

應用 FMEA 於 T700-GE-401 型發動機電氣系統故障分析

筆者/張雅婷

提要

在飛行安全歷史中，有太多的失事案例，造成人員傷亡與飛機毀損的結果，因此，唯有在真正了解飛機失事原因後，始能設法予以改進與預防。故本研究希望針對動力系統的故障原因進行分析，而目前業界常使用失效模式與效應分析(Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)於產品系統故障問題實施分析，其目的為找出系統潛在失效的模式，並針對潛在失效模式提出預防精進措施，以防範失效模式再生。

因此，本研究蒐整某陸軍航空單位維修資料庫之攻擊直升機發動機發生故障事件，試著將失效模式與效應分析(Failure Mode and Effect Analysis)導入運用，確認其是否可行並進一步提出預防發動機失效風險之對策與建議。本研究經由對發動機電氣系統運用 FMEA 分析所獲得的結果，提出對管理階層之修護品質管理建議，運用研究方法精進肇因分析，將各種失效模式運用本研究方法，逐步找出失效原因及風險指數，必可獲得改善系統之要修護準據。

關鍵詞: 直升機、失效模式與效應分析、發動機、FMEA

壹、前言

飛機事故其原因都是歷史一再重演，在飛行安全歷史中，有太多的失事案例，造成人員傷亡與飛機毀損的結果，因此，唯有在真正了解飛機失事原因後，始能設法予以改進與預防，進而藉由失事調查，做為改正措施之依據。

根據國軍修護管理系統統計陸軍攻擊直升機機隊於2006年至2015年之間，在飛行訓練過程中所發生危安事故因素分類數據中，直升機各系統故障率以動力系統比例最高佔 74.2%，直升機的動力系統廣義來說就是指發動機，此機件相當重要，其為所有動力輸出的來源，如同人體心臟，一沒作動，整體的功能就失效無作用。

依據國軍修護管理系統執行近十年各大系統故障統計，發現動力系統之發動機故障極高，其動力失效及故障，常為飛機失事之原因，故本研究希望針對動力系統的故障原因進行分析。

一、緒論

目前業界常使用失效模式與效應分析(Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)於產品系統故障問題實施分析，在早期是由福特汽車先導入運用於汽車工業，推廣運用於其公司教育手冊中，訂定失效模式與效應分析的作業程序，之後科技業也陸續導入，如美國最著名的阿波羅太空計畫。因此在本研究期望將 FMEA 作業模式導入於直升機的動力系統，確認其可用性，進而提建議，有效預防飛安事件發生。基於以上研究動機，本研究的研究目的有：(1)蒐集各業界運用失效模式與效應分析相關文獻資料。(2)使用藉由國軍修護管理系統，蒐整出潛於發動機失效的組件。(3)運用 FMEA 執行發動機失效的組件分析，確認其是否適合導入運用，若可行，則進一步提出預防發動機失效風險之對策與建議。

二、案例及文獻探討

(一)審視本軍近年來重大發動機失事案例，發生於民國 97 年 515 號機 AH-1W 攻擊直升機失事於龍潭市區，經調查確認發動機上之發動機電子控制單元品質不佳，因技令上容許兩具發動機之發動機電子控制單元互換交叉比對測試，對調互換後在地面試車及空中試飛一切正常，惟墜機時直升機旋翼沒運轉，顯示發動機為靜止狀態，事故後本軍將發動機電子控制單元及發動機殘骸送長榮航空檢測，偕同美國奇異公司確認，墜機失事元凶確為發動機電子控制單元電阻值異常錯誤，導致一級飛安事故發生。

(二)失效模式與效應分析運用

1. 失效模式與效應分析(Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)是一種品質改善的預防性技術。未雨綢繆預防性的工程技術，強調產品在設計、

製造之前先行探討失效的可能原因，利用可靠度機能方塊圖展開，分析低層次組件失效對較高層次分系統失效的影響，在失效未真正發生之前設法防止或減少其發生機會(簡志郎，2003)。

A. 運用 FMEA 之相關文獻

不同產業各種階段導入 FMEA 方法，對產品執行修正及改進，使產品品質有很大的幫助，以下為本研究摘要將各業界運用情形彙整如表 1。

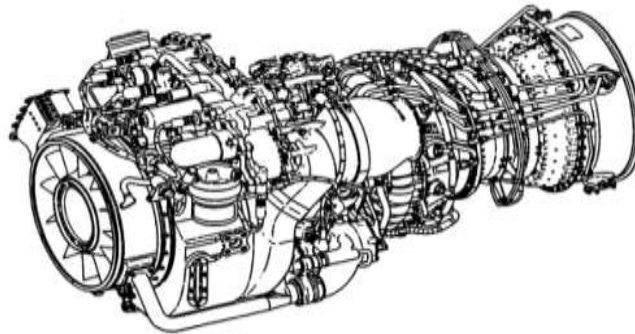
表 1、FMEA 應用相關文獻

作者/年代	對象(品名)	概述
李政儒/2006	中央空調系統	應用 FMEA 對煙控系統各項設備進行風險評估及發生失效時，其解析對系統造成何種影響，並提出建議改善對策，並藉由風險優先指數的評估，決定對系統失效要因採取對策順序，以改善系統的效能及可靠度。
溫敏智/2006	動力手工具	利用 FMEA 進行工程上的分析，找出所有潛在的失效模式，以及可能產生的後果，並利用 TRIZ 理論審視 FMEA 的建議措施，找到改善惡化之解決方法，最後再返回 FMEA 去審視此解決方法是否會引發其他的破壞模式。
李明賢、王玉鳳 /2006	環境管理系統	運用 FMEA，依風險優先指數分數之高低來鑑定顯著環境考量面，再用社會關心程度、改善技術之可行性及改善成本等三項指標之乘積總分進行第二次評估，以決定優先改善的順序。
Cliff/2007	採購	探討採購上因有一定風險，如意想不到成本、延長交貨時間、品質低劣等，故利用 FMEA 進行蒐集相關訊息的風險管理決策，以提供決策者考慮採購時，應選擇使用 FMEA 評估為基礎的廠商。

2. T700-GE-401 發動機原理概述

T700-GE-401 渦輪軸發動機是美國通用電氣飛機發動機公司(英文:General Electric Company, 簡稱 GE;其英語譯簡稱為奇異)所製造,我國軍航空單位現役之攻擊直升機即使用此發動機且裝載兩具,這兩具發動機裝有結合齒輪箱構成之動力總成,它們具有完全相同、輕巧、渦輪軸模組式結構之發動機,如圖 1 所示。

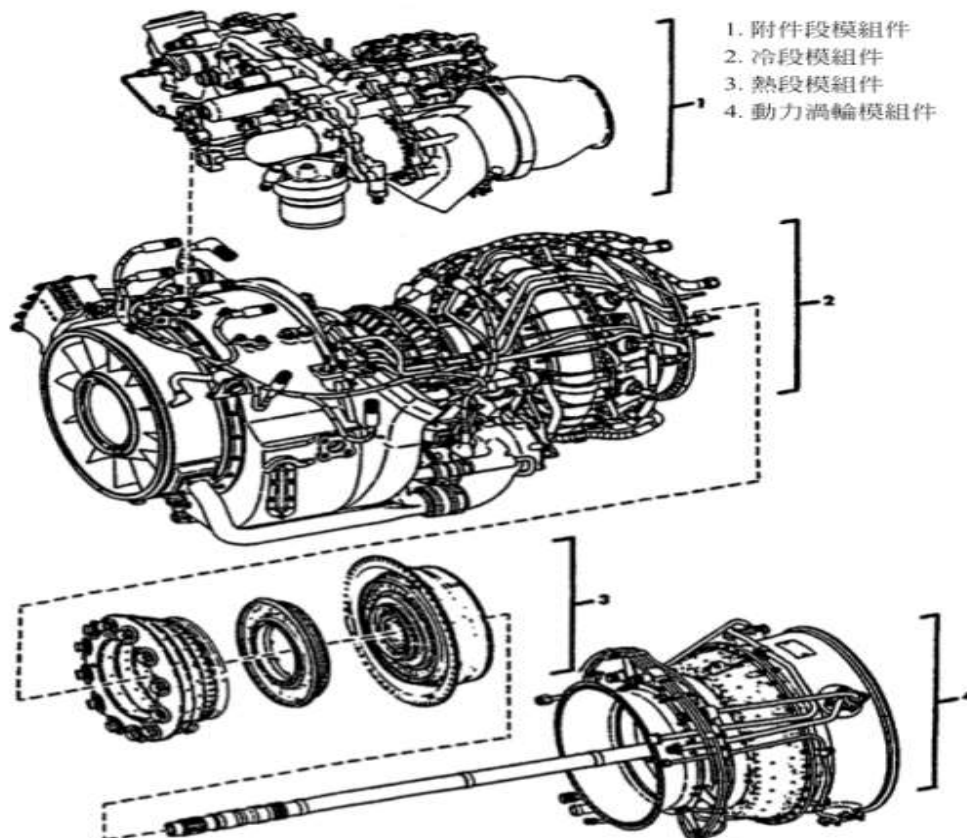
圖 1、T700-GE-401 渦輪軸發動機



資料來源: 68-4. A1-T700A-MMI-200+T700 引擎中間保養第一冊

發動機各模組、元件及系統組成區分為動力渦輪模組、熱端模組、冷端模組、附件齒輪模組、燃油系統、電氣系統、滑油系統及氣流系統,如圖 2 所示。

圖 2、發動機各主要機件



資料來源: 68-4. A1-T700A-MMI-200+T700 引擎中間保養第一冊

三、研究方法

(一)FMEA 步驟及表格運用

FMEA 的執行從分析失效模式開始，對於較複雜的產品(研究對象)由主系統劃分成子系統，再將子系統劃分成較小的單元，分析每個單元可能造成的失效模式及效應，進而研究如何採取有效的預防及改正措施(簡志郎，2003)

1. FMEA 步驟

首先決定分析項目為發動機電氣系統，介紹其各組件功能，利用失效模式與效應分析的管理手法展開失效模式，探討失效後產生的效應及其分析肇因，進而建立精進預防方法，再依計算失效模式之風險優先指數(RPN)，列舉出相對應之改善措施，作業流程主要分為 1. 列出發動機電氣系統分析層次 2. 列出所有潛在的失效模式 3. 評估失效原因與失效影響 4. 建立風險優先指數(RPN 值) 5. 研擬改善及預防措施。

失效模式及效應分析的過程，FMEA 重點在於產生三種參考指標，嚴重度(Severity)、發生度(Occurrence)及偵檢度(Detection)，以獲得失效模式之風險指數(RPN)，其關係式 Carl Carlson(2012)如下，並依發動機電氣系統之失效模式進行分析，計算 RPN 風險指數，提出關鍵改善重點。

$RPN=S*O*D$ ；S=嚴重度(Severity)；O=發生度(Occurrence)；D=偵檢度(Detection)

A. 發生度:所謂發生度，指的是造成某項缺點原因之發生頻率，失效問題的發生率越高則其等級也就越高。如表 2。

表 2、發生度評價標準表

失效頻率	失效原因	等級
經常發生(很高)	持續性發生失效	10
有時發生(高)	不可避免失效	9
	失效可斷定出原因	8
	失效無法被斷定原因	7
偶爾發生(中)	常見之失效連結至類案之測試	6
	偶爾之失效連結至類案之測試	5
	被隔離之失效連結至類案之測試	4
很少發生(很低)	僅有被隔離之失效至幾乎相同之測試	3
	受監控之失效至幾乎相同之測試	2
極少發生	透過預防措施可管制失效	1

資料來源：本研究蒐集整理

B. 嚴重度:所謂的嚴重度為某項缺點發生後，可能對最終使用客戶造成傷害或損

失之狀況，依實際傷害程度作判斷，以嚴重性評分標準區分為十個等級，等級越高表示損失傷害越大，反之等級越低表示越無影響。如表 3。

表 3、嚴重度評價標準表

影響	產品嚴重及影響程度	等級
安全或程序 規範	嚴重影響使用者及飛機系統安全且無獲得事前預警	10
	嚴重影響使用者及飛機系統安全，可獲得事前預警	9
主要功能 失效	主要功能失效後，飛機系統無法操作，但功能產生降級(Degraded)狀況者。	8
	主要功能失效後，飛機系統可以操作，但功能產生降級(Degraded)狀況者。	7
次要功能 失效	次要功能失效，系統仍可操作，但舒適度及方便性影響安全判斷。	6
	次要功能失效，系統仍可操作，但舒適度及方便性不致影響安全判斷。	5
造成使用者 困擾	目視或觸碰檢驗可發現不滿意缺點，但不影響操作，多數使用者(大於 80%)可注意到之缺點。	4
	目視或觸碰檢驗可發現不滿意缺點，但不影響操作，多數使用者(大於 50%)可注意到之缺點。	3
	目視或觸碰檢驗可發現不滿意缺點，但不影響操作，多數使用者(大於 20%)可注意到之缺點。	2
無	無被檢測出缺點(無影響)	1

資料來源：本研究蒐集整理

C. 偵檢度：可檢測系統失效發生的缺點或失效原因，以檢測性區分十個等級，

等級越高表示無法檢測到發生的缺點或失效原因，反之，等級越低，越容易偵測到失效原因。如表 4。

表 4、偵檢度評價標準表

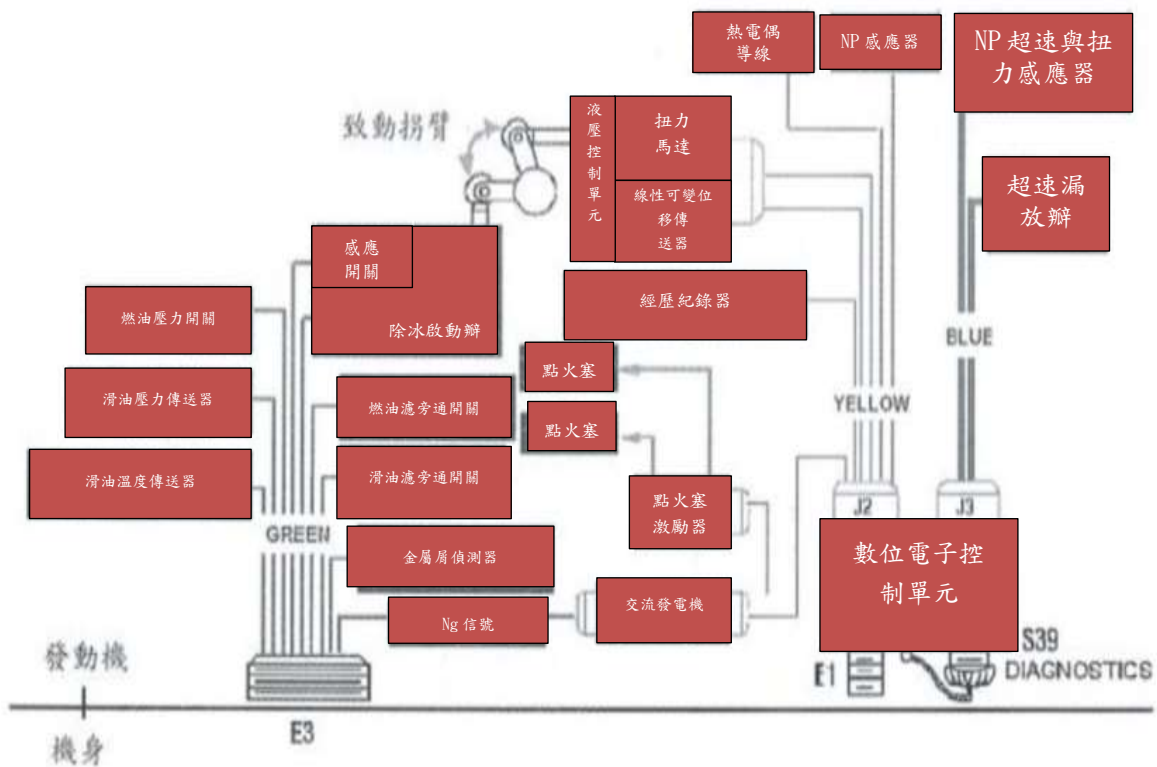
失效偵測	偵測準據	等級	可能性
絕對不可能	無法偵測	10	幾乎不可能
極微小	現行檢驗方法將不可能偵測	9	可能性極小
微小	現行檢驗方法只有微小的機會可去偵測	8	可能性低
極低	現行檢驗方法只有極低的機會可去偵測	7	非常低
低	現行檢驗方法可能的機會可去偵測	6	低
中等	現行檢驗方法可能有好的機會可去偵測	5	中等
中高	現行檢驗方法可能有很好機會可去偵測	4	中高等
高	現行檢驗方法幾乎可能有很好的機會可去偵測	3	高
極高	現行檢驗方法幾乎確定可以去偵測	2	極高
幾乎肯定	現行檢驗方法肯定可以去偵測	1	幾乎肯定

資料來源：本研究蒐集整理

(二)探討失效模組

本研究探討的失效模組為發動機電氣系統，將各組件之間的邏輯互動導入 FMEA，確認是否可運用，若可行即提出改善建議，已提供陸軍航空旅保修單位使用，各組件連接關係圖如圖 3，發動機電氣系統組件所需電源來自一安裝於附件齒輪箱前端右側的交流發電機。此發電機供應 AC 電源到點火系統，發動機電子控制單元(EECU)及經歷紀錄器，以及傳送至座艙儀表的氣體產生器(Ng)訊號。倘若交流電機損壞，直升機變流器會自動取而代之的供應電源到動力渦輪轉速(Np)超速保護系統(所有其他系統均操作不良)。藍色線束為傳輸超速及扭力訊號；綠色線束為監控發動機狀況(座艙儀表)；黃色線束為提供電源以及控制系統信號微調。

圖 3、電氣系統關係圖



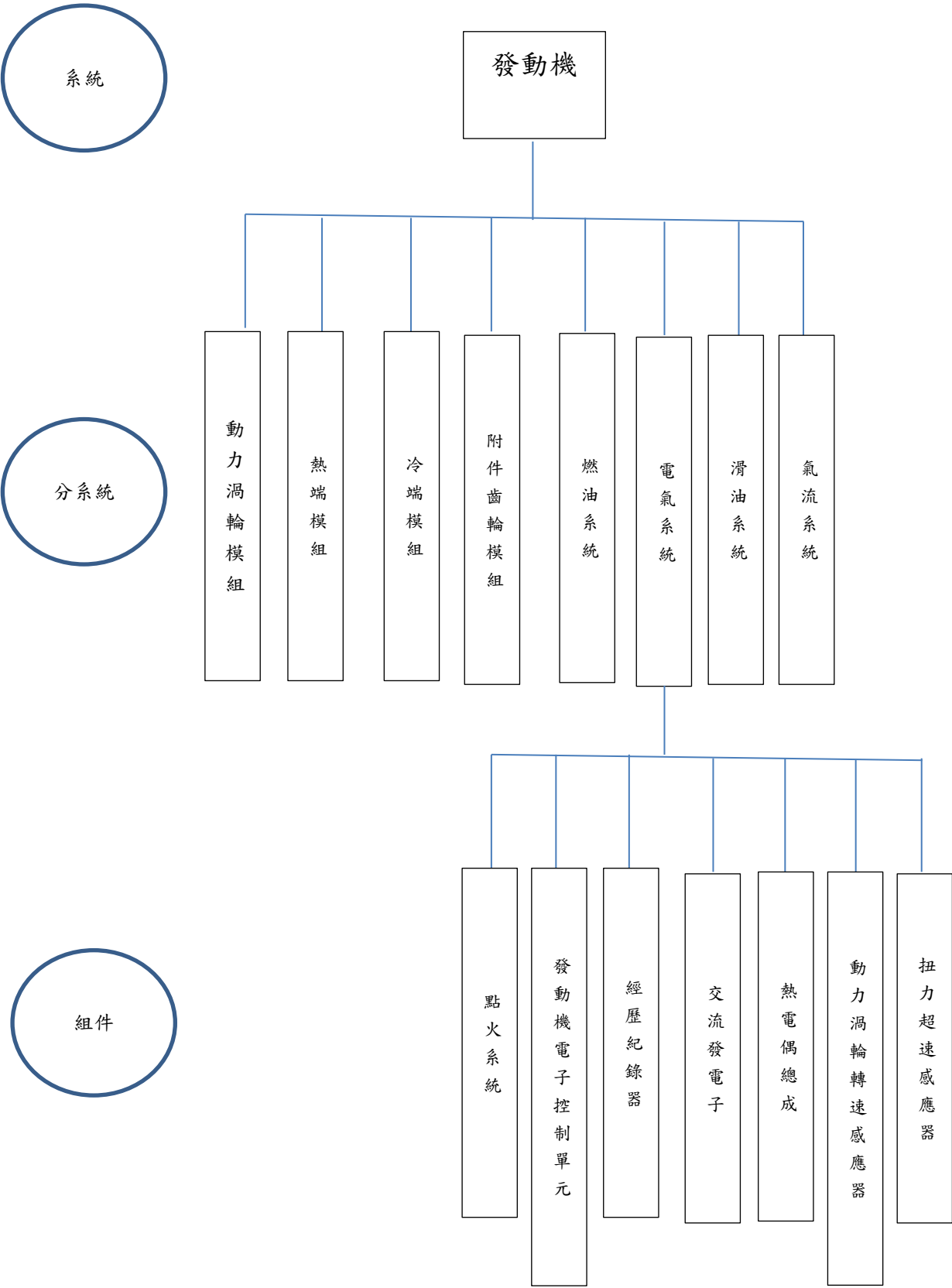
資料來源：“AH-1W 直升機發動機及相關系統操作原理，美海軍部，1990，NAVAIR 01-H1AAC-2-3.2，頁 8-17。

貳、失效模式與效應分析建立

一、案例實作列出發動機電氣系統分析層次

(一)FMEA 作業首要步驟為對分析的對象加以定義，將本研究對象分析分層為系統、分系統、組件三個層次，並繪製可靠度方塊圖，藉由可靠度方塊圖的建立，可清楚了解系統失效中失效之聯結互動。依照 FMEA 作業的實施，可靠度方塊圖的結構定義在一個系統中失效之邏輯互動，個別的方塊代表著單一元件失效、次系統的失效和其他可能導致系統失效的事件，且個別次系統方塊的可靠度行為可由較低階層的可靠度方塊圖來表示(簡志郎，2003)。本研發動機各系統組成區分為動力渦輪模組、熱端模組、冷端模組、附件齒輪模組、燃油系統、電氣系統、滑油系統及氣流系統:然電氣系零組件分為點火系統、發動機電子控制單元、經歷紀錄器、交流發電機、熱電偶總成、動力渦輪轉速感應器以及扭力超速感應器總成，依分析層次繪製可靠度方塊圖，如圖 4。

圖 4、發動機可靠度方塊圖



資料來源：本研究蒐集整理

(二)列出所有潛在的失效模式

透過相關資料及文獻彙整出發動機電器系組件分為:點火系統、發動機電子控制單元、經歷紀錄器、交流發電機、熱電偶總成、動力渦輪轉速感應器以及扭力超速感應器,運用國軍航空修護管理模組統計彙整某3年區間各組件潛在失效模式,例如:發動機電子控制單元潛在造成的失效模式為保險絲燒熔,整理失效模式如表5。

表5、發動機電氣系統潛在失效模式彙整表

項目	潛在失效模式
點火系統	點火導線接頭龜裂
	導線損壞
發動機電子控制單元	保險絲燒熔
	輸入及輸出線異常
經歷紀錄器	電氣接頭損壞
	經歷紀錄器視鏡玻璃霧化
交流發電機	線路損壞
	電氣接頭接觸不良
熱電偶總成	線路損壞
	接線端子接觸不良
動力渦輪轉速感應器	線路損壞
	電氣接頭鬆脫
扭力超速感應器	線路損壞

資料來源:本研究蒐集整理

(三)評估失效原因與失效的影響

將列舉完的失效模式一一列舉其失效的影響評估,並針對所造成的影響實施分析歸納出原因。例如:經歷紀錄器潛在造成的失效模式為接頭損壞,而失效的影響為無法紀錄發動機歷時紀錄,其原因為人員於拆裝時電氣接頭未對準安裝所致,將其所有失效原因與效應的影響彙整如表6。

表 6、發動機電氣系統失效影響及失效原因彙整表

項目	潛在失效模式	失效影響	失效原因
點火系統	點火導線接頭龜裂	發動機熄火	陶瓷材質脆弱
	導線損壞	發動機無法啟動	線路絕緣層破裂
發動機電子控制單元	保險絲燒熔	儀表出現飛機操作不正常	電流異常超過負載量
	輸出及輸入線異常	儀表出現故障訊息	電壓不穩
經歷紀錄器	電氣接頭損壞	無法紀錄發動機歷時紀錄	人為不當拆裝所致
	經歷紀錄器視鏡玻璃霧化	時數計算視窗無法辨識	人為不當拆裝所致
交流發電機	線路損壞	無法提供發動機上所需電力	線路老舊
	電氣接頭接觸不良	發動機儀表參數指針晃動	電氣接頭不乾淨有髒污
熱電偶總成	線路損壞	排氣尾溫 過高	線路絕緣層 破裂
	接線端子接觸不良	排氣尾溫無指示	導線材質硬，檢修不易
動力渦輪轉速感應器	線路損壞	發動機超速	線束端子氧化
	電氣接頭鬆脫無鎖緊	發動機高邊失效	飛機震動所致
扭力超速感應器	線路損壞	超速測試系統操作失效	線束變形

資料來源：本研究蒐集整理

(四)建立風險優先指數(RPN 值)

完成以上步驟後，建立風險優先數值(RPN)，對潛在失效的效應執行嚴重度、發生度及難檢度評分，如表 7 至表 9。

表 7 發動機電氣系統失效發生度

項目	潛在失效模式	發生度等級
點火系統	點火導線接頭龜裂	8
	導線損壞	4
發動機電子控制單元	保險絲燒熔	9
	輸出及輸入線異常	4
經歷紀錄器	電氣接頭損壞	3
	經歷紀錄器視鏡玻璃霧化	4
交流發電機	線路損壞	7
	電氣接頭接觸不良	3
熱電偶總成	線路損壞	5
	接線端子接觸不良	2
動力渦輪轉速感應器	線路損壞	6
	電氣接頭鬆脫無鎖緊	2
扭力超速感應器	線路損壞	6

資料來源：本研究蒐集整理

表 8、發動機電氣系統失效嚴重度

項目	潛在失效模式	嚴重度
點火系統	點火導線接頭龜裂	8
	導線損壞	5
發動機電子控制單元	保險絲燒熔	9
	輸出及輸入線異常	4
經歷紀錄器	電氣接頭損壞	3
	經歷紀錄器視鏡玻璃霧化	4
交流發電機	線路損壞	7
	電氣接頭接觸不良	3
熱電偶總成	線路損壞	5
	接線端子接觸不良	5
動力渦輪轉速感應器	線路損壞	5
	電氣接頭鬆脫無鎖緊	5
扭力超速感應器	線路損壞	5

資料來源：本研究蒐集整理

表 9、發動機電氣系統失效偵檢度

項目	潛在失效模式	偵檢度
點火系統	點火導線接頭龜裂	6
	導線損壞	5
發動機電子控制單元	保險絲燒熔	6
	輸出及輸入線異常	4
經歷紀錄器	電氣接頭損壞	3
	經歷紀錄器視鏡玻璃霧化	6
交流發電機	線路損壞	7
	電氣接頭接觸不良	3
熱電偶總成	線路損壞	5
	接線端子接觸不良	8
動力渦輪轉速感應器	線路損壞	4
	電氣接頭鬆脫無鎖緊	7
扭力超速感應器	線路損壞	4

資料來源：本研究蒐集整理

(五)執行結果分析

1. 計算 FMEA 風險值

本研究按表 2、表 3 及表 4 之分級，逐一完成發動機電氣系統各組件對潛在失效效應進行嚴重度、發生度及偵檢度評估，其評分範圍依照潛在失效效應不同，給予分數等級亦會不同，嚴重性的分數等級越高表示損失傷害越大，反之分數等級越低表示越無影響。發生度指的是造成某項缺點原因之發生頻率，失效問題的發生率越高則其分數等級也就越高，反之分數等級越低表示發生率越低。偵檢度為可檢測系統失效發生的缺點或失效原因，分數等級越高表示無法檢測到發生的缺點或失效原因，反之，分數等級越低，越容易偵測到失效原因。依發動機電氣系統產生三種參考指標，計算 RPN 風險指數，將嚴重度(S)、發生度(O)及偵檢度(D)相乘，所得數值顯示如表 10。

表 10、發動機電氣系統 RPN 計算結果

項目	潛在失效模式	嚴重度(S)	發生度(O)	偵檢度(D)	RPN
點火系統	點火導線接頭龜裂	8	8	6	384
	導線損壞	4	5	5	100
發動機電子控制單元	保險絲燒熔	9	9	6	486
	輸出及輸入線異常	4	4	4	64
經歷紀錄器	電氣接頭損壞	3	3	3	27
	經歷紀錄器視鏡玻璃霧化	4	4	6	96
交流發電機	線路損壞	7	7	7	343
	電氣接頭接觸不良	3	3	3	48
熱電偶總成	線路損壞	5	5	5	125
	接線端子接觸不良	2	5	8	80
動力渦輪轉速感應器	線路損壞	6	5	4	120
	電氣接頭鬆脫無鎖緊	2	5	7	70
扭力超速感應器	線路損壞	6	5	4	120

資料來源：本研究蒐集整理

2. 建立 FMEA 表與分析

依發動機電氣系 RPN 計算結果排名優先改善考量，前三名為發動機電子控制單元保險絲燒熔、點火系統點火導線接頭龜裂及交流發電機線路損壞，如表 11，本研究分析表單依序填入項目、潛在失效模式以及潛在失效效應、嚴重度等資料，另外依據偵檢度擬定檢查時機及檢查頻率，做為改善措施之規範如表 12。發動機電氣系相關，FMEA 分析敘述如下：

(1)發動機電子控制單元保險絲燒熔：

依修護管理系統統計分析過去機隊發生過之經驗顯示，多起故障因電流異常超過負載量導致保險絲燒熔而引起相關儀表出現飛機操作不正常，嚴重影響使用者及飛機系統安全，此組件功能如同人的大腦，大腦失去作用後，其他部位功能也會跟著失效。但本軍目前沒有維修發動機電子控制單元的能量，針對損壞組件的改善措施僅能執行更換，將故障組件轉送美方原廠公司實施檢測維修。本軍僅可經由現行檢驗方法偵測，獲得事前預警，執行預防。

(2)點火系統點火導線接頭龜裂：

系統故障因點火導線接頭材質(陶瓷)脆弱導致接頭龜裂而引起發動機熄火，主要功能失效後，飛機系統無法操作，但功能產生降級(Degraded)狀況者。本軍針對損壞組件的改善措施為針對發動機每 400 小時檢查，檢查點火導線有無損壞超限情況，有則執行更換，人員在拆裝時以棉布將陶瓷處包覆妥善儲放，避免碰撞產生龜裂損壞。

(3)交流發電機線路損壞：

系統故障因線路老舊致線路損壞而無法提供發動機上所需電力，主要功能失效後，飛機系統可以操作，但功能產生降級(Degraded)狀況者。本軍針對損壞組件的改善措施為針對發動機使用檢驗儀器檢查線路有無損壞超限情況，有則執行更換，避免線圈短路產生電力供應問題。

(4)熱電偶總成線路損壞：

系統故障因線路絕緣層破裂而引起排氣尾溫過高，次要功能失效，系統仍可操作，但舒適度及方便性不致影響安全判斷。本軍針對損壞組件的改善措施為針對發動機使用檢驗儀器檢查線路有無損壞超限情況，有則執行更換，避免線圈損壞產生排氣尾溫異常問題。

(5)動力渦輪轉速感應器線路損壞：

系統故障因線束端子氧化而引起發動機超速，次要功能失效，系統仍可操作，但舒適度及方便性影響安全判斷。本軍針對損壞組件的改善措施為針對發動機使用檢驗儀器檢查線路有無損壞超限情況，有則執行更換。

(6)扭力超速感應器線路損壞

系統故障因線束變形導致超速測試系統操作失效，次要功能失效，系統仍可操作，但舒適度及方便性影響安全判斷。本軍針對損壞組件的改善措施為針對發動機使用檢驗儀器檢查線路有無損壞超限情況，有則執行更換。

(7)經歷紀錄器電氣接頭損壞

系統故障因人為不當拆裝而導致無法紀錄發動機歷時紀錄，目視或觸碰檢驗可發現不滿意缺點，但不影響操作。本軍針對損壞組件的改善措施為加強維保人員訓練，落實檢查及保養機制，避免因不當拆裝碰撞。

表 11、發動機電氣系統 RPN 排名

項目	潛在失效模式	嚴重度 (S)	發生度 (O)	偵檢度 (D)	RPN	改善順序
發動機電子控制單元	保險絲燒熔	9	9	6	486	1
點火系統	點火導線接頭龜裂	8	8	6	384	2
交流發電機	線路損壞	7	7	7	343	3
熱電偶總成	線路損壞	5	5	5	125	4
動力渦輪轉速感應器	線路損壞	6	5	4	120	5
扭力超速感應器	線路損壞	6	5	4	120	5
點火系統	導線損壞	4	5	5	100	6
經歷紀錄器	經歷紀錄器視鏡玻璃霧化	4	4	6	96	7
熱電偶總成	接線端子接觸不良	2	5	8	80	8
動力渦輪轉速感應器	電氣接頭鬆脫 無鎖緊	2	5	7	70	9
發動機電子控制單元	輸出及輸入線異常	4	4	4	64	10
交流發電機	電氣接頭接觸不良	3	3	3	48	11
經歷紀錄器	電氣接頭損壞	3	3	3	27	12

資料來源：本研究蒐集整理

表 12、發動機電氣系統 FMEA 表

項目	潛在失效模式	嚴重度 (S)	發生度 (O)	偵檢度 (D)	RPN	改善措施
點火系統	點火導線接頭龜裂	8	8	6	384	每週檢查 (週保養)
	導線損壞	4	5	5	100	每 14 天執行 檢查
發動機電子 控制單元	保險絲燒熔	9	9	6	486	每週檢查 (週保養)
	輸出及輸入線異常	4	4	4	64	每月執行檢查
經歷紀錄器	電氣接頭損壞	3	3	3	27	每季執行檢查
	經歷紀錄器視鏡玻璃霧化	4	4	6	96	每月執行檢查
交流發電機	線路損壞	7	7	7	343	每 3 天執行檢查
	電氣接頭接觸不良	3	3	3	48	每月執行檢查
熱電偶總成	線路損壞	5	5	5	125	每 14 天執行 檢查
	接線端子接觸不良	2	5	8	80	每日檢查
動力渦輪轉 速感應器	線路損壞	6	5	4	120	每月執行檢查
	電氣接頭鬆脫 無鎖緊	2	5	7	70	每 3 天執行檢查
扭力超速感 應器	線路損壞	6	5	4	120	每月執行檢查

資料來源：本研究蒐集整理

參、結論與建議

執行故障分析，不外乎是想藉此探討料件的可靠度，再依其平均故障時間，完成年度備料計畫，以減少待料狀況，而影響機隊妥善率，但年度預算常為影響組織運作，若想要獲得最新的技術或料件，就需要金錢來維持，不若民間航空業者，可因應業務需要，運用資金或其他手段，達成改善機況來提升營運；故本研究所獲得之結論與建議，建議管理階層，機隊在預算無法及時支應的狀況下，應先期啟動預防機制，以延長料件使用壽命，降低故障率發生及節省預算的支應。

一、結論

機隊故障檢修無非是重於當下故障排除後功能恢復正常達到妥善目的為主，審視近年來品管部門每月執行的故障分析，僅執行料件故障升高或降低的趨勢追蹤，但總無法有效且系統化歸納出失效原因及改善作為，只能說現在的維修機制仍有改進空間，本研究以發動機電氣系統為例，利用國軍修護管理系統模組蒐整失效模式，將 FMEA 導入解析，如果能將每月修護品管分析運用 FMEA 研討解析故障風險指數，可補足修護管理模組後段分析不足之缺點，且可以有效掌握故障趨勢及是否採取相關修護對策，提升分析月報對機隊管理層面的重要性。

經由本研究風險優先指數計算後，依據評量結果實施分析，測得須優先改善前 3 名為發動機電子控制單元保險絲燒熔、點火系統點火導線接頭龜裂及交流發電機線路損壞狀況。發動機電子控制單元為發動機電氣系統失效最核心主因，RPN 值為 486，容易發生因電流異常超過負載量而造成保險絲燒熔導致飛機相關儀表產生操作不當訊息，審視偵檢度，可由現行檢驗方法加以偵測，精進措施為加強每週保養與檢查；經歷紀錄器雖然 RPN 值評量僅 27，但其發生度為 7，屬高故障率，常因人為不當拆裝導致電氣接頭損壞造成無法紀錄發動機歷時紀錄，須每季執行檢查與保養；此外，評量發現動力渦輪轉速感應器及扭力超速感應器 RPN 值均為 120，將兩項目經由發生度執行比較，動力渦輪轉速感應器為優先改善項目。

因園美方製造廠無釋放維修 T700 發動機修護能量相關技術文件，提供本軍執行故障組件拆檢維修，故遭遇故障狀況大多僅能執行組件更換。但經由本研究風險優先指數計算後，測得須優先改善前三名為發動機電子控制單元保險絲燒熔、點火系統點火導線接頭龜裂及交流發電機線路損壞，若本軍將其失效模式與效應分析結果提供美方製造廠，協請美方製造廠加強產品製作可靠度，並納為評比廠商優劣機制，以利機隊運作順遂；另外本軍在料件預畫籌建部門，也能將分析結果數據納為參考，以優先改善指數排名轉為預籌備料的優先項目，以妥善運用經費，減少備而不用的狀況。

二、建議

本研究經由對發動機電氣系統運用 FMEA 分析所獲得的結果，提出對管理階層之修護品質管理建議。

(一)運用研究方法精進肇因分析

資料庫蒐整及失效模式與效應分析過程中，發現機隊使用之修護管理系統模組最初設計僅考量統計機隊整體之可靠度與維護度，卻無法明確提出預防性作為獲該針對某一種失效提出精進做法，導致於機隊既定之修護品管分析月報僅呈現機隊整體趨勢，而對造成妥善率下降，可靠度降低之肇因分析產生窘困，若機隊管理層面在修護管理系統模組無軟體改版狀況下，將各種失效模式運用本研究方法，逐步找出失效原因及風險指數，必可獲得改善系統之要修護準據。

(二)修護管理系統模組軟體變革

在執行失效模式與效應分析解析過程可使用電腦軟體撰擬，因飛機系統為複雜之機電設備，通常由許多的組件透過串聯與並聯方式還完成設計功能，建議國軍修護品管部門採用 Isograph 可靠度工作平台(Reliability Workbench)軟體，將故障品項匯入執行可靠度預估、維護度預估、失效模式效應與關鍵性分析及可靠度方塊分析等，節省時間及人工成本，未來若能持續按 FMEA 追蹤精神將其他故障組件納入析，必能讓機隊突發之失效減少，所有故障均處於可掌握之風險內。希冀後續研究者可參考本論文，將其應用於其他產品上。

參考文獻

- 一、李政儒(2006)。應用 FMEA 在建築物中央空調與煙控併用系統風險評估之研究。未出版之碩士論文，國立臺灣科技大學自動化與控制研究所，台北市。
- 二、李明賢、王玉鳳(2006)。運用 FMEA 鑑別 ISO14001 顯著環境考量面之個案研究。品質學報，13(2)，159-173。
- 三、美海軍部(1990)。AH-1W 直升機發動機及相關系統操作原理。NAVAIR 01-H1AAC-2-3.2，8-17。
- 四、陸軍司令部(1990)。修護技術手冊 -NAVAIR 01-H1AAC-2-3.2，未出版之手冊。
- 五、簡志郎(2003)。模糊理論與 TOPSIS 法於失效模式與效應分析之應用。未出版之碩士論文，私立逢甲大學工業工程研究所，台中市。
- 六、溫敏智(2006)。FMEA 與 TRIZ 理論應用在動力手工具問題與決策系統之研究。未出版之碩士論文，國立臺灣科技大學機械工程研究所，台北市。
- 七、羅映浮(2000)。專案管理的失效模式與效應分析。未出版之碩士論文，

私立中華大學工業工程與管理研究所，新竹市。

- 八、Cliff, W. (2007). Using FMEA to Assess Outsourcing Risk. Quality Progress, 40(8), 17-21.
- 九、General Electric Company.(1879). About Engine. Retrieved February 5, 2017, from <https://www.ge.com/digital/>
- 十、Stamatis, D. H. (2003). Failure made and effect analysis: FMEA from theory to execution. Milwaukee: ASQ Quality Press: American society for Quality.

筆者簡介



姓名：張雅婷 級職：少校所長

學歷：空軍航空技術學院二技 102 年班、空軍航空技術學院通信電子參謀正規班 109 年班、中華科技大學科技管理學系碩士班。

經歷：組長、品管官、計畫官、A 型機管制官、現任六 0 一旅飛保廠軍武所所長。

電子信箱：

軍網：student102@webmail.mil.tw

民網：candy921927@gmail.com