

第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

台灣地區軌道運輸系統發軔於百餘年前，歷經路線、車輛等發展遞嬗，至今已成為包含南北高速鐵路、環島傳統鐵路、北高捷運鐵路等三大類在內的現代化軌道運輸系統。此三大系統中，捷運鐵路之第一條路線於民國 85 年正式通車，高速鐵路則預計於民國 95 年通車；較之於傳統鐵路，前二者引進時間較晚，且為整套系統引進，而傳統鐵路則是興築於西元 1887 年，其經營擘劃經歷清代、日本殖民政府以及光復後我國政府等三個不同時期，目前已完成環島鐵路網之構建，包括縱貫線、宜蘭線、北迴線、花東線、南迴線，屏東線等幹線鐵路，以及多條客貨運支線鐵路。

南北高速鐵路預計於民國 95 年底通車，對於傳統鐵路之路線重疊區間，勢必造成影響，長途客源之轉移將嚴重影響台鐵營收，為求因應此一軌道運輸市場結構之重組，政府規劃台鐵調整營運方式以及系統角色，朝向短途通勤運輸市場發展，預期以都會區台鐵路線捷運化的轉型方式，為台鐵尋求與高鐵重疊路線之出路。未來捷運化鐵路是以每八分鐘開行一班次通勤列車為規劃目標，因而造成行車密度增高；然而軌道運輸具有路線阻塞時無替代路線之特性，在提高路線行車密度之前提下，倘若發生路線阻塞，勢必對捷運化鐵路之營運造成中斷，同時亦對於相同路線上營運之區域鐵路造成影響，形成連鎖性的誤點。軌道車輛之可靠性在此高行車密度環境之中，顯得益發重要。

除了外部環境變遷造成台灣鐵路管理局實施都會區鐵路捷運化之轉型，其內部亦因應民營化而進行組織調整之規劃。機務部門預計實施「廠段合一」的階層縮減，原本由機廠負責之四、五級翻修作業以及機務段負責之一、二、三級檢修作業，將因應組織階層縮減，進而重新規劃維修階層。

目前台灣鐵路管理局負擔之列車檢修作業多為定時或定里程之計畫性檢修，對於各車型之零組件差異並無特別規劃。綜合以上內外部環境之變化以及衍生之需求，台灣鐵路管理局之機務單位在未來必須提供較之於現有維修架構下，更具可靠性之列車檢修作業。普遍應用於工業界大型系統之系統可靠度觀念，經歷多年發展已趨於成熟。以可靠度集中之維修方式(Reliability-Centered Maintenance, RCM)則是根據系統可靠度觀念，掌握系統中關鍵項目以及因素，將系統維修資源做有效率的分配，進而以可靠度為基準建立最佳的預防性維修計畫。此一維修方式同時可以兼顧系統安全以及降低維修成本，已大量應用於國防武器、航空產業以及核能發電廠等大型系統，然而在軌道產業中，僅有少數國家開始採行，尚未有大量且全面之應用，是為一具有發展應用潛力之技術。

值此台鐵轉型調整之際，本研究嘗試將以可靠度集中之維修方式(RCM)導入台鐵車輛維修作業，並以其為基礎取得關鍵零組件之最佳更換間隔，進而作為維修階層調整之依據。

1.2 研究對象與範圍

台灣鐵路管理局所轄之傳統鐵路系統，由於營運時間已久，經歷多年客貨運需求而逐次辦理購車計畫後，實際操作之軌道車輛不僅數量繁多，形式亦頗為複雜，至民國 92 年底營運操作之動力車輛型式計有電力機車 5 型 175 輛、柴電機車 7 型 146 輛、柴液機車 1 型 16 輛、電聯車 6 型 563 輛、柴油客車 5 型 171 輛，共計 24 型 1071 輛 [1]。由於各型車輛之動力系統相容性不高，因此在後勤方面維修技術之掌握以及預備料件之籌補，均成為台灣鐵路管理局機務單位之一大負擔。

面對都會區鐵路捷運化之轉型需求，通勤電聯車是為台鐵局未來營運之主力車種，台鐵局目前擁有之通勤電聯車計有南非聯合鐵路公司製造之 EMU400 型 48 輛、南韓大宇重工製造之 EMU500 型 344 輛、南韓 ROTEM 公司製造之 EMU600 型 56 輛。其中又以民國 84 年啟用之 EMU500 型為大宗，且其運用遍布北迴線、宜蘭線、縱貫線、屏東線等電氣化區間，是為目前台鐵局通勤電聯車之主力車種。配屬 EMU500 型電聯車之各機務段中，以嘉義機務段為唯一之單一車種運用單位，亦為原廠教官直接授課之單位，因此該段幹部、職工均累積相當完整之運用、檢修經驗。因此本研究預定以台鐵局嘉義機務段所屬之 EMU500 型電聯車為研究對象。

台鐵局於民國 84 年開始大量引進韓國製造之車輛，包括總數 400 輛的推拉式電車組以及總數 344 輛的 EMU500 型電車組，該批車輛於運用初期處於不穩定的高故障率狀況；至民國 90 年代初期，車輛狀況穩定，故障率下降而類似浴缸曲線之穩定期，然而至民國 94 年，故障率驟然大幅上升，至民國 94 年 8 月電力機車以及電聯車故障總數為 237 件，已達民國 93 年之百分之八十，平均約為每天發生一件(見表 1-1)。僅僅十年之運用期間即發生故障率忽然竄升之狀況，並連帶造成台鐵局列車嚴重誤點，引發輿論各界之關切，顯見軌道車輛之可靠性良窳與軌道經營業者營運以及商譽之密切關係。

表 1-1 台鐵局電氣化動力車輛近十年故障統計

年份	故障車型別	
	電力機車	電車組
84 年	167	98
85 年	181	208
86 年	241	172
87 年	214	213
88 年	167	165
89 年	149	178
90 年	119	121
91 年	155	101
92 年	133	84
93 年	171	120
94 年(至 8 月)	158	79

軌道車輛之重要系統包括：車體系統、轉向架與懸吊、煞車系統、推進系統、控制系統[2]。其中與車輛行走最直接相關者包括轉向架與懸吊、煞車系統、推進系統。早年電氣化軌道車輛搭載之動力設備，係以閘流晶體控制直流馬達，然直流馬達碳刷之跳火以及清潔問題，使得馬達之維修成本難以降低。由於近年來半導體技術進步迅速，軌道車輛產業導入閘關閘流體(Gate Turn-Off Thyristor, GTO)以變壓變頻 (Variable Voltage Variable Frequency, VVVF)方式控制交流馬達；近年更導入可高速開關產生良好電壓波形之絕緣閘雙極性電晶體(Insulator Gate Bipolar Transistor, IGBT)，因而得以更加精確的控制交流馬達。台鐵局於民國 84 年引進之 EMU500 型為 GTO 反相變流器，然而民國 92 年引進之 EMU600 型即為 IGBT 反相變流器，其進步程度頗大，而技術之世代更替之間，台鐵局又因為採購車輛數缺乏經濟規模，必須使用特殊規格零件，連帶造成對於關鍵零組件以及技術之掌握亦因而頗具難度；相較之下，台鐵局歷年引進車輛之轉向架與懸吊、煞車系統演進，多為廣泛、通用之技術，則無明顯難以克服之技術差異，經濟規模不足之特殊規格零件問題亦較輕微。

綜合上述各項條件，本研究預定以台鐵局嘉義機務段所屬 EMU500 型電聯車動力系統為研究範圍。針對該系統之各項零組件以及維修項目進行分析，以可靠度為基礎，探討適當之預防性維修計畫以及維修時距，並以之為調整維修階層之依據。

1.3 研究目的與內容

由於國內軌道產業缺乏車輛動力系統之研發能力，因此營運單位多半必須仰賴國外技術以及零組件，方能維持動力系統正常運作。台鐵局經營之傳統鐵路為軌距 1067mm 之窄軌系統，在全球市場中僅有少數國家採用相同規格；另一方面，受限於預算限制以及市場範圍，台鐵局單一採購之車輛數量無法達到規模經濟，許多為窄軌系統特別設計之零組件即成為特殊件，僅有少數廠商供料。在此少量生產以及缺乏運轉實據之先天限制下，即便是廠商，對於零組件之可靠度亦難以預作良好規劃以及事後修正，而台鐵局對於料件之設計以及壽期掌握不足，連帶造成不同維修階層之維修盲點。

本研究之目的在於應用可靠度集中維修方式，對軌道車輛維修階層進行調整。研究內容包括：

- (1) 可靠度、RCM 以及維修階層相關文獻收集；
- (2) 利用台鐵資料製作電聯車動力系統功能區塊圖以及可靠度區塊圖，確認其系統內組件之功能以及可靠度；
- (3) 使用失效樹分析(Fault Tree Analysis, FTA)整理求取電聯車動力系統失效關鍵項目，並以之為基礎配合維修成本估算，求得關鍵維修項目(Maintenance Significant Item, MSI)；
- (4) 應用失效模式、影響以及嚴重度分析(Failure Modes, Effects and Criticality Analysis, FMECA)方法，針對 MSI 進行分析，以獲得主要失效模式(dominant failure mode)；
- (5) 以預防關鍵維修項目之主要失效模式為基礎，選擇適當之預防性維修作業；
- (6) 應用韋伯分析(Weibull Analysis)就關鍵維修項目排定最適更換間隔；
- (7) 配合關鍵維修項目之軟硬體成本、支援成本、營運損失成本，就最適維修間隔以及對應工時對維修階層進行分析，並就結果進行適當調整。

第二章 文獻回顧與現況分析

本章就研究內容相關之文獻進行回顧，包括 2.1 節之可靠度領域文獻、2.2 節之 RCM 相關文獻、2.3 節之韋伯分析相關文獻，2.4 節則是針對軌道車輛維修文獻回顧與現況進行分析。

2.1 可靠度領域之相關文獻

現今有關裝備或產品可靠度的定義，一般多以 1952 年美國國防部所成立的電子裝備可靠度顧問小組(Advisory Group on the Reliability of Electronic Equipment, AGREE)針對美軍電子裝備之可靠度，進行調查研究而得之結論為基礎。AGREE 對可靠度所作之定義為：「可靠度為產品於既定的時間內，在特定的使用(環境)條件下，執行特定性能或功能，成功達成工作目標的機率。」。而後可靠度工程成為近代工業界應用最廣、發展最快之分析方法。Blanchard[18]則將可靠度定義為：「為某系統或產品、裝置在規定的使用條件下，於規定的時間內，發揮其特定功能而毫無失效之機率」

由上述定義可歸納得知可靠度係由「使用條件」、「時間」、「功能」以及「成功機率」等四要素所組成，其中以「成功機率」為整體性指標。可靠度亦是一種以時間為基礎的品質觀念，可利用機率與統計的方法，量化系統、產品或裝置不發生故障的可能性。實務上常以指數分配或指數故障定律(Exponential failure law)說明之：假設 λ 為故障率(每單位時間之故障數)，則平均失效間隔時間(MTBF)恰為故障率之倒數(即為 $1/\lambda$)，時間 t 以前發生至少一次故障之機率可用指數分配來代表。[19]

Blanchard 依照可靠度之系統功能結構差異，將其分為串聯系統(Series networks)、並聯系統(Parallel networks)與複聯系統(Combined series-parallel networks)，裝備系統之整體可靠度(R)與其所包含元件如次系統、零組件(A, B, C, \dots)之可靠度(R_A, R_B, R_C, \dots)之關係如下所示：

2.1.1 串聯系統

圖 2-1 顯示此系統係由多個元件串聯而成，其中任一元件之故障均會導致整個系統故障而無法產生正確 output。

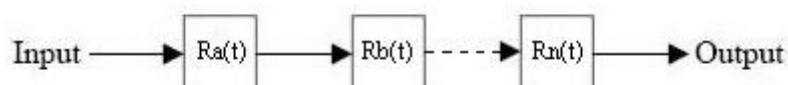


圖 2-1 串聯網路

令每一元件於某一時間之可靠度為 $R_a(t), R_b(t), \dots, R_n(t)$ ，則該串聯系統之可靠度 $R_s(t)$ 為：

$$R_s(t) = R_a(t) \times R_b(t) \times \dots \times R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$$

串聯系統故障率為：

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

串聯系統平均故障時間為：

$$\gamma_s = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad \text{其中 } \lambda_i \text{ 是第 } i \text{ 個元件之故障率， } \gamma_i \text{ 為第 } i \text{ 個元件之故障時間}$$

2.1.2 並聯網路

圖 2-2 顯示此系統係由多個元件並聯而成。

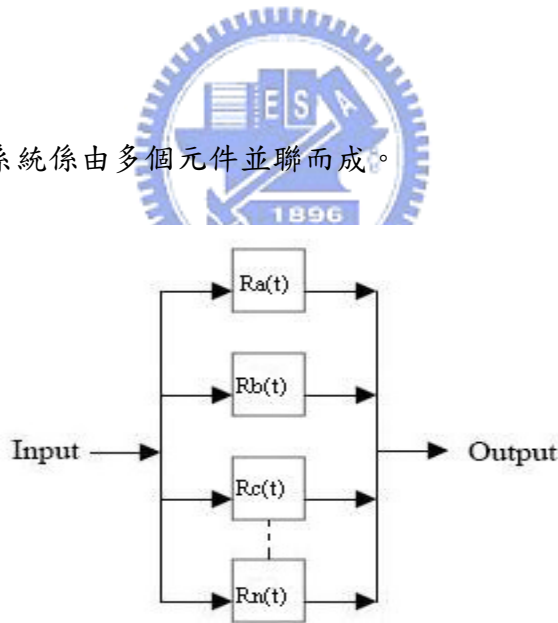


圖 2-2 並聯網路

假設每一元件之故障屬各自之獨立事件，則該並聯系統之可靠度 $R_p(t)$ 為：

$$R_p(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t))$$

並聯系統故障率為：

$$\lambda_p = \prod_{i=1}^n \lambda_i \times \sum_{i=1}^n \gamma_i$$

並聯系統平均故障時間為：

$$\gamma_p = \frac{\prod_{i=1}^n \gamma_i}{\sum_{i=1}^n \gamma_i}$$

2.2 RCM 模式之相關文獻

以可靠度集中之維修分析，是後勤支援分析過程之一大關鍵，其目的在於建立最佳的預防性維修計畫，平衡維修成本與效率，發揮系統最佳操作性能。RCM 起源於航空業的維修工作，最早是由 Stan Nowlan 與 Howard Heap[20]於 1960 年代發展之維修專案規劃方法，並將之應用於美國民航業界。該方法經數年演進之後，於 1978 年正式定名為 RCM。由於航空業之意外可能造成極其嚴重的人員傷亡和財物損失，因此航空業之安全相較於其他運輸領域更為受到重視，其安全要求亦高。為滿足飛航安全的標準，航空業者均投入大量人力、財力、物力進行嚴密的維護檢修工作，然而這也往往成為航空業者沉重的財務負擔。在這樣的環境之下，藉由可靠度與邏輯分析，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修工作上，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 方法之執行步驟

Anderson 與 Neri[21]提出執行RCM邏輯分析的四大步驟：(1)執行故障模式分析，找出關鍵項目。(2)針對各關鍵項目，應用RCM模式分析，決定各設備之處置方式，有效分配有限資源，達到設備維修最佳化的組合。(3)藉由設備維修工作的方法、設備維修的需求程度以及設備維修週期的界定，進而執行RCM 所決定的每一事項，同時於執行過程收集必要的訊息，以利未來的邏輯分析。(4)經由實際設備運轉經驗，掌握設備的壽命，進而調整設備維修的策略與執行內容，使整體設備維修達到最佳化。

Kennedy[22]將此四大步驟，細分為七個步驟：(1)選擇影響層面較顯著的區

域、(2)決定關鍵功能與績效標準、(3)找出明確的功能故障因素、(4)找出故障模式及其影響層面、(5)選擇彈性有效的維修策略、(6)排程與執行選定的策略目標、(7)最適化整體策略計畫。

Rausand[23]建議維修規劃人員進行RCM分析時，應與可靠度工程師、系統專案經理以及系統使用者充分溝通，使得研發階段之預防性維修計畫，於實際操作階段，可因為持續系統現場使用狀況、失效及維修之資料之蒐集、回饋、更新，而使得預防性維修計畫得以持續改善，達到維修最佳化之目標。

2.2.2 RCM方法之延伸

Hollick 與 Nelson[24]以加拿大空軍操作機種為例，指出在以往的經驗上，若有新機種加入操作時，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。

傳統的 RCM 作法均假設決策過程中沒有不確定性，以免造成非最佳維修策略的產生。而 S.Eisinger 與 U.K.Rakowsky[25]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)取代原本的二元問答，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[26]提出流線性 RCM(Streamlined RCM)，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[27]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。

G.Abdul-Nour、H.Beaudoin、P.Ouellet、R.Rochette 和 S.Lambertu[28]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/元件的使用年期屬於浴缸曲線中的哪一部份(DFR、CFR 或 IFR)、該元件的汰換成本以及系統失效所造成的影響。

2.2.3 維修工作之選定與最適維修工作之排程

Dekker[29]針對各維修最佳化模式之應用進行回顧。Vatn、Hokstad 和 Bodsberg[30]則提出系統整體維修最佳化的模式。Huang、Miller 和 Okogbaa[31]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 與 Parlar[32]針對多元件(Multi-Unit)系統的各類維修模式進行回顧。Sittithumwat 等[33]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[3]則利用基因演算法(Generic Algorithm)探討最佳的維修頻率。

2.2.4 維修績效之評估

RCM 的引進往往導致高初始成本(Initial Cost)。D.J.Bowler、P.L.primrose 和 R.Leonard[34]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。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[4]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[35][36]根據系統元件關鍵性(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 方法之應用

Pedregal 等[37]應用了 RCM²的方法於軌道道岔的維修工作。RCM²結合了 Reliability Centered Maintenance(RCM₁)和 Remote Condition Monitoring(RCM₂)，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[38]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。

陳臣乾[5]以 RCM 之邏輯分析，建立海軍二代艦的系統維修計畫。吳崇銘[6]應用 RCM 分析武器系統，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。

蘇國璋[7]以台北市柴油燃料公車系統的維修單位為測試對象，使用失效模式與效應分析(FMEA)技術，以 RCM 邏輯進行系統可用度(Availability)的評估及相關資料的收集，提供管理決策單位對於運具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。

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。

2.3 韋伯分析之相關文獻

韋伯分析來自於統計學上的韋伯分配(Weibull distribution)，其應用十分廣泛，特別常見於失效度漸減、漸增或為常數之可靠度議題。由於韋伯分配之機率密度函數圖形具多變化性，使其應用於各種失效數據時具有相當大彈性。陳文彬[9]以巡防艇失效的數據，利用Weibull+軟體進行分析，來選擇配適的結果，求出各艇的平均失效間隔時間、平均維修時間、操作妥善率、維修成本。將所求出的數據分析，並探討裝備失效後的維修階段，從改進策略中獲得之結果。熊義明[10]以韋伯機率圖紙及應用最小平方方法估算產品的壽命分佈參數，最後以建構的韋氏分配模式，推估武器系統於正常狀態下的平均壽命、磨適數量，提供後續大量生產的品質管制措施，進而提升可靠度的穩定性。

2.4 軌道車輛維修文獻回顧與現況分析

本節內容如下：2.4.1 小節介紹維修之定義、2.4.2 小節介紹維修型態、2.4.3 小節介紹維修階層、2.4.4 小節是為小結。

2.4.1 維修之定義

維修之意義，根據 Blanchard[39]指出，維修是為維持或修理回復系統或裝備至堪用狀況之一切措施。Monks[40]認為，維修係指使設備維持於良好可用狀態之所有作為，包括清潔、潤滑、檢查、維護、調整、校正、局部維修、翻修等作業均屬之，其範圍頗為廣泛。Pintelon 與 Gelders[41]則認為維修是根據一定程序將裝備或系統修理回復或保持至特定可運轉狀況，其最大目的在於發揮系統或裝備之最大可用度。

2.4.2 維修型態

由於不同系統或裝備之條件不盡相似，為滿足其用途、性能、價格、備品量、人力限制，可靠度之要求等條件，而發展出不同維修型態。K. Hitomi[42]指出，機器設備之故障是無可避免的，藉由週期性的檢視、修理及更換的一切維護作為活動，以減少故障發生次數以及延長機器設備使用壽命，並擴展機器設備使用能量，概略可分為故障維修(Breakdown Maintenance)、預防維修(Preventive Maintenance)、矯正維修(Corrective Maintenance)等三大類。分別說明如下：

- (1)故障維修(Breakdown Maintenance)：是指機器設備發生故障而無法正常運轉時，加以修理之維修作業。有效的故障維修可降低復原時間。
- (2)預防維修(Preventive Maintenance)：是指對機器設備實施適當的定期性計畫檢查，試圖在故障發生之前加以調整修理，使之免於繼續惡化或肇生故障。有效的預防維修可降低故障次數。
- (3)矯正維修(Corrective Maintenance)：又稱為改造維修，係指藉由機器設備故障原因之記錄、統計與分析，針對故障原因加以改善，可提高設備可靠度並避免相同故障再次發生。

莊明聰[2]指出，軌道車輛之維修工作分為預防檢修、故障檢修以及大修三種。分別說明如下：

- (1)預防檢修是指依預訂的準則或時程，對正常功能的設備進行檢查合保養，使其能維持營運要求；或將設備從線上調回機廠進行維修作業，以減少設備可能的故障以防止服務品質的降低。
- (2)故障檢修是指將因故障、意外事件、人為破壞所引起的缺陷予以修復，通常是在列車／設備運轉中發生故障、預防檢修作業期間發現故障或接到製造商的通知／警告通報時實施。故障檢修作業理念是要在不妨礙安全的前提下，使故障的設備進速修復，重新恢復營運。

(3)大修是指車輛機具經使用某一固定時段後，需實施徹底檢查、修理與測試之作業，以確保安全並免於故障。依使用時間或行駛里程多寡，大修作業之檢修程度是有所區別的，如木柵線電聯車車輛大修作業分為局部大修、整體大修二種。

根據我國鐵路機車車輛檢修規則第3條[11]規定，機車檢修分為定期檢修以及臨時檢修兩種，台鐵局之列車維修作業即依循此規定，分別介紹如下：

(1)定期檢修：以固定營運時間或是固定運轉里程為基準，依不同期程之長度排定不同深度以及廣度之檢修工作。其作業型態包括預防性維修作業以及大修作業。

(2)臨時檢修：以現況決定維修項目，通常是以事故、故障之處理為主，其維修深度、廣度以及維修階層視現況而定。簡單如司機員或機務員之線上故障排除，複雜如重大事故由機廠級單位進行維修工作。其作業型態包括故障性維修作業以及矯正性維修作業。



2.4.3 維修階層

Blanchard[39]指出，維修階層是依使用組織架構下各階層之維修能量、維修人員技術層次、後勤支援設備及經濟考量予以分級。李順德[12]將維修階層分為初級之使用單位、中級之場站、高級之廠級，其架構如圖 2-3 所示。

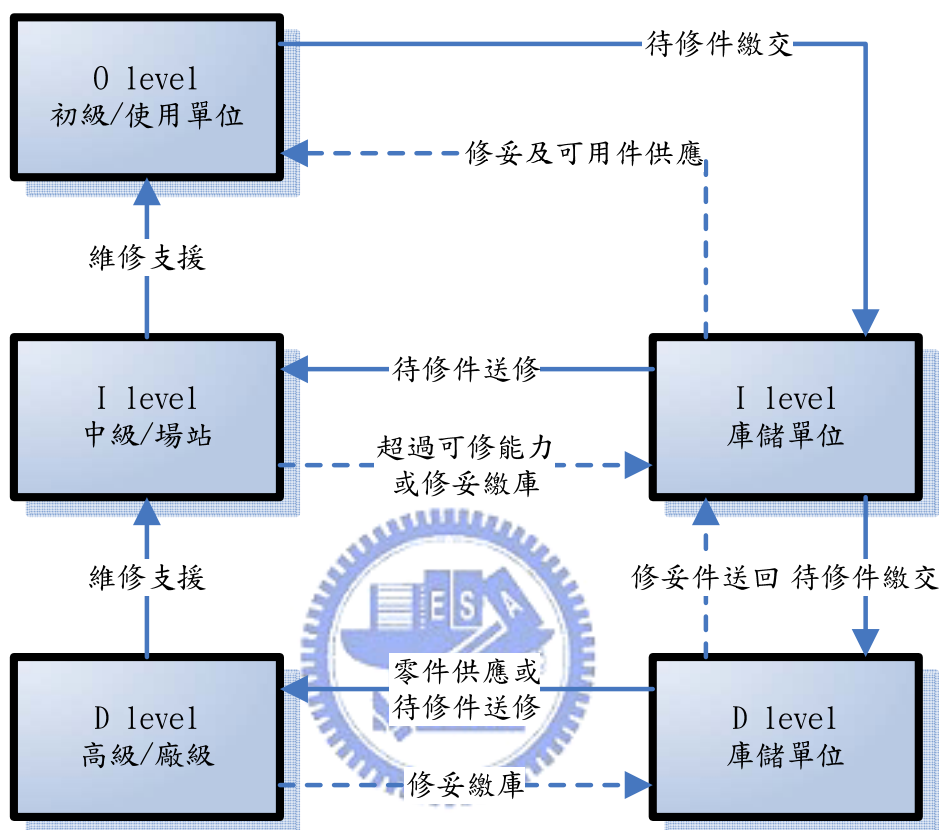


圖 2-3 維修階層示意圖

(1)初級／使用單位(O level)：此維修階層執行最基本而簡單之拆裝維修工作，因此僅需配置基礎維修資源。遇故障狀況時，將故障零組件拆卸更換並後送至中級維修階層進行檢修。

(2)中級／場站(I level)：此維修階層配置維修資源較為充足。收納來自初級之故障零組件之後，由此階層加以檢查修復。完成修復者送回初級階層或暫囤於庫房以利日後運用；判定無法於本階層修復者後送至高級維修階層進行翻修。

(3)高級／廠級(D level)：此維修層級執行最詳細複雜之翻修工作，因而配置所有必要的測試以及生產設備。收納由中級後送之零組件之後，加以翻修或重製並檢驗無誤後，送回中級維修層級。

根據我國鐵路機車車輛檢修規則第 4 條、第 5 條規定[11]，機車之定期檢修分為四級，各級檢修之最長週期均有明確規定(見表 2-1)。其各級檢修工作重點如下：

- (1)一級檢修：以視覺、聽覺、觸覺、嗅覺，就有關行車主要機件之狀態及作用施行檢修。
- (2)二級檢修：以清洗、注油、測量、調整、校正、試驗，用以保持動力、傳動、行走、軀機、集電設備、儀錶等裝置動作圓滑、運用狀態正常之檢修或局部拆卸檢修。
- (3)三級檢修：對動力、傳動、行走(含轉向架)、軀機、儀錶、車身、連結器、控制、電氣、輔助等裝置主要機件之特定部分施行拆卸並作細部分解之檢修。
- (4)四級檢修：對一般機件施行全盤檢修，各重要機件施行重整之檢修。

表 2-1 各級定期檢修週期

級別	一級		二級		三級		四級	
	公里	期間	公里	期間	公里	期間	公里	期間
維修週期	1800	三日	90000	三月	1000000	三年	4000000	十二年

台鐵局目前仍沿用舊制之五級檢修制度，其維修階層可分為機廠以及機務段兩個階層，機廠負責三至五級之檢修作業，維修階層較高，屬於 D 階層；機務段則為實際操作車輛之單位，負責一級至四級之檢修作業，屬於 O 階層以及 I 階層。台鐵局預計於民國 100 年之前調整機務單位組織階層，實施「廠段合一」制度，將四級以下之檢修作業統一於整合之機務單位實施，四級以上之翻修作業則視狀況由外包廠商或是整合之機務單位實施。

2.4.4 小結

由台鐵局之修理車輛統計數據可知，列車維修作業是以定期檢修為主，臨時檢修則是針對預期外之事故或故障狀況進行補救性維修。然而現行之預防性維修作業乃是一體適用於所有車型，而非依據各型車不同之特性進行設計，在可靠度以及維修成本方面均有可再加強之空間。RCM 模式可針對系統零件之可靠度，訂定適當之維修時距，並藉由資料更新的回饋機制，以促成維修策略的調整。另一方面，維修層級之適度調整可以在成本經濟上取得較佳之效益，恰可補足台鐵局面對未來內外環境變遷之維修策略調整需求。

第三章 研究方法與流程

本章之 3.1 節說明 RCM 分析；3.2 節說明失效樹分析；3.3 節說明預防維修時距選定模式；3.4 節說明維修階層分析；3.5 節說明研究流程與步驟。

3.1 RCM 分析

RCM 分析是一種程序，其用途在於蒐集系統從研發階段至部署服役階段所有資料並持續回饋、更新，以改善設計或未來之維修策略。其理論基礎涵蓋下列四個特性[13]：(1)維持系統設備應有之功能；(2)功能異常時能確認可能的失效模式；(3)經由失效模式分析決定系統功能的優先順序；(4)決定合適的預防性維修措施。其目的在於以最低的維修成本，確保系統原有設計之可靠度與安全度。RCM 無法改正原有設計可靠度與安全度之缺陷，僅能以工程修改之方式進行。

綜合Rausand、周光暉、薛家豪、林忠漢[23][14][15][16]等人之分析，RCM 流程可分為下列十個步驟：

(1) 系統選定與資訊蒐集

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。因此在執行 RCM 之前必須考量 RCM 是否較傳統維修計畫對系統更為有利，以及應由系統中何層級開始執行。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。

(2) 定義系統的邊界

系統邊界之定義目的在於確認系統間輸入與輸出之介面。支援與被支援系統之關係應積以歸類劃分，以求相關重要功能不至於闕漏，並避免與鄰近系統發生功能重疊的狀況。系統可再分為次系統、次次系統等，RCM分析中最低層級是為「分析項目」(analysis items)，意指可展現單一功能且獨立之項目。可利用可靠度區塊圖(reliability block diagram)或失效樹分析(FTA)，將系統功能細分為次系統至功能項目等層級。

若分析項目無重要失效模式，則其相關裝備之失效模式連帶可視為不重要。因此分析項目之選定以及明確之定義對於RCM分析之效率影響頗大，應盡量選擇較高層級進行分析，以免過於繁瑣之分析項目性能標準難以定義。

(3) 系統說明及功能方塊圖

系統中是由不同次系統所組成，其各有不同功能。輸出入介面之關係以及相關附屬設備功能之界定，可由功能區塊圖(functional block diagram)之繪製取得。此外尚須確認系統輸出入介面、設備清單與配置、設備歷史檔案。通常可將系統分為下列六種不同功能：

- A. 必要功能(essential) --主要目的，如：水管輸水的功能。
- B. 輔助功能(auxiliary) --支持必要功能，如：水管容納水。
- C. 保護功能(protective) --保護人、裝備、環境，如：壓力安全閥。
- D. 資訊功能(information) --狀態監控、危險警告裝置。
- E. 介面功能(interface) --分析項目和其他項目的連結。
- F. 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。

(4) 關鍵項目選擇

可使用失效樹分析(FTA)、可靠度區塊圖(reliability block diagram)、蒙地卡羅模擬法(Monte Carlo simulation)找出對於系統運作功能重要的項目(Functional significant items, FSI)。另應找出 MCSI(維修成本關鍵項目)，即高失效率、高維修成本、低維修度、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(關鍵維修項目)，而 RCM 後續的分析步驟均以針對 MSI 為主。

(5) 系統功能失效分析

確認並描述系統失效模式(system failure mode)，亦稱為功能失效(functional failure)。失效模式主要有三種類型：

- A. 突發性失效(sudden failures)，此類失效無法由系統設計測試而預測。
- B. 成長性失效(gradual failures)，此類失效可藉由實驗、測試進行預測，代表某一性能範圍之衰退。
- C. 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，又稱為磨耗失效(wearout failure)。

進一步針對各失效模式決定其嚴重度(Criticality)，決定因素有：

- A. S：人員安全(Safety of personnel)。
- B. E：環境衝擊(Environmental Impact)。
- C. A：生產妥善度(Production availability)。
- D. 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)。各因素中若有一個以上為高或中等級，則界定為重要；若四者皆為低或可忽略，且發生頻率亦低，則界定為不重要。

(6) 失效模式、影響以及嚴重度分析(FMECA)

FMECA是一種結構化、預防性的可靠度分析技術，其目的在於確立可能之失效模式，探討失效發生原因，並採取預防性措施並謀求改進之對策，以提高產品之可靠度。以FMECA工作單記錄主要失效模式(dominant failure mode)之資料：操作模式、功能、失效模式、故障影響嚴重程度(以最糟狀況表示)、最糟情況(worst case)發生機率、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。

FMECA是由失效模式、影響分析以及嚴重度分析兩部分組成。通常是以建立FMEA分析表(見表3-1)，對零組件輸出之功能進行分析，找出造成失效之可能原因，最終取得造成系統功能失效之關鍵性組件。

表3-1 FMECA分析表



系 統 _____						日 期 _____						
零組件 _____						分析者 _____						
組件敘述			失效描述			故障造成的影響			失 效 頻 度	補 救 措 施	嚴 重 等 級	備 註
編 號	名 稱	功 能	故 障 型 式	故 障 原 因	偵 測 裝 置	本 身	上 一 級	整 個 系 統				

(7) 決策邏輯樹分析

決策邏輯樹是以系統裝備之功能失效模式分析為基礎，依據完整之分析研判程序，就FMECA界定之關鍵失效模式進行評估，並經由一系列二元性問題回答已確認功能失效之影響，並決定預防性維修之需求。其過程可運用風險評估矩陣(Risk Assessment Matrix)將風險之重要性劃分為五類以及五種可能之機率範圍，於此5X5矩陣可分為三類可能結果，分別是紅色—不可接受的風險，需進行維修行動；黃色—中等風險，建議進行維修行動；綠色—可接受的風險，暫時不採取維修行動；此評估卡可區分為安全、任務達成以及成本損失等三種考量因素。系統中裝備失效模式之決策邏輯樹如圖3-1所示，風險評估卡如表3-2所示。

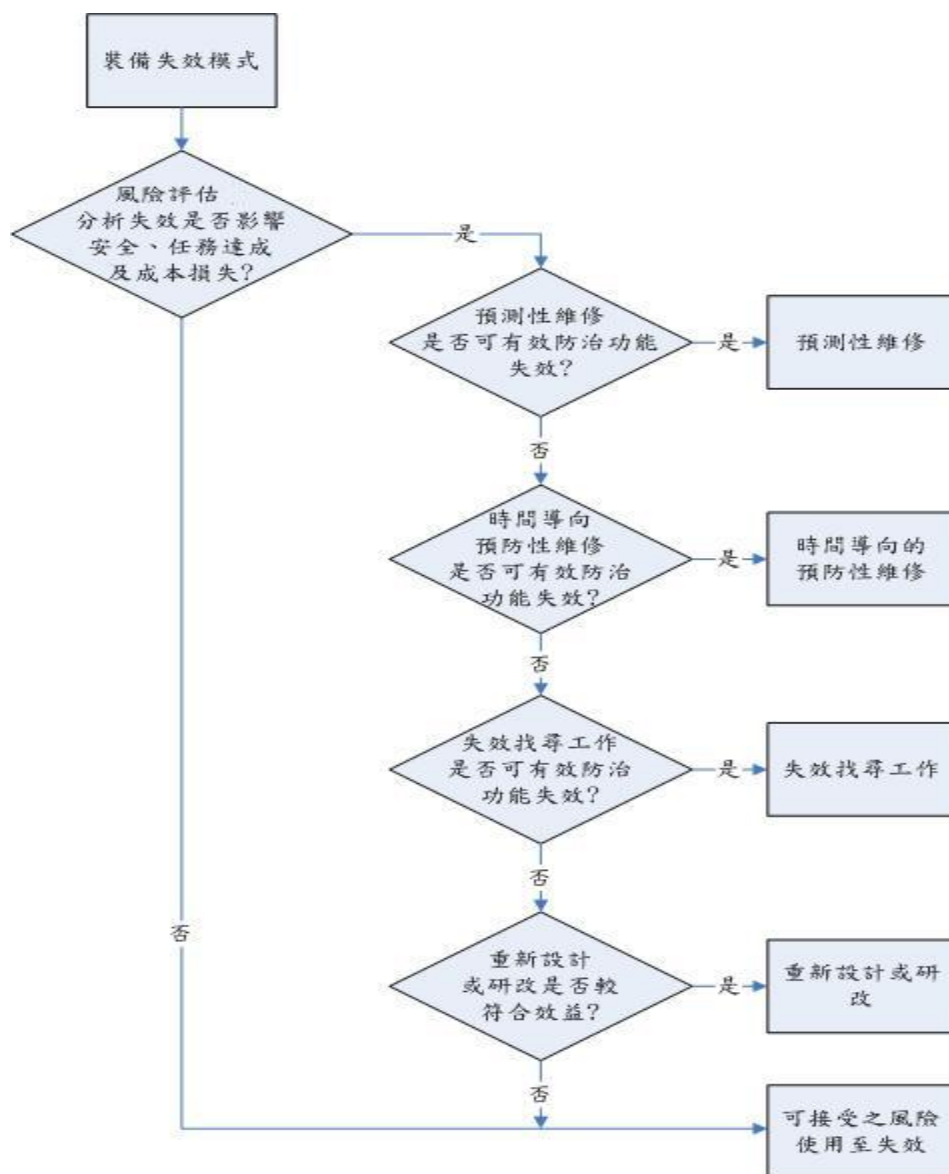


圖 3-1 關鍵失效模式之決策邏輯樹[8]

表 3-2 FMECA 風險矩陣

嚴重等級 β 值	I	II	III	IV
1.00				
0.20				
0.10				
0.01				
0.00				

(8) 選定維修工作

針對主要失效模式(dominant failure mode)，判斷可能之工作性質，如時間導向工作、條件導向工作以及尋錯工作(failure finding tasks)，再決定預防性維修應採取之作業方式。無法歸納於預防性維修之項目，則另行歸類進一步修訂整體維修計畫。預防性維修作業可分為以下五類：

- A. 定期檢視狀況 (scheduled on-condition task)
- B. 定期進行修理 (scheduled overhaul)
- C. 定期進行更換 (scheduled replacement)
- D. 定期進行功能測試 (scheduled function test)
- E. 運轉至故障後再進行汰換 (run to failure)

工作之選定與否是由適宜和有效來加以考量。所謂適宜(Applicable)，指的是該維修工作可將失效機率減至可接受的範圍之內；有效(Effective)，則是該維修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。

(9) 決定維修時距

維修時距之決策，主要係考量預防檢修間隔時間應如何適當安排。預防性維修作業通常為定期實施，在有限的成本限制下追求維修時距之拉長；在可靠度與安全度之考量下追求維修時距之縮短。如何於兩個構面中決定最佳維修時距是非常困難之工作。過去許多文獻曾探討過最適維修時距的模型，然而其多半僅只考慮單一項目，且將失效成本視為可以貨幣量化之。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。

(10) 現場資料蒐集驗證與更新

可靠度資料於系統設計初期多為預設目標，缺乏實據，而RCM最大優點就是將最初之設計規格有系統的分析以及文件化，因而有利於實際操作時修訂。而實

際操作以及維修資料可回饋於分析程序，使RCM獲得更精確的分析結果。此一回饋流程包括三種不同期程：

- A. 短期修正：對初期分析結果進行修訂，將新的失效以及可靠度資料重新輸入。
- B. 中期任務評估：中期修正必須謹慎確認初始之RCM分析選定維修工作是否適宜且有效。利用累積之維修經驗可以發現重要的失效原因，進而修正FMECA資料。
- C. 長期對初始策略之修訂：考量整個流程之分析，包括內外環境之變化，而非局部之修正。

回饋機制建立實行之後，系統如於操作過程中出現嚴重之失效或異常狀況，應對照FMECA之分析進行比較，若發現未涵蓋於分析之中，則必須針對該部分重新實施FMECA以及後續之RCM分析。

3.2 失效樹分析

失效樹分析發軔於美國之國防工業，1960年美國國防部開發義勇兵洲際彈道飛彈時，屢次發生事故而遭受滯礙，過去針對此類事故的研究均著重於事後的事故鑑定及調查，並未對於事故預防、零組件事故機率以及錯誤事件風險量測發展有效之工具。因此美國國防部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，預先知道失誤的所在及其發生的機率。正式定名可追溯至1961年由H. A. Watson以及A. B. Mearns所發表之分析方式，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。

失效樹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，可用作為防止意外事故發生的工具，或事故發生後的調查方法。隨著應用電腦於FTA，大型系統如：飛彈系統、核能發電廠以及軌道運輸系統等均可以進行整合性的分析

失效樹分析之構建，首先應確認不期望發生於系統之意外事故，做為頂端事件(Top Event)。作為頂端事件之意外事故，應為高風險事件，也就是其嚴重程度、發生機率相乘所得之風險值高，同時必須有一定的複雜度。選定頂端事件之後，以各種邏輯符號繪製連結一次要因、二次以及其下各層要因等造成意外事故之要因。分析方向是為由上而下，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，應利用現有的資料，發掘新的資料。有新的資料出現時，得隨時修正。以下就失效樹分析之常用邏輯符號進行簡單的介紹與定義說明。

(1)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。

(2)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 3-2 所示。



圖 3-2 FTA 之長方形符號

(3)圓形符號：代表系統的某基本事件(Basic Event)，無須加以進一步的分析。這些基本事件也許是電路故障或失去功能，如圖 3-3 所示。



圖 3-3 FTA 之圓形符號

(4)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 3-4 所示。

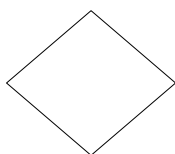


圖 3-4 FTA 之菱形符號

(5)鐘罩形符號：稱為 AND gate。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 3-5 所示。



圖 3-5 FTA 之鐘罩形符號

(6)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 3-6 所示。

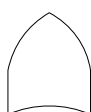


圖 3-6 FTA 之盞形符號

(7)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 3-7 所示。



圖 3-7 FTA 之橢圓形符號

(8)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 3-8 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 3-9 所示。

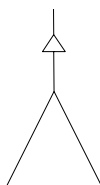


圖 3-8 FTA 之三角形符號(一)transfer-in triangle

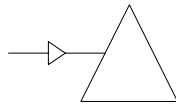


圖 3-9 FTA 之三角形符號(二)transfer-out triangle

失效樹分析中，最高層之事件即為頂端事件(Top Event)，而最底端的事件為基本事件(Basic Event)。用於災害調查時，頂端事件代表災變的結果；用於預防作業時，則為不希望發生的事件。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，即為基本事件。基本事件為失效樹最小、最基本的事件，且各基本事件均為邏輯上的獨立事件。

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

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

最小切割組/集合(Minimum Cut Set)是最小的基本事件的集合。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，某一事故的失效樹可以此一所有最小切集合的集合來表示。

失效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端事件發生的基本事件；就避免頂端事件發生而言，哪些基本事件需予特別注意等問題。最小切集合也許僅含有一個基本事件，也許含有兩個或多個基本事件。含有一個基本事件的最小切集合，稱為一元(one-component)最小切集合；含有兩個基本事件的最小切集合，稱為二元(two-component)最小切集合；含有 n 個基本事件的最小切集合，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本事件皆發生失誤時，才會使頂端事件發生。

就系統安全的角度而言，比較有興趣的是從失效樹中找出最小切集合，以決定哪些基本事件的改善之道及防止順序。但從可靠度的觀點來看，比較關心的是頂端事件不發生的情況。失效樹是表示頂端事件發生的情況，若要表示「頂端事件不發生」的情況，則需把原來失效樹中的 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失效樹的反面，亦即成功樹(Success Tree)。同理，最小切集合的反面就是最小徑集合。最小徑集合是基本事件皆不發生的最小集合，使得頂端事件不致發生。

實施定性分析最簡便的方式，是使用布林代數(Boolean algebra)，以圖 3-10 為例：

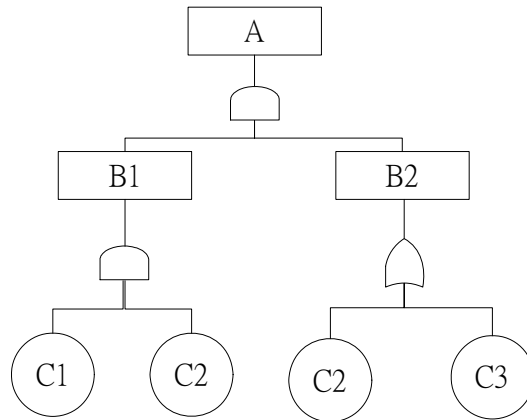


圖 3-10 失效樹定性分析範例

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C₁與C₂的交集，假設C₃機率極低，則簡化後可省略不計。圖 3-11 為圖 3-10 之簡化，其意義相同。

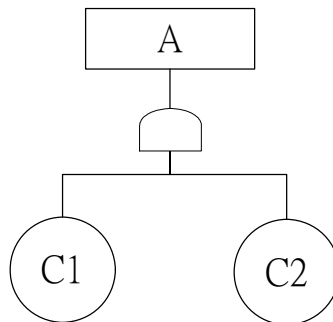


圖 3-11 失效樹定性分析範例之簡化

至於失效樹的定量分析，簡言之，在於求得頂端事件(Top Event)的機率。以下加以說明：

- (1) 如圖 3-12 所示，AND Gate 下互為獨立事件。若 B_1, B_2, \dots, B_n 皆是互為獨立事件(independent event)，則 $P(A) = P(B_1)P(B_2)\cdots P(B_n) = \prod_{i=1}^n P(B_i)$ 。

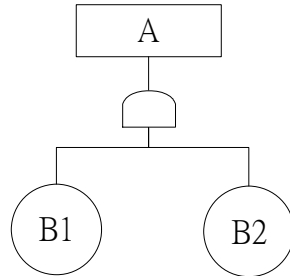


圖 3-12 失效樹定量分析範例之一

- (2) 如圖 3-13 所示，OR Gate 下互為獨立事件。若 B_1, B_2, \dots, B_n 皆是互為獨立事件，則

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

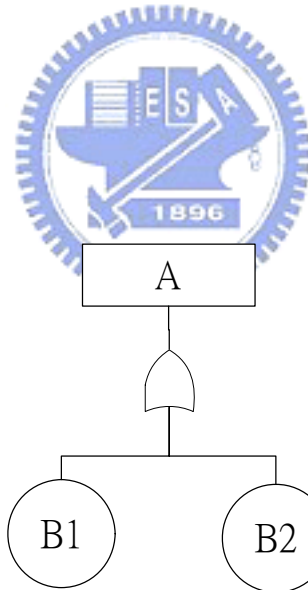


圖 3-13 失效樹定量分析範例之二

失效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，逐步推得頂端事件的發生機率。

3.3 預防維修時距選定模式

對裝備之適度保養可延緩其老化之速度，而維修以及更換零組件可提升系統之可靠度。對於維修作業之規劃而言，如何於適當之時間安排維修作業，以求系統可靠度上升，並避免維修成本過度浪費，是為一重要之課題。預防保養的更換模式可概分為有兩種：固定間隔更換策略以及預定年限更換策略。Elsayed[43]由維修成本、可靠度及停機時間(Total Downtime)，訂定維修時距選定模式。模式之基本假設如下：

- (1) 失效發生進行矯正性維修所耗成本高於預防性維修所耗成本。
- (2) 系統失效率函數隨時兼呈單調成長(具有累積磨損性質)，修妥後視同新品(as good as new)。
- (3) 最小維修(minimal repair)不會改變系統失效率(as bad as old)，因為一個零件維修或更換，對複雜系統而言不影響系統失效率。

3.3.1 固定區間更換策略

固定區間更換策略 (Constant Interval Replacement policy, CIRP) 此種維修模式是一種採用簡易之預防性維修和更換策略，即於固定的時間週期進行更換修，與設備的使用年限(age)無關。在此種策略維修週期中，維修作業分為兩類，一類作業為不管組件使用狀況，只要達到預定時間就進行維修；另一類則為在維修週期內發生失效發生時即進行最少矯正性維修，亦稱為區間更換策略 (Block replacement policy)。本策略每單位時間之維修成本為

$$C(t_p) = \frac{C_p + C_f M(t_p)}{t_p} \quad (3.1)$$

$C(t_p)$ ：當時間為 t_p 更換時，每單位時間所需維修成本期望值

C_p ：執行定期更換時所需之預防性維修成本

C_f ：失效時進行更換所需之矯正性維修成本

$M(t_p)$ ：定期更換時間週期(0, t_p)中，發生失效更換次數之期望值

3.3.2 預定年限更換策略

CIRP型維修策略可能造成固定時距未屆即發生失效狀況，因而進行矯正性維修，然又再次於固定時距進行預防性維修，將造成更換件壽命之浪費。Blanks and Tordan[44]於1986年提出預定年限維修策略。此策略不同於CIRP型維修策略，預定年限維修策略是將每次維修效果視為更新作業（as good as new），也就是經失效維修後，維修時間重新計算，如例如系統預定維修間隔 t_p ，若工作到時間 TI ($TI < t_p$) 即發生故障，即進行維修，修復後系統繼續使用，則下一個維修間隔從修護後開始計算。

預定年限維修假設備使用至預定維修時間 t_p 時，其可靠度將退化至 $R(t_p)$ ，可視為系統在 t_p 時還存活機率，此時系統故障機率為 $1-R(t_p)$ ；若在 t_p 時進行預防性維修，則其單位時間維修成本為 $C(t_p)$ ：[預防性維修成本 (C_p) X系統存活率+失效維修成本X系統失效率]／期望年限週期長度。

年限週期 t_p 之維修期望成本為

$$C_p R(t_p) + C_f [1 - R(t_p)] \quad (3.2)$$

年限週期之期望值為

$$t_p R(t_p) + M(t_p) [1 - R(t_p)] \quad (3.3)$$

單位時間維修成本 $C(t_p)$ 為

$$C(t_p) = \frac{C_p R(t_p) + C_f [1 - R(t_p)]}{t_p R(t_p) + M(t_p) [1 - R(t_p)]} \quad (3.4)$$

$$C(t_p) = \frac{C_p R(t_p) + C_f [1 - R(t_p)]}{\int_0^{t_p} R(t) dt} \quad (3.5)$$

$R(t)$ ：設備可靠度函數

$M(t_p) = \int_0^{t_p} R(t) dt$ ：設備開始使用至預定更換年限時間 t_p 之失效時間長度之期望值

3.4 維修階層分析

維修階層分析(Level Of Repair Analysis, LORA)通常應用於分析各維修活動是否具有成本經濟效益。圖 3-14 說明了維修階層分析決策流程，流程中包括五個決策點：(1)在 O 階層維修、(2)在 I 階層維修、(3)在 D 階層維修、(4)在失效點報廢汰除、(5)合約商維修。其中前三項決策點由系統運用單位就成本進行考量，後二項則在系統設計階段即已設定標準。

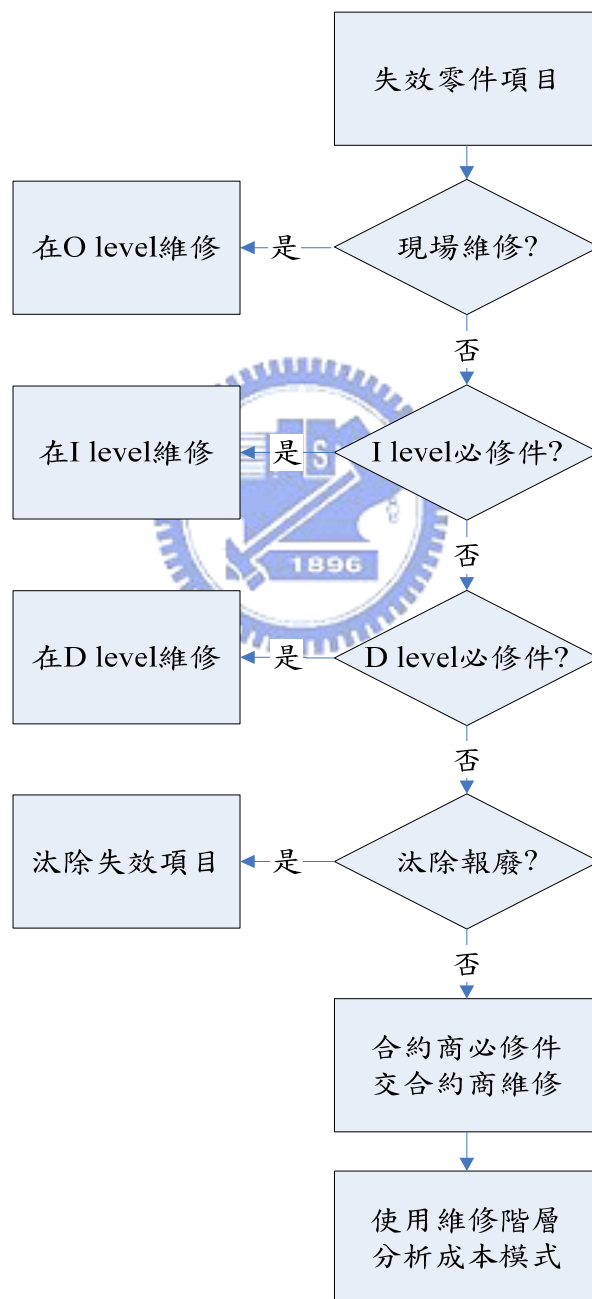


圖 3-14 維修階層分析決策流程圖

經過決策邏輯樹之五個決策點分析後，仍難以判定適當維修階層者，即適用維修階層分析。進行維修階層分析的系統零件，應事先收集平均操作時間、獲得成本(包含設計研發與生產)、各維修層級工資、庫儲成本、場站成本(軟硬體)、零件運輸包裝成本、汰除成本、營運損失成本等調整依據。而後就諸項可量化為成本之項目，進行維修總成本之估算，維修階層分析表如表 3-3。另可進行敏感度分析，針對改善後之調整依據項目代換後求得改善後總成本，以利評估該改善作業是否符合成本經濟效益。[17]

表 3-3 維修階層分析表

評估標準	O 級維修	I 級維修	D 級維修	失效汰除	說明或理由
獲得成本 (設計研發與生產)					
維修工資					
庫儲成本					
場站成本(軟硬體)					
維修訓練成本					
零件運輸包裝成本					
汰除成本					
營運損失成本					
估算總成本					

3.5 研究步驟與流程

本節說明本研究本章前列各節所述之研究方法，整合而成之研究步驟以及流程。

3.5.1 研究步驟

本研究在執行上主要可分為以下步驟加以進行：

(1) 確認研究問題與研究目的，並界定研究範圍

由於電聯車系統龐大繁雜，受限於本研究之時間與能力，無法進行整體系統之 RCM 分析，因此選擇重點系統進行研究。考量台鐵局近年來電聯車事故數呈不正常增加之趨勢，而未來都會區鐵路捷運化將大量運用電聯車，以軌道區間容量之特性而言，一旦於站間故障即佔用路線造成路塞，可見其動力系統之可靠度對於列車正常營運之影響甚大；另一方面，台鐵局正在檢討其維修階層並欲進行機務單位組織調整，因此本研究以電聯車動力系統作為 RCM 分析以及排定維修階層之研究對象。

(2) 製作系統功能區塊圖以及失效樹分析

由電聯車動力系統之相關技術資料以及台鐵局嘉義機務段之維修紀錄，取得電聯車動力系統之各項功能、失效模式以及可靠度資料，並製作系統功能區塊圖，以尋求電聯車動力系統功能與失效項目。使用失效樹分析尋求電聯車動力系統失效關鍵項目，配合維修成本估算，尋求關鍵維修項目。

(3) 應用失效模式、影響以及嚴重度分析方法，針對關鍵維修項目進行分析，以獲得主要失效模式

由台鐵局嘉義機務段檢查股、修繕股、台北機廠電力工區等，直接接觸 EMU500 型電聯車動力系統維修單位之作業人員，協助填寫 FMECA 分析表，藉以分析並判斷關鍵維修項目各失效模式之嚴重度高低。

(4) 選擇適當之預防性維修作業以及維修間隔

分析得知關鍵維修項目之主要失效模式後，選擇適當之預防性維修作業，並利用韋伯分析就關鍵維修項目排定適合之維修間隔。

(5) 進行維修階層調整

列出關鍵維修項目之零組件更新成本、維修成本、人工成本、設備支援成本、運用停止期間造成之營運損失成本，就最適維修間隔以及對應工時對維修階層進行適當安排。

(6) 結論與建議

根據以上之研究步驟，對台鐵局電聯車動力系統之關鍵維修項目以及維修階層調整提出建議，以求在可靠度不致降低之狀況下提升維修績效、並於維修階層調整中節省維修成本。並可以此模式套用至電聯車其他系統，完成電聯車系統之RCM分析以及維修階層調整。

3.5.2 研究流程

本研究之研究工作項目與研究流程，如圖 3-15 所示。

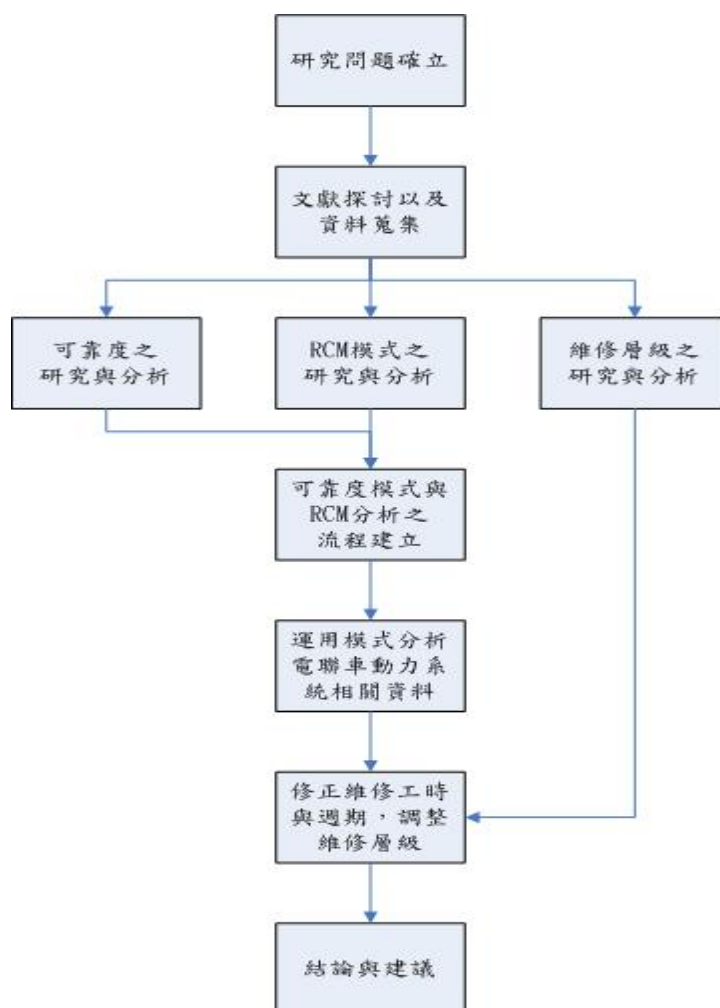


圖 3-15 研究流程圖

第四章 RCM 分析模式建立

本章針對 EMU500 型電聯車動力系統進行可靠度集中維修分析，4.1 節是為本研究之研究對象系統分析。4.2 節進行失效樹分析，尋求電聯車動力系統失效關鍵項目，配合維修成本估算，尋求關鍵維修項目。4.3 節以失效模式、影響以及嚴重度分析方法(FMECA)分析並判斷關鍵維修項目各失效模式之嚴重度高低。

4.1 電聯車系統分析

本研究以台鐵局所屬 EMU500 型電聯車之動力系統為主要研究對象。本型車是以四節功能互異之車廂為一單元之編組方式，包括駕駛馬達車附設車長室，形式為 EMC500；電力車，形式為 EP500；拖車，形式為 ET500，駕駛馬達車附設機械室，形式為 EM500。四輛車編組後合稱 EMU500 型電聯車(Electrical Multiple Unit, EMU)。

本型電聯車之子系統可分為車體系統、行走裝置、煞車系統、動力系統、保安系統。各車搭載之動力系統主要設備如表 4-1 所示，分別敘述如下：EP500 型搭載高壓設備元件(集電弓、真空斷路器、高壓襯套等)、主變壓器(含一次側繞組，二次側繞組、輔助繞組)，主要功能在於將來自電車線之高壓電變壓變流，供給位於 EMC、EM500 型之動力換流器。

表 4-1 EMU500 型各車搭載之動力系統主要設備

車輛形式	EP500	EMC500	EM500
動力系統 主要設備	集電弓 高壓變壓器 高壓襯套 真空斷路器 主變壓器 (含一次側繞 組、二次側繞 組、 輔助繞組)	動力換流器*2 (含半控制之 閘流晶體電橋、 電壓源 D.C.link 電路、 反向變流器)	動力換流器*2 (含半控制之 閘流晶體電橋、 電壓源 D.C.link 電路、 反向變流器)

EMC500 型搭載兩組動力換流器(由半控制之閘流晶體電橋、電壓源 D.C.link 電路、反向變流器組成)，每組動力換流器供給兩具牽引馬達，共計四具牽引馬達。EM500 型搭載設備同於 EMC500 型，此二型車為負責列車牽引之動力車(motor car)，EP500 與 ET500 型是為無動力拖車，換算本型電聯車組之動車比為

50%；而動力車均為全動軸設計，因此本型車之動軸比亦為 50%，較高之動車比以及動軸比代表較佳之加速性能。本型車之最高速度為 110km/h，滿載時最大加速率在 50km/h 前，達到平均 $0.8m/s^2$ 的水準，足堪與臺北捷運系統之電聯車相比擬，是為台鐵營運車輛中，加速度最佳者。此一優異加速能力，是都會區鐵路捷運化不可或缺之條件。由各組件之主要功能，可將動力系統再分為高壓設備次系統、主變壓器次系統、牽引動力用動力換流器次系統，圖 4-1 為 EMU500 型電聯車動力系統功能方塊圖。

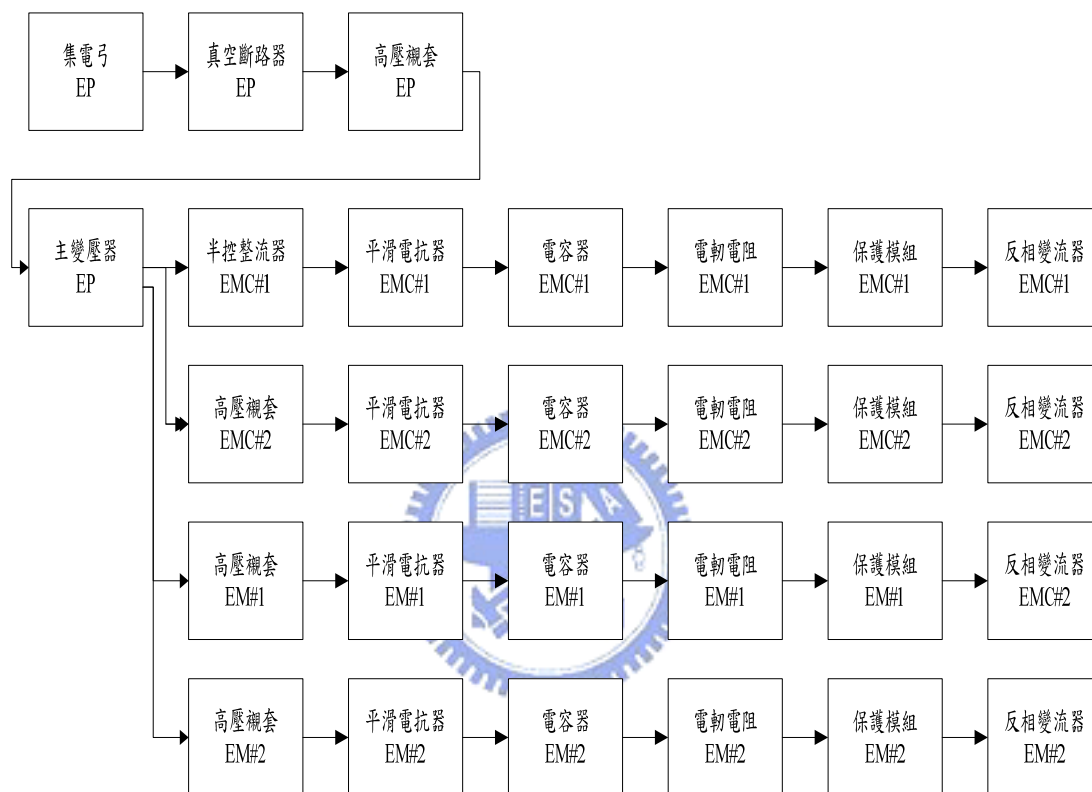


圖 4-1 EMU500 型電聯車動力系統示意圖

4.2 動力系統失效樹分析

本節進行分別針對動力系統之兩個次系統進行失效樹之構建，以及其後續之定性、定量分析。失效樹定性分析指的是推導失效樹之最小切割組(Minimal Cut Set)；定量分析指的是頂端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)。

4.2.1 展開失效樹結構

在構建各系統功能失效的失效樹之前，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) 高壓設備次系統故障，導致列車無法引電

集電弓係可摺疊之單邊框架式集電弓，以服務風缸之空氣壓力舉升。集電舟上覆碳刷，與電車線接觸，引導 25000V AC 高壓電，流經高壓變壓器時，由高壓變壓器偵測電車線電壓值，如低於 17500V 或高於 27500V，會導致真空斷路器切開。真空斷路器以真空室作為一大型之絕緣開關，如保護電路作用則會切開集電弓與主變壓器間之通路。高壓襯套穿過 EP 車車頂，位於車外之真空斷路器與車內之主變壓器間，是為車體高壓絕緣之設備。本次系統均為串聯元件，失效樹圖位於圖 4-2。

(2) 主變壓器次系統、牽引動力用換流器次系統故障，導致列車無法供電

主變壓器位於 EP 車內，接受來自引電系統之 25000V AC 高壓電，並由四條二次側繞組降壓，將 17000V AC 電力供應予馬達車。主變壓器以油浴方式進行冷卻，如其油泵或涼油器故障，即有超溫之危險，此時將啟動保護電路致使真空斷路器切開。EMC 以及 EM 等馬達車，搭載牽引動力用換流器，每一換流器具有兩個模組，各自供應其專屬之動力轉向架。換流器內設有半控整流器、平滑電抗器、電容器、反相變流器等設備，可將來自主變壓器二次側繞組之單相 17000V AC 變換為三相 440V AC，作為牽引馬達供電來源。失效樹圖如圖 4-2、4-3、4-4。

以各次系統功能失效在做為失效樹的頂端事件加以展開時，為避免失效樹結構過於複雜，因此將失效樹展開層級定在元件/裝備(Component)層級，意即以台鐵電聯車維修技術能力所及之最小更換單元(Least Replacement Unit, LRU)為主。而其計算基準是以台鐵局電聯車維修最高層級之台北機廠為主。

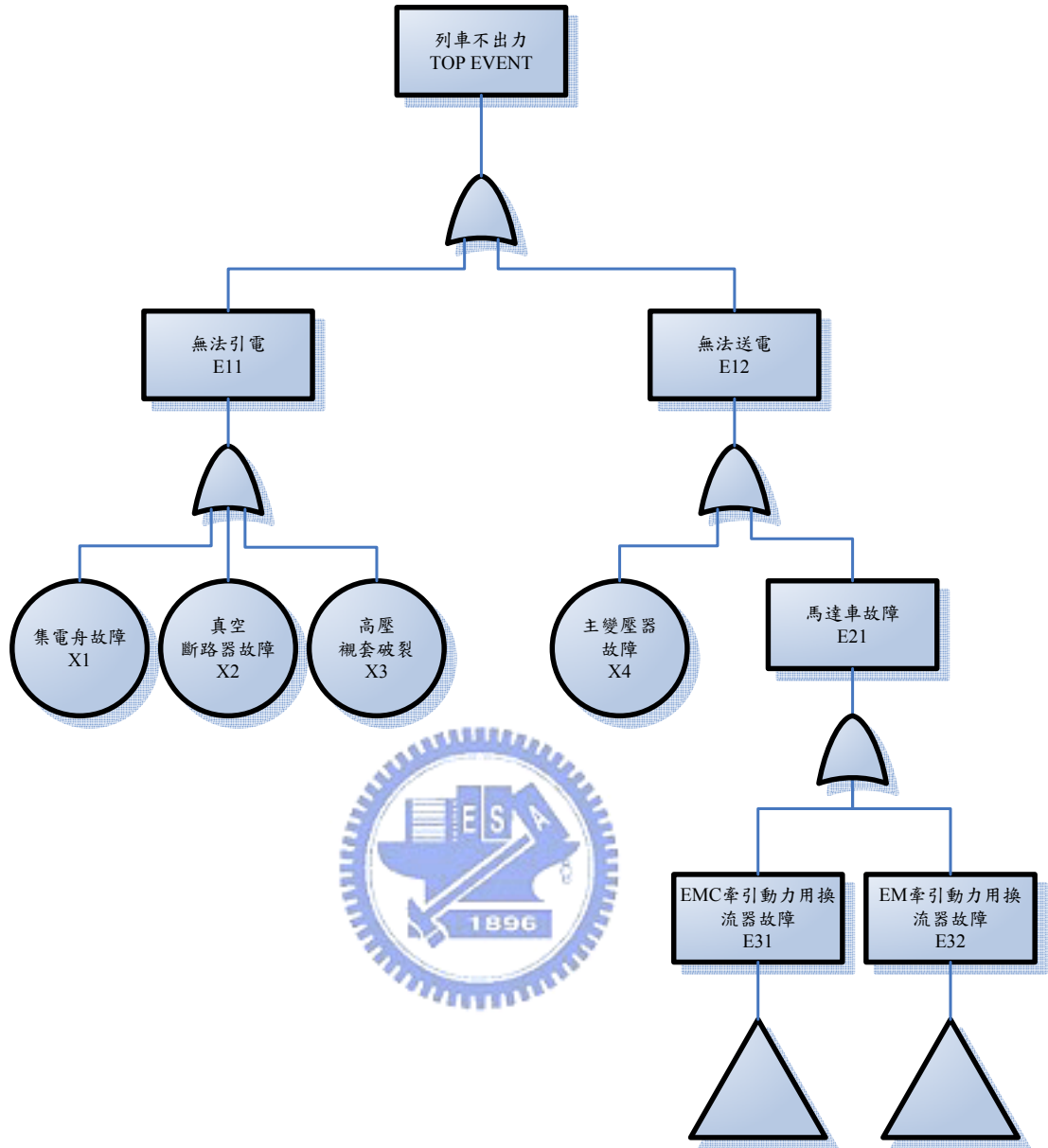


圖 4-2 動力系統之失效樹結構圖

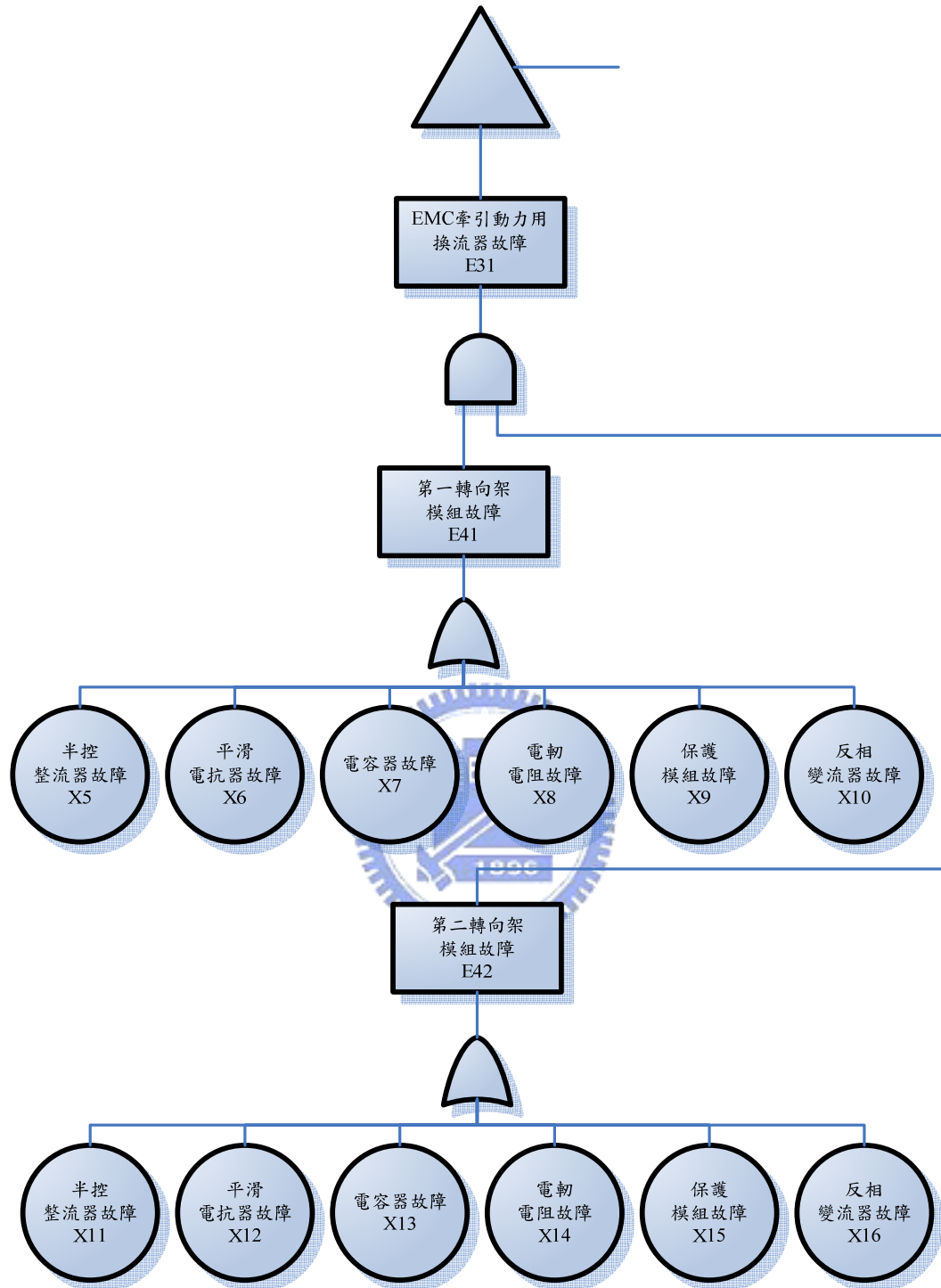


圖 4-3 牽引動力用換流器次系統失效樹結構圖（一）

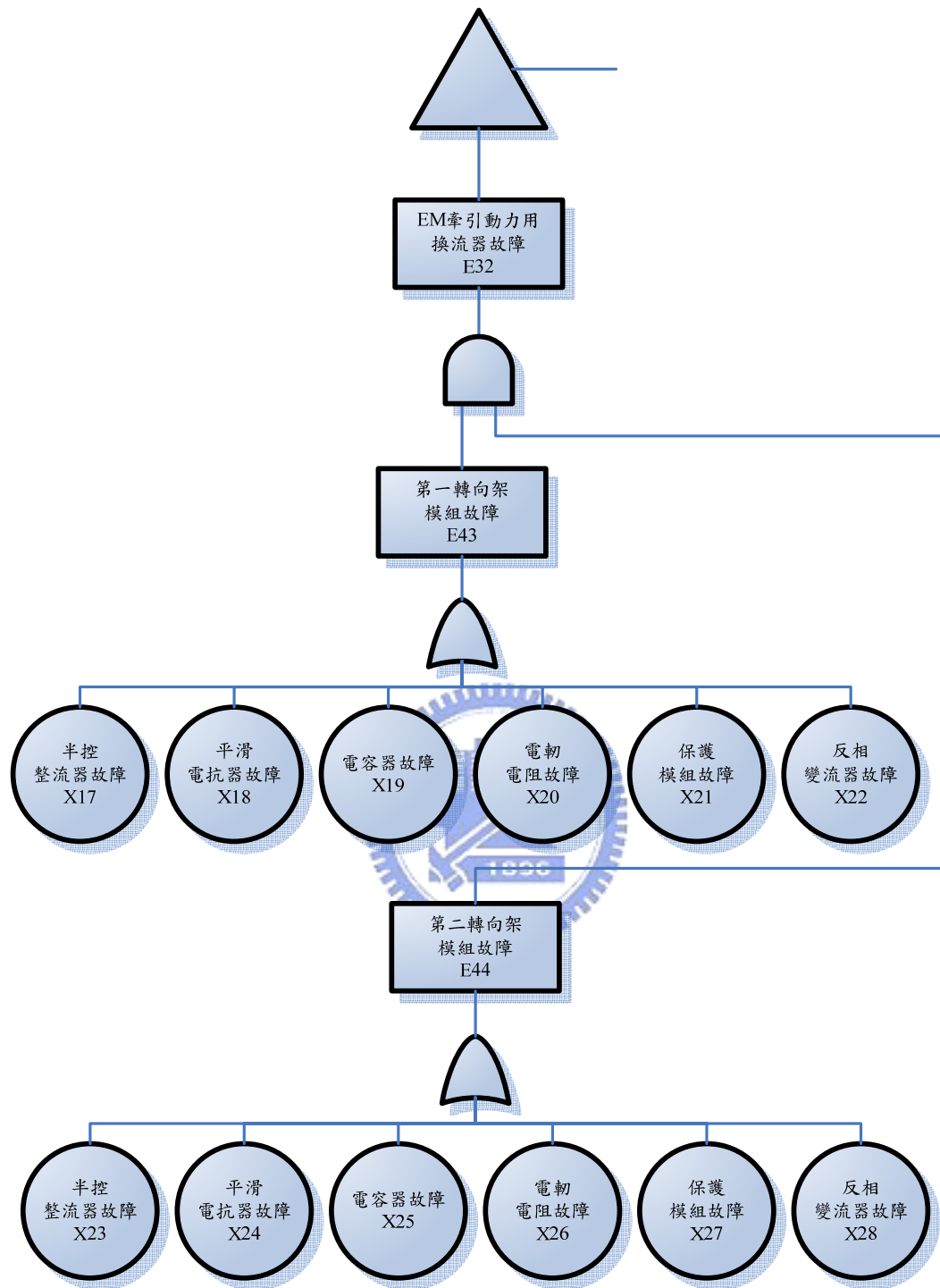


圖 4-4 牽引動力用換流器次系統失效樹結構圖 (二)

4.2.2 失效樹之定性分析

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。觀察所建立完成之失效樹可發現，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：

$$X \cdot X = X$$

$$X + X = X$$

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

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

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



以下針對各失效樹進行最小切割組的推導。

- (1) 高壓設備次系統故障，導致列車無法引電

$$E_{11} = X_1 + X_2 + X_3$$

- (2) 主變壓器、牽引動力用換流器次系統故障，導致列車無法供電

$$E_{41} = X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10}$$

$$E_{42} = X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16}$$

$$E_{43} = X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} + X_{21} + X_{22}$$

$$E_{44} = X_{23} + X_{24} + X_{25} + X_{26} + X_{27} + X_{28}$$

$$\begin{aligned}
E_{12} &= X_4 + E_{21} \\
E_{21} &= E_{31} + E_{32} \\
E_{31} &= E_{41} \times E_{42} \\
&= (X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10}) \times (X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16}) \\
&= X_5 X_{11} + X_5 X_{12} + X_5 X_{13} + X_5 X_{14} + X_5 X_{15} + X_5 X_{16} + X_6 X_{11} + X_6 X_{12} \\
&\quad + X_6 X_{13} + X_6 X_{14} + X_6 X_{15} + X_6 X_{16} + X_7 X_{11} + X_7 X_{12} + X_7 X_{13} + X_7 X_{14} \\
&\quad + X_7 X_{15} + X_7 X_{16} + X_8 X_{11} + X_8 X_{12} + X_8 X_{13} + X_8 X_{14} + X_8 X_{15} + X_8 X_{16} \\
&\quad + X_9 X_{11} + X_9 X_{12} + X_9 X_{13} + X_9 X_{14} + X_9 X_{15} + X_9 X_{16} + X_{10} X_{11} + X_{10} X_{12} \\
&\quad + X_{10} X_{13} + X_{10} X_{14} + X_{10} X_{15} + X_{10} X_{16}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_{32} &= E_{43} \times E_{44} \\
&= (X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} + X_{21} + X_{22}) \times (X_{23} + X_{24} + X_{25} + X_{26} + X_{27} + X_{28}) \\
&= X_{17} X_{23} + X_{17} X_{24} + X_{17} X_{25} + X_{17} X_{26} + X_{17} X_{27} + X_{17} X_{28} + X_{18} X_{23} + X_{18} X_{24} \\
&\quad + X_{18} X_{25} + X_{18} X_{26} + X_{18} X_{27} + X_{18} X_{28} + X_{19} X_{23} + X_{19} X_{24} + X_{19} X_{25} + X_{19} X_{26} \\
&\quad + X_{19} X_{27} + X_{19} X_{28} + X_{20} X_{23} + X_{20} X_{24} + X_{20} X_{25} + X_{20} X_{26} + X_{20} X_{27} + X_{20} X_{28} \\
&\quad + X_{21} X_{23} + X_{21} X_{24} + X_{21} X_{25} + X_{21} X_{26} + X_{21} X_{27} + X_{21} X_{28} + X_{22} X_{23} + X_{22} X_{24} \\
&\quad + X_{22} X_{25} + X_{22} X_{26} + X_{22} X_{27} + X_{22} X_{28}
\end{aligned}$$

由失效樹布林代數計算結果可知，電聯車動力系統之最小切割組，分為一元切割組以及二元切割組，其中一元切割組分別為 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 ，即集電弓、真空斷路器、高壓襯套、主變壓器之失效；二元切割組則較為複雜，為EMC以及EM等馬達車牽引動力用換流器之第一以及第二轉向架模組之原件失效事件相乘，如 (X_5, X_{11}) 、 (X_5, X_{12}) 、 (X_5, X_{13}) 、 (X_5, X_{14}) 、 (X_5, X_{15}) 、 (X_5, X_{16}) 、 (X_6, X_{11}) 、 (X_6, X_{12}) 、 (X_6, X_{13}) 、 (X_6, X_{14}) 、 (X_6, X_{15}) 、 (X_6, X_{16}) 、……、 (X_{22}, X_{23}) 、 (X_{22}, X_{24}) 、 (X_{22}, X_{25}) 、 (X_{22}, X_{26}) 、 (X_{22}, X_{27}) 、 (X_{22}, X_{28}) ，共有 72 組，加上一元切割組合計為 76 組，亦可視為 76 種狀況，其中任一狀況之發生，均會導致實現頂端事件，亦即「列車動力不足」。然而二元切割組發生之條件，在於兩件基本事件均同時成立，以 (X_5, X_{11}) 此一最小切割組為例，且 X_5 與 X_{11} 互為獨立事件時，其發生機率是為 $P(X_5) \times P(X_{11})$ ，若各事件之發生機率相等，則顯然二元切割組之發生機率將低於僅含有單一事件之一元切割組發生機率。

另一方面，由於失效樹中，引電與送電次系統是處在 OR 閘之下，因此彼此之間並無共同之失效原因；送電系統中，各動力換流器之轉向架模組組成均相同，且同一動力換流器之兩個轉向架模組係處於 AND 閘之下，因此半控整流器、平滑電抗器、電容器、電軔電阻、保護模組、反相變流器之失效，對動力換流器而言，均具有共同原因之性質。

4.2.3 失效樹之定性分析

失效率和元件處於失效狀態(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

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

此時元件的平均失效時間(Mean Time Between Failure)為

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

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，等於元件快要失效時會急速攀升。因此，如果選取的時間長度與元件的平均失效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) 本研究以動力系統發生失效機率最高的時間點做為參考。在可靠度研究領域中，MTBF 被視為是最有可能發生失效的使用時間。由台鐵局提供資料可知 MTBF 為 7563 小時。

獲得各基本事件和頂端事件的發生機率之後，定量分析應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端事件發生的影響程度大小，其間之分別在於，重要性探討的重點在於當頂端事件發生時，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，頂端事件發生的機率大小。分別說明重要性以及關鍵性指標計算方式如下：

(1) 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} 表示在頂端事件已發生的情況下，內含 X_i 的切割組處於失效狀態； $\Pr(T)$ 則代表頂端事件發生機率。

(2) 事件關鍵性：關鍵性愈高的基本事件，些微的改善即可減低頂端事件的發生，因此應優先執行設計改善。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。關鍵性指標計算方式為 $C_{X_i} = \Pr(X_i) \times \Pr(T | X_i)$ 。

本研究對各基本事件進行事件重要度以及關鍵性事件之計算，結果如表 4-2 所示。由分析結果可知，集電弓、主變壓器、各動力轉向架模組之反相變流器之關鍵性以及重要度均高，其中以集電弓失效關鍵性、重要度均為最高；主變壓器失效重要度高於反相變流器；反相變流器失效關鍵性高於主變壓器。以上三者是為電聯車動力系統中，應加強檢修之裝備。

表 4-2 動力系統失效樹定量分析結果

事件項目	失效率 (百萬小時/ 次)	發生機率 (MTBF=7563h)	事件重要度	事件關鍵性
X1.集電弓	8.8889	0.067227	0.27639	0.067227
X2.真空斷路器	1.6667	0.012605	0.05182	0.012605
X3.高壓襯套	3.3333	0.025210	0.10364	0.025210
X4.主變壓器	6.6667	0.050420	0.20729	0.050420
X5.半控整流器 EMC#1	3.4722	0.026260	0.02279	0.010240
X6.平滑電抗器 EMC#1	0.55556	0.004202	0.00365	0.001638
X7.電容器 EMC#1	0.27778	0.002101	0.00182	0.000819
X8.電軻電阻 EMC#1	1.1111	0.008403	0.00729	0.003277
X9.保護模組 EMC#1	3.4722	0.026260	0.02280	0.010240
X10.反相變流器 EMC#1	19.028	0.143910	0.12492	0.056116
X11.半控整流器 EMC#2	3.4722	0.026260	0.02279	0.010240
X12.平滑電抗器 EMC#2	0.55556	0.004202	0.00365	0.001638
X13.電容器 EMC#2	0.27778	0.002101	0.00182	0.000819
X14.電軻電阻 EMC#2	1.1111	0.008403	0.00729	0.003277
X15.保護模組 EMC#2	3.4722	0.026260	0.02280	0.010240
X16.反相變流器 EMC#2	19.028	0.143910	0.12492	0.056116
X17.半控整流器 EM#1	3.4722	0.026260	0.02279	0.010240
X18.平滑電抗器 EM#1	0.55556	0.004202	0.00365	0.001638

X19.電容器 EM#1	0.27778	0.002101	0.00182	0.000819
X20.電軻電阻 EM#1	1.1111	0.008403	0.00729	0.003277
X21.保護模組 EM#1	3.4722	0.026260	0.02280	0.010240
X22.反相變流器 EM#1	19.028	0.143910	0.12492	0.056116
X23.半控整流器 EM#2	3.4722	0.026260	0.02279	0.010240
X24.平滑電抗器 EM#2	0.55556	0.004202	0.00365	0.001638
X25.電容器 EM#2	0.27778	0.002101	0.00182	0.000819
X26.電軻電阻 EM#2	1.1111	0.008403	0.00729	0.003277
X27.保護模組 EM#2	3.4722	0.026260	0.02280	0.010240
X28.反相變流器 EM#2	19.028	0.143910	0.12492	0.056116



4.3 失效模式、影響以及嚴重度分析

失效模式、影響與嚴重度分析(Failure Modes, Effects and Criticality Analysis)發展始於 1950 年代初期，隨飛機引擎由螺旋槳引擎變更為噴射引擎而開發的設計分析方法。由於噴射機之推力遠較螺旋槳為大，控制氣動力面之操縱系統所需力量亦必須隨之增大，因而必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，美國航太總署執行阿波羅計畫時，可靠度以及安全管理即為契約之重要條款，FMECA 被指定予合約商實施，因此廣泛應用於美國之太空計畫。

美國國防部於 1970 年代開始應用 FMECA，並於 1974 年出版正式之 FMECA 標準書刊，將之定名為 MIL-STD-1629，後於 1980 年修定更新為 MIL-STD-1629A。1985 年國際電工委員會(International Electro-technical Commission, IEC)出版 IEC812「系統可靠度分析技術—失效模式與效應分析程序」即是參考美軍標準 MIL-STD-1629A 加以修改而成之 FMEA 作業程序，其內容除對電子、機械及油壓等設備或零件的 FMEA 做說明外，同時提到可將 FMEA 應用在軟體及人員功能的可靠度分析上。

美國汽車業界亦於 1970 年代開始應用 FMECA，福特汽車公司於 1977 年公佈 FMEA 的作業標準於教育手冊中，教導員工此技術之運用，隨後通用汽車、克萊斯勒汽車公司在美國品管協會汽車分會(ASQC)及汽車工業策進會(Auto Industry Action Group, AIAG)的贊助下進行各汽車作業規範及表單的整合；1993 年上述單位制訂了一套「潛在失效模式與效應分析參考手冊」(Potential Failure Mode Effects Analysis Reference Manual)，本手冊於 1995 年完成第二版修訂，成為汽車工程學會(Society for Automotive Engineers, SAE)之正式技術文件，並定名為 SAE J-1739。

本研究採用 MIL-STD-1629A 之程序，對 EMU500 型電聯車動力系統進行失效模式、影響分析(FMEA)。於分析表中依序填入組件敘述、失效狀態以及效應、補救措施、嚴重等級、失效效應機率等資料。其中嚴重等級依照台鐵內部對於列車事故延誤之判定標準加以分級，以求符合營運現況，如表 4-3 所示；失效效應機率則採用 MIL-STD-1629A 標準加以分級，如表 4-4 所示。FMEA 分析表如表 4-5~4-14 所示。

表 4-3 嚴重等級分配表

失效嚴重程度	嚴重等級
造成其他系統損壞	I
於 80 分以上方能排除	II
於 5~80 分內完成排除	III
於 0~5 分內完成排除	IV

表 4-4 失效效應機率分配表

系統功能影響	β
系統完全喪失	1.00
極可能喪失	0.20
可能喪失	0.10
幾乎不可能喪失	0.01
對系統無影響	0.00

表 4-5 集電弓 FMEA 分析表

系統 <u>高壓設備</u>											
零組件 <u>集電弓</u>											
組件敘述		失效描述			失效效應			補救措施	嚴重等級	失效效應機率	備註
編號	功能	模式	原因	偵測	本身	上一層	系統				
A1	自電車線引入 25000V 高壓電	(1)無法舉升	空氣壓力不足	自測	無法作動	無法作動	無法引電	無	II	1.00	
		(2)接觸不良	集電舟碳刷破損	自測	無法作動	無法作動	無法引電	無	II	1.00	

表 4-6 真空斷路器 FMEA 分析表

系 統 <u>高壓設備</u>											
零組件 <u>真空斷路器</u>											
組件敘述		失效描述			失效效應			補救措施	嚴重等級	失效效應機率	備註
編號	功能	模式	原因	偵測	本身	上一層	系統				
A2	以真空方式對集電弓與主變壓器間進行絕緣及消弧	(1)強制不閉合	保護電路作用	微動開關	無法作動	無法作動	無法引電	保護電路復位，如無效以手動開關強制閉合	III	1.00	

表 4-7 高壓襯套 FMEA 分析表

系 統 <u>高壓設備</u>											
零組件 <u>高壓襯套</u>											
組件敘述		失效描述			失效效應			補救措施	嚴重等級	失效效應機率	備註
編號	功能	模式	原因	偵測	本身	上一層	系統				
A3	作為真空斷路器輸出端以及主變壓器輸入端之電流承載	(1)無法承載電流	襯套破裂	自測	無法作動	無法作動	無法引電	無	II	0.20	

表 4-8 主變壓器 FMEA 分析表

系統 <u>供電系統</u>											
零組件 <u>主變壓器</u>											
組件敘述		失效描述			失效效應			補救措施	嚴重等級	失效效應機率	備註
編號	功能	模式	原因	偵測	本身	上一層	系統				
B1	輸入 25000V AC 高壓電變壓變流為 1500V DC 輸出	(1)油流無法降溫	油泵故障	微動開關	功能不全	功能不全	可能影響出力	無	II	0.10	
			涼油器故障	微動開關	功能不全	功能不全	可能影響出力	無	II	0.10	
		(2)二次繞組 EMC 端故障	保險絲燒毀	微動開關	無法變壓	功能不全	EMC 端不出力	無	II	0.10	
		(3)二次繞組 EM 端故障	保險絲燒毀	微動開關	無法變壓	功能不全	EM 端不出力	無	II	0.10	

表 4-9 半控整流器 FMEA 分析表

系 統 <u>牽引動力用換流器</u>											
零組件 <u>半控整流器</u>											
組件敘述		失效描述			失效效應			補救措施	嚴重等級	失效效應機率	備註
編號	功能	模式	原因	偵測	本身	上一層	系統				
C1	將主變壓器二次側 AC1700V 之電壓經過匣流體以及二極體轉為 DC1100V 以上之電壓	(1)未點火而有電流通過	匣流體短路	微動開關	無法整流	無法作動	動力轉向架不出力	隔離	III	0.10	
			二極體短路	微動開關	無法整流	無法作動	動力轉向架不出力				

表 4-10 平滑電抗器 FMEA 分析表

系 統 <u>牽引動力用換流器</u>											
零組件 <u>平滑電抗器</u>											
組件敘述		失效描述			失效效應			補救措施	嚴重等級	失效效應機率	備註
編號	功能	模式	原因	偵測	本身	上一層	系統				
C2	減輕抑制電路及電容器突增電流	(1)電抗作用不良	電流超載燒毀	微動開關	無法穩流	無法作動	動力轉向架不出力	隔離	III	0.10	

表 4-11 電容器 FMEA 分析表

系 統 <u>牽引動力用換流器</u>											
零組件 <u>電容器</u>											
組件敘述		失效描述			失效效應			補救措施	嚴重等級	失效效應機率	備註
編號	功能	模式	原因	偵測	本身	上一層	系統				
C3	平穩電壓、除去雜波、提供瑪達足夠之轉矩電源	(1)放電不良	電流超過容量	微動開關	無法放電	無法作動	動力轉向架不出力	隔離	III	0.10	

表 4-12 電軔電阻 FMEA 分析表

系 統 <u>牽引動力用換流器</u>											
零組件 <u>電軔電阻</u>											
組件敘述		失效描述			失效效應			補救措施	嚴重等級	失效效應機率	備註
編號	功能	模式	原因	偵測	本身	上一層	系統				
C4	於速控模式下，接受電動機轉為發電機之電能，加以消耗	(1)超載無法消耗電能	電阻超載	微動開關	無法散熱	過負載切斷相關馬達群出力	動力轉向架不出力	改為牽引力控制	IV	0.01	

表 4-13 保護模組 FMEA 分析表

系 統 <u>牽引動力用換流器</u>											
零組件 <u>保護模組</u>											
組件敘述		失效描述			失效效應			補救措施	嚴重等級	失效效應機率	備註
編號	功能	模式	原因	偵測	本身	上一層	系統				
C5	異常電壓達 2050V 時，產生觸發訊號使匣流體導通，將異常電壓短路	(1)異常訊號	匣流體短路	微動開關	產生錯誤觸發訊號	DC-link 短路	動力轉向架不出力	復位無效後隔離	III	0.1	

表 4-14 反向變流器 FMEA 分析表

系 統 <u>牽引動力用換流器</u>											
零組件 <u>反向變流器</u>											
組件敘述		失效描述			失效效應			補救措施	嚴重等級	失效效應機率	備註
編號	功能	模式	原因	偵測	本身	上一層	系統				
C6	將電壓變壓變頻，觸發 GTO 轉換為三相 AC 供給牽引馬達	(1)無法變流	GTO 燒毀	微動開關	無法變流	無法作動	動力轉向架不出力	隔離	III	0.1	

整合 FMEA 以及關鍵性分析後，將各分析項目填入風險矩陣，如表 4-15 所示。其中可見失效效應機率值(β)以集電弓、真空斷路器等偏高；嚴重等級則多半集中餘 II、III 兩級。由於電聯車動力系統發生之故障多半直接造成列車運轉障礙，因而必須臨時停車加以排除，故除可以直接切換駕駛模式以利排除之電軔故障外，其餘無 IV 級，而動力系統之故障最嚴重者僅為列車完全無法運轉，不至於造成其他系統之傷害，故亦無屬於 I 級之分析項目。經由風險矩陣分析之後，選定所有維修項目中，最偏向高嚴重等級以及高失效效應機率之集電弓，為關鍵維修項目。

表 4-15 FMECA 風險矩陣

嚴重等級 β 值	I	II	III	IV
1.00		A1	A2	
0.20		A3		
0.10		B1	C1.C2.C3 C5.C6	
0.01				C4
0.00				

第五章 維修時距選定與維修階層調整

本章依據第四章選定之關鍵維修項目進行維修時距之選定以及維修階層之調整。5.1 節以軟體進行失效資料之分析；5.2 節進行維修時距之選定；5.3 節進行維修階層之分析。

5.1 失效資料分析

第四章選定 EMU500 型電聯車動力系統關鍵維修項目為集電弓，將其失效資料數據進行整理，並運用統計軟體進行機率統計之分析。本研究以台鐵局嘉義機務段於民國 92 年 1 月 1 日至 94 年 12 月 31 日所統計之故障統計資料進行分析，其中集電弓共發生 16 次失效，將各次失效紀錄之啟用至失效時間(Type I cycle) 整理後列於表 5-1。將維修項目失效之使用時間輸入 Relex 軟體進行分析，檢定後顯示此維修項目符合韋伯分配， η 值為 1026.335， β 值為 9.665，其失效率密度函數圖如圖 5.1 所示。

表 5-1 集電弓失效資料

故障排序	1	2	3	4	5	6
Type I cycle(小時)	569	768	845	923	924	959
故障排序	7	8	9	10	11	12
Type I cycle(小時)	997	1003	1012	1036	1038	1054
故障排序	13	14	15	16		
Type I cycle(小時)	1061	1078	1123	1159		

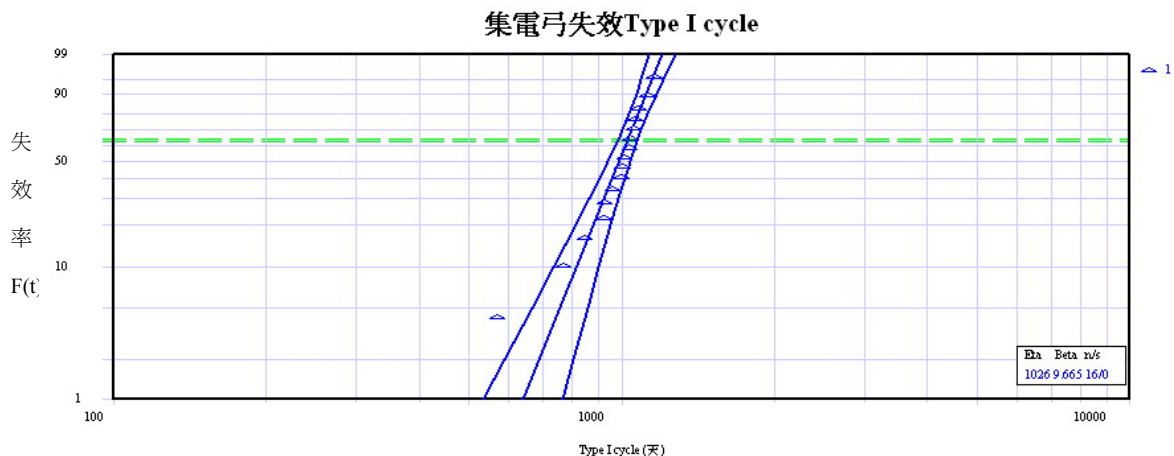


圖 5-1 失效率密度函數圖

5.2 選定維修時距

由失效模式以及故障資料可知，集電弓是為突然發生而無法藉由徵兆而預知故障。若採用固定區間更換策略，將有可能發生組件故障之臨時性維修作業完成後，又於組件壽命尚長時，於到達固定區間時再度執行預防更換，形成浪費之狀況。因此本研究選擇以「預定年限模式」之預防維修方式計算維修時距。

以預定年限模式計算維修時距之基本假設如下：

- (1) 修妥後視同新品表現(as good as new)。
- (2) 維修時無待料狀況。
- (3) 維修成本參數採計裝備價值、修復器材、人力工時。
- (4) 最短經用年限為 20 年。
- (5) 年度預計修護量為 10 組。
- (6) 目前嘉義機務段共有 25 組電聯車服役。

預防性維修所需要的成本為 C_p ，其中包括更換、修復動力系統所需之料件、設備、人力工時，分別列計如下：

- (1) 料件部份：集電弓以及相關消耗性材料價值為新台幣 82800 元。
- (2) 設備部份：維修所需設備以及週邊支援器材設施共計 3560000 元，以 20 年之經用年限，以及每年 10 組之修護量計算，平均消耗裝備費用為 $3560000/(10 \times 20) = 17800$ 元。
- (3) 人力工時：維修集電弓平均人力工時為 3 人 8 小時，維修職工每小時薪資約為 250 元，單次維修人力成本為 $250 \times 3 \times 8 = 6000$ 元。

單次預防性維修成本即為 $82800 + 17800 + 6000 = 106600$ 元。

失效進行矯正性維修成本 C_f 為列車動力系統失效，造成無法正常運轉之損失，並加上預防性維修成本而得。本型車遇故障時除增加維修工時外，另必須開行救援列車，將列車由故障地點拖離迴送至機務段，連帶造成續行列車誤點，另有維修後之試運轉作業等支出，造成二日無法正常運用，產生之營業損失亦計入矯正性維修成本。

- (1) 料件部份：集電弓以及相關消耗性材料價值為新台幣 828000 元。
- (2) 設備部份：維修所需設備以及週邊支援器材設施共計 3560000 元，以 20 年之經用年限，以及每年 10 組之修護量計算，平均消耗裝備費用為 $3560000/(10 \times 20) = 17800$ 元。
- (3) 人力工時：維修集電弓平均人力工時為 3 人 8 小時，維修職工每小時薪資約為 250 元，單次維修人力成本為 $250 \times 3 \times 8 = 6000$ 元。

(4) 營業損失：含故障列車暫停運用兩日營業損失、開行救援列車費用、該班次列車誤點費用、續行列車誤點費用、試運轉列車費用，合計約為 220000 元。

單次矯正性維修成本合計為 $82800+17800+6000+220000=326600$ 元。

以 C_p 以及 C_f 代入預定年限之預防性維修計算公式(3.5)

$$C(t_p) = \frac{C_p R(t_p) + C_f [1 - R(t_p)]}{\int_0^{t_p} R(t) dt}$$

$$C(t_p) = \frac{106600R(t_p) + 326600[1 - R(t_p)]}{\int_0^{t_p} R(t) dt}$$

使用 MATLAB7 軟體進行分析，可求得集電弓以及其所屬次系統之可靠度，如圖 5-2 所示。由圖中可知第 767 天時，集電弓可靠度為 0.94249431，系統可靠度為 0.93036560，此時之平均維修成本 155.092 元為最小。

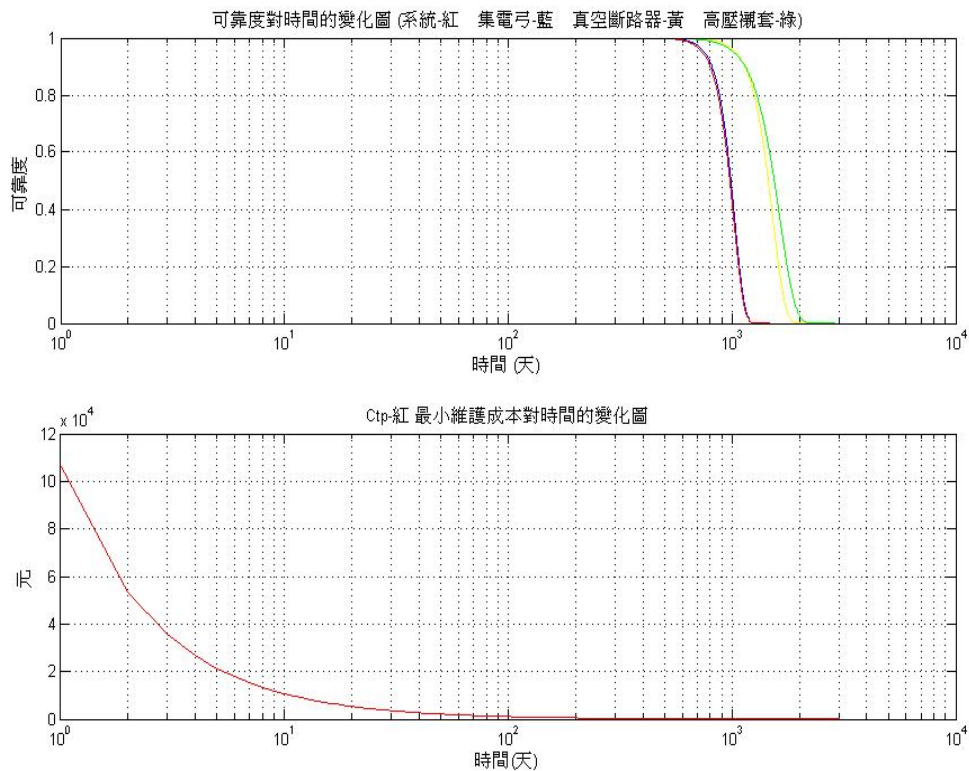


圖 5-2 系統可靠度與最小維修成本對時間的變化圖

以最小成本為前提選定維修時距，當維修時距為 767 天時，平均維修成本為 155.092 元，次系統可靠度為 0.93036560。亦即每當 EMU500 型電聯車更新集電弓後正常運轉 767 天，即進行集電弓之維修。若採取矯正性維修，當時間趨近無限大時，可靠度為零，代入(3.5)式可推得如下式所列之單位時間維修成本。由此可知單位時間成本以預防性維修之 155.092 元優於矯正性維修之 336 元。

$$C(\infty) = \frac{C_f}{MTTF} \cong \frac{326600}{972} \cong 336$$

以本研究之失效資料為例，25 組車於三年內共發生 16 次集電弓失效，因此必須進行 16 次矯正性維修，單次矯正性維修成本為 326600 元，總成本為 5225600 元。若實施 RCM 維修，則依據選定之 767 天維修時距，25 組車共需進行 35.69 次預防性維修作業，單次預防性維修成本為 106600 元，總成本為 3804661 元，較矯正性維修作業費用為低。

若以 20 年之經用年限加以計算，採取矯正性維修之單組車維修次數為 7.51 次，總成本為 2752766 元，採取預防性維修之單組車維修次數為 9.52 次，總成本為 1014576 元，較矯正性維修作業費用為低。



5.3 維修階層分析

以維修階層概念分析台鐵局目前維修體系，可知其機務段層級機務段則為實際操作車輛之單位，負責一級至四級之檢修作業，屬於 O 階層以及 I 階層。機廠負責三至五級之檢修作業，維修階層較高，屬於 D 階層。EMU500 型電聯車配屬段為台北、新竹、彰化、嘉義等機務段，責任機廠為台北機廠。電聯車組原廠商為韓國大宇重工(Daewoo Heavy Industries)，該公司已於民國 88 年切割改組為韓國軌道車輛公司(KOROS)，後又於民國 91 年更名為 Rotem company，然而該公司聲稱並未承接大宇重工時期之保固等服務，因此 EMU500 型電聯車之原廠商歸屬未明。動力系統之原廠商則為韓國大宇重工轉承包之德國西門子公司(Siemens AG)。

就台鐵局目前對 EMU500 型電聯車之維修作業，三至四級之檢修作業可由機務段或機廠實施，最高等級之五級檢修僅有機廠得以實施，而較偏重於日常保養之一至二級檢修則專門由實際運用車輛之機務段實施。針對本研究選取之關鍵維修項目—集電弓，其維修工作無法直接於線上執行，因此於決策樹中排除 O 層級之可行性，不予分析。

本研究參考美國國防部之 MIL-STD-1390D 之維修階層分析軍規標準，並依據現實狀況加以修正，對集電弓進行維修階層分析。首先列出各階層之必要成本如表 5-2 所示。

表 5-2 維修階層分析符號表

符號	名稱
SE	支援設備費用
SEM	支援設備保養費用
T	技術訓練相關費用
SS	備份件安全存量費用
S	備份件之運輸費用
BC	營業損失
L	維修人力成本
DC	D-level 總成本
IC	I-level 總成本

本研究之維修階層分析，以台鐵局 EMU500 型之實際配屬狀況為基準，各項條件如下：

- (1) 目前線上共有 86 組列車服役。
- (2) 維修時距為 767 日，年度預計更換 41 組。
- (3) 階層分級：D 階層維修單位為台北機廠、庫儲單位為台北材料廠；I 階層分為四區，包括台北機務段、新竹機務段、彰化機務段、嘉義機務段。維修設備成本於 D、I 級均相同。
- (4) 料件部份：集電弓以及相關消耗性材料價值為新台幣 828000 元。
- (5) 設備部份：維修所需設備以及週邊支援器材設施共計 3560000 元，I 階層共分為四區，故為 $3560000 \times 4 = 14240000$ 。
- (6) 人力工時：單次維修集電弓平均人力工時為 3 人 8 小時，維修職工每小時薪資約為 250 元， $250 \times 8 \times 3 = 6000$ 元。
- (7) 備份件之運輸費用平均為 1500 元/件，每年成本為 61500 元。
- (8) 單日營運損失計為 80000 元，於機廠進行維修必須加計迴送往機廠以及返回本段費用以及時間，共計二日，為 200000 元。
- (9) 備料安全存量為一個月，計為 4 個。

以年度為單位進行各維修階層成本計算，結果如表 5-3 所示。

表 5-3 維修階層分析結果

維修階層 成本	I-level (機務段加總)	D-level (台北機廠)
SE	712000	178000
SEM	96000	24000
T	104000	26000
SS	3394800	3394800
S	61500	0
BC	3280000	8200000
L	246000	246000
總成本	7897300	12068800

由分析結果可知，I 層級之總成本為 7897300 元，D 層級之總成本為 12068800 元，以 I 層級成本較低，是為較佳之選擇。由表 5-X 可知，I 層級之支援設備費用、支援設備保養費用、技術訓練相關費用、備份件之運輸費用均較高，代表在相同之維修能力要求下，I 層級由於分為四個機務段，各機務段均必須設置一套固定設備，因此其設置以及保養成本耗費較高，且需負擔料件由 D 層級庫儲單位撥運之費用；而 D 層級之營業損失遠高於 I 層級，主要原因在於由機務段至機廠之往返迴送時間均佔有一天之時間，加上維修所需時間，列車無法投入營運，

外加開行迴送列車之費用，均會造成營運損失，以 RCM 分析所得之年度維修量 41 組計算，每車組暫停運用兩天，則僅僅就集電弓維修就會造成每年度本型車 82 天之運用暫停時間。整體而言，機務段層級維修作業具有地利之便，配屬段之車組可省去迴送時間以及費用，雖然在固定設備成本方面，以機廠層級較佔優勢，然而一旦總分析期間拉長，固定費用分攤甚至折舊完畢，則機廠階層無可避免之營運損失將益發明顯，以電聯車經用年限 20 年之保守估計，兩相比較下，機務段階層維修已佔有優勢。而台鐵局限於購車經費，往往有車輛超過經用年限仍持續運用之狀況，根據本研所得之趨勢，機務段階層維修更具有節省成本之優勢。



第六章 結論與建議

6.1 結論

- (1) 由失效樹定性分析可知 EMU500 型電聯車動力系統，同一牽引動力用換流器之兩個模組，必須同時發生故障才能導致牽引動力用換流器功能完全喪失而故障，此類設計可避免單一故障造成之系統失效。
- (2) 由失效模式、影響與嚴重度分析可知關鍵維修項目為嚴重等級以及失效效應機率均高之集電弓。
- (3) 若採取預定年限模式之預防性維修策略，並以最小成本為前提選定維修時距，當維修時距為 767 天時，平均維修成本為 155.092 元，次系統可靠度為 0.93036560。亦即每當更新集電弓後正常運轉 767 天，即必須進行集電弓之維修。若採取矯正性維修，單位時間維修成本為 336 元。
- (4) 以本研究之三年期失效資料計算，25 組車於三年內共發生 16 次集電弓失效，因此必須進行 16 次矯正性維修，單次矯正性維修成本為 326600 元，總成本為 5225600 元。若實施 RCM 維修，則依據選定之 767 天維修時距，25 組車共需進行 35.69 次預防性維修作業，單次預防性維修成本為 106600 元，總成本為 3804661 元，較矯正性維修作業費用為低。
- (5) 以 20 年之經用年限加以計算，採取矯正性維修之單組車維修次數為 7.51 次，總成本為 2752766 元，採取預防性維修之單組車維修次數為 9.52 次，總成本為 1014576 元，較矯正性維修作業費用為低。
- (6) 維修階層分析結果顯示，I 階層之總成本為 7897300 元，D 階層之總成本為 12068800 元，以 I 階層，即機務段實施維修之成本較低，是為較佳選擇。
- (7) 機務段層級維修作業具有地利之便，配屬段之車組可省去迴送時間以及費用，雖然在固定設備成本方面，以機廠層級較佔優勢，然而一旦總分析期間拉長，固定費用分攤甚至折舊完畢，則機廠階層無可避免之營運損失將益發明顯，以電聯車經用年限 20 年之保守估計，兩相比較下，機務段階層維修已佔有優勢。而台鐵局限於購車經費，往往有車輛超過經用年限仍持續運用之狀況，根據本研究所得之趨勢，機務段階層維修更具有節省成本之優勢。
- (8) 本研究以可靠度集中維修方式，結合已服役系統之失效現況，對維修項目進行評估，並針對風險以及關鍵性高之項目進行維修間距調整，而後再針對維修階層進行分析，為該維修項目建立兼顧可靠度以及成本之維修策略，研究結果顯示，經過分析選定並調整之維修工作，確實可以提升軌道車輛系統可靠度，並節省維修成本。未來可應用於台鐵各式具備完整失效資料之車輛維修作業，並可作為未來維修階層精簡之參考依據。

6.2 建議

- (1) 本研究所採用之研究資料為單機務段段單一車型之某一時段資料，而非列車服役生涯之完整資料，因此在研究對象選取上採取較保守之策略，僅以動力系統之高壓設備次系統中的集電弓進行分析。然軌道車輛各系統之間環環相扣，未來可針對其他系統或動力系統之其他維修項目進行研究，以求獲得更加完整且妥善之軌道車輛維修策略。
- (2) 失效樹定量分析是為一有效之維修項目選擇工具，然本研究因缺乏完整之可靠度相關數據而無法實施定量分析，僅能以定性分析了解各最小切割組之基本事件組成。未來若能補足數據，則失效模式、影響與嚴重度分析之失效效應機率，可更加精確，有利於可靠度集中維修分析之流程。
- (3) 就實際狀況而言，系統經過維修之後之可靠度無法完全恢復至新品之狀態，然本研究於選取維修時距時，假設維修後可視同新品。建議未來研究可嘗試採用不完全維護之觀念，以求符合實際狀況。
- (4) 可靠度、妥善率、維修度、安全性(RAMS) 系統的執行，近來逐漸受到重視，此一系統必須於設計階段即加以導入方能獲致最大之成效，建議各軌道事業體於未來建立完整之 RAMS 作業程序，以利服役後之性能保證以及維修作業。
- (5) 維修階層分析可經由更精密周延的成本切割，獲致更加精確之數據，如事業單位內外部成本之計算等。未來實施維修階層精簡之評估，亦可利用維修階層分析之方式加以實施，避免一味的精簡組織所造成的維修能力以及成本之不良影響。
- (6) 應用於軌道車輛之科技日趨進步，經營軌道事業之單位應積極了解新技術之演進，建立並充實該事業單位之維修能量，購買車輛時應要求廠商提供完整之可靠度試驗資料以及數據；舊有之維修規定若有不合宜之處，主管機關亦應加以正視，依照現實狀況加以修訂，以免造成法令漏洞或過度限制，成為維修觀念進步之窒礙。