

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

操作及支援成本與後勤參數關係之研究

(Study of logistic parameters affecting operation and support costs)

計畫類別： 個別型計畫

計畫編號：NSC 91 - 2212 - E - 002 - 084

執行期間： 91 年 8 月 1 日至 92 年 7 月 31 日

計畫主持人：劉正良

計畫參與人員：張建國

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：臺灣大學機械工程學系

中 華 民 國 九 十 二 年 七 月 三 十 一 日

可供推廣之研發成果資料表

? 可申請專利

! 可技術移轉

日期：92年7月31日

國科會補助計畫	計畫名稱：操作及支援成本與後勤參數關係之研究 計畫主持人：劉正良 計畫編號：NSC 91 - 2212 - E - 002 - 084 學門領域：自動化
技術/創作名稱	操作及支援成本與後勤諮詢
發明人/創作人	劉正良、張建國
技術說明	本研究針對操作及支援成本與可靠度、維護度、妥善率之相互關係，配合美國軍規 MIL-STD-1388-2B 規範，提出一套獲得操作與支援成本的方法。在系統設計初期加入後勤支援的考量，可以有效提高系統可靠度、維護度與妥善率，並可降低系統之直接操作支援成本。最後以堆高機之兩種機型為案例，比較其成本差異。
	This work analyzes reliability, maintainability and availability that affect operation and support costs. To add logistic support consideration at the first stage of systematic design period may effectively increase reliability, maintainability and availability of a system. Thus decreases operation and support cost of that system. Referring to USA MIL-STD-1388-2B specification, some major items will be selected so as to establish operation and support costs of a system. A forklift vehicle is chosen as a case study to understand its performance.
可利用之產業及可開發之產品	適合具有設計、製造、操作、維修等產品週期之機電產業，其範圍並不限於單件產品之開發。
技術特點	凡產品具有階層式之系統架構，其次系統、元件、費用產生項目能予以參數化及賦予權重者，均可依設計或經驗加入可靠度、維護度與妥善率，以估計操作與維修成本，使產品週期在開發階段即能預期產品之週期成本。
推廣及運用的價值	要了解所設計的產品的操作及支援成本，必須先建立產品的操作及支援成本模型，使產品在設計開發階段，即能對於產品有清楚的了解，作出較佳的設計。利用建立此成本模型的過程，系統化地建立操作及支援成本模型，對後續之操作及維修均能確切掌握。

1. 每項研發成果請填寫一式二份，一份隨成果報告送繳本會，一份送 貴單位研發成果推廣單位（如技術移轉中心）。

操作及支援成本與後勤參數關係之研究

劉正良 張建國

國立臺灣大學 機械工程學系

國科會計劃編號：NSC 91 - 2212 - E - 002 - 084

中文摘要：

後勤是一種自然科學與人文科學的綜合學問。在系統設計初期加入後勤支援的考量，可以有效提高系統可靠度、維護度與妥善率，並可降低操作支援成本。以長期的觀點考量，操作及支援成本對於系統壽命週期成本影響甚大，故本研究針對操作及支援成本與可靠度、維護度、妥善率之相互關係，提出一套獲得操作與支援成本的方法。

關鍵詞：操作及支援成本、可靠度、維護度、妥善率

英文摘要：

This work analyzes reliability, maintainability and availability that affect operation and support costs. To add logistic support consideration at the first stage of systematic design period may effectively increase reliability, maintainability and availability of a system. Thus decreases operation and support cost of that system. Referring to USA MIL-STD-1388-2B specification, some major items will be selected so as to establish operation and support costs of a system. A forklift vehicle is chosen as a case study to understand its performance.

Keywords: operation and support costs, logistics, availability, reliability, maintainability

報告內容：

一、前言

後勤的應用範圍廣博且複雜，其領域包含系統的整個生命週期，從需求產生開始，概念設計、細部設計、製造與部署、操作與支援以及淘汰等階段，後勤的活動均有非常重要的影響。

為了讓系統在操作壽命中有最高效益，後勤的概念必定會影響到概念設計、細部設計、製造、操作支援，甚至會影響到最後捨棄系統時的處理方式。因此，現代的設計人員在進行系統設計時，必定需要考慮到後勤對操作及支援成本的影響。

若能建立一個操作及支援成本模型，或是能夠發展一套建立此模型的方法，能夠簡易地建立出合用且正確的模型，將使設計人員在設計時，對於產品有更清楚的了解，或可藉此作出較佳的設計；同時這一套建立操作及支援成本模型的方法也可以讓維修人員、管理人員使用，作為產品的維修工作以及各項決策的參考。

二、成本模型推導

關季明[1]認為依壽命成本的定義，獲得之系統依其性質和效能的不同，大致上又可分成兩類：

1. 無修復性的 (non-repairable)，或稱為完全失效型 (ultimate failure)，多屬費用性支出的消耗品，在使用期間不會發生作業維修費用，經使用一段期限以後，即需報廢、重新購置。

2. 可修復性的 (repairable)，或稱為效能遞減型 (diminishing effectiveness)，多屬資本性支出的物品，使用壽命期間，常須負擔額外的後勤維修費用，減緩其效能遞減率，以延長系統的壽命，故其壽期成本要比原售價多出許多。

在本研究中，操作及支援成本的項目參考 CASA 所提出的壽期成本項目，其中有 16 項是關於操作及支援成本，這 16 項成本可能發生在三個維修階層，李順德[2]定義這三個維修階層如下：

1. 初級 單位或 O 階層(organizational level)，在此維修階層將執行最基本而簡單的拆裝維修工作，只需要配置最簡單的維修支援。
2. 中級 場站 野戰或 I 階層(intermediate level)，在此維修階層將執行較複雜的檢修工作，所以，配置維修支援的類別及深度與其執行工作的內容相關。
3. 高級、原廠、基地或 D 階層 (depot level)，在此維修階層將執行最詳細且複雜的翻修工作，所以，需要配置所有必要的測試裝備及生產設備。

本研究在建立系統模型的部分可用圖 1 表示，首先需要系統爆炸圖、零件圖等系統結構資料來建立 SBOM 模型；接著需要零組件可靠度資料配合 SBOM 來建立可靠度模型；借由可靠度模型所估計出的可靠度數據來進行維修工作的規劃，並以此建立維護度模型；在得到系統維護度數據後可以進一步計算出系統妥善率數據；以上述多項資料配合 CASA 中的 16 項操作及支援成本，進行操作及支援成本估計。

三、SBOM

在進行後勤支援分析時，為了要有效地建立與使用後勤支援分析資料，必須要針對所要分析的系統建立後勤支援分析控制碼 (logistics support analysis control number, LCN)，藉由此一控制碼將各項後勤資料與系統作連結，以確認各項資料與系統的相關性。

要建立有效的 LCN 控制碼需要有一個系統的結構材料清單，一個基本的結構材料清單可以圖 2 表示，將所要分析的主系統拆解為數個次系統，次系統可依據情況繼續拆解為次系統，此處的次系統亦可以由單一零件構成；Wing et al.[3]的研究指出利用此種樹狀圖展開方式，配合各項參數資料的填寫，可將最低維修單位的資料記錄下來，透過各種計算方式將資料處理後，提供系統層級作為決策依據。

傳統上，建立系統材料清單的方式是依照系統的外觀特徵或工程圖來作分解；在將系統分解為次系統或零組件時，可以分成依照系統實體 (physical) 作分解，或是依照系統功能 (functional) 作分解，其中建立一組依據系統實體分解的方式較為容易，但在進行可靠度與維護度分析時，純粹依據系統實體作分解會造成失效率、可靠時間與維護頻率等資料的計算錯誤。

但若要依照功能將系統分解，最容易遇到的問題就是無法細分到最小的零件，大多只能將主系統分解成數個功能群組，無法只依據此種分解方式紀錄所有元件資料。

為了解決上述的問題，同時採取兩種分解方式並加以適當修改或可以得到較好的結果，其要點如下：

1. 使用系統爆炸圖作為將系統分解的依據。
2. 在上層分解的前幾層採用功能性分解，例如將主系統的電路系統、液壓系統獨立出來；而且同一層次的系統不會互相影響，例如圖 2 的次系統 A 失效不會造成次系統 B 的失效。
3. 在較下層的分解中則採用實體分解的方式進行，例如電路系統中有前燈構造與後燈構造。

建立好結構材料清單後，就可進行 LCN 的編碼工作，編碼規則大致如圖 2 所示，詳細規則請見 USA-MIL-STD-1388-2B[4]。

四、可靠度分析

假設在主系統中有 n 個次系統，其中 n 個次系統平均使用壽命 (T_i) 為已知，且 n 個次系統間的失效情況不會互相影響，若工作時間為 t ，主系統的平均使用壽命如公式 (3)。

$$\text{第 } i \text{ 個次系統的可靠度為 } R_i = e^{-\frac{t}{T_i}} \quad (1)$$

主系統的可靠度 R 的推導方式如公式 (2)

$$R = e^{-\frac{t}{T}} = \prod_{i=1}^n R_i = e^{-\sum_{k=1}^n \frac{t}{T_k}} \quad (2)$$

$$e^{-\frac{t}{T}} = e^{-\sum_{i=1}^n \frac{t}{T_i}}$$

$$\frac{1}{T} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{T_i}$$

$$\text{主系統的平均使用壽命 } T = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{T_i}} \quad (3)$$

由圖 3 中次系統的平均使用壽命資料，配合推導出的公式 (3)，可以算出主系統的平均使用壽命 T 。

$$T = \frac{1}{\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_3} + \frac{1}{T_4} + \dots}$$

同樣地，由圖 4 中次系統的平均使用壽命資料，配合推導出的公式 (3)，可以算出次系統 A 的平均使用壽命 T_1 。

$$T_1 = \frac{1}{\frac{1}{T_{1,1}} + \frac{1}{T_{1,2}} + \frac{1}{T_{1,3}} + \frac{1}{T_{1,4}} + \dots}$$

五、維護度分析

要計算出系統的維護度，須先建立維修工作清單，一般的維修工作清單內容分為預防性維修工作與改正性維修工作；其中預防性維修工作是為了讓系統的可靠程度維持在一定的程度而建立，一般以建立系統定期檢修工作清單來達成，內容主要是保養與更換耗材一類的工作；改正性維修工作是在系統發生非預期性損壞時所進行的維修工作，需要針對系統進行失效模式與效應分析，列出各種失效狀況以及對應的維修工作；在此兩類型維修工作中需要紀錄各項工作的平均維修時間、維修頻率等資料來計算系統維護度。

假設系統 A 中共有預防性維修工作 n 項，其中每項預防性維修工作平均維修時間為 Mp_i ，發生頻率為 fp_i ；改正性維修工作 m 項，每項維修工作平均時間為 Mc_j ，發生頻率為 fc_j ，則依據 Langford[5] 所整理的資料進行主系統的平均維護時間 (M) 推導。

$$M = \frac{\sum_{j=1}^m fc_j \times Mc_j + \sum_{i=1}^n fp_i \times Mp_i}{\sum_{j=1}^m fc_j + \sum_{i=1}^n fp_i} \quad (4)$$

Mc_j : 第 j 項改正性維修工作的平均維修時間。

fc_j : 第 j 項改正性維修工作的改正性維修率。

Mp_i : 第 i 項預防性維修工作的平均維修時間。

fp_i : 第 i 項預防性維修工作的預防性維修率。

M : 平均維修時間，本研究中以平均維修時間作為評估維護度高低的依據。

六、妥善率分析

妥善率是一個運作前的指標，指出系統達成操作任務的可能性。妥善率的定義為一種用來量測系統準備妥當來達成系統功能的機率。妥善率也就是將系統可操作的時間，除以系統可使用時間與不可使用時間的和。討論妥善率時所採用的簡化方式主要有以下幾項：

1. 固有妥善率 (A_i)

2. 操作妥善率 (A_o)

固有妥善率的定義為：在理想環境下的妥善率，特點在於所有的後勤需求的資源都已經準備妥當，也就是說在失效發生時，立即可以開始進行維修的動作，屬於一種在設計階段就可以獲得的參考值，其數學模型如下：

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (5)$$

$MTBF$: 平均失效間隔時間。

$MTTR$: 平均維修時間。

操作妥善率 (A_o) 與固有妥善率 (A_i) 之間不同處在於：操作妥善率需要考慮實際操作時，後勤延遲所造成的時間延誤。其數學模型如下：

$$A_o = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + MLDT} \quad (6)$$

$MLDT$: 平均後勤延遲時間。

因為增加了後勤延遲時間的考量，操作妥善率較固有妥善率更能代表實務上的妥善率，操作妥善率的示意圖如圖 5。

七、成本估計

參考 CASA 所提出的壽期成本項目，其中有 16 項是關於操作及支援成本，如表 1 所示。

依照 USA-MIL-STD-1388-2B 的規劃，操作與支援等動作會在三個階層發生，分別是單位階層、場站階層及基地階層，因此以上列出之 16 項操作與支援成本需要就三個維修階層作紀錄，所以在操作及支援成本部分可以簡化為下列形式。

$$OSC = \sum_{j=1}^{16} X_j^o + \sum_{j=1}^{16} X_j^i + \sum_{j=1}^{16} X_j^d \quad (7)$$

X_j^d : 基地階層的成本項目，上標的 d 表示 depot level，下標的 j 為成本項目編號。

- X_j^i : 場站階層的成本項目, 上標的 i 表示 intermediate level, 下標的 j 為成本項目編號。
- X_j^o : 基地階層的成本項目, 上標的 o 表示 organizational level, 下標的 j 為成本項目編號。

前述之 16 項操作及支援成本中, 有多項與可靠度、維護度與妥善率無直接關聯, 因此以操作及支援成本的一定比例估計之, 該比例是以 Katz[6]對 Apache 直昇機與操作及支援成本關係的研究結果作為估計值, 本研究所採用的比例如表 2 所示。

其他項操作與支援成本的估計方式如下:

1. 操作人員工資 (X_1):

$$X_1 = A_o \times TTU \times ORP \times SOLR \times FOT \quad (8)$$

TTU : 系統預期使用的總時間。

ORP : 操作人員需計費的時間比率。

$SOLR$: 操作人員時薪。

FOT : 時薪波動調整調整值。

2. 維修人員工資 (X_2):

$$X_2 = TTU \times f \times MTTR \times MLR \times FOT \quad (9)$$

f : 維修率。

$MTTR$: 平均維修時間。

MLR : 維修人員時薪。

5. 維修零件與材料成本 (X_5)、維修消耗品成本 (X_6) 與完全失效形備用品補充成本 (X_7)

$$X_5 = TTU \times f \times MCPR \quad (10)$$

$$X_6 = TTU \times f \times MCPR \quad (11)$$

$$X_7 = TTU \times f \times MCPR \quad (12)$$

$MCPR$: 每次維修一品項之耗材成本。

7. 運輸成本 (X_9)

$$X_9 = TTU \times f \times NRTS \times CPP \quad (13)$$

$NRTS$: 失效品項在維修階層無法修復之機率。

CPP : 平均運送成本。

八、結果與討論

本研究以日本東洋運搬機株式會社的堆高機進行分析, 模型架構以型號 FD20Z5 為主, 驅動單元 (drive unit) 則以離合器形式 (clutch type) 為主, 以此作為本研究所推導之成本估計模型的實際應用例, 並對過程中的狀況加以分析及討論。在這個應用例中, 可靠度模型中所採用的操作時間為預定操作時間; 維護度模型中所採用的維修工作為預防性維修工作, 改正性維修工作時間及頻率則為一估計值; 後勤延遲時間亦為估計值, 妥善率模型則採用操作妥善率。

依據黃靖雄[7]編著之汽車學, 汽車之基本構造可分為五大系統, 分別是動力系、傳動系、電系、底盤系、車身系等。

由於堆高機屬於特種用途之車輛, 與一般汽車相比, 多出了液壓升降系, 藉以舉高、搬運重物,

因此在堆高機的構造分類中加上液壓升降系以滿足功能分類的需求，如此一來可將堆高機分解成如圖 6 所示之六大系統 完成好堆高機的結構材料清單後，依據 USA-MIL-STD-1388-2B 規範進行 LCN 編碼，編碼結果如圖 6 所示。

依據先前推導出之公式 (3) 可以由較下層系統之平均使用壽命推導出上層系統之平均使用壽命，在填入所有下層系統之假設平均使用壽命後，可得如表 3 的結果。

收集堆高機之單位預防性維修資料如表 4 所示，配合公式 (4) 可以算出次系統單位預防性維修工作的平均維護時間，也可進一步算出系統單位預防性維修工作的平均維護時間，如表 5 所示。以相同方式整理堆高機之單位改正性維修資料如表 6 所示、堆高機之基地維修資料如表 7 所示。由表 4 至表 7 的資料配合公式 (4) 得以計算出堆高機的平均維護時間 M 及維護頻率 f 。

$$M = \frac{fp_0^o \times Mp_0^o + fc_0^o \times Mc_0^o + fp_0^d \times Mp_0^d + fc_0^d \times Mc_0^d}{fp_0^o + fc_0^o + fp_0^d + fc_0^d}$$

$$= 48.82(\text{min})$$

$$f = fp_0^o + fc_0^o + fp_0^d + fc_0^d$$

$$= 0.0874(1/\text{hr})$$

在經過維護度模型的試算後，在系統操作階段的平均使用壽命就應該以維修率的倒數來表示，而非可靠度模型中的平均使用壽命，以維修率的倒數來表示才能表現出妥善率的意義；由先前所推導出之 M 與 f 配合公式 (5) 與公式 (6)，可以得到系統的妥善率數值，其中固有妥善率 (A_i) 為 93.36%。

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{0.0874} = 11.44(\text{hr})$$

$$A_i = \frac{T}{T + M}$$

$$= \frac{11.44 \times 60}{11.44 \times 60 + 48.82} = 93.36\%$$

由於堆高機為一般工程中常用車輛，維修所需要之耗材與零組件容易獲得，受到後勤延遲的影響也會比較小，若將平均後勤延遲時間設定為平均維修時間的一半，則得到操作妥善率 (A_o) 為 90.35%。

$$MLDT = \frac{M}{2} = \frac{48.82}{2} = 24.41(\text{分鐘})$$

$$A_o = \frac{T}{T + M + MLDT}$$

$$= \frac{11.44 \times 60}{11.44 \times 60 + 48.82 + 24.41}$$

$$= 90.35\%$$

依據第四章所建立的公式 (8) 至公式 (13)，配合先前所計算出可靠度維護度與妥善率等資料，可以開始進行成本估計，配合堆高機之特性，各項成本的估計方式如下。

$$X_1 = 90.35\% \times TTU \times 1 \times 150 \times 1 = 135.50 \times TTU$$

$$X_2 = X_2^o + X_2^d$$

$$= TTU \times (fc_0^o \times Mc_0^o + fp_0^o \times Mp_0^o) \times MLR^o \times FOT$$

$$+ TTU \times (fc_0^d \times Mc_0^d + fp_0^d \times Mp_0^d) \times MLR^d \times FOT$$

$$= TTU \times (0.0266 \times \frac{71.25}{60} + 0.06 \times \frac{11.41}{60}) \times 150 \times 1$$

$$+ TTU \times (0.000476 \times 1860 + 0.000333 \times 2400) \times 240 \times 1$$

$$= 13.21 \times TTU$$

$$Xp_5^o = TTU \times \sum_{i=1}^n (f_i \times MCPR_i^o) = 6.325 \times TTU$$

$$Xc_5^o = TTU \times \sum_{i=1}^n (f_i \times MCPR_i^o) = 22.00 \times TTU$$

$$X_5^d = TTU \times \sum_{i=1}^n (f_i \times MCPR_i^d) = 17.08 \times TTU$$

$$X_5 = Xp_5^o + Xc_5^o + X_5^d = 45.41 \times TTU$$

$MCPR_i^o$: 第 i 項維修工作在單位階層的平均維修耗材成本

$MCPR_i^d$: 第 i 項維修工作在基地階層的平均維修耗材成本

$$X_9 = TTU \times \left(\frac{1}{2400} + \frac{1}{16800} + \frac{1}{3000} \right) \times 6000 = 4.86 \times TTU$$

$$X_1 + X_2 + X_5 + X_9 = (135.53 + 13.21 + 45.41 + 4.86) \times TTU$$

$$= 190.00 \times TTU$$

$$OSC = 190.00 \times TTU \div (1 - 22.5\%) = 256.77 \times TTU$$

以長期使用、大量使用的觀點來看 TCM 堆高機 FD20Z5(clutch type)的操作與支援成本，可將操作與支援成本與使用時間的關係以圖 7 表示。

九、結論

本研究旨在求得一個建立操作及支援成本模型的方法，在順利建立操作及支援成本模型之後，將可以更加準確估計壽期成本。

本研究利用美國軍規 1388-2B 中建立結構材料清單的概念，將系統以類似樹狀圖展開的方式進行拆解，並在拆解過程對每一個元件進行 LCN 編碼，以便將每一個元件的可靠度、維護度與妥善率等相關資料記錄起來，同時透過這種樹狀圖展開的方式，也可以讓較低維修階層的資料在透過一定方式的計算之後，提供資訊讓較高階層作為決策的依據；在成本估計的部分，本研究採用 CASA 對操作及支援成本定義的十六項成本項目作為核心，首先針對每一項成本項目建立估計方程式，在填入可靠度、維護度與妥善率等相關後勤資料後，將十六項成本累加作為本研究的成本模型。

透過這個方法，在系統設計的初期，就可以針對可能的設計方案進行操作及支援成本的估計，讓設計人員在設計的流程中，能夠對未來系統運作的狀況有更多了解；同時以參數化的設計，使得此模型可以經簡單的修改而合於其他使用條件，能夠減少在進行操作及支援成本估計時所花費的時間；並利用建立此成本模型的過程，規劃一個系統化建立操作及支援成本模型的方法，以為需要自行建構操作及支援成本模型的人士之參考。

參考文獻

- [1]關季明，維護度工程與系統可用度，中華民國品質學會，第 168-169 頁，1997
- [2]李順德，整體後勤支援原理及應用，華泰書局，第 17-25 頁，1997
- [3]Wing, Thomas E. and Larry H. Crow, A model for mean-time-to-repair and mean-logistics-delay-time at the system level, Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp.389-393, 1990
- [4]USA MIL-STD-1388-2B: Logistic Support Analysis, 2002(updated)
- [5]Langford, John W., CPL, CPM, Logistics: principles and applications, McGraw-Hill, Inc., New York, pp.3-84, 1995
- [6]Katz, Richard A., Graphical Methods for Exploratory Data Analysis (A Study of O&S Costs for the AH-64A Apache Helicopter), SCEA/ISPA Joint International Conference and Educational Workshop, 1999

