

# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景與動機

國內近年來軌道事業發展蓬勃，自從民國 85 年台北捷運通車以來，各縣市莫不極力以爭取興建軌道事業作為主要的施政目標。再加上高鐵即將於民國 95 年通車，以及台鐵正逐漸轉型邁向民營化經營。這一切事實，在在都顯示出國內陸路運輸的主流已逐漸由公路運輸轉型為軌道運輸。軌道系統由於具有運量大、速度快、污染低及可靠度高的服務特性，因此近年來已成為政府交通部門建設的重心。可預期的是，在地狹人稠的台灣地區，軌道系統未來所扮演的運輸角色，相形之下將會更加複雜和重要。

對於民眾而言，一個可以信賴的運輸系統，其安全性必然是需要優先列入考量的因素。由於軌道系統的列車具有同時運送大量旅客的特性，一旦發生意外，所造成的衝擊與傷亡程度往往相當可觀。所以，對於確保軌道系統的安全性，政府與學界責無旁貸。然而，由於過去國內長期對於軌道運輸的漠視，在軌道運輸安全方面的相關研究，不管是在技術或政策層面，與國外相形之下都極為缺乏。因此，在未來國內軌道事業陸續興建完成的同時，也必須極力提昇與拓展在地化且符合本國國情的軌道安全相關研究，以因應未來國內軌道系統運作上的需求。

軌道系統安全的確保，除了在規劃和興建階段必須符合安全方面的規範之外，一旦軌道系統進入營運的階段，維護(Maintenance)將成為一個極為重要的安全課題。好的維護策略是確保軌道系統正常營運不可或缺的整體後勤支援(Integrated Logistics Support, ILS)工作之一。然而，由於過去國內軌道事業的單純和公營特性，使得國內在軌道系統維護的策略上，多半只是依賴軌道維修技術人員憑藉其維修的經驗加以決定。不可否認地，現場維修人員的經驗對於決定維修策略有著莫大的影響和幫助。然而，其維修作法卻多半僅止於軌道系統元件的技術層面，藉由定期的檢修和汰換工作，也就是所謂的預防性維修(Preventive Maintenance, PM)，來達成確保該元件的正常運作。至於在系統整體安全觀念和維修成本之考量上，則頗為缺乏。

系統可靠度的觀念在工業界早已行之有年，其主要是藉由掌握維持系統正常運作的關鍵因素或項目，以確保該系統能夠穩定正常的運作。更甚者，有助於提供決策者足夠的系統安全資訊，以利將維修資源做最有效率之應用，達到降低維護成本的目的，此乃所謂的可靠度集中維護(Reliability-Centered Maintenance, RCM)。然而可靠度集中維護在軌道維護上之應用，不管是在國內或國外，都仍屬於萌芽階段，未來極有發展的潛力。

隨著國內軌道事業逐漸走向民營化之際，維修成本在未來國內民營軌道機構的營運上，將是不容忽視的考量因素。如何在確保系統安全風險在一定可容許範圍之內的前提下，將維修資源做最有效率的應用，以達成維修工作的有效執行，以及維修成本的節省，同時兼顧安全與經濟層面，將是未來國內民營軌道事業是

否能順利營運的關鍵議題。

有鑑於此，本研究將可靠度集中維護(RCM)的觀念引入國內軌道系統維護之中，並以台北捷運電聯車系統之維護工作為例，試圖尋找出能有效滿足安全和經濟考量的軌道維護策略，以期對於國內軌道系統未來的正常營運能夠有所助益。

## 1.2 研究對象與範圍

現今國內的軌道系統主要有台鐵、台北捷運、高雄捷運、台灣高鐵、其他鐵路(如糖鐵、林鐵等)，由於高鐵與高雄捷運尚在興建中，尚無實際運轉的維修資料，因此不列入實證研究對象之考慮。其次，糖鐵和林鐵由於規模不大，再加上並非以運送旅客為主要目的，較無安全上之疑慮，因此也不列入考慮。最後，由於台北捷運系統為近年才通車之軌道系統，在維修相關資料的搜集上較為完備，再者由於該系統負擔了現今台北都會區運輸的重責大任，尤其是在尖峰時段的通勤需求，若一旦發生意外，將對台北都會區的民眾造成莫大之影響與衝擊。此外，由於台北捷運每日發車班次的高密集性，使用上極為頻繁，相形之下維修工作的重要性更加明顯。因此，本研究將研究對象預設為台北捷運系統。



圖 1-1 軌道系統五大設施[13]

由於軌道系統在結構上極為龐大與複雜，其下尚且包涵了許多子系統如機車車輛系統、行車控制系統、電力供應系統、車站調車場系統、軌道結構土建系統等(如圖 1-1 所示)。基於研究時程與研究資源上的考量，在整個捷運系統之下選擇一子系統，介定為本研究之範圍，將有其必要性。回顧台北捷運系統通車以來的重大意外事件(見表 1-1)，除了颱風等天然災害因素之外，多半是由於電聯車系統的因素所造成。因此，本研究將研究範圍介定在台北捷運系統的電聯車系統的相關維護工作上(如圖 1-2 所示)，針對其各維護工作項目加以深入分析，並從維持系統可靠度的角度加以出發，探討電聯車系統的各維護項目之優先順序，及其應優先採取的維護工作。

表 1-1 台北捷運高運量行車事故統計表(台北市政府交通局，2003)

時間 種類	1997 年	1998 年	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	總計
列車故障	1	1	1	2	2	2	11
號誌故障	1	1	2	0	1	0	5
天然事件	0	0	0	0	1	2	3
供電中斷	0	1	2	0	5	0	8
人為因素	0	0	0	0	0	0	0
火災事件	0	0	0	0	0	0	0
路線障礙	0	0	0	0	0	0	0
天然災害	0	2	0	1	1	0	4
軌道故障	0	0	0	0	0	0	0
非法入侵	0	0	2	1	3	0	6
其他事故	1	3	0	4	2	2	12
死傷人數	0	2	1	1	1	1	6
事故件數	3	8	7	8	15	6	49

資料來源：[23]

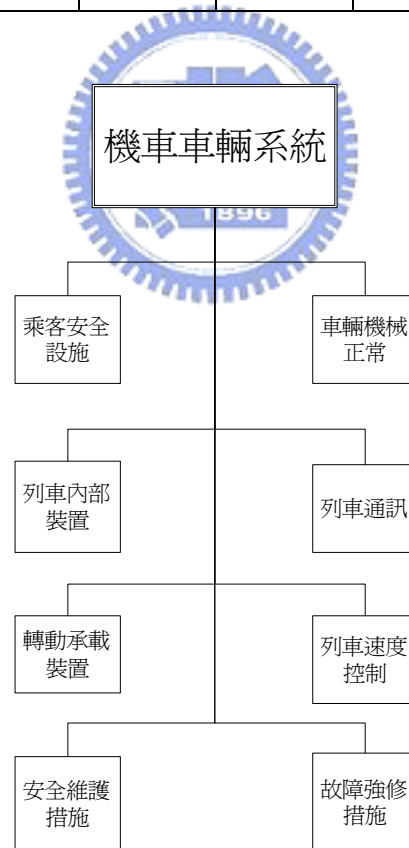


圖 1-2 軌道車輛系統的安全議題[13]

### 1.3 研究目的與內容

本研究的目的是在探討可靠度集中維護方法(RCM)在軌道維護策略上之應用。將針對台北捷運電聯車系統進行分析以改善現有之維護策略，判斷電聯車各維護項目對於系統可靠度的影響程度，以及如何調整台北捷運現行維修策略，以有效達成節省維護成本之目的。

本研究的具體內容如下所述：

- (1) 利用可靠度集中維護(RCM)方法發展台北捷運電聯車系統維護策略。
- (2) 確認電聯車系統下之各重要系統功能，並進行功能失效分析(Function Failure Analysis, FFA)，針對各系統功能失效模式的影響程度加以分析。
- (3) 利用錯誤樹分析(FTA)，找出影響電聯車系統功能運作上之關鍵項目，並考慮維修成本，以找出維護重要項目(Maintenance Significant Item, MSI)。
- (4) 搜集電聯車系統各維護重要項目之可靠度相關資料。
- (5) 針對各維護重要項目進行失效模式和影響及嚴重度分析(Failure Modes, Effects and Criticality Analysis, FMECA)，並找出其重大失效模式(Dominant Failure mode)。
- (6) 從預防各維修關鍵項目之重大失效模式發生的觀點出發，選擇適當的預防性維修工作(PM Task)，並且研擬維修策略方案。
- (7) 利用派翠網路(Petri Net)將維修策略方案加以模式化(Modeling)，並藉以評估該維修策略方案的績效(Ex：系統可靠度提升、維修成本下降等)。

### 1.4 研究方法

本研究根據可靠度集中維護(RCM)的各步驟，針對台北捷運電聯車系統進行維護工作的分析與規劃。本研究進行之工作和採取的方法主要可分為以下四部份：

#### (1) 系統功能失效分析

針對台北捷運電聯車架構進行分析，瞭解其下各子系統之組成與功能，並且在電聯車子系統層面下定義出各功能失效(Function Failure)項目。以各功能失效項目作為問項，進行問卷設計，並發放問卷給台北捷運維修部各級人員進行調查。

在問卷分析方面，採取參照單位分析(Ridit analysis)法，以瞭解在影響程度與發生頻率的綜合考量下，各功能失效是否值得進行後續分析的優先順序。

#### (2) 維護關鍵項目的決定

從維持電聯車系統功能正常運作的觀點出發，將前述分析結果中判定為重要的系統功能失效項目進行錯誤樹分析(Fault Tree Analysis)，追溯該失效發生的種種原因，以瞭解該失效是由何元件(Component)所故障所導致。並利用錯誤樹之定量分析，將其重要性加以排序，以進行後續之分析。

#### (3) 維護工作的選定

針對前述錯誤樹分析結果中所指出的關鍵項目(元件)，進行失效模式、影響

與嚴重度分析(FMECA)，瞭解造成該元件故障的種種失效模式，並挑選出其中嚴重度屬於「不可接受」或「不被期待」的失效模式，做為後續研擬維護策略之依據。

#### (4) 維護策略之研擬及維護績效之評估

從避免關鍵項目中「不可接受」或「不被期待」之失效模式的觀點出發，選擇相對應的維護工作項目，研擬維護策略。並且建構電聯車系統之派翠網路(Petri Net)，模擬電聯車維護工作運作之過程。藉由調整派翠網路的參數(Ex：維護間隔)，瞭解所擬之維護策略所造成之變化(Ex：維護成本下降、該元件平均失效間隔增加)，以作為評估該維護策略績效之根據，並且提出改善現有電聯車系統維護策略之建議。



## 1.5 研究流程

本研究之研究工作項目與研究流程，如圖 1-3 所示。本研究首先進行研究問題的確立，其中包含研究主題、範圍、對象的決定。繼而進行相關文獻的回顧與探討。之後進行陸續進行系統功能分析、錯誤樹分析與失效模式、危害與嚴重度分析。在系統功能分析方面，藉由針對台北捷運電聯車各級維修人員進行問卷調查，以找出重要的系統功能失效，繼而利用錯誤樹分析找出造成該系統功能失效的原因與元件，以及利用 FMECA 分析找出該元件嚴重度較高的失效模式。

在探討出導致系統失效的主要成因後，選擇相對應的維護工作以研擬維護策略，並且利用派翠網路進行模擬和評估維護績效。最後，根據結果提出結論與建議。

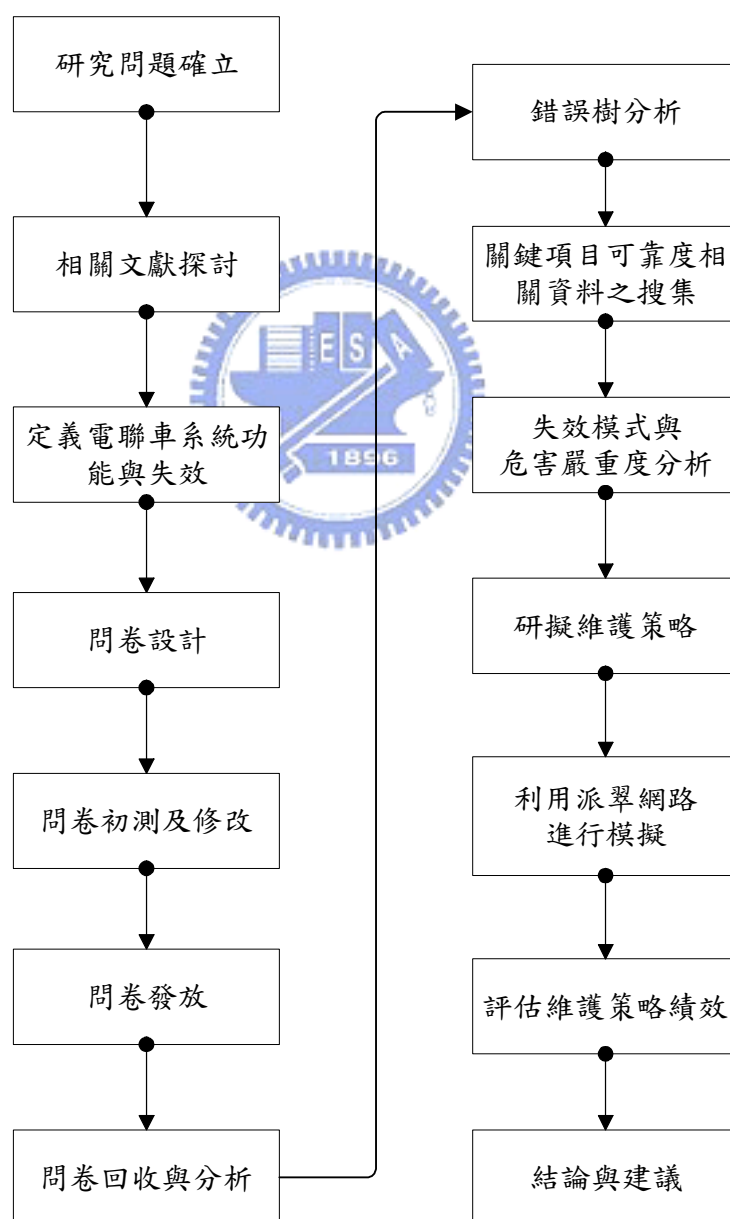


圖 1-3 研究流程圖

## 第二章 現況分析與文獻回顧

本章主要針對研究議題進行現況分析與相關文獻回顧，首先由台北捷運現行的維修策略與工作談起，以瞭解台北捷運電聯車系統目前採行的維修方式。繼而針對國內外 RCM 方法的相關研究進行回顧，最後針對所回顧的文獻進行評析。

### 2.1 台北捷運維修工作之現況

根據黃漢榮君[1]在其著作中所提到，台北捷運系統目前的維修理念為以下五點：

- (1) 滿足車輛、機具、設備和人員之最佳動線與作業安全。
- (2) 提供人員及車輛、機具、設備等具有足夠與安全的工作與移動空間。
- (3) 提供足夠的人員、材料、機具、設備及維修工具。
- (4) 以最少的人員、維修時間及費用，以執行維修作業。
- (5) 擁有最大彈性與適應性，以面對維修工作調整與設備擴充。

此外，該著作中亦提到台北捷運目前的維修作業，可分為以下兩類：

#### 一. 預防檢修(Preventive Maintenance)

預防檢修以工作包括一系列的檢查，以及隨著營運時間延長，而增加的定期性組件更換，以電聯車系統為例，主要包含如下：

- (1) 日檢(Daily)：包括車廂外部及內部檢查、駕駛室檢查及車廂清掃等。
- (2) 二週檢(14 Day)：包括集電靴磨耗、駕駛室車門極限開關功能測試、空壓機油位檢查、檢查車廂底盤設備、煞車碟片及急電靴，排放空氣槽中的水份，檢查所有外露的管線等。檢修所需時間為每列車 4 小時。
- (3) 月檢(Month)：包括極限開關及門鎖機構功能、煞車塊、聯結器緊急鬆脫螺拴、集電靴厚度、檢查牽引馬達傳動聯結器有無洩油、冷媒量與冷凍油檢查等。
- (4) 季檢(16 Week)：除了執行二週檢之外，尚包括設備內部檢查、更換損壞或磨損的零件、整修車輪接觸面及邊緣、整修集電靴、測試控制電路和車載號誌電路，清洗車廂底盤和轉向架。檢修所需時間為每列車 8 小時。
- (5) 半年檢(6 Month)：包括更換空壓機之空氣過濾器、分解並檢查空調設備、機械連結器潤滑及煞車單元、牽引設備箱、閘刀開關箱、靜態換流器、自動列車控制設備、車載通訊設備、車載號誌設備檢查等。檢修所需時間為每列車 8 小時。
- (6) 年檢(1 Year)：包括緊急逃生門、儲氣槽洩壓、集電靴臂螺帽扭力、高速斷路器及車軸軸承組檢查等。
- (7) 三年檢(3 Year)：包括更換齒輪油、車窗及車門窗、喇叭功能、蒸發器熱絕緣交換器、電容器、集電靴絕緣、集電靴高度及磨耗、煞車夾持器及煞車塊檢查等。
- (8) 五年檢(5 year)：更換轉向架，更換每組轉向架所需的時間為 8 小時。
- (9) 半使用年限檢修(Half Life)：完全地翻修、更換所有電纜、修復所有的零件並

檢修整個車體。檢修所需時間為每列車 4 星期。

## 二. 故障維修(Corrective Maintenance)

故障維修通常在主要機廠或次要機廠內進行。每個機廠都提供一條軌道做為更換零件之用。該修護軌配有起重設施，使無法移動的車輛能在現場修復，必要時，機廠人員可到相關機廠執行維修工作。至於因碰撞而損壞的車輛，需回到主要機廠做檢修。在維修人員方面則是三班輪值，以排除列車故障或處理列車出軌等意外事件。

綜合以上所述，我們瞭解到現今台北捷運電聯車系統的維修方式，仍以預防性維護(或稱預防檢修)為主，尚未導入 RCM 維護的觀念。此外，RCM 方法中所提倡的降低維修成本，以及藉由資料更新的回饋機制，以促成維修策略的調整。兩者都正好與台北捷運系統的維修理念相符。由此可見，RCM 的導入將是未來台北捷運系統改善維修策略的必然趨勢。

## 2.2 RCM 方法之相關文獻

可靠度集中維護(Reliability-Centered Maintenance, RCM)起源於航空業的維護工作。由於飛航意外一旦發生時，往往造成極大的人員傷亡和經濟損害，因此飛航安全相較於其他運輸領域，向來格外受到重視，其安全要求也非常地嚴格。因此，為滿足飛航安全的標準，民航業者莫不投注大量財力進行嚴密的維護檢修工作，然而這也往往成為民航業者沉重的財務負擔。在這樣的環境之下，同時兼顧確保系統風險及降低維修成本的 RCM 方法便因應而生，並且日後被廣泛地應用在許多系統龐大複雜、安全風險要求嚴格，或者系統失效成本龐大領域的維護工作上，例如：核能電廠、軍事武器系統、配輸電系統、太空梭等。以下便針對 RCM 方法之發展與應用的相關文獻作詳細的說明。

### 2.2.1 RCM 方法的延伸與改進

G.Abdul-Nour、H.Beaudoin、P.Ouellet、R.Rochette 和 S.Lambertu[47]以煉鋁工廠為例，進行 RCM 的個案研究。在該研究中指出，決定 RCM 中維修工作數量和種類的因素有：機器/元件的使用年期(age)屬於浴缸曲線(bathtub curve)中的哪一部份(DFR、CFR 或 IFR)、該元件的汰換成本(Replacement Cost)以及系統失效所造成的影響(Safety Consequences of system failure)。而 Rausand[48]則曾經對於執行 RCM 分析的各項步驟(共計 12 項)做了詳細的整理與說明。

此外，Hollick&Nelson[49]以加拿大空軍(Canadian Air Force, CAF)為例，指出在以往的經驗上，若一個新的機隊加入運作時，重新執行 FMEA/RCM 分析是缺乏效率的，因此提出一個新方法，利用現有的資料來設計新機隊的維修排程工作。

至於在 RCM 的改進方面，以往在傳統的 RCM 作法上，均假設在 RCM 決策過程中沒有不確定性，因為那會造成非最佳維修策略的產生。而 S.Eisinger&U.K.Rakowsky[50]針對此點則提出了一個機率性 RCM(Probabilistic



RCM)的方法，該方法有以下的優點：(1)受訪者作答時以信賴程度(degree of belief)取代原本的是和否(Yes/No)，不僅較能反應受訪者的真實認知，在資料搜集上也較為容易。(2)產生的結果不是單一方案，而是一組可能方案，如此可以避免錯誤的決策，且較單一的決策更具有廣泛性。(3)在某些情況下，針對整個模組做 RCM 分析比單一元件來得好，此時機率性 RCM 的非單一方案特性更顯得有幫助。(4)機率性 RCM 有助於找出系統設計上的問題和成因。(5)只需將機率設計定為 1 或 0，仍可直接進行傳統的確定性 RCM 分析。

Hauge&Johnston[51]則提出流線性 RCM(Streamlined RCM)，嘗試考量廣義的風險(含安全、任務達成度、排程、支持度、成本五類)以改進傳統的 RCM 分析過程，並且以太空梭地面後勤支援設備的維修工作為例，進行實證分析。

Al-Najjar 和 Alsyouf[52]將模糊多目標決策(Fuzzy MCDM)應用於 RCM 之中，結合個人對於失效原因認知上的差異，以制定出充分利用資訊且更具備彈性的維修策略。

V.S.Deshpande 和 J.P.Modak[53]嘗試將 RCM 方法應用到印度的傳統加工產業上，在這類產業上應用 RCM 時往往遭遇到維修相關資訊不足及管理者和作業員對於 RCM 方法的陌生。該研究提出三點方法加以改進：(1)建置維修資訊管理系統(Maintenance Management Information System)。(2)成立 RCM 審查小組(RCM Review Group)。(3)給予人員適當的 RCM 相關訓練。研究結果證實 RCM 方法的確有效降低維修成本。儘管引進 RCM 時須花費一定的成本，然而因為故障情形明顯減少，造成故障維修(Breakdown Maintenance, BDM)的成本大幅下降，使得總維修成本因而節省許多。

## 2.2.2 關鍵維修項目之判斷與決定

S.Martorell、A.Muñoz 和 V.Serradell[54]利用傳統的錯誤樹分析(FTA)和邏輯樹分析(Logic Tree)，針對核電廠系統的維修加以分析，找出其關鍵元件的重大失效成因(Dominant Failure Cause)，並提出監督與預防策略。

Duthie[55]等將定量風險評估(Probabilistic Risk Assessment, PRA)方法整合至 RCM 過程中。利用 PRA 可決定執行維修工作(maintenance action)的優先順序，然而此方法必須在失效機率(failure probability)資料可得的情況下方能使用。

S.Martorell、V.Serradell 和 G.Verdú[56]利用由 PSA(Probabilistic Safety Assessment)衍生出來的核心損害頻率方法(Core Damage Frequency, CDF)來衡量系統元件是否是維持系統正常運作的關鍵項目。綜合其風險衡量指標：風險達成價值，Risk achievement Worth)，以及其關鍵性(Criticality)衡量指標：華索(Fussell-Vesely)指標，來決定該執行何種類的維修工作，如：視妥善度而定、監視預防、修理或移除等。

此外，楊朝均[3]將模糊理論應用於飛航安全維修上。除了採用風險優先數(Risk Property Number, RPN)分析其風險評價外，並以 TOPSIS 方法修正原本風險優先數的缺點，且經實例分析後證實可符合實務面之需要。

薛家豪[4]針對捷運電聯車系統的維護工作進行研究。他以灰色多屬性決策

方法來進行維修作業之選取(以每日檢修作業為例)，能夠提供決策管理者對於維修作業項目增減之參考；並以建立目標層級方法來架構維修績效評估指標，以協助決策管理者進行維修目標與策略之修正與規劃。在結果方面，經由與機廠專家的訪談，得到透過灰色多屬性決策的方法有助於維修作業選取之規劃參考的結論。

### 2.2.3 維修工作的選定與最適維修工作排程的探討

Huang、Miller 和 Okogbaa[57]利用韋伯分配(Weibull Distribution)決定單一元件系統的最適維修間隔(Interval)。Cho&Parlar[58]針對多元件(Multi-Unit)系統的各類維護模式進行回顧。此外 Dekker[59]亦針對各維修最佳化模式之應用進行回顧；而 Vatn、Hokstad 和 Bodsberg[60]則提出系統整體維修最佳化的模式。

Sittithumwat 等[61]提出在有限資訊下，維修資源應如何達到最適分配的數學模式。沈育樹[5]則利用基因演算法(Generic Algorithm)探討最佳的維護頻率。

### 2.2.4 維修績效之評估

D.J.Blower、P.L.primrose 和 R.Leonard[62]提出了一個經濟評估的方法，來判斷一系統值不值得引進 RCM。RCM 的引進往往導致高初始成本(Initial Cost)。而該方法將 RCM 的引進視為一個投資決策(Investment Decision)的問題，而以經濟項目分析引進 RCM 之後公司預期之獲利(Profit)，該方法的優點在於：(1)管理者可清楚瞭解 RCM 帶來的經濟效益，增加管理者對於引進 RCM 的支持度。(2)在引進 RCM 的資源投入之前，就可以決定 RCM 的經濟適宜性(economic suitability)。(3)使執行策略能同時兼顧財務和營運上的考慮。

陳國棟[6]利用平衡計分卡(balanced scoring card)評估捷運電聯車維修績效。經資料蒐集及統計分析後，共選取了 20 項績效指標項目，並且利用因素分析，萃取出五項核心績效因素，分別為：財務面下之成本及設備效益、維修人員效率；顧客面下之安全及舒適便利性；內部流程面下之可靠度及維修作業達成率；學習成長面下之員工學習與成長。之後並建立績效指標評估實施方式及流程。此外，經由單因子變異數分析結果，顯示受訪主管及員工並不因職務、年資、學歷之不同而有顯著性差異。

G.F.D'Addio、P.Firpo 和 S.Savio[63][64]根據系統元件重要性(Criticality)和運作資料(Performance Data)以隨機性派翠網路(Stochastic Petri Nets, SPN)建構高速鐵路車輛和大眾運輸系統維修工作的排程模式，並且評估其績效，證實 RCM 方法能有效減少維修成本，且適用於運輸系統。

### 2.2.5 RCM 在軌道系統方面之應用

Pedregal 等[66]應用了 RCM<sup>2</sup>的方法於軌道道岔的維護工作。RCM<sup>2</sup>結合了 Reliability Centered Maintenance(RCM<sub>1</sub>)和 Remote Condition Monitoring(RCM<sub>2</sub>)，藉由即時監控的功能獲取資訊，並藉以調整維修工作。然而對於無法觀察的元件，該研究則利用了 UC Model(Unobserved component models)加以預測。

Carretero 等[67]應用了 RCM 方法於歐洲軌道路網系統的維修上。由於歐洲

軌道路網系統極為龐大，在分析上頗為耗時。因此該研究將整個路網系統加以分層，計有：路線(Line)、區段(Section)、系統(System)、子系統(Subsystem)、維修項目(Maintenance Item)等。利用各層級之間的關係，可快速計算出整個路網系統各部份的狀態值(State)和嚴重度(Criticality)，以利維修工作優先順序的決定。

### 2.2.6 其他與 RCM 相關之研究

Johansson & Nilsson[68]的研究指出，軌道設施維護成本對於交通承載量有規模經濟(scale economy)的特性，其成本對交通承載量的彈性遠小於 1。Johnston 等[69]則運用電腦模擬的方式來訓練人員熟悉 RCM 方法的進行步驟與流程。

鄭志剛[7]嘗試應用灰色預測模型 GM (1,1)，預測武器系統零附件的耗用情形，並與現行備料需求方式做一比較分析，該研究顯示此方法可以更精準的預測零附件需求，可有效降低營運成本並維持系統可靠度。

陳祖光[8]探討如何在武器系統部署服役階段應用 RCM 分析，以掌握武器系統失效問題，適時預防並於失效發生時能及時達成維修目標，有效地提昇武器系統整體維修作業效益。此外，運用 RCM 分析於部署服役後系統最佳維修策略之探討，亦可於廠家提出研改案時，利用此分析模式來評估其是否具成本效益。

蘇國璋[9]曾經以台北市現行柴油燃料公車系統的維修(護)單位為實證對象。首先，使用失效模式與效應分析(FMEA)技術，在以可靠度為中心的維護度觀念模式(RCM)下進行系統可用度(Availability)的評估及相關資料的收集，提供管理決策單位對於運的維護度觀念模式下進行系統可用度的評估及相關資料的收集，提供管理決策單位對於運利用知識獲得與人機介面發展的技術和工具建立出維修任務分析的模式以及故障診斷型的專家系統，使其達到維修人員快速無誤地解決問題上的能力要求。

施育仁[10]探討機器設備之績效指標，結合以案例式基礎推理(Case-Based Reasoning, CBR) 之機台故障診斷的推論結果，提供使用者做決策。其中在推理的機制上對於機器設備有形資料的擷取，配合專家的經驗法則，依據機器設備停機狀況所得的案例，進行分析及彌補各站機器設備故障碼資料不足的部份與經驗的傳承，採行案例為基礎推理的方式將專家經驗儲存於案例資料庫中進行分析比較，篩選出可行維修策略的推理法則，給予不同需求的使用者。並且以半導體業測試部門做個案實證研究。

陳臣乾[11]嘗試進行可靠度集中維護(RCM)之邏輯分析，以產生二代艦的系統維修計畫。而吳崇銘[12]應用 RCM 分析於武器系統上，協助制訂出適當的預防性維修策略，找出裝備失效原因與影響，使其避免嚴重的失效結果，並達成較低的壽期成本。

## 2.3 派翠網路(Petri Net)之相關文獻

派翠網路(Petri Net)的觀念，最早是在 1926 年，由德國數學家 Carl Adam Petri 博士所提出，為一種兼具堅強數學基礎及狀態導向(State-Oriented)圖形化(Diagrammatic)的模式化系統分析與發展工具，以描述平行系統(Parallel Systems)

的動態行為(Dynamic Behavior)，圖形化的表示正符合人類視覺對圖形資訊最容易瞭解的特性，用來描述事件(Event)與條件(Condition)存在關係的圖形表達工具，可用來表達同步(Synchronous)與共時(Concurrent)的系統行為，且派翠網路本身的數學結構有相當完整的定義，可以用來分析系統的績效。可應用在許多不同的領域，做為系統的模式化(Modeling)、分析與模擬時的工具。常見的應用領域如彈性製造系統(Flexible Manufacturing Systems, FMS)、網路協定(Network Protocols)、計算機架構(Computer Architectures)、作業系統(Operation Systems)、即時系統(Real-Time Systems)、排程(Scheduling)及最佳化(Optimization)等。派翠網路的基本特性為：(1)一種優良的模式化工具。(2)一種容易邏輯化(Logicizing)的工具。(3)能夠清楚描述所探討的問題中之共時事件(Concurrent Event)與非同步事件(Asynchronous Event)。

柯裕隆[15]曾應用派翠網路於配電系統開關的開啟與關閉操作的模式化，並結合啟示性搜尋法及復電法則以建立配電系統的派翠網路開關操作策略推論機制。張捷能[16]將派翠網路應用於多媒體之復原模式。劉耿宏[17]則將廣義隨機派翠網路運用於生產線的預防保養。此外，王喬[20]應用派翠網路於多腔式製程設備之模式構建及自動化排程中；李承勳[18]則應用派翠網路於自動化工廠之偵察員和維修員的設計問題上。至於在可靠度工程的應用方面，邱錫斌[19]運用派翠網路於失效分析方法(Failure Analysis Approach)上，與傳統上所採用的錯誤樹分析法加以比較，並且以捷運車輛煞車系統為例，分析其故障原因。

## 2.4 文獻評析

由前三節所述可知，可靠度集中維護(RCM)的相關技術與方法，不管是在決定維護關鍵項目或者是最適維護排程方面，早已發展成熟且廣泛地應用在許多領域的維護議題之上。然而，RCM在軌道系統維修方面的應用，目前仍屬於萌芽階段，僅有少數研究針對軌道系統進行RCM分析。再者，國內軌道相關研究的起步較晚，以台北捷運為例，維修觀念仍停留在傳統的預防性維修上(如2.1節所述的日檢、月檢等)。雖有若干引入可靠度維護的案例，但也多半停留在元件層次，尚未應用於系統整體維護工作的分析、規劃與管理上。因此，本研究利用RCM中的錯誤樹分析(FTA)、失效模式和影響及嚴重度分析(FMECA)來找出影響系統風險較大的關鍵項目，以及其對於系統影響程度較大的失效模式，並針對這些項目和失效模式進行維修策略方案之研擬(Ex：維修工作的選定、維修間隔的調整)和維修績效的評估。嘗試以系統全觀的角度出發，提出調整台北捷運電聯車系統維護策略之建議。

### 第三章 電聯車系統分析與研究步驟

本章首先針對研究對象，也就是捷運電聯車系統進行分析，詳細說明其各子系統之功能與構成元件。繼而針對在本研究可靠度集中維護(RCM)分析過程中所採用的各種分析方法加以說明。最後詳述本研究在進行上的各個步驟，以及預期可能遭遇之問題與因應作法。

#### 3.1 電聯車系統分析

本研究的主要研究對象為台北捷運電聯車系統。高運量電聯車是以 3 節車廂(2 節動力車及 1 節無動力車)組成一個車組(Electrical Multiple Unit, EMU)，再由 2 車組以其尾部聯結成 1 列車，列車以 DM1-T-M2-M2-T-DM1 六節車廂固定編組方式上線營運，其中 DM1 車配有駕駛室，兩車廂之間有通道相通，電聯車規格如表 3-1 所示。電聯車主要由 11 個子系統所組成，如圖 3.1 所示，以下分別加以說明。

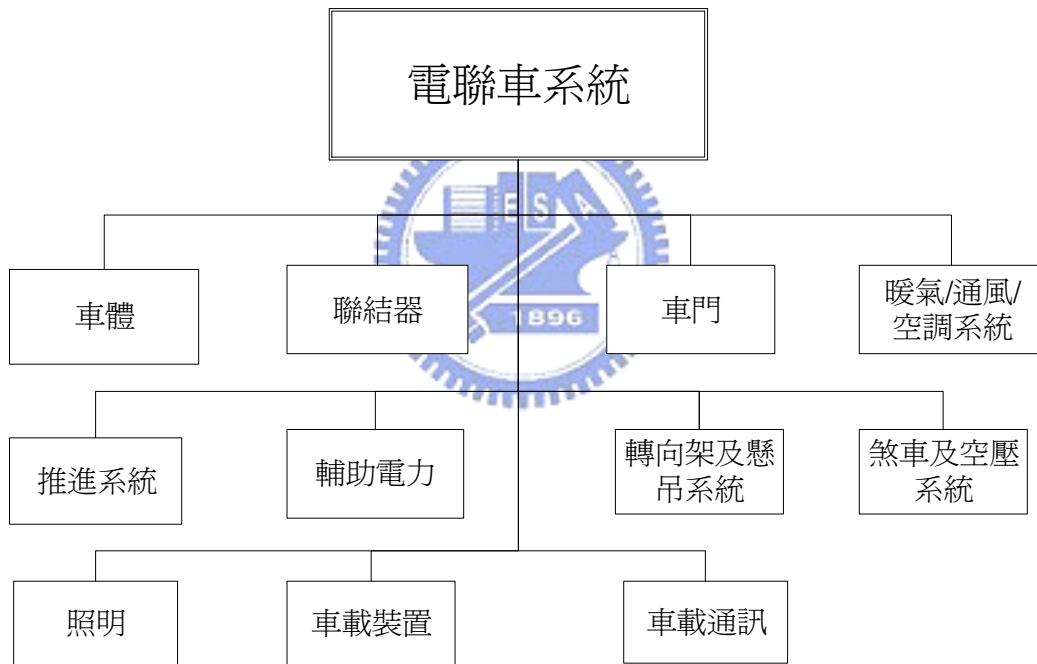


圖 3-1 電聯車子系統

##### 一. 車體(Car Body)

包含車體組成、車間通道、外殼與內裝、駕駛室、安全設施五部份。其中車體組成又可細分為底盤、左右側板、前後端板、車頂；外殼與內裝可細分為座椅、支柱與扶手桿、屏風、喇叭及緊急通話器、車內標誌、地板、廣告夾持器、通風管道。

##### 二. 聯結器(Coupler and Draft Gear)

包含機械聯結器(位於 DM1 車前端)、電氣及機械聯結器(位於 M2 車尾端)、半永久聯結器(位於 DM1 車與 T 車之間及 T 車與 M2 車之間)三部份。其中機械

連結器又分為機械連結頭、牽引連結裝置、連結器支撐座、中心定位裝置、氣閥。

### 三. 車門(Door)

包含旅客車廂門、駕駛室側門、駕駛室與車廂間隔離門、緊急逃生門、車門操作及相關組件。其中最後一項又可分為駕駛室操作面板、駕駛室控制箱、車門控制箱、車門就地控制面板、車門蓋板驅動機構、車旁釋壓閥、車尾關門按鈕、門開指示燈、滑輪組、擴音器、安全聯鎖設計。

表 3-1 高運量電聯車規格

高運量電聯車	淡水線、新店/中和/南港線	
車軌間距	1435 公厘	
車重	DM1 車	39 噸
	T 車	34 噸
	M2 車	39.5 噸
旅客座位	DM1 車	56 位
	T 車	60 位
	M2 車	60 位
營運年限	30 年	
供電方式	第三軌直流 750 伏特	
車廂長	23.5 公尺	
車廂寬	3.18 公尺	
車廂高	3.59 公尺	
列車長	141 公尺	
車廂地板高	1.15 公尺，與月台同高	
月台與列車間距	75 公厘	
軌道間距	1.435 公尺	
尖峰載客量	每車 319 人，坐位全部坐滿，站位 6 人/平方公尺	
最大載客量	每車 370 人，坐位全部坐滿，站位 7 人/平方公尺	
最高設計速度	90 公里/小時	
最高營運速度	80 公里/小時	
啟動加速度	1.0 公尺/秒/秒	
平均加速度	0.55 公尺/秒/秒	
常態煞車減速度	1.0 公尺/秒/秒	
緊急煞車減速度	1.3 公尺/秒/秒	
最大急衝度	0.8 公尺/秒/秒/秒	
平均行駛速度	35 公里/小時	
手動駕駛最高速度	25 公里/小時	
可承受最大風速	35 公里/小時	

主線最小曲率半徑	200 公尺
機廠最小曲率半徑	140 公尺
爬坡能力	≥3%
電池組	鎳鎘電池組 240 安培

資料來源：[1]

#### 四. 暖氣/通風/空調系統(Heating, Ventilation and Air Conditioning)

包括壓縮機/冷凝器機組、蒸發器機組及空調控制單元三部份。

#### 五. 推進系統(Power and Traction System)

包含集電靴、閘刀開關、線開關、線電抗器、推進變流器、煞車電阻、冷卻風扇、牽引馬達、齒輪箱、推進邏輯、主控制器、調車控制器等。

#### 六. 輔助電力(Auxiliary Electricity)

包含集電靴、閘刀開關、電氣及機械聯結器、蓄電池及電池充電器、機廠插座、輔助控制回路、接地電刷、低壓接線盒、靜態變流器等。

#### 七. 轉向架及懸吊系統(Trucks and Suspension System)

包含架框、主懸吊系統、次懸吊系統、輪軸系統、軸箱總成、側向緩衝擋、水平閘、縱向聯結組、防滾桿組、煞車裝置、列車自動停止裝置、輪緣潤滑器、速度偵測器、傳動單元、集電靴、接地碳刷及接地環、煞車引動器等。

#### 八. 煞車及空壓系統(Friction Breaks and Air Supply System)

包含空壓系統、編碼器、煞車控制單元、懸吊系統控制裝置、車輪防滑設備、自動列車停止裝置。

#### 九. 照明(Lighting)

包含日光燈、白熱燈、目的地顯示器等。

#### 十. 車載號誌(Cab Signal)

包含駕駛室號誌設備、車底盤號誌設備、自動列車保護/列車對道旁通訊接收線圈、列車對道旁通訊用發射線圈、速度感測器等。

#### 十一. 車載通訊(Cab Communication)

包含列車識別控制單元、列車識別控制操作面盤、通知控制單元、旅客內部通話單元、列車預錄語音廣播系統、無線電收發器、整流器、旅客通話喇叭、車廂喇叭、共用話筒、專用話筒等。

由上述系統分析可以瞭解，台北捷運電聯車系統非常地複雜，其中所包含的裝備(equipment)多達數千個。因此，在維修工作上必須擇其重要者優先加以執行，否則容易造成維修資源上的不必要浪費。

## 3.2 研究方法說明

可靠度集中維護(Reliability-Centered Maintenance, RCM)的觀念最早起源於航空業飛安維護工作的領域，是一種考慮各元件對整體系統安全的影響程度，並且適當配置維修資源的維修方式。根據 EPRI(Electric Power Research Institute)對於 RCM 的定義：「針對系統功能和其失效的方式進行系統化的全盤考慮，並且根據安全和經濟因素的優先順序加以考量，進行適宜且有效的預防性維護工作」。所謂適宜(Applicable)，指的是該維護工作可將失效機率減至可接受的範圍之內，也就是安全上的考量；至於有效(Effective)，則是該維護工作的成本必須小於失效(Failure)的成本，換言之亦即經濟上的考量。由此可知，RCM 是在原本的預防性維修工作中納入系統可靠度和維修成本的概念，從系統整體安全和經濟效益的角度出發，令維修工作的安排能夠更加具備效率，避免不必要的維修資源浪費，同時維持系統安全風險在可忍受的範圍之內。

而在 RCM 方法的實際操作上，融合了以往系統安全分析的許多方法，如錯誤樹分析(Fault Tree Analysis, FTA)和失效模式、影響與嚴重度分析(Failure Modes, Effects and Criticality Analysis, FMECA)等，以便找出影響系統的關鍵項目和其失效所造成的影響程度。至於維修工作的選擇、排程最佳化與維修績效評估方面，有許多方法相繼被提出，計有：決策邏輯樹分析(Logic Tree Analysis)、基因演算法(Generic Algorithm)、模糊多目標決策(Fuzzy MCDM)、灰色多屬性決策分析、平衡計分卡(balanced scoring card)、派翠網路(Petri Net)等。其中由於派翠網路的數學結構具有相當完整的定義，不僅可用來構建維修工作排程的模式，亦可用來分析系統的績效。因此，本研究運用派翠網路來進行台北捷運電聯車系統維修程和績效的評估。以下便針對 RCM 分析實際執行操作上的各步驟，以及本研究在 RCM 分析中採用的各方法加以說明。

### 3.2.1 RCM 方法之執行步驟

RCM 方法在實際執行上一共可分為 12 個步驟[48]，以下分別加以詳述。

#### 一. 研究事前準備

定義並且釐清目標和分析的範圍。此外，對於安全和環境方面的要求、政策和接受準則，也必須明確可見，以作為 RCM 分析的限制條件。

#### 二. 系統選擇和定義

首先要考慮的問題是針對哪一個系統，以及應針對該系統的哪個層級執行分析(整體、系統、子系統)。由於維修資源有限，所以必須訂出各層級進行 RCM 分析的優先順序，以獲益最大者為優先。此外，RCM 分析的最低層級為分析項目(analysis item)，而維修工作(Task)和間隔(interval)亦是針對分析項目來加以決定。

#### 三. 功能失效分析(Function Failure Analysis, FFA)



首先確認所有重要的系統功能。可分為以下幾種：

- (1) 必要功能(essential) --主要目的，如：水管輸水的功能。
- (2) 輔助功能(auxiliary) --支持必要功能，如：水管容納水。
- (3) 保護功能(protective) --保護人、裝備、環境，如：壓力安全閥。
- (4) 資訊功能(information) --狀態監控、危險警告裝置。
- (5) 介面功能(interface) --分析項目和其他項目的連結。
- (6) 多餘功能(superfluous) --改裝後失去功用的功能；有時候會造成其他功能的失效。

其次確認介面。可利用功能區塊圖(functional block diagram)、可靠度區塊圖(reliability block diagram)或錯誤樹分析(FTA)，將系統功能細分為子系統功能，再細分為功能項目功能。

最後確認並描述系統失效模式(system failure mode)；亦稱為功能失效(functional failure)，可分為三類：

- (1) 突發性失效(sudden failures)。
- (2) 漸發性失效(gradual failures)，可藉由測試和檢驗預測得知。
- (3) 老化性失效(aging failures)，隨時間其發生機率愈來愈高，如材質上的磨耗。並且針對各失效模式決定其嚴重度(Criticality)，決定因素有：

- (1) S：人員安全(Safety of personnel)。
- (2) E：環境衝擊(Environmental Impact)。
- (3) A：生產妥善度(Production availability)。
- (4) C：物料損失(Material loss costs)。

各因素之評估可分成四個等級：高(High)、中(Medium)、低(Low)、可忽略(Negligible)。四因素中若有其一為H或M，則界定為重要(significant)；若四者皆為L或N，且發生頻率亦低，則界定為不重要。另外，發生頻率也是必須納入考量的因素。

#### 四. 關鍵項目選擇

利用錯誤樹分析(FTA)、可靠度區塊圖(reliability block diagram)、蒙地卡羅模擬法(Monte Carlo simulation)找出對系統運作功能上重要的項目，即FSI(Functional significant items)。除FSI外，還必須找出MCSI(維修成本重要項目)，即高失效率、高維修成本、低修妥率(maintainability)、前置時間長、需外聘維修人力的維修項目。FSI和MCSI的結合即為MSI(維護重要項目)，而以下的分析均是針對MSI為主。

#### 五. 資料搜集和分析

進行相關的資料搜集，應搜集的資料計有：

- (1) 設計資料(Design Data)
- (2) 營運資料(Operational Data)
- (3) 可靠度資料(Reliability Data)：MTTF (mean time to failure，平均失效時間)、

MTTR (mean time to repair, 平均失效時間)、 $z(t)$  (failure rate function, 失效率函數)

此外,若系統尚未建置好,導致可靠度資料缺乏時,可暫時先用類似裝備、製造商使用說明書和測試結果中所取得的替代資料進行分析。

#### 六. 失效模式、影響和嚴重度分析(FMECA)

找出各 MSI 中,影響較大的失效模式(dominant failure mode),並採用 FMECA 工作單,紀錄以下資料:MSI 編號、操作模式、功能、失效模式、故障影響/嚴重等級(以 worst case 表示)、最糟情況(worst case)發生機率、MTTF、嚴重度、失效成因、失效機制、失效特性(可否監測、失效機率是否隨時間增加、完全隨機性)、維修行動、失效特性量度等。

#### 七. 維修行動之選擇

針對各影響較大的失效模式(dominant failure mode),決定適當且有效的預防性維護工作,維修工作可分為以下五類:

- (1) 定期檢視狀況 (scheduled on-condition task)
- (2) 定期進行修理 (scheduled overhaul)
- (3) 定期進行更換 (scheduled replacement)
- (4) 定期進行功能測試 (scheduled function test)
- (5) 運轉至故障後再進行汰換 (run to failure)

#### 八. 維修時間間隔的決定

過去許多文獻曾探討過最適維修時間間隔的模型,然而其多半建立在兩點假設之下:(1)只考慮單一項目(2)失效(failure)成本皆可以用貨幣加以量化。在實務上此兩點假設往往不成立,因此多半依賴過去累積的經驗,或者是系統元件製造商的建議。

#### 九. 預防性維護工作之比較分析

從該工作是否適宜和有效來加以考量。所謂適宜(Applicable),指的是該維護工作可將失效機率減至可接受的範圍之內;有效(Effective),則是該維護工作的成本必須小於失效(Failure)的成本。換言之即是安全和經濟因素上的同時兼顧。

#### 十. 非關鍵項目的處理

假使維護成本不高,則執行原有的維修排程;若維修成本過高,則考慮停止原先排定的維護工作。

#### 十一. 執行

不恰當的維修和執行中的維護工作,都可能造成意外。換言之,必須體認到維護工作本身即帶有風險,尤其是人為疏忽常容易釀成意外。

#### 十二. 運作資料的搜集與更新

在系統運作過程中,必持續搜集相關資料並加以更新。資料的更新有助於以

下三點：

- (1) 短期---維修間隔的調整。
- (2) 中期---維修工作的評估。
- (3) 長期---起始維修策略之修正。

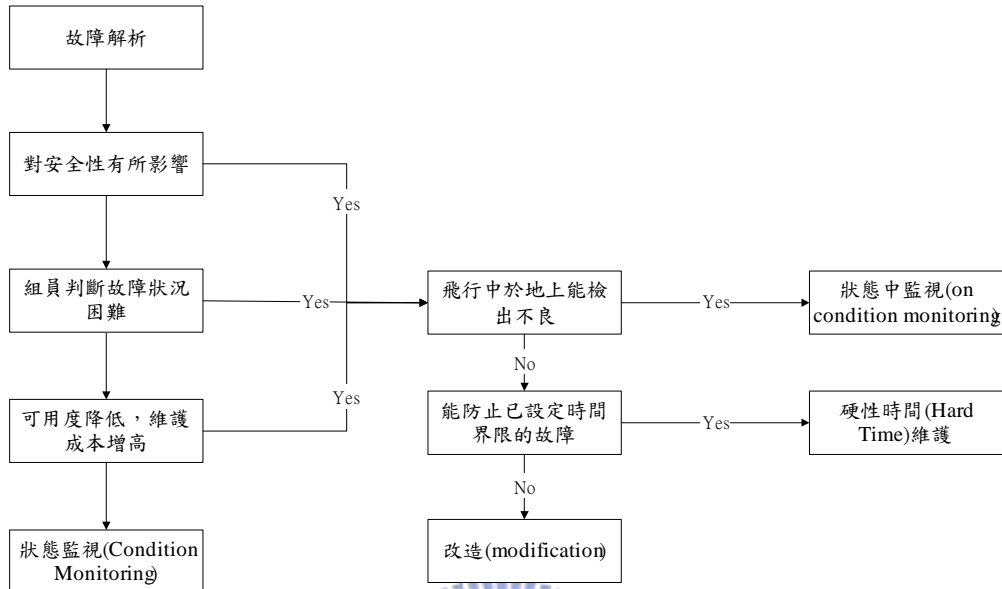


圖 3-2 飛機維修的簡單 RCM 邏輯[27]

圖 3-2 是以飛機維修為例的 RCM 架構[20]。其中 On Condition 是對重要的單元的定期性確認；Hard Time 是利用設定時間界限的檢修(overhaul)進行預防維護；Condition Monitoring 是對較不重要的單元依狀態進行非定期預防維護(包含事後維護)。

### 3.2.2 參照單位分析(Ridit Analysis)

Ridit 一詞就如同 Logit、Probit 一樣，「it」詞尾所代表的是一種型式的轉換(Transformation)，而「Rid」的含意則是「Relative to an Identified Distribution」，意指「與特定分佈相對應」，因此 Ridit Analysis 亦稱為「參照單位分析」，由 Bross 在 1958 年所提出[78]，適合用來處理含混且模糊的資料。其主要精神在於利用累積機率分數(Cumulative Probability Score)來表示順序尺度(Ordinal Scale)資料中各順序等級之強弱，以代替傳統上任意選擇順序等級中之百分數的作法。假設有  $m$  個順序等級， $k$  個分類(或問項)。其作法是先確定一個標準組(Reference Class，或稱為參考組)Y 之分配為  $\{\pi_i, i=1,2,\dots,m\}$ ，並且令  $r_1 = \frac{1}{2}\pi_1$ ，

$$r_i = \sum_{k=1}^{i-1} \pi_k + \frac{1}{2}\pi_i, \quad i=2,\dots,m。其中 \pi_i = \frac{n_{i\cdot}}{n_{\cdot\cdot}}, n_{i\cdot} 為第 i 個順序等級的總次數，$$

$n_{\cdot\cdot} = n_{1\cdot} + n_{2\cdot} + \dots + n_{m\cdot}$ 。很明顯地， $r_1 < r_2 < r_3 < r_4 < \dots < r_m$ 。再者，令  $R_{ij} = r_i \pi_{ij}$ ，

$\pi_{ij}$  表示第  $j$  項第  $i$  順序等級之機率，其中  $j=1,2,\dots,k$ 。接著便可以求出第  $j$  項問項

的相對於  $m$  尺度順序等級「橫向比較」的 Mean Ridit 值（或稱 Average Ridit），簡稱  $R_j$ 。 $R_j = \sum_{i=1}^5 R_{ij}$ ，這些  $R_j$  值的期望值恆等於 0.5[85]。

此外，尚可利用 Kruskal-Wallis 檢定來檢驗各  $R_j$  值之間是否有存在有等級上的顯著差異。其虛無假設和對立假設分別解釋如下：

$H_0$ ：所有項目之重要性均相等。

$H_1$ ：並非所有項目之重要性均相等。

令  $W$  為檢定統計量， $W = \frac{12n_{..}}{(n_{..} + 1)} \sum_{j=1}^k n_j (R_j - 0.5)^2$ 。對於  $k$  個問項中，以  $m$  個順序尺度來衡量受訪者的反應。 $n_{ij}$  表示受訪者在第  $j$  個問項中填答  $i$  的總數。

$n_{i.}$  表示所有填答中填答  $i$  的總數，也就是  $n_{i.} = \sum_{j=1}^k n_{ij}$ 。 $n_{.j}$  表示第  $j$  問項之填答人數，也就是  $n_{.j} = \sum_{i=1}^m n_{ij}$ ， $n_{..}$  表示所有受訪者所填答的問項總數目。在  $W$  的計算

中，另定義  $T = 1 - \frac{\sum_{j=1}^k n_{i.}^3 - n_{i.}}{n_{..}^3 - n_{..}}$  為所有項目之重要性均相等(Ties)之校正因子。 $W$

之分配為近似於自由度為  $(k-1)$  之卡方分配，即  $W \sim \chi_{(k-1)}^2$ 。所以，當  $W > \chi_{(1-\alpha)(k-1)}^2$  時，表顯著拒絕虛無假設，顯示各項目之重要性呈現等級上的顯著差異。

### 3.2.3 錯誤樹分析(Fault Tree Analysis, FTA)

錯誤樹分析(Fault Tree Analysis, FTA)首先發展於美國國防科技工業，導因於航空飛彈工業屢次發生事故或失敗，過去的研究均著重於事後的事故鑑定及調查，對於事故的預防以及各零組件發生事故的機率，甚至錯誤事件風險的量測均付之闕如。有鑑於此，1960 年代美國空軍乃商請貝爾實驗室研究一套追尋事故前因後果的方法，在事故發生之前，甚至系統建構之前，能預先知道錯誤所在以及其發生的機率。此種方法亦可以應用在事故發生後，探討事故錯誤原因及風險。1961 年，H. A. Watson 以及 A. B. Mearns 發展錯誤樹分析，以一種以邏輯圖形的方法，追溯系統中所有可能導致不幸結果的錯誤。

錯誤樹分析可分為定性分析以及定量分析，可以探究意外事故發生的原因，瞭解各因素的相互關係，並就每一促成因素發生的機率，探究整體事故之發生機率，固有安全工程師使用它來作為意外事故防止的工具，或事故發生後的調查方法之一。在 1964 年，R. E. Vesely 在愛達荷核子公司 (Idaho Nuclear Corporation) 開創使用電腦處理 FTA 的先河，此後，使得 FTA 能處理複雜的定性及定量分析，因此使得大型系統如：飛彈系統、核能發電廠以及軌道運輸系統等都可以作整合性的分析

從事錯誤樹分析，首先選擇在系統中不希望發生的意外事故，做為頂上事件

(Top Event)。選擇的意外事故之風險必須要高，也就是其嚴重程度、發生機率或者兩者乘積後的風險值很高，而且問題必須有一定的複雜度，一般風險小的事故或複雜度不夠的事件是沒有作錯誤樹分析的必要。在選定頂上事件之後，便由上而下開始分析事故的原因。上者為果，下者為因。上下事件之間，以閘(Gate)加以區隔。由上而下的分析過程中，必須儘可能利用已知的資料，發掘新的資料。即使資料不詳，亦可以推理之，此時得借助於經驗、知識、和想像力。有新的資料出現時，得隨時修正。以下先針對錯誤樹分析所會用到的邏輯符號進行簡單的介紹與定義說明。

**【事件】**：在系統中一個已經很明確或特殊的事情。在本質上，這些事件有兩種可能的情況：發生與不發生，而且只有這兩種情況。每一事件，未必造成錯誤，可能只是系統中的某一正常功能，例如電器開關，當不能產生開關的正常功能時，才算錯誤。錯誤時，這事件稱為錯誤事件 (Fault Event)，否則即屬於正常事件 (Normal Event)。事件的正常或錯誤，兩者為互斥 (mutually exclusive) 且包含全部 (all-encompassing)。換句話說，兩者不能同時發生或並存。

**【長方形符號】**：代表一特定的事件。常常表示 AND gate 或 OR gate 的輸入 (input) 或輸出 (output)。進一步的分析是可能的，如圖 3-3 所示。



圖 3-3 FTA 之長方形符號

**【圓形符號】**：代表系統中的某一基元事件(Basic Event)，無須加以進一步的分析。這些基元事件也許是電路故障或失去功能，如圖 3-4 所示。

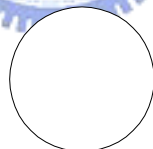


圖 3-4 FTA 之圓形符號

**【菱形符號】**：代表事件的發展由於資料的缺乏而終止，沒有充分的資料支持下一層次的推理是合理的。但若有進一步的推理仍然可行。這是一個發展未完全的事件 (undeveloped or incomplete event)。如圖 3-5 所示。

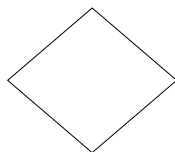


圖 3-5 FTA 之菱形符號

**【鐘罩形符號】**：稱為 AND gate。其意義為只有在其子項目都同時存在或發生的情況下，其母項目才會存在。假若其中一個子項目不存在，母項目即不可能存在，如圖 3-6 所示。



圖 3-6 FTA 之鐘罩形符號

【盞形符號】：稱為 OR gate，代表其子項目中任一個或一個以上存在或發生時，其母項目即存在，如圖 3-7 所示。

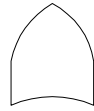


圖 3-7 FTA 之盞形符號

【橢圓形符號】：代表條件情況，非意外或錯誤事件，但需要在此條件情況之下，其 AND gate 或 OR gate 的母項目才會存在，如圖 3-8 所示。

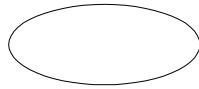


圖 3-8 FTA 之橢圓形符號

【三角形符號】：稱為轉移符號 (transfer symbol)，分為兩種，一為 transfer-in triangle，自三角形的頂端流出來。使用時，此記號的上一層是 gate 與其連接，並指向樹的另一部份（該部分有 transfer-out triangle），如圖 3-9 所示。另一為 transfer-out triangle，自三角形的一邊之終點指向樹的重複部分。使用時，自三角形邊之中點出來與 gate 連接。在此 gate 的下方輸入事件皆為重複部分，如圖 3-10 所示。

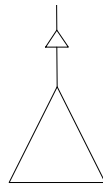


圖 3-9 FTA 之三角形符號（一）transfer-in triangle

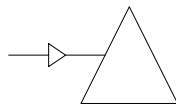


圖 3-10 FTA 之三角形符號（二）transfer-out triangle

在一個錯誤樹中，最底下的事件即為基元事件 (Basic Event)。當我們在事故發生之後，進行推論、追尋事故之所以發生的原因之時，當追尋到再往下分析已無意義之時，此不能再予細分的事件，即為基元事件。基元事件為錯誤樹最小、最基本的事件，且俱為邏輯上的獨立事件。頂上事件 (Top Event) 為錯誤樹中，最上面的那個事件，換言之，頂上事件常是災變的結果，或者是我們所不希望發生

的事件。

在建立錯誤樹之後，便可針對事故進行定性和定量分析。錯誤樹的定性分析的目的包括：

- (1) 找出使得 Top Event(頂上事件)發生的基元事件，亦即算出最小切割組 (Minimum Cut Set，又稱最小切集合)。
- (2) 明瞭哪些基元事件較為重要。

最小切割組/集合(Minimum Cut Set)是最小的基元事件的集合。如果這個最小的切集合處於失誤狀態，整個系統就處於失誤狀態。因其為最小的切集合，故不能包含其他最小的切集合(否則就不會是最小切集合)。因此，某一事故的錯誤樹可以此一所有最小切集合的集合來表示。

錯誤樹的定性分析是以最小切集合為基礎，以決定哪些會促使頂上事件發生的基元事件；就避免頂上事件發生而言，哪些基元事件需予特別注意等問題。最小切集合也許僅含有一個基元事件，也許含有兩個或多個基元事件。含有一個基元事件的最小切集合，稱為一元(one-component)最小切集合；含有兩個基元事件的最小切集合，稱為二元(two-component)最小切集合；含有 n 個基元事件的最小切集合，稱為 n 元(n-component)最小切集合。一個 n 元最小切集合必需在其所有集合內的基元事件皆發生失誤時，才會使頂上事件發生。

就系統安全的角度而言，比較有興趣的是從錯誤樹中找出最小切集合，以決定哪些基元事件的改善之道及防止順序。但從可靠度的觀點來看，比較關心的是頂上事件不發生的情況。錯誤樹是表示頂上事件發生的情況，若要表示「頂上事件不發生」的情況，則需把原來錯誤樹中的 OR Gate 改換成 AND Gate，而將 And Gate 換成 OR Gate，且將切集合換成徑集合(Path Set)即可。徑集合是切集合的反面。而徑集合的集合就是原來錯誤樹的反面，亦即成功樹(Success Tree)。同理，最小切集合的反面就是最小徑集合。最小徑集合是基元事件皆不發生的最小集合，使得頂上事件不致發生。

實施定性分析最簡便的方式，是使用布林代數(Boolean algebra)，以圖 3-11 為例：

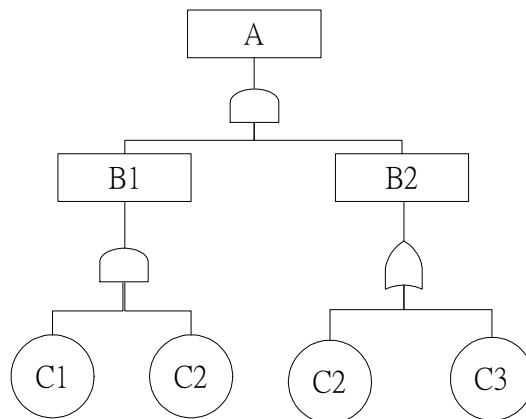


圖 3-11 錯誤樹定性分析範例

經由布林代數運算可得：

$$\begin{aligned}
A &= B_1 B_2 \\
\because B_1 &= C_1 C_2 \\
\because B_2 &= C_2 + C_3 \\
\therefore A &= C_1 C_2 (C_2 + C_3) \\
&= C_1 C_2 C_2 + C_1 C_2 C_3 \\
&= C_1 C_2 + C_1 C_2 C_3 \\
&= C_1 C_2 (1 + C_3) \\
&= C_1 C_2
\end{aligned}$$

亦即 A 事件是  $C_1$  與  $C_2$  的交集， $C_3$  因機率太低，較不重要。圖 3-12 為圖 3-11 之簡化，其意義相同。

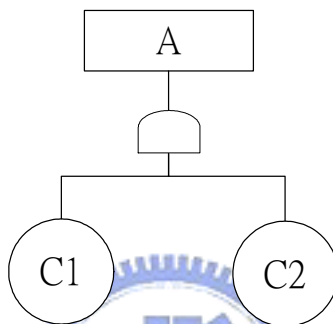


圖 3-12 錯誤樹定性分析範例之簡化

至於錯誤樹的定量分析，簡言之，在於求得頂上事件(Top Event)的機率。以下加以說明：

- (1) 在 AND Gate 下互為獨立事件(如圖 3-13 所示)。若  $B_1, B_2, \dots, B_n$  皆是互為獨立事件(independent event)，則  $P(A) = P(B_1)P(B_2) \cdots P(B_n) = \prod_{i=1}^n P(B_i)$ 。

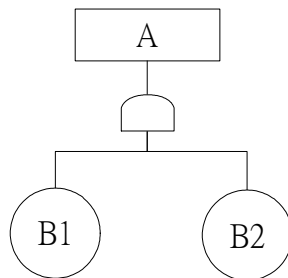


圖 3-13 錯誤樹定量分析範例之一

- (2) 在 OR Gate 下互為獨立事件(如圖 3-14 所示)。若  $B_1, B_2, \dots, B_n$  皆是互為獨立事件，則



$$\begin{aligned}
P(A) &= 1 - [1 - P(B_1)][1 - P(B_2)] \dots [1 - P(B_n)] \\
&= 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(B_i)] \\
&= 1 - \prod_{i=1}^n P(\bar{B}_i)
\end{aligned}$$

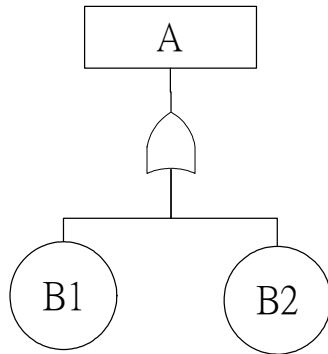


圖 3-14 錯誤樹定量分析範例之二

錯誤樹定量分析便以上述兩例為基礎，藉由各分支底下 AND Gate/OR Gate 的運算，逐步推得頂上事件的發生機率。

### 3.2.4 失效模式、影響與嚴重度分析(Failure Modes ,Effects and Criticality Analysis , FMECA)

失效模式、影響及嚴重度分析 (Failure Mode, Effect and Critical Analysis，簡稱 FMECA)，首先在美國國防科技中研究發展，且在國防部各機構普遍應用，後來逐漸應用於核能、化工、石化、海上鑽油等高風險工業中。而其他精密工業如航太工業、半導體工業、資訊業亦已普遍使用之。工業界的設計工程師與可靠度工程師常運用 FMECA 以預測複雜系統的可靠度，預估一個系統的次系統或零件在某特定的時間及情況下，如何失去其功能，失效的次數是多少，失效之後對其他零件或對整個系統會產生多大的影響，以及整個系統的風險。

FMECA 是 FMEA(故障型式及其影響分析)和 CA(Criticality Analysis，嚴重度分析)兩種分析技術的總稱。其中 FMEA 的步驟如下(請參考表 3-2)：

- (1) 建立基本規範：包括作業與環境的要求條件、要分析的硬體之最低程度是什麼。辨識系統等。
- (2) 確定所要分析的系統，並加以描述：所要分析的系統、子系統及組立(合)(assembly)的功能皆予認定。系統的使用限制條件，故障型式亦須敘明。說明系統的功能應包括所要完成的工作任務、作業模式、作業環境情況、預期得任務次數等。
- (3) 畫方塊圖：說明系統內各組件的作業、功能上的相互關係，互依(interdependencies)情況的方塊圖，應予建立，並指出系統內外的介面。每一作業面或作業模式宜各有其方塊圖。
- (4) 認定故障型式及其原因：指出各零組件的介面故障模式及其故障原因。每一

故障型式的原因也許不僅有一種，因此需把相關的原因一一列出。

- (5) 認定故障的影響：每一零組件在作業、功能，所造成的影響，應予認定、評估並紀錄。影響的層面有其大小，因此需考慮發生故障的零組件本身的影響，以及對其他零組件、子系統或整個系統的不同影響。
- (6) 說明故障偵測裝置：作業員用來偵測故障型式發生的裝置需予說明。故障偵測裝置，如視覺或聽覺警告裝置、自動感知裝置、感知儀器等皆予列出。這些裝置應能使作業員立即察覺故障發生，而採取適當的補救措施。
- (7) 補救措施：一旦故障發生，為了消除或減輕故障的不良影響，可經由設計本身或由作業員採取補救措施。
- (8) 嚴重度分類：評估每一種故障型式，依其發生後可能產生的最嚴重結果，賦予一個嚴重度分類。可靠度工程師將此項分類分成四級，而安全工程師自安全觀點，將每一級的含義略為變更，分為四類：
  - (i) 安全(Safe)或稱微不足道(negligible)：故障發生時，不會改變系統的正常功能，且不會造成系統的傷害或損毀系統的功用，或產生系統的危害，或造成人員傷亡或顯著的財產損失。
  - (ii) 安全邊緣(safety marginal)：故障發生時，多少會影響系統的正常功能、人員傷害或顯著的財產損失，只要調整或修理即可恢復正常作業。
  - (iii) 危急(Critical)：故障發生時，會影響系統的正常功能，對於系統的人員、財產會造成損害、傷亡，需立即採取補救措施。
  - (iv) 災變(Catastrophic)：故障發生時，會使整個系統嚴重損毀而失去功能，造成至少一人死亡或多人重傷。
- (9) 提出改善措施，以便消除故障或控制危害。
- (10) 備註或說明：FMEA 分析單上各欄中有需要說明的地方，可在最後一欄敘述。在此欄中亦可談到一些不正常的情況、redundant 零件的故障影響、特別重要的設計問題等。

表 3-2 故障型式及影響分析單(FMEA)範例

系 統 _____							日 期 _____					
零組件 _____							分析者 _____					
任 務 _____							審核者 _____					
編號	零組件名稱	功能	故障型式	故障原因	作業模式	故障造成的影響			故障偵測裝置	補救措施	嚴重性分類	備註或說明
						對零組件本身	對其他零件	對整個系統				

FMEA 的技術的優點是(1)對於硬體設備的檢核相當徹底。(2)是複雜系統的利器。(3)易於實施。大部份採用定性分析，小部份做量化分析(如發生機率或故障

率)，具有半量化功能。其缺點為(1)很少分析人為失誤(2)耗時費力(3)分析者未察覺多重故障情況。

CA(嚴重度分析)的目的是將FMEA中故障型式依其發生頻率與嚴重度分類予以分級，以利於決定改善的先後順序。因此CA僅是FMEA的左右手，不能沒有FMEA而獨立存在。一般採用故障率(failure rate)資料和特定的零件結構(configuration)資料(請參考表3-3)，若缺乏資料則改採定性法加以判斷。一旦各種故障型式分析出其嚴重性與嚴重度之後，便可利用嚴重度矩陣(criticality matrix)，比較他們之間的嚴重度。將零件故障型式的代號分別由其嚴重性與嚴重度數(或發生機率)，填入矩陣空格中(如表3-4所示)。居於矩陣左上方的故障型式，其嚴重度愈高，改善措施須優先考慮實施。而居於右下方者，其嚴重度較低，可隨後再予改善。

嚴重度矩陣或稱風險指數，為比較風險大小的簡單方法。表3-5表示風險評估機準及可接受之程度。

表 3-3 嚴重度分析單(CA)範例

系 統 _____											日 期 _____			
零 組 件 _____											分 析 者 _____			
任 務 _____											審 核 者 _____			
編 號	零 組 件 名 稱	功 能	故 障 型 式	故 障 原 因	作 業 模 式	嚴 重 性 分 類	故 障 機 率	$\beta$	$\alpha$	$\lambda p$	t	Cm	Cr	備 註 或 說 明
							故 障 率							

表 3-4 嚴重度(風險)矩陣

故障機率	災害嚴重性			
	災變(1)	危急(2)	安全邊緣(3)	安全(4)
Frequency(A)	1A	2A	3A	4A
Probable(B)	1B	2B	3B	4B
Occasional(C)	1C	2C	3C	4C
Remote(D)	1D	2D	3D	4D
Improbable(E)	1E	2E	3E	4E

表 3-5 風險評估基準

風險指數	風險可接受性	改善措施
1A, 1B, 1C, 2A, 2B	不可接受	實施強制性的改善, 或控制措施
1D, 1C, 3A	不被期待	設法改善或控制
1E, 1D, 3B, 3C	可接受	適當警覺, 需予稽查
2E, 3D, 3E, 4A, 4B, 4C, 4D, 4E	可接受	不需特別注意或稽查

### 3.2.5 派翠網路(Petri Net)

一般而言，一個派翠網路為一個具有雙方向性的圖形(Bipartite Directed Graph)，具備兩種元件—網路(Net)和初始標記(Initial Marking)。網路包含兩種節點—分別稱為位置節點(Places)和轉移節點(Transitions) —以及有方向性的線段(Directed Arcs)以連接位置節點到轉移節點的流量關連(Flow Relation)。以圖形表示時，圓圈 O 代表位置節點，方塊狀□表示轉移節點，黑點●代表表徵(Token)，其中位置節點內可含有或不含有表徵，且限制每個位置節點內所含的表徵數目最多為一個。以帶方向性的線段來表示從位置節點到轉移節點及轉移節點到位置節點的流向關連。如圖 3-15 所示。

如果一個派翠網路中某些位置節點內含有表徵，則稱此派翠網路為一個具標記(Marking)的派翠網路。於系統模式化(Modeling)時，位置節點表示系統中關於程序或資源的狀態(State)，轉移節點表示在系統中的事件(Event)或活動(Activities)。一個轉移節點(事件)會有數個不等的輸入位置節點(Input Place Nodes)和輸出位置節點(output Place Nodes)，代表此事件的事前條件(Pre-Conditions)和事後條件(Post-Conditions)。派翠網路的規則只有一個：轉移節點的致能(Enabled)與激發(Fired)，當一個轉移節點的所有輸入位置節點均含有表徵時，轉移節點具備致能的條件。一個可致能的轉移節點代表其可能會被激發，轉移節點的激發(Firing)將支配控制派翠網路的動態行為，當一個轉移節點被激發後，其輸入位置節點中的表徵將被移除，且表徵將順勢向前傳遞至該轉移節點所對應的所有的輸出位置節點中。透過派翠網路中轉移節點的激發及表徵不斷地向前傳遞，同步並行推論可被完美地詮釋。藉由表徵不斷地向前傳遞，當表徵傳遞至代表最終目標之位置節點時，則完成派翠網路推論機制之整個推論過程。

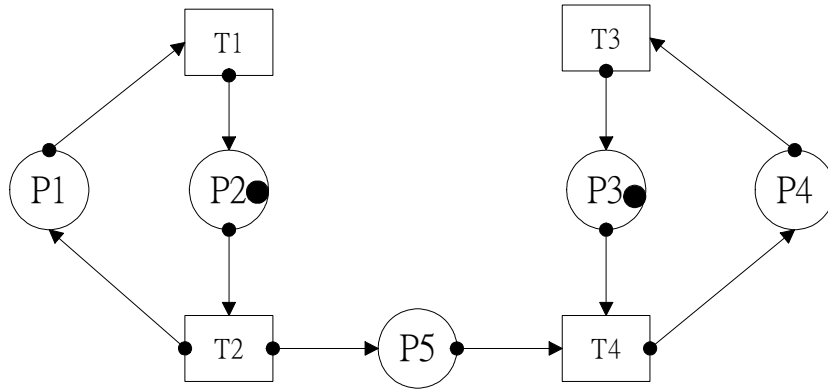


圖 3-15 典型派翠網路模組 資料來源：[15]

派翠網路的基本模組有以下五種：

模組一：若 A 則 B。當左側的 A 條件滿足並取得表徵時，轉移節點被致能激發之後，表徵向前傳遞，亦即此時系統狀態由左側的 A 改變至右側的 B(如圖 3-16 所示)。

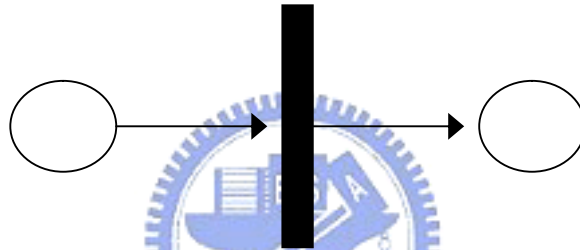


圖 3-16 派翠網路基本模組一

模組二：若  $A_1$  且  $A_2$  且...且  $A_n$ ，則 B。當左側的  $A_1 \sim A_n$  條件滿足並均取得表徵時，轉移節點被致能激發之後，表徵向前傳遞，亦即此時系統狀態改變至右側的 B。此型式可視為邏輯上及閘(AND Gate)運算操作(如圖 3-17 所示)。

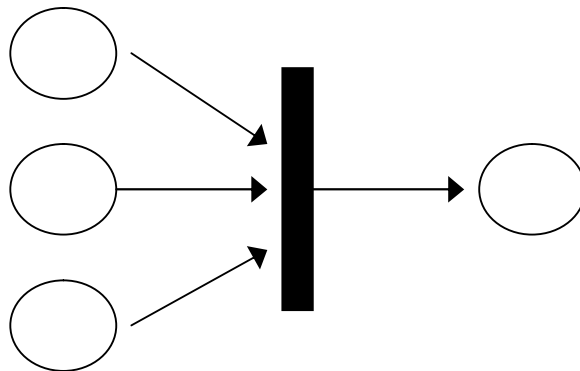


圖 3-17 派翠網路基本模組二

模組三：若 A 則  $B_1$  且  $B_2$  且...且  $B_n$ 。當左側的 A 條件滿足並取得表徵時，轉移節點被致能激發之後，表徵向前傳遞至  $B_1 \sim B_n$ ，亦即此時系統狀態改變至右側的  $B_1$  及  $B_2$  及...及  $B_n$ (如圖 3-18 所示)。

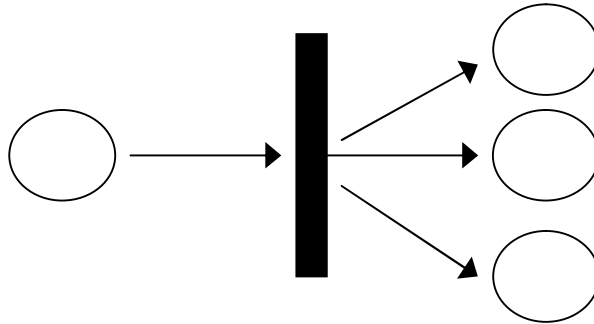


圖 3-18 派翠網路基本模組三

模組四：若  $A_1$  或  $A_2$  或...或  $A_n$ ，則  $B$ 。當左側的  $A_1 \sim A_n$  其中只要有一個條件滿足並取得表徵時，轉移節點被致能激發之後，表徵向前傳遞，亦即此時系統狀態改變至右側的  $B$ 。此型式可視為邏輯上或閘(OR Gate)運算操作(如圖 3-19 所示)。

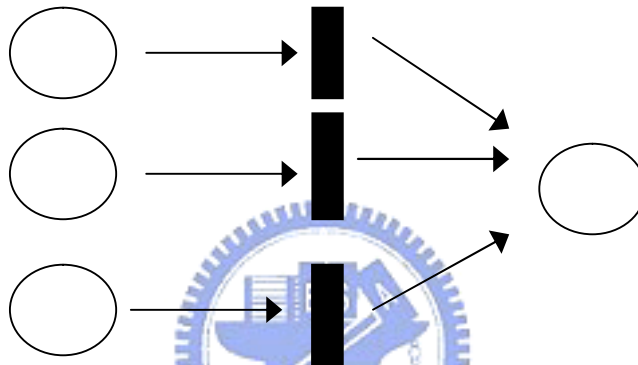


圖 3-19 派翠網路基本模組四

模組五：若  $A$  則  $B_1$  或  $B_2$  或..或  $B_n$ 。當左側的  $A$  條件滿足並取得表徵時，轉移節點被致能激發之後，表徵向前傳遞至  $B_1 \sim B_n$  其中一個，端視各轉移節點的守衛函數(Guard Function)而定(如圖 3-20 所示)。

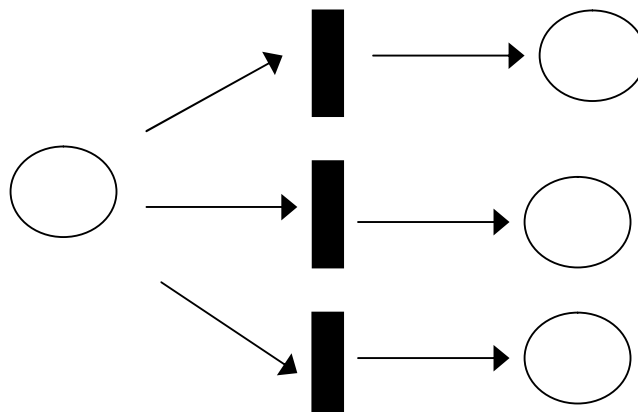


圖 3-20 派翠網路基本模組五

派翠網路之網路結構可分為下列五種：

(一)禁止線段：當輸入位置節點有表徵時，轉移節點將無法被致能；但當輸入位置節點無表徵時，則此轉移節點可被致能並激發(如圖 3-21 所示)。

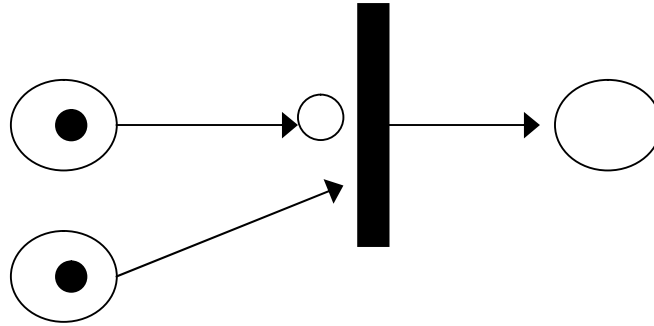


圖 3-21 具有禁止線段之派翠網路

(二)連續事件：一連串之事件接連著被致能激發，表徵不斷地向前傳遞，形成連續事件之派翠網路(如圖 3-22 所示)。

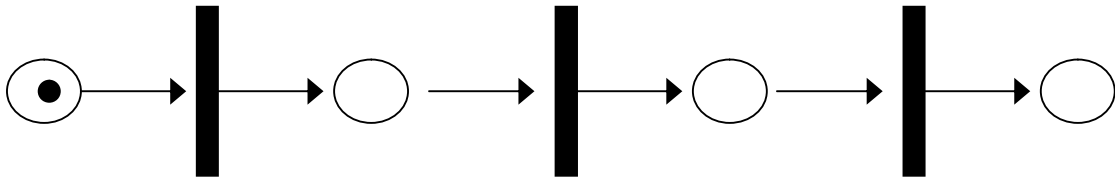


圖 3-22 連續事件派翠網路

(三)事件衝突(Event-Conflict)、選擇(Choice)或決策(Decision)：如圖 3-23 所示。當兩個以上的轉移節點均有機會被致能激發時，結果是只有其中一個可被致能激發。此時便成為事件衝突的情形，必須於此兩個以上事件中做出選擇或決策。



圖 3-23 衝突、選擇或決策之派翠網路

(四)共時執行：如圖 3-24 所示，當最左側的轉移節點被致能激發後，表徵向右傳遞至兩個位置節點中，並將同時繼續向右傳遞至各自的下一個位置節點中，產生事件同時進行的情形。

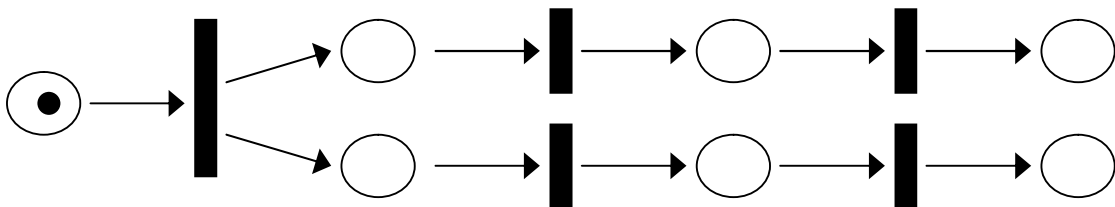


圖 3-24 共時執行之派翠網路

(五)同步：假設表徵傳遞無時間差，意即同步傳遞至轉移節點中。如圖 3-25 所示，三個表徵同時傳遞至轉移節點中，而轉移節點在被致能激發之後，表徵向右傳遞至右側的位置節點中。

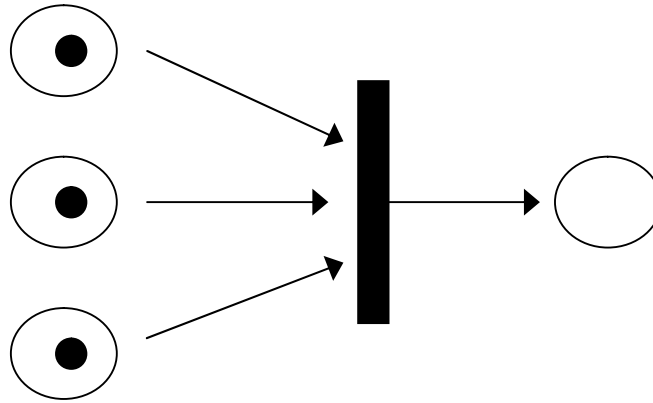


圖 3-25 同步之派翠網路

長期以來，派翠網路發展為以分析同步、非同步事件、資源分配與共享、死結(deadlock)等特徵的離散事件系統為目的，並被廣泛應用在分析彈性製造系統、作業系統排程、計算機硬體結構設計、通訊系統等。由於派翠網路具有網路式的圖形方式，因此在模式化後，易於詳細瞭解系統之內部運作，且派翠網路可做進一步的擴展、組合或化簡，更適合分析複雜系統。多年來派翠網路理論已發展相當完善，可應用於系統定量與定性上的分析。其語言模型(Petri Net Language)，更可直接用於線上之排程模擬。

使用派翠網路進行系統分析的步驟為：對系統模式化、求得派翠網路模型、由派翠網路模型分析系統屬性，並進一步反覆修正系統，改善系統效能。如圖 3-26 所示步驟。

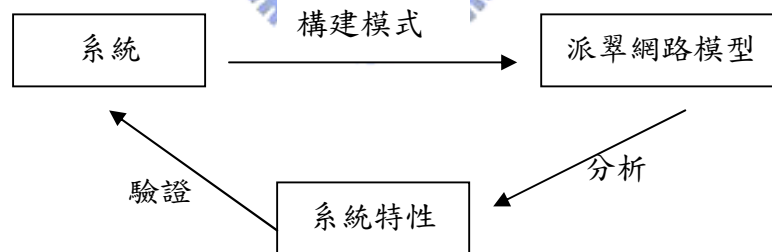


圖 3-26 使用派翠網路構建模型及分析系統之步驟圖

派翠網路建構方式有三種，在 Jeng and DisCesare 兩位學者的文章中[72]，討論由底而上(Bottom-up method)及由上而下(Top-down Method)的建構方式。在由底而上的建構方式中，首先忽略各子系統間之相互作用，並個別建構子系統的派翠網路架構，而這些子系統通常以簡單的結構去模擬，接著，考慮子系統間的相互作用，並進行位置節點(place)以及轉移節點(transition)的融合，此方法的優點在於能夠使系統每一部份模組化而易於處理。在由上而下方式中，首先考慮整個系統的大架構，並對每一小部份做更細部的結構建立，如此經過多次細化(Refinement)來達成複雜系統的建立。此外，Zhou and DisCesare[73]提出混合型(Hybrid Synthesis)，來建構整個系統，其具有上述兩者之優點。圖 3-27 為應用派翠網路於軌道系統維護工作之簡例。



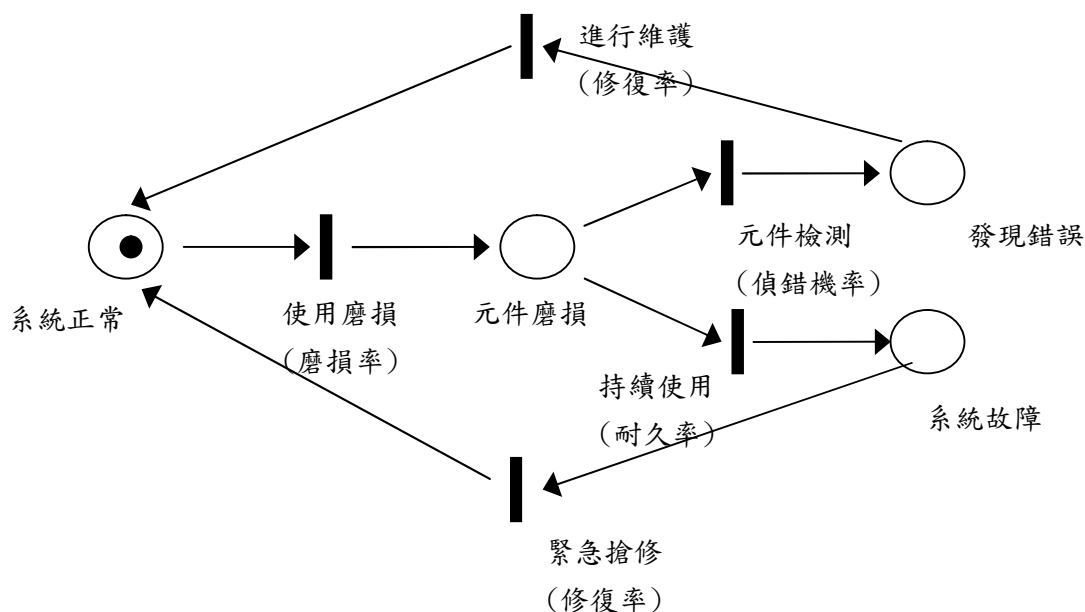


圖 3-27 派翠網路應用於軌道系統維護工作之簡例

而在派翠網路的效能計算方面，在 Zuberek and Kuniak[74]中解釋如何利用時間性(Timed)派翠網路來分析產能。由於一般的 Petri Net 並沒有辦法表示出時間，因此時間性派翠網路就是將時間因素加入派翠網路模型中。而加入的方式有兩種，一種是將持續時間加於位置節點(Place)上，稱為 P-Timed；另一種則是把激發時間加於轉移節點(Transition)上，稱為 T-Timed。但由於 P-Timed 有兩個缺點：(1)無法區分位置節點內標記的狀況。(2)對於擁有兩個以上輸入位置節點的轉移節點，由於各位置節點時間不同，使得激發情況複雜。因此，大部份多採用 T-Timed 的做法。

在派翠網路的傳統分析方法上，一為結構式(structural)或不變性(invariant)的分析方式，另一種則為延展樹(reachability Tree)的分析方式。結構式的分析主要是運用轉換矩陣  $D$ ，來做為系統的保守性(Conservative)，一致性(Consistent)，以及不變性(Invariant)的分析。延展樹的分析法，則是給定一起始狀態  $\mu$ ，而  $\mu$  向量在轉移節點(Transition)後的變化可用  $\delta(\mu, t_j) = \mu + e[j] \cdot D$  來表示，如此，就可依序導出系統可到達的狀態，再加上時間因素，就可計算系統到達各狀態的時間，並進一步分析系統效能，找出最佳效能路徑。

### 3.3 研究步驟

本研究在執行上主要可分為以下步驟加以進行：

#### 一. 系統選擇與定義

考量本研究之時間與人力上之限制，無法對捷運全系統整體進行 RCM 分析，因此必須先從捷運系統中挑選出適當層級的次系統來進行分析與研究。由於電聯車系統對於捷運系統之正常營運影響甚大，再加上過去台北捷運所發生之事故或

意外，多半是由於電聯車系統故障所導致，所以本研究選擇電聯車系統作為 RCM 分析的主要對象。

## 二. 進行系統功能失效分析(FFA)及問卷調查

藉由電聯車系統設計之技術標準規範內容所述，列出電聯車系統之各項功能與其失效，並針對各系統功能失效項目進行問卷設計。發放至台北捷運電聯車各級維修相關人員進行調查，以瞭解在「發生頻率」和「影響程度」(分為四個構面：人員安全、營運衝擊、環境衝擊、財務損失)之綜合考量下，該功能失效之重要性優先順序。

問卷調查共分為兩階段：第一階段初測之結果將用來進行問卷問項及語意之修正；第二階段回收之結果則利用參照單位分析(Ridit Analysis)進行統計檢定與排序，以判斷哪些功能失效有值得進行後續分析之必要。

## 三. 進行錯誤樹分析

針對判定為重要(significant)的各系統功能失效進行錯誤樹分析(FTA)，以瞭解造成該功能失效的成因和關鍵零組件。並綜合維修成本之考慮，找出關鍵維護項目(MSI)。

## 四. 進行 FMECA 分析

針對各關鍵維護項目，進行 FMECA 分析。除了與捷運公司接洽，搜集電聯車系統維修相關可靠度資料外，另請台灣捷運維修相關人員協助填寫故障型式及影響(FMEA)分析單，以判斷該零組件(維修關鍵項目)各失效模式之嚴重度高低。

## 五. 建構派翠網路進行模擬與績效評估

針對 FMECA 分析中界定為「不可接受」或「不被期待」的失效模式，選擇相對應之維護工作，以作為擬定維護關鍵項目之維修策略的主要參考。再者，建構派翠網路模擬維護工作進行的過程，並且以系統可靠度(Ex：妥善率或平均失效間隔)和維修成本作為主要的績效指標，以評估前述所研擬維護策略之績效改善程度。

## 六. 結論與建議

根據前述分析之結果，提出調整台北捷運電聯車系統維護策略之建議。除了提出各維修工作項目之優先執行順序外，並且說明其對於電聯車系統可靠度之影響，以及合適的維護間隔。以供捷運公司作為未來調整維護策略之參考。

本研究各階段之工作內容、預期遭遇之問題與解決方法、時程規劃如表 3-6 所示。

表 3-6 各階段之工作內容、預期遭遇到問題與解決方法及時程規劃

流程	工作內容	預期遭遇到問題及解決方法	時程
問卷設計與初測	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 定義系統功能、子系統功能</li> <li>● 選取電聯車系統主要安全功能加以分析，探討其所關聯之子系統功能</li> <li>● 定義子系統功能(與電聯車系統安全功能相關者)之失效</li> <li>● 以系統功能之失效做為問卷問項；以該失效在「人員安全、營運衝擊、環境衝擊、財務損失」四構面之影響程度及發生頻率多寡做為選項</li> <li>● 請台北捷運維修部人員進行初測，並提出問卷修改之建議(語意描述、問項增減等)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 維修專業知識不足，無法完整定義系統功能與子系統功能→參考電聯車設計標準規範及相關文獻</li> </ul>	已完成
問卷發放	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 針對台北捷運各級維修相關人員進行問卷調查及回收</li> </ul>		已完成
問卷分析	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 進行信/效度分析</li> <li>● 進行 RIDIT 分析</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 如何將四構面之 Rj 值加以整合→利用問卷中所設計之題目，讓受訪者填寫四構面之權重，利用算術平均數法求得受訪群體對於四構面之權重。最後利用該權重值將四構面之 Rj 值加以整合。</li> <li>● 如何將「影響程度」和「發生頻率」加以結合為單一判斷指標→利用「風險=影響程</li> </ul>	已完成

		度×發生頻率」的概念，整合為風險指標。並選取風險指標排序的前 3~5 名，進行後續分析。	
錯誤樹分析	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 針對風險大的子系統功能失效建構錯誤樹</li> <li>● 利用錯誤樹的最小切集合分析，找出造成該失效的關鍵項目(裝置/元件)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 維修專業知識不足，造成錯誤樹結構上不完整→參考電聯車系統架構之相關文獻，並延請台北捷運人員提出修正建議</li> </ul>	已完成
FMECA 分析	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 搜集該裝置/元件之設計規格相關資料</li> <li>● 搜集該裝置/元件之故障率資料</li> <li>● 填寫 FMEA 表，並界定該裝置/元件各失效模式的嚴重性(Consequence)</li> <li>● 填寫 CA 表，界定出該裝置/元件各失效模式的發生頻率(Frequency)</li> <li>● 結合前述兩者，建立嚴重度矩陣；並挑選出其中屬於「不可接受」或「不被期待」者，進行後續分析</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 缺乏該裝置/元件之設計規格相關資料→參考相關文獻(Ex：軌道工程學)</li> <li>● 缺乏該裝置/元件之故障率資料→針對該裝置/元件之維修人員進行訪談或調查，以界定該失效發生頻率</li> <li>● 維修專業知識不足，造成失效模式不夠完整→參考系統架構之相關文獻，並延請台北捷運人員提出修正建議</li> </ul>	已完成
擬定維修策略	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 從減少「不可接受」或「不被期待」之失效模式的觀點出發，研擬維修改善策略</li> <li>● 搜集台北捷運目前對於前述關鍵項目(裝置/元件)之維修相關資訊(維修工作項目、維修週期等)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 缺乏該項目的維修現況資訊→由目前台北捷運各定期檢修(如日檢、月檢等)之工作內容判斷，以及參考相關研究之資料。</li> </ul>	已完成
建構派翠網路(Petri Net)及績效	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 進行電聯車系統運作之派翠網路模式構建</li> <li>● 評估在研擬策略下，系統維修績效(系統安</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 如何選取績效指標→參考相關文獻，選擇其中與安全、系統正常營運、維修成本相</li> </ul>	已完成

評估	全性提升或成本下降)之改善程度。	關者。	
進行論文撰寫	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 提出結論與建議</li> <li>● 論文數據資料整理</li> </ul>		已完成



## 第四章 問卷設計與調查分析結果

本章首先說明了如何研擬出電聯車系統功能失效項目，並根據其做為問卷問項設計參考之過程。繼而探討評比各問項風險高低的架構，以及如何進行兩階段問卷發放調查之設計。最後並針對問卷回收結果進行參照單位分析(Ridit Analysis)，以決定出問卷中風險高或影響程度大的項目，以進行後續之分析。

### 4.1 問卷內容設計

#### 4.1.1 問項內容

根據黃漢榮君[1]所述，電聯車的功能主要可分為兩類：提供「舒適搭乘品質」和「安全運輸服務」，兩類功能之細項如表 4-1 所示。

表 4-1 電聯車功能一覽表

一. 提供舒適搭乘品質	(1) 低噪音 (2) 溫度及濕度適當 (3) 行車平穩 (4) 空氣清靜 (5) 座椅舒適 (6) 廣播清楚 (7) 車廂內燈光明亮 (8) 車廂內部及外觀清潔 (9) 車廂不會漏水 (10) 空調系統不會滴水
二. 提供安全運輸服務	(1) 照明和指示燈號正常 (2) 車門開關及煞車功能正常 (3) 故障率及出軌率低 (4) 具備緊急通訊及滅火設備

然而，本研究的重點在於維護策略是否能有效確保電聯車系統之風險維持在一定程度之下。因此，在系統功能分析上將以第二類為主，也就是從「提供安全運輸服務」的角度出發，確保「照明和指示燈號正常」、「車門開關及煞車功能正常」、「故障率及出軌率低」、「具備緊急通訊及滅火設備」四項基本功能能夠正常運作。以下配合表 4-2「電聯車子系統功能一覽表」(經由參考『捷運軌道車輛技術標準規範—高運量鋼軌車輛規劃基準』與『捷運系統建設技術規範草案之研究—系統整合篇(1/2)』兩者內容，整理後得之)，分別加以說明。

#### (1) 照明和指示燈號正常

此功能在運作上牽涉到的子系統層級為「照明」和「車載號誌」兩者。由對照該兩子系統功能項目(請參考表 4-2)可知，導致此功能無法正常運作的原因有「車廂內照明不正常(無法正常運作或照度不足)」、「車外路徑照明不正常」、「燈

號顯示不正常」、「列車狀態指示不正常」、「速限命令之接收、解碼、執行和顯示不正常」、「測量及顯示列車實際速度功能不正常」、「功能位階調整功能不正常」、「傳輸資訊以自動設定路徑和自動監控功能不正常」、「控制列車準確靠站停車功能不正常」、「依接收到的速限命令調節車速功能不正常」等 9 項。因此先初步將其列入問卷問項之中。

表 4-2 電聯車子系統功能一覽表

子系統	功能項目
車體(含車體內裝)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 列車在所有操作及載重狀況下均應符合動、靜態包絡線之要求。即使最嚴重的擺動發生時，車輛仍不可超出動態包絡線。</li> <li>● 車間通道地板上任何位置的高度變化不可超出 15mm。</li> <li>● 在 W4 負載下，車體結構任何元件在使用壽命期間應有足夠之使用強度，且不得有永久變形發生。</li> <li>● 在使用壽命期間，車體承樑受轉向架在正常營運之牽引或煞車之動態負荷下，不得出現裂痕或疲勞破壞。</li> <li>● 在使用壽命期間，車端底架牽引樑受聯結器在正常營運之推拉之動態負荷下，不得出現裂痕或疲勞破壞。</li> <li>● 椅座應能承受足夠之垂直及水平荷重而不會永久變形或破壞。</li> <li>● 椅背及椅面應有足夠之橫向及縱向強度以抵抗慣性力。</li> </ul>
聯結器	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 自動聯結器在垂直或水平方向應具有足夠的擺動空間，以便在最嚴苛的 S 型軌、垂直曲軌及車間高度差同時發生時，列車仍能正常行駛。</li> <li>● 聯結器不會碰撞到車體底架。</li> </ul>
車門	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 保護乘客。</li> <li>● 防止空氣外洩。</li> <li>● 防止噪音進入。</li> <li>● 任一車門未開關且鎖住時，應有聯鎖電路防止列車行駛。</li> </ul>
空調/通風/暖氣	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 可自動且連續地對於空調及通風進行控制，使車內溫度保持在設定值。</li> <li>● 冷媒之臭氧層破壞係數(Ozone Depetion Potential，ODP)應為 0。</li> </ul>

推進系統	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 提供電聯車之牽引動力。</li> </ul>
輔助電力	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 提供電聯車各子系統及其控制迴路所需之電力。</li> <li>● 負責電聯車之啟動控制、故障顯示及照明控制。</li> </ul>
轉向架及懸吊裝置	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 支撐空車皮重及旅客重量。</li> <li>● 傳遞牽引馬達所產生之牽引力使電聯車前進。</li> <li>● 藉由煞車系統使電聯車減速或停止。</li> <li>● 藉由懸吊系統吸收電聯車與鋼軌之震動，以提供良好乘車品質。</li> <li>● 藉由與車體之間的相對運動使電聯車在彎曲的軌道上安全行駛。</li> <li>● 維持電聯車於高速行駛之穩定性並延長鋼軌使用年限。</li> <li>● 維持車體之靜態及動態包絡線，以確保電聯車與土建設施之安全。</li> </ul>
煞車及空壓	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 提供常態煞車。</li> <li>● 提供緊急煞車。</li> <li>● 提供駐車煞車(防止停車時不正常滑動)。</li> <li>● 提供電聯車煞車所需之氣體。</li> <li>● 提供車門控制、空調緊急風門、集電靴、次懸吊系統空氣彈簧、氣動喇叭及線開關等所需之氣體。</li> </ul>
照明系統	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 車廂內照明。</li> <li>● 車外路徑照明。</li> <li>● 燈號顯示。</li> <li>● 列車狀態指示。</li> <li>● 車廂內之照明設備應提供離地板1公尺平面處的平均照度值不低於 250LUX,且最小值不可低於 200LUX。</li> </ul>
車載號誌	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 接收、解碼、執行和顯示速限命令。</li> <li>● 依接收到的速限命令調節車速。</li> <li>● 調整功能位階以控制速度。</li> <li>● 測量及顯示實際列車速度。</li> <li>● 傳輸資訊以自動設定路徑和自動監控。</li> <li>● 控制列車準確地靠站停車。</li> </ul>
車載通訊	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 司機員對列車控制員之通訊。</li> <li>● 司機員對列車控制員之緊急通訊。</li> <li>● 司機員對塔台調度員之通訊。</li> <li>● 司機員對車上旅客廣播。</li> <li>● 前後端駕駛室司機員通話。</li> </ul>



## (2) 車門開關及煞車功能正常

此功能在運作上牽涉到的子系統層級為「車門」和「煞車及空壓」兩者。由對照該兩子系統功能項目(請參考表 4-2)可知，導致此功能無法正常運作的原因有「車門不能正常開關」、「聯鎖電路失效，導致列車在車門未關閉的情況下行駛」、「常態煞車功能失效」、「緊急煞車功能失效」、「駐車煞車功能失效(列車停車時有不正常之滑動)」、「空壓系統未能提供煞車所需之氣體」等 6 項。因此先初步將其列入問卷問項之中。

## (3) 故障率及出軌率低

此功能在運作上牽涉到的子系統層級為「車體」、「聯結器」、「推進系統」、「輔助電力」和「轉向架」五者。由對照該五子系統功能項目(請參考表 4-2)可知，導致此功能無法正常運作的原因有「車輛行駛之擺動超出動態包絡線」、「車間通道地板之高度變化過大(超過 15mm)」、「車體結構元件出現永久變形」、「車體承樑出現裂痕或疲勞破壞」、「車端底架牽引樑出現裂痕或疲勞破壞」、「椅座、椅背、椅面出現永久變形或破壞」、「在 S 型軌、垂直曲軌及車間高度差同時出現時，聯結器擺動空間不足造成列車無法正常行駛」、「聯結器碰撞到車體底架」、「電聯車牽引動力不足」、「無法提供足夠電力供電聯車其他子系統及其控制迴路使用」、「電聯車之啟動控制、故障顯示及照明控制失效」、「無法支撐空車皮重及旅客重量」、「無法傳遞牽引馬達所產生之牽引力使電聯車前進」、「無法藉由煞車系統使電聯車減速或停止」、「無法藉由懸吊系統吸收電聯車與鋼軌之震動」、「無法藉由與車體之間的相對運動使電聯車在彎曲的軌道上安全行駛」、「無法維持電聯車於高速行駛之穩定性並延長鋼軌使用年限」、「無法維持車體之靜態及動態包絡線」等 18 項。因此先初步將其列入問卷問項之中。

## (4) 具備緊急通訊及滅火設備

此功能在運作上牽涉到的子系統層級為「車載通訊」和「車體內裝」兩者。由對照該兩子系統功能項目(請參考表 4-2)可知，導致此功能無法正常運作的原因有「司機員對列車控制員之通訊功能失效」、「司機員對列車控制員之緊急通訊功能失效」、「司機員對塔台調度員之通訊功能失效」、「司機員對車上旅客廣播功能失效」、「前後端駕駛室司機員通話功能失效」、「司機員對求助旅客或旅客對司機員通話功能失效」、「自動滅火設施不能正常運作」、「滅火器不能正常運作」等 8 項。因此先初步將其列入問卷問項之中。

除了前述根據相關文獻所列出之問項外，本研究另外針對捷運公司維修部系統安全工程師進行訪談，並蒙其惠賜寶貴意見進行問卷之修正與增補。最後整理出共計有問項 78 題，如表 4-3 所示。

表 4-3 初擬電聯車系統功能失效項目一覽表

子系統	功能	題目(危害項目)
照明	提供列車照明與燈號顯示	車廂內緊急照明功能失效
		車外路徑照明(車頭燈)不正常
		尾燈照明不正常
		車外列車狀態指示燈號(如：煞車中、通訊中、手動操作)不正常
車門	(1)供乘客進出與和緊急逃生 (2)防止乘客在列車行進中掉落車外	列車靜止時，車門不能正常開關
		緊急情況(如：停電)時，車門無法以人工方式開啟
		安全迴路失效，導致列車在車門未關閉的情況下行駛
		車門於列車行駛中開啟
		車間門故障
		駕駛室側門故障
		緊急逃生門故障
		車輛兩側之車門開啟指示燈故障
		駕駛室之車廂門控制開關失效
		門鈴故障
煞車及空壓系統	(1)提供列車減速功能 (2)在緊急情況下，讓列車迅速停止	一般煞車功能失效
		緊急煞車功能失效
		駐車煞車功能失效(列車停車時有不正常之滑動)
		推進與煞車之同步連鎖功能失效，列車在未獲得足夠煞車力的情況下行駛
		空壓機故障，無法產生足夠的壓力
		輸壓管線破裂
		安全閥(穩定管線壓力，將多餘氣體排至大氣中)故障
		車下絆腳閘桿失效，未能撞擊軌旁跳脫臂(Trip Arm)並及時啟動緊急煞車
		空轉/打滑修正功能失效
		駕駛室煞車系統指示設備故障(含煞車指示燈、駐車煞車指示燈、雙針壓力表)
煞車時發出尖銳刺耳的聲響或異味、冒煙		
車體和車體	支撐乘客重量	車輛行駛之擺動超出動態包絡線(左右擺動過大)
		車間通道地板之高度變化過大(超過 15mm)
		車體結構元件出現永久變形(Ex：地板出現凹陷變形)
		車體承樑出現裂痕或破壞
		中心銷出現裂痕或破壞

內裝	(1)供旅客乘坐或站立時維持平衡	滅火器失效或不能正常運作
		車窗產生噪音、振動、鬆動或漏水
		椅座、椅背、椅面出現永久變形或破壞
		水平式握桿或手拉環斷裂
		車門屏風破裂
	(2)緊急滅火設備	駕駛室擋風玻璃上之雨刷/噴水裝置故障
聯結器	(1)連結各車廂使其成為車組	在劇烈變化的行駛環境下(如：S型軌、爬升段或車間高度差)，聯結器擺動空間不足造成列車無法正常行駛
		聯結器碰撞到車體底架
		列車行駛中，聯結器自動解聯
	(2)使車廂電路與氣壓管線相連接	聯結器結構出現裂痕或破壞
		機械、電機、氣壓聯結無法於一次操作中同時完成
推進系統	提供列車加速前進功能	電聯車牽引動力不足
		速度感測器故障
		推進電路故障
		馬達無法吸入車底空氣進行冷卻
		灰塵與雨滴滲入馬達
輔助電力	將第三軌之供電加以變壓，供列車設備使用	靜態變流器(SIV)故障，無法正常變壓供其他子系統及控制迴路使用
		電瓶蓄電不足，無法供應緊急通風與照明之用
		電聯車之啟動控制、故障顯示及照明控制失效
		輸出感應裝置故障，無法偵測直流定電壓輸出的喪失
轉向架及懸吊系統	(1)支撐車廂重量	轉向架結構出現破裂、裂痕或斷裂的現象
		車軸出現裂痕或表面剝落的現象
		車輪輪轂、輪緣及踏面處出現裂痕或變形
	(2)維持車廂水平及高度	車輪輪徑不足或各軸輪徑值差異過大
		車底設備箱、蓋或大型設備掉落
		主懸吊系統故障崩塌，造成車廂傾斜
		次懸吊系統(氣囊)漏氣
	(3)使列車行駛時保持	防滾桿(anti-roll)失效，導致電聯車在彎曲的軌道上行駛時，車廂內未能保持水平
		無法維持電聯車於高速行駛之穩定性

	穩定	防滾桿(anti-roll)失效，無法維持車體之靜態及動態包絡線，車身晃動過大
		轉向架在直軌上出現蛇行(Hunting)現象
		車輛在彎軌上行駛時，出現輪緣攀爬現象
暖氣 通風 空調 系統	維持車 內通風 及溫度	無法自動且連續地進行空調及通風控制
		無法使車內溫度保持在設定值
車 載 號 誌	(1)接收 和執行 速限命 令	速限命令之接收、解碼、執行和顯示不正常
		測量及顯示列車實際速度功能不正常
		功能位階(動力輸出百分比)調整功能不正常
		傳輸資訊以自動設定路徑和自動監控功能不正常
	(2)測量 及調整 車速	控制列車準確靠站停車功能不正常
		依接收到的速限命令調節車速功能不正常
車 載 通 訊	駕駛 員、乘客 和行控 中心三 者之通 訊	司機員對列車控制員之通訊功能失效
		司機員對列車控制員之緊急通訊功能失效
		司機員對塔台調度員之通訊功能失效
		司機員對車上旅客廣播功能失效
		前後端駕駛室司機員通話功能失效
		司機員對求助旅客或旅客對司機員通話功能失效
		列車識別控制單元故障
		旅客車廂及駕駛室之閉路電視系統故障

#### 4.1.2 問卷初測與分析

由於初擬問項過多，因此有必要針對其先進行篩選的動作，以免造成受訪者在填答時的障礙與困擾。再者，也有必要針對問卷的效度(Validity)進行測試。「效度」指的是測量的正確性，換言之即是測驗或其他測量工具確能測得其所欲測量的特質或功能之程度。測量的效度愈高，表示測量的結果愈能顯現其所欲測量對象的真正特徵[37]。效度的評估有三種不同的模式：(1)內容效度：從測量的內容與範圍著手。(2)效標關聯效度：從外在標準契合程度加以評估。(3)建構效度：強調概念意涵釐清。一般而言，若問卷測量的是具體的事物或專業知識的判斷，應評估其內容效度；若測量的事物為抽象的概念或心理傾向，則應評估其建構效度。由於前述問項涉及捷運維護之專業知識，所以應評估其內容效度

本研究採取 Lawche(1975)所提出之 CVR(Content Validity Raio)法，以評估問卷的內容效度，確保各問項之適合性[77]。其計算 CVR 值的公式如下：

$$CVR_i = \frac{n_e - N/2}{N/2}$$

$n_e$ ：檢核問題*i*填答「非常適合」及「適合」之專家人數。

$N$ ：檢核問題*i*填答「非常適合」、「適合」、「不適合」及「非常不適合」專家人數。(亦即不包含填答「沒意見」專家人數)

CVR 法乃是透過合適的專家人數比例，反應出專家對該問題特性之判斷(合適與否)，並由 CVR 值是否大於最小接受門檻值(門檻值透過線性轉換加以決定)，來進行評鑑是否接受該問項，適合本研究專家問卷之評估。本研究利用 CVR 法來評鑑前述之問項，以決定該問項是否適合由捷運維修部員工填答，藉以評估其是否為影響電聯車安全及正常營運中風險較高的項目。

表 4-4 填答專家人數與 CVR 最小接受門檻值對照表

填答專家人數	CVR 最小接受門檻值
5	0.99
6	0.99
7	0.99
8	0.75
9	0.78
10	0.62
11	0.59
12	0.56
13	0.54
14	0.51
15	0.49
20	0.42
25	0.37
30	0.33
35	0.31
40	0.29

資料來源：[77]

在選擇進行問卷內容效度評估的專家方面，本研究考慮捷運維修部各級人員，分為高階主管(部、處、室主管以上)、中階主管(廠、場長)、基層主管(領班、股長)、非主管人員(技術員、技術士)四類。其中高階、中階主管並未直接接觸第一線的維護工作，而非主管人員僅對於手邊負責之維護工作較為熟悉。基層主管由於須針對維護工作做最後的評核及把關，對於電聯車 11 個子系統之運作均有一定程度的認識。因此，本研究選擇北投機廠 14 位基層主管，作為專家小組進

行問卷初測，評估問卷的效度。

本研究讓專家小組針對各問項進行「非常合適」、「適合」、「沒意見」、「不適合」、「非常不適合」等五尺度的評估(初測問卷如附錄一所示)。其評估結果如表 4-5 所示。



表 4-5 各問項之 CVR 值及判斷是否刪除一覽表

子系統	功能	題號	題目(危害項目)	N	n <sub>e</sub>	填答人數	CVR	門檻值	是否刪除
照明	提供列車照明與燈號顯示	1	車廂內緊急照明功能失效	13	10	14	0.538462	0.54	仍加以保留
		2	車外路徑照明(車頭燈)不正常	12	5	14	-0.16667	0.56	刪
		3	尾燈照明不正常	10	6	14	0.2	0.62	刪
		4	車外列車狀態指示燈號(如：煞車中、通訊中、手動操作)不正常	10	5	14	0	0.62	刪
車門	(1)供乘客進出與和緊急逃生 (2)防止乘客在列車行進中掉落車外	5	列車靜止時，車門不能正常開關	9	7	13	0.555556	0.78	刪
		6	緊急情況(如：停電)時，車門無法以人工方式開啟	12	11	14	0.833333	0.56	
		7	安全迴路失效，導致列車在車門未關閉的情況下行駛	13	13	13	1	0.54	
		8	車門於列車行駛中開啟	12	12	14	1	0.56	
		9	車間門故障	10	8	13	0.6	0.62	刪
		10	駕駛室側門故障	9	5	13	0.111111	0.78	刪
		11	緊急逃生門故障	10	9	14	0.8	0.62	
		12	車輛兩側之車門開啟指示燈故障	12	9	14	0.5	0.56	刪
		13	駕駛室之車廂門控制開關失效	10	10	14	1	0.62	
14	門鈴故障	10	3	14	-0.4	0.62	刪		
煞車	(1)提供列車減	15	一般煞車功能失效	14	14	14	1	0.51	
		16	緊急煞車功能失效	12	12	13	1	0.56	

及 空 壓 系 統	(2)在緊急情況下，讓列車迅速停止	17	駐車煞車功能失效(列車停車時有不正常之滑動)	13	12	14	0.846154	0.54	
		18	推進與煞車之同步連鎖功能失效，列車在未獲得足夠煞車力的情況下行駛	10	10	13	1	0.62	
		19	空壓機故障，無法產生足夠的壓力	13	11	13	0.692308	0.54	
		20	輸壓管線破裂	11	10	13	0.818182	0.59	
		21	安全閥(穩定管線壓力，將多餘氣體排至大氣中)故障	13	12	14	0.846154	0.54	
		22	車下絆腳閥桿失效，未能撞擊軌旁跳脫臂(Trip Arm)並及時啟動緊急煞車	11	10	14	0.818182	0.59	
		23	空轉/打滑修正功能失效	14	9	14	0.285714	0.51	刪
		24	駕駛室煞車系統指示設備故障(含煞車指示燈、駐車煞車指示燈、雙針壓力表)	11	9	14	0.636364	0.59	
		25	煞車時發出尖銳刺耳的聲響或異味、冒煙	12	10	13	0.666667	0.56	
車 體 和 車 體 內 裝	支撐乘客重量	26	車輛行駛之擺動超出動態包絡線(左右擺動過大)	9	7	13	0.555556	0.78	刪
		27	車間通道地板之高度變化過大(超過 15mm)	11	8	14	0.454545	0.59	刪
		28	車體結構元件出現永久變形(Ex:地板出現凹陷變形)	9	8	14	0.777778	0.78	仍加以保留
		29	車體承樑出現裂痕或破壞	13	12	14	0.846154	0.54	
		30	中心銷出現裂痕或破壞	12	11	13	0.833333	0.56	
	(1)供旅客乘坐或站立時維持平衡	31	滅火器失效或不能正常運作	12	11	13	0.833333	0.56	
		32	車窗產生噪音、振動、鬆動或漏水	9	6	13	0.333333	0.78	刪
		33	椅座、椅背、椅面出現永久變形或破壞	11	7	13	0.272727	0.59	刪
		34	水平式握桿或手拉環斷裂	10	8	12	0.6	0.62	應刪，但仍保留
		35	車門屏風破裂	11	6	13	0.090909	0.59	刪



	(2)緊急滅火設備	36	駕駛室擋風玻璃上之雨刷/噴水裝置故障	11	8	12	0.454545	0.59	刪
聯結器	(1)連結各車廂使其成為車組	37	在劇烈變化的行駛環境下(如：S型軌、爬升段或車間高度差)，聯結器擺動空間不足造成列車無法正常行駛	12	10	13	0.666667	0.56	
		38	聯結器碰撞到車體底架	10	8	13	0.6	0.62	應刪，但仍保留
	(2)使車廂電路與氣壓管線相連接	39	列車行駛中，聯結器自動解聯	12	9	13	0.5	0.56	應刪，但仍保留
		40	聯結器結構出現裂痕或破壞	11	10	13	0.818182	0.59	
		41	機械、電機、氣壓聯結無法於一次操作中同時完成	10	8	13	0.6	0.62	應刪，但仍保留
推進系統	提供列車加速前進功能	42	電聯車牽引動力不足	11	7	13	0.272727	0.59	刪
		43	速度感測器故障	12	10	13	0.666667	0.56	
		44	推進電路故障	11	8	13	0.454545	0.59	應刪，但仍保留
		45	馬達無法吸入車底空氣進行冷卻	11	6	13	0.090909	0.59	刪
		46	灰塵與雨滴滲入馬達	10	8	14	0.6	0.62	應刪，但仍保留
輔助電力	將第三軌之供電加以變壓，供	47	靜態變流器(SIV)故障，無法正常變壓供其他子系統及控制迴路使用	9	7	14	0.555556	0.78	應刪，但仍保留
		48	電瓶蓄電不足，無法供應緊急通風與照明之用	13	12	14	0.846154	0.54	
		49	電聯車之啟動控制、故障顯示及照明控制失效	10	8	14	0.6	0.62	應刪，但仍保留

	列車設備使用	50	輸出感應裝置故障，無法偵測直流定電壓輸出的喪失	12	7	14	0.166667	0.56	刪
轉向架及懸吊系統	(1)支撐車廂重量 (2)維持車廂水平及高度 (3)使列車行駛時保持穩定	51	轉向架結構出現破裂、裂痕或斷裂的現象	13	12	14	0.846154	0.54	
		52	車軸出現裂痕或表面剝落的現象	13	13	14	1	0.54	
		53	車輪輪轂、輪緣及踏面處出現裂痕或變形	12	11	14	0.833333	0.56	
		54	車輪輪徑不足或各軸輪徑值差異過大	11	9	14	0.636364	0.59	
		55	車底設備箱、蓋或大型設備掉落	13	13	14	1	0.54	
		56	主懸吊系統故障崩塌，造成車廂傾斜	12	12	14	1	0.56	
		57	次懸吊系統(氣囊)漏氣	14	12	14	0.714286	0.51	
		58	防滾桿(anti-roll)失效，導致電聯車在彎曲的軌道上行駛時，車廂內未能保持水平	12	11	14	0.833333	0.56	
		59	無法維持電聯車於高速行駛之穩定性	12	11	14	0.833333	0.56	
		60	防滾桿(anti-roll)失效，無法維持車體之靜態及動態包絡線，車身晃動過大	13	11	14	0.692308	0.54	
		61	轉向架在直軌上出現蛇行(Hunting)現象	12	10	14	0.666667	0.56	
		62	車輛在彎軌上行駛時，出現輪緣攀爬現象	11	9	14	0.636364	0.59	
暖氣通風空調系統	維持車內通風及溫度	63	無法自動且連續地進行空調及通風控制	10	8	14	<b>0.6</b>	<b>0.62</b>	刪
		64	無法使車內溫度保持在設定值	10	7	14	0.4	0.62	刪
車載	(1)接收和執行	65	速限命令之接收、解碼、執行和顯示不正常	12	10	14	0.666667	0.56	
		66	測量及顯示列車實際速度功能不正常	12	11	14	0.833333	0.56	

號誌	速限命令 (2)測量及調整車速	67	功能位階(動力輸出百分比)調整功能不正常	14	12	14	0.714286	0.51	
		68	傳輸資訊以自動設定路徑和自動監控功能不正常	12	10	14	0.666667	0.56	
		69	控制列車準確靠站停車功能不正常	11	9	14	0.636364	0.59	
		70	依接收到的速限命令調節車速功能不正常	12	8	14	0.333333	0.56	刪
車載通訊	駕駛員、乘客和行控中心三者之通訊	71	司機員對列車控制員之通訊功能失效	14	12	14	0.714286	0.51	
		72	司機員對列車控制員之緊急通訊功能失效	13	11	14	0.692308	0.54	
		73	司機員對塔台調度員之通訊功能失效	14	13	14	0.857143	0.51	
		74	司機員對車上旅客廣播功能失效	9	8	14	0.777778	0.78	仍加以保留
		75	前後端駕駛室司機員通話功能失效	10	8	14	<b>0.6</b>	<b>0.62</b>	刪
		76	司機員對求助旅客或旅客對司機員通話功能失效	10	8	14	<b>0.6</b>	<b>0.62</b>	刪
		77	列車識別控制單元故障	11	11	14	1	0.59	
		78	旅客車廂及駕駛室之閉路電視系統故障	8	7	14	0.75	0.75	

由表 4-5 之初測結果中可知，CVR 值高於門檻值者予以保留；CVR 值非常接近門檻值者(四捨五入至小數點第二位)仍然加以保留；CVR 值低於門檻值者予以刪除。然而，若干題目雖然 CVR 值低於門檻值，但經本研究評估後，認為其對於電聯車安全和正常營運仍有一定程度影響，因此基於保守起見，仍然將其保留(見表 4-5 之第 34、38、39、41、44、46、47、49 題)至第二階段問卷調查。初擬問項經過效度評估篩選後剩下 55 題。

### 4.1.3 風險評估設計

在各系統功能失效之風險評估方面，「發生頻率」和「影響程度」是兩個決定風險的主要因素，風險等於兩者之乘積。發生頻率高和影響程度大的功能失效，往往對於系統安全與正常營運的衝擊也較大。因此本研究在評估功能失效所造成的風險時，也是以此兩因素為主要指標。

在發生頻率的評比方面，本研究讓受訪者以四個等級：「高」、「中」、「低」、「可忽略」，加以判斷並填答。

在影響程度評比方面，則可再細分為「人員安全」、「營運衝擊」、「環境衝擊」、「財務損失」四個構面加以評估。「人員安全」指的是系統失效發生時，造成的人員傷亡；「營運衝擊」指的是系統失效發生時，造成的列車延誤時間；「環境衝擊」指的是系統失效發生時，造成該路線之道路路網壅塞，或者造成其他路線列車延遲；「財務損失」指的是系統失效發生時，更換或修復該設備所需之財務支出(包含物料、備品及人力成本)。在此四構面下，同樣是讓受訪者以四個等級：「高」、「中」、「低」、「可忽略」，加以判斷並填答，各等級的定義分別如表 4-6 與表 4-7 所示。

表 4-6 發生頻率構面評估等級之定義

評估構面	等級	說明
發生頻率	高	在連續操作 100 小時中發生
	中	在連續操作 1,000 小時中發生
	低	在連續操作 10,000 小時中發生
	可忽略	在連續操作 100,000 小時中發生

表 4-7 影響程度四構面評估等級之定義

評估構面	等級	說明
人員安全	高	造成人員死亡
	中	造成人員重傷
	低	造成人員輕傷
	可忽略	人員無受傷或死亡
營運衝擊	高	延誤時間達 1 小時以上
	中	延誤時間介於 20 分鐘至 1 小時之間
	低	延誤時間介於 5 分鐘至 20 分鐘之間

	可忽略	延誤時間低於 5 分鐘以下
環境衝擊	高	造成其他路線列車延誤以及附近道路路網嚴重壅塞
	中	造成其他路線列車延誤以及附近道路路網輕微壅塞
	低	僅造成其他路線列車延誤，但未造成附近道路路網壅塞
	可忽略	未造成附近道路路網壅塞或是其他路線列車延誤
財務衝擊	高	維修金額支出達 1 百萬元以上
	中	維修金額介於 10 萬元至 1 百萬元之間
	低	維修金額介於 1 萬元至 10 萬元之間
	可忽略	維修金額低於 1 萬元以下

綜合以上所述之風險評估準則，以及根據經初測分析篩選後所保留下來的問項，本研究擬出電聯車系統功能失效風險評估問卷(如附錄二所示)，並進行第二階段的問卷調查。

## 4.2 問卷分析結果

本研究第二階段問卷調查對象仍以捷運公司基層主管為主。由於目前高運量系統北投、新店、南港三個機廠的基層主管(含領班、股長)總計約為 60 人左右，因此，本研究將不採取抽樣的方式，而改以普查的方式，對於高運量各機廠所有基層主管進行第二階段問卷調查。以下便針對問卷回收後的分析，進行詳細的說明。

### 4.2.1 樣本說明與分佈情形

第二階段問卷調查共計發出 60 份，回收 42 份，佔受訪母體的 70%。樣本分佈情形如表 4-8 所示。由表中資料可知以下幾點：就「年齡」而言，受訪對象(台北捷運維修部基層主管)皆介於 20~50 歲，且大部份均集中在 30 到 39 歲之間的年齡層；就「教育程度」而言，大部份受訪者為專科或大學學歷，顯示受訪者具有一定程度的專業訓練與素養；就「進入捷運公司工作年資」與「從事電聯車維修工作年資」兩項而言，大部份受訪者均擁有 3 年以上的年資，顯示受訪者皆具有足夠的電聯車維護工作經驗；就「職稱」而言，受訪對象大多數為領班及股長，非領班或股長職級的受訪者(技術士)雖然佔了 30%，然而其多以代領班身份執行維修工作，因此也符合原本對於受測母體的要求；就「服務部門」而言，三個高運量捷運系統維修機廠的受訪者均佔有一定比例，其中北投機廠由於維修層級較高，維修人員較多，因此回收樣本數也最多；就「維修專長」而言，機械與電機專長佔了大部份，這與執行電聯車維修工作所需的專業相符。

表 4-8 樣本分佈情形

項目	分組	百分比(%)
年齡	20-29 歲	9.76
	30-39 歲	87.8
	40-49 歲	2.44
	50-59 歲	0
	60 歲以上	0
性別	男	100
	女	0
教育程度	國中以下	2.44
	高中職	4.88
	專科	46.34
	大學	39.02
	碩士以上	7.32
婚姻狀況	未婚	27.5
	已婚	72.5
進入捷運公司工作年資	0-3 年	2.44
	3-6 年	24.39
	6-9 年	43.9
	9 年以上	29.27
從事電聯車維修工作年資	0-3 年	7.32
	3-6 年	29.27
	6-9 年	43.9
	9 年以上	19.51
職務	領班	52.5
	股長	17.5
	其他	30
服務部門	北投機廠	57.5
	南港機廠	32.5
	新店機廠	10
維修專長	機械	31.58
	電機	65.79
	其它	2.63

#### 4.2.2 信度分析

信度指的是問卷調查結果的一致性。影響一致性的結果主要有兩項：問卷調查內容(問項)之設計與受訪者是否認真填答。問卷題目設計不佳及受訪者任意填答，都會導致受測結果的信度降低。因此有必要針對調查結果先進行信度分析。

在信度分析方面，本研究採取 Cronbach  $\alpha$  係數做為衡量信度的指標。 $\alpha$  值愈高者，表示一致性愈高。全量表及各構面(人員安全、營運衝擊、環境衝擊、財務損失、發生頻率)的  $\alpha$  係數如表 4-9 所示。

表 4-9 信度分析結果

各構面	Cronbach $\alpha$ 值
全量表	0.9885
人員安全子量表	0.9784
營運衝擊子量表	0.9785
環境衝擊子量表	0.9771
財務損失子量表	0.9647
發生頻率子量表	0.9500

根據 Henson(2001)的觀點，認為  $\alpha$  值與研究目的有關，如果研究者的目的在於編製預測問卷或測驗、測量某觀念的先導性研究， $\alpha$  值介於 0.5 至 0.6 之間就已足夠。以發展測量工具為目的時， $\alpha$  值應在 0.7 值以上。當以基礎研究為目的時， $\alpha$  值最好在 0.8 以上。當測驗是用來做為截斷分數(cutoff score)之用而扮演重要角色，如篩選、分組、接受特殊教育等， $\alpha$  值最好在 0.9 以上。而 0.95 是最宜的標準。本研究的目的是在於尋找出影響捷運電聯車安全與營運的關鍵項目，因此  $\alpha$  值應以 0.9 以上為佳。

由表 4-9 中資料可知，全量表的  $\alpha$  係數達 0.9 以上。顯示問卷調查結果信度良好。而就各構面來看，影響程度的四構面和發生頻率構面的  $\alpha$  值均高於 0.9。顯示受訪者針對各問項在影響程度及發生頻率的評比判斷上的一致性甚佳。下節將針對問卷調查結果進行參照單位分析，以篩選出風險程度較高的問項。

#### 4.2.3 參照單位分析結果

在篩選出風險較高的問項方面，本研究採用參照單位分析(Ridit Analysis)加以進行。參照單位分析以受訪者填答結果的邊際分佈(Marginal Distribution)做為參考組(Reference Group)，並且以其累積機率密度(C.D.F)做為轉換原本受訪者填答各強度等級至 ridit 值(介於 0~1 之間)之依據。之後計算各對照組(Comparison Group)，也就是問項的平均 ridit 值(mean ridit)。各問項之平均 ridit 值代表「由參考組和對照組中各任意各挑選一人，對照組填答等級高於參考組填答等級之機率」。在本研究中，參考組為「受訪者對問卷整體項目的影響程度與發生頻率評比」，對照組為「受訪者對各問項的影響程度與發生頻率評比」。因此，由比較各

問項的平均 ridit 值可知哪個問項在影響程度和發生頻率的評比上較為重要(因較多受訪者認定該問項的評比分數較高)。由於參考組的平均 ridit 值恆為 0.5，所以當該問項的 ridit 值高於 0.5 時，可認定其為較重要的(指在該構面的評比下)項目。一般多以 0.5 做為初步判斷問項間重要與否的門檻值，再針對問項彼此之間 ridit 值的高低加以比較。

此外，由參照單位分析雖然可瞭解各問項在各構面下的評比。然而，本研究的目的是在於找出在影響捷運電聯車安全與營運中，風險較高的項目。本研究中將風險定義為：

$$\text{風險(Risk)} = \text{影響程度(Consequence)} \times \text{發生頻率(Frequency)}$$

因此，將各問項計算出的各構面加以整合：先將人員安全、營運衝擊、環境衝擊、財務衝擊四構面的 ridit 依據權重(w1 至 w4)加以整合，如下式所示：

影響程度 = (w1 × 人員安全) + (w2 × 營運衝擊) + (w3 × 環境衝擊) + (w4 × 財務損失)  
之後再將影響程度和發生頻率的 ridit 值相乘積，並以該值做為衡量該問項風險的指標。乘積值愈高者，代表該問項風險愈高。

至於影響程度四構面權重的決定方式，本研究讓受訪者針對該構面重要性進行 0~100 分的評比，之後再加以標準化後得到各受訪者之權重，並且以受訪群體的權重平均值做為進行四構面 ridit 值整合的權重值。各構面權重值如表 4-10 所示。

表 4-10 各構面權重值

各構面	權重值
人員安全	0.333695
營運衝擊	0.269789
環境衝擊	0.216101
財務損失	0.180414

各問項在影響程度四構面的 ridit 值如表 4-11 所示。整合後之影響程度 ridit 值、發生頻率 ridit 值和風險如表 4-12 所示。



表 4-11 各問項在影響程度四構面下的 Ridit 值

題號	題目	人員安全		營運衝擊		環境衝擊		財務損失	
		Ridit 值	排序	Ridit 值	排序	Ridit 值	排序	Ridit 值	排序
1	車廂內緊急照明功能失效	0.416616	37	0.425796	45	0.398088	52	0.398963	47
6	緊急情況(如：停電)時，車門無法以人工方式開啟	0.53195	24	0.541096	17	0.510449	23	0.498597	27
7	安全迴路失效，導致列車在車門未關閉的情況下行駛	0.775473	2	0.608581	7	0.565609	9	0.558478	16
8	車門於列車行駛中開啟	0.780448	1	0.667674	2	0.577598	7	0.589398	11
11	緊急逃生門故障	0.594298	16	0.432336	44	0.43397	46	0.457985	35
13	駕駛室之車廂門控制開關失效	0.540761	22	0.56953	11	0.556998	11	0.436609	39
15	一般煞車功能失效	0.624734	9	0.609991	5	0.612111	4	0.54702	19
16	緊急煞車功能失效	0.670244	4	0.597347	8	0.612215	3	0.551103	18
17	駐車煞車功能失效(列車停車時有不正常之滑動)	0.553742	21	0.521991	22	0.545265	12	0.490477	30
18	推進與煞車之同步連鎖功能失效，列車在未獲得足夠煞車力的情況下行駛	0.604919	12	0.54379	15	0.544921	13	0.493365	28
19	空壓機故障，無法產生足夠的壓力	0.429191	34	0.514039	26	0.517443	19	0.409519	44
20	輸壓管線破裂	0.421729	35	0.507872	30	0.490444	34	0.398945	48
21	安全閥(穩定管線壓力，將多餘氣體排至大氣中)故障	0.404568	41	0.449354	42	0.467125	39	0.407474	45
22	車下絆腳閘桿失效，未能撞擊軌旁跳脫臂(Trip Arm)並及時啟動緊急煞車	0.661855	5	0.566634	12	0.572399	8	0.571674	14
24	駕駛室煞車系統指示設備故障(含煞車指示燈、駐車煞車指示燈、雙針壓力表)	0.413292	39	0.411184	47	0.414569	49	0.344138	54

25	煞車時發出尖銳刺耳的聲響或異味、冒煙	0.385535	44	0.39208	49	0.47368	37	0.414889	41
28	車體結構元件出現永久變形(Ex：地板出現凹陷變形)	0.400017	42	0.351874	53	0.389399	53	0.509248	24
29	車體承樑出現裂痕或破壞	0.63906	8	0.576254	10	0.535126	16	0.683143	3
30	中心銷出現裂痕或破壞	0.643206	6	0.552074	13	0.564268	10	0.645526	6
31	滅火器失效或不能正常運作	0.516951	25	0.367263	50	0.398149	51	0.355782	51
34	水平式握桿或手拉環斷裂	0.406595	40	0.272709	55	0.291367	55	0.288227	55
37	在劇烈變化的行駛環境下(如：S 型軌、爬升段或車間高度差)，聯結器擺動空間不足造成列車無法正常行駛	0.489881	27	0.528625	21	0.501832	29	0.481554	31
38	聯結器碰撞到車體底架	0.56807	18	0.546242	14	0.505725	26	0.560921	15
39	列車行駛中，聯結器自動解聯	0.761728	3	0.756151	1	0.729661	1	0.728672	1
40	聯結器結構出現裂痕或破壞	0.568757	17	0.530717	19	0.493768	32	0.600888	10
41	機械、電機、氣壓聯結無法於一次操作中同時完成	0.375168	49	0.397187	48	0.442668	44	0.394859	49
43	速度感測器故障	0.361278	51	0.418905	46	0.422355	47	0.394786	50
44	推進電路故障	0.326746	53	0.458683	37	0.454108	41	0.536361	22
46	灰塵與雨滴滲入馬達	0.278541	55	0.353397	52	0.410031	50	0.572487	13
47	靜態變流器(SIV)故障，無法正常變壓供其他子系統及控制迴路使用	0.372943	50	0.514106	25	0.521576	18	0.542183	20
48	電瓶蓄電不足，無法供應緊急通風與照明之用	0.465624	30	0.528666	20	0.509963	24	0.528235	23
49	電聯車之啟動控制、故障顯示及照明控制失效	0.414745	38	0.456189	39	0.470476	38	0.464552	34
51	轉向架結構出現破裂、裂痕或斷裂的現象	0.603992	13	0.543748	16	0.540751	14	0.680255	4
52	車軸出現裂痕或表面剝落的現象	0.567591	19	0.510084	29	0.4932	33	0.580904	12
53	車輪輪轂、輪緣及踏面處出現裂痕或變形	0.599342	14	0.520904	23	0.505156	27	0.604881	7
54	車輪輪徑不足或各軸輪徑值差異過大	0.439961	33	0.458281	38	0.477521	36	0.491462	29

55	車底設備箱、蓋或大型設備掉落	0.623807	10	0.665936	3	0.670774	2	0.684081	2
56	主懸吊系統故障崩塌，造成車廂傾斜	0.611486	11	0.630222	4	0.584184	5	0.654496	5
57	次懸吊系統(氣囊)漏氣	0.465416	31	0.501638	31	0.509274	25	0.537252	21
58	防滾桿(anti-roll)失效，導致電聯車在彎曲的軌道上行駛時，車廂內未能保持水平	0.534048	23	0.488726	33	0.513684	20	0.504258	26
59	無法維持電聯車於高速行駛之穩定性	0.498063	26	0.490818	32	0.525297	17	0.505363	25
60	防滾桿(anti-roll)失效，無法維持車體之靜態及動態包絡線，車身晃動過大	0.553863	20	0.512014	28	0.513168	21	0.551153	17
61	轉向架在直軌上出現蛇行(Hunting)現象	0.598415	15	0.583526	9	0.536805	15	0.603823	8
62	車輛在彎軌上行駛時，出現輪緣攀爬現象	0.64204	7	0.609428	6	0.580014	6	0.602718	9
65	速限命令之接收、解碼、執行和顯示不正常	0.390456	43	0.482534	35	0.49737	31	0.470587	33
66	測量及顯示列車實際速度功能不正常	0.378552	46	0.452449	40	0.461775	40	0.45065	37
67	功能位階(動力輸出百分比)調整功能不正常	0.359872	52	0.449392	41	0.454056	42	0.412726	42
68	傳輸資訊以自動設定路徑和自動監控功能不正常	0.419187	36	0.512578	27	0.48953	35	0.477561	32
69	控制列車準確靠站停車功能不正常	0.377625	47	0.483619	34	0.501039	30	0.416766	40
71	司機員對列車控制員之通訊功能失效	0.478695	28	0.51672	24	0.512599	22	0.452647	36
72	司機員對列車控制員之緊急通訊功能失效	0.478695	28	0.532245	18	0.50476	28	0.443677	38
73	司機員對塔台調度員之通訊功能失效	0.447871	32	0.362337	51	0.446547	43	0.412573	43
74	司機員對車上旅客廣播功能失效	0.384192	45	0.433285	43	0.418061	48	0.345196	53
77	列車識別控制單元故障	0.376489	48	0.459284	36	0.438164	45	0.401339	46
78	旅客車廂及駕駛室之閉路電視系統故障	0.303461	54	0.331321	54	0.379669	54	0.345271	52

表 4-12 各問項的影響程度、發生頻率 Ridit 值與風險

題號	題目	影響程度		發生頻率		風險		評比 影響 0.6/風險 0.3
		Ridit 值	排序	Ridit 值	排序	影響*頻率 Ridit 乘積	排序	
1	車廂內緊急照明功能失效	0.411904	46	0.457227	37	0.188334	50	
6	緊急情況(如：停電)時，車門無法以人工方式開啟	0.52375386	22	0.424221	45	0.222187	41	
7	安全迴路失效，導致列車在車門未關閉的情況下行駛	0.64594648	4	0.483314	33	0.312195	3	***
8	車門於列車行駛中開啟	0.67171851	2	0.387126	50	0.260039	22	*
11	緊急逃生門故障	0.49136221	30	0.4114	48	0.202147	49	
13	駕駛室之車廂門控制開關失效	0.53324062	20	0.553878	14	0.29535	9	
15	一般煞車功能失效	0.60400821	9	0.58778	7	0.355024	1	***
16	緊急煞車功能失效	0.61654264	6	0.54706	18	0.337286	2	***
17	駐車煞車功能失效(列車停車時有不正常之滑動)	0.5319301	21	0.483806	32	0.257351	23	
18	推進與煞車之同步連鎖功能失效，列車在未獲得足夠煞車力的情況下行駛	0.55533548	15	0.551488	16	0.306261	4	**
19	空壓機故障，無法產生足夠的壓力	0.46760439	33	0.573707	10	0.268268	18	
20	輸壓管線破裂	0.4557082	35	0.511324	23	0.233015	35	
21	安全閥(穩定管線壓力，將多餘氣體排至大氣中)故障	0.43069372	39	0.553632	15	0.238446	33	
22	車下絆腳閘桿失效，未能撞擊軌旁跳脫臂(Trip Arm)並及時啟動緊急煞車	0.60056392	11	0.484035	31	0.290694	11	*
24	駕駛室煞車系統指示設備故障(含煞車指示燈、駐車煞車指示燈、雙針壓力表)	0.40052286	49	0.557237	12	0.223186	39	

25	煞車時發出尖銳刺耳的聲響或異味、冒煙	0.41164497	47	0.596431	5	0.245518	28	
28	車體結構元件出現永久變形(Ex：地板出現凹陷變形)	0.40444064	48	0.440638	42	0.178212	51	
29	車體承樑出現裂痕或破壞	0.6076083	8	0.420617	47	0.255571	24	*
30	中心銷出現裂痕或破壞	0.60197952	10	0.463171	36	0.27882	14	*
31	滅火器失效或不能正常運作	0.42181667	42	0.496353	28	0.20937	48	
34	水平式握桿或手拉環斷裂	0.32421761	55	0.541559	20	0.175583	52	
37	在劇烈變化的行駛環境下(如：S 型軌、爬升段或車間高度差)，聯結器擺動空間不足造成列車無法正常行駛	0.50141406	26	0.423977	46	0.212588	44	
38	聯結器碰撞到車體底架	0.54741825	17	0.386148	51	0.211385	46	
<b>39</b>	<b>列車行駛中，聯結器自動解聯</b>	0.74732965	1	0.359733	54	0.268839	17	*
40	聯結器結構出現裂痕或破壞	0.54808586	16	0.408299	49	0.223783	38	
41	機械、電機、氣壓聯結無法於一次操作中同時完成	0.39924789	50	0.356787	55	0.142446	54	
43	速度感測器故障	0.39606916	52	0.676646	2	0.267999	19	
44	推進電路故障	0.42768159	41	0.704788	1	0.301425	6	
46	灰塵與雨滴滲入馬達	0.38018323	53	0.362209	53	0.137706	55	
47	靜態變流器(SIV)故障，無法正常變壓供其他子系統及控制迴路使用	0.47368024	31	0.594338	6	0.281526	12	
48	電瓶蓄電不足，無法供應緊急通風與照明之用	0.5035098	24	0.496353	28	0.249918	26	
49	電聯車之啟動控制、故障顯示及照明控制失效	0.44695546	37	0.496766	27	0.222032	42	
51	轉向架結構出現破裂、裂痕或斷裂的現象	0.58783127	12	0.38101	52	0.22397	37	
52	車軸出現裂痕或表面剝落的現象	0.53840189	18	0.432522	43	0.232871	36	
53	車輪輪轂、輪緣及踏面處出現裂痕或變形	0.55882574	14	0.431256	44	0.240997	30	
54	車輪輪徑不足或各軸輪徑值差異過大	0.46231185	34	0.547159	17	0.252958	25	

55	車底設備箱、蓋或大型設備掉落	0.65619706	3	0.443161	40	0.290801	10	*
56	主懸吊系統故障崩塌，造成車廂傾斜	0.61840042	5	0.486128	30	0.300622	7	***
57	次懸吊系統(氣囊)漏氣	0.49762629	27	0.561812	11	0.279572	13	
58	防滾桿(anti-roll)失效，導致電聯車在彎曲的軌道上行駛時，車廂內未能保持水平	0.51204563	23	0.476756	34	0.244121	29	
59	無法維持電聯車於高速行駛之穩定性	0.50331079	25	0.475076	35	0.239111	32	
60	防滾桿(anti-roll)失效，無法維持車體之靜態及動態包絡線，車身晃動過大	0.53328946	19	0.441894	41	0.235658	34	
61	轉向架在直軌上出現蛇行(Hunting)現象	0.58205975	13	0.452533	38	0.263401	20	
62	車輛在彎軌上行駛時，出現輪緣攀爬現象	0.61274323	7	0.451536	39	0.276675	15	*
65	速限命令之接收、解碼、執行和顯示不正常	0.4528588	36	0.576834	8	0.261224	21	
66	測量及顯示列車實際速度功能不正常	0.42948068	40	0.519309	22	0.223033	40	
67	功能位階(動力輸出百分比)調整功能不正常	0.41391235	45	0.508671	24	0.210545	47	
68	傳輸資訊以自動設定路徑和自動監控功能不正常	0.47011575	32	0.528681	21	0.248541	27	
69	控制列車準確靠站停車功能不正常	0.43995239	38	0.67146	3	0.29541	8	
71	司機員對列車控制員之通訊功能失效	0.49158106	29	0.615615	4	0.302625	5	
72	司機員對列車控制員之緊急通訊功能失效	0.49245721	28	0.546185	19	0.268973	16	
73	司機員對塔台調度員之通訊功能失效	0.41814055	43	0.505602	25	0.211413	45	
74	司機員對車上旅客廣播功能失效	0.3977203	51	0.55665	13	0.221391	43	
77	列車識別控制單元故障	0.41663754	44	0.575427	9	0.239745	31	
78	旅客車廂及駕駛室之閉路電視系統故障	0.33498932	54	0.502609	26	0.168369	53	

此外，針對各構面計算而得的 ridit 值進行 Kruskal-Wallis 檢定，如表 4-13 所示。由表中結果可知各構面 W 值均高於  $\chi^2_{(0.025,54)}=76.19206$ ，顯著拒絕虛無假設。表示各問項間存在有等級上的顯著差異。

表 4-13 Kruskal-Wallis 檢定結果

各構面	W 值	顯著與否 ( $\chi^2_{(0.025,54)}=76.19206$ )
人員安全	427.8845	Yes
營運衝擊	242.1256	Yes
環境衝擊	166.7437	Yes
財務損失	311.9127	Yes
發生頻率	248.7806	Yes

觀察表 4-12 的資料可知，各問項的風險值大多介於 0.2~0.4 之間，風險值愈高者表示該問項對於捷運電聯車系統安全與營運的衝擊也愈大。然而，風險大有可能是影響程度大或者發生頻率高所導致。若兩問項的風險值相同(或相去不遠)，該如何判斷何者為較值得優先解決或預防的系統功能失效呢?從系統安全的角度來看，影響程度較大的項目往往值得優先考量。影響小而發生頻繁的項目雖然容易發生，但對於系統所造成的損害和影響不大，因此往往不是關心的重點(例如：騎腳踏車摔倒受傷)；反之，若該項目影響程度大，儘管發生頻率小，然而一旦發生後，對於系統將會造成令人無法承受的損失(例如：核電廠爆炸)。由於捷運電聯車系統攸關民眾行的權益與安全，一旦發生故障，對於社會大眾所造成的衝擊甚大，因此對於影響程度大的系統功能失效，我們仍要加以考量，不可輕忽。

綜合以上所述，本研究在重大系統功能失效(指對系統造成衝擊較大者)項目的選取方面，同時考慮影響程度和風險兩項指標：若該項目影響程度大者(高於 0.6 者)，標計為「\*」；若該項目風險大(高於 0.3)，而影響程度也高於平均者(高於 0.5)，標計為「\*\*」；若該項目風險與影響程度均大者(風險高於 0.3 且影響程度高於 0.6)，標計為「\*\*\*」。星號愈多者，表示其應優先處理的順序愈高。

本研究礙於時間與人力，因此僅選擇少部份優先處理順序較高(標記為「\*\*」與「\*\*\*」者)的項目進行後續分析與維護策略方案之研擬與模擬。共計有以下六項：

- (1) 安全迴路失效，導致列車在車門未關閉的情況下行駛
- (2) 一般煞車功能失效
- (3) 緊急煞車功能失效
- (4) 列車行駛中，聯結器自動解聯(註：此項目雖然風險值未高於 0.3，然而由於其影響程度為各問項中最大者，因此亦納入考慮)
- (5) 主懸吊系統故障崩塌，造成車廂傾斜
- (6) 推進與煞車之同步連鎖功能失效，列車在未獲得足夠煞車力的情況下行駛

下一章即針對以上所選取的六項電聯車系統功能失效進行錯誤樹分析和 FMECA 分析。

## 第五章 錯誤樹分析(FTA)與失效模式、影響與嚴重度分析(FMECA)

本章針對 4.2.3 節中所選取的六項電聯車重大系統功能失效進行深入的分析。首先利用錯誤樹分析探討造成系統功能失效發生的原因及關鍵元件，繼而針對關鍵元件進行失效模式、影響與嚴重度分析，以瞭解該元件的各失效模式中何者應該優先預防其發生。最後並針對嚴重度高的失效模式討論其適當的維護工作項目。

### 5.1 建構系統功能失效之錯誤樹

在構建各系統功能失效的錯誤樹之前，必須先針對該功能運作的流程進行瞭解。以下分別加以說明：

#### (1) 安全迴路失效，導致列車在車門未關閉的情況下行駛

車門的關閉與列車的行進是互相連鎖的。當車門關上時，電聯車的安全迴路會加以連通，並送出推進訊號至推進系統使列車行進。因此，若列車在車門未關閉的情況下行進，必然是「車門未關上」及「推進訊號送至推進系統」兩者同時發生所造成的。從此兩事件出發，之後再深入探究此兩事件的肇因，以建構此系統功能失效的錯誤樹。此失效的功能區塊圖(Functional Block Diagram)與錯誤樹分別如圖 5-1 與圖 5-7 所示。

#### (2) 一般煞車功能失效

一般煞車運作的過程主要有三個步驟：煞車訊號接收、煞車控制單元進行訊號處理，以及煞車作動。煞車訊號經 DM1 車編碼器處理後，再藉由列車同步訊號線路傳遞至 T 車和 M2 車的煞車控制單元加以解碼並且進行氣電訊號的轉換。之後依據氣壓控制訊號進行機械煞車的運作(在此之前電力煞車已經先啟動)。分析導致此三步驟失效的原因，以建構此系統功能失效的錯誤樹。此失效的功能區塊圖與錯誤樹如圖 5-2 與圖 5-8 所示。

#### (3) 緊急煞車功能失效

緊急煞車功能的啟動過程有別於一般煞車，乃是經由緊急煞車電氣迴路加以控制。一旦該迴路閉路時，各列車煞車控制單元中的緊急電磁閥便加以激磁，並促使機械煞車直接啟動，利用磨擦的原理令列車快速地減速停止。此失效的功能區塊圖與錯誤樹如圖 5-3 與圖 5-9 所示。

#### (4) 列車行駛中，聯結器自動解聯

造成聯結器在行駛中自動解聯的主要原因，除了人為因素外(例如：駕駛員不小心按下自動解聯按鈕)，往往是聯結器結構上的毀損或斷裂。聯結器包括聯結頭、支撐座、牽引聯結裝置等。由這幾個部份的失效肇因加以分析，以建構此系統功能失效的錯誤樹。此失效的功能區塊圖與錯誤樹如圖 5-4 與圖 5-10 所示。

#### (5) 主懸吊系統故障崩塌，造成車廂傾斜

主懸吊系統由八只錐形橡皮彈簧組成，每兩個彈簧與軸箱、架框相連接成為一組懸吊系統，車軸上的負荷均由彈簧加以承受。分析此四組懸吊系統，以建構此系統功能失效的錯誤樹。此失效的功能區塊圖與錯誤樹如圖 5-5 與圖 5-11 所示。

#### (6) 推進與煞車之同步連鎖功能失效,列車在缺乏足夠煞車力下行駛



此功能失效指的是牽引馬達推進功能正常，但電力煞車功能無法正常運作，因此列車雖可正常行駛，然而在煞車時卻無法藉由電力煞車加以減速，而有煞車力不足的現象。此失效的功能區塊圖與錯誤樹如圖 5-6 與圖 5-12 所示。

此外，以各系統功能失效在做為錯誤樹的頂事件加以展開時，為避免錯誤樹展開過於複雜，以及後續進行蒐集資料和策略模擬時之需要，因此將錯誤樹展開層級定在元件/裝備(Component)層級，換言之即是以電聯車的最小更換單元(Least Replacement Unit, LRU)為主。由觀察六項重大系統功能失效的錯誤樹可知，會導致其發生的故障元件分別如表 5-1 所示。

表 5-1 導致六項重大系統功能失效發生的故障元件

重大系統功能失效	故障元件
安全迴路失效，導致列車在車門未關閉的情況下行駛	列車同步訊號線路(Train Line) 關門(安全)電驛(Relay) 車門互鎖電路/電驛 計時器 極限開關(Limit Switch) 雙向電磁閥(Magnet Valve) 調節閥(Pressure Regulating Valve) 驅動皮帶 驅動架 彈簧箱 車門控制儲氣槽(Door Control Reservoir) 氣壓缸固定件 氣壓缸(Cylinder) 活塞桿(Door Cylinder) 自動鎖定裝置
一般煞車功能失效」	列車同步訊號線路(Train Line) DM1 車編碼器(Encoder) 解碼器(Decoder) 氣電轉換閥(Analogue Convertor) 繼動閥(Relay Valve) 荷重切斷閥(Load Dependant Valve) 壓縮機調節閥(Compressor Governor) 回生式電力煞車盤(Dynamic Brake) 煞車電阻(Brake Resistor) 氣壓回路 空壓機(Air Supply Equipment) 緊急/煞車閥(Emergency Brake Valve) 主儲氣槽(Main Reservoir) 煞車儲氣槽(Brake Supply Reservoir) 輔助儲氣槽(Auxiliary Reservoir) 三動閥(Triple Valve/Double Check Valve) 汽缸(煞車氣壓缸)(Brake Cylinder)

	煞車夾持器(Brake Caliper) 煞車引動/作動器(Brake Actuators/Activator) 煞車片(Disc Brake Pad)
緊急煞車功能失效	緊急煞車電氣回路 緊急電磁閥(Magnet Valve) 繼動閥(Relay Valve) 緊急煞車氣壓回路 空壓機(Air Supply Equipment) 緊急/煞車閥(Emergency Brake Valve) 主儲氣槽(Main Reservoir) 煞車儲氣槽(Brake Supply Reservoir) 輔助儲氣槽(Auxiliary Reservoir) 三動閥(Triple Valve/Double Check Valve) 汽缸(煞車氣壓缸) 煞車夾持器(Brake Caliper) 煞車引動/作動器(Brake Actuators/Activator) 煞車片(Disc Brake Pad)
列車行駛中，聯結器自動解聯	機械聯結頭(Mechanical Coupler Head) 聯結器支撐座(Cantilever Support Assembly) 固定座(半永久)(Anchorage) 通道支撐座(Gangway Support) 緩衝器(Draft Gear) 能量吸收器(Energy Absorption Device) 緊急鬆脫螺栓(Emergency Release Bolt Assembly)
主懸吊系統故障崩塌，造成車廂傾斜	錐形橡皮彈簧(Conical Rubber Axle Spring)
推進與煞車之同步連鎖功能失效,列車在缺乏足夠煞車力下行駛	回生式電力煞車盤(Dynamic Brake) 煞車電阻(Brake Resistor)

在完成六項重大系統功能失效的錯誤樹之後，下一節將分別針對各錯誤樹進行定性與定量的分析，以找出影響該失效的關鍵項目(Critical Item)。

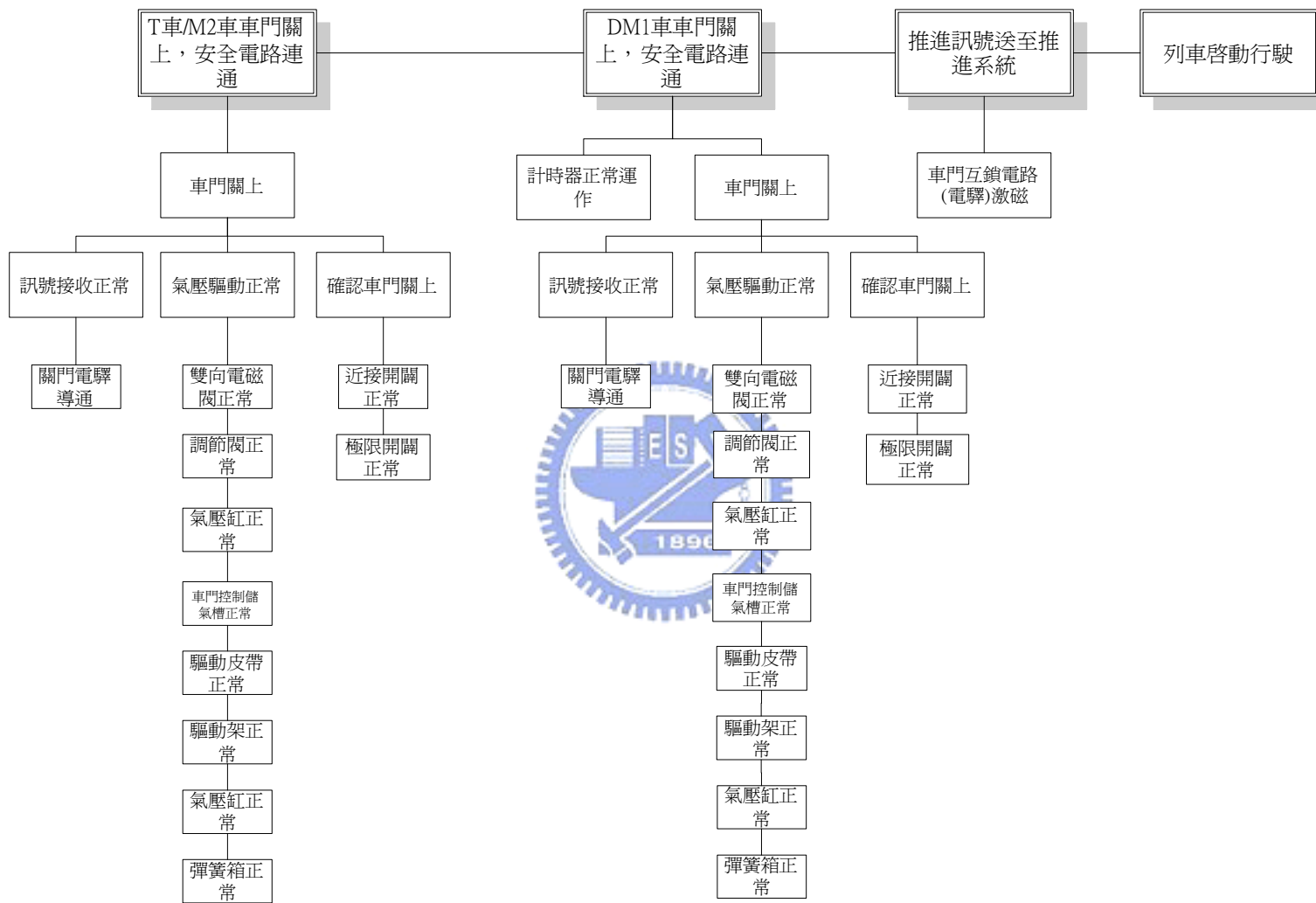


圖 5-1 「安全迴路失效，導致列車在車門未關閉的情況下行駛」之功能區塊圖

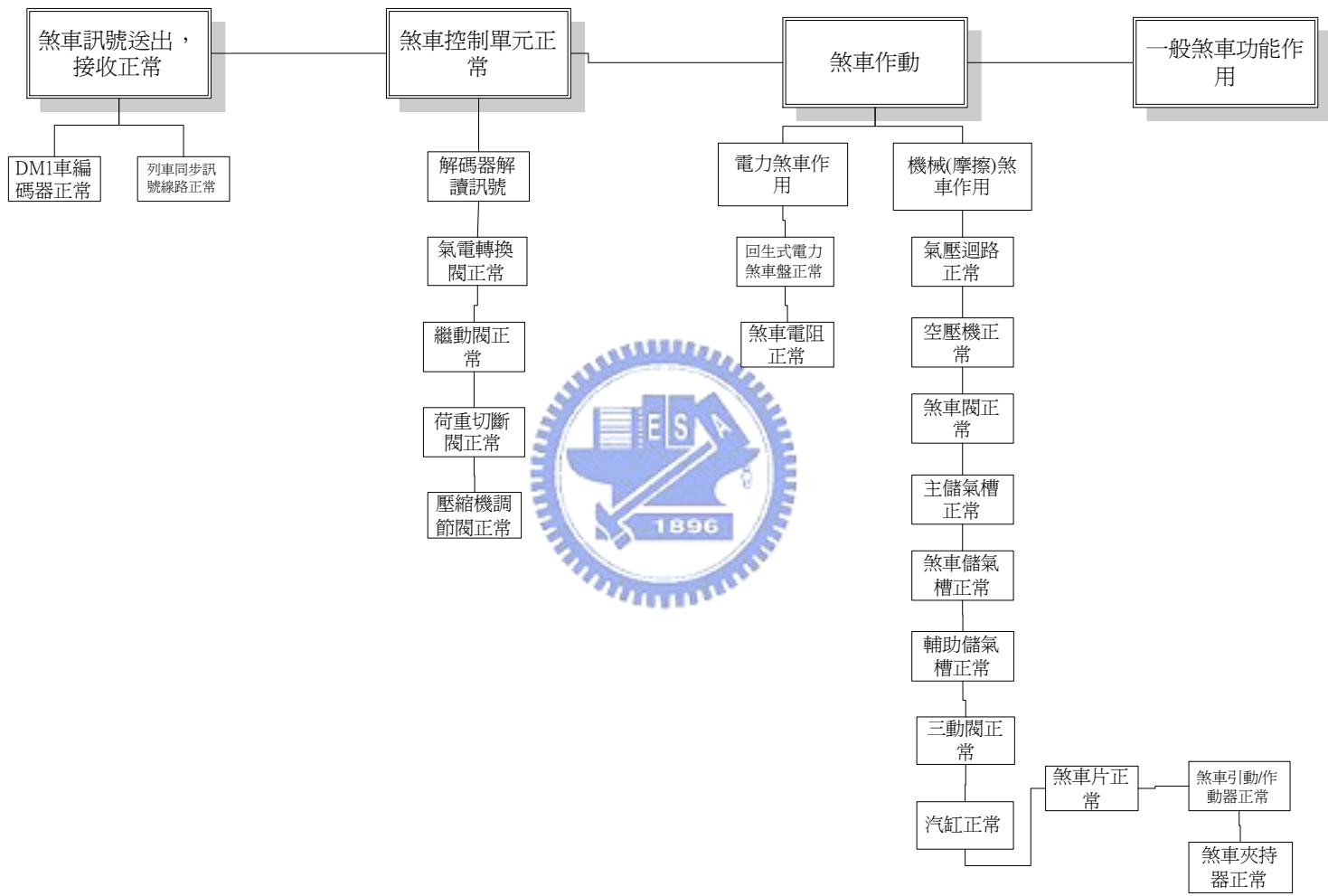


圖 5-2 「一般煞車功能失效」之功能區塊圖

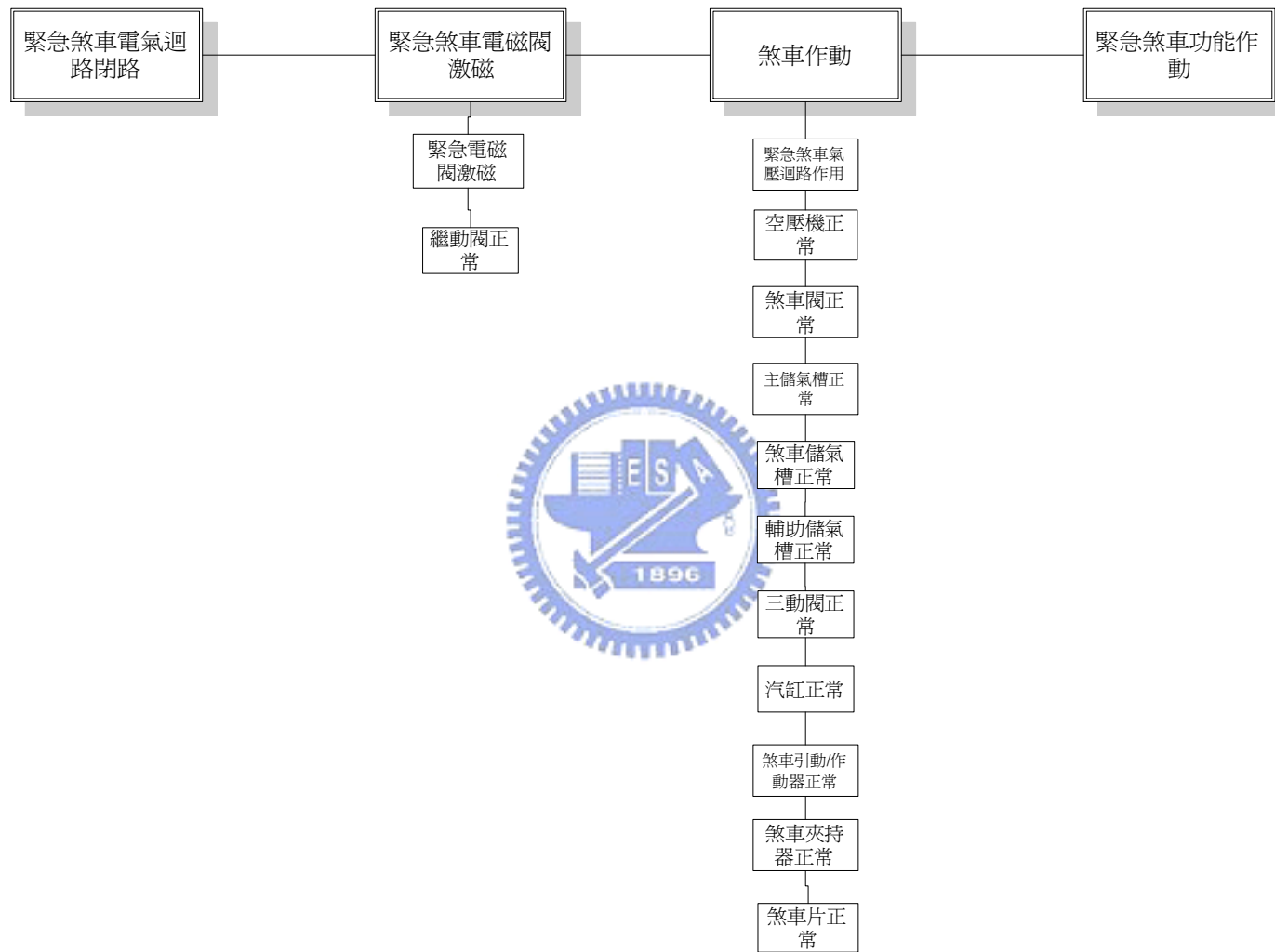


圖 5-3 「緊急煞車功能失效」之功能區塊圖

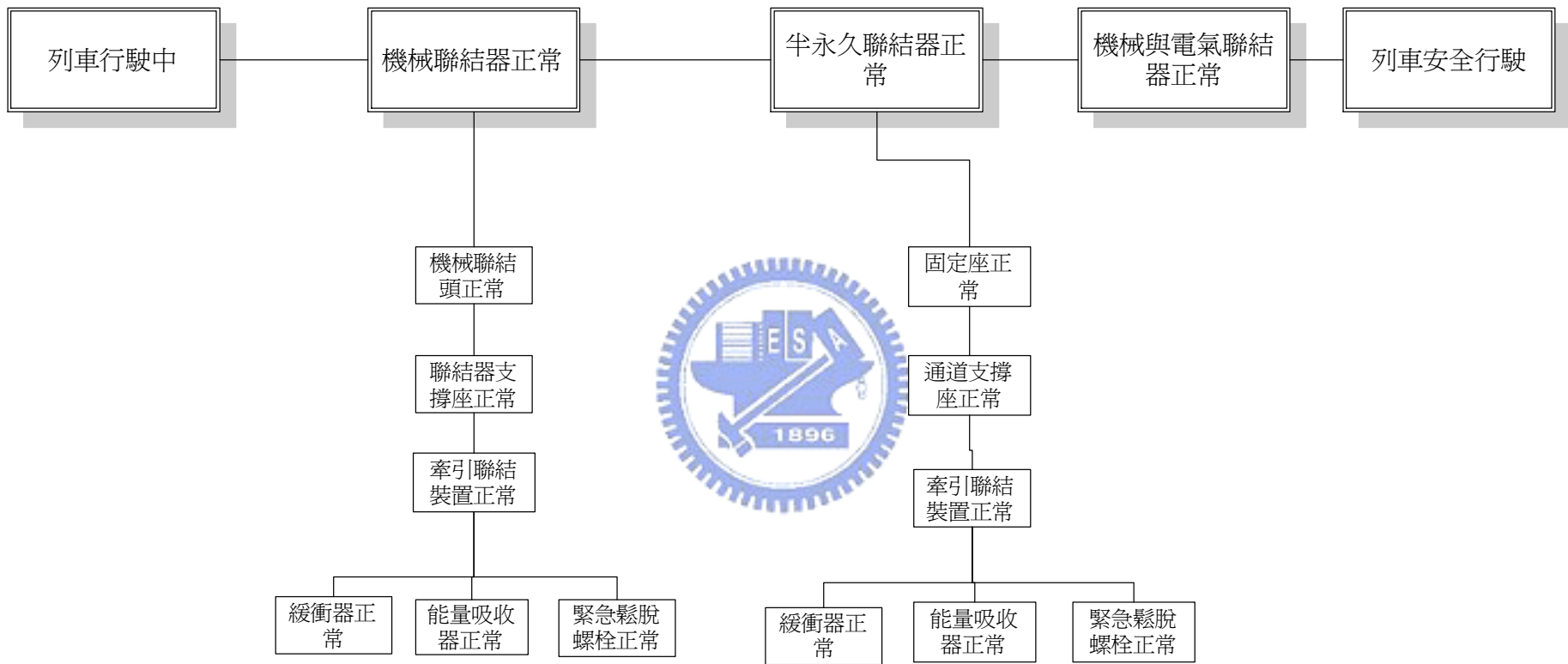


圖 5-4 「列車行駛中，聯結器自動解聯」之功能區塊圖

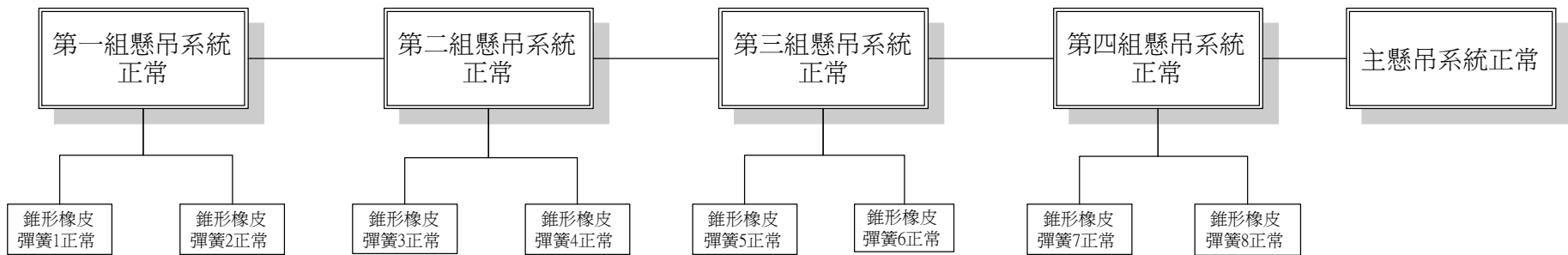


圖 5-5 「主懸吊系統故障崩塌，造成車廂傾斜」之功能區塊圖

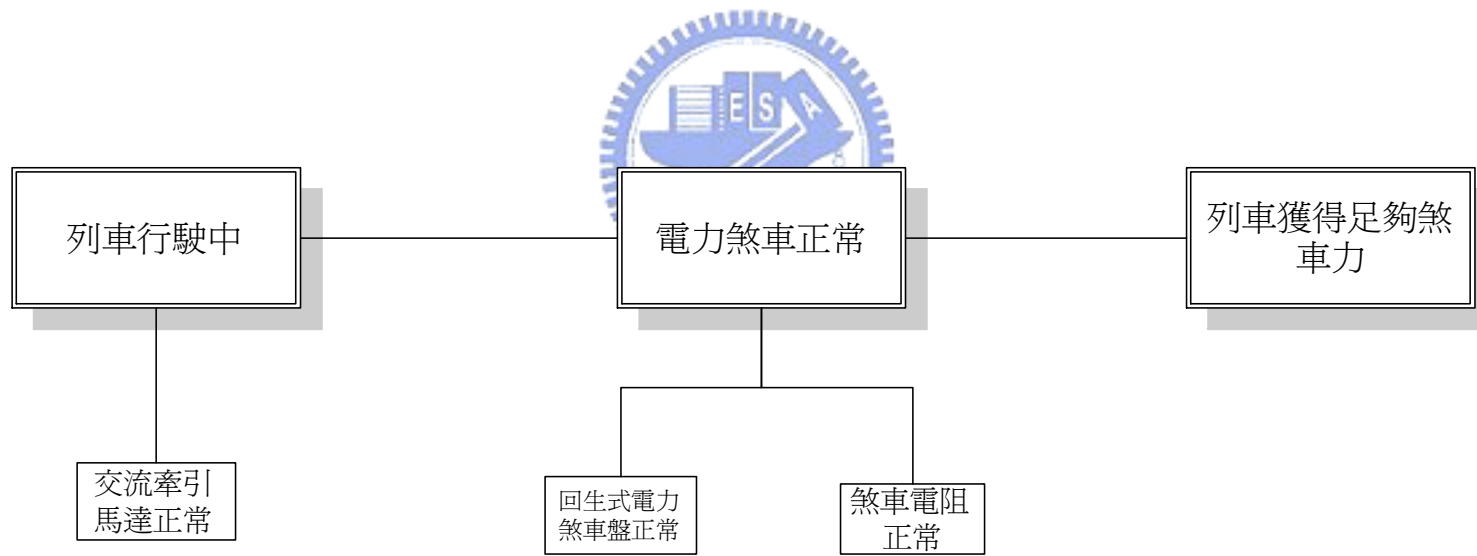


圖 5-6 「推進與煞車之同步連鎖功能失效，列車在缺乏足夠煞車力下行駛」之功能區塊圖

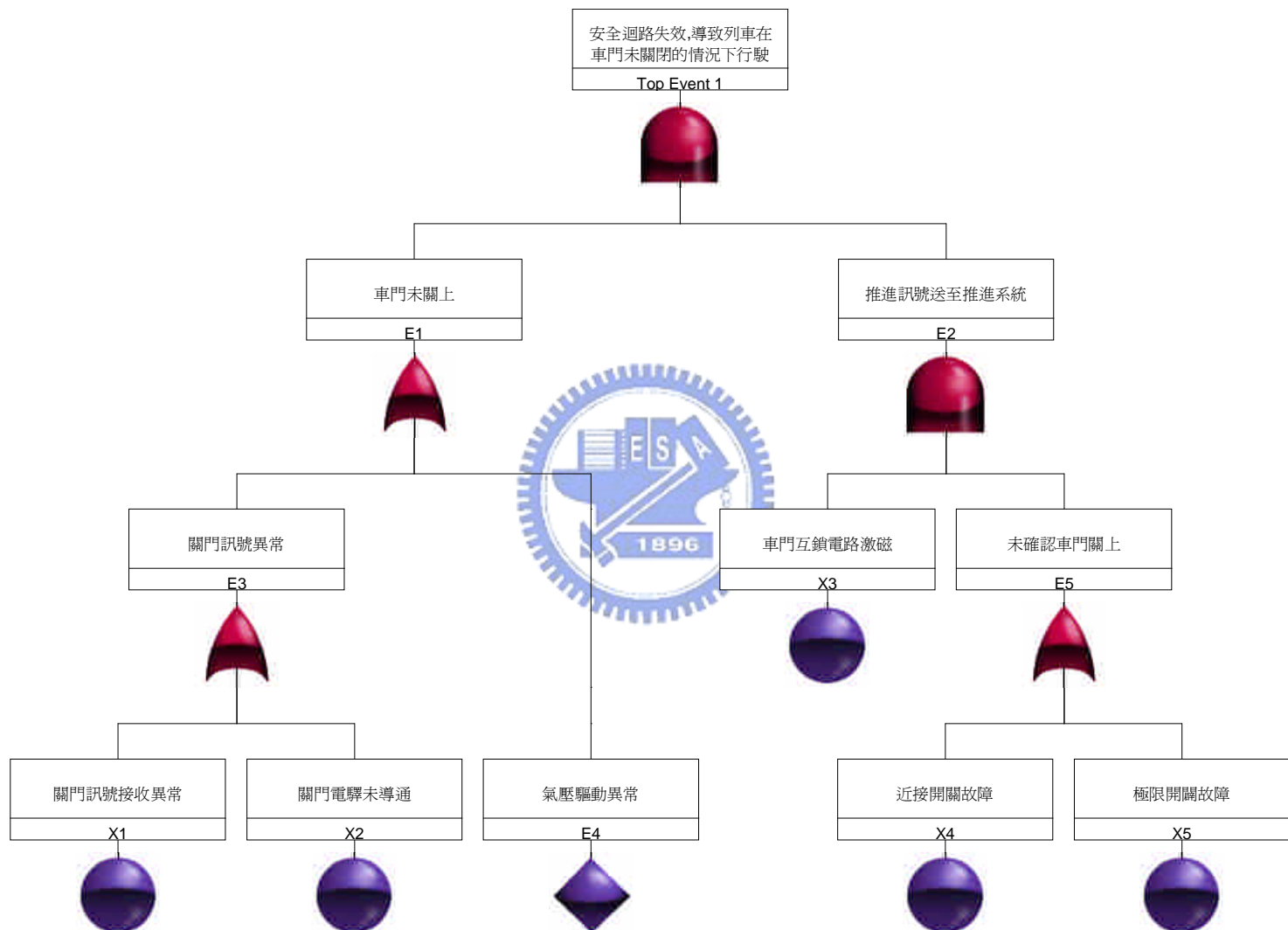


圖 5-7 「安全迴路失效，導致列車在車門未關閉的情況下行駛」之錯誤樹



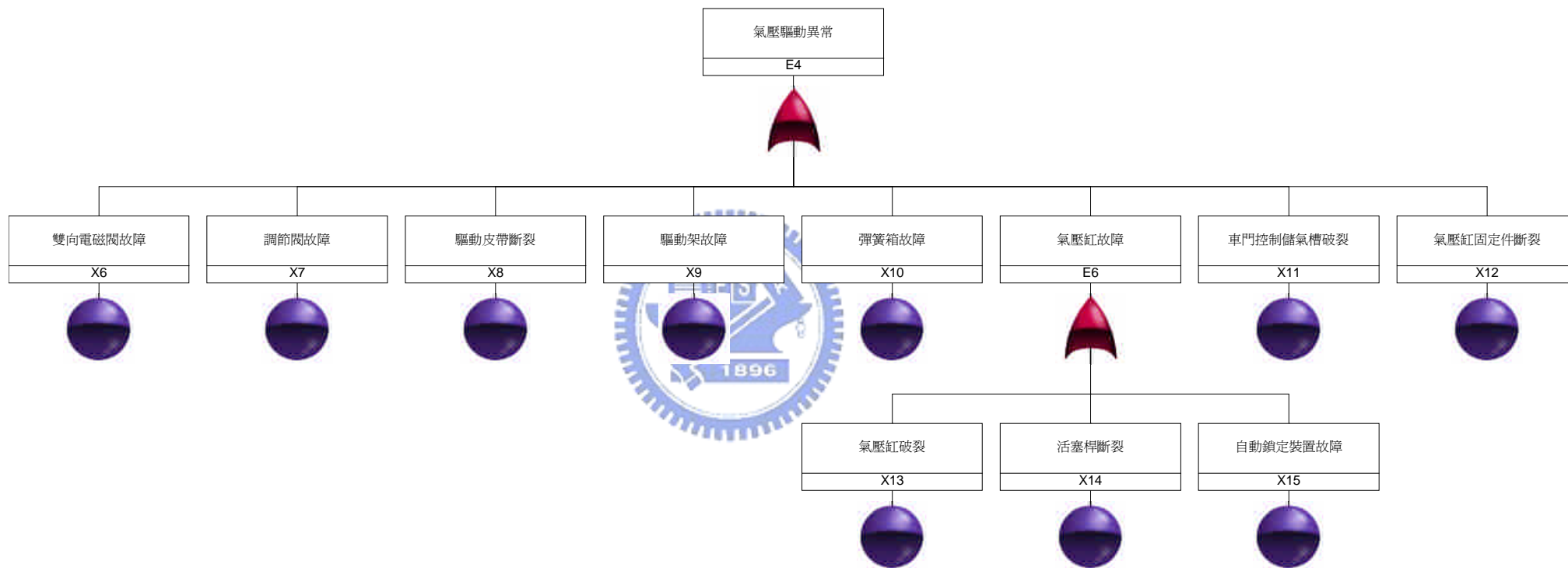


圖 5-7 「安全迴路失效，導致列車在車門未關閉的情況下行駛」之錯誤樹(續)

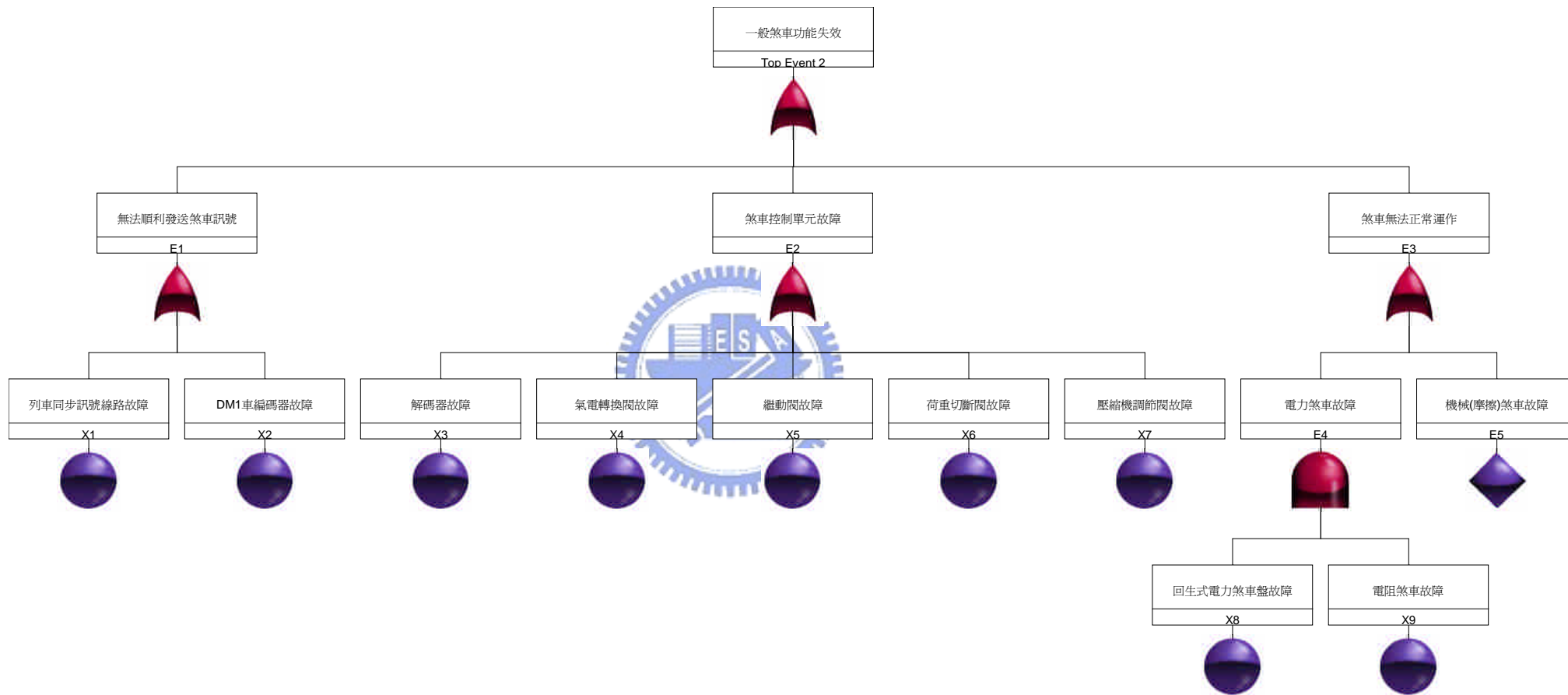


圖 5-8 「一般煞車功能失效」之錯誤樹

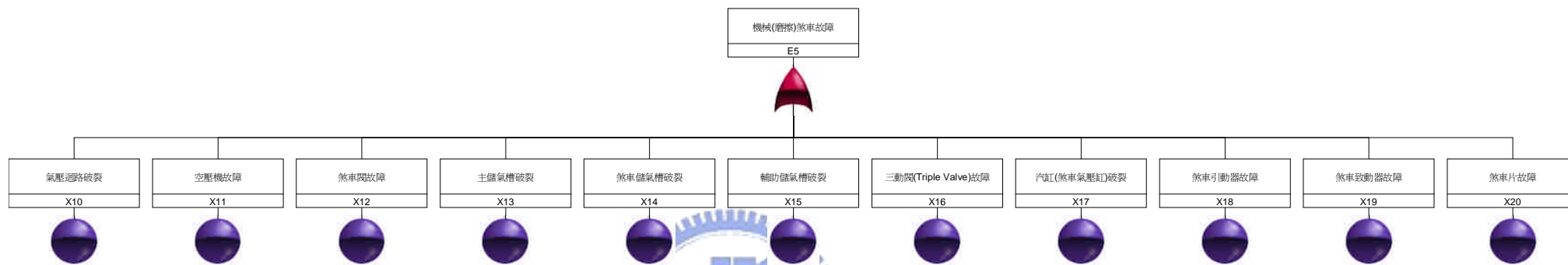


圖 5-8 「一般煞車功能失效」之錯誤樹(續)



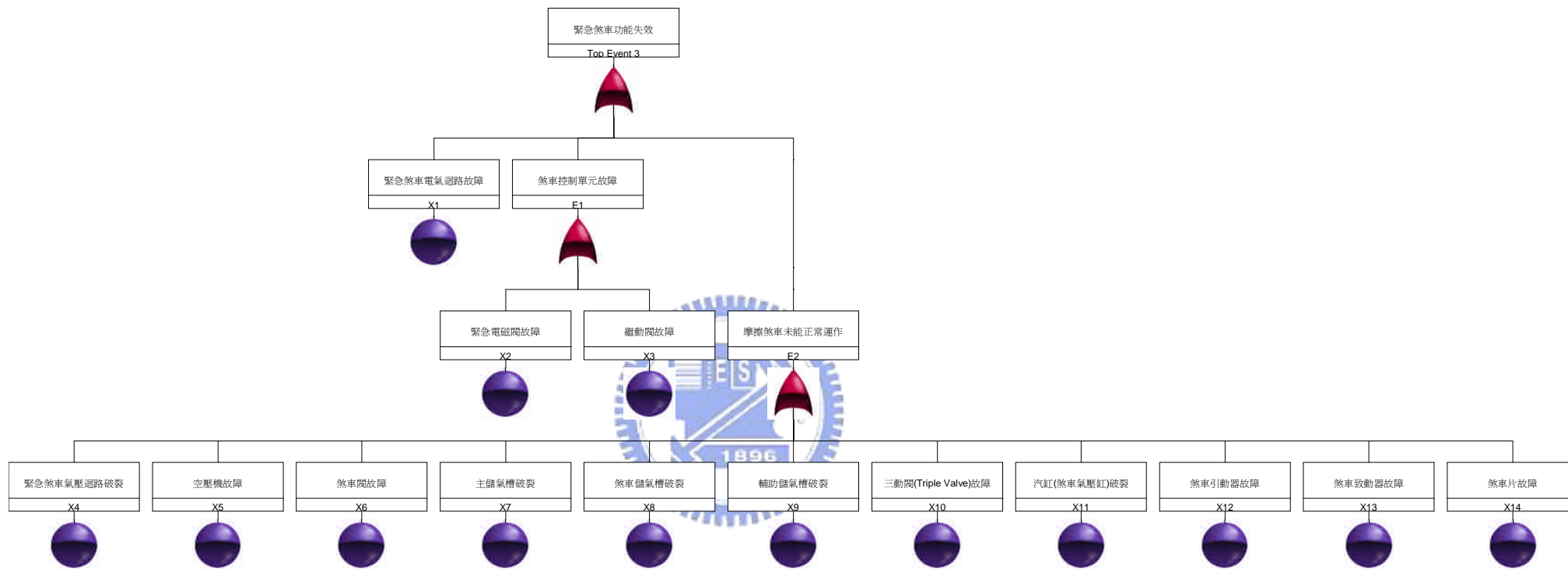


圖 5-9 「緊急煞車功能失效」之錯誤樹

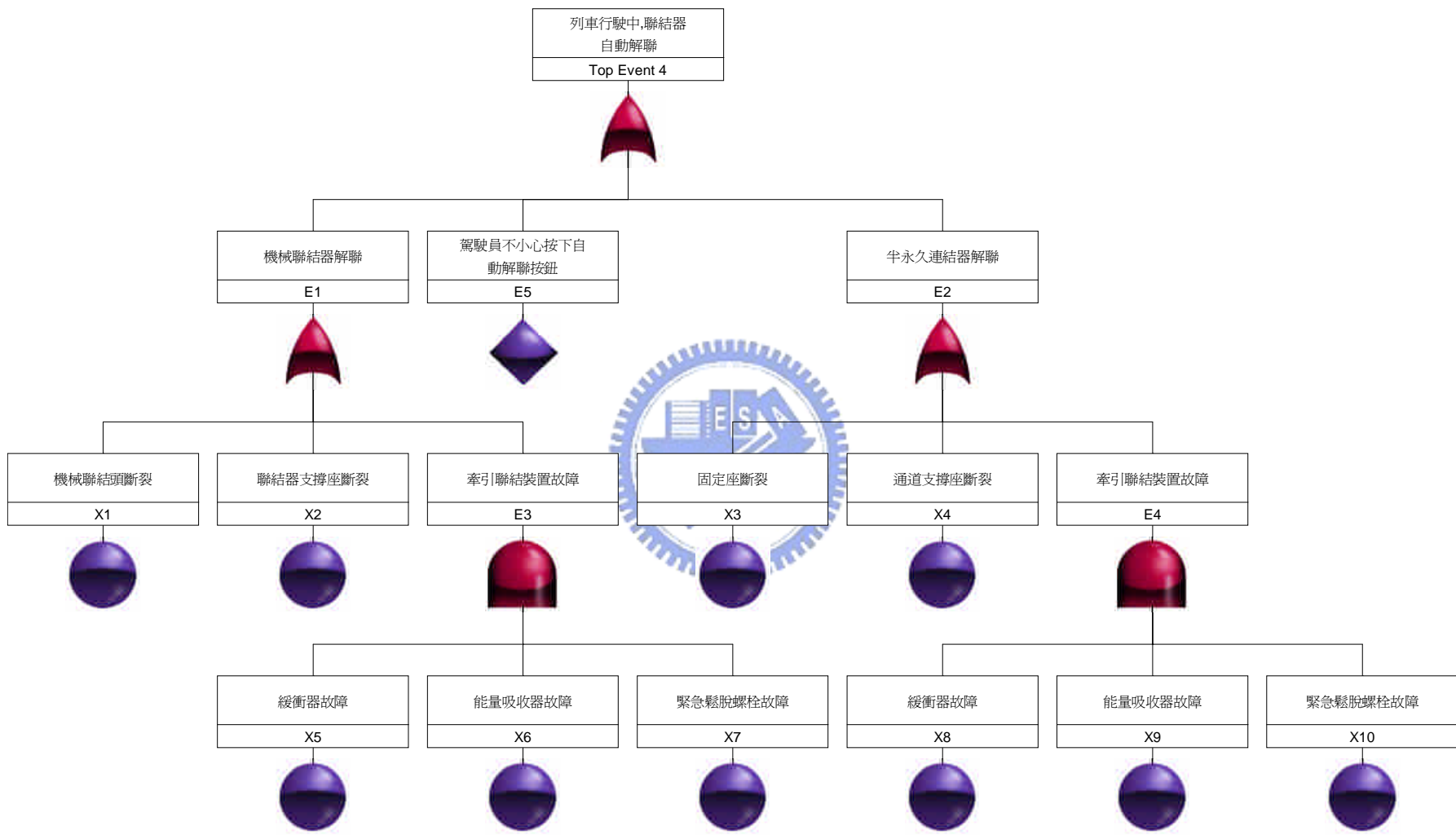


圖 5-10 「列車行駛中，聯結器自動解聯」之錯誤樹

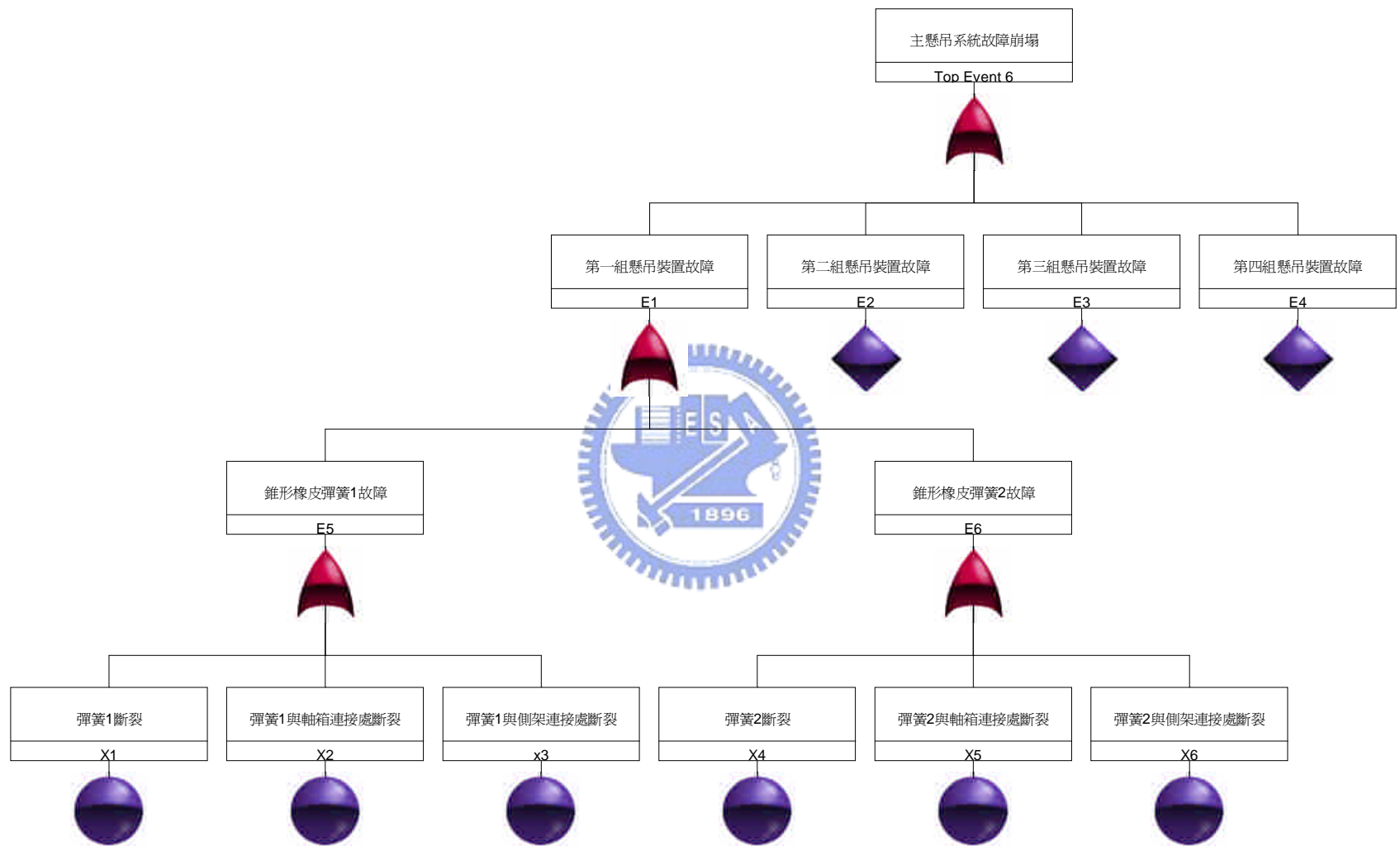


圖 5-11 「主懸吊系統故障崩塌，造成車廂傾斜」之錯誤樹

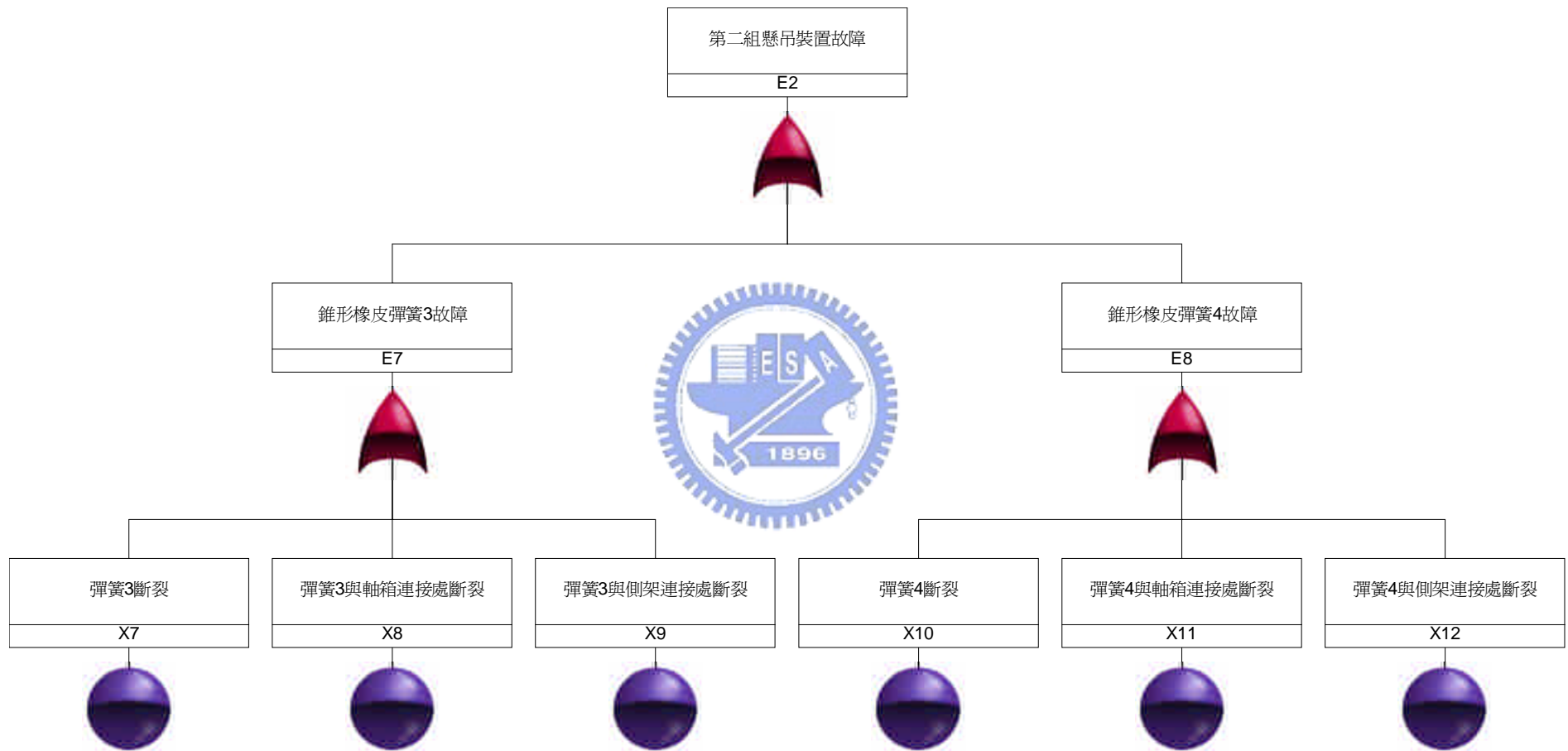


圖 5-11 「主懸吊系統故障崩塌，造成車廂傾斜」之錯誤樹(續)

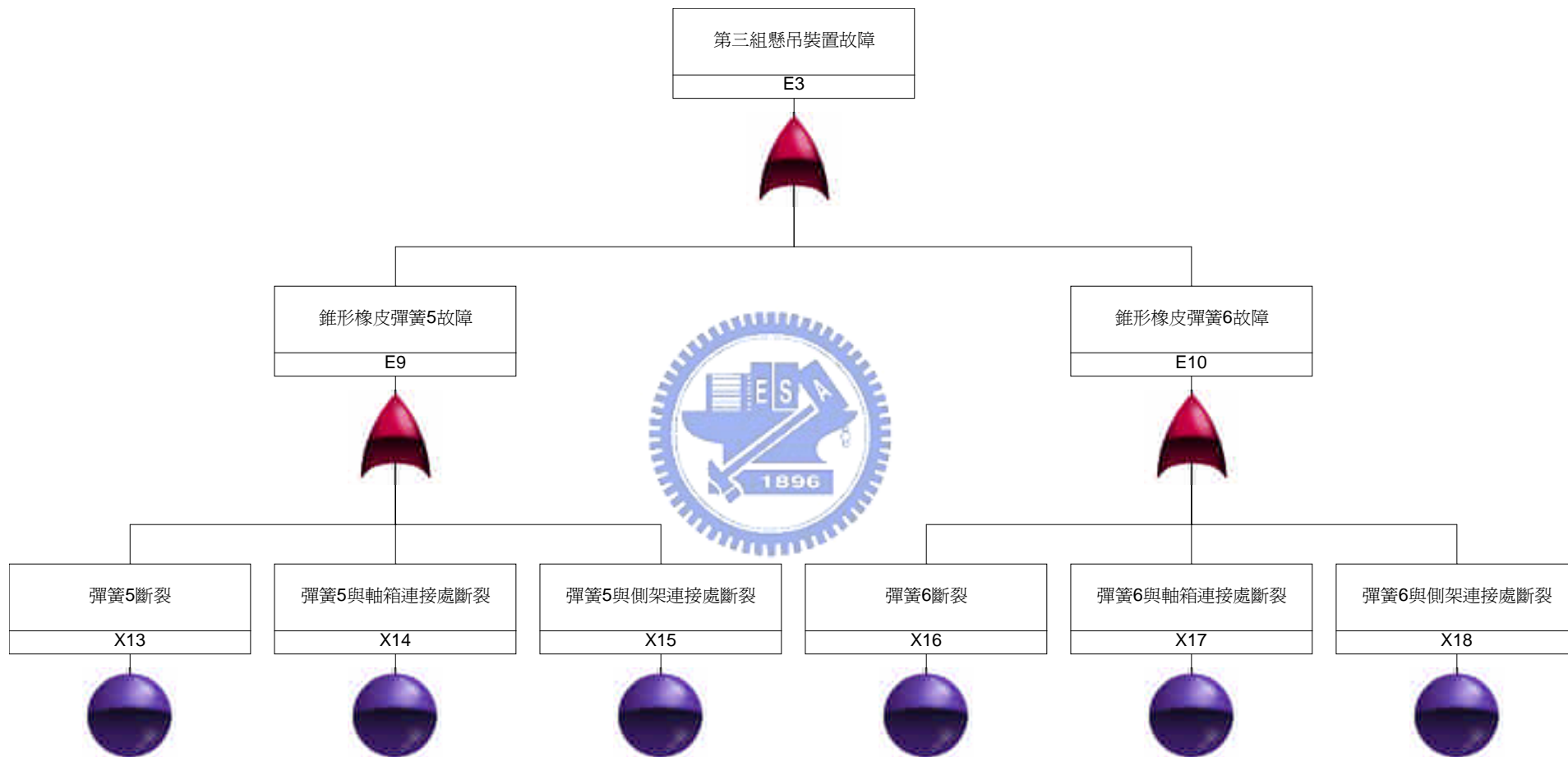


圖 5-11 「主懸吊系統故障崩塌，造成車廂傾斜」之錯誤樹(續)



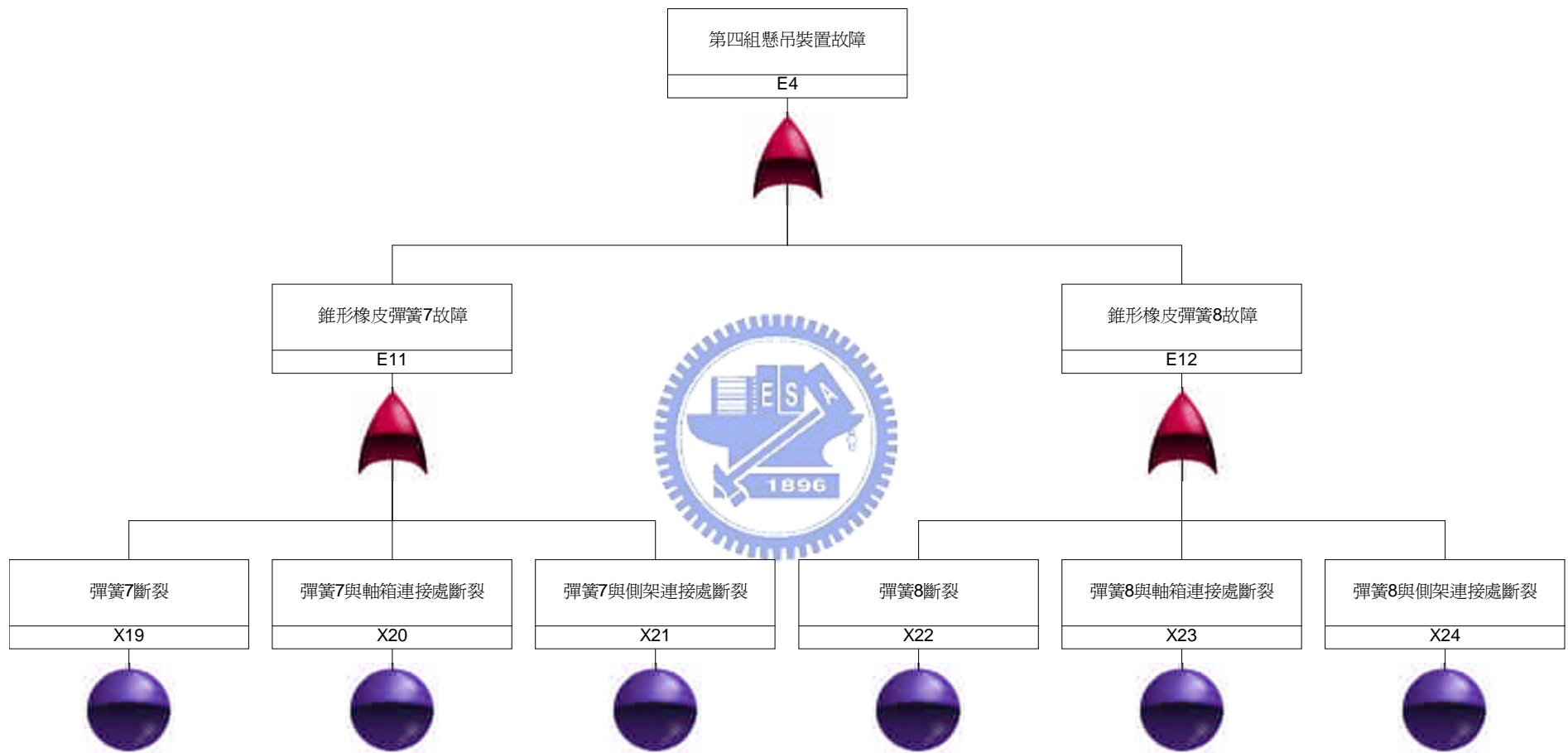


圖 5-11 「主懸吊系統故障崩塌，造成車廂傾斜」之錯誤樹(續)

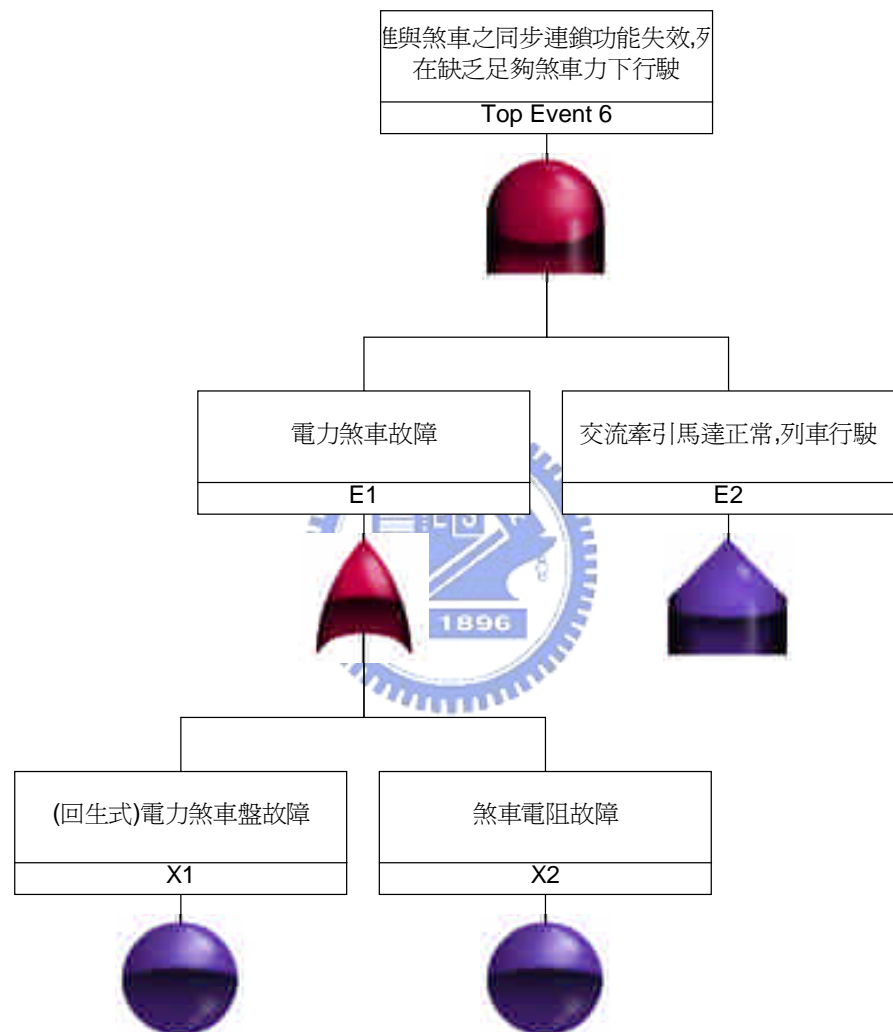


圖 5-12 「推進與煞車之同步連鎖功能失效,列車在缺乏足夠煞車力下行駛」之錯誤樹

## 5.2 維護關鍵項目之選取

本節針對前述 5.1 節中建構出六個錯誤樹進行定性與定量的分析。錯誤樹定性分析指的是推導錯誤樹之最小切割組(Minimal Cut Set)；定量分析指的是頂事件發生機率的估算，以及決定各基本事件的重要度(Importatnce)和關鍵性(Criticality)。以下分別針對定性與定量分析的過程與結果加以說明。

### 5.2.1 各錯誤樹之定性分析

切割組(又稱切集合)指的是一群基本事件的組合，當組合內之所有基本事件皆發生時，則頂端事件必然會發生。觀察所建立完成之錯誤樹可發現，切割組係一條由頂端事件通達基本事件的路徑，此路徑將可具有若干個分支(Branch)，而非必為一條直達的路徑。如果某一切割組內之基本事件僅缺少一件(即條件不足)，即可避免頂端事件的發生，則該切割組即為最小切割組。換言之，最小切割組即為「造成頂端事件發生之最少事件的組合」。尋找最小切割組的目的在於發現導致頂端事件發生所需之最少基本事件組合，可作為頂端事件分析與防制的基礎。

布林代數(Boolean Algebra)是用來推導切割組的數學工具。其運用的基本原則如下：

- (1) 將每一個基本事件視為一個布林變數。
- (2) 對每一個「OR 閘」之輸出事件以其輸入事件之布林變數之總和(Sum)來表示。
- (3) 對每一個「AND 閘」之輸出事件以其輸入事件之布林變數之乘積(Product)來表示。

此外，基本的布林代數運算如下：

$$X \cdot X = X$$

$$X + X = X$$

$$X(X + Y) = X$$

$$X + X \cdot Y = X$$

$$X + Y \cdot Z = (X + Y)(X + Z)$$

以下針對各錯誤樹進行最小切割組的推導。

- (1) 安全迴路失效，導致列車在車門未關閉的情況下行駛(參考圖 5-7)

$$E_3 = X_1 + X_2$$

$$E_5 = X_4 + X_5$$

$$E_6 = X_{13} + X_{14} + X_{15}$$

$$E_4 = X_6 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + E_6$$

$$= X_6 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15}$$

$$E_1 = E_3 + E_4$$

$$= X_1 + X_2 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15}$$

$$E_2 = X_3 \cdot E_5$$

$$= X_3 \cdot (X_4 + X_5)$$

$$= X_3 \cdot X_4 + X_3 \cdot X_5$$

$$\begin{aligned}
\therefore TE_1 &= E_1 \cdot E_2 \\
&= X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 + X_1 \cdot X_3 \cdot X_5 + X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 + X_2 \cdot X_3 \cdot X_5 + X_6 \cdot X_3 \cdot X_4 + X_6 \cdot X_3 \cdot X_5 \\
&\quad + X_7 \cdot X_3 \cdot X_4 + X_7 \cdot X_3 \cdot X_5 + X_8 \cdot X_3 \cdot X_4 + X_8 \cdot X_3 \cdot X_5 + X_9 \cdot X_3 \cdot X_4 + X_9 \cdot X_3 \cdot X_5 \\
&\quad + X_{10} \cdot X_3 \cdot X_4 + X_{10} \cdot X_3 \cdot X_5 + X_{11} \cdot X_3 \cdot X_4 + X_{11} \cdot X_3 \cdot X_5 + X_{12} \cdot X_3 \cdot X_4 + X_{12} \cdot X_3 \cdot X_5 \\
&\quad + X_{13} \cdot X_3 \cdot X_4 + X_{13} \cdot X_3 \cdot X_5 + X_{14} \cdot X_3 \cdot X_4 + X_{14} \cdot X_3 \cdot X_5 + X_{15} \cdot X_3 \cdot X_4 + X_{15} \cdot X_3 \cdot X_5
\end{aligned}$$

(2) 一般煞車功能失效(參考圖 5-8)

$$E_1 = X_1 + X_2$$

$$E_2 = X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7$$

$$E_4 = X_8 \cdot X_9$$

$$E_5 = X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20}$$

$$E_3 = E_4 + E_5$$

$$= (X_8 \cdot X_9) + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20}$$

$$\therefore TE_2 = E_1 + E_2 + E_3$$

$$\begin{aligned}
&= X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 \cdot X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} \\
&\quad + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20}
\end{aligned}$$

(3) 緊急煞車功能失效(參考圖 5-9)

$$E_1 = X_2 + X_3$$

$$E_2 = X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14}$$

$$\therefore TE_3 = X_1 + E_1 + E_2$$

$$= X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14}$$

(4) 列車行駛中，聯結器自動解聯(參考圖 5-10)

$$E_3 = X_5 \cdot X_6 \cdot X_7$$

$$E_4 = X_8 \cdot X_9 \cdot X_{10}$$

$$E_1 = X_1 + X_2 + E_3 = X_1 + X_2 + X_5 \cdot X_6 \cdot X_7$$

$$E_2 = X_3 + X_4 + E_4 = X_3 + X_4 + X_8 \cdot X_9 \cdot X_{10}$$

$$\therefore TE_4 = E_1 + E_2 + E_5$$

$$= X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 \cdot X_6 \cdot X_7 + X_8 \cdot X_9 \cdot X_{10} + E_5$$

(5) 主懸吊系統故障崩塌，造成車廂傾斜(參考圖 5-11)

$$E_5 = X_1 + X_2 + X_3$$

$$E_6 = X_4 + X_5 + X_6$$

$$E_7 = X_7 + X_8 + X_9$$

$$E_8 = X_{10} + X_{11} + X_{12}$$

$$E_9 = X_{13} + X_{14} + X_{15}$$

$$E_{10} = X_{16} + X_{17} + X_{18}$$

$$E_{11} = X_{19} + X_{20} + X_{21}$$

$$E_{12} = X_{22} + X_{23} + X_{24}$$

$$E_1 = E_5 + E_6 = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6$$

$$E_2 = E_7 + E_8 = X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12}$$

$$E_3 = E_9 + E_{10} = X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18}$$

$$E_4 = E_{11} + E_{12} = X_{19} + X_{20} + X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24}$$

$$\therefore TE_5 = E_1 + E_2 + E_3 + E_4$$

$$= X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} + X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24}$$

(6) 推進與煞車之同步連鎖功能失效,列車在缺乏足夠煞車力下行駛(參考圖 5-12)

$$E_1 = X_1 + X_2$$

$$\therefore TE_6 = E_1 \cdot E_2$$

$$= X_1 \cdot E_2 + X_2 \cdot E_2$$

### 5.2.2 各錯誤樹之定量分析

在完成定性分析之後，本節接下來進行錯誤樹的定量分析，主要分成兩項：(1)頂事件發生的機率推導。(2)評估各基本事件之重要度與關鍵性。在進行分析之前，首先必須針對表 5-1 中所列導致各重大系統功能失效的元件進行失效率 (Failure Rate,  $\lambda$ ) 資料的蒐集。本研究參考以往工業界以及美國軍方所發展出的元件失效率資料庫，擇其相近者以做為本研究進行分析的資料。各元件的故障率如表 5-2 所示。

表 5-2 各元件故障率資料

元件名稱	故障率(每百萬小時)
列車同步訊號線路(Train Line)	3.31
關門(安全)電驛(Relay)	0.166
車門互鎖電路/電驛	0.166
計時器	0.569
極限開關(Limit Switch)	0.25
雙向電磁閥(Magnet Valve)	1.50
調節閥(Pressure Regulating Valve)	9.4
驅動皮帶	40
驅動架	2
彈簧箱	0.0409

車門控制儲氣槽(Door Control Reservoir)	2.27
氣壓缸固定件	2
氣壓缸(Cylinder)	1.1
活塞桿(Door Cylinder)	1.296
自動鎖定裝置	6
列車同步訊號線路(Train Line)	3.31
DM1 車編碼器(Encoder)	3.000003
解碼器(Decoder)	0.26
氣電轉換閥(Analogue Convertor)	1.5
繼動閥(Relay Valve)	1.49999925
荷重切斷閥(Load Dependant Valve)	1.49999925
壓縮機調節閥(Compressor Governor)	1.49999925
回生式電力煞車盤(Dynamic Brake)	0.8196
煞車電阻(Brake Resistor)	0.0048
氣壓回路	0.5
空壓機(Air Supply Equipment)	23.0999697
緊急/煞車閥(Emergency Brake Valve)	1.49999925
主儲氣槽(Main Reservoir)	0.757
煞車儲氣槽(Brake Supply Reservoir)	2.27
輔助儲氣槽(Auxiliary Reservoir)	0.1
三動閥(Triple Valve/Double Check Valve)	4.61
汽缸(煞車氣壓缸)(Brake Cylinder)	1.1
煞車夾持器(Brake Caliper)	24
煞車引動/作動器(Brake Actuators/Activator)	52.4
煞車片(Disc Brake Pad)	4.8
緊急煞車電氣回路	3.31
緊急電磁閥(Magnet Valve)	0.3
緊急煞車氣壓回路	0.5
機械聯結頭(Mechanical Coupler Head)	0.03300003
聯結器支撐座(Cantilever Support Assembly)	0.100001
固定座(半永久)(Anchorage)	10
通道支撐座(Gangway Support)	0.01
緩衝器(Draft Gear)	0.33620226
能量吸收器(Energy Absorption Device)	0.0037
緊急鬆脫螺栓(Emergency Release Bolt Assembly)	0.21000021
錐形橡皮彈簧(Conical Rubber Axle Spring)	0.648

資料來源：[29][90][91]

失效率又稱為「瞬間故障率」(Instantaneous Failure Rate)。失效率和元件處於故障狀態(換言之即是元件壽命)之機率密度函數有著以下的關係：

$$f(t) = \lambda(t)e^{-\left[\int_0^t \lambda(t')dt'\right]}$$

在可靠度工程中，多半假設元件壽命符合指數分配(換言之即是元件失效率在一開始使用時較高，之後逐漸遞減而趨向一穩定值)，因此上式可改寫為

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

此時元件的平均故障時間(Mean Time Between Failure)為

$$\begin{aligned} MTBF &= \int_0^{\infty} tf(t)dt \\ &= \frac{1}{\lambda} \end{aligned}$$

然而，必須先給定一段元件使用時間長度後，方能決定失效機率。在時間長度的決定方面，主要考慮以下兩點：

- (1) 元件失效率的變化基本上符合浴缸曲線(Bathtub Curve)：剛開始使用時元件的失效率偏高，之後逐漸降低至一穩定值，等於元件快要故障時會急速攀升。因此，如果選取的時間長度與元件的平均故障時間相較而言甚小時，基本上可將其使用壽命視為指數分配。
- (2) 由於探討的頂事件皆為電聯車子系統層級之失效，因此本研究以該子系統發生故障機率最高的時間點做為參考。在可靠度研究領域中，「平均故障時間」(MTTF 或 MTBF)被視為是最有可能發生故障的使用時間。電聯車各子系統的平均故障(或失效)時間如表 5-3 所示。

表 5-3 電聯車各子系統之平均失效時間(MTBF)

電聯車子系統	平均失效時間(小時，承商值)
車體及其附件	23255
聯結器及其附件	40258
車門及其控制	1883
空調系統	5498
輔助電氣系統	1001
動力牽引系統	915
轉向架及懸吊系統	65750
磨擦式煞車	1848
照明系統	8793
車上控制設備	9300
通訊系統	5000

資料來源：[44]

綜上所述，本研究選擇各項事件「所屬之子系統的平均失效時間」做為計算各基本事件與頂事件失效機率的時間長度。其中「安全迴路失效，導致列車在車門未關閉的情況下行駛」屬於車門子系統，平均失效時間為 1883 小時；「一般煞車功能失效」屬於煞車子系統，平均失效時間為 1848 小時；「緊急煞車功能失效」

屬於煞車子系統，平均失效時間為 1848 小時；「列車行駛中，聯結器自動解聯」屬於聯結器子系統，平均失效時間為 40258 小時；「主懸吊系統故障崩塌，造成車廂傾斜」屬於轉向架及懸吊子系統，平均失效時間為 65750 小時；「推進與煞車之同步連鎖功能失效,列車在缺乏足夠煞車力下行駛」屬於煞車子系統，平均失效時間為 1848 小時。

利用上列數據加以計算各基本事件的失效機率，配合 5.1 節中各錯誤樹之最小切割組，可推導出各項事件(系統功能失效)的發生機率。主要依據以下兩個法則。

(1) AND 閘：輸出機率為所有輸入事件發生機率的乘積，亦即

$$\Pr(O) = \Pr(1) \times \Pr(2) \times \cdots \times \Pr(n)$$

(2) OR 閘：輸出機率為所有輸入事件發生機率的總和，亦即

$$\Pr(O) = \Pr(1) + \Pr(2) + \cdots + \Pr(n)$$

其中  $\Pr(O)$  代表 AND/OR 閘上層事件之發生機率， $\Pr(i)$ ,  $i=1,2,\dots,n$  分別代表 AND/OR 閘各輸入事件之發生機率。經推導後得到各項事件機率如表 5-3 所示。然而須注意的是，此機率為系統在未經維護的情況下，由於各元件本身失效率特性所導致，在後續進行策略模擬分析時，將以此做為維護策略改善系統風險的衡量基準。

表 5-4 各項事件機率

頂事件	發生機率	運作時間(小時)
安全迴路失效,導致列車在車門未關閉的情況下行駛	0.000225904	1883
一般煞車功能失效	0.210652375	1848
緊急煞車功能失效	0.198765522	1848
列車行駛中,聯結器自動解聯	0.335245161	40528
主懸吊系統故障崩塌,造成車廂傾斜	0.640321247	65750
推進與煞車之同步連鎖功能失效,列車在缺乏足夠煞車力下行駛	0.000754042	1848

<註>發生機率值指的是當子系統運作時間達到平均故障時間時,該失效發生的機率(在未經維護的情況下)

在獲得各基本事件和頂事件的發生機率之後,接下來進行重要度和關鍵性的評估。兩者皆是探討基本事件對於頂事件發生的影響程度大小。所不同的是,重要性探討的重點在於當頂事件發生時,基本事件對於其發生的貢獻或影響;而關鍵性探討的則是當某特定之基本事件發生時,頂事件發生的機率大小。衡量重要度的指標計有以下五種:[32][28][31]

(1) 結構重要度：結構重要度是從錯誤樹結構上著手分析各基本事件的重要程度，若一基元事件在錯誤樹的最小切割組中出現次數愈多的話，其結構重要度便愈高。結構重要度僅考慮基本事件在錯誤樹結構中出現次數的多寡，來加以判斷其重要程度，但未將基本事件的發生機率大小納入考量。其計算方式容後說明。

(2) 概率重要度：如果進一步考慮基本事件發生機率的變化會對於頂事件發生機率造成多大影響，此時可利用概率重要度指標加以衡量。其計算方式為



$I_{p(i)} = \frac{\partial P}{\partial p_i}$ ，其中  $I_{p(i)}$  為基本事件  $i$  的概率重要度指標， $P$  為頂事件發生機率，

$p_i$  為基元事件發生機率。由於頂事件機率等於其各切割組發生機率之總和。因此  $I_{p(i)}$  可視為內含基元事件  $i$  的所有切割組中餘事件機率乘積後再予以加總。

舉例來說：假設頂事件機率為  $P = p_1 p_3 + p_1 p_5 + p_3 p_4 + p_2 p_4 p_5$ ，則

$$I_{p(1)} = \frac{\partial P}{\partial p_1} = p_3 + p_5, I_{p(2)} = \frac{\partial P}{\partial p_2} = p_4 \cdot p_5。$$

從概率重要度的計算方式可看出，一個基本事件的概率重要度並不取決於它本身的概率值大小，而是與它所在最小切割組中其他基本事件機率乘積大小及它在各個最小切割組中重複出現的次數有關。此外，概率重要度還有一個重要的性質：當假定所有基本事件的發生機率均為  $\frac{1}{2}$  時，概率重要度係數就等於結構重要度係數。本研究利用此關係，先求出基本事件的概率重要度，再求得其結構重要度分析。

- (3) 事件/臨界重要度：一般而言，減少發生機率大之基本事件的機率要比減少發生機率小之基本事件的機率要來得容易，而概率重要度係數並未反映此事實，因此，它不是從本質上反映各基本事件在錯誤樹中的重要程度。而臨界重要度  $C_i$  則是以敏感度和發生機率雙重角度衡量各基本事件的重要程度，其

計算式為  $C_i = \frac{\partial \ln P}{\partial \ln p_i} = \frac{p_i}{P} I_{p(i)}$ 。臨界重要度又稱為事件重要度，事件重要度

的計算方式為  $I_{x_i} \cong \sum I_{CX_i}$ ， $I_{CX_i} = \frac{\Pr(S_{CX_i})}{\Pr(T)}$ ，其中  $I_{CX_i}$  為內含基本事件  $X_i$  的切割組重要度， $S_{CX_i}$  表示在頂事件已發生的情況下，內含  $X_i$  的切割組處於故障狀態； $\Pr(T)$  則代表頂事件發生機率。由事件重要度的計算方式可知其會獲得與臨界重要度相同的數值。

- (4) Birnbaum 係數：Birnbaum 係數是另一種用來評估基本事件重要度的指標，其計算方式為  $B_{f,i} = P(T | X_i = 1) - P(T | X_i = 0)$ ，其中  $B_{f,i}$  為 Birnbaum 係數， $P(T | X_i = 1)$  和  $P(T | X_i = 0)$  分別代表當基本事件  $X_i$  發生與未發生時，頂事件  $T$  的機率。由其計算方式可知，Birnbaum 係數在於比較基本事件  $X_i$  發生與未發生時，頂事件發生機率的變化情形，藉以做為評估其重要性的指標。

- (5) Fussell-Vesely 係數：此係數的計算方式為  $FV_i = B_{f,i} \times \lambda_i$ ，換言之即是除了考慮基本事件  $X_i$  發生與否對於頂事件機率的敏感度外，也同時將基本事件的失效率同時納入考量。

此外，衡量關鍵性的指標為

$$C_{X_i} = \Pr(X_i) \times \Pr(T | X_i)$$

關鍵性愈高的基本事件，些微的改善(例如發生機率降低少許)即可減低頂事件的發生，因此應儘早(或優先)執行設計改善。反之，若關鍵性較低，則可視狀況彈性調整其順序，優先性較低。

本研究針對各重大系統功能失效(圖 5-7 至 5-12)進行上述指標的計算，其結果如表 5-5 至表 5-10 所示。

表 5-5 「安全回路失效、導致列車在車門未關閉情況下行駛」之錯誤樹定量分析結果

Case1. 安全回路失效、導致列車在車門未關閉情況下行駛										
項目	MTTF/ MTBF	失效率 $\lambda$	子系統 MTBF	失效發生 機率	概率重要 度	事件重要 度/臨界重 要度	結構重要 度	事件關鍵 性	Birnbaum 係數	Fussell- Vesely 係數
X1.列車同步訊號線路(Train Line)	302114.8 036	3.31	1883	0.006213 347	0.000000 4818	0.000013 2505	0.5	0.000011 5136	0.001637 305	0.0054 1948
X2.關門(安全)電驛(Relay)	6024096. 386	0.166		0.000312 529	0.000000 4818	0.000000 6665	0.5	0.000000 5791	0.001627 64	0.0002 70188
<b>X3.車門互鎖電路/電驛</b>	6024096. 386	0.166		0.000312 529	0.000195 8394	<b>0.000270</b> <b>936</b>	6	0.000038 1006	<b>0.121722</b> <b>526</b>	0.0202 05939
<b>X4.計時器</b>	1757469. 244	0.569		0.001070 853	0.000039 7054	<b>0.000188</b> <b>215</b>	3	<b>0.000130</b> <b>5481</b>	<b>0.121814</b> <b>93</b>	<b>0.0693</b> <b>12695</b>
<b>X5.極限開關(Limit Switch)</b>	4000000	2.50E-01		0.000470 639	0.000039 7054	0.000082 7204	3	<b>0.000057</b> <b>3758</b>	<b>0.121741</b> <b>78</b>	<b>0.0304</b> <b>35445</b>
X6.雙向電磁閥(Magnet Valve)	666666.6 667	1.50E+0 0		0.002820 515	0.000000 4818	0.000006 0150	0.5	0.000005 2058	0.001624 372	0.0024 36558
X7.調節閥(Pressure Regulating Valve)	106382.9 787	9.40E+0 0		0.017544 472	0.000000 4818	0.000037 4152	0.5	0.000032 4293	0.001651 478	0.0155 23893
<b>X8.驅動皮帶</b>	25000	40		0.072553 344	0.000000 4818	<b>0.000154</b> <b>727</b>	0.5	<b>0.000134</b> <b>3313</b>	0.001752 746	<b>0.0701</b> <b>09852</b>
X9.驅動架	500000	2		0.003758 918	0.000000 4818	0.000008 0162	0.5	0.000006 9386	0.001626 099	0.0032 52198
X10.彈簧箱	2444987 7.75	0.0409		7.70117 E-05	0.000000 4818	0.000000 1642	0.5	0.000000 1421	0.001619 321	0.0000 662302
X11.車門控制儲氣槽(Door Control Reservoir)	440528.6 344	2.27E+0 0		0.004265 288	0.000000 4818	0.000009 0961	0.5	0.000007 8737	0.001627 031	0.0036 9336
X12.氣壓缸固定件	500000	2		0.003758 918	0.000000 4818	0.000008 0162	0.5	0.000006 9386	0.001626 099	0.0032 52198

X.13 氣壓缸(Cylinder)	909090.9 091	1.1		0.002069 156	0.000000 4818	0.000004 4127	0.5	0.000003 8240	0.001625 568	0.0017 88125
X.14 活塞桿(Door Cylinder)	771604.9 383	1.296		0.002437 393	0.000000 4818	0.000005 1980	0.5	0.000004 5046	0.001626 168	0.0021 07514
X.15 自動鎖定裝置	166666.6 667	6		0.011234 417	0.000000 4818	0.000023 9584	0.5	0.000020 7624	0.001640 636	0.0098 43816

表 5-6 「一般煞車功能失效」之錯誤樹定量分析結果

Case2.一般煞車功能失效										
項目	MTTF/ MTBF	失效率 $\lambda$	子系統 MTBF	失效發生 機率	概率重要 度	事件重要 度/臨界重 要度	結構重要 度	事件關鍵 性	Birnbaum 係數	Fussell- Vesely 係 數
X1.列車同步訊號線路(Train Line)	302114.8 036	3.31	1848	0.006098 21	1	0.028949 163	1	0.006098 21	0.794190 767	2.628771 439
X2.DM1 車編碼器(Encoder)	333333	3.000003		0.005528 666	1	0.026245 448	1	0.005528 666	0.793735 925	2.381210 156
X3.解碼器(Decoder)	3846153. 846	2.60E-01		0.000480 365	1	0.002280 366	1	0.000480 365	0.789726 981	0.205329 015
X4.氣電轉換閥(Analogue Converter)	666667	1.50E+0 0		0.002768 16	1	0.013140 892	1	0.002768 16	0.791538 731	1.187307 503
X5.繼動閥(Relay Valve)	666667	1.499999 25		0.002768 16	1	0.013140 892	1	0.002768 16	0.791538 731	1.187307 503
X6.荷重切斷閥(Load Dependant Valve)	666667	1.499999 25		0.002768 16	1	0.013140 892	1	0.002768 16	0.791538 731	1.187307 503
X7.壓縮機調節閥(Compressor Governor)	666667	1.499999 25		0.002768 16	1	0.013140 892	1	0.002768 16	0.791538 731	1.187307 503
X8.回生式電力煞車盤(Dynamic	1220107.	0.8196		0.001513	0.000008	0.000000	0.5	0.001513	0.790544	0.647929

Brake)	369			474	8704	0637		474	093	939
X9.煞車電阻(Brake Resistor)	2083333 33.3	0.0048		8.87036 E-06	0.001513 474	0.000000 0637	0.5	0.000008 8704	0.789354 626	0.003788 902
X10.氣壓回路(Main Pipe Air Reservoir)	2000000	0.5		0.000923 573	1	0.004384 348	1	0.000909 866	0.775221 854	0.387610 927
<b>X11.空壓機(Air Supply Equipment)</b>	43290.1	23.09996 97		0.041790 408	1	<b>0.198385 648</b>	1	<b>0.041442 669</b>	0.815089 535	18.82854 359
X12.緊急煞車閥(Emergency Brake Valve)	666667	1.499999 25		0.002768 16	1	0.013140 892	1	0.002728 085	0.777021 342	1.165531 43
X13.主儲氣槽(Main Reservoir)	1321003. 963	7.57E-01		0.001397 958	1	0.006636 327	1	0.001377 342	0.775684 64	0.587193 272
X14.煞車儲氣槽(Brake Supply Reservoir)	440528.6 344	2.27E+0 0		0.004186 173	1	0.019872 425	1	0.004126 724	0.778404 687	1.766978 639
X15.輔助儲氣槽(Auxiliary Reservoir)	1000000 0	0.1		0.000184 783	1	0.000877 194	1	0.000182 013	0.774501 126	0.077450 113
X16.三動閥(Triple Valve/Double Check Valve)	216919.7 397	4.61E+0 0		0.008483 094	1	0.040270 582	1	0.008369 506	0.782596 552	3.607770 105
X17.汽缸(煞車氣壓缸)(Brake Cylinder)	909090.9 091	1.1		0.002030 735	1	0.009640 22	1	0.001715 339	0.635326 613	0.698859 274
<b>X18.煞車夾持器(Brake Caliper)</b>	41666.66 667	2.40E+0 1		0.043382 831	1	<b>0.205945 131</b>	1	<b>0.042947 787</b>	0.814661 939	19.55188 654
<b>X19.煞車引動/作動器(Brake Actuators/Activator)</b>	19083.96 947	5.24E+0 1		0.092294 416	1	<b>0.438136 129</b>	1	<b>0.091688 726</b>	0.862377 685	45.18859 069
X20.煞車片(Disc Brake Pad)	208333.3 333	4.80E+0 0		0.008831 174	1	0.041922 974	1	0.008696 151	0.780955 035	3.748584 168

表 5-7 「緊急煞車功能失效」之錯誤樹定量分析結果

Case3.緊急煞車功能失效										
項目	MTTF/ MTBF	失效率λ	子系統 MTBF	失效發生 機率	概率重要 度	事件重要 度/臨界重 要度	結構重要 度	事件關鍵 性	Birnbaum 係數	Fussell- Vesely 係 數
X1.緊急煞車電氣回路	302114.8 036	3.31	1848	0.006098 21	1	0.030680 421	1	0.006098 21	0.806150 553	2.668358 33
X2.緊急電磁閥(Magnet Valve)	3333333. 333	3.00E-01		0.000554 246	1	0.002788 443	1	0.000554 246	0.801678 805	0.240503 642
X3.繼動閥(Relay Valve)	666667	1.499999 25		0.002768 16	1	0.013926 762	1	0.002768 16	0.803458 58	1.205187 267
X4.緊急煞車氣壓回路	2000000	0.5		0.000923 573	1	0.004646 547	1	0.000909 923	0.787181 484	0.393590 742
<b>X5.空壓機(Air Supply Equipment)</b>	43290.1	23.09996 97		0.041790 408	1	<b>0.210249 783</b>	1	<b>0.041449 453</b>	0.827664 218	19.11901 839
X6.緊急煞車閥(Emergency Brake Valve)	666667	1.499999 25		0.002768 16	1	0.013926 762	1	0.002728 271	0.789008 733	1.183512 508
X7.主儲氣槽(Main Reservoir)	1321003. 963	7.57E-01		0.001397 958	1	0.007033 201	1	0.001377 43	0.787651 409	0.596252 117
X8.煞車儲氣槽(Brake Supply Reservoir)	440528.6 344	2.27E+0 0		0.004186 173	1	0.021060 863	1	0.004127 023	0.790413 42	1.794238 463
X9.輔助儲氣槽(Auxiliary Reservoir)	1000000 0	0.1		0.000184 783	1	0.000929 653	1	0.000182 024	0.786449 637	0.078644 964
X10.三動閥(Triple Valve/Double Check Valve)	216919.7 397	4.61E+0 0		0.008483 094	1	0.042678 9	1	0.008370 22	0.794669 954	3.663428 488
X11.汽缸(煞車氣壓缸)	909090.9 091	1.1		0.002030 735	1	0.010216 738	1	0.002001 174	0.788278 239	0.867106 063

X12.煞車夾持器(Brake Caliper)	41666.66 667	2.40E+0 1		0.043382 831	1	<b>0.218261</b> <b>349</b>	1	<b>0.043037</b> <b>172</b>	0.829241 674	19.90180 018
X13.煞車引動/作動器(Brake Actuators/Activator)	19083.96 947	5.24E+0 1		0.092294 416	1	<b>0.464338</b> <b>157</b>	1	<b>0.091874</b> <b>74</b>	0.877693 548	45.99114 192
X14.煞車片(Disc Brake Pad)	208333.3 333	4.80E+0 0		0.008831 174	1	0.044430 11	1	0.008714 244	0.795014 763	3.816070 862

表 5-8 「列車行駛中,聯結器自動解聯」之錯誤樹定量分析結果

Case4.列車行駛中,聯結器自動解聯										
項目	MTTF/ MTBF	失效率λ	子系統 MTBF	失效發生 機率	概率重要 度	事件重要 度/臨界重 要度	結構重要 度	事件關鍵 性	Birnbaum 係數	Fussell- Vesely 係 數
X1.機械聯結頭斷裂(Mechanical Coupler Head)	3030300 0	0.033000 03	40258	0.001327 633	1	0.003960 186	1	0.001327 633	0.665638 563	0.021966 095
X2.聯結器支撐座斷裂 (Cantilever Supper Assembly)	9999900	0.100001		0.004017 747	1	0.011984 505	1	0.004017 747	0.667436 43	0.066744 31
<b>X3.固定座(半永久)(Anchorage)</b>	100000	1.00E+0 1		<b>0.331407</b> <b>151</b>	1	<b>0.988551</b> <b>631</b>	1	0.331407 151	0.994259 57	9.942595 7
X4.通道支撐座(Gangway Support)	1000000 00	1.00E-02		0.000402 499	1	0.001200 611	1	0.000402 499	0.665022 51	0.006650 225
X5/X8.緩衝器(Draft Gear, Drawbar)	2974400	0.336202 26		0.013443 647	0.000001 2539	0.000000 0503	0.25	0.004506 94	0.000001 6680	0.000000 5608
X6/X9.能量吸收器(Energy Absorption Device)	2702700 00	0.0037		0.000148 944	0.000113 176	0.000000 0503	0.25	0.000049 9550	0.000150 461	0.000000 5567
X7/X10.緊急鬆脫螺栓 (Emergency Release Bolt Assembly)	4761900	0.210000 21		0.008418 552	0.000002 0023	0.000000 0503	0.25	0.002822 301	0.000002 6630	0.000000 5592

表 5-9 「主懸吊系統故障崩塌,造成車廂傾斜」之錯誤樹定量分析結果

Case5.主懸吊系統故障崩塌,造成車廂傾斜										
項目	MTTF/ MTBF	失效率 $\lambda$	子系統 MTBF	失效發生 機率	概率重要 度	事件重要 度/臨界重 要度	結構重要 度	事件關鍵 性	Birnbaum 係數	Fussell- Vesely 係 數
X1-X24.錐形橡皮彈簧(Conical Rubber Axle Spring)	1543209. 877	6.48E-01	65750	0.041711 118	1	0.065140 925	1	0.041711 118	1	0.648

表 5-10 「推進與煞車之同步連鎖功能失效，列車在未獲得足夠煞車力下行駛」之錯誤樹定量分析結果

Case6. 推進與煞車之同步連鎖功能失效，列車在未獲得足夠煞車力下行駛										
項目	MTTF/ MTBF	失效率 $\lambda$	子系統 MTBF	失效發生 機率	概率重要 度	事件重要 度/臨界重 要度	結構重要 度	事件關鍵 性	Birnbaum 係數	Fussell- Vesely 係 數
X1.回生式電力煞車盤(Dynamic Brake)	1220107. 369	0.8196	915	0.000749 653	1	<b>0.994179</b> <b>767</b>	1	<b>0.000749</b> <b>653</b>	0.999995 608	0.819596 4
X2.煞車電阻(Brake Resistor)	2083333 33.3	0.0048		4.39199 E-06	1	0.005824 6	1	0.000004 3920	0.999250 347	0.004796 402

由表 5-6 至表 5-10 的結果可知，影響各重大系統功能失效發生的關鍵元件分別為

- (1) 安全回路失效、導致列車在車門未關閉情況下行駛：車門互鎖電路/電驛、計時器、極限開關、驅動皮帶。
- (2) 一般煞車功能失效：空壓機、煞車夾持器、煞車致動器。
- (3) 緊急煞車功能失效：空壓機、煞車夾持器、煞車致動器。
- (4) 列車行駛中,聯結器自動解聯：固定座。
- (5) 主懸吊系統故障崩塌,造成車廂傾斜：錐形橡皮彈簧。
- (6) 推進與煞車之同步連鎖功能失效，列車在未獲得足夠煞車力下行駛：回生式電力煞車盤。

下一節將針對上述各元件(共計 10 項)進行失效模式、影響與嚴重度分析(FMECA)，以決定後續進行維護策略模擬的優先順序。

### 5.3 維護關鍵項目之失效模式、影響與嚴重度分析(FMECA)

失效模式、影響與嚴重度分析(Failure Modes, Effects and Criticality Analysis，或稱失效模式、效應與關鍵性分析)最早的發展是在 1950 年初期，隨飛機引擎變更為噴射引擎而開發的設計分析方法。由於噴射機之操縱系統須改用油壓裝置或電氣裝置等較為複雜、但較省力的構造。然而當時油壓裝置或電氣裝置之可靠度並不高，為了防範飛行時因此等裝置發生失效，造成事故，甚至發生飛行員死亡的情形，格魯曼(Grumman)公司開發了失效模式、效應與關鍵性分析法，並廣泛使用 FMECA 以進行噴射機之可靠度設計，其成果相當顯著。此外，FMECA 也廣泛應用於美國太空總署的阿波羅計劃之中。

FMECA 的執行步驟先前已在 3.2.4 節中加以說明，在此不再加以贅述。此外，因為失效模式比例( $\alpha$ )資料無法獲得，因此本研究在關鍵性判斷方面採取定性分析法，僅利用失效效應機率( $\beta$ )加以決定其關鍵性高低。[31]

表 5-11 是針對 5.2 節中 10 項關鍵元件進行 FMECA 的結果。並且根據表中嚴重等級和失效效應機率兩項，決定出各項目在風險矩陣中的位置，如表 5-12 所示。

由表 5-12 中可看出，屬於應優先處理的元件共計有五項：固定座、煞車夾持器、煞車致動器、空壓機、主懸吊彈簧。



表 5-11 十元件之危害、影響及嚴重度分析表

編號	元件	功能規格	失效模式	失效原因	失效效應	檢測方法	補救措施	嚴重等級	失效效應機率( $\beta$ )
1	車門互鎖 電路(電 驛)	當車門互鎖 電驛激磁 時,可連通 推進控制電 路	激磁異常	電驛故障	在車門未關閉的情況下,連通 推進電路,導致列車開始行駛	進行功 能測試	更換	II	0.121910388
2	計時器	計時器每經 過7秒,重 新啟動關門 信號一次, 直到其確定 車門已關閉 為止	誤判車門 已關閉	計時器故 障	在車門未關閉的情況下,未能 重新啟動關閉信號	進行功 能測試	更換	III	0.121910388
3	極限開關	用來確認車 門完全關 閉,以隔離 障礙物偵測 迴路	無法偵測 車門關閉 狀態	開關故障	無法確認車門是否關上	進行功 能測試	更換	IV	0.121910388

編號	元件	功能規格	失效模式	失效原因	失效效應	檢測方法	補救措施	嚴重等級	失效效應機率( $\beta$ )
4	驅動皮帶	帶動車廂門左右門扉同時打開或關閉	斷裂	磨損	車門無法關上	目視	更換	II	0.001851483
5	空壓機	產生壓縮空氣供煞車氣壓控制迴路使用	無法產生足夠壓縮空氣	空壓機上零件故障	空氣不足，摩擦煞車無法正常運作	進行功能測試	檢修或更換	II	0.991678986
6	煞車夾持器	將由煞車致動器傳來的煞車力轉換至煞車片上	喪失全部或部份的煞車力輸出	夾持器無法緊壓煞車碟片	煞車力不足，列車無法減速至靜止，	進行功能測試	更換	II	0.989971973
7	煞車致動器	煞車時利用壓縮空氣將作動器推動，使夾持器之襯墊緊壓煞車碟片	喪失全部或部份的煞車力輸出	致動器故障	無法將氣壓充分轉換為推動夾持器的力量	進行功能測試	更換	II	0.993437415(合計)
			煞車空氣外洩	致動器與氣壓管線相連處破裂	氣壓不足，造成推動夾持器的力量不足，煞車力不足	進行管線壓力偵測	更換	II	

編號	元件	功能規格	失效模式	失效原因	失效效應	檢測方法	補救措施	嚴重等級	失效效應機率( $\beta$ )
8	固定座	半永久聯結器的一部份，維持車廂長期之聯結	結構斷裂或破損	承受應力過大	造成車廂分離	目視	更換	I	1
9	(主懸吊) 錐形橡皮彈簧	承受車軸上的負荷，並吸收電聯車的震動能量以減低蛇行運動	斷裂	承受應力過大	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 無法維持主懸吊系統之固定</li> <li>2. 車體傾斜導致與地面間距不足(變小)</li> <li>3. 列車行駛時無法維持穩定</li> </ol>	目視	更換	II	1(合計)
			潛變 (Creep, 指結構發生緩慢的塑性變形)	使用時間過長	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 無法維持主懸吊系統之固定</li> <li>2. 車體傾斜導致與地面間距不足(變小)</li> <li>3. 列車行駛時無法維持穩定</li> </ol>	進行結構強度檢測	更換	II	
10	回生式電力煞車盤	感測煞車電流，並送出電力煞車控制訊號	無法正常運作	煞車盤上二極體、驅動電路或電流感測器故障	電力煞車故障，無法產生足夠煞車力	進行功能測試	檢修或更換	III	1

表 5-12 風險矩陣/關鍵性分析

關鍵性值\嚴重等級	I.致命失效	II. 嚴重失效	III. 主要失效	IV.次要失效
0.8~1	8	9、7、5、6	10	
0.6~0.8				
0.4~0.6				
0.2~0.4				
0~0.2		1、4	2	3

<註>同一欄內依關鍵性高低加以先後排序

#### 5.4 維護工作項目之選擇與探討

觀察 5.3 節中的表 5-11，可知前述五項應優先處理的關鍵項目中，「空壓機」所對應的檢測方法為進行功能檢測，補救方式為檢修或更換；「煞車夾持器」所對應的檢測方法為進行功能檢測，補救方式為更換；「煞車致動器」所對應的檢測方法為進行功能檢測和進行管線壓力偵測，補救方式為更換；「固定座」所對應的檢測方法為目視檢測，補救方式為更換；「主懸吊彈簧」所對應的檢測方法為目視、進行結構強度檢測，補救方式為更換。

綜合以上所述，該五項設備在失效模式的預防及處理上，多半是仰賴檢查、測試以及更換。由於目前台北捷運電聯車系統的維護工作多半也是定期檢查和定期更換，因此本研究在後續方面也是以此兩項主要維護工作為出發點，進行維護策略規劃與模擬。



## 第六章 電聯車系統維護策略研擬與維護績效評估

本章將進行電聯車系統維護策略研擬，以及維護績效的之評估。6.1 節首先建構派翠網路模式，模擬維護工作進行的過程，並藉以觀察元件在長期使用下故障次數、維護成本、頂事件發生機率的變化，以做為調整定期檢修/更換間隔與研擬維護策略之參考。6.2 節針對三個評估維護績效的指標加以說明。6.3 節研擬較合適的混合策略。6.4 節針對各混合策略進行模擬，以選擇出最適之策略。

### 6.1 建構電聯車系統維護之派翠網路模式

本節首先進行關鍵元件維護之派翠網路模式。本研究基於下列幾點考量，來進行模式的建構：

- (1) 假設元件使用壽命符合指數分配(如 5.2.2 節所述)，一旦元件使用時間達到其壽命之後，便處於隨時可能故障的狀態。另外假設元件在達到其使用壽命後，再經過一極短暫時間(與元件壽命相較之下)後會便會故障。由於各關鍵元件之平均使用壽命均達數萬小時以上，因此本研究假設各元件在達到其壽命後，再使用 3 小時便會故障(除非及時更換)。
- (2) 假設元件在尚未達到其使用壽命前，如遇定期檢修，檢查結果必然是元件處於正常可運作狀態(但仍必須付出檢查成本)。
- (3) 若元件已達其使用壽命而尚未故障(但最多僅能再使用 3 小時)時，如遇定期檢修，則有 95% 的機率檢測出該元件處於危險狀態，並且進行更換的工作，此時要付出檢查與更換成本。
- (4) 元件每隔一段時間便會進行強制更換的工作(即使尚未到達其使用壽命)，此時要付出更換元件成本。
- (5) 在成本計算方面：檢查成本僅耗費人力成本，而更換成本除了人力成本外，須另計備品成本。人力成本指的是技術員/士工作每小時須付出的成本。目前台北捷運維修部技術員的月薪為 32000 元，技術士的月薪為 40000 元。本研究取其平均並計算得出人力成本約為每工時 50 元。

綜合以上五點所述，建構出元件維修工作之派翠網路模式如圖 6-1 所示。

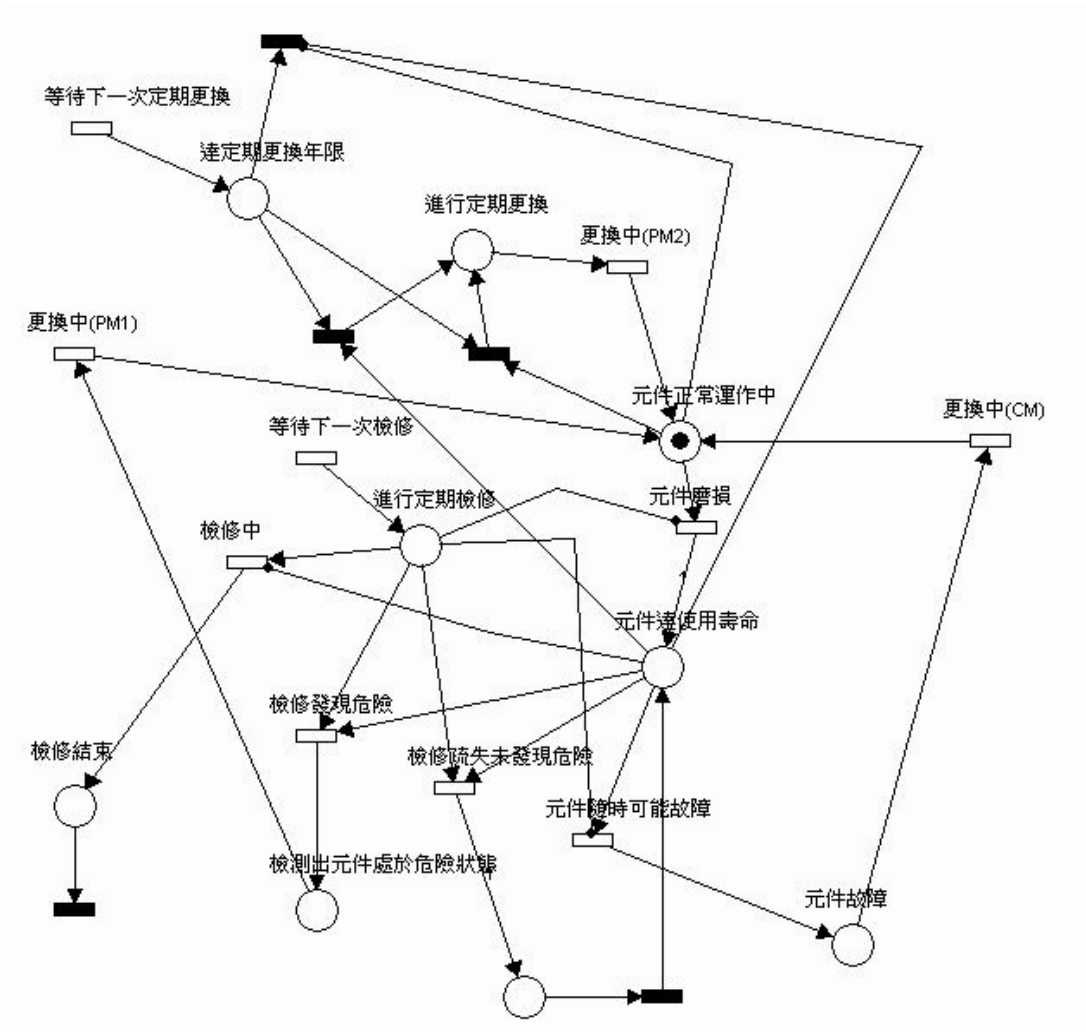


圖 6-1 元件維修工作之派翠網路

## 6.2 電聯車系統維護績效之衡量指標

在建構出維修工作之派翠網路之後，本節將討論維護工作執行的績效衡量指標。所謂績效(Performance)，指的是資源投入後，目標達成的程度。在電聯車系統維護工作中，所欲達成的目的主要為電聯車安全且正常的運作。由前述 Ridit 分析中我們知道六項對於風險較高或對於系統衝擊較大的功能失效。而經由後來的錯誤樹分析及 FMECA 分析，我們逐漸找出影響失效發生的關鍵項目，並決定出應優先處理的維修項目。因此，如果這些項目在經過維護工作執行後，能有效降低重大系統功能失效的發生(換言之即是減少系統風險)，便可視為維修工作之績效。此外，由於維修工作需支出一定成本，儘管愈密集的維護工作會導致系統風險大幅降低，然而其成本的支出卻是相當可觀的，就某種程度上而言可視為維修資源上的浪費。所以，如何在充分利用維修資源的考量下，儘可能地降低重大系統功能失效(即前述錯誤樹的頂事件)，應是電聯車維護工作的首要目標。

本研究在維護工作的績效評估採取下列三點因素加以考量。

- (1) 維修成本績效：在此定義為「每百萬元的投入，可達成多少的「頂事件機率改善程度」。此項指標也是首要的考量因素。
- (2) 改善程度：此指標指的是「維護策略執行後，可達成多少的頂事件機率改善程度」。考慮此指標的目的在於確保頂事件機率可降至一定程度的容忍值門檻之下(改善程度愈高愈好)。
- (3) 故障次數：元件一旦故障，間接導致頂事件發生，造成系統停擺或人員傷亡。此外部成本雖然難以估算，然而，就捷運電聯車所扮演的角色來看，其肩負都會區通勤往來的重責大任，一旦發生故障，衝擊的層面將非常的廣，社會大眾隨之付出的成本也將會非常的大。因此，必須除了維修資源運用的效率、風險改善程度外，故障次數也必須儘可能降低才行。

## 6.3 電聯車系統維護混合策略之研擬

在研擬維護策略之前，首先觀察 6.2 節中的三項指標隨著檢修與更換間隔調整時的變化情形。其參數設定如表 6-1 所示。由於維修參數搜集上的困難，因此本研究在此階段僅針對煞車夾持器、煞車致動器、空壓機、主懸吊彈簧進行模擬。在模擬時間的決定方面，由於各元件壽命均在數萬小時以上，模擬時間必須夠長才足以反映出元件平均使用時間(MTBF)的變化，因此選擇兩百萬小時做為模擬時間長度。此外由於主懸吊彈簧的壽命達 150 萬小時，因此其模擬時間特別加長至一億六千萬小時。模擬結果如圖 6-1 至圖 6-4 所示。

由觀察圖 6-1 可知，維修績效隨檢修間隔增加而有減少的趨勢，而隨更換間隔增加而有增加的趨勢；改善程度隨檢修間隔增加而有減少但會逐漸穩定的趨勢，而隨更換間隔增加而有增加但逐漸穩定的趨勢；故障次數隨檢修間隔增加而有增加但逐漸穩定的趨勢，而隨更換間隔增加而有減少但逐漸穩定的趨勢。因此，本研究初步決定選擇煞車夾持器的檢修間隔為 10 小時或 20 小時；更換間隔為 140000 小時，以進行後續混合策略之模擬。同理，由觀察圖 6-2 至圖 6-4，選擇出以下混合策略：煞車致動器的檢修間隔為 10 小時或 50 小時；更換間隔為 40000 小時或 180000 小時；空壓機的檢修間隔為 10 小時或 20 小時；更換間隔為 20000 小時或 180000 小時；主懸吊彈簧的檢修間隔為 1000 小時或 2000 小時；更換間隔為 90000 小時或 190000 小時。

表 6-1 模擬參數設定

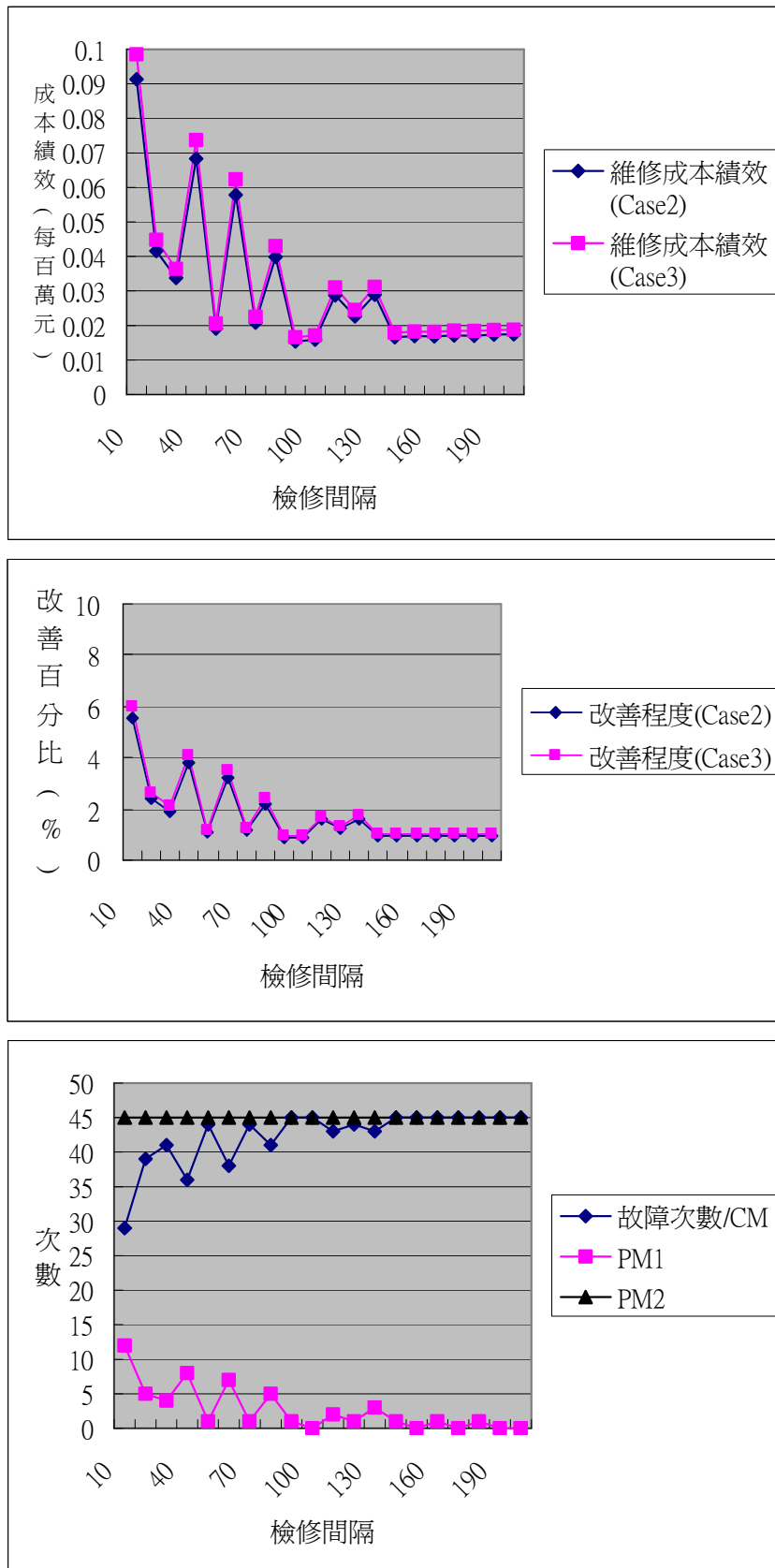
元件名稱	MTBF	目前策略 (檢修/更換)	維修時間 (檢修/更換)	維修成本 (人力/備品)	模擬時間	檢修間隔	更換間隔
煞車夾持器	41666.67	24/43800	1/1	50/600000	2000000	10~200， 20 組	10000~2000 00，20 組
煞車致動器	19084	24/43800	1/1	50/600000	2000000	10~200， 20 組	10000~2000 00，20 組
空壓機	43290.1	24/17520	1/3	50/900000	2000000	10~200， 20 組	10000~2000 00，20 組
主懸吊彈簧	1543210	2160/43800	8/24	50/20000	160000000	1000~20000 ，20 組	10000~2000 00，20 組

表 6-2 目前現有策略模擬結果

元件名稱	目前策略 (檢修間隔/ 更換間隔)	模擬時間	可用度	維修成本	改善百分比 (Case2，主懸 吊是 Case5)	維修績效 (Case2，主懸 吊是 Case5))	改善百分比 (Case3)	維修績效 (Case3)
煞車夾持器	24/43800	2000000	0.9999807	57404450	3.246777735	0.056559687	3.502527529	0.061014913
煞車致動器	24/43800	2000000	0.9999562	88607050	5.985595177	0.067552132	6.456215844	0.072863455
空壓機	24/17520	2000000	0.9999796	146223700	1.913680496	0.013087348	2.059414071	0.014083996
主懸吊彈簧	2160/43800	160000000	0.9999949	107283600	6.831842398	0.063680212		



圖 6-2 夾持器模擬結果



<註>PM1 代表因檢測出危險狀態而進行更換的次數；PM2 代表定期更換的次數

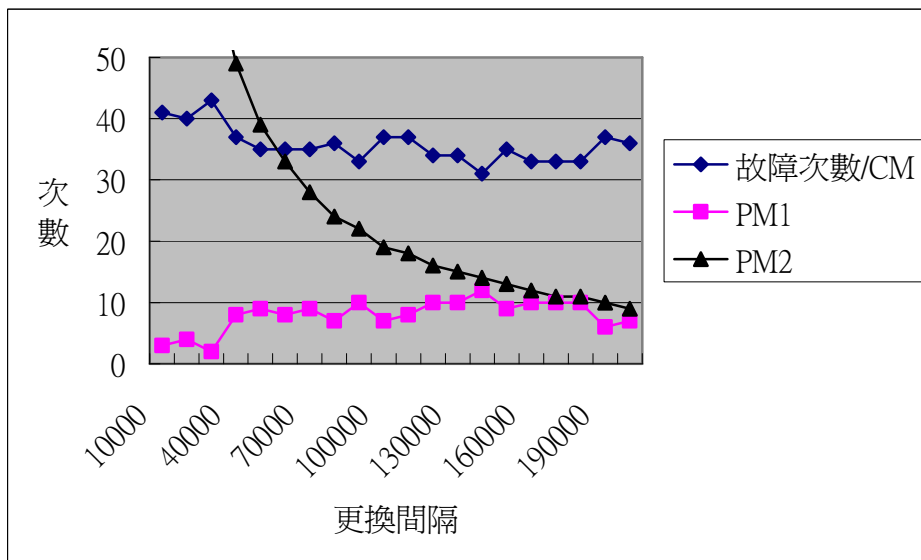
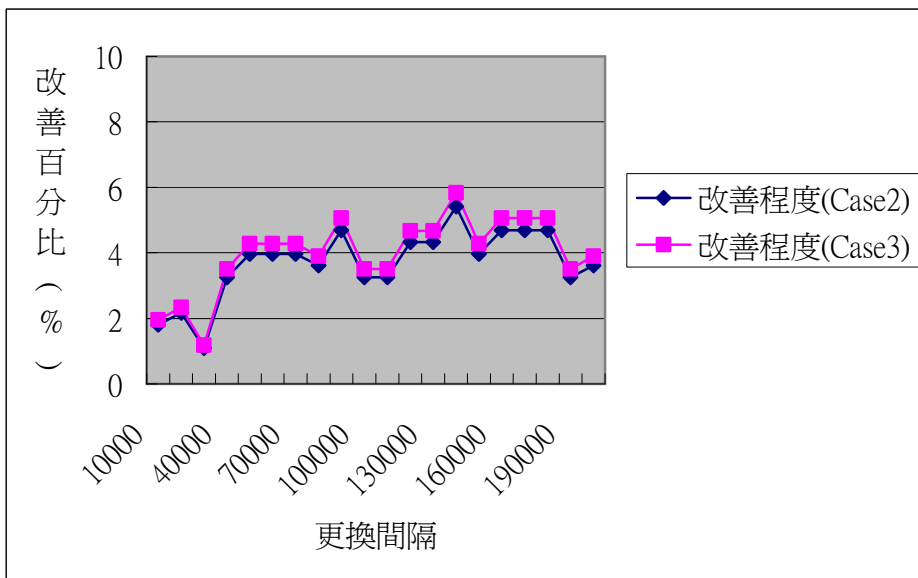
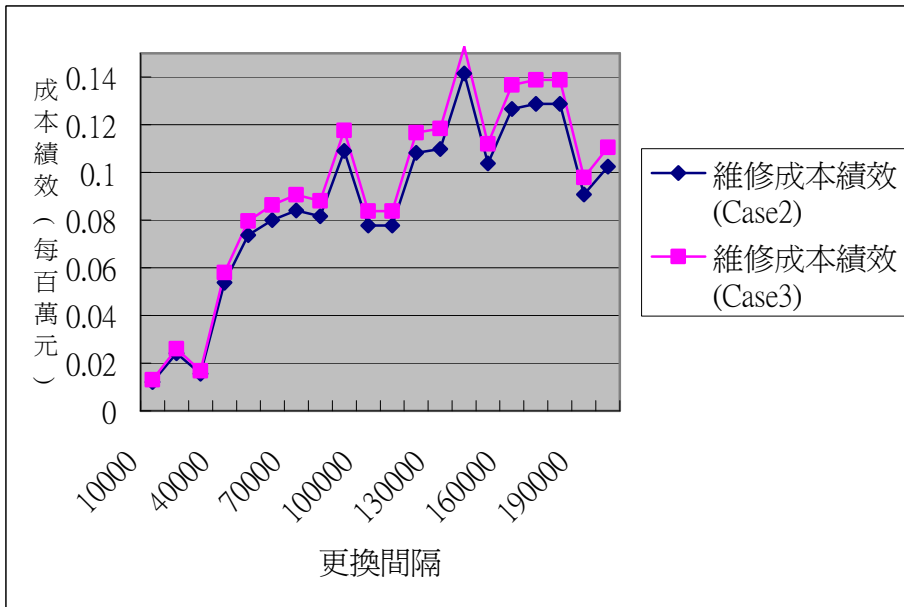
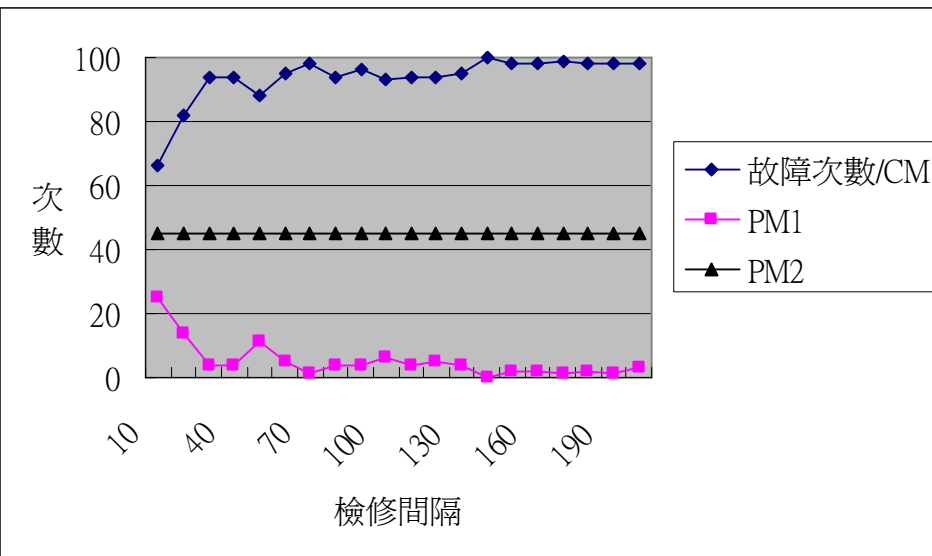
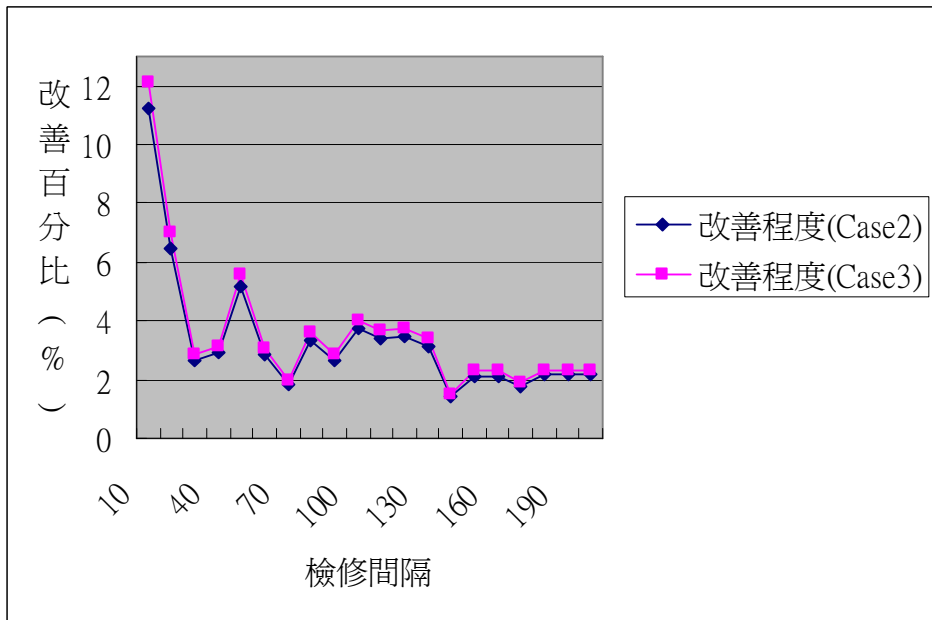
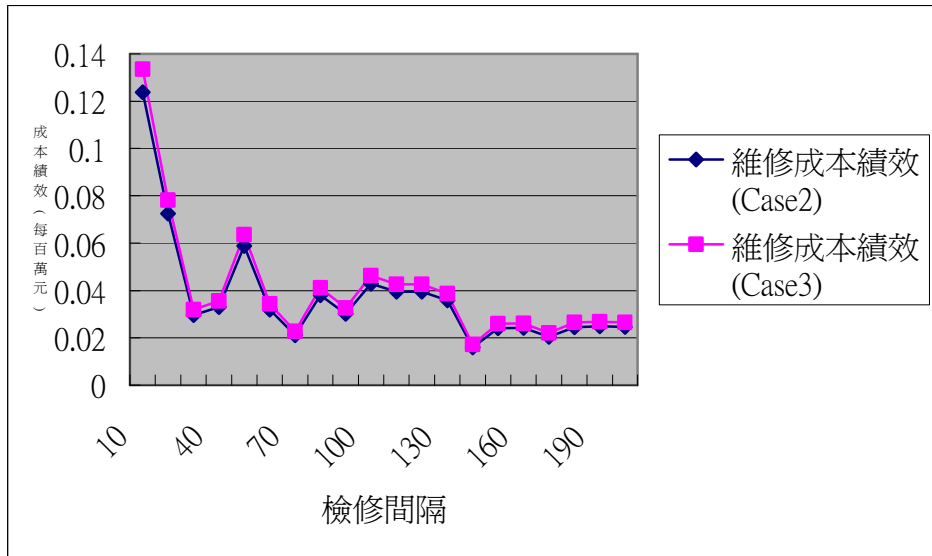


圖 6-3 致動器模擬結果



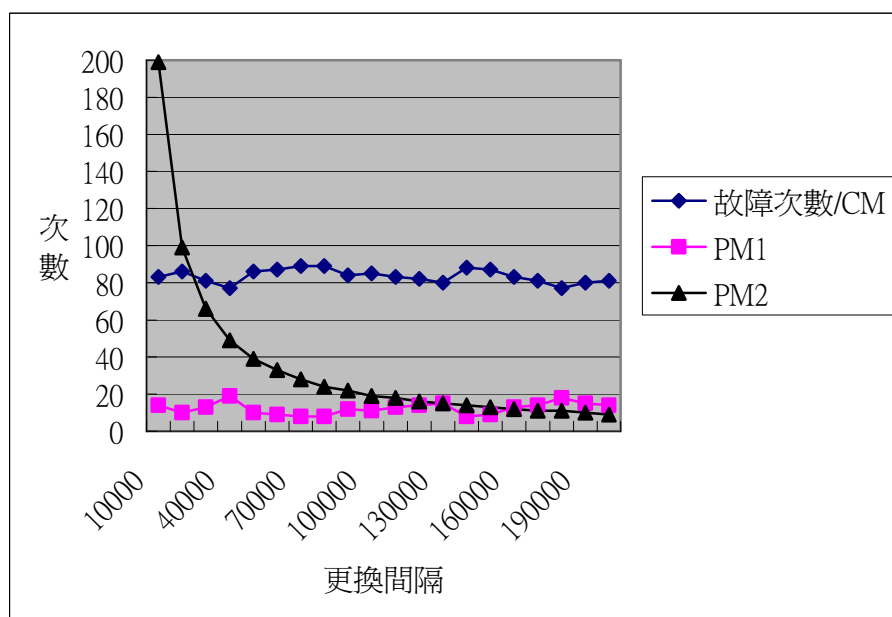
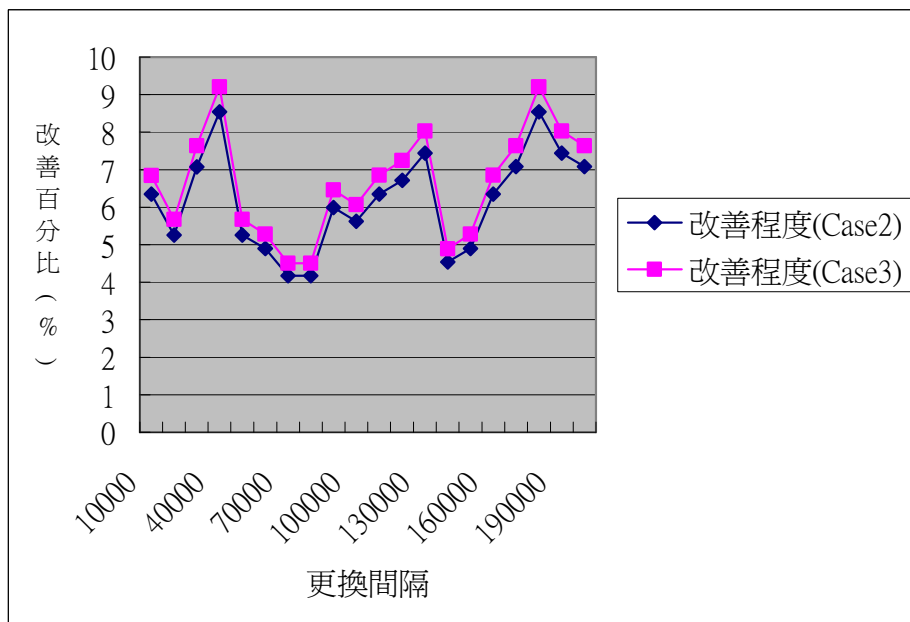
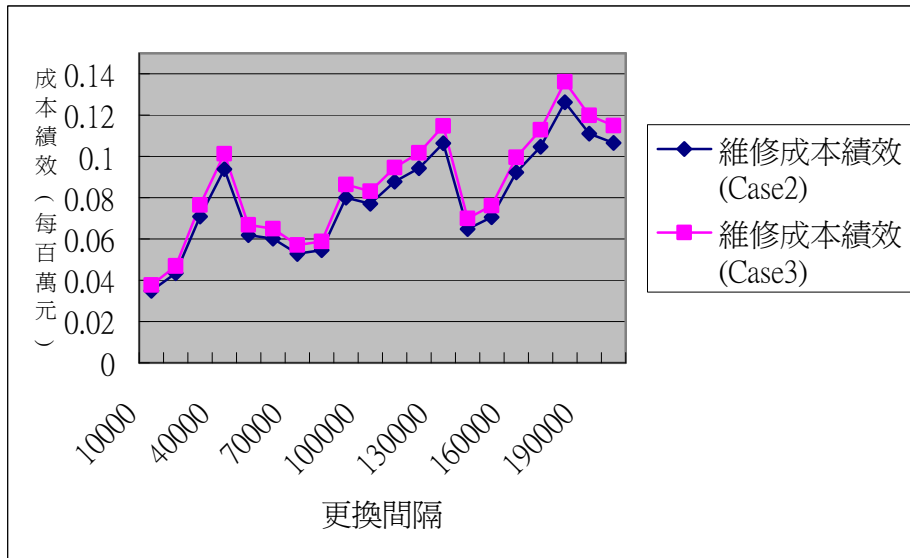
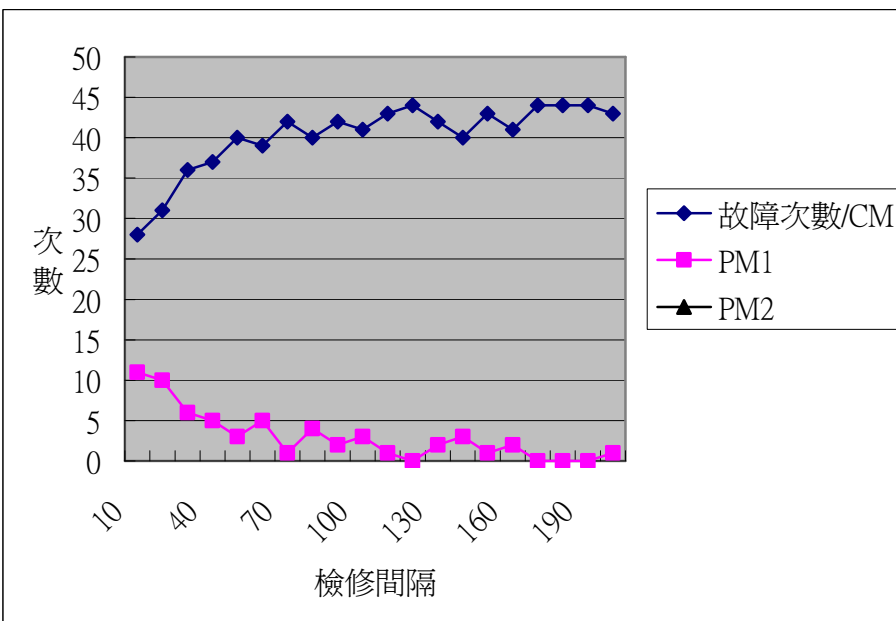
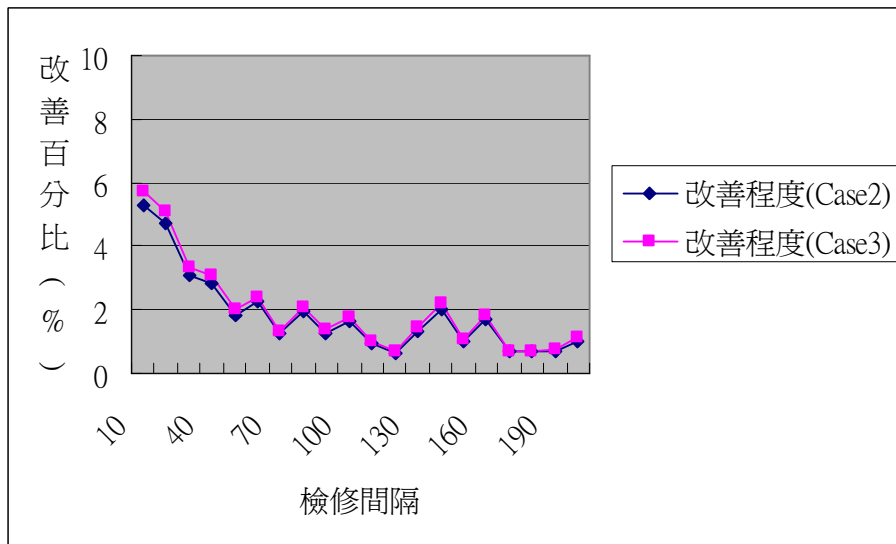
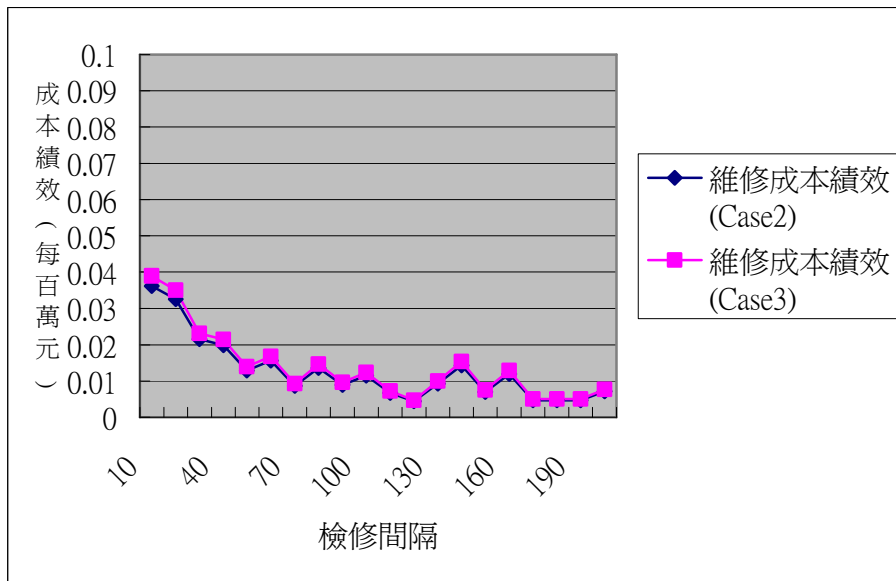


圖 6-4 空壓機模擬結果



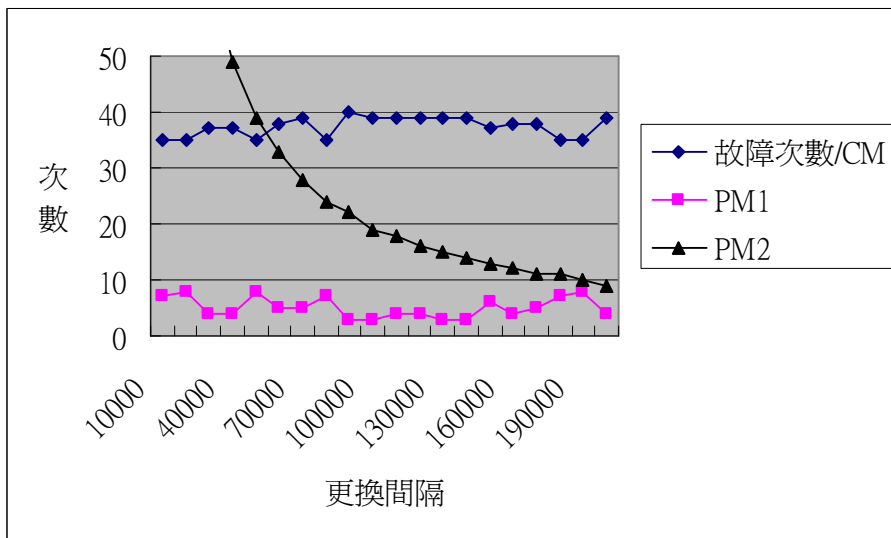
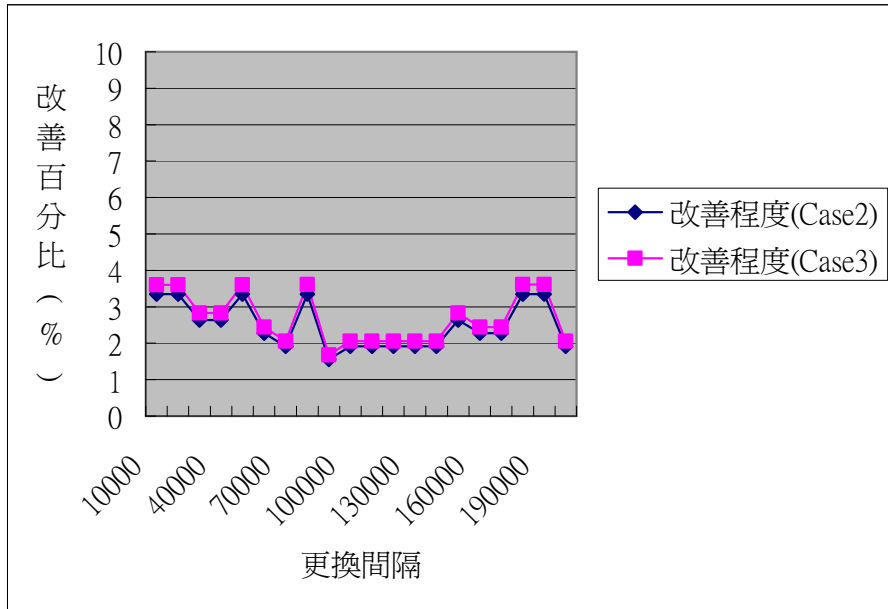
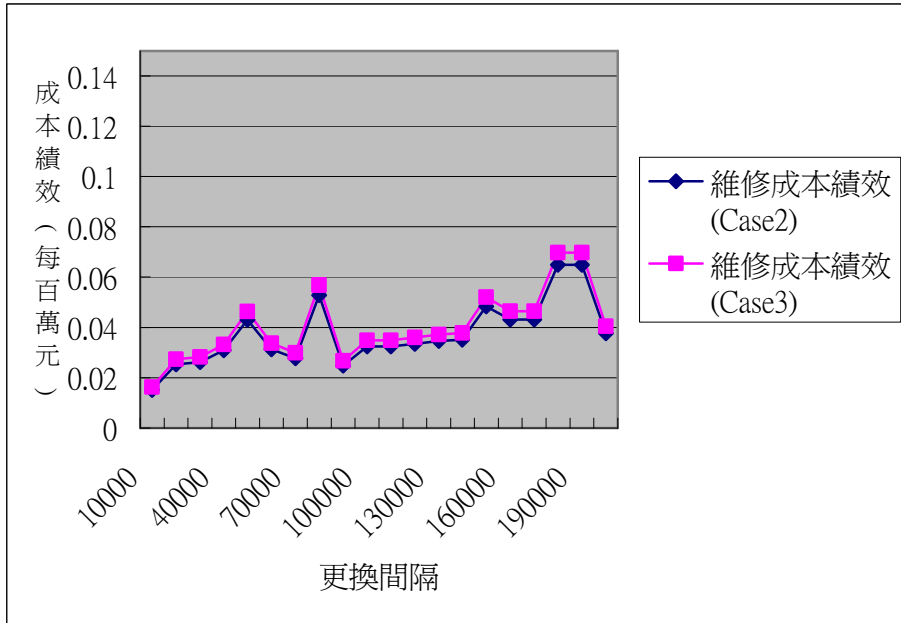
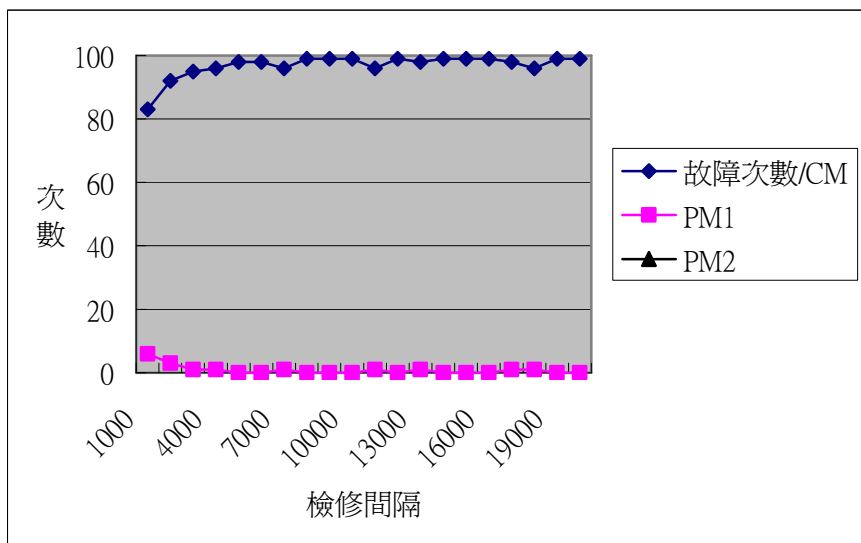
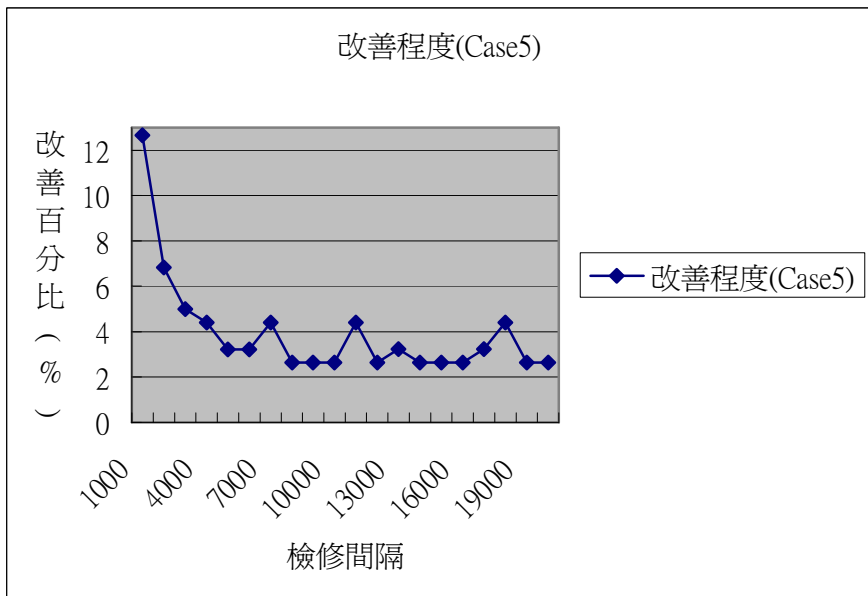
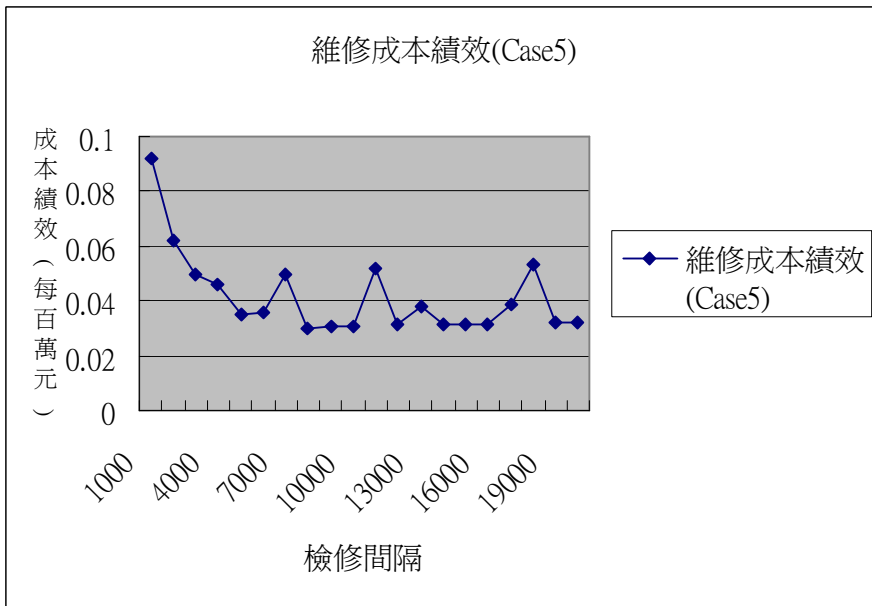
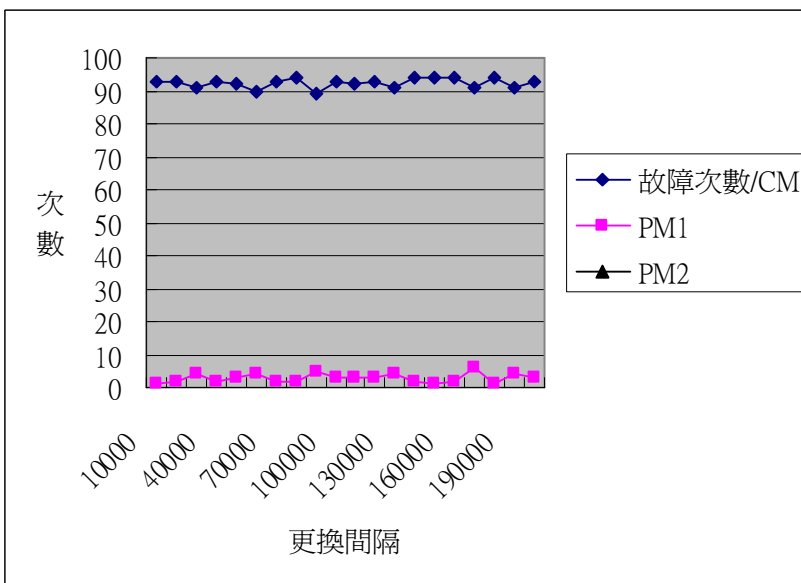
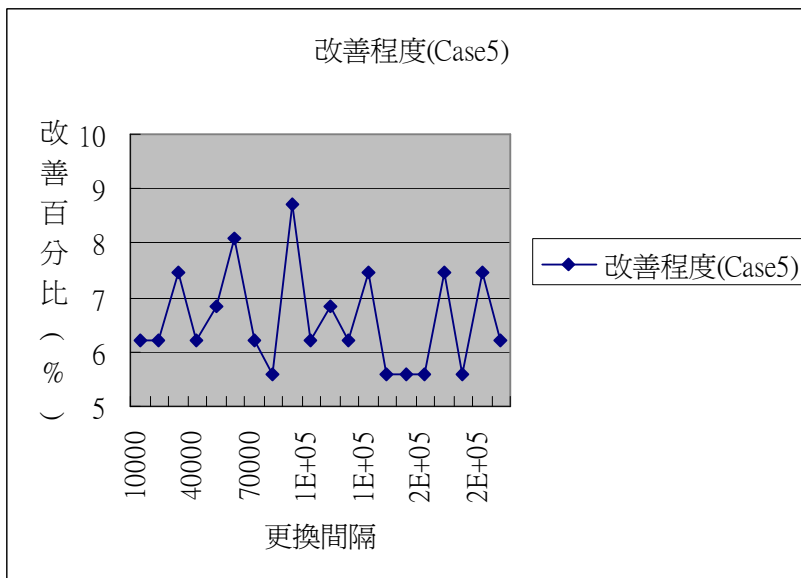
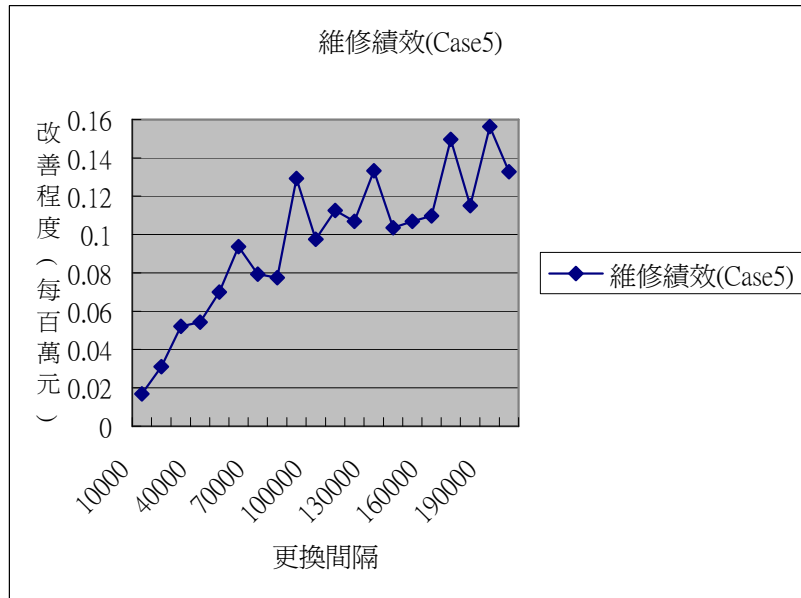
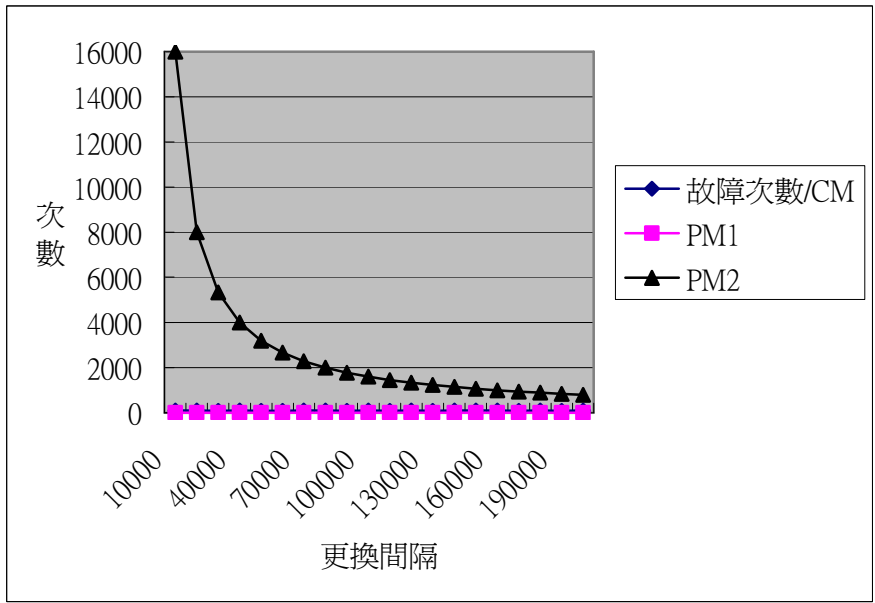


圖 6-5 主懸吊彈簧模擬結果









## 6.4 電聯車系統維護策略之評估結果

本節將針對 6.3 節所挑選出來的混合策略進行模擬，並根據其結果加以排序，決定何者為最佳策略。模擬結果如表 6-3 所示。

觀察表 6-3 的結果可知，對於煞車夾持器而言，檢修間隔 10 小時，更換間隔 140000 小時為最佳的選擇。其在 Case2 的改善百分比為 6.691%，維修績效為 0.157，在 Case3 的改善百分比為 7.218%，維修績效為 0.169。然而目前台北捷運最短的檢修週期為日檢，10 小時間隔在現行維護制度下恐難以施行，因此改考慮檢修間隔 20 小時，更換間隔 140000 小時之策略，此時其在 Case2 的改善百分比為 0.992%，維修績效為 0.0258，在 Case3 的改善百分比為 1.07%，維修績效為 0.0278。

就煞車致動器而言，檢修間隔 10 小時，更換間隔 180000 小時為最佳的選擇。其在 Case2 的改善百分比為 11.22%，維修績效為 0.157，在 Case3 的改善百分比為 12.1%，維修績效為 0.169。然而 10 小時間隔在現行維護制度下恐難以施行，因此改考慮檢修間隔 50 小時，更換間隔 180000 小時之策略，此時其在 Case2 的改善百分比為 4.434%，維修績效為 0.061，在 Case3 的改善百分比為 4.46%，維修績效為 0.066。

就空壓機而言，檢修間隔 10 小時，更換間隔 180000 小時為最佳的選擇。其在 Case2 的改善百分比為 6.84%，維修績效為 0.124，在 Case3 的改善百分比為 7.37%，維修績效為 0.134。然而 10 小時間隔在現行維護制度下恐難以施行，因此改考慮檢修間隔 20 小時，至於更換間隔，若以改善百分比為優先考量，更換間隔可定為 20000 小時，此時其在 Case2 的改善百分比為 2.52%，維修績效為 0.019，在 Case3 的改善百分比為 2.72%，維修績效為 0.021。若以維修資源效率為優先考量，更換間隔可定為 180000 小時，此時其在 Case2 的改善百分比為 2.16%，維修績效為 0.041，在 Case3 的改善百分比為 2.33%，維修績效為 0.044。

就主懸吊彈簧而言，檢修間隔 1000 小時，更換間隔 190000 小時為最佳的選擇。其在 Case5 的改善百分比為 11.61%，維修績效為 0.149。

綜上所述，各元件改善程度約在 2%~12% 之間。顯示針對上述項目進行策略最佳化調整時，能顯著減少頂事件發生機率，降低系統風險。這也間接反證出利用可靠度集中維護的概念進行分析時，的確能夠找出電聯車系統中的關鍵項目，而針對關鍵項目進行策略研擬，能有效地降低系統風險。

表 6-3 混合策略模擬結果

元件名稱	混合策略(檢 修間隔/更換 間隔)	模擬時間	可用度	維修成本	改善百分比 (Case2, 主懸 吊是 Case5)	維修績效 (Case2, 主懸 吊是 Case5))	改善百分比 (Case3)	維修績效 (Case3)	排序
煞車夾持 器	10/140000	2000000	0.9999857	42693700	6.691159971	0.156724762	7.218224759	0.169070021	1
	20/140000	2000000	0.9999774	38442000	0.992190294	0.025810059	1.070345153	0.027843118	2
煞車致動 器	10/40000	2000000	0.9999637	93698000	11.22026769	0.119749276	12.10246771	0.129164632	2
	10/180000	2000000	0.9999637	71496150	11.22079035	0.156942582	12.10303119	0.169282279	1
	50/40000	2000000	0.9999536	90168100	4.133884275	0.045846417	4.458913214	0.049451116	4
	50/180000	2000000	0.9999536	67966250	4.134492386	0.060831551	4.459569263	0.065614467	3
空壓機	10/20000	2000000	0.9999857	133311650	6.076539796	0.045581461	6.539288601	0.049052642	2
	10/180000	2000000	0.9999868	54998600	6.844861538	0.124455196	7.36612063	0.133932875	1
	20/20000	2000000	0.9999805	131683050	2.523591017	0.019164129	2.715770861	0.020623542	4/3
	20/180000	2000000	0.99998	53370000	2.163405665	0.040535988	2.32815585	0.043622931	3/4
主懸吊彈 簧	1000/90000	160000000	0.9999957	97762400	11.60388723	0.118694787			2
	1000/190000	160000000	0.9999957	77940400	11.61188181	0.148984119			1
	2000/90000	160000000	0.9999952	70162400	6.623605985	0.094403926			4
	2000/190000	160000000	0.9999953	50340400	6.631662254	0.131736384			3

## 第七章 結論與建議

### 7.1 結論

- (1) 由 Rudit 分析可知，影響捷運電聯車系統安全與正常營運的系統功能失效有六項：「安全迴路失效，導致列車在車門未關閉的情況下行駛」、「一般煞車功能失效」、「緊急煞車功能失效」、「列車行駛中，聯結器自動解聯」、「主懸吊系統故障崩塌，造成車廂傾斜」、「推進與煞車之同步連鎖功能失效，列車在未獲得足夠煞車力的情況下行駛」。
- (2) 針對該六項系統功能失效項目進行錯誤樹分析，找出影響該失效的關鍵項目，計有以下 10 項：車門互鎖電路/電驛、計時器、極限開關(Limit Switch)、驅動皮帶、空壓機、煞車夾持器/卡鉗(Brake Caliper)、煞車致動器(Brake Actuators)、固定座(Anchorage)、主懸吊系統/錐形橡皮彈簧(Conical Rubber Axle Spring)、回生式電力煞車盤(Dynamic Brake)。
- (3) 進行 FMECA 分析後，得知應優先處理的項目有五項：煞車夾持器、煞車致動器、空壓機、固定座、主懸吊彈簧。
- (4) 本研究基於人力時間上的限制，再加上電聯車系統維修與可靠度參數搜集上的困難，因此僅針對空壓機、煞車夾持器、煞車致動器、主懸吊彈簧四個項目進行維修策略的模擬，以及最適維修策略的決定，並與目前所採行的策略相比較。
- (5) 由模擬結果可知：煞車夾持器的最適檢修和更換間隔分別為 10 小時和 140000 小時左右。較未實施定期檢查與定期更換的改善百分比達 6.69%(Case2)與 7.21%(Case3)；維修績效為 0.157(Case2)和 0.169(Case3)，維修績效衡量單位為：每百萬元投入之改善百分比。
- (6) 煞車致動器的最適檢修和更換間隔分別為 10 小時和 180000 小時左右。較未實施定期檢查與定期更換的改善百分比達 11.22%(Case2)與 12.1%(Case3)；維修績效為 0.157(Case2)和 0.169(Case3)。
- (7) 空壓機的最適檢修和更換間隔分別為 10 小時和 180000 小時左右。較未實施定期檢查與定期更換的改善百分比達 6.84%(Case2)與 7.37%(Case3)；維修績效為 0.124(Case2)和 0.134(Case3)。
- (8) 主懸吊彈簧的最適檢修和更換間隔分別為 1000 小時和 190000 小時左右。較未實施定期檢查與定期更換的改善百分比達 11.61%(Case5)；維修績效為 0.149(Case5)。
- (9) 由於考慮到目前捷運系統最短檢修間隔為每日，10 小時的檢修間隔在執行上恐有困難，因此若考慮將維護間隔改為 20 小時(致動器改為 50 小時)，此時煞車夾持器的改善百分比達 0.99%(Case2)與 1.07%(Case3)，維修績效為 0.026(Case2)和 0.028(Case3)；煞車致動器的改善百分比達 4.13%(Case2)與 4.46%(Case3)，維修績效為 0.061(Case2)和 0.066(Case3)；空壓機的改善百分比達 2.16% 或 2.52%(Case2)與 2.33% 或 2.71%(Case3)，維修績效為 0.04 或 0.02(Case2)和 0.044 或 0.021(Case3)，端視決策者希望達成的目的是改善百分比高或者維修績效高(有兩個策略可選擇)。
- (10) 將最佳策略與台北捷運目前所採行的維修策略相比較，可知就煞車夾持器、煞車致動器、空壓機、主懸吊彈簧四者而言，更換間隔尚有再向上提升的空間；夾持器、空壓機、主懸吊彈簧的檢修間隔應加以縮短，致動器檢修間隔則應提升。

- (11) 可用度均在 0.9999 以上，顯示捷運系統由於定期檢修與更換時間和元件平均故障時間(MTBF)相差達萬倍之上，所以對於可用度之衝擊甚微，可忽略不計。
- (12) 綜合以上所述，由實證結果可知可靠度集中維護(RCM)的確有助於提升軌道系統維護績效。並且根據篩選出之關鍵項目所制定的維護策略，能明顯改善系統風險(有效降低重大系統功能失效發生機率)。不僅證實了可靠度集中維護方法在軌道系統的適用性，也為未來國內軌道系統維護觀念的革新，開啟了一個新的方向。

## 7.2 建議

- (1) 在關鍵系統功能項目的選取中，本研究雖然將財務損失構面納入問卷設計，然而未來可針對此再加以深入分析。此外，本研究以避免捷運系統重大影響事故發生為主要考量而加以選擇關鍵系統功能失效項目，未來可針對不同需求另行決定是否為關鍵系統功能失效項目的判斷準則。
- (2) 在最適維護策略的決定方面，本研究採取派翠網路模擬的方式加以進行分析。由於本研究重點在於證實可靠度集中維護方法能有效找出調整維護策略的關鍵點，因此在模式建構上僅考慮定期檢修和定期更換兩種維護方式(也是目前台北捷運的作法)，未來可考慮將其他維修方式納入模式中。
- (3) 本研究在維護成本計算方面，僅考慮人力成本與備品成本，對於故障造成系統衝擊的財務損失並未詳加估算。未來可將其納入考量中，使維護成本的估算更加完備。
- (4) 在系統功能失效分析方面，本研究針對台北捷運維修部基層主管進行問卷調查。而以往在實務上多半是結合各領域專家成立一專門小組進行分析。如何整合各維修專業人員的意見以得出一共同的結論，未來尚有許多發展空間。
- (5) 本研究在頂事件機率的判定上，採取最糟情況(Worst Case)的觀點，並針對此最糟情況加以改善至可容忍程度之內。然而捷運電聯車系統在實際上運作時的風險應是小於此最糟情況。未來可針對此一般情況再加以深入探討。

## 參考文獻

1. 黃漢榮，軌道工程學，初版，高立圖書有限公司，台北，民國九十二年
2. [http://home.trtc.com.tw/INTRO92/introduction\\_1.asp](http://home.trtc.com.tw/INTRO92/introduction_1.asp)。
3. 楊朝均，“構建航空站空側風險架構之研究-FMEA 之應用”，國立成功大學交通管理科學系碩士論文，民國九十一年
4. 薛家豪，“維修管理之決策與績效評估”，國立清華大學工業工程與工程管理學系碩士論文，民國八十七年
5. 沈育樹，“維護管理系統設計與模式分析”，中原大學工業工程研究所博士論文，民國九十一年
6. 陳國棟，“以平衡計分卡觀點探討台北捷運電聯車維修績效指標”，元智大學工業工程與管理學系碩士論文，民國九十二年
7. 鄭志剛，“運用灰理論 GM(1,1) 模式預測裝備零附件之計畫備料”，國防管理學院後勤管理研究所碩士論文，民國九十二年
8. 陳祖光，“以可靠度為中心之維修分析運用於部署服役後系統最佳維修策略之研究”，國防大學中正理工學院兵器系統工程研究所碩士論文，民國九十年
9. 蘇國璋，“以知識為基礎的故障復原管理機制之發展與應用”，國立清華大學工業工程與工程管理學系博士論文，民國八十九年
10. 施育仁，“半導體後段製程生產設備維修決策支援系統之研究”，國立台北科技大學生產系統工程與管理研究所碩士論文，民國八十八年
11. 陳臣乾，“以可靠度為中心的維修在武器系統修護計畫上之應用”，中正理工學院兵器系統工程研究所碩士論文，民國八十六年
12. 吳崇銘，“武器系統預防性維修整體規劃之探討”，中正理工學院兵器系統工程研究所碩士論文，民國八十五年
13. 吳晉光，“軌道運輸系統安全管理檢核評估之研究—以台北捷運公司為例”，國立交通大學運輸工程與管理學系碩士論文，民國九十年六月。
14. 郭承璋，“以系統安全管理方法檢核我國軌道運輸之安全—以台鐵站務系統為例”，國立交通大學運輸科技與管理學系碩士論文，民國九十一年六月。
15. 柯裕隆，“應用派翠網路於配電系統開關操作策略制定之研究”，國立中山大學電機工程學系博士論文，民國九十年六月。
16. 張捷能，“多媒體展示之復原模式”，國立中央大學資訊管理研究所碩士論文，民國八十七年五月。
17. 劉耿宏，“運用廣義隨機裴氏網路於生產線的預防保養”，國立交通大學機械工程學系碩士論文，民國八十七年。
18. 李承勳，“偵察員與維修員的設計與實作：裴氏圖及互通系統計算法解法”，國立交通大學工業工程與管理學系碩士論文，民國八十七年
19. 邱錫斌，“運用 Petri Net 於可靠度工程之失效分析”，國立交通大學機械工程學系碩士論文，民國八十四年
20. 王喬，“多腔式製程設備之建模及自動化排程”，國立交通大學機械工程學系碩士論文，民國八十九年
21. 莊明聰，“以整體後勤支援觀點探討軌道車輛維修制度”，國立台灣科技大學機械工程系碩士論文，民國九十二年
22. 陳建財，“獨立驗證與確認制度對我國軌道系統安全之影響”，國立台灣科技大學機械工程系碩士論文，民國九十三年
23. 呂志明，“捷運系統營運安全風險管理之探討”，國立台北科技大學土木與防

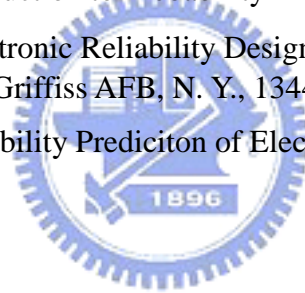
- 災研究所碩士論文，民國九十三年
24. 林文欽，「高運量及中運量捷運系統維修作業之比較研究—以台北捷運系統淡水線、木柵線為例」，國立交通大學交通運輸研究所碩士論文，民國八十六年
  25. 胡凱程，「高運量捷運淡水線線上緊急維修作業改善之研究」，國立交通大學交通運輸研究所碩士論文，民國八十七年
  26. 楊昌裔，系統安全設計與危害分析，第二版，新文京開發出版股份有限公司，台北，民國九十三年
  27. 陳耀茂，可靠度工程—方法與應用，初版，五南圖書出版公司，台北，民國九十年
  28. 黃清賢，危害分析與風險評估，第三版，三民書局股份有限公司，台北，民國九十二年
  29. 黃清賢，危害分析與風險評估操作手冊，初版，新文京開發出版股份有限公司，台北，民國九十二年
  30. 柯輝耀，可靠度保證—工程與管理技術之應用，三版，中華民國品質學會，台北，民國九十三年
  31. 柯輝耀，預防性失效分析—FMECA&FTA 之應用，初版，中華民國品質學會，台北，民國九十年
  32. 趙吉山等，鐵路運輸安全管理，中國鐵道出版社，北京，2003 年
  33. 捷運軌道車輛技術標準規範—高運量鋼軌車輛規劃基準，交通部，民國九十二年五月
  34. 捷運系統建設技術規範草案之研究—系統整合篇(1/2)，交通部科技顧問室，民國九十三年四月
  35. 捷運車輛監理(證照)制度之研究，交通部高速鐵路工程局，民國九十三年九月
  36. Robert F. DeVellis，吳齊殷譯，量表的發展：理論與應用，初版，國立編譯館，民國八十九年四月
  37. 邱皓政，量化研究與統計分析，初版，五南圖書出版股份有限公司，民國九十一年
  38. C. James Goodwin，鄭默、鄭日昌譯，心理學研究—方法與設計，初版，五南圖書出版股份有限公司，民國九十一年
  39. 李美蕃，「簡介捷運工程的系統保證作業—以電聯車為例說明 R&M 作業概要」，捷運技術，第 9 期，第 23-28 頁，民國 82 年
  40. 李美蕃，「簡介捷運工程的系統保證作業(續)—安全性及人性因素之考量」，捷運技術，第 9 期，第 29-35 頁，民國 82 年
  41. 林宜勝，「捷運機廠維修設施與設計」，捷運技術，第 11 期，第 19-27 頁，民國 83 年
  42. 勞定華，「台北捷運系統機廠與列車維修計劃之配合」，捷運技術，第 11 期，第 28-33 頁，民國 83 年
  43. 張明坤，「捷運系統安全工程」，捷運技術，第 15 期，第 161-167 頁，民國 85 年
  44. 張明坤，「可靠度理論與其在捷運系統應用上之實務探討」，捷運技術，第 16 期，第 85-95 頁，民國 86 年
  45. 周光暉，「可靠度中心式維修(RCM)—國外技術與發展現況介紹」，台電核能月刊，第 169 期，第 37-43 頁，民國 86 年

46. 周光暉,「流線型可靠度中心式維修技術」,核研季刊,第24期,第73-84頁,民國86年
47. G. Abdul-Nour, H. Beaudoin, P.Ouellet, R. Rochette, S.Lambert, “A Reliability Based Maintenance Policy; A Case Study”, Computers ind. Engng, Vol.35, pp. 591-594, 1998.
48. Marvin Rausand, ”Reliability centered maintenance”, Reliability Engineering and System Safety, Vol.60, pp. 121-132, 1998.
49. Ludwig J. Hollick, Greg N. Nelson, “Rationalizing Scheduled-Maintenance Requirements Using Reliability Centered Maintenance – A Canadian Air Force Perspective”, IEEE Proceedings Annual Reliability and Maintenance Symposium, pp. 11-17, 1995.
50. S. Eisinger, U. K. Rakowsky, “Modeling of uncertainties in reliability centered maintenance — a probabilistic approach”, Reliability Engineering and System Safety, Vol.71, pp. 159-164, 2001.
51. Bonnie S. Hauge, Donald C. Johnston, “Reliability Centered Maintenance and Risk Assessment”, IEEE Proceedings Annual Reliability and Maintenance Symposium, pp. 36-40, 2001.
52. Basim Al-Najjar, Imad Alsyouf, “Selecting the most efficient maintenance approach using fuzzy multiple criteria decision making”, International journal of production economics, Vol.84, pp. 85-100, 2003.
53. V. S. Deshpande, J. P. Modak, “Maintenance strategy for tilting table of rolling mill based on reliability considerations”, Reliability Engineering and System Safety, Vol.80, pp. 1-18, 2003.
54. S. Martorell, A. Muñoz, V. Serradell, “An approach to integrating surveillance and maintenance tasks to prevent the dominant failure causes of critical components”, Reliability Engineering and System Safety, Vol.50, pp. 179-187, 1995.
55. John C. Duthie, Michael I. Robertson, Alan M. Clayton, David P. G. Lidbury, “Risk-based approaches to ageing and maintenance management”, Nuclear Engineering and Desisn, Vol.184, pp. 27-38, 1998.
56. S. Martorell, V. Serradell, G. Verdú, “Safety-related equipment prioritization for reliability centered maintenance purposes based on a plant specific level 1 PSA”, Reliability Engineering and System Safety, Vol.52, pp. 35-44, 1996.
57. J. Huang, C. R. Miller, O. G. Okogbaa, “Optimal Preventive-Replacement Intervals for the Weibull Life Distribution : Solutions & Applications”, IEEE Proceedings Annual Reliability and Maintenance Symposium, pp. 370-377, 1995.
58. Danny I. Cho, Mahmut Parlar, “A survey of maintenance models for multi-units systems”, European Journal of Operational Research, Vol.51, pp.1-23, 1991.
59. Rommert Dekker, “Applications of maintenance optimization models : a review and analysis”, Reliability Engineering and System Safety, Vol.51, pp. 229-240, 1996.
60. Jørn Vatn, Per Hokstad, Lars Bodsberg, “An overall model for maintenance optimization”, Reliability Engineering and System Safety, Vol.51, pp. 241-257, 1996.
61. A. Sittithumwat, F.Soudi, K.Tomsovic, “Optimal allocation of distribution maintenance resources with limited information”, Electric Power Systems Research, Vol.68, pp.208-220, 2004.
62. D. J. Bowler, P. L. Primrose, R. Leonard, “Economic evaluation of reliability-centered maintenance(RCM) : an electricity transmission industry perspective”, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol.142, No.1, pp. 9-16, 1995.



63. G. F. D'Addio, P. Firpo, S. Savio, "Reliability Centered Maintenance : A Solution to Optimise Mass Transit System Cost Effectiveness", International Conference on Developments in Mass Transit Systems, Conference Publication No. 243, pp. 211-216, 1998.
64. Gian Francesco D'Addio, Stefano Savio, Pierluigi Firpo, "Optimized Reliability Centered Maintenance of Vehicles Electrical Drives for High Speed Railway Applications", ISIE'97, pp. 555-560, 1997.
65. Stefano Savio, "Modeling of Diagnostics Aided RCM Procedure for Transportation Systems Dependability and Cost Evaluation", ISIE'99, pp. 877-882, 1999.
66. Diego J. Pedregal, Fausto P. García, Felix Schmid, "RCM<sup>2</sup> predictive maintenance of railway systems based on unobserved components models ", Reliability Engineering and System Safety, Vol.83, pp. 103-110, 2004.
67. Jesús Carretero, José M. Pérez, Félix García-Carballeira, Alejandro Calderón, Javier Fernández, Jose D. García, Antonio Lozano, Luis Cardona, Norberto Cotaina, Pierre Prete, "Applying RCM in large scale systems : a case study with railway networks", Reliability Engineering and System Safety, Vol.82, pp. 257-273, 2003.
68. Per Johansson, Jan-Eric Nilsson, "An economic analysis of track maintenance costs", Transport Policy, Vol.11, pp. 277-286, 2004.
69. Donald C. Johnston, "Simulation in RCM Training", IEEE Proceedings Annual Reliability and Maintenance Symposium, pp. 235-239, 2001.
70. S. Epstein, A. Rauzy, "Can we trust PRA", Reliability Engineering & System Safety, Vol.88, pp. 195-205, 2005.
71. William Keller, Mohammad Modarres, "A historical overview of probabilistic risk assessment development and its use in the nuclear power industry : a tribute to the late Professor Norman Carl Rasmussen", Reliability Engineering & System Safety, Vol.89, pp. 271-285, 2005.
72. M. D. Jeng, F. DiCesare, "A Review of Synthesis Techniques for Petri-nets with Applications to Automates Manufacturing Systems", IEEE Trans. Systems. Man. Cybern., Vol.23, pp. 301-312, 1993.
73. M. C. Zhou, F. DiCesare, Petri Net Synthesis for Discrete Event Control of Manufacturing Systems, Boston, MA, Kluwer, 1993.
74. W. M. Zuberek, W. Kublak, "Timed Petri Net Models of Flexible Manufacturing Cells", Proceedings of the 36<sup>th</sup> Midwest Symposium on Circuits and Systems, Vol.2, pp.922-925, 1993.
75. Michael K. Molloy, "Performance Analysis Using Stochastic Petri Nets", IEEE Transactions on Computers, Vol. C-31, No.9, pp. 913-917, 1982.
76. C. Cordier, M. Fayot, A. Leroy & A. Petit, "Integration of Process Simulations in Availability Studies", Reliability Engineering & System Safety, Vol.55, pp. 105-116, 1997.
77. C. H. Lawshe, "A Quantitative Approach to Content Validity", Personnel Psychology, Vol.28, pp. 563-575, 1975.
78. Bross ID J. , 「 How to use ridit analysis 」 , Biometrics , Vol.14 , p.18-38 , 1958.
79. J. Douglas, "The Maintenance Revolution", EPRI Journal, No.3, pp. 47-51, 1995.
80. N. Pouplard, E. M. Qannari & S. Simon, "Use of Ridits to Analyse Categorical Data in Preference Studies", Food Quality and Preference, Vol.8, No.5/6, pp. 419-422, 1997.

81. Leo Huang, Hsien-Tang Tsai, "The Study of Senior Traveler Behavior in Taiwan", *Tourism Management*, Vol.24, pp. 561-574, 2003.
82. Martin Doyle, Stephen Dorling, "Visibility Trends in the UK 1950-1997", *Atmospheric Environment*, Vol.36, pp. 3161-3172, 2002.
83. J. Endrenyi, "Impact of Maintenance Strategy on Reliability", Final report by the IEEE/PES Task Force on Impact of Maintenance Strategy on Reliability of the Reliability, Risk and Probability Applications Subcommittee, July 1999.
84. Anthony M. Smith, 「Reliability-Centered Maintenance」, McGraw-Hill, 1993.
85. Alan Agresti, 「Analysis of Ordinal Categorical Data」, p.167~p.170, John Wiley&Sons, 1984.
86. Norman M. Bradburn, 「The Structure of Psychological Well-Being」, Walter de Gruyter, Inc., Chicago, 1969.
87. James L. Peterson, 「Petri Net Theory and the Modeling of Systems」, Prentice-Hall, 1981.
88. Winfrid G. Schneeweiss, 「Petri Nets for Reliability Modeling (in the Fields of Engineering Safety and Dependability)」, LiLoLe-Verlag GmbH(Publ. Co. Ltd.), 1999.
89. Sheldon M. Ross, 「Introduction to Probability Models」, Academic Press, 2003.
90. MIL-HDBK-338A, 「Electronic Reliability Design Handbook」, Vol. I & II, Rome Air Development Center, Griffiss AFB, N. Y., 13441-5700, 1988.
91. MIL-HDBK-217F, 「Reliability Prediction of Electronic Equipment」, RELI-0074, Air Force, 1991.



# 附錄一 第一階段問卷(內容效度評估)



您好：

素仰 台端博學多聞、學養俱豐，希望借助 您的意見以協助確認捷運電聯車系統功能失效項目，並作為問卷內容設計與修正之參考。本論文研究分成三階段進行：

第一階段利用相關文獻中的參考資料(Ex：捷運軌道車輛技術標準規範—高運量鋼軌車輛規劃基準、軌道系統建設技術規範草案之研究—系統整合篇、軌道工程學等)，定義出電聯車系統的四項主要安全功能：「照明和指示燈號正常」、「車門開關及煞車功能正常」、「故障率及出軌率低」、「具備緊急通訊及滅火設備」。並且列出與此四項功能相關的子系統功能。最後以這些子系統功能的失效作為「電聯車系統功能失效項目檢核問卷」初擬之問項。

第二階段利用捷運公司維修部人員專業的知識，對於電聯車系統功能失效檢核問卷各要項進行審查，並提供寶貴意見。由貴公司員工之寶貴意見中加以評估後，整理出一份電聯車系統功能失效項目檢核之問卷。未來將透過捷運公司維修部，發給捷運公司維修部員工填答後回收。

第三階段透過對捷運公司維修部員工之調查，以員工所填寫檢核評估問卷，以求得到電聯車各功能失效項目對於電聯車系統營運及安全上的衝擊程度。其次利用統計分析與系統安全分析方法，尋找出影響電聯車系統安全及營運的關鍵維護項目，並針對其進行失效模式、影響與嚴重度分析(FMECA)，最後研擬該維護關鍵項目之維護策略並且評估其績效。

目前本研究正進行第二階段部份，懇請 您提供在工作上寶貴的經驗與意見，撥冗協助填答。問卷內容僅供學術研究之用，絕不對外公開。謝謝 您的支持與協助。

敬祝 身體健康 萬事如意

國立交通大學運輸科技與管理研究所 指導教授 張新立博士

研究生 林忠漢

聯絡電話：0921-328788

E-mail：lukelin.tem92g@nctu.edu.tw

- 您認為由捷運公司維修部員工檢核下列各問題的發生頻率與影響程度，藉以評估何者是影響電聯車安全及正常營運中風險較高的項目，是否合適?

子系統	功能	題目(危害項目)	非常適合	適合	沒意見	不適合	非常不適合	建議修正意見 (題目文字修改，可直接於題目上修正)
照明	提供列車照明與燈號顯示	車廂內緊急照明功能失效						
		車外路徑照明(車頭燈)不正常						
		尾燈照明不正常						
		車外列車狀態指示燈號(如：煞車中、通訊中、手動操作)不正常						
車門	(1)供乘客進出與緊急逃生 (2)防止乘客在列車行進中掉落車外	列車靜止時，車門不能正常開關						
		緊急情況(如：停電)時，車門無法以人工方式開啟						
		安全迴路失效，導致列車在車門未關閉的情況下行駛						
		車門於列車行駛中開啟						
		車間門故障						
		駕駛室側門故障						
		緊急逃生門故障						
		車輛兩側之車門開啟指示燈故障						
		駕駛室之車廂門控制開關失效						
門鈴故障								
(1)提供	一般煞車功能失效							

煞車及空壓系統	列車減速功能(2)在緊急情況下，讓列車迅速停止	一般煞車功能失效						
		緊急煞車功能失效						
		駐車煞車功能失效(列車停車時有不正常之滑動)						
		推進與煞車之同步連鎖功能失效，列車在未獲得足夠煞車力的情況下行駛						
		空壓機故障，無法產生足夠的壓力						
		輸壓管線破裂						
		安全閥(穩定管線壓力，將多餘氣體排至大氣中)故障						
		車下絆腳閘桿失效，未能撞擊軌旁跳脫臂(Trip Arm)並及時啟動緊急煞車						
		空轉/打滑修正功能失效						
		駕駛室煞車系統指示設備故障(含煞車指示燈、駐車煞車指示燈、雙針壓力表)						
煞車時發出尖銳刺耳的聲響或異味、冒煙								
車體和車體內裝	支撐乘客重量	車輛行駛之擺動超出動態包絡線(左右擺動過大)						
		車間通道地板之高度變化過大(超過 15mm)						
		車體結構元件出現永久變形(Ex：地板出現凹陷變形)						
		車體承樑出現裂痕或破壞						
	(1)供旅客乘坐或站立時維持平衡	中心銷出現裂痕或破壞						
		滅火器失效或不能正常運作						
		車窗產生噪音、振動、鬆動或漏水						
		椅座、椅背、椅面出現永久變形或破壞						
		水平式握桿或手拉環斷裂						

	(2)緊急滅火設備	車門屏風破裂 駕駛室擋風玻璃上之雨刷/噴水裝置故障							
聯結器	(1)連結各車廂使其成為車組	在劇烈變化的行駛環境下(如：S型軌、爬升段或車間高度差)，聯結器擺動空間不足造成列車無法正常行駛							
	(2)使車廂電路與氣壓管線相連接	聯結器碰撞到車體底架 列車行駛中，聯結器自動解聯 聯結器結構出現裂痕或破壞 機械、電機、氣壓聯結無法於一次操作中同時完成							
	推進系統	提供列車加速前進功能	電聯車牽引動力不足						
			速度感測器故障						
			推進電路故障						
馬達無法吸入車底空氣進行冷卻									
灰塵與雨滴滲入馬達									
輔助電力	將第三軌之供電加以變壓，供列車設備使用	靜態變流器(SIV)故障，無法正常變壓供其他子系統及控制迴路使用							
		電瓶蓄電不足，無法供應緊急通風與照明之用							
		電聯車之啟動控制、故障顯示及照明控制失效							
		輸出感應裝置故障，無法偵測直流定電壓輸出的喪失							
轉向架及	(1)支撐車廂重量 (2)維持	轉向架結構出現破裂、裂痕或斷裂的現象							
		車軸出現裂痕或表面剝落的現象							
		車輪輪轂、輪緣及踏面處出現裂痕或變形							
		車輪輪徑不足或各軸輪徑值差異過大							

懸吊系統	車廂水平及高度 (3)使列車行駛時保持穩定	車底設備箱、蓋或大型設備掉落						
		主懸吊系統故障崩塌，造成車廂傾斜						
		次懸吊系統(氣囊)漏氣						
		防滾桿(anti-roll)失效，導致電聯車在彎曲的軌道上行駛時，車廂內未能保持水平						
		無法維持電聯車於高速行駛之穩定性						
		防滾桿(anti-roll)失效，無法維持車體之靜態及動態包絡線，車身晃動過大						
		轉向架在直軌上出現蛇行(Hunting)現象						
		車輛在彎軌上行駛時，出現輪緣攀爬現象						
暖氣通風空調系統	維持車內通風及溫度	無法自動且連續地進行空調及通風控制						
		無法使車內溫度保持在設定值						
車載號誌	(1)接收和執行速度命令 (2)測量及調整車速	速度命令之接收、解碼、執行和顯示不正常						
		測量及顯示列車實際速度功能不正常						
		功能位階(動力輸出百分比)調整功能不正常						
		傳輸資訊以自動設定路徑和自動監控功能不正常						
		控制列車準確靠站停車功能不正常						
車載通訊	駕駛員、乘客和行控中心三者之通訊	依接收到的速度命令調節車速功能不正常						
		司機員對列車控制員之通訊功能失效						
		司機員對列車控制員之緊急通訊功能失效						
		司機員對塔台調度員之通訊功能失效						
		司機員對車上旅客廣播功能失效						
		前後端駕駛室司機員通話功能失效						
司機員對求助旅客或旅客對司機員通話功能失效								



		列車識別控制單元故障						
		旅客車廂及駕駛室之閉路電視系統故障						

- 若您覺得有若干電聯車系統功能失效項目未被包含在以上表格中，請您加以補充，謝謝。



附錄二 第二階段問卷(電聯車系統功能失效風險評估)



您好:

本問卷係探討捷運電聯車系統之功能失效造成的影響程度，以及發生頻率的多寡，藉以作為未來進一步分析及研擬電聯車維護策略之參考。懇請 您提供在工作上寶貴的經驗與意見，撥冗協助填答。問卷內容僅供學術研究之用，絕不對外公開。謝謝 您的支持與協助。

敬祝 身體健康 萬事如意

國立交通大學運輸科技與管理研究所 指導教授 張新立博士  
研究生 林忠漢  
聯絡電話：0921-328788  
E-mail：lukelin.tem92g@nctu.edu.tw

### <填答注意事項>

※影響程度由以下四部份加以決定，各選項定義分別為：

1. 人員安全，指的是系統失效發生時，造成的人員傷亡  
【高：造成人員死亡】、【中：造成人員重傷】、【低：造成人員輕傷】、【可忽略：人員無受傷或死亡】
2. 營運衝擊，指的是系統失效發生時，造成的列車延誤時間  
【高：延誤時間達 1 小時以上】、【中：延誤時間介於 20 分鐘至 1 小時之間】、【低：延誤時間介於 5 分鐘至 20 分鐘之間】、  
【可忽略：延誤時間低於 5 分鐘以下】
3. 環境衝擊，指的是系統失效發生時，造成該路線之道路路網壅塞，或者造成其他路線列車延遲  
【高：造成其他路線列車延誤以及附近道路路網嚴重壅塞】、【中：造成其他路線列車延誤以及附近道路路網輕微壅塞】  
【低：僅造成其他路線列車延誤，但未造成附近道路路網壅塞】、【可忽略：未造成附近道路路網壅塞或是其他路線列車延誤】
4. 財務損失，指的是系統失效發生時，更換或修復該設備所需之財務支出(包含物料、備品及人力成本)  
【高：維修金額支出達 1 百萬元以上】、【中：維修金額介於 10 萬元至 1 百萬元之間】、【低：維修金額介於 1 萬元至 10 萬元之間】、  
【可忽略：維修金額低於 1 萬元以下】

※發生頻率各選項定義分別為：

- 【高：在連續操作 100 小時中發生，約 1 週左右】、【中：在連續操作 1,000 小時中發生，約 2 個月左右】、【低：在連續操作 10,000 小時中發生，約 1 年半左右】、【可忽略：在連續操作 100,000 小時中發生，約 15 年左右】

- 一、 請您先就電聯車功能失效的四個影響構面，分別進行介於 0~100 分之重要性評分，分數愈高者表示愈重要。  
 (範例：人員安全--90；營運衝擊--80；環境衝擊--40；財務損失--30)

構面	重要性得分
人員安全	
營運衝擊	
環境衝擊	
財務損失	

- 二、 請您針對以下各電聯車系統功能失效項目，進行影響程度(分為四個構面)與發生頻率上的評估。

題號	題目	影響程度																發生頻率			
		人員安全				營運衝擊				環境衝擊				財務損失				可忽略	低	中	高
		可忽略	低	中	高	可忽略	低	中	高	可忽略	低	中	高	可忽略	低	中	高				
1	車廂內緊急照明功能失效																				
6	緊急情況(如：停電)時，車門無法以人工方式開啟																				
7	安全迴路失效，導致列車在車門未關閉的情況下行駛																				
8	車門於列車行駛中開啟																				
11	緊急逃生門故障																				

題號	題目	影響程度																發生頻率											
		人員安全				營運衝擊				環境衝擊				財務損失				可忽略	低	中	高								
		可忽略	低	中	高	可忽略	低	中	高	可忽略	低	中	高	可忽略	低	中	高												
13	駕駛室之車廂門控制開關失效																												
15	一般煞車功能失效																												
16	緊急煞車功能失效																												
17	駐車煞車功能失效(列車停車時有不正常之滑動)																												
18	推進與煞車之同步連鎖功能失效，列車在未獲得足夠煞車力的情況下行駛																												
19	空壓機故障，無法產生足夠的壓力																												
20	輸壓管線破裂																												
21	安全閥(穩定管線壓力，將多餘氣體排至大氣中)故障																												
22	車下絆腳閘桿失效，未能撞擊軌旁跳脫臂(Trip Arm)並及時啟動緊急煞車																												
24	駕駛室煞車系統指示設備故障(含煞車指示燈、駐車煞車指示燈、雙針壓力表)																												
25	煞車時發出尖銳刺耳的聲響或異味、冒煙																												
28	車體結構元件出現永久變形(Ex：地板出現凹陷變形)																												
29	車體承樑出現裂痕或破壞																												

題號	題目	影響程度																發生頻率								
		人員安全				營運衝擊				環境衝擊				財務損失				可忽略	低	中	高					
		可忽略	低	中	高	可忽略	低	中	高	可忽略	低	中	高	可忽略	低	中	高									
30	中心銷出現裂痕或破壞																									
31	滅火器失效或不能正常運作																									
34	水平式握桿或手拉環斷裂																									
37	在劇烈變化的行駛環境下(如:S型軌、爬升段或車間高度差), 聯結器擺動空間不足造成列車無法正常行駛																									
38	聯結器碰撞到車體底架																									
39	列車行駛中,聯結器自動解聯																									
40	聯結器結構出現裂痕或破壞																									
41	機械、電機、氣壓聯結無法於一次操作中同時完成																									
43	速度感測器故障																									
44	推進電路故障																									
46	灰塵與雨滴滲入馬達																									
47	靜態變流器(SIV)故障,無法正常變壓供其他子系統及控制迴 路使用																									
48	電瓶蓄電不足,無法供應緊急通風與照明之用																									
49	電聯車之啟動控制、故障顯示及照明控制失效																									
51	轉向架結構出現破裂、裂痕或斷裂的現象																									
52	車軸出現裂痕或表面剝落的現象																									
53	車輪輪轂、輪緣及踏面處出現裂痕或變形																									

題號	題目	影響程度																發生頻率											
		人員安全				營運衝擊				環境衝擊				財務損失				可忽略	低	中	高								
		可忽略	低	中	高	可忽略	低	中	高	可忽略	低	中	高	可忽略	低	中	高												
54	車輪輪徑不足或各軸輪徑值差異過大																												
55	車底設備箱、蓋或大型設備掉落																												
56	主懸吊系統故障崩塌，造成車廂傾斜																												
57	次懸吊系統(氣囊)漏氣																												
58	防滾桿(anti-roll)失效，導致電聯車在彎曲的軌道上行駛時，車廂內未能保持水平																												
59	無法維持電聯車於高速行駛之穩定性																												
60	防滾桿(anti-roll)失效，無法維持車體之靜態及動態包絡線，車身晃動過大																												
61	轉向架在直軌上出現蛇行(Hunting)現象																												
62	車輛在彎軌上行駛時，出現輪緣攀爬現象																												
65	速限命令之接收、解碼、執行和顯示不正常																												
66	測量及顯示列車實際速度功能不正常																												
67	功能位階(動力輸出百分比)調整功能不正常																												
68	傳輸資訊以自動設定路徑和自動監控功能不正常																												
69	控制列車準確靠站停車功能不正常																												
71	司機員對列車控制員之通訊功能失效																												
72	司機員對列車控制員之緊急通訊功能失效																												

題號	題目	影響程度																發生頻率			
		人員安全				營運衝擊				環境衝擊				財務損失				可忽略	低	中	高
		可忽略	低	中	高	可忽略	低	中	高	可忽略	低	中	高	可忽略	低	中	高				
73	司機員對塔台調度員之通訊功能失效																				
74	司機員對車上旅客廣播功能失效																				
77	列車識別控制單元故障																				
78	旅客車廂及駕駛室之閉路電視系統故障																				

### ◆基本資料

1. 年齡：\_\_\_\_\_。
2. 性別： 男  女。
3. 教育程度： 國中以下  高中職  專科  大學  碩士以上
4. 婚姻狀況： 未婚  已婚
5. 進入捷運公司工作年資：\_\_\_\_\_年
6. 從事電聯車維修工作年資：\_\_\_\_\_年
7. 職務： 領班  股長  其他 \_\_\_\_\_(請填職稱)
8. 服務部門： 北投機廠  南港機廠  新店機廠
9. 維修專長(Ex：機械、電機等)：\_\_\_\_\_。

