

國立成功大學  
工業與資訊管理研究所  
碩士論文

以疊代式路徑生成法求解貨運列車設計問題

An iterative route generation approach for solving the  
train design problem

研究生：李泓毅

指導教授：王逸琳 博士

中華民國一百零二年六月

國立成功大學

碩士論文

以疊代式路徑生成法求解貨運列車設計問題

An iterative route generation approach for  
solving the train design problem

研究生：李泓毅

本論文業經審查及口試合格特此證明

論文考試委員：

李家宏 王逸琳

孔令傑 李宇欣

指導教授：王逸琳

系(所)主管：黃宇和

中華民國 102 年 5 月 29 日

## 摘要

鐵路運輸是許多國家的重要運輸模式，因此如何使鐵路運輸系統更有效率一直是許多專家學者努力的目標，本研究將探討鐵路運輸系統中的「列車設計問題」，由於列車由驅動的「動力車」(Locomotive)掛載一些車廂所構成的「車廂集」(Block)所組成，該問題主要分成兩個部分：第一部分求解動力車行駛路徑的「動力車路徑規劃問題」，第二部分則求解如何將車廂集由其起點送至訖點且應由那些動力車掛載以形成列車的「車廂集裝載計畫」。由於車廂集之旅運與轉運成本皆與動力車行駛路徑密切相關，而動力車路徑亦因其起訖站未知而致其可行解空間極大，造成求解十分困難。本研究先針對「動力車路徑規劃問題」提出兩種路徑產生方式，再以產生出來的動力車路徑為基礎，利用整數規劃求解「車廂集裝載計畫」，並試圖藉由新增可改善列車路徑平衡性或合併列車路徑等方式核建立更好的動力車路徑。最後，將新的動力車路徑加入整數規劃模型中，並重新求解。如此反覆地求解整數規劃模型與更新動力車路徑，直至收斂至足夠滿意的結果為止。本研究將從現實鐵路系統中擷取兩筆資料，接著以這兩筆資料為基礎，利用隨機的方式產生其餘測試資料。測試結果顯示，我們所提出的疊代式路徑生成演算法不但可以有效求解，並可容易地將現行的動力車路徑納入考量以設計出更好的列車運行計畫，兼具理論與實務價值。

關鍵詞：列車設計問題；動力車路徑規劃問題；車廂集裝載計畫；整數規劃；路徑生成法。

# Abstract

In the freight railroad industry, how to aggregate freight railcars based on different attributes to create blocks and subsequently combine them to create trains have not changed over the past two centuries. This is called a Train Design Problem (TD), which contains two major components: (1) Train Routing (TR) and (2) Block-to-Train assignment (BTA). TR identifies the origin, destination, and route for each individual train, while BTA seeks the best transportation plan for each block that determines which trains to carry it. Hence, as the solution of TR has changed, so does BTA's. To calculate the optimum solution of TD, we need to solve TR and BTA iteratively. This paper proposes an iterative solution method, which first solves TR with two procedures, and then solves BTA with an Integer Programming model. With several speeding-up techniques such as column generation procedure and warm start mechanism, our solution approach can identify a good solution in short time. We also give a modification procedure to further improve the solution quality by adding new train routes that reduces the train imbalances or merges different train routes, which in turn enhances practicality of our solution method. Results of computational experiments indicate that our solution method does well in comparison with those in literatures.

**Keywords:** Train Design; Train Routing; Block-to-Train Assignment; Integer Program; Column Generation Approach

## 誌謝

兩年多的碩士生活終於結束了，雖然在進 lab 之前就聽很多大學長跟大學姐說這間 Lab 會「待到很晚」，那時並沒有很在意，想說才 8 月應該還好。但在聽了無數次晨鳥聲後，我深刻覺得這兩年過得宛如十年之久。常言道，人生就像是在拍一部電影，只是在這兩年的片長裡，時常被導演 NG，而如今終於可以至下個鏡頭，真的要感謝那些幫助過我的人。

首先，本論文得以順利完成，承蒙王逸琳老師的悉心指導，對於研究問題、研究方法、論文架構及內文無不一一匡正與修改，而在研究態度上老師更是以身作則，為我樹立典範。而論文口試期間，也要感謝口試委員李宇欣老師、李家岩老師和孔令傑老師的不吝指正與建議，使得本論文更臻完備。

另外，Lab61205 的大家也是不可或缺的重要因素。佳琦大學姐感謝你在當上國中數學老師後，還要指導我的中文寫作。敏婷學姐，謝謝你一直容忍我這個學弟。子欽學長感謝你花了好幾個晚上教導我 ppt 的製作還有修改論文，你真的是 Office 達人。瑜庭夥伴雖然你常常不在，但總是會在最關鍵的時刻出現(Ex. Meeting 時)，感謝你讓我認識了不少台南美食以及為我加油打氣，還有楷涵學弟及阿飄學長，感謝你們指導我程式的邏輯和技巧，在我心目中你們就像第二指導教授。真的很感謝 Lab 的大家，是你們讓我這個在外遊子有了家的感覺，你們常問我為什麼不回家，因為每當我進 Lab 的時候，其實就是回家了。

最後，我還要感謝我的父母及家人，謝謝你們在背後的支持與鼓勵，讓我可以全心全意的專注在研究中，如今我可以大聲的跟你們說我畢業了，希望這個碩士學歷能讓你們引以為傲。

# 目錄

|  |      |
|--|------|
| 摘要.....  | I    |
| Abstract .....   | II   |
| 誌謝.....  | III  |
| 目錄.....  | IV   |
| 表目錄.....   | VI   |
| 圖目錄.....   | VIII |
| 第一章 緒論.....  | 1    |
| 1.1 研究背景.....  | 1    |
| 1.2 研究動機與目的.....                                       | 1    |
| 1.3 論文架構.....  | 2    |
| 第二章 文獻回顧.....  | 3    |
| 2.1 問題描述.....  | 3    |
| 2.1.1 車廂集設計問題(Block Design, BD).....                   | 3    |
| 2.1.2 列車設計問題(Train Design, TD).....                    | 4    |
| 2.2 車廂集設計問題相關文獻.....                                   | 9    |
| 2.3 列車設計問題相關文獻.....                                    | 11   |
| 2.4 小結.....  | 15   |
| 第三章 研究方法.....  | 18   |
| 3.1 問題假設與參數.....                                       | 18   |
| 3.2 求解方法.....  | 21   |
| 3.2.1 求解流程.....  | 21   |
| 3.2.2 疊代式路徑生成演算法(Iterative Route Generation, IRG)..... | 23   |
| 3.3 動力車路徑規劃問題.....                                     | 24   |

|  |    |
|--|----|
| 3.3.1 前置作業 .....                             | 25 |
| 3.3.2 程序一(Procedure 1) .....                 | 25 |
| 3.3.3 程序二(Procedure 2) .....                 | 28 |
| 3.4 車廂集裝載計畫 .....                            | 32 |
| 3.4.1 參數與變數定義 .....                          | 32 |
| 3.4.2 整數規劃模型 .....                           | 33 |
| 3.5 列車路徑修正程序(Train Route Modification) ..... | 35 |
| 3.5.1 動力車平衡性路徑新增方式(Balancing Trains) .....   | 35 |
| 3.5.2 合併列車路徑新增方式(Merging Trains) .....       | 37 |
| 3.6 小結 .....                                 | 37 |
| 第四章 數值分析 .....                               | 39 |
| 4.1 範例說明 .....                               | 39 |
| 4.2 數值實驗 .....                               | 44 |
| 4.2.1 測試資料與參數設定 .....                        | 44 |
| 4.2.2 數值結果與分析 .....                          | 45 |
| 4.3 小結 .....                                 | 49 |
| 第五章 結論與未來研究方向 .....                          | 51 |
| 5.1 論文總結 .....                               | 51 |
| 5.2 未來研究方向 .....                             | 52 |
| 參考文獻 .....                                   | 55 |
| 附錄 .....                                     | 57 |

## 表目錄

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 表 2-1 表定路段設定表.....         | 5  |
| 表 2-2 文獻之考量因素表.....        | 16 |
| 表 3-1 集合說明表.....           | 20 |
| 表 3-2 參數說明表 I.....         | 20 |
| 表 3-3 表定路段設定表.....         | 26 |
| 表 3-4 參數說明表 II.....        | 32 |
| 表 3-5 變數說明表.....           | 32 |
| 表 4-1 車廂集相關參數設定表.....      | 39 |
| 表 4-2 鐵路路段相關參數設定表.....     | 40 |
| 表 4-3 表定路段相關資訊表.....       | 40 |
| 表 4-4 各站點之轉運成本表.....       | 41 |
| 表 4-5 各項參數設定表.....         | 41 |
| 表 4-6 動力車路徑規劃問題之可行解.....   | 42 |
| 表 4-7 車廂集裝載計畫可行解.....      | 42 |
| 表 4-8 人員不平衡計算表.....        | 43 |
| 表 4-9 動力車不平衡計算表.....       | 43 |
| 表 4-10 測試資料比較表.....        | 44 |
| 表 4-11 測試方法組合表.....        | 44 |
| 表 4-12DataSet1 之成本分析表..... | 45 |
| 表 4-13DataSet2 之成本分析表..... | 45 |
| 表 4-14DataSet1 之成本比例表..... | 46 |
| 表 4-15DataSet2 之成本比例表..... | 46 |
| 表 4-16 各研究之結果比較表.....      | 48 |



|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 表 4-17DataSet1 之動力車種類比例表 .....       | 49 |
| 表 4-18DataSet2 之動力車種類比例表 .....       | 49 |
| 表 5-1 對偶變數說明表 .....                  | 54 |
| 表 A-1RandomDataSet1_1 之成本分析表 .....   | 57 |
| 表 A-2RandomDataSet2_2 之成本分析表 .....   | 57 |
| 表 A-3RandomDataSet1_3 之成本分析表 .....   | 58 |
| 表 A-4RandomDataSet1_4 之成本分析表 .....   | 58 |
| 表 A-5RandomDataSet1_5 之成本分析表 .....   | 59 |
| 表 A-6RandomDataSet1_6 之成本分析表 .....   | 59 |
| 表 A-7RandomDataSet1_7 之成本分析表 .....   | 60 |
| 表 A-8RandomDataSet1_8 之成本分析表 .....   | 60 |
| 表 A-9RandomDataSet1_9 之成本分析表 .....   | 61 |
| 表 A-10RandomDataSet1_10 之成本分析表 ..... | 61 |
| 表 A-11RandomDataSet1_11 之成本分析表 ..... | 62 |
| 表 A-12RandomDataSet1_12 之成本分析表 ..... | 62 |
| 表 A-13RandomDataSet1_13 之成本分析表 ..... | 63 |
| 表 A-14RandomDataSet1_14 之成本分析表 ..... | 63 |
| 表 A-15RandomDataSet1_15 之成本分析表 ..... | 64 |
| 表 A-16RandomDataSet1_16 之成本分析表 ..... | 64 |
| 表 A-17RandomDataSet1_17 之成本分析表 ..... | 65 |
| 表 A-18RandomDataSet1_18 之成本分析表 ..... | 65 |
| 表 A-19RandomDataSet1_19 之成本分析表 ..... | 66 |
| 表 A-20RandomDataSet1_20 之成本分析表 ..... | 66 |

## 圖目錄

|  |    |
|--|----|
| 圖 2-1 車廂集設計問題說明圖.....                          | 4  |
| 圖 2-2 鐵路網路圖.....                               | 6  |
| 圖 2-3 表定路段網路圖.....                             | 7  |
| 圖 2-4 動力車行駛網路圖.....                            | 7  |
| 圖 2-5 轉運說明圖.....                               | 9  |
| 圖 3-1 求解流程概念圖.....                             | 22 |
| 圖 3-2 疊代式路徑生成法之虛擬碼圖.....                       | 24 |
| 圖 3-3 動力車參考點說明圖.....                           | 26 |
| 圖 3-4 表定路段網路圖(修正).....                         | 27 |
| 圖 3-5 程序一之動力車路徑說明圖.....                        | 27 |
| 圖 3-6 車廂集路徑情況圖.....                            | 28 |
| 圖 3-7 表定路段條列圖.....                             | 29 |
| 圖 3-8 網路圖 $\hat{G} = (\hat{N}, \hat{A})$ ..... | 30 |
| 圖 3-9 程序二之動力車路徑說明圖.....                        | 31 |
| 圖 4-1 範例網路圖.....                               | 39 |
| 圖 4-2 DataSet1 與 DataSet2 之目標函式值對時間圖 .....     | 47 |

# 第一章

## 緒論

### 1.1 研究背景

鐵路運輸為許多國家的主要運輸模式之一，以美國為例，不論是在礦產業、石油業及營造業等許多企業，其在原物料運輸方面皆須仰賴鐵路運輸，由此可見鐵路運輸的重要性，如何提升鐵路運輸的效率以及減少其營運上的成本向來都是許多國家的政府交通部門及鐵路相關業者一直努力的目標。

鐵路運輸發展至今已超過兩個世紀，包含許多複雜的作業流程與決策。Assad (1980) 將鐵路運輸的決策分為策略層面(strategic level)、戰術層面(tactical level)與操作層面(operation level)。其中，策略層面主要是針對鐵路運輸中的基礎設施進行長遠性的規劃，如鐵道拓寬、設置新站點、站點擴建等；戰術層面乃是在各項基礎設施的設置都為已知的情況下，制定以週或月為單位的中短期運送班表；操作層面則是以先前在戰術層面中制訂出來的班表為方針，進行實務上的操作。鐵路管理者便依序針對上述三個層面所會面臨到的問題制定決策，進而建構出完整的鐵路運輸統。

### 1.2 研究動機與目的

根據美國鐵路運輸協會(Association of American Railroads)在 2011 年對於鐵路總成本的分析報告指出，營運成本所佔之比例為所有成本當中最高者(約佔總成本的 65%)，而該項成本又與戰術層面有著最直接的關係，主要原因在於該層面中所包含的決策問題，一般可分為「車廂集設計問題」(Block Design, BD)與「列車設計問題」(Train Design, TD)，而這兩者通常又合稱為「旅行計畫」(Trip Plan)。因此，若能有效地處理旅行計畫，對於提升鐵路運輸的效率以及減少其在營運上的成本勢必有很大的

幫助。然而，不論是 BD 或 TD 在學術上皆屬 NP-hard 問題，故本研究僅針對 TD 進行求解，而過去與 TD 相關之文獻大都是在「動力車」(Locomotive，或翻譯成「鐵路機車」、「火車頭」、「機關車」等，為專門提供動力的車輛)路徑已給定的情況下求解。然而已給定的動力車路徑若非先針對車廂集的起訖需求來量身訂做的話，便無法解出整體而言最佳的 TD。

本研究將動力車路徑視為決策變數，並同時處理 TD 所包含的兩個子問題：「動力車路徑規劃問題」(Train Routing，TR)與「車廂集裝載計畫」(Block to Train Assignment，BTA)。其中，TR 旨在求解動力車路行駛之路徑，而 BTA 則是在既定的動力車路徑下，找出每個車廂集的最佳運送方式。由於動力車路徑理應隨給定的車廂集起訖點而定，然而車廂集的裝載計畫又會隨動力車路徑而變，因此 TR 與 BTA 兩問題環環相扣、互相影響，本研究旨在找出動力車路徑與車廂集運送方式的最佳搭配方式。

### 1.3 論文架構

本論文之架構如下：第二章為文獻回顧，先針對旅行計畫所包含的兩個子問題：BD 與 TD 加以介紹，再回顧其相關文獻。第三章為研究方法，包括我們提出的整數規劃模式以及求解演算法的設計過程。在第四章中，本研究將測試兩個從美國鐵路運輸系統中化簡而來的實際鐵路設計問題，分析與討論求解結果。最後，第五章總結本研究成果與貢獻，並提供未來可研究的方向與建議。

## 第二章

### 文獻回顧

本章先在 2.1 節中描述「旅行計劃」所包含的兩個問題：「車廂集設計問題」與「列車設計問題」，接著在 2.2 與 2.3 節中回顧與此兩問題相關之文獻，並在最後的 2.4 節中說明文獻與本研究之差異。

#### 2.1 問題描述

##### 2.1.1 車廂集設計問題(Block Design, BD)

鐵路運輸業者的運貨方式導致 BD 成為一個重要的問題，一般業者們運貨的流程為：從供貨端接收貨物，接著將這些貨物置於車廂內，而隨著所裝貨物的不同，每節車廂的目的地也就跟著不同。如圖 2-1(a)所示，圖中每個方塊即為一節車廂，並以不同顏色來表示每節車廂的訖點。以站點 1 為例，在該站點中共有七節車廂以其作為起點，而當中又有兩節車廂的訖點為站點 7(粉紅色)、兩節為站點 6(黃色)以及三節為站點 4(綠色)。在確定好每節車廂的訖點之後，業者們便將這些車廂串連起來形成「車廂集」(Block)，接著將這些車廂集掛載至動力車上進行運送，而 BD 就是在決定每節車廂應如何連接形成車廂集，以及每座站點所需產生的車廂集數量。

車廂一旦形成車廂集後，對於在同一個車廂集內的車廂，儘管彼此的訖點不盡相同，這些車廂都會被視為一個集體，須等到車廂集抵達至其訖點時方能進行拆解。換句話說，假使站點 1 有七節車廂(其中三節之訖點為站點 4)連接成為一個車廂集，且該車廂集的訖點為站點 6，則只有當車廂集行駛至站點 6 時，這七節車廂才會被拆解；即便車廂集在行駛途中經過了站點 4，其所包含的三節訖點為站點 4 的車廂依然會跟著車廂集行駛至站點 6，而不會停留在站點 4。BD 除了須考慮每個車廂集的起訖點與所包含之車廂外，它還須確保在車廂集形成之後，所有車廂仍可從起點運送至訖

點。

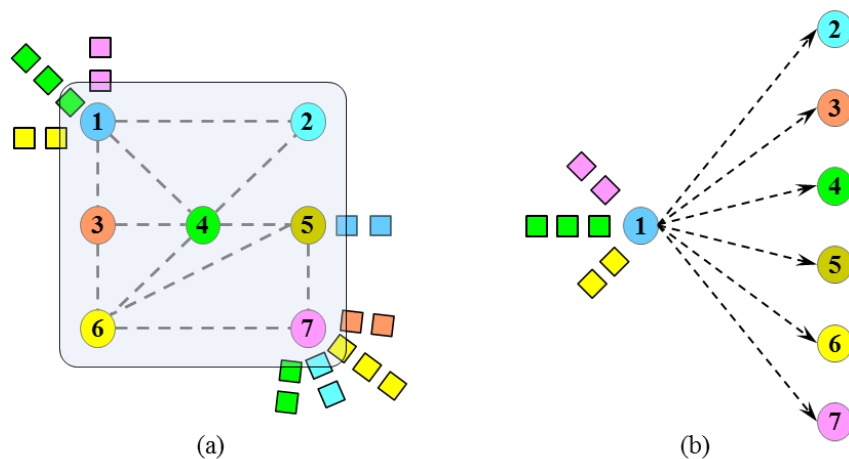


圖 2-1 車廂集設計問題說明圖

Ahuja et al. (2007) 則是以「車廂集網路」(Blocking Network)來求解 BD，在此網路圖中每一座站點皆與其它站點相連，每條節線都代表著一個車廂集。在圖 2-1(b)中，我們以站點 1 為範例，圖中站點 1 與其餘六座站點都有一條節線相連，而每條節線各代表一個車廂集。其中，箭頭所指的站點即為車廂集之訖點，尾端所連之站點則為車廂集之起點。因此，對於有車廂流經之節線便是我們所須建構之車廂集，而流經每段節線之車廂便是該車廂集所包含之車廂。經此轉換，BD 便是從車廂集網路中找出每節車廂的運送方式，使所花費的總成本最低。如第一章所述，BD 屬於戰略層面之決策問題，所以諸如鐵路運輸網路、各站點可容納之車廂數等各項實體設施的設置在該問題中皆為已知。

### 2.1.2 列車設計問題(Train Design, TD)

如前節所述，在處理完 BD 之後，業者們須將停靠在每座站點的車廂集掛載至動力車上形成列車，然後進行運送，而 TD 便是在決定車廂集運送時所需的動力車路徑(TR)以及每個車廂集的運送方式(BTA)，TD 與 BD 一樣屬於戰略層面之決策問題，亦即所有基礎設施之設置方式皆為已知，且通常在處理 TD 前已求解完 BD，所以停靠在各站點之車廂皆已連接形成車廂集，且每個車廂集之起訖點與車廂集數量同樣也為

已知。以下將分別針對 TD 包含的 TR 與 BTA 做更進一步的說明。

### 2.1.2.1 動力車路徑規劃問題(Train Routing, TR)

TR 旨在規劃動力車路徑，讓停靠在各站點的車廂集得以順利地從其起點運行至其訖點。在鐵路路網中，駕駛員通常會在兩個固定站點間駕駛動力車，且其路線通常為鐵路路網中通過此兩站點的最短路徑，該最短路徑通常稱為「表定路段」(Crew Segment)，而表定路段的兩個端點則分別稱為「表定路段起點」(Crew Origin)與「表定路段訖點」(Crew Destination)。因此在鐵路路網中，動力車只會通過被表定路段所覆蓋的鐵路路段，而未被表定路段覆蓋(即經過)的鐵路路段與站點將無動力車經過(因此可被移除)。如圖 2-2 所示，圖中以不同顏色之實線表示覆蓋在鐵路上的表定路段，虛線表示未被表定路段覆蓋之鐵路路段，並以紅色站點表示表定路段起訖點。圖中的站點 2 與站點 3 由於其對外連接的鐵路路段皆未被表定路段所覆蓋，因此動力車無法抵達此兩站，而以此兩站為起訖點的車廂集亦將無法被運送。表 2-1 列出表定路段的編號、起訖點、及其行駛路線(Crew Path)。依據此表，負責表定路段 1 之駕駛員，將從站點 1 經由站點 4 再至站點 7(或是從站點 7 經由站點 4 再至站點 1)，且僅有當駕駛員行駛至表定路段起訖點(站點 1 或站點 7)時，才會進行駕駛員換班(同一列車換不同駕駛員)或停放列車等作業。

表 2-1 表定路段設定表

| Crew Segment No. | Crew Origin | Crew Destination | Crew Path |
|------------------|-------------|------------------|-----------|
| 1                | 1           | 7                | 1-4-7     |
| 2                | 1           | 4                | 1-4       |
| 3                | 4           | 6                | 4-6       |
| 4                | 6           | 7                | 6-7       |

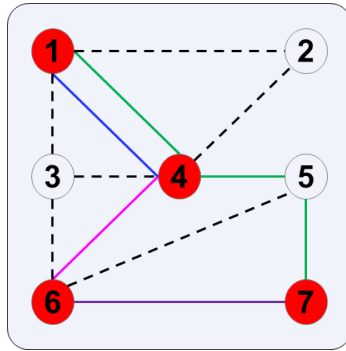


圖 2-2 鐵路網路圖

由上述可以做以下推論：

### 1. 動力車路徑所行經之鐵路路段必定有表定路段覆蓋

由於動力車駕駛員只會在制定好的表定路段內駕駛動力車，故若要有動力車行經此鐵路路段，該路段勢必被包含在先前制定好的表定路段之內(亦即該鐵路路段被表定路段所覆蓋)。

### 2. 動力車路徑定是由表定路段所構成，且其起訖點必為表定路段起訖點

負責某段表定路段內的駕駛員必須從該表定路段起(訖)點開始駕駛，且只有當駕駛員駕駛至表定路段訖(起)點時，方能進行換班(即同一列車但換人駕駛)或停駛該列車等作業。若駕駛員換班，表示同一列車將於該站點換另一駕駛員繼續行駛另一表定路段；反之，若駕駛員停駛，則表示該站點為該表定路之訖(起)點，且亦為該列車之訖(起)點。

有鑑於此，我們可依據每條表定路段的起點與訖點建構一個「表定路段網路圖」，該圖中每個節點皆為表定路段之起點或是訖點，每條節線皆代表著一條表定路段，而其長度即為通過該表定路段起點與訖點之最短路徑的長度。如圖 2-3 所示，此圖為依據表 2-1 所建構之表定路段網路圖，而節線上之編號為表定路段的編號。因此，從網路圖中任取一條路徑皆可作為動力車路徑，而每條路徑所包含之節線即為該動力車路徑所選取之表定路段。在表定路段網路圖上的路徑皆遵循上述的兩項原則，例如選擇 1→7→6 這條路徑作為動力車路徑，則其所選擇之表定路段為表定路段 1 及 4，而所



對應到鐵路路網(圖 2-2)的行駛方式為 1→4→7→6。

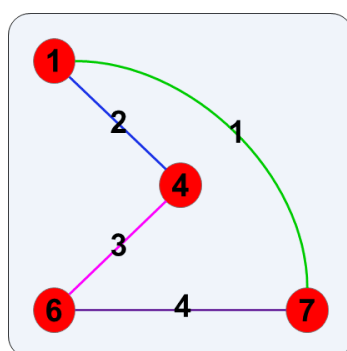


圖 2-3 表定路段網路圖

每當駕駛員行駛至表定路段之訖點時，駕駛員便會換班或是停駛列車。若駕駛員在表定路段訖點換班，卻無另一列車將該駕駛員再載回該表定路段的另一端時，公司就必須花費額外的成本將該駕駛員載回去，這些額外費用稱為「人員不平衡成本」(Crew Imbalance Cost)。同樣地，對於每座站點而言，若停駛在該站的動力車數與出站的動力車數不同的話，公司也必須花費額外的「動力車不平衡成本」(Train Imbalance Cost)將多餘的動力車開回去。

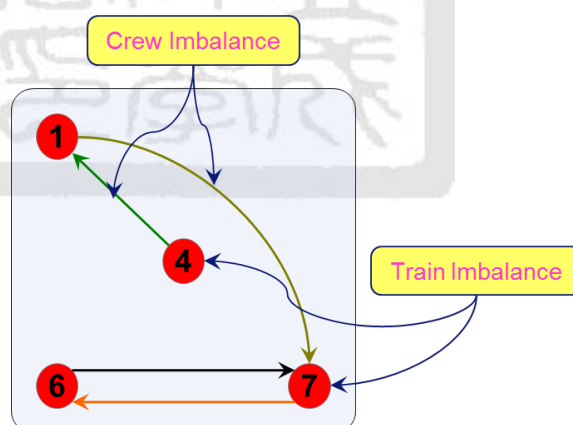


圖 2-4 動力車行駛網路圖

如圖 2-4 所示，此圖為依據圖 2-3 所建構之動力車行駛網路，而圖中表定路段 1 只有一台從站點 1 開到站點 7 的列車，所以負責表定路段 1 的駕駛人員從站點 1 駕駛列車至站點 7 後，即無法再從站點 7 回到站點 1；對於負責表定路段 2 的駕駛員也是如此。而這些順向與逆向動力車數不相等的表定路段即為人員不平衡之表定路段，需

計算「人員不平衡成本」。另外，圖中站點 4 和站點 7 的停駛和出站的動力車數並不相等，所以這兩座站點為動力車不平衡之站點，需計算「動力車不平衡成本」。

總結上述，TR 旨在決定動力車路徑，其中包含了動力車之起訖點及其所行經之表定路段。成本方面除了動力車行駛成本之外，亦需考慮人員與動力車之不平衡成本。此外，在產生動力車路徑的同時，也應將後續的車廂集裝載計畫納入考慮，如此方能確保每個車廂集皆能順利地被運送，不然就要針對無法被運送的车廂集付出懲罰成本。

#### 2.1.2.2 車廂集裝載計畫(Block to Train Assignment, BTA)

BTA 是從先前規劃好的動力車路徑中，找出每個車廂集的最佳運送方式。雖然車廂集的行駛路徑不像動力車路徑有諸多的限制，但每個車廂集在運送的途中可能會接連地被不同動力車所掛載，而每次的掛載與卸載皆須耗費人力與時間，此類花費稱之為「車廂集轉運成本」(Block Swap Cost)。然而，不單只有車廂集會引發轉運成本。對於每台動力車而言，只要在行駛途中的中繼站進行車廂集的掛卸載，即會引發「工作事件成本」(Work Event Cost)，而此即為動力車引發之轉運成本。如圖 2-5 所示，圖中虛線表示未被動力車經過之鐵路路段，並以不同顏色之實線表示不同動力車且其箭頭所指之方向為動力車行進之方向，而車廂集的起訖點分別為站點 1 及 6。依據此圖，車廂集將先由藍色動力車將自站點 1 運送至站點 4，接著再由綠色動力車自站點 4 運送至站點 6，故車廂集在站點 4 轉運(引發一次車廂集轉運成本)，而對於藍色動力車而言則在站點 4 引發了一次工作事件成本。

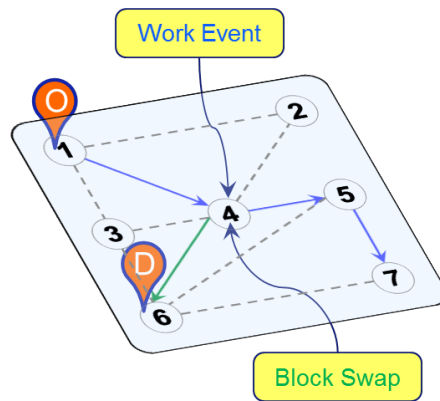


圖 2-5 轉運說明圖

在現實的鐵路運輸中，對於工作事件及車廂集轉運次數一般都會加以限制，以避免某些站點因為工作事件或是車廂轉運的次數過多，而延誤送貨時間或列車班次。除了上述提及的成本外，「車廂集行駛成本」和「列車設置成本」也都是車廂集裝載計畫所必須考慮的成本因素。在限制條件方面，針對諸如每段鐵路路段可承受之長度、重量及動力車數等基礎設施的容量限制，也都在本研究所考慮的範疇之內。

## 2.2 車廂集設計問題相關文獻

車廂集設計問題(BD)通常是列車運輸業者第一個處理的問題，而在處理該問題時，除了車廂旅行及裝卸成本外，一般還會再考慮三種容量限制(Ahuja et al, 2007)，茲分述如下：

### 1. 每座站點所能產生之車廂集數量

每個車廂集在產生時，都需要一條軌道，但每座站點所能提供的軌道數量卻是有限的，因此每座站點只能產生一定數量的車廂集。當然隨著站點的類型不同，其所能產生之車廂集數量也就跟著不同。

### 2. 每座站點所能處理之車廂數量

在實際的鐵路運輸系統中，每座站點的佔地面積都不相同，所以每座站點能處理的車廂數亦不相同，如果運送至該站點的車廂數超出其所能負荷的數量，則有可能導致運送時間上的延遲，更進一步可能使整個系統癱瘓，因此在求解車廂集設計問題時，

大多會考慮此限制。

### 3. 每個車廂集所能容納之車廂數

對於每個車廂集所行經之鐵路路段，其所能容納的車廂數上限是一定的，所以每個車廂集所能容納之車廂數也是有一定的限制。

由於每個車廂的起訖點都為已知，所以可以將一個車廂視為一個商品 (commodity)，而車廂集設計問題所要解決的就是在不違反任何一種容量限制的條件下，藉由車廂集將這些商品以最少的成本從起點運送至訖點，一般學術上將這種問題稱為多商品網路流量問題 (Multicommodity Flow Problem)，其在求解時相當不易，通常需搭配啟發式演算法、拉氏鬆弛法 (Lagrangian Relaxation) 或列生成法 (Column Generation) 等求解技巧，方能有效求解。

Bordin et al. (1980) 便是將車廂集設計問題視為一多商品網路流量問題，並以非線性混整數規劃模式 (Non-Linear Mixed Integer Programming) 進行模式化，企圖在考量各站點的容量限制以及車廂集所能容納的車廂數下進行求解。Newton et al. (1998) 將問題模式化成一混整數規劃模式 (Mixed Integer Programming, MIP)，並以列生成法進行求解。Barnhart et al. (2000) 則使用與 Newton et al. (1998) 相同之數學模式，但以拉氏鬆弛法求解該模式。除了將車廂集設計問題視為多商品網路流量問題外，Assad (1983) 則是以動態規劃 (Dynamic Programming) 的方式求解該問題。上述文獻都是以找出精確最佳解為目的，所以當問題變大時，其所需的求解時間便難以估算，而這也大大縮減了這些文獻的實用性。

有鑑於此，Ahuja et al. (2007) 則是先建構好車廂集網路後，再以一整數規劃模式 (Integer Programming, IP) 加以模式劃，並針對該問題提出 VLSN (Vary Large-Scale Neighborhood Search) 演算法求解。透過該演算法，Ahuja et al. (2007) 有效地求解了與實際鐵路運輸系統差不多大小的問題，且也將此演算法應用在現實的鐵路運輸系統中。

## 2.3 列車設計問題相關文獻

在排定好每座站點的車廂集計畫後，接著便是處理列車設計問題(TD)，由 2.1 節可知 TD 主要分成兩部分：動力車路徑規劃問題(TR)及車廂集裝載計畫(BTA)，而這兩者有著密不可分的關係。隨著動力車路徑的改變，車廂集的運送方式勢必得跟著變動。因此，在一組特定的動力車路徑下所求得的车廂集最佳運送方式，未必是其它組動力車路徑的最佳運送方式，所以 TR 與 BTA 必須一直反覆地求解，方能得到彼此的最佳搭配方式。

Assad (1980) 和 Haghani (1987) 統整了一般鐵路運輸業所面臨問題的相關數學模型，歸納出三個主要問題：(1)站址選擇與鐵道最佳化問題、(2)站點作業流程之決策問題，以及(3)鐵路運輸問題。首先，站址選擇與鐵道最佳問題又可分為兩部分：一是在滿足最大的顧客需求下，決定各站之位置；二則為考量各鐵道之維修與升級成本的前提下，最小化貨物所需之運送時間。其次，站點作業流程之決策問題則是希望制定出一套可縮減車廂在站點之停留時間的流程。最後，該文獻整理出鐵路運輸問題包含了動力車路徑規劃問題、動力車班表制定、車廂集設計方式與各車廂運送方式等諸多問題。

另外，Gorman (1998)、Keaton (1989, 1992)、Haghani (1989) 及 Newman (2000) 等文獻則是求解列車設計問題，這些文獻的共通點在於它們都是在既定的動力車路徑中挑選動力車，接著求解車廂集裝載計畫。

Gorman (1998) 考量了動力車的設置、轉運及裝卸等諸多成本，以及諸如各段鐵路路段所能承受之車廂數、重量等容量限制，以最小化各項運輸成本與運輸延遲時間為目標進行求解。該篇文獻的求解方式為先從所有可能的動力車路徑中隨機挑選，直至所有的車廂集皆能被運送為止，並以此作為一個起始解。在產生一百多個起始解之後，便以一種結合基因演算法與禁忌搜尋法之啟發式演算法來進行各個起始解間的交配與突變，直至最佳解收斂為止。

Keaton (1989, 1992) 將 BTA 視為一多商品網路流量問題。在所有可行的動力車路徑已給定的情況下，再考量各項運輸成本與容量限制，將各車廂集以最少的成本從其起點運送至訖點。在求解方面，Keaton (1989, 1992) 採用拉氏鬆弛法，並在求解的同時導入對偶修正機制，希望藉此加快最佳解的收斂速度。

Haghani (1989) 則是在求解列車設計問題時，同時考慮空車廂的運補方式，並假設所有站點的空車廂需求為已知。由於其數學模式的目標式為非線性，在求解之初，這篇文獻會先以線性函數近似目標式，並忽略各項整數限制求解，以得到該問題之最佳解下界，接著將問題拆成兩部分：車廂集運送問題與空車廂運補問題，並分別進行求解直至所求解出來的目標值與最佳解下界間的差距小至可接受為止。

Newman (2000) 將車廂集運送的形式分成「經過轉運」與「直達」兩種，再將問題拆成三個部分：(1)車廂集直接運送至訖點，(2)車廂集運送至轉運點，與(3)從轉運點運送至車廂集訖點。接著再考慮列車設置、車廂旅行、車廂裝卸等成本來求解此三個子問題。這種作法除了動力車路徑需事先給定外，車廂集所能轉運的站點也必須事先給定。

相對於前述幾篇文獻，Lee et al. (2013) 與 INFORMS(2011)等文獻則在未知動力車行駛路徑的情況下，求解列車設計問題(TD)。因此，這些文獻需自行設計動力車行駛路徑，而非從既定的動力車路徑中挑選。其中，Lee et al. (2013) 先求解 TR，接著再求解 BTA。而針對 TR，該文獻以一種結合列生成法之演算法來產生動力車路徑。該文獻首先針對每一個車廂集以 TR 之整數規劃模型求出其前 k 短的路徑，接著便依據這些路徑設計 BTA 之整數規劃模型，此即為文獻中常見的 Dantzig-Wolfe 與列生成法中的 Restricted Master Problem (RMP)。RMP 主要是以最小化動力車行駛成本、車廂集行駛成本以及動力車在行駛時引發的相關成本為目標，並在考量諸如每段鐵路路段可容許之動力車數量、長度及重量等相關容量限制式的情況下所建立之整數規劃模型。在建立好 RMP 之後，該文獻接著便針對 RMP 的每一條限制式設立一個對應的對偶變數，然後以這些對偶變數為基礎來計算每條動力車路徑之 reduced cost，接著

找出 reduced cost 為負的動力車路徑，此即為列生成法中的 Pricing Sub-Problem。透過反覆求解 RMP 與 Pricing Sub-Problem，直至產生了一定數量的動力車路徑或是所有動力車路徑之 reduced cost 皆非負數方能停止。產生完動力車行駛路徑之後，再求解 BTA 之整數規劃模型，該整數規劃模型考量容量、轉運及平衡性相關限制式，以最小化動力車設置數量、動力車行駛距離、車廂集行駛距離、轉運相關成本以及平衡性相關成本之總和為目標。此法每次在產生動力車路徑時需加入迴圈消除限制式 (Self-Cycle Elimination Constraint)，且所求解之 Pricing Sub-Problem 為具有額外限制式之最短路徑問題 (Constrained Shortest Path Problem, CSP)，由於 CSP 已被定義為 NP-hard 問題，因此要找出一定數量之動力車路徑勢必會花費不少時間，且上述流程還未涉及到 BTA 之求解，因此我們預期此求解方法之效率應不致太好。

在 INFORMRS (2011) 中的 KOPPA 和 OR@UNIMI 亦採取與 Lee et al. (2013) 類似的求解流程，且其 BTA 同樣也是透過求解整數規劃而得。然而針對求解 TR，KOPPA 採用隨機選取表定路段的方式來建構其動力車路徑。他們首先利用一數學模型來估算表定路段 (亦即在所有車廂集皆須被運送的情況下，估算所需要的表定路段集合)，接著假設各車廂集行駛路徑為表定路段網路圖上通過其起訖點之最短路徑，以此估算每條鐵路上所需流經的動力車數量。估算完畢之後，KOPPA 便以這些估算值作為限制，然後以隨機的方式來產生動力車路徑。他們先從所有表定路段中隨機挑選一條作為動力車的起始路段，接著再隨機搜尋一條與之相連的表定路段做為下一條行駛路段，直到路段長度到達某一定長度為止，就這樣一直產生數百條頭尾相連的表定路段所連成的動力車路徑，接著再利用數學模式來判斷這些動力車路徑是否滿足先前所估算的限制。若滿足就繼續求解 BTA；反之，則重新產生動力車路徑並一再重複這些動作直至滿足為止。該做法之優點在於不會因為測試資料的不同導致求解品質的下降，然而，由於其產生動力車路徑方式為隨機，因此不能確定所產生之路徑可否運送全部車廂集，乃需透過求解數學模式方可知，而有可能導致即便求解數百回合仍無法找出合適的動力車路徑的困境。

OR@UNIMI 則是採用與 Lee et al. (2013) 相似的做法，他們先針對 BTA 設計一整數規劃模型，該模型以所輸入之某些車廂集路徑以及列車行駛路徑來建構整數規劃模型，再取其對偶模式以建立對應的 Pricing Problem。而其 Pricing Problem 的目標式可分為求解車廂集路徑與動力車路徑兩部分。他們藉由求解一整數規劃模式，找出 reduced cost 為負的車廂集路徑，再透過禁忌搜尋法來找出 reduced cost 為負的路徑來當動力車路徑。在建立好車廂集路徑及動力車路徑之後，OR@UNIMI 便將這些路徑代入考量轉運之整數規劃模式中求解原列車設計問題。而該求解方法之缺點同樣在於 Pricing Problem 的求解時間過長，進而導致方法的實用性下降。

此外，Jha et al. (2008) 則是直接給定動力車行駛路徑，再求解 BTA。該文獻先以一時空網路圖(Space-Time Network)來描述問題，將節點分為三類：train-arrival node、train-departure node 及 ground node，分別用來表示動力車的進出站以及記錄車廂集在各站點的離站時間。節線的部分也分成三類：train arc、connection arc 及 ground arc。其中，train arc 是用來表示列車在實體路網中的行駛方式以及其行駛的時間；而 connection arc 及 ground arc 則是用來表示在時間空間中，動力車及車廂集在同一站點不同時間所發生之事件。因此，connection arc 和 ground arc 所連接的節點在時空網路中是代表同一站點，只是時間點上的不同。在建構好時空網路圖之後，本文獻便以 path-flow 形式之整數規劃模型來模式化問題。由於此種形式的整數規劃模型需使用車廂集行駛路徑當作輸入。因此在求解之前，先以一類似 Dijkstra 演算法的啟發式演算法產生車廂集路徑，該演算法首先找出所有車廂集起點之站點，接著針對這些站點找出與其相鄰的點，並在該點上設置一個標籤(label)，以記錄到達這個點所需的時間、動力車數、前一個與之相連的點等相關資訊，最後找出所有標籤當中最好的(如距離最短或是所需的動力車數最少等)站點做路徑的延伸，且將該標籤標註為「永久的」。如此一直反覆執行這些步驟直至所有標籤皆變為永久為止。最後，本文獻分別以分支界限法(Branch and Bound)、拉氏鬆弛法、貪婪演算法等求解技巧進行求解。然而該篇文獻所提出之作法，需在動力車路給定的情況下才能使用，而在動力車路徑給定的



情況下，便無法得知 BTA 最佳解。

綜觀上述文獻，其在成本考量方面主要可以下分成四項，分別為動力車設置成本、動力車旅行成本、車廂集旅行成本、車廂集轉運成本。容量限制方面則可分為鐵路相關之容量限制及站點相關之容量限制這兩類。另外，在求解程序方面，大都是先處理 TR，接著才求解 BTA，之所以用此種處理方式的主因有二：(1)為了降低列車設計問題在求解時的困難度；(2)由於世界各國的鐵路運輸業發展至今已相當成熟，所以動力車行駛路徑以及時程大都已固定已知，如果要重新規劃所有動力車路徑及時程，對於業者們而言成本太高。因此，回顧完上述文獻後我們發現文獻大都先從既定的動力車路徑中挑選，或是直接給定動力車路徑，然後再求解 BTA。

有鑑於此，本研究的求解流程同樣將採取先求解 TR 再求解 BTA，而為了因應各國的鐵路運輸系，我們將求解 TR 所得到的動力車作為 BTA 之輸入，如此便可以現有之動力車路徑來規劃各車廂集的運送。另外，為了避免 KOPPA 在產生動力車路徑時面臨到的問題，本研究會以所有車廂集皆能運送為前提來產生動力車路徑，而為了使 BTA 的求解結果不會受限於起始之動力車路徑，我們還會提出一系列路徑修正程序，並透過疊代機制使目標值持續收斂。

## 2.4 小結

本章首先描述旅行計畫中所包含的 BD 與 TD。由於兩者皆屬戰略層面，所以各項基礎設施之設置方式及其限制在兩個問題中皆為已知。BD 旨在決定各站點之車廂集形成方式及起訖點，而 TD 則在各車廂集皆能被運送的前提下，設計動力車行駛路徑，並進而從中找出各車廂集之最佳運送方式。因此，這兩者的求解順序一般為先處理 BD，接著再求解 TD，而後者也為本研究主要探討之對象。

文獻部分大致可分為 BD 以及 TD 等兩大類相關文獻。在 BD 這部分，由於問題的特性，大部分文獻都將其視為一多商品網路流量問題，而此問題是在考量各種容量限制的前提下，以最低的成本將這些商品從起點運送至訖點。該問題是一個 NP-hard

的問題，鮮少有文獻著重在計算其精確最佳解，大部分文獻採用啟發式演算法、拉氏鬆弛法或列生成法等求解技巧進行求解。

而 TD 所包含的 TR 與 BTA 兩個子問題關係非常密切，必須反覆的求解此兩問題方能得到其最佳的搭配方式。為了減少求解的困難度，多數文獻通常在求解此問題時會先處理 TR 或是直接給定所有可行的動力車路徑，接著再處理 BTA。而在動力車路徑皆已知的情況下，BTA 同樣可視為一多商品網路流量問題。因此，即便是在動力車路徑給定的情況下，TD 問題仍是個 NP-hard 的問題，而本研究假設更進一步假設動力車路徑為未知，所以將更困難。

我們將 2.3 節中的文獻以及本研究中所考慮的因素統整在表 2.1 中，以 X 表示有考慮的項目，從表中可以清楚看出本研究與 INFORMS (2011) 及 Lee et al. (2013) 對於所有列出的因素皆有納入考慮，反之其餘文獻大都只考量車廂集轉運以及容量限制兩項因素。

表 2-2 文獻之考量因素表

| 文獻                | 車廂集轉運 | 列車相關因素 | 容量限制 | MISS |
|-------------------|-------|--------|------|------|
| Assad (1980)      |       |        |      |      |
| Gorman(1998)      | X     |        | X    |      |
| Haghani (1987)    |       |        |      |      |
| Haghani (1989)    | X     |        | X    | X    |
| INFORMS (2011)    | X     | X      | X    | X    |
| Jha et al. (2008) | X     |        | X    |      |
| Lee et al (2013)  | X     | X      | X    | X    |
| Keaton (1989)     | X     |        | X    |      |
| Keaton (1992)     | X     |        | X    |      |
| Newman (2000)     | X     |        | X    |      |
| 本研究               | X     | X      | X    | X    |

附註： 列車相關因素包含了人員不平衡(Crew Imbalance)、動力車不平衡(Train Imbalance)、工作事件(Work Event)等相關因素。MISS 代表車廂集可能不被運送之因素。

為求更貼近現實中的鐵路運輸系統，本研究除了考慮車廂集轉運這項因素之外，也會一併考慮其它相關因素。針對動力車路徑，我們亦會參考現實中的動力車行駛方式以及相關規範。如前述，本研究的求解流程大致為先處理 TR，再求解 BTA，此外我們還會根據車廂集裝載計畫所得出的解進行動力車路徑的修正與新增，希望藉此能得到更佳的解，第三章將對本研究所提出之求解流程作更詳盡的說明。



## 第三章

### 研究方法

#### 3.1 問題假設與參數

如第一章所述，TD 為戰略層面之決策問題，所以各項基礎設施之設置在該問題中皆為已知。在此，本研究以  $G=(N,A)$  代表所考慮的鐵路路網，其中  $n \in N$  和  $a \in A$  分別代表各站點及各鐵路路段，而  $N$  與  $A$  則各為所有站點和鐵路路段所形成之集合，並以  $d_a$ 、 $U_{t,a}^L$ 、 $U_{t,a}^W$  及  $U_a^{NT}$  分別表示鐵路路段  $a$  之長度、可容納最大之列車長度、最大之列車重量及最多之動力車數量。另外，我們亦假設各表定路段之起訖點皆為已知，而本研究也依據這些表定路段建構表定路段網路圖  $\tilde{G}=(\tilde{N},S)$ ，該圖中每條節線即為一條表定路段，每個節點則為表定路段起訖點(請參考圖 2-3)。其中， $s \in S$  和  $\tilde{n} \in \tilde{N}$  分別表示表定路段及表定路段起訖點，而  $S$  與  $\tilde{N}$  則為這些表定路段及表定路段起訖點所構成之集合，並以  $l_s$  表示表定路段  $s$  之長度。

「旅行計畫」如前述可以分成 BD 和 TD，而本研究預先假設 BD 已先行求解完畢，僅針對 TD 進行求解。因此，停靠在各站點之車廂皆已連接完畢形成車廂集，且每個車廂集的起訖點、長度、重量及車廂數皆為已知。在此，本研究以  $b \in B$  表示停靠在各站點的車廂集，而  $B$  則是這些車廂集所構成之集合，並以  $l_b$ 、 $w_b$  及  $K_b$  分別表示車廂集  $b$  的長度、重量及車廂數。針對每個車廂集，本研究假設其單位行駛成本為  $C_b^{Tr}$ ，而各車廂集路徑集合  $P_b$  之聯集則以  $P$  表示(亦即  $P=\bigcup_{b \in B} P_b$ )，故車廂集  $b$  之總行駛本為  $C_b^{Tr} d_p$ ，其中  $d_p$  為路徑  $p$  之長度且  $p \in P_b$ 。另外，由於車廂集有可能不被運送，而每個沒被運送之車廂集  $b$  的懲罰成本為  $C^{MC} K_b$ ，亦即針對車廂集  $b$  內每個車廂皆須計算懲罰成本，並以二元變數  $\mu(b)$  判斷車廂集  $b$  是否要運送，若  $\mu(b)=1$  表示車

廂集  $b$  有被運送，反之則否。

針對動力車的部分，本研究分別以  $C^{SU}_t$ 、 $C^{Tr}_t$  及  $d^{Tr}_t$  表示動力車  $t$  之設置成本、行駛成本及行駛距離，並以  $T$  代表所有動力車構成之集合，所以每台動力車  $t$  皆為一條路徑。而每台行經鐵路路段  $a$  的動力車  $t$ ，所能掛載之車廂集個數則以  $U^{NB}_{t,a}$  表示之。如前述，動力車在行駛的途中可能會引發工作事件成本，在此本研究以  $C^{WE}$  表示之。同樣地，車廂集也有可能在運送的途中引發轉運成本。然而，各站點所引發之轉運成本皆不盡相同，有鑑於此本研究便以  $C^{BS}_i$  代表站點  $i$  所引發之單次車廂集轉運成本。在第二章中我們也曾提及，對於工作事件與車廂集轉運一般都會做次數上的限制，而本研究分別以  $U^{WE}_t$  和  $U^{BS}_b$  代表之。另外，動力車路徑所引發的單次人員不平衡成本與動力車不平衡成本，在本研究中則分別以  $C^{CI}$  及  $C^{TI}$  表示之。由於動力車行駛路徑及數量在本研究中皆為未知，故本研究以二元變數  $\psi(t)$  判斷動力車  $t$  是否行駛，若  $\psi(t)=1$  代表要行駛，反之則否。

總結上述，本研究只就 TD 分析求解，亦即在 BD 已事先求解完畢的條件下，找出動力車行駛路徑與車廂集運送路徑的搭配方式，所以各站的車廂集數量以及其起訖點皆為已知，且各車廂集的車廂數、長度、重量也為已知。在動力車路徑方面，本研究會針對其通過的鐵路路段限制車廂數、長度及重量，依規定本研究所產生出來的動力車路徑皆為表定路段所組成的。另外，針對車廂集轉運和工作事件，在本研究中也會納入考量並做次數上的限制。成本方面，除了車廂集行駛成本、動力車設置成本、動力車行駛成本等路徑相關成本外，本研究還會考量車廂集轉運成本、工作事件成本、人員不平衡成本、動力車不平衡成本以及車廂集未被運送之懲罰成本。我們把車廂集轉運成本與工作事件成本統稱為轉運相關成本，人員不平衡成本及動力車不平衡則統稱為平衡性相關成本。以下表 3-1 及表 3-2 分別條列了研究中用到的集合與參數。

表 3-1 集合說明表

| 集合          | 說明                      | 集合    | 說明                     |
|-------------|-------------------------|-------|------------------------|
| $B$         | 車廂集 $b$ 構成之集合           | $A$   | 鐵路路段 $a$ 構成之集合         |
| $T$         | 動力車 $t$ 構成之集合           | $A_t$ | 動力車 $t$ 會經過之鐵路路段構成之集合  |
| $N$         | 站點 $n$ 構成之集合            | $A_b$ | 車廂集 $b$ 會經過之鐵路路段構成之集合  |
| $\tilde{N}$ | 表定路段起訖點 $\tilde{n}$ 之集合 | $A_s$ | 表定路段 $s$ 會經過之鐵路路段構成之集合 |
| $N_b$       | 車廂集 $b$ 所經過站點構成之集合      | $S$   | 表定路段 $s$ 構成之集合         |
| $N_t$       | 動力車 $t$ 所經過站點構成之集合      | $S_t$ | 動力車 $t$ 所經過表定路段構成之集合   |
| $P_b$       | 車廂集 $b$ 之路徑集合           | $P$   | 車廂集路徑集合 $P_b$ 之聯集      |

表 3-2 參數說明表 I

| 符號         | 說明                              | 符號             | 說明                             |
|------------|---------------------------------|----------------|--------------------------------|
| $C_b^{Tr}$ | 車廂集 $b$ 之單位旅行成本                 | $d_p^{Tr}$     | 車廂集路徑 $p$ 之行駛距離                |
| $C_t^{Tr}$ | 動力車 $t$ 之單位旅行成本                 | $K_b$          | 車廂集 $b$ 之車廂數                   |
| $C^{SU}$   | 單一動力車設置成本                       | $d_a$          | 鐵路路段 $a$ 之長度                   |
| $C^{MC}$   | 車廂未被運送的懲罰成本                     | $d_s$          | 表定路段 $s$ 之長度                   |
| $C^{CI}$   | 動力車不平衡成本 (Train Imbalance Cost) | $U_{t,a}^{NB}$ | 動力車 $t$ 行經之鐵路路段 $a$ 可容納之最大車廂集數 |
| $C^{TI}$   | 人員不平衡成本 (Crew Imbalance Cost)   | $U_{t,a}^L$    | 動力車 $t$ 行經之鐵路路段 $a$ 可容納之最大列車長度 |
| $C^{WE}$   | 工作成本 (Work Event Cost)          | $U_{t,a}^W$    | 動力車 $t$ 行經之鐵路路段 $a$ 可容納之最大列車重量 |
| $C_i^{BS}$ | 站點 $i$ 之轉運成本 (Block Swap Cost)  | $U_b^{BS}$     | 車廂集 $b$ 最多可轉運之次數               |
| $l_b$      | 車廂集 $b$ 之長度                     | $U_t^{WE}$     | 動力車 $t$ 最多工作事件之次數              |
| $w_b$      | 車廂集 $b$ 之重量                     | $U_a^{NT}$     | 鐵路路段 $a$ 段所能容納最多動力車數           |

## 3.2 求解方法

### 3.2.1 求解流程

如第二章所述，KOPPA 在產生動力車路徑時未將車廂集路徑納入考量，導致其在求解完 TR 仍需求解一整數規劃模型，以確保各車廂集皆能運送。而為了避免此種情形，在產生動力車路徑的同時，我們亦須考慮車廂集的行駛方式。然而，在研究中我們僅知各車廂起訖點，對於動力車路徑則須自行設計。因此，最直接的方式便是依據車廂集的資訊來建立動力車路徑。而由此本研究針對 TD 中的 TR 提出兩種動力車路徑產生程序：程序一(Procedure 1, P1)及程序二(Procedure 2, P2)，而此兩程序最大的不同在於產生動力車路徑的基準點不同。程序一先以各車廂集的起訖點作為動力車起訖點的參考點，接著透過修正這些參考點來得到列車的起訖點，最後由這些起訖點來產生動力車路徑。反觀程序二則是在已知車廂集行駛路徑的基礎下，依據這些路徑來產生動力車路徑。而此兩程序所產生之動力車路徑集合，則分別稱作  $T_{P1}$  與  $T_{P2}$ 。

針對 BTA，本研究提出一整數規劃模型，而此整數規劃模型須以動力車路徑及車廂集路徑作為輸入方能求解。針對動力車路徑的部分，我們可由程序一或程序二來取得，而車廂集路徑部分則需視其動力車路徑產生程序之選擇。若選擇程序一，則車廂集路徑需待動力車路徑產生完畢方可得知。若選擇程序二，則本研究便以通過各車廂集起訖點之最短路徑作為其行駛路徑。我們將此兩程序產生之車廂集路徑集合分別以  $P_{P1}$  與  $P_{P2}$  表示，而被整數規劃模型選取之動力車路徑所構成的集合則以  $T_S$  表示。

然而，若僅以先前 P1 或 P2 所產之動力車路徑作為 BTA 之輸入，會使最終的求解結果受到限制，而為了使解能更進一步改善，我們必增加新的動力機車路徑給 BTA。因此，動力車路徑除了由程序一及程序二所產生外，本研究還會依當前整數規劃模型中所選出的動力車路徑作為基礎(亦即  $T_S$ )，產生新的動力車路徑，此即列車路徑修正

程序(Train Modification)。該程序中，我們提出兩種修正方式來產生新的動力車路徑：  
 (1)是以減少平衡性相關性成本為目標，並藉由數學模式求解來產生的動力車平衡性  
 路徑新增方式(Balancing Trains)；(2)則是找出能相連的列車，並將它們合併產生新的  
 路徑的合併列車路徑新增方式(Merging Trains)，而此兩修正程序所產生之動力車路徑  
 集合則分別為  $T_{IMB}$  與  $T_M$ 。因此，列車路徑修正程序需在 BTA 以求解完的情況下才能  
 進行，而不能獨立進行動力車路徑的產生，故新的動力車路徑仍受到 BTA 的限制。

以下圖 3-1 為本研究之求解流程概念圖，與多數文獻相似，本研究首先處理 TR  
 接著再求解 BTA。除此之外，本研究還利用列車路徑修正程序更新動力車路徑集合  $T$   
 中的路徑，希望藉此獲得更好的求解結果。而之後的 3.2.2 節會對本研究所使用的疊  
 代式路徑生成演算法(Iterative Route Generation Algorithm, IRG)作更詳盡的說明。

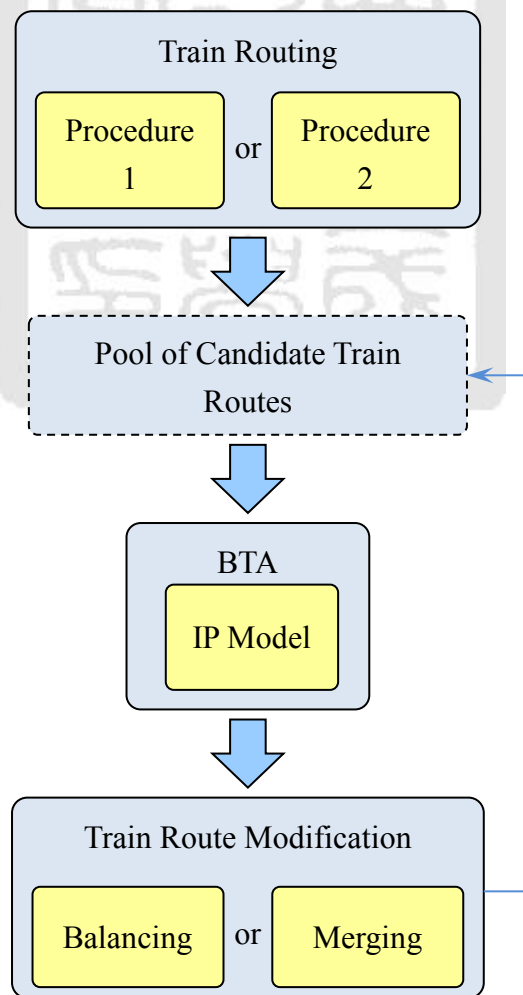


圖 3-1 求解流程概念圖



### 3.2.2 疊代式路徑生成演算法(Iterative Route Generation, IRG)

首先，IRG 以程序一或二來初始化動力車路徑集合  $T$ ，亦即  $T \leftarrow T \cup T_{p1}$  或  $T \leftarrow T \cup T_{p2}$ ，接著依據所選擇之程序產生車廂集路徑。若選擇程序一，則本研究就以  $P_{p1}$  中之路徑作為車廂集行駛路徑(及  $P \leftarrow P_{p1}$ )，反之，若選擇程序二，則以  $P_{p2}$  中之路徑作為車廂集行駛路徑(及  $P \leftarrow P_{p2}$ )。

其次，IRG 便從  $T$  中挑選動力車路徑，而為了使最初所選取之動力車路徑能運送所有車廂集，IRG 會從每個車廂集所對應之動力車路徑中隨機挑選一條作為整數規劃模型之輸入。我們將每個車廂集  $b$  對應之動力車路徑所構成之集合以  $T_b$  表示，而這些作為整數規劃模型輸入的動力車路徑所構成之集合則以  $T_C$  表示。接著，將  $T_C$  包含之動力車路徑與車廂集路徑輸入至整數規劃模型中求解。

最後，列車路徑修正程序會以整數規劃模型所選之動力車路徑為輸入，藉此產生新的動力車路徑，在研究中以  $T_S$  表示這些動力車路徑。接著，將  $T_S$  加至  $T$  中，以便作為下次整數規模型之輸入。

我們將上述過程稱為一回合，所以在每回合內包含了更新動力車路徑集合  $T$ 、從  $T$  中選取動力車路徑、求解整數規劃模型以及執行列車路徑修正程序等四大步驟，而本研究將持續疊代數回合直至最佳解收斂或是達到所設定的門檻值為止。另外，在求解整數規劃模型時，我們會以上一回的解作為起始解(亦即以  $T_S$  作為下一回合的起始解)，在研究中稱此為 Warm Start 機制，以便減少所需的求解時間且可維持一定的求解品質。再者，為了不讓求解時間過長，本研究也會限制每回合選取的動力車路徑數量。因本研究所提出之求解方法實屬列生成法之應用，每回合之每條動力車路徑皆代表一欄(column)，並以 Warm Start 機制以上回合之解當作本回合之初始解以確保求解品質不致劣化，並利用列車路徑修正程序增加新的欄以改進求解品質，下圖 3-2 為

IRG 之虛擬碼。

圖 3-2 疊代式路徑生成法之虛擬碼圖

---

**Iterative Route Generation Algorithm**

---

```

1: Initialize  $T \leftarrow \phi$ ,  $T_C \leftarrow \phi$ ,  $P \leftarrow \phi$ 
2: If select Procedure1
3:    $T \leftarrow T \cup T_{P1}$ 
4:    $P \leftarrow P \cup P_{P1}$ 
5: Else If select Procedure2
6:    $T \leftarrow T \cup T_{P2}$ 
7:    $P \leftarrow P \cup P_{P2}$ 
8: End If
9: For  $i=1, \dots, \text{Rep}$ 
10:  If  $i=1$ 
11:    For  $b \in B$ 
12:      randomly select a train route from  $T_b$ , and add it to  $T_C$ 
13:    End For
14:  Else
15:    While  $|T_C| < M$ 
16:      randomly select a train route from  $T$ , and add it to  $T_C$ 
17:    End While
18:  End If
19:  solve BTA with  $P$  and  $T_C$  as input
20:  initialize  $T_S$  with the solution from BTA
21:   $T_C \leftarrow \phi$ ,  $T_C \leftarrow T_S$ ,
22:  If select Balancing Trains route
23:     $T \leftarrow T \cup T_{IMB}$ 
24:  Else If select Merging Trains route
25:     $T \leftarrow T \cup T_M$ 
26:  End If
27: End For

```

---

### 3.3 動力車路徑規劃問題

由於本研究計算車廂集路徑成本的方式為該車廂集所包含的車廂乘上車廂集路徑長度(亦即  $d_p^{Tr} \cdot K_b$ )，而每個車廂集所包含之車廂可能多達數十節以上，因此加總起來勢必會對總成本有很大的影響。有鑑於此，本研究希望每個車廂集都能以最短路徑

的方式來運送，而由此我們衍伸出兩種動力車路徑產生式：(1)由動力車路徑中找出每個車廂集的最短運送方式的程序一；(2)依據車廂集在鐵路路網中的最短路徑來產生動力車路徑的程序二。而以下將分別說明在產生動力車路徑前的前置作業，以及兩種動力車路徑產生程序的詳細步驟。

### 3.3.1 前置作業

根據前述，動力車駕駛員只會在表定路段內駕駛動力車，所以本研究在求解之初就會將未被表定路段覆蓋之路段刪除。因此，在鐵路網路圖  $G=(N, A)$  中所有鐵路路段  $a$  皆為表定路段覆蓋之路段。另外，由於車廂集的數量及起訖點皆為已知，且其未能被運送之懲罰成本相當昂貴，故本研究將以所有車廂集皆能被運送的前提下來產生動力車路徑。

### 3.3.2 程序一(Procedure 1)

在本研究中動力車起訖點皆未知，而我們又須確保所產生的動力車路徑能順利地運送所有車廂集。因此，程序一先以各車廂集的起訖點作為動力車路徑起訖點的參考點，接著，找出有經過這些參考點的表定路段，並以這些表定路段起訖點作為動力車的起點或是訖點。但由於車廂集的起訖點可能座落在表定路段之內，以致其所對應的起訖點不只一個。如圖 3-3 所示，其中圖 3-3(a)為鐵路網路圖，當中的每條節線都為一段鐵路路段，並以不同顏色之實線表示覆蓋在該鐵軌上的表定路段，而圖 3-3(b)則為對應之表定路段網路，各表定路段之資訊則整理在表 3-3 中。圖中車廂集的起點座落在表定路段 3 內，而其訖點則與表定路段 2 及 4 的訖點重合，所以動力車的起點有兩個選擇(站點 1 及站點 6)。至於動力車訖點，因為車廂集之訖點已與表定路段訖點重合，故本研究便直接將此站點(站點 7)作為動力車之訖點。

表 3-3 表定路段設定表

| Crew Segment No. | Crew Origin | Crew Destination | Crew Path |
|------------------|-------------|------------------|-----------|
| 1                | 1           | 4                | 1-4       |
| 2                | 4           | 7                | 4-7       |
| 3                | 1           | 6                | 1-3-6     |
| 4                | 6           | 7                | 6-7       |

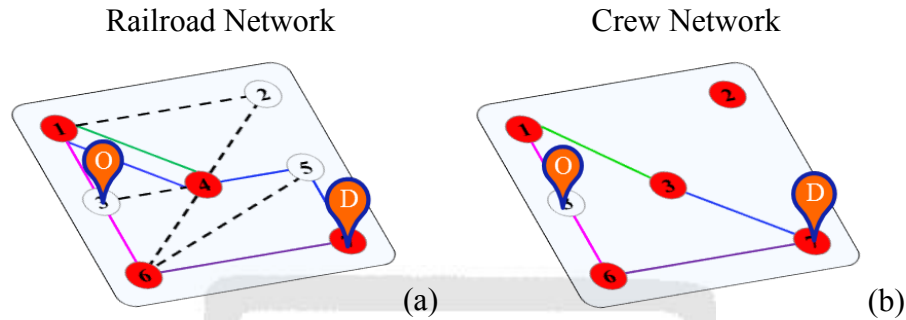


圖 3-3 動力車參考點說明圖

由上述的例子中，我們可以發現動力車起訖點可能會有多重選擇，而為了從中選出較佳的起點或訖點，本研究將對表定路段網路圖進行修正。首先，對於所有座落在表定路段內的車廂集起訖點如圖 3-3 中的車廂集起點，本研究將其獨立出來視為虛擬的動力車起訖點，接著，將所有未經過這些車廂集起訖點之表定路段刪除，然後再將這些表定路段的起點與訖點與虛擬的動力車起訖點相連。以圖 3-3 為例，修正過後的表定路段網路圖如圖 3-4 所示，圖中以虛線表示新增之節線而箭頭所指方向為節線之流向，所以連接站點 1 之虛擬節線為順向的表定路段 3，而連接站點 6 的虛擬節線則為逆向的表定路段 3。修正完畢之後，本研究便以每個車廂集起點與訖點作為動力車的起點與訖點，由此便能確保所產生之動力車路徑皆涵蓋了所對應的車廂集起訖點。

最後，本研究在修正過的表定路段網路圖上以通過每台動力車起訖點之最短路徑作為其行駛路徑。因此，以圖 3-3 為例所產生的動力車路徑為 3→6→7，而 3→6 代表順向的表定路段 3，所以動力車實際的路徑 1→6→7，而對應到的鐵路路網則為 1→3→6→7。透過此方式，本研究便可以最短的動力車路徑來運送車廂集，而這也是程序一在產生動力車路徑時的主要概念。

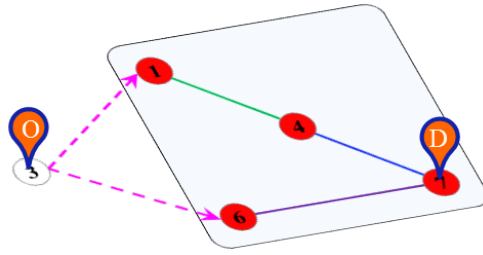


圖 3-4 表定路段網路圖(修正)

處理完動力車路徑之後，本研究接著產生車廂集路徑。根據前述，每一個車廂集皆會對應到一條動力車路徑。因此，本研究便根據每個車廂集所對應的動力車路徑來產生其路徑，而產生方式為在該車廂集所對應的動力車路徑下，以通過該車廂集起訖點的最短路徑作為其行駛路徑，所以在圖 3-3 中的車廂集行駛路徑為  $3 \rightarrow 6 \rightarrow 7$ 。

然而若採用程序一所產生的動力車路徑，可能會使車廂集有繞路的情況發生，如圖 3-5 所示。圖中車廂集的起訖點分別為站點 1 及 7，由於此兩站點皆與表定路段起訖點重合，所以若根據程序一的產生方式，我們只需從表定路段網路圖中找出通過站點 1 及 7 的最短路徑即為該車廂集所對應之動力車路徑，而該動力車路徑為  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 7$ ，接著再產生車廂集路徑為  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 7$ 。然而，車廂集實際上最短的路徑應為  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 7$ 。

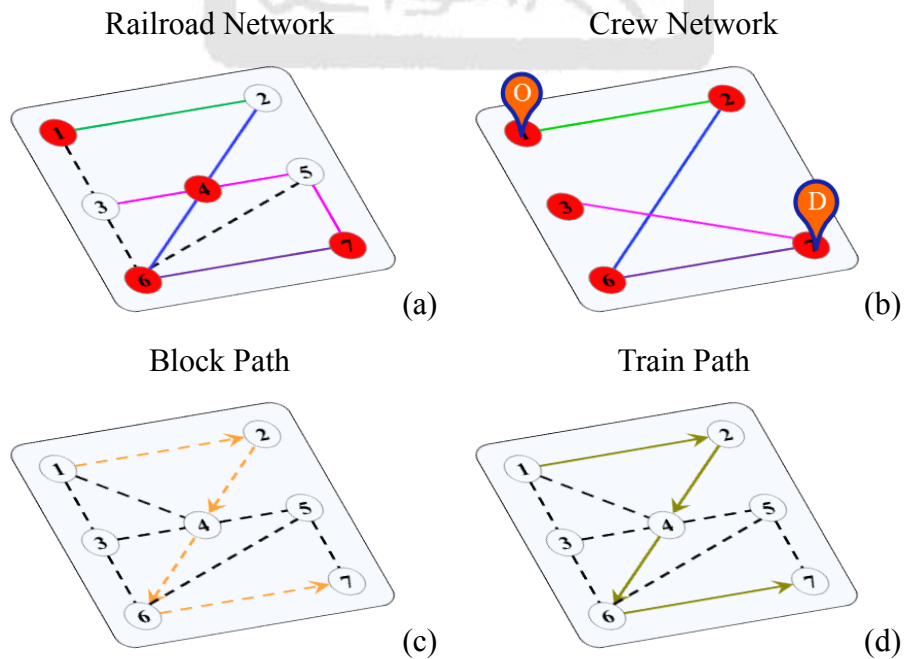


圖 3-5 程序一之動力車路徑說明圖

### 3.3.3程序二(Procedure 2)

有別於程序一直接在表定路段網路中產生車廂集路徑的方式，程序二會預先使各車廂集的行駛路徑皆為其在原始鐵路網路中通過其起訖點的最短路徑。假使有一車廂集  $b$  須從  $n_1$  運送至  $n_2$ ，則程序二開始便會以通過  $n_1$  及  $n_2$  的最短路徑作為車廂集  $b$  的行駛路徑，以圖 3-6 為例，該路徑為  $n_1 \rightarrow n_6 \rightarrow n_8 \rightarrow n_2$  且其所通過的鐵路路段依序為  $a_1$ 、 $a_2$  及  $a_3$ 。如 3.3.1 節所述，所有鐵路路段在本研究中皆會被表定路段所覆蓋，而在圖 3-6 中以虛線表示流經每段鐵路路段的表定路段，所以流經鐵路路段  $a_1$  的表定路段有  $s_1$ 、 $s_5$  及  $s_7$ ， $a_2$  的有  $s_1$  與  $s_5$ ，而  $a_3$  的則有  $s_5$  與  $s_{11}$ 。此外，圖 3-6 中實心的圓圈為表定路段起訖點，以  $s_5$  為例，其起訖點分別為  $n_1$  及  $n_8$ ，而其餘表定路段皆以此類推。

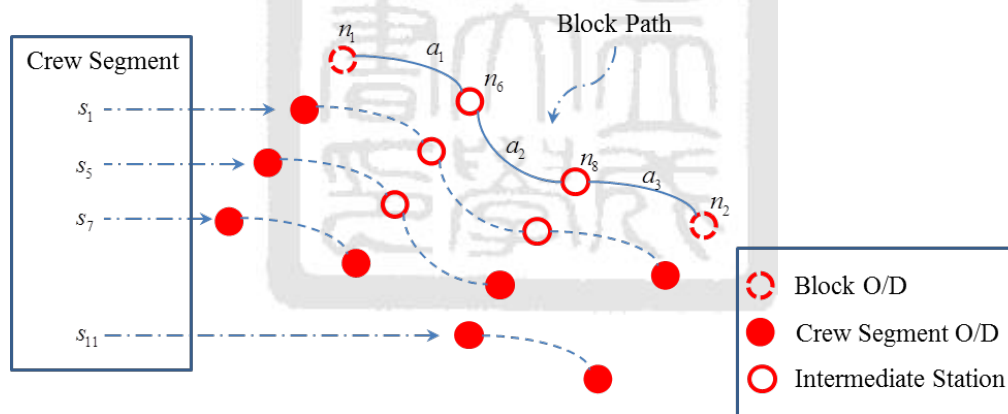


圖 3-6 車廂集路徑情況圖

在確立好各車廂集的行駛路之後，接著便是針對每個車廂集路徑列舉出所有流經該路段的表定路段如圖 3-7 所示，而現下的問題便是如何串聯這些表定路段以形成動力車路徑。

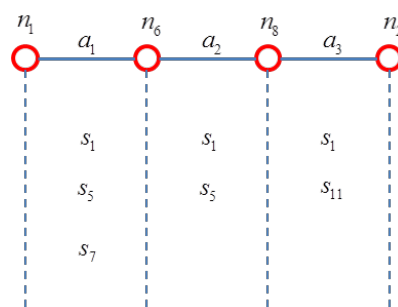


圖 3-7 表定路段條列圖

假使我們將圖 3-7 中流經鐵路路段  $a_1$  的表定路段  $s_1$  與流經鐵路路段  $a_2$  的表定路段  $s_5$  相連，而由圖 3-6 可知  $s_1$  的訖點與  $s_5$  的起點不同，所以動力車駕駛員不能同時選擇  $s_1$  與  $s_5$  作為其行駛路線。因此，對於此種表定路段連接方式，我們就必須設置兩台動力車才能使車廂集順利通過鐵路路段  $a_1$  與  $a_2$ ，而這也表示我們必須多花一次的動力車設置成本與車廂集轉運成本，且亦有可能會引發轉運車廂之工作事件。

若我們將流經鐵路路段  $a_1$  的表定路段  $s_1$  與流經鐵路路段  $a_2$  的表定路段  $s_1$  相連，而在此種連接方式下，由於鐵路路段  $a_1$  與  $a_2$  皆被涵蓋在同一表定路段之內，所以只需一台動力車便可使車廂集順利通過鐵路路段  $a_1$  與  $a_2$  而不需轉運。另外，針對鐵路路段  $a_2$  與  $a_3$ ，我們也可分別以  $s_5$  及  $s_{11}$  作為動力車行駛之表定路段。儘管兩者為不同的表定路段，但  $s_5$  的訖點與  $s_{11}$  的起點相同，換句話說，此兩表定路段可互相連接。因此，動力車駕駛員可以同時選擇此兩表定路段作為其行駛的路線，卻不會引發額外的設置成本與轉運成本。

透過上面的分析，我們發現對於車廂集行駛路徑中任兩條相鄰的鐵路路段如  $a_2$  與  $a_3$ ，若選擇相同的表定路段或可相連的表定路段如  $s_5$  與  $s_{11}$  作為動力車路徑的連接方式，則我們只需一台動力車便可使車廂集通過這兩段鐵路路段。反之，若是選擇無法



相連的表定路段作為動力車路徑的连接方式，則必須花費額外的動力車設置成本及轉運成本，方能使車廂順利地運行。

然而，為了使每個車廂集在運送時，皆能以最少轉運次數及最少動力車來運送，程序二必須找出流經每段車廂集路徑的表定路段的最佳連接方式。根據上述，最佳連接方式便是針對每段相鄰的車廂集路段，以相同或是彼此可相連的表定路段來連接，如此便可確保車廂集在行駛的途中，能以最少轉運次數及最少動力車來運送。

為了達到此一目的，程序二首先以流經該車廂集路徑的所有表定路段來建構網路圖  $\hat{G} = (\hat{N}, \hat{A})$ ，所以每條車廂路徑皆有對應的網路圖  $\hat{G}$ 。 $\hat{G}$  網路圖中的每個節點即為一條表定路段，每條節線連接方式則是依照車廂集路徑之次序來連接。

以圖 3-7 為例，程序二會先把流經鐵路路段  $a_1$  的表定路段  $s_1$ 、 $s_5$  及  $s_7$  與流經  $a_2$  的  $s_1$  與  $s_5$  相連，接著再將流經  $a_2$  的  $s_1$  及  $s_5$  與流經  $a_3$  的  $s_1$  及  $s_{11}$  相連。若節線所相連的兩條表定路段是同一條，則其長度為 0(即不用換 crew)，反之則為 1(即必須換 crew)，而針對流經車廂集路徑首段與末段的表定路段則分別以虛擬起點與訖點與之相連，在圖 3-8 中則繪製了以圖 3-7 為基底所建構的  $\hat{G} = (\hat{N}, \hat{A})$  網路，圖中節線上的數字代表長度。

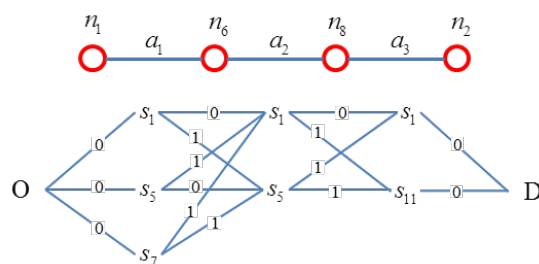


圖 3-8 網路圖  $\hat{G} = (\hat{N}, \hat{A})$

在建構完網路圖  $\hat{G} = (\hat{N}, \hat{A})$  之後，接著我們只須在網路圖上找出通過虛擬起訖點的最短路徑即可得知表定路段的最佳連接方式，而在本研究中以  $L$  代表此最短路徑之長度。在程序二中，我們將採用 DFS (Depth First Search) 演算法找出長度介於  $L$  與  $L + K$



( $K$  為自行設定之常數)之間的所有路徑 (如此較能提供更多候選路線, 或可改善求解品質), 其中每條路徑皆代表著一條動力車路徑。

因此, 若以圖 3-5 的鐵路路網與表定路段網路為基礎, 程序二所產生的動力車路徑及車廂集路徑則如圖 3-9 所示。由於程序二會先假設每個車廂集路徑為通過其起訖點的最短路徑, 所以在圖 3-9 中車廂集路徑為  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 7$ , 而所對應的動力車路徑分別為  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 6$  與  $3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 7$ 。

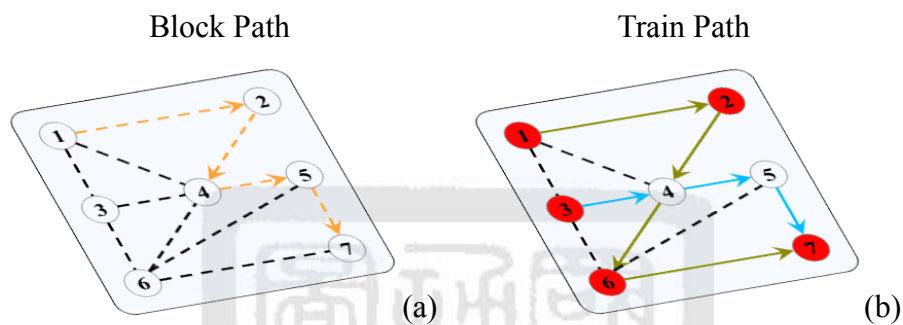


圖 3-9 程序二之動力車路徑說明圖

總結上述, 不論程序一或二都希望車廂集在其所產生的動力車路徑下, 都能以最短的行駛距離來運送。首先, 程序一以各車廂集起訖點作為列車起訖點, 並從表定路段網路圖中找出通過這些起訖點的最短路徑作為動力車路徑, 接著再從動力車路徑中找出每個車廂集的最短路徑。因此, 在程序一中每個車廂集都有一台動力車可將其從起點運送至訖點, 而該動力車所行駛之路徑必為通過其起訖點的最短路徑, 但對車廂集路徑卻未必為最短(如圖 3-5)。

其次, 程序二則是依據車廂集在鐵路路網中的最短路徑來產生動力車路徑, 而由於表定路段的限制一條車廂集路徑可能需要一條以上的動力車路徑才能完全覆蓋(如圖 3-9), 所以對於某個車廂集而言, 在其運送的過程中可能需要兩台以上的動力車用接力的方式, 將其從起點運送至訖點。因此, 儘管程序二產生的動力車路徑可以確保車廂集一定行駛在鐵路路網中的最短路徑, 但其也可能引發額外的轉運成本及動力車設置成本。

### 3.4 車廂集裝載計畫

在有了車廂集路徑與動力車路徑之後，本研究便以整數規劃模型求解車廂集裝載計畫，並希望透過求解此模式得到在此動力車行駛路徑集合下的最佳車廂集運送方式。

#### 3.4.1 參數與變數定義

由於大部分已整理在表 3-1 與表 3-2 中，故本研究僅針對未在此兩表中提及的參數做描述，相關參數即變數定義則別整理在表 3-4 及 3-5 中：

表 3-4 參數說明表 II

| 符號          | 說明                  | 符號                   | 說明  |
|-------------|---------------------|----------------------|---|
| $N_p$       | 路徑 $p$ 會經過的站點所構成之集合 | $\theta_{t,n}^{out}$ | 指標參數，若站點 $n$ 為動力車之起點則為 1，反之為 0            |
| $\bar{N}_b$ | 車廂集 $b$ 的起訖點構成之集合   | $\rho_t^{\bar{s}}$   | 指標參數，若動力車 $t$ 經過表定路段 $s$ 且方向為順向則為 1，反之為 0 |
| $\bar{N}_t$ | 動力車 $t$ 的起訖點構成之集合   | $\theta_{t,n}^{in}$  | 指標參數，若站點 $n$ 為動力車之訖點則為 1，反之為 0            |
| $\bar{N}_T$ | 所有動力車起訖點構成之集合       | $\rho_t^{\bar{s}}$   | 指標參數，若動力車 $t$ 經過表定路段 $s$ 且方向為逆向則為 1，反之為 0 |
| $T_n$       | 經過站點 $n$ 的動力車構成之集合  | $\rho_t^a$           | 指標參數，若動力車 $t$ 經過鐵路路段 $a$ 則為 1，反之為 0       |
| $S_T$       | 所有被動力車經過的表定路段構成之集合  |                      |   |

表 3-5 變數說明表

| 變數                       |   |
|--------------------------|---|
| $x(b, p, t, a)$          | $\begin{cases} 1, & \text{車廂集 } b \text{ 在其行徑的路徑 } p \text{ 上的鐵軌 } a \text{ 是被動力車 } t \text{ 所掛載} \\ 0, & O.W. \end{cases}$ |
| $y(b, p, n)$             | $\begin{cases} 1, & \text{車廂集 } b \text{ 在其行徑的路徑 } p \text{ 上的站點 } n \text{ 發生轉運} \\ 0, & O.W. \end{cases}$                 |
| $\bar{y}(t, n, \lambda)$ | $\begin{cases} 1, & \text{動力車 } t \text{ 在其路徑上的第 } \lambda \text{ 個站點 } n \text{ 發生工作事件} \\ 0, & O.W. \end{cases}$          |
| $\sigma(b, p)$           | $\begin{cases} 1, & \text{車廂集 } b \text{ 的路徑 } p \text{ 被選取} \\ 0, & O.W. \end{cases}$                                      |

$$\mu(b) = \begin{cases} 1, & \text{車廂集 } b \text{ 不被運送} \\ 0, & O.W. \end{cases}$$

$$\psi(t) = \begin{cases} 1, & \text{火車 } t \text{ 被選取} \\ 0, & O.W. \end{cases}$$

$$\bar{L}(s), \tilde{L}(s) \in Z^+ \quad \text{記錄人員不平衡發生次數}$$

$$W^+(n), W^-(n) \in Z^+ \quad \text{記錄站點 } n \text{ 工作事件發生次數}$$

### 3.4.2 整數規劃模型

#### 目標式

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{t \in T} (C^{SU} + C_t^{Tr} d_t^{Tr}) \psi(t) + \sum_{b \in B} C_b^{Tr} \sum_{p \in P_b} K_b d_p^{Tr} \sigma(b, p) + C^{WE} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N_t - \bar{N}_t} \sum_{\lambda=1}^{\lambda_{t,n}} \bar{y}(t, n, \lambda) \\ & + \sum_{b \in B} \sum_{p \in P_b} \sum_{n \in N_p - \bar{N}_b} C_n^{BS} y(b, p, n) + \sum_{s \in S_T} C^{CI} (\bar{L}(s) + \tilde{L}(s)) + \sum_{n \in \bar{N}_T} C^{TI} (W^+(n) + W^-(n)) + C^{MC} \sum_{b \in B} K_b \mu(b) \end{aligned} \quad (3.1)$$

式(3.1)依據 3.1 節的描述主要可以分成四個部分，分別為路徑相關成本、轉運相關成本、平衡性相關成本，以及懲罰成本。其中，路徑相關成本包含了動力車行駛成本、動力車設置成本及車廂集行駛成本，而轉運相關成本則包含了工作事件成本與車廂集轉運成本；再來，平衡性相關成本包含了人員不平衡成本和動力車不平衡成本。其中，懲罰成本則是在車廂集未被運送的情況下所引發的成本。

#### 限制式

$$\sum_{(b,p) \in BP_a} l_b x(b, p, t, a) \leq U_{t,a}^L \quad \forall t \in T, \forall a \in A_t \quad (3.2)$$

$$\sum_{(b,p) \in BP_a} w_b x(b, p, t, a) \leq U_{t,a}^W \quad \forall t \in T, \forall a \in A_t \quad (3.3)$$

$$\sum_{(b,p) \in BP_a} x(b, p, t, a) \leq U_{t,a}^{NB} \quad \forall t \in T, \forall a \in A_t \quad (3.4)$$

$$\sum_{t \in T} \rho_t^a \psi(t) \leq U_a^{NT} \quad \forall a \in A \quad (3.5)$$

式(3.2)、(3.3)、(3.4)及(3.5)為容量相關限制式，並分別針對行駛在鐵路路段  $a$  上的列車限制其長度、重量、掛載車廂數以及通過鐵路路段  $a$  的動力車數目。

$$\sum_{n \in N_p - \bar{N}_b} y(b, p, n) \leq U_b^{BS} \quad \forall b \in B, \forall p \in P_b \quad (3.6)$$

$$\sum_{n \in N_t - \bar{N}_t} \sum_{\lambda=1}^{|\lambda_t|} \bar{y}(t, n, \lambda) \leq U_t^{WE} \quad \forall t \in T \quad (3.7)$$

式(3.6)與(3.7)為轉運相關限制式，分別限制車廂集轉運次數和工作事件次數。

$$\sum_{t \in TA_a} x(b, p, t, a) = \sigma(b, p) \quad \forall b \in B, \forall p \in P_b, \forall a \in A_p \quad (3.8)$$

$$\sum_{p \in P_b} \sigma(b, p) + \mu(b) = 1 \quad \forall b \in B \quad (3.9)$$

$$\psi(t) \geq x(b, p, t, a) \quad \forall t \in T, \forall a \in A_t, \forall (b, p) \in BP_a \quad (3.10)$$

式(3.8)、(3.9)、(3.10)及(3.11)為路徑相關限制式，是用來確保車廂集路徑的唯一性，和判斷動力車路徑的選取與否。

$$y(b, p, N_p^s) \geq \pm(x(b, p, t, A_p^s) - x(b, p, t, A_p^{s+1})) \quad \forall b \in B, \forall p \in P_b, s = 1, 2, \dots, |A_p| - 1, \forall t \in TA_{A_p^s} \cup TA_{A_p^{s+1}} \quad (3.11)$$

$$\sum_{\lambda=1}^{\lambda_{t, N_t^{\bar{s}+1}}} \bar{y}(t, N_t^{\bar{s}+1}, \lambda) \geq \pm(x(b, p, t, A_t^{\bar{s}}) - x(b, p, t, A_t^{\bar{s}+1})) \quad \forall t \in T, \bar{s} = 1, \dots, |A_t| - 1; \forall (b, p) \in BP_{A_t^{\bar{s}}} \cup BP_{A_t^{\bar{s}+1}} \quad (3.12)$$

式(3.12)及(3.13)用來判斷車廂集和列車分別在那些站點發生轉運及工作事件。

$$\bar{L}(s) - \bar{L}(s) = \sum_{t \in TR_s} \rho_t^{\bar{s}} \psi(t) - \sum_{t \in TR_s} \rho_t^{\bar{s}} \psi(t) \quad \forall s \in S_T \quad (3.13)$$

$$W^+(n) - W^-(n) = \sum_{t \in T} \theta_{t,n}^{out} \psi(t) - \sum_{t \in T} \theta_{t,n}^{in} \psi(t) \quad \forall n \in \bar{N}_T \quad (3.14)$$

式(3.14)及(3.15)則分別用來計算人員不平衡與動力車不平衡次數。透過上述模式求解後，本研究便可得知在動力車及車廂集路徑給定的情況下，其最佳的搭配方式為何。

$$x(b, p, t, a) \in \{0, 1\} \quad \forall b \in B, \forall p \in P_b, \forall t \in T, \forall a \in A_b \cap A_t \quad (3.15)$$

$$y(b, p, n) \in \{0, 1\} \quad \forall b \in B, \forall p \in P_b, n \in N_b - \bar{N}_b \quad (3.16)$$

$$\bar{y}(t, n, \lambda) \in \{0, 1\} \quad \forall t \in T, \forall n \in N_t - \bar{N}_t, \forall \lambda \in \lambda_t \quad (3.17)$$

$$\mu(b) \in \{0,1\} \quad \forall b \in B \quad (3.18)$$

$$\psi(t) \in \{0,1\} \quad \forall t \in T \quad (3.19)$$

$$\bar{L}(s), \tilde{L}(s), W^+(n), W^-(n) \in Z^+ \quad (3.20)$$

式(3.16)至(3.21)則為變數相關限制式，分別用來定義變數類型與值域範圍。

### 3.5 列車路徑修正程序(Train Route Modification)

在求解完整數規劃模式之後，本研究便可得知每個車廂集的運送方式以及所需要的動力車路徑。而為了使整數規劃模式所求得解能夠有進一步的改善，本研究將根據這些被選取的動力車路徑來產生新的動力車路徑。此一過程在本研究中稱為列車路徑修正程序，在程序中本研究又分別提出了兩種修正方式：(1)動力車平衡性路徑新增方式(Balancing Trains)與(2)合併列車路徑新增方式(Merging Trains)，以下將對此兩種新增方式做更詳盡地說明。

#### 3.5.1 動力車平衡性路徑新增方式(Balancing Trains)

該新增方式首先觀察每座站點的  $W^+(n)$  與  $W^-(n)$  值，並記錄兩者不相等的站點(亦即記錄有動力車不平衡之情形的站點)。若  $W^+(n)$  大於  $W^-(n)$ ，則表示流出之動力車數大於流進，所以我們必須增加流進之動力車數以抵銷不平衡之情形。反之，若  $W^-(n)$  大於  $W^+(n)$  則表示流進之動力車數大於流出，所以我們必須增加流出動力車數方能抵銷不平衡之情形。因此，對於  $W^-(n)$  大於  $W^+(n)$  的站點，我們可以將其視為動力車的起點，而對於  $W^+(n)$  大於  $W^-(n)$  的站點則可將其視為動力車之訖點。

確立好新動力車之起訖點後，接著便記錄  $\bar{L}(s)$  與  $\tilde{L}(s)$  不相等的表定路段(亦即有動力車不平衡之情形的表定路段)。若  $\bar{L}(s)$  大於  $\tilde{L}(s)$ ，則表示順向之動力車數大於逆向，

所以我們須增加逆向之動力車數以抵銷人員不平衡次數之情形。反之，若  $\bar{L}(s)$  大於  $\bar{L}(s)$ ，則表示逆向之動力車數多於順向。針對該表定路段，我們則須增加順向之動力車數以抵消人員不平衡之情形。因此，對於  $\bar{L}(s)$  大於  $\bar{L}(s)$  的表定路段，我們便以該表定路段的反方向作為動力車可能行駛之路段，而對於  $\bar{L}(s)$  大於  $\bar{L}(s)$  的表定路段，我們則以該表定路段的方向作為動力車可能行駛之路段。

由上述記錄之資訊我們便可建構網路圖  $\bar{G}=(\bar{N},\bar{A})$ ，其中， $\bar{N}$  為  $W^+(n)$  與  $W^-(n)$  不相等之站點與  $\bar{L}(s)$  與  $\bar{L}(s)$  不相等之表定路段的起訖點所構成之集合，而  $\bar{A}$  為  $\bar{L}(s)$  與  $\bar{L}(s)$  不相等之表定路段所構成之集合。因此，在  $\bar{G}$  網路圖中每個節點都是表定路段起訖點，而每條節條皆為表定路段。

根據此圖本研究可建立一整數規劃模型來決定流經每條節線的動力車數，而當中的目標式為最小化所有動力車行駛距離之總和，限制式則包含了流量守恆限制式及各段節線的容量限制式。流量守恆限制式為確保各站點流進之動力車數與流出的相等，容量限制式則限制流經每段節線之動力車數不得超過  $\bar{L}(s)$  或  $\bar{L}(s)$ ，如此便不會造成額外的人員不平衡成本。完整之數學模式則如下所示：

### 變數

$\bar{x}_{ij}^s$  流經節線  $(i,j)$  之動力車數量，而  $s$  為節線  $(i,j)$  所代表之表定路段

### 目標式

$$\text{Min} \sum_{(i,j) \in \bar{A}} d_s \bar{x}_{ij}^s \quad (3.21)$$

### 限制式

$$\sum_{j \in \bar{N}} \bar{x}_{ij}^s - \sum_{j \in \bar{N}} \bar{x}_{ji}^s = W^-(i) - W^+(i) \quad \forall i \in \bar{N} \quad (3.22)$$

$$0 \leq \bar{x}_{ij}^s \leq \bar{L}(s) + \bar{L}(s) \quad \forall (i,j) \in \bar{A} \quad (3.23)$$

$$\bar{x}_{ij}^s \in Z^+ \quad \forall (i, j) \in \bar{A} \quad (3.24)$$

透過求解此數學規劃模型，我們便可得知流經各段節線的動力車數量，接著再將  $W^-(n)$  大於  $W^+(n)$  之站點設為動力車之起點，而  $W^+(n)$  大於  $W^-(n)$  之站點則設為訖點，並以 FDA(Flow Decomposition Algorithm)搭配 DFS(Depth-First Search)列舉出所有從起點到訖點的可行路徑作為新的動力車行駛路徑。

### 3.5.2 合併列車路徑新增方式(Merging Trains)

該新增方式是以減少動力車設置成本為目標，也就是以較少的動力車數量來完成所有車廂集的運送。此新增方式先記錄整數規劃模型所選取的動力車路徑，接著判斷某兩條動力車路徑是否可連接，如果可以就將之連接以形成新的動力車路徑，所謂兩條動力車路徑可連接指的是這兩條動力車路徑可以指派同一位駕駛員去駕駛，而在動力車行駛網路中，則代表其中一條動力車路徑的訖點與另一條的起點相同，而由此我們便得到一批新的動力車路徑。

## 3.6 小結

在本章中，我們首先說明本研究使用之參數及假設，由於本研究僅針對 TD 進行探討，所以事先假設 BD 以求解完畢。因此，停靠在各站點之車廂皆以連接完畢形成車廂集，且各車廂集之起訖點、車廂數量、總長度以及總重量皆為已知。如第二章所述，TD 可分為 TR 與 BTA。對於 TR，在成本方面，本研究主要考量動力車設置成本、動力車行駛成本及平衡性相關成本，而在限制方面則有每段鐵路路段可容納之車廂數的限制。另外，本研究更進一步假設每條動力車路徑皆須由表定路段所組成，且每一段表定路段的起訖點皆為已知。對於 BTA，在成本方面則考量了車廂集行駛成本、轉運相關成本以及車廂集未被運送之懲罰成本，而在限制方面除了容量限制之外，本研究還加入了轉運次數之限制。

由於 BTA 須在動力車路徑為已知的情況下方能求解，故本研究先以程序一及二來產生初步的動力車與車廂集路徑，接著將所產生的動力車路徑及車廂集路徑輸入至整數規劃模型中求解。求解之後，本研究便得知所需之動力車路徑，接著本研究便把這些動力車路徑輸入至列車路徑修正程序中，並以動力車平衡性路徑新增方式或合併列車路徑新增方式來產生新的動力車路徑。最後再將這些新的動力車路徑加到整數規劃模型中重新求解，藉此提升求解品質，而本研究將反覆地執行動力車路徑修正程序及求解整數規劃模型直至解的改善程度令我們滿意為止。

針對 TR 本研究提出了程序一及二，程序一以車廂集起訖點作為動力車路徑起訖點之參考點，並從包含這些參考點的表定路段中訂出動力車起訖點，接著以通過這些動力車起訖點之最短路徑作為動力車行駛路徑。最後，依據這些動力車路徑來產生車廂集行駛路徑。程序二則是預先假設各車廂集之行駛路徑皆為通過其起訖點的最短路徑，並記錄流經這些路徑的表定路段，然後連接這些表定路段來形成動力車路徑。若依照程序一的產生方式，每個車廂集皆有一台專屬動力車可將其從起點運送至訖點，但車廂集路徑卻不一定為鐵路路網上的最短路徑。反觀程序二，每個車廂集皆行駛在鐵路路網中的最短路徑上，但其運送方式可能需由數台動力車以接力的方式來運送。

在列車路徑修正程序中，本研究同樣提出了兩種新增方式：(1)動力車平衡性路徑新增方式；(2)合併列車路徑新增方式。動力車平衡性路徑新增方式的主要理念為減少平衡性相關成本，而基於此本研究提出了一個整數規劃模型，並透過求解此模型來獲得新的動力車路徑。合併列車路徑新增方式則是以縮減車廂集在運送時所需的動力車數量為目標，並以串聯的方式來新增動力車路徑。上述兩種方式都須以先前整數規劃模型所求得結果當作輸入，亦即要在整數規劃模型求解完畢之後才能進行列車路徑修正程序，而以下第四章將先以一個小例子說明本研究中各項數值及成本的計算方式，接著再以測試資料進行數值分析。



## 第四章

### 數值分析

#### 4.1 範例說明

本節將以一個具有四座站點、五條鐵路路段及五個車廂集的小例子，說明在本研究中所考慮的各項因素、參數設定及各項成本的計算方式，而此範例的網路圖如圖 4-1 所示。

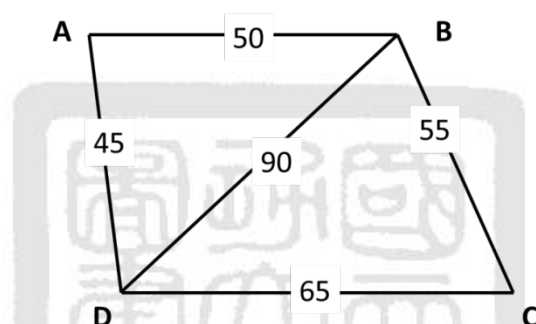


圖 4-1 範例網路圖

在本研究中，由於車廂設計問題已事先處理完畢，所以各站點車廂集數目、起訖點、長度重量與車廂集所含之車廂數目皆為已知。我們將這個範例所設定的車廂集相關參數整理在表 4-1 中。

表 4-1 車廂集相關參數設定表

| 車廂集 No. | 起點 | 訖點 | 車廂數量 | 長度(Feet) | 重量(Tons) |
|---------|----|----|------|----------|----------|
| Block1  | A  | C  | 50   | 3000     | 2500     |
| Block2  | A  | D  | 25   | 1500     | 1250     |
| Block3  | B  | D  | 40   | 2400     | 2000     |
| Block4  | D  | A  | 28   | 1680     | 1400     |
| Block5  | D  | B  | 16   | 960      | 800      |

鐵路路段相關參數如長度、可容納之車廂長度、重量等容量參數整理在表 4-2 中，而表定路段相關資訊則整理在表 4-3 中。根據前面章節所述，表定路段的連接方式為其起點至訖點的最短路徑。以本節中的範例來做說明，表定路段 1 的起訖點分別為站點 A 及 B，而通過這兩座站點的最短路徑為 A-B，所以表定路段 1 的連接方式就為 A-B。此外在本研究中，我們亦假設鐵路路段與表定路段皆為雙向且對稱。亦即，若存在一段鐵路路段或表定路段從站點 A 接至 B，則必定也存在一條鐵路路段或表定路段從站點 B 連接至 A，且兩者的參數設定都相同。

表 4-2 鐵路路段相關參數設定表

| 起點 | 訖點 | 距離(Miles) | 最大列車長度(Feet) | 最大承受重量(tons) | 最多動力車數量 |
|----|----|-----------|--------------|--------------|---------|
| A  | B  | 50        | 8000         | 10000        | 3       |
| A  | D  | 45        | 5000         | 11000        | 4       |
| B  | C  | 55        | 9000         | 9000         | 5       |
| B  | D  | 90        | 8500         | 10000        | 4       |
| C  | D  | 75        | 9200         | 11000        | 4       |

表 4-3 表定路段相關資訊表

| No. | 起點 | 訖點 | 連接方式 | 距離(miles) |
|-----|----|----|------|-----------|
| 1   | A  | D  | A-D  | 45        |
| 2   | B  | A  | B-A  | 50        |
| 3   | B  | D  | B-D  | 90        |
| 4   | B  | C  | B-C  | 55        |
| 5   | D  | C  | D-C  | 65        |

其餘參數如動力車設置成本、動力車旅行成本、車廂集旅行成本等與每座站點的轉運成本則分別整理在表 4-4 與 4-5 中。

表 4-4 各站點之轉運成本表

| 站點 | 車廂集轉運成本 |
|----|---------|
| A  | 30      |
| B  | 50      |
| C  | 50      |
| D  | 70      |

表 4-5 各項參數設定表

| 參數                        | 設定值  |
|---------------------------|------|
| 動力車設置成本(per train)        | 400  |
| 動力車旅行成本(per mile)         | 10   |
| 車廂集旅行成本(per mile per car) | 0.75 |
| 人員不平衡成本                   | 600  |
| 動力車不平衡成本                  | 1000 |
| 車廂未被運送之懲罰成本               | 5000 |
| 工作事件成本                    | 350  |
| 車廂集最多可轉運次數                | 3    |
| 動力車最多工作做事件次數              | 4    |
| 動力車最多可掛載車廂集數              | 8    |

在設定好各項參數後，本研究接著以一個可行解說明各項因素的計算方式，如工作事件次數、車廂集轉運次數、人員不平衡次數等本研究所考量之因素，以及各項成本之計算，此可行解將以三台動力車(Train1、Train2 及 Train3)運送五個車廂集(Block1~5)。另外，我們將可行解分成 TR 與 BTA 兩部分來說明。

首先在 TR 這部份，我們將每台動力車的行駛路徑、行駛距離、上卸載的車廂數以及所經過的表定路段記錄在表 4-6 中。例如 Train1 的行駛路徑為 A→D→A，行駛距離為 90(miles)，而其所選取之表路段為 1 號表定路段。

表 4-6 動力車路徑規劃問題之可行解

| No.    | 序列 | 站點 | 累積里程(miles) | 卸載<br>車廂數 | 上載<br>車廂數 | 經過之表定路段<br>No. |
|--------|----|----|-------------|-----------|-----------|----------------|
| Train1 | 1  | A  | 0           | 0         | 75        | 1              |
| Train1 | 2  | D  | 45          | 75        | 28        | 1              |
| Train1 | 3  | A  | 90          | 28        | 0         | 1              |
| Train2 | 1  | B  | 0           | 0         | 40        | 3              |
| Train2 | 2  | D  | 90          | 40        | 50        | 3              |
| Train2 | 3  | C  | 155         | 50        | 0         | 5              |
| Train3 | 1  | D  | 0           | 0         | 16        | 3              |
| Train3 | 2  | B  | 90          | 16        | 0         | 3              |
| 總共行駛里程 |    |    | 355         |           |           |                |

BTA 部份則記錄在表 4-7 中，其中包含了車廂集的行駛路徑、行駛距離、轉運點等相關資訊。舉例來說，Block1 先在站點 A 被 Train1 掛載，接著在站點 D 被卸載並掛載至 Train2，然後再由 Train2 運送至站點 C。因為 Block1 在站點 D 轉運(轉運站未包含車廂集的起訖點)，所以針對該站必須計其所對應的轉運成本，由表 4-4 可知該轉運成本為 70。至於 Block1 的行駛距離則為 Block1 的車廂數乘上所行經路段之距離，所以針對路段 A-D，Block1 所行駛的距離為 2250(=45\*50)。

表 4-7 車廂集裝載計畫可行解

| No.    | 序列 | 列車     | 起點 | 終點 | 轉運成本 | 路段長度 | 車廂數 | 行駛距離  |
|--------|----|--------|----|----|------|------|-----|-------|
| Block1 | 1  | Train1 | A  | D  | 70   | 45   | 50  | 2,250 |
| Block1 | 2  | Train2 | D  | C  | 0    | 65   | 50  | 3,250 |
| Block2 | 1  | Train1 | A  | D  | 0    | 45   | 25  | 1,125 |
| Block3 | 1  | Train2 | B  | D  | 0    | 90   | 40  | 3,600 |
| Block4 | 1  | Train1 | D  | A  | 0    | 45   | 28  | 1,260 |
| Block5 | 1  | Train3 | D  | B  | 0    | 90   | 16  | 1,440 |

在有上述可行解之後，本研究用表 4-8 及 4-9 分別計算人員不平衡次數與動力車不平衡次數。

表 4-8 人員不平衡計算表

| 表定路段方向 I | 表定路段方向 II | 方向 I<br>動力車數 | 方向 II<br>動力車數 | 不平衡次數 |
|----------|-----------|--------------|---------------|-------|
| A→D      | D→A       | 1            | 1             | 0     |
| B→D      | D→B       | 1            | 1             | 0     |
| D→C      | C→D       | 1            | 0             | 1     |
| 不平衡總次數   |           |              |               | 1     |

表 4-9 動力車不平衡計算表

| 站點     | 出發動力車數 | 終止動力車數 | 不平衡次數 |
|--------|--------|--------|-------|
| A      | 1      | 1      | 0     |
| B      | 1      | 1      | 0     |
| C      | 0      | 1      | 1     |
| D      | 1      | 0      | 1     |
| 不平衡總次數 |        |        | 2     |

附註：出發動力車數亦指以該站點作為起站的動力車數量，  
終止動力車數則為以該站為終站的動力車數。

各項成本計算則如下所示：

1. 動力車總設置成本=3(設置動力車數量)\*400(列車設置成本)=1,200
2. 動力車總旅行成本=355(列車總行駛里程)\*10(列車旅行成本)=3,350
3. 車廂集總旅行成本=12,925(車廂集總共行駛里程)\*0.75(車廂集旅行成本)=9693.75
4. 工作事件總成本=2(工作事件次數)\*350(工作事件成本)=700
5. 車廂集轉運總成本=70(表 4.7)
6. 人員不平衡總成本=1(表 4.8)\*600(人員不平衡成本)=600
7. 動力車不平衡總成本=2(表 4.9)\*1000(動力車不平衡成本)=2,000
8. 懲罰成本=0(未運送之總車廂數)\*5000(車廂集未被運送之懲罰成本)=0

可行解之總成本=17,613.75

## 4.2 數值實驗

### 4.2.1 測試資料與參數設定

本研究將以兩個從現實鐵路路段運輸系通中擷取來的測試資料(DataSet1, DataSet2)為基礎，並透過隨機的方式產生 20 筆與 DataSet1 大小相近的資料來進行測試，故本研究將測試 22 筆資料，而 DataSet1 與 DataSet2 的大小則記錄在表 4-10 中。測試環境為一台具有 Core i7 處理器及 4GB RAM 之個人電腦，並在 Windos 7 作業系統下使用 Gurobi 5.05 版的求解軟體進行求解，各項參數設定列於表 4-5。

表 4-10 測試資料比較表

|               | DataSet1 | DataSet2 |
|---------------|----------|----------|
| 站點數           | 94       | 221      |
| 車廂集數( $ B $ ) | 239      | 369      |
| 表定路段數         | 154      | 187      |

根據第三章，本研究針對 TR 提出了程序一及二來產生初步的動力車路徑，而 BTA 則是透過求解整數規劃模型，最後列車路徑修正程序同樣也提出了兩種新增方式。因此，每筆測試資料皆有六種測試方法，如表 4-11 所示。表中第一欄為各測試方法之簡稱，例如 P1N 為採用程序一(P1)搭配無列車路徑修正程序(N)之測試方法。

表 4-11 測試方法組合表

| Test Name          | P1N  | P1IMB     | P1M   | P2N  | P2IMB     | P2M   |
|--------------------|------|-----------|-------|------|-----------|-------|
| Procedure          |      | 1         |       |      | 2         |       |
| Train Modification | None | Imbalance | Merge | None | Imbalance | Merge |

針對每一種測試方法，本研究都各別疊代 15 次，而每回的求解時間上限皆設為 500 秒，並設定 Gap 值為 0.5%。換句話說，當求解時間達到 500 秒或是 Gap 值達到 0.5%時，該回合就會結束並開始下一回合，而我們將重覆進行 15 次。另外，每回合

給定的動力車數量則設定為 $|B|$ 台，亦即 $T_C$ 為各測試資料的車廂集數量，而各測試資料之設定請參考表 4-10。

#### 4.2.2 數值結果與分析

本小節先就原始之 DataSet1 與 DataSet2 分析討論，而其餘 20 筆以 DataSet1 為基礎隨機產生之測試資料的測試結果因與 DataSet1 之測試結果相近故其列於附錄中。以下表 4-12 及 4-13 則分別條列了 DataSet1 與 DataSet2 在測試後的總成本，而表 4-14 與 4-15 則分別為兩筆測試資料在不同測試方法下的各項成本之比例表。

表 4-12 DataSet1 之成本分析表

| Method               | Procedure1 |           |           | Procedure2 |           |           |
|----------------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
|                      | IMB        | Merge     | None      | IMB        | Merge     | None      |
| Train Modification   |            |           |           |            |           |           |
| Number of Iteration  | 15         |           |           | 15         |           |           |
| Block Travel Cost    | 1,565,250  | 1,565,250 | 1,565,250 | 1,556,660  | 1,556,660 | 1,556,660 |
| Train Travel Cost    | 397,585    | 363,540   | 378,032   | 389,239    | 359,496   | 370,279   |
| Block Swap Cost      | 2,060      | 1,730     | 1,760     | 2,470      | 2,140     | 2,280     |
| Work Event Cost      | 35,700     | 47,250    | 35,000    | 39,550     | 46,200    | 34,650    |
| Crew Imbalance Cost  | 22,800     | 32,400    | 33,600    | 19,200     | 28,800    | 26,400    |
| Train Imbalance Cost | 20,000     | 46,000    | 46,000    | 22,000     | 42,000    | 40,000    |
| Missed Cost          | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         | 0         |
| Total Cost           | 2,043,400  | 2,056,170 | 2,059,640 | 2,029,120  | 2,035,300 | 2,030,270 |

表 4-13 DataSet2 之成本分析表

| Method               | Procedure1 |           |           | Procedure2 |           |           |
|----------------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
|                      | IMB        | Merge     | None      | IMB        | Merge     | None      |
| Train Modification   |            |           |           |            |           |           |
| Number of Iteration  | 15         |           |           | 15         |           |           |
| Block Travel Cost    | 2,186,140  | 2,186,140 | 2,186,140 | 2,177,720  | 2,177,720 | 2,177,720 |
| Train Travel Cost    | 466,132    | 447,342   | 459,342   | 462,440    | 455,575   | 457,991   |
| Block Swap Cost      | 2,880      | 3,050     | 3,060     | 4,170      | 4,200     | 4,050     |
| Work Event Cost      | 63,700     | 74,900    | 64,050    | 64,050     | 67,200    | 63,350    |
| Crew Imbalance Cost  | 10,800     | 12,600    | 12,600    | 12,600     | 15,000    | 15,600    |
| Train Imbalance Cost | 10,000     | 18,000    | 18,000    | 10,000     | 16,000    | 16,000    |
| Missed Cost          | 420,000    | 420,000   | 420,000   | 420,000    | 420,000   | 420,000   |
| Total Cost           | 3,159,650  | 3,162,030 | 3,163,190 | 3,150,980  | 3,155,700 | 3,154,710 |

表 4-14DataSet1 之成本比例表

| Method               | Procedure1 |        |        | Procedure2 |        |        |
|----------------------|------------|--------|--------|------------|--------|--------|
| Train Modification   | IMB        | Merge  | None   | IMB        | Merge  | None   |
| Number of Iteration  | 15         |        |        | 15         |        |        |
| Block Travel Cost    | 76.60%     | 76.12% | 76.00% | 76.72%     | 76.48% | 76.67% |
| Train Travel Cost    | 19.46%     | 17.68% | 18.35% | 19.18%     | 17.66% | 18.24% |
| Block Swap Cost      | 0.10%      | 0.08%  | 0.09%  | 0.12%      | 0.11%  | 0.11%  |
| Work Event Cost      | 1.75%      | 2.30%  | 1.70%  | 1.95%      | 2.27%  | 1.71%  |
| Crew Imbalance Cost  | 1.12%      | 1.58%  | 1.63%  | 0.95%      | 1.42%  | 1.30%  |
| Train Imbalance Cost | 0.98%      | 2.24%  | 2.23%  | 1.08%      | 2.06%  | 1.97%  |
| Missed Cost          | 0.00%      | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%      | 0.00%  | 0.00%  |
| Total Cost           | 100%       | 100%   | 100%   | 100%       | 100%   | 100%   |

表 4-15DataSet2 之成本比例表

| Method               | Procedure1 |        |        | Procedure2 |        |        |
|----------------------|------------|--------|--------|------------|--------|--------|
| Train Modification   | IMB        | Merge  | None   | IMB        | Merge  | None   |
| Number of Iteration  | 15         |        |        | 15         |        |        |
| Block Travel Cost    | 69.19%     | 69.14% | 69.11% | 69.11%     | 69.01% | 69.03% |
| Train Travel Cost    | 14.75%     | 14.15% | 14.52% | 14.68%     | 14.44% | 14.52% |
| Block Swap Cost      | 0.09%      | 0.10%  | 0.10%  | 0.13%      | 0.13%  | 0.13%  |
| Work Event Cost      | 2.02%      | 2.37%  | 2.02%  | 2.03%      | 2.13%  | 0.20%  |
| Crew Imbalance Cost  | 0.34%      | 0.40%  | 0.40%  | 0.40%      | 0.48%  | 0.49%  |
| Train Imbalance Cost | 0.32%      | 0.57%  | 0.57%  | 0.32%      | 0.51%  | 0.51%  |
| Missed Cost          | 13.29%     | 13.28% | 13.28% | 13.33%     | 13.31% | 13.31% |
| Total Cost           | 100%       | 100%   | 100%   | 100%       | 100%   | 100%   |

根據表 4-12 及 4-13，我們發現在所有測試方法中，以 P2 搭配 Balancing Trains 可以獲得最低的總成本。另外，P2 所產生之車廂集路徑成本較低，其原因在第三章中曾提及，主要因為 P2 所產生之車廂集路徑為實體鐵路上的最短路徑，而 P1 卻須依據所產生之動力車路徑來產生，所以會使車廂集產生繞路的情況，而由表 4-12 及 4-13 我們可再次驗證。接著在表 4-14 與 4-15 中，則分別整理了 DataSet1 與 DataSet2 的各項成本佔總成本之比例，從表中可以明顯看出不論是在何種測試方法下，DataSet1 與 DataSet2 皆以車廂集的行駛成本佔有最高之比例，其次則為動力車行駛成本。因此，在研究中我們以最小化動力車行駛距離以及車廂集行駛距離為兩動力車路徑產生序



的出發點，確實可以有效地降低總成本。

另外，在表 4-15 中的每種測試方法皆有近 13% 的懲罰成本，透過分析我們發現造成該成本的原因在於 DataSet2 中有五個車廂集的起點或是訖點未覆蓋在表定路段之內，以致動力車無法順利運這些車廂集，從而導致懲罰成本的產生。因此，在目前所設定的參數下，各車廂集之運送成本皆小於懲罰成本，故若非上述之情況，所有車廂集皆會被運送。而根據本研究提出之整數規劃模型，各車廂集是否被運送皆須通過運算，並藉由變數  $\mu(b)$  來做判斷，而非強制限制每個車廂集都須運送，如此在遇到 DataSet2 之情形時，便不會有無解之情況產生，且可隨著參數之變動做出最適之選擇。

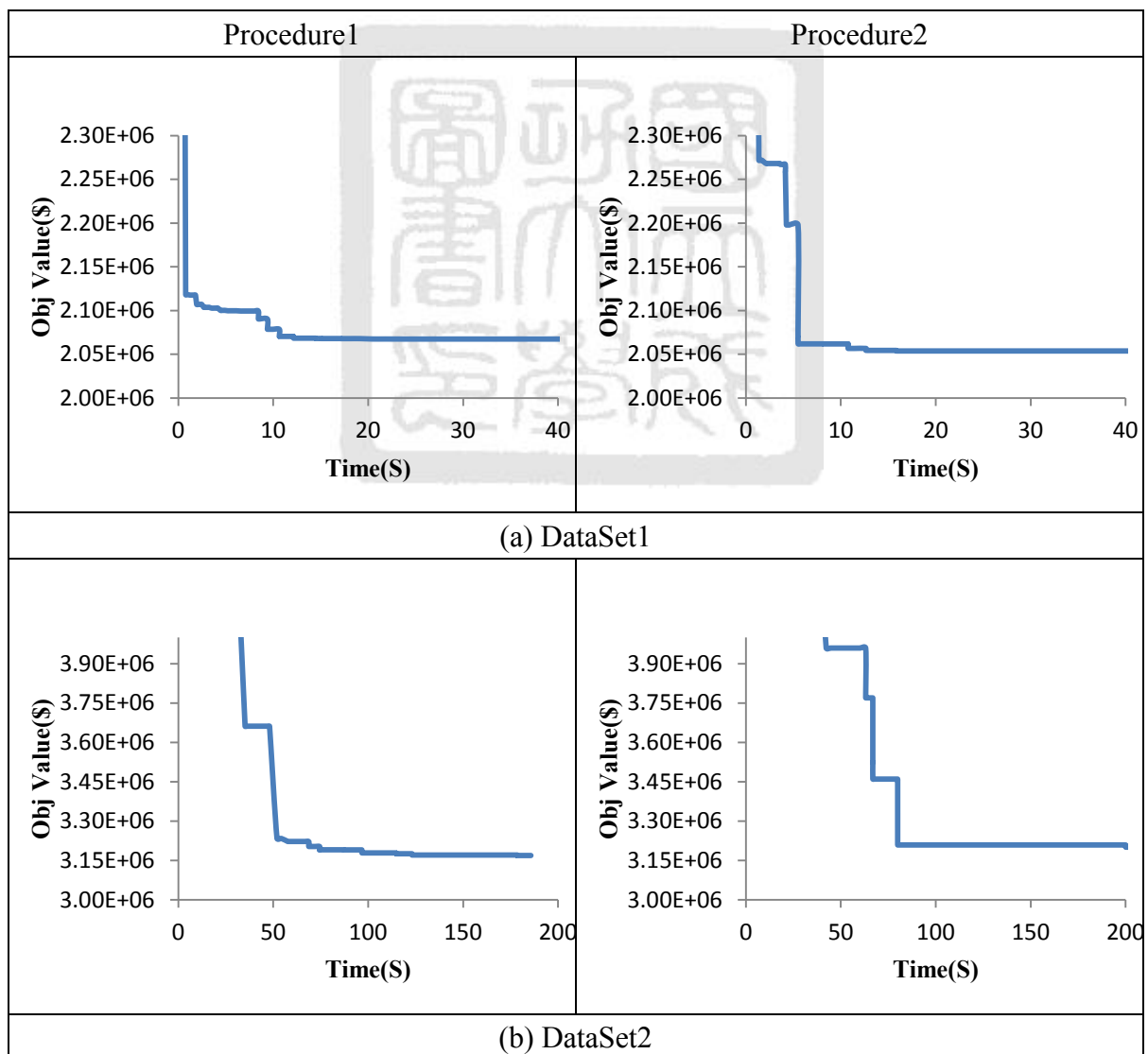


圖 4-2 DataSet1 與 DataSet2 之目標函式值對時間圖

在求解時間方面，本研究以圖 4-4 來做說明，圖中左半邊為 P1 下的目標函式值對時間圖，而右半邊則為 P2 下的，並以(a)及(b)兩小圖區別 DataSet1 與 DataSet2。由於不同測試方法所得到的目標函式值對時間圖皆相近，故本研究僅擷取列車路徑修正程序採用 None 的測試資料。此外，本研究為了方便分析求解速度，對於 DataSet1 我們只繪製出 40 秒內的目標函式值，而 DataSet2 則繪製出 200 秒內的。

從中我們發現不論是 P1 或是 P2，皆可使 DataSet1 的總成本在 40 秒內收斂至約 205 萬單位，而 DataSet2 則可收斂至約 315 萬單位，兩者皆與最終成本只相差約百分之一個單位，由此可突顯本研究所提之求解方法在速度上有不錯的成效。而本研究也將所求得的结果與參加 INFORMS 所舉辦的鐵道競賽的前兩名隊伍 KOPPA 和 OR@UNIMI 以及 Lee et al. (2013)進行比較，我們將比較結果列在表 4-16 中。雖然，本研究在 DataSet1 上略輸 KOPPA，可是在與現實情況較近的 DataSet2 上，本研究卻有最佳的表現。

表 4-16 各研究之結果比較表

|                  | DataSet1  |          | DataSet2  |          |
|------------------|-----------|----------|-----------|----------|
|                  | Cost (\$) | Time (s) | Cost (\$) | Time (s) |
| KOPPA            | 2,043,471 | 45       | 3,187,999 | 225.7    |
| OR@UNIMI         | 2,212,163 | 36000    | 3,538,924 | 36000    |
| Lee et al.(2013) | 2,069,752 | 342      | 3,240,177 | 2700     |
| 本研究              | 2,053,840 | 40       | 3,168,760 | 200      |

另外，我們也將最後一回合所選取之動力車比例記錄在表 4-17 與 4-18 中。其中，Initial Train 代表起始之動力車路徑，亦即  $T_{P1}$  或  $T_{P2}$  集合中之動力車路徑，而 Balancing Trains 與 Merging Trains 則各別表示列車路徑修正程序產生之動力車路徑。從中可以看出不論是在 DataSet1 或是 DataSet2，本研究產生之起始動力車路徑皆佔有五成以上的比例，這也意味著起始之動力車路徑即可獲得不錯的成果。而本研究所設計之 IRG 演算法，在沒有列車路徑修正程序的情況下仍可執行，因此針對上述之情況，本研究可自行調整求解機制，藉此縮短求解時間。因此，本研究所提出之求解方法除了在求

解速度上有突出的表現，還可依照資料的特性調整求解機制以此提升該方法之實用性。

表 4-17DataSet1 之動力車種類比例表

| Procedure          | 1    |       |      | 2    |       |      |
|--------------------|------|-------|------|------|-------|------|
| Train Modification | IMB  | Merge | None | IMB  | Merge | None |
| Initial Train      | 88%  | 60%   | 100% | 89%  | 62%   | 100% |
| Balancing Trains   | 12%  | 0%    | 0%   | 11%  | 0%    | 0%   |
| Merging Trains     | 0%   | 40%   | 0%   | 0%   | 38%   | 0%   |
| Total              | 100% | 100%  | 100% | 100% | 100%  | 100% |

表 4-18DataSet2 之動力車種類比例表

| Procedure          | 1    |       |      | 2    |       |      |
|--------------------|------|-------|------|------|-------|------|
| Train Modification | IMB  | Merge | None | IMB  | Merge | None |
| Initial Train      | 96%  | 73%   | 100% | 99%  | 86%   | 100% |
| Balancing Trains   | 4%   | 0%    | 0%   | 1%   | 0%    | 0%   |
| Merging Trains     | 0%   | 27%   | 0%   | 0%   | 14%   | 0%   |
| Total              | 100% | 100%  | 100% | 100% | 100%  | 100% |

### 4.3小結

針對動力車設計問題，本研究採用兩組從現實鐵路路段系統中簡化而來的測試資料：DataSet1 與 Dataset2 及 20 筆以 DataSet1 為基礎隨機產生的測試資料進行相關的數值試驗。由於本研究針對 TR 提出了程序一與二兩種動力車路徑產生方式產生動力車路徑，以及 Balancing Trains 與 Merging Trains 兩種列車路徑修正程序，因此再加上沒有採用列車路徑修正程序(None)的測試方法一共 12 種。

針對這 12 種測試方法，本研究皆以 IRG 演算法求解，並設定總疊代次數為 15 次，而每回合終止條件則設定求解時間不得超過 500 秒以及 Gap 小於 0.5%。根據測試結果，本研究發現不論是在 DataSet1 還是 DataSet2，都以採用  $T_{p2}$  為起始動力車路徑之集合，可得到較佳的結果，而不論採用何種動力車路徑產生程序，其在求解速度方面都有不錯的表現。本研究也將所求得的结果與 INFORMS 和 Lee et al. (2013)進行

比較。

如第二章所述，KOPPA 針對動力車設計問題提出了兩階段的疊代式解法，而他們的求解流程同樣也採取先求解 TR 接著再求解 BTA。針對 TR，他們首先以隨機的方式來產生動力車路徑，對於 BTA 則透過求解數學模型進行，求解方式則是先隨機產生數條動力車路徑，接著以這些路徑作為數學模式之輸入並求解，然後一直反覆進行這兩個步驟。然而，這樣的求解方式可能需要很長的作業時間，原因在於動力車路徑產生方式是隨機的，因此需重複試驗好幾組動力車路徑方能確定各車廂集是否能被運送，然後才能求解 BTA。

其次，OR@UNIMI 也是先求解動力車路徑規劃問題再進行車廂集裝載計畫的求解，而他們的求解方式也與 Lee et al.(2013)相似差別在於 OR@UNIMI 動力車路徑產生方面是採用禁忌搜尋法的方式來產生。但，此種求解方式可能會需要較長的時間來產生動力車路徑，且隨著路徑數量的增加所需的時間也就跟著越長。最後比較結果，本研究只在 DataSet1 上略輸 KOPPA 對，而在 DataSet2 中則是所有隊伍中表現最佳者。

另外，為了瞭解所產生之動力車路徑對於最後解結果的貢獻，本研究記錄了各類動力車路徑在最終結果中所佔之比例，從中我們發現起始之動力車路徑佔了多數，每種測試方法皆有五成以上，由此便可得知採用兩種程序所產生之動力車路徑即可獲得不錯之結果。而本研究所設計之 IRG 演算法也可因應上述之發現來配合調整做法，亦即本研究可以選擇不要加入列車路徑修正程序，藉此減少不必要的求解時間。以下第五章將針對整篇論文進行統整，並說明未來研究就方向。

## 第五章

### 結論與未來研究方向

#### 5.1 論文總結

本研究主要探討之問題為列車設計問題，並假設車廂集設計問題已先行求解完畢，而列車設計問題又可分成動力車路徑規劃問題及車廂集裝載計畫。

針對列車設計問題，本研究採用 IRG 演算法來求解。IRG 先求解 TR 來產生起始之動力車路徑，並以這些路徑作為 BTA 之輸入；接著，再以 BTA 所選取之動力車路徑輸入至列車路徑修正程序來產生新的動力車路徑。最後，將這些新的動力車路徑加至 BTA 中重新求解。上述過程在本研究中稱為一回合，而 IRG 將重複疊代數回合直至門檻值為止。

首先，針對 TR，本研究提出兩種動力車路徑產生程序分別為程序一及程序二。程序一主要是將各車廂集起訖點作為動力車路徑參考點，並搜尋包含這些參考點的表定路段，接著對表定路段網路圖進行修正，然後以這些參考點作為列車起訖點，最後再以通過動力車起訖點之最短路徑作為動力車行駛路徑。產生完動力車路徑之後，程序一才會依據這些動力車路徑來產生車廂集路徑。程序二則預先假設車廂集行駛路徑為通過其起訖點之最短路徑，接著，從流經這些車廂集行駛路徑的表定路段中找出最佳的連接方式藉此產生列車行駛路徑。程序一希望以表定路段中最短的動力車路徑來運送車廂集，而程序二則希望車廂集路徑為原鐵路路網（而非表定路網）中最短，且使用最少動力車數量及最少轉運次數的方式來運送車廂集。

其次，BTA 則是透過整數規劃模型來進行求解，而此整數規劃模型須以動力車路徑以及車廂集路徑作為輸入方能進行求解。透過模型的求解，本研究便可得知在此組動力車路徑及車廂集路徑下的最佳的運送方式，而為了提升整數規劃模型所求得的了解，本研究又提出了列車路徑修正程序，並企圖以此程序來產生新的動力車路徑。

列車路徑修正程序包含了兩種列車路徑新增方式：動力車平衡性路徑新增方式與合併列車路徑新增方式，其中，動力車平衡性路徑新增方式係透過數學模式之求解以得到新列車會經過之路段，接著再搭配演算法來產生新增的動力車路徑，而合併列車路徑新增方式則是透過列車的串聯來產生新的動力車路徑。兩種新增方式皆須以先前整數規劃模型所選取之動力車路徑作為輸入方能進行求解。

從第四章的數據分析中，本研究發現不論是以何種程序來產生動力車路徑，我們提出的解法在求解速度上都有不錯的成效。儘管在 DataSet1 上略輸 KOPPA，但在與現實鐵路運輸系統相近的 DataSet2 上卻是表現最佳的。另外，以本研究提出之動力車路徑產生程序所產生之起始動力車路徑即可獲得不錯的結果，且本研究所設計的 IRG 演算法還可依據不同的測試資料進行調整，所以當需要在有限時間內得到可行解時，本研究可以選擇停止列車路徑修正程序，藉此縮短求解時間。因此，對於現今發展相當成熟的鐵路運輸系統，也可以在既定的動力車路徑下，參照此方法來規劃各車廂集的運送方式。

## 5.2 未來研究方向

本研究所提出之求解演算法在執行時會不斷的增加新的動力車路徑，且同時保留既有的動力車路徑。雖然在求解時，我們只會從所有動力車路徑中選出數條來進行求解(亦即從  $T$  選出數條來建構  $T_C$ )，但本研究並未針對  $T$  提出刪減程序，所以隨著疊代次數的增加動力車數量也就跟著增加，進而導致整數規劃模式的求解時間增加。另外，雖然本研究所設計的整數規劃模型可讓車廂擁有兩條以上的路徑，但不論是在何種程序下進行求解，其在求解時的車廂集路徑都是固定的並不會隨著疊代次數而改變。然而在車廂集路徑固定的情形下，求解空間也相對的縮小了。針對上述問題，本研究期望在未來能提出有效的解決方案。例如，增加車廂集的行駛路徑而不單以最短路徑作為其行駛之路徑，以及觀察每條動力車路徑在幾回疊代後的選取次數，以決定動力車

的保留與否。

此外，在列車路徑修正程序中，本研究在產生新的動力車路徑時並未考慮在加入該動力車路徑之後，是否可使總成本下降，亦即該動力車路徑的 reduced cost 是否為負。因此，本研究提出一個線性規劃模型，並從此線性規劃模型的對偶形式中找出每條動力車路徑的 reduced cost，其模式如下所示：

### 目標式

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{t \in T} (C^{SU} + C_t^{Tr} d_t^{Tr}) \psi(t) + \sum_{b \in B} C_b^{Tr} K_b \sum_{p \in P_b} d_p^{Tr} \sigma(b, p) \\ & + \sum_{s \in S} C^{Cl} (\bar{L}(s) + \tilde{L}(s)) + \sum_{n \in \tilde{N}} C^{Tr} (W^+(n) + W^-(n)) \end{aligned} \quad (5.1)$$

### 限制式

$$\sum_{p \in P_b} \sigma(b, p) = 1 \quad \forall b \in B \quad (5.2)$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{p \in P_b} \rho_p^a l_b \sigma(b, p) - U_a^L \sum_{t \in T} \rho_t^a \psi(t) \leq 0 \quad \forall a \in A \quad (5.3)$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{p \in P_b} \rho_p^a w_b \sigma(b, p) - U_a^W \sum_{t \in T} \rho_t^a \psi(t) \leq 0 \quad \forall a \in A \quad (5.4)$$

$$\sum_{t \in T} \rho_t^a \psi(t) \leq U_a^{NT} \quad \forall a \in A \quad (5.5)$$

$$\bar{L}(s) - \tilde{L}(s) - \sum_{t \in TR_s} \rho_t^{\bar{s}} \psi(t) + \sum_{t \in TR_s} \rho_t^{\tilde{s}} \psi(t) \geq 0 \quad \forall s \in S \quad (5.6)$$

$$W^+(n) - W^-(n) - \sum_{t \in T} \theta_{t,n}^{out} \psi(t) + \sum_{t \in T} \theta_{t,n}^{in} \psi(t) \geq 0 \quad \forall n \in \tilde{N} \quad (5.7)$$

$$0 \leq \psi(t) \leq 1 \quad \forall t \in T, \quad 0 \leq \sigma(b, p) \leq 1 \quad \forall b \in B \quad \forall p \in P_b \quad (5.8)$$

此模式的目標式考量了動力車路徑成本、車廂集路徑成本、平衡性相關成本及車廂集未被運送之懲罰成本，限制式則包含了容量限制式以及平衡性相關限制式，而每條限制式所對應的對偶變數則整理在表 5-1 中。由此本研究便可計算每條動力車路徑的 reduced cost，而其對應的數學式則如下所示：

$$\begin{aligned}
\pi_t &= C^{SU} + C_t^{Tr} d_t^{Tr} + \sum_{a \in A} \rho_t^a U_a^L \pi_a^2 + \sum_{a \in A} \rho_t^a U_a^W \pi_a^3 - \sum_{a \in A} \rho_t^a \pi_a^4 - \sum_{s \in S} (\rho_t^{\bar{s}} - \rho_t^{\bar{s}}) \pi_s^5 - \sum_{n \in \tilde{N}} (\theta_{t,n}^{out} - \theta_{t,n}^{in}) \pi_n^6 \\
&= C^{SU} + C_t^{Tr} d_t^{Tr} + \sum_{a \in A} (U_a^L \pi_a^2 + U_a^W \pi_a^3 - \pi_a^4) \rho_t^a - \sum_{s \in S} (\rho_t^{\bar{s}} - \rho_t^{\bar{s}}) \pi_s^5 - \sum_{n \in \tilde{N}} (\theta_{t,n}^{out} - \theta_{t,n}^{in}) \pi_n^6 \\
&= C^{SU} + \sum_{s \in S} \left[ \sum_{a \in A} \rho_t^{a,s} (C_t^{Tr} d_a + U_a^L \pi_a^2 + U_a^W \pi_a^3 - \pi_a^4) + (\rho_t^{\bar{s}} - \rho_t^{\bar{s}}) \pi_s^5 \right] + \sum_{n \in \tilde{N}} (\theta_{t,n}^{in} - \theta_{t,n}^{out}) \pi_n^6
\end{aligned} \tag{5.9}$$

其中， $\rho_t^{a,s}$  為指標參數，若鐵路路段  $a$  在表定路段  $s$  內且列車  $t$  也經過，則  $\rho_t^{a,s}$  為 1，反之為 0。

表 5-1 對偶變數說明表

| 限制式  | 對偶變數                                    |
|--|---|
| $\sum_{p \in P_b} \sigma(b, p) = 1$  | $\pi_b^1 \quad \forall b \in B$         |
| $\sum_{b \in B} \sum_{p \in P_b} \rho_p^a l_b \sigma(b, p) - U_a^L \sum_{t \in T} \rho_t^a \psi(t) \leq 0 \quad \forall a \in A$                 | $\pi_a^2 \quad \forall a \in A$         |
| $\sum_{b \in B} \sum_{p \in P_b} \rho_p^a w_b \sigma(b, p) - U_a^W \sum_{t \in T} \rho_t^a \psi(t) \leq 0 \quad \forall a \in A$                 | $\pi_a^3 \quad \forall a \in A$         |
| $\sum_{t \in T} \rho_t^a \psi(t) \leq U_a^{NT} \quad \forall a \in A$  | $\pi_a^4 \quad \forall a \in A$         |
| $\bar{L}(s) - \bar{L}(s) - \sum_{t \in TR_s} \rho_t^{\bar{s}} \psi(t) + \sum_{t \in TR_s} \rho_t^{\bar{s}} \psi(t) \geq 0 \quad \forall s \in S$ | $\pi_s^5 \quad \forall s \in S$         |
| $W^+(n) - W^-(n) - \sum_{t \in T} \theta_{t,n}^{out} \psi(t) + \sum_{t \in T} \theta_{t,n}^{in} \psi(t) \geq 0 \quad \forall n \in \tilde{N}$    | $\pi_n^6 \quad \forall n \in \tilde{N}$ |

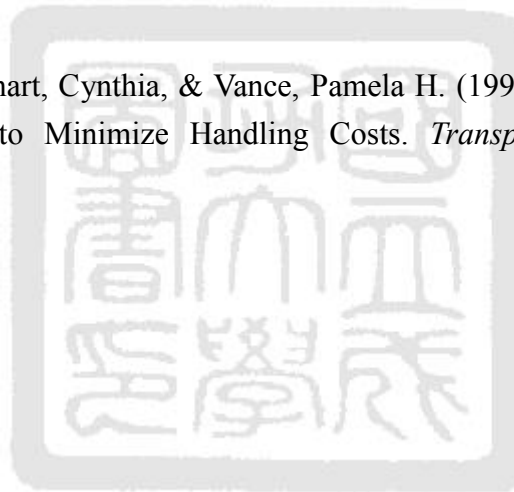
因此，本研究便可利用式(5.9)計算每條由列車路徑修正程序所產之動力車路徑的 reduced cost，並只加入  $\pi_t < 0$  的動力車路徑至先前的整數規劃模型中。另外本研究也可以用式(5.8)中，每條表定路段  $s$  的長度，來取代原先表定路段網路圖  $G(\tilde{N}, S)$  中每條節線的長度，接著再利用程序一來產生新的動力車路徑；在產生完動力車路徑之後，本研究同樣只加入  $\pi_t < 0$  的動力車路徑至整數規劃模式中。本研究希望藉此確定所新增的動力車路徑可使總成本下降，而不是盲目地增加動力車路徑以致求解時間變慢且總成本也無明顯下降。然而此做法之缺點就如同 Lee et al. (2013)，我們需在產生動力車路徑的同時加入迴圈消除限制式，且由於網路圖  $G(\tilde{N}, S)$  中的節線長度有可能為負，所以有可會產生負迴圈，以至一般的最短路徑演算法皆無法使用。因此如何克服上述的兩個難題，勢必為該方法能否必運用之關鍵，也為日後可研究之課題。



## 參考文獻

- Ahuja, R. K., Jha, K. C., & Liu, J. (2007). Solving Real-Life Railroad Blocking Problems. *Interfaces*, 37(5), 404-419.
- Assad, Arjang A. (1980). Models for rail transportation. *Transportation Research Part A: General*, 14(3), 205-220.
- Assad, A. A. (1983). Analysis of rail classification policies. *INFOR*, 21, 293-314.
- Barnhart, Cynthia, Jin, Hong, & Vance, Pamela H. (2000). Railroad Blocking: A Network Design Application. *Operations Research*, 48(4), 603-614.
- Bodin, Lawrence D., Golden, Bruce L., Schuster, Allan D., & Romig, William. (1980). A model for the blocking of trains. *Transportation Research Part B: Methodological*, 14(1-2), 115-120.
- Francis Gorman, Michael. (1998). An application of genetic and tabu searches to the freight railroad operating plan problem. *Annals of Operations Research*, 78(0), 51-69.
- Haghani, Ali E. (1987). Rail freight transportation: A review of recent optimization models for train routing and empty car distribution. *Journal of Advanced Transportation*, 21(2), 147-172.
- Haghani, Ali E. (1989). Formulation and solution of a combined train routing and makeup, and empty car distribution model. *Transportation Research Part B: Methodological*, 23(6), 433-452.
- INFORMS (2011). RAS Problem Solving Competition.  
<<http://www.informs.org/Community/RAS/Problem-Solving-Competition/2011-RAS-Problem-Solving-Competition>>.
- Jha, Krishna C., Ahuja, Ravindra K., & Şahin, Güvenç. (2008). New approaches for solving the block-to-train assignment problem. *Networks*, 51(1), 48-62.

- Jin, Jian Gang, Zhao, Jun, & Lee, Der-Horng. (2013). A column generation based approach for the Train Network Design Optimization problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 50(0), 1-17.
- Keaton, Mark H. (1989). Designing optimal railroad operating plans: Lagrangian relaxation and heuristic approaches. *Transportation Research Part B: Methodological*, 23(6), 415-431.
- Keaton, Mark H. (1992). Designing Railroad Operating Plans: A Dual Adjustment Method for Implementing Lagrangian Relaxation. *Transportation Science*, 26(4), 263-279.
- Newman, Alexandra M., & Yano, Candace Arai. (2000). Scheduling Direct and Indirect Trains and Containers in an Intermodal Setting. *Transportation Science*, 34(3), 256-270.
- Newton, Harry N., Barnhart, Cynthia, & Vance, Pamela H. (1998). Constructing Railroad Blocking Plans to Minimize Handling Costs. *Transportation Science*, 32(4), 330-345.



## 附錄

表 A-1RandomDataSet1\_1 之成本分析表

| Method               | Procedure1 |           |           | Procedure2 |           |           |
|----------------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Train Modification   | IMB        | Merge     | None      | IMB        | Merge     | None      |
| Number of Iteration  | 15         |           |           | 15         |           |           |
| Block Travel Cost    | 1,530,040  | 1,530,040 | 1,530,040 | 1,530,010  | 1,530,010 | 1,530,010 |
| Train Travel Cost    | 375,602    | 330,734   | 341,123   | 371,955    | 335,671   | 342,879   |
| Block Swap Cost      | 3,910      | 3,960     | 4,050     | 5,520      | 4,850     | 5,370     |
| Work Event Cost      | 32,200     | 42,700    | 30,450    | 36,750     | 46,200    | 31,150    |
| Crew Imbalance Cost  | 13,800     | 31,800    | 34,200    | 7,200      | 28,800    | 25,200    |
| Train Imbalance Cost | 14,000     | 52,000    | 52,000    | 8,000      | 42,000    | 42,000    |
| Missed Cost          | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         | 0         |
| Total Cost           | 1,969,552  | 1,991,234 | 1,991,863 | 1,959,435  | 1,987,531 | 1,976,609 |

表 A-2RandomDataSet2\_2 之成本分析表

| Method               | Procedure1 |           |           | Procedure2 |           |           |
|----------------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Train Modification   | IMB        | Merge     | None      | IMB        | Merge     | None      |
| Number of Iteration  | 15         |           |           | 15         |           |           |
| Block Travel Cost    | 1,453,060  | 1,453,060 | 1,450,000 | 1,453,060  | 1,450,000 | 1,450,000 |
| Train Travel Cost    | 374,466    | 321,521   | 336,265   | 359,529    | 322,195   | 331,283   |
| Block Swap Cost      | 4,220      | 4,160     | 4,370     | 4,870      | 4,860     | 5,060     |
| Work Event Cost      | 35,000     | 45,850    | 33,250    | 38,850     | 50,050    | 37,100    |
| Crew Imbalance Cost  | 25,800     | 48,000    | 47,400    | 25,800     | 43,800    | 40,800    |
| Train Imbalance Cost | 18,000     | 56,000    | 56,000    | 20,000     | 50,000    | 44,000    |
| Missed Cost          | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         | 0         |
| Total Cost           | 1,910,550  | 1,928,590 | 1,930,000 | 1,902,110  | 1,920,000 | 1,910,000 |

表 A-3RandomDataSet1\_3 之成本分析表

| Method               | Procedure1 |           |           | Procedure2 |           |           |
|----------------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Train Modification   | IMB        | Merge     | None      | IMB        | Merge     | None      |
| Number of Iteration  | 15         |           |           | 15         |           |           |
| Block Travel Cost    | 1,590,000  | 1,594,040 | 1,590,000 | 1,590,000  | 1,590,000 | 1,590,000 |
| Train Travel Cost    | 364,688    | 327,665   | 336,692   | 357,152    | 331,739   | 332,605   |
| Block Swap Cost      | 4,180      | 3,770     | 3,950     | 4,800      | 4,880     | 4,870     |
| Work Event Cost      | 33,950     | 45,500    | 33,600    | 37,100     | 44,450    | 32,900    |
| Crew Imbalance Cost  | 22,800     | 39,000    | 38,400    | 20,400     | 35,400    | 36,000    |
| Train Imbalance Cost | 16,000     | 46,000    | 48,000    | 16,000     | 38,000    | 38,000    |
| Missed Cost          | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         | 0         |
| Total Cost           | 2,040,000  | 2,055,980 | 2,050,000 | 2,030,000  | 2,050,000 | 2,040,000 |

表 A-4RandomDataSet1\_4 之成本分析表

| Method               | Procedure1 |           |           | Procedure2 |           |           |
|----------------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Train Modification   | IMB        | Merge     | None      | IMB        | Merge     | None      |
| Number of Iteration  | 15         |           |           | 15         |           |           |
| Block Travel Cost    | 1,530,000  | 1,530,000 | 1,531,550 | 1,530,000  | 1,530,000 | 1,530,000 |
| Train Travel Cost    | 349,655    | 320,852   | 334,285   | 351,903    | 321,174   | 321,699   |
| Block Swap Cost      | 4,240      | 3,780     | 4,000     | 5,860      | 5,380     | 5,770     |
| Work Event Cost      | 33,950     | 45,500    | 32,550    | 38,500     | 40,600    | 37,100    |
| Crew Imbalance Cost  | 30,000     | 45,600    | 46,800    | 26,400     | 43,800    | 42,000    |
| Train Imbalance Cost | 28,000     | 48,000    | 48,000    | 20,000     | 44,000    | 42,000    |
| Missed Cost          | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         | 0         |
| Total Cost           | 1,980,000  | 2,000,000 | 1,997,190 | 1,970,000  | 1,990,000 | 1,980,000 |

表 A-5RandomDataSet1\_5 之成本分析表

| Method               | Procedure1 |           |           | Procedure2 |           |           |
|----------------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Train Modification   | IMB        | Merge     | None      | IMB        | Merge     | None      |
| Number of Iteration  | 15         |           |           | 15         |           |           |
| Block Travel Cost    | 1,450,000  | 1,450,000 | 1,450,000 | 1,450,000  | 1,450,000 | 1,450,000 |
| Train Travel Cost    | 381,843    | 352,024   | 361,804   | 365,020    | 347,063   | 350,302   |
| Block Swap Cost      | 4,360      | 3,590     | 3,930     | 6,200      | 5,170     | 5,660     |
| Work Event Cost      | 37,800     | 47,600    | 34,650    | 42,700     | 47,250    | 41,650    |
| Crew Imbalance Cost  | 16,800     | 37,800    | 37,800    | 19,800     | 36,000    | 30,600    |
| Train Imbalance Cost | 20,000     | 48,000    | 50,000    | 26,000     | 46,000    | 42,000    |
| Missed Cost          | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         | 0         |
| Total Cost           | 1,910,803  | 1,939,014 | 1,938,184 | 1,909,720  | 1,931,483 | 1,920,212 |

表 A-6RandomDataSet1\_6 之成本分析表

| Method               | Procedure1 |           |           | Procedure2 |           |           |
|----------------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Train Modification   | IMB        | Merge     | None      | IMB        | Merge     | None      |
| Number of Iteration  | 15         |           |           | 15         |           |           |
| Block Travel Cost    | 1,581,370  | 1,580,000 | 1,580,000 | 1,580,000  | 1,580,000 | 1,580,000 |
| Train Travel Cost    | 394,784    | 342,431   | 356,102   | 385,432    | 347,422   | 354,552   |
| Block Swap Cost      | 3,570      | 3,160     | 3,390     | 5,410      | 4,260     | 4,580     |
| Work Event Cost      | 34,650     | 45,150    | 33,250    | 37,800     | 47,600    | 34,650    |
| Crew Imbalance Cost  | 17,400     | 41,400    | 41,400    | 17,400     | 37,800    | 36,000    |
| Train Imbalance Cost | 18,000     | 56,000    | 56,000    | 18,000     | 52,000    | 48,000    |
| Missed Cost          | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         | 0         |
| Total Cost           | 2,049,770  | 2,068,141 | 2,070,142 | 2,044,042  | 2,069,082 | 2,057,782 |

表 A-7RandomDataSet1\_7 之成本分析表

| Method               | Procedure1 |           |           | Procedure2 |           |           |
|----------------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Train Modification   | IMB        | Merge     | None      | IMB        | Merge     | None      |
| Number of Iteration  | 15         |           |           | 15         |           |           |
| Block Travel Cost    | 1,510,000  | 1,510,000 | 1,510,000 | 1,500,000  | 1,500,000 | 1,500,000 |
| Train Travel Cost    | 389,731    | 331,160   | 341,869   | 372,944    | 334,001   | 342,046   |
| Block Swap Cost      | 4,030      | 3,950     | 4,030     | 5,270      | 5,080     | 5,190     |
| Work Event Cost      | 31,850     | 42,000    | 32,200    | 36,400     | 45,850    | 37,100    |
| Crew Imbalance Cost  | 13,200     | 38,400    | 37,200    | 15,000     | 34,200    | 28,800    |
| Train Imbalance Cost | 12,000     | 54,000    | 56,000    | 16,000     | 48,000    | 50,000    |
| Missed Cost          | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         | 0         |
| Total Cost           | 1,960,811  | 1,979,510 | 1,981,299 | 1,945,614  | 1,967,131 | 1,963,136 |

表 A-8RandomDataSet1\_8 之成本分析表

| Method               | Procedure1 |           |           | Procedure2 |           |           |
|----------------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Train Modification   | IMB        | Merge     | None      | IMB        | Merge     | None      |
| Number of Iteration  | 15         |           |           | 15         |           |           |
| Block Travel Cost    | 1,530,000  | 1,530,000 | 1,530,000 | 1,530,000  | 1,530,000 | 1,530,000 |
| Train Travel Cost    | 361,616    | 313,984   | 327,184   | 347,179    | 310,960   | 322,360   |
| Block Swap Cost      | 3,310      | 3,020     | 3,070     | 4,370      | 4,690     | 4,430     |
| Work Event Cost      | 32,550     | 41,650    | 30,100    | 33,950     | 45,850    | 32,200    |
| Crew Imbalance Cost  | 15,600     | 38,400    | 38,400    | 21,000     | 39,600    | 38,400    |
| Train Imbalance Cost | 12,000     | 52,000    | 52,000    | 16,000     | 42,000    | 40,000    |
| Missed Cost          | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         | 0         |
| Total Cost           | 1,955,076  | 1,979,054 | 1,980,754 | 1,952,499  | 1,973,100 | 1,967,390 |

表 A-9RandomDataSet1\_9 之成本分析表

| Method               | Procedure1 |           |           | Procedure2 |           |           |
|----------------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Train Modification   | IMB        | Merge     | None      | IMB        | Merge     | None      |
| Number of Iteration  | 15         |           |           | 15         |           |           |
| Block Travel Cost    | 1,570,000  | 1,570,000 | 1,570,000 | 1,570,000  | 1,570,000 | 1,570,000 |
| Train Travel Cost    | 383,347    | 340,306   | 353,795   | 371,393    | 343,763   | 345,312   |
| Block Swap Cost      | 4,350      | 3,920     | 4,160     | 4,970      | 5,490     | 4,980     |
| Work Event Cost      | 37,450     | 46,900    | 35,350    | 41,300     | 49,000    | 42,350    |
| Crew Imbalance Cost  | 15,000     | 30,000    | 30,000    | 10,200     | 25,200    | 27,600    |
| Train Imbalance Cost | 14,000     | 48,000    | 48,000    | 10,000     | 34,000    | 36,000    |
| Missed Cost          | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         | 0         |
| Total Cost           | 2,024,147  | 2,039,126 | 2,041,305 | 2,007,863  | 2,027,453 | 2,026,242 |

表 A-10RandomDataSet1\_10 之成本分析表

| Method               | Procedure1 |           |           | Procedure2 |           |           |
|----------------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Train Modification   | IMB        | Merge     | None      | IMB        | Merge     | None      |
| Number of Iteration  | 15         |           |           | 15         |           |           |
| Block Travel Cost    | 1,550,000  | 1,550,000 | 1,550,000 | 1,550,000  | 1,550,000 | 1,550,000 |
| Train Travel Cost    | 352,058    | 322,164   | 331,509   | 347,694    | 325,143   | 333,503   |
| Block Swap Cost      | 5,050      | 4,660     | 5,030     | 6,440      | 6,690     | 6,550     |
| Work Event Cost      | 31,850     | 44,100    | 32,550    | 37,100     | 50,050    | 36,400    |
| Crew Imbalance Cost  | 34,800     | 48,600    | 46,800    | 33,000     | 45,600    | 45,000    |
| Train Imbalance Cost | 16,000     | 44,000    | 48,000    | 16,000     | 34,000    | 34,000    |
| Missed Cost          | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         | 0         |
| Total Cost           | 1,989,758  | 2,013,524 | 2,013,889 | 1,990,234  | 2,011,483 | 2,005,453 |

表 A-11RandomDataSet1\_11 之成本分析表

| Method               | Procedure1 |           |           | Procedure2 |           |           |
|----------------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Train Modification   | IMB        | Merge     | None      | IMB        | Merge     | None      |
| Number of Iteration  | 15         |           |           | 15         |           |           |
| Block Travel Cost    | 1,470,000  | 1,470,000 | 1,470,000 | 1,470,000  | 1,470,000 | 1,470,000 |
| Train Travel Cost    | 369,094    | 322,057   | 336,456   | 362,223    | 325,699   | 337,334   |
| Block Swap Cost      | 4,330      | 4,290     | 4,480     | 5,410      | 5,560     | 5,540     |
| Work Event Cost      | 36,050     | 45,150    | 32,550    | 35,350     | 44,100    | 32,900    |
| Crew Imbalance Cost  | 14,400     | 37,200    | 36,600    | 16,800     | 34,800    | 33,000    |
| Train Imbalance Cost | 14,000     | 48,000    | 48,000    | 16,000     | 40,000    | 38,000    |
| Missed Cost          | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         | 0         |
| Total Cost           | 1,907,874  | 1,926,697 | 1,928,086 | 1,905,783  | 1,920,159 | 1,916,774 |

表 A-12RandomDataSet1\_12 之成本分析表

| Method               | Procedure1 |           |           | Procedure2 |           |           |
|----------------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Train Modification   | IMB        | Merge     | None      | IMB        | Merge     | None      |
| Number of Iteration  | 15         |           |           | 15         |           |           |
| Block Travel Cost    | 1,520,000  | 1,520,000 | 1,520,000 | 1,520,000  | 1,520,000 | 1,520,000 |
| Train Travel Cost    | 391,784    | 339,488   | 353,369   | 371,219    | 337,902   | 347,375   |
| Block Swap Cost      | 5,010      | 4,510     | 4,980     | 6,480      | 6,030     | 6,240     |
| Work Event Cost      | 34,300     | 46,900    | 34,300    | 39,900     | 49,350    | 39,900    |
| Crew Imbalance Cost  | 22,200     | 45,000    | 43,800    | 30,000     | 40,800    | 39,000    |
| Train Imbalance Cost | 18,000     | 56,000    | 56,000    | 24,000     | 50,000    | 46,000    |
| Missed Cost          | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         | 0         |
| Total Cost           | 1,991,294  | 2,011,898 | 2,012,449 | 1,991,599  | 2,004,082 | 1,998,515 |



表 A-13RandomDataSet1\_13 之成本分析表

| Method               | Procedure1 |           |           | Procedure2 |           |           |
|----------------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Train Modification   | IMB        | Merge     | None      | IMB        | Merge     | None      |
| Number of Iteration  | 15         |           |           | 15         |           |           |
| Block Travel Cost    | 1,510,000  | 1,510,000 | 1,510,000 | 1,510,000  | 1,510,000 | 1,510,000 |
| Train Travel Cost    | 397,506    | 349,806   | 366,253   | 379,547    | 343,511   | 355,076   |
| Block Swap Cost      | 5,080      | 4,680     | 4,830     | 5,920      | 6,290     | 5,870     |
| Work Event Cost      | 39,200     | 50,750    | 37,100    | 42,350     | 51,800    | 40,600    |
| Crew Imbalance Cost  | 17,400     | 36,000    | 35,400    | 20,400     | 28,200    | 31,200    |
| Train Imbalance Cost | 16,000     | 56,000    | 58,000    | 16,000     | 44,000    | 42,000    |
| Missed Cost          | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         | 0         |
| Total Cost           | 1,985,186  | 2,007,236 | 2,011,583 | 1,974,217  | 1,983,801 | 1,984,746 |

表 A-14RandomDataSet1\_14 之成本分析表

| Method               | Procedure1 |           |           | Procedure2 |           |           |
|----------------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Train Modification   | IMB        | Merge     | None      | IMB        | Merge     | None      |
| Number of Iteration  | 15         |           |           | 15         |           |           |
| Block Travel Cost    | 1,460,000  | 1,460,000 | 1,460,000 | 1,460,000  | 1,460,000 | 1,460,000 |
| Train Travel Cost    | 365,836    | 325,004   | 342,405   | 355,199    | 318,115   | 330,133   |
| Block Swap Cost      | 4,380      | 4,330     | 3,880     | 5,320      | 5,540     | 5,330     |
| Work Event Cost      | 33,600     | 45,150    | 31,500    | 36,750     | 47,250    | 37,100    |
| Crew Imbalance Cost  | 21,600     | 35,400    | 36,600    | 20,400     | 31,800    | 32,400    |
| Train Imbalance Cost | 18,000     | 48,000    | 46,000    | 18,000     | 40,000    | 42,000    |
| Missed Cost          | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         | 0         |
| Total Cost           | 1,903,416  | 1,917,884 | 1,920,385 | 1,895,669  | 1,902,705 | 1,906,963 |

表 A-15RandomDataSet1\_15 之成本分析表

| Method               | Procedure1 |           |           | Procedure2 |           |           |
|----------------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Train Modification   | IMB        | Merge     | None      | IMB        | Merge     | None      |
| Number of Iteration  | 15         |           |           | 15         |           |           |
| Block Travel Cost    | 1,460,000  | 1,460,000 | 1,460,000 | 1,460,000  | 1,460,000 | 1,460,000 |
| Train Travel Cost    | 368,898    | 330,501   | 342,848   | 363,287    | 333,325   | 344,073   |
| Block Swap Cost      | 3,650      | 3,480     | 3,410     | 4,370      | 4,180     | 4,100     |
| Work Event Cost      | 33,950     | 46,550    | 34,300    | 35,700     | 49,350    | 35,350    |
| Crew Imbalance Cost  | 22,200     | 39,000    | 40,200    | 26,400     | 39,600    | 38,400    |
| Train Imbalance Cost | 22,000     | 52,000    | 54,000    | 22,000     | 46,000    | 44,000    |
| Missed Cost          | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         | 0         |
| Total Cost           | 1,910,698  | 1,931,531 | 1,934,758 | 1,911,757  | 1,932,455 | 1,925,923 |

表 A-16RandomDataSet1\_16 之成本分析表

| Method               | Procedure1 |           |           | Procedure2 |           |           |
|----------------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Train Modification   | IMB        | Merge     | None      | IMB        | Merge     | None      |
| Number of Iteration  | 15         |           |           | 15         |           |           |
| Block Travel Cost    | 1,480,000  | 1,480,000 | 1,480,000 | 1,480,000  | 1,480,000 | 1,480,000 |
| Train Travel Cost    | 365,849    | 313,391   | 327,450   | 357,592    | 316,003   | 324,288   |
| Block Swap Cost      | 4,570      | 4,730     | 4,650     | 5,430      | 5,650     | 5,410     |
| Work Event Cost      | 35,000     | 47,600    | 36,400    | 38,150     | 47,950    | 38,850    |
| Crew Imbalance Cost  | 22,200     | 41,400    | 40,200    | 18,600     | 36,600    | 33,600    |
| Train Imbalance Cost | 18,000     | 52,000    | 52,000    | 16,000     | 44,000    | 40,000    |
| Missed Cost          | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         | 0         |
| Total Cost           | 1,925,619  | 1,939,121 | 1,940,700 | 1,915,772  | 1,930,203 | 1,922,148 |

表 A-17RandomDataSet1\_17 之成本分析表

| Method               | Procedure1 |           |           | Procedure2 |           |           |
|----------------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Train Modification   | IMB        | Merge     | None      | IMB        | Merge     | None      |
| Number of Iteration  | 15         |           |           | 15         |           |           |
| Block Travel Cost    | 1,670,000  | 1,670,000 | 1,670,000 | 1,670,000  | 1,670,000 | 1,670,000 |
| Train Travel Cost    | 380,256    | 338,277   | 347,086   | 376,747    | 330,900   | 339,752   |
| Block Swap Cost      | 4,370      | 4,130     | 4,190     | 4,900      | 4,710     | 4,790     |
| Work Event Cost      | 33,250     | 41,300    | 32,550    | 34,300     | 46,200    | 33,950    |
| Crew Imbalance Cost  | 25,200     | 42,600    | 43,200    | 19,800     | 39,600    | 39,600    |
| Train Imbalance Cost | 16,000     | 58,000    | 58,000    | 14,000     | 52,000    | 50,000    |
| Missed Cost          | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         | 0         |
| Total Cost           | 2,129,076  | 2,154,307 | 2,155,026 | 2,119,747  | 2,143,410 | 2,138,092 |

表 A-18RandomDataSet1\_18 之成本分析表

| Method               | Procedure1 |           |           | Procedure2 |           |           |
|----------------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Train Modification   | IMB        | Merge     | None      | IMB        | Merge     | None      |
| Number of Iteration  | 15         |           |           | 15         |           |           |
| Block Travel Cost    | 1,370,000  | 1,370,000 | 1,370,000 | 1,370,000  | 1,370,000 | 1,370,000 |
| Train Travel Cost    | 370,319    | 332,617   | 349,816   | 360,025    | 332,560   | 346,478   |
| Block Swap Cost      | 4,600      | 4,380     | 4,650     | 5,630      | 5,440     | 5,490     |
| Work Event Cost      | 34,650     | 47,600    | 34,300    | 37,800     | 50,750    | 36,750    |
| Crew Imbalance Cost  | 26,400     | 42,000    | 40,800    | 27,000     | 37,800    | 37,200    |
| Train Imbalance Cost | 22,000     | 56,000    | 54,000    | 24,000     | 44,000    | 42,000    |
| Missed Cost          | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         | 0         |
| Total Cost           | 1,827,969  | 1,852,597 | 1,853,566 | 1,824,455  | 1,840,550 | 1,837,918 |

表 A-19RandomDataSet1\_19 之成本分析表

| Method               | Procedure1 |           |           | Procedure2 |           |           |
|----------------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Train Modification   | IMB        | Merge     | None      | IMB        | Merge     | None      |
| Number of Iteration  | 15         |           |           | 15         |           |           |
| Block Travel Cost    | 1,580,000  | 1,580,000 | 1,580,000 | 1,580,000  | 1,580,000 | 1,580,000 |
| Train Travel Cost    | 407,215    | 354,011   | 368,576   | 394,545    | 343,044   | 355,397   |
| Block Swap Cost      | 4,300      | 3,990     | 4,210     | 5,780      | 5,340     | 5,750     |
| Work Event Cost      | 35,000     | 46,550    | 35,000    | 39,200     | 50,400    | 38,500    |
| Crew Imbalance Cost  | 16,800     | 37,200    | 35,400    | 15,000     | 32,400    | 30,000    |
| Train Imbalance Cost | 10,000     | 54,000    | 54,000    | 12,000     | 50,000    | 48,000    |
| Missed Cost          | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         | 0         |
| Total Cost           | 2,053,315  | 2,075,751 | 2,077,186 | 2,046,525  | 2,061,184 | 2,057,647 |

表 A-20RandomDataSet1\_20 之成本分析表

| Method               | Procedure1 |           |           | Procedure2 |           |           |
|----------------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Train Modification   | IMB        | Merge     | None      | IMB        | Merge     | None      |
| Number of Iteration  | 15         |           |           | 15         |           |           |
| Block Travel Cost    | 1,630,000  | 1,630,000 | 1,630,000 | 1,630,000  | 1,630,000 | 1,630,000 |
| Train Travel Cost    | 420,732    | 360,324   | 367,814   | 413,222    | 355,844   | 368,497   |
| Block Swap Cost      | 4,500      | 4,120     | 4,140     | 5,020      | 5,270     | 5,150     |
| Work Event Cost      | 35,350     | 47,600    | 34,650    | 34,650     | 49,350    | 38,850    |
| Crew Imbalance Cost  | 10,200     | 36,600    | 33,000    | 10,800     | 33,600    | 31,800    |
| Train Imbalance Cost | 8,000      | 60,000    | 62,000    | 10,000     | 52,000    | 54,000    |
| Missed Cost          | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         | 0         |
| Total Cost           | 2,108,782  | 2,138,644 | 2,131,604 | 2,103,692  | 2,126,064 | 2,128,297 |