

國立臺灣大學工學院機械工程學系

碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering


National Taiwan University

Master Thesis

應用化學反應活化能概念於

產品之綠色模組化設計方法

A Green Modular Product Design Method by the Concept
of the Activation Energy of Chemical Reactions



王偉哲

Wei-Zhe Wang

指導教授：陳湘鳳 博士

Advisor: Shana Smith, Ph.D.

中華民國 101 年 7 月

July, 2012

誌謝

本論文的完成，首先要先感謝我的母親，在研究所考試落榜之時支持我重考，並且支援我的生活經濟上之所需，使我可以無後顧之憂地完成學業。母親總是支持而不加干涉的教育方式，使我在求學生涯得以多方嘗試、增廣見聞、發揮創意，使我求學時不必背負沉重的期望。

我要感謝我的指導教授—陳湘鳳教授，透過教授對我的指導，以及彼此的相處互動，不僅使我的論文品質得以大幅改善，也使我學到許多做人處事的道理。指導教授花了大量時間與我討論並修改論文，是完成本論文的直接推手。

接著，我要感謝我的女朋友永宜，在我研究上遇到瓶頸時，聽我發牢騷，又陪我在空閒之餘一起騎車去戶外散心，實在是我碩士班兩年生涯裡精神上的大力支持。

感謝實驗室的學長威翰，在我初進碩士班時給予閱讀研究文獻的訓練；感謝學長繼良、偉書、政緯，以及學姊珮瑜、禹璇的建議與指導，我我能在兩年的碩士班生涯內快速進入狀況；感謝同窗兩年的國維、育緯、鏗合、維寧，從你們身上我學到了許多做人處事的道理，並拓展了我的人生觀；感謝學弟立彥、子豪、智文、晨皓、徵麟，使實驗室的氣氛更加快樂熱絡。

最後，要感謝參與我生活所需的一切人事物。孟軻說：「一日之所需，百工斯為備。」能順利維持生活並完成論文，每位參與生活所需的無名英雄功不可沒！

摘要

由於環境負載的增加，使得自然資源的使用必須越來越有效率，產品的綠色表現優劣便成為日漸重要的課題。透過重新設計，可改善新產品的綠色表現，而模組化設計是一非常有效提升產品綠色表現的設計手段。在本論文裡，作者提出一種利用原子理論，以及基於化學反應活化能的綠色模組化設計方法。本論文提出的方法，考量了五種功能上的聯繫關係，以及五種影響綠色表現的屬性，使得產品內的零組件合併成為功能模組，以及功能模組內的綠色模組。同時考量零組件的功能聯繫關係與綠色屬性，兼顧了新產品模組配置的合理性，以及新產品的綠色表現。最後，作者以液晶螢幕、檯燈以及電子辭典為例，利用本論文提出的方法進行綠色模組化設計，產生新的模組配置建議，提供設計者作為發展下一代產品的參考。

關鍵字：設計方法、綠色設計、模組化設計、創新設計、重新設計、化學反應活化能。

Abstract

Due to increasing environmental concern, natural resource use must become more efficient. As a result, green design is now an important research topic. The goal of green design is to improve the environmental performance of products by re-designing the products to make them more modular. The goal of this thesis is to create a green modular product design method by the concept of the activation energy of chemical reactions. The method uses five product functions and five product attributes that affect green performance to group parts into functional modules and green modules within each functional module. Considering both product functions and product attributes simultaneously assures the feasibility of the modules that are created and improves the green performance of the product. The study uses the method to group parts into functional modules and green modules for a LCD monitor, a desk lamp, and an electronic dictionary. The study results can be used to show designers how to create innovative green products or improve the green performance of existing products.

Key words: design method, green design, modular design, innovative design, re-design, activation energy of chemical reactions.

目錄

第一章	緒論	1
1.1	研究動機	1
1.2	研究目的	2
第二章	文獻回顧	3
2.1	綠色設計	3
2.2	模組化設計	7
2.3	綠色模組化設計	11
2.4	小結	33
第三章	研究方法	35
3.1	原子理論	35
3.2	原子理論在工業設計扮演的腳色	36
3.3	利用原子理論於模組化設計	36
3.3.1	產品內的零件功能聯繫關係	37
3.3.2	重新模組化設計的設計範圍	40
3.3.3	距離矩陣 D	41
3.3.4	總聯繫矩陣 TR	43
3.3.5	電荷矩陣 Q	44
3.3.6	力量矩陣 F	46
3.3.7	最大作用力矩陣 MF	47
3.3.8	應用共價鍵概念形成分子功能模組	48
3.4	應用化學反應概念於多屬性模組的合併	49
3.4.1	功能相關度矩陣(FC)	50
3.4.2	零件的化學活性(AC)	52
3.4.3	碰撞理論與化學反應之活化能	53
3.4.4	應用化學反應活化能(AE)概念於功能模組合成	54

3.5	功能模組內的綠色模組	61
3.5.1	產品內零件的綠色屬性	61
3.5.2	綠色相似度矩陣(GS)	63
3.5.3	綠色程度矩陣 GD	66
3.5.4	應用化學反應活化能 AE 概念於綠色模組合成	67
第四章	案例研究	72
4.1	案例一 宏碁 AL1721 液晶螢幕	72
4.1.1	重新模組化設計的設計範圍	72
4.1.2	距離矩陣(D)	75
4.1.3	總聯繫矩陣(TR)	77
4.1.4	電荷矩陣(Q)	78
4.1.5	力量矩陣(F)	79
4.1.6	最大作用力矩陣(MF)	81
4.1.7	應用共價鍵概念形成分子功能模組	82
4.1.8	功能相關度矩陣(FC)	83
4.1.9	零件的化學活性(AC)	84
4.1.10	應用化學反應活化能(AE)概念於功能模組合成	86
4.1.11	綠色相似度矩陣(GS)	92
4.1.12	綠色程度矩陣(GD)	95
4.1.13	應用化學反應活化能(AE)概念於綠色模組合成	96
4.1.14	討論	100
4.2	案例二 檯燈	101
4.2.1	重新模組化設計的設計範圍	101
4.2.2	距離矩陣(D)	103
4.2.3	總聯繫矩陣(TR)	104
4.2.4	電荷矩陣(Q)	104

4.2.5	力量矩陣(F)	105
4.2.6	最大作用力矩陣(MF)	106
4.2.7	應用共價鍵概念形成分子功能模組	107
4.2.8	功能相關度矩陣(FC)	108
4.2.9	零件的化學活性(AC)	109
4.2.10	應用化學反應活化能(AE)概念於功能模組合成	110
4.2.11	綠色相似度矩陣(GS)	113
4.2.12	綠色程度矩陣(GD)	115
4.2.13	應用化學反應活化能(AE)概念於綠色模組合成	116
4.2.14	討論	118
4.3	案例三 無敵 CD-316 Pro 電子辭典	119
4.3.1	重新模組化設計的設計範圍	119
4.3.2	距離矩陣(D)	122
4.3.3	總聯繫矩陣(TR)	122
4.3.4	電荷矩陣(Q)	123
4.3.5	力量矩陣(F)	128
4.3.6	最大作用力矩陣(MF)	128
4.3.7	應用共價鍵概念形成分子功能模組	132
4.3.8	功能相關度矩陣(FC)	132
4.3.9	零件的化學活性(AC)	137
4.3.10	應用化學反應活化能(AE)概念於功能模組合成	138
4.3.11	綠色相似度矩陣(GS)	144
4.3.12	綠色程度矩陣(GD)	147
4.3.13	應用化學反應活化能(AE)概念於綠色模組合成	148
4.3.14	討論	151
第五章	結論與未來展望	153

5.1	結論	153
5.2	未來展望	154
	參考文獻	155



圖目錄

圖 2.1	綠色合作設計框架圖.....	6
圖 2.2	零件間的三種聯繫關係.....	10
圖 2.3	成雙比較法.....	10
圖 2.4	迴路分析法.....	11
圖 2.5	權重分配方式.....	17
圖 3.1	範例產品.....	42
圖 3.2	化學反應的能量障壁—活化能.....	54
圖 3.3	功能模組不穩定度.....	59
圖 3.4	功能模組產生流程圖.....	60
圖 3.5	綠色模組不穩定度評估值.....	70
圖 3.6	綠色模組產生流程圖.....	71
圖 4.1	宏碁 AL1721 液晶螢幕爆炸圖.....	73
圖 4.2	功能模組不穩定度.....	89
圖 4.3	功能模組[3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 40]的綠色模組不穩定度.....	98
圖 4.4	功能模組[15, 16, 17, 18, 19, 22]的綠色模組不穩定度.....	99
圖 4.5	檯燈產品爆炸圖.....	102
圖 4.6	功能模組不穩定度.....	113
圖 4.7	功能模組[1, 2, 4, 6, 8, 10]的綠色模組不穩定度.....	117
圖 4.8	CD-316 PRO 電子辭典爆炸圖.....	120
圖 4.9	功能模組不穩定值.....	141
圖 4.10	功能模組[1, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 23, 24, 25]的綠色模組不穩定度.....	150

表目錄

表 2.1	家具的重新設計例子.....	4
表 2.2	針對維護性目的的交互作用因子.....	14
表 2.3	模組驅動力的量化.....	16
表 2.4	生命週期選項以及其影響因子.....	19
表 2.5	後續處理程序相似度表.....	21
表 2.6	後續處理因子量化表.....	23
表 2.7	文獻回顧表.....	31
表 3.1	距離矩陣 D.....	43
表 3.2	總聯繫矩陣 TR.....	44
表 3.3	電荷矩陣 Q.....	46
表 3.4	力量矩陣 F.....	47
表 3.5	最大作用力矩陣 MF.....	48
表 3.6	五種不同功能聯繫關係的功能模組分群.....	49
表 3.7	原始的功能相關度矩陣 FC.....	51
表 3.8	功能關係權重.....	51
表 3.9	功能相關度矩陣 FC.....	52
表 3.10	活性矩陣 AC.....	53
表 3.11	活化能矩陣 AE.....	56
表 3.12	功能模組分群解與其功能模組不穩定度.....	58
表 3.13	綠色屬性權重.....	65
表 3.14	零件的綠色屬性.....	65
表 3.15	綠色相似度矩陣 GS.....	66
表 3.16	綠色程度矩陣 GD.....	67
表 3.17	活化能矩陣 AE.....	68

表 3.18	綠色模組分群解與其綠色模組不穩定度.....	69
表 4.1	宏碁 AL1721 液晶螢幕零件表.....	74
表 4.2	宏碁 AL1721 液晶螢幕零件表(簡化後).....	75
表 4.3	距離矩陣 D.....	76
表 4.4	總聯繫矩陣 TR.....	77
表 4.5	電荷矩陣 Q.....	78
表 4.6	力量矩陣 F.....	80
表 4.7	最大作用力矩陣 MF.....	81
表 4.8	五種不同功能聯繫關係的功能模組分群.....	83
表 4.9	功能關係權重.....	84
表 4.10	功能相關度矩陣 FC.....	85
表 4.11	化學活性矩陣 AC.....	86
表 4.12	活化能矩陣 AE.....	87
表 4.13	功能模組候選解.....	90
表 4.14	液晶螢幕的綠色屬性權重.....	92
表 4.15	液晶螢幕產品的零組件綠色屬性.....	93
表 4.16	功能模組[3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 40]的綠色相似度矩陣 GS.....	94
表 4.17	功能模組[3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 40]的綠色矩陣 GD.....	95
表 4.18	功能模組[3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 40]的綠色模組分群候選解.....	96
表 4.19	功能模組[3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 40]的活化能矩陣.....	97
表 4.20	功能模組[15, 16, 17, 18, 19, 22]的活化能矩陣.....	98
表 4.21	功能模組[15, 16, 17, 18, 19, 22]的綠色模組分群候選解.....	99
表 4.22	檯燈產品零件表.....	102
表 4.23	檯燈產品零件表(簡化後).....	103
表 4.24	距離矩陣 D.....	103

表 4.25	總聯繫矩陣 TR.....	104
表 4.26	電荷矩陣 Q.....	105
表 4.27	力量矩陣 F.....	106
表 4.28	最大作用力矩陣.....	107
表 4.29	五種不同功能聯繫關係的功能模組分群.....	108
表 4.30	功能關係權重.....	108
表 4.31	功能相關度矩陣 FC.....	109
表 4.32	化學活性矩陣 AC.....	110
表 4.33	活化能矩陣 AE.....	111
表 4.34	功能模組候選解.....	112
表 4.35	檯燈產品的零組件綠色屬性.....	114
表 4.36	檯燈的綠色屬性權重.....	114
表 4.37	功能模組[1, 2, 4, 6, 8, 10]的綠色相似度矩陣 GS.....	115
表 4.38	綠色程度矩陣 GD.....	115
表 4.39	功能模組[1, 2, 4, 6, 8, 10]的活化能矩陣 AE.....	116
表 4.40	功能模組[1, 2, 4, 6, 8, 10]的綠色模組分群候選解.....	116
表 4.41	功能模組[9, 11, 14]的活化能矩陣 AE.....	117
表 4.42	功能模組[9, 11, 14]的綠色模組分群候選解.....	118
表 4.43	模組分群結果比較.....	118
表 4.44	CD-316 PRO 電子辭典產品零件表.....	121
表 4.45	CD-316 PRO 電子辭典產品零件表(簡化後).....	122
表 4.46	距離矩陣 D.....	123
表 4.47	總聯繫矩陣 TR.....	126
表 4.48	電荷矩陣 Q.....	127
表 4.49	力量矩陣 F.....	129

表 4.50	最大作用力矩陣 MF.....	131
表 4.51	五種不同功能聯繫關係的功能模組分群.....	133
表 4.52	功能關係權重.....	134
表 4.53	功能相關度矩陣.....	134
表 4.54	化學活性矩陣 AC.....	137
表 4.55	活化能矩陣 AE.....	138
表 4.56	功能模組候選解.....	142
表 4.57	電子辭典產品的零組件綠色屬性.....	145
表 4.58	電子辭典的綠色屬性權重.....	145
表 4.59	功能模組[1, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 23, 24, 25]的綠色相似度矩陣 GS....	146
表 4.60	功能模組[1, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 23, 24, 25]的綠色程度矩陣 GD.....	147
表 4.61	功能模組[1, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 23, 24, 25]的活化能矩陣 AE.....	148
表 4.62	功能模組[1, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 23, 24, 25]的綠色模組分群候選解..	149
表 4.63	模組分群結果比較.....	151

第一章 緒論

1.1 研究動機

隨著新產品的製程不斷演進，以及消費者喜好的廣泛，各種產品的生命週期為了滿足各種面向的需求而愈趨縮短，許多生命週期短、符合消費者喜好需求的各種產品被大量製造、使用，然後廢棄。大量被製造的產品成為環境上的負擔，而現今的模組化設計範疇大多專注於製造上成本的減低，綠色屬性常常不是在設計之初就被優先考量的因素。倘若在設計末段，甚至量產之後，才考慮產品的再利用、回收等生命週期性質，則可能在產品壽命終了時，造成額外後續處理程序的執行。在設計之初便引入綠色目的，並利用模組化手段增進產品綠色表現，可以避免許多由於未事先考量而造成的設計抵觸。另一方面，由於環保意識的抬頭，以及各種有關資源使用、廢棄處理的規章在許多國家紛紛設立，如何在設計產品時引入整個生命週期的綠色考量是現今產品設計時必須考量的問題。而綠色設計方法便成為解決方案，其中零件的綠色性質為依歸的模組化設計方法，可以有效地來使產品達到綠色目的。

由於現今的綠色模組化設計方法，雖然考量到了綠色屬性，但過度重視原始產品的零件配置方式，如此可能使新的模組化設計因遷就於舊設計而缺乏創新，改進有限；或是只能一次考量一個綠色屬性而無法兼顧其他綠色屬性。因此，本研究欲提出一種可同時考量多種屬性，以開發新一代產品的綠色模組化創新設計方法。

1.2 研究目的

本研究目的是在於，提供設計者考量多種綠色屬性，並擺脫舊式產品零件配置，以設計新一代綠色產品的模組化方法。使設計者面臨功能性、幾何配置、綠色表現等難以兼顧的觀點時，能按照本方法提出的模組化建議，順利設計出下一代更綠色的產品。

考量多種零件間的訊息流關係，是為了使新的模組化配置更合理，可使新產品的模組內聚度提高，而模組與模組間的聯繫可以降低，使模組盡可能保持獨立性。

考量多種綠色屬性的產品模組化，是為了增加新一代產品的綠色表現，例如：

1. 使產品內相同材質的零件能統一處理，減少拆卸步驟。
2. 位於同一模組內的產品零件更易於被再利用以及回收。
3. 減少設計末期或量產時，才考量綠色屬性所造成的多餘成本和設計變更，簡化設計流程。

利用本方法，可提出一套創新的模組配置分群，但模組配置並不包括零件的介面結合、材質選用等具體的細節設計。

第二章 文獻回顧

2.1 綠色設計

由於環境意識的提升，以及各國環境法規的確立，對環境友善以減少生態衝擊的產品需求日趨增加。消費者對於環保重要性的認知，隨著資訊和教育的普及，而變得普遍且更加深入，進而使消費者傾向購買較為環保的商品。

Bovea 與 Wang(2007)提出了一種可計算花費與消費者喜好，並整合環境條件至產品發展的新穎重新設計方法。Bovea 與 Wang 考量了消費者偏好的重要程度，以及各個零組件的相對重要程度。首先，建立重要度矩陣(important matrix)，其目的是將設計變更專注在對顧客來說最重要的產品元件。

接著，Bovea 與 Wang 提出顧客對每個零件分配的相對重要性的計算式，如此可以把設計變更專注在相對重要的零組件上，使設計更有效率。接續以上，下一步可建立初始矩陣(initial matrix)，目的是為了匯集原始產品設計對於環境及經濟觀點上的資訊。

最後，可建立生態重新設計矩陣(Ecoredesign matrix)，可顯現出第 k 個設計改良對於環境衝擊跟花費的相對關係。

例如，在 Bovea 與 Wang 以家具的重新設計的範例裡，可以得到如下表的結果：

表 2.1 家具的重新設計例子

		Weight	Particle board	Coating	Edge	Leg	Tap	Levelling	Structure	Iron fitting	Packing	Total
Importance matrix	Customer expectations											
	Strong working surface	3	●	○	○							
	Stability	4	△			○		●	●	△		
	No damage during transport	4									●	
	Light weight	1	●	△	△	○	△	△	●	△		
	Visually attractive	4		○	○	●	△					
	Wood touch/sense surface	3		●	○							
	Non visible fittings	3					○					
	Low cost	3	△	△	△	○	△	△	○	△	△	
	Use recycling/ recycled materials	3	○	△	△	○	△	△	○	○	●	
	Use of non toxic materials	4	○	○	△	○			○			
	Easy to disassembly	3									●	
	Avoid cutting down trees	3	●	△								○
	Absolute importance (i)		91	67	41	81	20	43	75	44	72	534
	Relative importance (%)		17.0	12.5	7.7	15.2	3.7	8.1	14.0	8.2	13.5	100
Initial design	Environment	Absolute environmental impact (e(mPt))	893.5	99.3	142.9	4156.1	20.1	12.2	4072.9	29.8	363.0	9789.8
		Relative environmental impact (E(%))	9.1	1.0	1.5	42.5	0.2	0.1	41.6	0.3	3.7	100
		Environmental index (EI)	1.9	12.5	5.1	0.4	18.5	81	0.3	27.3	3.6	
Cost		Relative cost(C(%))	57.2	0.7	1.2	12.9	0.8	0.2	23.4	0.6	3.0	100
		Cost index (CI)	0.3	17.9	6.4	1.2	4.6	40.5	0.6	13.7	4.5	
Ecoredesign	IMP 1	Environmental comparison (EC ¹ %)	-	-	-	-35.5	-	-	-	-	-	15.1
		Cost comparison (CC ¹ %)	-	-	-	-13.2	-	-	-	-	-	1.7
	IMP 2	Environmental comparison (EC ² %)	-	-	-	-	-	-	-0.5	-	-	-0.2
		Cost comparison (CC ² %)	-	-	-	-	-	-	+3.0	-	-	+0.7
	IMP 3	Environmental comparison (EC ³ %)	-40.7	-	-20.3	-	-	-	-	-	-	-4.0
		Cost comparison (CC ³ %)	-17.0	-	-9.0	-	-	-	-	-	-	-9.8
	IMP 4	Environmental comparison (EC ⁴ %)	-13.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-1.2
		Cost comparison (CC ⁴ %)	+7.5	-	-	-	-	-	-	-	-	+4.3
	IMP 5	Environmental comparison (EC ⁵ %)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-44.1
		Cost comparison (CC ⁵ %)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-5.7

Bovea 與 Wang 提出的方法考量了消費者的偏好重要程度，以及各個零組件的相對重要程度，最後可以清楚列出各種設計改良變更分別在花費以及環境衝擊之於原始設計有著什麼程度的變動。此方法量化了各個零件的重要度，和設計變更的花費，但是不涉及模組化的設計，也就是說，並沒有有效地利用模組化手段以增進綠色表現。

假設 $EC^k(\%)$ 和 $CC^k(\%)$ 皆為負值，則表示其設計改善同時減低環境衝擊與花費，是理想的結果；若 $EC^k(\%)$ 為負值但 $CC^k(\%)$ 為正，則只有在 $CC^k(\%)$ 尚處於消費者願意支付的幅度內，此設計改善才同時滿足公司與顧客需求。

為了保持競爭力，企業總是重度依賴於發展能滿足使用者需求的新產品。傳統的產品設計，考量功能是否符合顧客需求，或是加工成本是否經濟。由於激烈的商業競爭，綠色設計觀點總是被忽略。然而，大量的能源消耗以及環境污染使得環境保護的意識提升。無論是企業自發性地引入綠色設計概念於產品設計，或是出口國家的法規限制，都對新產品的發展有極大的影響。由於競爭環境的顯著變遷，Yang 等人(2010)建構一種基於綠色的合作的設計與運作流程的框架。合作的產品設計(collaborative product design)幫助整合企業內的設計、行銷、製造部門，以及物料供應商和外國採購商，並致力於及時、周密的資訊交換。

Yang 等人提出的框架可分為兩部分：合作的設計以及合作的營運。合作的設計強調在研究與設計之始，便將綠色設計概念導入產品發展的初始階段。合作的營運，則是將廣泛的資訊技術，轉變成源於綠色的結構，以及建立一綠色設計系統，此系統可以將綠色設計概念整合入產品的發展。

合作的設計

在合作設計的階段裡，意義重大的資料變更，以及彼此通訊的紀錄之管理，可使得這些設計規範成為未來執行任何的設計變更的參考，以避免產生相同錯誤，或是因為過時的資訊，而產生無意義的錯誤和嘗試。

合作營運

在合作營運的階段裡，關於意義重大的資料修改（例如建模、標準作業程序、

標準檢驗程序)、重要協調時的訊息(廣告時機, 特定的製程或工具)以及綠色法規的紀錄之管理, 可做為製造工程規劃的參考。

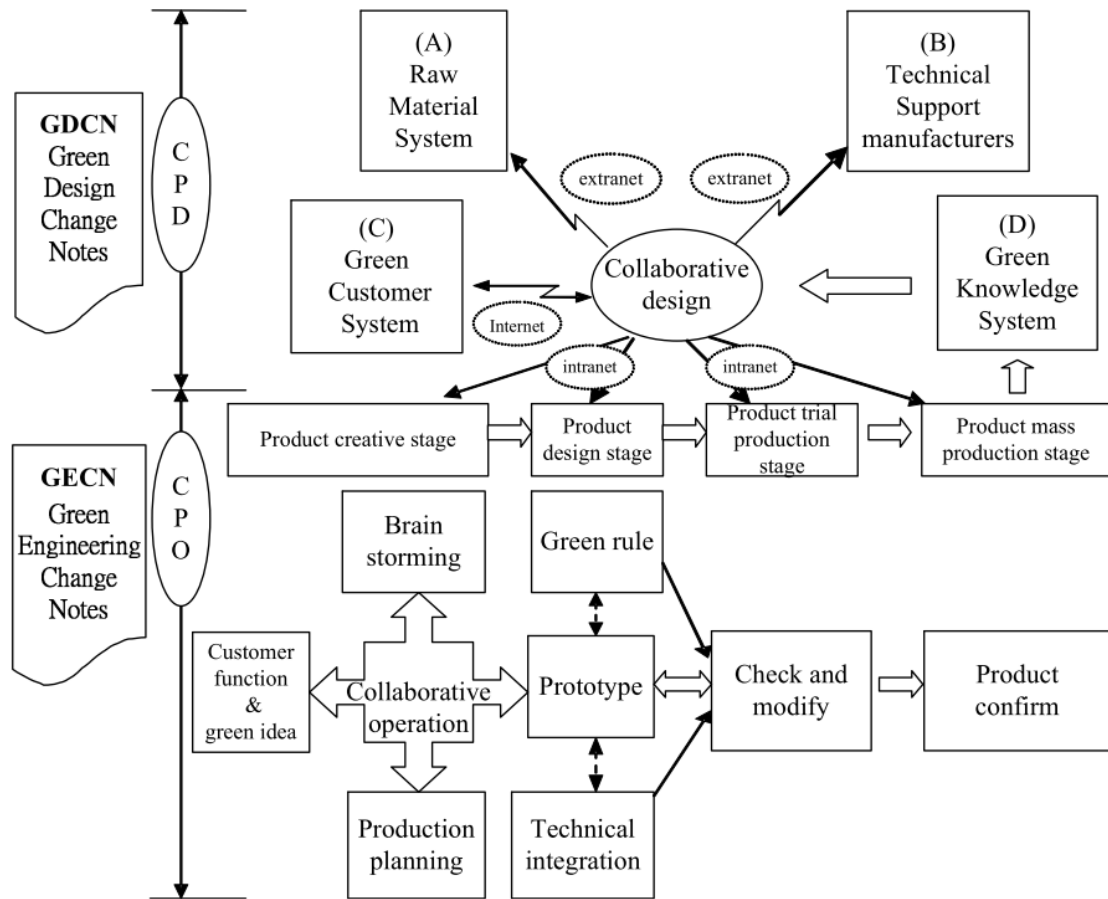


圖 2.1 綠色合作設計框架圖

此文獻整合了協力工程(concurrent engineering)以及合作產品設計的概念與方法, 可用以增強新產品設計的客製化程度, 以及工作效率。經由合作的設計, 在企業內部的部門, 以及外部的顧客與供應商可透過網路系統整合, 設計出更客製化的服務。企業可維持提供高效率服務、縮短設計所需時間、改善設計品質、增加顧客滿意度以及達到大量訂製的目標。Yang 等人提出的框架使綠色設計在現代企業裡有了可行的轉型空間, 透過設計檔案數位化可使公司內的各個部門都能合作致力於設計; 透過網路聯繫, 可使顧客意見以及供應商能對新產品發展產生貢獻。

由於環境意識的提升，現代企業是否可永續發展，與產品的設計上，是否為可持續且綠色有關。Randy(2010)提出了十八個有關綠色產品、綠色製程、綠色工廠設計，以及管理的原則。Randy 參觀了許多知名企業，其所提出的十八個原則，圍繞在日本的“monozukuri”精神。monozukuri 的意思是，永續的、對環境友善的、綠色的產品與工廠，以及產品設計與製程設計的整合。

Randy 提出的十八個原則，其核心意義在於設計出顧客需要，且渴望擁有的可永續發展、對環境友善且高品質之產品。在對的時候製造客戶所需的量(just-in-time)，透過全球化的供應鏈，減低庫存浪費與成本。此文獻提出了企業可透過遵循此十八個原則，可引發連續性的改善。另外，還提出了可見的工廠管理(visual factory management)概念，使工廠內每個人都能透明的在當下了解工廠整體的運作，使得工廠內的成員能看見阻礙而想辦法克服。

Randy 所提出的原則，使得企業在設計過程與製造過程中，能有效的往永續發展與綠色的方向邁進，並解釋了為什麼這些原則能發生效力。其十八個原則由參訪觀察許多成功的永續及綠色的企業並討論歸納而來，適合引入需要產業轉型以求永續發展的企業。

2.2 模組化設計

一個產品的一個或多個功能，通常是由產品內部的許多子功能所合成的。而在傳統上，產品內部的許多零件通常因為可替換性、可升級性、功能性、製程簡化性、保養維護等許多不同原因，而形成數個模組。透過模組化設計，製造數個種類的零件，用不同組合滿足絕大多數的客製化需求，是很有效率的產品設計方法。零件也常常因為高度的功能耦合性而形成模組，例如汽車內的引擎模組、電

腦內的電源供應器模組以及冷氣內的壓縮機模組等。有時也為了降低成本，使用較為經濟的製程而使零件合成模組。方便保養維護或更換也是常見的模組化原因，例如檯燈內的燈管模組。

在製造階段裡，由於產品被劃分為數個子系統，複雜度減低了且增加了升級的速度。模組化設計使得產品多樣化、少批生產以及獨特客製化製造為可行的。

顧客是產品在使用階段的主體。顧客對於產品差異化以及個人化的需求越來越明顯。越來越多顧客將專注轉移到產品的新功能，而模組化設計可以滿足消費者更多選擇。

現代的產品和設備變得越來越複雜、巨大、昂貴且依賴專業知識，使用者的經驗和技術常常無法單獨地負擔。倘若產品或設備是由數個獨立模組所組成，則模組可被簡易地分離與組裝，保養維護的工作可以以模組為單位來實施，大幅改善了保養狀況、簡化和加速保養、減低保養花費，以及必要時可以更換模組以確保維修品質。

隨著社會的急速發展，未充分利用的產品的產生量也急遽增長，對環境造成威脅。許多企業對於未善加利用的產品的拆卸與回收投以更多關注，模組化設計可以使產品更易於拆卸與回收，進一步提高了零件的再利用可能性。

Tseng、Chang 與 Li(2008)將工程屬性加諸在連繫圖模型中，以計算零件間的連結程度。零件間的聯繫強度(liaison intensity)值被指定在 0~100 間，並由四個屬性及其權重合成，分別是接觸形式(CT)30%，結合形式(CB)20%，工具形式(TL)35%，可取得方向(AD)15%。

對於零件 i 的總聯繫度為： $LI_i = CT_i + CB_i + TL_i + AD_i$

對模組 i 之內的總計聯繫強度為： $T_i = \sum_{C_l \in M_i} \sum_{C_k \in M_i} LI_{lk} / 2$

分群基因演算法的適應函數為： $LI_{intra} = \sum_{i=1}^q T_i$

利用分群基因演算法可將上述之適應函數最大化，其核心意義是“在一個產品中，模組之內的聯繫度總和越高越好”。

透過分群基因演算法得到模組化分群解之後，Tseng 等人提出了簡易分析綠色表現與花費的分析公式。其中，綠色表現的分析公式，意義為“零件的污染量”，其零件污染值的資料引用來自 Eco-indicator99。公式如下：

$$\text{Poll} = \text{Weight} \times \text{Indicator}$$

其中，Poll 為一個零件的污染值，Weight 為零件重量，Indicator 為每單位污染量。

接著利用分組基因演算法以分群零件，並將交配機制修改以適合模組化設計。

模組化的考量為接觸形式、結合形式、工具形式、以及可取得方向，偏向物理上的關係，而非直接的綠色目的，雖然最後提出用綠色分析的方式去評估其綠色表現，但無法保證其分群結果為綠色取向。

Wang 等人(2010)利用了設計結構矩陣(Design Structure Matrix, DSM)來幫助產品零件模組化。其利用設計結構矩陣以模組化的原則是，將彼此間具有較多訊息流的零件，分為模組。設計結構矩陣定義了三種零件間的關係：並聯、串聯以及互相耦合，如圖 2.2。

Three Configurations that Characterize a System																														
Relationship	Parallel Independence	Sequential Dependency	Coupled Interaction																											
Graph Representation																														
DSM Representation	<table border="1"><tr><td></td><td>A</td><td>B</td></tr><tr><td>A</td><td></td><td></td></tr><tr><td>B</td><td></td><td></td></tr></table>		A	B	A			B			<table border="1"><tr><td></td><td>A</td><td>B</td></tr><tr><td>A</td><td></td><td></td></tr><tr><td>B</td><td>1</td><td></td></tr></table>		A	B	A			B	1		<table border="1"><tr><td></td><td>A</td><td>B</td></tr><tr><td>A</td><td></td><td>1</td></tr><tr><td>B</td><td>1</td><td></td></tr></table>		A	B	A		1	B	1	
	A	B																												
A																														
B																														
	A	B																												
A																														
B	1																													
	A	B																												
A		1																												
B	1																													

圖 2.2 零件間的三種聯繫關係

將產品內的各個零件關係皆輸入設計結構矩陣後，必須有一套規則，以使彼此有聯繫的一群零件合成為一模組。Wang 等人提出成雙比較法(two's comparative algorithm)以及迴路分析法(loop analysis)以分群模組，其規則如下：

成雙比較法(two's comparative algorithm)：將設計結構矩陣從後面開始每列兩兩比較，若前面的行比後面的行內所具有的 1 的數量(訊息流數量)來得多，則將此行向後移，持續到所有零件皆被排序，如圖 2.3。

Task	X2	X3	X5	X6	X7	Task	X2	X3	X5	X6	X7	Task	X2	X3	X6	X7	X5
X2			1			X2			1			X2					1
X3			1		1	X3			1		1	X3				1	1
X5		1			1	X5		1			1	X6	1				
X6	1					X6	1					X7	1	1	1		1
X7	1	1	1	1		X7	1	1	1	1		X5		1		1	

圖 2.3 成雙比較法

迴路分析法(loop analysis)：取一零件當作起始檢查點，檢查是否跟其他點同時有輸入，又有輸出的關係，定義其為迴路，如圖 2.4 的 X3 與 X5 構成迴路。

Task	X2	X3	X5	X6	X7
X2			1		
X3			1		1
X5		1			1
X6	1				
X7	1	1	1	1	

圖 2.4 迴路分析法

設計結構矩陣具有將零件間訊息流的傳遞順序方向以及數量紀錄的特性，但不易再額外加入其他屬性，是一種考量功能性的模組化分群方式。即使將零件依各種規則排序完成，還是難以看出模組化分群結果，解讀不易，也就是說 DSM 無法獨立完成分群結果，在模組化分群方法裡較不完整，不利提出最佳解與加入其他用以分群的目標屬性。

2.3 綠色模組化設計

傳統的模組化設計通常是基於幾何與功能因素的，鮮少為了增進綠色表現而模組化。由於綠色產品的需求與日俱增，模組化便成為一種有效率的增加產品綠色表現的手段。在綠色模組化的領域裡，除了考量基於幾何關係與功能性的模組化屬性，更進一步考量材料相似性、可回收性、可再利用性等許多綠色屬性。綠色屬性可以包含生產、使用以及壽命終了時廢棄等三種面向上的許多屬性。生產上的綠色屬性有製程環保程度、原料種類使用、運輸里程等屬性；使用上的綠色屬性有例如單位壽命、保養頻率等屬性；壽命終了後的綠色屬性則包括了材料相似性、拆卸步驟多寡、可回收性、可再利用性等綠色屬性。壽命終了廢棄階段

的綠色屬性，在目前的綠色模組化設計方法裡較常見。綠色模組化設計的目的，是要考量產品的綠色屬性，驅向最佳化綠色表現而模組化。

生命週期的概念包括了產品生命週期內從初始概念設計、一般產品使用、到最終產品廢棄的所有觀點。所謂生命週期上的觀點，是整產品在其生命週期內面臨到的製造、使用以及後續處理等課題，例如回收、保養以及再利用等。Newcomb 等人(1996)提出了一種基於設計結構矩陣的產品結構分解方法，並提供了兩種有關模組度(modularity)的評估方法。一種是評估在不同的生命週期觀點上，模組分群的相似性；另一種則是評估模組之間的連結性。

Newcomb 等人作了兩個假設：

1. 對絕大多數的產品而言，產品內的架構，在組裝、拆卸、回收、服務以及其他壽命終了之後的特性上扮演先決腳色。

2. 高度的生命週期模組度對於各種不同生命週期觀點是有益的。在本文獻裡，高度的生命週期模組度，表示在不同的生命週期觀點(回收、保養以及再利用等)上，其模組分群是相似的，所以結構觀點上的模組也就相似於回收、保養以及再利用上等生命週期觀點上所構成的模組。如此可使設計者、回收者以及保養者可依循統一產品結構，順利執行保養或回收等手續。

利用設計結構矩陣分群得到模組化解，必須建立一套規則。Newcomb 等人將設計結構矩陣的元素值指定為整數 1 至 4，以材料相容性為例，1 為最相容，4 為最不相容。

接著，Newcomb 等人又提出兩種關於模組性的估算方式：

1. Correspondence Ration (CR)：估算任兩觀點形成的模組的相似性

$$CR = \frac{|V_i(x) \cap V_j(x)|}{|V_i(x) \cup V_j(x)|}$$

$V_i(x)$ 表示由 V_i 觀點形成，且包含有 x 這個零件的模組。

$|X|$ 上式的絕對值符號的意思是 X 集 內的物件個數。

對於整體產品的模組相似評估式：

$$CR_{overall} = \frac{\sum CR}{No. of modules}$$

2. Cluster Independence (CI)：估算模組之間的交互作用

$$CI = \frac{\text{模組之內的連結數量}}{\text{整個產品內的總連結數量}}$$

接著，將 $CR_{overall}$ 和 CI 相乘，可以得到模組性程度(modularity)。利用此基於設計結構矩陣的方法，可以觀察原始設計的 CR 和 CI 值，並探討如何增加重新設計之後的 CR 和 CI 值。如果 CR 值高，表示不同觀點所構成的模組內容是類似的，有利於產品壽命終了之處理；如果 CI 值高，表示物理連結多數位於模組之內，而非模組與模組之間，也有利產品壽命終了處理。觀察原始設計裡，不同觀點所產生的模組，利用減少使用材料種類、將相容材料分作一群、重新思考壽命終了後的處理、以及服務，等等重新設計方法，產生新產品，再帶入 modularity 的計算式，若新設計比原始設計的 CR 和 CI 都提升了，則整體產品之 modularity 值便提升了。

Gu 等人(1997) 提出了一種可達成多種目標的整合性模組化設計方法。此方法辨識出各種不同欲達成的目標所牽涉之因子，再透過交互作用分析建立起兩兩零件在這些因子的相對關係，然後再以基因演算法將這些零件群聚起來以建構模組。

Gu 等人的方法第一步先辨識出有那些欲達成的目標，以及每個目標分別被數個因子所影響的交互作用程度。例如針對”維護性”目標，可有表 2.2 的交互作用重要程度加權表格：

表 2.2 針對維護性目的的交互作用因子

Relevant Factor	Interaction	Weight
Attachment	10	0.45
Relative position	6	0.35
Exchange	8	0.05
Frequency of failure	10	0.05
Repair similarities	5	0.05
Down time similarities	3	0.05
Total weight		1.00

知道各個因子的交互作用程度後，可以建構出兩兩零件的交互作用加權平均矩陣 TT ，例如零件 i 和零件 j 的算法，利用之前的相關因子與交互作用表格值：

$$TT_{ij} = 0.45 \times 10 + 0.35 \times 6 + 0.05 \times 8 + 0.05 \times 10 + 0.05 \times 5 + 0.05 \times 3$$

TT 為一對稱矩陣，對角線元素設為 10。

接著，建立基因演算法的適應函數，形式為：

$$U = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \delta_{i,j} TT_{Ci,Cj} + Pe = Minimum$$

其中，零件 i 與 j 在同一模組時， $\delta_{i,j} = 0$ ，否則為 1；而 Pe 則在違反設計上的約束時，設為一極大數，否則為 0。

透過此方法，可得到不同目標的分群結果，再將不同目標的分群結果取其交集，則可以得到同時考量多個目標的模組化解。

此方法可以形成以多個目標考量下的模組分群,但是若考量的目標數量增加,則如同圖八的表格也會增加,增加繁複度;另外,透過取不同屬性形成的模組的交集方法,無法考量兩種不同目標的重要性;同時,欲達成之目標數量增加時,取交集的模組分群結果會增加排擠性,模組數量會遽增,較不實際。

Gu 等人(1999)後來又提出了另一種模組分群方法。將零件彼此的相關性量化並加權,且設計了新的適應函數,並利用模擬退火演算法,將模組解最佳化。此方法包括了三個階段:問題界定、交互作用分析、模組形成。此方法辨識出跟設計目標有關的因子,再透過交互作用分析使這些因子依附到零件上,並將這些零件分群至模組。

利用模擬退火演算法,可將零件分別填入模組內,而且模組的數量可由 1 至設計者預先設定的最大值,也不會因為欲達成之目標變多而增加了排擠性。

不同的產品有不同的考量因素,也就是可改變其模組化目的,進而改變目的牽涉到的相關因素,且可以同時考慮多個目的來產生重新設計的模組,是一種基於原有產品產生新模組配置的方法。

同時考量多個綠色屬性,將之量化再加權,是產生綠色模組化解常見的做法。Yu 等人(2011)提出了一種同時考量功能組成、幾何位置、連結方法、零件壽命、材料相容性、可回收與可再利用性的方法。Yu 等人將這些綠色屬性視為驅動合成模組的力量,稱之為模組驅動力(Modular Driving Forces, MDFs)。將零件間所有廣泛的 MDF 聯繫相加可建構出廣泛聯繫矩陣(comprehensive relation matrix),如表 2.3。

表 2.3 模組驅動力的量化

Grades of contribution of two components with respect to each MDF.

MDFs	Grade	Description
Function (Fig. 1)		
Strong	9	High contribution to main function
Normal	3	One contribute to the main function, the other to subordinate function of THIS main function
Weak	1	Contribution to the same subordinate function
None	0	Contribution to different function or subordinate function
Geometric position (Fig. 1)		
Strong	9	One component inside another
Normal	3	Constrained by other 2 components (3–4 degree of freedom)
Weak	1	One component contacted to another (4–5 degree of freedom)
None	0	Having no direct relations (5–6 degree of freedom)
Connection pattern (Fig. 1)		
Strong	9	Connection by welding or chemicals
Normal	3	Connection by fasteners like bolts
Weak	1	Connection by spacing
None	0	No connection
Component lifetime		
Strong	9	Components with longer physical lifetime than functional lifetime
Normal	3	Components with long and different physical, short functional lifetime
Weak	1	Components with short and same physical lifetime
None	0	Components with short and different physical lifetime
Material compatibility (Fig. 1)		
Strong	9	Same materials
Normal	3	Compatible materials
Weak	1	Not completely compatible materials
None	0	Incompatible materials
Recyclability		
Strong	9	End-of-life intent: reuse + reuse
Normal	3	End-of-life intent: recycle + recycle
Weak	1	End-of-life intent: reuse + recycle
None	0	End-of-life intent: reuse/recycle + landfill

廣泛聯繫矩陣中的元素 c_{ij} 表示了零件間的關聯度，計算範例為：

$$c_{ij} = w_{11} \times F_{fun,ij} + (w_{121} + w_{211}) \times F_{geo,ij} + (w_{122} + w_{212}) \times F_{con,ij} + (w_{22} \times F_{lif,ij} + w_{23} \times F_{mat,ij} + w_{24} \times F_{rec,ij})$$

權重的分配則如圖 2.5。

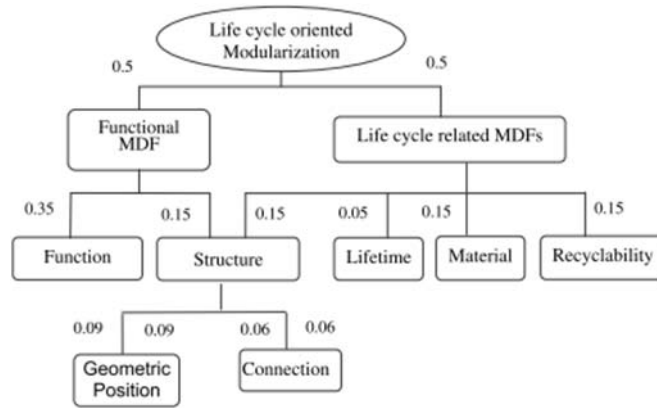


圖 2.5 權重分配方式

建立記錄了任兩零件間的模組驅動力關係的廣泛聯繫矩陣後，需設計一評估模組適合程度的函數，以分群基因演算法(Grouping Genetic Algorithm, GGA)將之最佳化求得優良模組化解。

Yu 等人認為零件的壽命可由以下兩種觀點視之：物理壽命(physical life)與功能壽命(functional life)。其中，物理壽命表示零件損壞無法使用的壽命；而功能壽命表示功能已不足夠、不合時宜之壽命。

此方法考慮到了功能上的屬性(功能、幾何結構)以及生命週期上的屬性(壽命、材料相容性、回收、再利用)，並在壽命方面提出物理壽命和功能壽命的見解，並將零件之間壽命的關係量化。以 GGA 法分配模組，再評估其模組化解之優劣，但沒有規範適當的模組數量，可能導致模組數量很少，過度聚集，模組功能獨立性低；或是模組數量過多，增加模組間的聯繫複雜度。

Umeda 等人(2008)提出一種整合眾多相關於產品生命週期、以及幾何關係合理

性之屬性的產品模組架構決定方法。Umeda 等人認為，考量一個產品之完整生命週期，並將產品內經歷相同生命週期程序的零件，聚集成同一模組，以改善可拆卸性、可保養維護性、可升級性、可再利用性以及回收性等生命週期裡可能經歷的生命週期選項(LCP, Life Cycle Options)。

Umeda 等人的方法，其輸入的資訊包含產品內零件的幾何資訊、零件彼此的連結關係、以及零件們的生命週期選項；產出的資訊則是新模組架構的幾何模型。此方法的第一階段利用了自組織映射圖網路(SOM, Self-Organized Map)，以計算零件在多種屬性上的相似度，以達到將經歷相同生命週期的零件分為數個群集的效果。接著，在第二階段裡，此方法再取出了基於產品幾何資訊，以及零件間彼此的結合資訊的物理性模組。在第二階段裡再次取出合乎物理原則的模組，可避免一種情形—某一個零件包含在某個模組內，但這個零件卻與此模組在第一階段裡屬於不同的群集。這種情況會使得要取出此零件，則此模組的拆卸為必要，大幅降低了可拆卸性。

Umeda 等人使用了 SOM 以得到同時考量多種屬性的模組分群。SOM 可利用自組織神經網路(Self-Organizing Neural Network)減低資料點的維度以分群。Umeda 等人首先將共有相同生命週期屬性，經 SOM 加權後分類成數群；接著，在不同的生命週期選項裡，再次利用 SOM，找尋其相似程度，以得到分群。如此便得到由生命週期選項的整合觀點而形成的模組。

表 2.4 生命週期選項以及其影響因子

LCOPs and their weighting attributes

LCOP	Weighting attributes	Objective
Recycling	Constituent materials	Grouping components of which materials can be recycled without separation
Maintenance	Physical lifetime	Grouping components with short physical lifetime for easy replace
Reuse	Physical/value lifetime	Grouping components with long physical/value lifetime
Upgrading	Value lifetime	Grouping components with short value lifetime

接著，此方法提出了兩個模組結構的拘束。第一，模組內所包含的零件，必須屬於同一個群集。若違反此規則，則會使模組化的基本優點無效，例如可拆卸性、可再利用性、可回收性等等。第二，不允許一個模組在幾何上環繞了另一個不屬於同一群集的零件。因為在此種情況下，必須要拆解此模組才能得到該零件，如此也會使模組化的基本優點無效。

在此方法的第二階段裡，Umeda 等人定義了數種關於幾何與連接關係上的數學表示式，以從上一階段裡提取出在幾何上為合理的模組架構。首先定義了模組的密度(modular density)，為模組內零件的體積總和與該模組的大約體積的比值。其中一個模組的大約體積此處定義為包含此模組的凸面殼體(convex hull)之體積，其中每個凸面殼體為未來可能的模組架構的候選。

Umeda 等人並做了一個假設：模組的密度表示了幾何上的剛性、緊湊性以及模組的獨立性。

Umeda 等人定義產品的模組度(Modularity)如下：

$$\text{Modularity} = \sum_{k=1}^N \sum_{P_{ij} \in M_k} \text{Connection}(x_i, x_j)$$

其中，N 為產品內的模組數量， M_k 為產品中的第 k 個模組， P_{ij} 為屬於模組 M_k 裡的零件對。

透過在設計者所設定的模組數量 N 裡，最大化產品內的模組度，即可得到最後的模組架構。

Umeda 等人提出的方法可同時考量到多種產品內零件會面臨的生命週期選項，再以這些生命週期選項找出零件的相似度，以自組織映射圖達成模組分群的效果。接著，再利用兩個基於幾何關係上的拘束，在自組織映射圖達成的分群裡，提出滿足幾何拘束合理性的模組分群架構。Umeda 等人的方法由於考量的幾何關係來源為原本尚未被重新設計的產品，可能會導致新的模組分群架構囿於原本不良的設計，改良程度有限；或者由於其設定的拘束為強原則，解的空間太小，難以找到適合的解。另外，Umeda 等人對模組密度所做的假設：“模組的密度表示了幾何上的剛性、緊湊性以及模組的獨立性。”然而，功能上的獨立性與模組空間配置的緊湊度，並不一定為正相關的。

欲利用設計結構矩陣以求得綠色模組化解，常見的難處是難以將綠色屬性加諸在設計結構矩陣之中。Lai 與 Gershenson(2009)提出一種基於產品壽命終了的处理程序的模組化設計表示方法，此表示方式包含了程序相似矩陣(process similarity matrix)以及程序附屬矩陣(process dependency matrix)。程序相似矩陣包含了零件兩

兩後續處理程序的相似，而程序附屬矩陣包含了後續處理程序過程中所需要的拆卸難度。

對於任兩零件對於後續處理程序的相似性，Lai 與 Gershenson 提出了一個後續處理程序相似度表格(表 2.5)。此表格考量了可回收性、材料相容性、拆卸性等屬性。經由此表格，可以建立出程序相似矩陣。

表 2.5 後續處理程序相似度表

Retirement similarity factors			Similarity score		
Components with the same post-life intent	Components could be reused together		1.00		
	Components could be disposed together		1.00		
	Both components will be recycled	Made of the same material or different materials with good material compatibility		1.00	
		Made of different materials with some material compatibility		0.67	
		Made of different materials with limited material compatibility		0.33	
		Made of incompatible materials with complete incompatibilities so further disassembly is unavoidable	Both the connection types and the disassembly directions are the same		0.20
			The connection types are the same, but the disassembly directions are different		0.10
			The connection types are different, but the disassembly directions are the same		0.10
			Neither the connection types nor the disassembly directions are the same		0.00
		Components with different post-life intents so further disassembly is unavoidable	Both the connection types and the disassembly directions are the same		0.20
The connection types are the same, but the disassembly directions are different			0.10		
The connection types are different, but the disassembly directions are the same			0.10		
Neither the connection types nor the disassembly directions are the same			0.00		
Maximum similarity score			1.00		

接著，Lai 與 Gershenson 建立程序附屬矩陣。程序附屬矩陣考量了數種影響後續處理程序難易度的因子：

Accessibility：可得性佳可使拆卸迅速有效率。

Disassembly force：拆卸力量與拆卸所需動作。

Positioning：是否需要準確對位。

Tool requirement：工具是否需要。

Material handling：重量、形狀、大小影響處理難易。

Fastening：結件的數量，以及不同結合方式的拆卸難易。

考量了這些影響後續處理程序難易度的因素後，Lai 與 Gershenson 採用了 Desai 與 Mital(2003)，以及 Papasavva(2003)等人利用的後續處理因子量化表(表 2.6)。



表 2.6 後續處理因子量化表

Retirement dependency factors			Dependency score	Interpretation	Maximum possible score	
Design attributes	Design features	Design parameters				
Accessibility of joints and grooves	Dimensions	Length, breadth, depth, radius, and angle made with surface	0.0	Shallow and broad fastener recesses, large and readily visible slots/recesses for snap fits	2.0	
			1.6	Deep and narrow fastener recesses, obscure slots/recesses for snap fits		
			2.0	Very deep and very narrow fastener recesses, slots for prying open snap fits		
	Location	On a planar surface	0.0	Groove locations allow easy access	2.0	
		On an angular surface	1.6	Groove locations are difficult to access, some manipulation required		
In a slot		2.0	Groove locations very difficult to access			
Disassembly force	Straight line motion without exertion of pressure	Push/pull operations	0.5	Little effort required	6.5	
			1.0	Moderate effort required		
			3.0	Significant effort required		
	Straight line and twisting motion without pressure	Twisting and push/pull operations	1.0	Little effort required		
			2.0	Moderate effort required		
			4.0	Significant effort required		
	Straight line motion with exertion of pressure	Inter-surface friction and/or wedging	2.5	Little effort required		
			3.0	Moderate effort required		
			3.0	Significant effort required		
	Straight line and twisting motions with exertion of pressure	Inter-surface friction and/or wedging	3.0	Little effort required		
			3.5	Moderate effort required		
			3.5	Significant effort required		
Twisting motions with pressure exertion	Material stiffness	3.0	Little effort required			
		4.5	Moderate effort required			
		6.5	Significant effort required			
Positioning	Level of accuracy required to position the tool	Axial Symmetry	0.0	No accuracy required	5.5	
			2.0	Some accuracy required		
			5.0	High accuracy required		
		Axial Asymmetry	0.0	No accuracy required		
			5.5	High accuracy required		
Requirement of tools for disassembly	Exertion of force		0.0	No tools required	3.0	
			1.0	Common tools required		
			3.0	Specialized tools required		
	Exertion of torque		0.0	No tools required		
			3.0	Specialized tools required		
Material handling	Component size	Component dimensions (very large or very small)	0.0	Easily grasped	4.0	
			3.5	Moderately difficult to grasp		
			4.0	Difficult to grasp		
	Component weight		0.0	Light (<7.5 lb)	3.0	
			2.5	Moderately heavy (<17.5 lb)		
			3.0	Very heavy (<27.5 lb)		
			0.0	Light, symmetric		5.0
			1.2	Light, semi-symmetric		
	1.4	Light, asymmetric				
	2.0	Moderately heavy, symmetric				
	2.2	Moderately heavy, semi-symmetric				
	2.4	Moderately heavy, asymmetric				
4.4	Heavy, symmetric					
4.6	Heavy, semi-symmetric					
5.0	Heavy, asymmetric					
Number of connections	Number of fasteners used to connect the components		1.0	One or few connections	3.0	
			2.0	Low number of connections		
			3.0	High number of connections		
Joining method	Non-destructive		1.0	Socket joint/snapconnections	2.0	
			2.0	Screw/thread connections		
	Destructive		0.5	Welded connections		
			1.0	Soldered connections		
			1.5	Adhesive connections		
Maximum dependency score					36	

有了後續處理程序相似度表和後續處理因子量化表後，便可以產生程序相似矩陣和程序附屬矩陣。將此二矩陣帶入 Guo 與 Gershenson(2004)提出的模組化設計方法，並利用 Ericsson 與 Erixon (1999)提出的產品模組數量適當範圍，便可以得到模組化解。

得到模組化解之後，由於可能存在不實際難以實現的情況，所以配置零件之後，檢查拆卸程序的合理性是必要的。產生模組化解之後，可再重新設計零件，以增進綠色表現。例如，若是模組 A 內有一零件跟模組 B 內的零件，關係度過大，則可以利用減少螺絲數量等手段，使不同模組間更加獨立，降低後續處理程序難度。

此方法考慮到了基於產品壽命終了之後的處理程序的零件相似性，以及零件後置處理程序的相關性，但只量化了零件間的相似性，而無具體描述如何以 DSM 將相似性高的零件合成模組的方法，屬於一種幫助量化的方法，無法直接得到模組化結果。

Smith 與 Yen(2010)提出了一種創新的方法，利用原子理論的概念解決設計模組化問題。

Smith 與 Yen 利用了原子帶電荷吸引力方面的概念，將各個零件做為一個帶電荷的粒子來看待，接著以接觸物件數量來考量以何者為帶正電的原子核，定義原子核的接觸數量門檻。透過分類零件中何者為電子，何者為原子核的過程中，帶正電的原子核會吸引身邊帶負電的電子，並建立原子團之間的關係，形成一個個模組。

按 Smith 與 Yen 的產生綠色模組的方法，必須透過綠色屬性導致的拘束，修正原子理論後，計算各零件對其他零件產生的最大吸引力，再將最大吸引力值相同的分為同一模組，可得到綠色模組。以原子理論方法一次考量一種綠色屬性，可得到基於此綠色屬性，且兼顧幾何接觸關係的綠色模組分群解，但是無法同時考量多個綠色屬性以產生綠色模組。

為了達成特定目標而重新設計，通常牽涉到了零件的合併、功能的分配、零件介面的修改等狀況，並可能會導致新的設計難以實現。為了將重新設計的不實際風險控制在一個可接受的值內，Yang 等人(2011)提出一種基於風險控管下的綠色模組化設計方法。Yang 等人提出了兩種可能使設計變更難以實現的風險，分別是功能拘束，以及物理拘束，分述如下：

1. 功能拘束：原則上模組的功能越獨立越好，因為若一個功能需要多於一個模組來共同達成的話，模組的獨立性就降低了，進而增加新設計難以實現的風險。功能風險值就是功能上不獨立的模組個數。
2. 物理拘束：重新設計意味著零件間介面結合方式的變更，每一個變更都可能使新設計暴露在難以實現的風險中。物理風險值就是新設計之於舊設計的所有內部需要被重新設計的介面個數。

透過兩種避免新設計難以實現風險的拘束，Yang 等人利用了分群基因演算法來分群零件。其考量了三種屬性，分別是再利用、保養維護與回收：

1. 再利用設計：相近且較長的壽命，以及可回收度高的零件，應被分至同一模組。
2. 保養維護設計：具有較短且相近壽命的零件，應被分至同一模組。

3. 回收設計：壽命終了後，具有相同切碎或分離步驟的零件，應被分至同一模組。

根據有利三種屬性的設計原則，分別可以設計三個適應函數，將之加權相加之後再利用分群基因演算法找尋最佳化模組解，得到新設計。Yang 等人的方法可以同時考量多個綠色屬性，並兼顧了新設計的實際性，但由於牽涉 GGA 的程式撰寫，對產品設計者的門檻略高。

Zhang 等人(2011)提出了基於生命週期設計的模組化設計流程。Zhang 等人認為生命週期設計考量了由最初的概念設計階段，以至細節設計階段的所有設計程序，包括了需求確認、產品設計、製造、運輸、使用以及回收。生命週期設計的目的是減低新產品上市的時間、改善產品的品質、減低花費、改善維護、增進環境意識與社會永續發展。

模組化設計最初是基於功能分析上的設計方法。經由一系列由產品市場調查、產品未來展望以及功能分析而產生的模組，再製造不同大小與性能的模組，便可以組合而成多種因應不同使用者需求的產品。Zhang 等人認為生命週期設計與模組化設計彼此之間的關係為，生命週期設計是一種平行且總體的思想，考量了由設計至回收的全部程序，屬於一種設計原理；而模組化設計是一種設計方法。生命週期設計提供了模組化設計一個指導方針。

Zhang 等人認為無論在設計階段、製造階段、使用階段、保養維護階段以至於回收階段，模組化設計都有其必要性。在設計階段裡，模組化設計方法可以改善產品設計效率、減短產品設計週期、減低製造花費以及傳承設計經驗，進而改善企業對於市場變遷的迅速反應。透過模組的組合與交換，產品有了不同功能，或

是功能相同但特性不同，可帶來新穎且廣泛的產品以迎合顧客的個人需求。

在製造階段裡，由於產品被劃分為數個子系統，複雜度減低了且增加了升級的速度。模組化設計使得產品多樣化、少批生產以及獨特客製化製造為可行的。

顧客是產品在使用階段的主體。顧客對於產品差異化以及個人化的需求越來越明顯。越來越多顧客將專注轉移到產品的新功能，而模組化設計可以滿足消費者更多選擇。

現代的產品和設備變得越來越複雜、巨大、昂貴且依賴專業知識，使用者的經驗和技術常常無法單獨地負擔。倘若產品或設備是由數個獨立模組所組成，則模組可被簡易地分離與組裝，保養維護的工作可以以模組為單位來實施，大幅改善了保養狀況、簡化和加速保養、減低保養花費，以及必要時可以更換模組以確保維修品質。

隨著社會的急速發展，未充分利用的產品地產生率也急遽增長，對環境造成威脅。許多企業對於未善加利用的產品的拆卸與回收投以更多關注，模組化設計可以使產品更易於拆卸與回收，進一步提高了零件的再利用可能性。

Zhang 等人提出的將生命週期設計融入模組化設計準則的概念，可改善設計階段、製造階段、使用階段、保養維護階段以至於回收階段的綠色表現及經濟表現。但由於 Zhang 等人提出的是概念性的想法，而非提出一具體的應用生命週期設計於模組化設計的方法，所以無法使設計者依循其方法以設計出綠色表現好的新產品。

Tchertchian 等人(2011)提出一種基於原始產品內模組的模組合並分群方法。其

分群考量的生命週期選項包含了再製造(Remanzufacture)以及回收。其中，再製造的定義是對面臨生命週期終了時的產品或零件，施加以一系列的製造程序，使之變成如新品般的性能之產品，可利用最低的能源和資源達到需求，減低製造新品時的浪費。

Tchertchian 等人所定義的產品架構如下：

$$\text{Current Product Architecture} = \sum \text{Current Module } i$$

其中：Current Module $i = \sum \text{Component } j$

Tchertchian 等人所定義的新產品架構如下：

$$\text{New Product Architecture} = \sum \text{Actual Module} - \sum \text{Component } j + \sum \text{New Component } k$$

新產品架構，等於原有之模組，去除不適合放在原有模組內的零件，再新加入適合放入模組內的零件。

Tchertchian 等人並將原始產品內原有的模組依其特性分成三種：可再製造潛力模組(pMR, Module potentially Remanzufacturable)、可回收潛力模組(pMr, Module Potentially recyclable)以及潛力未定模組(pMU, Module potentially Undefined)。潛力未定模組在方法最後的最佳化階段將被分為有可再製造潛力子模組與有可回收潛力子模組，使整個產品內只具有有可再製造潛力模組與有可回收潛力模組。

接著，Tchertchian 等人定義了模組彼此之類同(affinity)的概念：類同是根據某

種準則，兩個模組之間的潛在互動關係。此文獻提出之類同概念考量了以下兩個觀點：可靠度(reliability)的類同以及陳舊退化(obsolescence)的類同。

可靠度的類同其意義為兩個模組內零件的失效間隔平均時間(MTBF, Mean Time Between Failure)的相似度，其定義如下：

$$A_{rel} = 1 - \frac{MTBF_+ - MTBF_-}{MTBF_+}$$

其中下標“+”代表其 MTBF 值較大者。

陳舊退化的類同其意義為兩個模組內零件的有效價值壽命(VLT, Valuable Life Time)的相似度，其定義如下：


$$A_{obs} = 1 - \frac{VLT_+ - VLT_-}{VLT_+}$$

接著，此文獻定義了兩個模組的類同度如下：

$$\text{Affinity} = w_1 \times A_{rel} + w_2 \times A_{obs} + w_3 \times A_{com}$$

Tchertchian 等人認為，當兩個模組之類同度高於設定值的時候，則可以將兩個模組合併。

對於產品架構的優劣評定，Tchertchian 等人認為應對於經濟方面，以及環境方面。對於有可在製造潛力模組 pMR，Tchertchian 等人對執行 pMR 模組的拆卸花費計算。

關於環境方面的計算，Tchertchian 等人認為設計者應計算原物料抽取，以及模組加工時，對環境造成的衝擊。

Tchertchian 等人的方法主要是希望產品內的模組能夠透過節省能源與資源的方法，也就是再製造，進而改進原先設計使模組合併。其模組分群的方法是先辨識出原先產品內的模組，再探討這些模組的類同性，接著將類同性高的模組再合併，而類同度低的模組可能打散成為子模組，再分入可再製造或可回收的模組。由於其方法並非將原始產品內以單一零件的尺度，歸納每個零件的綠色屬性以分群，而是以原先已有之模組進行合併，考量得較粗淺，雖然對新設計的改動較小，但受原始產品模組構造之拘束，較難達成以創新產品構造改善綠色表現之目的。

以上對於有關綠色模組化設計課題之文獻，所考量的因素，以及使用的方法，表列如表 2.1。



表 2.7 文獻回顧表(1)

年分	作者	考量因素	使用方法
1996	Patrick J. Newcomb, Bert Bras, David W. Rosen	Material recycling, post-life intent, service intent	Design structure matrix (DSM)
1997	P. Gu, M. Hashemian, S. Sosale	Maintenance, reuse	Genetic algorithm (GA)
1999	P. Gu, S. Sosale	Maintenance, reuse, recycle, disposal	Simulated annealing algorithm
2007	M. D. Bovea, B. Wang	The importance of components, environment impact, environment cost	The method proposed in this literature
2008	Hwai-En Tseng, Chien-Chen Chang, Jia-Diann Li	Contact type, combination type, tool type, accessed direction	Grouped genetic algorithm (GGA)
2008	Yasushi Umeda, Shinichi Fukushima, Keita Tonoike, Shinsuke Kondoh	Recycle, maintenance, reuse, upgrade	Self-organized map (SOM)
2009	Xiaoxia Lai, John K. Gershenson	Reuse, material similarity, disassembly	Design structure matrix (DSM)
2010	Chung-Shing Wang, Pei-Yau Lin, Teng-Ruey Chang	Information exchange	Design structure matrix (DSM)

表 2.7 文獻回顧表(2)

年分	作者	考量因素	使用方法
2010	Shana Smith, Chao-ChingYen	Geometric information	Atomic theory
2011	Suiran Yu, Qingyan Yang , Jing Tao , Xia Tian , Fengfu Yin	Function, structure, component lifetime, material compatibility, recyclability	Grouped genetic algorithm (GGA)
2011	Qingyan Yang, Suiran Yu, Aicha Sekhari	Reuse, maintenance, recycle, functional and physical constraints	Genetic algorithm (GA)
2011	Zhang Jun-xia ,Wang Wei-wei, Cao Sai-sai	Market Demands, design, production, use, maintenance, recycle	N/A
2011	Nicolas Tchertchian , Dominique Millet , Olivier Pialot	Reliability, obsolescence, commonality	The method proposed in this literature

2.4 小結

Bovea 與 Wang(2007)考量了消費者的偏好重要程度以及各個零組件的相對重要程度，並計算各種設計改良變更分別在花費以及環境衝擊之於原始設計有著什麼程度的變動。此方法並未提供模組化的設計方法，設計者較不易採用之。Tseng 等人(2008)的方法則只考慮了原始設計內的幾何關係，容易拘泥在原設計的範圍，不易創造出新的綠色表現好的模組配置。

Newcomb 等人(1996)利用設計結構矩陣以模組化，其模組度計算方法可呈現新設計之優劣。Wang 等人(2010) 也利用設計結構矩陣，考量了訊息流的交換，是一種基於功能上的模組化方法。但並未考量零組件的綠色屬性，不易改善產品綠色表現。

Gu 等人(1999)的方法以設計目標及影響設計目標的因素，將之加權，再利用模擬退火法最佳化設計函數值，無法考量兩種不同目標的重要性；同時，欲達成之目標數量增加時，取交集的模組分群結果會增加排擠性，模組數量會遽增。

Yu 等人(2011)提出了物理壽命與功能壽命的見解，使零件的模組分群更為合理，但沒有規範適當的模組數量，可能導致模組數量很少，過度聚集，模組功能獨立性低；或是模組數量過多，增加模組間的聯繫複雜度。

Umeda 等人(2008)利用自組織映射圖執行模組分群，並做了一些假設及評估式，但由於其考量的因素為幾何關係，可能會導致新的模組分群架構圍於原本不良的設計，改良程度有限；或者由於其設定的拘束為強原則，解的空間太小，難以找到適合的解。另外，其假設：“模組的密度表示了幾何上的剛性、緊湊性以及模

組的獨立性。”並不一定成立。

Lai 與 Gershenson(2009)量化了零件間的相似性，而無具體描述如何以設計結構矩陣將相似性高的零件合成模組的方法，屬於一種幫助量化零件彼此關係的方法，無法直接得到模組配置。

Smith 與 Yen(2010)利用原子理論以產生新模組配置，但考量的是原始產品的接觸關係，不易創造出新模組配置，且一次只能考慮單項綠色屬性，尚有改良空間。

Zhang 等人(2011)提出一概念性的設計流程，而非提出一具體的應用生命週期設計於模組化設計的方法，所以無法使設計者依循其方法產生新的模組配置。

Tchertchian 等人(2011)的方法主要以再製造手段促進產品綠色表現，以原先已有之模組進行合併，考量得較粗淺，雖然對新設計的改動較小，但受原始產品模組構造之拘束，較難達成以創新產品構造大幅改善綠色表現之目的。

綜合我們對綠色模組化課題的文獻回顧，我們發現，大多數的方法，常常基於原始產品內的幾何關係，或是一次只能考量一項綠色屬性，而沒有同時兼顧零件彼此功能聯繫關係以及零件的綠色屬性關係的方法。我們在本論文便是要以原子理論為基礎，發展可以不拘束於原始產品的模組配置，且兼顧多種功能聯繫關係及多種綠色屬性的產品模組化設計方法。

第三章 研究方法

3.1 原子理論

原子理論在 1803 年被道爾吞(John Dalton, 1766-1844)首先提出。道爾吞認為：

1. 化學元素均由不可再分的微粒組成，這種微粒稱為原子。
2. 同一元素的所有原子，在質量和性質上都相同；不同元素的原子，在質量和性質上都不相同。
3. 不同的元素化合時，這些元素的原子按簡單整數比結合成化合物。
4. 化合物分解所得的原子，與構成化合物的同種原子，性質相同。

道爾吞提出的原子理論簡潔，但存在著錯誤，且並未提到電子的概念。隨後在 1909 年，拉塞福(Ernest Rutherford, 1871-1937)，透過用 α 粒子撞擊金箔的“金箔實驗”，發現絕大多數 α 粒子的被金原子散射的偏向很小，但少數的偏向角很大。拉塞福因此推斷原子內的大部分質量和正電荷，集中在很小的原子核上；而帶負電荷的電子，則像行星圍繞太陽旋轉一樣，圍繞著原子核運轉。

庫倫(Charles Augustin de Coulomb, 1736-1806)，於 1785 年發現了庫倫定律：

在真空狀況下，兩個靜止點電荷之間的交互作用力，與距離平方成反比，與電量乘積成正比，作用力的方向在它們的連線上，同號電荷相斥，異號電荷相吸。

將庫倫定律寫成數學形式如下：

$$F = \frac{k_e Q_1 Q_2}{r_{1,2}^2}$$

其中：

Q_1 ：第一個點電荷所帶的電量

Q_2 ：第二個點電荷所帶的電量

$r_{1,2}$ ： Q_1 和 Q_2 的距離

k_e ：庫倫常數

3.2 原子理論在工業設計扮演的腳色

Yen(2009)指出，若將原子理論應用在工業設計，則我們可以將含有主要功能、重要性較高的零件，當作是帶正電荷的原子核；而含有次要功能、重要性較低的零件，當作是帶負電荷，圍繞原子核的電子。一個原子包含了一個原子核和數個電子，原子核和數個電子所帶電量相同時稱之為電荷平衡。本論文將以原子構造，以及原子核和電子之間的吸引力，探討產品內部零件構成模組的關係。

3.3 利用原子理論於模組化設計

在本論文裡，我們利用原子構造的性質，將零件模擬成原子核和電子，進行模組化設計。本方法主要的概念是，找出產品裡面適合做為原子核，以及適合做為電子的零件。做為電子的數個次要零件就像原子構造般，圍繞著一個原子核，形成一個模組，而整個產品可由數個模組所構成。

本方法依據以下 3.3.1 節所提到的零件聯繫關係，可形成根據不同種類的聯繫關係所造成的功能模組。當一個零件在某種聯繫關係上，與其他零件的聯繫越多，也就是在在此種聯繫的觀點上來看，重要度越高，則越適合做為原子核；而跟原

子核有聯繫關係的零件，則適合做為此類原子核的電子。

欲應用原子理論來將零件分群，首先要改寫的是庫倫定律裡電荷吸引力的公式。由於我們希望能以較大、正值的吸引力表示模擬成電子、帶負電荷的零件，和模擬成原子、帶負電荷的零件，彼此相互吸引的程度，於是便將庫倫力公式改寫成如下形式：

$$F_{ij} = -\frac{kQ_iQ_j}{D_{i,j}^2}$$

F_{ij} ：零件 i 和零件 j 的吸引力

Q_i ：零件 i 的電荷，有正負值之分

$D_{i,j}$ ：零件 i 和零件 j 的“距離”，表示在某一特定屬性的相關度

k：多數時候設其值為 1，只有在多個原子核帶相同電荷時才依序加 1

3.3.1 產品內的零件功能聯繫關係

產品內的模組化，通常是由於產品內的零件，彼此在某個觀點上有關連性，例如功能性、擴充性、便於製造性，所以設計者才使有功能聯繫關係的零件放入同一模組內。產品內零件功能聯繫關係的強度多寡，決定了零件是否併入同一模組的應該程度多寡。

為了將零件間彼此的關係能夠有系統地列出，並且可依重要性量化，以便設計者帶入設計方法，研究聯繫關係的分類是必要的。Jarratt(2004)提出了八種元件間的關係：

1. 靜力(mechanical steady state, MS)：指兩零件之間有實體上的接觸，並且有固定

- 的負載關係，屬於一種對稱性關係。
2. 動力(mechanical dynamic, MD)：指兩零件的接觸是關乎位移，或動態的力，屬於一種有方向性的關係。
 3. 空間(spatial, SP)：零件彼此接觸或相鄰，有重要相對位置的關係，屬於一種對稱性的關係。
 4. 穩態熱力(thermal steady state, TS)：兩零件之間有固定的溫差，屬於一種有方向性的關係。
 5. 動態熱力(thermal dynamic, TD)：兩零件之間有變動的溫差，屬於一種有方向性的關係。
 6. 電子訊號(electrical signal, ES)：電子訊號有一個零件傳遞至另一個零件，屬於一種有方向性的關係。
 7. 接地(electrical earth, EE)：兩零件間的接地關係，屬於一種有方向性的關係。
 8. 電動力(electrical dynamic, ED)：兩零件之間存有有實體設計(physical design)，或有邏輯驅動的行為，屬於一種有方向性的關係。

其中，空間關係屬於產品內部結構配置的關係，而其他關係屬於功能性上的關係。

Tsai 與 Wang(1999)則將零件間彼此的關係，當作是輸入與輸出的參數流，提出了四種零件間的參數流：

1. 幾何拘束(geometric constraint, GE)：兩零件之間形狀、大小、公差或位置的關係。
2. 機械強度(mechanical strength, ME)：系統之內關乎力、重量、負載、應力分布、材料機械性質、機械穩定性的關係。

3. 能量流(energy flow, EF)：兩零件之間關於熱、光、電、位移或速度等系統的動態性質的關係。
4. 訊號流(signal flow, SF)：兩零件之間跟輸出／輸入介面、訊號傳遞、訊號穩定或感測方面的關係。

而 Chen(2010)採用 Tsai 與 Wang 對零件關係的定義，加入第五個零件間的參數流：

5. 其他功能(else function, EL)：其他不屬於上述參數流的關係。(例如電池蓋有防止電池從電池座內掉落的關係。)

本論文希望新產品的模組配置能不囿於舊產品內的模組配置，並考量產品內零件的功能聯繫關係，以產生創新模組配置。

在檢視了 Jarratt 以及 Tsai 與 Wang 的零件聯繫關係分類方法後，提出了以下五種產品內的零件功能聯繫關係：

1. 力回饋功能關係：兩零件之間有必要的力量承載上的回饋關係。一方必要的承載著另一方，或是彼此一起構成承載的能力。
2. 能量傳遞關係：兩零件之間有電能、熱能、光能等能量交換。
3. 訊號交換關係：兩零件之間有訊號透過輸入輸出的介面傳遞。
4. 共組功能關係：兩零件一起合作，以完整某項特定主功能或次功能。
5. 其他關係：兩零件之間存有以上未提及的聯繫關係，但存在某種無法忽略的關係。

歸納出五種零件聯繫關係之後，我們便可以由這五種聯繫關係，透過以下數節

所介紹之改良過後的原子理論，產生新的功能模組。

3.3.2 重新模組化設計的設計範圍

本論文提出的綠色模組化方法，旨在希望設計者可以依循經由本方法的分群結果，以設計出表現創新的綠色產品。但由於某些原始設計內的零件不涉及主要功能，或是為標準零件等情形，將之列入須被重新設計的範圍是不恰當的，是故將此情形歸納如下，以避免不合理的重新設計產生：

1. 充當兩個零件之間彼此結合的結件，例如螺絲、鉚釘等。
2. 從專業製造商選購的標準規格零件，例如照明燈管、機械產品內的軸承、書櫃上的鎖頭等。

零件之間彼此結合的方式，牽涉到新的模組化設計的實際細節設計，而在舊設計裡使用的介面結合方式，並不一定也在新設計裡被採用。舊的設計裡也許存在著一種情況：之前採用的零件介面結合方式不佳，有重新考慮的改良空間。於是，將零件之間的結件，視為一種“零件的結合方式”，而非須被重新設計的零件，是比較適當的。

舉例來說，傳統桌上型電腦的機殼，外部有固定蓋板的螺絲，內部則有許多用以固定光碟機、硬碟機、主機板、顯示卡、散熱風扇等螺絲。但現今已有許多廠商推出拆卸組裝免使用工具的機殼，利用滑槽、卡榫、扣具以替代傳統的緊固件，是一個改良舊設計裡“零件的結合方式”的例子。

另外，在設計產品的過程中，常常有使用其他廠商製造的標準規格零件的情

況。當設計者為了達成某特定功能，且市場上已存在此項零件，且價格合理，則使用標準規格零件是較好的選擇。倘若，為了達成某功能，不選擇現有的標準規格零件，而自行重新設計製造零件，不僅在製造上達不到足夠的經濟規模而耗費成本，更有可能由於本身並非該項標準規格零件的專業製造商，導致生產出來的零件品質堪慮，且增加成本。

設計時，選擇標準規格零件，可以透過零件共用化、製造分工專業化，以大量生產手段減少了各種無用的程序，所以可以更有效率的製造，更進一步兼顧了保養維護時的可替換性、可升級性。由專業製造商來生產標準規格零件，比起一般成品製造商自行設計生產零件來得有效率，可減少材料和能源使用，降低環境衝擊，達到增進綠色表現的目的。基於以上理由，將標準規格零件模組合併成模組，通常是不實際的；而且大部分的情形下，標準規格零件自身就是一個由多個零件製成的高度功能相關模組。

3.3.3 距離矩陣 D

在 Yen(2009)的論文裡，距離矩陣原本的意義是紀錄了任兩零件是否有接觸，定義為：若兩零件有接觸，則將此兩零件的距離設為 1；若兩零件無接觸，則將此距離設為 2。在本論文裡，我們修改了當初 Yen 所提出的原子理論內，距離矩陣的定義。我們將距離矩陣內“距離”的意義擴充解釋為“兩個零件，在某特定功能屬性上是否相關”，若兩零件在該功能屬性上有相關，則將距離設為 1；若兩零件在該功能屬性上無關，則設為 2。

我們以一個範例產品當作本篇論文模組化設計方法的解說例子。以圖 3.1 為例，假設我們要針對圖 3.1 的範例產品，產生於 3.1 節內所列舉的零件關係中，基於“訊

號交換關係”觀點上的功能模組分群。首先，我們必須辨識出如同 3.3.2 節提到的重新模組化設計的範圍。在本範例產品內，零件 1、零件 2、零件 3、零件 4、零件 5 以及零件 6 是主要的零件，而零件 7、零件 8、零件 9、零件 10 以及零件 11 是屬於 3.3.2 節提到的“充當兩個零件之間彼此結合的結件”，屬於後端設計階段裡的實際細節設計，不在本論文的模組化設計範疇之內，將之忽略。

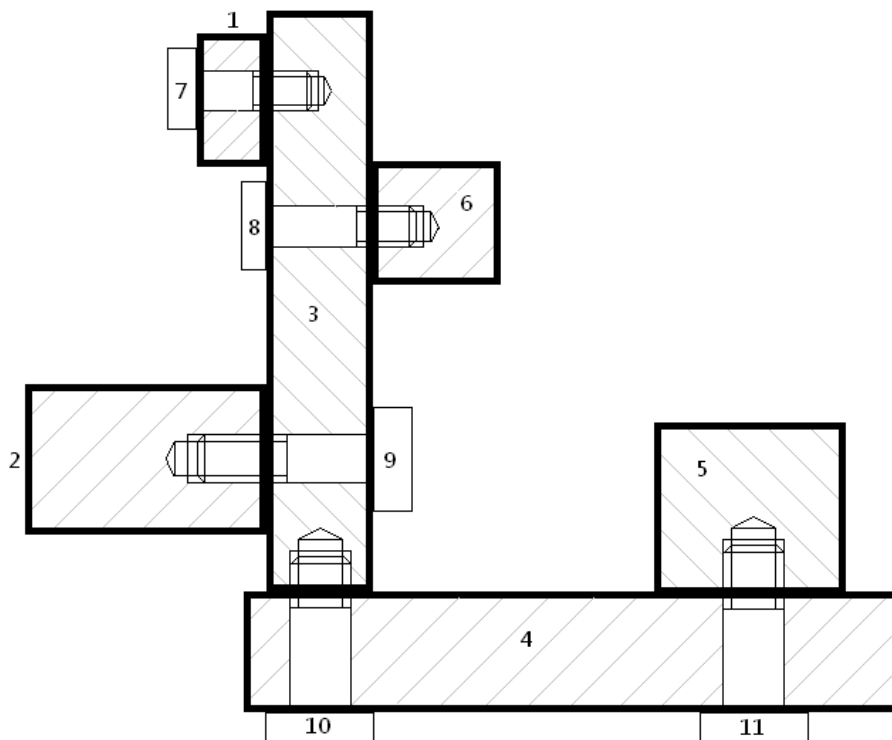


圖 3.1 範例產品

在確定模組化設計的範圍零件之後，接著必須建立紀錄了產品裡各零件彼此之間是否有訊號交換關係的矩陣。我們假設此範例產品內零件的訊號交換關係如表 3.1：

表 3.1 距離矩陣 D

D 訊號交換	1	2	3	4	5	6
1	0	2	2	1	2	2
2	2	0	2	2	2	2
3	2	2	0	1	1	1
4	1	2	1	0	2	2
5	2	2	1	2	0	2
6	2	2	1	2	2	0

這個紀錄了產品裡各零件彼此之間是否有訊號交換關係的表格，便是基於訊號交換關係觀點上的距離矩陣。其中，矩陣內元素值的定義規則為：

$D_{ij}=2$ ：零件 i 和零件 j 沒有訊號交換。

$D_{ij}=1$ ：零件 i 和零件 j 有訊號交換。

$D_{ii}=0$ ：對角線元素將之設為 0。

$D_{ij}=D_{ji}$ ：距離矩陣是一個對稱矩陣。

在產生距離矩陣之後，便可以再進一步地觀察產品內，哪些零件具有與其他零件高度聯繫的特徵，以下 3.4.3 節便再進一步建立總聯繫矩陣。

3.3.4 總聯繫矩陣 TR

本節所介紹的總聯繫矩陣 TR，目的是在於挑選出在產品中具有與其他零件高度聯繫的零件，而總聯繫矩陣可由 3.3.3 節的距離矩陣 D 所產生，規則如下：

$$\forall D_{ij} = 1, TR_i = \sum_j D_{ij}$$

也就是說，總聯繫矩陣 TR 的元素值，即為距離矩陣 D 內，每列裡距離為 1 出現的次數。如此一來，每個產品零件都在總聯繫矩陣 TR 內有了一個數值，其意義為“此零件，在該屬性觀點上，跟幾個其他零件有關聯”。舉例來說，對此範例產品，針對訊號交換觀點上的距離矩陣，形成的總聯繫矩陣 TR 如下：

表 3.2 總聯繫矩陣 TR

TR	
1	1
2	0
3	3
4	2
5	1
6	1

由總聯繫矩陣的建立，我們便可以看出總聯繫度較高、較適合做為原子核的零件，接著可將總聯繫度較低的零件視為電子。決定何者適合做為原子核、何者適合做為電子之後，便可以透過以下 3.3.5 節，賦予這些零件帶電量，模擬成原子核和電子。

3.3.5 電荷矩陣 Q

在此節裡，我們定義一個電荷矩陣，代號為 Q。電荷矩陣 Q 的用途是賦予零件本身帶有正或負電量，模擬原子核和電子的行為，以備之後帶入庫倫吸引力公式求取兩零件的吸引力，特別是原子核零件吸引電子零件。

首先，由上節所建立的總聯繫矩陣，必須先確定哪些零件應模擬為原子核。

在此，我們引用一由 Ericsson 與 Erixon(1999)提出的公式，其公式可做為設計者對於產品內，模組數量決定的設計參考。其公式為：

$$0.5\sqrt{N} \leq \text{模組數量} \leq \sqrt{N}$$

其中，N 為整個產品內零件的數量。利用以上公式，我們可以決定應該取幾個零件當作帶正電的原子核，因為在本方法裡，原子核的數量就是最終模組分群的數量。舉例來說，範例產品在設計範圍內的零件數為 6，則根據 Ericsson 與 Erixon 的模組數量公式決定的上下界為[1.22, 2.45]，於是我們將總聯繫度最高的兩個零件，零件 3 與零件 4，當作原子核；其他零件則當作是電子。做為原子核的零件，所帶電量為其總聯繫度，為正值；其餘做為電子的零件則帶負電荷，電量為 1：

$Q_i = +TR_i$ ：零件 i 被選為原子核。

$Q_i = -1$ ：零件 i 被選為電子。

根據以上定義，則範例產品由總聯繫矩陣而建構的電荷矩陣 Q 如表 3.3。

表 3.3 電荷矩陣 Q

零件編號	
1	-1
2	-1
3	+3
4	+2
5	-1
6	-1

建立電荷矩陣 Q，且藉由 3.3.3 得到的距離矩陣 D，便可以開始計算兩零件之間的作用力，下一小節並說明作用力的計算方法。

3.3.6 力量矩陣 F

本節定義的力量矩陣 F，目的是在計算兩零件彼此吸引力上的關係。零件之間的吸引力有可能是負值（表示互相排斥），或是正值（表示互相吸引）。3.3 節所提及的修正後庫倫力公式如下：

$$F_{ij} = -\frac{kQ_iQ_j}{D_{i,j}^2}$$

其中，各項符號的定義如同 3.3 節所說明的相同。現在我們已有了範例產品的距離矩陣 D 和電荷矩陣 Q，便可以以修正的庫倫力公式計算出力量矩陣 F。舉例來說，零件 1 和零件 3 的吸引力值為 $F_{1,3} = -\frac{1 \times (-1) \times (+3)}{2^2} = 0.75$ 。範例產品內零件的力量矩陣如表 3.4。

表 3.4 力量矩陣 F

	1	2	3	4	5	6
1	0	-0.25	0.75	2	-0.25	-0.25
2	-0.25	0	0.75	0.5	-0.25	-0.25
3	0.75	0.75	0	-6	3	3
4	2	0.5	-6	0	0.5	0.5
5	-0.25	-0.25	3	0.5	0	-0.25
6	-0.25	-0.25	3	0.5	-0.25	0

其中，吸引力為正值表示互相吸引，是帶正電的原子核零件與帶負電的電子零件所造成的；而造成負值的吸引力則表示排斥，是由於兩個帶正電的原子核零件，或是兩個帶負電的電子造成的排斥。

在這個階段，我們已成功地把產品中處於設計範圍內的零件，模擬成原子核和電子，並有互相吸引或排斥的特徵，下一節我們將說明如何應用這種特徵於零件模組分群。

3.3.7 最大作用力矩陣 MF

本節將定義一個由力量矩陣引申而來的最大作用力矩陣 MF，定義最大作用力矩陣的目的是在於找出哪些零件應被分為同一群，哪些則否。最大作用力矩陣 MF 內元素的定義如下：

$$MF_i = \max(F_{ij}), \forall j$$

根據以上最大作用力矩陣 MF 的定義，範例產品由 3.3.6 節力量矩陣 F 而來的最大作用力矩陣 MF 如下表：

表 3.5 最大作用力矩陣 MF

零件編號	
1	2
2	0.75
3	3
4	2
5	3
6	3

由最大作用力矩陣 MF 便可以產生模組分群解，其規則是“將具有相同最大作用力分為同一群”。另外一個規則是“將最大作用力小於原子核可能提供的吸引力的零件，分為獨立零件模組（游離電子）”。

以範例產品的 MF 矩陣為例，零件 1、零件 4 的最大作用力同樣為 2，於是可將之分為同一個模組；零件 3、零件 5、零件 6 的最大作用力同樣為 3，也分為同一群。另外，原子核所能提供的最小吸引力為 $F_{min} = -\frac{1 \times (+2) \times (-1)}{1^2} = 2$ ，然而零件 2 的最大作用力小於 2，於是零件 2 成為不被任何原子核吸引的游離電子，自身構成單一零件的模組。我們可以將模組分群的結果寫成以下形式：[1, 4]、[3, 5, 6]、[2]，每個中括弧內的零件群都是一個基於訊號交換關係觀點上的模組。

3.3.8 應用共價鍵概念形成分子功能模組

利用原子理論分群模組時，偶而會遇到一種狀況：雖然某兩個原子核分別形成了兩個功能模組，但其實這兩個功能模組的原子核卻是在該功能屬性觀點上有關聯的。這時候便適合將此兩個功能模組合併為一個模組，我們稱為分子功能模

組，其狀態就像分子內共用電子的兩顆原子一樣。分子功能模組就像是實際生活中的雙原子分子一樣，透過共用電子（零件）而構成。分子功能模組的形成會降低功能模組的數量，並有利再進一步透過以下數節所說明的方法，找尋功能模組內的綠色模組。

舉例來說，範例零件對於訊號交換關係觀點上的分群結果為：[1, 4]、[3, 5, 6]、[2]，然而，第一個模組的原子核零件 4 與第二個模組的原子核零件 3 在訊號交換關係觀點上有關聯，則我們可以將它們合併成一個模組：[1, 4, 3, 5, 6]、[2]。

3.4 應用化學反應概念於多屬性模組的合併

由 Smith 與 Yen 提出的原子理論模組分群法，可以將零件巧妙地模擬成帶正電的原子核與帶負電的電子，並透過計算最大作用力以形成模組。由於模組分群通常是同時考量多種功能屬性，因此，我們必須建立一種方法，使得多種屬性的模組得以合併。我們將範例產品，根據 3.3.1 所提到的功能聯繫關係，分別透過原子理論分群產生功能模組。假設基於各種功能聯繫觀點上的分群結果如下：

表 3.6 五種不同功能聯繫關係的功能模組分群

力回饋關係	能量傳遞關係	訊號交換關係	共組功能關係	其他關係
[1, 2, 3, 6]	[2, 3, 4]	[1, 4]	[3, 4]	[1, 6]
[4,5]	[1]	[3, 5, 6]	[1]	[2]
	[5]	[2]	[2]	[3]
	[6]		[5]	[4]
			[6]	[5]

透過原子理論分群方法，零件在各種不同屬性觀點構成了功能模組，而透過以下數節說明的原子化學活性，以及化學反應活化能的概念，可以將基於不同觀點上所形成的模組合併起來。

3.4.1 功能相關度矩陣(FC)

為了探究“任兩零件被分至同一模組的相關程度”，本小節我們建立了一種矩陣，稱之為功能相關度矩陣 FC。功能相關度矩陣紀錄了任兩零件於所有功能屬性模組上的總相關度，也就是兩個零件在不同功能觀點上位於同一個模組內的次數。

為了建構功能相關度矩陣，我們先定義以下相關式：

$c_{ij}^k = 1$ ：零件*i*與零件*j*，於功能屬性*k*構成的模組分群，屬於同一模組。

$c_{ij}^k = 0$ ：零件*i*與零件*j*，於功能屬性*k*構成的模組分群，不屬於同一模組。

$$\text{若 } \sum_k c_{ij}^k > 0, \text{ 則 } FC_{ij} = \sum_k c_{ij}^k$$

$$\text{若 } \sum_k c_{ij}^k = 0, \text{ 則 } FC_{ij} = 0.01$$

舉例來說，根據 3.4 節列出的所有功能觀點分群結果，對所有產品零件可產生功能相關度矩陣 FC 如下：

表 3.7 原始的功能相關度矩陣 FC

FC	1	2	3	4	5	6
1	0	1	1	1	0.01	2
2	1	0	2	1	0.01	1
3	1	2	0	2	1	2
4	1	1	2	0	1	0.01
5	0.01	0.01	1	1	0	1
6	2	1	2	0.01	1	0

但是，在實際的模組化設計過程裡，設計者對於不同種類產品，有著對不同功能屬性上的重要性，針對不同的產品，在功能屬性上會有不同的模組化驅使力，所以我們必須將五種功能聯繫關係附之以權重：

$$\sum_k w_k = w_{\text{力回饋關係}} + w_{\text{能量傳遞關係}} + w_{\text{訊號交換關係}} + w_{\text{共組功能關係}} + w_{\text{其他關係}} = 1$$

其中，若我們對範例產品的權重假設如下：

表 3.8 功能關係權重

W 力回饋關係	W 能量傳遞關係	W 訊號交換關係	W 共組功能關係	W 其他關係
0.14	0.22	0.18	0.26	0.2

則我們修正 FC 矩陣內元素的定義為：

$$\begin{aligned} \text{若 } \sum_k w_k \times c_{ij}^k > 0, \text{ 則 } FC_{ij} &= \sum_k w_k \times c_{ij}^k \\ \text{若 } \sum_k w_k \times c_{ij}^k = 0, \text{ 則 } FC_{ij} &= 0.01 \end{aligned}$$

如此可使修正後的功能模組相關度矩陣 FC_{ij} 範圍為 $[0, 1]$ ，修正後如表 3.8。

表 3.9 功能相關度矩陣 FC

FC	1	2	3	4	5	6
1	0	0.14	0.14	0.18	0.01	0.34
2	0.14	0	0.36	0.22	0.01	0.14
3	0.14	0.36	0	0.48	0.18	0.32
4	0.18	0.22	0.48	0	0.14	0.01
5	0.01	0.01	0.18	0.14	0	0.18
6	0.34	0.14	0.32	0.01	0.18	0

3.4.2 零件的化學活性(AC)

在 3.4.1 節，我們建立了經過加權的功能模組相關度矩陣，可表現兩零件的模組相關度。本節我們考慮了一個性質－各零件本身的化學活性，其意義是“零件本身跟外界的聯繫度多寡”。一個零件 i 的化學活性 AC_i 的定義如下：

$$AC_i = \frac{1}{k} \times \left(\frac{TR_i^1}{N-1} + \frac{TR_i^2}{N-1} + \dots + \frac{TR_i^k}{N-1} \right) = \frac{\sum_k TR_i^k}{k \times (N-1)}$$

其中， TR_i^k 為 i 零件在第 k 個功能屬性的總聯繫度。另外，由於一具有 N 個零件的產品中，其單一零件可能出現的最大總聯繫度為 $N-1$ ，令分母為 $N-1$ 的意義在於可使一零件在單一功能屬性的活性範圍為 $[0, 1]$ ，而多種功能屬性的活性總和範圍除以 k 後也為 $[0, 1]$ ，其範圍與功能模組相關度矩陣 FC 內元素值的範圍相同。

以範例產品來說，假設關於此五種功能聯繫關係的總聯繫矩陣分別如下：

TR	力回饋關係	能量傳遞關係	訊號交換關係	共組功能關係	其他關係
1	1	0	1	0	1
2	3	1	0	0	0
3	1	2	3	1	0
4	2	1	2	1	0
5	1	0	1	0	0
6	1	0	1	0	1

則可以由以上得知各個零件的活性，得到矩陣 AC：

表 3.10 活性矩陣 AC

1	0.12
2	0.16
3	0.28
4	0.24
5	0.08
6	0.12

一個零件的化學活性越大，表示與其他零件在功能上的聯繫度越多，而與其他零件聯繫度越多，表示越適合吸引其他零件，合併成為模組。

3.4.3 碰撞理論與化學反應之活化能

碰撞理論是威廉·路易士(William Lewis)在 1916 年提出，其理論描述了化學反應發生的經過。化學反應的發生，首先必須反應的粒子互相接近，並發生碰撞才能發生反應。然而，粒子之間發生碰撞不一定能產生化學反應，只有少數的碰撞引起反應，大部分的碰撞僅只是粒子間的互相碰撞，但並未引起反應即分開，

而能引起反應的碰撞情形稱為有效碰撞。使粒子發生有效碰撞反應所需的最低能量稱為活化能。

在自然界，發生化學反應所需要的活化能定義為一個化學反應的發生所需要克服的能量障壁，活化能可以用於表示一個化學反應發生所需要的最小能量。當一個化學反應所需要的活化能越低，則傾向較容易發生。氫分子與氧分子發生反應成為水分子的活化能示意圖如下：

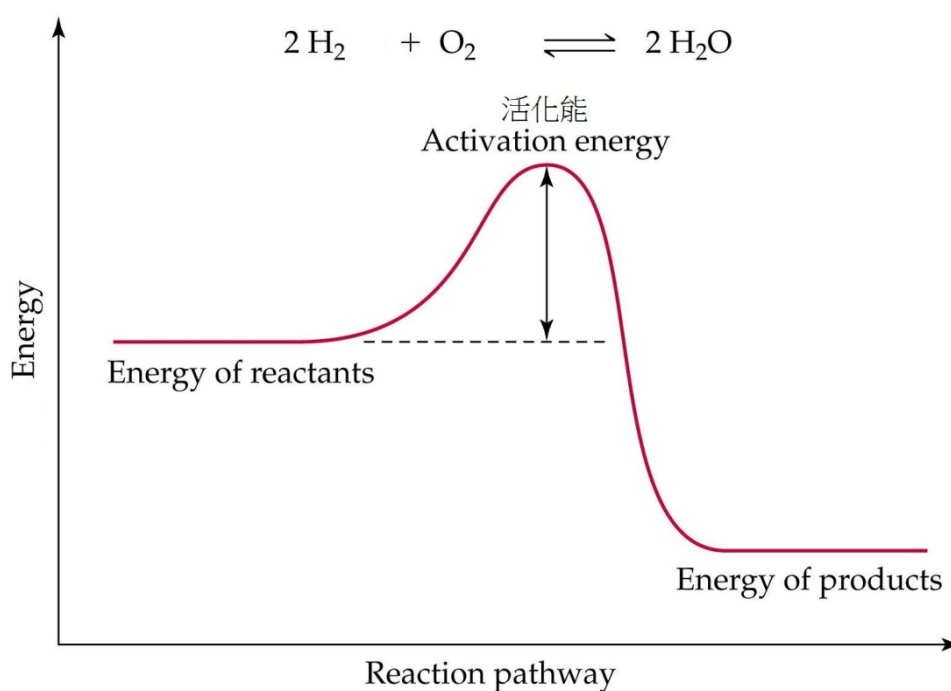


圖 3.2 化學反應的能量障壁—活化能

3.4.4 應用化學反應活化能(AE)概念於功能模組合成

本節提出了一個新的概念，我們再度將每個零件都模擬成種類不同、化學性質相異的原子。我們假設，對於一種功能聯繫觀點上所形成的功能模組，其中每個模組都是零件與零件之間所化合形成的化合物。在自然界，發生化學反應所需

要的活化能定義為一個化學反應的發生所需要克服的能量障壁，活化能可以用於表示一個化學反應發生所需要的最小能量。當一個化學反應所需要的活化能越低，則傾向較容易發生；當所需活化能越高，則越不易發生反應。

在本論文裡，我們利用如同化學反應活化能的概念，以描述兩個零件發生化學反應結合成同一模組的難易程度，並定義零件 i 與零件 j 兩者的活化能代號為 AE_{ij} 。

為了利用活化能的觀念於零件們的模組分群，我們假設了以下兩個原則：

1. 零件 i 與零件 j 化合成為一個模組的難易程度，與它們發生化學反應所需的活化能有關；化學反應的活化能越低，則此兩零件越容易化合成為同一模組，反之活化能越高，則不易化合成為同一模組。
2. 零件 i 與零件 j 發生化學反應所需的活化能反比於零件 i 與零件 j 活性的幾何平均數 $\sqrt{AC_i \times AC_j}$ ，也反比於零件 i 與零件 j 的功能模組相關度 FC_{ij} 。

由以上兩個假設，我們可以定義零件 i 與零件 j 產生化學反應形成化合物所需的活化能如下：

$$AE_{ij} = \frac{1}{\sqrt{AC_i \times AC_j} \times FC_{ij}}$$

由以上定義，並利用 3.4.1 節的 FC 矩陣以及 3.4.2 節的 AC 矩陣，我們對範例產品所產生的活化能矩陣 AE 如表 3.10。

表 3.11 活化能矩陣 AE

	1	2	3	4	5	6
1	0	51.55	38.97	32.73	1020.62	24.51
2	51.55	0	13.12	23.20	883.88	51.55
3	38.97	13.12	0	8.04	37.12	17.05
4	32.73	23.20	8.04	0	51.55	589.26
5	1020.62	883.88	37.12	51.55	0	56.70
6	24.51	51.55	17.05	589.26	56.70	0

活化能矩陣 AE 內的每個元素值代表了產生化學反應的難易程度，越低的活化能表示越容易化合在一起。舉例來說， $AE_{ij}(= AE_{ji})$ 為零件 i 與零件 j 產生化學反應而化合在一起的能量障壁。

根據範例產品的活化能矩陣 AE，我們可以開始進行多功能屬性模組的合併工作，其原則如下：

1. 假設活化能較低的化學反應將發生，並將此化學反應牽涉到的兩個零件，化合在一起，成為同一模組。
2. 由活化能小至大，持續發生化學反應，產生模組，直到全部的零件被合併進同一個模組內。每次產生化學反應時，記錄當下的反應物模組與生成物模組，以及執行化學反應所需的活化能。
3. 將每個功能模組分群解，帶入功能模組評估式：

$$\text{Functional Module Instability}(FMI) = \frac{\text{mean}(AES_{\text{Reacted}})}{N_{\text{parts in module}(s)}}$$

其中， AES_{Reacted} 為執行模組合併之化學反應時，其產生化學反應的活化

能。以本範例產品來說， $AE_{3,4} = 8.04$ 為最低的活化能，所以先合併零件 3 與零件 4，形成功能模組[3, 4]；接著， $AE_{2,3} = 13.12$ 的化學反應合併了零件 2 與零件 3，形成功能模組[2, 3, 4]。至此，功能模組[2, 3, 4]的 $AE_{S_{Reacted}}$ 便為 8.04 以及 13.12。 $N_{parts\ in\ module(s)}$ 則為模組內的零件數，以功能模組[2, 3, 4]來說， $N_{parts\ in\ module(s)} = 3$ 。

功能評估式之意義為功能模組內的不穩定程度。不穩定度之值越高，意味著功能模組合併之時有著活化能偏高、功能關係度偏低的兩個零件被合併，導致模組的內聚度越低。計算出各個候選功能模組解的功能模組不穩定度評估值之後，我們取其評估值最低的解作為功能模組分群解。

我們並為此方法做了一個假設：化學反應發生的前後不改變零件的化學性質。亦即，不論某零件是否已跟其他零件化合而被併入模組，其與尚未發生反應的其他零件活化能保持不變。

以範例產品的活化能矩陣 AE 為例，首先我們將活化能較低的幾個化學反應依序列出如下：

AE=8.04：(零件 3)–(零件 4)

AE=13.12：(零件 2)–(零件 3)

AE=17.05：(零件 3)–(零件 6)

AE=23.20：(零件 2)–(零件 4)

AE=24.51：(零件 1)–(零件 6)

AE=37.12：(零件 3)–(零件 5)

列出各種化學反應所需要的活化能之後，我們由活化能最低的化學反應開始

進行化合物合成。例如活化能最低的是零件 3 和零件 4 的化合反應， $AE=8.04$ ，所以我們將零件 3 和零件 4 合併成為一個模組： $[3, 4]$ 。

我們再繼續依序進行活化能由低至高的反應，如零件 2 和零件 3 的化合反應，此反應使零件 2 被併入已發生化學反應而產生的模組 $[3, 4]$ 裡面，產生新物質，成為模組 $[2, 3, 4]$ 。接著，我們透過執行 $AE=17.05$ 、 $AE=23.20$ 、 $AE=24.51$ 以及 $AE=37.12$ 的化學反應，最後我們可以得到以下模組化合物， $[1, 2, 3, 4, 5, 6]$ 。

以功能模組 $[2, 3, 4]$ 為例，計算功能模組評估值(FMI)，帶入前述 FMI 之定義，則可得 $FMI = \frac{(8.04+13.12)/2}{3} = 3.527$ 。

進行化合程序時，各個階段的化學反應生成物（模組解），以及各階段模組解的功能模組度評估值，如表 3.11 及圖 3.3 所示：

表 3.12 功能模組分群解與其功能模組不穩定度

模組分群解 1	模組分群解 2	模組分群解 3	模組分群解 4	全部合併
$[3, 4]$	$[2, 3, 4]$	$[2, 3, 4, 6]$	$[1, 2, 3, 4, 6]$	$[1, 2, 3, 4, 5, 6]$
$[1]$	$[1]$	$[1]$	$[5]$	
$[2]$	$[5]$	$[5]$		
$[5]$	$[6]$			
$[6]$				
$FMI=4.019$	$FMI=3.527$	$FMI=3.184$	$FMI=3.181$	$FMI=3.358$

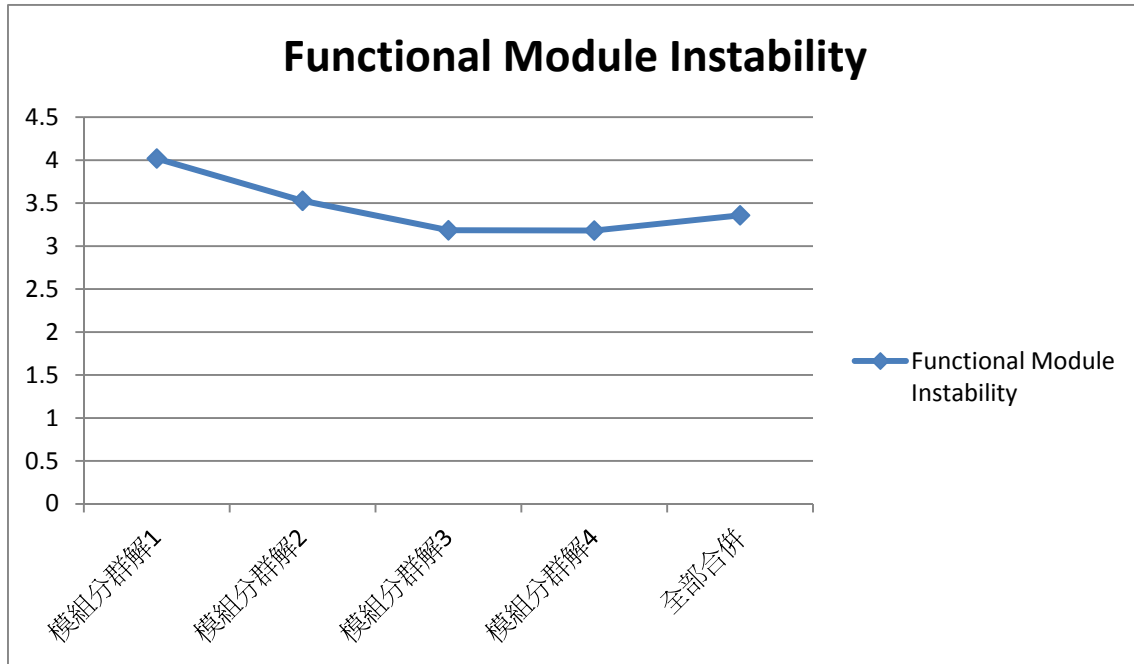


圖 3.3 功能模組不穩定度

由表所示，我們選擇模組不穩定度值最低的模組分群解 4 為最終的功能模組分群：[1, 2, 3, 4, 6]、[5]

由 3.3 節至 3.4 產生功能模組的流程圖如圖 3.4。

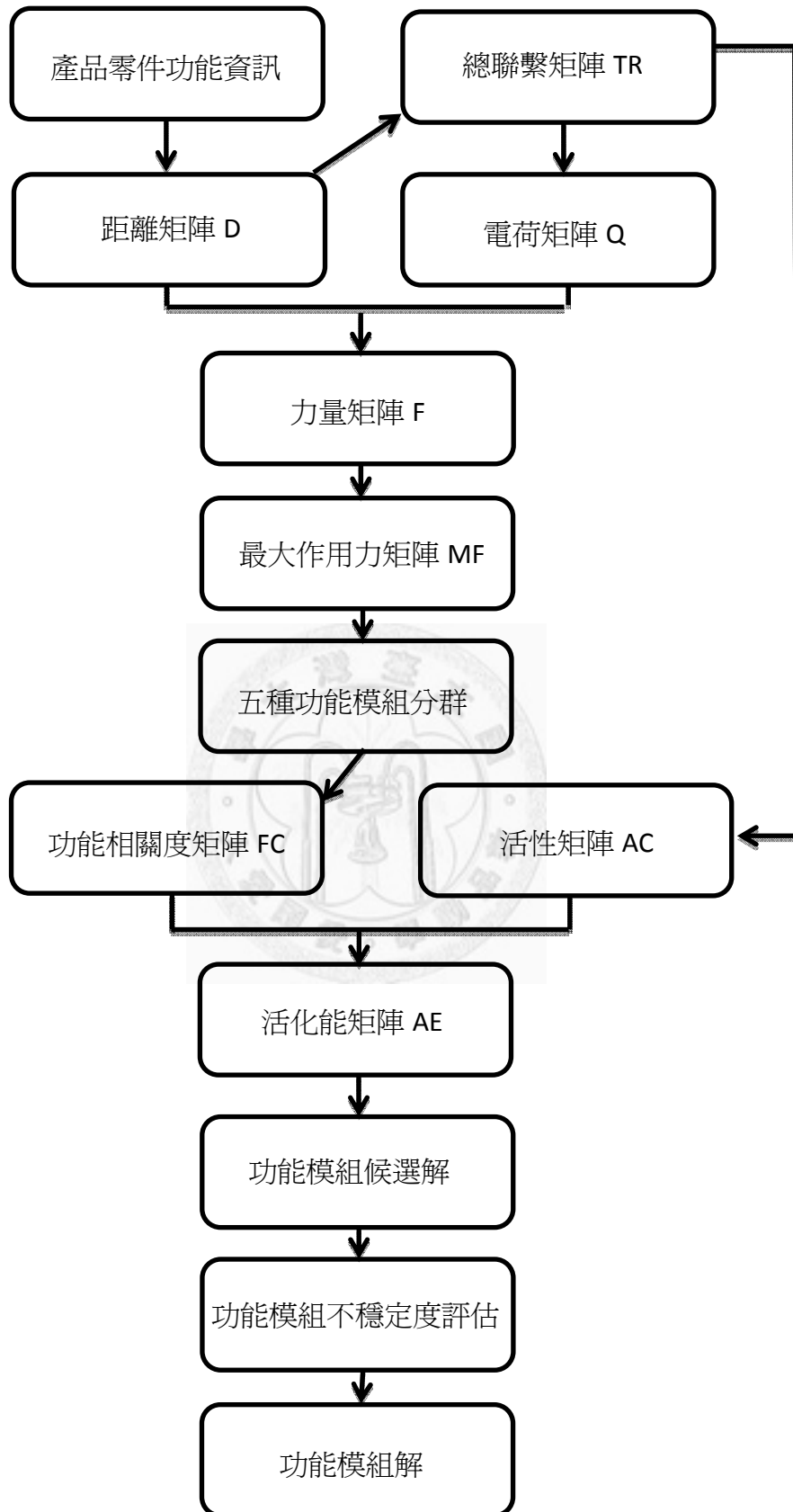


圖 3.4 功能模組產生流程圖

3.5 功能模組內的綠色模組

由 3.3 節至 3.4 節，我們利用了原子理論，以及利用化學反應合成的概念，產生了同時考量多種功能屬性的功能模組分群。在本節裡，我們將基於前面所生成的功能屬性模組範圍，進而產生功能屬性模組內的綠色屬性模組。在本論文裡，功能模組內部的綠色模組，其分群的依據是各個零件的綠色屬性，其中，綠色屬性較佳且相似的零件們傾向被分為同一群。

在本節裡，我們再次應用了前述之化學反應合成的概念，並重新定義化學反應分群方法裡的活性、活化能等概念，以產生功能模組內的綠色模組。經由對方法內部變數項定義上適度的修改，我們發現，利用化學反應概念的分群方法，可適用於在多種分群結果中尋找一個彼此相關度高的分群解，也適用於在個體具有多種屬性時，找尋屬性相似分群的解。

3.5.1 產品內零件的綠色屬性

欲將產品內的零件依其綠色屬性分群成綠色模組，首先必須要決定在本方法內欲考量的綠色屬性。透過我們對過去有關，Umeda 等人(2008)、Newcomb 等人(1996)、Yang 等人(2011)、Li 等人(2008)、Tchertchian 等人(2011)、Yu 等人(2011)之綠色設計相關文獻的回顧，我們決定考量以下五種綠色屬性：

1. 材料相似性(Material Similarity)：

材料相似性指的是兩個零件在材質上是否相似，兩者相似意味著產品在面臨生命週期終了時，其包含的零件之後續處理程序的類似性，相似者通常意味著可不須經由進一步拆卸分離手續，送至相同的後續處理場所。

2. 可回收性(Recyclability)：

指的是零件本身是否可回收，以循環再生原物料，而再生的原物料又可用以製造新產品。回收實質上是一種形變之後的再利用，例如切碎紙製品成紙漿原料、電弧爐融煉廢鋼成為鐵水等。產品內零件的回收可以減少垃圾廢棄及自然資源的消耗。

3. 可再利用性(Reusability)：

指的是零件本身是否可被再利用，其中又被分為直接式的再利用與間接式的再利用。直接再利用表示產品零件被當作原本的功能再使用，例如將報廢車輛上的堪用零件，為修復之用途，裝到現役同型的車輛上；間接再利用表示產品零件雖被再次使用，但並非以原始的零件功能使用，例如將寶特瓶裁切打孔後充作植栽用途。

4. 可保養維護性(Maintainability)：

指的是產品內的某些零件是否可透過實施保養維護，以延長其使用壽命。舉例來說，車輛引擎或是空壓機的汽缸是可保養的，它們可透過更換機油以延長其使用壽命。

5. 可升級性(Upgradability)：

指的是位於產品內的零件是否可以被更換升級。我們認為零件的更換主要是因為以下兩種狀況：第一種是產品內的某個零件損毀或耗盡導致產品失去功能，其他零件則正常，這時若能單獨更換掉該零件，則此產品可免去報廢和浪費，例如更換印表機內用完的墨水匣；第二種情形則是產品內的某個零件功能已經不足以應付現時用途，必須升級更新，例如將電腦內的記憶體或硬碟升級成容量更大、速度更快的型號。

3.5.2 綠色相似度矩陣(GS)

在 3.5.1 節我們列出了本方法裡欲考量的五種綠色屬性，本節我們定義一種矩陣，稱為綠色相似度矩陣 GS，此矩陣可以表達在一個功能模組內，任兩零件基於綠色屬性上的類似程度。

在實際的產品綠色模組設計過程裡，設計者對於不同領域的產品，有著對不同綠色屬性上的重要性，針對不同的產品，在綠色屬性上會有不同的模組化驅使力。我們認為，對於生命週期較短的產品，例如消費性電子產品，由於較少對此種產品內的零件實施保養維護，或是更換升級，實際使用上常常直接拋棄，購買新品，所以在綠色屬性的重視上便偏重材料相似性，以及可回收性；而對於生命週期較長的產品，例如中大型家電，內部的零件有時會面臨損壞更換的情況，於是在綠色屬性的重視上便偏重可保養維護性，以及可升級性。為了使本綠色設計方法能適用於不同領域之產品，我們必須將五種綠色屬性附之以權重：

$$\sum_n w_n = w_{\text{材料相似性}} + w_{\text{可回收性}} + w_{\text{可再利用性}} + w_{\text{可保養維護性}} + w_{\text{可升級性}} = 1$$

根據以上權重的定義，我們定義綠色相似度矩陣 GS 內的元素 GS_{ij} 如下：

$$GS_{ij} = w_n \times S_{ij}^n$$

其中， w_n 表示第 n 個綠色屬性的權重，而 S_{ij}^n 表示零件 i 與零件 j，在第 n 個綠色屬性上的相似程度。

由於各種綠色屬性的性質相異，則我們對於各種綠色屬性的 S_{ij}^n 定義如下：

1. 材料相似性(Material Similarity)：

$S_{ij} = 1$ ：零件 i 與零件 j 材質相似。

$S_{ij} = 0$ ：零件 i 與零件 j 材質不相似。

2. 可回收性(Recyclability)：

$S_{ij} = 1$ ：零件 i 與零件 j 皆可回收。

$S_{ij} = 0.7$ ：零件 i 與零件 j 皆不可回收。

$S_{ij} = 0$ ：零件 i 與零件 j 中一者可回收，另一者不可回收。

3. 可再利用性(Reusability)：

$S_{ij} = 1$ ：零件 i 與零件 j 皆可再利用。

$S_{ij} = 0.7$ ：零件 i 與零件 j 皆不可再利用。

$S_{ij} = 0$ ：零件 i 與零件 j 中一者可再利用，另一者則不可。

4. 可保養維護性(Maintainability)：

$S_{ij} = 1$ ：零件 i 與零件 j 皆需要保養維護，且週期相近。

$S_{ij} = 0.9$ ：零件 i 與零件 j 皆需要保養維護，但週期不相近。

$S_{ij} = 0.7$ ：零件 i 與零件 j 皆不需要保養維護。

$S_{ij} = 0$ ：零件 i 與零件 j 中一者需要保養維護，另一者則不用。

5. 可升級性(Upgradability)：

$S_{ij} = 1$ ：零件 i 與零件 j 皆可被升級。

$S_{ij} = 0.7$ ：零件 i 與零件 j 皆不可被升級。

$S_{ij} = 0$ ：零件 i 與零件 j 中一者可被升級，另一者則不可。

由以上對不同種類綠色屬性之 S_{ij}^n 的定義，我們可以定義出綠色相似度矩陣內的元素 GS_{ij} 如下：

$$\forall n, \exists S_{ij}^n > 0 : GS_{ij} = \sum_n w_n \times S_{ij}^n$$

$$\forall n, S_{ij}^n = 0 : GS_{ij} = 0.01$$

令 GS_{ij} 的範圍為 $[0, 1]$ ，我們對範例產品的綠色屬性權重假設如下所示：

表 3.13 綠色屬性權重

W 材料相似性	W 可回收性	W 可再利用性	W 可保養維護性	W 可升級性
0.22	0.2	0.14	0.2	0.24

並假設已知範例產品內零件的各項綠色屬性如下：

表 3.14 零件的綠色屬性

	材質	可回收	可再利用	可保養(頻率)	可升級
1	鋁	O	O	O(1 year)	O
2	毒性材料	X	X	X	X
3	熱塑塑料	O	X	X	X
4	熱塑塑料	O	X	X	X
5	玻璃	X	X	X	X
6	鐵	O	O	O(7 month)	O

則對於範例產品內的功能模組[1, 2, 3, 4, 6]，可產生綠色相似度矩陣 GS 如下：

表 3.15 綠色相似度矩陣 GS

GS	1	2	3	4	6
1	0	0.01	0.2	0.2	0.98
2	0.01	0	0.406	0.406	0.01
3	0.2	0.406	0	0.826	0.2
4	0.2	0.406	0.826	0	0.2
6	0.98	0.01	0.2	0.2	0

3.5.3 綠色程度矩陣 GD

在 3.5.2 節我們定義了兩兩零件對所構成的綠色相似度矩陣 GS，用以描述兩零件的綠色屬性相似度。在本節我們要定義的是一種有關單一零件本身綠色性質的矩陣，稱為綠色程度矩陣 GD，其意義在於紀錄“每個零件自己本身的綠色程度”。我們由 3.5.1 所介紹的綠色屬性來定義單一零件綠色程度的多寡，其中，材料相似性是針對任兩零件才有意義的屬性，由於本節是定義單一零件本身的綠色程度，於是材料相似性屬性在此忽略。我們定義一個零件的綠色程度如下：

$$\forall n, \exists De_i^n > 0 : GD_i = \frac{\sum_n w_n \times De_i^n}{\sum_n w_n}$$

$$\forall n, De_i^n = 0 : GD_i = 0.01$$

其中， w_n 是 3.5.2 節中對各種綠色屬性重要性的權重； De_i^n 是零件 i 在綠色屬性 n 上的綠色程度。各種綠色屬性的 De^n 值如下：

$De^n = 1$ ：可回收、可再利用、可保養維護、可升級。

$De^n = 0$ ：不可回收、不可再利用、不可保養維護、不可升級。

透過以上對綠色程度矩陣內元素 GD_i 的相關定義，我們可建立範例產品之功能模組[1, 2, 3, 4, 6]的綠色程度矩陣 GD 如下：

表 3.16 綠色程度矩陣 GD

GD	
1	1
2	0.01
3	0.256
4	0.256
6	1

3.5.4 應用化學反應活化能 AE 概念於綠色模組成

在本節裡我們再次利用類似 3.4 節產生化學反應所需活化能的概念，在功能模組的範圍內，進一步將零件合併形成綠色模組。首先，我們先定義綠色模組成併方法內的活化能 AE。此處活化能 AE 的性質如下，類似 3.4.3 節的原則：

1. 在一個功能模組內部，零件 i 與零件 j 化合成為一個綠色模組的難易程度，與它們發生化學反應所需的活化能有關；化學反應的活化能越低，則此兩零件越容易化合成為同一綠色模組，反之活化能越高，則不易化合為同一模組。
2. 零件 i 與零件 j 發生化學反應所需的活化能反比於零件 i 與零件綠色程度 GD 的幾何平均數 $\sqrt{GD_i \times GD_j}$ ，也反比於零件 i 與零件 j 的綠色相似度 GS_{ij} 。

由以上兩種性質，我們可以定義在功能模組內部，零件 i 與零件 j 產生化學反應形成綠色模組化合物所需的活化能如下：

$$AE_{ij} = \frac{1}{\sqrt{GD_i \times GD_j} \times GS_{ij}}$$

由以上定義，並利用 3.5.2 節的 GS 矩陣以及 3.5.3 節的 GD 矩陣，我們對範例產品所產生的活化能矩陣 AE 如下：

表 3.17 活化能矩陣 AE

AE	1	2	3	4	6
1	0	1000	9.87	9.87	1.02
2	1000	0	48.64	48.64	1000
3	9.87	48.64	0	4.72	9.87
4	9.87	48.64	4.72	0	9.87
6	1.02	1000	9.87	9.87	0

以功能模組[1, 2, 3, 4, 6]的活化能矩陣 AE 為例，首先我們將活化能較低的幾個化學反應依序列出如下：

AE=1.02：(零件 1)－(零件 6)

AE=4.72：(零件 3)－(零件 4)

AE=9.87：(零件 1)－(零件 3)、(零件 1)－(零件 4)、(零件 3)－(零件 6)、(零件 4)－(零件 6)

AE=48.64：(零件 2)－(零件 3)、(零件 2)－(零件 4)

列出各種化學反應所需要的活化能之後，我們由活化能最低的化學反應開始進行化合物合成。例如活化能最低的是零件 1 與零件 6，於是他們在功能模組[1, 2, 3, 4, 6]內形成綠色模組(1, 6)，可寫為[(1, 6), 2, 3, 4]。

接著我們繼續對活化能由低至高的化學反應程序，進行功能模組內的綠色模

組合成。活化能次低的化學合成反應是零件 3 與零件 4 的反應，所以零件 3 與零件 4 可形成綠色模組(3, 4)，可寫為[(1, 6), (3, 4), 2]。接著，我們透過執行 AE=9.87 與 AE=48.64 的化學反應，最後我們可以得到以下功能模組內的綠色模組化合物，[(1, 2, 3, 4, 6)]。

我們定義一綠色模組度評估式：

$$\text{Green Module Instability}(FMI) = \frac{\text{Mean}(AEs_{\text{Reacted}})}{N_{\text{parts in module}(s)}}$$

此評估式之意義為綠色模組內的不穩定程度。不穩定度之值越高，意味著綠色模組合併之時有著活化能偏高、綠色屬性相似度偏低的兩個零件被合併，導致模組的內聚度越低。計算出各個候選綠色模組解的綠色模組不穩度評估值之後，我們取其評估值最低的解作為綠色模組分群解。

進行化合程序時，各個階段的化學反應生成物（綠色模組解），以及各階段模組解的綠色模組度評估值，如下表所示：

表 3.18 綠色模組分群解與其綠色模組不穩定度

綠色模組分群解 1	綠色模組分群解 2	綠色模組分群解 3	全部合併
[(1, 6), 2, 3, 4]	[(1, 6), (3, 4), 2]	[(1, 3, 4, 6), 2]	[(1, 2, 3, 4, 6)]
GMI=0.510	GMI=0.718	GMI=1.301	GMI=3.213

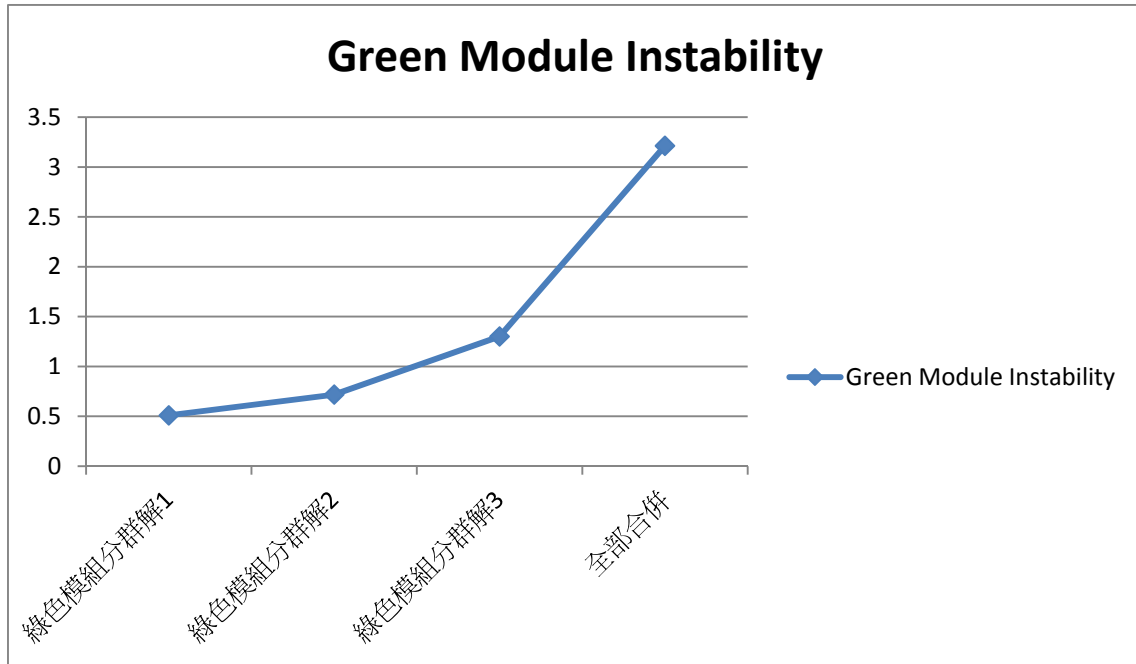


圖 3.5 綠色模組不穩定度評估值

由表 3.17 以及圖 3.5 所示，我們選擇功能模組度值最高的綠色模組分群解 1 為最終的綠色模組分群： $[(1, 6), 3, 4, 2]$

透過 3.4 節產生的功能模組分群，以及 3.5 節產生的功能模組內的綠色模組，我們最終可以把範例產品新的模組分群寫成以下： $[(1, 6), 3, 4, 2], [5]$ 。其中，中括號表示功能模組，小括號表示功能模組內可進一步合併的綠色模組。

3.5 節的綠色模組化方法流程，如圖 3.6。

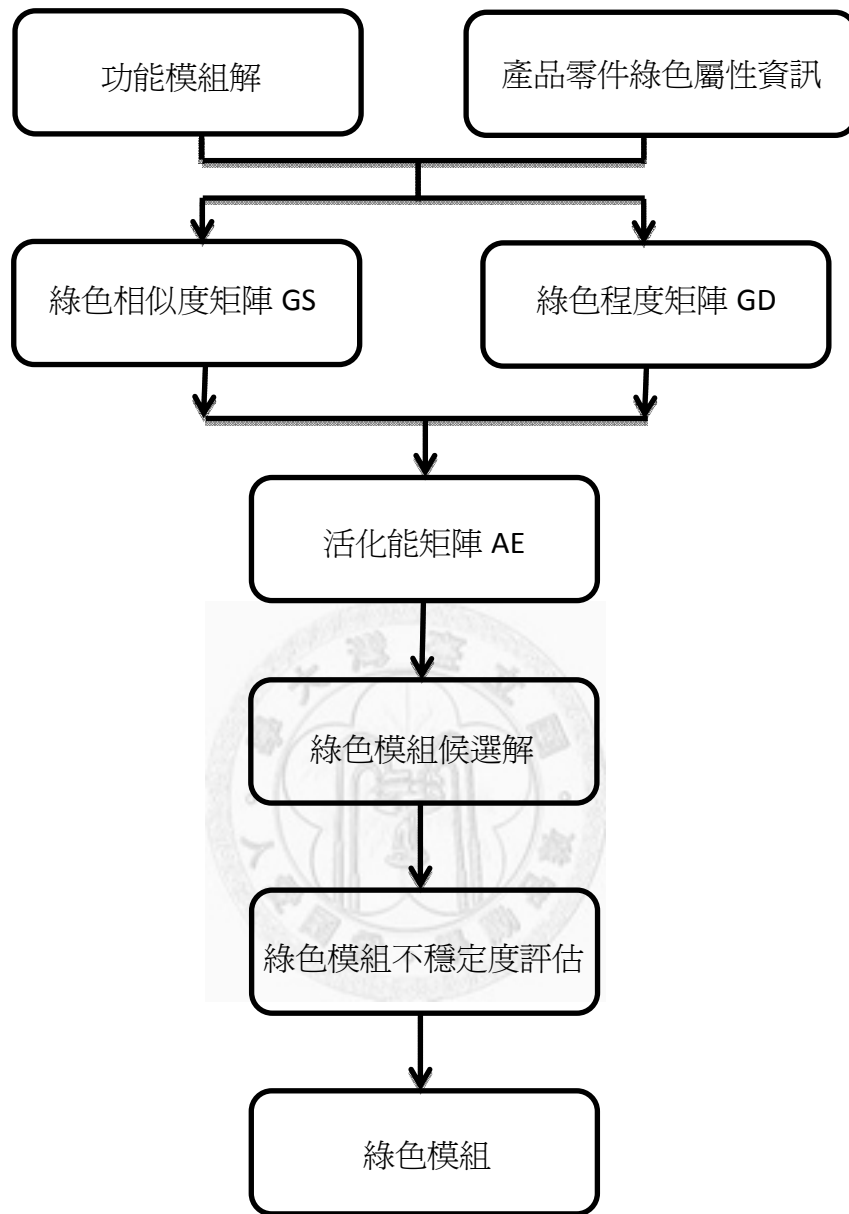


圖 3.6 綠色模組產生流程圖

第四章 案例研究

在第四章裡，我們將利用先前所發展的研究方法，導入兩個研究案例中，以產生利用我們發展出的研究方法所能得到的新穎、不受原始幾何配置拘束的綠色模組化設計。另外，與先前研究者的研究方法與模組化解做比較，以展示本論文之方法產生綠色模組化設計之成效。

4.1 案例一 液晶螢幕

在本節裡，我們將第三章裡所發展的研究方法，帶入李珣琮(2006)對某公司之某液晶螢幕產品的回收最佳化程序實證研究提供的產品零件資訊，以產生功能模組，以及功能模組內的綠色模組。由於原論文內各種零件的功能聯繫關係與綠色性質等資訊並不十分齊全，所以在本論文裡，對其零件的部分資訊採取合理假設，以供本論文之研究方法輸入資訊之用。

4.1.1 重新模組化設計的設計範圍

利用本論文的研究方法，對一產品產生模組分群解之前，需先利用 3.3.2 節提出的原則，將不適合列入重新模組化設計範圍的零件忽略。首先，我們先將液晶螢幕拆解報告內所列出的零件爆炸圖與零件表列出：

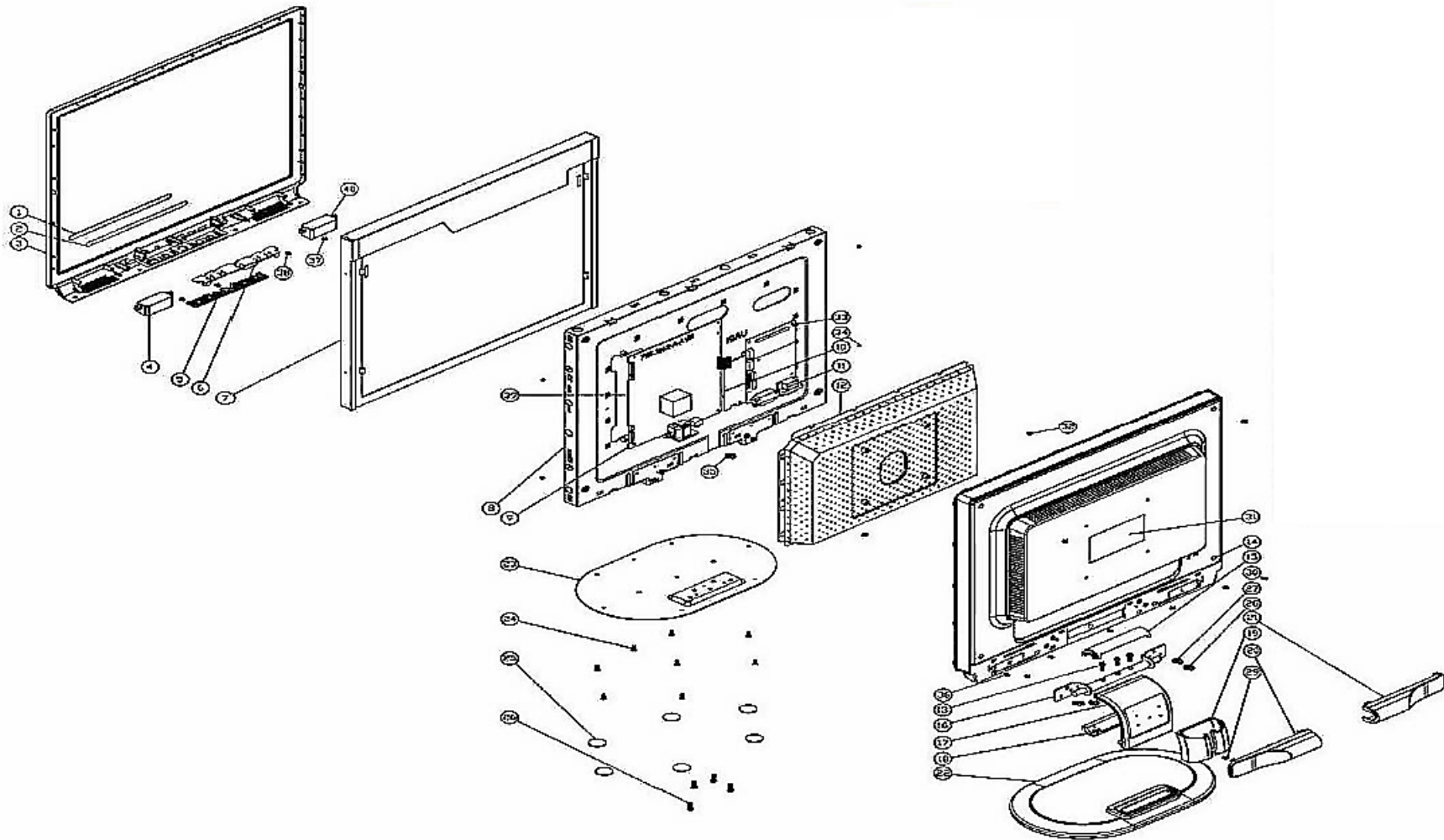


圖 4.1 液晶螢幕產品爆炸圖(李珣琮, 2006)

表 4.1 液晶螢幕零件表

1 透鏡飾條	11 主電路板	21 後右飾板	31 標籤
2 說明字條	12 保護蓋板	22 底盤	32 螺絲*2
3 邊框	13 螺絲*3	23 底座	33 螺絲*9
4 左喇叭	14 後蓋板	24 螺絲*4	34 螺絲*4
5 按鍵板	15 軸上蓋板	25 軟腳貼	35 螺絲
6 按鍵塑膜	16 絞鍊	26 螺絲*4	36 螺絲*5
7 面板	17 支撐臂	27 螺絲	37 螺絲*2
8 主框架	18 軸下蓋板	28 螺絲	38 螺絲*2
9 電源供應器	19 支架	29 螺絲	39 聚酯(PET)薄膜
10 音效電路板	20 後左飾板	30 螺絲*4	40 右喇叭



接著，我們去除不涉及主要功能，或是為標準零件等情形的零件，可以得到屬於本論文之方法範圍等 23 個主要零組件如下：

表 4.2 液晶螢幕零件表(簡化後)

3 邊框	11 主電路板	20 後左飾板
4 左喇叭	12 保護蓋板	21 後右飾板
5 按鍵板	14 後蓋板	22 底盤
6 按鍵塑膜	15 軸上蓋板	23 底座
7 面板	16 絞鍊	25 軟腳貼
8 主框架	17 支撐臂	39 聚酯(PET)薄膜
9 電源供應器	18 軸下蓋板	40 右喇叭
10 音效電路板	19 支架	

辨識出屬於本論文之設計方法範圍內的零組件後，我們將利用修改過的原子理論，配合 3.3.1 節內提到的五種功能聯繫關係，產生功能模組。

4.1.2 距離矩陣(D)

欲利用本論文之方法，針對產品內的零組件產生功能模組，首先要建立的是距離矩陣 D，其記錄了基於某種功能聯繫關係觀點上，零件彼此的聯繫資訊。以“訊號交換關係”為例，若兩零件在該功能屬性上有相關，則將距離設為 1；若兩零件在該功能屬性上無關，則設為 2。此產品基於訊號交換關係所產生的距離矩陣如表 4.3。

表 4.3 距離矩陣 D

D	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	25	39	40
3	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4		0	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5			0	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
6				0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
7					0	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
8						0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
9							0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
10								0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1
11									0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
12										0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
14											0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
15												0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
16													0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
17														0	2	2	2	2	2	2	2	2	2
18															0	2	2	2	2	2	2	2	2
19																0	2	2	2	2	2	2	2
20																	0	2	2	2	2	2	2
21																		0	2	2	2	2	2
22																			0	2	2	2	2
23																				0	2	2	2
25																					0	2	2
39																						0	2
40																							0

4.1.3 總聯繫矩陣(TR)

在 4.1.2 節我們對產品建立了距離矩陣 D，接著，我們可以由距離矩陣 D 產生總聯繫矩陣 TR，目的是在於挑選出在產品中具有與其他零件高度聯繫的零件。對於此產品，由 4.1.2 的距離矩陣 D 所產生的總聯繫矩陣 TR 如下表：

表 4.4 總聯繫矩陣 TR

	TR
3 邊框	0
4 左喇叭	1
5 按鍵板	2
6 按鍵塑膜	1
7 面板	1
8 主框架	0
9 電源供應器	0
10 音效電路板	2
11 主電路板	2
12 保護蓋板	0
14 後蓋板	0
15 軸上蓋板	0
16 絞鍊	0
17 支撐臂	0
18 軸下蓋板	0
19 支架	0
20 後左飾板	0
21 後右飾板	0
22 底盤	0
23 底座	0
25 軟腳貼	0
39 聚酯(PET)薄膜	0
40 右喇叭	1

4.1.4 電荷矩陣(Q)

由 4.1.3 節建立的總聯繫矩陣 TR，可以觀察出哪些零件在訊號交換功能聯繫關係上，有較高的總聯繫度，另一些則否。透過總聯繫矩陣 TR，若我們將 5 按鍵板、10 音效電路板以及 11 主電路板當作帶正電的原子核，其他的零組件則當作是帶負電的電子，則可以產生訊號交換功能聯繫關係的電荷矩陣 Q 如下：

表 4.5 電荷矩陣 Q

	Q
3 邊框	-1
4 左喇叭	-1
5 按鍵板	+2
6 按鍵塑膜	-1
7 面板	-1
8 主框架	-1
9 電源供應器	-1
10 音效電路板	+2
11 主電路板	+2
12 保護蓋板	-1
14 後蓋板	-1
15 軸上蓋板	-1
16 絞鍊	-1
17 支撐臂	-1
18 軸下蓋板	-1
19 支架	-1
20 後左飾板	-1
21 後右飾板	-1
22 底盤	-1
23 底座	-1
25 軟腳貼	-1
39 聚酯(PET)薄膜	-1
40 右喇叭	-1

4.1.5 力量矩陣(F)

由 4.1.2 節的距離矩陣 D 以及 4.1.4 節的電荷矩陣 Q，我們可以帶入 3.3 節修正後的庫倫力公式：

$$F_{ij} = -\frac{kQ_iQ_j}{D_{i,j}^2}$$

透過修正後的庫倫力公式一一計算產品內零組件兩兩的吸引力後，可產生力量矩陣 F，如表 4.6。

其中，力量矩陣 F 內吸引力為正值表示互相吸引，是帶正電的原子核零件與帶負電的電子零件所造成的；而造成負值的吸引力則表示排斥，是由於兩個帶正電的原子核零件，或是兩個帶負電的電子造成的排斥。透過力量矩陣 F 的計算，我們已將產品內的零組件模擬成原子核與電子，並有互相吸引和排斥的行為。

表 4.6 力量矩陣 F

F	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	25	39	40
3	0	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	1.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
4	-0.25	0	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	4	1.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
5	0.5	0.5	0	2	0.5	0.5	0.5	-2	-12	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
6	-0.25	-0.25	2	0	-0.25	-0.25	-0.25	1	1.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
7	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	0	-0.25	-0.25	1	6	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
8	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	0	-0.25	1	1.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
9	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	0	1	1.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
10	1	4	-2	1	1	1	1	0	-6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4
11	1.5	1.5	-12	1.5	6	1.5	1.5	-6	0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
12	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	1.5	0	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
14	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	1.5	-0.25	0	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
15	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	1.5	-0.25	-0.25	0	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
16	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	1.5	-0.25	-0.25	-0.25	0	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
17	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	1.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
18	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	1.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
19	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	1.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
20	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	1.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
21	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	1.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
22	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	1.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
23	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	1.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0	-0.25	-0.25	-0.25
25	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	1.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0	-0.25
39	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	1.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0
40	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	4	1.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0

4.1.6 最大作用力矩陣(MF)

本節將產生的最大作用力矩陣 MF，是產品內零組件產生功能模組的合併依據。

根據 4.1.5 節所產生的力量矩陣 F，此產品的最大作用力矩陣 MF 如下：

表 4.7 最大作用力矩陣 MF

	MF
3 邊框	1.5
4 左喇叭	4
5 按鍵板	2
6 按鍵塑膜	2
7 面板	6
8 主框架	1.5
9 電源供應器	1.5
10 音效電路板	4
11 主電路板	6
12 保護蓋板	1.5
14 後蓋板	1.5
15 軸上蓋板	1.5
16 絞鍊	1.5
17 支撐臂	1.5
18 軸下蓋板	1.5
19 支架	1.5
20 後左飾板	1.5
21 後右飾板	1.5
22 底盤	1.5
23 底座	1.5
25 軟腳貼	1.5
39 聚酯(PET)薄膜	1.5
40 右喇叭	4

產生最大作用力矩陣 MF 後，接著要計算的是原子核所能提供的最小吸引力，

在 4.1.4 節選擇的帶最小正電的原子核帶電為+2，所以原子核所能提供的最小吸引力為 $F_{min} = -\frac{1 \times (+2) \times (-1)}{1^2} = 2$ ，最大作用力 MF 小於此最小吸引力的零組件，被當作是游離電子，不分入任何模組裡。

將 MF 矩陣內具有相同最大吸引力，且其最大吸引力又大於原子核所能提供的最小吸引力的零件，合併為基於訊號傳遞功能關係上的模組。例如 $MF_4=MF_{10}=MF_{40}=4$ 、 $MF_5=MF_6=2$ 、 $MF_7=MF_{11}=6$ ，則可以合併成[4, 10, 40]、[5, 6]、[7, 11]等三個基於訊號傳遞功能關係上的模組。至此，可以將基於訊號傳遞觀點上的功能模組寫成如下：[4, 10, 40]、[5, 6]、[7, 11]、[3]、[8]、[9]、[12]、[14]、[15]、[16]、[17]、[18]、[19]、[20]、[21]、[22]、[23]、[25]、[39]。

4.1.7 應用共價鍵概念形成分子功能模組

在 4.1.6 節我們得到了基於訊號傳遞功能關係的功能模組，但雖然不同的原子核分別形成了不同的模組，但其實這些功能模組的某些原子核卻是在訊號傳遞觀點上有關聯的。這時候便適合將原子核彼此在訊號傳遞觀點上有關聯的模組，合併為一個分子功能模組，其狀態就像分子內共用電子的兩顆原子一樣。

舉例來說，[5, 6]、[7, 11]兩個模組的原子核零件，5 按鍵板和 11 主電路板，由距離矩陣可看出他們彼此有訊號傳遞關係上的聯繫，所以可將此二模組合併，成為[5, 6, 7, 11]。至此，最後的基於訊號傳遞觀點上的功能模組如下：[4, 10, 40]、[5, 6, 7, 11]、[3]、[8]、[9]、[12]、[14]、[15]、[16]、[17]、[18]、[19]、[20]、[21]、[22]、[23]、[25]、[39]。

4.1.8 功能相關度矩陣(FC)

為了利用化學反應活化能的觀念，合併不同功能聯繫關係所形成的功能模組分群解，產生最終的功能模組分群解，首先，須先建立功能相關度矩陣 FC。經由如同 4.1.2 至 4.1.7 節的做法，利用原子理論產生五種功能聯繫關係觀點上的功能模組，其結果如下表：

表 4.8 五種不同功能聯繫關係的功能模組分群

力回饋關係	能量傳遞關係	訊號交換關係	共組功能關係	其他關係
[3,7,8,12,14]	[4,7,9,10,11,40]	[4,10,40]	[15,16,17,18,19,22]	無模組形成
[16,17,19,22]	[3]	[5,6,7,11]	[3]	
[4]	[5]	[3]	[4]	
[5]	[6]	[8]	[5]	
[6]	[8]	[9]	[6]	
[9]	[12]	[12]	[7]	
[10]	[14]	[14]	[8]	
[11]	[15]	[15]	[9]	
[15]	[16]	[16]	[10]	
[18]	[17]	[17]	[11]	
[20]	[18]	[18]	[12]	
[21]	[19]	[19]	[14]	
[23]	[20]	[20]	[20]	
[25]	[21]	[21]	[21]	
[39]	[22]	[22]	[23]	
[40]	[23]	[23]	[25]	
	[25]	[25]	[39]	
	[39]	[39]	[40]	

列出所有不同功能聯繫關係觀點上的模組分群解後，我們可以建立功能相關度矩陣。我們對此液晶螢幕產品假設的功能聯繫關係權重如下表：

表 4.9 功能關係權重

W 力回饋關係	W 能量傳遞關係	W 訊號交換關係	W 共組功能關係	W 其他關係
0.20	0.21	0.22	0.23	0.14

由以上列出的各種功能聯繫關係分群結果，以及各種功能聯繫關係的權重，可建立功能相關度矩陣，如表 4.10。

4.1.9 零件的化學活性(AC)

由 3.4.2 節提到的化學活性定義 $AC_i = \frac{\sum_k TR_i^k}{k \times (N-1)}$ ，其中，由於我們考量的功能聯繫關係個數為 5 種，所以 $k=5$ ；而零組件數量為 23，所以 $N=23$ 。如此可產生化學活性 AC 矩陣如表 4.11。

表 4.10 功能相關度矩陣 FC

FC	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	25	39	40
3	0	0.01	0.01	0.01	0.2	0.2	0.01	0.01	0.01	0.2	0.2	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
4		0	0.01	0.01	0.21	0.01	0.21	0.43	0.21	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.43
5			0	0.22	0.22	0.01	0.01	0.01	0.22	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
6				0	0.22	0.01	0.01	0.01	0.22	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
7					0	0.2	0.21	0.21	0.21	0.2	0.2	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.21
8						0	0.01	0.01	0.01	0.2	0.2	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
9							0	0.21	0.21	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.21
10								0	0.21	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.43
11									0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.21
12										0	0.2	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
14											0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
15												0	0.23	0.23	0.23	0.23	0.01	0.01	0.23	0.01	0.01	0.01	0.01
16													0	0.43	0.23	0.43	0.01	0.01	0.43	0.01	0.01	0.01	0.01
17														0	0.23	0.43	0.01	0.01	0.43	0.01	0.01	0.01	0.01
18															0	0.23	0.01	0.01	0.23	0.01	0.01	0.01	0.01
19																0	0.01	0.01	0.43	0.01	0.01	0.01	0.01
20																	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
21																		0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
22																			0	0.01	0.01	0.01	0.01
23																				0	0.01	0.01	0.01
25																					0	0.01	0.01
39																						0	0.01
40																							0

表 4.11 化學活性矩陣 AC

	AC
3 邊框	0.027273
4 左喇叭	0.027273
5 按鍵板	0.036364
6 按鍵塑膜	0.027273
7 面板	0.045455
8 主框架	0.036364
9 電源供應器	0.054545
10 音效電路板	0.045455
11 主電路板	0.036364
12 保護蓋板	0.018182
14 後蓋板	0.036364
15 軸上蓋板	0.018182
16 絞鍊	0.045455
17 支撐臂	0.054545
18 軸下蓋板	0.018182
19 支架	0.018182
20 後左飾板	0.0000909
21 後右飾板	0.0000909
22 底盤	0.036364
23 底座	0.027273
25 軟腳貼	0.009091
39 聚酯(PET)薄膜	0.009091
40 右喇叭	0.027273

4.1.10 應用化學反應活化能(AE)概念於功能模組成

在 4.1.8 節以及 4.1.9 節分別得到功能相關度矩陣 FC 與活性矩陣 AC 後，便可以帶入 3.3.4 節的活化能 AE 計算公式 $AE_{ij} = \frac{1}{\sqrt{AC_i \times AC_j \times FC_{ij}}}$ ，以計算零組件們兩兩產生化學反應所需的活化能。此液晶螢幕產品的活化能矩陣 AE 如表 4.12。

表 4.12 活化能矩陣 AE(1)

AE	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14
3	0	3667	3175	3667	142	159	2593	2840	3175	225	159
4		0	3175	3667	135	3175	123	66	151	4491	3175
5			0	144	112	2750	2245	2460	125	3889	2750
6				0	129	3175	2593	2840	144	4491	3175
7					0	123	96	105	117	174	123
8						0	2245	2460	2750	194	138
9							0	96	107	3175	2245
10								0	117	3479	2460
11									0	3889	2750
12										0	194
14											0

表 4.12 活化能矩陣 AE(2)

AE	15	16	17	18	19
3	4491	2840	2593	4491	4491
4	4491	2840	2593	4491	4491
5	3889	2460	2245	3889	3889
6	4491	2840	2593	4491	4491
7	3479	2200	2008	3479	3479
8	3889	2460	2245	3889	3889
9	3175	2008	1833	3175	3175
10	3479	2200	2008	3479	3479
11	3889	2460	2245	3889	3889
12	5500	3479	3175	5500	5500
14	3889	2460	2245	3889	3889
15	0	151	138	239	239
16		0	47	151	81
17			0	138	74
18				0	239
19					0

表 4.12 活化能矩陣 AE(3)

AE	20	21	22	23	25	39	40
3	63509	63509	3175	3667	6351	6351	3667
4	63509	63509	3175	3667	6351	6351	85
5	55000	55000	2750	3175	5500	5500	3175
6	63509	63509	3175	3667	6351	6351	3667
7	49193	49193	2460	2840	4919	4919	135
8	55000	55000	2750	3175	5500	5500	3175
9	44907	44907	2245	2593	4491	4491	123
10	49193	49193	2460	2840	4919	4919	66
11	55000	55000	2750	3175	5500	5500	151
12	77782	77782	3889	4491	7778	7778	4491
14	55000	55000	2750	3175	5500	5500	3175
15	77782	77782	169	4491	7778	7778	4491
16	49193	49193	57	2840	4919	4919	2840
17	44907	44907	52	2593	4491	4491	2593
18	77782	77782	169	4491	7778	7778	4491
19	77782	77782	90	4491	7778	7778	4491
20	0	1100000	55000	63509	110000	110000	63509
21		0	55000	63509	110000	110000	63509
22			0	3175	5500	5500	3175
23				0	6351	6351	3667
25					0	11000	6351
39						0	6351
40							0

透過活化能矩陣 AE，列出各種化學反應所需要的活化能之後，我們由活化能最低的化學反應開始進行化合物合成，直到全部的零件合併成為同一模組為止。經過一連串的化學反應之後，將每個階段產生的功能模組候選解一一記錄下來，總共有 15 個。接著，將每個功能模組候選解帶入 3.4.4 節定義的功能模組不穩定度評估式 $FMI = \frac{Mean(AEs_{Reacted})}{N_{parts\ in\ module(s)}}$ ，如表 4.13。

計算完每個功能模組候選解的功能模組不穩定度 FMI 值之後，我們選擇不穩定度最小的解 12，作為最後的功能模組分群解：[15, 16, 17, 18, 19, 22]、[3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 40]、[20]、[21]、[23]、[25]、[39]。每個功能模組候選解的功能模組不穩定值異同如圖 4.2。

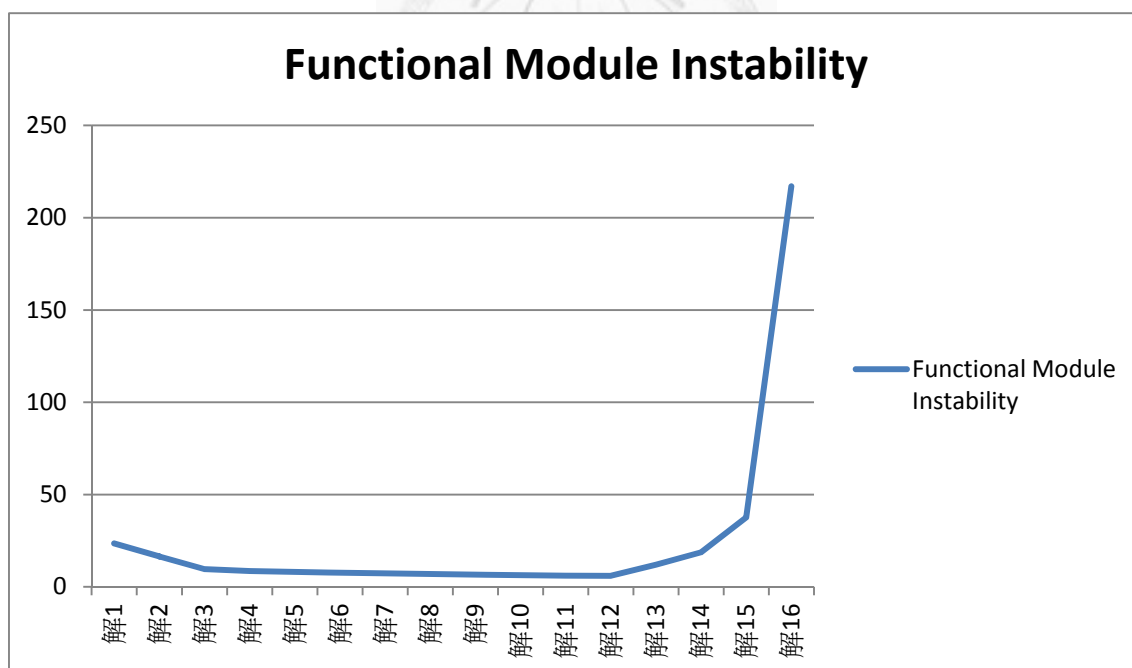


圖 4.2 功能模組不穩定度

表 4.13 功能模組候選解(1)

解 1	解 2	解 3	解 4	解 5	解 6	解 7
[16,17]	[16,17,22]	[16,17,22]	[16,17,19,22]	[16,17,19,22]	[16,17,19,22]	[16,17,19,22]
[3]	[3]	[4,10,40]	[4,10,40]	[4,7,9,10,40]	[4,7,9,10,11,40]	[4,5,7,9,10,11,40]
[4]	[4]	[3]	[3]	[3]	[3]	[3]
[5]	[5]	[5]	[5]	[5]	[5]	[6]
[6]	[6]	[6]	[6]	[6]	[6]	[8]
[7]	[7]	[7]	[7]	[8]	[8]	[12]
[8]	[8]	[8]	[8]	[11]	[12]	[14]
[9]	[9]	[9]	[9]	[12]	[14]	[15]
[10]	[10]	[11]	[11]	[14]	[15]	[18]
[11]	[11]	[12]	[12]	[15]	[18]	[20]
[12]	[12]	[14]	[14]	[18]	[20]	[21]
[14]	[14]	[15]	[15]	[20]	[21]	[23]
[15]	[15]	[18]	[18]	[21]	[23]	[25]
[18]	[18]	[19]	[20]	[23]	[25]	[39]
[19]	[19]	[20]	[21]	[25]	[39]	
[20]	[20]	[21]	[23]	[39]		
[21]	[21]	[23]	[25]			
[22]	[23]	[25]	[39]			
[23]	[25]	[39]				
[25]	[39]					
[39]	[40]					
[40]						
FMI=23.5	FMI=16.5	FMI=9.625	FMI=8.536	FMI=7.981	FMI=7.686	FMI=7.386

表 4.13 功能模組候選解(2)

解 8	解 9	解 10	解 11	解 12	解 13	解 14	解 15	解 16
[16,17,19,22]	[16,17,19,22]	[15,16,17,18,19,22]	[15,16,17,18,19,22]	[15,16,17,18,19,22]	[3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,14,15,16,17,18,19,22,40]	[3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,14,15,16,17,18,19,22,23,40]	[3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,14,15,16,17,18,19,22,23,25,39,40]	[3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,25,39,40]
[4,5,7,8,9,10,11,14,40]	[4,5,6,7,8,9,10,11,14,40]	[4,5,6,7,8,9,10,11,14,40]	[3,4,5,6,7,8,9,10,11,14,40]	[3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,14,40]	[20]	[20]	[20]	
[3]	[3]	[3]	[12]	[20]	[21]	[21]	[21]	
[6]	[12]	[12]	[20]	[21]	[23]	[25]		
[12]	[15]	[20]	[21]	[23]	[25]	[39]		
[15]	[18]	[21]	[23]	[25]	[39]			
[18]	[20]	[23]	[25]	[39]				
[20]	[21]	[25]	[39]					
[21]	[23]	[39]						
[23]	[25]							
[25]	[39]							
[39]								
FMI=6.892	FMI=6.656	FMI=6.255	FMI=6.063	FMI=5.989	FMI=11.979	FMI=18.709	FMI=37.657	FMI=217.058

4.1.11 綠色相似度矩陣(GS)

由 4.1.1 節至 4.1.10 節，我們順利地利用改良過後的原子理論，以及化學反應活化能的觀念，對此液晶螢幕產品產生了考量多種功能聯繫關係的功能模組。產生了功能模組之後，接著我們要利用功能模組之內綠色屬性的性質，帶入 3.5.2 節至 3.5.4 節的方法，利用化學反應活化能的概念，找出功能模組內適合被進一步合併的零件，產生綠色模組。

為了利用化學反應活化能的概念，找出功能模組內的綠色模組，首先要對功能模組建立綠色相似度矩陣 GS。我們先將液晶螢幕產品內，零組件的各項綠色屬性列出，如表 4.15。

有了液晶螢幕產品內零組件的各項綠色屬性資訊後，便可以利用這些資訊，配合對各種綠色屬性設定的權重，建立綠色相似度矩陣 GS。對此液晶螢幕產品，我們設定的綠色屬性權重如下表：

表 4.14 液晶螢幕的綠色屬性權重

W 材料相似性	W 可回收性	W 可再利用性	W 可保養維護性	W 可升級性
0.22	0.18	0.22	0.2	0.18

表 4.15 液晶螢幕產品的零組件綠色屬性

	材料	可回收	可再利用	可保養維護	可升級
3 邊框	塑膠	可	不可	不可	不可
4 左喇叭	電子廢棄物	不可	可	不可	可
5 按鍵板	電子廢棄物	不可	可	可	可
6 按鍵塑膠	塑膠	可	不可	可	可
7 面板	電子廢棄物	不可	可	不可	可
8 主框架	塑膠	可	不可	不可	不可
9 電源供應器	電子廢棄物	不可	可	不可	可
10 音效電路板	電子廢棄物	不可	可	不可	可
11 主電路板	電子廢棄物	不可	可	不可	可
12 保護蓋板	鐵	可	可	不可	不可
14 後蓋板	塑膠	可	不可	不可	不可
15 軸上蓋板	塑膠	可	不可	不可	可
16 絞鍊	鐵	可	可	可	可
17 支撐臂	塑膠	可	不可	不可	可
18 軸下蓋板	塑膠	可	不可	不可	可
19 支架	鐵	可	可	不可	可
20 後左飾板	塑膠	可	不可	不可	可
21 後右飾板	塑膠	可	不可	不可	可
22 底盤	塑膠	可	不可	不可	可
23 底座	鐵	可	不可	不可	可
25 軟腳貼	塑膠	可	不可	不可	不可
39 聚酯(PET)薄膜	塑膠類	可	不可	不可	不可
40 右喇叭	電子廢棄物	不可	可	不可	可

基於以上的綠色屬性權重和零組件綠色屬性資訊，我們可以對液晶螢幕產品內的功能模組[3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 40]建立綠色相似度矩陣 GS，如下表：

表 4.16 功能模組[3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 40]的綠色相似度矩陣 GS

GS	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	40
3	0	0.14	0.01	0.554	0.14	0.82	0.14	0.14	0.14	0.446	0.82	0.14
4		0	0.746	0.18	0.886	0.14	0.886	0.886	0.886	0.36	0.14	0.886
5			0	0.38	0.746	0.01	0.746	0.746	0.746	0.22	0.01	0.746
6				0	0.18	0.554	0.18	0.18	0.18	0.18	0.554	0.18
7					0	0.14	0.886	0.886	0.886	0.36	0.14	0.886
8						0	0.14	0.14	0.14	0.446	0.82	0.14
9							0	0.886	0.886	0.36	0.14	0.886
10								0	0.886	0.36	0.14	0.886
11									0	0.36	0.14	0.886
12										0	0.446	0.36
14											0	0.14
40												0

4.1.12 綠色程度矩陣(GD)

透過 3.5.3 節對綠色程度矩陣 GD 內元素的定義，我們可建立液晶螢幕產品之功能模組[3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 40]的綠色程度矩陣 GD 如下：

表 4.17 功能模組[3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 40]的綠色矩陣 GD

	GD
3 邊框	0.230769
4 左喇叭	0.512821
5 按鍵板	0.769231
6 按鍵塑膜	0.717949
7 面板	0.512821
8 主框架	0.230769
9 電源供應器	0.512821
10 音效電路板	0.512821
11 主電路板	0.512821
12 保護蓋板	0.512821
14 後蓋板	0.230769
40 右喇叭	0.512821

4.1.13 應用化學反應活化能(AE)概念於綠色模組成

得到 4.1.11 節的綠色相似度矩陣 GS，以及 4.1.12 節的綠色程度矩陣 GD 之後，我們便可以將它們帶入 3.5.4 節的活化能公式 $AE_{ij} = \frac{1}{\sqrt{GD_i \times GD_j \times GS_{ij}}}$ ，以計算功能模組 [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 40] 內，零組件們兩兩產生化學反應所需的活化能。此功能模組的活化能矩陣 AE 如表 4.19。

透過活化能矩陣 AE，列出各種化學反應所需要的活化能之後，我們由活化能最低的化學反應開始進行化合物合成，直到全部的零件合併成為同一模組為止。經過一連串的化學反應之後，將每個階段產生的功能模組候選解一一記錄下來，總共有 4 個。接著，將每個綠色模組分群候選解帶入 3.5.4 節定義的綠色模組不穩定度評估式 $GMI = \frac{Mean(AES_{Reacted})}{N_{parts\ in\ module(s)}}$ ，如表 4.18。

計算完每個綠色模組分群候選解的綠色模組不穩定度 GMI 值之後，我們選擇不穩定度最小的解 4，作為最後的功能模組分群解：[[3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 40]]。每個綠色模組候選解的綠色模組不穩定值異同如圖 4.3。

表 4.18 功能模組 [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 40] 的綠色模組分群候選解

解 1	[(4, 5, 7, 9, 10, 11, 40), 3, 6, 8, 12, 14]	GMI=0.3049
解 2	[(4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 40), 3, 8, 12, 14]	GMI=0.2919
解 3	[(3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 14, 40), 12]	GMI=0.2695
解 4	[(3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 40)]	GMI=0.2657

表 4.19 功能模組[3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 40]的活化能矩陣

AE	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	40
3	0	20.76	237.35	4.43	20.76	5.28	20.76	20.76	20.76	6.52	5.28	20.76
4		0	2.13	9.16	2.20	20.76	2.20	2.20	2.20	5.42	20.76	2.20
5			0	3.54	2.13	237.35	2.13	2.13	2.13	7.24	237.35	2.13
6				0	9.16	4.43	9.16	9.16	9.16	9.16	4.43	9.16
7					0	20.76	2.20	2.20	2.20	5.42	20.76	2.20
8						0	20.76	20.76	20.76	6.52	5.28	20.76
9							0	2.20	2.20	5.42	20.76	2.20
10								0	2.20	5.42	20.76	2.20
11									0	5.42	20.76	2.20
12										0	6.52	5.42
14											0	20.76
40												0

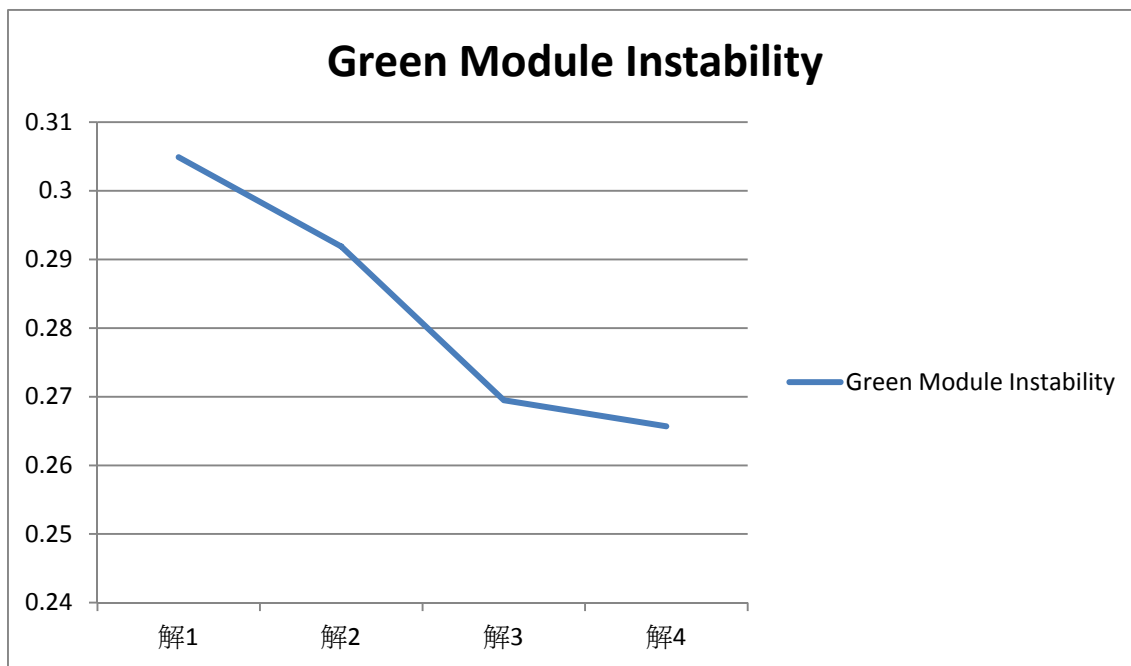


圖 4.3 功能模組[3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 40]的綠色模組不穩定度

利用如同以上對功能模組[3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 40]產生綠色模組分群的流程，我們可以對功能模組[15, 16, 17, 18, 19, 22]產生綠色模組分群的流程，我們列出其活化能矩陣、綠色模組分群候選解以及綠色模組不穩定度之圖列出，如表 4.20、表 4.21 以及圖 4.4。最後，可以得到綠色模組分群解[(16, 19), (15, 17, 18, 22)]。

表 4.20 功能模組[15, 16, 17, 18, 19, 22]的活化能矩陣

AE	15	16	17	18	19	22
15	0	4.088778	2.479024	2.479024	3.413967	2.479024
16		0	4.088778	4.088778	1.449584	4.088778
17			0	2.479024	3.413967	2.479024
18				0	3.413967	2.479024
19					0	3.413967
22						0

表 4.21 功能模組[15, 16, 17, 18, 19, 22]的綠色模組分群候選解

解 1	[(16, 19), 15, 17, 18, 22]	GMI=0.7250
解 2	[(16, 19), (15, 17, 18, 22)]	GMI=0.3703
解 3	[(15, 16, 17, 18, 19, 22)]	GMI=0.4100

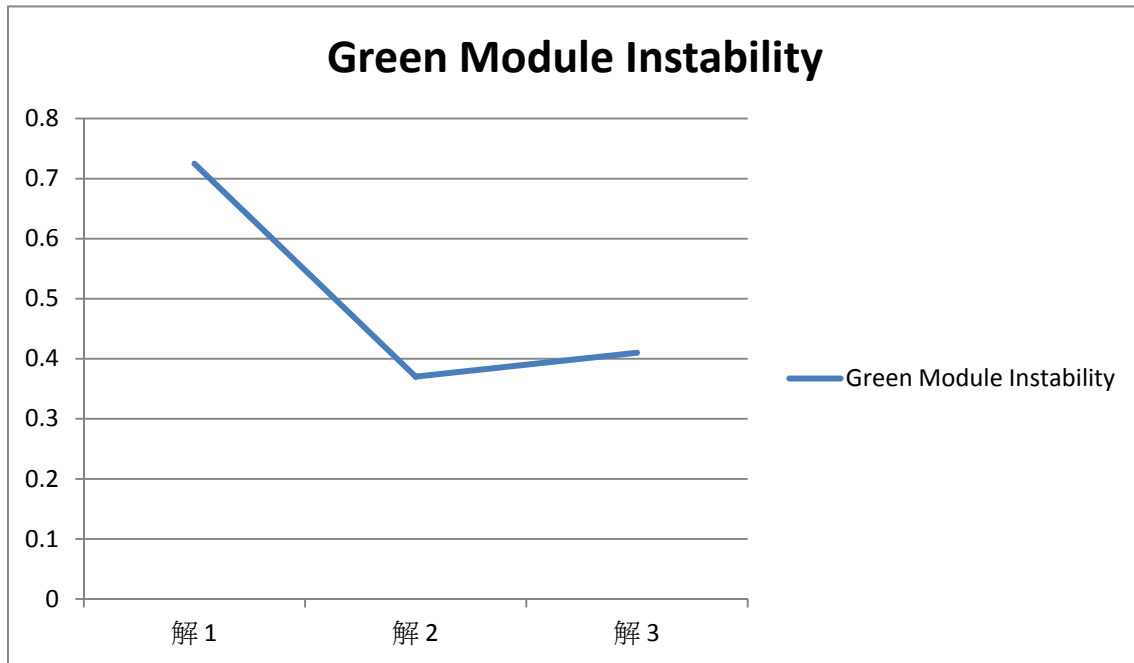


圖 4.4 功能模組[15, 16, 17, 18, 19, 22]的綠色模組不穩定度

我們順利地對液晶螢幕產品產生功能模組，並在功能模組內找出適合被進一步合併的綠色模組。最後，本方法產生的新一代模組配置可寫做如下：[(3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 40)]、[(16, 19), (15, 17, 18, 22)]、[20]、[21]、[23]、[25]、[39]。

4.1.14 討論

對於此液晶螢幕產品案例，我們利用了 3.2.2 節的簡化規則，將諸如螺絲、標籤等非主要功能零件去除，使得設計者在重新設計時能夠減少設計上的拘束。接著，透過改良過後的原子理論，我們產生了考量了五種功能聯繫關係的功能模組。

在本論文裡，功能模組屬於範圍較大、同時包含較多零件的模組。而在本論文所提出的方法第一階段裡，先產生大的功能模組，可避免設計者執行重新設計時，為了符合綠色屬性的相似，產生出功能上不相關、難以實現、不符合現實情況的模組。

產生了功能模組之後，接著依據零組件的綠色屬性以找出適合被進一步合併的綠色模組。小括號代表功能模組內的綠色模組，中括號代表功能模組。除了設計下一代產品可依循功能模組以重新分群模組化零件之外，功能模組內的綠色模組還可以進一步的透過改變介面結合方式、將材質相同化、合併成一個零件等細節設計手段，使其相似度最大化，達到產品經由重新模組化設計之後，在壽命終了時的綠色表現最佳化目的。以模組[(16, 19), (15, 17, 18, 22)]來說，零件 16 與零件 19，由於綠色屬性相近，所以適合被進一步合併成同一零件。同理，零件 15、零件 17、零件 18 以及零件 22，也由於綠色屬性相近，所以可透過重新設計將之合併，減少整個產品的零組件數量。

對於模組[(3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 40)]來說，由於整個功能模組內的綠色屬性原本就具有高相似度，所以也建議透過重新設計，合併部分零件，減少整個產品的零組件數量。

4.2 案例二 檯燈

在本節裡，我們將第三章裡所發展的研究方法，帶入 Tseng 等人(2008)論文中，作為其方法實行對象的檯燈產品，以產生功能模組，以及功能模組內的綠色模組。由於 Tseng 等人之論文內，各種零件的功能聯繫關係與綠色性質等資訊並不十分齊全，所以在本論文裡，對其零件的部分資訊採取合理假設，以供本論文之研究方法輸入資訊之用。

4.2.1 重新模組化設計的設計範圍

同樣的如同先前所述，對此檯燈產品產生模組分群解之前，需先利用 3.3.2 節提出的原則，將不適合列入重新模組化設計範圍的零件忽略。首先，我們先將此檯燈內的零件爆炸圖與零件表列出，如圖 4.5 以及表 4.22。

接著，我們依照 3.2.2 節所提及的簡化原則，去除不涉及主要功能，或是為標準零件等情形的零件，可以得到屬於本論文之方法範圍等 11 個主要零組件，如表 4.23。

辨識出屬於本論文之設計方法範圍內的零組件後，接著我們將利用修改過的原子理論，配合 3.3.1 節內提到的五種功能聯繫關係，產生功能模組。

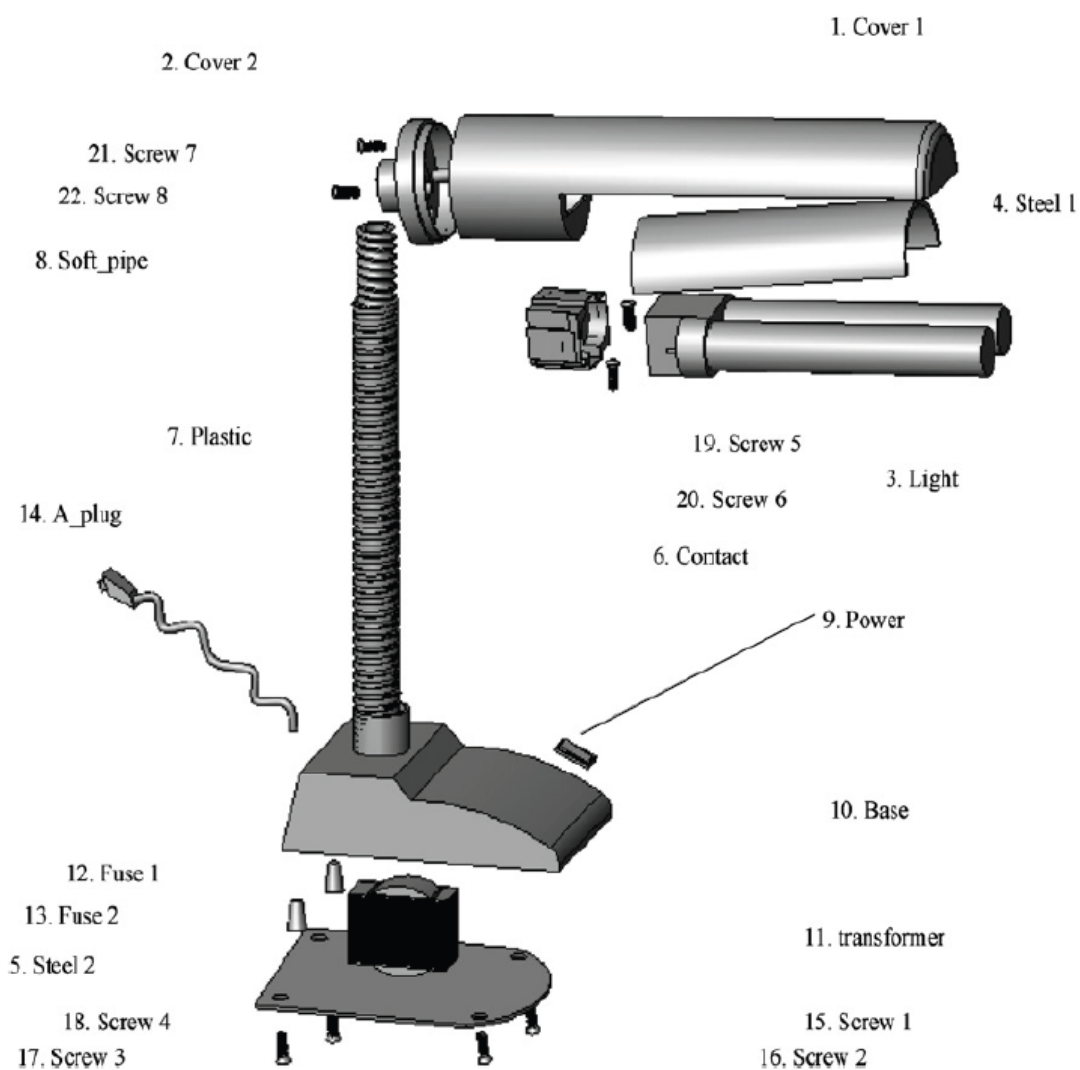


圖 4.5 檯燈產品爆炸圖(Tseng 等人, 2008)

表 4.22 檯燈產品零件表

1 Cover 1	6 Contact	11 Transformer	16 Screw 2	21 Screw 7
2 Cover 2	7 Plastic	12 Fuse 1	17 Screw 3	22 Screw 8
3 Light	8 Soft Pipe	13 Fuse 2	18 Screw 4	
4 Steel 1	9 Power	14 Plug	19 Screw 5	
5 Steel 2	10 Base	15 Screw 1	20 Screw 6	

表 4.23 檯燈產品零件表(簡化後)

1 Cover1	8 Soft Pipe
2 Cover2	9 Power
4 Steel1	10 Base
5 Steel2	11 Transformer
6 Contact	14 Plug
7 Plastic	

4.2.2 距離矩陣(D)

接著，我們對此檯燈產品產生距離矩陣 D。以“力回饋功能關係”為例，若兩零件在該功能屬性上有相關，則將距離設為 1；若兩零件在該功能屬性上無關，則設為 2。此產品基於力回饋功能關係所產生的距離矩陣如下表：

表 4.24 距離矩陣 D

	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	14
1	0	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	1	0	2	2	2	2	1	2	2	2	2
4	2	2	0	2	2	2	2	2	2	2	2
5	2	2	2	0	2	2	2	2	2	2	2
6	2	2	2	2	0	2	2	2	2	2	2
7	2	2	2	2	2	0	2	2	2	2	2
8	2	1	2	2	2	2	0	2	1	2	2
9	2	2	2	2	2	2	2	0	2	2	2
10	2	2	2	2	2	2	1	2	0	2	2
11	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	2
14	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0

4.2.3 總聯繫矩陣(TR)

同樣地，產生距離矩陣 D 之後，便可產生總聯繫矩陣 TR，挑選出在產品中具有與其他零件高度聯繫的零件，如下表：

表 4.25 總聯繫矩陣 TR

1 Cover 1	1
2 Cover 2	2
4 Steel 1	0
5 Steel 2	0
6 Contact	0
7 Plastic	0
8 Soft Pipe	2
9 Power	0
10 Base	1
11 Transformer	0
14 Plug	0

4.2.4 電荷矩陣(Q)

透過總聯繫矩陣 TR，若我們將 5 Cover 2 以及 8 Soft Pipe 當作帶正電的原子核，其他的零組件則當作是帶負電的電子，則可以產生力回饋功能聯繫關係的電荷矩陣 Q 如表 4.26。

表 4.26 電荷矩陣 Q

1 Cover 1	-1
2 Cover 2	+2
4 Steel 1	-1
5 Steel 2	-1
6 Contact	-1
7 Plastic	-1
8 Soft Pipe	+2
9 Power	-1
10 Base	-1
11 Transformer	-1
14 Plug	-1

4.2.5 力量矩陣(F)

由 4.2.2 節的距離矩陣 D 以及 4.2.4 節的電荷矩陣 Q，我們可以帶入 3.3 節修正後的庫倫力公式 $F_{ij} = -\frac{kQ_iQ_j}{D_{i,j}^2}$ ，透過修正後的庫倫力公式一一計算產品內零組件兩兩的吸引力後，可產生力量矩陣 F，如表 4.27。

表 4.27 力量矩陣 F

F	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	14
1	0	2	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
2	2	0	0.5	0.5	0.5	0.5	-8	0.5	0.5	0.5	0.5
4	-0.25	0.5	0	-0.25	-0.25	-0.25	1	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
5	-0.25	0.5	-0.25	0	-0.25	-0.25	1	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
6	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	0	-0.25	1	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
7	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	0	1	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
8	1	-8	1	1	1	1	0	1	4	1	1
9	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	0	-0.25	-0.25	-0.25
10	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	4	-0.25	0	-0.25	-0.25
11	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	-0.25	-0.25	0	-0.25
14	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	-0.25	-0.25	-0.25	0

4.2.6 最大作用力矩陣(MF)

根據 4.2.5 節所產生的力量矩陣 F，此檯燈產品的最大作用力矩陣 MF 如表 4.28。

產生最大作用力矩陣 MF 後，接著要計算的是原子核所能提供的最小吸引力。在 4.2.4 節選擇的帶最小正電的原子核帶電為+2，所以原子核所能提供的最小吸引力為 $F_{min} = -\frac{1 \times (+2) \times (-1)}{1^2} = 2$ ，最大作用力 MF 小於此最小吸引力的零組件，被當作是游離電子，不分入任何模組裡。

表 4.28 最大作用力矩陣 MF

1 Cover 1	2
2 Cover 2	2
4 Steel 1	1
5 Steel 2	1
6 Contact	1
7 Plastic	1
8 Soft Pipe	4
9 Power	1
10 Base	4
11 Transformer	1
14 Plug	1

將 MF 矩陣內具有相同最大吸引力，且其最大吸引力又大於原子核所能提供的最小吸引力的零件，合併為基於訊號傳遞功能關係上的模組。例如 $MF_1=MF_2=2$ 、 $MF_8=MF_{10}=4$ ，則可以合併成 [1, 2]、[8, 10] 等兩個基於力回饋功能關係上的模組。至此，可以將基於力回饋功能觀點上的功能模組寫成如下：[1, 2]、[8, 10]、[4]、[5]、[6]、[7]、[9]、[11]、[14]。

4.2.7 應用共價鍵概念形成分子功能模組

在 4.2.6 節我們得到了基於力回饋功能關係的功能模組，但其實某些功能模組的原子核卻是在力回饋功能觀點上有關聯的。這時候便適合將原子核彼此在力回饋功能觀點上有關聯的模組，合併為一個分子功能模組。

舉例來說，[1, 2]、[8, 10] 兩個模組的原子核零件，2 Cover 2 和 8 Soft Pipe，由距離矩陣可看出他們彼此有訊號傳遞關係上的聯繫，所以可將此二模組合併，成為 [1, 2, 8, 10]。至此，最後的基於力回饋功能觀點上的功能模組如下：[1, 2, 8, 10]、

[4]、[5]、[6]、[7]、[9]、[11]、[14]。

4.2.8 功能相關度矩陣(FC)

為了利用化學反應活化能的觀念，合併不同觀點所形成的功能模組分群解，產生最終的功能模組分群解，首先，須先建立功能相關度矩陣 FC。同樣地利用原子理論，經由如同 4.2.2 至 4.2.7 節的做法，可產生五種功能聯繫關係觀點上的功能模組，其結果如下表：

表 4.29 五種不同功能聯繫關係的功能模組分群

力回饋關係	能量傳遞關係	訊號交換關係	共組功能關係	其他關係
[1, 2, 8, 10]	[9, 11, 14]	無模組形成	[1, 2, 4, 6]	無模組形成
[4]	[1]		[5]	
[5]	[2]		[7]	
[6]	[4]		[8]	
[7]	[5]		[9]	
[9]	[6]		[10]	
[11]	[7]		[11]	
[14]	[8]		[14]	
	[10]			

列出所有不同功能聯繫關係觀點上的模組分群解後，我們可以建立功能相關度矩陣。我們對此液晶螢幕產品假設的功能聯繫關係權重如下表：

表 4.30 功能關係權重

W 力回饋關係	W 能量傳遞關係	W 訊號交換關係	W 共組功能關係	W 其他關係
0.22	0.23	0.2	0.25	0.1

由以上列出的各種功能聯繫關係分群結果，以及各種功能聯繫關係的權重，可建立功能相關度矩陣，如表 4.31。

表 4.31 功能相關度矩陣 FC

	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	14
1	0	0.47	0.25	0.01	0.25	0.01	0.22	0.01	0.22	0.01	0.01
2	0.47	0	0.25	0.01	0.25	0.01	0.22	0.01	0.22	0.01	0.01
4	0.25	0.25	0	0.01	0.25	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
5	0.01	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
6	0.25	0.25	0.25	0.01	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
7	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
8	0.22	0.22	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0.01	0.22	0.01	0.01
9	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0.01	0.23	0.23
10	0.22	0.22	0.01	0.01	0.01	0.01	0.22	0.01	0	0.01	0.01
11	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.23	0.01	0	0.23
14	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.23	0.01	0.23	0

4.2.9 零件的化學活性(AC)

由 3.4.2 節提到的化學活性定義 $AC_i = \frac{\sum_k TR_i^k}{k \times (N-1)}$ ，其中，由於我們考量的功能聯

繫關係個數為 5 種，所以 $k=5$ ；而零組件數量為 11，所以 $N=11$ 。如此可產生化學

活性矩陣 AC 如表 4.32。

表 4.32 化學活性矩陣 AC

	AC
1 Cover 1	0.08
2 Cover 2	0.06
4 Steel 1	0.02
5 Steel 2	0.02
6 Contact	0.02
7 Plastic	0.02
8 Soft Pipe	0.06
9 Power	0.04
10 Base	0.04
11 Transformer	0.02
14 Plug	0.02

4.2.10 應用化學反應活化能(AE)概念於功能模組成

在 4.2.8 節以及 4.2.9 節分別得到功能相關度矩陣 FC 與活性矩陣 AC 後，便可以帶入 3.3.4 節的活化能 AE 計算公式 $AE_{ij} = \frac{1}{\sqrt{AC_i \times AC_j \times FC_{ij}}}$ ，以計算零組件們兩兩產生化學反應所需的活化能。此檯燈產品的活化能矩陣 AE 如表 4.33。

表 4.33 活化能矩阵 AE

AE	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	14
1	0	30.71	100.00	2500.00	100.00	2500.00	65.61	1767.77	80.35	2500.00	2500.00
2		0	115.47	2886.75	115.47	2886.75	75.76	2041.24	92.78	2886.75	2886.75
4			0	5000.00	200.00	5000.00	2886.75	3535.53	3535.53	5000.00	5000.00
5				0	5000.00	5000.00	2886.75	3535.53	3535.53	5000.00	5000.00
6					0	5000.00	2886.75	3535.53	3535.53	5000.00	5000.00
7						0	2886.75	3535.53	3535.53	5000.00	5000.00
8							0	2041.24	92.78	2886.75	2886.75
9								0	2500.00	153.72	153.72
10									0	3535.53	3535.53
11										0	217.39
14											0

透過活化能矩陣 AE，列出各種化學反應所需要的活化能之後，我們由活化能最低的化學反應開始進行化合物合成，直到全部的零件合併成為同一模組為止。經過一連串的化學反應之後，將每個階段產生的功能模組候選解一一記錄下來，總共有 6 個。接著，將每個功能模組候選解帶入 3.4.4 節定義的功能模組不穩定度評估式 $FMI = \frac{Mean(AEs_{Reacted})}{N_{parts\ in\ module(s)}}$ ，如表 4.34 與圖 4.6。

表 4.34 功能模組候選解

解 1	解 2	解 3	解 4	解 5	解 6
[1, 2]	[1, 2, 8]	[1, 2, 8, 10]	[1, 2, 6, 8, 10]	[1, 2, 6, 8, 10]	[1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 14]
[4]	[4]	[4]	[5]	[9, 11, 14]	
[5]	[5]	[5]	[7]	[5]	
[6]	[6]	[6]	[9]	[7]	
[7]	[7]	[7]	[11]		
[8]	[9]	[9]	[14]		
[9]	[10]	[11]			
[10]	[11]	[14]			
[11]	[14]				
[14]					
FMI=15.355	FMI=16.053	FMI=14.723	FMI=12.556	FMI=10.859	FMI=27.862

計算完每個功能模組候選解的功能模組不穩定度 FMI 值之後，我們選擇不穩定度最小的解 5，作為最後的功能模組分群解：[1, 2, 4, 6, 8, 10]、[9, 11, 14]、[5]、[7]。

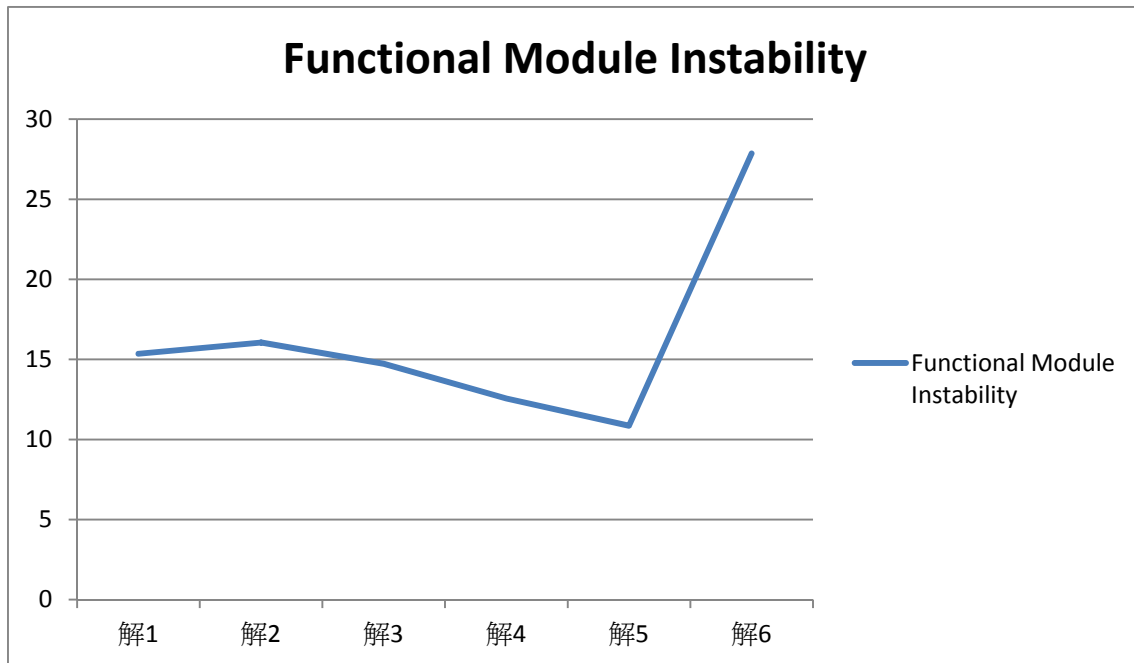


圖 4.6 功能模組不穩定度

4.2.11 綠色相似度矩陣(GS)

由 4.2.1 節至 4.2.10 節，我們對此檯燈產品產生了考量多種功能聯繫關係的功能模組。接著我們要利用功能模組之內綠色屬性的性質，以及化學反應活化能的概念，找出功能模組內適合被進一步合併的零件，產生綠色模組。

首先，我們必須對功能模組建立綠色相似度矩陣 GS。我們先將液晶螢幕產品內，零組件的各項綠色屬性列出，如表 4.35。

有了液晶螢幕產品內零組件的各項綠色屬性資訊後，便可以配合對各種綠色屬性設定的權重，建立綠色相似度矩陣 GS。對此檯燈產品，我們設定的綠色屬性權重如表 4.36。

表 4.35 檯燈產品的零組件綠色屬性

	材料	可回收	可再利用	可保養維護	可升級
1 Cover 1	塑膠	可	不可	不可	不可
2 Cover 2	塑膠	可	不可	不可	不可
4 Steel 1	鐵	可	不可	不可	不可
5 Steel 2	鐵	可	不可	不可	不可
6 Contact	塑膠	可	可	不可	不可
7 Plastic	塑膠	可	不可	不可	不可
8 Soft Pipe	鐵	可	可	不可	不可
9 Power	電子廢棄物	不可	不可	不可	可
10 Base	塑膠	可	不可	不可	不可
11 Transformer	電子廢棄物	不可	不可	不可	可
14 Plug	電子廢棄物	不可	不可	不可	不可

表 4.36 檯燈的綠色屬性權重

W 材料相似性	W 可回收性	W 可再利用性	W 可保養維護性	W 可升級性
0.23	0.2	0.17	0.2	0.2

基於以上的綠色屬性權重和零組件綠色屬性資訊，我們可以對液晶螢幕產品內的功能模組[1, 2, 4, 6, 8, 10]建立綠色相似度矩陣 GS，如表 4.37。

表 4.37 功能模組[1, 2, 4, 6, 8, 10]的綠色相似度矩陣 GS

GS	1	2	4	6	8	10
1	0	0.829	0.599	0.71	0.48	0.829
2		0	0.599	0.71	0.48	0.829
4			0	0.48	0.71	0.599
6				0	0.65	0.71
8					0	0.48
10						0

4.2.12 綠色程度矩陣(GD)

透過 3.5.3 節對綠色程度矩陣 GD 內元素的定義，我們可建立液晶螢幕產品之功能模組[1, 2, 4, 6, 8, 10]的綠色程度矩陣 GD 如下表：

表 4.38 綠色程度矩陣 GD

	GD
1 Cover 1	0.25974
2 Cover 2	0.25974
4 Steel 1	0.25974
6 Contact	0.480519
8 Soft Pipe	0.480519
10 Base	0.25974

4.2.13 應用化學反應活化能(AE)概念於綠色模組成

得到 4.2.11 節的綠色相似度矩陣 GS，以及 4.2.12 節的綠色程度矩陣 GD 之後，我們便可以將它們帶入 3.5.4 節的活化能公式 $AE_{ij} = \frac{1}{\sqrt{GD_i \times GD_j \times GS_{ij}}}$ ，以計算功能模組 [1, 2, 4, 6, 8, 10] 內，零組件們兩兩產生化學反應所需的活化能。此功能模組的活化能矩陣 AE 如表 4.39。

透過活化能矩陣 AE，列出各種化學反應所需要的活化能之後，我們由活化能最低的化學反應開始進行化合物合成，直到全部的零件合併成為同一模組為止。經過一連串的化學反應之後，將每個階段產生的功能模組候選解一一記錄下來，總共有 2 個。接著，將每個綠色模組分群候選解帶入 3.5.4 節定義的綠色模組不穩定度評估式 $GMI = \frac{Mean(AES_{Reacted})}{N_{parts \text{ in module}(s)}}$ ，如表 4.40。

表 4.39 功能模組 [1, 2, 4, 6, 8, 10] 的活化能矩陣 AE

AE	1	2	4	6	8	10
1	0	4.64	6.43	3.99	5.90	4.64
2		0	6.43	3.99	5.90	4.64
4			0	5.90	3.99	6.43
6				0	3.20	3.99
8					0	5.90
10						0

表 4.40 功能模組 [1, 2, 4, 6, 8, 10] 的綠色模組分群候選解

解 1	[1, 2, 4, (6, 8), 10]	GMI=1.601
解 2	[(1, 2, 4, 6, 8, 10)]	GMI=0.638

計算完每個綠色模組分群候選解的綠色模組不穩定度 GMI 值之後，我們選擇不穩定度最小的解 2，作為最後的功能模組分群解：[(1, 2, 4, 6, 8, 10)]。每個綠色模組候選解的綠色模組不穩定值異同如圖 4.7。

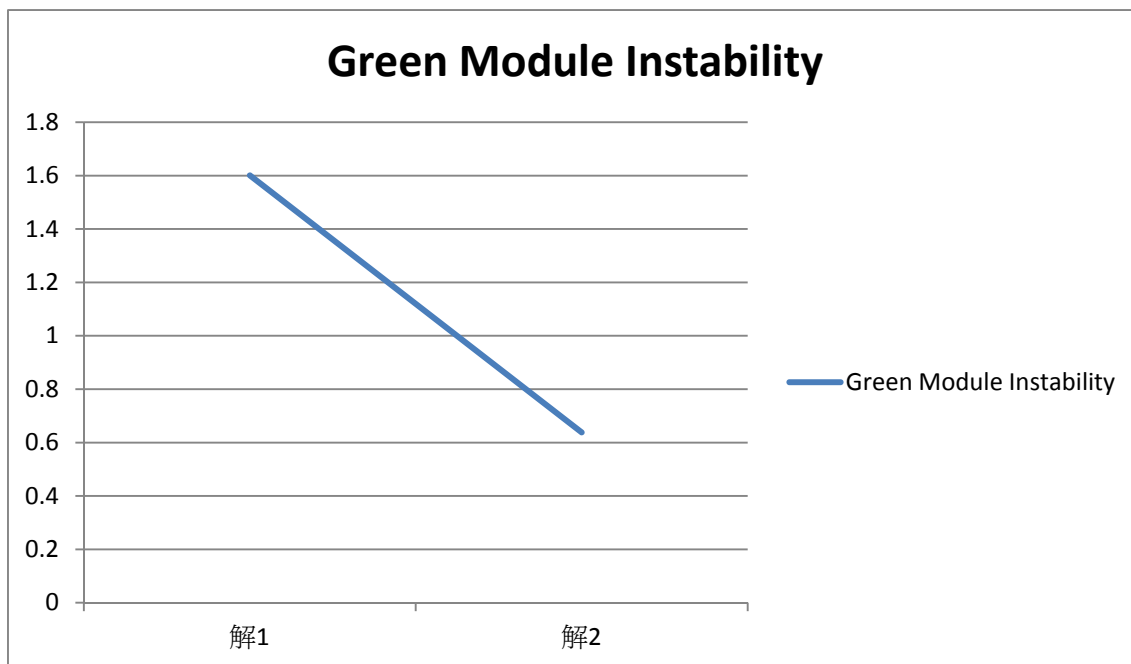


圖 4.7 功能模組[1, 2, 4, 6, 8, 10]的綠色模組不穩定度

利用如同以上對功能模組[1, 2, 4, 6, 8, 10]產生綠色模組分群的流程，我們可以對功能模組[9, 11, 14]產生綠色模組分群。茲將其活化能矩陣、綠色模組分群候選解以及綠色模組不穩定度之值列出，如表 4.41 以及表 4.42。最後，可以得到綠色模組分群解[(9, 11), 14]。

表 4.41 功能模組[9, 11, 14]的活化能矩陣 AE

AE	9	11	14
9	0	4.64	31.19
11		0	31.19
14			0

表 4.42 功能模組[9, 11, 14]的綠色模組分群候選解

解 1	[(9, 11), 14]	GMI=2.322
解 2	[(9, 11, 14)]	GMI=7.448

我們順利地對檯燈產品產生功能模組，並在功能模組內找出適合被進一步合併的綠色模組。最後，本方法產生的新一代模組配置可寫做如下：[(1, 2, 4, 6, 8, 10)]、[(9, 11), 14]、[5]、[7]。

4.2.14 討論

我們將以我們的分群結果與 Tseng 等人論文中產生的分群結果做比較。先將結果分列於下表：

表 4.43 模組分群結果比較

Tseng 等人(去除非主要零件後)	[1, 2, 4]、[5]、[7, 8, 9, 10]、[11, 14]
本論文	[(1, 2, 4, 6, 8, 10)]、[(9, 11), 14]、[5]、[7]

透過本論文之方法產生的模組分群結果，與 Tseng 等人論文中所產生的大致有交集，但略有不同。例如，零件 7 在本論文裡並未被分入任何模組內，而在 Tseng 等人論文裡，則與零件 8、零件 9 以及零件 10 分為一組。原因是在於零件 7 與其他零件的功能相關度並不高，所以利用我們的方法會傾向將之視為獨立零件；而 Tseng 等人論文考量的因素是接觸形式、結合形式以及使用工具等基於原始設計上的幾何關係，所以會將零件 7 與其他零件分為同一組。

另外，零件9的模組分群結果也與 Tseng 等人論文中所產生的結果有明顯差異。這是因為 Tseng 等人論文中所考量的皆為基於原始設計上的幾何關係，而非我們的方法所考量的五種功能關係。我們認為，若新設計的模組配置若僅基於原始設計上的幾何關係，則可能延續了原始設計裡尚具有改良空間的設計。以我們的方法，先依功能上的關係分群，再在功能模組的範圍找出適合進一步合併零件的綠色模組，是一種兼顧功能實現性與綠色表現的方法。

4.3 案例三 電子辭典

在本節裡，我們將第三章裡所發展的研究方法，帶入 Wang 等人(2010)論文中，作為其方法實行對象的電子辭典產品，以產生功能模組，以及功能模組內的綠色模組。由於 Wang 等人之論文內，各種零件的功能聯繫關係與綠色性質等資訊並十分齊全，所以在本論文裡，對其零件的部分資訊採取合理假設，以供本論文之研究方法輸入資訊之用。

4.3.1 重新模組化設計的設計範圍

同樣的如同先前所述，對此檯燈產品產生模組分群解之前，需先利用 3.3.2 節提出的原則，將不適合列入重新模組化設計範圍的零件忽略。首先，我們先將此檯燈內的零件爆炸圖與零件表列出，如圖 4.8 以及表 4.44。

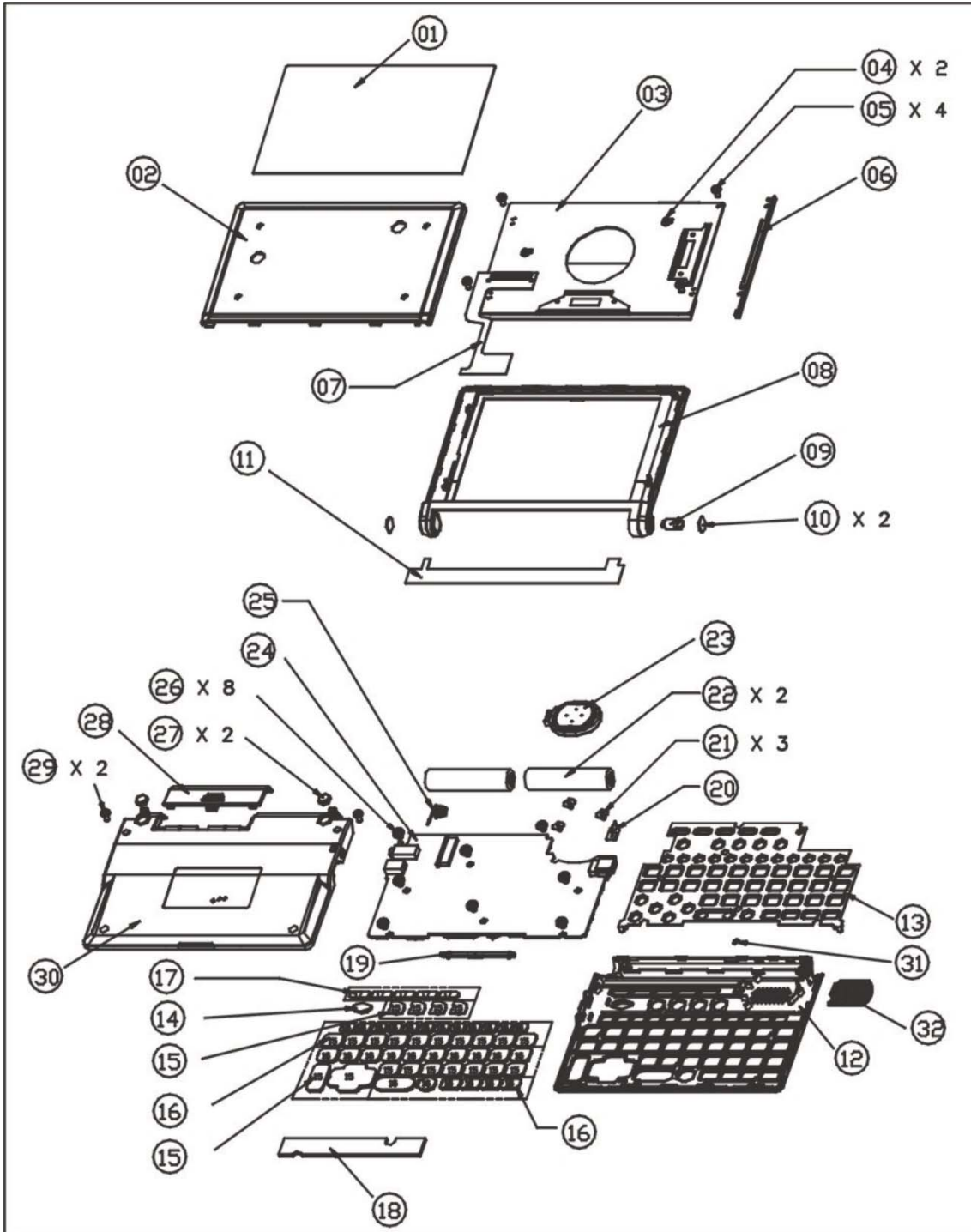


圖 4.8 電子辭典爆炸圖(Wang 等人, 2010)

接著，我們依照 3.2.2 節所提及的簡化原則，去除不涉及主要功能，或是為標準零件等情形的零件，可以得到屬於本論文之方法範圍等 26 個主要零組件，如表 4.45。

表 4.44 電子辭典產品零件表

1 BTDL-Coat	12 Keyboard Top Case	23 Speaker
2 Display Bottom Case	13 Rubber Sheet	24 Main PCB
3 Display	14 On/Off Key	25 Battery Connect (-)
4 Spring	15 Main2-Key	26 Screw
5 Screw	16 Main1-Key	27 Rubber Foot
6 Steel Plate	17 Fun-Key	28 Battery Door
7 FPCB	18 Steel Plate	29 Screw
8 Display Top Case	19 Door Knob	30 Keyboard Bottom Case
9 Hinge	20 Battery Connect(+)	31 Tape
10 Cover-TPDL	21 Screw	32 Speaker Net
11 Display Overlay	22 Battery	

表 4.45 電子辭典產品零件表(簡化後)

1 BTDL-Coat	12 Keyboard Top Case	23 Speaker
2 Display Bottom Case	13 Rubber Sheet	24 Main PCB
3 Display	14 On/Off Key	25 Battery Connect (-)
6 Steel Plate	15 Main2-Key	27 Rubber Foot
7 FPCB	16 Main1-Key	28 Battery Door
8 Display Top Case	17 Fun-Key	30 Keyboard Bottom Case
9 Hinge	18 Steel Plate	31 Tape
10 Cover-TPDL	19 Door Knob	32 Speaker Net
11 Display Overlay	20 Battery Connect(+)	

辨識出屬於本論文之設計方法範圍內的零組件後，接著我們將利用修改過的原子理論，配合 3.3.1 節內提到的五種功能聯繫關係，產生功能模組。

4.3.2 距離矩陣(D)

接著，我們對此檯燈產品產生距離矩陣 D。以“能量傳遞功能關係”為例，若兩零件在該功能屬性上有相關，則將距離設為 1；若兩零件在該功能屬性上無關，則設為 2。此產品基於力回饋功能關係所產生的距離矩陣如表 4.46。

4.3.3 總聯繫矩陣(TR)

在 4.3.2 節我們對產品建立了距離矩陣 D，接著，我們可以由距離矩陣 D 產生總聯繫矩陣 TR，目的是在於挑選出在產品中具有與其他零件高度聯繫的零件。對

於此產品，由 4.3.2 的距離矩陣 D 所產生的總聯繫矩陣 TR 如表 4.47。

4.3.4 電荷矩陣(Q)

由 4.3.3 節建立的總聯繫矩陣 TR，可以觀察出哪些零件在訊號交換功能聯繫關係上，有較高的總聯繫度，另一些則否。透過總聯繫矩陣 TR，若我們將零件 7 FPCB 以及零件 24 Main PCB 當作帶正電的原子核，其他的零組件則當作是帶負電的電子，則可以產生訊號交換功能聯繫關係的電荷矩陣 Q 如表 4.48。

表 4.46 距離矩陣 D(1)

D	1	2	3	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2		0	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3			0	2	1	2	2	2	2	2	2
6				0	2	2	2	2	2	2	2
7					0	2	2	2	2	2	2
8						0	2	2	2	2	2
9							0	2	2	2	2
10								0	2	2	2
11									0	2	2
12										0	2
13											0

表 4.46 距離矩陣 D(2)

D	14	15	16	17	18	19	20	23	24
1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	2	2	2	2	2	2	2	2	2
6	2	2	2	2	2	2	2	2	2
7	2	2	2	2	2	2	2	2	1
8	2	2	2	2	2	2	2	2	2
9	2	2	2	2	2	2	2	2	2
10	2	2	2	2	2	2	2	2	2
11	2	2	2	2	2	2	2	2	2
12	2	2	2	2	2	2	2	2	2
13	2	2	2	2	2	2	2	2	2
14	0	2	2	2	2	2	2	2	2
15		0	2	2	2	2	2	2	2
16			0	2	2	2	2	2	2
17				0	2	2	2	2	2
18					0	2	2	2	2
19						0	2	2	2
20							0	2	1
23								0	1
24									0

表 4.46 距離矩陣 D(3)

D	25	27	28	30	31	32
1	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2
3	2	2	2	2	2	2
6	2	2	2	2	2	2
7	2	2	2	2	2	2
8	2	2	2	2	2	2
9	2	2	2	2	2	2
10	2	2	2	2	2	2
11	2	2	2	2	2	2
12	2	2	2	2	2	2
13	2	2	2	2	2	2
14	2	2	2	2	2	2
15	2	2	2	2	2	2
16	2	2	2	2	2	2
17	2	2	2	2	2	2
18	2	2	2	2	2	2
19	2	2	2	2	2	2
20	2	2	2	2	2	2
23	2	2	2	2	2	2
24	1	2	2	2	2	2
25	0	2	2	2	2	2
27		0	2	2	2	2
28			0	2	2	2
30				0	2	2
31					0	2
32						0

表 4.47 總聯繫矩陣 TR

1 BTDL-Coat	0
2 Display Bottom Case	0
3 Display	1
6 Steel Plate	0
7 FPCB	2
8 Display Top Case	0
9 Hinge	0
10 Cover-TPDL	0
11 Display Overlay	0
12 Keyboard Top Case	0
13 Rubber Sheet	0
14 On/Off Key	0
15 Main2-Key	0
16 Main1-Key	0
17 Fun-Key	0
18 Steel Plate	0
19 Door Knob	0
20 Battery Connect(+)	1
23 Speaker	1
24 Main PCB	4
25 Battery Connect (-)	1
27 Rubber Foot	0
28 Battery Door	0
30 Keyboard Bottom Case	0
31 Tape	0
32 Speaker Net	0

表 4.48 電荷矩陣 Q

1 BTDL-Coat	-1
2 Display Bottom Case	-1
3 Display	-1
6 Steel Plate	-1
7 FPCB	+2
8 Display Top Case	-1
9 Hinge	-1
10 Cover-TPDL	-1
11 Display Overlay	-1
12 Keyboard Top Case	-1
13 Rubber Sheet	-1
14 On/Off Key	-1
15 Main2-Key	-1
16 Main1-Key	-1
17 Fun-Key	-1
18 Steel Plate	-1
19 Door Knob	-1
20 Battery Connect(+)	-1
23 Speaker	-1
24 Main PCB	+4
25 Battery Connect (-)	-1
27 Rubber Foot	-1
28 Battery Door	-1
30 Keyboard Bottom Case	-1
31 Tape	-1
32 Speaker Net	-1

4.3.5 力量矩陣(F)

由 4.3.2 節的距離矩陣 D 以及 4.3.4 節的電荷矩陣 Q，我們可以帶入 3.3 節修正後的庫倫力公式 $F_{ij} = -\frac{kQ_iQ_j}{D_{i,j}^2}$ ，透過修正後的庫倫力公式一一計算產品內零組件兩兩的吸引力後，可產生力量矩陣 F，如表 4.49。

4.3.6 最大作用力矩陣(MF)

本節將產生的最大作用力矩陣 MF，是產品內零組件產生功能模組的合併依據。根據 4.3.5 節所產生的力量矩陣 F，此產品的最大作用力矩陣 MF 如表 4.50。

產生最大作用力矩陣 MF 後，接著要計算的是原子核所能提供的最小吸引力。在 4.3.4 節選擇的帶最小正電的原子核帶電為 +2，所以原子核所能提供的最小吸引力為 $F_{min} = -\frac{1 \times (+2) \times (-1)}{1^2} = 2$ ，最大作用力 MF 小於此最小吸引力的零組件，被當作是游離電子，不分入任何模組裡。

將 MF 矩陣內具有相同最大吸引力，且其最大吸引力又大於原子核所能提供的最小吸引力的零件，合併為基於訊號傳遞功能關係上的模組。例如 $MF_3=MF_7=2$ 、 $MF_{20}=MF_{23}=MF_{24}=MF_{25}=4$ ，則可以合併成 [3, 7]、[20, 23, 24, 25] 等兩個基於能量傳遞功能關係上的模組。至此，可以將基於能量傳遞觀點上的功能模組寫成如下：[3, 7]、[20, 23, 24, 25]、[1]、[2]、[6]、[8]、[9]、[10]、[11]、[12]、[13]、[14]、[15]、[16]、[17]、[18]、[19]、[27]、[28]、[30]、[31]、[32]。

表 4.49 力量矩陣 F(1)

F	1	2	3	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	-0.25	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
2	-0.25	0	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
3	-0.25	-0.25	0	-0.25	2	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
6	-0.25	-0.25	-0.25	0	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
7	0.5	0.5	2	0.5	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
8	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0.5	0	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
9	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	0	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
10	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	0	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
11	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	0	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
12	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0	-0.25	-0.25	-0.25
13	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0	-0.25	-0.25
14	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0	-0.25
15	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0
16	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
17	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
18	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
19	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
20	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
23	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
24	1	1	1	1	-8	1	1	1	1	1	1	1	1
25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
27	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
28	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
30	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
31	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
32	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0.5	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25

表 4.49 力量矩陣 F(2)

F	16	17	18	19	20	23	24	25	27	28	30	31	32
1	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
2	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
3	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
6	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	-8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
8	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
9	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
10	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
11	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
12	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
13	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
14	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
15	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
16	0	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
17	-0.25	0	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
18	-0.25	-0.25	0	-0.25	-0.25	-0.25	1	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
19	-0.25	-0.25	-0.25	0	-0.25	-0.25	1	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
20	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0	-0.25	4	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
23	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0	4	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
24	1	1	1	1	4	4	0	4	1	1	1	1	1
25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	4	0	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
27	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	-0.25	0	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25
28	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	-0.25	-0.25	0	-0.25	-0.25	-0.25
30	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	-0.25	-0.25	-0.25	0	-0.25	-0.25
31	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0	-0.25
32	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	1	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0

表 4.50 最大作用力矩陣 MF

1 BTDL-Coat	1
2 Display Bottom Case	1
3 Display	2
6 Steel Plate	1
7 FPCB	2
8 Display Top Case	1
9 Hinge	1
10 Cover-TPDL	1
11 Display Overlay	1
12 Keyboard Top Case	1
13 Rubber Sheet	1
14 On/Off Key	1
15 Main2-Key	1
16 Main1-Key	1
17 Fun-Key	1
18 Steel Plate	1
19 Door Knob	1
20 Battery Connect(+)	4
23 Speaker	4
24 Main PCB	4
25 Battery Connect (-)	4
27 Rubber Foot	1
28 Battery Door	1
30 Keyboard Bottom Case	1
31 Tape	1
32 Speaker Net	1

4.3.7 應用共價鍵概念形成分子功能模組

在 4.3.6 節我們得到了基於能量傳遞功能關係的功能模組，但其實某些功能模組的原子核卻是在能量傳遞功能觀點上有關聯的。這時候便適合將原子核彼此在能量傳遞功能觀點上有關聯的模組，合併為一個分子功能模組。

舉例來說，[3, 7]、[20, 23, 24, 25]兩個模組的原子核零件，零件 7 FPCB 以及零件 24 Main PCB，由距離矩陣可看出他們彼此有訊號傳遞關係上的聯繫，所以可將此二模組合併，成為[3, 7, 20, 23, 24, 25]。至此，最後的基於力回饋功能觀點上的功能模組如下：[3, 7, 20, 23, 24, 25]、[1]、[2]、[6]、[8]、[9]、[10]、[11]、[12]、[13]、[14]、[15]、[16]、[17]、[18]、[19]、[27]、[28]、[30]、[31]、[32]。

4.3.8 功能相關度矩陣(FC)

為了利用化學反應活化能的觀念，合併不同觀點所形成的功能模組分群解，產生最終的功能模組分群解，首先，須先建立功能相關度矩陣 FC。經由如同 4.3.2 至 4.3.7 節的做法，利用原子理論產生五種功能聯繫關係觀點上的功能模組，其結果如表 4.51。

表 4.51 五種不同功能聯繫關係的功能模組分群

力回饋關係	能量傳遞關係	訊號交換關係	共組功能關係	其他關係
[8,9,10]	[3,7,20,23,24,25]	[3,7,13,14,15,16,17,23,24]	[1,3,8,11]	無模組形成
[12,19,27,28,30]	[1]	[1]	[2]	
[13,14,15,16,17]	[2]	[2]	[6]	
[1]	[6]	[6]	[7]	
[2]	[8]	[8]	[9]	
[3]	[9]	[9]	[10]	
[6]	[10]	[10]	[12]	
[7]	[11]	[11]	[13]	
[11]	[12]	[12]	[14]	
[18]	[13]	[18]	[15]	
[20]	[14]	[19]	[16]	
[23]	[15]	[20]	[17]	
[24]	[16]	[25]	[18]	
[25]	[17]	[27]	[19]	
[31]	[18]	[28]	[20]	
[32]	[19]	[30]	[23]	
	[27]	[31]	[24]	
	[28]	[32]	[25]	
	[30]		[27]	
	[31]		[28]	
	[32]		[30]	
			[31]	
			[32]	

列出所有不同功能聯繫關係觀點上的模組分群解後，我們可以建立功能相關度矩陣。我們對此液晶螢幕產品假設的功能聯繫關係權重如下表：

表 4.52 功能關係權重

W 力回饋關係	W 能量傳遞關係	W 訊號交換關係	W 共組功能關係	W 其他關係
0.19	0.21	0.23	0.21	0.16

由表 4.51 列出的各種功能聯繫關係分群結果，以及各種功能聯繫關係的權重，可建立功能相關度矩陣，如表 4.53。

表 4.53 功能相關度矩陣(1)

FC	1	2	3	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0.01	0.21	0.01	0.01	0.21	0.01	0.01	0.21	0.01
2		0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
3			0	0.01	0.44	0.21	0.01	0.01	0.21	0.01
6				0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
7					0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
8						0	0.19	0.19	0.21	0.01
9							0	0.19	0.01	0.01
10								0	0.01	0.01
11									0	0.01
12										0

表 4.53 功能相關度矩陣(2)

FC	13	14	15	16	17	18	19
1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
2	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
3	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.01	0.01
6	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
7	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.01	0.01
8	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
9	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
10	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
11	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
12	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.19
13	0	0.42	0.42	0.42	0.42	0.01	0.01
14		0	0.42	0.42	0.42	0.01	0.01
15			0	0.42	0.42	0.01	0.01
16				0	0.42	0.01	0.01
17					0	0.01	0.01
18						0	0.01
19							0

表 4.53 功能相關度矩陣(3)

FC	20	23	24	25	27	28	30	31	32
1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
2	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
3	0.21	0.44	0.44	0.21	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
6	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
7	0.21	0.44	0.01	0.21	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
8	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
9	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
10	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
11	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
12	0.01	0.01	0.01	0.01	0.19	0.19	0.19	0.01	0.01
13	0.01	0.23	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
14	0.01	0.23	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
15	0.01	0.23	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
16	0.01	0.23	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
17	0.01	0.23	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
18	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
19	0.01	0.01	0.01	0.01	0.19	0.19	0.19	0.01	0.01
20	0	0.21	0.01	0.21	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
23		0	0.01	0.21	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
24			0.01	0.21	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
25				0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
27					0	0.19	0.19	0.01	0.01
28						0	0.19	0.01	0.01
30							0	0.01	0.01
31								0	0.01
32									0

4.3.9 零件的化學活性(AC)

由 3.4.2 節提到的化學活性定義 $AC_i = \frac{\sum_k TR_i^k}{k \times (N-1)}$ ，其中，由於我們考量的功能聯繫關係個數為 5 種，所以 $k=5$ ；而零組件數量為 26，所以 $N=26$ 。如此可產生化學活性 AC 矩陣如下表：

表 4.54 化學活性矩陣 AC

1 BTDL-Coat	0.016
2 Display Bottom Case	0.008
3 Display	0.032
6 Steel Plate	0.00008
7 FPCB	0.032
8 Display Top Case	0.024
9 Hinge	0.032
10 Cover-TPDL	0.008
11 Display Overlay	0.008
12 Keyboard Top Case	0.024
13 Rubber Sheet	0.04
14 On/Off Key	0.016
15 Main2-Key	0.016
16 Main1-Key	0.016
17 Fun-Key	0.016
18 Steel Plate	0.00008
19 Door Knob	0.016
20 Battery Connect(+)	0.016
23 Speaker	0.016
24 Main PCB	0.104
25 Battery Connect (-)	0.016
27 Rubber Foot	0.008
28 Battery Door	0.024
30 Keyboard Bottom Case	0.04
31 Tape	0.00008
32 Speaker Net	0.008

4.3.10 應用化學反應活化能(AE)概念於功能模組合成

在 4.3.8 節以及 4.3.9 節分別得到功能相關度矩陣 FC 與活性矩陣 AC 後，便可以帶入 3.3.4 節的活化能 AE 計算公式 $AE_{ij} = \frac{1}{\sqrt{AC_i \times AC_j \times FC_{ij}}}$ ，以計算零組件們兩兩產生

化學反應所需的活化能。此電子辭典產品的活化能矩陣 AE 如下表：

表 4.55 活化能矩陣 AE(1)

	1	2	3	6	7	8	9
1	0	8838.8	210.4	88388.3	4419.4	243.0	4419.4
2		0	6250.0	125000.0	6250.0	7216.9	6250.0
3			0	62500.0	71.0	171.8	3125.0
6				0	62500.0	72168.8	62500.0
7					0	3608.4	3125.0
8						0	189.9
9							0

表 4.55 活化能矩陣 AE(2)

	10	11	12	13	14	15	16
1	8838.8	420.9	5103.1	3952.8	6250.0	6250.0	6250.0
2	12500.0	12500.0	7216.9	5590.2	8838.8	8838.8	8838.8
3	6250.0	297.6	3608.4	121.5	192.1	192.1	192.1
6	125000.0	125000.0	72168.8	55901.7	88388.3	88388.3	88388.3
7	6250.0	6250.0	3608.4	121.5	192.1	192.1	192.1
8	379.8	343.7	4166.7	3227.5	5103.1	5103.1	5103.1
9	328.9	6250.0	3608.4	2795.1	4419.4	4419.4	4419.4
10	0	12500.0	7216.9	5590.2	8838.8	8838.8	8838.8
11		0	7216.9	5590.2	8838.8	8838.8	8838.8
12			0	3227.5	5103.1	5103.1	5103.1
13				0	94.1	94.1	94.1
14					0	148.8	148.8
15						0	148.8
16							0

表 4.55 活化能矩陣 AE(3)

	17	18	19	20	23	24
1	6250.0	88388.3	6250.0	6250.0	6250.0	2451.5
2	8838.8	125000.0	8838.8	8838.8	8838.8	3466.9
3	192.1	62500.0	4419.4	210.4	100.4	39.4
6	88388.3	1250000.0	88388.3	88388.3	88388.3	34668.8
7	192.1	62500.0	4419.4	210.4	100.4	1733.4
8	5103.1	72168.8	5103.1	5103.1	5103.1	2001.6
9	4419.4	62500.0	4419.4	4419.4	4419.4	1733.4
10	8838.8	125000.0	8838.8	8838.8	8838.8	3466.9
11	8838.8	125000.0	8838.8	8838.8	8838.8	3466.9
12	5103.1	72168.8	268.6	5103.1	5103.1	2001.6
13	94.1	55901.7	3952.8	3952.8	171.9	1550.4
14	148.8	88388.3	6250.0	6250.0	271.7	2451.5
15	148.8	88388.3	6250.0	6250.0	271.7	2451.5
16	148.8	88388.3	6250.0	6250.0	271.7	2451.5
17	0	88388.3	6250.0	6250.0	271.7	2451.5
18		0	88388.3	88388.3	88388.3	34668.8
19			0	6250.0	6250.0	2451.5
20				0	297.6	2451.5
23					0	2451.5
24						0

表 4.55 活化能矩陣 AE(4)

	25	27	28	30	31	32
1	6250.0	8838.8	5103.1	3952.8	88388.3	8838.8
2	8838.8	12500.0	7216.9	5590.2	125000.0	12500.0
3	210.4	6250.0	3608.4	2795.1	62500.0	6250.0
6	88388.3	125000.0	72168.8	55901.7	1250000.0	125000.0
7	210.4	6250.0	3608.4	2795.1	62500.0	6250.0
8	5103.1	7216.9	4166.7	3227.5	72168.8	7216.9
9	4419.4	6250.0	3608.4	2795.1	62500.0	6250.0
10	8838.8	12500.0	7216.9	5590.2	125000.0	12500.0
11	8838.8	12500.0	7216.9	5590.2	125000.0	12500.0
12	5103.1	379.8	219.3	169.9	72168.8	7216.9
13	3952.8	5590.2	3227.5	2500.0	55901.7	5590.2
14	6250.0	8838.8	5103.1	3952.8	88388.3	8838.8
15	6250.0	8838.8	5103.1	3952.8	88388.3	8838.8
16	6250.0	8838.8	5103.1	3952.8	88388.3	8838.8
17	6250.0	8838.8	5103.1	3952.8	88388.3	8838.8
18	88388.3	125000.0	72168.8	55901.7	1250000.0	125000.0
19	6250.0	465.2	268.6	208.0	88388.3	8838.8
20	297.6	8838.8	5103.1	3952.8	88388.3	8838.8
23	297.6	8838.8	5103.1	3952.8	88388.3	8838.8
24	116.7	3466.9	2001.6	1550.4	34668.8	3466.9
25	0	8838.8	5103.1	3952.8	88388.3	8838.8
27		0	379.8	294.2	125000.0	12500.0
28			0	169.9	72168.8	7216.9
30				0	55901.7	5590.2
31					0	125000.0
32						0

透過活化能矩陣 AE，列出各種化學反應所需要的活化能之後，我們由活化能最低的化學反應開始進行化合物合成，直到全部的零件合併成為同一模組為止。經過一連串的化學反應之後，將每個階段產生的功能模組候選解一一記錄下來，總共有 17 個。接著，將每個功能模組候選解帶入 3.4.4 節定義的功能模組不穩定度評估式 $FMI = \frac{Mean(AEs_{Reacted})}{N_{parts\ in\ module(s)}}$ ，如表 4.56。

計算完每個功能模組候選解的功能模組不穩定度 FMI 值之後，我們選擇不穩定度最小的解 11，作為最後的功能模組分群解：[1, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 23, 24, 25]、[12, 19, 28, 30]、[2]、[3]、[10]、[11]、[18]、[27]、[31]、[32]。每個功能模組候選解的功能模組不穩定值異同如下圖。

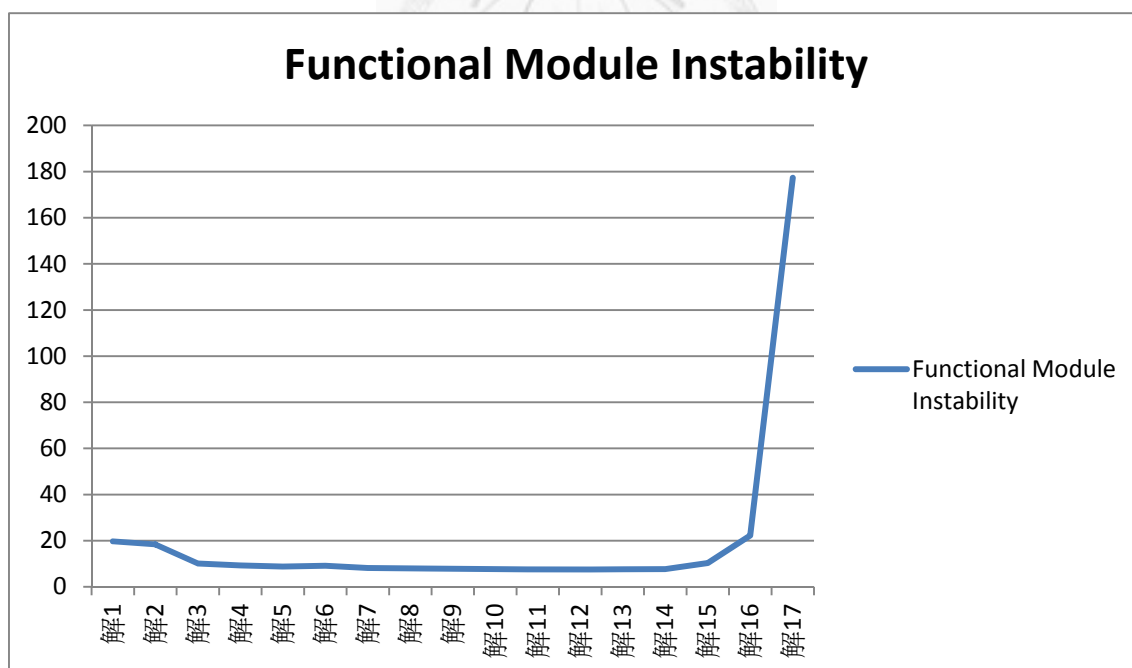


圖 4.9 功能模組不穩定值

表 4.56 功能模組候選解(1)

解 1	解 2	解 3	解 4	解 5	解 6
[3, 24]	[3, 7, 24]	[3, 7, 24]	[3, 7, 23, 24]	[3, 7, 23, 24, 25]	[3, 7, 13, 14, 15, 16, 17, 23, 24, 25]
[1]	[1]	[13, 14, 15, 16, 17]	[13, 14, 15, 16, 17]	[13, 14, 15, 16, 17]	[1]
[2]	[2]	[1]	[1]	[1]	[2]
[6]	[6]	[2]	[2]	[2]	[6]
[7]	[8]	[6]	[6]	[6]	[8]
[8]	[9]	[8]	[8]	[8]	[9]
[9]	[10]	[9]	[9]	[9]	[10]
[10]	[11]	[10]	[10]	[10]	[11]
[11]	[12]	[11]	[11]	[11]	[12]
[12]	[13]	[12]	[12]	[12]	[18]
[13]	[14]	[18]	[18]	[18]	[19]
[14]	[15]	[19]	[19]	[19]	[20]
[15]	[16]	[20]	[20]	[20]	[27]
[16]	[17]	[23]	[25]	[27]	[28]
[17]	[18]	[25]	[27]	[28]	[30]
[18]	[19]	[27]	[28]	[30]	[31]
[19]	[20]	[28]	[30]	[31]	[32]
[20]	[23]	[30]	[31]	[32]	
[23]	[25]	[31]	[32]		
[25]	[27]	[32]			
[27]	[28]				
[28]	[30]				
[30]	[31]				
[31]	[32]				
[32]					
FMI=19.70	FMI=18.40	FMI=10.14	FMI=9.32	FMI=8.80	FMI=9.17

表 4.56 功能模組候選解(2)

解 7	解 8	解 9	解 10	解 11	解 12
[3, 7, 13, 14, 15, 16, 17, 23, 24, 25]	[3, 7, 8, 13, 14, 15, 16, 17, 23, 24, 25]	[3, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 23, 24, 25]	[3, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 23, 24, 25]	[1, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 23, 24, 25]	[1, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 23, 24, 25]
[12, 28, 30]	[12, 28, 30]	[12, 28, 30]	[12, 19, 28, 30]	[12, 19, 28, 30]	[12, 19, 27, 28, 30]
[1]	[1]	[1]	[1]	[2]	[2]
[2]	[2]	[2]	[2]	[6]	[6]
[6]	[6]	[6]	[6]	[10]	[10]
[8]	[9]	[10]	[10]	[11]	[11]
[9]	[10]	[11]	[11]	[18]	[18]
[10]	[11]	[18]	[18]	[27]	[31]
[11]	[18]	[19]	[20]	[31]	[32]
[18]	[19]	[20]	[27]	[32]	
[19]	[20]	[27]	[31]		
[20]	[27]	[31]	[32]		
[27]	[31]	[32]			
[31]	[32]				
[32]					
FMI=8.15	FMI=7.96	FMI=7.83	FMI=7.75	FMI=7.49	FMI=7.58

表 4.56 功能模組候選解(3)

解 13	解 14	解 15	解 16	解 17
[1, 3, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 23, 24, 25]	[1, 3, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 23, 24, 25]	[1, 3, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 23, 24, 25, 27, 28, 30]	[1, 2, 3, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 23, 24, 25, 27, 28, 30, 32]	[1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 23, 24, 25, 27, 28, 30, 31, 32]
[12, 19, 27, 28, 30]	[12, 19, 27, 28, 30]	[2]	[6]	
[2]	[2]	[6]	[18]	
[6]	[6]	[18]	[31]	
[10]	[18]	[31]	[32]	
[18]	[31]	[32]		
[31]	[32]			
[32]				
FMI=7.63	FMI=7.71	FMI=10.30	FMI=22.25	FMI=177.33

4.3.11 綠色相似度矩陣(GS)

為了利用化學反應活化能的概念，找出功能模組內的綠色模組，首先要對功能模組建立綠色相似度矩陣 GS。我們先將電子辭典產品內，位於功能模組內之零組件的各項綠色屬性列出，如表 4.57。

有了電子辭典產品內零組件的各項綠色屬性資訊後，便可以利用這些資訊，配合對各種綠色屬性設定的權重，建立綠色相似度矩陣 GS。對此電子辭典產品，我們設定的綠色屬性權重如表 4.58。

表 4.57 電子辭典產品的零組件綠色屬性(1)

[1, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 23, 24, 25]	材料	可回收	可再利用	可保養維護	可升級
1 BTDL-Coat	塑膠	可	可	不可	可
3 Display	電子廢棄物	不可	可	不可	可
7 FPCB	電子廢棄物	不可	可	不可	可
8 Display Top Case	塑膠	可	不可	不可	不可
9 Hinge	鐵	可	不可	可	可
13 Rubber Sheet	塑膠	可	不可	可	可
14 On/Off Key	鐵	可	不可	可	可
15 Main2-Key	鐵	可	不可	可	可
16 Main1-Key	鐵	可	不可	可	可
17 Fun-Key	鐵	可	不可	可	可
20 Battery Connect (+)	鐵	可	不可	可	不可
23 Speaker	電子廢棄物	不可	可	不可	可
24 Main PCB	電子廢棄物	不可	可	不可	可
25 Battery Connect (-)	鐵	可	不可	可	不可

表 4.57 電子辭典產品的零組件綠色屬性(2)

[12, 19, 28, 30]	材料	可回收	可再利用	可保養維護	可升級
12 Keyboard Top Case	塑膠	可	不可	不可	不可
19 Door Knob	塑膠	可	不可	不可	不可
28 Battery Door	塑膠	可	不可	不可	不可
30 Keyboard Bottom Case	塑膠	可	不可	不可	不可

表 4.58 電子辭典的綠色屬性權重

W 材料相似性	W 可回收性	W 可再利用性	W 可保養維護性	W 可升級性
0.19	0.19	0.18	0.22	0.22

基於以上的綠色屬性權重和零組件綠色屬性資訊，我們可以對液晶螢幕產品內的功能模組[1, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 23, 24, 25]建立綠色相似度矩陣 GS，如下表：

表 4.59 功能模組[1, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 23, 24, 25]的綠色相似度矩陣

GS(1)

GS	1	3	7	8	9	13	14
1	0	0.532	0.532	0.534	0.388	0.578	0.388
3		0	0.855	0.154	0.198	0.198	0.198
7			0	0.154	0.198	0.198	0.198
8				0	0.316	0.506	0.316
9					0	0.734	0.924
13						0	0.756
14							0

表 4.59 功能模組[1, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 23, 24, 25]的綠色相似度矩陣

GS(2)

GS	15	16	17	20	23	24	25
1	0.388	0.388	0.388	0.19	0.532	0.532	0.19
3	0.198	0.198	0.198	0.01	0.855	0.855	0.01
7	0.198	0.198	0.198	0.01	0.855	0.01	0.01
8	0.316	0.316	0.316	0.47	0.154	0.154	0.47
9	0.924	0.924	0.924	0.726	0.198	0.198	0.726
13	0.756	0.756	0.756	0.536	0.154	0.154	0.536
14	0.946	0.946	0.946	0.726	0.198	0.198	0.726
15	0	0.946	0.946	0.726	0.198	0.198	0.726
16		0	0.946	0.726	0.198	0.198	0.726
17			0	0.726	0.198	0.198	0.726
20				0	0.01	0.01	0.88
23					0	0.855	0.01
24						0	0.01
25							0

4.3.12 綠色程度矩陣(GD)

透過 3.5.3 節對綠色程度矩陣 GD 內元素的定義，我們可建立液晶螢幕產品之功能模組[1, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 23, 24, 25]的綠色程度矩陣 GD 如下表：

表 4.60 功能模組[1, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 23, 24, 25]的綠色程度矩陣 GD

1 BTDL-Coat	0.728395
3 Display	0.493827
7 FPCB	0.493827
8 Display Top Case	0.234568
9 Hinge	0.777778
13 Rubber Sheet	0.777778
14 On/Off Key	0.777778
15 Main2-Key	0.777778
16 Main1-Key	0.777778
17 Fun-Key	0.777778
20 Battery Connect (+)	0.506173
23 Speaker	0.493827
24 Main PCB	0.493827
25 Battery Connect (-)	0.506173

4.3.13 應用化學反應活化能(AE)概念於綠色模組合成

我們將 4.3.11 節的綠色相似度矩陣 GS 以及 4.3.12 節的綠色程度矩陣 GD 帶入

3.5.4 節的活化能公式 $AE_{ij} = \frac{1}{\sqrt{GD_i \times GD_j \times GS_{ij}}}$ ，以計算功能模組[1, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15,

16, 17, 20, 23, 24, 25]的活化能矩陣 AE。此功能模組的活化能矩陣如下表：

表 4.61 功能模組[1, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 23, 24, 25]的活化能矩陣 AE(1)

	1	3	7	8	9	13	14
1	0	5.225723	5.225723	10.96032	4.549312	3.053864	4.549312
3		0	4.796053	56.05776	13.14935	13.14935	13.14935
7			0	56.05776	13.14935	13.14935	13.14935
8				0	17.34558	10.83242	17.34558
9					0	2.252127	1.789027
13						0	2.186589
14							0

表 4.61 功能模組[1, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 23, 24, 25]的活化能矩陣 AE(2)

	15	16	17	20	23	24	25
1	4.549312	4.549312	4.549312	14.27515	5.225723	5.225723	14.27515
3	13.14935	13.14935	13.14935	400.061	4.796053	4.796053	400.061
7	13.14935	13.14935	13.14935	400.061	4.796053	410.0625	400.061
8	17.34558	17.34558	17.34558	17.91986	56.05776	56.05776	17.91986
9	1.789027	1.789027	1.789027	3.498719	13.14935	13.14935	3.498719
13	2.186589	2.186589	2.186589	4.738936	16.90631	16.90631	4.738936
14	1.747422	1.747422	1.747422	3.498719	13.14935	13.14935	3.498719
15	0	1.747422	1.747422	3.498719	13.14935	13.14935	3.498719
16		0	1.747422	3.498719	13.14935	13.14935	3.498719
17			0	3.498719	13.14935	13.14935	3.498719
20				0	400.061	400.061	4.435266
23					0	4.796053	400.061
24						0	400.061
25							0

透過活化能矩陣 AE，列出各種化學反應所需要的活化能之後，我們由活化能最低的化學反應開始進行化合物合成，直到全部的零件合併成為同一模組為止。經過一連串的化學反應之後，將每個階段產生的功能模組候選解一一記錄下來，總共有 8 個。接著，將每個綠色模組分群候選解帶入 3.5.4 節定義的綠色模組不穩定度評估式 $GMI = \frac{Mean(AEs_{Reacted})}{N_{parts\ in\ module(s)}}$ ，如下表：

表 4.62 功能模組[1, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 23, 24, 25]的綠色模組分群候選解

解 1	[(14, 15, 16, 17), 1, 3, 7, 8, 9, 13, 20, 23, 24, 25]	GMI= 0.4368
解 2	[(9, 14, 15, 16, 17), 1, 3, 7, 8, 13, 20, 23, 24, 25]	GMI= 0.3515
解 3	[(9, 13, 14, 15, 16, 17), 1, 3, 7, 8, 20, 23, 24, 25]	GMI= 0.3072
解 4	[(1, 9, 13, 14, 15, 16, 17), 3, 7, 8, 20, 23, 24, 25]	GMI= 0.2922
解 5	[(1, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 25), 3, 7, 8, 23, 24]	GMI= 0.2676
解 6	[(1, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 25), (3, 7, 23, 24), 8]	GMI= 0.2354
解 7	[(1, 3, 7, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 23, 24, 25), 8]	GMI= 0.2493
解 8	[(1, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 23, 24, 25)]	GMI= 0.2732

計算完每個綠色模組分群候選解的綠色模組不穩定度 GMI 值之後，我們選擇不穩定度最小的解 6，作為最後的功能模組分群解：[(1, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 25), (3, 7, 23, 24), 8]。每個綠色模組候選解的綠色模組不穩定值異同如圖 4.10。

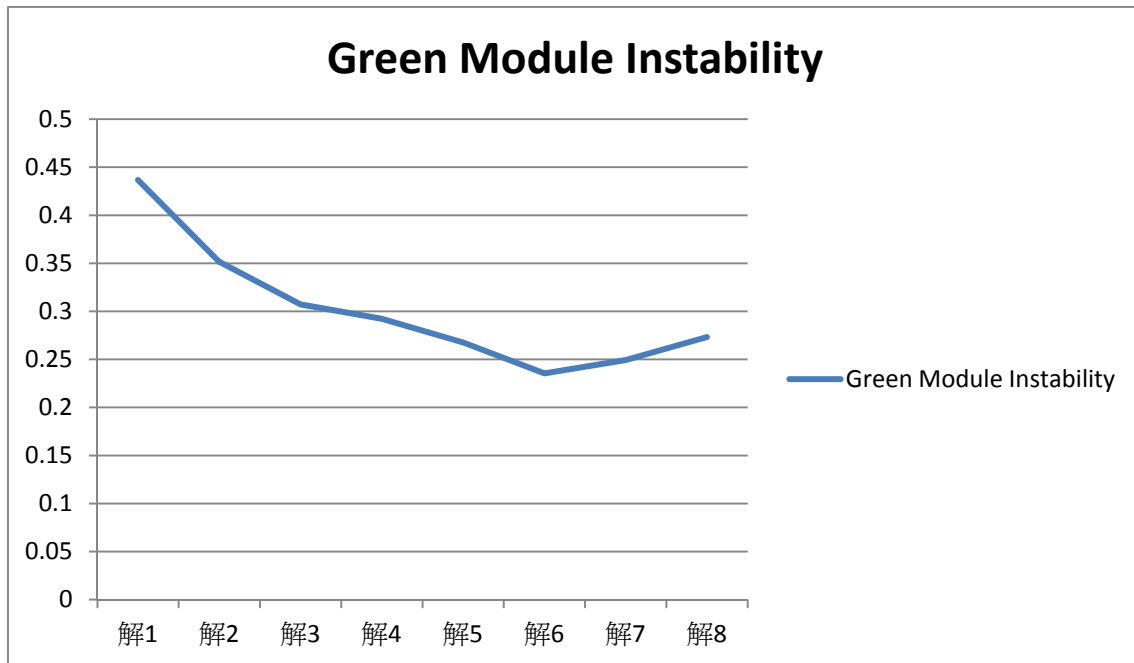
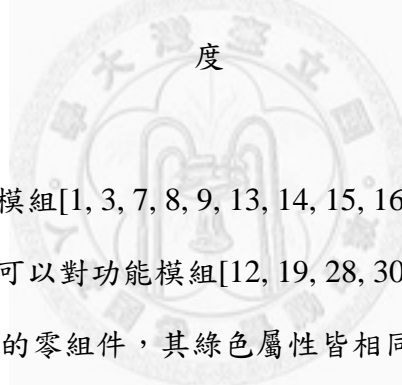


圖 4.10 功能模組[1, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 23, 24, 25]的綠色模組不穩定



利用如同以上對功能模組[1, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 23, 24, 25]產生綠色模組分群的流程，我們可以對功能模組[12, 19, 28, 30]產生綠色模組分群。由於功能模組[12, 19, 28, 30]內的零組件，其綠色屬性皆相同，所以產生綠色模組分群結果為[(12, 19, 28, 30)]。

我們順利地對電子辭典產品產生功能模組，並在功能模組內找出適合被進一步合併的綠色模組。最後，本方法產生的新一代模組配置可寫做如下：[(1, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 25), (3, 7, 23, 24), 8]、[(12, 19, 28, 30)]、[2]、[6]、[10]、[11]、[18]、[27]、[31]、[32]。

4.3.14 討論

我們將以我們的分群結果與 Wang 等人(2010)論文中產生的分群結果做比較。

先將結果分列於下表：

表 4.63 模組分群結果比較

Wang 等人 (去除非主要 零件後)	[18, 19, 30] 、[1, 2]、[3, 11]、[6, 8, 9, 10]、[12, 13]、 [7, 23, 24]、[20, 25]、[27, 28, 30]、[14, 15, 16, 17]、 [31]	FMI=317.45
本論文	[(1, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 25), (3, 7, 23, 24), 8]、 [(12, 19, 28, 30)]、[2]、[6]、[10]、[11]、[18]、[27]、 [31]、[32]	FMI=7.49

利用我們的方法產生的模組分群結果，與 Wang 等人論文中產生的分群結果比較，可發現某些本來存在於 Wang 等人的結果中的模組，其模組關係依然被包括在我們的模組分群結果內，另一些則否。這主要是因為我們的方法與 Wang 等人論文中所考量的因素不一樣導致。在 Wang 等人的論文內，考量到的是零件彼此是否有訊息傳遞，然而其訊息傳遞關係是廣義而未細分的；而在我們的方法內，我們定義了五種功能關係，並附之以權重，可讓設計者在設計時可依實際情況調整各種功能權重。

在 Wang 等人論文中產生的模組分群結果裡，幾乎所有的零件都被分入模組內；而我們的結果裡，未被分入模組內的獨立零件較多。這是因為這些零件與其他零件的功能關係度太低，以至於無從驅動這些零件與其他零件形成模組。

針對 Wang 等人論文中產生的模組分群結果，以及我們的分群結果，計算出功能模組不穩定值(FMI)，可發現我們產生的功能模組分群的不穩定度比起 Wang 等人的要小得多。

我們的方法不僅以可獨立調整權重的五種功能聯繫關係找出功能模組，又可以透過零件的綠色屬性，再進一步找出適合於功能模組範圍內合併的綠色模組，可提供設計者改善新產品綠色表現的模組配置參考。



第五章 結論與未來展望

5.1 結論

在環境負載日益增加、自然資源捉襟見肘的當下，新產品對於環境的衝擊必須降低，而自然資源的使用必須更有效率。考量以上兩點，新產品整體的綠色表現絕對有提升的必要性，而模組化設計方法便是一種非常有效的手段。本論文提出了一種創新的綠色模組化設計方法，考量了產品零件彼此的功能聯繫關係，以及每個零件的綠色屬性，並利用改良過後的原子理論，以及我們設計的化學反應活化能概念，成功的產生產品零件的功能模組分群，以及功能模組內適合進一步合併零件的綠色模組分群。

過去的原子理論模組分群法，考量到的是舊產品內，零件彼此接觸上的關係，而且一次只能考量一項綠色屬性。我們認為若僅考量舊產品內零件的接觸關係，則不利於創新設計出新一代綠色表現大幅增進的產品。本論文考量了五種功能上的聯繫關係，使得功能彼此聯繫度高的零件得以合併入同一功能模組。接著，本論文又考量了五種綠色屬性，使得功能模組內，綠色屬性相似的零件，得以進一步合併成綠色模組。

本論文之方法，同時考量到多種功能聯繫關係與綠色屬性，並且可獨立調整權重，不僅改善了新產品設計之綠色表現，且兼顧了新產品之模組配置的合理性以及可行性。

最後，總結以上敘述，本論文之貢獻可統整為以下六點：

1. 改良原始的原子理論模組分群方法，將原本考量舊產品內的零件接觸關係規則，修改成適用於功能聯繫關係上的模組分群方法。
2. 提出一種以化學反應活化能為概念的新方法，不僅能在多種不同功能上促成的分群結果內，找出一種功能聯繫度最高的分群結果，也能同時考量多種綠色屬性，找出一個綠色屬性相似度高的分群結果。
3. 產生功能模組，並且在功能模組內找出可進一步合併的綠色模組，此分為兩階段的模組概念兼顧了新模組配置的合理性、實現性以及綠色表現。
4. 剔除不適合參與綠色模組化設計的零件，減低重新設計的複雜度。
5. 提出模組內不穩定度的評估式，可提供設計者決定採用何種模組配置的參考。
6. 本論文提出的方法，利用常見的 Microsoft Excel 即可實行，方法實作容易，不牽涉複雜且須撰寫程式的演算法，降低了設計者產生新產品模組配置的門檻，減低企業導入本方法的阻力。

5.2 未來展望

本論文提出的方法，考量了零件彼此的功能聯繫關係以及綠色屬性，然而，各種功能以及綠色屬性的權重是由設計者所制定的，權重分配尚有不夠客觀之缺陷，進一步決定各種功能以及綠色屬性的重要度之研究尚待後續人員發展。

本論文尚未考量到新產品與原始產品之模組配置在整個生命週期之綠色表現優劣。倘若能將本方法與生命週期評估方法結合，不僅在模組分群解的選擇上更為準確，更可以將新產品的綠色表現增進量化，使得消費者有更充足的理由購買新產品而非舊產品，增加企業研發製造更多具有優良綠色表現之產品的助力。

參考文獻

中文部分

李珣琮，「LCD 類產品回收之最佳化程序研究」，國立成功大學碩士論文，2006。

英文部分

Bovea, M.D. and Wang, B. (2007), “Redesign methodology for developing environmentally conscious products”, *International Journal of Production Research* Vol. 45, Nos. 18–19.

Desai, A. and Mital, A. (2003), “Evaluation of disassemblability to enable design for disassembly in mass production”, *International Journal of Industrial Ergonomics* 32 265–281.

Ericsson, A. and Erixon, G. (1999), “Controlling design variants: Modular product platforms”, *Society of Manufacturing Engineers*.

Gu, P., Hashemian, M. and Sosale, S. (1997), “An integrated modular design methodology for life-cycle engineering”, *Annals of the CIRP* Vol. 46/1.

Gu, P. and Sosale, S. (1999), “Product modularization for life cycle engineering”, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 15 387-401.

Guo, F. and J. K. Gershenson (2004), “A comparison of modular product design methods based on improvement and iteration”, *Proceedings of the 2004 ASME Design Engineering Technical Conferences - 16th International Conference on Design Theory and Methodology*.

Jarratt, T. A. W. (2004), “A model-based approach to support the management of engineering change”, *Cambridge University PhD thesis*.

Lai, X. and Gershenson, J.K. (2009), “DSM-based product representation for retirement process-based modularity”, *Proceedings of the ASME 2009 International Design*

Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference.

Li, J., Zhang, H.C., Gonzalez, M.A. and Yu, S. (2008), “A multi-objective fuzzy graph approach for modular formulation considering end-of-life issues”, *International Journal of Production Research* Vol. 46, No. 14, 4011–4033.

Newcomb, P.J., Bras, B. and Rosen, D.W. (1996), “Implication of modularity on product design for the life cycle”, *Proceedings of The 1996 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers in Engineering Conference*.

Papasavva, S., Coyle, A., Goldman, S., Privette, R., Legati, R., Huff, C., Frisch, L. and Paul, R. (2003), “Development of recycling guidelines for PEM fuel cell systems”, *SAE Technical Paper* 2003-01-1141.

Ranky, P.G. (2010), “Sustainable green product design and manufacturing/assembly systems engineering principles and rules with examples”, *Sustainable Systems and Technology (ISSST) 2010 IEEE International Symposium*.

Smith, S., and Yen, C.C. (2010), “Green product design through product modularization using atomic theory”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 26 790–798.

Tchertchian, N., Millet, D. and Pialot, O. (2011), “Modular grouping exploration to design remanufacturable products”, *Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*.

Tsai, Y. T. and Wang, K.S. (1999), “The development of modular-based design in considering technology complexity”, *European of Operational Research* 119:692-703.

Tseng, H.E., Chang, C.C. and Li, J.D. (2008), “Modular design to support green life-cycle engineering”, *Expert Systems with Applications* 34 2524–2537.

Umeda, Y., Fukushige, S., Tonoike, K. and Kondoh, S. (2008), “Product modularity for life cycle design”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57 13–16.

Wang, C.S., Lin, P.Y. and Chang, T.R. (2010), “Green quality function development and modular design structure matrix in product development”, Proceedings of the 14th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design.

Yang, C. L., Hsu, H.K., Huang C. L. (2010), “A study on green based collaborative product design”, Management of Innovation and Technology (ICMIT) 2010 IEEE International Conference.

Yang, Q., Yu, S. and Sekhari, A., “A modular eco-design method for life cycle engineering based on redesign risk control”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology DOI 10.1007/s00170-011-3246-1 (2011).

Yen, C.C. (2009), “Green product design by atomic theory”, National Taiwan University Master Thesis.

Yu, S., Yang, Q., Tao, J., Tian, X. and Yin, F. (2011), “Product modular design incorporating life cycle issues - Group Genetic Algorithm (GGA) based method”, Journal of Cleaner Production 19 1016-1032.

Zhang, J.X., Wang, W.W. and Cao, S.S. (2011), “Module design based on life cycle design”, Advanced Materials Research Vols. 228-229 pp 158-161.