

## 應用 Abaqus 於馬達結構設計最佳化

林松慶<sup>1</sup>, 鄭榮和<sup>2</sup>

<sup>1</sup>國立台灣大學機械工程學研究所 <sup>2</sup>國立台灣大學機械工程學研究所教授

### 摘要

由於全球暖化、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，在功率密度目標上常無法有效達成，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。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，較傳統設計流程所設計的馬達提升 25.6% 功率重量密度(1.017kW/kg)與 10% 功率體積密度(3.01kW/L)。

**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

### 一、緒論

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。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。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。

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。



圖 1 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 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<br>單組電池系統 6.6kWh<br>(整車可安裝三組共<br>19.8kWh) |
| 最高時速            | 140km/h   |
| 續航能力            | 單組電池系統 60km<br>(三組電池系統可行駛<br>180km)               |



圖 2 動力馬達電磁設計之定轉子、繞線製造結果

表 2 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<br>磁鐵：0.6、繞線：5.5                        |
| 尺寸 (mm)                | 定子外直徑：250、轉子<br>外直徑：153.34、<br>轉子內直徑：102、疊積<br>厚度 55 |
| 電磁件產生之<br>最大功率重量<br>密度 | 1.35kW/kg<br>(22.9kg)                                |
| 電磁件產生之<br>最大功率體積<br>密度 | 11.3kW/Liter<br>(2.7Liter)                           |

圖 3 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 3。



圖 3 傳統結構設計流程所設計製造之結果

表 3 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 | 2.4    | 6   |
| 軸承座    |        |     |
| 輸出軸側外殼 | 3.5    | 9   |
| 軸承座    |        |     |
| 輸出轉軸   | 1.5    | 4   |
| 轉子軸殼   | 1.2    | 3   |
| 螺栓     | 2.5    | 7   |
| 其他     | 0.8    | 2   |

## 二、文獻回顧

### 2.1 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 [1]、2005 年 HONDA ACCORD [2]以及 2008 年 LEXUS LS600H [3]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 [4]。

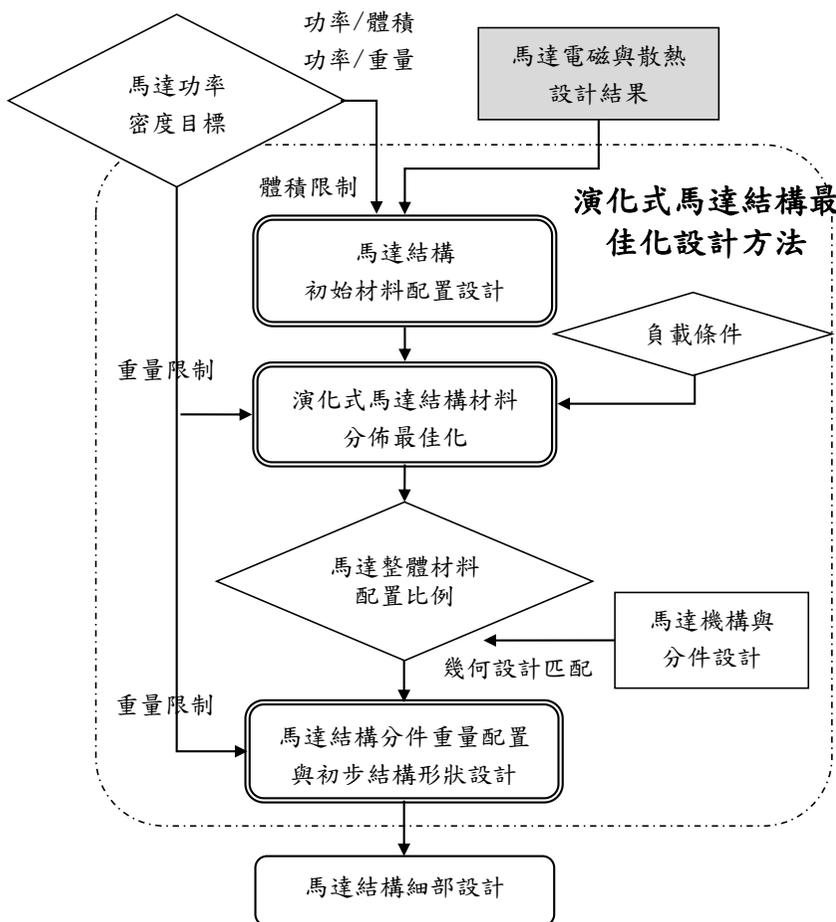
## 2.2 結構設計最佳化方法

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) [6]，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) [7]，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。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 [8]。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 [9]。

## 三、演化式馬達結構最佳化 (EMSO) 設計方法流程

如下圖所述，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



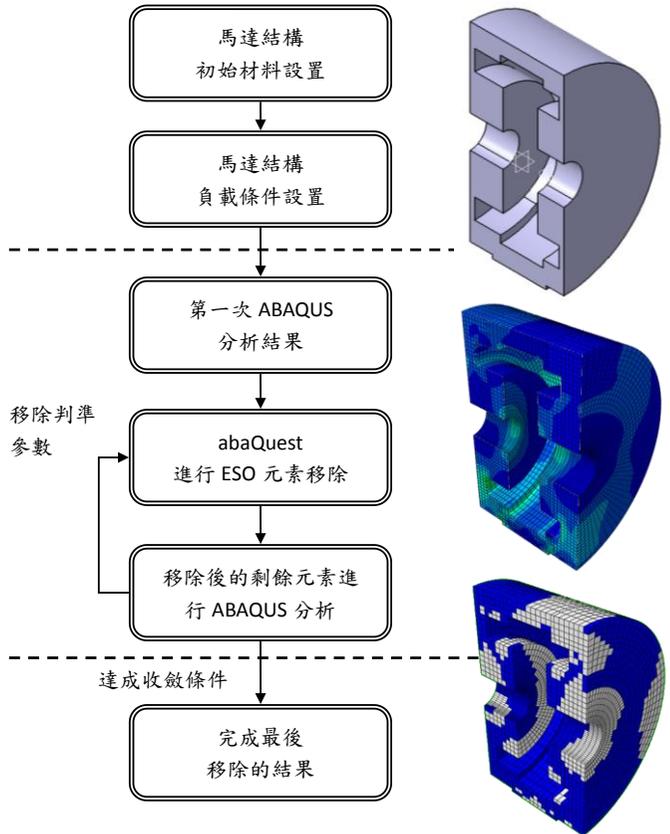
最佳化、馬達機構分件設計、馬達整體材料配置比例與分件幾何匹配、馬達結構分件重量配置與初步結構形狀設計共五個步驟。當電磁與散熱設計完成後，會有定轉子、繞線的設計結果，為求達到功率體積密度目標，乃進行馬達結構初始材料配置設計，由於功率體積密度所要求的體積是最外圍所佔的體積為準，因此考量定轉子與繞線大小與體積限制，設計一外圍包覆之體積，由於外圍體積不可能小於定轉子與繞線所佔的體積，所以約定轉子、繞線體積 1.2

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。各分件的重量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。

#### 四、演化式馬達結構最佳化設計實務應用

##### 4.1 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，這個體積是以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。如上圖所示，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，因此必須將其挖除。

##### 4.2 馬達結構負載與邊界條件設置

馬達的負載與邊界條件有：(1) 定子；(2) 轉子；(3) 自重，以及 (4) 馬達固定。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。

##### 4.3 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上圖所示。由前文所述，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。

流程圖的第二步便是使用 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，如圖所示，可以看出應力分佈的情況，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，圖 4 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 abaQuest 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，abaQuest 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。

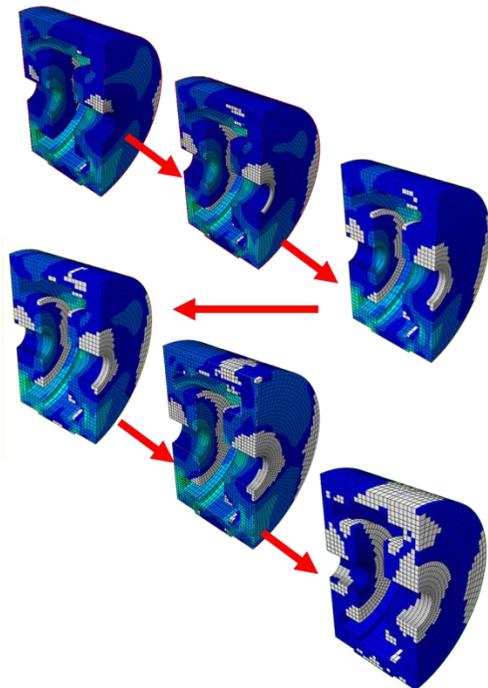


圖 4 馬達結構演化之過程

從圖 4 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。

#### 4.4 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 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 5 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。

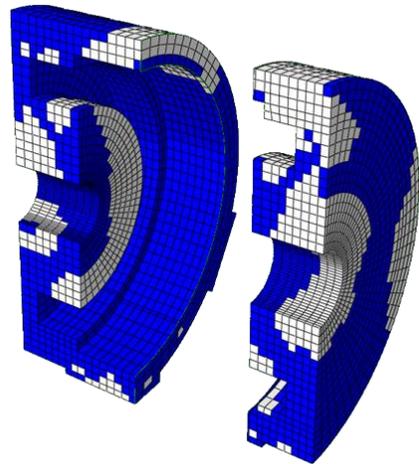


圖 5 馬達結構分件設計

#### 4.4 機構分件設計與材料分布最佳化結果幾何匹配

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 6 是將網格的模型轉換為 CAD 圖檔的馬達結構材料分件設計結果。

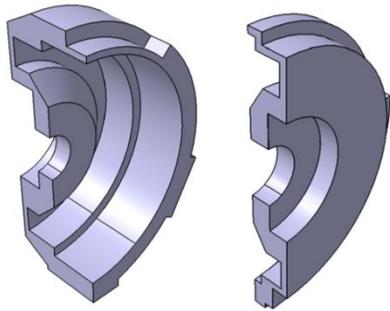


圖 6 馬達結構分件設計結果

#### 4.5 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 1.017kW/kg，馬達的功率為 31kW，電磁材料的總重量為 22.9kg，所以可以知道馬達的結構材料總重量限制為 7.6kg，其比例與實際重量如表 4 所示。

表 4 馬達材料比例分配

| 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    |

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。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，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，最後設計結果如圖 7 所示。

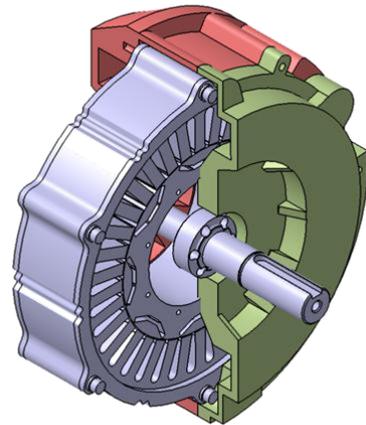


圖 7 馬達細部設計結果

#### 五、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。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。

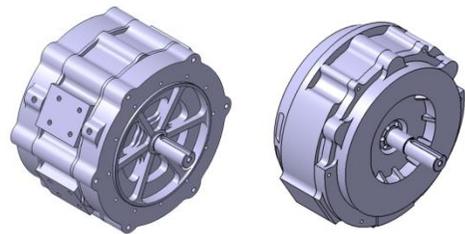


圖 8 傳統設計方法與本研究之方法在设计結果上之比較

表 5 設計結果提升之比較

| 功率密度目標             | 傳統設計流程 | 本研究<br>成果 | 提升性<br>能 |
|--------------------|--------|-----------|----------|
| 功率 / 重量 (kW/kg)    | 0.81   | 1.017     | 25.6%    |
| 功率 / 體積 (kW/Liter) | 2.74   | 3.01      | 10%      |

表 6 設計結果之材料分配比例

| 目標項目        | 傳統設計流程   | 本研究<br>成果 |
|-------------|----------|-----------|
| 馬達重量(kg)    | 38.1     | 30.5      |
| 馬達體積(L)     | 11.3     | 10.3      |
| 電磁材料(kg)(%) | 22.9(60) | 22.9(75)  |
| 結構材料(kg)(%) | 15.2(40) | 7.6(25)   |

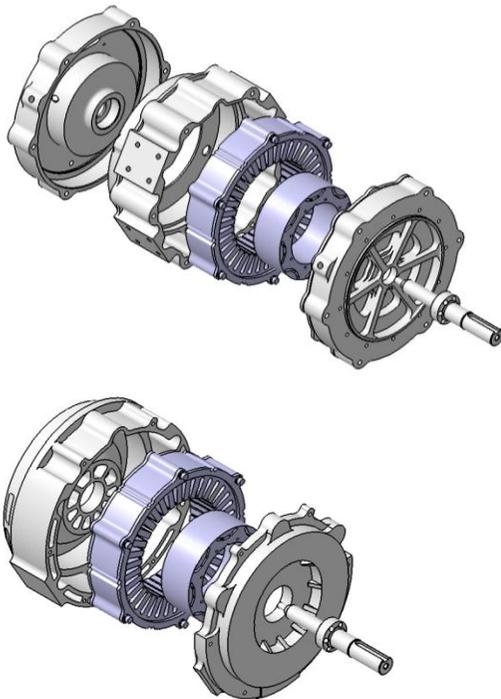


圖 9 設計結果之拆解圖比較

## 六、未來展望

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。

## 七、參考文獻

- [1] "Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System," Oak Ridge National Laboratory, 2004
- [2] "Evaluation of 2005 Honda Accord Hybrid Electric Drive System," Oak Ridge National Laboratory, 2006
- [3] "EVALUATION OF THE 2008 LEXUS LS 600H HYBRID SYNERGY DRIVE SYSTEM," Oak Ridge National Laboratory, 2008
- [4] "HVH250 Series Electric Motors," Remy International, Inc., 2009
- [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] Mlejnek, H. P., "Some Aspects of Genesis of Structures," Structural Optimization, Vol. 5, pp. 64-69., 1992
- [7] Y. M. Xie, and G. P. Steven, "A simple evolutionary procedure for structural optimization," Computers & Structures, Vol. 49, No. 5, PP. 885-896., 1993
- [8] 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

- [9] 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