

模糊故障診斷方法之研究

蔡有藤

德霖技術學院 機械系 教授

摘要

隨著科技的進步與自動化技術發展，機台設備漸趨高功能與複雜化，機台設備的保養維護越來越重要；透過故障診斷系統的建立，縮短停機維護時間，使設備發生故障時能迅速排除故障，為製造系統管理上的重要課題。本文探討系統故障徵兆(Symptoms)與故障源的建立方法，利用故障樹分析(Fault Tree Analysis)分析各機具(Tools)可能失效，建立機具失效的判定法則，系統故障徵兆與機具失效間的對應關係。利用模糊理論建立故障徵兆語意表示，對異常徵兆不明確問題建立故障源與徵兆之隸數度，發展模糊故障診斷推論策略；此外，結合貝式估計方法，分析故障底事件之失效機率，以為決定維護優先次序依據。透過二階段故障診斷作業，對徵兆具模糊性的故障問題，提供必要的故障維修資訊，使維護人員可迅速檢出故障源。此外，導入以診斷維修為導向之設計概念(Design for Diagnosis and Maintenance)，藉此改善設備可靠度、維護度、操作度，提昇設備妥善率及生產能力。

關鍵字：模糊估計、故障診斷、維護

A study of fuzzy fault diagnosis strategy

Yuo-Tern Tsai

Department of Mechanical Engineering, De-Lin Institute of Technology

Abstract

Following the development of production technology, equipment is more and more complex and maintenance is also more important in modern industry. In order to rapidly fix the faults and shorten the time of maintenance, fault diagnosis is more critical in maintenance action. This paper presented the method of fuzzy fault diagnosis to support the development remote fault diagnosis system. The technique of Fault Tree Analysis (FTA) is used to drawn out the possible faults and the symptoms of a system. The fuzzy evaluation is used to process the problems of which the faults and the symptoms are dealing with the uncertainty. The faulted subsystem was first decided by a fuzzy operation. The set theory is used to investigate the failure probabilities of the failure causes in each subsystem. The Bayesian estimation is then taken to evaluate the priority of failure for the causes. The web-based diagnosis framework was also suggested to development far-distance fault diagnosis system. Further, the concepts of design for diagnosis and design for maintenance are also proposed for promoting the availability of system in use.

Key words: Fuzzy evaluation, fault diagnosis and maintenance.

一、緒論

機台發生故障，維修工程師可依據機台狀況資料，判斷故障源並依據設備製造商提供之故障維修手冊進行簡易故障排除。然而，相關的診斷與維修知識仍屬工程師的經驗累積，由於工程師或專家的異動，常使得維修經驗與知識無法傳承下來，導致維修人員專業知識不夠；傳統維修作業面臨問題可歸納如下：

- ◇ 當設備發生故障，僅靠人員的知識及經驗來解決，缺乏整體相關訊息，容易造成誤判。
- ◇ 相關故障分析與解決對策，分散於各單位，無法有效整合與累積，以致造成資訊共享程度偏低。
- ◇ 隨著資料日積月累的增加，文件檔案不易維護與查閱。
- ◇ 因缺乏一套製程不良分析系統，故當製程發生不良時，無完整相關資料，提供解決問題的參考，而相關經驗不一定能累積與保存，以致事倍功半、曠廢待時。

為方便診斷及維修作業進行，複雜的機械設備，在出廠時都會附有簡易疑難排解手冊(Troubleshooting manual)，當設備發生簡易故障時，可由技術手冊進行排除，其故障診斷程序為：按照手冊上列出的症狀依序比對，並依可能性高至低列出所有導致該症狀的可能原因，這種做法的好處是手冊易於使用，但如果症狀記載於手冊中較尾端的部分，則需要較多時間尋找對應原因；當維護經驗不足或故障問題較複雜時，依照技術手冊比對方法可能無法滿足維護需求。此外，隨著科技的進展、設備複雜度的增加，體積小、功能強大的設備已越來越普遍，亦使故障診斷及後續維修工作變得困難。為縮短維護時間、有效提升機械設備之維護效率，結合圖像、文字和網路工具來整合過去維修經驗，發展故障診斷維修支援系統是有效的方法。

故障診斷一般都和專家系統結合，透過交談式的徵兆推理找出故障源，它是模擬專家思考之電腦程式，有別於傳統程式著重於數值運算，專家系統運作以符號推理為主，擅長處理知識密集(knowledge intensive)及特定領域的問題，將專家的知識從程式中分離出來單獨形成知識庫，並利用推論引擎處理知識和進行推論，協助使用者進行診斷、規劃以及預測等工作。在過去，專家系統已被廣泛應用於設備之故障診斷，如文獻[1]介紹如何使用專家系統於工程力學問題診斷。文獻[2]提出了智慧型維護支援系統(IMSS)，針對通用公司 J85-CAN -15 噴射引擎所發展，並裝載於 CF-5 戰鬥教練機上，這個以框架為基礎的系統，由診斷(diagnosis)、症狀(symptom)、詞彙(glossary)三個框架類型組成。文獻[3]提出一套渦輪引擎診斷系統 TED，此系統由 Visual Expert 軟體發展，以程序性推論系統(Procedural Reasoning System)為推論機制，是一種程序式及目標導向之問題解決方法。文獻[4]提出一套鐵路即時支援之智慧型案例分析系統 ICARUS。該系統以失效紀錄和修復紀錄作為案例庫的資料來源，從資料中擷取出失效叢集(fault cluster)，並以失效叢集結合權重(weighting)來計算新進案例與既有案例之相似度(degree of match)。文獻[5]提出一套人造衛星錯誤診斷系統，在此系統中，知識被表示成為許多個失效案例(fault cases)；當使用者選定一個組件時，系統由被選取組件之功能相關性連結，計算出每一個可能的失效路徑(failure path)，對各失效路徑作排序，使失效案例較多的失效路徑優先表示，藉以增加故障排除的速度。

在實際機械診斷維修作業之中，須取得相關維修記錄與技術文件報告，並依據實際症狀進行故障檢測與排除工作，例如發生時間、機械環境、機械配備、失效原因與其相關症狀，因此維修專業人員必須確立以下四個問題：

- (1)問題根源(The nature of the problem)：Alarm State
- (2)問題分佈(The deploy of the problem)：The Breakdown Component
- (3)排除方法(The exclude theory)：The Solution
- (4)回饋與改善(Feedback & Improve)：Design Theory & Technique

由於徵兆的模糊性，會使故障診斷發生誤判現象，為模擬人類行為的故障描述，增加診斷的正確性，模糊數學被廣泛使用，如文獻[6]利用模糊理論對動態系統進行故障診斷。此外類神

經網路亦經常被使用在故障診斷，他透過故障徵兆特性萃取，建立故障徵兆和故障間的對應關係，由量測之徵兆狀態對系統故障進行判斷。也有學者使用模糊粗集合進行故障診斷，如文獻[7]透過 VPRSM(Variable Precision Rough-Set Model)的方式，減少雜訊對資料的影響，然後找出模糊較低近似集合與模糊較高近似集合，整合出最泛化模糊規則，作為故障診斷依據。文獻[8]整合類神經網路與模糊粗集合進行遠端故障診斷。

為縮短故障診斷時間，提升故障診斷效率，本文提出二階段故障診斷法，利用模糊故障診斷方法，依據故障異警徵兆，初估可能故障子系統，進一步利用貝式估計方法，估算故障子系統內各失效底事件發生機率，以為維護優先次序之依據。在發展故障診斷系統時，系統故障源及故障徵兆的建立是首要工作，本文使用故障樹分析決定可能故障源與徵兆，建立為故障徵兆集，結合模糊集合理論，對故障徵兆不確定問題，發展模糊故障診斷推論架構，透過事前失效機率分析，對對失效底事件進行排序，使縮短故障診斷時間，診斷作業更具效率。進一步，結合此法與網路伺服器、案例推論伺服器及維護知識庫，將可發展遠距故障診斷維護支援系統。

二、事件集合分析

機械設備故障判別來自於專家累積之經驗與相關症狀的推論，藉由知識庫的建立與相關資訊技術的應用，可將機械所發生的異警狀態(Alarm States)與其對應之失效原因(Causes)整理表現出來。當意異警狀態（事件）與失效原因（結果）為強弱不等的多對多關係時，欲明確指出某事件結果可能相當繁雜，工程人員常需依據異警狀態對多個可能失效原因進行分析，以有效排除故障源。其中，機率是處理這些故障不明確的有效之方法之一，在平常的生活用語之中，機率可以說是衡量某一事件發生之可能性數值，而集合理論分析(Set Theory Analysis)更是機率推算常使用的方法。

2.1 集合理論

集合理論分析可計算在結果不明確情況下某一事件之機率，集合機率推論為直覺性且簡化的高效率計算方法，在一般集合推論方法，應用於診斷領域之分類型問題，特別於醫學病症診斷之應用；如 Tang 等[9]人應用集合理論(Set Theory)進行肺部病變的診斷研究，建構三階段集合篩選模型，並依據專家系統(Expert System)架構進行系統實現，透過交叉集合比對結果，證明此一方法是可行的。

在故障事件之中，機械異警(Alarm)與失效原因(Failure Cause)常存在著多對多交叉集合關係，假設所發生之異警事件(B)並非單一失效原因集合，而是同時產生多個失效原因，則可假設該空間中可能出現的類別總共有 k 個 $\{A_1, A_2, \dots, A_k\}$ ，且每個類別彼此均互斥，其集合分布狀態若 $k=5$ ，則集合圖形如圖 1 所示，

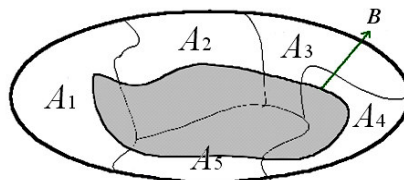


圖 1 事件集合分佈狀態

其中

$$\begin{aligned} P(B) &= P(B \cap A_1) + P(B \cap A_2) + \dots + P(B \cap A_k) \\ &= P(A_1)P(B|A_1) + P(A_2)P(B|A_2) + \dots + P(A_k)P(B|A_k) \end{aligned} \quad (1)$$

此異警事件與失效集合關係可表示成條件機率，如下

$$P(A_i | B) = \frac{P(A_i)P(B | A_i)}{P(B)} \quad (2)$$

將(1)代入(2)的分母，可以得到應用於 k 個事件類別的條件機率，

$$P(A_i | B) = \frac{P(A_i)P(B | A_i)}{P(A_1)P(B | A_1) + P(A_2)P(B | A_2) + \dots + P(A_k)P(B | A_k)} \quad (3)$$

當我們要判斷異警事件 B 究竟屬於哪一類別失效時，我們僅需估算類別 A_i 與類別 A_j 之間的概似率 (Likelihood Ratio) R ，

$$R = \frac{P(A_i | B)}{P(A_j | B)} = \frac{P(A_i)P(B | A_i)}{P(A_j)P(B | A_j)} \quad (4)$$

假如 $R > 1$ ，表示 B 比較偏向類別 A_i ；反之，假如 $R < 1$ ，表示 B 比較偏向類別 A_j 。在實際運算時， $P(A_i)$ 是第 i 類失效佔總失效的機率，而 $P(B | A_i)$ 則是由第 i 類失效所估測出來某一個異警的條件機率。

假如可能的異警不止一個，而是一組彼此互相獨立的事件 (B_1, B_2, \dots, B_d)，則當給定某個失效類別 A_i 時，他的事後機率可以表示為

$$P(B_1, B_2, \dots, B_d | A_i) = P(B_1 | A_i)P(B_2 | A_i) \dots P(B_d | A_i) \quad (5)$$

若將(5)的結果代入(3)中，則可以得到 k 個失效類別中，包含 d 個異警狀態的條件機率

$$P(A_i | B_1, B_2, \dots, B_d) = \frac{P(A_i)P(B_1 | A_i)P(B_2 | A_i) \dots P(B_d | A_i)}{\sum_{j=1}^k P(A_j)P(B_1 | A_j)P(B_2 | A_j) \dots P(B_d | A_j)} \quad (6)$$

2.2 貝氏估計 (Bayesian Estimation)

貝式估計是以條件機率為基礎，用以判斷未知事件的資料應該最接近哪一個類別，在實際事件之中，經常賦予所求異警事件一個起始的(Initial)或者是事前的(Prior)機率估計值進而開始分析，利用實驗或觀察所獲得的新資訊，來將事前機率值加以修正，得出所謂的事後機率(Posterior Probabilities)，其機率修正過程步驟如圖 2 所示。

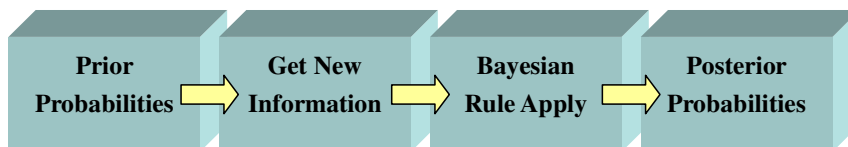


圖 2. Bayesian Theorem 修正機率

貝氏估計為條件機率的應用，根據機率理論，在事件 B 發生的條件下，則任何出現在事件 B 以外的事件的機率為零，亦即將整個機率問題的樣本空間限制在事件 B 內，此時事件 A 發生的機率可寫為：

$$P(A | B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad (7)$$

其中 $P(A \cap B) = P(B)P(A|B)$ ，同理 $P(A \cap B) = P(A)P(B|A)$ ，則

$$P(A|B) = \frac{P(A)P(B|A)}{P(B)} \quad (8)$$

其中， $P(A)$ 為在未瞭解事件 B 之前事件 A 發生的機率，又稱為事前機率(prior probability)， $P(A|B)$ 為已知事件 B 發生的情況後， A 發生的機率，又稱為事後機率(posterior probability)， $P(B|A)$ 稱為概似函數(likelihood function)， $P(B)$ 為使事後機率常態化常數，又稱為全機率(total probability)

貝氏定理(Bayesian Theorem)適用於計算事後機率之事件為互斥且集盡，此表示必須剛好只有一個事件發生，由於貝氏定理的互斥且集盡之特性，因此普遍應用於機械學習與診斷，如 X. Meng 等[10]針對於船舶機艙內的元件進行缺點診斷，當發生故障時，透過貝氏推論模型與樹狀元件結構輸出最為可能之故障原因。

三、故障診斷推論

故障診斷首要工作是確立可能故障源及各故障源徵兆，其中故障樹分析(Fault Tree Analysis, FTA)是一般常用之系統分析法，主要有歸納法(Induction)及演繹法(Deduction)兩種。故障樹技術以系統操作時所不願發生之結果為頂端事件(Top Event)，利用演繹的方法，逐步找出導致該事件發生的事件及原因，依其關係逐一繪成樹狀圖形，即為故障樹圖。故障樹繪製的目的就是以圖形表示系統故障的原因，另外亦可藉此圖形看出系統的缺點所在。通常分析者在進行繪製系統故障樹以前應對整個系統有全盤的瞭解，並考量分析系統重要之影響條件，斟酌加入各種故障因素，故一般繪製故障樹的方法有三種：基本故障法、二級故障法、操作故障法，至於該使用何種方法進行分析，應由可靠度分析工程師就實際需求選用。

決定故障源後，需建立故障徵兆集合，以為故障診斷依據；針對一個機械系統，系統異常徵兆主要可區分成二類[11]：

- (1) 功能異常，指系統功能輸出不正常、停機或產品輸出不正常，有系統當機或故障、產品功能異常。
 - ✧ 系統當機或故障：是指機器無法動作或損壞，可能原因是電力失效、機台定位點未歸位(如安全門未關)、負載超過、越位或零組件損壞等造成之功能失效。
 - ✧ 產品功能異常：是指材料問題、機台精度不良、工具磨損、鬆脫、阻塞、零件磨損等所造成之產品品質下降、不良率升高等。
- (2) 狀態異常，指機台運轉出現性能衰退所造成之問題，有機台狀況異常、製程參數異常。
 - ✧ 機台狀況異常：指機台運轉之異常狀況，如操作溫度、壓力過高，噪音、震動等問題所造成之性能退化。
 - ✧ 製程參數異常：機台操作環境設定不當，如位移、速度、加速度、進給率等設定不

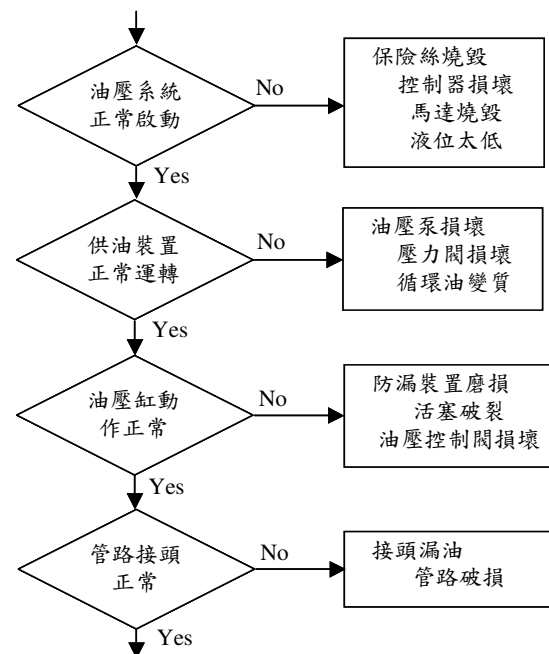


圖 3. 傳統故障診斷流程

當，造成加工品質不良或機台出現異常狀況。

針對油壓式射出成型機，其油壓系統失效圖可透過故障樹分析法來建立，可能失效問題有供油裝置失效、油壓閥損壞、油壓缸故障、管路或接頭破損等，其故障內容主要可分成五類：油壓系統、鎖模系統、射出系統、控制系統、動力源系統。

進行故障診斷推論時，可依故障徵兆發生的先後次序進行推論，例如機器不動，其診斷的順序為：有沒有電→保險絲是否燒毀→起始設定是否正常→控制器是否正常等。此外，很多管線及電路的故障問題，其訊號流動具一定的先後次序，診斷時可由安裝在管路中的感測器狀態，判斷出故障位置，圖 3 說明傳統故障診斷流程。然而，複雜設備之檢查常常曠日費時，例如引擎內部故障，需將引擎拆卸並對其作檢查；而在更複雜之電子零件中甚至需要儀器作測試。

四、 模糊估計 (Fuzzy evaluation)

模糊理論(Fuzzy Theory)為：「某一集合元素屬於某個集合的程度，可用 0 與 1 之間的某個數值來表示的方法」。因此，只要將傳統明確集合模糊化(Fuzzify)後，再推廣至模糊集合，就可以得到最佳的推廣性、錯誤容忍度以及更能適應用在真實世界中非線性現象之特性。

模糊理論的應用時機有以下幾方面：

- (1) 對於典型的模糊性問題，只有用模糊數學方法，才能進行適當的定量分析處理。
- (2) 有些複雜問題尚未找到精確方法時，模糊數學方法可以作為一種權宜而被使用。
- (3) 有些問題雖有精確的處理方法，但花費代價過高，用模糊數學法，則可部份或完全代替而不致喪失解決複雜問題的可行性。
- (4) 在某一緊急情形下，可採用模糊理論的概念，進行第一時間的處理，待條件許可之後，可再進一步做精確分析。

模糊數 (Fuzzy Number) 是指數值上的模糊集合，因此其可說是一特殊的模糊子集合，模糊數之隸屬度函數 (Membership Function) 可以使隸屬度 (Degree Membership) 從一封閉實數區間 X 對應至論域 (Degree Membership) 於區間[0,1]之間。因此某一模糊集合 A 為模糊數時，則其具有下列之特性：

- (1) $U_A(x)=0$ ，當 $X \in (-\infty, \alpha) \cup [\delta, \infty)$ 。
- (2) $U_A(x)$ 在 $[\alpha, \beta]$ 是嚴格遞增，在 $[\gamma, \delta]$ 是嚴格遞減。
- (3) $U_A(x)=1$ ，當 $X \in [\beta, \gamma]$ 。

當 $U_A(x)$ 在 $[\alpha, \beta]$ 與 $[\gamma, \delta]$ 之間為一元一次時，則其隸屬度函數可表示如圖 4 所示，當 $\alpha = \beta$ 且 $\gamma = \delta$ 時，此隸屬度函數為矩形模糊數 (Rectangular Fuzzy Number, R.F.N)；當 $\beta = \gamma$ 時，此隸屬度函數為三角形模糊數 (Triangular Fuzzy Number, T.F.N)；一般情形時，此隸屬度函數為梯形模糊數 (Trapezoid Fuzzy Number, Tr.F.N)。

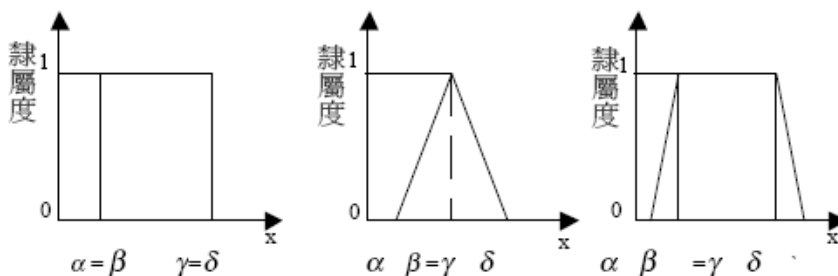


圖 4. 隸屬度函數圖 (a) 矩形模糊數 (b) 三角形模糊數 (c) 梯形模糊數

模糊集合常用語意變數(Linguistic variables)來表示，語意變數是用模糊集合來表達其值的變數，它能夠將敘述性的文字或語詞表示成值，而利用這種特性來解決不確定的情況及非量化系統的問題。語意變數所採用的語詞以自然語言為主，例如將專家對問題的看法：{非常重要、重要、普通、不重要、非常不重要}，利用語意變數轉換為模糊評估值，以達到量化之目的。一個語意項可以一個模糊值 (Fuzzy Value) 表示，一般而言，一個語意變數包含了四項資料：名稱 (Name)、種類 (Class)、範圍 (Range) 以及程度 (Degree)。由於其評比的值不是一個明確的值，而是一模糊值，因此在運算過程中往往必須面對複雜的運算以及不適當表現的語意變數，有鑑於此 Chen and Hwang 提出了一較為簡單且實用的方式，將語意性措辭 (linguistic terms) 轉成相關的模糊數表示。有關本文故障徵兆語意模糊數定義如下(表 1)：

表 1 故障徵兆指標語言集

語意變數	模糊數
非常不明顯 (VL)	(0, 0.1, 0.2)
不明顯 (L)	(0.1, 0.3, 0.5)
普通 (M)	(0.3, 0.5, 0.7)
明顯 (H)	(0.5, 0.7, 0.9)
非常明顯 (VH)	(0.8, 0.9, 1.0)

模糊估計常涉及到模糊隸屬值的計算，以整合多個模糊估計；考慮三個模糊數 A(L, M, R)、B(L, M, R)、C(L, M₁, M₂, R)，其中 A、B 為三角模糊數、C 為梯型模糊數，(L, M, R)分別為模糊數的左界、隸屬度最大值、右界。若模糊數相加 A⊕B=D，則 D 模糊數可表示為(L_d, M_d, R_d)，其中 $L_d = 1/2(L_a + L_b)$, $M_d = 1/2(M_a + M_b)$, $R_d = 1/2(R_a + R_b)$ 。同理，不同隸屬函數運算亦可求得，若模糊數 A⊕C=E，則 E 的模糊數表示為(L_e, E₁, E₂, R_e)，其中 $E_1 = 1/2(M_a + M_1)$, $E_2 = 1/2(M_a + M_2)$ ，L_e及 R_e則同三角模糊數計算。

透過語意變數對故障徵兆進行估計後，其故障現象相似值為模糊數，因此必須將模糊數非模糊化以求得一明確值。解模糊化 (Defuzzification) 是將模糊數轉為明確值的過程，其中以重心法最常使用，計算式如下

$$x^* = \frac{\int_x x\mu(x)dx}{\int_x \mu(x)dx} \tag{9}$$

當模糊數為三角形模糊數時，重心法的公式如下

$$F_i = \frac{(U_i - L_i) + (M_i - L_i)}{3} + L_i \tag{10}$$

單一異警訊息，可能是由多種故障原因產生，單一故障亦可能產生多個徵兆，經由模糊故障診斷，將可判斷出哪個故障源失效的機會比較大，因此建立故障徵兆指標與故障源間的模糊關聯矩陣為模糊故障診斷基礎。

模糊診斷原理是將機器設備的可能故障源表示成一個故障集合，Y={y1, y2, …yn}，同時故障徵兆也表示成一個狀態集，X={x1, x2, …xn}，進一步建立故障徵兆和故障源的模糊關聯矩陣，

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \tag{11}$$

式中 r_{ij} 代表 i -th 個徵兆對 j -th 個故障源的模糊隸屬度。診斷時先決定徵兆狀態集的模糊隸屬度，結合關聯矩陣及模糊運算，系統故障集可求出如下，

$$\tilde{Y} = \tilde{X} \circ \tilde{R} \tag{12}$$

其中隸屬度最大者，將是最可能發生之故障源。

五、模糊故障診斷

5.1 關聯矩陣

本文以光碟製程中之射出成型機為例說明故障診斷方法，射出成型機的動作可概分為數個階段，每個階段的作動器 (Actuator) 與控制對象也不盡相同，一次完整的動作可分為十個階段，必須注意的是這些階段有些會同時發生。模具關閉完成之後，射出機構機座開始前進直到射出口接上模具注入口為止，此即座進，接著進入射出階段，螺桿前推將熔融塑料射入模具之中，射出完成後進入保壓，螺桿繼續提供壓力來保持成品未凝固前的壓力穩定，接著進入冷卻一段，等待成品的初步冷卻，冷卻完後開始座退，射座向後退回，截斷與成品的連接處。接著螺桿轉動開始進料，同時冷卻二段也在進行，待成品表層冷凝完成，冷卻二段結束，模具打開並頂出成品，再重新從關模動作開始重覆以上動作。

透過故障數分析，射出機故障源可分為五大類，依據文獻[12]研究，光碟製程中射出機可能發生的異常徵兆歸納如下：

- ◇ 功能異常：不預期停機、有異音、黏片、結晶、小碟片。
- ◇ 狀態異常：溫度過高，壓力過大、速度太快、位置不正確。

依據過去維修記錄分析結果，射出機異常徵兆和故障源間關係可歸納如表 2 所示

表 2. 不良現象與子系統失效間模糊矩陣

系統單元 不良現象	油壓系統	鎖模系統	射出系統	控制系統	動力源系統
不預期停機	M	M	L	VH	VH
異音	H	VH	H	M	L
黏片	M	M	H	M	L
結晶	L	L	H	M	L
小碟片	H	H	H	H	L
溫度	M	M	VH	H	L
壓力	VH	VH	H	H	L
速度	L	L	VH	M	VH
位置	L	VH	L	M	M

利用重心法將語意變數轉成模糊數，可獲得模糊關聯矩陣 R ，若系統故障徵兆為 {VH, L, L, VL, VH, M, VL, VL, L}，即 $X=\{0.9, 0.3, 0.3, 0.1, 0.9, 0.5, 0.1, 0.1, 0.3\}$ ，由建立之模糊矩陣，由徵兆集合與模糊矩陣相乘可得模糊故障集合 (Eq.(12))，結果如下：

$$Y=\{0.5, 0.7, 0.3, 0.9, 0.1\}$$

結果顯示故障順序為：控制->鎖模->油壓->射出->動力 子系統，由決策矩陣 Y 可以得知，最可能之失效單元為**控制系統**。

5.2 維護優先次序判定

維護度優先次序判定是透過貝氏定理分析失效底事件，達成快速排除故障之目的。依據故障樹分析結果，控制子系統之失效原因即發生機率如表 3，

表 3 控制系統之故障源及發生機率統計表

	溫度感測器	切刀感測器	參數設定	軟體	加熱器
發生機率	0.25	0.20	0.05	0.15	0.35

依據貝式估計，式 (8) 可改寫如下，

$$P(C_i | A) = \frac{P(C_i)P(A | C_i)}{\sum_{n=1}^5 P(C_n)P(A | C_n)}, \quad i = 1,2,3,4,5$$

其中， $P(C_i)$ 為失效原因實際發生次數，由故障資料庫統計出故障機率，即 $P(C_i) = \text{happen count of } C_i / \text{total Count}$ ； $P(A | C_i)$ 為當 C_i 發生時導致 A 發生之機率，由專家決定失效原因影響失效單元的隸屬度，然後推求出條件機率，共分成五個等級；其中 $P(C_i | A)$ 為最終失效原因之事後機率。有關本例計算結果如表 4 內容所示。

表 4 控制系統之失效原因事後機率統計分析

Case C_i	Event Before $P(C_i)$	Condition $P(A C_i)$	Sets $P(A \cap C_i)$	Event After $P(C_i A)$
溫度感測器 C_1	0.250	0.700	0.175	0.287
切刀感測器 C_2	0.200	0.500	0.100	0.164
參數 C_3	0.050	0.300	0.015	0.025
軟體 C_4	0.150	0.500	0.075	0.122
加熱器 C_5	0.350	0.700	0.245	0.402

其中 $\sum_{i=1}^{n=5} P(C_i | A) = 1$ ，由事後機率 $P(C_i | A)$ 結果可得知，控制器故障原因排序為：

$$C_5 > C_1 > C_2 > C_4 > C_3$$

此結果顯示造成控制系統失效的失效原因為加熱器失效，因此可對加熱器做維修或更換，達到快速故障排除目的。

六、結論

故障診斷系統是縮短維護時間、提升維護效率的有效方法，本文以射出成型機為對象，分析射出機故障源和故障徵兆，利用故障樹分析法找出關鍵底事件，使用模糊理論裡的隸屬度函數，建立故障徵兆模糊評定、系統模糊故障診斷方法，透過二階段的診斷作業，確保故障診斷的正確性與效能。當機器發生異常時，維修人員可依據設備異常狀況，輸入故障症狀集合，由模糊故障診斷推論推估可能故障源，經由貝式估計方法，推估故障底事件的失效排序，達到快

速診斷、檢出、故障診斷排除之目的。

幾個研究心得歸納如下：

- (1) 模糊故障診斷中的維護優先次序的估算，其失效機率的排序與實際失效原因可能會有出入，將每次失效情況加入資料庫，可逐步調整貝氏估計法中的事前機率，確保故障排序的正確性。
- (2) 射出成型機的徵兆指標（不良現象、製程參數）的選取，其訂定可以更嚴謹與詳細，如此案例之概似度準確性會更高。
- (3) 模糊故障診斷中之模糊關係矩陣是故障診斷基礎，為確保診斷正確性，整合多個專家的評估結果是可行方法。
- (4) 整合模糊集合理論與網路伺服器、案例推論伺服器及知識庫等，透過 ASP、VB Script、XML 等技術開發，可對異常徵兆不明確問題，發展模糊故障診斷推論架構，結合維護作業規劃，將使遠距故障診斷維護支援系統更加完善。

參考文獻

- [1] Liebowitz, J., "Expert Systems: A Short Introduction", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 50, No.5/6, 1995, pp. 601~607.
- [2] Davidson, P.L., Halasz, M.S., Phan, S. and Hakima, S.A., "Intelligent Troubleshooting of Complex Machinery", ACM press, 1990, pp.16~22.
- [3] Helfman, R., Baur, E., Dumer, J. and Hanratty, H., "Turbine Engine Diagnostics (TED): An Expert Diagnostic System for the M1 Abrams Turbine Engine", American Association for Artificial Intelligence, 1999, pp. 69~76.
- [4] Varma, A. and Roddy, N., "ICARUS: Design and Deployment of a Case-based Reasoning System for Locomotive Diagnostics", Engineering Applications of Artificial Intelligence 12, 1999, pp. 681~690.
- [5] 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.
- [6] Huallpa, B.N.; Nobrega, E.; Von Zuben, F.J. , "Fault detection in dynamic systems based on fuzzy diagnosis" , Fuzzy Systems Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence.,The 1998 IEEE International Conference on , Volume: 2,1998.
- [7] Shen, L., Tay, F. E. H., Qu, L., and Shen, Y., "Fault Diagnosis Using Rough Set Theory", Computers in Industry, Vol. 43, No. 1, pp. 61-72, 2000 .
- [8] Hou, T. H., Liu, W. L., and Li, L., "Intelligent Remote Monitoring and Diagnosis of Manufacturing processes Using an Integrated Approach of Neural Networks and Rough Sets" Journal of Intelligent Manufacturing, 2002 .
- [9]R.B. Tang, Qin-Fang Deng, Hou-Qi Liu, "Set theory in diagnostic reasoning", Clinica Chimica Acta, Vol.327, pp.165~170, 2003.
- [10]X. Meng, G.. Bai, X. Shu and D. Bao, "A study on intelligent fault diagnosis in engine room by Bayes method", Intelligent Control and Automation, 2002. Proceedings of the 4th World Congress on, Vol.1 , 10-14 June, pp.631~.634, 2002.
- [11]蔡有藤、王國雄、胡世平，「案例為基故障診斷系統之發展」，*Proceeding of The 7-th ROC Symposium on Reliability and Maintainability*, HsinChu, Taiwan, pp.175-184, 2007 .
- [12]王國雄、蔡有藤、沈靖傑、許日榮，「遠距維護與故障診斷系統初步探討-以光碟製程設備中射出成型機為對象」，*Proceeding of the 23-th National Conference of the CSME*，崑山科大，台南，2006 .