

# 行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

## 次世代數位影音多用途光碟系統之光機電整合研究 —子計畫（一）主軸馬達伺服控制（III）

計畫類別： 個別型計畫          整合型計畫

計畫編號：NSC 89-2213-E-009-111

執行期間：八十八年八月一日 至 八十九年七月三十一日

計畫主持人： 邱 俊 誠

共同主持人：

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立交通大學 電機與控制工程學系

中 華 民 國 89 年 10 月 31 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告  
次世代數位影音多用途光碟系統之光機電整合研究  
—子計畫(一)主軸馬達伺服控制(III)  
The Integration in Optical, Mechanics, and Electronics of  
Digital Versatile Disc System — (III) Servo Control of Spindle Motor

計畫編號：NSC 89-2213-E-009-111

執行期限：八十八年八月一日至八十九年七月三十一日

主持人：邱俊誠 國立交通大學 電機與控制工程學系

## 一、中文摘要

本報告之研究重點為設計驅動電路的補償電流來減少光碟機主軸馬達的轉矩漣波，以增加光碟機之讀取效率。首先，建立馬達的靜態和動態的模型以分析光碟機主軸馬達的特性，然後利用光碟機主軸馬達的動態模型來模擬高速操作下馬達的反電動勢波形。其次，利用反電動勢波形和由驅動電路所量測到的電流來模擬及觀察馬達的轉矩漣波。為了減少轉矩漣波，我們研發了一個補償電路來產生能夠用來減少馬達振動和噪音的合成電流。此補償電路能夠大大地提升光碟機主軸馬達的轉度，增加光碟機之讀取效率。

**關鍵詞：**唯讀型光碟機、主軸馬達伺服控制、轉矩漣波、反電動勢。

## Abstract

A compensated current design incorporated with existing drive circuit is presented to reduce the torque ripple of a CD-ROM spindle motor. Firstly, the static and dynamic models of the motors are established in order to analyze the characteristic of CD-ROM spindle motor. The simulation of the dynamic model of CD-ROM spindle motor with driving circuit is then established to observe the back-EMF (electromotive force) wave-form of the motor in high speed operations. Secondly, based on the back EMF's wave-form and the current given by the drive circuit, the output torque of the CD-

ROM spindle motor is established. With this current, torque ripple of the motors is observed from the simulation. In order to reduce torque ripple, a compensated circuit is developed to generate synthetic current that can be used to reduce motor vibration and noise. This compensated circuit can be easily integrated into a driving chip that greatly enhances the speed of CD-ROM spindle motors.

**Key Words:** CD-ROM, Spindle Motor Servo Control, Torque Ripple, Back EMF.

## 二、緣由與目的

在光碟機的研究當中，如何增加光碟機的資料讀取速度與減少平均讀取時間是研發之中最主要的考量。本計劃是針對光碟機主軸馬達的驅動技術設計驅動電路補償電流來減少光碟機主軸馬達的轉矩漣波，以增加光碟機之讀取效率。一般來說，光碟機主軸馬達使用直流無刷馬達的原因不外乎它優異的加速度特性、好的速度/轉矩特性及轉速容易控制等特性。除此之外，直流無電刷馬達亦有噪音低和有良好的熱耗散等優點。

一般而言，利用矩形或弦波型式的電流來驅動一個直流無刷馬達，其轉矩漣波可能在旋轉盤中引起噪音和振動，因而降低速度控制方面的效能[1,2]。從馬達的轉矩特性觀點而言，減少轉矩漣波的方法有二：一個是透過改變磁場特性；另一個是透過改變輸入電流波

形。換句話說，我們能夠經由設計不同的磁場架構或是透過改變輸入線圈的電流波形來補償馬達的磁場[3]。現今，用於光碟驅動的直流無刷馬達其磁場架構大致上已經固定。在本文中，我們將分析反電動勢波形，並且探討輸入電流，磁場和轉矩之間的關係。在考慮這些關係後，我們設計出一個補償電路以產生合成電流來減少轉矩漣波，而且這個補償電路可以很容易整合到驅動晶片中。

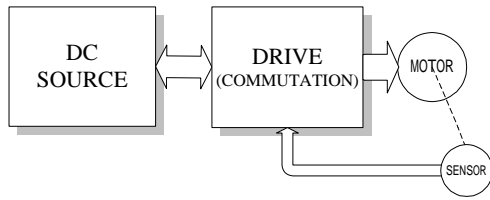


圖 1 無刷馬達的簡單方塊圖

### 三、機械系統的數學模型

為了取得直流無刷馬達的轉移函數，需要下面的假定：(a) 電壓來源理想；(b) 忽視線圈電感。有這些假定，我們得到下列關係[4]：

$$T(t) = K_t i(t) \quad (1)$$

$$e_b(t) = K_b \dot{\theta}(t) \quad (2)$$

$$T(t) = J \frac{d\dot{\theta}(t)}{dt} + T_L(t) \quad (3)$$

其中  $T(t)$  是電磁轉矩， $i(t)$  是線圈電流， $K_t$  是轉矩常數， $e_b(t)$  是反電動勢， $\dot{\theta}(t)$  是角速度， $K_b$  是反電動勢常數， $J$  是轉動慣量， $T_L$  是負載轉矩， $\frac{d\dot{\theta}(t)}{dt}$  是角加速度。穩態中歐姆定律是：

$$V(t) = r \cdot i(t) + e_b(t) \quad (4)$$

$V(t)$  是外加電壓， $r$  是線圈電阻。對於理想馬達能量的轉換效率是百分之百，亦即：

$$K_t = K_b \quad (5)$$

如果負載轉矩  $T_L = 0$ ，則直流無刷馬達的輸入電壓和輸出轉矩之間的關係是：

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{1}{\frac{rJs}{K_t} + K_b} \quad (6)$$

等式(6)是一個直流無刷馬達的轉移函數。

### 四、反電動勢的分析和測量法

無電刷馬達之直流電源是經由驅動電路的轉換產生出加入到直流無刷馬達的交流三相方波。這些波形是驅動電路經由極性交換所產生，驅動電路的主要架構是由6個電晶體所組成，當驅動電路給予設計的切換時序時；則在任一瞬間都會有不同臂的兩個電晶體導通，因此就能夠產生交流三相方波。當轉子轉動時，在一個全截距線圈中產生的電動勢是：

$$e_c = B \dot{S} D L \quad (V) \quad (7)$$

在一整個相線圈中產生的電動勢是在該相中所有串聯線圈電動勢的和。如果每相串聯個數是  $N_{ph}$ ，則：

$$e_{ph} = K_s N_{ph} e_c \quad (V) \quad (8)$$

繞線因素  $K_s$  是考慮所有導體磁通密度不相同的事實。如果我們考慮反電動勢的峰值或者有效值，是一個常數。則每磁極的氣隙磁通是：

$$W = \frac{f D L}{P} \quad (Wb) \quad (9)$$

$P$  是磁極的數目。在理想Y連接的直流無刷馬達中，B形波是矩形的並且任何時候都導通，並且如果  $K_b$  定義為  $\bar{e}_{cc} / \dot{S}$  的比例，則我們得到：

$$K_b = \frac{2}{f} K_s N_{ph} W P \quad (V \cdot s / rad) \quad (10)$$

以  $Z = 3 \times 2 \times N_{ph}$  來表達馬達中導體的總數。對於新的定義，可改寫如下：

$$K_b = \frac{1}{3} \frac{K_s Z W P}{f} \quad (V \cdot s / rad) \quad (11)$$

轉矩常數  $K_t$  是  $T$  與  $I$  的比例， $T$  是電磁轉矩由載波電流的兩個相產生的。假定這些線圈是充分集中的且每一個相都間隔120度的電角，則：

$$T = \frac{2}{3} Z \times \frac{D}{2} \times B I L \quad (N - m) \quad (12)$$

利用  $K_t$  的定義，如果我們把等式(9)代入等式(12)我們得到：

$$K_t = \frac{1}{3} K_s \frac{ZWP}{f} (N - m/T) \quad (13)$$

這個結果與等式(11)完全相同，亦即  $K_t = K_b$ 。對理想馬達而言，相對應的反電動勢波形是梯形波；和實際反電動勢波形相比，其峰值較低。測量直流無刷馬達反電動勢的方法是將直流無刷馬達一與另一個直流馬達二連接起來；此時直流無刷馬達二如同一個發電機。當直流馬達一在固定的轉速運轉下，直流無刷馬達二的反電動勢能夠被測量出來。相同地，利用圖2中所給的相同電路，我們能夠測量出反電動勢  $e_{LL}$  和每一相位的反電動勢  $e_{ph}$ ，依此，我們就能夠從反電動勢和角速度之間的比例關係直接計算  $K_b$ ，亦即：

$$K_b = \frac{\bar{e}_{LL}}{S} \quad (V \cdot s / rad) \quad (14)$$

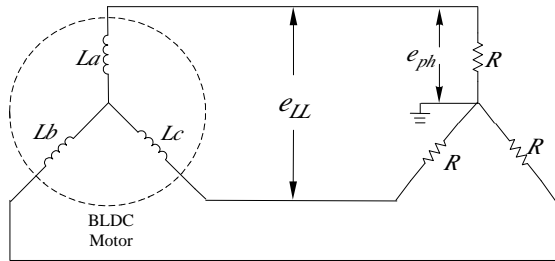


圖2 反電動勢測量的等效電路

## 五、轉矩的計算

一般而言，永磁馬達中轉矩的主要來源為耦合轉矩。馬達的即時耦合轉矩是每一相轉矩的總和。因此，即時轉矩能夠用電流  $i_p$ ，反電動勢  $e_p$ ，和角速度  $S$  來表達：

$$T_s = \sum_{p=1}^3 e_p i_p \quad (15)$$

如果反電動勢是完美的梯形，則一個理想的矩形輸入電流會產生一個平滑轉矩(如圖3所示)。如果反電動勢波形與正弦波類似，則產生的耦合轉矩將會含有諧波成份(如圖4所示)。這個轉矩漣波定義為：

$$T_{rip} = \frac{T_{MAX} - T_{MIN}}{T_{av}} \times 100\% \quad (16)$$

$T_{MAX}$ ， $T_{MIN}$ 是轉矩的最大值和最小值， $T_{av}$ 是輸出轉矩的平均值。在(圖4)所給的這個例子中產生的轉矩漣波  $T_{rip}$ 大約10.8%。因為轉矩漣波可能會產生之前描述的弊端，在下一節，我們將提出減少轉矩漣波的設計。

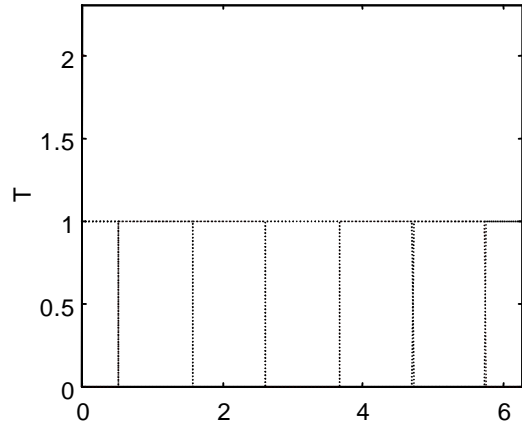


圖3 理想狀況下的輸出轉矩波形

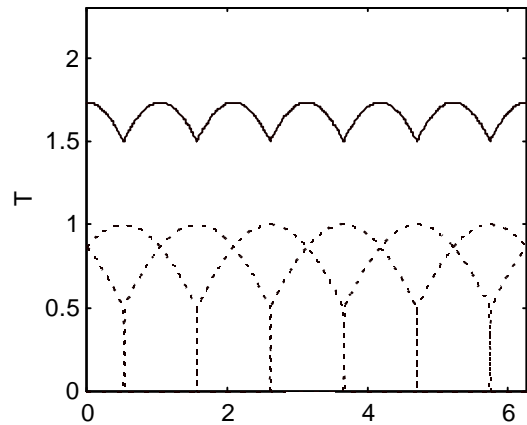


圖4 實際狀況下的輸出轉矩波形

## 六、減少轉矩漣波的設計

設計小尺寸直流無刷馬達時最重要的是其旋轉的穩定性。如果馬達的尺寸夠大，則轉矩的變化對於轉子轉速的影響會比較輕微。反之，一個小馬達中轉矩的變化將會大大地影響轉子轉速。因此，能夠產生穩定的轉矩來保持固定的轉速是整個設計過程中關鍵性的問題[5]。

在永磁馬達中減少轉矩漣波的方法是使線圈和磁鐵的相對位置產生偏斜，或者是改變馬達的激磁設計。然而，最近十年電力電子改

進了直流無刷馬達的性能。MOSFET脈寬調變變頻器的使用使得低慣性馬達有高動力/重量比，和高轉矩/電流比的理想特性。

為了改進使用現存驅動電路的轉矩漣波，我們需要進一步瞭解直流無刷馬達的特性。在3式中，我們需要使輸入電壓為零，並且從負載轉矩產生轉矩漣波，馬達速度與輸入轉矩漣波的比變為：

$$\frac{\tilde{S}(s)}{T_{rip}(s)} = \frac{1}{sJ + \frac{K_b \cdot K_t}{r}} = \frac{1}{sJ + D} \quad (17)$$

$D = K_b \cdot K_t / r$  是黏滯阻尼係數。為了減少馬達的轉矩漣波，觀察等式(17)可以有三個選擇。第一個選擇是要提升轉軸慣性；這將會加大馬達的尺寸。第二個選擇是要加大黏滯阻尼係數；這將會降低馬達的能量轉換效率。最後的選擇是要提升切換的頻率；這將會損失控制電流相位的精確度。因為上述的選擇都各有缺點，所以我們提出另外一個來克服上述困難的方法，此方法以圖5來說明：在電器角的一個周期中，三相馬達的六個基本切換頻率會引起一系列的轉矩漣波，包含許多諧波成份。如果我們透過設計一個外部電流合成電路在最低轉矩波形時送出一個補償電流，就能夠大大地改進轉矩漣波的振幅。電流合成電路由一個死帶電路及測量轉子位置的位置感測器所組成。在圖6中死帶電路供給馬達一個補償電流。如果馬達的磁場如圖7(a)和所提出的合成電流在圖7(b)然後，在圖7(c)產生每一相的轉矩，圖7(d)顯示馬達的總合輸出轉矩。透過使用等式(16)，轉矩漣波  $T_{rip}$  大大的降低至2.7%。此實驗證明補償電流可以輔助馬達產生了一個理想的轉矩波形，而且這個補償電路是可以很容易整合到驅動晶片中實際應用。

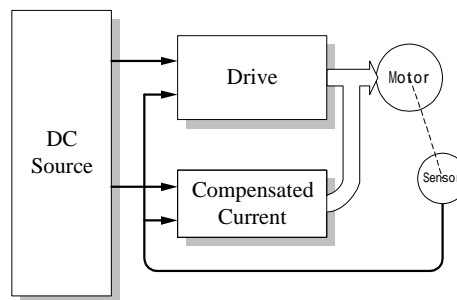


圖 5 改良的無刷馬達系統方塊圖

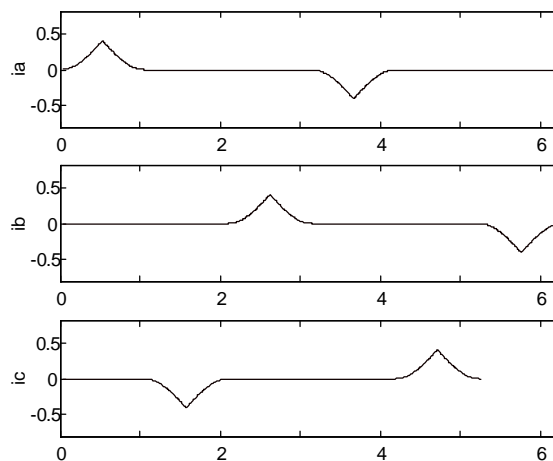
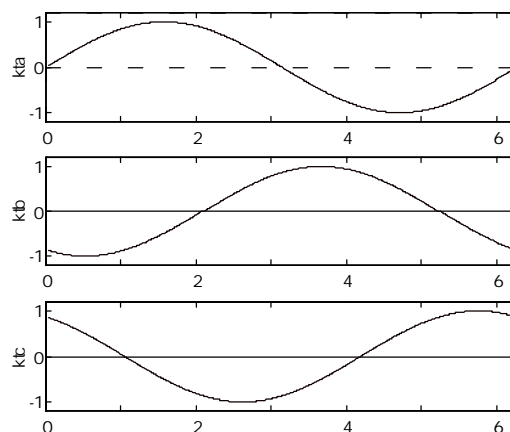
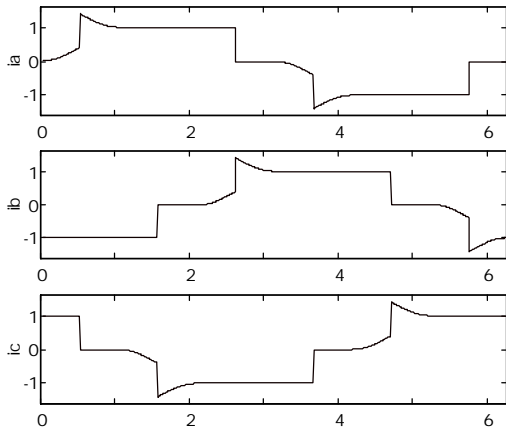


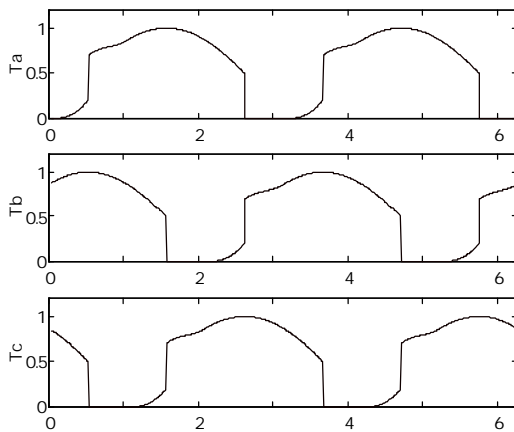
圖 6 補償電流的波形



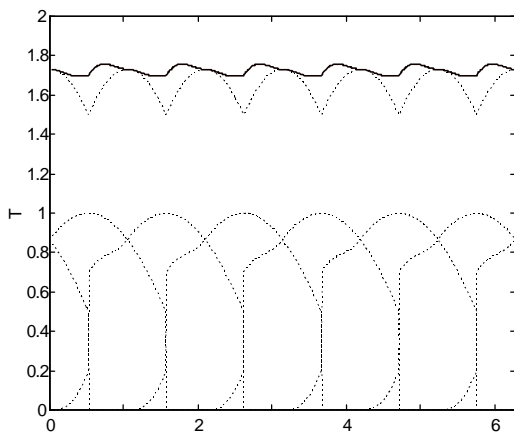
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 7 改良的無刷馬達的輸出轉矩波形

## 七、結論

在本文中，研發了一個從三相直流無刷馬達的驅動電路外部提供所設計的補償電流。這個補償電流提供一個可以實際減少轉矩漣波

的方法，使一般驅動器的轉矩漣波從10.8%減少為2.7%。在實際光碟機的主軸馬達應用方面，轉矩漣波的減小能夠除去振動、噪音和改進伺服控制方面的精確度。另外，本研發之補償電路不需要更換原本的驅動電路，故可以減短研發之時程。在未來的研究方面，補償電流電路和原本驅動電路將被整合在一起並且可以提供有效的電流控制。

## 八、參考文獻

- [1]. Jeff Kordik, "Computer Modeling and Analysis of Brushless DC Motors with Skewed Rotor Magnets". *Incremental Motion Control System and Devices*, pp.17-24,1990.
- [2]. T. Nakata, N. Takahashi and K. Uehara, "Analysis of Magnetic Characteristics of A Brushless DC Motor Taking into Account the Distribution of Magnetization", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. May-22, No.5, 1986, pp.1084-1086.
- [3]. J. Y. Hung, and Z. Ding, "Design of currents to reduce torque ripple in brushless permanent magnet motors", *IEE Proc. B*, Vol. 140, No. 4, 1993, pp. 260-266.
- [4]. JHE Miller, "Definition of  $\kappa_T$  and  $\kappa_E$  for Brushless DC Motors", *Incremental Motion Control System and Devices*, 1992, pp.87-96.
- [5]. Hoang Le-Huy, Robert Perret, and Rene Feuillet, "Minimization of Torque Ripple in Brushless DC Motor Drive", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol.22, No.4, 1986, pp.748-755