

國立臺灣大學工學院機械工程學研究所

碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

基於功率密度目標與可製造性之馬達結構設計

Motor structure design based on power density  
target and manufacturability



林松慶

Sung-Ching Lin

指導教授：鄭榮和 博士

Advisor: Jung-Ho Cheng, Ph.D.

中華民國 99 年 7 月

July, 2010

# 國立臺灣大學碩士學位論文

## 口試委員會審定書

基於功率密度目標與可製造性之馬達結構設計  
Motor structure design based on power density  
target and manufacturability

本論文係林松慶君 (R95522515) 在國立臺灣大學機械工程學研究所完成之碩士學位論文，於民國 99 年 7 月 9 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

鄭榮和 鄭宇和 (指導教授)

吳文方 吳文方

羅應照 羅應照

系主任、所長 張所鎡 張所鎡

## 誌謝

此篇論文順利完成，首要感謝上帝賜給我一個願意傾囊相授、悉心教學的指導教授鄭榮和老師。從大二開始參與鄭榮和老師的太陽能車專題，學習到許多機械工程領域的專業能力，以及如何成為具有領導能力與負責任的人，在處事方法及態度上等各方面皆受益良多，其耗費心血、不畏主流價值觀，為了培養優秀人才所建構的 FORMOSUN 先進動力研究中心，更提供學生一個極佳的磨練機會與環境，在此獻上深刻的感恩與敬意。此外，亦感謝論文口試委員吳文方教授與羅應照副總，提出寶貴的經驗與意見指導論文完成。

也感謝自太陽能車時期就不斷給予指導與意見的學長們，更要感謝在電動車開發時期一同努力的實驗室學弟們，或許團隊工作進行過程中總有低潮與難熬的關卡，感謝上帝讓一切的困難過去，使每位成員都有學習成長，並且有更好的向心力與凝聚力。

最後，感謝母親始終不斷的支持與鼓勵，教導我許多事情，關心我的健康，並且體諒在兼顧團隊工作、學業與研究上，使得回高雄陪伴母親的時間較少，感謝義父趙又興對於研究與生活上的關心與意見，以及感謝父親的關心與供應。另外，也感謝相當重要的家人與朋友-宜婷，一路陪伴成為重要的支柱。謹在此對所有人表達我誠摯的感謝與祝福。

誌於 國立臺灣大學工學院綜合大樓 144 室

2010 年 8 月

## 中文摘要

因著全球暖化、能源危機的威脅，進入了電動車輛蓬勃發展的新時代，對於車用動力馬達性能要求逐漸提高，其中功率重量密度與功率體積密度為關鍵的重要指標。以傳統的馬達結構設計流程方法進行馬達結構設計，不僅僅在功率密度目標上常無法有效達成，也因為結構設計的結果在可製造性上產生問題，導致整個流程不斷產生設計迴圈，使設計工作的效率低落。

因此本研究針對傳統馬達結構設計流程方法進行問題探討與分析，建構了創新的馬達結構設計流程方法，以整合演化式結構最佳化(ESO)方法與基於功率體積密度之馬達結構材料設置、馬達結構材料分佈最佳化、馬達機構分件與材料配置幾何匹配、基於功率重量密度之分件重量配置與初步結構設計，為一演化式馬達結構最佳化(EMSO)設計流程方法，搭配在結構細部設計中考慮馬達可製造性設計，使得此創新的馬達結構設計流程方法，可以有效的達成功率密度目標，並使結構設計結果具備可製造性。

實務應用在 FORMOSUN 先進動力研究中心所開發的電動車輛平台 Green Jumper 之動力馬達結構設計上，不僅較傳統設計流程所設計的馬達提升 25.6%功率重量密度，與 10%功率體積密度之性能，更使得結構設計的結果通過可製造性判定，並且整個流程完全沒有任何設計迴圈之產生，可以說是極為有效地提升設計工作的效率，解決了傳統馬達結構設計流程之問題。

關鍵字：馬達功率密度、創新馬達結構設計流程方法、演化式馬達結構最佳化、可製造性設計

## Abstract

Because of global warming and energy shortage crisis, it is entering the electric vehicle vigorous development new time. So the performance requirements for vehicle motor gradually increase, and the power weight and volume density is key and important indicator. The motor structure traditional design method not only makes the power density cannot effectively be reached, but also have problems in manufacture. It causes the entire flow to produce unceasingly design circle, and makes the project work efficiency to be low.

Therefore this research carries on the question discussion and the analysis in the traditional motor structural design method. This research also constructs the innovation motor structural design method, include Evolutionary Structural Optimization (ESO), establishment of motor structural material based on of power volume density, the motor structural material distribution optimization, motor mechanism design with the material disposition geometry match, and the weight disposition and preliminary structural design based on the power weight density. The integration of these processes is named Evolutionary Motor Structural Optimization (EMSO). EMSO can effectively achieve the power density goal, and makes the structural design result has the manufacturability.

The practice application in motor structural design of electric vehicle platform, Green Jumper, which the FORMOSUN advanced power research center developed, not only promote 25.6% power weight density and 10% power volume density, compared to traditional design method, but also make the structural design result passed the manufacturability determination. And the entire flow does not have any design circle. This research result can promote the project work efficiency, and solve problems in the traditional motor structural design flow.

Keywords-motor power density, the innovation motor structural design method, evolutionary motor structural optimization (EMSO), design manufacturability

# 目錄

誌謝 .....	4
中文摘要 .....	5
Abstract .....	6
目錄 .....	7
圖目錄.....	11
表目錄.....	14
<b>第一章 緒論.....</b>	<b>15</b>
<b>1-1. 研究背景.....</b>	<b>15</b>
1-1-a. 現今馬達應用發展 .....	15
1-1-b. 電動車輛發展對於動力馬達結構設計需求的影響 .....	17
<b>1-2. 研究動機.....</b>	<b>19</b>
1-2-a. 馬達基本構造說明 .....	19
1-2-b. 以電磁材料與結構材料分類馬達構造.....	20
1-2-c. 馬達結構材料各部分之作用 .....	20
1-2-d. 傳統馬達結構設計流程說明 .....	22
1-2-e. 傳統馬達結構設計流程所造成的問題.....	25
<b>1-3. 研究目的.....</b>	<b>27</b>

1-3-a. 建立創新的馬達結構設計流程與方法.....	27
1-3-b. 電動車輛之動力馬達實務應用 .....	28
1-4. 論文架構.....	35
<b>第二章 文獻回顧與探討 .....</b>	<b>37</b>
2-1. 文獻回顧主題分類與年份表.....	37
2-2. 車用動力馬達功率密度發展.....	41
2-3. 馬達功率密度提升方法 .....	42
2-4. 結構設計最佳化方法.....	42
2-5. 可製造性設計方法.....	43
2-6. 文獻回顧探討與總結.....	44
<b>第三章 創新馬達結構設計流程.....</b>	<b>46</b>
3-1. 傳統馬達結構設計流程步驟問題分析.....	46
3-2. 建構基於功率密度目標與可製造性之馬達結構設計流程 .....	49
3-2-a. 馬達結構設計步驟修正 .....	49
3-2-b. 馬達製程設計步驟修正 .....	50
3-2-c. 整合修正之步驟為創新馬達結構設計流程 .....	52
<b>第四章 演化式馬達結構最佳化設計 .....</b>	<b>55</b>

<b>4-1. 演化式馬達結構最佳化(EMSO)設計流程 .....</b>	<b>55</b>
4-1-a. EMSO 設計流程步驟說明 .....	55
4-1-b. 演化式結構最佳化(ESO)計算理論說明 .....	58
4-1-c. 分析軟體介紹說明 .....	59
<b>4-2. 演化式馬達結構最佳化設計實務應用 .....</b>	<b>62</b>
4-2-a. 基於功率體積密度的初始結構材料設置 .....	62
4-2-b. 馬達結構負載與邊界條件設置 .....	64
4-2-c. 演化式馬達結構材料分佈最佳化分析 .....	72
4-2-d. 以分佈最佳化分析結果進行機構分件設計 .....	78
4-2-e. 機構分件設計與材料分佈最佳化結果幾何匹配 .....	78
4-2-f. 基於功率重量密度的重量最佳化配置與初步結構設計 .....	80
4-2-g. 馬達各機構分件細部設計 .....	81
4-2-h. 演化式馬達結構最佳化設計與過去傳統設計結果之比較 .....	83
<b>第五章 馬達可製造性設計 .....</b>	<b>85</b>
5-1. 可製造性設計方法說明 .....	85
5-2. 本研究採用之馬達製造方法介紹 .....	87
5-3. 針對製造方法建構製程設計限制與參數資料庫 .....	89



5-4. Green Jumper 動力馬達細部設計與可製造性判定.....	95
5-5. Green Jumper 動力馬達可製造性設計結果.....	99
<b>第六章 本研究應用成果比較與討論 .....</b>	<b>101</b>
6-1. 實際應用成果比較.....	101
6-2. 比較結果討論 .....	102
<b>第七章 結論與未來方向 .....</b>	<b>107</b>
7-1. 研究結論.....	107
7-2. 未來研究方向建議.....	109
<b>參考文獻.....</b>	<b>110</b>



## 圖目錄

圖 1-1	馬達應用發展領域示意圖 .....	16
圖 1-2	馬達基本構造圖(Siemens' NEMA copper-rotor motors) .....	19
圖 1-3	馬達各結構材料構造位置圖 .....	21
圖 1-4	傳統馬達結構設計流程圖 .....	24
圖 1-5	本研究團隊自行開發製造的都會型鋰電池電動車 Green Jumper .....	29
圖 1-6	電動車輛 Green Jumper 動力馬達電磁設計之定轉子、繞線製造結果	30
圖 1-7	傳統結構設計流程所設計製造之結果 .....	31
圖 1-8	持續減重下功率重量密度變化 .....	33
圖 1-9	傳統的設計流程結果其體積與最小外圍體積比較 .....	34
圖 3-1	傳統馬達結構設計流程問題分析圖 .....	48
圖 3-2	馬達結構設計步驟衝突示意圖 .....	50
圖 3-3	馬達結構設計步驟修正示意圖 .....	50
圖 3-4	馬達結構設計步驟修正示意圖 .....	51
圖 3-5	創新馬達結構設計流程 .....	54
圖 4-1	演化式馬達結構最佳化(EMSO)設計方法流程 .....	57
圖 4-2	ESO 計算流程圖[43] .....	59
圖 4-3	abaQuest 物件導向最佳化程式 .....	61
圖 4-4	abaQuest 在 ESO 分析參數的設定介面 .....	61
圖 4-5	基於功率體積密度的初始結構材料設置 .....	63
圖 4-6	初始材料將定轉子與繞線空間移除的剖面示意圖 .....	63
圖 4-7	定子和外殼組裝示意圖 .....	65
圖 4-8	轉子構造組成圖 .....	66
圖 4-9	轉子軸承與軸承座結構裝配圖 .....	66

圖 4-10	在外殼上的鎖固座 .....	67
圖 4-11	定子負載施加處 (剖面圖) .....	69
圖 4-12	轉子軸承承靠示意圖 .....	70
圖 4-13	馬達固定鎖固平面 .....	71
圖 4-14	演化式馬達結構材料分佈最佳化分析計算流程 .....	73
圖 4-15	第一次分析結果應力分佈圖 (剖面圖) .....	74
圖 4-16	結構元素移除過程 (剖面圖) .....	76
圖 4-17	最終演化結果 (剖面圖) .....	77
圖 4-18	馬達機構分件設計 .....	78
圖 4-19	分件設計與材料分佈幾何匹配圖 .....	79
圖 4-20	各機構分件細部設計 .....	82
圖 5-1	馬達可製造性設計流程 .....	87
圖 5-2	CNC 銑床加工 .....	88
圖 5-3	銑刀和工件接觸之移除示意圖 .....	88
圖 5-4	採用 CNC 量產加工的筆記型電腦外殼 .....	89
圖 5-5	刀具殘留示意圖 .....	90
圖 5-6	各種外徑之銑刀 .....	91
圖 5-7	銑刀夾持於刀座 .....	91
圖 5-8	刀具和刀座銑切時和工件的相對位置關係 .....	92
圖 5-9	工件負角與刀具方向關係 .....	93
圖 5-10	五軸加工機示意圖 .....	93
圖 5-11	馬達細部設計的初步結果 .....	96
圖 5-12	定子外殼含解角器側軸承座結構違反可製造性判定之說明圖 .....	97
圖 5-13	輸出軸端軸承座結構違反可製造性判定之說明圖 .....	99
圖 5-14	定子外殼含解角器側軸承座結構設計修正 (剖面圖) .....	100

圖 5-15	輸出軸端軸承座結構設計修正（剖面圖） .....	100
圖 6-1	創新馬達結構設計流程與傳統馬達結構設計流程之馬達外型比較	102
圖 6-2	非軸對稱減重槽設計示意圖 .....	104
圖 6-3	本研究成果之馬達與傳統設計流程之馬達分件比較 .....	106
圖 7-1	本研究所發展之創新馬達結構設計流程 .....	108



## 表目錄

表 1-1	馬達構造材料用途分類表 .....	20
表 1-2	馬達結構材料各部分之作用 .....	21
表 1-3	都會型純鋰電池電動車 Green Jumper 之整車性能規格 .....	29
表 1-4	電動車輛 Green Jumper 動力馬達電磁設計結果規格 .....	30
表 1-5	各電磁材料構造與結構材料構造之重量所佔比例統計表 .....	32
表 1-6	本研究成果在功率密度上之預期目標 .....	34
表 2-1	文獻回顧主題分類與年份表整理 .....	37
表 2-2	車用動力馬達功率密度發展比較列表 .....	41
表 4-1	定子負載條件 .....	68
表 4-2	轉子負載條件 .....	70
表 4-3	依據設計目標之電磁材料與結構材料比例與重量 .....	80
表 4-4	設計後之各機構分件的估材料重量比例與對應實際重量 .....	80
表 4-5	EMSO 設計結果與傳統設計結果比較 .....	83
表 4-6	最終結果性能提升比較 .....	84
表 5-1	馬達銑切製程設計限制與參數資料表 .....	94
表 5-2	定子外殼含解角器側軸承座結構之可製造性判定結果 .....	96
表 5-3	輸出軸端軸承座結構可製造性判定結果 .....	98
表 6-1	本研究實際應用成果比較 .....	101

# 第一章 緒論

## 1-1. 研究背景

本研究針對高功率密度馬達進行結構設計之探討，特別是在電動車輛上使用之高功率輸出動力馬達，如圖 1-1 所示。因此本節主要說明現今馬達的應用發展，以及針對馬達在電動車輛上應用作為推進動力使用，所造成馬達結構設計需求上的影響與轉變。

### 1-1-a. 現今馬達應用發展

馬達應用之場合相當廣泛，如圖 1-1 所示，一般日常生活常見的用品中就常常使用到馬達，如電風扇、吸塵器、洗衣機、冷氣或是冰箱壓縮機，而對於消費型電子 3C 產品，如電腦風扇、光碟機、硬碟等，馬達也是不可或缺的重要零組件。此外，捷運、台鐵電聯車與高鐵也是藉由馬達來推動車輛前進。除了日常生活應用之外，工業場合應用更是不勝枚舉，如工具機、生產線、生產設備、機器手臂等，都必須利用馬達來達成工作目的。

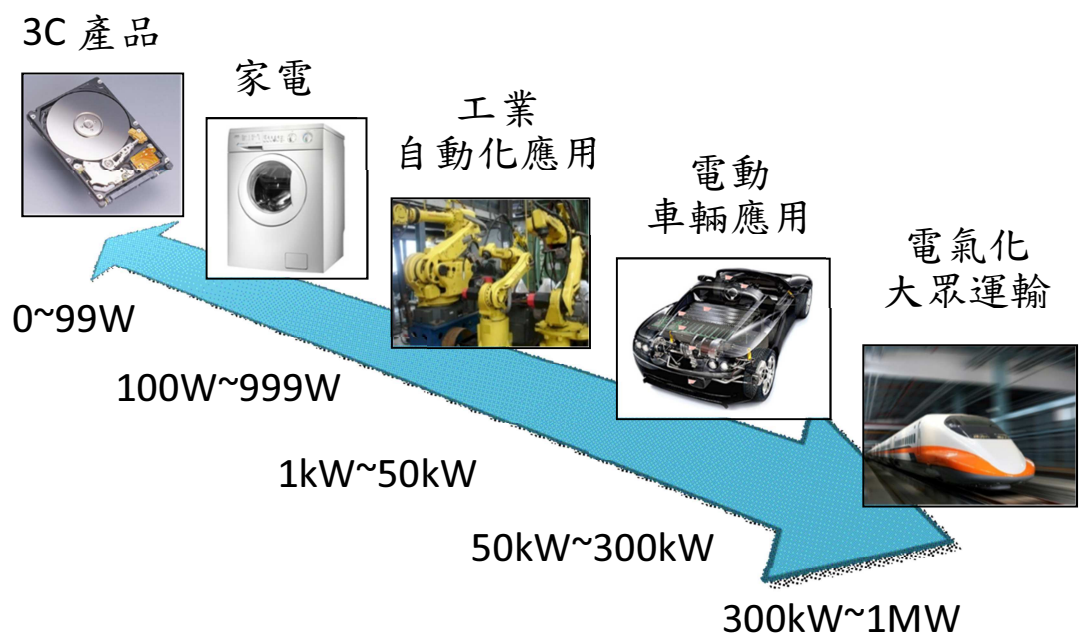


圖 1-1 馬達應用發展領域示意圖

由於近年來能源短缺與氣候變遷的議題相當受到重視，因此世界各國不論是食衣住行，各方面的節能減排活動都不斷的積極推廣。其中在交通的部分，是人類日常生活中對於節能減排影響最大的部分，佔碳排放比例的 13.1% [1]，所以針對交通載具在節能減排上的發展也逐漸積極起來。目前幾乎世界上所有的大小車廠皆推出電動車輛來呼應未來交通型態的改變，隨著電動車輛的發展，馬達在車輛上的開發應用也受到相當的重視，除了原本小型附屬系統，如雨刷、電動窗等使用之馬達，作為推進車輛的動力馬達也成為馬達技術發展的重要領域之一。從圖 1-1 來看，馬達的應用領域從小功率的 0~100W 到超大功率的 1MW，都有其應用產品，而電動車輛所需的動力馬達功率隨著車輛性能要求的不同而大致落在 50~300kW 左右。

### 1-1-b. 電動車輛發展對於動力馬達結構設計需求的影響

配合電動車輛之發展，馬達在作為動力應用上之研究也開始逐漸受到重視，然而在車輛使用上使馬達技術面臨一個新的挑戰---功率密度的提升。馬達功率密度係指功率對重量或是體積的比值，單位為 kW/kg 與 kW/Liter。功率密度越高，代表能夠在功率輸出的需求下，有更輕更小的馬達。重量與體積對於車輛之關鍵重要性在於：重量越重，行駛耗能越大；體積越大，車上能用的空間越少。

車輛行駛的耗能來源可以用以下方程式來表示：

$$P = mav + \frac{1}{2} \rho C_d A v^3 + mgv \left[ C_{rr} \cos(\tan^{-1} G) + m g \sin(\tan^{-1} G) \right],$$

P 為行駛總耗能，m 為車輛總重，a 是加速度，v 是車速，g 為重力常數，C<sub>rr</sub> 是滾動阻力，G 是坡度，ρ 是空氣密度，C<sub>d</sub> 是阻力係數，A 是車輛正投影面積。

因此可以發現除了空氣阻力的耗能項目以外，全都和重量有關，尤其是車輛輪胎行駛時一定會產生滾動阻力，重量越重的車子在行駛的同時耗能就比重量輕的耗能大，何況是加速時所帶來的耗能影響更大。這樣的關係使得電動車輛對於馬達的要求不單單是提供足夠的功率，還要重量輕，這是由於過去車輛以汽油作為能量儲存之手段，由於汽油儲存化學能之能量密度為電動車上鋰電池的 70 倍，因此電動車



輛被迫必須使用足夠的重量來裝載鋰電池，所造成的結果就是馬達必須要盡量降低重量。一般而言，約 1250kg 的車輛加上兩位乘客的重量大概為 1400kg，要有等同於 2 公升中型房車的性能表現（如 TOYOTA Altis），大約需具備 100kW (140hp)的動力輸出，如果使用一般的工業用馬達，其功率重量密度約為 0.2~0.5kW/kg，等於馬達重量為 200~500kg，車輛其他系統可以使用的剩餘重量只有 750~1050kg。然而如前文所述，電動車輛如複合動力車或是純電動車，都必須加裝能量密度較低的電池系統作為電力來源，勢必會壓縮可使用重量的空間，但是車輛其他如車體結構、底盤等之重量需求並沒有消失，如此一來馬達過重的問題就產生了。對於體積來說也是一樣的問題，電池的能量體積密度一樣遠小於汽油，因此需要空間裝載電池，造成馬達可以使用的空間也是相當有限。所以作為車輛動力馬達而言，高功率重量與體積密度是一個重要的關鍵性能指標。

從功率重量或體積密度的角度來看，重量與體積是在分母，功率是在分子，要提升功率密度的方法很直覺，要不就是增加功率，要不就是減少重量或是體積，因此過去對於馬達結構設計來說，只要能夠負擔馬達的荷載需求、滿足剛性或是強度的條件即可，並不會特別在意重量與體積的問題，事實上，過份設計的情況是常常可見的，然而這樣的設計概念在車輛應用上就使馬達完全無法達到對於功率密度的要求，因此本研究即是在探討如何在車輛使用之馬達結構設計上，將重量與體積降到最極限的程度。

## 1-2. 研究動機

此部分主要針對本研究之動機進行說明。藉由研究背景的瞭解，要在車輛上作為動力馬達，其功率密度必須達到某一程度以上才能夠滿足重量與體積的限制要求，因此對於馬達結構設計需求造成影響與轉變，由過去只要達到其結構負載作用目的即可，改變為必須考量其重量與體積限制，因此有必要瞭解馬達結構相關之背景知識與深入探討過去傳統馬達結構設計之流程。

### 1-2-a. 馬達基本構造說明

馬達的基本構造主要有定子、轉子、其他結構件與其他配件等，如圖 1-2 所示。定子顧名思義為馬達上具有電磁場作用但是固定不動之構造，而轉子為藉由與定子之間的電磁場作用而進行旋轉運動之構造。其他結構件與其他配件則為了支撐整個定轉子與提供特定功能而存在。

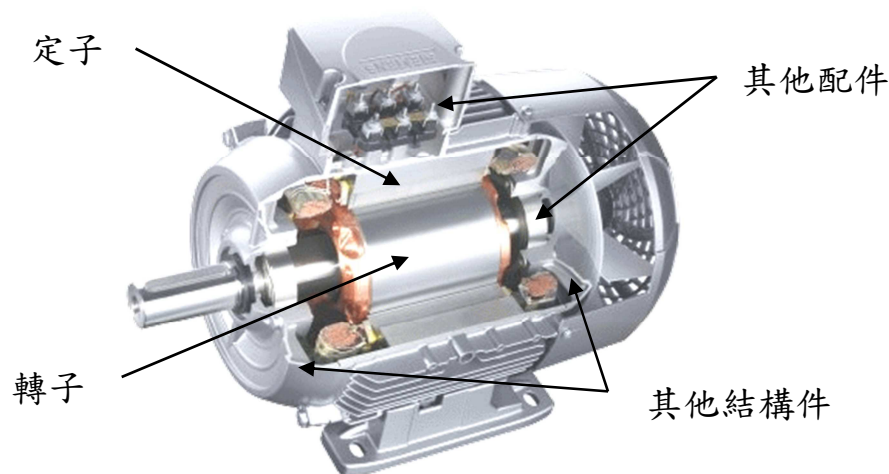


圖 1-2 馬達基本構造圖(Siemens' NEMA copper-rotor motors) [2]

### 1-2-b. 以電磁材料與結構材料分類馬達構造

馬達的構造可以其材料用途作一分類，如表 1-1。作為電磁場產生與作用的部分稱為電磁材料，包含定子、轉子、銅繞線、永久磁鐵。作為支撐結構作用的部分稱為結構材料，包含外殼、軸承座、轉軸等。另外有些構造並非作為電磁或是結構材料之用途，如電源接頭、軸承、螺栓等，則歸類為配件材料。

表 1-1 馬達構造材料用途分類表

材料用途	構造名稱
電磁材料	定子
	轉子
	銅繞線
	永久磁鐵
結構材料	外殼
	軸承座
	轉軸
配件材料	電源接頭
	軸承
	螺栓

### 1-2-c. 馬達結構材料各部分之作用

馬達結構材料各部分之作用如表 1-2 說明，圖 1-3 為對應各結構材料構造之位置。大體來說，結構材料必須提供支撐電磁材料構造之位置，並且承受馬達使用上的荷載與外來環境造成的受力條件，此外亦擔任保護內部組件或是提供使用環境下之遮蔽。

表 1-2 馬達結構材料各部分之作用

結構材料構造名稱	作用說明
外殼	固定定子位置之構造，並且支撐馬達整體之重量，藉由鎖固方式固定整個馬達。有的馬達亦會藉由外殼作為熱傳媒介，在其上設計散熱鰭片或是水流道來進行散熱。
軸承座	安裝軸承之構造，並且支撐轉子整體之重量。通常採用兩個軸承來支撐轉子，因此也會有兩個軸承座來配合轉子兩端的軸承，而軸承座與外殼的配合精度會影響轉子運作之順暢度。
轉軸	傳遞轉子矽鋼片扭力並輸出之構造，並且利用軸承支撐在軸承座上，達到可以同時擔任荷重與轉動之功能。

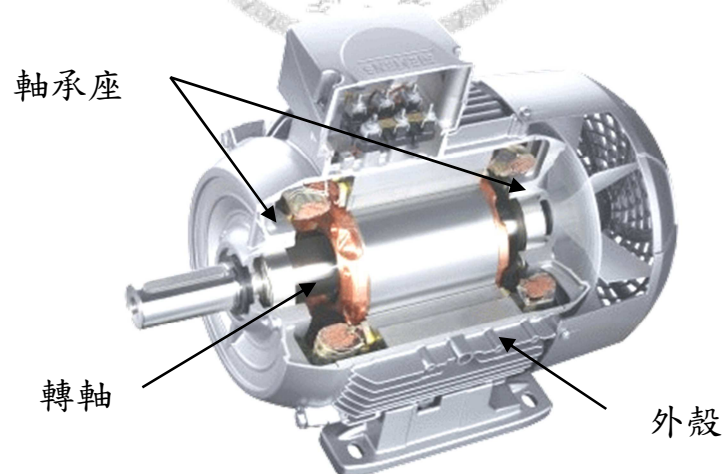


圖 1-3 馬達各結構材料構造位置圖

#### 1-2-d. 傳統馬達結構設計流程說明

圖 1-4 為傳統馬達結構設計流程，當完成馬達性能規格訂立，即由電磁工程師進行電磁設計，電磁設計之結果在經過散熱設計後，便會交由結構工程師進入機構設計，在這步驟主要為決定所有配件與結構件該如何佈置才能達到馬達運作的目的，並且決定轉軸大小與軸承配合，以及其他電力線出入規劃等。接著將各機構進行分件設計，決定出各結構件以進行結構設計，一般情況來說，機構設計與分件設計就會將結構件的形狀決定下來，結構設計僅瞭解結構件是否能夠滿足負載條件下結構強度與剛性的需求，如果不符合需求，就會針對結構較弱的部分進行補強，即完成結構設計的部分。當所有組件設計完成後，其組裝結果的重量與體積即決定了馬達的功率體積密度與功率重量密度，然而這時候的結果必須和功率密度之設計目標進行比較，如不符合功率密度目標即要針對各結構分件進行減少體積或降低重量的設計，因此需要不斷進行設計修改，以兼顧強度剛性與功率密度目標。

當完成馬達結構設計後，就要交由製程工程師針對導入製造的部分進行製程設計，並且以製程設計結果進行評估是否符合製造的效益。一般而言，過於複雜的製造程序或是難度過高的製造能力，將提高成本的支出，因此多半不會採用超過本身製造能力的製程設計，所以當不符合製造效益時，就必須針對製程能力進行提升或是結構設計進行修改。對於大多數的公司而言，通常修改結構設計的結果會比較經濟的選擇。無論選擇哪個方案，都必須要不斷進行設計修改來同時滿

足結構設計與製程設計上的要求，以達成最終馬達可以導入製造的結果。如果真的無法滿足各階段的目標要求，則轉為進行電磁設計結果的修改，看看是否能夠使後續的結構設計步驟滿足各階段的設計條件。



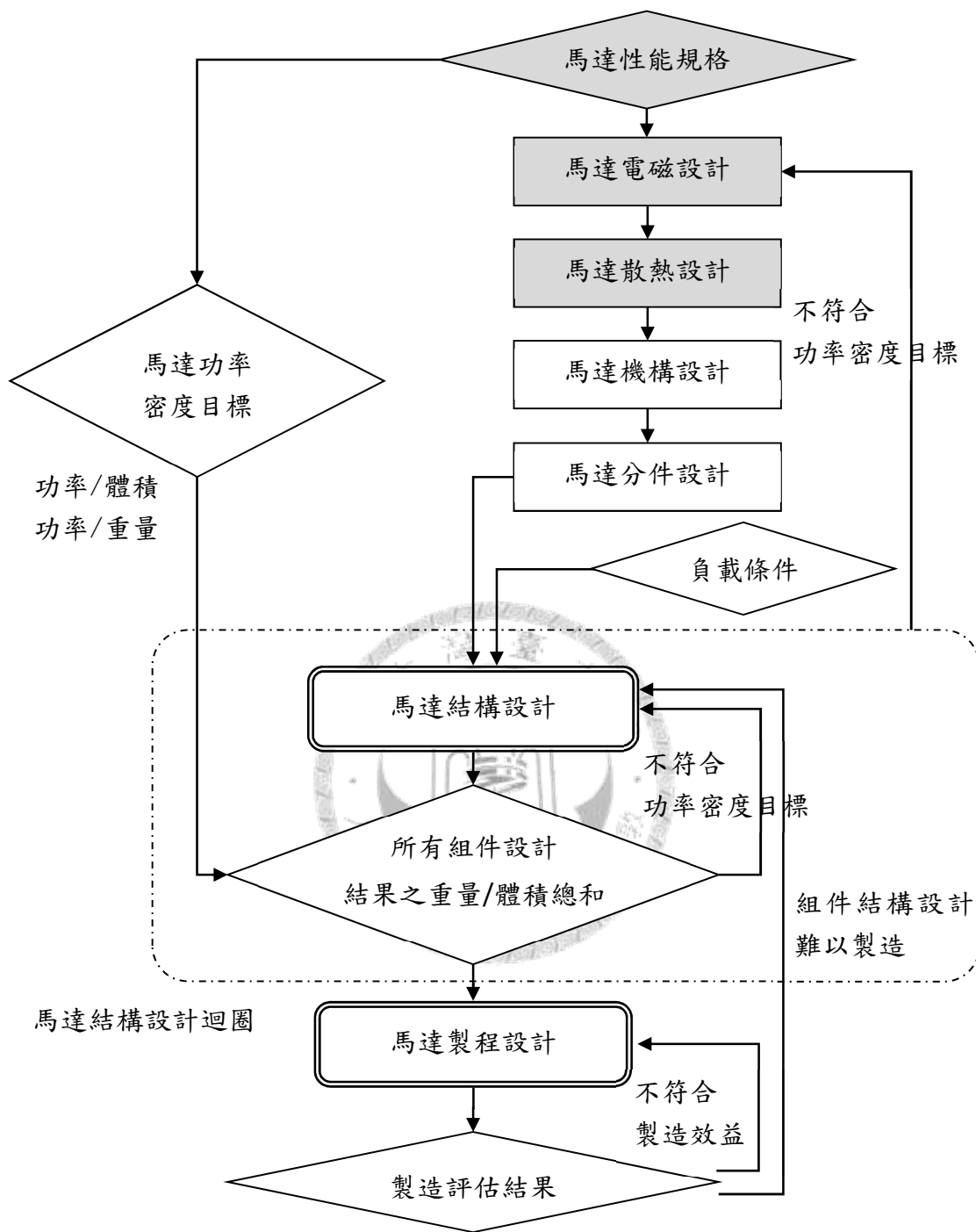


圖 1-4 傳統馬達結構設計流程圖

### 1-2-e. 傳統馬達結構設計流程所造成的問題

從圖 1-4 中，可以看出傳統的馬達結構設計流程步驟，產生了四個設計的迴圈：第一個是結構設計結果在重量和體積上的總和，必須要符合功率密度的目標，如果不符合還要重新進行減少體積或降低重量的設計，但同時必須滿足負載上的需求；第二個是馬達製造評估的結果如果不符合製造效益，則必須進行製程能力上的提升，意味著必須重新進行製程設計；第三個是當製程能力提升面臨成本考量時，則轉為針對結構設計結果進行修改，以滿足現有的製程能力，然而此部分之修改又同時影響到功率密度目標與負載需要；第四個是當所有的方案都沒有辦法使電磁設計結果導入實際馬達的製造，迫使要求電磁設計進行修改，等於是必須重頭開始，造成一個影響範圍廣大的設計迴圈。

傳統馬達結構設計流程形成的設計迴圈，對於馬達結構設計造成了四個問題：第一個是結構工程師在設計過程中充滿不確定性。由於結構設計結果的重量與體積會影響功率密度目標是否能夠達成，然而對於各零組件的減重設計卻沒有一個標準，瞭解哪一個零件該減重，或是哪一個不需要減重，因此只能夠每一個零件盡量輕量化設計，但是對於各零組件組裝後是否能夠達到整體的功率密度，卻無法在設計過程中確定；第二個是結構設計的最佳化只能針對各單一零件。因為結構在設計時，是針對機構與分件設計的結果來進行，只能依據各零組件設計成一定形狀後才開始最佳化，因此並非考量馬達整體受力條件下的最佳化，在結構設計上會落入機構與分件設計的侷限及盲點。



第三個是迴圈導致設計時程的增加。為了解決各迴圈的問題，必須不斷的進行迴圈以謀求答案收斂的可能性，然而各設計工作由不同的工程師來進行，如此一來便使得馬達整體設計時程的延長；第四個是時程壓力導致功率密度目標難以達成。由於產品通常面臨極大的上市時間壓力，產品推出的時間有其市場規劃，如果延誤產品上市時機，輕則造成產品競爭力下降，重則導致必須改變市場產品策略，使得過去投入的資源付諸流水，因此在面對時程壓力下功率密度目標往往是首要犧牲的對象，因為在自動化生產或是家電等應用領域，對於功率密度的要求並不嚴苛，大一點或是重一點的馬達依然可以使用，只要功率與負載強度、剛性有達到即可，並且最重要的是能夠導入製造，所以常以降低功率密度目標做為解決迴圈的手段。但是對於開發車用動力馬達而言，功率密度目標是無法被犧牲的，因此傳統的設計流程方法在設計車用動力馬達時確遇到相當大的困難點。

### 1-3. 研究目的

歸納傳統馬達結構設計流程所包含的問題，為：(1) 馬達結構設計過程充滿不確定性；(2) 結構最佳化只能依據機構分件設計結果的單一零件；(3) 太多的設計迴圈導致消耗掉許多時間；(4) 在時間壓力下妥協的結果往往犧牲功率密度。因此針對這些問題，本研究之目的有以下兩項：

#### 1-3-a. 建立創新的馬達結構設計流程與方法

本研究預期建立一創新改革的馬達結構設計流程，並發展其關鍵的設計方法，能夠解決傳統馬達結構設計流程中的各項問題。主要是希望藉由導入結構最佳化方法，配合馬達設計所必須考量的概念，以及應用時所需要滿足的條件，成為屬於馬達結構設計使用之最佳化方法，讓結構設計可以有效達成功率密度目標，而不需要進行多次的迴圈以求結果的收斂。此外，本流程方法必須在結構設計的同時能夠評估在製造上是否具有可行性，使得結構設計的結果就已經滿足自身製程能力限制，進一步確保了製程評估結果之效益，讓結構設計結果到製程設計的階段不會因為製程能力無法達到而產生迴圈，只要將製程設計完即可。如此便能使整個設計流程之迴圈產生的機會降到接近零，且可以絕對達到每一個階段預定的設計目標。

### 1-3-b. 電動車輛之動力馬達實務應用

本研究將藉由實際電動車輛所需要的動力馬達，來進行本研究建立的創新馬達結構設計流程方法在實務上之應用。其電動車輛的平台採用本實驗室團隊所自行設計開發製造的純鋰電池電動車 Green Jumper，並且依據目前的馬達電磁材料設計結果，包含定子、轉子、繞線，作為結構設計的初始起點，加上對應比較過去以傳統馬達結構設計流程所實際設計製造的結果，來作為本研究在功率密度目標訂定上的基礎。

#### A. Green Jumper 電動車輛介紹說明

圖 1-5 為本實驗室團隊所自行設計開發製造的純鋰電池電動車 Green Jumper，其相關性能規格如表 1-3 所列。Green Jumper 的設計理念在於藉由提升都會型電動車輛的性能，讓使用者感受到電動車輛不再是過去性能較汽油引擎車輛落後，甚至是可以超越的。並且以各種最佳效率的設計，得到整車極佳的行駛效率，提供最大的行駛里程，搭配可彈性增加與抽換的鋰電池系統，使得 Green Jumper 可從一個都會區的使用範圍，擴大至其他都會區，只要更換電池系統便可以獲得能源補充，遠較充電之方式節省時間，儘管如此，Green Jumper 依然提供充電的設計，在有插頭供電且時間允許的情況下，等待其能源補充完成，彈性的能源補充方案，可以讓能源的補充不受時間與地域的限制，彷彿讓此電動車輛的行駛應用範圍在不同的都會區「跳躍」，這也是 Green Jumper 命名的由來。



圖 1-5 本研究團隊自行開發製造的都會型鋰電池電動車 Green Jumper

表 1-3 都會型純鋰電池電動車 Green Jumper 之整車性能規格

項目	內容
車輛淨重	900kg
動力型式	前後各一顆永磁同步馬達共 62kW (單一馬達極限功率 31kW)
電池型式	鋰錳高分子電池 單組電池系統 6.6kWh (整車可安裝三組共 19.8kWh)
最高時速	140km/h
續航能力	單組電池系統 60km (三組電池系統可行駛 180km)

## B. Green Jumper 電動車輛使用之動力馬達電磁設計結果說明

圖 1-6 為本實驗室團隊研究生徐子庭同學設計之定轉子與繞線結果[3]，其主要藉由轉子磁石形狀與位置之設計，讓轉子產生之扭力提升，達到更大功率的輸出效果。其馬達與相關定轉子繞線的規格如表 1-4 所示。



(a)定子+繞線（整線前） (b)定子+繞線（整線後） (c)轉子（無磁鐵）

圖 1-6 電動車輛 Green Jumper 動力馬達電磁設計之定轉子、繞線製造結果

表 1-4 電動車輛 Green Jumper 動力馬達電磁設計結果規格

項目	內容
最大功率	31kW
最大扭矩	145Nm
最高轉速	6200rpm
重量 (kg)	定子：12.8、轉子：4 磁鐵：0.6、繞線：5.5
尺寸 (mm)	定子外直徑：250、轉子外直徑：153.34、 轉子內直徑：102、疊積厚度 55

電磁件產生之 最大功率重量密度	1.35kW/kg (22.9kg)
電磁件產生之 最大功率體積密度	11.3kW/Liter (2.7Liter)

### C. 依據傳統設計流程之馬達實際製造結果

圖 1-7 為依據傳統結構設計流程所實際進行設計製造之結果。其總重量為 38.1kg，體積為 11.3Liter，因此統合整體馬達之重量與體積實際結果，最大重量功率密度為 0.81kW/kg，最大體積功率密度為 2.74kW/Liter。而各電磁材料構造與結構材料構造之重量所佔比例統計如表 1-5 所示。



圖 1-7 傳統結構設計流程所設計製造之結果

表 1-5 各電磁材料構造與結構材料構造之重量所佔比例統計表

構造名稱	重量(kg)	比例%
電磁材料	22.9	60
定子	12.8	34
轉子	4	10
磁鐵	0.6	2
繞線	5.5	14
結構材料	15.2	40
定子外殼	3.3	9
解角器側外殼軸	2.4	6
承座		
輸出軸側外殼軸	3.5	9
承座		
輸出轉軸	1.5	4
轉子軸轂	1.2	3
螺栓	2.5	7
其他	0.8	2

#### D. 本研究目的應用成果預期之功率密度目標訂定與比較

從統計表來看，電磁材料構造與結構材料構造各佔總重量的 60% 與 40%。如果在電磁材料不變的情況下，持續對結構材料進行減重到剩下 10%，約 1.5kg，其功率重量密度變化如圖 1-8 所示。

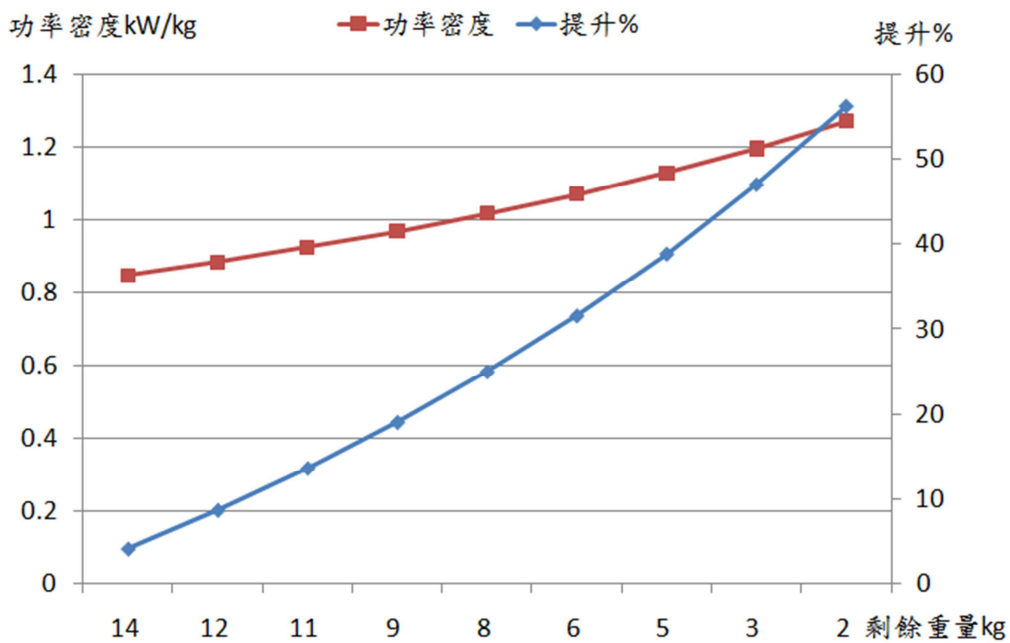


圖 1-8 持續減重下功率重量密度變化

由圖 1-8 與表 1-5 可知，結構材料重量無法減到剩下 2kg，即提升功率重量密度至 1.27kW/kg，因此取減重至剩下 50%的結構材料，即 7.6kg 作為目標，使最大功率重量密度成為 1.017kW/kg，提升 25.6%的功率重量密度性能。在體積的部分，傳統的結構設計流程其結果為 11.3Liter，其最大功率體積密度為 2.74kW/Liter，如果考量包覆定、轉子與繞線的最小外圍體積，約為 10.3Liter，其比較為圖 1-9 所示。因此最大功率體積密度可以成為 3.01kW/Liter，提升 10%的功率體積密度性能。



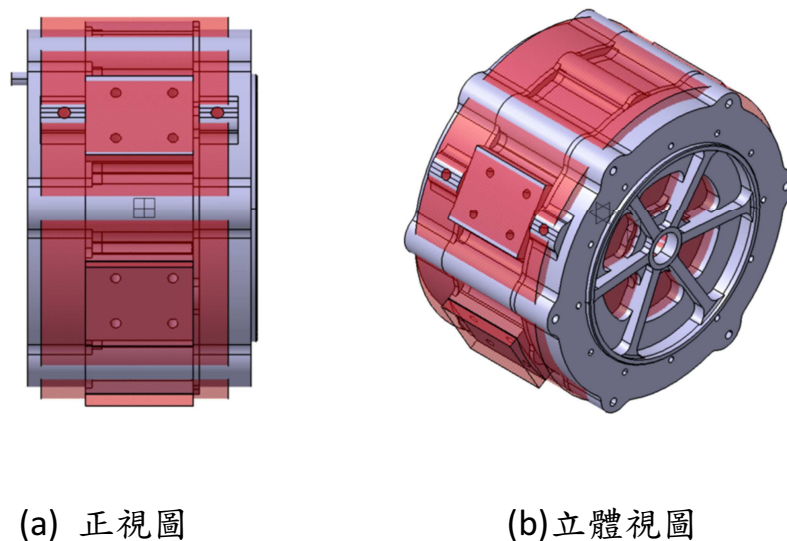


圖 1-9 傳統的設計流程結果其體積與最小外圍體積比較

由上面所述的比較計算，本研究目的應用成果預期之功率密度目標訂定為表 1-6 所列，這結果將作為本研究後續章節，進行新的動力馬達結構設計流程所要使用的目標。

表 1-6 本研究成果在功率密度上之預期目標

功率密度目標	傳統設計流程	本研究成果	提升性能
功率/重量(kW/kg)	0.81	1.017	25.6%
功率/體積 (kW/Liter)	2.74	3.01	10%

## 1-4. 論文架構

### 第一章 緒論

緒論的部分說明本研究相關的背景知識以及研究動機、目的，並且訂立本研究成果的預期目標。

### 第二章 文獻回顧與探討

本章主要是針對馬達在功率密度提升上的發展情況、馬達功率密度提升的方法、結構最佳化設計方法，以及可製造性設計方法四個方面的相關文獻回顧，並且進行文獻探討。

### 第三章 創新馬達結構設計流程

此部分是藉由流程問題分析來改善設計流程，針對各設計迴圈產生的原因來提供解決方案，並且建構一新的創新馬達結構設計流程，用此流程進行後面章節在電動車輛 Green Jumper 之新款動力馬達設計，並達成第一章所定的預期目標。

### 第四章 演化式馬達結構最佳化設計

本章會對演化式結構最佳化(Evolutionary Structural Optimization, ESO)方法進行詳細介紹，並且依據第三章所建構的創新馬達結構設計流程方法，將 ESO 與功率密度目標邊界條件設定、馬達初始分析材料設置、馬達材料分佈最佳化、最佳重量配置等馬達結構設計之方法，

整合為演化式馬達結構最佳化設計(Evolutionary Motor Structural Optimization, EMSO)方法。同時藉由此方法做為創新馬達結構設計流程的第一個階段，來進行電動車輛 Green Jumper 之新款動力馬達結構設計。

## **第五章 馬達可製造性設計**

此章接續第四章作為創新馬達結構設計的第二階段，主要是承接演化式馬達結構最佳化設計之結果，依據製程能力限制與參數所建構之資料庫來設定可製造性判準，並考量可製造性判準來檢視與完成細部的結構設計。

## **第六章 應用成果比較與討論**

將應用創新馬達結構設計流程與方法所進行的實際設計結果，與傳統馬達設計流程之結果進行比較與討論。

## **第七章 結論與未來方向**

總結本研究之成果比較與討論，並且針對本研究所局限的問題進行探討，作為本研究未來延伸的方向。

## **參考文獻**

條列本研究所參考的技術報告、文章、論文與書籍。

## 第二章 文獻回顧與探討

### 2-1. 文獻回顧主題分類與年份表

本研究針對第一章緒論所探討的內容與結果，將文獻回顧的主題定為四個部分：(1) 瞭解車用動力馬達功率密度發展情況。藉由此部分的探討，將本研究之目標成果與國內外的開發進展進行比較，定位本研究成果之技術水平位置；(2) 探討馬達功率密度提升方法。藉由瞭解過去之研究如何能夠提升馬達功率密度，評估是否有合適之方法可作為本研究參考；(3) 結構設計最佳化方法的相關研究整理歸納，便於針對馬達結構最佳化導入適合的最佳化工具，以有效整合至創新馬達結構設計流程；(4) 蒐集可製造性設計方法的相關研究與應用資料，作為應用至馬達結構設計之基礎。以上主題相關的文獻整理於以下年份表 2-1。

表 2-1 文獻回顧主題分類與年份表整理

年份	文獻名稱	主題分類
1986	J. Corbett, "Design for Economic Manufacture," Annals of the CIRP, Vol. 35/1, 1986 [4]	可製造性設計方法
1988	M. P. Bendsoe and N. Kikuchi, "Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 71, pp. 197-224., 1988 [5]	結構設計最佳化方法
1991	M. P. Bendsoe, H. C. Rodrigues, "Integrated Topology and Boundary Shape Optimization of 2D Solid," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 87, pp. 15-34., 1991 [6]	結構設計最佳化方法
1992	H. P. Mlejnek, "Some Aspects of Genesis of Structures,"	結構設計

	Structural Optimization, Vol. 5, pp. 64-69., 1992 [7]	最佳化方法
1992	John Farris and Winston A. Knight, "Design for Manufacture: Expert Processing Sequence Selection for Early Product Design," Annals of the CIRP, Vol. 41/1, 1992 [8]	可製造性 設計方法
1993	Y. M. Xie, and G. P Steven, "A simple evolutionary procedure for structural optimization," Computers & Structures, Vol. 49, No. 5, PP. 885-896., 1993 [9]	結構設計 最佳化方法
1993	Karl Ulrich, David Sartorius, Scott Pearson and Mark Jakiela, "Including the Value of Time in Design-for-Manufacturing Decision Making," MANAGEMENT SCIENCE/VO. 39, NO. 4, April 1993 [10]	可製造性 設計方法
1993	C. C. Chan, J. Z. Jiang, G. H. Chen, and X. Y. Wang, "A novel high power density permanent magnet variable-speed motor," IEEE Transactions on Energy Conversion 8, pp.297-303, 1993 [11]	馬達功率密度 提升方法
1994	R. J. Yang, and C. H. Chuang, "Optimal Topology Design Using Linear Programming," Computers & Structures, Vol. 52, No. 2, pp. 265-275., 1994 [12]	結構設計 最佳化方法
1994	Geoffrey Boothroyd, "Product design for manufacture and assembly," Computer-Aided Design Volume 26, 1994 [13]	可製造性 設計方法
1996	Y. M. Xie and G. P. Steven, "Evolutionary structural optimization for dynamic problems," Computer and Structure Vol.58, No. 6, pp.1067-1073, 1996 [14] A. V. Kumar, D. C. Gossard, "Synthesis of Optimal Shape and Topology of Structures," Journal of Mechanical Design, Vol. 118, pp. 68-74., 1996 [15]	結構設計 最佳化方法
1996	Torben Lenau, "The Missing Element in Design for Manufacture," Annals of the CIRP Vol. 45/1, 1996 [16]	可製造性 設計方法
1996	C. C. CHAN, J. Z. JIANG, W. XIA and K. T. CHAU, "A novel wide speed range permanent magnet brushless DC motor drive for electric vehicles," int. j. electronics, 1996, vol. 80, no. 2, pp.235-248 [17]	馬達功率密度 提升方法
1997	Y. M. Xie and G. P. Steven, "Evolutionary Structural Optimization," Springer, 1997 [18] Chu D. Nha, Y.M. Xie, A. Hira, G.P. Steven, "On various aspects of evolutionary structural optimization for	結構設計 最佳化方法

	<p>problems with stiffness constraint," Finite Element in Analysis and Design 24, pp.197-212, 1997 [19]</p> <p>Georg Thierauf, Jianbo Cai, "Parallel evolution strategy for solving structural optimization," Engineering Structure, Vol. 19, No. 4, PP.318-324, 1997 [20]</p>	
1998	<p>Chu D. Nha, Y.M. Xie, G.P. Steven, "An Evolutionary Structural Optimization Method for Sizing problems with discrete design variables," Computer and Structure 68, pp.419-431, 1998 [21]</p> <p>Yeh-Liang Hsu, Chuan-Tang Chen, Min-Sho Hsu, "Interpreting Results from Topology Optimization Using Density Contours," 中國機械工程學會第十五屆全國學術研討會論文集, pp. 855-860., 1998 [22]</p>	<p>結構設計 最佳化方法</p>
1999	<p>Qing Li, G.P. Steven, O.M. Querin, Y.M. Xie, "Evolutionary Shape Optimization for Stress Minimization," Mechanics Research Communications, Vol. 26, No. 6, pp.657-664, 1999 [23]</p> <p>M. Beckers, "Topology Optimization Using a Dual Method With Discrete Variable," Structural Optimization, Vol. 17, pp. 14-24., 1999 [24]</p>	<p>結構設計 最佳化方法</p>
2000	<p>O.M. Querin, G.P. Steven, Y.M. Xie, "Evolutionary structural optimization using an additive algorithm," Finite Element in Analysis and Design 34, pp.291-308, 2000 [25]</p> <p>O.M. Querin, V. Young, G.P. Steven, Y.M. Xie, "Computational efficiency and validation of bi-directional evolutionary structural optimization," Computer Method Application Engineering 189, pp.559-573, 2000 [26]</p>	<p>結構設計 最佳化方法</p>
2000	<p>T. Ohnishi and N. Takahashi, Fellow, IEEE, "Optimal Design of Efficient IPM Motor Using Finite Element Method," IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 36, NO. 5, SEPTEMBER 2000 [27]</p> <p>C.C. Hwang, J.J. Chang, "Design and analysis of a high power density and high efficiency permanent magnet DC motor," Journal of Magnetism and Magnetic Materials 209, PP.234-236, 2000 [28]</p>	<p>馬達功率密度 提升方法</p>
2001	<p>K. Sakai, T. Hattori, N. Takahashi, M. Arata, T. Tajima, "High</p>	<p>馬達功率密度</p>

	Efficiency and High Performance Motor for Energy Saving in Systems" IEEE, 2001 [29]	提升方法
2001	Tsai-C. Kuo, Samuel H. Huang, Hong-C. Zhang, "Design for manufacture and design for 'X': concepts, applications, and perspectives," Computer & Industrial Engineering 41, PP.241-260, 2001 [30]	可製造性 設計方法
2002	Martin O'Driscoll, "Design for manufacture," Journal of Materials Processing Technology 122 PP.318-321, 2002 [31]	可製造性 設計方法
2002	Nikolaos D. Lagaros, Manolis Papadrakakis, George Kokossalakis, "Structural optimization using evolutionary algorithm," Computer and Structure 80, pp.571-589, 2002 [32]	結構設計 最佳化方法
2004	Kab-Jae Lee, Sol Kim, Seong-Yeop Lim and Ju Lee, "Bridge design of interior permanent magnet motor for hybrid electric vehicle," International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 19, pp.601-606, 2004 [33]	馬達功率密度 提升方法
2004	"Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System," Oak Ridge National Laboratory, 2004 [34]	車用馬達 功率密度發展
		馬達功率密度 提升方法
2005	"FRACTIONAL-SLOT SURFACE MOUNTED PM MOTORS WITH CONCENTRATED WINDINGS FOR HEV TRACTION DRIVES," Oak Ridge National Laboratory, 2005 [35] LEILA PARSA, "PERFORMANCE IMPROVEMENT OF PERMANENT MAGNET AC MOTORS," Ph.D. Thesis, 2005 [36]	馬達功率密度 提升方法
2006	"Evaluation of 2005 Honda Accord Hybrid Electric Drive System," Oak Ridge National Laboratory, 2006 [37]	車用馬達 功率密度發展
2007	T. Ishigami et al., "Manufacturing technology for continuous high-density coils for brushless motors," Precision Engineering 31, pp.260-268, 2007 [38]	馬達功率密度 提升方法
2008	"EVALUATION OF THE 2008 LEXUS LS 600H HYBRID SYNERGY DRIVE SYSTEM," Oak Ridge National Laboratory, 2008 [39]	車用馬達 功率密度發展
		馬達功率密度

		提升方法
2008	J. A. Güemes, A. M. Iraolagoitia, M. P. Donsión and J. I. Del Hoyo, "Analysis of Torque in Permanent Magnet Synchronous Motors with Fractional Slot Windings," Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, 2008	馬達功率密度提升方法
2009	"HVH250 Series Electric Motors," Remy International, Inc., 2009 [40]	車用馬達功率密度發展

## 2-2. 車用動力馬達功率密度發展

由車用馬達功率密度發展之情況來看，目前已使用在車輛上的動力馬達，均有長足的發展。從 2005 年美國橡樹嶺國家實驗室(Oak Ridge National Laboratory)開始發表一系列逆向工程技術報告，針對 2004 年 TOYOTA Prius II [34]、2005 年 HONDA ACCORD [37]以及 2008 年 LEXUS LS600H [39]所做的實際拆解與量測。此外，GM Volt 所採用的馬達製造商 Remy International, Inc.在 2009 年發表 HVH250 系列車用動力馬達，達到目前預計實際商用產品中最高的最大功率重量密度 4.5kW/kg [40]。以下為馬達功率密度發展列表比較。

表 2-2 車用動力馬達功率密度發展比較列表

年份	使用車輛	最大功率	
		重量密度(kW/kg)	體積密度(kW/Liter)
2004	TOYOTA Prius II [34]	1.11	3.25
2005	Honda Accord Hybrid [37]	0.532	1.51
2008	Lexus LS600H Hybrid [39]	2.46	6.59
2009	GM Volt [40]	4.5	(估計)20



### 2-3. 馬達功率密度提升方法

使用永久磁鐵的交流同步馬達，可以有較多的方式來達成提升功率，並且具備高功率密度、效率高的特點，因此早從 1993 年開始，Chan, C. C., Jiang, J. Z., Chen, G. H., and Wang, X. Y. [11]與 1996 年 C. C. CHAN, J. Z. JIANG, W. XIA and K. T. CHAU [17]就以永磁馬達作為電動車使用。也因為永磁同步馬達在磁鐵形狀、繞線方式、定轉子矽鋼片形狀上可以有相當多的組合與設計，為了讓設計能夠更有效率，有限元素法開始在電磁設計中佔有相當大的角色，從 2000 年 T. Ohnishi and N. Takahashi, Fellow 開始[27]，一直到目前的研究幾乎都是藉由有限元素分析來找出最佳的電磁設計結果。2000 年 C.C. Hwang, J.J. Chang 為電動車所做的高效能馬達，就直接以有限元素法為設計工具達成性能目標 [28]，後續包含矽鋼片形狀、磁鐵配置與槽極數配合等都藉由有限元素分析導入至永磁同步馬達的設計，配合馬達特性的理論計算，使得永磁同步馬達不斷提升，包含 TOYOTA、HONDA、GM 車用馬達，其性能都保持大幅度的進步[29][33][34][35][36][37][39]。

### 2-4. 結構設計最佳化方法

結構設計的最佳化一直是結構工程師所關注的重點，畢竟靠著工程師經驗累積的方式來獲得最佳的結構外型是相當沒有效率的。結構最佳化的設計方法，在 1998 年 Bendsoe, M. P.和 Kikuchi, N.所發表的均質法(Homogenization Method)開始有了突破[5]，藉由將設計區域以連續

有孔的均質性、非等向性材料元素進行網格化，每個元素均具有三個設計變數，這些設計變數決定了孔的大小與方向。Mlejnek 於 1992 年提出材料分佈法(Material Distribution Method)[7]，以等向性材料對設計區域網格化，設計變數是以元素的材料密度值，用 0 或 1 代表元素是否充滿材料。1993 年 Y. M. Xie 與 G. P. Steven 提出演化式結構最佳化(Evolutionary Structural Optimization, ESO)[9]，則是藉由在結構中逐步移除不需要的材料，當求解依設定條件達到收斂後，其剩餘結構便是一個較為經濟的幾何結構，藉此獲得結構最佳設計。其後不論是對於剛性或是應力的判準上都有論文進行研究 [19] [23]。除此之外，增加式的演化方法(Additive ESO, AESO)則以連結負載與邊界條件施加處所需最少材料為核心結構，逐漸對應力過高處增加元素[25]。亦有延伸之雙向演化方式(Bidirectional ESO, BESO)是由任意介於最大與最小材料為初始設計，同時進行過弱材料之補強及累贅材料之移除，以期增加收斂速度以及避免單向式的演化不可逆之缺失，更能有效確保得到最佳化的效果[26]。

## 2-5. 可製造性設計方法

可製造性的考慮其實相當久以前就包含在設計過程中，1986 年 J. Corbett [4]與 1992 年 John Farris, Winston A. Knight [8]等人，就探討到設計過程中考量製造對於成本與設計效率都有提升。1993 年 Karl Ulrich [10]等人更說明可製造性設計不僅降低成本、提升設計製造效率，能夠使產品具有高度市場競爭力。1994 年 Geoffrey Boothroyd 提出產品設計

如何來考量製造與組樁的問題，針對各種組件的基本限制來引導產品設計[13]。1996年 Torben Lenau 開始以組織化的設計表格建立和製造間的關連，提供設計過程中的參考[16]。2001年 Tsai-C. Kuo, Samuel H. Huang, Hong-C. Zhang [30] 將可製造性設計延伸為在設計中不單單考量可製造、可組裝，甚至是可拆卸、環境保護、使用循環等，代表設計不再只是考量功能，而必須全面性的將相關因素納入設計因素中。2002年 Martin O'Driscoll [31] 將可製造性設計方法以流程的方式來導入設計，清楚的說明設計中如何考慮可製造性。以近來的實際工程應用，則在半導體與電路設計上顯著發展，由於微小化設計的考量，使得可製造性與否成為產品的重要關鍵，因此開始有許多自動化設計工具將可製造性判準納入設計資料庫，以提昇產品設計在製造上的良率。[41] [42]

## 2-6. 文獻回顧探討與總結

由車用動力馬達功率密度發展，可以瞭解現今車用動力馬達領域在功率密度上已經快速發展，並且獲得相當大的成效，相較於本研究之目標，似乎距離目前發展有一段距離，其原因主要在於除了結構設計的考量外，電磁材料能否提供更大的功率，以及散熱設計是否能夠維持馬達在安全溫度範圍內運作，加上許多製造上的技術提昇，都是功率密度提升的關鍵。另外在馬達功率提升的設計上，有限元素分析工具具有相當分量的影響，藉著這個工具可深入探討各種電磁設計的規格影響，並且和理論與控制相互搭配，將馬達性能不斷提升，連帶

車用馬達對於功率密度提高的要求，也可以有效的達成。然而在功率密度提升的方法中，幾乎不見有研究針對馬達結構輕量化上的深入探討，儘管如此，從各車廠發表的車用動力馬達來看，其結構設計與一般工業用馬達大不相同，並且盡量朝向體積小、重量輕的目標來設計。

而結構最佳化設計方法多年來的發展已經具有一定的成熟度，但是在馬達結構設計領域中鮮少將結構最佳化應用至設計方法中，使得在眾多馬達電磁設計的論文中，無法瞭解到底結構設計可以如何發展，以及馬達電磁設計後，其結構設計又怎麼能夠達到極限，以讓功率密度目標也能夠藉由縮小體積、降低重量來獲得提升。因此將結構最佳化方法應用至馬達結構設計是本研究的重點，並且明確說明此設計方法的核心與流程，使得馬達結構設計的領域可以有一有效的設計工具，增進馬達結構設計的競爭力。

此外，在過去的文獻中有相當多對於產品可製造性設計的探討，並且提供方法與流程作為設計核心理念。然而過去的研究多是以在非特定產品上的主要原則、普遍應用方法為主，針對特定產品在可製造性上的研究，近期以半導體製程與電路設計上居多，亦發展許多自動化設計工具，提升設計效率與製造良率。因此馬達要進入製造的過程中，遭遇的可製造性問題並未在過去的研究中發現，因此為了使本研究在馬達結構設計上能夠滿足可製造性，將對馬達的可製造性進行深入探討。

## 第三章 創新馬達結構設計流程

### 3-1. 傳統馬達結構設計流程步驟問題分析

由第一章的探討，可以瞭解傳統的馬達結構設計流程的問題，為：

- (1) 馬達結構設計過程充滿不確定性；
- (2) 結構最佳化只能依據機構分件設計結果的單一零件；
- (3) 太多的設計迴圈導致消耗掉許多時間；
- (4) 在時間壓力下妥協的結果往往犧牲功率密度。

針對以上所述之問題，由詳細的流程圖來開始進行流程步驟分析。如圖 3-1 所示，當馬達機構與分件設計結果要進入結構設計時，其包含的是已經決定好基本形狀的各零組件，而結構設計過程僅考量是否能夠承受負載條件，在完成設計後便有各零組件的最終結果，當馬達輸出功率已經設計完成的情況下，所有零組件的體積與重量總和即是功率密度結果。從以上描述我們可以將其流程步驟表示簡化為圖 3-1 上方小圖，中央的方框代表一個流程步驟，左邊箭頭為輸入，右邊箭頭為輸出，下方箭頭為條件，將馬達製程設計利用同樣的方法簡化為圖 3-1 下方小圖。

以簡化的圖形來看，馬達結構設計所必須要輸出的結果，並沒有辦法從輸入與條件中成為結構設計考慮的一環，這意味著結構設計這個步驟等於是被動經由負載條件的設計結果，來嘗試著得到滿足功率密度目標的可能，當不滿足後便從輸入端重新開始，因此錯誤的相對關係導致這個步驟必須不斷進行嘗試，而嘗試的過程中並沒有任何可

以考慮和輸出目標相關的條件，使得此步驟產生迴圈與不確定因素。同樣的情況出現在馬達製程設計，當一個未包含製程評估的結構設計結果，進入製程設計後其考量的條件僅有製造效益，當不符合製造效益就會考量製程能力的提升，但是製程能力的提升往往和製造效益產生衝突，因此便嘗試在製程能力與結構設計找到一個可能滿足兩者又符合製造效益的結果，而在此產生一個迴圈，但這個迴圈導致結構必須修改設計，等於又必須重新進入前一個迴圈，如此環環相扣使得整個馬達結構設計流程落入極度沒有效率的情況，便使得工程師在時間壓力下放棄滿足某一個步驟輸出或條件的要求，以期從迴圈中解套，這種方式雖然可以解決迴圈問題，然而卻讓整個馬達的性能規格下降，對於產品的應用來說是相當不利的，如車輛動力馬達對於功率密度的要求是屬於相當嚴苛且有一定標準，這樣的動力馬達設計結果就無法在車輛上使用。

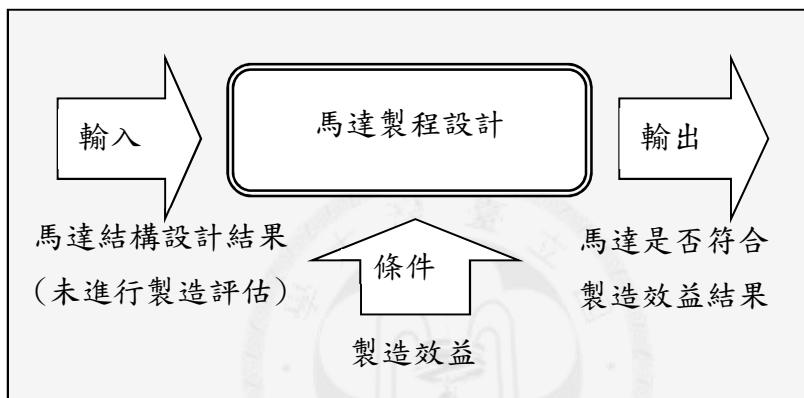
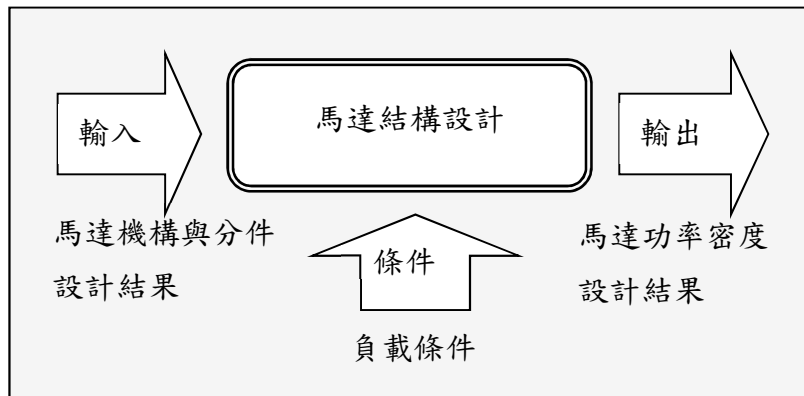


圖 3-1 傳統馬達結構設計流程步驟問題分析圖

### 3-2. 建構基於功率密度目標與可製造性之馬達結構設計流程

基於前一節分析內容所述，如能夠針對各流程步驟提供合適的輸入與條件，就能夠有效的得到預期希望的輸出結果，因此以下將分別以「馬達結構設計」與「馬達製程設計」兩個步驟進行改善，並且最終整合為一新的馬達結構設計流程，使之能有效達到功率密度目標與可製造性要求。

#### 3-2-a. 馬達結構設計步驟修正

依據結構設計的目標來看，應該是預期能夠得到符合功率密度目標，與滿足負載條件下強度或剛性的結果，負載條件本來就存在於條件中，因此不予更動，問題在於輸入與條件中並未包含任何和功率密度有關的項目，所以勢必要在輸入與條件中加入體積與重量限制考量。首先由輸入項來進行探討，從圖 3-2 來看我們可以發現，原本的馬達機構與分件設計結果和體積、重量限制考量其實是衝突的，因為當機構與分件設計完成後，體積與重量都已經有所結果了，所以造成如果要再考量體積與重量限制，就會產生迴圈，以此來看，機構與分件設計並不能作為馬達結構設計的輸入項，必須選擇體積或是重量作為結構設計的輸入項。然而，重量與材料的使用量有關，對於能否滿足負載條件有一定的影響，所以和負載共同作為結構設計條件，因此馬達結構設計步驟修正為如圖 3-3。



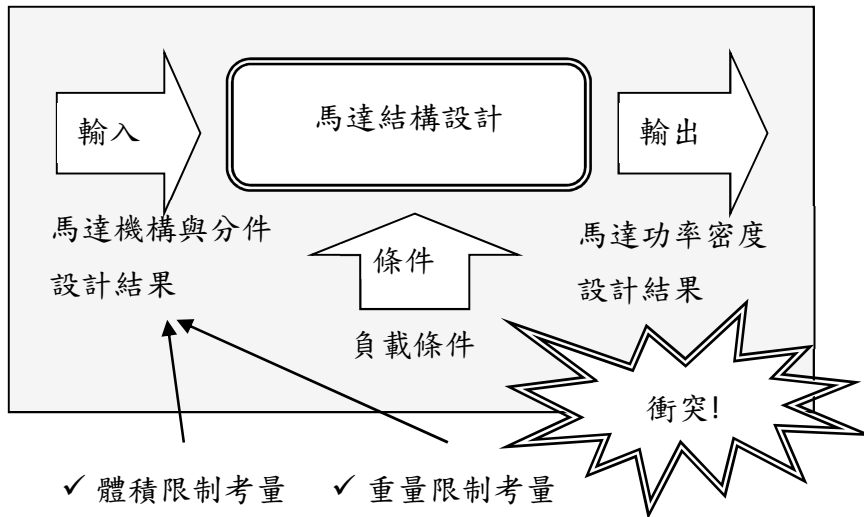


圖 3-2 馬達結構設計步驟衝突示意圖

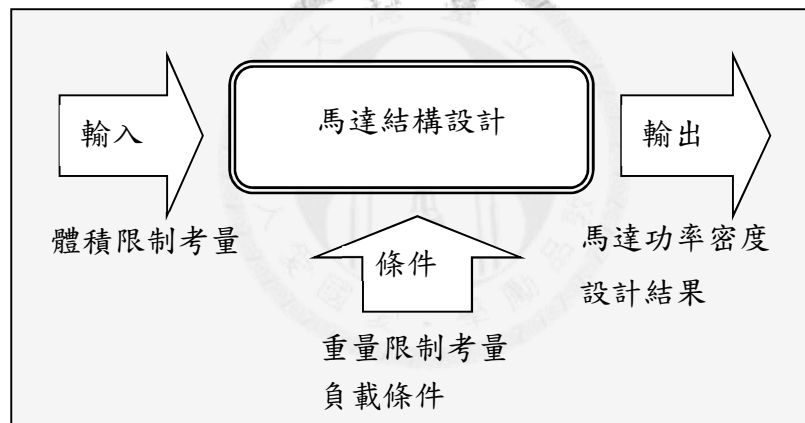
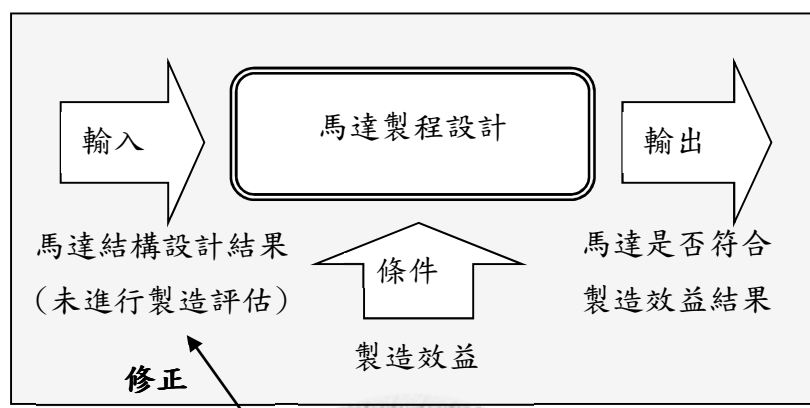


圖 3-3 馬達結構設計步驟修正示意圖

### 3-2-b. 馬達製程設計步驟修正

如同馬達結構設計步驟修正的方法，對馬達製程設計步驟進行修正。如圖 3-4 所示，製程設計的結果必須滿足製造效益的條件，因此製程設計的輸入項如果已經能夠有可製造性，便不需要針對製程能力進

行提升或改變，其製造效益自然會提高，因此結構設計結果作為製程設計的輸入項，其中必須包含可製造性的設計，使製程設計可以達到製造的效益。



✓ 可製造性考量

圖 3-4 馬達結構設計步驟修正示意圖

### 3-2-c. 整合修正之步驟為創新馬達結構設計流程

由馬達結構設計與馬達製程設計步驟的修正結果，本研究將之整合並且導入修正傳統的馬達結構設計流程，如圖 3-5 所示，馬達結構設計步驟必須以體積限制與電磁設計、散熱設計做為輸入項，考量重量與負載的條件，並且輸出包含可製造考量的結果，而馬達機構與分件設計將從結構設計的輸入項移至成為結構設計步驟的一環。由圖 3-5 可看出，一個馬達結構設計步驟被拆為多個次步驟。第一個是依循體積限制的馬達結構初始材料配置設計，這個設計步驟可以讓結構材料獲得可包含定轉子、繞線的外圍基本體積，又同時滿足體積限制，因此在這個步驟即達成功率體積目標。第二個是本研究預計建構的馬達結構最佳化設計方法，其必須要能夠考量馬達整體的重量與負載條件，並且讓馬達結構分件能夠獲知其各零件到底佔有多少重量比例，以提供結構細部設計參考。然而要在有限設計空間中得到一個最少材料的結構外型，無法靠著工程師採取試誤法的方式來達成，必須仰賴結構最佳化方法。結構最佳化方法之目的，在於提供結構設計依據剛性或是強度等需求，來對結構形狀尋求最佳分佈位置，以發揮結構材料的使用最大效益，避免不必要的結構材料存在於物件之中，進而達到物件輕量化的效果。

結構最佳化的方法於第二章文獻回顧中已有所探討，對於馬達在有限體積內，必須要考慮內部已知定轉子、繞線之使用空間的情況下，本研究採用 Xie 和 Steven 所開發之演化式結構最佳化(Evolutionary

Structural Optimization, ESO)方法作為運算理論核心[18]。ESO 方法是以逐漸移除物件原始設計空間中累贅元素之概念進行設計，以自然演化方式尋找最佳材料分佈配置，避免傳統經驗或既定概念之誤導，移除之判準可為 Von Mises 等效應力、應變能、熱應力等依結構功能需求而定。但單單就 ESO 方法並不足以考量各機構分件設計時必須了解的重量限制，因為各分件重量到底應該減到多輕才是底限，必須仰賴其他設計方法，包含馬達材料分佈最佳化與構件設計相互匹配、馬達分件重量計算等共同完成，構成一針對馬達結構設計的最佳化方法，本研究稱為演化式馬達結構最佳化 (Evolutionary Motor Structural Optimization, EMSO)設計方法。EMSO 的結果將可以進行可製造性設計的考量，以獲得最後精確的細部設計。因此整合前節所述修正的流程步驟，對傳統的設計流程進行流程步驟的順序重置與步驟增減，建構成為一創新的馬達結構設計流程，此流程將可有效達成功率密度目標與可製造性需求。

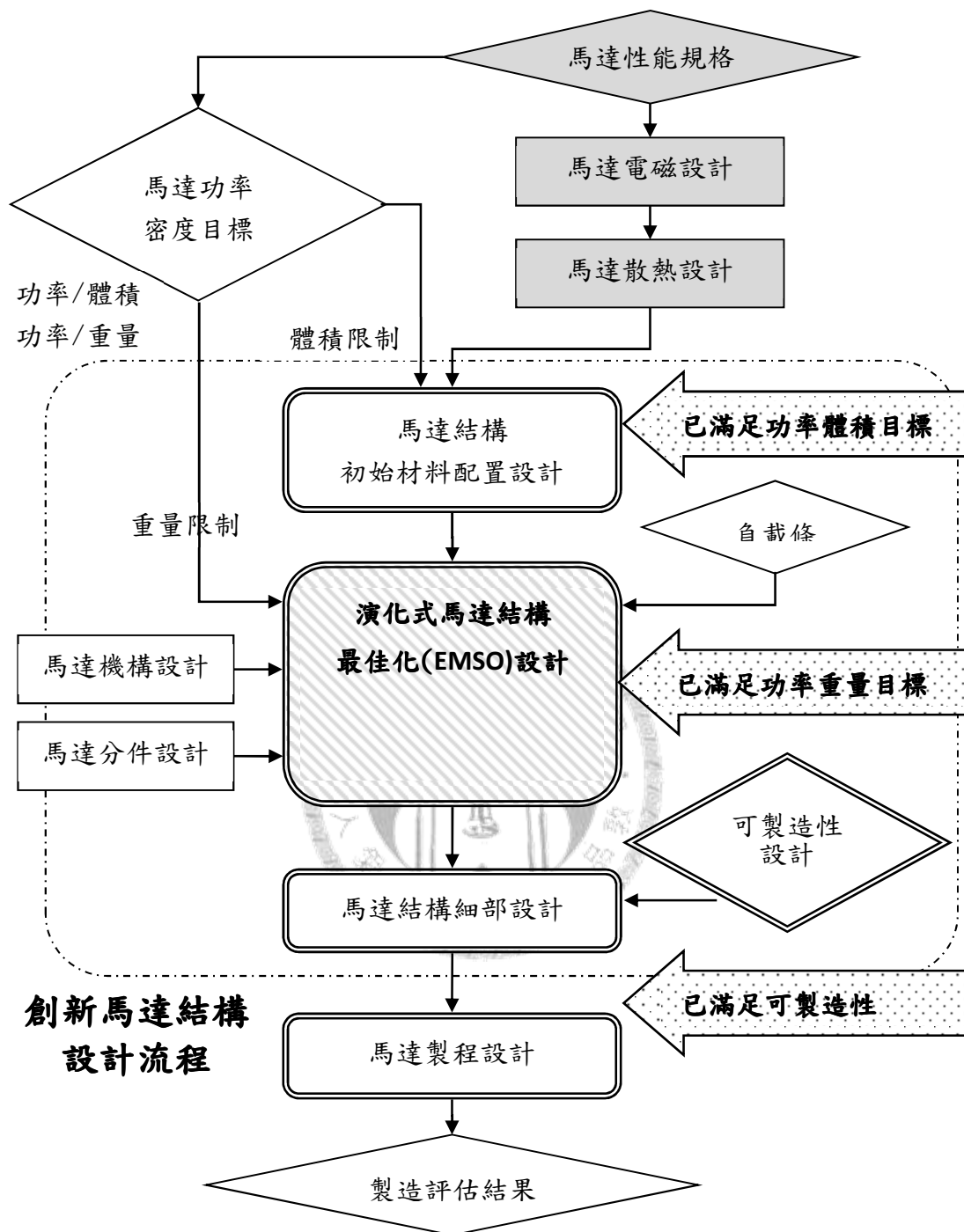


圖 3-5 創新馬達結構設計流程

## 第四章 演化式馬達結構最佳化設計

本章承接第三章所述，針對演化式馬達結構最佳化設計方法進行詳細論述，並且以 Green Jumper 電動車輛所使用之動力馬達進行實務設計應用。期望藉由本設計方法，可以達到在第一章表 1-6 所設定之功率密度目標。

### 4-1. 演化式馬達結構最佳化(EMSO)設計流程

#### 4-1-a. EMSO 設計流程步驟說明

如圖 4-1 所述，演化式馬達結構最佳化設計流程，是上向整合馬達結構初始材料配置設計，向下包含演化式馬達結構材料分佈最佳化、馬達機構分件設計、馬達整體材料配置比例與分件幾何匹配、馬達結構分件重量配置與初步結構形狀設計共五個步驟。當電磁與散熱設計完成後，會有定轉子、繞線的設計結果，為求達到功率體積密度目標，乃進行馬達結構初始材料配置設計，由於功率體積密度所要求的體積是最外圍所佔的體積為準，因此考量定轉子與繞線大小與體積限制，設計一外圍包覆之體積，由於外圍體積不可能小於定轉子與繞線所佔的體積，所以約定轉子、繞線體積 1.2 倍左右往外長出，大概是其功率體積密度的極限。獲得外圍體積後，便將內部定轉子、繞線的所佔空間去除，剩餘的即為演化式馬達結構材料分佈最佳化分析之初始材料，接著將馬達的負載條件，包含定子鎖固、轉子承載、整體自重以及整個馬達的鎖固方式，作為分析的邊界條件，如此便可進行分析，最佳

化分析收斂的終點條件，將以最後剩下的材料重量限制為考量。分析的結果將會顯示移除材料之位置，並且顯示整體的剩餘材料分佈，而這個分佈不僅滿足負載條件，亦同時滿足功率重量與功率體積密度目標。然而這個步驟的結果並不足以真正代表可以進行製程設計，因為其幾何外型較為不精確，且不是最終馬達各零組件的樣子，因此依據馬達整體材料配置比例的情況，進行馬達機構與分件的設計，針對機構與分件的設計結果與整體材料分佈的情況作幾何匹配設計。這個步驟最終可以得到各分件的材料分配比例以及結構的初步設計形狀，配合馬達整體的重量限制，即可得到各分件的重量限制。各分件的限制與初步結構外形對於結構細部設計極為重要，如果沒有這個限制，將不知道各分件細部設計對於重量的底線，由於細部結構設計同時還要進行可製造性設計，可能針對結構外形作變動調整，有分件重量的限制就可以清楚的知道該如何對各分件的細部進行刪除或增加材料。

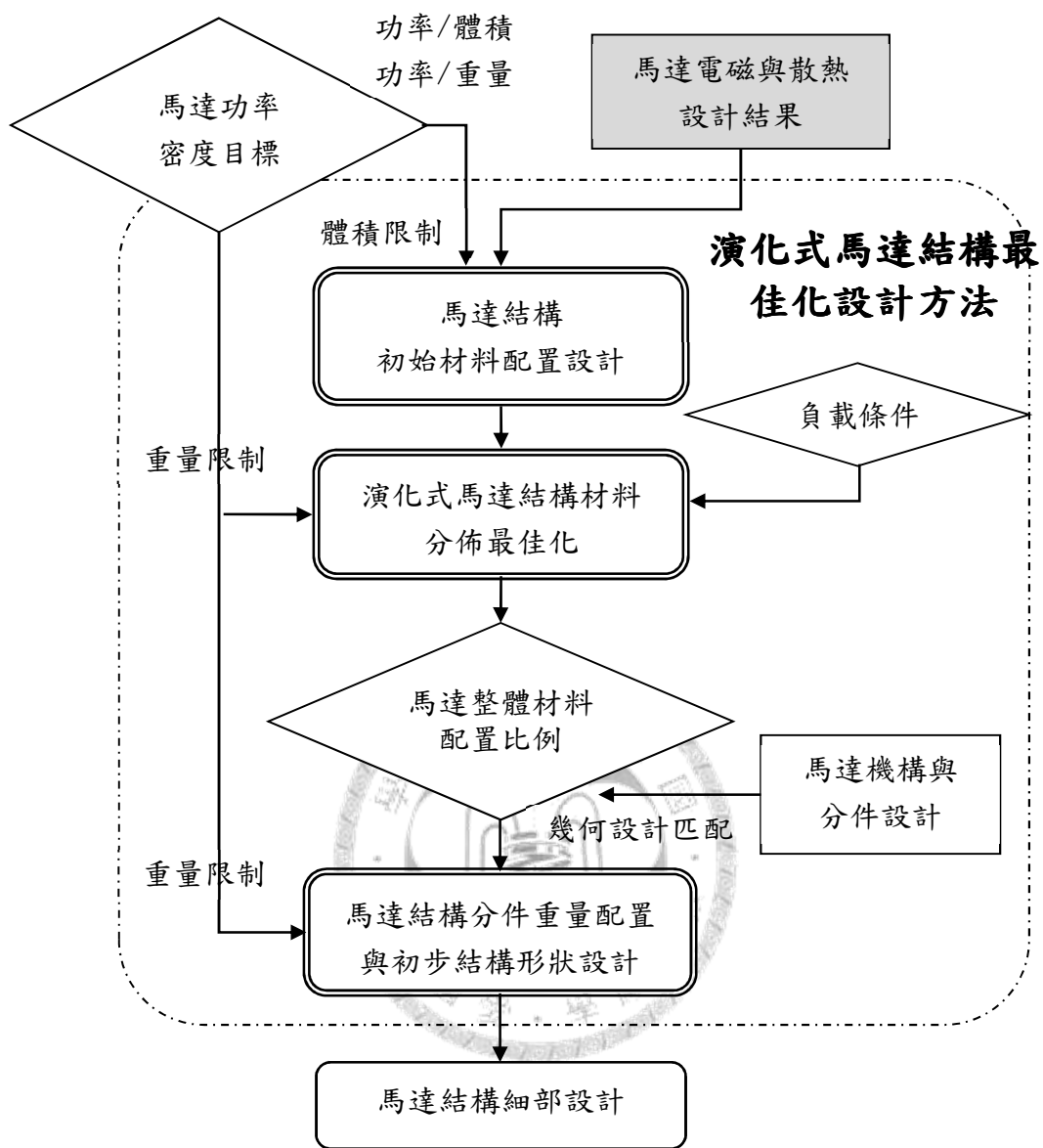


圖 4-1 演化式馬達結構最佳化(EMSO)設計方法流程



#### 4-1-b. 演化式結構最佳化(ESO)計算理論說明 [43]

ESO 是以移除判準作為累贅元素是否應該存在的判斷，並且經過不斷的逐步運算，以自然演化的方式尋找最佳的材料分佈位置。本研究由於在馬達結構上以應力特徵較剛性明顯，因此以 von Mises 等效應力作為移除判準。

ESO 的計算如圖 4-2 所示，從初始元素移除比例(initial rejection ratio,  $RR_0$ )開始，代表以當時所有元素等效應力( $\sigma_e^{vm}$ )之最大值( $\sigma_{max}^{vm}$ )多少百分比為移除基準，且為避免移除元素過多導致結構崩壞，通常數值為小於 1%。換言之，初始有元素分析得到各元素應力值後，應力值小於最大值 1%之元素視為累贅元素進行移除，當所有元素應力值皆大於此 1%門檻值，則完成首次疊代收斂。

初始移除比例  $RR_0$  完成收斂後，即以設定之演化速度(evolutionary rate,  $ER$ )提高移除比例以開始下次疊代，即  $RR_{i+1}=RR_i+ER$ ， $i=0,1,2,3\dots$ ，其中  $ER$  也通常設為小於 1%。第二階段疊代過程代表對於每個移除比例( $RR_i$ )皆進行重複的有限元素求值、應力值是否小於門檻值( $\sigma_{max}^{vm} \times RR_i$ )之判斷及移除元素之循環，直到受斂後提升至更高之移除比例，隨著元素逐漸減少，由過份安全設計逐漸使各結構元素之應力分佈趨於平均且接近極限值( $\sigma_{max}^{vm}$ )。

隨著移除比例逐漸提高，當  $RR_i$  達到設定之最終移除比例值( $RR_{final}$ )則停止演化步驟並視為完成結構形狀最佳化設計。由此可知， $RR_{final}$  之

定義會影響最佳化設計之程度，例如當結構之應力分佈極不平均時，過高之  $RR_{final}$  將導致大部分元素被移除甚至結構瓦解之可能性。因此，演算法亦以最終體積比例考慮原始 ESO 之  $RR_{final}$  值，例如對於使用均質材料之結構，同時可以設定最終體積移除比例為 50%，則達成後即停止演化步驟，並可將結構重量減為原來之一半。

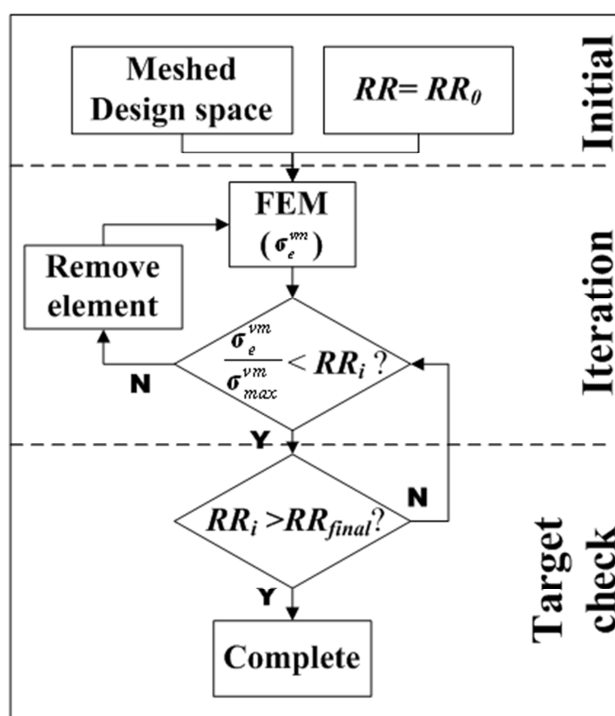


圖 4-2 ESO 計算流程圖[43]

#### 4-1-c. 分析軟體介紹說明

本研究針對有限元素分析的部分採用 ABAQUS 商用分析軟體，其屬於法商達梭系統公司(Dassault Systems)產品，目前版本為 6.9-1，此套裝軟體應用範圍涵蓋靜態固體力學、熱傳、電磁場及動態振動、機

動學、撞擊等工程常見問題，特別專長於複雜非線性問題之分析。由於 ABAQUS 已發展多年（早期屬於美國 HKS 公司），並具有複合及三明治材料分析能力、高度擴充性副程式模組及逐漸增加對 CAD 軟體(CATIA)之整合性等特點，其準確度亦廣獲各領域學術研究肯定採用，故本研究選用此一軟體為主要分析工具。[43]

而針對 ESO 的計算，採用本實驗室畢業之學長胡斯遠所開發的物件導向最佳化程式-abaQuest [44]，其程式外觀如圖 4-3。相較於一般商用最佳化套裝軟體常針對特定領域問題或使用特定演算法，而無法進行修改擴充，物件導向之 abaQuest 可以成功整合有限元素分析軟體、流場分析軟體如 Fluent，甚至機構分析如 ADAMS 等軟體，使用 Simplex、Complex、GA (Genetic Algorithm)、SA (Simulated Annealing)、ESO 等演算法，其開放式介面允許以 VB (Visual Basic)編譯之自訂演算法及最佳化程序，以上種種優勢使其可廣泛應用於各種最佳化問題，並可容易導入本研究新開發之結構設計流程等自訂程序 [43]。在針對 ESO 分析參數設定的部分，如圖 4-4 所示。

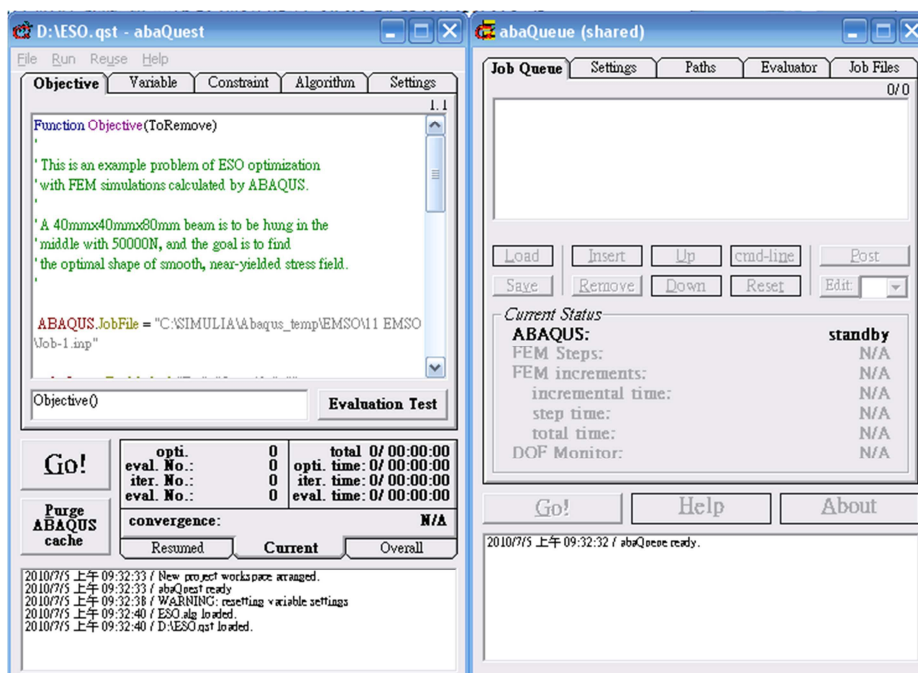


圖 4-3 abaQuest 物件導向最佳化程式

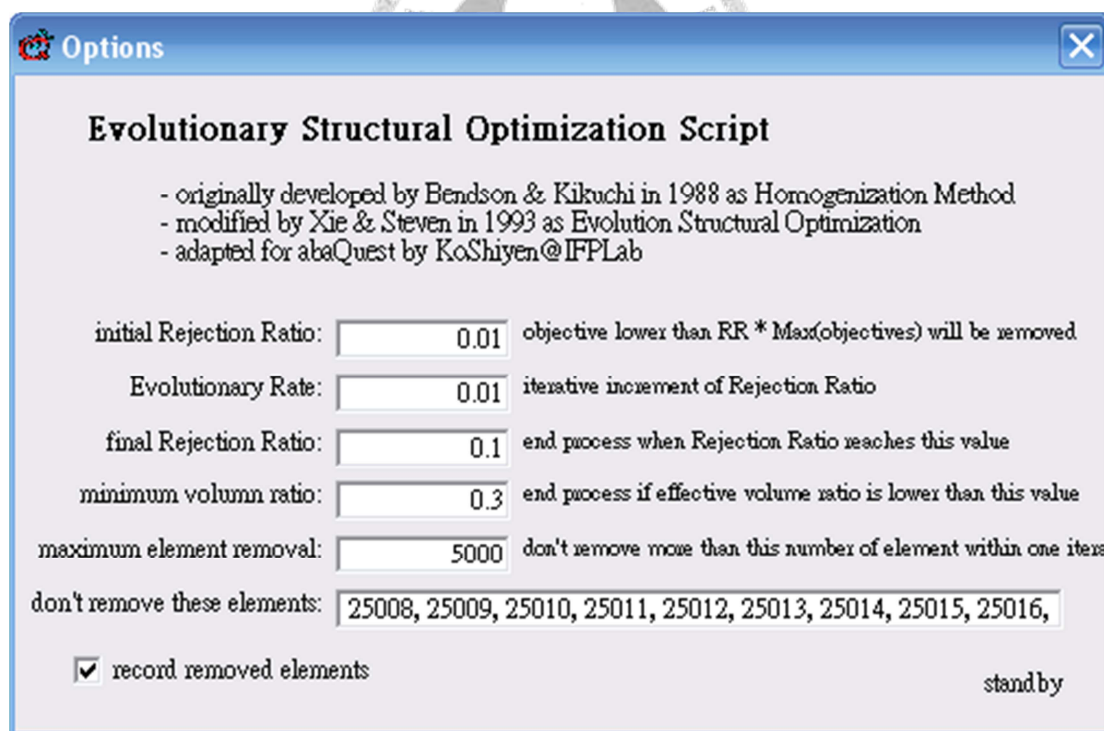


圖 4-4 abaQuest 在 ESO 分析參數的設定介面

## 4-2. 演化式馬達結構最佳化設計實務應用

### 4-2-a. 基於功率體積密度的初始結構材料設置

演化式馬達結構材料分佈最佳化分析必須由一個初步的設計空間開始，這個設計空間是以馬達功率體積密度目標作為限制，以本研究的目標設定為 3.01kW/Liter 來計算，馬達的最大極限功率為 31kW，所以體積限制為 10.3Liter，如同第一章的研究目的所述，這個體積是最靠近現有定轉子與繞線的方式來考慮，因此可以說是達到本電磁設計的最小極限體積，這個限定是相當重要的，由於體積不可能無限制的縮小，因此定義最小極限體積，也就是定義了最大的功率體積密度，如果要有更大的功率體積密度，則無法從體積的縮小來進行，必須使電磁材料產生更大的功率才行。如圖 4-5 所示，紅色部分的體積距離繞線部分是已經達到最接近的程度（表面距離 7mm），因此以這個設計空間作為演化式馬達結構材料分佈最佳化分析的初始結構材料。此外，由於此設計空間內包覆著定轉子與繞線所佔的體積，而這些體積是不能夠作為結構材料的地方，因此也必須將其挖除，挖除的結果如圖 4-6 所示。

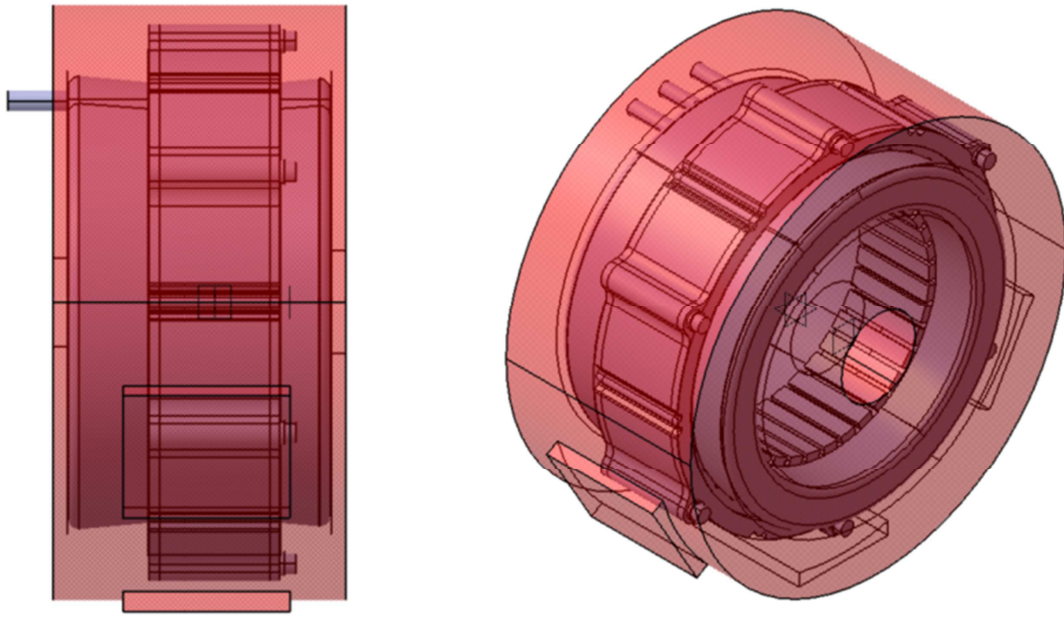


圖 4-5 基於功率體積密度的初始結構材料設置

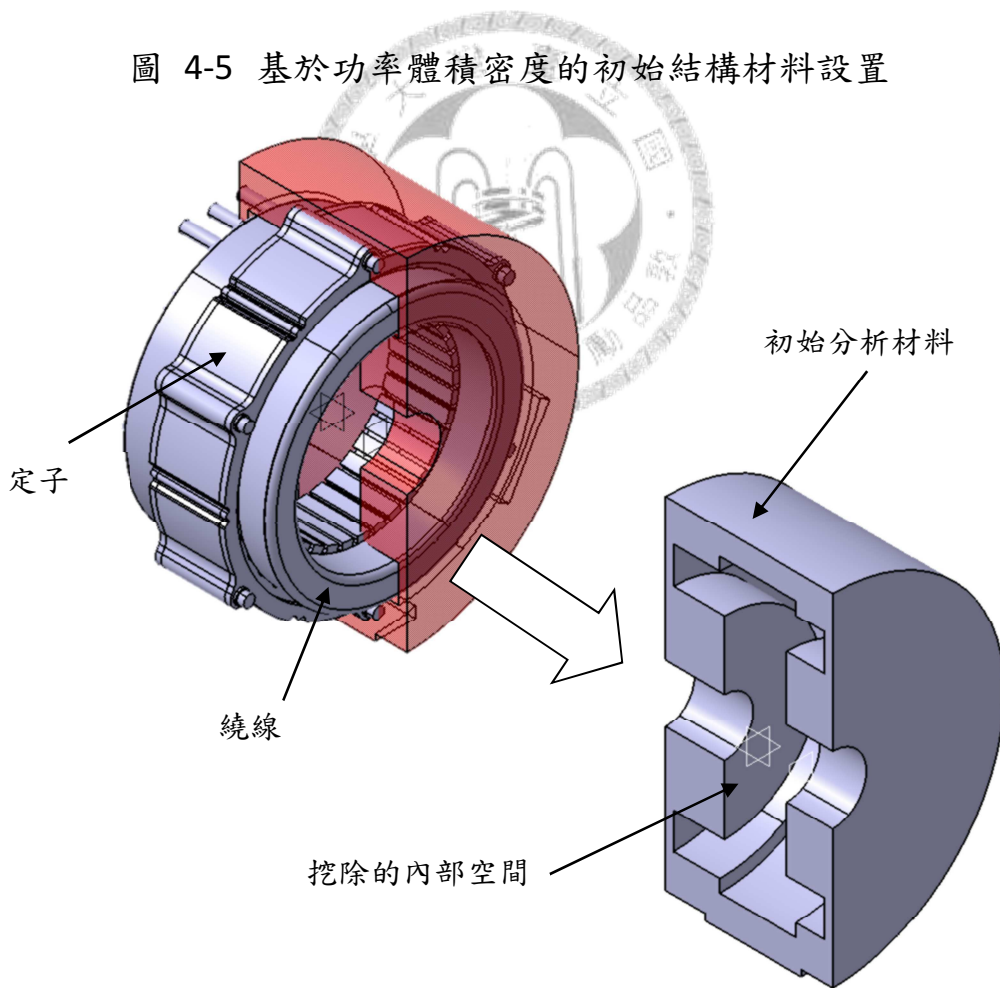


圖 4-6 初始材料將定轉子與繞線空間移除的剖面示意圖

#### 4-2-b. 馬達結構負載與邊界條件設置

本節針對馬達在車輛環境使用下會遭遇的負載與邊界條件進行說明，並且依據 Green Jumper 動力馬達實際在車輛上所設計的方式，實際設定 EMSO 分析模型的負載與邊界條件。

##### A. 馬達結構負載與邊界條件說明

馬達結構的負載可以分為三個部份：第一個是承載定子的結構，定子的固定方式可以直接藉由緊配合和外殼結構結合，也可以利用螺栓鎖固在結構上。由於本研究所使用的定子疊積厚度為 55mm，因此可以很容易使用螺栓來鎖固，增加組裝的便利性，但如果是較厚疊積的定子設計，就要考慮使用外殼緊配合的承載方式。如圖 4-7 所示，定子四周藉由六顆螺栓鎖在外殼上，和外殼周圍採取約 0.02~0.05mm 的公差，所以並不會由外殼來負擔定子的重量，在此外殼僅僅作為軸心對正的功用。

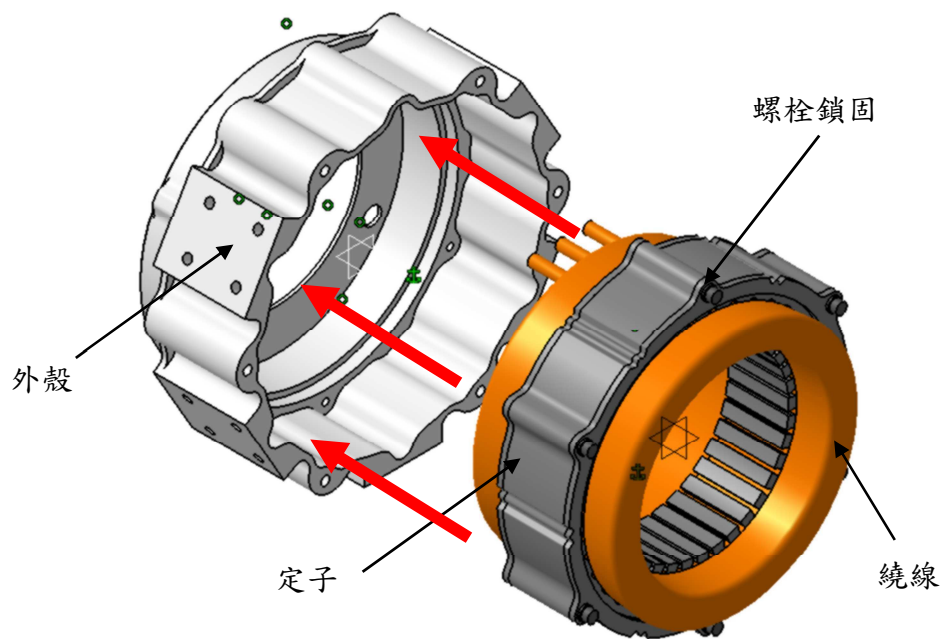


圖 4-7 定子和外殼組裝示意圖

第二個部分是承載轉子的結構，轉子的構造如圖 4-8 所示，由轉子矽鋼片、磁鐵、轉子軸轂、輸出轉軸四個主要零件組成，由於轉子必須藉由旋轉運動將機械能傳遞出去，因此使用軸承作為轉子和承載結構之間的中間物，讓結構可以承載轉子的重量，又不影響轉子運作，其裝配如圖 4-9 所示，兩側的軸承座將會固定軸承的外環，而轉軸固定在軸承內環，軸承中間的滾柱或滾珠便可以進行旋轉，所以轉子必須設計軸承座滿足固定承載的需求，圖中兩側的外殼便可以經由軸承座將轉子重量傳遞至外殼和外界의 固定處。



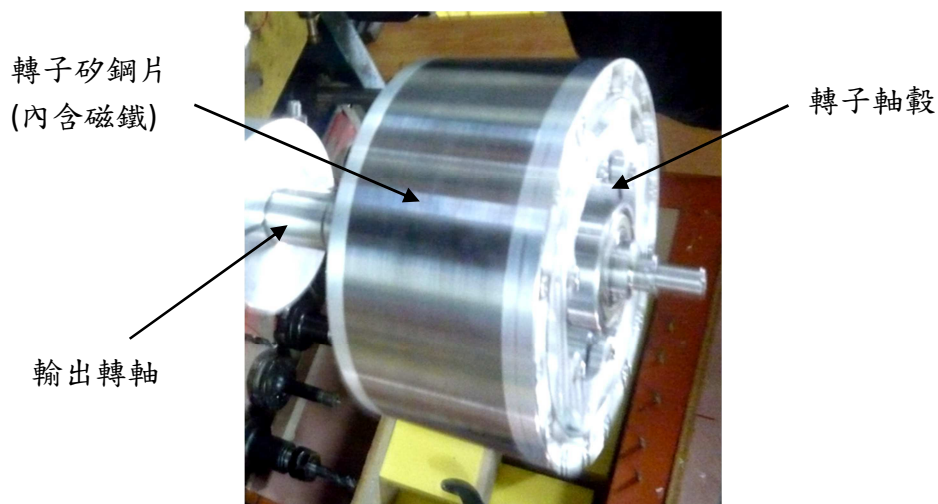


圖 4-8 轉子構造組成圖

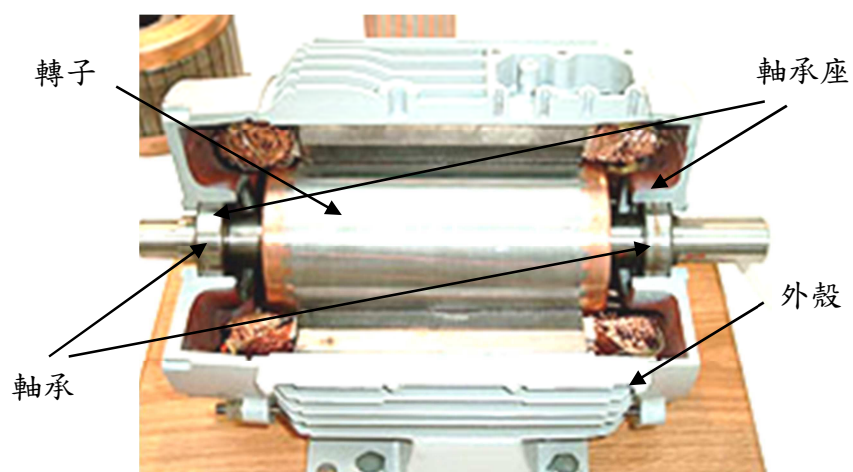


圖 4-9 轉子軸承與軸承座結構裝配圖

第三個部分是整體馬達的自重。在車輛環境中與一般工業應用或是日常生活應用最大的不同，在於其環境是處於常常會有振動的產生，有振動環境的情況下，其自重常常會因為振動加速度的關係，而有數倍的增加，對於馬達鎖固在車輛上的結構位置，造成較大的負荷，因此對於結構負載的受力條件，自重也是必須考量的一環。依據車輛特

性的差異以及對於組件可靠度要求的程度，自重的設定可以為重力加速度的 3~5 倍。

最後是針對整個馬達的固定方式，這在分析當中是作為固定的邊界條件。馬達的固定方式有很多，大體來說，只要能夠想辦法將馬達鎖固在系統中即可，以外部的組件來看，只有外殼和兩側的軸承座外殼，由於外殼所佔的面積較大，因此考量設計方便性與承載強度，多半會在外殼上設計固定座，如圖 4-10 所示。然而也可以在兩側的軸承座外殼上設計固定座，惟須注意整體設計的平衡，以免造成過大的負載，增加結構設計的困難度，以及必須使用較多的材料使得重量增加。

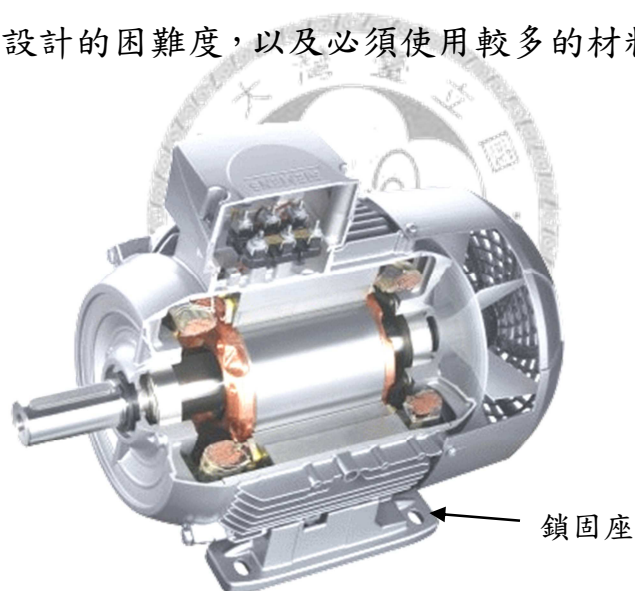


圖 4-10 在外殼上的鎖固座

## B. Green Jumper 動力馬達之 EMSO 負載與邊界條件設定

由前節所述，馬達的負載與邊界條件有：(1) 定子；(2) 轉子；(2) 自重，以及 (4) 馬達固定。以下針對 Green Jumper 動力馬達實際在車輛之設計，進行 EMSO 分析的負載與邊界條件設定。

定子的部分，由圖 4-7 可以看出，定子外圍有六顆螺栓孔的設計，這是用來提供定子鎖固在結構上，雖然定子會放入外殼之中，但是外殼和定子之間只是對軸心的作用，承載重量的還是鎖固定子的結構面。此外，儘管結構上鎖固螺栓的是螺栓孔，然而在分析設定上不宜將負載加在孔洞上，由於這會造成較大的應力集中，但是螺栓孔洞所處於的鎖固平面依然相當程度必須分擔負載，所以在負載條件上，以加載在鎖固平面上的方式來設定，如圖 4-11 所示。加載數值上，因為定子上面還有繞線的重量，要總合定子與繞線的重量才是實際的負載，另外，考慮車輛的振動環境，將其負載乘以三倍作為考慮振動加速度經常範圍所造成的影響。詳細的定子負載條件如表 4-1 所列。

表 4-1 定子負載條件

條件	數值
定子+繞線	18.3kg
受力面積	0.004m <sup>2</sup>
施力情況（向下）	686250N/m <sup>2</sup>

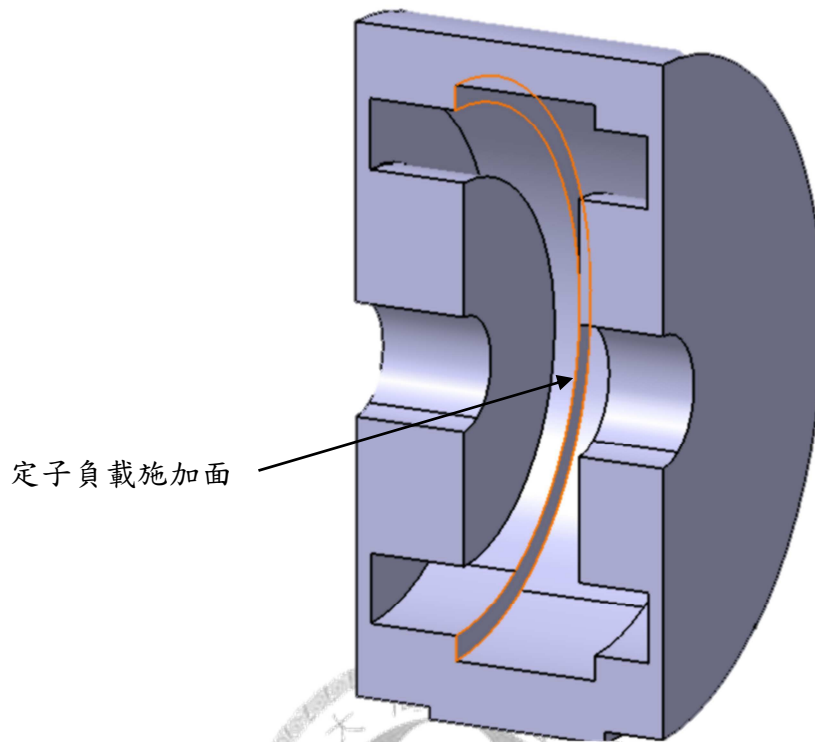


圖 4-11 定子負載施加處（剖面圖）

轉子的部分，則考量軸承所放置的位置。為了讓馬達體積盡量縮小，軸承不宜放離轉子太遠的位置，如圖 4-12 所示，如果盡量靠近轉子矽鋼片，這樣軸承座的位置就可以更往內靠，外圍體積自然縮小。如圖 4-9 所示，轉子的重量是靠軸承傳遞至軸承座來承載，因此轉子的重量將由兩側的軸承座來負荷，所以轉子重量可以設定平均分散在兩側的軸承和軸承座的接觸面上，如同定子對於重量的考慮，轉子的重量也是乘以三倍作為分析的負載條件設定，而轉子的實際重量包含轉子矽鋼片、磁鐵、轉子軸殼、輸出轉軸。詳細的轉子負載條件如表所列。

表 4-2 轉子負載條件

條件	數值
轉子+磁鐵	4.6kg
輸出轉軸	1.5kg
轉子軸殼	1.2kg
受力面積（兩側軸承承靠面）	$0.002\text{m}^2$
施力情況（向下）	$109500\text{N}/\text{m}^2$

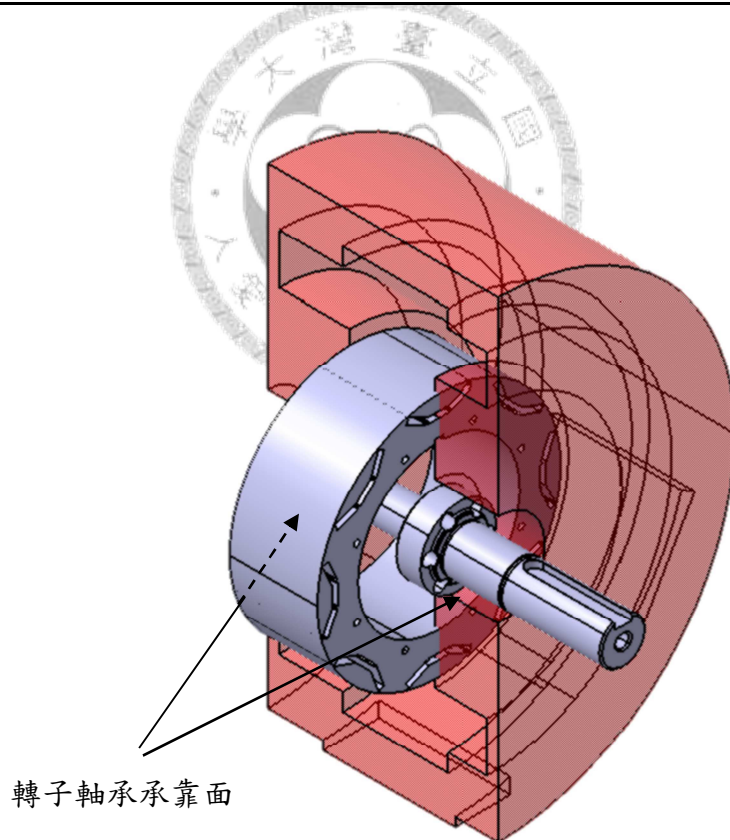


圖 4-12 轉子軸承承靠示意圖

自重的部份，以 ABAQUS 中的重力加速度來設定，如圖 4-13 所示，其針對模型中所存在的物件直接給予加速度，地球上正常的重力加速度約為  $9.8\text{m/s}^2$ ，為了考量三倍重力加速度的振動環境，其數值給予  $29.4\text{m/s}^2$ ，作用方向以馬達實際擺放的垂直軸方向為準。而在馬達固定的部分，以 Green Jumper 動力馬達在車體上的鎖固設計來看，是以底下的三個座來提供馬達固定，如圖 4-13 所示，因此這三個鎖固座對於馬達而言是固定不動的，所以針對這三個鎖固面在分析設定中是三軸方向全部鎖住，其位移為零。

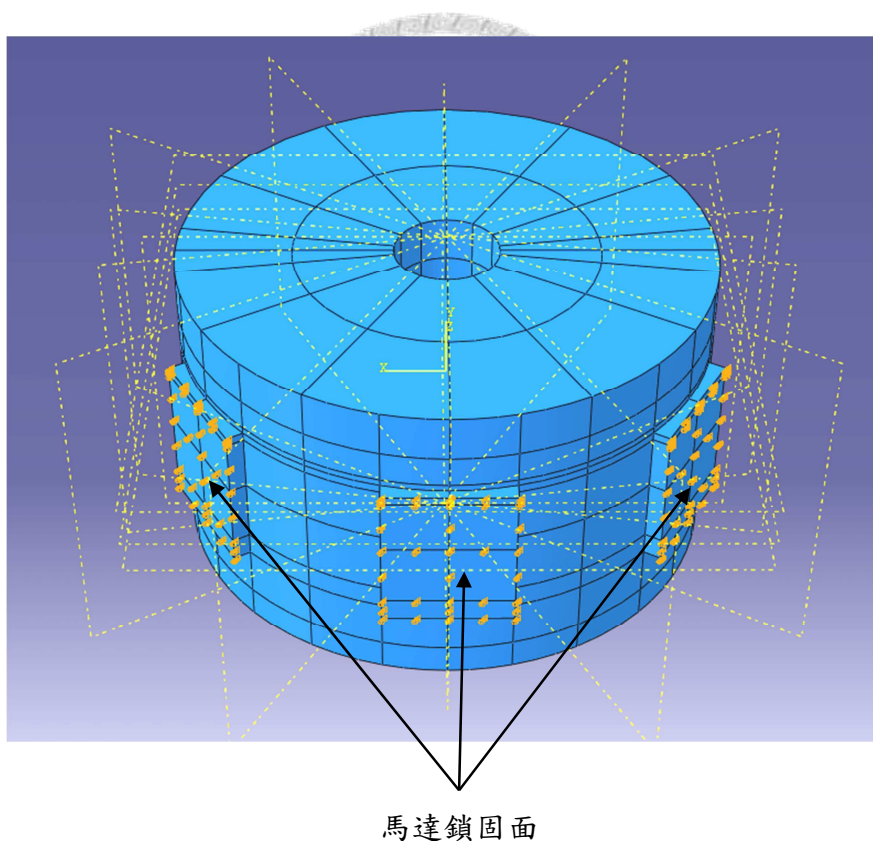


圖 4-13 馬達固定鎖固平面

#### 4-2-c. 演化式馬達結構材料分佈最佳化分析

設定完成負載與邊界條件的馬達初始材料，便可以進行演化式馬達結構材料分佈最佳化分析，其分析計算的流程如圖 4-14 所示。由 4-1-b 節所述，可以知道 ESO 方法是將結構承載後，逐漸將不經濟的結構材料移除，其判定的方式可以有剛性、應力、應變能等，由於馬達結構中的位移變形很小，因此採用應力作為判定的標準。



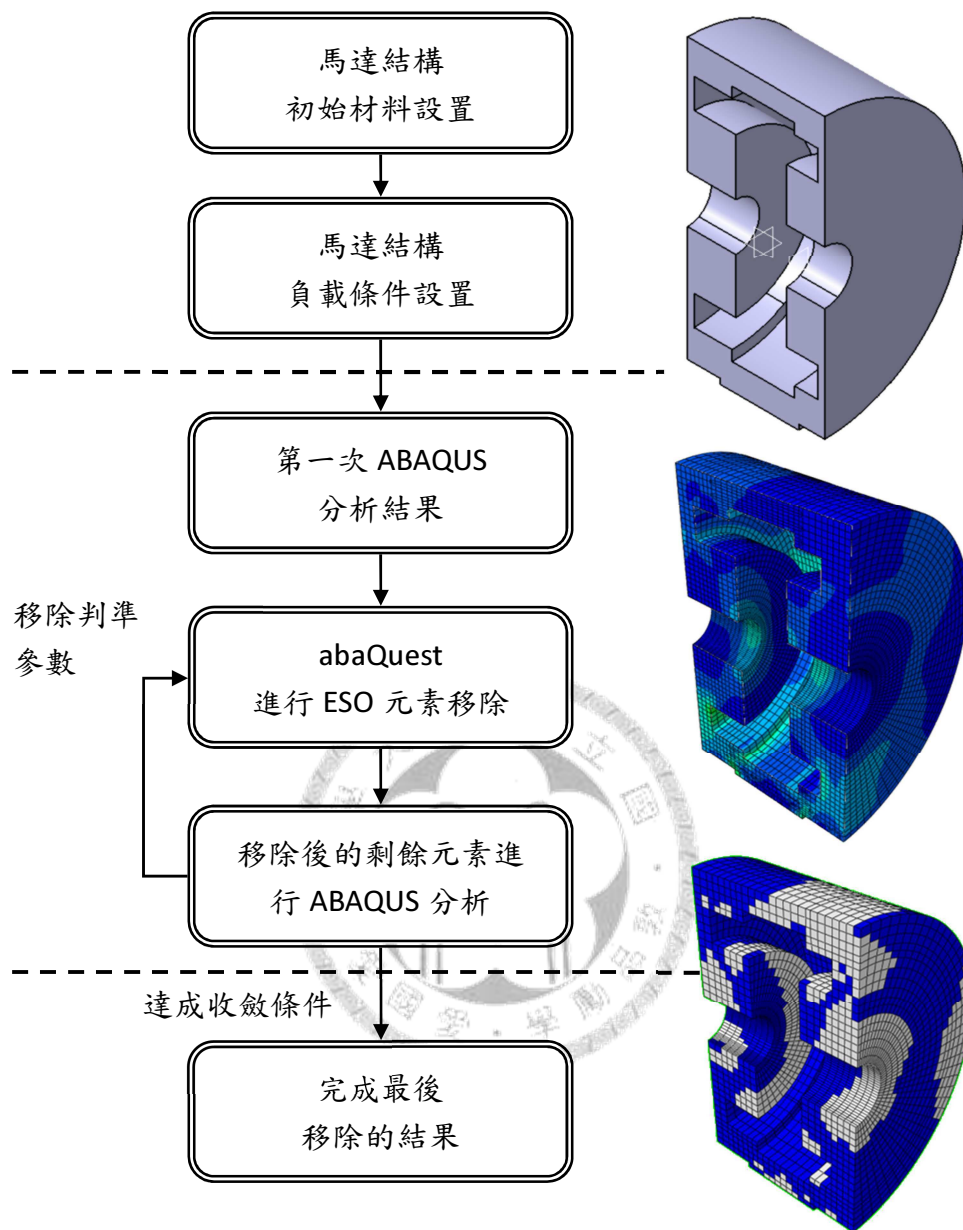


圖 4-14 演化式馬達結構材料分佈最佳化分析計算流程



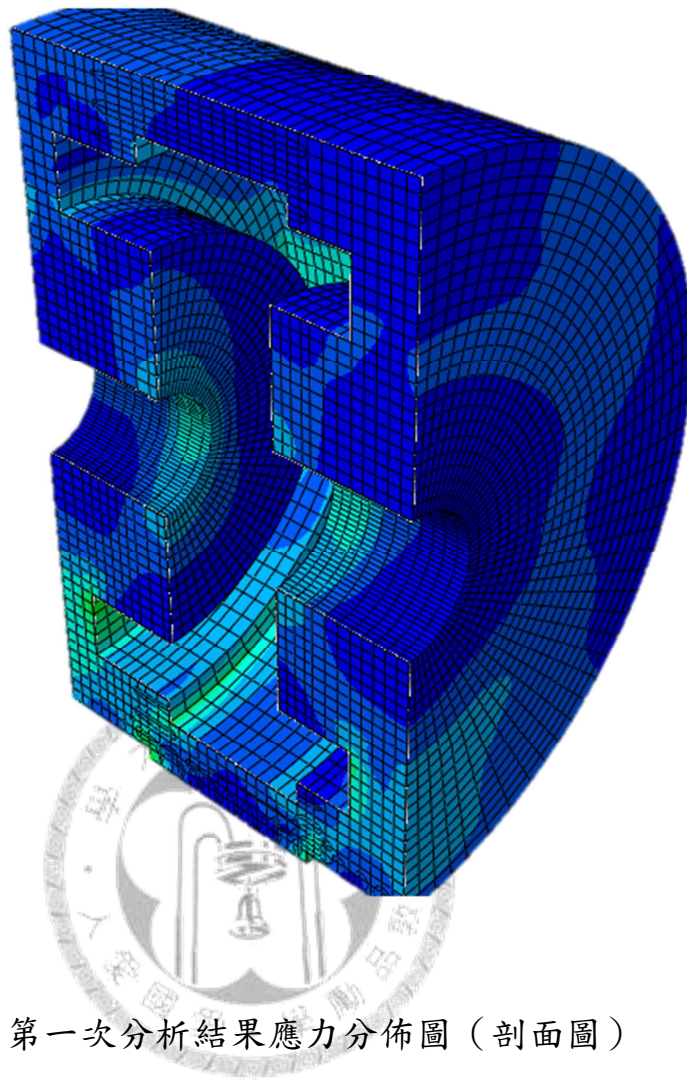


圖 4-15 第一次分析結果應力分佈圖（剖面圖）

流程圖的第一步便是使用 ABAQUS 進行第一次的分析，這個分析是要讓最佳化軟體 abaQuest 有起始的分析結果可以進行，如圖 4-15 所示，可以看出應力分佈的情況，越接近紅色其應力值越大，其最大應力值為，其餘接近藍色的部分是處於應力較小的位置，藉由應力的分佈，abaQuest 即可判定何處是不需要存在的結構，進而移除以達到最佳化的目的。因此第二步就是開始使用 abaQuest 進行分析，在 4-1-b 和 4-1-c 節已說明 abaQuest 在設定參數上的各項意義，如圖所示，本研究之分析在經過適當嘗試後，採用初始移除率  $RR=0.01$ ，移除增加量

RR=0.01，最大移除率 RR=0.1，最小剩餘體積為 0.5，單次元素移除總量不可超過 1000 個，而不可移除的元素設定為三個鎖固座的所有元素。圖 4-16 為一系列的元素移除狀態，可以看出結構移除的演化過程，白色的部分即是 abaqus 以設定之參數所移除的元素，剩餘的元素則有其新的應力分布情況，abaqus 將以新的應力分布情況繼續進行移除判定，並且以負載與邊界條件繼續分析，如此重複循環至達收斂條件為止。



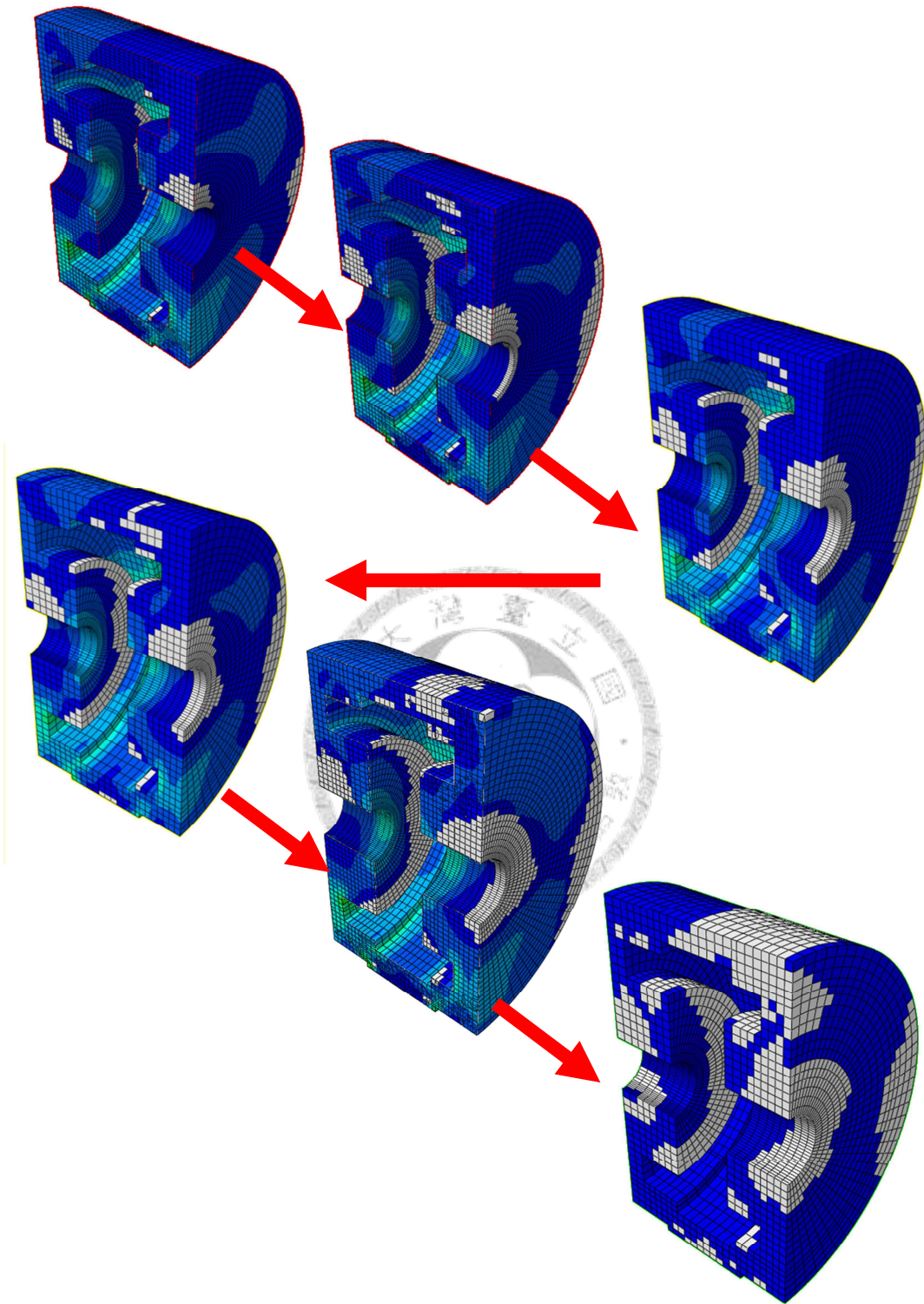


圖 4-16 結構元素移除過程 (剖面圖)

從圖 4-17 之演化結果中可以看出以下特點：定子鎖固的結構面，與三個整個馬達鎖固面間有一定程度的材料連結，越遠離的材料都是被移除的部分，但是非定子鎖固結構面的那側，其移除材料遠較定子鎖固面那側多；轉子軸承座到兩側外殼展現非軸對稱的結構型式，並且外圍角落的材料皆被移除；在底座附近的材料都是相當重要的結構，越往兩側移除元素越多。這樣的結構剩餘材料分佈是過去由工程師設計所無法規畫出來的，其形狀特殊但各部份材料卻都具有其存在意義，因此這個分析的確可以幫助工程師在結構外形設計上有更多的啟發，而這個分佈最佳化的結果將繼續進行 EMSO 的設計流程。

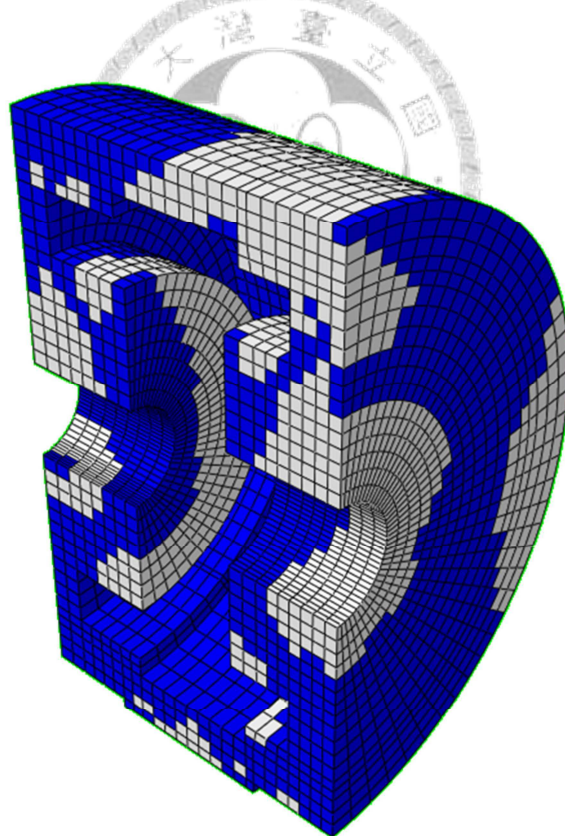


圖 4-17 最終演化結果（剖面圖）

#### 4-2-d. 以分佈最佳化分析結果進行機構分件設計

基本的馬達結構件為外殼、兩端的軸承座，由圖 4-17 之結構材料的分佈情況可以看出，兩側有明顯保留軸承座的結構存在，定子鎖固面與馬達鎖固座之間也有結構材料連結的需求。然而以定子外圍和解角器側的軸承座的結構連結來看，兩者結合為一體的設計較符合結構材料使用的經濟性，因此如圖 4-18 所示，將機構分件設計分為定子外殼含解角器軸承座結構，以及輸出軸側軸承座兩部分。

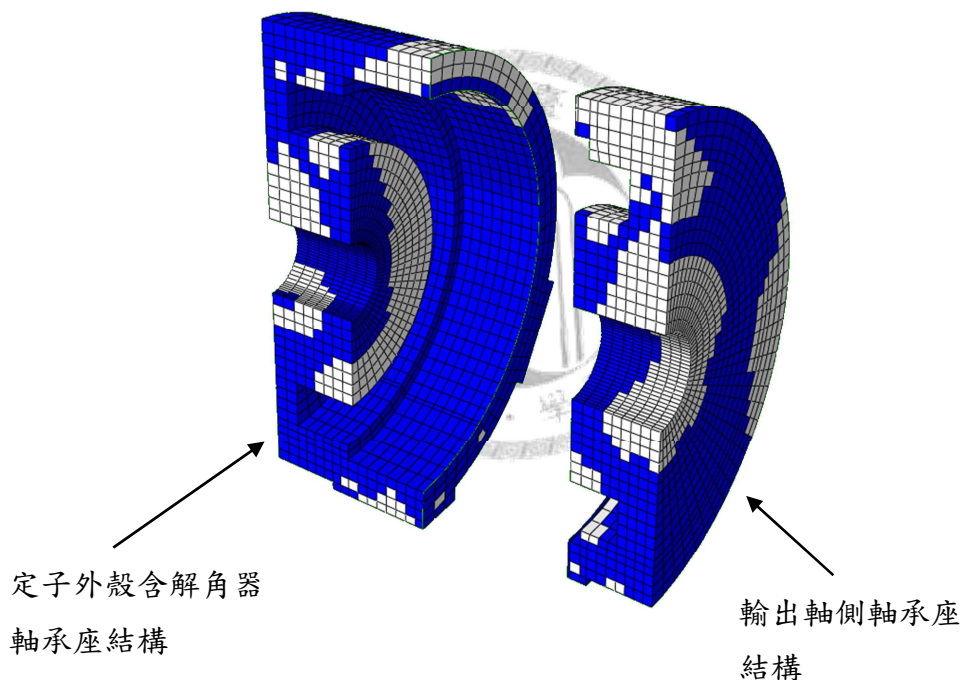


圖 4-18 馬達機構分件設計

#### 4-2-e. 機構分件設計與材料分佈最佳化結果幾何匹配

在決定機構分件設計後，則針對各分件的形狀和材料分佈最佳化結果進行幾何匹配，藉由演化式結構材料分佈最佳化分析和機構分件

設計我們得到如圖 4-18 的結果，由於在有限元素分析方法中模型必須以網格的形式存在，因此並不是平滑線條的幾何形狀，如果要進行後續的結構細部設計，則需將模型進行轉換，圖 4-19 上方是將網格的模型轉換為 CAD 圖檔的馬達結構材料分佈結果，本研究以這個結構外型作為機構分件形狀設計的依據，所設計出的分件如圖 4-19 下方所示。

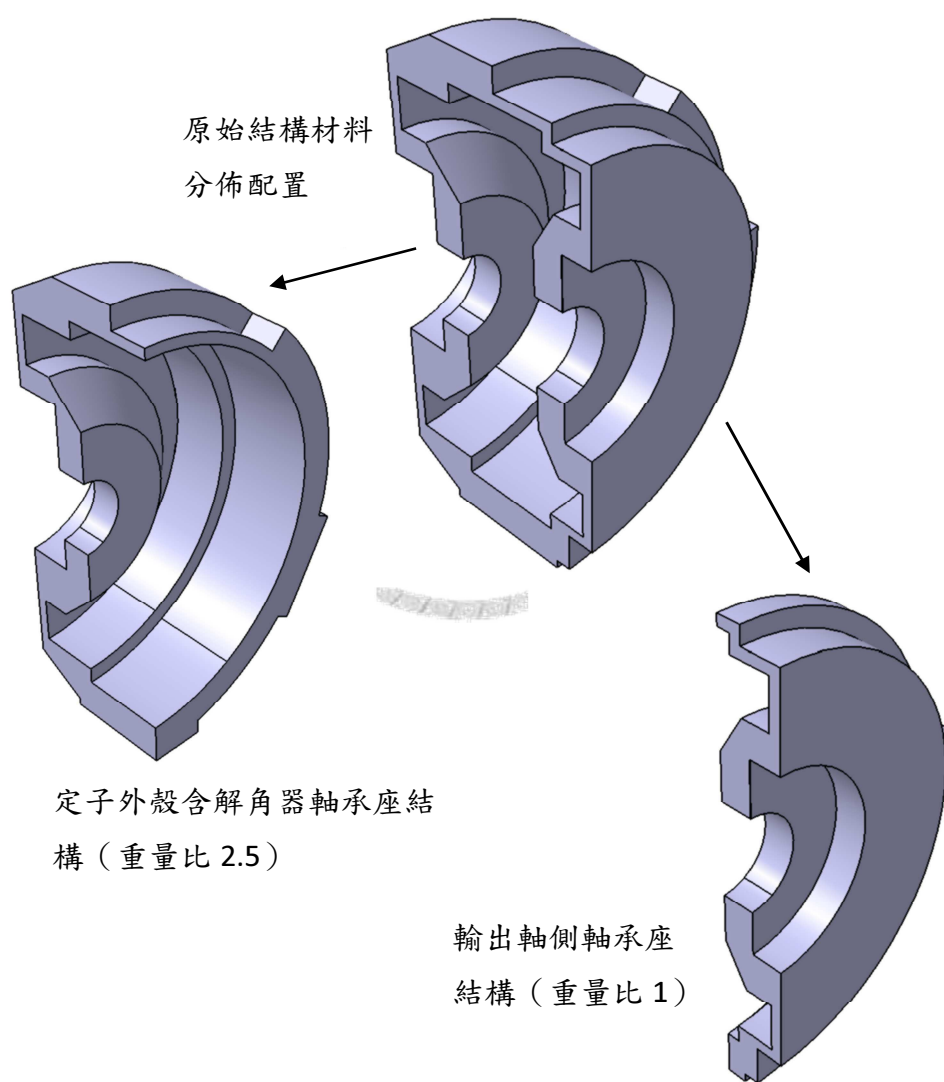


圖 4-19 分件設計與材料分佈幾何匹配圖

#### 4-2-f. 基於功率重量密度的重量最佳化配置與初步結構設計

事實上，在演化式馬達結構材料分佈最佳化的分析結果中，並未特別針對重量結果進行計算，這是因為主要考量的是馬達結構材料分佈的比例，當機構分件設計和材料分佈結果作幾何匹配後，也就可以定義出各分件的材料比例，而真正進行重量計算的步驟是在本節所進行。由於功率重量密度目標的限制為  $1.017\text{kW/kg}$ ，馬達的功率為  $31\text{kW}$ ，電磁材料的總重量為  $22.9\text{kg}$ ，所以可以知道馬達的結構材料總重量限制為  $7.6\text{kg}$ ，其比例與實際重量如表 4-3 所示。經過機構分件與材料分佈最佳化的匹配結果，各機構分件材料的重量比例與實際重量如表 4-4 所示。

表 4-3 依據設計目標之電磁材料與結構材料比例與重量

構造名稱	比例%	重量(kg)
馬達	100	30.5
電磁材料	75	22.9
結構材料	25	7.6

表 4-4 設計後之各機構分件的估材料重量比例與對應實際重量

構造名稱	比例%	重量(kg)
結構材料	-	7.6
定子外殼含解角	22	1.67
器側外殼軸承座		

輸出軸側外殼軸	8.8	0.67
承座		
輸出轉軸	19.8	1.5
轉子軸轂	12.6	0.96
螺栓	26.3	2
其他	10.5	0.8

藉由實際重量的獲得，便可以得到各機構分件之重量底線，參考演化式結構材料分佈的結果，進行結構的初步設計。如圖 4-19 所示，針對定子外殼含解角器側外殼軸承座以及輸出軸側外殼軸承座在結構分佈上的特性，參考表 4-4 來得知其重量限制，便可完成各機構分件之初步設計，這些組件的設計結果不僅僅完全滿足功率密度目標，亦可以同時滿足結構負載的要求。

#### 4-2-g. 馬達各機構分件細部設計

當各機構分件的初步設計完成後，便考量組裝與可製造性之部分，來進行結構的細部設計。由於各機構分件必須仰賴螺栓等機械元件進行組合，此外也包含出入線設計與其他的馬達需求細節，如圖 4-20 所示，因此馬達各機構分件細部設計將產出組裝方式以及各種電氣機構設計上的結果。此外，設計結果必須最後以有限元素法進行驗證檢查，確認設計結果在應力或變形上是在可允許的範圍內，確保設計使用無虞。最後，在細部設計的同時也必須考慮可製造性的設計，如第三章



所述，為避免結構設計在製程設計時因為無法達到可製造性而產生設計迴圈，而這個部分的詳細探討將在第五章進行。

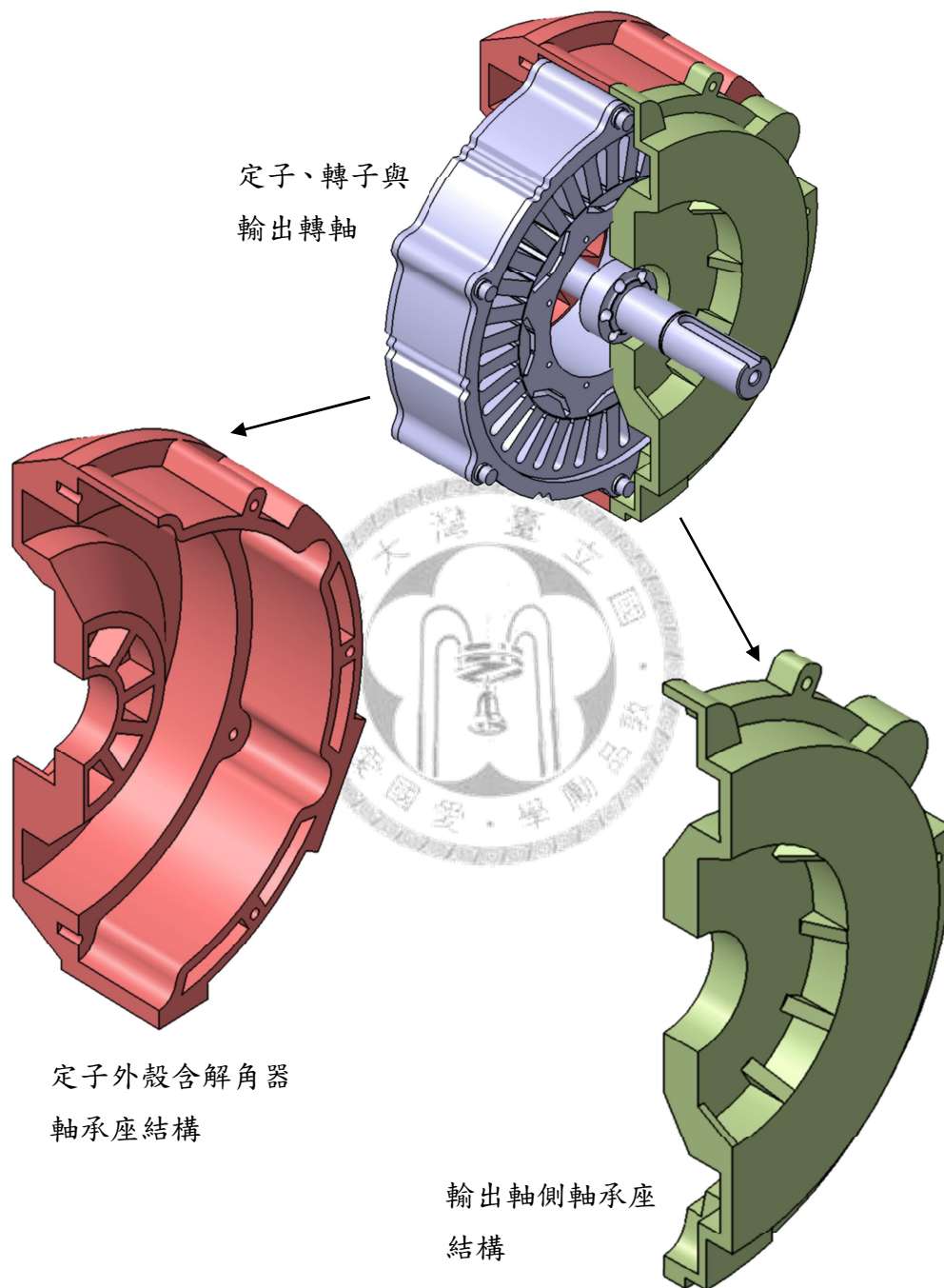


圖 4-20 各機構分件細部設計

#### 4-2-h. 演化式馬達結構最佳化設計結果與過去傳統設計結果之比較

表 4-5 顯示了演化式馬達結構最佳化設計結果，與過去傳統馬達結構設計結果之比較。第一個差異是在於整個結構材料所佔的體積，EMSO 的設計結果減少 1Liter，約 8.8%的體積，使得功率體積密度成功達到 3.01kW/Liter，這是由於在 EMSO 設計流程中，首先已經對於結構材料所能佔有的體積作了限制，在後續的設計上自然不可能會超過預定的體積範圍。第二個部分的差異在於結構材料的總重量，減少 7.6kg，約 50%的重量，使得功率密度成功達到 1.017kW/kg，這是由於在功率重量目標訂定後，以 EMSO 的分析可得到滿足重量限制的各分件實際重量(如表 4-4)，因此可確保在最終細部設計完成後都不會超過限制的重量。總結設計的最終結果，本研究所提出的創新馬達結構設計流程，的確讓結構設計結果達到如表 4-6 預定的性能提升，且整個設計流程並不會產生任何的設計迴圈，使設計工作具備極佳的進行效率。

表 4-5 EMSO 設計結果與傳統設計結果比較

構造名稱	演化式馬達結構最佳化 (EMSO)設計結果		傳統馬達結構 設計結果	
	體積(Liter)	10.3	體積(Liter)	11.3
	比例%	重量(kg)	比例%	重量(kg)
結構材料	-	7.6	-	15.2
定子外殼含解角器側	22	1.67	37.5	5.7
外殼軸承座				
輸出軸側外殼軸承座	8.8	0.67	23	3.5
輸出轉軸	19.8	1.5	9.9	1.5

轉子軸轂	12.6	0.96	7.9	1.2
螺栓	26.3	2	16.4	2.5
其他	10.5	0.8	5.3	0.8

表 4-6 最終結果性能提升比較

功率密度目標	傳統設計流程	本研究成果	提升性能
功率/重量(kW/kg)	0.81	1.017	25.6%
功率/體積(kW/Liter)	2.74	3.01	10%



## 第五章 馬達可製造性設計

### 5-1. 可製造性設計方法說明

從文獻探討可以發現，可製造性的設計方法主要是在設計過程中就考慮到製造的問題，可以藉由產品和設計有關的製造注意的事項，建立設計參考手冊，避免工程師在設計時產生了錯誤的設計，這個錯誤的設計並不是指功能或是性能目標沒有達成，而是單純的針對無法製造或是製造有相當程度的困難度，最好的例子就是機械設計便覽，如機械設計便覽在第9部分即說明了機械零件設計上之注意事項[45]，提醒許多在製造上會遭遇的細節，避免設計完成後才發現錯誤，這時的修正往往會影響範圍廣大，導致設計時程延長或是成本增加。

由此可知到設計參考手冊中如果包含製造部分的考慮，將有助於工程師在面對設計問題時也增加可製造之條件，然而如同文獻總結所述，普遍應用性的製造準則已經慢慢無法滿足工程師在設計上的需要，由於各種製造方法眾多，並且開始針對特定產品專精化，加上當製造限制條件眾多的時候，工程師根本無法一一去對應哪一個部分是哪一個條件，因此在近幾年應用較為特定產品類型的可製造性設計，開始採用製程設計限制與參數資料庫的建置方式，如半導體與電路設計，由於和製程能力息息相關，因此如果不採用資料庫的方式，很難有好的設計效率與成果產生[41] [42]。因此製程設計限制與參數資料庫的建置，是可製造性設計導入產品設計階段的重要步驟，由於現在電腦硬

體與軟體的快速發展，設計工具逐漸從人工走向電腦化，包含各種 CAD、CAE 和 CAE 工具不斷發表，因此可製造性設計也從過去由工程師自由發揮，開始以電腦軟體的方式來進行完整地毯式的可製造性判定，然而設計關鍵的地方是在於能否擁有對自身產品製程設計限制與參數的完整數據，由於每個產品都有其特殊的製造考慮，所以對於製程能力的瞭解與參數化是相當重要的。如國際印刷電路板製造商 MULTEK，針對其電路設計即明確定義在電路板上的的所有設計參數與製程能力的對應，便可以有效的藉由軟體自動化的來進行設計分析與修正 [46]。

由前文所述，製程設計限制與參數資料庫的建置，乃關鍵的可製造性設計步驟，藉由資料庫的建立，可以導入各種幾何分析軟體，並且隨時依據製程能力與參數的改變，即時的針對產品設計來分析是否具備可製造性，然而製程設計限制與參數並非結構設計者自訂，必需要和負責製造之單位進行溝通討論，瞭解製造單位的製程能力，這樣資料庫的內容才能夠符合實際情況，使可製造性分析產生有用的結果。因此本研究預計和製造單位合作，建構以馬達製造為考量對象的製程設計限制與參數資料庫，並且配合可製造性幾何分析軟體 DFM Pro 來作為可製造性設計分析之方法，進一步以第四章所做的結構細部設計結果來進行可製造性設計，使結構設計結果能夠有效的達到製造效益，消除結構設計與製程設計之間的设计迴圈。圖 5-1 為本研究預計進行的馬達可製造性設計流程。

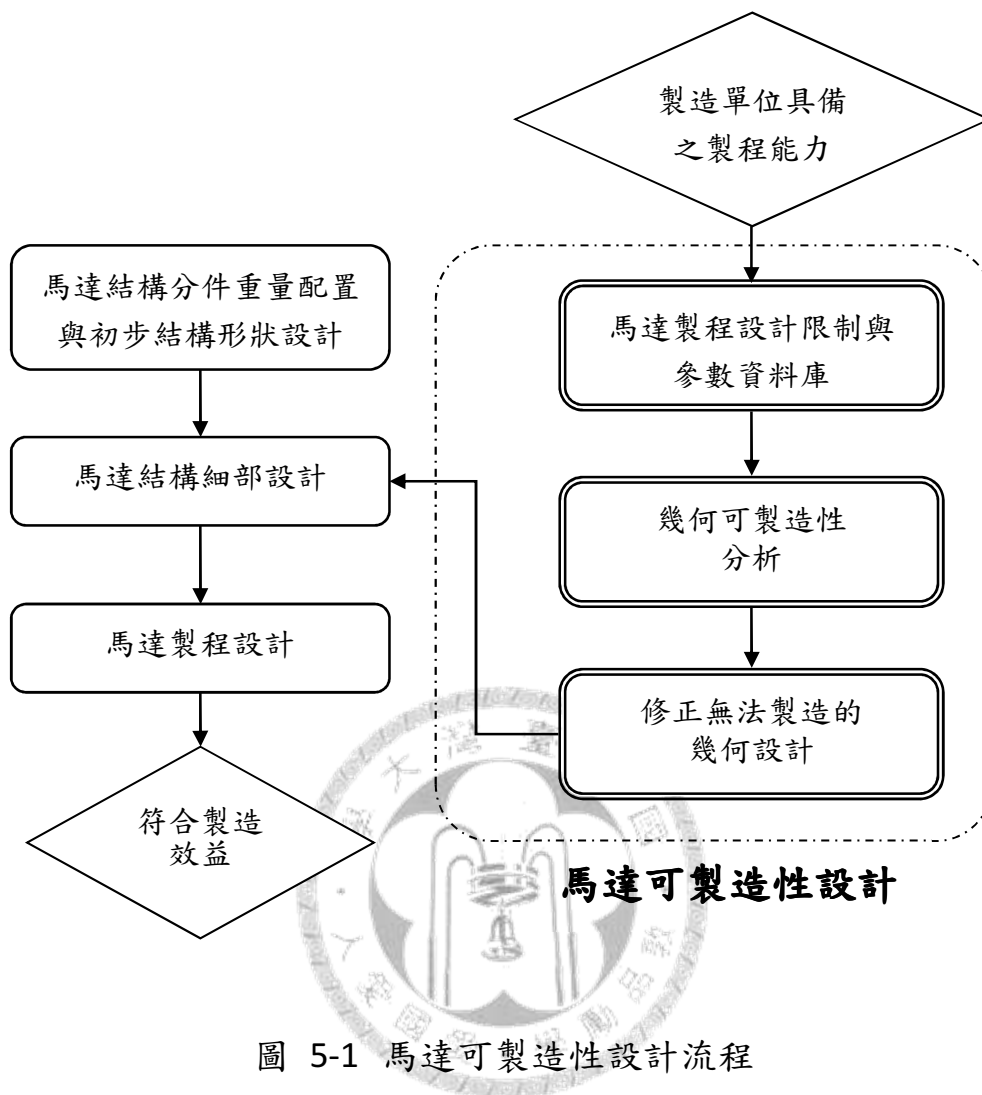


圖 5-1 馬達可製造性設計流程

## 5-2. 本研究採用之馬達製造方法介紹

本研究在馬達的製造方式上採用機械切削加工之銑切方式。銑床是常見的加工母機，而電腦數值控制(Computer Numerical Control, CNC)自動化銑床更是普遍應用在機械結構的加工上，由於如鑄造或是鍛造的方式，必須是大量生產才能夠符合成本效益所使用的製造方式，對於本研究所製造的是原型品來說，並不符合製造效益，因此採用銑切加工作為馬達的製造方法。



圖 5-2 CNC 銑床加工

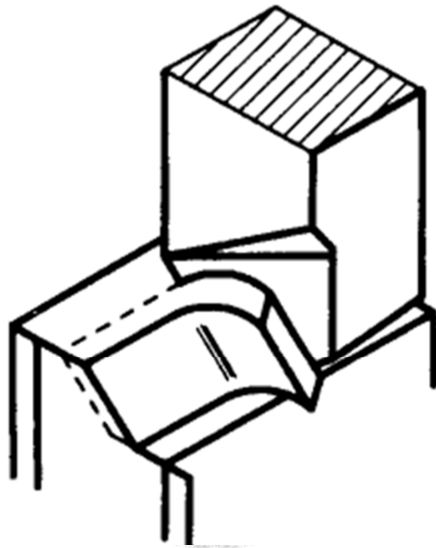


圖 5-3 銑刀和工件接觸之移除示意圖

如圖 5-2 所示，銑切加工是以銑刀在主軸上旋轉，讓工件和銑刀之間產生相對速度，當工件表面和銑刀接觸時產生塑性變形，進而移除材料（如圖 5-2 所示），並且藉由工件所在的床台進行移動，讓不需要的材料逐步移除，最終剩餘的材料就是設計所要達成的形狀。由於現今 CNC 銑床的發展快速，已經可以達到相當高的加工精度，並且使用高速主軸，以進行快速切削的加工，因此許多量產的製程也開始導入大量的 CNC 銑床加工，如圖 5-4 所示，過去採用射出成形作為筆記

型電腦外殼的方式，也開始轉而藉由 CNC 銑床的加工，來兼顧強度與重量，並且可以達到量產的規模。



圖 5-4 採用 CNC 量產加工的筆記型電腦外殼

### 5-3. 針對製造方法建構製程設計限制與參數資料庫

銑切加工的製造方法在製程設計限制與參數上有下列四個部分：第一是刀具殘料；第二是刀具外徑與深度；第三是工件形狀與刀具方向；第四是刀具外徑與切削工件肉厚。

刀具殘料是指由於刀具是以一旋轉軸進行旋轉，因此有其切削的半徑範圍，因此遭遇轉折時勢必會有殘留的工件無法切削，如圖 5-5 所示，紅色圍住的角落部分即是刀具殘留的工件材料。在設計時如果沒有考慮刀具殘料，就會有如圖 5-5 無法切削到的地方，而所剩餘的



殘料，端視刀具使用的大小來決定，如果刀具半徑大，則殘料多，刀具半徑小，則殘料少，然而如果沒有決定轉折的 R 角半徑，讓製造時的刀具來決定，輕則外觀不符合當初設計，重則可能產生功能無法達成的問題，因此結構設計的首要考量便是針對結構轉折的部位進行檢查。

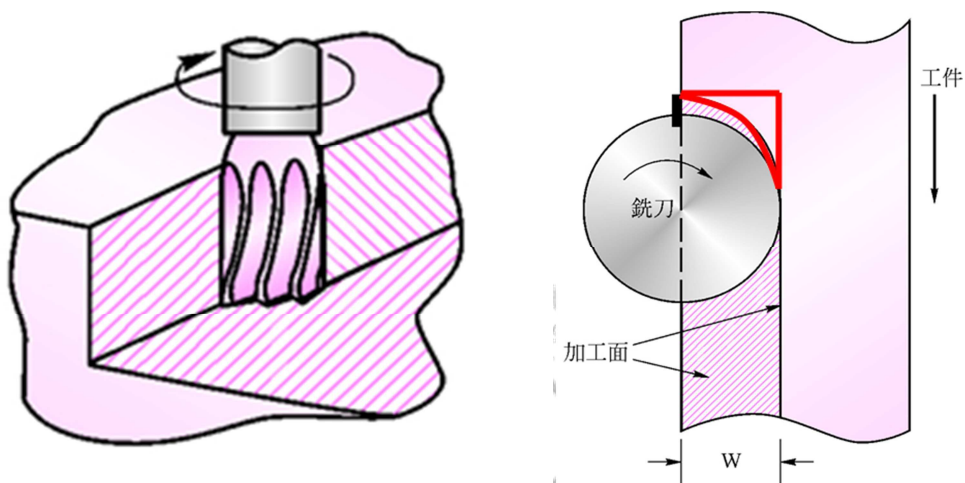


圖 5-5 刀具殘留示意圖

刀具外徑與深度係指不同的刀具外徑其能夠銑切的深度有其極限，另外，由於刀具是藉由刀座鎖固並且連結至機台主軸上，因此刀座也會影響到可以銑切的深度範圍。如圖 5-6 所示，不同的刀具外徑其長度亦不相同，當然也有長度較長的特殊設計刀具，然而還是有其極限，不可能無限制的變長，因此掌握刀具外徑和深度的關係是可以避免設計出無法銑切的重點。而圖 5-5 所示，是刀座和刀具的大小關係，當刀具長度也許足夠銑切到工件的一定深度，但是由於刀座的外徑較刀具大很多，因此當工件的外形會碰到刀座時，亦會造成無法銑切的情況，

如圖 5-8 所示，儘管刀具有足夠的長度可以銑切，但是因為刀座的干涉而導致無法加工。



圖 5-6 各種外徑之銑刀



圖 5-7 銑刀夾持於刀座

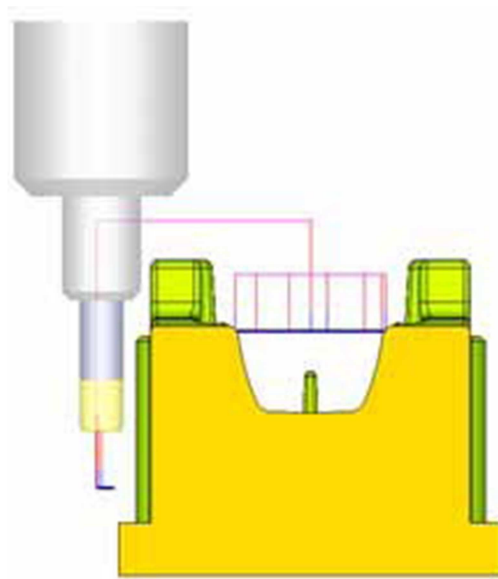


圖 5-8 刀具和刀座銑切時和工件的相對位置關係

工件形狀與刀具方向係指銑切時，銑刀的方向和工件形狀間的關係，一般的三軸銑床，只能針對 XYZ 三個方向進行直線運動，其刀具和床台是保持垂直的，因此如果工件的加工面無法由同一個方向進行加工，則必須在加工完一面後，重新擺放工件的方向，然後才繼續加工，這樣雖然不會導致無法加工，但是會增加製造的時間與難度，因為重新擺放必須多一個步驟，又要考慮定位的問題，以免加工尺寸產生誤差。然而，有一種情況是當工件產生負角的時候，便會使得刀具無法碰觸到工件，自然產生無法加工的問題，如圖 5-9 所示，刀具所指的地方都是工件上的負角。可以解決的方式為採用五軸的銑床，如圖 5-10 所示，五軸的銑床是除了三軸的直線運動外，還可以進行 XY 軸的轉動，因此刀具就不會一定要垂直床台，自然可以加工負角的位置。但是五軸的加工難度較高，機台成本與加工工時都較為昂貴，不

一定是具有製造效益的方式，因此端看自身的製造能力為主要判斷的依據，如果有五軸加工的製程能力基礎，則可以設計負角，如果沒有，建議還是以三軸加工來設計。

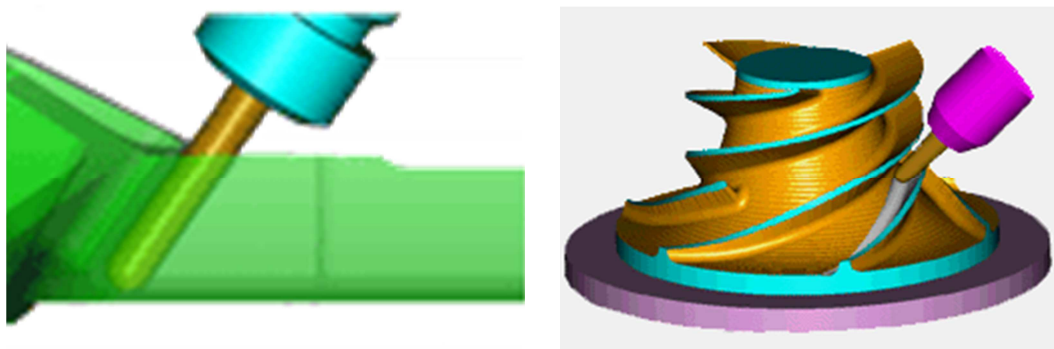


圖 5-9 工件負角與刀具方向關係

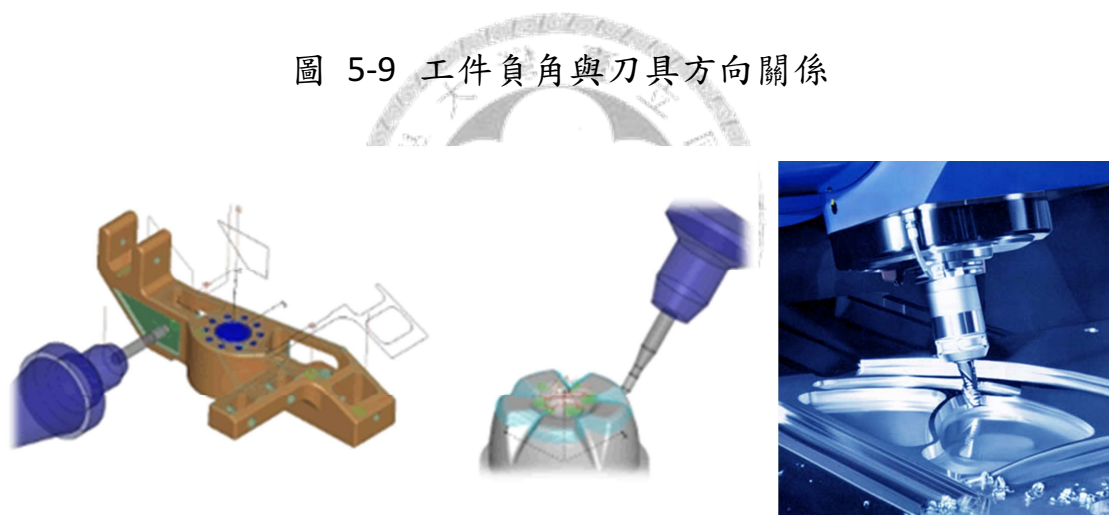


圖 5-10 五軸加工機示意圖

最後是針對刀具外徑與切削工件肉厚之間的關係，由於切削是刀具在工件表面，以一定厚度產生塑性變形進而移除工件材料，因此當工件已經很薄的時候，在切削時容易造成工件的振動，甚至是產生變形，使得設計的外形產生誤差或是加工失敗，所以對於工件肉厚越薄的加工，其自然產生一定的切削難度。如果自身的加工能力並沒有達

到可以切削薄殼的工件，就必須在設計中盡量避免，或是瞭解刀具外徑和可切削工件肉厚的關係，便可以在設計時修正超出製造能力的工件肉厚。

基於以上四類型的製程設計限制與參數，本研究建立如表 5-1 所列之銑切製程設計限制與參數資料表，這個資料表將成為資料庫的形式，並且配合 DFM Pro 建立對應的分析參數，以對結構幾何作可製造性分析。

表 5-1 馬達銑切製程設計限制與參數資料表

項目	製程限制	製程參數
<b>刀具殘料</b>		
刀具外徑所對應的 R 角	無法切削無 R 角的工件轉折	方向相交的面和面間不具有圓弧
	無法使用大於工件 R 角的刀具外徑	工件 R 角 ≤ 刀具外徑
<b>刀具外徑與深度</b>		
刀具外徑所對應之長度	無法切削深度大過刀具長度的位置	工件切削深度 ≤ 刀具長度
刀座外徑	無法切削從刀具前端到刀座半徑連線範圍內的工件	刀座半徑和刀具長度所圍成的直角三角形範圍內不能有工件

---

### 工件形狀與刀具方向

---

工件外形各平面與垂直面之夾角	無法切削有負角的位置	以垂直刀具方向檢查是否有夾負角的面
----------------	------------	-------------------

---

### 刀具外徑與切削工件肉厚

---

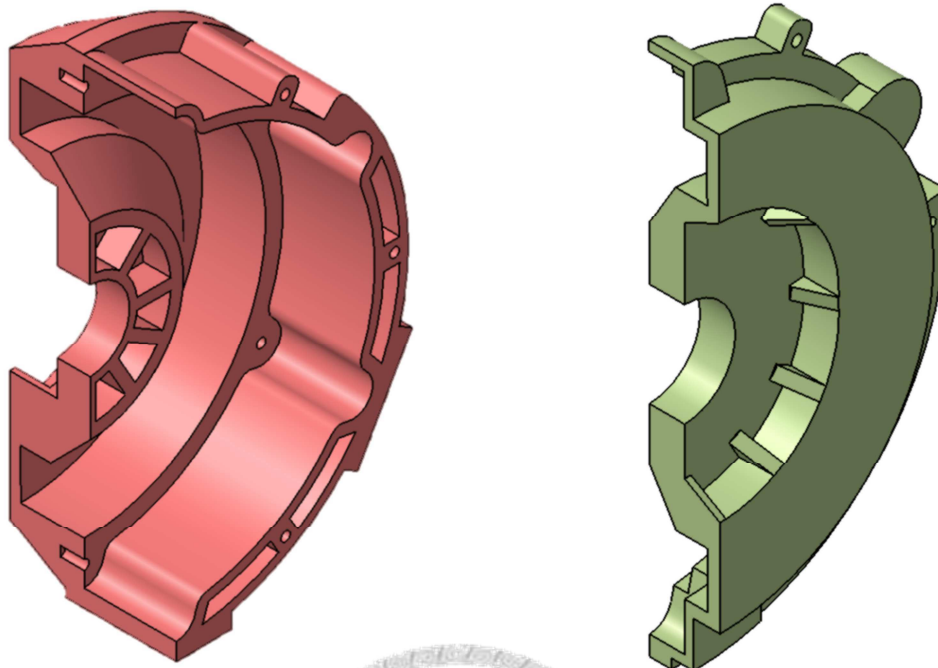
刀具外徑所對應之工件肉厚	無法切削過薄之工件肉厚位置	刀具經過地方必須檢查工件肉厚 $\leq$ 刀具切線肉厚限制
--------------	---------------	--------------------------------

---

DFM Pro 是 Geometric 公司的一套軟體，可以嵌入 SolidWorks 3D 繪圖軟體，依據可製造性的判定標準做幾何的分析，針對有問題的幾何特徵特別標示出來，並且說明其問題之原因，提供工程師在工件幾何修改上的參考。

#### 5-4. Green Jumper 動力馬達細部設計與可製造性判定

本節將針對所建構的製程設計限制與參數資料表，來對第四章最後細部設計的初步結果進行幾何分析，檢查是否產生製程設計上的可製造性問題。如圖 5-11 所示，其結構設計已經具備有幾何結果，因此可針對可製造性的判定準則來進行檢查，表 5-2 與表 5-3 輸出軸端軸承座結構可製造性判定結果為定子外殼含解角器側軸承座結構，以及輸出軸端軸承座結構可製造性判定的結果，並且將違反可製造性之相關位置示意於圖 5-12 與圖 5-13 輸出軸端軸承座結構違反可製造性判定之，使設計者便於瞭解問題的位置以進行修正。



(a) 定子外殼含解角器側軸承座結構 (b) 輸出軸端軸承座結構

圖 5-11 馬達細部設計的初步結果

表 5-2 定子外殼含解角器側軸承座結構之可製造性判定結果

項目	檢查結果
<b>刀具殘料</b>	
刀具外徑所對應的 R 角	共有 100 組面間有直線轉折
<b>刀具外徑與深度</b>	
刀具外徑所對應之長度	共有 4 個位置深度大於刀具長度
刀座外徑	無

工件形狀與刀具方向

工件外形各平面與  
垂直面之夾角

無

刀具外徑與切削工件肉厚

刀具外徑所對應之工件肉厚

無

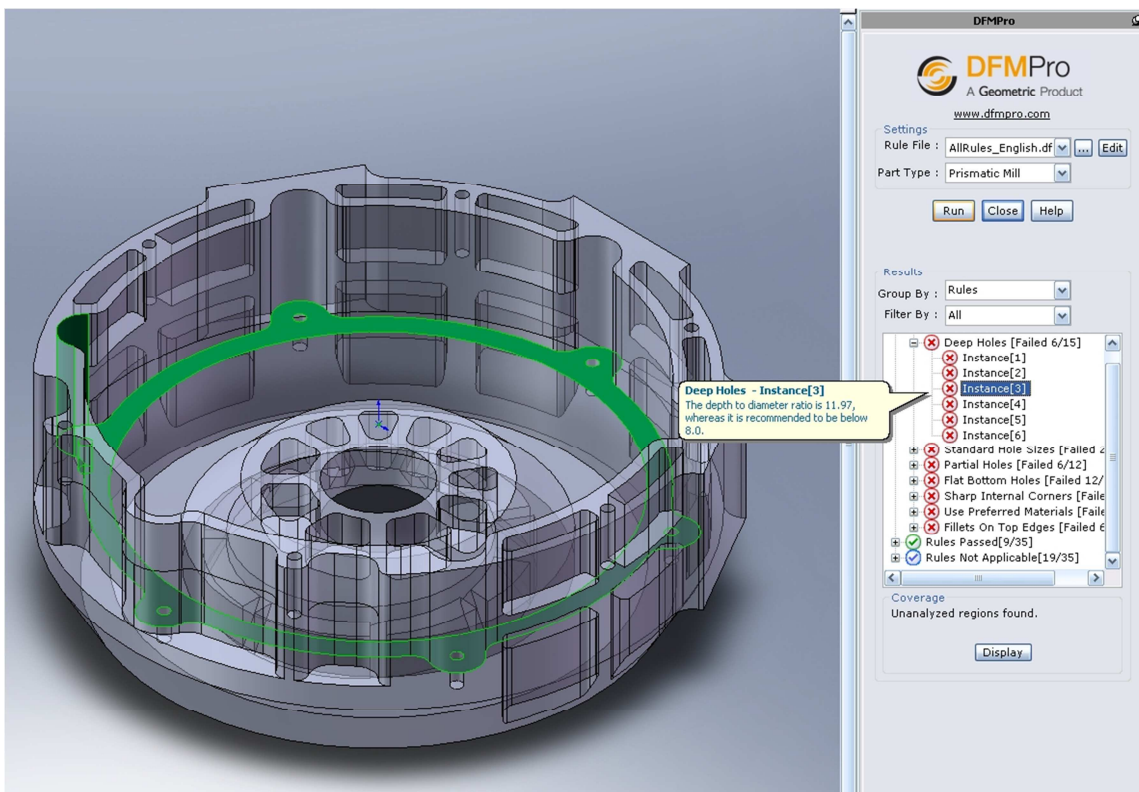


圖 5-12 定子外殼含解角器側軸承座結構違反可製造性判定之說明圖



表 5-3 輸出軸端軸承座結構可製造性判定結果

項目	檢查結果
<b>刀具殘料</b>	
刀具外徑所對應的 R 角	共有 56 組面間有直線轉折
<b>刀具外徑與深度</b>	
刀具外徑所對應之長度	無
刀座外徑	無
<b>工件形狀與刀具方向</b>	
工件外形各平面與垂直面之夾角	無
<b>刀具外徑與切削工件肉厚</b>	
刀具外徑所對應之工件肉厚	無

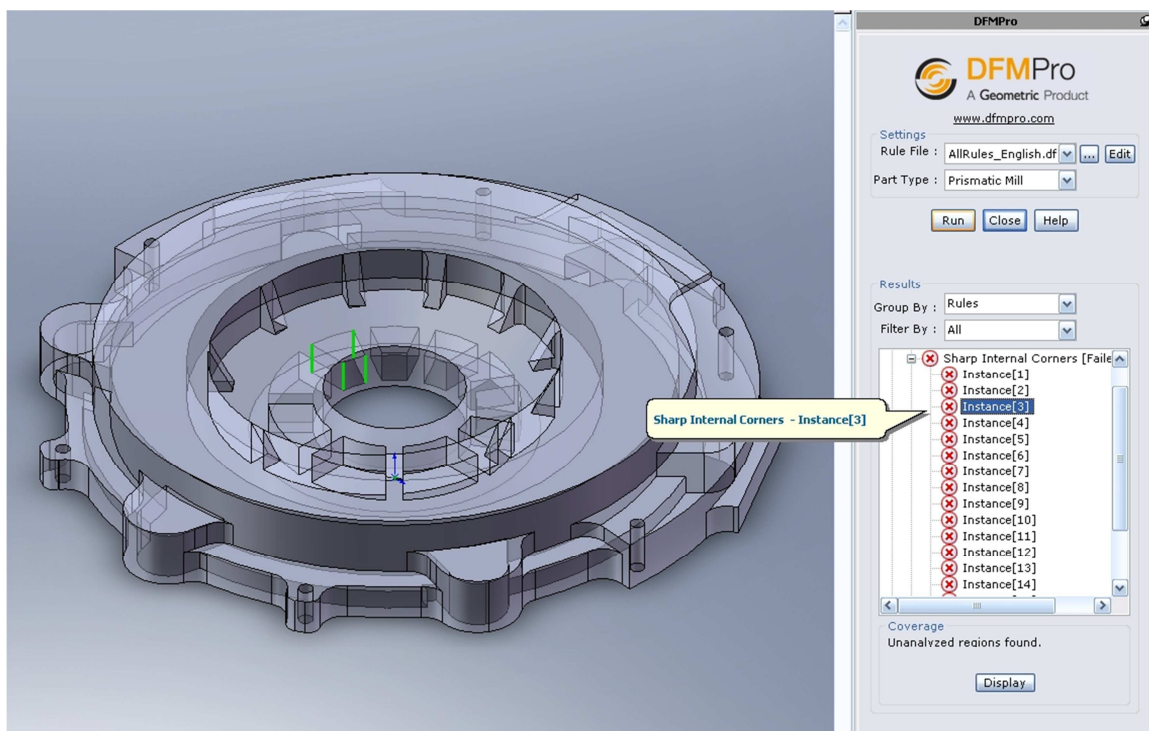
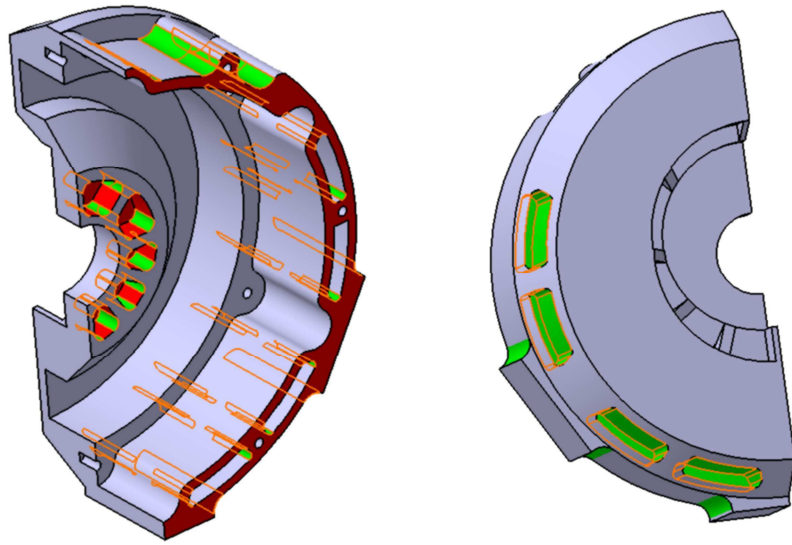


圖 5-13 輸出軸端軸承座結構違反可製造性判定之說明圖

### 5-5. Green Jumper 動力馬達可製造性設計結果

依據可製造性判定的結果，可以對結構設計進行修改，第一部是針對各轉折面進行 R 角設計，必須同時考慮 R 角和刀具的配合，以及刀具長度是否可以達到切削深度。第二步是針對定子外殼含解角器側軸承座結構有一處位置切削深度過深的問題，由於合適的切削深度對應直徑 10mm 的刀具約為 30mm，因此將減重槽的位置設計在兩側的位置皆有減重槽，但是深度減至 30mm，讓重量不會增加但是可以達到可製造性。



(a)結構轉折處增加 R 角

(b)減重槽增加另外一側，深度為 30mm

圖 5-14 定子外殼含解角器側軸承座結構設計修正（剖面圖）

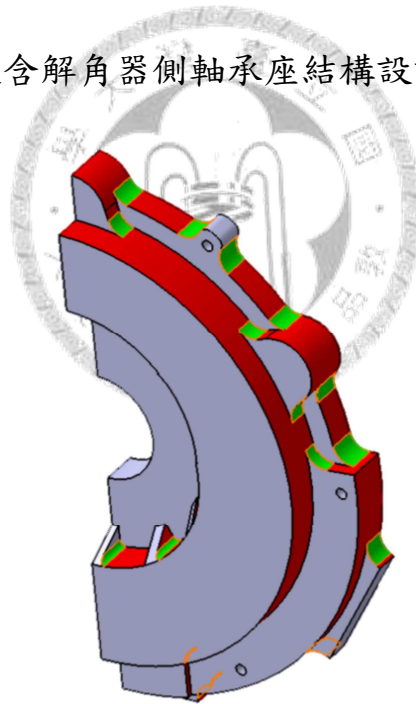


圖 5-15 輸出軸端軸承座結構設計修正（剖面圖）

## 第六章 本研究應用成果比較與討論

### 6-1. 實際應用成果比較

針對本研究所發展的創新馬達結構設計流程方法，以及結合 ESO 的演化式馬達結構最佳化(EMSO)設計，實際應用在馬達結構設計上的成果進行比較。以預定目標來說，功率重量密度較傳統設計方式提升 25.6%，而功率體積密度提升 10%。在這樣的條件下，針對是否能夠進行結構最佳化、是否滿足結構設計負載要求、設計過程中的不確定性、設計迴圈次數、是否能夠滿足功率密度目標、設計結果的可製造性以及整體設計時程做一列表 6-1。

表 6-1 本研究實際應用成果比較

功能或性質	本研究發展之創新馬達 結構設計流程方法	傳統馬達結構設計 流程方法
功率密度目標	功率重量密度目標 1.017kW/kg 功率體積密度目標 3.01kW/Liter	
是否能夠進行結構最佳化	可 針對馬達整體結構 材料達成最佳配置	可 僅能針對單一零件 做局部最佳化
是否滿足結構設計負載要求	是	是
設計過程中的不確定性	極少	多
設計迴圈次數多寡	無	多
是否能夠滿足功率密度目標	功率重量密度 100% 功率體積密度 100%	功率重量密度 74.4% 功率體積密度 90%

設計結果的可製造性	可與結構設計 同步達成	需要多次設計迴圈 方可達成
整體設計時程	短	長
工程師設計工作效率	高	低

## 6-2. 比較結果討論

針對比較結果，可以看出本研究所發展的創新馬達結構設計流程方法，以及結合 ESO 的演化式馬達結構最佳化(EMSO)設計，在功率密度目標完全滿足的情況下，可以針對馬達整體的結構材料分佈進行最佳化、滿足結構負載要求，並且將設計中不確定的因素降到極低，也使得設計迴圈的次數降到零，此外，在可製造性設計的部分能夠讓結構設計的結果直接導入製程設計，並不需要再從製程設計端重新進行設計修改，以上的結果讓整個設計時程大幅度縮短，也增進工程師在設計工作上的效率，因此本研究的確達到在研究目的上的預期目標。

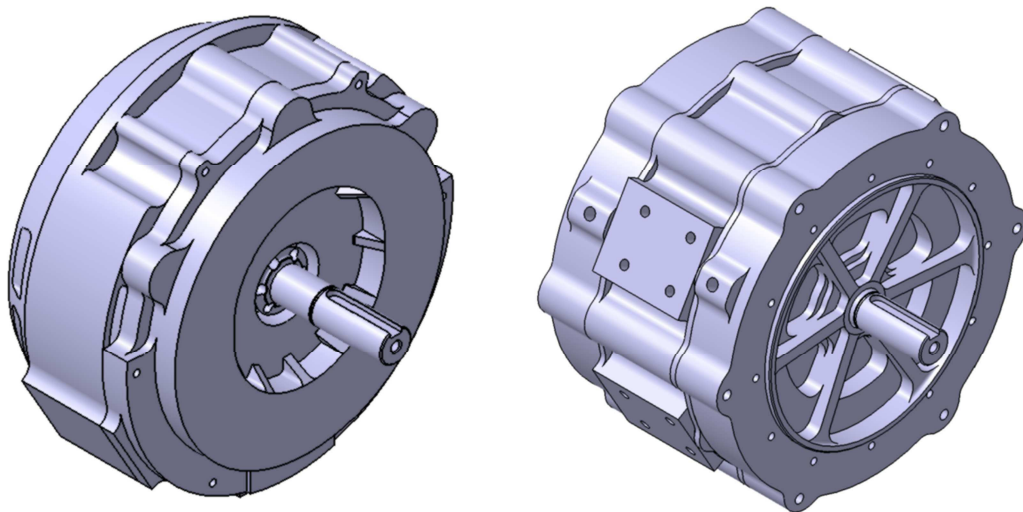


圖 6-1 創新馬達結構設計流程與傳統馬達結構設計流程之馬達外型比較

除此之外，由於採用演化式馬達結構最佳化(EMSO)設計方法，使得結構設計上產生許多新的特點，如圖 6-1 所示，兩顆馬達的外型上就有極大的差異，傳統的設計通常講究軸對稱設計，並且會為了減重而設計很多減重槽，但是本研究之結果僅對必要的地方做減重槽設計，且採用非軸對稱之外型減重設計，因此可以更有效的針對可以減重的地方進行減重，不能減重的地方則保留材料。這樣的特點更凸顯在圖 6-2 所示的地方，非軸對稱減重槽的設計過去不會出現在傳統的馬達設計上，由於轉子負載的特點，經由演化式結構材料分佈最佳化分析，自然會透露出這樣的結構特點，讓工程師有機會得到新的設計靈感，進而產生新的設計，不僅僅滿足負載條件，也讓重量更為減輕。



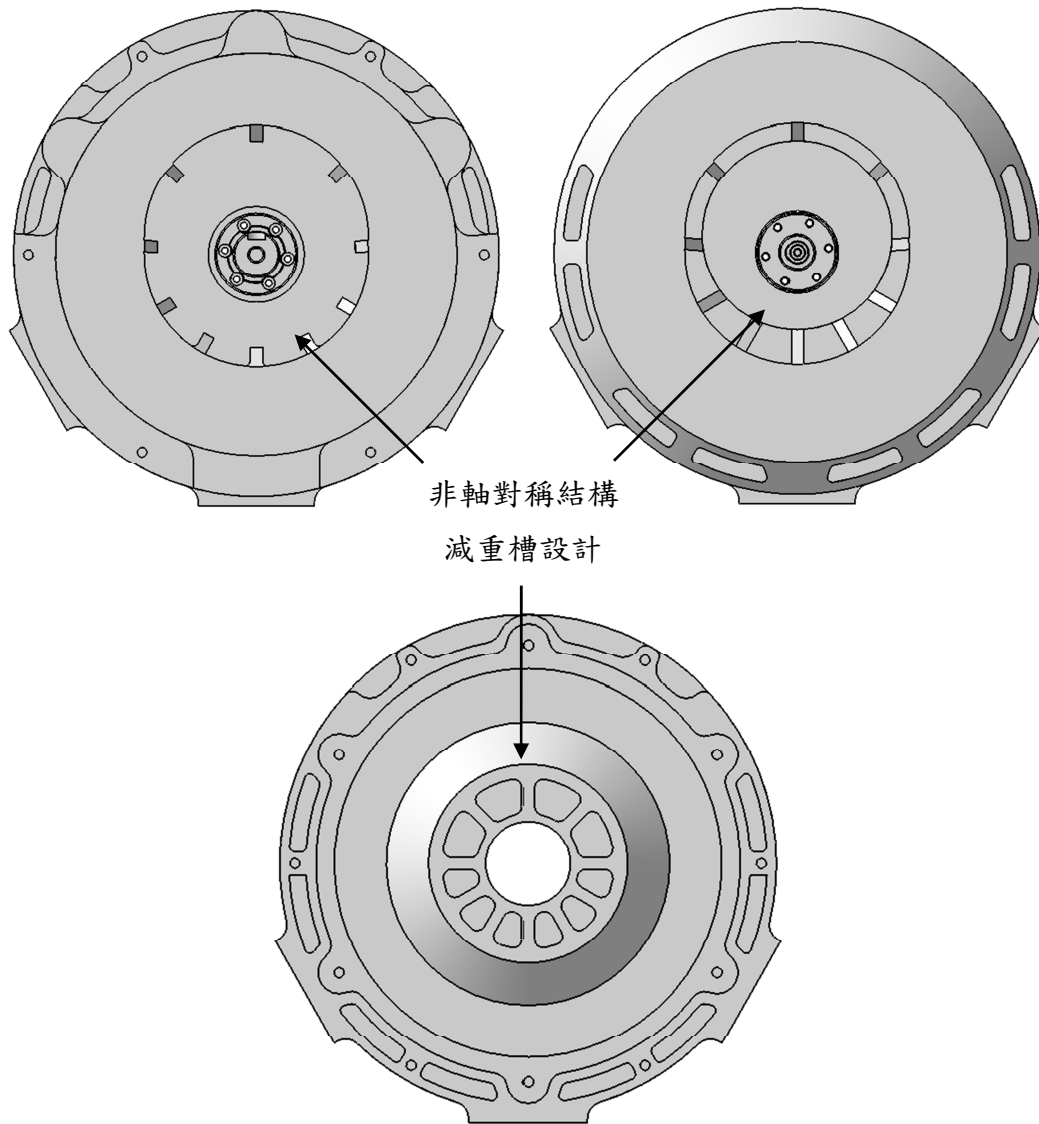
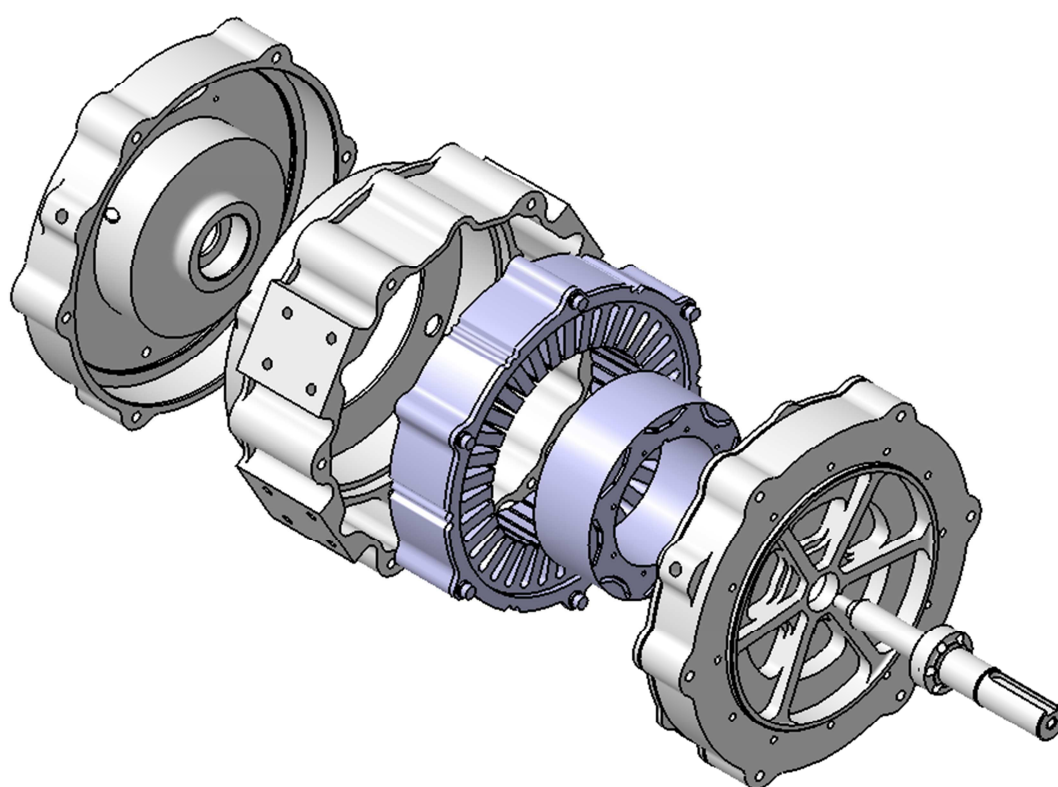


圖 6-2 非軸對稱減重槽設計示意圖

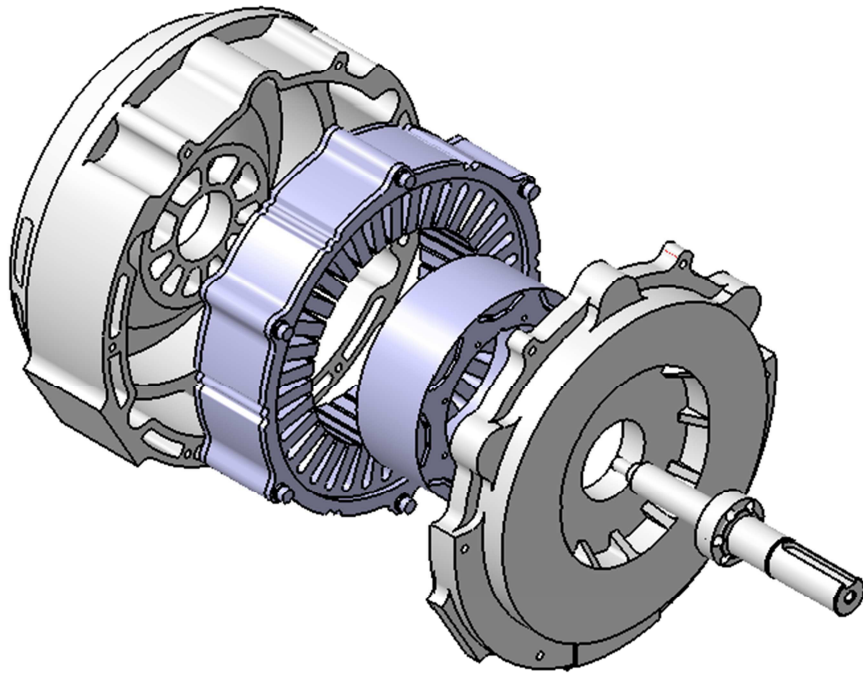
另外在機構分件設計上，由於是經由 EMSO 之材料分佈結果來探討分件的可能性以及合適性，並非以工程師過去之經驗來進行，在傳統的設計流程中，往往會先針對機構分件進行設計，因此侷限在既定的經驗法則，或是主觀的認知上，如圖 6-3 (a)所示，採用一般常使用的三件式分法作為定子外殼與軸承座結構，並非不可以，而是後續的結構設計便被限定在這樣的機構分件設計下，導致結構設計無法有效

的找出對馬達整體結構的最佳化設計。反之本研究之設計流程，先對馬達整體負載條件進行結構材料分佈最佳化的分析，瞭解材料配置後才進行機構分件設計，藉由分佈結果決定採用兩件式設計，不僅僅不會影響結構負載的能力，更可以有效達到重量更輕、體積更小的設計結果，這是本研究所建構的創新馬達結構設計所具備的特點。



(a)傳統馬達結構設計流程之馬達成果





(b)創新馬達結構設計流程之馬達成果

圖 6-3 本研究成果之馬達與傳統設計流程之馬達分件比較

## 第七章 結論與未來方向

### 7-1. 研究結論

本研究藉由針對傳統馬達結構設計流程所產生的問題，進行問題分析，且利用流程步驟的改善，獲得流程修改的方向與要素，並藉由演化式結構最佳化(ESO)方法的導入，發展專屬於馬達結構設計使用之演化式馬達結構最佳化(EMSO)設計方法，此外更以建構製程設計限制與參數資料庫，來進行結構設計的幾何分析，確保了可製造性設計，避免製程設計與結構設計之間的设计迴圈，最終進一步整合各流程步驟為一創新馬達結構設計流程方法，如圖 7-1 所示。此設計流程方法的確解決了過去傳統馬達結構設計流程所遇到的問題，並且在最極限的情況下將功率重量密度提升 25.6%，達到 1.017kW/Liter，功率體積密度提升 10%，達到 3.01kW/Liter，也使得整體的設計迴圈數目減到零，讓設計工作的效率大幅提昇。此外也藉由這個創新的馬達結構設計流程方法，使結構設計獲得許多突破傳統經驗設計法則的特點。

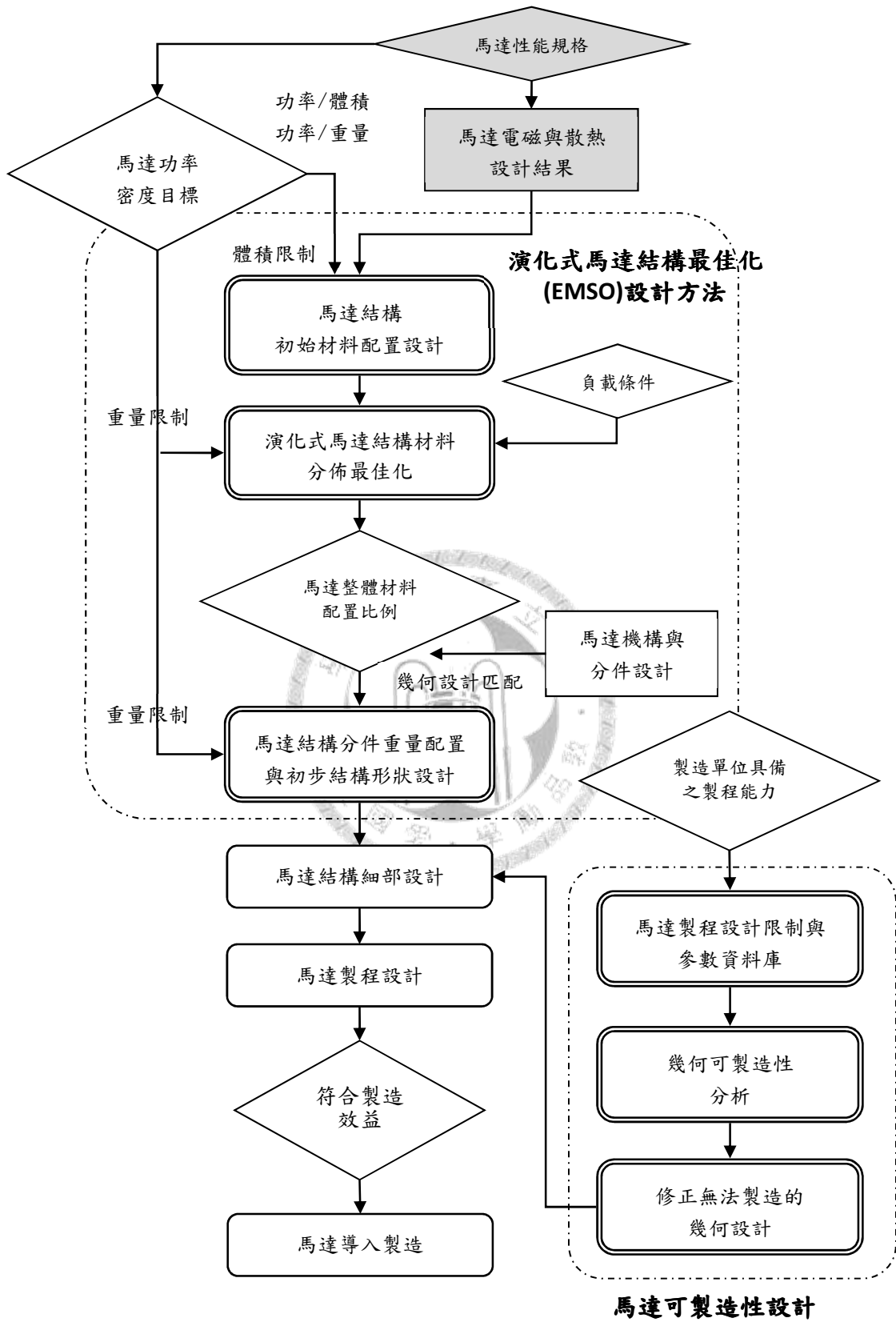


圖 7-1 本研究所發展之創新馬達結構設計流程

## 7-2. 未來研究方向建議

針對本研究的成果，雖然大幅提昇了功率密度的性能，並且改善過去傳統馬達設計上的各項問題，使得馬達結構設計可以達到其設計極限，但是相較於世界上其他國家在車用馬達功率密度上的發展，還是處於遠遠落後的狀態。深入探究其原因，主要是因為其他車廠所發展的車用馬達，除了結構設計達到最佳的輕量化外，其電磁材料所產出的功率、針對散熱的熱傳分析，以及在整體馬達製造的技術上，如繞線、矽鋼片、磁鐵等，都進行最佳化的設計，使得不單單是體積縮小、重量減輕而已，馬達電磁材料可以輸出的功率也更大，散熱的效果也更好，因而可以達到功率密度極高的程度。

就以上所述，本研究可以延伸的未來方向是以整合電磁設計最佳化、散熱設計最佳化，以及製程設計最佳化作為馬達整體的性能最佳化，以達成功率密度的最極限目標。此外，這樣的最佳化方法也可以應用至其他多物理領域整合的系統，如馬達驅動器、鋰電池系統或是功率轉換器等，甚至是整車電動動力系統的設計，使得電動車輛上各系統之設計都可以達到最佳極限的目標。

## 參考文獻

- [1] "Climate Change 2007 : Synthesis Report," P. 36, IPCC, November 2007
- [2] Siemens' NEMA copper-rotor motor <http://www.drives.co.uk/fullstory.asp?id=1957>
- [3] 徐子庭，"電動車 31kW 內置磁石永磁同步馬達設計研究，"國立台灣大學機械工程研究所 碩士論文，中華民國 99 年 3 月
- [4] J. Corbett, "Design for Economic Manufacture," Annals of the CIRP, Vol. 35/1, 1986
- [5] Bendsoe, M. P., and Kikuchi, N., "Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 71, pp. 197-224., 1988
- [6] Bendsoe, M. P., Rodrigues, H. C., "Integrated Topology and Boundary Shape Optimization of 2D Solid," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 87, pp. 15-34., 1991
- [7] Mlejnek, H. P., "Some Aspects of Genesis of Structures," Structural Optimization, Vol. 5, pp. 64-69., 1992
- [8] John Farris and Winston A. Knight, "Design for Manufacture: Expert Processing Sequence Selection for Early Product Design," Annals of the CIRP, Vol. 41/1, 1992
- [9] Y. M. Xie, and G. P. Steven, "A simple evolutionary procedure for structural optimization," Computers & Structures, Vol. 49, No. 5, PP. 885-896., 1993
- [10] Karl Ulrich, David Sartorius, Scott Pearson and Mark Jakiela, "Including the Value of Time in Design-for-Manufacturing Decision Making," MANAGEMENT SCIENCE/VO. 39, NO. 4, April 1993
- [11] C. C. Chan, J. Z. Jiang, G. H. Chen, and X. Y. Wang, "A novel high power density permanent magnet variable-speed motor," IEEE Transactions on Energy Conversion 8, pp.297- 303, 1993
- [12] R. J. Yang, and C. H. Chuang, "Optimal Topology Design Using Linear Programming," Computers & Structures, Vol. 52, No. 2, pp. 265-275., 1994
- [13] Geoffrey Boothroyd, "Product design for manufacture and assembly," Computer-Aided Design Volume 26, 1994

- [14] Y. M. Xie and G. P. Steve, "Evolutionary structural optimization for dynamic problems," *Computer and Structure* Vol.58, No. 6, pp.1067-1073, 1996
- [15] A. V. Kumar and D. C. Gossard, "Synthesis of Optimal Shape and Topology of Structures," *Journal of Mechanical Design*, Vol. 118, pp. 68-74., 1996
- [16] Torben Lenau, "The Missing Element in Design for Manufacture," *Annals of the CIRP* Vol. 45/1, 1996
- [17] C. C. CHAN, J. Z. JIANG, W. XIA and K. T. CHAU, "A novel wide speed range permanent magnet brushless DC motor drive for electric vehicles," *int. j. electronics*, 1996, vol. 80, no. 2, pp.235-248
- [18] Y. M. Xie and G. P. Steven, "Evolutionary Structural Optimization," Springer, 1997
- [19] Chu D. Nha, Y.M. Xie, A. Hira, G.P. Steven, "On various aspects of evolutionary structural optimization for problems with stiffness constraint," *Finite Element in Analysis and Design* 24, pp.197-212, 1997
- [20] Georg Thierauf, Jianbo Cai, "Parallel evolution strategy for solving structural optimization," *Engineering Structure*, Vol. 19, No. 4, PP.318-324, 1997
- [21] Chu D. Nha, Y.M. Xie, G.P. Steven, "An Evolutionary Structural Optimization Method for Sizing problems with discrete design variables," *Computer and Structure* 68, pp.419-431, 1998
- [22] Yeh-Liang Hsu, Chuan-Tang Chen, Min-Sho Hsu, "Interpreting Results from Topology Optimization Using Density Contours," *中國機械工程學會第十五屆全國學術研討會論文集*, pp. 855-860., 1998
- [23] Qing Li, G.P. Steven, O.M. Querin, Y.M. Xie, "Evolutionary Shape Optimization for Stress Minimization," *Mechanics Research Communications*, Vol. 26, No. 6, pp.657-664, 1999
- [24] M. Beckers, "Topology Optimization Using a Dual Method With Discrete Variable," *Structural Optimization*, Vol. 17, pp. 14-24., 1999
- [25] O.M. Querin, G.P. Steven, Y.M. Xie, "Evolutionary structural optimization using an additive algorithm," *Finite Element in Analysis and Design* 34, pp.291-308, 2000
- [26] O.M. Querin, V. Young, G.P. Steven, Y.M. Xie, "Computational efficiency and validation of bi-directional evolutionary structural optimization," *Computer Method Application Engineering* 189, pp.559-573, 2000

- [27] T. Ohnishi and N. Takahashi, Fellow, IEEE, "Optimal Design of Efficient IPM Motor Using Finite Element Method," IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 36, NO. 5, SEPTEMBER 2000
- [28] C.C. Hwang, J.J. Chang, "Design and analysis of a high power density and high efficiency permanent magnet DC motor," Journal of Magnetism and Magnetic Materials 209, PP.234-236, 2000
- [29] K. Sakai, T. Hattori, N. Takahashi, M. Arata, T. Tajima, "High Efficiency and High Performance Motor for Energy Saving in Systems" IEEE, 2001
- [30] Tsai-C. Kuo, Samuel H. Huang, Hong-C. Zhang, "Design for manufacture and design for 'X': concepts, applications, and perspectives," Computer & Industrial Engineering 41, PP.241-260, 2001
- [31] Martin O'Driscoll, "Design for manufacture," Journal of Materials Processing Technology 122 PP.318-321, 2002
- [32] Nikolaos D. Lagaros, Manolis Papadrakakis, George Kokossalakis, "Structural optimization using evolutionary algorithm," Computer and Structure 80, pp.571-589, 2002
- [33] Kab-Jae Lee, Sol Kim, Seong-Yeop Lim and Ju Lee, "Bridge design of interior permanent magnet motor for hybrid electric vehicle," International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 19, pp.601-606, 2004
- [34] "Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System," Oak Ridge National Laboratory, 2004
- [35] "FRACTIONAL-SLOT SURFACE MOUNTED PM MOTORS WITH CONCENTRATED WINDINGS FOR HEV TRACTION DRIVES," Oak Ridge National Laboratory, 2005
- [36] LEILA PARSA, "PERFORMANCE IMPROVEMENT OF PERMANENT MAGNET AC MOTORS," Ph.D. Thesis, 2005
- [37] "Evaluation of 2005 Honda Accord Hybrid Electric Drive System," Oak Ridge National Laboratory, 2006
- [38] T. Ishigami et al., "Manufacturing technology for continuous high-density coils for brushless motors," Precision Engineering 31, pp.260-268, 2007

[39] "EVALUATION OF THE 2008 LEXUS LS 600H HYBRID SYNERGY DRIVE SYSTEM," Oak Ridge National Laboratory, 2008

[40] "HVH250 Series Electric Motors," Remy International, Inc., 2009

[41] 林宗輝、馬光華，"The Rising and Growing Design-For-Manufacture (DFM)," 聯華電子公司，中央研發部-邏輯製程開發

[42] Paul Barrow, "可製造性設計 - 促進生產力的強大工具," 華爾萊科技公司

[43] 張智凱，"系統化複材三明治車體結構設計及最佳化方法," 國立台灣大學機械工程學系 博士論文，中華民國 96 年 7 月

[44] S. Y. Hu and J. H. Cheng, "Development of an Object-oriented Optimization Software for Industrial Utilization," Proceedings of the 4th Conference of OPTDES, Japan, 2004

[45] 小栗富士雄、小栗達男，"機械設計圖表便覽-增定三版," 中華民國 82 年

[46] Bill Frank (Multek Applications Engineer), "Design for Manufacture," MULTEK presentation

