

應用於自動鑽孔攻牙機之內藏型永磁同步機之設計與分析

Optimal Design of an IPM Motor for Automatic Tapping Machine Applications

黃昌圳^{1*}、丁家敏^{2*}、張正敏²、邱國麟²、吳昱勳³、彭昌明⁴

¹ 黃昌圳 東方電機技師事務所 技師

² 丁家敏 機械所 高階伺服技術部 研究員

³ 吳昱勳 機械所 高階伺服技術部 副研究員

⁴ 彭昌明 機械所 節能機械系統部 副工程師

摘要：本文設計一台應用於自動鑽孔攻牙機之內藏型永磁同步電機，額定功率 7.5 kW，額定轉速 18,000 rpm，最高轉速 24,000 rpm。首先配合攻牙機的尺寸與特性要求，選擇最合適的電機型式與槽極數，進行雛型設計，接著使用有限元素軟體進行電機的特性分析，再針對平均轉矩、轉矩漣波、與效率等三項使用模糊田口法結合有限元素分析作優化，最後完成組裝與測試。

Abstract : This paper is about designing an interior permanent magnet (IPM) synchronous motor used in automatic drilling and tapping machines. It has rated power of 7.5 kW, at a speed of 18,000 rpm. The maximum speed can reach 24,000 rpm. Based on the machine's size limitation and required performance, a suitable machine configuration and a slot-pole number are selected, and then the finite element software is used for analysis of the characteristics. To yield the desired performance, average torque, torque ripple and efficiency, the fuzzy-based Taguchi method coupled with the finite element method (FEM) analysis are used to refine the motor structure. Finally, the motor is constructed and tested.

關鍵詞：自動鑽孔攻牙機、永磁同步電機、模糊田口法

Keywords : Automatic drilling and tapping machines, Permanent magnet synchronous motor, Fuzzy-based Taguchi method

前言

多年來，由於感應機的結構堅固、維修少、與價位低等優點，因而被廣泛應用於工具機的驅動上 [1]，但因轉子所產生的高損失，降低了整體的效率與落後功因，故有逐漸被取代之趨勢。近年來，為了節能、滿足高效率、與高精度操作的需求，永磁電機儼然已成為一個不可或缺的選項，因為比起感應機，永磁電機具有更高的效率與功因 [2]。

然而，在高轉速的運用上，永磁電機並非無缺點，例如：表面型的永磁電機 (surface

permanent magnet motors, SPM)，貼在轉子鐵芯上的磁鐵，必須使用套管固定它，因而增加了轉子結構的複雜性 [2]，故本文採用內藏型永磁電機 (Interior Permanent Magnet Motor, IPM)，將磁鐵安裝在轉子鐵芯內，磁鐵形狀通常使用簡單的方型，這種形狀比起表面貼的圓弧型磁鐵便宜，也無須再使用其他零件固定 [3], [4]，然而它的最大問題是會出現較大的轉矩脈波，文獻上有許多解決之道 [4]-[10]，大致上不是應用適當的設計手段 [4]-[6]，[8]-[10]，就是仰賴控制的技巧 [7]-[8]，雖然以控制技巧來降低轉矩脈波非常有效，但本文是

專注在設計的考量上，並使用模糊田口法結合有限元素分析作優化。

在文獻上，有許優化的方法，其中田口法 (Taguchi method) 被證明對單一優化目標最有用的優化方法。田口法為一種實驗設計方法，是利用系統參數來完成優化設計的一種品質工程法，它能夠以較少的實驗次數找出目標之優化。然而，多數問題並非只是要求單一的優化目標，在多目標的優化中，各個優化目標間，難免有互相衝突的情形。本文中在完成雛型設計後，擬使用模糊田口法結合有限元素分析作優化，除了要降低轉矩脈波外，也擬提高平均轉矩與效率 [11]-[14]，最後完成組裝與測試。

初始設計

首先決定適當的槽極數 [8]-[10]，因槽極數對電機的輸出特性有著關鍵性的影響。本設計之電機操控之最高轉速達到 24,000 rpm，必須考慮市購驅動器可達到之最高頻率限制，故極數不宜過多，在能達到輸出速度與轉矩需求下，選擇 4 極 18 槽，此時每相每極槽數為 3/2，即分數槽繞組，通常分數槽繞組的設計在低頓轉矩、弱磁性能、效率及製程上皆有良好的性能表現。本設計採用鈷鐵硼磁鐵 (NdFeB)，剩磁 (Remanence, Br) 為 1.2 T，回復導磁率 (Recoil Permeability, μ_{rec}) 為 1.05，以

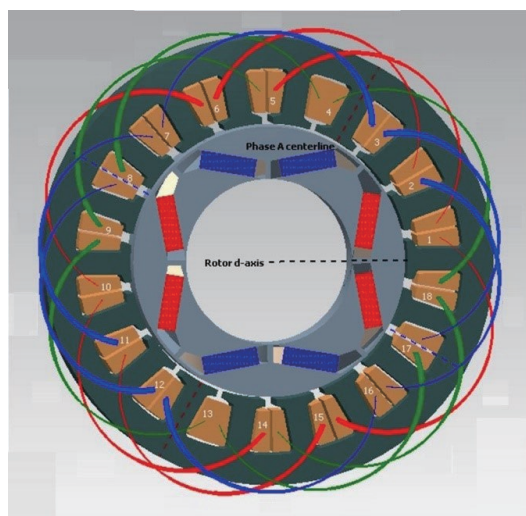


圖 1 馬達初始設計剖面圖

表 1 初始設計規格

規格	尺寸	規格	尺寸
定子外徑	81.0 mm	定子內徑	50.0 mm
槽深	10.0 mm	槽開口寬度	2.0 mm
齒靴角	15	齒間深度	0 mm
齒尖厚度	1.2 mm	齒寬	4 mm
底部圓角半徑	1.0 mm	底部圓角半徑	0.5 mm
積厚	80 mm	氣隙	0.5 mm
轉子外徑	49.0 mm	轉子內徑	30.0 mm
磁鐵方向	10°	磁鐵厚度	3.2 mm
磁鐵頂部間隙	4 mm	磁鐵寬度	10 mm
橋厚度	0.5 mm	橋寬度	5 mm
Post 寬度	1 mm	腹板厚度	1 mm
磁鐵材質	38SH	矽鋼片材質	25CS1500

表 2 電動機繞線配置表

線圈	去 回		線圈	去 回		線圈	去 回	
	1	5		1	8		1	11
A 相	2	6	B 相	2	9	C 相	2	12
	3	10		3	13		3	16
	4	14		4	17		4	19
	5	15		5	18		5	21
	6	1		6	4		6	7

V 字型埋入轉子鐵芯內，即所謂的內藏型，馬達初始設計剖面圖與詳細規格如圖 1 與表 1 所示。另外，馬達繞組設計詳細亦如圖 1 與表 2 所示，繞組因數達到 0.945。

模糊田口法優化

模糊田口法是在田口法中加入模糊邏輯理論，來找出最佳化的參數。一般田口法因為各因子間的交互影響，在執行多目標優化時會遇到參數的衝突問題，此時只能以影響程度來做權衡，選擇單一目標最佳化的參數，因而常無法得到真正優化的參數。

模糊田口法大致可分為四個步驟：建立田口法直交表 (Orthogonal Array)、灰關聯分析、建立模糊邏輯理論與選定最佳化組合並驗證，以下將詳述模糊田口法之步驟。

1. 建立田口法直交表

選取四個控制因子 A、B、C 及 D，相當於四個設計參數如圖 2 與表 3 所示，每一個因子具有

更完整的內容

詳見 | 機械工業雜誌 | · 434 期 · 108 年 5 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