

預防修護策略與維修成本考量最佳化-以直升機旋翼系統為例

筆者/中校沈世明

提要

機械設備的設計功能，隨著科技進步其功能較能承受老化或外在環境的衝擊，即使在較差的效能狀態下，仍能正常運作，故其效能隨著時間逐漸衰退，往往具備多狀態退化模式，本文從總成觀點，針對直升機旋翼系統，考量元件多狀態退化特性可被監控的情境下，以總成於個別退化狀態下的可能維修活動為決策變數，建構一個多目標預防維修模式，同時最小化直升機旋翼系統的平均不可用度與維修總成本。本文於求解系統多狀態可靠度相關指標時，首先針對系統中個別總成，建立離散狀態之非齊次連續時間馬可夫模式(non-homogeneous continuous time Markov models, NHCTMMs)與相關的非齊次性連續時間馬可夫報酬模式(Non-Homogeneous Continuous Time Markov Reward Models, NHCTMRMs)，來決定個別總成效能的動態行為，進而整合個別總成效能的動態行為，獲得整體系統的效能動態，計算「系統平均不可用度」與「維修總成本」，並導入非支配排序基因演算法(non-dominated sorting genetic algorithm III; NSGA III)，使能有效求解所建構之具限制條件的多目標最佳化數學模式，尋找出最佳預防修護策略及符合維修成本，以符合部隊實際維修任務的需求。

關鍵詞：預防修護、多狀態退化系統、非齊次馬可夫模式、支配排序基因算法、邊界近似法。

壹、前言

系統可靠度、維護度與可用度廣泛地使用在不同的領域中，來評估系統優劣的指標，例如：發電機及航空飛行器等，因此，維持系統在一個高可靠度或高可用度，使系統符合可操作的門檻需求，為實務上一個重要的研究議題，特別是當關鍵元件老化或突發性失效，會導致系統從可操作狀態進入故障狀態，並造成系統或整體嚴重損失，此時維持一個高可靠度或高可用度，為該系統構型設計的必要條件。Volkanovski等人提出以電力系統為例，其結構往往是大型、複雜的，並且內部元件具備線性與非線性失效分佈，電力系統內部包括子系統和總成，如變電站之串並聯的組成，包括總線、變壓器、斷路器和斷路開關組成。對整個系統可靠性的評估非常複雜，因為必須包括發電和輸電設施及其輔助元件的詳細建模，組件或子系統的故障也可能導致功率傳遞到特定負載的不足，所以系統的組成架構，影響整體可用度於使用期間的表現¹。

隨著科技進步，系統設備逐漸朝大型化與複雜化方向發展，例如：飛機系統，裝備於生命週期間之操作過程中，通常會遭受各種突發衝擊損傷以及運轉效能衰退等因素，造成系統由效能高逐漸退化至效能低的狀態，即系統從正常工作到完全失效的退化過程，往往經過若干中間狀態，二位元（妥善、故障）模組系統較難與現實情況相符，會忽略系統本身所表現出來的多狀態特性，導致無法評估設備的實際效能狀況。此外，隨著科技進步與發展，系統中組成元件也常具有多狀態退化的特性²，故針對具多狀態元件的多狀態系統(Multi-State Systems with Multi-State Components)，建立一個可靠性理論，並在此基礎上建立完善的系統可靠度最佳化設計、維修決策及保修管理等理論和方法，對了解複雜系統的失效原理、壽命預測以及提高其系統可靠度甚為重要³。此外，隨著電腦網路系統發展與即時監控技術進步，與線上檢測感應器做連結，大數據的技術運用下，可連續監控系統中個別總成的效能狀態，來維持或提升系統整體效能，例如：發電系統、飛機系統等，通常多狀態特性系統的效能退化至無法滿足任務需求時，系統則被視為失效⁴，因此，實施適當的預防維修活動，有助於維持或提升系統在任務時間的效能，也及早預防裝備效能不足影響任務遂行問題，以確保系統效能滿足任務上的需求。

¹ Volkanovski, A., Čepin, M., Mavko, B., "Application of the Fault Tree Analysis For Assessment of Power System Reliability," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 94, Issue 6, pp. 1116-1127, 2009.

² Xing, L., Dai, Y., "A New Decision-Diagram-Based Method for Efficient Analysis on Multistate Systems," *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, Vol. 6, No. 3, pp. 161-174, 2009.

³ Nagayama, S., Sasao, T., and Butler, J. T., Analysis of Multi-State Systems with Multi-State Components Using EVMDDs, IEEE, Victoria, BC, Canada, pp. 122-127, 2012.

⁴ Levitin, G., The Universal Generating Function in Reliability Analysis and Optimization, Springer, London, pp. 67-98, 2005.

本研究針對國內某型直升機之傳動旋翼系統，一個串並聯系統構型，系統內包含關鍵總成與冷備援總成，各總成為可修件多狀態特性，具完美預防維修、不完美預防維修、最小維修等，從總成觀點建構一個多目標預防維修模式，以避免因關鍵總成老化或隨機性失效，導致系統從操作狀態突然故障的情形，造成傳旋系統甚至飛機裝備之重大損害。假設直升機中總成的效能狀態可被連續監控的情境下，本研究所建構的多目標預防維修模式，以最低維修總成本與最低系統平均不可用度訂為兩個最小化目標值，經由多目標基因演算法找出柏拉圖前緣解(Pareto optimality，或稱帕雷托最適)，並從柏拉圖前緣解中，找出符合任務需求與不超出預算裕度之條件下，最適切之預防修護策略。

在研究方法方面，本研究將引用隨機過程理論中，離散狀態之非齊次性連續時間的馬可夫模式，經由韋伯失效函數(Weibull Hazard Function)，來量化元件由效能高的狀態退化至效能低的狀態間之轉移強度隨時間遞增的特徵，以適切描述老化狀態之元件失效率隨時間遞增的特性，以符合實務上元件隨時間老化的特性，進而評估「包含備援總成之多狀態退化系統」的動態狀態機率；本研究將建立非齊次性連續時間的馬可夫報酬模式⁵，評估維修總成本與平均可用度等相關指標。由於以NHCTMMs 評估多狀態退化系統的可靠度相關指標，相較於齊次性的馬可夫模式(Homogeneous Continuous Time Markov Models, HCTMMs)，其求解過程更複雜，尤其是隨著系統結構擴充、總成數量增加並設計有各式備援總成，系統可能的狀態也隨之增加，致無法使用傳統數學的解析法，獲取明確的解析解，以求解系統之動態狀態的機率分布，故求解非齊次性連續時間馬可夫模式的問題是一個複雜的挑戰⁶。Ding等學者提出邊界近似法，求解老化多狀態系統之狀態瞬間機率值，此方法的基本原理為將系統壽命分割成許多時間區間，並將每個時間區間的失效率視為常數，進而在各時間區間內，經由求解HCTMMs，獲得各時間區間之終點的狀態瞬間機率值，可以有效地求解NHCTMMs 之多狀態瞬間機率質量分布⁷。

本研究針對所建構的「直升機傳動旋翼系統的預防修護最佳模式」，以非支配排序基因算法結合邊界近似法，最佳化所建構的預防維修模式，來決定系統中個別總成於每一個老化狀態的最適切預防修護動作，例如：實施完美預防維修、不完美預防維修，使總成回復至先前效能較佳的狀態。本研究以建構預防修護模式，提供給決策者參考及斟酌任務執行與預算核撥之平衡，避免預算不足致影響任務遂行，或預算過多致浪費公帑等窘境。

⁵ Ding, Y., Lisnianski, A., Frenkel, I. and Khvatskin, L., "Optimal Corrective Maintenance Contract Planning for Aging Multi-State System," *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, Vol. 25, Issue. 5, pp. 612-631, 2009.

⁶ Lisnianski A., "Extended Block Diagram Method for a Multi-State System Reliability Assessment," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 92, Issue. 12, pp. 1601-1607, 2007.

⁷ Ding, Y., Lisnianski, A., Frenkel, I. and Khvatskin, L., "Optimal Corrective Maintenance Contract Planning for Aging Multi-State System," *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, Vol. 25, Issue. 5, pp. 612-631, 2009.

貳、假說與實驗

本文乃針對直升機旋翼系統為研究案例，建構與最佳化一個多目標預防維修方案，從旋翼及傳動系統中之總成觀點，假設系統中總成的效能狀態可被連續監控的情境下，以維修成本與系統平均不可用度為兩個望小的最佳化目標，經由最佳化總成在個別退化狀態的維修方案，來最小化系統平均不可用度與維修總成本，以滿足實務上對系統效能的需求，本文分析系統在任務時間內，這些個別狀態的可用度，提供實務應用之參考。研究方法將引用隨機過程理論中的非齊次性連續時間的馬可夫模式，來量化退化總成之狀態間轉移強度隨時間變動的情形，進而評估系統的動態狀態機率。本文將先針對系統中個別的多狀態總成，建立個別總成的 NHCTMMs，從而分析總成之多狀態退化效能的分布，另外為估計具多狀態退化總成之維修成本，續建構個別元件的 NHCTMRMs，並應用邊界近似法求解所建立個別元件的 NHCTMMs 與 NHCTMRMs，接著引用非支配排序基因算法所建構的最佳化預防維修模式，以「最小化系統維修總成本」及「最小化系統平均不可用度」二個為目標，以求出最適的維修方案，維修方案為總成在各個退化狀態下的最適維修動作，包含：完美維修、不完美維修或不實施任何維修動作等。

一、研究方法

區分為五個階段來驗證本文之案例研究具備有效性與實用性，說明如後：

- (一)蒐集與整理有關多狀態系統之效能計算、多狀態退化系統之隨機模式、非齊次性連續時間馬可夫模式、馬可夫報酬與老化多狀態系統之預防維修方案等相關文獻。
- (二)依據直升機旋翼傳動系統之複雜系統之構型設計，考量個別總成（如發動機、聯合齒輪箱、主傳動箱）皆為多狀態之情況下，分析該個別總成所具備多狀態的特性，包括系統多狀態個數及個別狀態下的系統效能值等，從而建構最佳旋翼系統之預防維修模式。
- (三)依照個別總成的維修方案，繪製多狀態總成之狀態轉移圖，建立每個總成之齊次或非齊次性連續時間的馬可夫模式與馬可夫報酬模式，以評估總成效能狀態之瞬間分布與某個維修方案下之維修成本，進而獲得不同策略下之期望維修總成本，作為所建構預防維修模式之一個目標。
- (四)繪製多狀態複聯退化系統之狀態轉移圖，建立該系統之非齊次性連續時間之馬可夫報酬模式，以評估各總成瞬間之各狀態機率分佈與效能狀態分布，接著運用 L_z 轉換法，來計算出系統於隨機過程中符合效能門檻之可用度與效能表現，進而求解系統於操作期間之平均不可用度，作為所建構預防維修模式之另一個目標。
- (五)撰寫 MATLAB 程式，應用邊界近似法解本文之非齊次性連續時間之馬可夫模式與馬可夫報酬模式，續將求解結果導入非支配排序基因算法中，

找出最佳化之預防維修模式。

二、實驗描述

(一)基本假設

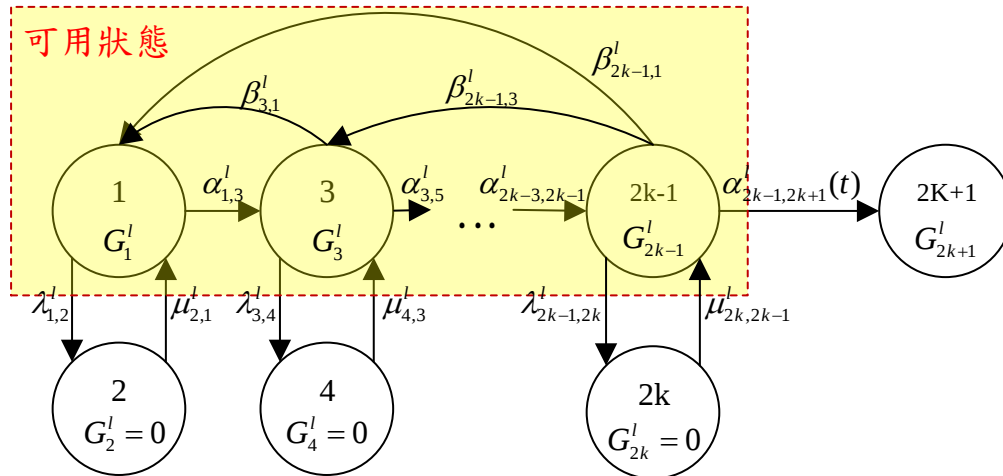
本文建構「多目標預防維修方案建構與最佳化」，包括下列假設與限制：

- 1.經由即時監控裝置，可掌握系統中各總成目前所處之效能狀態。
- 2.系統中之部分總成從完美狀態到完全失效狀態，中間包括多個退化之效能狀態，如發動機、聯合齒輪箱及主傳動箱。
- 3.系統中總成的狀態隨時間隨機退化至效能較差之狀態。
- 4.總成位於效能較差狀態時，可經由預防維修恢復至先前較好之狀態；若為完美預防維修，則可恢復至新品狀態之效能。
- 5.所有總成之狀態為互相獨立。
- 6.總成之部分退化率為時間遞增函數，如發動機總成之狀態 7 退化到狀態 9，退化率為 $\alpha_{79}^{ENG}(t)$ 。
- 7.聯合齒輪箱及主傳動箱之故障率為時間遞增函數，如聯合齒輪箱之狀態 1 故障到狀態 5，其故障率為 $\lambda_{15}^{UT}(t)$ 。
- 8.發動機總成發生突發性失效時，僅實施最小維修，將狀態恢復至故障前之效能。
- 9.忽略人為因素，如人員疏失造成維修負面衝擊發生，如外物擊傷之發生。
- 10.系統可用度於任務時間內需滿足最低容許效能值的需求。

(二)多狀態總成描述

系統為多狀態總成組合而成之退化系統，其中總成初始為完美可操作狀態，隨著時間演進而退化到較差之狀態，視系統整體效能符合需求門檻與否，針對效能已退化至較差狀態之總成，實施適切的維修動作，可恢復至先前較佳之操作狀態，或完美狀態；發動機總成具備多狀態元件特徵，隨時間演進，於操作過程中隨機發生突發性失效，其效能降至最低，需強制實施最小維修動作，使其恢復至失效前之狀態，系統之操作狀態則完全依照多狀態元件之效能狀態。圖 2.1 為第 1 個元件之狀態轉移示意圖，其中 $\alpha_{2d-1,2d+1}^l(t)$ ， $d=1,2,...,k$ ，表示總成從效能較高狀態退化至效能較低之狀態； $\beta_{2e-1,2d-1}^l$ ， $d=1,2,...,k$ ， $e=1,2,...,k$ ， $d < e$ 表示總成經由適切預防維修後，從效能較低狀態恢復至先前效能較高狀態，狀態 1 表示最佳狀態、狀態 1 至 k ，表示可接受狀態， $2k+1$ 表示完全失效狀態， $\lambda_{2d-1,2d}^l$ ， $d=1,2,...,k$ ，表示總成從可操作狀態發生突發性失效，無法產生效能； $\mu_{2d,2d-1}^l$ ， $d=1,2,...,k$ ，表示總成經由最小維修後，從失效狀態恢復至故障前效能狀態。 G_i^l 表示總成 l 在狀態 i 之效能。本文部份採用韋伯失效函數，評估各總成在個別狀態間的轉移強度，以描述總成在各退化狀態間轉移強度隨時間變動的特性，以及總成在維修後隨時間退化之特性。

圖 2.1 總成 I 狀態轉移示意圖

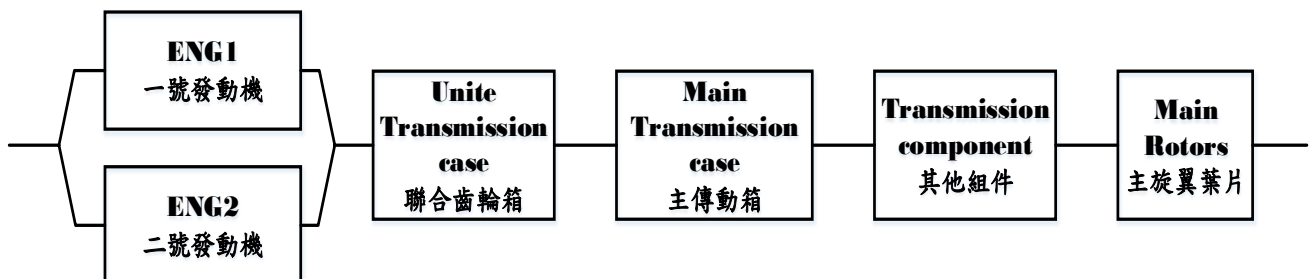


資料來源：筆者參考 Analysis of Multi-State Systems with Multi-State Components Using EVMDDs 文章繪製

(三) 評估系統動態狀態機率

本文針對「直升機旋翼系統」之系統效能指標評估，包括系統可用度與系統維修總成本等，以非齊次性連續時間馬可夫模式與馬可夫報酬模式，量化此類型多狀態退化系統中，總成退化率隨時間遞增之老化特性。進一步估算系統整體效能。接續以旋翼及傳動之串並聯多狀態系統，來說明本文建立之馬可夫模式與馬可夫報酬模式，運用邊界近似法，獲得總成與系統之動態機率分布，繼續評估系統滿足效能門檻之可用度與系統維修總成本等指標值之分析過程。此多狀態退化系統，包括一、二號發動機（並聯）、聯合齒輪箱、主傳動箱、其他傳動及旋翼組件、旋翼葉片等，系統構型圖如圖 2.2 所示。

圖 2.2 系統構型圖



資料來源：筆者自行繪製

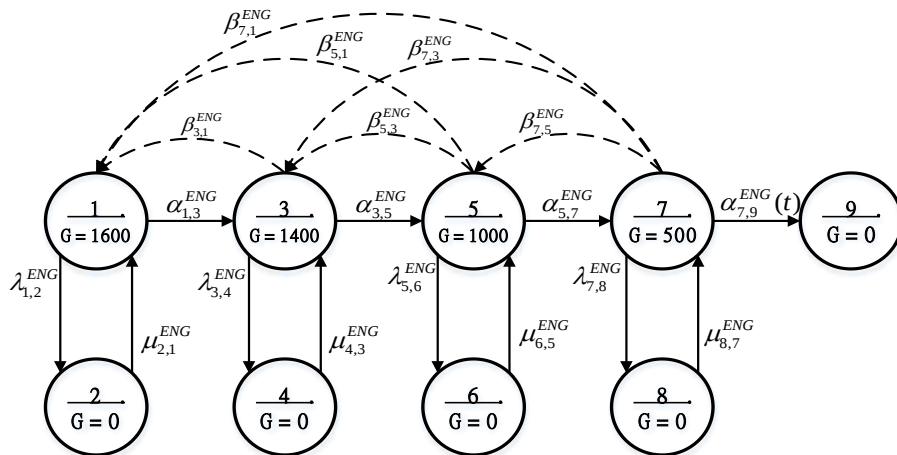
系統中之個別總成狀態轉移，說明如後：

1. 發動機總成：

具有 9 個狀態，從完美狀態 1（效能為 1,600 匹馬力）隨時間退化至最差狀態 9（效能為 0）、操作期間發動機之次總成可能隨機發生突發性失效，

如油控器、發動機電子控制單元等損壞，導致狀態轉移至狀態 2、4、6、8，效能為 0，針對損壞之次總成經由執行最小維修後，恢復至失效前之效能狀態，然而此維修活動不影響發動機本體操作效能（如圖 2.3）；另發動機為直升機動力產生來源，故狀態效能以馬力值表示，單具發動機最佳效能可產出 1,600 匹馬力，二具發動機採用並聯模式，動力為相加。

圖 2.3 發動機狀態轉移圖（一、二號發動機相同）

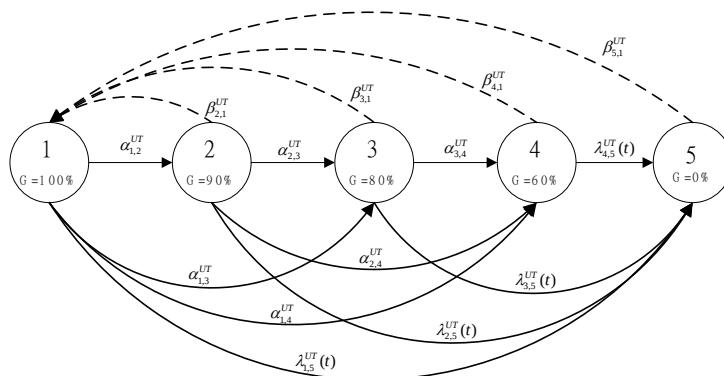


資料來源：筆者自行繪製

2. 聯合齒輪箱：

具有 5 個狀態，從完美狀態 1 隨時間退化至最差狀態 5、操作期間隨機發生突發性失效降至狀態 5，或衰退至效能更差效能狀態（如圖 2.4）；聯合齒輪箱不產生動能，然隨總成狀態老化將降低傳輸效能。因為聯合齒輪箱之總成特性，當執行預防維修時，僅能更新內部齒輪組件，是故僅能恢復至最佳狀態，無不完美維修活動。另聯合齒輪箱功能為傳輸，故狀態效能以傳輸百分比表示。

圖 2.4 聯合齒輪箱狀態轉移圖



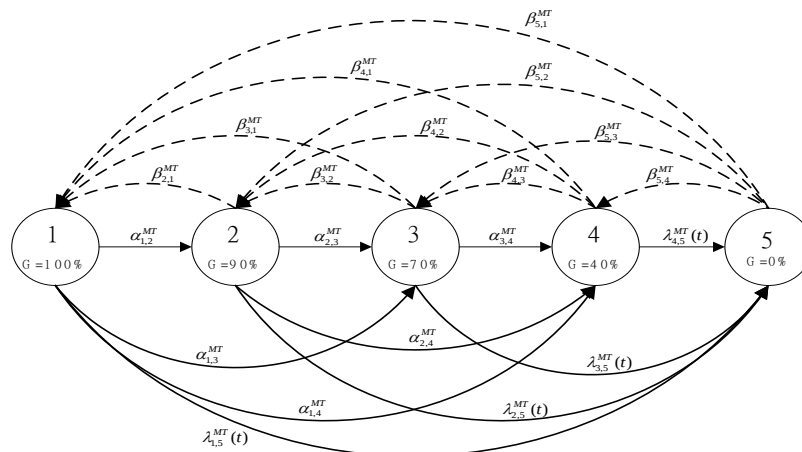
資料來源：筆者自行繪製

3. 主傳動箱：

具有 5 個狀態，從完美狀態 1 隨時間退化至最差狀態 5、操作期間隨機

發生突發性失效降至狀態 5，或衰退至效能更差狀態（如圖 2.5）；主傳動箱不產生動能，然隨總成狀態老化將降低傳輸效能。另因為主傳動箱之總成特性，當執行預防維修時，除更新內部齒輪組件之完美維修外，亦有更換軸承等附件之不完美維修活動，恢復至先前效能較佳狀態。另主傳動箱功能為動力傳輸，故狀態效能以傳輸百分比表示。

圖 2.5 主傳動箱狀態轉移圖

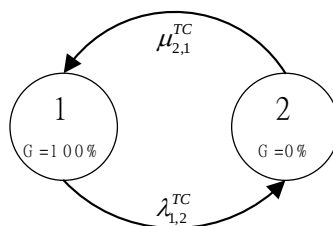


資料來源：筆者自行繪製

4.其他傳動與旋翼組件：

包含旋翼及傳動系統中之主承桿、主傳動軸、主旋翼轂...等總成，具有 2 個狀態，其組件不產生動能，從完美狀態 1 隨時間失效至最差狀態 2（如圖 2.6），失去傳輸之效能。另其他傳動與旋翼組件功能為傳輸，故狀態效能以傳輸百分比表示。

圖 2.6 其他傳動與旋翼組件狀態轉移圖

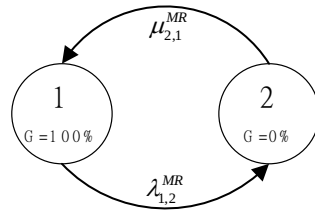


資料來源：筆者自行繪製

5.主旋翼葉片：

具有 2 個狀態，其組件不產生動能，從完美狀態 1 隨時間失效至最差狀態 2（如圖 2.7），失去傳輸之效能。另主旋翼葉片功能為傳輸，故狀態效能以傳輸百分比表示。

圖 2.7 主旋翼葉片狀態轉移圖



資料來源：筆者自行繪製

當系統之整體輸出效能低於門檻值(1,400 匹馬力)時，及無法滿足該直升機所需之動力實施飛行，系統將呈不可用狀態，需執行適切之維修活動，讓系統恢復可操作狀態。

(四)計算系統平均不可用度

- 1.步驟 1：決定系統中個別總成之失效轉移率、退化轉移率、最小維修轉移率及預防維修轉移率集合，本文除發動機總成狀態 7 退化至狀態 9、聯合齒輪箱及主傳動箱各狀態失效到狀態 5，屬裝備老化至磨耗期，以韋伯失效函數外，餘以指數失效函數，來量化狀態間退化、失效轉移強度，根據圖 2.3 至圖 2.7 總成之狀態轉移圖，列出每一總成之狀態及其轉移強度，對各總成繪製轉移強度表，如表 2.1 至表 2.5。

表 2.1 發動機總成之轉移強度彙整表（一、二號發動機相同）

States states \ G		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1600		$\lambda_{1,2}^{ENG}$	$\alpha_{1,3}^{ENG}$						
2	0	$\mu_{2,1}^{ENG}$								
3	1400	$\beta_{3,1}^{ENG}$			$\lambda_{3,4}^{ENG}$	$\alpha_{3,5}^{ENG}$				
4	0			$\mu_{4,3}^{ENG}$						
5	1000	$\beta_{5,1}^{ENG}$		$\beta_{5,3}^{ENG}$			$\lambda_{5,6}^{ENG}$	$\alpha_{5,7}^{ENG}$		
6	0					$\mu_{6,5}^{ENG}$				
7	500	$\beta_{7,1}^{ENG}$		$\beta_{7,3}^{ENG}$		$\beta_{7,5}^{ENG}$			$\lambda_{7,8}^{ENG}$	$\alpha_{7,9}^{ENG} (t)$
8	0							$\mu_{8,7}^{ENG}$		
9	0									

資料來源：筆者自行製表

表 2.2 聯合齒輪箱總成之轉移強度彙整表

states \ states G		1	2	3	4	5
1	100%		$\alpha_{1,2}^{UT}$	$\alpha_{1,3}^{UT}$	$\alpha_{1,4}^{UT}$	$\lambda_{1,5}^{UT}(t)$
2	90%	$\beta_{2,1}^{UT}$		$\alpha_{2,3}^{UT}$	$\alpha_{2,4}^{UT}$	$\lambda_{2,5}^{UT}(t)$
3	80%	$\beta_{3,1}^{UT}$			$\alpha_{3,4}^{UT}$	$\lambda_{3,5}^{UT}(t)$
4	60%	$\beta_{4,1}^{UT}$				$\lambda_{4,5}^{UT}(t)$
5	0%	$\beta_{5,1}^{UT}$				

資料來源：筆者自行製表

表 2.3 主傳動箱總成之轉移強度彙整表

states \ states G		1	2	3	4	5
1	100%		$\alpha_{1,2}^{MT}$	$\alpha_{1,3}^{MT}$	$\alpha_{1,4}^{MT}$	$\lambda_{1,5}^{MT}(t)$
2	90%	$\beta_{2,1}^{MT}$		$\alpha_{2,3}^{MT}$	$\alpha_{2,4}^{MT}$	$\lambda_{2,5}^{MT}(t)$
3	70%	$\beta_{3,1}^{MT}$	$\beta_{3,2}^{MT}$		$\alpha_{3,4}^{MT}$	$\lambda_{3,5}^{MT}(t)$
4	40%	$\beta_{4,1}^{MT}$	$\beta_{4,2}^{MT}$	$\beta_{4,3}^{MT}$		$\lambda_{4,5}^{MT}(t)$
5	0%	$\beta_{5,1}^{MT}$	$\beta_{5,2}^{MT}$	$\beta_{5,3}^{MT}$	$\beta_{5,4}^{MT}$	

資料來源：筆者自行製表

表 2.4 其他傳動與旋翼組件之轉移強度彙整表

states \ states G		1	2
1	100%		$\lambda_{1,2}^{TC}$
2	0%	$\mu_{2,1}^{TC}$	

資料來源：筆者自行製表

表 2.5 主旋翼葉片之轉移強度彙整表

states \ states G		1	2
1	100%		$\lambda_{1,2}^{MR}$
2	0%	$\mu_{2,1}^{MR}$	

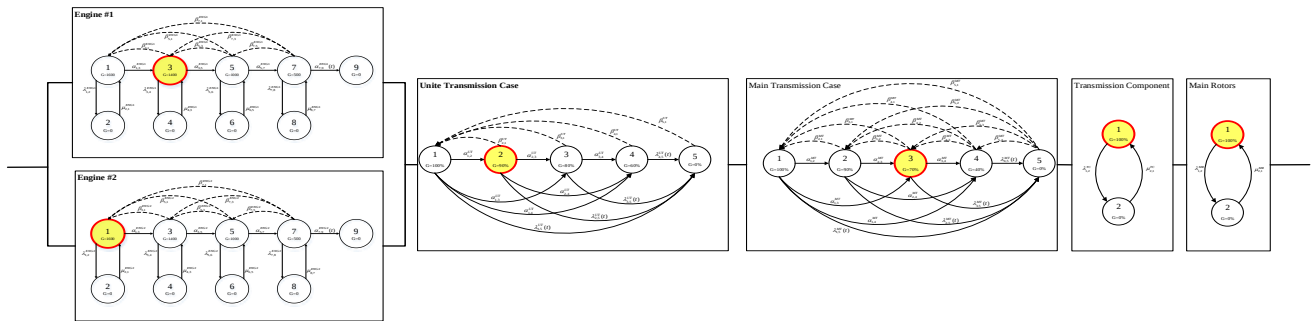
資料來源：筆者自行製表

若以馬可夫模式針對本文建構之旋翼系統，求解系統可用度，計有 8,100 個 (9*9*5*5*2*2) 狀態組合，倘使用 L_z 轉換法，僅針對個別總成先建立馬可夫模式，即可求解系統之可用度，大幅簡化運算過程。本文所建構之旋翼系統於 L_z 轉換法之結構方程式，如公式 2.1

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_6) = \Omega_+(X_1, X_2) \cdot \Omega_*(X_3, X_4, X_5, X_6) \quad (2.1)$$

其中 Y 為全系統效能分佈， Ω_f 表示運算元， X_1 為一號發動機之效能、 X_2 為二號發動機之效能、 X_3 為聯合齒輪箱之效能、 X_4 為主傳動箱之效能、 X_5 為其他傳動與旋翼組件之效能、 X_6 為主旋翼葉片之效能。本文任意取某一系統狀態，說明如何利用 L_z 轉換法計算系統整體輸出效能，如圖 2.8 所示

圖 2.8 特定系統狀態轉移圖



資料來源：筆者自行繪製

依照圖 3.8，二具發動機總成為並聯，系統效能為相加，當一號發動機處於狀態 2（效能 1,400 匹馬力），二號發動機處於狀態 1（效能 1,600 匹馬力），故二具發動機整合之效能值為 $\Omega_+\{G_{ENG1}^{(2)}, G_{ENG2}^{(1)}\} = 1400 + 1600 = 3000$ ；接續串聯之傳動與旋翼等總成，僅做動力傳輸，除聯合齒輪箱處於狀態 2（傳輸效能 90%）、主傳動箱處於狀態 3（傳輸效能 70%）外，餘皆處於最佳狀態（傳輸效能 100%），其傳輸效能值為 $\Omega_*\{G_{UT}^{(2)}, G_{MT}^{(3)}, G_{TC}^{(1)}, G_{MR}^{(1)}\} = 0.9 * 0.7 * 1 * 1 = 0.63$ ；故整體系統效能值為 $\Omega_*\{\Omega_+\{G_{ENG1}^{(2)}, G_{ENG2}^{(1)}\}, \Omega_*\{G_{UT}^{(2)}, G_{MT}^{(3)}, G_{TC}^{(1)}, G_{MR}^{(1)}\}\} = \Omega_*\{3000, 0.63\} = 1890$ ，依照上述演算過程，可獲得系統當下狀態之效能輸出值。

2. 步驟 2：建立多狀態退化系統之馬可夫模式與馬可夫報酬模式

運用 L_z 轉換方法，建立該系統之非齊次性連續時間馬可夫模式，以獲得系統可用度；若系統需求之最低容許效能值為 1,400 匹馬力，則系統效能低於 1,400 匹馬力時之狀態，視為失效，建立相關非齊次性連續時間馬可夫模式與馬可夫報酬模式。

3. 步驟 3：運用邊界近似法解聯立方程組，以獲得整個系統瞬間狀態機率與系統可用度。

- (1) 設定系統任務時間為 T 小時，且計算系統可用度之時間間隔為 n 。
- (2) 計算每一時間區間之長度 $\Delta t = T/n$ ，從而在時間點 $t_{i+1} = t_i + \Delta t, i = 1, \dots, n-1$ ，評估系統瞬間狀態機率與系統可用度。
- (3) 於每一時間區間之長度 Δt 內，運用邊界近似法計算瞬間狀態轉移強度，概述如後：~
- (4) 每一個時間之 λ^{i-} 與 λ^{i+} 。

$$\lambda^{i-} = \lambda(\Delta t \cdot (i-1)) \quad \lambda^{i+} = \lambda(\Delta t \cdot i) \quad (2.2)$$

(5)系統在每一個時間區間末值，瞬間狀態機率值 P_j^{n-} 與 P_j^{n+} ，系統於各狀態各區間時間點之機率值。

$$P_j^{i-}[\Delta t \cdot (i-1)] = P_j^{(i-1)-}[\Delta t \cdot (i-1)], j=1,2,\dots,k, i=1,2,\dots,n \quad (2.3)$$

$$P_j^{i+}[\Delta t \cdot (i)] = P_j^{i+}[\Delta t \cdot (i)], j=1,2,\dots,k, i=1,2,\dots,n \quad (2.4)$$

(6)效能大於 1,400 匹馬力以上之狀態機率值相加總，即為系統於任一時間區間之可用度上、下限值；當解析度越大，上、下限值之間的差距將縮小，逼近真值。

4.步驟 4：運用邊界近似法解聯立方程，分析系統可用度以數學式表達如下

$$A(t) = \sum_{g \geq w} P_k(t) \quad (2.5)$$

系統平均不可用度以數學式表達如下

$$\bar{A} = \frac{\int_0^T A(t) dt}{T} \quad (2.6)$$

$$\bar{UA} = 1 - \bar{A} \quad (2.7)$$

其中 w 表示系統最低容許效能值，本文經由求解非齊次性馬可夫模式之聯立微分方程組，可獲得多狀態系統之可用度。

(五)計算系統維修成本

系統維修總成本為各個總成維修成本之加總，針對系統中個別總成之多狀態轉移，進行各種狀態之機率值加總。

1.步驟 1：建立多狀態總成之馬可夫模式與馬可夫報酬模式：

依據圖 2.3 至圖 2.7 系統中各總成狀態轉移圖，建立總成之非齊次性連續時間馬可夫模式與馬可夫報酬模式之聯立方程組，如下列公式(2.8、2.9)。

$$\frac{dP_j(t)}{dt} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^k P_i(t) a_{ij}(t) - P_j(t) \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^k a_{ji}(t), j=1,2,\dots,k \quad (2.8)$$

$$\frac{dV_i(t)}{dt} = r_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k a_{ij}(t) r_{ij} + \sum_{j=1}^k a_{ij}(t) V_j(t), i=1,2,3,\dots,k \quad (2.9)$$

$a_{ij}(t)$ 及 $a_{ji}(t)$ 分別表示於時間 t ，系統從狀態 i 轉移至狀態 j 及從狀態 j 轉移至狀態 i 之轉移強度，二者皆為個別總成退化轉移率函數 $\alpha_{ij}(t)$ 、故障轉移率 $\lambda_{ij}(t)$ 、最小維修轉移率 μ_{ji} 、預防維修轉移率 β_{ji} 之線性組合，另根據各種不同維修方式之維修成本參數，設定馬可夫報酬矩陣後，求解所建立個別總成之馬可夫報酬模式，進而獲得總成於運轉期間的維修成本。

2. 步驟 2：運用邊界近似法求解總成之非齊次性馬可夫模式與馬可夫報酬模式，獲得各總成瞬間狀態機率及每一個狀態所累計之各總成報酬值（維修成本），本文運用邊界近似法計算個別總成之維修成本值概述如後：

- (1) 各總成各狀態維修成本之下限值 V_i^{n-} 與上限值 V_i^{n+} ， $i=1,2,3,\dots$ ，加總後為各總成維修成本之下限值 TER^- 與上限值 TER^+ ，維修成本介於兩者之間
- (2) 加總各總成執行維修或預防維修活動之總期望報酬，即可獲得系統維修總成本。

(六) 預防維修模式之建構

本文建構「直升機旋翼系統」之多目標預防維修模式與最佳化說明如後：

目標函數：

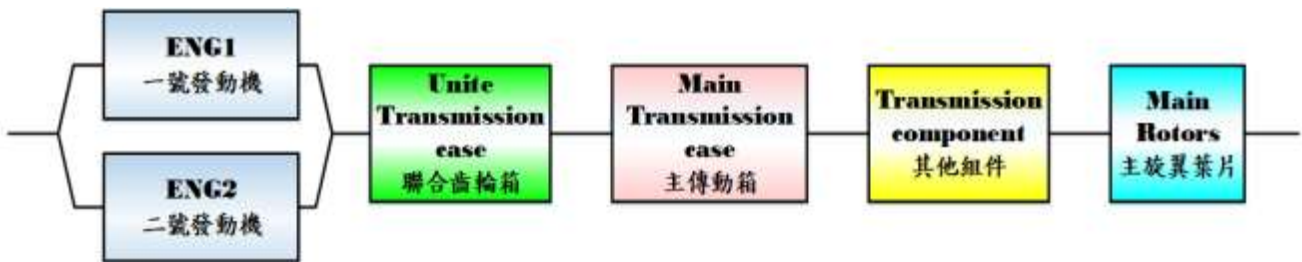
1. 目標一：以最小化系統維修總成本
2. 目標二：以最小化系統平均不可用度

參、實驗結果分析

一、案例描述

本章節參考 Isaac 等人所提模擬案例所提之多狀態退化系統為基礎⁸，建構直升機旋翼系統具備多狀態退化模式為案例，來說明本文建立之馬可夫模式與馬可夫報酬模式，並運用邊界近似法，計算總成與系統之動態狀態的機率分布，進而評估系統之不可用度與維修總成本等指標，此多狀態退化系統可靠度方塊圖詳如圖 3.1 所示，其總成之狀態則分述如後。

圖 3.1 系統可靠度方塊圖

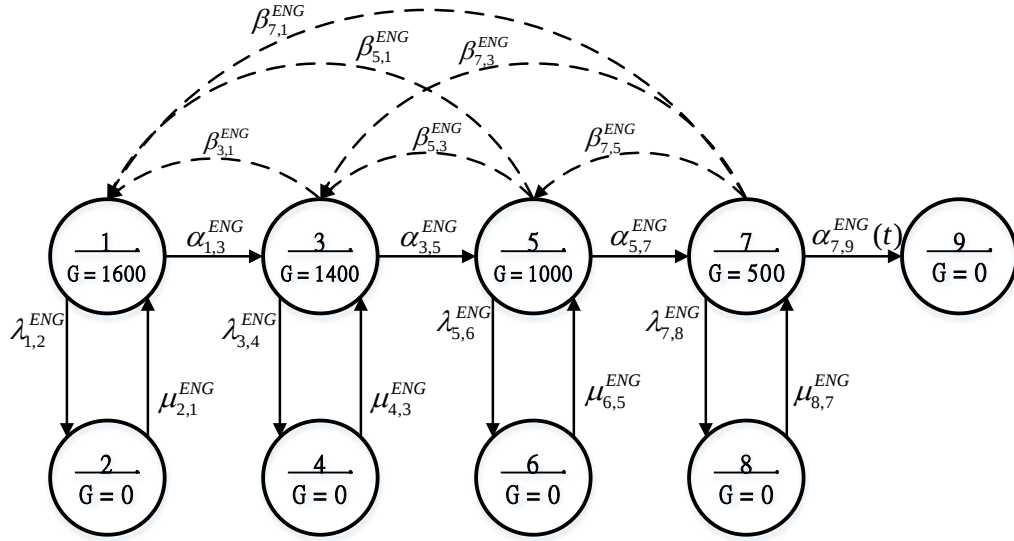


資料來源：筆者自行繪製

根據圖 3.1 得知，一、二號發動機等二具總成並聯，而依據圖 3.2 之狀態轉移圖，假設每一具發動機總成具有 9 個狀態，從完美狀態 1 隨時間退化至最差狀態 9，為防止效能太低無法操作，須執行適當預防維修，使總成恢復至先前效能較佳狀態；操作期間可能隨機發生突發性失效，導致總成狀態轉移至狀態 2、4、6、8，其效能為 0，經由執行最小維修後，恢復至失效前之效能狀態；虛線為決策變數，表示預防維修活動，可經由最佳化所建構的多目標預防維修模式，決定最適切之維修活動。

⁸ Isaac W. S., Mustapha N., Daoud A., "Performance Evaluation of Multi-State Degraded Systems with Minimal Repairs and Imperfect Preventive Maintenance," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 95, pp. 65-69, 2010.

圖 3.2 發動機總成之狀態轉移圖

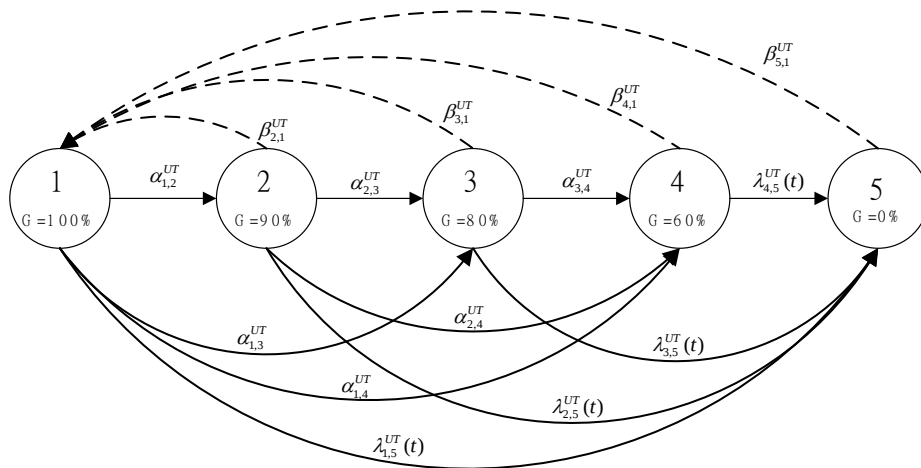


資料來源：筆者自行繪製

其中， G 為發動機效能值； $\alpha_{2j-1,2j+1}^{ENG}$ 為退化轉移率，其中 $\alpha_{7,9}^{ENG}(t)$ 為時間函數，隨時間增加； $\lambda_{2j-1,2j}^{ENG}$ 為突發性失效轉移率； $\mu_{2j,2j-1}^{ENG}$ 為最小維修轉移率； $\beta_{2d-1,2j-1}^{ENG}$ 為預防維修轉移率。

聯合齒輪箱假設具有 5 種狀態，從完美狀態 1（傳輸效能 100%）隨時間退化至最差狀態 5（傳輸效能 0%），操作期間因總成內部齒輪件屬機械元件，具磨耗現象，呈韋伯失效函數隨時間發生突發性失效機率變大，狀態突然轉移至狀態 5，或退化至較差效能狀態，可經由預防維修後，至可操作狀態；虛線為決策變數，表示可能的預防維修活動，經由所建構的最佳化多目標預防維修模式，可決定最適切之維修活動，狀態轉移圖如圖 3.3 所示。

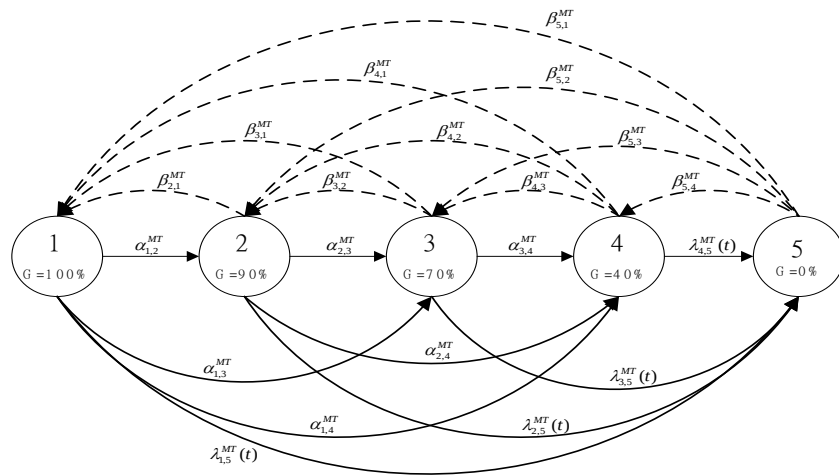
圖 3.3 聯合齒輪箱總成之狀態轉移圖



資料來源：筆者自行繪製

主傳動箱具有 5 種狀態，從完美狀態 1（傳輸效能 100%）隨時間退化至最差狀態 5（傳輸效能 0%），操作期間因總成內部齒輪件屬機械元件，具磨耗現象，呈韋伯失效函數隨時間發生突發性失效機率變大，或退化至效能較差狀態，可經由預防維修後，至可操作狀態；與聯合齒輪箱不同的是，因為總成內部可修特性，其預防維修具有不完美維修模式，傳輸效能僅恢復到較佳狀態而非完美新品；虛線為決策變數，表示預防維修活動，經由建構的最佳化多目標預防維修模式，決定最適切之維修活動，狀態轉移圖如圖 3.4 所示。

圖 3.4 主傳動箱總成之狀態轉移圖



資料來源：筆者自行繪製

其他傳動及旋翼組件包含有主承桿、主傳動軸、主旋翼轂、變向盤及變距連桿等，其統合後具備二種狀態，狀態 1 為傳輸效能 100%，隨時間操作失效呈指數分配模式轉移至狀態 2 為失效，總成之傳輸效能為 0%（狀態轉移圖如圖 3.5 左所示）；主旋翼葉片具備二種狀態，狀態 1 為傳輸效能 100%，隨時間操作失效呈指數分配模式轉移至狀態 2 為失效，總成之傳輸效能為 0%（狀態轉移圖如圖 3.5 右所示）。由於該總成在系統構型中為串聯模式，故須執行維修使其恢復到狀態 1，整體系統方可操作運轉。

圖 3.5 其他傳動與旋翼組件（左）、主旋翼葉片之狀態轉移圖（右）



資料來源：筆者自行繪製

系統任務時間假設為 300 小時（某型直升機每年飛行預估時數），針對該系統於最低容許效能門檻上，同時求解「最小化系統維修總成本」與「最小化系統平均不可用度」等目標；本文假設各元件於初始時間皆處於完美狀態。系統內各總成之轉移率、維修活動成本，如表 3.1 至表 3.7，相關參數為模擬數值，本文著重點於研究多目標多狀態退化系統預防維修模式之可行性。經由基因編碼值為 1 或 0，分別代表「有」或「無」維修活動之決策變數，以便進行基因演算，進而找出最佳化之維修方案。

表 3.1 發動機總成狀態間之轉移參數值（一、二號發動機相同）

故障轉移率	$\lambda_{1,2}^{ENG}$		$\lambda_{3,4}^{ENG}$		$\lambda_{5,6}^{ENG}$		$\lambda_{7,8}^{ENG}$					
	0.0032		0.0040		0.0048		0.0060					
退化轉移率	$\alpha_{1,3}^{ENG}$		$\alpha_{3,5}^{ENG}$		$\alpha_{5,7}^{ENG}$		$\alpha_{7,9}^{ENG}(t)$					
							a	b				
	0.0048		0.0060		0.0072		300	1.4				
最小維修轉移率	$\mu_{2,1}^{ENG}$		$\mu_{4,3}^{ENG}$		$\mu_{6,5}^{ENG}$		$\mu_{8,7}^{ENG}$					
	0.0075		0.0060		0.0050		0.0040					
預防維修轉移率	$\beta_{7,1}^{ENG}$		$\beta_{7,3}^{ENG}$		$\beta_{7,5}^{ENG}$		$\beta_{5,1}^{ENG}$		$\beta_{5,3}^{ENG}$		$\beta_{3,1}^{ENG}$	
	0.0120		0.1350		0.0150		0.1350		0.0165		0.0225	
備註：a 為韋伯分配之尺度參數、b 為韋伯分配之形狀參數												

資料來源：筆者自行製表

其中 $\lambda_{3,4}^{ENG}=0.0040$ ，表示狀態 3 轉移到狀態 4 之轉移率為 0.0040，意即為狀態 3 到狀態 4 之平均故障時隔為 250 小時； $\mu_{4,3}^{ENG}=0.0060$ ，表示狀態 4 轉移到狀態 3 之轉移率為 0.0060，意即為狀態 4 到狀態 3 之平均維修時間為 167 小時； $\alpha_{7,9}^{ENG}(t)$ 為韋伯分配，表示總成於狀態 7 退化至狀態 9，為總成老化階段，屬磨耗期，故其韋伯之形狀參數大於 1，隨時間遞增而轉移率增加。

表 3.2 聯合齒輪箱總成狀態間之轉移參數值

故障轉移率	$\lambda_{1,5}^{UT}(t)$		$\lambda_{2,5}^{UT}(t)$		$\lambda_{3,5}^{UT}(t)$		$\lambda_{4,5}^{UT}(t)$	
	a	b	a	b	a	b	a	b
	280	1.2	280	1.2	280	1.2	280	1.2
退化轉移率	$\alpha_{1,2}^{UT}$		$\alpha_{2,3}^{UT}$		$\alpha_{3,4}^{UT}$		$\alpha_{1,3}^{UT}$	
	0.0080		0.0144		0.0240		0.0056	
預防維修轉移率	$\beta_{5,1}^{UT}$		$\beta_{4,1}^{UT}$		$\beta_{3,1}^{UT}$		$\beta_{2,1}^{UT}$	
	0.3000		0.3000		0.3000		0.3000	
備註：a 為韋伯分配之尺度參數、b 為韋伯分配之形狀參數								

資料來源：筆者自行製表

表 3.3 主傳動箱總成狀態間之轉移參數值

故障轉移率	$\lambda_{1,5}^{MT}(t)$		$\lambda_{2,5}^{MT}(t)$		$\lambda_{3,5}^{MT}(t)$		$\lambda_{4,5}^{MT}(t)$	
	a	b	a	b	a	b	a	b
	320	1.1	320	1.1	320	1.1	320	1.1
退化轉移率	$\alpha_{1,2}^{MT}$		$\alpha_{2,3}^{MT}$		$\alpha_{3,4}^{MT}$		$\alpha_{1,3}^{MT}$	
	0.0088		0.0136		0.0272		0.0064	
預防維修轉移率	$\beta_{5,1}^{MT}$		$\beta_{4,1}^{MT}$		$\beta_{3,1}^{MT}$		$\beta_{2,1}^{MT}$	
	0.3000		0.3000		0.3000		0.3000	
	$\beta_{4,2}^{MT}$		$\beta_{3,2}^{MT}$		$\beta_{5,3}^{MT}$		$\beta_{4,3}^{MT}$	
	0.3500		0.3500		0.4000		0.4000	
備註：a 為韋伯分配之尺度參數、b 為韋伯分配之形狀參數								

資料來源：筆者自行製表

表 3.4 其他傳動及旋翼組件狀態間之轉移參數值

故障轉移率	$\lambda_{1,2}^{TC}$
	0.0015
維修轉移率	$\mu_{2,1}^{TC}$
	0.1500

資料來源：筆者自行製表

表 3.5 主旋翼葉片狀態間之轉移參數值

故障轉移率	$\lambda_{1,2}^{MR}$
	0.0012
維修轉移率	$\mu_{2,1}^{MR}$
	0.1000

資料來源：筆者自行製表

表 3.6 各總成最小維修活動之成本

發動機總成 (一、二號相同)	$C_{2,1}^{ENG}$	$C_{4,3}^{ENG}$	$C_{6,5}^{ENG}$	$C_{8,7}^{ENG}$
	100	100	100	100
其他傳動及 旋翼組件	$C_{2,1}^{TC}$			
	50			
主旋翼葉片 轉移率	$C_{2,1}^{MR}$			
	50			
備註	單位：仟元			

資料來源：筆者自行製表

表 3.7 各總成預防維修活動之成本

發 動 機 總 成 (一、二號相同)	$C_{7,1}^{ENG}$	$C_{7,3}^{ENG}$	$C_{7,5}^{ENG}$	$C_{5,1}^{ENG}$	$C_{5,3}^{ENG}$	$C_{3,1}^{ENG}$
	500	300	100	500	300	500
聯 合 齒 輪 箱	$C_{5,1}^{UT}$	$C_{4,1}^{UT}$	$C_{3,1}^{UT}$	$C_{2,1}^{UT}$		
	500	500	500	500		
主 傳 動 箱	$C_{5,1}^{MT}$	$C_{4,1}^{MT}$	$C_{3,1}^{MT}$	$C_{2,1}^{MT}$	$C_{5,2}^{MT}$	
	500	500	500	500	400	
	$C_{4,2}^{MT}$	$C_{3,2}^{MT}$	$C_{5,3}^{MT}$	$C_{4,3}^{MT}$	$C_{5,4}^{MT}$	
	400	400	300	300	200	
備 註	單位：仟元					

資料來源：筆者自行製表

二、多目標預防維修模式之建構

本文針對「直升機旋翼系統」，所建構的多目標預防維修模式，同時以「最小化系統維修總成本」與「最小化系統平均不可用度」為二個目標，從而決定個別總成於退化狀態之最佳維修活動，模式建構如下：

目標函數：

(一)目標一：以最小化系統維修總成本

$$\text{Min } C_s = \text{TER} = \sum_{n=1}^N V^n, \text{ 其中 } V^n = \sum_{i=1}^k V_i^n [\Delta t] \cdot P_i^n [\Delta t \cdot (n-1)], n=1, \dots, N \quad (3.1)$$

(二)目標二：以最小化系統平均不可用度

$$\text{Min } \overline{UA}, \text{ 其中 } \overline{UA} = 1 - \frac{\int_0^T A(t) dt}{T} \quad (3.2)$$

限制條件：

$$\sum_{j=1}^k X_{i,j} \leq 1 \quad (3.3)$$

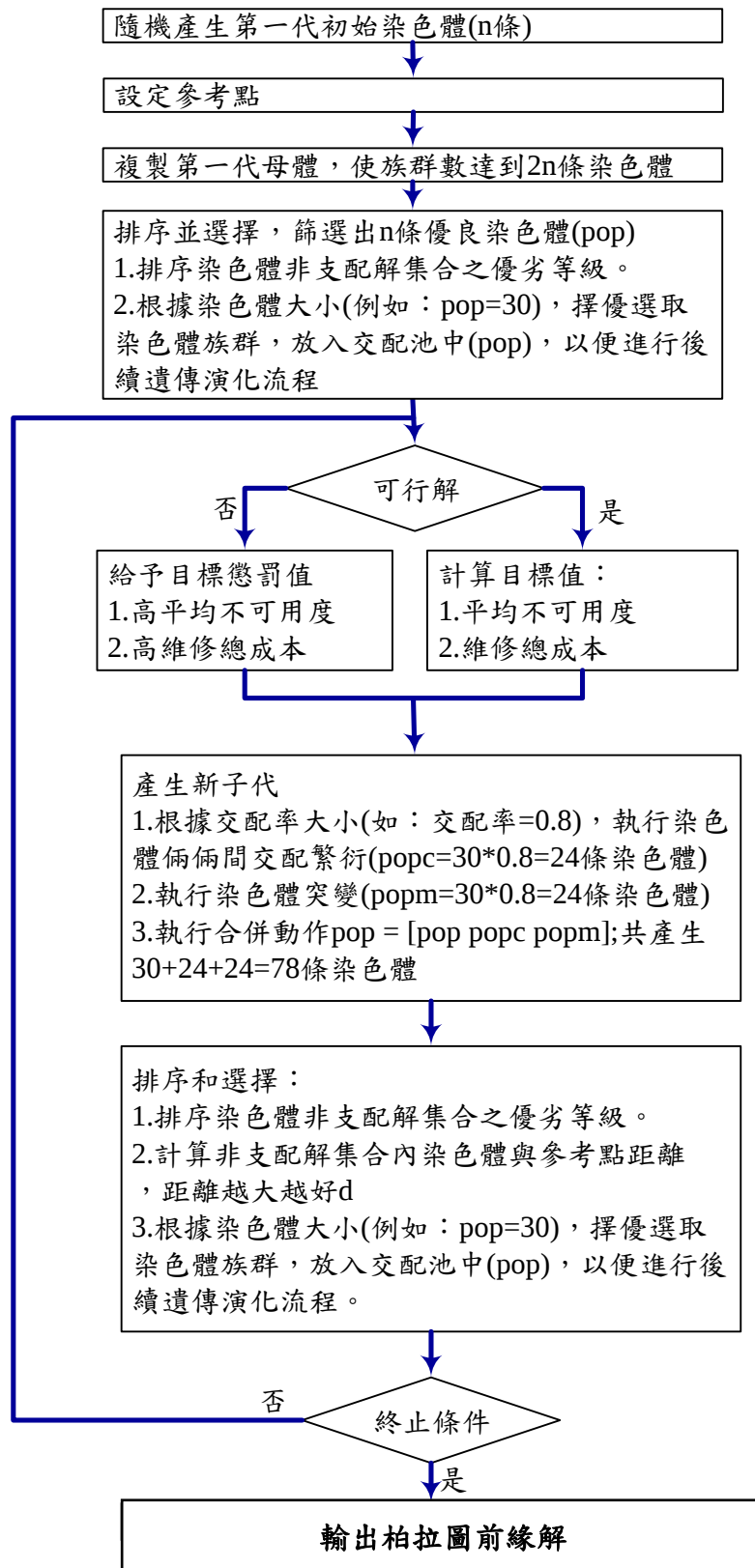
其中 C_s 為系統維修總成本； TER 為求解邊界近似法之總期望報酬，本文求解的期望報酬為維修總成本； M 為系統內之總成數，計一號發動機、二號發動機、聯合齒輪箱、主傳動箱、其他傳動與旋翼組件、主旋翼葉片等 6 個； V^n 為第 n 個總成維修成本； k 為總成所有狀態數； $P_i^n(t)$ 為第 n 個總成於時間 t 處於狀態 i 之機率值； N 為求解邊界近似法過程中任務時間之間隔解析度大小； $\overline{UA}$ 為系統平均不可用度； $A(t)$ 為系統可用度； T 為任務時間； $x_{i,j}$ 為狀態 i 回復至效能較佳之狀態 j 之二元決策變數；考量非支配排序基因算法之編碼與搜尋模式，適合用來求解離散型組合且符合多目標之最佳解，本文撰寫 MATLAB 程式，考量限制條件（公式 3.3）執行 NSGA III 演算法，所建構之預防維修模式，以獲得最佳之維修方案，維修方案表示個別總成在退化狀態之最佳化預防維修活動。

三、以非支配排序基因算法求解案例

根據所模擬之案例，本文採用非支配排序基因算法求解案例中各總成於每一個退化狀態之最適維修活動，其流程圖如圖 3.6。

圖 3.6 非支配排序演算法流程圖

非支配排序演算法流程圖



資料來源：筆者自行繪製

(1)產生第一代染色體

A.進行染色體編碼

由於模擬之直升機旋翼系統中，二具發動機具各有 9 種狀態 6 個預防維修活動、聯合齒輪箱有 5 種狀態 4 個預防維修活動、主傳動箱有 5 種狀態 10 個預防維修活動，故整體系統之預防維修活動由 26 個基因(6+6+4+10=26)所組成一條染色體，利用在每個維修活動以一個二元編碼的決策變數來表示，代表該維修活動之有無（1-有、0-無），故所建構的多目標預防維修模式，共計有 2^{26} 種(約 6,710 萬)維修活動為可行解，二元決策變數之基因序列與維修活動對照表如表 3.8。

表 3.8 二元決策變數之基因序列 G 與預防維修活動對照表

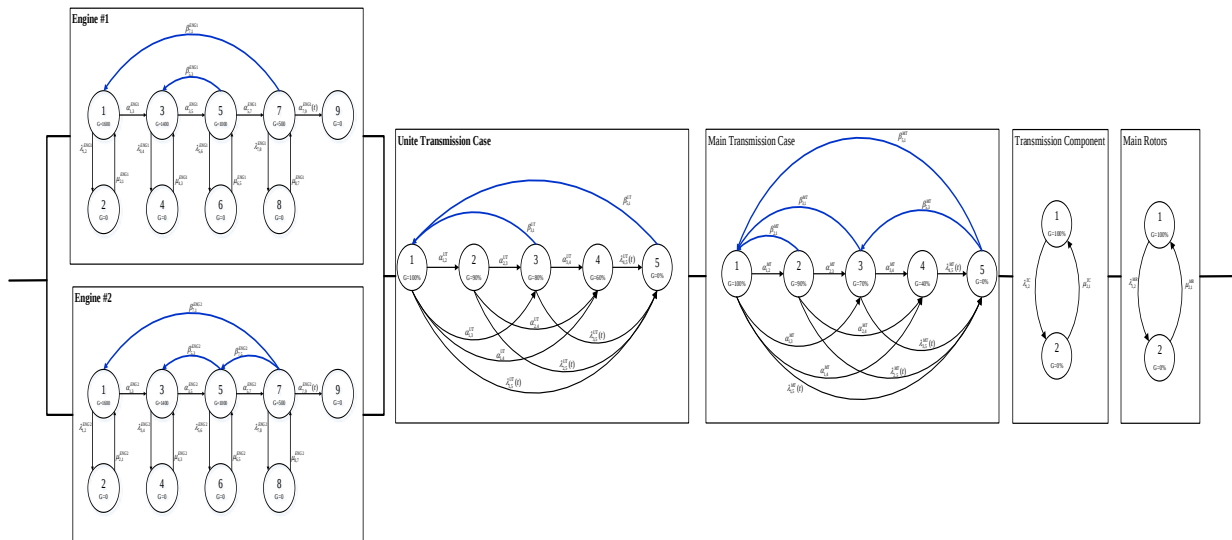
基因序列	G								
	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	G_7	G_8	G_9
維修活動	$\beta_{7,1}^{ENG1}$	$\beta_{7,3}^{ENG1}$	$\beta_{7,5}^{ENG1}$	$\beta_{5,1}^{ENG1}$	$\beta_{5,3}^{ENG1}$	$\beta_{3,1}^{ENG1}$	$\beta_{7,1}^{ENG2}$	$\beta_{7,3}^{ENG2}$	$\beta_{7,5}^{ENG2}$
基因序列	G_{10}	G_{11}	G_{12}	G_{13}	G_{14}	G_{15}	G_{16}	G_{17}	G_{18}
維修活動	$\beta_{5,1}^{ENG2}$	$\beta_{5,3}^{ENG2}$	$\beta_{3,1}^{ENG2}$	$\beta_{5,1}^{UT}$	$\beta_{4,1}^{UT}$	$\beta_{3,1}^{UT}$	$\beta_{2,1}^{UT}$	$\beta_{5,1}^{MT}$	$\beta_{5,2}^{MT}$
基因序列	G_{19}	G_{20}	G_{21}	G_{22}	G_{23}	G_{24}	G_{25}	G_{26}	
維修活動	$\beta_{5,3}^{MT}$	$\beta_{5,4}^{MT}$	$\beta_{4,3}^{MT}$	$\beta_{4,2}^{MT}$	$\beta_{4,1}^{MT}$	$\beta_{3,2}^{MT}$	$\beta_{3,1}^{MT}$	$\beta_{2,1}^{MT}$	

資料來源：筆者自行製表

B.產生初始染色體

本文運用 MATLAB 軟體內建語法(randi)產生初始染色體母代，獲得不同組合之維修活動編碼，形成基因排序，不同基因排序形成一條具有 26 個基因（二元決策變數）之染色體，每條染色體即對應一個預防維修模式之解，此解即代表系統中所有總成於個別狀態之預防維修活動。假設隨機產出一個染色體編碼[100010101010101010000011]，其編碼表示 $\beta_{7,1}^{ENG1}$ 、 $\beta_{5,3}^{ENG1}$ 、 $\beta_{7,1}^{ENG2}$ 、 $\beta_{7,5}^{ENG2}$ 、 $\beta_{5,3}^{ENG2}$ 、 $\beta_{5,1}^{UT}$ 、 $\beta_{3,1}^{UT}$ 、 $\beta_{5,1}^{MT}$ 、 $\beta_{5,3}^{MT}$ 、 $\beta_{3,1}^{MT}$ 及 $\beta_{2,1}^{MT}$ 等有實施維修活動（藍色實線），其狀態轉移圖如下圖 3.9 所示

圖 3.9 特定預防維修方案之系統狀態轉移圖



資料來源：筆者自行繪製

(2)設定參考點

設定一組均勻分佈於目標間之參考點來幫助族群演化，並且在環境選機制中使用利基保存機制，來維持族群的分散程度。

(3)複製初始染色體

運用 Matlab 內建語法 repmat，複製第一代母代，使族群數達到 $2n$ 條染色體數。

(4)第一次排序和選擇

A. 排序染色體非支配解集合之優劣等級，越好之解其等級越低。

B. 根據染色體大小，擇優選取染色體族群，放入交配池中，以便進行後續遺傳演化流程。

(5)基因篩選機制

根據限制條件（公式 3.3），圖 3.9 中基因演算法獲得之二號發動機維修方案 $\beta_{7,1}^{ENG2}$ 、 $\beta_{7,5}^{ENG2}$ ，及主傳動箱預防維修方案 $\beta_{5,1}^{MT}$ 、 $\beta_{5,3}^{MT}$ ，雖為適切之維修活動，但未能符合實務上需求，故為了符合實務執行維修活動時，於任一退化狀態，僅會實施一個維修活動，本文納入基因淘汰機制，當演算法求得之預防維修方案未能符合實務需求時，給予極差的懲罰值，代表不可行解。

(6)產生新子代

A. 染色體交配

隨機產生第一代計 30 條染色體，每代族群為 30 條染色體，從初始族群之染色體中，依照適應度函數值，好的染色體有更大機會被隨機選擇至交配池執行交配，再兩兩成對染色體中執行交配，產生新的染色體世代。

B. 染色體突變

染色體交配過程中，具有發生突變的可能，以作為演化之推動力，不理想的突變會經天擇過程被淘汰，而對求解有利之突變則會被累積下去，幫助跳脫局部解之窘境。

(7) 排序和選擇

排序染色體非支配解集合之優劣等級及距離參考點連成之基準線距離遠近，並根據染色體大小，擇優選取染色體族群，放入交配池中，以便進行後續遺傳演化流程；對族群依據不受支配的特性做排序，並給予較好的不受支配解有系統的擁有較高的適應值，並可在 NSGA III 演化過程中，迫使解朝向柏拉圖最佳前緣解移動。

(8) 終止條件：求解此案例，設定 GA 最大迭代數為 40 代時，即停止演算。

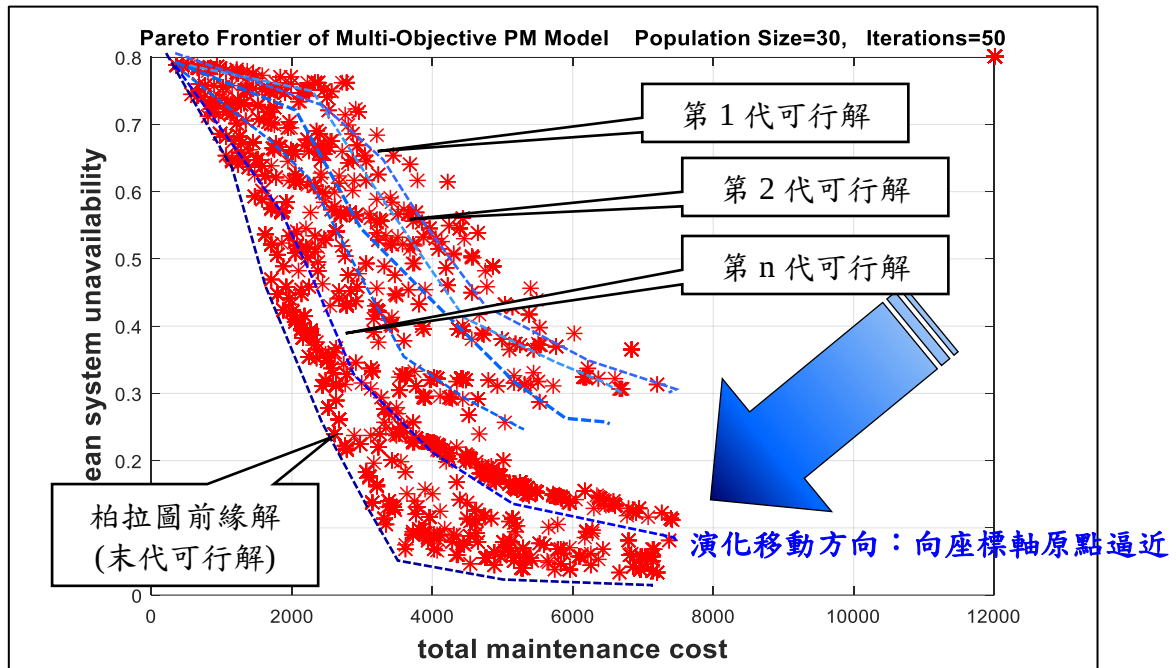
(9) 輸出柏拉圖前緣解

以任務時間操作 300 小時，系統最低容許效能 $w=1,400$ 匹馬力，得到每一世代柏拉圖為基之非支配解集合。演算法逼近柏拉圖解之最佳化過程，如圖 3.10，得到每一世代柏拉圖為基之非支配解集合；演算法逼近柏拉圖解之最佳化過程，而所獲得的柏拉圖前緣解，有效地提供多樣化的維修方案。

(10) 補充說明

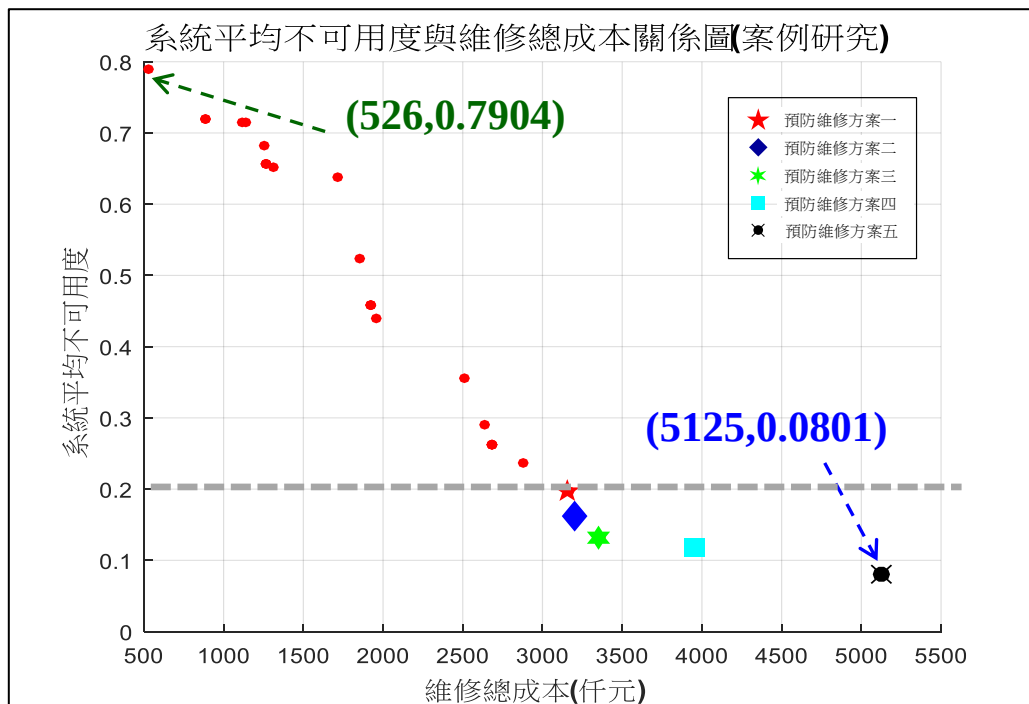
每一個基因代表一種預防修護策略，以第一代可行解為基礎，在每一代基因演化過程，求出得結果優於上一代表現，將列出計算結果與圖形，而前代之可行解即被支配(取代)，再以此基因相互交配演化與進化，此一繁複過程為「柏拉圖改善」，直到演化到最末代，為「柏拉圖前緣解」，亦為最演算最佳狀態，不可能再有更多的柏拉圖改善，亦是非支配解之集合。

圖 3.10 柏拉圖改善過程與前緣解



資料來源：筆者運用 MATLAB 程式計算結果並繪製圖形

圖 3.11 柏拉圖前緣解集合



資料來源：筆者運用 MATLAB 程式計算結果並繪製圖形

根據圖 3.11 所獲得之多樣化維修方案，計找出 20 個可行解，其中最小維修總成本為 526 仟元（系統平均不可用度為 0.7904），最低系統平均不可用度為 0.0801（維修總成本為 5,125 仟元）；針對低於平均不可用度 0.2 以下計有 5 種預防維修方案，彙整如表 3.9 至表 3.13。

表 3.9 預防維修方案一

系統平均不可用度	0.1961
系統維修總成本	3,161 仟元
基因編碼	0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1,0,1,0

資料來源：筆者自行製表

表 3.10 預防維修方案二

系統平均不可用度	0.1627
系統維修總成本	3,201 仟元
基因編碼	0,0,1,0,0,0,1,0,0,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1,0,1,0

資料來源：筆者自行製表

表 3.11 預防維修方案三

系統平均不可用度	0.1322
系統維修總成本	3,357 仟元
基因編碼	0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0,1,0,1,0

資料來源：筆者自行製表

表 3.12 預防維修方案四

系統平均不可用度	0.1168
系統維修總成本	3,952 仟元
基因編碼	0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,1,0,1,0,1,0,0,1,0,0,0,0,1,0,1,0

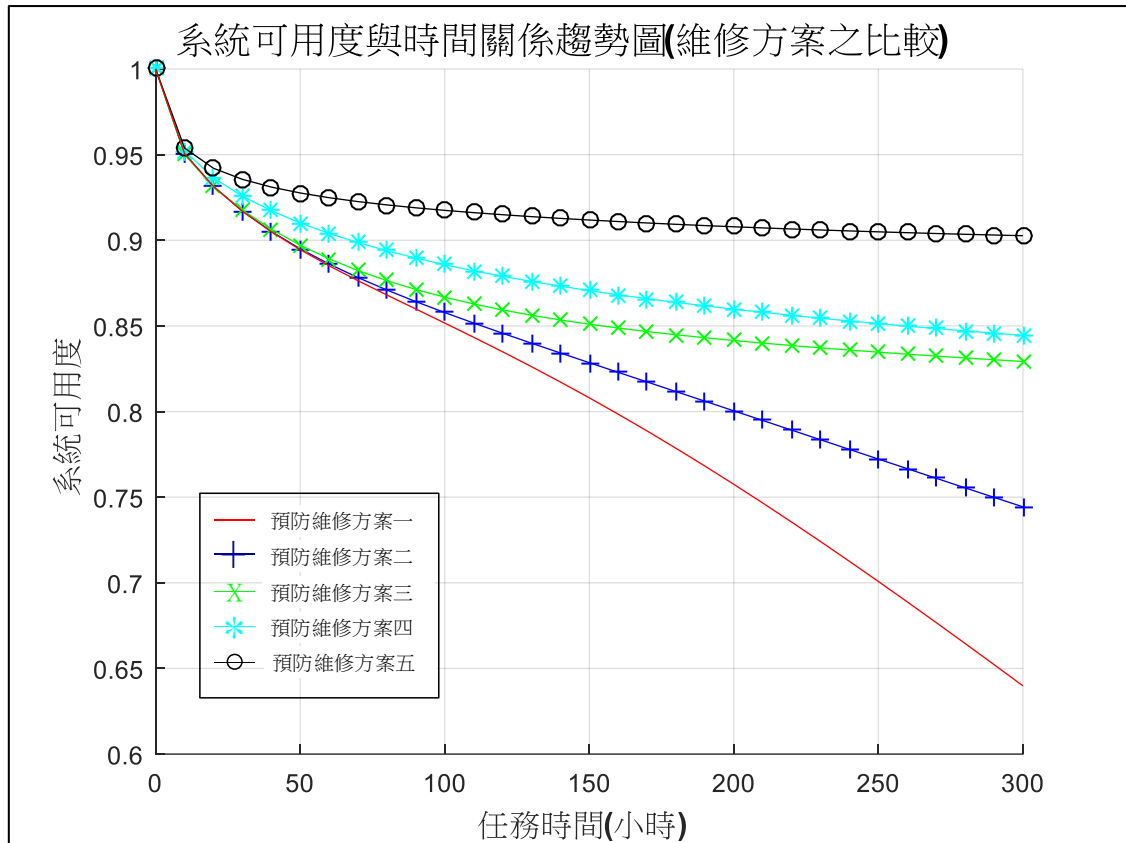
資料來源：筆者自行製表

表 3.13 預防維修方案五

系統平均不可用度	0.0801
系統維修總成本	5,125 仟元
基因編碼	0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,1,0,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,1,0,1,0

資料來源：筆者自行製表

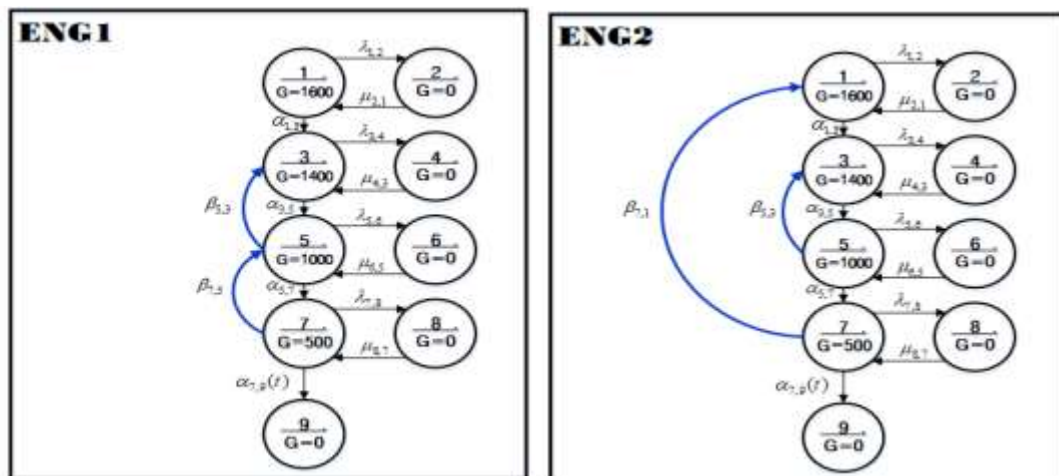
圖 3.12 系統可用度與時間關係趨勢圖（維修方案之比較）



資料來源：筆者運用 MATLAB 程式計算結果並繪製圖形

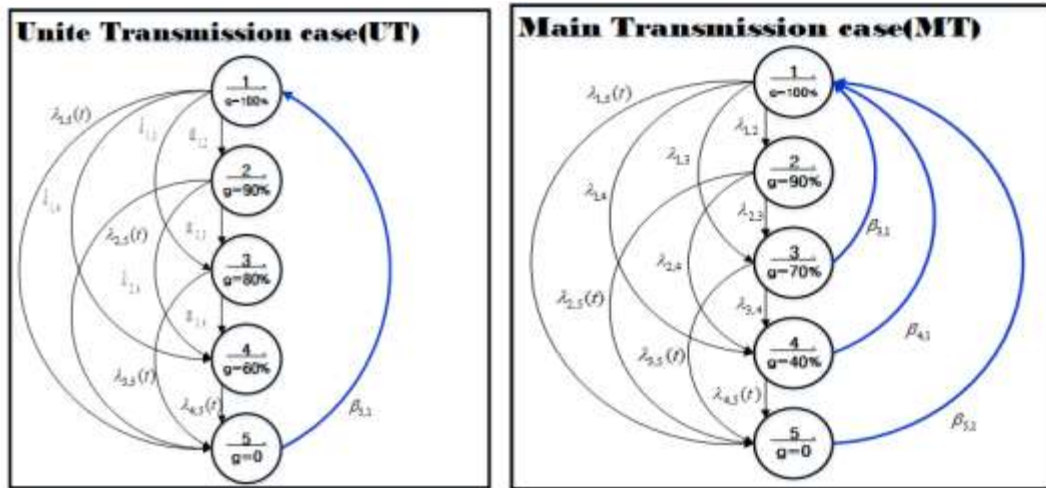
在本案例之環境條件下，要求平均不可用度低於0.2且維修總成本低於3,500仟元，以系統平均不可用度越低越好者，執行預防維修方案三，系統於操作期間，平均可用度為0.8678，維修總成本計3,357仟元，其基因編碼解所對應之預防維修活動，其狀態轉移圖如圖3.13、圖3.14所示。

圖 3.13 一、二號發動機之預防維修活動



資料來源：筆者自行繪製

圖 3.14 聯合齒輪箱與主傳動箱之預防維修活動



資料來源：筆者自行繪製

根據圖 3.13 及圖 3.14 得知，各總成之最適預防修護方案說明如後：

(1)一號發動機計執行二種預防維修活動：

- a.當發動機效能退化到狀態 5(馬力 1,000 匹)時，可執行不完美預防修護回到效能較佳之狀態 3(馬力 1,400 匹)，維持系統運作效能。
- b.最差當發動機效能已退化到狀態 7(馬力 500 匹)時，須執行不完美預防修護回到效能較佳之狀態 5(馬力 1,000 匹)，提供足夠動力執行任務，以維持系統正常運作。

(2)二號發動機計執行二種預防維修活動：

- a.當發動機效能退化到狀態 5(馬力 1,000 匹)，可執行不完美預防修護回到效能較佳之狀態 3(馬力 1,400 匹)，維持系統運作效能。
- b.最差當效能退化到狀態 7(馬力 500 匹) 須執行完美預防修護回到效能較佳之狀態 1(馬力 1,600 匹)，提供足夠動力執行任務，維持系統正常運作。

(3)聯合齒輪箱計執行一種預防維修活動：

當聯合齒輪箱效能退化到狀態 5(傳輸效率 0%)，在執行完美預防修護回到效能最佳之狀態 1(傳輸效力 100%)，使整體系統運作正常。

(4)主傳動箱計執行三種預防維修活動：

- a.當效能退化到狀態 3(傳輸效率 70%)，執行完美預防維修回到效能最佳之狀態 1(傳輸效率 100%)。
- b.當效能退化到狀態 4(傳輸效率 40%)，執行完美預防維修回到效能最佳之狀態 1(傳輸效率 100%)。
- c.最差當效能退化到狀態 5(傳輸效率 0%)，即得執行完美預防維修回到效能較佳之狀態 1(傳輸效率 100%)，使整體系統正常運作。

經由本文建構多目標預防修護模式，在系統操作時間為 300 小時，系統效

能門檻為 1,400 匹馬力，失效轉移率、退化轉移率、維修轉移率與預防維修轉移率等參數不變之環境下，執行上述各總成之預防維修活動，系統在操作期間，其平均可用度為 0.9199，維修總成本計 5,125 仟元。

肆、結論

本研究針對「多狀態老化系統」，從總成觀點建構一個多目標預防維修模式，在求解多目標最佳化的策略上，採用以柏拉圖為基的技術，發展一個離散型決策變數之多目標最佳化的基因演算法，從而決定系統中個別總成於每一個退化狀態的最適維修活動，研究結論歸納計二點，概述如後：

- 一、所建構的多目標預防修護模式，可適切評估多狀態系統中，所發展的最佳化演算法，亦可以提供多樣化的可行解之多目標維修方案；惟本文研究重點於建構預防維修最佳化運算模式，後續再配合各型機總成故障資料庫、維修成本等參數，可提供決策者在有限預算與對裝備性能的要求下，經本文基因演算法，找出最適切的預防修護策略與合理的預算需求。
- 二、所獲得之最佳維修方案，僅在各總成之部分退化狀態執行最適切預防修護活動，即可滿足系統可用度的需求，所需的系統維修總成本亦較低，可避免不必要的維修，耗用資源又無法適切提升裝備可用度。

參考文獻

- [1] Volkanovski, A., Čepin, M., Mavko, B., "Application of the Fault Tree Analysis For Assessment of Power System Reliability," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 94 , Issue 6, pp. 1116-1127, 2009.
- [2] Xing, L., Dai, Y., "A New Decision-Diagram-Based Method for Efficient Analysis on Multistate Systems," *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, Vol. 6, No. 3, pp. 161-174, 2009.
- [3] Nagayama, S., Sasao, T., and Butler, J. T., Analysis of Multi-State Systems with Multi-State Components Using EVMDDs, IEEE, Victoria, BC, Canada, pp. 122-127, 2012.
- [4] Levitin, G., The Universal Generating Function in Reliability Analysis and Optimization, Springer, London, pp. 67-98, 2005.
- [5] Lisnianski, A., Levitin, G., The Multi-State System Reliability: Assessment, Optimization and Applications, World Scientific, Singapore, pp. 15-48, 2003.
- [6] Ding, Y., Lisnianski, A., Frenkel, I. and Khvatskin, L., "Optimal Corrective Maintenance Contract Planning for Aging Multi-State System," *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, Vol. 25, Issue. 5, pp. 612-631, 2009.
- [7] Liu, Y., Huang, H. Z., "Optimal Replacement Policy for Multi-State System Under Imperfect Maintenance," *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 59, Issue. 3, pp. 483- 495, 2010.
- [8] Liu, Y., Kapur, K. C., New model and measurement for reliability of multi-state systems in handbook of performability engineering, Springer, London, pp. 400-435, 2008.
- [9] Lisnianski A., "Extended Block Diagram Method for a Multi-State System Reliability Assessment," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 92, Issue. 12, pp. 1601–1607, 2007.
- [10] 陸軍航空裝備保修手冊，陸軍司令部，桃園，第 1.12-1.19 頁，2016。
- [11] 范淼，後勤管理導論，黎明文化事業公司，臺北，第 258-259 頁，1999。
- [12] 國軍武器系統整體後勤支援教則，國防部，臺北，第 30 頁，1994。
- [13] 余斯慰，整體後勤支援，中正理工學院，桃園，第 85-88 頁，1991。
- [14] Waveland P., An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering, Waveland , Canada, pp. 98-105, 1997.
- [15] Isaac W. S., Mustapha N., Daoud A., "Performance Evaluation of Multi-State Degraded Systems with Minimal Repairs and Imperfect Preventive Maintenance," *Reliability Engineering and System Safety* , Vol. 95, pp. 65-69, 2010.

- [16] Sheu S.-H., Chang C.-C., Chen Y.-L., Zhange Z. G., “Optimal Preventive Maintenance and Repair Policies for Multi-State Systems,” *Reliability Engineering and System Safety* , Vol. 140, pp. 78-87, 2015.
- [17] Lisnianski A., Frenkel I., Ding Y., Multi-State System Reliability Analysis and Optimization for Engineers and Industrial Managers, Springer, London, pp. 273-281, 2010.
- [18] Lisnianski A., Elmakias D., Laredo D., Haim H.B., “A multi-state Markov model for a short-term reliability analysis of a power generating unit,” *Reliability Engineering and System Safety* , Vol. 98, Issue. 1, pp. 1-6, 2012.
- [19] Frenkel I., Lisnianski A. and Khvatskin L., “Availability Assessment for Aging Refrigeration System by Using Lz-Transform,” *Journal of Reliability and Statistical Studies* , Vol. 5, Issue. 2, pp.33-43, 2012.
- [20] Frenkel I., Lisnianski A. and Khvatskin L., “On the Lz-Transform Application for Availability Assessment of an Aging Multi-State Water Cooling System for Medical Equipment,” SCE-Shamoon College of Engineering, Israel, pp.59-77, 2013.
- [21] Deb K., Agrawal S., Pratap A., and Meyarivan T., “A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA III,” *KanGAL Report*, No. 200001, pp.1-11, 2000.
- [22] Deb K., and Jain H., “An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems With Box Constraints,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, VOL. 18, No. 4, pp.577-601, 2014.
- [23] 劉慧敏，多目標基因演算法於基本面選股策略之應用，碩士論文，國立中央大學，桃園，2002。
- [24] 李震昱，高目標演算法中參考點之探究，碩士論文，國立臺灣師範大學，台北，2017
- [25] Liu Y., Huang H., “Optimal Replacement Policy for Multi-State System Under Imperfect Maintenance,” *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 59, Issue. 3, pp. 483-495, 201

筆者簡介



姓名：沈世明

級職：中校主任

學歷：中正理工學院 92 年班、國管院後管正規班 99 年班、理工學院碩士 108 年班。

經歷：兵技官、組長、所長、工場副場長、後參官、工場主任、現任航空 602 旅飛保廠標訓室中校主任。

電子信箱：軍網：vesimon@webmail.mil.tw

民網：vesimon1112@gmail.com