任務節線 (i,j) 被油耗路徑 o 所包含時為 1；否則為 0

η_q ：二元整數，當子運用路徑 q 被啟用，並包含某些運轉任務時為 1；否則為 0

μ_o ：二元整數，當油耗路徑 o 被啟用，並包含某些運轉任務時為 1；否則為 0

本研究之子問題仍延用第四章之網路模式，並維持所有決策變數均為二元整數，故其仍為一個二元整數規劃問題，用以在每個迭代求解最小縮減成本，並尋找出對受制主問題最有改善效率的一條運用路徑，其詳細數學模式如下所示：

目標函數：

$$\text{Min } C^R \sum_{(i,j) \in S_R} R_{ij} \rho_{ij} + C^I \sum_{(i,j) \in S_I} \rho_{ij} - \sum_{(i,j) \in S_T} \overline{\sigma}_{ij} \rho_{ij} \quad (71)$$

限制式：

$$\sum_{(h,i) \in \Omega^-(i)} \rho_{hi} - \sum_{(i,j) \in \Omega^+(i)} \rho_{ij} = \begin{cases} -1 & i \in N_{P+} \\ 1 & i \in N_{P-} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (72)$$

$$\sum_{(h,i) \in \Omega^-(i)} y_{hiq} - \sum_{(i,j) \in \Omega^+(i)} y_{ijq} = \begin{cases} -\eta_q & i \in N_{Q+} \\ \eta_q & i \in N_{Q-} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall q \in Q \quad (73)$$

$$\sum_{(h,i) \in \Omega^-(i)} \delta_{hio} - \sum_{(i,j) \in \Omega^+(i)} \delta_{ijo} = \begin{cases} -\mu_o & i \in N_{O+} \\ \mu_o & i \in N_{O-} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall o \in O \quad (74)$$

$$\sum_{q \in Q} y_{ijq} = \rho_{ij} \quad \forall (i,j) \in S \setminus \{S_W, S_{Q^+}, S_{Q^-}, S_{O^+}, S_{O^-}\} \quad (75)$$

$$\sum_{o \in O} \delta_{ijo} = \rho_{ij} \quad \forall (i,j) \in S \setminus \{S_W, S_{Q^+}, S_{Q^-}, S_{O^+}, S_{O^-}\} \quad (76)$$

$$\sum_{(i,j) \in S_A} \rho_{ij} \leq B^{A_p} - 1 \quad (77)$$

$$\sum_{(i,j) \in S_A} y_{ijq} \leq B^{A_l} - 1 \quad \forall q \in Q \quad (78)$$

$$\sum_{(i,j) \in S_T} T_{ij} y_{ijq} + \sum_{(i,j) \in S_R} R_{ij} y_{ijq} \leq B^{L_l} \quad \forall q \in Q \quad (79)$$

$$\sum_{(i,j) \in S_T} T_{ij} \delta_{ijo} + \sum_{(i,j) \in S_R} R_{ij} \delta_{ijo} \leq B^{L_o} \quad \forall o \in O \quad (80)$$

$$\rho_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in S \quad (81)$$

$$y_{ijq} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in S, q \in Q \quad (82)$$

$$\delta_{ijo} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in S, o \in O \quad (83)$$



$$\eta_q \in \{0,1\} \quad \forall q \in Q \quad (84)$$

$$\mu_o \in \{0,1\} \quad \forall o \in O \quad (85)$$

目標函數 (71) 為相對於受制主問題的縮減成本，共包含有三個項目。前兩項相當於欲新增之運用路徑內，所包含的迴送成本 ($C^R \sum_{(i,j) \in S_R} R_{ij} \rho_{ij}$) 以及檢修成本

($C^I \sum_{(i,j) \in S_I} \rho_{ij}$) 等兩部分，第三項成本 ($-\sum_{(i,j) \in S_T} \overline{\sigma}_{ij} \rho_{ij}$) 則用以評估所擬定出之路

徑加入受制主問題後可帶來的效率性，其中 $\overline{\sigma}_{ij}$ 反應受制主問題車輛需求限制式的對偶變數。當受制主問題中的某個營運車次節線 $(i,j) \in S_T$ 尚未滿足其車輛需求 D_{ij} 時，對偶變數 $\overline{\sigma}_{ij}$ 將反應正值，致使 $-\overline{\sigma}_{ij} \rho_{ij}$ 項為負數，對於以極小化為目標的子問題而言，新建的運用路徑將有較多的機會選擇該類節線；反之，若已滿足需求量的節線， $\overline{\sigma}_{ij}$ 則易反應為負數或 0，致使 $-\overline{\sigma}_{ij} \rho_{ij}$ 項為正，給予目標函數選取該運用路徑之壓力而盡量不去選擇該節線。

限制式 (72)、(73) 與 (74) 分別為處理運用路徑、子運用路徑以及油耗路徑之流量守恆限制式。限制式 (72) 是針對運用路徑的部分，其起迄點須為虛擬起始節點 $i \in N_{P+}$ 以及虛擬終止節點 $i \in N_{P-}$ ，而其中的各節點必須滿足其流入量與流出量相等，由於子問題每次僅產生一組運用路徑，故可將表示運用路徑的指標 p 除去，改以變數 ρ_{ij} 為二元變數輔助決策，當其值為 1 時，表示該次迭代所產生之運用路徑包括節線 (i,j) 。又運用路徑內包含一次或多次的檢修與油料填充安排，即表示其內包含有多組「子運用路徑」以及「油耗路徑」，其必需也得滿足流量守恆之限制，故 (73) 式與 (74) 式即處理上述兩者之流量守恆，以二元變數 y_{ijq} 與 δ_{ijo} ，分別表示節線 (i,j) 是否被子運用路徑 q 或油耗路徑 o 所包覆，第 (73) 式限制子運用路徑 q 如果包含營運任務之接續時，其變數 η_q 必須反應為 1，而後該子運用

路徑必須遵守自其專屬的虛擬起始節點 $i \in N_{Q+}$ 流出、虛擬終止節點 $i \in N_{Q-}$ 流入，且接續過程所經之各節點需滿足流入量與流出量守恆之原則，又當 $\eta_q = 0$ 時表示子運用路徑未被啟動；同理，第 (74) 式限制油耗路徑 o 包含營運任務之接續時，其變數 μ_o 必須反應為 1，該油耗運用路徑必須遵守自節點 $i \in N_{O+}$ 流出、節點 $i \in N_{O-}$ 流入，且接續過程所經之各節點需滿足流入量與流出量守恆之原則，當 $\mu_o = 0$ 時表示油耗運用路徑未被啟動。

限制式 (75) 處理子運用路徑與運用路徑間之相互守恆、限制式 (76) 則為油耗路徑與運用路徑間的相互守恆。其概念同於前章之限制式 (38)、(39) 所歸咎路徑接續的概念，對於所有的節線而言，運用路徑與子運用路徑間必須是守恆的，該道理也同樣可應用在運用路徑與油耗路徑間之守恆，惟有等待節線以及連結虛擬子運用路徑節點或虛擬油耗路徑節點相關的節線 $(i,j) \in \{S_w, S_{Q^+}, S_{Q^-}, S_{O^+}, S_{O^-}\}$ ，表示完成維修或加油後的等候，或某個子運用路徑或油耗運用路徑之始末，與原有的運用路徑無關，故並無須滿足上述限制。另由於既有流量守恆限制的約束，原限制式 (40)、(41) 可以在此省略，而不致影響求解結果。

限制式 (77) 為確保運用累積天數限制式，同 4.3.3 節二元整數規劃模式的作法，採用一次累加某個路徑內的所有節線，以保有不需執行逐點累積的優點，維繫其總累積天數不大於上界值 B^{Ap} ，相當於不能經過 $B^{Ap} - 1$ 個跨夜節點。限制式 (78) 為確保檢修總累積天數，不違背檢修規定上限值 B^{Al} ，不能經過 $B^{Al} - 1$ 個跨夜節點。限制式 (79) 為處理檢修累積里程限制所設，其維繫其總累積里程不違背檢修規定上限值 B^{Ll} 。限制式 (80) 為處理油料填充累積里程限制所設，其以不違背該車型所能負擔的上限值 B^{Lo} 為原則。

最後，限制式 (81) ~ (85) 為子問題中所包含之各決策變數的定義域，在子問題中共有五組決策變數，其仍均為二元整數，以維繫 4.3.3 節模式中所能提供較優良之求解時間，其各自所代表的意義如前文所定義。

5.4 車輛運用路徑規劃變數產生法演算流程

本研究參酌變數產生法中的 Gilmore-Gomory 演算流程，將其應用於軌道運輸車輛運用路徑規劃問題，以第四章建立之網路架構及數學模式為背景，並參酌學理特性進行問題拆解後，研擬求解演算流程如下圖 5.3 所示。在此本研究定義 Z_{UB} 表示求解過程中之上界值 (upper bound)、 Z_{LB} 則為求解過程中之下界值 (lower bound)、 Z_{MP} 為求解受制主問題的目標函數值、 Z_{RDP} 為經線性鬆弛後受制主問題的對偶問題之目標函數值。此外，求解過程中以上界值與下解值間的間距 (gap) 判斷求解收斂與否，以 γ 表示可接受之最小間距；又每回合僅加入一條運用路徑，故指標 p 除了代表第 p 條被加入鬆弛後受制主問題的運用路徑外，亦可同時代表求解的迭代數。

求解開始時首先設定 $p=1$ 表示第一回合求解開始，並設定 $Z_{UB}=\infty$ 、 $Z_{LB}=-\infty$ ，為起始的條件；而後，直接求解經線性鬆弛後受制主問題的對偶問題，基於本研究已在 5.3.1 節將車輛使用數的限制式改作為軟性限制條件，故在各迭代求解的過程中均可以獲得一組可行解數值；將其求解過程中相對於鬆弛後受制主問題的對偶變數向量 σ_{ij} 儲存並更新於 $\overline{\sigma_{ij}}$ ，進而傳入子問題作為其中的參數；求解子問題可獲得最小化縮減成本 (及子問題的目標函數)，由於其具有最佳化機制，故藉由自問題所產生的變數 (運用路徑)，為對主問題目標值最具有改善效益的一組變數集合，當所縮減成本為負值時，根據對偶可行性，表示主問題的目標函數尚有改善的空間，此時將子問題所求解出的運用路徑 ρ_{ij} 記錄下來，並依照該輪迭代數將其存入 $\overline{x_{ijp}}$ ，並傳入鬆弛後的受制主問題以進入下一代逐步求解最小化目標值，本研究每次只傳第一組運用路徑之用意，在於為了避免一次求取多組時要另外給定運用路徑集合 p ，同時包括子運用路徑 q 與油耗路徑 o 的預設數量勢必必須變多，反而將造成子問題的求解速度變慢，而牽連到整體的解題時間，相關的研究也認

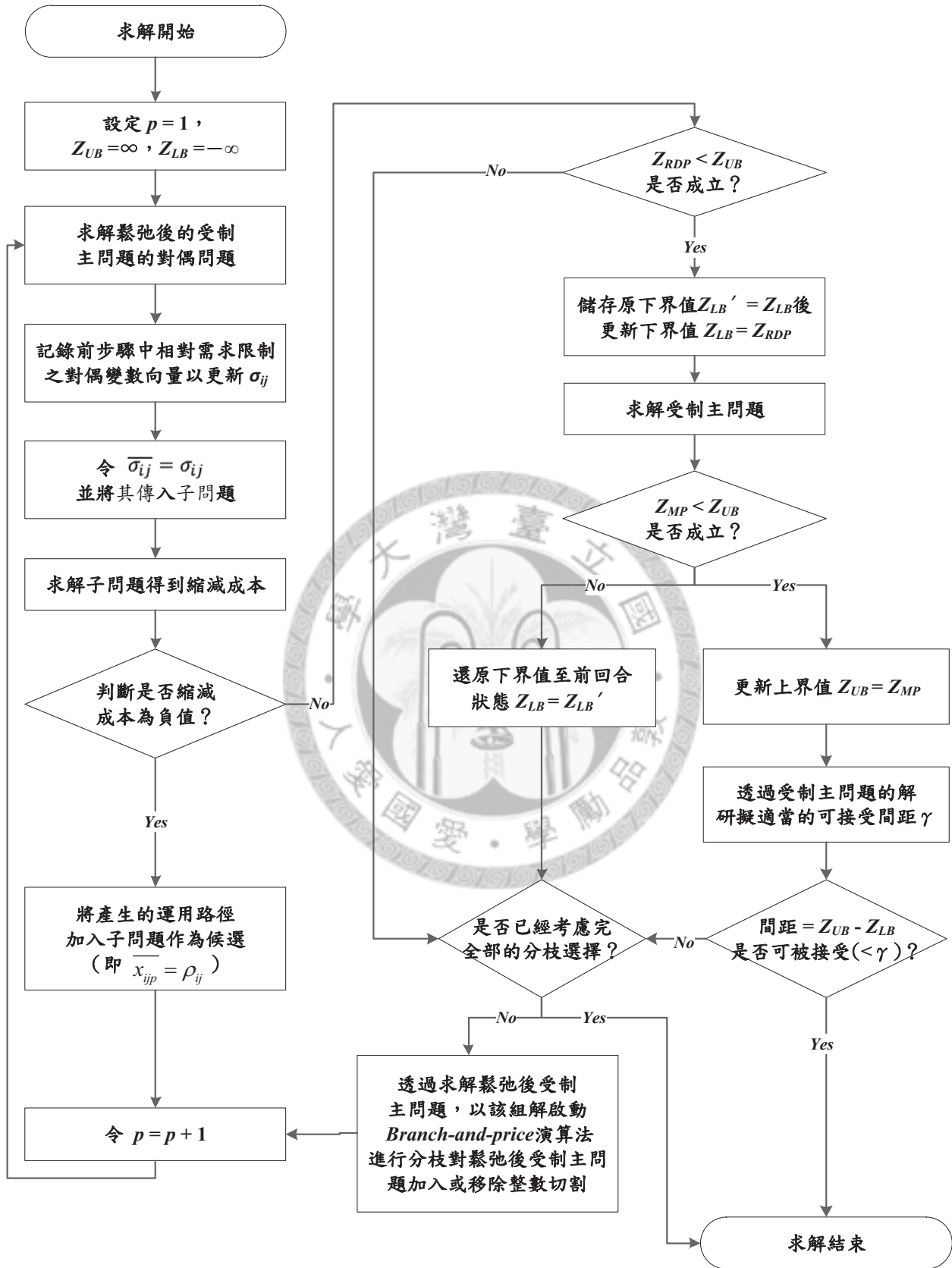


圖5-3 車輛運用路徑規劃求解流程圖

為每次給予主問題傳入一組解可以較多組解佳，又可同時避免子問題有更多退化解的可能 (Peeters and Kroon, 2008)。而若前述判斷縮減成本已非負值，則表示鬆弛後受制主問題已無再行改善的空間，故此時要進入後續最佳解的判讀機制。

基於對偶理論，鬆弛後受制主問題的對偶問題所求得的最佳解 Z_{RDP} ，應與其主問題相同，故 Z_{RDP} 即可代表鬆弛後受制主問題線性規劃最佳解，第一次最佳解判讀時， Z_{RDP} 必然小於上界值 Z_{UB} ，故將其更新為 Z_{LB} ；此時，對鬆弛後受制主問題加回整數限制式，使之回到原有的受制主問題，並以相同的參數值求解受制主問題，若其目標值 Z_{MP} 較現有的上界值 Z_{UB} 為優（小），即該組解可被暫時接受，並將 Z_{MP} 更新為新的上界；又本研究將透過受制主問題的解集合，進而研擬可接受間距 γ 作為後續判讀停止機制的參數，當受制主問題中的所有迴送位置，均為時刻表設計中不滿足起迄點總量守恆的部分時，表示其已做到最小迴送成本，故要上界值再縮小的唯一可能，即至少需減少一次以上的檢修，故將 γ 將設為一次檢修成本之值，反之若仍有迴送機會，則將就「最小迴送距離成本」與「一次檢修成本」兩者取較小值作為 γ ，表示最小的改善空間；其後，判別其上界值與下界值間の間距 ($Z_{UB} - Z_{LB}$)，是否可被接受 ($< \gamma$)，以物理意義而言，相當於判別「整數規劃的目標值與線性規劃的目標值之差值，其是否已經小於整數規劃求解結果的最小改善可能？」若上述假設成立，則無法再行改善 Z_{UB} 故求解結束，該輪整數規劃的解即為運用路徑規劃問題之最佳解，本研究多數的案例測試在此步驟即可獲得收斂，反之若欲強調需求解最佳目標值，本研究則規劃其須再啟動 *Branch-and-price* 演算法再行加入變數進而求取最佳解。

實作 *Branch-and-price* 演算法的過程中，係透過前個迭代鬆弛後受制主問題的該組解作為分枝的依據，並逐步考量再下一輪欲加入鬆弛後受制主問題的整數切割，再重新進入下一代求解子問題，並利用子問題加入新的運用路徑，藉由擴大可行解區間再行逐步尋求最佳解，在進入最佳解的判讀機制時，根據運用路徑

規劃的問題特性，收斂時實質具有許多不同的改善空間，因此時的求解過程中已加入部分整數切割，若其反而造成該輪 Z_{RDP} 之值大於上界值 Z_{UB} 時，則沒有討論的必要，可以重新開始進行下一個分枝的考量；若其滿足 $Z_{UB} > Z_{RDP}$ ，則可暫時更新為下界值，俟其加回其他整數限制式的受制主問題求解後，比較其目標值 Z_{MP} 與現在的上界值之差距 Z_{UB} ，若 Z_{MP} 較小則可更新為新的上界，反之則表示該組解並沒有比較優越，故還原前回合的下界值後，再行考慮其他分枝與切割的可能。直到滿足可接受間距，或已經沒有可以再分割的分枝時，則結束求解流程。

本研究採用基於變數產生法所研擬之演算流程，並針對運用路徑規劃問題進行求解，其具有以下優勢：

- (1) 本研究透過變數產生法，逐輪於子問題產生對目標值有貢獻的運用路徑，以為後續求解之選擇，此舉免去了前章二元整數規劃模式在共同決策多條運用路徑時，必須窮舉過多運用路徑組合的機會，其可避免考量組合多樣的運用路徑以浪費過多的求解時間。
- (2) 由於子問題每次產生的運用路徑並不會再主問題被刪除，致使產生的運用路徑不會再重複（因為對主問題最佳解的改善沒有貢獻），故前章所及兩運用路徑交換所致的平行解現象，並不會在本演算流程中出現。
- (3) 本研究子問題每次僅求解一條運用路徑，故在子問題中可拿掉運用 p 的指標，又對於一運用路徑內所包含得檢修、油料填充次數均在有限的範圍，故子運用路徑集合 Q 與油耗路徑集合 O 亦僅限制在一個運用路徑所及的範圍之中，就子問題而言，其相較於原始二元整數規劃模式中，至少節省了 p 倍以上的問題規模。
- (4) 本研究依據運用路徑規劃問題的特性，於演算過程的停止機制，對於不同的受制主問題的解，給予有彈性的停止機制 γ ，將可造就更有效率的收斂

以避免不必要的長尾現象。又建議在 *Branch-and-price* 的過程中，透過既有的上界值與下界值先行檢視可能的解效益，將不適合的解先行剔除，以免浪費時間於其後續求解整數規劃上。

總評本研究所發展之求解演算法，實同時汲取前章回顧之「以多元物流法建立數學模式」與「以指派法建立數學模式」兩者之優勢，子問題部份透過網路結構，以及多元物流的概念連結出各條運用路徑、子運用路徑以及油耗路徑，並安排路徑內的各項可能任務；主問題則透過路徑模式法的概念，從多條運用路徑所構成的集合中，指派其中的數條以覆蓋時刻表中所有營運車次節線。基與主問題或子問題相互的幫助，使得多元物流法無須再行考量各集合無限的擴張，並避免問題規模無限制的增大，而指派法亦無需考量全部的車次排序，僅需就多元物流法所建立出之有效率的運用路徑考慮集合包覆問題即可。應用兩者問題模式特性，將得以有效的縮短解題時間。

又根據運用路徑規劃問題本身之特性，子問題採用每次加入一條運用路徑的概念，並以縮減成本檢核是否要進行下一回合求解，此舉可避免解題時間增長，並可化解變數產生法的長尾現象。另外本研究根據問題特性，不再以 0 作為最後問題的收斂準則，而透過參數 γ 給予更有效率的收斂，過去非要解到 $Z_{UB}=Z_{LB}$ 之結果，將導致解題呈現長尾的拖延，且後續迭代求出的解與創造的路徑，對目標值亦無改善的效益，故本文獻已經在此避免。又本研究所研擬之演算流程並不違背任何決策車輛運用路徑規劃之精神，對於後續的決策支援模式開發，將具有實質於求解時間的貢獻，且解題流程中仍保有一定的彈性，使用者可自行調整所需的求解環境或收斂機制。



第六章 實證案例分析

本研究於第四章分別基於混合整數規劃以及二元整數規劃法，發展了兩套數學模式，並於第五章基於變數產生法及 Gilmore-Gomory 流程，發展車輛運用路徑規劃的求解演算法。故在本章將針對實務案例進行求解，一方面比較求解演算法對於求解時間改善的效率，最重要者在於評估本研究數學模式之正確性，以及其在實務作業上之適用性，輔以了解其所不足與尚須人工調整之處。

數學模式中影響運用規劃複雜度的因子，包括各車次需求總數、規劃期程、車隊大小、可能涉及的維修或加油次數等；對於實務人員而言，不同的起迄組合、行經路線別、同一時空下過近、過頻繁的車次接續等亦為規劃之複雜度。綜觀以上，無論就學理或是實務的概念切入，臺鐵局所面臨的決策問題甚至較多數的軌道營運業者更甚複雜，是故本研究以此為基礎，發展用以解決問題的最佳化機制與演算法，將有助於細膩的考量各項運用路徑規劃中的子議題，而欲將此研究成果使用於其餘較單純的軌道運輸系統，僅需依其特性簡化既有的數學模式，即可使用以從事有效率的規劃。

本研究計有三組發展自臺鐵局之案例，此鑑於傳統鐵路的車次結構具有多種不同的起迄組合，其實質上較捷運系統或高速鐵路更為慎密，又各型車輛在檢修抑或油料填充之規範上亦不相同，在運用的安排上因其檢修（臺鐵局運用路徑內包含 1A 級檢修安排）與油料填充時段並無限制可彈性使用，且全運用路徑規劃之彈性亦不限於一天（或某幾天）以內，各案例分別如以下簡述之：

◆ 案例一：小規模虛擬測試案例（6.2 節）

為了確保模式之可行性，案例一首先建立一個小型的測試用路網，假設其以柴聯車組營運，另時刻表週期為兩天一循環，其各車次與機務段的起迄組合來自四個不同的車站。本案例中為了確認網路中所有節線使用的正確性，故意

設計不守恆的車次組合以及較容易達到的檢修與油料填充里程限制。

◆ 案例二：花蓮機務段 DR2900 與 DR3000 柴聯自強號車隊（6.3 節）

花蓮機務段 DR2900 與 DR3000 柴聯自強號車隊，為目前臺鐵局單一機務段所擁有最大的柴聯車隊，兩者可彼此相互連掛使用。其負責的車次亦為最多且最為複雜，營運區間自樹林順行至臺南。參考民國 100 年 9 月 28 日改點資料，服務範圍內計有 6 個起迄相關的車站，每週擔負 102 個車次的營運任務。本研究以該時刻表為基礎，透過前章研擬之演算法求解最佳運用路徑規劃。

◆ 案例三：新竹機務段 EMU500 與 EMU600 電聯區間車車隊（6.4 節）

新竹機務段 EMU500 與 EMU600 電聯區間車車隊，雖並非臺鐵局目前最大的車隊，然其所擔任之區間車服務範圍自羅東逆行至彰化，涵蓋宜蘭線、縱貫線、山線、海線以及六家支線，負責的車次、服務範圍與起迄組合是最為複雜，又該車隊以四節一組可彼此連掛，在運用路徑的規劃上比 EMU700 型更具有彈性與挑戰性。參考民國 100 年 9 月 28 日改點資料，服務範圍內計有 11 個起迄相關的車站，每週擔負 744 個車次的營運任務。本研究以該時刻表為基礎，透過前章所研擬之演算法求解最佳化運用路徑規劃。

6.1 比較基準定義與說明

在進行案例分析之前，本研究在此先行定義後續衡量運用路徑規劃成果之指標，共包含以下五項分別陳述於後，不同的案例將以各自適合的指標進行比較。

- (1) **迴送距離**：基於時刻表所安排的車次中，其規劃以某個車站作為起點的總車組數，未必與其作為迄點的總車組數相互守恆；即便兩者守恆，其又可能另遷就其餘維修、油料填充限制問題，以致可能將有迴送的情形發生。對於軌道營運業者而言，迴送本身不具效益，是為多餘的成本支出，應該盡可能地避免或減少。

- (2) **檢修次數**：基於本研究將針對臺鐵局作為案例分析之對象，考量臺鐵局的各級檢修僅 1A 級檢修會被包含在運用路徑當中，故判斷其檢修次數之多寡，將可簡單的對應其檢修成本。又運用表安排後將逐週執行，故週期內所節省之成本將會重複於各週期間實踐，故降低檢修次數的效益亦同。
- (3) **總成本**：基於前述迴送距離與檢修次數，均可透過其與相對之單位成本之積求取正確的成本值，以判斷求解結果之改善。本研究在此亦採用總成本作為比較指標，亦可得到更直接的資訊。
- (4) **單日最高用車數**：基於各機務段所擁有的車輛資源有限，又根據第三章得知，其每日需保有一定車輛作為備用或送廠維修之彈性，故給予車隊數上限。然除此之外，若基於運用路徑規劃再行降低單日最高用車數，將有助於規劃出的運用表在後續執行調配作業時更具彈性。
- (5) **求解時間**：本研究旨在於發展一套可用以輔助實務運用路徑規劃的決策支援模式，為了達到可為支援實務之目的，其求解時間必須坐落在可接受的範圍內，並至少需較人工安排作業時間為小，才具備系統研發之適宜性。

表6-1 評估比較基準之計算單位

比較基準	單位
迴送距離	延車公里
檢修次數	次
總成本	元
單日最高用車數	輛（組）
求解時間	分（秒）

6.2 案例一：小規模虛擬測試案例

本研究在此先擬定一個較小型的測試用路網，其內所包含的所有營運參數均為假設值，並藉此先行判斷第四章所建構出之數學模式，以及第五章所發展出來的演算機制是否正確合宜。本案的路網以兩天為時刻表週期，並以柴聯車組作為營運車種，以測試各種表示任務的節線是否能被正確的選擇，並忠實反應各項決策變數值。

6.2.1 案例一輸入參數資訊

路網模仿臺鐵局花東線中的四個主要起迄車站，並假設其各自擁有不同的性質與功能，如下表 6-2 所列，車輛的配屬機務段假設於 A 站，各運用路徑的起始與結束須於該點為準，再以 A 站為參考點給定 B、C、D 各站的相對位置（假設順行方向為正值），該路網中可執行 1A 級檢修的位置係於 A、B、C 等三站。

又本案例設有五種不同起迄組合的車次類型（分別為 A→B、A→C、B→A、C→A、D→A），構成不同的營運車次節線（ S_T ）組合，另為了測試迴送節線（ S_R ）的選擇，之於接續以及各累積里程計算上的正確性，本案建立規劃週期內共 12 個無法達成各站起迄總量守恆之營運車次，故計有營運車次節線 12 條並刻意創造必要的迴送，又每車次均僅有 1 組車的需求。而後，依據可行的時間點將週期內置入迴送節線共計 16 條（每日 8 條）。檢修時間設定為每兩小時內可完成、油料填充則設定一小時內可完成，依照此概念並參考表 6-2 之車站功能，陸續加入各檢修節線（ S_I ）以及油料填充節線（ S_O ）。又本例僅為測試，故限制各維修場站日間只具備處理一輛車的容量，夜間則沒有維修容量的限制。而因為這是一個兩天的路網，故將存有跨夜節點與其對應的跨夜節線（ S_A ）存在，其他尚包含設有等候節線（ S_W ），以構成此測試路網，如圖 6-1 所示。為本研究為了更清晰呈現圖 6-1 之網路，並沒有將虛擬起始節點與迄點加入該圖中描繪，此二節點所創建出的節線各

自連結至 A 車站各時間帶的節點。

表6-2 案例一基本車站與場站功能資訊

車站	相對機務段 座標位置 (順行為正值)	可否執行 1A 級檢修	可否執行 油料填充	可否執行 跨夜儲車	備註資訊
A	0 公里	可執行	可執行	可執行	機務段位置
B	+209 公里	可執行	可執行	可執行	-
C	+364 公里	可執行	可執行	可執行	-
D	+376 公里	不可執行	不可執行	可執行	-

本案例中假設機務段有 6 組車輛可投入營運、求解週期為 2 日，車輛運用規則部分假設各運用路徑的累積天數上限為 2 日、1A 級檢修累積天數上限為 1 日、1A 級檢修累積里程上限為 400 公里，油料填充累積里程上限為 400 公里。又成本資訊部分假設每次每組車檢修成本為 1,000 元、每組車每公里迴送成本為 100 元。詳細資訊茲整理如下表所示。

表6-3 案例一輸入參數值

參數類別	參數項目	參數數值
需求限制	週期內總車次數需求	12 車次
	週期內總車組數需求	12 車組
車隊限制	車隊大小 (H)	6 組車
週期限制	求解週期 (k)	2 日
運用規則	運用路徑累積天數上限 (B^{Ap})	2 日
	1A 級檢修累積天數上限 (B^{At})	1 日
	1A 級檢修累積里程上限 (B^{Lt})	400 公里
	油料填充累積里程上限 (B^{Lo})	400 公里
成本資訊	單位檢修成本 (C^l)	1,000 元/次
	單位迴送成本 (C^R)	100 元/公里

6.2.2 案例一求解結果

本研究使用套裝軟體 GAMS (General Algebraic Modeling System) 並在 2.10 GHz CPU 及 8 GB RAM 的個人電腦編譯程式碼，藉由 CPLEX 9.0 之平台求解 (GAMS Development Corporation, 2008)。求解成果如圖 6-2 所附，在最小化成本的目標下求解每週期內將產生 12 次檢修、以及 24 延車組公里的迴送，共計成本 14,400 元，每日最大用車數為 4 組車。

本案共規劃出四條運用路徑，以運用路徑 1 (粉紅色部分) 為例，兩天的運用週期內共經由 4 個車次任務節線、2 次等待節線 (恰好皆於 C 站)、2 次 1A 級檢修任務節線 (恰好皆在 A 站執行檢修)，以及 2 次 C 站與 D 站間 12 公里的迴送任務節線，另於 A 站歷經自第一日至第二日的跨夜節線。統整該運用路徑共花費檢修成本 2,000 元、迴送成本 2,400 元，其餘各運用路徑規劃成果均如圖 6-2 所呈現。

在此，為了比較各種數學模式之優劣，並呈現本研究於 5.4 節提出之演算法的效力，透過表 6-4 分別比較：混合整數規劃直觀模式 (4.3.2 節)、二元整數規劃加速模式 (4.3.3 節) 以及本研究擬定之基於變數產生法的求解演算流程 (5.4 節)。比較依據面對本案相同的問題結構，包括採用各種方式求解將產生的決策變數、限制式數量，以及最重要的求解時間，由於三者皆可以求得最佳解，故在此並不考量比較解的品質。

比較前兩數學模式之統計資訊，雖採用混合整數規劃直觀模式所需要的決策變數較少，但絕大多的變數都屬於整數變數 (用以處理各運用路徑內的累積資訊問題)，其擁有較複雜的可行解空間組合，透過 CPLEX 9.0 最佳化套裝軟體執行規劃求解時並觀察其求解過程，會發現求解過程中雖然很容易找到某組初始解，但其後的改善速度極慢，以本案例即須花費 988 秒的時間而言，並不適合應用於實務問題。

相較之下，二元整數規劃加速模式雖然採用較多的決策變數，但因為其全部都是二元整數（模式統計中的整數變數為目標函數的右端值），故在求解過程中僅為零一的決策，且限制式的總數也因為逐點累積的運用相關變數，變成一次計算，相對而言下降了許多，在相同的環境下，求至最佳解共耗時 19 秒，比起混合整數規劃法更適合使用以求解實務上較大規模之問題。又本研究另測試若將油料填充問題忽略（相當於求解電聯車組），求解時間僅需 14 秒，其更具有競爭優勢。

本研究所擬定之演算法，基於變數產生法已將問題解構為主問題與子問題，故不適合在此比較決策變數與限制式數量，故無法於下表中呈現。由於其子問題模式基礎係建立在良好的二元整數規劃模式之上，主問題則為單純的集合包覆問題，求解流程實質更改善了二元整數規劃模式所具有的缺失（請參閱 4.3 節、5.4 節之陳述），僅需 10 秒的時間便可求得最佳解。又本研究另測試若將油料填充問題忽略之求解時間僅需 8 秒。有鑑於此結果，後續實務案例分析，將以本研究 5.4 節所提出的演算法求解車輛運用路徑規劃問題，詳如後章所述。

表6-4 採用不同演算機制求解案例一之成果比較

模式統計資料	混合整數規劃	二元整數規劃	變數產生法
	直觀模式 (4.3.2 節)	加速模式 (4.3.3 節)	求解流程 (5.4 節)
限制式數量	5,746	3,237	-
二元決策變數數量	786	19,842	-
整數決策變數數量	2,305	1	-
求解時間*（秒）	988	19	10

*註：本研究所判斷之求解時間，係以求得最佳解的時間計算。

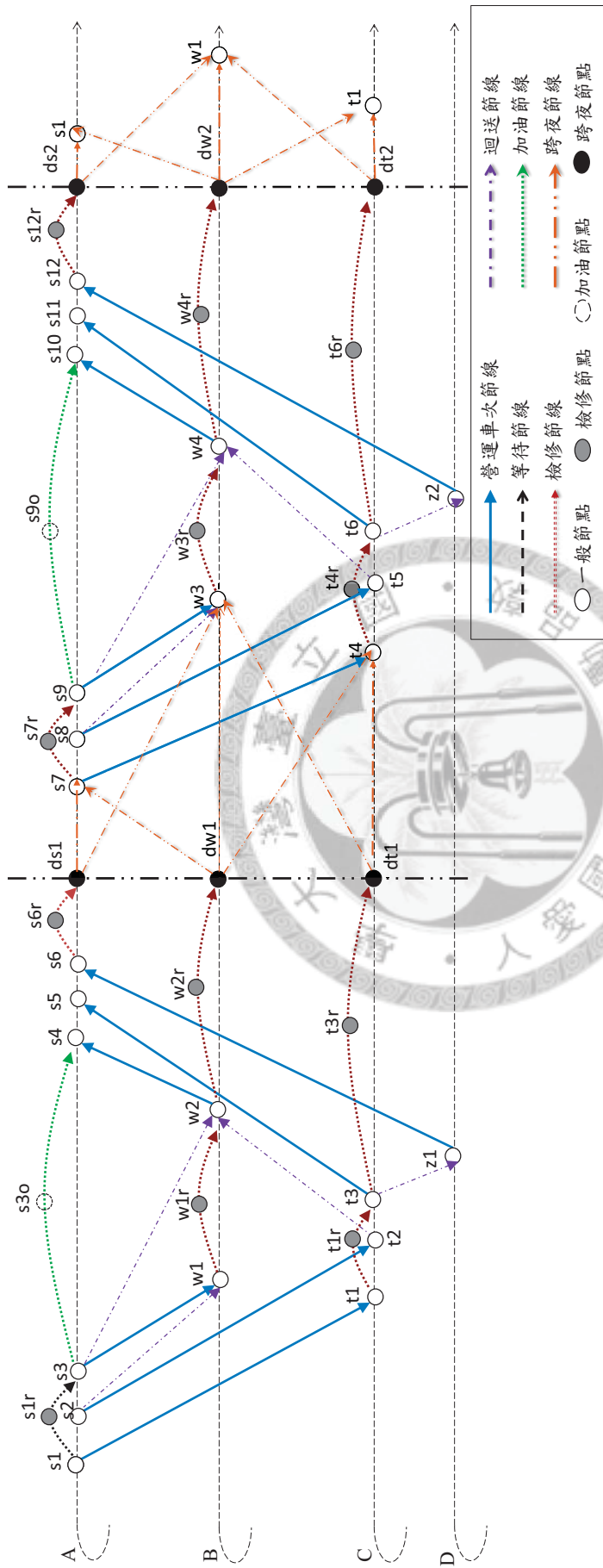


圖 6-1 案例一網路規劃示意圖

(註：為了清晰呈現，本網路圖未將虛擬節點繪製於其中)

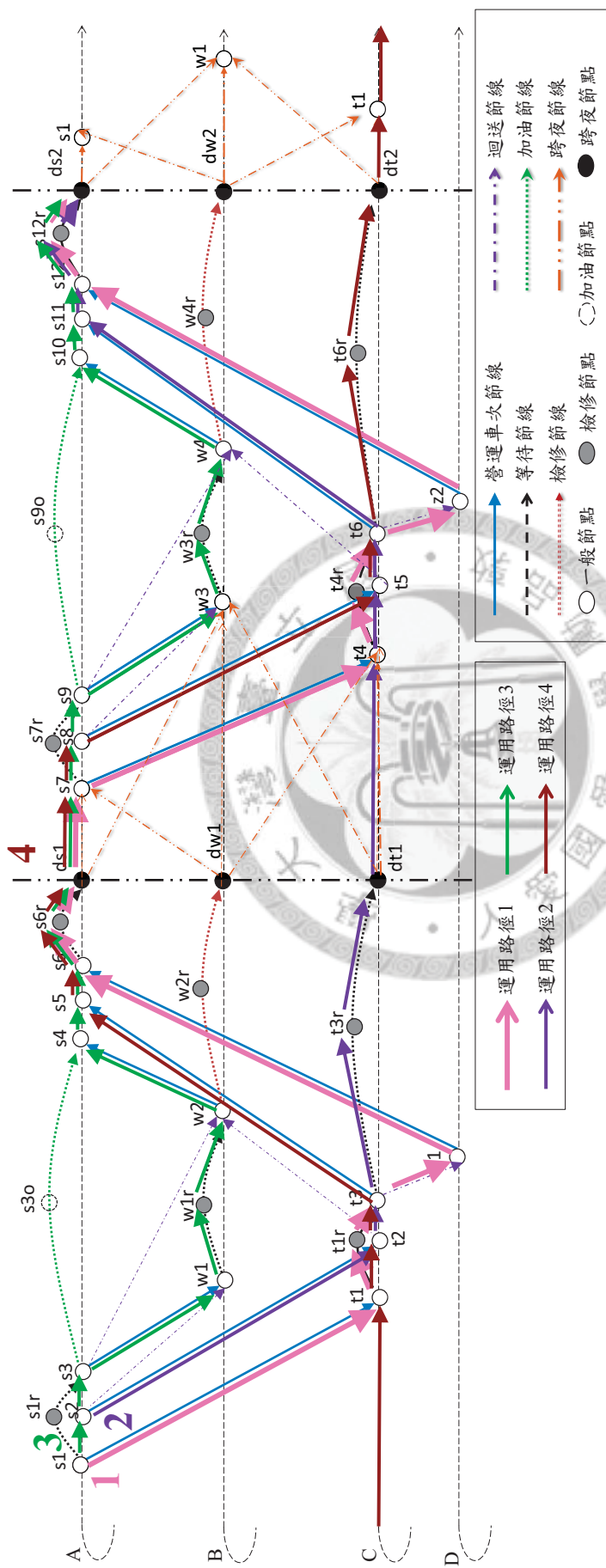


圖6-2 案例一求解結果

(註：為了清晰呈現，本網路圖未將虛擬節點繪製於其中)

6.3 案例二：花蓮機務段 DR2900 與 DR3000 型柴聯自強號車隊

根據第三章實務作業回顧所及，僅有以柴油驅動的車輛才必須執行油料填充任務，故自數學規劃的角度切入，求解柴油驅動的機車或車組，相較於規模相同但以電力驅動的車輛，實質上更具複雜度，即必須耗費更多的計算時間以執行規劃，而對於數學規劃而言，多出的限制式亦同樣為今實務作業人員手排運用表時需額外考量的問題。

本研究為確立數學模式與演算法在實務案例的可行性，本節遴選臺鐵局現行所需考量油耗問題的車輛中，規模最龐大的 DR2900、DR3000 柴聯自強號車隊，基於兩者之控制系統與動力規格基本上完全相容，在運用的安排上兩車型可彼此連掛（故可視為同個車隊）。該車型為動力分散式車組，以三節車廂為一組作為營運之最小單位，目前隸屬於花蓮機務段。



圖6-3 以三節為一組的 DR2900、DR3000 型柴聯自強號車組

6.3.1 案例二輸入參數資訊

隸屬於花蓮機務段 DR2900、DR3000 柴聯自強號車組，其服務範圍涉及北迴線、花東線、南迴線與縱貫線南段等區間，擔當非電氣化區間的主要自強號客車。上述車隊服務的範圍內可作為營運車次起站與迄站者，依據順行方向排列包括樹林調車場、花蓮車站、台東車站、知本車站、新左營車站以及臺南車站，其以花蓮車站為參考點，給定其餘路網中各車站相對位置（假設順行方向為正值），以及各場站所具備關於檢修、油料填充與跨夜儲車等不同的性質與功能，如下表 6-5 所列。

表6-5 案例二基本車站與場站功能資訊

車站	相對機務段 座標位置 (順行為正值)	可否執行 1A 檢修	可否執行 油料填充	可否執行 跨夜儲車	備註資訊
樹調	-209 公里	可執行	可執行	可執行	-
花蓮	0 公里	可執行	可執行	可執行	所屬機務段
台東	+155 公里	可執行	可執行	可執行	-
知本	+167 公里	不可執行	不可執行	不可執行	-
新左營	+323 公里	可執行	可執行	可執行	-
台南	+361 公里	不可執行	不可執行	不可執行	-

本案例依據臺鐵民國 100 年 9 月 28 日改點之時刻表作為輸入資料，該次改點後，DR2900、DR3000 柴聯車組之時刻表係以「七天」為循環週期，週期內由綜合調度總所所安排指定使用 DR2900、DR3000 車隊運轉者，每日有 13 至 15 個車次需求不等，各車次所要求的車組數依運量預測安排有 2 至 4 組之不同（即掛載 6~12 節不等的車廂），七日共計 102 個車次、280 個柴聯車組需求。

DR2900 與 DR3000 該時期共計有 31 組車 93 節車廂，並全數歸花蓮機務段所有，若以維持 90% 的平均妥善率估算，每日最多可使用車組數不得超過 27 組，故以其作為總車隊數的上限。另依據臺鐵於安排運用規劃之慣性，每個運用路徑以不超過 4 日為限，又臺鐵車輛檢修規則中對自強號柴聯車組之限制，目標車隊中各車組每運轉 1,800 公里或 3 日以內需進行一次 1A 級預防性檢修，油耗情況可計算為每隔 900 公里左右需進行一次油料填充（依據本研究實務訪談結果為 960 公里左右，在此作較保守的估計）。相關參考數據可見表 6-6 所列。另本研究參酌現有運用表的迴送時間、與時刻表中現行路線容量的空檔，安排可能的迴送節線。

而成本項的考量部分，目前臺鐵的會計制度係基於平均攤銷法考量各子成本，然基於蕭國文（2010）分析臺鐵機務成本於實務運用上的帳務性質，鑑於現有制度無法妥善攤提於單一支屬單位（如本研究所考量發生於機務處的成本），故其建

議採用作業基礎成本制度 (activity-based costing) 建立成本項目，能更準確地進行細部成本的推算。本研究採用該文所建議計入的成本項與調整係數加以核算，並考量柴聯車組之特性，另扣除各級檢修費用後，可得其單位車組迴送成本約為每公里 80 元。而單位檢修成本無法採用現有臺鐵的會計制度推算，故以檢修之延人工時與作業員之薪水進行推估，約為 1,023 元。上述兩者亦將作為輸入，如表 6-6 所列。

表6-6 案例二輸入參數值

參數類別	參數項目	參數數值
需求限制	週期內總車次數需求	102 車次
	週期內總車組數需求	280 車組
車隊限制	車隊大小 (H)	27 組車
週期限制	求解週期 (k)	7 日
運用規則	運用路徑累積天數上限 (B^{Ap})	4 日
	1A 級檢修累積天數上限 (B^{At})	3 日
	1A 級檢修累積里程上限 (B^{Lr})	1,800 公里
	油料填充累積里程上限 (B^{Lo})	900 公里
成本資訊	單位檢修成本 (C^l)	1,023 元/次
	單位迴送成本 (C^R)	80 元/公里

6.3.2 案例二求解結果

本研究使用套裝軟體 GAMS 並在 2.10 GHz CPU 及 8 GB RAM 的個人電腦編譯程式碼，藉由 CPLEX 9.0 之平台求解 (GAMS Development Corporation, 2008)。採用本研究於 5.4 節所提出之求解演算法，所收斂之各運用路徑如附件二所附，而彙整各比較資訊，如下表 6-7 所示。

表 6-7 案例二求解成果比較

項目	人工安排		本研究求解結果		改善幅度
週期內檢修任務	97	次	53	次	45.36%
週期內迴送任務	912	延車組公里	912	延車組公里	0.00%
單日最高用車數	24	組車	20	組車**	16.67%
總成本(含檢修、迴送)	172,191	元	127,179	元	26.14%
求解時間(含油料填充安排)	1	日*	181	分	-
求解時間(不含油料填充安排)	-		47	分	-

* 註：人工安排時間依據規劃者經驗略有不同，故不做改善幅度的推算，本案例的規劃時間約需耗費一個工作天。

** 註：實務作業中若某日某車所執行之運用路徑恰為其末日者，其結束運用依規定執行 1A 級檢修後，部分車輛尚可安排至其餘當日較晚開始執行之運用路徑，依此手動計算單日最高用車數為 20 組車；然又部份機務段在調配安排時，會事前限定單一車輛每日只能執行一個運用路徑，即完成上述檢修後隔日才能再做使用，故以此計算之單日最高用車數為 23 組車；然兩者均較人工安排之 24 組車略有改善。

表 6-7 彙整本研究之求解結果，顯示每週期可省去 44 次的檢修作業，較人工安排減少 45.36% 的檢修成本，相當於總成本的 26.14%。在不違背累積檢修天數的限制下，演算過程迫使每個車組在使用過程中，盡可能的服務滿 1,800 公里在執行檢修，多數進機務段檢修之車輛，其累積里程數可達 1,600 公里以上，此為檢修次數下降的主因。又人工安排與基於本研究之求解機制，所求得之總迴送距離均為 912 延車(組)公里，檢視原有的車次規劃，兩者均已達到最小迴送距離。另由於檢修次數的減少，致使每日使用的總車輛數亦隨之降低，原先透過人工安排單日最高用車數為星期六、日的 24 組車(依調配實務慣例計算)，在透過本研究所擬定的求解機制運算後，可下降為星期日的 20 組車，此計算方式乃設定各日結束運用之車輛，經檢修後可即時調整執行當日後續車輛調配之任務；但倘若考量臺鐵路部分機務段預備車輛使用慣例，部分機務段限制每日每車僅能執行一個運用路徑者，其單日最多用車數則為 23 組車，本研究現行車隊限制式亦以此為標準給定較嚴格的限制；兩者的結果均較現有情況用車數較少，所節省下的用車將可提供後續執行調配規劃時能更多的車輛使用彈性。

透過本研究所提出之演算法，其求解時間在考量全模式（包含油料填充問題）的情況僅耗時 181 分鐘，相較於臺鐵實務規劃者於本案例大約得花一個工作天的時間，顯見本案具有相當大的加速成效。然若先行將油料填充節線內化，可將解題時間降到 47 分鐘，其兩者在本案所解出的正解恰好相同。在此，本研究可提供不同時間敏感度不同的使用者，可選擇其中適合的求解方式。

6.4 案例三：新竹機務段 EMU500 與 EMU600 型電聯區間車車隊

相較於求解柴聯車組的運用規劃，電聯車車組本身可以先行忽略油料填充的相關課題，又部分機務段所擁有的電聯車車隊規模未必較前節為大，然實務上安排區間車營運的電聯車隊運用規劃問題，相較於前節所規劃自強號車組是為更大更複雜的難題。歸咎其原因，在於其涉及可作為起迄的可行車站數眾多，不同起迄組合的車次亦相當多元，又同一個機務段的車輛存在有跨線營運的可能，在累積里程的計算上，以及接續安排的彈性上，對於執掌的作業員而言是為難題。

本研究在此須針對上述課題為本進而測試，故遴選臺鐵局現行電聯區間車車隊，服務於新竹機務段的 EMU500、EMU600 型電聯車車隊求解，其配予該車隊所需擔任的車次任務，所涵蓋服務範圍自彰化經順行至羅東，網路覆蓋之複雜程度為各機務段中之最廣。基於兩者可連掛的安排在過去具有先例，在此亦視為同個車隊，此二車型均為動力分散式車組，以四節車廂為一組作為營運之最小單位。



圖6-4 以四節為一組的 EMU500、EMU600 型電聯車組

6.4.1 案例三輸入參數資訊

隸屬於新竹機務段 EMU500、EMU600 型電聯車組，其服務範圍服務範圍涉及北迴線、縱貫線北段、山線、海線以及六家支線等區間，作為通勤列車使用。

上述車隊服務的範圍內可作為車次起站與迄站者，包括羅東車站、福隆車站、基隆車站、七堵車站、樹林調車場、中壢車站、新竹車站、苗栗車站、三義車站、彰化車站與六家車站等十一個車站。其以新竹車站為參考點，給定其餘路網中各車站相對位置（假設順行方向為正值，經由特定路徑者將另行註明），以及各場站所具備關於檢修與跨夜儲車等不同的性質與功能，如下表 6-8 所列。

本案例依據臺鐵民國 100 年 9 月 28 日改點之時刻表作為輸入資料，該次改點後，EMU500、EMU600 電聯車組之時刻表係以「七天」為循環週期，為了彰顯求解問題之效率性，並同時得到一個全域考量的結果，本節案例亦加入其運用表中同意可由 EMU500、EMU600 電聯車組替換行駛的 EMU700 型車所肩負之車次。綜合以上，每日將有 103 至 108 個車次需求不等，各車次所要求的車組數依其運量預測安排有 1 或 2 組之不同（即掛載 4 或 8 節車廂），七日共計 744 個車次、978 個車組需求。

表6-8 案例三基本車站與場站功能資訊

車站	相對機務段 座標位置 (順行為正值)	可否執行 1A 檢修	可否執行 跨夜儲車	備註資訊
彰化	-110 公里	可執行	可執行	經由海線
	-105 公里			經由山線
苗栗	-52 公里	不可執行	可執行	-
三義	-34 公里	不可執行	可執行	-
新竹	0 公里	可執行	可執行	所屬機務段
中壢	+39 公里	不可執行	可執行	-
樹調	+66 公里	可執行	可執行	-
七堵	+100 公里	可執行	可執行	-
基隆	+106 公里	不可執行	可執行	-
福隆	+135 公里	不可執行	不可執行	經由北迴線
羅東	+183 公里	不可執行	不可執行	經由北迴線
六家	+10 公里	不可執行	不可執行	經由六家線

EMU500 與 EMU600 該時期配屬於新竹機務段所有者共計有 15 組車，由於該機務段部分車次，依當時運用表所述，亦可托予 EMU700 行電聯車代駛，故保有維修時調度上的一定彈性，故本研究在此不再考慮平均妥善率。然相對而言，本案求解之車次中，亦加入可為替換使用的 EMU700 型電聯車所承續的運用，為求公平起見，須將每日運用於此類編組的 6 組車在此加入（原運用為期三天、每天兩組），故假設每日可使用車輛數為 21 組車。另依據臺鐵於安排運用規劃之慣性，每個運用路徑以不超過 4 日為限，又臺鐵車輛檢修規則中對電聯車組之限制，目標車隊中各車組每運轉 1,800 公里或 3 日以內需進行一次 1A 級預防性檢修。最後，由於電聯車組不需要考慮油耗問題，故相關資訊可忽略不計。相關參考數據可見表 6-9 所列。另本研究參酌現有運用表的迴送時間、與時刻表中現行路線容量的空檔安排可能的迴送節線。

在成本項的處理上，本案例亦根據蕭國文（2010）之文獻，採用作業基礎成本制度，並依其建議計入的成本項與調整係數加以核算，考量電聯車組的特性，另扣除各級檢修費用後，可得其每車組的單位迴送成本約為每公里 166 元。而同前節所述，有關單位檢修成本部分，其無法採用現有臺鐵的會計制度推算，故仍以檢修之延人工時與作業員之薪水進行推估，約為每次 1,023 元。上述兩者亦將作為輸入，如表 6-9 所列。

表6-9 案例三輸入參數值

參數類別	參數項目	參數數值
需求限制	週期內總車次數需求	744 車次
	週期內總車組數需求	978 車組
車隊限制	車隊大小 (H)	21 組車
週期限制	求解週期 (k)	7 日
運用規則	運用路徑累積天數上限 (B^{Ap})	4 日
	1A 級檢修累積天數上限 (B^{A_l})	3 日
	1A 級檢修累積里程上限 (B^{L_l})	1,800 公里
成本資訊	單位檢修成本 (C^l)	1,023 元/次
	單位迴送成本 (C^R)	166 元/公里

6.4.2 案例三求解結果

本研究使用套裝軟體 GAMS 並在 2.10 GHz CPU 及 8 GB RAM 的個人電腦編譯程式碼，藉由 CPLEX 9.0 之平台求解 (GAMS Development Corporation, 2008)。採用本研究於 5.4 節所提出之求解演算法，所收斂之各運用路徑如附件三所附，而彙整各比較資訊，如下表 6-10 所示。

表6-10 案例三求解成果比較

項目	人工安排	本研究求解結果	改善幅度
週期內檢修任務	54 次	37 次	31.48%
週期內迴送任務	144 延車組公里	144 延車組公里	0.00%
單日最高用車數	20 組車	16 組車	20.00%
總成本 (含檢修、迴送)	79,146 元	61,755 元	21.98%
求解時間	1 日*	175 分	-

*註：人工安排時間依據規劃者經驗略有不同，故不做改善幅度的推算，本案例的規劃時間約需耗費一個工作天

上表彙整採用本研究所擬定的演算法求解結果，顯示每週期可省去 20 次的檢修作業，較人工安排減少 31.48% 的檢修成本，相當於總成本的 21.98%。在不違背累積檢修天數的限制下，演算過程迫使每個車組在使用過程中，盡可能的服務滿 1,800 公里在執行檢修，多數進機務段檢修之車輛，其累積里程數可達 1,400 公里以上，此為檢修次數下降的主因。本案相較於前節求解柴聯車組在子問題中所造成的束縛限制式 (binding constraint) 並不相同，前者以檢修的累積里程為主，而本案的束縛限制則有部分係發生在累積天數，探究其原因係因為區間車輛每個車次的行駛距離較短，且承擔的車次較為零散，故部分車輛無法在三日內行駛達 1,800 公里，其概念與實務訪談時與規劃者之經驗相同。

又人工安排與基於本研究之求解結果，所獲得的總迴送距離均為 144 延車(組)公里，檢視原有的車次規劃，兩者均已達到最小迴送距離。另由於檢修次數的減

少，致使每日使用的車輛數亦隨之降低，原先透過人工安排單日最高用車數為平日的 20 組車（依調配實務慣例計算），在透過本研究所擬定的求解機制運算後，其下降為同為平日（星期二與星期三）的 16 組車，可提供其他車輛在執行後續調配規劃時更多使用彈性。

由於本研究求解之目標車型是為電聯車組，故油料填充相關的油耗路徑及其限制式可在子問題中全數忽略，故即便在較大規模的本例，亦僅需 175 分鐘即可求得最佳解。本案例所承擔的總檢修次數雖較前案較小，但更複雜的起迄結構與車次接續，導致人工安排這個運用規劃大約需執行一個工作天左右，顯見本案有相當大的加速作業成效。

6.5 案例綜合討論

透過上述各案例的求解結果顯示，本研究所擬定的三種求解方法，以 5.4 節所提出基於變數產生法與 Gilmore- Gomory 演算流程之演算機制為最佳，將可大幅降低運用路徑規劃過程中的處理時間。透過該演算法所收斂出的運用路徑求解結果，在本章所求解之案例中均可被證實為一組最佳解，對於初級檢修成本的部分能提供相當幅度的改善，根據附件二與附件三所呈現求解出之運用表顯示，每組車在規範許可的範圍內，幾乎都運用到較高的里程或達到累積天數之上限才執行檢修，相當於每組車都多分擔了部分的營運里程，其亦能同時達到降低單日用車數的成效。而在迴送成本的部分，有鑑於過去臺鐵局機務處的實務作業人員已給予相當不錯的迴送任務排定，故在此的改善空間不大，又本研究之求解結果均可與人工安排相當，均維繫在最低的迴送成本。

然分析本研究之模式目前尚存有改善空間，由於最佳化的結果希望每個車組都能夠從事最有效的運用，故其排定的運用編組非常靈活，相對於原人工安排的運用表，其拆編掛車組的次數將大幅增加，對機務段或車站人員而言或許是為負

擔，業務量的增加亦有可能將造成反彈。另最佳化過程中並未考量人員運用規劃，機班安排是否可能會有超時的疑慮，並不在本案中作為限制式以為考量。

故本研究在此建議，實務規劃人員可將現階段的研究成果，其車次與任務的串接過程作為一組初始解參考以為修改，此舉能同時達到減少規劃時間，並維繫規劃者之調整彈性，實務上排班技術最為精進的日本軌道運輸營運業者亦採用類似的方法執行規劃。本研究將詳細的使用方式於下章提出，研究者亦期許未來可以逐步改善精進數學模式與演算機制，並能更為貼近實務之用。





第七章 結論與建議

車輛是為軌道運輸中最昂貴的設備之一，然而其資源規劃作業在傳統較封閉的鐵路產業中實屬細膩，過去多有賴有經驗的作業員，透過人工執行決策以安排運用或調配任務。基於上述原因，我國從事軌道運輸相關的研究中，較少涉及車輛資源使用或運用效率相關的課題，其中在「車輛運用路徑規劃」的議題上，更是完全沒有任何相關研究或技術報告的涉獵。又縱觀國外相關的學術研究，大多數的文獻在運用規劃的課題上大多有所省略，部分文獻甚至沒有考慮到軌道運輸系統的營運特性，以致其餘求解出的結果無法應用以支援實務決策。

探討「運用路徑規劃問題」，其透過有經驗的規劃者可以擬定出一條不錯且具有一定水準的運用表，然由於需求預測之成果難以預料，故當其擔負較複雜的營運班表，以及無序的車輛組成時，其規劃作業過程費時、費工，且人工作業並無最佳化的演算背景，難以確保所獲得的解為一組全域最佳解。

故本研究統整運用問題所需考量的因子擬定決策架構，並基於變數產生法中的 Gilmore- Gomory 演算流程，發展一個運用路徑規劃的求解演算法（如 5.4 節所示），透過輸入時刻表、基礎設施資訊、各種運用規則、維修限制、車輛耗油特性以及成本資訊等，將可輸出一組基於最佳化決策的循環式運用表。又本研究所研發之決策支援工具與數學模式，在於求解滿足車組需求下，最小化檢修成本與迴送成本之和，其並不考慮其他成本項，希望求得一個最具車輛使用「效率」的一組運用路徑。其應用於臺鐵局的實務案例求解，並與實務規劃成果相互比較，本研究提出之求解演算機制將可維繫最小的迴送成本，並節省 31%~45% 的檢修次數，相當於節省總成本項中約 22%~25% 的花費，在每日最大用車數上也具有 10%~20% 的改善，又求解時間亦坐落在一個可接受的範圍以內，可接受用以在實務作業中輔助營運者進行決策之用。

7.1 結論

本研究探討運用路徑規劃問題，並透過數學規劃法與解構技術，發展出一套有效的求解機制。逐一檢視於緒論所提及之各研究目的，於本節彙整研究過程中所獲得的重要成果，彙整計有以下六項結論。

結論一：車輛「運用路徑規劃」於軌道運輸規劃流程中的定位，實屬「營運性層級」，其用以反應實務上軌道營運業者對時刻表進行更動後，必須對車輛的使用進行之有效率的調整。

過去個文獻對於運用路徑規劃問題之混淆，主要係源自其逕自結合部分的後端工作，如車輛購置、服務品質提升等，這些問題掩蓋了原運用路徑規劃議題之重要性，且對實務單位而言，上述額外工作多為獨立在各子部門，能與運用問題作一完整的切割，故不宜列入本議題作為討論。單純的運用路徑規劃應屬營運性層級的決策，為實務規劃者在時刻表變動的過程中必要的配套業務之一。

結論二：影響軌道車輛運用路徑規劃問題之重要子議題，包含「車次接續問題」、「空車迴送問題」、「初級檢修問題」以及「油料填充問題」。

本研究透過彙整過去文獻並進行實務訪談結果，於 4.2 節收斂出以上四項影響運用路徑規劃的關鍵因子，其須以「單一車輛」的觀點出發，於接續的過程中確保時間及空間上的可行性，以完成車次接續或可能的空車迴送，並涵蓋所有需求。又某條運用路徑的過程中若涉及較長的期程，必然將考慮將「初級檢修」或「油料填充」等任務安排進該運用路徑之中。過去的研究著重於前兩項議題，對於後兩項限制的涉獵較小，並未能從單一車輛的角度出發，此為其較不適用於實務之主因之一。

結論三：基於運用路徑規劃問題具有時間、空間等多維度的結構，採用「網路問題」建立其問題架構與數學模式，實為得宜的作法。又根據問題特性採用「圓形

時空網路圖」為基礎，較傳統的作法能大幅解省變數以及限制式的數量，將能有效增進後續求解時間。本研究應用其發展「混合整數規劃直觀模式」及「二元整數規劃加速模式」等兩套方法進行求解，其後者具有較高的解題效率，然將其直接應用於大型規模的案例中仍不敷使用。

多數的文獻指出網路問題與多元物流模式，其能有效的輔助運用問題之求解，本研究選用圓形時空網路建立問題架構，將「節線表示任務」擬定兩種不同的最佳化數學模式，分別為「混合整數規劃直觀模式」以及「二元整數規劃加速模式」。兩者最大的不同之處在於累積資訊（以檢修累積里程為例）的計算，前者透過簡單而直觀的概念，各節點每經歷一節線便「逐節點累加」正確的累積里程，並依此於各節點確保其不超過給定之上限；後者則設定虛擬節點，以利其在最後「一次加總」某個路徑或子路徑的累積里程值，並藉該結果確保最後加總的結果不超過給定之上限。測試結果以後者為佳，但其仍具有變數規模過大的隱憂，對於實務大規模問題的求解仍受限制。

結論四：運用路徑規劃問題屬於「變數複雜」問題，變數產生法相較於其他的解構技術更能夠有效的改善求解時間。以其拆解本研究之「二元整數規劃加速模式」，將能使求解過程同時擁有「多元物流法」以及「路徑模式法」之優勢，該方法無論在求解時間或是精確度上，經測試均具有相當的績效，足以應付支援軌道運輸業實務規劃問題。其亦便於在運用路徑中依據各車型車種，作更彈性的調整。

變數產生法適用於處理變數複雜的數學規劃問題，其首先刪除複雜的變數空間，並透過各迭代求解縮減成本，逐步加入對原（主）問題具有效益的變數集合，能有效的改善求解時間，非常適合應用於本研究所處理之運用路徑規劃問題。本研究透過子問題求解對主問題最具有改善效益的運用路徑，主問題則決策子問題傳入之各路徑的用車數，並傳遞需求訊息予子問題。前者利用原多元物流法之問題結構，後者則應用路徑模式法中集合包覆問題的策略，涵蓋兩者之求解優勢。

另因決策運用路徑的步驟全數透過子問題處理，此舉將能便於數學模式面臨不同車型車種時，無論進行參數或數學模式的調整皆具相當彈性。

結論五：採用變數產生法拆解運用路徑規劃問題時，應顧及子問題（創造有效率的運用路徑）的問題規模及求解時間，依本研究之測試成果，以每迭代創造一條運用路徑的方法最為有效。

變數產生法的求解過程中將多次求解子問題以判讀縮減成本，子問題規模過大時，其將可能拖累整體的求解時間，然其決策的範疇小於一條運用路徑時則無法維繫各運用累積資訊的合理計算。本研究經測試後亦認為「各迭代創造一條運用路徑」並將其加入主問題的方法最為有效。

結論六：本研究於 5.4 節透過變數產生法發展出一套「車輛運用路徑規劃的求解演算法」，將其導入實務案例測試，該結果相較於人工規劃而言，將能大幅地降低求解時間，亦可有效改善總檢修成本、並維繫最小迴送里程數，並可透過運用實務問題特性證明其收斂至最佳解。此外，由於檢修前運用里程數的提升，致使每日的用車數量亦能降低。可知本研究除了給予低成本的車輛運用方式外，亦給予更靈活的車輛調度。本方法具有導入運用路徑規劃之實務作業中輔助決策之能力。

本研究透過求解臺鐵局較大規模的實務案例，以民國 100 年 9 月 28 日改點後的時刻表，輔與路線、檢修場站資訊作為輸入，藉以驗證數學模式於面臨實務問題之實用性。實務案例二求解現有最大規模的柴聯自強號車隊，可在三小時左右收斂獲得最佳解，其運用表除了可維繫現有的最低迴送成本外，在檢修成本部分有 45.36% 的改善，又單日使用最高車數也得以有效的下降。而後於實務案例三中求解電聯車組，可將油耗相關之限制先行移除，此舉應證數學模式使用上的彈性，並反應差不多的求解結果，維繫現有的最低迴送成本，並使檢修成本與總成本項下降，單日使用最高車數亦下降之，給予更靈活的車輛調度彈性。

7.2 研究貢獻

本研究為國內首篇探討運用路徑規劃課題之學術研究，其透過文獻回顧法、實務訪談法逐步收斂影響本問題之各項重要的決策因子，並透過數學規劃法建立決策模式，而後採用變數產生法解構問題以精進求解時間。彙整有以下六項貢獻。

貢獻一：本研究並盡可能完整地彙整近四十年內，國內外從事車輛運用路徑之相關文獻，藉此理解問題之特性並找出重要的決策因素，統整結果亦可作為相關後續研究之範本作為參考，亦可給予實務人員比較各國鐵路系統之特性，作為其規劃作業之改善基礎。

本研究盡研究者所能，回顧近四十年來各從事運用路徑問題相關之文獻，根據其特性依車種進行分類，並逐步彙整出其所考慮之目標函數、限制問題以及可能用以求解的數學方法。另以魚骨圖的結構彙整出五大重要子議題，包括：「車次間接續問題」、「車次間迴送問題」、「初級檢修問題」、「車種問題」以及「其他問題」。上述成果將有助於後續研究者更能清楚的瞭解本問題之特性，並以本研究作為參考依據，進而選定特定的變數，而研擬其後續研究課題，對於實務規劃人員者亦可透過本回顧，比較不同軌道系統間重視之項目，亦可考量加以參酌其中的某些決策機制。

貢獻二：本研究訪談臺灣鐵路局機務處從事「車輛運用路徑規劃」之作業員，彙整其製作運用表之人工決策過程，並基於數學邏輯繪製為流程圖，另透過實務規劃者的角度了解從事規劃時所考量因素，統整結果亦可作為相關後續研究之範本作為參考，或作為實務人員發展相關教材之基礎。

臺鐵局的車輛運用規劃實由機務處所負責，規劃工作係發生於每次改點之後，其以改點前的運用表作為依據，透過「保存不受改點影響的運用路徑」、「修正受改點影響的運用路徑」、「新建並強化運用路徑」等三個程序完成新的運用表規劃。

各個運用路徑內包括有出車、收車、營運、等待、迴送、清潔、檢修、油料填充以及編組等不同的任務，基於作業員之決策邏輯，可彙整之決策五大因子分別為「空間因子」、「時間因子」、「維修規劃因子」、「車隊運用率因子」，以及專門為柴油動力車輛所衍生之「油耗因子」。

上述成果將有助於後續研究者，能基於實務操作的立場，更清楚的瞭解本問題之特性與操作流程，進而選定特定的變數研擬後續研究課題。而又近期其餘研究課題之文獻中，亦有基於人工規劃機制發展啟發式演算法之例，本研究可作為此類文獻之基石，以成就後續更多的研究發展。對於實務規劃者而言，本研究在此可用以輔助師徒傳授的運用規劃問題，提供一個紙本的彙整，實務人員可以此為本擴充內容以為員訓教材，給予更完善的作業交接。

貢獻三：本研究彙整學術文獻與作業之特性，研擬車輛運用路徑規劃問題之決策架構，除了汲取過去文獻之優勢外，本研究另具有以下特性與研究突破：

- (1) 可同時應用於輔助不同車種的車輛進行決策、
- (2) 以單一車輛為單位更細緻的考量運用、油耗及檢修規則上的限制、
- (3) 加入各車種油耗情況以為考量因子、
- (4) 在各機、檢段足以負擔的各個時段加入可能的檢修或油料填充考量，給予更有彈性的安排。

本研究所擬定之運用路徑規劃決策模組，保有過去研究所彙整出重要的子問題，包括「車次接續問題」、「空車迴送問題」以及「初級檢修問題」。另根據實務訪談，新增「油料填充問題」於決策模式予以考量，另將「車種問題」一般化致使研發之系統可用支援不同車種之規劃。又其於檢修與油耗問題的考量上，不同於過去研究，參酌實務作業採用單一車輛為基礎進行評估，該作法對於本問題將可給予更準確的限制。另本研究給予更具靈活的檢修與油料填充考量，相較過去僅提供特定時段（如夜間）或空間（如車輛所屬機務段）檢修之方法，將更能展

現其彈性。以上成果均未曾在過去研究中完整考量，可為本研究在學術領域之突破，並為更貼近實務作業之方式。

貢獻四：本研究採用圓形時空網路模式建立問題結構，並藉多元物流法建立兩種不同形式的數學模式，分別為「混合整數規劃直觀模式」以及「二元整數規劃加速模式」，其均透過實證測試驗證其正確性，並兼顧使用上之彈性，具有延伸於其他求解機制之潛力。

本研究所研發之兩模式在實證案例測試後，均確立為正確的數學模式，在求解過程中相較於 5.4 節所擬定之求解演算法耗時較多，故沒有用以再行分析實務案例的求解績效。然就學理上而言，「混合整數規劃直觀模式」的累加特性，與人工規劃的邏輯極為相似，可作為後續研究者作為以人工規劃為基礎的啟發式演算法發展，為一個具有潛力的方法；「二元整數規劃加速模式」其具有決策變數均為二元變數的特性，適合基因演算法之解題機制，亦具有發展潛力。又上述兩種模式所擬定出之限制式，均可為之拆解以作為實務規劃者的輔助計算或限制。

貢獻五：本研究透過變數產生法發展出一個車輛運用路徑規劃的求解演算法，其同時擁有多元物流網路問題中採用二元整數規劃模式的優點，亦具備路徑模式法（以指派問題建立數學模式）中，透過集合包覆的概念快速求解之績效。另本研究基於運用路徑規劃問題特性，對該演算法設定了較快速的收斂機制，更進一步的可以化解求解過程中的長尾現象，並透過實證案例測試並驗證其正確性。

基於二元整數規劃數學模式的解題效率有限，故本研究在此另行發展解構機制以增進求解效率。在透過分析各種適用於整數規劃的解構機制後，本研究選擇使用變數產生法中的 Gilmore-Gomory 演算流程，其應用於本問題較他者能提供最具效率的改善成果。在此求解流程中，主問題基於路徑模式法，用以判斷各營運車次的需求量是否被滿足，求解其選擇最小成本的決策組合；子問題則透過原有二元模式對運用路徑的限制，決策對主問題最具改善效率的一組運用路徑並傳入

主問題。在收斂機制部分，為了化解變數產生法常見的長尾現象，本研究透過運用路徑規劃問題之特性，設定上、下界之差值只要低於任何一個最小的改善範圍即可收斂，該範圍其或為檢修、或為一個極小的迴送成本，基於解的組合不同可有所差異。

本演算法在測試網路中進行驗證，其可較「混合整數規劃直觀模式」以及「二元整數規劃加速模式」在更短的時間內獲得最佳解或近似最佳解，故以其作為決策支援模式之主體，其可有效的改善求解時間，並能化解單純採用商用軟體求解全模式的缺點，其無論在學術研究的理論背景應用或於實務上的系統推廣，均相當重要。

貢獻六：本研究為我國第一篇從事運用路徑規劃問題相關的學術研究，並發展出首套運用路徑的最佳化決策模式，並將其延伸發展出車輛運用路徑規劃的求解演算法，其求解時間相較於過去人工作業有較大的節省。透過實務案例測試結果可維繫最低成本的迴送安排，並有效的節省檢修次數，在每日最大用車數上也具有改善。依此確立了其正確性與適用性，本演算法將能有效的輔助作業員進行運用路徑規劃決策，以從事最低成本、最具使用效率的循環式運用表安排。

其測試結果確立了其正確性與適用性，並在案例二所代表最大的柴聯車隊，以及案例三所代表涵蓋區間最長之電聯車隊，皆可於三小時左右完成求解，在不考慮人力資源安排，並將拆編掛時間先行內化的情況下，其求解較人工規劃為快速。以上案例測試得以證明本研究能有效的輔助營運者進行運用路徑規劃之決策，以從事最低成本、最具使用效率的運用表安排，並具有實務推廣之潛力。

7.3 建議

基於結論與研究貢獻，本節將針對軌道運輸業者應用本研究所發展出之演算法暨決策支援架構，以執行車輛運用路徑規劃之安排，先行提出其使用上的建議，

並討論其所具有的其他延伸功能，於 7.2.1 節所示。而後 7.2.2 節本研究將針對現行成果之不足，提出後續研究方向，以及延伸本研究之可能建議，研究者亦期望後續車輛資源運用之課題能逐步為學術研究與實務規劃單位所重視。

7.3.1 實務應用建議

本研究基於軌道運輸營運業者，於決策支援架構之應用上提出以下建議：

建議一：應用本決策支援模式輔助一般車輛運用路徑規劃作業。

軌道運輸營運業者若欲採用本決策支援模式，輔助運用路徑規劃決策，其需在求解過程中，逐次求解「一個機務段的一個車型」，又可彼此連掛運用之車輛在本研究中亦視為一個車型。其準備輸入資料可參考圖 4-3 之架構圖，預備如：時刻表、期望車型、各車次車輛需求、路線硬體設施（含車隊規模）、車輛檢修規定、機檢段硬體設備負荷量、車輛油耗現象、單位迴送成本、單位檢修成本等資料；各項資訊可分別透過運務處綜合調度所、轄內車站、機務處車輛科、行車技術科、各機務段與檢車段等單位分別蒐集獲取。求解過程可參酌運用問題之特性，先行省略部分不必要的限制（例如：電聯車組可省去油耗相關的運算限制），而後進行求解並輸出一組週期性運用表。上述使用的流程，可依照車種等級由高至低使用（例如由自強號、區間車至貨物列車），並重複以上步驟逐步將所有機務段、車型逐一安排求解直到完成。

又部分軌道運輸業者在從事運用路徑規劃時，會參酌考量人力之安排，或基於某個大致的規劃成果逐步調整人力運用。本研究建議此類軌道營運業者，可利用本研究發展之演算法，先行求解出一組運用路徑規劃，並將該成果視為起始解以為參考。其後的做法非常有彈性，決策者可在原有的模式中彈性地逐步加入限制，或刪除某些基於人力運用中不可能發生的節線再行求解，亦可透過人工的機制調整起始解中的各運用路徑（類似乎時人工規劃，先行排定一組運用後再做微

調)，或自行發展基於人工機制的啟發式系統，加以檢核並改善路徑。

本研究在此亦就某些具有特殊實務考量或限制的軌道系統，其應如何應用本決策支援模式靈活的執行決策，加以分析討論如後：

- (1) 若同機務段中的同型車在排定運用時，依車次需求分作「可執行拆掛作業」或「不可執行拆過作業」(在機務段也不會再作拆掛)等兩種情況時。應用本研究可將兩種車次與其可用的車輛先行分作兩組，並將兩者視為不同的車輛分別進行求解運算。
- (2) 若運用過程中面臨某些接續的車次或任務，其受限於廠站特性、軌道容量、接續時間或其他特定因素，已經評估不得執行拆編掛及彈性的調度，且必須由一個特定的車組執行時，可事先將這一連串的任務視為「一個任務」，將第一個任務的起始時間帶與位置定義為該節線的起始節點，最後一個任務的中止時間帶與位置定義為該節線的中止節點，再行根據所包覆的任務給予此節線適當的性質，諸如營運里程、跨夜等。
- (3) 當面臨車站本身不可執行拆編掛任務時，若車站不具儲車性質，可採用上述作法將接續的兩個車次視為一個任務應用之，或不給予車站內其餘的等候節線，以限制車輛必須如期發出，由於無法執行拆編掛的車站通常規模也比較小，在臺鐵實務作業中這樣的案例較常發生。然而，若車站同時具有儲車性質時，可單純給予多條不同的等候節線，並另行設限於該站發車的各車次起始節點，只能被其中一條等候節線接續之；此類車站在實務中並不多見，又其等候所造成的車次間接續時間多半過長，無法構成有效率的運用路徑，故本研究建議實務人員仍採用先進先出的機制實為合理。
- (4) 當車站無法執行跨夜儲車時，則無須給予車站內的跨夜節線，惟須確認此類車站若無法達成進、出車站的總車輛數守恆時，須確保車輛可以在跨夜

時間點前迴送至其他場站。

建議二：應用本決策支援模式輔助超大規模之車輛運用路徑規劃作業。

當遇到超大規模的問題時，如何確保有效的求解時間是為實務規劃上的一大難題，此將可透過前述本研究具有高彈性的求解機制予以化解。除了建議一所提出的應用之機制外，為了減少大規模問題的解題時間，本研究建議可將改點前舊有運用表的運用路徑資料作為參考解，先行加入主問題以作為一組初始解，此舉將可避免無初始解時，子問題需於各迭代中先行將主問題未滿足的需求量逐一填滿所花費的求解時間，當問題規模較大時，一個週期內的時刻表有可能為數百條運用路徑所包覆，故逐次產生得以包覆所有車次需求的運用組合，其實是非常可觀的一項作業。

本研究在此提出的作法可確保運用路徑規劃，係基於舊有運用表開始演進，舊有規劃結果可能因為部分車次被移除後為一組不可行解，然其可於子問題中再行逐步加入對求解主問題最有貢獻的一組運用路徑，求解過程中將得以很快速的產生出一組可行解並再逐漸改善解的品質，又其餘較彈性的作法尚包括在滿足所有需求限制後（無處罰成本項），給予求解時間上限作為考量，同時確保其在指定時間內求解完成，並至少擁有一組滿足需求的可行解。

實質上，本方法亦可應用於一般規模的運用路徑規劃，如同人工規劃的機制，自改點前的運用表作為參考，逐步更新到改點後的運用表，其作業時間將會比從無至有更具效率，然本方法並不適用於完全作過任何規劃的一組新時刻表，故本研究在此仍提供上述兩種求解方法供使用者參考選用。

建議三：應用本決策支援模式輔助其他作業。

基於我國無論臺鐵局或台灣高鐵公司目前每逢連續假日時，都有某些固定的加班車班次、以特定的營運車次及時段運行，這些事前安排好的加班車，對於軌

道營運業者而言，多半另行爲這些車次獨立安排特有的運用路徑規劃。然而，該做法多半要耗費其他的車輛，且在僅行駛一、兩個往返隨即進入檢修的狀況下，並不是一個有效率的運用方式。故在此建議營運者可採用本研究之演算法，評估加班車之運用，並對於該車隊於加班週期內進行求解，進而了解是否有多開行一個運用路徑的必要，或許這些車次經由重新規劃後，將具有內化至某些運用路徑之內的可能。而被減少使用的車輛，又可再行輔助其他的加班車作業，以解決連續假日一票難求的問題。

除此之外，本模式可用於車輛自兩機務段間移轉，或有重新購車的考量下，用以評估對於其對於運用路徑規劃成本項的影響，任何的車輛變動均可以加以事先考量，以求取最有效的規劃。

建議四：對於第六章於臺鐵局測試案例結果之使用上建議。

本研究基於對臺鐵局實務案例之測試結果，在不考慮人力資源規劃之安排下，可以有大幅檢修次數的降低，以及週期內用車總數之改善，另在解題時間上亦有所突破，能維持在一個實務規劃者可接受的範圍之內。然其需加入人力安排之限制時，可考慮依循建議一之流程，在決策支援架構的數學模式中，逐步加入限制或拿去某些節線，以求規劃之實用性。除此之外，在此可提出幾項需特別留意的地方。首先，本研究為追逐最有效率的車輛運用模式，故於本案中暫時不含拆編掛成本，然其保有拆編掛保留的時間，可確保運用路徑規劃之成果中含有拆編掛作業安排者，將得以在各指定車站完成重新編組作業。

除此之外，在車次接續的過程中，大致可以看出某些有效率的運用路徑，其係由某幾個特定的營運區間共同組合而成，此資訊可回饋予前端排定時刻表者做為參考，試圖在下次改點前安排可作為類似接續的客貨時刻。

7.3.2 後續研究建議

本研究在此對於後續將進行運用路徑規劃研究者，提出以下可行的建議：

建議五：加入人力資源運用以及拆編掛限制，以考量更完整的決策框架。

本研究在前節所提出對於現有模式尚不足之處，其一為未考量後續人力資源規劃問題，然本研究現行認為其可係參酌建議一的作法，透過後續人工作業的微調予以化解，此與目前日本軌道運輸業之作法相仿；其二為本研究未考量拆編掛成本問題，部分鐵路營運業者於拆編掛之人力配置，其以工作班為基礎，工作人員係領取固定之薪資，故增加拆編掛理當不應增加成本，然過多的拆編掛作業是否會造成工作人員因辛苦有所反彈，研究者在此並不得而知。故上述兩者可為後續研究者參考，予以考量加入其他的限制條件或變數於運用路徑規劃研究問題中，以求決策支援模式更能滿足實務規劃之結果。

建議六：加入考量跨機務段的配車與容量的協調，以利車輛運用規劃問題可以同時求解多個機務段，並藉此進行各機務段間配車的整合以及平均妥善率的調整。

本研究現階段所發展出的數學模式架構目前仍是以單一機務段為出發點，然當多個機務段同時擁有相同或類似車隊時，此舉不若車種具有優先順序，對各機務段而言，無論先就某段的配車先行求解，其於路線容量、檢修容量上的使用，較其他機務段而言均不公平，因而在此平行機制的限制下，未來應以發展能同時求解多個機務段的演算方法為佳。

建議七：結合運用路徑規劃與其後之車輛調配規劃，合成一組「車輛資源運用規劃」決策支援框架，以期更有效率的改善車輛之使用。

在車輛資源運用規劃問題中，實質包含上層的運用路徑規劃問題，以及下層的車輛調配問題兩部分。本研究實質針對上層問題進行特性分析，進而收斂並研

擬出適當的決策因子，而後發展求解演算法以為決策；而下層問題在過去的研究中則僅有較少的文獻涉獵（曾微雯，民 100；Lai et al., 2011）。其兩者的作業在本研究及過去各研究中的數學建模並無直接相關，實務規劃者於決策時亦將此二機制分開考量（如臺鐵局將上層問題分予車輛科或行車技術科負責、下層問題則由各機務段自行擬定），然其兩者基於後續欲面臨更高級的檢修問題時，其檢修累積里程或天數上必須相互配合，又未能保持各機務段之起迄總量守恆的運用路徑規劃，亦無法造就出良好的調配規劃。是故，最佳的運用規劃雖與最佳的調配規劃具有一定程度的關聯，然其關係並非絕對。此外，改點過程中涉及兩運用表切換時，該日的調配作業需另就兩運用表之銜接問題加以考量，並研擬合理的運用切換計畫，此舉亦為必須被此決策框架所囊括的重要問題。茲若以上，本研究建議後續工作者，將兩者結合為一發展「車輛資源運用規劃」決策支援框架，以期更有效率的改善車輛之使用。

建議八：發展啟發式的演算法以加速求解。

本研究測試各種運用路徑規劃的解構機制，遴選出其中績效最佳的變數產生法作為發展本案求解演算法之基礎，其方法具有相當深厚的作業研究學理背景以為支持。然近來啟發式演算法相關的研究，在作業研究相關的文獻上亦相當興盛，故在此亦建議後續研究者可基於本研究第四章所發展之兩數學模式，發展相對應的求解機制，依照目前數學模式之特性，「混合整數規劃直觀模式」適合應用於發展一套基於人工排班機制的演算流程，其用於逐點累加里程的做法，在過去從事調配問題的文獻中有藉由類似機制，進而發展啟發式演算法之先例（曾微雯，民 100）。「二元整數規劃加速模式」則因為其決策變數均為二元變數的特性，適合用於發展基因演算法。上述為建議藉由本研究既有之數學模式發展演算法之提議，供後續研究者作為參考。

參考文獻

1. Ahuja, R. K., Cunha, C.B., and Sahin, G. 2005. Network models in railroad planning and scheduling. *Tutorials in Operations Research*. 1: 54-101.
2. Ahuja R. K., Dewan P., Jaradat M., Jha K. C., and Kumar A. 2006. An optimization-based decision support system for train scheduling. Technical report, Innovative Scheduling, Gainesville, FL, USA.
3. Alexandersson, G., Hultén, S., Fearnley, N. and Longva, F. 2010. Impact of regulation on the performances of long-distance transport services: A comparison of the different approaches in Sweden and Norway. *Research in Transportation Economics*. 29(1): 212-218.
4. Alfieri, A., Groot, R., Kroon, L., and Schrijver, A., 2002. Efficient circulation of railway rolling stock. ERIM Technical report - Research in Management. Erasmus Research Institute of Management, Rotterdam, Netherlands.
5. Alfieri, A., Groot, R., Kroon, L., and Schrijver, A. 2006. Efficient circulation of railway rolling stock. *Transportation Science*. 40(3): 378-391.
6. Alvelos, F. 2005. Branch-and-Price and Multicommodity Flows. Ph. D. Thesis. Engenharia de Produção e Sistemas - Área de Investigação Operacional. Universidade do Minho, Portugal.
7. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) 2007. Transportation - Invest in our future: America's freight challenge. Washington, D. C., USA, AASHTO.
8. Barnhart, C., Johnson, E.L., Nemhauser, G.L., Savelsbergh, M.W.P., and Vance, P.H. 1998. Branch-and-price: column generation for solving huge integer programs. *Operation Research*. 46(3): 316-329
9. Benders, J.F. 1962. Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems. *Numerische Mathematik*. 4(1): 238-252.
10. Ben-Khedher, N., Kintanar, J., Queille, C., and Stripling, W. 1998. Schedule Optimization at SNCF: from conception to day of departure. *Interfaces*. 28(1): 6-23.
11. Berger, R.T., Coullard, C.R., and Daskin, M.S. 2007. Location-routing problems with distance constraints. *Transportation Science*. 41(1): 29-43.
12. Blakely, E.J., and Leigh, N.G. 2010. Planning local economic development: Theory

and practice. 4th ed. California, USA, SAGE Publications, Inc.

13. Boole, J.M.P. 1980. The solution of a railway locomotive scheduling problem. *Journal of the Operational Research Society*. 31(10): 943-948.
14. Budai, G., Maróti, G., Dekker, R., Huisman, D., and Kroon, L. 2010. Rescheduling in passenger railways: the rolling stock rebalancing problem. *Journal of Scheduling*. 13(3): 281-297.
15. Bussieck, M. R., Winter, T., and Zimmermann, U.T. 1997. Discrete optimization in public rail transport. *Mathematical Programming*. 79: 415-444.
16. Cacchiani, V., Caprara, A. and Toth, P. 2010. Solving a real-world train-unit assignment problem. *Mathematical Programming Series B*. 124: 207-231.
17. Cacchiani, V., Caprara, A. and Toth, P. 2012. A Lagrangian heuristic for at train-unit assignment problem. *Discrete Applied Mathematics*. In Press.
18. Cadarso, L., and Marín, Á. 2010. Robust routing of rapid transit rolling stock. *Public Transport*. 2(1-2): 51-68.
19. Cadarso, L., and Marín, Á. 2011. Robust rolling stock rapid transit networks. *Computers and Operations Research*. 38: 1131-1142.
20. Chen, D.S., Batson, R.G., and Dang, Y. 2010. Applied interger programming. 1st ed. Hoboken, New Jersey, USA, McGraw-Hill.
21. Chen, Y., and Alexander, W. 2012. Green infrastructure: The effects of urban rail transit on air quality. *American Economic Journal: Economic Policy*. 4(1): 58-97.
22. Cheng, Y. H., and Tsao, H. L. 2010. Rolling stock maintenance strategy selection and spares parts estimation. *International Journal of Production Economics*. 128(1): 404-412.
23. Chung, J. W., Oh, S. M., and Choi, I. C. 2009. A hybrid genetic algorithm for train sequencing in the Korean railway. *Omega*. 37(3): 555-565.
24. Cordeau, J.F., Soumis, F., and Desrosiers, J. 2000. A Benders decomposition approach for locomotive and car assignment problem. *Transportation Science*. 34(2): 133-149.
25. Cordeau, J.F., Desaulniers, G., Lingaya, N., Soumis, F., and Desrosiers, J. 2001a. Simultaneous locomotive and car assignment at VIA Rail Canada. *Transportation Research Part B: Methodological*. 35(8): 51-71.

26. Cordeau, J.F., Soumis, F., and Desrosiers, J. 2001b. Simultaneous assignment of locomotives and cars to passenger trains. *Operations Research*. 49: 531–548.
27. Crainic, T.G., and Roy, J. 1988. OR tools for tactical freight transportation planning. *European Journal of Operational Research*. 33(3): 290-297.
28. Dantzig, G.B., and Wolfe, P. 1960. Decomposition principle for linear programs. *Operations Research*. 8(1): 101–111.
29. Dejax, P.J., and Crainic, T.G. 1987. A review of empty flows and fleet management models in freight transportation. *Transportation Science*. 21(4): 227-247.
30. Desrosiers, J., Sournis, F., and Desrochers, M. 1984. Routing with time windows by column generation. *Networks*. 14: 545-565.
31. Desrosiers, M., and Soumis, F. 1989. A column generation approach to the urban transit crew scheduling problem. *Transportation science*. 23(1): 1-13.
32. Dumas, Y., Desrosiers, J., and Soumis, F. 1991. The pickup and delivery problem with time windows. *European Journal of Operational Research*. 54: 7–22.
33. Eidenbenz, S., Pagourtzis, A., and Widmayer, P. 2003. Flexible train rostering. *Proceedings of International Symposium on Algorithms and Computation, Lecture Notes in Computer Science*. 2906: 615-624.
34. Erlebach, T., Gantenbein, M., Hürlimann, H., Neyer, G., Pagourtzis, A., Penna, P., Schlude, K., Steinhöfel, K., Taylor, D.S., and Widmayer, P. 2001. On the complexity of train assignment problems. *Proceedings of International Symposium on Algorithms and Computation, Lecture Notes in Computer Science*. 2223: 390-402.
35. Everett, H.I. 1963. Generalized Lagrange multiplier method for solving problems of optimum allocation of resources. *Operations Research*. 11(3): 399-417.
36. Fioole, P.J., Kroon, L., Maro'ti, G., and Schrijver, A. 2006. A rolling stock circulation model for combining and splitting of passenger trains. *European Journal of Operational Research*. 174: 1281–1297.
37. Florian, M., Bushell, G., Ferland, J., Guerin, G., and Nastansky, L. 1976. The engine scheduling problem in a railway network. *INFOR*. 14(2):121-138.
38. Forbes, M.A., Holt, J.N., and Watts, A. W. 1991. Exact solution of locomotive scheduling problems. *Journal of the Operational Research Society*. 42(10): 825-831.
39. Freling, R., Lentink, R.M., Kroon, L.D., and Huisman, H. 2005. Shunting of

- passenger train units in a railway station. *Transportation Science*. 39 (2): 261–272.
40. GAMS Development Corporation. 2008. GAMS- A user's guide. GAMS Development Corporation: Washington, DC.
 41. Geng, J.C. 2008. Study on optimization of EMUs scheduling for passenger -dedicated line. *Journal of Xi-hua University Natural Science*. 27(6): 83-86.
 42. Gilmore, P.C., and Gomory, R.E. 1961. A linear programming approach to the cutting-stock problem. *Operations Research*. 9: 849-859.
 43. Gilmore, P.C., and Gomory, R.E. 1963. A linear programming approach to the cutting-stock problem- Part II. *Operations Research*. 11: 863-888.
 44. Givoni, M. and Rietveld, P. 2007. The access journey to the railway station and its role in passengers' satisfaction with rail travel. *Transport Policy*. 14(5): 357-365.
 45. Haase, K. Desaulniers, G., and Desrosiers, J. 2001. Simultaneous vehicle and crew scheduling in urban Mass Transit Systems. *Transportation Science*. 35(3): 286-303.
 46. Haghani A.E. 1989. Formulation and solution of a combined train routing and makeup, and empty car distribution model. *Transportation Research*. 23B(6): 433-452.
 47. Haghani, A.E. 1987. Rail freight transportation: a review of recent optimization models for train routing and empty car distribution. *Journal of Advanced Transportation*. 21(2): 147-172.
 48. Holmberg, K., and Yuan, D. 2003. A multicommodity network flow problem with side constraints on paths solved by column generation. *Journal on Computing*. 15(1): 42-57.
 49. Hong, S.P., Kim, K.M., Lee, K., and Park, B.H. 2009. A pragmatic algorithm for the train-set routing: The case of Korea high-speed railway. *Omega*. 37: 637-645.
 50. Huisman, D. 2007. A column generation approach for the rail crew re-scheduling problem. *European Journal of Operational Research*. 180: 163-173.
 51. Iacono, M., Levinson, D., and Geneidy, A. 2008. Models of transportation and land use change: A guide to the territory. *Journal of Planning Literature*. 22(4): 323-341.
 52. Jong, J.C., Suen, C.S., and Chang, S.K., 2012. A Decision Support System to Optimal Railway Stopping Patterns: Application to the Taiwan High Speed Rail. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. In

Press.

53. Kalvelagen, E. 2003. Column generation with GAMS. <http://www.amsterdamoptimization.com/pdf/colgen.pdf>, accessed 10 March 2011. Amsterdam Optimization Modeling Group.
54. Kuo, C.C., and Nicholls, G.M. 2007. A mathematical modeling approach to improving locomotive utilization at a freight railroad. *Omega*. 35: 472-485.
55. Lai, Y. C., Zeng, W. W., and Liu, K. C. 2011. Development of an operational rolling stock assignment model for Taiwan high speed rail. *Proceedings of 9th World Congress on Railway Research*. Lille, France.
56. Laporte, G., and Louveaux, F.V. 1993. The integer L-shaped method for stochastic integer programs with complete recourse. *Operations Research Letters*. 13: 133-142.
57. Lingaya, N., Cordeau, J.F., Desaulniers, G., Desrosiers, J., and Soumis, F. 2002. Operational car assignment at VIA Rail in Canada. *Transportation Research Part B: Methodological*. 36: 755-778.
58. Lu, A., and Marsh, A. 2011. Zen and the art of commuter rail operations: Taiwan Railways Administration's design, operations, and philosophy. *Proceedings of 90th Transportation Research Board*. Washington, DC, USA.
59. Maróti, G., and Kroon, L. 2005. Maintenance routing for train units: the transition model. *Transportation Science*. 39(4): 518-525.
60. Maróti, G., and Kroon, L. 2007. Maintenance routing for train units: The interchange model. *Computers and Operations Research*. 34(4): 1121-1140.
61. Meyer, M., and Miller, E. J. 2001. Urban transportation planning: A decision-oriented approach. 2nd ed. Boston, Massachusetts, USA, McGraw-Hill.
62. McCartney, S., and Stittle, J. 2012. 'Engines of Extravagance': The privatised British railway rolling stock industry. *Critical Perspectives on Accounting*. 23(2): 153-167.
63. Nishi, T., and Muroi, Y., and Inuiguchi, M. 2011. Column generation with dual inequalities for railway crew scheduling problems. *Public Transport*. 3(1): 25-42.
64. Otsuki, T., Aisu, H., and Tanaka, T., 2010. A search-based approach to the railway rolling stock allocation problem. *Proceedings of International Symposium on Algorithms and Computation, Lecture Notes in Computer Science*. 6509: 131-143.

65. Peeters, M., and Kroon, L. 2008. Circulation of railway rolling stock: A branch-and-price approach. *Computers and Operations Research*. 35: 538-556.
66. Poudenx, P. 2008. The effect of transportation policies on energy consumption and greenhouse gas emission from urban passenger transportation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 42(6): 901-909.
67. Profillidis, V.A. 2006. Railway management and engineering. 3rd ed. Hampshire, England, Ashgate Publishing Company.
68. Ramani, K.V. 1981. An information system for allocating coach stock on Indian Railways. *Interfaces*. 11(3): 44-51.
69. Ramani, K.V., and Mandal, B.K. 1992. Operational planning of passenger trains in Indian Railways. *Interfaces*. 22(5): 39-51.
70. Rastke, A., Horstel, J., and Schumacher, A. 1996. Optimised rostering and maintaining of high speed rail system. *Computers in Railways V*. 1: 403-409.
71. Rietveld, P. 2000. The accessibility of railway stations: the role of the bicycle in The Netherlands. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 5(1): 71-75.
72. Rouillon, S., Desaulniers, G., and Soumis, F. 2006. An extended branch-and-bound method for locomotive assignment. *Transportation Research Part B: Methodological*. 40: 404-423.
73. Rus, G., and Nombela, G. 2007. Is Investment in high speed rail socially profitable? *Journal of Transport Economics and Policy*. 41(1): 3-23.
74. Sahin, B., Yilmaz, H., Ust, Y., Guneri, A.F., and Gulsun, B. 2009. An approach for analysing transportation costs and a case study. *European Journal of Operational Research*. 193(1): 1-11.
75. Sato, K., and Fukumura, N. 2010. An algorithm for freight train driver rescheduling in disruption situations. *Quarterly Report of RTRI*. 51(2): 72-76.
76. Sato, K., and Fukumura, N. 2011. Freight locomotive rescheduling algorithm during disordered train operation. *Quarterly Report of RTRI*. 52(2): 81-85.
77. Schrijver, A. 1993. Minimum circulation of railway stock. *CWI Quarterly*. 3: 205-217.
78. Sun, K., and Li, H. 2010. Scheduling problems with multiple maintenance activities

- and non-preemptive jobs on two identical parallel machines. *International Journal of Production Economics*. 124(1): 151-158.
79. Sussman, J. 2000. Introduction to transportation systems. 1st ed. Boston, Massachustees, USA, Artech House.
80. Thomet, M.A. 1971. A user-oriented freight railroad operating policy. *IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society*. 1(4): 349-356.
81. Tsai, T.H., Lee, C.K. and Wei, C.H. 2009. Neural network based temporal feature models for short-term railway passenger demand forecasting. *Expert Systems with Applications*. 36(2): 3728-3736.
82. Wang, I.L., and Lin, I.C. 2010. Solving the railway cyclic crew rostering problem. *Proceedings of the 23rd International Chinese Transportation Professional Association Annual Meeting & the 8th Asia Pacific Transportation Development Conference*. Tainan, Taiwan.
83. Wey, W.M., and Chang, Y.H. 2009. A comparative location study for the joint development station of a mass rapid transit system: a case in Taichung City in Taiwan. *Environment and Planning B: Planning and Design*. 36: 573-587.
84. Wright, M.B., 1989. Applying stochastic algorithms to a locomotive scheduling problem. *Journal of the Operational Research Society*. 40(2): 187-192.
85. Xie, M., Mao, B., Ho, T.K., Chen, Z., and Bai, Y. 2010. Modeling circulation of train-set with multiple routing. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*. 10(3): 50-57.
86. Yu., G. 1998. Operations Research in the airline industry. Boston, Massachustees, USA, Kluwer Academic Publishers.
87. Ziarati, K., Soumis, F., Desrosiers, J., Grlinas, S., and Saintonge, A. 1997. Locomotive assignment with heterogeneous consists at CN North America. *European Journal of Operational Research*. 97: 281-292.
88. Ziarati, K., Soumis, F., Desrosiers, J., and Solomon, M.M. 1999. A branch-first, cut-second approach for locomotive assignment. *Management Science*. 45(8): 1156-1168.
89. Zhao, P., and Tomii, N. 2004. An algorithm for train-set scheduling on weekday based on probabilistic local search. *Systems Engineering-Theory and Practice*. 24(2): 123-129.

90. 日本車輛製造株式会社，台灣向け鉄道車両の受注に関するお知らせ，日本車輛製造株式会社新聞稿，平成 22 年（2011 年）。
91. 王國琛，結合限制規劃與數學規劃求解大型後艙空勤組員排班問題，國立交通大學運輸科技與管理學研究所碩士論文，民國九十一年。
92. 李治綱、林正章，鐵路系統列車服務計劃模式之發展與應用，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，行政院國家科學委員會，民國八十八年。
93. 李治綱、謝汶進，應用雙層次規劃於高速鐵路列車服務設計之研究，運輸計畫季刊，第三十一卷，第一期，頁 95-119，民國九十一年。
94. 何進郊，客貨車檢修，臺灣鐵路管理局員工訓練中心，民國七十八年。
95. 姜渝生，台灣地區整體軌道路網建構之重要課題，經濟前瞻，第九十七期，頁 101-104，民國九十四年。
96. 凌宇康，應用可靠度為中心維修方式規劃軌道車輛維修階層之研究—以台鐵電聯車動力系統為例，國立交通大學運輸科技與管理學研究所碩士論文，民國九十五年。
97. 凌瑞賢，運輸規劃原理與實務，鼎漢國際工程顧問股份有限公司出版，台北，民國九十三年。
98. 張有恆，軌道運輸管理，華泰文化事業股份有限公司，台北，民國九十七年。
99. 張倍瑜、李昱達、張學孔，台北大眾捷運後期路網替選方案之評估研究，中華民國運輸年會 98 年學術論文研討會，桃園縣，民國九十八年。
100. 張學孔，高速鐵路運量預測模式之檢核與發展，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，行政院國家科學委員會，民國八十八年。
101. 陶冶中、劉嵩瀚，固定與移動自動閉塞區間制下多車種列車運行之模擬模式研究，運輸計畫季刊，第三十七卷，第三期，頁 293-330，民國九十七年。
102. 葉珮婷，應用變數產生法求解有時間窗限制的收送貨問題，國立交通大學運輸科技與管理學研究所碩士論文，民國九十八年。
103. 曾微雯，研發台灣高速鐵路列車組指派最佳化模式，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文，民國一百年。
104. 蕭國文，臺鐵機務成本實務運用與分析，臺鐵資料，第三百四十四期，頁 53-70，民國九十九年。
105. 鍾慧諭、黃于真，鐵道運輸需求預測與分析，臺灣整體鐵道網規劃願景研討會，

新北市，民國一百零一年。

106. 鍾慧諭、陳柏君、葉叔達，鐵道路網規劃成果，臺灣整體鐵道網規劃願景研討會，新北市，民國一百零一年。
107. 盧宗成，捷運司機員排班問題之研究—以台北捷運公司為例，國立交通大學運輸科技與管理學研究所碩士論文，民國八十九年。
108. 蘇昭銘、程培倫、郭旻鑫，捷運系統列車排程決策支援系統，運輸計畫季刊，第三十卷，第二期，頁 409-437，民國九十年。





附錄一 臺灣鐵路管理局各型機車檢修週期表

表附 1-1 柴電機車、柴液機車、柴聯車、柴油客車檢修週期表

項目	檢修級別		檢修週期	機車型式		實行單位	
	名稱	簡稱		柴電機車 柴液機車	柴聯車 柴油客車		
定期檢修	一級檢修	1A	行車里程	1,500	1,800	機檢段	
			使用期間	3 日	3 日		
		1B	行車里程	15,000	/	/	機檢段
			使用期間	30 日			
	二級檢修	2A	行車里程	55,000	30,000	機檢段	
			使用期間	3 月	3 月		
		2B	行車里程	165,000	/	/	機檢段
			使用期間	9 月			
	三級檢修	3A	行車里程	330,000	120,000	機檢段 或機廠	
			使用期間	1.5 年	2 年		
		3B	行車里程	990,000	240,000	機檢段 或機廠	
			使用期間	4.5 年	4 年		
	四級檢修	4A	行車里程	1,980,000	480,000	機廠	
			使用期間	9 年	9 年		
4B		行車里程	3,960,000	/	/	機廠	
		使用期間	18 年				
臨時檢修	行駛檢修	行檢		必要時檢修	必要時檢修	機檢段	
	特別檢修	特檢		必要時檢修	必要時檢修	機檢段 或機廠	
<p>附註：</p> <p>(1) 本表視車種、型式、車況及運用情形由主管機關擬定之。</p> <p>(2) 行車公里數與使用日數先到者施行檢修。</p> <p>(3) 行車公里數得視機車運用及實際車況酌予增加百分之二十，但不得超過交通部頒布鐵路機車車輛檢修規則之最高限制。</p> <p>(4) 使用期間得扣除停用及滯留日數。</p> <p>(5) 停用及不常使用之車輛於使用前必須分別再執行一級或二級檢修。</p> <p>(6) 四級檢修得視車況作局部更新。</p> <p>(7) 柴電機車、柴液機車包括以下型號：R20、R100、R150、R180、R190、S200、S300、S400、DHL100</p> <p>(8) 柴聯車、柴油客車包括以下型號：DR2510、DR2700、DR2800、DR2900、DR3000、DR3100、DRC1000</p>							

表附 1-2 電力機車、推拉式車輛檢修週期表

項目	檢修級別		檢修週期	機車型式		實行單位
	名稱	簡稱		電力機車	推拉式車輛 (E1000)	
定期檢修	一級檢修	1A	行車里程	1,600	1,800	機檢段
			使用期間	3 日	3 日	
		1B	行車里程	45,000	45,000	機檢段
			使用期間	45 日	45 日	
	二級檢修	2A	行車里程	70,000	90,000	機檢段
			使用期間	3 月	3 月	
		2B	行車里程	210,000	270,000	機檢段
			使用期間	9 月	9 月	
		2C	行車里程	420,000	500,000	機廠
			使用期間	1.5 年	1.5 年	
	三級檢修	3B	行車里程	840,000	1,000,000	機廠
			使用期間	3 年	3 年	
	四級檢修	4A	行車里程	1,720,000	2,000,000	機廠
			使用期間	6 年	6 年	
4B		行車里程	3,440,000	4,000,000	機廠	
		使用期間	9 年	12 年		
臨時檢修	行駛檢修	行檢		必要時檢修	必要時檢修	機廠
	特別檢修	特檢		必要時檢修	必要時檢修	機檢段 或機廠
附註：						
(1) 本表視車種、型式、車況及運用情形由主管機關擬定之。						
(2) 行車公里數與使用日數先到者施行檢修。						
(3) 行車公里數得視機車運用及實際車況酌予增加百分之二十，但不得超過交通部頒布鐵路機車車輛檢修規則之最高限制。						
(4) 使用期間得扣除停用及滯留日數。						
(5) 停用及不常使用之車輛於使用前必須分別再執行一級或二級檢修。						
(6) 四級檢修得視車況作局部更新。						
(7) 電力機車包括以下型號：E200、E300、E400						

表附 1-3 電聯車車輛檢修週期表

項目	檢修級別		檢修週期	機車型式		實行單位
	名稱	簡稱		區間車	自強號及 EMU400	
定期檢修	一級檢修	1A	行車里程	1,800	1,800	機檢段
			使用期間	3 日	3 日	
		1B	行車里程	/	45,000	機檢段
			使用期間		45 日	
	二級檢修	2A	行車里程	90,000	72,000	機檢段
			使用期間	3 月	3 月	
		2B	行車里程	270,000	216,000	機檢段
			使用期間	9 月	9 月	
		2C	行車里程	500,000	430,000	機廠
			使用期間	1.5 年	1.5 年	
	三級檢修	3B	行車里程	1,000,000	860,000	機廠
			使用期間	3 年	3 年	
	四級檢修	4A	行車里程	2,000,000	1,720,000	機廠
			使用期間	6 年	6 年	
4B		行車里程	4,000,000	3,440,000	機廠	
		使用期間	9 年	12 年		
臨時檢修	行駛檢修	行檢		必要時檢修	必要時檢修	機廠
	特別檢修	特檢		必要時檢修	必要時檢修	機檢段或機廠

附註：

- (1) 本表視車種、型式、車況及運用情形由主管機關擬定之。
- (2) 行車公里數與使用日數先到者施行檢修。
- (3) 行車公里數得視機車運用及實際車況酌予增加百分之二十，但不得超過交通部頒布鐵路機車車輛檢修規則之最高限制。
- (4) 使用期間得扣除停用及滯留日數。
- (5) 停用及不常使用之車輛於使用前必須分別再執行一級或二級檢修。
- (6) 四級檢修得視車況作局部更新。
- (7) 區間車包括以下型號：EMU500、EMU600、EMU700
- (8) 自強號包括以下型號：EMU100、EMU1200、EMU300、TEMU1000



附錄二 案例二求解結果

求解成果仿現有臺鐵局運用表作為呈現，惟本研究所求解出每日所適用之運用路徑略有不同，故每張運用表均標明各運用路徑之「起始日」與「總行駛里程」。案例二共計有 43 條運用路徑，茲呈現如表附 2-1~表附 2-13 所示。

表附 2-1 案例二求解結果-週一運用表

運用 號碼	花蓮機務段 【DR2900、3000型】 柴聯車運用表 1					
	樹 調	花 蓮	台 東	知 本	新 左 營	台 南
D1AB (2x3)	<p style="text-align: right;">1,786km</p>					
D2A (3)	<p style="text-align: right;">1,792km</p>					
D3A (3)	<p style="text-align: right;">1,792km</p>					
D4A (3)	<p style="text-align: right;">1,786km</p>					

表附 2-2 案例二求解結果-週二運用表 (1/2)

運用號碼	花蓮機務段 【DR2900、3000型】 柴聯車運用表 2					
	樹調	花蓮	台東	知本	新左營	台南
D5A (3)	<p>10:05 205 06:23 17:49 244 23:00 12:45 215 07:30 17:49 244 23:00 06:12 302 09:02 21:58 307 16:15 06:12 307 16:15 本運用逢週二啟用 1,792km</p>					
D6AB (2x3)	<p>17:55 314 23:15 12:55 303 08:30 15:27 312 20:38 19:37 231 10:25 21:38 254 01:03 21:36 迴送油 20:52 本運用逢週二啟用 1,786km</p>					
D7A (3)	<p>10:05 205 06:23 12:50 228 19:03 12:45 215 07:30 12:50 228 19:03 06:12 302 09:02 21:58 307 16:15 本運用逢週二啟用 1,792km</p>					

表附 2-4 案例二求解結果-週三運用表 (1/2)

運用號碼	花蓮機務段 【DR2900、3000型】 柴聯車運用表 4					
	樹調	花蓮	台東	知本	新左營	台南
D11A (3)	10:05 12:50	205 06:23		228 22:00		
		12:55		303	油	08:30
		15:27		312		20:38
					21:36	迴送 油
		21:58		307	16:15	20:52
	本運用逢週三啟用					1,786km
D12A (3)		08:20		306	13:43	
					油	05:37
		12:10		301		06:10
		17:55		314	23:55	06:23
	19:37			231	10:25	油
	21:38			254	01:03	
	本運用逢週三啟用					1,786km
D13A (3)		08:20		306	13:43	
					油	05:37
		12:55		303		08:30
		15:27		312		20:38
					21:36	迴送 油
	19:37			231	10:25	20:52
	21:38			254	01:03	
	本運用逢週三啟用					1,786km

表附 2-5 案例二求解結果-週三運用表 (2/2)

運用 號碼	花蓮機務段 【DR2900、3000型】 柴聯車運用表 5					
	樹 調	花 蓮	台 東	知 本	新 左 營	台 南
D14A (3)	10:05 12:50	06:23 油 12:10 油 08:20 21:58	205 228 301 306 307		22:00 05:37 23:55 13:43 16:15	油 102 06:10 06:23
本運用逢週三啟用						1,786km
D15A (3)	10:05 12:50 12:45 17:49	06:23 油 215 244 06:12 21:58	205 228 油 215 244 302 307		19:03 07:30 23:00 09:02 16:15	油 油
本運用逢週三啟用						1,792km
D16A (3)	10:05 17:49 12:45 12:50	06:23 油 215 228 12:55	205 244 油 215 228 303		23:00 07:30 22:00 08:30	油
本運用逢週三啟用						1,792km

表附 2-6 案例二求解結果-週四運用表 (1/2)

運用 號碼	花蓮機務段 【DR2900、3000型】 柴聯車運用表 6					
	樹 調	花 蓮	台 東	知 本	新 左 營	台 南
D17A (3)	10:05 17:49 12:45 12:50	06:23 244 油 215 228	23:00 07:30		油 22:00	
		12:55	303		油 08:30	1,792km
	本運用逢週四啟用					
D18A (3)		17:55 12:10 17:55	314 301 314	23:15 05:37 23:55	油 102 油	06:10 06:23
	19:37 21:38	254	01:03	10:25		
	本運用逢週四啟用					
	1,786km					
D19A (3)	10:05 12:50	06:23 228		22:00 05:37	油 102	06:10 06:23
	12:10 08:20 21:58	301 306 307		23:55 13:43 16:15		
	本運用逢週四啟用					
	1,786km					
D20A (3)		15:27	312	21:36	迴送 油	20:38 20:52
	19:37 21:38	254	01:03	10:25		
	08:20 21:58	306 307		13:43 16:15		
	本運用逢週四啟用					
	1,786km					

表附 2-7 案例二求解結果-週四運用表 (2/2)

運用 號碼	花蓮機務段 【DR2900、3000型】 柴聯車運用表 7					
	樹 調	花 蓮	台 東	知 本	新 左 營	台 南
D21AB (2x3)		08:20 油	306 12:55 303 15:27 312		13:43 08:30 21:36 10:25	20:38 20:52 迴送 油
	19:37 21:38		231 254		01:03	
	本運用逢週四啟用					1,786km
D22A (3)	10:05 12:50	205 油	06:23 228 12:45 215 12:50 228	19:03 07:30		
		12:55	303		22:00 08:30	油
	本運用逢週四啟用					1,792km
D23A (2)	10:05 12:50	205 油	06:23 228 油	19:03 06:12		
	19:37 21:38		302 231 油 254	09:02 10:25 01:03		
	本運用逢週四啟用					1,482km

表附 2-8 案例二求解結果-週五運用表 (1/2)

運用號碼	花蓮機務段 【DR2900、3000型】 柴聯車運用表 8					
	樹調	花蓮	台東	知本	新左營	台南
D24A (4)	10:05 17:49 12:45 12:50 19:37 21:38	06:23 244 油 215 228	23:00 07:30		22:00 05:37 10:25	06:10 06:23 20:38 20:52
						3,008km
D25AB (2x3)		15:27 12:55 15:27 12:55	312 303 312 303		21:36 08:30 21:36 08:30	20:38 20:52 20:38 20:52
						1,444km
D26A (3)	10:05 17:49 12:45 12:50	06:23 244 油 215 228	23:00 07:30		22:00 16:15	油
						1,792km
D27AB (2x3)		08:20 12:10 17:55 19:37 21:38	306 油 301 314 231 254		13:43 05:37 23:55 10:25	06:10 06:23 油
						1,786km

表附 2-9 案例二求解結果-週五運用表 (2/2)

運用號碼	花蓮機務段 【DR2900、3000型】 柴聯車運用表 9					
	樹調	花蓮	台東	知本	新左營	台南
D28A (4)	<p>本運用逢週五啟用 3,300km</p>					
D29A (3)	<p>本運用逢週五啟用 1,786km</p>					
D30A (3)	<p>本運用逢週五啟用 1,736km</p>					

表附 2-10 案例二求解結果-週六運用表 (1/2)

運用號碼	花蓮機務段 【DR2900、3000型】 柴聯車運用表 10					
	樹調	花蓮	台東	知本	新左營	台南
D31A (3)	<p>08:20 ● 12:55 15:27 19:37 21:38 01:03 08:30 10:25 13:43 20:38 20:52 21:36 迴送油</p> <p>306 303 312 231 254</p> <p>本運用逢週六啟用</p> <p>1,786km</p>					
D32A (3)	<p>10:05 12:50 12:55 17:55 12:10 06:23 ● 22:00 23:55 05:37 06:10 06:23 08:30 油 油 102</p> <p>205 228 303 314 301</p> <p>本運用逢週六啟用</p> <p>1,786km</p>					
D33A (4)	<p>10:05 12:50 17:49 19:37 21:38 10:05 17:49 19:37 21:38 06:23 ● 22:00 22:45 01:15 油 06:12 09:02 10:25 01:03 01:03 06:23 23:00 油 06:12 09:02 10:25 迴送油</p> <p>205 228 313 302 231 254 244 254</p> <p>1A, 日檢</p> <p>本運用逢週六啟用</p> <p>3,300km</p>					

表附 2-11 案例二求解結果-週六運用表 (2/2)

運用號碼	花蓮機務段 【DR2900、3000型】 柴聯車運用表 11					
	樹調	花蓮	台東	知本	新左營	台南
D34AB (2x3)	<p>10:05 205 06:23 17:49 244 23:00 12:45 215 07:30 12:50 228 22:00 21:58 307 16:15 油 迴送 本運用逢週六啟用 1,792km</p>					
D35A (3)	<p>15:27 312 20:38 21:36 迴送 20:52 05:37 102 06:10 12:10 301 06:23 15:27 312 20:38 21:36 迴送 20:52 05:37 102 06:10 12:10 301 06:23 油 迴送 本運用逢週六啟用 1,596km</p>					



表附 2-12 案例二求解結果-週日運用表 (1/2)

運用號碼	花蓮機務段 【DR2900、3000型】 柴聯車運用表 12					
	樹調	花蓮	台東	知本	新左營	台南
D36A (3)		15:27			21:36	20:38 20:52
						迴送油
		12:55			23:55	08:30
		17:55			10:25	油
	19:37					
	21:38	01:03				
						1,786km
D37A (3)		17:55			21:36	23:15 20:38 20:52
						油
		12:55			10:25	08:30
		15:27				迴送油
	19:37					
	21:38	01:03				
						1,786km
D38A (3)	10:05	06:23			21:36	20:38 20:52
						迴送油
	12:50				22:00	油
		12:55			16:15	08:30
		15:27				油
	21:58					
						1,786km
D39A (4)	10:05	06:23			23:00	09:02 10:25
						油
	12:50				22:00	油
					22:45	油
					09:02	油
	19:37				10:25	油
	21:38	01:03				IA, 日檢
						油
	10:05	06:23			09:02	油
	17:49				10:25	油
	19:37					油
	21:38	01:03				油
						3,300km

表附 2-13 案例二求解結果-週日運用表 (2/2)

運用號碼	花蓮機務段 【DR2900、3000型】 柴聯車運用表 13					
	樹調	花蓮	台東	知本	新左營	台南
D40A (3)	<p>08:20 ● 306 13:43 01:15 313 22:45 油 12:45 215 07:30 12:50 228 22:00 油 05:37 102 06:10 12:10 301 06:23 本運用逢週日啟用 1,786km</p>					
D41A (3)	<p>10:05 205 06:23 ● 17:49 244 23:00 油 12:45 215 07:30 12:50 228 19:03 油 06:12 302 09:02 21:58 307 16:15 本運用逢週日啟用 1,792km</p>					
D42A (3)	<p>08:20 ● 306 13:43 21:58 307 16:15 油 10:05 205 06:23 12:50 228 22:00 油 05:37 102 06:10 12:10 301 06:23 23:55 本運用逢週日啟用 1,786km</p>					
D43A (3)	<p>08:20 306 13:43 油 12:55 303 08:30 15:27 312 20:38 21:36 迴送 20:52 油 19:37 231 10:25 21:38 254 01:03 本運用逢週日啟用 1,786km</p>					



附錄三 案例三求解結果

求解成果仿現有臺鐵局運用表作為呈現，惟本研究所求解出每日所適用之運用路徑略有不同，故每張運用表均標明各運用路徑之「起始日」與「總行駛里程」。案例三共計有 34 條運用路徑，茲呈現如表附 3-1~表附 3-21 所示。

表附 3-1 案例三求解結果-週一運用表 (1/4)

運用號碼	新竹機務段 【EMU500、600型】 機車運用表 1										
	羅東	福隆	基隆	七堵	樹調	中壢	新竹	六家	苗栗	三義	彰化
E1A (3)	09:03 1152 06:38										
	09:20 1163 11:36										
	14:29 1212 12:11										
	14:58 1221 17:23										
	21:54 1304 19:55										
	22:04 迴 22:14										
	06:05 1104 05:52										
	06:25 1121 09:25										
	12:29 1192 09:38										
	12:51 1201 15:17										
	18:10 1254 15:49										
	18:40 1263 21:07										
	06:20 06:40 1701										
	07:10 06:50 1702										
	07:20 07:40 1705										
	08:10 07:50 1706										
	08:20 08:40 1711										
	09:10 08:50 1712										
	09:20 09:40 1715										
	10:10 09:50 1716										
	10:20 10:40 1721										
	11:10 10:50 1722										
	11:20 11:40 1725										
	12:10 11:50 1726										
	12:20 12:40 1731										
	13:10 12:50 1732										
	13:20 13:40 1735										
	14:10 13:50 1736										
	14:20 14:40 1741										
	15:10 14:50 1742										
	15:20 15:40 1745										
	16:10 15:50 1746										
	16:20 16:40 1751										
	17:10 16:50 1752										
17:20 17:40 1755											
18:10 17:50 1756											
18:20 18:40 1761											
19:10 18:50 1762											
19:20 19:40 1765											
20:10 19:50 1766											
20:20 20:40 1771											
21:10 20:50 1772											
21:20 21:40 1775											
22:10 21:50 1776											
22:20 22:40 1781											
23:10 22:50 1782											
23:18 23:37 1785											
00:04 23:45 1786											
本運用逢週一啟用											
1,546km											

表附 3-2 案例三求解結果-週一運用表 (2/4)

運用 號 碼	新竹機務段 【EMU500、600型】 機車運用表 2											
	羅 東	福 隆	基 隆	七 堵	樹 調	中 壢	新 竹	六 家	苗 栗	三 義	彰 化	
E2A (3)								06:20	●	06:40	1701	
								07:10	┌───┐	06:50	1702	
								07:20	┌───┐	07:40	1705	
								08:10	┌───┐	07:50	1706	
								08:20	┌───┐	08:40	1711	
								09:10	┌───┐	08:50	1712	
								09:20	┌───┐	09:40	1715	
								10:10	┌───┐	09:50	1716	
								10:20	┌───┐	10:40	1721	
								11:10	┌───┐	10:50	1722	
								11:20	┌───┐	11:40	1725	
								12:10	┌───┐	11:50	1726	
								12:20	┌───┐	12:40	1731	
								13:10	┌───┐	12:50	1732	
								13:20	┌───┐	13:40	1735	
								14:10	┌───┐	13:50	1736	
								14:20	┌───┐	14:40	1741	
								15:10	┌───┐	14:50	1742	
								15:20	┌───┐	15:40	1745	
								16:10	┌───┐	15:50	1746	
								16:20	┌───┐	16:40	1751	
								17:10	┌───┐	16:50	1752	
								17:20	┌───┐	17:40	1755	
								18:10	┌───┐	17:50	1756	
								18:20	┌───┐	18:40	1761	
								19:10	┌───┐	18:50	1762	
								19:20	┌───┐	19:40	1765	
								20:10	┌───┐	19:50	1766	
								20:20	┌───┐	20:40	1771	
								21:10	┌───┐	20:50	1772	
								21:20	┌───┐	21:40	1775	
								22:10	┌───┐	21:50	1776	
								22:20	┌───┐	22:40	1781	
								23:10	┌───┐	22:50	1782	
							23:18	┌───┐	23:37	1785		
							00:04	┌───┐	23:45	1786		
							09:03				1152	
							09:20	┌───┐			1163	11:36
							14:29	┌───┐			1212	12:11
							14:58	┌───┐			1221	17:23
							22:18	┌───┐			1308	19:48
							22:36	┌───┐			1311	00:13
							10:09				4148	06:42
							10:33	┌───┐			4157	13:39
							19:40	┌───┐			4224	16:50
							20:01	┌───┐			4233	00:09
本運用逢週一啟用												
1,562km												

表附 3-3 案例三求解結果-週一運用表 (3/4)

運用號碼	新竹機務段 【EMU500、600型】 機車運用表 3											
	羅東	福隆	基隆	七堵	樹調	中壢	新竹	六家	苗栗	三義	彰化	
E3A (3)	<p>05:35 ● 2107 06:28</p> <p>10:03 1168 06:43</p> <p>10:20 1173 13:11</p> <p>16:49 1242 13:48</p> <p>17:05 1243 19:33</p> <p>22:20 2201 00:09</p> <p>09:34 1162 05:10</p> <p>09:43 週 09:53</p> <p>16:47 1237 18:59</p> <p>22:18 1308 19:48</p> <p>22:36 1311 00:13</p> <p>10:09 4148 06:42</p> <p>10:33 4157 13:39</p> <p>19:40 4224 16:50</p> <p>20:01 4233 00:09</p>											
	本運用逢週一啟用											
	1,762km											
	E4A (3)	<p>09:03 1152 06:38</p> <p>09:20 1163 11:36</p> <p>14:29 1212 12:11</p> <p>14:58 1221 17:23</p> <p>17:51 1284 20:01</p> <p>20:43 1291 22:59</p> <p>05:25 1132 07:44</p> <p>10:24 1141 08:00</p> <p>17:51 1284 20:01</p> <p>20:43 1291 22:59</p> <p>09:03 1152 06:38</p> <p>09:20 1163 11:36</p> <p>14:29 1212 12:11</p> <p>14:58 1221 17:23</p>										
		本運用逢週一啟用										
		1,498km										

表附 3-4 案例三求解結果-週一運用表 (4/4)

運用號碼	新竹機務段 【EMU500、600型】 機車運用表 4											
	羅東	福隆	基隆	七堵	樹調	中壢	新竹	六家	苗栗	三義	彰化	
E5A (3)												
	本運用逢週一啟用											
	1,525km											
	E6A (3)											
		本運用逢週一啟用										
		1,446km										

表附 3-5 案例三求解結果-週二運用表 (1/3)

運用號碼	新竹機務段 【EMU500、600型】 機車運用表 5(1)												
	羅東	福隆	基隆	七堵	樹調	中壢	新竹	六家	苗栗	三義	彰化		
E7A (4)							06:50		07:10			1703	
							07:40		07:20			1704	
							07:50		08:10			1707	
							08:40		08:20			1708	
							08:50		09:10			1713	
							09:40		09:20			1714	
							09:50		10:10			1717	
							10:40		10:20			1718	
							10:50		11:10			1723	
							11:40		11:20			1724	
							11:50		12:10			1727	
							12:40		12:20			1728	
							12:50		13:10			1733	
							13:40		13:20			1734	
							13:50		14:10			1737	
							14:40		14:20			1738	
							14:50		15:10			1743	
							15:40		15:20			1744	
							15:50		16:10			1747	
							16:40		16:20			1748	
							16:50		17:10			1753	
							17:40		17:20			1754	
							17:50		18:10			1757	
							18:40		18:20			1758	
							18:50		19:10			1763	
							19:40		19:20			1764	
							19:50		20:10			1767	
							20:40		20:20			1768	
							20:50		21:10			1773	
							21:40		21:20			1774	
							21:50		22:10			1777	
							22:40		22:20			1778	
							22:50		23:10			1783	
							23:40		23:20			1784	
							1A, 日禁						
							07:44				05:25		1132
							08:00				10:24		1141
							14:29				12:11		1212
							14:58				17:23		1221
											22:20		2201
						09:34				05:10		1162	
						09:43		09:53				週	
	16:18					12:34		16:05				1234	
						16:30				19:16		1241	
							06:20			06:40		1701	
							07:10			06:50		1702	
							07:20			07:40		1705	
							08:10			07:50		1706	
							08:20			08:40		1711	
							09:10			08:50		1712	
							09:20			09:40		1715	
							10:10			09:50		1716	
							10:20			10:40		1721	
							11:10			10:50		1722	
							11:20			11:40		1725	
							12:10			11:50		1726	
							:						

續上頁

表附 3-5 (續) 案例三求解結果-週二運用表 (1/3)

運用號碼	新竹機務段 【EMU500、600型】 機車運用表 5(2)											
	羅東	福隆	基隆	七堵	樹調	中壢	新竹	六家	苗栗	三義	彰化	
E7A (4)	承續上頁											
	：											
							12:20		12:40	1731		
							13:10		12:50	1732		
							13:20		13:40	1735		
							14:10		13:50	1736		
							14:20		14:40	1741		
							15:10		14:50	1742		
							15:20		15:40	1745		
							16:10		15:50	1746		
							16:20		16:40	1751		
							17:10		16:50	1752		
							17:20		17:40	1755		
							18:10		17:50	1756		
							18:20		18:40	1761		
							19:10		18:50	1762		
							19:20		19:40	1765		
							20:10		19:50	1766		
							20:20		20:40	1771		
							21:10		20:50	1772		
							21:20		21:40	1775		
							22:10		21:50	1776		
							22:20		22:40	1781		
							23:10		22:50	1782		
						23:18		23:37	1785			
						00:04		23:45	1786			
	本運用逢週二啟用										1,633km	

表附 3-6 案例三求解結果-週二運用表 (2/3)

運用號碼	新竹機務段 【EMU500、600型】 機車運用表 6(1)											
	羅東	福隆	基隆	七堵	樹調	中壢	新竹	六家	苗栗	三義	彰化	
E8A (3)							06:20	●	06:40	1701		
							07:10	□	06:50	1702		
							07:20	□	07:40	1705		
							08:10	□	07:50	1706		
							08:20	□	08:40	1711		
							09:10	□	08:50	1712		
							09:20	□	09:40	1715		
							10:10	□	09:50	1716		
							10:20	□	10:40	1721		
							11:10	□	10:50	1722		
							11:20	□	11:40	1725		
							12:10	□	11:50	1726		
							12:20	□	12:40	1731		
							13:10	□	12:50	1732		
							13:20	□	13:40	1735		
							14:10	□	13:50	1736		
							14:20	□	14:40	1741		
							15:10	□	14:50	1742		
							15:20	□	15:40	1745		
							16:10	□	15:50	1746		
							16:20	□	16:40	1751		
							17:10	□	16:50	1752		
							17:20	□	17:40	1755		
							18:10	□	17:50	1756		
							18:20	□	18:40	1761		
							19:10	□	18:50	1762		
							19:20	□	19:40	1765		
							20:10	□	19:50	1766		
							20:20	□	20:40	1771		
							21:10	□	20:50	1772		
							21:20	□	21:40	1775		
							22:10	□	21:50	1776		
							22:20	□	22:40	1781		
							23:10	□	22:50	1782		
							23:18	□	23:37	1785		
							00:04	□	23:45	1786		
							06:50	◡	07:10	1703		
							07:40	□	07:20	1704		
							07:50	□	08:10	1707		
							08:40	□	08:20	1708		
							08:50	□	09:10	1713		
							09:40	□	09:20	1714		
							09:50	□	10:10	1717		
							10:40	□	10:20	1718		
							10:50	□	11:10	1723		
							11:40	□	11:20	1724		
							11:50	□	12:10	1727		
							12:40	□	12:20	1728		
						12:50	□	13:10	1733			
						13:40	□	13:20	1734			
						13:50	□	14:10	1737			
						14:40	□	14:20	1738			
						14:50	□	15:10	1743			
						15:40	□	15:20	1744			
						15:50	□	16:10	1747			
						:						

續下頁

表附 3-7 案例三求解結果-週二運用表 (3/3)

運用 號 碼	新竹機務段 【EMU500、600型】 機車運用表 7											
	羅 東	福 隆	基 隆	七 堵	樹 調	中 壢	新 竹	六 家	苗 栗	三 義	彰 化	
E9AB (2x3)												
	<p>本運用逢週二啟用</p> <p style="text-align: right;">1,774km</p>											
	E10A (3)											
		<p>本運用逢週二啟用</p> <p style="text-align: right;">1,434km</p>										

表附 3-8 案例三求解結果-週三運用表 (1/2)

運用號碼	新竹機務段 【EMU500、600型】 機車運用表 8										
	羅東	福隆	基隆	七堵	樹調	中壢	新竹	六家	苗栗	三義	彰化
E11A (4)											
	<p>本運用逢週三啟用</p> <p style="text-align: right;">1,931km</p>										
	E12A (3)										
		<p>本運用逢週三啟用</p> <p style="text-align: right;">1,767km</p>									

表附 3-9 案例三求解結果-週三運用表 (2/2)

運用號碼	新竹機務段 【EMU500、600型】 機車運用表 9										
	羅東	福隆	基隆	七堵	樹調	中壢	新竹	六家	苗栗	三義	彰化
E13A (3)	<p>本運用逢週三啟用</p> <p style="text-align: right;">1,739km</p>										
E14A (3)	<p>本運用逢週三啟用</p> <p style="text-align: right;">1,589km</p>										
E15A (3)	<p>本運用逢週三啟用</p> <p style="text-align: right;">1,746km</p>										

表附 3-10 案例三求解結果-週四運用表 (1/4)

運用號碼	新竹機務段 【EMU500、600型】 機車運用表 10											
	羅東	福隆	基隆	七堵	樹調	中壢	新竹	六家	苗栗	三義	彰化	
E16A (3)	06:20						●	06:40	1701			
							07:10	06:50	1702			
							07:20	07:40	1705			
							08:10	07:50	1706			
							08:20	08:40	1711			
							09:10	08:50	1712			
							09:20	09:40	1715			
							10:10	09:50	1716			
							10:20	10:40	1721			
							11:10	10:50	1722			
							11:20	11:40	1725			
							12:10	11:50	1726			
							12:20	12:40	1731			
							13:10	12:50	1732			
							13:20	13:40	1735			
							14:10	13:50	1736			
							14:20	14:40	1741			
							15:10	14:50	1742			
							15:20	15:40	1745			
							16:10	15:50	1746			
							16:20	16:40	1751			
							17:10	16:50	1752			
							17:20	17:40	1755			
							18:10	17:50	1756			
							18:20	18:40	1761			
							19:10	18:50	1762			
							19:20	19:40	1765			
							20:10	19:50	1766			
							20:20	20:40	1771			
							21:10	20:50	1772			
							21:20	21:40	1775			
							22:10	21:50	1776			
							22:20	22:40	1781			
							23:10	22:50	1782			
							23:18	23:37	1785			
							00:04	23:45	1786			
14:29						1212		12:11				
14:58						1221		17:23				
						22:20	2201		00:09			
09:20						1158		05:10				
09:32						1161		11:36				
20:11						1284		17:51				
20:43						1291		22:59				
本運用逢週四啟用											1,235km	

表附 3-11 案例三求解結果-週四運用表 (2/4)

運用號碼	新竹機務段 【EMU500、600型】 機車運用表 11												
	羅東	福隆	基隆	七堵	樹調	中壢	新竹	六家	苗栗	三義	彰化		
E17A (3)	09:03						1152					06:38	
	09:20						1163					11:36	
	14:29						1212					12:11	
	14:58						1221					17:23	
	17:51						1284					20:01	
	20:43						1291					22:59	
	05:25						1132					07:44	
	10:24						1141					08:00	
	13:10						1198					10:45	
	13:37						1207					16:02	
	17:51						1284					20:01	
	20:43						1291					22:59	
							06:50					07:10	1703
												07:40	1704
												07:50	1707
												08:40	1708
												08:50	1713
												09:40	1714
												09:50	1717
												10:40	1718
												10:50	1723
												11:40	1724
												11:50	1727
												12:40	1728
												12:50	1733
												13:40	1734
												13:50	1737
												14:40	1738
												14:50	1743
												15:40	1744
												15:50	1747
												16:40	1748
											16:50	1753	
											17:40	1754	
											17:50	1757	
											18:40	1758	
											18:50	1763	
											19:40	1764	
											19:50	1767	
											20:40	1768	
											20:50	1773	
											21:40	1774	
											21:50	1777	
											22:40	1778	
											22:50	1783	
											23:40	1784	
	本運用逢週四啟用										1,658km		

表附 3-12 案例三求解結果-週四運用表 (3/4)

運用號碼	新竹機務段 【EMU500、600型】 機車運用表 12(1)										
	羅東	福隆	基隆	七堵	樹調	中壢	新竹	六家	苗栗	三義	彰化
E18A (3)	07:44			1132				05:25			
	08:00			1141				10:24			
	13:10			1198				10:45			
	13:37			1207				16:02			
	20:11			1284				17:51			
	20:43			1291				22:59			
				06:50				07:10 1703			
								07:40 07:20 1704			
								07:50 08:10 1707			
								08:40 08:20 1708			
								08:50 09:10 1713			
								09:40 09:20 1714			
								09:50 10:10 1717			
								10:40 10:20 1718			
								10:50 11:10 1723			
								11:40 11:20 1724			
								11:50 12:10 1727			
								12:40 12:20 1728			
								12:50 13:10 1733			
								13:40 13:20 1734			
								13:50 14:10 1737			
								14:40 14:20 1738			
								14:50 15:10 1743			
								15:40 15:20 1744			
								15:50 16:10 1747			
								16:40 16:20 1748			
								16:50 17:10 1753			
								17:40 17:20 1754			
								17:50 18:10 1757			
								18:40 18:20 1758			
								18:50 19:10 1763			
								19:40 19:20 1764			
								19:50 20:10 1767			
								20:40 20:20 1768			
								20:50 21:10 1773			
								21:40 21:20 1774			
								21:50 22:10 1777			
								22:40 22:20 1778			
								22:50 23:10 1783			
								23:40 23:20 1784			
								06:40 1701			
								07:10 06:50 1702			
								07:20 07:40 1705			
								08:10 07:50 1706			
								08:20 08:40 1711			
								09:10 08:50 1712			
								09:20 09:40 1715			
								10:10 09:50 1716			
							10:20 10:40 1721				
							11:10 10:50 1722				
							11:20 11:40 1725				
							12:10 11:50 1726				
							:				

續下頁

表附 3-12 (續) 案例三求解結果-週四運用表 (3/4)

運用號碼	新竹機務段 【EMU500、600型】 機車運用表 12(2)											
	羅東	福隆	基隆	七堵	樹調	中壢	新竹	六家	苗栗	三義	彰化	
E18A (3)							:	承續上頁				
							12:20	[]	12:40	1731		
							13:10	[]	12:50	1732		
							13:20	[]	13:40	1735		
							14:10	[]	13:50	1736		
							14:20	[]	14:40	1741		
							15:10	[]	14:50	1742		
							15:20	[]	15:40	1745		
							16:10	[]	15:50	1746		
							16:20	[]	16:40	1751		
							17:10	[]	16:50	1752		
							17:20	[]	17:40	1755		
							18:10	[]	17:50	1756		
							18:20	[]	18:40	1761		
							19:10	[]	18:50	1762		
							19:20	[]	19:40	1765		
							20:10	[]	19:50	1766		
							20:20	[]	20:40	1771		
							21:10	[]	20:50	1772		
							21:20	[]	21:40	1775		
							22:10	[]	21:50	1776		
							22:20	[]	22:40	1781		
							23:10	[]	22:50	1782		
							23:18	[]	23:37	1785		
						00:04	[]	23:45	1786			
本運用逢週四啟用											1,412km	

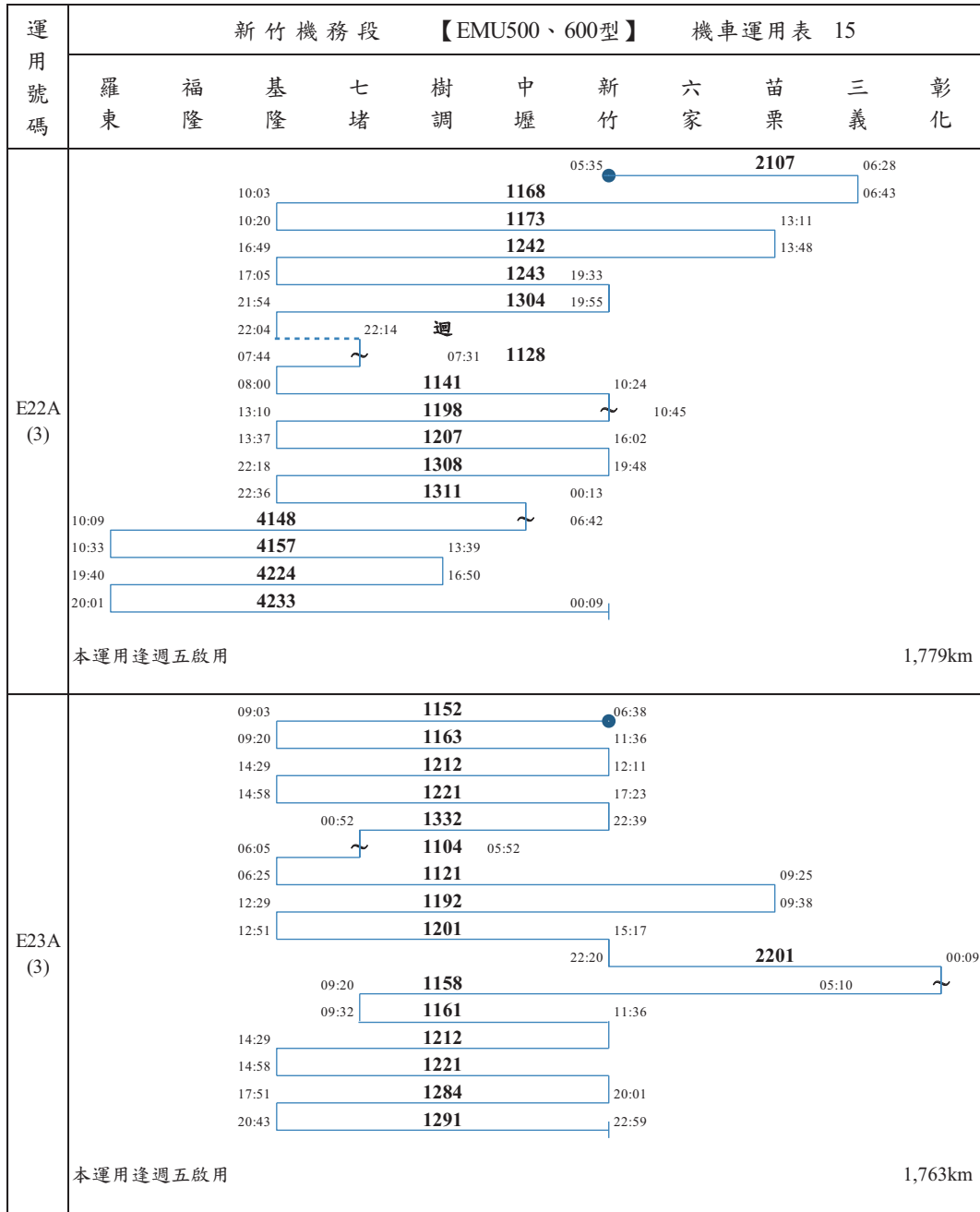
表附 3-13 案例三求解結果-週四運用表 (4/4)

運用 號碼	新竹機務段 【EMU500、600型】 機車運用表 13													
	羅 東	福 隆	基 隆	七 堵	樹 調	中 壢	新 竹	六 家	苗 栗	三 義	彰 化			
E19A (3)	09:03													
												06:38		
	09:20											11:36		
	14:29											12:11		
	14:58											17:23		
												22:20		
														00:09
	09:34												05:10	
	09:43													
	10:09													
10:33														
19:40														
20:01														
本運用逢週四啟用											1,589km			
E20A (3)	07:44													
												05:25		
	08:00											10:24		
	13:10											10:45		
	13:37											16:02		
	21:54											19:55		
	22:04													
	06:05												05:52	
	06:25												09:25	
	12:29												09:38	
	12:51												15:17	
	18:10												15:49	
18:40												21:07		
												23:39		
07:44														
08:00												10:24		
14:29												12:11		
14:58												17:23		
17:51												20:01		
20:43												22:59		
本運用逢週四啟用											1,792km			

表附 3-14 案例三求解結果-週五運用表 (1/3)

運用 號 碼	新竹機務段 【EMU500、600型】 機車運用表 14										
	羅 東	福 隆	基 隆	七 堵	樹 調	中 壢	新 竹	六 家	苗 栗	三 義	彰 化
E21A (3)											
	本運用逢週五啟用										
	1,038km										

表附 3-15 案例三求解結果-週五運用表 (2/3)



表附 3-16 案例三求解結果-週五運用表 (3/3)

運用號碼	新竹機務段 【EMU500、600型】 機車運用表 16											
	羅東	福隆	基隆	七堵	樹調	中壢	新竹	六家	苗栗	三義	彰化	
E24A (3)												
	本運用逢週五啟用											
	1,763km											
	E25A (3)											
		本運用逢週五啟用										
		1,763km										

表附 3-18 案例三求解結果-週六運用表 (2/2)

運用號碼	新竹機務段 【EMU500、600型】 機車運用表 18												
	羅東	福隆	基隆	七堵	樹調	中壢	新竹	六家	苗栗	三義	彰化		
E27A (3)													
	本運用逢週六啟用												
	1,751km												
	E28A (3)												
		本運用逢週六啟用											
		1,448km											
		E29A (3)											
			本運用逢週六啟用										
			1,750km										

表附 3-19 案例三求解結果-週日運用表 (1/3)

運用號碼	新竹機務段 【EMU500、600型】 機車運用表 19											
	羅東	福隆	基隆	七堵	樹調	中壢	新竹	六家	苗栗	三義	彰化	
E30A (3)												
	本運用逢週日啟用											
											1,623km	
	E31A (3)											
		本運用逢週日啟用										
												1,359km

表附 3-20 案例三求解結果-週日運用表 (2/3)

運用號碼	新竹機務段 【EMU500、600型】 機車運用表 20											
	羅東	福隆	基隆	七堵	樹調	中壢	新竹	六家	苗栗	三義	彰化	
E32A (3)												
	本運用逢週日啟用											
	1,774km											
	E33A (3)											
		本運用逢週日啟用										
		1,371km										

表附 3-21 案例三求解結果-週日運用表 (3/3)

運用號碼	新竹機務段 【EMU500、600型】 機車運用表 21											
	羅東	福隆	基隆	七堵	樹調	中壢	新竹	六家	苗栗	三義	彰化	
E34A (3)	06:50						●	07:10	1703			
							07:40	07:20	1704			
							07:50	08:10	1707			
							08:40	08:20	1708			
							08:50	09:10	1713			
							09:40	09:20	1714			
							09:50	10:10	1717			
							10:40	10:20	1718			
							10:50	11:10	1723			
							11:40	11:20	1724			
							11:50	12:10	1727			
							12:40	12:20	1728			
							12:50	13:10	1733			
							13:40	13:20	1734			
							13:50	14:10	1737			
							14:40	14:20	1738			
							14:50	15:10	1743			
							15:40	15:20	1744			
							15:50	16:10	1747			
							16:40	16:20	1748			
							16:50	17:10	1753			
							17:40	17:20	1754			
							17:50	18:10	1757			
							18:40	18:20	1758			
							18:50	19:10	1763			
							19:40	19:20	1764			
							19:50	20:10	1767			
							20:40	20:20	1768			
							20:50	21:10	1773			
							21:40	21:20	1774			
							21:50	22:10	1777			
							22:40	22:20	1778			
							22:50	23:10	1783			
						23:40	23:20	1784				
						07:44	1132	~				
						08:00	1141	10:24				
						13:10	1198	10:45				
						13:37	1207	16:02				
						17:51	1284	20:01				
						20:43	1291	22:59				
						09:03	1152	~				
						09:20	1163	11:36				
						14:29	1212	12:11				
						14:58	1221	17:23				
						17:51	1284	20:01				
						20:43	1291	22:59				
本運用逢週日啟用											1,658km	

作者簡歷



劉國著， Kuo-Chu (Orson) Liu

基本資料：

出生地：臺北市

出生日期：民國 77 年 7 月 3 日

聯絡地址：臺北市信義區虎林街 164 巷 74 號 2 樓

電子信箱：haoxiang.taiwan@gmail.com

學歷：

國立臺灣大學土木工程學研究所交通工程組，工學碩士 (2010~2012)

國立成功大學交通管理科學系，管理學士 (2006~2010)

臺北市立麗山高級中學 (2003~2006)

臺北市立興雅國民中學 (2000~2003)

臺北市立博愛國民小學 (1994~2000)

經歷：

中華民國交通部觀光局華語特約導遊、領隊 (2010~)

中華民國交通部公路總局遊覽車評鑑輔導員 (2010~)

臺灣鐵路管理局車站志工 (2003~)

高雄捷運公司運務處實習生 (2007, 2008 暑期)

國立成功大學鐵道研究社行政顧問、副社長 (2007~)

國立成功大學交通管理科學系學會長、代理會長、副會長 (2007~2009)

臺北市立麗山高級中學畢業生聯合會長暨畢業典禮召集 (2005~2006)

研究興趣與專長：

軌道營運管理、異質性路網分析、最佳化決策、運輸人因量測