一種電動汽車的內藏型磁石馬達設計

Interior Permanent Magnet Motor Design for Electric Vehicles

馬碩晟 [1*]、徐銘懋 [2]、張朝信 [3]

[1] 工研院機械所 控制核心技術組 副研究員
[2] 工研院機械所 控制核心技術組 研究員
[3] 工研院機械所 控制核心技術組 資深工程師

前言

先進國家法規的要求及對環保意識的抬頭，電動車扮演了相當重要且關鍵的腳色，本文提出一款應用於電動汽車的內藏型磁石馬達設計，除了較廣泛的 V 型的磁石配置，更加入獨特的磁阻單元的設計，使其最佳效率輸出能達到 97%；並且在提高效率的同時，磁阻單元也能夠同時扮演分散應力的彈簧體，使得內藏型磁石馬達在高速運轉下，發生形變的問題也能被一併克服，最後，透過轉子偏移的方式，達成降低頓轉轉矩的效果，完成整體馬達的設計。

獨特的內藏型永磁馬達設計

現今電動車的馬達，槽極配置非常重要，匹配繞線後，將會有多種的損失分布；最常用的槽極數多為 48 槽 8 極，例如 TOYOTA 的 Prius、日本 NISSAN 的 Leaf 等，而 BMW i3 則採 72 槽 12 極的設計。一般而言，較高的極數能夠降低馬達的頓轉轉矩，但是馬達的鐵損也會相對提高，在考慮配線的方便性跟定子結構強度下，72 槽的定子齒部會太過細長，在繞入漆包線的時候，繞線的張力可能會造成定子齒部彎曲，此外過多的槽也會造成繞線的難度增加；故選擇使用 48 槽 8 極的槽極比。

表 1 參考 BMW i3[1][2] 的馬達規格，為本文設計的馬達規格要求，設定額定轉速為 4800 rpm，最高轉速 11400 rpm，一般而言，表面貼磁的馬達轉子因為磁石直接正對定子靴部，其磁通的利用率是最高的，如**圖 1** 所示，但是在高速運轉的情況下，例如本文的最高目標轉速 11400 rpm，則比較少使用表面貼磁的轉子設計，因為表面貼磁的磁鐵通常靠膠合黏著或是小部分的背鐵固定在轉子上，磁石較有可能會因為離心力向外飛脫，或是碎裂等問題；而內藏型磁石的轉子設計就克服了這樣的問題，透過轉子鐵心開槽，直

表 1 電機規格

項目	規格	單位
馬達種類	永磁馬達	-
馬達形式	內藏形磁石	-
額定功率	70	kW
最大功率 @2min	120	kW
額定電壓	400	V
電壓範圍	300-450	V
額定轉速	4800	rpm
最高轉速	11400	rpm
最大轉矩	250 / 4800 rpm	N-m
最大電流	400	A rms

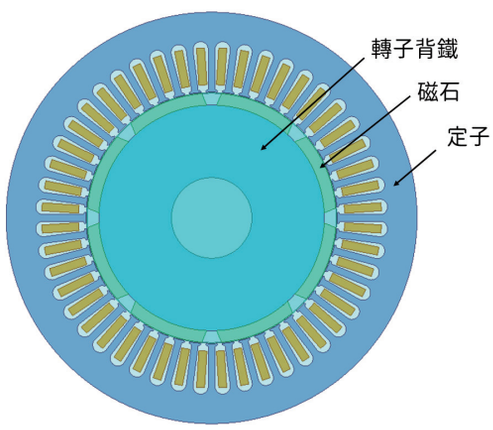


圖 1 磁石表面黏貼型馬達

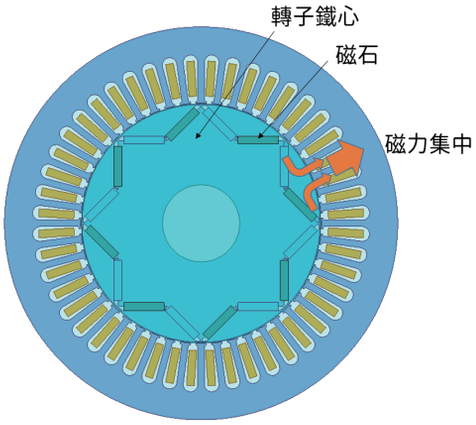


圖 2 內藏型磁石轉子與磁石集磁效果示意

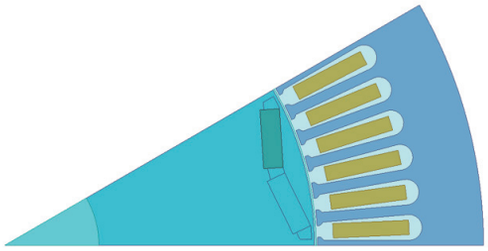


圖 3 內藏型馬達 1/12 剖面

接將磁石放置在轉子內部，就可以防止磁石飛脫，另外因為內藏型磁石的磁石埋在轉子內部，其產生的磁力不如表面貼磁磁石配置，所以為了增加轉子表面的磁力，就可以將磁石透過 V 型的配置，使相同極性的磁石產生集磁的效果，來增強磁力，如**圖 2** 所示。

在轉子設計方面，以**圖 3** 為例，兩片磁石夾在轉子鐵心裡，是 V 型磁石的典型配置，因轉子形狀，使得磁石外部的結構應力降低，在高速運轉下，鐵心會有永久形變的可能；**圖 4** 為**圖 3** 在 11400 rpm 下所得的應力分析，觀察出最大應力達到 665.5 MPa，已超過矽鋼片的降伏強度 385 MPa，為了提高轉子的結構強度，會在兩個磁石中間加入支撐樑，如**圖 5** 所示，加入支撐樑後，在 11400 rpm 的轉速下，分析結果如**圖 6** 所示，最大應力可以降至 120 MPa，安全因數達到 3.2。

相對的，加上結構加強樑後，磁鐵間會產生很大的漏磁通，這是由於磁石會因為支撐樑而造成磁路短路。為了進一步提升效率，本文的設計進一步結合磁阻馬達的轉子設計概念，利用轉子

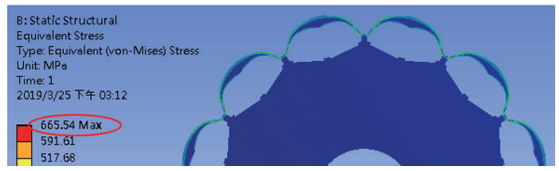


圖 4 應力分析結果

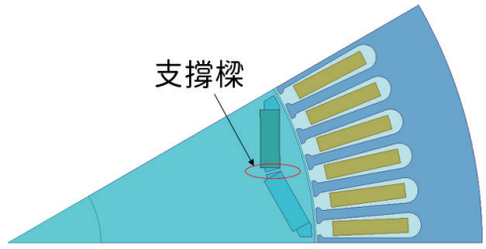


圖 5 內藏型馬達 1/12 剖面 - 轉子加上結構加強樑

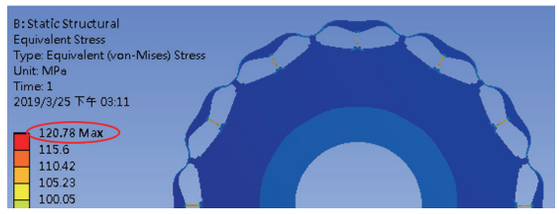


圖 6 加上加強樑應力分析結果

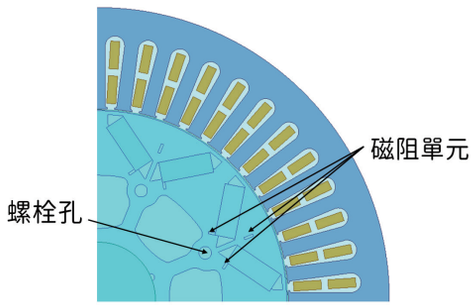


圖 7 磁阻單元示意圖

內的磁阻單元使磁力線更加集中，並且阻隔原本會流向支撐樑的漏磁通，如**圖 7** 所示，透過這樣的方式就能將馬達的鐵損有效降低，而達到高效率的目標，**圖 8** 為本文馬達轉子在 11400 rpm 下的應力分布，在分析過程中，發現螺栓孔對於分瓣應力有非常不錯的效果，原因是打孔之後的鐵心結構會類似於彈簧體，會幫助分瓣離心力所產生的作用力，進而分散了支撐梁上的應力；螺栓孔其實也是磁阻單元的元素之一。

另外，本文利用感應馬達轉子斜槽的概念，將轉子分為兩塊，外觀如**圖 9** 所示，透過**圖 10** 的裝配偏移螺栓的角度，就能使兩片轉子之間產生

更完整的內容

詳見 ▌機械工業雜誌 ▌ • 445 期 • 109 年 4 月號

機械工業雜誌·每期 220 元·一年 12 期 2200 元

線上訂購網址：https://www.automan.tw/magazine/orderMag.aspx

▌付款方式▌

1. 郵局劃撥—戶名：財團法人工業技術研究院機械所　帳號：07188562
   請於劃撥單的通訊欄寫明：購買期數、金額等
2. 匯款資料—兆豐國際商業銀行新竹分行(代號 017)
   帳號：203-07-02288-0　戶名：財團法人工業技術研究院
3. 信 用 卡—請填寫信用卡訂購單

麻煩您將**繳款收執**或**信用卡刷卡單**傳真至(03)582-2011，我們會盡快處理您的訂單並開通權限，再次感謝您的支持與愛護。

訂書專線：03-591-9339　　傳　真：03-582-2011

機械工業雜誌·官方網站：www.automan.tw　機械工業雜誌·信箱：jmi@itri.org.tw

機械工業雜誌 優/惠/訂/購/單

訂閱一年 12 期

$ 2200 / 續訂戶 $ 2000

好禮二選一

A 史欽泰墨寶帆布袋

B 工研院機械所無人車USB (8G)

訂閱紙本+電子雜誌

$ 3000 ~~原價 $ 4400~~

一年12期

贈送

A 史欽泰墨寶帆布袋

訂閱二年 24 期

$ 4000 / 續訂戶 $ 3600

好禮四選二

A 史欽泰墨寶帆布袋

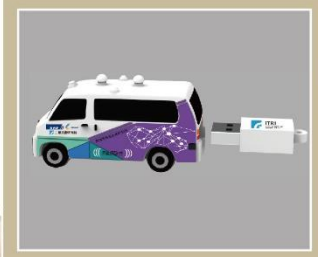
B 工研院機械所無人車USB (8G)

C 工具機叢書任一本

D 智慧機械人叢書任一本

限量專屬精品送給您

A



B

C

D