

產品維修適宜性的自動化分析

杜春長 余志成

國立台灣科技大學 機械工程研究所

台北市

摘要

設計的可維修性直接影響產品的保固維護成本，而同步工程的設計理念主張在初期設計階段便進行維修適宜性的評估，因此本文整合品質機能展開、故障模態與效應分析及維修模態分析，進行產品設計的可維修性評估。其中以品質機能展開的方法，對應出功能零件與使用需求之間的關連性，進而找出零件的故障嚴重性，再結合零件的故障偵測困難性，求得零件故障影響指標。文中並提出產品維修適宜性的分析架構，由零件故障影響性、維修頻率拆卸步驟與時間，估計每一維修模態的維修成本，藉以找出關鍵零組件以及維修工資的集中處，用以評估零組件壽命及零件陳列設計。為達到分析的自動化，本文提出語意式的資料架構，配合推理規則與搜尋，自動找出維修零件的最少拆卸步驟，便於未來同步工程分析的產品可維修性評估。

前言

傳統的序列式設計方法，常因偏重滿足功能上的需求，而忽略了設計與可製造性、可裝配性、可維修性及可回收性等相關課題間的互動關係。其中，裝配費用佔了生產製造成本中的 40~50%，不當的裝配設計，將導致成本不必要的增加。所以許多的專家學者針對設計的裝配適宜性提出了相關的分析方法；Boothroyd 與 Dewhurst (1983) 即提倡以減少零件數目來降低組裝成本，並依經驗法則計算裝配時間與設計效率 (Design Efficiency) 來評估設計的可裝配性。而 Sturges 與 Kilani (1992) 則將組裝動作參數化，藉由一個半自動的輔助軟體，來分析設計的可裝配性指標 (Assembly Index)。為提升初期設計拆卸難易度分析的可行性，有些文獻嘗試將拆卸步驟的推導自動化。Bryan (1992) 以圖示與語意表現法 (Semantic Representation, Duda, 1978)，建構出一個圖形化的組裝架構圖，來描述設計的陳列 (Layout) 方式。以 Icons 代表零件、次組合與連結件，而 Links 則說明機械系統內零件彼此間的關係，並以推論 (Inferencing) 的方式表列出維修所需的步驟。然而，在生命週期成本花費之中，可維修性是另一項重要的考量因素。

故障零件的拆卸雖可視為反組裝的一種，但尚牽涉到故障零件偵測的難易度與零件設計的陳列 (Layout design)，相關文獻相較於 DFA 便少很多。但產品的可維修性直接影響保固維修成本與顧客對產品的滿意度與信心，可維修性的提高可提昇產品形象和提高顧客滿意度與忠實度，不僅降低產品的保固成本，舊品出售 (Resale) 的價值也會提高，對於產品生命週期成本的影响是不容忽視的。不當的設計將使得產品故障維修時的困難度增加、成本提高，因此在設計初期亦必須將維修的適宜性加以考慮。

在可維修性的研究中，有一些分析方法可作為設計評估的工具。故障模態與效應分析 (Failure Mode and Effect Analysis; FMEA) (Huang, 1996) 分析零件故

障對設計機能所產生的影響，針對零件故障發生的機率、偵測困難性及故障的嚴重性，評估出零件的重要性。Makino (1989) 應用產品的保固維修記錄於設計品質的提升，並提出一個電腦化的檢查清單 (Checklist) 作為維修性設計的參考。維修模態分析 (Service Mode Analysis; SMA) (DiMarco, 1995) 在於評估維修頻率、步驟與成本，找出關鍵零組件與維修工資的集中處，藉以改良該零組件之壽命與零組件之陳列設計的方法。Dowie (1995) 根據產品拆卸過程，針對每一零件的拆卸時間，計算出所需花費的拆卸成本，估計產品的總拆卸花費。Dini 等人 (1992) 提出干涉矩陣 (Interference Matrix)、鏈結矩陣 (Connection Matrix) 及接觸矩陣 (Contact Matrix)，個別利用六個方向的矩陣，描述零件移除時的空間干涉情形，並以電腦自動產生拆卸步驟。

然而各個維修模態分析只考量零件拆卸、重組與更換所需的成本，並未考慮到各故障模態的可偵測性與相對重要性，其中重要性的考量應以該零件功能失效對顧客的影響來決定，如此才能較客觀的估計產品整體的可維修性。本文將以品質機能展開的觀念找出各零件的重要性，配合故障模態與效應分析及維修模態分析，建立產品可維修性的分析模式，並配合零件陳列設計、資料架構與推論法則，作為可維修性自動化分析的基礎。

產品維修適宜性

產品與顧客的接觸開始於產品製造的完成，而產品的品質以及可維修性直接影響保固維護成本與顧客對該產品的滿意度與信心。適宜維修的設計 (Design for Serviceability; DFS) 在於研究產品的維修瓶頸，以簡化拆卸步驟、權衡零件壽命與維修成本，及確保使用者滿意度的方式，來降低產品的保養維修成本。而影響產品維修適宜性的主要因素包括：

1. 嚴重性 (Severity)

元件故障將導致產品部分機能失效，而其故障的嚴重性應由該元件對顧客需求的影響性來決定。

2. 可偵測性 (Diagnoseability)

產品故障維修的第一步驟在偵測是哪一個元件失效，可偵測性乃指不藉助特殊昂貴的檢測設備，診斷出問題所在的難易度。

3. 失效機率 (Failure Probability)

元件在生命週期中失效的機率需權衡零件成本與維修成本，提升零件品質可降低失效機率，減少維修成本，但須衡量對零件成本的影響。

4. 可接近性 (Accessibility)

產品的陳列設計 (Layout) 影響失效元件的可接近性，失效機率較高的元件應安排在產品較外層的位置，並且需提供足夠的工具維修空間。

5. 可拆卸性 (Disassemblibility)

零件的接合方式決定更換該零組件所需的時間、工具與技術。當零組件可能因產品故障而需拆卸時，應採用適宜反覆拆裝的接合方式。

6. 可修復性 (Repairability)

若元件只需調整或清理，而不需更換整個零件時，其調整或清理的困難度稱為可修復性。

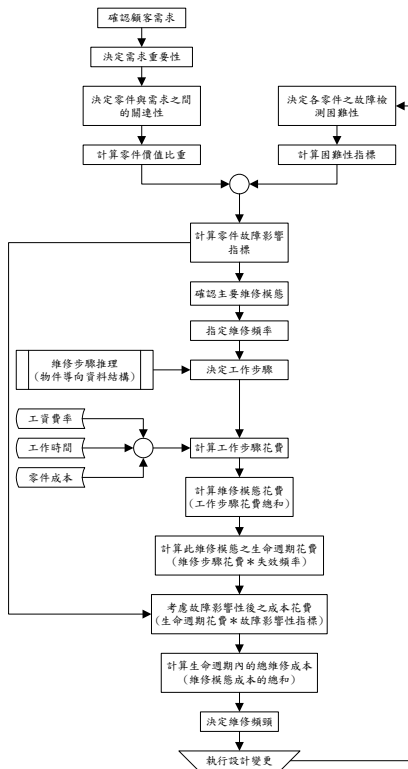


圖 1 可維修性分析流程圖

零件故障影響性分析

零件故障將導致部分機能的失效，而其故障的影響性應由機能失效對使用者需求的不滿足度來決定。品質機能展開 (Quality Function Deployment; QFD) 以一種矩陣式的分析架構，將使用者需求對應到滿足使用者的設計品質，並將設計目的及品質保證的重點，展開到生產階段 Akao (1983)，確保設計品質的重點透過 QFD 的網路，傳達至產品規格的訂定、各個相關零件的品質及製造品管的要素。而 QFD 依分析對象的不同，可演化成許多種不同的矩陣形式。在 DFS 的觀點下，我們所關心的是如何從顧客需求品質的降低，找出故障零組件的影響性，因此本文應用 QFD 的觀念來決定零件價值比重，配合故障偵測困難度來估計各個故障模態的影響指標 (表 1)。

表 1 零件故障影響性分析表

| | | | | |
|--------------------------|--------------|-----|--------|-------|
| ◎：強關連性 +9 | | | 零件列表 | 需求重要性 |
| ○：一般關連性 +3 | | | | |
| △：弱關連性 +1 | 顧客需求 | 關連性 | | |
| | | | | |
| 權重 | | | | |
| 零件價值比重 (S) % | | | | |
| 故障偵測困難性 | 1. 顯而易見 | | 故障可偵測性 | |
| | 2. 有自動檢測警示裝置 | | | |
| | 3. 有可供判斷的前兆 | | | |
| 4. 需拆卸檢測 | | | | |
| 5. 需拆卸後以儀器檢測 | | | | |
| 權重 | | | | |
| 困難性指標 (D) % | | | | |
| 零件故障影響指標 (S + D)/100 + 1 | | | | |

零件故障影響性分析表的建構大致可分為幾個步驟：

1. 分析顧客需求與零件之間的關連性

若某一零件對於某一顧客需求的影響越大，則代表其之間的關連性越強，一般以下列符號或點數代表其關連性，若之間不存在關連性則空白。

◎：(9 points) 強關連性

○：(3 points) 一般關連性

△：(1 points) 弱關連性

2. 需求重要性分析

考量顧客對此需求品質的重視程度，分別給予評定點數 (1/不重要—5/很重要)。

3. 計算權重

依需求重要性及需求與零件的關連性計算出每一零件的權重。

$$\text{Wegiht} = \sum_d R_{dp} \times I_d \quad (1)$$

R_{dp} ：顧客需求 d 與零件 p 之間的關連性

I_d ：顧客需求 d 的重要性

4. 計算零件價值比重

為每一個零件在權重總和中所佔的比例。

5. 分析故障檢測困難性

故障檢測的困難性大致可分為五種情形：

- 顯而易見

零件的故障可由人工在不經任何拆卸動作的情形下，以目測得知。

- 有自動檢測警示裝置

經由檢知器 (Sensor) 得知某零件是否已經故障。

- 有可供判斷的前兆

故障發生後會有某些徵兆發生，如煞車皮耗盡後會有噪音產生。

- 需拆卸檢測

必須拆除某部分零件才能得知該零件是否故障。

- 需拆卸檢測可以儀器檢測

拆除部分零件後，仍無法得知零件是否故障，必須依賴特殊儀器檢測。

經由使用者決定各零件的故障檢測方式之後，便可對應所配給的點數求得故障檢測的困難性指標。

6. 計算零件故障影響指標

零件故障的影響性由零件價值比重及檢測困難性所決定，本文定義其影響指標如式(2)

零件故障影響指標

$$= (\text{零件價值比重} + \text{故障偵測困難指標}) / 100 + 1 \quad (2)$$

以發電機為例 (圖 2)，表 2 所示為其零件故障影響性分析表。

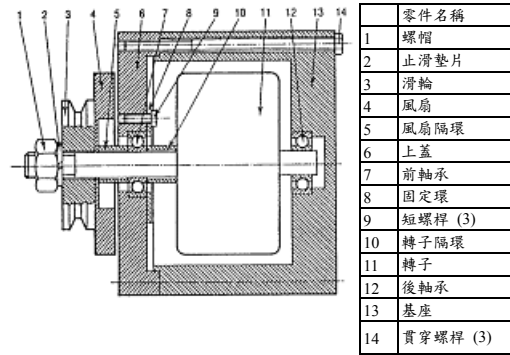


圖2 發電機之組合剖面圖(John 等, 1991, p.212)

表 2 發電機之零件故障影響性分析表

| | 滑輪 | 風扇 | 風扇隔環 | 上蓋 | 前軸承 | 轉子隔環 | 轉子 | 後軸承 | 基座 | 需求重要性 |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| ◎：強關連性 +9 | | | | | | | | | | |
| ○：一般關連性 +3 | | | | | | | | | | |
| △：弱關連性 +1 | | | | | | | | | | |
| 噪音小 | △ | ○ | | △ | ◎ | | ○ | ◎ | △ | 2 |
| 不會震動 | ◎ | ◎ | | △ | ◎ | | ◎ | ◎ | △ | 3 |
| 散熱效果佳 | △ | ◎ | | | ○ | | ◎ | ○ | | 4 |
| 發電量大 | ○ | | | | ○ | | ◎ | ○ | | 2 |
| 發電效率佳 | ◎ | △ | | | ○ | | ◎ | ○ | | 2 |
| 能夠正常發電 | ○ | | | | ○ | | ◎ | ○ | | 5 |
| 權重 | 72 | 71 | 0 | 5 | 84 | 0 | 132 | 84 | 5 | |
| 零件價值比重 (S) % | 15.9 | 15.7 | 0 | 1.1 | 18.5 | 0 | 29.1 | 18.5 | 1.1 | |
| 故障偵測困難性 | | | | | | | | | | |
| 1. 顯而易見 | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | | ✓ | |
| 2. 有自動檢測警示裝置 | | | | | | | | | | |
| 3. 有可供判斷的前兆 | | | | | ✓ | | | ✓ | | |
| 4. 需拆卸檢測 | | | ✓ | | | ✓ | | | | |
| 5. 需拆卸後以儀器檢測 | | | | | | | ✓ | | | |
| 權重 | 1 | 1 | 4 | 1 | 3 | 4 | 5 | 3 | 1 | |
| 困難性指標 (D) % | 4.35 | 4.35 | 17.4 | 4.35 | 13 | 17.4 | 21.7 | 13 | 4.35 | |
| 零件故障影響指標 (S+D)/100+1 | 1.20 | 1.2 | 1.17 | 1.05 | 1.32 | 1.17 | 1.51 | 1.32 | 1.05 | |

拆卸及裝配的時間估計

維修工作的進行免不了要對產品進行拆卸以及裝配的程序，而拆卸及裝配所需花費的時間成本，在維修成本中佔了相當程度的比重，而設計的可接近性與可拆卸性會影響維修動作的時間，因此如何去評估維修過程中所耗費的時間，則成為評估設計可維修性的重要課題。美國西屋 (Westinghouse) 電器公司於 1986 年發展一套「組裝設計評估旋轉盤」，根據零件的握持過程及插入特性將裝配時間參數化，做為零件裝配時間的估計。

而拆卸時間的估計方面，本文修改 Westinghouse 的組裝時間評估方式，根據拆卸時取動作及移除的狀況，歸納出如表 5 所示之裝配及拆卸動作時間選項。但在 D 與 E 欄中，因拆卸並不牽涉到零件的對位步驟，故不須加入這兩項握持動作的時間。而在接合方式這一欄的時間參數則與裝配的時間差異較大；以扣合或壓合的接合方式而言，一般拆卸動作較裝配動作困難許多；首先是扣合卡榫位置的辨識，若無適當的卡榫位置標示，拆卸過程將較為費力，有時甚至需要使用其他工具，並可能因拆卸時的不當用力，而損壞非更換零件。故對於維修過程中需要拆解的扣合件，應標示卡榫位置 (圖 3)，或預留頂出嵌合件的設計 (圖 4)，以減少拆卸時間。因此不同的扣合及壓合設計，

所造成的拆卸困難性差異頗大，必須針對其拆卸時間予以不同的權重 W_s 。

$$\text{扣合拆卸時間} = 1 \times W_s \quad (3)$$

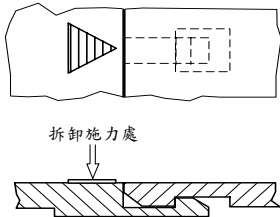


圖3 扣合件的卡榫位置標示

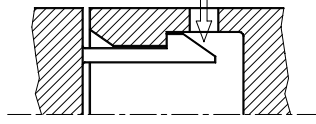


圖4 預留頂出嵌合件的缺口設計

以發電機的拆裝過程為例，表 3 及表 4 分別為發電機的裝配及拆卸時間估計。

表 3 發電機之裝配時間估計

| Part/Operation Description | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L |
|----------------------------|------|-------|--------------|------------------|---------------|--------------|---------------|--------------|--------------|-------------------|----------------|-------|
| hand. cond. | Size | thick | insert align | end to end align | insert direc. | insert cond. | insert clear. | fastn. proc. | time / oper. | no. of reps. Nrep | rept. time J*K | |
| 1. 基座 | | | | 0.25 | 0.25 | 0.6 | 2.25 | 0.25 | | 3.6 | 1 | 3.6 |
| 2. 後軸承 | | | | 0.25 | 0.25 | 0.6 | 1.25 | 1.6 | 1 | 4.95 | 1 | 4.95 |
| 3. 轉子 | | | | 0.25 | 1 | 0.6 | | 1.6 | 1 | 4.45 | 1 | 4.45 |
| 4. 轉子隔環 | | 0.1 | | 0.25 | 0.25 | 0.6 | | 0.25 | | 1.45 | 1 | 1.45 |
| 5. 次組件 sub1 | | | | 0.25 | 1 | 0.6 | | 0.9 | | 2.75 | 1 | 2.75 |
| (1) 上蓋 | | | | 0.25 | 0.25 | 2 | | 0.25 | | 2.75 | 1 | 2.75 |
| (2) 前軸承 | | | | 0.25 | 0.25 | 2 | 1.25 | 1.6 | 1 | 6.35 | 1 | 6.35 |
| (3) 固定環 | | | 0.4 | 0.25 | 0.25 | 2 | | 0.25 | | 3.15 | 1 | 3.15 |
| (4) 短螺桿 | | 0.1 | | 0.25 | 1 | 2 | | 0.9 | 4 | 8.25 | 3 | 24.75 |
| 6. 貫穿螺桿 | | | | 0.25 | 1 | 2 | | 0.9 | 4 | 8.15 | 3 | 24.45 |
| 7. 風扇隔環 | | 0.1 | | 0.25 | 0.25 | 0.6 | | 0.25 | | 1.45 | 1 | 1.45 |
| 8. 風扇 | | | | 0.25 | 1 | 0.6 | | 0.25 | | 2.1 | 1 | 2.1 |
| 9. 滑輪 | | | | 0.25 | 0.25 | 0.6 | | 0.25 | | 1.35 | 1 | 1.35 |
| 10. 止滑墊片 | 1.5 | 0.1 | 0.2 | 0.25 | 0.25 | 0.6 | | 0.25 | | 3.15 | 1 | 3.15 |
| 11. 螺帽 | | | | 0.25 | 0.25 | 0.6 | | 0.9 | 4 | 6 | 1 | 6 |

表 4 發電機之拆卸時間估計

| Part/Operation Description | A | B | C | F | D | E | F | G | H | I |
|----------------------------|------|-------|---------------|--------------|---------------|--------------|--------------|-------------------|----------------|------|
| hand. cond. | size | thick | remove direc. | remove cond. | remove clear. | fastn. proc. | time / oper. | no. of reps. Nrep | rept. time J*K | |
| 1. 基座 | | | | 2 | 2.25 | 0.25 | | 4.5 | 1 | 4.5 |
| 2. 後軸承 | | | | 2 | 1.25 | 1.6 | 1 | 5.85 | 1 | 5.85 |
| 3. 轉子 | | | | 2 | | 1.6 | 1 | 4.6 | 1 | 4.6 |
| 4. 轉子隔環 | | 0.1 | | 2 | | 0.25 | | 2.35 | 1 | 2.35 |
| 5. 次組件 sub1 | | | | 2 | | 0.9 | | 2.9 | 1 | 2.9 |
| (1) 上蓋 | | | | 2 | | 0.25 | | 2.25 | 1 | 2.25 |
| (2) 前軸承 | | | | 0.6 | 1.25 | 1.6 | 1 | 4.45 | 1 | 4.45 |
| (3) 固定環 | | | 0.2 | 0.6 | | 0.25 | | 1.05 | 1 | 1.05 |
| (4) 短螺桿 | | 0.1 | | 0.6 | | 0.9 | 4 | 5.6 | 3 | 16.8 |
| 6. 貫穿螺桿 | | | | 0.6 | | 0.9 | 4 | 5.5 | 3 | 16.5 |
| 7. 風扇隔環 | | 0.1 | | 2 | | 0.25 | | 2.35 | 1 | 2.35 |
| 8. 風扇 | | | | 2 | | 0.25 | | 2.25 | 1 | 2.25 |
| 9. 滑輪 | | | | 2 | | 0.25 | | 2.25 | 1 | 2.25 |
| 10. 止滑墊片 | | 0.1 | 0.2 | 2 | | 0.25 | | 2.55 | 1 | 2.55 |
| 11. 螺帽 | | | | 2 | | 0.9 | 4 | 6.9 | 1 | 6.9 |

表 5 組裝及拆卸動作的選項

| 分類 | 組裝時間 | 拆卸時間 | 狀況 | 定義 |
|------------|------|------|-----------|---|
| A. 持取狀況 | 0.5 | 0.5 | 沉重物件 | 零件重量大於 5Kg(10 lbs) |
| | 1.0 | 1.0 | 易損壞、尖銳物件 | 可能會斷裂、抓傷身體、彎曲、尖銳 |
| | 1.5 | | 套疊/纏結的 | 需要靈敏、小心才能分開 |
| | 2.0 | 2.0 | 需使用鑷子夾取 | |
| | 3.6 | 3.6 | 需使用其他工具 | |
| | 6.0 | | 重度套疊/纏結的 | 需要更靈敏、小心才能分開 |
| B. 大小 | 0.6 | 0.6 | < 2 mm | 指零件尺寸中的最大值。 |
| | 0.4 | 0.4 | 2-6 mm | 若插入對位數目小於 4，則組裝時間乘以 2 倍 |
| | 0.1 | 0.1 | 6-12 mm | |
| | 0.0 | 0.0 | > 12 mm | |
| | 0.0 | 0.0 | > 2mm | |
| C. 厚度 | 0.5 | 0.5 | < 0.5mm | 若插入對位數目小於 4，則組裝時間乘以 2 倍 |
| | 0.2 | 0.2 | 0.5-2 mm | |
| | 0.0 | 0.0 | > 2mm | |
| D. 插入軸對位數 | 1.5 | | 1 (不是很明顯) | |
| | 1.0 | | 1 (很明顯) | |
| | 0.25 | | 2 or 更多 | |
| E. 端面對位數 | 1.5 | | 1 (不是很明顯) | |
| | 1.0 | | 1 (很明顯) | |
| | 0.25 | | 2 or 更多 | |
| F. 插入或移出方向 | 0.6 | 0.6 | 向下 | |
| | 1.4 | 1.4 | 從旁邊 | |
| | 1.7 | 1.7 | 斜角/扭動/傾側 | |
| | 2.0 | 2.0 | 向上 | |
| | 2.0 | 2.0 | 向上 | |
| G. 插入或移出狀況 | 1.25 | 1.25 | 插入或移出動作受限 | |
| | 1.35 | 1.35 | 暫時性的支持/壓制 | 加入或移除零件時，需要扶持，否則會掉落。 |
| | 1.50 | 1.50 | 使用雙手 | 插入或移除時有對齊或偏向動作，因難度較高須使用雙手才能完成之。 |
| | 2.25 | 2.25 | 使用夾治具 | 安裝或移除時須先固定基座，然後才能把零件和基座組成在一起。 |
| | 6.00 | 6.00 | 彈性物件 | 放鬆時零件不會保持一定形狀或剛開始時需要額外的處理才能安裝完成。 |
| H. 插入或移出餘隙 | 0.25 | 0.25 | 大 | $Diff_i = 0.65 - 0.65 \text{Log} \left(\frac{10^* (\text{餘隙})}{\text{裝配特徵尺寸}} \right)$ |
| | 0.90 | 0.90 | 小 | |
| | 1.60 | 1.60 | 非常小 | |
| I. 幾何接合 | 0 | 0 | 插入或移除 | |
| | 1 | 1 | 扣合或壓合 | |
| | 3 | 3 | 拉彎或彎曲 | |
| | 4 | 4 | 旋入或旋出 | |
| | 5 | 5 | 化學聚合 | |
| | 7 | 7 | 軟焊 | 非鐵系合金溫度低於 430°C 焊材 |
| | 9 | | 硬焊 | 非鐵系合金溫度高於 430°C 焊材 |
| 11 | | 黏著劑 | | |

產品可維修性分析

產品可維修性分析由零件故障影響指標、失效機率、維修步驟以及時間，估計生命週期維修成本 (Life-cycle Service Cost)。其中零件故障影響性的分析評估故障的嚴重性與可偵測性。零件的維修模態成本包括零件成本、調整工資及拆卸裝配工資，可評估設計的可接近性、可拆卸性與可修復性，產品故障的檢測困難度及故障嚴重性，皆嚴重的影響到了顧客對該產品的滿意度及信心，因此在生命週期維修成本上必須列入考慮。

而失效機率的訂定應權衡零件重要性、維修工資與零件成本，採用品質較高的零組件雖可降低失效機率，但須考慮伴隨的零件成本的增加，應以生命週期成本的最小化為權衡標準。

式(5)所估計的生命週期維修成本為維修模態成本乘上零件重要度與失效機率，代表平均每一個產品在生命週期中所分攤的維修費用。

(1) 維修模態成本 (Service Mode Cost, SMC)

$$SMC = (t_L \times C_{LR}) + C_P \quad (4)$$

t_L : 維修時間
 C_{LR} : 單位工資
 C_P : 零件成本

(2) 產品生命週期維修成本 (Life Cycle Service Cost, LCSC)

$$LCSC = \sum \{[(t_L \times C_{LR}) + C_P] \times f_R \times W_p\} \quad (5)$$

W_p : 零件重要度
 f_R : 維修模態頻率

表 6 為發電機的可維修性分析表，可由表中找出維修階段成本最高的關鍵零組件，藉以改進零件的壽命及拆卸方式，降低零組件的維修成本。例如：由表 6 可得知更換轉子所佔的維修費用最高，因此可以考慮使用故障率較低的轉子，以降低它的失效頻率；減少轉子附近不必要的空間干涉，可簡化維修過程的動作，亦可降低維修模態成本。另外，由單一維修步驟可看出貫穿螺桿所佔的拆卸時間最多，若能改變其固定方式減少拆裝時間，亦能達到降低維修成本的目的。

表 6 發電機之可維修性分析表

| Labor Rate(nt/hr) : \$ 200 | Service Modes | | | | | Serviceability Analysis | Total frequency of Steps | Life cycle Step Cost | | |
|-------------------------------|-----------------|---------------------|-------------------|-------|-------|-------------------------|--------------------------|----------------------|--------|------|
| | Part Importance | Failure Probability | 更換滑輪 | 更換前軸承 | 更換後軸承 | | | | 更換風扇 | 更換轉子 |
| | | | 1.209 | 1.235 | 1.39 | | | | 1.207 | 1.44 |
| | | | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.2 | 0.7 | | | |
| Labor Steps | Labor Time(sec) | Labor Step Costs | Disassembly steps | | | | | | | |
| 移除螺帽 | 6.9 | 0.383 | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | 1.6 | 0.4352 | |
| 移除止滑墊片 | 2.55 | 0.142 | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | 1.6 | 0.0496 | |
| 移除滑輪 | 2.25 | 0.125 | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | 1.6 | 0.0224 | |
| 移除風扇 | 2.25 | 0.125 | | ✓ | | ✓ | ✓ | 1.3 | 0.0182 | |
| 移除風扇隔環 | 2.35 | 0.131 | | ✓ | | | ✓ | 1.1 | 0.0209 | |
| 移除貫穿螺桿 (3) | 16.5 | 0.917 | ✓ | ✓ | | | ✓ | 1.5 | 1.2255 | |
| 移除次組件 sub1 | 2.9 | 0.161 | | ✓ | ✓ | | ✓ | 1.5 | 0.075 | |
| 移除短螺桿 (3) | 16.8 | 0.933 | ✓ | | | | | 0.4 | 0.3332 | |
| 移除固定環 | 1.05 | 0.058 | | ✓ | | | | 0.4 | 0.01 | |
| 移除前軸承 | 4.45 | 0.247 | | ✓ | | | | 0.4 | 0.0856 | |
| 移除上蓋 | 2.25 | 0.125 | | | | | | 0 | 0 | |
| 移除轉子隔環 | 2.35 | 0.131 | | | | | | 0 | 0 | |
| 移除轉子 | 4.6 | 0.256 | | | | | ✓ | 0.7 | 0.1008 | |
| 移除後軸承 | 5.85 | 0.325 | | | ✓ | | | 0.4 | 0.0856 | |
| 移除基座 | 4.5 | 0.250 | | | | | | 0 | 0 | |
| 安裝基座 | 3.6 | 0.2 | | | | | | 0 | 0 | |
| 安裝後軸承 | 4.95 | 0.275 | | | ✓ | | | 0.4 | 0.11 | |
| 安裝轉子 | 4.45 | 0.247 | | | | | ✓ | 0.7 | 0.1729 | |
| 安裝轉子隔環 | 1.45 | 0.081 | | | | | | 0 | 0 | |
| 安裝上蓋 | 2.75 | 0.153 | | ✓ | | | | 0.4 | 0.0612 | |
| 安裝前軸承 | 6.35 | 0.353 | ✓ | | | | | 0.4 | 0.1412 | |
| 安裝固定環 | 3.15 | 0.175 | ✓ | | | | | 0.4 | 0.07 | |
| 安裝短螺桿 (3) | 24.75 | 1.375 | ✓ | | | | | 0.4 | 0.55 | |
| 安裝次組件 sub1 | 2.75 | 0.153 | ✓ | ✓ | | | ✓ | 1.5 | 0.2295 | |
| 安裝貫穿螺桿 (3) | 24.45 | 1.358 | ✓ | ✓ | | | ✓ | 1.5 | 2.037 | |
| 安裝風扇隔環 | 1.45 | 0.081 | ✓ | | | | ✓ | 1.1 | 0.0891 | |
| 安裝風扇 | 2.1 | 0.117 | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | 1.3 | 0.1521 | |
| 安裝滑輪 | 1.35 | 0.075 | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | 1.6 | 0.12 | |
| 安裝止滑墊片 | 3.15 | 0.175 | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | 1.6 | 0.28 | |
| 安裝螺帽 | 6 | 0.333 | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | 1.6 | 0.5328 | |
| Part Cost | | | \$ 150 | \$ 50 | \$ 50 | \$ 200 | \$ 500 | | | |
| Service Mode Cost | | | 151.2 | 57.57 | 53.19 | 201.48 | 504.78 | | | |
| Weight SMC | | | 54.84 | 28.44 | 29.57 | 48.64 | 508.82 | | | |
| Total Life-cycle service Cost | | | | | | | | | 7.0078 | |

維修拆卸步驟的推理

傳統的可維修性分析需實際拆裝原型設計 (Prototype)，不僅費時，同時若發現問題，設計變更往往需耗費相當高的成本，因此同步工程主張在概念設計階段就針對生命週期中的相關因素進行評估。為達成可維修性分析的自動化，首先必須將零件之間的接合關係與空間次序，以資料架構的方式表現出來，並配合推理法則與知識庫的搜尋，自動產生維修零件的拆卸與裝配步驟。

物件—鏈結表示法

本文參考廖偉志、余志成 (1998) 所提出的物件鏈結圖示法，以物件 (object)、鏈結 (Link) 及符號描述物件之間的裝配行為模式及空間次序的幾何關係，用以取代傳統立體爆炸圖的裝配順序關係。

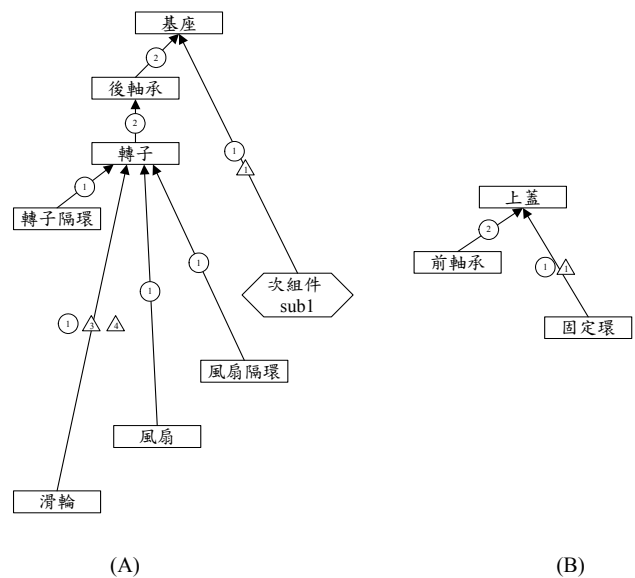


圖 5 發電機之物件鏈結圖示法

圖 5 所示即為發電機之物件鏈結圖示法，鏈結之符號所對應的裝配方式如表 7 所示。

表 7 組裝方式與符號之對照表

| 分離固定件 | 符號 | 幾何接合 | 符號 |
|-------|-----|-------|----|
| 螺栓 | △1 | 插入 | ① |
| 螺釘 | △2 | 扣合或壓合 | ② |
| 螺帽 | △3 | 拉彎或彎曲 | ③ |
| 墊圈 | △4 | 旋入 | ④ |
| 鉚釘 | △5 | 化學聚合 | ⑤ |
| 鍵 | △6 | 軟焊 | ⑥ |
| 栓 | △7 | 硬焊 | ⑦ |
| 銷 | △8 | 黏著 | ⑧ |
| 釘 | △9 | | |
| 扣環 | △10 | | |

物件鏈結圖示法的組成主要包含物件、鏈結及階層，物件包含元件、組件及次組件，鏈結則表示物件之間的接合方式，為幾何接合或是分離固定件，另外，鏈結具有方向性，如圖 5 中滑輪主動鏈結於轉子上，裝配方式則是以插入、墊圈及螺帽的方式接合。而「裝配階層 (Assembly Hierarchy)」具有的意義是兩物件有鏈結關係，高低位置表示的便是裝配的主被動關係，假設 A 物件主動鏈結的移除會受到 B 物件的影響，以致 A 無法順利移出，我們稱 B 物件干涉到 A 物件，則 B 物件的階層必須在 A 物件的下一層，如圖 5 中轉子隔環的移出會受到次組件的干涉，所以次組件的階層必須在轉子隔環的下一層。而若裝配過程中有次組件的情形發生，則將次組件視為單一零件，如圖 5 中上蓋、前軸承及固定環為一次組件，主動鏈結於基座上，而此次組件之鏈結圖則如圖 5 (B) 所示。

零件裝配與拆卸程序推論

為了便於維修拆卸步驟的推理，本文使用物件導向的資料結構方式，分別定義零件名稱、鏈結關係及干涉關係三個類別，將鏈結圖示中的鏈結及干涉資料記錄下來。其中，鏈結關係紀錄該零件主動鏈結在其他哪些零件上，而干涉關係則紀錄該零件會影響哪些零件主動鏈結的移除。在鏈結關係及干涉關係的紀錄方面，由於資料長度的不確定，為了避免浪費記憶空間，將鏈結關係及干涉關係的資料型態定義為動態陣列，視資料長度重新定義矩陣的大小，再配合資料庫的使用，找出鏈結的方式以及拆裝時間的估計。資料結構定義如下：

Type Part_Attribute

Name as string

Link () as string

Interference () as string

End Type

完成資料結構的定義之後，再將各個零件以陣列的方式定義為此種資料結構，定義方式如下：

Dim Part(n) as Part_Attribute n = 1 ~ N

N：零件總數

以發電機中的風扇為例，風扇主動鏈結於轉子上，則風扇與轉子之間具有鏈結關係，而風扇隔環及次組件 sub1 主動鏈結的移除會受到風扇的干涉而無法順利移出，所以風扇與風扇隔環及次組件 sub1 間具有干涉關係，因此風扇的陳列資料如下所示：

Part(10).Name = “風扇”

Part(10).Link(0) = “轉子”

Part(10).Interference(0) = “次組件 sub1”

Part(10).Interference(1) = “風扇隔環”

發電機之所有零件的陳列資料則如附錄一所示。

1. 物件鏈結圖之推論

在完成產品中各零件的資料結構定義之後，便可利用此資料結構推論出物件鏈結圖，步驟如下：

- (1) 決定各零件在沒有干涉關係的情形下的階層。若一零件沒有任何主動鏈結，則定義該零件為第一層，若 A 零件主動鏈結於 B 零件，而 B 零件為第 n 層，則定義 A 零件為 n+1 層。
- (2) 考慮各零件之間的干涉關係。若一零件不會影響到任何零件主動鏈結的移除，則維持該零件的階層，若 A 零件的裝入會影響到 B 零件主動鏈結的移除，而 B 零件為第 n 層，則定義 A 零件為 n+1 層。
- (3) 反覆檢查零件的鏈結及干涉關係與階層之間的合理性若不合理則調整零件的階層，直到完全合理為止。

2. 完整拆卸順序的推理

建立可維修性分析表的第一步，必須將產品的完整拆卸順序求出，以便於之後維修步驟的對應。推論步驟如下：

- (1) 找出所有沒有任何被動鏈結，亦沒有被任何零件干涉到的零件，則這些零件為目前可拆卸的零件，亦即位於物件鏈結圖中最後一層的零件。
- (2) 將已拆卸的零件由暫存區中移除，並將該零件從各零件中的鏈結及干涉類別中移除，反覆執行第一步驟，直到完全拆除為止。

3. 維修步驟的推理

物件維修的拆卸目的，在於能夠接觸到故障零件，所以在拆卸的過程中，若某一零組件不會影響到故障零件的拆除，則可以保留此零件。整個拆卸動作的推論大致可分為兩大步驟：

- (1) 首先由零件的鏈結類別中，找出所有與維修零件有被動鏈結關係的零件，並存放於一暫存區中。
- (2) 再由零件的干涉類別中，找出所有會干涉到維修零件主動鏈結移除的零件，亦將之存放於暫存區中。
- (3) 反覆檢查暫存區中所存放的零件，將所有干涉到暫存區中零件移除且不存在暫存區中的零件找出。推論過程詳見附錄二。

透過以上之推論步驟，可以得知暫存區中存放所有必須拆除的零件，依照先前合理拆卸順序的推論，即可順利維修故障零件，維修完畢後，可依反向順序裝回零件。以更換發電機之轉子為例：

- (1) 找出所有對轉子有主動鏈結的零件：滑輪、風扇、風扇隔環及轉子隔環。而螺帽及止滑墊片則是用於維持滑輪與轉子之間鏈結關係的分離固定件，拆裝動作必須隨著滑輪同步進行，因此不

考慮其與轉子之件的鏈結及干涉關係。

- (2) 找出所有干涉到轉子移出的零件：次組件 sub1。
- (3) 找出所有對已知必須拆除件有干涉的零件：
 - 滑輪：無。
 - 風扇：無。
 - 風扇隔環：無。
 - 轉子隔環：無。
 - 次組件 sub1：無。

則其拆卸步驟如表 8 所示。

表8 轉子之維修拆卸步驟

| 拆卸步驟 | 零件名稱 | 分離固定件 |
|------|----------|---------|
| 1 | 滑輪 | 螺帽+止滑墊片 |
| 2 | 風扇 | |
| 3 | 風扇隔環 | |
| 4 | 次組件 sub1 | 貫穿螺桿 |
| 5 | 轉子隔環 | |

結論

產品的維修適宜性分析在於評估零件失效的嚴重性、失效機率、可偵測性、可接近性、可拆卸性和可修復性。本文結合品質機能展開及故障模態與效應分析的觀念，提出可維修性的分析架構。其中品質機能展開對應出故障模態與零件之間的關連性，進而求得各零件的故障嚴重性指標，再加上檢測的困難程度，計算出各個零組件的零件故障影響性。而可維修性分析則用以分析產品的可接近性，利用維修拆卸步驟的推理，將最少的拆卸步驟找出，並將零件重要度及零件失效機率加以考慮，找出關鍵零組件及為修工資的集中處，作為設計變更的參考依據。本文以物件—鏈結的陳列表示法取代傳統立體爆炸圖的裝配順序關係，提出以資料結構方式記錄零件之間的陳列關係，配合維修拆卸步驟的推論，找出最少的維修拆卸步驟。未來更將依前述的分析方法，設計一套可維修性的分析程式，以物件導向的資料結構方式推論，配合資料庫的建立，自動化分析產品的可維修性，以輔助產品設計工程師在設計初期對產品可維修性的評估，做為產品設計的依據。

誌謝

本研究蒙國科會編號 NSC 88-2212-E-011-017 計畫經費補助，僅此致謝。

參考文獻

- [1] Boothroyd, G., Dewhurst, P., *Design for Assembly: a designer's handbook*, Boothroyd Dewhurst Inc., Wakerfield, Rhode Island, 1983.
- [2] Boothroyd, G., Dewhurst, P., Knight, W., *Product Design for Manufacture and Assembly*, Marcel Dekker, Inc., 1994, pp.6
- [3] Bryan, C., Eubanks, C., Ishii, K., "Data Representation for Serviceability Design," *ASME Design Theory and Methodology*, 1992, pp.1-8
- [4] DiMarco, P., Eubanks, F., and Ishii, K., "Service Mode and Effects Analysis: Integration of Failure Analysis and Serviceability Design," *ASME computers in Engineering Conference*, 1995, pp.1-8
- [5] Dowie, T., Simon, M., and Fogg, B., "Product Disassembly Costing in A Life-Cycle Context," *Clean Electronics Products and Technology*, 9-11, 1995, pp. 202-207
- [6] Duda, R.O., et.al., *Semantic Network Representations in Rule-Based Inference System*, Pattern-Directed Inference Systems, Waterman, D. and Hayes-Roth, F., eds., Academic Press, New York, 1978
- [7] Ishii, K., Bryan, C. and Eubanks, C., "Data Representation for Serviceability Design," *ASME DTM*, 1992, pp.1-8
- [8] Ishii, K., Eubanks, C.F., and Marks, M., "Evaluation Methodology for Post-manufacturing Issues in Life-cycle Design," *Concurrent Engineering: Research and Application*, Vol.1, 1993, pp.61-68
- [9] John, C., Mike, D., John, M., Christopher, P., *Design for Manufacture, Strategies, Principles and Techniques*, Addison-Wesley Publishing Company 1991, pp.203-214
- [10] Makino, A., Barkan, P., and Pfaff, R., "Design for Serviceability," *Proc. Of the 1989 ASME Winter Annual Meeting 1989*, San Francisco CA., 1989
- [11] Struges, R.H. and Kilani, M.I., "Towards an Integrated Design for an Assembly Evaluation and Reasoning System," *Computer Aided Design*, Vol.24 No.2, 1992, pp.67-79
- [12] Westinghouse Productivity and Quality Center, *Design for Assembly Calculator*, Pittsburgh, PA, USA, 1986
- [13] Yokota, K. and Brough, D.R., "Assembly / Disassembly Sequence Planning," *Assembly Automation*, Vol.12 No.3, 1992, pp.31-38
- [14] 廖偉志和余志成, "產品裝配維修及回收設計同步化分析之物件陳列表示法", 中國機械工程學會第十五屆學術研討會, 1998, pp.721-728

[15] 顏清輝和陳家豪, “綠色設計之電腦輔助拆卸程序及拆卸評估方法”, 中國機械工程學會第十三屆學術研討會, 1996, pp.490-497

聯絡作者

余志成 副教授

機械工程研究所

國立台灣科技大學

台北市 106 基隆路四段 43 號

TEL : 02-2737-6499 FAX : 02-2737-6460

E-mail : jcyu@mail.ntust.edu.tw

附錄一

發電機之零件陳列資料

```
Part(1).Name= “基座”           Part(2).Name= “後軸承”
Part(1).Link(0)= “”           Part(2).Link(0)= “基座”
Part(1).Interference(0)= “”   Part(2).Interference(0)= “”

Part(3).Name= “轉子”          Part(4).Name= “轉子隔環”
Part(3).Link(0)= “後軸承”    Part(4).Link(0)= “轉子”
Part(3).Interference(0)= “”   Part(4).Interference(0)= “”

Part(5).Name= “次組件 sub1”   Part(6).Name= “上蓋”
Part(5).Link(0)= “基座”       Part(6).Link(0)= “”
Part(5).Interference(0)= “轉子隔環” Part(6).Interference(0)= “”
Part(5).Interference(1)= “轉子”
Part(5).Interference(2)= “後軸承”

Part(7).Name= “前軸承”        Part(8).Name= “固定環”
Part(7).Link(0)= “上蓋”       Part(8).Link(0)= “上蓋”
Part(7).Interference(0)= “”   Part(8).Interference(0)= “前軸承”

Part(9).Name= “風扇隔環”     Part(10).Name= “風扇”
Part(9).Link(0)= “轉子”       Part(10).Link(0)= “轉子”
Part(9).Interference(0)= “次組件 sub1” Part(10).Interference(0)= “次組件 sub1”
Part(10).Interference(1)= “風扇隔環”

Part(11).Name= “滑輪”
Part(11).Link(0)= “轉子”
Part(11).Interference(0)= “次組件 sub1”
Part(11).Interference(1)= “風扇隔環”
Part(11).Interference(2)= “風扇”
```

附錄二

‘ 假設 Dismantle_temp() 中存放所有與維修零件有被動鏈結關係及干涉到維修零件的零件。

‘ n 為零件總數，p 為 Dismantle_temp() 中的零件總數

Dim Chk_Exist as Boolean

‘ Chk_Exist 用以檢查零件是否已經存在

Dim i, j, k, m, as integer

m = 0

Do While m < UBound (Dismantle_temp)

 m = m + 1

 For j = 0 to n

 For k = 0 to UBound(Part(j).Interference)

 If Part(j).Interference(k) = Dismantle_temp(m) then

 Chk_Exist=False

 For i=0 to ubound(dismantle_temp)

 If part(j).interference(k)=Dismantle_temp(i) then

 Chk_Exist=True

 End if

 If Chk_Exist=False then

 Dismantle_temp(p+1) = Part(j).name

 End if

 Next

 p=p+1

 End if

Next

Next

Loop