

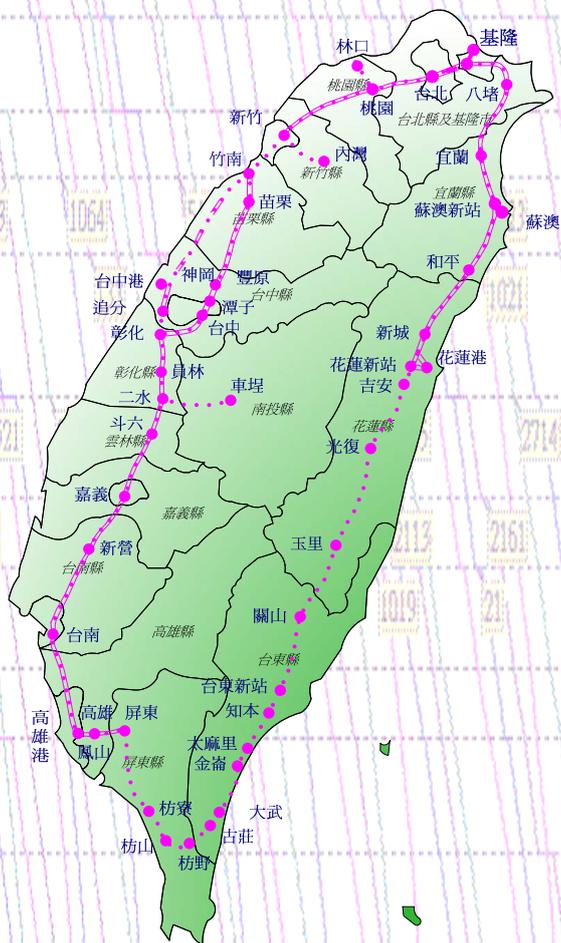


交通部運輸研究所

臺鐵車輛排程

最適化之研究

期末簡報



財團法人中興工程顧問社

中華民國94年12月2日

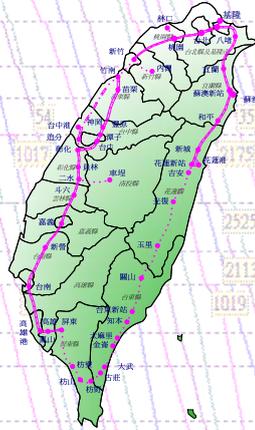
基隆
八堵
沙撈越
南港
松山
台北
萬華
板橋
樹林
山佳
鶯歌
桃園
內壢
中壢
埔心
楊梅
富岡
湖口
新豐
竹北
新竹

10:00 10:30 11:00 11:30 12:00 12:30 13:00 13:30 14:00 14:30 15:00 15:30 16:00 16:30 17:00 17:30 18:00



交通部運輸研究所 臺鐵車輛排程最適化之研究

期末簡報



財團法人中興工程顧問社

中華民國94年12月2日

1

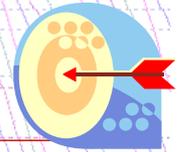
簡報內容

- 壹、前言
- 貳、兩階段求解的概念
- 參、基因演算法求解程序
- 肆、最佳到開時間求解模式
- 伍、模式驗證與參數敏感度分析
- 陸、案例分析
- 柒、結論與後續研究建議



2

壹、前言之一



研究動機

- 👉 列車排點為運轉計畫的最核心作業
- 👉 目前臺鐵列車排班系統的求解能力與最適化尚無法達到預期的目標

研究目的

- 👉 探討臺鐵列車排班的影響因素
- 👉 釐清排班問題的架構與特性
- 👉 建立列車排點最適化模式並發展初步的求解方法

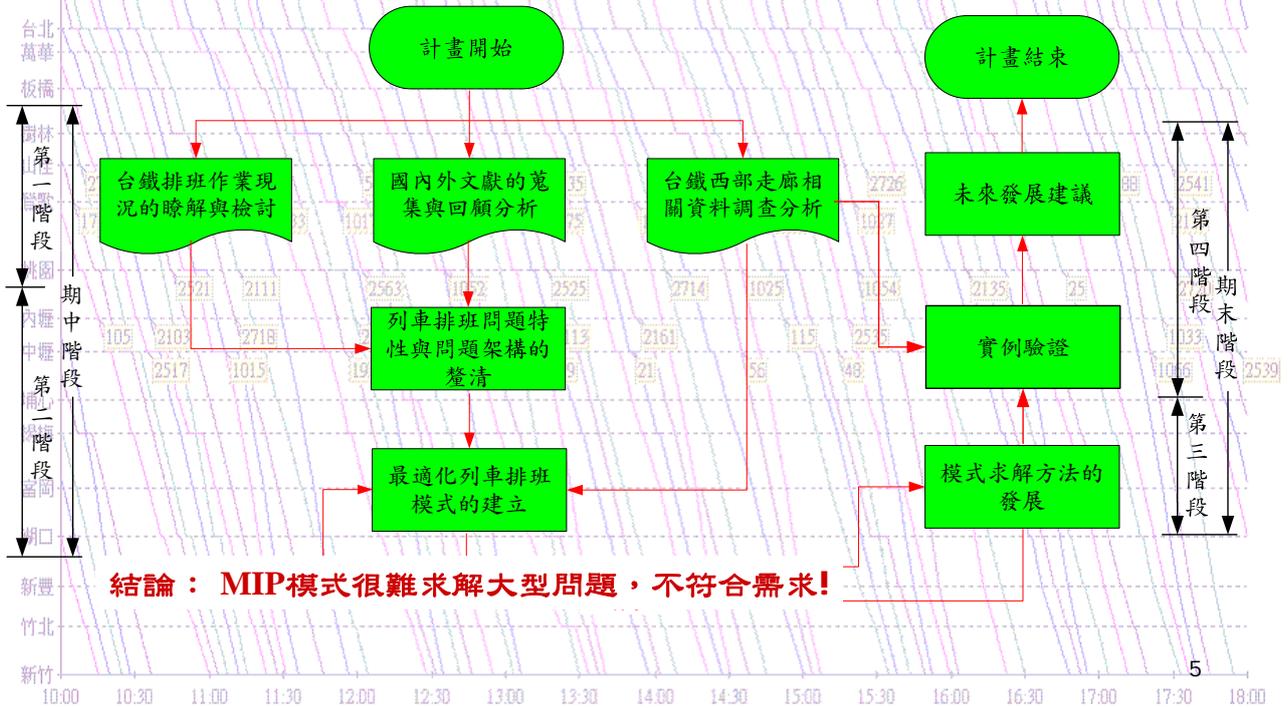
壹、前言之二

研究內容

- 👉 相關文獻的回顧及分析
- 👉 臺鐵西部走廊路線設施調查分析
- 👉 臺鐵現有班表及排班方法的檢討
- 👉 最適化排班模式之建立與求解
- 👉 實例驗證與案例分析



壹、前言之三



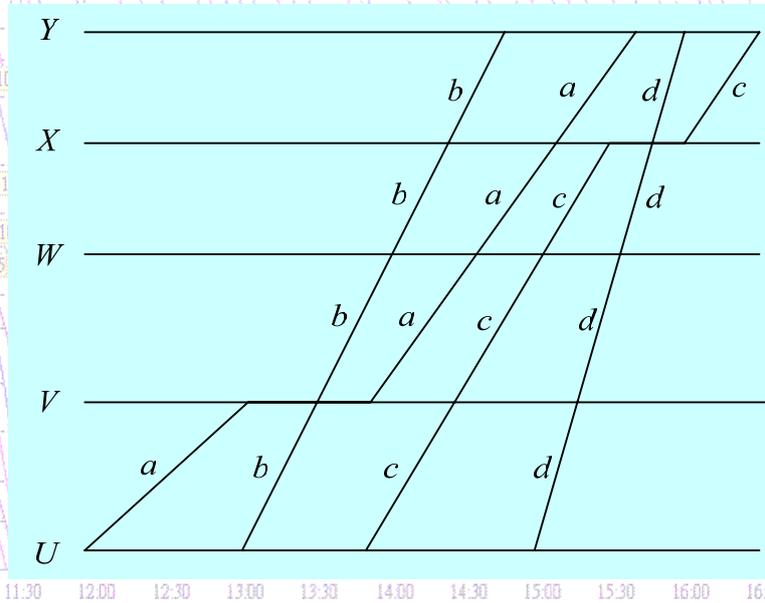
壹、前言之四

MIP求解列車排點之效率

| 列車數 | 二元變數個數 | 分支定限法最大節點數 | 限制式個數 | 運算時間(sec) |
|-----|--------|--------------------------|-------|------------|
| 2 | 67 | 2.95148×10^{62} | 366 | 0.125 |
| 3 | 201 | 6.42775×10^{60} | 819 | 0.516 |
| 4 | 402 | 2.0658×10^{21} | 1452 | 2.500 |
| 5 | 670 | 9.7978×10^{201} | 2265 | 16.094 |
| 6 | 1005 | 6.8577×10^{302} | 3258 | 86.031 |
| 7 | 1407 | ◎ | 4431 | 122.781 |
| 8 | 1876 | ◎ | 5784 | 1001.625 |
| 9 | 2412 | ◎ | 7317 | 2241.875 |
| 10 | 3015 | ◎ | 9030 | 20865.307 |
| 11 | 3685 | ◎ | 10923 | 118658.219 |
| 12 | 4422 | ◎ | 12996 | ☆ |
| 13 | 5226 | ◎ | 15249 | ☆ |
| 14 | 6097 | ◎ | 17682 | ☆ |
| 15 | 7035 | ◎ | 20295 | ☆ |

貳、兩階段求解的概念之一

□ 一組『列車序的組合』及其『對應的到開時間』為列車排點的一組解



貳、兩階段求解的概念之二

□ 對混合整數規劃而言，二元變數主要是用來描述列車先後順序的關係，但是二元變數的組合中有許多是無意義的

| 情節 | ρ_{12}^i | ρ_{13}^i | ρ_{23}^i | 先行 | 續行 | 尾隨 |
|----|---------------|---------------|---------------|------|------|------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 列車 1 | 列車 2 | 列車 3 |
| 2 | 1 | 1 | 0 | 列車 1 | 列車 3 | 列車 2 |
| 3 | 1 | 0 | 0 | 列車 3 | 列車 1 | 列車 2 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 列車 3 | 列車 2 | 列車 1 |
| 5 | 0 | 1 | 1 | 列車 2 | 列車 1 | 列車 3 |
| 6 | 0 | 0 | 1 | 列車 2 | 列車 3 | 列車 1 |
| 7 | 1 | 0 | 1 | × | × | × |
| 8 | 0 | 1 | 0 | × | × | × |

貳、兩階段求解的概念之三

兩階段求解

- 外層決定『有意義的二元變數組合』，即列車序
- 內層決定『列車於各車站的到離時間』

兩階段求解的效益

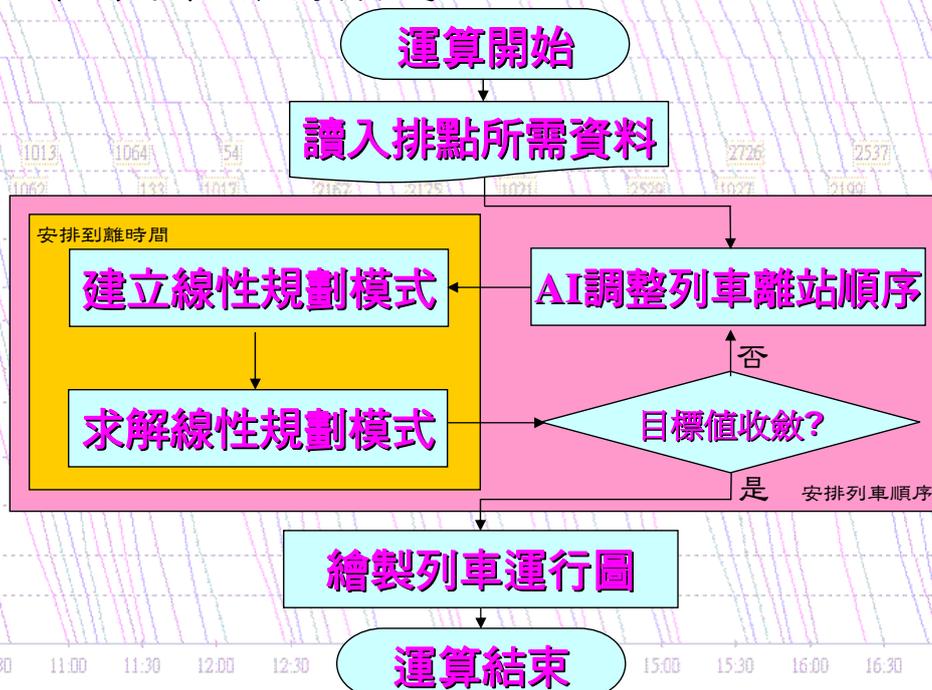
- 縮小求解空間

5列車5車站為例： 2.5353×10^{30} V.S. 2.0736×10^8

- 有效縮小數學模式的規模

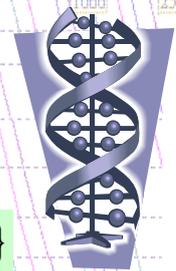
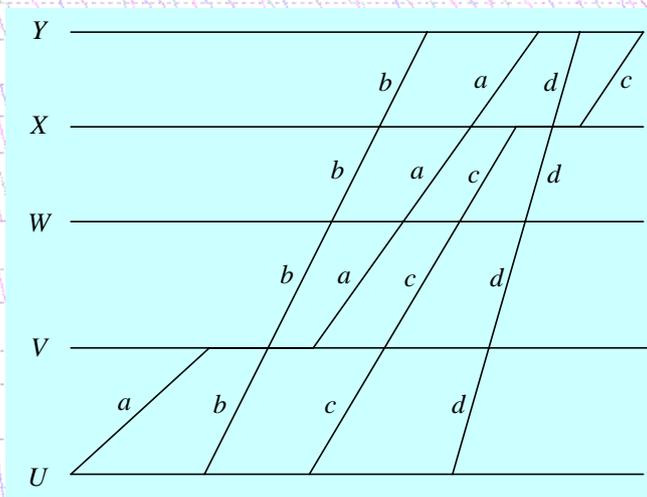
貳、兩階段求解的概念之四

兩階段求解的概念



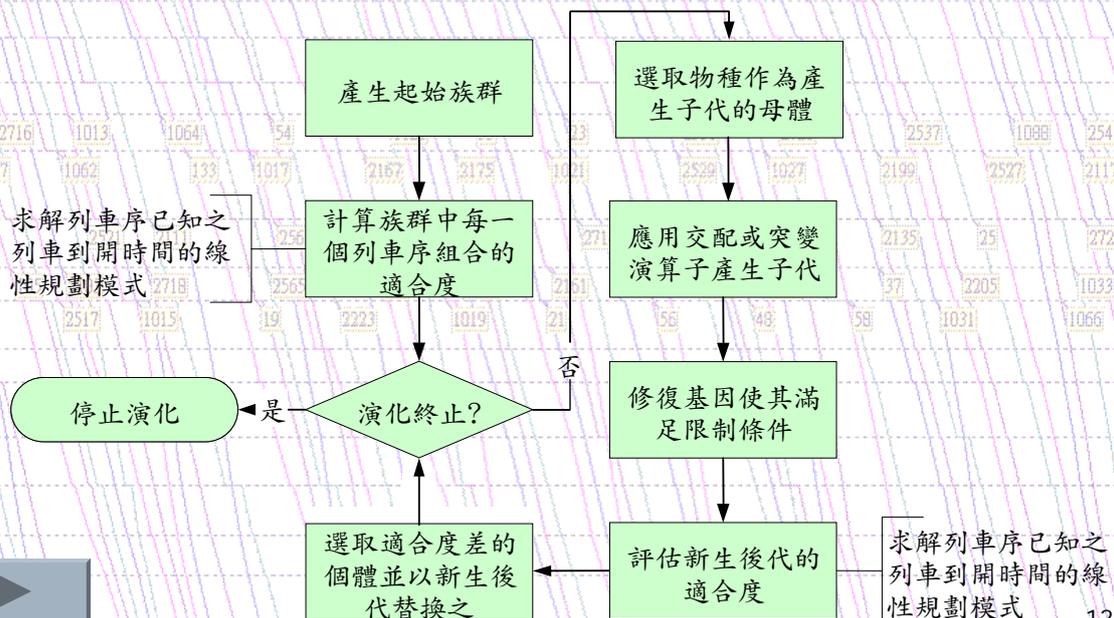
參、基因演算法求解程序之一

基因編碼



參、基因演算法求解程序之二

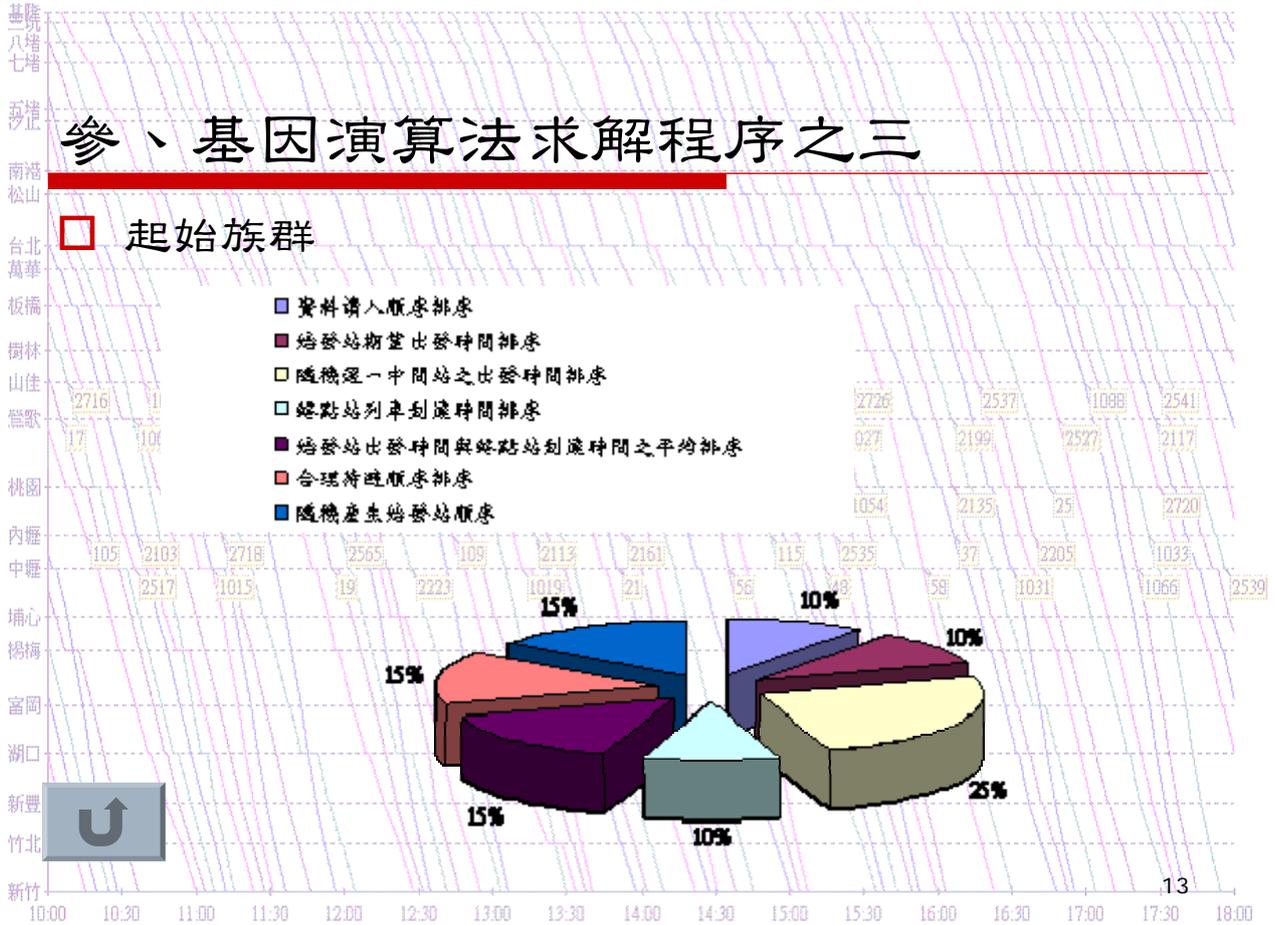
求解流程



參、基因演算法求解程序之三

起始族群

- 資料讀入順序排序
- 始發站期望出發時間排序
- 隨機選一中間站之出發時間排序
- 終點站列車到達時間排序
- 始發站出發時間與終點站到達時間之平均排序
- 合理待避順序排序
- 隨機產生始發站順序

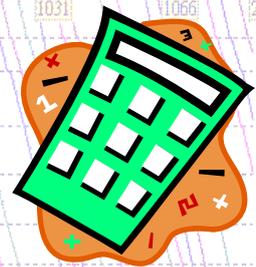
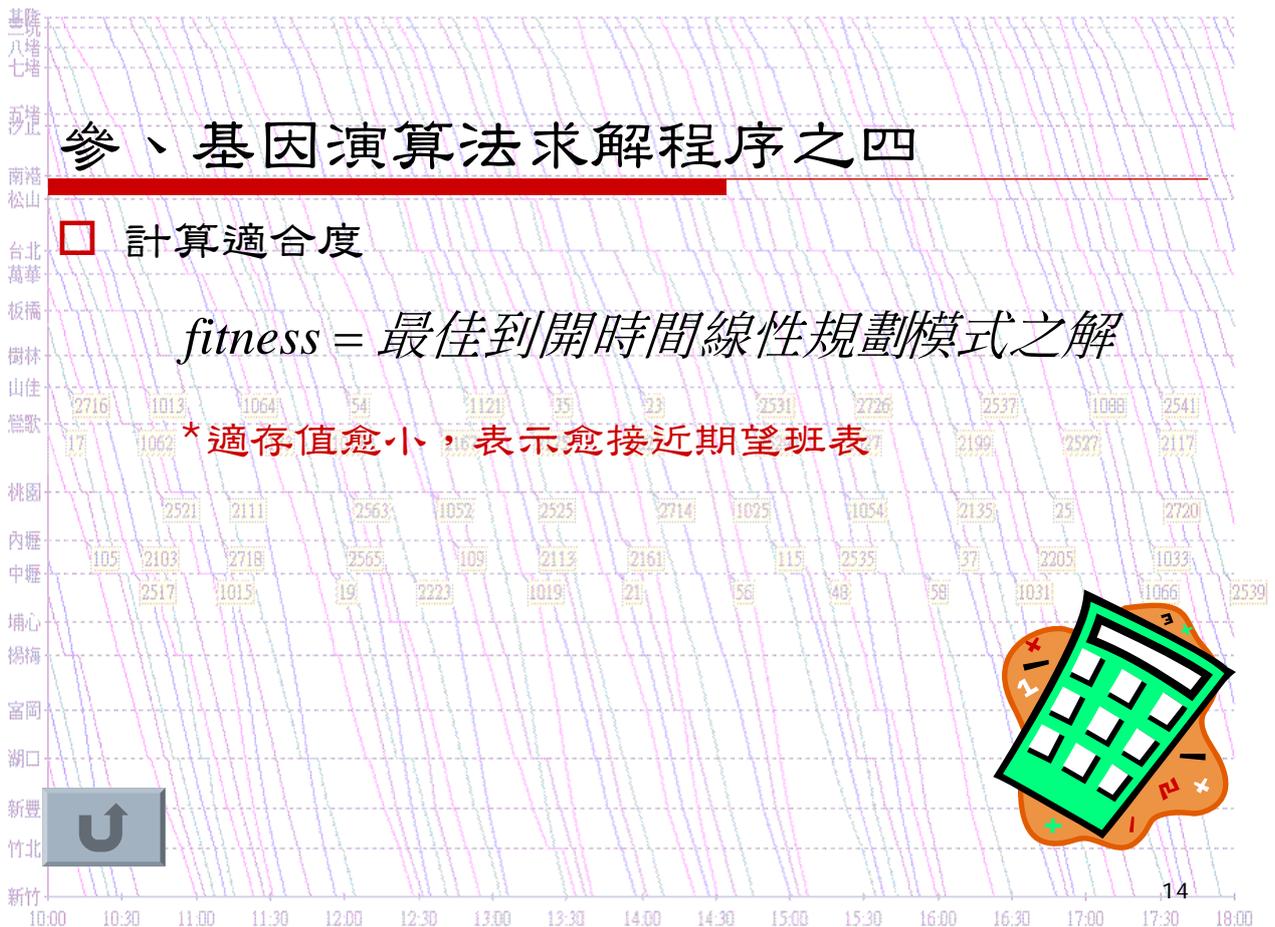


參、基因演算法求解程序之四

計算適合度

$fitness = \text{最佳到開時間線性規畫模式之解}$

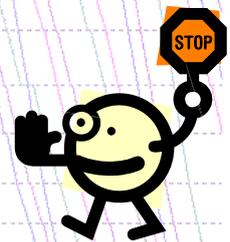
* 適存值愈小，表示愈接近期望班表



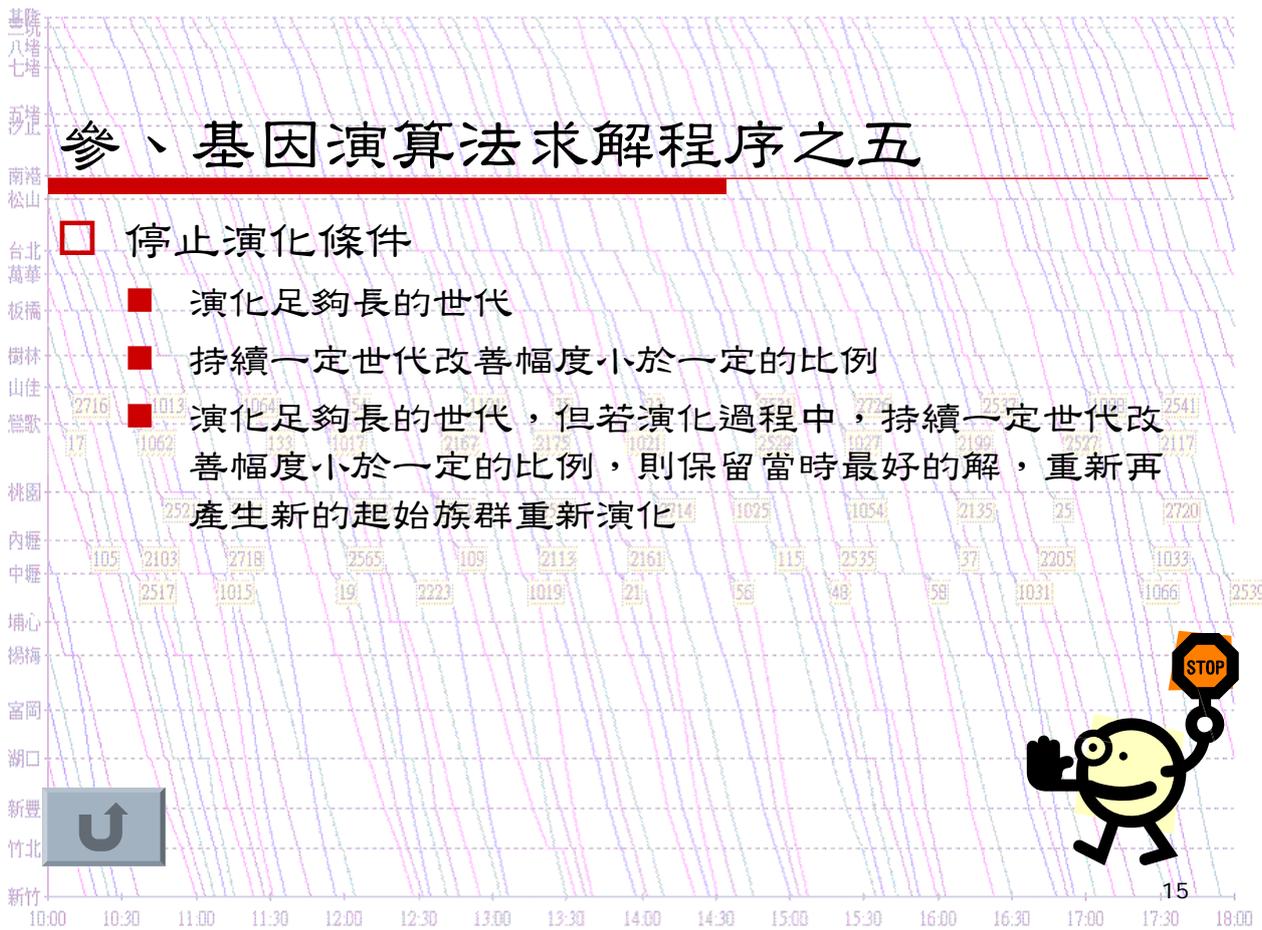
參、基因演算法求解程序之五

□ 停止演化條件

- 演化足夠長的世代
- 持續一定世代改善幅度小於一定的比例
- 演化足夠長的世代，但若演化過程中，持續一定世代改善幅度小於一定的比例，則保留當時最好的解，重新再產生新的起始族群重新演化



15



參、基因演算法求解程序之六

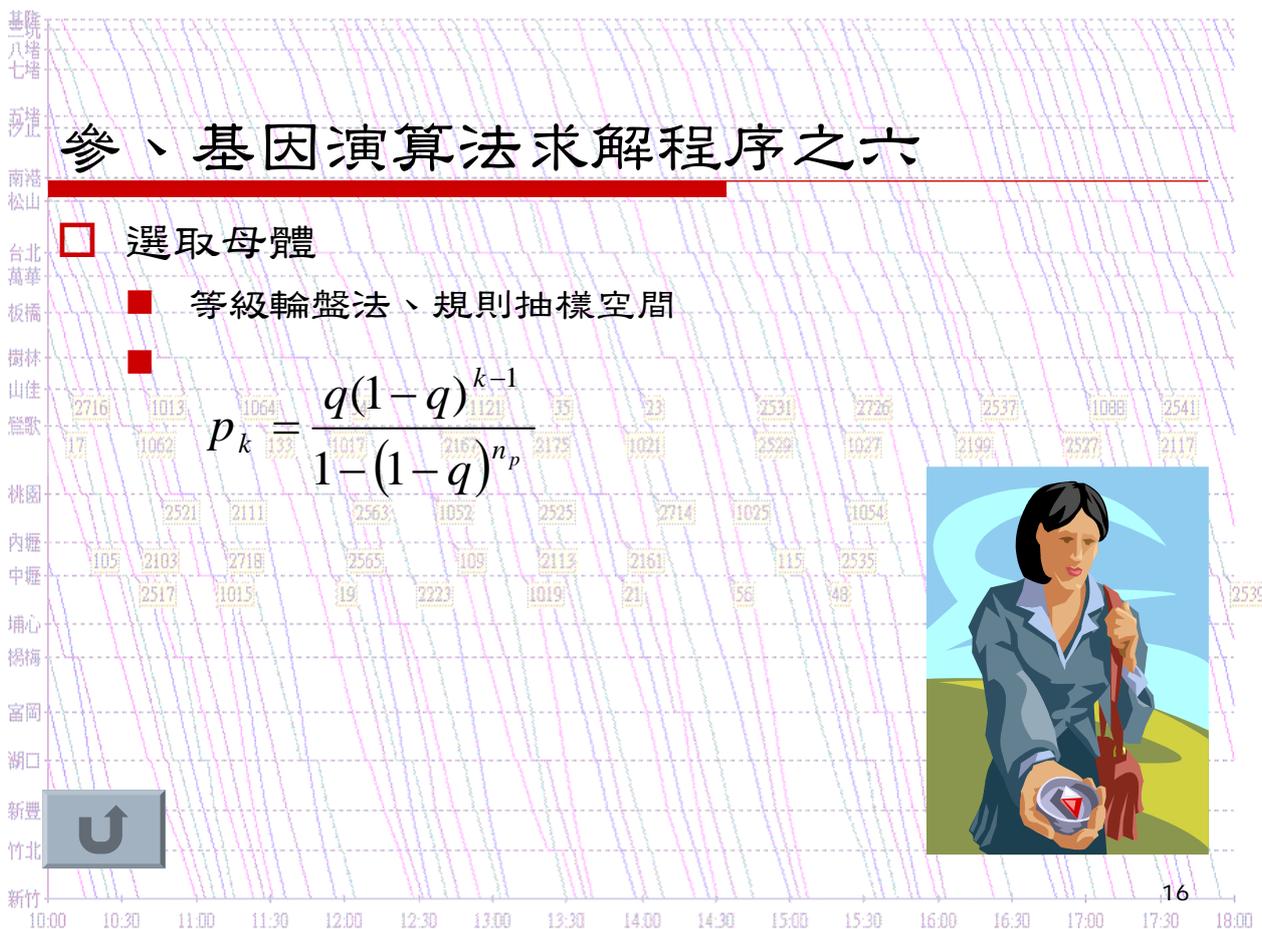
□ 選取母體

- 等級輪盤法、規則抽樣空間

$$p_k = \frac{q(1-q)^{k-1}}{1-(1-q)^{n_p}}$$



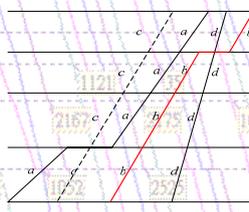
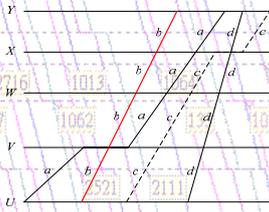
16



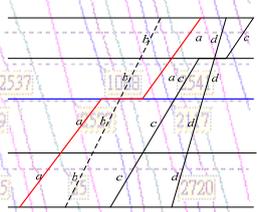
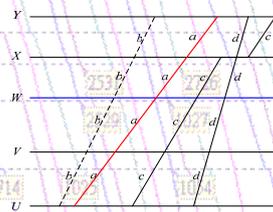
參、基因演算法求解程序之七

交配與突變

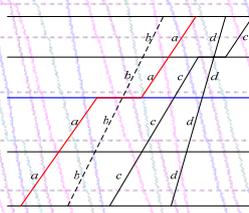
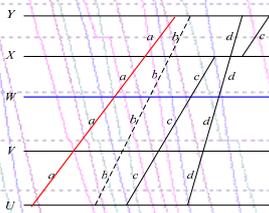
第一型突變



第三型突變



第二型突變

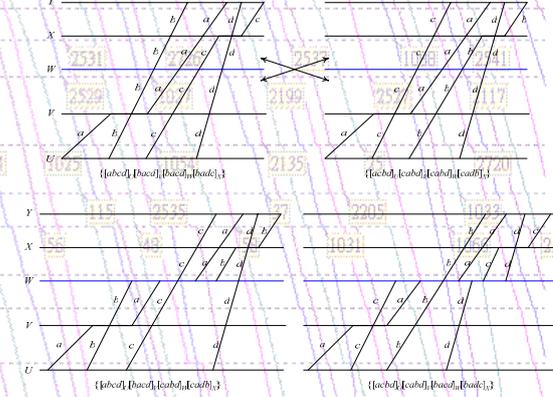
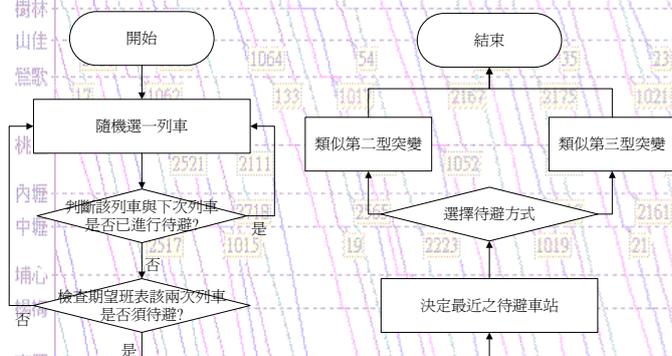


參、基因演算法求解程序之八

交配與突變

第四型突變 = 二型 + 三型

第一型交配



參、基因演算法求解程序之九

□ 基因修復

■ 軌道容量檢查數學式

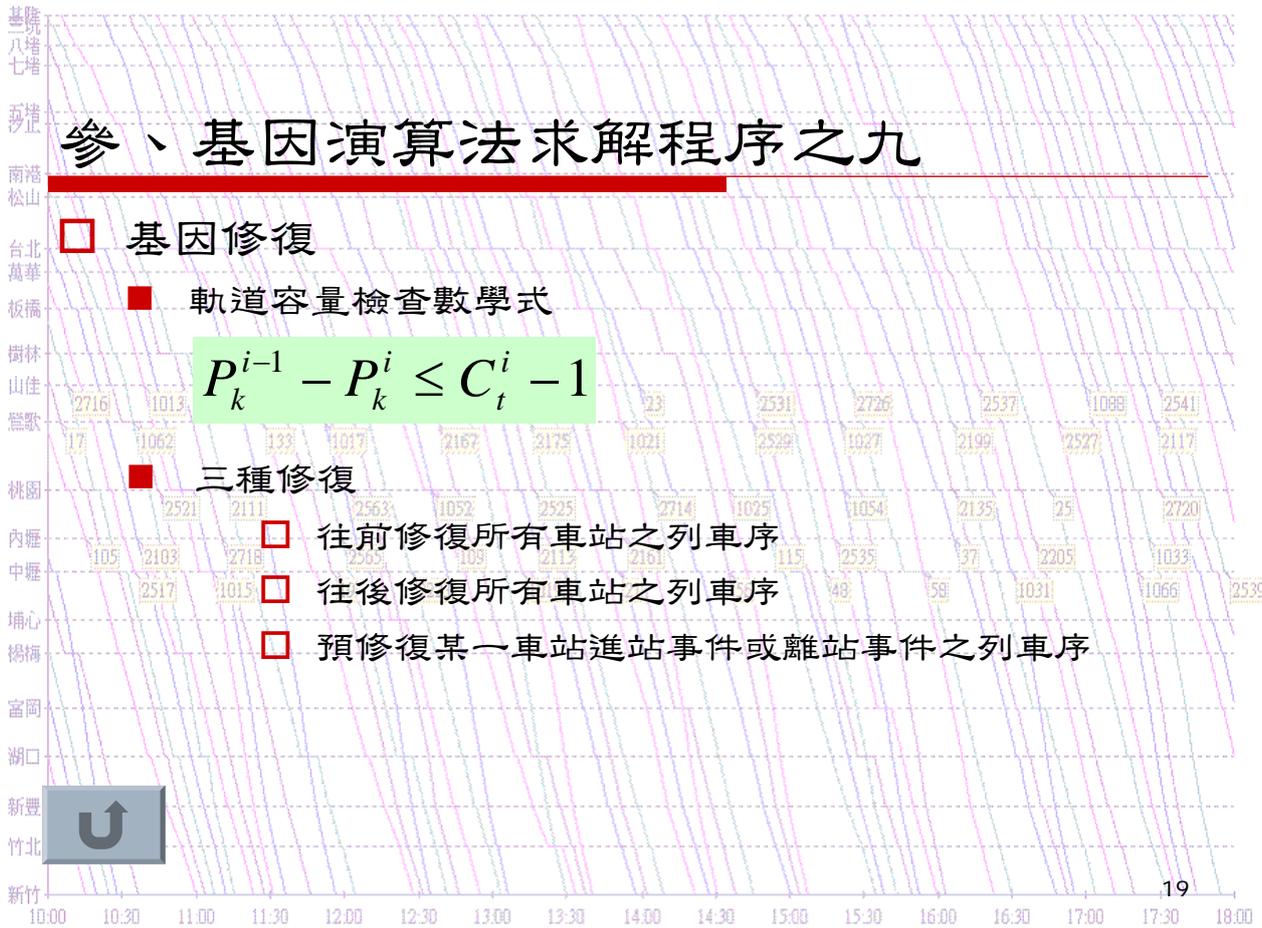
$$P_k^{i-1} - P_k^i \leq C_t^i - 1$$

■ 三種修復

□ 往前修復所有車站之列車序

□ 往後修復所有車站之列車序

□ 預修復某一車站進站事件或離站事件之列車序



參、基因演算法求解程序之十

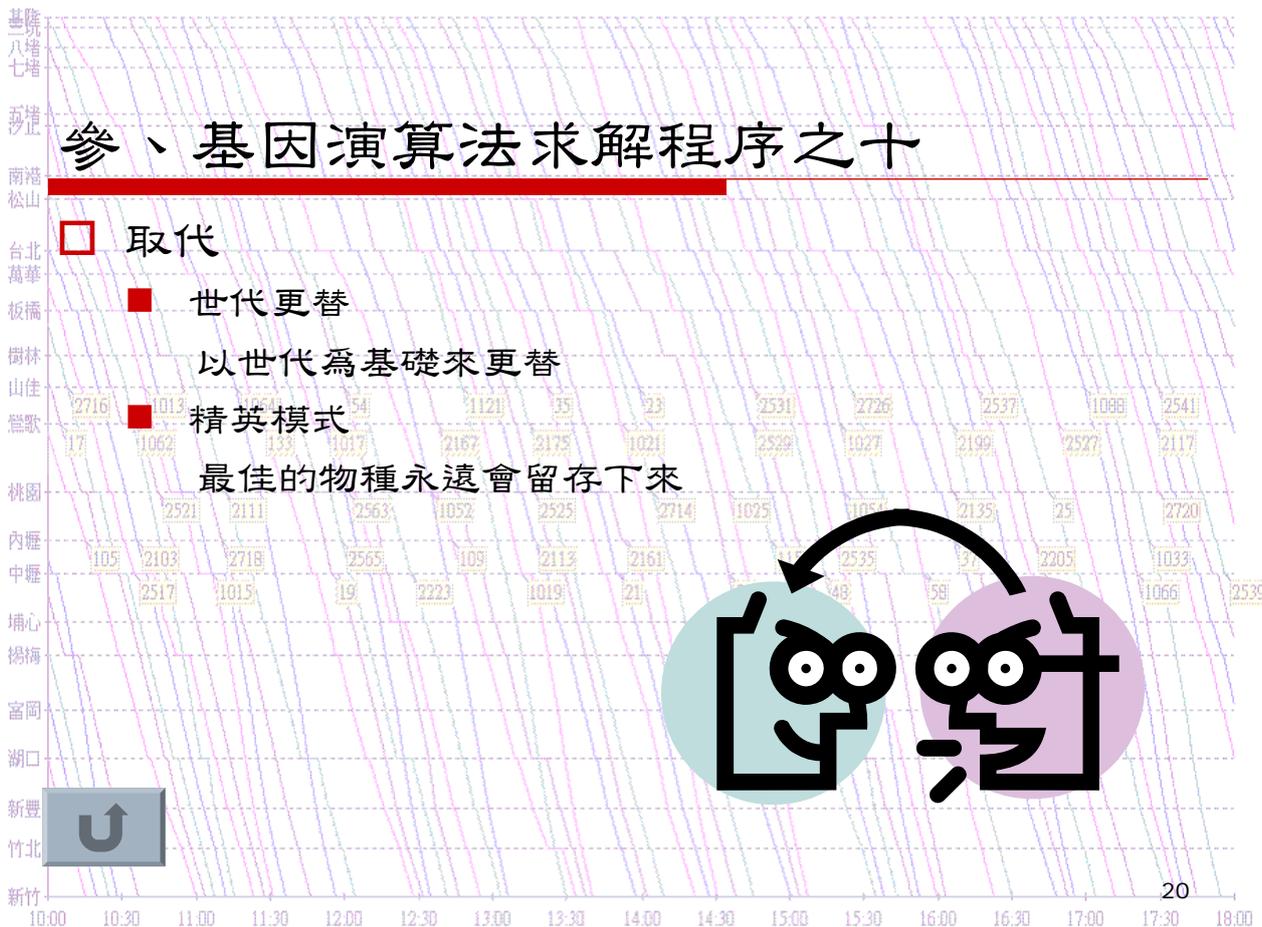
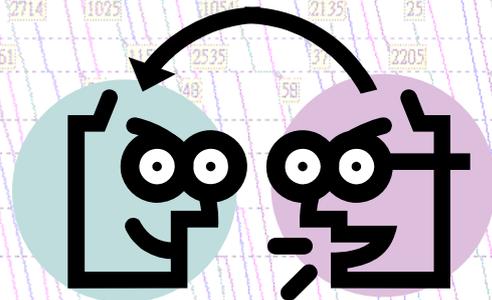
□ 取代

■ 世代更替

以世代為基礎來更替

■ 精英模式

最佳的物種永遠會留存下來



肆、最佳到開時間求解模式之一

目標函數

- 與期望班表差距最小

限制式

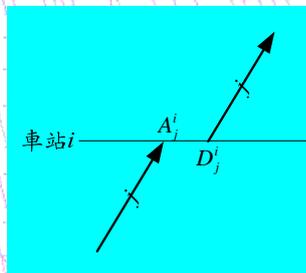
- 排班時間限制 --- 始發站最早、期望與最晚出發時間
- 列車續進限制 --- 採用站間運轉時間為定值
- 停站時間限制 --- 考慮最短與最長停站時間
- 運轉時隔限制 --- 離站、進站與同股道到開時隔
- 站間軌道限制 --- 站間不容許追越
- ~~站內軌道容量限制~~ --- 符合實際車站可用軌道數限制

21

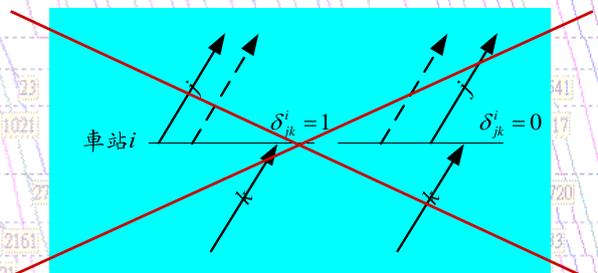
肆、最佳到開時間求解模式之二

決策變數

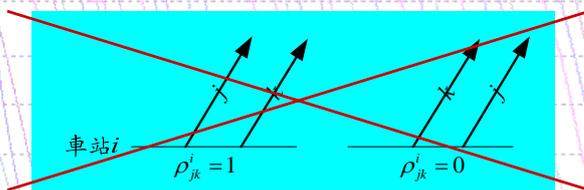
- 到站時刻與離站時刻



- 到離先後順序



- 離站先後順序

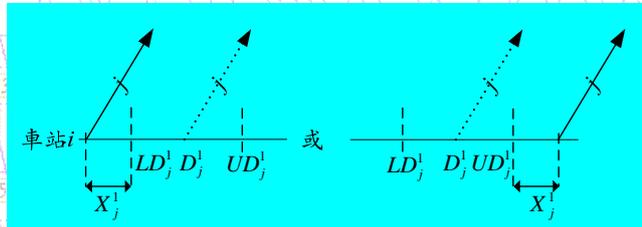


22

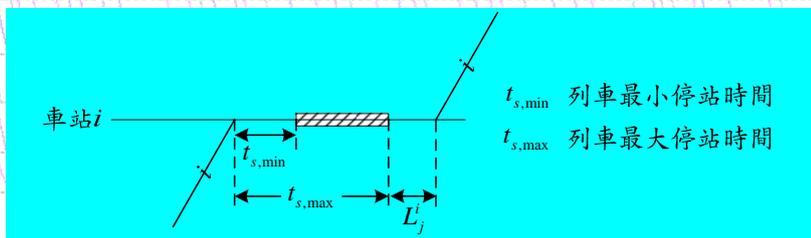
肆、最佳到開時間求解模式之三

□ 決策變數

□ 出發時間的差值



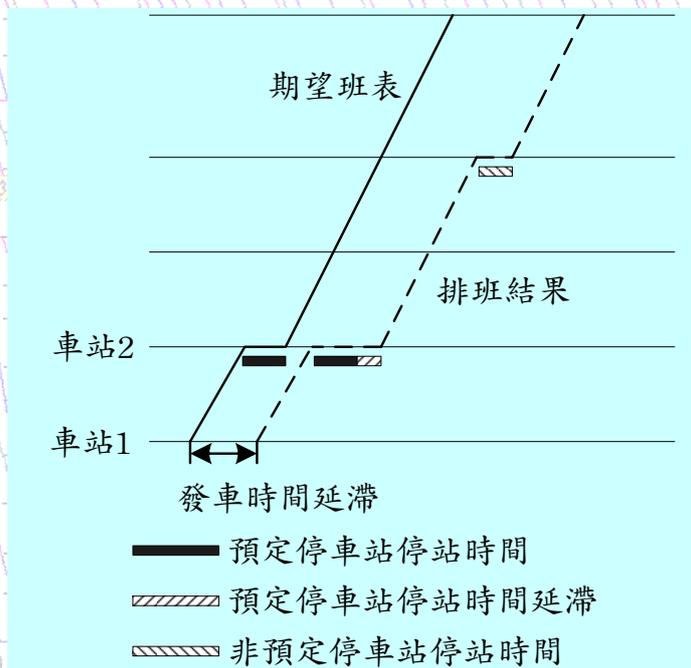
□ 最長容許停站時間的差值



23

肆、最佳到開時間求解模式之四

□ 目標函數



24

肆、最佳到開時間求解模式之五

目標函數

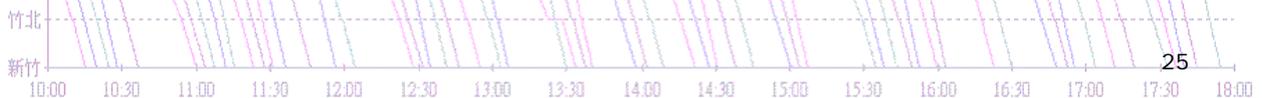
$$Min Z = \sum_{j=1}^n ka_j |D_j^1 - ED_j^1| + \sum_{j=1}^n [kb_j \sum_{i \in P_j} (Dw_j^i - EDw_j^i) + kc_j \sum_{i \in NP_j} Dw_j^i] + M(\sum_{j=1}^n X_j^1 + \sum_{j=1}^n \sum_{i=2}^{m-1} L_j^i)$$

$$E_j \geq 0$$

$$E_j \geq D_j^1 - ED_j^1$$

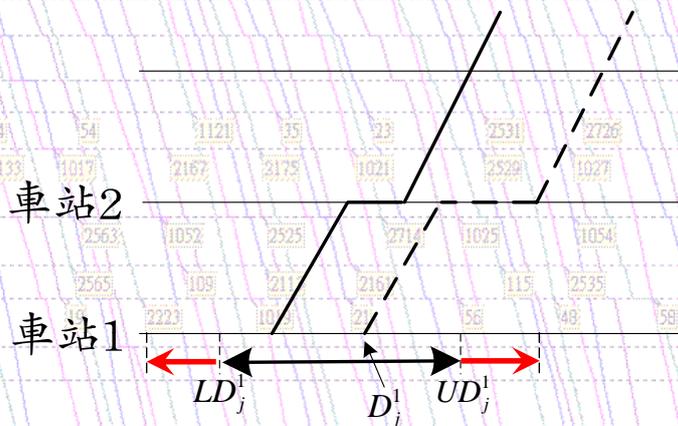
$$E_j \geq ED_j^1 - D_j^1$$

$$Min Z = \sum_{j=1}^n ka_j E_j + \sum_{j=1}^n [kb_j \sum_{i \in P_j} (Dw_j^i - EDw_j^i) + kc_j \sum_{i \in NP_j} Dw_j^i] + M(\sum_{j=1}^n X_j^1 + \sum_{j=1}^n \sum_{i=2}^{m-1} L_j^i)$$



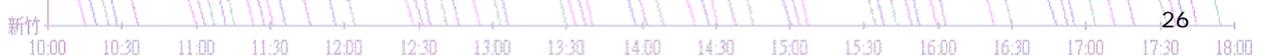
肆、最佳到開時間求解模式之六

排班時間限制式



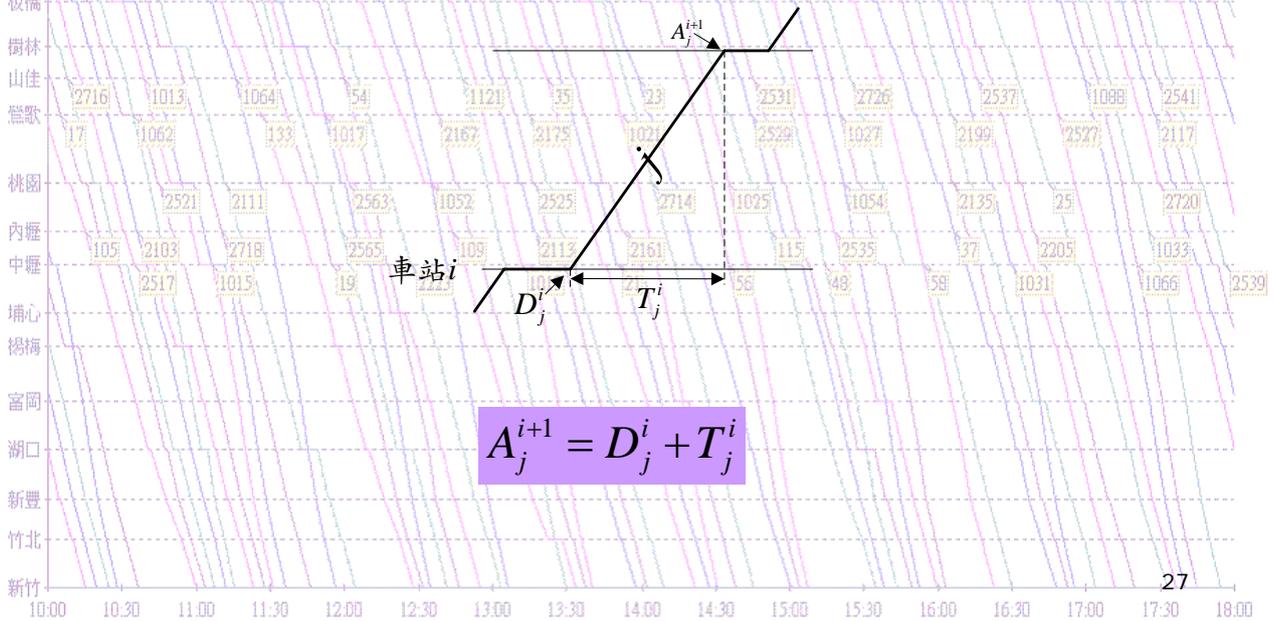
$$D_j^1 \geq LD_j^1 - X_j^1$$

$$D_j^1 \leq UD_j^1 + X_j^1$$



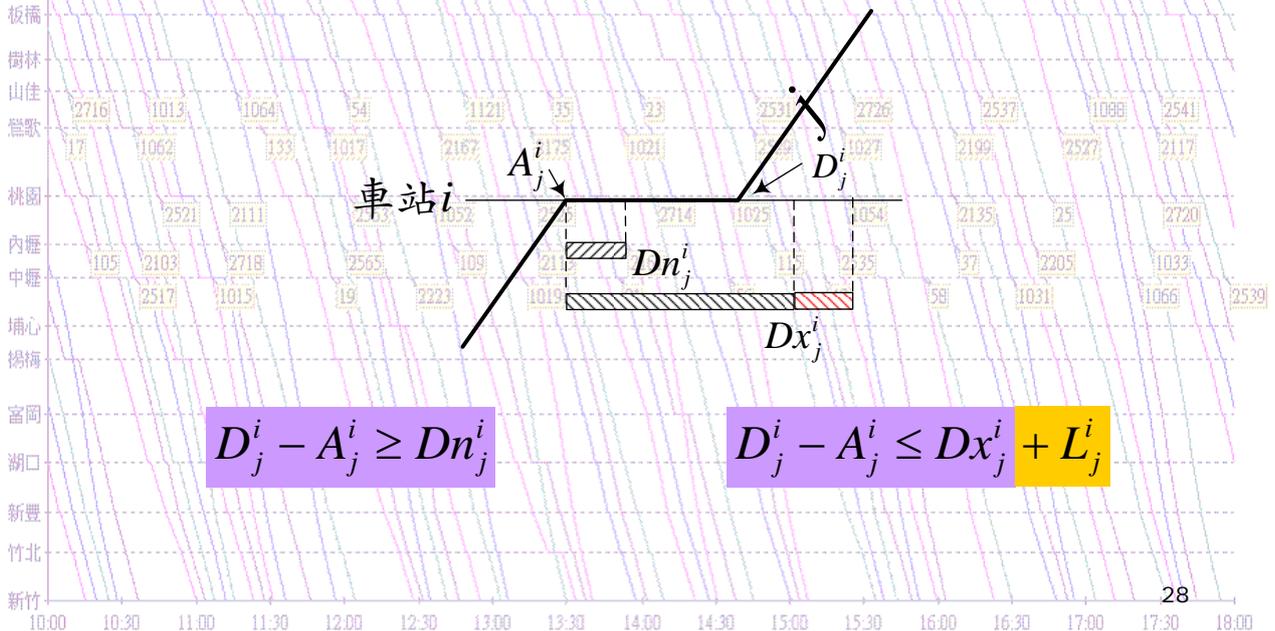
肆、最佳到開時間求解模式之七

□ 列車續進限制式



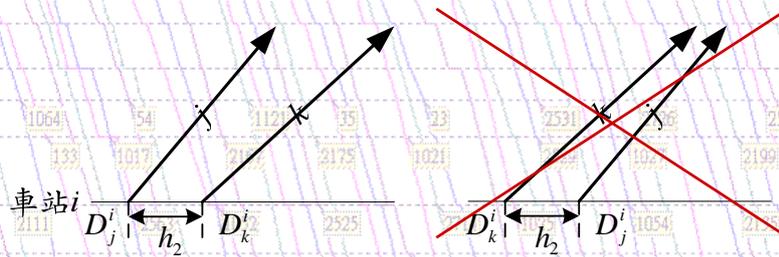
肆、最佳到開時間求解模式之八

□ 停站時間限制式



肆、最佳到開時間求解模式之九

□ 離站時隔限制式



$$D_k^i - D_j^i \geq h_2 = M(1 - \rho_{jk}^i)$$

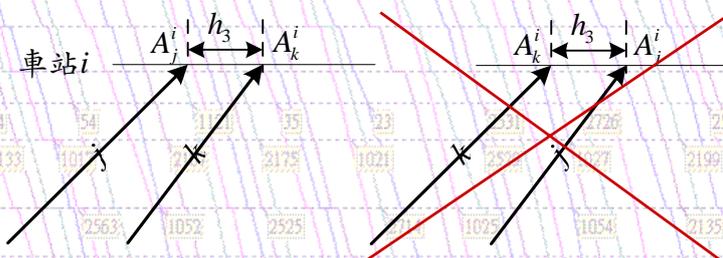
~~$$D_j^i - D_k^i \geq h_2 - M\rho_{jk}^i$$~~

列車序已知，假設列車k緊接在列車j之後離站

29

肆、最佳到開時間求解模式之十

□ 進站時隔限制式



$$A_k^i - A_j^i \geq h_3 = M(1 - \rho_{jk}^{i-1})$$

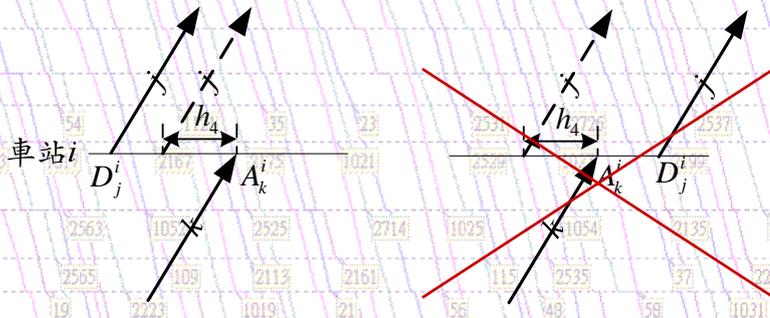
~~$$A_j^i - A_k^i \geq h_3 = M\rho_{jk}^{i-1}$$~~

列車序已知，假設列車k緊接在列車j之後進站

30

肆、最佳到開時間求解模式之十一

同股道到開時隔限制式



$$A_k^i - D_j^i \geq h_4 - M(1 - \delta_{jk}^i)$$

$$A_k^i - D_j^i \leq h_4 + M\delta_{jk}^i - \varepsilon$$

列車序已知，假設列車j為列車k
進站之前最近的離站列車

31

肆、最佳到開時間求解模式之十二

站內軌道容量限制

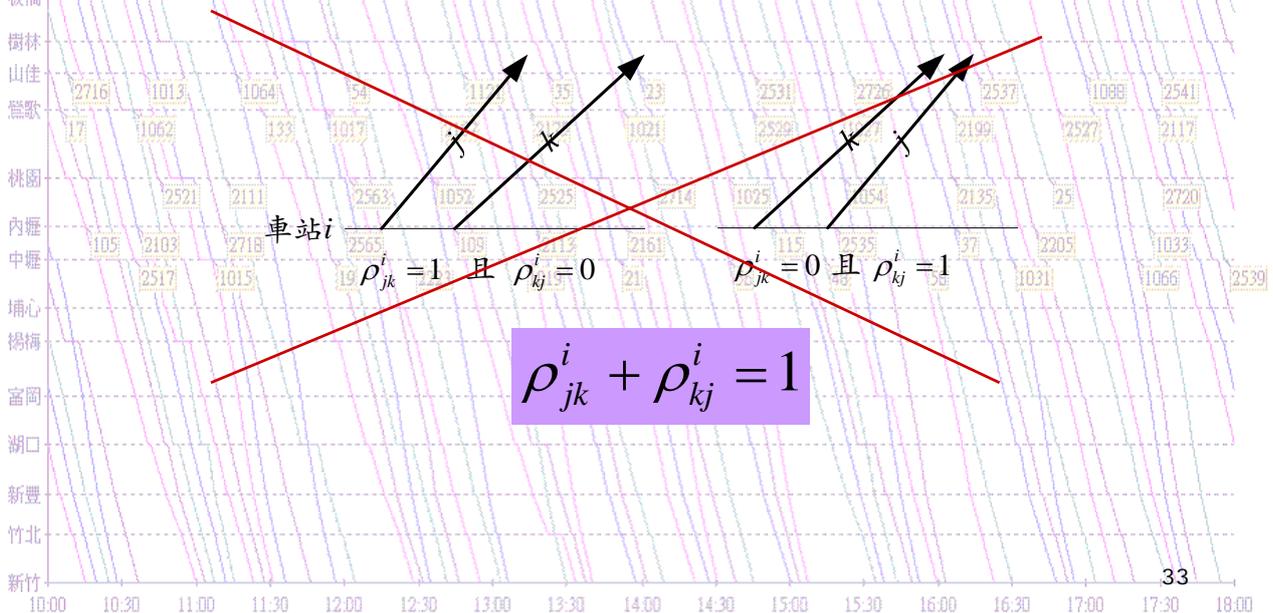
$$\sum \text{Input} - \sum \text{Output} \leq L_i - 1$$

$$\sum_{j=1}^n (\rho_{jk}^{i-1} - \delta_{jk}^i) \leq L_i - 1$$

32

肆、最佳到開時間求解模式之十三

兩列車先後關係邏輯限制



肆、最佳到開時間求解模式之十四

模式規模比較

■ m 代表車站數

■ n 代表列車數

| 變數或限制式數目的變化 | |
|-------------|--|
| 實數變數 | 增加 $n(m-1)$ |
| 二元變數 | 減少 $\frac{1}{2}n(n-1)(3m-5)$ 完全不需要! |
| 限制式 | 減少 $n(2m-3)(2n-3) + n(m-2) + 3m - n - 4$ |

伍、模式驗證與參數敏感度分析之一

□ 模式驗證：與第六章混整數規劃模式之求解結果比較

□ 模式驗證之案例

基隆—新竹路段，共計24個車站、2~30次列車、7種速度種別，各車站之最長停站時間皆設為10分鐘，離站時隔設為2.5分鐘，進站時隔設為3分鐘，同股道到開時隔設為5分鐘。

| 權重係數類別 | 車種 | | | |
|-----------|-------|-------|-------|------|
| | 自強西/東 | 莒光西/東 | 復興西/東 | 通勤電車 |
| 始發時間誤差 | 5 | 3 | 2 | 1 |
| 計畫停站時間誤差 | 15 | 10 | 7 | 5 |
| 非計畫停站時間誤差 | 30 | 20 | 15 | 10 |

35

伍、模式驗證與參數敏感度分析之二

□ 基因演算參數

| 參數分類 | 參數值 | |
|----------|----------------------|-----|
| 族群大小 | 240 | |
| 世代交替比例 | 1/5 | |
| 交配與突變比例 | 第一型突變 | 1/6 |
| | 第二型突變 | 1/6 |
| | 第三型突變 | 1/6 |
| | 第四型突變 | 1/6 |
| | 第一型交配 | 1/3 |
| 天擇壓力 | 0.08 | |
| 最大演化世代 | 1000 | |
| 提前停止演化條件 | 連續 100 世代適存值改善率等於 0% | |

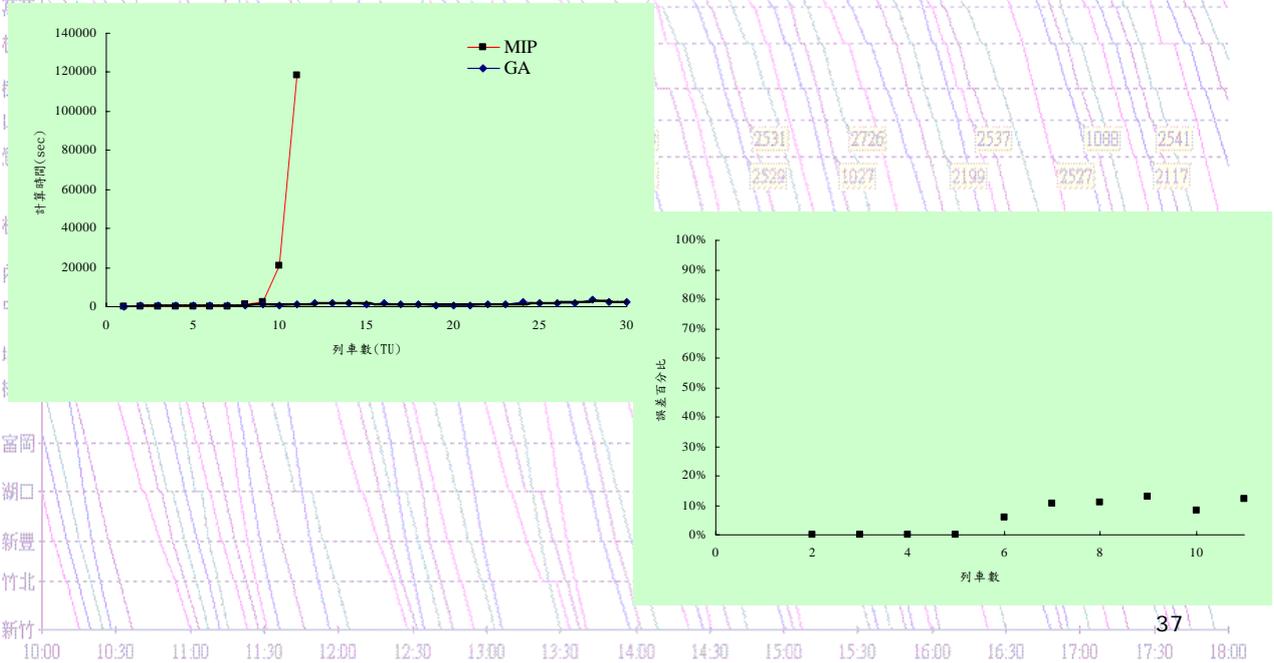
□ 求解方法

- ◎ Pentium4 3.2GHz CPU
- ◎ 1.5GB RAM
- ◎ 列車排點基因模式 (ILOG CPLEX 9.0 求解LP)

36

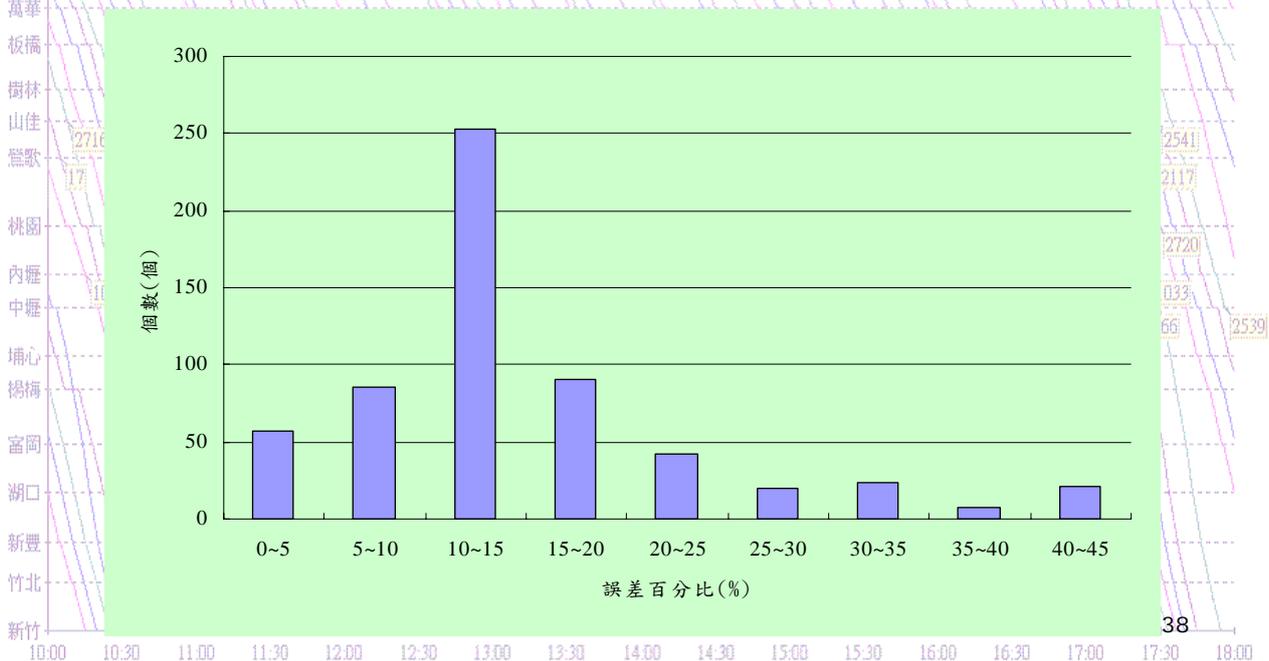
伍、模式驗證與參數敏感度分析之三

求解結果



伍、模式驗證與參數敏感度分析之四

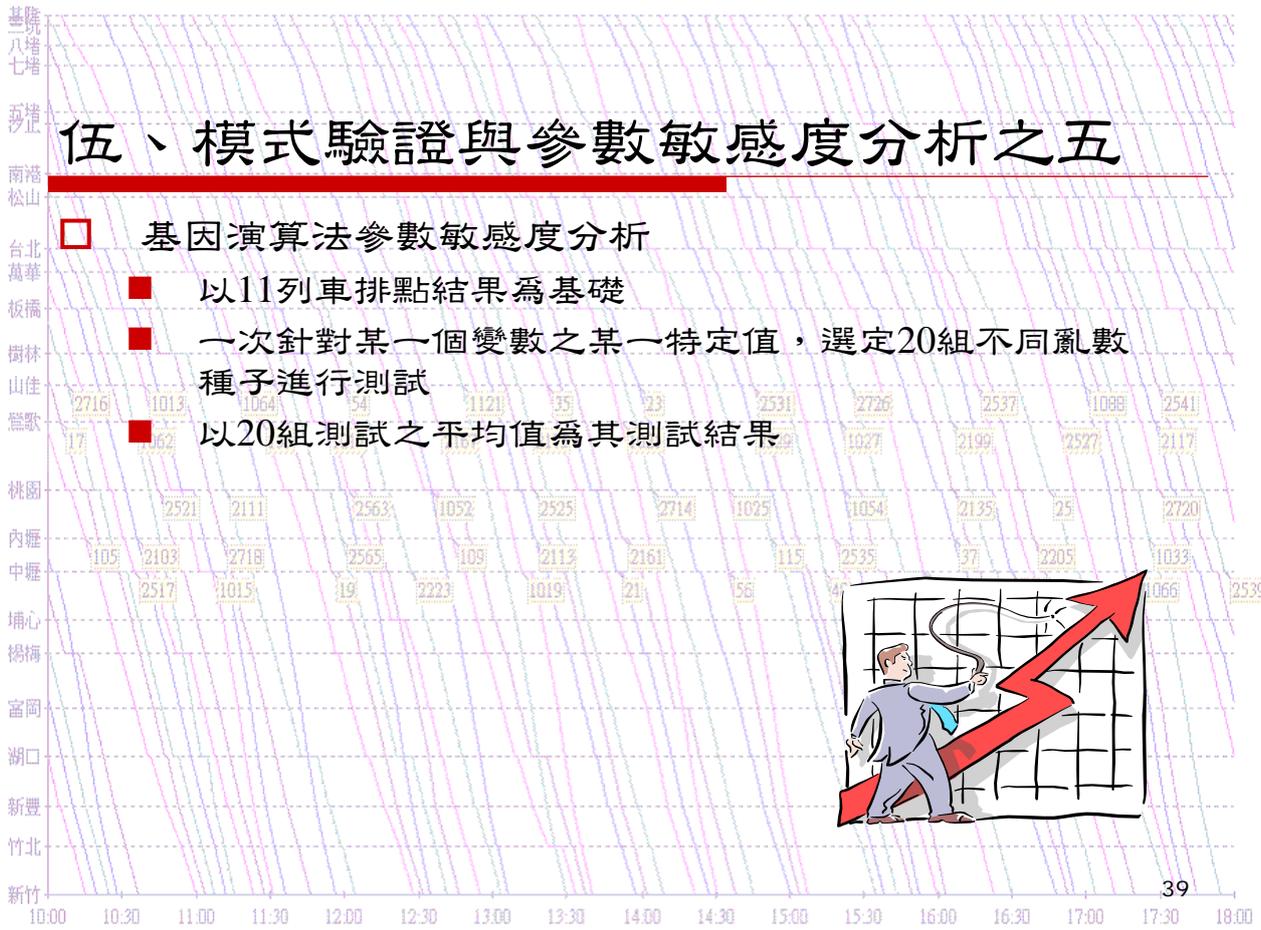
以11列車執行600個不同亂數種子之測試



伍、模式驗證與參數敏感度分析之五

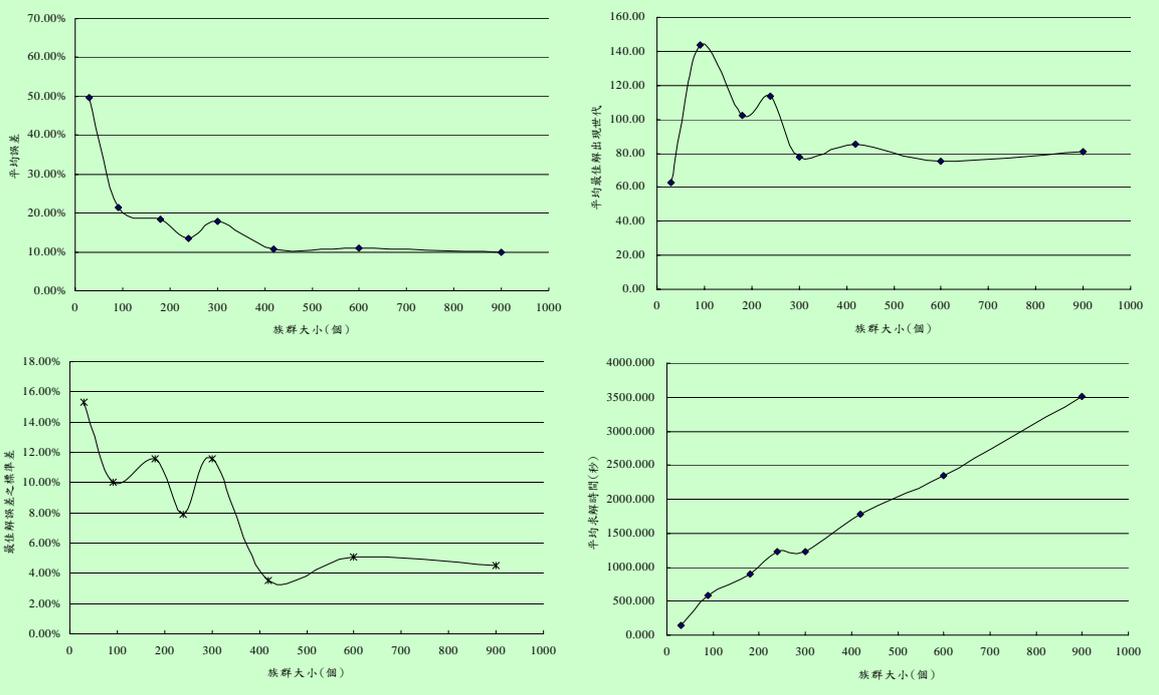
基因演算法參數敏感度分析

- 以11列車排點結果為基礎
- 一次針對某一個變數之某一特定值，選定20組不同亂數種子進行測試
- 以20組測試之平均值為其測試結果



伍、模式驗證與參數敏感度分析之六

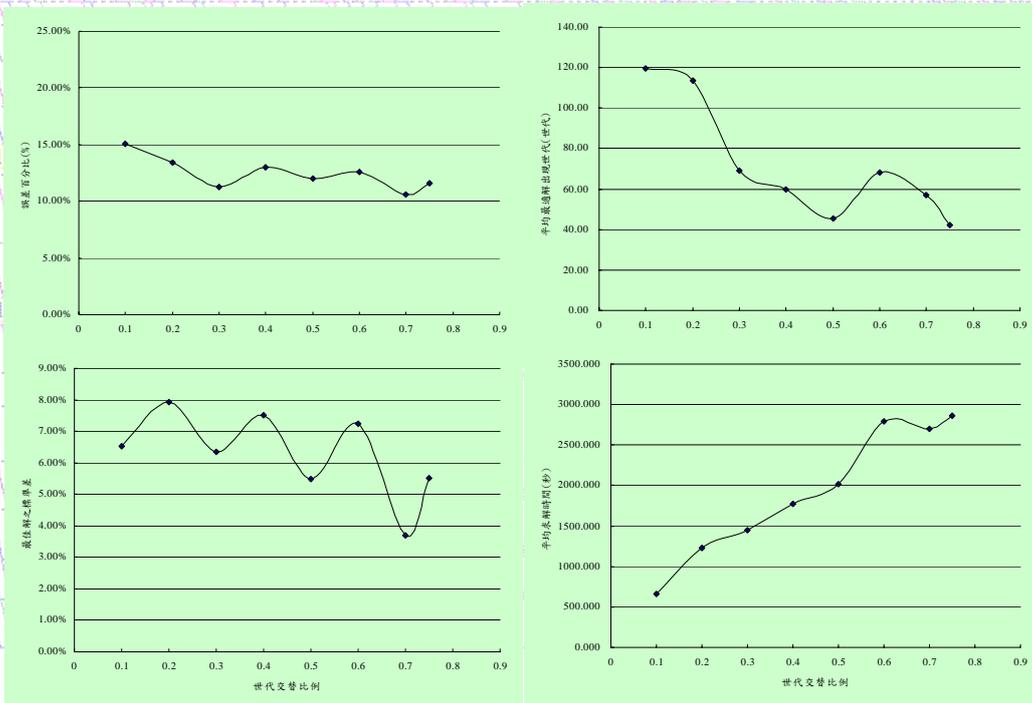
族群大小敏感度分析



基隆
八堵
七堵
汐止
南港
松山
台北
萬華
板橋
樹林
山佳
鶯歌
桃園
內壢
中壢
埔心
楊梅
富岡
湖口
新豐
竹北
新竹

伍、模式驗證與參數敏感度分析之七

世代交替比例敏感度分析

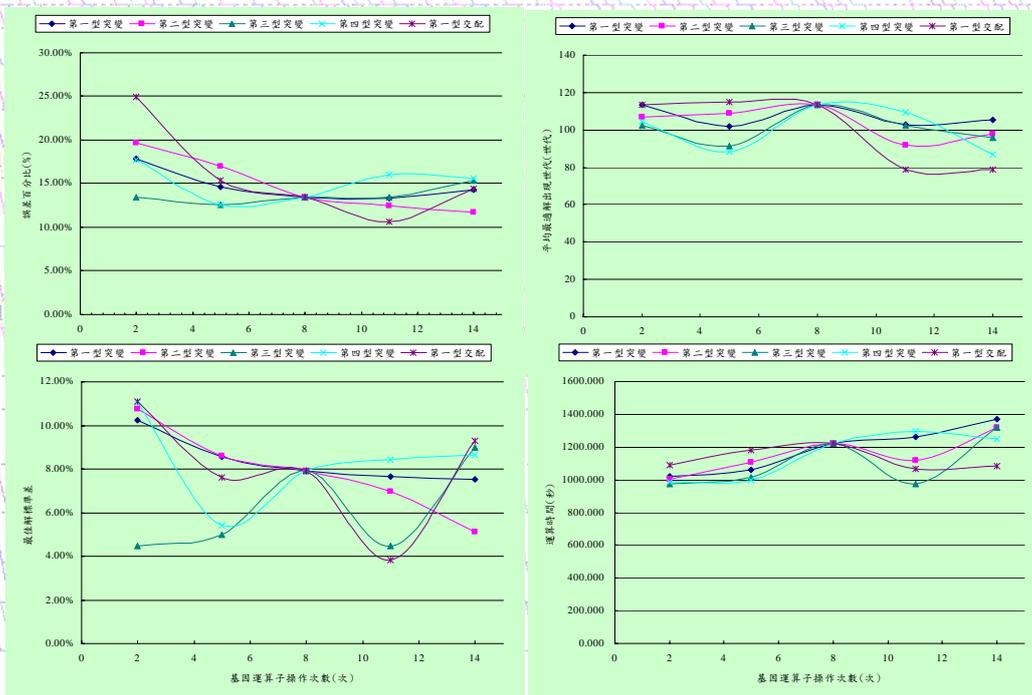


271
17
2541
2117
2720
1033
1066
2539
41
17:30 18:00

基隆
八堵
七堵
汐止
南港
松山
台北
萬華
板橋
樹林
山佳
鶯歌
桃園
內壢
中壢
埔心
楊梅
富岡
湖口
新豐
竹北
新竹

伍、模式驗證與參數敏感度分析之八

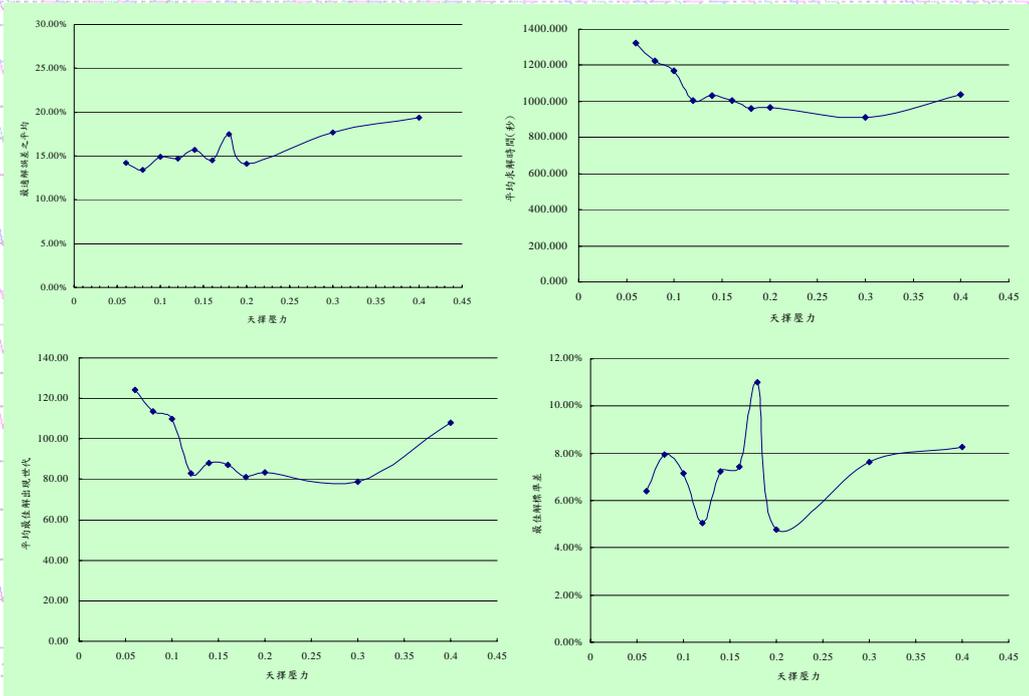
突變與交配比例敏感度分析



271
17
2541
2117
2720
1033
1066
2539
42
17:30 18:00

伍、模式驗證與參數敏感度分析之九

天擇壓力敏感度分析



伍、模式驗證與參數敏感度分析之十

案例分析基因演算參數建議值

| 參數分類 | | 參數值 |
|---------|-------|---------|
| 族群大小 | | 420 |
| 世代交替比例 | | 0.2~0.3 |
| 交配與突變比例 | 第一型突變 | 5/30 |
| | 第二型突變 | 6/30 |
| | 第三型突變 | 5/30 |
| | 第四型突變 | 3/30 |
| | 第一型交配 | 11/30 |
| 天擇壓力 | | 0.08 |



陸、案例分析之一

台鐵基隆至新竹路段下行線

重要背景資料

- 共計24個車站，三坑、八堵、五堵、山佳、內壢與新豐等站之下行線僅有一股軌道可供運用，其餘18個車站下行線均有兩股以上軌道可供運用
- 權重係數及運轉時隔與模式驗證測試例相同
- 期望班表參考94.10.11台鐵網站時刻表產生
- 所有列車均由基隆行駛至新竹
- 總列車數共計139列

| 車種 | 自強西 | 自強東 | 莒光西 | 莒光東 | 復興西 | 復興東 | 電車 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| 列車數 | 21 | 17 | 15 | 7 | 7 | 1 | 71 |

45

陸、案例分析之二

基因演算參數

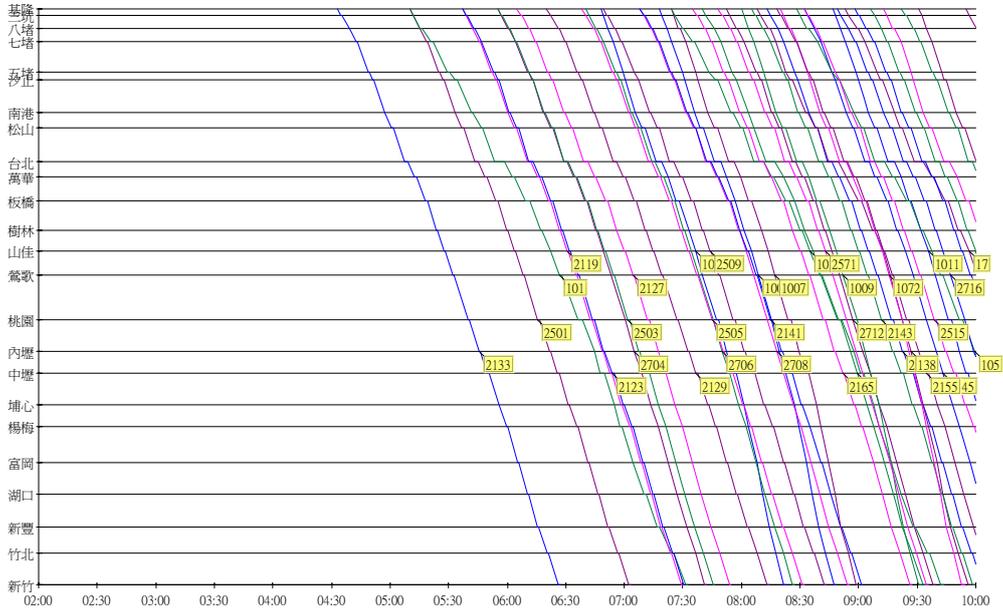
| 參數項目 | | 設定 | 單位 |
|---------|-------|---|----|
| 最長演化世代 | | 1000 | 世代 |
| 族群大小 | | 420 | 個 |
| 交配與突變比例 | | 0.2 | - |
| 執行次數 | 第一型突變 | 14 | 次 |
| | 第二型突變 | 18 | 次 |
| | 第三型突變 | 14 | 次 |
| | 第四型突變 | 6 | 次 |
| | 第一型交配 | 16 | 次 |
| 天擇壓力 | | 0.08 | - |
| 停止條件 | | 演化1000世代，但若連續100世代最適解改善率小於7.5%，則保留當時之最適解並重新產生新的族群進行演化 | |

46

基隆
八堵
七堵
汐止
南港
松山
台北
萬華
板橋
樹林
山佳
鶯歌
桃園
板橋
樹林
山佳
鶯歌
桃園
內壢
中壢
埔心
楊梅
富岡
湖口
新豐
竹北
新竹

陸、案例分析之三

期望班表 2:00~10:00

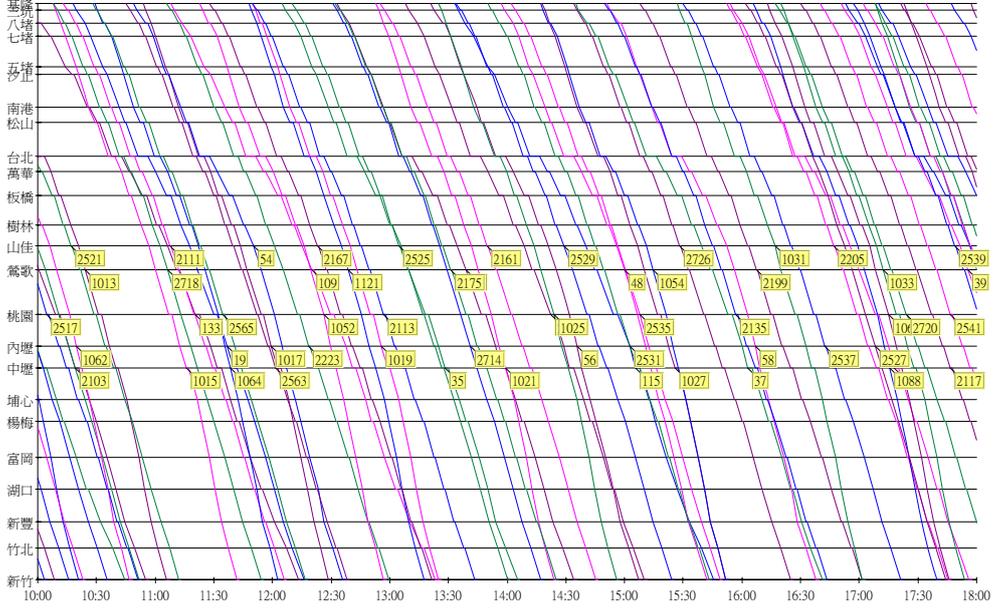


2541
2117
2720
033
56
2539
47
30 18:00

基隆
八堵
七堵
汐止
南港
松山
台北
萬華
板橋
樹林
山佳
鶯歌
桃園
板橋
樹林
山佳
鶯歌
桃園
內壢
中壢
埔心
楊梅
富岡
湖口
新豐
竹北
新竹

陸、案例分析之四

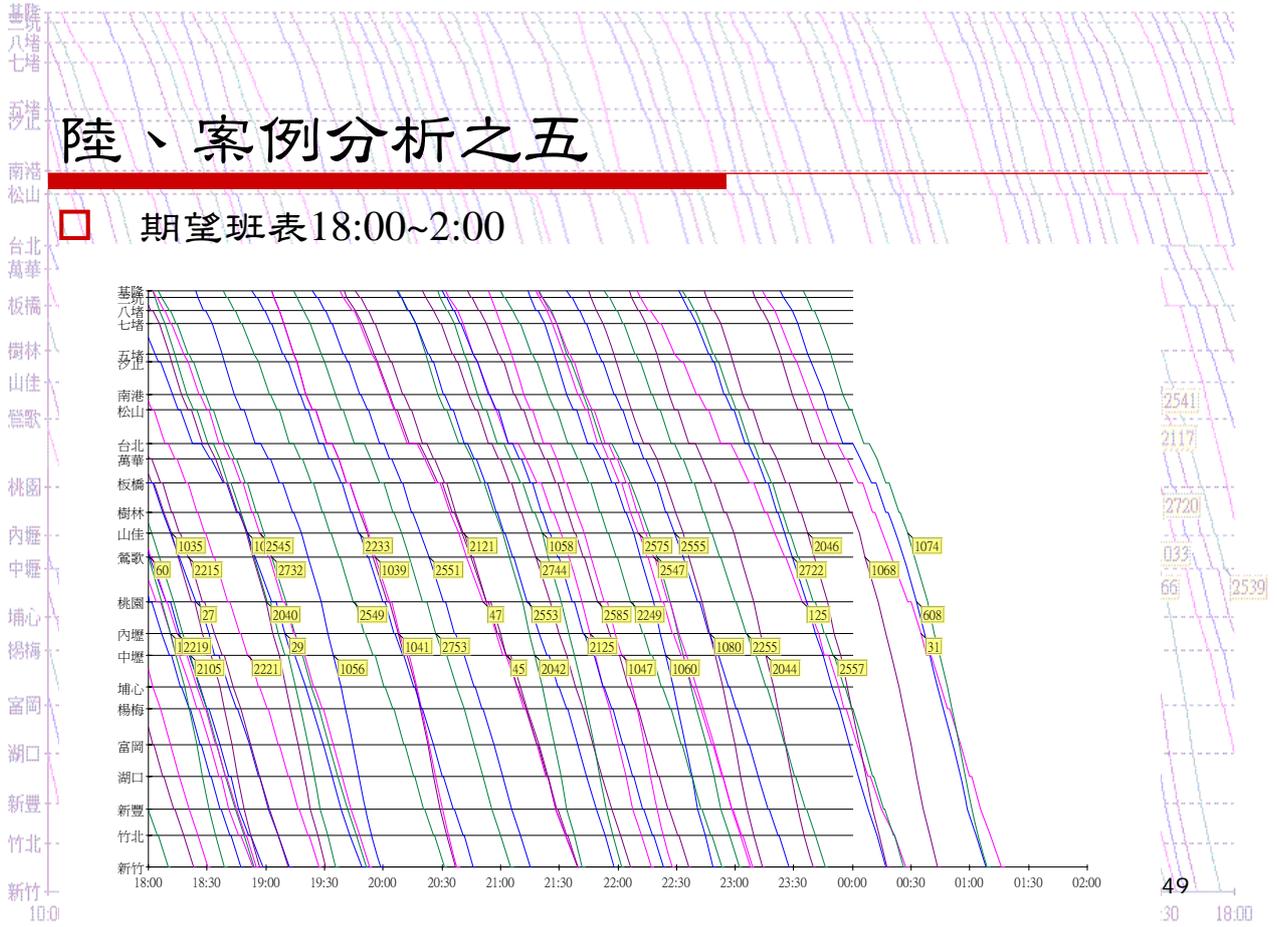
期望班表 10:00~18:00



2541
2117
2720
033
56
2539
48
30 18:00

陸、案例分析之五

期望班表 18:00~2:00

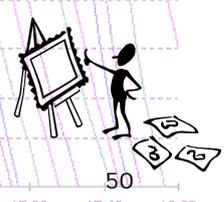
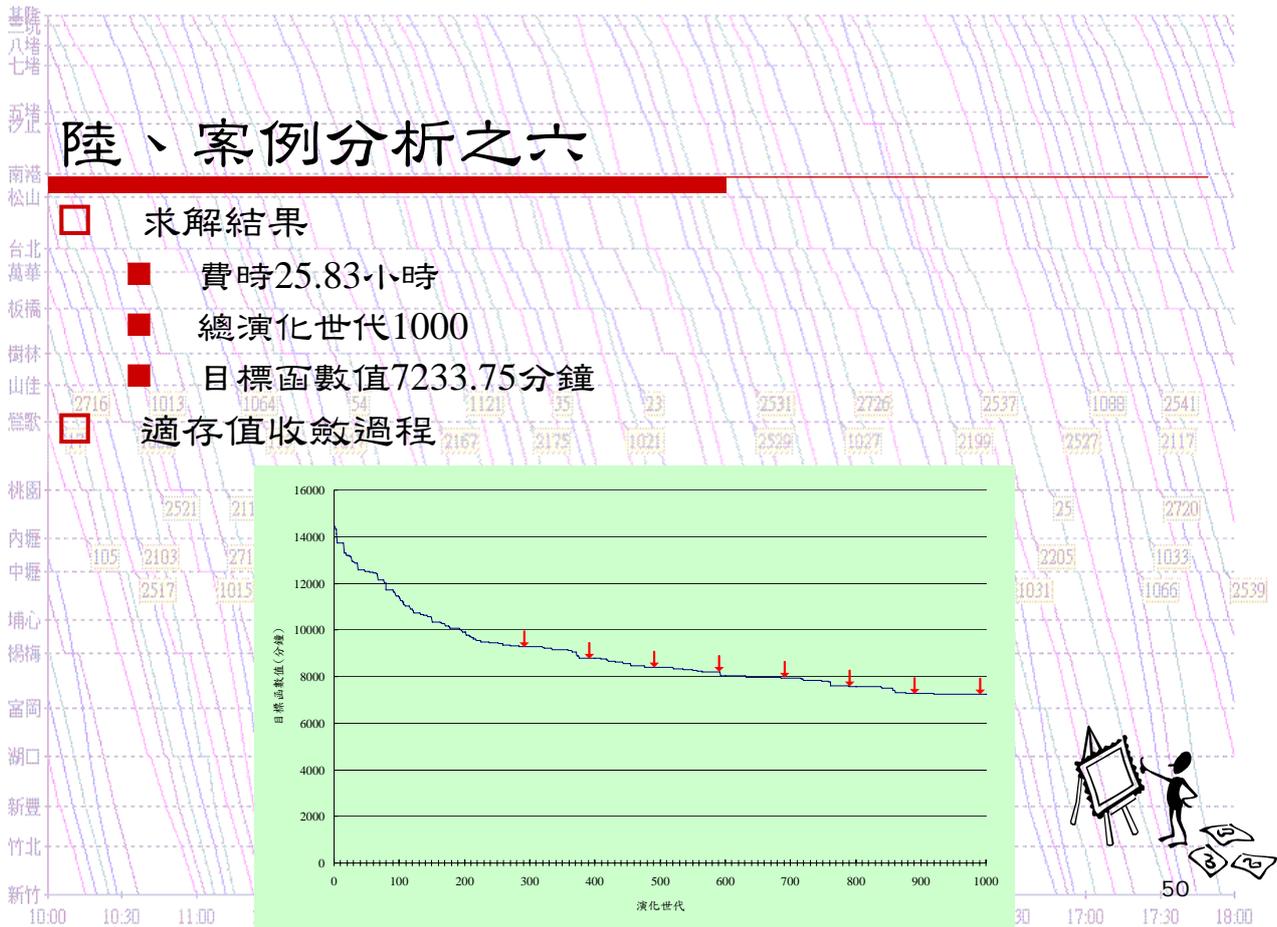


陸、案例分析之六

求解結果

- 費時 25.83 小時
- 總演化世代 1000
- 目標函數值 7233.75 分鐘

適存值收斂過程



陸、案例分析之七

排點結果統計

| 項目 | 期望班表 | 第一世代班表 | 最適班表 | 單位 | |
|------|-----------|--------|---------|---------|----|
| 列車停站 | 總停站時間 | 1631 | 2357.25 | 2119.25 | 分鐘 |
| | 總次數 | 1655 | 1751 | 1687 | 次 |
| | 平均停站時間 | 0.9855 | 1.3462 | 1.2562 | 分鐘 |
| | 最長停站時間 | 5 | 10 | 10 | 分鐘 |
| | 總停站時間延滯 | - | 726.25 | 488.25 | 分鐘 |
| | 停站時間延滯總次數 | - | 289 | 168 | 次 |
| | 平均延滯時間 | - | 2.5130 | 2.9063 | 分鐘 |
| | 最長停站時間延滯 | - | 9 | 9 | 分鐘 |

51

陸、案例分析之八

排點結果統計

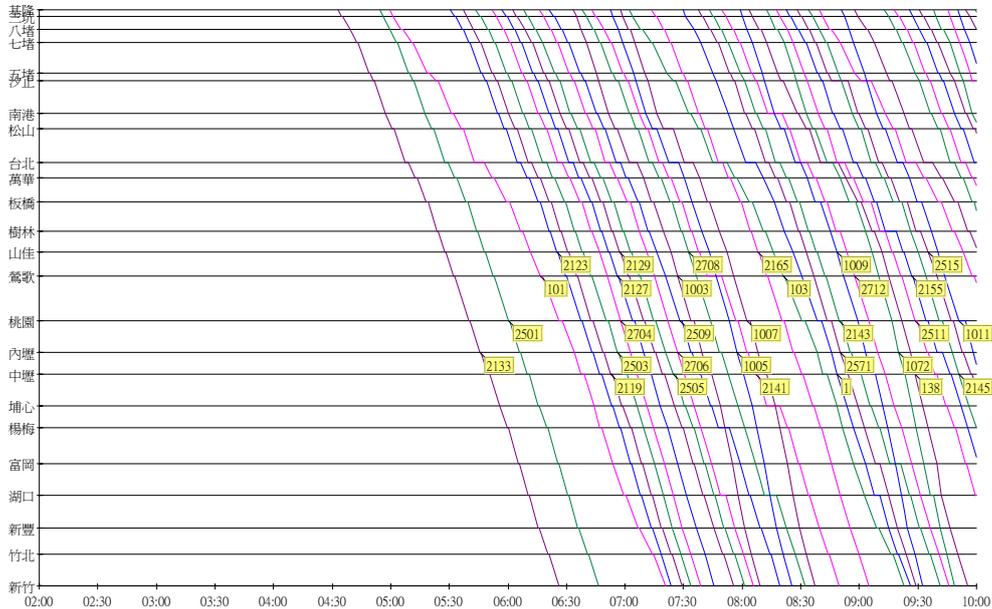
| 項目 | 期望班表 | 第一世代班表 | 最適班表 | 單位 | |
|---------|------|--------|---------|---------|----|
| 始發車站時間 | 總延滯 | - | 1381.75 | 1375.25 | 分鐘 |
| | 平均延滯 | - | 9.9406 | 9.8939 | 分鐘 |
| | 最長延滯 | - | 30 | 30 | 分鐘 |
| 終到點達站時間 | 總延滯 | - | 1787.5 | 1488 | 分鐘 |
| | 平均延滯 | - | 12.8597 | 10.7050 | 分鐘 |
| | 最長延滯 | - | 44.25 | 32.25 | 分鐘 |
| 表行訂時旅間 | 總延滯 | - | 726.25 | 488.25 | 分鐘 |
| | 平均延滯 | - | 5.2248 | 3.5126 | 分鐘 |
| | 最長延滯 | - | 24 | 17.5 | 分鐘 |

52

基隆
八堵
七堵
汐止
南港
松山
台北
萬華
板橋
樹林
山佳
鶯歌
桃園
內壢
中壢
埔心
楊梅
富岡
湖口
新豐
竹北
新竹
10:00

陸、案例分析之九

最適班表2:00~10:00

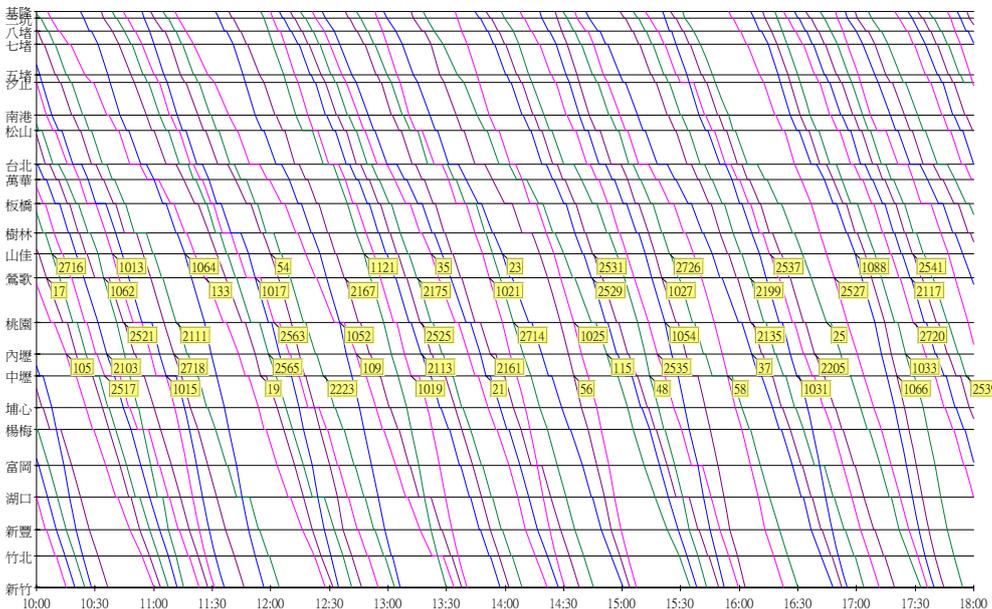


2541
2117
2720
033
56
2539
53
30 18:00

基隆
八堵
七堵
汐止
南港
松山
台北
萬華
板橋
樹林
山佳
鶯歌
桃園
內壢
中壢
埔心
楊梅
富岡
湖口
新豐
竹北
新竹
10:00

陸、案例分析之十

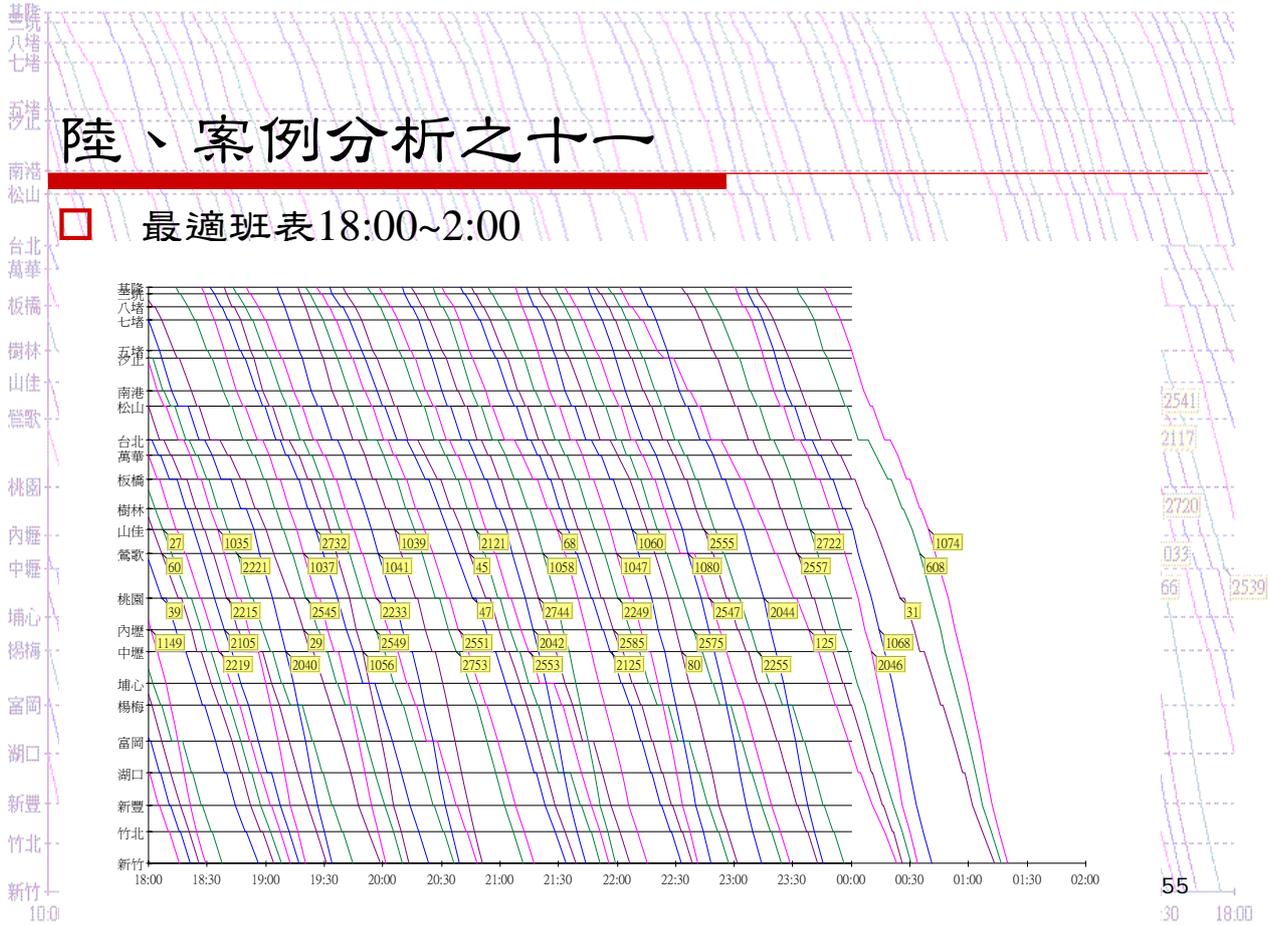
最適班表10:00~18:00



2541
2117
2720
033
66
2539
54
30 18:00

陸、案例分析之十一

最適班表 18:00~2:00



柒、結論與後續研究建議之一

結論部分

- 本研究探討列車排點之基本觀念，可為後續研究之基礎
- 列車排點問題之求解方法大致可分為：啟發式演算法、模擬分析法與數學規劃法
 - 啟發式演算法 -> 解的品質通常不會太好
 - 數學規劃法 -> 可求得最佳解，但難以直接運用
 - 模擬分析法 -> 須加強最佳化的觀念
- 臺鐵排班作業主要問題在於輔助軟體無法完全發揮排除列車衝突的功能，主要關鍵在於排除衝突的演算法



柒、結論與後續研究建議之二

結論部分

- 針對複線運轉所建立之「列車排點整數模式」，已包含多數列車排點實務所考慮之限制式，架構可為後續研究之參考
- 在不考慮簡化問題之前提下，利用混合整數規劃求解列車排點實務問題恐有相當的困難
- 兩階段求解的概念確實可以用來求解大規模列車排點問題
- 綜觀國內外的文獻，沒有任何列車排點最佳化模式可以求解本研究案例分析之問題規模，這是本研究的一大突破

57

柒、結論與後續研究建議之三

後續研究建議部分

- 有必要推動相關研究計畫，探討鐵路營運管理決策支援系統建置之可能性，並規劃研究架構與推動方式
- 就列車排點而言，仍有必要發展站內軌道運用模式
- 求取列車排點之精確最佳解仍存在相當大的挑戰，發展大規模列車排點問題之最適化模式較切合實際
- 可以進一步研究其他人工智慧法於兩階段列車排點求解概念之運用
- 可進一步研究模擬分析法結合數學規劃法在列車排點最適化問題的運用

58



柒、結論與後續研究建議之四

□ 後續研究建議部分

- 建議以兩階段求解之概念為基礎，發展上、下行同時考慮之模式

■ 短期之內仍有改善臺鐵列車排班系統演算核心之必要

- 建立排點過程動畫展示與查詢介面，其次必須建立人工暫停演算並進行局部人工排班，然後再交由電腦繼續演算且不會更動人為排班結果的機制
- 可以考慮加入回溯（Backtracking）的機制
- 排除衝突的演算法必須加入通盤考量的機制
- 若評估上述逐項改善的方式不符需求，建議保留系統出圖功能，重新開發演算核心

59

簡報完畢、敬請指教



60