

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

效能導向後勤供應鏈管理專題

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2623-7-009-004-

執行期間：94年01月01日至94年12月31日

執行單位：國立交通大學工業工程與管理學系(所)

計畫主持人：巫木誠

計畫參與人員：陳詠進、林劭函、徐楊康

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 3 月 17 日

自評

● 研究內容與原計畫相符程度

相符程度相很高。

● 達成預期目標情況

完全達成

目標 1：確認零件失效模式並非皆服從卜瓦松分配

目標 2：發展一適用於各類失效分配的最佳化存貨配置求解模型。

● 學術期刊發表或申請專利之學術或應用價值

學術價值：擬投稿至 SCI 的國際期刊

應用價值：國防零配件庫存約可省數千萬元。

摘 要

隨著國防安全議題的日趨受到重視，軍方武器系統若於演練操作或實戰時期能夠有效運作將是非常重要的，而負責維持系統設備正常運作的備份件則是其關鍵所在，若備份件存量過少，便無法適時對失效的系統進行維修、更換，因而耽誤生產作業；若備份件存量過多時，則會導致庫存成本過高，故如何提供一有效的備份件補給體系實是一重要的研究課題。

然而，過去備份件的相關文獻並無在多階補給架構與多階系統結構，以及有限維修能力之下，針對不符從卜瓦松失效分配行為的零件進行最佳化存貨配置的研究。故，本研究提出一個最佳化求解模型，乃藉由模擬程式以有效呈現零件真實需求分配所帶來的影響，並且採用邊際搜尋法則以有效地發展最佳化成本與效益曲線，更於模型中藉由「快速取得搜尋初始解」、「評選重要零件」、「刪除冗站」、「場站分群」、「變數動態刪除」五構想進而縮短求解空間並節省模擬時間。而在 X 系統的個案中，不僅說明零件失效行為並不完全符合卜瓦松分配模式，更在備份件存貨配置上證明確實存在高達 10% 的成本節省空間。

關鍵詞：備份件、存貨、妥善率、模擬、卜瓦松

Abstract

The spare-part stocking problem is very important for weapon system. Keeping a higher inventory level would increase weapon's availability, yet at the price of incurring higher costs. Most related literature assumed that the failure of a spare part follows a Poisson distribution. This would reduce the problem complexity; yet may not well model a particular real world problem. This research aims to solve the spare-part stocking problem in a scenario where the failures of spare parts are not limited to Poisson distribution. The proposed method involves three major steps. First, we use OPUS10, proprietary software, to yield an initial solution. Second, we use simulation technique to evaluate the performance of a stocking solution. Third, we develop some heuristics to efficiently and effectively improve the solution until a satisfactory one is obtained. Experiment results show that the proposed method as compared to OPUS10 may save about 10% in inventory cost.

Keywords: spare-parts, inventory, availability, simulation, Poisson

章節目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
目錄.....	III
圖目錄.....	V
表目錄.....	VI
第一章 緒論.....	01
1.1 研究動機.....	01
1.2 論文章節安排.....	02
第二章 文獻探討.....	03
2.1 METRIC 核心文獻.....	03
2.2 失效分配核心文獻.....	04
2.3 文獻探討小結.....	04
第三章 問題描述.....	05
3.1 備份件補給架構.....	05
3.2 系統與零件屬性.....	05
3.3 失效維修行為.....	06
3.4 真實需求分配.....	07
第四章 研究模型與方法.....	08
4.1 研究模型.....	08
4.2 研究方法.....	10
4.2.1 起始解.....	11
4.2.2 解空間.....	12
4.2.2.1 重要零件.....	12
4.2.2.2 刪除冗站.....	13
4.2.2.3 場站分群.....	15
4.2.2.4 動態行除.....	15
第五章 實例驗證.....	17
5.1 案例情境.....	17
5.1.1 補給體系架構.....	17
5.1.2 系統零件結構.....	18
5.1.3 真實需求分配.....	18

5.2 研究流程.....	19
5.2.1 起始解.....	20
5.2.2 重要零件.....	21
5.2.3 刪除冗站與場站分群.....	22
5.2.4 動態刪除與邊際結果.....	22
5.2.5 結果比較.....	23
第六章 結論.....	25
參考文獻.....	26
附錄 模擬程式使用說明	

圖目錄

圖 1.1 補給體系架構概念圖.....	01
圖 3.1 補給體系架構概圖 1.....	05
圖 3.2 系統零件結構概圖 1.....	06
圖 3.3 可線上更換單元.....	06
圖 3.4 LRU 維修流程.....	07
圖 4.1 C/E curve.....	09
圖 4.2 研究模型.....	10
圖 4.3 OPUS10 輸入變數與輸出變數關係.....	12
圖 4.4 補給體系架構概圖 2.....	13
圖 4.5 系統零件結構概圖 2.....	13
圖 4.6 單分支結構 1.....	14
圖 4.7 單分支結構 2.....	14
圖 4.8 分群例 1.....	15
圖 4.9 分群例 2.....	15
圖 4.10 解空間縮減模型.....	16
圖 5.1 X 補結體系架構.....	17
圖 5.2 X 系統零件結構.....	18
圖 5.3 研究流程.....	20
圖 5.4 冗站與分群.....	22

表目錄

表 5.1 最適失效分配.....	18
表 5.2 存貨配置.....	20
表 5.3 平均缺貨時間.....	21
表 5.4 邊際過程.....	22
表 5.5 敘述統計與統計檢定.....	24

第一章 緒論

1.1 研究動機

在國防安全的考量下，軍方武器系統若於演練操作或實戰時期能夠有效運作將是重要關鍵所在，因此如何維持系統設備正常運作將是非常重要的。而一般用來衡量系統正常運作的績效指標乃妥善率 (availability)，其數學表達法即如下式：

$$A = \frac{T - t_d}{T}$$

其中 A 是武器系統的妥善率， T 乃該系統總規劃操作時間，而 t_d 是

系統的當機無法作業的時間，由此式我們可發現：系統的妥善率愈高，可運作的時間 ($T - t_d$) 就愈長，也就代表著武器系統愈能穩定執行保防作業，因此軍方都盡可能地縮短系統當機時間，以提高整體防衛能力。

一般而言，為了有效降低當機時間所造成的安全風險又或產能損失，維修人員於系統當機時，第一時間內所採取的修復動作乃取下該失效零件，置換庫房相同種類的備用零件 (spare parts 備份件)，而所取下的失效零件則進入維修流程。因此在備份件的庫存與補給方面，若是備份件存量過少，將造成無法適時對失效的系統進行維修更換的動作，耽誤正常生產作業；若備份件存量過多時，則將導致庫存成本過高，故如何提供一有效的備份件補給體系實是一重要的研究課題。

一般備份件補給體系乃屬於多階層架構 (multi-echelon)，如圖 1.1 所示，最底層是系統設備的操作使用單位，中間層級是地區性庫存和維修單位，最高層則是總庫存和維修單位。此外，各層級單位分別具有不同等級的備份件維修能力與存貨水準，若較低層單位針對某零件沒有能力維修時，則將該零件往上遞送請求其上層單位予以支援；若較低層單位發生缺料狀況時，則依據給定的遞補邏輯由其上層單位撥貨予以填補，其目的皆是為了維持最底層的系統操作單位在特定的妥善率下執行作業。

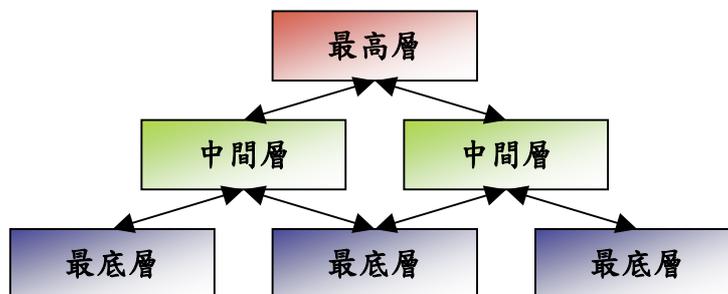


圖 1.1 補給體系架構概念圖

對於上述備份件補給體系，過去相關文獻的主要研究重點是：在卜瓦松的需求分配假設下（即零件失效間隔時間滿足指數分配），探討無限維修能力或有限維修情境，如何於給定的妥善率目標，藉由啟發式解法的數學模型來決定各單位庫存的請購點（reorder point）和請購量（reorder quantity），使補給體系的總營運成本最低；此問題一般稱之為 (s_{ij}, S_{ij}) 補給決策，當層級單位 j 的備用零件 i 庫存量低於 s_{ij} 時就進行請購作業，而請購量必須使庫存量重新達到 S_{ij} 。

但系統零件的失效模式皆在卜瓦松分配的假設下，將可能造成無法與真實需求分配相符的情況，其啟發式解法所求解之最佳存貨水準（stock-level）也就可能產生失真的現象。對於備份件需求若發生高估的現象，將造成不必要的存貨成本浪費；反之，則可能導致系統當機卻無法馬上針對該失效零件予以置換，造成系統停擺時間過長，無法達到所設定的目標妥善率。雖有部分過去文獻藉由貝氏或模擬探討非卜瓦松失效需求下的模型，但卻無法同時考量多階的補給架構以及多階的系統結構等情境。

因此，本論文擬從真實需求分配的角度，以及在有限維修能力的考量下，來分析如何建構適用於多階補給架構與多階系統結構的求解模型，期望以較低的總營運成本來滿足系統目標妥善率。

1.2 論文章節安排

本論文其它章節內容安排如下：第二章是文獻回顧，主要探討備份件存貨管理的相關文獻。第三章是研究問題描述，介紹一備份件補給架構與系統結構的組成與屬性，以及零件失效模式與維修行為模式。第四章為研究模型與方法，描述如何建構最佳化存貨配置求解模型。第五章是實例驗證，藉由 X 武器系統進行個案研究。第六章是結論與未來研究方向。

第二章 文獻探討

過去幾年來，備份件補給體系的最佳化模型已是熱門的研究主題，其中存貨配置水準的最佳化更是許多學者研究重心所在。

2.1 METRIC 核心文獻

針對可維修備份件 (repairable spare parts) 而言，Sherbrooke [1]所提出的 METRIC (multi-echelon technique for recoverable item control) 乃是研究多階補給架構 (multi-echelon) 及單階系統結構 (single-indenture) 的先驅者，其目的乃在給定的平均妥善率之下，取得最低成本的存貨配置，並證實最大化平均妥善率即等同於最小化「最高層級系統零件在最低層級存貨位置的總期望缺貨量」。

Muckstadt [2]則擴充 METRIC 模型予以納入組合件 (assembly item) 與零組件 (component) 的交互影響因素，即所謂多階系統結構 (multi-indenture)，此模型亦稱之為 MOD-METRIC。其運作的核心概念乃將原問題分解成兩個子問題，其一乃在給定組合件擬分配備份數總量下，求解於各場站之最適零組件配分數量；其二乃在給定問題一中所求得於各場站之最適零組件備份數量與已知組合件之可分配備份數總量下，求解各場站之最適組合件備份數量。

而 METRIC 與 MOD-METRIC 兩模型中於各維修場站維修中以及補給中零件個數 (pipeline) 的估算採用卜瓦松機率分配，如此一來零件個數的變異數與期望值的比值應為 1，但事實上卻較 1 為大。故，Slay [3]以及 Graves [4]既而提出用負二項式機率分配來取代卜瓦松，前者模型亦稱為 VARI-METRIC。之後，Sherbrooke [5]並結合 MOD-METRIC 與 VARI-METRIC 而成為一多階補給架構與多階系統結構的備份件補給模型，且在模擬執行結果的驗證下證實結果甚為正確。

上述模型皆假設維修廠站擁有充分又或無限維修能力，意即沒有零件等候於維修廠站之前，在現實世界乃屬不合理。因此 Gross 等人[6]則在有限維修能力下，針對多階補給體系的可維修備份件，使用封閉式傑克生網路 (Jackson network) 之等候理論進行研究，此方法在固定參數的封閉網路上提供穩態機率的良好估算，但，由於參雜許多演算法而使得最佳化存貨水準的困難度有所增加。此外，Albright 與 Soni [7]、Gupta 與 Albright [8]、以及 Albright 與 Gupta [9]則在馬可夫過程 (Markov processes) 的基礎上進行研究，然而此方法的缺點在於求解過程中狀態 (state) 個數將會非常龐大。

Diaz 與 Fu [10]則擴充 VARI-METRIC 模型以 $GI/G/k$ 多產品等候系統來取

代 $M/G/\infty$ ，發展一多階補給架構、單階系統結構模型，採用聚集-反聚集（aggregation-disaggregation）方法試著在穩態下，求取於維修與等候的每種零件個數之相關第一與第二動差。不幸地，侷限於分析上的複雜度，唯有單一服務站台的等候模型其變異數可被求得。

2.2 失效分配核心文獻

以上 METRIC 及 METRIC 衍生物所建構出的備份件最佳化存貨求解模型皆離不開卜瓦松分配的零件失效行為假設，但現實生活中卻不甚適當，故 Aronis 等人[11]考慮一個 $(S-1, S)$ 存貨政策下，以貝氏方法（Bayesian approach）討論三種零件的失效率分配，再依此失效率分配決定備份件需求量的機率分配，該研究認為備份件需求量應該是一 Gamma-Poisson compound 分配，而非一般研究所假設的卜瓦松分配；隨後即依其所提分配求出單一場站的庫存水準 S 。

並有學者藉由模擬來呈現失效分配行為對妥善率績效的影響，進而予以最佳化，Kabir 等人[12]與 Sarker 等人[13]分別藉由 SLAM 模擬程式以及 SIMSCRIPT II.5 套裝軟體來建構模型，乃針對單一相同備份零件，利用大量情境又或全數搜尋的方式求解存貨策略 (s, S) 與維修策略之預防更換時間「 t 」或預防更換週期「 T 」兩者策略間同步的最佳化，其個案探討即以韋伯（Weibull）替代了卜瓦松失效分配。

Marseguerra 等人[14]則搭配基因演算法（genetic algorithm）於蒙地卡羅模擬（Monte Carlo simulation）模型中，進而求解多種不同備份零件的最佳化存貨水準 S_i 。值得注意的是，這些適用於多種分配的最佳化模擬模型皆侷限於單階補給架構，即並不存在上下游間的補給關係。

因此 Ahmed 等人[15]與 Alkhamis 等人[16]乃針對多階補給架構之可修元件存貨系統，分別藉由模擬退火法（simulated annealing）以及粒子群優化法（particle swarm optimization）搭配蒙地卡羅模擬，最佳化下游基地與上游中心等處的備份機台數量與維修管道（channel）數量，然而兩者研究皆僅簡單地把一個機台視為一個備份件，也就是當 M 台機器執行作業時，則有 S 台機台在旁待命與備用，乃屬單階系統結構，即系統零件並不存在上下層間的結構關係。

2.3 文獻探討小結

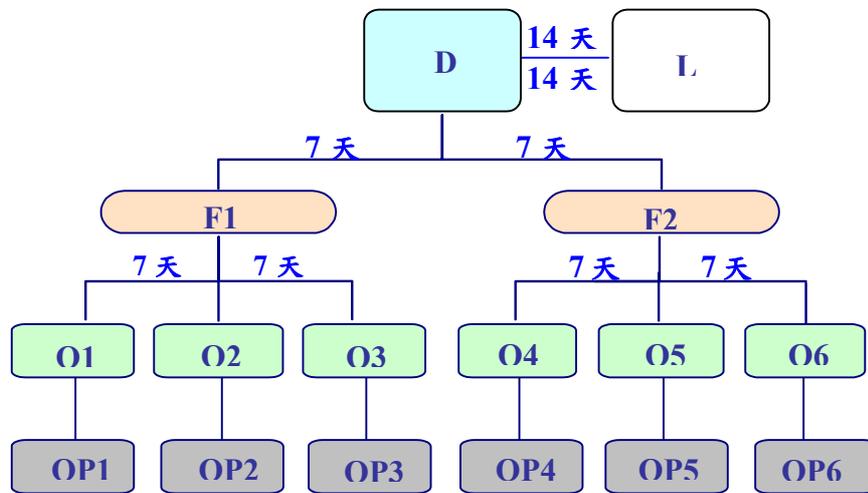
故，本研究為彌補過去研究的缺失而提出的研究模型不僅同時考量了「多階補給架構」、「多階系統結構」、「有限維修能力」，更適用於「多種失效分配」，進而期望以較低的總營運配置成本來滿足系統目標妥善率。

第三章 研究問題描述

本研究主要探討如何從真實需求分配的角度，來取代卜瓦松需求模型假設，進而分析及建構一有效的備份件最佳化補給模型，期望以較低的總營運成本來滿足武器系統之目標妥善率。因此本章將針對「備份件補給架構」、「系統與零件屬性」、「失效維修行為」、以及「真實需求分配」進行闡述，以了解此最佳化模型的構建情境。

3.1 備份件補給架構

一般備份件補給體系乃屬於多階層架構，如圖 3.1，最底層是系統設備的操作使用單位，中間層級是地區性庫存和維修單位，最高層則是整體庫存以及維修單位，而單位內部所具有的「維修功能」即是備份件補給體系與一般產品供應鏈系統最大的不同處之一，且每個單位皆具有不同等級的維修與置換能力，愈上層單位維修與置換能力愈強。此外，針對運輸體系而言，單位與單位之間各自擁有不同的運輸時間，而針對系統使用單位而言，單位內各自可擁有不同的系統數目，且每部系統可予以設定不同的利用率。



註：OP→系統操作單位

圖 3.1 補給體系架構概圖 1

3.2 系統與零件屬性

系統零件的多階層結構方式一般主要以物料清單 (bill of material, BOM) 來呈現，組成零件並可依維修特性而區分成「LRU」、「DU」、「SRU」以及「DP」，其中 LRU 代表線上更換單元，系統裡可維修與替換；SRU 代表場站更換單元，

LRU 內可維修與替換；DU 代表可拋棄單元，系統裡不可維修但可替換（「線上」代表系統操作使用單位），如圖 3.2 所示。

於如此結構下，各零件的失效都將導致系統當機，而產生對系統妥善率共同影響的特性，這也是備份件補給與一般產品供應鏈最大的不同處之一，因其不同產品所欲滿足的需求對象是不同的顧客，彼此間並不存在緊密影響的組合性質。此外，每項零件各自擁有不同的單價以及失效率（failure rate），而當零件失效事件發生時，則各自送往上層不同的維修單位進行維修或者置換作業，其中零件位於每單位的修護時間亦有所差異。

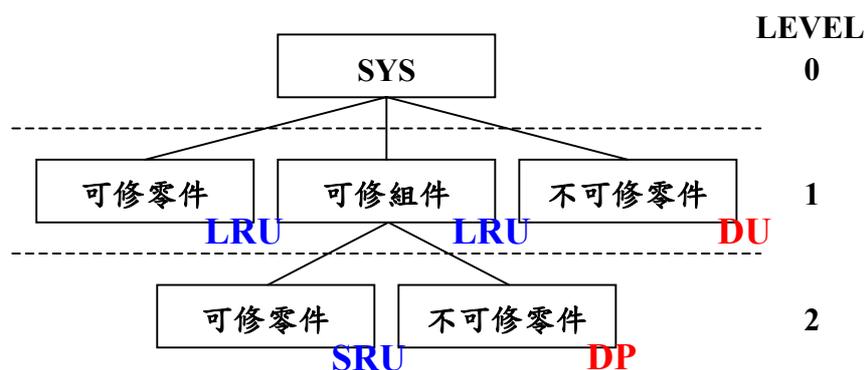


圖 3.2 系統零件結構概圖 1

3.3 失效維修行為

當武器系統內零件失效事件發生時，由於系統使用單位一般不具相關零件的維修能力（較高層級才具備），以及為了盡量縮短當機時間，第一時間內所採取的修復動作乃取下該失效的可線上更換單元「可維修零件模組（LRU）」或「不可維修零件（DU）」，置換上游庫房中相同種類的備用零件，而所取下的失效零件若屬可維修單元則進入維修流程，否則立即拋棄，如圖 3.3 所示。

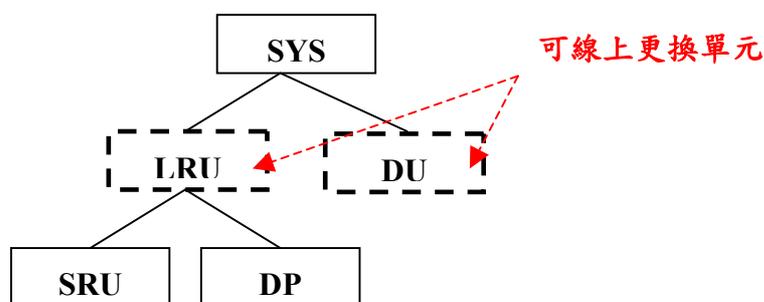


圖 3.3 可線上更換單元

維修流程中，由於LRU的失效必源於其組成份子「SRU」或「DP」的功能喪失，故送達具有維修能力的場站時，則發出對SRU或DP存貨的需求訊號，並予以置換，而被置換下的零件若屬於可維修單元（SRU），則進入維修廠（repair shop）執行維修作業，否則立即拋棄，如圖3.4所示。

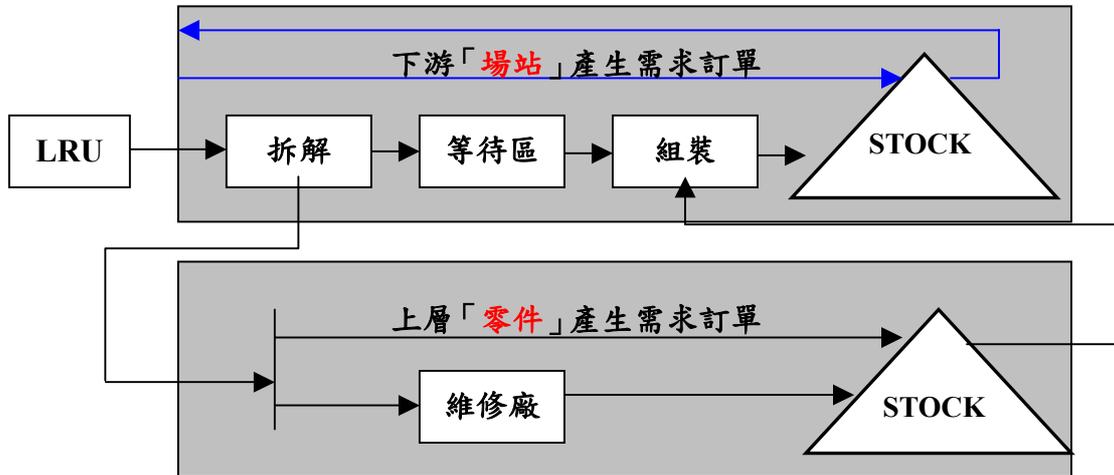


圖 3.4 LRU 維修流程

3.4 真實需求分配

為避免系統零件的失效模式在卜瓦松分配的假設下可能造成的失真現象，而導致各單立存貨水準的錯估，本研究乃藉零件失效的歷史資料進行統計分析，以了解真實的需求分配。

當以上備份件補給架構、系統與零件屬性、失效維修行為、以及真實需求分配等參數資料都已知的情況下，本研究將在各場站單位皆為 $(S_{ij} - 1, S_{ij})$ 的存貨補給策略下，發展適應各類需求分配的最適存貨水準 (S_{ij}) 求解模型，其中 i 代表著不同系統零件的代號， j 則代表不同場站單位的名稱。

第四章 研究模型與方法

4.1 研究模型

本研究為有效呈現零件的真實需求分配所帶來的影響，乃藉由間斷事件模擬 (discrete event simulation) 來進行模型程式的建構，用以評估武器系統的妥善率績效，模型程式內容不僅考量了上章節所提及的備份件補給體系、系統與零件屬性、失效維修行為、以及真實需求分配等等相關的屬性，更可以適用於其他種類的武器系統又或機台設備而滿足一般性 (general)。

為了有效率發展最佳化成本與效益曲線 (C/E curve)，本研究乃採用邊際搜尋法 (marginal search)，最近的文獻中又或稱之為貪婪法 (greedy algorithm)，其主要概念為：在現存狀態下，選擇增加單位成本所能為目標式帶來最大貢獻的變數予以加碼，繼而形成新的狀態並重複進行以上行為。邊際搜尋法若應用於本研究中，則變數必須考量系統零件 i 與場站單位 j 的所有組合「 S_{ij} 」，邏輯如下：

$$\text{步驟一：計算 } \Delta P_{ij} = \frac{A(\bar{s} + e_{ij}) - A(\bar{s})}{c_i} \forall i, j$$

$$\text{步驟二：選擇 } (i^*, j^*) = \arg \max_{i, j} (\Delta P_{ij})$$

$$\text{步驟三：} \bar{s} = \bar{s} + e_{i^*j^*}$$

步驟四：重複以上直到達到「目標妥善率」又或「預算上限」。

符號解釋：

s_{ij} ：零件 i 在場站單位 j 的存貨水準

\bar{s} ：補給體系所有存貨水準的矩陣， I (零件數) \times J (場站數) 矩陣

$A(\bar{x})$ ： \bar{x} 存貨水準矩陣的平均系統妥善率

c_i ：零件 i 的成本

e_{ij} ：第 i 列第 j 行值為 1，其它皆為 0 的矩陣

ΔP_{ij} ：於場站 j 增加零件 i 一單位存貨，單位成本所增加的妥善率

值得注意的是，當邊際搜尋法搭配模擬程式進行存貨配置的最佳化時，必會產生「求解時間過長」的問題。舉凡備份件補給體系中，若武器系統由 31 項零件所構成，而補給架構包含 10 個場站單位，則一輪的邊際搜尋必須執行 310 個模擬實驗，在每次模擬實驗必須執行十個隨機種子 (seeds)，而每次模擬時間為一分鐘的情況下，則每增加一個零件就必須花費 51.67 小時 (約 2.15 天)。主要原因可歸納成下列兩點，其一乃邊際搜尋法變數過多所造成；其二乃模擬程式本身執行時間的限制，由於模擬過程為正確地估算母體平均數則必須執行多組隨機亂數值 (random seed)，這也就導致時間不可避免的耗費。

為了有效節省搜尋所耗費的時間，本研究特藉備份件存貨配置最佳化的商用軟體 OPUS10 之幫助，其假設零件失效行為皆服從卜瓦松分配，選擇合適的妥善率之最佳配置作為邊際搜尋的起始解，主要是因為存貨配置在最佳化過程中所描繪的成本與效益曲線皆具有「欲增加單位妥善率會隨著妥善率上升而必須花費更多的成本」的特性，如圖 4.1 所示，在 85% (or 90%) 的妥善率區隔下，明顯發現紅色虛線右側成本遠大於左側，而此成本即代表著各種零件庫存水準的增加，因此若能在現有存貨水準 \bar{x} 下藉由模擬程式進行服從真實需求分配的邊際調整作業，即能使整個備份件補給體系的總營運成本大幅下降。

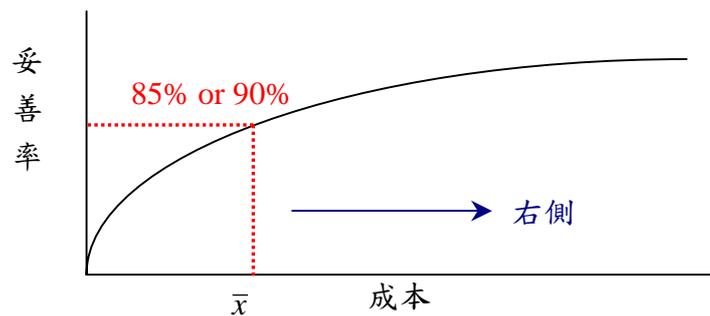


圖 4.1 C/E curve

此外，本研究為解決變數維度過多而造成求解空間太大 ($S_{ij}, \forall i, j$) 的問題，乃藉由缺貨時間此衡量指標來確認下次改善的「重要」零件，目的在於降低所有變數組合 S_{ij} 中的 i (零件) 維度；並根據零件維修特性 (LRU、DU、SRU 以及 DP) 針對備份件補給體系之架構進行簡化作業，目的在於降低所有變數組合 S_{ij} 中的 j (單位) 維度，以利於邊際搜尋求解時間的有效縮短；並自動監控模擬程式執行邊際搜尋的過程，以動態刪除對增加妥善率毫無貢獻度 ($\Delta Availability = 0$) 的無效變數，模型架構如圖 4.2 所示。

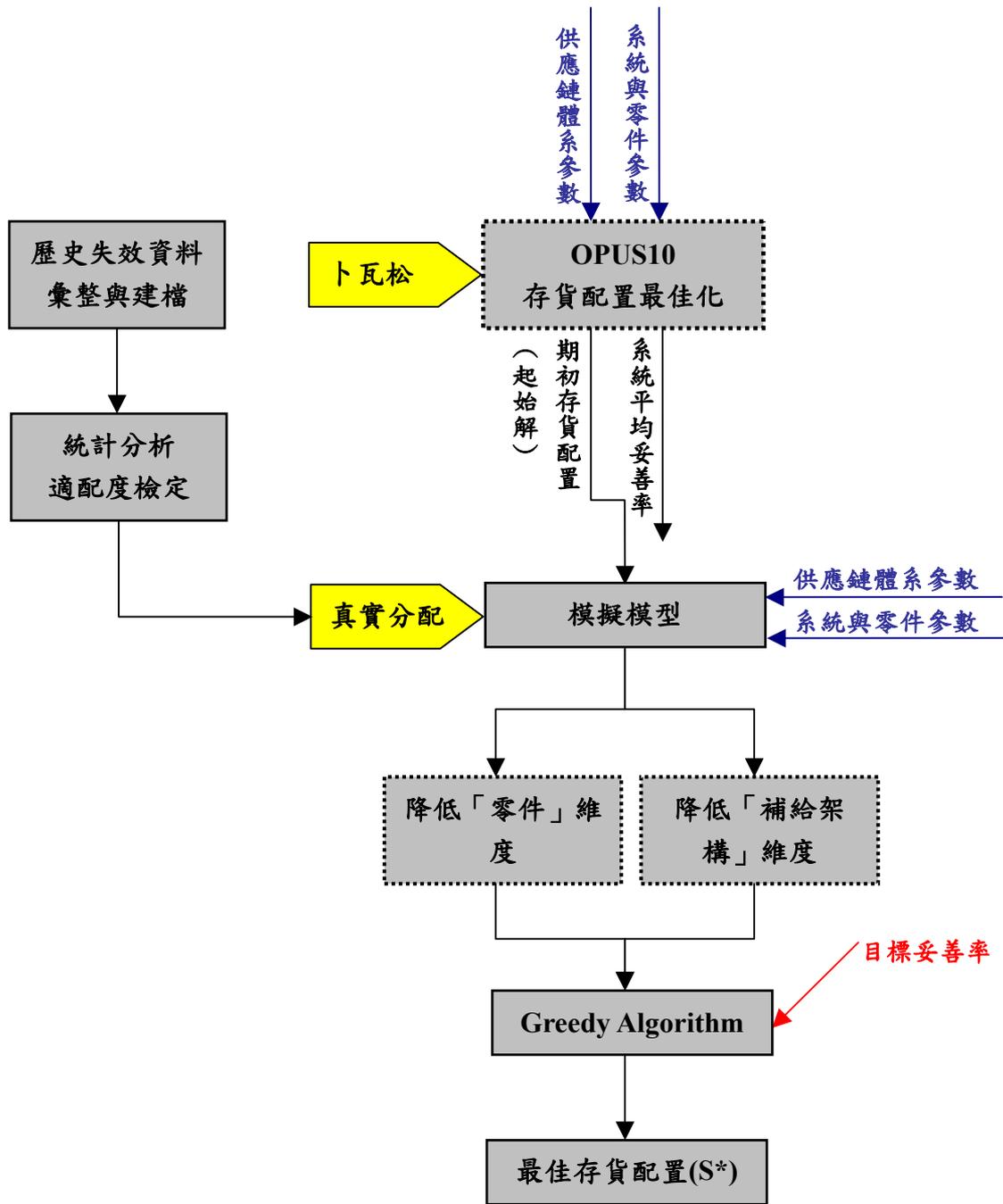


圖 4.2 研究模型

4.2 研究方法

本研究乃藉由模擬程式來呈現真實需求分配的影響，並利用邊際搜尋法有效取得最佳備份件存貨配置及發展最佳化成本與效益曲線，為了改善最佳化過程中的模擬時間，擬由「起始解」、「解空間」兩方向來探討之。

4.2.1 起始解

由圖 4.1 C/E curve 的曲線特性可知：隨著妥善率的上升，欲增加單位妥善率必須花費更多備份件存貨配置成本，因此若我們能針對 85% (or 90%) 右側成本進行改善作業，即可在較短的時間內節省絕大多數的成本，故邊際搜尋法的存貨配置起始解主要藉由商用軟體 OPUS10 來快速取得 85% 或 90% 的最佳存貨配置。

OPUS10 為一求解備份件存貨配置最佳化的商用軟體，它假設零件失效行為皆服從卜瓦松分配，其主要運算輸出變數包含每一種零件 i 在每一個單位 j 的存貨請購點與請購量 (s_{ij}, S_{ij})、系統平均妥善率 (availability, A) 以及補給體系的總營運成本 (total support cost, TSC) 三項。主要的運算輸入參數分別為 C^{re} 、 T^{re} 、 T_{jo}^{tr} 、

C_{jo}^{tr} 、 T_{ij}^{ma} 、 F_{ij}^{ma} 、 U_j 、 P_i 、 FR_i 以及 Q_i ，這些參數與變數分別說明如下：

(1) 輸入參數

- C^{re} : 單位外購成本；
- T^{re} : 向外部供應商的外購前置時間；
- T_{jo}^{tr} : 第 j 個單位與第 o 個單位之間的運輸時間；
- C_{jo}^{tr} : 第 j 個單位與第 o 個單位之間的運輸成本；
- F_{ij}^{ma} : 第 j 個單位對於第 i 個零件的維護能力；
- T_{ij}^{ma} : 第 j 個單位對於第 i 個零件的維護時間；
- U_j : 第 j 單位的系統利用率；
- FR_i : 第 i 零件的失效率；
- P_i : 第 i 種零件的價格；
- Q_i : 第 i 種零件於每部機台的配置數量；

(2)輸出變數

A : 系統平均妥善率；

TSC : 供應鏈的總營運成本；

(s_{ij}, S_{ij}) : 第 j 個單位對於第 i 種零件的存貨配置政策；

因此，我們可以把 OPUS10 的輸入參數以及輸出變數之間的函數關係式表達成下式：

$$(TSC, A, s_{ij}, S_{ij}) = f(C^{re}, T^{re}, T^{tr}, C^{tr}, F^{ma}, T^{ma}, U_j, FR_i, P_i, Q_i)$$

其等式的右邊代表補給體系的輸入參數，等式的左邊代表補給體系的輸出變數，函數 f 則代表 OPUS10 軟體。意即在一補給體系中，若給定外購時間與成本、單位之間運輸時間與成本、單位對零件的維修能力與時間、以及零件價格、失效率與零件數量等等後，即可以計算出系統總營運成本、系統總平均妥善率以及最佳存貨配置，如圖 4.3 所示。

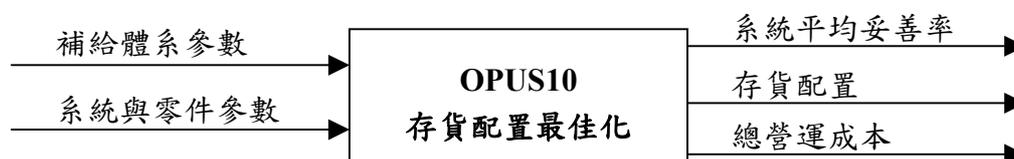


圖 4.3 OPUS10 輸入參數與輸出變數關係

4.2.2 解空間

為有效縮減求解空間，本研究提出以下四種方法：(一) 零件依據平均缺貨時間進行重要性排序並挑選缺貨嚴重者；(二) 刪除補給體系中不需要的場站單位或稱為冗站；(三) 場站單位依據零件存貨重要性予以分群；(四) 動態排除邊際搜尋中對增加妥善率毫無貢獻度的變數。本節將針對以上方法予以詳細說明。

4.2.2.1 重要零件

重要零件的評斷主要依據該零件的缺貨程度來衡量。場站單位對於特定零件的缺貨量（欠撥量）一般定義成需求未被滿足的數量，而需求未被滿足的定義在本研究中則以等待時間來表示：從一零件訂單在場站的倉儲位置發生，直到處理

掉被要求的訂單為止。若需求產生而零件正好在手中時，則等待時間即為 0；否則將會持續呈現待料狀況直到較高層級該零件的存貨補到。最後特定零件的平均缺貨時間若高於設定合適的門檻值者，則列入進行邊際搜尋的零件對象，如此一來即可有效縮減 S_{ij} (零件-場站組合) 的「 i 」(零件) 維度。

只有直接從系統產生的需求片段才會被計算在內，故場站倉儲位置只需考量直接支援系統的單位 (O 層級)，如圖 4.4 所示。此乃因為系統操作單位發生零件失效而產生需求時，將直接向這些場站執行尋料動作，較高層級的零件存貨也必須透過它們才能支援系統單位，這些場站倉儲即扮演著存貨樞紐的角色，若發生缺料將會直接導致系統當機時間的延長。

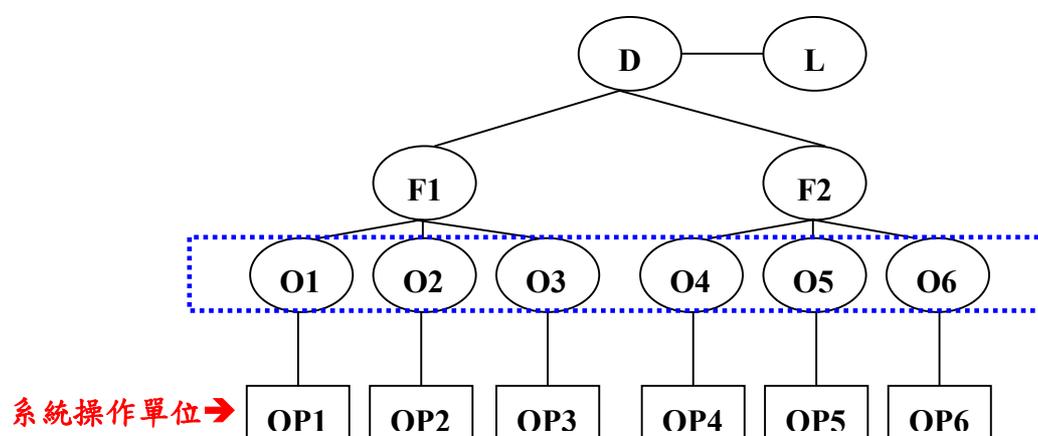


圖 4.4 補給體系架構概圖 2

此外，由於系統使用單位所發出的零件訂單，其屬性皆是屬於線上可以更換單元 (LRU、DU)，因此如果取出的重要零件屬於 LRU 時，則必須再將其成員零件「SRU」與「DP」納入邊際搜尋的對象，如圖 4.5 所示。

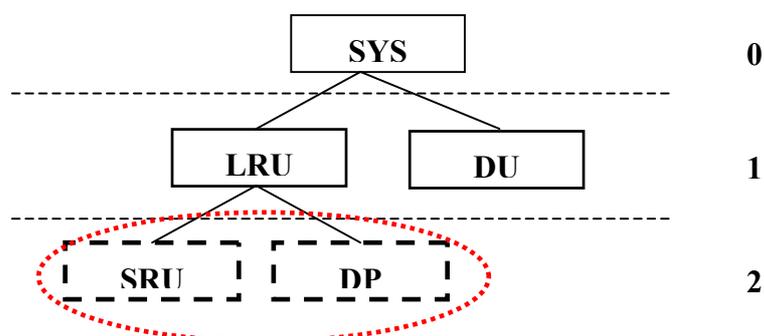


圖 4.5 系統零件結構概圖 2

4.2.2.2 刪除冗站

冗站的判斷取決於零件存貨的必要性，隨著零件屬性的不同即產生不同的需

求型態，亦相對應著不同冗站的定義，以下將針對可線上更換單元與不可線上更換單元分別討論之：

(1) 可線上更換單元-LRU、DU

各場站此類型存貨的目的主要為滿足下游產生的需求，即為系統操作單位該零件失效所造成的需求，故在系統具有相同利用率下，若上下游相鄰的場站擁有相同數目的系統，即補給體系產生單分支的結構 (single branch)，如圖 4.6 所示，則視較高層場站冗站；如果系統具有不同的利用率，則必須再考量系統操作時間所造成期望需求個數的差異 (操作時間 \times 失效率)，而不單以系統數目來簡略衡量。

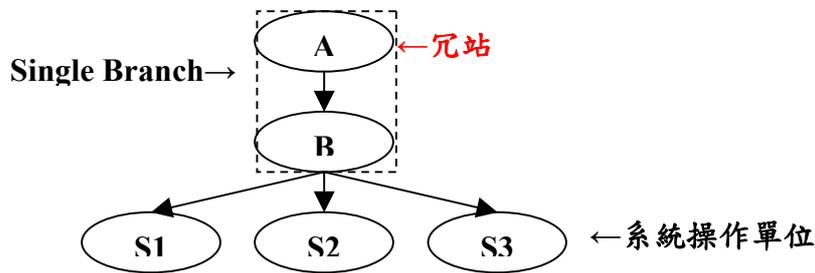


圖 4.6 單分支結構 1

(2) 不可線上更換單元-SRU、DP

各場站此類型存貨的目的主要為滿足當地「可維修的線上更換單元 (LRU)」其內部組成單元的置換 (replacement)，再者才是滿足下游因此置換行為所產生的遞補需求，舉凡缺一補一之存貨遞補策略。故，SRU 與 DP 僅限存於具有置換能力之最低層級以上的場站單位，否則即定義為冗站，進而判斷補給體系是否產生單分支的結構，如此亦視為冗站。舉凡補給體系若共有五個層級 (L、D、I、O、以及 OP)，若於 D 層級才對該 LRU 存有置換能力，則「I、O、OP」則被視為冗站，又「L」與「D」若呈現單分支的現象，則「L」亦需摒除在外，如圖 4.7 所示。

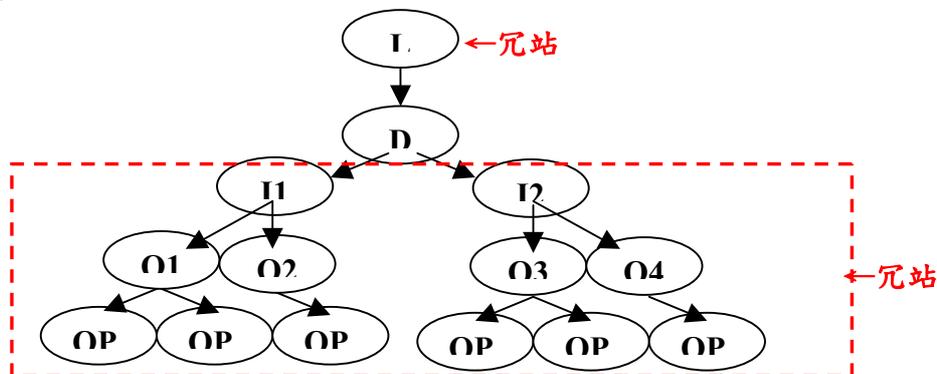


圖 4.7 單分支架構 2

4.2.2.3 場站分群

場站分群作業主要根據存貨重要性來進行，本研究將存貨視為一種「避險」工具：能夠避免愈多的缺貨風險則代表此場站的存貨愈顯重要，並以公式 $I = T \times N$ 來表達，其中 I 代表存貨絕對重要性， T 代表上游存貨到來的運輸時間， N 則代表單位時間內下游期望需求量，若系統具有相同的利用率，則 N 可簡略成計算下游系統數目，否則必須考量個別操作時間所造成的影響。以下將以兩個例子分別說明 N 與 T 的含義：

- (1) 在系統利用率相同之下，若相同層級的兩場站（A 與 B），A 場站下游擁有多部系統，B 場站只擁有一部系統，則 A 場站的缺貨風險乃是 B 場站的三倍大，故存貨重要性乃 A 強於 B，如圖 4.8 所示。

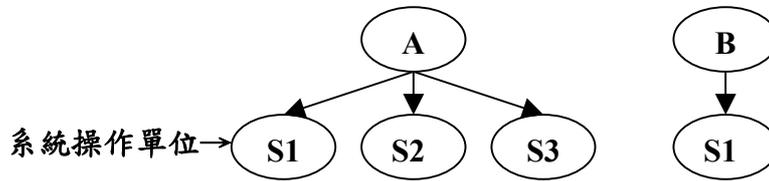


圖 4.8 分群例 1

- (2) 在下游需求率相同之下，若相同層級的兩場站（A 與 B），A 場站與上游存貨位置的運輸時間長達 3 天，B 場站只需要 1 天，則 A 場站的缺貨風險乃是 B 場站的三倍大，故存貨重要性乃 A 強於 B，如圖 4.9 所示。

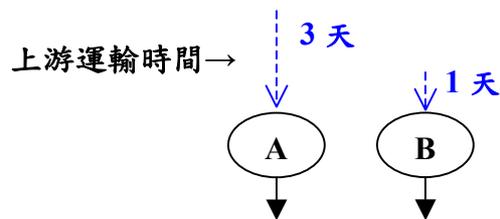


圖 4.9 分群例 2

4.2.2.4 動態刪除

動態刪除乃在於排除邊際搜尋中的無效變數，也就是對妥善率毫無貢獻度者，故以 $\Delta Availability$ 此指標來衡量之。舉凡，增加零件 i 在場站 j 對妥善率的增益為 0 時，代表著該零件位於此場站的存貨量已達飽和狀態，不再需要於此場站增加該零件存貨，也不必再針對其「零件-場站」進行模擬評估。

最後，藉由圖 4.10 解空間縮減模型來呈現四種方法的作用與所占的角色。
 註 $i \rightarrow$ 零件； $j \rightarrow$ 場站； $I \rightarrow$ 零件集合； $J \rightarrow$ 場站集合； $g \rightarrow$ 群組； $G \rightarrow$ 群組集

合。

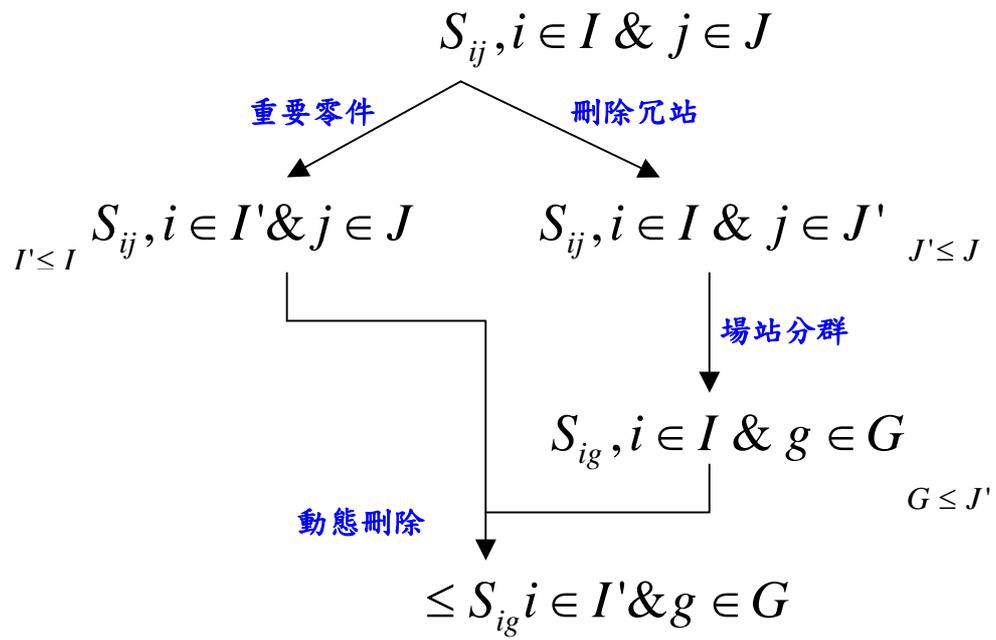


圖 4.10 解空間縮減模型

第五章 實例驗證

本章將以「X 武器系統」為例，進而說明本研究備份件補給體系存貨最佳化求解模型，將實驗事前資訊與執行結果予以呈現，並與卜瓦松需求分配假設下的求解模型相互比較。

5.1 案例情境

5.1.1 補給體系架構

本研究案例之備份件補給架構即如圖 5.1 所示，共有十個場站，每個場站皆有不同等級的維修能力與庫存水準，採取 $(S_{ij} - 1, S_{ij})$ 的遞補邏輯，並可分成三種類型，其中「維修庫存中心 (DEPOT)」代表同時具有零件倉儲與維修功能，「儲存區 (STORE)」則代表只具倉儲但無維修能力，而「系統操作單位 (OP)」不具倉儲與維修能力。此外，針對運輸體系而言，單位與單位之間各自擁有 7 至 14 天的運輸時間，而針對系統使用單位而言，單位內各自可擁有一部系統，且每部系統利用率設定成一天執行八個小時。

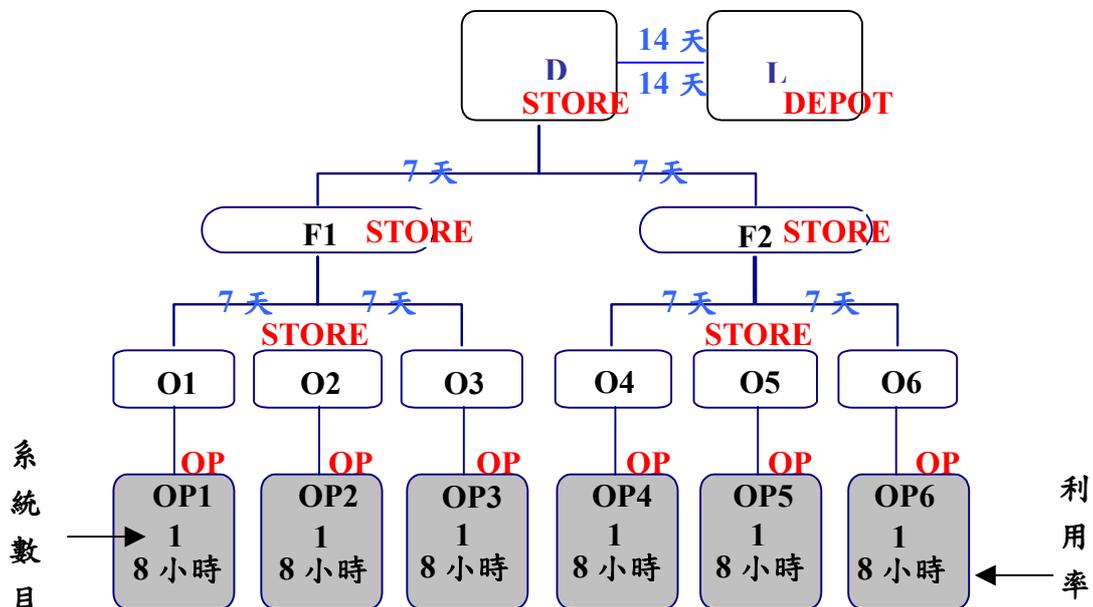


圖 5.1 X 補給體系架構

5.1.2 系統零件結構

本研究案例之系統零件結構即如圖 5.2 所示，共有 31 項零件，每項零件各自擁有不同的單價以及個數，而就零件維修特性而言，可分成「LRU」與「DU」兩種類型，其維修作業皆於最高層級場站（L）進行，值得注意的是：由於特殊原因，本例中四項零件（CSP7、CSP12、CSP28、CSP29）於「O」層級乃存在存貨上的限制，視為不可存取。

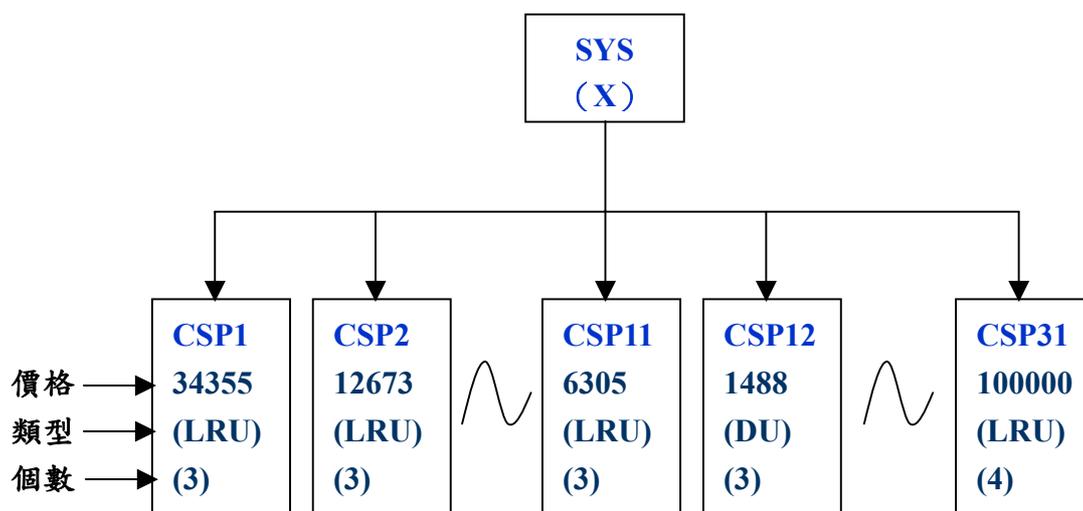


圖 5.2 X 系統零件結構

5.1.3 真實需求分配

本研究乃針對 X 武器系統的三十一項關鍵零件，蒐集其民國 85 至 92 年所發生的失效資料，取其間隔時間並藉由統計方法進行卡方適配度檢定，結果如下表 5.1 所示。

表 5.1 最適失效分配（單位：小時）

零件代號	分配類型	參數一	參數二
CSP1	Normal	1836.000000	985.257200
CSP2	Weibull	1.673610	1189.085069
CSP3	Weibull	2.801588	1565.001937
CSP4	Exp	7368.718420	
CSP5	Exp	41667.000000	
CSP6	Exp	41667.000000	

零件代號	分配類型	參數一	參數二
CSP7	Lognormal	619.220819	465.800817
CSP8	Exp	6093.000000	
CSP9	Normal	734.833333	262.631618
CSP10	Normal	947.875000	387.690391
CSP11	Weibull	3.159709	2296.805596
CSP12	Weibull	3.841071	782.502733
CSP13	Exp	10369.669440	
CSP14	Weibull	1.645066	855.600883
CSP15	Gamma	1.512847	614.379260
CSP16	Exp	41667.000000	
CSP17	Exp	554.037037	
CSP18	Exp	41667.000000	
CSP19	Weibull	1.579133	881.921481
CSP20	Exp	1053.000000	
CSP21	Weibull	1.939028	1999.663308
CSP22	Gamma	0.914441	921.259713
CSP23	Gamma	1.767493	309.228966
CSP24	Lognormal	1637.590774	802.001181
CSP25	Lognormal	805.489358	477.921881
CSP26	Normal	1770.142857	927.811840
CSP27	Weibull	1.843485	809.279662
CSP28	Weibull	2.948155	653.145869
CSP29	Exp	736.300000	
CSP30	Weibull	1.821618	789.915852
CSP31	Weibull	3.289314	2300.646068

5.2 研究流程

本研究模型乃將目標妥善率設定成 90%，並藉由 OPUS10 商用軟體取得妥善率在 90.45% 下的最佳存貨配置，作為邊際搜尋方法的初始解，由此解發展真實需求分配（非皆為卜瓦松）下的成本與效益曲線，如圖 5.3 所示。

最後，為了比較「本研究模型（無卜瓦松需求假設）」與「過去模型（有卜瓦樣需求假設）-OPUS10」的成效差異，乃藉由本研究所建構之適用多種分配的模擬平台，取兩者在真實需求分配設定下具相同妥善率表現的個別存貨配置，藉

比較其「總零件成本」來判斷孰優孰劣。

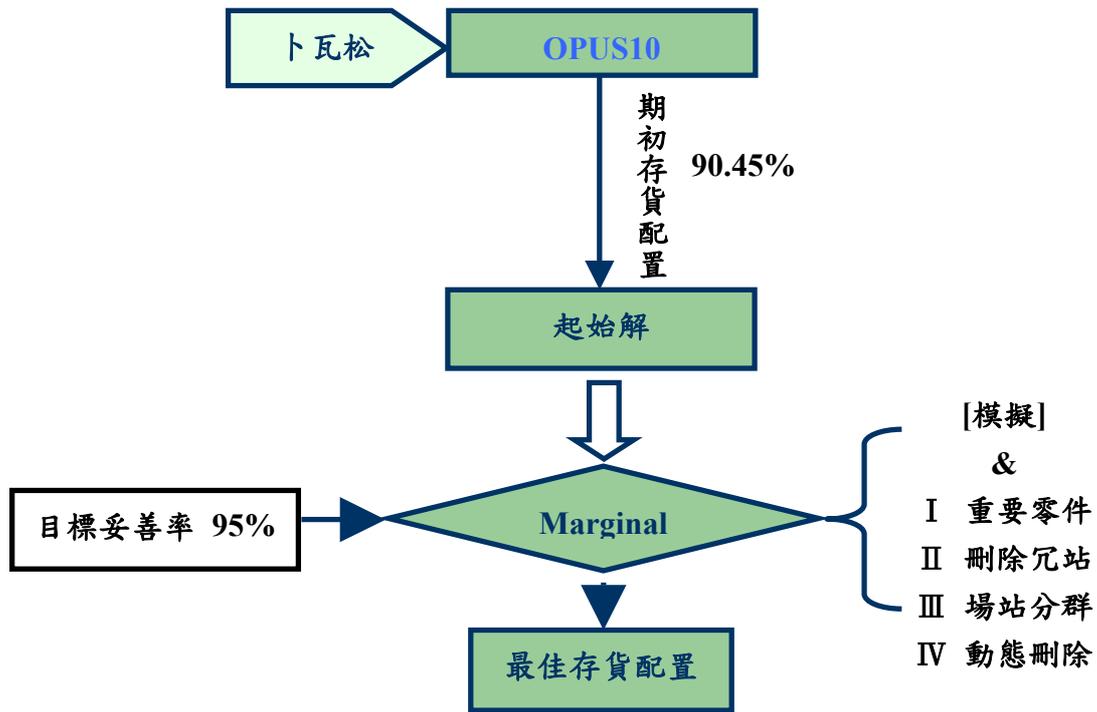


圖 5.3 研究流程

5.2.1 起始解

藉由 OPUS10 商用軟體取得妥善率在 90.45% 下的最佳存貨配置作為起始解，如表 5.2 所示，註：縱向欄位代表各零件名稱；橫向欄位代表各場站名稱。

表 5.2 存貨配置

	L	D	F1	F2	O1	O2	O3	O4	O5	O6
CSP1	5	1	1	1	0	0	0	0	0	0
CSP2	6	1	1	1	1	1	1	1	1	1
CSP3	5	1	0	0	1	1	1	1	1	1
CSP4	6	1	1	1	1	1	1	1	1	1
CSP5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CSP6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CSP7	10	2	1	1	0	0	0	0	0	0
CSP8	8	0	1	1	1	1	1	1	1	1
CSP9	17	0	1	1	2	2	2	2	2	2
CSP10	13	0	0	0	2	2	2	2	2	2
CSP11	4	1	0	0	1	1	1	1	1	1

CSP12	9	0	2	2	0	0	0	0	0	0
CSP13	12	0	1	1	2	2	2	2	2	2
CSP14	6	1	0	0	1	1	1	1	1	1
CSP15	5	1	0	0	1	1	1	1	1	1
CSP16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CSP17	8	2	1	1	1	1	1	1	1	1
CSP18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CSP19	6	1	0	0	1	1	1	1	1	1
CSP20	7	2	1	1	1	1	1	1	1	1
CSP21	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1
CSP22	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
CSP23	8	2	1	1	1	1	1	1	1	1
CSP24	4	1	1	1	0	0	0	0	0	0
CSP25	8	2	1	1	1	1	1	1	1	1
CSP26	5	1	1	1	0	0	0	0	0	0
CSP27	6	2	1	1	1	1	1	1	1	1
CSP28	14	2	1	1	0	0	0	0	0	0
CSP29	6	1	1	1	0	0	0	0	0	0
CSP30	8	2	1	1	1	1	1	1	1	1
CSP31	4	1	1	1	0	0	0	0	0	0

5.2.2 重要零件

以 OPUS10 所得之起始解代入模擬，在執行過許多隨機種子後，將平均缺貨時間大於 2 小時者視為重要零件，故我們挑選了 CSP1、CSP7、CSP8、CSP9、CSP10、CSP26、CSP29 七項零件作為邊際搜尋的對象，如表 5.3 所示。

表 5.3 平均缺貨時間

零件	平均缺貨時間	零件	平均缺貨時間	零件	平均缺貨時間
CSP1	2:02:48:00.0033	CSP2	19:12.0000	CSP3	0.0000
CSP4	28:48.0000	CSP5	0.0000	CSP6	0.0000
CSP7	2:07:12:00.0000	CSP8	2:24:00.0000	CSP9	13:16:48.0000
CSP10	1:01:12:00.0000	CSP11	0.0000	CSP12	0.0000
CSP13	0.0000	CSP14	0.0000	CSP15	0.0000
CSP16	0.0000	CSP17	43:12.0000	CSP18	0.0000

零件	平均缺貨時間	零件	平均缺貨時間	零件	平均缺貨時間
CSP19	0.0000	CSP20	24:00.0000	CSP21	0.0000
CSP22	14:24.0000	CSP23	0.0000	CSP24	1:40:48.0000
CSP25	0.0000	CSP26	2:03:31:12.0000	CSP27	0.0000
CSP28	0.0000	CSP29	6:14:24.0000	CSP30	4:48.0000
CSP31	1:40:48.0000				

5.2.3 刪除冗站與場站分群

在 OP 層級系統數目與利用率相同之下，場站「L」與場站「D」則形成單分支結構，故將 L 視為冗站；並可依據存貨重要性而將場站分成三群 (G1、G2、G3)，如圖 5.4 所示。

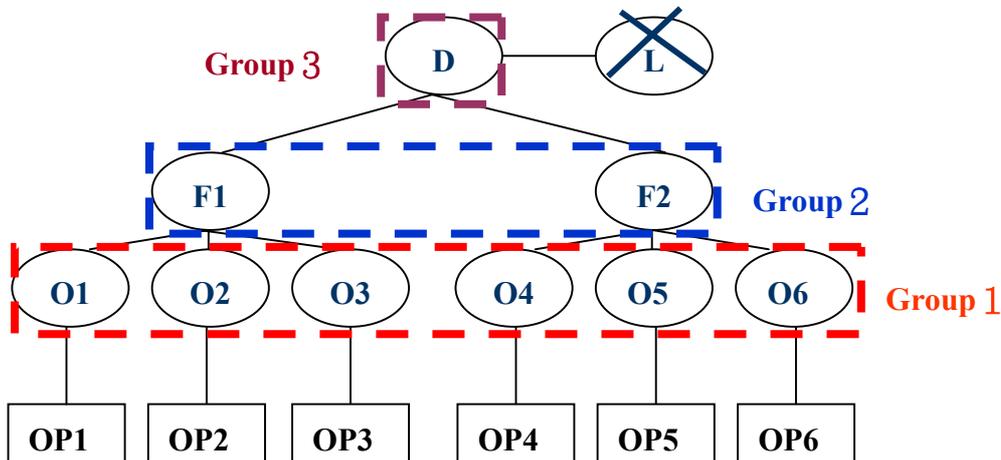


圖 5.4 冗站與分群

5.2.4 動態刪除與邊際結果

「零件-場站」變數動態刪除的部分，於此乃藉由邊際搜尋過程中變數個數呈現遞減狀態來表達，而邊際搜尋中的零件存貨與妥善率增加過程即如表 5.4 所示，其中變數個數即為表中最後一欄位數值。

表 5.4 邊際過程

順序	場站群組	零件名稱	妥善率的增量	零件-場站數
1	G3	CSP8	0.003819040000	19
2	G1	CSP9	0.000558680000	15
3	G1	CSP9	0.000273270000	12

4	G2	CSP10	0.000304090000	10
5	G3	CSP29	0.006975840000	9
6	G2	CSP10	0.000009920000	9
7	G3	CSP10	0.000068300000	9
8	G2	CSP10	0.000055190000	9
9	G3	CSP7	0.000528530000	8
10	G2	CSP7	0.001125100000	7
11	G1	CSP1	0.001069560000	6
12	G1	CSP10	0.000020400000	5
13	G1	CSP26	0.001268180000	5
14	G3	CSP29	0.000484500000	4
15	G3	CSP29	0.000069760000	4
16	G1	CSP1	0.000158960000	4

此過程所花費的時間為：

$$\begin{aligned}
 & (\text{零件-場站總合}) \times (\text{seed 數}) \times (\text{模擬時間}) \\
 & = 135 \times 10 \times 1 (\text{分}) \\
 & = \mathbf{22.5 (\text{小時})}
 \end{aligned}$$

假若不經「解空間」縮減作業，則必須花費：

$$\begin{aligned}
 & (\text{零件數}) \times (\text{場站數}) \times (\text{seeds 數}) \times (\text{模擬時間}) \times (\text{總增加零件數}) \\
 & = 31 \times 10 \times 10 \times 1 (\text{分}) \times 50 \\
 & = \mathbf{2583.33 (\text{小時}) = 107.63 (\text{天})}
 \end{aligned}$$

因此，本研究所應用的解空間縮減方法，確實縮短了執行時間，其縮減幅度高達 100 倍 (2583.33 / 22.5)。

5.2.5 結果比較

針對「過去模型 (卜瓦松需求假設) -OPUS10」，取其成本與效益曲線妥善率為 94.94% 的最佳存貨配置 (A 方案)，代入本研究的模擬平台，其失效需求乃採取真實分配，執行 25 個亂數種子，結果如表 5.5 所示：針對「本研究模型 (無

卜瓦松限制)」，根據上述邊際搜尋產生的成本與效益曲線，取其第十六次加碼後的最佳存貨配置 (A' 方案)，亦代入模擬平台執行 25 個亂數種子，結果如表 5.5 所示。我們可以發現：在 95% 的信心水準下，沒有足夠的證據說明兩者之間存在顯著差異。

表 5.5 敘述統計與統計檢定

A(OPUS10)		A'(本研究)		z 檢定：兩個母體平均數差異檢定		
平均數	93.43%	平均數	93.27%	平均數	0.934339	0.932725
中間值	96.53%	中間值	96.27%	已知的變異數	0.002362	0.002304
標準差	4.86%	標準差	4.80%	觀察值個數	25	25
變異數	0.24%	變異數	0.23%	假設的均數差	0	
範圍	14.08%	範圍	14.08%	z	0.11807	
最小值	83.81%	最小值	83.81%	P(Z<=z) 單尾	0.453006	
最大值	97.89%	最大值	97.89%	臨界值：單尾	1.644853	
個數	2500.00%	個數	2500.00%	P(Z<=z) 雙尾	0.906012	
				臨界值：雙尾	1.959961	
→ Not Reject Ho						

然而，A 方案的存貨配置成本高達 12,002,843，A' 方案存貨配置成本僅需要 10,717,966，故藉由本研究模型來進行求解最佳存貨配置，在相同妥善率表現下，可以節省高達 10 % 左右的存貨成本。

第六章 結論與未來研究方向

過去備份件的相關文獻並無人在多階補給架構與多階武器系統結構，以及有限維修能力之下，針對不符從卜瓦松失效行為的零件，進行最佳化存貨配置的研究。故本研究提出一個最佳化求解模型，乃藉由模擬程式以有效呈現零件真實需求分配所帶來的影響，並且採用邊際搜尋法則以有效地發展最佳化成本與效益曲線，即在給定目標妥善率下之取的最小成本的存貨配置。於模型中，更藉快速取得搜尋初始解的構想來節省絕大部分的模擬執行時間，且同時「評選重要零件」、「刪除冗站」、「場站分群」、「變數動態刪除」進一步地縮小求解空間以節省時間。

由 X 系統個案中，本研究不僅說明零件失效行為並不完全符從卜瓦松分配模式，更在導入本研究提出得最佳化模型後，產生相對於過去模型高達 10% 以上的備份零件存貨成本之節省。因此，本研究所發展適用於多種不同零件失效分配之最佳化模型確實是必要的且可行的。

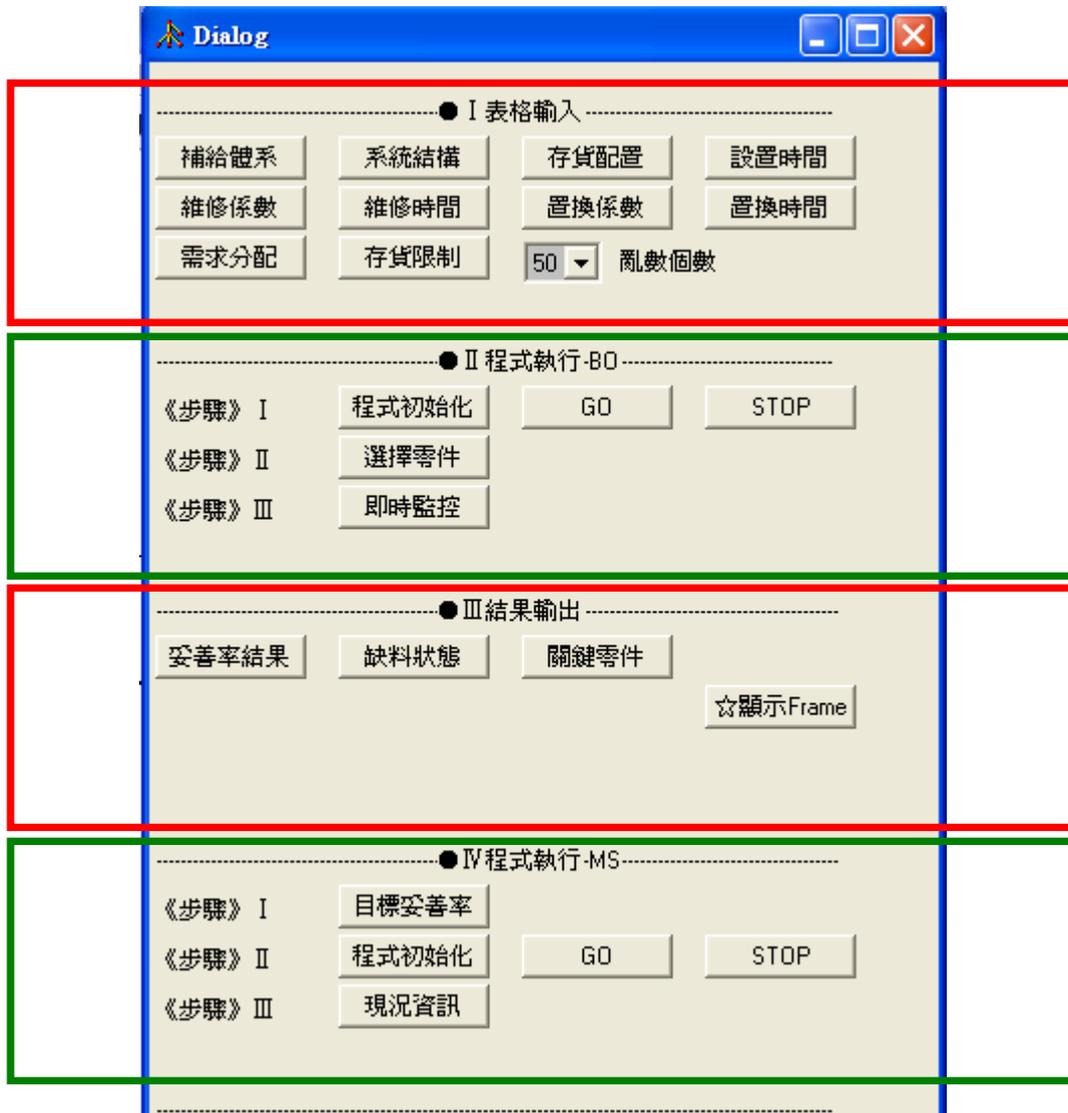
本研究目前只針對存貨水準進行最佳化求解作業，後續研究可針對有限維修能力，探討如何同時考量存貨水準，並且進行最佳化零件維修優序決策，或者於求解空間縮減方面進行探討，其中包含補給體系架構以及系統零件結構，使得本模型執行面更有效率。

參考文獻

- [1] Sherbrooke, C.C., 1968, “METRIC: Multi-Echelon Technique for Recoverable ItemControl”, *Operations Research* 16, 122-141.
- [2] Muckstadt, J, 1973, "A model for a multi-item, multi-indenture inventory system", *Management Science* 20, 472-481.
- [3] Slay, F.M., 1984, “VARY-METRIC: An Approach to Modeling Multi-Echelon Resupply when the Demand Process is Poisson with Gamma Prior”, Report AF301-3, LogisticManagement Institute, Washington, D.C.
- [4] Graves, S., 1985, “A multi-echelon inventory model for a repairable item with one-for-one replenishment, *Management Science* 31, 1247 – 1256.
- [5] Sherbrooke, C.C., 1986, "VARI-METRIC: improved approximations for multi-indenture, multi-echelon availability models", *Operations Research* 34, 311-319.
- [6] Gross, D., D.R. Miller and R.M. Soland, 1983, “A closed queueing network model for multi-echelon repairable item provisioning”, *IIE Transactions* 15(4), 344-352.
- [7] Albright, S.C. and A. Soni, 1988, “Markovian multi-echelon repairable inventory system”, *Naval Research Logistics Quarterly* 35, 49-61.
- [8] Gupta, A. and S.C. Albright, 1992, “Steady-state approximations for multi-echelon multiindentured repairable-item inventory system”, *European Journal of Operational Research* 97(3), 340-353.
- [9] Albright, S.C. and A. Gupta, 1993, “Steady-state approximation of a multi-echelon multiindentured repairable-item inventory system with a single repair facility”, *Naval Research Logistics* 40(4), 479-493.
- [10] Diaz, A. and M.C. Fu, 1997, “Models for multi-echelon repairable item inventory systems with limited repair capacity”, *European Journal of Operational Research* 97, 480-492.

- [11] Aronis, K.P., 2004, Magou, I., Dekker, R., Tagaras, G., "Inventory Control of Spare Parts Using a Bayesian Approach: A Case Study," *European Journal of Operational Research*, vol.154, pp.730-739.
- [12] Kabir, A.B.M.Z. and H.A. Farrash, 1996, "Simulation of an integrated age replacement and spare provisioning policy using SLAM", *Reliability Engineering and System Safety* 52, 129-138.
- [13] Sarker, R. and A. Haque, 2000, "Optimization of maintenance and spare provisioning policy using simulation", *Applied Mathematical Modelling* 24, 751-760.
- [14] Marseguerra, M., 2005, Zio, E., Podofillini, L., "Multiobjective spare part allocation by means of genetic algorithms an Monte Carlo simulation", *Reliability Engineering and System Safety* 87, 325-335.
- [15] Ahmed, M.A., 1997, Alkhamis, T.M., Hasan, M., "Optimizing discrete stochastic systems using simulated annealing an simulation", *Computers and Industrial Engineering* 32, 823-836.
- [16] Alkhamis, T.M. and M.A. Mohamed, 2005, "Simulation-base optimization for repairable systems using particle swarm algorithm", *2005 Winter Simulation Conference*.

附錄 使用者介面說明



本程式使用介面主要分成

(1)「表格輸入」、(2)「程式執行-BO」、(3)「結果輸出」以及(4)「程式執行-MS」四個部分，使用步驟如下：

《步驟一》表格輸入

→目的：[輸入模擬情境相關資料](#)

主要包含「補給體系參數」、「系統零件參數」以及「存貨修護參數」三部分，並有隨機種子(seeds)數可供選擇

註：「存貨配置」的表格資料代表「邊際搜尋初始存貨配置解」

(EX OPUS10 妥善率 90%下的存貨配置解)

《步驟二》程式執行-Backorder Time

→目的：藉「平均缺貨時間」來篩選「重要零件」

- (1)首先必須先按下「程式初始化」此按鈕，以讀取步驟一的輸入資料
- (2)藉「GO」與「STOP」兩按鈕來執行或暫時停止程式之進行
- (3)於程式進行中，可以藉由「即時監控」按鈕來取得程式執行之進度
- (4)當程式執行完畢，則按下「選擇零件」根據平均缺貨時間來選取重要零件

《步驟三》結果輸出

→目的：呈現於規劃模擬種子數下 (EX 50 runs) 的模擬結果資訊

主要包含「妥善率結果」、「缺料狀態」以及「關鍵零件」三部分

《步驟四》程式執行-Marginal Search

→目的：藉邊際搜尋法來取得最佳化之成本效益曲線 (C/E curve)

- (1)首先按下「目標妥善率」此按鈕設定執行目標，預設值為 95%
- (2)再者必須按下「程式初始化」此按鈕，以讀取步驟二的產出-重要零件
- (3)藉「GO」與「STOP」兩按鈕來執行或暫時停止程式之進行
- (4)於程式進行中，可以藉由「現況資訊」按鈕來取得邊際最佳化之進度
- (5)當程式執行完畢，亦可藉「現況資訊」按鈕來取得最後結果

註：模擬程式於邊際搜尋過程中，會自動進行「刪除冗站」、「場站分群」、以及「動態刪除無效變數」三部分