

國立勤益科技大學
工業工程與管理系碩士班

碩士論文

應用 RCM 與 TPM 協同規劃
維修策略之績效評估



研究生：楊邦溢

指導教授：黃存宏

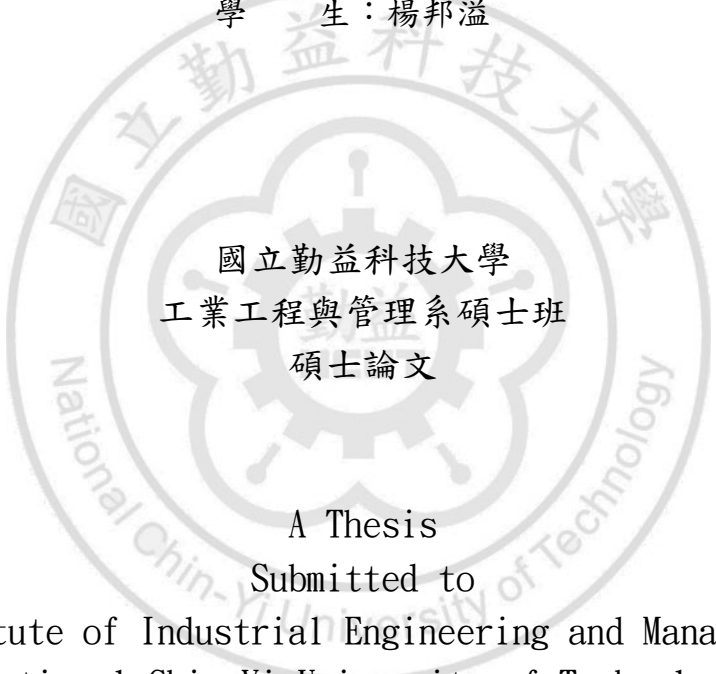
中華民國一〇二年六月十九日

應用 RCM 與 TPM 協同規劃維修策略之績效評估

Performance Evaluation of Planning Maintenance Strategy with
Application of RCM and TPM

指導教授：黃存宏

學生：楊邦溢

The logo of National Chin-Yi University of Technology is a circular emblem. It features a central gear with a lightbulb above it, all enclosed within a stylized gear-like border. The text '國立勤益科技大學' is written in Chinese characters around the top inner edge, and 'National Chin-Yi University of Technology' is written in English around the bottom inner edge.

國立勤益科技大學
工業工程與管理系碩士班
碩士論文

A Thesis

Submitted to

Institute of Industrial Engineering and Management
National Chin-Yi University of Technology
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Engineering

July 2013

Taiping, Taichung, Taiwan, Republic of China

民國一〇二年六月

國立勤益科技大學

工業工程與管理系碩士在職專班

論文口試委員會審定書

本校工業工程與管理系 碩士在職專班 楊邦溢 君

所提論文 應用 RCM 與 TPM 協同規劃維修策略之績效評估

合於碩士資格水準，業經本委員會評審認可。

口試委員：

杜信宏

陳水清

指導教授：

黃存宏

系(所)主任：

康鶴耀

中華民國 102 年 6 月

應用 RCM 與 TPM 協同規劃維修策略之績效評估

學生：楊邦溢

指導教授：黃存宏

國立勤益科技大學
工業工程與管理系碩士班

摘要

維修規劃(Maintenance Plan, MP)是系統設備整體運籌規劃的一環，為確保系統在服勤環境下保有高可靠度、高安全性與高維護性之重要籌備工作之一，維修要項適當與否影響系統運作效益甚鉅，未臻完善之維修作業可能影響系統安全或功能發揮，甚而造成財物及人員之損失，若長期地過度維護更衍生人力與裝備等維持資源的浪費並降低系統可用度，故在系統設備發展階段即應以設計植入(Design-in)法考量使用者條件與環境，縝密擘劃維修計畫。以可靠度為中心之維修(Reliability-Centered Maintenance, RCM)與全面生產維護(Total Productive Maintenance, TPM)兩種策略係為維修規劃泛用之技術，而維修規劃的兩個主要目標，一是確定設備維護策略，二是如何經濟有效的完成設備維護活動，經本研究實證可以 RCM 用來完成第一個目標，並結合 TPM 以達到第二個目標，藉由 RCM 的評估流程與 TPM 現場設備管理策略緊密結合，可達到以設備服勤現況修正維修策略的目的，並有效提高系統運作的壽命週期成本(Life-Cycle Cost, LCC)更為經濟之效益。

關鍵詞：維修規劃、以可靠度為中心之維修、全面生產維護、壽命週期成本

Performance Evaluation of Planning Maintenance Strategy with Application of RCM and TPM

Student : P. Y. Yang

Advisor : Dr. T. H. Huang

National Chin-Yi University of Technology
Department of Industrial Engineering and Management

Abstract

Maintenance Plan (MP) is one part of the overall logistics program of system equipment, is one of the preparatory work to ensure that the system in service environment to maintain high reliability, high security and high maintainability. The adequacy of maintenance items will hugely affect the effectiveness of the system operation. Imperfect maintenance operation may affect the safety or function of system, even cause loss of property and personnel. If long-term over maintenance, then it will derivative the waste of supporting resources of manpower and equipment and reduce system availability. Therefore, the developing stage of the system equipment shall immediately consider the user conditions and environment with design-in method, and carefully formulate maintenance plan. The two strategy of Reliability-Centered Maintenance (RCM) and Total Productive Maintenance (TPM) is a generic technology of maintenance planning. Two main objectives of maintenance planning are, first, to determine the maintenance strategy of equipment, secondly, to cost-effectively accomplish the activities of equipment maintenance. By the evidence for this study, RCM can be used to complete the first goal, combined with the TPM in order to achieve the second goal. By means of closely combining the evaluation process of RCM and the field device management strategy of TPM, the current status of equipment service can be achieved the purpose of correcting maintenance strategy, and be effectively improved the life-cycle cost (LCC) of the system operation to be more economical effectiveness.

Keywords : Maintenance Plan, Reliability-Centered Maintenance, Total Productive Maintenance, Life-Cycle Cost

致謝

學習過程是辛苦的，而享受豐收成果的心情，如同此刻撰寫致謝文，啟發是言語得以表達，首要感謝啟發我勤奮向學的長官張家騏先生，您的專業及學識終將成為敝人努力追求之目標、翁高文先生的勤學精神，是我戮力求取學問的標竿，以及伴我度過大學階段共同打拼的戴嘉宏、陳彥致及王國忠同學、同窗兩年熱情分享論文撰寫心得的黃敏郎、張永宗同學；求學階段適逢職場轉換，更感謝劉素卿組長、陳府文、黃振東經理的栽培、廖佑勝、鄧建南、洪崇祐及其他同仁的協助，讓我在職場及論文撰寫上得到莫大幫助。

因為平凡，所以努力，此為激發我求知欲的原動力，將經驗透過學習內化為知識，更是我終身學習的志向，藉由母校創辦人訓示：教育無他、榜樣而已，期望此求學過程成為我子女學習的榜樣，感謝父母、內人、弟妹這段期間的協助與照料，讓我得以順利完成學業；最後，感謝指導教授黃存宏老師在學習過程中的悉心指導與鼓勵，由於您的關懷與督促，才得以順利完成本論文。更感謝本系陳水淙教授與修平科技大學杜信宏教授對於本論文建議與教導，因為您們的傾囊相授與指教，使得本論文之流程架構更臻完備，學生謹致以最誠摯的敬意，感謝您們。

感謝所有照顧我、激勵我和教導我的每一位，相處過程的火花，都是驅使我不斷學習的動力，祝福各位永遠平安喜樂、身體健康。

楊邦溢 謹誌

國立勤益科技大學工業工程與管理系

2013年6月19日

目錄

| | |
|--|-----|
| 摘要 | i |
| Abstract | ii |
| 致謝 | iii |
| 目錄 | iv |
| 表目錄 | vi |
| 圖目錄 | vii |
| 第一章 緒論 | 1 |
| 1.1 研究背景與動機 | 1 |
| 1.2 研究目的與方法 | 2 |
| 1.3 研究流程與架構 | 3 |
| 第二章 文獻探討 | 5 |
| 2.1 以可靠度為中心之維修(Reliability-Centered Maintenance, RCM) | 5 |
| 2.2 全面生產維護(Total Productive Maintenance, TPM) | 9 |
| 2.3 維護規劃(Maintenance Plan, MP) | 16 |
| 2.4 可靠度(Reliability) | 21 |
| 2.5 失效模式與效應分析(Failure Mode And Effects Analysis, FMEA) | 24 |
| 2.6 系統安全分析(System Safety Analysis) | 29 |
| 2.7 壽命週期成本(Life-Cycle Cost, LCC) | 34 |
| 2.8 RCM 與 TPM 方法歸納 | 41 |
| 第三章 研究方法 | 48 |
| 3.1 研究方法與流程 | 48 |
| 3.2 研究方法描述 | 49 |
| 第四章 實例研究 | 56 |
| 4.1 案例簡介及系統說明 | 56 |
| 4.2 問題描述 | 58 |
| 4.3 順序電門支架損傷肇因-有限元素分析結果 | 59 |
| 4.4 順序電門支架裂紋之失效定義及處置方式 | 59 |
| 4.5 順序電門支架-失效資料蒐集與統計結果 | 60 |
| 4.6 順序電門支架-累積失效分布統計結果 | 60 |
| 4.7 順序電門支架-失效模式效應分析結果 | 61 |
| 4.8 順序電門支架-重要性功能確認決策推論結果 | 62 |
| 4.9 順序電門支架-RCM 決策邏輯推論結果 | 63 |
| 4.10 順序電門支架-維護作業評估結果說明 | 64 |
| 4.11 順序電門支架-失效特徵評估結果 | 65 |

| | |
|----------------------------|----|
| 4.12 順序電門支架-壽期成本評估結果 | 65 |
| 4.13 最佳維修策略評定 | 67 |
| 第五章 結論與建議 | 69 |
| 5.1 結論 | 69 |
| 5.2 未來研究方向 | 69 |
| 參考文獻 | 71 |



表目錄

| | |
|-------------------------------|----|
| 表 1 以可靠度為中心之維修作業之應用相關研究 | 8 |
| 表 2 全面生產維護之應用相關研究 | 14 |
| 表 3 維護規劃之應用相關研究 | 19 |
| 表 4 可靠度工程之應用相關研究 | 23 |
| 表 5 失效模式與效應分析法之應用相關研究 | 27 |
| 表 6 操作及支援危害分析法之應用相關研究 | 33 |
| 表 7 壽命週期成本法之應用相關研究 | 39 |
| 表 8 RCM 與 TPM 之效益指標比較表 | 45 |
| 表 9 失效定義及處置方式建議 | 60 |
| 表 10 失效資料蒐集 | 60 |
| 表 11 嚴重性等級 | 62 |
| 表 12 評估方案比較 | 68 |



圖目錄

| | | |
|------|--------------------|----|
| 圖 1 | 研究流程圖 | 4 |
| 圖 2 | 權衡分析流程圖 | 36 |
| 圖 3 | 維修規劃決策流程圖 | 49 |
| 圖 4 | 設計參數及 FMEA 評估流程圖 | 50 |
| 圖 5 | 建立可靠度參數蒐集及統計分析之流程圖 | 51 |
| 圖 6 | 建立 RCM 分析流程圖 | 52 |
| 圖 7 | 重要性功能確認決策圖 | 53 |
| 圖 8 | RCM 決策邏輯圖 | 54 |
| 圖 9 | 失效特徵評估圖 | 54 |
| 圖 10 | 反制投擲系統方塊圖 | 57 |
| 圖 11 | 順序電門支撐架 | 58 |
| 圖 12 | 順序電門及支撐架安裝示意圖 | 58 |
| 圖 13 | 順序電門支撐架應力分佈圖 | 59 |
| 圖 14 | 順序電門支撐架裂紋累積失效分布圖 | 61 |
| 圖 15 | 重要性功能確認決策推論圖 | 63 |
| 圖 16 | RCM 決策邏輯推論圖 | 64 |
| 圖 17 | 失效特徵評估推論圖 | 65 |

第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

孫子兵法：『兵馬未動，糧草先行』即有運籌帷幄的後勤概念，而後勤(Logistics)一詞的濫觴，源自於軍事術語，在 Webster 辭典對其解釋為『The procurement, maintenance, and transportation of military material, facility, and personnel』意即軍事物資、設施、人員的籌購、維持及運送轉移，而美國後勤工程師協會(Society of Logistics Engineering, SOLE)進一步定義為『The art of science and management, engineering, and activities concerned with requirements, design, and supplying and maintaining resources to support objectives, plans, and operations』闡述了以需求、設計、供補、維護資源來達到管理、工程及相關活動的目標、計畫及運作，爰上說明，領略出『後勤為系統獲得整合性後勤支援與資源的管理科學，用以分析、規劃、確認及提供系統服勤後所需的後勤品項與支援方案，俾確保在最低廉的壽期成本下，有效維持與運作。』；從孫子學說論述下，已強調要有後勤整備的前瞻規劃思考，從軍事科學面向探討 1970 年代的傳統後勤的『事後導向』概念，係以先求有，再求系統獲得後的相關需求發展，轉變至今整體後勤支援一反傳統的規劃，強調同步工程(Concurrent Engineering)的技術，應與系統裝備同時規劃、設計、發展，確保系統服勤前，充分獲得經濟、有效的維持計畫，故不論系統設備研發、獲得及後續運用等，起始構想即應以貫穿整個壽命週期(Life Cycle)輪廓作為運籌規劃之考量。

預防性維修計畫是系統設備整體運籌規劃的一環，為確保系統在服勤環境下保有高可靠度、高安全性與高維護性之重要籌備工作之一，更是當代複雜系統在設計之初即需融入設計考量的關鍵因素。

預防性維修要項之適當與否，影響系統運作效益甚鉅，未臻完善之預防性維修作業可能影響系統安全或運作效益之順遂，甚而造成財物及人員之損失，若因長期過度維護的負面累積，更衍生人力與裝備等維持資源的浪費，進而降低使用及妥善率，故不論是系統設備製造廠家或使用顧客，對預防性維修計畫之制定，戮力用心規劃，並基於系統設備可靠性、維護性及系統安全性適切前題下，務求執行必要性且為最經濟之維修方案。

預防性維修的思維，在過去基於直覺制定，立即而非深思熟慮後所作之決定，以強調零組件可更換之裝備，不考慮備份(Standby)複聯(Redundance)系統，而現在則基於邏輯分析評估後制定，注重較零組件高之階層，並選擇性分析可更換零組件之裝備，強調對設計影響。

從預防性維修成本觀點比較，傳統維修政策，以 DC-8 飛機為例，339 項裝備須定期翻修，耗費 4 百萬人力小時在結構檢查上，才達成每隔 2 萬小

時檢查之時距；新時代 RCM 的導入，DC-10 飛機自設計及考量，僅 7 項裝備須定期翻修，另外，B-747 飛機耗費 6 萬 6 千人力小時在結構檢查上，達成每隔 2 萬小時檢查之時距(柯輝耀，2008)。

系統設備之籌購或建置，其允收條件可透過定性或量化的關鍵效益指標(Key Performance Indicators, KPI)來評量其良窳，諸如可靠度、維護度、可用度、安全度及支援度等，作為允收標準之門檻(Threshold)，然系統服勤後，其壽命特徵會隨著操作時間的增加而減低，因此，必須透過周延的維修規劃(Maintenance planning, MP)設計，使其失效後能迅速恢復運作(Turn Around)；TPM 的手法，著重在從業人員對於系統保養與維護的落實，提升保養與維護效率以及降低人為疏失的影響，這樣的論述，就穩健設計或系統安全的考量，無法有效徹底防範整個系統運作中最不穩定的因子-人，因此，如何結合 TPM 及以可靠度為中心之維護作業規劃以設計植入法(Design In)落實在系統獲得的產品壽命週期管理(Product Lifecycle Management, PLM)各個階段中，為本研究之動機。

從系統的觀點而言，要發揮其功能，不僅止於系統設備本身，應包括促使系統能協同運作的基本條件，諸如教育訓練、維修規劃、包搬儲運(包裝、搬運、儲存、運輸)、技術手冊、補給支援、設施及電腦資訊資源的各項條件整備，而 TPM 的精神較偏重在人員的教育訓練，以持續不斷的訓練使人員的操作、檢查、維護及紀律發揮效用，這再再挑戰從業人員的惰性及記憶，而此等訓練若能以知識管理的方式，完整地在技術手冊中呈現，使其管理者充分掌握修維護制度的有效性、訓練單位對於訓練標準的一致性，以及從業人員的作業依循標準性，都有其一套完善的管理及規劃。

本研究透過 TPM 及 RCM 結合的綜效，更具體的將 TPM 落實在維修規劃概念中，再藉由 RCM 不斷的循環修正維修保養策略，使其基於安全、效能及成本經濟條件下，系統效益達到最大化為目標。

1.2 研究目的與方法

由於系統裝備發展技術日新月異，性能及技術不斷精進，除附加成本高昂外，更徒增了操作、維護複雜度，為能滿足系統安全運作、功/性能充分發揮及維持成本經濟條件下，從系統發展概念導入 RCM 設計並結合了服勤階段使用者 TPM 精神的發揮，再以系統後續服勤的維修參數蒐集分析以回饋修正檢查保養計畫，遂行 PDCA 閉路(Closed Loop)循環持續精進，使其成本效益最佳化為本研究宗旨。因此本研究擬應用以可靠度為中心之維修為立論基礎以決定預防性維修之需求，再結合 TPM 精實保養維護者的作業方式，俾提高最佳的運作維持效益，本研究方法探討彙整如后：

1. 本研究探討 RCM 作業之發展背景與績效。

2. 本研究探討 TPM 遂行成效及結合知識管理法，使其修維護準據文件化、標準化。
3. 本研究探討可靠度設計對維修策略影響。
4. 本研究探討藉由失效模式與效應分析結果作為 RCM 評估條件。
5. 本研究探討藉由系統安全分析法作為 RCM 評估系統安全考量。
6. 本研究探討壽命週期成本法對 RCM 評估成本效益之影響。

1.3 研究流程與架構

本論文架構共分為五個章節，第一章為緒論，以『後勤』作為開端，說明維修規劃為整體後勤之一環，並藉由 RCM 及 TPM 的導入，使其達到有系統性的維修規劃。第二章為相關文獻回顧，簡介 RCM 與 TPM 之功能與績效、維修規劃及可靠性之依存關係及失效模式與效應、系統安全及壽命成本等分析方法作為 RCM 評估基準，並從以往研究文獻探究其對於維修計畫周延性及系統可靠性的相互影響，最後根據 RCM 與 TPM 的文獻探討結果整理歸納其差異性。第三章為研究方法與流程，主要以系統服勤階段，其維修規劃經實際服勤場景運作後，對於維修計畫修訂或精進構面作為研究想定，擬定一邏輯性評估流程、需求的技巧、應用、成本及效益等，以架構維修規劃決策流程與評量步驟。第四章為實例研究，藉由國內某型戰機歷經服役場景所見的問題案例，加以運用 RCM 及 TPM 技術評估系統設計階段制定的維修規劃適用性，俾提列出可能的解釋與建議，檢討最佳維修規劃策略及修訂維修計畫。第五章的結論與建議，則就 RCM 與 RCM 之執行策略進行整合效益歸納及適用性提出研究結果，並對未來的研究方向作說明，論文架構如圖 1 所示。

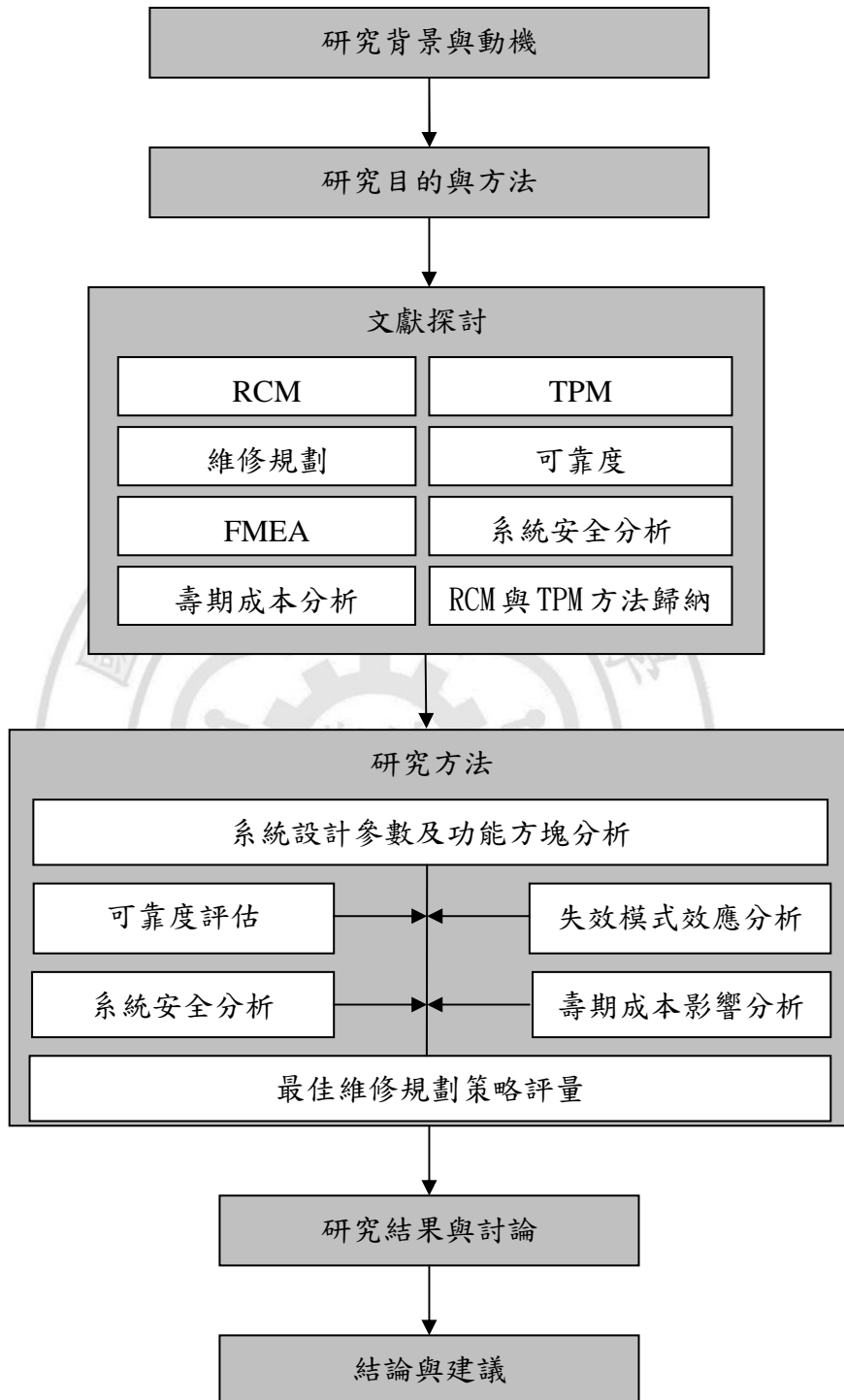


圖 1 研究流程圖
資料來源：本研究整理

第二章 文獻探討

基於系統或設備在設計階段係以固有可靠度來進行預防性維修作業規劃，因固有可靠度僅考量設計與製造特性，不包含實際操作環境因子影響，經過實地操作後所發生之退化(Degradation)情況，即須對服勤階段之系統、設備維修計畫合宜性重新評量，故本文獻探討之範疇，爰 1.2 節所述，為使維修規劃的預防性作為滿足三個主要條件：一、系統安全運作。二、功/性能發揮。三、維持成本經濟條件。就系統發展植入 RCM 設計概念，並結合服勤階段 TPM 作業管理的遂行，以及持續回饋修正檢查保養計畫等三個面向，探討維修規劃的泛用技術 RCM 與 TPM 之執行概念與相關應用研究，並於第八節提出兩種技術合併執行維修規劃的可行性及兩者間之差異性。

另針對維修計畫擬定的預防性維護政策，旨在確保系統能有效且安全的持續運作，其預防性維護項目及檢查時距律定的良窳與其週全性，對系統安全度、可靠度及可用度等整體運作效益影響甚鉅，故藉由概念及文獻探討後，可了解維修計畫制定主要以可靠度為中心作為規劃考量，並藉由失效模式效應分析掌握產品設計弱點並加以設計改善，及透過系統安全分析技術達到危害預防，以滿足可靠度及系統安全設計；最後，就壽命週期成本構面評估系統、設備全壽命成本效益，並選擇適切之維修方案，使其達成系統維持成本經濟之目標。

文獻探討主要分為八個章節，第一節及第二節旨在介紹 RCM 與 TPM 之主要概念以及流程；第三節介紹維修規劃之運籌以及對產品壽命週期管理之影響；第四節介紹可靠度，並說明與維修規劃良窳的依存關係以及目前的應用領域；第五節、第六節、第七節分別介紹 FMEA、系統安全分析及壽命成本分析的應用及第八節綜整 RCM 與 TPM 的效益指標並加以方法歸納探討等，分述如后：

2.1 以可靠度為中心之維修(Reliability-Centered Maintenance, RCM)

2.1.1 以可靠度為中心之維修作業之概念

為能改善舊思維『以設計者觀點的維修規劃』，1970 年代初期，美國航空界著手構思以可靠度為中心的維護作業原則，亦獲得美國航空運輸委員會(Air Transport Association, ATA)，航太製造學會(Aerospace Manufacturers' Associates, AMA)與美國聯邦航空管理委員會(Federal Aviation Administration, FAA)等單位的協助，籌組成立維護作業推動小組(Maintenance Steering Group, MSG)進行系統化的研究，有效運用了失效模式與效應分析、故障樹分析(Fault tree analysis, FTA)及其他相關分析手法，來確認系統運作、狀況監控與停機維護等需求預測、並且促使產品在設計與研發階段即融入維修維護進手性(Accessibility)、模組化(Modularization)程度、零件標準化及互換

性、操作或維修者需求、測試與維修支援設備整備、備份零件籌購及維修規劃政策等進行系統化的評估與擘劃。

施行 RCM 的目標，旨在設計階段即將產品的固有可靠度(Inherent reliability)在服勤環境下可能發生之退化情況及產品服勤階段之維修護支援需求作整體性的考量，並對其操作狀況、可能產生的功能失效、失效的影響效應以及透過預防性維護機制來避免失效發生，據以研擬最佳的維修規劃，期使產品在整體壽命週期的各個階段之操作可靠度均能滿足規格水準以上。RCM 的指導方針主要有：

1. RCM 以系統裝備之安全、功/性能及成本經濟為焦點。
2. RCM 以全系統觀作為規劃考量。
3. RCM 面對設計限制不斷精進。
4. RCM 定義缺陷為不符使用需求的條件，例如：未達某些功能或性能規範。
5. RCM 維修規劃的製訂為有效的。
6. RCM 維修規劃的製訂是適切的。
7. RCM 具焦於缺陷之預測俾進行事前預防維修及事後缺陷矯正、定期維修、狀態監測等預防性措施。
8. RCM 是一個閉環(Closed Loop)系統，賡續不斷改善循環。

RCM 以平均失效間隔(Mean Time Between Failure, MTBF)為基準加以規劃預防性維修政策，另部份元件則因失效特性以潛在失效(Potential Failure, PF)間隔來律定預防性維修時距，是項均強調對系統設備進行早期診斷與矯正，俾防範異常狀態所致停機事件的發生，並以系統設備能在高可靠度、可用度及維護度基準下加以規劃的計畫性維護，使其達到高度可使用率及最低的維修護成本。(柯煒耀，2008)

註：PF 間隔是指從發現設備故障的時刻到設備完全失效時刻之間的時間間隔，例如初始裂紋發現到完全斷裂造成零件功能完全喪失。

2.1.2 以可靠度為中心之維修作業之應用

化工業：

張仁榮、徐啟銘、張銘坤[2007]以可靠度為中心的維修方法源於航太工業，近十年來已被廣為應用於石油開採及石化工業上，以有效提升設備操作的可靠度。透過有效的維修策略來提高設備運轉的可靠度，即降低設備發生早天失效的可能性並因此而降低失效的影響，俾確定各個不同功能性失效模式的可能性及功能性失效模式所造成的生產不連續損失以及安全和環境方面的影響。此方法亦引用“高/中/低”表示失效風險等級來確定最佳化維修策略進而有效降低失效風險。透過對不同失效模式的風險分析，可以得到工場設備的風險分佈，以避免對低風險設備的過度維修及高風險設備的維修不足，

並在有限維修成本支出的情況下提高工廠操作的可靠度，經由 RCM 的遂行，強調對少量的高風險項進行控制，即可以有效控制系統的風險並減少非計畫性停車，同時避免對大多數低風險項目的過度維修成本。

製造業：

王同群[2011]在設備維護上，典型的排程為透過設備零件模型根據其失效模式效應分析，以推估零件可靠度為基礎。然當失效分析應用於機會保養時，如何推估關鍵零件之可靠時間，在有限時間內進行預防維護，實為保持設備高可利用率的關鍵。

該研究應用可靠度為中心之維修方法，根據分類零件對設備影響度，分析其失效關鍵模式，以區分零件之潛在失效效應。其次，將零件失效效應予以模糊化，並彙整專家模糊規則知識後，進行零件風險模糊化評估。最後藉由動態可靠度分析，求出關鍵元件的更換時間點，以排定不同零件之處理優先次序，據此進行預防或改善維護等措施。

在應用基礎上，以某玻璃基板公司設備維護分析為例，其關鍵性失效的零組件運用 RCM-FMECA，產品損失已由 2009 年至 2010 年減少 56.25%。運用 RCM-FMEA，產品損失已由 2009 年至 2010 年減少 80.4%。未來若透過 RCM 分析，將可更有效地分析出其關鍵零件之風險優先度，與其相對可靠度，從而提供預防維護甚至機會保養的優先次序預測表列，與設備改善重點的依據。

軌道業：

凌宇康[2006]研究台灣鐵路管理局面對高鐵通車以及交通環境改變造成之營運衝擊，計畫推動都會區鐵路捷運化以及內部組織調整等多項措施。然軌道車輛系統尤以動力系統之可靠度影響列車營運最鉅，且台鐵局車輛近年來故障率大幅增加，嚴重影響營運，都會區鐵路捷運化後，路線容量更將趨於飽和，故車輛故障引起之營運影響將更為嚴重。

國內軌道車輛維修規劃仍以預防性維修(Preventive Maintenance)觀念為主，該研究引進以可靠度為中心之維修方式於軌道車輛維修作業之改善，將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，同時可以兼顧系統安全以及降低維修成本。該研究以台鐵 EMU500 型電聯車之動力系統作為以可靠度為中心之維修方式分析對象，藉由維修成本、時間尋求適當之維修階層，以作為台鐵局未來改善維修作業以及調整組織架構之參考，研究結果顯示，該型電聯車動力系統之關鍵維修項目為高壓設備次系統之集電弓，採預定年限模式之預防性維修策略進行維修規劃，並以最小成本為前提制定維修時距，其可靠度以及維修成本均優於矯正性維修；而以計算所得之維修時距以及成本為基準，進行維修階層分析，可得機務段層

級進行集電弓維修作業優於機廠層級之結果，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。

張新立[2005]大眾運輸系統首重安全，民眾方能放心地搭乘，而維護是影響軌道系統安全的主要因素，好的維護管理不但可以增進營運生產力，更可讓維護資源有效運用，減少軌道營運者之成本。國內軌道系統維護之作法仍採取傳統的預防性維修(Preventive Maintenance)，在維護資源的運用上缺乏效率，額外的維護成本將會導致缺乏競爭力。該研究引進可靠度核心維護於軌道系統維護管理中。可靠度核心維護起源於航空業，是兼顧成本與安全考量的維修方式。該研究運用故障樹分析和失效模式和影響與嚴重度分析(Failure Mode Effects and Criticality Analysis, FMECA)分析找出台北捷運電聯車系統的維修關鍵項目(Maintenance Significant item, MSI)，並依據嚴重度矩陣(Criticality Matrix)決定維修工作的執行優先順序，以作為軌道系統維護管理之參考。

航空業：

楊朝鈞[2003]RCM 手法最初是用來開發當作規劃新型飛機的維護性作業計畫。經過改良後，目前廣泛應用於設計核能發電廠或火力發電廠等維護性計畫方面。RCM 主要目的是確保適當的維修工作以讓系統依照規範所訂定的標準正常運作，透過 RCM 方法雖不能使系統最佳可靠度提升，但是可輕易找出最佳維修策略，避免維修資源的浪費。關於以可靠度為中心之維修作業之應用的相關研究綜整如下表 1 所示。

表 1 以可靠度為中心之維修作業之應用相關研究

| 學者 | 研究結果 | 備註 |
|-----------------------------|---|------|
| 柯煒耀 (2008) | RCM 以 MTBF 為基準加以規劃預防性維修政策，另部份元件則因失效特性以潛在失效間隔來律訂預防性維修時距，是項均強調對系統設備進行早期診斷與矯正，俾防範異常狀態所致停機事件的發生，使其達到高度可使用率及最低的維護成本。 | 學術研究 |
| 張仁榮 徐啟銘 張銘坤 [2007] | RCM 應用於石油開採及石化工業上，透過有效的維修策略來提高設備運轉可靠度，即降低設備發生早天失效的可能性進而降低失效的影響，俾確定各個不同功能性失效模式的可能性及功能性失效模式所造成的生產不連續損失以及安全和環境方面的影響，強調對少量的高風險項進行控制，即可以有效控制系統的風險並減少非計畫性停車，同時避免對大多數低風險項目的過度維修成本。 | 化工業 |
| 王同群 [2011] | 應用 RCM 在設備維護上，根據分類零件對設備影響度，分析其失效關鍵模式，以區分零件之潛在失效效應。另將零件失效效應予以模糊化，並彙整專家模糊規則知識後，進行零件風險 | 製造業 |

| 學者 | 研究結果 | 備註 |
|---------------|--|-----|
| | 模糊化評估。最後藉由動態可靠度分析，求出關鍵元件的更換時間點，以排定不同零件之處理優先次序，據此進行預防或改善維護等措施。 | |
| 凌宇康 [2006] | 引進 RCM 於軌道車輛維修作業之改善，將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，同時可以兼顧系統安全以及降低維修成本。 | 軌道業 |
| 張新立 [2005] | 維護是影響軌道系統安全主要因素，好的維護管理可增進營運生產力，讓維護資源有效運用並減少營運成本，引進 RCM 於軌道系統維護管理中，運用故障樹分析和失效模式和影響與嚴重度分析分析找出捷運系統的維修關鍵項目，並依嚴重度矩陣決定維修工作的執行優先順序，作為軌道系統維護管理之參考。 | 軌道業 |
| 楊朝鈞 [2003] | RCM 應用於設計核能發電廠或火力發電廠等維護性計畫，確保適當的維修工作以讓系統依照規範所訂定的標準正常運作，透過 RCM 方法雖不能使系統最佳可靠度提升，但是可輕易找出最佳維修策略，避免維修資源的浪費。 | 航空業 |

資料來源：本研究整理

2.2 全面生產維護(Total Productive Maintenance, TPM)

2.2.1 全面生產維護之概念

日本在 1950 年因應國內工業發展而引進設備維護管理技術，並基於預防性維修體制，且吸取了英國設備綜合工程學的理論，及結合國情而逐步發展成為 TPM，其中心思想相似於日本發跡的全面品質管制(Total Quality Control, TQC)，強調從業人員的績效發揮，改變以往著眼於產品的品質，視設備維護為產品壽命週期的一環，期望透過此技術使設備操作壽命延長，讓設備能在高可靠性的狀態下發揮生產效率以確保投資績效，並且能有效掌控危險事故的發生俾提高安全裕度。就此，TPM 可定義為以下幾點(鈴木德太郎，1994)：

1. 以達到設備的最高效率為目標。
2. 建立以設備全壽期為考量的全面保養體制。
3. 跨越設備計畫部門、使用部門及保養部門的活動。
4. 從公司最高階到第一線從業人員的全面參與。
5. 有動機及目標的管理，藉由小集團的自主活動，發揮環環相扣之精神以推展 TPM。

簡而言之，遂行 TPM 技術旨在降低設備故障率，意即透過完善的保養維修規劃，促使設備在高可靠度下運行，進而提升設備操作品質及生產良率，更挹注了總體生產力，有效降低了成本及人員教育訓練等資源；TPM 的演進，可溯及至 1950 年代以前的事後保養(Break-down Maintenance, BM)，係指當設備產生故障停機或性能衰減才進行矯正性維護，實施方式則區分為突發故障後的維護及故障產生時若有備餘設計的預備機制則採事後維護處置；而後，在 1960 年代以前預防保養(Preventive Maintenance, PvM)概念的發跡，日本在此時期約 1951 年間自美國引進預防性保養技術，期望在設備故障前達到預防故障發生的成效，預防保養的主要重點如后：

1. 日常保養，第一線從業人員實施設備操作前保養，如潤滑、檢點、調整、清潔等。
2. 巡迴檢點，由保養部門點檢(歷日或歷時，約每月乙次)。
3. 定期整備、固定的保養時距從事調校、更換潤滑油及零件的定期更換。
4. 預防修理，當預防性維護中發現缺點或異常所執行的矯正性修理。
5. 更新修理，當性能衰退或劣化所執行的修理使之恢復原有的功能或性能。

接續 1970 年代時期，為了提高設備使用率及企業生產力，再一次演化為生產保養(Productive Maintenance, PM)，採用的方法有四種：

1. 保養預防(Maintenance Preventive, M.P)，以同步工程的思維，從設備設計概念達到易於保養或無須保養。
2. 預防性保養、包含每日操作前維護或定期計畫性維護。
3. 矯正維護(Corrective Maintenance, C.M)，針對故障矯正，俾提高設備可靠性及維護性。
4. 事後保養，該階段的保養概念，已經顧慮到生產設備的壽命週期管理思維。

後續則逐步再演進到 1980 年代以前的全面生產保養(Total Productive Maintenance, TPM)，加深了各部門間橫向、直向協同合作，讓 TPM 有系統的運行；由於科技的蓬勃發展，1980 年代以後更提升到預測保養(Predictive Maintenance, PdM)的技術，透過監測技術及設備，全面、連續性的監控系統或設備的性能趨勢，有效改善了過去定期保養所致的過度維護(Over Maintenance)現象；近年來，由於企業趨向全球化經營，傳統的 TPM，在 1990 年代以後漸進轉變成為注重企業體的全面經營改革，而 TPM 不再僅僅追求設備效率，希望藉此改造成為全面生產經營系統(Total Productive Management System)，使其超越現狀，邁向全面的經營改革。(高福成 1994)

TPM 係以生產設備為導向，著眼於如何讓設備發揮使用效益，精進的面相諸如：

1. 改善生產模具、設備與製造方法的可靠性、維護性及安全性，並將其 Know-How 加以彙整並使技術標準化。

2. 以現有設備、模具、治具所製造出品質安定、符合生產規範的產品為基準 (Base Line)，彙整其 Know-How 作為生產技術的依循並傳承及教育從業人員。
3. 不斷提升設備稼動率、生產品質的可靠性及生產運作期間的生產力。
4. 使從業人員有工欲善其事，必先利其器的觀念，訓練培養對設備熟諳度，使其對設備操作及維護更投入、愛惜的風氣。(高福成，1994)

TPM 亦結合了許多概念如 5S (SEIRI-整理、SEITON-整頓、SEIKETSU-清潔、SEISO-清掃、SHITSUKE-素養)、零故障、零次品等導入，以日本推行為例，促使企業在設備維修費用降低約 50% ，設備稼動率提高約 50% ，對第一線從業人員及經營管理的執行面起了最直接的效用。

2.2.2 全面生產維護之應用

製造業：

潘浙楠[1997]完善的維修/保養制度可免除生產設備因故障或損害造成的不良品與停工損失；而全面生產保養結合了事後保養、預防保養 (Preventive Maintenance, PM)、生產保養、改良式保養 (Corrective Maintenance, CM)、保養預防等措施，可使維修成本與生產損失減至最低，生產設備使用效能達到最大，為企業營運帶來正面之助益。該論文研究國內廠商如何建立維修制度、如何進行維修/保養，以及面臨的問題與影響；結果顯示推動 TPM 之影響因素有：1.TPM 之教育與訓練。2.維修保養制度之建立。3.設備之自主維修與改善；另推行 TPM 之成功因素為：1.維修改善活動之規劃與實施。2.個別改善之落實與否；並探討認知面與實施面之關係，結果顯示應先培養自主維修/保養之共識以維持個別改善之成果；其次為建立維修/保養制度與遂行教育訓練計畫對於維修/保養策略之運用與技術之提升有顯著助益。再者進行集群分析(Clustering analysis)顯示化工、半導體、紡織等導入 TPM 之產業有以下結論：1.高階主管之督導尚可。2.自主保養小組活動未積極展開。3.員工對於設備自主維修與改善的認知仍顯不足。4.未能制定預防保養之標準工時。5.維修小組成員未能有效運用預防保養手法制定改善對策。6.產品壽命週期之成本效益分析未臻理想；另塑膠、機械及自動化、通訊與資訊、食品製造等未導入 TPM 活動之產業反映了下列之特徵：1.高階主管的督導不佳。2.缺乏 TPM 之導入教育。3.TPM 之推展組織缺乏妥善規劃。4.預防保養政策之制定不周延。5.維修資料並未記錄或保存狀況不佳。6.維修管理技術待提升；並經卡方獨立性檢定 (Chi-Square test of independence) 其機器/設備故障率與維修成本降低之相關因素有：1.預防保養計畫之制定。2.維修/保養標準工時之訂定。3.所有生產設備故障記錄之保存。

經營管理：

蔡炳程[1999]TPM以設備為切入點，著眼於影響生產力的損失為架構，來展開提升企業能力之改善活動，進而形成企業的競爭優勢。TPM的做法，除了TPM展開活動的十二步驟外，並運用目標管理、職制示範、活動步驟化、診斷制度...等手法，以PDCA為管理手段，來達成企業在效率、品質、創新與顧客回應方面，能有獨特之能力。故TPM能夠協助企業建構持續性的競爭優勢。

王勝嘉、邱元錫、張紂微[2002]分析台灣中小企業經營管理特性及TPM導入之可行性研究，對推動TPM之自主保養及個別改善兩大支柱，研擬可行之TPM導入模式包含(一)推動TPM的組織、人員職掌動作方式。(二)推動TPM所需之教育訓練與宣導方式。(三)導入TPM之主計畫製作與里程預估。(四)全面導入TPM兩大支柱的詳細步驟及作法。(五)TPM之目標設定與導入時應注意事項，及(六)適合中小企業之TPM效益衡量指標等。由於中小企業規模小人員少，故在導入模式的設計上力求簡單與詳盡，對於導入支柱之各步驟及作法，甚至程序、里程及效益指標均加以制訂或提出具體建議，以減少導入時之摸索時間及成本，使其提升企業之競爭力。

吳志雄[2002]企業競爭力受效率、效能、品質、創新、差異化及顧客滿意度等影響，而生產方面，尤需具備高生產效率，優良品質及低成本等優勢。推動TPM之目標係藉人與設備的體質改善，達到提高設備總合效率，提升生產力、品質及降低成本之目的，進而精進整體企業。遂行TPM涵蓋八大支柱如個別改善、自主保全、計畫保全、品質保全、開發管理、教育訓練、安全衛生及間接部門等，其旨在消除十六大損失，包括設備效率化之八大損失、人員效率化之五大損失及原物件效率化之三大損失等，並在作業中運用目標管理、目視管理、診斷稽核系統、FMEA、PM(P-4M)(Phenomena - Mechanism, Man, Machine, Material)分析及MQ(Machine Quality)分析等手法，且用PDCA(Plan, Do, Check, Action)管理循環來運作整個TPM推動，並以性能指標來呈現生產(Production)、品質(Quality)、成本(Cost)、交期(Delivery)、安全(Safety)及士氣(Morale)等之運作效益。研究結果顯示，推行TPM活動可有效達到預期目標，並能協助企業改善體質及提升競爭優勢，對企業能力與競爭優勢均有正面助益。

江中守[2009]指出TPM以生產設備為改善核心，持續進行內部改善活動，提升設備總合效率，及人員能力的提升進而強化公司競爭優勢，該研究以某日系半導體封裝廠為例，應用問卷調查及實地訪談高階主管，探討案例公司推行TPM的成功關鍵，結果顯示，透過推行TPM，使得設備總合效率有效的提升，且廠內工作人員的技能亦獲同步提升。

鄭坤憑[2009]TPM 強調高效能的生產力、準時交貨、增進顧客滿意度，而 TPM 活動展開需結合經營方針與願景，第一階段展開 TPM 的目標是藉人與設備的體質改善，進而改善企業體質，以達零損失、零故障、零缺點及零災害。第二階段展開 TPM 進階到生產管理效率極限化、新產品開發能力，以達高品質低成本目標，來提升企業整體競爭力；該論文探討導入 TPM 的過程與實施成效，且運用 IT 資訊技術輔助 TPM 活動結合公司的經營方針，以全面性經營管理系統整合了企業之使命、經營理念、企業文化、方針與目標、策略方案與執行計畫，促使整體資源充分發揮；另針對導入 TPM 成功關鍵因素加以實證 IT 資訊技術輔助 TPM 活動，不論是低成本、高品質、交貨成效、縮短上市時間，直接或間接皆有正向顯著關聯。故實施 TPM 可幫助團體創造凝聚力，且提供企業一致的目標，進而獲致豐碩之效益。

張憲嘉[2008]藉由中華汽車案例研究推動 TPM 的基礎工作，以訪談方式，驗證基礎工作與推動的關係。研究結果指出，具備『TPM 的基礎工作』能力有利於 TPM 推動，並建議產業界應以 TPM 為主軸來導引改善活動持續不斷進行，運用最高經營層的支持貫徹全員參與及教育訓練，是為推動 TPM 的最關鍵成功因素。

許靖河[2010]全面生產管理的成效，係由人和設備的體質改善、將製造的各種損失降為零、達到改善企業的體質。TPM 的推展，不單純僅為設備維護保養的活動，甚至走向 TPM 之營運的全方位解決方案（Total Solution）。該研究探討 TPM 活動以生產設備為改善核心，持續進行內部精進改善活動，提升設備總合效率及強化公司競爭優勢等分析。結果顯示從根本、基層全員推展 TPM 活動，結合持續改善、精實生產以落實、整合、教導、評議，並透過科學手法，改變工作態度、可有效提升工作方法與能力，藉此拉大與競爭者的距離。

藍天雄、莊烘銘、何明果、李宜錡 [2007]企業推行 TPM 旨在減少因設備而造成的損失，該研究以冰箱製造廠生產設備為例，推行 TPM 活動來防範未然。結果顯示未實施 TPM 活動前之重要生產設備之稼動率、製程良品率及綜合生產效率之生產報表數據資料，與實施 TPM 活動後之生產數據作為比較。結果證實在實施 TPM 活動後設備稼動率提升了 3.7%；製程良品率提升 2.8%、綜合效率提升 11.57%，證明工廠實施 TPM 活動，可減少因為設備問題所造成的各項損失。關於全面生產維護之應用的相關研究綜整如下表 2 所示。

表 2 全面生產維護之應用相關研究

| 學者 | 研究結果 | 備註 |
|-----------------------------|--|------|
| 鈴木德太郎 (1994) | TPM 強調從業人員的績效發揮，改變以往著眼於產品的品質，視設備維護為產品壽命週期的一環，期望透過此技術使設備操作壽命延長，讓設備能在高可靠性的狀態下發揮生產效率以確保投資績效。 | 學術研究 |
| 高福成 (1994) | TPM 以生產設備為導向，著眼於設備使用效益發揮，作業重點如： 1.改善生產模具、設備與製方法的可靠性、維護性及安全性，並將其 Know-How 加以彙整並使技術標準化。 2.以現有設備、模具、治具所製造出品質安定、符合生產規範的產品為基準，彙整其 Know-How 作為生產技術的依循並傳承及教育從業人員。 3.不斷提升設備稼動率、生產品質的可靠性及生產運作期間的生產力。 4.使從業人員有工欲善其事，必先利其器的觀念，訓練培養對設備熟諳度，使其對設備操作及維護更投入、愛惜的風氣。 | 學術研究 |
| 潘浙楠 [1997] | 完善的維修/保養制度可免除生產設備因故障或損害造成的不良品與停工損失；推動 TPM 之影響因素有： 1.TPM 之教育與訓練。 2.維修保養制度之建立。 3.設備之自主維修與改善 推行 TPM 之成功因素為： 1.維修改善活動之規劃與實施。 2.個別改善之落實與否。 經探討認知與實施面之關係，結果顯示應先培養自主維修/保養之共識以維持個別改善之成果；其次為建立維修/保養制度與遂行教育訓練計畫對於維修/保養策略之運用與技術之提升有顯著助益。 | 製造業 |
| 蔡炳程 [1999] | 以設備影響生產力的損失為架構，展開提升企業能力之改善活動而形成企業的競爭優勢。TPM 運用目標管理、職制示範、活動步驟化、診斷制度...等手法，以 PDCA 為管理手段，來達成企業在效率、品質、創新與顧客回應方面，能有獨特之能力。 | 經營管理 |
| 王勝嘉 邱元錫 張紂微 [2002] | 推動 TPM 之自主保養及個別改善之模式包含： 1.推動 TPM 的組織、人員職掌動作方式。 2.推動 TPM 所需之教育訓練與宣導方式。 3.導入 TPM 之主計畫製作與里程預估。 4.全面導入 TPM 兩大支柱的詳細步驟及作法。 | 經營管理 |

| 學 者 | 研 究 結 果 | 備註 |
|------------------------------------|--|----------|
| | 5.TPM 之目標設定與導入時應注意事項。 6.適合中小企業之 TPM 效益衡量指標等。 | |
| 吳志雄 [2002] | TPM 藉由人與設備的體質改善，達到提高設備總合效率，提升生產力、品質及降低成本之目的，進而精進整體企業。遂行 TPM 涵蓋八大支柱如個別改善、自主保全、計畫保全、品質保全、開發管理、教育訓練、安全衛生及間接部門等，旨在消除如設備效率化之八大損失、人效率化之五大損失及原物件效率化之三大損失等，並在作業中運用目標管理、目視管理、診斷稽核系統、FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)、PM (P-4M) 分析及 MQ 分析等手法，且用 PDCA 管理循環來運作整個 TPM 推動，並以性能指標來呈現生產、品質、成本、交期、安全及士氣等之運作效益。 | 經營 管理 |
| 江中守 [2009] | TPM 以生產設備為改善核心，持續進行內部改善活動，提升設備總合效率，及人員能力的提升進而強化公司競爭優勢。 | 經營 管理 |
| 鄭坤憑 [2009] | TPM 強調高效能的生產力、準時交貨、增進顧客滿意度，其首要目標是藉人與設備的體質改善，進而改善企業體質，以達零損失、零故障、零缺點及零災害，並進階到以生產管理效率極限化、新產品開發能力，以達高品質低成本目標，來提升企業整體競爭力。 | 經營 管理 |
| 許靖河 [2010] | 藉由人和設備的體質改善，將製造的各種損失降為零，達到改善企業的體質，TPM 不單純僅設備維護保養的活動，更應以生產設備為改善核心，持續進行內部精進改善活動，提升設備總合效率及強化公司競爭優勢等分析；故若從根本、基層全員推展 TPM 活動，結合持續改善、精實生產以落實、整合、教導、評議，並透過科學手法，改變工作態度、可有效提升工作方法與能力，藉此拉大與競爭者的距離。 | 經營 管理 |
| 藍天雄 莊烘銘 何明果 李宜錡 [2007] | 推行 TPM 旨在減少因設備而造成的損失，其研究顯示未實施 TPM 活動前之重要生產設備之稼動率、製程良品率及綜合生產效率之數據資料，相較於實施後之數據比較，證實實施 TPM 活動後設備稼動率提升了 3.7%；製程良品率提升 2.8%、綜合效率提升 11.57%，證明工廠實施 TPM 活動，可減少因為設備問題所造成的各項損失。 | 經營 管理 |

資料來源：本研究整理

2.3 維護規劃(Maintenance Plan, MP)

2.3.1 維護規劃之概念

1960 年代前的維修作業大多以設計者的經驗及觀點來規劃相關工作項目與執行步序，當系統交由使用者運作後，發現其作業要求多是單方面主觀的設計，缺乏使用者運作介面考量，這不僅造成維護複雜度，徒增從業人員負擔，甚至設計理念與實務推展落差而窒礙難行等問題層出不窮，此等維護作業缺乏系統化思考進而導致系統運作效益不彰，而衍生了設計階段即以同步工程考量產品至服勤場景所需顧慮的適應性概念孕育而生。(柯輝耀，2008)

維修規劃主要透過研發設計者的初始設計資料如可靠度、維護度與安全度，並結合使用者的需求與經驗加以設計，其前提必須確保系統可用度、最低維持成本及系統效益(System Effectiveness)的發揮，根據大型複雜系統壽命週期成本分配的調查顯示，75%以上的產品壽命週期成本(Life Cycle Cost, LCC)耗費於實際運作與維護作業(Blanchard, 1991)，因此，就成本觀以 80/20 法則考量，維修規劃的重要度不容忽略，而規劃的目標不僅期望系統不發生失效，更希望一但發生失效亦能迅速復原(Turn-Around)；其次，如何確保使用單位的訓練規劃、設施整建、技術手冊編撰、技術能量籌建以及備份零件籌購管理，都是維修規劃需要深入探討的議題。

2.3.2 維護規劃之應用

航空業：

維修計畫有助於確保安全、可靠與符合經濟效益的飛機性能；針對旗下的商用客機，波音與航空業者及主管機關合作發展與管理維修計畫，隨著與時俱進的飛機性能知識，這些經驗也以新資訊與最佳化要求的型態運用在維修計畫上，近年來，波音透過現役性能數據的統計分析，在與航空業者及主管當局合作提升維修計畫效率上獲得了顯著的進展。(Brian McLoughlin.,Farshad Doulashahi.,Jason Onorati, 2011)

產品發展階段的維修規劃可能藉由類似裝備法、實驗室測試值、可靠度預估法來籌劃，但隨著服勤場景轉換，受了使用、維修及環境等條件的影響，初期規劃的適用性即應隨著產品在各個壽命週期階段產生結果的回饋與修正，使其不斷檢討與精進，就以國內某航空工業發展戰機為例，從全型發展(Full Scale Development, FSD)階段，即利用一架全尺寸試驗機體及各重要結構零組件，執行設計服役操作負載頻譜試驗，即全機耐久性試驗及結構零組件容損與耐久性試驗，來加以研析確認飛機結構設計的缺點或瑕疵，並持續反映於量產型飛機之設計修改，另於服役階段後，著手推展積極的機隊管理作為，藉由戰力前導機(Leader The Force, LTF)小機群超前全機隊平均操

作時數的服役參數蒐集及重要控制點的追蹤與拆檢，並依統計分析結果回饋 RCM 機制來修正整個維修規劃，以確保達到 8000 飛行小時的服役壽命；上述的研究、分析、回饋與改善循環係假設飛機的關鍵性結構於製造過程已含有小瑕疵或裂紋的存在，而在服役操作期間，由於反覆受到負載的作用及飛行操作環境影響，結構若有初始裂紋則可能漸漸生長。因此，從初始設計即應適當的選擇材料，考量負載路徑，適當的檢查時距修正及持續的設計改善，使其設計的應力程度在容損設計規範內，防範機體結構損害及影響飛行安全的現象發生。執行上述計畫的兩個主要目的有：

1. 全型發展階段(研發階段)

建立、評估及驗證飛機之結構設計，並確認在強度、剛度、容損、耐久性 & 服役壽命等方面是否滿足需求。

2. 機隊管理階段(服役階段)

(1) 持續追蹤每架飛機的使用情況。

(2) 評估飛機實際使用改變對結構、重要元件之影響，修訂維修規劃。

(3) 執行必要的維護、矯正行動，以維持機隊運作整備、保障飛行安全、管控運作成本，期運作壽命及效益發揮最大化。

傅憲端[2007]航空公司能安全營運係仰賴航機的維護工作，其核心主要為航機維護計畫、可靠性計畫的完善與否，再配合維修作業規劃，三者需緊密的連結才能對安全運作有保障，該研究綜整個案公司相關航機營運營收狀況成本資料及航機維修成本架構的觀點，分析航機整體維護計畫及可靠性計畫的執行及配合維修作業規劃的效益，提出解決方案的改善構想與改善作法，以維修作業規劃為考量起始點，以航機維護計畫及可靠性計畫為範疇，將飛航營運系統維修體系分成航機維護計畫需求及維修作業規劃與維修作業管理三大構面進行檢討分析，以作為改善作業的基礎；結果顯示，航機運作除符合法規要求，使其保持最高的安全適航，及使以最小的維護成本滿足營運需求，對航機維護計畫及可靠性計畫作持續性的改善，可得到實際的效益。

製造業：

林偉仁[2005]設備、製程與人員是構成生產製造活動的三大要素，為了保持設備持續的運作，使生產流程更加順暢，就設備維護管理的建構及生產製造活動，深入剖析 RCM、HPMM 與 TPM 各系統的運作構面，整理出是項彼此間相對關係，透過問卷調查與結構方程式模型，證實了台灣製造業採用這些系統確實對於設備維護管理績效產生正向影響，進而正向影響了生產製造績效，同時 TPM 系統相較其它設備維護管理系統對生產製造績效的影響效果為大。

李典慶、張聖坤、唐文勇[2004]最佳的檢測及維修在保證結構於設計工作壽命期內之可靠指標大於最低可靠指標的基礎上，使得結構生命週期內總的期望費用最小。該研究以受點腐蝕損傷的船體構件為例，分析了最佳檢測及維修策略的制定過程，指出最佳的檢測是在結構的可靠指標低於最低可靠指標前就對結構進行檢測，除風險與成本之間能夠達到平衡，並達檢測及維修策略最佳化。

王國雄、蔡有藤[2005]指出光碟片產製過程之機器設備運轉速度極快，稍有不慎，極易造成不良率偏高現象；為減少不良率的產生並提高生產效能，就光碟製造設備架構遠端監測，以發展智慧型故障診斷展即時監控系統與遠距維修支援系統，當設備處於性能衰退或故障狀態，適時提供必要資訊進行即時維修，並結合故障樹分析與模糊聚類分析(Fuzzy cluster identification)技術，分析評估其失效率與可靠度退化；透過失效模式影響分析，訂定不同為維護層級，分析不同維護作業對這些設備可靠度、失效率影響。更進一步利用馬可夫程序(Markov process)分析系統的維護特性及維護特徵參數，據以建立系統的動態維護模型，整合人力資源與生產排程，規劃光碟製程設備預防維護作業。

聶錦楨[2011]要確保良好的設備運作狀態，必須以預防性的角度進行設備維護。該研究針對具備立即監控技術的設備，採用離散時間異質馬可夫式衰退模型來描述設備狀態的變化，以(一)上三角轉移機率矩陣描述設備狀態的衰退；(二)轉移機率的改變描述設備的老化現象(狀態衰退的「加速」)。並假設(三)有多種不完全維護動作可供選用；(四)維護動作具有失敗的風險；(五)檢測點之間的運作成本隨設備年齡與狀態而變化等，並結合動態規劃與滾動時間軸概念，以未來數期內最小期望總成本現值為目標，發展出動態維護策略演算法，時間複雜度為老化機制的相關參數模式假設中，採用中斷式幾何分配描述狀態衰退幅度(即狀態轉移前後的狀態值之差)，並將分配參數視為設備年齡的遞增函數(可配適二元羅吉斯迴歸模型)，使各期狀態轉移機率隨年齡而變化；結果顯示該法可確實簡化參數的估計與縮減其所需歷史資料量，另在多種類型的參數設定值組合下，皆具有顯著的成本縮減效果。

軌道業：

詹豐隆[2000]諸多大型複雜系統的發展，需考量如何將顧客需求融入系統的規劃中，以提升系統的競爭力尤顯重要，該研究結合系統工程的手法，運用決策科學的工具，如目標層級架構及其他分析工具如：環境分析(簡稱SWOT)、聲音內含表單(voice of content table, 簡稱VOCT)、品質功能展開(quality function deployment, 簡稱QFD)、活動關係分析，以建立系統規劃架構，並以捷運機廠維修流程規劃為例驗證該規劃架構。其研究發現系

統規劃架構有助於分析系統中的問題，並且提供了評估準則擬定的參考，系統流程規劃架構並可以協助其他類似系統工作流程的建立，不僅有效解決捷運機廠規劃方案的架構程序，並提出機廠流程規劃架構更可作為廣大製造業新廠房設立或再生工程（re-engineering）之參考，對於服務系統也能參考本規劃流程以建立系統中的服務程序。

薛家豪[1998]為能使捷運系統長期保持良好的運轉狀態，對於維修策略之擬定與分析以及維修作業之規劃與執行即為重要的決策問題；如何評估維修策略是否達到預期的目標，則就必須透過績效指標的衡量，隨時監控運轉的績效。該研究以灰色多屬性決策方法來進行維修作業之選取（每日檢修作業為例），俾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，有助於決策管理者進行維修目標與策略之修正與規劃，進而發揮系統運轉效率，提升服務品質（例如：每日電聯車之正常發車率等）。研究顯示，經由與機廠專家的訪談，認為透過灰色多屬性決策的方法提供了維修作業選取之規劃參考，而後續可以就其他檢修週期進行相同的分析。另外，維修績效評估指標的建立的確給予捷運機廠重要的評估依據，後續可以建構一個維修指標系統（Maintenance Indicator System）來監控捷運系統之維修品質，確保系統之穩定。

學術研究：

蔡燕純[2004]為使系統在最小成本發揮最大效益，除了在系統研發、製造階段投入心力，更不可忽視規劃維護作業的重要性，適當的維護策略不但可以延長產品壽命，提高可靠度、提高效率及安全性，還可降低成本，該研究利用馬可夫鏈建立一結合動態可靠度模式之預防維護模型，分析維護作業與系統性能、壽命及成本之關係，結果顯示利用維護回復率將系統實行各維護活動如預防保養與修理後，系統無法完全修復，故將其可靠度可回復與無法回復之部分再區分為兩個狀態來分析計算，利用儲存維護未能回復量來表現系統雖經維修後，仍有部分損傷累積於系統內部，此等損傷的存在是系統性能退化的因素，為了保證系統運作安全性，以運轉最低可靠度做為系統實行預防更換作業的基準，並加入成本概念來決策最佳修理週期及更換標準之設定。關於維護規劃之應用的相關研究綜整如下表 3 所示。

表 3 維護規劃之應用相關研究

| 學者 | 研究結果 | 備註 |
|---------------|--|------|
| 柯輝耀 (2008) | 傳統的維修作業大多以設計者的經驗及觀點來規劃相關工作項目與執行步續，系統服勤後發現作業要求多是設計者主觀的規劃，缺乏使用者運作介面考量，造成維護複雜度且徒增作業負擔，甚至設計理念與實務推展落差等問題，其維護作業缺乏系統化思考進而導致系統運作效益不彰，而衍生了設計階段即 | 學術研究 |

| 學 者 | 研 究 結 果 | 備註 |
|--|---|-----|
| | 以同步工程考量產品至服勤場景所需顧慮的維護規劃。 | |
| Brian McLoughlin Farshad Doulashahi Jason Onorati (2011) | 維修計畫有助於確保安全、可靠與符合經濟效益的飛機性能；波音與航空業者及主管機關合作發展與管理維修計畫，隨著與時俱進的飛機性能知識，透過新資訊與最佳化要求的型態運用在維修計畫上，近年來更藉由現役性能數據的統計分析，並與航空業者及主管當局合作提升維修計畫效率上獲得了顯著的進展。 | 航空業 |
| 李典慶 張聖坤 唐文勇 [2004] | 最佳的檢測及維修策略在保證結構於設計工作壽命期內之可靠指標大於最低可靠指標的基礎上，使得結構生命週期內總的期望費用最小，透過最佳檢測及維修策略制定過程的分析，指出最佳的檢測是在結構的可靠指標低於最低可靠指標前就對結構進行檢測，除風險與成本之間能夠達到平衡，並達檢測及維修策略最佳化。 | 製造業 |
| 王國雄 蔡有藤 [2005] | 透過故障樹分析與模糊聚類分析技術，分析評估其失效率與可靠度退化；並藉由失效模式影響分析，訂定不同為維護層級，分析不同維護作業對這些設備可靠度、失效率影響。更進一步利用馬可夫程序分析系統的維護特性及維護特徵參數，據以建立系統的動態維護模型，整合人力資源與生產排程，規劃製程設備預防維護作業。 | 製造業 |
| 傅憲端 [2007] | 航空公司能安全營運係仰賴航機的維護工作，其核心主要為航機維護計畫、可靠性計畫的完善與否，再配合維修作業規劃，三者需緊密的連結才能對安全運作有保障，透過航機整體維護計畫及可靠性計畫的執行及配合維修作業規劃的效益分析，並以維修作業規劃為考量起始點，航機維護計畫及可靠性計畫為範疇，將飛航營運系統維修體系分成航機維護計畫需求及維修作業規畫與維修作業管理三大構面進行檢討分析，使其保持最高的安全適航，及使以最小的維護成本滿足營運需求，對航機維護計畫及可靠性計畫作持續性的改善，可得到實際的效益。 | 航空業 |
| 詹豐隆 [2000] | 大型複雜系統的發展，需考量如何將顧客需求融入系統的規劃中，以提升系統的競爭力，其研究結合系統工程的手法，運用決策科學的工具，如目標層級架構及其他分析工具如：環境分析、聲音內含表單、品質功能展開、活動關係分析，以建立系 | 軌道業 |

| 學者 | 研究結果 | 備註 |
|---------------|--|------|
| | 統規劃架構，以捷運機廠維修流程規劃為例驗證該規劃架構。其研究發現系統規劃架構有助於分析系統中的問題。 | |
| 薛家豪 [1998] | 為使捷運系統長期保持良好的運轉狀態，維修策略之擬定與分析以及維修作業之規劃與執行即為重要的決策問題；其研究以灰色多屬性決策方法來進行維修作業之選取（每日檢修作業為例），俾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，有助於決策管理者進行維修目標與策略之修正與規劃，進而發揮系統運轉效率，提升服務品質。 | 軌道業 |
| 蔡燕純 [2004] | 為使系統最小成本發揮最大效益，除系統研發、製造階段投入心力，更不可忽視規劃維護作業的重要性，適當的維護策略不但可以延長產品壽命，提高可靠度、提高效率及安全性，亦降低成本，該研究利用馬可夫鏈建立一結合動態可靠度模式之預防維護模型，分析維護作業與系統性能、壽命及成本之關係，結果顯示為了保證系統運作安全性，以運轉最低可靠度做為系統實行預防更換作業的基準，並加入成本概念來決策最佳修理週期及更換標準之設定。 | 學術研究 |

資料來源：本研究整理。

2.4 可靠度(Reliability)

2.4.1 可靠度工程概念

可靠度的研究可溯及約 1940 年代雷達系統研發過程的故障問題衍生，為了減低故障率運用了科學管理技術-可靠度，惟當時並未命名為可靠度，然而，自此漸漸的發展，而後至 1950 年代，可靠度的想法由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) 針對電子裝備可靠度問題進行研究所獲得的結論為基礎，同時賦予可靠度之定義為：『可靠度於產品既定的時間內，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』。由此可看出可靠度係由『功能』、『使用條件』、『時間』及『成功機率』等四要素所構成，且以『成功機率』作為產品可靠度的關鍵效益指標。(真壁肇、陳耀茂，1989)(柯輝耀，2008)

可靠度係指產品被使用時，能長時間維持預期的設計成效之能力。也就是在指定之條件及時間內，執行所要求之功/性能的能力或機率。由於產品最終由使用者決定接受與否，因此，可靠度愈高，顧客之滿意程度也越高。

在系統發展初期，維修計畫的形成，主要以預防性分析其產品潛存失效模式與影響效應，以及硬體可靠度之平均失效間隔來規劃預防性維修計畫的時距，此屬設計過程中驗證分析的一種方法，也是設計發展初期導入可靠度技術的主要目的，其利用既存的資料，如類似裝備、功能的產品參數，或透過零件計數法等，以數學模式與技術及品質因子分析、設計產品可靠度，使其達成可靠度預估與設計目標。

系統服勤階段起，更需透過可靠度管理以蒐集維修資料，俾利掌控失效產生的影響效應，提出矯正對策及改善設計弱點，並針對維修計畫之維護、檢查與翻修等時距，評估預防性維護措施的有效性，期降低作業風險，同時評量預防性維修規劃之適切性及推算可靠度參數值，以作為預防性維修分析與修訂維修計畫之依據，並檢討維護方案的成本經濟性。故可靠度設計是為系統、設備維修規劃之重要指標之一，亦是確保系統品質、效能，且能經久耐用的設計考量。

2.4.2 可靠度工程之應用

電力業：

郭子瑜[2012]維護規劃應考量可靠度、可用度、維護度和低成本，其中除了測試和維修時間外，亦不容忽略維修資源的影響，例如可投入維修人員的數目，故於可靠度與維護度分析時，需將維修資源視為重要參數來探討，同時考慮此參數失效對維護策略釐定的影響。該研究以通用等候理論為分析依據，配合真實失效資料，建構電廠幫浦之可靠度分析模式俾分析系統失效情形，再考量維修資源對分析結果的影響，研究證實適當地增加維修資源數量和施行預防維護對幫浦的績效確實有正面的影響，代表考慮維修資源帶來的影響和施行預防維護有其必要性。

軌道業：

梁家祥[2010]為了能達到高品質、高可靠度的捷運系統，於規劃期間就同時考慮系統的可靠度、可用度及可維修性為近代捷運工程建設的新趨勢，並根據不同設計模式下，進行功能分析與可靠度方塊圖對應關係評估，根據其系統的可靠性計算方法及主要衡量指標，比對分析各種設計方案之間的優劣。

邱彥達[2010]為了使捷運系統能符合高品質、高可靠度的要求，在設計規劃階段就必須同時考慮系統營運之後的可靠度(Reliability)、可用度(Availability)及可維修度(Maintainability)，此分析技術稱為RAM分析，為目前捷運系統興建的新趨勢。

該研究針對號誌系統進行相關分析，期使捷運系統可符合高運量、安全性、高效率以及舒適性之要求，達有效監控列車運行，提供安全的行車路徑，避免列車處於危險狀態。

製造業：

劉正良、張建國[2003]在系統設計初期加入可靠度、維護度與妥善率等設計考量，除可降低操作支援成本外，更使產品週期在開發階段即能預期產品之週期成本。該研究以長期的觀點研究操作及支援成本與可靠度、維護度、妥善率之相互關係，提出一套獲得操作與支援成本的方法。

石化業：

方寶嬪、王振華[2011]設備保養觀念從早期的被動式故障維修漸轉成較主動的保養性維修，對於設備保養週期的決定，影響到其作業產線及生產成本，最佳的維修保養週期，可減少故障維修時所支出的大額成本，並可有效降低作業生產曾業人員工作負荷，故需藉由故障記錄，有效地轉化為可靠度資訊，而失效率數據來自維修紀錄的後處理(工單)，惟經常發現多數工單因故使資料記載不完全，最後導致多數資料還未進入後處理之失效率計算階段，即面臨刪除的命運。這些被刪除的數據不僅可惜，更重要的是計算品質已因其受到污染，而影響失效率計算的準確性。關於可靠度工程之應用的相關研究綜整如下表 4 所示。

表 4 可靠度工程之應用相關研究

| 學者 | 研究結果 | 備註 |
|---------------|---|-----|
| 郭子瑜 [2012] | 維護規劃應考量可靠度、可用度、維護度和低成本，其中除了測試和維修時間外，亦不容忽略維修資源的影響，例如可投入維修人員的數目，故於可靠度與維護度分析時，需將維修資源視為重要參數來探討，同時考慮此參數失效對維護策略釐定的影響。 | 電力業 |
| 梁家祥 [2010] | 為達高品質、高可靠度的捷運系統，於規劃期間就同時考慮系統的可靠度、可用度及可維修性為近代捷運工程建設的新趨勢，並根據不同設計模式下，進行功能分析與可靠度方塊圖對應關係評估，根據其系統的可靠性計算方法及主要衡量指標，比對分析各種設計方案之間的優劣。 | 軌道業 |
| 邱彥達 [2010] | 為使捷運系統能符合高品質、高可靠度的要求，在設計規劃階段就必須同時考慮系統營運之後的可靠度、可用度及可維修度，此分析技術稱為 RAM 分析，為目前捷運系統興建的新趨勢。 | 軌道業 |
| 劉正良 張建國 | 在系統設計初期加入可靠度、維護度與妥善率等設計考量，除可降低操作支援成本外，更使產品週期在開發階段即能預期產品之 | 製造業 |

| 學 者 | 研 究 結 果 | 備 註 |
|----------------------|--|-----|
| [2003] | 週期成本，其研究以長期的觀點研究操作及支援成本與可靠度、維護度、妥善率之相互關係，提出一套獲得操作與支援成本的方法。 | |
| 方寶嬪 王振華 [2011] | 設備保養觀念從早期的被動式故障維修漸轉成較主動的保養性維修，對於設備保養週期的決定，影響到其作業產線及生產成本，最佳的維修保養週期，可減少故障維修時所支出的大額成本，並可有效降低作業生產曾業人員工作負荷，故需藉由故障記錄，有效地轉化為可靠度資訊，而失效率數據來自維修紀錄的後處理(工單)。 | 石化業 |

資料來源：本研究整理

2.5 失效模式與效應分析(Failure Mode And Effects Analysis, FMEA)

2.5.1 失效模式與效應分析之概念

失效模式與效應分析的發展約莫始於 1950 年代，航空器引擎技術變革為噴射引擎(Jet engine)而加以開發之設計分析方法，由於當時飛行操控系統因應性能提升須採用更心更為複雜的油壓或電氣裝置，為了防範硬體失效所致的飛行安全事件，甚而損失人員性命，格魯曼(Grumman) 公司開發了失效模式、效應與關鍵性分析法以進行航空器可靠度設計；此外，美國航空太空總署(NASA)執行阿波羅(APOLLO)計畫時，亦將可靠度及安全管理定為發展合約條款，明文要求合約商必須實施失效模式、效應與關鍵性分析，就此，美國在太空科技發展計畫上，廣泛的運用 FMEA 於可靠度保證與安全性之評估上。(柯輝耀，2001)

FMEA 屬於結構化、預防性的系統分析技術，所謂結構化是指其運用所建立之分析程序，依表格逐欄位分析的系統化(Systematic)分析，而預防性係指其最佳執行時機是在事故發生前，有效的 FMEA 作業，除可推判可能的失效模式，探討失效肇因，並採行預防性措施及謀求策進作為外，更可減低諸多事後變更或補救潛在風險，以提高產品可靠度。故透過此方法在系統設計或使用階段均可有效達到防範未然及提升可靠度設計之目的，在 ISO 9004(2000)品質管理系統中，已明確將可靠度、失效模式與效應分析及故障樹分析等技術，提列為設計與發展潛在風險評價的主要工具。(柯輝耀，2008)

FMEA 施行主要從設計的早期階段開始，藉以『預見失效及預防失效』之技術控制設計品質，此舉將有助於對設計的評估及作為擇選改進措施的先後順序之參考依據；FMEA 分析運用了系統化分析的概念，而系統化的定義(Blanchard, B.S., 1991)(Haasl, D. F, Roberts, N. H., Vesely, W. E. and Goldberg,

F. F., 1981)係指『一項由許多交互作用(Interaction)之離散要素(Discrete element)所組成，而具備特定功能(Function)或性能(Performance)之確定的實體』，另美國國防部在系統安全計畫要件(DOD,1993)更加透徹將系統一辭釋意為：『系統是人員、程序、物料、工具、設施和軟體的混合體，不論其複雜性如何，此混合體之各組成共同作用於所欲操作的環境，藉以執行某項作業達成某項生產、支援、任務之需要。』此一定義泛指系統的組成份子諸如人力/訓練、供應支援、工具/設備、設施規劃、技術手冊、維修規劃、包裝/搬運/儲存/運輸、電腦資訊支援及管理程序作為等，環環相扣缺一不可，而分析者應基於全系統的觀點，以莫非定律(Murphy's Law)所言『任何可能發生之錯誤，均將必然發生』，並本著事故發生最劣條件下(worst-case)來加以設想前因後果，加以確認系統中所有可能的故障，根據對故障模式的分析，確定每一故障對系統工作的影響，找出單點故障，並按故障模式的嚴重程度及發生機率，確定其危害性。(GJB 1391-92，1992)

FMEA 的執行效益主要有：(MIL-STD-1629，1980., SAE-J 1739，2002)

1. 依據系統化的分析程序，來輔助設計、生產及組裝人員深入檢討各層次可能發生的失效模式，找出設計、生產及組裝上的弱點，藉此加以改進或防範。
2. 提供失效準則，作為可靠度分析之參考依據。
3. 產生潛在失效模式清單，發掘可靠度關鍵項目，列入設計分析、驗證、生產製造、後勤工程及可靠度管制之重點，以便建立設計改進與發展試驗之優先順序。
3. 提供完整的資料以為製程檢驗規劃、測試標準、檢驗程序、檢試規格及其他產品管制措施建立之參考。
4. 提供安全設計與評估資料。
5. 作為設計審查之輸入資料。
6. 作為維護作業分析之參考資料。

FMEA 作業與系統設計息息相關，且具互補的功效，故於產品的全壽命週期中，必須持續不斷的實施，其所得的成果建議亦是設計改善的重要參考資料。

2.5.2 失效模式與效應分析法之應用

航空業：

楊朝鈞[2003]提出之失效模式及效應分析除了可以系統化、數據化的方式增加航空業維護硬體設施之效益、提升飛安品質外；與可靠度中心式維修手法的結合，以最合理的成本將危害風險降至最低，讓飛航安全不再是航空業成本的一大負擔。FMEA 應用範圍廣泛，該研究為使其適切於航空場站，

除分析其風險評價所採用風險優先數之缺點外，並以 TOPSIS 方法修正，且經實例分析後證實可符合實務面之需要。

醫療業：

林淑娟[1993]運用醫療失效模式及效應分析(Healthcare Failure Mode & Effects Analysis, HFMEA)評估手術室流程潛在風險因子，並提出改善手術室病人安全之可行方案。該研究以某區域教學醫院手術室流程中之「器械供應系統」進行潛在失效模式及效應分析評估，研究結果顯示 HFMEA 方法在醫療服務業上能偵測出醫療系統病人安全的風險因子俾有效掌控潛在失效模式、失效原因及高風險事件，並予以提出策進作為，有效防範危害，提升以病人安全為首的醫療服務品質。

劉侃[2006]運用醫療失效模式及效應分析評估護理人員給藥流程潛在風險因子，並提出改善病人給藥安全之可行性方案。其運用醫療資訊技術建立一套教育系統，提供醫療人員即時正確的訊息以及決策輔助工具更加確保病人用藥的安全，亦利用資訊技術去發掘給藥過程的不良給藥事件或幾近失誤的事件，作為改善及學習的依據。

製造業：

湯敏儷[2005]從審計風險(Audit Risk, AR)觀點探討審計風險的量化，運用企業於設計與製程上預防風險所使用的失效模式與效應分析工具，建立審計風險量化表，並以光陽集團公司於 1998 年至 2004 年所累積的內部稽核缺失項目，採專家評價方式，先將缺失項目依失效模式與效應分析工具整理成失效模式與效應分析格式，再依照失效模式與效應分析評點模式制定審計風險評估準則，導出 RPN(Risk Priority Number) 風險關鍵指數值，完成審計失效模式與效應分析表，以協助經營者提升企業的競爭優勢，提高其為企業除弊興利之附加價值。

鄭人福[2007]失效模式與效應分析為 TS16949 中的核心工具之一，其目的在於工程人員利用各式表格進行檢索，在產品進行開發設計之時，便利用嚴密的分析作業，預先陳列出所有系統可能發生的失效情形，以及其可能所造成的不良影響，從而進行針對性的預防措施以及解決方案，以期能達到確實的預防效果，確實降低產品發生失效所造成的成本，經由安全氣囊系統個案研究證實失效模式與效應分析對安全氣囊系統設計有顯著的改善效益。

周智偉[2012]提出簡化失效模式及效應分析並與標準作業程序(Standard Operating Procedure SOP)結合應用的方式，除了可以系統化、數據化的方式改善半導體設備組裝製程之效益、提升設備組裝之可靠與品質外也可以以合理的成本將危害風險降至最低，藉由半導體設備製造業的應用實績，除分析其風險評估所採用風險優先數評等方式，與實行上所遭遇到之窒礙點，並應

用簡化與標準化方法，失效模式與效應分析與標準化的作業程序（SOP），為設備生產線建立出較容易實行的作業方式。

方鈞[1998]整合了失效模式、效應與關鍵性分析、故障樹及事件樹等三種分析方法建立半導體製程改善研究架構，並以某半導體晶圓廠實例，探討運用失效模式與效應分析方法以改善半導體製程技術。

胡瑞珉[2011]以半導體製造商於新產品導入階段即推動失效模式與效應分析實施方法，篩選潛在的失效模式，來協助深溝式電容(Deep Trench Capacitor)製程模組段之製程改善活動，達到試產良率提升的階段性目標，個案結果顯示試產階段實施失效模式與效應分析尤為重要。

吳建輝[2010]利用失誤模式與影響分析來剖析追蹤因設備故障所致洩漏的問題點，並增加矽甲烷供應系統的穩定性、提升人員作業的安全性、改善供應氣體的品質、減少意外災害發生機率。研究結果顯示，該氣體供應系統在導入失效模式與效應分析方法後，可明顯獲得失效改善之重點，有效降低風險優先指數，提升系統之可靠度。

物流業：

陳建誠[2006]運用失效模式與效應分析技術於物流作業流程，符合醫藥品的特性、法律觀點及貨櫃溫度管理，發掘其作業流程的失效模式、效應與原因，以模糊德菲法(Fuzzy Delphi Method)凝聚群體決策共識，評估失效模式風險值，並運用灰關聯分析(Grey Relational Analysis)決定失效模式之改善順序，建立醫藥物流作業流程(Pharmaceutical Logistics Processes)經由失效模式與效應分析遂行，可發掘物流作業於醫藥品不足之處，並減少不良之成本，所累積的知識與經驗，可提供新流程設計之參考依據。關於失效模式與效應分析法之應用的相關研究綜整如下表 5 所示。

表 5 失效模式與效應分析法之應用相關研究

| 學者 | 研究結果 | 備註 |
|---------------|--|-----|
| 楊朝鈞 [2003] | 失效模式及效應分析除了可以系統化、數據化的方式增加航空業維護硬體設施之效益、提升飛安品質外；與可靠度中心式維修手法的結合，以最合理的成本將危害風險降至最低。 | 航空業 |
| 林淑娟 [1993] | 運用醫療失效模式及效應分析評估手術室流程潛在風險因子，並提出改善手術室病人安全之可行方案，其研究結果顯示 HFMEA 方法在醫療服務業上能偵測出醫療系統病人安全的風險因子俾有效掌控潛在失效模式、失效原因及高風險事件，並予以提出策進作為，有效防範危害，提升以病人安全為首的醫療服務品質。 | 醫療業 |
| 劉侃 [2006] | 運用醫療失效模式及效應分析評估護理人員給藥流程潛在風險因子，並提出改善病人給藥安全之可行性方案，該技術可發掘給藥過程的不良給藥事件或幾近失誤的事件，作為改善及學習的依 | 醫療業 |

| 學 者 | 研 究 結 果 | 備 註 |
|---------------|---|-----|
| | 據。。 | |
| 湯敏儷 [2005] | 運用企業於設計與製程上預防風險所使用的失效模式與效應分析失效模式與效應分析工具，建立審計風險量化表，採專家評價方式，先將缺失項目依失效模式與效應分析工具整理成失效模式與效應分析格式，再依照失效模式與效應分析評點模式制定審計風險評估準則，導出 RPN 風險關鍵指數值，完成審計失效模式與效應分析表，以協助經營者提升昇企業的競爭優勢，提高其為企業除弊興利之附加價值。 | 製造業 |
| 鄭人福 [2007] | 失效模式與效應分析目的在於工程人員利用各式表格進行檢索，在產品進行開發設計之時，便利用嚴密的分析作業，預先陳列出所有系統可能發生的失效情形，以及其可能所造成的不良影響，從而進行針對性的預防措施以及解決方案，期能達到確實的預防效果，確實降低產品發生失效所造成的成本。 | 製造業 |
| 周智偉 [2012] | 提出簡化失效模式及效應分析並與標準作業程序結合應用的方式，除了可以系統化、數據化的方式改善半導體設備組裝製程之效益、提升設備組裝之可靠與品質外也可以以合理的成本將危害風險降至最低。 | 製造業 |
| 方 鈞 [1998] | 整合了失效模式、效應與關鍵性分析、故障樹及事件樹等三種分析方法建立半導體製程改善研究架構，並以某半導體晶圓廠實例，探討運用失效模式與效應分析方法以改善半導體製程技術。 | 製造業 |
| 胡瑞珉 [2011] | 於新產品導入階段即推動失效模式與效應分析實施方法，篩選潛在的失效模式，來協助製程模組段之製程改善活動，達到試產良率提升的階段性目標，其結果顯示試產階段實施失效模式與效應分析尤為重要。 | 製造業 |
| 吳建輝 [2010] | 利用失誤模式與影響分析來剖析追蹤因設備故障所致洩漏的問題點，並增加矽甲烷供應系統的穩定性、提升人員作業的安全性、改善供應氣體的品質、減少意外災害發生機率，其結果顯示在導入失效模式與效應分析分析方法後，可明顯獲得失效改善之重點，有效降低風險優先指數，提升系統之可靠度。 | 製造業 |
| 陳建誠 [2006] | 運用失效模式與效應分析技術於物流作業流程，發掘其作業流程的失效模式、效應與原因，以模糊德菲法凝聚群體決策共識，評估失效模式風險值，並運用灰關聯分析決定失效模式之改善順序，建立物流作業流程，以發掘物流作業不足之處及減少不良之成本，所累積的知識與經驗，可作為新流程設計之參考依據。 | 物流業 |

資料來源：本研究整理

2.6 系統安全分析(System Safety Analysis)

2.6.1 系統安全分析之概念

系統安全分析係運用工程及管理原則、規範及技術，使系統在其運轉的效能、時程及經費限制下，達到於產品壽命週期的各個階段皆具有最佳的安全度，其主要目的在於預防意外事件之發生，有效杜絕或降低意外事件之風險，而非意外事件發生後再採取補救矯正措施；常言道：『用最壞的打算做最好的準備』、『居安思危』簡單的兩句話，可知危害預防之觀念深植人心，孫子兵法又言：『安則靜、危則動。』，安全與危險僅一線之隔、正反相對之物，故不危險則平安無損傷之；然而，零危害、零傷害的觀念對系統安全分析既不實際也不全然適切，因為系統運作或作業環境絕對無零風險、零危害的事實存在。根據國際安全組織(ISO)對系統安全分析的理念，安全是傷害或損毀的風險(Risk)限於可接受程度的狀態，換言之，傷害或損毀若已超過可接受的程度，即是不安全，反之則安全，故進行安全分析的度量衡前，須先界定可接受的風險程度(an acceptable level)，作為接受與否的準據。(黃清賢，1996)

系統安全的發展史，可追溯至 1947 年，最早之系統安全分析報告-安全工程(ENGINEERING FOR SAFETY)提交給予美國航空科學院；在 1950 至 1960 年代，美國發展義勇兵彈道飛彈計畫(MINUTEMAN INTERCONTINENTAL BALLISTIC MISSILE, ICBM)率先導入系統安全觀念運用；1962 年間，美國空軍正式頒布 BSD EXHIBIT 62-41-SYSTEM SAFETY ENGINEERING FOR THE DEVELOPMENT OF AIRFORCE BALLISTIC MISSILES；到了 1963 年美軍公布 MIL-STD-38130, MILITARY SPECIFICATION - GENERAL REQUIREMENT FOR SAFETY ENGINEERING OF SYSTEM AND ASSOCIATED SUBSYSTEMS AND EQUIPMENT，並於 1966 年修訂為 MIL-STD-38130A；後續又於 1969 年正式公布了 MIL-STD-882 SYSTEM SAFETY PROGRAM FOR SYSTEMS AND ASSOCIATED SUBSYSTEM AND EQUIPMENT，並陸續修訂至 2012 年為 MIL-STD-882E 版。

安全分析的方法，依產品壽命週期階段，約略可區分為初步危害分析(Preliminary Hazard Analysis, PHA)，在概念設計至全型發展期間施行，依美軍規範 MIL-STD-882, System Safety Program Requirement，Task 202 說明 PHA 在性質上屬於歸納型的定性分析，此項分析工作通常為系統安全計畫中最早開始執行的一項分析工作，且應在系統先期發展或是概念設計階段之初期即應開始執行，執行 PHA 主要是用以對系統設計獲得一個初步的風險評估，目的則是期望儘早鑑別出在系統或是設計上可能存在的各類危害事

件，並且趁系統的設計尚未定型前，即能夠將各種安全設計特性或是用以消除抑或控制各類危害事件的方案納入到系統的設計中，使分析能夠獲致最大效益。

失效危害分析實施階段約自初步設計後期，貫穿全型發展階段至測試與評估初期，藉由失效模式與效應分析系統化的分析程序，加以辨識並量化單點失效，以輔助設計人員深入檢討各層次可能發生的失效模式，找出設計上的弱點，據以改進或防範，執行是項分析的結果，可有效發掘系統可靠度設計的關鍵項目，列為設計驗證及可靠度管制的重點，並作為系統設計評估的輸入參數及初期測試可靠度、安全性評估之考量，失效模式與效應分析亦將作為失效樹分析所需資料之前置作業。

操作及支援危害分析(Operating & Support Hazard Analysis, OSHA)的運行自全型發展後期，歷經測試評估、生產佈署至壽期終了，亦屬於歸納型的定性分析，該分析作業通常是系統安全工程最晚開始執行，其目的旨在鑑別並評估一系統在其整體操作及支援中，與其相關之環境、人員、程序以及裝備等危害事件，在執行上主要著重於人員對操作及維護程序的執行，分析其潛在的人為錯誤危害因子，以及各項作業與危害事件相互之關係，透過此分析方法的程序控制方式來降低危害事件的風險，並將分析結果與改進建議反映或落實到系統設計、技術手冊或教育訓練中。

2.6.2 初步危害分析(Preliminary Hazard Analysis, PHA)概念

執行 PHA 分析者通常根據所蒐集獲得之可供參考的系統相關資訊來執行分析，其中對危害事件則是透過對系統中可能會導致人員傷亡及/或系統裝備毀損的各種潛在之本質性或誘發性狀況的了解加以鑑別而得知，執行分析時，需依靠其本身對系統及其設計的瞭解熟悉、所蒐集獲得的相關資料、類似系統的歷史經驗資料，及其本身所累積的經驗等來協助獲取對危害事件及影響的瞭解。而且分析者必須先鑑別各類危害事件後，才能繼續加以分析並提出各項控制與改進建議方案，以消除或是控制這些危害事件並達到確保與增進系統之安全程度與危害預防目標。

PHA 的執行上，可將危害事件依照其本質加以區分成兩類：『本質性危害事件』與『誘發性危害事件』，分別說明如下：

1. 本質性危害事件：

某些行動、系統裝備、操作等，其本身即對人員及/或裝備等具有危害，這類屬於本質性的危害事件或是本質上即具有危害的工作項目，無法經由初步的重新設計予以消除。例如刀具在設計上就是要使刀刃鋒利以用來切削，因此刀具的一項危害事件及其影響可能是“鋒利的刀刃”以及“人員不慎被割傷”，此類危害事件並無法透過初步的重新設計予以消除，因此，通常是透過採用輔助或是防護裝備的設計及/或訂定特殊的使用守則-

技術手冊，並要求相關人員遵循-教育訓練，來降低其危害的嚴重程度或是其發生的機率。

2. 誘發性危害：

危害事件係由於設計上的疏忽或是缺乏對安全的謹慎態度而造成的，然這類屬於誘發性的危害事件通常可以透過重新設計(Redesign)、設計變更或是執行步驟上的重新安排，即能有效地降低其危害，甚至將其完全消除。例如某件誘發性危害事件為“金屬片的尖角銳邊曝露在外”，然其影響則為“人員遭受金屬片的銳邊割傷”。該例與上述刀具的例子具有相似之處，然而在此例中的危害事件卻可以透過在設計上明確訂定製造時，須對金屬片的尖角銳邊做倒角及/或彎曲處理，而完全消除人員遭受割傷的危害。

2.6.3 操作及支援危害分析(Operating & Support Hazard Analysis, OSHA)概念

執行 OSHA 分析者之分析技巧與初步危害分析相仿，差別在於分析標的係根據技術手冊撰寫單位所提供之系統操作/維修護程序資料-技術手冊來執行分析，分析者須依靠其本身對系統及其設計的瞭解與熟悉，所蒐集獲得的相關資料、類似系統的歷史經驗，以及本身所累積的經驗等，輔以鑑別出各項危害事件並評估危害事件之影響，進而加以分析並提出各項控制與改進建議，據以檢討設計修改、修訂相關技術文件或檢討教育訓練課目規劃，積極消除或是控制這些危害事件。

執行操作及支援危害分析時，主要係予以鑑別出系統在操作及維修護程序的敘述上可能存在之危害事件的潛在肇因，其分析的範圍包括了下列各項：

1. 不正確的操作/維修護程序敘述資料。
2. 操作/維修護程序的順序或是步驟的安排失當。
3. 操作/維修護程序的敘述不明確，包括下列各項：
 - (1) 難以明瞭。
 - (2) 意義不明確。
 - (3) 圖示不清楚。
 - (4) 資料在對應上不相符或不連貫。
4. 打字、繪圖或是在內容編輯上的錯誤。
5. 操作/維修護程序的資料不完整，包括下列各項：
 - (1) 圖示資料不夠充足。
 - (2) 檢查或測試項目的遺漏或是不夠完整。
 - (3) 圖表資料不夠詳盡。
6. 操作/維修護程序敘述資料過於繁複，包括下列各項：
 - (1) 重複的敘述出現的次數過於頻繁。

- (2)提供太多過於詳細且不必要的細部設計資料。
7. 被遺漏或是不合宜的警告、注意等警示，包括下列各項：
- (1)缺乏適當的警告、注意等警示提示。
 - (2)警告、注意等警示提示的位置安排不恰當。
 - (3)警告、注意等警示提示的敘述內容不恰當。

在執行 OSHA 分析後，針對欲改善的議題研擬處置對策時，有三點事項必須加以遵循或考量的，分述如后：

1. 對危害事件的控制須按系統安全優先順序，優先考量以重新設計或設計修改，以及裝設安全/保護裝置於以控制後，才能對仍無法消除之剩餘風險採用警示的方式加以控制。
2. 對危害程度嚴重等級屬於第一級重大者以及第二級關鍵者的危害事件，不可僅以提供警示的方式作為其唯一控制方式。
3. 警示可分為警告標示/標牌，以及警告標題/文字等，應遵循下列注意事項：
 - (1) 在使用上應儘量遵循並採用既定的規範或是標準。
 - (2) 對無既定的規範或標準可供參考者，可自行設計簡單易懂的圖案、符號或標語等，但應注意其明確性。
 - (3) 應先將技術文件中之操作/維護步驟中所會使用的警告符號、圖案以及其所代表的定義予以列舉，並針對系統中所使用之危害物質加以說明。

藉由系統化的分析法，逐步漸進的掌握風險、控制風險及消彌風險是為執行安全分析的最終目標，對於分析所得的結果具體加以改善，期望對現行或新增之各項維護作業更臻完善，俾確保人機介面的作業安全。

2.6.5 操作及支援危害分析法(Operating & Support Hazard Analysis, OSHA)之應用

化工業：

張珪庭[2002]為防範意外發生以達到操作安全的最終目的，危害分析是任何化工製程再運轉前一項必要的工作。對於一個高度複雜且其中的單元操作又是高度互相關連的批次製程來說，製程的操作步驟是一指定的時間序列進行，不同的操作步驟會使系統的定性因果關係跟著改變，若仍以人工方式進行演譯推論方法，勢對人力與時間需求龐大，故有其必要將安全分析過程自動化。該研究藉由派氏網為基礎之演譯推論策略運用在批次或半批次製程危害分析技巧上，來確認此一分析技巧的有效性與正確性。

製造業：

邱鐘慶[2009]以定性風險評估法-危害與可操作性評估方法(Hazards and Operability studies HAZOP)先找出製程相關危害因素，並提供適當改善建議，而後再結合定量風險評估方式-層級保護分析(Layers of Protection Analysis LOPA)將事故發生嚴重度等級與發生機率找出系統風險程度是否為可接受程度，該研究以氫氣拖車與鋼瓶組的供應系統為例逕行分析、比較各種安全儀器與系統設計的風險效益，俾證實危害分析方法的有效性。

電子業：

洪健仁[2009]半導體因大量使用毒性、易燃性氣體，造成製程中衍生大量廢氣，為使操作人員能在安全、無慮的環境中作業，就製程局部尾氣處理設備(local scrubber, LS)進行危害分析與評估。該研究藉由分析局部尾氣處理設備常見的危害以蒐集異常事件資料的訊息，並提出新的風險評估方法，代替 HazOp, FTA, ETA, 等常用的評估方式，以證實潛在的異常事件危害因素之影響包含人員安全、環境損害、設備與營運損失。

金融業：

陳俊德、張明松[2009]指出銀行夜間批次作業管控，常常遇到不可預期的資訊安全威脅風險，由於缺乏深入分析與探討各項資安事件發生原因，與剖析對銀行資訊資產衝擊做出明確定義，造成無法採取有效的資訊安全管理政策。該研究使用改良的危害與可操作性分析、主成份分析(Principal Component Analysis, PCA)、失誤樹等風險評估的方法進行危害原因分析，建立評估準則之層級結構，提供銀行管理者有效資訊作風險排除，以及作為建立批次作業資訊安全多準則風險評估模式的基礎，結果顯示，可有效協助管理者作策略的參考與評估出資訊安全的風險指數以及安全對策評選，確實改善現有夜間批次作業控管機制。關於操作及支援危害分析法之應用的相關研究綜整如下表 6 所示。

表 6 操作及支援危害分析法之應用相關研究

| 學者 | 研究結果 | 備註 |
|---------------|---|-----|
| 張珪庭 [2002] | 為防範意外發生以達到操作安全的最終目的，危害分析是任何化工製程再運轉前一項必要的工作。對於一個高度複雜且其中的單元操作又是高度互相關連的批次製程，藉由派氏網為基礎之演譯推論策略運用在批次或半批次製程危害分析技巧上，來確認此一分析技巧的有效性與正確性。 | 化工業 |
| 邱鐘慶 [2009] | 以定性風險評估法-危害與可操作性評估方法先找出製程相關危害因素，並提供適當改善建議，而後再結合定量風險評估方式- | 製造業 |

| 學者 | 研究結果 | 備註 |
|----------------------|--|-----|
| | 層級保護分析將事故發生嚴重度等級與發生機率找出系統風險程度是否為可接受程度，經氫氣拖車與鋼瓶組的供應系統分析案例比較各種安全儀器與系統設計的風險效益，證實危害分析方法的有效性。 | |
| 洪健仁 [2009] | 半導體因大量使用毒性、易燃性氣體，造成製程中衍生大量廢氣，為使操作人員能在安全、無慮的環境中作業，就製程局部尾氣處理設備進行危害分析與評估。經由蒐集分析異常事件的資料，以新的風險評估方法，代替 HazOp, FTA, ETA, 等常用的評估方式，以證實潛在的異常事件危害因素之影響包含人員安全、環境損害、設備與營運損失。 | 電子業 |
| 陳俊德 張明松 [2009] | 銀行夜間批次作業管控經常遭遇不可預期的資訊安全威脅風險，因缺乏深入分析與探討資安事件肇因，並剖析對銀行資訊資產衝擊做出明確定義，造成無法採取有效的資訊安全管理政策。其研究使用改良的危害與可操作性分析、主成份分析、失誤樹等風險評估法進行危害原因分析，結果顯示，可有效協助管理者作策略的參考與評估出資訊安全的風險指數以及安全對策評選，確實改善現有夜間批次作業控管機制。 | 金融業 |

資料來源：本研究整理

2.7 壽命週期成本(Life-Cycle Cost, LCC)

2.7.1 壽命週期成本之概念

壽命週期成本概念緣起於 1947 年美軍，在此之前，美軍於武器系統獲得的成本概念，偏重在評估某些特殊功能或技術之獲得，並未將系統佈署服勤後的維持費用納入考量，導致服勤階段的運作及之於成本超乎預期成本，且預算追加困頓，導致系統服勤壽命相對縮短。就此，美國國防部於 1971 年力求革新，開始重視以成本導向(Design To Cost, DTC)的武器系統的壽命成本分析，期達到最低壽命成本及戰力發揮最大化之成本效益目標。(Blanchard, Benjamin S., 1992)(SAE G-11, 1995)

美軍對壽命成本的考量，一般而言包含研發成本、生產成本及使用成本；另以發展階段而言可分成四個階段，分述如后：

1. 概念階段(Conceptual Phase)：

主要工作為產品市場分析，競爭力評估，產品需求功能定義，成立成本設計導向組織執行成本分析及預劃成本目標，稽核程序制定，分派專人負責成本目標之達成。

2. 研發階段(Development Phase)：

主要工作為完成初步及細部設計審查，要求設計、製程須達成預劃之成本目標，建立製程、品質管制，決定自製或外包、成本報告管理控制、計畫時程管理控制、整體後勤支援規劃及構型管理。

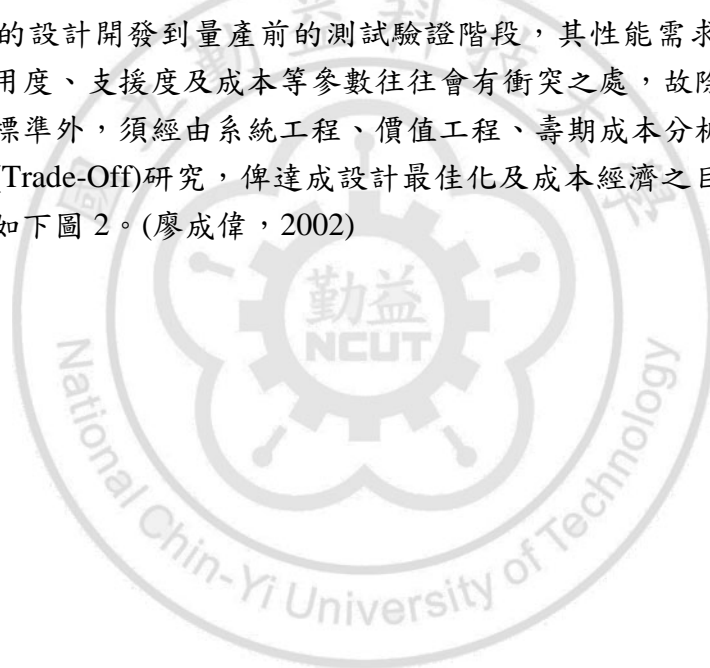
3. 生產階段(Production Phase)：

主要工作為完成量產計畫書，執行量產準備審查確保生產產能充分發揮，執行實體型態稽核、生產排程物料管理、成本時程管控等。

4. 使用服勤階段(Operation And Service)：

執行整體後勤支援相關工作，含維修支援裝備與工具、人員訓練、技術手冊、備份件供補支援與籌購、壽期成本資料蒐集與分析、售後服務與保固等，以服務及品質確保顧客滿意度及忠誠度。

產品的設計開發到量產前的測試驗證階段，其性能需求如可靠度、維護度、可用度、支援度及成本等參數往往會有衝突之處，故除須訂定規劃目標及允收標準外，須經由系統工程、價值工程、壽期成本分析及相關專業等執行權衡(Trade-Off)研究，俾達成設計最佳化及成本經濟之目標，權衡分析作業流程如下圖 2。(廖成偉，2002)



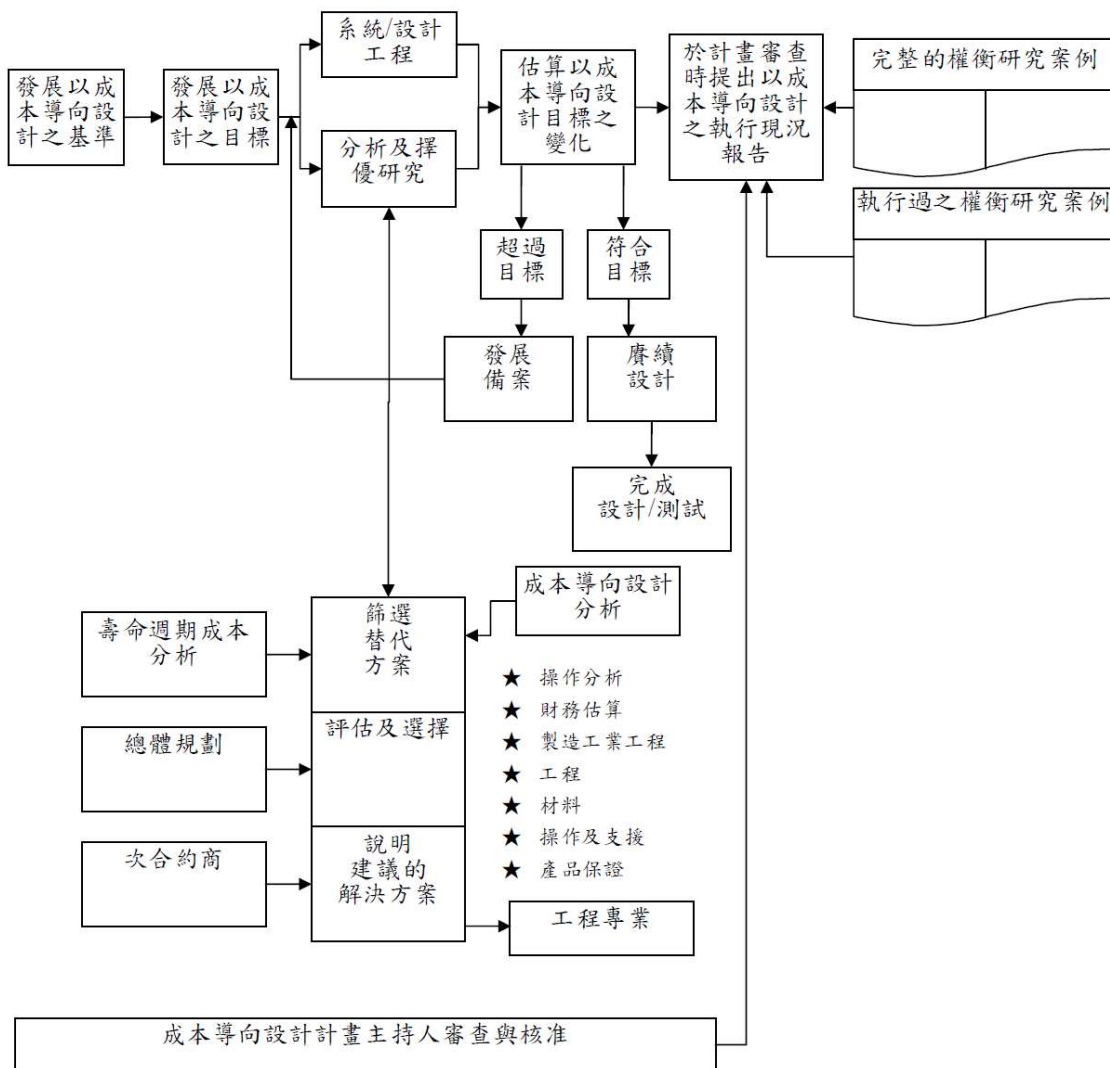


圖 2 權衡分析流程圖

資料來源：Michaels et al. (1989)

另外，Fabrycky[1991]指出壽命週期成本係指產品的籌購與獲得或系統在其整個壽命相關的所有成本；其成本計算方式為現值分析的延伸，通常應用於涵蓋整個系統壽命週期幅度(System Life Span)的成本預估方案，從計畫初始的評估階段至最終的汰除所產生的成本，壽命週期成本的應用如建築物(新建或購買)、新產品線、製造工廠、商用航空器、汽車研發及國防系統等...尤其對大部分的國防與航太工業而言，更是需要壽命週期成本，此法亦可稱作對成本做設計。(Leland Blank, Anthony Tarquin., 2006)

執行壽命週期成本分析管理之目標，係經由壽命成本要素擇優分析後，降低潛在成本，並能適時、適項、適切的將分析結果-成本相關資訊提供管理階層決策參考，達到總壽命成本的降低；由於科技一日千里，近代的

系統發展益趨精密、複雜且昂貴，使用壽命的延長及長時間操作所需的財力及資源，逐漸成為維持預算編列及分配的負擔。

壽命週期成本的估算若以獲得階段(Acquisition Phase)與運作階段(Operations Phase)區分，其範疇說明如下：(Leland Blank, Anthony Tarquin., 2006)

1. 獲得階段(Acquisition Phase)：

為產品與服務傳遞前的所有作業活動，又細分為：

- (1) 需求定義階段：包括使用者、顧客需求的決定，相對於預期系統的評估與系統需求文件的整備。
- (2) 初步設計階段：包括可行性研究、概念及初期規劃；或許在此階段對方案通過與否下達決策。
- (3) 細部設計階段：包括資源的細部規劃，如資金、人員、設施、資訊、系統、行銷等。

2. 運作階段(Operations Phase)：

所有的作業活動均已具備功能性，產品與服務皆屬，細分成下列階段：

- (1) 建構與執行階段：包括採購、建構及系統架構的執行、測試與整備等。
- (2) 使用階段：系統運作產生產品與服務。
- (3) 過時與處置階段：涵蓋清理轉移至新系統的時間，舊系統的的移除、回收。

根據國內軍事系統籌建的案例，若將壽命成本概分成研發、生產及操作支援成本等階段，所佔比例分別約為10%、40%及50%，而操作支援成本約為總壽命成本半數，故服勤階段的成本樽節對系統運籌規劃影響頗為重大；藉由壽命成本分析法，除可瞭解全壽命各階段所需耗費之成本，以作為各項維持經費編列之參考依據外，另結合系統維修計畫及可靠度、維護度、使用率趨勢，加以推估系統裝備因功/性能衰減徒增之維持成本，持續不斷的精進，促使成本效益充分發揮。

2.7.2 壽命週期成本法之應用

電力業：

郭子瑜[2012]藉由可靠度、可用度、維護度和成本考量來進行維護規劃，並建構電廠幫浦(Pump)之生命週期成本，以決定最佳維修資源數量及幫浦之最佳維護排程，俾兼顧電廠安全與營運績效下，提升幫浦之可用度。

營造業：

連夷佐[2003]橋樑管理大多著重在維護技術的探討，如何讓橋樑發揮最大機能的管理決策，常受限於人力、經費而窒礙難行。該研究就橋樑的生命週期，提出一套生命週期成本評估模式以供橋樑管理者決策參考之依據，應用統計分析之方法，針對目前國內橋樑維護管理程序及歷年經費支出資料整

理進行探討。再透過橋樑結構特性、服務性能及環境條件狀況之分析歸納，建立橋樑維護工作之執行原則，再依照維護程度的不同，將維護工作項目分為預防性定期維護、修理及置換等項目，並考量維修頻率、維修時機及因維修之延誤所致用路人成本等條件下，建立專案層級橋樑維護管理生命週期成本評估模式，期充分發揮設施機能，達到舒適的行車環境及使用者安全之目標。

羅昱盈[2006]建築物之設計與營造階段較著重在機能、成本、美觀、進度與品質等議題，卻忽略後續營運維護階段中維護經濟性之規劃或管制，導致龐大後生命週期之營運維護成本產生。由於補助學校預算逐年劇減，校舍的維護規劃難度日益升高、維護預測模型的缺乏、加上對預防規劃與策略的漠視，已直接導致近期校舍加速劣化與校園公共安全危害等重大管理問題，該研究指出金額折現對於 LCC 比例影響甚大，且營運與能源費用是建築物在 LCC 策略規劃上之重點，藉由構件維護修繕週期及趨勢分析結果，分析出維護計畫之週期評估以 5 年為宜，經歸納彙整關鍵修繕項目，提出相關擬對策給 A/C/E 作為規劃設計、施工與營運維護等階段，進行營運維護效益評估、營建品質提升與使用維護管理規劃之參考，俾利預算編列參考之用。

林楠凱[2004]從生命週期成本分析的角度探討校園中不同類型水池的建造工法與維護管理方式等項目之生命週期成本，並以訪談法來瞭解設計人員與維護管理者之建造工法、維護管理方式及使用後評估，在藉由歸納法進行分類後針對不同類型的水池作生命週期成本計算；其主要成本分配包括資本（Capital）、保養（Maintenance）、燃料（Fuel）、替換（Replacement）、轉賣（Salvage）等，主要計算項目包括使用年限、水池的施工方式與其成本、維護管理方式與其成本等。該研究歸納出生態水池生命週期若以 30 年為期，則以採全生態工法施做方式加校內師生共同管理之組合最為符合經濟與永續發展之效益。

製造業：

梁書銘[2008]以最佳壽期成本之設備採購策略模式，透過成本有效性改善之共同目標，整合供應商與製造商能力於低壽命週期成本之設備購置，主要考量項目包括：資本、保養、操作、維修與轉賣等，建構一個適合企業使用之設備失效模式與成本效應分析於壽期成本決策模式應用，達到設備壽期成本最佳化決策以維持並提高公司競爭力。

軍工業：

譚海林[2005]指出壽期成本分析法是一種不同於過去慣用的決策方法，其重點如下：(1)選擇系統、產品時，要將採購費與維持費統一考慮。據此以達到總費用最低的目的。(2)在研製系統、產品的開始階段就進行壽命週期費用的研究，據此可以更加主動地進行最經濟的設計。(3)設計時把壽命

週期費用作為設計參數加以運用(費用設計),且費用不是系統、產品滿足其它設計指標後的"被動"的結果,而是要按預定費用計畫實現的指標。(4)進行充分的權衡,據此獲的最佳的改進方案;該研究從艦船系統壽期中的後勤觀點,由全壽期管理、整體後勤支援、後勤支援分析與壽期成本分析的關連性,探討全壽期成本的觀念,在有限的資源下,於投資重大裝備系統時,節省後勤支援成本,增加裝備系統運作之可用度,達到最大之經濟效益。關於壽命週期成本法之應用的相關研究綜整如下表7所示。

表7 壽命週期成本法之應用相關研究

| 學者 | 研究結果 | 備註 |
|--------------------|---|------|
| Fabrycky [1991] | 壽命週期成本係指產品的籌購與獲得或系統在其整個壽命相關的所有成本;其成本計算方式為現值分析的延伸,通常應用於涵蓋整個系統壽命週期幅度的成本預估方案,從計畫初始的評估階段至最終的汰除所產生的成本。 | 學術研究 |
| 郭子瑜 [2012] | 藉由可靠度、可用度、維護度和成本考量來進行維護規劃,並建構電廠幫浦之生命週期成本,以決定最佳維修資源數量及幫浦之最佳維護排程,俾兼顧電廠安全與營運績效下,提升幫浦之可用度。 | 電力業 |
| 連夷佐 [2003] | 就橋樑提出一套生命週期成本評估模式供管理者決策參考,其應用統計分析法,對國內橋樑維護管理程序及歷年經費支出資料整理進行探討,再透過橋樑結構特性、服務性能及環境條件,建立橋樑維護工作執行原則,依維護程度的不同,將維護工作分為預防性定期維護、修理及置換等項,並考量維修頻率、維修時機及因維修延誤所致用路人成本等條件,建立橋樑維護管理生命週期成本評估模式,使其充分發揮設施機能,達到舒適的行車環境及使用者安全之目標。 | 營造業 |
| 羅昱盈 [2006] | 建築物之設計與營造階段較著重在機能、成本、美觀、進度與品質等議題,卻忽略後續營運維護階段中維護經濟性之規劃或管制,導致龐大後生命週期之營運維護成本產生,其藉由構件維護修繕週期及趨勢分析結果,分析出維護計畫之週期,經歸納彙整關鍵修繕項目,提出相關研擬對策作為規劃設計、施工與營運維護等階段,進行營運維護效益評估、營建品質提升與使用維護管理規劃之參考,俾利預算編列參考之用。。 | 營造業 |
| 林楠凱 [2004] | 從生命週期成本分析的角度探討校園中不同類型水池的建造工法與維護管理方式等項目,並以訪談法來瞭解設計人員與維護管理者之建造工法、維護管理方式及使用後評估,再藉由歸納法進行分類後針對不同類型的水池作生命週期成本計算;主要成本分 | 營造業 |

| 學 者 | 研 究 結 果 | 備 註 |
|-----------------|--|-----|
| | 配包括資本、保養、燃料、替換、轉賣等，計算項目包括使用年限、水池的施工方式與其成本、維護管理方式與其成本等。 | |
| 梁 書 銘 [2008] | 以最佳壽期成本之設備採購策略，整合供應商與製造商能力於低壽命週期成本之設備購置，考量項目包括：資本、保養、操作、維修與轉賣等，建構一個適合企業使用之設備失效模式與成本效應分析於壽期成本決策模式應用，達到設備壽期成本最佳化決策以維持並提高公司競爭力。 | 製造業 |
| 譚 海 林 [2005] | <p>壽期成本分析法之執行重點：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.選擇系統、產品需將採購費與維持費一併考量，並使其達到總費用最低的目的。 2.系統、產品的研發階段即進行壽命週期費用的評估，據此達成最經濟的設計考量。 3.將壽命週期費用作為設計參數加以運用(費用設計)，且費用不是系統、產品滿足其它設計指標後的"被動"的結果，而是要按預定費用計畫實現的指標。 4.進行充分的權衡，據此獲的最佳的改進方案。 | 軍工業 |

資料來源：本研究整理

2.8 RCM 與 TPM 方法歸納

RCM 與 TPM 屬於系統設備維修規劃之方法技術，若結合前述如可靠度評估、失效模式效應分析、系統安全分析及壽期成本分析等技術循序縝密的規劃，可確保其操作安全性、系統可靠性及運作成本經濟性等條件下發揮運作效益，故藉由歸納法加以評估是項技術的適切性及合宜性並加以裁適 (Tailor) 運用，將有助於維修規劃更臻完善，提高保養維修便利性及系統設備使用率。

歸納法是獲得新知識的基本方法，在科學研究、技術發展和管理決策過程中均具有重要的作用，其歸納的流程將採以下步驟：

1. 蒐集和累積一系列事物經驗或知識素材；
2. 分析所得材料的基本性質和特點，尋找出其服從的基本規律或共同規律；
3. 描述和概括以作出系統化判斷，所得材料的規律和特點，從而將這些規律作為預測同類事物的其它事物的基本原理。

以下將綜整 2.1 節 RCM 及 2.2 節 TPM 的文獻個案探討與學者著作加以歸納其共同規律，惟研究結果將受限於歸納法無法窮究所有案例，恐受樣本數不足或有限的觀察而造成以偏概全的邏輯錯誤，故歸納結果將以保守態度推論。

本研究所提出之 RCM 與 TPM 效益指標如表 8，係根據本文中蒐集的相關文獻探討，部份學者對於運用 RCM 以規劃維修計畫提出的概念論述，及參照漢翔公司引用軍用規範及洛克希德技術移轉之經國號戰機維修計畫發展經驗整理所獲得，而 RCM 之評量指標、相關技術及工具等，亦已廣泛應用於研討案例之戰鬥機隊管理計畫中；然對於 TPM 指出的方法與技術，主要參照學者著作及研究論述整理所得，因諸多研究著重在作業管理技術的應用及成效探討，並未探究如何應用 TPM 規劃系統、設備的維修計畫，故本節將就僅獲得的相關資訊，歸納其方法應用之差異性及適用性，結果如后：

1. 定性與量化方法管理的差異

(1) TPM 著重系統設備高效率，透過定性的管理原則與方法，強化教育訓練，並在作業中運用如看板管理達到目標管理、目視管理，提升設備效率化降低八大損失、人員效率化之五大損失、原物件效率化之三大損失以及 TQM 等技術，強化人員本質學能及現場作業管理績效。

(2) RCM 以量化的系統設計參數、分析、回饋與修正，相關參數與方法詳表 8 後勤工程構面列舉之效益指標，且運用以可靠度為中心的維修規劃技術使其達到系統功能的邏輯維修，明確分析故障的影響程度決定哪些項目、檢查時距、實施方式及何種維修層級，並將其標準化、文件化達到知識、技術管理及經驗傳承(Lessons Learned)與延續。

爰上，TPM 與 RCM 協同規劃策略即是把系統工程、後勤工程、後勤支援及後勤管理視為一個環環相扣系統結構性的一體化設計，故 RCM 可做為系統設備維修規劃確保系統高可靠度、可用度、維護度、安全度及成本效益的決策依據，再輔以 TPM 全員參與、目標管理及 TQM 等管理技術，協同維修體制之遂行，俾發揮系統運作效益。

2. 施行階段的差異

就產品壽命週期輪廓之概念、研發、生產及服勤等四個階段來區分 TPM 與 RCM 差異性，TPM 適用於使用者接收系統設備後的服勤運作階段，因屬現貨採購，對於系統在概念、研發及生產階段的維修規劃上缺乏將使用者需求設計植入，導致初期服勤適應性(Suitability)不佳、運作磨合期增長，且改善行動受長鞭效應影響而增加成本；RCM 則以全壽命週期觀，進行四個階段之設計，在概念階段即融入系統裝備服勤後使用者的維持概念，並於研發階段考量產後支援需求，以確保產品量產及銷售服勤後，具備完善的維修規劃，並根據服勤經驗及修維護紀錄蒐集與回饋持續修正維修規劃，此為 RCM 規劃技術之具體展現。

3. 施行成本的差異

(1) TPM 運用於服勤階段，對於系統設備運作適應性不佳者，鮮少仰賴製造商技術支援，營運者藉由定性的管理方法與技術提升設備運作效益，相對成本耗費低廉，此為一般企業高接受度之主因，其次為管理方法及技術易於導入企業。

(2) RCM 遂行貫穿整個產品壽命週期，產品研製前期的概念及研發成本投入，因納入使用者條件之設計考量，有助於生產階段時，可確認較佳操作保養介面的產品構型，甚而減少了服勤階段的設計變更，惟需投入諸多經費，對於一般企業有龐大的成本壓力，然而對於涉及生命安全之高風險系統如核能電廠、軌道業、船舶、航空器、公共建設或國防武器系統等，為能有效控制風險，技術支援的成本投入不遺餘力。

4. 評量指標的差異：

(1) 計畫與管理構面：

RCM 透過可靠度、維護度、可用度及安全度等度量衡參數管理、分析與改善，以及文件化及標準化等技術手冊、作業規範制定，使其管理及從業人員有其共同依循標準與經驗、技術之傳承；相較於 TPM 如管理者承諾屬精神層面的宣達，等同 RCM 明確定義於組織章程或作業計畫中。對於維修規劃制定有效及適切性，RCM 透過邏輯性分析以檢討其維修計畫成效，TPM 僅從作業效率考量，無邏輯推演程序作為評估標準。壽期成本設計與管理，以及系統性維修規劃技術，為 RCM 邏輯性推演主要考量與成果，而系統性維修規劃係指效益指標

比較表中，後勤支援構面的各項工作於維修規劃成效評估時，必要同步檢討的支援規劃，在 TPM 的相關研究尚未提出此概念。

(2) 產品壽命週期構面：

以 RCM 籌建系統維修計畫始於概念設計階段至系統汰除，透過不斷的檢討與改進，使其維修規劃更有效且經濟；TPM 尚無提出於發展階段如何執行維修規劃之概念，故僅對生產服勤階段既定的維修計畫，以作業、品質管理技術提升作業效率。

(3) 後勤工程構面：

透過可靠度、維護度、可用度及安全度等度量衡參數的應用，及人因工程及人機介面的設計考量，以輔助 RCM 技術制定與持續精進維修計畫，TPM 的相關著作及研究未具體提出。

(4) 後勤支援構面：

其概念源自於軍事武器系統獲得整體後勤支援規劃，對於系統獲得計畫所應具備的後勤支援品項，以滿足後續系統運作，RCM 評估技術須同步考量各分項受影響程度並提出改善或配套措施，TPM 的相關著作及研究未具體提出。

(5) 系統工程構面：

RCM 針對功/性能運作效益及系統設計不斷精進，而系統構型管理旨在控制與管理系統設備因改善方案所致的設計變更，並予以文件化紀錄，此舉有助於管理或從業人員對系統、設備之軟、硬體功能、安裝及外型變更前後差異的鑑別，有效管理維修物料型別及進行新構型的維修作業，避免缺點重現；TPM 技術由使用端自行應用與改善，對於系統設計精進，較缺乏重新設計能力，另構型管理技術於 TPM 相關著作及研究尚無此構想。

5. 歸納結果：

(1) TPM 著重定性管理原則與方法，對於既定的維修規劃，透過作業方法與技術的精進以提升作業效率，適用於系統裝備服勤階段起，若遭遇運作初期適應性不佳的改善活動，較缺乏原系統製造商的支援與資源，對系統設備之工程變更及不符使用者介面之設計改善有限，設計變更成本則由使用者自行吸收，但運作成本相對經濟，且管理方法及技術也易於導入企業。

(2) RCM 以邏輯性思考律定維修計畫，藉由量化數據預估、設計、分析及維修資料蒐集統計等資訊與工程技術整合，朝產品全壽命週期各階段的維修規劃邁進，適用於大型、複雜、高價、長壽期或高安全性要求之系統設備，宜配合產品壽命週期管理，由使用者與製造商共同投入

前期的發展及後期的維持規劃，故需藉由諸多專長領域進行資源管理與計畫推展，導致所費不貲。



表 8 RCM 與 TPM 之效益指標比較表

| 構面 | 效益指標 | RCM | TPM | 備註 |
|-------|--------------|-----|-----------------------------|--|
| 計畫與管理 | 管理者承諾 | | √ | 於 TPM 屬顯性指標，RCM 則遵循明確的文件化指引如技術文件、政策及作業程序書，便於知識管理與傳承 |
| | 維修規劃制定有效及適切性 | √ | √ | |
| | 壽期成本設計與管理 | √ | | TPM 著作及相關研究未具體提出 |
| | 系統性維修規劃考量 | √ | | TPM 著作及相關研究未具體提出 |
| | 跨部門協同規劃 | √ | √ | |
| | 全面參與性 | √ | √ | |
| | 改善設備效率化 | | √ | RCM 藉後勤工程構面之可用度評量指標及壽期成本評估以掌控成本損失 |
| | 人員效率化 | | √ | RCM 藉後勤工程構面之維護度評量指標管理及改善人員效率 |
| | 原物件效率化 | | √ | RCM 藉後勤工程構面之可靠度評量指標管理及改善原物件效率 |
| | 目標管理 | | √ | RCM 藉後勤工程構面之可靠度、維護度、可用度、安全度評量指標作為管理目標 |
| | 目視管理 | | √ | RCM 藉後勤工程構面之可靠度、維護度、可用度、安全度評量指標進行分析與圖表製作達到目視管理 |
| | 作業者實施自主保養 | | √ | RCM 藉技術文件制定預防性保養計畫，檢查要項文件化、標準化 |
| | 工作紀律 | | √ | RCM 藉技術文件制定作業標準，使工作紀律落實於文件化、標準化 |
| | TQM | √ | √ | |
| 5S | √ | √ | RCM 藉技術文件制定設施規劃、作業環境及工作紀律管理 | |
| 產品壽命 | 概念設計階段 | √ | | TPM 無邏輯性制定維修計畫之功能，僅對既定的維修規劃，從產品生產服勤階段起，透過作業方法與技術的精進以提升作業效率 |

| 構面 | 效益指標 | RCM | TPM | 備註 |
|----------|---------------|-----|------------------|--|
| 週期 | 驗證展示階段 | V | | TPM 無邏輯性制定維修計畫之功能，僅對既定的維修規劃，從產品生產服勤階段起，透過作業方法與技術的精進以提升作業效率 |
| | 工程發展階段 | V | | TPM 無邏輯性制定維修計畫之功能，僅對既定的維修規劃，從產品生產服勤階段起，透過作業方法與技術的精進以提升作業效率 |
| | 生產服勤階段 | V | V | |
| 後勤 工程 | 維修資料蒐集與應用 | V | V | |
| | 可靠度設計與精進 | V | | TPM 著作及相關研究未具體提出 |
| | MTBF 平均失效間隔 | V | | 品質效益衡量參數-操作時數/失效次數，TPM 著作及相關研究未具體提出 |
| | 失效模式與效應分析 | V | V | |
| | 可用度設計與精進 | V | | TPM 著作及相關研究未具體提出 |
| | 使用率/稼動率 | V | | 品質效益衡量參數-可用機數/持有機數，TPM 著作及相關研究未具體提出 |
| | 維護度設計與精進 | V | | TPM 著作及相關研究未具體提出 |
| | MRT 平均修復時間 | V | | 品質效益衡量參數-發工至完工總時間/總失效次數，TPM 著作及相關研究未具體提出 |
| | MTTR 平均執行修理時間 | V | | 品質效益衡量參數-總修理時間/總失效次數，TPM 著作及相關研究未具體提出 |
| | MMTR 平均執行修理工時 | V | | 品質效益衡量參數-總修理人工時/總失效次數，TPM 著作及相關研究未具體提出 |
| | 人因工程設計 | V | | TPM 著作及相關研究未具體提出 |
| 人機介面設計考量 | V | | TPM 著作及相關研究未具體提出 | |
| 安全度設計與精進 | V | | TPM 著作及相關研究未具體提出 | |

| 構面 | 效益指標 | RCM | TPM | 備註 |
|----------|--------------|-----|-----|-----------------------------------|
| | 系統安全分析 | V | | 參數統計與分析-RPN 風險係數，TPM 著作及相關研究未具體提出 |
| | 操作危害分析 | V | | 參數統計與分析-RPN 風險係數，TPM 著作及相關研究未具體提出 |
| | 失效樹分析 | V | | 參數統計與分析-毀損率，TPM 著作及相關研究未具體提出 |
| 後勤 支援 | 維修規劃與精進 | V | V | |
| | 教育訓練規劃與精進 | V | V | |
| | 技術文件運用與增修訂管理 | V | V | |
| | 零件供應補給調整 | V | | TPM 著作及相關研究未具體提出 |
| | 人力資源規劃與精進 | V | | TPM 著作及相關研究未具體提出 |
| | 包搬儲運規劃與精進 | V | | TPM 著作及相關研究未具體提出 |
| | 支援裝備及工具規劃與精進 | V | | TPM 著作及相關研究未具體提出 |
| | 電腦資訊資源規劃與運用 | V | V | 如物料供補、設備維修資料蒐集及生產管理等資訊系統籌建與運用 |
| | 設施規劃與精進 | V | | TPM 著作及相關研究未具體提出 |
| 系統 工程 | 功/性能運作效益 | V | V | |
| | 系統設計精進 | V | | TPM 著作及相關研究未具體提出 |
| | 系統構型管理 | V | | TPM 著作及相關研究未具體提出 |

資料來源：本研究整理

第三章 研究方法

3.1 研究方法與流程

本研究方法係以系統服勤階段，其維修規劃經實際服勤場景運作後，對於維修計畫修訂或精進構面作為研究想定，擬定一邏輯性評估流程、需求的技巧、應用、成本及效益等，以架構維修規劃決策流程與評量步驟。第一部分則探討研究標的之設計參數如裝備之設計特徵、功能方塊圖及施行失效模式與效應分析，俾篩選並決定需分析之功能或結構抑或飛安緊要件等關鍵性重要元件，並排除無需分析之非重要件，及初步評估研發階段之維修規劃歷經實際運作場景服役階段後，其預防性維修計畫可否有效防範失效事件所致的飛行風險。第二部分透過機隊維修參數的蒐集、審查及可靠度統計與分析，評估系統或元件之可靠度消長趨勢，以觀察對於戰鬥機隊現階段及後續運作之影響。第三部份針對評估標的進行 RCM 分析邏輯，以評定失效結果及影響、預防性維修計畫之適用性及定期檢查、定期更換時距之合宜性。第五部分就相關分析結果若有重新設計需求者，檢討重新設計後再評估之，若屬預防性維修計畫未臻週全者，則重新檢討壽限檢查或定期更換作業，並將評定之檢查維修作業程序及方法結合保養或維修等工作，再配合該系統的操作及檢查週期特性，納入維修計畫中，以及增修訂於相關維修手冊中，達到知行合一、運作順遂及風險管理之目標；流程架構整理如圖 3。

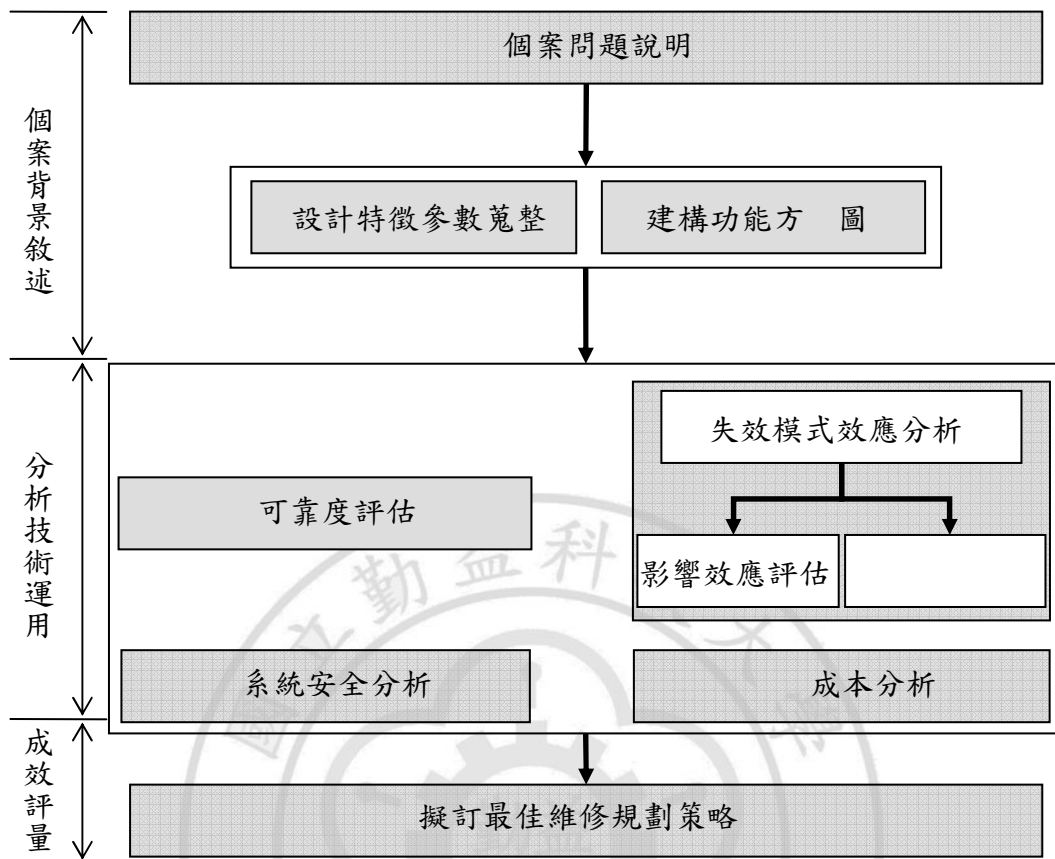


圖 3 維修規劃決策流程圖

資料來源：本研究整理

3.2 研究方法描述

3.2.1 建立研究標的設計參數剖析及失效模式影響效應評估步驟

執行此評估步驟旨在事先找出產品操作時潛在之硬體失效模式以及其效應，以採取適當之設計修改或其他補救措施，其評估步驟計有六項如圖 4，摘述如后：

1. 提供 FMEA 所需資料：

- (1) 自供應商、承製商或設計單位獲得產品設計之任務輪廓(操作環境、操作時間)。
- (2) 取得設計及介面之功能資料。
- (3) 以設計藍圖做為硬體組成資料參考。

2. 定義產品分析階層：

- (1) 依需求定義出產品之 FMEA 起始分析階層(Initial Indenture Level)。
- (2) 依硬體分解結構(Hardware Breakdown Structure, HBS)定義產品細部分析階層。

- (3) FMEA 分析階層由最終產品向下展開至系統、次系統、模組、組件、零件等最低階層(Lowest Indenture Level)。
3. 建構及審查功能方塊圖：
 - (1) 參考設計輪廓及設計功能資料，由下而上解析出各分析階層於任務進行中，本身及介面間之功能表現與關連性。
 - (2) 依功能表現與關連性繪製各分析階層功能方塊圖。
 - (3) 審查功能方塊圖。
4. 評估並賦予嚴重等級：

評估失效模式之終端效應所對應之嚴重等級。
5. 辨認及審查失效偵測方式與補償措施：
 - (1) 依據 MIL-STD-1629 內失效偵測之定義確認出產品各分析階層之實際失效偵測方式。
 - (2) 依據 MIL-STD-1629 內補償措施之定義確認出產品各分析階層之實際失效效應補救措施。
 - (3) 協同設計單位及相關單位審查 FMEA 設計補償措施之適當性。
6. 文件化分析結果及建議：

建立 FMEA 工作表及相關報告。

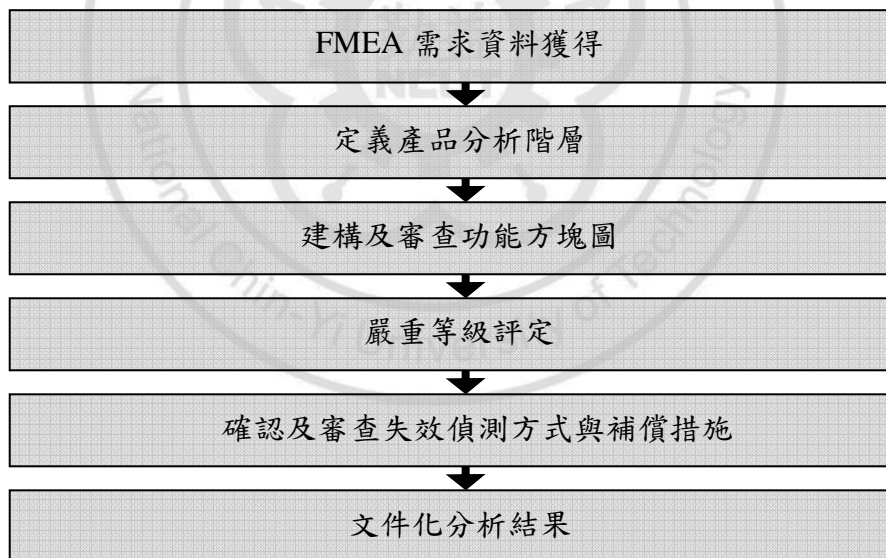


圖 4 設計參數及 FMEA 評估流程圖

資料來源：本研究整理

3.2.2 建立可靠度參數蒐集及統計分析之步驟

建立可靠度參數蒐集及統計分析之主要作業為維修資料蒐集的資料庫建置與審查，其目的在於讓使用者運作系統期間的維修資訊能詳實無誤的記

載，以提供裝備評估分析及管制使用，最終達到提升產品之品質及俾益於成本效益，相關作業分為六個步驟如圖 5 所示，敘述如后：

1. 資料蒐集及審查流程訂定：
依使用者需求，由分析單位訂定作業流程，並將此作業規劃納入管理計畫中，俾制定人力需求規劃。
2. 維修資料填寫規則相關文件之編訂：
由使用者與分析單位協同編訂相關文件，以作為資料填寫之標準。
3. 維修資料之蒐集：
由使用者依填寫規則將維修資訊紀錄於維修資料蒐集表單，並將其輸入維修資料蒐集系統中。
4. 審查維修資料：
分析單位自維修資料蒐集系統上逕行失效類別判定、維護工時消耗及故障隔離及改正措施能力評量，並與使用者討論定案，將其結果回饋修正維修資料蒐集資料庫中。
5. 統計與分析：
分析單位根據效益指標需求決定分析標的與層級，篩選維修資料庫資訊，將各項參數值代入公式，計算各元件、零件之統計參數如失效率、平均失效間隔時間、可靠度消長趨勢、平均修理時間、每操作小時維護工時及可用度等。
6. 擬定改善對策：
分析導致運作成效不彰之肇因，與設計單位、供應商或承製商研擬處置對策後提案改善，並加以驗證精進方案有效性。

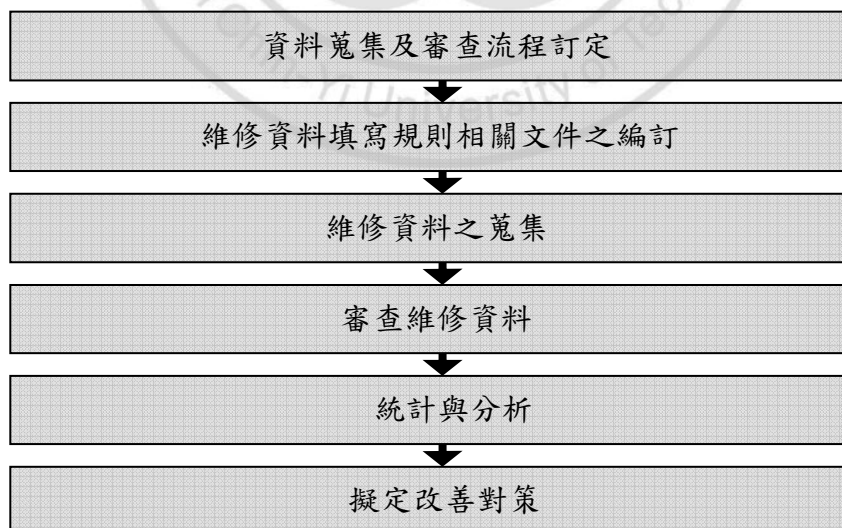


圖 5 建立可靠度參數蒐集及統計分析之流程圖

資料來源：本研究整理

3.2.3 建立 RCM 分析邏輯之步驟

本研究係以系統服勤後的產後支援階段衍生之個案問題 RCM 進行精進評估為案例，建立 RCM 分析邏輯主要分為六個步驟如圖 6 所示，分別為：

1. 確認分析標的初始設定的預防性維護需求之有效性。
2. 爰上可靠度韋伯分析之結果，推估系統或元件最終服勤壽命週期可能面臨的故障或失效次數差異。
3. 進行分析標的之重要性功能確認，評定失效所產生的影響效應對壽命週期成本之影響性。
4. 進行 RCM 決策邏輯推演如圖 7、8，確認預防性維修需求的種類，如潤滑/保養、定期檢查、定期更換、重新設計或取消檢查機制採視況維修 (Condition Maintenance) 檢討需求預防性維修之決策參考。
5. 根據失效特徵圖 9 推估潛在失效點及功能喪失來確立預防性作業時距或決策立即性全面加強檢查之發布時機。
6. 執行壽命週期成本估算，評定精進方案施行前後之成本效益評估。

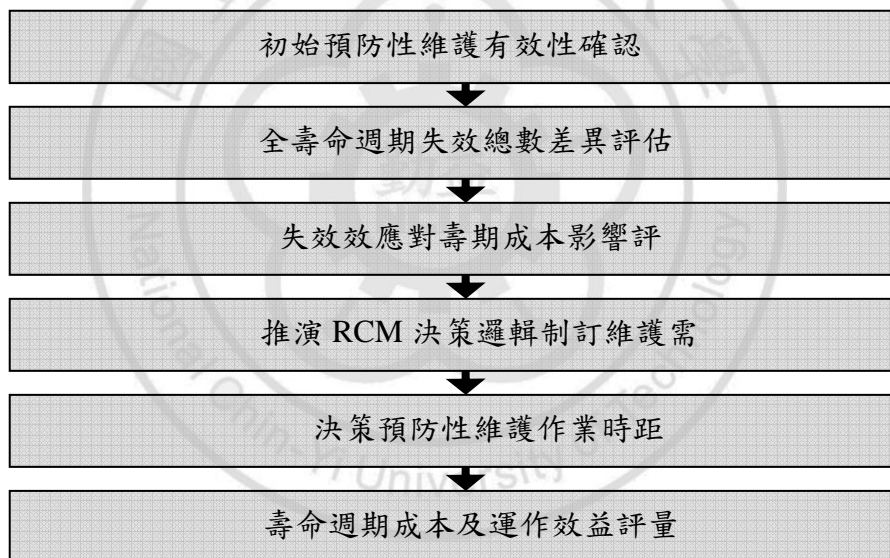


圖 6 建立 RCM 分析流程圖

資料來源：本研究整理

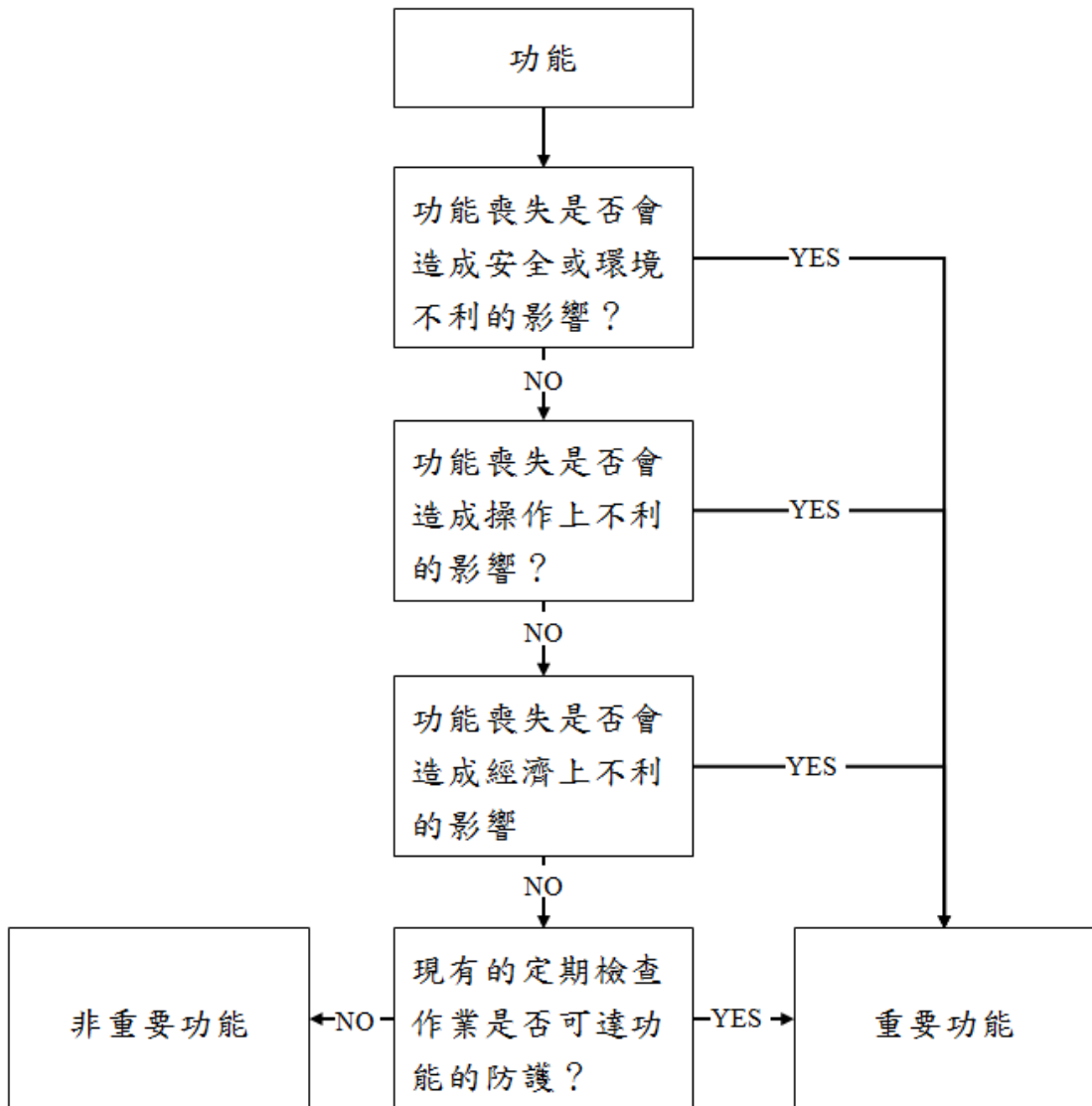


圖 7 重要性功能確認決策圖
 資料來源：NAVAIR 00-25-403

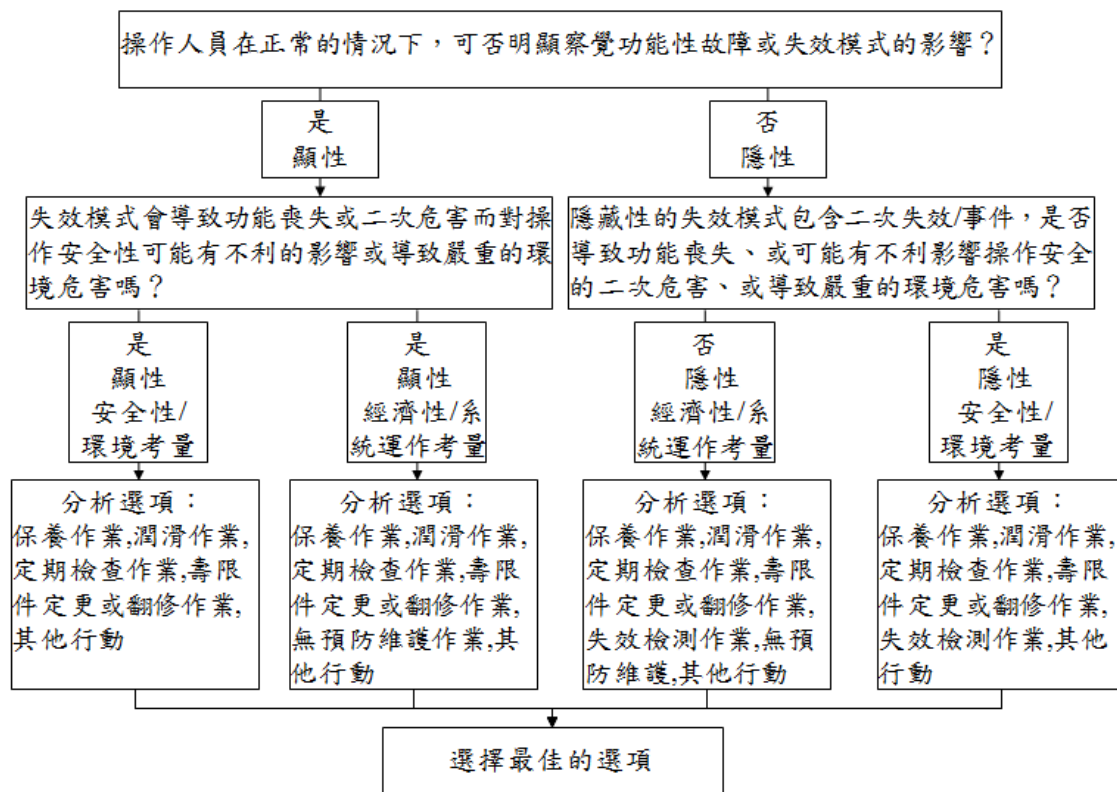


圖 8 RCM 決策邏輯圖
資料來源：NAVAIR 00-25-403

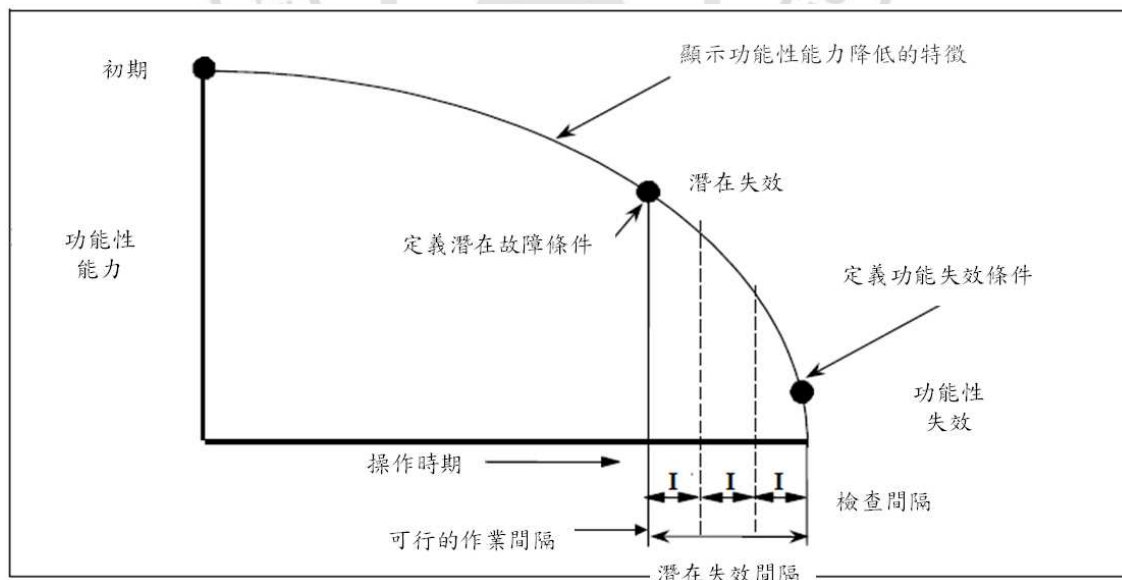


圖 9 失效特徵評估圖
資料來源：NAVAIR 00-25-403

3.2.4 最佳維修策略評量

對於維修策略評定前，應先思考所排定之預防性維護方案的預期效果，對系統任務設計達到最大可能效益之影響，並基於系統操作安全為首要，再者防止固有可靠度衰退或功/性能減低，其次則以最低維護成本達到預防維護之效果等條件下，來擇選最佳之維修策略，其維護方案發展之五大主軸及評估作業流程五項重點摘述如后：

維護方案發展主軸：

1. 確認維護方案訂定之必要性。
2. 定義維護方案排定之週期、頻率。
3. 評定維護程序所需資源，如人力、訓練、裝備及技術手冊。
4. 評定維護標的施行維護的設施地點及維護能量、階層劃分。
5. 為符合經濟效益，考量個別的維護方案整併執行的可行性評估。

預防性維護評估作業流程：

1. 提出預防性維修新增或修訂需求：
提出預防性維修新增或修訂需求時，應基於使用經驗，維修資料蒐集分析結果，廠家資料更新或最新試驗結果等因素，顧客或專業發覺有新增或修訂預防性維修需求之必要而提出申請，不可為了增加操作者或維修者信心而做建議，預防性維修項目應越少越好。
2. 預防性維修需求專業審核：
審查時，注重工程上該預防性維修需求之必要性、檢查方式之適切性、以及檢查或維修週期之合宜性。
3. 綜整並審核預防性維修需求：
依 RCM 邏輯，審查該預防性維修需求之必要性及檢查方式，於綜整時不可漏失任何可能相關單位之意見，並需注意工作負荷之分配來決定檢查時機。
4. 修訂或新增預防性維修需求項目：
將預防性維修需求轉化為技術手冊格式及語言，務求清楚、可依循。
5. 回覆需求單位不修訂原因：
綜整工程判斷、邏輯分析結果、測試數據及相關佐證資料等，若無需檢討預防性作為，應解釋不採納理由，務求使提案單位信服。

第四章 實例研究

4.1 案例簡介及系統說明

本研究以系統服勤階段維修規劃的修訂與精進為對象，擬引用國內某戰鬥機隊服役期間發生的失效事件作為分析案例，對於服役中的系統應以滿足作戰效益為考量，故評估決策將以操作安全及作戰效能發揮為主軸，並需對其維修計畫的修訂所致全機隊壽命週期成本的變化，加以考量成本與效益間影響；本案評估方式將以 RCM 技術為基礎，輔以 TPM 作業管理技術，以決策最佳維修計畫。

評估過程擬參考 2.8 章節 RCM 與 TPM 歸納結果，併用定性與量化之評估技巧，以探討維修規劃對失效預防的有效性、硬體可靠度指數的消長、安全危害預防及壽命成本效益影響等，惟受案例特性及方法考量，未全面運有效益指標歸納之評估技巧，說明如后：

1. 管理者承諾對 TPM 屬顯性指標，就 RCM 而言，規範與技術文件之訂定代表指導原則及執行依據，本案例將對技術文件之既定預防性維修計畫進行影響評估，並提出檢討修訂。
2. 案例問題的初步分析通常應用特性要因分析法，本例直接對故障零件進行模擬應力分析且肇因分析明確，故省略 TQM 之特性要因分析(定性)步驟，改採有限元素分析(量化)結果。
3. 改善設備效率化、人員效率化及原物件效率化，在 RCM 的評估過程引用了部份評估參數如壽命成本估算，包含維護度人力與工時評估、物料需求變化等，等同 TPM 對該三項效益指標訴求，差別在於 RCM 有明確參數定義及運用。
4. 目標管理、目視管理、作業者實施自主保養、工作紀律、TQM 及 5S 等效益指標，在 RCM 的評估過程需同步考量是項條件是否受影響，這些屬於作業管理層面的目標或管理方式，均以知識管理方式，以文件化明確的記述於相關技術手冊、作業規範中，從效益指標比較表 8 之後勤工程構面等 9 項指標逐項評量維修計畫的修訂對其各分項影響為何，並加以改善及修訂文件；另 TPM 對其管理方法運用，採行看板、標語及各項品質管理技術，使其從業人員保有高度的工作紀律，進而加強自主保養的遂行，俾確保目標管理、目視管理的達成與有效性；本屬方法的選擇與應用，對 RCM 與 TPM 為相輔相成的技術支援，故案例僅就效益指標呈負面評估結果者，於章節 4.13 最佳維修策略評定中提出改進建議，而不逐項提出評估結果與說明。
5. 維修資料蒐集與應用在潘浙楠[1997]的 TPM 論文著作中指出維修資料並未記錄或保存狀況不佳之問題，故系統服勤產生的維修資料蒐集與應用對

TPM 與 RCM 遂行屬於應備條件，應用維修資料統計及分析的結果可了解系統功/性能、可靠度與維護度消長現象，並針對衰退、不符設計目標或超出預期維護成本加以監控、評估與改善，囿於 TPM 的相關論述中僅提及概念，故案例中將以該機隊運用的維修資料蒐集分析系統作為維修資料蒐集工具，搭配漢翔公司自行發展全方位整合服務後勤系統(Total Logistics Support, TLS)之可靠度分析技術提出分析結果，業界對於維修資料庫的建構、蒐集與分析可參考美國 RELEX 公司推出的 FRACAS(故障報告、分析和糾正措施，Failure Report Analysis and Corrective Action System，FRACAS)專業系統軟體，籌劃維修資料蒐集系統。

該型戰機之電戰系統主要提供飛機自衛及反制之功能，當飛機暴露在陸空多重雷達與飛彈威脅源時，電戰系統可偵測威脅源的型式、特性及方位，而施以最有效反制、或顯示可行的干擾方案，供飛行員判斷採取必要之反制與閃避策略，致使敵方攻擊武器失效或暫態失能，確保戰場存活率而提高任務達成率；該系統由數個次系統組成(如圖 10 反制投擲系統方塊圖，因涉及機密僅呈現簡要圖示)，其一反制投擲系統包含了座艙控制器、規劃器、安全開關、順序電門、投擲器組及彈夾箱等，而順序電門安裝於支撐架上，再緊固於機體結構上，其功能主要接受規劃器的載彈投擲命令，並將其轉換成電點火脈波，順序器同時回饋彈艙辨認和存量資料給其他介面，故該零件的失效將造成干擾反制作業無效，可能肇致飛行員面臨作戰環境而喪失性命及飛機損毀。

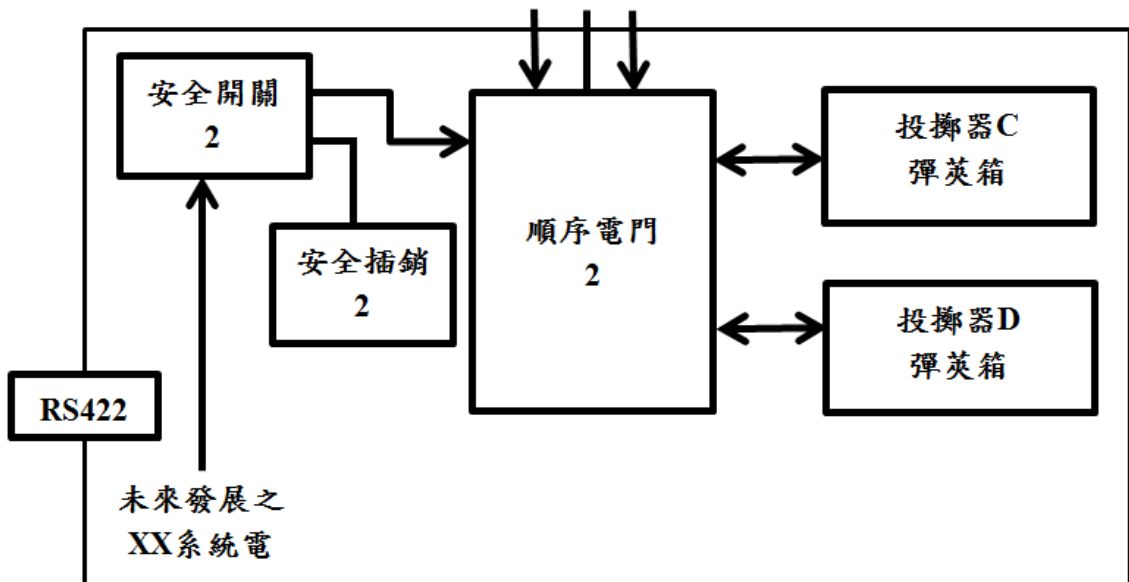


圖 10 反制投擲系統方塊圖

資料來源：系統技術文件

4.2 問題描述

順序電門支撐架原屬全壽限件，初始強度設計大於負載，預估可滿足8000 飛行小時服役疲勞壽命，故設計階段之維修規劃並未律定為定檢或定更項目，該案例緣起於使用單位階層(Organization Level, O/L)逕行飛行線可換件(Line Replaceable Unit, LRU)拆件周轉時，不預期發現順序電門支撐架(如圖 11 順序電門支撐架、圖 12 順序電門與支撐架示意圖)疑似裂紋，經非破壞性檢查(NonDestructive Inspection, NDI)-渦電流確認為裂紋，因應該事件擴大檢查數架戰機亦有類似情況，研判可能為通案。

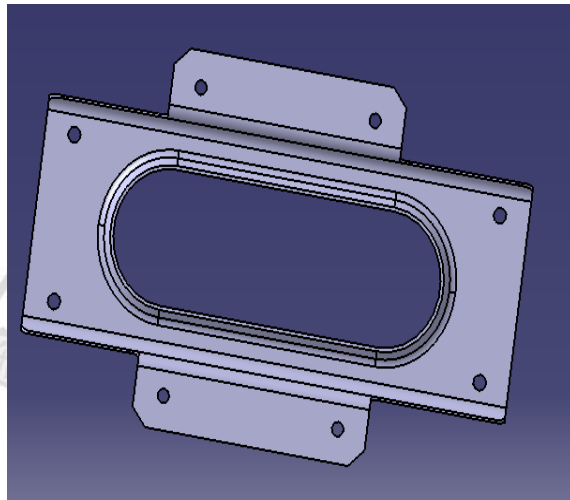


圖 11 順序電門支撐架
資料來源：漢翔公司

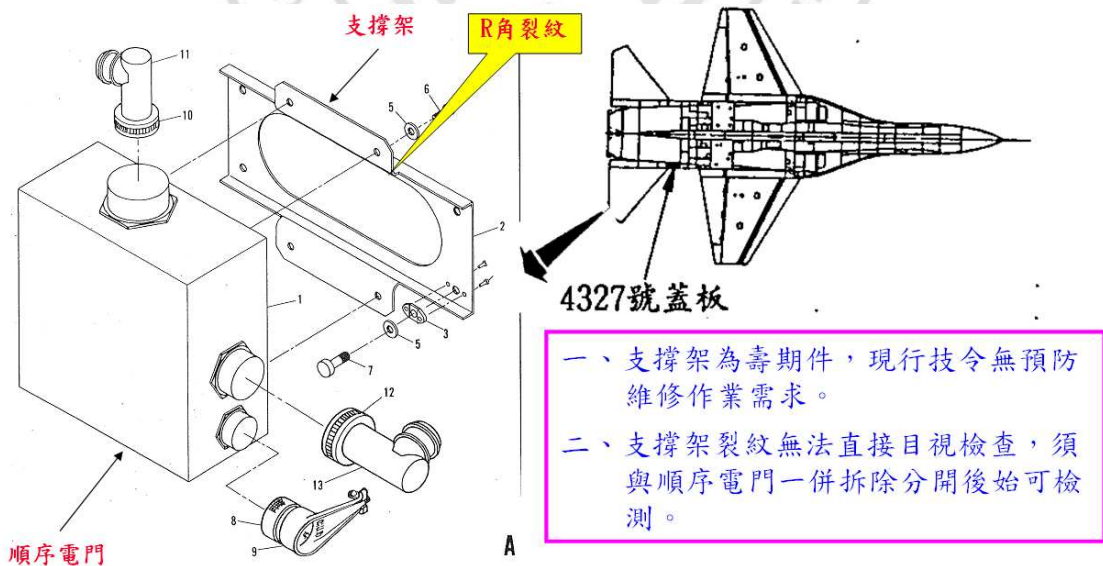


圖 12 順序電門及支撐架安裝示意圖
資料來源：系統技術文件

4.3 順序電門支架損傷肇因-有限元素分析結果

1. 由於裂紋發生於 R 角(Radius)處，初步研判損傷肇因為 R 角處應力集中效應，並在長期承受環境負載下所產生之低周疲勞裂紋。
2. 順序電門支架設計負載條件為 X,Y,Z 三方向各別承受 15G 負載；順序電門裝備重量約 5.2 Lbs，位於掛耳搭接面幾何中心外 1 吋位置；依據前述條件進行有限元素分析(Finite Element Method, FEM)。
3. 根據 FEM 結果顯示 R 角處最高應力 88.8 ksi，經除以 1.5 安全因子(Safety Factor)後應力為 59.2 ksi (千克/每平方英吋-拉伸力壓強單位)，結果仍大於疲勞允許值(Fatigue Allowable)26.0 ksi；因此，研判 R 角處損傷之肇因應為應力集中所造成之疲勞裂紋。(詳見圖 13 順序電門支撐架應力分佈圖)
4. 擬賡續以有限元素分析結果於實驗室進行模擬負載條件，執行實體拉伸試驗以評估潛在及功能失效間隔，俾提供週期檢查時距訂定參考。

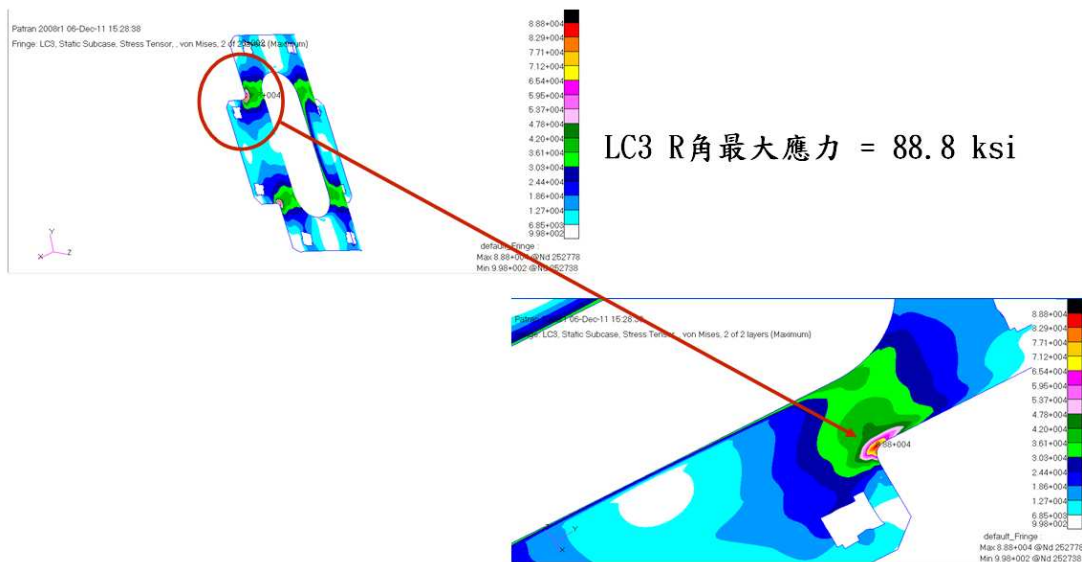


圖 13 順序電門支撐架應力分佈圖

資料來源：漢翔公司有限元素分析結果

4.4 順序電門支架裂紋之失效定義及處置方式

根據工程分析及缺陷檢出之鑑別條件，目視檢查約可鑑別大於 0.5 吋之順序電門支架裂紋缺陷，就 4.3 節 FEM 推論結果，當裂紋達 0.5 吋以上時，可能導致應力區瞬間破斷而失效定義為功能失效，故發現裂紋達 0.5 吋(含)以上時需進行更換硬體；當裂紋小於 0.5 吋時，如以目視檢查可能無法檢出缺陷，建議以非破壞性檢查-渦電流檢驗法探傷，以確認缺陷狀態，而該失效定義則屬於潛在失效，尚不肇致硬體功能喪失，應於裂縫兩端施予鑽挖止裂孔，以遏止或減緩裂縫繼續增長，該支架可繼續使用。

表 9 失效定義及處置方式建議

| 失效定義 | 條件 | 建議檢測方式 | 建議處置作法 |
|------|-----------|----------|-----------|
| 潛在失效 | 裂紋小於 0.5" | 目視及渦電流檢查 | 於裂紋尖端鑽止裂孔 |
| 功能失效 | 裂紋大於 0.5" | 目視 | 更換支撐架 |

資料來源：本研究整理

4.5 順序電門支架-失效資料蒐集與統計結果

1. 由維修資料蒐集系統篩選戰鬥機隊維修工單記錄，截至調查日，過去服役經驗中並未有順序電門支撐架失效相關維修記錄。
2. 依據使用單位問題反映 16XX 號機順序電門拆件時發現支撐架有裂紋，另挑選 14XA、14XB 及 14XC 等 3 架執行非破壞性檢查-渦電流檢驗法後，發現其順序電門支撐架亦有裂紋。
3. 經蒐集上述各架機順序電門支撐架發生裂紋之操作時數如下表，但缺乏裂紋長度記錄：

表 10 失效資料蒐集

| 機號 | 使用時數 | 發現方式 |
|------|-------|--------|
| 16XX | 3,407 | 目視 |
| 14XA | 1,766 | NDI 檢查 |
| 14XB | 1,974 | NDI 檢查 |
| 14XC | 1,780 | NDI 檢查 |

資料來源：本研究整理

4.6 順序電門支架-累積失效分布統計結果

1. 維修資料蒐集截至 100/11 月某聯隊各架機飛行時數及失效情況統計。(如圖 14 順序電門支撐架裂紋累積失效分布圖)
2. 失效分布符合特徵壽命參數(θ) 4,585 小時、斜率參數(β)3.61 之二參數 (β ：形狀參數-韋氏斜率， η ：尺度參數-特徵壽命)韋柏分配，其失效率隨操作時數增加而提高；本案例未採三參數估計係受限於順序電門支撐架無法查證切確的初始裂紋發生時間，而缺乏 t ：隨機變數-失效時間，故不予考量。

- 韋柏分析結果，斜率參數(β) >1 屬磨耗型特性，符合 RCM 分析要件，其產品之失效率變化特徵符合遞增失效率(Increasing failure rate; IFR)之特性者；另產品壽命特徵屬常數失效率者，則無須逕行預防性維護作業，如電子產品等。
- 依據此失效分布推估全機隊全壽期 15 年內預估發生支撐架裂紋事件約 68 次。(經 FMEA 分析本失效案例對飛行風險無重大影響，全機隊一次性檢查將影響戰備，故未實施全面檢查，僅按使用單位提列 4 具裂紋事件估計，實際裂紋發生數量應會更多)。

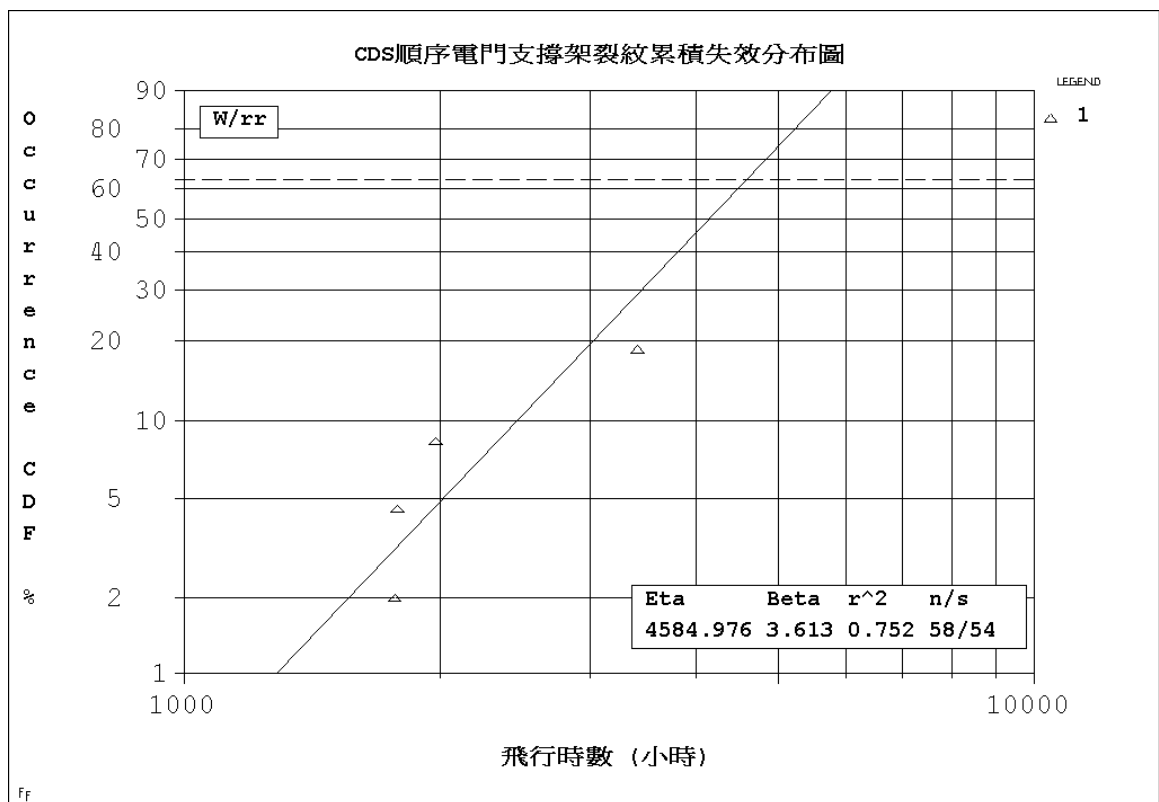


圖 14 順序電門支撐架裂紋累積失效分布圖

資料來源：漢翔公司韋柏分析結果

4.7 順序電門支架-失效模式效應分析結果

根據順序電門支架初始設計規範，其結構強度應大於負載，可滿足全壽期不致損壞，惟本失效案例出現後，推翻原始設計考量之假設操作及環境負載條件，無法符合戰機服役場景之負載，故重新進行 FMEA，分析結果如后：

分析標的：IDF 反制投擲系順序電門支撐架

功能：支撐及固定順序電門

失效模式：裂紋

失效原因：支撐架局部 R 角應力集中，長期承受環境負載下所產生之疲勞裂紋

失效效應：

1. 本 身：支撐架斷裂無法穩固順序電門。
2. 上一層：順序電門損壞或線束鬆脫/斷裂。
3. 飛 機：無法投射火焰彈及干擾絲，造成任務偏異。

檢驗方法：目視及渦電流等非破壞性檢驗。

補償措施：順序電門損壞或線束鬆脫/斷裂時，反制投擲系統即自動產生失效警告通知飛行員。

嚴重等級：III(次要系統受損將減低甚至喪失可使用度及導致無法完全達成任務或造成較小傷害-依據 MIL-STD-1629 分類如下表 11)

表 11 嚴重性等級

| 等級 | 程度 | 說 明 |
|-----|----|---|
| I | 致命 | 失效可能造成死亡或系統的損失 |
| II | 關鍵 | 失效可能導致嚴重的人身傷害、重大財產損失，或主要系統的損害導致任務失敗 |
| III | 輕度 | 失效可能導致輕微的傷害、輕微財產損失或輕微的系統損傷，進而造成延誤、可用度的損失或任務衰減 |
| IV | 微小 | 失效尚不足以造成傷害、財產損失或系統的損害，但會導致非預期的維修或修理 |

資料來源：MIL-STD-1629

4.8 順序電門支架-重要性功能確認決策推論結果

根據 RCM 重要性功能確認評估流程如圖 15，當順序電門支架功能喪失時，其失效效應對飛行安全及環境無重大影響，但對系統操作可能因支撐架斷裂無法穩固順序電門，恐造成順序電門損壞或線束鬆脫/斷裂，導致戰機無法投射火焰彈及干擾絲而造成任務偏異，且失效事件可能有順序電門支架、順序電門損壞或線束斷裂等零件損壞可能性，影響壽期成本，評估結果順序電門支架屬重要功能件。

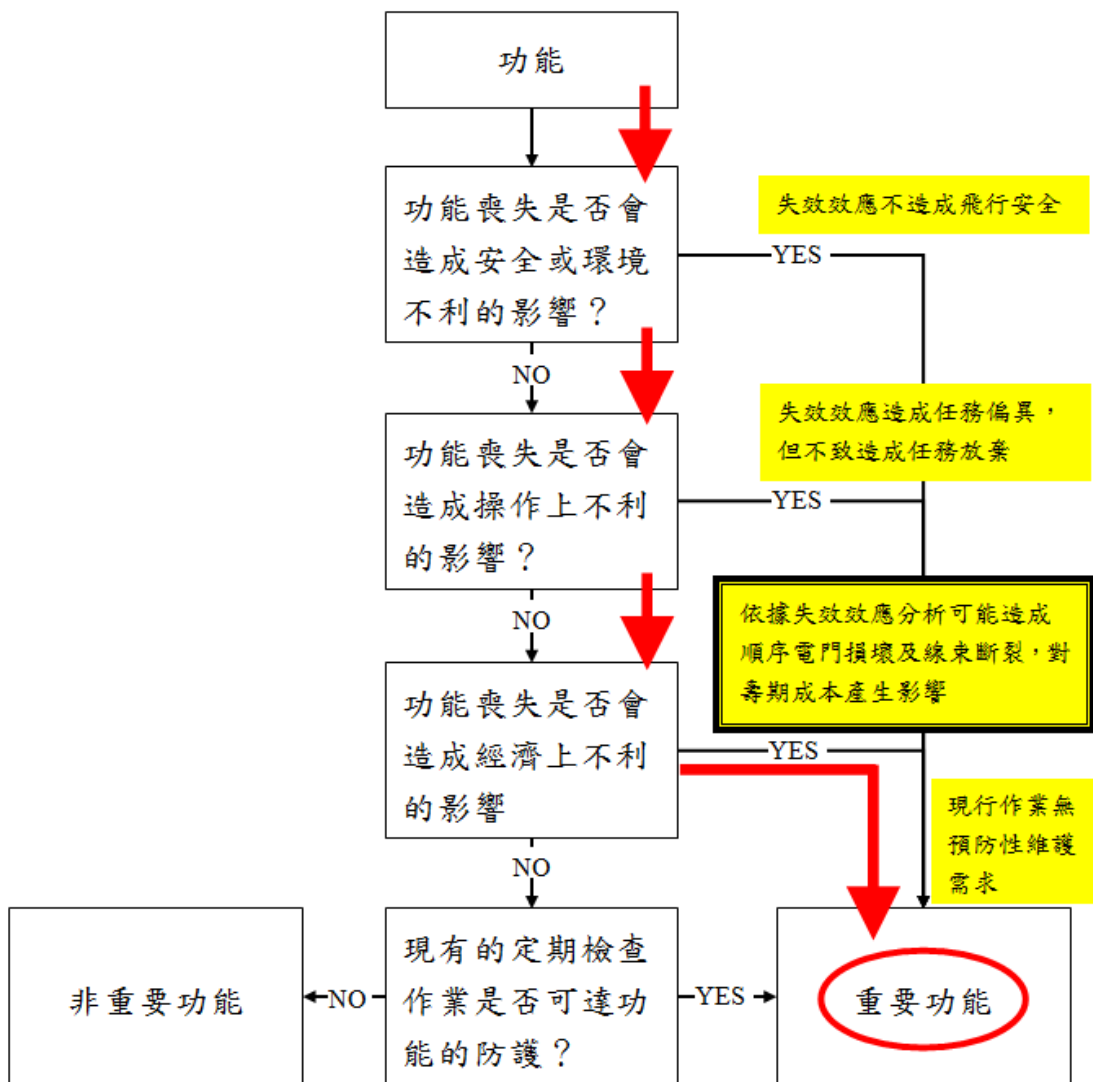


圖 15 重要性功能確認決策推論圖
資料來源：NAVAIR 00-25-403

4.9 順序電門支架-RCM 決策邏輯推論結果

順序電門支架設計原屬全壽限件無須納入預防性檢查計畫，而支架裝置隱蔽於順序電門下方，若未能拆下順序電門則支架因遮蔽處於盲區，無法明顯察覺潛在失效，且其失效並不影響戰機系統功能、環境及操作安全危害，僅對經濟性壽期成本有所影響，故維護作業評估建議選項有定期檢查、壽限件定更或翻修作業、失效檢測、無預防維護作業(採用 OCM 視況維修)或其他行動(設計變更)，應進一步執行壽期成本評估以決策最佳選項。



圖 16 RCM 決策邏輯推論圖

資料來源：NAVAIR 00-25-403

4.10 順序電門支架-維護作業評估結果說明

- 保養作業(Servicing Task)：

順序電門支撐架無須補充消耗品，不適用。
- 潤滑作業(Lubrication Task)：

順序電門支撐架無須潤滑，不適用。
- 定期維修作業(On Condition Task)：
 - 400 小時週檢時目視及渦電流檢查順序電門支撐架是否產生裂紋。
 - 於 180 天投擲器銹蝕檢查時一併執行檢查順序電門有否產生裂紋。(經實機安裝位置驗證無法直接目視方式確認，不適用)
- 壽限件定更或翻修作業(Hard Time Task)：

依據順序電門支撐架裂紋成長特性，律定定更時距並據以更換新件。
- 失效檢測(Failure Finding Task)：

順序電門支架於律定之使用期間執行檢查，以察覺是否已達到功能失效情況，若有則更換新件。
- 無預防維護作業(No PM)：

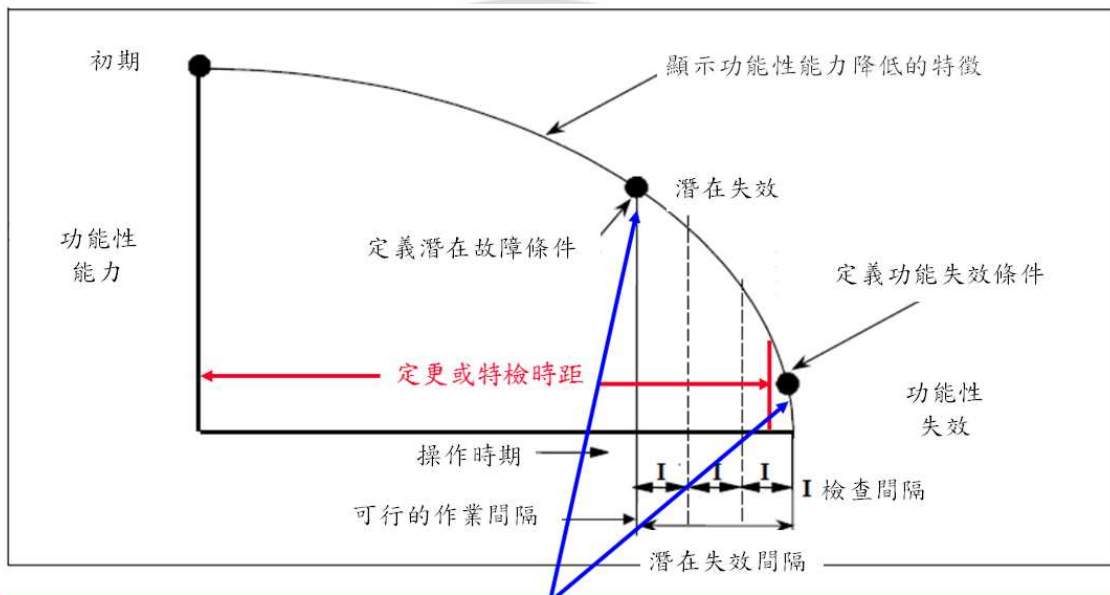
無須使用預防維護作業，於失效後以矯正性修護方式執行。

7. 其他行動(Other Action)：

重新設計順序電門支撐架使符合全壽期使用需求，並配合於週檢期間檢查，如有損耗(ATTRITION)情況再進行更換作業。

4.11 順序電門支架-失效特徵評估結果

因電門支架之失效案例無法確認初始裂紋發生起始點及大於 0.5 吋定義功能失效條件之相關使用時數，故無法定義潛在失效間隔以作為可行的預防性作業間隔律定，惟失效樣本之特徵壽命值(平均失效間隔)約為 4585 飛行小時，遠大於該型戰機既定預防性週期檢查每 400 飛行小時檢查之時距，故基於系統功能及壽期成本經濟考量，保守建議配合 400 小時週期檢查，如需精準律定週期檢查時距，建議由實驗室進行拉伸試驗以觀察潛在失效至功能失效之失效間隔，參閱圖 17。



現行無支撐架相關潛在失效起始點及功能失效期間之使用時數統計資料可供參考。

圖 17 失效特徵評估推論圖

資料來源：NAVAIR 00-25-403

4.12 順序電門支架-壽期成本評估結果

1. 壽期成本評估假設及參考資料：

(1) 本項評估部份假設條件因缺乏相關裂紋功能失效資料、裂紋成長期間及驗證等相關資料，僅能就現行所蒐集資料予以概估成本效益。

(2) 參考資料

<1>戰鬥機數：127 架

<2>維修作業頻率

使用壽期：15 年

15 年內預估支撐架裂紋將發生約 68 次。
平均每架機每年使用時數：130 小時(近五年全機隊平均值)。
400 小時週檢次數：5 次 (130 小時/年*15 年/400 小時)。
全壽期定更或及特檢次數：1 次(時距>4000 小時)。
支撐架裂紋打止裂孔可減少功能失效率為 30%。
支撐架裂穿而導致功能失效之機率為 10%。
順序電門損壞機率為支撐架功能失效之 10%。
特定使用時間執行功能檢測之裂紋檢出機率為 50%。

<3>檢測處理工時：30 分鐘

<4>維修作業人力費用

空軍維修人員工費率：600 元/小時(後勤支援分析-LSA 壽期估算
使用參數)。

<5>器材費用

順序電門單價：NT\$ 593,860 (US\$ 19,795.37)

支撐架單價：NT\$ 34,463

2. 評估結果與建議：

維護作業規劃建議以 On Condition Task 定型維修方案於每 400 飛行小時週期檢查執行，藉由定期檢查掌握順序電門支架潛藏問題並做適當處置後，可延長該零件使用壽命，惟定期檢查作業次數及檢測成本相較其他方案為多，但整體而言其壽期成本為最經濟之方式，評估方案壽期成本計算概述如下，方案優劣比較如表 12 評估方案比較所示。

(1) On Condition Task：

檢測處理成本：

$5(\text{機隊使用 15 年期間須執行 400 飛行小時週檢次數}) * 600(\text{工費率}) * 0.5(\text{檢測處理工時}) * 127(\text{飛機總數}) = 190,500$

支撐架器材成本：

$68(15 \text{ 年內預估裂紋發生次數}) * 0.1(\text{支撐架裂穿而功能失效之機率}) * 0.7(\text{打止裂孔後失效率遞減}) * 34,463(\text{支撐架單價}) = 164,044$

合計：354,544 元

(2) Hard Time Task：

支撐架器材成本：

$127(\text{飛機總數}) * 34,463(\text{支撐架單價}) = 4,376,801$

合計：4,376,806 元

(3) Failure Finding Task：

支撐架器材成本：

$68(15 \text{ 年內預估裂紋發生次數}) \times 0.1(\text{支撐架裂穿而功能失效之機率}) \times 34,463(\text{支撐架單價}) = 234,348$

順序電門器材成本：

$68(15 \text{ 年內預估裂紋發生次數}) \times 0.1(\text{支撐架裂穿而功能失效之機率}) \times 0.1(\text{順序電門損壞機率}) \times 0.5(\text{特定使用時間檢測之裂紋檢出機率}) \times 593,860(\text{順序電門單價}) = 201,912$

合計：436,260 元

(4) No PM：

支撐架器材成本：

$68(15 \text{ 年內預估裂紋發生次數}) \times 0.1(\text{支撐架裂穿而功能失效之機率}) \times 34,463(\text{支撐架單價}) = 234,348$

順序電門器材成本：

$68(15 \text{ 年內預估裂紋發生次數}) \times 0.1(\text{支撐架裂穿而功能失效之機率}) \times 0.1(\text{順序電門損壞機率}) \times 593,860(\text{順序電門單價}) = 403,825$

合計：638,173 元

(5) Redesign：

400 小時週檢壽期成本+CR(Change Requirement-設計變更需求)成本：

合計：>354,544 元

4.13 最佳維修策略評定

根據 4.5 節失效模式效應分析評估結果，其嚴重等級為 III『輕度』，因順序電門支架失效僅造成輕微的傷害、輕微財產損失或輕微的系統損傷，並導致延誤、可用度的損失或任務衰減，故順序電門支撐架維護作業評選排除操作安全與功能喪失影響，主要仍以壽期成本之經濟因素考量，經分析評估後，選擇定型維修作業最符合成本經濟性，故將順序電門支撐架檢查納入該型機既定之 400 飛行小時週檢執行預防性檢查作業。

另需同步檢討後勤支援構面 1.修訂技術文件將順序電門支架納入 400 小時計畫性檢查項目。2.將檢查重點納入教育訓練課程並周知從業人員參照技術文件遂行檢查要點，及加以記錄裂紋成長趨勢，俾作為後續可靠度統計分析參考及檢討定檢時距合宜性之依據。

表 12 評估方案比較

| 維護作業方案 | 優點 | 缺點 | 壽期成本 |
|---|-----------------------------------|--------------------------------------|---|
| On Condition Task (400 小時週檢) | 定期檢測有無裂紋發生並處理，可延長支撐架使用壽命 | 定期檢測處理作業次數多，預防性檢測成本較高 | 檢測處理成本： $5*600*0.5*127=190,500$ 支撐架器材成本： $68*0.1*0.7*34,463=164,044$ 合計： 354,544 元 |
| Hard Time Task (定更) | 使用至特定時間更換新支撐架，無需執行定期檢驗作業。 | 支撐架未至功能失效情況即更換，經濟效益較差 | 支撐架器材成本： $127*34,463=4,376,801$ 合計： 4,376,801 元 |
| Failure Finding Task (特定使用時間功能檢查) | 於特定使用時間執行一次性檢查，若有功能失效發生則更換，檢測成本較低 | 不能確保後續功能失效事件不致發生 | 支撐架器材成本： $68*0.1*34,463=234,348$ 順序電門器材成本： $68*0.1*0.1*0.5*593,860=201,912$ 合計： 436,260 元 |
| No PM (無預防性維護作業) | 無須投入預防性維修工作，預防性作業成本低 | 可能會發生順序電門裝備損壞或線束斷裂鬆脫後才能發現，矯正性失效成本較高。 | 支撐架器材成本： $68*0.1*34,463=234,348$ 順序電門器材成本： $68*0.1*0.1*593,860=403,825$ 合計： 638,173 元 |
| Redesign (重新設計) | 可有效降低壽期內支撐架裂紋發生率 | 增加工程變更成本 | 400 小時週檢壽期成本+CR 成本 合計： >354,544 元 |

資料來源：本研究整理

第五章 結論與建議

5.1 結論

本研究嘗試以 RCM 與 TPM 之執行策略進行整合效益歸納，並應用於維修策略規劃，俾制定一最佳維修方式與週期，經 2.8 節歸納結果顯示：(一)就維修規劃執行階段而言，RCM 可滿足產品全壽命週期，TPM 僅為系統裝備服勤階段起。(二)評估方法之差異，RCM 同時以定性研究及量化分析達成邏輯性評估方法，以系統安全、功能發揮及壽期成本經濟為目標，TPM 則藉由定性的管理方法與技術，以提升設備運作效益為宗旨。(三)技術導入及成本之差異，RCM 須結合產品壽命週期管理，由使用者與製造商共同投入前期的發展及後期的維持規劃，故需藉由諸多專長領域進行資源管理與計畫推展，導致技術導入不易且所費不貲，TPM 僅運用企業的內部資源，運作成本相對經濟，且管理方法及技術易於導入。爰上結論，對於大型、複雜、高價、長壽期或高安全性要求之系統設備，尤以失效可能形成災難性的重大損失如航太、軍事、核能及石化等產業，建議採用 RCM 技術俾提升系統安全、功能及成本等運作效益；另外，RCM 技術亦可涵蓋 TPM 管理模式，企業可以依照實際需求及成本考量，對 RCM 的定量分析加以 Tailor 適用之評估指標。

該案例係以 RCM 結構化決策邏輯為評估基礎，藉由系統服勤環境之壽命分配加以回饋修正研發階段以 MTBF 預估法進行的 RCM 規劃，據以檢討服勤階段的最佳維修策略，可有效提升運作效益，惟其過程中評估技巧的選用受案例特性及方法考量，未全面運用 RCM 與 TPM 效益評量指標之選項，但整合運用 RCM 與 TPM 的概念確認為可行方式。

5.2 未來研究方向

維修作業應用『預防重於治療』之概念加以規劃，對系統裝備而言為絕對必要之工作，某些大型複雜系統之使用壽期長達數十年之久，服勤期間所累積的維修費用遠高於系統購置費用(Acquisition Cost)，由於其維持成本昂貴，更值得我們審慎考量；另外，對於維修規劃的設計，除考量研發過程的 Design-In 外，更應充分運用其操作使用期間之後勤工程相關資料，如可靠度、可用度、維護度及安全度等參數之回饋，以利執行 RCM 分析與修訂，並作為降低操作支援成本及未來系統設備研發、籌購及壽期成本估算之重要參考依據。

維修計畫所制定的預防性檢查項目係針對系統操作安全性、功能性及壽期成本影響顯著之重要性元件加以規劃保養、檢查、定期更換或翻修等作業，故系統設計者於系統發展階段即應考量是項條件並結合使用者需求，選

擇合宜的系統或硬體設計，而使用者於系統設備建置前更應充分蒐集系統設計資訊，即便無從獲得，可根據類似系統裝備使用經驗，或邀集相關從業人員、維修工程師及作業主管加以研議及評定系統中那些元件屬性為重要性功能件者，而據以制定合宜的維修計畫，終將有助於接裝單位先期制定的維修能量籌建規劃構想更臻完備。



參考文獻

- [1] 方鈞，1998，建構半導體製程改善之失效模式與效應分析架構及其應用研究，國立清華大學，碩士論文。
- [2] 方寶嬪、王振華，2011，“石化廠維修履歷到可靠度數據轉換研究”，國立高雄第一科技大學，勞工安全衛生研究季刊 民國 100 年 12 月 第 19 卷第 4 期。
- [3] 王同群，2011，基於模糊策略的可靠度為中心之設備維護程序，國立高雄第一科技大學，碩士論文。
- [4] 王國雄、蔡有藤，2005，光碟製程設備智慧型診斷與維修保養系統之發展，國立中央大學，國科會計畫。
- [5] 王勝嘉、邱元錫、張紂微，2002，“台灣中小企業導入 TPM 之模式探討”，朝陽學報第七期。
- [6] 江中守，2009，TPM 活動導入與改善方向之研究—以某半導體廠為例，國立清華大學，碩士論文。
- [7] 吳志雄，2002，全面生產管理(TPM)活動之導入與成效研究—以汽車零組件公司為例，國立中央大學，碩士論文。
- [8] 吳建輝，2010，應用 FMEA 於氣化供應系統風險評估之研究—以某半導體廠矽甲烷為例，國立清華大學，碩士論文。
- [9] 李典慶、張聖坤、唐文勇，2004，“基於風險的船體結腐蝕優化檢測及維修規劃”，上海交通大學學報 38 卷 11 期。
- [10] 周智偉，2012，FMEA 應用於設備組裝改善之研究，國立高雄第一科技大學，碩士論文。
- [11] 林偉仁，2005，設備維護管理系統與生產製造績效之關係探討，國立中央大學，碩士論文。
- [12] 林淑娟，1993，運用失效模式與效應分析於手術流程之病人安全評估—以中部某區域教學醫院為例，中國醫藥學院，碩士論文。
- [13] 林楠凱，2004，校園水池生命週期成本(LCC)之研究—以台中市國小為例，朝陽科技大學，碩士論文。
- [14] 邱彥達，2010，可靠度分析運用於大眾捷運系統—高雄捷運號誌系統為例，國立高雄第一科技大學，碩士論文。
- [15] 邱鐘慶，2009，製程危害分析安全等級之研究，國立高雄第一科大，碩士論文。
- [16] 柯輝耀，2001，預防性失效分析，中華民國品質學會。
- [17] 柯輝耀，2008，可靠度保證，中華民國品質學會。

- [18] 洪健仁，2009，半導體廠局部尾氣處理設備危害與風險評估，國立中央大學，碩士論文。
- [19] 胡瑞珉，2011，運用 FMEA 於 DRAM 深溝式電容製程改善之研究，中原大學，碩士論文。
- [20] 凌宇康，2006，應用可靠度為中心維修方式規劃軌道車輛維修階層之研究—以台鐵電聯車動力系統為例，國立交通大學，碩士論文。
- [21] 真壁肇、陳耀茂，1989，可靠性工程入門，中華民國品質學會。
- [22] 高福成，1994，新 TPM 全面生產保養推進實務，中衛發展中心。
- [23] 張仁榮、徐啟銘、張銘坤，2007，“以可靠度為中心的維修(RCM)方法來降低工場非計畫性停車的影響”，化工 第 54 卷第一期。
- [24] 張珏庭、王漪峯、賴昭安、王聖尤，2002，以 Petri Net 模式為基礎之批次製程危害分析方，國立成功大學，國科會計畫。
- [25] 張新立，2006，應用可靠度集中維修方式規劃軌道車輛維修階層之研究—以台鐵電聯車動力系統為例，國立交通大學，國科會計畫。
- [26] 張憲嘉，2008，汽車公司導入 TPM 之研究 以中華汽車公司為例，國立清華大學，碩士論文。
- [27] 梁家祥，2010，大眾捷運不斷電系統配置可用性分析，國立台灣海洋大學，碩士論文。
- [28] 梁書銘，2008，結合 FMEA 技術與壽命成本分析於最佳化設備採購策略之研究，國立屏東科技大學，碩士論文。
- [29] 許靖河，2010，企業運用全面生產管理提升競爭優勢之研究—以 W 公司為例，台北科技大學，碩士論文。
- [30] 連夷佐，2003，橋梁維護管理生命週期成本評估模式之研究，國立中央大學，碩士論文。
- [31] 郭子瑜，2012，有限資源下之可靠度分析與維護排程探討—以電廠幫浦為例，國立台灣大學，碩士論文。
- [32] 陳俊德、張明松，2009，“具有或閘失誤樹於銀行批次作業之風險模式建構”，華凡大學，國立空中大學管理與資訊學系管理與資訊學報，民 98，14 期。
- [33] 陳建誠，2006，建立醫藥物流作業流程 FMEA 模式，中原大學，碩士論文。
- [34] 傅憲端，2007，航空產業中航機維護及可靠度計畫改善之個案研究，國立中央大學，碩士論文。
- [35] 湯敏儷，2005，運用 FMEA 技術於審計風險之研究—光陽公司案例，義守大學，碩士論文。
- [36] 黃清賢，1996，危害分析與風險評估，三民書局。

- [37] 楊朝鈞，2003，構建航空站空側風險架構之研究-FMEA 之應用，國立成功大學，博士論文。
- [38] 詹豐隆，2000，系統規劃架構-以捷運機廠維修流規劃為例，國立清華大學，碩士論文。
- [39] 鈴木德太郎，1994，新 TPM 展開實務，中衛發展中心。
- [40] 廖成偉，2002，高科技產業成本導向設計概論，漢翔公司學術季刊。
- [41] 劉正良、張建國，2003，操作及支援成本與後勤參數關係之研究，國立台灣大學，國科會計畫。
- [42] 劉侃，2006，運用失效模式與效應分析技術及資訊科技改善用藥安全，高雄醫學大學，碩士論文。
- [43] 潘浙楠，1997，台灣工廠維修制度之現況分析及其改進之道，國立成功大學，碩士論文。
- [44] 蔡炳程，1999，以全面生產管理(TPM)建構企業競爭優勢之探討，國立清華大學，碩士論文。
- [45] 鄭人福，2007，TS16949 中 FMEA 在安全氣囊上之案例研究，台北科技大學，碩士論文。
- [46] 鄭坤憑，2009，全面生產管理 TPM 之 e 化活動實務探討—以 C 公司案例，國立中央大學，碩士論文。
- [47] 薛家豪，1998，維修管理之決策與績效評估，國立清華大學，碩士論文。
- [48] 聶錦楨，2011，異質馬可夫式衰退系統之多動作動態預防維護策略研究，國立清華大學，碩士論文。
- [49] 藍天雄、莊烘銘、何明果、李宜錡，2007，冰箱製造廠推行 TPM(全面生產保養)之績效研究，管理科學研究 2007 第二屆管理與決策學術研討會特刊。
- [50] 羅昱盈，2006，以生命週期成本觀點研析學生宿舍建築之維護成本與策略，國立台灣大學，碩士論文。
- [51] 譚海林，2005，艦船系統全壽期成本分析研究，國立高雄第一科技大學，碩士論文。
- [52] Blanchard, B.S, 1991, System Engineering Management, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA。
- [53] Blanchard, Benjamin S., “Logistics Engineering and Management, ” 4th ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1992, RMS: Reliability, “Maintainability & Supportability Guidebook, ”。
- [54] Brian McLoughlin、Farshad Doulashahi、Jason Onorati, 2011, “Flight Safty Quarterly, Winter 2011”。
- [55] DOD, System Safety Program, Requirements, MIL-STD-882C, Jan. 1993 (Department of Defense)。

- [56] Fabrycky., “Life-cycle cost and economic analysis , ” Prentice Hall,1991 ◦
- [57] GJB 1391-92 , 1992 , National Standard of the People's Republic of China ◦
- [58] Haasl, D. F, Roberts, N. H., Vesely, W. E. and Goldberg, F. F. , 1981 , Fault Tree Handbook, NUREG-0492 , U.S. Nuclear Regulatory Commission ◦
- [59] Jack V. Michaels., William P. Wood., “ DESIGN TO COST, ” New York :Wiley ,1989 ◦
- [60] Leland Blank, Anthony Tarquin, “ Engineering Economy, ” Mc GRAW hill ,2006 ◦
- [61] MIL-STD-1629 , 1980 , Procedures for Performing a Failure Mode,Effects and Criticality Analysis ◦
- [62] NAVAIR 00-25-403 , 2005 , GUIDELINES FOR THE NAVAL AVIATION RELIABILITY-CENTERED MAINTENANCE PROCESS ◦
- [63] SAE G-11, RMS Committee, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale. PA, 1995 ◦
- [64] SAE-J 1739 , 2002 , Potential Failure Mode and Effects Analysis Reference Manual ◦

