

國立交通大學
工業工程與管理學系

碩士論文

多種需求分配下

備份件補給系統的存貨配置

A Inventory Allocation Model for Spare Part Logistic
Systems Under Multiple Demand Distributions

研究生：陳詠進

指導教授：巫木誠 博士

中華民國九十五年五月

多種需求分配下備份件補給系統的存貨配置

A Inventory Allocation Model for Spare Part Logistic Systems

Under Multiple Demand Distributions

研究生：陳詠進

Student: Yung-Chin Chen

指導教授：巫木誠博士

Advisor: Dr. Muh-Cherng Wu

國立交通大學

工業工程與管理學系



Submitted to Department of Industrial Engineering and Management

College of Management

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of Master of Science

In

Industrial Engineering

May 2006

Hsin-Chu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十五年五月

多種需求分配下備份件補給系統的存貨配置

研究生：陳詠進

指導教授：巫木誠博士

國立交通大學工業工程與管理學系

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。故本研究提出一個較佳化求解模型，首先乃藉商用軟體 OPUS10 取得一起始解；再者利用 eM-Plant 模擬平台建構一具考量多種需求分配之能力的評估程式；最後結合邊際配置法進行較佳化作業，並發展 4 個方法針對邊際演算法進行修正，以強化求解效率。而在 X 系統的個案中，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

A Inventory Allocation Model for Spare Part Logistic Systems Under Multiple Demand Distributions

Student : Yung-Chin Chen

Advisor : Dr. Muh-Cherng Wu

Institute of Industrial Engineering and Management
National Chiao Tung University

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

致謝

本論文得以順利完成，首先必須要感謝巫木誠教授在這兩年來的細心教導，除了相關學術領域的指引之外，在做事態度以及人際相處方面，也使得學生獲益良多，讓學生知道「態度」才能決定一個人的高度，也能夠自豪地說出「我不是假鈔，我是真材實料的」，在此致上最誠摯的謝意。同時，十分感謝口試老師許錫美博士、彭德保博士以及陳文智博士，針對論文提供了許多寶貴的意見，使學生的論文更臻完善，為我兩年的研究生涯劃上了完美的休止符。

在研究所這兩年中，感謝同門的林劭函、顏豪君、吳政翰、陳德珊以及盧威豪的陪伴、相互激勵與安慰。此外，感謝同研究室的徐楊康學長、蘇泰盛學長、施昌甫學長、謝岳霖學長以及林雅娟學姐，給我相當多的指導與鼓勵，與您們一起做研究讓我學到非常多的東西，感覺真的很棒、很充實。

最後要深深感謝我的父母親陳文英先生與盧美玉女士、哥哥詠隆，由於您們不斷地鼓勵與支持，讓我能夠埋首於論文學業上，衷心地感謝你們給予我的精神支持。僅以此論文獻給最敬愛的家人以及所有關心我的師長、學長姐與朋友們。

詠進

于 風城交大

2006-6-19

章節目錄

圖目錄.....	I
表目錄.....	II
第一章 緒論.....	01
1.1 研究動機.....	01
1.2 論文章節安排.....	03
第二章 文獻探討.....	04
2.1 需求限制卜瓦松.....	04
2.2 需求不限卜瓦松.....	05
2.3 文獻探討整理.....	06
第三章 研究問題與情境.....	08
3.1 補給架構屬性.....	08
3.2 系統零件屬性.....	08
3.3 失效維修程序.....	09
第四章 研究模型.....	11
4.1 模組 1：尋找起始解.....	11
4.1.1 OPUS10.....	11
4.1.2 決定起始解.....	13
4.2 模組 2：評估解的績效.....	14
4.3 模組 3：更新解.....	14
第五章 邊際演算化的修正.....	16
5.1 重要零件.....	16
5.2 減少站點考量.....	17
5.3 場站分群.....	18
5.2 動態刪除.....	20
5.3 解空間縮減小結.....	20
第六章 實例驗證一.....	22
6.1 案例一情境.....	22
6.1.1 補給體系架構.....	22
6.1.2 系統零件結構.....	23
6.1.3 真實需求分配.....	23

6.2 案例一求解過程.....	25
6.2.1 起始解.....	25
6.2.2 重要零件.....	27
6.2.3 刪除冗站與場站分群.....	27
6.2.4 動態刪除與邊際結果.....	28
6.2.5 案例一結果比較.....	29
第七章 實例驗證二.....	31
7.1 案例二情境.....	31
7.1.1 補給體系架構.....	31
7.2 案例二求解過程.....	32
7.2.1 起始解.....	32
7.2.2 重要零件.....	34
7.2.3 刪除冗站與場站分群.....	34
7.2.4 動態刪除與邊際結果.....	35
7.2.5 案例二結果比較.....	36
第八章 結論.....	39
參考文獻.....	40
附錄一.....	42
附錄二.....	43
附錄三.....	45



圖目錄

圖 1.1 補給體系架構概念圖.....	01
圖 1.2 系統零件結構概念圖.....	02
圖 3.1 零組件維修特性.....	09
圖 3.2 可線上更換單元.....	09
圖 3.3 LRU 維修流程.....	10
圖 4.1 研究模型.....	11
圖 4.2 OPUS10 (A).....	13
圖 4.3 OPUS10 (A_0).....	13
圖 4.4 C/E curve.....	14
圖 4.5 SIM (\bar{S}).....	14
圖 5.1 第一層倉儲位置.....	17
圖 5.2 子層零件示意圖.....	17
圖 5.3 單分支結構.....	18
圖 5.4 不具修護能力場站.....	18
圖 6.1 案例一 X 補給體系架構.....	22
圖 6.2 案例一 X 系統零件結構.....	23
圖 6.3 案例一求解過程.....	25
圖 6.4 案例一冗站與分群.....	28
圖 7.1 案例二 X 系統零件結構.....	31
圖 7.2 案例二求解過程.....	32
圖 7.3 案例二冗站與分群 1.....	35
圖 7.4 案例二冗站與分群 2.....	35

表目錄

表 2.1 文獻整理.....	07
表 3.1 維修特性.....	09
表 6.1 最適失效分配.....	24
表 6.2 案例一存貨起始解.....	26
表 6.3 案例一平均缺貨時間.....	27
表 6.4 案例一邊際過程.....	28
表 6.5 案例一敘述統計與統計檢定.....	29
表 6.6 案例一結果整理.....	30
表 7.1 案例二存貨起始解.....	33
表 7.2 案例二平均缺貨時間.....	34
表 7.3 案例二邊際過程.....	36
表 7.4 案例二敘述統計與統計檢定.....	37
表 7.5 案例二結果整理.....	38

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或實戰時期能夠有效運作，即可穩定地執行保防作業進而提升整體防衛能力，因此如何縮短系統當機時間以維持設備正常運作將是關鍵所在。一般為了有效降低武器的當機時間所造成的安全風險或產能損失，乃憑藉後勤充足的維修資源，其中主要包含維修人力與備用零件（spare parts 備份件）兩者，本研究乃著眼於後者。

維修人員於系統當機時，第一時間內所採取的修復動作：取下該失效零件並更換庫房備份件，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為一重要的研究課題。

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單位，中間層級是地區性庫存和維修場站，最高層則是總庫存和維修場站。此外，各層級場站分別具有不同等級的備份件維修能力與存貨水準，若較低層場站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場站予以支援；若較低層場站發生缺料狀況時，則依據給定的遞補邏輯由其上層場站撥貨予以填補。

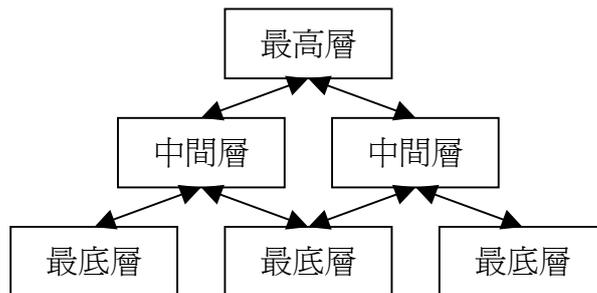


圖 1.1 補給體系架構概念圖

而武器系統乃由多種不同組件以及零件所組成，如圖1.2所示，即所謂多階系統結構（multi-indenture），一般以物料清單（bill of material, BOM）予以呈現。

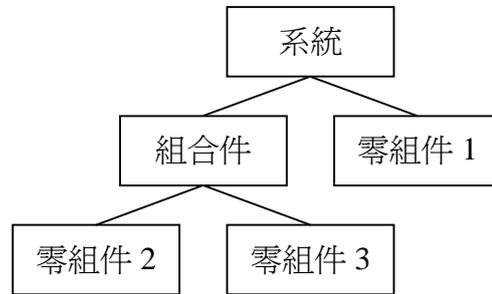


圖 1.2 系統零件結構概念圖

針對多階補給架構與多階系統零件結構，在給定的目標妥善率（數學表達法： $A = \frac{UpTime}{UpTime + DownTime}$ ，其中 A ：武器系統的妥善率， $UpTime$ ：系統正常操作時間， $DownTime$ ：系統失效當機時間），決定每種零件在不同場站的最適庫存請購點與請購量，使補給體系的總營運成本最低，乃是備份件庫存管理非常重要的一環。此問題一般又稱之為 (s_{ij}, S_{ij}) 補給決策；當場站 j 的備用零件 i 存量低於庫存量 s_{ij} 時就進行請購作業，而請購量必須使其重新達到庫存量 S_{ij} 。

對於上述補給決策問題，過去相關研究的發展主要環繞著 Sherbrooke 所提出的 METRIC 模型[1]，乃針對 $(S_{ij} - 1, S_{ij})$ 的補給決策，藉由數學模型來衡量系統績效，再者搭配邊際分析（marginal analysis）最佳化技術，在維修廠站具無限又或有限產能的情境下，來探討滿足目標妥善率的最適 S_{ij} 組合。值得注意的，這些研究皆必須在零件失效（需求）分配皆符從卜瓦松機率分配的前提假設下進行。

於 METRIC 的求解模型中，若零件需求屬於卜瓦松過程，則可根據 PALM's theorem 輕易地估算維修（補貨）中零件個數的機率分配：零件需求個數 X 滿足

$\lambda = m$ 的卜瓦松過程，且零件維修（補貨）時間滿足平均值為 T 的相同且獨立之任意分配，則穩態下維修（補貨）中的零件個數 Y 之機率分配則滿足平均值為 mT 的卜瓦松分配。

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（ S^* ）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。此外雖有部分過去文獻藉由貝氏方法[11]或模擬工具，建構零件非限於卜瓦松失效下的較佳化模型，但卻無同時考量多階補給架構以及多階系統結構如此情境。

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：第二章是文獻探討，主要探討備份件存貨管理的相關文獻。第三章是研究問題與情境，介紹一備份件補給體系與系統零件的組成與屬性，以及零件維修行為模式。第四章為研究模型，包含三主要求解模組。第五章是邊際演算法的修正，發展縮減求解空間的方法。第六、七章分別是實例驗證一與二，藉由 X 武器系統進行個案研究。第八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，其中缺一補一（one-for-one replenishment，即 $(S_{ij}-1, S_{ij})$ ，其中 S_{ij} ：零件 i 於場站 j 的庫存量）決策下的期初存貨配置水準之最佳化，更是許多學者研究重心所在。

2.1 需求限制卜瓦松

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及單階系統結構的先驅者，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」。主要藉由數學模型來衡量系統績效，再者搭配邊際分析（marginal analysis）最佳化技術，來求解滿足目標妥善率的最適 S_{ij} 組合。

Muckstadt [2]則擴充 METRIC 模型予以納入組零件（assembly item）與零組件（component）的交互影響因素，即所謂多階系統結構，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，其一乃在給定組零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零件之可分配備份數總量下，求解各場站之最適組零件備份數量。

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。因而有人予以導入等候模型（queueing model），其方法主要有二，一者以馬可夫鏈（Markov chain）來代表整個系統，二者將整個系統分解成個別的小型等候系統。

針對前者方法，Gross 等人[6]則在有限維修能力下，針對多階補給架構的可維修備份件，使用封閉式傑克生網路（closed 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倍增，並存在最高層級（Depot）無法存貨的缺陷限制。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遭遇複雜的問題時，求解過程中狀態（state）個數將會異常龐大，舉凡高達幾十億個狀態數。

針對後者方法，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 需求不限卜瓦松

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 文獻探討整理

故本研究為彌補過去研究的缺失，整理如表 2.1，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「多種需求分配」，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。

表 2.1 文獻整理

決定存貨水準	多種需求分配	Multi-Echelon (BOS)	Multi-Indenture (BOM)	有限維修資源限制	模型
Sherbrooke 1968	Poisson	O	X	X	METRIC
Muckstadt 1973	Poisson	O	O	X	MOD-METRIC
Slay 1984	NB	O	O	X	VARI-METRIC
Graves 1985	NB	O	X	X	METRIC 延伸
Sherbrooke 1986	Poisson	O	O	X	MOD + VARI
Gross 1983	Poisson	O	X	O	Markov Chain
Albright 1988-1993	Poisson	O	O	O	Markov Chain
Diaz 1997	Poisson	O	O	O	VARIMETRIC + Queueing
Aronis 2004	Gamma-Poisson	X	X	X	Bayesian
Kabir 1996	O	X	X	X	Simulation + 全數
Marseguerra 2005	O	X	X	X	Simulation + GA
Ahmed 1997	O	O	X	O	Simulation + SA
Alkhamis 2005	O	O	X	O	Simulation + PSO
本研究	O	O	O	O	SIM + MA + Heuristic

第三章 研究問題與情境

本研究主要針對具多階性質的「補給體系」架構以及「系統零件」結構，在標準的維修流程與 $(S_{ij}-1, S_{ij})$ 的補貨政策下，同時考量多種零件需求分配，進而分析及建構一有效的備份件較佳化補給模型，期望找出較佳存貨配置矩陣 \bar{S}^* ($S_{ij}^*, \forall i$ (零件), j (場站))，以較低的總營運成本來滿足武器系統之目標妥善率。

本研究對於備份件需求的強度不再假設是整段時間維持不變，乃納入運作中武器系統數目的考量，即所謂有限失效母體，期望更能與現實行為相符。以下將針對「補給體系屬性」、「系統零件屬性」、以及「失效維修程序」進行闡述，以了解此較佳化模型的構建情境。

3.1 補給體系屬性

備份件補給體系乃屬於多階層架構，每個場站皆分別具有直屬的上游與直轄的下游場站，最底層是系統設備的操作單位，中間層級是地區性庫存和維修場站，最高層則是整體庫存以及維修場站，而場站內部所具有的「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。

本研究並考量各場站具有有限的維修資源（特定數目的修護人員），當零件維修需求太高時則必須等候。此外針對運輸體系而言，場站與場站之間各自擁有一個別的運輸時間；針對系統操作單位而言，場站可擁有一個別的系統數目，且每部系統可予以設定不同的操作時間。

3.2 系統零件屬性

武器系統與零件亦屬於多階層結構，每項零件各自擁有的單價以及失效率（failure rate），當零件失效事件發生時，則各自送往上層不同的維修場站進行

維修或者更換作業，一零件於不同場站具有不同等級的修護能力，其修護時間亦有所差異。而零件個別的失效都將導致系統當機，即對系統妥善率產生串聯影響的特性，這也是備份件補給體系與一般產品供應鏈最大的不同處之一。

零組件並可依維修特性而區分成「LRU」、「DU」、「SRU」以及「DP」四類，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；**DP** 代表可拋棄元件，維修項目內無法維修但可替換（「線上」代表武器系統操作單位），整理如表 3.1 所示，輔以圖 3.1。

表 3.1 維修特性

	可直接從武器系統拆解	無法直接從武器系統拆解
可維修	<u>LRU</u>	<u>SRU</u>
不可維修	DU	DP

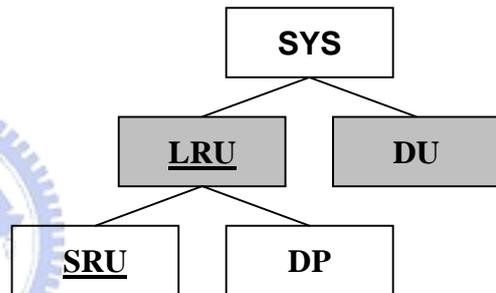


圖 3.1 零組件維修特性

3.3 失效維修程序

當武器系統內零件失效事件發生時，於現場的維修流程，乃取下該失效 LRU 或 DU 單元，如圖 3.2 所示，並從支援庫房取料予以更換，失效的單元若屬不可維修（DU），則逕行拋棄；若屬可以維修（LRU），則將其送修。

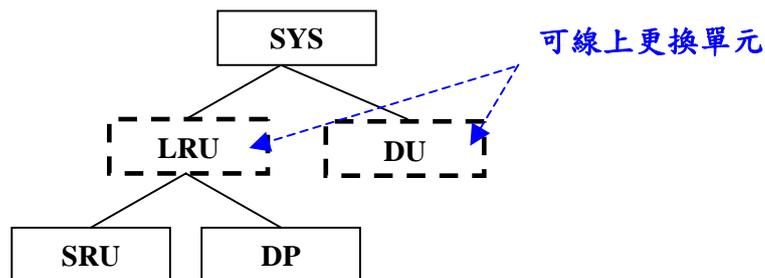


圖 3.2 可線上更換單元

於 LRU 的維修流程中，上游維修場站收到失效的 LRU，則立即提供下游一 LRU 備份件以滿足 $(S_{ij} - 1, S_{ij})$ 之遞補需求，同時判斷導致該 LRU 失效的問題零件屬於 SRU 又或 DP，再者對 SRU 或 DP 備份件發出需求訊號並予以更換。被更換下的零件若屬 DP，則逕行拋棄；若屬 SRU，則進入本站又或上游有能力執行修復動作的維修廠 (repair shop)，如圖 3.3 所示。

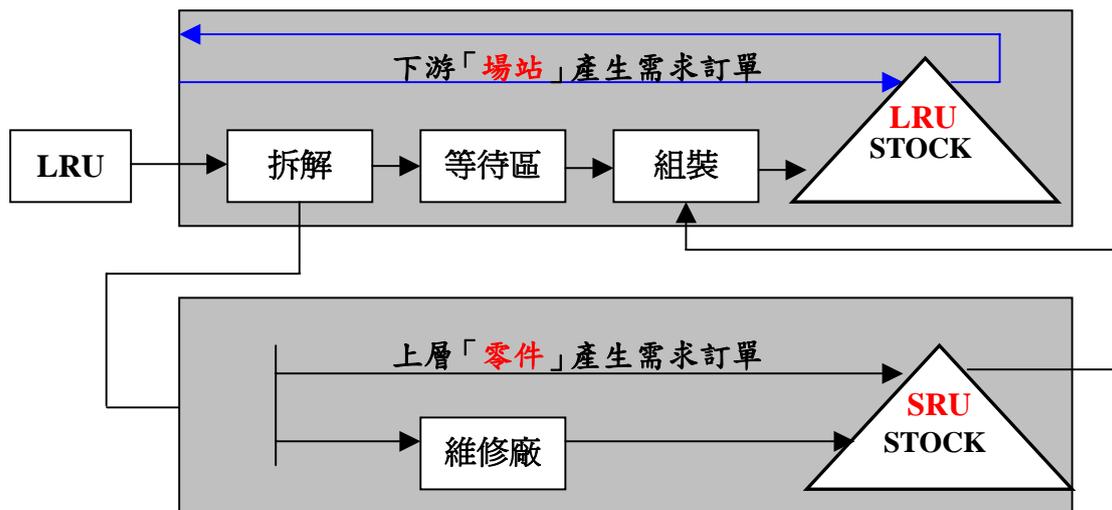


圖 3.3 LRU 維修流程

第四章 研究模型

在已知的補給體系與系統零件相關屬性、失效維修程序、以及 $(S_{ij} - 1, S_{ij})$ 的遞補邏輯下，本研究欲求解在目標妥善 A_d 下之較佳存貨配置矩陣 \bar{S}^* ($S_{ij}^*, \forall i$ (零件), j (場站))，主要藉由「尋找起始解 \bar{S}_0 」、「評估解 \bar{S} 的績效」、與「更新解 \bar{S} 」三大模組達成，如圖 4.1 所示。

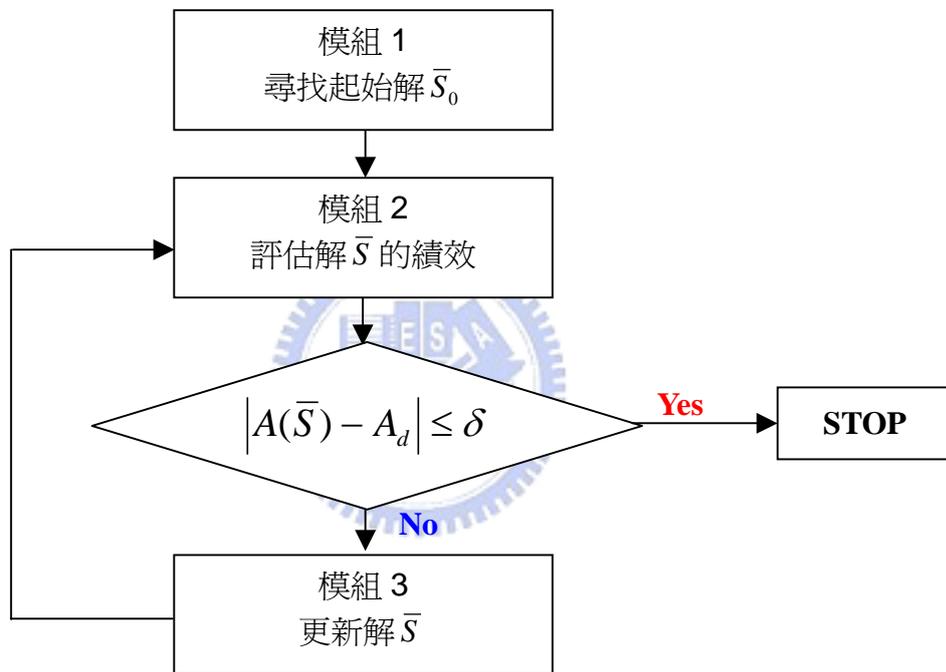


圖 4.1 研究模型

4.1 模組 1：尋找起始解 \bar{S}_0

在卜瓦松需求情境下，藉備份件存貨配置最佳化商用軟體 OPUS10 的輔助，選擇合適妥善率之最佳配置作為搜尋的起始解「 \bar{S}_0 」。

4.1.1 OPUS10

OPUS10 為一求解備份件存貨配置最佳化的商用軟體，其假設零件需求行為皆服從卜瓦松分配，而主要運算輸出變數包含每一零件 i 位於每一場站 j 的存貨

請購點與請購量 (s_{ij}, S_{ij}) 以及供應鏈總營運成本 (total support cost, TSC) ; 主要的
 運算輸入參數分別為 A 、 BOS 、 BOM 、 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 ，這些參數與變數說明如下：

(1)輸入參數

- A : 系統平均妥善率；
- BOS : 補給體系架構；
- BOM : 系統零件結構；
- 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 個場站與第 o 個場站之間的運輸時間；
- C_{jo}^{tr} : 第 j 個場站與第 o 個場站之間的運輸成本；
- F_{ij}^{ma} : 第 j 個場站對於第 i 種零件的維護能力；
- T_{ij}^{ma} : 第 j 個場站對於第 i 種零件的維護時間；
- U_j : 第 j 個場站的系統利用率；
- FR_i : 第 i 種零件的失效率；
- P_i : 第 i 種零件的價格；
- Q_i : 第 i 種零件於每部系統的配置數量；

(2)輸出變數

- TSC : 供應鏈的總營運成本；
- (s_{ij}, S_{ij}) : 第 j 個場站對於第 i 種零件的存貨配置政策；

若採取 $(S_{ij}-1, S_{ij})$ 補貨政策，則輸出變數 (s_{ij}, S_{ij}) 即可簡化成 S_{ij} 。意即在一
 補給體系中，若給定系統平均妥善率 A 、補給體系與系統零件相關屬性，以及
 $(S_{ij}-1, S_{ij})$ 補貨政策，即可以計算最佳存貨配置 \bar{S} 與總營運成本 TSC ，如圖 4.2
 所示。

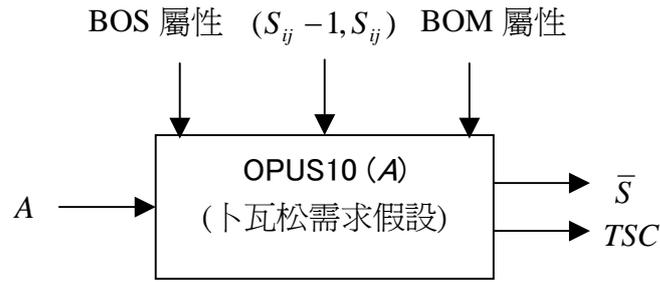


圖 4.2 OPUS10 (A)

4.1.2 決定起始解 \bar{S}_0

若已知目標妥善率為 A_d ，則本研究將起始解妥善率 A_0 設定成： $A_0 = A_d - r$ ， r 為模型使用者給定的一適當正數值（例如 5%），並藉 OPUS10 軟體取得妥善率 A_0 下的最佳存貨配置 \bar{S}_0 作為模型的起始解，如圖 4.3 所示。

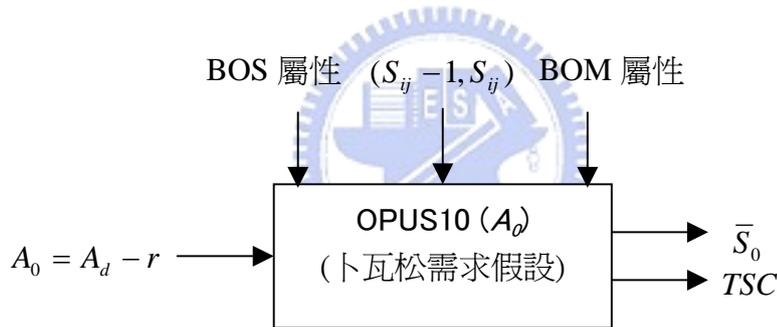


圖 4.3 OPUS10 (A_0)

由於存貨配置在最佳化過程中所描繪的成本與效益曲線 (C/E curve) 其邊際存貨成本皆具有遞增的特性，如圖 4.4 所示，故本研究模型更適用於求解「高」目標妥善率 A_d ，乃因若能在圖中現有存貨水準 \bar{S}_0 下進行較佳化調整作業，即能使整個備份件補給體系的總營運成本大幅下降。

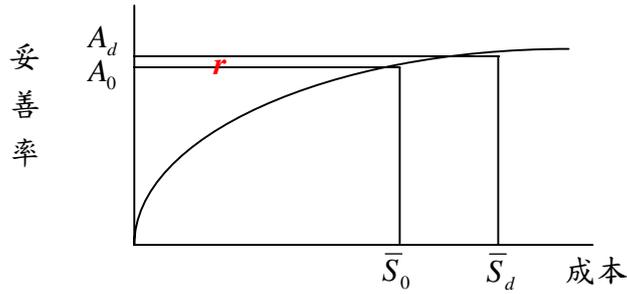


圖 4.4 C/E curve

4.2 模組 2：評估解 \bar{S} 的績效

本研究為有效呈現零件的多種需求分配所帶來的影響，乃藉由 eM-Plant 此間斷事件模擬 (discrete event simulation) 平台來進行模組程式的建構，用以評估 \bar{S} 存貨配置下的武器系統之平均妥善率 A ($A = \sum_{k=1}^K A_k / K$, A_k 代表第 k 部系統的妥善率，並佈署有 K 部)。模型程式內容不僅考量了上章節所提及的補給體系屬性、系統零件屬性、失效維修程序、以及呈現 $(S_{ij} - 1, S_{ij})$ 之補貨邏輯，更可以適用於具不同 BOS/BOM 之其他武器系統又或機台設備，功能如圖 4.5 所示。

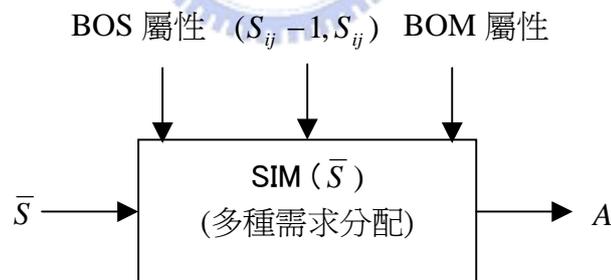


圖 4.5 SIM (\bar{S})

4.3 模組 3：更新解 \bar{S}

本研究為在多種需求分配下有效率更新 \bar{S} ，進而發展較佳成本與效益曲線，乃採用邊際配置法 (marginal allocation)，又或稱之為貪婪法 (greedy algorithm)，其主要概念為：在現存狀態下，選擇邊際貢獻最大的變數予以加碼更新，繼而形成新的狀態並且重複以上行為。邊際配置法若應用於本研究中，則變數必須考量

系統零件 i 與場站 j 的所有組合「 S_{ij} 」，邏輯如下：

$$\text{Step 1: 計算 } \Delta P_{ij} = \frac{A(\bar{S} + e_{ij}) - A(\bar{S})}{c_i} \forall i, j$$

$$\text{Step 2: 選擇 } (i^*, j^*) = \arg \max_{i, j} (\Delta P_{ij})$$

$$\text{Step 3: } \bar{S} = \bar{S} + e_{i^* j^*}$$

$$\text{Step 4: 重複以上直到達到「目標妥善率」; } |A(\bar{S}) - A_d| \leq \delta$$

符號解釋：

\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

$A(\bar{S})$ ：模組二評估 \bar{S} 存貨水準矩陣之平均系統妥善率，即 $\text{SIM}(\bar{S})$ 。

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，當邊際配置法搭配「模組 2」進行存貨配置的較佳化時，必會產生求解 $A(\bar{S})$ 次數過多，而導致時間過長的問題。舉凡一備份件補給體系中，若武器系統由 31 項零件所構成，而補給體系架構包含 10 個場站，則一輪的邊際搜尋必須執行 310 個模擬實驗，即求解 $A(\bar{S})$ 310 次，倘若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，則每增加一個零件就必須花費 51.67 小時（約 2.15 天）；若 \bar{S}_0 需增加 10 個零件，則時間將高達 520 小時（約 21 天）。

本研究為解決變數維度過多而造成求解空間過大的問題，乃提出 4 個方法來修正邊際演算法，其一，確認重要零件；其二，減少站點考量；其三，進行場站分群；其四：動態刪除無效變數，並於下章節詳述之。

第五章 邊際演算法的修正

針對邊際演算法，本研究提出四個方法予以修正：

- (一) 重要零件：零件依據「累積缺貨時間」進行重要性排序並挑選缺貨嚴重者；
- (二) 減少站點考量：減少考量補給體系中不需要的場站；
- (三) 場站分群：場站依據零件「存貨重要性」予以分群；
- (四) 動態刪除：動態排除搜尋過程中邊際貢獻度極少的變數。

5.1 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「模組 2」模擬結果中特定零件的累積缺貨時間 T_b 若高於設定合適的門檻值 H 者 ($T_b > H$)，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。

並且只有直接從系統產生的需求片段才會被計算在內，因此在評估累積缺貨時間時，場站倉儲位置只需考量直接支援系統的場站（例如 O 層級），如圖 5.1 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武器系統當機時間的延長。

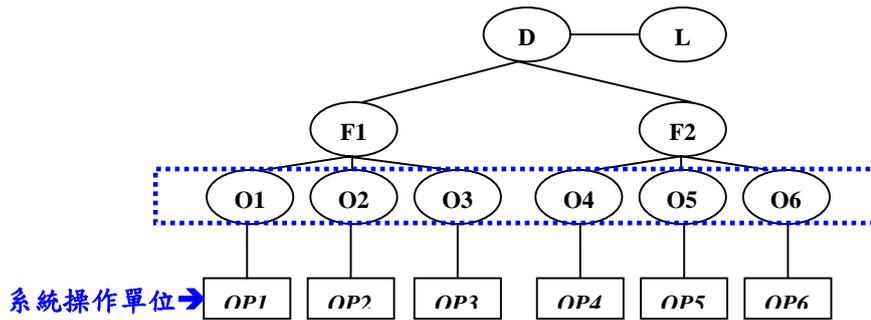


圖 5.1 第一層倉儲位置

此外，由於系統操作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，則必須再將其子零件「SRU」與「DP」納入邊際搜尋的對象，如圖 5.2 所示。

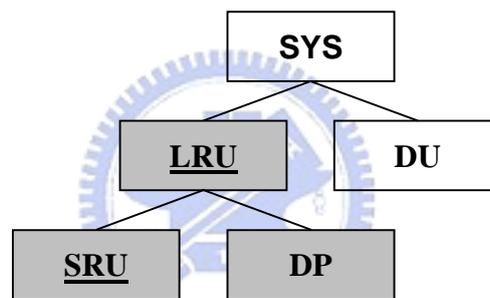


圖 5.2 子層零件示意圖

5.2 減少站點考量

針對某些零件，某特定站點可不必考慮。而站點考量與否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，亦相對應著不同的判斷法則，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武器系統產生的需求，即系統操作單位該零件失效所造成的需求，故若上下游相鄰的場站擁有相同數目的系統，則此補給體系即產生單分支的結構 (single-parent-single-son)，如圖 5.3 所示，高層場站將不予考量，源於備料置於子場站可減少因運輸時間所造成的缺貨風險。

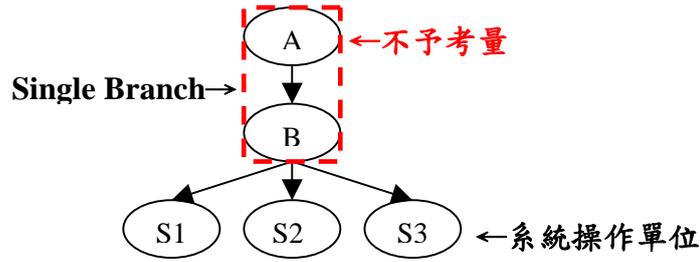


圖 5.3 單分支結構

(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)，故不具修護 LRU 的場站，不必考慮 SRU 與 DP 的備料。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」則不予考量，如圖 5.4 所示。

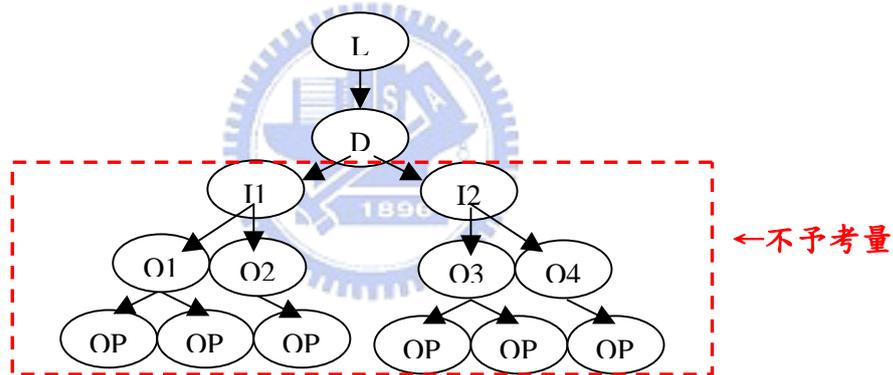


圖 5.4 不具修護能力場站

5.3 場站分群

一般在邊際配置法中評估是否要增加零件 i 的數量時，邊際收尋一輪多次 $A(\bar{S})$ 的計算，僅能決定「某一」特定場站具有優先加碼權，屬於個別增加性質。若將場站針對特定零件 i 予以分群，不但可以減少 $A(\bar{S})$ 的計算次數，因為一次 $A(\bar{S})$ 的計算其評估的對象乃一群場站同時增加一個零件 i 的效益；而且也大幅降低邊際演算法計算的輪數，因為一輪邊際收尋的計算，即能決定「某群」特定場站具有優先加碼權，屬於群組增加性質。

此外本研究乃將零件存貨視為一種「避險」工具，因此針對某特定零件 i ，能夠在某場站減少愈多的邊際缺貨風險，則代表某特定存貨 i 在此場站的相對重要性愈高，而缺貨風險可藉由計算「所需庫存水準 (pipeline, PL)」超出「目前配置庫存水準 S 」的機率來求得，即 $\Pr(PL > S)$ 。

同 METRIC [1] 求解模型，本研究假設 PL 滿足卜瓦松分配以快速估算缺貨機率，進而依其結果予以場站分群。因為若 $j1$ 與 $j2$ 兩場站目前的配置庫存水準 S 相同，即 $S_{ij1} = S_{ij2}$ ；且平均所需庫存水準 $E[PL]$ 亦相同，即 $E[PL_{ij1}] = E[PL_{ij2}]$ ，則在 PL 滿足卜瓦松分配下，即代表著具有相同的邊際缺貨機率：

$$\Pr(PL_{ij1} > S + 1) - \Pr(PL_{ij1} > S) = \Pr(PL_{ij2} > S + 1) - \Pr(PL_{ij2} > S) \quad (1)$$

故視「 $j1$ 」與「 $j2$ 」為同一群同群組。

式(1)中 $E[PL]$ 的計算，可藉由 METRIC 數學模型進行求解：

$$E[PL_{ij}] = \lambda_{ij} r_{ij} E[T_{ij}] + \sum_{k \in SA(i)} h_{ijk} E[BO_{kj}] + \lambda_{ij} (1 - r_{ij}) E[O_{ij}] + f_{ij} E[BO_{i, SUP(j)}] \quad (2)$$

符號解釋：

- λ_{ij} : 零件 i 在場站 j 的需求率；
- r_{ij} : 零件 i 在場站 j 的維修機率；
- T_{ij} : 零件 i 在場站 j 的維修時間；
- $SA(i)$: 零件 i 的子零件集合；
- h_{ijk} : 於場站 j ，缺貨零件 k 中，導致母零件 i 無法及時修復的比例；
- BO_{kj} : 零件 k 在場站 j 的缺貨個數；
- O_{ij} : 上游直屬場站至場站 j 的運輸時間；
- f_{ij} : 於上游直屬場站，缺貨零件 i 中，導致場站 j 無法及時補貨的比例；
- $SUP(j)$: 場站 j 的直屬上游場站；

而式(2)中 λ_{ij} 的計算屬於「Bottom-up」性質，由下而上彙總：

$$\lambda_{ij} = \sum_{l \in CUS(j)} \lambda_{lj} (1 - r_{lj}) + \sum_{k \in AS(i)} \lambda_{kj} r_{kj} q_{kji}$$

符號解釋：

$CUS(j)$: 場站 j 所轄下游場站集合；

$AS(i)$: 零件 i 的母零件集合；

q_{kji} : 於場站 j ，零件 k 的失效乃導因於其子零件 i 的機率；

且式(2)中 $E[BO_{ij}]$ 的計算屬於「Top-down」性質，由上而下擴散：

$$\begin{aligned} E[BO_{ij}] &= 1 \times \Pr(PL_{ij} - S_{ij} = 1) + 2 \times \Pr(PL_{ij} - S_{ij} = 2) + 3 \times \Pr(PL_{ij} - S_{ij} = 3) + \Lambda \\ &= \sum_{x=S_{ij}+1}^{\infty} (x - S_{ij}) \Pr(PL_{ij} = x) \end{aligned}$$

5.4 動態刪除

動態刪除乃在於排除邊際搜尋中的無效變數，也就是對妥善率貢獻度極小

者，故以 $\Delta P_{ij} = \frac{A(\bar{S} + e_{ij}) - A(\bar{S})}{c_i}$ 此指標來衡量之。若 $\Delta P_{ij} < \delta$ ，則下一輪的 MA

不考慮 (i, j) 此「零件-場站」組合。

5.5 解空間縮減小結

因此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，乃藉由累積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針對備份件補給體系之架構進行辨別冗站與場站分群的簡化作業，目的在於降低所有變數組合 S_{ij} 中的 j (單位) 維度，；並自動監控程式執行邊際搜尋的過程，針對貢獻度極小的

零件-場站組合予以動態刪除，同時不斷地降低 S_{ij} 中的 i 與 j 兩維度。



第六章 實例驗證一

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較佳化求解模型，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。

6.1 案例一情境

6.1.1 補給體系架構 (multi-echelon)

本研究案例之備份件補給體系架構即如圖 6.1 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，場站與場站之間各自擁有 7 天的運輸時間，而針對系統操作單位而言，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。

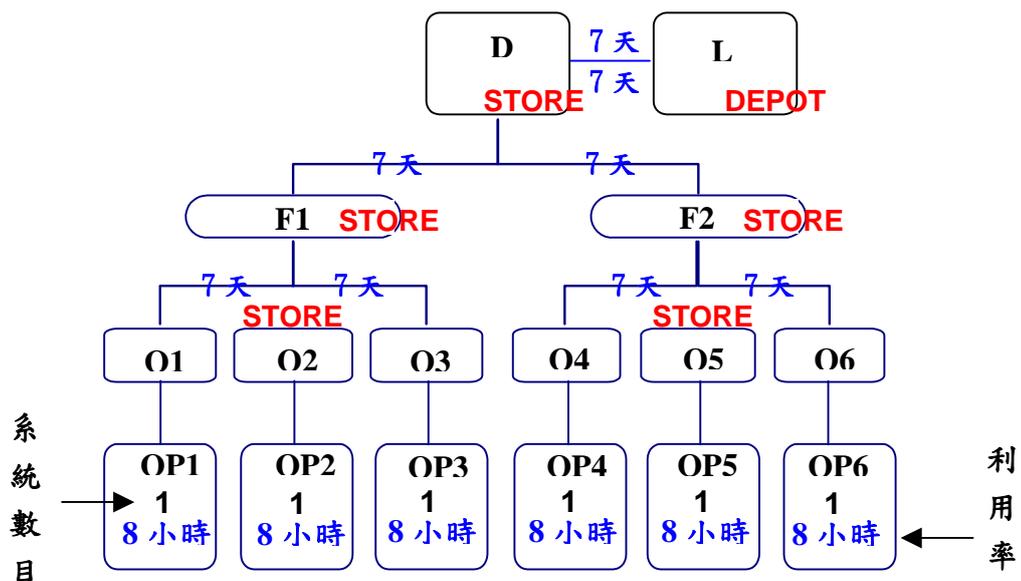


圖 6.1 案例一 X 補給體系架構

6.1.2 系統零件結構 (single-indenture)

本研究案例之系統零件結構即如圖 6.2 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，詳細資料表列於附錄一。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。

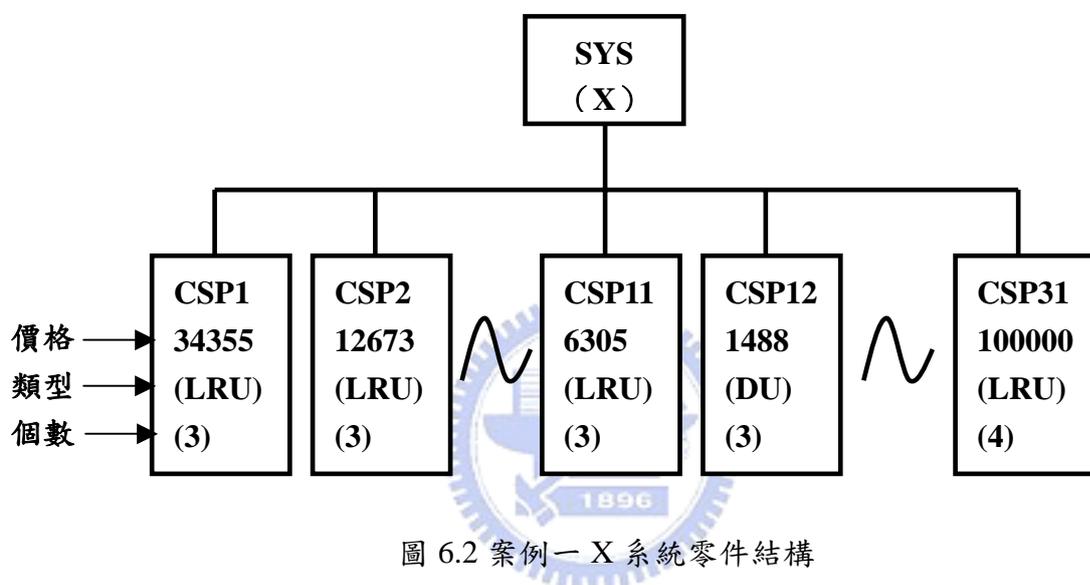


圖 6.2 案例一 X 系統零件結構

6.1.3 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，詳細資料表列於附錄二，結果發現零件需求分配不完全是卜瓦松分配，如表 6.1 所示。

表 6.1 最適失效分配 (單位：小時)，

其中 Normal、Lognormal 分配，參數一代表 μ ，參數二代表 σ ；Weibull、Gamma 分配，參數一代表 α ，參數二代表 β ；Exponential 分配，參數一代表 β 。

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	
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

6.2 案例一求解過程

已知目標妥善率 A_d 為 95%，乃設定起始解妥善率 A_0 為 90.45% (r 約為 5%)，並藉由 OPUS10 商用軟體取得最佳存貨配置，作為邊際搜尋方法的初始解 \bar{S}_0 ，由此解發展多種需求分配下的成本與效益曲線，如圖 6.3 所示。

最後，為了比較無卜瓦松需求假設的「本研究模型」與有卜瓦松需求假設的「OPUS10」之成效差異，乃取兩者在「模組 2」多種需求分配設定下，具相同妥善率表現（約 95%）的個別存貨配置，藉比較其「總零件存貨成本」來判斷孰優孰劣。

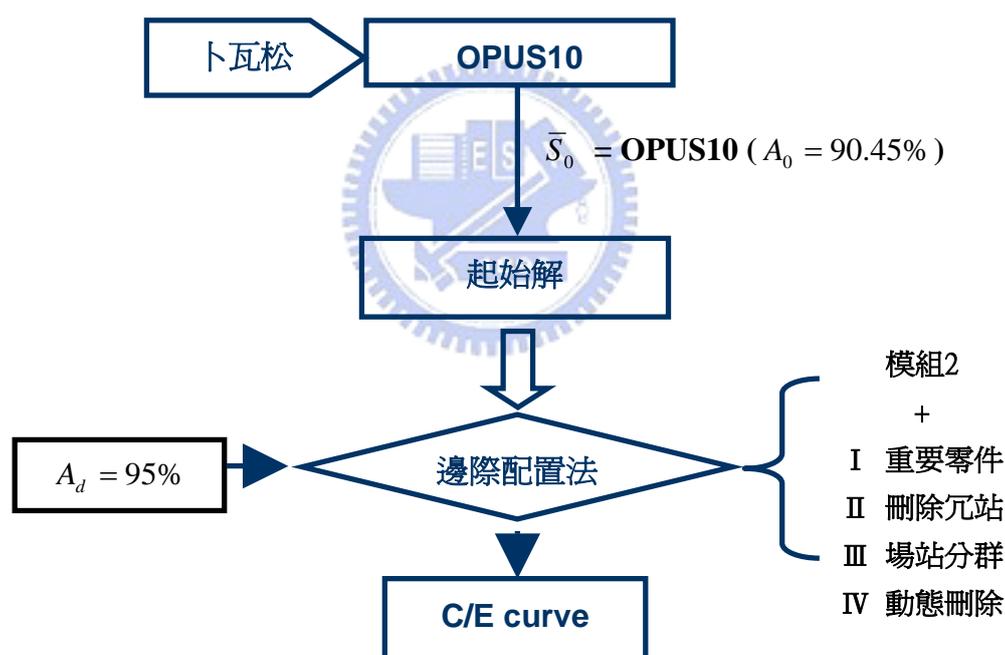


圖 6.3 案例一求解過程

6.2.1 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 6.2 所示。

表 6.2 案例一存貨始起解

(註：縱向欄位代表各零件名稱；橫向欄位代表各場站名稱)

	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

6.2.2 重要零件

以 OPUS10 所得之起始解代入模組 2，在執行過多個隨機種子後，將平均缺貨時間大於 1 小時者視為重要零件，故我們挑選了 CSP1、CSP7、CSP17、CSP19、CSP22、CSP24、CSP26、CSP29 八項零件作為邊際搜尋的對象，如表 6.3 所示。

表 6.3 案例一平均缺貨時間

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	1:18:57:36.0000	CSP2	0.0000	CSP3	0.0000
CSP4	0.0000	CSP5	0.0000	CSP6	0.0000
CSP7	3:21:36.0000	CSP8	0.0000	CSP9	0.0000
CSP10	0.0000	CSP11	0.0000	CSP12	0.0000
CSP13	0.0000	CSP14	0.0000	CSP15	0.0000
CSP16	0.0000	CSP17	1:02:24.0000	CSP18	0.0000
CSP19	1:50:24.0000	CSP20	14:24.0000	CSP21	0.0000
CSP22	1:16:48.0000	CSP23	24:00.0000	CSP24	1:07:12.0000
CSP25	0.0000	CSP26	1:07:21:36.0000	CSP27	28:48.0000
CSP28	0.0000	CSP29	7:40:48.0000	CSP30	0.0000
CSP31	33:36.0000				

6.2.3 刪除冗站與場站分群

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 6.4 所示。

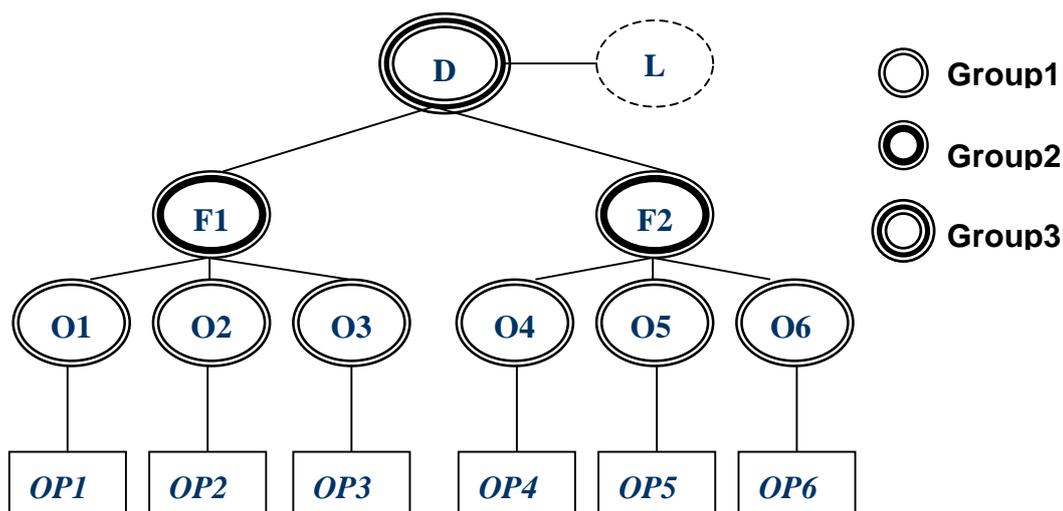


圖 6.4 案例一冗站與分群

6.2.4 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 6.4 所示，其中變數個數即為表中最後一欄位數值。

表 6.4 案例一邊際過程

順序	場站群組	零件名稱	妥善率的增量	零件-場站數
1	G1	CSP1	0.158741%	22
2	G2	CSP19	0.014027%	11
3	G3	CSP29	0.023570%	10
4	G1	CSP26	0.109994%	8
5	G2	CSP17	0.006531%	8
6	G1	CSP17	0.006394%	5
7	G2	CSP7	0.007042%	4
8	G1	CSP24	0.014065%	3

此過程所花費的時間為：

$$(\text{零件-場站總合}) \times (\text{seed 數}) \times (\text{模擬時間})$$

$$= 71 \times 10 \times 1 (\text{分})$$

$$= 11.83 (\text{小時})$$

假若不經「解空間」縮減作業，則必須花費：

$$\begin{aligned}
 & (\text{零件數}) \times (\text{場站數}) \times (\text{seeds 數}) \times (\text{模擬時間}) \times (\text{總增加零件數}) \\
 & = (27 \times 10 + 4 \times 4) \times 10 \times 1 \times 31 \\
 & = 1477.67 \text{ (小時)} = 61.57 \text{ (天)}
 \end{aligned}$$

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 (1477.67 / 11.83)。

6.2.5 案例一結果比較

針對「OPUS10」，取其妥善率為 94.91% 的最佳存貨配置 (\bar{S}_A)，代入模組 2 之多種需求分配設定下進行妥善率評估作業，執行 25 個亂數種子，結果如表 6.5 所示；針對「本研究模型」，根據上述邊際搜尋產生的成本與效益曲線，取其第八次加碼後的較佳存貨配置 (\bar{S}_A 方案)，亦代入模組 2 進行評估，執行 25 個亂數種子，結果如表 6.5 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 6.5 案例一敘述統計與統計檢定

OPUS10		本研究		z 檢定：兩個母體平均數差異檢定		
平均數	94.27%	平均數	94.29%	平均數	94.27%	94.29%
中間值	0.96866	中間值	0.96947	已知的變異數	0.003734	0.003738
標準差	0.06111	標準差	0.06114	觀察值個數	25	25
變異數	0.00373	變異數	0.00374	假設的均數差	0	
範圍	0.21726	範圍	0.21726	z	-0.0109	
最小值	0.76771	最小值	0.76771	P(Z<=z) 單尾	0.495642	
最大值	0.98496	最大值	0.98496	臨界值：單尾	1.644853	
個數	25	個數	25	P(Z<=z) 雙尾	0.991283	
				臨界值：雙尾	1.95996	
→Not Reject						

然而， \bar{S}_A 的存貨配置成本高達 12,002,843， \bar{S}_{A_0} 存貨配置成本僅需要 10,791,383，故藉由本研究模型來進行求解較佳存貨配置，在相同妥善率表現下，可以節省高達 10.09 % 左右的存貨成本。

此外，若目標妥善率 A_d 為 90%，並設定起始解妥善率 A_0 為 86.06%（ r 仍為 5%），重覆以上研究步驟，在相同妥善率表現下，約可節省 4.21 % 左右的存貨成本，整理如表 6.6。

表 6.6 案例一結果整理

	一	二
	目標妥善率=95%	目標妥善率=90%
	起始解妥善=90.45% ($r \cong 5\%$)	起始解妥善=86.06% ($r \cong 5\%$)
原始配置成本	12,002,843	9,353,994
較佳配置成本	10,791,383	8,959,884
節省比例	10.09%	4.21%

第七章 實例驗證二

本章將以「X 武器系統」為基，修改其系統零件結構使成為多階系統，其它屬性皆維持不變，並與卜瓦松需求分配假設下的求解模型相互比較。

7.1 案例二情境

7.1.1 系統零件結構(multi-indenture)

本研究案例之系統零件結構即如圖 7.1 所示，共有 34 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」、「DU」與「SRU」三種類型，其維修作業皆於最高層級場站（L）進行，詳細資料表列於附錄三。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。

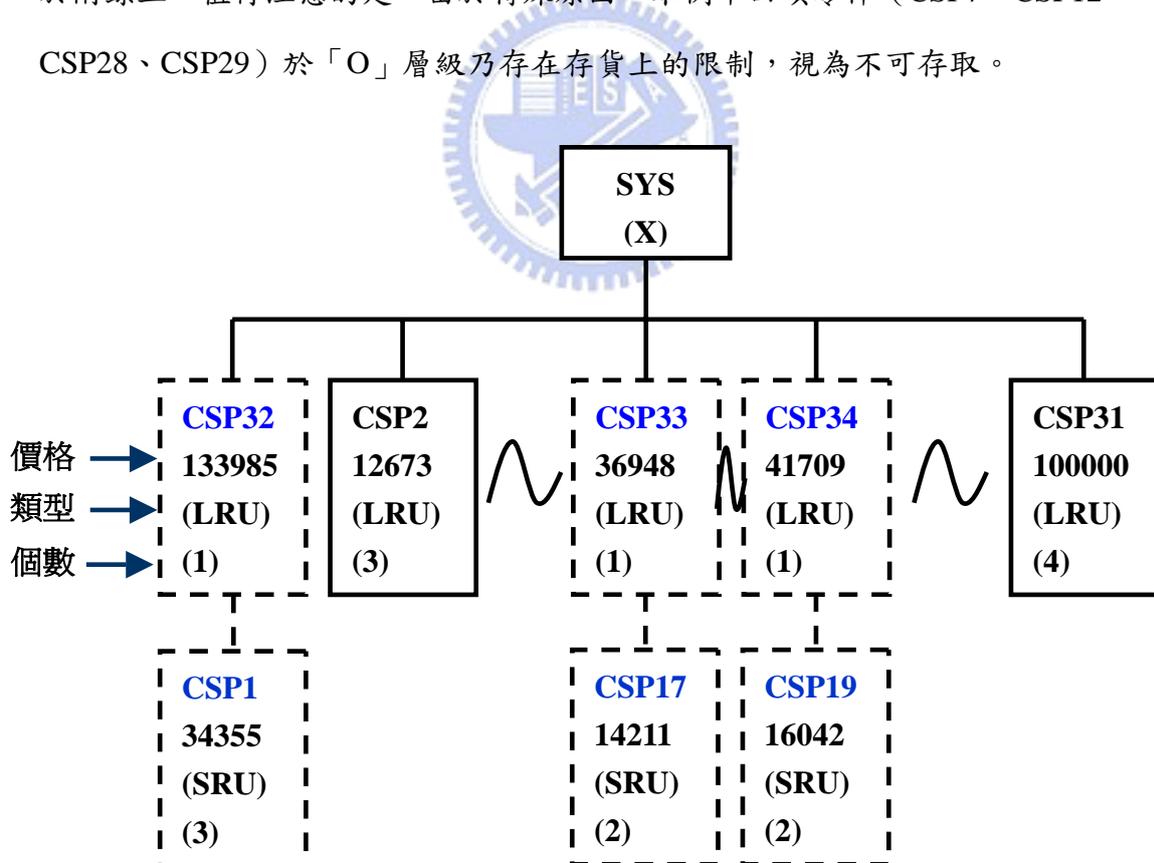


圖 7.1 案例二 X 系統零件結構

7.2 案例二求解過程

已知目標妥善率 A_d 為 95%，乃設定起始解妥善率 A_0 為 89.34% (r 約為 5%)，並藉由 OPUS10 商用軟體取得最佳存貨配置，作為邊際搜尋方法的初始解 \bar{S}_0 ，由此解發展多種需求分配下的成本與效益曲線，如圖 7.2 所示。

最後，為了比較無卜瓦松需求假設的「本研究模型」與有卜瓦松需求假設的「OPUS10」之成效差異，乃取兩者在「模組 2」多種需求分配設定下，具相同妥善率表現（約 95%）的個別存貨配置，藉比較其「總零件存貨成本」來判斷孰優孰劣。

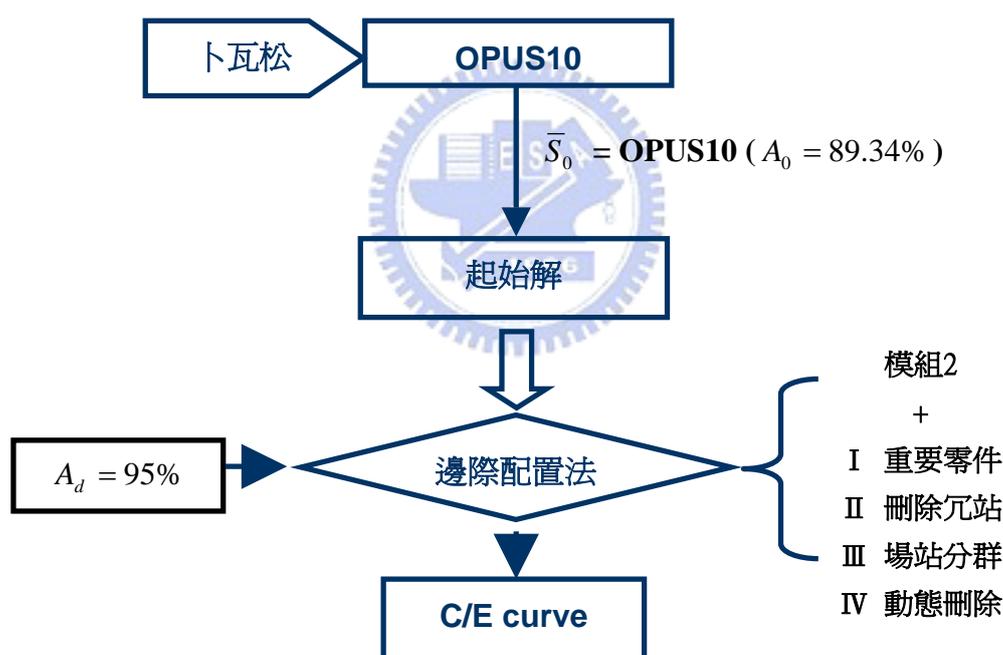


圖 7.2 案例二求解過程

7.2.1 起始解

藉由 OPUS10 商用軟體取得妥善率在 89.34% 下的最佳存貨配置作為起始解，如表 7.1 所示。

表 7.1 案例二存貨起始解

(註：縱向欄位代表各零件名稱；橫向欄位代表各場站名稱)

	L	D	F1	F2	O1	O2	O3	O4	O5	O6
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
CSP18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CSP20	7	2	1	1	1	1	1	1	1	1
CSP21	4	1	0	0	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
CSP32	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0
CSP1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CSP33	7	2	0	0	1	1	1	1	1	1

CSP17	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CSP34	6	1	0	0	1	1	1	1	1	1
CSP19	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0

7.2.2 重要零件

以 OPUS10 所得之起始解代入模組 2，在執行過多個隨機種子後，將平均缺貨時間大於 1 小時者視為重要零件，故我們挑選了 CSP7、CSP14、CSP20、CSP22、CSP24、CSP26、CSP32、CSP33 八項零件作為邊際搜尋的對象，如表 7.2 所示。

表 7.2 案例二平均缺貨時間

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	0.0000	CSP2	0.0000	CSP3	0.0000
CSP4	0.0000	CSP5	0.0000	CSP6	0.0000
CSP7	5:02:24.0000	CSP8	0.0000	CSP9	0.0000
CSP10	0.0000	CSP11	0.0000	CSP12	0.0000
CSP13	0.0000	CSP14	1:16:48.0000	CSP15	0.0000
CSP16	0.0000	CSP17	0.0000	CSP18	0.0000
CSP19	0.0000	CSP20	1:45:36.0000	CSP21	0.0000
CSP22	1:40:48.0000	CSP23	4:48.0000	CSP24	1:07:12.0000
CSP25	0.0000	CSP26	1:09:36:00.0000	CSP27	0.0000
CSP28	0.0000	CSP29	0.0000	CSP30	0.0000
CSP31	33:36.0000	CSP32	2:09:07:12.0000	CSP33	6:14:24.0000
CSP34	0.0000				

7.2.3 刪除冗站與場站分群

(1) LRU/DU 分群結果

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 7.3 所示。

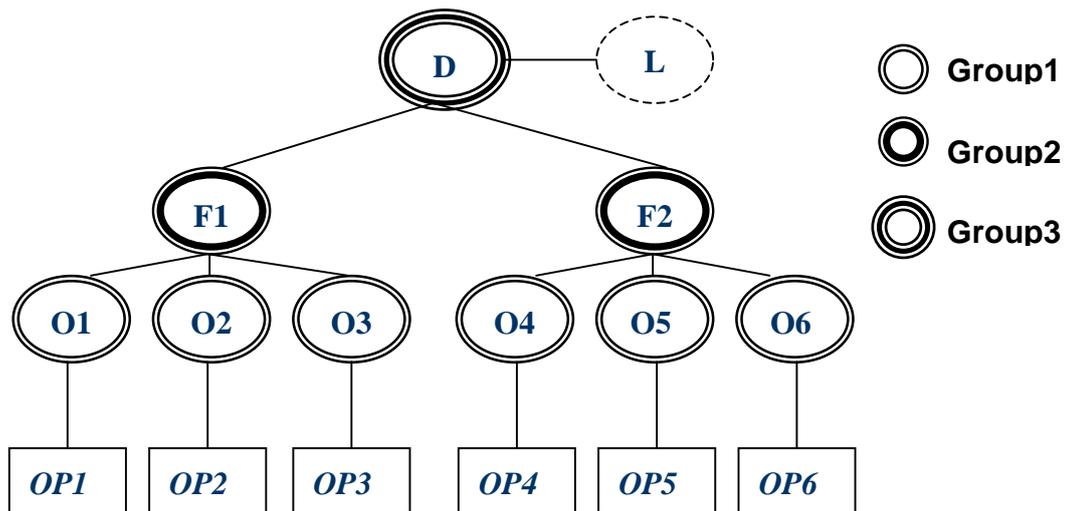


圖 7.3 案例二冗站與分群 1

(2) SRU/DP 分群結果

場站層級「D」以下皆對「LRU」不具修復能力，故皆視為冗站；並可依據存貨重要性而將場站分成一群（G1），如圖 7.4 所示。

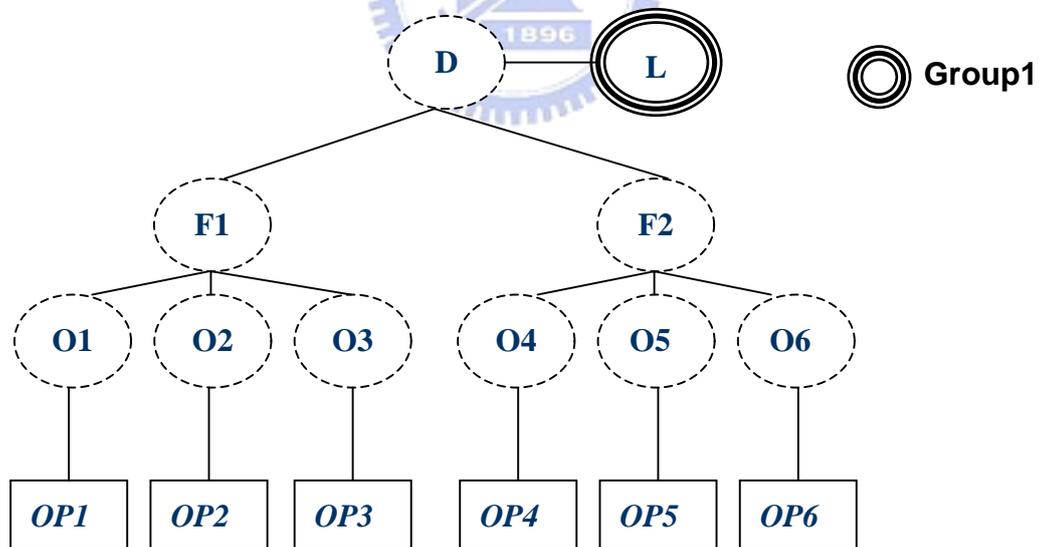


圖 7.4 案例二冗站與分群 2

7.2.4 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 7.3 所示，

其中變數個數即為表中最後一欄位數值。

表 7.3 案例二邊際過程

順序	場站群組	零件名稱	妥善率的增量	零件-場站數
1	G3	CSP22	0.021443%	25
2	G1	CSP26	0.119680%	25
3	G2	CSP32	0.057805%	25
4	G2	CSP33	0.005552%	6
5	G1	CSP32	0.060214%	5
6	G1	CSP26	0.012072%	4
7	G1	CSP24	0.007058%	3
8	G1	CSP33	0.001540%	2

此過程所花費的時間為：

$$\begin{aligned}
 & (\text{零件-場站總合}) \times (\text{seed 數}) \times (\text{模擬時間}) \\
 & = 95 \times 10 \times 1 \text{ (分)} \\
 & = \mathbf{15.83 \text{ (小時)}}
 \end{aligned}$$



假若不經「解空間」縮減作業，則必須花費：

$$\begin{aligned}
 & (\text{零件數}) \times (\text{場站數}) \times (\text{seeds 數}) \times (\text{模擬時間}) \times (\text{總增加零件數}) \\
 & = (27 \times 10 + 4 \times 4) \times 10 \times 1 \times 35 \\
 & = \mathbf{1843.33 \text{ (小時)}} = \mathbf{76.81 \text{ (天)}}
 \end{aligned}$$

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 (1843.66 / 15.83)。

7.2.5 案例二結果比較

針對「OPUS10」，取其妥善率為 94.92% 的最佳存貨配置 (\bar{S}_A)，代入模組 2 之多種需求分配設定下進行妥善率評估作業，執行 25 個亂數種子，結果如表 7.4

所示；針對「本研究模型」，根據上述邊際搜尋產生的成本與效益曲線，取其第八次加碼後的較佳存貨配置 ($\bar{S}_{A'}$ 方案)，亦代入模組 2 進行評估，執行 25 個亂數種子，結果如 7.4 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 7.4 案例二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	94.36%	平均數	94.39%	平均數	94.36%	94.39%
中間值	0.97499	中間值	0.97499	已知的變異數	0.00253	0.00254
標準差	0.05030	標準差	0.05040	觀察值個數	25	25
變異數	0.00253	變異數	0.00254	假設的均數差	0	
範圍	0.15040	範圍	0.15025	z	-0.0199	
最小值	0.83317	最小值	0.83332	P(Z<=z) 單尾	0.49206	
最大值	0.98357	最大值	0.98357	臨界值：單尾	1.64485	
個數	25	個數	25	P(Z<=z) 雙尾	0.98413	
				臨界值：雙尾	1.95996	
				→ Not Reject		

然而， \bar{S}_A 的存貨配置成本高達 12,829,024， $\bar{S}_{A'}$ 存貨配置成本僅需要 11,744,952，故藉由本研究模型來進行求解較佳存貨配置，在相同妥善率表現下，可以節省高達 8.45 % 左右的存貨成本。

此外，若目標妥善率 A_d 為 90%，並設定起始解妥善率 A_0 為 86.35% (r 仍為 5%)，重覆以上研究步驟，在相同妥善率表現下，約可節省 0.43 % 左右的存貨成本，整理如表 7.5。

表 7.5 案例二結果整理

	一	二
	目標妥善率=95%	目標妥善率=90%
	起始解妥善=89.34% ($r \cong 5\%$)	起始解妥善=86.35% ($r \cong 5\%$)
原始配置成本	12,829,024	9,622,250
較佳配置成本	11,744,952	9,580,769
節省比例	8.45%	0.43%



第八章 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，針對多種失效行為的零件，進行最佳化存貨配置的研究。故本研究提出一個較佳化求解模型，首先乃藉商用軟體 OPUS10 取得一起始解；再者利用 eM-Plant 模擬平台建構一具考量多種需求分配之能力的評估程式；最後結合邊際配置法進行較佳化作業，並發展「評選重要零件」、「減少站點考量」、「場站分群」、「動態刪除變數」四個方法針對邊際演算化進行修正，以強化求解效率。

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較佳化模型後，針對高目標妥善率情境，產生相對於過去模型高達 10% 左右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較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較佳化求解作業，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., "METRIC: Multi-Echelon Technique for Recoverable ItemControl", *Operations Research* 16, 122-141, 1968.
- [2] Muckstadt, J, "A model for a multi-item, multi-indenture inventory system", *Management Science* 20, 472-481, 1973.
- [3] Slay, F.M., "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, 1984.
- [4] Graves, S., "A multi-echelon inventory model for a repairable item with one-for-one replenishment, *Management Science* 31, 1247 – 1256, 1985.
- [5] Sherbrooke, C.C., "VARI-METRIC: improved approximations for multi-indenture, multi-echelon availability models", *Operations Research* 34, 311-319, 1986.
- [6] Gross, D., D.R. Miller and R.M. Soland, "A closed queueing network model for multi-echelon repairable item provisioning", *IIE Transactions* 15(4), 344-352, 1983.
- [7] Albright, S.C. and A. Soni, "Markovian multi-echelon repairable inventory system", *Naval Research Logistics Quarterly* 35, 49-61, 1988.
- [8] Gupta, A. and S.C. Albright, "Steady-state approximations for multi-echelon multiindentured repairable-item inventory system", *European Journal of Operational Research* 97(3), 340-353, 1992.
- [9] Albright, S.C. and A. Gupta, "Steady-state approximation of a multi-echelon multiindentured repairable-item inventory system with a single repair facility", *Naval Research Logistics* 40(4), 479-493, 1993.
- [10] Diaz, A. and M.C. Fu, "Models for multi-echelon repairable item inventory systems with limited repair capacity", *European Journal of Operational Research* 97, 480-492, 1997.

- [11] Aronis, K.P., Magou, I., Dekker, R., Tagaras, G., “Inventory Control of Spare Parts Using a Bayesian Approach: A Case Study,” *European Journal of Operational Research* 154, 730-739, 2004.
- [12] Kabir, A.B.M.Z. and H.A. Farrash, “Simulation of an integrated age replacement and spare provisioning policy using SLAM”, *Reliability Engineering and System Safety* 52, 129-138, 1996.
- [13] Sarker, R. and A. Haque, “Optimization of maintenance and spare provisioning policy using simulation”, *Applied Mathematical Modelling* 24, 751-760, 2000.
- [14] Marseguerra, M., 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, 2005.
- [15] Ahmed, M.A., Alkhamis, T.M., Hasan, M., “Optimizing discrete stochastic systems using simulated annealing an simulation”, *Computers and Industrial Engineering* 32, 823-836, 1997.
- [16] Alkhamis, T.M. and M.A. Mohamed, “Simulation-base optimization for repairable systems using particle swarm algorithm”, *2005 Winter Simulation Conference*, 2005.
- [17] Sleptchenko, A., *Integral Inventory Control in Spare Parts Networks with Capacity Restrictions*, Twente University Press, 2002, the Netherlands.
- [18] Sherbrooke, C.C., *Optimal Inventory Modeling of Systems-Multi-Echelon Techniques*, Kluwer Academic Publishers, 2004, 2nd ed..

附錄一

零件名稱	上層零件名稱	零件類型	數量	價格
CSP1	TKSYS	LRU	3	34355
CSP2	TKSYS	LRU	3	12673
CSP3	TKSYS	LRU	3	38733
CSP4	TKSYS	LRU	20	12696
CSP5	TKSYS	LRU	2	12468
CSP6	TKSYS	LRU	3	26673
CSP7	TKSYS	LRU	3	97552
CSP8	TKSYS	DU	24	366
CSP9	TKSYS	DU	6	118
CSP10	TKSYS	DU	6	685
CSP11	TKSYS	LRU	3	6305
CSP12	TKSYS	DU	3	1488
CSP13	TKSYS	DU	60	14
CSP14	TKSYS	LRU	2	35476
CSP15	TKSYS	LRU	2	17258
CSP16	TKSYS	LRU	3	69238
CSP17	TKSYS	LRU	2	14211
CSP18	TKSYS	DU	4	10836
CSP19	TKSYS	LRU	2	16042
CSP20	TKSYS	LRU	3	3464
CSP21	TKSYS	LRU	3	9886
CSP22	TKSYS	LRU	2	12362
CSP23	TKSYS	LRU	2	13152
CSP24	TKSYS	LRU	3	66218
CSP25	TKSYS	LRU	3	11084
CSP26	TKSYS	LRU	4	69238
CSP27	TKSYS	LRU	2	5836
CSP28	TKSYS	LRU	4	100000
CSP29	TKSYS	LRU	2	77647
CSP30	TKSYS	LRU	3	28523
CSP31	TKSYS	LRU	4	100000

附錄二（單位：天）

CSP1	CSP2	CSP3	CSP4	CSP7	CSP8	CSP9	CSP10	CSP11	CSP12	CSP13
2018	2273	1184	3227	945	672	958	1332	2325	945	672
1975	410	1203	1472	298	737	248	676	1528	500	802
2859	879	2195	2859	1641	415	731	737	2859	485	1452
1000	830	815	3289	215	974	974	1366	730	884	1584
275	2072	1339	2069	395	854	764	794	2954		824
2709	586	705	1494	609	764	734	1249	2404		
2434	201	850		304			1155	1554		
2705	1584	1550					274			
549	1734	1189								
	395	2099								
	880	2224								
	854									

CSP14	CSP15	CSP17	CSP19	CSP20	CSP21	CSP22	CSP23	CSP24	CSP25
1008	1008	2040	62	1247	673	88	27	2239	1496
214	214	948	532	674	1073	24	299	685	548
821	1381	401	1472	325	858	167	87	1037	221
955	194	312	919	529	2859	2946	1547	2859	823
194	1846	640	196	2859	3164	1917	118	2435	740
1846	847	441	858	305	1949	813	1062	1219	749
1013	166	544	1106	2370		128	156	1524	452
1160	2585	176	1786	369		914	650	1064	350
880	734	226	477	2220		1004	407		1779
120	1250	1448	596	184		90	879		436
429	334	206	215	885		215	582		499
940	1310	120	425	669		60	1086		330
945	214	90	245			335	312		640
214		185	1275			1700	210		2010
		120	185			1159	520		639
		395	1339			1919	760		850
		975	1430				365		1249
		610	794				605		760

		1034	850				369		915
		910	1129				1520		639
		580					550		
		214					334		
		395					425		
		425					365		
		885					429		
		240							
		399							

CSP26	CSP27	CSP28	CSP29	CSP30	CSP31
1215	560	945	172	1376	3251
2195	1433	663	1304	531	1956
2859	1120	214	415	233	1944
2495	1096	762	194	189	915
1189	205	455	2415	672	2709
214	405	335	245	1150	1674
2224	664	609	699	727	1979
	1255	669	1310	422	
	1108		395	1155	
	670		214	630	
	120			252	
	335			170	
	940			652	
	885			760	
	670			1495	
	304			515	
	1305			914	
	855			120	
	244			1159	
	1215			1155	
	125			730	
	425			429	
	609				

附錄三

零件名稱	上層零件名稱	零件類型	數量	價格
CSP2	TKSYS	LRU	3	12673
CSP3	TKSYS	LRU	3	38733
CSP4	TKSYS	LRU	20	12696
CSP5	TKSYS	LRU	2	12468
CSP6	TKSYS	LRU	3	26673
CSP7	TKSYS	LRU	3	97552
CSP8	TKSYS	DU	24	366
CSP9	TKSYS	DU	6	118
CSP10	TKSYS	DU	6	685
CSP11	TKSYS	LRU	3	6305
CSP12	TKSYS	DU	3	1488
CSP13	TKSYS	DU	60	14
CSP14	TKSYS	LRU	2	35476
CSP15	TKSYS	LRU	2	17258
CSP16	TKSYS	LRU	3	69238
CSP18	TKSYS	DU	4	10836
CSP20	TKSYS	LRU	3	3464
CSP21	TKSYS	LRU	3	9886
CSP22	TKSYS	LRU	2	12362
CSP23	TKSYS	LRU	2	13152
CSP24	TKSYS	LRU	3	66218
CSP25	TKSYS	LRU	3	11084
CSP26	TKSYS	LRU	4	69238
CSP27	TKSYS	LRU	2	5836
CSP28	TKSYS	LRU	4	100000
CSP29	TKSYS	LRU	2	77647
CSP30	TKSYS	LRU	3	28523
CSP31	TKSYS	LRU	4	100000
CSP32	TKSYS	LRUO	1	133984.5
CSP1	CSP32	SRU	3	34355
CSP33	TKSYS	LRUO	1	36948.6
CSP17	CSP33	SRU	2	14211
CSP34	TKSYS	LRUO	1	41709.2

CSP19	CSP34	SRU	2	16042
-------	-------	-----	---	-------

