

國立成功大學
交通管理科學研究所
碩士論文

捷運化對臺鐵局路線容量之影響

The Effect of Rapid Transit Systematization on Railways
Capacity of Taiwan Railways Administration (TRA)

研究生：羅建欣

指導教授：鄭永祥 博士

中華民國一零七年六月

國立成功大學

碩士在職專班論文

捷運化對臺鐵路路線容量之影響

The Effect of Rapid Transit Systematization on
Railways Capacity of Taiwan Railways
Administration(TRA)

研究生：羅建欣

本論文業經審查及口試合格特此證明

論文考試委員：

張有恆 李治綱

指導教授：鄭永祥

系(所)主管：廖俊雄

中華民國 107 年 6 月 15 日

摘要

隨著國內高速鐵路營運、各都會區捷運系統啟用及運輸市場改變，臺灣鐵路管理局(以下稱臺鐵局)的角色正面臨轉型，因此「臺鐵捷運化」是目前持續進行的過程，其目的在於提升區域運輸服務，以達整體運輸系統整合。

為符合臺鐵捷運化之目標，在路線上新增數通勤車站並加開通勤列車，惟臺鐵局係屬快慢車混合經營且停站方式複雜之軌道系統，而施工計畫內容對於捷運化後的路線容量評估卻相當少見，因此，本研究將進一步分析臺鐵捷運化後路線容量之變化及可能提升路線容量之方法。

軌道路線容量係國內外學者、學術單位反覆研究的議題，在研究的方法上常見有班表壓縮法、數學規劃法及電腦模擬法，各方法都提供相當重要的資料及基礎，惟影響路線容量的因素眾多，應全面考量軌道系統列車種別、車站及站間相互影響的可能，以求結論接近事實。

因此，本研究在方法上以具備彈性、平行運算能力之模糊派翠網(Fuzzy Petri Nets)作為推論引擎，參考鐵路局行車規章並以從業人員的角度編寫知識庫以建構「軌道路線容量評估模組」，針對「臺中計畫」加以分析，提出臺中計畫通勤車站啟用後最適列車種組合及平均發車間隔，以及捷運化後軌道系統與系統中各節點的連動關係，希望能作為臺鐵局對於捷運化區間加開列車及施工單位設計之參考。

關鍵詞：

路線容量、軌道路線容量評估模組、模糊派翠網(Fuzzy Petri Nets)、知識庫。

The Effect of Rapid Transit Systematization on Railways Capacity of Taiwan Railways Administration (TRA)

Jianshin-Shin Row

Yung-Hsiang Cheng

Department of Transportation and Communication Management Science & Institute of Telecommunications Management, National Cheng Kung University

SUMMARY

The policy of “Rapid Transit Systematization” has been executing for Taiwan Railways Administration(TRA)which is a traditional railroad .The subject of policy is making TRA underground or elevated and aims to integrate railway systems into a regional transport system, most important of all,the policy is building new Commuter Rail Stations in the line. The aim of this study is to analyze the the capacity of “Taichung Project” of the policy.

The capacity of railway transportation system is critical to the service quality and the railway capacity is not easy to analyze. Difficulties include the numerous interrelated factors about human,the complex structure of the railway and the vehicles. Therefore a tool that deals with these factors must be flexible. Thus, the method this study employed is Fuzzy Petri Nets (FPNs) which is flexible. FPNs is composed of Fuzzy Logics and Petri Nets, so it is not only flexible, but also could deal with uncertainty.This study proposed a tool named “*railway capacity evaluation module*” could solve the problems of the railway capacity.

This study described that the Taichung Project would not be the same as TRA Taipei corridor because the numbers of the station tracks in the Taichung Project are lesser than TRA Taipei corridor.

Key Words:

Capacity, railway capacity evaluation module, Fuzzy Petri Nets, Knowledge Base.

INTRODUCTION

Researches or proposals about the policy for railway capacity are rare, but railway capacity is important to service quality. Therefore, this study will analyze the effect of the policy on railways capacity. There are the most trains one way/rush hour in the TRA Taipei station so far, 5 express trains and 7 commuter trains in one hour. This study presents the set with (i,j) , “I” for express train numbers and “j” for commuter train numbers.This study adopted the set of TRA Taipei station to evaluate whether Taichung Project conform with the subject of the policy or not.

There are many literatures about railway capacity, as a result, this study cited some skills and concepts from these literatures to support this study approach and methods. Railway infrastructure is complex, so it is difficult to analyze (Mussone & Calvo, 2013). For solution, optimization problem is essential, such as only one train category. The two best known analytical methods are UIC406 approach in DB, or CUI method in Britain, These methods employed “timetable compression” and ignored some limitation of nodes.Iliasov, Lopatkin and Romanovsky (2013) established a tooling platform, the “SafeCap platform”, which would allow engineers to design stations and junctions and

reason about capacity. Although previously methods could deal with some problems of the railway capacity, it is not enough. The factors that affect railway capacity include railway infrastructure, train type and Planners, what a tool we need to reason capacity would concern these factors. Therefore the study adopted expert system approach that Fay (2000), Cheng&Yang (2009) had used to deal with disorder in railway transportation. Fay and Cheng et al. both employed Fuzzy Petri Nets (FPNs) as an inference engine for reasoning the decision-making.

This study adopted the expert system approach and FPNs as an inference engine to establish the design pattern named “*railway capacity evaluation module*”. This study described how to reason the railway capacity with the *railway capacity evaluation module*.

The numbers of trains in a hour of the Taichung Project would not be the same as TRA Taipei corridor with reasoning by “*railway capacity evaluation module*”. The primary reason for the result is the numbers of the station tracks in the links, in other words, the numbers of the station tracks are lesser than TRA Taipei corridor.

MATERIALS AND METHODS

This study represented a design pattern, shown in Figure1, for explaining about the *railway capacity evaluation module*. The core of the module is an expert system.

The theories this study cited are fuzzy theory and Petri Nets theory. The fuzzy logic is for management of fuzzy information in the rules in knowledge base of the expert system. and for fuzzy reasoning in FPNs as inference engine.

Petri Nets (PNs) theory is an important tool for systems analysis; it is a mathematical modeling of dynamic systems. This study adopted PNs for the ontology of the inference engine. Fuzzy Petri Nets consisted of PNs and fuzzy logic, it is an inference engine of the expert system for reasoning the capacity.

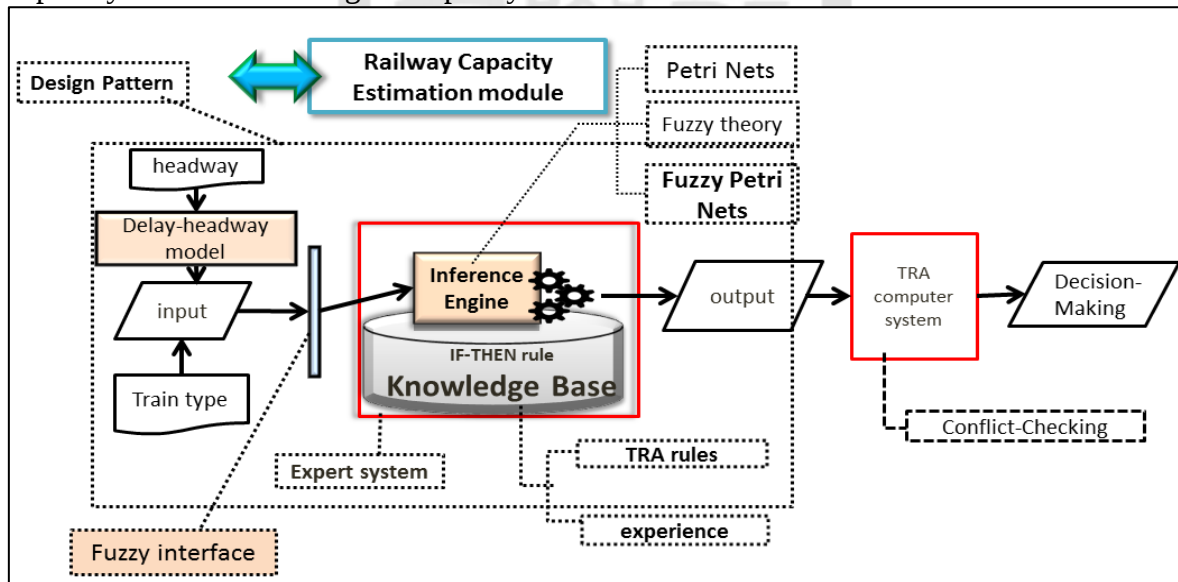


Figure 1.the design pattern of this study

RESULTS AND DISCUSSION

The scenarios this study set in the Taichung Project represented with (i, j), shown in Table1, and represented the theoretical capacity of the Taichung Project with different train types.

This study found out the bottleneck of the Taichung Project No.2 (all commuter stations operating) will locate on the section between P16 and P21 (P16 for Tanzi station, P21for Taiyuan station), because there will be 2 commuter stations operated, shown in fig2.

Table 1

	item	stage	train numbers (i, j)	Utilization (%)	Variety of Capacity(%)	Headway (min)
Taichung Project	1	No.1	11trains(4 : 7)	63.6%	--	5.5
	2	No.1	15trains(0 : 15)	46.7%	+36%	4
	3	No.2	10trains(3 : 7)	70%	-9%	6
	4	No.2	11trains(1 : 10)	63.6%	+10%	5.5
	5	No.2	12trains(0 : 12)	58.3%	+20%	5
Taipei corridor	6	--	12trains(5 : 7)	--	--	5

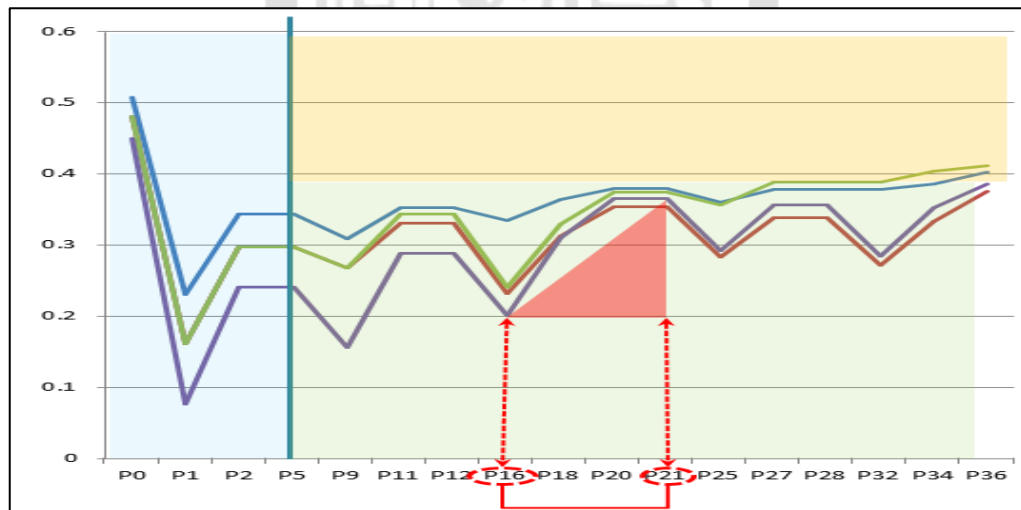


Figure 2.the bottleneck of the Taichung Project

CONCLUSION

Although the capacity of the Taichung Project could not be the same as TRA Taipei corridor, this study proposed two ways to promote the railway capacity. The first way is to adjust the train type set, shown in Table1 item4 and 5. The second way is to build up sidetracks in P19 (Song Chun station), shown in Fig3.

This study established the *railway capacity evaluation module* to modify the approaches of capacity estimation in the past and provided the railway planners with methods for scheduling how many trains (train type set) in the links or line.

The fuzzy logics of the train type this study adopted is discrete membership function, it is not easy to establish, the future study about discrete membership function could improve by learning experiences and collect more data.

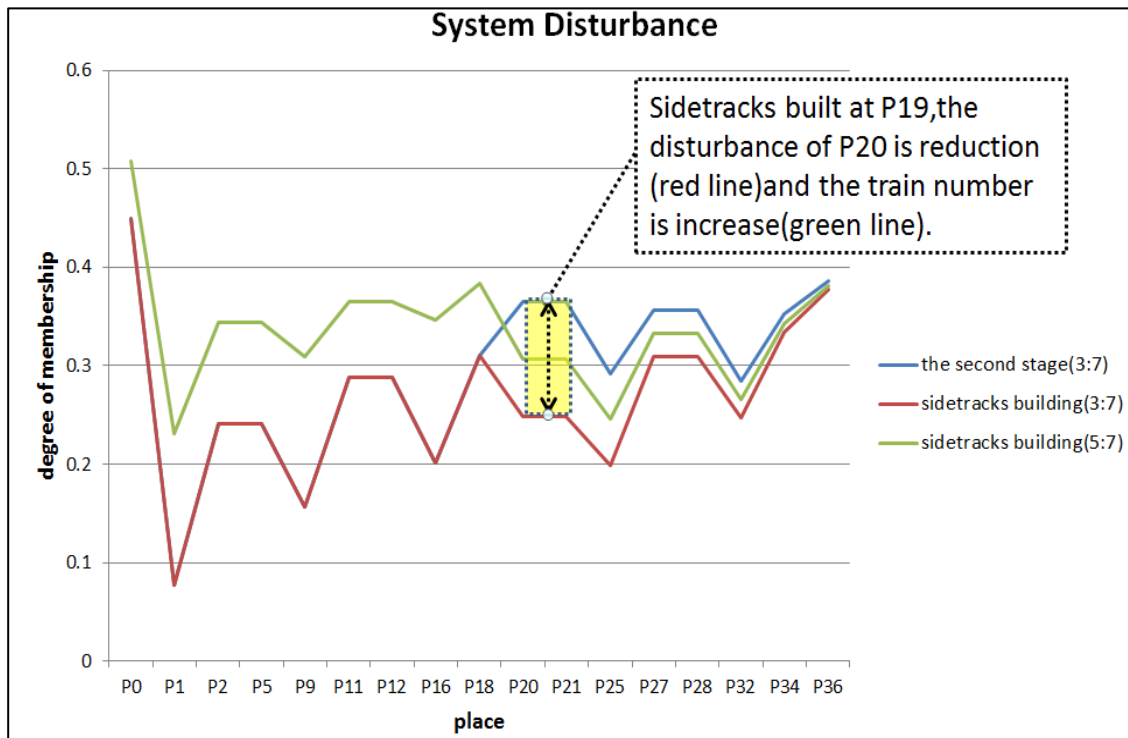


Figure 3.the membership of system disturbance

誌謝

隨著論文審核完成進而付梓，回想過程受到師長指導、同學砥礪及同事幫忙甚多，所受恩惠難以細述，惟畢生銘記。

首先感謝我的指導教授 鄭永祥老師從如何寫論文、題目發想、架構修正一步步的教導、提供學習資源並從營運供給、需求面提出觀點思考，論文才能順利完成；同時感謝口試委員 張有恒教授及 李治綱教授對於論文中不足的部分加以指正並提出不同角度的視野，使研究內容更為臻至完善。而成功大學課程多元，授課教師亦提供許多寫作技巧及觀念，其中感謝 李威勳老師對於系統設計、模型本體及演算法提出精闢的建議，使得模型更為收斂有效率。

與學長的觀念討論及同學們的砥礪、協助，使寫作過程的艱澀得以緩和；其中，感謝海外深造的正賢學長撥冗解答我許多數學問題及國外軌道系統的運作，累積論文寫作的養分；感謝詩彥、曉涵同學幫忙處理許多程序及學瑀同學重要資訊的分享及「即刻救援」，讓我不用時常台北、台南間往返奔波，節省勞費。

工作與學業的平衡，往往是在職生的糾結；在此感謝臺鐵局綜合調度所吳所長榮欽的勉勵、張組長素雲、王調度員宏良及劉調度員允韜暨全體行車組組員幫忙，讓我可以在無後顧之憂的情況下，完成論文寫作；也感謝運轉科洪調度員偉喆資料提供及意見交換，使我有更多的寫作靈感。

最後，謹以此論文獻給我的母親 劉素華女士，感謝您一路的支持與鼓勵。

羅建欣 謹誌

2018.07.於三角湧

目錄

摘要	I
誌謝	VI
表目錄	X
圖目錄	XII
第一章 緒論	1
1.1 研究背景及動機	1
1.2 研究目的	4
1.3 研究範圍及對象	5
1.4 研究方法	7
1.5 研究流程	7
第二章 文獻回顧	10
2.1 臺鐵捷運化路線容量現況及捷運系統路線容量之文獻探討	10
2.1.1 捷運化下路線容量影響	10
2.1.2 捷運系統之路線容量評估	11
2.2 鐵路路線容量評估相關文獻	12
2.3 Petri Nets 及 Fuzzy Petri Nets 之相關文獻探討	15
2.3.1 派翠網(Petri Nets, PNs)文獻探討	15
2.3.2 模糊派翠網(Fuzzy Petri Nets, FPN)文獻探討	17
2.4 小結	18
第三章 研究設計與方法	21
3.1 研究設計流程與 Design Pattern	21
3.2 派翠網(Petri Nets, PNs)基礎架構	24
3.2.1 派翠網(Petri Nets, PN)構成要素介紹	24
3.2.2 派翠網(Petri Nets, PN)之定義	24
3.3 模糊理論(Fuzzy Theory)介紹	29
3.3.1 模糊集合概念介紹	29
3.3.2 常見的模糊分布	30

3.4 模糊派翠網(Fuzzy Petri Nets, FPNs)介紹	32
3.4.1 模糊派翠網(FPN)的數學特性	32
3.4.2 「IF-THEN」在 FPN 中之應用	33
3.5 臺鐵行車規章、電腦排點系統及資料取得說明	37
3.5.1 臺鐵局行車規章實務介紹	37
3.5.2 臺鐵局電腦排點輔助系統介紹	39
3.5.2 研究數據取得	44
3.6 小結	45
第四章 建構路線容量評估模組與說明	46
4.1 利用 FPNs 建構路線容量評估模組之條件說明	47
4.2 知識庫及推論引擎之建構	48
4.3 知識庫各階段規則之意義	50
第五章 路線容量評估模組之驗證	53
5.1 Phase0 路線容量評估模組之數學驗證	55
5.1.1 計畫開行階段之驗證	56
5.1.2 車站調節及結果產出階段之驗證	57
5.1.3. Reachability Tree	61
5.2 Phase1 資料歸屬度產生	62
5.2.2 歸屬值之建立	63
5.3 Phase2 資料源投入推論演算	67
5.4 Phase3 結果產出與班表試排法驗證	71
5.4.1 TEST1 班表試排法驗證	71
5.4.2. TEST2 班表試排法驗證	72
5.4.3. Stress Testing 班表試排法驗證	73
5.5 小結	75
第六章 案例分析-臺中計畫	76
6.1. 臺中計畫之模型說明	79
6.2. 情境分析	81
6.3. 增加路線容量之列車種排列組合	86
6.4. 小結	91
第七章 結論與建議	93

7.1 結論.....	93
7.2. 研究貢獻	96
7.3 未來研究建議	98
參考文獻	99
附錄一、行車計畫規則知識庫	101
附錄二、臺中計畫演算過程	102
附錄三、臺中計畫模型(PNs)各節點代表意義	104
附錄四、臺中計畫-行車計畫規則知識庫	107



表目錄

表 1-1 臺北、臺中站對號車與區間車比較表，以 2017.09.06 班表為例。...	2
表 2-1.文獻分析方法比較表.....	20
表 3-1 位置節點及移轉節說明.....	26
表 3-2.運轉情形變更及增減分情形.....	38
表 3-3 運轉速度與線別(節錄實施要點 73 條部分線別).....	39
表 3-4 轍叉號碼與列車運轉速度(節錄行車實施要點第 75 條部分表格)....	39
表 4-1 位置節點思維狀態表.....	49
表 4-2 移轉節點行車系統狀態表.....	49
表 4-3 行車計畫推論規則.....	50
表 4-4 調節能力推論規則.....	51
表 4-5 行車計畫結果規則.....	52
表 5-1 各節點路線容量比較(單位小時/單方向).....	62
表 5-2 各區段時間推估.....	64
表 5-3 發車間隔與歸屬值.....	66
表 5-4.The membership degree of each place in TEST1	70
表 5-5 The membership degree of each place in TEST2	71
表 5-6. The membership degree of each place in Stress testing.....	74
表 6-1.指標位置(place)節點意義.....	77
表 6-2.情境設定.....	77
表 6-3 第一階段(5:7)指標位置節點歸屬值.....	81
表 6-4 第一階段(5:7)推論結果位置節點歸屬值.....	81
表 6-5. 第一階段(4:7) 指標位置節點歸屬值.....	82
表 6-6 第一階段(4:7)推論結果位置節點歸屬值.....	82
表 6-7 第一階段(0:15) 指標位置節點歸屬值.....	83
表 6-8 第一階段(0:15)推論結果位置節點歸屬值.....	83
表 6-9 第二階段(4:7) 指標位置節點歸屬值.....	84
表 6-10 第二階段(4:7)推論結果位置節點歸屬值.....	84
表 6-11.第二階段(3:7) 指標位置節點歸屬值.....	85
表 6-12 第二階段(3:7)推論結果位置節點歸屬值.....	85

表 6- 13 增加路線容量之列車種排列組合.....	86
表 6- 14 第二階段(2:9) 指標位置節點歸屬值.....	86
表 6- 15 第二階段(2:9)推論結果位置節點歸屬值.....	86
表 6- 16 第二階段(1:10) 指標位置節點歸屬值.....	87
表 6- 17 第二階段(1:10) 推論結果位置節點歸屬值.....	88
表 6- 18 第二階段(0:12) 指標位置節點歸屬值.....	89
表 6- 19 第二階段(0:12) 推論結果位置節點歸屬值.....	89
表 6- 20 第二階段(0:13) 指標位置節點歸屬值.....	90
表 6- 21 第二階段(0:13)推論結果位置節點歸屬值.....	90
表 6- 22 路線容量評估模組推演結果.....	92
表 7- 1 臺中計畫各階段路線容量.....	94
表 7- 2 最適車種排列組合.....	97



圖目錄

圖 1- 1 臺北站各線別對號列車自強號組成分析。.....	2
圖 1- 2 臺北站區間車組成來源分析。.....	3
圖 1- 3.臺鐵局現階段使用之電腦排點輔助系統。.....	4
圖 1- 4.研究範圍，全長為 21.7 公里，資料來源：鐵工局網站.....	6
圖 1- 5 本研究範圍之各站股道配置示意圖，資料來源：鐵工局中部工程處.....	6
圖 1- 6.研究流程圖.....	9
圖 2- 1 捷運化政策下路線容量變化示意圖.....	11
圖 2- 2.使用 PNs 模擬車站運作。資料來源：Žarnay(2004)......	16
圖 2- 3PN 建模過程示意圖 資料來源：Žarnay (2004)。.....	17
圖 3- 1 研究設計流程圖及研究方法示意圖.....	22
圖 3- 2.The Design Pattern of this study.....	23
圖 3- 3Petri Nets 構成元件示意圖 本研究彙整.....	24
圖 3- 4.移轉節點(T0)尚未滿足前.....	26
圖 3- 5 移轉節點(T0)滿足後.....	26
圖 3- 6.computation.....	27
圖 3- 7 衝突決策.....	27
圖 3- 8for AND input logic.....	28
圖 3- 9.for AND output logic.....	28
圖 3- 10.for OR input logic.....	28
圖 3- 11for OR output logic.....	29
圖 3- 12Fuzzy Petri Nets 推論過程說明.....	33
圖 3- 13「IF...THEN...」示意圖.....	35
圖 3- 14「IF...AND...THEN...」示意圖.....	35
圖 3- 15.「IF...or...THEN...」示意圖.....	35
圖 3- 16「IF...THEN...and...」示意圖.....	36
圖 3- 17「IF...THEN...or...」示意圖.....	36
圖 3- 18 站間號誌聯動示意圖.....	38
圖 3- 19.台鐵局目前使用之電腦排點輔助系統.....	40
圖 3- 20.新增行車計畫示意圖。.....	40

圖 3- 21.多重列車調整。.....	41
圖 3- 22 排點系統中使用之車站示意圖。.....	41
圖 3- 23 衝突檢查.....	42
圖 3- 24.股道重複檢查示意圖。.....	42
圖 3- 25.運轉時隔衝突檢查示意圖。.....	43
圖 3- 26.時間-空間運行圖，紅圈黃點為衝突處。.....	43
圖 3- 27 臺鐵臺北站 07 時 30 分起至 08 時 30 分之運行圖.....	44
圖 3- 28 台北捷運板南線發車時刻。資料來源 臺北捷運官網.....	44
圖 4- 1 路線容量評估模組架構圖.....	46
圖 4- 2. 路線容量評估模組之推論引擎 ontology 圖-以 PNs 表示.....	48
圖 4- 3 行車計畫 Petri Net 推論模型-計畫開行階段.....	50
圖 4- 4.行車計畫 Petri Net 推論模型-車站調節階段.....	51
圖 4- 5. 行車計畫 Petri Net 推論模型-結果回饋階段.....	52
圖 5- 1 驗證架構關係圖.....	54
圖 5- 2 計畫開行階段之圖形.....	56
圖 5- 3. 車站調節及結果回饋階段之圖形.....	57
圖 5- 4.Analysis Methods of validation processes.....	61
圖 5- 5 駕駛行為與閉塞區間示意圖.....	63
圖 5- 6 列車發車間隔與延誤之關係圖.....	65
圖 5- 7.歸屬函數示意圖.....	66
圖 5- 8 flow chart for the algorithm.....	69
圖 5- 9 臺中站 2.7 分發車間隔之運行圖.....	72
圖 5- 10 列車待避前(A)後(B)差異比較圖.....	73
圖 5- 11. Stress testing 之運行圖；虛線為加開列車(4753F)次。.....	74
圖 6- 1 案例分析流程圖.....	76
圖 6- 2 臺中計畫(第2階段)路線容量評估模組推論引擎之 Ontology(PNs)模型圖.....	78
圖 6- 3 臺中計畫 Ontology(PNs)模型圖說明，以附錄三規則 4 為例。.....	80
圖 6- 4 臺中計畫第一階段 12 列次/單向/尖峰小時.....	81
圖 6- 5 臺中計畫第一階段 11 列次/單向/尖峰小時.....	82
圖 6- 6 臺中計畫第一階段 15 列次/單向/尖峰小時.....	83

圖 6-7 台中計畫第二階段啟用 11 列次/單向/尖峰小時。.....	84
圖 6-8 台中計畫第二階段 10 列次/單方向/尖峰小時.....	85
圖 6-9.11 列次/單向/1 小時(對號車：通勤列車=2:9).....	87
圖 6-10 11 列次/單向/1 小時(對號車：通勤列車=1:10).....	88
圖 6-11.12 列次/單向/1 小時(對號車：通勤列車=0:12).....	89
圖 6-12.13 列次/單向/1 小時(對號車：通勤列車=0:13).....	90
圖 7-1.第七章結構圖.....	93
圖 7-2.擾動歸屬度-位置節點.....	95
圖 7-3 模擬工程手段之擾動量歸屬度-位置節點變化.....	96
圖 7-4.對號-通勤列車組合示意圖.....	97



第一章 緒論

1.1 研究背景及動機

臺灣鐵路管理局(以下稱臺鐵局)曾經在臺灣交通運輸史上扮演著主要運輸角色，但隨著運輸市場結構改變，臺鐵局亦須調整營運方式以符合臺灣整體運輸規劃資源配置，「臺鐵捷運化政策」也因此應運而生；參考「臺鐵兼具都會區捷運功能暨增設通勤車站評估計畫」、「台鐵都會區捷運化暨區域鐵路先期建設計畫」及國內相關文獻，其捷運化政策主要目標有：(1)因應高速鐵路通車協助臺鐵轉型(2)強化臺鐵之都會通勤與接駁功能(3)建構臺鐵為大眾運輸之一環(4)舒緩政府對都會捷運建設之投資 (張恩輔；黃笙琰；鍾志成, 2014)。但在相關計畫書、文獻卻鮮少針對路線容量分析或者是提供營運者作為加開列車之決策依據。目前臺鐵捷運化政策約略以北、中、南三個主要都會區作為施行對象，其中以臺北都會區中的樹林=七堵間發車密度最高，也是臺鐵局營運路線中最接近捷運化服務水準的區域。

本研究以「臺中都會區鐵路高架捷運化計畫」(以下稱臺中計畫)為例，自105年10月15日臺中站高架車站啟用，揭示了臺中市區鐵路高架捷運化開端，略以統計資料比較臺中都會區(以臺中站為中心)與臺北都會區(臺北車站為中心)兩者差異，臺北車站於尖峰期間可達到為五分鐘之最小運轉時隔；若以2017年9月6日臺鐵時刻表作為比較基礎，以臺中站作為觀察對象，相較於臺北站而言，臺中站車密度相對較低(約為臺北車站 50%)，如表 1-1。進一步分析臺北車站列車種組成，以各線別對號列車自強號為分析對象，如圖 1-1，臺北站上行對號列車(自強號)，58 列次中有 26 列次由樹林始發開往花蓮、臺東方向(45%)，8 列次是經由海線開往臺北方向(14%)，剩餘部分係經由山線開往臺北之自強號為 24 列次，幾乎與臺中站對號列車高度重疊；另有關臺北站上行區

間車部份，列車組成來源則更多，其中有 13%係經由臺中站開往臺北，如圖 1-2。

表 1-1 臺北、臺中站對號車與區間車比較表，以 2017.09.06 班表為例。

項目	上行車		下行車	
臺北站	對號列車 (自強號)	58 列次	對號列車 (自強號)	59 列次
	區間車	90 列次	區間車	89 列次
臺中站	對號列車 (自強號)	25 列次	對號列車 (自強號)	27 列次
	區間車	55 列次	區間車	58 列次

資料來源：臺鐵局，本研究彙整

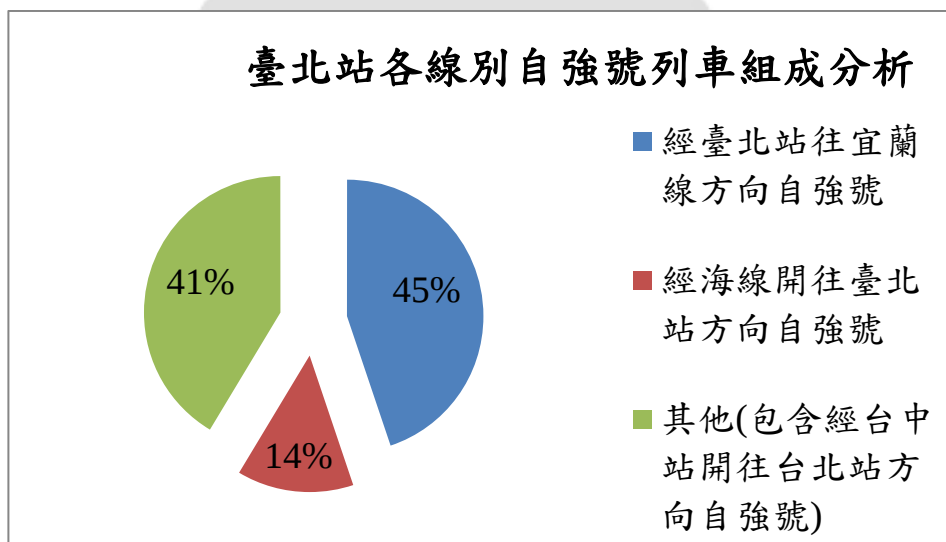


圖 1-1 臺北站各線別對號列車自強號組成分析。

資料來源：臺鐵局，本研究彙整。

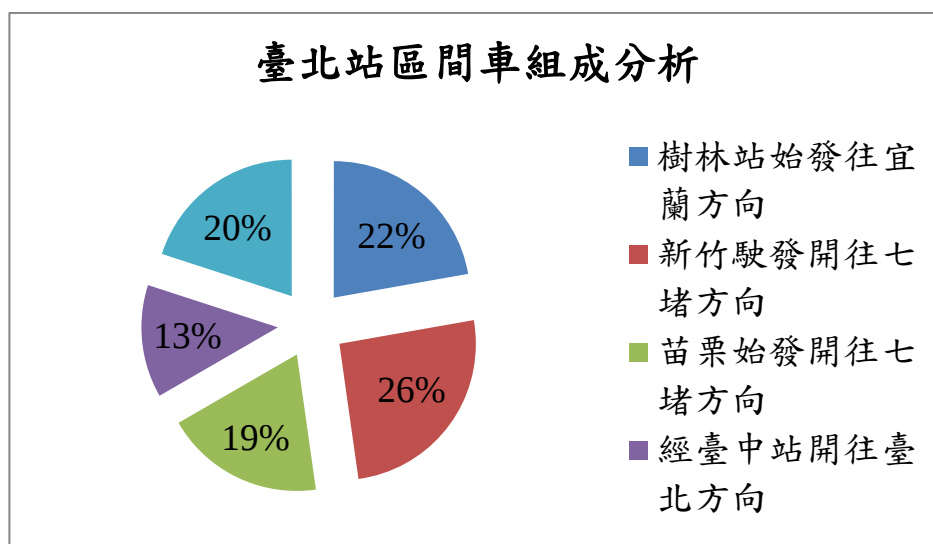


圖 1-2 臺北站區間車組成來源分析。

資料來源：臺鐵局，本研究彙整。

綜上所述，假若中部廊帶要達成捷運化目標，須加開列車以提高行車密度，必先考慮其車站、路線條件所構成的路線容量是否能負荷高密度列車數，同時也是該項政策成功與否之關鍵；又臺鐵局所營運的系統係為複雜且多情境的動態行車系統，且行車計畫主要是由專業人員規劃，換言之，行車計畫即具有主觀、質化性質之特性。因此，如何在不同路線條件及多情境行車運轉情形下作出提高車次數量之決策是捷運化計畫中應被謹慎評估，回顧國外文獻有關利用數種行車規則(rules)、不同情境或條件下透過決策系統作出因應對策如：Fay(2000)在不同情境、條件下透過決策系統作為調度人員是否讓表定準點列車等待慢分的列車之決策行為；Cheng & Yang(2009)針對臺鐵局鐵路行車系統在不同情境狀態下無法正常運轉時，透過使用專家系統決定施行運轉整理方式，均係透過模糊派翠網(Fuzzy Petri Nets)所建構的推演系統所得到的結論，故本研究亦使用模糊派翠網路作為評估決策模組之推論引擎，以處理複雜的軌道系統條件下之路線容量評估及加開列車數量之決策。

綜上，透過本研究之評估決策模組應用將行車運轉規章、運轉整理、路線、車站股道配置等多情境之因素作為評估路線容量之基礎，並藉由臺鐵局現行使

用的電腦排點輔助系統將加開列車以運行圖方式呈現，如圖 1-3，進而達到以學術理論結合實務應用以提供臺鐵捷運化政策更清楚之方向。

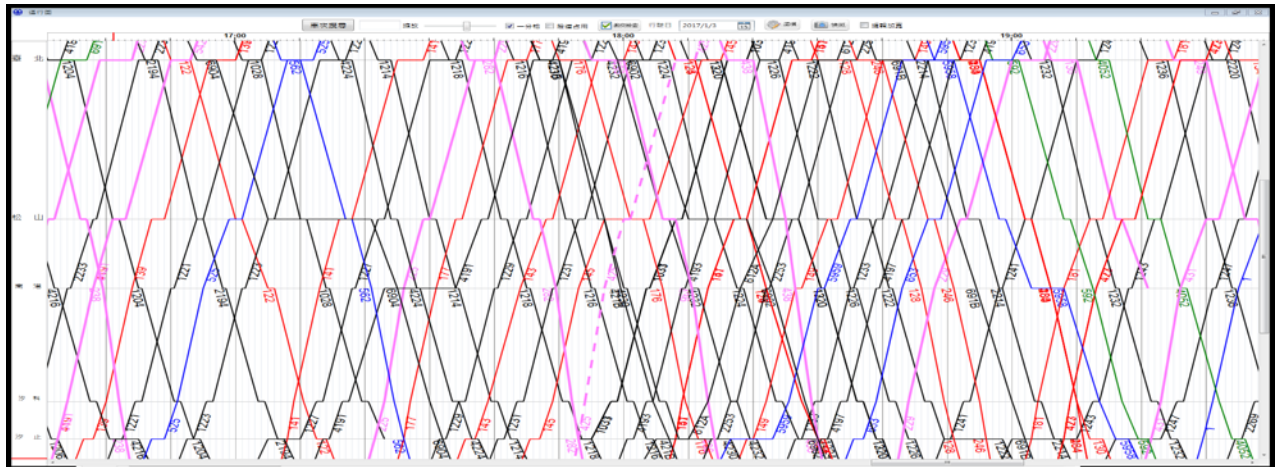


圖 1- 3.臺鐵局現階段使用之電腦排點輔助系統。

資料來源：臺鐵局，本研究彙整。

1.2 研究目的

臺鐵捷運化評估標準項目中，行車密度是否能提升是重要指標，臺中計畫路廊是否有足夠的容量收納增開列次是重要因素，而臺鐵系統屬於快慢車混合、車站股道配置及停靠站組合複雜之行車系統，因此，要提出客觀決策實屬不易，又路線容量評估之影響因素眾多，並非係由節點或由區間(link)單一因素所影響，故在研究工具選擇上須具備彈性優勢，因此本研究參考 Fay(2000)及 Cheng et al.(2009)如何透過建構專家系統在複雜的行車系統下建立決策支援系統，建立一套路線容量評估模組，以利興工單位在未來鐵路立體化之車站設計規畫及提供臺鐵局加開列車之決策基礎，依據 1.1 研究背景及動機分析指出，目前中部都會區車密度仍低於北部都會區，為達「臺中都會區鐵路高架捷運化計畫」之服務水準，故主要研究目的如下：

- (1)本研究以臺中計畫之行車條件為基礎，透過推論引擎(Inference Engine)及知識庫(Knowledge Base)建構軌道系統路線容量評估模組，其中推論引擎係由

模糊派翠網(Fuzzy Petri Nets)所組成，藉此分析臺中計畫列車種組合數最大量，評估是否能達成捷運化之服務水準。

(2)藉由本研究路線容量評估模組建立，一方面可將本研究之成果作為臺鐵局實務作業運用及知識庫傳承經驗外，另一方面可了解軌道系統擾動程度與節點調節能力變化聯動關係，提供日後軌道路線容量相關評估研究之基礎。

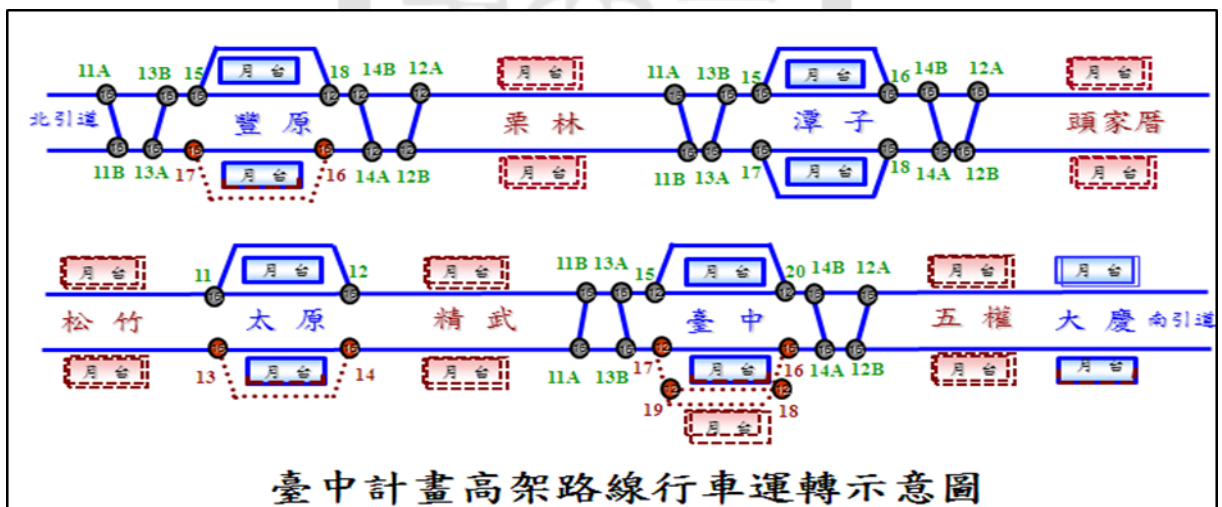
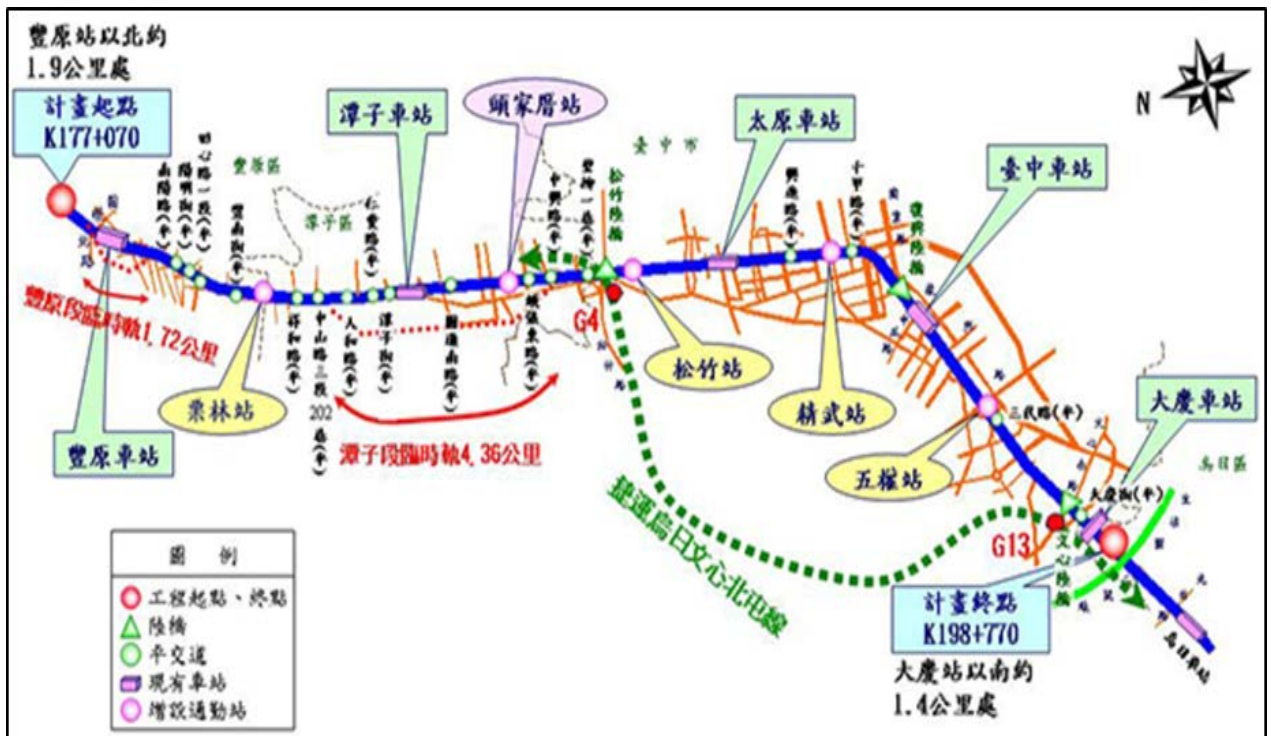
(3)透過本研究之路線容量評估模組推演，可於事前評估立體化區間之瓶頸路段，提供施工單位在鐵路立體化設計參考之基礎，使得後續立體化計畫更符合營運需求亦能提供其他軌道運輸業者在快慢車混合營運之參考。

1.3 研究範圍及對象

本研究以臺鐵捷運化政策為背景，設定「臺中都會區鐵路高架捷運化計畫」(以下稱臺中計畫)為達成捷運化目標，臺鐵局須在中部路廊加開列車數以符合捷運化需求。

研究範圍設定為豐原至大慶站，沿途各站為：栗林站、潭子站、頭家厝站、松竹站、太原站、精武站、臺中站、五權站全長為 21.7 公里，如圖 1-4。

列車種則簡化設定為區域連結之對號列車(express train)及捷運化通勤之區間車(commuter train)兩車種。研究對象係由北往南開行之列車，即由豐原站往大慶站方向開行，行車方式以複線運轉方式行車，閉塞方式以 CTC(centralized traffic control system)行車，期間無列車交會情形，研究範圍各站之股道配置如圖 1-5。



1.4 研究方法

在研究方法部分透過文獻回顧學者 Fay(2000)及 Cheng et al(2009).使用專家系統處理複雜的軌道系統問題，故本研究亦採用專家系統作為研究工具並使用 FPNs 作為推論引擎，將其具有圖像化及建模能力優越之特性，用於模擬複雜的軌道行車系統運轉情形。將行車計畫人員之思維、行車規章及法規範以建構規則知識庫(knowledge base)做為判斷依據，如準點之認定方式、系統擾動程度，並以 IF-THEN 判斷列車運轉時的可能發生情形及系統中各節點應為之反應，並結合模糊理論建立歸屬函數模型並將各條件歸屬度加以運算，最後於系統輸出端取得模糊值。

本研究為更符合臺鐵局實務運作，經過本研究之評估決策系統推演後得列車間隔，並透過現行臺鐵局使用的電腦排點輔助系統以班表試排法呈現理想班表並透過其衝突檢查予以驗證該班表無衝突及確定其班表可行性。

1.5 研究流程

有關本研究之研究流程如圖 1-6，並分述如下：

- (1) 研究背景敘述及動機發想以確定研究主題、方向。
- (2) 以研究主題為基礎確認研究範圍及對象。
- (3) 透過文獻回顧，本研究針對路線容量的議題下，分析過去研究基礎所使用的方法及研究對象之特性；再比較有關使用模糊派翠網(Fuzzy Petri Nets, FPNs)文獻如何在複雜多變的軌道系統中扮演推論的工具之相關探討。
- (4) 將行車規章、臺鐵局員工教育訓練教材及從業人員經驗建構知識庫，並以該知識庫建構 FPNs 推論引擎，同時使用臺鐵局目前電腦排點輔助系統驗證及呈現運行圖，使本研究更接近臺鐵系統實際運作。

- (5) 輸入單位小時單方向之列車種組合(對號列車數(i),通勤列車數(j))及平均發車時隔($60/(i+j)$)之歸屬值投入路線容量評估模組，經推論產出擾動風險歸屬值後，將列車種組合及發車時隔透過電腦排點系統衝突檢查功能驗證，則該路線容量單位小時單方向之總列車數為(i+j)列次，平均發車間隔為($60/(i+j)$)分。
- (6) 將本研究路線容量評估模組建議發車間隔以臺鐵局使用電腦排點輔助系統以空間-時間圖呈現、分析。
- (7) 結論與建議。



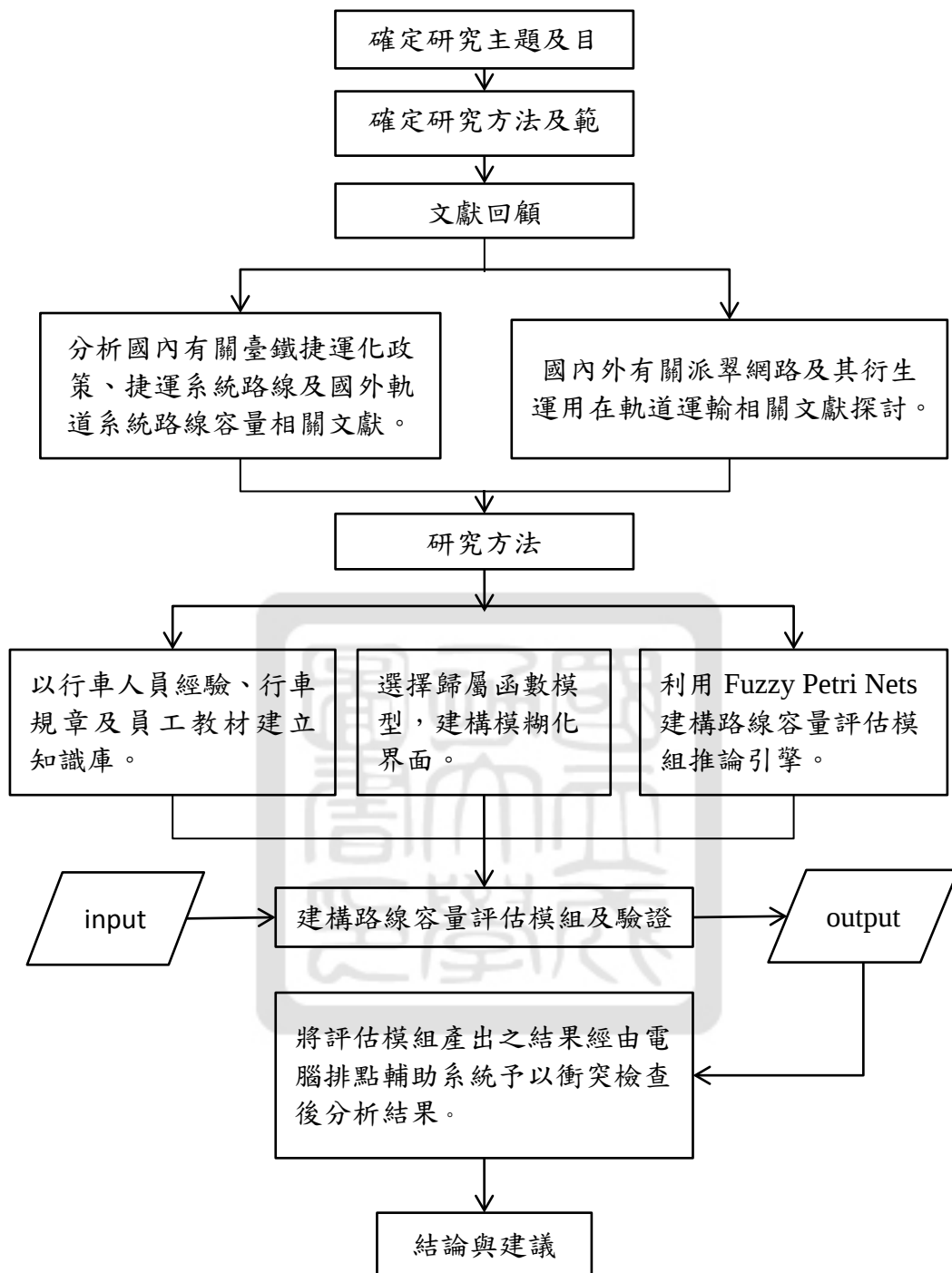


圖 1- 6.研究流程圖

第二章 文獻回顧

軌道路線容量是軌道系統中的關鍵，不論是班表穩定度或者是運轉整理方面都關係著系統中是否有足夠的容量收納列車數及吸收系統擾動，分析學者 Mussone & Calvo(2013)文獻指出，在軌道系統營運中，辦理行車運轉人員，如調度員，往往在乎線上列車未依行車計畫運轉時，所施行的運轉整理(reschedueling)，而行車計畫人員則重視行車計畫之列車運行時刻的安排，但這是一體兩面的，其關鍵在於路線容量。因此，本研究分析過往文獻作為基礎，以瞭解如何利用不同的方法分析的軌道系統路線容量及如何處理軌道系統複雜情境下之行車調度方式之選擇。

本章節以下將會分為三個部分，第一部分蒐集有關國內有關臺鐵捷運化、捷運系統路線容量有關文獻，作為軌道系統比較基礎；第二部分為軌道系統路線容量評估之相關文獻；第三部分則探討有關在複雜的軌道行車系統中如何透過專家系統得到決策的基礎之相關文獻，而中文獻中採用 Fuzzy Petri Nets(FPNs)作為推論引擎，其中 Zadeh(1983)將專家系統定義為提供使用者提出問題並得到答案之資訊系統設備，其問題有關之資訊則儲存於該設備之知識庫中；有關系統如何推論將在下一章節第三章研究設計與方法中更詳細介紹說明。

2.1 臺鐵捷運化路線容量現況及捷運系統路線容量之文獻探討

列車運行區間係由節點所構成(如車站)的，而各車站股道數、站間通勤車站多寡決定了運行區間之吞吐量，現今臺鐵局所營運的路線在部分路段已達飽和且屬傳統鐵路系統，其營運方式下的停靠站與車種數組合眾多，捷運系統則相對單純許多。在路線上增設數通勤站，將導致車速無法提升、同一距離下運轉時分延長並且造成對號列車延遲可能性增加，使得服務品質下降。

2.1.1 捷運化下路線容量影響

張恩輔、黃笙琰、鍾志成(2014)於「臺鐵捷運化建設效益回顧與建議」中利用統計資料分析臺鐵捷運化政策下近十年間車種、站間距離、列車平均巡航速度及發車頻率的變化，並以(1)平均站距(2)發車頻率(3)車種等級(4)停靠型態作為臺鐵系統與捷運系統差異性之比較指標，該文獻中指出因捷運化政策在臺鐵局所營運之傳統鐵路路線上增設通勤站，通過該路段之通勤電車運轉時分增加，平均巡航速度下降，使得號誌安全運轉時隔增加，進而導致路線容量下降，如圖 2-1。

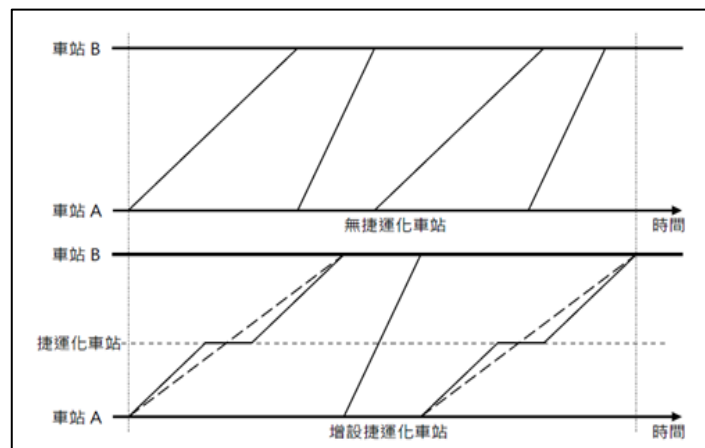


圖 2-1 捷運化政策下路線容量變化示意圖

資料來源：張恩輔；黃笙琰；鍾志成，中華民國運輸學會 103 年。

為使政策更能達到捷運化水準，該文獻對於捷運化對於臺鐵系統所受到的衝擊提出改善作為，(1)如增加數個通勤站中，部分通勤站應具備待避功能，如臺中捷運化計畫之太原站、(2)站間距離應有一定距離，使列車能提升巡航速度、(3)運轉時分計算基準以 15 秒為單位、(4)列車性能(5)加強捷運通勤站周邊接駁系統，提升搭乘意願。

2.1.2 捷運系統之路線容量評估

鍾志成、黃笙琰、李治綱、賴勇成、林國顯、劉昭榮(2012)以臺北捷運高運量系統板南線為例，分析其路線容量主要受限停站時間、號誌安全時距、運轉寬裕時間以及橫渡線規劃配置等因素影響，依經驗瓶頸點可能發生在最繁忙的中間站、末端車站，或是路線的銜接點。鍾志成等人建立數學公式計算捷運

系統各種條件之號誌顯示進行號誌所需時間之因素，並以此建立數學模型計算路線容量，推估可能發生瓶頸之車站(南港往永寧方向為忠孝復興站，永寧往台北方向為台北站。)並以捷運公司實際統計數據予以驗證，而後並針對板南線往南港和往永寧方向的兩個瓶頸點進行敏感度分析，並以經濟學中的彈性(elasticity)觀念，瞭解比較各影響因子對最小運轉時隔的影響(如寬裕時間、列車加減速等)。

該文獻建議要達到最小運轉時隔提高路線容量之目標，可從增加列車減速率和煞車有效因子，或者減少停站時間、進站前巡航速度和間隔安全係數等方面著手；然而列車煞車關係到旅客搭乘舒適度，而巡航速度和間隔安全係數涉及路線、軌道電路及號誌系統，亦不易變更，因此若要提升容量，較為可行且有效的方案為減少停站時間。

2.2 鐵路路線容量評估相關文獻

路線容量與服務品質是一體兩面，充裕的路線容量是確保班表穩定度重要的關鍵，因為餘裕容量可以吸收路線擾動而造成列車延誤的增延時分。路線容量同時亦是行車計畫人員對於車、路如何彼此交互作用下的結果；以下將探討文獻有關軌道系統路線容量的方法。

Mussone & Calvo(2013)認為軌道路線容量因結構複雜所以是難以精準定義且量化的，而目前對於路線容量的大抵上係以一段週期時間內所通過之最大輛列車做為路線容量評估。文獻中指出目前廣為周知的評估方法為 U.I.C(Union International des Chemins de Fer)，但是該方法不適合對於節點及車站股道路線容量的評估。Mussone, L.等人以透過數學規劃求得最佳解方式評估路線容量，其方法係針對進路(Path)、節點(node)關係設定，例如 a 站經節點 A 到 e 站，表示方式為 $\text{path}: a \rightarrow e: a(\text{station}) \rightarrow A(\text{node}) \rightarrow e(\text{station})$ ；該文獻將數個車站(a,b,c,...)起訖(OD)之 $\text{Path}=\{a-e, c-e, \dots\}$ 及 $\text{node}=\{A, B, C, D, E, F, Y\}$ 架構「進路-節點矩陣」，並以此為基礎建構數學模型；其目標函數為定期列車數及非定期列車數最大化，

以各進路(Path)通過各節點(node)之最大列車數之股道占用率(the percentage of occupation)為限制式，並以站內軌道(track)、站間路線(Line)、進路(Path)決策變數以求最佳解。惟複雜的數學式為求最佳解則需相關限制式放寬及簡化，使其成為線性規劃求解(solve the linear programming)。將問題數學式簡化成為兩條路線(P1, P2: 進路 1、2 經過節點之占用率)及一個節點時， $P1+P2<1$ ，則該節點為狹隘點(narrower)；該文獻以 Bern-Thun Line 為例，在情境設定下(如貨物列車不停靠 Bern、各車站股道運用數量等條件)評估瓶頸路段之發生點或站間路線，藉此使計畫人員了解軌道系統中敏感路段。

Armstrong, Preston, Potts, Bektas, & Paraskevopoulos (2017)則提出有關路網中的節點(車站(node)及分歧處(junction))造成路線容量的限制，並以路線容量利用率說明其影響進而改善進路及列車排程(schedule)使節點容量得以改善。文獻以 UIC406(Union International des Chemins de Fer, or International Union of Railways)及 CUI(Capacity Utilization Index)兩者方法差異比較，雖兩者使用的方法類似均係以班表壓縮法(timetable compression))但適用的對象細節仍有所差異，UIC406 適用於號誌閉塞區間(the signal block level)，而 CUI 則適用於較長的路線區段，即兩節點間的「直線段」(plain line)，不考慮單一閉塞區段，但兩者均受限於非直線段的節點(node)；Mussone et al.(2013)亦提出上述 UIC406 不適合有關於評估節點與容量關係之看法；Sameni, M. K., Landex, A., & Preston, J. (2011)提出因 UIC 406 及 CUI 兩者對 headway 考量點不同，導致對於同一路段之路線容量使用率有所差異。

Armstrong et al.在該文獻先使用 CUI：(1)壓縮法評估路線容量利用率(capacity utilization)，主要係評估車站或分歧處(junction)觀察，忽略停站時間(waiting time)，並計算觀察點之 capacity utilisation，而(2)後再透過 re-routeing 及 re-scheduling，以零工式工廠排程技巧(job shop scheduling techniques)將列車視為「工件」(jobs)經由軌道路網中之節點跟路線所組成的「機器」(machine)加工處理，列車在軌道上運轉時分則相當於工件產生的時間，藉此建立最佳化

模型，最後得到降低路線利用率以提升服務可靠度或再加開更多的列車，文中亦指出有關路線容量在尖峰時間帶時，減少兩車時隔(headway)或改用可通行較高速的道岔(turnout)改善的效益並不大。

Iliasov, Lopatkin & Romanovsky(2013)使用 SafeCap platform 應用程式針對瓶頸點評估路線容量，其具備跨平台整合環境技術提供可視化的模擬過程，包含了軌道系統安全確認元件，如軌道配置、進路、接點、列車運行行為、閉塞號誌圖說及評估路線容量之外掛程式，藉此推導在確認鐵路安全的情況下之評估路線容量並在此應用程式平台中透過改變軌道配置以提升路線容量並優化班表。Iliasov et al.在該文獻中所使用的路線容量評估工具 SafeCap platform 進一步分析如下：(1)以 DSL(Domain Specific Language)元件建構車站之軌道布置，其透過 DSL 建模的圖說(schema)具有間斷性(discrete，如號誌條件)模擬及連續性(continuous，如列車加、減速度)模擬的功能，藉此建構軌道幾何圖(railway topology)、列車進路、車站條件、交接點(junction)及模擬列車運行。(2)透過容量評估外掛程式(plug-ins)評估路線容量，透過變更軌道佈置(patterns)以提升路線容量(capacity)，文中亦指出軌道系統的節點(nodes，junctions and stations)是路線容量的關鍵。這也反映了臺鐵捷運化區間能否達到捷運化的服務水準之其中重要因素之一。

Riejos, Barrena, Ortiz & Laporte(2016)針對軌道系統之路線佈置為 radial-backbone(X-tree 結構)之理論路線容量(theoretical capacity)分析，Riejos et al.則係以 Madrid-Seville Line 為研究對象，文獻中認為軌道路線路線容量主要係依據其物理特性，如站間路線數目(單線區間、雙線區間)、車站數量、站內股道(副正線、側線)等因素，而 Madrid-Seville Line 係位於主幹線(backbone)上，其路線容量已呈現飽和狀態，該文獻試圖在不改變路線條件下，以車輛運用調整方式使得路線容量得以增加，Riejos, F. A. O 等人透過分析 OD(origin-destination)資料分析，取得各站轉乘、搭乘人數量，計算車隊(fleet)數規模與各站搭乘、轉乘人數關係之分析模型並藉此發展解決問題之演算法

(algorithm)，在一定條件下(如每列次盡可能滿載之條件)將數學公式寫成程式語言透過電腦計算求出最佳解以滿足所有旅運服務之最小車隊規模，藉此決定最少車輛數(vehicles)，減少已飽和的 Madrid-Seville Line 容量占用，增加路線容量之餘裕空間。

2.3.Petri Nets 及 Fuzzy Petri Nets 之相關文獻探討

正常而言，路線上所營運之一般列車屬計畫性開行，應依計畫行點運轉，電腦可以預先安排而儲存進路；惟在某些情況，列車無法依計畫運行，產生延誤，此時調度員依行車規章規定，視列車等級、銜接、前後距離等規定施予運轉整理手段，試圖將列車延誤降到最低並減少列車延誤之影響，其中，列車依計畫運行則是計畫人員如何分析系統中車、路關係，並給予適當、適時及適切的安排；換言之，不論是調度員施行運轉整理或者是計畫人員安排行車計畫都是建立在路線容量的基礎上，因此如何在複雜的行車系統中做出評估並且決定是系統營運重要關鍵，在本章節將探討有關在行車系統中多情境下如何作出決策之相關文獻。

2.3.1 派翠網(Petri Nets,PNs)文獻探討

Žarnay(2004)針對使用派翠網(Petri Net,PNs)在交通運輸系統建模之應用及程序提出探討。透過 PNs 將以「列車」、「股道」及「占用」等軌道系統組成元素對應 PN 各元件表示，同時呈現 PNs 建模彈性及平行分析之優勢。例如黑點(token)表示列車數、圓圈(place)表示股道占用與否、移轉節點(transition)表示進站(Entering)跟出站(Leaving)；如圖 8(a)至(c)為說明：列車運行方向由左(Left)往右(Right)運轉，列車數在左邊有兩列次並以兩個 token 表示，(a)列車尚未進站，表示軌道無佔用，token 位於(track is free)之 place。(b)一列次進站，軌道占用中，token 位於(track is taken)之 place。(c)當該列次離開車站後，表示列車

之 token 傳遞至 Right 之 place，同時表示軌道無佔用之 token 位於(track is free) 之 place。

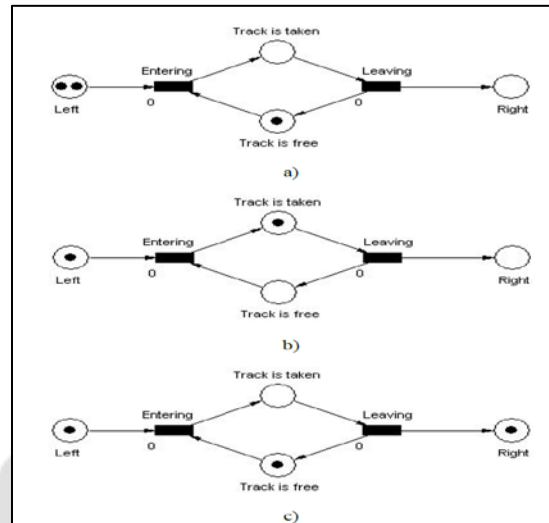


圖 2- 2.使用 PNs 模擬車站運作。資料來源：Žarnay(2004).

綜上，透過 PNs 的應用可以達成以下目標(1)敘述現實中的系統(2)由系統不同情境來模擬真實系統行為(3)分析系統行為發現系統衝突(4)統計系統行為結果。

Žarnay 在文獻中表示如何利用 PN 建模過程，以上述列車通過車站股道站用為例，建模過程如圖 9，可以(1)模型基本元素，如動力車輛、路線條件(2)列車進路(列車移動方向)，例如：由左至右。(3)列車排序過程(processes of a train set)(4)最高一階段為決策(decision-making)，指透過該階段做出決定指派列車、員工之過程；然而在此階段往往是最困難的，Žarnay 指出可以透過 PN 之分支 (another special branch of Petri Nets)fuzzy Petri Nets 來處不明確的情況。文末亦指出，隨著交通系統日益複雜，單純使用 PN 作為解決問題的工具日益複雜，因此 PN 為基礎結合其他理論衍生出的工具則是未來研究的方向。

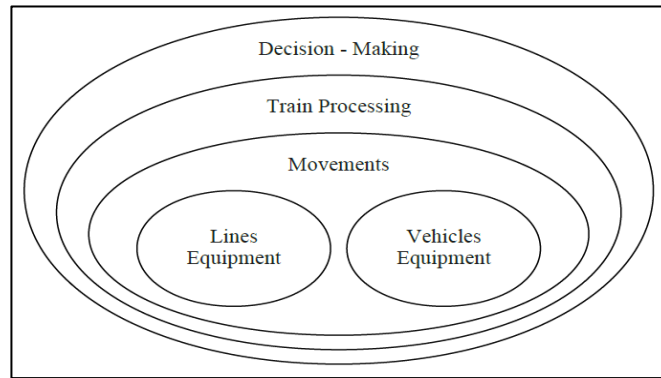


圖 2- 3PN 建模過程示意圖 資料來源：Žarnay (2004)。

2.3.2 模糊派翠網(Fuzzy Petri Nets,FPN)文獻探討

隨著系統日益複雜，資訊的取得及回饋的精準度也日益不精確，在龐大系統中伴隨而來的是多情境狀態下要如何採取策略解決問題，Cheng et al.(2009)透過 Fuzzy Petri Nets(FPN)建構調度決策規則，將原本存在於調度人員心中(mind)之經驗轉換成可利用的知識規則(knowledge rule)，該文獻以臺灣鐵路系統為例，透過蒐集整合臺鐵局調度人員的會談以專家知識之規則知識庫(knowledge base)，並以 Fuzzy Petri Nets(FPN)做為系統推演工具建構專家決策系統(Expert System)；在行車運轉異常、多種情境下，如 CTC(centralized traffic control)故障、ATP (automatic train protection) 故障、動力車故障等事件下，如何透過 FPN 模擬得到適當的調度選擇。在該文獻歸納調度觀點有待避、折返行駛、特開及合併運轉，調度考量則有列車等級、後續運轉距離、月台停靠時間及旅客數量等等因素，再透過「IF-THEN rule」建立列車調度規則資料庫(Train dispatch rule base)，例如，當調度觀點(dispatch opinion)如果(IF)考量列車等級及(AND)後續運轉距離及(AND)月台停靠時間，則(THEN)調度行為是待避。建立模型後，利用歸屬函數(membership functions)取得個調度觀點(或事件)求得歸屬度之模糊值，並投入 FPN 所建構的專家系統推演出在事故發生時所採取的行為及其結果，據此可提供給調度人員針對「事故類型」決定採取對應之「策略」。

Fay(2000)認為調度人員如何有效率的採取運轉整理以處理軌道系統中發生的擾動是軌道運輸市場營運中重要的一環，文中提到有關列車控制的發展可以觀察到兩種研究趨勢，即algorithm及heuristic方法。而algorithm及heuristic方法在應用上的差異性；而這兩者也非相互排斥的；例如可以利用heuristic方法處理調度決策，如當號誌故障時：(a)停駛(b)變更路線(c)等待故障排除，而後可以透過algorithm方法加以修飾，列如，上述(b)決策：「列車應該利用哪個剩餘股道變更路線？」或如上述(c)決策：「應該在哪一個月台等待故障排除才會將擾動影響將低至最小？」。而該文獻所使用的Fuzzy Petri Nets則具備兩者的優勢並以圖像化表現。

Fa(2000)以表定列車是否等待延誤列車為例子，利用知識取得及建立模型、透過歸屬函數模型(membership function)計算情境條件(如：延誤情形、剩餘旅行距離及旅客數量)之歸屬度及建構評估目標的規則資料庫(rule base)並以Visual Basic建立Fuzzy Petri Nets推演工具所組成的決策支持系統，將具有「IF-THEN」模糊規則(fuzzy rule)的專家知識之調度支援系統應用在鐵路營運控制系統中，依據調度人員所採取的調度行為得到的結果作為調度人員決定是否讓原定準點之表定列車等待延誤列車之決策依據。

2.4 小結

臺鐵捷運化政策執行約莫十多年，針對臺鐵局營運之傳統路線上增設通勤車站所造成的路線容量衝擊之文獻則屬少見，而有關軌道系統路線容量相關文獻大略可分為數學分析法、班表最佳化法及電腦模擬法，綜觀在國內外相關文獻所累積的基礎上有以車站或節點做為討論研究基礎，有的則以長區間作為分析對象。因此，不論微觀或者巨觀都有著「見樹不見林」或者是「見林卻不見樹」的限制及缺憾，如班表壓縮法，不論是 UIC406 適用於號誌閉塞區間(signal block)或是 CUI 適用於長進路區段(longer route section)且不考慮號誌區間，雖然 Armstrong, J. et al.提出改善節點評估方式，但系統背景建立的同時卻忽略整

體系統與車站間之交互作用，如忽略號誌條件及相鄰兩站的影響，對於路線容量評估結果與現實系統將差距甚遠；而在部分模擬法決策支援系統中，如路線容量評估工具 SafeCap platform，因車站所有進路、股道在安全查核過程中所耗時間較久(約略 45 分鐘)，無法達成時效性要求且使用單位人員未必具備電腦科學基礎及撰寫程式能力進而整合現有電腦輔助系統，而在最佳化方法中對於目標函數及限制條件之設計為能產生最佳解，往往會有簡化運轉條件及實際運轉情形，如停站時間、車與路互影響情形及節點行車條件；若將行車條件細節多加著墨則數學演算式複雜，且在求解上又出現困難。

國內外文獻對於軌道系統容量研究文獻對於本研究方向有極大助益，惟其中所使用之方法、工具及介面友善程度均較低，對於現職行車計畫人員接受度不高；而路線容量評估要件中對於人、車與路相互間動態條件及計畫人員思維層面分析路線容量相關研究則屬少見，至於利用專家系統分析評估路線容量更為罕見；如今 Petri Nets(PN)及其衍生工具，如 Fuzzy Petri Nets，目前已廣泛運用在列車交通控制領域中並展現其建模優勢(Suraj, 2012)，例如，Cheng et al.(2009)等人在專家系統中利用 Fuzzy Petri Nets 擔任推論引擎作為最是調度策略的分析工具，其有關文獻方法分析如表 2-1。

隨著軌道系統日益複雜，處理的問題也越來越棘手，附隨而來的不確定性也隨之升高；從文獻中了解影響軌道路線容量並非由單一節點或者是單一區間所造成，本研究為處理龐大而複雜的臺鐵行車系統之路線容量評估，在工具選擇採用 Fuzzy Petri Nets(FPNs)之優勢彈性建構路線容量評估模組之推論引擎，處理複雜多情境的軌道系統，使模型更符合實際運轉情形，有關 FPNs 之內容於第三章研究設計與方法中說明。

表 2- 1.文獻分析方法比較表

項目	評估分析 區間	使用者 友善介面	運算時間 (相較於 FPNs)	建模彈性	系統各元素 辨別度
電腦模擬法	節點	中等	長	較低	清楚
演算法	區間	較低	中 (視情況而定)	中	清楚
數學規劃法	節點 (分歧處)	較低	中	中	清楚
* FPNs 應用	**	較高	較短	優	較為不清楚

資料來源：本研究彙整，*本研究以 FPN 建構路線容量評估模組之推論引擎。



第三章 研究設計與方法

參考 Cheng et al.(2009)透過專家系統處理多情境因素選擇最適調度策略之研究，本研究採用該文獻之方法處理臺鐵捷運化路線容量議題，因此，在本章節將過去的研究基礎上結合臺鐵局實務操作經驗、運轉規章架構路線容量評估模組並使用電腦排點輔助系統予以驗證，在資料取得部分則以臺鐵臺北站 07 時 30 分至 08 時 30 分單方向之列車種組合數及捷運臺北站周間 08 時 00 分至 09 時 00 分之列車數為數據來源。此章節提出本研究設計流程、方法及處理問題之 Design Pattern，並在第四建構路線容量評估模組。本章依序說明順序：

- (1) 第一部份說明研究架構之研究設計流程圖及研究方法示意圖，如圖 3-1 並藉此提出本研究之 Design Pattern，如圖 3-2；
- (2) 第二部分為派翠網路(Petri Nets)構成元件如何推演及後續相關運用；
- (3) 第三部份模糊理論，說明如何將本研究之資料源與規則間取得共同語言(歸屬值)得以相互運算；
- (4) 第四部份則說明如何將模糊理論結合 PNs 成為模糊派翠網(Fuzzy Petri Nets)；
- (5) 第五部分將介紹臺鐵員工教材、臺鐵行車規章行車運轉限制暨行車條件、研究數據取得及臺鐵局目前所使用的電腦排點輔助系統，作為後續模型建立之驗證之衝突檢查。

3.1 研究設計流程與 Design Pattern

參考過去文獻由知識庫(knowledge base)結合推論引擎(Inference engine)所組成之專家系統作為本研究路線容量評估模組主要系統，本研究流程主要係先確認研究主題及對象，找出適當方法後建構路線容量評估模組，並將本研究設定情境之列車種組合及發車間隔投入路線容量評估模組推演進而產出結果，在方法上由 Petri Nets(PNs)結合模糊理論衍生而成的 Fuzzy Petri Nets(FPNs)作為推論引擎(Inference engine)，以及知識庫由臺鐵行車規章及教材及行車經驗所

構成並透過模糊理論取得歸屬程度(模糊值)在推論引擎中運算推演，其推演結果再以臺鐵電腦排點輔助系統加以驗證並產出運行圖，本研究設計流程圖如圖 3-1，並將設計流程及方法綜整成本研究處理路線容量評估問題之 Design Pattern 如圖 3-2。

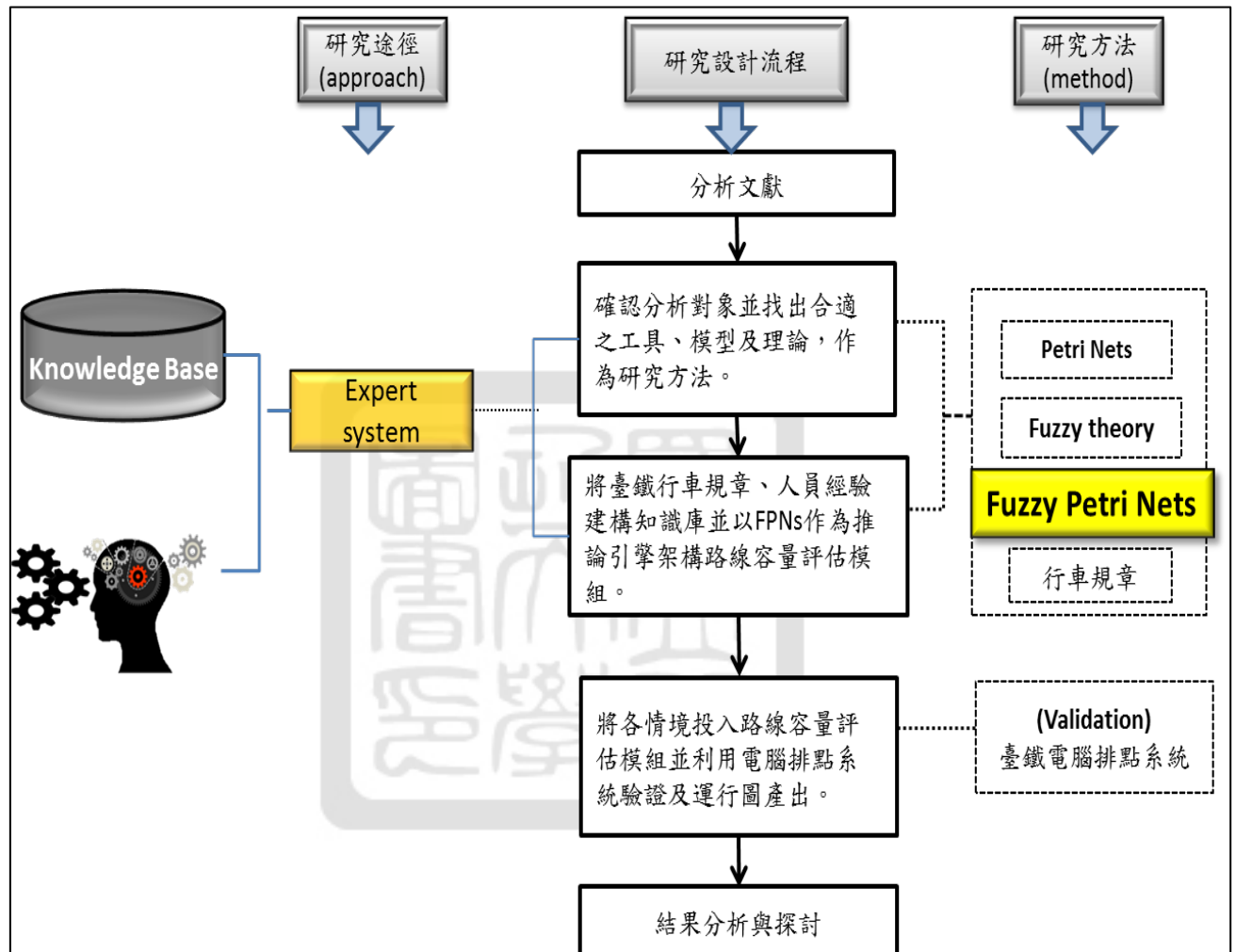


圖 3-1 研究設計流程圖及研究方法示意圖

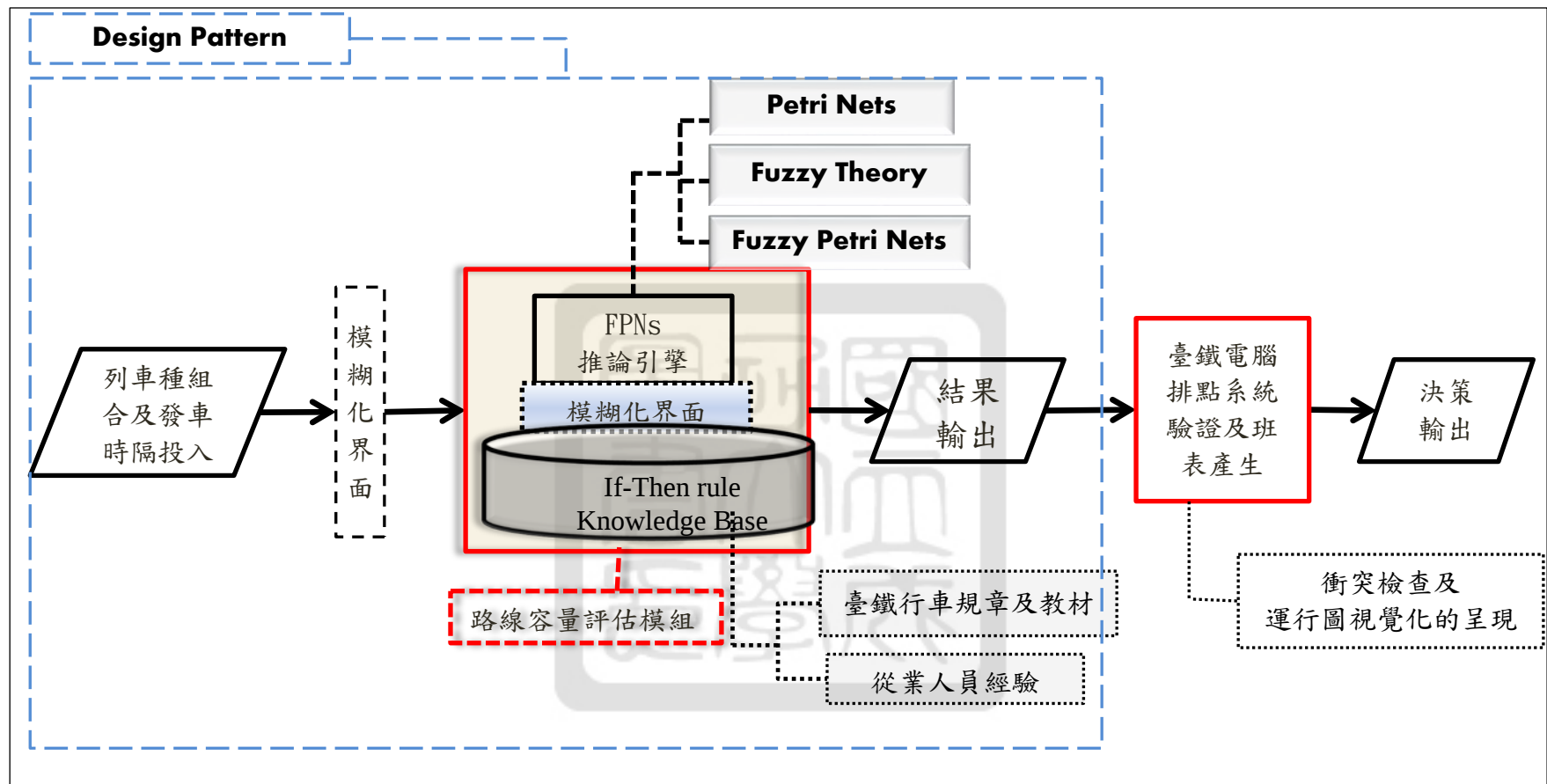


圖 3- 2.The Design Pattern of this study

以下各節將介紹說明有關本研究方法 petri nets、Fuzzy theory、Fuzzy Petri Nets 以及臺鐵行車規章、電腦排點系統等工具內容及本研究之應用。

3.2 派翠網(Petri Nets,PNs)基礎架構

Petri Nets 是由 Carl Adam Petri 在 1962 年博士論文(Communication with automata)所發展而成的，Petri Nets 是以圖像形式建模且具備平行、同時處理的能力，因此系統中構成要素彼此間具有同步相互作用之條件下相當適合使用 PN 建模，本章節將對於基礎 Petri Nets(PNs)特性及運作分析說明。

3.2.1 派翠網(Petri Nets,PN)構成要素介紹

依 Žarnay(2004)針對使用派翠網(Petri Net,PNs)在鐵路車站交通建模對於由 PN 所構成之系統能以圖解標記、精準數學語言及分析之系統工具，而該工具是由位置節點(place)、移轉節點(transitions)、方向弧(arc)及標記(token)所組成，place 常以圓形表示、transitions 常以長方形表示、arc 以箭頭符號表示，token 則以黑點表示，如圖 3-3。

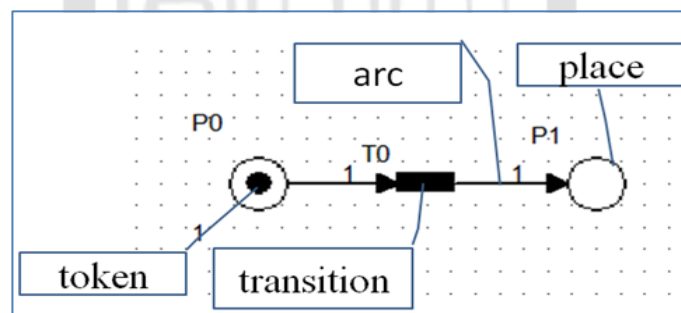


圖 3- 3Petri Nets 構成元件示意圖 本研究彙整

3.2.2 派翠網(Petri Nets,PN)之定義

本研究參考 Cheng et al. (2009)專家系統中對於基礎 PN 推演說明、Liu, You, Li, & Tian. (2017)Fuzzy Petri nets 應用文獻回顧之研究及陶冶中、洪敏琛(104 年)台鐵調度策略相關文獻，對於基礎 PN 數學特性整理成以下說明：

$PN=(P,T,F,W,M_0)$ ：

$P=\{P_1,P_2,\dots,P_m\}$ 表示由位置節點(place)所組成的有限集合， m 表示 place 數量。

$T=\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 表示由移轉節點(transition)所組成的有限集合， n 表示 transition 的數量，每一個 PN 有 $n \geq 1$ 的 transition。

$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 表示由方向弧 (arc) 所組成的集合，PN 流向關聯(flow relation)。

$W : F \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ 表示權重函數(weight function)。

$M_0 : P \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ 表示初始標記(initial marking)。

3.2.3 派翠網(Petri Nets, PN)之基礎推論

Peterson(1981)認為 PN 之應用係透過建模(modeling)方式得以表現出來，並且分析結構中重要訊息及系統中動態行為，因此廣泛運用在各個領域。PN 建模推論過程中有一定的規則及基本型態，每一個構成元件，如位置節點 place(input place、output place)、移轉節點(transition)，在系統中均有可能代表之意義，如表 3-1。位置節點及移轉節說明，在模型的建構過程中，位置節點(place)間不能直接以方向弧(arc)連結，位置與位置節點間需透過移轉節點才能建立，每個位置節點在系統中有代表的意義，如前置條件、輸入訊號或者資源等意義，而一個移轉節點可能由一個或多個輸入節點或輸出位置節點(陶冶中、洪敏琛，民 104 年)，這意味著前製條件滿足了事件規則或者是工作要求而產出了後果或者是可得到資源。換句話說，在 PNs 推論規則(rule)中，當一個或多個輸入位置節點之標記在滿足移轉節點時，如圖 3-4，該移轉節點或數個移轉節點則有活化的能力，即可將標記往下傳遞，當標記持續傳遞至系統目標之輸出位置節點時，完成推論過程，如圖 3-5。

表 3- 1 位置節點及移轉節點說明

輸入位置節點 (Input place)	移轉節點 (Transition)	輸出位置節點 (Output place)
前置條件(Precondition)	事件(Event)	後置條件(Postcondition)
輸入資料(Input data)	計算步驟(Computation step)	輸出資料(Output data)
輸入訊號(Input signals)	訊號處理器(Signal processor)	輸出訊號(Out signals)
資源需求(Resources needed)	任務或工作(Task or Job)	釋放資源(Resources released)
條件(Conditions)	邏輯子句(Clause in logic)	結論(Conclusion)
緩衝(Buffers)	處理器(Processor)	緩衝(Buffers)

資料來源：Murata, T. (1989)、楊立安(2007)。

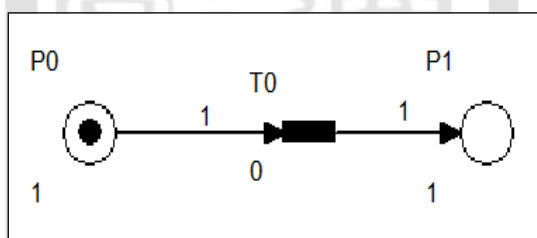


圖 3- 4.移轉節點(T0)尚未滿足前

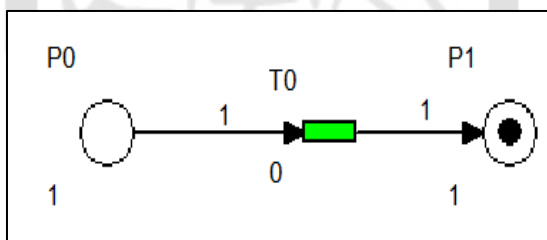


圖 3- 5 移轉節點(T0)滿足後

綜合上述，PNs 是一個具備平行運算的圖形模型，能以圖解方式仿人思考模式，彼此間相互鍵結，完成 PN 模型系統進行推論；以下係整理有關 Peterson 對於 PN 推論的基本應用及圖示樣態介紹：

(1)近似人類思考計算之 PN 元素組成圖示樣態，如圖 3-6，投入與產出之計算

P0 為判斷系統之投入，透過計算、製程或派工系統得到產出 P1。

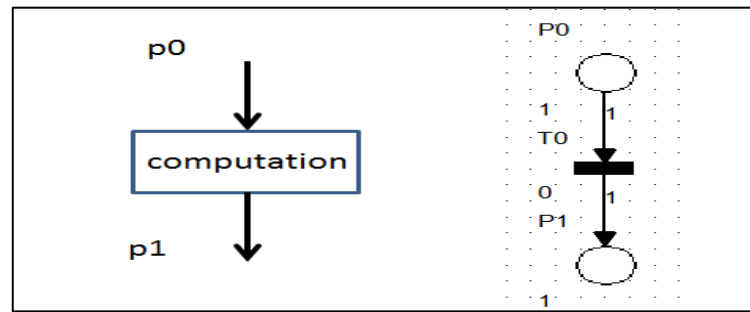


圖 3- 6.computation

(2)近似人類決策行為之 PNs 元素組成圖示樣態，如圖 3-7，在衝突情境下，於數方案中(T0 或 T1)擇一，使得前置條件 P0 得到 P1(或 P2)之結果。

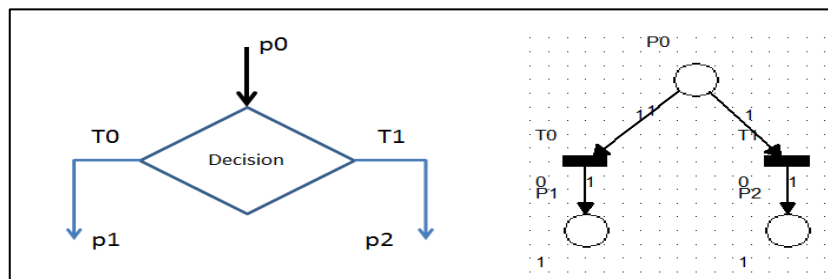


圖 3- 7 衝突決策

(3)PNs 的發展演繹過程中，其功能及用途因需求更加多元化，在加州大學洛杉磯分校(University of California at Los Angeles)的 Estrin 教授的指導下將邏輯“AND”、“OR” 觀念與 PN 結合，使用在節點(node)結合程序操作的邏輯控制，又稱為 UCLA graph model(Peterson, 1981)，其基本圖示樣態即意涵說明如下：

A.當輸入端節點邏輯為 AND 時的 PNs 圖示樣態，如圖 3-8，即前置條件同時成立時，則結果成立。

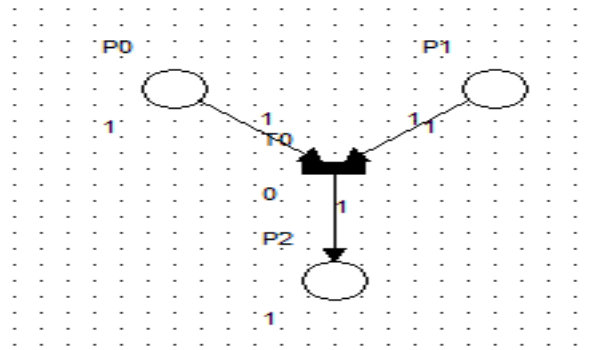


圖 3- 8for AND input logic

B.當輸出端節點邏輯為 AND 時的 PNs 圖示樣態，如圖 3-9，即結果同時執行(成立)。

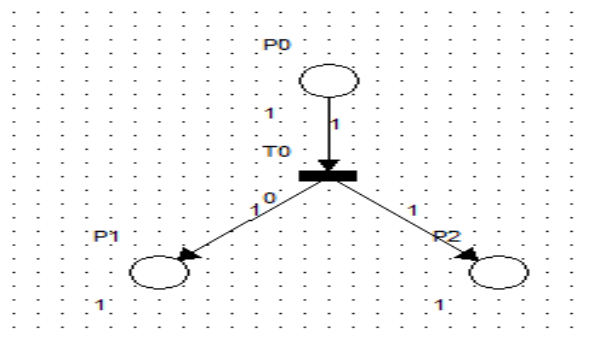


圖 3- 9.for AND output logic

C.當輸入端節點邏輯為 OR 時的 PNs 圖示樣態，如圖 3-10，即前置條件擇一成立。

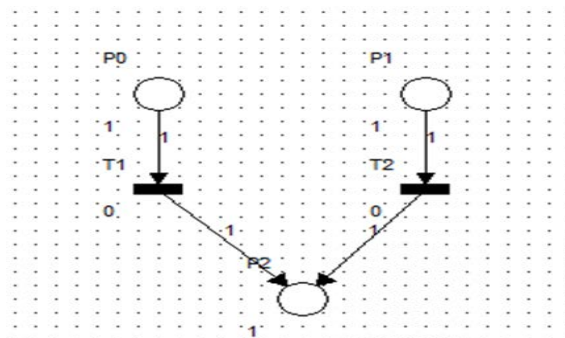


圖 3- 10.for OR input logic

D 當輸出端節點邏輯為 OR 時的 PNs 圖示樣態，如圖 3-11，即結果擇一成立。

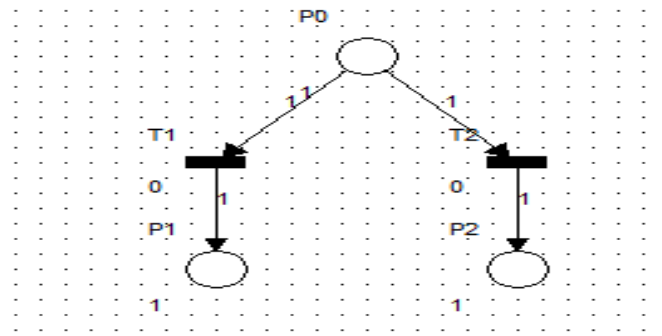


圖 3- 11for OR output logic

3.3 模糊理論(Fuzzy Theory)介紹

模糊理論係由 L.A.Zadeh 於 1965 年提出模糊集合之數學基礎所發展，以處理相對概念但沒有明確界線的模糊性現象之一門學問，例如，年輕與年老，那些年紀會被歸屬於年輕或者年老的範疇，需要有建立歸屬函數予以區別其歸屬程度。模糊理論廣泛應用於涉及人類主觀認定或判斷領域，如機器智慧化、專家系統、行為與心理分析等領域(王文俊，2005)。

在許多文獻中對於條件及結果都係建立在精確概念上，如數學規劃在一定的限制條件下求最佳解，在其數學式中的參數、變數均為明確數值(馮正民，邱裕鈞，研究分析方法，頁 199)，但在行車計畫人員思考的過程中，很多時候對於一件事物的表述並非如此的精準，例如，列車慢分所延誤時間是明確的，但是延誤時間對於系統擾動風險程度則是不明確的。

3.3.1 模糊集合概念介紹

傳統集合是將具有明確界限之同樣性質元素給予歸類，當作一個整體予以觀察與研究，傳統集合的概念可以用以下歸屬函數加以表示：

$$X_A(u) = \begin{cases} 1, & u \in A \\ 0, & u \notin A \end{cases} \quad (3-1)$$

其意義為 A 為一集合， X_A 是集合 A 的歸屬函數，如果 u 元素屬於 A 集合，則歸屬含數值 $X_A(u)=1$ ；如果 u 元素不屬於 A 集合，則歸屬函數值 $X_A(u)=0$ 。換句話說，在傳統集合中，討論集合中各元素之歸屬程度時，透過歸屬函數值

即具有不是「1」，就是「0」的明確性。

透過歸屬函數建立可將集合轉化成函數值，使得各集合間相對應之運算產生交互作用的結果，也因此有利於系統邏輯推論。

若某集合內之構成元素無法很明確歸屬於該集合或界定無法明確歸屬，則該集合稱之為模糊集合；即使該元素的來源是明確數值，但涉及到主觀意識將該元素之「屬於」量化時，則需透過模糊理論的技術加以處理。例如，前述所提列車慢分為例，假設在某一行車條件下列車經過不同番號道岔之速度導致列車慢分為 0.5、1、1.5 分，該慢分集合 A 為{0.5、1、1.5}，其集合之組成元素均為明確數值，但都無法很精確的表達究竟是慢幾分才歸類於「列車延遲風險大」的範疇，此時就需要模糊理論的技巧加以處理得知該元素的歸屬程度。模糊集合的歸屬函數：

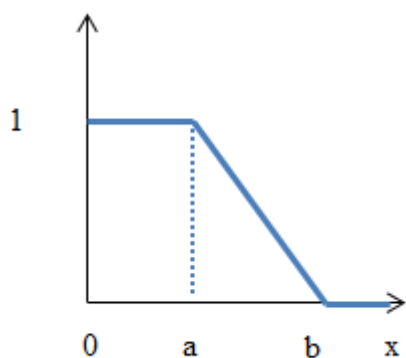
$$F_B: U \rightarrow [0,1], u \mapsto F_B(u) \quad (3-2)$$

其中 U 為論域，B 為論域上之一模糊集合， F_B 指的是 B 的歸屬函數，上述表示利用歸屬函數 F_B 說明 U 中元素 u 歸屬於 B 模糊集合的程度，即 $F_B(u)$ 為 u 對於 B 之歸屬度， $F_B(u)$ 之範圍為 0 到 1 之間，即[0,1]，越接近 1 表示歸屬程度越高，反之越接近 0 則歸屬程度越低(馮國臣，2007)。

3.3.2 常見的模糊分布

歸屬函數可以用模糊分布表示；歸屬函數相當於一個轉換機制，可以將一數值轉換成對於一個模糊集合中的歸屬程度，也才能將模糊集合進行量化進而演算及處理同時也運用結合在其他研究方法中，使得對於研究客體有更多層面的分析。在實際運用中，針對問題的性質加以選擇適當的模糊分布，使之更符合實際情況。本研究參考 Cheng et al.(2009)及 Fay(2000).在文獻中所使用的模糊分布圖及馮國臣《模糊理論基礎與應用》，分別敘述如下：

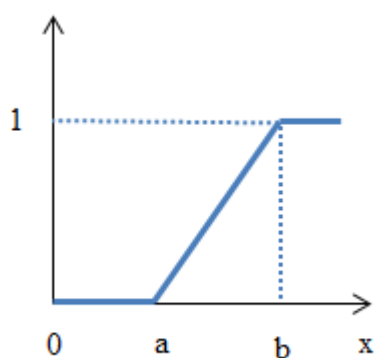
(1) 半梯形分布，偏小型



$$F(x) = \begin{cases} 1 & x < a \\ \frac{b-x}{b-a} & a \leq x < b \\ 0 & b \leq x \end{cases}$$

(3-3)

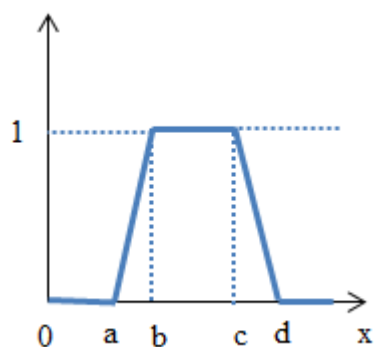
(2) 半梯形分布，偏大型



$$F(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x \end{cases}$$

(3-4)

(3) 台型分布



$$F(x) = \begin{cases} 1 & x < a \\ \frac{b-x}{b-a} & a \leq x < b \\ 0 & b \leq x \end{cases}$$

(3-5)

3.4 模糊派翠網(Fuzzy Petri Nets,FPNs)介紹

傳統的 Petri nets(PNs)已呈現其強大的建模彈性，處理許多動態系統問題。但隨著系統規模逐漸擴大隨之而來的資訊傳遞及取得便越來越不精確，面對現實中軌道系統運轉情形多態樣的況下，要以傳統 PN 來處理問題恐怕有些許不足。同理可證，在過往專家決策系統中，推論工具以二值邏輯，即 1 與 0 作為啟動系統推論的閾值亦難符合現實系統運作情形；若以歸屬程度作為啟動推論系統的閾值則越能呈現實際系統運作，也因此為處理多情境且日益複雜的系統問題，如 Looney(1988)將傳統的 PN 引入介於 0 到 1 之數值以表對於事物的接近程度，並利用模糊規則使其在系統中運算及推論，使 PN 更能呈現現實狀態，傳統 PN 亦結合其他方法或理論衍生出 hybrid Petri Nets，其中之一為 Fuzzy Petri Nets(FPNs)，而本研究亦將使用 FPN 作為研究推論工具。

3.4.1 模糊派翠網(FPN)的數學特性

根據 Liu et al.(2017)文獻回顧整理及 Suraj(2012, September)針對 FPN 由 8 個元素所構成，其元素定義說明如下：

Fuzzy Petri Nets 主要組成元素： $FPN=(P,T,D,I,O,f,\alpha,\beta)$ ：

$P=\{P_1,P_2,\dots,P_m\}$ 表示由位置節點(place)所組成的有限集合。

$T=\{t_1,t_2,\dots,t_n\}$ 表示由移轉節點(transition)所組成的有限集合。

$D=\{d_1,d_2,\dots,d_m\}$ 表示由命題(Propositions)所組成的有限集合，且 $P \cap T \cap D = \emptyset$,

$|P|=|D|$ 。

$I: P \rightarrow T$ 表示輸入函數(input function)；位置節點到移轉節點間之線段。

$O: T \rightarrow P$ 表示輸出函數(output function)；指移轉節點到位置節點之線段。

$f: T \rightarrow [0,1]$ ；從移轉節點映射至 0 至 1 之間實數之關聯函數。

$\alpha: P \rightarrow [0,1]$ ；從位置節點映射至 0 至 1 之間實數之關聯函數。

$\beta: P \rightarrow D$ ；從位置節點對射至命題之關聯函數。

以文獻常見舉例說明，如圖 3-12，表達模糊邏輯與 PN 彼此間如何推論的過程：

前提為 temperature is hot,則結果為 humidity is low：

$P=\{P1,P2\}, T=\{t_1\}, D=\{\text{it is hot, the humidity is low}\}$

$I(t_1)=\{P1\}, O(t_1)=\{P2\}$

$f(t_1)=0.9$

$\alpha(P1)=0.9, \alpha(P2)=0$

$\beta(P1)=\text{it is hot}$

$\beta(P2)=\text{the humidity is low}$

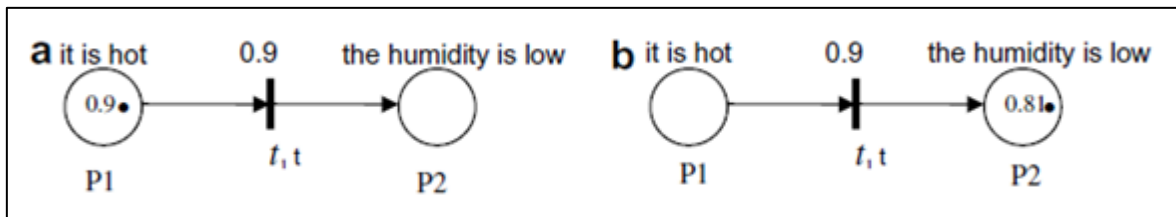


圖 3- 12Fuzzy Petri Nets 推論過程說明

(a) 移轉節點 t1 活化前(b) 移轉節點 t1 活化後。

資料來源：Cheng et al. (2009)

3.4.2 「IF-THEN」在 FPN 中之應用

在 FPNs 每個組成元素原本是單純的事實或價值的描述，例如「通過列車」、「進站停車再開」、「擾動風險等元素」，然而利用 IF-THEN rules 編排後各單元彼此間得以鍵結，例如：「若通過列車改停車再開則擾動風險增加」之規則，數規則集結後則成為知識庫，藉此架構 FPNs 推論網路並以模糊邏輯推演。本節參考 Liu et al.有關 IF-THEN 在 FPN 中之基本表示如下：

R_i ：IF P1 THEN PO ,(CF,certainty factor = μ),Th.

P1：表示規則之前提要件(antecedent)。

PO：表示規則之結論(consequent or output)。

R：表示推論規則組成之集合， $R=\{R_1,R_2...R_i\}$

CF= μ ， $\mu \in [0,1]$ ，表示某因子對於規則認定之歸屬程度(強度)。

$Th = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i\}$ ，表示由各位置節點命題的歸屬函數值或閾值(threshold values)所組成之集合。

依據 Fay(2000)、Cheng et al.(2009)針對 FPN 推論過程中，針對規則(rules)、前提要件及結果間相互關係：

(1) R_i ：IF P_1 THEN PO ,(CF,certainty factor $=\mu$), Th .

$$\alpha(P_1)=\lambda_1, CF=\mu, \alpha(PO)=\lambda_2=\lambda_1*\mu$$

(2) rule 是結合數前提要件： R_i ：IF P_1 AND P_2 THEN PO ,(CF,certainty factor $=\mu$), Th .

$$\alpha(P_1)=\lambda_1, \alpha(P_2)=\lambda_2$$

$$\alpha(PO)=\lambda_0=(\lambda_1+\lambda_2)/2, \text{即採其算術平均數。}$$

(3) 在衝突決策中，即數個決策採取一決策時，或結合兩個以上 rule 變成一個 rule 時，其 λ_0 ：

$$R_x: \text{IF}(\dots)\text{THEN } PO_x, \alpha(PO_x)=\lambda_x$$

$$R_y: \text{IF}(\dots)\text{THEN } PO_y, \alpha(PO_y)=\lambda_y$$

$$\alpha(PO)=\lambda_0, \lambda_0=f(\lambda_x, \lambda_y)$$

依據 Fay 所提出數規則(rule)之結合值為 λ_0 ，該 λ_0 介於 $\text{MAX}(\lambda_x, \lambda_y)$ 與 $\lambda_x + \lambda_y - \lambda_x \lambda_y$ 之間；依據 Cheng et al.(2009)在專家系統推論方式，則 $\lambda_0 = \text{MAX}(\lambda_x, \lambda_y)$ ，即取大值，本研究亦採此方式作為數個 rule 結合之計算方式。

綜上所述，FPN 具備將各明確元素(如延誤時分，延誤 1、2 分均為明確數值)透過歸屬函數計算出歸屬程度(模糊數值)再透過 IF-THEN 推演運算呈現出計畫人員思考模式之優勢推演能力，參考 Liu et al.透過以下圖 3-13 至圖 3-17 說明其基本 FPNs 推論圖形基本態樣：

(1) 圖 3-13，「IF...THEN...」，即若 P_1 則 P_o 。當左側節點 P_1 事件前提滿足後，移轉節點被活化，則系統狀態移轉至結點 P_o 。

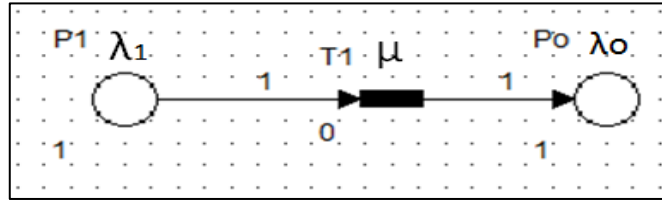


圖 3- 13 「IF...THEN...」示意圖

- (2) 圖 3-14. 「IF...AND...THEN...」，即 IF $P_1 \text{ AND } P_2 \text{ AND } \dots P_n$ ，則 P_0 。當左側 $P_1 \sim P_n$ 前提條件均滿足時，如同時執行、或數情境同時發生時，則移轉節點活化，系統從左邊推演至到右邊 P_0 ，如車站主正線列車占用且後續列車跟隨進站則車站啟動調節。

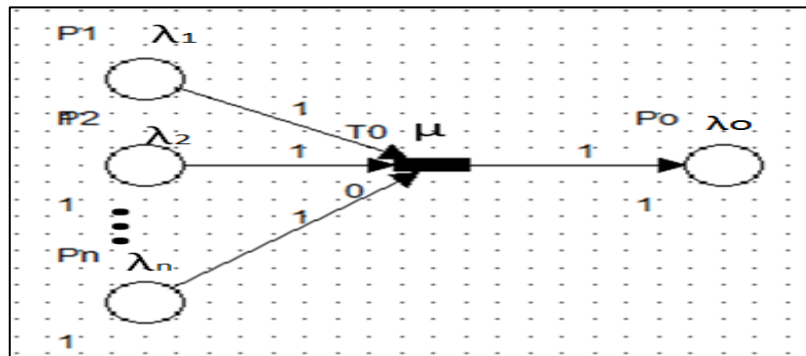


圖 3- 14 「IF...AND...THEN...」示意圖

- (3) 圖 3-15. 「IF...or...THEN...」，即若 $P_1 \text{ or } P_2 \text{ or } \dots P_n$ ，則 P_0 ；即決策衝突情境，當左側 $P_1 \sim P_n$ 條件擇有一個條件被滿足時，則移轉節點活化，系統推演從左邊移轉到右邊 λ_0 ；例如，當通勤列車間距小於 X 分或對號列車發車間距小於 X 分時，則系統擾動風險高。

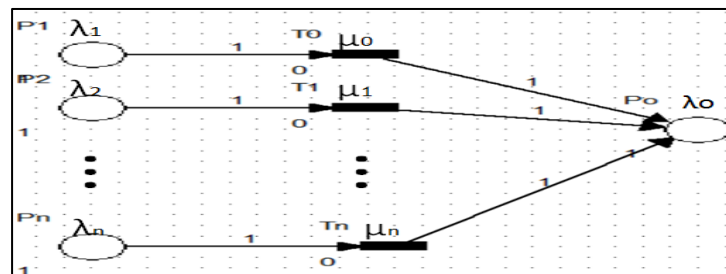


圖 3- 15. 「IF...or...THEN...」示意圖

- (4) 圖 3-16，相當於「IF...THEN...and...」，即若 P_i 則 P_1 and P_2 and... P_n 。當左側 P_i 條件被滿足時，移轉節點活化，狀態從系統左邊移轉到右邊 P_1 及 P_2 及...及 P_n 成立，如若啟動車站調節則先開通主正線且後開通副正線。

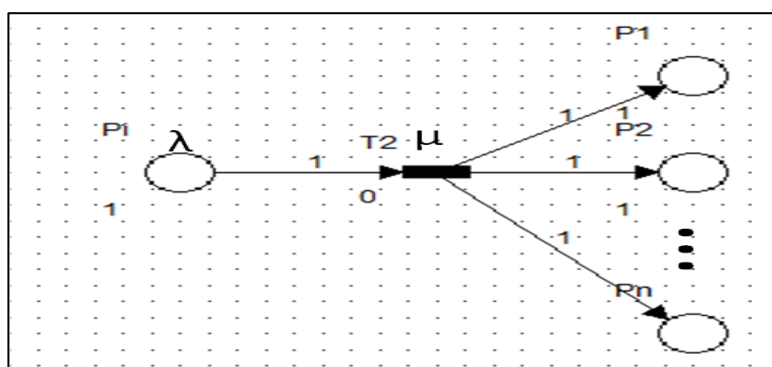


圖 3- 16 「IF...THEN...and...」示意圖

- (5) 圖 3-17，相當於「IF...THEN...or...」，即若 P_i 則 P_1 or P_2 or... P_n 。當左側 P_i 條件被滿足時，活化數個移轉節點中之一個移轉節點，驅動狀態從系統左邊推演到右邊 P_1 或 P_2 或...或 P_n 其中之一成立，例如，當發車間距 X 分時，則號誌顯示險阻或注意或進行，此時則需透過移轉節點作為判斷。

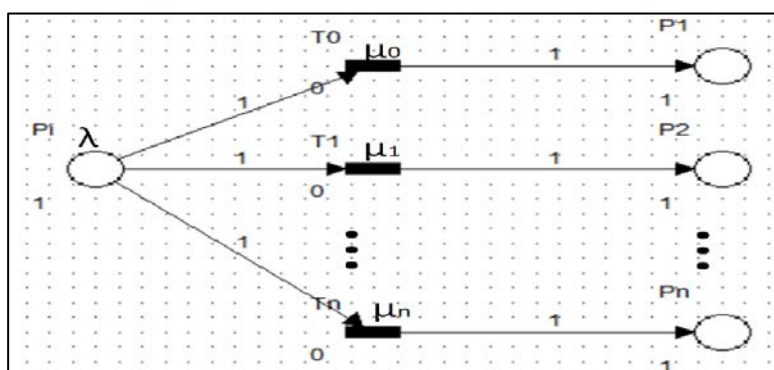


圖 3- 17 「IF...THEN...or...」示意圖

3.5 臺鐵行車規章、電腦排點系統及資料取得說明

為使本研究更符合臺鐵實際運作及建構本研究之路線容量評估模組規則知識庫(knowledge base)之需要，以臺鐵局行車規章、教材做為知識庫之架構基礎及利用臺鐵運行圖、臺北捷運時刻表蒐集本研究模型所需要的數據，並利用臺鐵局電腦排點系統衝突檢查作為驗證。

3.5.1 臺鐵局行車規章實務介紹

鐵路行車運轉依行車規章辦理；其中，為維行車運轉安全需要，鐵路行車規則第二條及第六十三條明文規定列車於軌道系統中運轉時，人、車、路三者間的關係：

- (1) 依據鐵路行車規則第二條對於閉塞區間之定義為「指不能同時運轉二列以上列車之號誌區間。」。
- (2) 第六十三條：「列車之運轉，應依號誌之顯示辦理。」。可以得知軌道運輸為達安全運輸之要求，將軌道路線利用「閉塞區間」予於分割成一段接續一段之距離，而在臺鐵系統中是以固定號誌機作為切割閉塞區間，因此乘務員(司機員)應依號誌顯示行車，以確保在一般情形下，一個閉塞區間只允許一列次列車安全運轉。

綜上，鐵路路網是由數個車站及數個閉塞(block)所組成，一路線可切分為數個閉塞區間(block) (Samà, Meloni, D'Ariano & Corman, 2015)，又因行車安全，每個區間只運轉一列次列車。而每個閉塞區間與號誌機均聯鎖，當列車於軌道電路占用時，透過繼電器作動使中途閉塞號誌機顯示為險阻(紅燈)，該閉塞區間(假設為 B_n)與前一個閉塞區(假設為 B_{n-1})間相互連動，前一個閉塞(B_{n-1})則為注意(黃燈)，如圖 3-18，當中途閉塞間設立通勤車站時，且列車須停站辦理客運，則使整個系統運轉速度下降，進而使整體路線容量下降，即在單位時間內

在該區間可以通過的列車數下降。

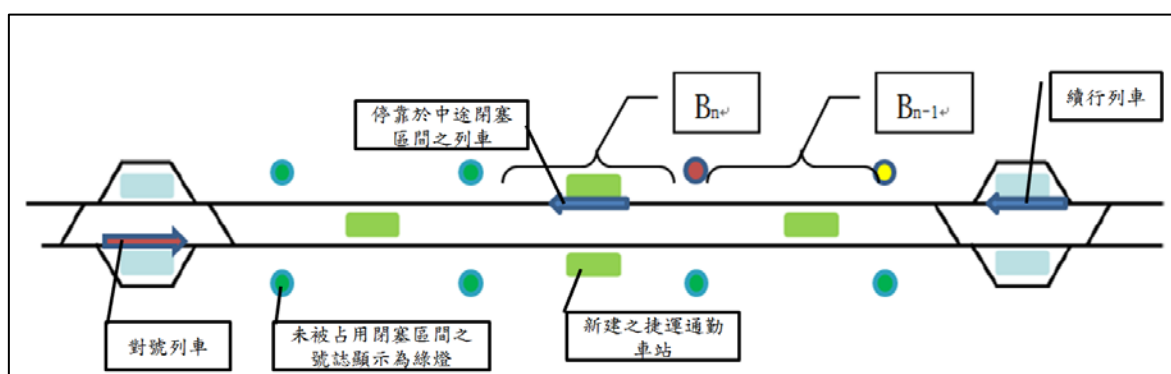


圖 3- 18 站間號誌聯動示意圖¹

資料來源：張恩輔、黃笙琬、鍾志成(2014)，本研究改編彙整。

基於行車規章對於行車安全為最高指導原則下，對於人、車、路三者間的行為加以規範，因此，列乘務人員依據號誌駕駛列車表現會因行車計畫、列車調度、路線條件(曲率半徑)等因素有增減分的結果，依據謝文隆、王家福(民 93)於臺鐵局員工訓練中心編撰行車計畫，針對列車運轉狀態變更時，提出行車運轉時分增減之變化量，如表 3-2，例如列車原本在某站通過而改為停車再開，其增延分為進站增加 0.5 分，開出增加 0.75 分，比原本運轉時分增加 1.25 分。

表 3- 2.運轉情形變更及增減分情形

車種 電車組 增減時分 進入開出站 運轉情形變更情形		
	進站	開出
通過改為停車	+0.5	+0.75
停車改通過	-0.25	-0.5
主正線變更為副正線到開	+0.75	+0.5

資料來源：交通部台灣鐵路管理局員工訓練中心 行車計畫

而列車運轉速度與路線條件，如路線強度、曲率半徑亦跟有關，以本研究設定列車種別及線別而言，參考鐵路行車實施要點第七十三條得知，對號車及

¹ 對號列車相對於區間車而言需要有較長的續進綠燈帶。

區間車在台中線之車速度，如表 3-3，及該實施要點第七十五條列車在各番號道岔之速度限制，如表 3-4，藉此作為本研究後續歸屬函數模型架構之依據。

表 3-3 運轉速度與線別(節錄實施要點 73 條部分線別)

線名	區間	傾斜式及推拉式電車組	電車組	機車		機動車	備考
				電力	柴電		
縱貫線	基隆—高雄間	130	120	110	110	110	
臺中線	竹南—彰化間 成功—追分間	130	120	110	110	110	
臨港線	高雄—前鎮間				60	70	
屏東線	高雄—屏東間	130	120	110	110	110	
	屏東—枋寮間				110	110	
宜蘭線	八堵—蘇澳間	130	120	110	110	110	
北迴線	蘇澳新—花蓮	130	120	110	110	110	
臺東線	花蓮—臺東間				110	110	

資料來源：臺鐵局行車規章

表 3-4 轍叉號碼與列車運轉速度(節錄行車實施要點第 75 條部分表格)

轍叉號碼	轉轍器單開時		轉轍器雙開時	
	曲線半徑 (公尺)	每小時限速 (公里)	曲線半徑 (公尺)	每小時限速 (公里)
八號	107.1	25	220.6	45
十號	162.6	35	335.4	50
十二號	243.2	45	501.9	60
十六號	526.6	60		

資料來源：臺鐵局行車規章

3.5.2 臺鐵局電腦排點輔助系統介紹

為使臺鐵局於排點作業更為有效率，目前使用電腦排點輔助系統(以下稱排點系統)介面，如圖 3-19，本章節將針對該排點系統之(1)加開列車及(2)衝突檢查功能介紹，並作為後續本研究之路線容量評估模組之驗證。



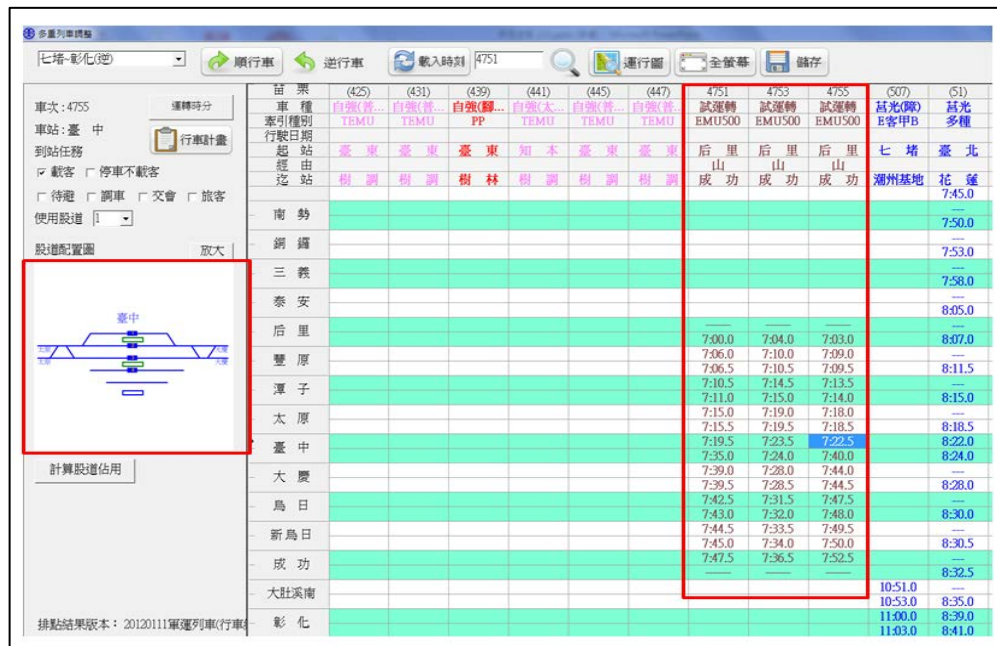
圖 3- 19.台鐵局目前使用之電腦排點輔助系統

(1) 加開列車：

在排點系統中透過「新增列車計畫」可將車次、行駛幹線、起訖站及牽引種別等條件輸入建立加開列車所需資料，如圖 3-20。

圖 3- 20.新增行車計畫示意圖。

以欲加開后里=成功間(4751)、(4753)、(4755)次 3 列次為例，運轉條件為各站皆停靠、牽引種別為 EMU500 型電聯車，其中各站間之運轉時分已內建於該排點系統。該系統會將計畫人員欲加開行列車之時刻表在「多重列車調整」項目表示，如圖 3-21，並在欲調整之停靠站以路線簡圖表示之，如圖 3-22。



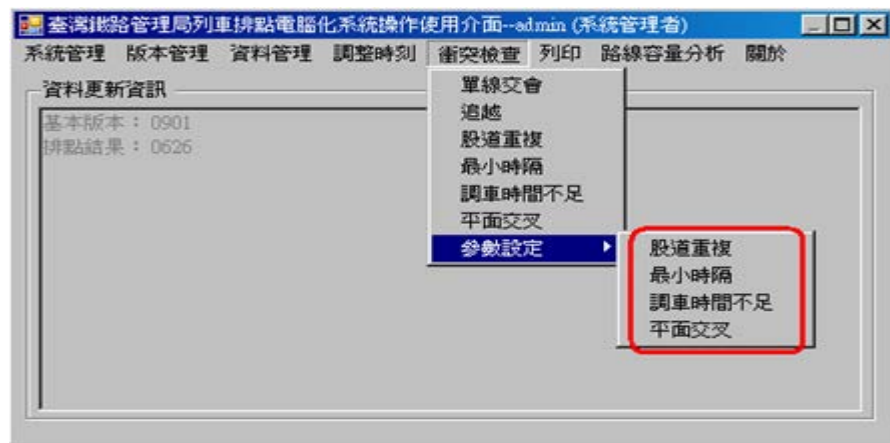


圖 3- 23 衝突檢查

以股道重複為例，在一定時間內同一股道為達行車安全，如臺中站第 2 股道，正常情況下不允許一列次以上列車進入(調車模式、運轉救援列車為例)，因此藉由號誌的保護，該股道被數列次占用應有一定之時隔，之如圖 3- 24。

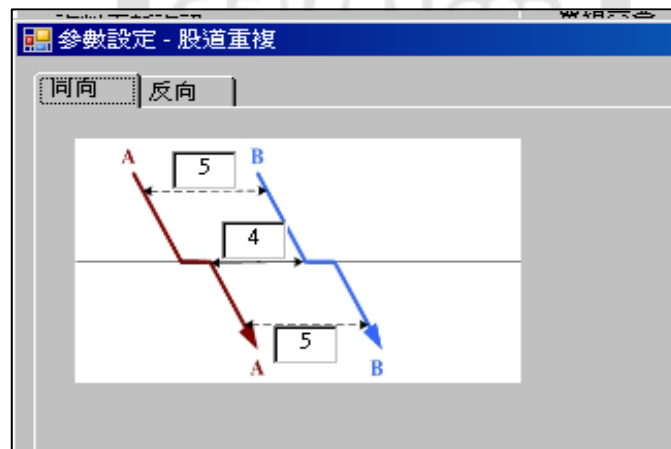


圖 3- 24.股道重複檢查示意圖。

同理，列車行駛於路線上，該路線亦被號誌機切割為數個閉塞區間，各列次列車通過每個閉塞區間均有一定時隔，以維運轉安全。本研究之研究對象為 CTC 區間，以 CTC 雙單線區區間為例，如圖 A 列次與 B 列次間之最小運轉時隔，如圖 3- 25。

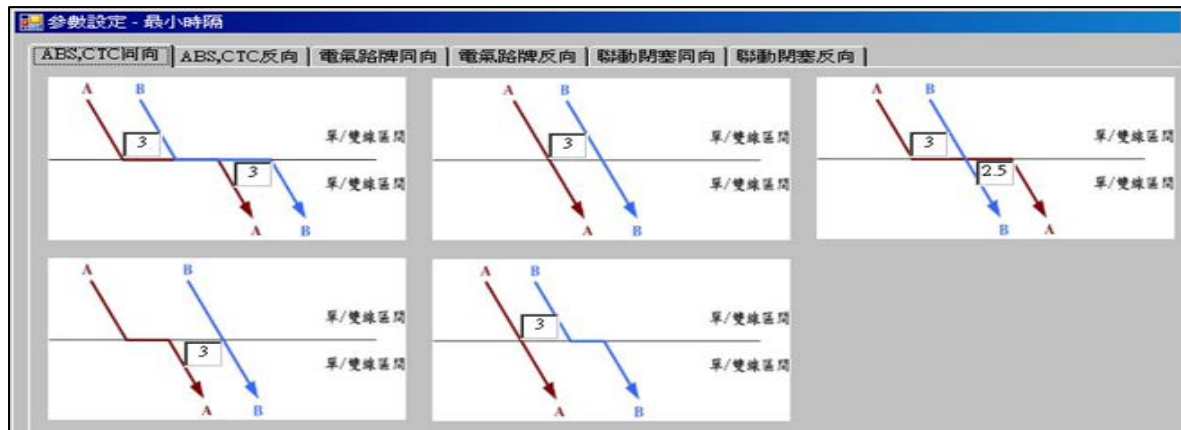


圖 3-25.運轉時隔衝突檢查示意圖。

綜上所述，以后里=成功間加開(4751)、(4753)、(4755)為例，(4751)次於后里於 07 時 00 分開車、(4753)次后里 07 時 04 分開車，(4755)次為加開列車，開車時間 07 時 03 分，邏輯上為衝突，在各列次間運轉時隔即為不合理，又各列車分別到達台中站，下行各次停靠台中站股道運用次序為第 2 股(主正線)→第 1 股道(副正線)：(4751)次 07 時 19 分到第 2 股道；07 時 35 分開、(4755)次 07 時 22 分到 1 股道；07 時 40 分開，在不考慮平面交叉下，實務上(4753)應在臺中站機外停車等路，若計畫人員將點排入台中站，則不合理，以時間-空間之運行圖表示，如圖 3-26，將各列次在行車計畫不合理的部分以圓圈黃點表示。

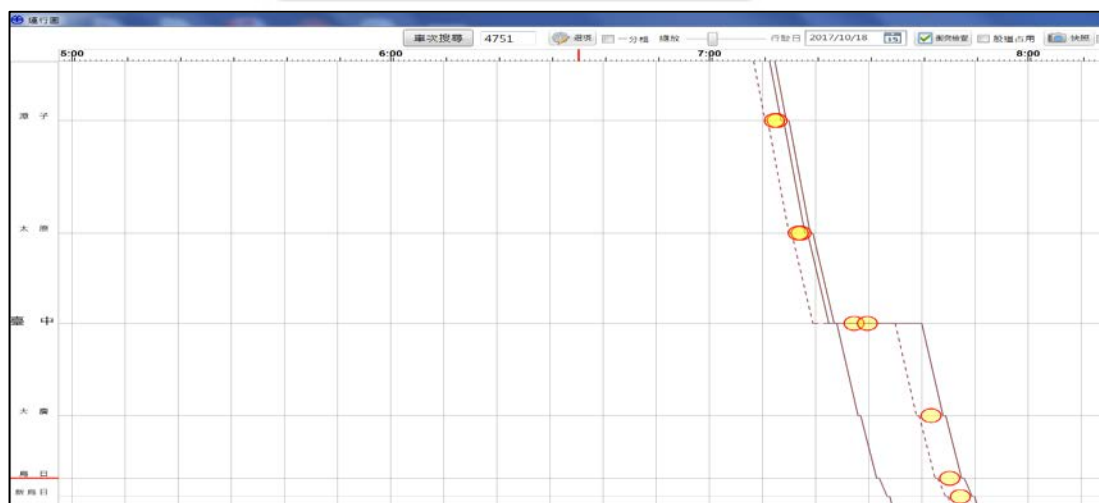


圖 3-26.時間-空間運行圖，紅圈黃點為衝突處。

3.5.2 研究數據取得

本研究數據之取得係透過臺鐵局運行圖 07 時 30 分起至 08 時 30 分止，如圖 3-27，單位小時單方向(逆行)12 列次，其中 7 列次通勤列車、5 列次對號列車，以及臺北捷運官方網站之時刻表，如圖 3-28，單一車種，28 列次/單方向/小時。

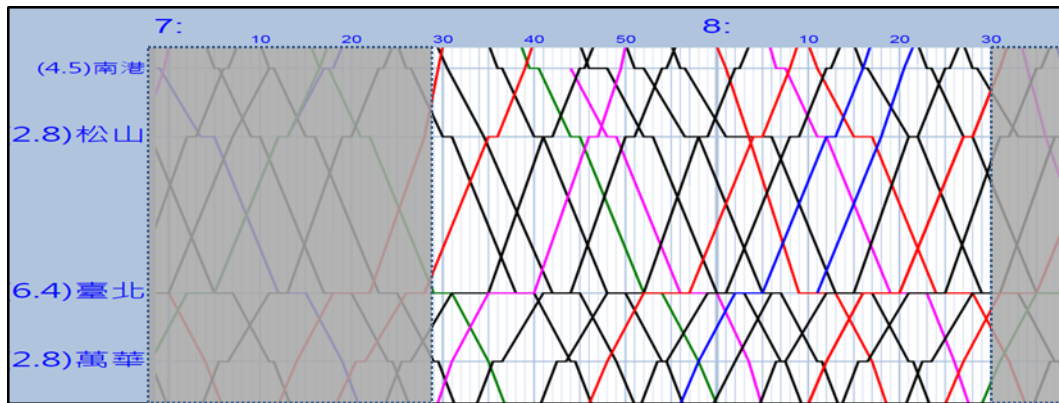


圖 3-27 臺鐵臺北站 07 時 30 分起至 08 時 30 分之運行圖

車次 (Train No.)	平日 (Monday-Friday)	週六 (Saturday)	週日 (Sunday)
06	00 10 16 19 26 32 36	00 10 16 19 26 32 36	00 10 16 26 33 41 49
07	00 04 08 12 14 17 20	00 04 08 12 14 17 20	04 12 19 27 35 42 50
08	00 04 08 12 14 17 20	00 04 08 12 14 17 20	04 12 19 27 35 42 50
09	01 04 07 10 13 16 20	01 04 07 10 13 16 20	02 06 10 14 18 22 26
10	01 04 07 10 13 16 20	01 04 07 10 13 16 20	02 06 10 14 18 22 26
11	01 04 07 10 13 16 20	01 04 07 10 13 16 20	02 06 10 14 18 22 26
12	01 04 07 10 13 16 20	01 04 07 10 13 16 20	02 06 10 14 18 22 26
13	01 04 07 10 13 16 20	01 04 07 10 13 16 20	02 06 10 14 18 22 26
14	01 04 07 10 13 16 20	01 04 07 10 13 16 20	02 06 10 14 18 22 26
15	01 04 07 10 13 16 20	01 04 07 10 13 16 20	02 06 10 14 18 22 26
16	01 04 07 10 13 16 20	01 04 07 10 13 16 20	02 06 10 14 18 22 26
17	01 04 07 10 13 16 20	01 04 07 10 13 16 20	02 06 10 14 18 22 26
18	01 04 07 10 13 16 20	01 04 07 10 13 16 20	02 06 10 14 18 22 26
19	01 04 07 10 13 16 20	01 04 07 10 13 16 20	02 06 10 14 18 22 26
20	01 04 07 10 13 16 20	01 04 07 10 13 16 20	02 06 10 14 18 22 26
21	01 04 07 10 13 16 20	01 04 07 10 13 16 20	02 06 10 14 18 22 26
22	01 04 07 10 13 16 20	01 04 07 10 13 16 20	02 06 10 14 18 22 26
23	01 04 07 10 13 16 20	01 04 07 10 13 16 20	02 06 10 14 18 22 26
24	01 04 07 10 13 16 20	01 04 07 10 13 16 20	02 06 10 14 18 22 26
25	01 04 07 10 13 16 20	01 04 07 10 13 16 20	02 06 10 14 18 22 26
26	01 04 07 10 13 16 20	01 04 07 10 13 16 20	02 06 10 14 18 22 26
27	01 04 07 10 13 16 20	01 04 07 10 13 16 20	02 06 10 14 18 22 26
28	01 04 07 10 13 16 20	01 04 07 10 13 16 20	02 06 10 14 18 22 26

圖 3-28 台北捷運板南線發車時刻。資料來源 臺北捷運官網

取得臺鐵臺北站尖峰小時單方向到開列車數及捷運臺北站尖峰小時單方向到開列車數之目的係於第 5 章模型驗證時，作為系統分析及比較之資料源。

3.6 小結

本章節說明有關於本研究方法中各組成元件之功能並說明數據取得方式，其中利用 FPNs 具備建模彈性、平行運算優勢建構推論引擎並以臺鐵局行車規章及員工訓練中心教材建構知識庫，藉此建立路線容量評估模組。本研究將於第四章說明路線容量評估模組如何建立，並於第五章模組驗證時利用臺鐵局現有電腦排點輔助系統作為衝突檢查之驗證。



第四章 建構路線容量評估模組與說明

本章節將說明有關本研究之路線容量評估模組主體結構之建構背景、目標、限制及知識庫，並利用 PNs 架構推論引擎之本體論(Ontology)及其說明，路線容量評估模組主要架構如圖 4-1，為利於說明路線容量評估模組以下稱本模組，為能清楚表達系統完整性，其中發車間隔擾動模型及模糊分布模型(歸屬函數模型)將於第五章模型驗證一併說明，本章節則以知識庫及推論引擎為說明主體。

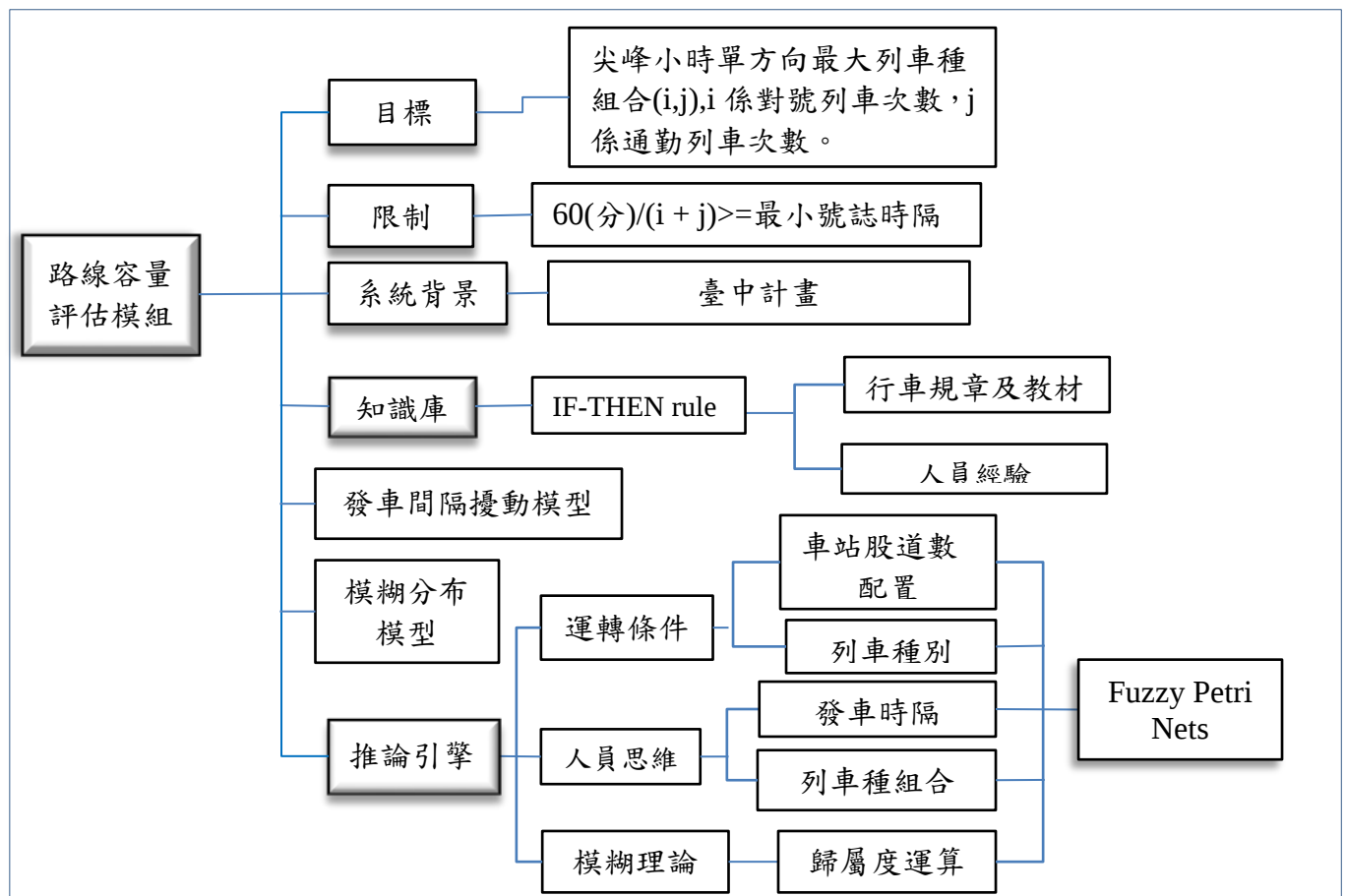


圖 4-1 路線容量評估模組架構圖

4.1 利用 FPNs 建構路線容量評估模組之條件說明

(1) 背景：

即臺中計畫，該計畫分兩階段啟用，為符合捷運化政策方向，模組在車種設定簡化為「對號列車」及「通勤列車」。研究對象針對尖峰小時之單方向之對號、通勤列車之車種組合，以 (i, j) 表示， i 表示對號列車數， j 表示通勤列車數，列車單位小時平均發車間隔為 $60(\text{分})/(i+j)$ 。

(2) 目標及限制： $\text{Max}(i, j)$ ， $60/(i+j)$ 大於等於最小安全運轉時隔，即號誌由險阻顯示平安之時間差。

(3) 建模範圍：範圍為臺中站及其南北兩站間；

(4) 行車方式：採複線運轉，即上行列車走西線，下行列車走東線；系統推演過程中不考慮平面交會，

(5) 閉塞方式：CTC 行車制。

(6) 車站調節：本模組以車站主正線、副正線、續行列車跟隨及進站號誌機外方停車(機外停車)作為條件組合，主要內容有：

- A. 待避列車，即先到站之列車進入副正線等待續行列車進站後先行開出後，再開車行駛。
- B. 依序進站，指利用車站股道數及股道開通方向使列車依序進站，如先開通主正線為第一列車進路，再開通副正線為第二列次列車進路(續行列車間因主正線受前次列車佔用，則車站開通副正線)。
- C. 機外停車：指列車在號誌機外方等待進行號誌顯示。
- D. 站間通勤站通勤車停靠辦理客運，該通勤站無調節能力，即無法待避列車。
- E. 列車跟隨：指以 CTC 設定跟隨，先到站之列車開出後，續行列車依原進路進站。

(7) 利用 IF-THEN rule 建立知識庫，如附錄 1，並藉此架構推論引擎，並以 PN 表現其 Ontology。

4.2 知識庫及推論引擎之建構

知識庫是本模組架構推論引擎之基礎，透過 IF-THEN rule 將「前因」與「後果」結合成規則，再透過數規則建構本模組知識庫，如附錄一。

透過知識庫建構本模組之推論引擎(Inference engine)如圖 4-2，並以 Petri Nets 表示推論引擎之本體(Ontology)，以下 4.3 節將以 PN 說明知識庫各階段規則之意義及 IF-THEN rule 應用。

在推論引擎 ontology 中，以位置節點(place)表示計畫人員思維、車站股道運用及結果；arc 表示思考流程方向及推演方向，透過移轉節點(transition)表示行車系統的狀態及規則，將計畫人員的考量之因果關係一步一步地呈現，PNs 中各 place 代表意義，如表 4-2，transition 代表意義，如表 4-3。

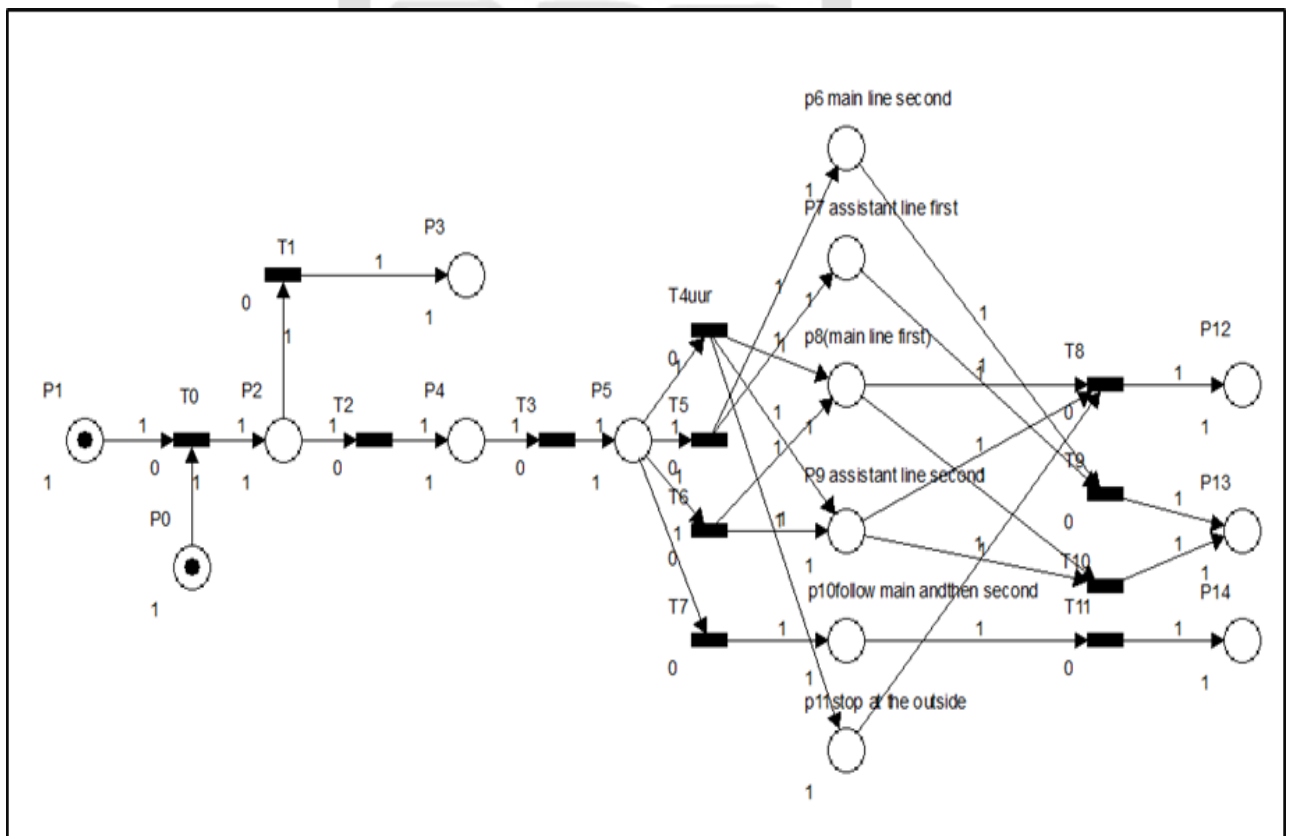


圖 4-2. 路線容量評估模組之推論引擎 ontology 圖-以 PNs 表示

表 4-1 位置節點思維狀態表

位置節點	代表計畫人員的思維
P0	列車種組合(對號列車數：通勤列車數)
P1	列車發車時隔
P2	運轉情形歸屬程度
P3	重新檢視行車計畫
P4	模擬運轉
P5	車站調節功能
P6	主正線後開通
P7	副正線先開通
P8	主正線先開通
P9	副正線後開通
P10	列車跟隨進站
P11	機外停車
P12	擾動風險高(係指無法依行車計畫時刻運行而產生延誤)
P13	擾動風險中(係指達到路線容量理論值)
P14	擾動風險低(係指尚可再加開列車)

資料來源：本研究彙整

表 4-2 移轉節點行車系統狀態表

移轉節點	代表行車系統的狀態及規則
T0	歸屬程度模型
T1	小於號誌限制之歸屬度
T2	大於號誌限制之歸屬度
T3	發車間隔及車種
T4	號誌機外方等待路線
T5	變更運轉順序
T6	股道依序開通
T7	由 CTC 預定進路
T8	運轉整理介入
T9	待避列車
T10	後續列車依續進站
T11	CTC 設定跟隨進站

資料來源：本研究彙整

4.3 知識庫各階段規則之意義

綜上，利用表 4-2 位置節點及表 4-3 移轉節點在模型系統所代表的意義，本節更進一步將位置節點及移轉節點透過「IF-THEN」rule 建立知識庫並轉譯成為畫人員內心的思維，行車計畫規則知識庫如附錄一。

- (1) 計畫開行階段，如圖 4-3，計畫人員思考「發車間隔應為多少?」、「單位小時單方向應該行多少對號列車、多少區間車之車組數?」之過程；該階段之 IF-THEN Rule，如表 4-4；當計畫人員考量列車發車時隔(P1)及車種別組合(P0)條件下，依據歸屬程度模型(T0)計算運轉情形歸屬程度(P2)；若運轉情形歸屬程度(P2)，大於號誌時隔不足之歸屬度(T1)，則重新檢視行車計畫(P3)，或者(OR)小於最小號誌時隔不足之歸屬度(T2)，則可模擬運轉(P4)。

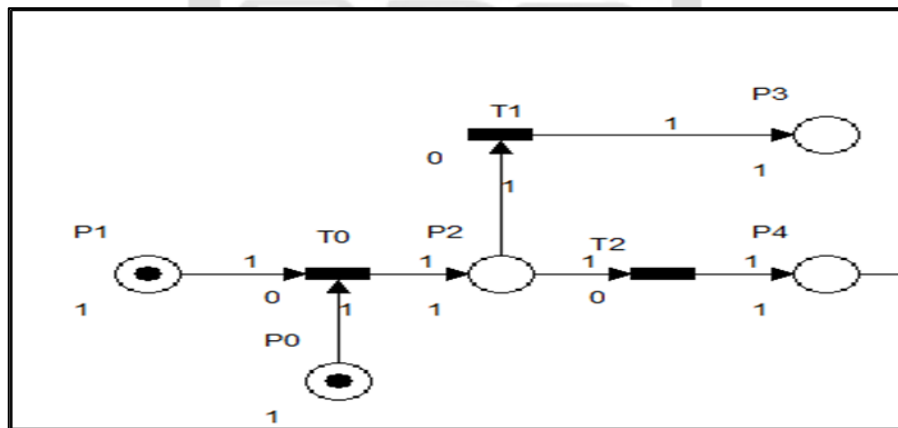


圖 4-3 行車計畫 Petri Net 推論模型-計畫開行階段

表 4-3 行車計畫推論規則

Rule	行車計畫推論規則
Rule1	IF P0 AND P1 THEN P2
Rule2	IF P2 THEN P3 OR P4

資料來源：本研究彙整

- (2) 車站調節階段，如圖 4-5，在此階段計畫人員須考量車站調節能力及行車運轉情形，該階段之 IF-THEN Rule，如表 4-5；若欲將行車計畫上線模擬運轉(P4)，確認發車間隔及車種組合情形(T3)後則啟動車站調節(P5)；若啟動車站調節(P5)，視運轉情形為列車號誌機外方等待路線(T4)時，則車站開通主

正線(P8)且後續列車進副正線(P9)並機外停車(P11)，或者(OR)，視運轉情形為變更運轉順序時(T5)，則車站先開通副正線(P7)且後開通主正線(P6)，於適宜股道站待避列車，或者(OR)，視運轉情形股道依序開通(T6)，則先開通主正線(P8)後開通副正線(P9)，或者(OR)，由 CTC 預定進路即可(T7)，則列車跟隨進站(P10)。

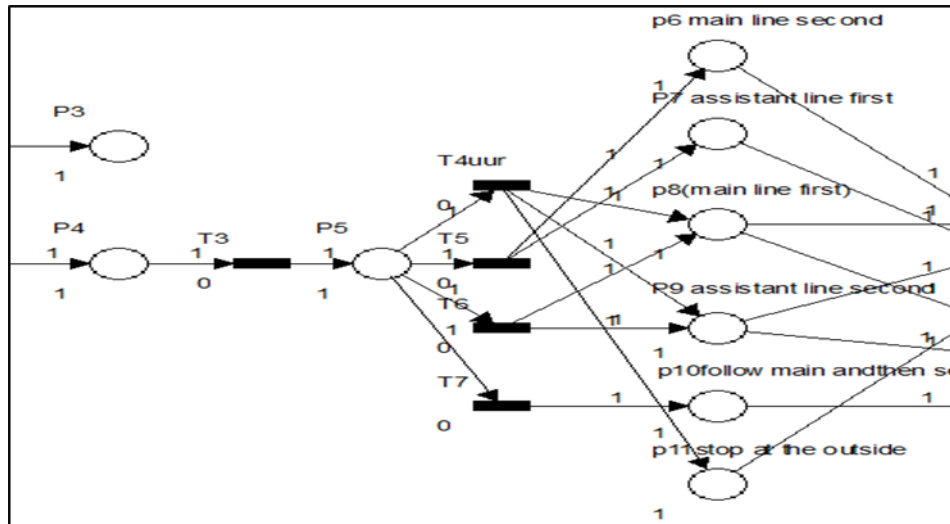


圖 4-4.行車計畫 Petri Net 推論模型-車站調節階段

表 4-4 調節能力推論規則

Rule	調節能力推論規則
Rule3	IF P4 THEN P5
Rule4	IF P5 THEN [P8 AND P9 AND P11]
Rule5 ²	IF P5 THEN [P6 AND P7]
Rule6	IF P5 THEN [P8 AND P9]
Rule7	IF P5 THEN P10

資料來源：本研究彙整

(3) 結果產出階段，如圖 4-6，經過車站調節階段後之推論結果產出，透過本評估模組得到列車種組合及發車間隔對系統的影響程度；該階段之 IF-THEN Rule，如表 4-6；若開通主正線(P8)且後續列車進副正線(P9)並機外停車(P11)情形發生，該運轉情形須值台調度員施行運轉整理介入(T8)，則該計畫之擾動風險高(P12)；若則先開通副正線(P7)且後開通主正線(P6)使後續對號列車

² Rule5 指待避，指先進站之列車進入車站適宜股道，等待後續列車進站而先行開出之營運行為。

進站先行，即計畫人員安排待避列車(T9)，或者(OR)，先開通主正線(P9)且後開通副正線(P10)讓後續列車依序進站(T10)，則計畫之擾動風險中(P13)；若列車跟隨進站(P10)，由 CTC 設定跟隨進站(T11)，則計畫擾動風險低(p14)，可以考慮再增加列車數。

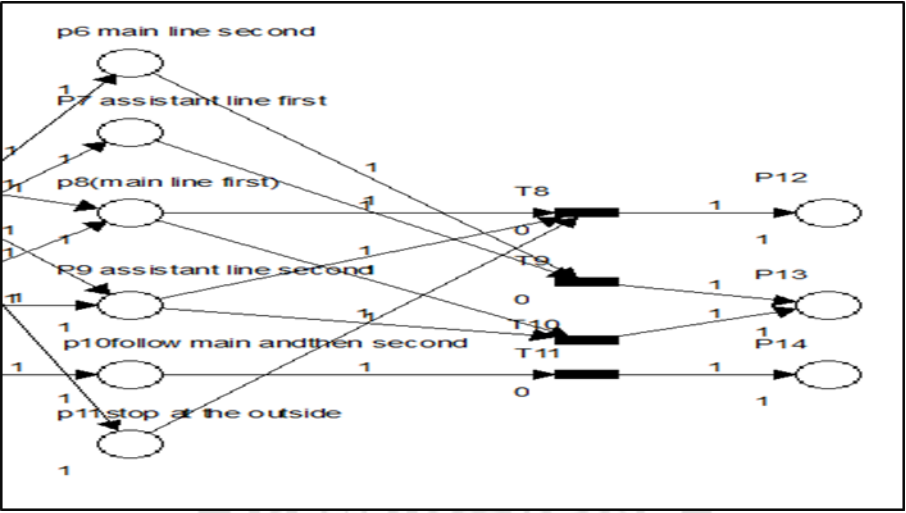


圖 4-5. 行車計畫 Petri Net 推論模型-結果回饋階段

表 4-5 行車計畫結果規則

Rule	行車計畫結果規則
Rule8	IF P8AND P9 AND P11 THEN P12
Rule9	IF [P6 AND P7] OR [P8 AND P9] THEN P13
Rule10	IF P10 THEN P14

資料來源：本研究彙整

(4) 決策行為階段，經過上述三個階段後，已得知投入之列車發車時隔(P1)及列車種組合(P0)條件下產出之結果，如擾動風險高(P12)、擾動風險中(P13)或者擾動風險低(P14)等結果，決策者可視其推論結果選擇執行或者重新檢視行車計畫，其中擾動風險高(P12)係指無法依行車計畫時刻運行而產生延誤，擾動風險中(P13)係指達到路線容量理論值，擾動風險低(P14)係指尚可再加開列車。

第五章 路線容量評估模組之驗證

本章節將利用數學方法及班表試排法分別針對本研究第4章所架構之推演模型及 Design pattern 是可行的。各階段驗證流程及本研究之 Design pattern 相對應之驗證架構關係圖，如圖 5-1，本章說明由 Phase1 至 Phase3 說明驗證步驟及本研究路線容量評估模組推估結果並驗證之而後於第6章則說明 Phase4 研究客體分析：

- (0) phase0：透過數學方式檢驗模組之可達性(Reachability)及活性(Liveness)。
- (1) Phase1：本研究先參考目前軌道系統中各節點(node)之發車間距作為本研究模型之資料源產生之基礎並說明如何建構歸屬值，
- (2) Phase2：以臺中站之行車條件，模擬未來增加列車密度時的情況，
- (3) Phase3：以班表試排法加以驗證分析，取得 $\max(i,j)$ 。
- (4) Phase4：在經過 Phase1~Phase3 驗證模型可行後，於第6章透過本研究 design pattern 架構臺中計畫路廊並予以分析。

在模糊分布方面除本研究第3.3.2節所述之連續關係函數(continuous membership function)外，同時亦採用 Cheng et al.在文獻中採用不連續關係函數(discrete membership function)以處理本研究有關車種、股道條件等歸屬值。

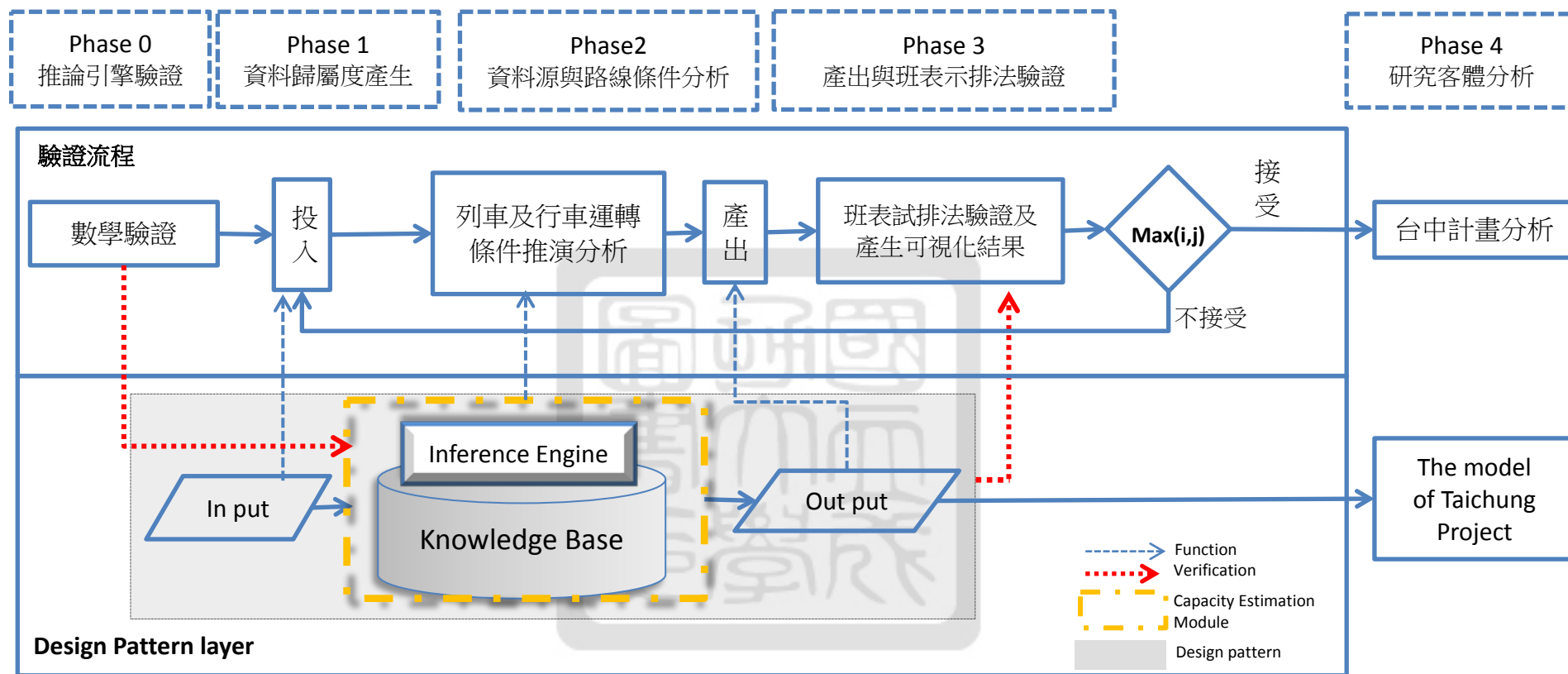


圖 5- 1 驗證架構關係圖

5.1 Phase0 路線容量評估模組之數學驗證

在 Phase0 階段將要確認透過本研究行車計畫規則知識庫所建構 PNs 模型是否能由初始標記狀態(M_0)推演至最後結論標記狀態(M_n)；Murata(1989)將 PNs 所具備之數種性質(如可達性、侷限性、活性等性質)加以分析，本研究參考 Murata 之分類並以可達性(Reachability)及活性(liveness)作為本研究之 PNs 模型是否具備推論能力之驗證方法，其定義及驗證過程說明如下：

(1)可達性(Reachability)：指系統的動態特性；依據 transition rule，在 PNs 中具備致能狀態的 transition(enabled transition)之激發(firing)將會改變 tokens 在 PNs 的分布。

(2) 活性(Liveness)：指運作系統中沒有「死鎖」(deadlocks)的情形發生，而 deadlocks 係指在 PNs 中 transitions 在任何激發程序(fire sequence)都不曾激發。

(3)驗證過程：

(A)關聯矩陣(Incidence matrix)：指一個由 n 個 transitions 及 m 個 places 所構成的 PNs(C)，其關聯矩陣(A)表示為： $A = [a_{ij}]$ ， $a_{ij} = a_{ij}^+ - a_{ij}^-$ ，其中 $a_{ij}^+ = w(i, j)$ ，即 transition $i \rightarrow$ out place j 之權重， $a_{ij}^- = w(j, i)$ ，即 input place $j \rightarrow$ transition i 之權重；另參考 Peterson, J. L 有關 Matrix Equation 定義則將 a_{ij}^+ 稱為輸出矩陣函數(matrices D^+ for output function)， a_{ij}^- 稱為輸入矩陣函數(matrices D^- for input function)，本研究中文描述則採用 Peterson 之敘述方式，以利說明，即 $D = D^+ - D^-$, D for composite change matrix。

(B)狀態方程式(State Equation)：求得上述 composite change matrix D (以下以 D 表示)後，以 $M_n = M_m + x * D$ ， M_m 表示系統初始狀態， M_n 表示由 M_m 初始狀態經 x (x 表示由 transition firing 組成的程序)移轉之狀態即 $M_m \rightarrow M_n, x$ for a sequence of transition firing。

以下將分為(1)計畫開行階段、(2)車站調節及結果回饋階段兩部分加以驗證及(3)並將前述兩階段驗證綜整成 Reachability tree。

5.1.1 計畫開行階段之驗證

如圖 5-2，透過驗證過程中標記狀態改變，證明本研究模型(PNs)中 transitions 在致能(enable)狀態下之激發(fire)一系列激發程序(firing sequence)，使 place 中 token 到達下一個位置節點，即 PNs 標記狀態的改變。

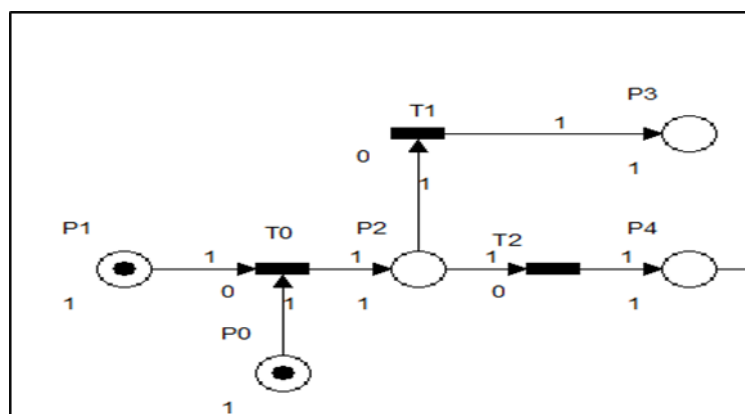


圖 5-2 計畫開行階段之圖形

D^- (輸入矩陣) :

	P0	P1	P2	P3	P4
T0	1	1	0	0	0
T1	0	0	1	0	0
T2	0	0	1	0	0

D^+ (輸出矩陣) :

	P0	P1	P2	P3	P4
T0	0	0	1	0	0
T1	0	0	0	1	0
T2	0	0	0	0	1

$D = D^+ - D^-$:

	P0	P1	P2	P3	P4
T0	-1	-1	1	0	0
T1	0	0	-1	1	0
T2	0	0	-1	0	1

$M_0 : (P0, P1, P2, P3, P4) = (1, 1, 0, 0, 0)$

$M_n = M_m + X * D$, $X_i = (T0, T1, T2)$, X_i :

$M_1 = M_0 + X * D$, $X_0 = (1, 0, 0)$

$$M_1 = (1,1,0,0,0) + (1,0,0)*D = (1,1,0,0,0) + (-1,-1,1,0,0) = (0,0,1,0,0)$$

$$M_2 = M_0 + X_1*D, X_1 = (1,1,0)$$

$$M_2 = (1,1,0,0,0) + (1,1,0)*D = (1,1,0,0,0) + (-1,-1,0,1,0) = (0,0,0,1,0)$$

$$M_3 = M_0 + X_2*D, X_2 = (1,0,1)$$

$$M_3 = (1,1,0,0,0) + (1,0,1)*D = (1,1,0,0,0) + (-1,-1,0,0,1) = (0,0,0,0,1)$$

Give a set P :

$$P = \{M_0, M_1, M_2, M_3\} = \{(1,1,0,0,0), (0,0,1,0,0), (0,0,0,1,0), (0,0,0,0,1)\}$$

Reachability : ΔM :

$$(1,1,0,0,0) \rightarrow T0 \rightarrow (0,0,1,0,0) = M_0 \rightarrow M_1 : M_1 \text{ is reachable from } M_0.$$

$$(1,1,0,0,0) \rightarrow T0 \rightarrow (0,0,1,0,0) \rightarrow T1 \rightarrow (0,0,0,1,0) : M_0 \rightarrow M_1 \rightarrow M_2, M_2 \text{ is reachable from } M_0.$$

$$(1,1,0,0,0) \rightarrow T0 \rightarrow (0,0,1,0,0) \rightarrow T2 \rightarrow (0,0,0,0,1) : M_0 \rightarrow M_1 \rightarrow M_3, M_3 \text{ is reachable from } M_0.$$

Liveness : absence of deadlocks in operating systems.

5.1.2 車站調節及結果產出階段之驗證

依據圖 5-3，在本節如同 5.1.1 節將對車站調節及結果產出階段之模型(PNs)之 Reachability 及 liveness 予以驗證。

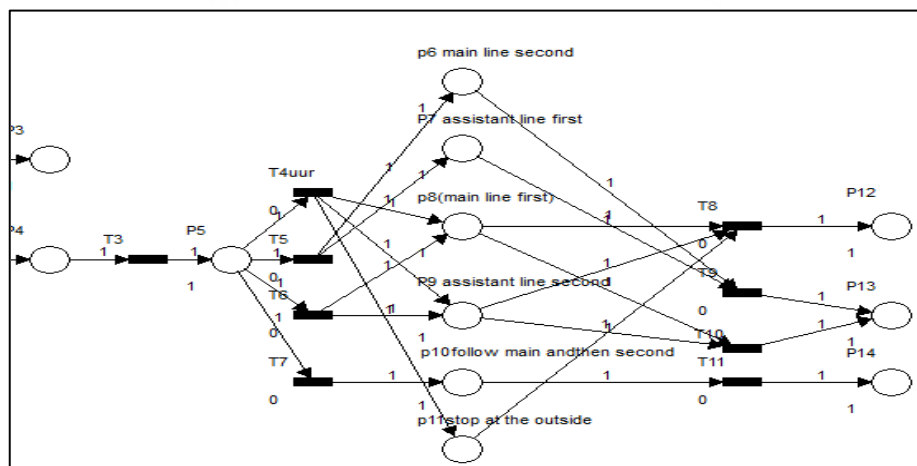


圖 5-3. 車站調節及結果回饋階段之圖形

D^- (輸入矩陣) :

	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	p14
T3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T6	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T7	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T8	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0
T9	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
T10	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
T11	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

D^+ (輸出矩陣) :

	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	p14
T3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T4	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0
T5	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
T6	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
T7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
T8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
T9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
T10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
T11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

$D = D^+ - D^-$:

	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	p14
T3	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T4	0	-1	0	0	1	1	0	1	0	0	0
T5	0	-1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
T6	0	-1	0	0	1	1	0	0	0	0	0
T7	0	-1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
T8	0	0	0	0	-1	-1	0	-1	1	0	0
T9	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	1	0
T10	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	1	0
T11	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	1

$M_0 : (P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, p14) = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$

$$M_n = M_m + X * D, X = (T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8, T_9, T_{10}, T_{11}) :$$

$$M_4 = M_0 + X * D, X_3 = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) :$$

$$M_4 = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) + (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) * D = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) + (-1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) = (0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$$

$$M_5 = M_0 + X * D, X_4 = (1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) :$$

$$M_5 = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) + (1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) * D = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) + (-1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0) = (0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0)$$

$$M_6 = M_0 + X * D, X_5 = (1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0) :$$

$$M_6 = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) + (1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0) * D = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) + (-1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) = (0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$$

$$M_7 = M_0 + X * D, X_6 = (1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0) :$$

$$M_7 = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) + (1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0) * D = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) + (-1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0) = (0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0)$$

$$M_8 = M_0 + X * D, X_7 = (1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0) :$$

$$M_8 = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) + (1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0) * D = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) + (-1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0) = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0)$$

$$M_9 = M_0 + X * D, X_8 = (1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0) :$$

$$M_9 = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) + (1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0) * D = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) + (-1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0) = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0)$$

$$M_{10} = M_0 + X * D, X_9 = (1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0) :$$

$$M_{10} = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) + (1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0) * D = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) + (-1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0) = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0)$$

$$M_{11} = M_0 + X * D, X_{10} = (1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0) :$$

$$M_{11} = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) + (1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0) * D = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) + (-1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0) = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0)$$

$$M_{12} = M_0 + X * D, X_{11} = (1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1) :$$

$$M_{12} = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) + (1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1) * D = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) + (-1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1) = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1)$$

Give a set R :

$R = \{M_0, M_4, M_5, M_6, M_7, M_8, M_9, M_{10}, M_{11}, M_{12}\} =$
 $\{(1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0), (0,1,0,0,0,0,0,0,0,0), (0,0,0,0,1,1,0,1,0,0,0),$
 $(0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0), (0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0), (0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0),$
 $(0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0), (0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0), (0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0),$
 $(0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1)\}$

Reachability : ΔM :

$(1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0) \rightarrow T3 \rightarrow (0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0) = M_0 \rightarrow M_4$, M_4 is reachable from M_0 .

$(1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0) \rightarrow T3 \rightarrow (0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0) \rightarrow T4 \rightarrow (0,0,0,0,1,1,0,1,0,0,0) :$
 $M_0 \rightarrow M_4 \rightarrow M_5$, M_5 is reachable from M_0 .

$(1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0) \rightarrow T3 \rightarrow (0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0) \rightarrow T5 \rightarrow (0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0) :$
 $M_0 \rightarrow M_4 \rightarrow M_6$, M_6 is reachable from M_0 .

$(1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0) \rightarrow T3 \rightarrow (0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0) \rightarrow T6 \rightarrow (0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0) :$
 $M_0 \rightarrow M_4 \rightarrow M_7$, M_7 is reachable from M_0 .

$(1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0) \rightarrow T3 \rightarrow (0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0) \rightarrow T7 \rightarrow (0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0) :$
 $M_0 \rightarrow M_4 \rightarrow M_8$, M_8 is reachable from M_0 .

$(1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0) \rightarrow T3 \rightarrow (0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0) \rightarrow T4 \rightarrow (0,0,0,0,1,1,0,1,0,0,0)$
 $\rightarrow T8 \rightarrow (0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0) : M_0 \rightarrow M_4 \rightarrow M_5 \rightarrow M_9$, M_9 is reachable from M_0 .

$(1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0) \rightarrow T3 \rightarrow (0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0) \rightarrow T5 \rightarrow (0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0)$
 $\rightarrow T9 \rightarrow (0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0) :$

$M_0 \rightarrow M_4 \rightarrow M_6 \rightarrow M_{10}$, M_{10} is reachable from M_0 .

$(1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0) \rightarrow T3 \rightarrow (0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0) \rightarrow T6 \rightarrow (0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0)$
 $\rightarrow T10 \rightarrow (0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0) :$

$M_0 \rightarrow M_4 \rightarrow M_7 \rightarrow M_{11}$, M_{11} is reachable from M_0

$(1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0) \rightarrow T3 \rightarrow (0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0) \rightarrow T7 \rightarrow (0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0)$
 $\rightarrow T11 \rightarrow (0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1)$

$M_0 \rightarrow M_4 \rightarrow M_8 \rightarrow M_{12}$, M_{12} is reachable from M_0

Liveness : absence of deadlocks in operating systems.

5.1.3.Reachability Tree

綜上，本研究之模型從初始狀態 M_0 經過一系列激發程序到達 M_n ，即具備達可性，依據 Murata, T.對於 Liveness 之定義，本研究模型之 PNs 所有激發程序中，所有的 transition(T0~T11)均激發過，換言之，本研究模型具備 Liveness 且符合 L4-live(所有的激發程序中，各 transition 至少激發過一次)之標準，故本模型具備推論能力，其 Reachability Tree 如圖 5-4。

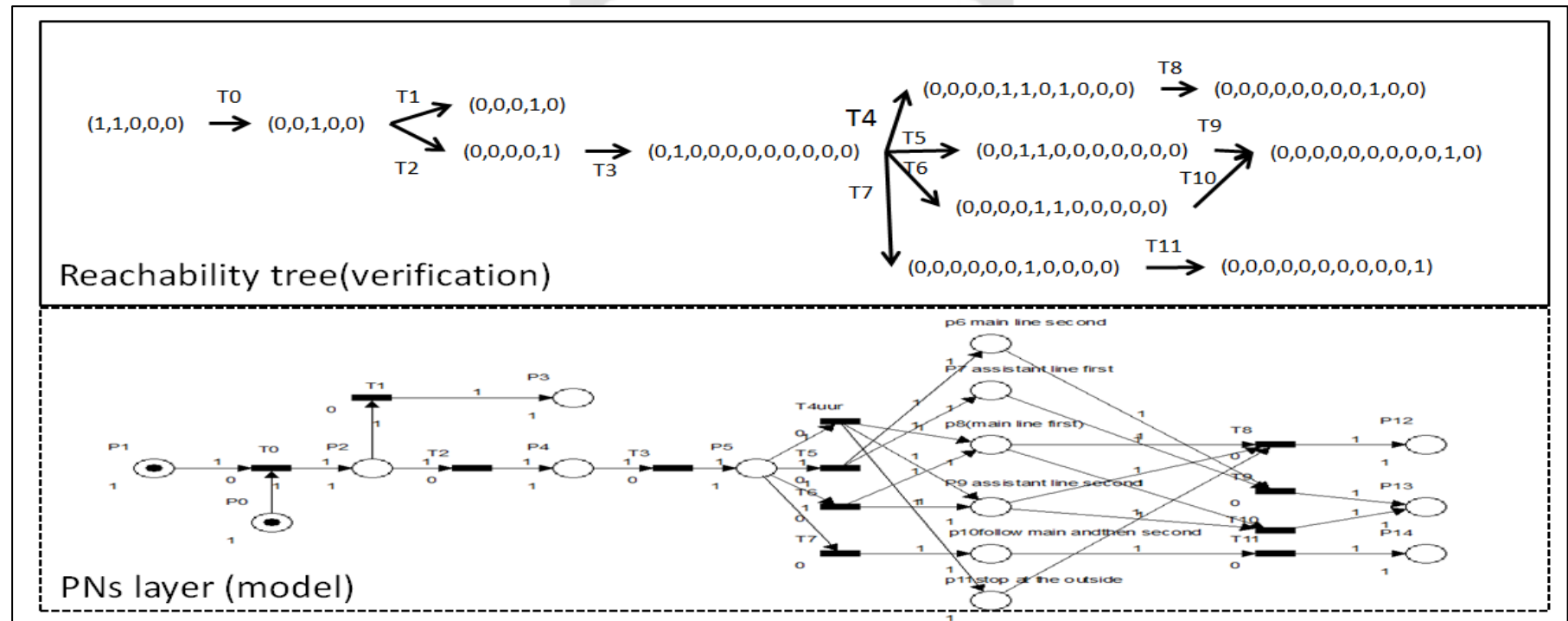


圖 5- 4.Analysis Methods of validation processes

5.2 Phase1 資料歸屬度產生

在 Phase1 階段，本研究需將資料源產生，資料源型態分為(1)明確值，如延誤時分、列車間隔時間、對號車與區間車之車數；(2)歸屬值，即明確值透過模糊分佈所得到相對應之模糊值。

5.2.1 建立資料源之明確值

如本研究之第一章緒論所述，臺北站位於臺鐵環島鐵路網中車密度最高路廊之節點，而在捷運化政策下同時參考臺北捷運板南線之臺北站(以下稱北捷並以系統 MRT 表示，如圖 5-6)發車情形以利比較分析傳統鐵路系統與捷運系統，將臺鐵臺北站、北捷板南線臺北站之尖峰小時發車條件彙整如表 5-1。

表 5-1 各節點路線容量比較(單位小時/單方向)

	臺鐵臺北站	北捷臺北站 (板南線)	臺中計畫-臺中 站(目前)
尖峰小時單方向開行列車數	12 列次	28 列次	7 列次
尖峰小時發車間隔	5 分/1 列次	2.14 分/1 列次	8.5 分/1 列次
尖峰小時對號列車數	5 列次	0(單一車種)	2 列次
尖峰小時通勤列車數	7 列次	28 列次	5 列次

資料來源：本研究彙整北捷官網及臺鐵局資料。

綜上，給定明確集合(Crisp Set)，其中參考北捷發車情形並設定為平均發車間及越過一個閉塞區間約 2.5 分/1 列次，以 2.7 分/1 列次計算，表示如下：

(1) $D(\text{node}) = \{\text{TRA taipeistation}、\text{MRT taipeistation}、\text{TRA taichungstation}\}$

(2) $H(\text{headway}) = \{5, 2.7, 8.5\}$

5.2.2 歸屬值之建立

在 5.1.1 取得 Crisp Sets 後須透過一介面(interface)取得各元素歸屬值，以下將說明如何推估最小運轉時隔及建立發車間隔、車種別列車數之相對應之歸屬值。

依據經驗、路線及行車運轉條件而言，推估本研究最小運轉時隔，即兩列車應間隔一定時間，以維持運轉安全。如圖 5-5 駕駛行為與閉塞區間示意圖，給定已知條件為兩列車為 V1、V2，駕駛行為穩定無急加速、急減速，臺中至大慶間營運時分為 4 分鐘(台中站出發→大慶站到達之時間差)：

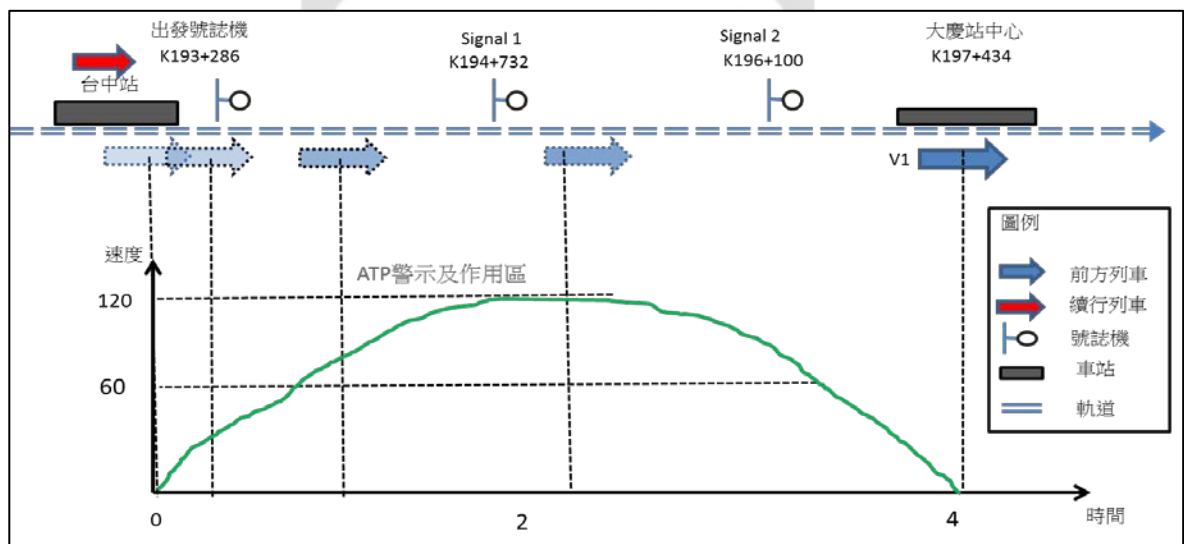


圖 5-5 駕駛行為與閉塞區間示意圖

- (1) 車種別：電車組；兩列車為 V1、V2，V1 為先行列車，V2 為續行列車。
- (2) 路線及運轉條件：臺中線，速度限制 120Km/Hr。
- (3) 運轉時分估算：當閉塞區間有列車占用時，其號誌應顯示紅燈，當 V1 少開行至第 2 閉塞(過 K194+732 處中途閉塞)時，臺中站下行出發才可能顯示進行號誌，續行列車 V2 依號誌行車，此時才啟動並低於一定速度壓過感應子，當壓過感應子時電腦計算其通過時間，如表 5-1：

A.臺中站到大慶站平均空間速度：

V1 之駕駛行為於兩站距離(公里)/運行時間(時) = $4.057/(4/60) = 61\text{Km/Hr}$ ，按此推估其駕駛曲線，及各區間、閉塞之速度。

B.臺中站南端站端路線(OS； $4\text{RA}(\text{K}193+286)=4\text{L}(\text{K}193+732)$)，V1 按駕駛曲線推估站端路線距離/平均速度 = $0.446/20 = 0.0223$ ，約為 1.338 分。

C.當 V1 越過東主正線上行進站號誌機 $4\text{L}(\text{K}193+732)$ ，速度持續提升，至少越過 $\text{signal}1(\text{K}194+732)$ 臺中站東主(副)正線之下行出發號誌機才能顯示進行號誌，計算時間： $1/55 = 0.018181818$ ，約為 1.09090909 分。

表 5-2 各區段時間推估

segment	distance(Km)	average speed(Km/h)	time(hr)	time(min)
the first block (South)	1	55	0.018	1.090
OS(south)	0.446	20	0.022	1.338
Taichung=Daqing	4.057	61	0.066	3.990

綜上，當先行列車 V1 占用站內股道至越過 $\text{signal}1$ 至少需 2.48 分，即兩列次間隔一個閉塞區間之最小運轉時隔為 2.48 分；換句話說，指站內即將一列車(V2 停止狀態下)之司機員看到下行出發號誌機顯示進行號誌之最小時間差約為 2.5 分。

續行列車 V2，無論是在下行進站號誌機機外停車再開或是改進副正線，依臺鐵局員工教育中心教材所示，如本研究表 3-2.運轉情形變更及增減分情形，約略增延 1.25 分(進站增延 0.75 分，出站增延 0.5 分)；故保守推估兩列車間隔至少 4 分($2.48(\text{分})+1.25(\text{分})$)，即兩列次理想發車間隔(班距)為 4.分。

若發車時間間隔不具備緩衝能力可能產生系統擾動造成班表穩定性下降，故理想間距 4 分尚須加上一定量的寬裕時間，本研究以一個閉塞最小運轉時分加上列車進、出站增延時分作為寬裕時間，約 2.5 分($1.09+1.25=2.34$ 分)，即實

際發車間隔=(理想發車間隔)+(寬裕時分)，約 6.5 分；若發車間隔若大於或等於 6.5 分鐘，本研究定義其對於系統延誤分為 0 分，若如發車間隔為 1 分(如表定時間 V1 時間間隔 V2 為 1 分)，對於開車延誤分為 5.5 分(6.5-1=5.5)，藉此推估列車發車間隔及延誤分關係暨系統擾動量歸屬值分述如下：

- (1)綜上所述，分別考量人車路三要素(列車種別、駕駛行為、閉塞區間聯鎖及路線條件)，推估列車延誤(y)與列車開車間隔(I)關係式： $y=6.5-I$ ，以圖 5-6 表示。

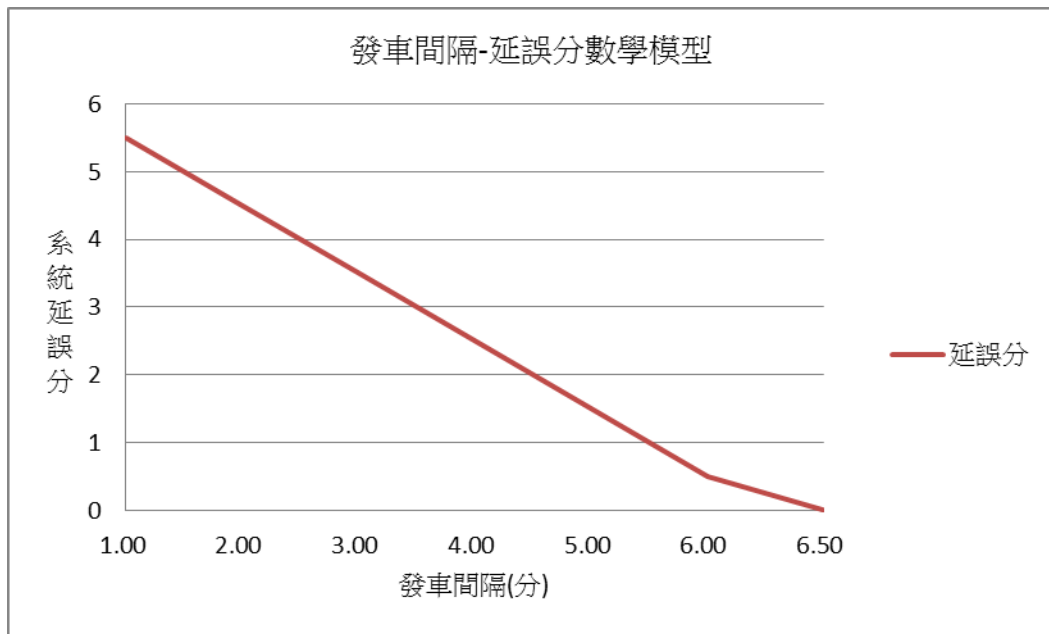


圖 5-6 列車發車間隔與延誤之關係圖

- (2)模糊分布選擇偏大型，示意圖如圖 5-7，令擾動歸屬程度值為 μ ：

$$y = x$$

$\mu=F(x)$,代入公式(3-4)相對應之歸屬值，經計算後得表 5-3。

$$F(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x \end{cases} \quad (3-4)$$

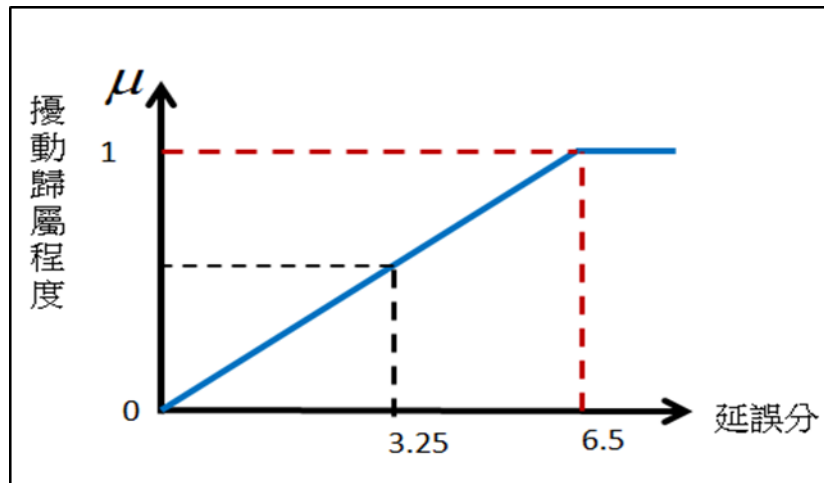


圖 5- 7.歸屬函數示意圖

表 5- 3 發車間隔與歸屬值

發車間隔	延誤分	fuzzy value
1	5.5	0.846
2	4.5	0.692
*2.5	4	0.615
3	3.5	0.538
4	2.5	0.384
4.5	2	0.307
**5	1.5	0.231

資料來源：本研究彙整

(3)有關車種別之列車數之歸屬值之計算，因對號列車營運需要較長的續進綠燈帶，若無法達較常續進綠燈帶時，對於擾動程度關係較高，反之區間車相對而言續進綠燈帶則較短，對於擾動程度關係較低，故本研究參考 Cheng, Y. H. 等人在文獻中採用不連續關係函數(discrete membership function)之歸屬值(express train,0.8、commuter train,0.3)並依據其車次數占比採加權平均數算之，如臺鐵臺北站對號列車：區間車 = 5:7，車種別歸屬值： $((0.8*5)+(0.3*7))/(5+7) = 0.508333333$ ，又參考對象中之臺北捷運系統車種別與台鐵之車種不同且該系統車種單一，故本研究將單一車種對於擾動的影響之歸屬訂為 0.3，並參考捷運系統之發車間隔。

綜上，經過 5.2.2 分析計算各元素之歸屬值之計算方式後，以集合方式表示以利後續演算法之進行：

(1) $D(\text{node})$ 表示由討論對象所構成之集合，如臺鐵臺北站、臺鐵臺中站、捷運臺北站。

(2) headway sets(H) 表示由發車間隔所構成之集合， $H = \{h_0, h_1, h_2, \dots\}$ 。

(3) FH 表示由 H 集合中各元素所對應之歸屬程度所構成之集合 $FH = \{\lambda_{h1}, \lambda_{h2}, \dots, \lambda_{hx}\}$ 。

(4) N 表示由列車組數種類構成之集合 $N = \{n_1, n_2, \dots, n_n\}$ 。

($n = \{i, j\}$, i for the numbers of express train/ 1hr, j for the numbers of commute train/ 1hr)

(5) FN 表示 N 相對應之模糊集合 $FN = \{\lambda_{n1}, \lambda_{n2}, \dots, \lambda_{nx}\}$ 。

(6) α 表示 fuzzy function，將位置節點內之 token 映射至 0 至 1 之間實數之關聯函數。

(7) $f: T \rightarrow [0,1]$ ；從移轉節點映射至 0 至 1 之間實數之關聯函數。

(8) 將本節討論對象及元素以集合表示如下：

(a) $D(\text{node}) = \{ \text{TRA taichungstation} \}$ 。

(b) $h_x = 60/(i+j)$, $H(\text{headway}) = \{h_1, h_2, \dots, h_n\} = \{5, 2.7, 8.5\} \rightarrow \alpha_h(h_x) \rightarrow FH = \{0.23, 0.58, 0\}$ 。

(c) $N = \{n_1, n_2, \dots, n_n\} = N\{\{5,7\}, \{0,28\}, \{2,5\}\} \rightarrow \alpha_n(n_x) \rightarrow FN = \{0.508, 0.3, 0.442\}$ 。

5.3 Phase2 資料源投入推論演算

在本節將分為三個部分，從上述 Phase1 取得資料並計算出其歸屬度後以(1)集合方式表示，(2)再投入路線容量評估模組計算，其演算法流程圖，如圖 5-10，並(3)產出並驗證：將臺鐵臺北站列車種組合及捷運臺北站列車種組合投入臺鐵臺中站系統條件。

(1) Given Sets: 將以下集合投入路線容量評估模組推演：

A:TEST1:MRT taipeistation.

Membership degree sets:

$FN_1=\{0.3\}, FH_1=\{0.58\}$

B:TEST2:TRA taipeistation

Membership degree sets:

$FN_2=\{0.508\}, FH_2=\{0.23\}$

(2)Algorithm of the Inference Engine :

Algorithm

Denotation:

H = headway Set , $H = \{h_0, h_1, h_2, \dots\}$

FH = a fuzzy set of H , $FH = \{\lambda_{h0}, \lambda_{h1}, \dots, \lambda_{hx}\}$

N = a set of number of train type , $N = \{n_0, n_1, n_2, \dots\}$,

$n = \{(i, j)\}$, i for express train numbers/h , j for community train numbers/h

FN = a fuzzy set of N , $FN = \{\lambda_{n0}, \lambda_{n1}, \dots, \lambda_{nx}\}$

T = a set of transition = $\{t_0, t_1, t_2, \dots\}$, f is fuzzy function for each $t \in T = f : t \rightarrow [0, 1]$

FT = a set of membership degree of $t_x = \{\mu_0, \mu_1, \dots\}$

P = a set of place = $\{P_0, P_1, P_2, \dots\}$

Input : FH, FN

Output : $R = \{d\}$, R for the result set , d for the result of membership degree

$Z = \max(i, j)$

Subject to

$60/(i+j) < 2.5$, 2.5 for limitation of signal

Step1 planning

$P_0 = \lambda_{n0}$, $P_1 = \lambda_{h0}$

$(\lambda_{hx} + \lambda_{nx}) * 0.5 = \lambda$

$f(t_0) = \mu_0$

$\lambda * \mu_0 = P_2$

step2 accommodation

IF $P_2 \geq$ the limitation of signal :

Check the operational plan = d_0

Else :

Simulation of operation

triggering the status of accommodation of the station (P_5)

IF $P_5 > \lambda_{threshold4}$:

Train stop outside of signal device

The risk of delay is high = d_1

Else :

If $\lambda_{threshold5} \leq P_5 < \lambda_{threshold4}$:

Waiting on appropriate track

The risk of delay is acceptable = d_2

Else :

If $\lambda_{\text{threshold6}} \leq P5 < \lambda_{\text{threshold5}}$:
 Open up the station routes orderly
 The risk of delay is acceptable = $d3$
 Else :
 The Train follow the former one by CTC = $d4$

Step3 result

For each d_x in **step2** :

Interpret d_x

END

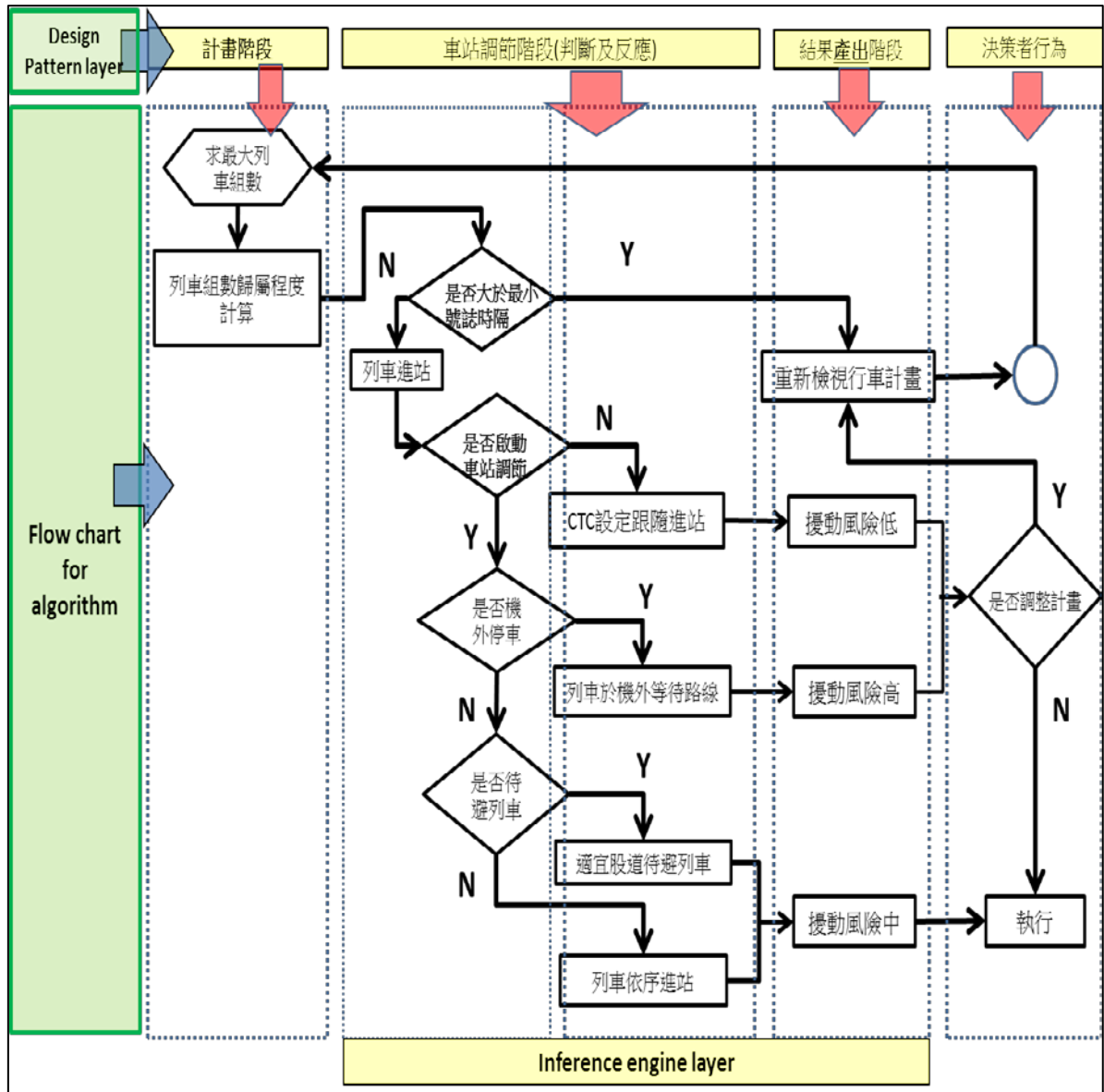


圖 5- 8 flow chart for the algorithm

(3)路線容量評估模組推論結果用以下方式表示：

The result: $R:\{d\}$ for the result set , d for the result degree of membership.

A: TEST1 : MRT taipeistation :

$$\therefore (0.3+0.58)*0.5 = 0.44 = P2 < 0.45$$

$$P2 * f(T2) = P4$$

$$P4 * f(T3) = P5 = 0.440 > 0.37$$

$$(P5 * f(T4)) = P8 = P9 = P11$$

$$((P8+P9+P11)/3) * f(T8) = 0.440 = P12$$

$$\text{Path: } P2 \rightarrow T2 \rightarrow P4 \rightarrow T3 \rightarrow P5 \rightarrow T4 \rightarrow [P8 \text{ and } P9 \text{ and } P11] \rightarrow T8 \rightarrow P12.$$

$$\therefore \text{Input sets: } \{\{0.580\}, \{0.3\}\} \rightarrow R:\{0.440\} \text{ for 「列車擾動風險高。」}$$

各位置節點之歸屬程度如表 5-4。

表 5- 4.The membership degree of each place in TEST1

place	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Degree	0.3	0.58042	0.4402	0	0.44021	0.44021	0	0
Postion	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	
place	0.44021	0.44021	0	0.44021	0.44021	0	0	

資料來源：本研究彙整 *‘‘0’’指 token 未被移轉至該 Place。.

B:TEST2: TRA taipeistation:

$$\therefore (0.508+0.230)*0.5) = 0.3696 = P2 < 0.45$$

$$P2 * f(T2) = P4$$

$$P4 * f(T3) = P5 = 0.36955$$

$$0.25 < P5 = < 0.37$$

$$(P5 * f(T5)) = P6 = P7$$

$$((P6+P7)*0.5) * f(T9) = P13, f(T9) = 0.9$$

$$P13 = 0.332596$$

$$\text{Path: } P2 \rightarrow T2 \rightarrow P4 \rightarrow T3 \rightarrow P5 \rightarrow T5 \rightarrow [P6 \text{ and } P7] \rightarrow T9 \rightarrow P13.$$

∴ Input set: $\{\{0.23\}, \{0.508\}\} \rightarrow R: \{0.332596\}$ for 「列車擾動風險中。」，各位置節點之歸屬程度表 5-5。

表 5- 5 The membership degree of each place in TEST2

place	<i>P0</i>	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>P4</i>	<i>P5</i>	<i>P6</i>	<i>P7</i>
Degree	0.508	0.230769	0.3696	0	0.36955	0.36955	0.3696	0.3696
Postion	<i>P8</i>	<i>P9</i>	<i>P10</i>	<i>P11</i>	<i>P12</i>	<i>P13</i>	<i>P14</i>	
place	0	0	0	0	0	0.332596	0	

資料來源：本研究彙整，“0”指 token 未被移轉至該 Place。

5.4 Phase3 結果產出與班表試排法驗證

經過 Phase2 階段推演後得到評估結果：如 TEST1 及 TEST2 分別得到「列車延誤可能性高」及「列車延誤可能性中等，應計畫適宜車站待避列車」。在 Phase3 階段將以臺鐵排點系統予以驗證本研究路線容量評估模組之模型所推演之結果是符合實務及常理，將 Phase2 中推演 $\text{Max}(i,j)$ ，以 TEST2 中臺鐵臺北站為例平均發車間隔 5 分鐘，單位小時 12 列次($60/(i+j)$, $i=5, j=7$)，並透過臺鐵現行排點系統衝突檢查予以驗證是否如本研究評估模組所評估的結果一致，驗證結果分述如下：

5.4.1 TEST1 班表試排法驗證

在 TEST1 中，將北捷板南線臺北站之發車間隔投入本研究之路線容量評估模型中，結果將呈現高度擾動，透過臺鐵排點系統衝突檢查，如圖 5-7，在本研究模型中產出結果為「列車延誤可能性高」，即滿足 Rule8，其經試排法驗證為高度擾動之不穩定班表，表 5-6 為模擬臺中站於單位小時單方向 22 列次之時刻表(平均發車間隔約 2.7 分)，縱使符合最越過一閉塞之最小運轉時隔(約 2.5 分)，仍呈現高度擾動，無法再排入列車，故在臺鐵系統的臺中站無法達到臺北捷運系統之發車密度(平均間隔約 2.14 分)。

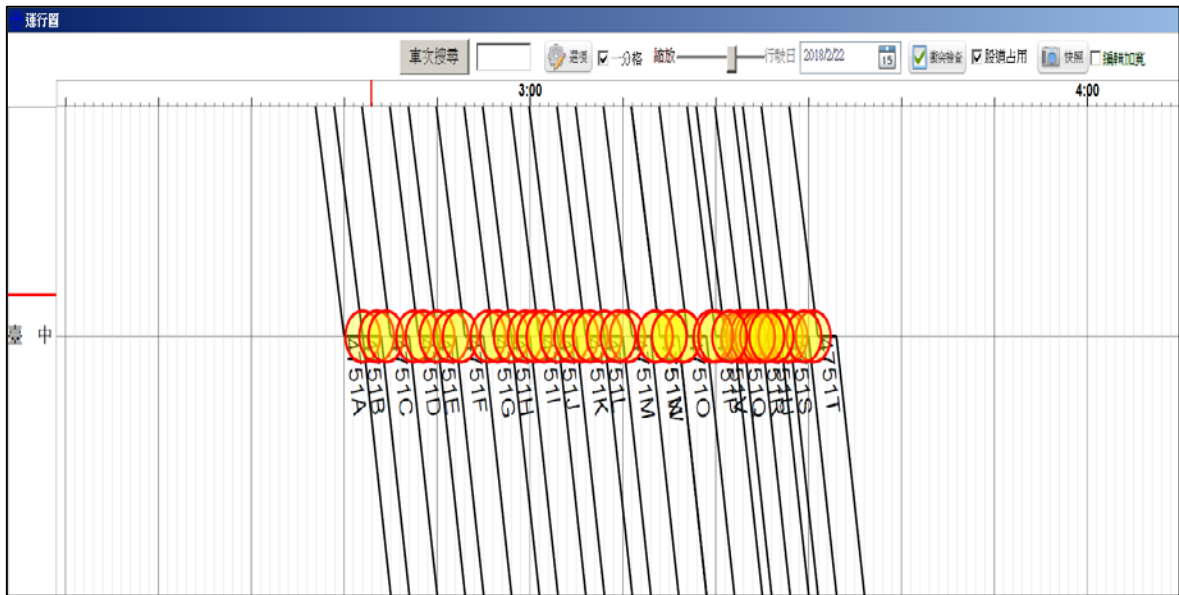


圖 5-9 臺中站 2.7 分發車間隔之運行圖

5.4.2.TEST2 班表試排法驗證

在 TEST2 中，將臺鐵車密度最高之臺北站發車間隔及列車種別數投入本研究之模型，模擬臺中站在該條件下之發車情形，即單向 12 列次/1 小時、對號列車次數：通勤列車次數為 5：7，如圖 5-11，推演過程中滿足了 Rule5(IF P5 THEN [P6 AND P7])及 Rule9(IF [P6 AND P7] OR [P8 AND P9] THEN P13)，即在車站調節階段是觸發了先開通副正線且後開通主正線之適宜車站待避列車之調節規則，而在評估階段則滿足了「應計畫適宜車站待避列車，列車擾動風險中」的條件。

若以過往文獻中以節點(node)的角度觀察路線容量，臺中站單方向 1 小時內排入 12 列車次，但路線容量並非由單一節點所能決定，即路線容量的議題需考量節點(車站，臺中站)及區間等因素，如圖 5-11 上圖 A 所示，已在站間引起擾動。

如本研究路線容量評估模組所評估之結果回饋階段為延誤風險中等(Rule9)，且在車站調節階段觸發了適宜車站待避列車(Rule5)，故將列車於是列車站待避列車後，重新投入排點系統並予以衝突檢查，如圖 5-13 下圖 B 所示，

節點(臺中站)與區間(臺中=大慶間)均無擾動情形發生，即經衝突檢查無衝突，

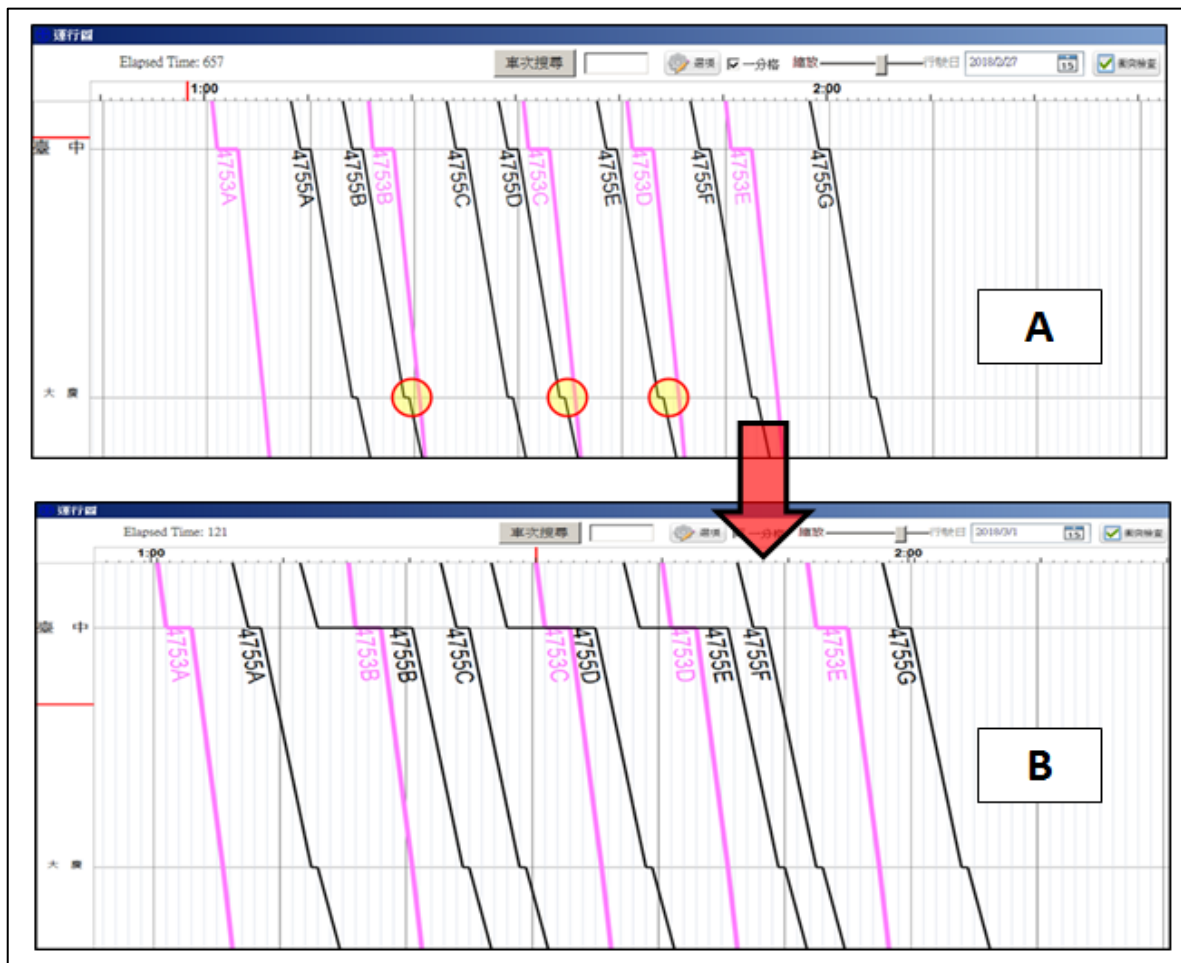


圖 5- 10 列車待避前(A)後(B)差異比較圖

5.4.3.Stress Testing 班表試排法驗證

綜上，以臺中站做為路線容量之觀察點，若單位小時內單方向開行 12 列次為其理想班表(即已達路線容量理論值)，則再加入一列車次則系統發生擾動且 Rule8 成立，即 TEST2 系統穩定受到破壞，系統發生擾動；故給定一壓力測試(Stress Testing)條件及集合如下：

- (1)單位小時單方向開行 13 列次投入系統(對號列車數:通勤列車數=6:7)。
- (2)Given stes :

$$H_s(\text{headway}) = \{4.6\} \rightarrow \alpha_h(h_s) \rightarrow FH_s = \{0.289\}。$$

$FN_s = \{0.530\}$ 。

Input set: $\{\{0.289\}, \{0.530\}\} \rightarrow R_s: \{0.4062\}$ 。

Path: $P2 \rightarrow T2 \rightarrow P4 \rightarrow T3 \rightarrow P5 \rightarrow T4 \rightarrow [P8 \text{ and } P9 \text{ and } P11] \rightarrow T8 \rightarrow P12$ ，「列車擾動風險高。」。Stress testing 中各位置節點之歸屬值如表 5-8。

表 5- 6. The membership degree of each place in Stress testing.

Place	<i>P0</i>	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>P4</i>	<i>P5</i>	<i>P6</i>	<i>P7</i>
Degree	0.5307	0.2899	0.4104	0	0.4103	0.4103	0	0
Place	<i>P8</i>	<i>P9</i>	<i>P10</i>	<i>P11</i>	<i>P12</i>	<i>P13</i>	<i>P14</i>	
Degree	0.4103	0.4103	0	0.4103	0.4062	0	0	

資料來源：本研究彙整。

(3)Result and verification:

在本研究模型推演中，投入條件滿足了 Rule4 及 Rule8，即列車發生「機外停車」且系統呈現「列車延誤可能性高」之狀態，如圖 5-11，換言之，在 TEST2 呈現系統平衡之單向 12 列次/小時再投入一列次(4753F)，即單向 13 列次/1 小時，如圖 5-13 虛線所示，系統開始擾動，TEST2 平衡受到破壞。

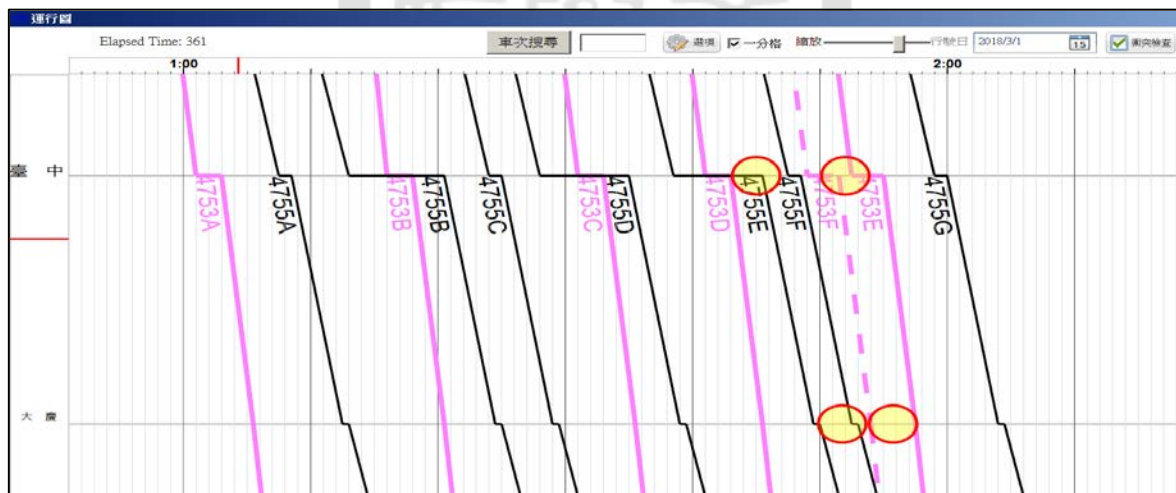


圖 5- 11. Stress testing 之運行圖；虛線為加開列車(4753F)次。

5.5 小結

綜上所述，在 Phase0 階段透過數學方式驗證本研究模型之可達性及活性以證明具備推論能力，即從初始狀態(M_0)推論到各種結論標記狀態(M_n)，而後(Phase1→Phase3 階段)利用班表試排法(臺鐵電腦排點系統)驗證本研究 Design Pattern 之推論結果，其與電腦排點系統衝突檢查之結果相符合並透過運行圖呈現無衝突之理想班表(路線容量理論值，若以班表試排法再加開一列次，如 Stress testing，系統穩定被破壞發生擾動)，故本研究之路線容量評估模組具備推論能力及評估臺鐵區域鐵路路線容量之能力。



第六章 案例分析-臺中計畫

在第五章透過數學方式驗證模型具備推演能力以及利用班表試排法驗證本研究之 Design Pattern 具備處理問題能力。

臺鐵局北部廊帶車密度最高，也是最接近捷運化之服務水準，以臺北站為中心，通勤列車於尖峰期間為 7 列次/單方向，故章節之研究對象-「臺中計畫」在各情境設定通勤列車數均不低於 7 列次，在此情況下評估臺鐵捷運化後有關路線容量之影響，本章節之流程如下圖 6-1：

- (1) 6-1 節：本研究利用 PNs 建構臺中計畫模型如圖 6-2，其行車計畫規則知識庫如附錄三；並敘明其演算過程，模型中各指標位置(place)節點意義如表 6-1。
- (2) 第 6-2 節：臺中計畫分為第一階段、第二階段啟用，本研究將情境設定 (scenario)1 至 4，如表 6-2，分析其啟用前後路線容量變化，情境 1 設定係參考臺鐵臺北站車組數，情境 3、4 設定係第二階段通勤站全面啟用之行車運轉條件。
- (3) 第 6-3 節：分析目前可能列車組數後，於在不低於臺鐵臺北站通勤列車數(7 列次)的形況下，以變更列車組數排列組合方式設定情境 5 至 8，如表 6-2，尋求該臺中計畫區段可能最大列車數。

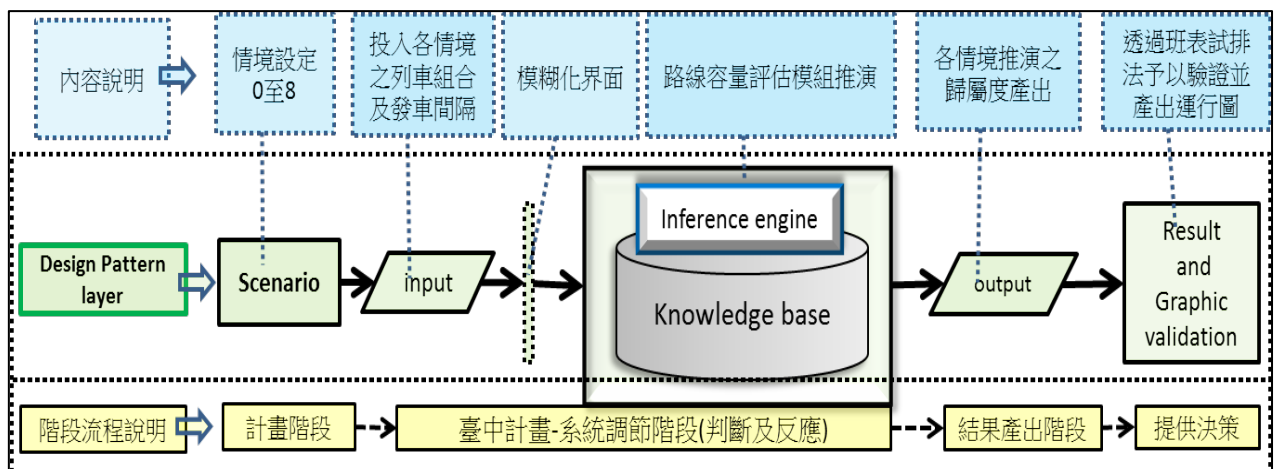


圖 6-1 案例分析流程圖

表 6- 1.指標位置(place)節點意義

P0	P1	P2	P5	P9	P11	P12	P16	P18
車組數	發車間隔	號誌時隔 判斷	進豐原站	出豐原站	站間(通 勤站)	進潭子站	出潭子站	站間 (通勤站)
P20	P21	P25	P27	P28	P32	P34	P36	
站間 (通勤站)	進太原站	出太原站	站間 (通勤站)	進臺中站	出臺中站	站間 (通勤站)	站間 (通勤站)	

表 6- 2.情境設定

情境	計劃階段	對號列車數	通勤列車數
*情境 0	臺中計畫第 1 階段	2	5
情境 1	臺中計畫第 1 階段	5	7
情境 2	臺中計畫第 1 階段	4	7
情境 3	臺中計畫第 1 階段	0	15
情境 4	臺中計畫第 2 階段	4	7
情境 5	臺中計畫第 2 階段	3	7
情境 6	臺中計畫第 2 階段	2	9
情境 7	臺中計畫第 2 階段	1	10
情境 8	臺中計畫第 2 階段	0	12
情境 9	臺中計畫第 2 階段	0	13

*情境 0 為目前臺中站尖峰時刻單方向列車種組合

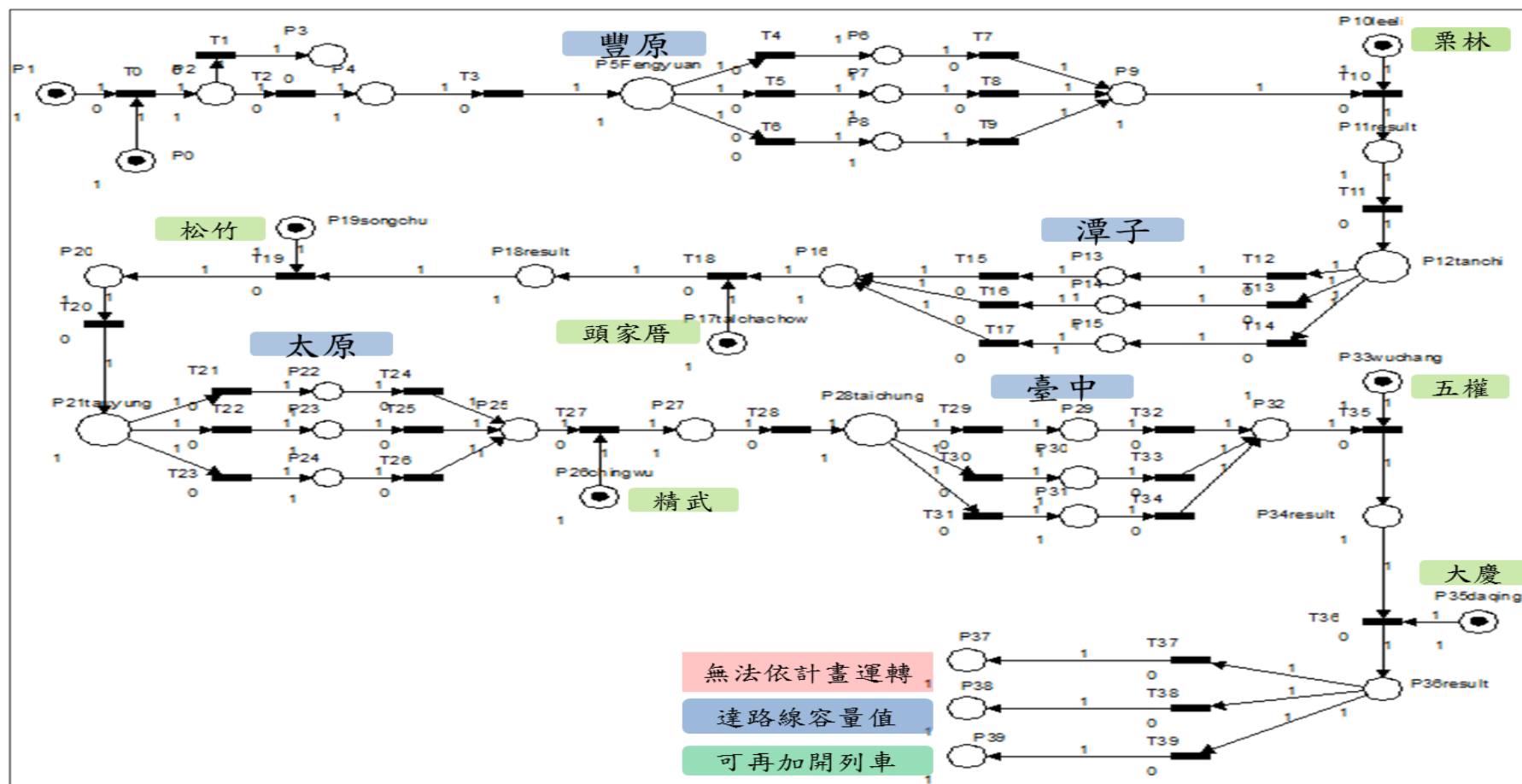


圖 6-2 臺中計畫(第 2 階段)路線容量評估模組推論引擎之 Ontology(PNs)模型圖

6.1.臺中計畫之模型說明

(1) 演算過程中除了 $FPN=(P,T,D,I,O,f,\alpha,\beta)$ 構成元素外，另說明其他集合之符號及意義如下：

(I) Headway sets(H)表示由發車間隔所構成之集合。

(II) FH 表示由 H 集合中各元素所對應之歸屬程度所構成之集合

$$FH = \{\lambda_{h1}, \lambda_{h2}, \dots, \lambda_{hx}\}。$$

(III) N 表示由列車組數種類構成之集合 $N = \{n_1, n_2, \dots, n_n\}$ 。

($n = \{i, j\}$, i for the numbers of express train/ 1hr, j for the numbers of commute train/ 1hr)

(IV) FN 表示 N 相對應之模糊集合 $FN = \{\lambda_{n1}, \lambda_{n2}, \dots, \lambda_{nx}\}$ 。

(V) W: $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ ，表示由權重所構成的集合，其代表由位置節點對於移轉節點之貢獻度。

有關其演算過程如附錄二。

(2) 為利於後續情境推演過程及結論表述，將以下列方式表示：

$$n = \{i, j\}$$

$$N = \{n_1, n_2, \dots, n_n\} = N\{\{i, j\}\} \rightarrow \alpha_n(n_x) \rightarrow FN = \{\lambda_n\}。$$

$$h_x = 60/(i+j), H(\text{headway}) = \{h_1, h_2, \dots, h_n\} \rightarrow \alpha_h(h_x) \rightarrow FH = \{\lambda_h\}。$$

$$\text{Input set: } \{\{\lambda_n\}, \{\lambda_h\}\} \rightarrow \text{inference engine} \rightarrow R: \{d\}$$

The result: R: {d} for the result set, d for result membership degree.

$d \rightarrow P: P_x$, P3: 重新檢視行車計畫, P37: 擾動風險高, P38: 已達路線容量理論值, P39: 可再加開列車。

(3) 臺中計畫 Ontology(PNs)模型圖說明：

以列車進豐原站為例，當車站啟動調節，以行車計畫規則，如附錄三，以規則 4 為例：「IF 列車進豐原站(P5)，視運轉情形(T4)，THEN 列車進站號誌機外方停車(P6)。」，在臺中計畫模型中之路徑為 $P5 \rightarrow T4 \rightarrow P6$ ，其以 PNs 表示如圖 6-3，其餘規則以此類推。

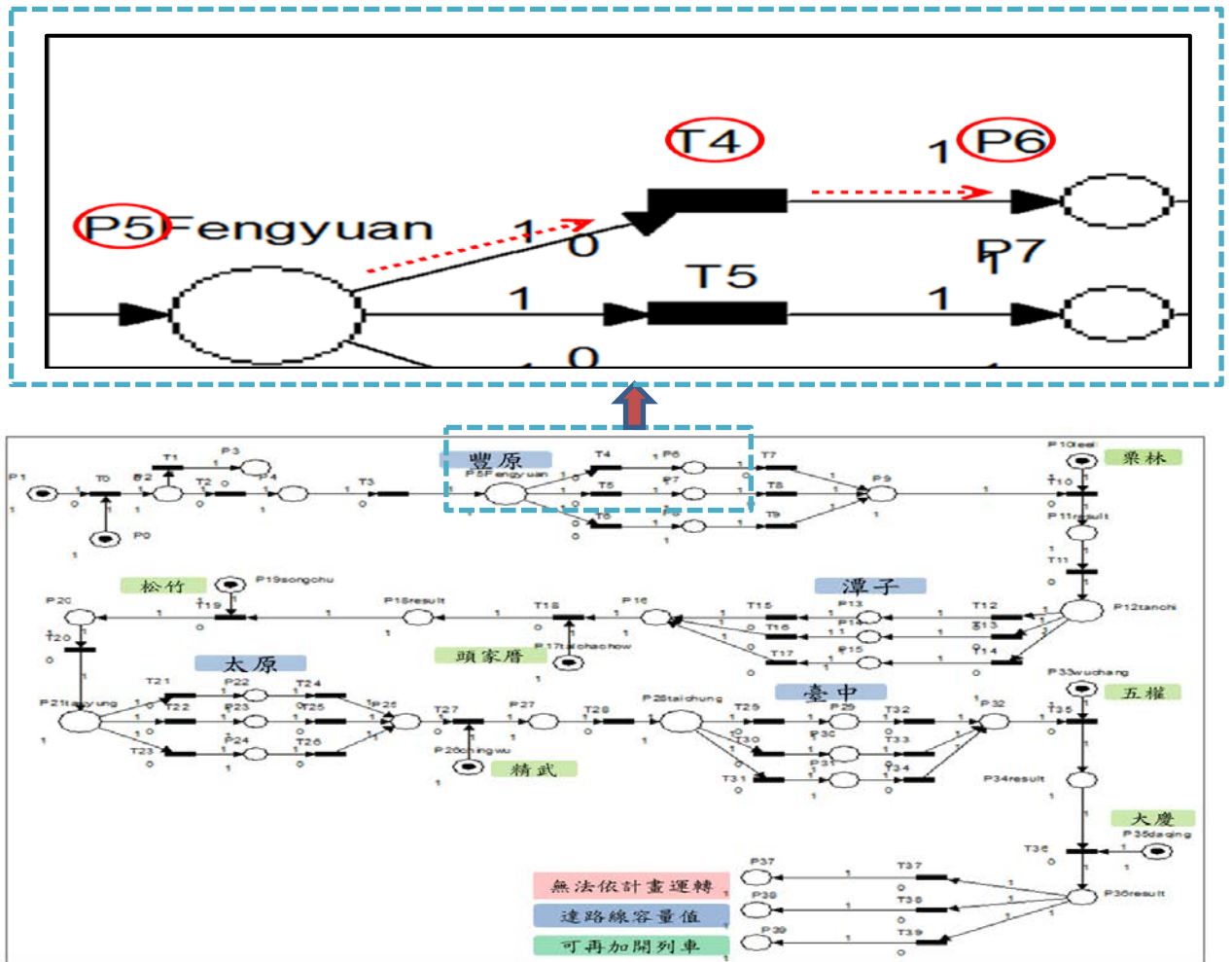


圖 6-3 臺中計畫 Ontology(PNs)模型圖說明，以附錄三規則 4 為例。

6.2.情境分析

(1)情境 1.台中計畫第 1 階段(對號列車：通勤列車 = 5:7)

$$n = \{5, 7\}$$

$$N = \{\{5, 7\}\} \rightarrow \alpha_n(n_x) \rightarrow FN = \{0.508\}。$$

$$H = \{h = (60/(5+7))\} \rightarrow \alpha_h(h_x) \rightarrow FH = \{0.230\}。$$

Input set: $\{\{0.289\}, \{0.530\}\} \rightarrow \text{Inference Engine} \rightarrow R: \{0.4062\}$ ，各指標位置
節點歸屬值如表 6-2。

評估結果： $d \rightarrow P: P_x = P37$ ，擾動風險高，如表 6-3，運行圖，如圖 6-4。

表 6-3 第一階段(5:7)指標位置節點歸屬值

Place	P0	P1	P2	P5	P9	P11	P12	P16	P18
Degree	0.508333	0.230769	0.344135	0.344135	0.309721	0.352361	0.352361	0.334743	0.364871
Place	P20	P21	P25	P27	P28	P32	P34	P36	
Degree	0.379936	0.379936	0.360939	0.377969	0.377969	0.377969	0.386485	0.403242	

表 6-4 第一階段(5:7)推論結果位置節點歸屬值

Place	P3	P37	P38	P39
Degree	0	0.403242	0	0



圖 6-4 臺中計畫第一階段 12 列次/單向/尖峰小時

(2)情境 2.台中計畫第 1 階段(對號列車：通勤列車 = 4:7)

$$n = \{4, 7\}$$

$$N = \{\{4, 7\}\} \rightarrow \alpha_n(n_x) \rightarrow FN = \{0.481\}。$$

$$H = \{h = 60/(4+7)\} \rightarrow \alpha_h(h_x) \rightarrow FH = \{0.160\}。$$

Input set: $\{\{0.481\}, \{0.160\}\} \rightarrow \text{Inference Engine} \rightarrow R: \{0.376\}$ ，各指標位置節點歸屬值如表 6-5。

評估結果： $d \rightarrow P: P_x = P38$ ，P38：已達路線容量理論值，如表 6-6，運行圖，如圖 6-5。

表 6- 5. 第一階段(4:7) 指標位置節點歸屬值

Place	P0	P1	P2	P5	P9	P11	P12	P16	P18
Degree	0.481	0.160	0.297	0.297	0.267	0.331	0.331	0.231	0.313
Place	P20	P21	P25	P27	P28	P32	P34	P36	
Degree	0.354	0.354	0.283	0.339	0.339	0.271	0.333	0.376	

表 6- 6 第一階段(4:7)推論結果位置節點歸屬值

Place	P3	P37	P38	P39
Degree	0	0	0.376	0

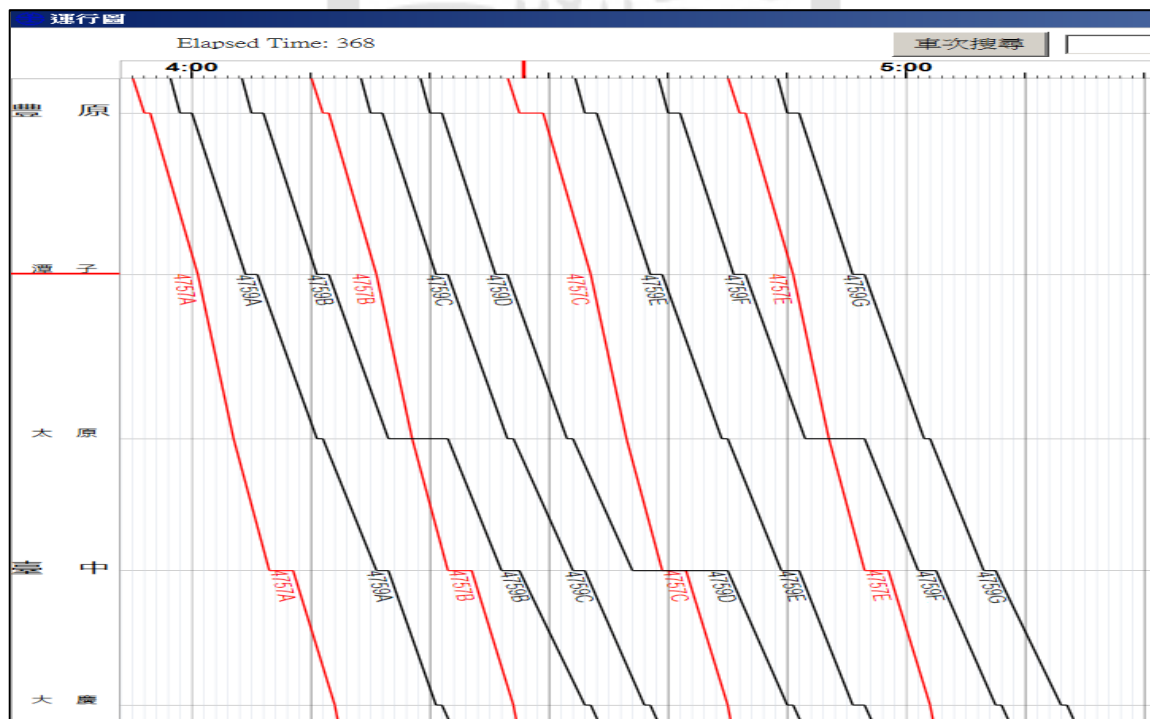


圖 6- 5 臺中計畫第一階段 11 列次/單向/尖峰小時

(3)情境 3.台中計畫第 1 階段(對號列車：通勤列車 =0:15)

$$n = \{0, 15\}$$

$$N = \{\{0, 15\}\} \rightarrow \alpha_n(n_x) \rightarrow FN = \{0.3\}。$$

$$H = \{h = 60/(0+15)\} \rightarrow \alpha_h(h_x) \rightarrow FH = \{0.384\}。$$

Input set: $\{\{0.3\}, \{0.384\}\} \rightarrow \text{Inference Engine} \rightarrow R: \{0.389\}$ ，各指標位置節點歸屬值如表 6-7。

評估結果： $d \rightarrow P: P_x = P_{38}$ ， P_{38} ：已達路線容量理論值，如表 6-8，運行圖，如圖 6-6。

表 6-7 第一階段(0:15) 指標位置節點歸屬值

Place	P0	P1	P2	P5	P9	P11	P12	P16	P18
Degree	0.3	0.384	0.30	0.30	0.274	0.335	0.335	0.234	0.314
Place	P20	P21	P25	P27	P28	P32	P34	P36	
Degree	0.354	0.358	0.28	0.33	0.339	0.272	0.333	0.389	

表 6-8 第一階段(0:15)推論結果位置節點歸屬值

Place	P3	P37	P38	P39
Degree	0	0	0.389	0

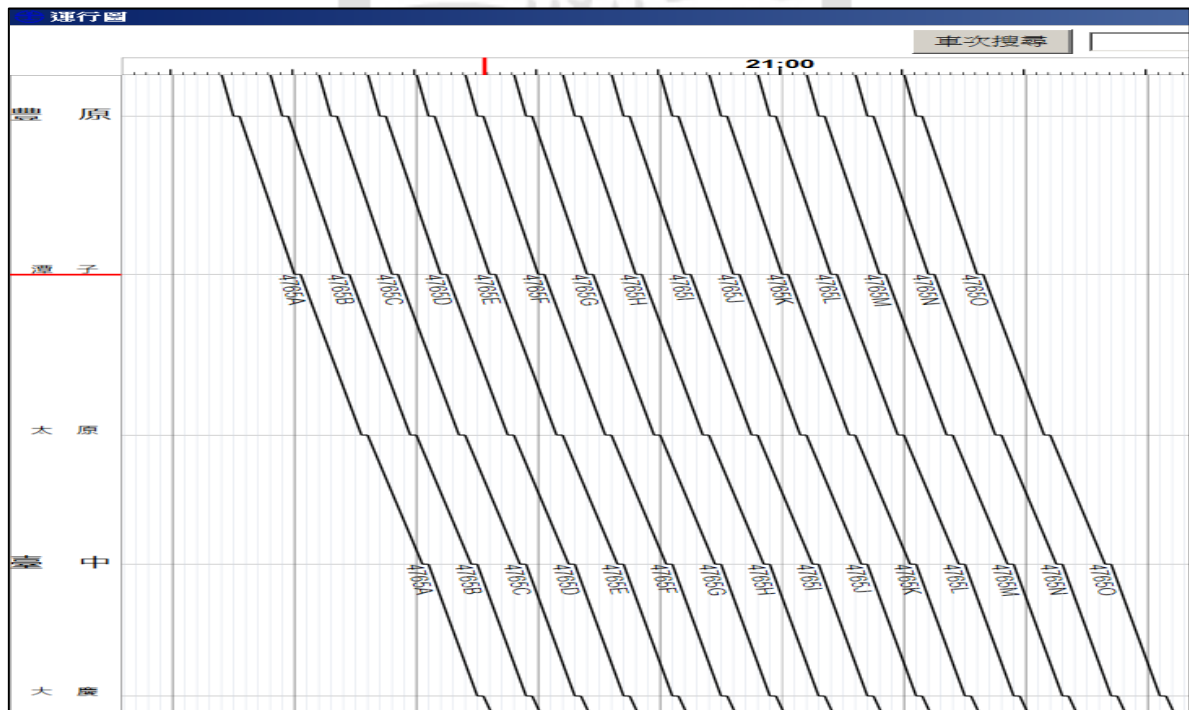


圖 6-6 臺中計畫第一階段 15 列次/單向/尖峰小時

(3)情境 4.台中計畫第 2 階段(對號列車：通勤列車 = 4:7)

$$n = \{4, 7\}$$

$$N = \{\{4, 7\}\} \rightarrow \alpha_n(n_x) \rightarrow FN = \{0.481\}。$$

$$H = \{h = 60/(4+7)\} \rightarrow \alpha_h(h_x) \rightarrow FH = \{0.160\}。$$

Input set: $\{\{0.481\}, \{0.160\}\} \rightarrow$ inference engine $\rightarrow R: \{0.412\}$ ，各指標位置節點歸屬值如表 6-9。

評估結果： $d \rightarrow P: P_x = P_{37}$ ， P_{37} ：擾動風險高，如表 6-10，運行圖如圖 6-7。

表 6-9 第二階段(4:7) 指標位置節點歸屬值

Place	P0	P1	P2	P5	P9	P11	P12	P16	P18
Degree	0.481818	0.160839	0.297238	0.297238	0.267514	0.343757	0.343757	0.24063	0.330315
Place	P20	P21	P25	P27	P28	P32	P34	P36	
Degree	0.375157	0.375157	0.3564	0.3882	0.3882	0.3882	0.4041	0.41205	

表 6-10 第二階段(4:7)推論結果位置節點歸屬值

Place	P3	P37	P38	P39
Degree		0	0.41205	0

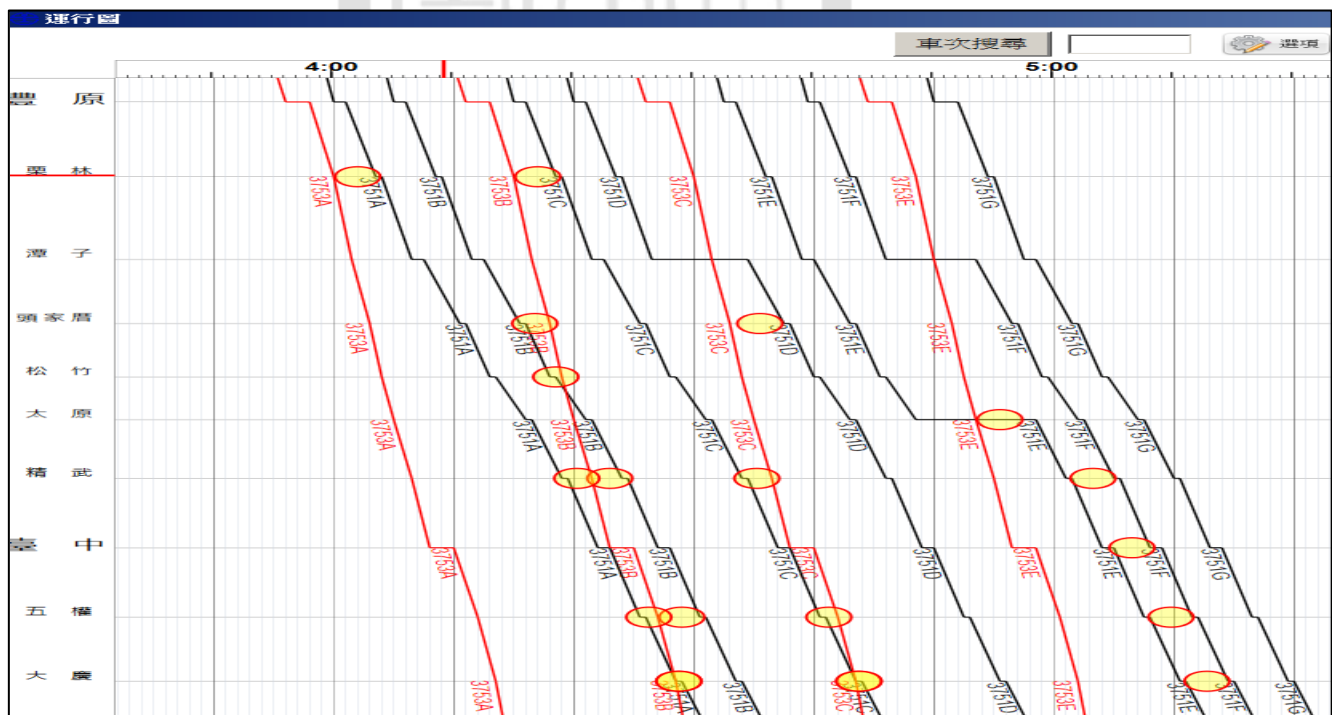


圖 6-7 台中計畫第二階段啟用 11 列次/單向/尖峰小時。

(4)情境 5.台中計畫第 2 階段(對號列車：通勤列車 = 3:7)

$$n = \{3, 7\}$$

$$N = \{\{3, 7\}\} \rightarrow \alpha_n(n_x) \rightarrow FN = \{0.45\}。$$

$$H = \{h = 60/(3+7)\} \rightarrow \alpha_h(h_x) \rightarrow FH = \{0.076\}。$$

Input set: $\{\{0.45\}, \{0.076\}\} \rightarrow$ inference engine $\rightarrow R: \{0.386\}$ ，各指標位置節點歸屬值如表 6-11。

評估結果： $d \rightarrow P: P_x = P_{38}$ ， P_{38} ：已達路線容量理論值，如表 6-12，運行圖如圖 6-8。

表 6- 11.第二階段(3:7) 指標位置節點歸屬值

Place	P0	P1	P2	P5	P9	P11	P12	P16	P18
Degree	0.45	0.076923	0.240962	0.240962	0.156625	0.288313	0.288313	0.201819	0.310909
Place	P20	P21	P25	P27	P28	P32	P34	P36	
Degree	0.365455	0.365455	0.292364	0.356182	0.356182	0.284946	0.352473	0.386236	

表 6- 12 第二階段(3:7)推論結果位置節點歸屬值

Place	P3	P37	P38	P39
Degree	0	0	0.386236	0

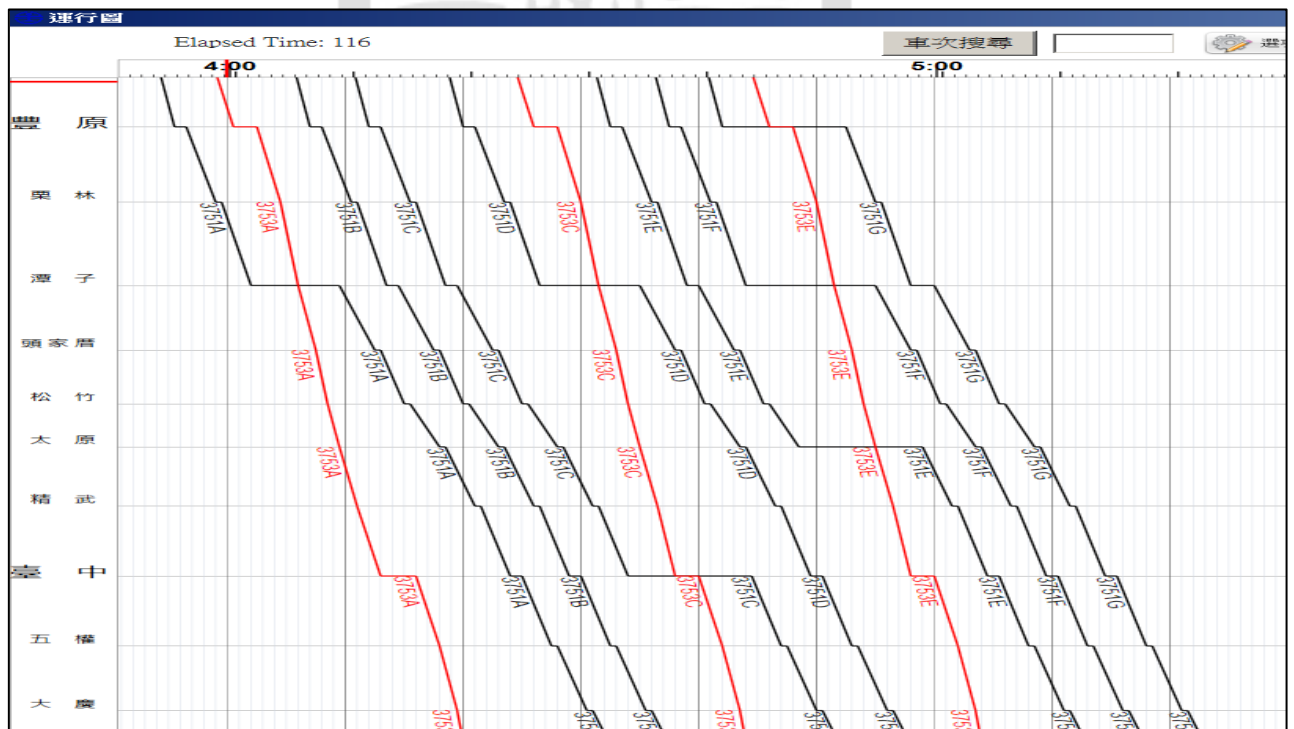


圖 6- 8 台中計畫第二階段 10 列次/單方向/尖峰小時

6.3.增加路線容量之列車種排列組合

在 6-2 節推演得知，臺中計畫於第二階段啟用後，在通勤列車數不低於 7 列次的情形下，列車組數為 3：7，共十列次，在本節將設定數種情境，在不使用工程手段下(例如，增設股道。)，調整列車種組合(i,j)，以達尖峰小時最大列車數之列車種組合數，如表 6-13。

表 6-13 增加路線容量之列車種排列組合

情境	運轉條件	對號列車次數	通勤列車次數
情境 6	臺中計畫第二階段	2	9
情境 7	臺中計畫第二階段	1	10
情境 8	臺中計畫第二階段	0	12
情境 9	臺中計畫第二階段	0	13

(1)情境 6.臺中計畫第 2 階段(對號列車：通勤列車 =2:9)

$$n = \{2, 9\}$$

$$N = \{\{2, 9\}\} \rightarrow \alpha_n(n_x) \rightarrow FN = \{0.390\}。$$

$$H = \{h = 60/(2+9)\} \rightarrow \alpha_h(h_x) \rightarrow FH = \{0.160\}。$$

Input set: $\{\{0.390\}, \{0.160\}\} \rightarrow$ Inference Engine $\rightarrow R: \{0.411\}$ ，各指標位置節點歸屬值如表 6-14。

評估結果： $d \rightarrow P: P_x = P_{37}$ ， P_{37} ：擾動風險高，如表 6-15，運行圖如圖 6-9。

表 6-14 第二階段(2:9) 指標位置節點歸屬值

Place	P0	P1	P2	P5	P9	P11	P12	P16	P18
Degree	0.390909	0.160839	0.256329	0.256329	0.230696	0.325348	0.325348	0.227744	0.323872
Place	P20	P21	P25	P27	P28	P32	P34	P36	
Degree	0.371936	0.371936	0.353339	0.38667	0.38667	0.38667	0.403335	0.411667	

表 6-15 第二階段(2:9)推論結果位置節點歸屬值

Place	P3	P37	P38	P39
Degree	0	0.411	0	0

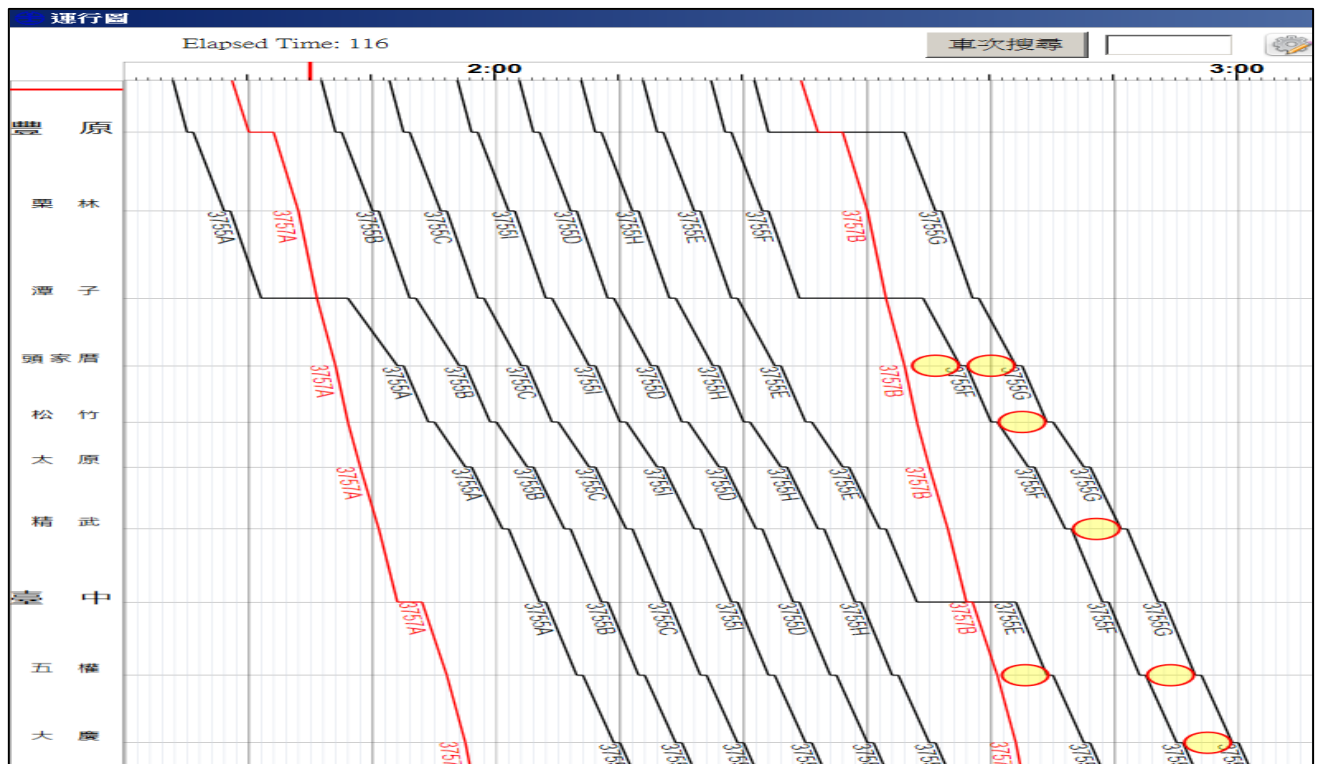


圖 6- 9.11 列次/單向/1 小時(對號車：通勤列車=2:9)

(2)情境 7.臺中計畫第 2 階段(對號列車：通勤列車 =1:10)

$$n = \{1, 10\}$$

$$N = \{\{1, 10\}\} \rightarrow \alpha_n(n_x) \rightarrow FN = \{0.345\}。$$

$$H = \{h = 60/(1+10)\} \rightarrow \alpha_h(h_x) \rightarrow FH = \{0.160\}。$$

Input set: $\{\{0.345\}, \{0.160\}\} \rightarrow \text{Inference Engine} \rightarrow R: \{0.386\}$ ，各指標位置節點歸屬值如表 6-16。

評估結果： $d \rightarrow P: P_x = P_{38}$ ， P_{38} ：已達路線容量理論值，如表 6-17，運行圖如圖 6-10。

表 6- 16 第二階段(1:10) 指標位置節點歸屬值

Place	P0	P1	P2	P5	P9	P11	P12	P16	P18
Degree	0.345	0.160	0.235	0.235	0.153	0.286	0.2869	0.201	0.310
Place	P20	P21	P25	P27	P28	P32	P34	P36	
Degree	0.365	0.365	0.292	0.356	0.356	0.284	0.352	0.386	

表 6-17 第二階段(1:10) 推論結果位置節點歸屬值

Place	P3	P37	P38	P39
Degree	0	0	0.386	0

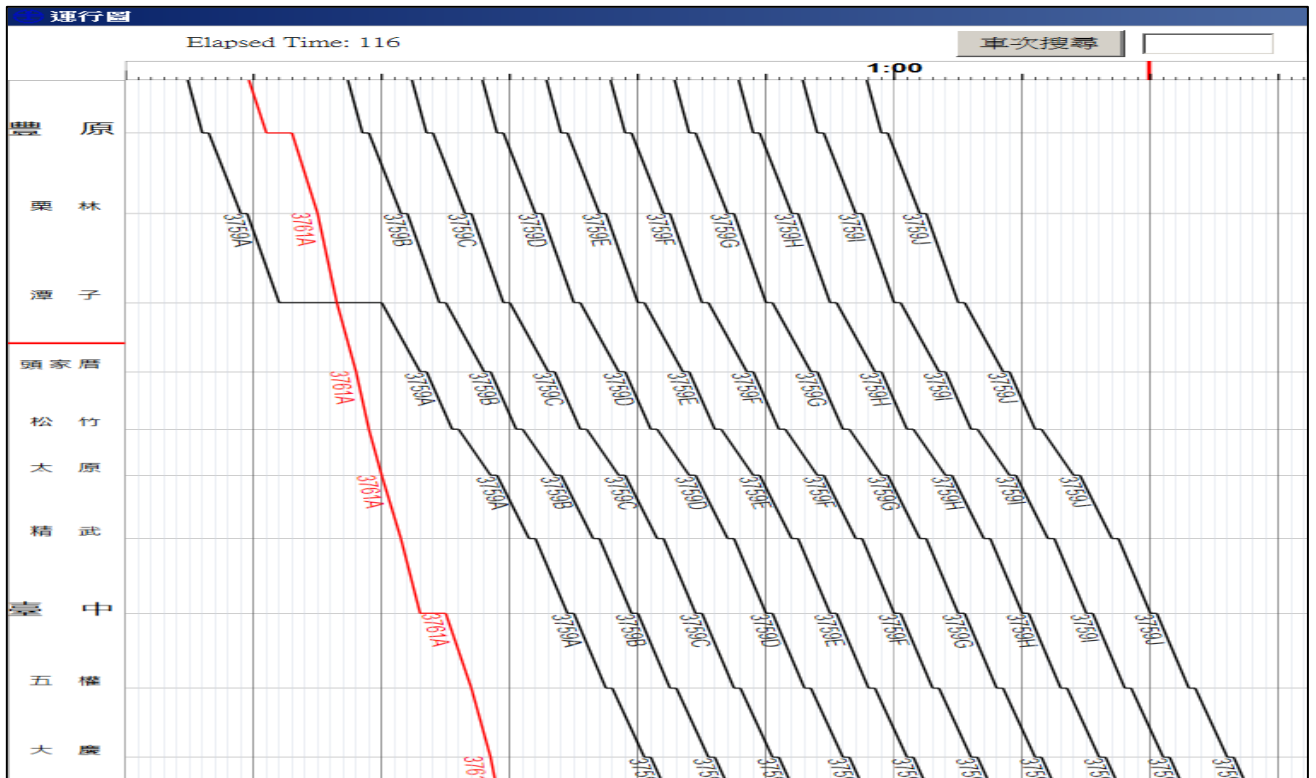


圖 6-10 11 列次/單向/1 小時(對號車：通勤列車=1:10)

(3)情境 8.臺中計畫第 2 階段(對號列車：通勤列車 =0:12)

$$n = \{0, 12\}$$

$$N = \{\{0, 12\}\} \rightarrow \alpha_n(n_x) \rightarrow FN = \{0.3\}。$$

$$H = \{h = 60/(0+12)\} \rightarrow \alpha_h(h_x) \rightarrow FH = \{0.230\}。$$

Input set: $\{\{0.3\}, \{0.230\}\} \rightarrow \text{Inference Engine} \rightarrow R: \{0.386\}$ ，各指標位置節點歸屬值如表 6-18。

評估結果： $d \rightarrow P: P_x = P38$ ，P38：已達路線容量理論值，如表 6-19，運行圖如圖 6-11。

表 6- 18 第二階段(0:12) 指標位置節點歸屬值

Place	P0	P1	P2	P5	P9	P11	P12	P16	P18
Degree	0.3	0.230	0.227	0.227	0.148	0.284	0.284	0.198	0.309
Place	P20	P21	P25	P27	P28	P32	P34	P36	
Degree	0.364	0.364	0.291	0.355	0.355	0.284	0.352	0.386	

表 6- 19 第二階段(0:12) 推論結果位置節點歸屬值

Place	P3	P37	P38	P39
Degree	0	0	0.386	0

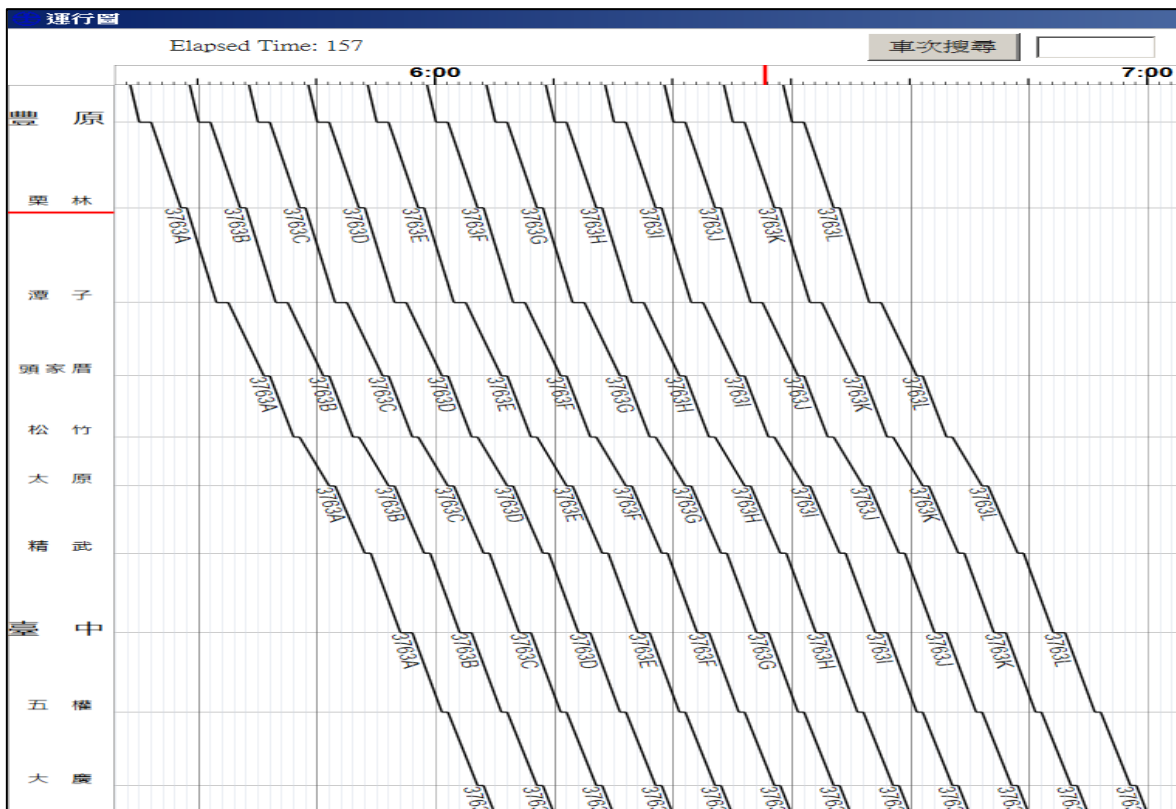


圖 6- 11. 12 列次/單向/1 小時(對號車：通勤列車=0:12)

(4)情境 9.台中計畫第 2 階段(對號列車：通勤列車 =0:13)

$$n = \{0, 13\}$$

$$N = \{\{0, 13\}\} \rightarrow \alpha_n(n_x) \rightarrow FN = \{0.3\}。$$

$$H = \{h = 60/(0+13)\} \rightarrow \alpha_h(h_x) \rightarrow FH = \{0.289\}。$$

Input set: $\{\{0.3\}, \{0.289\}\} \rightarrow \text{Inference Engine} \rightarrow R: \{0.411\}$ ，各指標位置節點歸屬值如表 6-20。

評估結果： $d \rightarrow P: P_x = P_{37}$ ， P_{37} ：擾動風險高，如表 6-21，運行圖如圖 6-12。

表 6- 20 第二階段(0:13) 指標位置節點歸屬值

Place	P0	P1	P2	P5	P9	P11	P12	P16	P18
Degree	0.3	0.289	0.257	0.257	0.231	0.325	0.325	0.228	0.324
Place	P20	P21	P25	P27	P28	P32	P34	P36	
Degree	0.372	0.372	0.353	0.386	0.386	0.386	0.403	0.411	

表 6- 21 第二階段(0:13)推論結果位置節點歸屬值

Place	P3	P37	P38	P39
Degree	0	0.411	0	0

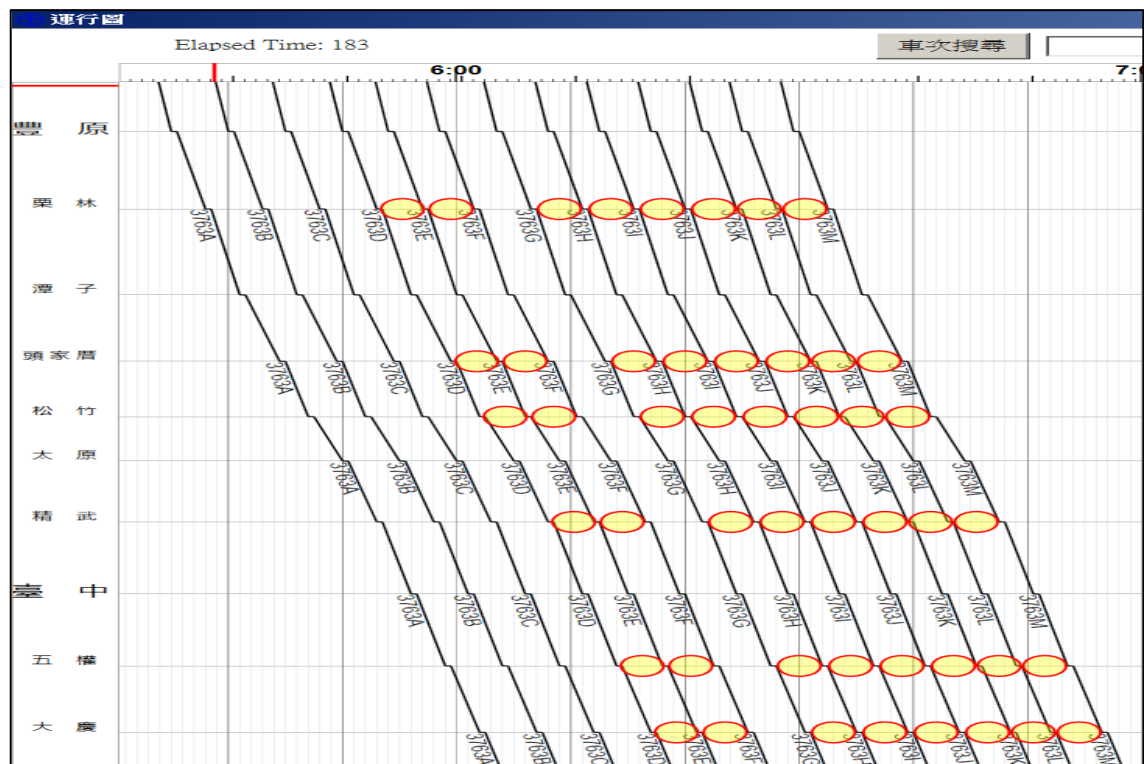


圖 6- 12. 13 列次/單向/1 小時(對號車：通勤列車=0:13)

6.4.小結

透過本研究路線容量評估模組推論並以臺鐵臺北站作為參考對象，通勤列車之車次數不低於 7 列次的條件下設定本章節情境 1 至 9，各情境分析說明如下(條件均為單方向/尖峰小時)，並彙整如表 6-22：

- (1) 在情境 1 各通勤車站尚未全面啟用，本研究將(5：7)投入臺中計畫路線容量評估模組分析時，在臺中站以南(臺中=大慶間)發生擾動，如圖 6-4，因此在情境 2，將對號列車次數降為 4 列次(4：7)，則該列車種組合數達到路線容量理論值，如圖 6-5。
- (2) 情境 4 為臺中計畫第二階段各通勤站全面啟用，原本第一階段列車種組合(4：7)經本研究路線容量評估系統推演結果為擾動風險高，即無法依行車計畫時刻運行而產生延誤，如圖 6-4，減少一列次對號列車，即情境 5 列車種組合(3：7)則該列車種組合數達到路線容量理論值，如圖 6-8。
- (3) 情境 6 至 9 則係為了增裕路線容量，以改變列車種組合方式為之，經過情境 5 得到總列車數為 10 列次(3+7=10)，為了增加總列車數，情境 6 減少 1 列次對號列車，增加 2 列次通勤列車(2：9)，推演結果為高度擾動，情境 6 同樣總列車次數為 11 列次但列車種組合為(1：10)時達路線容量理論值，相較於情境 5 總列車數提高 10%；若臺中計畫全面改以通勤列車營運，可開行 12 列次通勤列車，即情境 8(0：12)，相較於第二階段情境 5 總列車數提高 20%，13 列次通勤列車/單方向/尖峰小時則擾動風險高。
- (4) 在第一階段情境 3 之行車條件下，可開行 15 列次通勤列車，在第二階段情境 8 之行車條件下，可開行 12 列次通勤列車；在車種相同之條件下，第二階段路線容量下降 20%。

表 6-22 路線容量評估模組推演結果

情境	計畫階段 ³	推演結果	代表意義	對號列車數	通勤列車數	車次數	路線容量變化
0	第 1 階段(目前)		比較基礎	2	5	7	--
1	第 1 階段	0.403	擾動風險高	5	7	12	--
2	第 1 階段	0.376	達路線容量理論值	4	7	11	比較基礎
3	第 1 階段	0.389	達路線容量理論值	0	15	15	36.36%
4	第 2 階段	0.412	擾動風險高	4	7	11	--
5	第 2 階段	0.386	達路線容量理論值	3	7	10	-9.09%
6	第 2 階段	0.411	擾動風險高	2	9	11	--
7	第 2 階段	0.386	達路線容量理論值	1	10	11	0
8	第 2 階段	0.386	達路線容量理論值	0	12	12	9.09%
9	第 2 階段	0.411	高度擾動	0	13	13	--

資料來源：本研究彙整，列車組合為(對號車：通勤列車)；尖峰小時/單方向。

³ 臺中計畫第二階段啟用栗林、頭家厝、松竹、精武、五權 5 個通勤車站，通勤車站均無法待避列車。

第七章 結論與建議

國內有關臺鐵捷運化政策之研究議題，往往多著重在政策面及運具分工合作之關係，少有文獻針對臺鐵捷運化系統運轉層面提出分析，另有關國外針對軌道路線容量之研究文獻雖然豐碩，但影響軌道系統路線容量因素眾多，對於臺鐵捷運化後路線容量之影響難以藉由國外研結果予以解釋。

本研究建立路線容量評估模組針對臺鐵捷運化後路線容量變化予以分析，本章 7.1 節部分將表述本研究推論分析之發現及結果，在 7.2 節部分將提出本研究對於實務及學術之貢獻，最後在 7.3 節部分則提出未來的研究方向及發展之可能，第七章結構圖如圖 7-1。

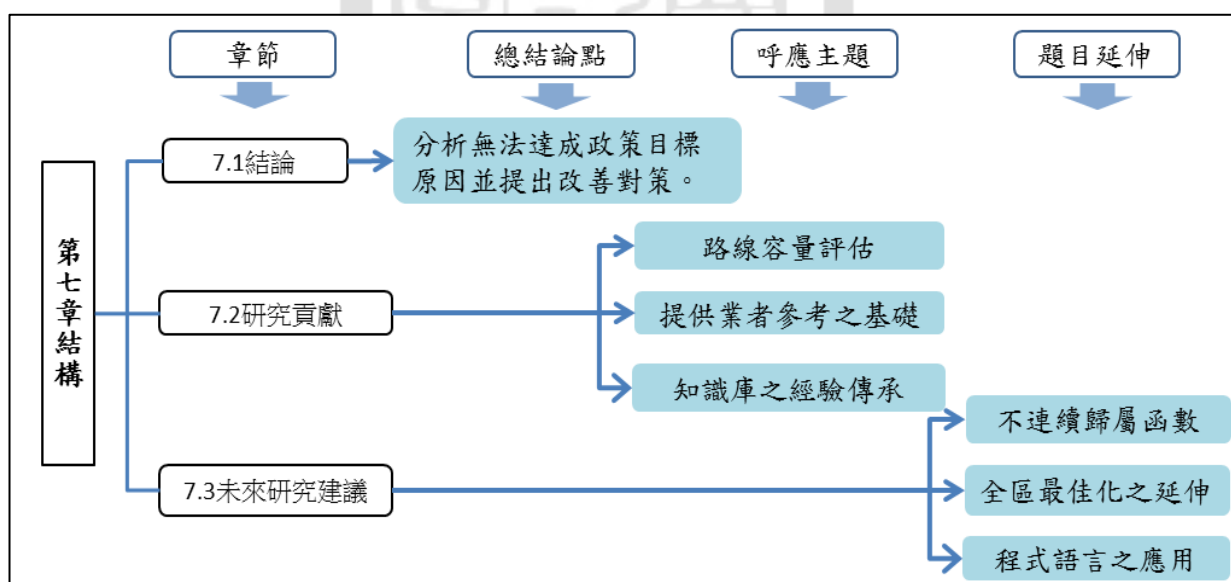


圖 7-1. 第七章結構圖

7.1 結論

臺中計畫在第二階段全面啟用通勤車站後，其路線容量無法達到臺北路廊之標準；臺中計畫各階段之車種組合、觀察及原因分析如下：

(1) 依據本研究分析，臺中計畫路線容量在維持單方向尖峰小時 7 列次通勤列

車之服務水準下，其路線容量無法達到臺北路廊之表現(對號車：通勤車=5：7)，各階段路線容量之車種組合如下：

- A. 臺中計畫第一階段路線容量車種組合：對號列車 4 列次、通勤列車 7 列次，共計 11 列次，平均發車間隔約為 5.5 分，如表 7-1 項次 1。
- B. 第二階段路線容量車種組合：對號列車 3 列次、通勤列車 7 列次，共計 10 列次，平均發車間隔為 6 分，如表 7-1 項次 3。
- C. 臺中計畫各階段路線容量變化(單方向/尖峰小時)，如表 7-1：
 - (A) 第一段啟用路線容量理論值 11 列次；第二階段啟用路線容量理論值為 10 列次，路線容量較第一階段約下降 9%(表 7-1 項次 3)。
 - (B) 依目前臺中站到開列車數(7 列次)，第二階段啟用後其路線利用率由第一階段 63.6%提高為 70%。

表 7-1 臺中計畫各階段路線容量

	項次	階段	車組數 (對號列車：通勤列車)	目前路線 利用率 ⁴	路線容量 變化	平均 發車間隔
臺中計畫	1	第 1 階段	11 列次(4：7)	63.6%	--	5.5 分
	2	第 1 階段	14 列次(0：14)			
	3	第 2 階段 ⁵	10 列次(3：7)	70%	-9%	6 分
	4	第 2 階段 ⁶	11 列車(1：10)	63.6%	+10%	5.5 分
	5	第 2 階段 ⁷	12 列次(0：12)	58.3%	+20%	5 分
臺北路廊	6	--	12 列次(5：7)	--	--	5 分

資料來源：本研究彙整，目前臺中站單方向/尖峰小時為 7 列次；臺北路廊係指北部捷運化區間⁸作為比較對象。

⁴ 目前路線利用率=目前開行列車次數(7 列次)/各階段之路線容量理論值

⁵ 項次 3 第 2 階段通勤車站全面啟用，比較項目係於第 1 階段車種組合(4：7)之比較。

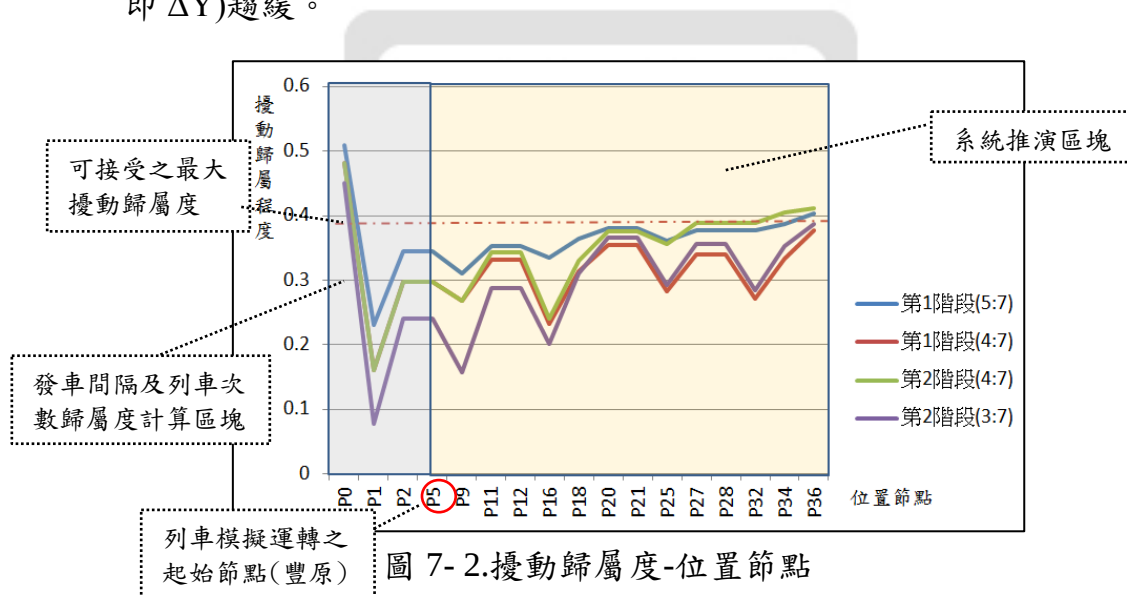
⁶ 透過車種組合變化增加路線容量，相較於第 2 階段車種組合(3：7)之比較。

⁷ 透過車種組合變化增加路線容量，相較於第 2 階段車種組合(3：7)之比較。

⁸ 本研究之北部捷運化區間係以臺北站為中心，北起南港站南至樹林站，約 21.8 公里，作為臺中計畫比較之區段。

(2) 為維持捷運化政策目標，通勤列車數不應低於臺鐵臺北車站 7 列次(單方向/尖峰小時)，各位置節點與擾動歸屬程度變化之觀察，如圖 7-3，分述如下：

- A. 第二階段列車種組合為(4：7)相較於第一階段(4：7)，其擾動歸屬歸屬度逼近可接受之最大擾動歸屬度(臨界值)發生在出潭子站(P16)至進太原站(P21)間，期間在 5.1 公里⁹內啟用了頭家厝及松竹站 2 座通勤站。
- B. 系統中各節點(車站)之調節能力隨著系統容量趨於飽和而降低，如第 1 階段列車組合數(5：7)，如圖 7-2 藍線，P21 至 P25(進太原站→出太原站)，相較於圖 7-2 紅色、紫色線段，調節幅度變化(擾動歸屬程度變化，即 ΔY)趨緩。



(3) 為增加路線容量，本研究提出以下改善措施之方法：

A. 模擬工程手段：

本研究之路線容量評估模組將擾動歸屬度變化大(P16 至 P21)之區段以圖表呈現，如圖 7-3，故本研究模擬透過工程手段在高擾動歸屬度區段增加待避線，如松竹站(P19)，則路線容量之車種組合則可增加為對號列車 5 列次、通勤列車 7 列次，共計 12 列次，路線容量較第一階段增加約 9%。

⁹ 潭子站里程 K184.1 公里，太原站里程 K189.2 公里

B. 調整車種組合：

(A) 車種組合為對號列車 1 列次及通勤列車 10 列次，共計 11 列次，路線容量維持與第一階段之相同。

(B) 全部改以通勤列車開行則可達到 12 列次，路線容量較第一階段增加約 9%。

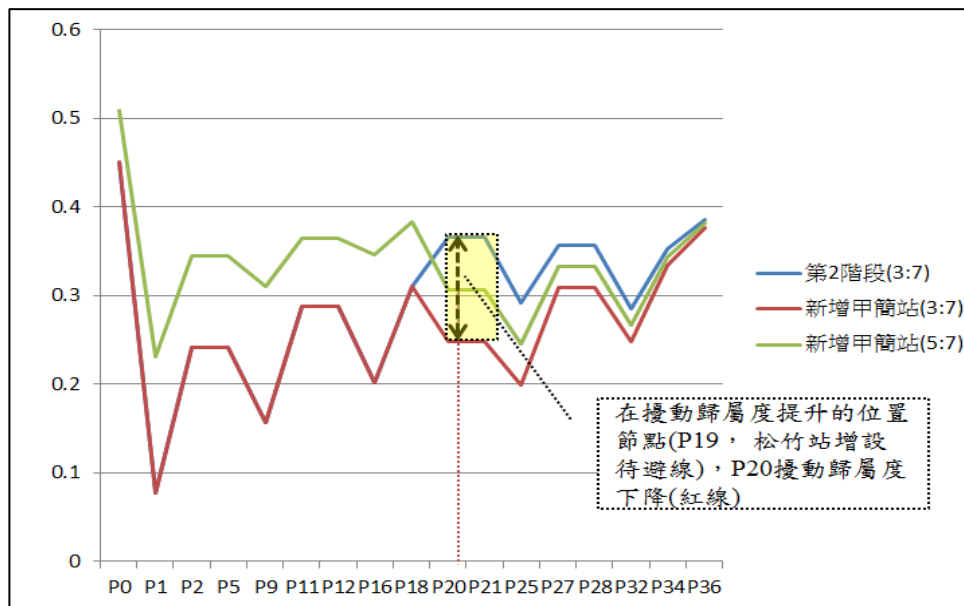


圖 7-3 模擬工程手段之擾動量歸屬度-位置節點變化

(4) 結果分析：目前臺中計畫通勤車站在第二階段全面啟用後路線容量(3：7)低於北部捷運化區間(5：7)，其原因本研究推估係在於其車站股道數差異性(一至三等站較多)，因此，臺中計畫路廊若要維持通勤列車次數 7 列次/單方向/尖峰小時的條件下，總車次數略低於臺北路廊，臺中計畫各通勤站啟用後，尖峰小時最適發車間距(平均)為 6 分鐘，車種組合為對號列車 3 列次，通勤列車 7 列次，共計 10 列次。

7.2.研究貢獻

(1)在實務方面：

A. 本研究弭補長久以來有關國內臺鐵捷運化對於路線容量影響之評估研究

及報告之缺乏，同時本研究評估模組及方法也可作為新工單位對於未來鐵路立體化設計車站股道、位置之參考，如圖 7-3。

B. 可利用本研究之路線容量評估模組有效率分析在捷運區間加開列車對系統容量的影響，且經由本研究之知識庫可讓行車運轉經驗得以有效傳承，如附錄四，減少人力斷層所造成的影響。

C. 提供軌道業者快慢車混合營運參考之基礎：

軌道系統路線容量有限，在假定業者僅提供對號列車與通勤列車兩種產品下，以臺鐵局為生產者的角度，透過本研究之路線容量評估模組提出最適列車種組合供軌道運輸業者參考，如表 7-2。以臺中計畫目前列車種組合數(2,5)為例，如圖 7-4 之紅點，表示該系統仍有空間增加列車數；若列車種組合落在右邊，如圖 7-4 之黑點，則系統發生擾動。

表 7-2 最適車種排列組合

	最適車種排列組合								
對號列車數	0	1	2	3	4	5	7	8	10
通勤列車數	12	10	8	7	5	3	2	1	0

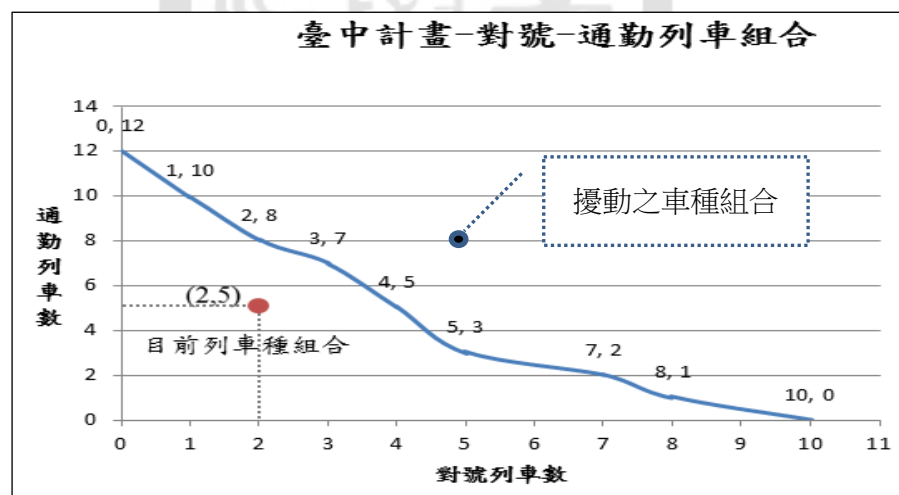


圖 7-4. 對號-通勤列車組合示意圖

(2)在學術方面：

A. 國內鮮少透過專家系統建構模組作為路線容量評估研究之方法，在未來可作為其他軌道系統之路線容量評估之研究基礎，使得研究方法更為多

元化。

- B. 本研究係透過臺鐵排點系統作為班表試排法驗證及圖表呈現，表現出最接近臺鐵系統真實狀態，透過本研究之結果，使得後續研究更能將理論結合實務。
- C. 本研究評估模組係結合節點(nodes)、區間(sections)及車種差異等因子對於軌道路線容量之影響，其中本研究指出車站(node)對於系統之路線容量影響並非固定而是隨著系統容量變化而有所差異，若忽略或過於簡化節點對路線容量影響，將使得評估結果與現實系統有所落差；因此本研究之模型建構之思維、方法將對於分析影響軌道路線容量之因素更為全面客觀。

7.3 未來研究建議

在回顧過往研究文獻之過程中，難免在設計上都有其限制，如簡化問題以求解，本研究模型仍有部分存在的困難，如通勤電車及對號列車之車種差異，本研究透過不連續之歸屬函數處理其歸屬程度，後續研究者可以收集資料，如車種別與列車延誤之數據，以利更客觀定義其歸屬程度進而推演更客觀結果。

本研究係以都市區域作為研究範圍，若將本研究之路線容量評估模組推廣到臺鐵全區間之路線容量評估，有一定的限制及困難，未來研究者須克服區域最佳化如何推廣成全區最佳化之限制，使路線容量評估區域範圍更為廣泛。

本研究以 PNs 架構路線容量評估模組之本體論(Ontology)，未來研究方向可將本研究之 Design Pattern 透過物件導向之程式語言整合成應用程式(application program)，成為更接近真實系統之分析工具。

參考文獻

1. Armstrong, J., Preston, J., Potts, C., Bektas, T., & Paraskevopoulos, D. (2017). Addressing nodal constraints on railway capacity. *Institution of Mechanical Engineers. Proceedings. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 231(5), 637-646.
2. Cheng, Y. H., & Yang, L. A. (2009). A Fuzzy Petri Nets approach for railway traffic control in case of abnormality: Evidence from Taiwan railway system. *Expert Systems with Applications*, 36(4), 8040-8048.
3. Fay, A. (2000). A fuzzy knowledge-based system for railway traffic control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 13(6), 719-729.
4. Hasibuan, N. A., Yusmiarti, K., Waruwu, F. T., & Rahim, R. (2017). Expert systems with genetics probability. *International Journal of Research In Science & Engineering*, 3(2), 112-116.
5. Iliasov, A., Lopatkin, I., & Romanovsky, A. (2013, September). The SafeCap platform for modelling railway safety and capacity. In *International Conference on Computer Safety, Reliability, and Security*, 130-137. Springer, Berlin, Heidelberg.
6. Lamorgese, L., & Mannino, C. (2015). An exact decomposition approach for the real-time train dispatching problem. *Operations Research*, 63(1), 48-64.
7. Lee, W. H., Tseng, S. S., & Tsai, S. H. (2009). A knowledge based real-time travel time prediction system for urban network. *Expert Systems with Applications*, 36(3), 4239-4247.
8. Liu, H. C., You, J. X., Li, Z., & Tian, G. (2017). Fuzzy Petri nets for knowledge representation and reasoning: A literature review. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 60, 45-56.
9. Looney, C. G. (1988). Fuzzy Petri nets for rule-based decisionmaking. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 18(1), 178-183.
10. Mapelsden, D., Hosking, J., & Grundy, J. (2002, February). Design pattern modelling and instantiation using DPML. In *Proceedings of the Fortieth International Conference on Tools Pacific: Objects for internet, mobile and embedded applications* (pp. 3-11). Sydney: Australian Computer Society, Inc..
11. Murata, T. (1989). Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, 77(4), 541-580.
12. Mussone, L., & Calvo, R. W. (2013). An analytical approach to calculate the capacity of a railway system. *European Journal of Operational Research*, 228(1), 11-23.
13. Peterson, J. L. (1981). *Petri net theory and the modeling of systems*. Englewood Cliffs, N J: Prentice-Hall.
14. Riejos, F. A. O., Barrena, E., Ortiz, J. D. C., & Laporte, G. (2016). Analyzing the theoretical capacity of railway networks with a radial-backbone topology. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 84, 83-92.
15. Samà, M., Meloni, C., D'Ariano, A., & Corman, F. (2015). A multi-criteria

- decision support methodology for real-time train scheduling. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 5(3), 146-162.
16. Sameni, M. K., Landex, A., & Preston, J. (2011). Developing the UIC 406 method for capacity analysis. In *4th International Seminar on Railway Operations Research*. Italy Rome.
 17. She, X., & Yang, J. (2016). Petri net based functional safety verification framework on rail control system. *Metallurgical and mining industry*, (2), 78-84.
 18. Suraj, Z. (2012, September). Generalised Fuzzy Petri Nets for Approximate Reasoning in Decision Support Systems. In Louchka Popova-Zeugmann (Chair), *Concurrency, Specification and Programming CS&P'2012*. Proceedings of the 21th International Workshop on Concurrency, Specification and Programming, Berlin, Germany.
 19. Vanit-Anunchai, S. (2010, June). Modelling railway interlocking tables using coloured petri nets. *International Conference on Coordination Languages and Models*, vol 6116, 137-151. Springer, Berlin, Heidelberg.
 20. Zadeh, L. A. (1983). The role of fuzzy logic in the management of uncertainty in expert systems. *Fuzzy sets and systems*, 11(1-3), 199-227.
 21. Žarnay, M. (2004, February). *Use of Petri Net for Modelling of Traffic in Railway Stations*. Proceedings of international conference Infotrans, Pardubice.
 22. 王文俊. (2001)。認識 **Fuzzy**。新北市：全華科技圖書股份有限公司。
 23. 交通部臺灣鐵路管理局(無日期)。臺鐵統計資訊。2017 年 10 月 26 日，擷取自 <http://www.railway.gov.tw/tw/CP.aspx?sn=7474>。
 24. 李允中、王小璠、蘇木春 (2008)。模糊理論及其應用：修訂版。新北市：全華圖書。
 25. 李威勳 (2009)。都會區交通路網整體效能提升之研究。國立交通大學博士論文，新竹市。
 26. 張恩輔、黃笙珖、鍾志成 (2014 年 12 月)。臺鐵捷運化建設效益回顧與建議。林東盈(主持人)，樂活運輸，臺灣更好行。中華民國運輸學會 103 年年會暨學術論文國際研討會，南投縣。
 27. 陶冶中、洪敏琛 (104 年 12 月)。隨機配翠網路應用於臺鐵捷運化之運行調度模擬模式建構與分析。運輸計畫季刊，第四卷(4)，333-372。
 28. 馮正民、邱裕鈞 (2004)。研究分析方法。新竹：建都文化。
 29. 馮國臣 (2007)。模糊理論：基礎與應用。臺北縣：新文京開發。
 30. 楊立安 (2007)。臺灣鐵路運轉整理之研究。國立高雄第一科技大學運籌管理所碩士論文，高雄市。
 31. 臺灣鐵路管理局 行車規章上冊。
 32. 謝文隆、王家福. (1996)，行車計劃。臺灣鐵路管理局。
 33. 鍾志成、黃笙珖、李治綱、賴勇成、林國顯、劉昭榮 (2012)。捷運系統路線容量分析-以臺北捷運高運量系統板南線為例。運輸學刊，24(1)，113-134。

附錄一、行車計畫規則知識庫

規則 1：

IF 投入發車間隔及(AND)車種別組合，THEN 計算運轉情形歸屬程度。

規則 2：

IF 規則 1 成立，THEN 決定重新檢視行車計畫或(OR)模擬運轉。

規則 3：

IF 決定模擬運轉，THEN 啟動車站調節。

規則 4：

IF 規則 3 成立，THEN 車站先開通主正線及後開通副正線且機外停車。

規則 5：

IF 規則 3 成立，THEN 車站先開通副正線後開通主正線。

規則 6：

IF 規則 3 成立，THEN 車站先開通主正線後開通副正線。

規則 7：

IF 規則 3 成立，THEN 列車跟隨進站。

規則 8：

IF 規則 4 成立，THEN 行車計畫之擾動風險高。

規則 9：

IF 規則 5 或(OR)規則 6 成立，THEN 行車計畫之擾動風險中。

規則 10：

IF 規則 7 成立，THEN 行車計畫之擾動風險低。

註：

規則第 1 至 3 及 8 至 10 為本研究所建立；第 4 至 7 為節錄行車規章。

附錄二、臺中計畫演算過程

$Z = \max(i, j)$
 Subject to
 $60/(i+j) < 2.5$
 $H \rightarrow \alpha_h(h_x) \rightarrow FN, N \rightarrow \alpha_n(n_x) \rightarrow FH$
 $P0 = FN = \lambda_{hx}, P1 = FH = \lambda_{nx}, W_0 = w_0$ (W for weight)
 $(\lambda_{hx} + \lambda_{nx} * w_0) * 0.5 = \lambda$
 $f(T0) = \mu_0$
 $\lambda * \mu_0 = P2$
 If $P2 > \lambda_{threshold1}$
 $P2 * T1 = P3, f(T1) = \mu_1$
 Print(“重新檢視行車計畫”)
 Print(“T2 unfired”)
 Else:
 $P2 * f(T2) = P4, f(T2) = \mu_2$
 $P4 * f(T3) = P5, f(T3) = \mu_3$
 If $P5 > \lambda_{threshold4}$:
 $f(T5) = f(T6) = f(T8) = f(T9) = 0, f(T7) = \mu_7$
 $(P5 * f(T4)) = P6, f(T4) = \mu_4, P7 = P8 = 0$
 Else:
 If $\lambda_{threshold5} \leq P5 \leq \lambda_{threshold4}$:
 $f(T4) = f(T6) = f(T7) = f(T9) = 0, f(T8) = \mu_8$
 $(P5 * f(T5)) = P7, f(T5) = \mu_5, P6 = P8 = 0$
 Else:
 $f(T4) = f(T5) = f(T7) = f(T8) = 0, f(T9) = \mu_9$
 $(P5 * f(T6)) = P8, f(T6) = \mu_6, P6 = P7 = 0$
 $\text{Max}(P6, P7, P8) * \text{Max}(f(T7), f(T8), f(T9)) = P9$
 $(P9 + (P10 * w_{10})) * 0.5 * f(T10) = P11$
 $P11 * f(T11) = P12$
 If $P12 > \lambda_{threshold12}$:
 $f(T13) = f(T14) = f(T16) = f(T17) = 0, f(T15) = \mu_{15}$
 $(P12 * f(T12)) = P13, f(T12) = \mu_{12}, P14 = P15 = 0$
 Else:
 If $\lambda_{threshold13} \leq P12 \leq \lambda_{threshold12}$:
 $f(T12) = f(T14) = f(T15) = f(T17) = 0, f(T16) = \mu_{16}$
 $(P12 * f(T13)) = P14, f(T13) = \mu_{13}, P13 = P15 = 0$
 Else:
 $f(T12) = f(T13) = f(T15) = f(T16) = 0, f(T17) = \mu_{17}$
 $(P12 * f(T14)) = P15, f(T14) = \mu_{16}, P13 = P14 = 0$
 $\text{Max}(P13, P14, P15) * \text{Max}(f(T15), f(T16), f(T17)) = P16$

```

(P16+(P17 * w17))*0.5*f(T18) = P18
(P18+(P19 * w19))*0.5*f(T19) = P20
P20 * f(T20) = P21
If P21 > λthreshold21:
    f(T22) = f(T23) = f(T25) = f(T26) = 0 , f(T24) = μ24
    (P21 * f(T21))= P22 , f(T12) = μ12 , P23 = P24 = 0
Else:
    If λthreshold22 <= P21 <= λthreshold21:
        f(T21) = f(T23) = f(T24) = f(T26) = 0 , f(T25) = μ25
        (P21*f(T22)) = P23, f(T22) = μ22 , P22 = P24 = 0
    Else:
        f(T22) = f(T23) = f(T24) = f(T25) = 0 , f(T26) = μ26
        (P21* f(T23)) = P24 , f(T23) = μ23 , P22 = P23 = 0
    Max(P22,P23,P24)*Max(f(T24),f(T25),f(T26)) = P25
    (P25+(P26*w26))*0.5*f(T27) = P27
    P27*f(T28) = P28
    If P28 > λthreshold29:
        f(T30) = f(T31) = f(T33) = f(T34) = 0 , f(T32) = μ32
        (P28 * f(T29))= P29 , f(T29) = μ29 , P30 = P31 = 0
    Else:
        If λthreshold30 <= P28 <= λthreshold29:
            f(T29) = f(T31) = f(T32) = f(T34) = 0 , f(T33) = μ33
            (P28*f(T30)) = P30, f(T30) = μ30 , P29 = P31 = 0
        Else:
            f(T29) = f(T30) = f(T32) = f(T33) = 0 , f(T34) = μ34
            (P28* f(T31)) = P31 , f(T31) = μ31 , P29 = P30 = 0
        Max(P28,P29,P30)*Max(f(T32),f(T33),f(T34)) = P32
        (P32 + (P33*w33))*0.5 * T35 = P34
        (P34 + (P35*w35))*0.5 * T36 = P36
        If P36 > λthreshold37:
            (P36 * f(T37))= P37
            Print("擾動風險高")
        Else:
            If λthreshold38 <= P36 <= λthreshold37:
                (P36*f(T38)) = P38
                Print("已達路線容量理論值")
            Else:
                (P26* f(T39)) = P39
                Print("可再加開列車")
End

```

附錄三、臺中計畫模型(PNs)各節點代表意義

一、位置節點(place)之代表意義：

位置節點	代表意義
P0	列車種組合(對號列車數：通勤列車數)
P1	列車發車時隔
P2	號誌時隔(歸屬度)判斷
P3	重新檢視行車計畫
P4	模擬運轉
P5	進豐原站
P6	豐原站進站號誌機外方等待路線
P7	豐原站適宜股道待避列車
P8	豐原站列車跟隨進站
P9	出豐原站
P10	進栗林站
P11	站間(栗林*=潭子間)運轉情形
P12	進潭子站
P13	潭子站進站號誌機外方等待路線
P14	潭子站適宜股道待避列車
P15	潭子站列車跟隨進站
P16	出潭子站
P17	進頭家厝站
P18	站間(頭家厝*=松竹*間)運轉情形
P19	進松竹站
P20	站間(松竹*=太原間)運轉情形
P21	進太原站
P22	太原站進站號誌機外方等待路線
P23	太原站適宜股道待避列車
P24	太原站列車跟隨進站
P25	出太原站
P26	進精武站
P27	站間(精武*=臺中間)運轉情形
P28	進臺中站
P29	臺中站進站號誌機外方等待路線
P30	臺中站適宜股道待避列車
P31	臺中站列車跟隨進站
P32	出臺中站

位置節點	代表意義
P33	進五權站
P34	站間(五權*=大慶間)運轉情形
P35	進大慶站
P36	臺中計畫運轉情形
P37	無法依計畫時刻運轉
P38	達路線容量
P39	可再加開列車

*表示第 2 階段啟用之通勤車站，站間影響情形不同於第 1 階段。

二、移轉節點(transition)之代表意義

位置節點	代表意義
T0	歸屬程度模型
T1	小於號誌限制之歸屬度
T2	大於號誌限制之歸屬度
T3	啟動車站(豐原)調節
T4	路塞
T5	變更運轉順序
T6	由 CTC 預定進路
T7	運轉整理介入
T8	對號列車先行
T9	CTC 設定跟隨進站
T10	計算擾動程度(栗林=潭子間)
T11	啟動車站(潭子)調節
T12	路塞
T13	變更運轉順序
T14	由 CTC 預定進路
T15	運轉整理介入
T16	對號列車先行
T17	CTC 設定跟隨進站
T18	計算擾動程度(頭家厝=松竹間)
T19	計算擾動程度(松竹=太原間)
T20	啟動車站(太原)調節
T21	路塞
T22	變更運轉順序
T23	由 CTC 預定進路
T24	運轉整理介入
T25	對號列車先行

位置節點	代表意義
T26	CTC 設定跟隨進站
T27	計算擾動程度(精武=臺中間擾動程度)
T28	啟動車站(臺中)調節
T29	路塞
T30	變更運轉順序
T31	由 CTC 預定進路
T32	運轉整理介入
T33	對號列車先行
T34	CTC 設定跟隨進站
T35	計算擾動程度(五權=大慶間)
T36	計算擾動程度(臺中計畫)
T37	擾動風險高
T38	擾動風險中
T39	擾動風險低



附錄四、臺中計畫-行車計畫規則知識庫

規則 1：

IF 投入發車間隔及(AND)車種別組合，THEN 計算運轉情形歸屬程度。

規則 2：

IF 規則 1 成立，THEN 決定重新檢視行車計畫或(OR)模擬運轉。

規則 3：

IF 決定模擬運轉，THEN 列車進豐原站。

規則 4：

IF 列車進豐原站，視運轉情形，THEN 列車進站號誌機外方停車。

規則 5：

IF 列車進豐原站，視運轉情形，THEN 列車適宜股道待避列車。

規則 6：

IF 列車進豐原站，視運轉情形，THEN 列車跟隨進站。

規則 7：

IF 規則 4 成立，THEN 列車出豐原站。

規則 8：

IF 規則 5 成立，THEN 列車出豐原站。

規則 9：

IF 規則 6 成立，THEN 列車出豐原站。

規則 10：

IF 考量列車出豐原站及列車進栗林站，THEN 決定站間(栗林*=潭子)運轉情形。

規則 11：

IF 評估站間運轉情形啟動調節，THEN 列車進入潭子站。

規則 12：

IF 列車進入潭子站，視運轉情形，THEN 列車進站號誌機外方停車。

規則 13：

IF 列車進潭子站，視運轉情形，THEN 列車適宜股道待避列車。

規則 14：

IF 列車進潭子站，視運轉情形，THEN 列車跟隨進站。

規則 15：

IF 規則 12 成立，THEN 列車出潭子站。

規則 16：

IF 規則 13 成立，THEN 列車出潭子站。

規則 17：

IF 規則 14 成立，THEN 列車出潭子站。

規則 18：

IF 視列車出潭子站及列車進頭家厝站運轉情形，THEN 決定站間(頭家厝=松竹)運轉情形。

規則 19：

IF 視站間運轉情形及列車進松竹站運轉情形，THEN 決定站間(松竹=太原)運轉情形。

規則 20：

IF 考量站間運轉情形啟動調節，THEN 列車進太原站。

規則 21：

IF 列車進入太原站，視運轉情形，THEN 列車進站號誌機外方停車。

規則 22：

IF 列車進太原站，視運轉情形，THEN 列車適宜股道待避列車。

規則 23：

IF 列車進太原站，視運轉情形，THEN 列車跟隨進站。

規則 24：

IF 規則 21 成立，THEN 列車出太原站。

規則 25：

IF 規則 22 成立，THEN 列車出太原站。

規則 26：

IF 規則 23 成立，THEN 列車出太原站。

規則 27：

IF 視列車出太原站及列車進精武站運轉情形，THEN 決定站間(精武=臺中)運轉情形。

規則 28：

IF 評估站間運轉情形啟動調節，THEN 列車進臺中站。

規則 29：

IF 列車進臺中站，視運轉情形，THEN 列車進站號誌機外方停車。

規則 30：

IF 列車進臺中站，視運轉情形，THEN 列車適宜股道待避列車。

規則 31：

IF 列車進臺中站，視運轉情形，THEN 列車跟隨進站。

規則 32：

IF 規則 29 成立，THEN 列車出臺中站。

規則 33：

IF 規則 30 成立，THEN 列車出臺中站。

規則 34：

IF 規則 31 成立，THEN 列車出臺中站。

規則 35：

IF 視列車出臺中站及列車進五權站運轉情形，THEN 決定站間(五權=大慶)運轉情形。

規則 36：

IF 視站間運轉情形及列車進大慶站運轉情形，THEN 計算臺中計畫運轉情形。

規則 37：

IF 規則 36 成立，THEN 無法依計畫時刻運轉。

規則 38：

IF 規則 36 成立，THEN 達路線容量值。

規則 39：

IF 規則 36 成立，THEN 可再加開列車。