

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

以知識為基之機械設備支援及維修諮詢系統

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2622-E-002-017-CC3

執行期間：91年06月01日至92年05月31日

執行單位：國立臺灣大學機械工程學系暨研究所

計畫主持人：劉正良

計畫參與人員：劉正良，鍾添東，張建國，梁效榕

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫為提升產業技術及人才培育研究計畫，不提供公開查詢

中 華 民 國 92 年 9 月 22 日

國科會補助提升產業技術及人才培育研究計畫成果精

簡報告

學門領域：生產自動化

計畫名稱：以知識為基之機械設備支援及維修諮詢系統

(Knowledge-based Query System for Support and Maintenance of Mechanical Equipments)

計畫編號：NSC 91-2622-E-002-017-CC3

執行期間：91 年 6 月 1 日至 92 年 5 月 31 日

執行單位：國立台灣大學機械系

主持人：劉正良

協同主持人：鍾添東

參與學生：

姓名	年級 (大學部、碩士班、博士班)	已發表論文或已申請之專利 (含大學部專題研究論文、碩博士論文)	工作內容
張建國	碩士班	張建國，”操作及支援成本與後勤參數關係之研究”，台大機械研究所碩士論文，2003/06.	設備後勤支援成本分析方法
梁效榕	碩士班	梁效榕，”以知識為基之機械設備錯誤診斷及維修諮詢系統”，台大機械研究所碩士論文，2003/06.	維修諮詢系統發展
黃 晟	碩士班		智慧型整合程式之發展

合作企業簡介

合作企業名稱：眾智國際股份有限公司

計畫聯絡人：吳美蓉 總經理

資本額：3000 萬元

產品簡介：系統設計、開發與整合

網址：<http://www.omniwise.com.tw/> 電話：(02) 27160958

一、研究摘要

(a) 中文摘要

以知識為基之機械設備支援及維修諮詢系統

摘要

本計畫發展一套知識為基之機械設備支援及維修諮詢系統，其目的在藉由篩選出影響支援及維修成本較大的後勤參數，以降低機械設備之壽命週期成本。

首先，參考美國 MIL-STD-1388-2B 規範建立一個資料模式，用以表示零件故障因素、維修程序與後勤參數。另外提出一套方法分析影響操作及支援成本之後勤參數（如：可靠度、維護度與妥善率）。並從 MIL-STD-1388-2B 規範中選出一些主要後勤項目，以建立系統操作及支援成本之評估法則。

接著，藉由建立系統之資料模式，發展一套包含故障診斷、維修支援、操作及支援成本評估等的知識為基電腦程式。諮詢系統則由整合上述知識為基程式與必要介面程式而成。在使用後向鍊結之推論機求得故障零件後，諮詢系統將以文字配合圖像顯示其維修程序。此外亦可提供諮詢影響操作及支援成本的後勤參數，例如可靠度、維護度與妥善率等，並獲得壽命週期成本隨著後勤參數改變的趨勢。最後，以戰車為例驗證所發展諮詢系統之功能。

關鍵字：後勤支援、妥善率、可靠度、知識為基系統、故障診斷

(b) 英文摘要

Knowledge-based Query System for Support and Maintenance of Mechanical Equipments

ABSTRACT

This project develops a knowledge-based query system for support and maintenance of mechanical equipments. The purpose of this project is to reduce the life cycle cost through providing necessary logistic parameters that influence the support and maintenance cost of that system.

First, a data model containing information about fault reasons, maintenance procedure and logistic parameters is established referring to USA MIL-STD-1388-2B specification. Methods for analyzing logistic parameters, such as reliability, maintainability and availability, that affect operation and support costs are proposed. Some major items are selected from MIL-STD-1388-2B specification to establish estimable rules for establishing operation and support costs of a system.

Second, based on the established data model for the system, knowledge-based computer programs for fault diagnosis, maintenance assistance and evaluation of operation and support costs are developed. Integrating these knowledge-based programs and the necessary user interface programs forms a

query system. An inference engine using backward chaining is applied for finding the fault component, and, after finding the fault component, the query system displays the maintenance procedure with textual information, accompanied with graphical images. Logistic parameters affecting the operation and support costs, such as reliability, maintainability and availability, can also be queried. The trend of life cycle cost thus can be obtained according to these logistic parameters. Finally, a tank is chosen as a case study to verify the capabilities of the developed query system.

Keywords : logistic support, reliability, availability, knowledge-based system, fault diagnosis

二、人才培育成果說明

本計畫對人才培育方面之成果說明如下：

- 訓練參與人員發展智慧型系統之能力。
- 訓練參與人員對後勤支援與維修程序之瞭解。
- 與企業界共同研究發展，增進產學雙方人員交流。
- 訓練參與人員瞭解如何建立機械設備之可靠度、妥善率、操作及支援成本評估等分析方法。
- 訓練參與人員對熟悉智慧型支援及維修系統之使用方法。

三、技術研發成果說明

本計畫建立一個可以系統化處理並管理機械設備支援及維修相關知識的諮詢系統，該系統整合零件故障診斷、維修支援與訓練以及操作及支援成本評估技術，使得有經驗的操作者可藉著此系統得到維修上的支援，新手可得到操作及維修流程的訓練，而管理者可得到設備維修或汰換成本考量上的建議，經由本系統之應用可提高機械設備妥善率，並降低直接操作及維護支援成本。所發展之智慧型諮詢系統可運用於軍事裝備，提升後勤維修效率，增強戰力。

本計畫完成之研發成果包括：

1. 定義適合機械設備後勤支援之資料模式
2. 建立機械設備之可靠度分析方法
3. 建立機械設備之妥善率分析方法
4. 建立機械設備操作及支援成本之評估方法
5. 建立零件故障診斷之推論方法
6. 建立零件維修程序之顯示方法
7. 機械設備相關後勤參數之建立及諮詢方法
8. 發展機械設備智慧型諮詢系統之電腦程式
9. 戰車之實例應用與展示

四、技術特點說明

以往有關支援與維修系統之研究，大都探討錯誤診斷、支援維修等功能，甚少考量成本因素。至於後勤支援對系統參數之影響，通常針對可靠度、維護度及妥善率等參數討論，甚少針對後勤參數與成本關係作研究；另國內較少自行發展機械設備之智慧型支援及維修諮詢系統。

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。

本計畫利用智慧型程式之特性，累積及傳承領域專家之經驗，提供上層級決策者操作及支援之資訊。針對機械設備設計者在概念設計階段，提供不同設計方案之操作及支援成本資訊，以為擇優選擇之依據，並研究後勤參數與操作及支援成本之關連性。

五、可利用之產業及可開發之產品

對具有設計、製造、操作、維修等產品週期之機電產業，均可應用本研究成果建立其支援及維修諮詢系統，其應用範圍並不限於單件產品之開發。另對於國防工業而言，經由利用本系統之應用，可提升設備之可靠度及妥善率，降低設備之操作及支援成本；對已經損壞之設備經由本計畫發展之錯誤診斷及維修諮詢可加速設備修復程序，提升國軍之整體戰力。

六、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。

行政院國家科學委員會提升產業技術及人才培育計畫

以知識為基之機械設備支援及維修諮詢系統

(Knowledge-based Query System for Support and Maintenance of Mechanical Equipments)

計畫主持人：劉正良

協同主持人：鍾添東

計畫編號：NSC 91-2622-E-002-017-CC3

精簡報告

一、前言：

後勤的應用範圍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，設計人員在進行系統設計時，必須考慮到後勤對操作及支援成本的影響。

若能建立一個合用且正確操作及支援成本模型，及簡易建立此模型的方法，將使設計人員在設計時，對產品有更清楚的了解，藉此作出較佳的設計；也可以讓維修、管理人員，作為維修工作及各項決策的參考。

另外近年來，機械設備正朝著”體積越小、功能越強大”的方向發展。設備複雜程度的增加，同時增加故障診斷、維修以及後續保養工作的複雜度，及維修人員訓練的困難。為了在專家或經驗豐富的人力不可得，或是時間急迫的情況下，亦保有一定維修水準，結合電腦技術發展診斷及維修支援之專家系統實為時勢所趨。這樣的系統可整合後勤支援所需的各種功能，除協助維修經驗保存、新進人力訓練等功能外，亦可整合物流、倉儲等產品管理系統，以減少後勤支援之資訊傳遞時間、降低維修支援時間和成本。

二、機械設備後勤支援之資料模式：

本文參照 USA MIL-STD-1388-2B 規範[1]訂定機械設備操作及後勤支援資料模式。首先先建立結構材料清單(structure bill of material, SBOM)作為系統分解結構，接著建立「後勤支援分析控制碼」(logistics support analysis control number, LCN)，用以連結各項後勤資料、定義各種設備生產、維修、維護、及相關的工具、料件、耗材等資料欄位。編碼規則大致如圖 1 所示，詳細規則請見 USA MIL-STD-1388-2B。

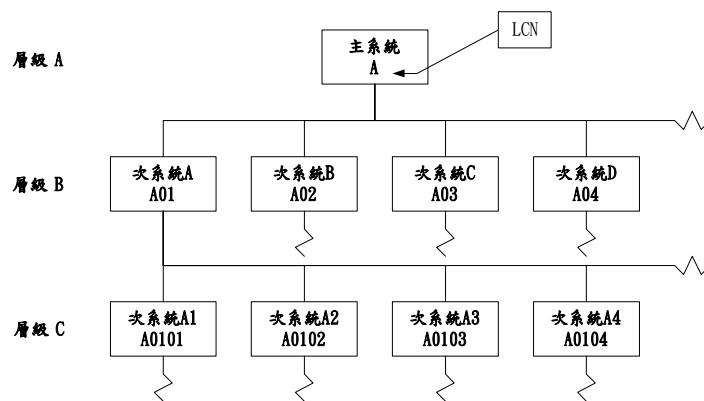


圖 1 系統 LCN 編碼簡圖

三、機械設備之可靠度分析

假設在如圖 2 之主系統中有 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 (1)：

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

$$\text{主系統的可靠度 } R = e^{-\frac{t}{T_i}} = \prod_{i=1}^n R_i = e^{-\sum_{i=1}^n \frac{t}{T_i}} \quad (2)$$

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

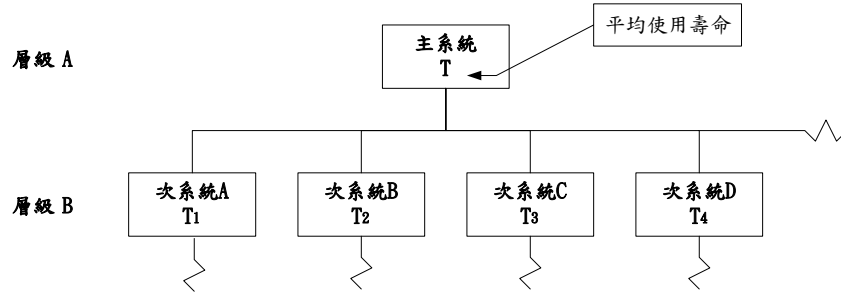


圖 2 可靠度計算示意圖一

四、機械設備之維護度分析

要計算出系統的維護度，須先建立維修工作清單，其內容分為預防性維修與改正性維修工作兩種。預防性維修工作主要是保養與更換耗材一類的工作，以維持系統的可靠程度；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。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[2]所整理的資料進行主系統的平均維護時間 M 推導：

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

五、機械設備之妥善率分析

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。妥善率的定義即系統可操作的時間除去系統可操作時間與不可操作時間的和。討論妥善率時的所採用的簡化方式主要有：固有妥善率 (A_i) 及操作妥善率 (A_o) [3]。

固有妥善率為理想環境下的妥善率，假設所有的後勤需求資源都已準備妥當，在失效發生時，可以立即進行維修，屬於一種在設計階段即可以獲得的參考值。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 (mean logistic delay time)。

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 3：

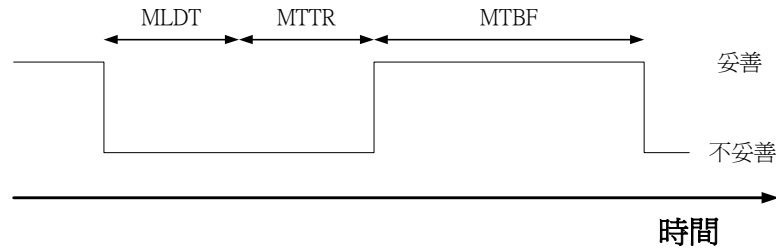


圖 3 操作妥善率示意圖

六、機械設備操作及支援成本之評估方法

在本研究中參考 CASA[4]所提出的壽期成本項目，選擇 16 項關於操作及支援成本的項目，其中有多項與可靠度、維護度與妥善率無直接關聯，因此參考 Katz [5]對 Apache 直昇機操作及支援成本研究作為估計值，以總操作及支援成本一定比例估計之，如表 1 所示。

表 1 後勤操作及支援成本項目表及其估計值

編號	成本項目名稱	成本代號	估計方式
1.	操作人員工資	X_1	$X_1 = A_o \times TTU \times ORP \times SOLR \times FOT$
2.	維修人員工資	X_2	$X_2 = TTU \times f \times MTTR \times MLR \times FOT$
3.	支援設備維護成本	X_3	$X_3 = 4\% \times OSC$
4.	持續訓練成本	X_4	$X_4 = 9\% \times OSC$
5.	維修零件與材料成本	X_5	$X_5 = TTU \times f \times MCPR$
6.	維修消耗品成本	X_6	$X_6 = TTU \times f \times MCPR$
7.	完全失效型備用品補充成本	X_7	$X_7 = TTU \times f \times MCPR$
8.	技術文件校訂成本	X_8	$X_8 = 2\% \times OSC$
9.	運輸成本	X_9	$X_9 = TTU \times f \times NRTS \times CPP$
10.	後續設備成本	X_{10}	$X_{10} = 2.5\% \times OSC$
11.	後續備料項目管理成本	X_{11}	$X_{11} = 1\% \times OSC$
12.	軟體維護成本	X_{12}	$X_{12} = 1\% \times OSC$
13.	承包商維修服務成本	X_{13}	$X_{13} = 1.5\% \times OSC$
14.	工程變革成本	X_{14}	$X_{14} = 1\% \times OSC$

15.	其他雜項之操作與支援成本	X_{15}	$X_{15} = 1\% \times OSC$
16.	後續保固費	X_{16}	$X_{16} = 1\% \times OSC$

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

f : 維修率

$MTTR$: 平均維修時間

MLR : 維修人員時薪

OSC : 總操作及支援成本

$MCPR$: 每次維修一品項之平均耗材成本
修復之機率

$NRTS$: 失效品項在維修階層無法

CPP : 平均運送成本

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，李順德[6]定義這三個維修階層如下：

1. 初級或單位(organizational level)：執行最基本的拆裝維修，只需配置簡單的維修支援。
2. 中級、場站或野戰(intermediate level)：執行較複雜的檢修工作，配置維修支援的類別及深度與其執行工作內容相關。
3. 高級、原廠或基地(depot level)：執行最詳細且複雜的翻修工作，需要配置所有必要的測試及生產設備。

前述 16 項操作與支援成本需就以上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 d 表示基地階層，下標 j 為成本項目編號。

X_j^i : 場站階層的成本項目，上標 i 表示場站階層，下標 j 為成本項目編號。

X_j^o : 單位階層的成本項目，上標 o 表示單位階層，下標 j 為成本項目編號。

七、零件故障診斷之推論方法

在 Yoshikiyo 等人[7]提出的人造衛星錯誤診斷系統中，系統先對失效途徑作評比，讓擁有較多失效案例者優先表示，以增進診斷的速度。本研究參考此法提出一個基於可能原因數目多寡的知識庫精鍊策略。以可能原因數目（NOC, Number of Causes）及平均可能原因數目（MNOC, Mean Number of Causes）的概念，評估推論時各可能原因對的重要性。

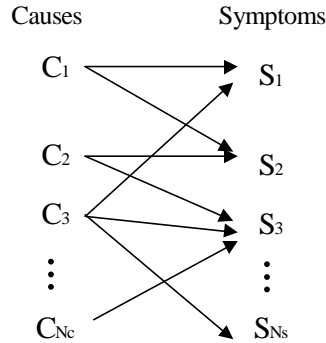
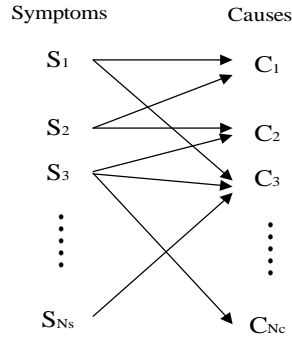


圖 4 傳統手冊中症狀及其原因對應關係 圖 5 整理後之症狀及其原因對應關係

首先在圖 4 的症狀與原因對應中，”症狀”可被視為”可能原因”的函數，亦即一個症狀對應至一或一個以上的可能原因。而推論機先將這些知識精煉成”一個可能原因對應一或一個以上症狀”的格式，如圖 5 所示。整理後之知識庫格式可表示為一函數：

$$cs_pair(C_i, [S_{i,1}, S_{i,2}, S_{i,3}, \dots, S_{i,j}]). \quad (8)$$

cs_pair 為可能原因與症狀之資料對(cause- symptom pair)，其中其中 C_i 為第 i 個可能原因， $S_{i,j}$ 分別代表 C_i 將會導致之第 j 個症狀。在”若一個故障之可能原因為真，則其對應之症狀將全數出現”的前提下，此式之含義為：可能失效原因 C_i 將會導致 S_1, S_2, \dots, S_j 等症狀。所以在同一個系統中，若一個症狀是由較多原因造成，相較於由較少原因造成的症狀，確認此症狀的出現與否，對診斷的流程有較大的影響。

之後由程式計算出各可能原因會導致之症狀數目 NC_i ，以及會導致第 j 個症狀之可能原因數目 $NS_{i,j}$ 。因此，第 i 個 cs_pair 之平均可能原因數目 $MNOC_i$ 可以式 (9) 表示。

$$MNOC_i = \frac{\sum_{k=1}^j NS_{i,k}}{NC_i} \quad (9)$$

之後整個知識精鍊的流程如圖 6 所示，並說明其步驟如下：

1. 查詢原知識庫中的所有症狀，並儲存在症狀串列中。
2. 計算各症狀對應的可能失效原因數目（NOC）。
3. 對各症狀依其 NOC，由大到小排列。
4. 計算症狀串列（symptom list）中各症狀 NOC 之總合。
5. 利用第 4 項結果，計算各資料對之平均原因數目（MNOC）。
6. 知識精鍊模組將各資料對根據 MNOC，由大到小排序。

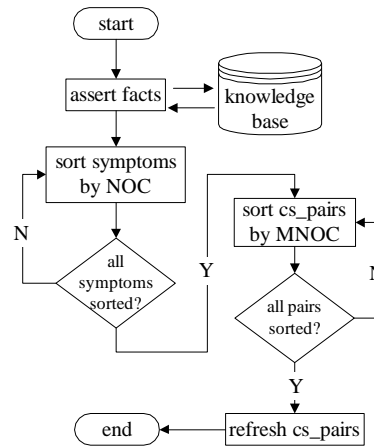


圖 6 知識庫精鍊流程圖

八、以平均原因數目為基之故障診斷專家系統推論策略

基於上述之推論方法，整個診斷的過程步驟簡述如下：

1. 診斷開始，推論引擎初始化，從知識庫讀入所有可能失效原因。
2. 根據前述精鍊策略執行知識精鍊。
3. 根據整理後之暫存知識庫，向使用者提出詢問。
4. 根據使用者的回應，推論引擎對暫存知識庫中的知識作保留或刪除，並決定下一個詢問使用者的問題。
5. 所有資料對皆被確認後，列出可能失效原因以及可能損壞之元件給使用者；若無可能失效原因則顯示推論失敗訊息。
6. 最後診斷結論將被呈現予使用者。最後診斷出的結果可能會是單一失效原因，或者是多個失效原因的混合。

九、機械設備智慧型諮詢系統之電腦程式

本計畫發展之諮詢系統架構衍生自 Ursenbach 等人[8]之智慧型維修支援系統及 Lee 與 Ragusa[9]之電子效能支援系統 EPSS，系統分成四個模組：零件故障診斷模組、維修支援訓練模組、操作及支援成本評估模組、圖文顯示模組。零件故障診斷模組以互動方式向使用者查核故障症狀，並推論出可能失效原因。維修支援訓練模組可藉推論出之失效原因，至資料庫擷取出維修流程、工具等說明，並藉由圖文展示模組表達給使用者。圖文顯示模組可產生 HTML 格式之網頁報表，透過瀏覽器視窗界面，及超連結呼叫對應的程式（例如 AutoCAD 等）來開

啓各種說明檔案，提供使用者維修步驟及操作程序等資訊。操作及支援成本評估模組執行可靠度、妥善率、維護度、人力及操作成本等後勤維修資料分析，提供機械設備管理者作為設備維修及汰換之參考。

智慧型諮詢系統建構時，以前述之資料格式建立包含後勤參數及維修資訊之資料庫，以 Microsoft Visual C++發展系統主控程式，整合上述各模組。故障診斷模組由 Prolog 發展如有需要符號運算或由邏輯式語言撰寫較為簡易之部份，亦由 Prolog 語言撰寫。智慧型諮詢系統之架構如圖 7 所示。

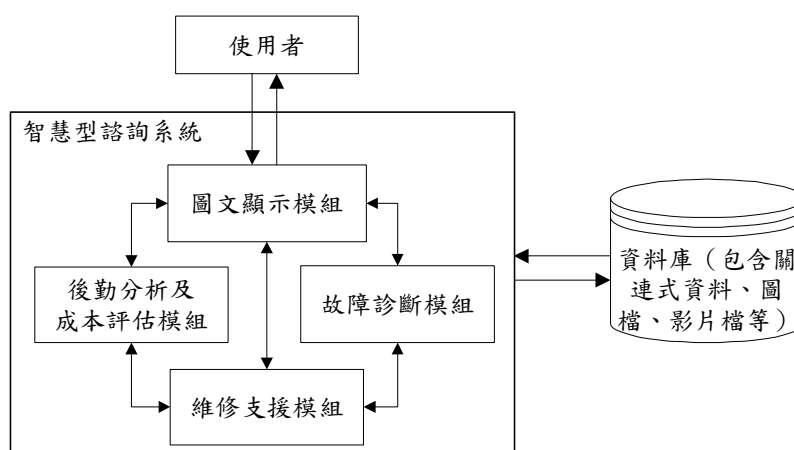


圖 7 智慧型諮詢系統架構圖

九、結論

在本文中所得之具體成果如下：

- 利用 USA MIL-STD-1388-2B 規範建立結構材料清單，將系統以其功能與結構樹狀展開，並對每一個元件進行 LCN 編碼，並以此建立一套適合機械設備錯誤診斷及維修支援之資料庫，用以紀錄元件之後勤參數及相關的維修資訊。
- 在建立可靠度與維護度模型後，本研究採用 CASA 定義的十六項成本項目作為操作及支援成本模型核心。經過評估各成本項目、填入可靠度、維護度與妥善率等後勤資料後，將所有成本項目累加即可得到設備之操作及支援成本。
- 本研究應用知識精鍊策略從建立的資料庫中粹取精鍊後之知識，並在錯誤診斷過程中提出一種基於平均原因數目之新的推論策略，可加速故障診斷流程。
- 本研究結合後勤資訊分析技術以及人工智慧理論發展一套知識為基之機械設備支援及維修諮詢系統，可正確及有效地運用於機械設備之錯誤診斷，並於後勤維修方面提供更完整的資訊。

參考資料

- [1] MIL-STD-1388-2B: *Logistic Support Analysis*, 2002 updated.
- [2] Langford, John W., CPL, CPM, *Logistics: principles and applications*, McGraw-Hill, Inc., New York, 1995, pp.3-84.

- [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*, 1990, pp.389-393.
- [4] 劉豪輝, 大型系統/產品引進之壽命週期成本分析研究, 大葉大學資訊管理研究所, 2000, 6-28 頁。
- [5] 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.
- [6] 李順德, 整體後勤支援原理及應用, 華泰書局, 1997, 17-25 頁。
- [7] Yoshikiyo Kato, Takahiro Shirakawa and Koichi Hori, "Utilizing Fault Cases for Supporting Fault Diagnosis Tasks", *Proceeding of International Conference on Knowledge-based Intelligent Information and Engineering System*, 2002, pp.1~5.
- [8] Ursenbach, A., Wang, Q. and Rao, M., "Intelligent Maintenance Support System for Trucks", *Intelligent Vehicles '95 Symposium*, 1995, pp. 235~240.
- [9] Lee, S. and Ragusa, J. M., "A multimedia electronic performance support system for automatic test equipments operation and training support", *Systems, Man, and Cybernetics, 1997. Computational Cybernetics and Simulation, 1997 IEEE International Conference on*, Vol.3, 1997, pp.2081-2085.