

# 永磁馬達最佳化設計

## Optimization Design of Permanent Magnet Motor

吳昱勳<sup>1</sup>、張正敏<sup>2\*</sup>、張鈞傑<sup>1</sup>、丁家敏<sup>2</sup>、吳郁欣<sup>3</sup>、黃昌圳<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 工研院機械所控制核心技術組高階伺服技術部 副研究員

<sup>2</sup> 工研院機械所控制核心技術組高階伺服技術部 研究員

<sup>3</sup> 逢甲大學電機所

<sup>4</sup> 逢甲大學電機系 教授

**摘要：**永磁馬達具有高功率密度、高響應、體積小等優點，近年來廣泛應用於民生與工業產品。為追求更好的馬達品質，常有提高最大轉矩、降低轉矩漣波、提高效率等需求，為達成這些最佳化設計，需考量諸多馬達設計參數，如定子槽型、磁鐵厚度等。然而最佳化設計往往需要大量的模擬實驗，本文引用田口法大幅減少實驗次數，取得符合目標的最佳設計結果。

**Abstract :** Permanent magnet motor has the advantages of high power density, high response, small volume, etc., and has been widely used in livelihood and industrial products in recent years. In order to pursue better motor quality, there is often a need to increase the maximum torque, reduce the torque ripple, and improve the efficiency. In order to achieve these optimized designs, many motor design parameters, such as stator slot shape, magnet thickness, etc., need to be considered. However, optimal design often requires a large number of simulation experiments. This article uses the Taguchi method to significantly reduce the number of experiments and achieve the optimized design results conforming to the goals.

**關鍵詞：**永磁馬達、田口法、最佳化設計

**Keywords :** PM motor, Taguchi method, Optimization design

### 前言

現今馬達廣泛應用於各種工商場合，乃至一般居家生活，為使用者帶來商機、舒適與便利性。由於使用量與日俱增，其所消耗之電能亦非常可觀，目前約占整體用電量之 50%、工業用電量之 70% [1]，永磁無刷馬達可用於自動化產業，汽車，機器人，船舶和飛機等多個領域。因為考量到體積與重量關係，以功率密度而言，永磁馬達高於感應馬達，在稀土磁性材料進步的今日，永磁馬達不僅設計得更強大但質量較低，轉動慣量較低，具有效率高，結構簡單的特點，易於控制等。藉由變頻驅動的永磁馬達成為運動控制應

用的可行選擇，如機器人技術，工具機，電動載具等。隨著電力電子技術的快速發展和成本下降，使得變頻驅動的永磁無刷馬達已被廣泛用於工業 [2]。因此，如何提高效率、降低成本，為迫切需要之研究重點 [3]。因此本文以永磁無刷馬達最佳化設計作為文章主題；在參考文獻 [3] 中，有關於永磁馬達的設計流程，描述如下：

1. 決定輸出額定數據
2. 決定主要尺寸
3. 決定材料
4. 計算磁鐵厚度
5. 等效磁路分析計算
6. 細部尺寸計算

7. 檢查：磁通密度 ( 若不符合則回到步驟 2)
8. 繞線方式與繞線因數
9. 決定電流密度與銅線型式
10. 計算電流、佔槽率、導體數
11. 檢查：Ke, Kt ( 若不符合則回到步驟 2)
12. 檢查：效率 ( 若不符合則回到步驟 2)
13. 完成設計

在上述流程中，制定規格後，規格中的扭力將是影響馬達體積之主要因素 [3]，因此，如何決定馬達體積將會是重點，因為體積決定了所需材料的重量，同時也是決定馬達成本的關鍵因素；在參考文獻 [4] 中，永磁馬達設計需要考慮到三個方面：變頻驅動器所能提供的電壓與電流，矽鋼片與稀土磁鐵的 BH 特性曲線，永磁無刷馬達的熱容與散熱方式。其中，熱容的數值大小與永磁馬達體積息息相關，因此，馬達的散熱方式就決定了永磁馬達的最大可允許熱容數值。在散熱方式與熱容範圍制定後，轉子外徑與馬達疊積的比例範圍就相對決定了，在參考文獻 [5] 中，轉子外徑與馬達疊積的比例隨著馬達功率區間，有相對不同的範圍，當馬達功率規格也制定後，轉子外徑與馬達疊積的範圍就決定了，在上述的流程中，第二步驟的決定主要尺寸就是訂定轉子外徑與馬達疊積的尺寸。從設計流程可得知，永磁馬達在設計過程中，需要訂定磁鐵的尺寸，如磁鐵厚度，磁鐵寬度，磁鐵材料等，需要訂定線圈參數，如線圈匝數，線圈線徑，線圈繞法等，需要訂定細部尺寸，如定子齒寬，定子軛部厚度，定子槽孔寬，定子靴部厚度等；從以上的說明可以知道，永磁馬達設計時，有太多參數需要設計，參數訂定後，需要計算損耗，如線圈銅損，矽鋼片的鐵損，風摩損等，計算扭力，與磁鐵工作點分析。上述的計算在現今都可採用有限元素軟體如 ANSYS, JMAG 進行處理，因此馬達設計開發者，就可以專注在參數的選取上，執行永磁馬達最佳化設計，在參考文獻 [6]-[8] 中，有提到採用傳統的方法，如 Hooke-Jeeves 方法，也有提到仿生的方法，如遺傳演算法，蜂群演算法等，可透

過 Matlab 等商用軟體實現多目標最佳化設計，而本文採用的是田口方法執行永磁馬達最佳化設計。

## 田口法介紹

田口法 (Taguchi Method) 由田口玄一博士 (Dr. Genichi Taguchi) 提出，1950 年代田口博士任職於日本電子通訊實驗室期間，發展出品質工程的基本理論，透過實驗進行系統參數設計最佳化的方法。田口博士發展的方法是一種用來改善品質的工程方法，稱為品質工程 (Quality Engineering)，日本許多工廠將田口法應用於品質管理，對市場、銷售做最佳化處理，田口法已經受到全球工業界與學術界的肯定，到近期田口法應用於電機設計，對馬達設計最佳化帶來重大影響。

田口法是一種實驗設計方法，利用系統參數來完成最佳化設計的一種品質工程法，且近年來廣泛應用於電機設計。相較於參考文獻 [6]-[8] 所提出採用的全因子方法，其所花費的計算量遠高於採用田口法，在參考文獻中 [9]-[11] 中有提到田口法已被證明在自動化產業的開發過程中有助於減少實驗次數。以電機設計來說，設計因子可能包括：定子槽型、槽深、槽開口寬度、磁鐵厚度、磁鐵展開角、疊積長度、繞線方式、電磁鋼片材料選擇... 等，若選擇其中 4 種設計因子作為變數，每個變數有 3 種變化值 (3 個級別)，用全因子方法將有 3 的 4 次方共 81 種組合，也就是要進行 81 次實驗，再從其中取得最佳值，若採用田口法的直交表，則只需要 9 次實驗模擬即可 [9]，可見田口法能夠大幅減少實驗次數，以非常經濟的時間成本快速找出最佳化的參數組合。

## 直交表 (Orthogonal Array) 是什麼？

直交表在 1947 年由 C.R.Rao 博士創立，如同一個矩陣型式，實驗規劃常已矩陣做排列組合，直交表將其簡化，此矩陣所有的列相對其他列都獨立，故被稱為直交表 [12]。

直交表常以下式表示：

$$L_a(b^c) \quad (1)$$

## 更完整的內容

詳見 | 機械工業雜誌 | • 439 期 • 108 年 9 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](http://www.automan.tw) 機械工業雜誌·信箱：[jmi@itri.org.tw](mailto: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