國立勤益科技大學工業工程與管理系

產品綠色循環設計之探討

A Research on Green Recyclable Design

摘要

隨著環保法規趨嚴與永續意識抬頭，如何將綠色循環概念有效導入產品開發階段，已成為產業界的重要課題。本研究旨在建立一套系統化的產品綠色設計評分模型，作為設計者在產品開發初期決策輔助工具。本研究整合產品結構、材料特性及回收價值等。導入碳足跡(Carbon Footprint)、物料清單(Bill of Materials, BOM)記錄零件材料性質以及繪製AND/OR 圖形。計算出各項綠色設計指標之權重，以解決設計決策中複雜的優先順序問題；同時，結合層級分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)、品質機能展開(Quality Function Deployment, QFD)以及拆解時間成本對產品零件進行分類，分析零件間的回收價值及綠色設計。針對手電筒與訂書機作為實證案例，透過 AHP 與 QFD 模型計算及驗證該評分方法在評估產品的有效性。先利用 AHP 模型對各項綠色設計準則進行成對比較，確立核心指標權重，解決複雜的優先順序問題；再將此權重帶入 QFD 模型的品質屋(House of Quality)，轉化為零件改良方案。研究結果顯示本模型能找出關鍵零件並改善，協助產品設計者在設計初期即能改善產品之綠色價值，抓出重點零件且分析如何改善，達成較佳的循環設計。本研究貢獻了碳足跡轉變成真實的數據、建立多項量化評估指標及提出綠色產品改善設計等。最後推論本研究提出的評估方法可以使設計者改良出具有綠色循環設計之產品。

關鍵詞：綠色設計、碳足跡(Carbon Footprint)、層級分析法(AHP)、品質機能展開(QFD)。

第一章、緒論

隨著全球市場競爭激烈與生命週期縮短，企業多聚焦於創新與成本，對產品生命終止(End-of-Life , EoL)階段的環境影響關注仍顯不足(Kiritsis *et al.* 2003)。為此本研究聚焦產品的初期設計階段，探討如何導入易拆解與綠色設計。希望透過簡單有效的評估方法，讓設計者在研發初期，就能提早以綠色設計規劃產品，為了有效達成上述目的，本研究建立一套可行評估方法。目的在於幫助設計者分析並找出改善產品設計的方法，將綠色設計的概念落實於研發初期，使產品能在降低回收成本的同時，也符合國際環保標準。

本研究以多面向觀點審視產品之綠色設計，首先以產品碳足跡 (Carbon Footprint, 2020) 作為綠色設計之評估，碳足跡是指一項產品在整個生命週期中，所產生的溫室氣體排放量。本研究之所以選擇碳足跡作為評估指標，是因它為目前國際上最普遍、也最能量化產品環保衝擊的標準，再透過 BOM 表(Bill of Materials, BOM) (2000) 將產品零件展開，本研究之所以採用 BOM 表記錄各零件的材料性質與環境碳係數，是因為它能完整清點出產品由哪些零部件組成。藉由 BOM 表，本研究才得以詳細記錄各零件的材料性質與環境碳係數，並以此作為後續拆卸順序規劃(Disassembly Sequence Planning , DSP)(Askiner,Surendra, 1998)的基礎，DSP是現代製造業、產品維修與綠色循環經濟中的一項關鍵技術。簡單來說，它就是利用演算法和邏輯分析，為一個複雜產品計算出最佳的零件拆解步驟，確保過程安全、高效率且符合環保與經濟效益。而在後續導入 DSP 的原因在於產品回收時不能盲目拆解，必須透過有順序規劃，找出省時與省力的拆卸路徑。因此本研究結合碳足跡數據與結構資訊，評估產品生命終止階段的回收與循環價值。其次本研究擬採取整合層級分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) (Saaty, 2004) 與品質機能展開 (Quality Function Deployment, QFD) (Akao,2003) 作為篩選零件方法，之所以選用 AHP，是因為綠色設計的評估指標眾多，透過 AHP 可以計算出各指標的相對重要程度（權重），避免主觀的誤差，因此本研究進一步導入 QFD 的分析，透過品質屋矩陣能將前述的指標權重轉換為零件的影響分數。藉由兩者的結合，本研究得以篩選出影響環境的關鍵零件與拆卸順序，作為後續改善設計之依據。最後本研究以拆解時間與成本評估產品在 EoL（生命週期終止）階段的回收價值與可利用性，之所以特別聚焦於 EoL 階段，是因為產品不論設計得再環保，若在報廢時面臨結構複雜、耗時且拆解成本過高的問題，將導致回收缺乏經濟效益，最終仍會被直接廢棄。因此本研究深入評估 EoL 階段的實務成本，才能確保綠色設計兼具環保與現實可行性。藉由改善前後數據對比說明改善後不僅能縮短拆卸時間以及降低成本，更能

落實綠色設計到 EoL 階段並對其進行設計改善。本研究以手電筒及釘書機為案例，驗證本研究所建構方法之可行性與綠色設計之價值。

研究貢獻主要分為以下幾點：

1. 本研究同時考量零件材料屬性、產品結構以及拆解流程，建立較完整之綠色設計分析架構。
2. 建立多項量化評估指標：包含拆解時間、拆解成本、碳足跡以及循環恢復指數等，以提升產品環境效益評估能力。
3. 透過結構整合與材料替代設計降低產品生命終止階段的回收負擔，最終提供具體案例分析結果，作為未來綠色設計研究與實務應用之重要參考。
4. 提出綠色循環概念之產品改善設計，透過結構整合與材料替代設計，降低產品於 EoL 階段之拆解與回收負擔。

最後本研究整體架構如下：第二章將回顧綠色設計、產品拆裝順序規劃及相關評估模型之文獻，並分析其優缺點；第三章說明本研究之方法架構與評估流程，並以手電筒產品進行案例分析並改善；第四章套用第三章節之模型，並以釘書機產品做為案例分析，且進行結果比較與討論；第五章則彙整研究結論，提出未來研究方向與建議。

第二章、文獻回顧

本研究回顧評分模型建構之核心理論與文獻，以確立方法論之理論基礎。首先，由產品拆解評估模型 Kroll and Hanft（1998）、Harivardhini and Chakrabarti（2016）以及 Aguiar *et al.*（2017）奠定產品結構與可拆解性之量化指標，用以衡量拆解難易度。其次，引入環境衝擊評估指標，其概念延伸自 Wackernagel 與 Rees（1990）提出的生態足跡，透過產品碳足跡提供生命週期環境影響之客觀量化基準。為整合多元指標並支援設計決策，本研究採用 Saaty（2004）提出之層級分析法（AHP），藉由層級矩陣運算解決多準則決策並計算指標權重；同時納入Akao 提出之品質機能展開（QFD）(2003,Akao)，系統性將需求轉換為設計參數，以支援指標間的系統化轉換分析。最後，為提升模型於生命終止（EoL）階段之實務適用性，引入懲罰因子分析（Marconi *et al*., 2018）及拆解成本文獻，據以修正拆解難度與實際操作之落差。綜上所述，本研究整合上述文獻，建構出一套兼顧環境永續與經濟效益之整合性評估架構，為後續設計決策依據。

2.1 探討舊有模型

本研究統整國內外關於產品拆解與回收評估之核心模型。首先，Kroll and Hanft（1998）模型奠定了拆解量化的基礎，透過標準化動作（如旋轉、拉、拔等）估算拆解時間與成本，然而其缺乏對整體拆解路徑與結構拓撲關係的宏觀描述。為解決操作環境與零件特性的局限性，Harivardhini and Chakrabarti（2016）進一步提出拆解工作量指數（DEI）模型，納入尺寸、重量及可接近性等懲罰因子，但該模型評估流程繁瑣，且較難在設計初期提供材料選擇與結構整合的支援。而 Aguiar *et al.*（2017）模型則聚焦於產品設計初期，透過整合結構特性與可回收性指標，評估生命週期終端的回收再利用潛力，在拆裝規劃、拆解順序配置及實際作業效率的探討上仍顯不足，因此於實務拆解應用層面仍存在延伸與改善之空間。

2.2 AND/OR分析

在拆裝順序規劃方面，AND/OR graph常被用於表示產品可能的組裝或拆解路徑，其概念可將產品狀態、零件間關係以及可行操作步驟轉換為圖形結構，以協助判斷不同拆卸順序之可行性。Homem de Mello and Sanderson(1990)提出以 AND/OR graph 表示產品裝配計畫的方法，能以較緊湊的方式呈現多種可能的裝配路徑，後續亦被延伸應用於拆裝順序規劃中。Zhou *et al.*(2019)亦指出，拆卸順序規劃主要涵蓋拆卸模式、拆卸建模以及規劃方法等面向，而圖形模型則為常見之產品拆卸建模方式之一。

2.3 碳足跡

本研究引入產品碳足跡(2020)，目的在於解決過去綠色設計多半都是單一的環保概念且缺乏客觀量化數據的問題。本研究以 BOM 表(2000)為基礎導入碳足跡，能更直接追溯零件的材料性質與環境碳係數，將產品結構轉化為真實的數據。此數據能判斷出哪些零件造成了主要的環境污染，進而協助設計者進行改良，並落實環境的綠色永續。

2.4 AHP 與 QFD 在產品設計應用

AHP (2004)提出之多準則決策方法，主要透過層級架構與成對比較方式建立各評估指標之相對權重。AHP 已廣泛應用於產品設計、供應鏈管理及綠色設計等領域，特別適合用於處理具有多項指標之決策問題。在綠色產品設計研究中，AHP 常用於分析材料成本、拆解難易度、環境污染程度以及回收性等因素之重要程度，以協助設計者建立較具客觀性之決策依據。QFD (2003)則為一種將顧客需求轉換為產品設計需求之方法，透過品質屋建立需求與技術特性間之關聯性分析。近年來 QFD 亦逐漸被應用於綠色設計領域，以整合環境需求、產品功能與永續設計目標。

2.5 懲罰因子分析

在產品拆解時間評估中，除了基本拆解時間外，產品零件的實際狀態亦會影響拆解效率，例如零

件磨損、變形、鏽蝕及接合狀態等因素。因此，Marconi *et al.*(2018) 提出以修正因子(Corrective Factors)概念調整有效拆解時間(Effective Disassembly Time)，該研究指出修正因子可有效反映產品實際拆解條件與操作困難度，使拆解評估結果更貼近真實情況。

2.6 拆解成本與經濟效益分析

拆解成本為產品生命終止階段中之重要評估項目，其主要包含人工拆解成本、工具使用成本、回收分類成本以及廢棄處理成本等。相關研究指出產品結構越複雜、零件數量越多，將導致拆解作業時間增加，進而提高整體拆解成本。因此近年研究逐漸透過拆解時間、操作次數與工具需求等指標估算產品拆解成本，以評估產品之經濟效益與回收可行性。此外若產品於設計初期即納入綠色設計與拆解性觀點，則可有效降低後續回收與拆解成本，並提升產品於循環資源利用效率，此說明在可回收性診斷模型(Aguiar *et al*., 2017)中得到證實。

2.7 文獻探討總結

在拆解模型演進上，Kroll 模型奠定任務量化基礎，但缺乏結構依連性描述；隨後引入懲罰因子，補足操作環境、施力需求與接近性等實務細節。在環境效益上，碳足跡為衡量永續性的核心工具，能具體量化零部件的環境衝擊。由於結構設計是材料回收的前置條件，若結構過於複雜導致無法有效拆解，零件便無法進入循環體系，這顯示出整合物理拆解難度與回收價值進行系統性分析的必要性。最後，透過 AHP 的權重分配與 QFD 的需求轉換，能有效將成本、功能與環境影響進行分層，把使用者期待客觀轉化為具體的綠色設計指標。總結而言，本研究建構之綜合評估體系整合了拆解效率、材料循環性與環境負荷，能在滿足產品基本性能的同時，實質提升循環永續價值。

第三章、綠色循環設計之方法

本節主要針對手電筒產品之結構組成與拆解關係進行分析，建立產品零件之拆解邏輯與可行拆解路徑，作為後續拆解時間、碳足跡、成本分析以及 AHP 結合 QFD 評估之基礎。由於產品於生命週期末端之回收效率與拆解性，會受到零件配置、結構關聯以及拆解順序影響，因此於改善設計前必須先完整掌握產品各零件之組成關係與拆解流程。將以手電筒作為實務驗證案例，從本研究所提出綠色循環設計評估方法。

3.1拆解順序規劃

本研究首先透過 3D 建構模型圖形方式建立手電筒產品之爆炸圖與 BOM 表結構圖，以釐清各零件之階層關係與組裝配置；接著利用 AND/OR 分析方法建立零件間之依存關係與拆解限制條件，進一步規劃產品之可行拆解順序。

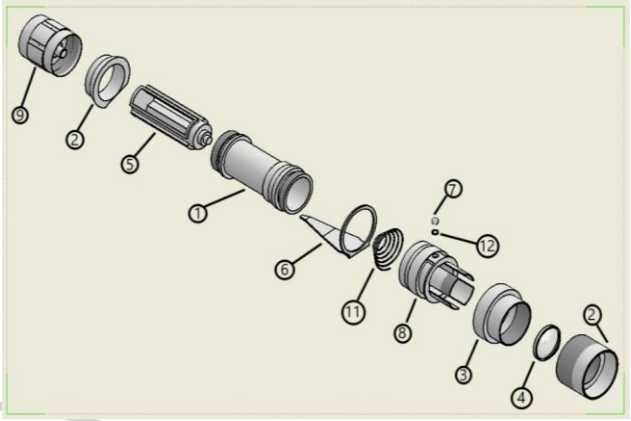


圖 1 零件爆炸圖

透過 3D 繪圖軟體建立手電筒之實體模型，並將其拆解為具有階層關聯之零件爆炸圖(如圖1所示)。此圖完整呈現了改善前手電筒的 12 個零件並依組裝與拆卸順序進行編號以及名稱(如表1 所示)。

表1手電筒零件表

P_2	燈頭外殼	P_8	LED燈模組
P_4	凸透鏡	P_{11}	大彈簧
P_9	開關橡膠按鈕	P_6	夾扣
P_5	電池筒身	P_1	主筒身
P_{10}	軟墊	P_7	定位珠
P_3	變焦環	P_{12}	小彈簧

在完成零件編號與名稱建立後，本研究進一步透過 BOM(Bill of Materials)結構圖分析各零件之階層關係與組裝依存性，如圖 3 所示。BOM 結構圖可清楚呈現產品由整體至部份零件之組成架構並有助於後續拆解順序與零件依存關係之分析。

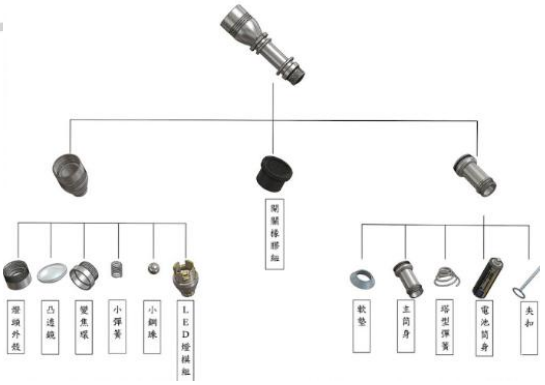


圖 2零件BOM表分析圖

圖 2 為手電筒之零件結構樹狀圖，展示各零件的從屬層級：最頂層為整體產品，往下依序拆分至各子組件與基本零件。箭頭方向即代表拆卸方向，由此可直觀看出要取出(LED 燈模組，必須先移除哪些外殼零件)這類結構限制，為後續 AND/OR 邏輯分析奠定基礎。

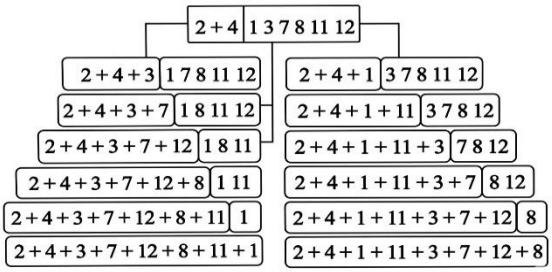


圖 3 手電筒AND/OR 分析圖 (數字是零件編號)

圖 3 是本研究規劃拆卸順序。圖中以AND 節點表示某零件必須等另一零件先拆除才能繼續，以 OR 節點表示在此處可選擇兩條不同的拆卸路徑繼續進行。例如圖4手電筒 AND/OR 分析圖中2 + 4表示燈頭外殼(P_2)與凸透鏡(P_4)已完成拆卸；此時流程將進入 OR 節點，代表拆解者可選擇不同拆解方向。若選擇拆除變焦環(P_3)，則拆解狀態將轉變為2 + 4 + 3；若選擇先拆除主筒身(P_1)，則流程將轉變為2 + 4 + 1。上述結果顯示產品於此階段存在多條可行拆解路徑。這個分叉正是後續兩條拆卸順序的來源，詳見圖 4。

拆解順序一（由前至後）：
P_2（燈頭外殼）→P_4（凸透鏡）→P_3（變焦環）→ P_7（定位珠）→ P_{12}（小彈簧）→P_8（LED燈模組）→ P_{11}（大彈簧）→ P_1（主筒身）

拆解順序二（由後至前）：
P_{11}（大彈簧）→ P_3（變焦環）→ P_7（定位珠）→ P_{12}（小彈簧）→ P_8（LED燈模組）

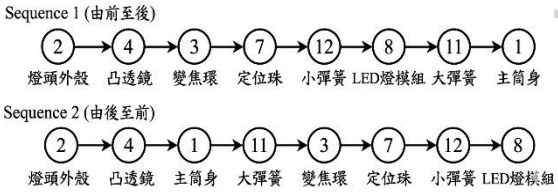


圖 4 手電筒可行拆卸順序

圖 4 將圖 3 的 AND/OR 邏輯轉化為具體的零件操作序列。順序一(Sequence 1)從燈頭前端往電池後端推進，共八個拆卸動作；順序二(Sequence 2)同樣從燈頭出發，但在凸透鏡之後改為先拆主筒身、再往前拆卸內部元件。兩條路徑均可完整拆解手電筒，本研究後續的拆解時間計算即以此第一順序的實際操作步驟為輸入。

3.2 AHP結合QFD零件篩選分析

在完成手電筒產品之零件結構分析與拆解路徑建立後，為進一步確認各零件對產品功能性、拆解性與回收效率之影響程度，本研究導入層級分析法(AHP)結合品質機能展開(QFD)進行零件重要性分析。由於產品設計涉及多項評估準則，各準則間具有不同程度之影響性，因此需透過多準則決策分

析方法建立客觀且系統化之評估架構，以作為後續改善零件篩選之依據。

本節分析主要分為兩個階段。第一階段透過AHP 建立七項設計評估準則之成對比較矩陣，包括 C_1 光束聚焦、C_2 發散控制、C_3 鎖固物件、C_4 提供電能、C_5 封裝閉合、C_6 便利性以及 C_7 操作簡單，並計算各準則之相對權重與一致性檢定結果，如表 2 至表 6 所示。第二階段則結合 QFD 方法，將各準則權重與零件功能關聯程度進行整合分析，以獲得各零件之綜合權重排序結果，如表 7 所示。此外為確保分析結果具備一致性與可信度，本研究將針對各成對比較矩陣進行一致性比率(Consistency Ratio, C.R.)檢定，當 C.R. 值小於 0.1 時，表示矩陣判斷結果具備良好一致性，可作為後續零件篩選與改善設計之依據。

首先本研究依據產品功能性、拆解性與使用需求建立七項評估準則，並透過 AHP 成對比較方式分析各準則之相對重要程度。為了比較各設計準則相對重要性，本研究首先建立成對比較矩陣，以將主觀判斷利用公式(1)轉換為可量化之數值資料。此方法透過兩兩比較方式，描述各準則間a_{ij} 表示準則 i 相對於準則 j 之重要程度。

成對比較矩陣

$$A = [a_{ij}] \tag{1}$$

表 2 手電筒設計評估準則之成對比較矩陣

比較矩陣	C_1 光束聚焦	C_2 發散控制	C_3 鎖固物件	C_4 提供電能	C_5 封裝閉合	C_6 便利性	C_7 操作簡單
C_1 光束聚焦	1	1/3	1	1/7	1/2	3	3
C_2 發散控制	3	1	2	1/7	2	3	3
C_3 鎖固物件	1	1/2	1	1/9	1	3	3
C_4 提供電能	7	7	9	1	9	9	9
C_5 封裝閉合	2	1/2	1	1/9	1	5	5
C_6 便利性	1/3	1/3	1/3	1/9	1/5	1	1
C_7 操作簡單	1/3	1/3	1/3	1/9	1/5	1	1
合計	14.67	10.00	14.67	1.73	13.9	25.0	25.0

透過上述方法，本研究對七項評估準則進行兩兩比較建立完整成對比較矩陣，結果如表2所示。

由於表2之成對比較矩陣為原始比較結果，各欄位數值總和不一致，若直接進行分析將造成尺度偏差，因此需進行正規化處理。透過公式(2)公式將原始數值轉換為比例值，使每一欄加總為1 ，轉換為比例權重：

正規化公式：

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} a_{ij}} \quad (2)$$

透過此轉換可將各欄位統一為比例形式，使其總和為1，以利後續權重計算。將表2進行正規化後，可得到結果如表3所示。

表 3 手電筒設計評估準則之正規化矩陣

正規化矩陣	C_1 光束聚焦	C_2 發散控制	C_3 鎖固物件	C_4 提供電能	C_5 封裝閉合	C_6 便利性	C_7 操作簡單
C_1 光束聚焦	0.068	0.033	0.068	0.083	0.036	0.120	0.120
C_2 發散控制	0.205	0.100	0.136	0.083	0.144	0.120	0.120
C_3 鎖固物件	0.068	0.050	0.068	0.064	0.072	0.120	0.120
C_4 提供電能	0.477	0.700	0.614	0.578	0.647	0.360	0.360
C_5 封裝閉合	0.136	0.050	0.068	0.064	0.072	0.200	0.200
C_6 便利性	0.023	0.033	0.023	0.064	0.014	0.040	0.040
C_7 操作簡單	0.023	0.033	0.023	0.064	0.014	0.040	0.040
合計	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

在完成成對比較矩陣之正規化處理後，本研究進一步計算各評估準則之相對權重，以反映各準則在整體設計評估中之重要程度。此階段之目的在於將正規化矩陣利用公式(3)轉換為單一權重向量，使各準則之影響程度得數據化表示，wi：第 i 項準則之權重 ，a'_{ij}：正規化矩陣之元素 ，n：準則數量。
權重計算方法

$$wi = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} a'_{ij} \quad (3)$$

上述公式之概念為將正規化矩陣中每一列之數值進行加總後取平均，以作為該準則之整體權重值。此結果可反映各準則在整體決策架構中的相對重要性。依據表3之正規化矩陣進行計算後，可得到各評估準則之權重與排序結果，如表4所示。

表 4 手電筒設計評估準則權重與排序結果

準則項目	相對權重	排序
C_1 光束聚焦	0.075	4
C_2 發散控制	0.130	3
C_3 鎖固物件	0.080	5
C_4 提供電能	0.534	1
C_5 封裝閉合	0.113	2
C_6 便利性	0.034	6
C_7 操作簡單	0.034	6
合計	1.000	-

由表4可知各準則之權重已完成數據化，其中權重較高者代表對產品設計影響較顯著，後續將據此進行一致性檢定，以確保結果可靠性。為確保AHP成對比較結果具邏輯一致性，並進行一致性檢定，以驗證各準則判斷是否存在矛盾情形。其目的在確認權重計算結果是否具有統計與決策可靠性。首先，將表2 之成對比較矩陣 A值 與表4之權重向量 w值 進行矩陣乘法運算，得到 Aw 向量，再以此計算最大特徵值 λ_{max}，其公式如下A：成對比較矩陣(表2)，w：由表3計算所得之權重向量(表4)，$(Aw)i$：矩陣與權重向量相乘後之結果：
最大特徵值 λ_{max} 計算

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{(Aw)_i}{wi} \quad (4)$$

表 5 手電筒設計評估準則權重彙整表

準則項目	向量值
C_1 光束聚焦	0.535
C_2 發散控制	1.022
C_3 鎖固物件	0.596
C_4 提供電能	4.320
C_5 封裝閉合	0.808
C_6 便利性	0.245
C_7 操作簡單	0.245

表 5 列出各準則的加權向量值，此數值是將成對比較矩陣乘以權重向量後所得，用於後續計算最大特徵值(λmax)。$\underline{\lambda max}$ 是判斷矩陣一致性的關鍵數值，若 λmax 與矩陣階數 n 差距過大，代表評分者的判斷前後矛盾，結果不可信賴；若兩者接近，則代表判斷具有一致性，詳見表 6。

在取得表5之 λ_{max} 後為基礎，並結合準則數量 n 所推導而得，用以將最大特徵值偏差量化為一致性誤差指標。其計算公式如下：
一致性指標

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \quad (5)$$

表 6 AHP 一致性檢定結果(λ_{max}、*C.I.*、*C.R.*)

λ_{max}	7.441
C.I.	0.073430858
C.R.	0.055629438

由表6可知一致性比率 *C.R.* = 0.056，遠低於 0.1 的可接受門檻，確認專家問卷的成對比較判斷具備良好一致性。至此AHP 階段的準則權重已完成驗證，可正式進入 QFD 零件評分階段，考量不同矩陣階數對一致性指標之影響，本研究導入隨機一致性指標(RI)，並計算一致性比率 *CR*，其公式如下：
一致性評估

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

為了確保評估結果之合理性，本研究亦透過最大特徵值計算一致性指標(*CI*)與一致性比例(*CR*)，用以檢驗各項判斷是否具備一致性。當 *CR* 值小於 0.1 時，代表整體評估結果具有良好的一致性，顯示本研究之分析結果具備一定之可信度與參考價值 (表4、5、6) 。在完成各項權重計算後，本研究以權重值作為排序依據，藉此判斷各零件重要程度。

表 7 手電筒設計方案之AHP綜合評估結果

評估準則 / 零件	C_1 光束聚焦	C_2 發散控制	C_3 鎖固物件	C_4 提供電能	C_5 封裝閉合	C_6 便利性	C_7 操作簡單	零件權重	排序
P_1 主筒身	0	0	9	0	9	3	0	1.842	4
P_2 燈頭外殼	3	0	0	0	0	0	0	0.226	12
P_3 變焦環	9	1	9	0	9	0	9	2.854	2
P_4 凸透鏡	3	3	9	0	0	0	0	1.339	5
P_5 電池筒身	3	0	0	9	3	0	0	5.369	1
P_6 夾扣	0	0	0	0	0	9	0	0.305	10
P_7 定位珠	1	1	0	0	3	0	0	0.544	8
P_8 LED 燈模組	9	0	3	0	0	0	0	0.920	7
P_9 開關橡膠按鈕	1	0	3	1	0	0	9	1.156	6
P_{10} 軟墊	0	0	0	0	0	9	0	0.305	10
P_{11} 大彈簧	3	0	0	3	3	0	0	2.167	3
P_{12} 小彈簧	1	1	0	0	3	0	0	0.544	8

表 7 對各零件進行綜合重要性評估，完整呈現各零件在不同設計準則下的加權得分，清楚識別出最需優先改善的關鍵零件。

由表7之分析結果可知，各零件權重分布存在明顯差異，其中電池筒身(5.369)權重最高，顯示其對產品整體性能影響最為顯著，並於結構穩定性與供電功能中具關鍵地位，因此列為最優先改善之零件；其次為變焦環(2.854)，其於功能性與使用便利性等準則下具較高影響力，故列為次優先改善項目；大彈簧(2.167)則因權重相對較高，若性能不足可能影響整體產品表現，亦納入後續改善考量範圍(表7)。在完成AHP權重分析後，本研究進一步針對零件進行改善優先順序篩選，為提升判斷之客觀性與代表性，採用中位數篩選法作為輔助依據，並以Excel之SQRT函數計算權重門檻值，以篩選具代表性之關鍵改善零件。透過此方法，可有效篩選高權重零件，提升後續改善分析之效率與聚焦性。本研究採用之篩選公式理由如下:

是利用均方根值(Root Mean Square，RMS)(2011)來設定篩選門檻的數學邏輯，其運作方式是先計算手電筒各個零件的原始權重值(如拆解難度或重要性分數)，接著找出這些零件的平均數，最後再進行開根號運算得出一個客觀的門檻值，這樣做能確保選出的三個手電筒零件(如電池筒身、變焦環及大彈簧)在技術分析中具有足夠的代表性與影響力，而非僅憑主觀經驗挑選。將手電筒各零件的權重值平方後求平均再開根號，以此得出一個客觀的篩選門檻，並結合實務上以總零件數 12 個的平方根(約為 3.46)取整數作為樣本數的標準，從中選出權重最高的三個零件(如電池筒身、變焦環及大彈簧)進行拆解與分析，確保研究結果正確無誤。

本研究採用之篩選公式如下：

$$Threshold = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}{n}} \quad (7)$$

其中：x_i 為各零件之權重值
n 為零件總數
Threshold 為篩選門檻值

上述公式可以運用 Excel 中 SQRT 函數進行計算，藉由各零件權重平方平均後再開根號，以取得整體權重之代表性門檻值。當零件權重高於此門檻值時，代表該零件對產品拆解性、回收性及綠色設計之影響程度較高，因此列為優先改善對象。分析結果顯示共有三項零件高於篩選門檻值，分別為電池筒身、大彈簧以及變焦環。然而，由於變焦環屬於精密結構零件，其內部機構較為複雜，且涉及光學與滑動結構設計，若進行改動可能影響產品原有功能與使用性能，綜合上述分析最終選定電池筒身與大彈簧作為主要改善零件，並於後續章節中針對其結構整合與材料替代進行改善設計，以提升產品拆解效率、回收便利性及整體綠色循環效益。

3.2.1 改善零件(1)大彈簧 → 導電綿

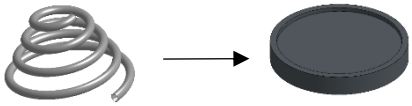


圖 5 大彈簧　　圖 6 導電綿

在原始設計中大彈簧(如圖5)主要作為電池與電路間之導電與彈性接觸元件，並兼具部分結構支撐功能。然而，於產品拆解與回收階段，此設計仍存在若干缺點。首先，彈簧屬高彈性零件，於拆解過程中容易產生彈跳、變形或飛散情形，不僅影響拆解效率，亦可能降低作業安全性。其次，彈簧多採金屬材料製成，但因體積較小且易與其他零件混雜，導致回收分類與再利用效益有限。此外長期使用下彈簧可能因材料疲乏而造成接觸不良，進一步影響導電穩定性。

基於上述問題本研究提出以導電綿(如圖6)取代傳統彈簧結構，以改善產品使用與生命週期末端EoL之相關問題，其改善效益如下：

1. 提升拆解穩定性：導電綿屬非彈跳式結構，可降低拆解時零件飛散之風險。
2. 簡化結構設計：減少機械彈性元件之使用，降低組裝與拆解複雜度。
3. 提升接觸可靠度：導電綿具良好壓縮回復特性，可維持穩定導電接觸。
4. 改善材料分類性：導電綿可設為單一材料系統，有助於後續回收與材料分離處理。

3.2.2 改善零件(2)主筒身與電池筒身之整合結構

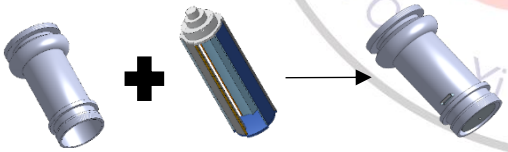


圖 7 主筒身 圖 8 電池筒身 圖 9 主筒身與電池筒身

由 AHP 分析結果可知，電池筒身為權重最高之零件，而主筒身亦於整體結構與功能中扮演關鍵角色。現行設計中，主筒身與電池筒身多採分離式結構，並透過螺紋或鎖固方式進行組裝。多段式結構將增加拆裝步驟與拆解時間，進而提升拆解作業之複雜度。其次，各部件可能採用不同材料製成，造成材料分類與回收處理上的困難。此外，部分結構功能具有重複性，易形成結構冗餘，不僅增加產品重量亦提高製造成本。

針對上述問題，本研究提出將主筒身與電池筒身整合為一體成型結構(圖9)，以一件取代兩件，具體改善方向如下：

1. 採用一體成型設計：減少零件數量與組裝步驟，降低結構複雜度。
2. 統一材料使用：提升產品於回收階段之材料分類效率。
3. 簡化內部結構：提升拆解效率並降低拆解流程複雜度。
4. 降低結構冗餘：減少重複支撐與連接設計，以降低產品重量與製造成本。

兩項改善方案——導電綿替換大彈簧、主電池筒身整合——分別從「小零件改善」與「大結構簡化」兩個層次降低了手電筒的拆解複雜度。接下來的 3.4 節將透過數據化指標，具體呈現這兩項改善在時間、環境與成本三個面向上產生了多大的實際效益。

3.3 拆解時間

以進行後續效率分析。各零件之原始拆解時間整理如表8所示。

表 8 手電筒拆卸原始時間

零件編號	零件名稱	時間(s)
P_2	燈頭外殼	6
P_4	凸透鏡	2
P_3	變焦環	2
P_7	定位珠	3
P_{12}	小彈簧	2
P_8	LED燈模組	35
P_{11}	大彈簧	2
P_6	夾扣	2
P_1	主筒身	22
P_5	電池筒身	6
P_{10}	軟墊	8
P_9	開關橡膠按鈕	7
合計		97

由表8可知，各零件拆解時間存在明顯差異，其中LED燈模組(35秒)與主筒身(22秒)所需時間最高，顯示其在拆解流程中所占作業負荷較大；相較之下，凸透鏡、變焦環及小彈簧等零件拆解時間較短，表示其拆解難度較低。整體而言產品拆解時間主要集中於少數關鍵零件，顯示後續改善應優先針對高時間占比零件進行分析。為使拆解時間評估更貼近實際作業情境，本節以Marconi *et al.*(2018) 提出修正因子(Corrective Factors)評估架構，導入校正因子(CF)進行時間修正，以反映不同零件特性對拆解時間之影響。原始模型以CF_1至CF_6作為評估基礎，主要針對零件物理特性(如尺寸、頭型與磨損程度)進行懲罰修正。然而考量本研究產品結構特性，部分判斷條件需進行調整，以提升適用性。修正後之校正因子整理如表9所示。

表 9 拆裝時間計算校正因子表

校正因子	判斷內容	懲罰值
CF_1	頭型：圓柱形帶槽口	1
CF_2	長度：>20mm，＜40 mm	1.1
CF_3	直徑：< 4 mm	1.2
CF_4	磨損：部分磨損/生鏽	1.3
CF_5	變形：未變形	1
CF_6	工具：扳手	1.2

由表9可知本研究將零件特性轉換為六項校正因子，並透過懲罰值反映拆解難易程度，使時間評估結果更具一致性與可比較性。除基本物理特性外，本研究進一步將作業條件細化為工具、可及性、夾具與施力四項構面，以提升拆解時間估算之精確度。各項改良校正因子設定如表10所示。

表 10 拆裝時間計算校正因子表(改良)

校正因子	判斷內容		懲罰值
CF_1	工具：	徒手	1
		一般	1.1
		特殊	1.2
CF_2	可及性：	可視	1
		需姿勢調整	1.1
		遮蔽	1.2
CF_3	夾具：	無	1
		一般	1.2
		特殊	1.3
CF_4	力：	直推	1
		側向	1.2
		動力輔助	1.3

表 10 為改良後之校正因子表，將作業條件細化為工具、可及性、夾具與施力四項構面，各項依難易程度設有分級懲罰值，使拆裝時間估算更貼近實際作業情境，提升評估結果之精確度。

$$T_i = T_s \times \prod_{k=1}^{4} CF_k \quad (8)$$

其中 T_i 為零件 i 之拆卸時間，T_s為基本時間(設定為4秒)，CF_k為第 k 項校正因子

根據公式(8)計算結果，可整理各零件改善前拆解時間與占比如表11所示。

表 11 手電筒前改善前時間

零件名稱	改善前時間(s)	改善前占比(%)
燈頭外殼	9.50	5.9
凸透鏡	2.40	1.5
變焦環	3.17	2.0
定位珠	5.62	3.5
小彈簧	3.74	2.3
LED燈模組	60.06	37.1
大彈簧	3.74	2.3
夾扣	2.40	1.5
主筒身	34.85	21.6
電池筒身	13.48	8.3
軟墊	12.67	7.8
開關橡膠按鈕	10.08	6.2
合計	161.71	100.0

由表11可知LED燈模組與主筒身為拆解時間主要來源，占整體作業時間比例最高，顯示其為影響拆解效率之關鍵零件；相較之下，其餘零件占比均較低。因此後續改善設計應優先針對高時間占比零件進行結構簡化，以提升整體拆解效率。然而雖然LED燈模組於拆解時間分析中屬於高耗時零件之一，但由於其本身為產品之核心發光元件，且屬於精密電子模組，其結構涉及光學設計與電子控制功能，對產品整體性能具有關鍵影響。因此，該零件不宜進行結構性改動或材料替代，以避免影響產品原有之發光效率與使用穩定性。基於上述考量，本研究於後續改善設計中，將LED燈模組排除於主要改善零件範圍之外，並將改善重點集中於具有結構可替代性與拆解改善潛力之零件，以確保產品功能完整性與改善設計之合理性。

3.4 碳足跡

拆解時間降低雖可反映作業效率之提升，但若僅以時間作為評估基準，仍無法完整呈現產品於生命週期中對環境所造成之影響。因此，本研究進一步以碳足跡作為環境衝擊評估指標，並針對改善前產品進行基礎數據建模與分析。在改善前設計中，產品結構採多段式組裝方式，各零件材料種類不一，包含金屬、塑膠以及複合材料等。由於不同材料具有不同之碳排放係數，因此各零件於製造、生產與回收階段皆會產生差異化之環境負荷。若產品結構複雜、拆解困難或材料回收性不佳，將進一步增加產品於生命終止階段EoL之環境衝擊。因此本研究透過零件重量、材料碳排放係數(Carbon Emission Factor)以及循環恢復指數(Circularity Index, CI)建立各零件之碳足跡模型，以計算各零件對整體環境負荷之影響程度。各零件碳足跡(Carbon Footprint, CFi)之計算公式如下：

$$CF_i = w_i \times e_i \times (1 - CI_i) \quad (9)$$

其中：w_i：第 i 個零件重量(kg)

e_i：第i 個零件之原料碳排放係數($kgCO_2e/kg$)

CI_i：第 i個零件之恢復指數(Circularity Index)

CF_i：第 i 個零件之碳足跡值($kgCO_2e$)

本研究根據各零件材料特性與回收策略進行碳足跡分析。分析結果顯示，改善前手電筒產品各零件之總碳足跡為 1.360 kgCO2e。其中以 LED 燈模組之碳足跡最高，達 1.350 kgCO2e，約佔整體碳足跡之 99.3%。其主要原因在於 LED 模組內含氮化鎵(GaN)相關材料，其材料碳排放係數較高，約為 1,500 kgCO2e/kg，因此即使採用 Recycle 回收策略，並設定恢復指數 CIi = 0.91，其碳足跡仍明顯高於其他零件。此外部分零件如燈頭外殼、凸透鏡、變

焦環以及電池筒身等，因採用 Reuse 復用策略，其恢復指數接近 1，因此於公式中（1−CIi）值趨近於 0，可有效降低產品製造、加工及組裝階段之能源消耗與材料使用量，進一步降低產品整體生命週期之碳排放量。整體改善效益顯示本研究所提出之設計改善可兼顧產品功能性、拆解效率與環境效益並如表 12 所示。。

表 12 彙整改善前各零件的碳足跡數據，透過材質、重量與碳排放係數的逐項對照，具體呈現設計改善在環境效益面的減碳成果。

表 12 前後改善各部位碳足跡比較

零件名稱	材質	重量 (kg)	碳係數 ($kgCO_2e/kg$)	改善前碳足跡 ($kgCO_2e$)
燈頭外殼	鎂合金	0.0050	0.50	0
凸透鏡	壓克力	0.0010	2.426	0
變焦環	鎂合金	0.0030	0.50	0
定位珠	不銹鋼	0.0001	1.70	1.53×10^{-5}
小彈簧	不銹鋼	0.0001	1.70	1.53×10^{-5}
LED 燈模組	塑膠/鋁基片/GaN	0.0100	1,500	1.350
導電綿	不銹鋼	0.0010	1.70	1.53×10^{-4}
夾扣	不銹鋼	0.0010	1.70	1.53×10^{-4}
主筒身	鎂合金	0.0100	0.50	4.50×10^{-4}
電池筒身	塑膠/鎳鍍鋼	0.0180	1.95	3.51×10^{-2}
軟墊	橡膠	0.0010	2.71	2.44×10^{-4}
開關橡膠按鈕	矽橡膠/鎂合金	0.0160	6.30	9.07×10^{-3}
合計				1.360

3.5 成本

本研究針對改善前之成本結構進行分析，以建立後續設計改善之基準比較依據。成本項目主要包含零件拆解作業所需之人工成本，並以拆解時間作為成本估算基礎進行成本計算方法上，本研究以「拆解時間 × 工資率」作為人工成本之估算基礎，其中工資設定為 190.08 元/小時(0.05280 元/秒)，用以反映實際作業之人力成本。如表13所示

表 13 改善前改善各零件成本比較

零件名稱	改善前時間 (s)	改善前成本 (元)
燈頭外殼	9.50	0.502
凸透鏡	2.40	0.127
變焦環	3.17	0.167
定位珠	5.62	0.297
小彈簧	3.74	0.198
LED燈模組	60.06	3.171
導電綿	3.74	0.198
夾扣	2.40	0.127
主筒身	34.85	1.84
電池筒身	13.48	0.712
軟墊	12.67	0.669
開關橡膠按鈕	10.08	0.532
合計	161.71	8.54

由表13可知，改善前產品總拆解成本為 8.54 元。其中 LED 燈模組之成本最高(3.171 元，占 37.1%)，其次為主筒身(1.84 元，占 21.5%)及電池筒身(0.712 元，占 8.3%)，三者合計占總成本之 66.9%，顯示其為主要成本來源。進一步分析可知成本較高之零件多與拆解時間較長或結構較複雜有關，例如 LED 燈模組因涉及電子元件與多層組裝結構，使拆解作業時間顯著增加；主筒身與電池筒身則因結構體積較大且需多步驟拆解，導致人工成本較高。

3.6 流程步驟說明

Step 1：本研究以 3D 繪圖軟體拆解手電筒，建立包含 12 個核心零件之爆炸圖(圖 2)與零件清單(表 1)，作為後續所有分析的起點。

Step 2：透過AND/OR關係分析建立零件間之拆解順序與依存條件釐清各零件之可拆解性與限制因素，以建構合理且可行拆解路徑。

Step 3：(AHP)建立多準則評估架構，將專家主觀判斷轉換為數據化權重，以分析各評估準則之相對重要性，並作為後續決策依據。

Step 4：透過品質機能展開(QFD)方法，將顧客需求或設計準則轉換為零件層級之技術特性，建立需求與零件之關聯矩陣。

Step 5：結合AHP與QFD之分析結果，依據權重與關聯強度篩選出關鍵影響零件，並建立改善優先順序，以集中資源於高影響度之零件進行後續設計改善。

Step 6：針對篩選出之關鍵零件提出結構與材料之改善方案，例如零件整合或材料替代，以降低拆解難度、提升回收效率並改善產品整體綠色循環效益。

Step 7：以改善前後的拆解時間(表 10)、碳足跡(表 11)與拆解成本(表 12)進行數據化比對，並整合為三軸圖(圖 11、12)直觀呈現整體改善幅度，驗證方法的實際可行性。



圖 10綠色循環設計流程圖

3.7 改善後設計

本研究改善分析選擇了拆解時間、碳足跡、成本與三軸圖作為指標，在建構一個拆卸零件時間效率、環境永續性的完整評估體系。首先拆解時間是衡量產品易拆解設計的核心，縮短時間不僅提升了維修與回收效率，更直接反映了拆卸工順序的改善。成本分析則是產品能否落地市場的關鍵，用以確認設計是否在零件的費用之間取得了更佳的經濟效益。最後透過三軸圖的視覺化呈現，能將上述三種性質不同的數據整合，直觀的展示出改善方案在多個分析決策下的分析，確保設計改善。

3.7.1 拆解時間

由結果可知，改善前產品總拆解時間為161.71秒，主要時間集中於LED燈模組(60.06秒)、主筒身(34.85秒)及電池筒身(13.48秒)，顯示多段式結構對整體拆解效率具有顯著影響。此外大彈簧是金屬彈簧結構，於拆解過程中需額外操作工具以完成分離，因此亦占有一定作業時間。在改善設計中，已將大彈簧替換為導電綿，並將主筒身與電池筒身進行結構整合，使拆解步驟明顯簡化，因此改善後總拆解時間下降至129.46秒，整體降低約 30.9%。顯示整體作業效率獲得提升。

表 14 前後改善各點感測時間比較

零件名稱	改善後時間 (s)	改善後占比(%)
燈頭外殼	9.50	7.33
凸透鏡	2.40	1.85
變焦環	3.17	2.45
定位珠	5.62	4.34
小彈簧	3.74	2.89
LED燈模組	60.06	46.39
大彈簧→導電綿	1.62	1.25
夾扣	2.40	1.85
主筒身	18.20	14.06
電池筒身	(整合移除)	(整合移除)
軟墊	12.67	9.79
開關橡膠按鈕	10.08	7.79
合計	129.46	100.0

表14呈現改善前後拆解時間差異，可明確反映結構簡化對作業效率之影響。

3.7.2 碳足跡

本節依據式(8)之碳足跡模型整理改善前後結果如表11所示。由結果可知改善前產品總碳足跡為1.360 $kgCO_2e$，其中主要排放來源為LED燈模組(1.350 $kgCO_2e$)，占整體比例約99.3%，顯示其為產品環境負荷之主要貢獻來源。相較之下其餘零件因採用回收或重複使用策略，其碳足跡影響相對有限。在改善設計中，透過導電綿取代金屬彈簧，並整合主筒身與電池筒身結構，使製造與組裝階段之材料使用量減少，進而降低整體生命週期碳排放。此外，LED燈模組屬高精密電子元件，涉及光源與電路整合設計，為維持產品原有功能與穩定性，因此本研究未對其進行結構或材料變更。詳細改善結果如表15 所示。

表 15 前後改善各部位碳足跡比較

零件名稱	材質	重量 (kg)	碳係數 ($kgCO_2e/kg$)	改進後碳足跡 ($kgCO_2e$)
燈頭外殼	鎂合金	0.0050	0.50	0
凸透鏡	壓克力	0.0010	2.426	0
變焦環	鎂合金	0.0030	0.50	0
定位珠	不銹鋼	0.0001	1.70	1.53×10^{-5}
小彈簧	不銹鋼	0.0001	1.70	1.53×10^{-5}
LED燈模組	塑膠/鋁基片/GaN	0.0100	1,500	1.350
導電綿	不銹鋼	0.0010	1.70	5.20×10^{-5}
夾扣	不銹鋼	0.0010	1.70	1.53×10^{-4}
主筒身	鎂合金	0.0100	0.50	3.90×10^{-4}
電池筒身	塑膠/鎳鍍鋼	0.0180	1.95	(整合移除)
軟墊	橡膠	0.0010	2.71	2.44×10^{-4}
開關橡膠按鈕	矽橡膠/鎂合金	0.0160	6.30	9.07×10^{-3}
合計				1.348

表 15 彙整改善前後各零件的碳足跡數據，透過材質、重量與碳排放係數的逐項對照，具體呈現設計改善在環境效益面的減碳成果。

3.7.3 成本

本節以拆解時間乘以工資率之方式(3.5章節所述)進行成本估算，並整理如表16所示。由結果可知改善前總成本為8.54元，其中主要成本集中於LED燈模組(3.171元)、主筒身(1.84元)及電池筒身(0.712元)，顯示拆解時間較長之零件亦對人工成本具有顯著影響。改善設計透過結構整合與零件簡化，使拆解時間降低，進而使總成本下降至6.84元，整體下降約19.9%，顯示本研究所提出之設計改善具備經濟效益。

表 16 前後改善各零件成本比較

零件名稱	改善後時間 (s)	改善後成本 (元)
燈頭外殼	9.5	0.502
凸透鏡	2.4	0.127
變焦環	3.17	0.167
定位珠	5.62	0.297
小彈簧	3.74	0.198
LED燈模組	60.06	3.171
導電綿	1.62	0.086
夾扣	2.4	0.127
主筒身	18.20	0.961
電池筒身	——	——
軟墊	12.67	0.669
開關橡膠按鈕	10.08	0.532
合計	129.46	6.84

表 16 呈現改善前後拆解成本差異，顯示時間縮減對人工成本之直接影響。

3.7.4 三軸圖

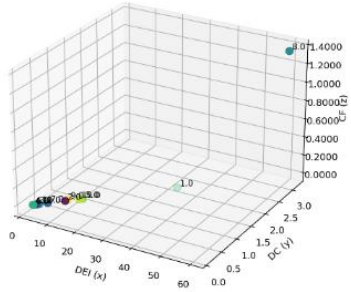


圖11手電筒改善前三軸圖

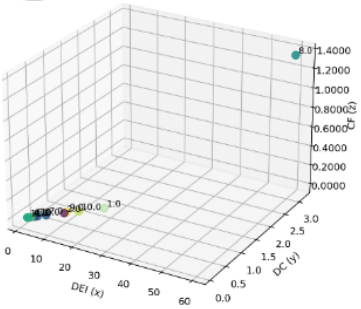


圖12 手電筒改善後三軸圖

圖 12 與圖 13 分別為改善前後的三軸評估圖，X 軸代表拆解時間、Y 軸代表碳足跡、Z 軸代表拆解成本。兩張圖對照可直觀看出三項指標的改善幅度：拆解時間由 161.71 秒降至 129.46 秒，碳足跡由 1.360 降至 1.348 kgCO2e，拆解成本由 8.54 元降至 6.84 元，整體綠色循環效益全面提升。

為進一步評估改善設計對產品整體綠色循環效益之影響，本研究將拆解時間、碳足跡與拆解成本三項指標進行整合分析，並建立三軸圖比較模型，以呈現改善前後產品於不同評估面向之變化情形。本研究以：X 軸代表拆解時間(Disassembly Time)、Y 軸代表碳足跡(Carbon Footprint)及 Z 軸代表拆解成本(Disassembly Cost) 。

透過上述三項指標建立產品綜合評估模型，以分析改善設計對產品拆解效率、環境負荷與成本效益之影響，如圖11、12所示。改善前之手電筒產品由於採多段式結構設計，因此於拆解過程中需進行較多旋轉、拆裝與零件分離操作，造成拆解時間與人工操作次數較高。此外內部大彈簧採金屬材料設計，於回收階段需進行額外材料分類與處理，因此增加產品生命週期中之碳排放與回收成本。本研究

透過主筒身與電池筒身整合設計，並以導電綿取代傳統金屬彈簧後，可有效降低零件數量與拆解步驟，同時減少部分金屬材料使用量，以降低產品整體環境負荷。根據分析結果顯示：拆解時間由 161.71 秒降低至 129.46 秒，碳足跡由 1.360 $kgCO_2e$ 降低至 1.348 $kgCO_2e$，拆解成本由 8.54 元降低至 6.84 元 其中以主筒身與電池筒身整合效果最為明顯，可有效降低拆解步驟與感測時間；而大彈簧改以導電綿替代後，則能降低材料碳排放量與拆解成本，並提升材料回收效率。整體分析結果顯示，改善後產品於拆解效率、環境負荷與成本效益三項指標皆具有明顯改善，代表本研究所提出之改善設計可有效提升產品之綠色循環設計效益。此外由三軸圖分析結果亦可發現，本研究透過結構整合與材料替代方式，在不影響產品原有功能之前提下，即可有效降低產品生命週期中之能源消耗、拆解成本與環境負荷，顯示本研究所建立改善方法具備良好之可行性與實務應用價值。

第四章、釘書機範例測試

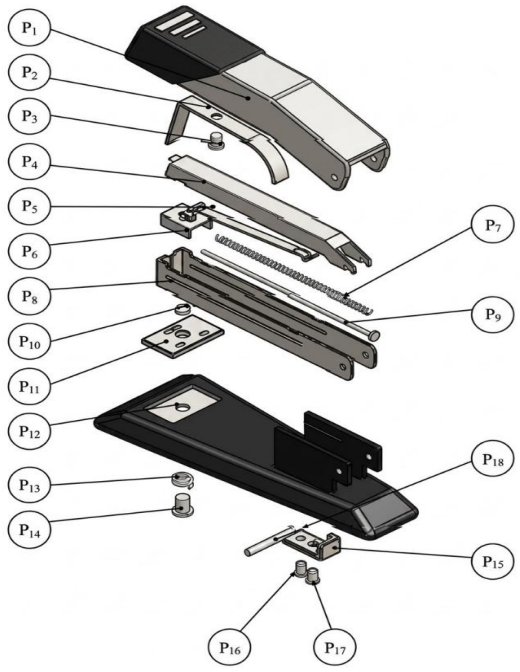


圖 14 釘書機零件爆炸圖

透過 3D 繪圖軟體建立釘書機之實體模型，並將其拆解為具有階層關聯之零件爆炸圖(如圖 14 所示)。並依組裝與拆卸順序進行編號以及名稱(如表 17 所示)。

表 17 釘書機零件表

零件編號	數量	零件名稱	零件編號	數量	零件名稱
1	1	上蓋	10	1	鉚釘頭
2	1	支架彈簧	11	1	衝擊板
3	1	上蓋的鉚釘	12	1	底座
4	1	鋼頂	13	1	彈簧
5	1	樞軸彈簧	14	1	鉚釘
6	1	滑塊	15	1	扣件
7	1	訂書釘彈簧	16	2	底座鉚釘
8	1	底軌	17	1	樞軸桿
9	1	導桿			

4.2 改善前後比較分析

本研究針對釘書機產品中影響環境負荷、材料回收性與產品循環使用效益較高之零件進行改善分析。考量本研究以綠色設計與循環回收為主要研究方向，因此改善方式以材料替代為主，避免過度變更原有產品結構，以維持產品功能。本研究選定 P_5 樞軸彈簧、P_7 訂書針彈簧以及 P_{13} 彈簧作為主要改善對象，並透過替代材質方式提升零件之耐用性、回收性與環境友善程度，同時降低產品生命週期中之碳排放與材料處理成本。

4.2.1 拆解時間

針對釘書機產品進行拆解流程分析。根據前述 AHP 與 QFD 分析結果顯示，P_5 樞軸彈簧、P_7 訂書針彈簧以及 P_{13} 彈簧等零件對產品拆解性、材料回收性與循環使用效益具有較高影響，因此本研究針對上述零件進行材料替代改善，以降低產品環境負荷並提升零件回收價值。原始設計中，釘書機內部彈簧零件多採一般碳鋼或鍍鋅鋼材，雖可滿足基本彈性需求，但長期使用後容易產生疲勞、氧化與材料劣化等問題。此外，部分彈簧零件於回收階段需進行額外材料分類處理，增加拆解與回收成本。因此本研究透過材料替代方式，將 P_5 樞軸彈簧改為不鏽鋼彈簧材料、P_7 訂書針彈簧改為低碳合金材料，以及 P_{13} 彈簧改為高回收性環保彈性材料，以提升零件耐用性與循環使用效益。改善後雖未大幅變更原有結構，但因材料耐用性與回收效率提升，可降低產品生命週期中之材料耗損與維修需求，同時提升產品之綠色循環設計效益。

表 18 前後改善各零件拆解時間比較表

零件名稱	改善前時間(s)	改善後時間(s)
上蓋	18.5	18.5
支架彈簧	9.8	8.2
鉚釘	41.2	41.2
滑塊	12.6	12.6
樞軸彈簧	22.4	16.3
導桿	8.5	8.5
訂書針彈簧	19.6	13.2
衝擊板	15.3	15.3
底座固定片	24.1	24.1
底座	17.5	17.5
固定扣件	15.3	15.3
支撐件	10.2	10.2
彈簧	12	7.4
底部鉚釘	8.4	8.4
底部墊片	5.6	5.6
底部鉚釘	8.2	8.2
底部鉚釘	8.1	8.1
防滑墊	6.5	6.5
—	271.8	239.1

如表 18 所示，數據顯示拆解時間的顯著縮減主要集中於彈簧類組件。其中樞軸彈簧 (P_5) 減少了 6.1 秒，彈簧 (P_{13}) 減少了 4.6 秒，訂書針彈簧 (P_7)則減少了 6.4 秒。這顯示設計改善成功簡化了彈性組件的固定或卸載機制。作業一致性維持：對於結構件及固定件(如上蓋 P_1、鉚釘 P_3、底座 P_{10} 等)，改善前後的時間維持不變。這證實本研究之改善策略具備針對性，能在不變動主體結構的前提下，有效降低特定複雜組件的拆解難度。整體效益總結：總拆解時間由改善前的 271.8 秒縮減至改善後的 239.1 秒，整體作業效率提升約 12%。

4.2.2 碳足跡

除拆解效率外產品材料使用與製造過程所造成之碳排放亦為綠色設計中重要之評估指標。本研究透過零件材料分析與結構改善，比較釘書機產品改善前後之碳足跡變化，以評估改善設計對環境負荷之影響。原始設計中產品包含多種金屬與塑膠零件，且部分零件採用鉚接與多段式固定方式，使產品於製造與回收階段需進行較多加工與分類程序。此外部分零件因拆卸困難而降低材料回收效率，進而增加產品生命週期之環境負荷。本研究透過零件整合與結構簡化設計，降低產品零件數量與材料種類同時提升產品之可拆解性與材料回收效率。改善後之產品由於材料分類較為集中，因此可降低回收處理階段之能源消耗與碳排放量，因此運用第3.4章節中公式(9)進行計算。

表 19 改善前後各零件碳足跡比較表

零件名稱	改善前碳足跡 ($kgCO_2e$)	改善後碳足跡 ($kgCO_2e$)
上蓋	0.182	0.182
支架彈簧	0.095	0.081
鉚釘	0.201	0.201
滑塊	0.074	0.074
樞軸彈簧	0.126	0.088
導桿	0.058	0.058
訂書針彈簧	0.144	0.097
衝擊板	0.088	0.088
底座固定片	0.165	0.165
底座	0.132	0.132
固定扣件	0.063	0.063
支撐件	0.052	0.052
彈簧	0.072	0.043
底部鉚釘	0.041	0.041
底部墊片	0.018	0.018
底部鉚釘	0.039	0.039
底部鉚釘	0.038	0.038
防滑墊	0.027	0.027
合計	1.615	1.487

根據表19整體分析結果顯示，改善後產品於拆解效率、材料回收性與碳排放控制方面皆較改善前具有更佳表現，顯示本研究提出之改善設計能有效提升產品之綠色循環效益。

4.2.3 拆卸成本

針對改善前後之成本差異進行分析，以評估改善設計實際可行性。成本分析主要包含零件拆解時間、人工作業成本以及回收處理成本等項目。原始設計中由於產品零件數量較多，且部分零件需透過工具輔助拆卸，因此於拆解階段需耗費較多人工操作時間。改善後透過零件整合拆裝方式改善，可有效降低拆解步驟與操作次數，使產品於拆解與回收階段之人工成本與處理成本皆有所下降。針對改善前後之成本差異進行分析，以評估改善設計之實際可行性。本研究工資率設定為190.08元/小時(0.0528元/秒)，並依據改善前後拆解時間進行成本估算。

表 20 改善前後各零件拆卸成本比較表

零件名稱	改善前成本(元)	改善後成本(元)
上蓋	0.98	0.98
支架彈簧	0.52	0.43
鉚釘	2.18	2.18
滑塊	0.67	0.67
樞軸彈簧	1.18	0.86
導桿	0.45	0.45
訂書針彈簧	1.03	0.7
衝擊板	0.81	0.81
底座固定片	1.27	1.27
底座	0.92	0.92
固定扣件	0.81	0.81
支撐件	0.54	0.54
彈簧	0.63	0.39
底部鉚釘	0.44	0.44
底部墊片	0.29	0.29
底部鉚釘	0.43	0.43
底部鉚釘	0.43	0.43
防滑墊	0.34	0.34
—	14.35	12.61

根據表20分析整體結果而言，本研究之改善設計在兼顧產品功能與結構穩定性之情況下，能有效降低產品生命週期中之整體成本支出，並提升產品之綠色循環設計效益。

4.2.4 三軸圖

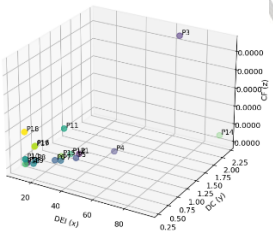


圖13 改善前釘書機三軸圖

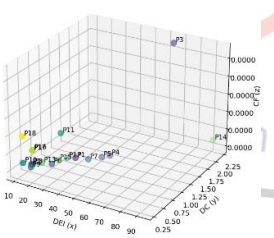


圖14改善後釘書機三軸圖

為進一步評估改善設計對產品整體綠色循環效益之影響，本研究將拆解時間、碳足跡與拆解成本三項指標進行整合分析，並建立三軸圖比較模型，以呈現改善前後產品於不同評估面向之變化情形。

本研究以：X 軸代表拆解時間(Disassembly Time)、Y 軸代表碳足跡(Carbon Footprint)及 Z 軸代表拆解成本(Disassembly Cost) 。

本研究透過材料替代方式，將原有一般碳鋼與鍍鋅鋼材分別改為不鏽鋼彈簧材料、低碳合金材料以及環保彈性材料後，可有效降低材料碳排放量，並提升零件之循環使用效益。

根據分析結果顯示：拆解時間由 271.8 秒降低至 239.1 秒 、碳足跡由 1.615 $kgCO_2e$ 降低至 1.487 $kgCO_2e$ 、拆解成本由 14.35 元降低至 12.61 元由三軸圖分析結果可進一步發現，本研究之改善方式雖未大幅變更產品原有結構，但透過局部材料替代即可有效降低產品生命週期中之環境負荷與拆解成本，同時提升材料回收性與產品循環使用價值。因此，本研究所建立之三軸分析模式除可作為釘書機產品之綠色設計評估方法外，亦可作為後續相關產品改善設計之參考依據。

第五章、結論與建議

本研究以綠色設計與循環回收理念為基礎，結合 AHP 與 QFD 方法，建立產品拆解與改善分析流程，並以手電筒與釘書機為例，探討拆解性、回收性、碳足跡與成本等面向之改善效果。研究首先透過 AHP 建立各評估指標權重，分析影響產品拆解與回收之關鍵因素，再結合 QFD 篩選需優先改善之關鍵零件，以建立系統化之綠色設計改善流程。結果顯示AHP 結合 QFD 方法能有效協助設計者找出高影響零件，並提升產品改善效率。

於手電筒案例中，透過主筒身與電池筒身整合，以導電綿取代金屬彈簧等方式進行改善。改善後零件數由 12 件降至 9 件，拆解時間由 161.71 秒降至 129.46 秒，拆解成本由 8.54 元降至 6.84 元，碳足跡亦由 1.360 $kgCO_2e$ 降至 1.348 $kgCO_2e$，顯示零件整合與簡化能有效降低拆解成本與環境負荷。

於釘書機案例中，本研究以材料替代方式進行改善，將部分彈簧採不鏽鋼、低碳合金與環保彈性材料，以提升回收性並降低碳排放。結果顯示，改善後之拆解時間(降至239.1s)，拆解成本降至12.61元，碳足跡亦降至 1.487 $kgCO_2e$、碳足跡與拆解成本皆呈下降趨勢，顯示材料替代同樣具備良好之綠色設計改善效果。分析結果顯示，改善後產品於拆解效率、環境負荷與成本效益等面向皆有所提升，顯示本研究方法具備實務應用價值。研究結果除可作為產品綠色設計與循環回收之參考依據。

本研究未來可進一步擴展應用範圍至不同產品類型，以驗證模型在多樣化產品結構下之適用性與穩定性；同時可納入更多評估指標，如零件可回收性、維修便利性與材料再利用率，以完善綠色設計評估體系。

參考資料

[1] 鄭智仁，2008，綠色導向產品之模組化及拆裝規劃，國立勤益科技大學工業工程與管理系研究所碩士論文。

[2] 陳依鈴，2021，產品設計中綠色評量指標之建立，國立勤益科技大學工業工程與管理系研究所碩士論文。

[3] 碳足跡：環境部氣候變遷署 - 產品碳足跡資訊 https://cfp.moenv.gov.tw/WebPage/WebSites/CoefficientDB.aspx

[4] Aguiar, J., Oliveira, L., Silva, J., Bond, D., Scalice, R. and Becker, D., 2016, “A design tool to diagnose product recyclability during product design phase”, Journal of Cleaner Production, vol. 141, pp. 219-229.

[5] Bogue, R., 2007, “Design for disassembly: A critical twenty-first century discipline”, Assembly Automation, vol. 27, pp. 285-289.

[6] Das, S., Yedlarajiah, P., Narendra, R., 2000, “An approach for estimating the end- of-life product disassembly effort and cost”, International Journal Production Research, vol. 38(3), pp.657–673.

[7] Desai, A. and Mital, A., 2003, “Evaluation of disassemblability to enable design for disassembly in mass production”, International Journal of Industrial Ergonomics. vol. 32,(4), pp. 265-281.

[8] Favi, C., Germani, M., Luzi, A., Mandolini, M. and Marconi, M., 2017, “A design for EoL approach and metrics to favour closed-loop scenarios for products”, International Journal of Sustainable Engineering, vol. 10, pp.136-148.

[9] Harivardhini, S., Murali Krishna, K. and Chakrabarti, A.,2017, “An Integrated Framework for supporting decision making during early design stages on end-of-life disassembly”, Journal of Cleaner Production, vol. 168,pp. 558-574.

[10] Kroll, E. and Hanft, T.A., 1996, “ Quantitative evaluation of product disassembly for recycling”, Research in Engineering Design, vol. 10, pp. 1–14.

[11] Kiritsis, D., Bufardi, A. and Xirouchakis, P., 2003, “Research issues on product lifecycle management and information tracking using smart embedded systems”, Advanced Engineering Informatics, vol. 17(3-4), pp.189-202.

[12] Otto, K. and Wood, K., 2001, “Product Design-Technical in Reverse Engineering and New Product Development”, Prentice Hall, London.

[13] Rahimifard, S., Abu Bakar, M.S. and Williams, D.J., 2009, “ Recycling process planning for the End-of-Life management of waste from electrical and electronic equipment”, CIRP Annals, vol. 58(1) , pp. 5-8.

[14] Akao,2003,https://www.emerald.com/ijqrm/article-abstract/20/1/20/139634/The-leading-edge-in-QFD-past-present-and-future?redirectedFrom=fulltext,pp20-35.

[15] AHP, ,Saaty, T.L. Decision making — the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP). J. Syst. Sci. Syst. https://doi.org/10.1007/s11518-006-0151-5, pp.13,1-35.

[16] Srinivasan, H., Figueroa, R. and Gadh, R., 1999, “Selective disassembly for virtual prototyping as applied to de-manufacturing”, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 15(3), pp. 231-245.

[17] Tatsiopoulos, I., 1996, “On the Unification of Bill of Material and Routing”, Computer in Industry, vol. 31, pp. 293-304.

[18] Journal of Electronics Manufacturing, Vol. 9(1) , pp. 79-95.

[19] Viswanathan, S. and Allada, V., 2001, “Configuration analysis to support product redesign for end-of-life disassembly”, International Journal of Production Research, Vol. 39(8) , pp. 1733-1753.

[20] Ziout, A., Azab, A. and Atwan, M., 2014, “ A holistic approach for decision on selection of end-of-life products recovery options”, Journal of Cleaner Production,pp497-516.

[21] Homem de Mello, L. S., & Sanderson, A. C. (1990).*AND/OR graph representation of assembly plans*.IEEE Transactions on Robotics and Automation, 6(2), 188–199.