

## 電腦輔助產品裝配維修及回收性同步化分析

廖偉志 余志成 杜春長

國立台灣科技大學 機械工程技術研究所

NSC 87-2212-E-011-009, NSC 88-2212-E-011-017

### 摘要

本文應用物件陳列表示法，透過電腦輔助設計系統及推論知識庫的建立，進行產品的裝配維修與回收設計的同步化分析。裝配性評估分析零件幾何特性、裝配動作的複雜性與零件效率。維修性評估在於分析比較維修頻率、步驟及其相關成本，藉以找出關鍵零組件與維修步驟的瓶頸。而回收性評估則探討產品於其生命週期終了，材料回收 (Recycle) 與元件回用 (Reuse) 中產品拆卸、分類的難易度。這三方面的分析同時受到零組件組合方式與空間陳列關係所影響。本文以零件間的鏈結矩陣(Link Matrix)與干涉矩陣(Interference Matrix)表示產品零組件間的裝配與空間關係，配合推論引擎的推導，研發一套同時探討產品裝配、維修及拆解分類適宜性的電腦輔助分析系統 *DASeR*，將裝配效率分析、維修模態分析(Service Mode Analysis)與回收拆卸分類評估予以自動化，藉以協助設計者進行產品的同步化開發。

### 前言

傳統的序列式設計方法，常因偏重滿足功能上的需求，而忽略了與製造、裝配、維修及回收等相關程序間的互動關係，造成設計與下游程序配合上的問題，或是在原型打樣階段才發現問題，造成設計變更的困難與時程的延誤。同步工程 (Concurrent Engineering) 的出現提高了產品的品質與競爭力，在產品研發之際便積極地尋求系統化的整合產品生命週期中各種重要課題，諸如可製造性、可裝配性、可維修性與回收性等。其主張在陳列設計 (Layout Design) 時，即應對產品的零件裝配效率 (Assembly Part Efficiency)、維修模態分析 (Service Mode Analysis) 與回收材料 (Recycle) 零組件回用 (Reuse) 的拆解特性，同時進行設計評估。電腦輔助同步化分析可從設計的可裝配性、維修性與回收性，進行相關程序的同步開發，以期在概念設計階段掌握設計的最佳化，縮短研發時程與生命週期成本。

適宜裝配的設計 (Design for Assembly; DFA) 主要從組裝零件的最少化、裝配方式的簡單化及安裝過程的最佳化三方面著手，以模組化的設計與零件幾何設計的變更，簡化安裝動作、方向及零件對位與存

取。Boothroyd 與 Dewhurst (1983) 提倡減少零件數目作為降低組裝成本的主要方法，並分析裝配動作的次數、複雜性，依經驗法則估計裝配時間，以設計效率 (Design Efficiency) 作為設計的可裝配性指標。Sturges 與 Kilani (1992) 則將組裝動作參數化，提出裝配性指數 (Assembly Index) 分析設計在裝配特性上的優劣。而在安裝過程的最佳化方面，有學者以元件特徵 (Feature) 代替實體模型 (Solid Model) 檢查空間干涉狀況，並以啟發性的方法 (Heuristics) 推論出元件之間的空間相對位置以產生裝配順序 (Mohammad and Kroll, 1993; Yokota and Brough, 1992; Golabi 等人, 1996)。DFA 常建議整合數個零件成為一較複雜的模組，導致許多相關零件的設計變更，因此在設計初期即進行 DFA 的評估變得十分重要。

適宜維修的設計 (Design for Serviceability; DFS) 主要考量該零件的故障可偵測性 (Diagnosability)、可接近性 (Accessibility)、可更換性 (Replaceability) 及可修復性 (Reparability)。由於可接近性及可更換性影響維修工資甚鉅，所以文獻多以這兩項作為研究的重點。其中，故障模態與效應分析 (Failure Mode and Effect Analysis, Huang, 1996, pp.310~315) 及維修模態分析 (Service Mode Analysis; Bryan, 1992)，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，藉以設計零組件壽命與改進零組件陳列設計。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。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，並以推論的方式表列出維修所需的步驟。亦有學者提出干涉矩陣 (Interference Matrix)，利用六個方向的干涉矩陣，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 (Dini 等人, 1992)。

適宜回收的設計 (Design for Recyclability; DFRE) 則在於分析產品於生命週期中對環境所產生的影響，進而探討產品材料的再生 (Recycle) 或重

要元件的回收再利用 (Reuse) 的可行性。近年環保意識抬頭，隨著 ISO 14000 標準的推行，製造廠商將須負起產品的報廢回收處理，所以設計者在選用材料時就必須考慮材料對環境的影響，並修改設計陳設與模組裝配方式，以降低零件拆解與處理成本。大部份的學者皆以回收的難易為研究的重點，Kroll (1996) 以一個試算表的模式，提出工作測量分析 (Work-Measurement Analysis) 來量化回收拆卸動作的困難度，藉以辨識出產品在回收性設計上的弱點，並作為替代設計間比較的依據。而後顏清輝和陳家豪 (1996) 更進一步修改 Kroll 的拆卸評估方法，整合現有的 CAD 軟體，利用電腦輔助拆卸程序的分析。為了使設計者能更方便更快速的評估產品的再生性，Ishii 等 (1993) 則藉其於 DFS 所提出的圖示一鏈結 (Icons-Linkers) 的圖形化架構，嘗試將環保的再生性分析自動化。Lee 等人 (1997) 將零件種類複雜度和材料回收效率之間的對應關係，提出回收對應圖 (Recyclability Map)，利用該圖可供設計者瞭解產品回收不確定性，且在變更設計變數下仍可得到最穩健的策略。

現有文獻顯示專家學者在 DFA、DFS 及 DFRE 皆有相當多的研究成果，但對於這三項的整合性研究卻相當有限，一般設計工程師皆能瞭解同步工程設計的重要性，也都知道必須在設計初期就考慮到設計的裝配性、維修性及環保性，但礙於設計負荷過大與專業知識的缺乏，經常在設計時顧此失彼，所以要輔助設計者進行同步化的產品分析，就必須發展一套同時考慮 DFA、DFS 及 DFRE 的電腦輔助同步化工程設計軟體。因此本文將利用一個共通的物件鏈結設計表現法，配合整合性的電腦輔助分析工具與專家系統知識庫的自動搜尋與重組功能，並輔以交談式的介面，使設計工程師於初期陳列設計時即能進行裝配性、維修性、回收性的同步化分析。

### 適宜組裝的設計

常用的設計準則有減少零件的數目和種類、避免使用分離固定件、簡化裝配方向、減少對位和零件轉向、提供自動對位的設計和設計足夠的零件安裝空間。Boothroyd 和 Dewhurst (1983) 提倡模組化設計以減少零件數目，並提出模組化的四個先決條件，必須同時符合才能被併入其他組件中。

- (1) 此零件間不需做相對運動。
- (2) 此二零件可使用同的材料。
- (3) 此零件不須與另一零件隔離，如避免振動、絕緣問題。
- (4) 此二零件合併後不會妨礙其他零件的安裝或拆卸。

美國西屋 (Westinghouse) 電器公司在 1986 發展一套「組裝設計評估旋轉盤」，根據零件的持取過程和插入特性，對應出困難指數。Sturges 和 Kilani

(1992) 簡化 Westinghouse 的評估過程，以 Case-Based 的描述選項 (表 2) 取代連續式的轉盤查詢，並設計成 Excel 工作表格 (表 1)，以估計裝配時間來評估組裝效率，此評估方法稱之為「修正式西屋組裝評估法 (Modified Westinghouse Method)」。應用修正的西屋組裝評估法於線性驅動器分析的結果如 (表 1)。

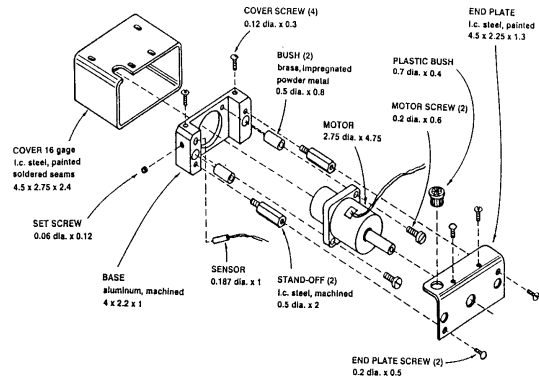


圖 1 線性驅動器的立體爆炸圖 (Boothroyd 等, 1994, p.6)

組裝評估表的第一行列舉零組件的裝配操作步驟，其中 A 到 E 欄位是描述零組件的持取 (Handling) 困難度，F 到 J 欄位是描述零組件插入動作，K 欄位是一次裝配動作所需要的時間加總，L 欄位是重複次數，M 欄位是重複操作所需要的時間。O 欄位則是依照模組化的四個先決條件來判斷，若經檢定此零件可與其他零組件合併，則填入「1」，否則填入「0」。N 欄位記錄此裝配動作是否牽涉到零組件的加入，之後計算「組裝評比」和「零件效率」作為產品可裝配性的指標。

組裝評比 AR (Assembly Rating) 為理想總組裝時間與實際總組裝時間的比值。其中，2.35 秒為每一零件的理想裝配時間，AR 值越接近 1，則代表此設計在組裝的觀點為越好的設計。

$$AR = (2.35 \times \text{零件數}) / (\text{總組裝時間}) \quad (1)$$

零件效率 PE (Part Efficiency) 為總零件數與理論上最少零件數的比值。若比值越接近 1，此設計則具有較佳的零件使用效率。

$$PE = (\text{理論最少零件數}) / (\text{實際零件數}) \quad (2)$$

而從各步驟所佔的總時間比例、動作的複雜度、固定件的數目等，亦可作為設計的改進依據，如表 1 中馬達和外殼裝配所需的時間最多，原因是使用螺絲的固定件，若改用壓扣方式固定可加快裝配動作。而減少分離的固定件同時也增加了零件效率，藉此分析可提昇設計的可裝配性。

表 1 線性驅動器之組裝評估表

Part/Operation Description	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
	hand. cond.	size	thick.	insert. align.	end to end align.	insert. direc.	insert. cond.	insert. clear.	fastn.	fastn. proc.	time/oper. (T op)	no. of reps. Nrep	repet. time K*L	Insert Part? 0 = no	eliminate part? 1 = ves
1.Base				0.25	1	0.6	2.25				4.1	1	4.1	1	0
2.Bushing		0.4		0.25	0.5	0.6		0.25		1	3	2	6	1	1
3.Motor sub.				1	1	0.6		0.25			2.85	1	2.85	1	0
4.Motor screw	1	0.4		0.25	1	0.6		0.9	4		8.15	2	16.3	1	1
5.Sensor sub.	1	0.6		0.25	1	0.6		0.9		1	5.35	1	5.35	1	0
6.Set screw	1	0.6	0.2	0.25	0.5	1.4		1.6	4		9.55	1	9.55	1	0
7.Stand-off		0.4		0.25	1	0.6		0.25		4	6.5	2	13	1	0
8.End plate				1	1	0.6		0.25			2.85	1	2.85	1	1
9.End plate screw	1	0.4		0.25	1	0.6		0.9	4		8.15	2	16.3	1	1
10.Plastic busing		0.1		0.25	1	1.4		0.25		1	4	1	4	1	1
11.Reorient							2.25				2.25	1	2.25	0	0
12.Cover				1	1	0.6		0.25			2.85	1	2.85	1	0
13.Cover screw	1	0.6		0.25	1	1.4		0.9	4		9.15	4	36.6	1	1
												20	122		
												TOP	TAT		

TOP	20	=總操作次數
TAT	122	=總組裝的時間
NP	19	=零件總數，包括固定件
Tavg	6.1	=單位操作次數所需的時間=TAT/TOP
Pmin	4	=最少零件數=NP-Lx Nx O
AR	0.366	=組裝評比=2.35*NP/TAT
PE	0.211	=零件效率 =Pmin/NP

表 2 組裝動作參數的選項表

	分類	時間	狀況
I. 持取動作	A. 持取狀況	0.5	沉重物件
		1.0	易損壞、尖銳物件
		1.5	套疊/纏結的
		2.0	需使用鑷子夾取
		3.6	需使用其他工具
		6.0	重度套疊/纏結的
	B. 大小	0.6	< 2 mm
		0.4	2~6 mm
		0.1	6-12 mm
		0.0	>12 mm
	C. 厚度	0.5	< 0.5mm
		0.2	0.5~2 mm
		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	
II 插入動作	F. 插入方向	0.6	向下
		1.4	從旁邊
		1.7	斜角/扭動/傾側
		2.0	向上
	G. 插入狀況	1.25	插入動作受限
		1.35	暫時性的支持/壓制
		1.50	使用雙手
		2.25	使用夾治具
	H. 插入餘隙	6.00	彈性物件
		0.25	大
		0.90	小
	I. 使用固定件	1.60	非常小
		0.0	墊片
		1.0	銷、釘、栓
		2.5	固定環
		4.0	螺絲
		5.0	螺帽/螺釘
J. 幾何接合	6.0	鉚釘	
	0	插入	
	1	扣合或壓合	
	3	拉彎或彎曲	
	4	旋入	
	5	化學聚合物結合或樁	
	7	軟焊	
	9	硬焊	
10	潤滑油		
11	黏著劑		

## 適宜維修的設計

產品與顧客的接觸開始於產品製造的完成，產品的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。改良產品的可偵測性、可接近性、可更換性和可修復性，可以降低產品的維修支出。維修模態分析藉由分析維修模態的維修頻率與步驟，估計生命週期維修成本（Life-cycle Service Mode Cost），評估可接近性與可修復性。其分析步驟如（圖 2）所示，其中每一步驟的拆裝時間多可沿用 DFA 分析所估計出的零件裝配時間，但某些固定方式如壓扣件，其固定位置的辨識與施力方式對拆卸時間有很大的影響，與裝配時間將會有相當的差距，在建立零件拆裝時間資料庫時須分別評估。每一模態的維修步驟支出等於維修工資加上零件成本，而維修模態成本則為維修步驟支出與維修頻率的乘積。若有好幾個維修模態則重複先前的程序，再全部加總起來（式 4），算出生命週期維修成本（LCSC）。

- 維修模態的花費（Service Mode Cost, SMC）

$$SMC = [(t_L \times C_{LR}) + C_P] \times f_R \quad (3)$$

$t_L$  : 維修時間

$C_{LR}$  : 單位工資

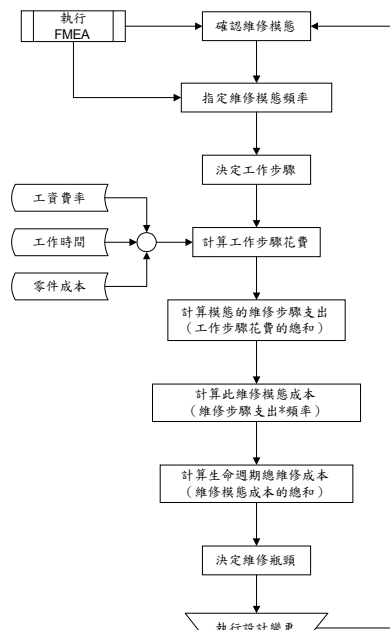
$C_P$  : 零件成本

$f_R$  : 維修模態頻率

- 生命週期維修成本（Life Cycle Service Cost）

$$LCSC = \sum_{j=1}^m \left( f_{R_j} \sum_{i=1}^n SMC_i \right) \quad (4)$$

每一步驟的生命週期頻率（Life-cycle frequency）為各相關維修模態頻率的總和



FMEA: 故障模態與效應分析

圖 2 維修模態分析流程圖

表 3 為典型的維修模態分析表，可由表中找出維修階段的關鍵零組件，藉以改進零件陳設與壽命。並

可找出維修步驟的集中處，以簡化其拆卸方式。例如：從表 3 得知更換馬達所佔的費用最高，因此可考慮使用故障率低的馬達以降低故障頻率，但須權衡零件成本可能的增加；另可減少馬達附近不必要的零件空間干涉，減少維修過程的動作。而由維修步驟可看出外殼（Cover）的固定佔去相當多的工資成本，歸究於螺絲的使用量太多，可改變固定方式以減少拆卸的時間，以上措施皆能達到降低維修的成本。

表 3 線性驅動器之維修模態分析表

Service Mode	Frequency						Service Mode Analysis	
	0.3		0.4		0.15		Lift-Cycle Frequency	Lift-Cycle Cost
	Labor	Part	Labor	Part	Labor	Part		
Labor steps	Time(sec)	Rate/hr	Cost	Labor Step Costs				
Remove Cover Screw	36.6	\$120		1.22	1.22	1.22	0.85	1.037
Remove Cover	2.85	\$120		0.095	0.095	0.095	0.85	0.081
Remove End Plate Screw	16.3	\$120		0.5432	0.5432	0.5432	0.85	0.462
Remove End Plate	2.85	\$120		0.095	0.095	0.095	0.85	0.081
Remove Motor Screw	16.3	\$120		0.5432			0.3	0.163
Replace Motor	6	\$120	\$1500	1500.19			0.3	450.057
Replace Bush	12	\$120	\$200	200.4			0.4	80.16
Replace Sensor	10.7	\$120	\$150			150.36	0.15	22.553
Insert Cover Screw	36.6	\$120		1.22	1.22	1.22	0.85	1.037
Insert Cover	2.85	\$120		0.095	0.095	0.095	0.85	0.081
Insert End Plate Screw	16.3	\$120		0.5432	0.5432	0.5432	0.85	0.461
Insert End Plate	2.85	\$120		0.095	0.095	0.095	0.85	0.081
Insert Motor Screw	16.3	\$120		0.5432			0.3	0.163
Total Step Cost				1505.18	204.31	154.26		
Service Mode Cost				451.55	81.72	23.14		
Total Life-cycle Cost								556.417

## 適宜回收的設計

產品環保性評估分析產品於生命週期中對環境所產生的影響，減少製造、包裝、使用與報廢處理過程中所產出的廢棄污染，其中如何能經濟有效地再生材料或重複使用其重要元件，已成為近來研究重點。尤其因為環保意識的提昇與法令的修訂，製造者將須負責產品報廢後的回收處理。但回收處理的主要困難在於成本太高，導因於使用材料太多、材質回收處理困難、拆卸動作複雜等。設計者應選用容易回收處理的材料，並修改設計陳設與模組裝配方式，使報廢品能快速地拆解分類，以降低處理成本。回收處理中拆解動作的目的在於材料的分類，與維修方面的拆裝不同，不僅對於拆解技術的要求較低，而且只要分解至回收相容材質的次組合便可回收，並不須分解到個別零件。

可回收性的優劣可從「回收效率」和「拆除效率」來判定。依據 DFRE 法則，材料種類是越少越好，為了區別材料種類數目對回收效率的影響，本文主張除了考慮零件的回收處理方式外應加入「不相容材質數目」因子，強調材料單一化的重要性。另外，拆卸效率除了評估零件效率外也應考慮零件區塊數目，一般回收拆除並不會對產品作細部拆除，若材質相容的零件相連一起，則可視為單一區塊同時處理。因此，必須對產品作區塊化，計算出拆卸區塊連接時所需的時間成本。

首先零件作區塊化，零件相連且材質相容者可成為一個區塊，不相容者則自成一個區塊，依照此原則

統計出區塊數目。再以區塊的回收方式給予回收損失指數(表 4)，「重複使用 (Reuse)」是處理方式中最環保的，「材料再生 (Recycle)」是次之，必須做材料再生處理成本較高，「廢棄」處理是較差的回收方式，而若廢棄零件在掩埋、焚化時會產生毒素，則造成的損失是最大的。

表 4 回收損失指數

重複使用	0.25
材料再生	0.5
無毒廢棄	0.75
有毒廢棄	1.0

1、產品再生效率 (Reproduction Efficiency, RE)

$$RE = \frac{\text{最少零件區塊數} \times 0.25}{\text{區塊回收損失指數總和}} \times 100\% \quad (5)$$

零件回用是產品再生的最佳選擇，原因是零件回用所需要的成本和對環境所造成的衝擊是最少的。RE 值之分子中的組件除包括組件如馬達等，或複合材質如塑膠嵌入金屬射出件等，也是歸類於組件，因此不相容材料數目不包含組件數目在內。回收總損失為個別材料與組件的回收損失指數的總和。

2、區塊分解效率 (Dismantle Efficiency, DE)

$$DE = \frac{\text{最少零件設計的區塊數} \times 2.35}{\text{零件區塊化的拆除總時間}} \times 100\% \quad (6)$$

在區分出設計的材料區塊後，回收的拆卸動作實際上即是分離區塊間的鏈結，由先前輸入的鏈結方式與零件的幾何特性，可估算出拆卸總時間。假設單一零件拆卸的理想時間與理想裝配時間同為 2.35 秒，以經由模組化考量後的最少零件設計區塊數作為回收設計的理想零件區塊數。

以表 5 的線性驅動器為例，其該設計共採用了 4 種不相容的材料與 2 個組件 (Motor 和 Sensor)。提高線性驅動器 RE 值，可以採用壽命較長的馬達，以便於回收時可以重複使用，但須考慮到成本的增加與設計標準化。另外 Plastic Bush 若改用無毒塑膠，也可降低回收損失指數。

表 5 線性驅動器之回收評估表

拆除區塊步驟	時間 (秒)	材質	處理方式	回收損失指數
1 Cover	27.45	低碳鋼	材料再生	0.5
2 Plastic Bush	2.75	SBR	有毒廢棄	1
3 End plane	12.15	低碳鋼	材料再生	0.5
4 Stand-off	21.8	低碳鋼	材料再生	0.5
5 Sensor	3.1	複合物	無毒廢棄	0.75
6 Motor	12.5	複合物	無毒廢棄	0.75
7 Bush	4.5	黃銅	材料再生	0.5
8 Base	2.85	鋁	材料再生	0.5
總計	8	87.1	6	5

$$RE = \frac{4 \times 0.25}{5} \times 100\% = 20\%$$

$$DE = \frac{2.35 \times 4}{87.1} \times 100\% = 10.8\%$$

其中由表 1 得知理想設計的最少零件數為 4，而區塊後的數目仍為 4。配合 DFA 的設計原則降低零件數目，可提昇 DE 值。

物件陳列表示法

基於 DFA、DFS 及 DFR 同步化分析需描述物件之間的裝配模式和空間關係，廖偉志與余志成 (1998) 提出物件陳列表示法包括：物件鏈結階層圖、鏈結矩陣和干涉矩陣。物件鏈結階層圖以物件 (Object)、鏈結 (Link) 和階層 (Assembly hierarchy)，描述物件之間的裝配行為模式和空間次序的幾何關係，取代傳統立體爆炸圖的裝配順序關係。鏈結矩陣是描述物件之間的裝配模式，透過編碼方式，建構出推演模型，以數值的正負號表示裝配時的主被動性，由主被動性來區別拆卸時的移除關係。干涉矩陣是描述某一物件加入對已存在物件移出的影響，由干涉矩陣可得到當某物件移除時，須先移開哪些物件，才能接近要移動的物件。「鏈結矩陣」對應「裝配模式」，而「干涉矩陣」對應「空間關係」，我們可建立裝配、拆卸的演算法，再配合零件資料庫，如材質、成本、裝配方式、維修頻率等，推理出裝配效率、維修態態分佈與回收拆解效益評估，便於同步分析的自動化。

表 6 組裝類別分類代碼及符號

分離固定件	代碼	符號	幾何接合	代碼	符號
墊片	1	△	插入	1	①
銷、釘、栓	2	△	扣合或壓合	2	②
固定環	4	△	拉彎或彎曲	4	③
螺絲	8	△	旋入	8	④
螺帽/螺釘	16	△	化學聚合物或樁	16	⑤
鉚釘	32	△	軟焊	32	⑥
			硬焊	64	⑦
			潤滑油	128	⑧
			黏著劑	256	⑨

鏈結矩陣

鏈結矩陣 (Link Matrix) 描述零件間的裝配關係，若零件  $e_i$  裝配在零件  $e_j$  上，則零件  $e_i$  稱為「主動式」鏈結， $LM(i,j)$  數值為正，零件  $e_j$  稱為「被動式」鏈結， $LM(i,j)$  數值為負，數值本身則表示零件間的結合方式(表 6)。為了充分表現可能的裝配組合模式，組裝類別代碼以二進位法表示之，使多重式鏈結所成的組合代碼為唯一。物件裝配方式若同時有「分離固定件」和「幾何接合」，則合成代碼是以「對」(Pair) 表示，合成代碼的最大碼數為 5 碼，前兩碼為「分離固定件」方式，後三碼為「幾何接合」，例如：某零兩組件之間的組合方式同時用到螺釘/螺帽、墊片、插入和旋入四種，其總合成碼為 Pair (16+1, 1+8) = 17009。根據以上的定義，我們以線性驅動器為範例，其鏈結矩陣如式 (7) 所示。

## 干涉矩陣

干涉矩陣 (Interference Matrix) 則描述零件間的移除關係, 若某個零件  $e_i$  的「主動式鏈結」移除受到其他零件  $e_j$  的影響, 以致無法順利移出, 則  $IM(i,j)=1$ , 反之則  $IM(i,j)=0$ 。由此所建立的矩陣, 稱為干涉矩陣。以線性驅動器為例, end plate 的裝入影響到了 bush、stand-off 及 motor 的主動鏈結移除, 所以在其相關位置上設為 1, 其他地方則設為 0, 以此類推可建構出線性驅動器的干涉矩陣, 如式 (8) 所示。

$$LM = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{base} & \text{sensor} & \text{bush} & \text{stand-off} & \text{motor} & \text{end plate} & \text{plastic bush} & \text{cover} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{base} \\ \text{sensor} \\ \text{bush} \\ \text{stand-off} \\ \text{motor} \\ \text{end plate} \\ \text{plastic bush} \\ \text{cover} \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & -8000 & -1 & -8 & -8001 & 0 & 0 & -8000 \\ 8001 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 8001 & 0 & 0 & 0 & 0 & -8000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 8000 & 0 & -2 & -8000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 8000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8000 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$IM = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{base} & \text{sensor} & \text{bush} & \text{stand-off} & \text{motor} & \text{end plate} & \text{plastic bush} & \text{cover} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{base} \\ \text{sensor} \\ \text{bush} \\ \text{stand-off} \\ \text{motor} \\ \text{end plate} \\ \text{plastic bush} \\ \text{cover} \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{pmatrix} \quad (8)$$

## 裝配、拆卸與回收分析的推理

### 裝配評估表的推理

在一產品的裝配關係中, 若某一物件  $b$  之  $LM(b,j) \leq 0, j=1 \sim n$ , 則表示此物件為一基座(base), 亦即此物件沒有任何主動鏈結的存在, 在組裝步驟中為第一優先。接著檢查裝配之合理性, 若在  $IM$  中的上三角及對角線不全為零, 則此裝配為一不合理之裝配順序, 必須從新排列找到一組合理之裝配順序。由此便可由上而下一一檢查各個物件  $k$  之  $LM(k,x)$ ,  $x$  為其他物件, 若  $LM(k,x)$  不全為零, 則經由二進位解碼程序, 找出此物件之安裝方式。另外由零件資料庫可得到零件之屬性, 屬性包括有安裝方式、幾何形狀、零件材料、維修頻率及回收模式等。若此物件裝配方式為使用分離固定件, 則此分離固定件將分別列出。由此可自動產生組裝評估表中的零件裝配操作步驟, 而各個零件的組裝特性可由零件資料庫中的零件屬性求得, 配合表 2 的時間定義, 便可完成組裝評估表的建構, 進而得到各個組裝特性的評估。

### 維修模態分析表的推理

物件維修的拆卸步驟亦可由  $LM$  和  $IM$  推理出來。其中  $IM$  因具有判定是否可以成為子集合

(Sub-Set) 的能力, 故其推理結果可以達到最少的拆卸步驟。推理步驟如下:

1. 由  $IM$  該物件的行資料檢查是否有干涉物件。若存在干涉物件則必須先行移除, 拆除的順序與裝配順序相反。
2. 由  $LM$  該物件的列資料找出移除某物件須拆除哪些鏈結, 拆除過程中只拆除主動鏈結, 有些物件可以次組合型態一同移除, 可以減少不必要的細部分解工作。
3. 物件維修完後必須再組裝回原貌, 其順序是依據最初的裝配順序。

在確認維修模態之後, 經過以上的推理, 可以得到任一維修模態的維修步驟, 構成維修模態分析表, 配合維修時間、單位工資、零件成本及維修模態頻率, 便可計算出每一維修模態的花費 ( $SMC$ ) 及生命週期內的維修花費 ( $LCSC$ )。

### 回收評估表的推理

產品回收處理方式包含回收、回用和廢棄。其拆卸程序與維修拆卸程序並不完全相同, 對於維修程序來說, 考量物件拆除的因素僅有裝配關係和幾何干涉關係, 找出必要的拆卸步驟; 而回收程序的拆卸, 主要考量材料的相容性和回收處理方式, 材料彼此相容且不影響其他物件的移除時, 在回收拆卸過程中可視為一個合併區塊 (Block), 不須分開處理, 如部份熱塑性的塑膠材質具有相容的特性, 否則各物件、組件自成一個區塊。因此, 產品回收拆卸效率與區塊數目有密切關係, 區塊數目越少其回收拆卸效率越高。形成合併區塊的三要素:

1. 合併物件區塊內的物件包括使用的固定件其材質須具有相容性。若材質不具備相容性, 則必須分類拆解以便於回收處理。
2. 物件區塊合併後必須保有穩定性, 故區塊內的物件之間須存在鏈結關係。
3. 確保被合併後的區塊不得使其他物件變得完全無法移出。

式 (9) 及式 (10) 為合併區塊化的邏輯運算式, 物件經過合併區塊後,  $LM$  及  $IM$  會降階為  $RLM$  (Reduced Link Matrix) 及  $RIM$  (Reduced Interference Matrix)。接著就必須檢查其裝配之合理性, 若  $RIM$  上三角與對角線元素不全為 0, 則表示此組件違背了要素 3, 為一不合理的次組件。在滿足合併區塊之三要素後, 則  $RIM$  由下而上的物件順序, 即為最後產品回收的拆卸步驟。拆卸區塊之步驟確定之後, 透過零件資料庫可以得到每一零件之拆卸時間、使用材質及報廢處理方式, 再對照表 4 求得回收損失指數, 建構出回收評估表, 進而求得產品再生效率 ( $RE$ ) 及區塊分解效率 ( $DE$ )。

$$RLM^{M+N_i} = LM^{M_i} + LM^{N_i} \quad (9)$$

$$RIM^{M+N_i} = IM^{M_i} + IM^{N_i}$$

$$\begin{aligned} RIM_{M+N,i} &= IM_{M,i} \vee IM_{N,i} \\ RIM_{i,M+N} &= IM_{i,M} \vee IM_{i,N} \quad i=1 \sim p, (\text{原矩陣零件數}) \end{aligned} \quad (10)$$

## 物件陳列表示法於裝配維修及回收性分析的應用

本文應用先前提出的物件陳列表示法於產品裝配維修與回收性分析中，並設計電腦輔助分析系統 *DASer* (Design for Assembly Serviceability and Recyclability)，此分析系統包含六個模組，分別為「物件資料 (裝配、成本、材質、回收) 模組」、「裝配及拆卸時間資料庫模組」、「適宜裝配的設計分析 (DFA) 模組」、「適宜維修的設計分析 (DFS) 模組」、「適宜回收的設計分析 (DFRE) 模組」與「物件鏈結階層圖模組」。

在開發程式的選擇上，我們以 MS Visual Basic 5.0 (VB5) 作為軟體開發工具，以 VB5 建構出圖形化的輸入介面，記錄物件之間的裝配、成本、材質及回收後置處理方式，使用者輸入完資料後，資料轉換成鏈結矩陣 (LM) 和干涉矩陣 (IM)，系統可進行 DFA、DFS 和 DFRE 的分析工作，透過電腦列表方式可呈現目前設計的生命週期成本集中處，作為設計變更的參考依據。而為了考慮每個裝配、拆卸環境不同，因此「裝配及拆卸時間資料庫」模組提供使用者設定資料庫，使分析後所估計的時間更為客觀。

*DASer* 在使用者輸入完零件之間的裝配、插入、材質、成本及回收模態資料後，便將資料以 ACCESS 資料庫格式存入檔案之中，此資料庫包含四個資料表：

1. Condition  
包含各種裝配條件，如持取狀況、插入狀況、物件鏈結方式及物件干涉情況等。
2. AssemblyDataTime  
包括操作時間及零件插入時間。
3. DisassemblyDataTime  
包含分離固定件及幾何接合之拆卸時間。
4. PostManufacture  
包含各零件之材質、零件成本、維修頻率及報廢處理方式等。

此資料庫為一開放性的資料格式，使用者可依實際情況自由更改資料庫，更有彈性地利用 *DASer* 進行產品的同步化開發。

*DASer* 是一個中英文雙語軟體，*DASer* 自動判斷是否為中文環境，若為中文環境則以中文標題畫面進入，並具有語系切換功能，否則便以英文標題顯示，如圖 3 所示。為了縮短學習操作學習時間，功能鍵上有工具提示 (Tool Tip) 小方塊，便於使用者瞭解該功能鍵的意義。

本文選擇 Wearnes 之二倍速光碟機作為分析的範例，圖 4 為此光碟機之立體爆炸圖，依據分析結果來決定設計的優劣，並且提出設計的改進建議。首先進入 *DASer* 並開啟新檔，新專案建立時，系統將詢問設計者是否需要變動時間資料庫，若要立即變更，則可選擇裝配或拆卸的時間資料庫，結束設定後即進入新增零件的輸入介面，包括裝配特性、材料與零件回收設定，在零件裝配關係的輸入中，依據零件實際的持取狀況和插入動作設定，每一選項的設定可以參照表 2 的組裝動作選項敘述。



圖 3 *DASer* 之標題畫面及輸入介面

依序輸入各零件資料後，便可進行 DFA、DFS 與 DFR 的評估，在維修模態分析方面我們考慮光碟機的雷射讀取頭 (Pick-Up head) 常因為被灰塵覆蓋導致無法正常讀取或是損毀，以及拖盤的極限開關 (Limit Switch) 失效，因此假設以下的維修模態：Pick-Up Head 清潔及 Limit Switch 更換。對此光碟機於組裝、維修及回收三部份的分析，圖 3 所示為建立零件的持取狀況、插入動作和鏈結關係輸入介面。圖 5 為分析後的所有圖表，讀者可自行參考比對。

由組裝評估表得知 W 型光碟機的零件數相當多，其中螺絲就有 25 個，因此零件效率 (PE) 僅有 0.488，若將螺絲以扣接方式替代，將可大幅提昇零件效率，組裝所需時間也可大幅下降。就區塊分解效率 (DE) 而言，W 型的分解時間需要 194.2 秒。對於維修頻率較高的零件，以 Pick-Up head 套件來說，則需要 27 個步驟，稍嫌繁雜，若能簡化維修步驟，如改變裝配方式與零件空間安排，則可降低維修成本。

進行回收分析中發現 W 型光碟機的塑膠零件大多都未標示材質名稱，因此產品的再生效率 (RE) 僅有 35.29%，所以形成的區塊數也就無法降低，一個良好的回收性設計，必須要能輕易的分辨零件材質，並採用回收性相容的材質，以簡化回收分類。

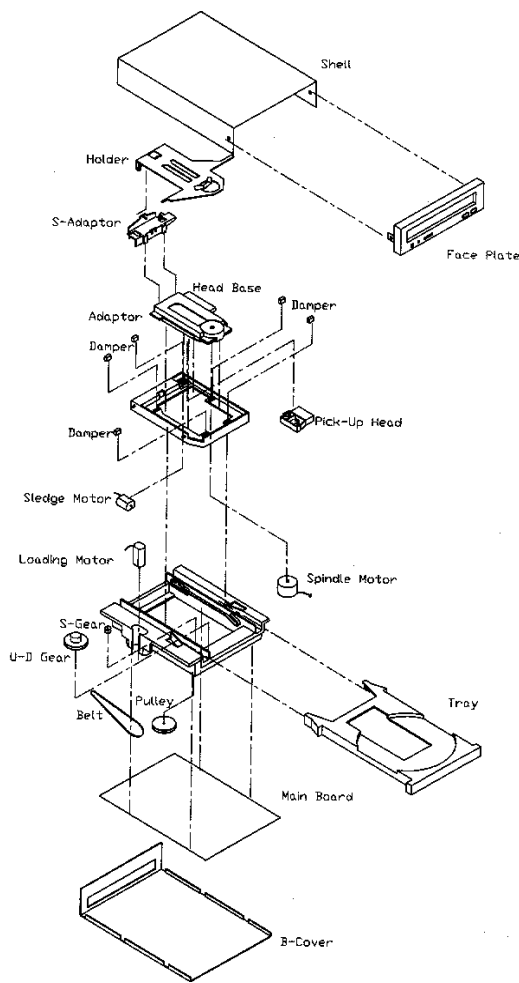


圖 4 W 型光碟機爆炸圖

## 結論

依據物件陳列表示法中的鏈結矩陣 (LM) 及干涉矩陣 (IM) 作為運算架構，經由 LM 與 IM 的推論可以得到裝配合理性、拆卸程序及零件合併區塊等資料，之後進行 DFA、DFS 與 DFRE 的評估。依所提出的陳列設計架構，發展一套圖形對話的視窗軟體 DASER，DASER 根據使用者輸入的資料，將自動產生四項分析圖表：

1. 物件鏈結階層圖  
「裝配階層」高低關係可得知零件裝配的主被動性，鏈結上的圖示表示零件之間的裝配模式。
2. 組裝評估表  
計算零件效率及組裝評比等相關資訊，作為設計改變的參考依據。
3. 維修模態分析表  
分析維修頻率、步驟及成本，找出關鍵零組件及工資的集中處。
4. 回收評估表  
計算出產品再生效率及區塊分解效率，提供使用者產品改善的指標。

使用者可利用這些評估表分析裝配效率、維修時間、回收效率等指數，做為產品改良的指標，此軟體並具有列印出、存檔、線上索引等功能協助設計者進行分析對照。

## 誌謝

本研究蒙國科會編號 NSC 87-2212-E-011-009 與 NSC 88-2212-E-011-017 計畫經費補助，僅此致謝。

## 參考文獻

- Boothroyd, G., Dewhurst, P., (1983), *Design for Assembly: a designer's handbook*, Boothroyd Dewhurst Inc., Wakerfield, Rhode Island.
- Bryan, C., Eubanks, C., Ishii, K. (1992), "Data Representation for Serviceability Design," *ASME Design Theory and Methodology*, pp.1-8
- Design for Assembly Calculator (1986), *Westinghouse Productivity and Quality Center*, Pittsburgh, PA, USA
- Duda, R.O., et al., (1978), *Semantic Network Representations in Rule-Based Inference System*, Pattern-Directed Inference Systems, Waterman, D. and Hayes-Roth, F., eds., Academic Press, New York.
- Golabi, S., Abhary, K., Luong L. H.S. (1996), "An Automatic Approach for Assembly Sequence Planning," *Engineering Design and Automation* 2 (3), pp.171-185
- Huang, G.Q., 1996, *Design For X*, Chapman and Hall, pp.310-315
- Ishii, K., Eubanks, C.F., and Marks, M. (1993), "Evaluation Methodology for Post-manufacturing Issues in Life-cycle Design," *Concurrent Engineering: Research and Application*, Vol.1, pp.61-68
- Kroll, E. (1996), "Application of Work-Measurement Analysis to Product Disassembly for Recycling," *Concurrent Engineering: Research and Application*, Vol.4 No.2, pp.149-157
- Lee, Burton H., Seung, Rhee. And Ishii K., (1997), "Robust Design for Recyclability Using Demanufacturing Complexity Metrics," *Proceedings of the 1997 IEEE Design Engineering Technical Conferences and Computer in Engineering Conference*, pp.1-8
- Makino, A., Barkan, P., and Pfaff, R., (1989), "Design for Serviceability," *Proc. Of the 1989 ASME Winter Annual Meeting 1989*, San Francisco CA..
- Struges, R.H. and Kilani, M.I. (1992), "Towards an Integrated Design for an Assembly Evaluation and Reasoning System," *Computer Aided Design*, Vol.24 No.2, pp.67-79
- Yokota, K. and Brough, D.R. (1992), "Assembly / Disassembly Sequence Planning," *Assembly Automation*, Vol.12 No.3, pp.31-38
- 廖偉志和余志成 (1998), "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十四屆學術研討會
- 顏清輝和陳家豪 (1996), "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, pp.490-497



# COMPUTER AIDED CONCURRENT ANALYSIS OF ASSEMBLABILITY SERVICEABILITY AND RECYCLABILITY

Wei-Jyh Liao  
Jyh-Cheng Yu  
Chun-Chang Du

Department of Mechanical Engineering  
National Taiwan University of Science and Technology  
Taipei, Taiwan 106, R.O.C.

## ABSTRACT

This paper applies the proposed layout design representation to the concurrent analysis of assemblability, serviceability, and recyclability. Our design representation

uses the Link Matrix to illustrate the assembly relationship among parts, and the Interference Matrix to denote the geometrical interaction in the disassembly procedure. "Design for Assembly", "Design for Serviceability", and "Design for Recyclability" are all interacted with the types of assembly and the layout design, and should be considered in the simultaneous manner at the stage of conceptual design. This paper addresses the importance and the analytical tools of DFA, DFS, and DFRE. The proposed scheme is applied to develop a computerized analytical system (*DASeR*). With the aid of the interactive interface, the object-oriented knowledge base, and the inference engine, *DASeR* can greatly facilitate the analysis of Assembly Efficiency, Life-Cycle Service Cost, and Recycling Efficiency.

Keywords: Layout Design, Concurrent Engineering, Assembly, Disassembly, Service Mode Analysis, Recycle, Computer Aided Design

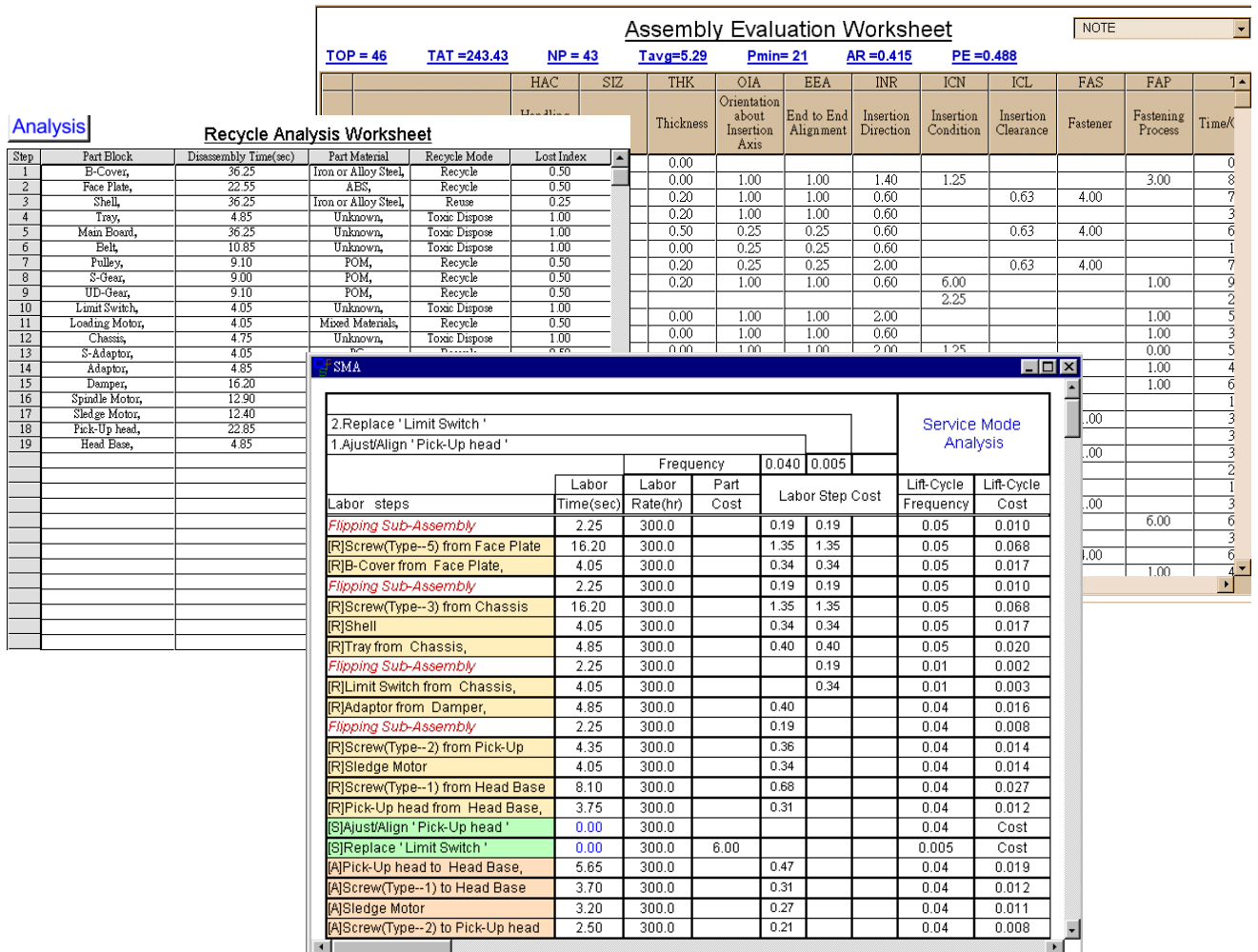


圖 5 *DASeR* 的輸出分析圖表