

產品生命週期下整合模組化與拆裝規劃之研究

曾懷恩 郭婉儀*

國立勤益科技大學工業工程與管理系

摘要

市場激烈的競爭造成產品生命週期日益縮短，而消極性的資源回收方式，已經無法因應現今產品所造成環境日益嚴重的負擔，故如何在產品初期的設計工作考量中，就考慮到資源的利用率可以達到最大、同時對於環境的傷害最輕，一般稱這種更積極的趨勢為綠色生命週期工程設計。為了使生命週期延長、使得資源能夠做更有效的使用，產品生命週期的結束並不見得是其組成零件的全面更新，就需要從企業活動的根源：產品的研發與設計層面來作解決。本研究擬企圖建立模組化及拆裝規劃的整合性評估方法，方法總共分爲四個階段，首先在第一階段，以工程資訊來量化產品零件間的結合強度，本研究稱之爲關聯強度。第二階段則以集群基因演算法將產品模組化；第三階段則是拆裝順序的產生；第四階段則評估模組的拆解成本與回收利益。本研究以 Borland C++6.0 作爲發展演算方法的工具，最後，本文以檯燈爲範例來驗證本研究提出的方法。

關鍵詞： 集群基因演算法，關聯強度，模組化，拆裝規劃。

DEIGN FOR END OF LIFE ON PRODUCT MODULARITY AND DISASSEMBLY PLANNING

Hwai-En Tseng Wan-Yi Kuo*

*Department of Industrial Engineering and Management
National Chin-Yi University of Technology
Taichung, Taiwan 41170, R.O.C.*

Key Words: grouping genetic algorithms, liaison intensity, modularity, disassembly planning.

ABSTRACT

Fierce competition in the market is cutting down product life cycle. Therefore, it is important to maximize the usage percentage of resources and minimize the damage to the environment in the early stage of product design. This more aggressive design tendency is referred to as green life cycle engineering design. This study attempts to build an integrated approach for product modular design and disassembly planning using the four stage procedure. At Stage one, the liaison intensity was used to quantify the connection relationship among parts by their engineering information. At Stage two, the product to be recycled was modularized by

*通訊作者：郭婉儀，e-mail: a7711261988@hotmail.com

Corresponding author: Wan-Yi Kuo, e-mail: a7711261988@hotmail.com



the grouping genetic algorithms. At Stage three, a forward phase heuristic algorithm was used to specify the disassembly planning. At Stage four, the disassembly cost and recycle profit of the modules were evaluated.

一、前言

近年來，注重環境保護的意識已經成為普世的價值，但是在現有市場上所製造的產品有真正實際回收的比例卻不高，故努力於環境保護的相關研究應是刻不容緩的議題；在面對資源回收的課題中應該抱持著兩個目標，其一是對於在已經廢棄的產品中，在目前的社會所建構的回收體系中，儘可能做最大資源的回收，這部份在政府及若干宗教團體已投入相當的資源戮力宣導；其次，也應將重心放在許多企業活動的源頭，也就是在產品設計階段就積極地開始加入綠色設計的觀點，以便在產品使用後，所剩餘的零件或次組裝件能夠儘可能回收；無疑地，努力於第二個目標對於環境保護的目標其效果應該更為根本也更為深遠，本研究擬將重心放在這個議題上，過去，為了支援綠色設計的議題上許多研究者有著各種不同的觀點，如為環境而考慮的設計 (design for environment, DFE) 或為生命週期而考慮的設計 (design for end of life, DfEOL) 的相關技術[1, 2]。過去，大多數的 DFE 或 DfEOL 工具只能提供觀念性的描述及定性的程序建議來處理環保的問題，故建立定量的評估方法將可適時地輔助設計者在設計初期階段就能作出對綠色生命週期正確的決策。

為因應的顧客需求，市場區隔下造成產品組成日趨複雜，製造商為了解決繁複零件所衍生的問題，產品模組化是常被使用的方法。根據 Otto 和 Wood 的研究[3]，所謂的模組 (module) 可以被定義為在產品的功能模型描述下，與功能有著一對一的對應成的實體結構，良好的模組化設計將能有效地降低生產成本及快速地組合成新的產品以因應快速的顧客需求變化。以對應顧客需求、功能規格為目的的稱之為功能導向的模組化設計 (function-based modular design)。過去會有許多研究會以比如說功能性、製造性或客製化等不同觀點來探討模組化的議題[4]，但是在以生命週期為導向的研究並不多。

過去，曾有 Tseng 等研究會以功能性的觀點來探討模組化的議題[5]，接著，Tseng 等人以集群基因演算法 (grouping genetic algorithms, GGAs) 來探討模組化，並嘗試綠色及成本折衝的考量[6]。本研究中將延續 Tseng 等人[6]的研究，企圖嘗試模組化與拆裝規劃的整合，對於綠色生命週期設計的輔助將有更進一步的意義，本研究的建議模組化與拆裝規劃可以四個階段來進行整合 (如圖 1 所示)，說明如下：

1. 第一階段：評估零件間強度

Step 1：設計者評估產品零件間工程資訊。

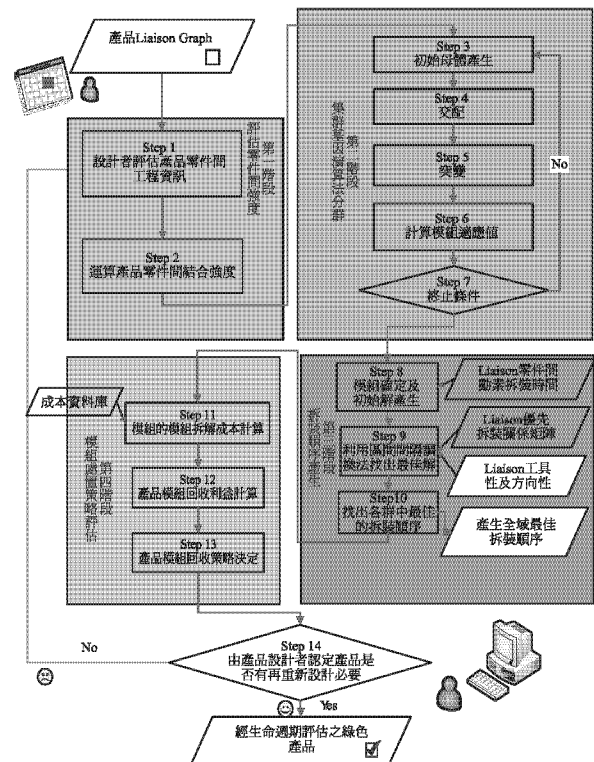


圖 1 產品生命週期下整合模組化與拆裝規劃之架構

Step 2：運算產品零件間結合強度。

2. 第二階段：集群式基因演算法分群 (grouping genetic algorithms, GGAs)

Step 3：運用隨機貪婪演算法 (random greedy algorithm) 產生初始母體。

Step 4：交配。

Step 5：突變。

Step 6：計算適應值。

Step 7：判斷是否符合終止條件。

3. 第三階段：拆裝順序規劃的產生

Step 8：模組確定及初始解產生。

Step 9：利用區間間隔調換法。

Step 10：最佳拆裝順序。

4. 第四階段：模組的成本、效益策略評估

Step 11：模組的模組拆解成本計算。

Step 12：產品回收利益計算 (5.2)。

Step 13：產品回收策略決定 (5.3)。

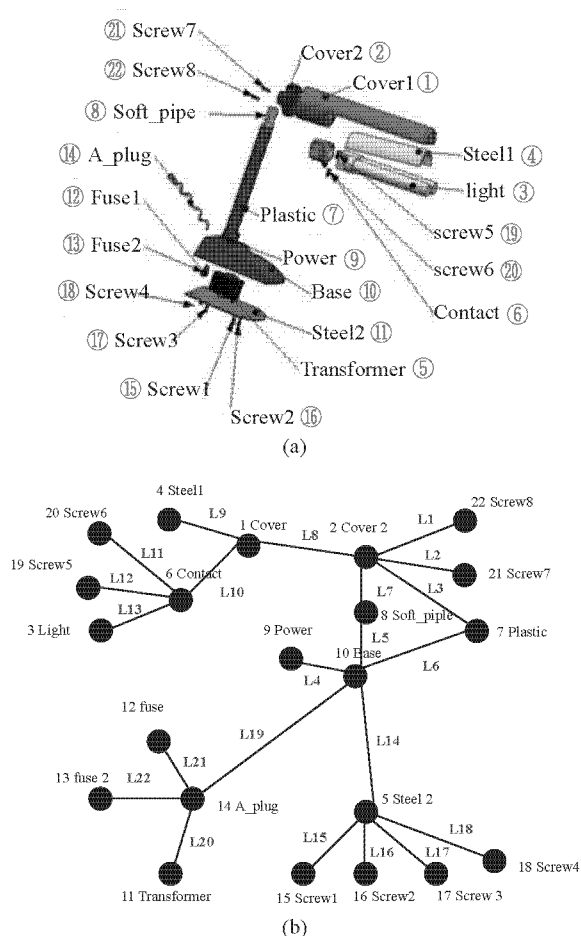


圖 2 檯燈之立體圖及關聯圖。(a) 立體圖；(b) 關聯圖

本文將在第 2 節說明零件關係圖的表達法，第 3 節中探討集群基因演算法及區間間隔調換法，第 4 節中說模組處置策略的方法，在第 5 節中以檯燈為範例說明圖 1 的步驟，最後在第 6 節中說明結論。

二、零件間關係圖形表達法

1. 產品結構圖形表達法

本研究以關聯圖 (liaison graph) 來表達產品結構，以結點 (node) 代表零件，而弧 (arc) 代表零件與零件的關聯關係，如圖 2(a) 是一個檯燈的 3D 立體圖，圖 2(b) 即是代表檯燈的關聯圖。

2. 零件間工程資訊

零件間結合強度由四個工程資訊如接觸型態、連結型態、工具型態、易接近性綜合評估表現零件間結合強度。分數由最低 0 到最大值 100 分。這樣的評分標準已在過去的研究中建立[6]，四個工程資訊間權重由不同產品或公司實際上來作考量。四個工程屬性觀點分述如下：

- (一) 接觸型態：描述零件間接觸面積與接觸點的方式，越多接觸點或是零件間越大接觸面積表示兩個零件間密合程度越高，並給其強度關係。
- (二) 連結型態：主要描述零件與零件間的緊密程度，並給予一連結方式表示其強度關係。
- (三) 工具型態：主要考量工具的操作困難程度，並給予一工具方式表示其強度關係。
- (四) 易接近性：由可行的結合方向考量是易接近性的依據。零件與另一零件接近的角度越多代表零件結合時，越容易跟其他零件組裝而不受限於其他零件。並給予一易接近性方式。

評估零件 i 與零件 j 間結合強度 $CCS_{i,j}$ ，由上述四個工程屬性經過權重相加後所決定，公式如下：

$$CCS_{i,j} = W_{CT}CT_{i,j} + W_{CB}CB_{i,j} + W_{TL}TL_{i,j} + W_{AD}AD_{i,j} \quad (1)$$

$CT_{i,j}$ 與 W_{CT} 分別為第 i 零件與第 j 零件間接觸型態強度與權重； $CB_{i,j}$ 與 W_{CB} 分別為第 i 零件與第 j 零件間連結型態強度與權重； $TL_{i,j}$ 與 W_{TL} 分別為第 i 零件與第 j 零件間工具型態強度與權重； $AD_{i,j}$ 與 W_{AD} 分別為第 i 零件與第 j 零件間易接近性強度與權重。本研究依照公式(2) 來計算權重[6]，所訂定的權重比率依序為接觸方式-30%；連結性-20%；工具性-40%；易接近性-10%。

$$W_i = \frac{2(n+1-k)}{n(n+1)} \quad (2)$$

$$0.5\sqrt{\text{產品總零件數}} \leq \text{模組數} \leq \sqrt{\text{產品總零件數}} \quad (3)$$

$$\frac{\text{產品總零件數}}{\text{最大模組數}} \leq \text{模組內最大零件數} \leq \frac{\text{產品總零件數}}{\text{最小模組數}} \quad (4)$$

三、研究方法

1. 集群基因演算法

集群基因演算法專門用來求解分群問題。Falkenaue [8] 認為傳統基因演算法來解決分群問題會有三項缺點：

- (一) 傳統的編碼型式很浪費儲存空間。
 - (二) 透過標準的複製機制繁衍下一代不容易產生品質好的解。
 - (三) 透過標準置換機制如交配及突變容易破壞衍生子代的品質。為修改這些缺點，集群基因演算法的編碼方式等與傳統基因演算法之間差異描述如下：
- (1) 傳統編碼(Encoding)的型式存在很浪費儲存空間 (Redundant space)。
 - (2) 透過標準的複製機制(Roulette wheel)繁衍下一代不容易產生品質好的解。



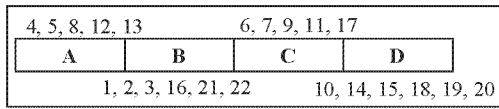


圖 3 集群基因演算法 GGAs 編碼

(3) 透過標準的置換機制(如 Crossoner 及 Mutation)容易破壞衍生的子代。

2. 編碼方式

Falkenaur [8]所提出集群基因編碼之方法,其中一個基因代表一個模組,如圖 3 是檯燈範例的染色體的範例,表示有 ABCD 四個模組數,而模組內零件表示如下:A = {4、5、8、12、13}、B = {1、2、3、16、21、22}、C = {6、7、9、11、17}、D = {10、14、15、18、19、20}。

3. 適應性函數

假設產品 P 由 Nc 個零件所構成,亦即表示為 P = {Cj | j = 1, 2, ..., Nc}。而產品 P 可以將產品分為 m 個模組,可以將產品結構表現如下:

$$Product = \{M_m | I = 1, 2, 3 \dots m\} \quad (5)$$

因為產品全部 Liaison 個數固定,故本研究假設產品所有零件間結合強度為一個固定常數。假設產品某一模組 Mi 有 n 個零件,其中 Pi 與 Pk 為模組中的兩個零件, Pi 與 Pk 的零件結合強度可表示成 LLIK。Ti 代表模組 Mi 內的所有零件結合強度總和如公式(5)。因為在關聯圖中的零件間鍵結並無方向性故需要除以 2。本研究群組基因演算法適應性函數是加總產品每一個模組,即為求最大化。亦即將產品模組內的連結強度最大,而模組間的連結強度最小。模組內的強度越強代表模組間的強度越弱,亦代表模組間越容易結合與拆解,適應性函數表示如公式(7)。

$$T_i = \sum_{P_i \in M_i} \sum_{P_k \in M_i} LLIK / 2 \quad (6)$$

$$LI_{intra} = \sum_{i=1}^m T_i \quad (7)$$

將產品全部的零件結合強度 (LI_{total}) 減去每一個模組內 LI_{intra},最後剩下為模組間的強度,其公式可表示如下:

$$LI_{inter} = LI_{total} - LI_{intra} \quad (8)$$

4. 交配

GGAs 是藉由不斷的交配機制產生出新的子代,針對父代與母代以隨機的方式產生交配點。將父代的交配區段,插入母代的交配區段產生新的子代。並檢查是否有重

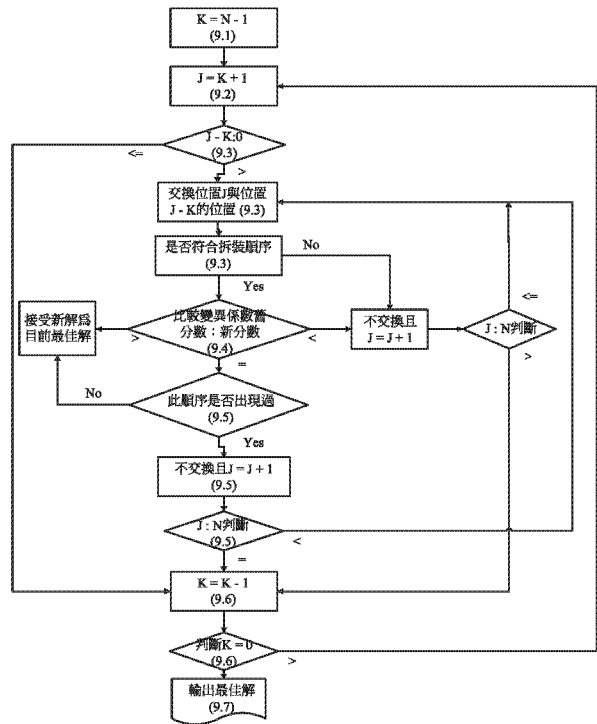


圖 4 區間間隔調換法流程圖

複零件出現在新子代,若有則刪除該基因,並補齊因刪除基因所遺失的產品零件。

5. 突變

本研究中採取消除一個已經存在的群組的突變方法。隨機刪除染色體中的基因,將因刪除所遺失的零件以隨機的方式插入有零件間關係的模組中。假設若無適當的模組,則再產生新的模組。

6. 終止條件

本研究則利用固定演化代數的作法來作為終止條件。集群式基因演算法的終止方法普遍有兩種,一為設定演化代數,或是設定一目標值,當演化之染色體等於或大於目標值停止。本研究則利用固定演化代數的作法來終止條件但也針對最佳解染色體作為合理性的檢測,若出現不合理則不中止仍然繼續執行集群基因演算法。

7. 區間間隔調換法

區間間隔調換法則扮演將模組內拆裝求解的工作,於是本研究利用一個零件或者一模組當作一個工作來做排序的問題,其優點在於利用此方法之 7 個步驟可以快速排出順序,其步驟如圖 4。

本研究以下列適應性函式列目標式來衡量拆裝順序:

$$f(D, T) = \sum_{i=1}^n (w_d D_i + w_t T_i) \quad (9)$$



表一 以拆裝觀點的 Fastener 型態表

Unfastening Action				Destructive Action	
Separate fasteners		Integral fasteners		Process	Relative
Fastener Type	U-Rating	Fastener Type	U-Rating	Axial Pulling	1
Nail with head	1.5	Cylindrical Snapfit	1.6	Levered Pulling	1.4
Nail w/o head Pin	1.8			Hammering	1.6
Screw/Bolt standard head	1.4	Cantilever Snapfit	1.3	Adhesive separation	1.7
Screw/Bolt speciality	2.2			Shearing cut	1.8
Nut & Bolt	2.1	Seam/Crimp Joint	1.6	Saw cutting	1.8
Rivet/Staples	2			Flame cutting	2.3
Retaining	2.5	Interference Fit	1.8	Crushing and	3
Tape	1.7			chemical	1.9
Adhesive	2.1	Integrally Threaded Part	2.2	Shredding	2.1
Welded	4			Impact breakage	2.6
Velcro/Zipper	1	Socket and Plug	1.2	Suction and	1.7
Releasable Chips	1.8			Paint Removal	2.4
				Drilling	1.2

其中

$f(D, T)$ ：代表第 1 個 Liaison 到第 n 個 liaison 之變異分數，若拆裝方向 $D_i = D$ 時則 $f(D, T) = 0$ ，若拆裝工具 $T_i = T$ 時則 $f(D, T) = 0$ 。 $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。 n 為關聯 (liaison) 個數。

四、模組處置策略評估

1. 模組的模組拆解成本計算

研究成本的計算主要是針對拆解模組內的 liaison 來作為計算的基礎，如圖 2(a) 的檯燈範例中要拆解整個檯燈則必須將圖 2(b) 的 22 個 liaison arc 全部拆解才能完全分解。如表一所示根據不同的型態而有不一樣的破壞性拆解活動，而以 relative effort 來評估評估其困難度。

本研究即根據表一來定義 liaison 關係的拆解成本 DC_{ij} 及 $Naik$ [7]，如公式(10) 所示：

$$DC_{ij} = (UA - effort \times U - Rating) + (DA - effort \times Relative - effort) + (LC \times DT) \quad (10)$$

其中

DC_{ij} ：拆解成本 (disassembly cost)，拆解零件 i 與零件 j 鍵結關係所需要的成本。

LC ：勞動成本 (labor cost)，單位時間所需要的人力成本。

$UA-effort$ ：美金/UA-effort，評估非破壞性拆解所需要的成本，本研究預設為 0.08 美金/單位。

$DA-effort$ ：美金/DA-effort。評估破壞性拆解所需要的成本，本研究預設為 0.15 美金/單位。

DT ：拆裝時間 (disassembly time)，以秒為單位，本研究中以方法時間衡量法 (method time measurement, MTM) 來評估拆解的時間[9]，所謂的 MTM 的評估方法是分解拆裝動作至 MTM 所包含的 17 個基本運動型態的描述，再對應已知 MTM 時間資料表，來取得拆裝的標準時間。

本研究提出以模組為單位評估拆解模組所需要的模組拆解成本，可以根據公式(10) 計算出每一個零件間鍵結關係的拆解成本，假設拆解模組 m 共需要拆解 n 格鍵結關係， DC_n 則表示拆解 n 鍵結關係的拆解成本，模組拆解成本可由公式(11) 表示如下：

$$Cost_m = \sum_{i=1}^n DC_n \quad (11)$$

2. 產品模組回收利益計算

產品在結束生命週期成為廢棄物時，若將回收有產品價值之零件再加以回收利用，不但可以減少廢棄物以及環境汙染產生，也可以帶給製造業多餘的回收收益。

(一) 丟棄 (throw away or disposal, T)：將廢棄的產品零件直接丟棄。不期望從零件 i 能得到任何的回收利益，故設為零並以下列的方式描述：

$$T_i = 0 \quad (12)$$

(二) 重新循環 (recycling, RC)：零件所構成的材料，經過特殊回收後可以重新製造新零件或是將這些回收的原物料用於他用。將零件 i 賣給資源回收商所得利益



表二 臺灣資源回收價格表

原物料	美金 / 公克	例如
青銅	0.00263	瓦斯爐的爐心、水龍頭
鐵	0.00046	鐵碗鐵杯
鋁	0.00116	鋁罐
紙	0.00009~0.00011	紙箱廢紙
不鏽鋼	0.00132	鋼杯等
紅銅	0.00461	電線的內容物
光碟	0.00033	DVD 光碟或是 CD 光碟
燈管	0.00010	檯燈燈管日光燈管
玻璃回收	0.00003	窗戶玻璃
塑膠回收	0.00019	塑膠罐

為 RC_i ，公式如下。其中， w_i 零件 i 的重量； r_i 公為資源回收商回收零件 i 的價格。依照構成零件原物料的回收價格為主，如表二是本研究採用臺灣資源回收的價格，此價格可因不同國家或市場的狀況而有所調整。

$$RC_i = r_i \times w_i \quad (13)$$

(三) 重新使用 (reuse, R)：將廢棄產品零件 i 維修或處理後，將此零件販售給二手市場或是製造商，若從中獲取利益為 RU_i ，若 p_i 為二手商可能會購買 i 零件的價錢； D 為產品折舊率， n 為 useful life，目前本研究以雙倍餘額遞減法 (declining balance method) 來決定折舊率[6]，公式如下：

$$RU_i = D \times p_i \quad (14)$$

$$D = \frac{2}{n} \quad (15)$$

3. 產品模組回收策略決定

本研究以模組為單位去評估模組三種回收策略的總價值，假設產品總共有 m 個模組，產品的第 m 個模組裡總共有 n 個零件。 TT_m 表示模組 m 內所有零件皆為丟棄策略價值的總和，可表示為 $TT_m = \sum_{i=1}^n T_i$ ； TRC_m 表示模組 m 內所有零件皆為重新循環策略價值的總和，可表示為 $TRC_m = \sum_{i=1}^n RC_i$ ； TRU_m 表示模組 m 內所有零件皆為重新使用策略價值的總和，本研究取三種回收價值最大者作為模組 m 的回收價值 ($Benefit_m$)，如公式(16) 所示。

$$Benefit_m = \max\{TT_m, TRC_m, TRU_m\} \quad (16)$$

本研究根據產品每一模組的最大回收利益 ($Benefit_m$) 與模組拆解成本 ($Cost_m$) 之間的關係，判斷產品中所有模組的經濟價值，如公式(17) 所示。當 $Value \geq 1$ ，則模組 m

具有綠色拆解價值，將模組內所有零件全部拆解並依照每零件三種回收策略最大價值的策略進行回收； $Value < 1$ 時，則表示模組 m 的最大回收利益小於模組拆解成本，則不符合經濟效益不用拆解其內部零件。

$$Value = \frac{Benefit_m}{Cost_m} \quad (17)$$

五、檯燈範例

本研究以檯燈為例，產品連結圖可由圖 2(a) 為檯燈的立體圖，圖 2(b) 為檯燈的關連圖。檯燈共有 22 個零件，以及 22 條關連圖，示範如何從零間結合強度的屬性做評估，屬性包括接觸性、連結性、工具性、易接近性，屬性計算零件間結合性強度，再經由集群式基因演算法將零件模組化，再將模組化之零件拆裝排順序，在進行模組處置策略的評估將回收成本及利益作為是否回收的策略，再經由設計者判斷是否重新設計，以達到生命週期評估之綠色產品。

1. 第一階段：評估零件間強度

(一) Step 1：評估產品零件間工程屬性，並計算零件間結合強度 (CCS)。如表三，零件 1 與零件 2 的接觸型態為單面接觸，連結型態為放入，工具型態為手，易接近性為 5 個角度。
(二) Step 2：接觸型態權重 0.3；連結型態權重 0.2；工具型態 0.4；易接近性 0.1；運用公式(1) 計算零件 1 與零件 2 的結合強度如下。其他的零件結合強度計算亦同，所有零件間的結合強度如表三。

$$CCS_{1-2} = (0.3 \times 18) + (0.2 \times 4) + (0.4 \times 7) + (0.1 \times 3) = 9.3$$

2. 第二階段：群組基因演算法分群

(一) Step 3：將檯燈零件間鍵結關係與各零件間結合強度當作集群基因演算法演算的資料來源，並以隨機貪婪法生產初始母體 40 個。另外模組數範圍經過公式(4) 計算得模組數最小設 3，最大設為 5。而每一模組數的最大零件數為 5~8。
(二) Step 4：交配。採取輪盤式選擇父代與母代，但是父代不能等於母代，進行交配。
(三) Step 5：突變。採取隨機刪除某一個群組。
(四) Step 6：計算適應值。檯燈 CCS_{total} 是表三所有 CCS 的總和為 215.5，計算交配或突變所產生新染色體的適應值，適應值計算如下。模組 1 的模組內強度：

$$T_1 = \frac{CCS_{2,8} + CCS_{2,22} + CCS_{2,21} + CCS_{2,7} + CCS_{10,7} + CCS_{10,8} + CCS_{10,9}}{2} = \frac{8.3 + 10.5 + 10.5 + 7.5 + 7.5 + 8.3 + 12.2}{2} = 32.4$$



表三 零件間結合強度表

Liaison	各項各程資訊				CCS
	接觸型態 (CB)	連接型態 (CB)	工具型態 (TL)	易接近型態 (AD)	
L ₁₋₂	單面接觸 (18)	放入 (4)	用手的 (7)	5 個角度 (3)	9.3
L ₁₋₄	單面接觸 (18)	插入 (8)	用手的 (7)	1 個角度 (15)	11.3
L ₁₋₆	單面接觸 (18)	放入 (4)	用手的 (7)	5 個角度 (3)	9.3
L ₂₋₇	線接觸 (12)	放入 (4)	用手的 (7)	5 個角度 (3)	7.5
L ₂₋₈	線接觸 (12)	插入 (8)	用手的 (7)	5 個角度 (3)	8.3
L ₂₋₂₁	點接觸 (6)	旋入 (12)	用小工具的 (14)	1 個角度 (15)	10.5
L ₂₋₂₂	點接觸 (6)	旋入 (12)	用小工具的 (14)	1 個角度 (15)	10.5
L ₃₋₆	多面接觸 (30)	插入 (8)	用手的 (7)	1 個角度 (15)	14.9
L ₅₋₁₀	單面接觸 (18)	放入 (4)	用手的 (7)	5 個角度 (3)	9.3
L ₅₋₁₅	點接觸 (6)	旋入 (12)	用小工具的 (14)	1 個角度 (15)	10.5
L ₅₋₁₆	點接觸 (6)	旋入 (12)	用小工具的 (14)	1 個角度 (15)	10.5
L ₅₋₁₇	點接觸 (6)	旋入 (12)	用小工具的 (14)	1 個角度 (15)	10.5
L ₅₋₁₈	點接觸 (6)	旋入 (12)	用小工具的 (14)	1 個角度 (15)	10.5
L ₆₋₁₉	點接觸 (6)	旋入 (12)	用小工具的 (14)	1 個角度 (15)	10.5
L ₆₋₂₀	點接觸 (6)	旋入 (12)	用小工具的 (14)	1 個角度 (15)	10.5
L ₇₋₁₀	線接觸 (12)	放入 (4)	用手的 (7)	5 個角度 (3)	7.5
L ₈₋₁₀	線接觸 (12)	插入 (8)	用手的 (7)	5 個角度 (3)	8.3
L ₉₋₁₀	多點接觸 (24)	插入 (8)	用手的 (7)	4 個角度 (6)	12.2
L ₁₀₋₁₄	點接觸 (6)	插入 (8)	用手的 (7)	1 個角度 (15)	7.7
L ₁₁₋₁₄	點接觸 (6)	放入 (4)		1 個角度 (15)	8.9
L ₁₂₋₁₄	點接觸 (6)	旋入 (12)	用手的 (7)	1 個角度 (15)	8.5
L ₁₃₋₁₄	點接觸 (6)	旋入 (12)	用手的 (7)	1 個角度 (15)	8.5

模組 2 的模組內強度 $T_2 = 28.25$

模組 3 的模組內強度 $T_3 = 21$

模組 4 的模組內強度 $T_4 = 12.95$

所以染色體適應值 (CCS_{intra}) 及 CCS_{inter} 分別為：

$$\begin{aligned} CCS_{intra} &= T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \\ &= 32.4 + 28.25 + 21 + 12.95 \\ &= 94.6 \end{aligned}$$

$$CCS_{inter} = 215.5 - 94.6 = 120.9$$

- (五) Step 7：判斷是否符合終止條件。若符合則至 Step 9；若否，則返回 Step 3。

3. 第三階段：拆裝順序規劃的產生

- (一) Step 8：初始解方式應用隨機貪婪(random greedy)的方式，來建構拆裝模組間的初始拆裝解，並且需檢查模組間的拆裝順序及拆裝時間，檯燈範例的模組初始解的拆解順序若結果為模組 1→模組 3→模組 2→模組 4。

- (二) Step 9：利用區間間隔調換法

- (三) Step 10：得到最佳拆裝順序。

本研究之拆裝順序所探討有兩個部分，其一為未運用

集群基因演算法，而是所有零件利用拆裝演算法來排列拆裝順序；其二為運用集群式基因演算法之分群，再利用拆裝演算法排列拆裝順序，最後在判斷其最佳拆裝順序。

未運用集群基因演算法之拆裝順序為：

$$\begin{aligned} &L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow L_3 \rightarrow L_7 \rightarrow L_6 \rightarrow L_5 \rightarrow L_4 \rightarrow L_{14} \rightarrow L_{18} \rightarrow L_{17} \rightarrow \\ &L_{15} \rightarrow L_{16} \rightarrow L_8 \rightarrow L_9 \rightarrow L_{10} \rightarrow L_{11} \rightarrow L_{12} \rightarrow L_{13} \rightarrow L_{19} \rightarrow \\ &L_{21} \rightarrow L_{22} \rightarrow L_{20} \circ \end{aligned}$$

時間耗用了 0.079 秒。

最後本研究利用 Borland C++6.0 撰寫基因演算法 (GGA) 及區間間隔調換法之演算法，並且在 CPU 為 Pentium (R) D 2.80 GHz 以及記憶體 (RAM) 2.49 GB 的電腦硬體環境下執行集群基因演算法以及區間間隔調換法。找到各模組與各零件的拆裝順序。

運用集群基因演算法：

初始的分群：模組 1→模組 3→模組 2→模組 4。

利用區間間隔調換法：模組 1→模組 3→模組 4→
模組 2。

運用集群基因演算法之拆裝順序為：



表四 檯燈模組拆解成本

模組	Liaison	拆解活動	UA-Rating	UA-effort	Labour	Disassembly	成本 (美金)	Cost
模組 1	L ₂₋₂₂	非破壞性	1.4	0.08	0.00087	1.5540	0.1134	1.0311
	L ₂₋₂₁	非破壞性	1.4	0.08	0.00087	1.5540	0.1134	
	L ₂₋₇	非破壞性	1.4	0.08	0.00087	1.1295	0.1130	
	L ₂₋₈	非破壞性	2.2	0.08	0.00087	1.1295	0.1770	
	L ₇₋₁₀	非破壞性	2.1	0.08	0.00087	1.1295	0.1690	
	L ₈₋₁₀	非破壞性	2.2	0.08	0.00087	1.1295	0.1770	
	L ₉₋₁₀	非破壞性	2.1	0.08	0.00087	0.5755	0.1685	
模組 3	L ₅₋₁₀	非破壞性	2.2	0.08	0.00087	1.1295	0.1770	0.6304
	L ₅₋₁₈	非破壞性	1.4	0.08	0.00087	1.5540	0.1134	
	L ₅₋₁₇	非破壞性	1.4	0.08	0.00087	1.5540	0.1134	
	L ₅₋₁₅	非破壞性	1.4	0.08	0.00087	1.5540	0.1134	
	L ₅₋₁₆	非破壞性	1.4	0.08	0.00087	1.5540	0.1134	
模組 4	L ₁₀₋₁₄	破壞性	1	0.15	0.00087	0.2698	0.1502	0.6009
	L ₁₂₋₁₄	破壞性	1	0.15	0.00087	0.2698	0.1502	
	L ₁₃₋₁₄	破壞性	1	0.15	0.00087	0.2698	0.1502	
	L ₁₁₋₁₄	破壞性	1	0.15	0.00087	0.2698	0.1502	
模組 2	L ₁₋₂	非破壞性	1	0.08	0.00087	0.8237	0.0807	0.7978
	L ₁₋₄	非破壞性	2.1	0.08	0.00087	0.5755	0.1685	
	L ₁₋₆	非破壞性	2.2	0.08	0.00087	0.5755	0.1765	
	L ₆₋₂₀	非破壞性	1.4	0.08	0.00087	1.5540	0.1134	
	L ₆₋₁₉	非破壞性	1.4	0.08	0.00087	1.5540	0.1134	
	L ₃₋₆	非破壞性	1.8	0.08	0.00087	1.5540	0.1454	

L₁→L₂→L₃→L₇→L₆→L₅→L₄→L₁₄→L₁₈→L₁₇→
L₁₅→L₁₆→L₁₉→L₂₁→L₂₂→L₂₀→L₈→L₉→L₁₀→
L₁₁→L₁₂→L₁₃。

時間耗用了 0.147 秒。

4. 第四階段模組的成本、效益策略評估

(一) Step 11：計算各模組的模組拆解成本。舉例計算模組 4 的模組拆解成本如下：

$$\begin{aligned}
 Cost_4 &= DC_{L_{10-14}} + DC_{L_{12-14}} + DC_{L_{13-14}} + DC_{L_{11-14}} \\
 &= \{(1 \times 0.15) + (0.00087 \times 0.2698)\} \\
 &\quad + \{(1 \times 0.15) + (0.00087 \times 0.2698)\} \\
 &\quad + \{(1 \times 0.15) + (0.00087 \times 0.2698)\} \\
 &\quad + \{(1 \times 0.15) + (0.00087 \times 0.2698)\} \\
 &= 0.6009
 \end{aligned}$$

其餘模組的模組拆解成本詳細資訊如表四，可得知模組 1 之拆解成本為 1.0311、模組 3 之拆解成本為

0.6304、模組 4 之拆解成本為 0.6009、模組 2 之拆解成本為 0.7978。

(二) Step 12：產品回收利益計算

計算檯燈各模組的回收價值，如模組 1 零件 2 的 Cover 2 之各項回收策略價值。零件 2 的 Cover 2 之組成材料為塑膠，回收價格為 0.00019 美元，重量為 30 公克。各模組詳細如表五計算如下：

(1) 零件 2 的 Cover 2 的丟棄策略 (T)：

不期望從零件 2 的 Cover 2 得到任何回收利益，所以為 0。

(2) 零件 2 的 Cover 2 的重新循環 (RC)：

$$RC_{Cover\ 2} = r_{Cover\ 2} \times w_{Cover\ 2} = 0.0001930 = 0.0062$$

(美金)。

(3) 零件 2 的 Cover 2 的重新使用 (R)：

利用公式(15)，假設檯燈之使用年限為 4 年，所以折舊率為 0.5。

$$RU_{Cover\ 2} = D \times P_{Cover\ 2} = 0.5 \times 0.069 = 0.0345 \text{ (美金)}。$$

根據表五得知各產品模組以及各零件的回收利益計算。

(三) Step 13：產品回收策略決定

由表六可以判斷最終產品是否回收，模組 3 與模組 4



表五 檯燈各模組回收策略價值

模組	零件	零件名稱	重量 (KG)	材料	丟棄收益	重新循環	重新使用	最大利益
模組 1	21	Screw 7	0.00125	鐵	0	0.0006	0.0345	0.3452
	22	Screw 8	0.00125	鐵	0	0.0006	0.0345	
	2	Cover 2	0.03	塑膠	0	0.0062	0.0345	
	7	Plastic	0.01	塑膠	0	0.021	0.0518	
	8	Sof t_pipe	0.2	鐵	0	0.0967	0.0518	
	9	Power	0.01	塑膠	0	0.0021	0.0518	
	10	Base	0.04	塑膠	0	0.0083	0.0863	
模組 3	15	Screw 1	0.00125	鐵	0	0.0006	0.0345	0.6583
	16	Screw 2	0.00125	鐵	0	0.0006	0.0345	
	17	Screw 3	0.00125	鐵	0	0.0006	0.0345	
	18	Screw 4	0.00125	鐵	0	0.0006	0.0345	
	5	Steel 2	0.2	鋼	0	0.6559	0.5178	
模組 4	11	Transformer	0.4	鋁	0	0.4833	0.5178	0.6904
	12	Fuse 1	0.01	塑膠	0	0.0021	0.0518	
	13	Fuse 2	0.01	塑膠	0	0.0021	0.0518	
	14	A_plug	0.09	塑膠	0	0.0186	0.0690	
模組 2	19	Screw 5	0.00125	鐵	0	0.0003	0.0345	0.6559
	20	Screw 6	0.00125	鐵	0	0.0003	0.0345	
	6	Contact	0.05	塑膠	0	0.1640	0.0345	
	3	Light	0.04	玻璃	0	0.0001	0.0000	
	4	Steel 1	0.01	鋼	0	0.0048	0.2589	
	1	Cover 1	0.08	塑膠	0	0.0166	0.2934	

表六 Value 值及回收判斷

模組	模組 1	模組 3	模組 4	模組 2
Benefit	0.3452	0.6583	0.6904	0.6559
Cost	1.0311	0.6304	0.6009	0.7978
Value	0.3348	1.0443	1.1489	0.8221
判斷是否回收	不回收	回收	回收	不回收

可作為回收的策略，目前模組 1 與模組 2 雖判斷出不回收，但可以透過重新改良與設計來改良這個結果，以提高回收率。

在檯燈的範例中發現，透過本研究四個階段的演算步驟將可整合考量模組化及拆裝順序規劃。

六、結 論

在產品設計的初期階段就建立量化評估模式是綠色生命週期設計的重要觀念，本研究建立了模組化及拆裝規劃整體的考量，主要以關係圖 (liaison graph) 來表達產品的資訊，建立產品間的連結強度計算方式，這是模組與零

件間關係的基本資訊；接著，以集群基因演算法來作模組的切割，以區間間隔調換法來探討拆裝順序規劃，最後，再以建立的成本效益的經濟衡量來評估模組的回收性，從相關案例的探討後，說明本研究的量化評估模式應用在綠色設計應是可行的途徑。

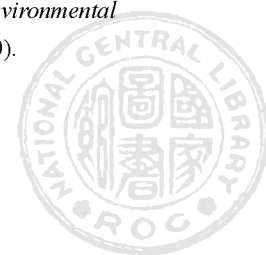
在未來研究方面，由於拆裝規劃可分為全部拆裝及選擇性拆裝兩類，所謂全拆意謂著所有的零件一律拆除，而本研究探討模組化及回收的問題，故屬於選擇性拆裝的範圍，未來在選拆及全拆的問題上應可再作更周延的研究。

誌 謝

本研究感謝國科會 NSC101-2221-E-167-021 計畫經費支持。

參考文獻

- Ilgin, M. A. and Gupta, S. M., "Environmentally Conscious Manufacturing and Product Recovery (ECMPRO): A Review of The State of The Art," *Journal of Environmental Management*, Vol. 19, No. 3, pp. 563-591 (2010).



2. Go, T. F., Wahab, D. A., Rahman, M. N. Ab., Ramli, R., and Azhari, C. H., "Disassemblability of End-of-Life Vehicle: A Critical Review of Evaluation Methods," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 19, No. 13, pp. 1536-1546 (2011).
3. Otto, K. and Wood, K., *Product Design-Technical in Reverse Engineering and New Product Development*, Prentice Hall, London (2001).
4. Jose, A. and Tollenaere, M., "Modular and Platform Methods for Product Family Design: Literature Analysis," *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 16, No. 3, pp. 371-390 (2005).
5. Tseng, H. E., Chang, T. S., and Yang, Y. C., "A Connector-Based Approach to The Modular Formulation Problem for A Mechanical Product," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 24, No. 3-4, pp. 161-171 (2004).
6. Tseng, H. E., Chang, C. C., and Cheng, C. J., "Disassembly-Oriented Assessment Methodology for Product Modularity," *International Journal of Production Research*, Vol. 48, No. 14, pp. 4297-4320 (2010).
7. Das, S. K. and Naik, S., "Process Planning for Product Disassembly," *International Journal of Production Research*, Vol. 40, No. 6, pp. 1335-1355 (2002).
8. Falkenauer, E., *Genetic Algorithms and Grouping Problems*, John Wiley and Sons, NY (1998).
9. Tseng, H. E. and Tang, C. E., "A Sequential Consideration for Assembly Sequence Planning and Assembly Line Balancing Using the Connector Concept," *International Journal of Production Research* Vol. 44, No. 1, pp. 97-116 (2006).

2013年05月23日 收稿

2013年06月25日 初審

2013年07月09日 接受

