

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

軌道運輸系統時刻表績效評估系統之研發與建立

Development of the Timetable Performance Evaluation

System for Rail Transportation



陳冠廷

Chen, Kuan-Ting

指導教授：賴勇成 教授

Major Professor: Lai, Yung-Cheng

中華民國 101 年 7 月

Jul. 2012

國立臺灣大學（碩）博士學位論文
口試委員會審定書

軌道運輸系統時刻表績效評估系統之研發與建立
Development of the Timetable Performance Evaluation
System for Rail Transportation

本論文係陳冠廷君（R99521514）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 101 年 06 月 15 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）

范植谷

李治綱

鍾志成

賴勇成

范植谷

李治綱

鍾志成

系主任

呂良正

呂良正

（簽名）

誌謝

這份論文能夠完成著實得力於許多人的幫忙，感謝臺灣鐵路管理局提供相關研究資料，也特別感謝調度總所陳文淇副所長，行車保安委員會陳明詮先生，資訊中心設計組李立偉先生，運務處行車組林建維先生等人於本研究的協助，由於各位的指教與幫忙，研究才得以順利展開。

在研究所的兩年，無論是作研究亦或是撰寫論文，如今終於能取得一點小小的成果，誠摯的感謝賴勇成老師於期間的指導，讓我見識到老師對於研究與軌道運輸的執著與熱忱，也得以在軌道運輸的領域中能窺其一二。另外也由衷感謝口試期間范植谷局長、李治綱老師與鍾志成博士能在忙碌之中撥空給予指教，在研究上給予寶貴的建議，也讓我了解到自己的研究如何能更趨嚴謹與完善。

兩年來的研究所的日子有時很苦悶，感謝有軌道團隊大家的陪伴，偶爾還能苦中作樂。感謝大兩屆的宗晏學長與牧阡學姐在我剛加入軌道團隊之後的帶領，即使在畢業後仍會花時間與我討論我在研究上遇到的問題並給予建議；另外，非常感謝志生，論文能夠順利完成真的是非常感謝有你在這兩年來一起努力熬夜、一起討論研究，還有柏文、姿雅、國著，同為軌道團隊的大家一起經歷辛苦的兩年；也非常感謝學弟軒宇、道中以及學妹耘禎，在我們二年級忙著論文的時候幫了許多的忙，也祝你們未來不論做什麼樣的決定都能夠順利。

要感謝的人真的很多，也包括交通組 R99 的大家，看前人寫的誌謝常常引用陳之藩先生於謝天一文中的經典語句，我想我也不免俗的套用一下：要感謝的人太多了，還是謝天吧！

最後僅以此文獻給我的家人，感謝你們的包容與關懷。

冠廷 2012.07.

摘要

時刻表是軌道運輸服務最高的營運準則，而如何衡量一個的時刻表績效是營運單位的重要課題，對於軌道運輸所提供的服務來說，績效的衡量可從營運者、旅客亦或是車輛觀點，本研究自營運單位的角度以時刻表的效率與穩定程度來定義時刻表之績效，高使用效率代表有效的利用軌道資源，而穩定的時刻表在系統發生意外時能迅速的回復至正常狀態，然而，密集的班次有時反而造成可靠度的下降，因此效率與穩定度之間存在一權衡關係。本研究結合可靠度分析、容量分析及風險分析的方法概念，建立一套時刻表績效評估系統，可協助營運單位比較不同時刻表之間的績效差異，亦可辨識系統中不穩定的時段與路段。

過去的研究常以延滯時間評估時刻表的穩定度，但這種方法可能會有低估或高估穩定度的可能，因此，李宗晏（2010）自容量的角度提出「回復時間」的概念，即系統發生意外狀況後排除受影響的列車所需的時間，其研究以時刻表在一天營運下的「期望回復時間」作為指標；但由於行車事故的隨機特性，營運時回復時間未必會是平均值，本研究進一步分析回復時間的不確定性，以建立完整的時刻表評估系統，提出四個評估指標：使用效率、期望回復時間、回復時間標準差以及失效機率，研究中承襲回復時間的概念，除修正其模式外，亦建立蒙地卡羅模擬模式，提出新的評估指標衡量回復時間的不確定性，期望以此系統提供營運業者在進行時刻表建構設計時更彈性的資訊作為參考。

在案例分析中，本研究以實際臺鐵北部時刻表透過四個評估指標進行分析，發現穩定度的瓶頸時空點發生在晨峰與昏峰時段及汐止至七堵區間，若進一步比較改點前後，結果顯示上下行的時刻表在改點後都提高了使用率，而改點後上行時刻表的穩定度指標都顯示穩定度下降的情況，但在改點後下行時刻表只有期望回復時間增加，其標準差及失效機率卻下降，顯示回復時間的出現較為集中，改

點前在一個標準差的範圍下反而會出現較高的回復時間，而失效機率則直接說明高回復時間的出現機率較低，因此相較於上行時刻表，改點後下行時刻表的穩定度不必然較差。透過這些指標的分析，營運業者可在改點決策上有更精確的資訊，並透過持續的修正與績效分析協助提升時刻表之績效，以確保營運單位提供的服務能滿足運輸需求持續的成長且維持優良的服務品質。

關鍵字：時刻表穩定度、軌道容量、回復時間、蒙地卡羅模擬



Abstract

Reliable railway operation is a result of a well-designed timetable. A robust and stable timetable should incorporate an appropriate level of slacks in order to recover the system from the unexpected disruption to the normal state. However, due to the high cost of railway infrastructure, a surplus slack can incur an unexpected expense and waste. Consequently, the evaluation of timetable stability and efficiency is important, since there is a trade-off between the railway capacity, capacity utilization and stability.

Most of the previous studies evaluated timetable stability with delay index, while Li (2010) considered this index may either over or underestimate the stability and thus proposed to use recovery time from the aspect of railway capacity. Recovery time is the amount of time to clear out the disrupted scheduled trains and return to the normal state. Li calculated the expected recovery time of timetable as the stability index. However, due to the uncertainty of disturbance, the inherently randomness of recovery time should be further studied in order to provide a flexible evaluation result. In this research, a timetable performance evaluation system is developed with four indices, including efficiency, expected recovery time, standard deviation of recovery time and failure probability. And the Monte Carlo simulation accounted for the uncertainty of recovery time is also developed.

A case study of Taiwan Railway Administration (TRA) before and after the timetable revision on September 28th, 2012 was applied. The evaluation results showed that the bottlenecks of the stability are on peak periods and Xizhi to Qidu section. The analysis also showed that after the revision, the efficiency of capacity utilization increased. This led to the decrease of stability of northbound timetable, but not all the

stability indices of southbound timetable indicated a worse result. With the evaluation of these four indices, accurate information can be provided to the railway agency in the timetable planning process so as to provide reliable and robust services to their customers, and return on shareholders' investment.

Keywords: *Timetable stability, Railway capacity, Recovery time, Monte Carlo simulation*



目錄

口試委員會審定書.....	I
誌謝.....	II
摘要.....	III
Abstract	V
圖目錄.....	IX
表目錄.....	XI
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究目的.....	4
1.3 研究範圍與限制.....	4
1.4 研究方法.....	5
1.5 研究流程與架構.....	5
第二章 文獻回顧.....	7
2.1 時刻表穩定度分析.....	7
2.1.1 解析模式.....	7
2.1.2 模擬模式.....	9
2.2 軌道容量分析.....	10
2.3 時刻表、容量與營運可靠度之關係.....	15
2.4 小結.....	17
第三章 時刻表績效評估系統架構.....	19
3.1 評估指標意義.....	19
3.2 指標一：時刻表使用效率.....	21
3.3 指標二：期望回復時間（容量使用之風險）.....	22
3.3.1 期望回復時間模式架構.....	24
3.3.2 事故發生機率分析.....	25
3.3.3 嚴重度分析.....	29
3.3.4 期望回復時間運算模式.....	34
3.4 指標三：回復時間標準差.....	35
3.4.1 模擬模式架構.....	37
3.4.2 模擬模式假設.....	38
3.4.3 模擬機制與分析流程.....	39
3.4.4 回復時間標準差運算.....	47
3.5 指標四：時刻表失效機率.....	47

3.6 時刻表績效評估流程與系統建立	48
第四章 案例分析	53
4.1 資料說明與整理	53
4.1.1 容量與事故容量分析結果	53
4.1.2 事故發生機率分佈試合結果	59
4.2 指標一：使用效率分析	64
4.3 指標二：期望回復時間分析	65
4.4 指標三：回復時間標準差分析	69
4.4.1 模擬次數決定	69
4.4.2 模擬結果	70
4.5 指標四：失效機率分析	78
4.6 時刻表改點前後指標綜合討論	86
4.7 小結	90
第五章 結論與建議	93
5.1 結論	93
5.2 建議	94
參考文獻	97



圖目錄

圖 1-1 服務品質模型	2
圖 1-2 民國 100 年 9 月 28 日臺鐵時刻表改點前後部分路段每日列車數.....	3
圖 1-3 研究流程圖	6
圖 2-1 臺鐵容量模式容量基本分析單元.....	11
圖 2-2 臺鐵容量模式計算流程	11
圖 2-3 軌道系統營運績效回饋循環	15
圖 2-4 班距與風險之關係.....	16
圖 3-1 軌道容量關係圖.....	20
圖 3-2 穩定度風險分析流程圖	24
圖 3-3 期望回復時間分析流程圖	25
圖 3-4 列車小時計算方式變更說明	27
圖 3-5 事故發生機率計算流程	28
圖 3-6 事故容量示意圖.....	29
圖 3-7 回復時間示意圖.....	33
圖 3-8 失效機率模擬分析流程圖	37
圖 3-9 軌道系統行車事故之隨機特性說明	38
圖 3-10 反向轉換法概念.....	42
圖 3-11 蒙地卡羅模擬執行流程	46
圖 3-12 時刻表績效之魚骨圖	49
圖 3-13 時刻表評估流程圖	50
圖 4-1 時刻表績效評估示意圖	53
圖 4-2 捷運化車站股道配置類型	54
圖 4-3 時刻表改點前後路線區段期望回復時間.....	66
圖 4-4 時刻表改點前後時段期望回復時間.....	66
圖 4-5 各類事故風險剖面圖	68
圖 4-6 改點前各類事故風險比例圓餅圖	68
圖 4-7 改點後各類事故風險比例圓餅圖	69
圖 4-8 模擬次數與回復時間平均值變化.....	70
圖 4-9 改點前上行模擬結果散佈圖	71
圖 4-10 改點前上行累積相對次數分佈圖.....	72
圖 4-11 改點前上行相對次數分佈圖.....	72
圖 4-12 改點前下行模擬結果散佈圖	73
圖 4-13 改點前下行累積相對次數分佈圖.....	73

圖 4-14 改點前下行相對次數分佈圖	73
圖 4-15 改點後上行模擬結果散佈圖	74
圖 4-16 改點後上行累積相對次數分佈圖	74
圖 4-17 改點後上行相對次數分佈圖	75
圖 4-18 改點後下行模擬結果散佈圖	75
圖 4-19 改點後下行累積相對次數分佈圖	76
圖 4-20 改點後下行相對次數分佈圖	76
圖 4-21 改點前、後上行時刻表回復時間集中範圍	77
圖 4-22 改點前、後下行時刻表回復時間集中範圍	77
圖 4-23 樣本資料與指數分佈 QQ-plot	78
圖 4-24 極端值理論模型極值數據獲取概念示意圖	79
圖 4-25 平均餘額函數圖	81
圖 4-26 改點前上行試合結果與樣本經驗分佈比較	82
圖 4-27 改點前下行試合結果與樣本經驗分佈比較	82
圖 4-28 改點後上行試合結果與樣本經驗分佈比較	82
圖 4-29 改點後下行試合結果與樣本經驗分佈比較	83
圖 4-30 改點前上行試合結果之 GPD 與樣本資料 QQ-plot	83
圖 4-31 改點前下行試合結果之 GPD 與樣本資料 QQ-plot	83
圖 4-32 改點後上行試合結果之 GPD 與樣本資料 QQ-plot	84
圖 4-33 改點後下行試合結果之 GPD 與樣本資料 QQ-plot	84
圖 4-34 各時刻表極端分佈機率密度函數比較	87
圖 4-35 上行時刻表改點前後效率與期望回復時間 3D 圖	89
圖 4-36 下行時刻表改點前後效率與期望回復時間 3D 圖	90

表目錄

表 2-1 六種列車進出站方式之號誌安全時距.....	12
表 2-2 臺鐵車站股道配置型式及對應平均號誌安全時距公式.....	12
表 2-3 瓶頸號誌安全時距公式.....	13
表 3-1 事故發生地點統整表.....	30
表 3-2 事故月台型式.....	31
表 3-3 各事故類型之號誌安全時距.....	32
表 3-4 可能的事故類型與股道配置改變情形(以路線故障為例).....	44
表 3-5 事故發生可能地點累積機率(以路線故障為例).....	44
表 4-1 車站股道配置.....	54
表 4-2 路線實用容量.....	55
表 4-3 車站事故月台股道配置.....	56
表 4-4 單股道事故上行事故容量.....	56
表 4-5 單股道事故下行事故容量.....	57
表 4-6 雙股道事故上行事故容量.....	58
表 4-7 雙股道事故下行事故容量.....	59
表 4-8 民國 97 年至 99 年行車事故統計表.....	60
表 4-9 各類事故之中斷時間.....	61
表 4-10 各類事故指數分佈參數估計結果.....	62
表 4-11 適合度檢定結果.....	63
表 4-12 改點後上行時刻表部分時段路段表曝光量(列車小時).....	63
表 4-13 改點後上行時刻表部分時段路段事故發生機率.....	64
表 4-14 上行時刻表改點前後使用效率分佈分析單元數.....	64
表 4-15 下行時刻表改點前後使用效率分佈分析單元數.....	65
表 4-16 改點前後各類事故風險值.....	67
表 4-17 時刻表回復時間極端分佈分析結果.....	85
表 4-18 改點前後上、下行時刻表指標分析結果.....	86

第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

現今軌道運輸系統隨著科技的進步呈現多樣化的發展，包括高速鐵路、傳統鐵路與都市捷運系統的建設，各自在完善大眾運輸路網的過程中扮演著重要的角色，不同運具之間的競爭與整合，為軌道營運業者帶來的課題是如何提升服務水準以吸引旅客搭乘。而根據鍾志成與張仕龍的整理(2012)，有效提升服務水準的方式是減少「企業對顧客期望的認知」與「顧客期望的服務」之間的落差(圖 1-1)，由於軌道運輸提供的服務與時刻表息息相關，對於軌道運輸來說，列車的停靠站必須按照時刻表計畫，其營運服務直接受到時刻表計畫的影響，而一個營運績效優良的軌道系統，應該要能依照時刻表所安排的時間來運行，然而不可避免的，軌道系統在實際營運過程中可能受到不同程度的干擾影響列車的運行計畫，並可能對搭乘旅客造成不便，特別是當旅客有與其他運具進行轉乘接駁的需求時；因此從營運單位提供服務的角度來說，時刻表設計之好壞對於軌道營運業者來說是評估其系統服務績效之重要指標，對於旅客來說亦是決定是否搭乘之重要參考，一方面受到事故干擾的頻率若過高，時刻表鮮少能依照既定設計運行而與計畫停靠站時間產生差異，會增加旅客的不信任感，另一方面，軌道系統的建設具有高投資成本之特性，為避免資源的浪費，營運業者會希望能充分的利用軌道資源。所以，軌道資源的使用以及旅客需求是排點人員重要的考量因素，然而軌道運輸的服務基本上在土建等基礎設施完成後會受到軌道容量的限制，在這樣的限制下，軌道系統硬體的負荷程度，將視乎於時刻表擬定的緊密度，資源的運用是否留有足夠空間應付意外的發生，對於系統服務水準有著重要的影響。也因此，對營運單位而言，若要減少旅客實際感受服務品質與旅客所期望的服務之間的落差，時

刻表的績效分析便成為了一件重要的工作，系統本身軌道容量大小以及營運時意外的干擾應同時被營運單位納入考量。

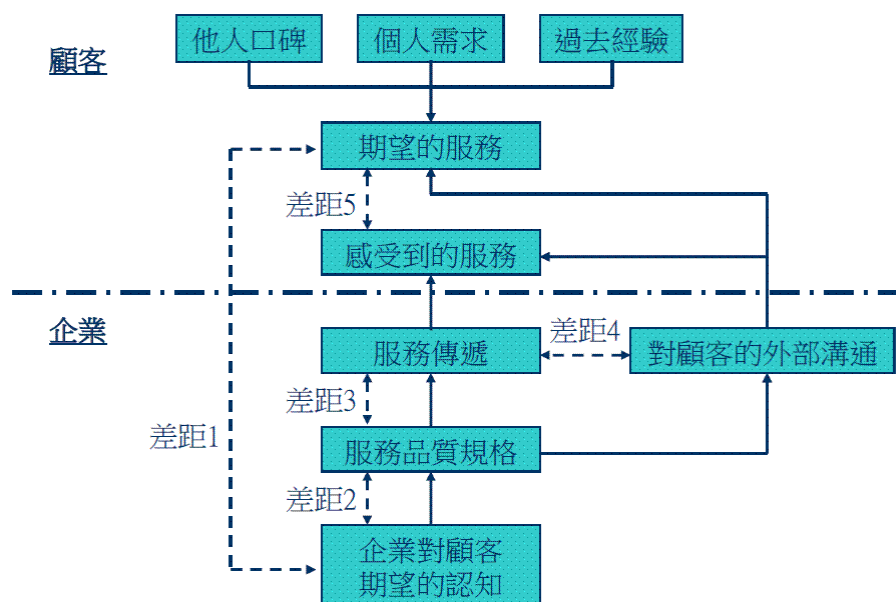


圖 1-1 服務品質模型

資料來源：鍾志成等人整理(2012)

目前國內在政府積極推動民眾使用大眾運輸的政策下，期許未來持續的吸引大眾運輸使用人次的成長，為此，軌道營運單位將有可能調整其服務計畫進行時刻表改點滿足人數的成長，以提供更多的服務，時刻表評估便顯其重要性；以臺鐵來說，為能有效利用既有的運輸資源來強化區域通勤及接駁功能，並與其他的運具進行整合，勢必面臨到營運策略的轉變，面對「捷運化」的過程，臺鐵的營運目標也開始重視如何提高其服務水準，並達到加強通勤運輸的功能，除配合既有鐵路基礎設施進行相關工程施作之外，能夠設計出符合捷運化營運目標的時刻表亦是十分重要的作業，近年來臺鐵也曾進行多次改點，嘗試在某些時段路段上增加班次的密集性的排點，圖 1-2 顯示了民國 100 年 9 月 28 日改點前後部分路段的使用量變化情形，可見改點後每日通過列車數有增加的現象，如此密集的排班可能對系統服務帶來重大的影響，因此有必要進行時刻表評估。

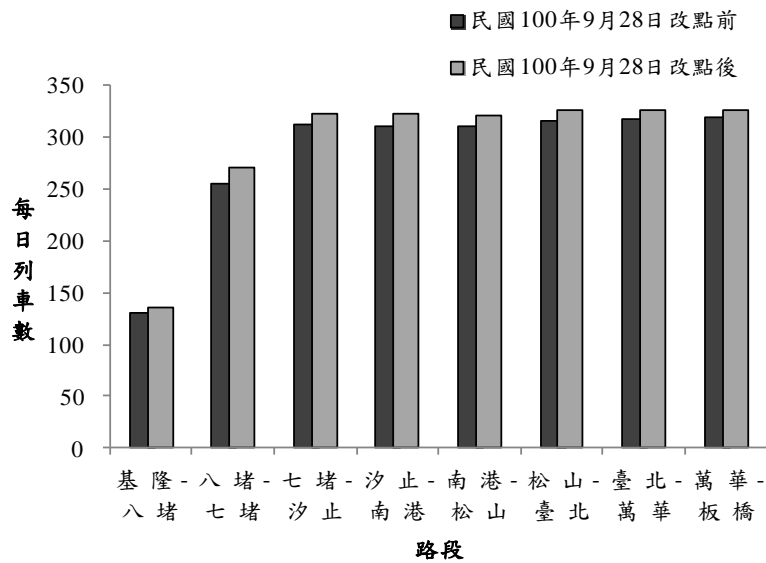


圖 1-2 民國 100 年 9 月 28 日臺鐵時刻表改點前後部分路段每日列車數

過去研究常以穩定度(stability)對時刻表的好壞進行評析，並以延滯時間(delay)作為評估指標，一個穩定的時刻表能快速的吸收營運風險，在受到干擾後迅速回復至正常的運行狀態。而如前所述，時刻表之好壞與容量資源運用關係甚鉅，當時刻表排的較緊密時，表示營運列車數高，發生事故後能夠進行運轉調度的空間較小，進而使得系統回復至正常會需要較長的時間，因此有著較差的穩定度；李宗晏(2010)提出了以軌道容量風險模式評估時刻表穩定度與效率的方法並應用於臺鐵系統的分析，該模式自路線容量與風險分析的角度進行評估，同時提出了以「回復時間」作為評估指標的方式，探討時刻表改點前後穩定度的變化，由於軌道路線容量對於時刻表的排點會產生一定的限制，李宗晏的研究不僅考慮了容量使用效率，也透過行車事故資料對於系統發生事故的機率進行分析，能夠計算出時刻表在一天的營運下的期望回復時間；但由於行車事故發生具有隨機性，實際運行時回復時間未必會正好是平均值，李宗晏以其定義之回復時間的期望值作為時刻表穩定度之指標，然而尚未分析回復時間的不確定性，由於行車營運時遭遇的意外干擾具有不可預期的特性，因此回復時間的結果應是一個不確定的狀態，所以本研究承襲了李宗晏所提出的概念分析回復時間的不確定性，除了更新穩定度評估模式之外，亦提出新的評估指標，並建立時刻表的評估系統，期望能提供

軌道營運業者更完整的評估資訊，作為時刻表建構設計時的參考，以提升服務效力。

1.2 研究目的

本研究預期建構一時刻表績效評估系統以供營運單位參考利用，當取得時刻表後便能計算時刻表的評估指標，並對不同時刻表進行績效差異的比較，而研究之目的可歸納如下：

- (1) 回顧軌道容量風險模式並修正模式以更精準的評估風險
- (2) 以「回復時間」的角度建立模擬模式分析回復時間的不確定性，並建立衡量回復時間不確定性的穩定度評估指標。
- (3) 透過使用效率分析找出影響時刻表穩定度的因素。
- (4) 以「回復時間」的角度建立完整的「時刻表績效評估系統」，提供排點人員評估時刻表績效的方法。

1.3 研究範圍與限制

本研究主要就已知時刻表評量其穩定度，並針對列車行車營運時可能遭受的干擾以及軌道容量的限制下進行分析。軌道列車在行車營運時存有各種可能的干擾影響行車營運，包括天然災害、行車事故等，而本研究主要針對行車事故的發生對列車營運的影響進行資料蒐集與分析；另一方面，由於軌道運輸路網是一個相當複雜的系統，過往在分析軌道容量時通常是將路網分為許多路段並計算路段容量，本研究在分析時刻表穩定度時，空間參考點的區隔同樣以路段容量分析的區隔為基準，在分析上忽略事故發生後相鄰區段的交互影響。

本研究所提出之評估指標雖能對單一時刻表計算出指標結果，在應用上必須以相對概念進行比較，顯示時刻表在改點前後的穩定度變化情形，以作為排點人員的參考。

1.4 研究方法

本研究為建立完整的時刻表評估系統，提供時刻表資源運用效率與穩定度的相關資訊，首先以容量分析探討時刻表使用效率，接著以風險分析的方法與概念對時刻表的穩定度進行分析，以估計時刻表風險作為穩定度的評估指標之一，而風險的估算主要在於量化事故的發生機率以及事故發生後的嚴重程度，其中發生機率的部份以可靠度工程的概念分析發生機率函數，而嚴重程度則是計算事故發生後回復至正常所需之回復時間，此亦是透過容量分析衡量事故發生後軌道容量的變化而得；而考慮到事故發生的不確定性，進一步再以回復時間概念為基礎，建立一模擬模式，透過隨機變數的產生模擬行車事故發生的情形，時刻表每一次完整的運作可視為完成一天的營運，由於模式運作須考慮隨機變數取樣的完整性，因此需進行一定次數的模擬，後續方能對結果進行統計分析，提出衡量回復時間不確定性的穩定度指標；最後，研究中亦將透過使用效率的探討找出影響時刻表穩定度的因素。

1.5 研究流程與架構

本研究之流程整理如圖 1-3 所示，在確認研究主題與研究目的之後，蒐集與研究主題相關之文獻並進行回顧以了解相關主題研究之近況，據以建立時刻表績效之評估概念，接著建立時刻表之績效評估指標，包括時刻表的穩定度指標以及使用效率指標，前者將改進軌道容量風險模式(解析模式)中部分的研究方法同時提出模擬模式進行分析，後者則是透過軌道容量分析進行；研究中也將以臺鐵為案例分析對象蒐集並整理相關資料應用解析模式與模擬模式進行分析，並初步探討使用效率及穩定度的關係找出效率如何影響時刻表穩定度之間的影响，根據前述分析的經驗以建立時刻表穩績效評估系統的分析流程，最後再進行研究結果整理具體的提出結論以及未來的研究方向。

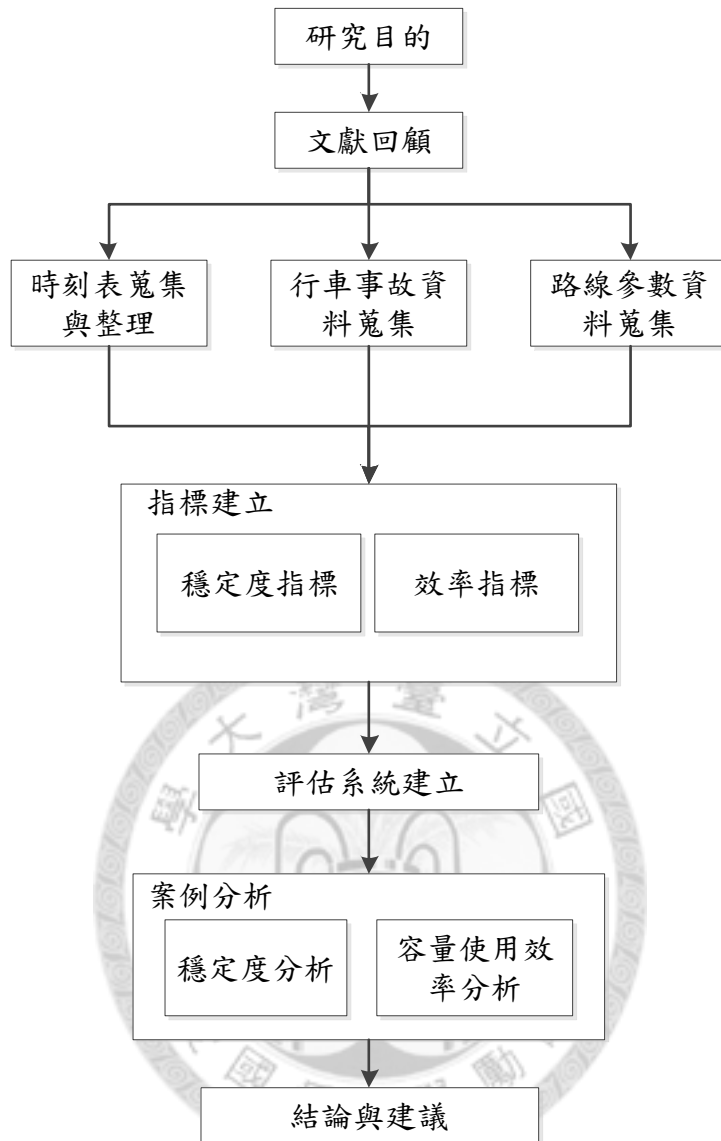


圖 1-3 研究流程圖

第二章 文獻回顧

本章將依序回顧過去國內外時刻表穩定度的評估方法與評估指標，以及交通部運輸研究所提出之軌道容量分析方法，而為說明軌道容量的使用與穩定度之間的權衡關係，最後整理相關文獻指出容量資源使用對時刻表穩定度評估的重要性。

2.1 時刻表穩定度分析

回顧過去時刻表評估的相關研究，常見的研究方法主要可分為解析法與模擬法。而列車在實際運行時會受到一些不確定性因素影響，包括列車旅行時間、停車時間等(可併稱為作業時間，process time)可能與預先設定的時間產生偏誤，列車的運轉過程並非完全依照時刻表的要求，因此過去對於時刻表穩定度評估的相關研究根據模式是否考慮到作業時間的隨機特性又可分為確定性模式(Deterministic Model)以及隨機性模式(Stochastic Model)，以下將針對時刻表穩定度之評析方法依解析模式與模擬模式進行概要整理，並說明是否考慮隨機特性。

2.1.1 解析模式

解析模式是根據列車運轉特性以等候理論或數學規畫法等方法，透過數學方式進行運算，以評估時刻表。在解析模式的研究中，Goverde (2007)利用Max-Plus 代數方法衡量週期性時刻表的穩定度，該研究定義穩定度為時刻表中緩衝時間(Slack time)之大小，而不穩定的時刻表由於無緩衝時間，也就導致延滯在列車與列車之間的蔓延。然而在列車營運過程中有許多不確定性因素，Goverde等人(2009)後又以確定性的Max-Plus代數法為基礎，發展了隨機性的Max-Plus代數法進行時刻表穩定度分析，研究中將列車停站時間、站間運轉時間以特定機率分佈取代確定性模

式中的定值，分析系統回復正常時刻表營運所需的時間。

有鑒於日漸成長的旅運量，如何有效的運用現有的軌道基礎設施資源而維持時刻表的強健性是現今營運單位的重要課題，而因為軌道營運的過程中可能遇到無法預期的干擾而產生初始延滯(primary delay)，Salido等人(2008)認為一個強健(robust)的時刻表能減少初始延滯蔓延的影響，因此嘗試建立一個評估時刻表強健性的方法，該研究以真實時刻表為輸入，辨識影響時刻表強健性(robustness)之參數，以解析方法求得時刻表之強健性，並同時利用模擬方法隨機設定延滯，可計算不同時刻表之強健性指標，說明何者為較強健的時刻表。

Delorme等人(2009)的研究為RECIFE計畫的一支，該計畫旨在發展一套決策支援軟體評估軌道基礎設施的極限，並從而決定是否應該進行升級等事項，而Delorme等人的研究主要在於發展時刻表穩定度的評估模組，研究中以最佳化模式求解時刻表在受到一個設定的初始延滯影響後，每一列列車因為延滯的蔓延所產生的外生次要延滯(knock-on delay或稱連鎖延滯)大小，再將所有列車受到的外生次要延滯加總即為該時刻表之穩定度。

在進行時刻表設計時，為了預防延滯時間的發生，D'Angelo等人(2009)利用解析模式設計額外時間，用以吸收列車運行可能產生的延滯，降低因延滯產生需重新進行列車排點之需求，此外，該研究以穩定時刻表的設計概念，將時刻表恢復功能納入規劃階段中，如果系統發生中斷情況時，時刻表可以吸收延滯時間並使列車能繼續運轉。Cicerone等人(2009)的研究中亦表示，一個穩定性高的時刻表能吸收有限的延滯時間，並建立模式設計一個具有基本吸收能力的時刻表，其與未進行最佳化設計的時刻表之成本的比例定義為時刻表穩定度的衡量指標。

李宗晏(2010)提出軌道容量風險模式評估時刻表穩定度，研究中以風險的角度描述行車事故的不確定性，由行車事故發生後軌道容量的損失變化情形，建立事故容量的運算方式，並根據容量、事故容量以及自時刻表轉換而得的使用量計算回復時間，將之視為風險分析中嚴重程度的部分，而事故發生機率與嚴重度的乘

積可得期望回復時間值，此可作為時刻表穩定度的評估指標比較改點前後時刻表穩定度的變化。

2.1.2 模擬模式

模擬即是以電腦建立一個接近真實運作情形的環境，將真實情境進行轉換，而隨著模擬的目的與複雜度適時的透過一組假設放寬理想條件。在時刻表穩定度之研究中，模擬模式主要針對不同參數之變化，評估各項因子改變對穩定度之影響。

Carey與Carville(2000)於研究中模擬列車於車站受到不同情境的初始延滯影響後可能產生的外生次要延滯，進行1000次的模擬並將結果用於分析次要延滯之機率分佈，藉此機率分佈作為衡量時刻表穩定性之標準，此模擬結果可用於比較分析在改點前後時刻表可靠度的變化，以作為是否採用改點後之時刻表之依據，亦可用於探討在改變營運策略下對於時刻表的影響程度，提供決策分析參考。

Middelkoop與Bouwman(2002)也在Simone模擬軟體下，模擬荷蘭鐵路路網並設計不同情境來分析時刻表的穩定度，模擬結果可做為營運策略改變之參考，並透過資料庫自動產生可行的時刻表，以此作為改善後的狀況而加以運用。Simone為荷蘭Railned與Incontrol Enterprise Dynamics公司合作開發之模擬軟體，其開發之原意是為了比較不同時刻表之穩定度以作為營運規畫之決策參考輔助工具，該模擬軟體可引入不同的干擾（確定性或隨機性的初始延滯），用於偵測路網可能的瓶頸處並量化不同軌道配置下可能產生的延滯時間，以分析延滯的原因及影響，由於該軟體係針對荷蘭鐵路系統設計，因此擁有荷蘭鐵路系統相關之資料庫，能透過時刻表穩定度目標的設定，改進既有時刻表設計。

Demitz 等人(2004)的研究中指出在規則性班表運作之下由於每一班列車在每個車站的發車模式都相同，加上直達車的關係，在路網中必須有多個轉乘車站使得旅客可連結到路網中的所有車站，而轉乘的時間通常在八分鐘之內，由於延滯

會在列車間蔓延，將造成旅客無法順利轉乘，因此時刻表的強健性(Robustness)便顯得重要，該研究以RailSys模擬軟體嘗試進行調整班表中列車的旅行時間與停站時間並比較加入干擾後平均延滯的變化，以確認調整後在同樣的服務水準下（班次頻率、轉乘連結時間等）不失時刻表的強健性，而利用RailSys同樣能產生確定性以及隨機性的列車作業時間來進行模擬分析。

Vromans等人(2006)指出影響軌道系統營運可靠度的關鍵因素是時刻表的異質性(Heterogeneity)，即在相同區間上列車旅行時間有著很大的變異性，因此以模擬模式嘗試在不改變停站模式等限制下，建構出將旅行時間同質化(homogenize)的時刻表，評估異質性時刻表(Heterogeneous Timetable)以及同質性時刻表(Homogeneous Timetable)在受到隨機性的干擾下的可靠度，並整理相關研究結果提出安排時刻表的準則，減少延滯的擴散及影響，能提高軌道系統的可靠度。

劉昭榮(2011)以臺鐵為例建構鐵路列車連鎖延滯之模擬模式，將一已知時刻表輸入後可產出實際運行的時空圖，如此便能分析連鎖延滯蔓延之程度，該研究中分成兩個階段探討影響延滯之關鍵因素，在第一階段中相關影響參數以確定性的方式作為輸入，在給定不同情境之初始延滯後分析連鎖延滯蔓延情形；在第二階段將站間運轉時間與停站時間兩因素進行隨機特性分析，並納入模式中推估連鎖延滯，分析結果可提供營運單位作為參考。

2.2 軌道容量分析

在時刻表設計績效的評估中，軌道容量的估算是非重要的工作之一，因此本研究將回顧交通部運輸研究所（民 97）所建立之臺鐵容量評估模式。運研所所發展的模式可估算每小時通過列車數或是載運旅客數，本研究中估算容量的客體為列車，而容量指的則是單位時間內某個空間參考點所能通過的最大列車數。另一方面，由於軌道系統相當複雜，難以直接評估整個路網的容量，對於傳統鐵路而言，考慮到交會待避行為多發生於車站內，故車站的股道配置對容量有很大的影

響，臺鐵容量模式的空間參考單位以路線區段為基本分析單元，涵蓋相鄰車站（須能提供交會待避）以及站間路段，如圖 2-1 所示。

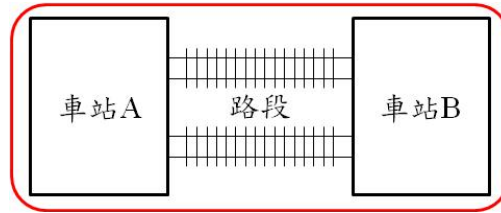


圖 2-1 臺鐵容量模式容量基本分析單元

在軌道容量的計算中考慮最小運轉時隔的組成，公式為：

$$C_l = \frac{3600}{\bar{h}} \quad (2.1)$$

其中， C_l =路線容量(trains/hr)

\bar{h} =路線之列車平均最小運轉時隔(s)

由上式可知計算容量之基礎為最小運轉時隔，而最小運轉時隔由瓶頸號誌安全時距、交會待避損失時間以及運轉寬裕時間組成，圖 2-2 整理了容量計算的分析流程，顯示關鍵輸入資訊為路線條件、交通條件以及控制條件。

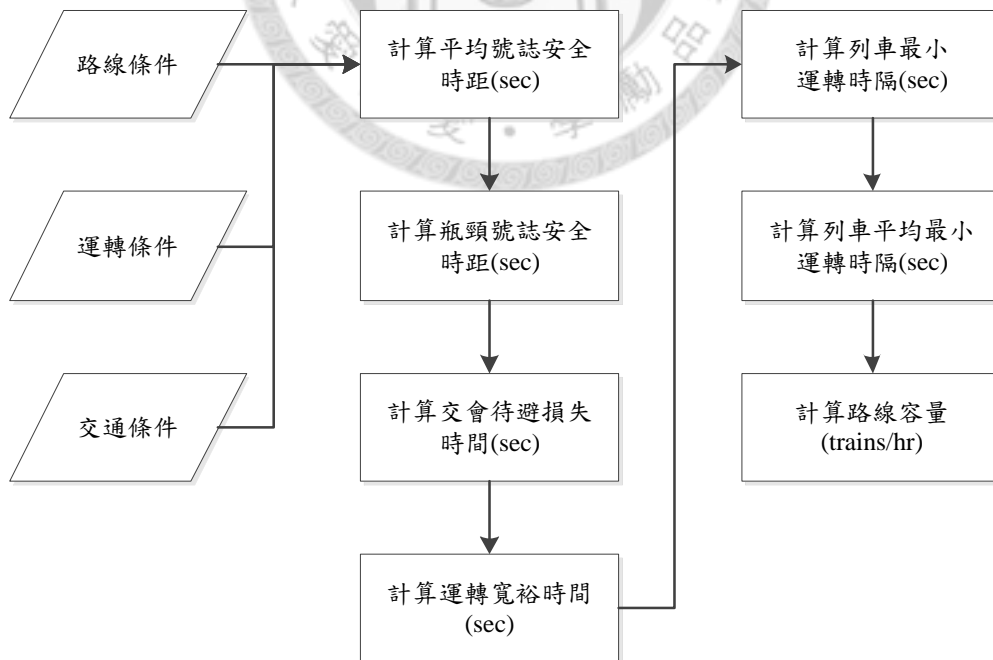


圖 2-2 臺鐵容量模式計算流程

資料來源：Lai et al. (2010)

上圖中的計算步驟簡述如下：

1. 列車分組

依據列車性能、營運型態等資訊將列車進行分組，而分組的目的在於計算時隔。

2. 決定站間運轉時分

3. 決定站內停站時間

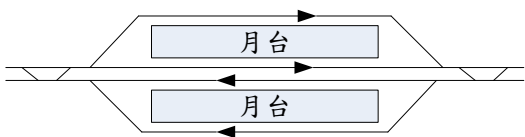
4. 計算平均號誌安全時距

平均號誌安全時距的計算與列車號誌控制系統以及站內股道配置有關；計算上首先需考慮相鄰列車進出站時是否於站內停靠相同股道的情境，表 2-1 為運研所整理各種情境進出站時號誌安全時距之說明，因此在計算上便可選擇適合的公式以求得號誌安全時距，至於詳細推導公式可參考運研所(2008)的研究報告。接著依照站內股道配置與運用方式，計算列車的號誌安全時距，臺鐵容量模式依據臺鐵車站股道配置型式共分為四類，其相對應的計算公式整理於表 2-2 中。

表 2-1 六種列車進出站方式之號誌安全時距

運轉方向	時隔種類	停靠股道	號誌安全時距
同向	進站	同一股道	$T_{s,A1}$
		不同股道	$T_{s,A2}$
	離站	同一股道	$T_{s,D1}$
		不同股道	$T_{s,D2}$
反向	交會	不同股道	$T_{s,M}$
	交叉	不同股道	$T_{s,X}$

表 2-2 臺鐵車站股道配置型式及對應平均號誌安全時距公式

車站月台軌道配置	進出站方式	平均號誌安全時距
	進站	$T_{s,A2}$
	離站	$T_{s,D2}$

	進站	$\frac{1}{3}T_{s,A1} + \frac{2}{3}T_{s,A2}$
	離站	$\frac{1}{3}T_{s,D1} + \frac{2}{3}T_{s,D2}$
	進站	$0.75T_{s,A1} + 0.25T_{s,A2}$
	離站	$0.75T_{s,D1} + 0.25T_{s,D2}$
	進站	$T_{s,A1}$
	離站	$T_{s,D1}$

5. 計算瓶頸號誌安全時距

由於運行時交通組成條件不同，相鄰兩車站的瓶頸號誌安全時距可能有所不同，因此依據表 2-3 的整理，計算不同列車組成的瓶頸號誌安全時距。

表 2-3 瓶頸號誌安全時距公式

交通條件	瓶頸車站位置	瓶頸號誌安全時距
$t_i = t_j$		$T_s = \max(T_{s,D}^A, T_{s,A}^B)$
$t_i < t_j$		$T_s = \max(T_{s,D}^A, T_{s,A}^B - (t_j - t_i))$
$t_i > t_j$		$T_s = \max(T_{s,D}^A - (t_j - t_i), T_{s,A}^B)$
反向交會		$T_s = \max(T_{s,M}^B, T_{s,min})$

註： $T_{s,min}$ 為排點時列車最短交會號誌時距，臺鐵建議值為 25 秒

6. 計算交會待避損失時間

由式 2.2 計算待避損失時間：

$$t_l = \frac{1}{2} |t_i - t_j| \quad (2.2)$$

式中， t_i 為先行列車站間運轉時間(sec)

t_j 為續行列車站間運轉時間(sec)

t_l 為損失時間

至於交會損失時間則可由式 2.3 計算：

$$t_l = \frac{1}{2} (t_i + t_j) \quad (2.3)$$

7. 計算運轉寬裕時間

運轉寬裕時間的計算可由下式決定：

$$t_m = \beta (T_s + t_l) \quad (2.4)$$

其中， t_m 為運轉寬裕時間(sec)

T_s 為瓶頸號誌安全時距(sec)

t_l 為交會或待避損失時間(sec)

β 為運轉寬裕時間係數，在臺鐵容量模式中採用 0.35 來計算

8. 計算列車最小運轉時隔

列車的最小運轉時隔由瓶頸號誌安全時距、交會待避損失時間以及運轉寬裕時間組成，可以式 2.5 表示：

$$h_{ij} = T_s + t_l + t_m \quad (2.5)$$

9. 計算平均最小運轉時隔

平均最小運轉時隔的計算是因為臺鐵列車的車種組成多樣且速度不一致，因此以平均值代表實際營運情況，其作法是給予各種列車組成的最小運轉時隔一權重，如下式整理：

$$\bar{h} = \sum_{i,j} h_{ij} \times p_{ij} \quad (2.6)$$

式中： h_{ij} 為平均最小運轉時隔

h_{ij} 為續行列車 j 跟隨先行列車 i 的最小運轉時隔

p_{ij} 為先行列車 i 與續行列車 j 的相對頻率(根據時刻表統計)

10. 計算路線容量

最後根據式 2.1 便可計算路線容量。

2.3 時刻表、容量與營運可靠度之關係

Goverde(2005)曾以圖 2-3 說明了時刻表設計與軌道系統營運績效之關係，在營運過程中所遭遇的干擾應被記錄，作為設計時刻表時的參考，以確定排班的緊密度是否有預留足夠的空間以應付干擾的產生，實際上這也說明了在 2.1 節中對於時刻表穩定度所做之評估指標，亦可作為營運可靠度之參考。

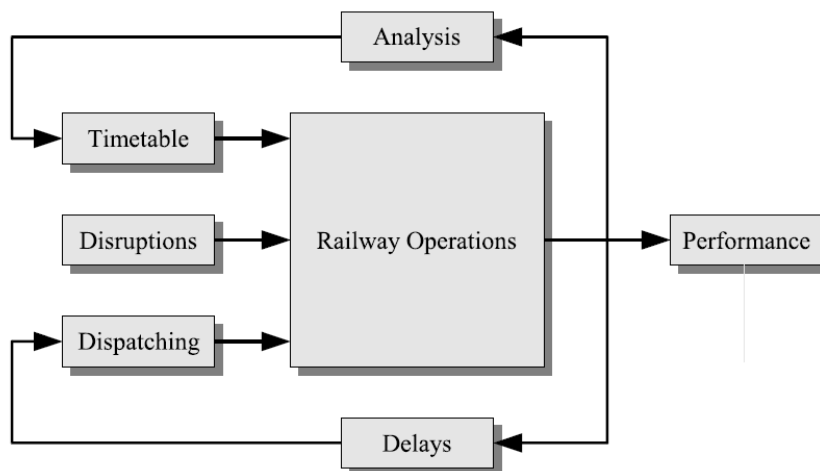


圖 2-3 軌道系統營運績效回饋循環

資料來源：Goverde (2005)

另一方面，又因為時刻表排班作業能夠設計的緊密度受限於軌道基礎設施，因此時刻表、容量與與營運指標之間存在著權衡關係，有鑑於此在僅只是進行時刻表穩定度評估之外的研究，亦有嘗試探討三者之間的關係。

在 Herrmann(2006)的研究中同樣提到了這樣的關係，由於軌道系統建設時，

基礎建設的部分，包括股道配置以及路線規畫等屬於長程規畫項目，而時刻表的設計卻可能在一定營運的時間之後便需要因應需求而改點，在這樣的期限內不太可能去改變既有的軌道配置，同時也因為軌道硬體設施的升級將是一筆龐大的支出成本，相較來說，在時刻表方面採取因應策略是較多營運單位採行的方法，然而此時若要增加班表的密度，將可能犧牲時刻表的穩定度。

Stok(2008)的研究則嘗試建立使用量與時刻表風險之間的關係，由於軌道容量有其限制，不同的使用量可能與營運風險之間存在權衡關係，其所定義的風險為假設在列車運行時不受閉塞控制的情況下連續兩列車之間的距離小於臨界距離(Critical Distance)的機率，而臨界距離的定義為三位式(Three aspect)號誌運轉下的兩閉塞區間長度與列車長度之和，考慮到列車的站間運行時間具有隨機特性，該研究以布朗運動(Brownian Motion)描述列車站間運行過程並以隨機微分方程表示，將預計的使用量輸入蒙地卡羅模擬模式中藉由每一次的蒙地卡羅模擬迭代(Monte Carlo Iteration)求解連續兩列車距離，經過一千次模擬後可估計該使用量下風險出現的機率。圖 2-4 為其案例分析之使用量與風險之關係圖，當列車間的班距越小表示列車數越高，而其風險也越高。

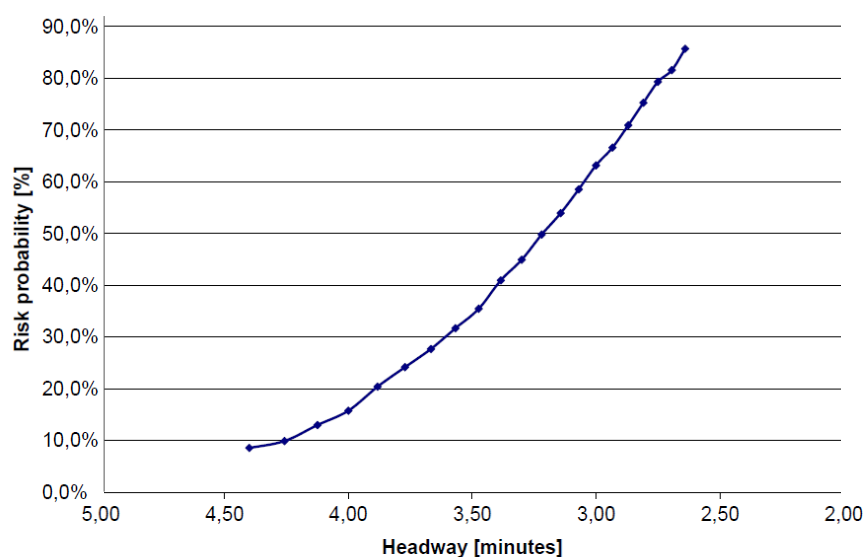


圖 2-4 班距與風險之關係

資料來源：Stok(2008)

李宗晏(2010)的研究中亦指出，軌道容量的使用率與時刻表穩定度之間有很大的關係，當使用率增加時會導致時刻表穩定度的下降，因此在其研究中評估時刻表穩定度時亦建立了效率分析模組，一方面可監控使用率不佳的時刻表以使得使用量能在合理的範圍內提升；另一方面，一個不穩定的時刻表必定有著高使用效率，因此可適時的減少使用量至可接受的使用率標準，重新分析該時刻表的穩定度，作為排點人員的參考。

2.4 小結

總結來說，軌道運輸系統在營運過程中受到干擾是無可避免的，更可能會在列車與列車之間連鎖影響，影響程度取決於時刻表的設計，因此時刻表評估提供了衡量在既有軌道硬體設施之下，檢視對於提供滿足旅客需求(時刻表)的設計可能的影響，而這樣的影響往往是以「時間」的概念作為評估指標，在上述的回顧中可以看到評估指標包括：(1)緩衝時間大小(2)平均延滯時間或其分佈(3)平均連鎖延滯時間或其分佈(4)改點後延滯增加的比率等，主要仍是以「延滯時間」的相關概念作為出發點，唯李宗晏指出延滯時間評估可能的缺失，提出一個新的方式計算「回復時間」作為指標，其定義之回復時間計算與軌道系統路線實用容量息息相關，而時刻表、容量與營運可靠度之間存有權衡關係，因此回復時間適合用於評估時刻表設計績效，此外其研究方法結合了風險分析的概念，可將軌道營運當中行車事故的不確定性納入考量，然而若以行車事故的隨機特性作為模式的輸入，則應可得到具有隨機特性的分析結果，例如回復時間的範圍亦或是機率分佈，在李宗晏的研究中尚未對此進行探討，本研究將蒐集行車事故歷史資料，預測行車事故的發生機率，同時結合軌道容量與時刻表使用量的分析，進一步延伸分析回復時間的不確定性提出相對應的評估指標，並進行系統性的整理以建立一個完整的時刻表績效評估系統。



第三章 時刻表績效評估系統架構

第三章將對本研究進行時刻表績效的評估方式與流程作介紹，內容首先說明為何使用這些評估指標，接著介紹各項指標的建立方式以及評估方法，最後系統性的整理評估系統架構與流程。

3.1 評估指標意義

在第二章中的回顧可看到過去文獻對於時刻表、容量與營運可靠度之間的權衡關係的強調，顯示資源的運用情形是軌道運輸系統營運的重要影響因素，營運單位在安排時刻表時考量的不僅是旅客會有密集班次的需求，同時也為了有效利用容量避免資源的浪費，因而會需要了解時刻表使用效率作為參考資訊；另一方面，營運單位也必須要能提供可靠的服務以獲取旅客的滿意度，可靠的服務則有賴於穩定的時刻表，對於時刻表設計優劣的評析又常藉由穩定度衡量，因此在本研究對於時刻表績效所建立的評估系統包含了使用效率與穩定度的評估指標，其中使用效率的評估可由已知的計畫時刻表與軌道實用容量計算而得，而在評估穩定度時應考慮軌道系統實際在營運時包括列車本身運行的過程以及周圍環境因素充滿著不確定性的情況，因而列車營運過程中受到干擾的情形是不可避免的，所以在評估穩定度時重要的課題是：(1)時刻表受到影響的機率程度如何以及(2)受到影響後的影響程度大小，因此本研究將根據前述兩項課題探討時刻表的穩定度，同時建立三個穩定度的相關指標，以確保考慮了不確定性的要素。以下首先說明使用效率與穩定度之意義。

由於軌道系統的基礎設施建設有著高投資成本的特性，對於營運單位而言，如果有足夠的系統需求，將盡可能的充分利用軌道容量資源，另一方面，也因為軌道系統的使用率在未來有著持續成長的空間，可以預期使用量的增加；基於前

述原因，反映在時刻表的結果是高使用量的安排，然而由圖 3-1 中可看到當使用量越高，迫近甚至是超過軌道容量的極限，意味著剩餘容量的減少甚至消失，同時密集的安排，導致列車與列車之間緩衝時間的縮短，增加了事故發生後列車延滯蔓延的機會，反而犧牲了時刻表的穩定度進而造成營運可靠度的下降，影響服務水準，因此從容量使用效率進一步探討分析，一方面可檢視使用率不佳的資源運用情形，另一方面，後續結合穩定度的分析亦可找出不穩定的時刻表進而減少時刻表使用量，當運輸需求不允許減少使用量時，效率分析甚至可作為未來硬體設備投資與升級的參考，因此在時刻表績效的評估系統中，使用效率將作為第一個評估指標。

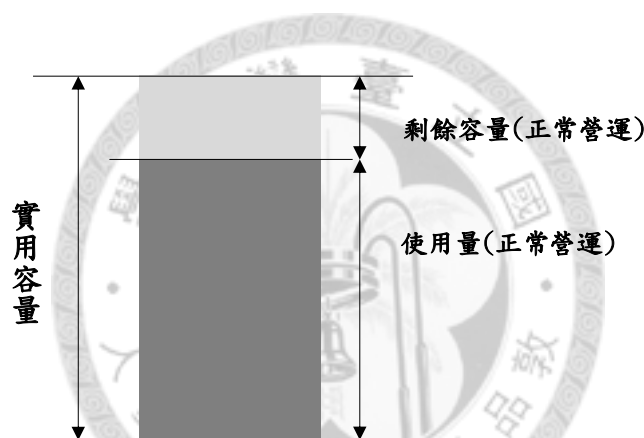


圖 3-1 軌道容量關係圖

至於所謂的穩定度，指的是時刻表吸收干擾的能力，時刻表若具有良好吸收干擾的能力，軌道系統受到干擾的時候便能迅速的回復至正常運行，過往研究多考慮列車運行時的作業時間受到干擾而產生的相關延滯時間作為指標，本研究首先將以「期望回復時間」作為第二個評估指標，在這之前應先了解回復時間的意義，根據評估模式的運算進一步即可求得期望回復時間。

顧名思義，回復時間的概念可理解為列車從不穩定的狀態回復到正常狀況下營運所需的時間，在過往的研究中，如 Hansen(2010)指出，為了能夠消耗短時間的延滯，在時刻表排點時應預留回復時間(Recovery time)，例如國際鐵路聯盟 (UIC，International Union of Railways)之建議：增加列車實際站間運轉時間的 7% 作為緩衝；

回復時間的概念與穩定度的定義相似，因此以回復時間作為評估指標或許是可行的方法，然而，就如同前所述，過去國外學者的研究多將回復時間定義為時刻表中預防「微小」延滯所刻意安排於作業時間中的增補時間，當列車遭遇長時間延滯時，列車則必須採取運轉調度策略，因此以先前國外學者所定義的回復時間，無法反應長時間干擾的影響程度，而多半仍以延滯時間作為時刻表績效的評估指標，然而以延滯時間作為指標有其可能的缺失(將於 3.3.4 節說明)，因此根據回復時間的概念，李宗晏從容量的角度提出計算方式，且可考慮不同時間長度的干擾，關於回復時間的計算方式將於後續章節中介紹。

進一步若考慮到系統受干擾後回復至正常所需之回復時間應具有不確定性，透過對於行車事故的不確定性進行分析，由回復時間之標準差可衡量其不確定性，當標準差的數值越高，顯示離平均值的程度越遠而不穩定，因此標準差為第三個評估指標。另一方面，營運過程中回復時間可能存在一個標準值，營運單位將盡量避免事故發生後回復時間超過此標準值而對營運產生嚴重的影響，透過不確定性分析可另外求得「回復時間之機率分佈」，根據適合的分佈計算超過標準值的機率，衡量超標的可能性，稱之為時刻表的失效機率並定義為第四個指標。

本研究認為一個時刻表績效的評估應同時考慮上述指標以更完整得資訊來進行決策，當使用效率增加而導致期望值較高時不必然標準差與失效機率就更高，若期望值並非劇烈的增加且標準差亦或是失效機率較低時，或許以該時刻表來營運是可接受的，取決於實務單位的經驗來決定是否採用現行時刻表或是進行修正作業。以下將說明各指標之運算方法與模式。

3.2 指標一：時刻表使用效率

根據運研所(2008)的研究報告，所謂容量使用效率(或利用率)，即是使用容量與實用容量的比值，可以下式表示：

$$\eta(\%) = \frac{f_t}{C_t} \times 100\% \quad (3.1)$$

其中， η 為容量使用率

f_t 為使用量

C_t 為路線實用容量

式 3.1 中路線實用容量的計算分析如同 2.2 節的回顧，由系統的路線條件、運轉條件以及交通條件計算在正常營運條件下單位時間內可通過的列車數上限，而使用量是由時刻表的到開資訊轉換而得，說明在單位時間內由時刻表安排實際通過的列車數，因此將兩者相除便能得到容量實際運用的比值，透過時刻表使用效率的分析，便能了解目前軌道基礎設施資源的使用情形，而在這樣的資源使用情形下，結合穩定度的分析以檢討設計時刻表的績效，可作為營運規畫的參考資訊。

3.3 指標二：期望回復時間（容量使用之風險）

期望回復時間的評估以定量的風險分析方式進行，Purdy(2010)整理國際標準組織於 2009 年公告有關風險管理標準 ISO 31000：2009(正式名稱為 Risk management – principles and guidelines，風險管理原則及指導綱要)的說明，指出當中對風險的定義為「不確定性對目標的影響」，由此可知所謂風險主要包含了「不確定性」與「影響」兩個部分，並且風險是可以衡量與計算的，一般在風險分析上主要便是衡量這兩者的組合，可將之視為事件發生的「機率強度(Probability)」與「事件後果(Consequence)」之乘積(如式 3.2)，來分別描述「不確定性」以及「影響」。

$$\text{Risk} = (\text{Probability}) \times (\text{Consequence}) \quad (3.2)$$

由前述可知，風險的概念涵蓋「機率」與「嚴重度」兩個部分，而軌道系統在行車營運時受到干擾的發生具有不確定性的特性，因此對於分析 3.1.2 節所提到的兩個課題，風險分析概念的運用是一個可行的方法，此便是因為風險可將「隨

機特性」與「事件後果」的影響納入考量。

考量軌道容量因為行車事故影響導致可用容量下降（下降的結果定義為事故容量）造成營運狀態的改變，而平均所需回復至正常的時間即為本研究所定義之穩定度，以風險分析的角度評估時刻表穩定度的步驟包括：風險識別、危害分析、後果分析以及風險估計，如圖 3-2 所示，而其整體分析流程整理如下：

1. 確認風險分析範圍

在時刻表穩定度的分析中，需要將時刻表資訊進行轉換，因此須先確認分析路段以及分析時段的範圍，以確定資料蒐集範圍。

2. 決定分析事件種類

軌道行車營運中干擾事件的可能性有許多，例如：天然災害、行車事故、人員因素等，對於不同的分析事件，分析結果會有不同的意義。

3. 事件資料蒐集與整理

針對分析範圍蒐集基本資訊以及歷史資料，包括事件數、路線資訊等，為後續分析之前置作業。

4. 事件頻率分析

涵蓋曝光量之決定以及分析行車事故之發生機率。

5. 事件損害程度分析

在事件損害程度分析的工作中將探討容量改變所帶來的影響。

6. 風險程度計算。

將風險事件進行量化分析，以求得期望回復時間值。

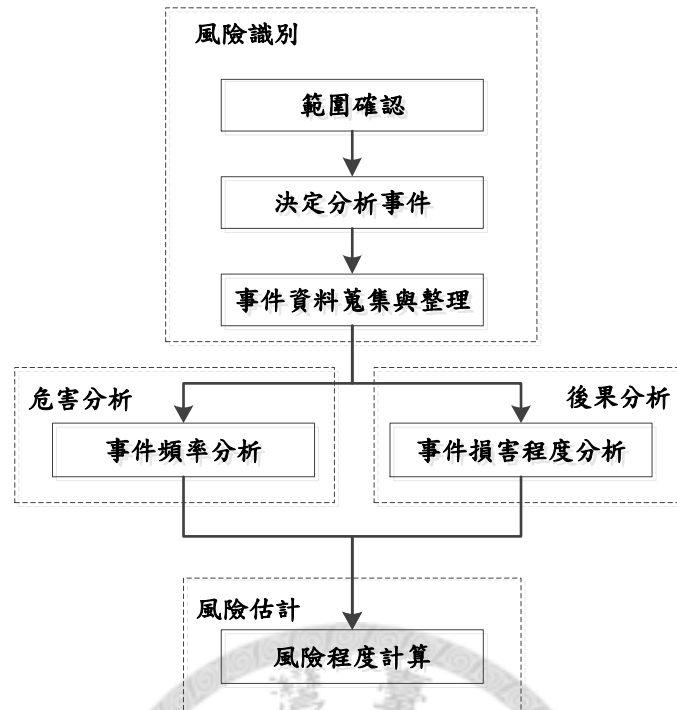


圖 3-2 穩定度風險分析流程圖

3.3.1 期望回復時間模式架構

時刻表之穩定度評估方法基本概念為風險分析，包含「發生機率」以及「嚴重度」兩個部分，在軌道系統中存有各種風險導致系統中斷運行而影響時刻表的正常營運，本研究主要著重於分析軌道系統中不可預期的行車事故的影響，也就是研究中考慮各類行車事故導致營運中斷的發生機率，而不納入天災人禍事件的影響；至於嚴重度的衡量則以「回復時間」取代延滯時間作為指標。

圖 3-3 為時刻表期望回復時間的分析流程，圖中顯示模式之輸入主要涵蓋三個部分：行車事故資料、計畫時刻表以及路線資訊，並透過「事故發生機率分配試合模組」估算行車事故發生機率；「容量分析模組」則是估計嚴重度的重要分析工具，回復時間的計算由容量及時刻表使用量而得，此模組包含運研所出版之臺鐵容量模式以及李宗晏所提出之事故容量計算方法；最後計算機率與回復時間之乘積得到「期望回復時間」作為時刻表穩定度的評估指標。

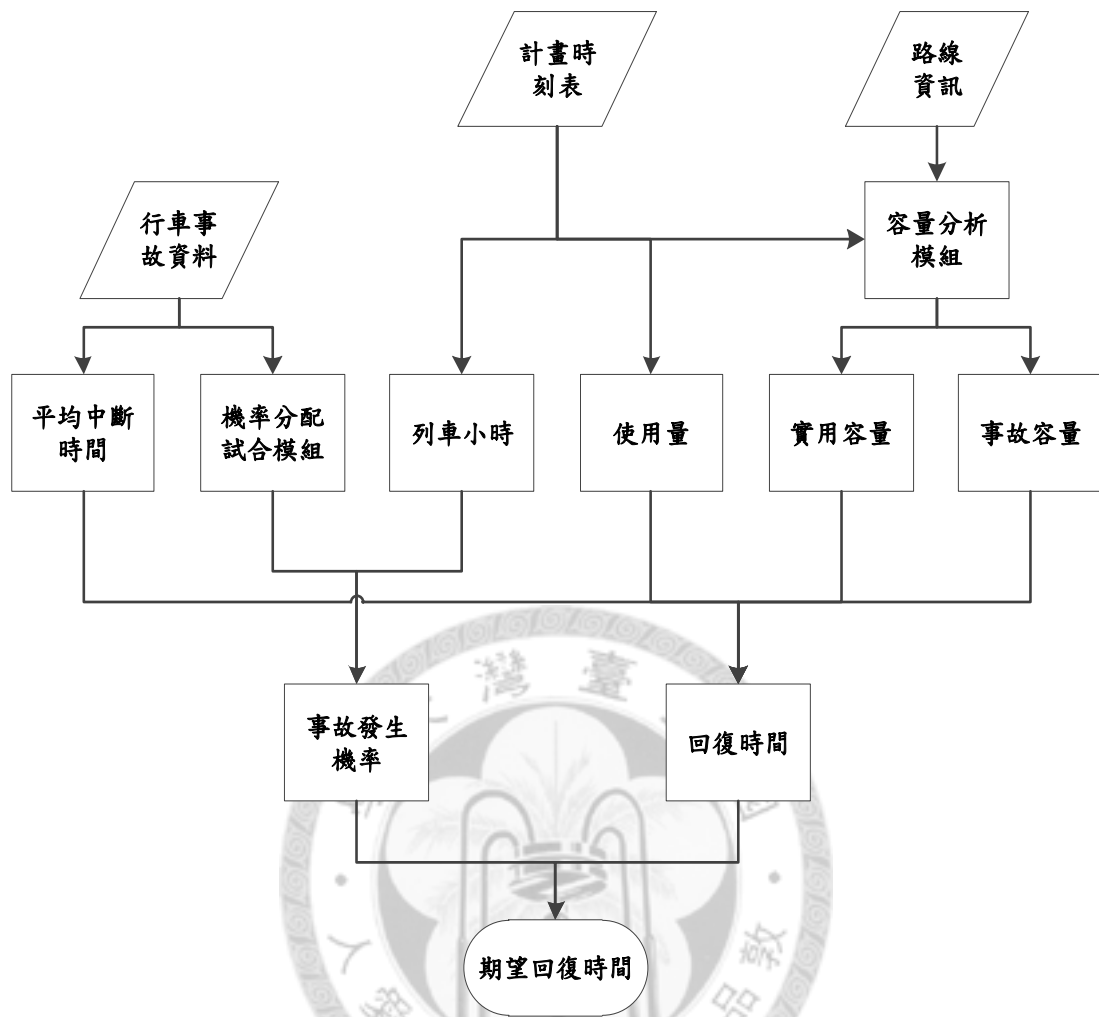


圖 3-3 期望回復時間分析流程圖

3.3.2 事故發生機率分析

在圖 3-3 中，事故發生機率分配試合模組引用自劉牧阡(2010)之研究，該研究指出：在軌道運輸相關研究中過往主要多以次/年、次/人旅次、次/動力車行駛公里等平均值來估計事故發生頻率，然而若將行車相關軟、硬體視為一個系統一併考量，隨著曝光量的增加，事故發生頻率可能呈現非線性增長的狀態，因此改以「可靠度」的概念透過事故發生機率分佈估算不同的使用時間內的事務發生機率而非以平均值定義，並假設行車事故發生的間隔符合指數分佈，藉此估計行車事故的發生機率；另一方面，一般來說在尖峰時刻與離峰時刻使用量會有明顯的不同，

因此將時段劃分後再分析時刻表穩定度可以突顯時間點所造成的差異，反應不同時段事故發生機率的不同。

在計算事故發生率時，曝光量的定義對於研究結果有很大的影響，過去研究常界定為列車行駛公里數，但若考量到在一時刻表下各個區段通過列車數的不同，其行車事故發生的機率也不相同，而當列車慢行、怠速或停站時，只要列車在營運的狀態下，皆有可能發生事故，因此曝光量單位改以各區段之「列車小時」來定義。在劉牧旻的研究中，列車小時是先計算各時段的「使用量」，再以使用量乘上時段長度而得，而使用量係指時刻表上單位時間內通過某路段的列車數，舉例來說，若將時段劃為 60 分鐘，在營運路線上某一區段在時段 6:00~7:00 上通過 8 列車，則「路線使用量」為 8(列車/60 分鐘)，「列車小時」為 $8 \times 1 = 8$ (列車小時)。若以此方式來估計列車小時，則時段的選擇變得非常重要，由於一般來說列車在某一個路線分析單元(同容量分析單元)上的作業時間(包含站間旅行時間、停站時間等)大致上落在 4 至 15 分鐘不等，那麼使用量所乘上的時段長度理當能動態的配合每個作業時間長度會更準確，以研究原本選定的 30 分鐘(0.5 小時)來說，乘上 0.5 來計算實際上是假設每一列車有半小時的作業時間，若實際僅有 15 分鐘的作業時間(15 分鐘後以運行至其他區段上)，將可能高估列車小時；有鑑於此，本研究列車小時之計算方式改以列車實際作業時間在該時段長度的比例並將該時段內個別列車所佔的比例加總來得到該時段的列車小時。以此方式計算則能避免高估的情形，同時對於一時刻表來說列車小時總和不會隨著時段劃分長度的改變而改變，仍保持為一定值。圖 3-4 說明了列車小時計算的改變。

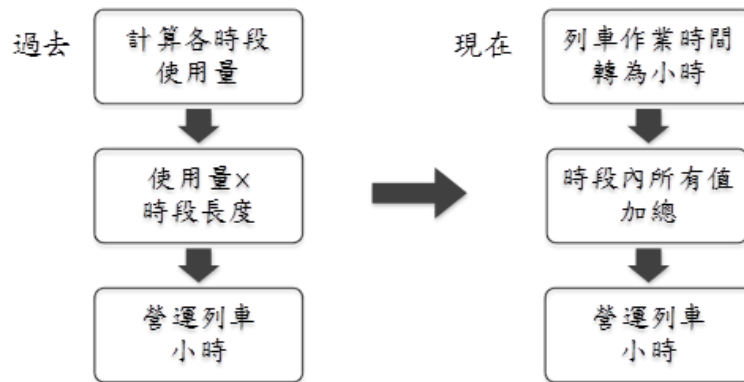


圖 3-4 列車小時計算方式變更說明

現實上來說，各類事故的發生原因有很多種狀況，即便為同一類事故也可能有不同的影響，導致路線中斷時間的長短亦有很大的差別，因此可進一步藉由「集群分析法(Cluster Analysis)」來處理事故資料，集群分析的使用不需有任何假設，可將同一類事故再分為數個等級，使得每一個分群中資料有較高的同質性，也就是事故中斷時間相近，而不同分群中的事故資料則存有明顯的異質性，之後才以事故發生機率分配試合模組來計算各類、各等級事故的發生機率。

研究中採用兩階段集群分析法(Two-Step Cluster Analysis)將事故類別再劃分，而進行集群分析的變數為事故中斷時間長度，首先採用華德法(Wards Method)決定集群個數，再以 K-平均數法(K-Means)進行最後分群，使分群結果更具代表性。而本研究的分析程序扼要說明如下：

1. 透過第一階段「階層式(Hierarchical)集群分析」之華德法進行第一階段決定集群數的作業，先將每一個個體視為一個集群，接著將各集群依序合併，以群內觀察值變異數和最小以及群間觀察值變異數和最大為目標決定集群數。
2. 第二階段為「非階層式(Non-Hierarchical)集群分析」，以步驟一分群的結果，計算各群平均數作為 K-means 分析的起始點，找出最後集群之個數，以確定各類事故的分群結果。

將集群分析後的事務類別分別透過發生機率分配試合模組求得事故發生機率分佈，研究中視軌道系統為可修復系統，且系統故障率為一常數，而事故發生間

隔(以列車小時計算)符合指數分佈，其機率密度函數如式 3.3 所示：

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, 0 < t < \infty, \lambda > 0 \quad (3.3)$$

其中， λ = 事故發生率

t = 事故發生間隔時間(列車小時)

而累積分佈函數則可以表示為式 3.4，其意義為在使用時間 T 內，事故發生的機率為 P 。

$$F(T) = P(t < T) = 1 - e^{-\lambda T} \quad (3.4)$$

上式中需要估計的參數為事故發生率 λ ，至於參數估計之方法，研究中以機率繪圖紙法估計參數，再以 K-S 檢定(Kolmogorov-Smirnov Test)進行適合度檢定(Goodness of Fit Test)驗證理論分佈的正確性。

由於指數分佈具有無記憶性(Memoryless)，因此無論前方區段已營運多少列車小時，各時段區段下事故的發生機率只與該時段區段下的列車小時數有關，由此可表現出一時刻表下各區段於不同時段之事故發生機率的特性。關於機率分配試合模組的計算流程整理如圖 3-5。

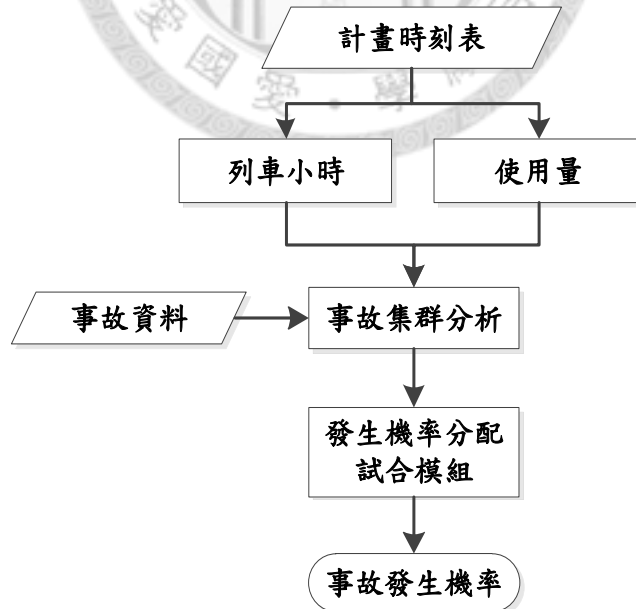


圖 3-5 事故發生機率計算流程

3.3.3 嚴重度分析

本節將說明如何計算事故發生後的嚴重度指標—回復時間，而實用容量與事故容量的計算為分析回復時間的重要依據，在第二章已回顧實用容量的計算步驟及方法，因此將先說明事故容量的概念，再介紹如何依據容量分析模組求得回復時間。

(1) 事故容量分析

事故容量的分析由李宗晏(2010)提出，基本承襲運研所(2008)的臺鐵容量模式，依舊維持以路線區段(包含兩端車站及中間路段)作為最小分析單元，然而所考慮的是當事故發生後，造成某股軌道無法提供列車通行進而導致可用股道數減少的情形，由於此時是以剩餘可用的股道配置來運行，容量可能因此而下降，對續行列車產生影響，分析此時下降的容量值，即為事故容量的基本概念，其示意圖如圖 3-6 所示。

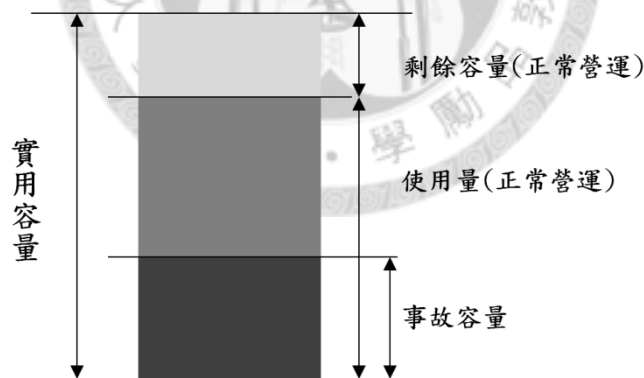


圖 3-6 事故容量示意圖

而問題是當事故的發生為隨機狀況，不同類型的事務發生在路段亦或是車站，不同的地點原先就有著不同的股道配置，事故發生後可能被封閉的股道數也不同，列車運行必須避開事故發生地點，因此事故發生的地點及對股道的影響會影響容量的計算，在臺鐵容量模式中並未分析事故發生後的容量值，有鑑於此，必須重新對事故容量進行討論，首先將臺鐵制定的 33 類事故依其可能發生的地點區分為

「路線事故」與「車站事故」(見表 3-1)，接著在車站內發生事故是導致一股道封閉還是兩股道皆封閉的單股道事故或雙股道事故。

表 3-1 事故發生地點統整表

發生於站間路段之事故	發生於車站之事故
衝撞、傾覆、火災、列車出軌、車輛出軌、列車分離、進入錯線、機車故障、電車故障、機動車故障、客車故障、貨車故障、電車線設備故障、路線故障、列車障礙、列車妨礙、平車或電搖車障礙、車輛衝擊、閉塞裝置故障、號誌故障、號誌機外停車、列車延誤、死傷、其他。	衝撞、傾覆、火災、列車出軌、車輛出軌、列車邊撞、車輛邊撞、列車分離、進入錯線、機車故障、電車故障、機動車故障、客車故障、貨車故障、路線故障、車輛溜逸、止衝檔衝擊、路牌錯誤、列車妨礙、車輛遺留、轉轍器擠壞、車輛衝擊、無閉塞行車、辦理閉塞違章、號誌故障、列車延誤、死傷、其他。

資料來源：李宗晏(2010)

事故容量之最小運轉時隔亦包含瓶頸號誌安全時距、交會待避損失時間以及運轉寬裕時間，而此時瓶頸號誌安全時距的分析將受到影響，不同事故影響下的推算過程會依據股道佔用情況區分為路線事故之號誌安全時距計算以及車站事故之號誌安全時距計算，至於交會待避損失時間與運轉寬裕時間計算方式如第二章之回顧。

路線事故號誌安全時距計算公式

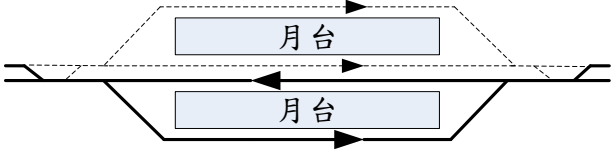
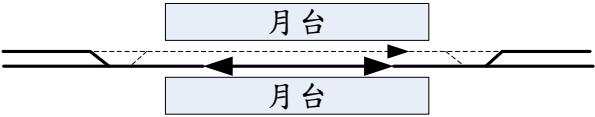
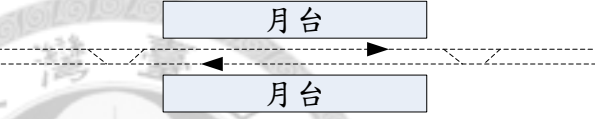
由於站間路段僅有兩股複線運轉的軌道，當事故發生在站間路段時，某一方之列車無法通行，受影響之列車將運用對向股道行駛，此時站間路段則改由單線運轉行駛並以單線運轉之公式(運研所，民 97)計算事故容量。

車站事故號誌安全時距計算公式

至於在車站內的事故容量計算與車站內的原始股道配置有關，若站內有兩股專用股道提供列車停靠，此時車站事故造成單一股道封閉亦或兩股皆封閉會有不同的事故容量計算方式；為此，依據臺鐵車站原始股道配置的類型李宗晏另外提出三種事故月台型式，因此一共七型月台型式作為考慮發生單股道事故亦或是雙

股道事故後，推算號誌安全時距的基準，而新增之月台型式如表 3-2 所示。

表 3-2 事故月台型式

事故月臺	圖示
第 V 型月臺	
第 VI 型月臺	
第 VII 型月臺	

資料來源：李宗晏(2010)

舉例來說，當第一型月台發生雙股道事故導致月台變為第五型時，此時對向一股專用股道必須供事故方向列車停靠，由於車站內平面交叉處可能產生衝突，在分析時必須分別考慮同向列車停靠一股道之進出站時距以及反向行列車於交叉處之時距，因此可用同向進出站之時距 $T_{S,A1}$ 、 $T_{S,D1}$ ，以及反向列車平面交叉之號誌安全時距 $T_{S,X}$ 來分析；又如當第四型車站發生單股道事故導致月台為第六型時，車站內僅有一股道提供雙向列車停靠，若列車的運轉是依一南下一北上的規則停靠，此時進出站的號誌安全時距可依 $T_{S,X} + t_d$ 來計算；而當第四型月台發生雙股道事故導致月台成為第七型時，站內已無可用軌道供列車停靠，即在中斷時間內所有列車皆無法通行，此時的事務容量則為零。其餘的事故月台型式與原本典型四型月台類似，計算公式則與 2.2 節回顧之實用容量模式相同，可參閱運研所(2008)之研究報告，所有推導結果整理如表 3-3。

最後依據事故發生的地點，例如圖 2-1 中當 A 站發生事故，將 A 站的事務號誌安全時距與路線及 B 站正常營運下的號誌安全時距比較，可決定該分析單元中

的瓶頸事故容量，所得之事故容量便可作為後續回復時間計算的基準。

表 3-3 各事故類型之號誌安全時距

事故類型	車站類型		號誌安全時距	
	事故發生前	事故發生後	進站	離站
單股道事故	第一型車站	第三型車站	$0.75T_{s,A1} + 0.25T_{s,A2}$	$0.75T_{s,D1} + 0.25T_{s,D2}$
	第二型車站	第四型車站	$T_{s,A1}$	$T_{s,D1}$
	第三型車站	第四型車站	$T_{s,A1}$	$T_{s,D1}$
	第三型車站	第五型車站	$\max(T_{s,A1}, T_{s,X} + t_d)$	$\max(T_{s,D1}, T_{s,X} + t_d)$
	第四型車站	第六型車站	$2 \times (T_{s,X} + t_d)$	$2 \times (T_{s,X} + t_d)$
雙股道事故	第一型車站	第五型車站	$\max(T_{s,A1}, T_{s,X} + t_d)$	$\max(T_{s,D1}, T_{s,X} + t_d)$
	第二型車站	第六型車站	$2 \times (T_{s,X} + t_d)$	$2 \times (T_{s,X} + t_d)$
	第三型車站	第六型車站	$2 \times (T_{s,X} + t_d)$	$2 \times (T_{s,X} + t_d)$
	第四型車站	第七型車站	事故容量為零	事故容量為零

資料來源：李宗晏(2010)

(2) 回復時間計算

當軌道系統發生事故而造成營運中斷時，定義在中斷時間原本預定要發出或通過該中斷點的所有列車為中斷列車數，若以圖 3-5 來說明，時刻表在某時段排定了既定的使用量，然而發生事故之後造成容量下降為事故容量，若事故容量甚至小於使用量則此時使用量超過事故容量的部分所代表的列車因無法停靠或通行，於是產生了中斷列車；在事故排除後，利用後續時段的剩餘容量來消耗中斷列車數所需的時間即稱為回復時間(T^R)，透過圖 3-7 可展示上述概念。而在應用回復時間的概念時，值得注意的是，回顧過去國外的文獻，當列車延滯時間過長，會考慮將列車取消，然而在本研究中事故發生後，即使中斷時間過長，依然會將所有列車發完，此是由於要考量車輛指派的接續問題，避免隔天的營運無列車可運用，

同時過程中的運轉調度方式與調度人員能力將忽略，假設營運的過程中，調度人員有足夠能力將該時段的剩餘容量利用完。

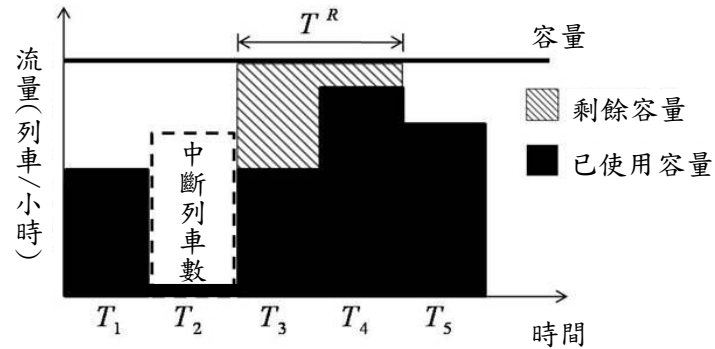


圖 3-7 回復時間示意圖

而回復時間的計算步驟則整理如下：

- 步驟一：決定時間區段長度 T
- 步驟二：計算單一事故發生於時段 T_n 時，在中斷時間內產生的中斷列車數 C
 1. 中斷時間小於 T 時，該事故造成的中斷列車數 C 為 T_n 內原本應通過卻未通過之列車數 E_n^D
 2. 中斷時間大於 T 時且自時段 T_n 至 T_{n+N} ，中斷列車數 C 的計算則等於 T_n 至 T_{n+N} 內應通過而未通過之列車數 $\sum_{n}^{n+N} E_n^D$
- 步驟三：計算單一事故發生於時段 T_n 後，回復至時刻表正常運作所需之時間 T^R
 1. 中斷時間小於 T 時，當事故排除後自時段 T_{n+f} 至 T_{n+y} 時剩餘容量總和 $\sum_{h=n+f}^{n+y} I_h^R$ 大於 C 時，所用的回復時間等於 $y \times T$
 2. 中斷時間大於 T 時且自時段 T_n 至 T_{n+N} ，當事故排除後自時段 T_{n+N+f} 至 T_{n+N+y} 之剩餘容量總和 $\sum_{h=n+N+f}^{n+N+y} I_h^R$ 大於 C 時，回復時間等於 $y \times T$

在計算嚴重度時，事故發生地點可能於兩端車站以及中間路線，由於不同的地點所估算的事故容量值會有不同，因此透過歷史資料統計發生於站間與車站的

比例，並以此為權重，依序求出兩端車站以及中間路線的回復時間後，再乘上對應的比例，作為該時段區段的嚴重度估計值，舉例來說，當車站的比例為 f ，則站間為 $1-f$ ，因此回復時間值可以下式計算：

$$\text{回復時間} = \frac{(\text{A 站} + \text{B 站})}{2} \times f + (\text{站間}) \times (1 - f) \quad (3.5)$$

另外必須說明的是，在李宗晏的研究中，中斷列車數的計算是將時段長度內的所有使用量都計為中斷列車，也就是即使中斷時間長度未滿時段長度，仍將所有使用量列入考慮，也因此計算回復時間時皆從事故修復後的下一個時段開始計算，基於這個原因以及其計算列車小時的方式，回復時間的計算應當使時段長度越短以得到越準確的估計結果，而因此採取 30 分鐘為時段長度。本研究中斷列車數的計算則依據中斷時間的長度計算，未滿時段長度則將該時段的使用量減去事故容量後再乘上中斷時間長度佔時段長度的比例，而回復時間的計算則當事故排除後即開始運算，後續在某個時段中若剩餘容量大於中斷列車數時，則以中斷列車數佔剩餘容量的比例再乘上時段長度作為該時段的回復時間，同時，本研究亦修改列車小時的計算方式，如 3.3.2 節中所述，因此便不需要將時段切的非常細，而為了方便計算本研究的時段長度選擇以一小時來劃分。

3.3.4 期望回復時間運算模式

風險的定義為事故發生機率與回復時間的乘積，因此風險的計算實際上可看作是嚴重度的期望值，可以式 3.6 計算：

$$Risk_{\text{Timetable}} = \sum_{i,j,k} Risk_{ij}^k = \sum_{i,j,k} Probability_{ij}^k \times Recovery\ Time_{ij}^k \quad (3.6)$$

其中， k ：第 k 類事故

i ：第 i 個區段

j ：第 j 個時段

所得的結果可表示該時刻表在各類事故發生一次後回復至正常狀態下營運的

平均時間，並隱含不同類型的事故發生為互斥事件的假設，當一時刻表的期望回復時間越高，說明該時刻表在發生事故後所需要的回復時間就越長，因此相對來說就是一個較不穩定的時刻表；反之若得到較低的期望回復時間則為相對穩定的時刻表。

從第二章的回顧可知在先前的時刻表穩定度相關的研究中多以「延滯」相關的時間作為評估指標，而延滯時間的定義是實際到達時間與預計到達時間的差異，一般在記錄上有兩種記錄標準：一是直接計算列車在終點站的延滯，忽略中間站的記錄，由於中間站可能有趕點的運作方式使得整體延滯記錄變小，對於中間站曾經發生的延滯若忽略不計，可能會低估整體系統的不穩定性；另一則是列車在各個車站的延滯時間加總，然而此種方式記錄則會高估，因為對營運單位而言實際上只需要排除最初造成的延滯即可減緩對系統整體的影響；而以回復時間作為評估標準，則僅在發生事故的當下估算影響最後再加以累計，而取得兩種延滯記錄方式的平衡。

3.4 指標三：回復時間標準差

在前一節中的模式根據事故發生率與回復時間來衡量容量使用風險，此計算結果為「平均值」，然而實際營運時是具有不確定性的，探討回復時間的不確定性進一步可以分析其標準差；由前面的章節可知回復時間的計算實際上是一連串複雜的分析步驟，並受到軌道系統營運過程中行車事故隨機現象的影響，有鑑於此，本研究以蒙地卡羅模擬法建構時刻表評估模擬模式，相較於解析模式僅能得到回復時間的期望值，蒙地卡羅模擬的輸入為機率分佈而能得到各種對應的輸出結果，可分析已知時刻表回復時間的不確定性，是不確定性分析常用的研究方法。

本節將說明如何透過蒙地卡羅模擬法進行隨機抽樣以計算回復時間，並對抽樣結果進行分析，計算其餘的穩定度指標。回復時間的產生，是由於行車事故中有許多不確定性的因素所造成，因此本研究以蒙地卡羅模擬法進行分析，所謂的

蒙地卡羅模擬，即是透過已知機率分佈的隨機變數進行取樣，得到一隨機變數值後計算相對應的輸出。由於蒙地卡羅模擬是一個完全隨機的取樣過程，取樣應盡可能涵蓋到定義域中的所有位置，因此在應用上必須重複相同的取樣步驟數次，以使模擬結果具代表性；而因為蒙地卡羅模擬法的運用主要基於兩個理論：大數法則(Law of large number)以及中央極限定理(Central limit Theorem)(James, 1980)，前者說明在這樣本空間中所模擬得到的樣本來自於相同分配中的隨機變數，經過相當次數的模擬後所得到的樣本平均數具有一致性，且是母體平均數之不偏估計；而中央極限定理則假設一隨機變數 X ，若抽樣一組隨機變數樣本，不論其母體分佈為何，當取樣數 n 夠大時，樣本平均數 \bar{X} 將會趨近於常態分佈。因此模擬結果可視為具統計性質，以統計估計結果與推論結果對問題進行探討亦可適用(洪華生, 1988)。

而回復時間的不確定性分析的概念可整理如圖 3-8 步驟：

1. 確認分析範圍

同期望回復時間分析，確認路線、時段資訊以確定資料蒐集範圍。

2. 探討行車事故的隨機特性來源

探討隨機特性之因子為何，並決定參數與變數為確定性或不確定性之因子。

3. 相關資料蒐集與整理

蒐集各參數與變數之資料並進行整理。

4. 找尋適合的機率分佈

對於被視為不確定性的參數或變數確認足以代表其隨機特性之機率分佈用以衡量結果之不確定性。

5. 進行模擬模式分析

建立蒙地卡羅模擬模式，設定試驗次數後，以模式進行試驗分析。

6. 模擬結果統計分析

進行模擬工作並對結果進行統計分析。

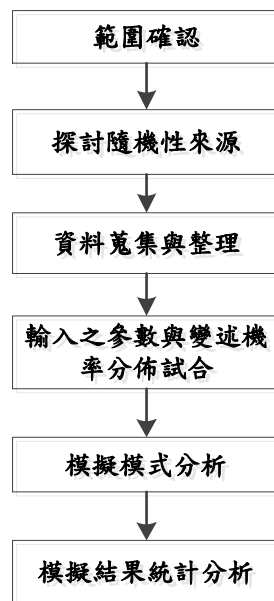


圖 3-8 失效機率模擬分析流程圖

3.4.1 模擬模式架構

本研究所建立之模擬模式旨在探討回復時間的不確定性，此是由於軌道系統營運過程中行車事故發生具隨機特性而對於班表營運所帶來的不可預期影響，對於行車事故的隨機性，可分為三個層面，如圖 3-9 之虛線框內所示。首先即是行車事故必然發生與否之不確定性，由於行車事故種類繁多，各類事故具有不同之發生率，營運過程中行車事故是否發生將視乎於發生率之高低；第二點則是事故衝擊之大小，也就是不同事故可能造成不同長度的中斷時間；最後則是行車事故發生後對於股道配置之影響，當事故發生於路線亦或車站內分別對於複線運轉之軌道系統產生單股道或是兩股道皆無法營運的結果會造成容量下降的程度不同而產生不同的中斷列車數。對於第二點各類事故中斷時間的長短所帶來的影響，由於本研究在分析各類事故發生率時，以中斷時間為變數進行集群分析來減低各類事故發生後中斷時間之變異性，同時為了降低複雜度以縮短模擬運算時間，本模式之分析對於事故的隨機特性僅建立在第一與第三層面上，對於中斷時間並不考慮以隨機的方式處理，僅以「平均中斷時間」作分析。

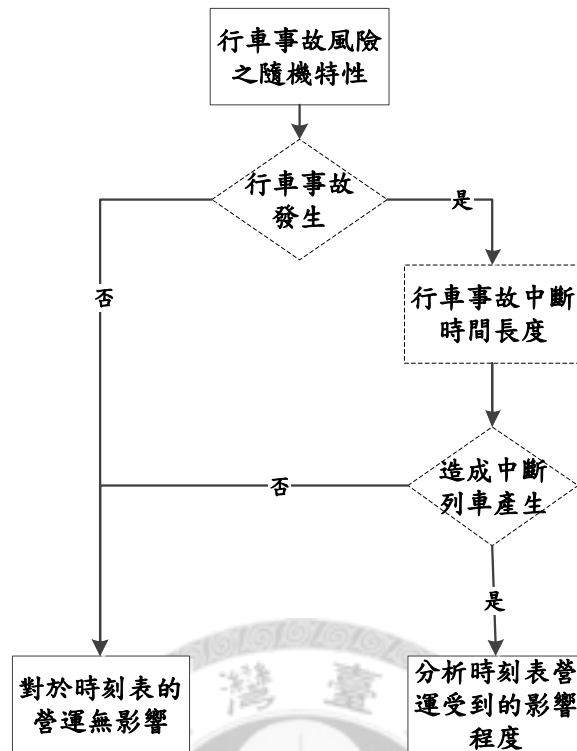


圖 3-9 軌道系統行車事故之隨機特性說明

3.4.2 模擬模式假設

本研究所建構的模擬模式其基本假設如下，若有額外的假設說明將在後續章節中補充。

1. 同解析模式，將一天長度劃分為 24 個時段，因此每個時段長度為一小時，同時路線以容量最小分析單元為一個分析路段，因此共有 504 個分析單元，模擬模式分別對每個單元進行模擬。
2. 上下行時刻表分開模擬。
3. 車站間以複線運轉運行並以隨機方式模擬事故是否發生，而事故的發生地點僅考慮在車站或是路線上三點藉此分析軌道容量的變化影響。
4. 發生事故後的運轉調度策略僅考慮利用後續時段剩餘容量將中斷列車數消耗，不考慮實際運轉調度的執行過程。

3.4.3 模擬機制與分析流程

本節將說明模擬方式計算回復時間的運作機制與分析流程。從前面章節對於回復時間的介紹我們大致可以將分析步驟分為三類：行車事故發生、依據容量變化的情形計算中斷列車數，最後計算消除中斷列車至回復表定運作的時間作為回復時間。針對以上分析流程的詳細內容整理如下：

(1) 行車事故產生模擬

列車在運行過程中行車事故的發生為具有隨機特性的隨機過程，難以利用確定性的方式描述其發生過程，因此可透過隨機過程的理論對於具有隨機特性的事件加以描述，在本研究中假設行車事故的發生是一個卜瓦松過程(Poisson Process)，並以此判斷事故是否發生。

本研究的核心在於探討事故發生後回復時間的計算，第一步即是了解事故在給定的時段內發生的情形，可以計數過程(Counting Process)模擬此現象；對於計數過程的定義，Ross(2009)曾對此介紹，說明了如果我們定義 $N(t)$ 為從 0 到 t 時刻之間某一事件發生的次數來表示一個隨機過程 $\{N(t), t \geq 0\}$ ，那麼可將此過程視為一計數過程，並須滿足下列條件：

1. $N(t) \geq 0$
2. $N(t)$ 之值為整數
3. 如果 $s < t$ ，則 $N(s) \leq N(t)$
4. 對於 $s < t$ ， $N(t) - N(s)$ 表示在 $(s, t]$ 的間隔之間發生的次數

上述條件中，第一及第二個條件直截的表示了計數過程中發生的次數必須大於等於 0 且應為整數，第三個條件說明隨著時間的增加，次數也應該增加或至少維持不變，第四個條件的說明則非常直觀，以 $N(t) - N(s)$ 表示在兩個先後不同的時間間隔之間的發生次數。

而卜瓦松過程(Poisson Process)則是計數過程中的其中一類，並被廣泛應用於

風險管理、可靠度分析以及等候理論模型之中，本研究即假設列車行車事故的發生是具有卜瓦松過程的計數過程，而此假設須滿足卜瓦松過程的定義，對於一個具有發生率為 λ 的卜瓦松過程，須滿足：

1. $N(0) = 0$
2. 此過程具有獨立增量(Independent increments)
3. 對於時段長度為 t 的任意時段內，事件的發生次數服從 Poisson 分佈，即對於所有 $s, t \geq 0$,

$$P\{N(t+s) - N(s) = n\} = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^n}{n!}, n = 0, 1, \dots$$

上述條件中，條件 1 表示當時間為 0 時，發生次數為 0；條件 2 則說明在彼此不相交的不同時段內，發生次數彼此獨立；條件 3 隱含說明了穩定增量(Stationary increments)的概念，若時段長度相同，不同時段內的發生次數具有相同的機率分佈(卜瓦松分佈)。對於卜瓦松過程的定義，另一種常見的定義方式是將上述第二點及第三點合併敘述卜瓦松過程滿足獨立增量以及穩定增量的特性，並增加如下的條件說明，在此以第四點及第五點補述之：

4. $P\{N(t) = 1\} = \lambda t + o(t) \approx \lambda t$
5. $P\{N(t) \geq 2\} = o(t) \approx 0$

其中 $o(h)$ 的定義為 $f(h)=o(h)$ ，當 $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(h)}{h} = 0$ 。

即是說明，當時段 t 的長度趨近於 0 時，在此時段內發生一次事件的機率約等於 (λt) ，而發生兩次以上事件的機率則趨近為 0。

基於此兩點定義，在本研究中的 t 其長度為該時段之營運列車小時，取改點前上行時刻表中所有分析單元中最大之營運列車小時($t=1.783$)及最大之事故發生率($\lambda=0.001216$)之乘積為 0.002168，再由卜瓦松分佈計算發生一次事故之機率 $P\{N(t)=1\} = 0.002163$ ，發現兩者值大約近似；而 $P\{N(t) \geq 2\} = 1 - P\{N(t)=0\} - P\{N(t)=1\} \approx 0.00000235 \rightarrow 0$ ，分別符合第四點及第五點的要求，而其餘的分析單元的事故發生率與列車小時的組合不會再有更大的值，因此同樣會符合假設，顯示

以一小時作為分析時段長度已夠小，所以在本研究中假設各類事故在每一個時段內發生之次數最多為一次，如此便能在統計事故發生 1 次的單元中判斷事故發生，而發生 0 次的單元則表示無事故發生，此亦為本研究中之一重要假設。

以卜瓦松過程假設列車行車事故發生的另一個原因在於，一個符合卜瓦松過程的隨機過程，其事件發生間隔時間符合指數分佈，與本研究假設事故發生間隔符合指數分佈一致，由於上述說明中的第二及第三個條件，相當於說明該隨機過程中於任何一時間點事件的發生與之前的時間無關，換句話說具有無憶性的特性，因此間隔時間呈指數分佈是可預期的(Ross, 2009)。

至此，對於行車事故發生次數的模擬便可以卜瓦松過程進行。對於發生率為 λ 的事故，在時段 T 之內產生服從指數分佈的事故發生間隔時間 t ，若 t 小於 T 則表示事故在時段內發生(此處由於本研究之曝光量為列車小時故 T 與 t 之單位皆為列車小時)。

而在模擬過程中欲產生服從指數分佈的隨機變數，可利用反向轉換法(Inverse Transform Method)進行，其概念如圖 3-10 所示，圖中左半邊為均勻分佈之累積機率分佈，而右半邊圖形為目標之隨機變數累積分佈(以常態分佈為例)，考慮一服從均勻分佈之基本變數 u_k ，可得知其累積機率值 $U(u_k)$ 並對應至目標分佈，藉由求得目標分佈函數之反函數即可得到一服從目標機率分佈之隨機變數 x_k ，也就是令 U 為服從均勻分布且範圍落於 0 至 1 之間之隨機變數，對於連續分佈函數 $F(x)$ 定義隨機變數 X ：

$$X = F^{-1}(U)$$

則隨機變數 X 服從分佈函數 F 。因此本研究欲得到服從指數分佈的隨機變數可以同樣概念推導，指數分佈的分佈函數如下式所示

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x}, X > 0 \quad (3.7)$$

令 $U = 1 - e^{-\lambda x}$ ，推導過程如下：

$$1 - e^{-\lambda x} = U$$

$$e^{-\lambda X} = 1 - U$$

$$-\lambda X = \ln(1 - U)$$

$$X = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - U) \quad (3.8)$$

由於 $1-U$ 與 U 同樣為服從均勻分布之隨機變數，因此式 3.8 可改為

$$X = -\frac{1}{\lambda} \ln(U) \quad (3.9)$$

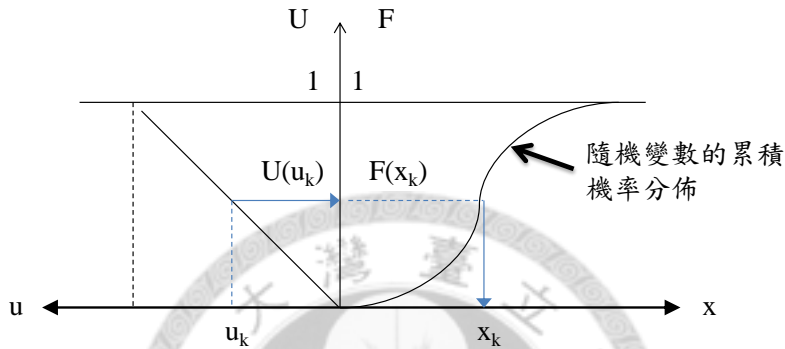


圖 3-10 反向轉換法概念

最後，利用下列演算邏輯可模擬事故是否發生：

- 步驟一：令一起始時間 $t=0$ ，事故發生次數 $I=0$
- 步驟二：產生服從均勻分布的隨機亂數 U
- 步驟三：計算 $t = t - \ln(U)/\lambda$
- 步驟四：若 t 小於該時段的營運列車小時 T ，則表示事故發生；相反地，若 t 大於營運列車小時 T ，則無事故發生

(2) 中斷列車數計算

確定事故是否發生後，仍須了解事故的發生地點及對路線容量的影響，以分析事故容量，處理後續中斷列車數的計算。本研究根據歷史資料統計事故發生於路線與車站間的頻率進行模擬，藉由經驗分佈(Empirical Distribution)來模擬可能發生的地點，其分佈函數可以 3.10 式表示：

$$F_n(a_i) = \frac{\sum_{i=1}^n I_{a_i}}{n}, a_i \in A \quad (3.10)$$

其中， I_A 為指標隨機變數(random indicator variable)，當樣本滿足事件 a_i 時則為 1，否則為 0，因此分子為滿足 a_i 的個數，而經驗分佈可表示滿足事件 $\bigcup_{i=1}^n a \in A$ 的發生頻率。

首先，統計符合路線事故的件數計算事故發生後於路線的發生頻率為 f ，則發生於車站的頻率為 $1-f$ ，而由於沒有更詳細的資料統計發生於車站的事故是導致雙股道亦或單股道封閉的雙股道事故或是單股道事故，本研究整理所有分析車站於正常狀態下營運的股道配置與各類事故發生後可能造成的事故容量，並保守假設各種情況下，單股道事故與雙股道事故的發生機會均等，所以於車站內產生不同的事故容量的機率為 $(1-f)/n$ ，而 n 為站內可能產生的事故容量組合的個數，因此欲模擬事故發生於路線或車站並造成何種事故容量可以式 3.11 進行分析，即

$$P = \begin{cases} f, & \text{路線事故} \\ \frac{1-f}{n}, & \text{車站事故} \end{cases} \quad (3.11)$$

其中， P 為發生機率

f 為路線事故統計比例

n 為於車站內產生不同事故容量的可能性

以路線故障事故為例，由於路線故障可能發生於路線及車站內，於車站內發生時又可能造成單一方向單股軌道或兩股軌道無法正常停靠，此時若發生於路段兩端車站皆為第一型股道配置之車站，則共有五種可能性，發生在車站則有四種，見表 3-4，此時發生於路線或車站並造成何種事故容量之模擬便可以以下式進行：

$$P = \begin{cases} f, & \text{路線事故} \\ \frac{1-f}{4}, & \text{車站事故} \end{cases} \quad (3.12)$$

表 3-4 可能的事務類型與股道配置改變情形(以路線故障為例)

可能情形	事故容量類型
1	路線事故
2	A 站雙股道事故
3	A 站單股道事故
4	B 站雙股道事故
5	B 站單股道事故

在電腦模擬中，以亂數產生服從均勻分布的隨機亂數 U 可決定事故的地點，由式 3.11 將其累加可得式 3.9 的累積分佈形式，並可整理如表 3-5，同時 U 值應為落於 $[0,1)$ 的亂數，根據 U 值介於的區間範圍，判斷為對應的事故發生地點。

表 3-5 事故發生可能地點累積機率(以路線故障為例)

可能情形	累積機率
1	f
2	$(1+3f)/4$
3	$(2+2f)/4$
4	$(3+1f)/4$
5	1

雖然根據卜瓦松過程的假設，同類事故在同一站內發生兩次以上的事務其發生機率將趨近於 0，在同一個時段內每一類事故只會發生一次，然而在事故發生機率分析中是得到每類事故個別的事務發生率，因此在模擬過程中是分別針對每一類事故進行卜瓦松過程的模擬，因此同一個分析單元中可能出現兩類以上的事務，本研究對出現兩類事故以上情形所造成的中斷列車數的計算上須先作判別的處理，以計算事故發生後回復至正常容量所需的時間，彙整如下：

在 3.3 節中平均值的意義為一天之內發生一次事故需要的回復時間，其所隱含

的是假設那一次事故的發生應是一天之中某一類事故在某個時段發生一次，首先，根據交通部臺灣鐵路管理局行車事故調查報告及救援須知(2001)的說明：「二種以上事故併發時，應依前列類別之次序，以在先者為主報告之，但前項第卅二款『死傷』與第卅一款『列車延誤』併發時，應以『死傷』為主報告之；第卅三款『其他』與第卅一款『列車延誤』或第卅二款『死傷』併發時，應以『其他』為主報告之。」，所以從歷史資料來看，在同一個時段內發生超過兩次事故的情況幾乎找不到是因為臺鐵在記錄事故時是以較嚴重的事故為準；另一方面，考量到在實務上若發生兩類以上事故，營運單位會同時進行故障排除作業，因此實際上對於發生事故的路段而言當中斷時間較短的事故已被排除，該路段上仍處於受到中斷時間較長事故影響的狀態，因此基於前述兩個原因，在模擬分析時便延用解析模式中的假設，即在一個時段內僅發生一類事故，並且原則上以較嚴重的事故來進行後續回復時間的計算，以避免低估風險的情況，模擬時會在每一類事故完成卜瓦松過程的模擬後比較中斷時間的長度作為該分析單元事故的選擇方式。

最後，當全數單元內事故發生與否、發生後事故類型及事故容量確定後便能後續計算各單元中的中斷列車數的作業。

(3) 回復時間計算

在模擬的過程中，回復時間計算的概念如 3.2.3 節的計算步驟，即是計算事故排除後以剩餘容量消耗所有累積中斷列車數所需的時間，而要注意的地方是在同一路段上連續的時段皆發生事故的情形，當前一個時段先發生的事故排除後，即可開始消耗中斷列車數，若前一個時段的中斷會影響到後續的時段，則此時的剩餘容量是事故容量與使用量的差值（由於有第二個時段事故發生），若尚未有剩餘容量，則待所有事故排除後才開始計算回復時間。

(4) 模擬流程

本研究透過上述模擬機制分析回復時間的機率分佈，模式具體步驟整理如下：

1. 決定樣本空間大小，亦即決定模擬次數 n 的大小。

2. 決定分析單元，包含時段長度以及路線分析範圍。
3. 透過反向轉換法產生隨機變數，以卜瓦松過程判斷事故是否發生。
4. 若分析單元內有事故發生，根據歷史資料統計模擬事故發生地點，結果將影響事故容量值。
5. 依據前述計算中斷列車數。
6. 計算回復時間。
7. 當完成 n 次的模擬後，整理模擬結果進行統計分析

整個蒙地卡羅模擬之流程，可以圖 3-11 表示：

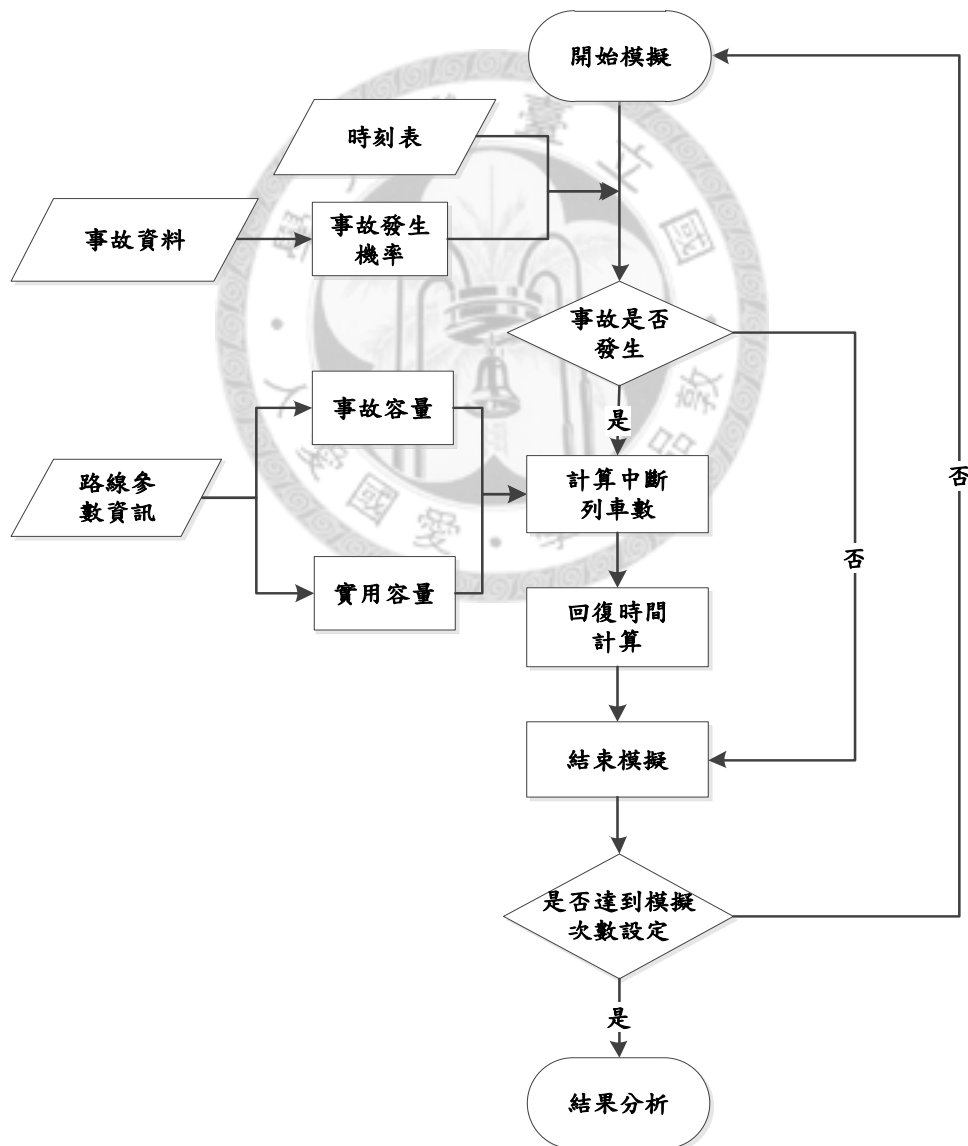


圖 3-11 蒙地卡羅模擬執行流程

3.4.4 回復時間標準差運算

本節一開始提及由於蒙地卡羅模擬的分析結果可視為具統計性質，因此根據時刻表的模擬結果所得之樣樣本空間，可求出時刻表回復時間之樣本標準差，當標準差值越大，顯示樣本資料離平均值越遠，數據較離散，對於時刻表來說，則是說明更容易出現高回復時間的情形，而營運單位則希望能避免高回復時間的出現，因此回復時間之標準差作為時刻表績效評估的第三個評估指標。而樣本標準差的公式則整理如下：

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.13)$$

其中， s 為樣本標準差

n 為樣本數

x_i 為樣本資料， $i = 1, 2, \dots, n$

\bar{x} 為樣本平均

3.5 指標四：時刻表失效機率

根據模擬結果所得之樣本，亦可被用於找出回復時間適當的理論機率分佈，以了解不同回復時間的發生機率，不過由於回復時間的指標第一次由李宗晏自軌道容量運用的角度提出後，並未有對回復時間特性進行探討的相關研究，而根據先前的研究中 Yuan 等人(2006)指出軌道運輸研究中常以指數分佈配適延滯時間的分佈，考慮到回復時間是修正延滯時間可能低估或高估的指標，因此本研究仍會先檢視以指數分佈進行回復時間機率分佈的試合是否合適；但由於回復時間是當行車事故發生之後才進一步運算，實際上如果行車事故的發生率不高，在加上事故的發生後也不一定會有中斷列車產生，模擬的結果中回復時間出現的機率可能

也較低，因此營運單位會關心的高回復時間的發生可能便屬於稀少事件，若模擬結果呈現如此的趨勢，則可改以描述稀少事件的發生率的方法進行，例如極端值理論(Extreme Value Theory)；找出適當的機率分佈後，除了計算不同回復時間的發生率，當回復時間高過一個營運單位不可接受標準的範圍時得發生機率也可被計算求出，在本研究中定義此為第四個評估指標，稱為失效機率；對於不同的時刻表來說，模擬結果所試合的理論機率分佈會有不同的參數估計結果，因此時刻表的標準差、失效機率亦會有不同的結果，即使一時刻表的平均回復時間較低仍不能保證其標準差、失效機率亦較低，因此必須要綜合性的對穩定度指標進行評估。

3.6 時刻表績效評估流程與系統建立

本節將根據前述所建立之模式與方法，提出時刻表績效之評估流程，並說明評估系統建立的方式，茲陳述於後。

在評估時刻表的設計好壞時，考量到影響軌道運輸營運的因素非常複雜，應盡可能的考慮具有代表性的影響因素，以使評估結果具有實值參考價值，本研究在評估時刻表時以行車事故的風險考慮對於軌道營運的干擾事件，並考慮後續行車事故發生後造成的影響，因此就影響穩定度與效率評估的重要因素建立魚骨圖如圖 3-12，進一步可了解各類因素的相互關係。而影響穩定度與效率指標的原因基本可分為行車事故、嚴重程度以及使用量，說明如下：

1. 行車事故：行車事故的發生是因為各類事故的發生經過以及發生頻率的影響結果。
2. 嚴重程度：軌道基礎設施的使用在發生事故後其影響程度取決於實用容量、發生事故後的故事容量以及中斷時間的長短。
3. 使用效率：如同 2.4 節的回顧，在不同路線區段以及時段所排定的列車數越高將可能影響穩定度的表現，而這也將取決於計畫時刻表的安排。

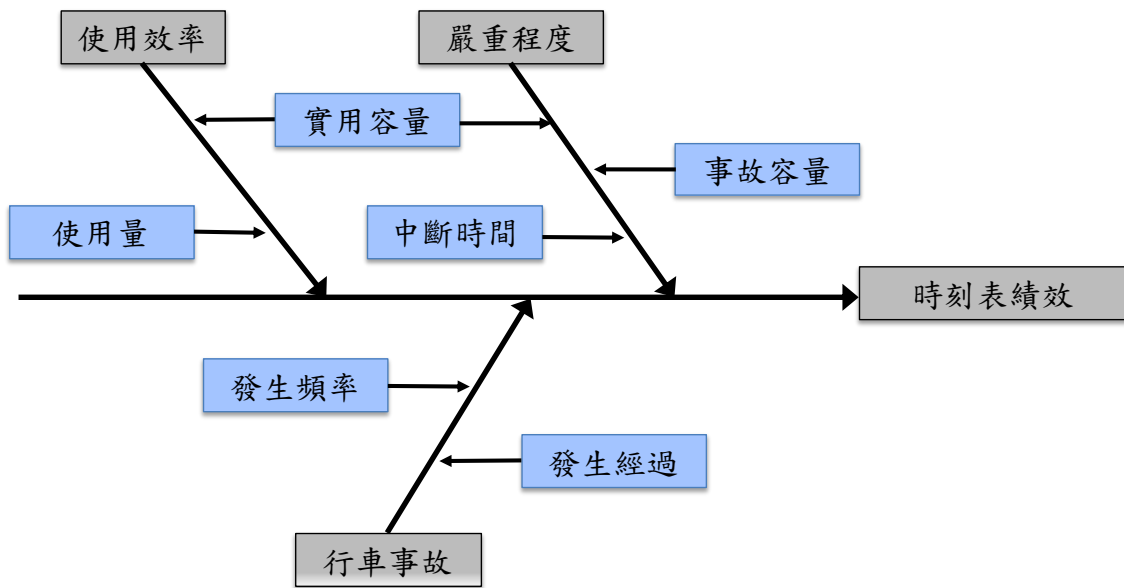


圖 3-12 時刻表績效之魚骨圖

本研究所提出的評估方式應考慮到上圖中可能的影響因素，因此時刻表的評估過程大致可分成三個階段，並整理評估流程圖於圖 3-13：

1. 資料蒐集：依據欲分析路線蒐集行車事故資料與路線參數分析事故發生機率、實用容量與事故容量。
2. 時刻表設計結果評估：依據本章之解析模式與模擬模式評估時刻表，若分析結果時刻表風險為不可接受風險，則應進行適當的修正設計，並再次評估，直到時刻表評估結果能令營運單位接受。
3. 營運回饋：依據計畫時刻表實際營運後，應持續蒐集相關營運資訊作為未來時刻表排點的參考，同時事故資料記錄應保持更新，除了用於分析外，也可作為營運維護之參考。

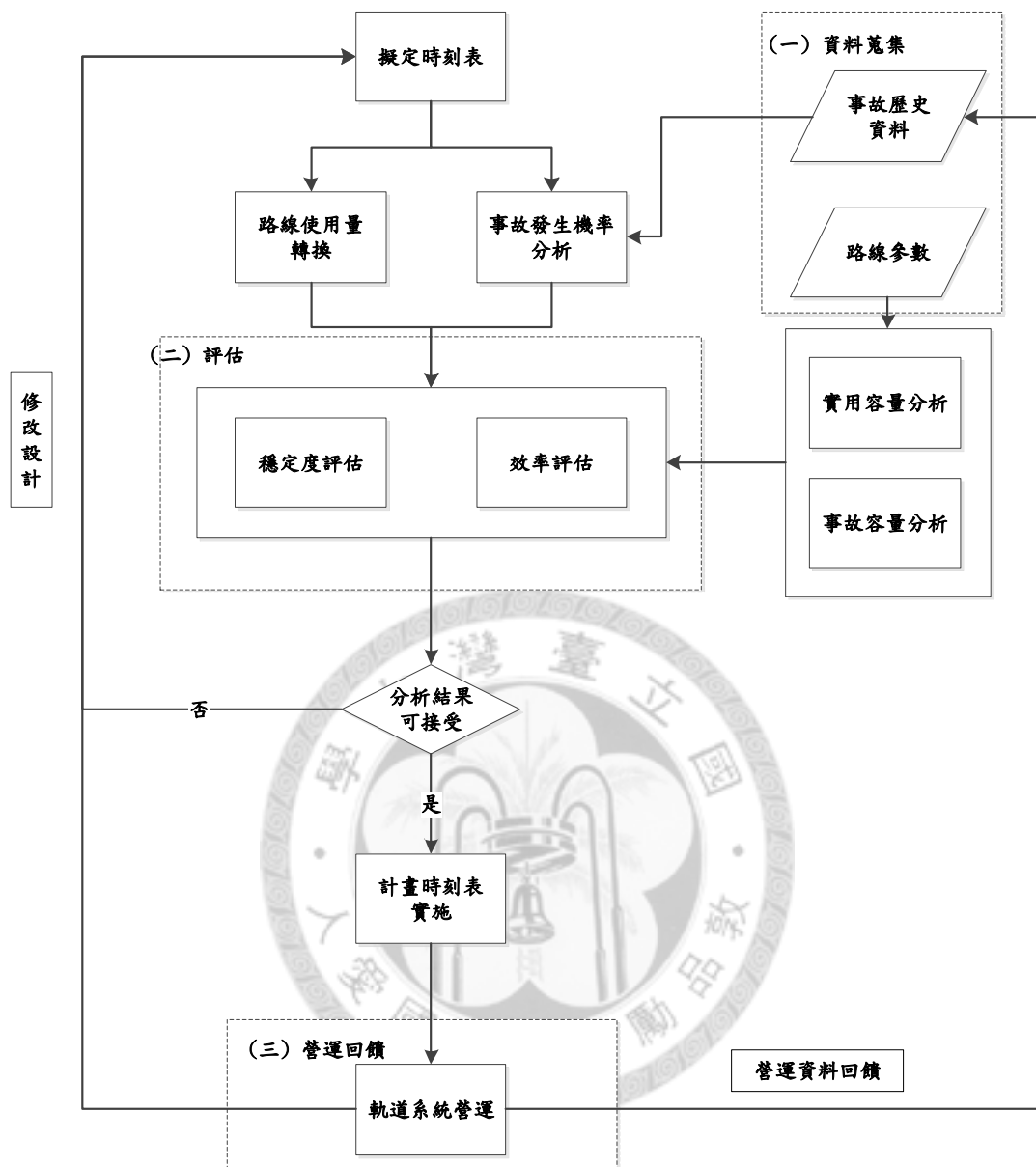


圖 3-13 時刻表評估流程圖

根據圖 3-13，本研究以 excel 軟體中的 VBA(Visual Basic for Application)程序指令建立效率與穩定度之評估系統，以執行分析與計算的工作。系統中主要包含 3 個要素：

1. **輸入資訊轉換系統**：此系統主要在於將重要之資訊透過程式指令轉換為後續評估系統之輸入。包含時刻表、行車事故資料以及路線參數之轉換。

時刻表轉換

時刻表為本模式之重要輸入，透過使用量轉換系統自動化讀取時刻表的到開時間將之轉換為使用量與列車小時。

事故機率分析

將行車事故資料輸入 excel 中建檔，再以 VBA 程序協助計算事故發生間隔列車小時，並透過 relex 可靠度分析軟體得到各類事故發生率。

容量與事故容量分析

由 VBA 程序所建立之容量分析系統輸入分析範圍之路線參數資訊計算容量與事故容量。

2. **自動化分析系統：**根據本章節所建立之模式與方法對效率與穩定度進行分析。

效率模式

將時刻表與路線轉換之資訊為輸入，即可分析軌道使用效率。

穩定度模式

根據本研究建立之模式之說明輸入對應前置分析資料，計算不同的時刻表穩定度指標。

3. **評估結果輸出：**分析結果以圖型化方式呈現，便於了解時刻表績效分析結果。



第四章 案例分析

本章將以臺鐵作為案例分析對象，對民國 100 年 9 月 28 日改點前後之時刻表進行結果比較，以說明在取得計畫時刻表後可依照第三章的時刻表績效評估系統架構分析時刻表的穩定度與效率，圖 4-1 整理了評估系統的輸入需求與輸出結果，依照此架構，本章首先在 4.1 節說明輸入資料的說明與整理，接著 4.2 節至 4.5 節分別說明指標計算之結果，並於 4.6 節中進行指標的綜合討論對改點前後的結果進行比較，最後 4.7 節對案例分析結果進行小結。



圖 4-1 時刻表績效評估示意圖

4.1 資料說明與整理

本節將分兩部分進行說明，包括軌道容量的分析及事故資料的蒐集與整理，茲分述如後。

4.1.1 容量與事故容量分析結果

由第三章的介紹，路線之容量與使用量為計算嚴重度之關鍵資訊，因此在分析時刻表穩定度前，須先求出相關容量值。本研究以臺鐵臺北段之二十二站為例，包括基隆、八堵、七堵、汐止、南港、松山、臺北、萬華、板橋、樹林、山佳、鶯歌、桃園、內壢、中壢、埔心、楊梅、富岡、湖口、新豐、竹北以及新竹等站，

近年來臺鐵為因應捷運化於此區間陸續增設捷運化車站，由於這些捷運化車站的股道配置類型可視為複線運轉之路線（如圖 4-2），對於本研究的考量來說僅影響行車時間，而此將反應在時刻表中，並被轉換為營運列車小時，故在本研究中忽略不計。

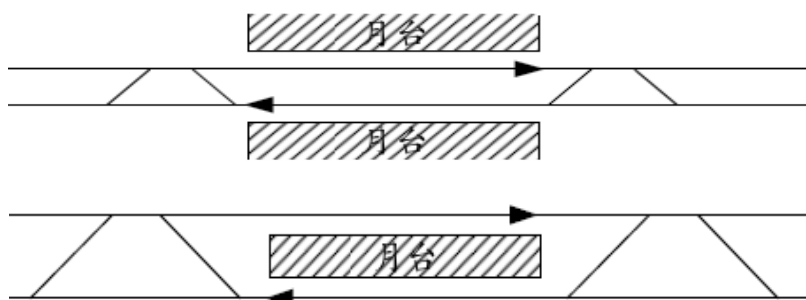


圖 4-2 捷運化車站股道配置類型

資料來源：運研所(2008)

而表 4-1 為分析範圍內的股道配置情形，依據股道配置及路線參數資訊所得之容量則整理如表 4-2。

表 4-1 車站股道配置

車站	上行	下行	車站	上行	下行
基隆	III	III	鶯歌	I	I
八堵	II	II	桃園	III	III
七堵	I	I	內壢	III	III
汐止	III	III	中壢	I	I
南港	I	I	埔心	I	I
松山	I	I	楊梅	I	I
臺北	I	I	富岡	I	I
萬華	II	II	湖口	I	I
板橋	I	I	新豐	I	I
樹林	I	I	竹北	II	II
山佳	I	I	新竹	I	I

表 4-2 路線實用容量

分析路段	改點前(列車/小時)		改點後(列車/小時)	
	上行	下行	上行	下行
基隆=八堵	10.51	10.54	11.09	10.55
八堵=七堵	14.35	12.92	14.28	12.97
七堵=汐止	7.92	9.47	7.92	9.53
汐止=南港	10.65	10.44	10.64	10.51
南港=松山	15.79	16.17	15.77	16.28
松山=臺北	12.70	13.10	12.71	13.15
臺北=萬華	13.27	14.46	13.26	14.55
萬華=板橋	10.71	13.23	10.66	13.27
板橋=樹林	13.07	15.30	13.01	15.34
樹林=山佳	12.67	15.06	12.64	15.30
山佳=鶯歌	13.54	13.06	13.51	13.12
鶯歌=桃園	9.61	10.14	9.63	10.15
桃園=內壢	10.78	10.15	10.78	10.12
內壢=中壢	12.80	11.93	12.81	11.90
中壢=埔心	12.60	12.02	12.54	12.03
埔心=楊梅	15.22	12.66	14.90	12.71
楊梅=富岡	12.60	10.58	12.70	10.59
富岡=湖口	12.17	12.19	12.17	12.13
湖口=新豐	11.83	11.46	11.84	11.42
新豐=竹北	15.25	13.34	15.28	13.35
竹北=新竹	10.15	9.70	10.03	9.69

至於事故容量的計算，當事故發生於兩端車站時須考慮事故發生後為單股道事故亦或雙股道事故的情形，由於兩者將造成不同的股道數封閉的情況，進而影響事故容量的計算，表 4-3 中整理不同事故發生後股道配置的改變情形。由表 4-3 的資訊來估算事故容量，而上、下行分別發生單、雙股道事故後的事務容量可見表 4-4 至表 4-7。

表 4-3 車站事故月台股道配置

分析路段	單股道事故		雙股道事故	
	上行	下行	上行	下行
基隆	IV&V	IV&V	VI	VI
八堵	IV	IV	VI	VI
七堵	III	III	V	V
汐止	IV&V	IV&V	VI	VI
南港	III	III	V	V
松山	III	III	V	V
臺北	III	III	V	V
萬華	IV	IV	VI	VI
板橋	III	III	V	V
樹林	III	III	V	V
山佳	III	III	V	VII
鶯歌	III	III	V	V
桃園	IV&V	IV&V	VI	VI
內壢	IV&V	IV&V	VI	VI
中壢	III	III	V	V
埔心	III	III	V	V
楊梅	III	III	V	V
富岡	III	III	V	V
湖口	III	III	V	V
新豐	III	III	V	V
竹北	IV	IV	VI	VI
新竹	III	III	V	V

表 4-4 單股道事故上行事故容量

分析路段	改點前(列車/小時)		改點後(列車/小時)	
	出發站	抵達站	出發站	抵達站
新竹=竹北	9.13	8.45	9.00	8.53
竹北=新豐	9.33	13.72	9.32	13.73
新豐=湖口	11.78	12.12	11.78	12.12
湖口=富岡	11.59	11.84	11.64	11.77
富岡=楊梅	11.97	11.89	12.06	11.96
楊梅=埔心	13.72	12.91	13.52	12.63

埔心=中壢	12.43		11.18		12.35		11.22	
中壢=內壢	10.89		11.97	8.98*	10.88		11.94	9.02*
內壢=桃園	8.76	9.30*	8.76	7.64*	8.75	9.28*	8.75	7.66*
桃園=鶯歌	5.94	7.70*	9.61		5.94	7.71*	10.41	
鶯歌=山佳	12.24		13.54		12.18		13.79	
山佳=樹林	11.76		10.77		11.74		10.76	
樹林=板橋	11.29		10.57		11.22		10.49	
板橋=萬華	8.60		8.58		8.53		8.56	
萬華=臺北	11.67		7.48		11.64		7.42	
臺北=松山	7.27		11.31		7.25		11.33	
松山=南港	11.53		10.41		11.51		10.58	
南港=汐止	10.31		7.97	10.40	10.30		8.00	10.44*
汐止=七堵	5.66	7.87	7.92		5.69	7.88*	7.92	
七堵=八堵	12.80		14.34		12.88		14.28	
八堵=基隆	7.31		7.31	9.85	7.03		7.03	10.48*

*：事故發生於第三型車站，可能轉為第四型與第五型，*表示為第五型

表 4-5 單股道事故下行事故容量

分析路段	改點前(列車/小時)			改點後(列車/小時)				
	出發站		抵達站	出發站		抵達站		
基隆=八堵	7.15	8.59*	7.15	7.14	8.60*	7.14		
八堵=七堵	13.00		11.08		12.97		11.14	
七堵=汐止	9.47		6.18	9.09*	9.53	6.10	9.11*	
汐止=南港	8.33	9.02*	10.62		8.28	9.03*	10.51	
南港=松山	13.88		11.61		13.87		11.67	
松山=臺北	10.49		7.28		10.50		7.32	
臺北=萬華	6.88		10.72		6.91		10.89	
萬華=板橋	9.14		11.14		9.08		11.21	
板橋=樹林	11.88		12.42		11.96		12.44	
樹林=山佳	11.38		5.99		11.56		5.96	
山佳=鶯歌	5.93		9.85		5.94		9.95	
鶯歌=桃園	10.14		6.57	7.84*	10.15		6.66	7.88*
桃園=內壢	8.76	7.89*	8.76	10.22*	8.76	7.87*	8.76	10.12*
內壢=中壢	11.17	9.95*	11.04		11.22	9.94*	10.99	
中壢=埔心	10.92		11.94		10.90		11.97	
埔心=楊梅	12.12		11.67		12.16		11.72	

楊梅=富岡	10.58	10.58	10.59	10.79
富岡=湖口	11.96	11.87	11.88	11.79
湖口=新豐	11.00	10.80	11.00	10.77
新豐=竹北	12.60	10.01	12.58	10.16
竹北=新竹	8.47	8.15	8.45	8.15

*：事故發生於第三型車站，可能轉為第四型與第五型，*表示為第五型

表 4-6 雙股道事故上行事故容量

分析路段	改點前(列車/小時)		改點後(列車/小時)	
	出發站	抵達站	出發站	抵達站
新竹=竹北	6.58	4.40	6.51	4.41
竹北=新豐	4.42	9.63	4.41	9.62
新豐=湖口	9.16	9.22	9.17	9.24
湖口=富岡	8.67	8.25	8.67	8.24
富岡=楊梅	8.22	9.53	8.21	9.51
楊梅=埔心	9.77	8.42	9.76	8.34
埔心=中壢	8.68	8.42	8.67	8.44
中壢=內壢	7.97	4.98	7.95	4.97
內壢=桃園	4.99	3.88	4.98	3.89
桃園=鶯歌	3.89	9.61	3.90	9.62
鶯歌=山佳	9.88	0.00	9.86	0.00
山佳=樹林	0.00	9.40	0.00	9.41
樹林=板橋	9.25	8.16	9.21	8.10
板橋=萬華	8.02	4.46	7.94	4.46
萬華=臺北	4.43	5.49	4.43	5.46
臺北=松山	5.60	9.71	5.59	9.68
松山=南港	9.49	8.63	9.49	8.61
南港=汐止	8.93	5.09	8.92	5.11
汐止=七堵	4.95	7.92	4.97	7.92
七堵=八堵	9.76	4.71	9.95	4.80
八堵=基隆	4.47	5.51	4.38	5.72

表 4-7 雙股道事故下行事故容量

分析路段	改點前(列車/小時)		改點後(列車/小時)	
	出發站	抵達站	出發站	抵達站
基隆=八堵	5.84	4.35	5.84	4.35
八堵=七堵	4.41	6.80	4.40	6.76
七堵=汐止	6.65	4.85	6.63	4.84
汐止=南港	5.03	10.10	5.02	10.14
南港=松山	10.80	9.29	10.78	9.33
松山=臺北	9.70	5.56	9.72	5.59
臺北=萬華	5.62	4.49	5.64	4.51
萬華=板橋	4.44	7.93	4.45	7.97
板橋=樹林	8.27	8.46	8.31	8.46
樹林=山佳	8.38	0.00	8.43	0.00
山佳=鶯歌	0.00	7.75	0.00	7.73
鶯歌=桃園	7.89	3.88	7.91	3.89
桃園=內壢	3.91	4.96	3.90	4.97
內壢=中壢	4.88	7.34	4.88	7.31
中壢=埔心	7.65	11.24	7.66	11.27
埔心=楊梅	10.65	10.01	10.67	10.03
楊梅=富岡	9.29	9.33	9.25	9.37
富岡=湖口	9.26	9.00	9.25	9.03
湖口=新豐	8.72	9.93	8.76	9.90
新豐=竹北	10.92	4.45	10.89	4.45
竹北=新竹	4.46	7.80	4.47	7.80

求出容量、事故容量，並計算出使用量後，由使用量減去事故容量可得中斷列車數，而由容量減去使用量則能得剩餘容量，因此根據 3.3.3 節計算回復時間的步驟，可得到不同事故容量下各時段路段的回復時間，再以歷史資料統計站間路線與兩端車站的事故發生比例依式 3.5 計算出各時段路段加權後的回復時間值。

4.1.2 事故發生機率分佈試合結果

本研究依據交通部臺灣鐵路管理局行車事故調查報告及救援須之制訂之 33 類事故蒐集並整理自民國 97 年至民國 99 年為止，自基隆站至新竹站一共三年期間

的事故資料作為分析對象。此三年間於基隆至新竹段所統計的臺鐵行車事故資料，資料來源基本為「臺鐵行車事故紀錄」，而根據英國鐵路安全及標準委員會(Rail Safety and Standards Board, RSSB)的研究報告(2004)指出當事故資料筆數小於五筆時會影響參數估計的準確性，因此其中這三年間發生件數五件以下的事務忽略不計，雖然並不代表這些事故沒有發生的可能性，但由於筆數過少而不適合進行後續分析。本研究另將行車事故記錄之車輛出軌與列車出軌記錄合併為出軌事故，並將車輛故障分離，整理出共 13 類事故，而由於臺鐵行車事故記錄資料中之號誌故障並未完整包含所有的 CTC 及 ATP 故障，為求號誌故障的分析能夠完整，亦自「CTC 及號誌故障登記表」及「ATP 故障影響情形統計表」中蒐集相關資料；其中 CTC 故障取得民國 98 年間共 130 件資料，而 ATP 資料則因為並無區分發生地點的資訊，涵蓋了所有營業里程範圍，由於本研究之分析範圍止於基隆至新竹路段，因此依照營業里程數來估計 ATP 故障件數，後續在進行發生機率分析處理時，則將 CTC 及 ATP 的故障資訊合併入號誌故障之等級，最後將整理結果呈現於表 4-8，所示為將事故資料進行整理後各類事故件數，發生機率之估計也將以此表為基準，作進一步的處理。

表 4-8 民國 97 年至 99 年行車事故統計表

編號	類型	總計(件)	編號	類型	總計(件)
1	出軌	14	9	列車妨礙	28
2	機車故障	104	10	號誌設備故障	124
3	電車故障	214	11	CTC 故障	130(98 年)
4	機動車故障	8	12	ATP 故障	429
5	客車故障	11	13	列車延誤	44
6	電車線設備故障	28	14	死傷	55
7	路線故障	16	15	其他	84
8	列車障礙	43		總計	1332

在進行事故發生機率估算之前，如 3.3.2 節之說明，首先將表 4-8 之資訊進行兩階段集群分析並以中斷時間為分群變數，整理結果如表 4-9 所示，分類分群後共

21 類事故，依據這 21 類事故再進行事故發生率的估算，在此需要加註的是，其中號誌故障等級一為 ATP 故障，號誌故障等級二為號誌設備故障，號誌故障等級三與四是 CTC 故障的分群結果。而本研究整理 97 年至 98 年之時刻表轉換為列車小時，97 年時刻表之一日列車小時為 512.08，而 98 年時刻表與 99 年時刻表之一日列車小時分別為 540.03 以及 558.80，由前述資料可估算三年期間連續兩件事故發生的間隔列車小時，將間隔由小自大排序並以中位數等級進行累積機率計算，再將資料點描繪於指數分配機率繪圖紙上，並透過 K-S 檢定，驗證事故發生間隔列車小時符合指數分佈。

表 4-9 各類事故之中斷時間

事故類別	中斷時間	事故類別	中斷時間
出軌	281.36	號誌故障等級一	6.17
列車妨礙	39.21	號誌故障等級二	69.28
列車延誤等級一	19.64	號誌故障等級三	23.22
列車延誤等級二	71.5	號誌故障等級四	117
列車障礙	43.19	電車故障等級一	23.86
死傷等級一	54.54	電車故障等級二	66.37
死傷等級二	106.11	電車線故障	117.21
其他等級一	29.12	機車故障等級一	39.53
其他等級二	196	機車故障等級二	201.8
客車故障	35.82	機動車故障	25.63
路線故障	89.31		

至於 ATP 之事故資料由於僅能得知每月發生件數無法得知確切發生日期，因此事故發生間隔無從得知，無法以機率繪圖紙進行資料嵌合與參數估計，在此以平均值的方式作為事故發生率的估算方法，即以基隆至新竹路段上三年總發生次數除以總列車營運小時，而所有事故的參數估計結果整理於表 4-10。

表 4-10 各類事故指數分佈參數估計結果

編號	事故類別	$\lambda_i = 1/MTBF_i$ (次/列車小時)	MTBF (列車小時)	R^2
1	出軌	0.000021	47619.05	0.93
2	列車妨礙	0.000043	23255.81	0.82
3	列車延誤等級一	0.000056	17857.14	0.96
4	列車延誤等級二	0.000014	71428.57	0.92
5	列車障礙	0.000068	14705.88	0.96
6	死傷等級一	0.000072	13888.89	0.98
7	死傷等級二	0.000016	62500	0.95
8	其他等級一	0.000124	8064.52	0.95
9	其他等級二	0.000037	27027.03	0.81
10	客車故障	0.000018	55555.56	0.97
11	路線故障	0.000026	38461.54	0.92
12	號誌故障等級一	0.000729	1371.34	
13	號誌故障等級二	0.000193	5181.35	0.94
14	號誌故障等級三	0.001216	822.37	0.97
15	號誌故障等級四	0.000123	8130.08	0.93
16	電車故障等級一	0.000056	3174.60	0.99
17	電車故障等級二	0.000014	23255.81	0.83
18	電車線故障	0.000051	19607.84	0.98
19	機車故障等級一	0.000164	6097.56	0.98
20	機車故障等級二	0.000014	71428.57	0.74
21	機動車故障	0.000014	71428.57	0.90

表 4-10 中判定係數(R^2)顯示了參數估計結果對於指數分佈轉換後的迴歸直線大致上都能有良好的解釋能力，另外本研究以 K-S 檢定進行適合度檢定，在顯著水準 5% 下，檢驗理論分佈的正確性，其虛無假設 H_0 為事故發生間隔時間服從指數分佈，若臨界值大於檢定統計量則不拒絕虛無假設，檢定結果如表 4-11。根據檢定結果顯示各類事故的發生間隔時間皆服從指數分佈，至於號誌故障等級一，由於事故發生率是用平均值估計，在此不作適合度檢定。

表 4-11 適合度檢定結果

編號	事故類別	檢定統計量	臨界值	結論
1	出軌	0.1602	0.3614	不拒絕 H_0
2	列車妨礙	0.1570	0.2544	不拒絕 H_0
3	列車延誤等級一	0.1229	0.2300	不拒絕 H_0
4	列車延誤等級二	0.1885	0.4834	不拒絕 H_0
5	列車障礙	0.1150	0.2099	不拒絕 H_0
6	死傷等級一	0.0592	0.3614	不拒絕 H_0
7	死傷等級二	0.1696	0.4543	不拒絕 H_0
8	其他等級一	0.1440	0.1550	不拒絕 H_0
9	其他等級二	0.4285	0.5632	不拒絕 H_0
10	客車故障	0.1475	0.4093	不拒絕 H_0
11	路線故障	0.2107	0.3376	不拒絕 H_0
12	號誌故障等級二	0.0776	0.1226	不拒絕 H_0
13	號誌故障等級三	0.0854	0.1268	不拒絕 H_0
14	號誌故障等級四	0.2976	0.3614	不拒絕 H_0
15	電車故障等級一	0.0591	0.0997	不拒絕 H_0
16	電車故障等級二	0.1182	0.2590	不拒絕 H_0
17	電車線故障	0.0901	0.2499	不拒絕 H_0
18	機車故障等級一	0.0738	0.1410	不拒絕 H_0
19	機車故障等級二	0.3759	0.4300	不拒絕 H_0
20	機動車故障	0.3598	0.4834	不拒絕 H_0

最後，依據估計結果將發生率參數代入式 3.4，可得到各類事故的分佈函數，再將每一個時段區段的列車小時輸入至式中可得到每一個時段區段的發生機率。表 4-12 與表 4-13 中以改點後上行時刻表為例，列出部分分析單元並分別呈現分析單元中的曝光量以及出軌事故的發生機率。

表 4-12 改點後上行時刻表部分時段路段表曝光量(列車小時)

	7:00~8:00	8:00~9:00	9:00~10:00	10:00~11:00
新竹=竹北	1.017	0.967	0.467	0.600
竹北=新豐	0.933	0.433	0.417	0.317
新豐=湖口	0.900	0.517	0.433	0.333

表 4-13 改點後上行時刻表部分時段路段事故發生機率

	7:00~8:00	8:0~9:00	9:0~100:00	10:00~11:00
新竹=竹北	2.13E-05	2.03E-05	9.8E-06	1.26E-05
竹北=新豐	1.96E-05	9.1E-06	8.75E-06	6.65E-06
新豐=湖口	1.89E-05	1.08E-05	9.1E-06	7E-06

4.2 指標一：使用效率分析

由式 3.1 的運算，在分析範圍內上行時刻表一日的平均使用效率由 41.58% 增加至 42.46%，增幅為 0.88%；而下行時刻表之使用效率由 43.20% 增加為 44.18%，增幅為 0.98%。進一步將 21 個區段、24 個區段一共 504 個分析單元各別算出使用效率，表 4-14 及表 4-15 所示即為所有分析單元使用率的分情形，而根據前述的整理顯示改點後使用效率的增加，由於使用效率與穩定度之間存在權衡關係，勢必對時刻表穩定度產生影響。

表 4-14 上行時刻表改點前後使用效率分佈分析單元數

使用率	分析單元個數		使用率	分析單元個數	
	改點前	改點後		改點前	改點後
>100%	16	18	50~45%	58	54
100~95%	0	2	45~40%	31	36
95~90%	7	8	40~35%	56	62
90~85%	6	5	35~30%	32	29
85~80%	10	13	30~25%	18	18
80~75%	17	32	25~20%	5	6
75~70%	24	10	20~15%	6	5
70~65%	22	20	15~10%	4	6
65~60%	23	27	10~5%	15	11
60~55%	37	35	5~0%	0	0
55~50%	30	21	0%	87	86

表 4-15 下行時刻表改點前後使用效率分佈分析單元數

使用率	分析單元個數		使用率	分析單元個數	
	改點前	改點後		改點前	改點後
>100%	5	8	50~45%	51	50
100~95%	10	2	45~40%	30	29
95~90%	4	7	40~35%	34	33
90~85%	9	11	35~30%	20	22
85~80%	13	18	30~25%	16	12
80~75%	16	21	25~20%	5	6
75~70%	11	10	20~15%	9	11
70~65%	40	51	15~10%	4	4
65~60%	34	31	10~5%	11	10
60~55%	50	39	5~0%	0	0
55~50%	39	38	0%	93	91

4.3 指標二：期望回復時間分析

根據圖 3-3 的分析流程，期望回復時間的計算結果，改點前的時刻表為 126.67 分鐘，其中上行時刻表的結果為 70.29 分鐘，下行時刻表為 56.38 分鐘；而改點後的時刻表為 147.9 分鐘，上行時刻表佔了其中的 85 分鐘，而下行時刻表為 62.9 分鐘。顯見在改點後穩定度有下降的趨勢，不論上行、下行也都呈現穩定度下降的結果，而整體來說，穩定度一共下降了 16.76%，說明若在一天之內發生一次事故，改點後平均需要多 21.23 分鐘來使得軌道系統能回復到正常時刻表的運作，因此相對於改點前的時刻表來說顯得較不穩定。

圖 4-3 顯示了若從路線區段的角度來看，無論改點前後，路線的瓶頸區段發生在七堵至汐止區間，且有明顯的高峰，改點前該區段回復時間來到 62.62 分鐘，而改點後更是高達 73.84 分鐘，探究其原因，若觀察七堵站與汐止站的股道配置，七堵站雖然軌道配置為站內有四座島式月台的第一型車站，然而汐止站為第三型月台，容量的瓶頸勢必發生在汐止，觀察表 4-2 的實用容量值可以發現自八堵至南港的三個區段間，七堵至汐止的區間實用容量最低，若在此區段排入較高的使用量

則由於較低的容量在發生事故後會導致較高的中斷列車，以至於的瓶頸在此產生。

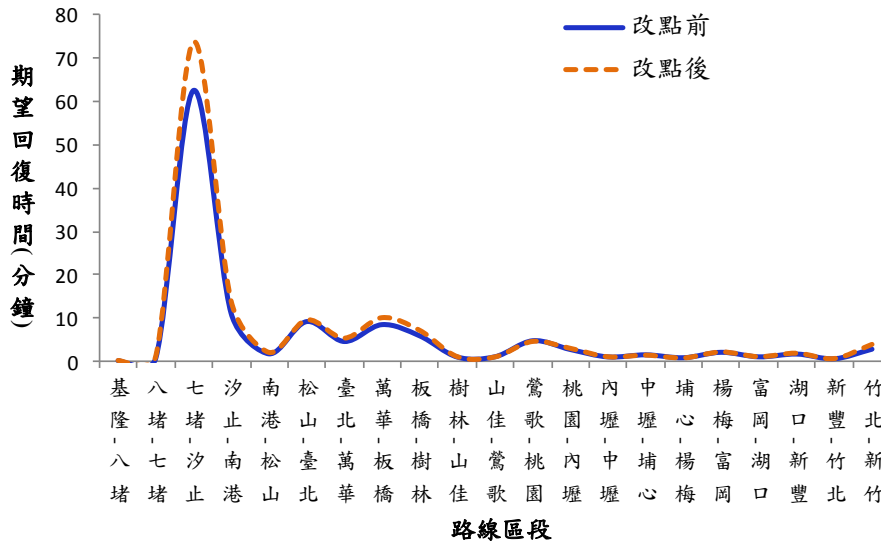


圖 4-3 時刻表改點前後路線區段期望回復時間

另外，若從時段的角度來觀察(圖 4-4)，期望回復時間於早上八點到九點與晚上六點到七點的時段明顯較高，改點前在此兩時段的風險值分別為 14.28 分鐘以及 14.79 分鐘，改點後則上升至 17.56 分鐘以及 17.91 分鐘，主要也是因為在這兩個時段內排入了更多車次的車次，相較於其他時段有更高的列車小時。

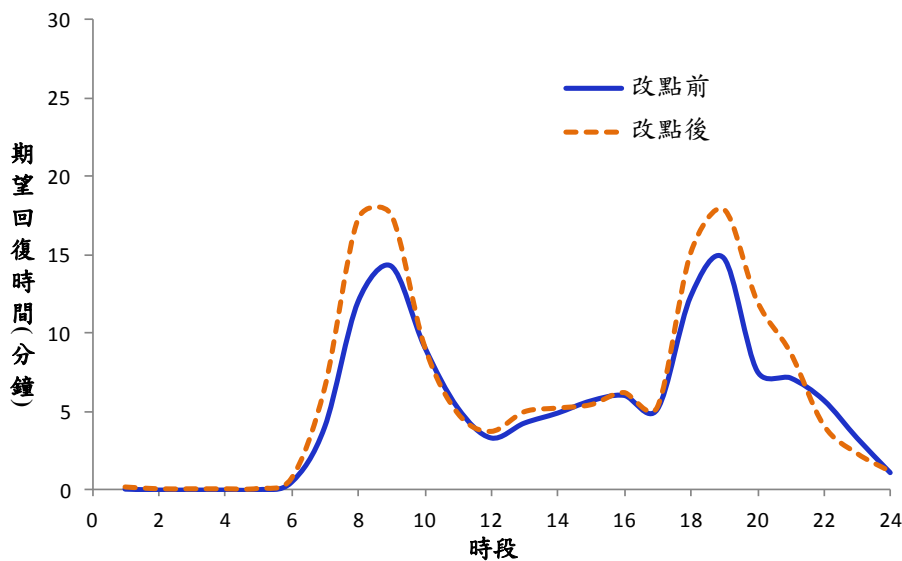


圖 4-4 時刻表改點前後時段期望回復時間

最後，風險模式是依據各類事故的發生機率與事故發生後的嚴重度而得，表

4-16 為各類事故改點前後的風險估算結果，並透過圖 4-5 整理了各類事故的風險剖面圖(Risk Profile)，其中可以看到前五高的風險包含了所有的號誌故障風險，再以圖 4-6 以及圖 4-7 來看不論改點前後，號誌故障風險分別佔據了 76% 以及 77% 的風險，顯示時刻表穩定度的不穩定因素主要來自於號誌故障風險。

表 4-16 改點前後各類事故風險值

事故種類	風險值(期望回復時間)	
	改點前	改點後
出軌	1.29	1.41
列車妨礙	1.02	1.16
列車延誤等級一	0.96	1.10
列車延誤等級二	0.50	0.56
列車障礙	2.45	2.71
死傷等級一	1.95	2.23
死傷等級二	0.64	0.73
其他等級一	2.56	2.94
其他等級二	2.09	2.29
客車故障	0.42	0.47
號誌故障-ATP	61.84	75.05
號誌故障-號誌設備	7.04	7.81
號誌故障(CTC)等級一	22.87	25.61
號誌故障(CTC)等級二	5.14	5.77
路線故障	0.99	1.12
電車故障等級一	6.04	6.93
電車故障等級二	1.50	1.71
電車線故障	2.36	2.64
機車故障等級一	3.96	4.49
機車故障等級二	0.78	0.86
機動車故障	0.28	0.32

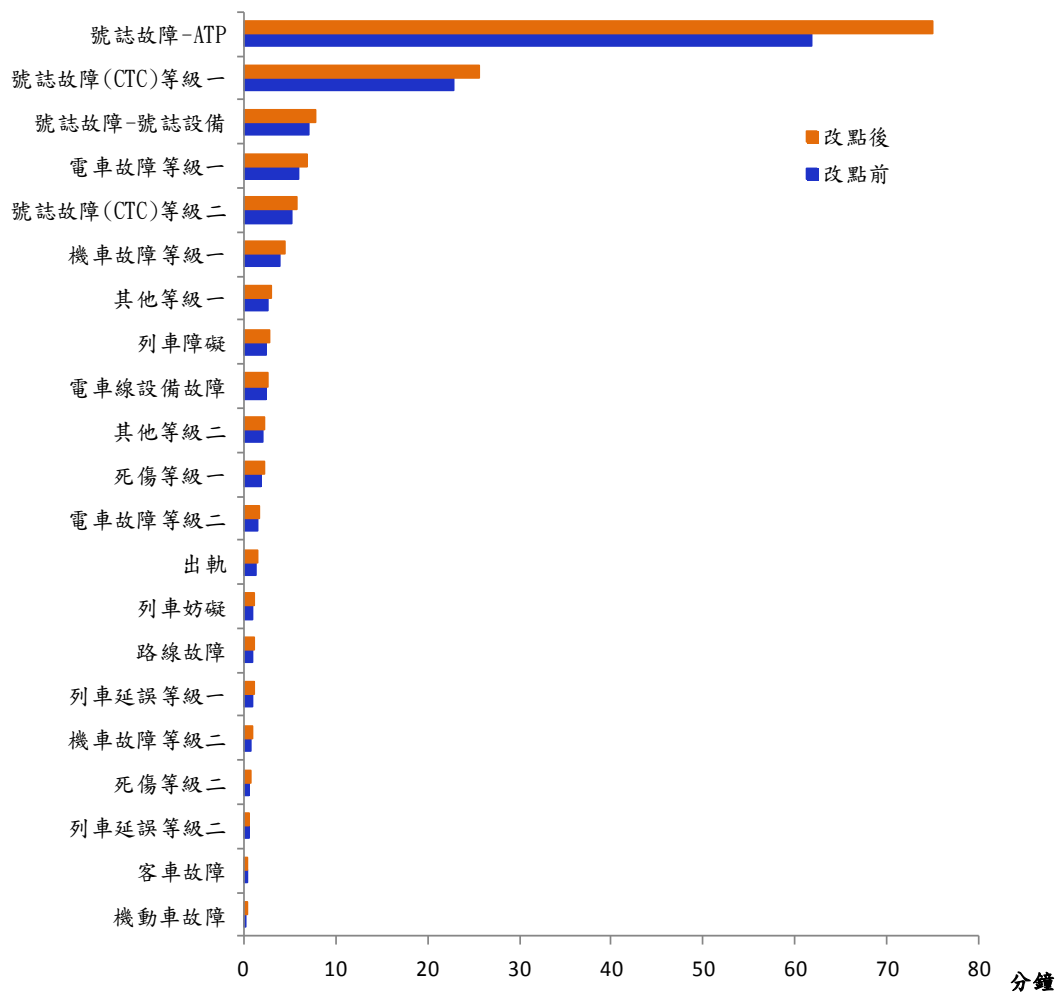


圖 4-5 各類事故風險剖面圖

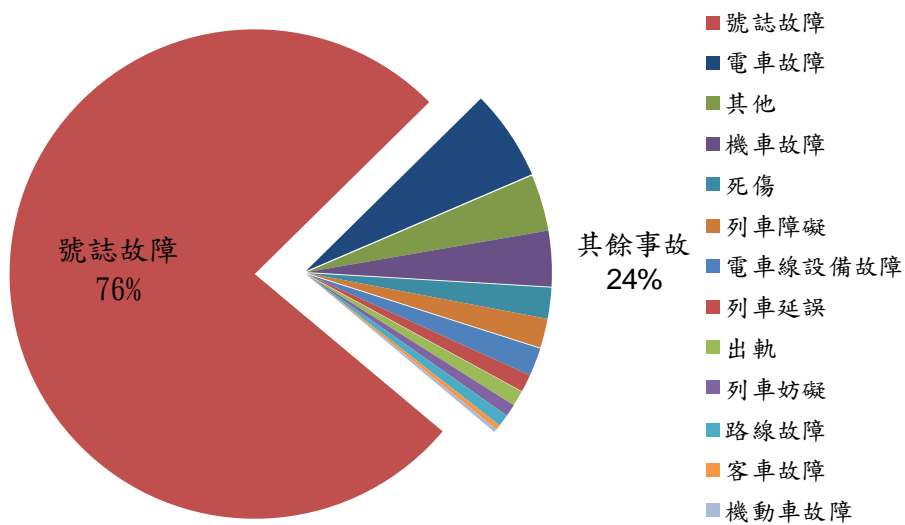


圖 4-6 改點前各類事故風險比例圓餅圖

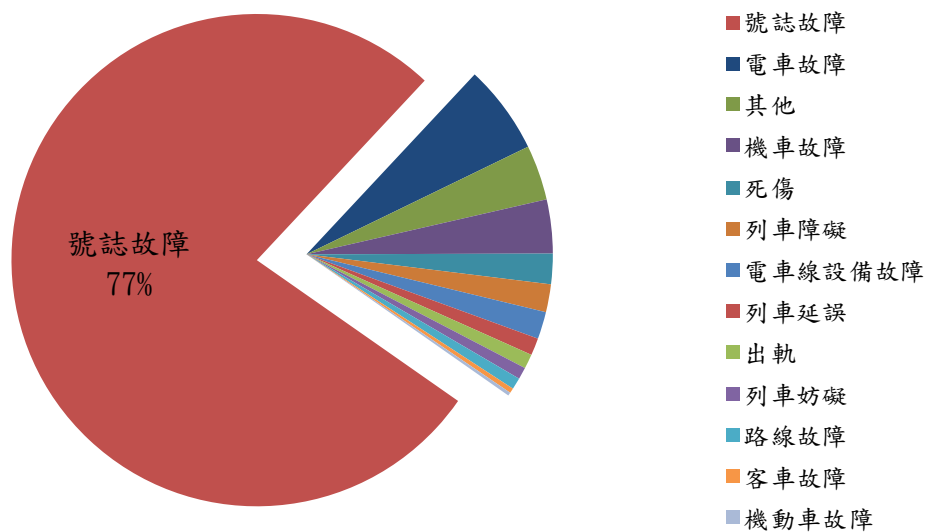


圖 4-7 改點後各類事故風險比例圖餅圖

4.4 指標三：回復時間標準差分析

依據 3.4 節所建立的模擬模式，對其模擬結果進行統計分析後可得到第三個績效指標，而模擬之結果與指標之計算整理如後。

4.4.1 模擬次數決定

一般在應用模擬方法時，當模擬樣本數越大模擬結果理當越接近真實結果，然而實際上並不可能進行無限次的模擬，同時基於時間成本的限制與考量，在應用上常見的問題是究竟多大的樣本空間能夠合理的相信模擬結果能滿足研究目標的設定，若回顧過去的模擬研究，多進行至少 1000 次的模擬試驗，在時刻表穩定度的研究中，Carey 與 Carville(200)亦是分析模擬時刻表運作 1000 次後的結果，然而在不同的研究中可能因為考量的因素不同對結果的精確度有不同要求，再進行模擬結果分析前，本研究嘗試確認 1000 次的模擬試驗能滿足需求。

本研究觀察 1000 次模擬平均值的收斂過程(圖 4-8)，隨著模擬次數的增加，大約在 300 次之前呈現劇烈的變化，400 次至 600 次之間次之，在 700 次之後平均數的變異則更加平緩。因此本研究認為實際上在應用時可採用 1000 次之模擬結果。

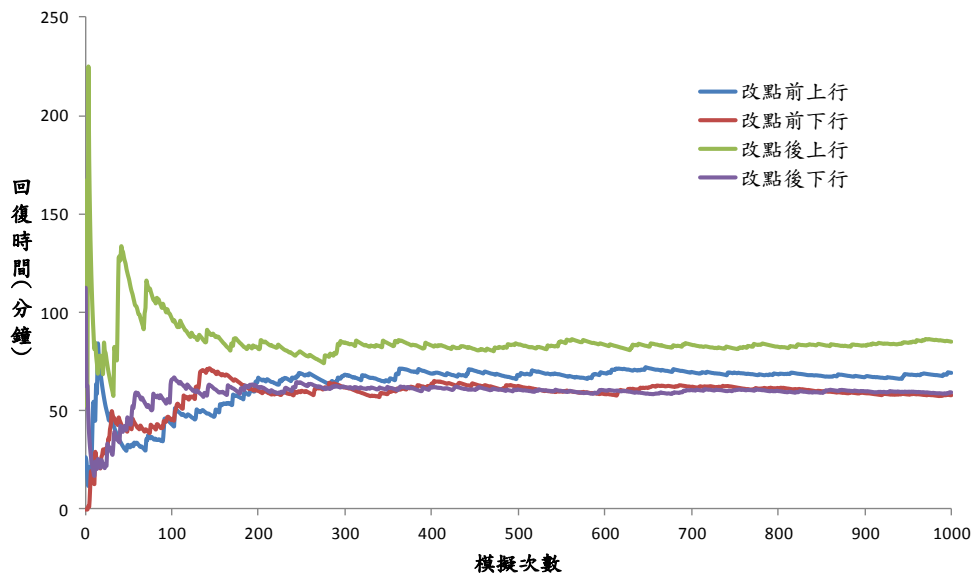


圖 4-8 模擬次數與回復時間平均值變化

4.4.2 模擬結果

本研究以模擬 1000 次後之結果個別分析改點前後上、下行時刻表之時刻表穩定度，在有限次數下的樣本空間，其對問題的估計結果通常只能視為近似於真實運作之結果，因此試驗的誤差必然存在，所以在使用模擬法時，應分析誤差可能存在的範圍，最普遍的方式是探討對於母體估計之誤差範圍，鑒於蒙地卡羅模擬法是依據中央極限定理，即使樣本來自於一個未知的母體，只要樣本數夠大，樣本平均值將近似於常態分佈，因此在模擬後得到足夠大的樣本數下，樣本平均將遵循常態分佈，而其信賴區間應為：

$$\left[\bar{X} - z \frac{S_n}{\sqrt{n}}, \bar{X} + z \frac{S_n}{\sqrt{n}} \right] \quad (4.1)$$

其中， \bar{X} 為樣本平均

S_n 為樣本標準差

n 為樣本數

z 為標準常態分佈值。

以下整理各時刻表之模擬結果與標準差指標之計算：

(一) 改點前上行

改點前上行平均回復時間為 69.11 分鐘，依式 3.13 可得樣本標準差為 172.85 分鐘，最大回復時間則為 1162.06 分鐘，而平均回復時間之 95% 信賴區間為 ± 10.71 分鐘，圖 4-9 呈現了模擬結果之散佈圖。在圖 4-10 及圖 4-11 中則分別顯示了累積相對次數分佈圖以及相對次數分佈圖，以一般的軌道運輸來說大部分時間都應該要能照時刻表運作，因此回復時間為 0 分鐘的情形在時刻表的運行過程中佔絕大多數(在改點前上行的 1000 筆樣本中共 556 筆為 0，改點前下行以及改點後上、下行的模擬結果亦有此現象)應該符合預期。另一方面，由於研究中所關心的是有回復時間的模擬結果，因此在相對次數分佈圖中，去除掉了回復時間為 0 的情形，僅顯示資料尾部的分佈狀況，後續改點前下行以及改點後上、下行的模擬結果亦作相同處理。

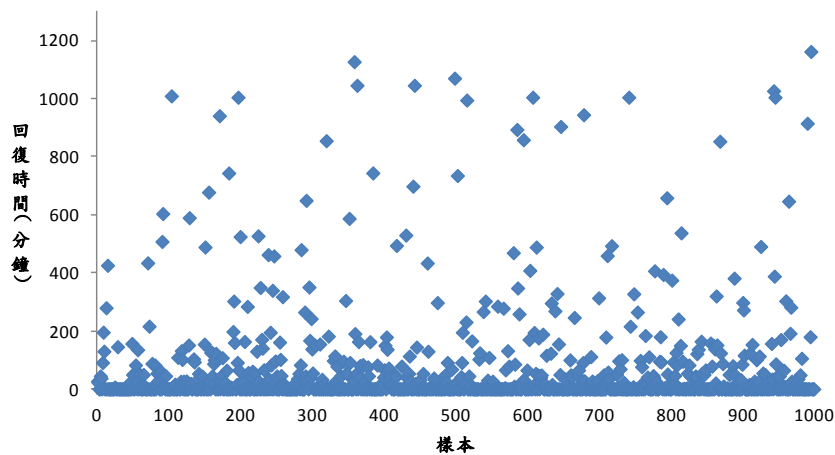


圖 4-9 改點前上行模擬結果散佈圖

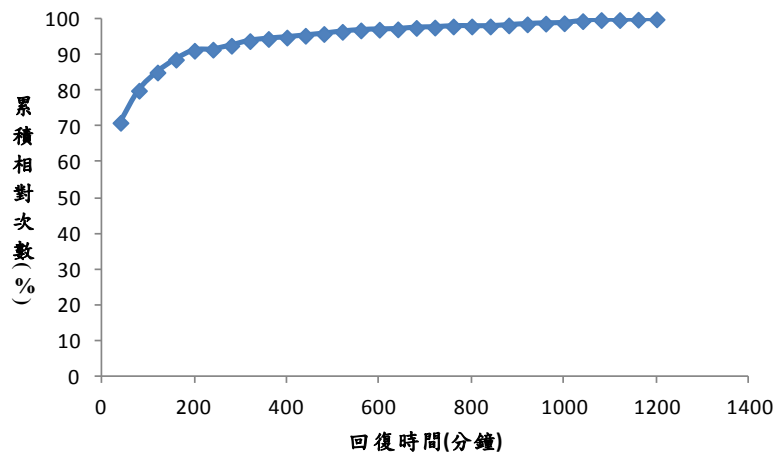


圖 4-10 改點前上行累積相對次數分佈圖

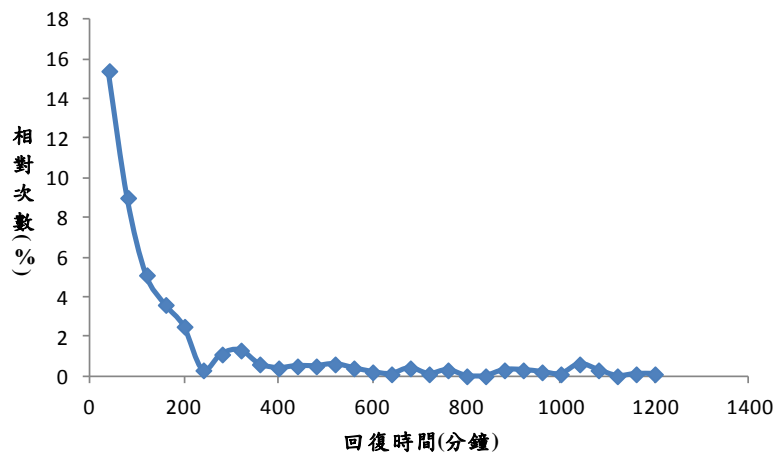


圖 4-11 改點前上行相對次數分佈圖

(二) 改點前下行

改點前下行平均回復時間為 57.58 分鐘，樣本標準差為 120.71 分鐘，最大回復時間則為 831.18 分鐘，而平均回復時間之 95%信賴區間為 ± 7.48 分鐘，圖 4-12 呈現了模擬結果之散佈圖。進一步將模擬結果整理為累積相對次數分佈圖以及相對次數分佈圖以觀察回復時間之趨勢，資訊如圖 4-13 及圖 4-14 所示。

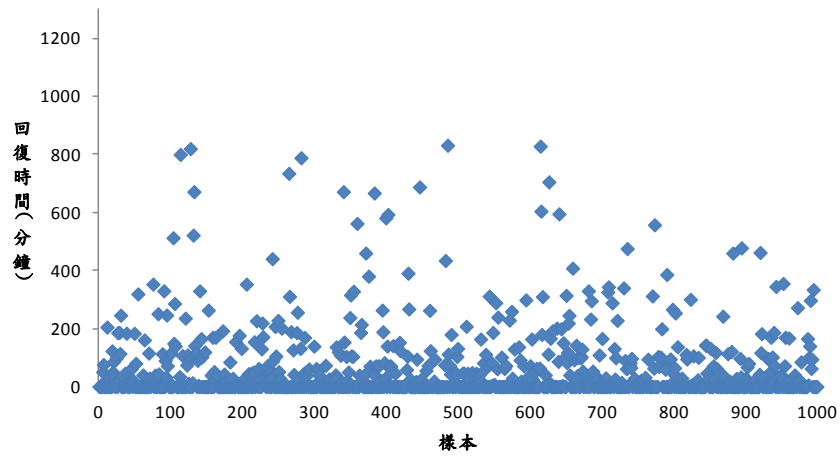


圖 4-12 改點前下行模擬結果散佈圖

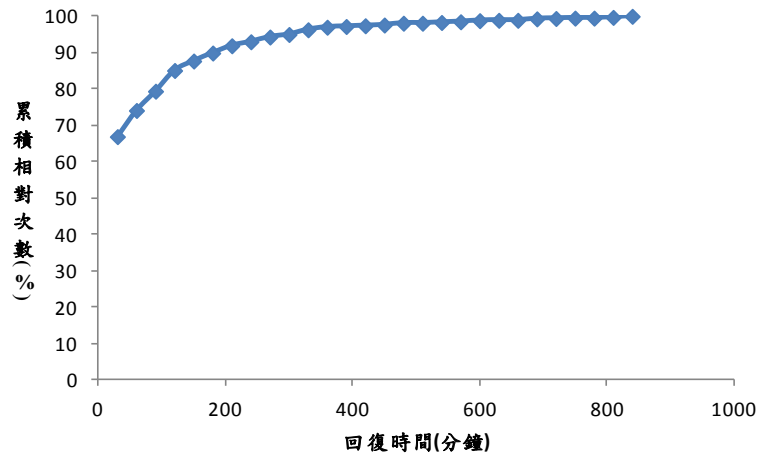


圖 4-13 改點前下行累積相對次數分佈圖

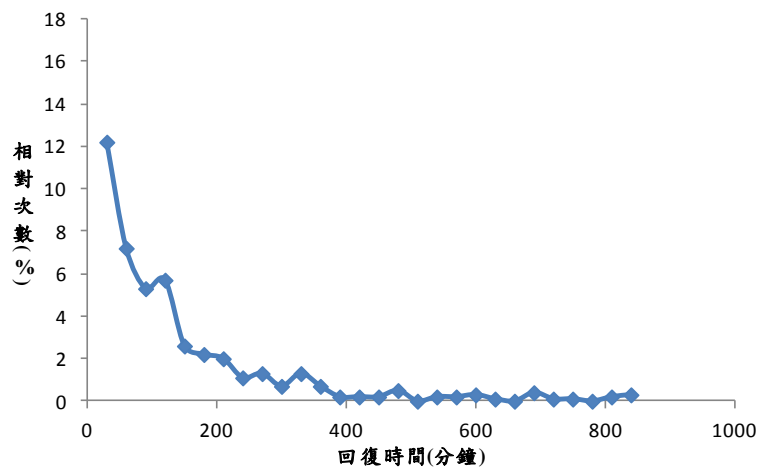


圖 4-14 改點前下行相對次數分佈圖

(三) 改點後上行

改點後上行平均回復時間為 85.11 分鐘，樣本標準差為 198.73 分鐘，最大回復時間則為 1210.48 分鐘，而平均回復時間之 95% 信賴區間為 ± 12.32 分鐘，由模擬所得之散佈圖如圖 4-15 所呈現。同樣將模擬結果整理為累積相對次數分佈圖以及相對次數分佈圖，其資訊如圖 4-16 及圖 4-17 所示。

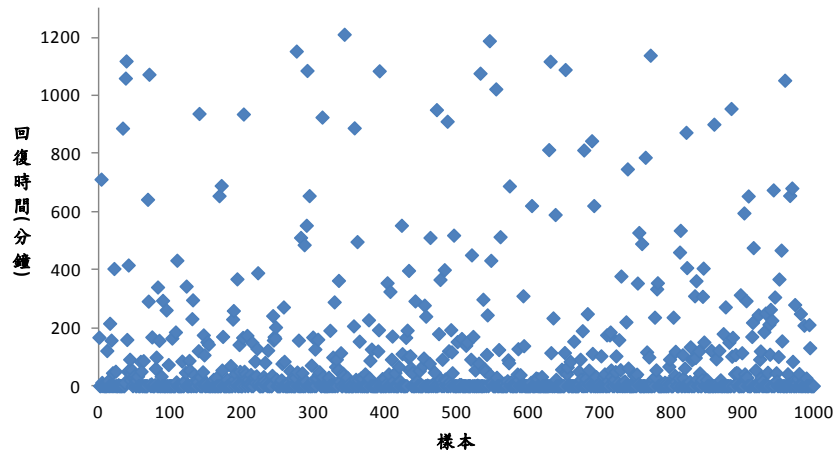


圖 4-15 改點後上行模擬結果散佈圖

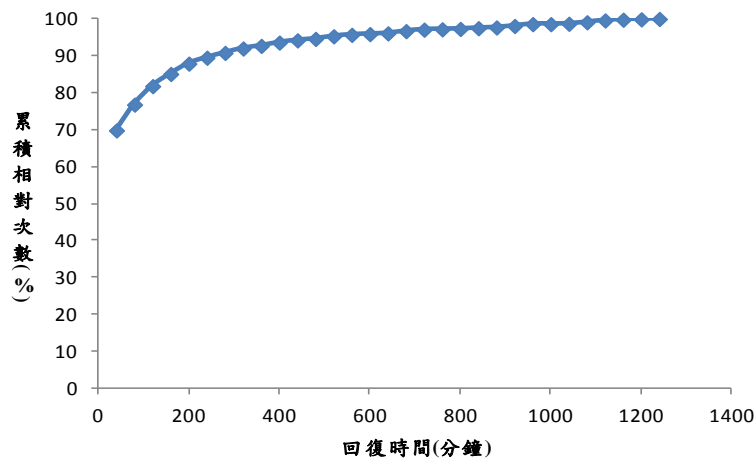


圖 4-16 改點後上行累積相對次數分佈圖

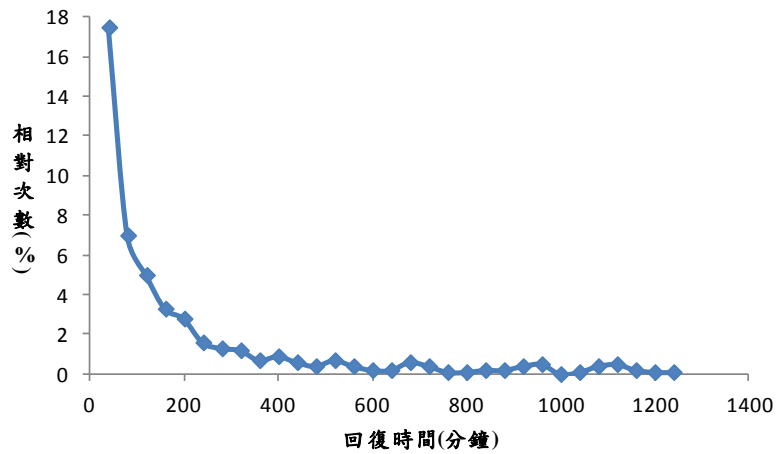


圖 4-17 改點後上行相對次數分佈圖

(四) 改點後下行

改點後下行平均回復時間為 59.27 分鐘，樣本標準差為 115.98 分鐘，最大回復時間則為 975.87 分鐘，而平均回復時間之 95%信賴區間為 ± 7.19 分鐘，模擬結果散佈圖如圖 4-18 所呈現。同樣整理模擬結果成累積相對次數分佈圖以及相對次數分佈圖檢視回復時間的趨勢，如圖 4-19 及圖 4-20 所示。

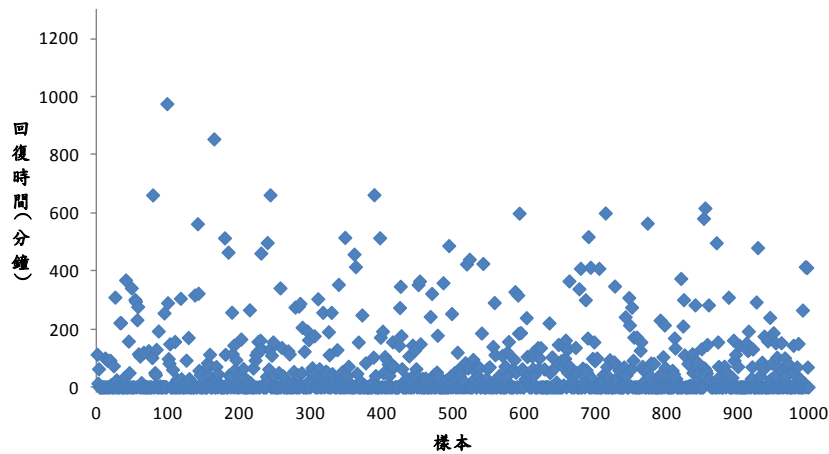


圖 4-18 改點後下行模擬結果散佈圖

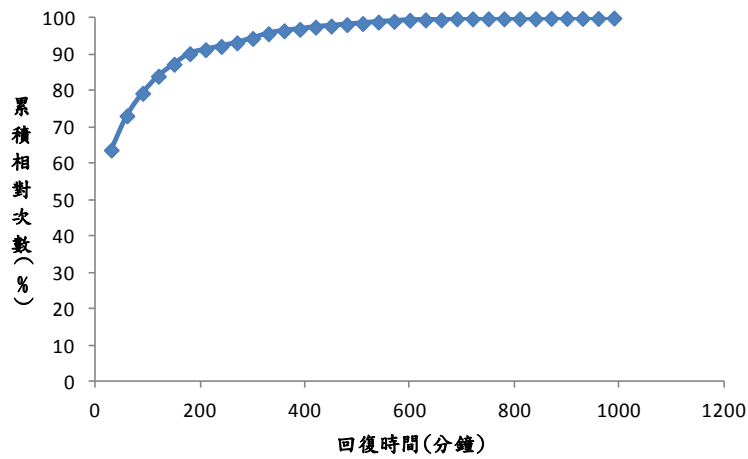


圖 4-19 改點後下行累積相對次數分佈圖

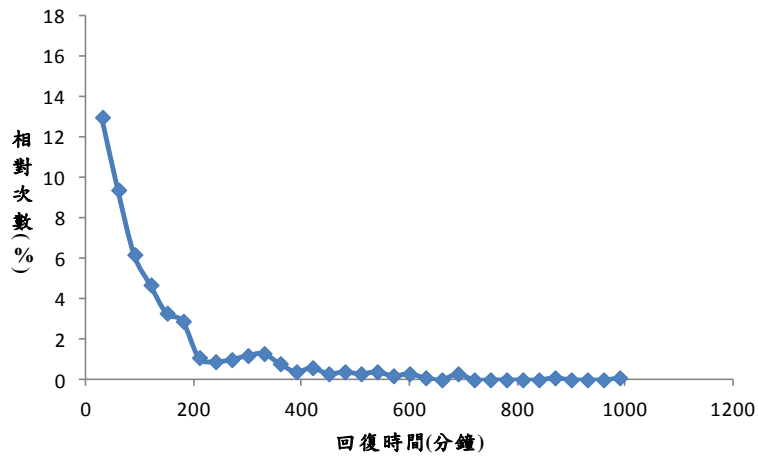


圖 4-20 改點後下行相對次數分佈圖

(五) 模擬結果整理

根據模擬模式的結果，改點前的平均回復時間為 126.69 分鐘，而改點後則為 144.37 分鐘，顯示穩定度有明顯的下降，整體來說，改點前上、下行與改點後上、下行之時刻表在模擬 1000 次後其平均結果與解析模式之期望回復時間值相近，以解析結果為基準差距個別約為-1.27%、2.82%、0.12%以及-5.77%，由於模擬模式是基於解析模式的假設所建構，因此在一定次數的模擬後此結果是可以預見的。改點前上行時刻表平均值為 69.11 分鐘，一個樣本標準差的範圍為 0~241.96 分鐘(回復時間應 ≥ 0)，涵蓋了約 92%的樣本點；改點後上行平均值為 85.11 分鐘，一個樣

本標準差的範圍為 0~283.84，涵蓋了約 91% 的樣本點；改點前下行的平均值為 57.58 分鐘，一個樣本標準差的範圍為 0~178.29 分鐘，涵蓋了約 87% 的樣本點；改點後下行的平均值為 59.27 分鐘，一個樣本標準差的範圍為 0~175.25 分鐘，涵蓋了約 90% 的樣本點。由前述可知大約在一個標準差的範圍內可以涵蓋大部分在改點前後的回復時間結果，這些資訊整理如圖 4-21 及圖 4-22，分別顯示了上、下行時刻表的回復時間結果，這些資訊整理如圖 4-21 及圖 4-22，分別顯示了上、下行時刻表在改點前後回復時間集中的範圍。

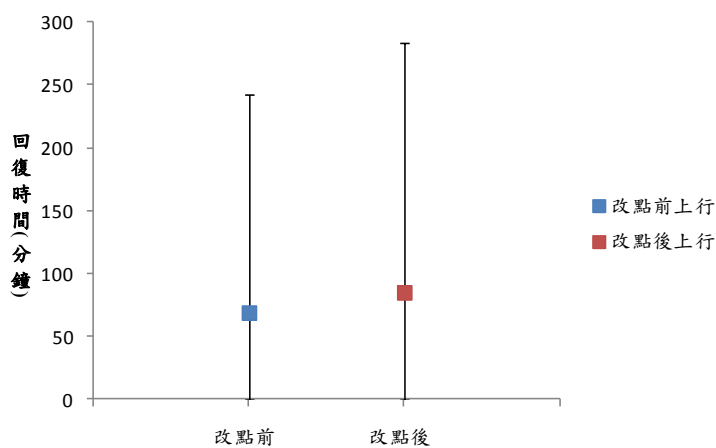


圖 4-21 改點前、後上行時刻表回復時間集中範圍

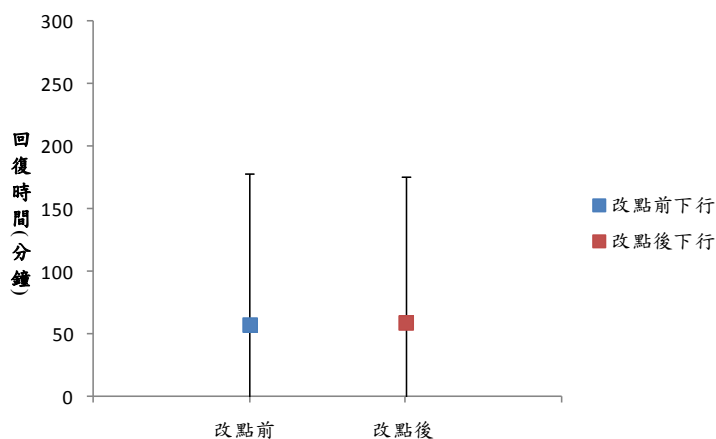


圖 4-22 改點前、後下行時刻表回復時間集中範圍

最後，若觀察各相對次數分佈圖(圖 4-11、圖 4-14、圖 4-17 以及圖 4-20)，可見回復時間的分佈具有偏斜且尾部向右延伸的現象，高回復時間的出現機率非常低且範圍非常大，從實際營運的考量來說，高回復時間可能造成的是高營運損失，

因此即使高回復時間的出現機率極低，對於排點人員來說亦有重要參考價值，而從相對次數分佈圖無法描述高於樣本資料最大值的回復時間，因此本研究嘗試找出回復時間的理論分佈，並將於下一節詳述過程與結果。

4.5 指標四：失效機率分析

根據 3.5 節的說明，在先前的研究中學者(Yuan 等人, 2006)指出軌道運輸研究中常以指數分佈試合延滯時間的分佈，但若將資料點繪製指數分佈的 QQ-plot，顯示回復時間可能是來自於尾端比指數分佈更長的分佈，因此若以指數分佈估計其結果可能會低估回復時間，而透過極端值理論(Extreme Value Theory)來描繪長尾分佈是一個可行的方法。

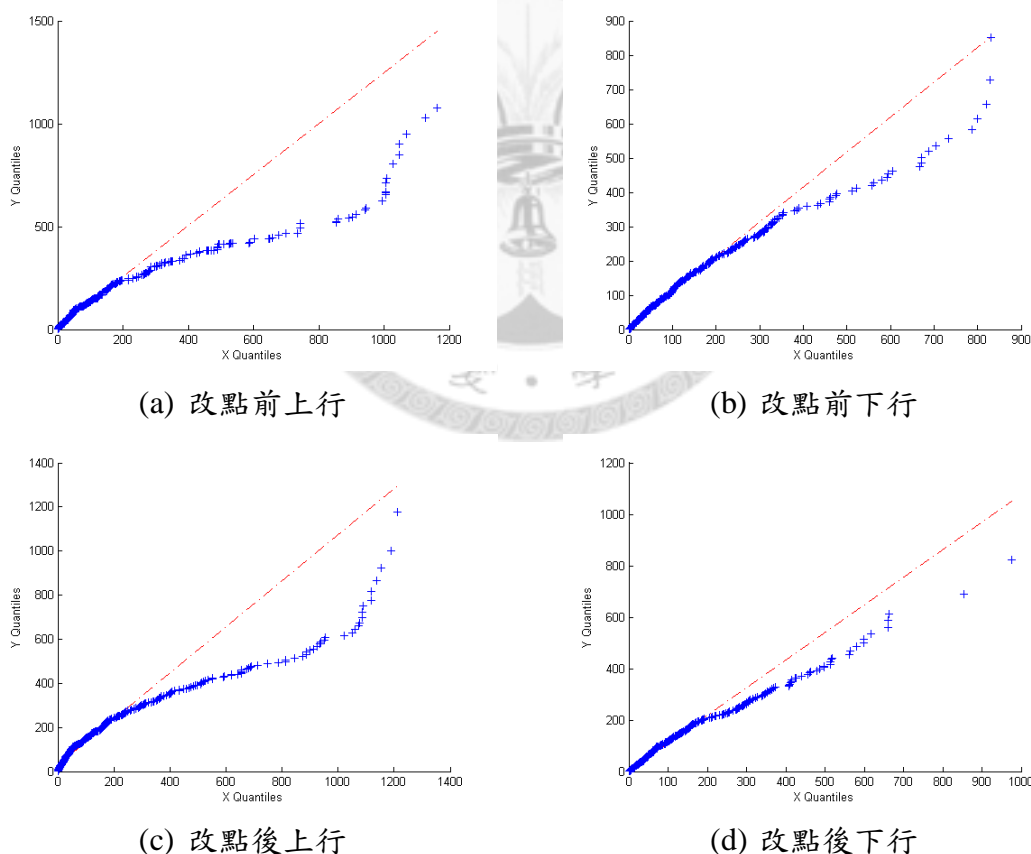


圖 4-23 樣本資料與指數分佈 QQ-plot

極端值理論過去被應用在極端降雨、地震災害以及財務工程等領域中，可用

於描述事件尾端分佈的情況，而不需知道整個母體的分佈，一般來說，極端值理論可分為兩種模型，包括 Block Maxima 模型以及 Peak Over Threshold(POT)模型，前者主要是在每段期間(Block)取出最大值並透過一般化極端值分佈(Generalized Extreme Value Distribution, GEV)來探討尾端的分佈；而後者則是以一般化柏拉圖分佈(Generalized Pareto Distribution, GPD)捕捉超過一特定門檻值 u 的資料點的分佈，圖 4-24 可用於說明兩種模型的概念。

根據 Coleman(2002)，雖然並未有絕對的理由說明該用 Block Maxima 模型或是 POT 模型，一般而言，對於具有季節性或週期性的樣本資料通常可用 Block Maxima 模型，而由於回復時間並不像水文資料或是財務投資報酬風險資料以年、月等可決定出期間間隔，且對於 Block Maxima 模型來說，在每一個 block 之內只取最大值的概念可能導致忽略其他的極端值(Lin, 2003)，因此在本研究中嘗試以 POT 模型對回復時間的尾端建立極端值分佈。

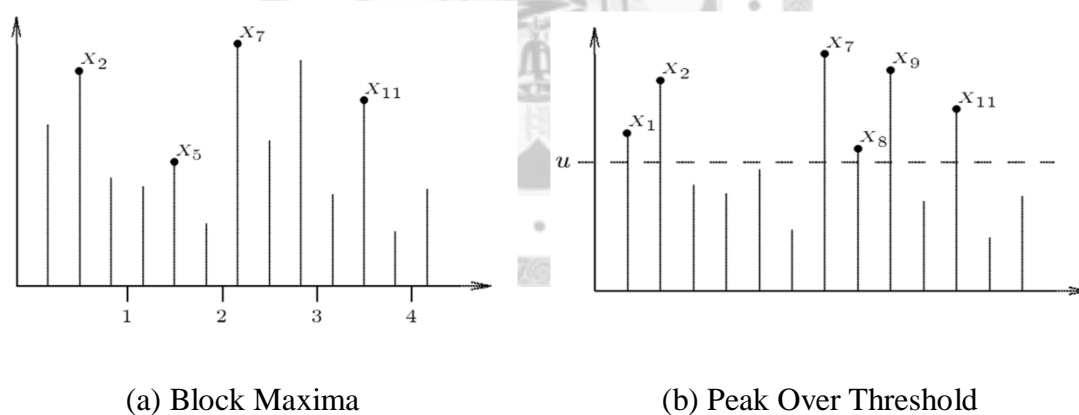


圖 4-24 極端值理論模型極值數據獲取概念示意圖

資料來源：Kellezi(2000)

POT 模型是在捕捉超過一特定門檻值的「條件分佈函數」，對於此分佈可定義為：

$$F_u(y) = P(X - u \leq y | X > u), y > 0 \quad (4.2)$$

根據條件機率公式，並假設一隨機變數的分佈函數為 F (未知)，式 4.2 可改為

$$F_u(y) = \frac{F(u+y) - F(u)}{1 - F(u)} = \frac{F(x) - F(u)}{1 - F(u)}, \quad z \geq u \quad (4.3)$$

同時當取得一個適當的 u 值時，式 4.3 將趨近於一般化柏拉圖分佈(GPD)：

$$G(x) = \begin{cases} 1 - (1 + \xi \frac{x}{\sigma})^{-1/\xi}, & \text{if } \xi \neq 0 \\ 1 - e^{-x/\sigma}, & \text{if } \xi = 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

其中， ξ 為形狀參數(Shape Parameter)

σ 為大於 0 的規模參數(Scale Parameter)

當 ξ 大於 0 的時候，說明原本的分佈確實為厚尾分佈，而對於 ξ 以及 σ 的估計方式，大多採用最大概似估計法(Maximum likelihood Estimation, MLE)，對數概似函數為：

$$L(\xi, \sigma | y) = \begin{cases} -n \log \sigma + (\xi^{-1} - 1) \sum_{i=1}^n \log(1 - \frac{\xi}{\sigma} y_i), & \text{if } \xi \neq 0 \\ -n \log \sigma - \sigma^{-1} \sum_{i=1}^n y_i, & \text{if } \xi = 0 \end{cases} \quad (4.5)$$

在應用 GPD 時，須先決定 u 值以供後續參數值的估計，根據 Kellezi(2000)的研究，可透過門檻值對樣本平均餘額函數 $e_n(u)$ (Sample Mean Excess Function)作圖來決定，當圖形於某一門檻值後呈現正斜率的直線時顯示樣本可以該門檻值作為後續參數估計的選擇，而 $e_n(u)$ 之定義為：

$$e_{n(u)} = \frac{\sum_{i=k}^n (x_i^n - u)^+}{n - k + 1}, \quad k = \min \{i | x_i^n > u\} \quad (4.6)$$

其中， $n - k + 1$ 為超越門檻值之樣本數，而“+”號表示當 $x_i^n - u$ 為正時才考慮。

圖 4-25 呈現了改點前後上、下行時刻表之平均餘額函數對門檻值之圖，並擷取可以觀察到正斜率的部分，根據圖形之觀察本研究之門檻值設定為：改點前上行 $u=26$ 、改點前下行 $u=20$ 、改點後上行 $u=35$ 、改點後下行 $u=10$ ，決定 u 值後，後續便可對超過門檻值之樣本進行參數估計。

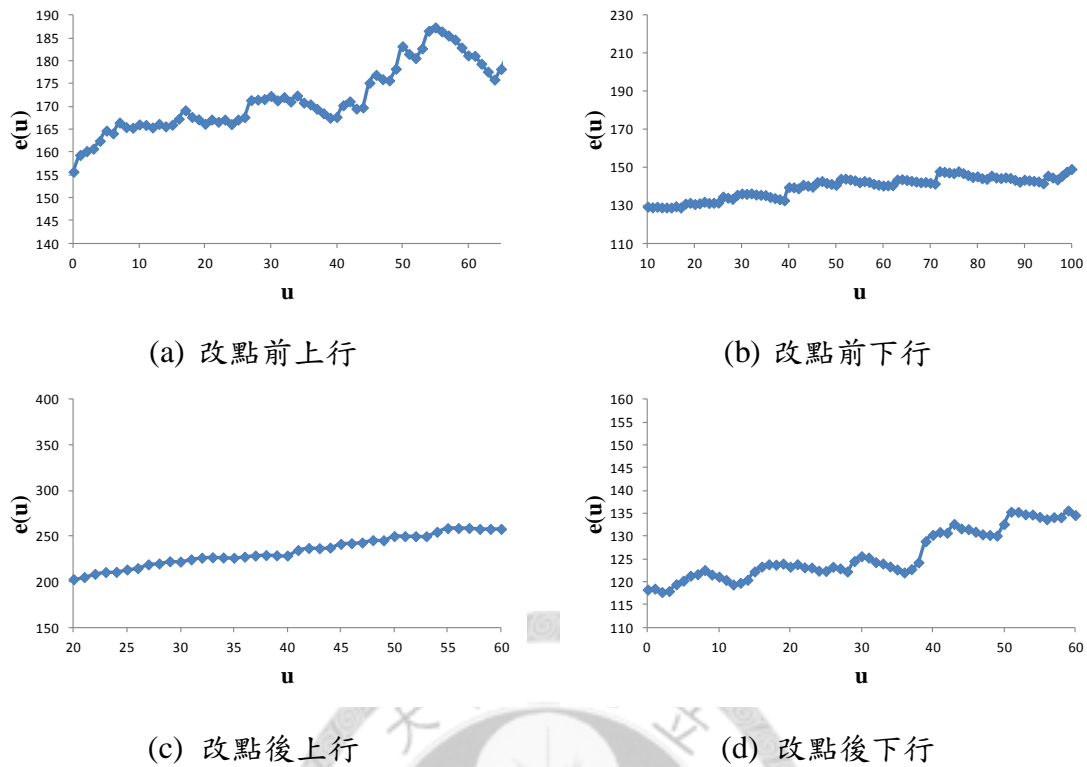


圖 4-25 平均餘額函數圖

根據前述決定的門檻值，可以 MLE 法估計 ζ 以及 σ ，研究中以 Matlab 進行參數估計。估計結果顯示，改點前上行的 $\zeta=0.2331$ ， $\sigma=159.6748$ ；改點前下行的 $\zeta=0.0267$ ， $\sigma=149.6251$ ；改點後上行的 $\zeta=0.0828$ ， $\sigma=243.2664$ ；至於改點後下行的 $\zeta=0.0763$ ， $\sigma=123.1448$ 。

而模式的驗證，可以圖示的方式進行(2003, Lin)，圖 4-26 至圖 4-29 為各時刻表進行 GPD 試合之結果與來自樣本的經驗分佈結果比較；另外，將模擬樣本資料與從估計出的 GPD 產生的隨機樣本繪製 QQ-plot，從 QQ-plot 來檢視模型的適合度，如圖 4-30 至圖 4-33 所示(圖中橫軸為樣本資料，縱軸為隨機樣本資料)，部分結果顯示在最尾端的部分，估計出的 GPD 會稍微高於樣本模擬結果，也就是 GPD 試合之結果於高回復時間時會有再高估的情況，但大致上依據本研究所假定的門檻值能使回復時間符合 GPD 分佈，並且能得到比指數分佈更好的結果(圖 4-23)。

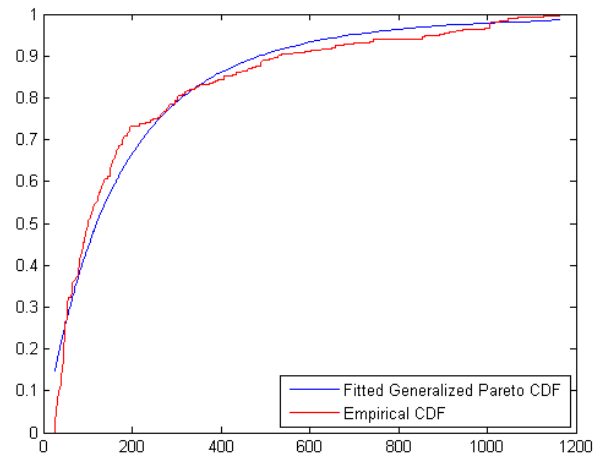


圖 4-26 改點前上行試合結果與樣本經驗分佈比較

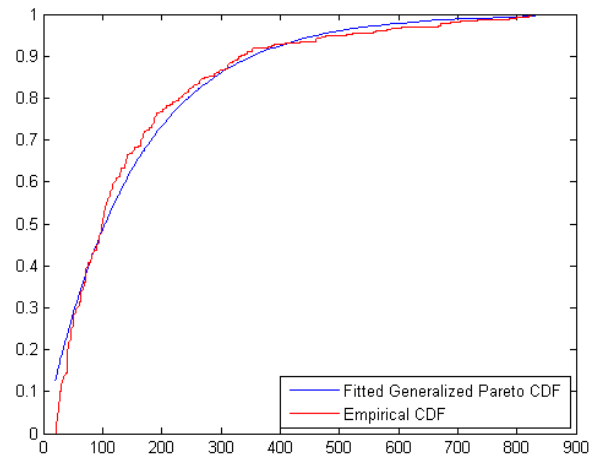


圖 4-27 改點前下行試合結果與樣本經驗分佈比較

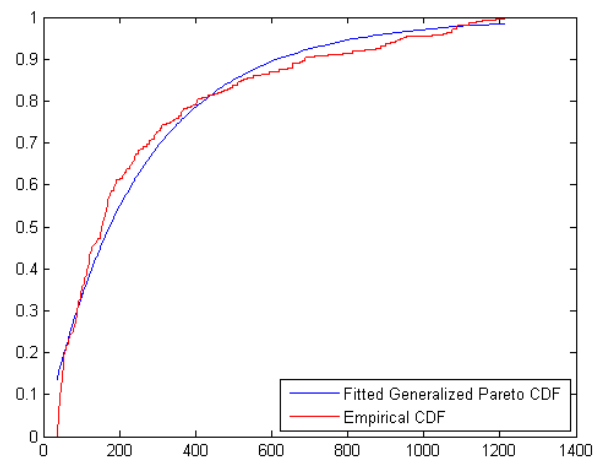


圖 4-28 改點後上行試合結果與樣本經驗分佈比較

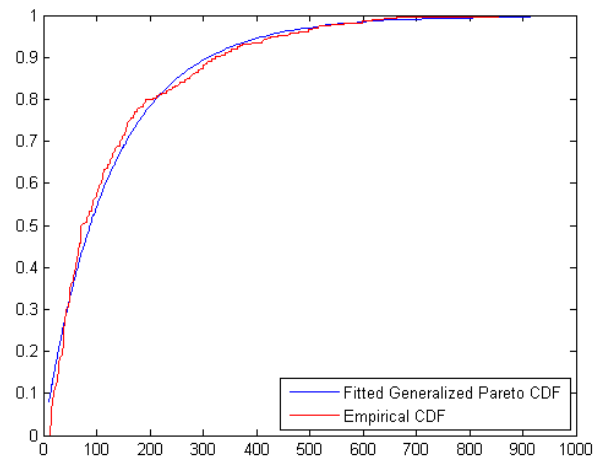


圖 4-29 改點後下行試合結果與樣本經驗分佈比較

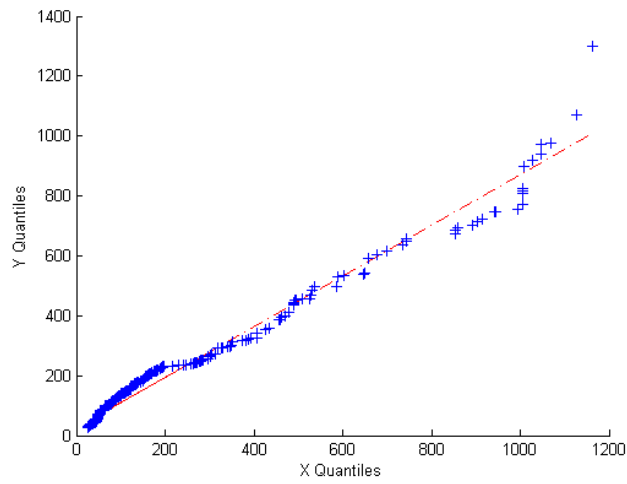


圖 4-30 改點前上行試合結果之 GPD 與樣本資料 QQ-plot

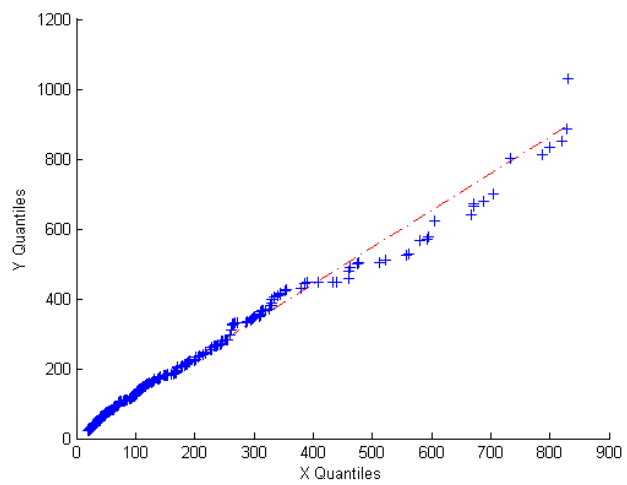


圖 4-31 改點前下行試合結果之 GPD 與樣本資料 QQ-plot

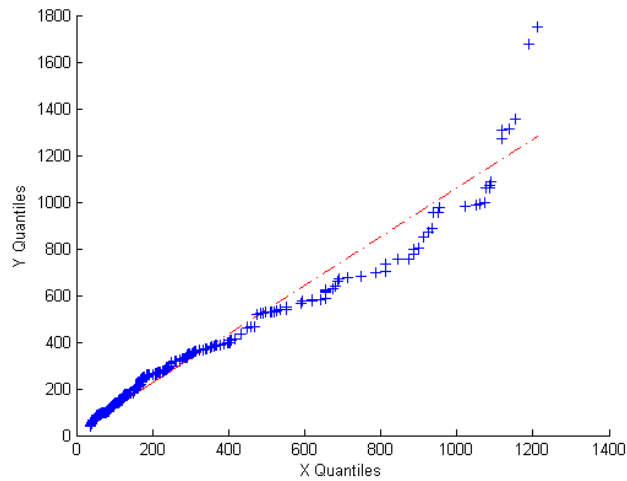


圖 4-32 改點後上行試合結果之 GPD 與樣本資料 QQ-plot

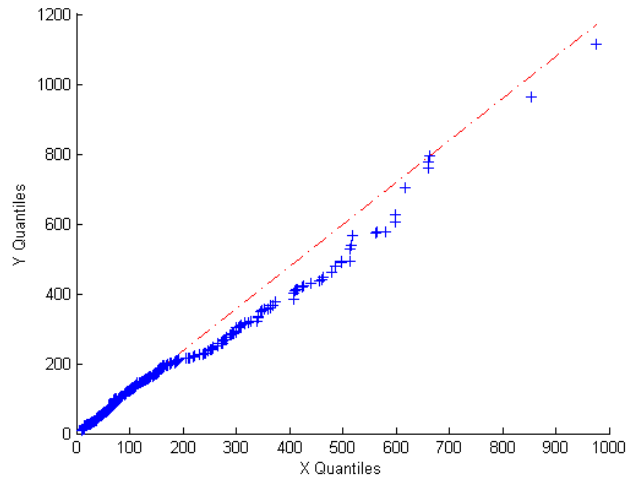


圖 4-33 改點後下行試合結果之 GPD 與樣本資料 QQ-plot

最後，由式 4.3 及式 4.4，合併可得下式：

$$G(x) = \frac{F(x) - F_n(u)}{1 - F_n(u)} \quad (4.7)$$

經過整理後上式可改為：

$$F(x) = (1 - F_n(u))G(x) + F_n(u) \quad (4.8)$$

式 4.8 中 $F_n(u)$ 可由 $(n - N_u)/n$ 估計 (Lin, 2003)，而 n 為樣本數， N_u 為超越門檻值之個數，因此可再經過整理，如式 4.9 所示：

$$F(x) = 1 - \frac{N_u}{n} \left(1 - \xi \frac{x - u}{\sigma}\right)^{1/\xi} \quad (4.9)$$

式 4.9 可作為 $x > u$ 之尾端分佈表示式。

實際上由式 4.9 便能計算不同回復時間值得發生機率，當營運單位給定一個回復時間的標準時，可計算超過此標準的機率，也就是第四個指標－失效機率，而由於回復時間是一個新提出的指標，不同的營運單位、軌道系統可能會有不同的標準，根據前述平均值加上一個標準差的範圍內大概可涵蓋 90% 左右的回復時間值，本研究以超過此範圍的回復時間值為不可接受的情況(Unacceptable Recovery, UR)，並以上、下行時刻表於改點前的值作為標準，以檢驗改點後的差異，也就是上行時刻表以 241.96 分鐘，而下行時刻表則以 178.29 分鐘定義為標準對所有時刻表進行試算並比較，而因為機率值之合應為 1，因此其可能發生的機率等於 1 減去式 4.9 的估計值，如式 4.10 所示。

$$Failure\ Probability = F(x > UR) = \frac{N_u}{n} \left(1 - \xi \frac{UR - u}{\sigma}\right)^{1/\xi} \quad (4.10)$$

因此改點前、後上行時刻表以及改點前、後下行時刻表的失效機率分別為 0.065、0.129、0.126 以及 0.105，顯示改點後上行時刻表發生事故後高回復時間的出現機率增加而較不穩定；反之，改點後下行時刻表雖然期望回復時間增加，失效機率值卻有所下降，由此可見改點後的下行時刻表其穩定度不見得較差。對於所有時刻表個別的計算結果則整理於表 4-17。

表 4-17 時刻表回復時間極端分佈分析結果

時刻表	不能接受回復時間值(UR)	GPD 門檻值(u)	形狀參數(ξ)	規模參數(σ)	N_u	FP
改點前 上行	241.96	26	0.2331	159.6758	329	0.065
改點後 上行	241.96	35	0.0828	243.2664	312	0.129
改點前 下行	178.29	20	0.0267	148.6251	372	0.126
改點後 下行	178.29	10	0.0763	123.1448	443	0.105

4.6 時刻表改點前後指標綜合討論

將前述指標的分析結果合併整理於表 4-18 中進行比較，由表中可以看到改點後上下行時刻表的效率增加而導致期望回復時間亦增加，說明改點後平均一天之內發生一次事故回復至正常所需的時間較改點前增加，而若從不確定性的指標，即標準差和失效機率來看，改點後上行的指標也呈現上升的現象，但改點後下行時刻表在這兩個指標卻呈現下降的情形，首先標準差的下降說明改點後下行時刻表回復時間的分佈較集中，因此同樣在一個標準差的範圍之內出現的回復時間值較小，而失效機率下降直接說明不能接受的回復時間值的出現機率較小，對營運單位來說高回復時間的出現是要盡量避免的，因此綜合來說，由於使用效率的增加，改點後上行時刻表相較於改點前是一個較不穩定的時刻表，但下行時刻表的穩定度在改點後卻不盡然較差。

表 4-18 改點前後上、下行時刻表指標分析結果

	上行			下行		
	改點前	改點後	改變比例	改點前	改點後	改變比例
使用效率(%)	41.58	42.46	+2.11%	43.20	44.18	+2.27%
期望回復時間 (分鐘)	70.29	85	+20.97%	56.38	62.9	+11.56%
標準差(分鐘)	172.85	198.73	+14.97%	120.71	115.98	-3.92%
失效機率	0.065	0.129	+98.46%	0.126	0.105	-16.67%

由前述結論，值得觀察的是，改點前下行時刻表雖然有最小的期望回復時間，但失效機率卻大於改點後下行時刻表，主要可能原因是因為改點後下行時刻表的模擬結果樣本之標準差稍微較小，因此回復時間的分佈相較於改點前下行更向左半部集中，導致改點前下行時刻表回復時間超過標準值的機會較高，同時也因為試合出的尾部分佈有不同的厚度(圖 4-34)，皆可能導致這樣的結果。最重要的仍是對於回復時間標準值的認知尚未明確，在未來若能定義出標準，相信能使失效機

率指標更具參考價值。

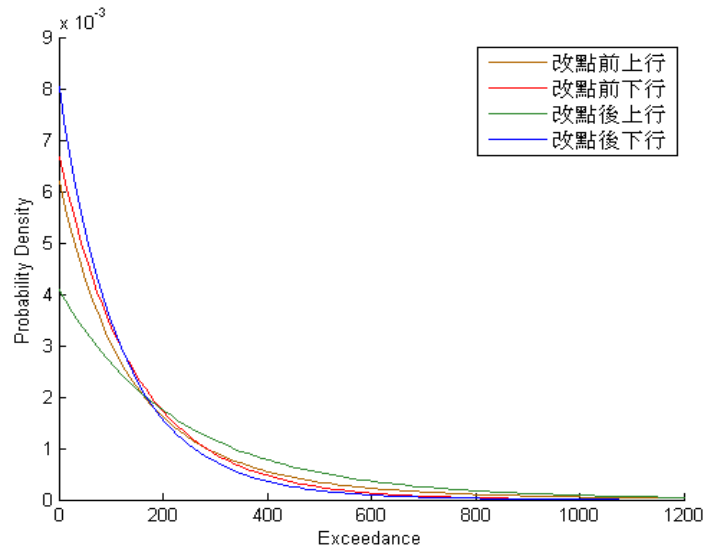


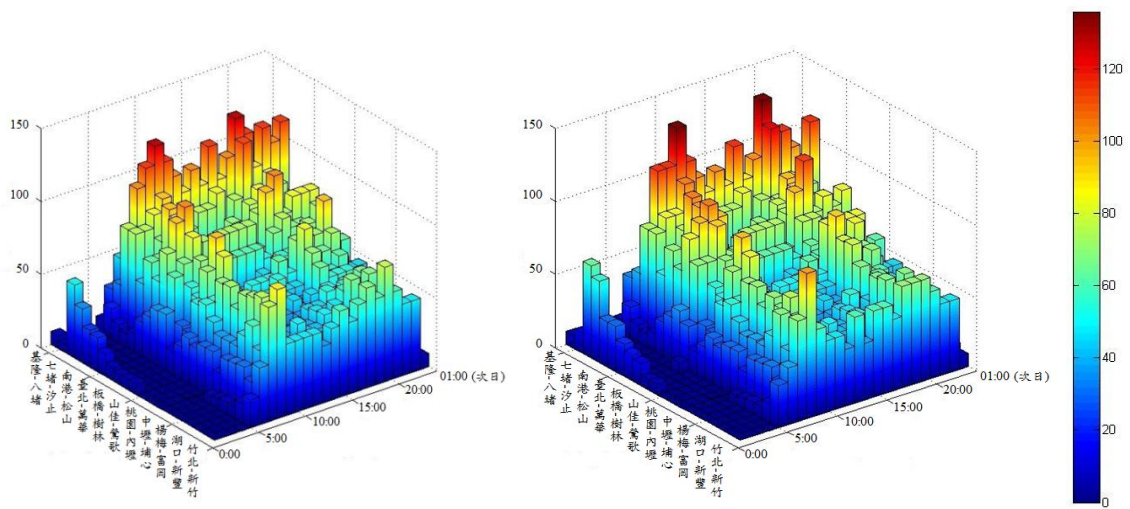
圖 4-34 各時刻表極端分佈機率密度函數比較

進一步觀察使用效率增加的幅度遠小於期望回復時間的比例，且下行時刻表在改點後的增幅雖然大於上行時刻表，但期望回復時間的增幅卻不及上行時刻表，有鑑於此，若觀察表 4-14 及表 4-15 所有分析單元的使用率，根據運研所(2009) 的研究報告整理指出過去許多學者認為使用率若大於 80%則有需要改善，而表中的結果顯現使用率達 80%以上的分析單元數在改點後皆有增加的情形，上行時刻表中大於 80%的單元數自 39 增加至 47，提升幅度約 20.5%，而下行時刻表則自 41 增加至 46 提升幅度約 12.2%，這與期望回復時間的增加比例相近，也說明了高使用效率單元對穩定度的影響；另外，下行時刻表中使用率高於 100%的單元數明顯少於上行時刻表，也反應了為什麼下行時刻表中雖然整體使用效率皆高於上行時刻表，期望回復時間卻小於上行時刻表。

若將各單元效率與回復時間的變化趨勢以 3D 圖的方式呈現，整理如圖 4-35 及圖 4-36 所顯示的資訊，從路線區段的角度觀看，可以觀察到七堵-汐止區間為瓶頸路段，而使用率與期望回復時間的趨勢相一致；若從時段的角度來看，回復時間較高的時段有雙峰的情形，但值得觀察的是，使用率的最高峰所對應到的不一定是期望回復時間的最高峰，如圖 4-36(b)及圖 4-36 (d)的比較，在汐止-七堵區間

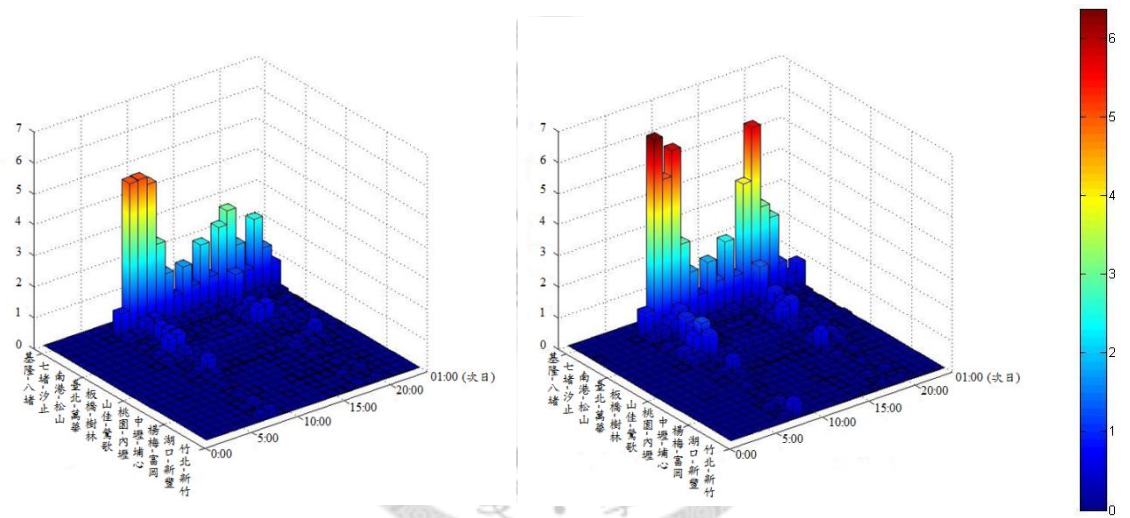
於 20:00 至 21:00 之間達到最高使用率 133.16%，相對應的期望回復時間為 1.97 分鐘卻非為最大回復時間，回復時間的最大值出現在上午 7:00 至 8:00，達到 3.22 分鐘，相對應的使用率為 104%，對於這樣的結果，從圖中可以注意的到是，當使用效率在連續時段皆為高使用效率的情形，會得到更大的回復時間，上、下行時刻表皆然；仍以改點後下行時刻表為例，上午 7:00 至 10:00 連續使用效率皆高於 90%，而在 20:00 至 21:00 時段之後，使用效率迅速的下降至 73.45%，由於回復時間的計算是考慮後續時段的剩餘空間供中斷列車進行運轉調度，也因此 21:00 之後的運轉調度彈性更具餘裕，事故發生後所需的回復時間也就不需那麼長。根據 3D 圖的趨勢比較便可了解高使用效率單元的密度越高會使得時刻表反而趨於不穩定。





(a) 改點前效率

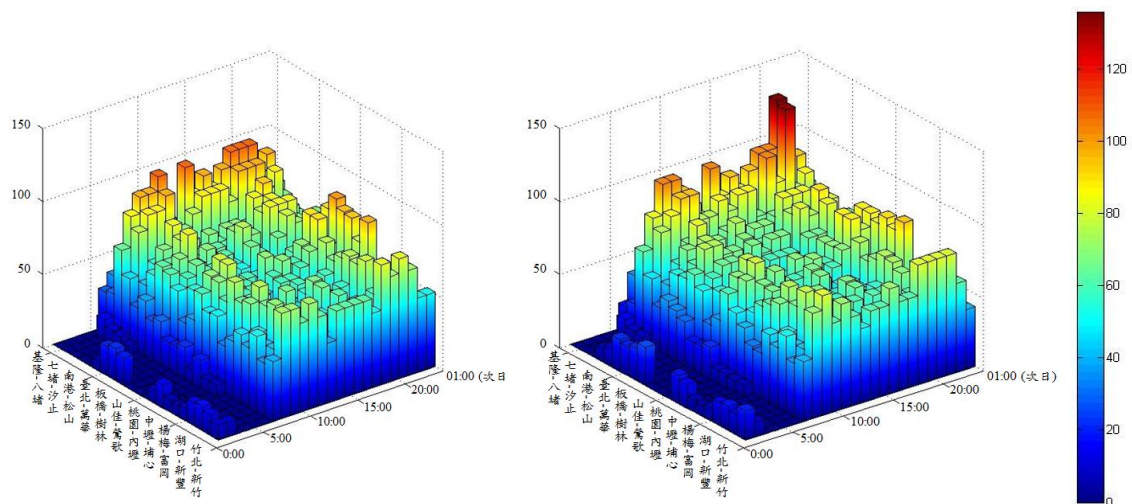
(b) 改點後效率



(c) 改點前期望回復時間

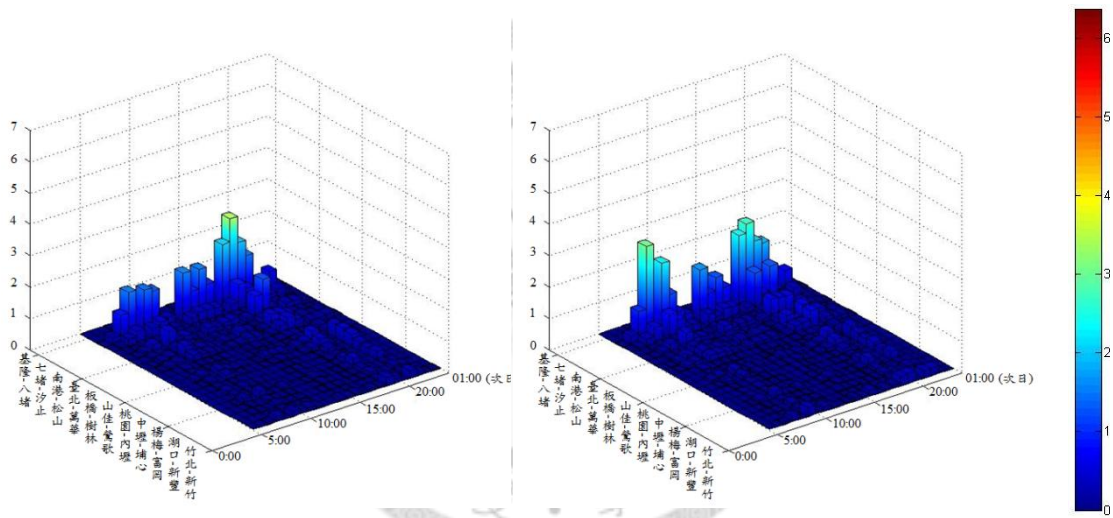
(d) 改點後期望回復時間

圖 4-35 上行時刻表改點前後效率與期望回復時間 3D 圖



(a) 改點前效率

(b) 改點後效率



(c) 改點前期望回復時間

(d) 改點後期望回復時間

圖 4-36 下行時刻表改點前後效率與期望回復時間 3D 圖

4.7 小結

本研究藉由四個指標分析時刻表績效，並應用於民國 100 年 9 月 28 日改點前後的時刻表進行案例分析，結果顯示改點後上下行的時刻表期望回復時間都有所增加，而從路線區段分析結果來看，北上與南下時刻表改點前後高風險主要發生在七堵至汐止區段；從時段分析結果來看，高風險主要集中於晨峰與昏峰時段；從事故類型來看，號誌故障風險則為主要風險來源，其中又以號誌故障等級一(ATP

故障)影響最為重大，而主要原因則是因為 ATP 的故障率遠高於其他事故。

另一方面，根據模擬結果可計算出樣本標準差，說明回復時間分佈的離散程度，結果顯示改點後上行的標準差最高，因此高於平均值的回復時間的出現相較其他時刻表會是更大的回復時間，而模擬結果也顯示回復時間具有厚尾的現象，在平均值加上一個樣本標準差的回復時間，可涵蓋大約 90%的樣本，分析失效機率時，假設上下行時刻表皆以改點前此範圍為準，在這範圍之外的回復時間視為不能接受的情形，透過一般化柏拉圖分佈分析，可計算出時刻表的失效機率。

最後，時刻表排點密度的增加導致回復時間增加是可預期的，但增加的幅度仍要視不同時段的安排，連續時段高密度的安排將導致穩定度大幅的下降，對於排點人員來說若因為穩定度高而需要調整使用量時，因盡量避免連續高使用效率的出現，或者在高使用效率單元後安排一個能夠有剩餘容量的空間以在事故發生後能幫助時刻表的營運回復至正常。





第五章 結論與建議

5.1 結論

本研究自營運單位的角度建立了完整的時刻表績效評估系統，並可藉由提出的四個指標對時刻表進行評估，評估的結果可作為營運單位排點作業之參考，而本研究所獲得的具體結論整理如下：

1. 本研究以使用效率及回復時間的觀點建立了時刻表績效評估系統提出四個評估指標，其中穩定度以回復時間評估的好處在於從受到中斷的列車使用量的角度以及與軌道容量資源的交互關係去考慮回復至正常所需的時間，彌補了過去研究雖有提出容量、使用量與營運可靠度的交互關係，在評估時刻表時，仍多以延滯時間作為指標缺少了與容量交互考慮的方式。
2. 本研究蒐集了相關行車事故歷史資料並進行建檔整理，可得到不同事故發生後造成系統中斷時間的長度資訊，並整理了事故發生的間隔列車小時，而間隔列車小時配合以可靠度工程的概念計算行車事故的發生機率能反應出使用量大小(亦即在單位時間內班次的密集程度)會影響該時段事故發生機率的特性，可提供營運單位了解系統的可靠度。
3. 本研究探討分析單元內高使用效率與穩定度之間的關係，說明連續高使用效率會使得剩餘容量不足甚至為0，導致事故發生後沒有運轉調度的空間而導致回復時間的拉長。
4. 以解析模式分析的優點，除了能快速的比較時刻表的穩定度之外，同時能找出瓶頸發生的時間與地點，以及各類事故中造成瓶頸的主要原因為何，以本研究來說，雙峰時段、七堵至汐止區間為造成時刻表不穩定的主要時空點，而號誌故障則是時刻表風險的主要來源。

5. 由於行車事故的不確定性，回復時間也應是具有隨機特性的指標，考慮嚴重度所定義的「回復時間」概念非為數學模式，而是一連串繁複的計算步驟，本研究透過蒙地卡羅模擬評估可找出回復時間的標準差以及機率分佈，並可分析時刻表的失效機率，本研究即透過衡量回復時間的不確定性增加時刻表評估的完整性。
6. 相較於解析模式，以蒙地卡羅模擬分析時刻表需要較長的運算時間，但可進一步找出回復時間的特性，模擬結果顯示回復時間具有厚尾的特性，透過極端值理論中一般化柏拉圖分佈的應用描述回復時間的尾端分佈能夠得到良好的結果，進而預測回復時間的發生機率，提供排點人員作為服務規劃的參考資訊。
7. 延續上述結論，從案例分析中可以看到，期望回復時間的增加不必然造成標準差與失效機率的增加，對於時刻表排點人員來說能提供更具彈性的資訊以作評估是否採用改點後的時刻表。

5.2 建議

1. 從文獻回顧以至於本研究的案例分析皆指出軌道容量、路線使用量以及營運可靠度之間具有權衡關係，顯示的是對於旅客來說並不是一味的提升使用效率就是較好的方式，當使用率高到一個程度之後，在餘裕不足的情況下發生事故後反而需要更多的時間使得營運回復至正常，也因此建議在未來可進一步去找出穩定度與效率之間適切之平衡點，方可在既有的容量資源下提供服務而維持一定的服務水準。
2. 本研究透過臺鐵容量模式分析臺鐵路線區段的實用容量，然而在部分路段上的尖峰時段，亦或是發生事故之後，實務上營運單位可能會將容量的利用率使用超過 100%，而對服務水準產生影響，未來建議可嘗試找出最大容量值，作為容量利用率的嚴格上限限制，一旦運輸需求超過此限制，營運單位應可

思考路線與號誌升級之可能性，以在營運績效上能維持服務水準。

3. 本研究以民國 97-99 年之資料進行分析，未來應持續更新歷史資料年限以確保分析時使用新的資料而能反應當時的情況，建議未來採用滾動平面法的方式，決定分析時段與滾動週期，隨著時間前進而能以新的資訊分析。
4. 由於目前臺鐵事故資料之建檔方式多以陳述句之方式說明，需要從陳述句中對資料判讀取得所需資訊，本研究建議可建置一事故資料庫，整理建檔格式及資料項目，方便新資料的輸入與存取，使未來能更方便並且更完整的分析事故發生率。而本研究所建議之建檔格式應至少包括原有之事故類別、事故原因、事故地點、發生時間、天氣資訊外，可將影響程度再劃分為不同格式項目，包含：事故修復時間長度、調度處理方式、影響車次、影響列車數，以減少文字敘述所造成資料判讀之困難。
5. 藉由解析模式可找出瓶頸的時空點，而瓶頸處的期望回復時間較高意謂著當事故發生後需要更長的時間以使軌道系統營運回復至正常時刻表運作，因此穩定度差的時刻表可能導致與其他運具之間的整合不佳，影響旅客運具選擇的意願，有鑑於此，針對瓶頸的時空點營運單位應可提早建立預備時刻表作為事故發生後的營運對策，以維持服務水準。
6. 本研究所分析之行車事故是基於既有的行車事故資料，而事件的發生可分為可預期與不可預期兩種，可預期事故應是針對系統本身的生命週期，並透過管理維護的方式進行控制，而不可預期事故則多半可能是因為環境因素或是外來因素的影響，而不易衡量，因此若要更全面的考量列車行車事故，建議未來能夠進一步再由其他方式，如專家經驗、文獻回顧等方式將不可預期的事故一併考量，以期更完整的考慮事故的發生，使模式的評估能更接近真實環境。
7. 一般來說，任何的服務都涵蓋了兩個面向：服務提供者與服務接受者，在軌道運輸中服務的接受方則為所有搭乘旅客，而本研究所建構之時刻表績效評

估系統是自營運單位的角度出發，因此建議在未來的研究上亦能夠將旅客資訊納入評估，可藉由取得詳細的旅客旅行起迄資料進一步分析當事故發生後各列車服務中斷後受到影響的旅客人數為何，此結果可能影響營運單位的運轉調度策略，並可反應到回復時間的計算方式。

8. 承上述建議，根據鍾志成與張仕龍(2012)的研究，由於服務指標的建立大致可分為四個面向：安全、可靠、舒適與便捷。因此若從旅客角度考量時刻表之服務品質時，除了穩定度(安全、可靠)與效率(便捷)的評估之外，應可納入更完整的評估指標，如不同的時刻表設計導致乘載率、營運班距與營運速度的變化情形；舉例來說，軌道系統的準點率亦或穩定度等指標雖然有所提升，有時可能是因為營運單位藉由營運速度的下降換取而來，對旅客而言反而意謂著旅行時間的增加，此結果不一定表示服務品質的提升。
9. 本研究首次嘗試找出回復時間的隨機特性，由極端值理論可應用於回復時間值分佈的尋找，然而本研究並未找出究竟多大的回復時間值為營運單位所不能接受的極端狀況，不同的營運單位或系統可能有各自適合的標準，因此建議未來各營運單位可進一步探討自身軌道系統適合的標準值，以使本研究之貢獻能更趨完整。
10. 本研究在進行解析模式與模擬模式分析時，受限於資料蒐集的困難與不足，並無法由實際資料確認行車事故發生佔用股道的特性，因此假設事故可能造成單股道封閉以及雙股道封閉並且較保守的假設發生機率是相等的(各50%)，後續應用分析時若能取得更完整的資料，分析結果應更能反應真實。

參考文獻

1. 鍾志成與張仕龍(2012),「鐵道服務水準與營運模式」,發表於臺灣整體鐵道網規劃願景研討會。
2. 李宗晏(2010),「臺鐵時刻表穩定度與效率評估」,台灣大學工學院土木工程學系交通工程組碩士論文。
3. Goverde, R. M. P. (2007), “Railway timetable stability analysis using max-plus system theory”, *Transportation Research Part B*, Vol. 41, pp. 179-201.
4. Goverde, R. M. P., Heidergott, B., and Merlet G. (2009), “Railway timetable stability analysis using stochastic max-plus linear systems”, *Proceedings of 3rd ISROR*, pp. 19. Zurich: ISROR.
5. Salido, M. A., Barber, F., and Ingolotti, L. (2008), “Robustness in railway transportation scheduling”, *Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, June 25-27, 2008, Chongqing, China.
6. Delorme, X., Gandibleux, X., and Rodriguez, J. (2009), “Stability evaluation of a railway timetable at station level”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 195, pp. 780-790.
7. D’Angelo, G., Di Stefano, G., Navarra, A., and Pinotti, C. M. (2009), “Recoverable robust timetables on trees”, *Lecture Notes in Computer Science*, v 5573 LNCS, 451-462.
8. Cicerone, S., D’Angelo, G., Di Stefano, G., Frigioni, D., and Navarra, A. (2009), “Recoverable robust timetabling for single delay: Complexity and polynomial algorithms for special cases”, *Journal of Combinatorial Optimization*, Vol. 18, pp. 229-257.

9. Carey, M., and Carville, S. (2000), "Testing schedule performance and reliability for train stations", *Journal of the Operation Research Society*, vol. 51, pp. 666-682.
10. Middelkoop, D., Bouwman, M. (2002), "Testing the stability of the rail network", *Computers in Railways VIII*, pp. 995-1002.
11. Demitz, J., Hubschen, C., Albrecht, C. (2004), "Timetable stability – Using simulation to ensure quality in a regular interval timetable", *Advances in Transport*, vol. 15, pp. 549-562.
12. Vromans, M. J., Dikker, R., Kroon, L. G. (2006), "Reliability and heterogeneity of railway services", *European Journal of Operational Research*, Vol. 172, pp. 647-665.
13. 劉昭榮(2011),「鐵路列車連鎖延滯之模擬模式構建與應用」, 交通大學交通運輸研究所博士論文。
14. 交通部運輸研究所(2008),「運輸系統容量分析暨應用研究 – 軌道系統(2/4)」, 交通部運輸研究所, 研究報告。
15. Lai, Y. C., Shih, M. C., and Jong, J. C. (2010), "Railway capacity model and decision support process for strategic capacity planning", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2197, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D. C., pp. 19-28.
16. Goverde, R. M. P. (2005), "Punctuality of railway operations and timetable stability analysis", PhD Dissertation, Transport & Planning Department, Delft University of Technology.
17. Hermann, T. M. (2006), "Stability of timetables and train routings through station regions", PhD Dissertation, Institute of Operation Research, ETH Zurich.
18. Stok, R. (2008), "Estimation of railway capacity consumption using stochastic differential equations", PhD Dissertation, University of Trieste.

19. Hansen, I. A. (2010), "Railway network timetabling and dynamic traffic management", *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 8, No. 1, pp. 19-32.
20. Purdy, G. (2010), "ISO 31000:2009 – Setting a New Standard for Risk Management", *Risk Analysis*, Vol. 30, No. 6, pp. 881-886.
21. 劉牧阡(2010),「臺鐵行車營運風險分析系統之研究」,台灣大學工學院土木工程學系交通工程組碩士論文。
22. James, F. (1980), "Monte carlo theory and practice", *Rep. Prog. Phys.*, Vol. 43, pp. 1145-1189.
23. 洪華生、鄧漢中(1988),「工程或然率：決策、風險與可靠度第二冊」,台北市：科技圖書公司。
24. Ross, S. M. (2009), "Introduction to Probability Models (10th ed., pp. 312-319)", Academic Press.
25. 交通部臺灣鐵路管理局(2001),「行車事故調查報告及救援須知」,交通部臺灣鐵路管理局運轉規章(下)。
26. RSSB (2004), "A statistical review of the RSSB safety risk model (WP1)", Rail Safety and Standards Board, U.K.
27. Yuan, J., Goverde, R. M. P., Hansen, I. A. (2006), "Evaluating stochastic train process time distribution models on the basis of empirical detection data", *Computers in Railways X*, pp. 631-640.
28. Coleman, R. (2002), "Modelling Extremes", *International Statistical Workshop*, Seoul University.
29. Lin, X. G. (2003), "Statistical Modelling of Severe Wind Gust", *International Congress on Modelling and Simulation*, Townsville, Vol. 2, pp. 620-625.
30. Kellezi, E., and Gilli, M. (2000), "Extreme value theory for tail-related risk measures", Working paper, Department of Econometrics and FAME, University of

Geneva.

31. 交通部運輸研究所(2009),「運輸系統容量分析暨應用研究－軌道系統(3/4)」,交通部運輸研究所,研究報告。

