

精密主軸馬達

Spindle Motor for High Density Disk Drive

王建昌、姚永德

Chien-Chang Wang, Yeong Der Yao

小型電動馬達之應用非常的廣泛，人類日常生活息息相關的諸電器用品，小型馬達的應用到處可見。其中高精度主軸馬達與記錄媒體之相關性更是密切，以資訊電腦中的硬碟 (HDD) 為例，其配戴著最精密設計的主軸馬達，是時下儲存媒體之主流。本文乃依其相關性分析整理，並將研發心得作一整理，尤其針對如何降低「精密主軸馬達」頓轉扭矩的創新方法作分析及報導。

Motors touch many aspects of our lives. The application of small-size electronic motors is almost everywhere in the world. We can always find one or several motors in many electronic consumers, such as each automobile contains dozens of motors. In modern history, we have witnessed the tremendous contribution of motors to improve our human life. Spindle motor is a key component in the hard disk drives of modern computers. In this report, we would like to review some of the recent research works related to spindle motor for high density disk drive, and to present a high efficiency spindle motor designed by us.

一、簡介

今日小型電動馬達之應用非常的廣泛，舉凡汽車、資訊、音響、影視等等與人類日常生活息息相關的諸自動物品裡，沒有一項不需要小型馬達的。以汽車為例，一部汽車至少需要數十個小型電動馬達。馬達在今日日新月異的時代裡，其進展實為快速，例如有關的用語及標準等亦瞬息萬變，若要將小型電動馬達作正確的分類實不容易。依電源之使用分類，馬達可分為：直流、交流、脈衝及靜電等。依其構造的方法不同可分為：移動電樞、移動磁鐵、移動線圈及密封型等。依動作型態之不

同，可分為：旋轉、直線及振動等。有關「精密小馬達」之分類，若依主要特徵區分，常見的有：(1) 直流馬達、主軸馬達、無蕊馬達，(2) 風扇馬達，(3) 步進馬達，(4) 線性馬達，(5) 振動馬達，(6) 超音波馬達及 (7) 伺服馬達等等。由於近年來資訊產品的快速發展，帶動了其不可缺的「精密小型馬達」的需求亦與日俱增。本文將針對其中之精密主軸馬達相關特性及改進作簡略的分析與介紹。

二、精密主軸馬達的應用

以高精度主軸馬達在磁記錄媒體上之應用為



圖 1. 硬碟機的基本結構。

例，每年保持著強勁容量擴張趨勢的硬碟 (HDD) 備受大眾矚目，其配戴著最精密設計的主軸馬達，已成為時下儲存媒體之主流。在光儲存媒體方面的應用，則有價格低廉的 CD 系列碟機產品與著重影音及視覺效果的 DVD 系列碟機產品。其他的應用則有可攜式 MD player、雷射印表機的多面鏡馬達 (polygon motor) 與 CPU 散熱風扇等，故精密主軸馬達的應用實與我們日常生活緊緊地結合在一起。

三、儲存媒體的發展趨勢

1. 高密度化、家電化與小型化

從近兩年的國際硬碟公司合併案，在 2001 年 4 月美國 Maxtor 完成收購美國 Quantum 硬碟公司的工作，一舉成為全球規模最大的硬碟企業，而日立公司於 2002 年 5 月戰略性收購 IBM 的虧損部門，幾個重要硬碟大廠正進行重整，嘗試在這龐大的硬碟市場佔有一席之地。由圖 1 簡單說明硬碟機的機構，資料記錄於碟片上，訊號的寫入和讀取均通過磁頭進行。硬碟的容量則取決於磁頭敏感度和碟片的記錄密度。一個硬碟片能夠記錄多少資料，取決於硬碟片中可記錄 1 位元資料的物理區域大小。寫入 1 位元訊息所需的區域稱為記錄位元。

在 HDD 中通過磁配戴有高感度 MR 或 GMR 感測器的頭，沿著被稱作軌道的同心圓狀的記錄區域磁化磁盤表面來記錄資料，如圖 2 所示。記錄密度以每平方英寸的位元數來表示，在 2002 年最新

的 HDD 中，3.5 英寸和 2.5 英寸盤片的最大記錄密度均提高到了約 50 Gbit/in^2 。雖然因產品而有所不同，但在軌道密度方面，每 1 mm 擁有 2700 條軌道、每條軌道的 1 mm 中記錄有 2 萬 8000 位元以上的數據。簡單說就是，在圓周方向約為 35 nm、半徑方向約為 350 nm 的微小區域中便可記錄 1 位元數據。

透過縮小位元間隔與軌道間隔，可達到記錄密度的提升。但光靠上述記錄位元區域的縮小是不夠的，故 GMR 及 TMR 磁頭技術的陸續開發，才大幅提升硬碟的記錄密度。高容量硬碟的問世，造就了家電化應用的實現；如先鋒公司於 2002 年 11 月所發表配備 120 GB 硬盤的 DVD 錄影機，如圖 3 所示，其特點為將硬碟容量從原來的 80 GB 增加到 120 GB。最大可以記錄 153 個小時的影視節目。HDD 除開拓錄影功能的市場外，亦在攜帶型音樂媒體也有應用，如 Alpine 在 2003 年 4 月所發表配備可拆卸式 HDD 的車載音響「HAD-5460MS」，如圖 4 所示。

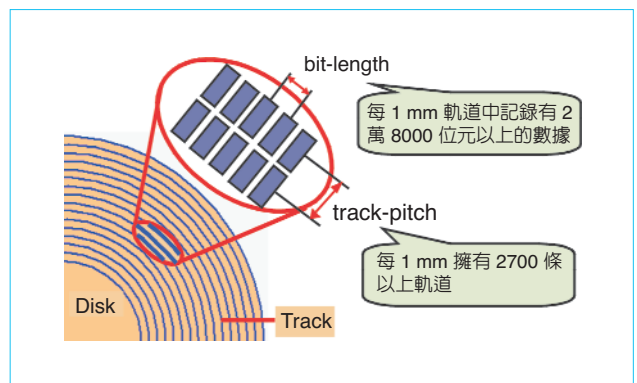


圖 2. 碟片軌道與位元間距示意圖。



圖 3. Pioneer 的 DVD 錄影機。



圖 4. Alpine 的車用可拆卸式 HDD。

由於硬盤能夠從車內取出，用 USB 連線連接個人電腦，因此用戶可以將個人電腦中保存的音樂數據及 CD 的音樂數據等下載到硬盤中。該產品採用了東芝製造的存儲容量為 16 GB 的 2.5 英寸硬盤，大約可以保存 3000 首歌曲的音樂容量。硬盤已不僅被廣用在個人電腦和伺服器的領域，目前也開始普及到家用錄影機和可攜帶型音樂播放機等範疇。

回顧硬盤發展歷程，發展趨勢是記錄密度的提高。記錄密度的提高實現了硬盤的大容量和高速度，從而也使得小型硬盤更加普及，例如圖 5 所示為 IBM 的 Microdrive。同樣的狀況也發生在光碟機的發展上，如圖 6 所示為 Philips 所設計的微型光碟片。硬盤最重要的指標是儲存容量，購買新電腦的使用者最關心的已不再是 CPU 的工作頻率和記憶容量，而是硬盤容量。在個人電腦中配備電視節目錄影功能已不是什麼新鮮事，家電用 HDD 錄影機也如雨後春筍般的推出，勢必為家用影音儲存媒體帶來新的變革。

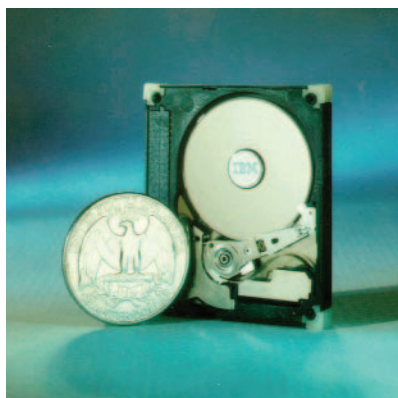


圖 5. IBM Microdrive。



圖 6. Philips 的微型光碟片。

2. 高速化

擁有大容量尚需有快速的資料傳輸速率，才能符合消費者的要求，成為電腦週邊的基本配備或家電必備儲存裝置。而 HDD 的傳輸速度取決於平均尋軌時間、轉速和記錄密度，其意義分別說明如下。平均尋軌時間是指磁頭到達目的磁軌所需的時間。經由伺服裝置控制使得磁頭在碟片上來回移動，從而找出目的位元位置，以個人電腦所使用的普通硬盤為例，其平均尋軌時間約為 10—12 ms。碟片轉速主要決定於帶動旋轉的主軸馬達性能，轉速越高，磁頭等待旋轉的時間就越短，3.5 英寸型產品一般的轉速為 5400 rpm，而高性能產品中有的甚至達到 7200 rpm，面對伺服器等特殊用途的產品，有的甚至具有 10000 rpm 或者 15000 rpm 的性能。

2003 年硬盤的記錄密度約為 100 Gbit/in² (120 GB/單碟)，但硬盤廠仍向 Tbit/in² 的目標挺進。下文將介紹在面臨容量還逐漸增加的趨勢，主軸馬達的幾項設計技術。由於碟片記錄區域沿半徑方向呈縱長形，因此最近的主流是通過縮小這一距離(即軌道間距)來提高記錄容量。如果縮小軌道間隔，那麼因為碟片的振動，可能會使磁頭難以追蹤到目標軌道，量化到主軸馬達的規格要求則為徑向非重複性偏擺 (radial non-repeatable run-out, NRRO)，以目前硬盤機主軸馬達設計對這一規格之要求，從所得情報判斷應當在 50 奈米以下。之所以在旋轉碟片的主軸馬達中採用流體動壓軸承 (hydro dynamic fluid bearing) 的產品越來越多，就是因為液態軸承不僅有靜音 (一般對家電製品的噪音

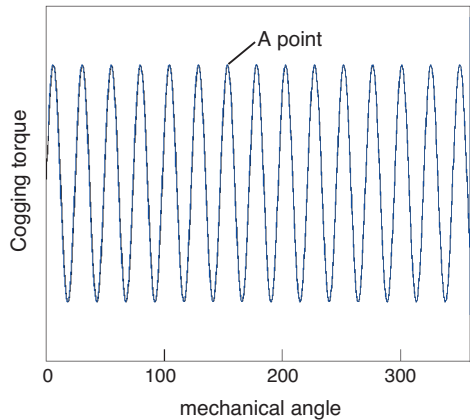


圖 7. 九槽十二極轉子轉一週頓轉扭矩波形。

值要求為小於 30 dB (A) 效果，而且還具有可減少盤片因主軸馬達旋轉而產生的振動特點。且其提升產品於動作下的抗震性 (anti-shock) 至 100 g 以上。

高精度動壓軸承的使用，改善主軸馬達上述特性至一定水平之上，然而馬達為一機、電與磁路的結合設計，故會有相互耦合的問題，在馬達精度被嚴格要求下，更顯現出三者彼此間相互影響的敏感度。主軸馬達中因有永久磁鐵與軟磁 (矽鋼片) 的配置，在線圈未激磁的情況下，永磁與矽鋼片間有著磁交鍊存在，造成馬達週期性切線方向的扭矩分布，此一擾人的特性稱為頓轉扭矩 (cogging torque)，會造成主軸馬達的振動與噪音。以目前高階主軸馬達產品設計而言，其值被要求在 $1 \text{ g} \cdot \text{cm}$ 以下，以避免對軸承穩定性造成影響，進而影響整個碟機系統的特性。接續將對如何抑制主軸馬達之頓轉扭矩深入剖析說明。

四、降低頓轉扭矩的方法

首先找出頓轉扭矩週期性及轉子與定子相對關係。以 9 槽 12 極主軸馬達為例，因定子 9 槽配合轉子 12 極，產生固定定子下，旋轉一圈，會有下圖基本頓轉扭矩之諧波產生 (10 度機械角下產生一個弦波，如圖 7 所示，可以對稱理論大概看出)。先找出在 A point 時轉子與定子相對位置，此時頓轉扭矩最大，若能找到此位置為何頓轉扭矩如此大之原因，再予以修整，降低了此點頓轉扭矩後，再回去重複確認週期性有無喪失 (有可能顧此失彼，壓

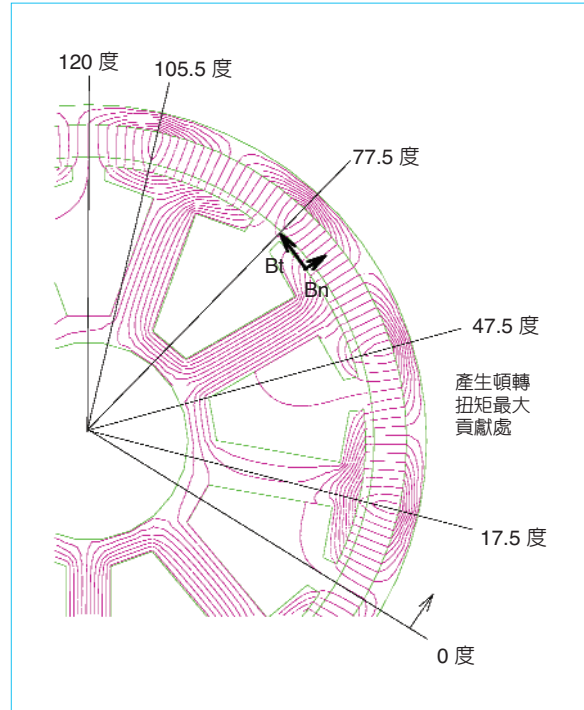


圖 8. 頓轉扭矩最大時轉定子磁力線分布。

抑此點造成其他位置頓轉扭矩變大)，若週期不變，則頓轉扭矩降低之目的已然達成。那該如何降低頓轉扭矩，下列提供一個縮減頓轉扭矩的技術⁽¹⁻⁴⁾。

以下是利用 FEM 軟體解析頓轉扭矩最大時轉子與定子相對位置之磁力線表徵圖，在這個實例中馬達鐵心未做任何修整，有超出規格之頓轉扭矩值。在圖 8 上定義一個座標系統由 0 度定義到 120 度，角度變數為 θ ，取一條圓弧路徑，半徑為馬達圓心到馬達氣隙中點，圓弧路徑圓心為馬達圓心。將此路徑上之 B_n 與 B_t 取出， B_n 定義為垂直此路徑之磁場 (即馬達徑向磁場)， B_t 定義為平行此路徑之磁場 (即馬達切線方向磁場)，繪出如圖 9(a)。縱軸物理量為磁通密度，單位為 tesla，橫軸座標為角度，即是前面提及之新設立座標系統，將 B_n 與 B_t 重疊繪出，磁場較高者即為 B_n 場，由 Maxwell stress tensor 法則 $T_{\text{cogging}} \propto \int B_n \cdot B_t \cdot dr$ ，而 B_n 與 B_t 之乘積 ($B_n \cdot B_t$) 沿路徑積分總和即表現頓轉扭矩之大小，以下將 ($B_n \cdot B_t$) 與路徑相關位置作圖 9(b)，正的面積與負的面積相加若為零，則頓轉扭矩為零，由該圖可發現，相鄰之正面積與負面積值都非常接近。我們經計算，特將其值分別列於表 1 以作比較。

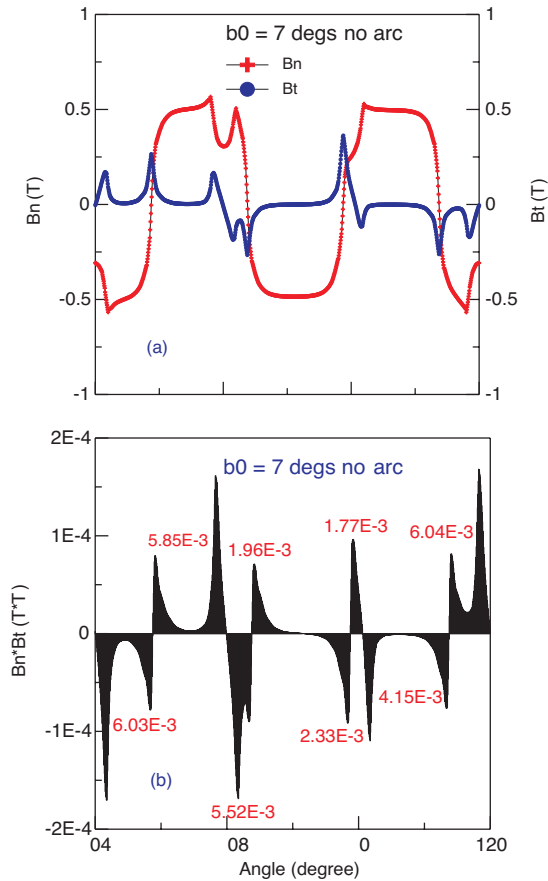


圖 9. (a) B_n - θ 與 B_t - θ 圖，(b) $B_n \cdot B_t$ - θ 圖。

若差值之總和為零，則頓轉扭矩為零，但第四項負的面積太大，造成總和偏負值，故由分析圖 8 於角度 47.5 度定子與轉子相對位置上，再參考圖 9 (a) 改變 47.5 度時 B_n 與 B_t 波形之表現，降低此乘積絕對值 5.52×10^{-3} 之數值，或提高 1.96×10^{-3} 之值，則有助降低頓轉扭矩。至於如何變化 B_n 與 B_t ，相對之定子形狀會如何相對應改變，得憑設計經驗與對磁路特性的敏銳度。我們將上例定子的鐵心作了一番修整，如圖 10 所示，在鐵心齒端以弧形作修飾，然後再分析其 B_n - θ 與 B_t - θ ， $B_n \cdot B_t$ - θ 之關係圖，分別將結果以圖 11 (a) 與圖 11 (b) 表示，可與圖 9 作比較及分析。其面積變化亦列表如表 2 所示。明顯的，其第 4 項之差值已獲得改善，面積差亦縮小到 0.16×10^{-3} ，已使得頓轉扭矩降到符合規格之內。當然如前所提，仍得將轉子與定子相對旋轉 (最少一個週期)，確認最後頓轉扭矩之波形，圖 12 (a) 與圖 12 (b) 列出鐵心修整前與修整後，單相

表 1. 修改前 B_n 與 B_t 相乘面積和差表。

項次	正面積	負面積	差
1	5.85×10^{-3}	6.03×10^{-3}	-0.18×10^{-3}
2	6.04×10^{-3}	4.15×10^{-3}	1.89×10^{-3}
3	1.77×10^{-3}	2.33×10^{-3}	-0.56×10^{-3}
4	1.96×10^{-3}	5.52×10^{-3}	-3.56×10^{-3}
和	15.62×10^{-3}	18.03×10^{-3}	-2.41×10^{-3}

表 2. 定子修改後 B_n 與 B_t 相乘面積和。

項次	正面積	負面積	差
1	8.84×10^{-3}	9.31×10^{-3}	-0.47×10^{-3}
2	8.22×10^{-3}	6.51×10^{-3}	1.71×10^{-3}
3	2.95×10^{-3}	2.61×10^{-3}	0.34×10^{-3}
4	3.48×10^{-3}	5.22×10^{-3}	-1.74×10^{-3}
和	23.49×10^{-3}	23.65×10^{-3}	-0.16×10^{-3}

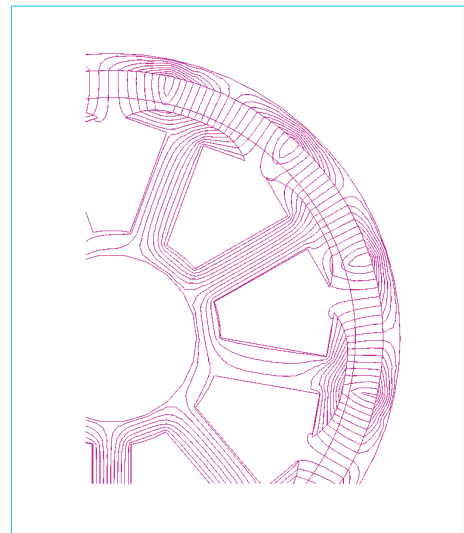


圖 10. 銅片外形修整後磁力線分佈圖。

K_t 與頓轉扭矩圖，由比較可明顯觀察出在頓轉扭矩之大幅降低，但 K_t 仍維持在一定水平。

由上述技術方法，頓轉扭矩已降低很多，其中單相 K_t 亦會受到干擾，使得馬達效率較修弧前差了一些，所以降低頓轉扭矩與增加效率之問題，將存在有最佳化值。

徹底瞭解降低頓轉扭矩之機制，可定義其關鍵性參數，進行最佳化之設計⁽⁵⁾。對主軸馬達的定子

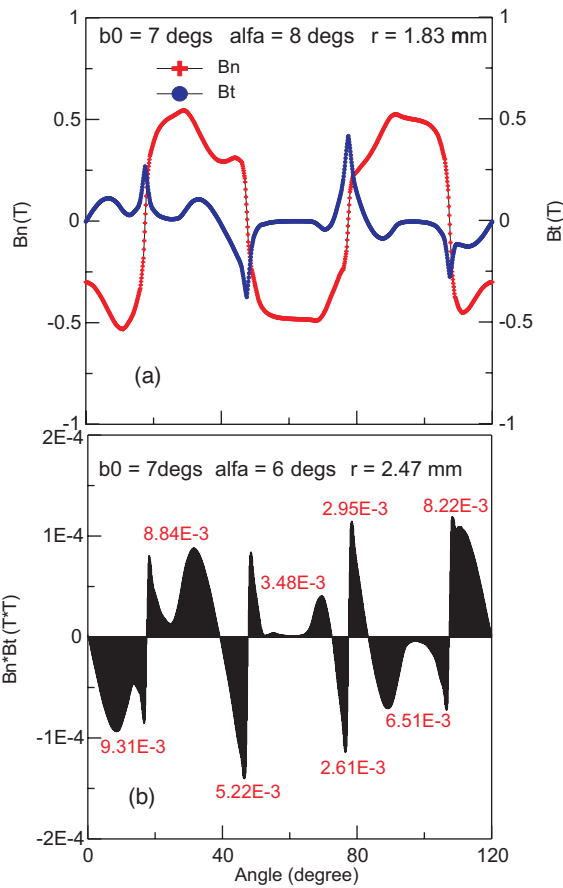


圖 11. (a) 修整後 B_n - θ 與 B_t - θ 圖，(b) 修整後 $B_n \cdot B_t$ - θ 圖。

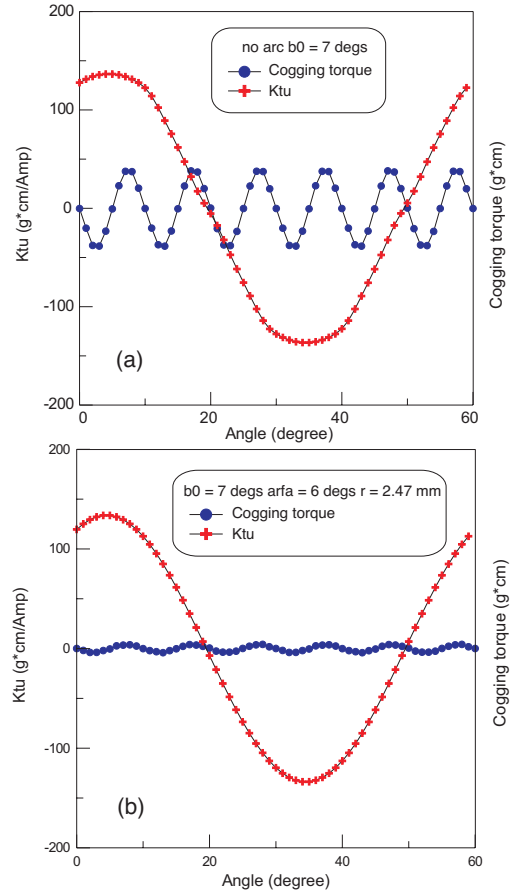


圖 12. (a) 修整前單相 K_t 與頓轉扭矩波形圖，(b) 修整後單相 K_t 與頓轉扭矩波形圖。

外形變化，結合 RNM (reluctance network method) 磁路分析方法與遺傳基因最佳化演算法 (genetic algorithm, GA)，其最佳化概念如圖 13 所示，有效率地將定子最佳化外形計算出來。在逼近最佳化定子外形分 (a) 原始外形、(b) 挖溝槽、(c) 導圓角、(d) 挖溝槽與導圓角結合四種方式，幾何圖形如圖 14 所示。各種外形經計算結果如圖 15 所示。此最佳化方式的運用，就理論計算而言，可將頓轉扭矩值降低到 $1 \text{ g} \cdot \text{cm}$ 以下，故可應用於今日高精度的 HDD 或 DVD 所需之馬達。

五、結論

隨著儲存裝置記錄密度的不斷提升，主軸馬達的設計要求亦越來越嚴苛，主要焦點在振動與噪音的抑制、能量消耗的降低、壽命的延長與抗震能力

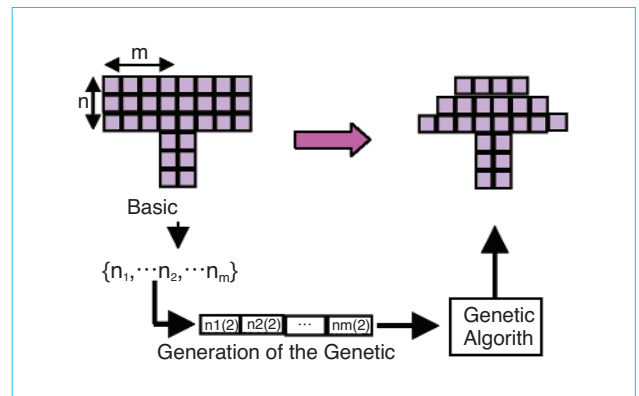


圖 13. 定子外形最佳化方法概念。

的提升，並以達到高密度化、高速化與微型化為目標。家電等日常電器用品具有廣大的消費市場，主軸馬達為其一極重要之關鍵性主件。要提升馬達之功能，其電、磁力 (cogging、core loss 與不均勻的

電磁交互作用力) 的影響將被嚴謹的納入考量，與高精度的軸承相輔相成，以完成高性能主軸馬達的設計與製作。

此外，馬達工業極具競爭性，欲將優良性能之馬達推出市場，不僅僅上述關鍵技術的建立即可，更重要的尚需考量：(1) 產品的高信賴性要求，(2)

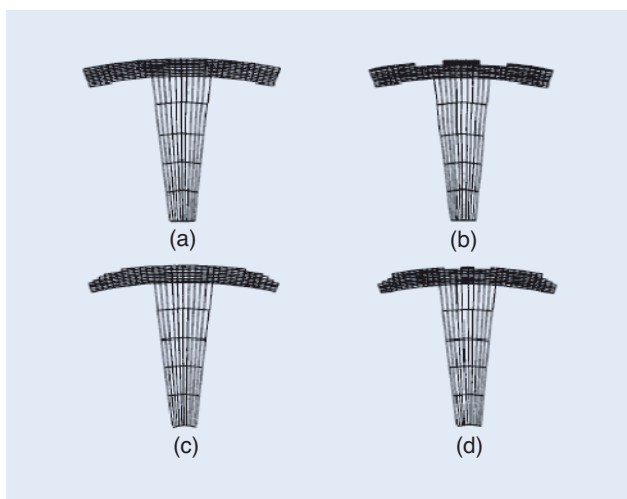


圖 14. 定子原始外形與 3 逼近最佳化的外形。

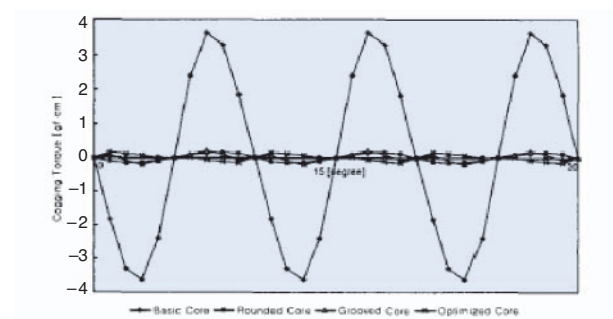


圖 15. 各種定子外形相對的頓轉扭矩。

產品評價技術與檢測裝置之建立，(3) 高品質的材料製作與設計，(4) 客觀的評價標準等。最後仍需不斷的創新技術及不斷的開發新產品，以符合顧客的需求等。

本文乃依筆者過去幾年來研究「精密主軸馬達」之經驗，將研發心得作一整理，尤其針對如何降低精密主軸馬達頓轉扭矩的創新方法作分析及報導。

參考文獻

1. Y. D. Yao, D. R. Huang, J. C. Wang, S. J. Wang, T. F. Ying, and D. Y. Chiang, *IEEE Trans. on Mag.*, **34**, 465 (1998).
2. 王建昌, 中正大學物理所碩士論文 (1998).
3. 姚永德, 王建昌, 廖清波, 黃得瑞, 趙志謀, 無刷馬達定子及其修弧方法, 發明專利第 112462 號 (2000).
4. Y.-D. Yao, J.-C. Wang, C.-P. Liao, D.-R. Huang, C.-M. Chao, *Stator of And Arc Shaping Method for Brushless Motor*, United States Patent Number: 6,044,737 (2000).
5. K.-J. Han, H.-S. Cho, D.-H. Cho, and H.-K. Jung, *IEEE Trans. on Mag.*, **36**, 1927 (2000).

- 王建昌先生為國立中正大學物理研究所碩士，現任工業技術研究院光電工業研究所工程師。
- 姚永德先生為美國克拉克森大學物理博士，現任中央研究所物理所研究員。
- Chien-Chang Wang received his M.S. in physics from National Chung Cheng University. He is currently an engineer in the Industrial Technology Research Institute.
- Yeong Der Yao received his Ph.D in physics from Clarkson University, USA. He is currently a research fellow in the Institute of Physics at Academia Sinica.