

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

以延滯基準研發多車種基本列車當量模式

Development of Delay-Based Base Train Equivalents for
Multiple-Type Train Operations

The seal of National Taiwan University is a circular emblem. It features a central bell (the University Bell) flanked by two torches. The words "國立臺灣大學" (National Taiwan University) are inscribed around the top inner edge, and "愛國勵學" (Love Country, Encourage Learning) is inscribed around the bottom inner edge.

林姿雅

Tzu-Ya Lin

指導教授：賴勇成 博士

Advisor: Yung-Cheng Lai, Ph.D.

中華民國 101 年 6 月

June 2012

口試委員會審定書

3

國立臺灣大學（碩）博士學位論文 口試委員會審定書

以延滯基準研發多車種基本列車當量模式
Development of Delay-Based Base Train Equivalents for
Multiple-Type Train Operations

本論文係林姿雅君（R99521502）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）

李治綱

鍾志成

賴勇成

李治綱

鍾志成

系主任

呂良正

呂良正

（簽名）

致謝

感謝台大土木系交通組，讓我有兩年充實的研究所回憶，謝謝賴勇成老師的指導與兩位辛苦的口試委員李治綱老師與鍾志成博士的建議，讓這個研究有更完整的呈現。

謝謝 R99 的同學們雖然大家都在為研究努力，但還是不忘分享一下彼此的心得和點滴；謝謝軌道團隊的大家，有學長姐們的照顧、有同學們的互相討論、還有學弟妹們的幫忙，雖然謝謝只是兩個字，但還是要謝謝這兩年這團隊給我的回憶；感謝我的家人，聽我說很多開心或氣憤的事，並適時的給予我熱切的回應。

結束研究所的求學階段，祝福繼續求學的朋友研究順利，祝福進入職場的朋友工作順利，祝福當兵的朋友一切順利，最後，再次感謝，祝福大家都能在各個階段擁有珍貴美好的回憶！

林姿雅 謹識



摘要

在軌道系統中，為了滿足不同旅運需求，營運單位常提供多種不同的列車服務，而這些特性不同的列車同時行駛於相同路段中，將提升路網的異質性，對於容量有顯著的衝擊。然而，過去的容量計算方式，常根據可接受延滯下通過路段之最大列車數，直接總計所有列車，忽略了列車異質性及其影響，易錯估鐵路容量。因此，本研究提出多車種基本列車當量模式，藉由相同延滯之下可通過路段之基本列車單位應相同之中心概念，建立起基本列車當量運算模式，並可根據基本列車當量，轉換不同列車成為同一列車單位，評估流量於路段中之實際影響。

基本列車當量模式建立於容量分析方法之基礎上，因此重要影響參數與影響容量之因子皆相同，包含路段條件、列車特性與營運特性等三大類。爰此，基本列車當量之數值也隨著參數組合之不同而變化，然而對於單一路段而言，最重要的影響因子便為流量與列車異質性，本研究首先提出動態列車當量模式，可根據不同的流量與列車異質性組合計算其對應之列車當量值。然而，根據分析之結果可以發現，列車異質性對於基本列車當量之影響，遠大於流量之影響，為了增進計算的方便性，本研究更進一步提出固定列車當量模式，針對特定路段、特定異質性，建立一組可通用之列車當量值，提升運用上的便利性。除此之外，基本列車當量模式建立又因特性不同，需分為兩車種與多車種兩種不同之情境分別建構。在案例分析中，本研究先利用模擬法獲得不同參數條件下之列車延滯資料，搭配動態兩車種列車當量模式、動態多車種列車當量模式、固定兩車種列車當量模式與固定多車種列車當量模式等計算流程建立各列車當量值，結果顯示在兩車種與三車種之列車當量值皆有相同趨勢。本研究所提出之模式方法可廣泛應用於以延滯計算容量基礎之軌道系統，且藉由當量轉換後建立相同列車單位，協助鐵路系統準確的評估系統之容量，掌握系統的供需能量及服務水準。

關鍵字：列車當量、容量分析、容量因子、模擬方法、列車延滯。

Abstract

A conventional railway system usually has multiple types of trains with various service patterns operating on the same line. This difference in train characteristics lead to different capacity impacts on the system. Recently a new concept was proposed to use Base train equivalent (BTE) standardize different train type into base train; this concept is similar to Passenger car equivalent (PCE) on highway. By convert these non-base trains to a standardized unit we call the convert volume as base train units (BTU). However, previous study focuses on the development of BTE with analytical capacity models as opposed to delay-based capacity models, such as parametric or simulation models. Consequently, this research develops delay-based BTE models for delay-based capacity models.

Since BTE is developed based capacity models its value also varies with key capacity factors, such as traffic, operating and route characteristics. However, in terms of a particular route, BTE would only vary with traffic volume and heterogeneity since most of the other factors will be fixed. Therefore, this study first develops dynamic BTE models with consideration of volume and heterogeneity. Besides that, this study also develops fixed BTE model with consideration of heterogeneity since its impact is far more significant than traffic volume.

Another variation in the development is the number of train types. For only two-type train operations, BTE can be directly computed based on the developed BTE models. However, the same model cannot be directly applied to multiple-type train operations (three or more types) due to due to limited output of variables from the capacity models. This study adopts the concept of vector projection to identify single value for each BTE in this case.

With the proposed models, the unit of delay-based rail capacity can be converted into a standard unit. The impact of an additional train can be easily assessed, and capacity measurements from different lines or systems can be compared and evaluated.

Keywords: Base Train Equivalent, Capacity Analysis, Capacity Factor, Simulation Mode, Train Delay.



目錄

口試委員會審定書	I
致謝.....	II
摘要.....	III
Abstract.....	IV
目錄.....	VI
圖目錄.....	VIII
表目錄.....	IX
第一章、緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究範圍.....	3
1.4 研究方法.....	4
1.5 論文架構.....	4
第二章、文獻回顧	7
2.1 軌道容量計算模式.....	7
2.1.1 模擬法容量計算模式	8
2.1.2 參數法容量計算模式	10
2.2 小客車當量計算模式.....	12
2.2.1 以延滯為基礎之小客車當量模式	13
2.2.2 以速度和密度為基礎之小客車當量模式	14
2.2.3 以使用率為基礎之小客車當量模式	16
2.2.4 以間距為基礎之小客車當量模式	16

2.3 基本列車當量計算模式	17
2.4 小結	19
第三章、 研究方法	21
3.1 模式概念	21
3.2 模式建構	23
3.2.1 動態當量值	23
3.2.2 固定當量值	34
3.3 小結	48
第四章、 案例分析	49
4.1 試驗設計	49
4.2 兩車種之單車種運行基本列車當量	51
4.3 兩車種之雙車種運行基本列車當量	52
4.3.1 動態兩車種之雙車種運行基本列車當量	52
4.3.2 固定兩車種之雙車種運行基本列車當量	56
4.4 三車種基本列車當量	62
4.4.1 動態三車種基本列車當量	62
4.4.2 固定三車種基本列車當量	65
4.5 流量基準與延滯基準方法之列車當量值比較	71
4.6 平均、最小平方誤差與最小絕對誤差方法之列車當量值比較	73
4.7 基本列車當量之應用	75
4.8 小結	77
第五章、 結論與建議	79
5.1 結論	79
5.2 建議	80
參考文獻	81

圖目錄

圖 1.1	研究流程圖.....	5
圖 2.1	RTC 模擬程序示意圖.....	9
圖 2.2	CN 參數模式延滯-列車數曲線.....	11
圖 2.3	延滯-流量曲線 (劉允宣, 民 100).....	18
圖 3.1	相同延滯之混合與基本流量比較.....	21
圖 3.2	動態兩車種列車當量值.....	24
圖 3.3	動態當量值之延滯-流量曲線(a)轉換前、(b)轉換後.....	26
圖 3.4	動態多車種列車當量值計算流程圖.....	27
圖 3.5	動態當量值之兩車種三維空間示意圖.....	30
圖 3.6	兩車種之 BTU 流量空間.....	32
圖 3.7	動態三車種當量值 BTU 流量空間示意圖.....	33
圖 3.8	固定兩車種列車當量值計算流程圖.....	35
圖 3.9	固定當量值之延滯-流量圖.....	36
圖 3.10	不同當量組合之延滯-BTU 圖.....	36
圖 3.11	迭代後之延滯-BTU 曲線.....	39
圖 3.12	固定多車種列車當量值計算流程圖.....	40
圖 3.13	迭代後混合車流與基本車流比較示意圖.....	43
圖 3.14	固定當量值之兩車種三維空間示意圖.....	44
圖 3.15	兩車種-各流量之子空間.....	45
圖 3.16	三車種之三維空間示意圖.....	46
圖 3.17	三車種-各延滯基準子空間.....	47
圖 4.1	兩車種之客車動態列車當量值.....	54
圖 4.2	延滯增加與流量轉換比較.....	55
圖 4.3	兩車種動態車流延滯比較.....	56
圖 4.4	兩車種之客車固定列車當量值.....	58
圖 4.5	固定兩車種車流延滯比較.....	59
圖 4.6	三車種之動態列車當量-異質性曲線.....	63
圖 4.7	相同列車數之延滯比較.....	64
圖 4.8	三車種固定當量值.....	66

表目錄

表 3.1	模擬過程之輸入與輸出.....	24
表 4.1	列車特性.....	50
表 4.2	兩車種之單車種運行動態與固定當量值比較.....	52
表 4.3	列車延滯與當量值比較.....	56
表 4.4	兩車種之雙車種運行動態與固定當量值比較.....	61
表 4.5	三車種動態與固定當量值比較.....	68
表 4.6	列車當量值計算與驗證 (a) 模式一 (劉允宣, 民 100)、(b) 模式二 (本研究模式)	71
表 4.7	平均 (方法一)、最小平方誤差 (方法二) 與最小絕對誤差 (方法三) 方法之列車當量值比較.....	75
表 4.8	每日使用率.....	76
表 4.9	不同路段比較.....	77



第一章、緒論

1.1 研究動機

在現今人口活動密集的情況下，相對的也增加了運輸需求的必要性，由於有這些需求產生，也提高運輸系統的服務重要性，一個都市的運輸系統服務也逐漸成為都市發展的關鍵指標。

由於軌道系統具有高安全性、高載運量並擁有較高的效率性，在交通運具的發展過程中，軌道系統逐漸受到重視。雖然公路運輸對於旅客而言可以有較高的可及性，但軌道運輸相較於公路運輸而言可以在一定的時間載運較多的旅客或貨物，而安全性與效率也較公路運輸來的高，其龐大的載運容量足以負荷目前的旅運需求。在近來環保意識的抬頭下，由於私有小汽車和機車率居高不下，故其所產生的污染也較高，而這些污染是為運輸過程中所產生的外部成本，間接的破壞生態平衡，無法降低對環境永續的消耗，為了減少運輸對環境的衝擊，發展軌道運輸系統是為一可行的策略。

為了滿足不同旅運需求，軌道營運單位可能會提供不同車種的列車服務，而各列車的停站模式與列車特性皆不相同（鍾志成等人，民 94），因此在計算軌道容量時，大多是以單位時間內可運行的最大列車數為此路段上之列車容量，但此容量可能代表不同的車種組合，並未能反映出實際所造成之影響。劉允宣（民 100）針對不同車種提出了一個轉換概念，基本列車當量（Base Train Equivalent, BTE），應用公路小客車當量的概念對軌道列車進行轉換，有藉於此，將軌道列車標準化為同一車種列車，轉換後之流量稱為基本列車單位（Base Train Units, BTU），但在其模式中是以相同流量下比較基本與混合車流之延滯，且多針對兩車種進行討論，並未完全探討至多車種模式，拜目前科技進步所賜，軌道列車性能日益提升，也增加列車間的多樣性，提供愈來愈多不同車種服務，即使為相同車種，列車間若有不同停站模式，也需分為不同車種來探討。因此，尚需要探討多車種基本列

車當量轉換之計算模式。而由於軌道容量多以可接受延滯時間下可通過之最大列車數所訂定，不同於前人選用之研究方法-以相同流量為基準（劉允宣，民 100），本研究將以相同延滯情況討論基本與混合車流，而將列車當量作為兩車流之間流量轉換依據，在流量與容量皆轉換為相同單位後，可評量實際路段容量之使用情況，用以標準化多車種列車，並在相同單位下進行路段流量與容量分析工作。

1.2 研究目的

由於目前軌道系統中會有多車種同時在同一路網中運行，在不同列車組成情境下，需建立多車種基本列車當量模式，以適用於軌道車流特性之轉換過程。由於軌道車流會隨著不同容量參數條件而產生不同影響，故列車當量值也會隨之產生變動，然而對於單一路段而言，路段特性與列車性能並不會隨意改變，而重要影響因子便為流量與列車異質性，根據不同的流量與列車異質性組合計算其對應之列車當量值，於本研究中以動態列車當量模式稱之。分析結果發現，列車異質性對於基本列車當量之影響，遠大於流量之影響，為了提高使用便利性，本研究進一步針對特定異質性，建立一組於該異質性下可通用之列車當量值，稱為固定列車當量值模式，用以降低動態當量值使用之繁複。但由於路段上車流組成情況可能為單車種、兩車種或多車種，而單車種為軌道系統中僅營運單一車種（如捷運系統）其車種特性與停站模式皆相同，因此並不需要進行當量轉換可直接進行容量分析；而兩車種則為系統中含兩種營運車種，一可定義為基本列車另一車種為非基本列車，由於僅含一非基本列車（一個未知當量值）故可求得唯一解，其又可分為兩種情況，首先為路段上於該時段僅運行非基本列車其車流未含基本列車，其二為兩種車種同時皆於路段上運行；而多車種則涵蓋多種非基本列車，會有多組可行解產生，故需分別討論，因此本研究目的希望可以建立動態與固定之兩車種與多車種列車當量模式，並在後續案例分析中探討各模式下列車當量值之趨勢，最後進行列車當量應用，藉由轉換流量與容量為相同單位進行分析工作，

改善目前直接加總列車數作為流量或容量之誤差，提出一個標準化軌道容量計算方式，並使不同路段之車流轉換為相同標準，於路段之間有相同溝通的基準，以了解不同路段之車流情況。。

1.3 研究範圍

軌道系統容量分析中常使用列車最小運轉時隔或列車延滯作為容量分析依據，使用列車最小運轉時隔計算路段容量，是用前、後列車須間隔之平均運轉時隔來計算單位時間內可運行之列車數（Kittleson and Associates, 2003；Jong, 2009）；而以延滯作為分析路段容量依據，是在期望服務的列車延滯條件下可通過之最大列車數（Krueger, 1999），若以延滯作為基礎分析路段容量，可看出路段中整體列車營運狀況，適合規劃人員進行列車指派或調度工作，故在本研究中將以列車延滯作為計算多車種基本列車當量之基準。

在本研究中將以北美路網為背景設定路段資料，先建立兩車種列車當量模式概念再進而探討多車種列車當量模式，在多車種的部分本研究以三車種為例，在案例分析分別探討兩車種與三車種之列車當量值趨勢，在兩車種分為兩部份，分為單一車種運行情況與兩車種運行情況並使用貨運列車與客運列車，三種車種部分使用兩種貨運列車加上一種客運列車。由於在路段上列車或路段參數變更時，便使列車當量值改變，因此發展動態當量值模式可準確的反應出車流狀況；為了簡化動態當量值使用繁複，由於路段條件在正常營運狀況不會隨意改變，且列車基本特性也變動不大，故影響車流狀況因素，可歸納為營運流量與異質性，然而，根據分析之結果可以發現，列車異質性對於基本列車當量之影響，遠大於流量之影響，為了增進計算的便利性，在本研究中嘗試於不同異質性下找出代表各異質性之列車當量值，稱為固定列車當量值，並於研究中分別探討兩車種與三車種之動態與固定列車當量值。

1.4 研究方法

本研究以軌道容量模式之流量與延滯關係，探討各車流條件下之延滯狀況，並將利用模擬方法獲得不同參數條件之列車延滯資料。研究中將以選定的基本列車先使用模擬法獲得延滯-流量曲線，而此曲線上皆為基本列車車流，使用者可依其營運列車自行定義基本列車，再分別模擬不同混合車流條件之延滯程度，本研究中心概念為相同延滯情況下，通過路段的基本列車單位（BTU）應相同，故以延滯-流量關係建立兩種列車當量轉換模式：動態列車當量模式與固定列車當量模式，並透過流量單位之間的轉換（列車/天、BTU/天），計算列車當量值，兩種列車當量模式中先探討兩車種模式，由於兩車種模式中僅包含一種非基本列車，故可計算唯一解，在多車種部分，由於會有多種非基本列車於車流中，產生多組解狀況，故需將非基本列車分開討論以建立多維空間概念，空間中探討基本車流與混合車流之反映特性，並找出車流所對應座標，使用向量投影將基本車流座標投影至可行解區域中，找出投影座標作為該情境下之非基本列車當量值，最後進行列車當量比較與分析。

1.5 論文架構

本論文分為五章，其各章內容分別如下：

第一章、緒論：介紹研究動機、研究目的、研究範圍與研究方法。

第二章、文獻回顧：分為三個部分，首先回顧軌道容量分析模式，再進行公路小客車當量計算模式，最後探討目前軌道基本列車當量計算方法。

第三章、研究方法：利用模擬軟體進行模擬工作並整理模擬數據，再利用軌道容量之延滯-流量關係，建立動態與固定基本列車當量模式，說明在當量轉換與投影過程中如何找出非基本列車當量值。

第四章、案例分析：以兩車種與三車種為例，應用研究方法以計算非基本列車當量值，並針對不同轉換基準（流量基準、延滯基準）與不同資料統計方

式進行比較分析，最後進行基本列車當量比較與應用分析。

第五章、 結論與建議：總括上述章節，並提出本研究結論、建議與未來應用。

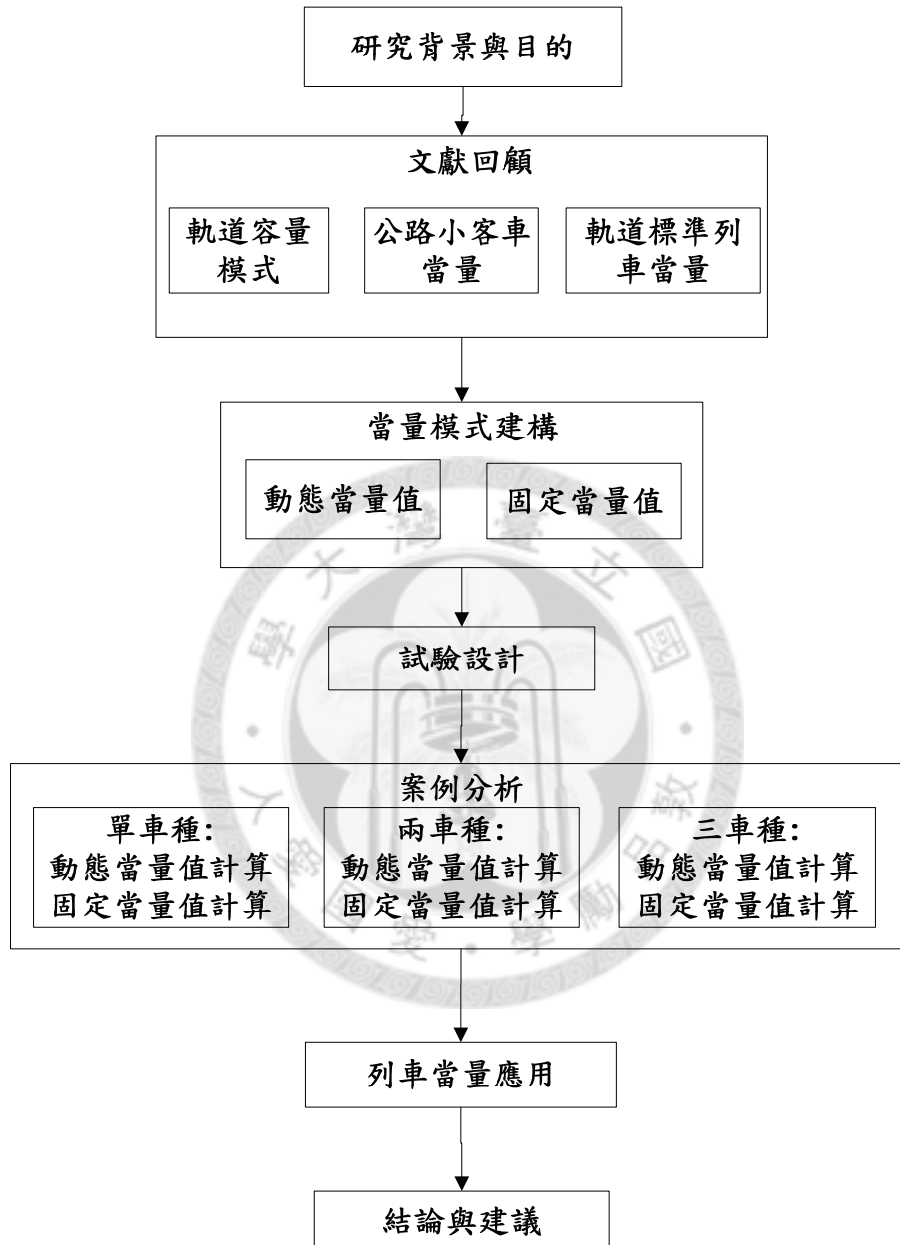


圖 1.1 研究流程圖



第二章、文獻回顧

由於當量概念是用於標準化路段流量與容量，藉由轉換不同車種為同一標準之過程，因此發展當量概念於軌道系統前，需先探討軌道容量模式計算理論與基礎，以了解軌道容量定義，其次由於基本列車當量概念是來自於公路小客車當量，故進而探討公路小客車當量模式之分析依據，由於公路與軌道車流特性不同，先藉由了解軌道容量定義再探討小客車當量計算概念以了解其應用關係，而此兩部分是為作為發展軌道基本列車當量之基礎，最後將回顧目前基本列車當量發展，並了解其模式概念與不足之處，作為本研究發展依據。此章節將分為軌道容量計算模式、小客車當量模式與軌道列車當量計算模式三部分進行討論。

2.1 軌道容量計算模式

軌道容量分析是分析軌道系統負荷能力和運行情形的其中一個重要指標，針對軌道容量分析研究，已發展數種軌道容量估算方法，軌道容量計算並沒有一個固定的計算準則，因不同研究單位針對不同研究對象和目的，發展不同軌道容量計算法，又不同軌道容量計算方式有其不同特色。而軌道容量計算基礎大多為列車最小運轉時隔（Kittleson and Associates, 2003； Jong, 2009； Pachl, 2002； 鍾志成等人，民 94，民 99）與列車延滯（Krueger, 1999； Gorman, 2009； Murali 等人，2010； Sogin 等人，2011； Dingler, 2011）。

以最小運轉時隔為基礎之計算模式多為解析解方法，定義瓶頸車站並計算單位時間內通過之最大列車數，通常是透過數學分析計算而來，以物理意義為基礎（列車加減速時間、煞車距離等）來計算軌道容量，以最小運轉時隔而言，若各車站或區間配置不為一致，且車種數越多，影響列車最小運轉時隔的因素組合會越多，而將會使各當量值受限於特定區間；以列車延滯為基礎之軌道容量模式，多為使用參數法或模擬方式，藉由改變不同參數特性以獲得車流延滯情況，並在

可接受之延滯下計算通過路段之最大列車數，針對列車延滯情況為基礎，依設定條件，比較各延滯情況下列車通過路段之車流狀況，可看出整體列車運行情況，因此以整體延滯情況推估整體路段之列車當量值，可適用於整體路段狀況，因此本研究將以延滯為基準探討延滯相關之模擬法與參數法軌道容量計算模式。

2.1.1 模擬法容量計算模式

模擬法需要詳細的資料數據，舉凡列車性能、營運資料及基礎設施等相關資訊，均需作為輸入參數，且在輸入因素方面較不會有所限制，以達仿真效果。因此，使用模擬法進行分析，多半可以得到較為貼近實務系統營運狀況，適合用於營運計畫（Abril，2007；Dingler，2011），但模擬的過程需要花費較長的時間，也需要完善的資料庫做為輸入與輸出。而 Martin 認為軌道模擬工具整合需要考慮各個部分：單一系列模擬、軌道列車性能、動力設備、各項開發（工程設計、營運設計、號誌設計），未來整合各項軌道模擬工具將對成本效益有極大的改善（Martin，1999）。Krueger 等人以 CN 鐵路為例，闡述鐵路模擬環境顯著的挑戰、利益與相關應用。如：模擬模式發展與挑戰、模擬列車指派的效益、模擬策略規劃等（Krueger 等人，2000），

瑞士研發的軌道模擬軟體 OpenTrack，藉由使用者所定義的列車、基礎設施與時刻表，模擬出列車運行圖、相關統計資料、速度-距離關係曲線等（Nash 和 Huerlimann，2004）。以北美目前廣泛使用的軌道運輸模擬軟體 RTC（Rail Traffic Controller）為例，使用者可以藉由建構條件路網和指派列車種類、數量，模擬實際發生情況，由於在不同情境下會有不同的列車當量，RTC 可依據使用者所排列之列車次序進行模擬，最後求得相關情境下之列車運行狀況與延滯（Wilson，2008），其作業流程如圖 2.2 所示。

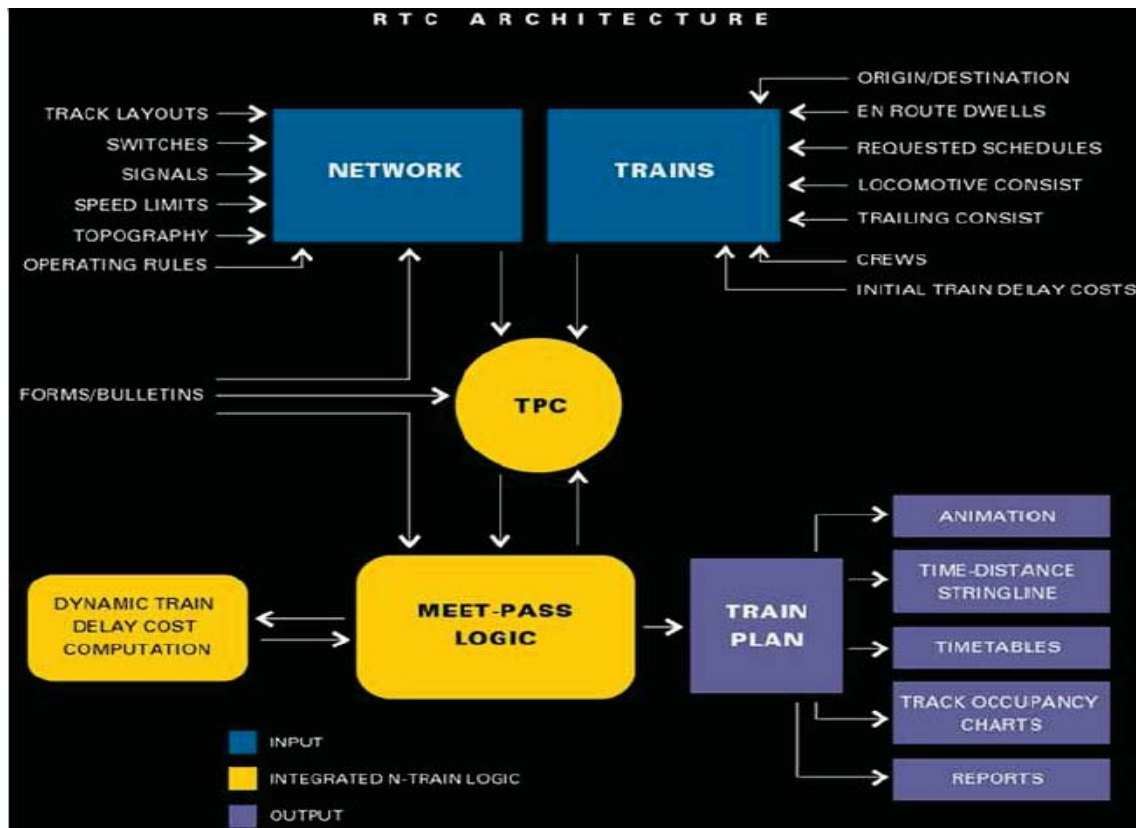


圖 2.1 RTC 模擬程序示意圖

Welch 與 Gussow 利用模擬結果探討若要使容量擴充,改善方式包含增加號誌時相、雙線區間比例等,但需考慮其帶來的成本效益(Welch 與 Gussow, 1986)。Dingler (2011) 以四種車種(三種貨車+一種客車)利用模擬分析異質性對軌道路網之影響,由於路網上有異質性的影響將會降低路網可使用之容量,藉由改變列車數量、列車比例與列車組合(列車優先性差異),找出影響異質性的重要因素,由於客運列車性能佳且優先性高,便會造成路網中貨運列車待避等延滯,故若加入相同數量之客運列車與貨運列車,客運列車所造成的延滯較高。Sogin 等人(2011)使用一種貨車與一種客車進行模擬,並變化客車速度 50、79、90 和 110 mph,在客車速度為 90 mph 所造成貨車延滯最大,超過此速度,速度的邊際影響將開始下降。

Vromans 等人(2006)認為路段上異質性的影響將會造成列車準點性和可靠

度降低，為了降低不同列車差異的影響，製造同質性車流可以提供更多的列車服務，提出了兩種計算方式，利用列車最短運轉時隔與列車進站運轉時隔概念，來評估可靠度與時刻表中異質性的影響，並以模擬方式比較兩個不同案例。

Liotta 等人（2009）將軌道容量計算分兩階段，在有確定的時刻表下，先利用壓縮時刻表的方式找出最佳容量，並以模擬進行驗證工作，利用模擬過程來確定路線容量。

2.1.2 參數法容量計算模式

參數法是一介於解析解及模擬法之間的容量計算方法，可以補足此兩種方法之差異（Lai，2008；Lai and Barkan，2009）。Leilich（1998）認為軌道分析模擬工具有其不同類型，而不同的軌道模擬方式都會有未考慮到的因素，且著重考量的方面不同，Leilich 認為使用者應評估所需以選擇模擬工具，並嘗試提出軌道參數容量模式以概括模擬軟體的差異。而參數法可藉由模擬過程與相關資訊建構一統計方法來預測與估計資源成本、量化時間或可靠度等（Sherriff 等人，2005），參數法提出影響軌道容量的重要因素，包含路網條件（如：側線區間、號誌區間等）、交通特性（如：列車優先性、速度比等）及營運參數（如：停站時間等）等，再透過迴歸分析得到列車延滯狀況（Krueger，1999；Gorman，2009）。

以北美常用之參數容量模式，CN 參數模式（Canadian National Parametric Model）為例，在 CN 參數模式中，對於容量之定義為在路段上特定的交通與營運計畫下，不超過門檻值之可通過最大列車數，而門檻值大致設定於不超過列車乘務人員之工作時數，而在此門檻值內包含列車最短運轉時間、列車延滯和列車停等時間，以圖 2.3 可以看出，在門檻值下之延滯時間（1 小時），可通過之列車數為 25 輛列車，若曲線較陡峭為延滯增加（紅線），較曲線緩為延滯減少（藍線）。

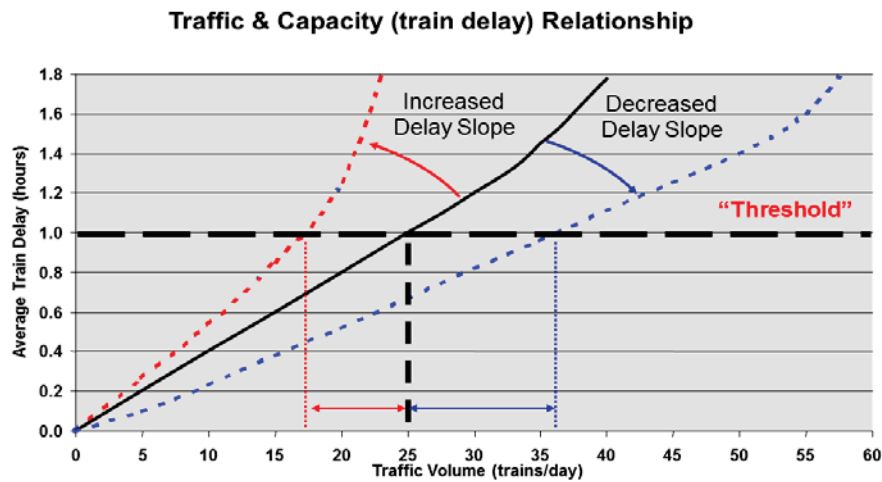


圖 2.2 CN 參數模式延滯-列車數曲線

在各種不同混合車流狀況下可以得到不同延滯—交通流量指數曲線（如圖 2.3），使用者可藉由改變不同的鐵路容量因子值，由不同參數組合所形成之曲線皆不相同。CN 參數模式的式子為下列所示（式 2.1）如圖 2.3 所示列車延滯（ D ）和列車數（ V ）之間會呈現指數關係，而 A 、 B 為隨著鐵路容量因子而變的係數值，表示當列車數越多，延滯時間會隨列車數量成指數成長。

$$D = Ae^{BV} \quad (2.1)$$

Abril 等人（2007）認為軌道容量會依列車運行而變化，Abril 等人指出影響軌道容量參數可分為三大部分，包含基礎設施參數（路段長度、軌道速限等）、交通參數（列車組成、尖峰小時、列車優先性等）、營運參數（停站時間、維修、可靠度等），在不同情況下，會使路段上可運行列車數改變（Abril 等人，2007）。

Gorman（2009）將總運行時間分為最短旅行時間與延滯時間，影響最短運行時間的重要因子包含列車性能（如：若馬力越強則列車加減速能力與運行速度愈佳）、路網特性與軌道速限等；影響延滯重要因素為主要延滯、次要延滯與容量使用率，主要延滯如列車超會車時所造成的延滯，次要延滯為受到其他列車影響所

造成的延滯，容量使用率為總列車小時與列車間距變異，若這兩因子愈大延滯就會愈大，Gorman 利用迴歸找出各因素與延滯關係，並用以預測運行時間。Murali 等人以洛杉磯路網為例，針對單線與雙線路網，先用模擬方式得到各條件下的延滯情形，參數包含子路段長度、速限、側線或橫渡線的數量及分布狀況等，再將延滯與各參數進行迴歸分析（Murali 等人，2010），黃詠安（2011）也利用多元迴歸與類神經網路的方式在各種參數（側線間距、號誌間距、軌道速限、流量、異質性等）下進行延滯預測。

2.2 小客車當量計算模式

由於在公路道路上，車流是由不同車種所組合而成，而這些不同車種有不同的車輛性能與車輛尺寸等，這些相異條件下必須有一共同的標準單位，用以評估公路服務準則，小客車當量是以小客車為基本單位，將其他車種依其車輛運作特性、佔用道路面積或影響車流程度等，轉化成其等同於多少輛小客車。而公路運輸規劃中，藉由旅次發生、分佈與運具選擇轉換得到各分區之車旅次（小客車單位），並推估各路段之交通量及旅行時間，藉由將車種轉為相同單位下進行運輸供給與需求評估衡量（凌瑞賢，民 95）。小客車當量的概念最早是由 1965 年 Highway Capacity Manual（HCM）所定義，而小客車當量發展至今已四十餘年，用以表示在某個道路條件和交通狀況下，將卡車或公車對於公路容量的影響，換算以小客車作為單位，係一個沒有單位的數值（HCM，1965）。又不同的混合車流與道路條件皆會影響到重車與小客車之間的關係，亦即所估算的重車之小客車當量值將受到影響，故後續的研究即針對上述特性調整既有的當量值（HCM，1985；HCM，2000）。而在過去相關文獻中，分別針對不同車流因素進行小客車當量轉換，以不同角度作為小客車當量之轉換基礎，以下將分別針對各轉換基礎進行探討。

2.2.1 以延滯為基礎之小客車當量模式

以延滯為基礎來計算小客車當量，是由於混合車流中小客車因其他車種所導致的延滯和基本車流中小客車間所相互導致的延滯差異，來推導不同車種的小客車當量值。

在 1980 年時，Craus 等人利用車輛超車和車輛旅行時間差所造成的延滯，以兩車道公路為例並考慮反向車流狀況，比較路段上重車被超車所造成的平均延滯，和路段上皆是小客車車流相互超車所造成的平均延滯，但由於在蒐集超車次數與反向車流資料會較繁複，且較難執行驗證的工作。Cunagin 和 Messeru 也是利用超車概念與車輛旅行時間差異計算當量，比較兩車流，在混合車流中，重車被小客車的超車率乘上重車與小客車的旅行時間差，在基本車流中，則為小客車間的超車率乘上小客車間的旅行時間差（Cunagin 和 Messeru，1983）。

Benekohal 和 Zhao 於 1999 年時，探討針對號誌化路口，會有車輛停等之問題，所以延滯為在等候車隊中車輛停等時間與加減速所造成的延滯，在同質性車流與異質性車流皆為相同車輛數下，利用異質性車流中重車平均延滯，與同質性車流平均延滯之比率計算重車之小客車當量(D_{PCE})。Rahman 等人以橫街為例，同樣探討在號誌路口時，車輛停等之延滯時間，而延滯會隨著重車在等候車隊中的不同位置有所不同，假設車輛皆在未飽和車流中，等候車隊第一輛若為重車，其所造成的總延滯將會最大，重車在車隊最後方所造成的總延滯最小，若在車隊中重車比例愈高重車當量值就會愈大（Rahman 等人，2003）。Rodriguez Seda 和 Benekohal 在 2006 年以都市公車為主，延伸 D_{PCE} 的概念，同樣探討當公車在號誌化路口下當公車在不同車流位置所造成的延滯情況將會不同，影響當量因素除了公車於車流中位置外，還包括公車進入與離開路段時的號誌燈號，他們認為公車在越前方的等候位置當量值將會越大，在紅燈剛進入車流且綠燈開啟進入站牌停等所造成的延滯最為嚴重，而號誌週期可能會使當量值產生誤差（Rodriguez Seda 和 Benekohal，2006）。

由於影響小客車當量因素有許多，故 Chitturi 和 Benekahal 用參數的角度計算 work zone 中小客車當量值，利用 D_PCE 計算概念，變化高速公路上五種不同參數值：work zone 長度、車輛流量、重車類型、車輛間之速度差與重車比例，當參數改變會有不同延滯時間，研究中指出，小客車當量會隨著 work zone 長度、車輛流量、車輛間之速度差增加而變大，但若重車比例增加時，當量值將會降低，是由於重車比例增加造成可進入路段的總車輛數降低，故總延滯降低，小客車當量會隨重車比例增加而減少（Chitturi 和 Benekahal，2008）。

2.2.2 以速度和密度為基礎之小客車當量模式

HCM（1985）透過整合速度和密度以定義「服務水準」，因此許多學者，開始探討速度和密度對小客車當量之影響，由於流率（車/小時）等於密度（車/公里）乘以速度（公里/小時），故此三種因素相互影響甚大，關聯極高，在此節將整理與速度、密度之相關小客車當量文獻。

透過車輛速度為分析的研究，Van Aerde 和 Yagar（1984）是根據車流中每一車種以及對向來車之速率折減率，計算各車種之小客車當量。其方法是輸入不同百分比區間之速度及各車種之流量數，根據自由流率和車種數量建構多元線性迴歸，並以迴歸式中各車種係數與小客車係數比來估計各車種之小客車當量。

$$\begin{aligned} \text{Percentile speed} = & \text{Free speed} + C1 \times \text{number of cars} \\ & + C2 \times \text{number of trucks} \\ & + C3 \times \text{number of recreational vehs} \\ & + C4 \times \text{number of other vehs} \\ & + C5 \times \text{number of opposing vehs} \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$PCE_n = C_n / C_1 \quad (2.3)$$

式中：

$C_i = i$ 車種之速率折減係數（ $i=1\sim4$ ）

$C_5 =$ 反向車輛之速率折減係數

$PCE_n = n$ 車種之小客車當量 ($n=1\sim5$)

而台灣於 2001 年修訂之公路容量手冊中也以速度之概念來計算當量值，在手冊中指出，如將大車轉換成小客車，則流量及密度之值會隨著變動，但速度應保持不變才有意義（林豐博等人，民 90）。

$$Q_{av}(1-P_a)+Q_{av}P_aE=Q_{bv}(1-P_b)+Q_{bv}P_bE \quad (2.4)$$

式中：

Q_{av} = 速率-流率關係曲線 a 在平均速率為 v 時之流率（輛/小時）

Q_{bv} = 速率-流率關係曲線 b 在平均速率為 v 時之流率（輛/小時）

P_a = 車流 Q_{av} 中之大車比例

P_b = 車流 Q_{bv} 中之大車比例

E = 大車之小客車當量

根據此原則，如兩車流流率與速率之關係曲線有相同之自由速率，由上式可以看出，等號左右兩邊為 a ， b 混合車流之小客車單位，而兩車流之小客車單位在相同速度下須相等。

以密度的角度來看，若在相同的服務水準下，混合車流和基本車流將具有不同的車流密度（Huber，1982），透過重車比例與重車之小客車當量值可以找出兩車流之密度關係，並以此關係可以整理出重車之小客車當量值，如下：

$$PCE = \frac{1}{P} \left(\frac{q_B}{q_M} - 1 \right) + 1 \quad (2.5)$$

式中：

q_B = 基本車流流率

q_M = 混合車流流率

Tiwari 等人(2000)在相同行車速度和需求時比較同質性車流與異質性車流，由於使用道路面積不同故會有不同的密度，在六種不同道路條件下，比較兩車流的密度／車道寬度之比值，作為各情境下之重車當量值。

2.2.3 以使用率為基礎之小客車當量模式

以使用率為基礎進行分析的部分，Linzer 等人有別於 1965 年 HCM 中只探討兩車道，其探討四車道與多車道之小客車當量變化，使用相同的使用率轉換其重車之小客車當量值，藉由固定混合車流和基本車流的使用率來計算重車之小客車當量。Linzer 等人先利用模擬繪製出給定的設計速度下，使用率與混合流率關係圖並加上不同坡度曲線，從圖中利用相同使用率下可以找出給定條件下之混合流率，再利用混合流率與基本流率之關係找出重車之小客車當量值（Linzer 等人，1979）。

2.2.4 以間距為基礎之小客車當量模式

有別於延滯、速度與密度的比較基準下只考慮到車流行為，利用間距作為轉換基礎下將可考慮駕駛人之心態，然 Werner 和 Morall（1976）指出以間距為基礎的當量計算方式適用於低服務水準的平面道路，並認為重車在道路上的速度較慢，所佔的空間也較大，先用速度與超車比率找出服務水準，再利用混合車流與基本車流之平均間距，與混合車流之車種比例找出重車之小客車當量值。Seguin 等人（1982）定義間距為 lagging headway 為前、後車的後保險桿間隔時間，提出當量值應設定為在給定條件下「重車 i 平均間距」和「小客車平均間距」之比值。

而後，Krammers 與 Crowley（1986）認為不同的車種組合情境將會有不同的間距，例如：「前車為重車、後車為小客車」或「前車為小客車、後車為重車」等，

此多歸因於駕駛人之心態而對於不同車種將保持不同行車間距，如重車若在小客車後方時，重車駕駛便會與小客車保持較長的間距，以策安全，因此 Krammers 和 Crowley 是比較混合車流平均間距與小客車間之間距作為重車之小客車當量。

$$E_T = [(1 - P_T)H_{TP} + PH_{TT}] / H_p \quad (2.6)$$

式中：

P_T = 重車比例

H_{TP} = 前車為小客車後車為重車之間距

H_{TT} = 重車間的平均間距

H_p = 小客車間的平均間距

但使用 Krammers 與 Crowley 間距法來計算重車之小客車當量時，就不會考慮到駕駛者之超車意願及超車行為，車輛皆以保持一定間距行駛，因此可能會忽略掉一些影響當量大小的因素。

2.3 基本列車當量計算模式

基本列車當量模式在目前尚屬新穎的議題，劉允宣（民 100）提出使用三種軌道容量模式進行基本列車當量之計算（解析解、模擬法與參數法），在解析解的部分使用臺鐵容量模式，利用列車間最小運轉時隔與公路重車因子概念來計算基本列車當量值，並用近似解的方式推估多車種基本列車當量，而本研究將以延滯為基準，故在此暫不討論解析解模式。參數法與模擬法皆以列車延滯為基礎，參考 Benekahal 和 Zhao（2000）的 D_PCE 作法，在相同流量下，比較平均一輛非基本列車於車流中所增加的延滯，與平均基本列車延滯，進行當量轉換（式 2.7），在參數法的部分使用 CN 參數模式進行分析；在模擬法部分使用模擬軟體 RTC 取

得延滯資料，再進行當量計算（劉允宣，民 100）。

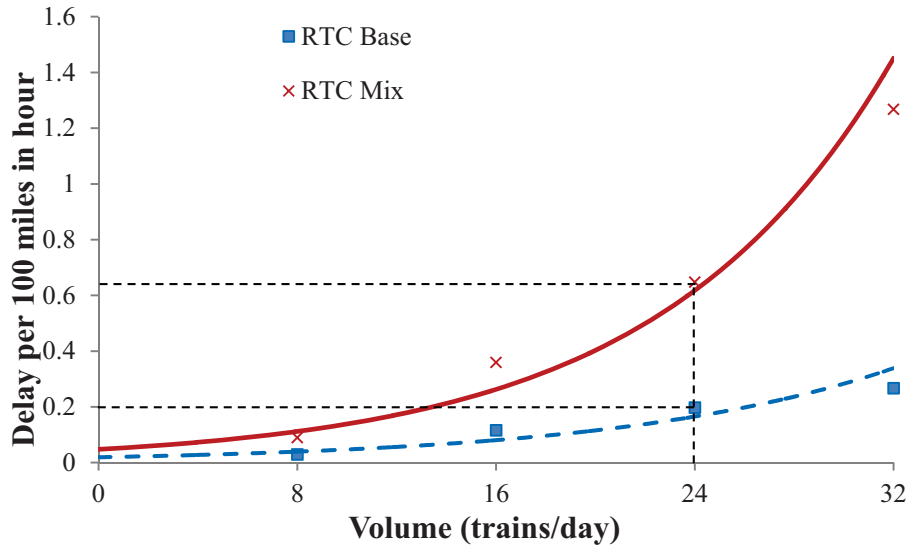


圖 2.3 延滯-流量曲線（劉允宣，民 100）

$$D_BTE = 1 + \frac{\Delta d_i}{d_B} \quad (2.7)$$

式中：

Δd_i = 平均一輛非基本列車所增加的延滯

d_B = 基本列車之平均延滯

在此作法中是以相同流量下，比較基本車流與混合車流延滯差異，並將延滯差異平均分配至非基本列車中，進而計算出列車當量值。但於該研究中僅討論到兩車種，在該模式中無法同時討論多車種基本列車當量值計算，僅可得知第 i 種非基本列車與基本列車之關係，無法了解多種車種於車流之相互關係，較為其不足之處。

2.4 小結

總論以上針對以列車延滯情況為基礎之軌道容量模式，依設定條件，比較不同列車組合於路段上所增加的運行時間，可看出整體列車運行情況。以參數法而言，不同參數法所考慮的參數條件不同，可能造成在多車種時有些參數無法進行計算，使得參數法在使用上會有些許限制；相較於參數法，模擬法雖模擬時間較久但較不會有參數法之使用限制，可依使用者依其設定條件模擬，因此本研究將會採取模擬方式以獲得車流延滯資料。

藉由軌道容量模式可得到列車延滯情況，故以列車延滯作為當量轉換基礎，目前小客車當量以延滯為基礎之計算模式，因為公路與軌道車流特性不同，若以超車延滯方式（Craus 等人，1980；Cunagin 和 Messeru，1983）來計算，由於軌道列車無法像公路車輛自行變換車道，會有股道限制，且列車速度會依各區間限制不同甚至減速停站，無法像公路車輛保持一定速度行駛；若依 D_{PCE} （Benekahal 和 Zhao，1999；Rahman 等人，2003；Rodriguez Seda 和 Benekahal，2006；Chitturi 和 Benekahal，2008）方式計算，以整體延滯狀況來看，不需如同超車方式需考慮車流特性，但僅可得知第 i 種車與小客車之關係，無法了解多車種在路段上相互影響關係。

劉允宣（民 100）參考 Benekahal 和 Zhao 於 1999 所提出方式應用於軌道列車中，其研究已提出基本列車當量之初步概念，在本研究中將延伸基本列車當量概念，並希望可提出以列車延滯情況為主，且考慮多車種於車流中相互影響關係之多車種基本列車當量模式。



第三章、研究方法

3.1 模式概念

本研究是使用列車延滯作為計算基準，而延滯定義為列車實際通過路段所花費時間與列車最短運行時間之差異，而主要影響列車最短運行時間因素為列車性能（馬力等）與路線特性（坡度、曲率與軌道速限等），而實際列車運行時間可能還包含主要延滯（超、會車等）或其他列車影響所造成的次要延滯（Gorman, 2009）。本研究以相同延滯通過路段之基本列車單位（BTU）應相同概念來建構新的基本列車當量模式，不同於劉允宣（民 100）以相同列車數比較混合與基本車流之延滯差異，其差別在於軌道容量通常定義為在營運人員可接受的延滯時間內通過的最大列車數，是以確定的延滯時間比較列車流量狀況，因此以相同延滯作為基準比較車流情況會較符合軌道容量模式之定義，且在計算過程中較可以看出列車流量轉換情況，故在本研究將以相同延滯情況比較混合與基本車流之流量轉換，其計算概念如圖 3.1，而以相同流量做為基礎與相同延滯作為基礎，兩者當量值所代表之意義也會有所不同，因此於第四章案例分析中，也將探討兩種算法之當量值差異，進行比較分析。

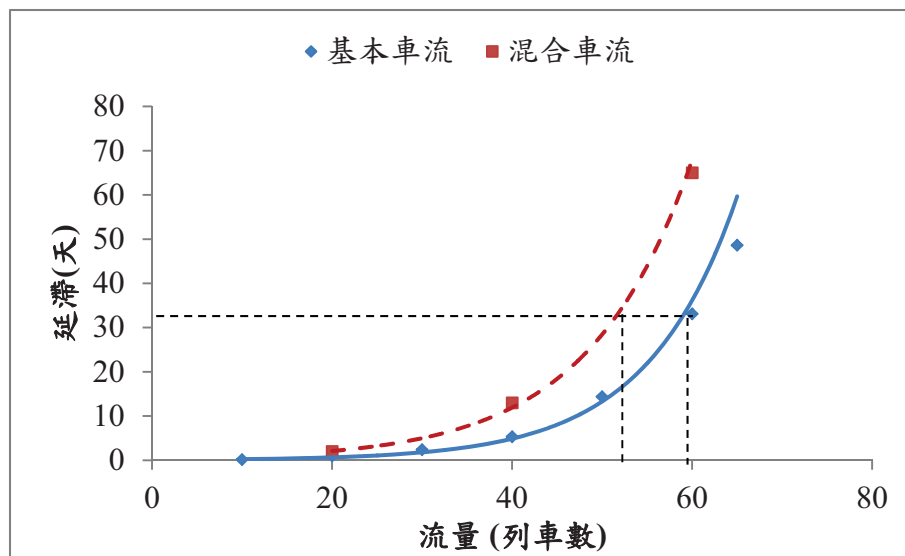


圖 3.1 相同延滯之混合與基本流量比較

由於影響軌道容量因子大多可分為三部分，如：路段條件（側線、號誌配置、路段長度）、交通特性（列車數量、異質性、車種與性能）或營運條件（停站時間、停站模式）等，而這些因子改變後便會影響路段容量，若路段容量改變便會影響流量轉換，因此影響路段容量因子等同於影響列車當量因子，故在不同因素條件下會計算出不同列車當量值，過去小客車當量研究文獻中大多探討在不同情境下所得出不同當量值，而其當量值可代表該車種在各車流情況中的運行狀況（Linzer 等人，1979；Huber，1982；Van Aerde 和 Yagar，1984；Benekohal 和 Zhoa，2000）；但在這樣的情況下會使營運管理人員在使用上有較多不便，因為沒有一個確定的當量值可以適用於各車流中，故當量值會各條件不同而一直發生變動，在公路容量手冊中提到為了分析方便可建議重車當量值，給定當量值於營運管理單位分析方便（林豐博等人，民 90；HCM，1985；HCM；2000）。

於單一路段來看，路段與列車特性不會隨意改變，因此本研究先以不同車流與異質性情況計算列車當量值，而此當量值將可準確的反應出各條件情況下所造成的列車延滯，稱為動態當量值；為了使用便利，在探討流量與異質性之影響可發現，路段上異質性所造成的影響大於流量，故本研究進一步嘗試在相同列車異質性下，給定一組列車當量值，將不同異質性分別討論，用以表示不同異質性之列車當量值，稱為固定當量值，固定當量值不如動態當量值可以完全反應出列車影響情況，但可以簡化列車當量值依條件不同而變動的情況。

由於路段上列車流量組成可能有多種情況，如：單車種流量、兩車種流量組成或多車種流量組成，在單車種情況下，如同捷運系統，皆為相同車種因此不需進行當量轉換；而兩車種可分為兩種情況，一為該路段於單位時段所通過之列車皆為非基本列車未含基本列車，二為兩種車種同時運行於路段上；而多車種則為系統中包含三種以上車種，將於第四章案例分析進行兩車種（單車種運行情況、雙車種運行情況）與多車種列車當量計算，以比較路段列車當量值。在動態與固定列車當量值模式中，由於兩車種模式只有一種非基本列車當量值需要計算，故

可直接進行轉換，但多車種方面包含多種非基本列車，故有多種非基本列車當量值需要考慮，會有非唯一解的情況產生，基於相同概念下，先建立兩車種當量模式再以兩車種模式概念進而延伸討論多車種列車當量模式，在第四章之案例分析也將探討兩車種與多車種之列車當量趨勢。

3.2 模式建構

在模式建構部分將分為兩部分來探討，先就不同車流狀況來分析，3.2.1 節將進行動態當量值模式建構；再來，就相同異質性下於 3.2.2 節進行固定當量值模式建構，以下將分別進行討論。

3.2.1 動態當量值

如同前面所言，動態當量值當車流中有任一項容量因子改變，便會使當量值改變。本研究將以延滯作為模式建構基礎，以列車整體延滯情況作為當量轉換的依據，由於在兩車種的部分僅有一種非基本列車，在流量轉換計算較容易，而多車種時包含多種非基本列車，因此在計算過程中不如兩車種可直接經由流量轉換而得到當量值，因此，本研究在模式建構的部分會分為兩車種與多車種來討論。

動態兩車種列車當量計算流程與模式

在動態兩車種列車當量模式中包含一種非基本列車與基本列車，以下皆以兩車種之雙車種運行情況為例，而在單車種運行情況也可應用相同方式進行計算，先藉由模擬過程取得車流延滯資料，而在以相同延滯情況比較基本車流與混合車流之流量，並基於相同延滯下通過之 BTU 應相同之概念，將流量單位進行轉換，以計算出非基本列車之當量值。圖 3.2 為動態兩車種列車當量計算之流程圖，以下分為各步驟進行說明：

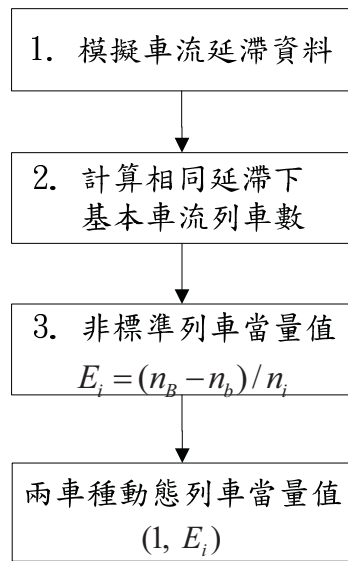


圖 3.2 動態兩車種列車當量值

步驟一：模擬資料

故先以模擬軟體分析基本車流與各不同情境下之列車延滯狀況，在此階段需確定路段上的車種數量與將以何種列車為基本列車，並獲得不同混合車流與基本車流的延滯資料。表 3.1 為模擬過程中之輸入與輸出：

表 3.1 模擬過程之輸入與輸出

輸入			輸出
路段特性	交通參數	營運參數	
路段長度	列車優先性	列車停站時間	列車延滯時間
側線區間	列車速度		
號誌區間	列車馬力		
雙線比例	異質性		
	流量		

步驟二：比較相同延滯之混合與基本車流流量

在步驟一時可以藉由模擬資料取得基本車流之延滯-流量曲線，由於在相同延滯狀況下，可以通過路段的總列車當量流量應相同（BTU 應相同），故以混合車流的延滯為主，可找出相對應延滯之基本車流流量。

式 3.1 中表示在相同延滯情況下混合車流與基本車流所通過之 BTU，其等號

左邊等於該混合車流於該延滯情況所產生的流量 (BTU)；等號右邊的等於基本車流於相同延滯的流量 (BTU)，由於在相同延滯下，因此兩車流可通過的 BTU 應相同，因此流量單位經由當量轉換後由 (列車/天) 改為 (BTU/天)，在圖 3.3a 中混合車流原本為 25 輛列車且延滯為 5.3 天，但於相同延滯下應可通過約 41 輛基本列車。藉由當量轉換後 (圖 3.3b)，在相同延滯下，混合流量座標將會和基本流量座標重疊，表示轉換後相同延滯的 BTU 值應相同。而若為兩車種之單車種運行情況時，以式 3.1 為例，等號左方則可省略基本列車，僅包含非基本列車數與其當量值。

$$n_b \times E_b + n_i \times E_i = n_B \times E_B \quad (3.1)$$

式中：

n_b = 為混合車流中之基本列車數

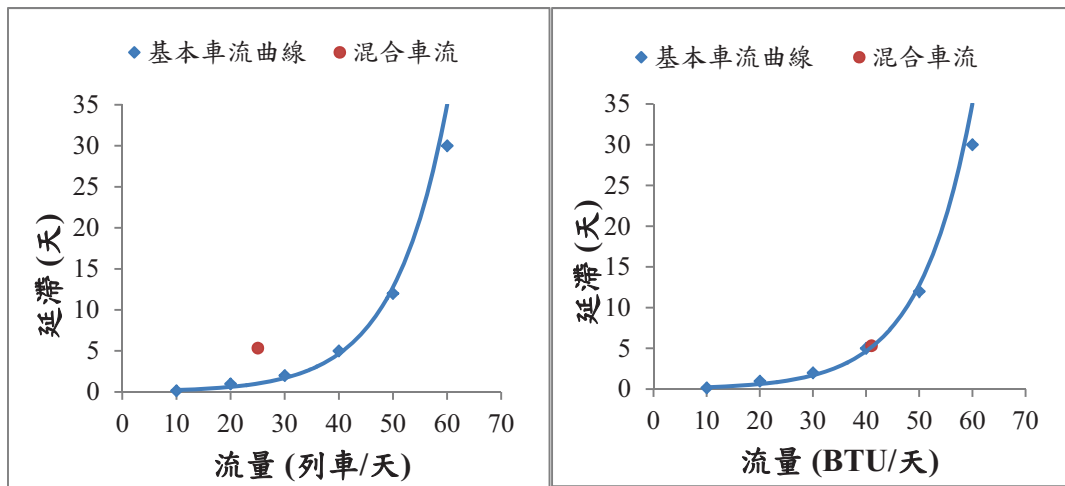
n_i = 為混合車流中之非基本列車數

n_B = 為基本車流中之基本列車數

E_i = 非基本列車的當量值

E_b = 混合車流之基本列車當量值 (=1)

E_B = 基本車流之基本列車當量值 (=1)



(a)

(b)

圖 3.3 動態當量值之延滯—流量曲線(a)轉換前、(b)轉換後

步驟三：計算非基本列車當量值

在兩車種之雙車種運行的情況，混合車流與基本車流之基本列車當量值(E_b 、 E_B)皆為1，由於只有一種非基本列車，經由移項將式(3.1)寫成式(3.2)，僅有一個未知數，可以求出唯一解 E_i ， i 車種之列車當量值；而單車種運行情況下，也可利用相同方式將式3.1進行移項，以計算列車當量值。

$$E_i = \frac{(n_B - n_b)}{n_i} \quad (3.2)$$

動態多車種列車當量計算流程與模式

在動態多車種當量模式中包含了基本列車與多種非基本列車，故車流中將有三種以上車種，藉由模擬過程獲得不同車流延滯資料，並以相同延滯通過之 BTU 應該相同概念比較基本車流與混合車流之流量，但於多車種中會產生多組可行解，故將原本延滯-BTU 二維空間的 BTU 分別拆成各車種之 BTU，建立多維空間概念並以座標投影方式找到一解，下圖 3.4 為動態多車種列車當量計算之流程圖，以下分幾個步驟進行詳細說明：

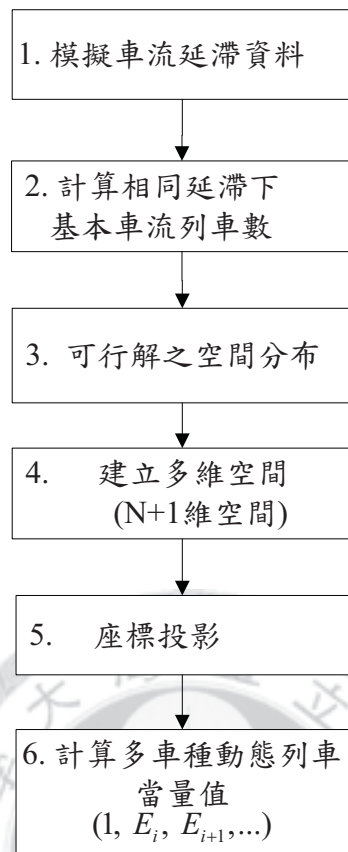


圖 3.4 動態多車種列車當量值計算流程圖

步驟一：模擬資料

先以模擬軟體取得基本車流與各不同情境下之列車延滯狀況，並確定路段上的車種數量與將以何種列車為基本列車，且得到不同混合車流與基本車流的延滯資料，而模擬過程所需之輸入與輸出如表 3.1。

步驟二：比較相同延滯之混合與基本車流流量

如同兩車種，藉由模擬資料取得基本車流之延滯—流量曲線，由於在相同延滯狀況下，可以通過路段的總列車當量流量應相同（BTU 應相同），故以混合車流的延滯為主，可找出相對應延滯情況下基本車流之流量，可將式（3.1）延伸為式（3.3）。

在多車種情況，在相同延滯情況下，故兩車流可通過的 BTU 也應相同，式

3.3 中等號左邊等於相同延滯情況下混合車流的流量 (BTU)，各車種數乘上其當量值後並加總，便為混合車流之總流量 (BTU)；等號右邊的等於基本車流在相同延滯下之流量 (BTU)。

$$n_b \times E_b + \sum_{i=1}^I n_i \times E_i = n_B \times E_B \quad (3.3)$$

式中：

I = 非基本列車類型數

i = 第 i 種非基本列車

$n_b, n_i, n_B, E_b, E_i, E_B$ 如前述

步驟三：可行解之空間分布

倘若為多車種在混合車流中時，由於只有一個式子，但卻有多個變數(式 3.3)，會形成多組可行解的情況發生，而若使用這些可行解在當量轉換過程中，皆可以得到相同的 BTU 值，如：三種車種中，列車數量為 A 種列車數 1 列，B 種列車數 2 列，C 種列車數 2 列，若 A 車種為基本列車，而 B、C 列車之當量值為 2 與 3、3 與 2、...等，加總後會得到一樣的 BTU。在此步驟將找出各可行解之組合空間，根據式 3.3 將其整理成以各車種之 BTU 相加，如式 3.4，由於 BTU_B, BTU_b 可直接從混合車流與基本車流之基本列車數得知，故將兩項整理至等號右邊如式 3.5：

$$BTU_b + \sum_{i=1}^I BTU_i = BTU_B \quad (3.4)$$

$$\sum_{i=1}^I BTU_i = BTU_B - BTU_b \quad (3.5)$$

式中：

BTU_B = 基本車流 BTU ($= n_B \times E_B$)

BTU_b = 混合車流中基本列車 BTU ($=n_b \times E_b$)

BTU_i = 混合車流中第 i 種列車之 BTU ($=n_i \times E_i$)

以下以三車種為例，若以三車種看來，混合車流可視為基本車流 BTU 加上第 i 種非基本列車 BTU，再加上第 $i+1$ 種非基本列車 BTU。

$$BTU_b + BTU_i + BTU_{i+1} = BTU_B \quad (3.6)$$

$$BTU_i + BTU_{i+1} = BTU_B - BTU_b \quad (3.7)$$

以式 3.6 來看，本應為三元一次方程式，但由於 BTU_b 為定值，移項後可直接計算兩車流之基本列車數相差值，因此視 BTU_i 、 BTU_{i+1} 為兩未知數，式 3.7 可視為一個二元一次方程式，在空間中為一直線關係，而在此直線上之任一點皆為可行解，轉換後可得到相同之 BTU，而此直線於空間中將分布為 BTU_b 皆等於一定值情況下；若在四車種時，由於基本列車數為已知為一定值，移項後，便為三元一次方程式，在空間中可行解分布為一平面關係，此平面上之任一點皆為可行解，而其分布為 BTU_b 皆等於一定值情況下，多車種時可得知可行解之多元一次方程式，而其多元一次方程式並非為於空間中之真正方程式(因為 BTU_b 為定值且已先移項處理)，而找到方程式之目的，是為了得知可行解在空間中之分布情況，將用於之後的投影步驟中作為計算方向向量之依據，根據多元一次方程式之分佈空間，了解此空間至少需由多少方向向量所組成。

步驟四：建立多維空間座標

為了解決多組可行解的問題，將在這些可行解中找出一組可以表示此情況下的當量值，以三車種為例，BTU 是由各種類列車數乘上其當量值所加總而來，因此可將 BTU 拆成各車種之 BTU 值，我們將延滯-BTU 二維空間展開成四維空間，

故在此四維空間的四個座標軸分別為：延滯、基本列車數 BTU_b 、第 i 種非基本列車之 BTU_i ($n_i \times E_i$)、第 $i+1$ 種非基本列車之 BTU_{i+1} ($n_{i+1} \times E_{i+1}$)。倘若混合車流有 N 種車種，則展開空間為 $N+1$ 維 (N 種車種 BTU +延滯)。由於兩車種並不需此步驟建立多維空間就可計算出唯一解，但在空間圖型展示上，僅能到三維空間 (2 種車種 BTU +延滯)，因此圖 3.5 先以兩車種概念表示，將原本二維之延滯- BTU (圖 3.3b) 展開成三維空間 (圖 3.5)，其三個座標軸為延滯、 BTU_b 和 BTU_i 。圖中藍點與紅點表示在相同延滯，基本車流和混合車流的座標位置，在兩車種中僅有唯一解，所以在展開後 (圖 3.5) 僅會顯示一個混合車流座標。

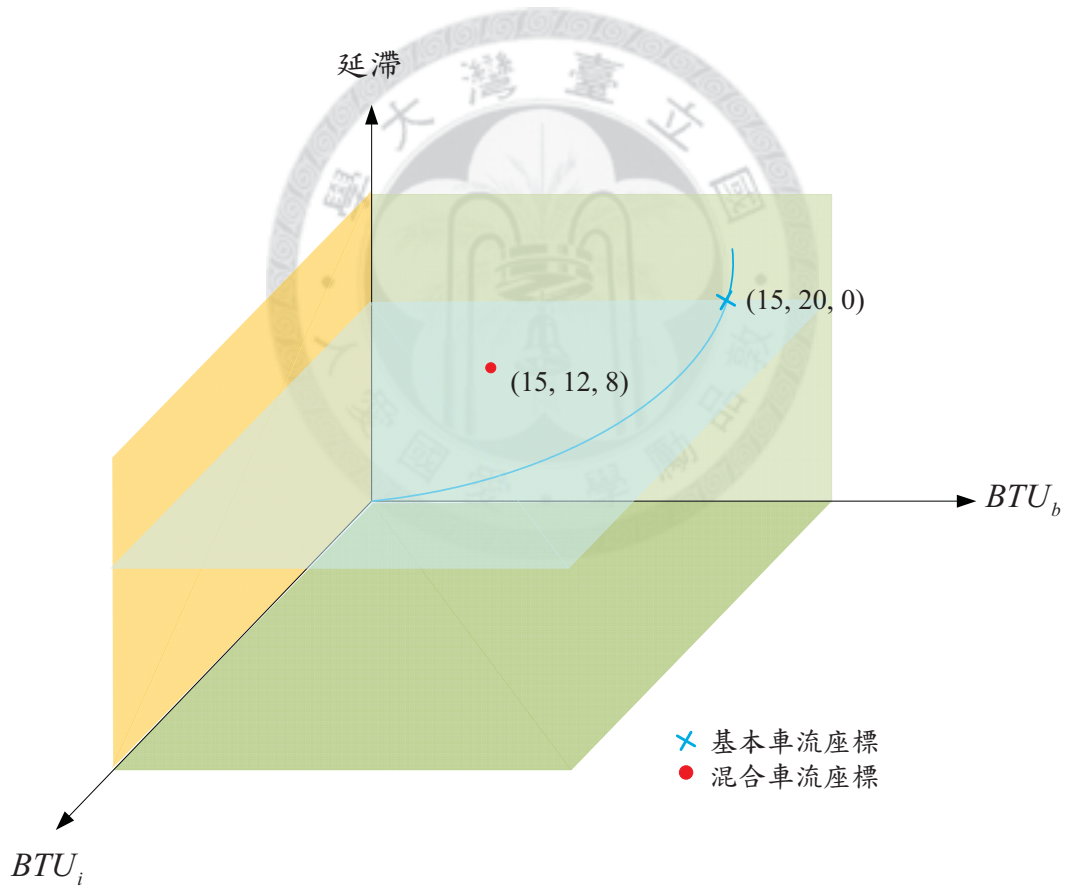


圖 3.5 動態當量值之兩車種三維空間示意圖

在空間中，步驟三以找出的各可行解在多維空間中之方程式，式子中之各點座標皆為一組可行解，其意義為各組可行解下，可以產生相同的 BTU ；同樣的，

也可以找出相同延滯情況下基本車流在空間中之座標，而基本車流座標將會在延滯和 BTU_b 這兩軸所構成的面上，因為沒有任何非基本列車，故在他軸座標皆為 0。

步驟五：座標投影

而多車種中，由於會產生多組可行解，但實際運算上，必須要從這些可行解中找出一組代表解，才能讓營運人員有使用依據，因此要嘗試在可行解空間中找出一組解為使用基準。步驟四時已建立混合車流與基本車流之空間座標概念，在此先分為兩部分來討論，首先為基本車流座標，該座標於空間意義可反映出與混合車流相同延滯與相同 BTU，其次為混合車流可行解空間，也為步驟三所得之可行解空間分布，在此空間中任一點座標意義皆反應和基本車流相同延滯與相同 BTU，也就表示這兩部分所代表的特性（延滯、BTU）皆相同，由於在先前轉換流量過程皆以基本車流與混合車流相互對應比較，因此嘗試找出於空間中基本車流座標對應於可行解空間之座標，而對應過程也為找出其投影座標，用其投影座標作為代表解，在此使用座標投影的概念找出基本車流座標投影至混合車流空間之座標點，以代表此車流情況下的列車當量值。

空間中利用方向向量與法向量內積為零關係（式 3.8），可找出投影之座標，在步驟三可以得到可行解之多元一次方程式，以藉此了解可行解於空間中的分布情況，且了解此空間最少需由幾個方向向量所組成（式 3.9），而其空間中任意兩點便可組成方向向量，且令投影座標為方程式中一點 $(BTU_b, BTU_i, BTU_{i+1}, \dots)$ ，而法向量便可為基本車流座標與投影座標所組成，利用方向向量與法向量內積為零關係，可求得投影座標。

$$(\vec{u} \cdot \vec{v}) = 0 \quad (3.8)$$

$$\begin{bmatrix} \vec{u}_1 \\ \vec{u}_2 \\ \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

式中：

$\vec{u}$ =方向向量

$\vec{v}$ =法向量

由於二元一次方程式為一直線，表示可行解於空間中為直線關係，其任兩點所構成之方向向量皆為倍數關係，故僅需一方向向量與法向量作內積，若為三元一次方程式，表示至少需由兩個方向向量組成一面，故取不同之任兩方向向量與法向量作內積為零，多車種可以此類推找到法向量與所需之方向向量以計算出投影座標。由於各車流皆在相同延滯下作比較，在此可先將延滯忽略，以兩車種而言從圖 3.5 三維空間省略延滯簡化為 BTU_b 、 BTU_i 二維 BTU 流量空間，車流座標皆分布於此空間中（圖 3.6）。

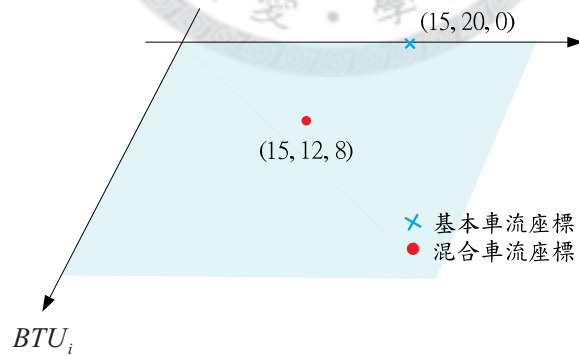


圖 3.6 兩車種之 BTU 流量空間

而在三車種的部分無法用四維空間來圖示，由於都以相同延滯下來比較，故省略延滯後以 BTU 流量三維空間來表示，三軸分別為 BTU_b 、 BTU_i 、 BTU_{i+1} ，如圖 3.7 所示，圖中藍點為基本車流，紅點皆為混合車流可行解，換句話說，各

個紅點座標皆可反映出相同的 BTU，而在三車種中可行解會呈直線關係。

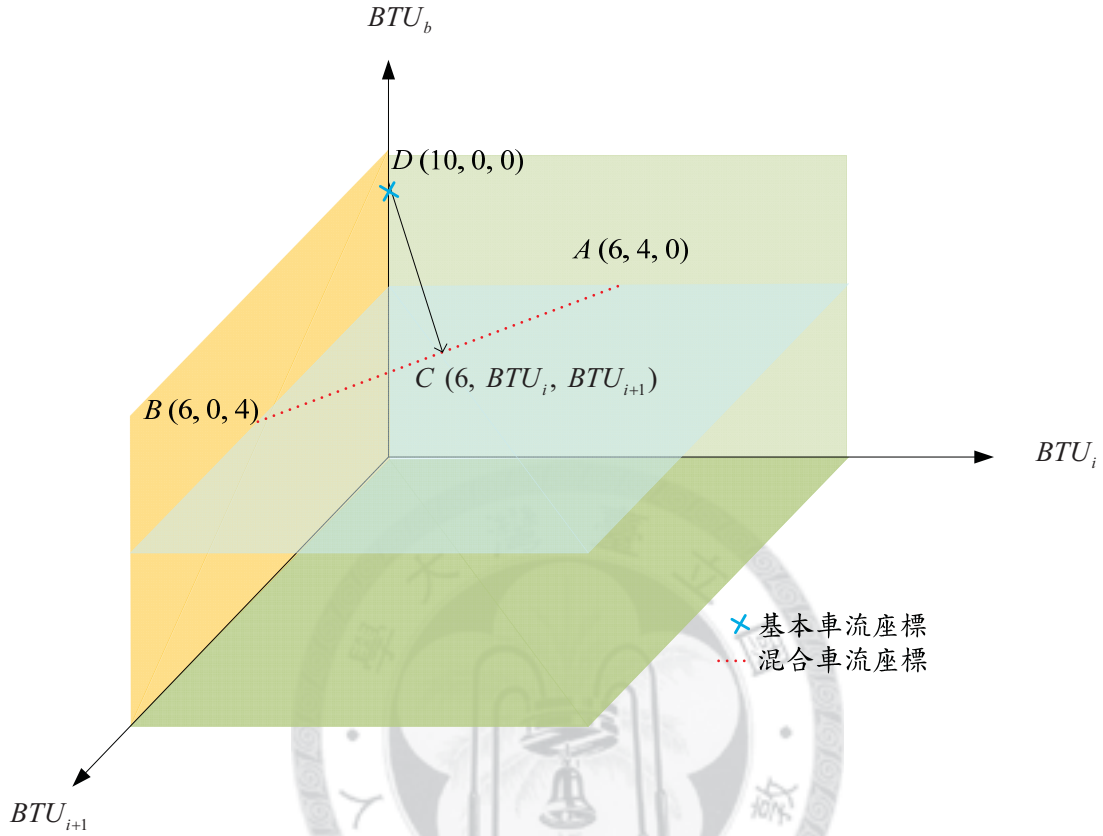


圖 3.7 動態三車種當量值 BTU 流量空間示意圖

以圖 3.7 為例，令投影座標為 $(6, BTU_i, BTU_{i+1})$ ，在相同延滯下通過路段之 BTU 相同概念中 ($BTU_b + BTU_i + BTU_{i+1} = BTU_B$)，由於混合與基本車流之基本列車數皆已知，可為 $6 + BTU_i + BTU_{i+1} = 10$ ，移項後為 $BTU_i + BTU_{i+1} = 4$ ，方向向量與法向量如下所示：

$$\text{方向向量：}\vec{u} = \overrightarrow{AB} = (6-6, 0-4, 4-0) = (0, -4, 4)$$

$$\text{法向量：}\vec{v} = \overrightarrow{CD} = (10-6, 0-BTU_i, 0-BTU_{i+1}) = (4, -BTU_i, -BTU_{i+1})$$

$$\text{內積：}\begin{bmatrix} 0 & -4 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4 \\ -BTU_i \\ -BTU_{i+1} \end{bmatrix} = 0 \Rightarrow 4BTU_i - 4BTU_{i+1} = 0$$

並與 $BTU_i + BTU_{i+1} = 4$ 聯立後，可求得投影座標為：

$$(BTU_b, BTU_i, BTU_{i+1}) = (6, 2, 2)。$$

步驟六：計算基本列車當量值

得到投影後的座標，而此座標便為基本車流座標對應於混合車流空間之相對位置，以三車種為例，其座標為 $(BTU_b, BTU_i, BTU_{i+1})$ 除以各車種列車數，便可得此混合車流情況之列車當量值 $(1, E_i, E_{i+1})$ ，在四車種以上便無法以圖示展現，但仍可以相同延滯通過路段 BTU 相同之概念，找出可行解於空間中分布狀況找出方向向量與法向量，並計算投影後的座標得到列車當量值。

3.2.2 固定當量值

在前一節中已經介紹了動態當量值，此節中將要說明如何在相同異質性中找出可以代表此列車異質性之列車當量值。如同動態當量值，先以流程圖來呈現計算過程，並將兩車種與多車種各分為幾個步驟進行討論。

固定兩車種列車當量計算流程與模式

在固定兩車種當量值部分，如同動態兩車種當量值，以雙車種運行情況為例，而單車種運行時也可利用相同方式進行計算。固定當量值與動態當量值不同，將可產生基本車流曲線與相同異質性之混合車流曲線，此模式僅包含一種非基本列車，藉由當量值迭代的過程，將產生不同混合車流曲線，藉以找出與基本車流最接近之混合曲線當量值，下圖 3.8 為固定兩車種列車當量計算之流程圖，以下分為個步驟進行詳細說明：

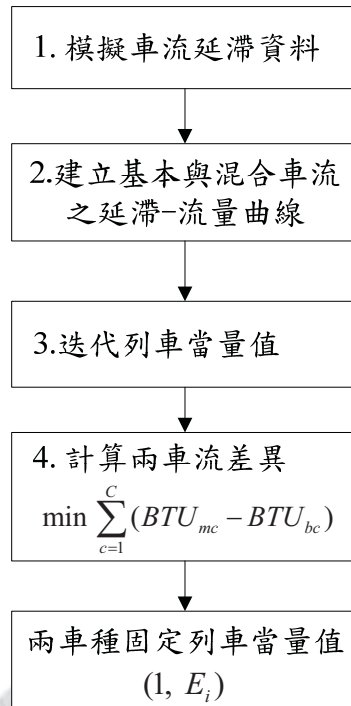


圖 3.8 固定兩車種列車當量值計算流程圖

步驟一：模擬資料

以模擬軟體取得基本車流與各不同情境下之列車延滯狀況，並確定路段上的車種數量與將以何種列車為基本列車，且得到不同混合車流與基本車流的延滯資料。而模擬過程所需之輸入與輸出如表 3.1。

步驟二：建立混合車流與基本車流曲線

在步驟一時可以藉由模擬資料取得基本車流之延滯-流量曲線，但在此混合車流不再為一個座標點，為了找出固定當量值，可以在不同流量但相同異質性下找出一條混合車流的延滯-流量曲線，如圖 3.9 範例所示，x 軸為流量（列車/天），y 軸為延滯，紅色虛線為相同列車異質性但不同流量下，所描繪出的混合車流曲線，藍線為基本車流曲線。

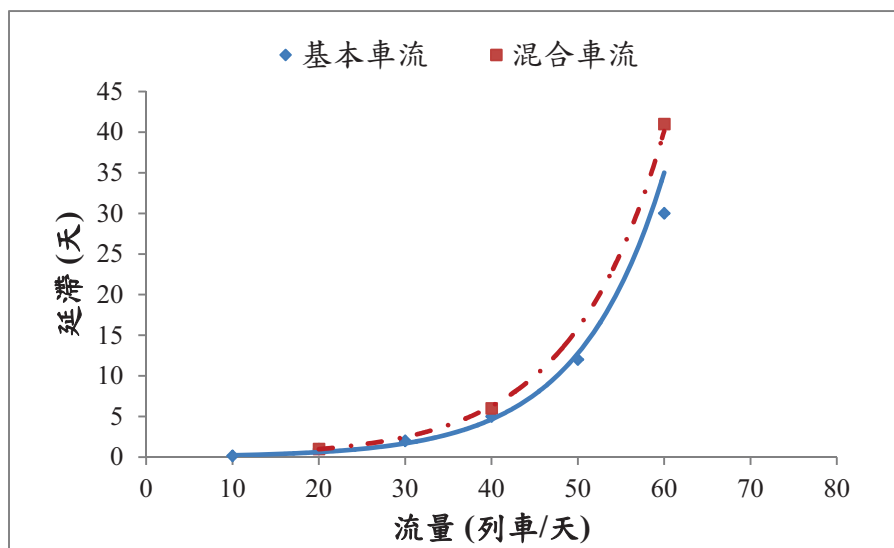


圖 3.9 固定當量值之延滯-流量圖

步驟三：迭代非基本列車當量值

以兩車種而言，將 x 軸轉換為 BTU，帶入當量值將原本混合車流單位（列車/天）轉換成 BTU（BTU/天），而代入不同當量值將會產生不同混合車流曲線，因此不斷迭代過程中，便會產生多條混合車流曲線，圖 3.10 中紅色區域範圍皆為在不同當量值下，混合車流曲線可能產生之區域：

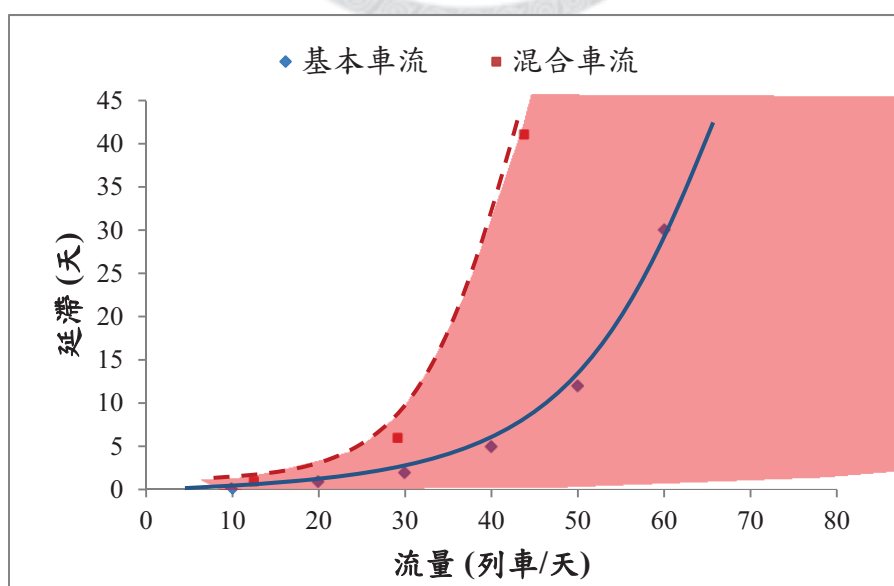


圖 3.10 不同當量組合之延滯-BTU 圖

而紅色虛線為當量值以大於 0 開始來看，是由於迭代過程中當量值皆需大於 0，因為在計算 BTU 轉換時，還是基於混合與基本車流在相同延滯情況下，通過之 BTU 應相同的概念，若以前述（式 3.1）來看：

$$n_b \times E_b + n_i \times E_i = n_B \times E_B \quad (3.1)$$

若當量值為負號，表示相同延滯狀態下，基本車流所通過的總列車數少於混合車流中的基本列車數，這並不符合實際情況也相當不合邏輯，故在過程中皆以當量值大於 0 進行迭代。

步驟四：計算非基本列車當量值

在兩車種中僅有一種非基本列車，表示僅有一個當量值需要迭代，決定以何當量值為此情境下之固定當量值，將取決於迭代過程中，混合車流與基本車流之 BTU 差異最小之當量值。

式 3.10 中，由於不同混合車流與基本車流延滯-流量曲線的傾斜程度不同，若以單一流量延滯情況來做計算，則無法確保該混合車流與基本車流曲線為最相近，以 C 為所選取之延滯基準個數而延滯基準可以各混合車流之延滯為主，取 C 個延滯基準來表示於各延滯情況下計算兩車流之 BTU 差異，所取的延滯基準個數越多，混合車流與基本車流曲線將越接近。在這些混合車流曲線中，以相同延滯情況下，取混合車流與基本車流 BTU 之相差最小的該組當量值作為兩車種之固定當量值，所得之混合車流曲線也為最接近基本車流曲線（圖 3.11）。

$$\min \sum_{c=1}^C \sqrt{(BTU_{mc} - BTU_{bc})^2} \quad (3.10)$$

$$BTU_{mc} = n_{ic} \times E_i + n_{bc} \times E_b \quad (3.11)$$

$$E_i > 0 \quad (3.12)$$

式中：

C = 選取延滯基準個數

BTU_{mc} = 第 C 個延滯基準之混合車流 BTU

BTU_{bc} = 第 C 個延滯基準之基本車流 BTU

E_i = i 車種之迭代當量值

n_{ic}, n_{bc} = 第 C 個延滯基準之混合車流 i 車種列車數與基本列車數

下列以取三種延滯基準個數 ($C=3$) 情況下為例，計算各延滯情況下，混合車流與基本車流之 BTU 最小差異，將式 3.10 展開後如式 3.13：

$$\min \left\{ \sqrt{(n_{i,1} \times E_i + n_{b,1} \times E_b - n_{B,1} \times E_B)^2} + \sqrt{(n_{i,2} \times E_i + n_{b,2} \times E_b - n_{B,2} \times E_B)^2} + \sqrt{(n_{i,3} \times E_i + n_{b,3} \times E_b - n_{B,3} \times E_B)^2} \right\} \quad (3.13)$$

在式 3.13 中，混合與基本車流中各車種列車數皆已知，基本列車當量值也皆為 1 ($E_b, E_B = 1$)，故式 3.13 中未知數只有 E_i ，可以找出唯一當量值，且混合車流轉換後將與基本車流最為接近。兩車種於單車種運行狀況時，等於混合車流中僅含非基本列車（一未知當量值），也可應用相同方式，利用迭代過程找出與基本車流曲線最接近之非基本列車當量值。

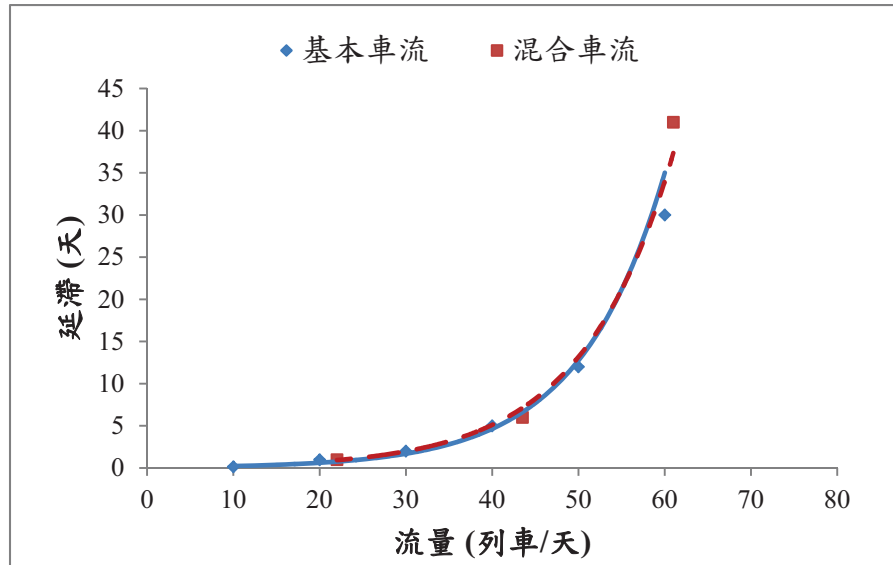


圖 3.11 迭代後之延滯-BTU 曲線

固定多車種當量值計算流程與模式

在固定多車種當量值計算方面，可產生基本車流曲線與相同異質性之混合車流曲線，此模式中包含多種非基本列車，故藉由當量值迭代的過程中，產生不同混合車流曲線，而在此與基本車流最接近之混合車流曲線並不唯一，換句話說會產生多組可行解，其各組當量值轉換後皆可得到相同之 BTU，且可產生相同之混合曲線，因此將延滯-BTU 二維空間之 BTU 拆成各車種之 BTU，展開成多維空間，以空間投影方式找出一組解，下圖 3.12 為固定多車種列車當量計算之流程圖，以下將分為個步驟進行詳細說明：

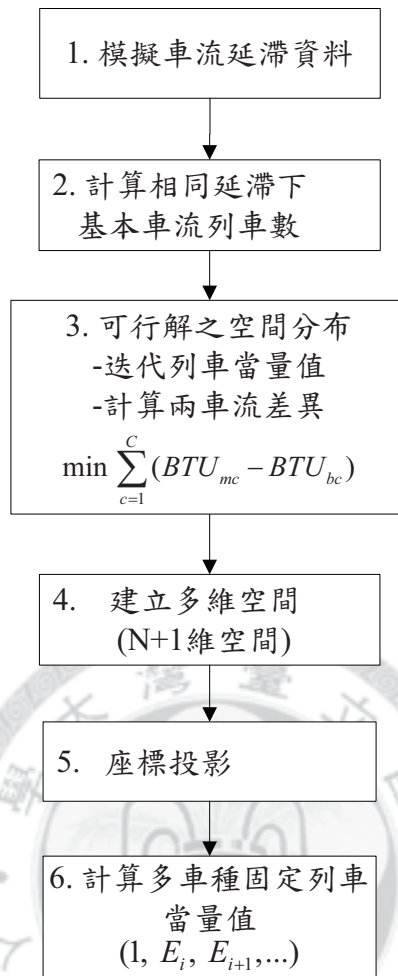


圖 3.12 固定多車種列車當量值計算流程圖

步驟一：模擬資料

以模擬軟體取得基本車流與各不同情境下之列車延滯狀況，並確定路段上的車種數量與將以何種列車為基本列車，且得到不同混合車流與基本車流延滯資料。而模擬過程所需之輸入與輸出如表 3.1。

步驟二：建立混合車流與基本車流曲線

在步驟一時可以藉由模擬資料取得基本車流之延滯-流量曲線，並如同固定兩車種當量值可以在不同流量但相同列車異質性找出一條混合車流的延滯-流量曲線，此時流量為單位仍為列車/天，當量值尚未轉換流量。

步驟三：可行解之空間分布

在多車種的情況下，混合車流中除了基本列車外，尚有多於一種之非基本列車，故此時便有多組當量值的迭代組合，在不同當量值組合下，流量單位為 BTU/天，而迭代當量值應大於 0，以符合實際意義。

在兩車種情況下可用式 3.10 求得一組唯一解，但在多車種的情況下，固定當量值也會和動態當量值一樣遇到多組可行解的問題，換句話說，如圖 3.11 迭代完後，可找出與基本車流最相近之曲線，而有多組可行解轉換後皆可畫出該曲線。如同前述式 3.10 所示，以三車種為例將其展開後可得式 3.14，在此以 $C=3$ 為例，表示取同異質性下三種流量之延滯情況作計算：

$$\begin{aligned} \min \left\{ \sqrt{(n_{i,1} \times E_i + n_{i+1,1} \times E_{i+1} + n_{b,1} \times E_b - n_{B,1} \times E_B)^2} \right. \\ + \sqrt{(n_{i,2} \times E_i + n_{i+1,2} \times E_{i+1} + n_{b,2} \times E_b - n_{B,2} \times E_B)^2} \\ \left. + \sqrt{(n_{i,3} \times E_i + n_{i+1,3} \times E_{i+1} + n_{b,3} \times E_b - n_{B,3} \times E_B)^2} \right\} \end{aligned} \quad (3.14)$$

從式 3.14 可看出有兩個未知數為 E_i 、 E_{i+1} ，基本列車當量值皆為 1 ($E_b, E_B = 1$)，故僅一個方程式將產生多組可行解，但由於固定當量值考慮各相同異質性之不同流量，因此無法如同動態當量值可以直接找出可行解之空間分布狀況，因此在不斷迭代的過程中，車種數量越多列車當量值組合便會越多，當量值迭代順序需從小至大，因為無法確定當量最大值為何，以三車種而言，如先固定 $E_i = 1$ 找出 E_{i+1} 為何情況下，混合車流與基本車流最為接近，以找出一組可行解，再依次增加 E_i 之迭代值，進而窮舉出各可行解。從式 3.14 來看，由於混合與基本車流中各車種列車數皆已知，在迭代過程中，可以窮舉出所有可能列車當量組合，找出各可行解，但為了避免迭代次數過多，可先找出一組可行解，從此可行解中可得到各流量延滯下兩車流之 BTU 差異，式 3.15 中在不同延滯下兩車流之 BTU 差異設為 d_c ，從各車流分別來看，將式 3.14 拆成式 3.15：

$$\begin{aligned}
n_{i,1} \times E_i + n_{i+1,1} \times E_{i+1} + n_{b,1} - n_{B,1} &= d_1 \\
n_{i,2} \times E_i + n_{i+1,2} \times E_{i+1} + n_{b,2} - n_{B,2} &= d_2 \\
n_{i,3} \times E_i + n_{i+1,3} \times E_{i+1} + n_{b,3} - n_{B,3} &= d_3
\end{aligned} \tag{3.15}$$

式 3.15 表示各車流中混合車流 BTU 與基本車流 BTU 的差異可能為正或為負，而先將基本車流補上兩車流差異後便為混合車流之 BTU，然後再扣掉混合車流中的基本列車數，便為混合車流中之非基本列車 BTU 總合，將式 3.15 整理移項後可得式 3.16：

$$\begin{aligned}
n_{i,1} \times E_i + n_{i+1,1} \times E_{i+1} &= d_1 + n_{B,1} - n_{b,1} \\
n_{i,2} \times E_i + n_{i+1,2} \times E_{i+1} &= d_2 + n_{B,2} - n_{b,2} \\
n_{i,3} \times E_i + n_{i+1,3} \times E_{i+1} &= d_3 + n_{B,3} - n_{b,3}
\end{aligned} \tag{3.16}$$

在此三種流量下當量值 E_i 、 E_{i+1} 皆相同，其列車數也為相同比例不同總流量，故 3.16 三式中各車種列車數會與各車流倍數呈等比關係，因此 3.16 的三式呈等比放大（圖 3.13），其可先視為同一式如同動態當量值作法，將式 3.16 等號右邊數值整理成常數 f （式 3.17），在多車種中找出多元一次方程式（3.18），了解各組可行解於空間分布情況。換句話說，任何符合式 3.18 之當量值便可得到相同 BTU，且這些可行解皆可畫出同一條與基本車流最接近之混合車流曲線。

$$n_i \times E_i + n_{i+1} \times E_{i+1} = f \tag{3.17}$$

$$BTU_i + BTU_{i+1} = f \tag{3.18}$$

可將式 3.18 整理為通式，如式 3.19：

$$\sum_{i=1}^I BTU_i = f \quad (3.19)$$

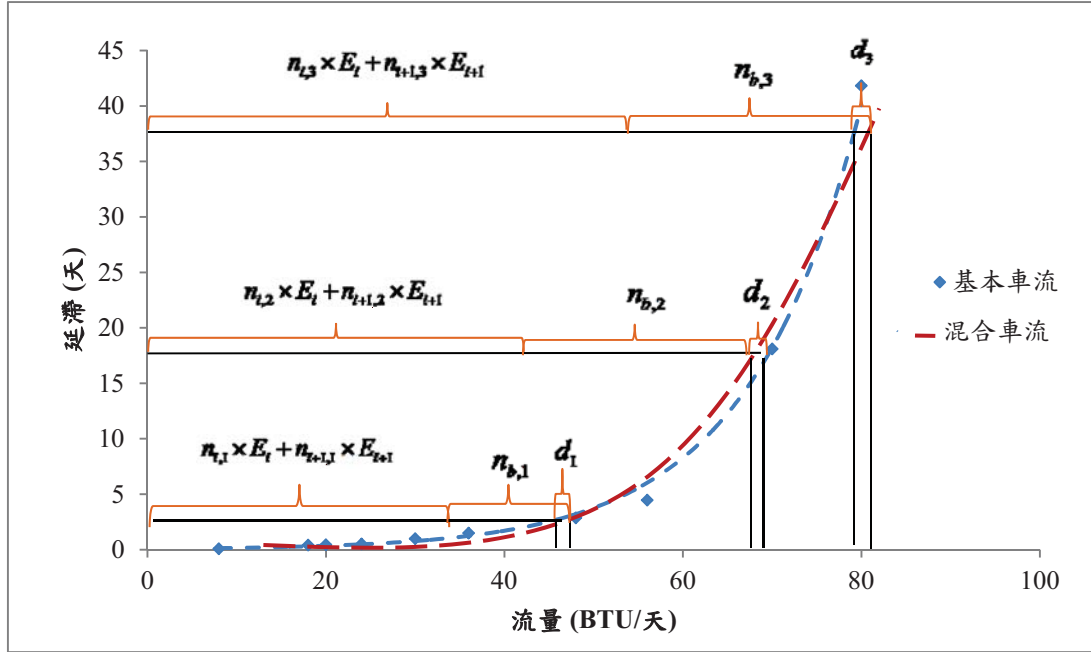


圖 3.13 迭代後混合車流與基本車流比較示意圖

步驟四：建立多維空間座標

而找出一可代表解的作法，以三車種為例，將原本二維空間（延滯-BTU）展開成四維空間（延滯- BTU_b - BTU_i - BTU_{i+1} ），故在空間中可以描繪出一條基本車流曲線，一樣會顯示在延滯- BTU_b 這個面上，因其車流中無非基本列車。建立多維空間如同動態當量值所示，若有 N 種車種，便會展開成 $N+1$ 維空間（ N 車種 BTU +延滯）。

雖然兩車種不需建立多維空間即可迭代出唯一當量值，但由於圖示僅能以三維空間展示，圖 3.14 先以兩車種為例，展開後三軸為延滯、 BTU_b 和 BTU_i ，在兩車種中可以找出唯一解，所以空間中只會產生一條混合車流曲線，圖 3.14 中可以看出一條基本車流曲線在延滯- BTU_b 的面上，而混合車流曲線則會在此空間中。

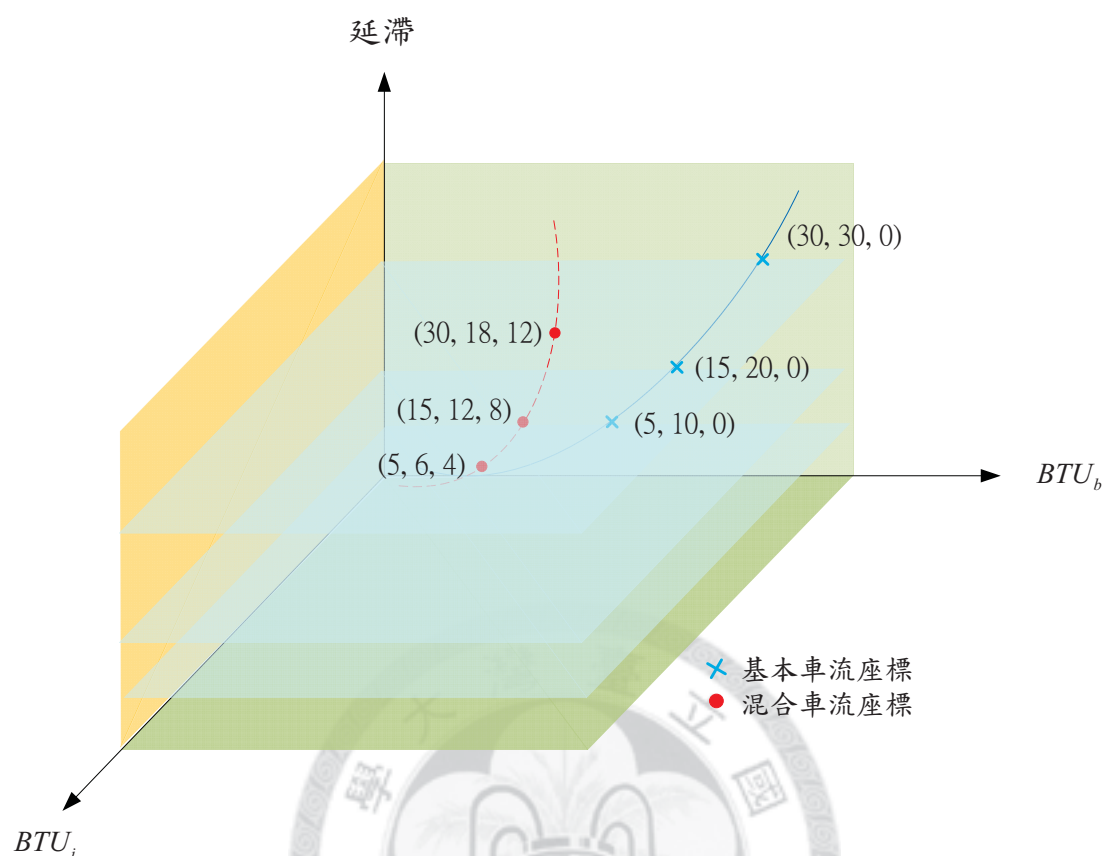
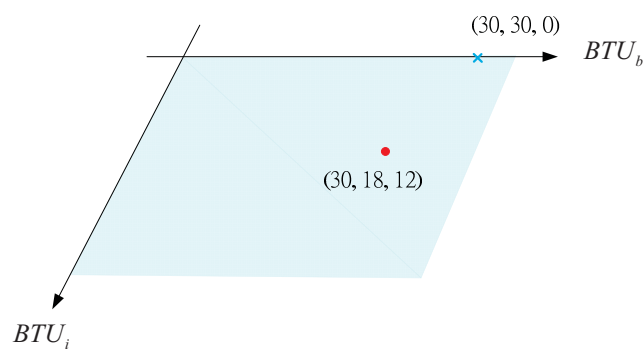


圖 3.14 固定當量值之兩車種三維空間示意圖

由於各車流皆在相同延滯下作比較，在此先將延滯忽略，但固定當量值以相同異質性不同流量下以給定一組當量值，以兩車種為例，忽略延滯後兩軸為 BTU_b 、 BTU_i （圖 3.15），在不同流量下可分割出不同空間。



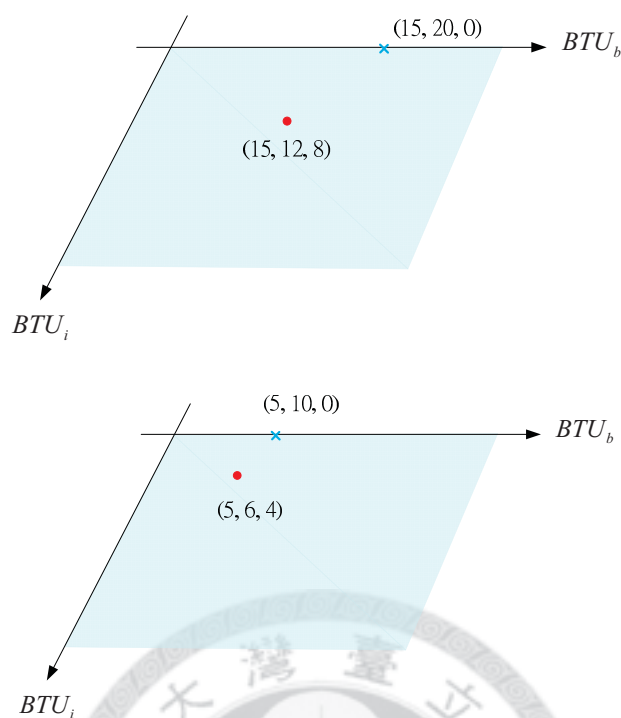


圖 3.15 兩車種-各流量之子空間

步驟五：座標投影

而多車種中，由於會產生多組可行解，步驟四時已建立混合車流與基本車流之空間座標概念，為了從多組可行解中找出一組可代表之列車當量值，將圖 3.16 分為兩個部分來看，先為基本車流座標，各基本車流座標表示在不同延滯基準下可通過之 BTU，其次在不同延滯基準下可切出不同混合車流空間，各空間座標點意義反映出相同延滯下，通過之 BTU 與對應之基本車流相同，而各延滯基準之基本車流座標與混合車流空間所呈現之特性（延滯、BTU）皆相同，因此找出兩車流於空間中之對應關係，將基本車流對應混合車流空間中，找出其於空間中所相對位置，也為使用座標投影的概念找出與基本車流投影至混合車流空間中，以該混合車流座標之當量值組合代表此車流情況下的列車當量值。

三車種時，由於無法呈現四維空間，因此也先忽略延滯，三軸分別為 BTU_b 、 BTU_i 、 BTU_{i+1} ，故可以畫出三車種之三維空間示意圖，圖 3.16：

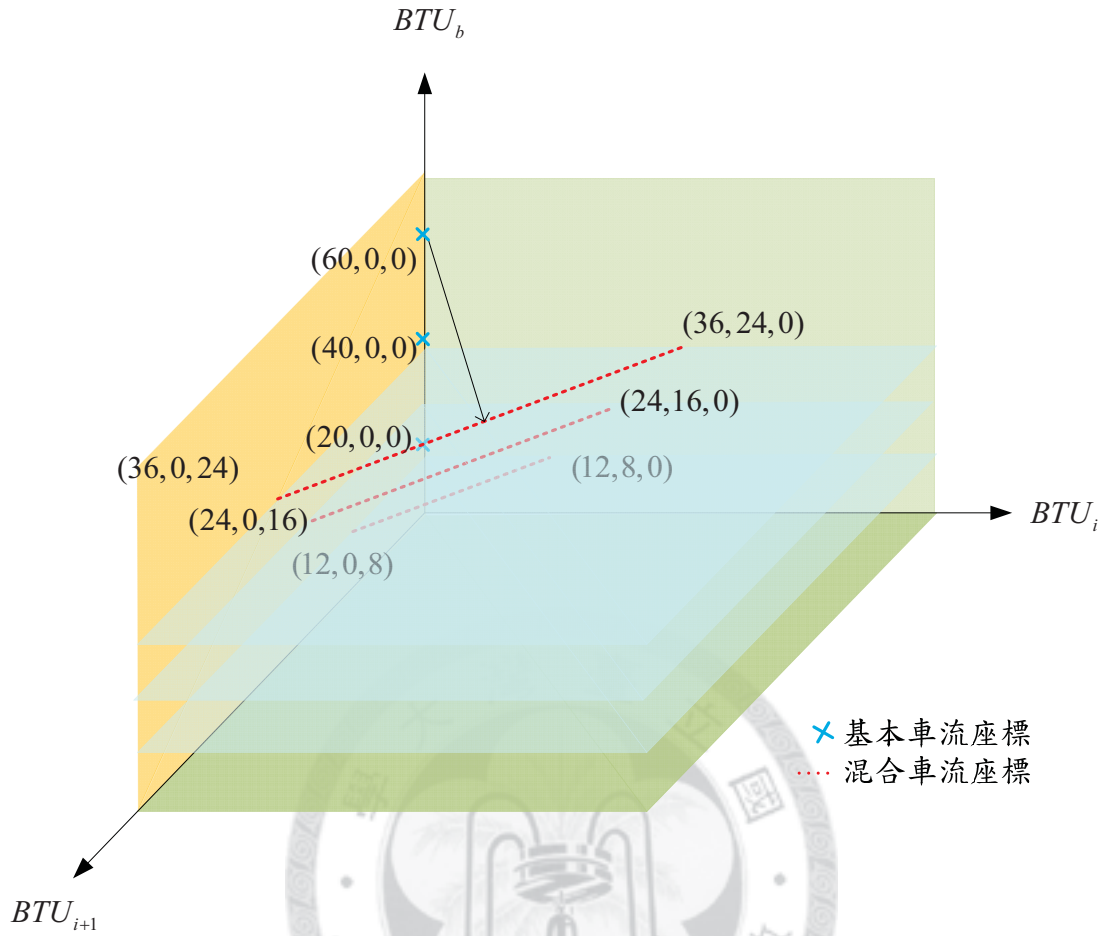


圖 3.16 三車種之三維空間示意圖

在固定當量值中，由於是以相同異質性不同流量下找出可代表之列車當量值，圖 3.16 三個子空間之混合車流座標，是依步驟三（式 3.18）所得之多元一次方程式，依不同流量倍數而產生，故不同延滯基準會在空間中會產生不同子空間，如圖 3.17，在迭代各組當量值時，因列車比例固定，故各子空間座標會隨流量比例放大而放大，如圖 3.17 各子空間之混合車流列車數分別為 $(n_i = 2, n_{i+1} = 2, n_b = 12)$ 、 $(n_i = 4, n_{i+1} = 4, n_b = 24)$ 、 $(n_i = 6, n_{i+1} = 6, n_b = 36)$ ，各延滯基準下，分別對應之基本車流分為 20 BTU、40 BTU、60 BTU，由於固定當量值在相同異質性下相同，從下列例子來看在不同流量下，各軸座標呈等比例放大：

➤ $BTU_i = 2 \times E_i, BTU_{i+1} = 2 \times E_{i+1}, BTU_b = 12$

- $BTU_i = 4 \times E_i, BTU_{i+1} = 4 \times E_{i+1}, BTU_b = 24$
- $BTU_i = 6 \times E_i, BTU_{i+1} = 6 \times E_{i+1}, BTU_b = 36$

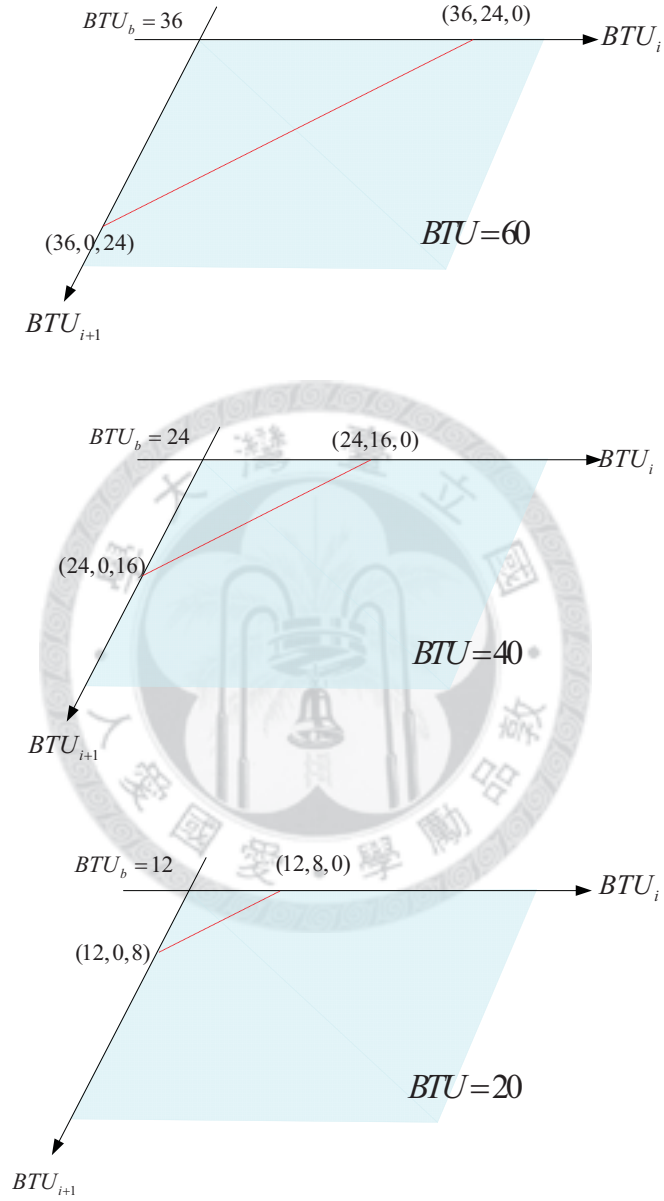


圖 3.17 三車種-各延滯基準子空間

由於基本車流座標皆在 BTU_b 軸上，因此在各子空間的投影結果並不會有差異，可取其一個延滯基準作投影即可，投影方式如動態當量值所示，以三車種而言可視為將點投影至直線上，利用方向向量與法向量進行內積為零，以找出投影

座標。投影之計算過程，請參考多動態車種列車當量計算步驟五。

步驟六：計算基本列車當量值

得到投影後的座標，其座標為 $(BTU_b, BTU_i, BTU_{i+1})$ 除以各車種列車數量後，便可得到此混合車流情況之列車當量值 $(1, E_i, E_{i+1})$ ，在四車種以上無法以圖示展現，但仍可以相同延滯通過路段 BTU 相同之概念，找出各可行解，並找出投影後的座標得到列車當量值。

3.3 小結

總論以上兩部分之列車當量計算模式：動態當量值與固定當量值，各分為兩車種與多車種模式探討，兩車種可分為兩種情況：單車種運行與雙車種運行情況，而兩種運行情況皆可應用相同計算方式而得列車當量值，並在各部分分為幾個步驟來說明。動態與固定當量值計算概念相似，固定當量值沿用動態當量值作法，是以相同異質性所計算出一個最適當量值，用以代表該混合車流相互影響情況。

動態當量值與固定當量值之兩車種與多車種計算程序可參考計算流程圖所示，在兩車種下可找出唯一當量值；在多車種情況下，皆以空間概念找出相同延滯下的基本與混合車流之座標位置，由於空間中基本車流與混合車流所代表之特性皆相同，兩車流所顯示意義皆為相同延滯與相同 BTU，並找出其相互對應關係，以各組可行解於空間中與基本車流之投影概念，將基本車流座標投影至混合車流上，並以投影點座標為該混合車流情況下，非基本列車之基本列車當量。

第四章、案例分析

本章中一開始先將進行試驗設計，確定試驗設計並開始進行列車當量值：兩車種（單車種運行情況、雙車種運行情況）與三車種計算與分析，以歸納出列車當量值特性，且比較不同基準之當量計算方式與不同資料統計方式，並討論於不同計算方式下當量值之差異，在本章最後，將嘗試將當量值應用至流量與容量分析中，以看出實際路段車流情況。

4.1 試驗設計

在案例分析中，將進行兩車種與三車種之動態當量值與固定當量值計算分析，並以北美路網列車為例，由於北美路網中與其他地區路網特性不同，常有客運列車與貨運列車同時運行，且不同列車之列車特性差異甚大，若該路段以列車總合為其流量或容量，會反映出較大誤差性，故以該路網與其列車為案例分析之對象。案例分析中所使用三種車種之特性為下表 4.1 所示，聯運貨車（Intermodal）與煤礦車（Coal train）同為貨運列車，聯運貨車通常載運一般貨櫃而煤礦車主要載運煤礦，客運列車主要用於載運旅客，本案例之客運列車最高速度可至 79 mph 左右，但由於路段軌道性能限制，並且客、貨運列車混合運行，故通常將客運列車行駛速度降低，以減低風險。在此三種列車中以客運列車性能最佳，其次為聯運貨車，性能最差者為煤礦車，由表 4.1 可以看出三種列車的特性相當不同，而實際在路網上運行之列車種類並不只所列出的三種列車，因此，更需要當量適時的轉換，以了解實際流量與列車延滯關係。

表 4.1 列車特性

列車特性	客運列車	聯運貨車	煤礦車
機車動力	P42-DC locomotives	5 SD70 locomotives	3 SD70 locomotives
車廂/拖車數	13 cars	93 cars	115 cars
列車載重	500 tons	5,900 tons	16,445 tons
列車長度	500 feet	5,649 feet	6,325 feet
HP/TT	15.4	3.64	0.78
最大速度	79 mph	70 mph	50 mph

*HP/TT= horsepower-to-trailing ton (馬力/列車載重)

以下分析中會進行兩車種（單車種運行與雙車種運行情況）與三車種計算，在兩車種計算分析中，由於客運列車與煤礦車為列車性能差異最大列車，故使用客運列車與煤礦車進行當量計算，由於北美路往多以貨運列車為主故以煤礦車為基本列車；在三車種當量計算分析中將加入聯運貨車，再加入一車種性能界於其中之情況下，探討客車與煤礦車差異，並以聯運貨車為基本列車進行列車當量計算。以下為案例試驗設計：

- 兩車種之單車種運行：車流中僅含一異質性（100% 客車車流），分別於三種流量下進行模擬（20、40 與 60 輛列車），共 3 組車流模擬。
- 兩車種之雙車種運行：以 10%為車流間隔單位，將有 9 種異質性，且分別於三種流量下進行模擬（20、40 與 60 輛列車），共 27 組車流模擬。
- 三車種：以 10%為車流間隔單位，將有 36 組異質性，且分別於三種流量下進行模擬（20、40 與 60 輛列車），共 108 組車流模擬。

而實際上在不同路段區域下列車當量值會隨其條件不同而有所變動，而本研究以單一假設路段進行分析，而模擬的路段條件為以下所示：

1. 單線路段

2. 路段長度為 262.25 miles
3. 號誌間距為 2.75 miles
4. 側線間距為 11 miles
5. 路段內為固定區間三時相號誌控制
6. 側線為均勻分布於路段中
7. 東西向各車種發車數一致
8. 客車於路段上停靠三站，且均勻分布於路段中，停站時間皆為 2 分鐘

確定列車種類後將進行模擬分析而本研究選用模擬軟體為北美常用軌道模擬軟體 RTC，在各不同列車比例組合下都會以 30 個隨機亂數進行模擬。每個隨機亂數藉以變化列車之表訂出發時間前、後 15 分鐘而產生最後列車延滯時間，而過去研究常用計算方式為取其 30 筆資料之延滯平均值，利用多筆隨機亂數計算平均值（Dingler，2010）用以降低模擬變異使模擬資料接近真實情況。在統計方法中除了平均方式外，也有使用不同方法（最小平方誤或絕對誤差等）進行資料分析，在本章 4.6 節也將試用不同方式比較列車當量計算結果。

以下將針對兩車種與三車種進行案例分析，分別比較其動態當量值與固定當量值之差異，並以不同層面探討當量值變動因素，最後歸納出兩車種與三車種之列車當量值變化趨勢，且於分析後將嘗試進行列車當量值之應用，在不同條件下應用當量值進行流量/容量計算與結果分析，最後探討不同計算方式與其當量值比較。

4.2 兩車種之單車種運行基本列車當量

在兩車種之單車種運行基本列車當量計算分析中，以客車和煤礦車為例，將以煤礦車為基本列車而客車為非基本列車，分為動態基本列車當量與固定基本列車當量進行探討。

由於單車種運行情況僅有一種列車異質性（100%客車車流），並於三種流量下（20 輛列車、40 輛列車與 60 輛列車）進行模擬與當量計算，由於只有一種非基本列車，也就是只有一個未知列車當量值，故在相同延滯通過之 BTU 應相同之概念，可以進行流量轉換，並計算客車列車當量值，如表 4.2 所示。

可發現在低流量時，動態當量值差異會來的較明顯，是由於延滯-流量曲線為指數分布，也表示於低流量下，增加列車或減少列車流量對於延滯而言並不會有太大的影響，列車於路段上尚有寬裕空間；相反的，於低流量下，一旦延滯增加或減少，便會明顯影響到流量轉換，因此於低流量時當量轉換變動會來的較大，由於兩車種之單車種運行僅含一異質性與三種流量，當量組數較少，詳細當量值比較可於兩車種之雙車種運行與三車種時看出較明顯差異並於後續進行討論。由下表可看出不同流量之動態當量值與固定當量值有些許差異，又以低流量情況下當量值差異最為明顯（相差 0.18 左右），其原因如同前述，低流量值當量變動會來的較大，因此與固定當量值比較時，差異也會來的較明顯。

表 4.2 兩車種之單車種運行動態與固定當量值比較

P%	固定 E_p	流量	動態 E_p	E_p 差
100P	0.58	20P	0.40	0.18
		40P	0.57	0.01
		60P	0.66	0.08

4.3 兩車種之雙車種運行基本列車當量

在兩車種之雙車種運行情況下，基本列車當量計算分析中以客車和煤礦車為例，將分為動態基本列車當量與固定基本列車當量進行探討。

4.3.1 動態兩車種之雙車種運行基本列車當量

在兩車種列車比例組合下，以煤礦車為基本列車並以列車比例 10%為間隔單位，會有 9 種列車異質性，再分別於三種流量下（20 輛列車、40 輛列車與 60 輛

列車)進行資料模擬，在不同列車異質性與列車流量下，共有 36 組列車當量值。

在兩車種混合車流中，只有一種非基本列車，換句話說也就是只有一個未知列車當量值，不會有多組可行解的問題，故在相同延滯通過之 BTU 應相同之概念，可以進行混合車流與基本車流之流量轉換，進而得到客車的列車當量值，如表 4.4 所示，在不同列車組合中，可以求出客車於該車流組合之當量值。

以下將針對動態兩車種之雙車種運行情況列車當量值結果，歸納出一些特性進行分析討論，在動態當量值部分，將分別討論列車異質性、流量與列車延滯對於列車當量值之影響關係，了解在不同列車異質性與流量下列車當量值之變化趨勢，且由於兩車種中僅有一種非基本列車（基本列車當量值為 1），可直接探討從列車延滯情況與其當量值之關係。

列車異質性與列車當量值之關係探討

表 4.4 中整理成圖 4.1，橫軸為異質性（在此以客車比例示之），縱軸為列車當量值（ E_p 為客車當量值， E_c 為煤礦車當量值），將三種車流量之客車當量值放在一起，可以看出無論在何種流量下，當客車比例較低時，其客車當量值會較高，反之若客車比例較高時，則客車當量值會較低，由於在兩車種時僅會有唯一解，在此可以歸納出當非基本列車在混合車流中比例愈高時，其當量值會愈低，兩者會呈反向關係。

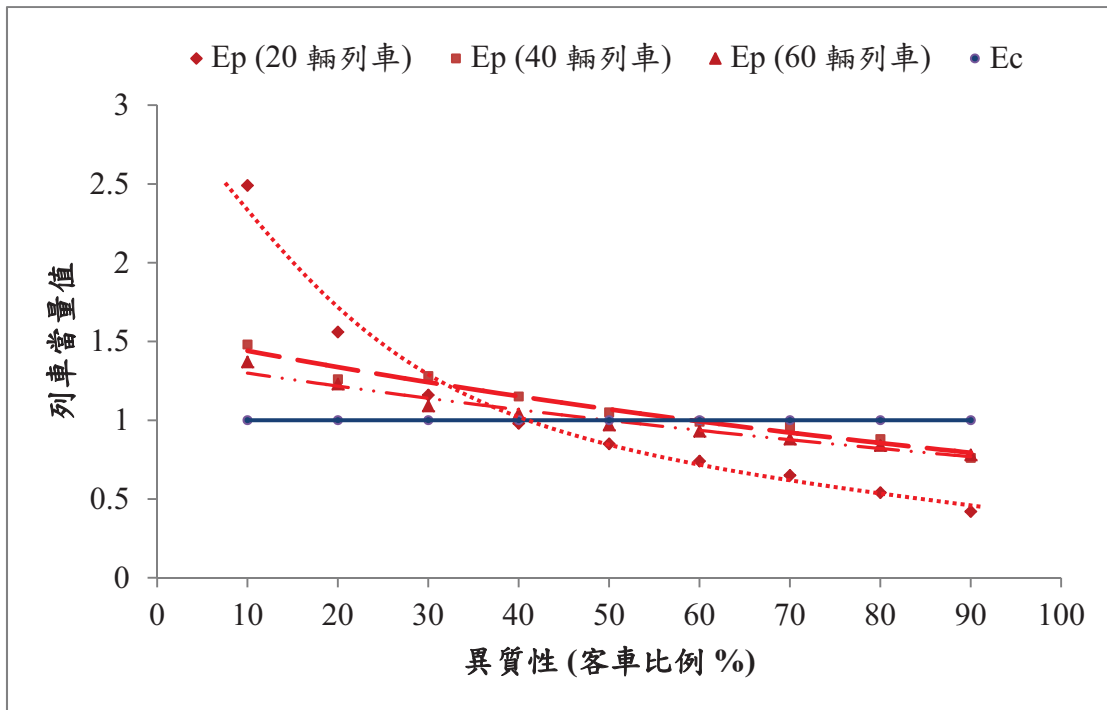


圖 4.1 兩車種之雙車種運行客車動態列車當量值

流量與列車當量值之關係探討

從圖 4.1 中可以看到代表 20 輛列車的曲線是變化幅度最大的曲線。並從表 4.4 中來看，客車當量值最大可到 2.49 (2P-18C) 左右，而最小可到 0.42 (18P-2C)，但此兩種情況皆發生在流量等於 20 輛列車下。

這是由於列車延滯-流量曲線是呈指數成長，故在低流量下延滯的差異不大，換句話說，低流量時若流量增加或減少，對延滯而言並不會有太大的改變，必須要加入或降低大量的列車，延滯情況才產生明顯的變化；相反的，在高流量中當流量增加，延滯就會有急遽的改變，也表示只要加入少量列車就會對延滯產生顯著的影響。可從圖 4.2 範例看出，藍色為延滯-流量曲線呈指數分布，若在三種流量下 (20、40 與 60 輛列車) 同時各增加一單位的延滯，其在不同延滯狀態下，所對應的流量轉換幅度便有顯而易見的差異。

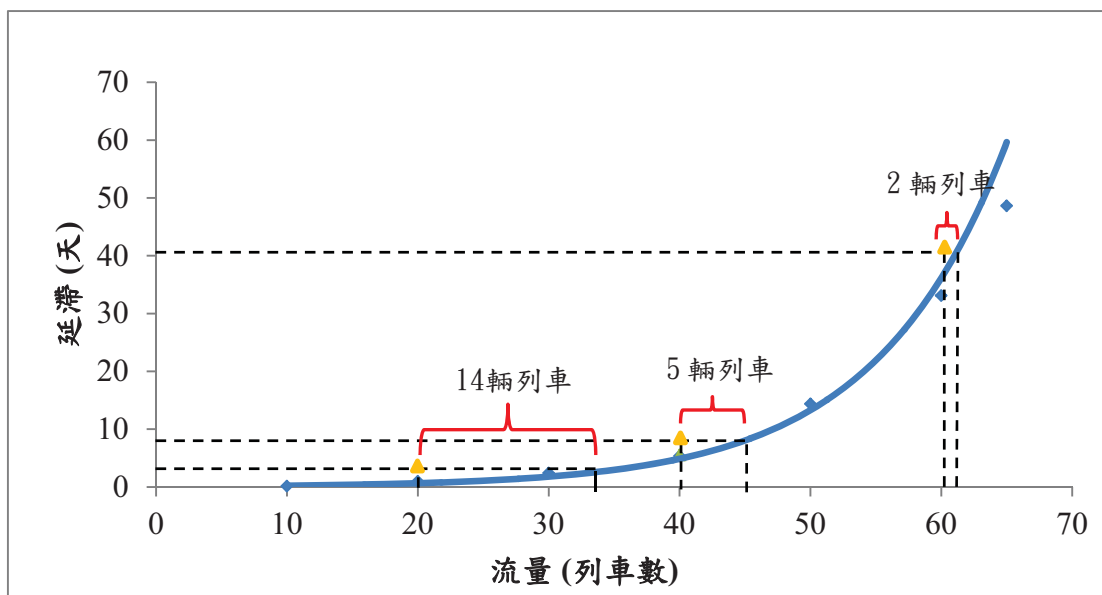


圖 4.2 延滯增加與流量轉換比較

圖 4.2 中在流量 20 情況下增加一單位延滯，其延滯等於增加約 14 輛列車於路段上，流量為 40 情況下，增加一單位延滯表示等於增加 5 約輛列車於路段中，流量為 60 輛列車時，延滯增加一單位等於約增加 2 輛列車於路段，因此在低流量時一旦延滯增加，流量便有明顯的改變，連帶在低流量時，當量值轉換在會有顯著的差距。

列車延滯與列車當量值之關係探討

而在表 4.4 中可以看到客車當量值會有小於 1 或大於 1 的狀況，表 4.3 以相同列車數但兩種不同列車組合為例，各會產生不同延滯情況，而該延滯情況下對應至基本車流曲線座標，可找出相對應之基本車流列車數；6P-54C 所產生的延滯應可通過之基本列車數為 62.22，但該組合下列車數僅為 60，表示客車所造成的影響大於煤礦車，客車當量值應大於 1；而 54P-6C 在該延滯可通過的基本列車數僅為 47.98，但該組合下可通過列車數為 60，表示在該情況下客車所造成的影響已小於煤礦車，客車當量值應小於 1。

表 4.3 列車延滯與當量值比較

列車組合	延滯(天)	列車數	基本車流列車數	客車當量值
6P-54C	37.38	60	62.22	1.37
54P-6C	9.70	60	47.98	0.78

以圖 4.3 來看，若混合車流座標位於基本車流曲線左方(6P-54C)，則表示相同延滯情況下，混合車流通過之列車數少於基本車流，此時非基本列車當量值會大於 1，若混合車流座標位於基本車流曲線右方(54P-6C)，則表示相同延滯下混合車流通過之列車數已大於基本車流，此時非基本列車當量值會小於 1。

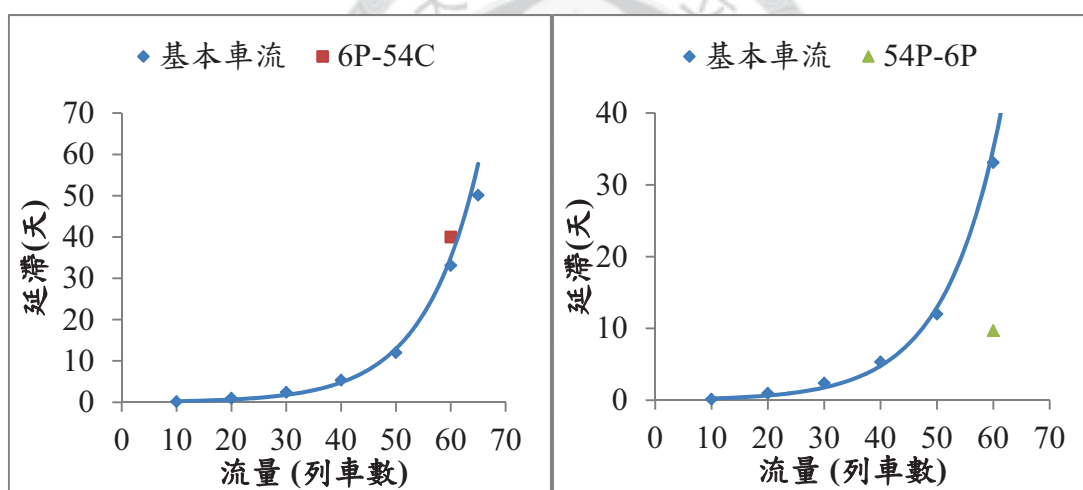


圖 4.3 動態兩車種車流延滯比較

4.3.2 固定兩車種之雙車種運行基本列車當量

在上一章節中，由於不同異質性與不同流量會造成不同的列車當量值，在此章節中將要嘗試整合相同異質性但不同流量，以列車異質性為主的方式，找出各異質性的固定當量值以簡化使用上的繁複。上一節中不同組合情況下，會有 36 組列車當量值，在以列車異質性為主的情況下，將只會有 9 組不同異質性之列車當量值。

由於在兩車種中只有一種非基本列車，故在計算固定當量值時，只會有一組解，基於相同延滯通過 BTU 應相同的概念，進行迭代當量值用以改變混合車流曲線，所以在迭代當量值的過程中，可以找出與基本車流曲線最接近的混合車流曲線，其計算結果請參考表 4.4。

在固定當量值部分，將針對列車異質性與列車延滯探討對於列車當量值之影響，了解在不同列車異質性下列車當量值之變化趨勢，且由於兩車種中僅有一種非基本列車（基本列車當量值為 1），可直接探討從列車延滯情況與其當量值之關係。由於固定當量值是將不同流量但相同異質性之車流一起考慮，因此在固定當量值將不需探討流量這個因素。

列車比例與列車當量值之關係探討

將表 4.4 整理成圖 4.4，可以看出煤礦車當量值（ E_c ）皆為 1，當客車比例較高時，其客車當量值（ E_p ）會較低，反之若客車比例較低時，則客車當量值會較高，此計算結果與動態當量值有相同的趨勢。而煤礦車比例大約增加至 50% 左右，客車當量值會開始大於煤礦車（大於 1），表示當以煤礦車為主的車流中，客車會造成主要路段上的衝突，反之亦然。

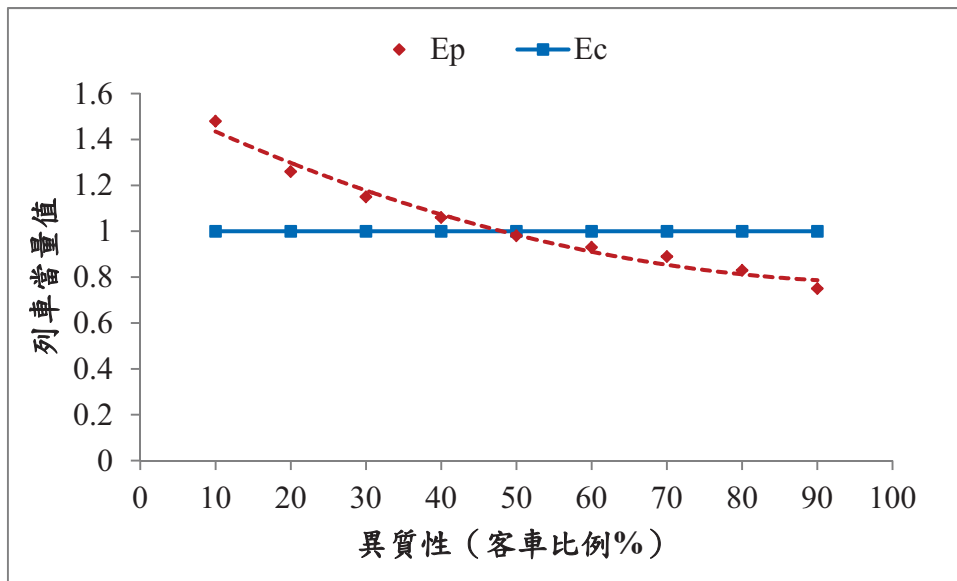


圖 4.4 兩車種之雙車種運行客車固定列車當量值

延滯與列車當量值之關係探討

如同動態當量值所示，圖 4.5 中當混合車流曲線位於基本車流曲線之左方時，其列車當量值會大於 1，表示在相同延滯，其混合車流所通過的列車數低於基本車流，由於煤礦車當量值為 1，因此在該情況下客車當量值應大於 1，客車於車流中所造成之衝突會大於煤礦車；倘若混合曲線位於基本車流曲線之右方時，表示在相同延滯，其混合車流所通過的列車數會高於基本車流，表示客車所造成的衝突已小於煤礦車故在相同延滯可通過混合車流列車數大於基本車流列車數，其客車當量值會小於 1。

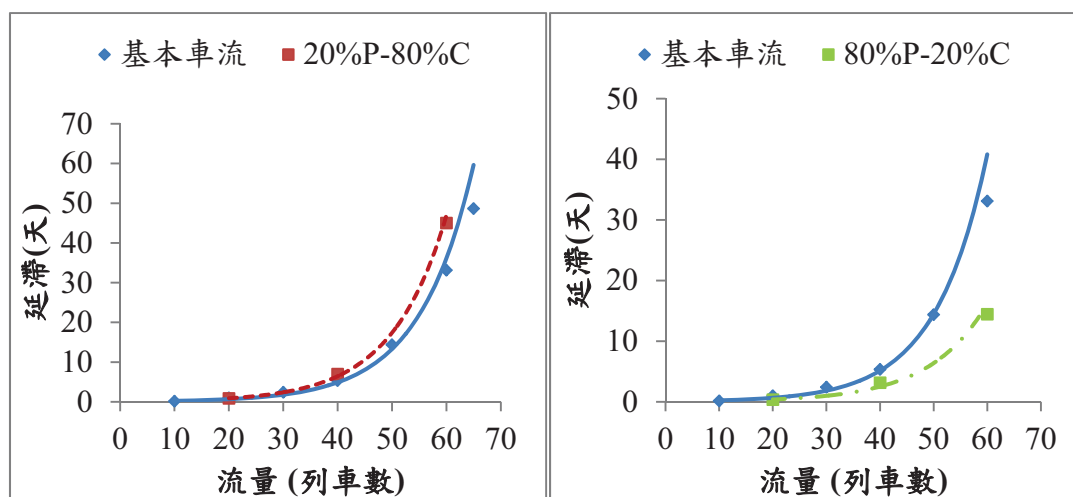


圖 4.5 固定兩車種之雙車種運行車流延滯比較

兩車種之雙車種運行情況—動態與固定當量值比較

從動態當量值與固定當量值中皆可發現，當煤礦車比例越大時客車的當量值會隨之增加，也就等於在車流中客車所佔的比例較少，由於客車的優先性較高，煤礦車必須讓客車先行且煤礦車的性能也較差，除了煤礦車本身所造成的延滯外，在讓客車先行並待避的過程中，由於煤礦車皆需進入側線停等，造成側線擁擠，增加大量列車間的次要延滯，且客車可能也需減速行駛，故在以煤礦車為主的車流中，客車對於路段所造成的衝突較大。反之若客車比例越大時，其客車當量值也會隨之減少，由於在以客車為主的車流中，主要造成車流延滯增加之因素便為煤礦車，車流中少部分的煤礦車除了速度較慢外，在待避過程中除了造成本身的延滯外也會增加整體車流延滯，此時煤礦車對於路段上的衝突就顯而易見。而延滯與流量關係呈指數成長，在低流量時流量增加或減少對於延滯而言並不會有太大的改變，若一旦延滯增加或減少，便會使流量產生明顯變動，因此以延滯為基礎比較流量轉換，在低流量列車當量值變化會來的較大。由於兩車種僅包含一種非基本列車，以本案例為例，動態當量值與固定當量值皆可從延滯情況，判斷客車當量值與煤礦車當量值大小關係，若相同延滯下可通過基本車流列車數多於混合車流列車數，則客車於車流中影響大於煤礦車 ($E_p > E_c$)，反之。

由下表（表 4.4）來看，比較各車流下固定當量值與動態當量值的差異，可以發現在低流量的情況（20 輛列車）固定當量值與動態當量值的差異最大，當量差異可達 1.06，其次是流量為 40 輛列車時，當量差異最多約為 0.16，差異最小為 60 輛列車時，當量差異僅達 0.06，而此結果顯示在低流量情況下，動態當量值與固定當量值變動較大，由於延滯-流量曲線呈指數分布，故在低流量下動態當量值變動較顯著。由於容量分析時，大多著重於中、高流量分析，提高路段使用效益探討車流延滯狀況是否已超過可接受之範圍，在低流量時，流量增加或減少對於延滯而言並沒有太大變動，故仍可參考固定當量值作為轉換依據，其所反映出之延滯情況並不會有太大差異，但若為求精確在低流量，建議使用動態當量值。



表 4.4 兩車種之雙車種運行動態與固定當量值比較

P%-C%	固定 E_P	流量	動態 E_P	E_P 差
10P-90C	1.43	2P-18C	2.49	1.06
		4P-36C	1.48	0.05
		6P-54C	1.37	0.06
20P-80C	1.24	4P-16C	1.56	0.32
		8P-32C	1.26	0.02
		12P-48C	1.23	0.01
30P-70C	1.12	6P-14C	1.16	0.04
		12P-28C	1.22	0.16
		18P-42C	1.09	0.03
40P-60C	1.04	8P-12C	0.98	0.06
		16P-24C	1.15	0.11
		24P-36C	1.04	0
50P-50C	0.97	10P-10C	0.85	0.12
		20P-20C	1.05	0.08
		30P-30C	0.97	0
60P-40C	0.93	12P-8C	0.74	0.19
		24P-16C	0.99	0.06
		36P-24C	0.93	0
70P-30C	0.88	14P-6C	0.65	0.23
		28P-12C	0.96	0.08
		42P-18C	0.88	0
80P-20C	0.84	16P-4C	0.54	0.30
		32P-8C	0.88	0.04
		48P-12C	0.84	0
90P-10C	0.76	18P-2C	0.42	0.34
		36P-4C	0.76	0
		54P-6C	0.78	0.02

4.4 三車種基本列車當量

在三車種基本列車當量計算分析中，以客車、聯運貨車和煤礦車為例，並以聯運貨車為基本列車，將分為動態基本列車當量與固定基本列車當量進行探討。

4.4.1 動態三車種基本列車當量

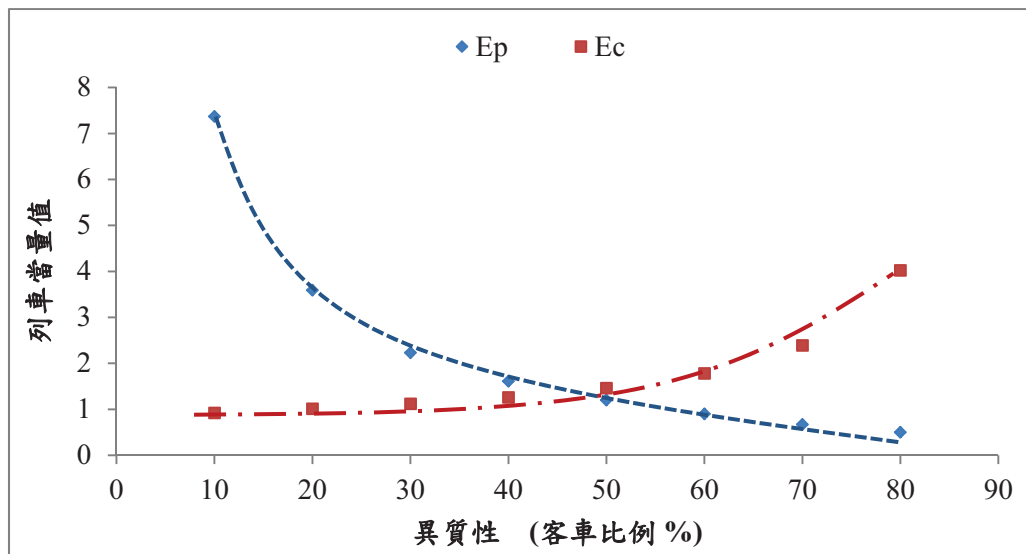
在三車種列車比例組合下，以聯運貨車為基本列車並以列車比例 10% 為間隔單位，會有 36 種列車異質性，且分別在三種流量下進行資料模擬，在不同列車異質性與列車流量下，共有 108 組列車當量值。

在三車種混合車流中，只有兩種非基本列車，換句話說也就是有兩個未知列車當量值，基於相同延滯通過相同 BTU 的概念，會有多組可行解的問題利用前章所述將延滯-BTU 二維空間展開成多維空間，找出基本與混合車流於空間分布狀況，由於其所代表之座標特性皆相同，並利用空間投影的方式，找出其對應位置，計算不同車種組合下，客車與煤礦車的列車當量值，如表 4.5 所示，在不同列車組合中，可以求出客車 (E_p) 與煤礦車 (E_c) 於該車流組合之當量值。

在動態當量值部分，將針對列車異質性、非基本列車當量值與流量探討其列車當量值之變化，了解在不同列車異質性與流量下列車當量值之變化趨勢，且在三車種中，也可以了解非基本列車之變化趨勢。

列車異質性與列車當量值之關係探討

由於以聯運貨車為基本列車，其當量值皆為 1，若以客車與煤礦車所佔之比例來看，車流中當客車比例越高，其當量值便會越低，而煤礦車比例越高，當量值也呈現降低的現象（圖 4.6），呼應了兩車種所呈現之趨勢，當非基本列車於車流中所占比例越高時，其當量值呈反向關係。



* 聯運貨車比例 10% ，流量=20 輛列車

圖 4.6 三車種之動態列車當量-異質性曲線

當客車與煤礦車之列車比例愈懸殊的時候，則當量值差異就越大，如上圖客車比例為 10%時（2P-2P-16C）客車當量值為 7.37 而煤礦車為 0.92，顯示出客車於該車流中造成衝突較大，會造成兩種貨運列車必須不斷待避並讓客車先行，使其延滯增加。

客車當量值與煤礦車當量值之關係探討

從表 4.5 中可以發現，客車當量值較煤礦車當量值差異來的大，假設以 16P-20I-4C 與 4P-20I-16C 為例（圖 4.7），4P-20I-16C 因客車數量較少，故延滯情況較為嚴重，對應基本車流之列車數較 16P-20I-4C 延滯下來的多，其轉換當量值也應較大，且在 4P-20I-16C 車流下，由前述特性所知，因客車比例較低為路段上之衝突車種，故客車當量值應較大；而在 16P-20I-4C 的情況下，整體車流產生的延滯較低，轉換當量值也應較小，在此列車組合中客車比例較高客車為主要車種，故客車當量應較小，所以雖然 16P-20I-4C 與 4P-20I-16C 同為 40 輛

列車，但所產生的延滯並不相同，雖其客車與煤礦車比例相反，列車比例並不會對當量值有相對關係，所以在此客車的當量值變化會來的比煤礦車來的大。

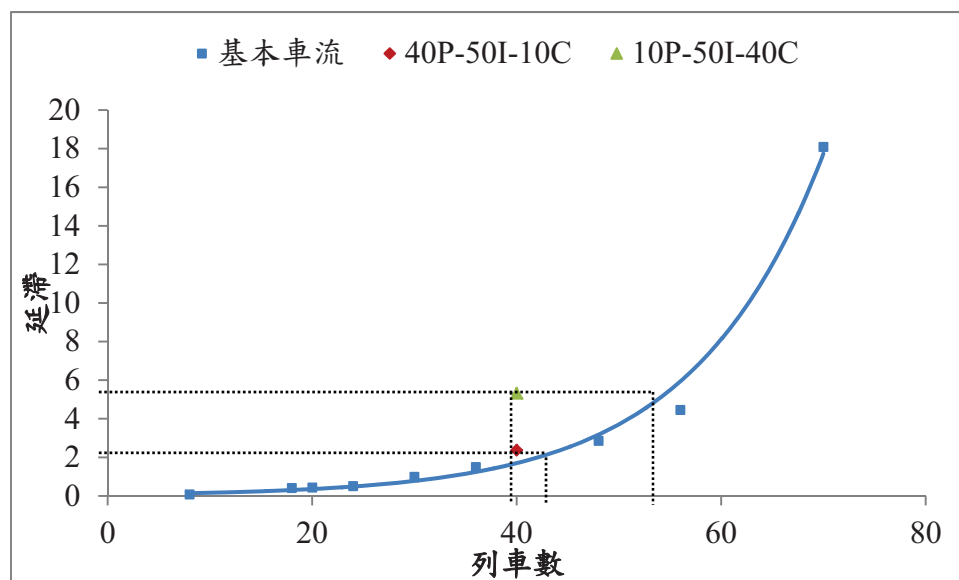


圖 4.7 相同列車數之延滯比較

流量與列車當量值之關係探討

以表 4.5 為例，各車流比例下分別於三種流量下比較客車與煤礦車之當量值計算結果，可以發現在中、高流量時（40、60 輛列車），其當量計算結果相差不算太大，但流量為 20 情況下，客車與煤礦車的當量值與中、高流量當量值差異較明顯，此趨勢如同動態當量值所述，由於延滯-流量曲線呈指數分布，因此在低流量時一旦延滯增加或減少，流量便有明顯的改變，連帶在低流量時，當量值轉換都會有顯著的差距。

從表 4.5 中在客車比例較少的時候，低流量（20 輛列車）客車與煤礦車當量值皆高於中、高流量之當量值，但隨流量比例改變當客車比例增加後，低流量的客車與煤礦車當量值皆低於中、高流量的當量值。在低流量時當量值隨列車異質性不同會產生較大或較小的當量值，當客車比例較低時車流所造成的延滯結果會比較高，故在低流量時當量值轉換也會比較大，但在客車比例較高的時候，由於所造成的延滯結果較低，在此時混合車流所造成的延滯可能低於相同列車數下基

本車流所造成的延滯，因此轉換後當量值可能又較低，故在低流量時，當量值的變動幅度會有較明顯的差異情況產生。

4.4.2 固定三車種基本列車當量

在此將要整合相同列車異質性但不同流量，以列車異質性為主的方式，找出各異質性下的固定當量值以簡化使用上的繁複。在動態當量值中不同組合情況下，會有 108 組列車當量值，在以固定當量值的情況下，將只會有 36 組不同異質性之列車當量值。

固定三車種當量值可藉由相同車流比例之混合車流曲線，基於相同延滯通過相同 BTU 的概念，但由於三車種會有多組解的問題，因此可以迭代出各組可行解找出與基本車流最接近之混合車流曲線，但為了避免迭代次數過多，可先找出可行解之空間分布狀況，再經由空間投影後找出兩車流之對應位置，經由計算過程可以將各列車組合之列車當量值整理成表 4.5。

在固定當量值部分，以下將針對列車異質性與非基本列車當量值探討其當量值之變化；了解在不同列車異質性下列車當量值之變化趨勢，且在三車種中，也可以了解非基本列車之變化趨勢。由於固定當量值將不同流量但相同列車異質性一起計算，因此將不會探討流量因素。

列車異質性與列車當量值之關係探討

在固定三車種當量值，聯運貨車為基本列車其當量值為 1，若以客車與煤礦車所佔之比例來看，車流中當客車比例越高，其當量值便會越低，而煤礦車比例越高，當量值也呈現降低的現象，以固定當量值的方式來呈現也可以得到與動態當量值相同之趨勢（圖 4.8），當非基本列車於車流中所占比例越高時，其當量值呈反向關係。

客車當量值與煤礦車當量值之關係探討

在圖 4.8 中，除了列車異質性與當量值之關係外，也可看出在固定當量值的部分也如同動態當量值一般，客車之列車當量值變化之幅度大於煤礦車列車當量值，其原因如同前述，當客車於車流中比例越低時，其整體車流延滯狀況越大，轉換之 BTU 也相對的較大，此時由於客車比例較低，為主要車流造成車流衝突之列車，在此情況下，客車當量值就會有較高的結果，反之亦然，因此客車當量值的變動會比煤礦車來的明顯。

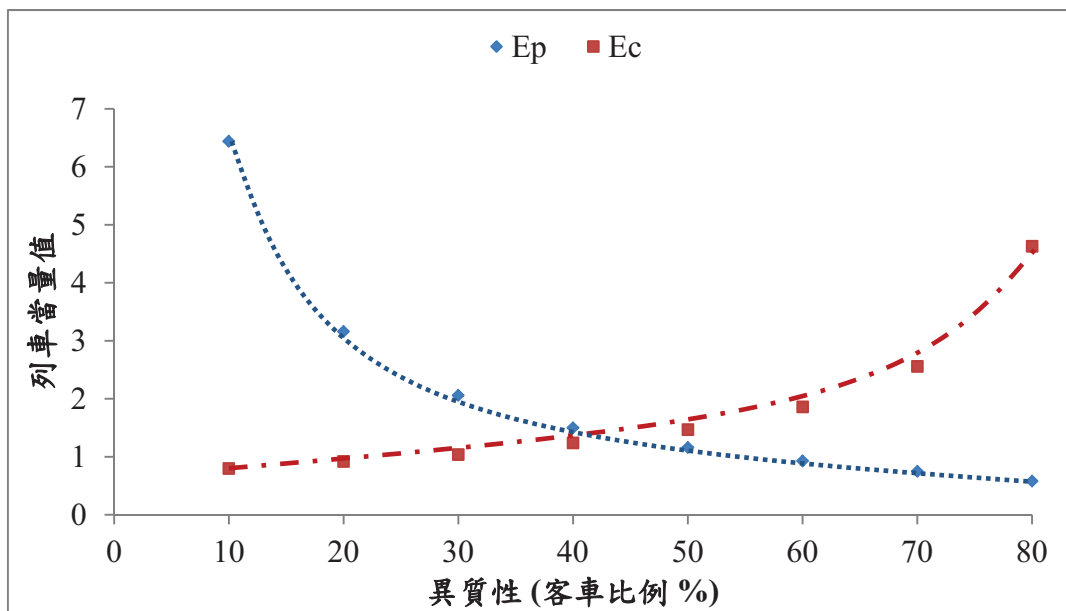


圖 4.8 三車種固定當量值

三車種—動態與固定當量值比較

綜合上述關係比較，非基本列車之當量值會隨其在車流比例增加而減少，如同兩車種當量值與列車比例呈反向關係，可解釋為其車種比例較少，於車流中為造成衝突之車種，故其當量值較大，反之。而由於不同車流異質性會造成不同的延滯情況，以上述關係來看，客車之當量值變動會較煤礦車來的大。在流量方面，延滯-流量關係呈指數成長，在低流量時流量增加或減少對於延滯而言差異不大，

若一旦延滯改變，便會使流量產生明顯變動，因此以延滯為基礎比較流量時，在低流量列車當量值變化會來的較大。

由表 4.5 來看，比較各車流比例下固定當量值與動態當量值的差異，可以發現由於客車當量值變動較大，故固定與動態當量值差異也較煤礦車來的大，在低流量的情況下（20 輛列車），客車當量差異達 1.09 而煤礦車當量值為 0.70，流量為 40 輛列車時，客車當量差異最多約為 0.3 而煤礦車為 0.15，60 輛列車時，客車當量差異約 0.33 而煤礦車為 0.21，而此結果顯示在低流量情況時，固定當量值與動態當量值差異會較高流量時大。以本研究為例，固定當量值所反映出之列車當量值較接近中、高流量車流之動態當量值，若在低流量時使用固定當量值作為流量轉換依據，可能會有較多流量誤差產生，但如同先前所述，在低流量時，流量增加或減少對於延滯而言並沒有太大變動，故仍可參考固定當量值作為轉換依據，其所反映出之延滯情況並不會有太大差異，但若為求精確在低流量時建議使用動態當量值。

而在三車種中客車當量值最大達 7.37（2P-2P-16C），煤礦車當量值最大達 4.78（48P-6I-6C），相對於兩車種而言，由當量值可以反映出三車種所造成的衝突較大，故若車種數越多，對車流影響程度就越大。

表 4.5 三車種動態與固定當量值比較

I%	P%-I%-C%	固定 E_p	固定 E_c	流量	動態 E_p	動態 E_c	E_p 差	E_c 差
I=10%	10P-10I-80C	6.28	0.78	20	7.37	0.92	1.090	0.135
				40	6.43	0.8	0.150	0.015
				60	6.12	0.76	0.160	0.025
	20P-10I-70C	3.13	0.89	20	3.59	1.01	0.458	0.115
				40	3.23	0.92	0.098	0.028
				60	3.07	0.86	0.062	0.035
	30P-10I-60C	2.04	1.02	20	2.23	1.12	0.190	0.100
				40	2.13	1.07	0.090	0.050
				60	1.97	0.99	0.070	0.030
	40P-10I-50C	1.51	1.21	20	1.61	1.26	0.103	0.054
				40	1.59	1.27	0.078	0.063
				60	1.45	1.18	0.057	0.026
	50P-10I-40C	1.16	1.45	20	1.2	1.46	0.040	0.010
				40	1.21	1.52	0.050	0.070
				60	1.13	1.42	0.030	0.030
	60P-10I-30C	0.93	1.86	20	0.9	1.78	0.028	0.077
				40	0.98	1.97	0.052	0.113
				60	0.91	1.81	0.018	0.047
	70P-10I-20C	0.74	2.61	20	0.68	2.37	0.069	0.240
				40	0.78	2.73	0.035	0.121
				60	0.74	2.57	0.005	0.037
	80P-10I-10C	0.59	4.71	20	0.5	4.01	0.089	0.705
				40	0.59	4.71	0.001	0.005
				60	0.6	4.78	0.011	0.065
I=20%	10P-20I-70C	5.9	0.84	20	6.61	0.95	0.120	0.131
				40	5.97	0.85	0.012	0.012
				60	5.59	0.8	0.053	0.048
	20P-20I-60C	2.92	0.97	20	3.3	1.1	0.130	0.134
				40	3.02	1	0.034	0.031
				60	2.72	0.91	0.068	0.062
	30P-20I-50C	1.88	1.13	20	1.98	1.21	0.053	0.071
				40	1.95	1.17	0.037	0.035
				60	1.78	1.09	0.053	0.035

I%	P%-I%-C%	固定 E_p	固定 E_c	流量	動態 E_p	動態 E_c	E_p 差	E_c 差
I=20%	40P-20I-40C	1.37	1.37	20	1.47	1.47	0.073	0.073
				40	1.44	1.44	0.051	0.051
				60	1.285	1.285	0.062	0.062
	50P-20I-30C	1.04	1.72	20	1.01	1.67	0.029	0.029
				40	1.11	1.83	0.067	0.064
				60	1	1.67	0.038	0.029
	60P-20I-20C	0.8	2.44	20	0.82	2.5	0.025	0.025
				40	0.84	2.5	0.050	0.025
				60	0.78	2.34	0.025	0.041
	70P-20I-10C	0.61	4.23	20	0.54	3.8	0.115	0.102
				40	0.61	4.22	0	0.002
				60	0.63	4.41	0.033	0.043
I=30%	10P-30I-60C	5.28	0.89	20	5.96	1	0.129	0.124
				40	5.42	0.9	0.027	0.011
				60	4.99	0.84	0.055	0.056
	20P-30I-50C	2.59	1.04	20	2.85	1.14	0.100	0.096
				40	2.68	1.08	0.035	0.038
				60	2.47	0.97	0.046	0.067
	30P-30I-40C	1.67	1.24	20	1.78	1.34	0.066	0.081
				40	1.74	1.29	0.042	0.040
				60	1.42	1.3	0.150	0.048
	40P-30I-30C	1.19	1.57	20	1.19	1.6	0	0.019
				40	1.25	1.69	0.050	0.076
				60	1.12	1.52	0.059	0.032
	50P-30I-20C	0.88	2.22	20	0.86	2.14	0.023	0.036
				40	0.93	2.36	0.057	0.063
				60	0.86	2.14	0.023	0.036
	60P-30I-10C	0.65	3.91	20	0.6	3.61	0.077	0.077
				40	0.65	3.91	0	0
				60	0.67	3.99	0.031	0.020
I=40%	10P-40I-50C	4.73	0.94	20	5.21	1.04	0.101	0.106
				40	4.83	0.97	0.021	0.032
				60	4.49	0.89	0.051	0.053
	20P-40I-40C	2.3	1.15	20	2.76	1.38	0.200	0.200
				40	2.37	1.19	0.030	0.035
				60	2.1	1.05	0.087	0.087

I%	P%-I%-C%	固定 E_p	固定 E_c	流量	動態 E_p	動態 E_c	E_p 差	E_c 差
I=40%	30P-40I-30C	1.415	1.415	20	1.48	1.48	0.046	0.046
				40	1.53	1.53	0.081	0.081
				60	1.31	1.31	0.074	0.074
	40P-40I-20C	0.98	1.97	20	1.07	2.13	0.092	0.081
				40	1.05	2.09	0.071	0.061
				60	0.91	1.83	0.071	0.071
	50P-40I-10C	0.7	3.49	20	0.67	3.33	0.043	0.046
				40	0.71	3.57	0.014	0.023
				60	0.7	3.51	0	0.006
I=50%	10P-50I-40C	4.02	1.005	20	5.04	0.98	0.254	0.025
				40	4.32	1.07	0.075	0.065
				60	3.69	0.92	0.082	0.085
	20P-50I-30C	1.9	1.27	20	2.16	1.43	0.137	0.126
				40	2.05	1.37	0.079	0.079
				60	1.73	1.14	0.089	0.102
	30P-50I-20C	1.21	1.81	20	1.31	1.96	0.083	0.083
				40	1.3	1.93	0.074	0.066
				60	1.12	1.67	0.074	0.077
	40P-50I-10C	0.77	3.08	20	0.75	2.98	0.026	0.032
				40	0.76	3	0.013	0.026
				60	0.79	3.13	0.026	0.016
I=60%	10P-60I-30C	3.38	1.13	20	3.73	1.24	0.104	0.097
				40	3.65	1.21	0.080	0.071
				60	3.11	1.03	0.080	0.088
	20P-60I-20C	1.56	1.56	20	1.815	1.815	0.163	0.163
				40	1.665	1.665	0.067	0.067
				60	1.4	1.4	0.103	0.103
	30P-60I-10C	0.87	2.64	20	0.9	2.72	0.034	0.030
				40	0.88	2.62	0.011	0.008
				60	0.86	2.61	0.011	0.011
I=70%	10P-70I-20C	2.65	1.32	20	2.93	1.47	0.106	0.114
				40	2.92	1.47	0.102	0.114
				60	2.35	1.18	0.113	0.106
	20P-70I-10C	1.07	2.14	20	1.23	2.46	0.150	0.150
				40	1.08	2.18	0.009	0.019
				60	1.01	2.01	0.056	0.061

I%	P%-I%-C%	固定 E_p	固定 E_c	流量	動態 E_p	動態 E_c	E_p 差	E_c 差
I=80%	10P-80I-10C	1.72	1.72	20	2.19	2.19	0.273	0.273
				40	1.805	1.805	0.049	0.049
				60	1.505	1.505	0.125	0.125

4.5 流量基準與延滯基準方法之列車當量值比較

過去延滯相關之列車當量計算模式中，劉允宣（民 100）是參考 Benekahal 與 Zhao(1999)小客車當量作法，以流量基準於相同流量下比較基本與混合車流延滯差異用以計算列車當量值（請參考圖 2.3），而本研究是以延滯基準概念於相同延滯情況下，比較基本與混合車流進行列車當量值轉換（請參考圖 3.1），因此如同第三章所提及，於兩種不同比較基準下其當量值所代表之意義不同，此節中欲探討使用者應用當量值進行流量計算時，運用此兩種不同作法，所得客車列車當量值（ E_p ）與基本列車單位（BTU）是否不同。

表 4.6 使用兩種不同基礎進行計算比較與驗證，可看出兩種方式所得到的列車當量值差異甚大，其 BTU 也相差甚遠，以下進行驗證，由於流量基準是以基本與混合車流於相同流量為主，因此可比較轉換後之延滯是否相同，而延滯基準則可驗證轉換後之流量是否相同。由表 4.6 看來，若以流量為基準（以下稱為模式一）所計算出之當量值，將轉換後之 BTU 帶入基本車流曲線中，其基本車流延滯並不等同混合車流延滯；而若以延滯基準（以下稱為模式二）所得之當量值看來，藉由當量值轉換後之混合車流 BTU 則可對應至相同延滯之基本車流 BTU。

表 4.6 列車當量值計算與驗證 (a) 模式一（劉允宣，民 100）、(b) 模式二（本研究模式）

(a)

混合車流 延滯(天)	混合流量	E_p	BTU	基本車流 延滯(天)
0.91	2P-18C	4.25	26.51	1.27
5.46	4P-36C	2.97	47.89	9.62
37.38	6P-54C	3.34	74.04	114.45

(b)

混合車流 延滯(天)	混合流量	E_p	BTU	基本車流 BTU
0.91	2P-18C	2.49	22.98	22.97
5.46	4P-36C	1.48	41.92	41.90
37.38	6P-54C	1.37	62.22	62.22

以流量基準（模式一）作法計算列車當量值，其做法主要是以特定情況下，藉由車流延滯差異反應出基本列車與非基本列車於該情況下之比較，其當量值表示於針對特定情況下，非基本列車與基本列車之延滯比值，此作法可藉由當量值與列車數推導回混合車流延滯，但若將計算後之 BTU 帶回基本車流曲線中，可能產生混合車流之延滯並不等於相同基本列車所造成延滯。流量基準（模式一）較類似利用當量值進行延滯轉換，其當量值代表該特定車流組成之車種之延滯比值；而以延滯基準（模式二）作法則利用當量值進行流量轉換，其當量意義為基本列車與非基本列車之流量比值，模式一主要用於描述特定車流組成下車種之延滯比，以看出車種的延滯差異，但未考慮到在不同組成下所比較的基本列車平均延滯並不相同（請參考式 2.7），而其於不同組成下所轉換後 BTU 並無法直接比較也無法反應相同基本列車流量所造成延滯，故以本研究延滯基準模式（模式二）進行流量轉換，將不同車流的延滯情況皆對應至基本車流曲線，其不同車流組成藉由當量轉換成 BTU 可進行比較且等於相同基本列車數所造成之實際延滯。

4.6 平均、最小平方誤差與最小絕對誤差方法之列車當量值比較

如同 4.1 節所提及，由於北美軌道模擬計算中，多採用將不同亂數種子資料平均方式做為該情況下之延滯情況並進行容量分析（Dingler，2010），故本研究中也使用 30 筆隨機亂數之延滯平均值進行列車當量值計算（以下稱方法一），然而統計方法中也有不同方式可進行資料分析，此節將使用最小平方誤差（以下稱方法二）與最小絕對誤差方式（以下稱方法三），比較於不同統計方式當量值之差異。

最小平方誤差（方法二）是將 30 筆亂數延滯資料皆進行當量計算，並找出當量值為何時，30 筆資料之基本與混合車流 BTU 平方誤差加總最小，利用最小平方誤差方式找出列車當量值（式 4.1）。而最小絕對誤差計算方式（方法三）也與平方誤差雷同，但是採用基本與混合車流 BTU 之加總誤差絕對值（式 4.2），進而找出列車當量值。

最小平方誤差法（方法二）：

$$\min. \sum_{x=1}^X (BTU_{mx} - BTU_{bx})^2 \quad (4.1)$$

最小絕對誤差法（方法三）：

$$\min. \sum_{x=1}^X (|BTU_{mx} - BTU_{bx}|) \quad (4.2)$$

式中：

x = 第 x 筆亂數延滯

X = 共 X 筆亂數延滯（本研究使用 30 筆亂數資料）

BTU_{bx} = 第 x 個亂數延滯之對應基本車流 BTU

BTU_{mx} = 第 x 個亂數延滯之對應混合車流 BTU

利用式 4.1 與 4.2 可計算出混合車流中列車當量值為何情況下，各筆亂數資料之 BTU 平方誤差或絕對誤差加總最小，而利用上述兩種方式除了考慮各筆資料情況外，使用平方或絕對值的作法，也可避免平均時加、減相互抵消。由下表 4.7 例子中，可看出使用平方誤差（方法二）或是絕對誤差（方法三）之作法所得到的當量值相同，並與本研究使用平均方式（方法一）相比，可發現動態當量值差異最大僅至 0.03，固定當量值最多僅差 0.01，是由於模擬過程中，相同情況之 30 筆隨機亂數所產生的延滯情況相當，延滯結果集中且離散程度低，不會有極高或極低的延滯情況發生。而本研究延續過去軌道模擬資料統計方式，利用亂數延滯資料平均方法（Dingler, 2010），並使用 30 個模擬樣本數，由於當樣本數大於或等於 30 時，樣本平均數機率分配會近似於常態分配為對稱曲線分布，符合中央極限定理，因此本研究於 30 個樣本情況下取其延滯平均值作為該車流組成之延滯，利用平均延滯進行當量計算。



表 4.7 平均（方法一）、最小平方誤差（方法二）與最小絕對誤差（方法三）方法之列車當量值比較

P%-I%-C%	方法一 固定 E_p	方法一 固定 E_c	方法二 方法三 固定 E_p	方法二 方法三 固定 E_c	流量	方法一 動態 E_p	方法一 動態 E_c	方法二 方法三 動態 E_p	方法二 方法三 動態 E_c
10P-10I-80C	6.28	0.78	6.28	0.78	20	7.37	0.92	7.39	0.92
					40	6.43	0.8	6.44	0.80
					60	6.12	0.76	6.12	0.76
20P-10I-70C	3.13	0.89	3.13	0.89	20	3.59	1.01	3.56	1.02
					40	3.23	0.92	3.23	0.92
					60	3.07	0.86	3.04	0.87
30P-10I-60C	2.04	1.02	2.04	1.02	20	2.23	1.12	2.23	1.12
					40	2.13	1.07	2.13	1.07
					60	1.97	0.99	1.97	0.99
40P-10I-50C	1.51	1.21	1.50	1.20	20	1.61	1.26	1.59	1.27
					40	1.59	1.27	1.58	1.27
					60	1.45	1.18	1.46	1.17
50P-10I-40C	1.16	1.45	1.16	1.45	20	1.20	1.46	1.18	1.48
					40	1.21	1.52	1.21	1.51
					60	1.13	1.42	1.13	1.41
60P-10I-30C	0.93	1.86	0.93	1.86	20	0.90	1.78	0.89	1.79
					40	0.98	1.97	0.98	1.96
					60	0.91	1.81	0.91	1.82
70P-10I-20C	0.74	2.61	0.74	2.61	20	0.68	2.37	0.67	2.35
					40	0.78	2.73	0.78	2.73
					60	0.74	2.57	0.74	2.58
80P-10I-10C	0.59	4.71	0.59	4.71	20	0.50	4.01	0.50	3.98
					40	0.59	4.71	0.59	4.73
					60	0.60	4.78	0.60	4.79

*三車種之聯運貨車為 10%流量

4.7 基本列車當量之應用

在此節中將應用所計算出的基本列車當量，應用於比較每天指派不同車流情況下，以三車種為例並使用固定當量值來轉換，在路段上容量多以每日可接受的平均列車延滯，可運行的最大列車數表示(Welch 和 Gussow, 1986; Kruger, 1999)，

本研究假設營運單位在各路段中可接受之平均延滯時間皆為 1 小時/100 哩/列車，以聯運貨車為基本列車，若在平均 1 小時/100 哩/列車之延滯情況下，可通過的最多聯運貨車列車數約為 55 輛列車，故此路段上之容量可視為 55 BTU。

以表 4.8 為例， n_p 為客車列車數， n_l 為聯運貨車列車數， n_c 為 Coal 列車數， E_p 為客車當量值， E_l 為聯運貨車當量值， E_c 為 Coal 當量值， N 為總列車數， C 為路段容量，使用率為 BTU/C。

表 4.8 每日使用率

日期	n_p	n_l	n_c	E_p	E_l	E_c	N	BTU	C	使用率
3/1	4	32	4	1.72	1	1.72	40	45.76	55	0.832
3/2	20	8	12	1.04	1	1.72	40	49.44	55	0.899
3/3	20	16	4	0.7	1	3.49	40	43.96	55	0.799
3/4	12	12	16	1.67	1	1.24	40	51.88	55	0.943
3/5	8	8	24	2.92	1	0.97	40	54.64	55	0.993

若每日路段上皆有 40 輛列車運行，經列車當量值轉換後則 BTU 便有明顯差異，雖列車數皆相同，但藉由當量值轉換後可看出各混合車流對路段上的實際影響，在 3/5 時 BTU 最大，表示該天營運車流所造成的影響相當於 54.64 輛聯運貨車所造成的延滯，使用率高達 99.3%；而 3/3 時 BTU 最小，僅等於 43.96 輛聯運貨車所產生的延滯，若以使用率來看，當使用率越高表示流量已越接近容量，若使用率大於 1，表示所指派的列車流量所產生的延滯狀況將會大於可接受的門檻值，此時需考慮降低流量或是放寬門檻值，營運單位可利用列車當量值轉換看出每日營運狀況，並作適合的調整安排。

而通常一個地區內並不會只有一個軌道路段，以下再加入兩個不同路段 2、3（表 4.9）來表示在不同條件下當量轉換之不同影響，路段中長度、側線區間、號

誌區間等條件皆不相同，因此其容量也不相同，轉換後之 BTU 與容量可了解不同路段之使用率情況。

表 4.9 不同路段比較

路段	n_p	n_l	n_c	E_p	E_l	E_c	N	BTU	C	使用率
1	12	12	16	1.67	1	1.24	40	51.88	55	0.943
2	32	4	4	0.48	1	3.87	40	35.07	66	0.531
3	4	16	20	4.41	1	0.88	40	51.23	51	1.005

* 路段 2：長度 161.75 miles、側線區間 5.5 miles、號誌區間 2.75 miles

路段 3：長度 109.75 miles、側線區間 16.5 miles、號誌區間 1.375 miles

從表 4.9 可以發現在不同路段上，其容量並不相同，也由於其路段特性皆不同故藉由當量值轉換後，可以了解在一定延滯時間門檻下，各路段容量狀況，而當量轉換皆由各路段流量延滯對應其基本車流所得之，故在不同路段其當量轉換也不一定相同，藉由轉換後之流量與容量可計算各路段容量使用率，將其皆轉換為相同單位，可以比較出各路段之使用情形，上表中顯示路段 3 的容量較小，因此路段上使用率也容易就達到飽和甚至超過 1，表示超過了營運人員可接受的延滯範圍，營運人員可藉由了解各路段運行之延滯情況，並進行列車調度安排。

4.8 小結

在不同車流情況中，車流組成可能為兩車種（單車種運行與雙車種運行情況）或多車種組成，在兩車種之單車種運行部分較單純僅有一組異質性，因此比較不同流量，可發現在低流量下當量值差異會較大，且在兩車種之雙車種運行與三車種部份也有相同情況。而兩車種之雙車種運行情況下與三車種之動態當量值與固定當量值所呈現趨勢相同，若以固定當量值來表示該車流異質性下，由於在低流量，列車數量增減與延滯情況較不明顯，需增加大量列車才會使延滯微幅成長，

在以延滯基準轉換當量的情況下，當量變動較大，故在以固定當量值來表示低流量狀況時，誤差會較大，但在低流量時由於列車數彼此延滯情況不顯著，流量轉換後所對應之延滯情況較不顯著，可使用固定當量值來計算，但若要求精確，低流量時建議可使用動態當量值來表示。而從計算結果可以發現，當車種數越多，所造成延滯越多，其列車當量值也會越大，可反映出多車種在路段上所造成之衝突程度較高。

在兩車種之雙車種運行的部分，當客車比例越高時，當量值越小，若客車比例越低，當量值則會越高，非基本列車與列車比例呈反向關係，而由於路段上只有兩車種，可由延滯-流量圖中看出若混合車流座標位於基本車流座標左方時，其當量值大於 1，右方則小於 1。三車種時，聯運貨車當量值為 1，非基本列車如客車與煤礦車在比例與當量值關係中會成反向關係，且由於列車比例與延滯情況不同，客車當量值變化比煤礦車來的明顯。

經由比較先前以相同流量之當量計算與本研究以相同延滯之當量計算，由於以不同概念做法因此所得之當量值有許多差異，以相同流量的方式，其當量值較類似用於延滯轉換，以相同延滯計算當量值，藉由當量值轉換對應至相同基本車流 BTU，且於此作法較類似流量轉換概念。而比較不同統計方式，由於過去模擬多使用亂數資料平均方式進行容量分析工作，因此本研究也延續相同作法，而採用模擬樣本數為 30，因為當樣本大於等於 30，則樣本平均數機率分配將近似於常態分配，故取其延滯平均做為當量計算之依據。在當量應用部分，藉由本研究所提出方式可以計算出不同路段之列車當量值，因此可將各路段之流量與容量轉換為相同單位，以看出不同路段之使用率，進而了解各路段之列車實際運行狀況。

第五章、 結論與建議

由於目前在軌道系統中，在計算軌道容量大多是以單位時間內可運行的最大列車數為此路段上之列車容量，但此容量可能代表不同的車種組合，並未能反映出實際所造成之影響。而有藉於此，將軌道列車標準化為同一車種列車，用於了解不同時段或路段上的列車運行狀況。本研究因應服務型態變化與不同類別之多種列車，探討多車種列車當量轉換模式，用以轉換多種列車於相同單位下進行路段流量與容量分析工作。

5.1 結論

1. 本研究以延滯基準作為轉換基本與混合車流之依據，而其較符合軌道容量模式之定義，以可接受之延滯探討通過路段之列車數，並於相同延滯通過路段之BTU應相同之概念，在此基準下對應基本車流以轉換列車當量值。
2. 透過本研究所提出之動態與固定列車當量模式，使用者可依其營運狀況定義基本列車，藉由列車當量值轉換後了解路段實際流量，而路段容量則為可接受延滯之最大基本列車數，在流量與容量皆為一致單位下進行相關分析工作。
3. 而動態列車當量值較可反映出實際列車轉換情況，但不如固定當量值來的使用便利，而使用者可依其路段狀況選擇適合之當量轉換模式，用於進行轉換路段車種為相同基本列車單位。
4. 兩車種之雙車種運行時，在動態與固定當量值中皆可發現，非基本列車當量會依其比例越高而當量值越小，呈反向關係；而三車種時，動態與固定當量值也有相同趨勢，非基本列車其比例與當量值呈反向關係；表示車種比例於車流中越低時，便為造成車流衝突之主要車種，其當量值越高。
5. 比較兩車種與三車種之固定與動態當量值差異，可以發現於低流量動態當量值與固定當量值差異會較明顯，是由於固定當量值考慮該異質性整體基本與混合

車流之差異最小，而延滯-流量曲線呈指數分布，故動態當量值於低流量時本應變動較大，因此固定當量值與低流量之動態當量值差異會較顯著。

6. 當車種數越多，所造成延滯越多，其轉換後之列車當量值也會越大，在本案例分析中三車種之列車當量值變化程度會比兩車種來的大，可反映出車種數越多在路段上所造成之延滯程度較高。

5.2 建議

1. 在本研究中以假設相同路段不同車流狀況做討論，未來可調整其他不同路段情況作為列車當量值之比較分析，並進而探討路段因子與列車當量值之影響關係。
2. 本研究以延滯作為基準計算流量轉換，嘗試在多維空間中找出基本與混合車流之對應位置，探討其座標特性，並先以數學概念利用投影方式計算列車當量值，但多車種列車當量計算方式可從不同層面探討，未來可發展不同計算方式以進行比較工作。
3. 本研究利用模擬方式，模擬不同車流情況，雖模擬過程較為仿真卻也較費時，後續研究可建立列車當量參數式，結合各種容量影響因子，用以取代模擬分析，並降低列車當量計算時間。
4. 由於不同營運單位可能包含有不同路段與車流組合，因此為了往後分析便利，可建立各路段之列車當量轉換表，利於未來營運單位進行相關流量轉換分析工作。
5. 而當量值應用除了轉換為一致單位探討流量與容量狀況，也可作為軌道運輸改善之評估與服務水準之依據，可使營運單位藉由列車當量值轉換來估計不同路段之車流影響程度，找出使用率過大或瓶頸之路段。

參考文獻

1. 林豐博、曾平毅、歐陽餘慶、林國顯、蘇振維、張瓊文、黃新薰、湯儒彥（民 90），「2001 年台灣地區公路容量手冊」，交通部運輸研究所。
2. 凌瑞賢（民 95），「運輸規劃原理與實務」，鼎漢國際工程顧問股份有限公司。
3. 黃詠安（民 100），「研發列車於單雙線鐵路之運行時間預測模式」，臺灣大學工學院土木學系交通工程組碩士論文。
4. 劉允宣（民 100），「研發基本列車當量分析模式」，臺灣大學工學院土木學系交通工程組碩士論文。
5. 鍾志成、李治綱、盧麗嵩、張仕龍、張恩輔、林國顯、蘇振維、劉昭榮（民 94），「軌道容量研究—臺鐵系統容量模式之建構分析（一）」，交通部運輸研究所財團法人中興工程顧問社。
6. 鍾志成、李治綱、賴勇成、黃笙玗、盧麗嵩、張仕龍、張恩輔、孫千山、林蓁、林志偉、林杜寰、李永強、林國顯、劉昭榮（民 99）「運輸系統容量分析暨應用研究—軌道系統(4/4)」，交通部運輸研究所。
7. Abril, M., Barber F., Ingolotti L., Salido M.A., Tormos P., and Lova A. (2007), An Assessment of Railway Capacity, *Transportation Research Part E*, doi:10.1016/j.tre.2007.04.001
8. Benekohal, R. F., Zhao, W. (1999), Delay-based Passenger Car Equivalents for Trucks at Signalized Intersections, *Transportation Research*, part A 34, pp.437—457.
9. Chitturi, M. V., and Benekohal, R. F. (2008), Effect of Work Zone Length and Speed Difference Between Vehicle Types on Delay-Based Passenger Car

Equivalents in Work Zones, *87th Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington, DC.

10. Craus, J., Polus, A., and Grinberg, I. (1980), A Revised Method For The Determination of Passenger Car Equivalents, *Transportation Research*, Vol. 14A, pp. 241-246.
11. Cunagin, W., and Messer, C. (1983), Passenger Car Equivalents for Rural Highways, *Transportation Research Record 905*, TRB, National Research Council, Washington, DC., pp. 61-68.
12. Dingler, M. (2011), The Impact of Strategies and New Technologies on Railroad Capacity, Master Dissertation, University of Illinois, Urbana, IL.
13. Gorman, M. H. (2009), Statistical Estimation of Railroad Congestion Delay, *Transportation Research Part E 45*, pp. 446-456
14. *Highway Capacity Manual 1965*, TRB, National Research Council, Washington, DC., 1965.
15. *Highway Capacity Manual 1985*, TRB, National Research Council, Washington, DC., 1985.
16. *Highway Capacity Manual 2000*, TRB, National Research Council, Washington, DC., 2000.
17. Huber, M. (1982), Estimation of Passenger Car Equivalents of Trucks in Traffic Stream, *Transportation Research Record 869*, TRB, National Research Council, Washington, DC., pp. 60-70.

18. Jong, J. C., Chang, E. F. and Huang, S. H. (2009), A Railway Capacity for Estimating Hourly Throughputs with Mixed Traffic and Complex Track Layouts, *Proc. to 3th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis Engineering and Optimization Approaches*, Zurich, Switzerland.
19. Kittleson and Associates, INC., *Transit Capacity and Quality of Service Manual (TCQSM) 2nd Edition*, TRB, National Research Council, Washington, DC.
20. Kozan, E., Burdett, R. L. (2006), Techniques for absolute capacity determination in railways, *Transportation Research Part B* 40, pp. 616–632.
21. Krammes, R., and Crowley, K. (1986) , Passenger Car Equivalent for Trucks on Level Freeway Segments, *Transportation Research Record 1091*, TRB, National Research Council, Washington, DC., , pp. 10-17.
22. Krueger, H. (1999), Parametric Modeling in Rail Capacity Planning, *Proceedings of Winter Simulation Conference*, Phoenix, AZ.
23. Krueger, H., Vaillancourt, E., Drummie, A. M., Vucko, S. J., and Bekavac, J. (2000), Simulation Within The Railroad Environment, *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, Phoenix, AZ.
24. Lai, Y. C. (2008), Increasing Railway Efficiency and Capacity Through Improved Operations, Control and Planning, PhD Dissertation, University of Illinois, Urbana, IL.
25. Lai, Y. C., Barkan, C. P. L. (2009), An Enhanced Parametric Railway Capacity Evaluation Tool (RCET), *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2117, pp. 33-40.

26. Leilich, R. (1998), Application of Simulation Models in Capacity Constrained Rail Corridors, *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, ed. J. S. Carson, M. S. Manivannan, D. J. Medeiros, E. F. Watson.
27. Linzer, E., Roess, R., and McShane, W. (1979), Effect of Trucks, Buses, and Recreational Vehicles on Freeway Capacity and Service Volume, *Transportation Research Record 699*, TRB, National Research Council, Washington, DC., pp. 17-24.
28. Liotta, G. C. G., Rondinone, P. C. F., and Luca, P. D. (2009), A Simulation—Based Approach For Estimating The Commercial Capacity of Railways, *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*, pp. 2542 - 2552.
29. Martin, P. (1999), Train Performance and Simulation, *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*, pp. 1287-1294.
30. Murali, P., Dessouky, M. M., Ordonex, F., Palmer, K. (2009), A Delay Estimation Technique for Single and Double—track Railroads, *Transportation Research Part E 46*, pp. 483-495.
31. Nash, A. and Huerlimann, D. (2004), Railroad Simulation Using Open Track, *Computers in Railways IX*, Transactions of the Wessex Institute.
32. Pachl, J. (2002), *Railway Operation and Control, 2002*, VTD Rail Publishing, Mountlake Terrace, WA.
33. Rahman, Md. M., Okura, I., and Nakamura, F. (2003), Measuring Passenger Car Equivalencies (PCE) For Large Vehicles at Signalized Intersections, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.5, pp. 1223-1233.

34. Rodriguez — Seda, J., Benekohal, R. F., (2006), Methodology for Delay — Based Passenger Car Equivalencies for Urban Transit Buses, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1988, pp 127-137.
35. Seguin, E. et al. (1982), *Passenger Car Equivalents on Urban Freeways*, Report DTFH61-80-C-00106, FHWA, U.S. Department of Transportation.
36. Sherriff, M., Boehm, B., Williams, L., Nagappan, N. (2005), *An Empirical Process for Building and Validating Software Engineering Parametric Models*, North Carolina State Univeristy CSC-TR-2005-45.
37. Sogin, S., Barkan, C. P. L., and Saat, M. R. (2011), Simulation The Effects of Higher Speed Passenger Trains in Single Track Freight Networks, *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*, pp. 3684-3692.
38. Tiwari , G., Fazio , J., and Pavitravas , S.(2000), Passenger Car Units for Heterogeneous Traffic Using a Modified Density Method, *Transportation Research Circular E-C018: 4th International Symposium on Highway Capacity*, pp. 246-257
39. Van Aerde, M., and Yagar, S. (1984), Capacity, Speed, and Platooning Vehicle Equivalents for Two-Lane Rural Highways, *Transportation Research Record 971*, TRB, National Research Council, Washington, DC., pp. 58-67.
40. Vromans, M. et al. (2006), Reliability and Heterogeneity of Railway Services, *European Journal of Operational Research (172)*, pp. 647-655.
41. Welch, N., Gussow, J. (1986), Expansion of Canadian National Railway's Line Capacity, *Interfaces 16 (1)*, pp.51-64.

42. Werner, A., and Morrall, J. (1976), Passenger Car Equivalencies of Trucks, Buses, and Recreational Vehicles for Two-Lane Rural Highways, *Transportation Research Record 615*, TRB, National Research Council, Washington, DC., pp. 10-17.
43. Wilson, E. (2008), *Rail Traffic Controller (RTC) Brochure*, Berkeley Simulation Software, Berkeley, CA.

