# 具灌注膠 AC-8 永磁式 263 線圈無刷馬達田口法之檢測分析

王士榮、廖文賢

南亞技術學院機械系

## 摘要

在馬達的設計與分析上，熱傳問題是一項重要的課題，因為熱傳遞特性將直接影響到尺寸與壽命。設計可靠且經濟的高壓高頻馬達，必須預先瞭解馬達內部構造的溫度分佈情形。為解析熱傳問題，本研究以具灌注環氧樹脂膠263線圈之無刷永磁馬達為研究對象，使用軟體FLUENT 5.5模擬灌注膠之熱傳導與馬達參數之溫度分佈，並利用實驗量測驗證之，最後利用田口方法來求得最佳的製程組合，以降低熱傳遞問題。分析所得之數據可用於馬達製程設計之參考，期能達成提高產品良率。

關鍵字：無刷永磁馬達、熱傳分析、環氧樹脂、田口方法

*Email：wzl@nanya.edu.tw　Tel：09-4361070#5121　Fax：03-4365226

# INSPESEION OF EPOXY RESIN AND 263 COILS IN AC8 PERMANENT-MAGNET BRUSHLESS MOTOR WITH TAGUCHI METHOD

Shu-Lung Wang*、Win-Shin Liao

Department of Mechanical Engineering Nanya Institute of Technology

## Abstract

On the design and analysis of motors, the thermal problem is an important subject because the size and life of motors are affected by the thermal characterization. To design a reliable and economical high voltage and high frequency motor, it is necessary to be able to predict accurately the temperature distribution within the motor physical geometry. For thermal analysis, this study presents thermal analysis of a brushless permanent magnet motor with 263 coils and epoxy resins. The temperature distribution solutions carried out by FLUENT 5.5 are used to determine the relationship between the thermal conductivity of epoxy resins and the motor based parameter. The predictions by software have been verified by experiments, and agreement between the numerical and the experimental data has been found. In addition, the Taguchi method is used to find optimal processing condition to reduce the thermal problem. The data presented in this report have been used to improve the quality of practical motor designing processes and reduce the failure rate.

Keywords：Brushless permanent magnet motor, Thermal analysis, Epoxy resin, Taguchi method

*Email：wzl@nanya.edu.tw Tel：09-4361070#5121 Fax：03-4365226

# 壹、 前言

近年來由於電力以及電子高速微處理器迅速，發展使得無刷馬達在高效能之伺服機構中逐漸呈現嶄露頭角趨勢；根據美國電力研究院(EPRI)的評估，電能消耗佔全部能量40%，到了西元2010年80%電能需經電力轉換後供給電器設備使用，其中馬達耗能佔全部電能55%[1]，這項數據意味著選用高效率的電動機及其驅動器，對節省能源有相當大的幫助。無刷馬達的驅動系統不但具備高功率密度及高效率的特性，亦可以滿足省能及小型化的要求，漸漸取代傳統馬達設計，故對提昇整體能源效益具有極大的助益。在無刷永磁馬達的設計與分析上，因為馬達的熱傳特性直接影響馬達的尺寸與壽命。

環氧樹脂是一種重要的熱固性樹脂。環氧樹脂固化物具有良好的化學穩定性、電絕緣性、耐腐蝕性及優異的機械性能和物理性能，同時環氧樹脂還具有良好的工藝操作性能，廣泛應用於塗料行業、機械行業、電子行業、交通運輸業、汽車製造業、建築業、航空等領域，同時為因應LED加工需求時，也會使用不同材料特性的環氧樹脂(Epoxy)。因此本研究主要是以目前最新研發技術-以灌注膠（即環氧樹脂相關產品）注入無刷永磁馬達線圈組內，除具有電絕緣性之功用外，更有提升馬達熱傳遞性之效能。文獻上，對馬達的熱傳遞分析大都以傳統馬達為討論前提 [2,3,4]，即使涉及無刷永磁馬達，也都以熱傳遞分析模型為主[5,6]。本研究將以航空工業產品AC-8無刷永磁馬達為研究重心，針對馬達運作時與灌注膠之熱傳遞效能的熱傳遞實驗及數值模型作分析，建立馬達熱傳遞分析模型，以得到精確的溫度分佈及馬達各項性能分析技術。

在實驗方法上利用各種環氧樹酯與馬達間操作時之性能及檢測分析技術。對注入灌注膠之AC-8永磁式無刷馬達而言，則我們希望能掌握環氧樹酯材料之性質及製作技術以控制其品質。若搭配實際量測，便能將實測值和分析值作對照，驗證有限元素法熱傳分析的準確性，以提供檢驗人員建立檢驗程序，並提供完整製程技術分析。以國外最近發表有關無刷永磁馬達的論文而言，絕大部分都是在探討以3D有限元素模型作無刷永磁馬達之熱傳場分析，藉以了解內部的溫度分佈情形，文獻中所提出的分析方法其熱傳參數大多不易求得，為使分析的結果更精確，均強調隔離物有其討論之必要。因此，本研究即是將隔離物轉換為散熱與絕緣之主體部分，此一新設計不僅國內絕無僅有，國外也只應用於航太高科技精密機械。

本研究針對加工後無刷永磁馬達各項性能規劃檢驗程序，並配合各項製造程

序訂定一套標準規範。本研究成果，可讓廠商獲得重要技術整合及製程分析與檢測能力，在相關領域建立具主導地位並具國際競爭力。研究重點如下：

一、技術提升指標：針對無刷永磁馬達設計時注入灌注膠是最新研發關鍵散熱技術。影響馬達效率的重要因素時，需考慮到熱傳遞的分析，特別是灌注膠之溫度傳遞效果；為使分析的結果更精確，對具灌注膠馬達作深入的了解以及對品質的控制，才可以縮短摸索時間而依功能來設計及建立量測程序，並大量降低工時和成本。

二、效益：AC8 無刷永磁馬達依照其功能有不同設計，且由於其精密度高及具備經濟性，被廣泛應用於高科技產業。故本研究提出一個以實驗暨數值模擬模型做無刷永磁馬達之熱傳遞場分析，本研究所提出的分析方法快速且方便，經由本分析，可提供設計者另一項重要的參考依據，不但可提升馬達的運轉效率和使用壽命，更能提升能源效益並可發展出適合設計需求最佳化之製造程序。

三、實務應用與潛力：本研究之成果可協助業者突破高功率馬達加工技術之基礎，針對變數建立自主性與標準化國內外之研發技術，了解具灌注膠馬達製造對品質性能之影響。可廣泛應用於高速馬達、扭力負荷高或操作時易造成散熱不佳時而引起熱應力集中高之各型馬達的製造，藉此項技術可建立完整精密馬達加工技術概念應用於各式航空級無刷馬達開發等。

# 貳、 無刷永磁馬達理論與設計參數

## 一、 馬達應用需求

一般而言，馬達的應用場合直接影響馬達主要尺寸及負載特性，所以設計者需先知道馬達使用場合的空間限制，方可決定馬達的轉子外徑與有效軸長，若是應用於空間較小的場合，則需使用較短的軸長與較大的轉子外徑；同時根據不同使用上的需求，來決定槽極數與鐵心的材料，故根據不同的需求，來選擇不同的材料進行應用。

## 二、 永磁材料

近年來，由於永磁材料特性不斷的提升，在各種用途的應用也越來越多，目前，在工業界中最常使用的永磁材料種類有三大類：(a)鋁鎳鈷磁石，(b)鐵氧體磁石，(c)稀土類磁石，其中稀土類的釹、鐵、硼永久磁石是目前磁性能最佳的永磁材料；近年來隨著永久磁鐵技術的進步，釹鐵硼磁石的耐溫程度已達 220℃以上，但是其成本也比較高，在馬達設計上仍然要考慮到成本的問題，因此需針對不同的使用場合來選擇合適的磁石，以求得最大效益。

## 三、 馬達極數、相數及槽數

無刷直流馬達的相數通常為三相，因為三相馬達可以成 Y 接或△接，且具有良好的啟動特性、低轉矩漣波、易於改變旋轉方向。但是有許多小型風扇馬達亦常採用單相或兩相的結構，主要的理由是因為降低相數，可以減少電力電子功率元件及霍爾元件的數目以降低成本。但是相數降低，亦將導致轉矩漣波升高，降低馬達之輸出性能。採用四相馬達雖然可以使轉矩漣波再降低，但也會增加功率開關元件的數目及成本。永磁無刷馬達的轉速可以(2-1)式表示：

$$n = 120\ f/Np \qquad (2\text{-}1)$$

其中轉速 n(rpm)正比於開關元件之切換頻率 f，而反比於磁極數 Np，在需要高轉速的應用場合，通常是選擇 2 極或 4 極，其目的是盡量降低開關元件的切換損失及定子鐵心損失。但是增加磁極數可以使馬達輸出轉矩增加，並降低轉矩漣波。另外，提高磁極數，使得每一塊磁石寬度降低，所以通過背鐵的總磁通量將降低，因此定子背鐵及轉子背鐵厚度都得以降低。但是極數增加，也會造成磁極之間的漏磁增加，同時也將使開關元件的切換頻率提高，進而使開關元件切換損失及鐵心損失升高。至於槽數的選擇，必須依據相數、極數，以及所要採用之繞組形式而定，以平衡三相繞組之馬達而言，馬達之極數與槽數必須滿足(2-2)式：

$$Ns/〔GCD（Ns,Np）〕= 3K \qquad （2\text{-}2）$$

其中 Ns 為槽數，Np 為極數，GCD 為最大公因數，而 K 是一正整數。所以針對同一個馬達極數，會有許多槽數的組合可供選擇。要特別注意的是，槽數與極數的選擇，會直接影響到無刷永磁馬達頓轉轉矩大小，而頓轉轉矩的週期 $T_{cog}$，可由(2-3)式計算得到：

$T_{cog}$＝360M/LCM（Ns,Np）……（2-3）

其中 M 為機械角度，而 LCM 是最小公倍數，所以通常所選擇之定子槽數，是使 LCM(Ns,Np)最大，使頓轉轉矩之週期降低，頓轉轉矩之頻率升高，即可減低因永磁馬達對稱性結構所增加之頓轉轉矩。但是槽數仍然直接影響到馬達繞組型式及線圈跨距(Coil pitch)，故有時必須針對馬達之設計目標做折衷性的選擇。（說明:永磁無刷馬達頓轉轉矩的產生是由於轉子磁石與定子槽齒間的交互作用。因為頓轉轉矩會促使馬達產生漣波輸出、震動與噪音，所以在馬達使用上，頓轉轉矩是不受歡迎的。）

## 參、 實驗方法

本實驗性能測試之無刷馬達機型為繞線線圈數 263 圈下，具灌注膠之 AC8 無刷馬達灌膠區位置如圖 1 所示 。AC-8 馬達結構包括 (1)尾蓋：保護換相組與內部組件（如圖 2 所示）。 (2)換相殼：固定換相組與電源訊號線通過點（如圖 3 所示）。 (3)定子外殼：內部有定子、馬達線圈、軸承培林（如圖 4 所示）。 (4)轉子組：包含六片磁鐵、軸心、兩個磁鐵套（如圖 5 所示）。(5) 軸承一、軸承二：固定轉子（如圖 6 所示）。 (6)組合圖（如圖 7 所示）。

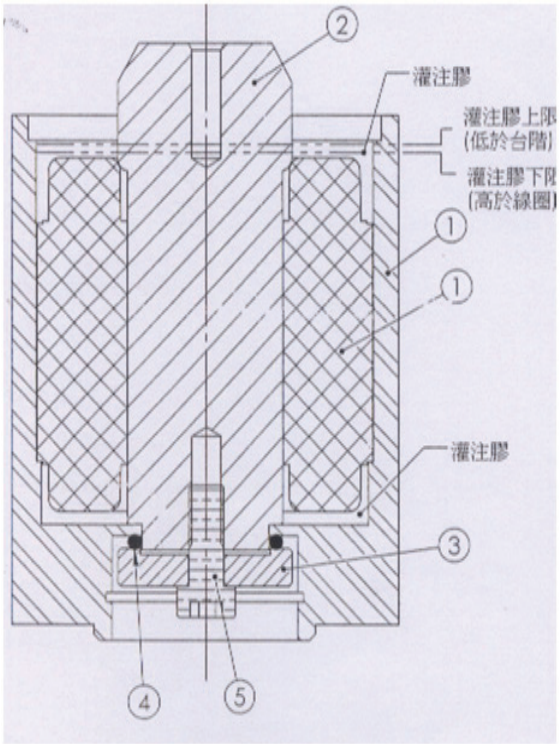



圖 1、灌膠區位置

圖 2(a) 、尾蓋

圖 3、換相殼

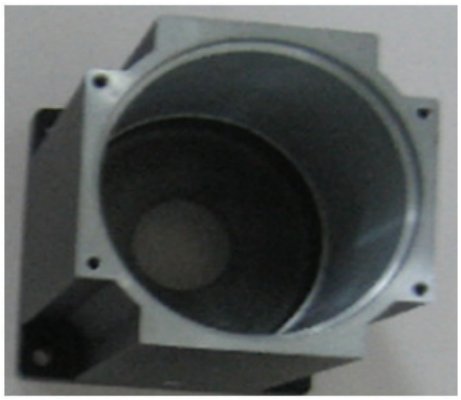
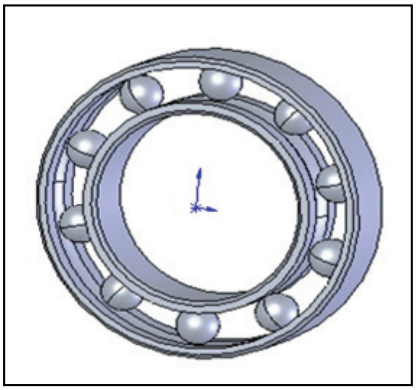


圖 4、定子外殼

圖 5、轉子組



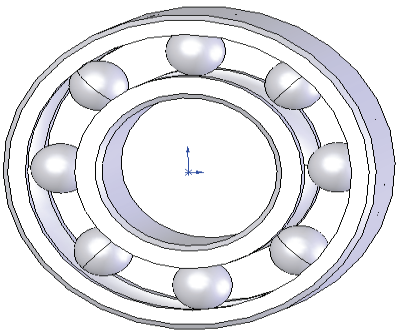


圖 6、軸承一、二

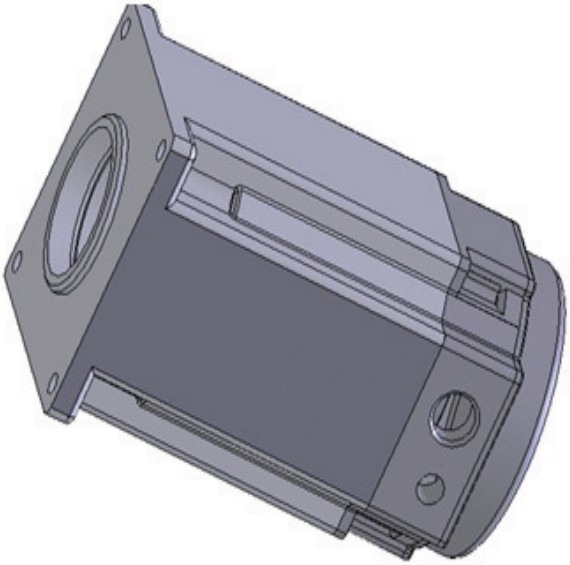


圖 7、組合圖

本實驗主要是將灌注膠經由灌注孔流至灌注區覆蓋整個定子線圈組，對於流程圖中測試樹酯（494XD-10B）及硬化劑（494XD-10A）其性質如表一。實驗研究流程圖如圖 8 所示。馬達實驗機之機器規格為 MICROTEST 公司生產 MT-6600R 馬達轉子自動測試機，實驗機機型如圖 9 所示。首先在電表模式下輸入測試頻率

及測試電壓下可量測電感值、電容值、阻抗值、直流電阻值、交流電阻值、品質係數、圈數比等。接著在綜合測試模式下對待測物（DUT）Wing`s（線圈）測試，測試時所設定一些管制標準與相對應測試條件，包含電感值、直流電阻值、絕緣、耐壓、層間短路、偏差調校測試等。對於實驗用硬體部分之實驗設備為灌膠加熱爐烤箱量測設備及輸出參數測試 MT-6600R 馬達轉子自動測試機；軟體部份為熱傳分析軟體及溫度紀錄分析儀，可針對熱傳遞部份做研發設計。

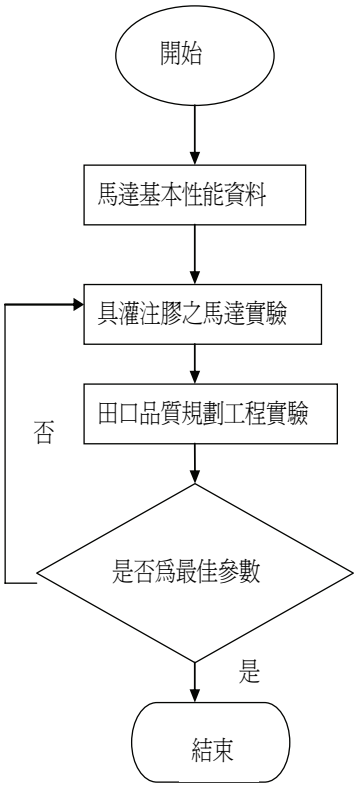



圖 8、實驗研究流程圖

圖 9、無刷馬達實驗性能測試 AC8-100 機型

| 編號/物性 | 494XD-10 | EIP-4260 |
|---|---|---|
| 硬度 | 85-88（Shore D） | Shore D-90 |
| 比重 | 1.58(25℃) | A:1.83-1.89<br>B:0.92-0.98 |
| 黏度 | 30000cps(25℃) | A2250-3750CPS (50℃) B:10-20 (25℃) |
| 介電強度 | 610V/mil | NA |
| 儲存時間 | 無規定 | 一年(未開封) |
| 硬化時間 | 135℃（4～6Hr） | 80℃ (15-25 分) |
| 熱傳導率 | ---------- | 4.826/BTU/Hr/F$^{t2}$/Ft/°F |
| 熱膨脹係數 | ---------- | $70*10^{-6}$ $k^{-1}$ |

表一、測試樹酯及其他樹酯性質

田口實驗計劃法，其目的特性中均存在一目標值，也存在合格、不合格的允

差。田口實驗計畫法，亦稱穩健性設計，主要基於上述之理由所發展出來的一套實驗設計法。其最重要目的是以有限的實驗，來獲得最多的實驗結果並有效分析之，因此田口實驗計畫法是一種有效率之實驗設計法則。經由參數設計，並以直交表和信號雜音比代替平均值($Y$)及變異數(σ2)來分析數據，並且分析影響產品功能不同因素後給予最佳參數組合，使產品功能受雜訊的影響降至最低。在考慮成本效益之下，採用田口式實驗計畫法，確實是比傳統實驗設計法有效率且節省成本，而所獲得的結果比較具實用性，故本論文採用田口式實驗計畫法來作為實驗之規劃方式。為建構灌注膠添加對 AC8無刷永磁馬達量測檢驗所顯示之效率，規劃固定繞線線圈數 263 圈下具灌注膠的五個參數包括 a.不同轉速下主軸速度（rpm）分別為 1360、990、672、408，b. 2.49、5.31、7.38、9.09 Static Friction 下之 Torque Driver（kg-cm），c.並考慮各不同頻率之下個別電阻之電阻值（Ω）為 17.86、17.85、17.84、18.0，d.在不同頻率之下電流（A）分別為 0.39、0.43、0.48、0.59 等（如表 2 所示），以（four-level, five -variable,16-test）作為五個控制因子搭配四個水準的實驗配置 $L_{16}$（12）直交表（如表 3 所示）。輸出變數 Outputs 為：反電動勢、電感、電阻，靜摩擦、驅動扭力、轉子測試、絕熱測試、LCR 錶、數位量錶等。

表 2、實驗參數

| W263 灌膠 | | 水準 1 | 水準 2 | 水準 3 | 水準 4 |
|---|---|---|---|---|---|
| A | 轉速 | 1360RPM | 990RPM | 672 RPM | 408RPM |
| B | 扭力 | 2.49 (kg-cm) | 5.31 (kg-cm) | 7.38 (kg-cm) | 9.09 (kg-cm) |
| C | 繞線線圈數 | 263 圈 | 263 圈 | 263 圈 | 263 圈 |
| D | 電流 (A) | 0.39 | 0.43 | 0.48 | 0.59 |
| E | 電阻 | 17.86 | 17.85 | 17.84 | 18 |

表 3、$L_{16}$（$4^5$）直交表的實驗配置

| | 轉速 | 扭力 | 繞線圈數 | 電流（A） | 電阻 |
|---|---|---|---|---|---|
| 實驗編號 | A | B | C | D | E |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 4 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 5 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 6 | 2 | 2 | 1 | 4 | 3 |
| 7 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 |
| 8 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 9 | 3 | 1 | 3 | 4 | 2 |
| 10 | 3 | 2 | 4 | 3 | 1 |
| 11 | 3 | 3 | 1 | 2 | 4 |
| 12 | 3 | 4 | 2 | 1 | 3 |
| 13 | 4 | 1 | 4 | 2 | 3 |
| 14 | 4 | 2 | 3 | 1 | 4 |
| 15 | 4 | 3 | 2 | 4 | 1 |
| 16 | 4 | 4 | 1 | 3 | 2 |

# 肆、 結果與討論

## 一、 田口式實驗設計分析

由表 4 及表 5 (263 圈 S/N 比一覽表及比(R)值)與圖 9 (線圈 263 圈)可比較出控制因子組合為 A2B1C2D1E3 時品質特性最好，如依影響力大小來排列為 A2B1D1C2E3。

表 4、 S/N 比一覽表

| 263 S/N 比一覽表 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 實驗編號 | 轉速 | 扭力 | 繞線線圈數 | 電流（A） | 電阻 |
| | A | B | C | D | E |
| 水準 1 | -28.8 | -28.7 | -28.9 | -28.9 | -28.9 |
| 水準 2 | -28.8 | -28.8 | -28.9 | -28.9 | -28.9 |
| 水準 3 | -28.9 | -28.9 | -28.9 | -28.9 | -28.9 |
| 水準 4 | -29 | -29.1 | -28.9 | -28.9 | -28.9 |
| EFFECT | 0.16 | 0.4 | 0.07 | 0.07 | 0.069 |
| RANK | 2 | 1 | 4 | 3 | 5 |

表 5、 S/N 比(R)值

| 實驗編號 | 轉速 A | 推力 B | 繞線線圈數 C | 電流 D | 電阻 E | 溫度(T) | S/N 比(R) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1360 | 2.49 | 263 | 0.39 | 17.84 | 27 | -28.627 |
| 2 | 1360 | 5.31 | 263 | 0.43 | 17.85 | 27.3 | -28.723 |
| 3 | 1360 | 7.38 | 263 | 0.48 | 17.86 | 27.6 | -28.818 |
| 4 | 1360 | 9.09 | 263 | 0.59 | 18 | 28.8 | -29.188 |
| 5 | 990 | 2.49 | 263 | 0.39 | 17.84 | 27.1 | -28.659 |
| 6 | 990 | 5.31 | 263 | 0.43 | 17.85 | 27.4 | -28.755 |
| 7 | 990 | 7.38 | 263 | 0.48 | 17.86 | 27.7 | -28.85 |
| 8 | 990 | 9.09 | 263 | 0.59 | 18 | 28.3 | -29.036 |
| 9 | 672 | 2.49 | 263 | 0.39 | 17.84 | 27.4 | -28.755 |
| 10 | 672 | 5.31 | 263 | 0.43 | 17.85 | 27.7 | -28.85 |
| 11 | 672 | 7.38 | 263 | 0.48 | 17.86 | 28 | -28.943 |
| 12 | 672 | 9.09 | 263 | 0.59 | 18 | 28.3 | -29.036 |
| 13 | 408 | 2.49 | 263 | 0.39 | 17.84 | 27.6 | -28.818 |
| 14 | 408 | 5.31 | 263 | 0.43 | 17.85 | 27.9 | -28.912 |
| 15 | 408 | 7.38 | 263 | 0.48 | 17.86 | 28.2 | -29.005 |
| 16 | 408 | 9.09 | 263 | 0.59 | 18 | 28.8 | -29.188 |
| 平均值 | | | | | | 27.8188 | -28.885 |

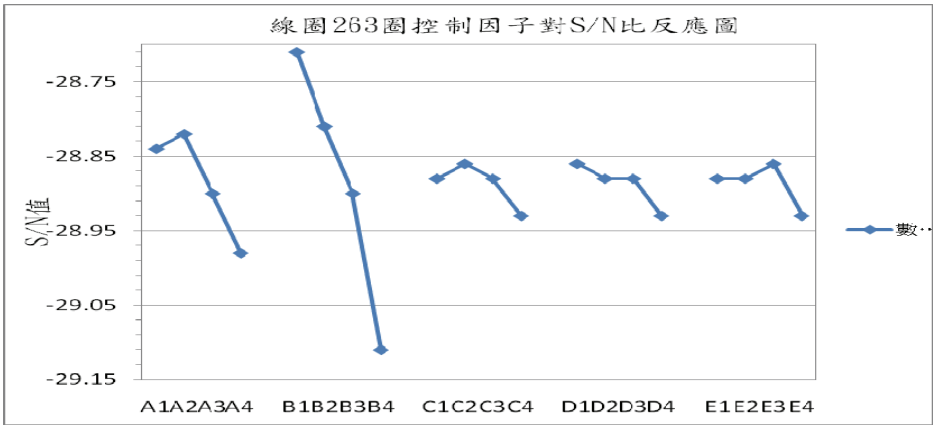



圖 9、 控制因子對 S/N 比反應圖

在此可先利用"一半準則"算出溫度的預測值。一般常用一半準則就是將具影響力的前半數因子當做重要因子，其它剩餘因子可視為不重要因子，其預測方式

如下：

S/N 預測值=ý+(AA-ý)+(BB-ý)+(CC-ý)+(DD-ý)…… (4-1)

式(4-1)中 AA、BB、CC、DD.....表最佳組合，ý 表 S/N 比的平均值。依一半準則則選出本實驗中具最影響力之四大因子為 A2B1C2D1。所以該 S/N 的預測值計算值如下：

S/N 的預測值計算值

=-28.89+(-28.82+28.89)+(-28.71+28.89)+(-28.86+28.89)= -28.61

S/N 的預測值計算值除了與第一組實驗值相近外，皆比 L16 表其餘 15 組實驗大，這表示品質特性可改善。另基於"一半準則"於理論方面沒有基礎，尚需經由變異分析法來預估實驗誤差以利與"因子和"誤差相比較，以定位各因子的重要性。假設有 n 組實驗而每組實驗有 r 個重覆的實驗數據，其總變異量 $SS_{TOTAL}$ 與總自由度 $DOF_{TOTAL}$ 分別可以下列表示：

$SS_{TOTAL}=\left[\Sigma_{i=1}^{n}\Sigma_{j=1}^{r}y_{ij}^{2}\right]-n*r*\bar{y}^{-2}$ .....(4-2)

$SS_{TOTAL}=\Rightarrow 13350.09-[16*1*(-28.89)^2]= -4.02$

$DOF_{TOTAL}=(n*r)-1$..... (4-3)

$DOF_{TOTAL}=16*1)-1=15$

每個因子變動產生的變異（因子效應向量），變異數（Variance）與因子自由度分別可以下列表示：在這裡鍵入方程式。

$SS_{TOTAL}=n*\frac{r}{L}*\Sigma_{K=1}^{L}(yk-ý)$ .....(4-4)

$DOF_{Factor}=L-1$……..……..….. (4-5)

$Var_{Factor}=SS_{Factor}/DOF_{Factor}$……..……..…..... (4-6)

上式中 yk 代表因子在水準 k 時的反應值，L 表示水準數目。

以控制因子 D 為例說明

$SS_D=16*1/4[(-28.86+28.89)^2+(-28.88+28.89)^2+(-28.88+28.89)^2+(-28.93+28.89)^2]$

$=0.0108$

$DOF_D=4-1$

$=3$

$Var_D = SS_D/DOF_D =$

$0.0108/3 = 0.0036$

$SS_A=16*1/4[(-28.84+28.89)^2+(-28.82+28.89)^2+(-28.9+28.89)^2+(-28.98+28.89)^2]$

$=0.0399$

$DOF_A=4-1$

$=3$

$Var_A = SS_A/DOF_A =$

$0.0399/3=0.0133$

$SS_B=16*1/4[(-28.71+28.89)^2+(-28.81+28.89)^2+(-28.9+28.89)^2+(-29.11+28.89)^2]$

$=0.3492$

$DOF_B=4-1$

$=3$

$Var_B = SS_B/DOF_B =$

$0.3492/3 = 0.116$

$SS_C=16*1/4[(-28.88+28.89)^2+(-28.86+28.89)^2+(-28.88+28.89)^2+(-28.93+28.89)^2]$

$=0.0075$

$DOF_C=4-1$

$=3$

$Var_C = SS_C/DOF_C =$

$0.0075/3 = 0.0025$

$SS_E=16\times1/4〔(-28.88+28.89)^2〕+(-28.88+28.89)^2+(-28.86+28.89)^2+(-28.93+28.89)^2〕$

$=0.0075$

$DOF_E=4-1$

$=3$

$Var_E = SS_E/DOF_E =$

$0.0075/3 = 0.0025$

$(\rho_i = ss' /SS_{TOTAL}) \times 100\% = \{0.0399-(15*0.0133)\}/-4.02 = 3.96\%$

以上所計算結果相關數據如表 6 所示。

表 6、變異(因子效應向量)，變異數(Variance)、
因子自由度、貢獻度個因子的重要性

| 線圈 263 圈 | | SS | DOF | Var | $\rho_i$ |
|---|---|---|---|---|---|
| A | 轉速 | 0.0399 | 3 | 0.0133 | 3.96 |
| B | 推力 | 0.3492 | 3 | 0.116 | 34.57 |
| C | 繞線線圈數 | 0.0075 | 3 | 0.0025 | 0.74 |
| D | 電流（A） | 0.0108 | 3 | 0.0036 | 1.073 |
| E | 電阻 | 0.0075 | 3 | 0.0025 | 0.745 |

表 7、線圈 263 圈因子變異數與
自由度計算結果

| | | | |
|---|---|---|---|
| A-E Total | 0.41 | 15 | NA |
| Total（$SS_{Total}$） | -4.02 | 15 | NA |

由計算結果得知五個因子變異量相加總和為 0.41 其與總變異量-4.02（如表 7 所示），所以該實驗因子為影響溫度因素主要因子，與依實務經驗判定重要因子選定結果相符，變異分析之後比較原始設計與最佳設計的 S/N 預測如下：

原始設計(A3B4D1)S/N 的比測值

S/N 的預測值計算值

=-28.89+(-28.9+28.89)+(-29.11+28.89)+(-28.86+28.89)=-29.09

最佳設計的 S/N 預測

S/N 的預測值計算值

=-28.89+(-28.82+28.89)+(-28.71+28.89)+(-28.86+28.89)= -28.61

依上述計算結果得知最佳設計比原始設計佳，其結果亦較合理。最後階段為將上述最佳設計實驗與原始設計結果做比較，以了解是否有所改善（如表 8 所示）。

原設計組合為　　A3B4C2D1E3

最佳設計組合為　　A2B1C2D1E3

其中原設計組合為 L16($4^5$)直交表中實驗結果如表 5 所示。

原設計組合為　　A3B4C2D1E3

最佳設計組合為　　A2B1C2D1E3

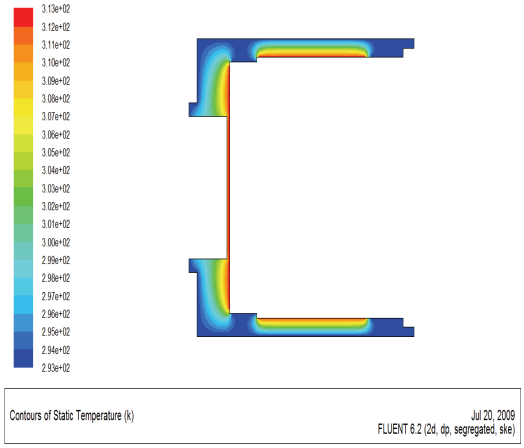
表 8、最佳設計實驗與原始設計結果比較

| 線圈 263 圈 | 溫度（T） | S/N 計算值 | S/N 預測值 |
|---|---|---|---|
| 原始設計組合 | 28.3 | -29.04 | -29.09 |
| 最佳設計組合 | 27.1 | -28.65 | -28.61 |
| 實驗驗證值 | 26.9 | -28.59 | -28.61 |

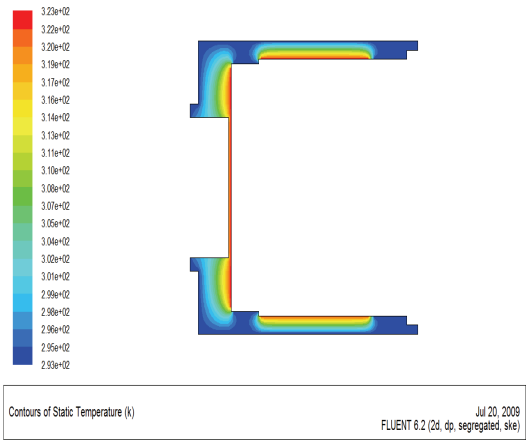
| 原設計組合 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| A3 | B4 | C2 | D1 | E3 |
| 672 RPM | 9.09 | 263 圈 | 0.39 | 17.84 |
| 最佳設計組合 | | | | |
| A2 | B1 | C2 | D1 | E3 |
| 990RPM | 2.49 | 263 圈 | 0.39 | 17.84 |

## 二、 建立 PMBL 馬達熱傳分析模式

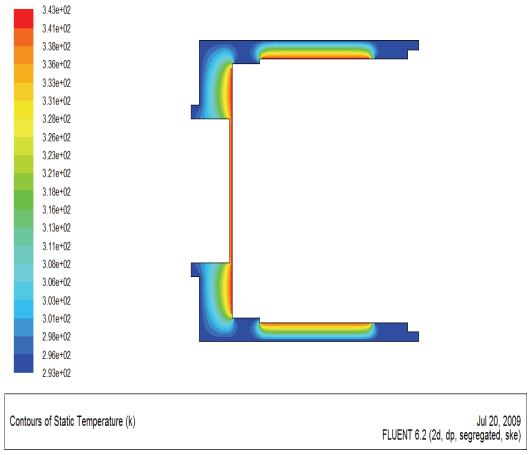
研究人員經由以下分析圖表可有效的控制 PMBL 馬達散熱模式及進行分析與設計改良因熱產生電性差異與設計範疇。馬達動態 X-Y 平面溫度分佈，如圖 10（a）～（e）所示，當線圈溫度 343K、空氣溫度 313K 時溫度明顯上升。若考慮馬達熱應力時，可發現熱應力集中於轉子與氣隙交接處，如圖 10（f）所示。



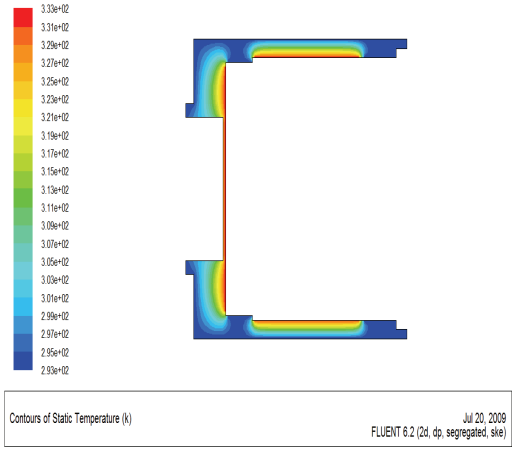

(a) 線圈溫度 313K、空氣溫度 293K.



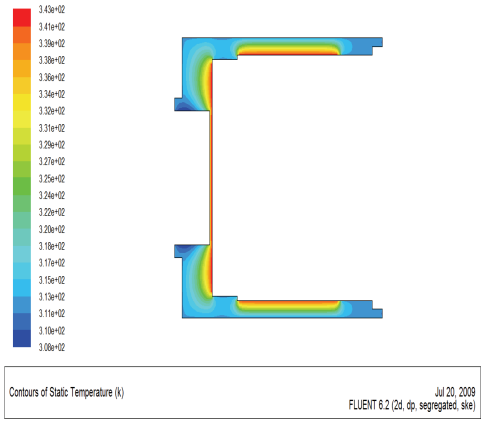

(b) 線圈溫度 323K、空氣溫度 293K




（c）線圈溫度 333K、空氣溫度 293K




（d）線圈溫度 343K、空氣溫度 293K




（e）線圈溫度 343K、空氣溫度 313K(溫度明顯上升)。

（f）線圈溫度 313K、空氣溫度 293K

圖 10、(a) ~ (e) 馬達動態 X-Y 平面溫度分佈，(f) 馬達熱應力集中處

## 三、 馬達灌膠與無灌膠正反轉平均溫度實測(T3)值

如圖 11、圖 12，依 263 圈線圈馬達灌膠與無灌膠正轉反轉實測 T3 溫度數值（T3 溫度係灌膠時以熱電偶線埋入馬達內部所量測時之溫度值）。以扭力控制電流量與馬達轉速量測定子、轉子中間溫度值，以正反轉個別實測數據作平均值。依數據可發現無灌膠溫度比灌膠馬達溫度高。

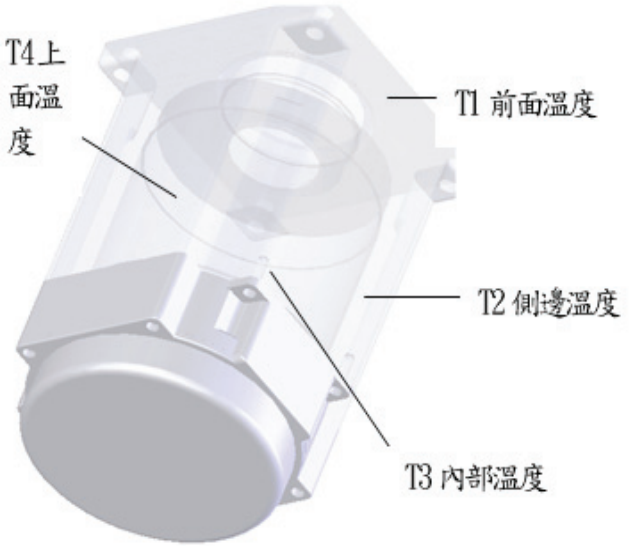



圖 11、AC8 無刷永磁馬達主要測溫位置示意圖

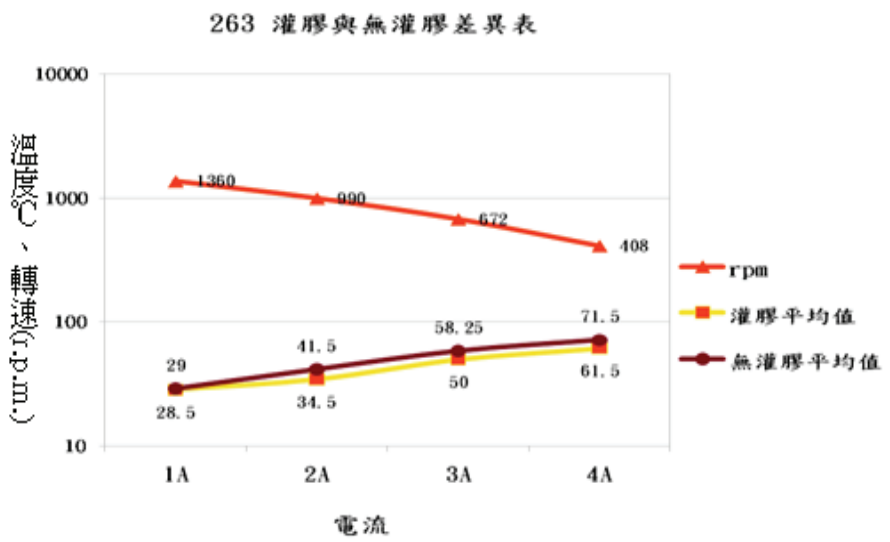



圖 12、馬達灌膠與無灌膠正轉反轉實測 T3 溫度

## 伍、 結論

一、本研究針對灌注膠（隔離物）之效應探討，對於馬達運轉時熱傳分析的結果更精確，確有其討論之必要。

二、搭配實際量測的實測值和分析值作對照，以驗證有限元素法在熱傳分析的準確性。

三、以田口品質設計方法，進行馬達溫度分析時，發現馬達負載之扭力值大小為控制因子時，其溫度變化最明顯位置為馬達內部溫度（T3），然而當到達某一扭力（線圈數 263 時約 7.38kg-cm）值時電流值就會升高（約 0.48A）其電壓值則降低。

四、討論有灌膠及無灌膠對馬達溫度之影響時，比較馬達正反轉個別實測數據平均值時，可發現無灌膠整體溫度比有灌膠溫度高。

五、馬達在運轉時，整個馬達最熱的地方就是線圈的部份，且線圈容易因為過熱受損，故使用時要對馬達線圈的溫度加以限制。

## 陸、 誌謝

本論文為 98 年度教育部推動技專校院與產業園區產學合作，計畫編號:Q99-02；由於教育部之支持，使得本計劃得以順利進行，特此致上感謝之意。

## 柒、 參考文獻

一、 鄧朝欽，“無刷永磁馬達的熱傳分析 “，逢甲大學電機工程學系碩士論文，中華民國 96 年 6 月。

二、 D. Sarkar, P. K. Mukherjee, and S. K. Sen, “Use of 3-DimensionalFinite Elements for Computation of Temperature Distribution in the Stator of An Induction Motor,” IEE Proceedings, Vol. 138, No. 2, March 1991.

三、 A. Bousbaine, W. F. Low, and M. McCorimick, “Novel Approach to the Measurement of Iron and Stray Load Losses in Induction Motors,” IEE Proceedings, Vol. 143, No.1, January 1996.

四、 Y. S. Lee, H. B. Lee, S. Y. Hahn, and K. S. Lee, “Temperature Analysis of

Induction Distributed Heat Sources by Finite Element Method," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, No.2, March 1997.

五、K. J. Tseng and S. B. Wee, "Analysis of Flux Distribution and Core Losses in Interior Permanent Magnet Motor," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, December 1999.

六、S. Inamura, T. Sakai, and K. Sawa, "A Temperature Rise Analysis of Switched Reluctance Motor Due to the Core and Copper Loss by FEM," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 39, No. 3, May 2003.

七、徐瑞富，"以田口方法改善金線偏移之銲線製程問題 "，中原大學機械工程系碩士論文，中華民國 94 年 7 月。