

國立交通大學
電機與控制工程學系
碩士論文

三相直流無刷馬達之特性參數估測

The Parameter Estimation of the Three-phase DC Brushless
Motor



研究生：高典瑋

指導教授：林錫寬 博士

中華民國九十五年六月

誌謝

感謝指導教授林錫寬博士，在研究所兩年的意見與耐心指導。您豐富的學識以及堅持的研究精神，都是我效法的對象。

感謝王世杰和謝孟勳學長，感謝你們的指導，給予我的研究方向及論文相當大的幫助，使我找到研究的方向。

感謝博士班李宗原學長、王超民學長和吳東穎學長，在我學業上的建議。感謝威勳、啓昌、存堯及俊杰學長，在實驗室兩年的陪伴，在我實驗遇到困難時，提供我經驗，告訴我解決問題的方法。以及同窗好友浩緯、星宇、品齊、匯欽與學弟學妹銘峰、凱祥、鎧鍾、魏愷，你們的陪伴使實驗室充滿和諧愉快的氣氛。

最重要的，我要感謝我的父親高文義先生以及母親蔡素瑛女士的關懷及付出，感謝哥哥高仁宏與姊姊高佩瑜的陪伴與關心，讓我可以堅持下去。更感謝女友宜樺在我研究所兩年的支持與鼓勵，感謝妳，我才可以完成本篇論文。在此僅以本篇論文的結果獻給我的家人與其他關心、幫助我師長及朋友，非常的感謝你們。



三相直流無刷馬達之特性參數估測

The Parameter Estimation of the Three-phase DC Brushless Motor

研究生：高典瑋

Student：Tien-Wei Kao

指導教授：林錫寬 博士

Advisor：Dr. Shir-Kuan Lin



A Thesis

Submitted to Department of
Electrical and Control Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master

in

Electrical and Control Engineering

June 2006

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十五年六月

三相直流無刷馬達之特性參數估測

研究生：高典瑋

指導教授：林錫寬 博士

國立交通大學電機與控制工程學系

摘要

三相直流無刷馬達有十一支接腳與驅動器相連，本文將這十一支接腳分為三類：(1) 三相線圈電壓接腳共有三支接腳；(2) 霍爾感測器的供應電源正負接腳共有兩支接腳；(3) 三組霍爾感測器的正負訊號接腳共有六支接腳。而給予任一接腳電壓，由於各接腳間彼此的相連性及電阻值不同，所以各接腳的電壓大小亦不同，可將三相線圈電壓接腳與八支霍爾接腳區分開來。再將八支霍爾接腳，任取兩支接上測試電源，利用擷取到的電壓值大小，可以找出正確的霍爾感測器的供應電源兩接腳。最後利用開路旋轉時量測到的三相感應電動勢波形，以及三個霍爾輸出波形，便可正確的辨識三相直流無刷馬達的十一支接腳。

三相直流無刷馬達的扭矩常數及電壓常數，反應出馬達的性能、輸出扭力大小及可操作的工作轉速。一般馬達設計者或使用者皆關注此參數的大小，若能事先量測，便可作為設計馬達控制器或挑選馬達的參考。本文利用透過驅動 IC(BA6849) 與 AD/DA 卡控制馬達，並利用馬達在單相旋轉時候的特性，快速的量測出馬達的扭矩常數。

在三相直流無刷馬達製造方面，鐵心繞完線圈後，三相線圈的繞組阻抗是否相同，也是一個相當重要的檢測。當三相線圈繞組相近時，馬達的線性度會較佳，因此控制會比較容易，故可以利用量測馬達的三相線圈繞組，作為檢測馬達的依據。透過商品化的 LCR METER 量測馬達阻抗，給予外部偏壓，使其激磁電流為一交流訊號加直流偏壓，可使馬達趨於穩定，此時量測馬達阻抗的結果較為正確。

The Parameter Estimation of the Three-phase DC Brushless Motor

Student : Tien-Wei Kao

Advisor : Dr. Shir-Kuan Lin

Department of Electrical and Control Engineering

National Chiao Tung University

ABSTRACT

There are eleven pins connecting to the motor driver in three-phase direct current brushless motor(DCBM). The proposed method in pin identification categorizes these eleven pins into three groups. The first group contains three pins of the three-phase coil . The second group contains two pins of the three-phase hall sensor source. The third group contains six pins of the three-phase hall sensor signal. A testing voltage can be supply to any one of the eleven pins. Because of the difference in the connection relationship of eleven pins, the eleven pins will be divided into two sets, three-phase coil and three-phase hall sensor. Next, any two of the eight pins of three-phase hall sensor are connecting to two testing voltages. The measured voltage signals of other pins are different according to distinctive testing condition, so two pins of the three-phase hall sensor source can be verified. Finally, the outputs of three-phase hall sensors can be verified from the signals of three-phase back electromotive forces when the DCBM rotates by manual.

The torsion constant(or called the reaction EMF constant) in DCBM relates to value of the torque, rotational speed that can be operated, and the performance of the motor. Therefore, the motor designer or user concern about this constant very much. If this constant can be measured in advance, the motor designer can take it as reference when designing motors. The proposed method in measuring torsion constant uses driver IC(BA6849) and AD/DA card to measure the constant. By the characteristic of DCBM rotating in single-phase mode, the torsion constant can be measured correctly and efficiently.

As the respect of manufacturing DCBM, measuring the values of resistance and inductance of three-phase coil is also an important test. After winding the coils on the iron of DCBM, the impedance of three-phase coil should match with each other. Hence, the linearity and controllability of DCBM will be better. The proposed method in measuring the impedance of three-phase coil use LCR METER to finish the test. Supplying a DC bias to the measuring AC current to the three-phase coil, then DCBM will be locked in the same position. As a result, measuring the impedance of three-phase coil can be more accurate.



目錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
目錄	iii
圖例目錄	vi
表格目錄	x
第一章 緒論	1
1.1 研究動機	1
1.2 傳統方法	3
1.3 論文架構	4
第二章 基本知識介紹	5
2.1 馬達結構介紹	5
2.2 馬達驅動原理	7
2.3 馬達的數學模型	18



2.4 NI PCI-6052E AD/DA 卡功能簡介	19
第三章 理論推導及實驗方法	23
3.1 馬達腳位自動識別法則	23
3.2 馬達腳位自動識別實驗方法	32
3.3 馬達扭矩常數估測的理論推導	38
3.4 馬達扭矩常數估測的實驗方法	41
3.5 馬達電阻與電感量測的理論推導	43
3.6 馬達電阻與電感量測的實驗方法	44
第四章 實驗機台及實驗結果	46
4.1 馬達腳位自動識別	46
4.2 馬達扭矩常數的量測	58
4.3 馬達電阻與電感的量測	63
第五章 實際產品應用	65
5.1 馬達腳位自動識別機台	65
5.2 馬達扭矩常數量測機台	75
5.3 馬達電阻與電感量測機台	79
5.4 馬達轉速與電流量測機台	82
第六章 結論與未來發展	84
6.1 結論	84
6.2 未來發展	85

圖例目錄

2.1	馬達的轉子與定子	6
2.2	馬達繞組出線兩種方式：(a) 三線式；(b) 四線式	6
2.3	馬達內部零件圖	7
2.4	機械角與電氣角相對位置圖	8
2.5	轉子與定子初始位置示意圖 ($\theta_r = 0^\circ$)	8
2.6	在 a 、 b 、 c 三個定子的位置量到的 K_t 波形	10
2.7	任意通兩相的 K_t 波形	11
2.8	120 度方波電壓驅動的轉矩漣波	12
2.9	三相皆導通的 K_t 波形	13
2.10	180 度方波電壓驅動的轉矩漣波	14
2.11	三相霍爾感測器與三相定子的相對位置	15
2.12	霍爾感測器之輸出訊號 (120 度驅動)	16
2.13	霍爾感測器之輸出訊號 (180 度驅動)	17
2.14	PCI-6052E AD/DA 卡	19
2.15	PCI-6052E 的接線盒及轉接線	19
3.1	馬達霍爾感測器配置圖	27
3.2	霍爾感測器之電阻模型	28
3.3	並聯型霍爾感測器配置之電阻模型	29
3.4	PIN4 與 PIN5 之間電阻圖	30

3.5	PIN5 與 PIN6 之間電阻圖	30
3.6	PIN5 與 PIN7 之間電阻圖	31
3.7	PIN4 與 PIN11 之間電阻圖	31
3.8	PIN5 與 PIN7 接上 2V 及 GND 後等效電路圖	35
3.9	馬達與驅動器的接線圖	38
3.10	馬達在單相旋轉模式下與驅動器的接線圖	39
3.11	單相旋轉改造電路示意圖	42
3.12	電阻與電感量測示意圖	44
4.1	腳位識別機台示意圖	46
4.2	三相線圈電壓接腳任一支接到 2V 擷取電壓圖	47
4.3	八支霍爾接腳任一支接到 2V 擷取電壓圖	48
4.4	2V 接到 PIN4, GND 接到 PIN5	49
4.5	GND 接到 PIN4, 2V 接到 PIN5	50
4.6	2V 接到 PIN5, GND 接到 PIN6	51
4.7	2V 接到 PIN5, GND 接到 PIN7	52
4.8	2V 接到 PIN4, GND 接到 PIN11	53
4.9	開路旋轉定義三相線圈電壓接腳	54
4.10	同一組的霍爾感測器輸出為反相波形, 不同組則否	55
4.11	霍爾輸出訊號 H_c^o 、 H_b^o 和 H_a^o 與 E_a 的關係	56
4.12	霍爾輸出訊號 $-H_c^o$ 、 $-H_b^o$ 和 $-H_a^o$ 與 E_a 的關係	56
4.13	腳位自動識別實驗測試板	57
4.14	扭矩常數量測機台示意圖	58
4.15	扭矩常數量測機台內部電路示意圖	58
4.16	單相旋轉下三相電壓波形圖	61
4.17	$V_w(t)$ 和積分過後 Ψ 的波形	62

4.18 扭矩常數實驗測試板	62
4.19 電阻與電感量測機台示意圖	63
5.1 馬達腳位自動識別機台實體	66
5.2 馬達與接線板連接圖	66
5.3 馬達腳位自動識別機台之視窗化操作介面	67
5.4 腳位自動識別步驟一流程圖	68
5.5 找出三相線圈電壓接腳	68
5.6 腳位自動識別步驟二流程圖	70
5.7 找出霍爾感測器的供應電源兩接腳	71
5.8 腳位自動識別步驟三流程圖（一）	72
5.9 腳位自動識別步驟三流程圖（二）	73
5.10 所有接腳定義完成	74
5.11 不同馬達腳位自動識別結果	74
5.12 馬達扭矩常數量測機台實體	75
5.13 馬達與轉接板連接圖	76
5.14 馬達扭矩常數量測機台的電路板	76
5.15 馬達扭矩常數量測機台之視窗化操作介面	77
5.16 馬達扭矩常數量測流程圖	78
5.17 馬達扭矩常數與電壓常數量測結果	79
5.18 馬達電阻與電感量測機台實體	80
5.19 馬達與 LCR METER 測試勾連接圖	80
5.20 馬達電阻與電感量測機台之視窗化操作介面	81
5.21 馬達電阻與電感量測流程圖	81
5.22 速度控制方塊圖	82
5.23 馬達轉速與電流量測之視窗化操作介面	83

5.24 調整增益值來符合不同狀況	83
-----------------------------	----



表格目錄

2.1	120 度方波電壓驅動的電流切換時間表	11
2.2	180 度方波電壓驅動的電流切換時間表	13
2.3	120 度方波電壓驅動之換相真值表	16
2.4	180 度方波電壓驅動之換相真值表	17
3.1	馬達腳位定義表	23
3.2	開路狀態下三相感應電動勢之間關係	25
3.3	正相霍爾輸出訊號和 E_a 的相位及零交越點順序關係	26
3.4	反相霍爾輸出訊號和 E_a 的相位及零交越點順序關係	26
3.5	BA6849 的換相真值時序表	41
4.1	三種不同方法量測馬達線電阻結果	63
4.2	三種不同方法量測馬達線電感結果	64

第一章

緒論

1.1 研究動機



隨著自動化與資訊產業的興起，全世界馬達的需求量越來越大，其中小型馬達年產量的增加更是明顯。又以三相直流無刷馬達 (Three-phase DC Brushless Motor) 的應用最為廣泛，因其控制性與響應優越，所以廣被工業界所採用，例如光碟機、硬碟機，以及印表機等相關電子產品。而不同馬達製造廠所出廠的馬達，其接腳定義不盡相同。為了想要了解不同馬達的特性，故提出三相直流無刷馬達腳位的自動識別法則，判斷出正確的接腳後，用以量測馬達的參數或控制馬達轉速。

目前市售光碟機馬達雖有十四支、十二支或十一支等不同數目的接腳，但是都只用到十一支接腳與光碟機的驅動器相連。設計馬達的研究人員，需要做的是將對手的馬達性能，與自己所做的馬達相比較，藉以得知兩顆馬達之間的差距，來作為品管或檢測的基準。為了量測對手物的馬達特性，當然得事先得知馬達的每一支接腳，每一支接腳都有不同的物理意義，假使接錯馬達的接腳，有可能使馬達受損或是霍爾感測器燒掉，當然馬達也無法正常旋轉，因此也無法量測所需的參數，例如轉速、電流、扭矩常數等。

購買市售的光碟機後，將馬達拆下，當時並不知道馬達各個接腳的定義，故必須使用試誤法來測試，以求得馬達正確的接腳順序，得知腳位後，再將正確的接腳順序接到自己的驅動器上，測試後作為與本身馬達性能的比對。試誤法會耗費掉相當多的時間，因此發展了一套自動馬達腳位識別的法則，用來加速分析對手物馬達的時間。馬達的十一支接腳有各自不同的物理定義，接腳間的電阻值也相異。透過一種自動檢測腳位的方式，可將光碟機馬達的十一支接腳快速的判別出來。當要分析對手物的馬達時，可將光碟機馬達接上機台做測試，即可找出正確的接腳定義。目前僅有一篇論文探討馬達腳位的自動識別 [4]。

本文中提到為了知道光碟機馬達的十一支接腳定義，在開路狀態下給予馬達接腳不同電壓，以 AD/DA 卡擷取電壓訊號，透過自行設計的電路板，將訊號擷取並計算，最後將馬達接腳正確的給予定義。

扭矩常數 K_t 關係到三相直流無刷馬達本身的性能、出力大小與可操作的工作轉速，所以不管是馬達設計者或是其使用者都非常在意它，若能事先量測，便可作為設計馬達控制器或挑選馬達的參考，因此有許多研究都在討論如何準確的估測扭矩常數 [1][2][3]。

本文中使用讓三相直流無刷馬達在單相的旋轉模式下的特性，將扭矩常數 K_t 快速且精確的計算出來，透過 AD/DA 卡的控制、驅動 IC(BA6849) 以及電路板的整體架構，驗證計算出來的扭矩常數 K_t 。

馬達的三相線圈繞組相近時，馬達的線性度會較佳，因此控制會比較容易，故可以利用量測馬達的三相線圈繞組，作為馬達檢測的依據。傳統通常使用鎖住轉子測試法來量測馬達的阻抗，必須製作夾具，且容易傷害到馬達，直接使用 LCR METER 量測，又可能因為轉子震動產生的感應電動勢，使得量測結果錯誤。

本文提出量測三相直流無刷馬達的阻抗時，利用商品化的 LCR METER，提供一具有一直流偏壓的交流弦波電流給馬達線圈繞組，馬達轉子即可鎖在固定的位置上，再透過 GPIB 通訊卡來擷取其電阻與電感值，驗證此方法比傳統的方法快速且便利。

1.2 傳統方法

目前僅有一篇論文 [4] 探討如何檢測馬達腳位，其缺點為：

- (1) 需量測電阻來將馬達的腳位分成三類，共要量測 11×11 組的電阻，無法完全自動化，且相當浪費時間；
- (2) 需利用積分方法將霍爾感測器正負訊號接腳的組別正確的歸類；
- (3) 需通以單相電流才能檢測出霍爾感測器正負訊號接腳的極性。

本文提出一種新了腳位檢測方式，其優點為：

- (1) 通以一直流電源正極於 11 支接腳的任一接腳，即可分辨出兩類：將三相線圈電壓接腳與其他八支霍爾接腳區分開來。
- (2) 將直流電源正負極接於其他八支接腳的任意兩支，可判別出霍爾感測器的供應電源正負極的兩支腳位。
- (3) 利用任意正向旋轉時量測出的腳位電壓，將霍爾感測器的所有訊號接腳兩兩相加，結果為零即為同組的霍爾感測器的正負訊號接腳。
- (4) 利用同組的霍爾感測器的正負訊號接腳相減所得的輸出波形，依零交越點順序，正確的將三組霍爾感測器的正負訊號接腳配對。

傳統量測扭矩常數的方式 [1] 如以下所述，此方法的缺點為：

- (1) 需要有另一伺服驅動系統；
- (2) 精密的速度感測器；
- (3) 待測馬達需要與伺服馬達對心連接，相當的不方便；

本論文利用一種鑑別方式，根據參考文獻 [8]，其優點有：

- (1) 不需要外掛一顆伺服馬達；
- (2) 不需鎖定馬達旋轉速度；
- (3) 不用更換定子，只需快速更換轉子，即可進行檢測；
- (4) 中間不需要有與伺服馬達對心的步驟。

一般量測馬達電阻與電感時，為求量測精準，通常必須製作夾具，使馬達轉子固定在同一個位置上，避免轉子振動產生的量測誤差；假使直接使用 LCR METER 來量測馬達的電阻與電感，其送出的交流激磁電流會使馬達轉子振動，而產生感應電動勢，亦會造成量測結果的錯誤。

本論文提出一種量測方式，根據參考文獻 [8]，只要透過 LCR METER 提供一具有直流偏壓的交流電流，其偏壓足以使馬達轉子不再振動，此時量測馬達電阻與電感，量測結果會較傳統方式快速且精確。

1.3 論文架構

本篇論文總共分爲六章，其中第一章將說明研究的方向；第二章將介紹本實驗所需用到的相關知識；第三章將說明新的鑑別方法；第四章將介紹實驗系統和實驗結果；第五章將介紹將理論應用到實際產品的開發；第六章將做一個的討論與總結。

本論文架構可分爲六大章節，分述如下。

第一章 緒論

先對研究背景及動機進行說明。

第二章 基本知識介紹

說明馬達的內部構造與啓動原理，以及實作時所用到控制卡的基本功能。

第三章 理論推導及實驗方法

對本論文所採用的理論以及實驗方法作詳細的推導與介紹。

第四章 實驗機台及實驗結果

介紹系統實作環境，並展示硬體電路以及成果。

第五章 實際產品應用

將本文所提出的理論應用到產品的開發。在此提出一些基本的功能，以及鑑別的流程。

第六章 結論與未來發展

將討論本系統之改善，提出未來產品開發的改進方向及建議。



第二章

基本知識介紹

爲了使讀者對本論文的實驗有更深入的了解，在此將對馬達的結構、驅動方式以及一些相關原理以及知識作基本的介紹，讓讀者能清楚了解之後的理論推導與實做的方法。



2.1 馬達結構介紹

本論文所討論的馬達爲九槽十二極的三相直流無刷馬達，九槽爲內部定子有九個槽；十二極爲外部轉子共十二極，如圖 2.1。外部轉子爲永久磁鐵所構成，因此每一極所占的角度爲 30 度機械角。內部定子由線圈纏繞鐵心所構成，線圈纏繞方式爲 Y 接，分別爲 a 、 b 、 c 三相線圈，繞組出線方式爲三線式。而鐵心兩邊的線圈各占 5 度機械角，槽與槽中心點間隔爲 40 度機械角；此外馬達定子上有三個霍爾感測器，用來偵測轉子和定子的相對位置，並回授訊號給驅動器，藉此驅動器切換改變電流的方向，產生一正向的力矩，馬達才能正常旋轉。

近幾年三相直流無刷馬達爲了實現薄型化以及省電化，已有廠商利用無感測型的三相直流無刷馬達取代具有感測器的三相直流無刷馬達，無感測型的三相直流無刷馬達的線圈繞組出線方式大都爲四線式，因此馬達三相線圈的中心線也必須有一出線，用來偵測定子線圈上的感應電動勢，達到換相的目的，定義電流流向中心相的方向爲正向，如圖 2.2。

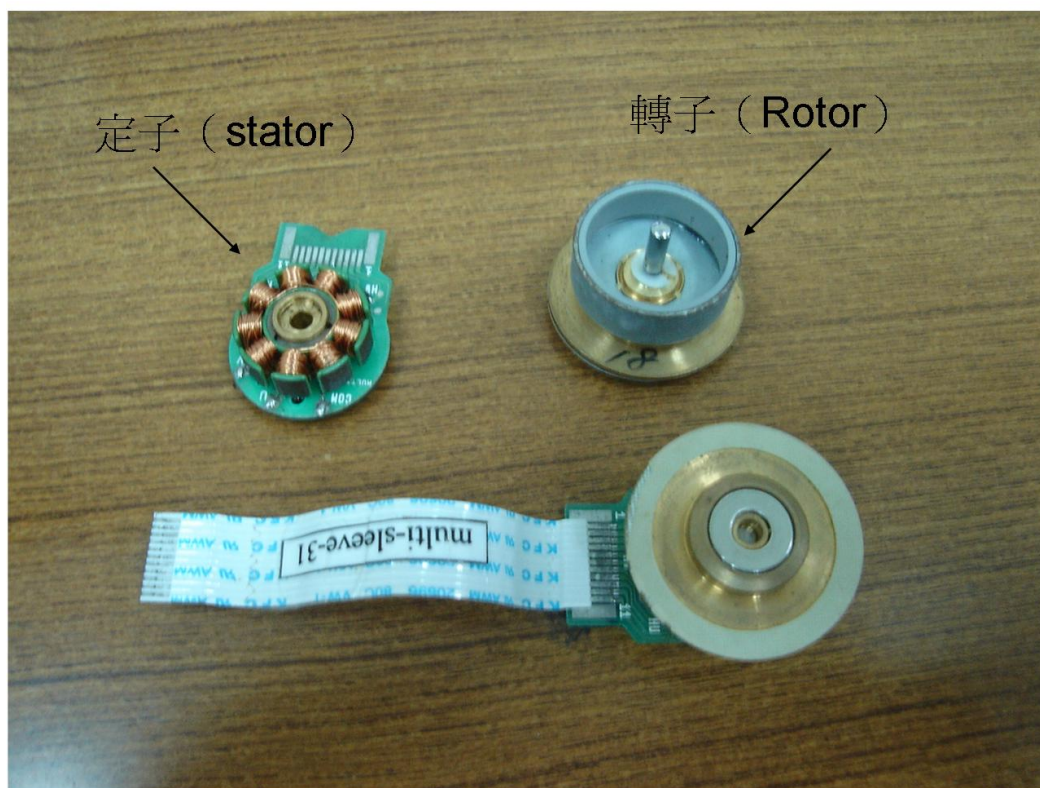


圖 2.1: 馬達的轉子與定子

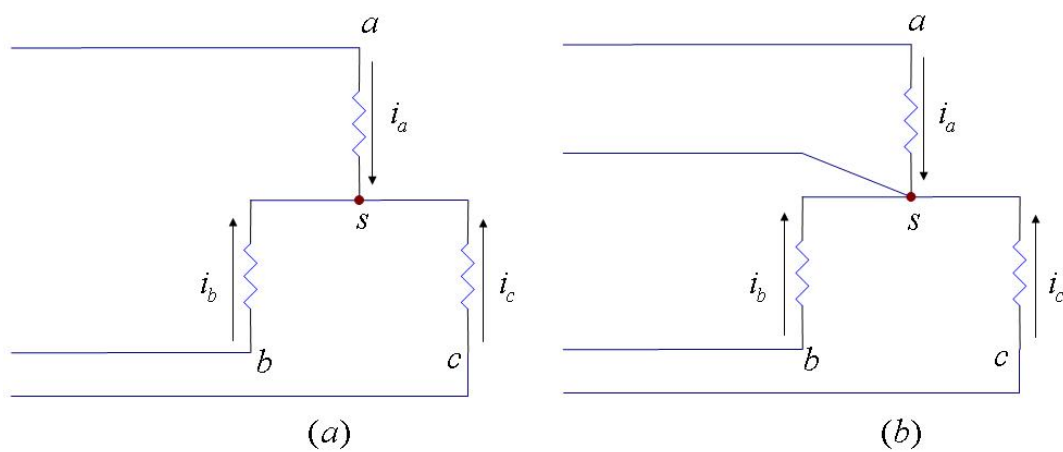


圖 2.2: 馬達繞組出線兩種方式：(a) 三線式；(b) 四線式

而馬達各零件的中英文名稱定義如下圖 2.3。

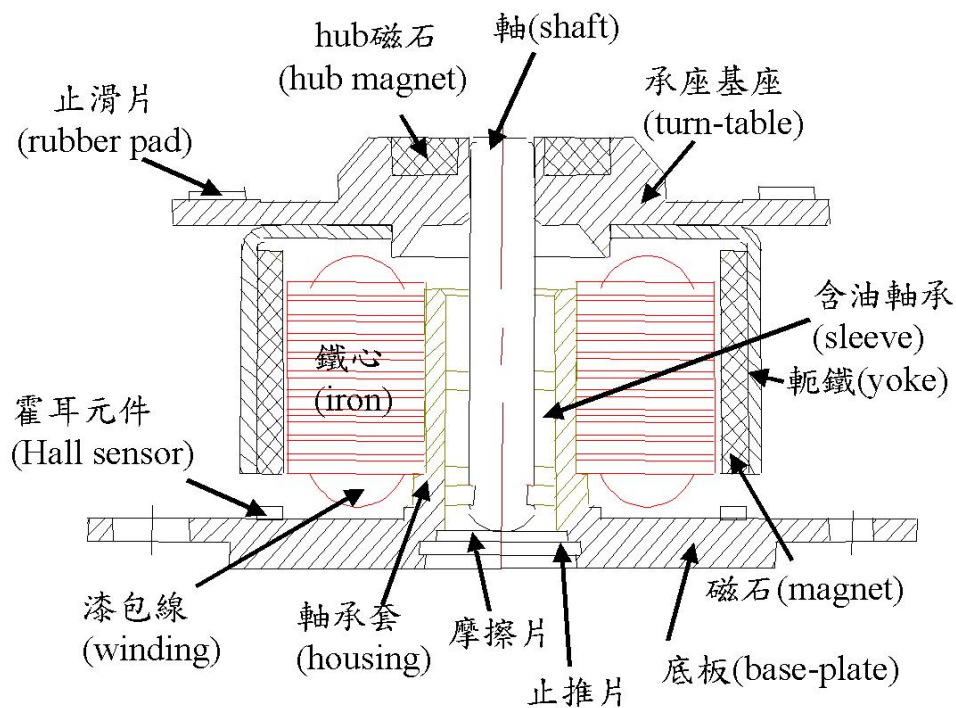


圖 2.3: 馬達內部零件圖

2.2 馬達驅動原理

馬達的轉子為永久磁鐵所構成，為了使馬達轉子能朝同一方向（順時針或逆時針）旋轉，在內部的定子上繞線圈，藉由外界的輸入電流造成定子磁場的改變，進而產生轉矩，來推動轉子。內部定子的磁場必須依照轉子位置而改變。通以定子上線圈電流產生磁場後，藉由磁場的交互作用力使馬達旋轉。

電氣角與機械角的關係：

九槽十二極的馬達在磁場循環上，每歷經一組 NS 極（機械角 60 度）便完成一個磁場（電場）週期，故知機械角 60 度相當於磁性（電氣）角 360 度， $\text{電氣角} / \text{機械角} = \text{馬達極數} / 2$ ，如圖 2.4。

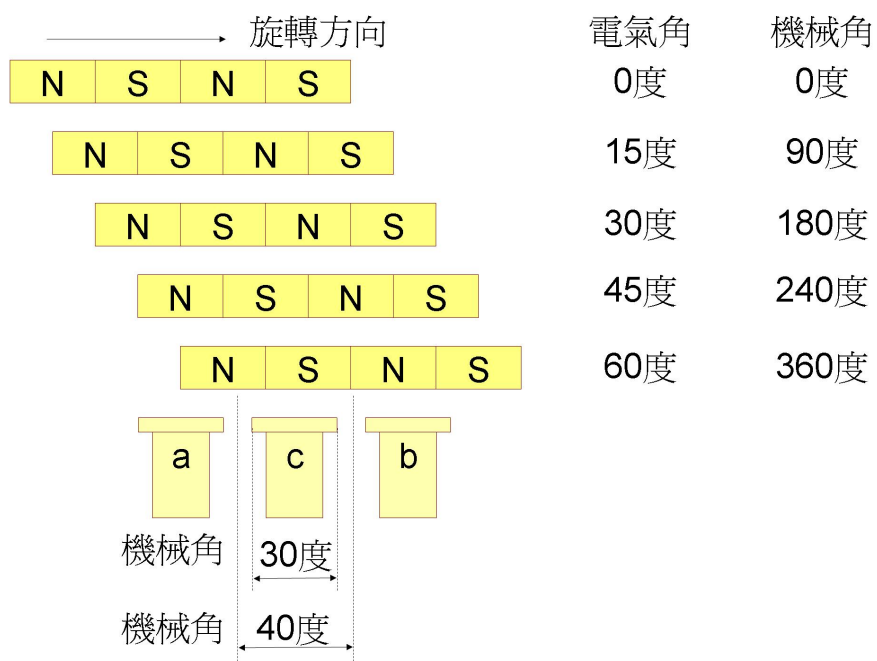
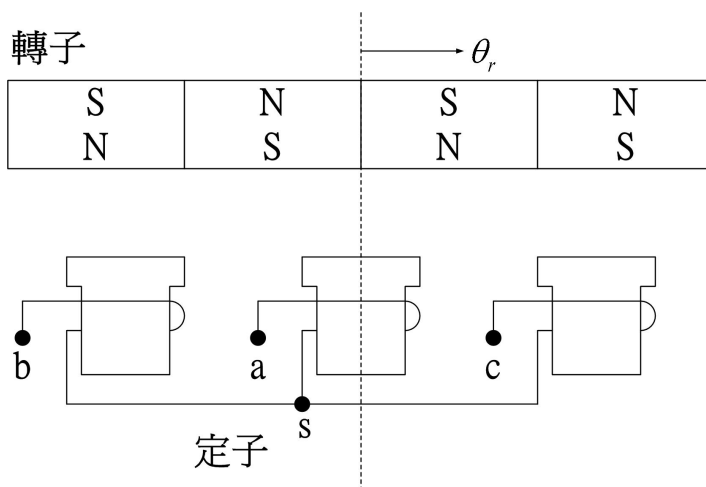


圖 2.4: 機械角與電氣角相對位置圖

定義馬達轉子與定子的初始位置如圖 2.5， $\theta_r = 0^\circ$ 的地方為轉子的 N-S 交界線與馬達定子 a 相的中心線重合的位置，此位置 ($\theta_r = 0^\circ$) 為以下所有討論的依據。

圖 2.5: 轉子與定子初始位置示意圖 ($\theta_r = 0^\circ$)

基本公式：

接下來介紹基本公式，已知佛來明左手定則為：

$$F = I \cdot L \times B = N I \cdot L \times B \quad (2.1)$$

F 為施力

I 定義為流經線圈的電流

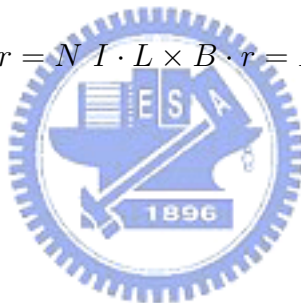
L 定義為線圈上受磁場感應的有效長度

B 定義為磁通密度

N 定義為假設匝數

而馬達輸出扭矩與電流的關係式為：

$$T = F \cdot r = N I \cdot L \times B \cdot r = K_t I \quad (2.2)$$



r 定義為力臂

K_t 定義為扭矩常數

磁通密度 B 與 θ_r 、 θ_s 有關：

$$B = B(\theta_r, \theta_s) = B_{max} \sin[P(\theta_r - \theta_s)/2] \quad (2.3)$$

P 為轉子上永久磁鐵的磁極數

θ_r 為轉子上對定子中點的角度差

θ_s 為定子上某一點對定子中點的角度差

根據式（2.2）、式（2.3），可得知馬達的扭矩常數 K_t 會隨著轉子轉動而成弦波變化。

$$K_t = N B_{max} L r \cos(P \theta_r/2) \quad (2.4)$$

圖 2.6 為當馬達旋轉時，分別在 a, b, c 三個定子的位置，所量到單相 K_t 隨著電氣角與機械角變化的波形圖，圖上 K_t 的大小已單位化。由圖 2.4 已知電氣角 / 機械角 = 6，所以電氣角跑了 360 度，機械角只跑了 60 度，也就是說馬達只轉了 60 度。

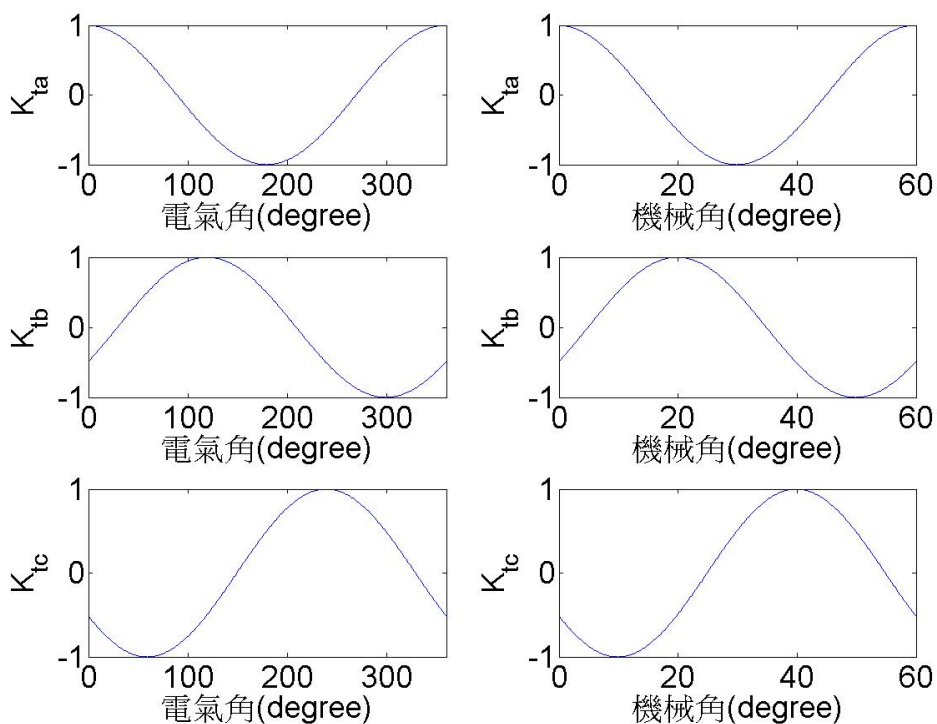


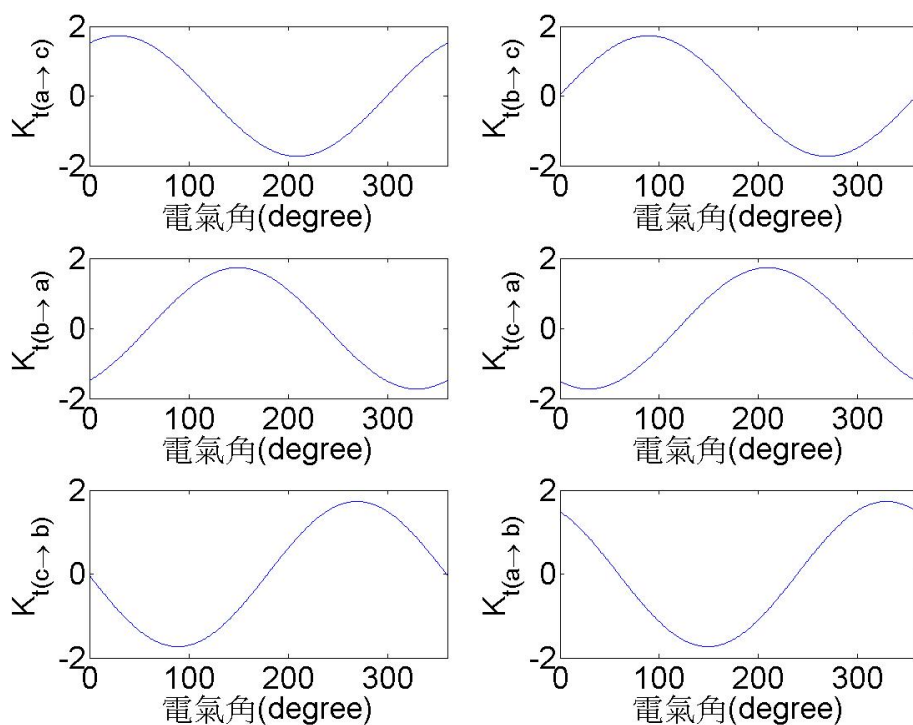
圖 2.6: 在 a, b, c 三個定子的位置量到的 K_t 波形

馬達驅動方式：

馬達的驅動方式可分為依照三相線圈導通的方式不同，分為電壓驅動跟電流驅動兩種。而常用的電壓驅動模式的可以分為以下兩種：

(1) 120 度方波電壓驅動

三相線圈中，任意導通兩相，另一相為開路，例如：通 ac 兩相，電流由 a 相流到 c 相，此時 b 相為開路狀態，此時扭矩常數表示為 $K_t = K_{ta} - K_{tc} \equiv K_{t(a \rightarrow c)}$ 。圖 2.7 為 a, b, c 三相定子線圈任意通兩相電流的情況下， K_t 隨著電氣角變化的波形圖。

圖 2.7: 任意通兩相的 K_t 波形

由式 (2.4) 可知，若要使馬達的輸出扭矩為最大值， K_t 必須維持最大值。在 120 度方波電壓驅動的模式下，藉由圖 2.7，可得到電流切換的電氣角位置如表 2.1。

表 2.1: 120 度方波電壓驅動的電流切換時間表

狀態	導通電流方向	電氣角
一	$a \rightarrow c$	[0, 60]
二	$b \rightarrow c$	[60, 120]
三	$b \rightarrow a$	[120, 180]
四	$c \rightarrow a$	[180, 240]
五	$c \rightarrow b$	[240, 300]
六	$a \rightarrow b$	[300, 360]
電流切換點 0, 60, 120, 180, 240, 300, 360		

根據馬達所在的電氣角位置，選擇此時扭矩最大的導通電流方向，便可使馬達以最大扭矩旋轉，例如：馬達位於電氣角 $[0, 60]$ 之間 ($\theta_r = [0, 60]$)，此時選擇導通電流為 a 流相到 c 相，馬達即以最大扭矩旋轉。對照圖 2.7 及表 2.1，可繪出馬達旋轉 360 電氣角（60 度機械角）的轉矩漣波如圖 2.8。

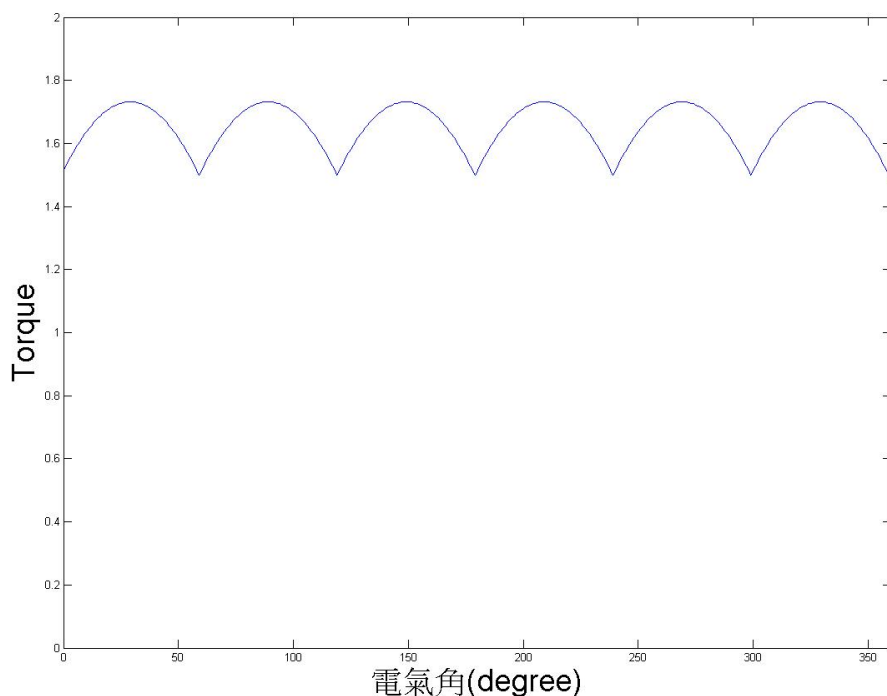
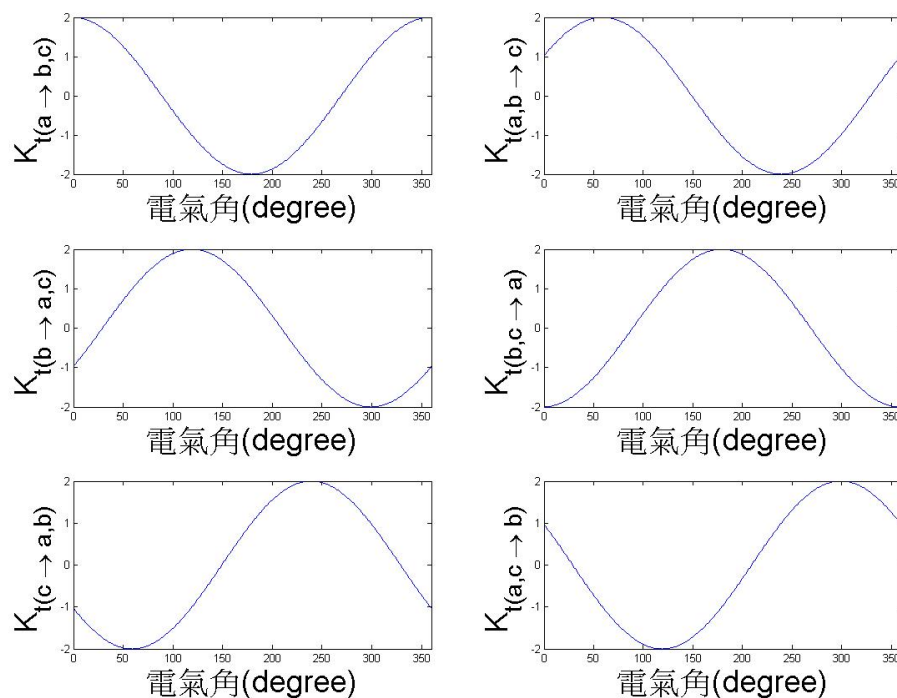


圖 2.8: 120 度方波電壓驅動的轉矩漣波

(2) 180 度方波電壓驅動

三相線圈中，三相皆為導通狀態，有兩種模式：電流由一相線圈流向其他兩相線圈；或是電流由其他兩相線圈流向剩下的一相線圈。例如：電流由 a 相流向 b 、 c 兩相，此時扭矩常數表示為 $K_t = K_{ta} - (K_{tb} + K_{tc}) \equiv K_{t(a \rightarrow b,c)}$ 。；而電流由 a 、 b 兩相流向 c 相，扭矩常數表示為 $K_t = (K_{ta} + K_{tb}) - K_{tc} \equiv K_{t(a,b \rightarrow c)}$ 。圖 2.9 為 a ， b ， c 三相定子線圈皆導通的情況下， K_t 隨著電氣角變化的波形圖。

圖 2.9: 三相皆導通的 K_t 波形

同理在 180 度方波電壓驅動的模式下，藉由圖 2.9，可得到電流切換的電氣角位置如表 2.2。

表 2.2: 180 度方波電壓驅動的電流切換時間表

狀態	導通電流方向	電氣角
一	$a \rightarrow b,c$	$[-30, 30]$
二	$a,b \rightarrow c$	$[30, 90]$
三	$b \rightarrow a,c$	$[90, 150]$
四	$b,c \rightarrow a$	$[150, 210]$
五	$c \rightarrow a,b$	$[210, 270]$
六	$a,c \rightarrow b$	$[270, 330]$
電流切換點 -30, 30, 90, 150, 210, 270, 330		

根據馬達所在的電氣角位置，選擇此時扭矩最大的導通電流方向，便可使馬達以最大扭矩旋轉。對照圖 2.9 及表 2.2，可繪出馬達旋轉 360 電氣角（60 度機械角）的轉矩漣波如圖 2.10。

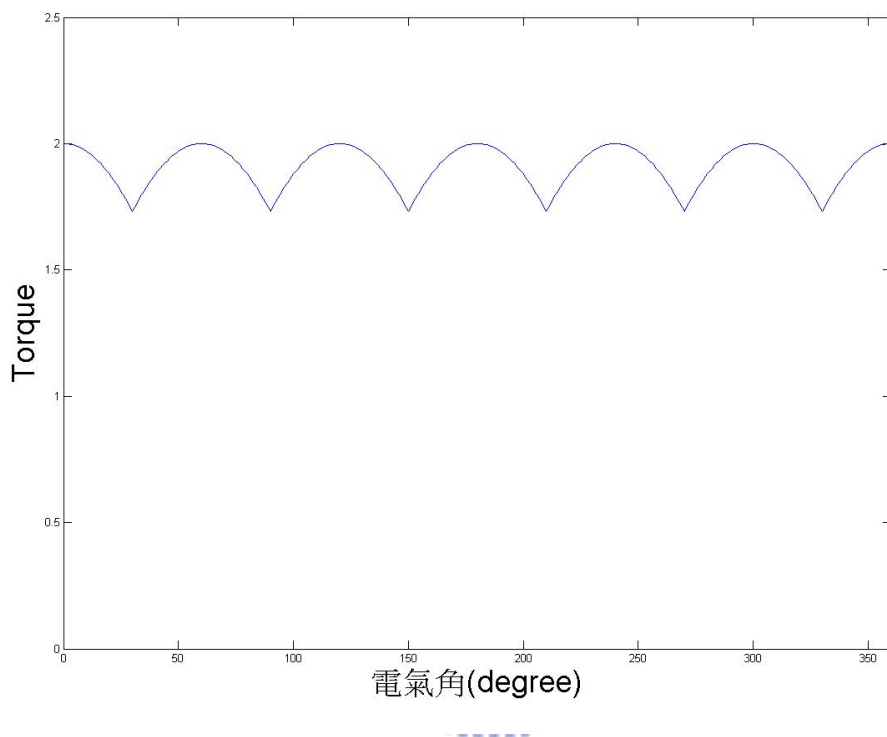


圖 2.10: 180 度方波電壓驅動的轉矩漣波

得知電流切換點後，爲了要在適當的時機產生上述驅動波形，便透過馬達定子上的霍爾感測器得知磁場的變化，來偵測馬達轉子與定子的相對位置。霍爾感測器利用霍爾效應，感測磁通密度之大小並隨之產生相對應變化之電壓值。已知當轉子磁石轉動時，對同一位置而言其所感應之磁通密度將隨之作變化，隨著霍爾感測器位置不同，其產生之感測訊號與扭矩常數之波形將會隨之具備不同之相位差，此相位差在安置霍爾感測器、或是設計驅動電路時必須預作考量，方能協調霍爾感測器的訊號與驅動電路換相，得到適當的驅動電訊。換相真值表的功能，便在於定義霍爾感測器訊號與輸出驅動訊號之相對關係。驅動馬達時，通常採用三顆霍爾感測器產生三組霍爾感測器訊號，以提供三相訊號換相使用。

已知三相電壓訊號相差為 120 度電氣角，對十二極轉子而言，機械角為 20 度，又落後 120 度等於超前 240 度（機械角 40 度），故對十二極的轉子而言，一般安置霍爾感測器以兩兩相間機械角 20 度或 40 度居多。九槽十二極的馬達，每槽所佔機械角為 40 度，為考慮安置霍爾感測器於槽齒間較為方便，故亦以霍爾感測器相間機械角 40 度作討論，配合圖 2.11 的轉子與定子初始位置定義，安置三顆霍爾感測器，三顆霍爾感測器相對於三相定子線圈的關係如圖 2.11。

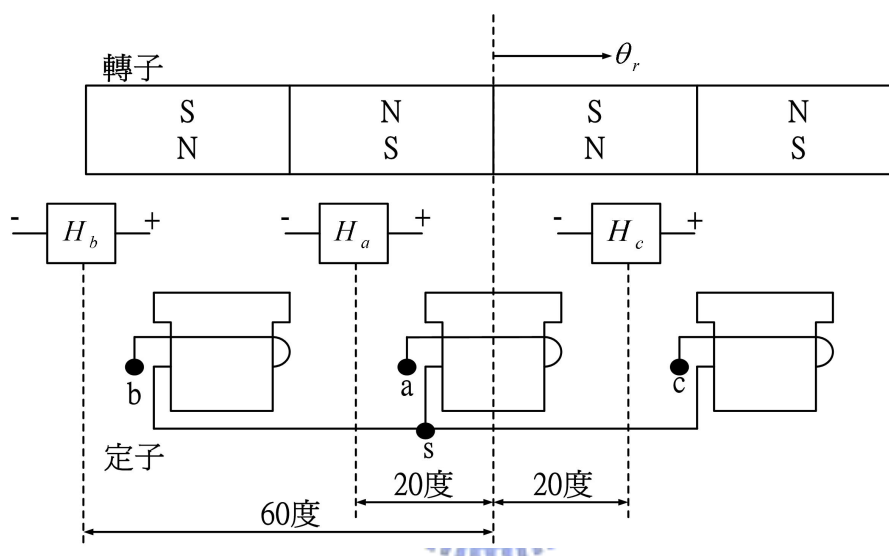


圖 2.11: 三相霍爾感測器與三相定子的相對位置

由上圖可推得三相霍爾輸出訊號 H_a^o 、 H_b^o 和 H_c^o 如圖 2.12 所示。 $H_a^o \equiv H_a^+ - H_a^-$ 、 $H_b^o \equiv H_b^+ - H_b^-$ 而 $H_c^o \equiv H_c^+ - H_c^-$ 由於三顆霍爾感測器其位置彼此相差 40 度機械角，故三個霍爾輸出訊號亦為相差 120 度電器角的弦波。

將霍爾輸出訊號劃分為 High、Low 兩種準位，則三相霍爾輸出訊號以 H、L 兩個準位表示，相對於時序變化分別示為 H1、H2 和 H3，亦繪製於圖 2.12 中。

對照表 2.1，發現 $H3 - H1$ 、 $H1 - H2$ 和 $H2 - H3$ 的訊號與 120 度方波電壓驅動時的 a 相、b 相和 c 相的準位時序圖相同，故可整理後得到 120 度驅動的換相真值表如表 2.3。

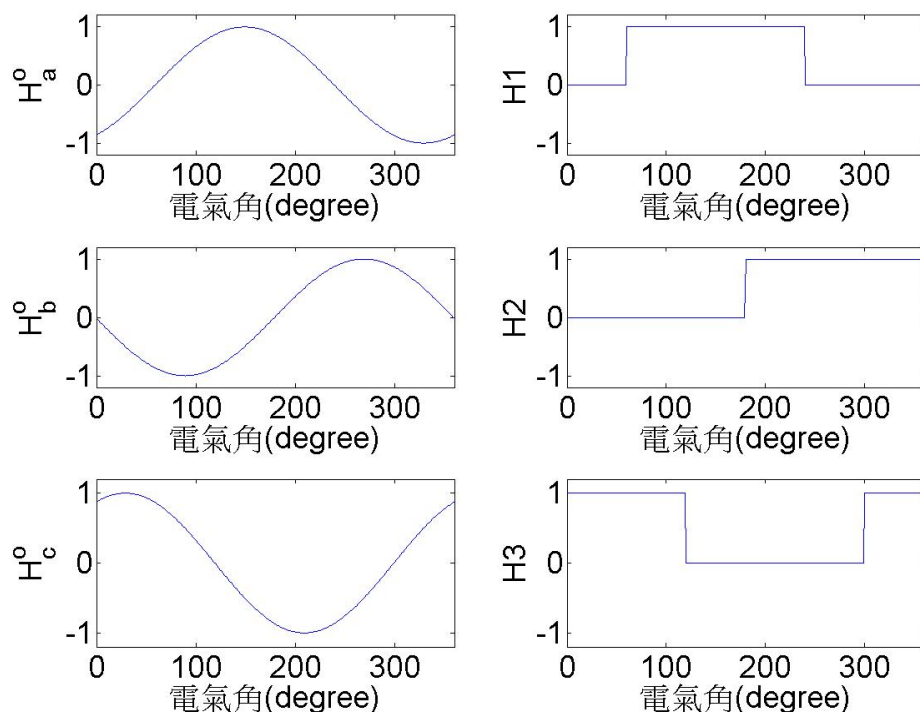


圖 2.12: 霍爾感測器之輸出訊號 (120 度驅動)

表 2.3: 120 度方波電壓驅動之換相真值表

		三相電壓			霍爾輸出訊號		
狀態	導通電流方向	a 相	b 相	c 相	$H3 - H1$	$H1 - H2$	$H2 - H3$
一	$a \rightarrow c$	High	Open	Low	H	M	L
二	$b \rightarrow c$	Open	High	Low	M	H	L
三	$b \rightarrow a$	Low	High	Open	L	H	M
四	$c \rightarrow a$	Low	Open	High	L	M	H
五	$c \rightarrow b$	Open	Low	High	M	L	H
六	$a \rightarrow b$	High	Low	Open	H	L	M

三相霍爾輸出訊號兩兩相減得到 $H_c^o - H_a^o$ 、 $H_a^o - H_b^o$ 和 $H_b^o - H_c^o$ ，將此三個訊號劃分為 High、Low 兩種準位，其相對於時序變化以 H 、 L 兩個準位示為 $H4$ 、 $H5$ 和 $H6$ ，如圖 2.13。

對照表 2.2，發現 $H4$ 、 $H5$ 和 $H6$ 的訊號與 180 度方波電壓驅動時的 a 相、 b 相和 c 相的準位時序圖相同，故可整理後得到 180 度驅動的換相真值表如表 2.4。

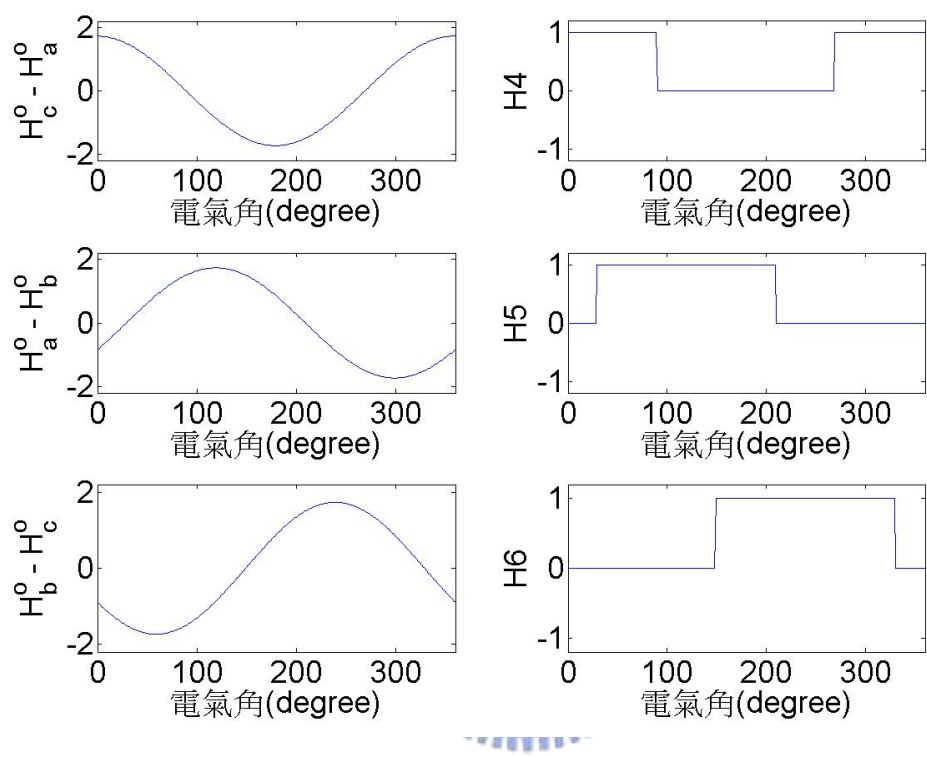


圖 2.13: 霍爾感測器之輸出訊號（180 度驅動）

表 2.4: 180 度方波電壓驅動之換相真值表

		三相電壓			霍爾輸出訊號		
狀態	導通電流方向	a 相	b 相	c 相	$H4$	$H5$	$H6$
一	$a \rightarrow b,c$	High	Low	Low	H	L	L
二	$a,b \rightarrow c$	High	High	Low	H	H	L
三	$b \rightarrow a,c$	Low	High	Low	L	H	L
四	$b,c \rightarrow a$	Low	High	High	L	H	H
五	$c \rightarrow a,b$	Low	Low	High	L	L	H
六	$a,c \rightarrow b$	High	Low	High	H	L	H

根據上述的表 2.3 及表 2.4，以霍爾輸出訊號，作為驅動器切換的依據，能讓馬達在 120 度或 180 度驅動模式下旋轉。需注意表 2.3 及表 2.4 所列之換相之真值表乃針對圖 2.11 中霍爾感測器的位置而得，根據霍爾感測器位置的不同，所建立的換相真值表也會不同。至於電壓或電流驅動，其差異僅在於驅動電路製作方式之不同，則不另作區別。

2.3 馬達的數學模型

為了在以下章節說明馬達的特性可以比較容易些，在此先列出馬達的駕馭方程式，如下二式：

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & -M & -M \\ -M & L_s & -M \\ -M & -M & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{bmatrix} + \frac{2\omega_r K_e}{P} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

式 (2.5) 為馬達的電氣方程式，主要由克西荷夫電壓定律推導而來，式中 V_{as} ， V_{bs} ，和 V_{cs} 分別為馬達的 a ， b ， c 三相的相電壓， R 為馬達的相電阻， i_a ， i_b ，和 i_c 分別為馬達的 a ， b ， c 三相的相電流， L_p 為馬達的相自感， M 為馬達相間的互感， ω_r 為馬達的轉速 (以電氣角表之)， K_e 為馬達電壓常數， P 為馬達永磁極數 θ_r 為馬達轉子的角位移 (以電氣角表之)，而各相電流自相端點流入中性點 s 的方向定義為正電流 (參考圖 2.2)。而馬達的機械方程式如下式表示：

$$\begin{aligned} T_e &= K_t \left[(i_a - \frac{i_b}{2} - \frac{i_c}{2}) \cos(\theta_r) + \frac{\sqrt{3}}{2} (i_b - i_c) \sin(\theta_r) \right] \\ &= \frac{2J}{P} \frac{d\omega_r}{dt} + \frac{2B_m}{P} \omega_r + T_L \end{aligned} \quad (2.6)$$

式 (2.6) 主要由牛頓運動定律推導而來，式中 K_t 為馬達的扭矩常數， T_e 為馬達的出力扭矩， J 為馬達慣量， B_m 為馬達的阻尼係數， T_L 為負載。在 m.k.s. 制下， $K_e = K_t$ 。

2.4 NI PCI-6052E AD/DA 卡功能簡介

本實驗所使用的 PCI-6052E AD/DA 卡 (圖 2.14) 是由美商國家儀器股份有限公司所出產的 AD/DA 卡，它是一塊高速度，高效率，多功能，PCI 介面的類比輸入輸出卡。且提供 Visual C++ 的函式庫供使用者呼叫。



圖 2.14: PCI-6052E AD/DA 卡

PCI-6052E 提供一個外接式的接線盒及轉接線 (圖 2.15)，可將 AD/DA 卡的所有訊號外接到實驗板，以便於實驗時的測試。而轉接盒上並有示意圖將所有通道列出，說明每個通道的功能及使用。



圖 2.15: PCI-6052E 的接線盒及轉接線

其規格如下：

一、類比輸出：

1. 兩個類比輸出；
2. 最高的更新頻率可以到達 333kS/s；
3. 解析度 16bits；
4. 輸出範圍可以有 -10V 10V，0V 10V，也可以自訂輸出電壓的上下限；
5. 輸出阻抗：0.1 歐姆。

二、類比輸入：

1. 十六個通道的類比輸入；
2. 最高的更新頻率可以到達 333kS/s；
3. 解析度 16bits；
4. 輸入範圍可以有 -10V 10V，0V 10V；
5. 輸入阻抗：100G 歐姆；
6. 三種觸發模式。

三、數位輸入輸出：

1. 八個可程式宣告的數位輸入輸出端。

四、計時器：

1. 兩組可上數下數的計時器；
2. 內部提供的基準頻率：20MHz 和 100kHz；
3. 外部最高可以輸入的基準頻率：20MHZ。

五、類比觸發：

1. 解析度：12bits；
2. 軟體控制正緣或負緣觸發；
3. 頻寬：700kHz；
4. 阻抗：10K 歐姆。

六、系統同步介面：

1. 可同時控制多張 ADDA 卡。

PCI-6052E 提供了許多範例程式讓使用者呼叫，當要使用這些函式前，必須先將 `nidaq.h` 以及 `nidaqex.h` 這兩個檔加到程式裡面，如此才能夠使用 PCI-6052E 所提供的函式庫。以下介紹基本常用到的函式命令：



一、初始設定：

首先必須宣告 AD/DA 卡卡號：deviceNumber = 1。

二、類比輸出：

AI_Configure ()：

設定類比輸出的通道、極性和參考電壓值。

AO_VWrite ()：

可自行在函式內部設定欲輸出的電壓值，此電壓值必須在卡的輸出範圍內。

三、類比輸入：

AI_Configure ()：

設定類比輸入的通道數、輸入模式、電壓值範圍和極性等，必須要在開始類比輸入之前宣告完畢。

DAQ_Rate ()：

根據卡的基本頻率，設定類比輸入的取樣頻率及基本頻率。

SCAN_Setup ()：

類比輸入動作初始化，設定欲使用的通道數，通道號碼以及增益值。

SCAN_Start ()：

多通道類比輸入初始化，根據先前設定的取樣頻率，設定總共的取樣數。

DAQ_Check ()：

偵測多通道類比輸入是否完成，擷取完成後即不再執行此動作。

SCAN_Demux ()：

將所有取樣數依照之前設定的通道數重新依序排列。

DAQ_VScale ()：

擷取的取樣數原先擷取後為二進位，使用此函式將取樣數轉為可直接處理的電壓值。

四、數位輸出：

DIG_Prt_Config ()：

設定數位輸出的通道，設定為數位輸出模式。

DIG_Out_Prt () :

利用八個數位輸出通道，輸出設定的二進位數值。

五、計時器：**GPCTR_Control () :**

將計時器初始化，並設定操作計時器一或是計時器二。

GPCTR_Set_Application () :

設定計時器的量測範圍，在本文使用中，設定為量測一個方波的週期。

GPCTR_Change_Parameter () :

設定計時器的基本頻率，開始計數的數目，以及正源觸發計數等多種模式。

GPCTR_Watch () :

持續監控並累加計數的數目，直到計數完畢，並將計數的最後結果輸出。

利用上面所列舉的函式，可自行撰寫 Visual C++ 的程式，以操控 AD/DA 卡來達到功能，文中實驗皆設計視窗化的操作介面，供使用者直接在電腦螢幕上操作。



第三章

理論推導及實驗方法

3.1 馬達腳位自動識別法則

三相直流無刷馬達共有十一支接腳與驅動器相連接，如表 3.1所示：

表 3.1: 馬達腳位定義表

1	a 相線圈端點電壓接腳
2	b 相線圈端點電壓接腳
3	c 相線圈端點電壓接腳
4	霍爾感測器 H_a 的正訊號接腳 H_a^+
5	霍爾感測器 H_a 的負訊號接腳 H_a^-
6	霍爾感測器 H_b 的正訊號接腳 H_b^+
7	霍爾感測器 H_b 的負訊號接腳 H_b^-
8	霍爾感測器 H_c 的正訊號接腳 H_c^+
9	霍爾感測器 H_c 的負訊號接腳 H_c^-
10	霍爾感測器的正供應電源 H^+
11	霍爾感測器的負供應電源 H^-

如上表所示，每相線圈皆有一個與其相配對的霍爾感測器，例如 a 相線圈所配對的為霍爾感測器 H_a ，而 H^+ 和 H^- 為霍爾感測器的正負供應電源兩支接腳。

本文的目的在於事先未知馬達十一支接腳的定義，利用公式法則推導出馬達腳位自動識別的方法，再經由 AD/DA 卡擷取資料及電腦運算，快速檢測出十一支接腳的定義，節省人工試誤法的繁瑣步驟。

本論文將馬達的十一支接腳分為以下三類：

- (A) 三相線圈電壓接腳三出線
- (B) 霍爾感測器的供應電源正負兩出線
- (C) 三相霍爾感測器的正負訊號接腳共六出線

首先討論馬達在開路旋轉狀態下，各接腳之間的關係。本論文已知馬達的電氣方程式，如式 (2.5)。觀察馬達在開路旋轉狀態下（順時針），三相感應電動勢之間的關係。假設 a 、 b 、 c 三相感應電動勢為 E_a 、 E_b 、 E_c 。在開路狀態下，將 $i_a = i_b = i_c = 0$ 代入馬達的電氣方程式。故可得出式 (3.1)：

$$\begin{aligned} V_{as} &= V_a - \left(\frac{V_a + V_b + V_c}{3} \right) \equiv E_a = \frac{2\omega_r K_e}{P} \cos \theta_r \\ V_{bs} &= V_b - \left(\frac{V_a + V_b + V_c}{3} \right) \equiv E_b = \frac{2\omega_r K_e}{P} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{cs} &= V_c - \left(\frac{V_a + V_b + V_c}{3} \right) \equiv E_c = \frac{2\omega_r K_e}{P} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (3.1)$$

其中 $V_{as} + V_{bs} + V_{cs} = V_a + V_b + V_c - 3V_s = 0$ ，所以 $V_s = (V_a + V_b + V_c)/3$ ，即可推導出式 (3.1)。其表示馬達各相的感應電動勢，在馬達開路旋轉時，可利用三相線圈各端點的電壓訊號估算獲得。若此時馬達轉速 ω_r 為正（表順時針方向旋轉），則由式 (3.1) 可以發現 E_c 為超前 E_a 120 度電氣角， E_b 為落後 E_a 120 度電氣角（如表 3.2）。以 E_a 的零交越點為基準，由於三相電壓訊號分別相差 120 度電氣角，因此本文定義出 a 相線圈後，便可依據 E_a 在由負到正的零交越點狀態，觀察其餘兩相端電壓波形的正或負，定義出 b 相線圈及 c 相線圈。

表 3.2: 開路狀態下三相感應電動勢之間關係

	E_a	E_b	E_c
和 E_a 相差電氣角	0 度	落後 E_a 120 度	超前 E_a 120 度
$E_a = 0$ 時電壓值	$E_a = 0$	$E_b < 0$	$E_c > 0$

當馬達的霍爾感測器的供應電源接腳輸入驅動電壓，因為霍爾感測器的正負接腳訊號正比於轉子的洩漏磁通，故霍爾感測器感應不同的磁場大小會有不同的霍爾感測器正負訊號，且霍爾感測器的正負訊號與三相電壓訊號為同樣頻率的弦波訊號。霍爾感測器的正負訊號是建構在直流偏壓值的一組交流訊號，其與三相定子線圈的相對位置如圖 2.11。又兩兩一組的霍爾感測器的正負訊號彼此為反相的，故可以利用霍爾感測器的正負訊號，將兩兩一組的霍爾感測器輸出歸類出來。本論文將同組的霍爾感測器的正負訊號相減後得到一個『霍爾輸出訊號』。

為了表示方便，本論文先省略霍爾輸出中直流偏壓的部分，當霍爾感測器輸入驅動電壓，並使馬達以順時針旋轉時，將此三顆霍爾感測器的三個霍爾輸出訊號表為式 (3.2) 或式 (3.3)：

$$\begin{aligned}
 H_a^o &\equiv H_a^+ - H_a^- = -v_o \cos(\theta_r + \frac{\pi}{6}) = v_o \cos(\theta_r - \frac{5\pi}{6}) \\
 H_b^o &\equiv H_b^+ - H_b^- = -v_o \cos(\theta_r - \frac{\pi}{2}) = v_o \cos(\theta_r + \frac{\pi}{2})
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

$$\begin{aligned}
 H_c^o &\equiv H_c^+ - H_c^- = -v_o \cos(\theta_r + \frac{5\pi}{6}) = v_o \cos(\theta_r - \frac{\pi}{6}) \\
 -H_a^o &\equiv H_a^- - H_a^+ = v_o \cos(\theta_r + \frac{\pi}{6}) = -v_o \cos(\theta_r - \frac{5\pi}{6}) \\
 -H_b^o &\equiv H_b^- - H_b^+ = v_o \cos(\theta_r - \frac{\pi}{2}) = -v_o \cos(\theta_r + \frac{\pi}{2}) \\
 -H_c^o &\equiv H_c^- - H_c^+ = v_o \cos(\theta_r + \frac{5\pi}{6}) = -v_o \cos(\theta_r - \frac{\pi}{6})
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

由式 (3.2) 及式 (3.1) 本論文可以發現 H_a^o 落後 E_a 150 度電氣角, H_b^o 超前 E_a 90 度電氣角, H_c^o 落後 E_a 30 度電氣角 (如表 3.3); $-H_a^o$ 超前 E_a 30 度電氣角, $-H_b^o$ 落後 E_a 90 度電氣角, $-H_c^o$ 超前 E_a 150 度電氣角 (如表 3.4)。

本論文以 E_a 由負到正的零交越點為基準, 觀察三個霍爾輸出訊號的零交越點順序, 就可以判斷出三個霍爾輸出訊號所對應到的霍爾感測器為 H_a 、 H_b 或 H_c ; 並依照三個霍爾輸出訊號在本身的零交越點前後的趨勢, 正確的定義出霍爾感測器訊號的正負兩端。本論文將同組的霍爾感測器兩個接腳的訊號相減, 定義為一個霍爾輸出訊號, 如 $H_a^o \equiv H_a^+ - H_a^-$, 而 $-H_a^o \equiv H_a^- - H_a^+$ 。但在 E_a 由負到正的零交越點過後, 三個霍爾輸出訊號, 不管是 H_a (或 $-H_a^o$)、 H_b (或 $-H_b^o$) 或 H_c (或 $-H_c^o$), 零交越點的位置並不會改變 (如表 3.3 和表 3.4)。利用三個霍爾輸出訊號的零交越點順序將三個霍爾輸出訊號歸類到三個霍爾感測器, 再觀察霍爾輸出訊號在零交越點前後的趨勢, 將霍爾感測器的正負訊號的兩端找出, 如此便完成了霍爾感測器的訊號接腳的正負定義。

表 3.3: 正相霍爾輸出訊號和 E_a 的相位及零交越點順序關係

	H_a^o	H_b^o	H_c^o
和 E_a 相差電氣角	落後 E_a 150 度	超前 E_a 90 度	落後 E_a 30 度
零交越點順序	後面第三	後面第二	後面第一
訊號趨勢	由負到正	由正到負	由負到正

表 3.4: 反相霍爾輸出訊號和 E_a 的相位及零交越點順序關係

	$-H_a^o$	$-H_b^o$	$-H_c^o$
和 E_a 相差電氣角	超前 E_a 30 度	落後 E_a 90 度	超前 E_a 150 度
零交越點順序	後面第三	後面第二	後面第一
訊號趨勢	由正到負	由負到正	由正到負

接下來討論光碟機馬達上霍爾感測器的配置情形，一般光碟機馬達上有三顆霍爾感測器，其配置法分為以下兩種；一種是串聯型配置，另一種是並聯型配置，如下圖 3.1：

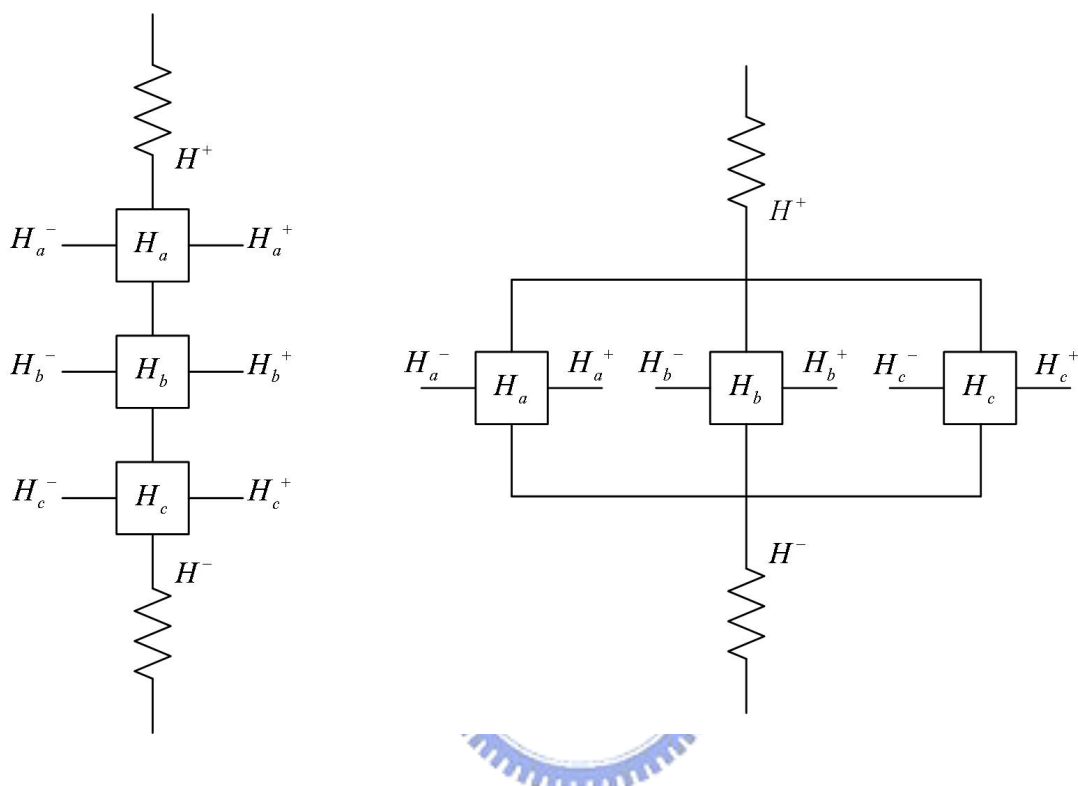


圖 3.1: 馬達霍爾感測器配置圖

桌上型電腦光碟機的主軸馬達上，三顆霍爾感測器大都採用並聯型的配置，其特點為其比串聯型需要稍高的電流。假使三顆霍爾感測器，其兩支訊號接腳間的電阻值有差異時，並聯的結果，由於電阻值不同，將造成流進各顆霍爾感測器的電流不同，則三顆霍爾感測器的正負訊號也有所差異。而三顆霍爾感測器中假使有一顆故障，並不會影響另外二顆霍爾感測器的運作。並聯後的霍爾感測器的供應電源端 H^+ 經過一個電阻後接上正電源； H^- 經過一個電阻後接上另一個偏壓電源，上下串電阻的目的是為了使霍爾感測器的輸出訊號為原本的交流感測訊號加上一直流偏壓，以確保霍爾感測器在馬達驅動器的工作電壓範圍內。在筆記型光碟機上主軸馬達上，則霍爾感測器的配置大部分使用串聯型較多，因其較省電；串聯型配置與驅動器的接法與並聯型大同小異。必須要說明的是，即使 H^+ 與 H^- 的兩個電源接反了，霍爾感測器仍然可以運作，但霍爾感測器的兩支接腳上的訊號也會因此反相。

一般在光碟機馬達上用的霍爾感測器多為 InSb 材料所製成，以 HW-108A 為例 (旭化成製作)，其輸入與輸出阻抗約為 $250 \sim 450\Omega$ ，其它廠牌的霍爾感測器也大概有相似的阻抗值；故對串聯型配置的霍爾感測器而言，霍爾感測器的供應電源端 H^+ 與 H^- 間的阻抗約為 $750 \sim 1350\Omega$ ，其兩支霍爾感測器的正負接腳間的阻抗 (例如 H_a^+ 和 H_a^-) 約為 $250 \sim 450\Omega$ 。對並聯型霍爾感測器而言，霍爾感測器的供應電源端 H^+ 與 H^- 間的阻抗約為 $83 \sim 150\Omega$ ，其兩支霍爾感測器的正負接腳間的阻抗 (例如 H_a^+ 和 H_a^-) 約為 $250 \sim 450\Omega$ 。

本文提出的自動腳位識別法則適用於桌上型的光碟機馬達，其霍爾感測器為並聯配置法。假設在理想狀態下，三顆霍爾感測器均相同。以霍爾感測器 H_a 為例。本論文建立霍爾感測器的電阻模型如圖 3.2，霍爾感測器的兩支訊號接腳兩端的電阻視為 $2R_2$ ；而霍爾感測器的電源供應正負兩端 H^+ 及 H^- 之間的電阻為 $2R_1$ ，

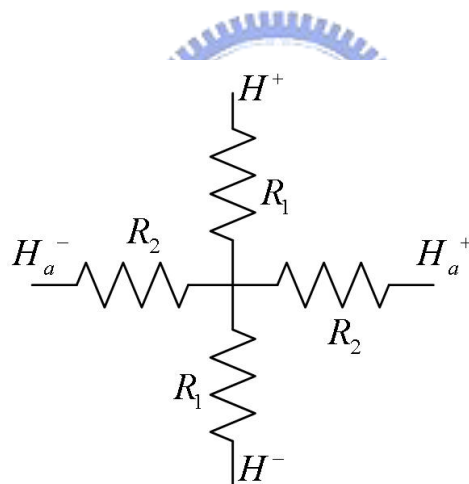


圖 3.2: 霍爾感測器之電阻模型

為了方便本論文的討論，以已知的馬達為例，此馬達的接腳定義為：PIN1 $\sim$ PIN3 為三相線圈電壓接腳，與霍爾感測器的接腳為斷路狀態，故不討論三相線圈電壓接腳與霍爾感測器的接線配置狀況。在其餘的八支霍爾接腳中 (包含霍爾感測器的訊號接腳以及供應電源接腳)，PIN4 及 PIN11 為霍爾感測器的供應電源 H^+ 及 H^- ；PIN5 及 PIN6、PIN7 及 PIN8、PIN9 及 PIN10 分別為三組霍爾感測器的正負訊號接腳，因此可就圖 3.1 中的並聯配置法，簡化為圖 3.3 (圖中號碼數即為接腳號碼)。

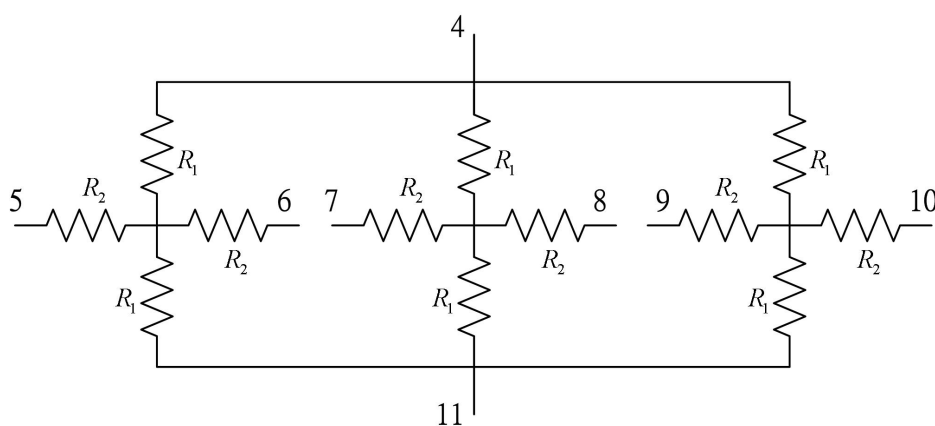


圖 3.3: 並聯型霍爾感測器配置之電阻模型

本論文中所有腳位的定義，均由腳位間互相的關係得到，以同樣的法則來定義接腳，可有許多不同的組合，本文僅將一種定義的方式找出，可就本文提出的關係式及方法，同樣的定義出馬達的腳位。

以並聯型的霍爾感測器配置為例，接下來討論這八支霍爾接腳，依照接腳間定義不同，任意兩隻接腳之間的電阻，將其分為以下四類：

(A) 霍爾感測器的供應電源接腳與霍爾感測器的訊號接腳

兩支接腳，一支為霍爾感測器的供應電源接腳正或負（PIN4 或 PIN11 其中任一），另一支為霍爾感測器的訊號接腳正或負（PIN5 到 PIN10 其中任一），可歸類為同一種狀況。

(B) 同一組霍爾感測器的訊號接腳正負

兩支接腳為同一組的霍爾感測器的訊號接腳，共三種狀況：PIN5 和 PIN6、PIN7 和 PIN8、PIN9 和 PIN10，可歸類為同一種狀況。

(C) 不同組霍爾感測器的訊號接腳正負

兩支接腳為不同組的霍爾感測器的訊號接腳。三組霍爾感測器的訊號接腳，任取不為同組霍爾感測器的兩支，例如：一支為 PIN5 或 PIN6 其中任一，另一支為 PIN7 或 PIN8 其中任一

(D) 霍爾感測器的供應電源接腳正負

兩支接腳為霍爾感測器的供應電源接腳正負，PIN4 及 PIN11。

在 (A) 類中，以 PIN4 與 PIN5 之間的電阻為例，可將其電阻模型簡化為下圖 3.4。由圖 3.4 可以計算出，PIN4 與 PIN5 之間的等效電阻 $R_{4-5} = R_2 + \frac{2}{3}R_1$ 。由圖 3.3 可知 (PIN4 或 PIN11 其中一支)，與 (PIN5 到 PIN10 其中一支) 之間的電阻均相等 (R_{4-5})。

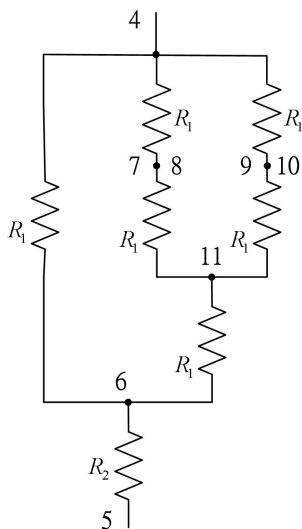


圖 3.4: PIN4 與 PIN5 之間電阻圖

在 (B) 類中，以 PIN5 與 PIN6 之間的電阻為例，可將其電阻模型簡化為下圖 3.5。由圖 3.5 可以計算出，PIN5 與 PIN6 之間的等效電阻 $R_{5-6} = 2R_2$ 。由圖 3.3 可知其與 PIN7 與 PIN8，PIN9 與 PIN10 之間的電阻均相等 (R_{5-6})。

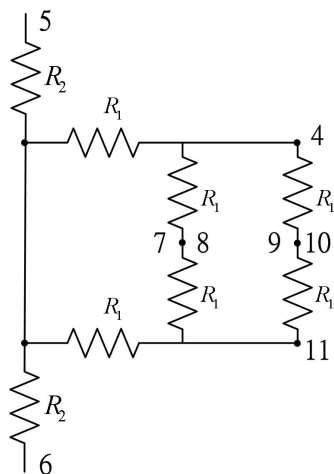


圖 3.5: PIN5 與 PIN6 之間電阻圖

在 (C) 類中，以 PIN5 與 PIN7 之間的電阻為例，可將其電阻模型簡化為下圖 3.6。由圖 3.6 可以計算出，PIN5 與 PIN7 之間的等效電阻 $R_{5-7} = 2R_2 + R_1$ 。由圖 3.3 可知 PIN5 (或 PIN6) 與 PIN7 (或 PIN8 或 PIN9 或 PIN10) 之間的電阻均相等 (R_{5-7})。亦即不同組的霍爾感測器訊號接腳，兩隻接腳之間的電阻均為 R_{5-7} 。

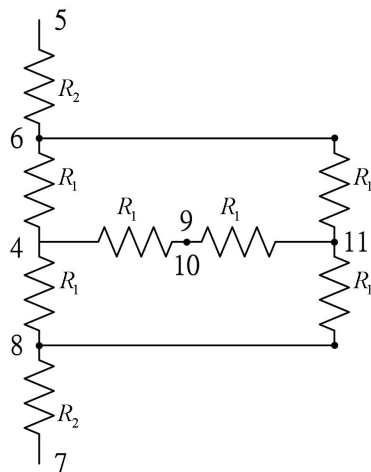


圖 3.6: PIN5 與 PIN7 之間電阻圖

在 (D) 類中，以 PIN4 與 PIN11 之間的電阻為例，可將其電阻模型簡化為下圖 3.7。由圖 3.7 可以計算出，PIN4 與 PIN11 之間的等效電阻 $R_{4-11} = \frac{2}{3}R_1$ 。

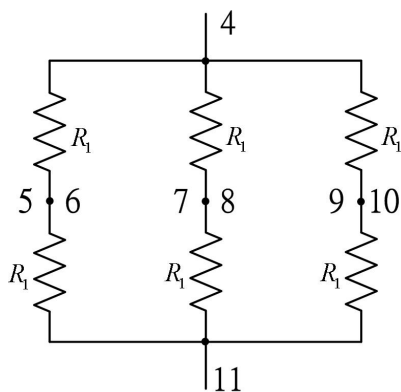


圖 3.7: PIN4 與 PIN11 之間電阻圖

討論任意兩支霍爾接腳之間電阻的關係是因為本論文提出的方法為：將任意兩支霍爾接腳給予 $2V$ 和 GND 的電壓訊號，然後擷取此八支霍爾接腳的電壓訊號，依照 $2V$ 和 GND 接到的接腳不同，對照上述的四種狀況，可以找出不同的電壓關係，藉以判別出兩支霍爾感測器的供應電源正負接腳。

至此已將馬達十一支接腳之間的關係大致介紹，接下來介紹本論文提出的實驗方法。

3.2 馬達腳位自動識別實驗方法

在 3.1 節已經介紹過，本論文將馬達的十一支接腳分為以下三類：

- (A) 三相線圈電壓接腳三出線
- (B) 霍爾感測器的供應電源正負兩出線
- (C) 三相霍爾感測器的正負訊號接腳共六出線

本論文的自動腳位識別法則為：利用給予任意接腳電壓，透過擷取電壓訊號，做為本論文判斷腳位的依據。在不同的情況下，給予任意馬達接腳電壓，接到了不同的接腳後，由於接腳之間的相連關係，以及電阻值和物理意義不同，故量到的電壓值也不盡相同。利用已知的馬達接腳，給予不同接腳電壓，找出接腳間的電壓大小關係，用來做腳位識別。由於馬達接腳間電阻值關係相同，故可經由已知的馬達，當作本論文判斷其他馬達腳位的準則。

本論文提出的自動腳位識別步驟如下：

- (一) 將三相線圈電壓接腳與其他八支霍爾接腳區分開來
- (二) 找出霍爾感測器的供應電源接腳
- (三) 所有腳位歸類完成

步驟（一）將三相線圈電壓接腳與其他八支霍爾接腳區分開來

首先，將十一支接腳中的三相線圈電壓接腳與其它八支霍爾接腳區分開來，要如何將這三支電壓接腳找出來呢？利用三相線圈電壓接腳與其它八支霍爾接腳之間為斷路狀態的關係，取十一支接腳中任意一支接腳，給予 $2V$ 的電壓訊號，然後擷取所有十一支接腳的電壓訊號，由於三相電壓接腳與其餘八支霍爾接腳是斷路的，故擷取電壓後會發生兩種狀況：

(a) 三支接腳的電壓訊號是 $2V$

(b) 八支接腳的電壓訊號是 $2V$

利用這兩種不同的狀況，必能找出三支接腳，其電壓大小與其他八支接腳的電壓大小不同。因此可三相線圈電壓接腳找出，必須要說明的是至此尚未將三相線圈電壓接腳正確的定義，只是先將三相線圈電壓接腳找出，以方便接下來的腳位識別。

步驟（二）找出霍爾感測器的供應電壓接腳

找出了三相線圈電壓接腳之後，接下來就是要找出霍爾感測器的供應電壓接腳。因為找出霍爾感測器的供應電源接腳才能使霍爾感測器正確的動作，感測出轉子磁極的正確位置。因此排除三相線圈電壓接腳三支接腳，將其餘八支霍爾接腳任取兩支接上 $2V$ 和 GND ，重新做擷取電壓的動作，擷取此八支接腳的電壓訊號，根據這些接腳的電壓大小不同，可以正確的找出霍爾感測器的供應電源兩接腳。不同接腳接受到電壓時，由於霍爾感測器的訊號接腳或是供應電壓接腳之間的電阻值大小跟物理意義不同，所以這八支接腳擷取到的電壓也有大小的不同。

此八支接腳，事先不知道其接腳定義，依照 3.1 節的說明以及圖 3.3 所示，根據與 $2V$ 和 GND 相連的兩支接腳不同，擷取此八支接腳的電壓，可以分為下列四種狀況，藉以找出霍爾感測器的供應電壓接腳：

(A) $2V$ 及 GND 接到霍爾感測器的供應電源接腳與霍爾感測器的訊號接腳以 PIN4 和 PIN5 為例，又可分为兩種情況：

(1) $2V$ 接到霍爾感測器的供應電源接腳 (PIN4)， GND 接到霍爾感測器的訊號接腳 (PIN5)。

利用圖 3.4，將 PIN4 接上 $2V$ ；PIN5 接上 GND 。可以得知下列電壓大小關係：

$$V_4 = 2V > V_7 = V_8 = V_9 = V_{10} > V_{11} > V_6 > V_5 = GND \quad (3.4)$$

因此除了電壓訊號為 $2V$ 和 GND 這兩支接腳以外，其餘的六支接腳的電壓訊號均大於或等於 V_6 ， $V_6 = (2R_2)/(R_2 + \frac{2R_1}{3})$ 。

此時電壓訊號為 $2V$ (V_4) 的接腳 (PIN4) 為一支霍爾感測器的驅動電源接腳；而找出其餘六支接腳中第二小的電壓 (V_{11}) 接腳，即找出另一支霍爾感測器的供應電源接腳 (PIN11)。

- (2) GND 接到霍爾感測器的供應電源接腳 (PIN4)， $2V$ 接到霍爾感測器的訊號接腳 (PIN5)。

利用圖 3.4，將 PIN4 接上 GND ；PIN5 接上 $2V$ 。可以得知下列電壓大小關係：

$$V_5 = 2V > V_6 > V_{11} > V_7 = V_8 = V_9 = V_{10} > V_4 = GND \quad (3.5)$$

因此除了電壓訊號為 $2V$ 和 GND 這兩支接腳以外，其餘的六支接腳的電壓訊號均小於或等於 V_6 ， $V_6 = (\frac{4R_1}{3})/(R_2 + \frac{2R_1}{3})$ 。

此時電壓訊號為 GND (V_4) 的接腳 (PIN4) 為一支霍爾感測器的驅動電源接腳；而找出其餘六支接腳中第二大的電壓 (V_{11}) 接腳，即找出另一支霍爾感測器的供應電源接腳 (PIN11)。

而其它接腳相同的情況如 3.1 節所述，均可看出相同的電壓關係。

- (B) 同一組霍爾感測器的訊號接腳正負

$2V$ 和 GND 接到同一組的霍爾感測器的訊號接腳，以 PIN5 和 PIN6 為例，PIN5 和 PIN6 一支接 $2V$ ，一支接 GND 。

利用圖 3.5，將 PIN5 接上 $2V$ ；PIN6 接上 GND 。可以得知下列電壓大小關係：

$$V_5 = 2V > V_4 = V_7 = V_8 = V_9 = V_{10} = V_{11} > V_6 = GND \quad (3.6)$$

因此除了電壓訊號為 $2V$ 和 GND 這兩支接腳以外，其餘的六支接腳的電壓訊號都在同一個準位 ($1V$)，此時排除電壓訊號為 $2V$ 及 GND 這兩支接腳，定義電壓訊號為 $2V$ 及 GND 此兩支接腳為同一組的霍爾感測器的訊號接腳，不為霍爾感測器的供應電源接腳，排除此兩支接腳，對其餘的接腳再做測試，直到找到正確的霍爾感測器的供應電源接腳。當已經找到了三組霍爾感測器的訊號接腳後，剩下的兩支接腳，即為霍爾感測器的供應電源兩接腳。

(C) 不同組霍爾感測器的訊號接腳正負

2V 和 GND 接到不同組的霍爾感測器的訊號接腳，以 PIN5 和 PIN7 為例，PIN5 和 PIN7 一支接 2V，一支接 GND。

利用圖 3.6，將 PIN5 接上 2V；PIN7 接上 GND。可以得知下列電壓大小關係：

$$V_5 = 2V > V_6 > V_4 = V_9 = V_{10} = V_{11} > V_8 > V_7 = GND \quad (3.7)$$

上述為理想狀態下八支接腳間電壓大小的關係式。

但實際上，如圖 3.8。 R_A 和 R_B 並不完全相等，即 $R_A \neq R_B \neq R_1$ ，故 I_1 並不等於零，而是有一微小電流值，造成

$$V_5 = 2V > V_6 > V_4 > V_9 = V_{10} > V_{11} > V_8 > V_7 = GND, I_1 > 0 \quad (3.8)$$

或

$$V_5 = 2V > V_6 > V_{11} > V_{10} = V_9 > V_4 > V_8 > V_7 = GND, I_1 < 0 \quad (3.9)$$

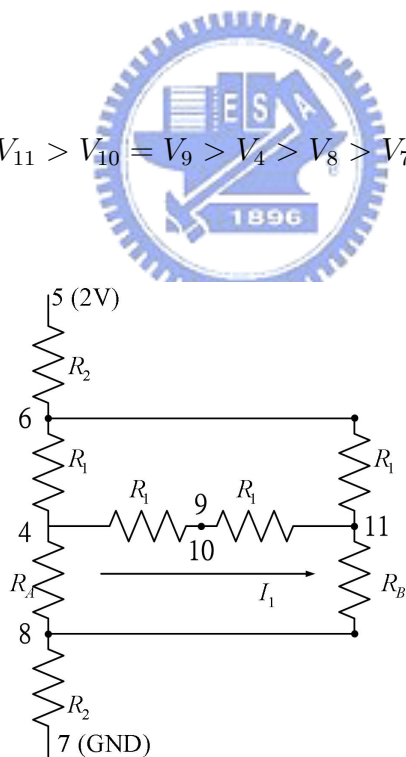


圖 3.8: PIN5 與 PIN7 接上 2V 及 GND 後等效電路圖

利用這種情形，找出電壓訊號為 2V 及 GND 的兩支接腳以外，其餘六支接腳當中第二小的電壓接腳，即找出一支霍爾感測器的供應電源接腳 (PIN4, $I_1 < 0$ 或 PIN11, $I_1 > 0$)。

此時有兩種方式找出另一支霍爾感測器的供應電源接腳：

- (1) 將 $2V$ 接到已找出的一支霍爾感測器的供應電源接腳 (PIN4 或 PIN11)，重新作電壓擷取測試，此時電壓擷取結果與 (A) 的 (1) 相同，再經過電壓擷取後，根據 (A) 的 (1) 的結果，找出另一支霍爾感測器的供應電源接腳。
- (2) 將 GND 接到已找出的一支霍爾感測器的供應電源接腳 (PIN4 或 PIN11)，重新作電壓擷取測試，此時電壓擷取結果與 (A) 的 (2) 相同，再經過電壓擷取後，根據 (A) 的 (2) 的結果，找出另一支霍爾感測器的供應電源接腳。

(D) 霍爾感測器的供應電源接腳正負

$2V$ 和 GND 接到霍爾感測器的供應電源接腳正負，PIN4 及 PIN11。不論是 $2V$ 接到了 PIN4， GND 接到 PIN11；或是 $2V$ 接到了 PIN11， GND 接到 PIN4。此時霍爾感測器便開始動作，此時各接腳間的關係不只是電阻關係，而是感受磁場後，造成不同的電壓訊號。故不同轉子磁極的位置會造成電壓擷取結果不同，感受到的磁場大小也相異。擷取電壓後，除了電壓訊號為 $2V$ 和 GND 這兩支接腳以外，其餘六支接腳的電壓訊號會依照轉子位置的不同而不同，但無法確認 $2V$ 和 GND 已經接到了霍爾感測器的供應電源接腳正負。此時有兩種方式來確認：

- (1) 將 GND 接到其餘六支接腳的任何一支 (PIN5 到 PIN10 任意一支)，重新作電壓擷取測試，此時電壓擷取結果與 (A) 的 (1) 相同，再經過電壓擷取後，確認接腳為霍爾感測器的供應電源接腳。
- (2) 將 $2V$ 接到其餘六支接腳的任何一支 (PIN5 到 PIN10 任意一支)，重新作電壓擷取測試，此時電壓擷取結果與 (A) 的 (2) 相同，再經過電壓擷取後，確認接腳為霍爾感測器的供應電源接腳。

由上述的 (A) (B) (C) (D) 即可兩支霍爾感測器的供應電源接腳正負，定義順序數較小的為霍爾感測器的供應電源正極 (PIN4)，順序數較大的為霍爾感測器的供應電源負極 (PIN11)，因為正負接反只會造成輸出的霍爾感測器的正負訊號接腳反相，並不失其一般性，故可自行定義。將 PIN4 接上 $2V$ ，PIN11 接上 GND 後，便可使霍爾感測器正常動作。

步驟（三）所有接腳歸類完成

根據上述步驟，已將此兩支霍爾感測器的供應電源正負給予定義。將兩支霍爾感測器的供應電源接上 2V 以及 GND 後，再以手撥動馬達（順時針旋轉），擷取開路旋轉時三相電壓的反應電動勢以及霍爾感測器的正負訊號接腳輸出的波形，根據旋轉時候三相電壓波形的大小，自行定義出 a 、 b 、 c 三相接腳。而兩兩一組的霍爾訊號為反相的，故可利用電壓訊號的相位關係，以及零交越點順序，做判別的動作，自動將腳位歸類，完成所有腳位識別。

（1）定義三相線圈電壓接腳

取三相線圈電壓接腳任意一支，定義其為 a 相線圈電壓接腳，電壓為 E_a 。由表 3.2，以 E_a 由負到正的零交越點為基準，由於三相線圈電壓彼此相差 120 度電氣角，故此時 $E_c > 0$ ， $E_b < 0$ ，根據此時另兩支接腳電壓值大小，定義出 b 相以及 c 相線圈電壓接腳。

（2）同一組的霍爾訊號歸類

將六個霍爾感測器的訊號兩兩相加，相加值為零的代表兩兩反相，為同一組霍爾感測器訊號；相加值不為零的，便不是同一組霍爾感測器。因此可找出三組霍爾感測器的訊號。同一組的訊號接腳，將接腳順序較小的訊號減去接腳順序較大的訊號（如 $V_5 - V_6$ ）得到一個霍爾輸出訊號，共三組可找到三個霍爾輸出訊號。

（3）三個霍爾輸出訊號與三相線圈配對

同樣以 E_a 由負到正的零交越點為基準，由於三個霍爾輸出訊號跟 E_a 間均有不同的相位差，根據表 3.3 和表 3.4，將三個霍爾輸出訊號對於三相電壓配對。其零交越點順序依序為 H_c^o （或 $-H_c^o$ ）、 H_b^o （或 $-H_b^o$ ）和 H_a^o （或 $-H_a^o$ ），且根據三個霍爾輸出訊號在零交越點前後的波形趨勢是由負到正或由正到負，確認之前得到的訊號，正確的將同一組霍爾感測器的正負接腳定義出來。

至此已將光碟機主軸馬達上十一支接腳正確的歸類出來。

3.3 馬達扭矩常數估測的理論推導

先前已經完成了光碟機馬達的腳位識別，接下來就可以配合自行設計的電路板，作電壓常數與扭矩常數估測的動作。三相直流無刷馬達的電壓常數與扭矩常數與馬達本身的性能、出力大小與可操作的工作轉速息息相關，因此不管是馬達設計者或其使用者都非常在意它，總是得事先量測，以作為設計驗證或挑選合適馬達的參考。

在以下的推導中，本論文將以三線式馬達為說明對象，但其原理可以同樣用在四線式馬達。由式（2.6）可以得知，當選擇 K_t 大的馬達來推動負載，對於相同的相電流，馬達可以產生較大的出力扭矩 T_e 。但在式（2.5）中可以發現當馬達之 K_e 較大時，對於相同的相電流，其三相感應電動勢的峰值也變大，對於只能提供三相線圈固定電壓的驅動器而言，此種狀況非常不利於高速旋轉。所以對馬達使用者來說，如何針對自己所需的馬達出力與操作轉速，選取合適的電壓常數與扭矩常數的馬達來是非常重要的事，一般馬達供貨商也都會在馬達規格書上列出此一參數。

而馬達與驅動器的接法如圖 3.9，驅動器是由三個電橋 Leg_1 、 Leg_2 、 Leg_3 所組成，每個電橋有兩個功率元件，可以是電晶體、MOSFET、IGBT 等電力電子元件。

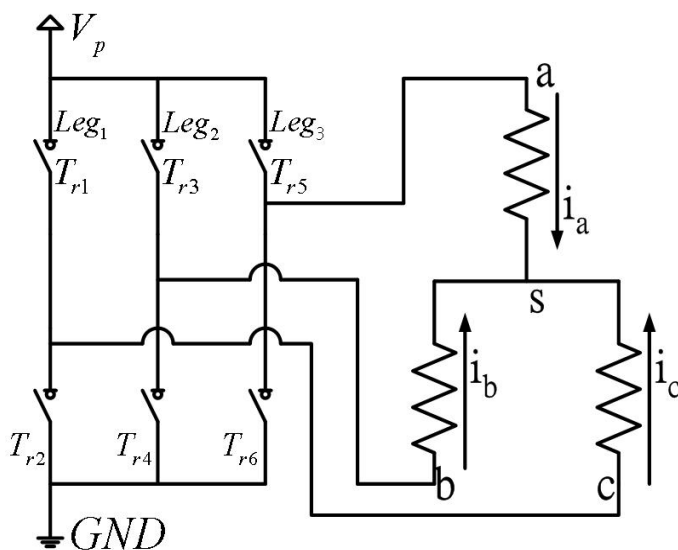


圖 3.9: 馬達與驅動器的接線圖

接下來介紹本論文推導的公式。爲了要計算馬達中某一相的扭矩常數 K_t ，本論文使馬達是以單相的方式旋轉，以 a 和 b 兩相通有電流； c 相爲開路狀態爲例。驅動器上只有 T_{r3} 、 T_{r4} 、 T_{r5} 、 T_{r6} 此四個功率元件有作開關的動作，而 T_{r1} 與 T_{r2} 一直是在開的狀態且驅動器不與 c 相繞組相連。如圖 3.10。

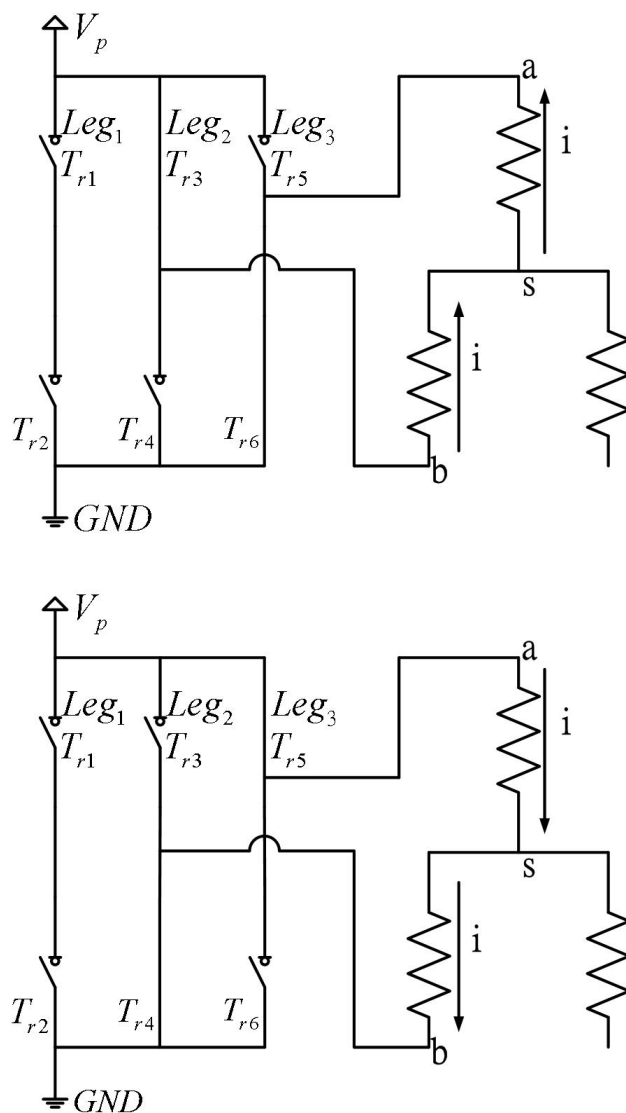


圖 3.10: 馬達在單相旋轉模式下與驅動器的接線圖

定義流向中心相的電流爲正電流，因此馬達在單相旋轉的模式下，可以發現 $i_a = -i_b$ ， $i_c = 0$ ，令 $i_a = -i_b = i$ 。代入馬達的電氣方程式 (2.5) 後改寫成式 (3.10)。

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ -i \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_p & -M & -M \\ -M & L_p & -M \\ -M & -M & L_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di}{dt} \\ \frac{d(-i)}{dt} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{2\omega_r K_e}{P} \begin{bmatrix} \cos \theta_r \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

由式 (3.10) 可以推得下式；

$$\begin{aligned} V_a &= V_{as} + V_s = Ri + L_p \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt} + \frac{2\omega_r K_e}{P} \cos \theta_r + V_s \\ V_b &= V_{bs} + V_s = -Ri - L_p \frac{di}{dt} - M \frac{di}{dt} + \frac{2\omega_r K_e}{P} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) + V_s \\ V_c &= V_{cs} + V_s = \frac{2\omega_r K_e}{P} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) + V_s \end{aligned} \quad (3.11)$$

已知 $\cos \theta_r + \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) + \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) = 0$ ，故定義一變數 $V_w(t)$ 為與時間有關之變數，令 $V_w(t)$ 如式 (3.12) 所示。

$$V_w(t) \equiv \frac{V_a + V_b - 2V_c}{-3} = \frac{2\omega_r K_e}{P} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \quad (3.12)$$

其中 V_a 、 V_b 和 V_c 為三相的端電壓，又已知 $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$ ，代入式 (3.12) 可得式 (3.13)。

$$V_w(t)dt = \frac{2K_e}{P} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3})d\theta_r \quad (3.13)$$

將式 (3.13) 雙邊積分可得變數 Ψ

$$\Psi \equiv \int_{t_0}^t V_w dt = \frac{2K_e}{P} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) + \Psi_0 \quad (3.14)$$

由式 (3.14) 發現 Ψ 是一個振幅為 $2K_e/P$ 的正弦波加上一個直流偏壓值 Ψ_0 。因此只要使馬達在單相模式下旋轉，並擷取單相旋轉時三相電壓接腳的端電壓值，計算出 $V_w(t)$ ，再將 $V_w(t)$ 積分後，量測積分結果的交流訊號的振幅大小，在乘以 $P/2$ ，即可得到電壓常數 K_e ，而在 m.k.s 制下，扭矩常數 $K_t = K_e$ 。

3.4 馬達扭矩常數估測的實驗方法

前面提到，爲了量測馬達扭矩常數 K_t ，本論文使馬達在單相模式下旋轉（ $i_a = -i_b = i$ ， $i_c = 0$ ），因此可將馬達的機械方程式（2.6）改寫爲下式（3.15）：

$$T_e = \sqrt{3}K_t i \cos(\theta_r + \frac{\pi}{6}) = \frac{2J}{P} \frac{d\omega_r}{dt} + \frac{2B_m}{P} \omega_r + T_L \quad (3.15)$$

由上式（3.15）可發現，爲了使馬達在單相模式下旋轉，必須通以與 $\cos(\theta_r + \frac{\pi}{6})$ 同相的電流 i ，可保持 $T_e > 0$ ，使馬達持續在單相模式下旋轉。因爲本論文主要是量測扭矩常數 K_t ，因此電流的大小不予以討論，只要電流切換方向與 $\cos(\theta_r + \frac{\pi}{6})$ 同相即可。

而由式（3.2）得知，使馬達在單相模式下旋轉需要的電流 i ，恰巧與 H_a^o 同相。因此利用 H_a^o 的訊號爲基準，作爲驅動器開關切換的依據。已知驅動 IC（BA6849）的換相真值時序表如下：

表 3.5: BA6849 的換相真值時序表

	Output Table						Input Table					
狀態	T_{r1}	T_{r2}	T_{r3}	T_{r4}	T_{r5}	T_{r6}	H_a^+	H_a^-	H_b^+	H_b^-	H_c^+	H_c^-
一	On	Off	On	Off	Off	On	H	M	M	M	L	M
二	On	Off	Off	On	Off	On	M	M	H	M	L	M
三	On	Off	Off	On	On	Off	L	M	H	M	M	M
四	Off	On	Off	On	On	Off	L	M	M	M	H	M
五	Off	On	On	Off	On	Off	M	M	L	M	H	M
六	Off	On	On	Off	Off	On	H	M	L	M	M	M
	$L = 2.4V$			$M = 2.5V$			$H = 2.6V$					

由上表 3.5 可看出，爲了使馬達如圖 3.10 的單相模式旋轉，即通以 ab 兩相線圈， c 相線圈爲開路狀態，同時以 H_a^o 作爲電流切換的根據。故本論文挑選六個狀態中的『狀態一』以及『狀態四』達成單相旋轉下電流的換相。

由於 BA6849 為一顆三相驅動的 IC，為了使馬達於單相模式（狀態一跟狀態四）下旋轉，根據表 3.5，本論文利用電阻分壓，透過 H_a^+ 及 H_a^- 經過比較器及多工器，製造出 H (2.6V)、 L (2.4V) 以及 M (2.5V) 的訊號，分別提供給 BA6849 上的霍爾感測器接腳；同時 c 相線圈不接到驅動器，因此改造電路如下圖 3.11。

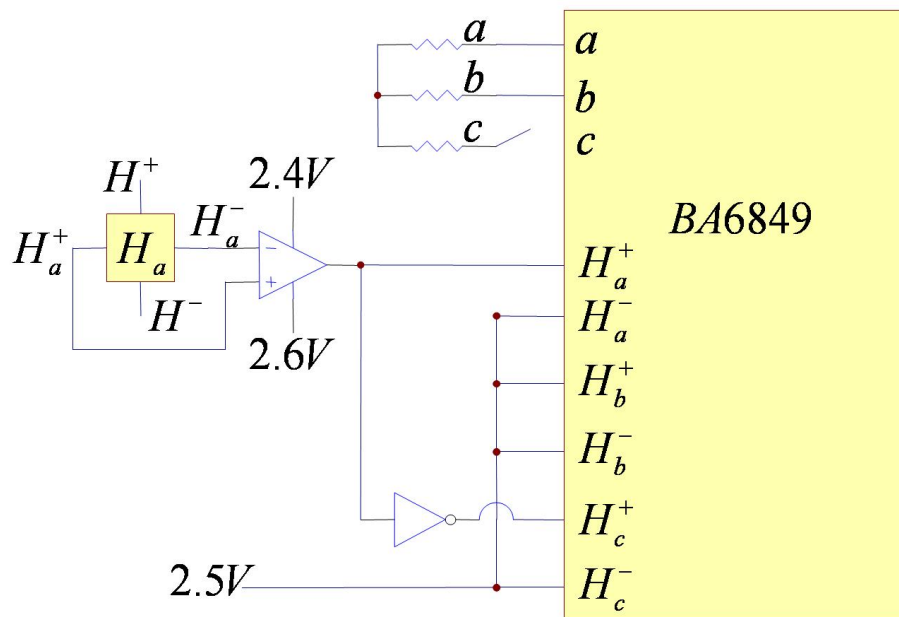


圖 3.11: 單相旋轉改造電路示意圖

本論文使馬達透過 BA6849 先以三相旋轉模式開始旋轉，到達一定轉速後，依照 H_a^o 的輸出訊號製造假訊號給 BA6849 後，同時將 c 相線圈開路，可使馬達在單相模式下旋轉。此時擷取其三相端電壓，加以計算過後得到 $V_w(t)$ ，將 $V_w(t)$ 積分得到 Ψ 並找出 Ψ 之交流訊號的振幅，再乘以 $P/2$ 即為馬達某相的電壓常數 K_e ，而扭矩常數 $K_t = K_e$ 。

3.5 馬達電阻與電感量測的理論推導

本論文於此節介紹量測馬達阻抗的測試方法：以三線式的馬達為本論文的量測對象，由第二章的介紹已知馬達的電氣方程式（2.5）及機械方程式（2.6），為了簡化起見，首先假設 $T_L = 0$ 以方便本文的討論。

在推導的過程中，由於三線式的馬達的線圈部份僅拉出三條出線，並沒有中心相出線，因此只能量測到馬達的線電阻及線電感。任意通以兩相電流，此時定子繞組所產生的磁場極性不會變化，馬達的轉子就有可能會被鎖在固定的位置上，但是就實際上來說，即使通入如此的電流，馬達轉子仍有可能發生些許的抖動，造成量測馬達阻抗時，電阻及電感值的量測錯誤，以下推導出能使馬達轉子固定的電流的充分條件。

通以任意兩相電流，假設通以 ab 兩相線圈，即 $i_a = -i_b = i$ ， $i_c = 0$ 。可將馬達的電氣方程式及機械方程式改寫後得到以下結果：

$$V_{as} = Ri + L_p \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt} + \frac{2\omega_r K_e}{P} \cos \theta_r \quad (3.16)$$

$$V_{bs} = -Ri - L_p \frac{di}{dt} - M \frac{di}{dt} + \frac{2\omega_r K_e}{P} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3})$$

$$T_e = \sqrt{3} K_t i \cos(\theta_r + \frac{\pi}{6}) = \frac{2J}{P} \frac{d\omega_r}{dt} + \frac{2B_m}{P} \omega_r \quad (3.17)$$

由式（3.16）可推得：

$$\begin{aligned} V_{ab} &= 2Ri + 2L_p \frac{di}{dt} + 2M \frac{di}{dt} - \frac{2\omega_r K_e}{P} \sqrt{3} \sin(\theta_r - \frac{\pi}{3}) \\ &= R_t i + L_t \frac{di}{dt} - \frac{2\omega_r K_e}{P} \sqrt{3} \sin(\theta_r - \frac{\pi}{3}) \end{aligned} \quad (3.18)$$

上式中 $R_t = 2R$ 為馬達的線電阻； $L_t = 2L_p + 2M$ 為馬達的線電感。假設電流 $i = i_{DC} + i_{AC} \sin \omega t$ ，且此時馬達轉子最終會被鎖在一固定位置上，因此 $\omega_r = 0$ ，可將式（3.18）改寫為：

$$V_{ab} = R_t i_{DC} + R_t i_{AC} \sin \omega t + L_t i_{AC} \omega \cos \omega t \quad (3.19)$$

此時馬達轉子已被鎖住，沒有感應電動勢產生，故 V_{ab} 亦可表示為直流偏壓及交流訊號的相加，示為：

$$V_{ab} = v_{DC} + v_{AC} \sin(\omega t + \phi) = v_{DC} + v_{AC}(\sin \omega t) \cos \phi + v_{AC}(\cos \omega t) \sin \phi \quad (3.20)$$

由式（3.19）式（3.20）可得馬達之線電阻及線電感：

$$R_t = \frac{v_{AC}}{i_{AC}} \cos \phi \quad ; \quad L_t = \frac{v_{AC}}{i_{AC} \omega} \sin \phi \quad (3.21)$$

在參考文獻 [8] 中提到，只要輸入一具有直流偏壓的弦波電流，此直流偏壓可使馬達轉子被穩定的鎖在一定的位位置，如此馬達線電阻及線電感可以式（3.21）求得，此為馬達轉子可以穩定停住的充分條件。

3.6 馬達電阻與電感量測的實驗方法

傳統上，業界直接使用商品化的 LCR METER 來量測馬達的阻抗，馬達的阻抗假設為電阻與電感串聯，其示意圖如下：

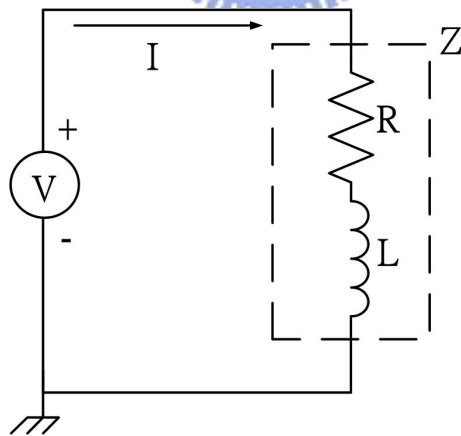


圖 3.12: 電阻與電感量測示意圖

LCR METER 將會提供待測物一測試電壓源 $V = v_{AC} \angle \theta$ ，因待測元件的等效阻抗可寫成 $Z = R + j\omega L$ ，所以此迴路的電流 I 將落後 V 一個相位 ϕ ，可寫為 $I = i_{AC} \angle (\theta - \phi)$ 。

如此只要利用 $Z = V/I$ ，即可計算得到電阻值 $R = (v_{AC}/i_{AC}) \cos \phi$ ；電感值 $L = (v_{AC}/i_{AC}\omega) \sin \phi$ 。但是當待測物是三相直流無刷馬達時馬達，因為馬達轉子上有永久磁鐵，當測試條件如上所述時，轉子會與交流激磁電流 I 產生交互作用，不當的作用會使得馬達轉子產生旋轉或在原地抖動，以至馬達將如發電機般產生感應電動勢，使得其電路模型不再單純只有電阻與電感串聯，以致於使用 LCR METER 時並無法真正量到馬達的阻抗。

將 LCR METER 設定為提供一具有直流偏壓的弦波電流給待測物，因此馬達轉子可固定在一位置上，馬達線電阻及線電感可以式 (3.21) 求得。在量測馬達的阻抗時，常需在不同的激磁頻率 ω 下量測，因當 ω 逐漸增大，電感會因渦流 (eddy current) 效應逐漸變小，而電阻會因極膚效應 (skin effect) 而逐漸變大，如此就可以明瞭馬達在不同頻率下激磁時，其阻抗產生的影響。



第四章

實驗機台及實驗結果

4.1 馬達腳位自動識別

圖 4.1 為本論文所提出整個系統的架構，只要將馬達接上接線板，即可開始測試此顆馬達的接腳，本系統適用的是十一支接腳且具有霍爾感測器的三相直流無刷馬達。接線板上具有接線器（jumper），可將馬達的任一接腳接到 2V 或是 GND，透過 AD/DA 卡擷取所有接腳的電壓訊號，即可作自動腳位識別。以 Visual C++ 撰寫視窗化的介面供使用者在電腦上直接操作，最後將結果顯示在電腦螢幕上。機台所需的電源 2V 與 GND 皆以電腦具有的 5V，透過電阻分壓的方式，提供測試時所需的電壓。

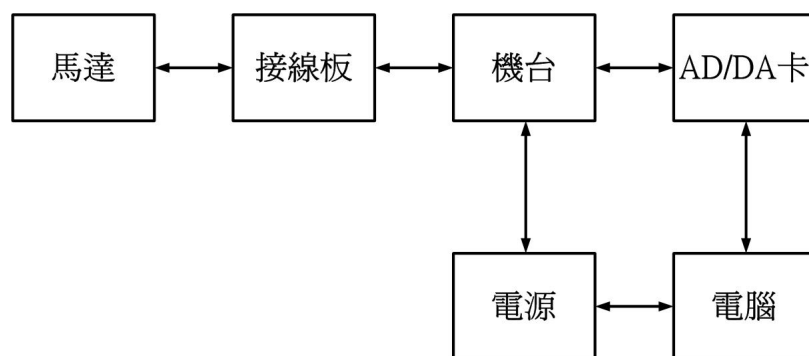


圖 4.1: 腳位識別機台示意圖

如第三章所說明的，以已知的馬達為例，PIN1 ~ PIN3 為三相線圈電壓接腳，PIN4 及 PIN11 為霍爾感測器的供應電源 H^+ 及 H^- ；PIN5 及 PIN6、PIN7 及 PIN8、PIN9 及 PIN10 分別為三組霍爾感測器的正負訊號接腳。接下來同前述分為三個步驟來測試。

步驟（一）將三相線圈電壓接腳與其他八支霍爾接腳區分開來

取十一支接腳中任意一支接腳給予 2V 的電壓，然後擷取所有十一支接腳的電壓訊號，本論文利用 AD/DA 卡來擷取所有接腳的電壓訊號，透過 matlab，將擷取到的十一支接腳的電壓訊號波形，繪於下列圖 4.2 和圖 4.3。

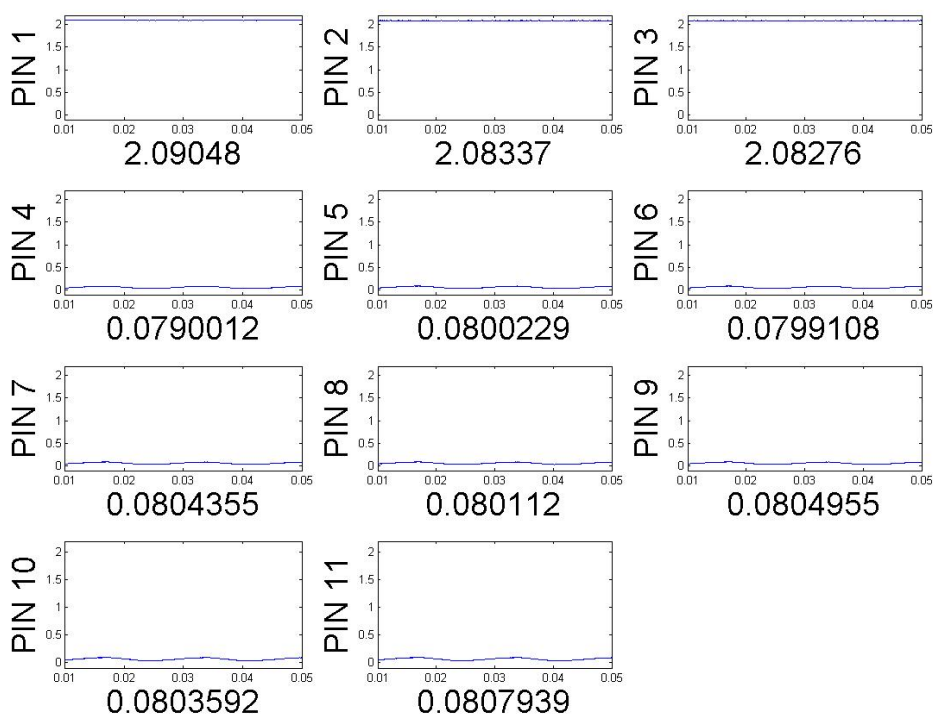


圖 4.2: 三相線圈電壓接腳任一接到 2V 擷取電壓圖

當 2V 接到了三相線圈電壓接腳任何一支，會發生上述狀況（a），如圖 4.2。PIN1，PIN2 和 PIN3 的電壓訊號為 2V；PIN4 到 PIN11 的電壓訊號為 GND 。故 PIN1，PIN2 和 PIN3 和其餘八支接腳（PIN4 到 PIN11）為斷路的狀態，PIN1，PIN2 和 PIN3 為三相線圈電壓接腳。

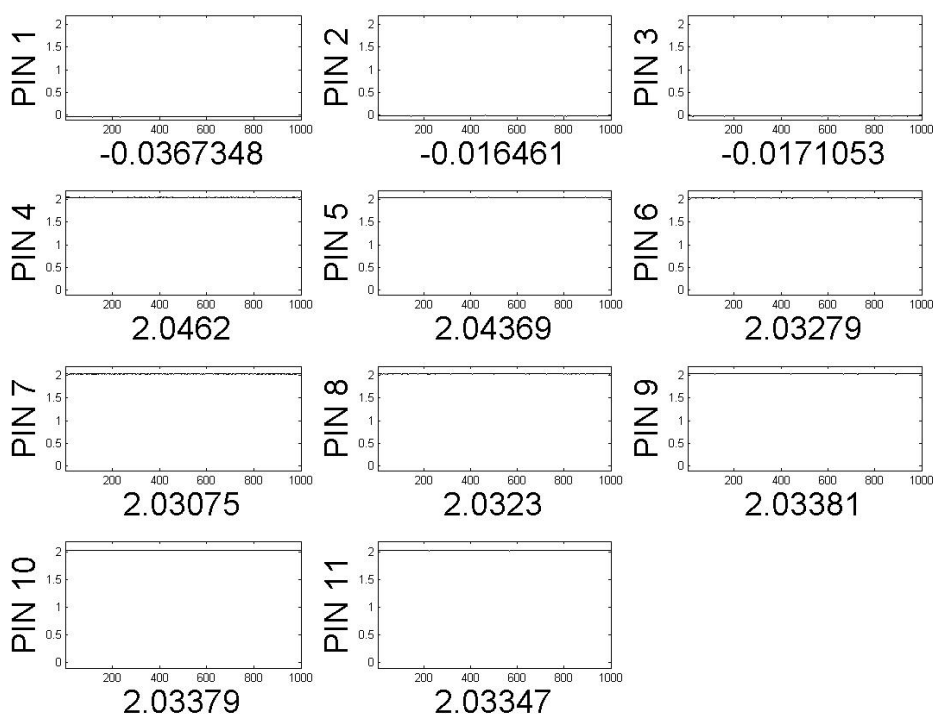


圖 4.3: 八支霍爾接腳任一支接到 2V 擷取電壓圖

當 2V 接到了其餘八支霍爾接腳任何一支，會發生上述狀況 (b)，如圖 4.3。PIN1, PIN2 和 PIN3 的電壓訊號為 *GND*；PIN4 到 PIN11 的電壓訊號為 2V 左右。故 PIN1, PIN2 和 PIN3 和其餘八支接腳 (PIN4 到 PIN11) 為斷路的狀態，PIN1, PIN2 和 PIN3 為三相線圈電壓接腳。

步驟 (二) 找出霍爾感測器的供應電壓接腳

依照 3.1 節的說明以及圖 3.3 所示，以實際上的馬達為例，根據 2V 和 *GND* 接的接腳，透過 AD/DA 卡擷取此八支接腳的電壓，同樣以 matlab 繪出所擷取的電壓圖，可以分為下列四種狀況，以不同結果來判斷，藉以找出霍爾感測器的供應電壓接腳：

(A) 2V 及 *GND* 接到霍爾感測器的供應電源接腳與霍爾感測器的訊號接腳
以 PIN4 和 PIN5 為例，又可分為兩種情況：

(1) 2V 接到霍爾感測器的供應電源接腳 (PIN4)，*GND* 接到霍爾感測器的訊號接腳 (PIN5)。

利用圖 3.4 及式 (3.4)，所得到的結果如圖 4.4。此時其餘的六支接腳的電壓訊號均大於或等於 V_6 (約 $1.33V$)，而電壓訊號為 $2V$ (V_4) 的接腳 (PIN4) 為一支霍爾感測器的驅動電源接腳；而找出其餘六支接腳中第二小的電壓 ($V_{11} = 1.53V$) 接腳，即找出另一支霍爾感測器的供應電源接腳 (PIN11)，此時便判別出霍爾感測器的供應電壓兩接腳。

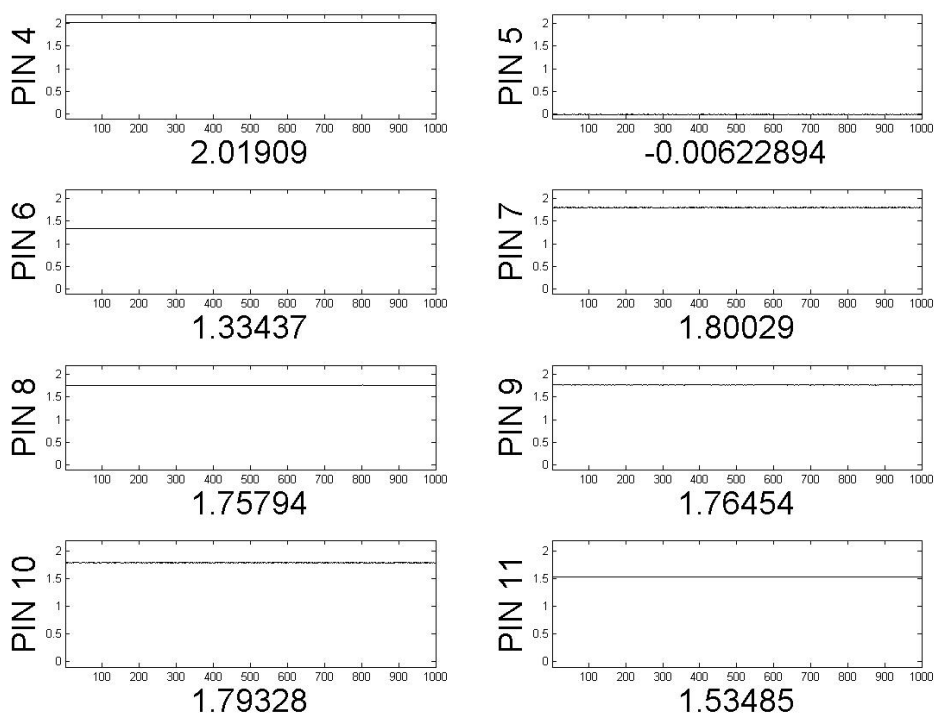


圖 4.4: $2V$ 接到 PIN4， GND 接到 PIN5

- (2) GND 接到霍爾感測器的供應電源接腳 (PIN4)， $2V$ 接到霍爾感測器的訊號接腳 (PIN5)。

利用圖 3.4 及式 (3.5)，所得到的結果如圖 4.4。此時其餘的六支接腳的電壓訊號均小於或等於 V_6 (約 $0.68V$)，而電壓訊號為 GND (V_4) 的接腳 (PIN4) 為一支霍爾感測器的驅動電源接腳；而找出其餘六支接腳中第二大的電壓 ($V_{11} = 0.47V$) 接腳，即找出另一支霍爾感測器的供應電源接腳 (PIN11)，此時便判別出霍爾感測器的供應電壓兩接腳。

而其它接線與（A）類相同的情況均可看出相同的電壓關係，可以利用同樣的方式找出霍爾感測器的供應電壓兩接腳。

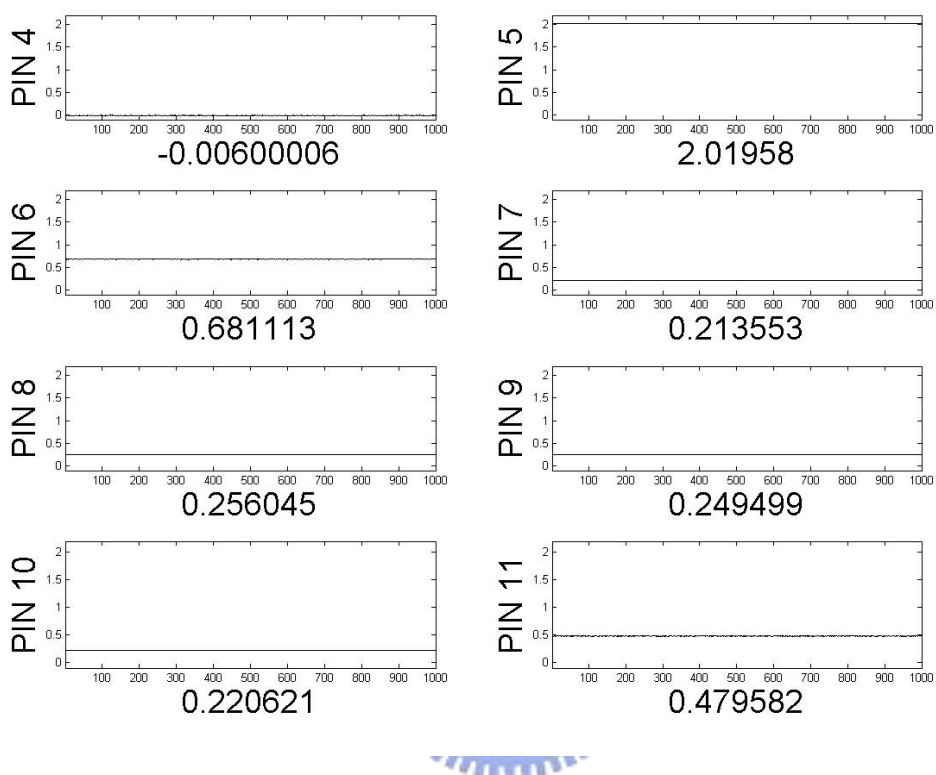


圖 4.5: GND 接到 PIN4，2V 接到 PIN5

（B）同一組霍爾感測器的訊號接腳正負

2V 和 GND 接到同一組的霍爾感測器的訊號接腳，以 PIN5 和 PIN6 為例，PIN5 和 PIN6 一支接 2V，一支接 GND 。

利用圖 3.5 及式（3.6），所得到的結果如圖 4.6。此時其餘的六支接腳的電壓訊號均在同一個準位（約 1V），此時排除電壓訊號為 2V 及 GND 這兩支接腳，定義此兩支接腳為同一組的霍爾感測器的訊號接腳，不為霍爾感測器的供應電源接腳，排除此兩支接腳，對其餘的接腳再做測試，直到找到正確的霍爾感測器的供應電源接腳。

而其它接線與（B）類相同的情況均可看出相同的電壓關係。當找到了三組霍爾感測器的訊號接腳後，即可知道剩下的兩支接腳必為霍爾感測器的驅動電源接腳正負。

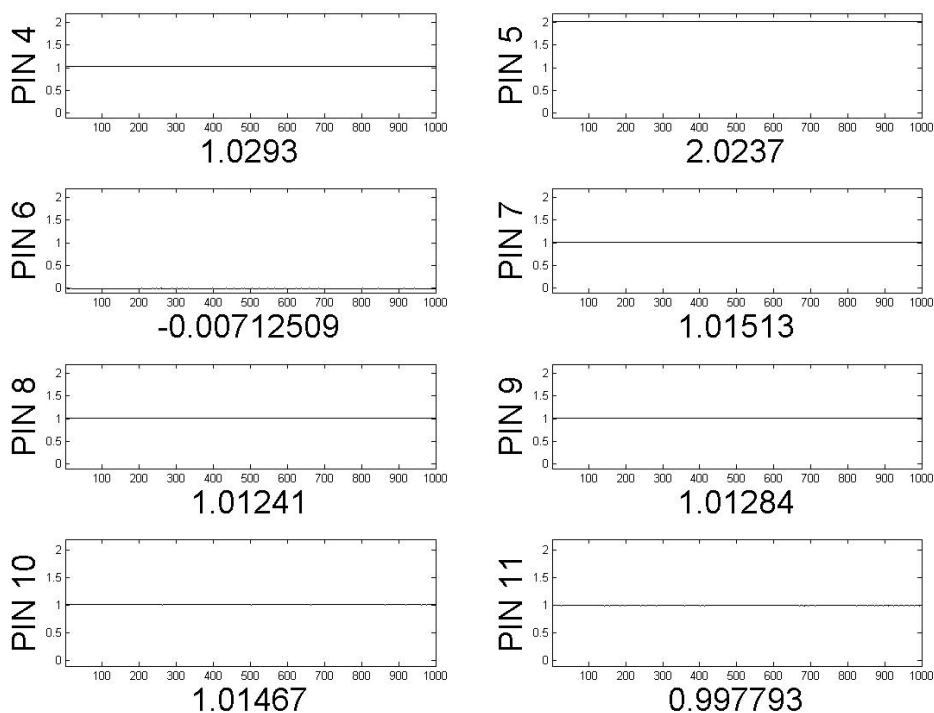


圖 4.6: 2V 接到 PIN5, GND 接到 PIN6

(C) 不同組霍爾感測器的訊號接腳正負

2V 和 GND 接到不同組的霍爾感測器的訊號接腳，以 PIN5 和 PIN7 為例，PIN5 接上 2V；PIN7 接上 GND 。

利用圖 3.8 及式 (3.8) 和式 (3.9)，所得到的結果如圖 4.7。找出其餘六支接腳中第二小的電壓 (V_{11})，即為一支霍爾感測器的供應電源接腳。

此時有兩種方式找出另一支霍爾感測器的供應電源接腳：

- (1) 將 2V 接到已找出一支霍爾感測器的供應電源接腳 (PIN11)，此時接線與 (A) 的 (1) 相同，再重新作電壓擷取測試，根據 (A) 的 (1) 的結果，找出另一支霍爾感測器的供應電源接腳。
- (2) 將 GND 接到已找出一支霍爾感測器的供應電源接腳 (PIN11)，此時接線與 (A) 的 (2) 相同，再重新作電壓擷取測試，根據 (A) 的 (2) 的結果，找出另一支霍爾感測器的供應電源接腳。

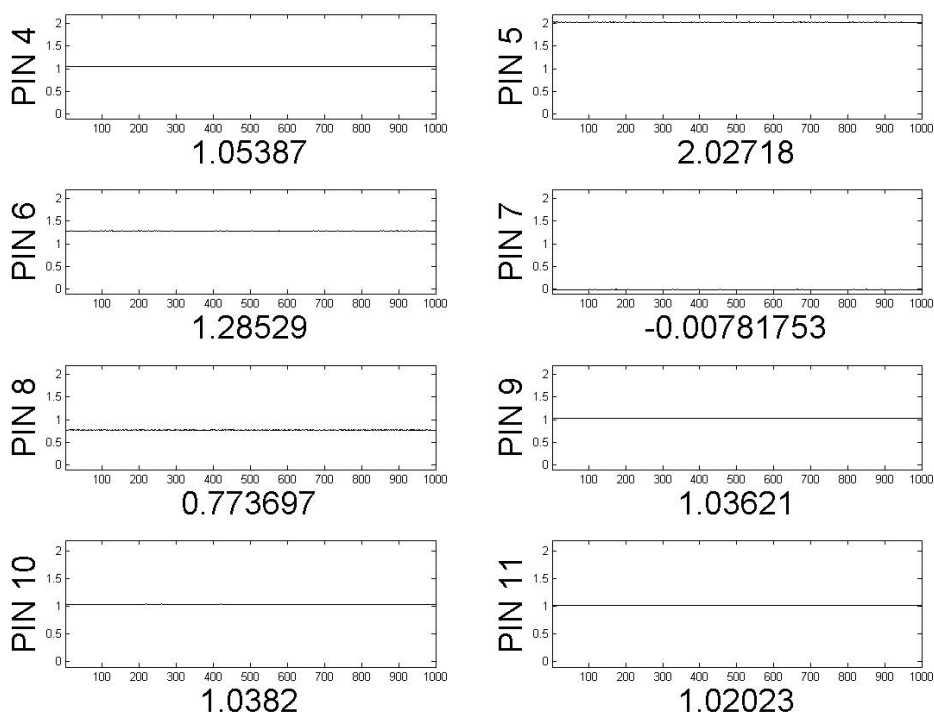


圖 4.7: 2V 接到 PIN5, GND 接到 PIN7

(D) 霍爾感測器的供應電源接腳正負

2V 和 GND 接到霍爾感測器的供應電源接腳正負, PIN4 及 PIN11。不論是 2V 接到了 PIN4, GND 接到 PIN11; 或是 2V 接到了 PIN11, GND 接到 PIN4。此時霍爾感測器便開始動作, 此時各接腳間的關係不只是電阻關係, 故不同轉子磁極的位置會造成電壓擷取結果不同, 感受到的磁場大小也相異。擷取電壓後, 除了電壓訊號為 2V 和 GND 這兩支接腳以外, 其餘六支接腳的電壓訊號會依照轉子位置的不同而不同。如圖 4.8, 但無法確認 2V 和 GND 已經接到了霍爾感測器的供應電源接腳正負。此時有兩種方式來確認:

- (1) 將 GND 接到其餘六支接腳的任何一支 (PIN5 到 PIN10 任意一支), 此時接線與 (A) 的 (1) 相同, 再重新作電壓擷取測試, 根據 (A) 的 (1) 的結果, 確認接腳為霍爾感測器的供應電源接腳。

- (2) 將 2V 接到其餘六支接腳的任何一支 (PIN5 到 PIN10 任意一支)，此時接線與 (A) 的 (2) 相同，再重新作電壓擷取測試，根據 (A) 的 (2) 的結果，確認接腳為霍爾感測器的供應電源接腳。

當 2V 和 GND 接到霍爾感測器的供應電源接腳正負，電壓擷取結果會因轉子位置而有所不同。

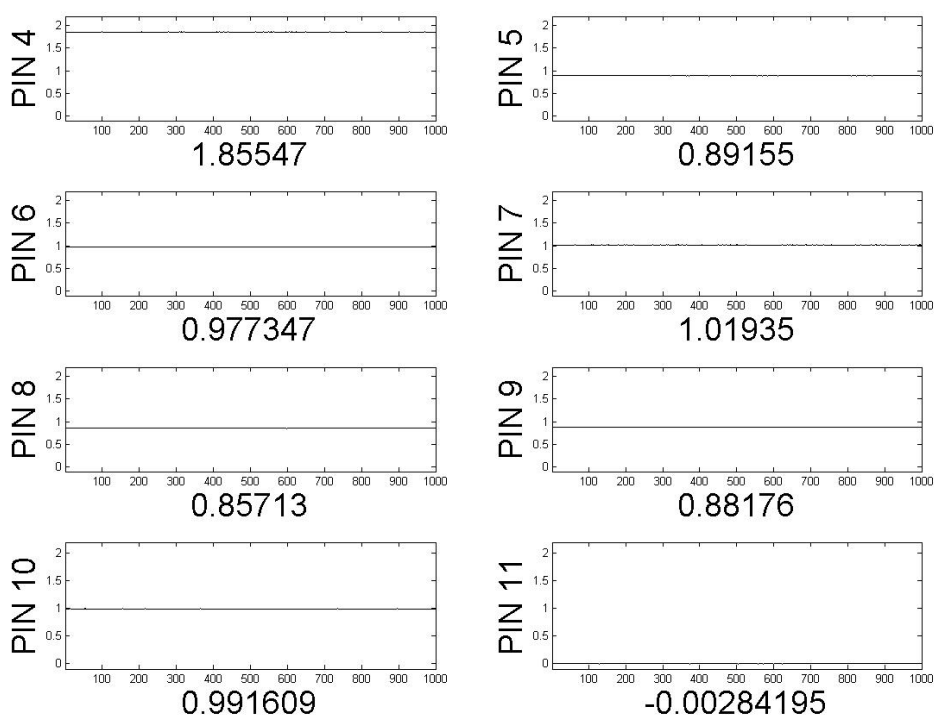


圖 4.8: 2V 接到 PIN4，GND 接到 PIN11

經由以上的判別找出了兩支霍爾感測器的供應電源接腳正負，定義順序數較小的為霍爾感測器的供應電源正極 (PIN4)，順序數較大的為霍爾感測器的供應電源負極 (PIN11)。將 PIN4 接上 2V，PIN11 接上 GND 後，便可使霍爾感測器正常動作。

步驟 (三) 所有接腳歸類完成

將兩支霍爾感測器的供應電源接上 2V 以及 GND 後，再以手撥動馬達，擷取開路旋轉 (順時針) 時十一支接腳的電壓訊號，利用電壓波形在零交越點的大小關係及順序，給予接腳定義，完成所有腳位識別。

由圖 4.9，三相線圈電壓接腳中取一支接腳順序最小的接腳，定義為 a 相線圈電壓接腳，電壓訊號為 E_a 。再以 E_a 由負到正的零交越點位基準，由於三相線圈電壓之電氣角彼此相差 120 度，此時電壓值大於 E_a 的為 E_c ，定義接腳為 c 相線圈；電壓值小於 E_a 的為 E_b ，定義接腳為 b 相線圈。

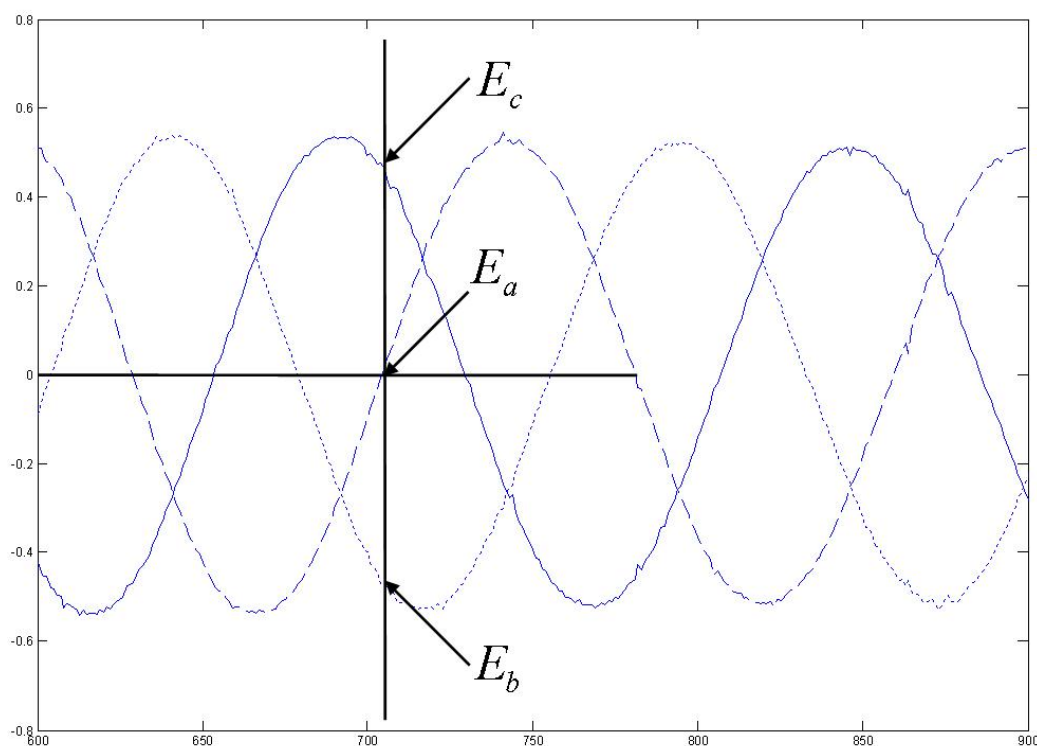


圖 4.9: 開路旋轉定義三相線圈電壓接腳

除了三相線圈電壓接腳與兩支霍爾感測器的驅動電源接腳外，剩下的六支接腳均為霍爾感測器的正負訊號接腳，已知同一組的霍爾感測器的正負訊號接腳波形為反相，以 H_a^+ 和 H_a^- 為例，可看出同一組的霍爾感測器的正負訊號接腳，波形相加近似於零；不同組的霍爾感測器輸出訊號會有一相位差，因此相加並不為零，如 $H_a^+ + H_b^-$ 。將六支輸出訊號彼此兩兩相加，相加結果為零的便為同一組的霍爾感測器輸出，如圖 4.10。可找出三組不同的霍爾感測器的正負訊號接腳，再將同一組的霍爾感測器的兩支訊號接腳，以接腳順序小的訊號減去接腳順序大的訊號，當作同一組的霍爾輸出訊號。此時尚未找出各個霍爾感測器的正負訊號接腳，只是先將其兩兩一組歸類。三個霍爾輸出訊號其結果可能為 H_c^o （或 $-H_c^o$ ）、 H_b^o （或 $-H_b^o$ ）、 H_a^o （或 $-H_a^o$ ）。

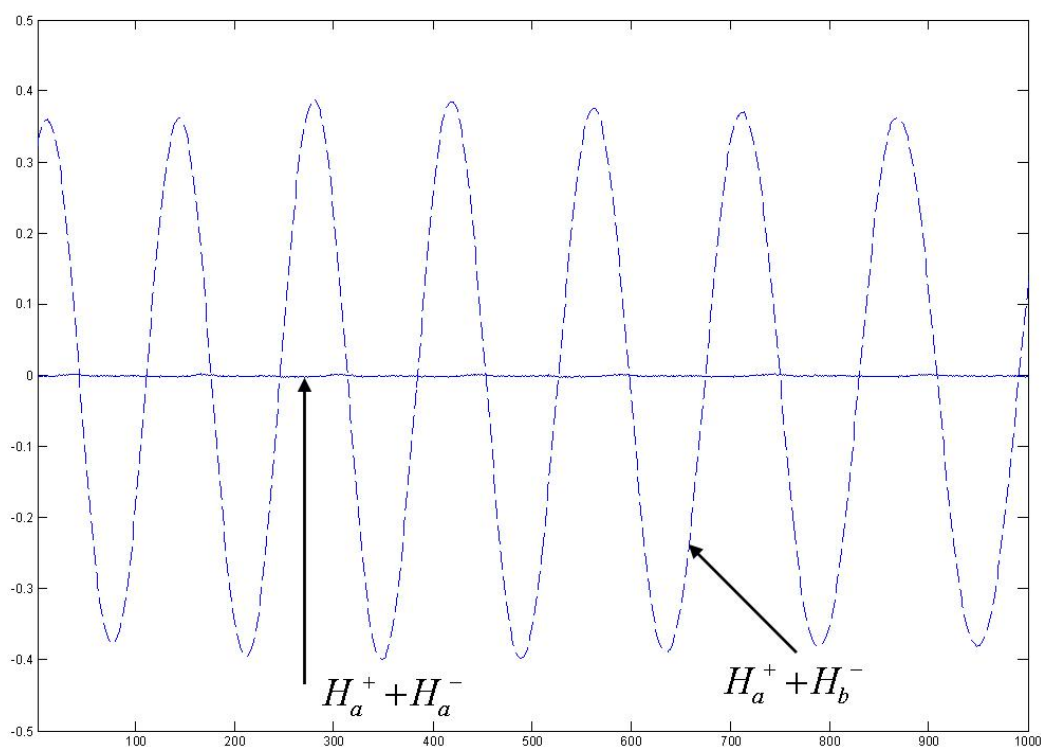


圖 4.10: 同一組的霍爾感測器輸出為反相波形，不同組則否

找出了三個霍爾輸出訊號後，將此三個霍爾輸出訊號與 E_a 比較。同樣以 E_a 由負到正的零交越點為基準，三個霍爾輸出訊號與 E_a 有不同的相位差，因此依照其零交越點的順序，依序為 H_c^o （或 $-H_c^o$ ） H_b^o （或 $-H_b^o$ ）、 H_a^o （或 $-H_a^o$ ）。只需找出三個霍爾輸出訊號的零交越點，依照其順序對應到的必為霍爾感測器 H_c 、霍爾感測器 H_b 和霍爾感測器 H_a 。

H_c^o 的零交越點前後為由負到正； H_b^o 的零交越點前後為由正到負； H_a^o 的零交越點前後為由負到正。而 $-H_c^o$ 的零交越點前後為由正到負； $-H_b^o$ 的零交越點前後為由負到正； $-H_a^o$ 的零交越點前後為由正到負。觀察三個霍爾輸出訊號在零交越點前後的波形趨勢，便可得知三個輸出訊號將歸類為 H_a^o （或 $-H_a^o$ ）、 H_b^o （或 $-H_b^o$ ）、 H_c^o （或 $-H_c^o$ ），得知同一組霍爾感測器的訊號接腳正負，正確的給予定義，如圖 4.11 和圖 4.12。

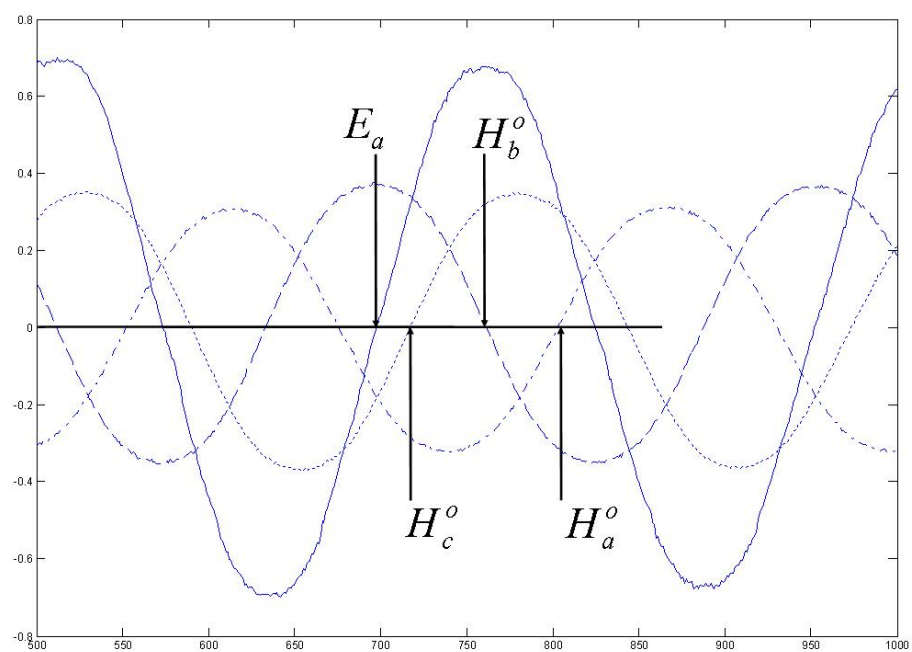


圖 4.11: 霍爾輸出訊號 H_c^o 、 H_b^o 和 H_a^o 與 E_a 的關係

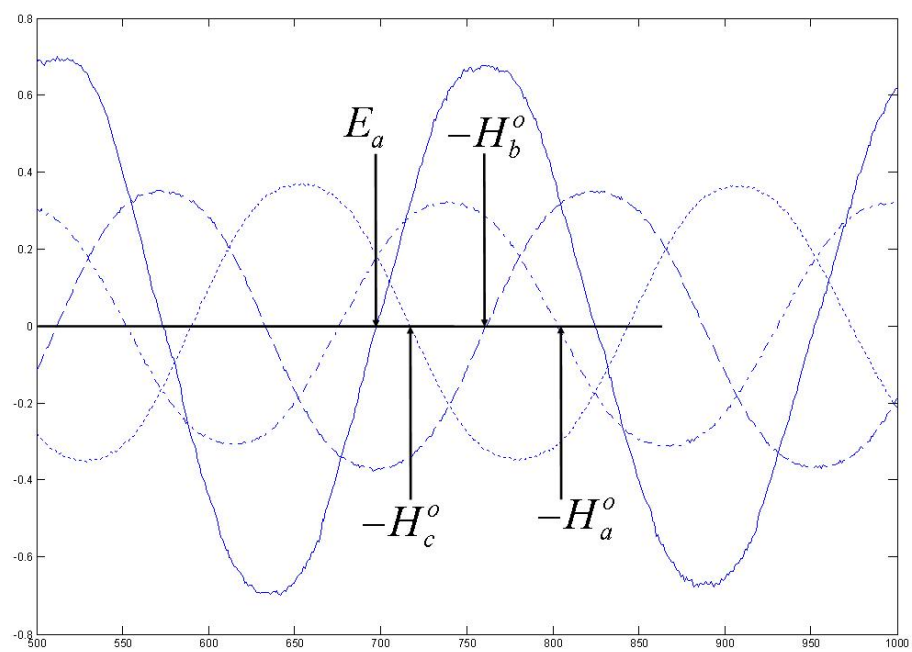


圖 4.12: 霍爾輸出訊號 $-H_c^o$ 、 $-H_b^o$ 和 $-H_a^o$ 與 E_a 的關係

上述圖 4.11 和圖 4.12 並不為所有可能情況，三個輸出訊號也有可能是 H_a^o 、 $-H_b^o$ 、 $-H_c^o$ ，有各種不同的組合，上圖只是舉例說明。由於本論文是利用零交越點的順序來判斷，因此不受影響。

圖 4.13 為實驗時所用的測試板，最左邊有連接頭可以接到馬達的排線上，最右邊可拉出訊號線與 AD/DA 卡的類比輸入通道相連，將擷取到的電壓訊號傳送到電腦內，作運算的功能。板子中間有十一組排針，利用接線器 (jumper) 可將馬達的任一接腳與 2V 或 GND 相通。

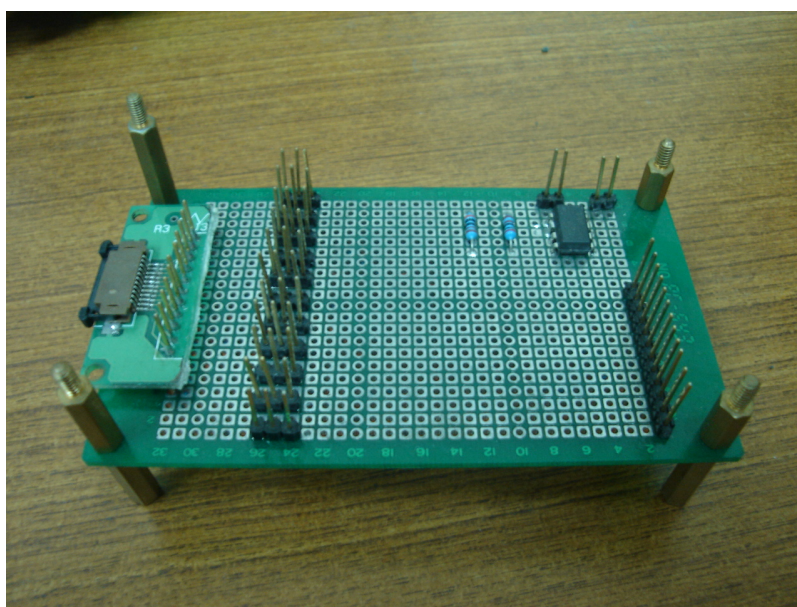


圖 4.13: 腳位自動識別實驗測試板

4.2 馬達扭矩常數的量測

將馬達的十一支接腳定義完成之後，經由本論文推導的方式，可量測出馬達的扭矩常數 K_t 。此系統架構跟圖 4.14 類似，此時馬達透過轉接板必須以正確的接腳接到驅動 IC 以及其他週邊電路上，才能使馬達正常的動作，量測馬達的扭矩常數 K_t 。同樣以 Visual C++ 撰寫視窗化的介面供使用者在電腦上直接操作，最後將量測結果顯示在電腦螢幕上。

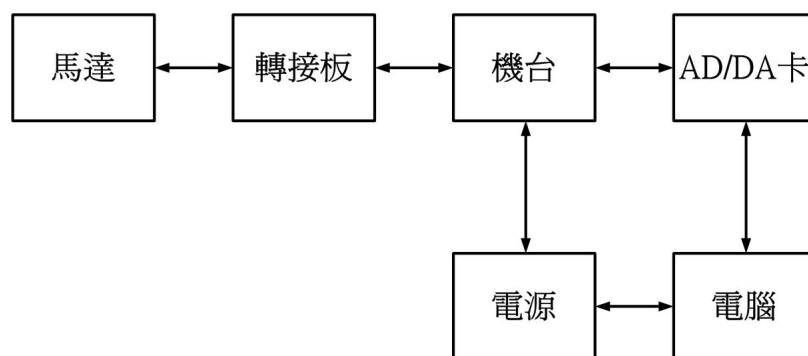


圖 4.14: 扭矩常數量測機台示意圖

其中機台電路部份如圖 4.15所示，主要由七個電路所組成：

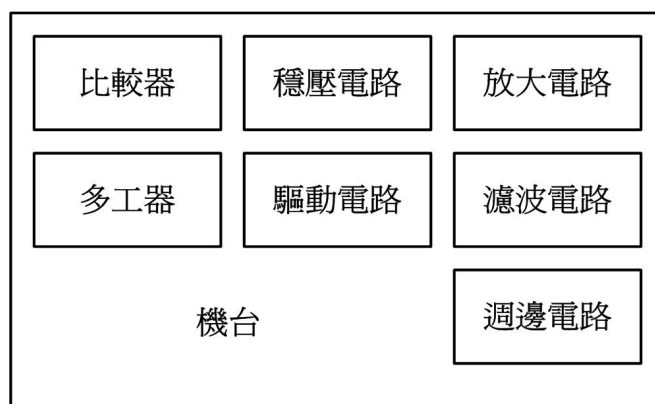


圖 4.15: 扭矩常數量測機台內部電路示意圖

(1) 比較器

比較馬達上的霍爾訊號，經過多工器後假造訊號給驅動電路，使馬達能以單相旋轉。利用比較器，將馬達上霍爾感測器的訊號 H_a^+ 、 H_a^- 作為比較器的兩個輸入。在旋轉時，比較輸出結果為一方波，將此方波作為多工器的控制訊號，控制多工器將產生的 H (2.6V) 或 L (2.4V) 訊號作為假造訊號，提供給驅動電路。當要量測馬達的扭矩常數 K_t 時，切換多工器便可將經由比較器所產生的假訊號傳送到驅動電路上，使馬達切換成單相旋轉。

(2) 多工器

接受命令，作為馬達三相旋轉與單相旋轉的切換。驅動電路接受兩種不同的訊號，讓馬達在三相模式或單相模式下旋轉，視窗化的程式透過 AD/DA 卡的數位輸出發出命令給多工器，讓馬達在三相旋轉過後，可以切換到單相模式下旋轉。

(3) 穩壓電路

提供驅動電路以及其他 IC 所需的電壓，主要是 LM7805 和 LM7812 兩顆穩壓 IC 以及一顆直流電壓轉換器，可將 12V 轉為 +15V 以及 -15V 提供給放大器。

(4) 驅動電路

與馬達連接，BA6849 為主要驅動 IC。將馬達以正確的接腳接到 BA6849，利用視窗化的程式透過 AD/DA 卡的類比輸出發出命令，給予 BA6849 電壓訊號，如此一來便可以使馬達在三相模式下旋轉。同時 BA6849 可接受上述假造的訊號，再將 c 相線圈與 BA6849 開路後，使馬達在單相模式下旋轉。

(5) 濾波電路

將馬達上的三相電壓訊號經過放大器後濾波，再經由 AD/DA 卡擷取其電壓訊號給 PC。馬達在單相模式下旋轉時，必須利用 AD/DA 卡的類比輸入通道擷取其三相端電壓的訊號後，經過程式運算求得其交流訊號振幅大小後，便得知其扭矩常數。但單相旋轉時可能會有一些高頻雜訊，影響計算的結果，所以加上濾波器以濾掉不需要的高頻雜訊。

(6) 放大電路

由於 AD/DA 卡的類比輸入通道設定成擷取範圍 $-10V$ 到 $10V$ ，爲了避免太大的電壓訊號，利用放大器將電壓依照一定比例縮小後，再輸入 AD/DA 卡的類比輸入通道。

(7) 週邊電路

包含繼電器及邏輯 IC，可作爲馬達欲切換成單相旋轉模式時，利用 AD/DA 卡的數位輸出給予訊號，將 c 相開路與驅動器分開。邏輯 IC 作爲整個機台的開關，開啓程式後，電源才會提供給機台，避免不必要的電源消耗。

利用已知十一支接腳的馬達，接到以上的機台，便可開始測試。由於馬達被著磁時所用的著磁機無法提供穩定的著磁電流，加上每顆磁石有些微材料成分的差異，所以無法確認每顆馬達所能提供的扭矩常數 K_t 都爲相近的。假設爲同樣接腳順序的馬達，此時只需更換轉子，便可快速的檢測出扭矩常數 K_t ，作爲生產線上檢測轉子把關重要依據。當要分析不同廠牌馬達的扭矩常數 K_t 時，爲了避免馬達受損或是機台燒毀，首先以馬達自動腳位自動識別機台，檢測出正確的接腳後，再依照正確的接腳接線，與馬達扭矩常數量測機台連接後，即可量測出馬達的扭矩常數。

馬達扭矩常數量測：

首先透過 AD/DA 卡的類比輸出給予 BA6849 的 E_C 及 E_{CR} 電壓訊號，當作電流命令讓馬達以三相模式正常旋轉，此時 BA6849 的接腳上會產生 FG 訊號，經由 AD/DA 卡的計時器擷取 FG 訊號的頻率後，加以計算便可得知馬達當時的轉速。馬達速度漸增，當偵測馬達轉速到達一定轉速時，經由 AD/DA 卡的數位輸出給予數位訊號，使得多工器切換，此時經由比較器假造的霍爾訊號便提供給 BA6849，以及切換繼電器使 c 相線圈開路，如此馬達便開始以單相模式旋轉。接下來就是利用 AD/DA 卡的類比輸入通道，擷取單相旋轉模式下， V_a ， V_b ，和 V_c 三相線圈的端電壓值，得到 $V_w(t)$ ，再將 $V_w(t)$ 作積分運算後，將其交流訊號分量的峰值取出，便可以知道此顆馬達的扭矩常數。

馬達在單相旋轉模式下，通以 ab 兩相電流而 c 相為開路狀態（如圖 3.10），三相端電壓波形如圖 4.16 所示。 DH_a 為 H_a^+ 與 H_a^- 經過比較器以後，產生的方波訊號，可看出 H_a 的確為電流切換的依據。

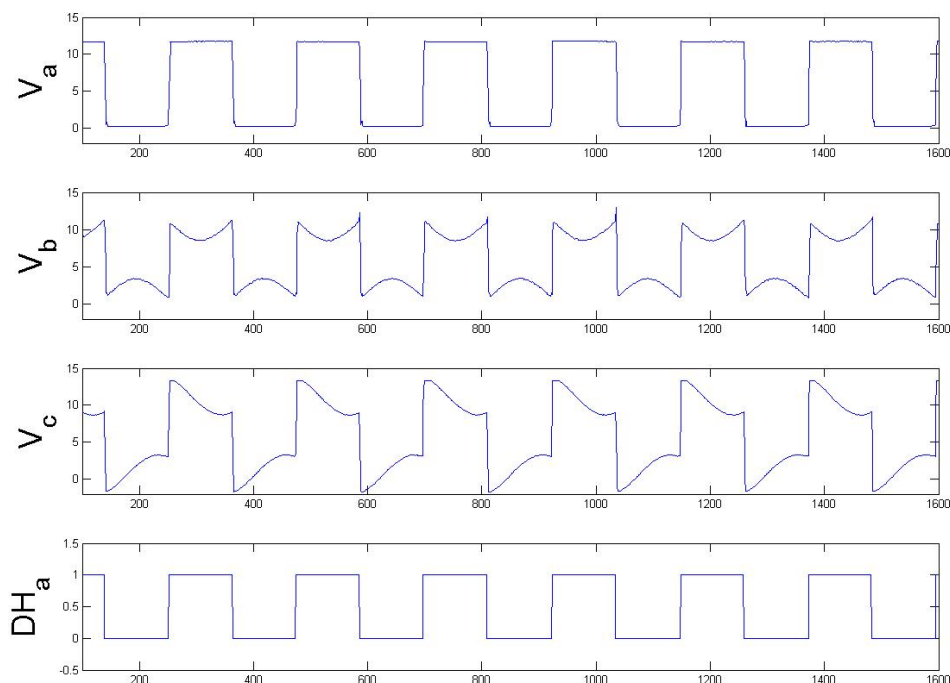


圖 4.16: 單相旋轉下三相電壓波形圖

將三相電壓波形根據式 (3.12) 及式 (3.14) 及加以運算過後，可得 $V_w(t)$ 及積分過後 Ψ 的波形如下圖 4.17。其中 Ψ_0 為一直流偏壓值，下圖的 Ψ 已減去其直流偏壓值後，剩下交流訊號成分。

圖 4.18 為實驗時所用的測試板，最左下角有連接頭可以接到馬達的排線上，左側可拉出訊號線與 AD/DA 卡的所用到的通道相連，作控制命令或其他類比輸入的功能。其它電路如示意圖說明：包含驅動電路、放大電路、穩壓電路、濾波電路、比較器、多工器及一些週邊電路。

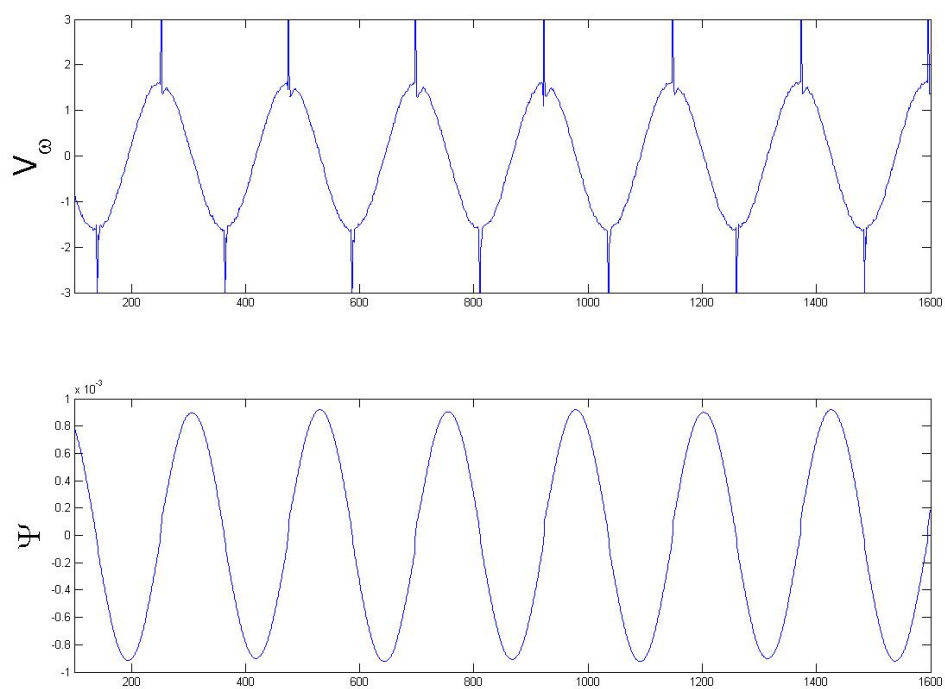
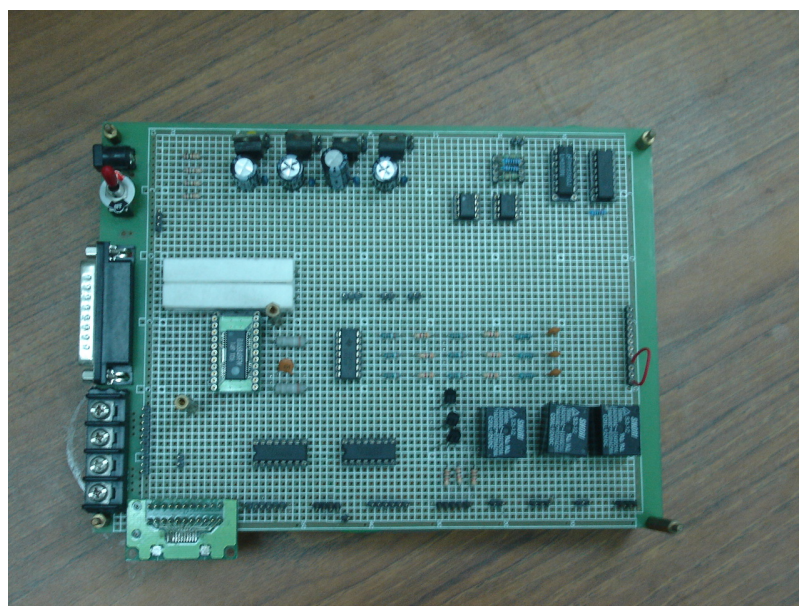
圖 4.17: $V_w(t)$ 和積分過後 Ψ 的波形

圖 4.18: 扭矩常數實驗測試板

4.3 馬達電阻與電感的量測

設定 LCR METER 提供一具有直流偏壓的弦波電流，與馬達的任意兩相線圈連接後開始測試。實驗時整個系統架構如圖 4.19，包含商品化的 LCR METER、外部電源及 GPIB 卡，外部電源提供其直流偏壓，GPIB 卡是爲了讓使用者可以直接在電腦上操作 LCR METER，此時也必須先得知馬達的三相線圈電壓接腳的位置，才能進行量測。以 Visual C++ 撰寫視窗化的介面供使用者在電腦上直接操作，最後將量測結果顯示在電腦螢幕上。

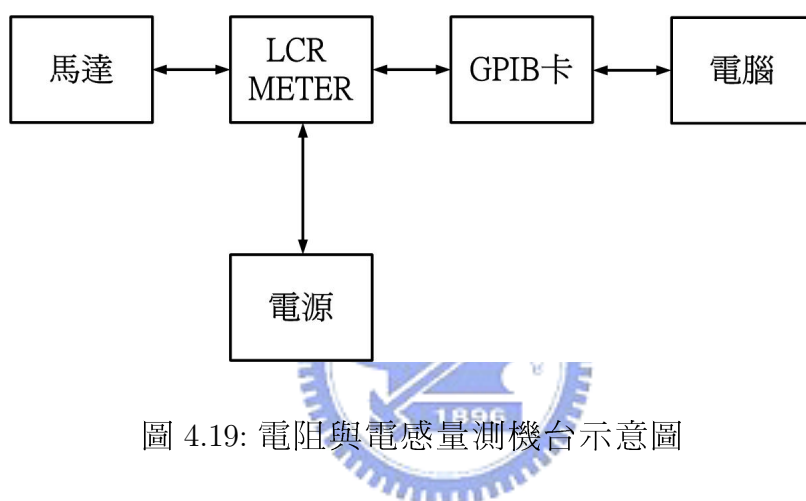


圖 4.19: 電阻與電感量測機台示意圖

實驗時，以三種不同方法，在兩種頻率下，測試同一顆馬達的電阻及電感，第一種方法爲傳統方法，直接使用 LCR METER 量測，不加入外部偏壓；第二種方法爲本文提出的方法，及提供外部偏壓給馬達的線圈，再進行量測的動作；第三種方法爲將馬達轉子夾住的方法，使用外力將馬達轉子固定在同一個位置，此爲標準值，用來與實驗方法作比對。實驗結果如表 4.1、表 4.2。LCR METER 的設定限制不盡相同，本實驗使用型號爲 ZM2353 的 LCR METER，其最低頻率設定爲 40 Hz；最高頻率設定爲 200 kHz。：

表 4.1: 三種不同方法量測馬達線電阻結果

頻率 (Hz)	傳統量測的方法	本文所提的方法	轉子固定量測法
40	1.7 Ω	1.62 Ω	1.6 Ω
1000	1.69 Ω	1.68 Ω	1.68 Ω

由表 4.1 可知，使用 LCR METER (ZM2353) 量測馬達的線電阻時，不論設定為高頻或是低頻，其量測結果均相近。

表 4.2: 三種不同方法量測馬達線電感結果

頻率 (Hz)	傳統量測的方法	本文所提的方法	轉子固定量測法
40	–	0.31 mH	0.31 mH
1000	0.30 mH	0.30 mH	0.31 mH

由表 4.2 可知，使用 ZM2353 量測馬達的線電感時，在低頻，使用傳統方法量測，會造成馬達轉子的抖動，故量測結果在某些位置會產生很大的錯誤，不加以紀錄。而本文提出的方法及轉子固定量測法，均能得到同樣的電感值，驗證本文提出方法的量測結果正確。而在高頻時，使用三種不同方法量測馬達線電感的結果均相同，這是因為馬達轉子超過馬達的機械頻寬，轉子無法及時跟上設定的激磁頻率，故消除了感應電動勢的影響，三種量測結果幾乎相同。



第五章

實際產品應用

依照本論文先前提出的理論及實驗方法，與產業界的需要配合，本論文可以設計製作三種量測馬達特性參數的機台，提供給馬達的製造工廠作為檢測的依據。首先為『馬達腳位自動識別機台』，利用此機台可將馬達的十一支接腳作正確的歸類。知道了正確的接腳之後，可以節省人工試誤的時間，以及避免造成馬達元件損毀或是機台故障；亦可作接下來的處理，例如量測馬達參數，控制馬達速度等。第二為『馬達扭矩常數量測機台』，扭矩常數關係著馬達的出力大小，轉速等，利用此機台可以快速的量測出已知接腳的馬達的扭矩常數 K_t ，作為同一批馬達出廠，判斷其扭矩常數鑑別的依據。第三為『馬達電阻與電感量測機台』，馬達三相繞組的是否相近，可作為馬達控制性檢測的一項依據，而在不同頻率下測試，可找出在不同頻率激磁下造成的影響。

5.1 馬達腳位自動識別機台

根據第三章的識別法則以及第四章的實驗結果，本論文規劃以下流程，使馬達腳位自動檢測的方式可以實現，並期望能使鑑別的時間縮短，快速的達到腳位識別的要求。並利用 AD/DA 卡作控制命令及資料擷取的功能，撰寫 Visual C++ 的視窗化介面，以供使用者直接在電腦螢幕上操作機台。實際製作的機台實體圖如圖 5.1，整個機台由電腦上的視窗操作；而圖 5.2 為馬達與接線板連接圖，接線板上有接線器（jumper）可供使用者操作。

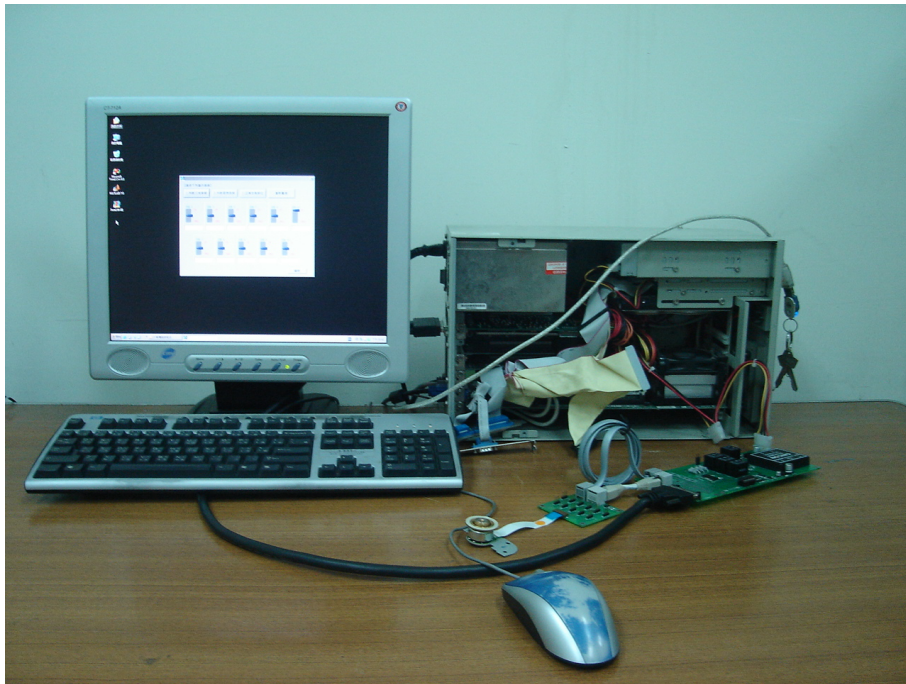


圖 5.1: 馬達腳位自動識別機台實體

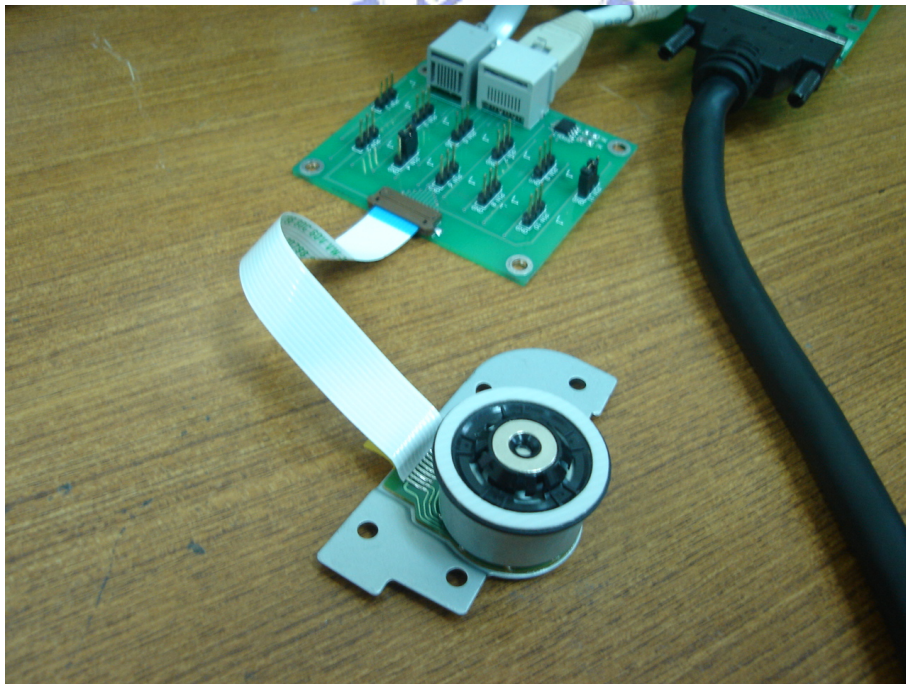


圖 5.2: 馬達與接線板連接圖

圖 5.3 為馬達腳位自動識別機台之視窗化操作介面，畫面上告知使用者接線方式，為了利於操作，故畫面樣式與接線板相同。操作介面上共有四個按鍵，分別可以作主要的三個判別加上重新量測。

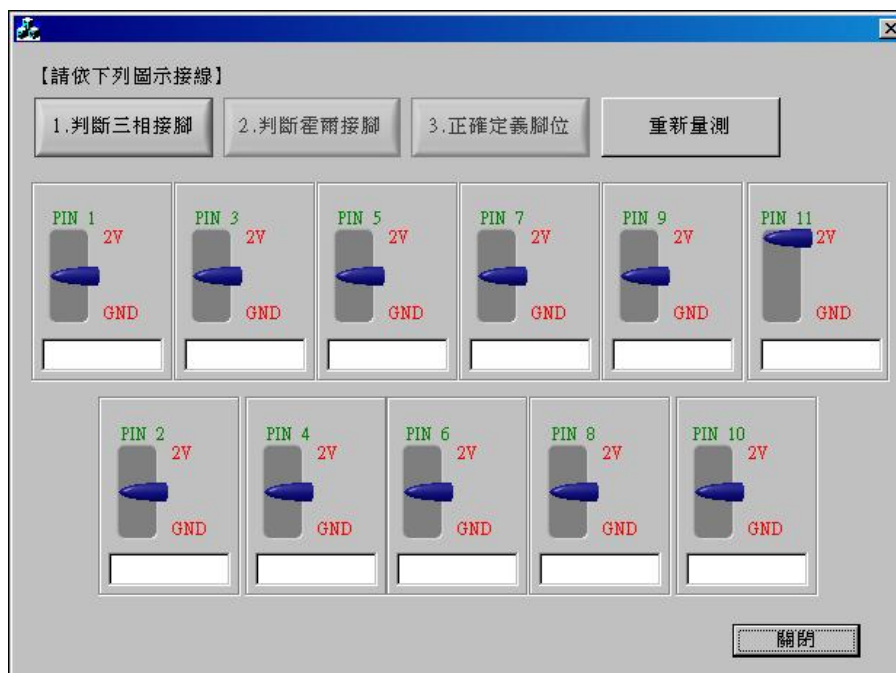


圖 5.3: 馬達腳位自動識別機台之視窗化操作介面

在開啓操作介面後，AD/DA 卡便送出數位輸出命令，將機台上的開關切換，此時電源便供應到機台上所有所需的接腳。接下來便依照先前的三個步驟，逐步作馬達接腳的檢測。

步驟（一）將三相線圈電壓接腳與其他八支霍爾接腳區分開來

步驟（二）找出霍爾感測器的供應電壓接腳

步驟（三）所有接腳歸類完成

首先要找出三相線圈電壓接腳，因此將馬達的十一支接腳任何一支接到 2V，按下按鍵（1）後作電壓擷取判斷的動作，為了使用者方便，如圖 5.3 所示，將第十一支接腳接上 2V，其餘接腳為浮接狀態。判斷三相線圈電壓接腳的流程圖如圖 5.4，此時便可找到三相線圈電壓接腳如圖 5.5，此類馬達的 PIN1、PIN2 和 PIN3 為三相線圈電壓接腳。

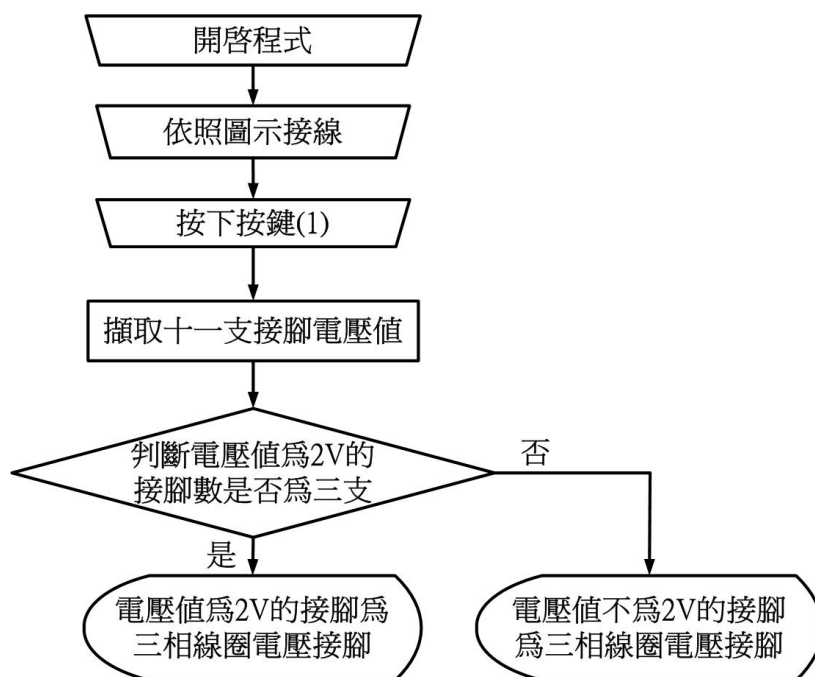


圖 5.4: 腳位自動識別步驟一流程圖



圖 5.5: 找出三相線圈電壓接腳

找到三相線圈電壓接腳後，接下來便依照畫面所示接線繼續測試，此時已將三支接腳排除，對於剩下八支霍爾接腳，作第二個步驟的處理，找出霍爾感測器的供應電源兩支接腳。

依照圖示將 2V 和 GND 接到圖上的位置後，按下按鍵 (2) 作電壓擷取判斷的動作，根據 2V 和 GND 接到的兩支接腳不同，會有不同的測試結果，故不同接腳順序的馬達所需測試的次數不相同，直到找到正確的霍爾感測器的供應電源接腳，其流程如圖 5.6，

根據圖 3.3，假定 $R_1 = R_2 = 200\Omega$ 。為了方便說明，排除 2V 與 GND 兩支接腳，將其餘六支接腳電壓，每次擷取電壓之後，依照電壓大小排列為： $V_A > V_B > V_C > V_D > V_E > V_F$ ，八支接腳依序為 PIN(2V)、PIN(A) ~ PIN(F)、PIN(GND)，A ~ F 分別對應到不同的接腳號碼。以下說明根據電壓擷取結果不同，而有不同的判斷。

(A) 類：根據圖 3.4 及式 (3.4)、式 (3.5)

(1) 擷取八支接腳電壓，並加以排列大小後，可發現 $V_f > 1.2V$ ，則 PIN(2V) 為一支霍爾電源接腳；PIN(E) 為另一支霍爾電源接腳。

(2) 擷取八支接腳電壓，並加以排列大小後，可發現 $V_a < 0.8V$ ，則 PIN(GND) 為一支霍爾電源接腳；PIN(B) 為另一支霍爾電源接腳。

(B) 類：根據圖 3.5 及式 3.6

擷取八支接腳電壓，並加以排列大小後，可發現 $V_a \approx V_b \approx V_c \approx V_d \approx V_e \approx V_f \approx 1V$ ，則 PIN(2V) 和 PIN(GND) 為同一組霍爾感測器的正負訊號接腳，排除此二支接腳，切換 2V 接線器 (jumper) 和 GND 接線器 (jumper)，到其餘接腳作測試，當找到了三組霍爾感測器的正負訊號後，剩下的兩支接腳即為霍爾感測器的供應電源兩接腳。

(C) 類：根據圖 3.6 和式 (3.8)、式 (3.10)

除了 (A) (B) 的電壓擷取結果以外，此時 $V_A \sim V_F$ 有高有低，，將 GND 接線器 (jumper) 接到 PIN(E)，重新測試。

(D) 類：此時霍爾感測器已開始動作

除了 (A) (B) 的電壓擷取結果以外，此時 $V_A \sim V_F$ 有高有低，，將 GND 接線器 (jumper) 接到 PIN(E)，重新測試。

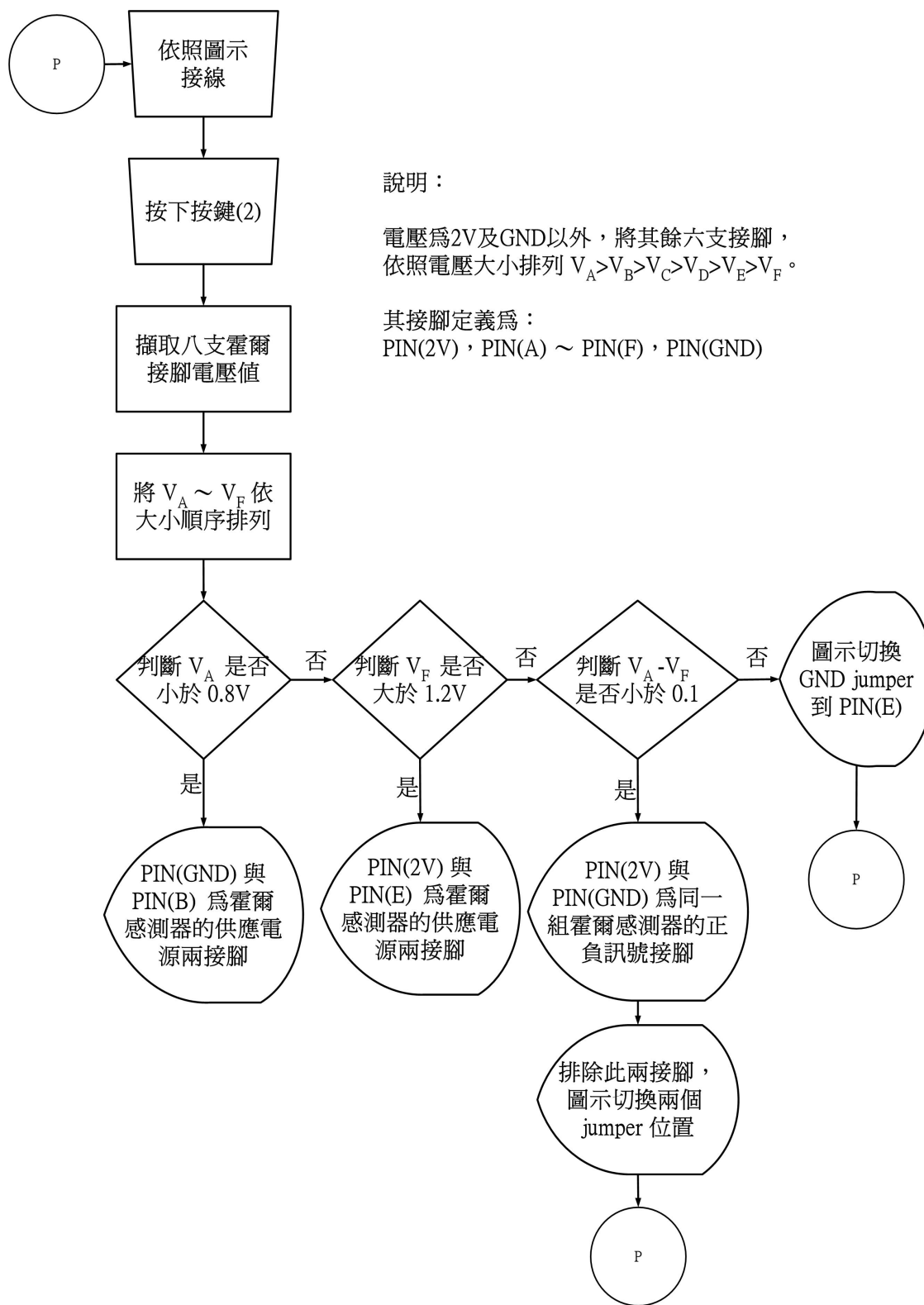


圖 5.6: 腳位自動識別步驟二流程圖

此時霍爾感測器的供應電源兩接腳已被找出，定義接腳順序較小的為霍爾感測器的供應電源正端接腳；接腳順序較大的為霍爾感測器的供應電源負端接腳。將 2V 接上了正電源接腳；GND 接上了負電源接腳，此時霍爾感測器已被接上電源，已開始動作。而其餘的六支接腳，均為霍爾感測器的訊號接腳。

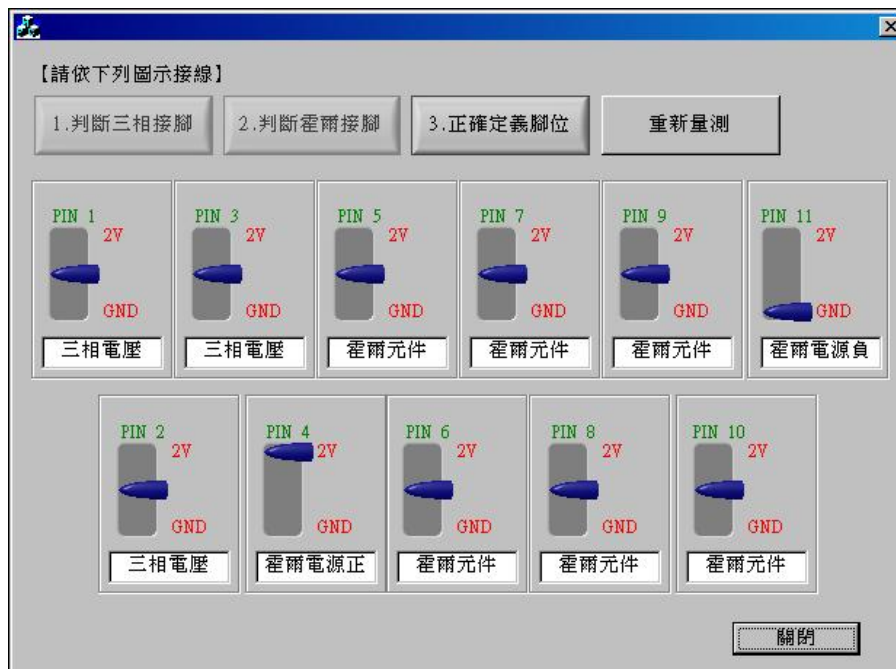


圖 5.7: 找出霍爾感測器的供應電源兩接腳

讓馬達在開路下順時針旋轉，同時按下按鍵（3）作電壓擷取判斷的動作，2V 及 GND 必須正確的接到霍爾感測器的供應電源兩接腳。擷取馬達在開路旋轉下的三相感應電動勢波形，六個霍爾感測器的接腳訊號，在程式裡面作判別，最後可以將所有接腳定義完成。

（1）定義三相線圈接腳

在開路旋轉時，定義三相線圈壓接腳中接腳順序最小的接腳為 a 相線圈電壓接腳（E1），根據開路旋轉時三相電壓的感應電動勢，定義出 b 相線圈電壓接腳及 c 相線圈電壓接腳。

（2）將兩兩一組的霍爾感測器的訊號歸類

六支霍爾感測器的訊號接腳，任意取兩支，兩兩相加，相加的結果為零即為同一組的霍爾感測器；不為零的則否。

(3) 三組霍爾感測器與三相電壓配對

將上述所找到的三組霍爾感測器訊號，同一組的訊號兩兩相減，得到三個霍爾輸出訊號，再根據與 E_a ($E1$) 由負到正的零交越點為依據，將三個輸出訊號的零交越點依序找出，並配對到三顆霍爾感測器，同時根據三個霍爾輸出訊號在零交越點前後的趨勢，將同一組霍爾感測器的接腳正負定義出來。

其流程圖如圖 5.8、圖 5.9。

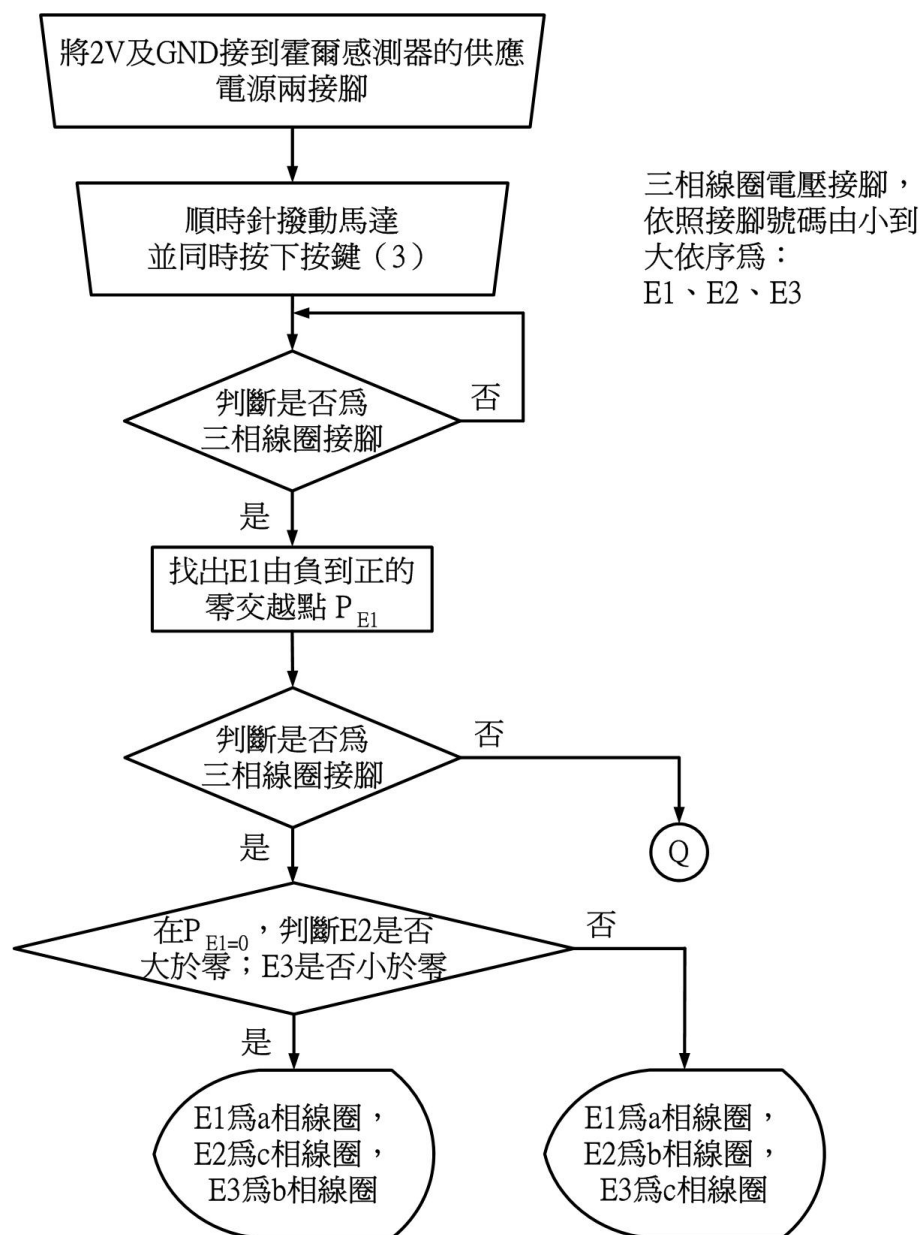


圖 5.8: 腳位自動識別步驟三流程圖（一）

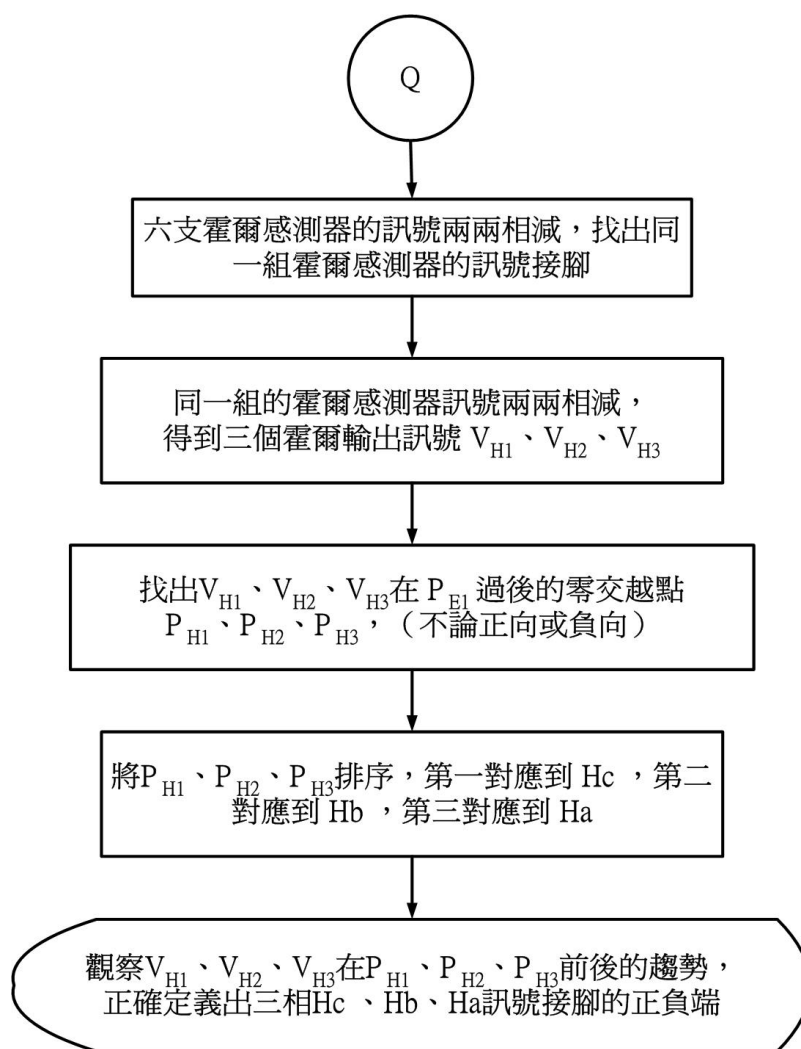


圖 5.9: 腳位自動識別步驟三流程圖（二）

至此馬達的十一支接腳已被完全定義完成，如圖 5.10、圖 5.11。馬達的十一支接腳有固定的關係，只要給予其中三支定義，根據其關係，可將所有接腳歸類完成。自行定義兩支為霍爾感測器的供應電源兩接腳，其正負定義可顛倒；另一支為 a 相線圈電壓接腳，共有三種不同選擇。因此對應到的三組霍爾感測器的訊號接腳正負和配對三相線圈亦不同，可有不同的組合方式，皆可使馬達正常旋轉，而必須強調的是，文中定義為順時針方向為正向旋轉。

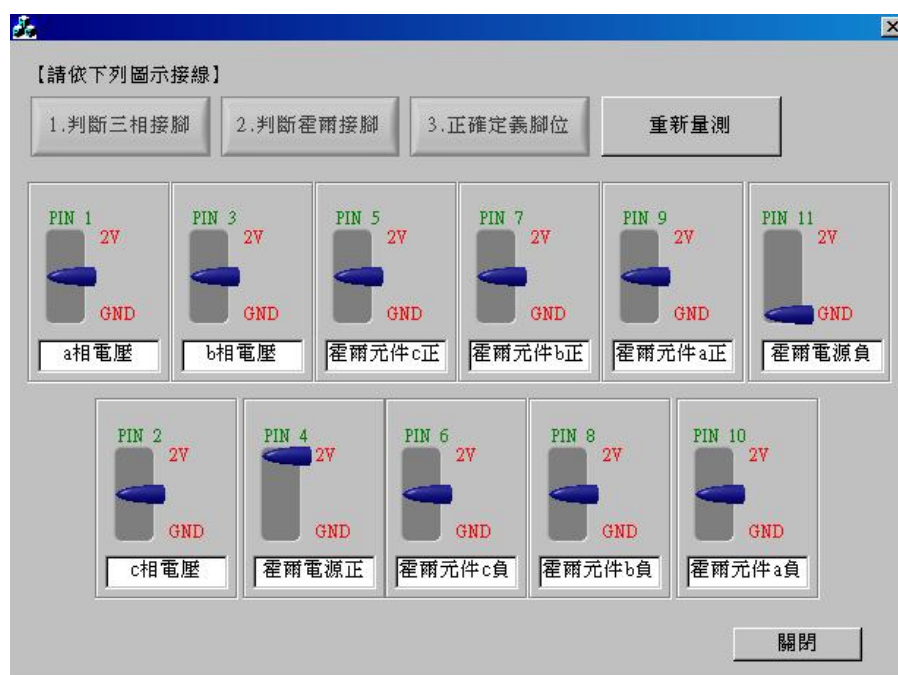


圖 5.10: 所有接腳定義完成

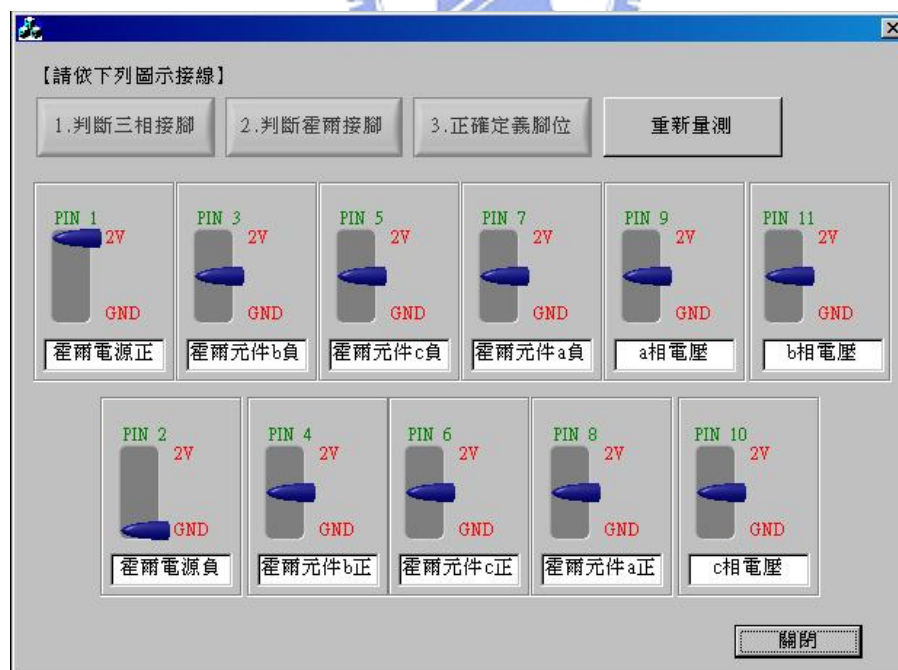


圖 5.11: 不同馬達腳位自動識別結果

5.2 馬達扭矩常數量測機台

根據第三章的識別法則以及第四章的實驗結果，本論文規劃以下流程，使馬達扭矩常數量測的方式可以實現，並期望能使鑑別的時間縮短，快速的達到扭矩常數量測的要求。並利用 AD/DA 卡作控制命令及資料擷取的功能，撰寫 Visual C++ 的視窗化介面，以供使用者直接在電腦螢幕上操作機台。實際製作的機台實體圖如圖 5.12。



圖 5.12: 馬達扭矩常數量測機台實體

圖 5.13 為馬達與轉接板連接圖，因為機台上有固定的腳位，接到驅動器及其他電路，故必須使用轉接板，使用者必須以正確的接線方式接線，馬達接上機台後才能正常旋轉，並量測其扭矩常數及電壓常數。

圖 5.14 為電路板，右邊為 SCSI 連接頭，AD/DA 卡透過轉接線傳送控制命令或接收類比訊號以作為計算；網路接頭與電話接頭透過網路線及電話線，與轉接板連接，而電路板的內部電路如圖 4.15 所描述。

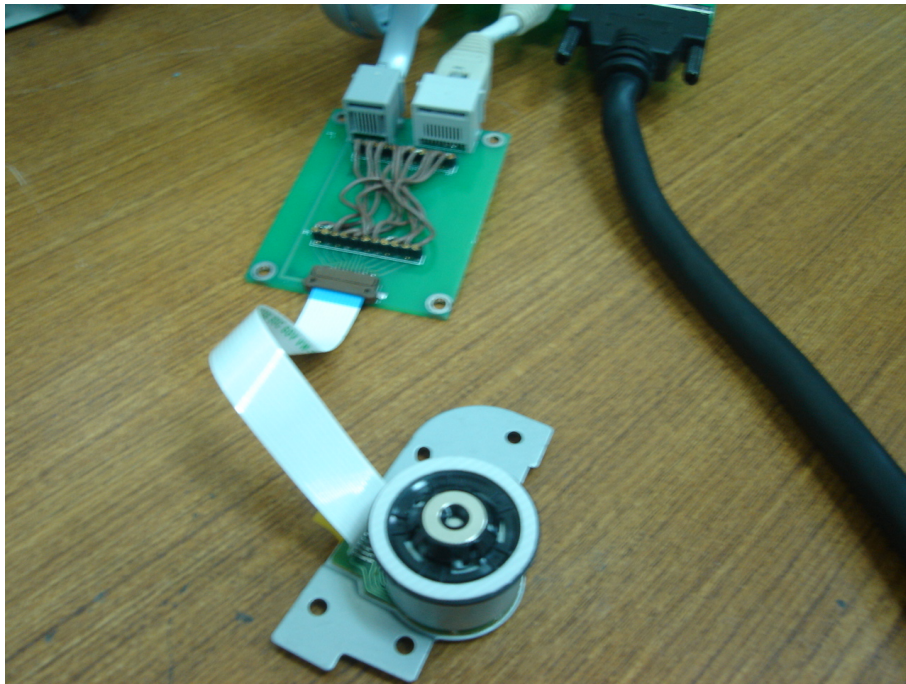


圖 5.13: 馬達與轉接板連接圖

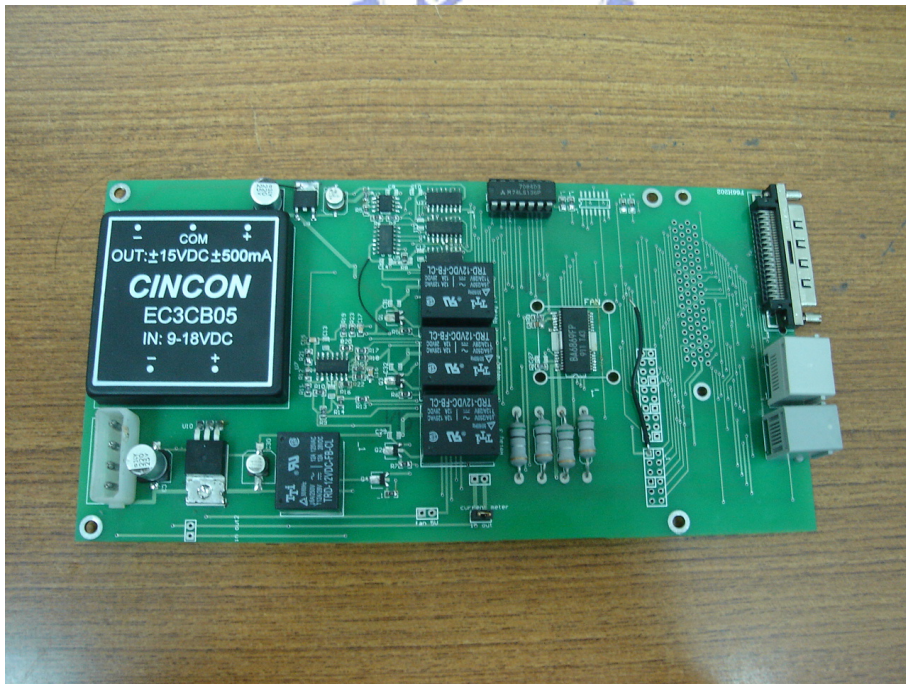


圖 5.14: 馬達扭矩常數量測機台的電路板

圖 5.15 為馬達扭矩常數量測機台之視窗化操作介面，將馬達以正確腳位接到機台後，只要按下按鈕即開始量測馬達的扭矩常數及電壓常數，右邊可自行設定上限及下限，作為檢測的標準；並由右邊視窗可看出積分的結果。

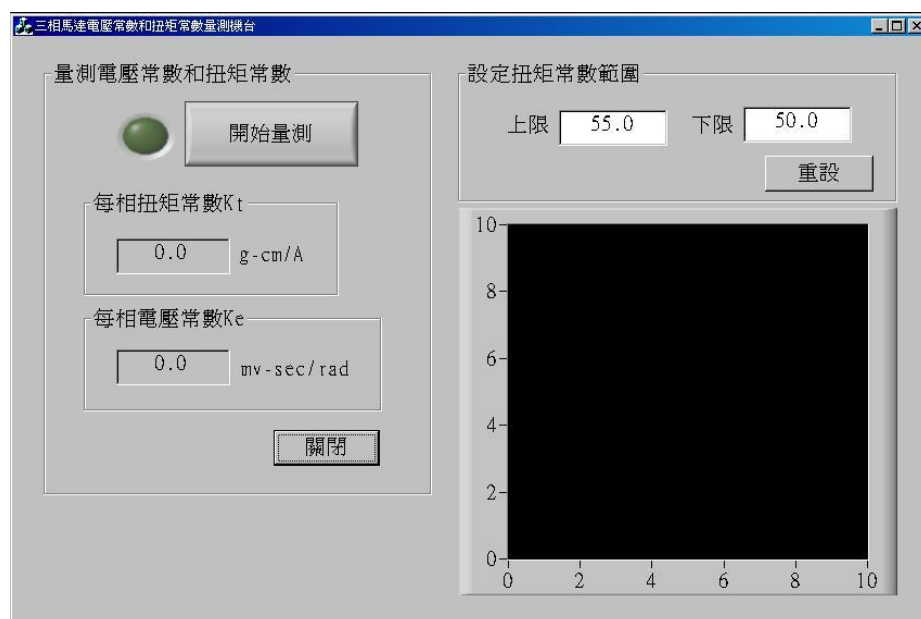


圖 5.15: 馬達扭矩常數量測機台之視窗化操作介面

開啓操作介面後，按下按鈕可使馬達由三相旋轉開始，到達一定轉速後，切換成單相旋轉，這是因為馬達直接在單相旋轉時，扭矩會有死點，利用三相旋轉沒有死點的特性，到達一定轉速後切換，此時有持續的慣量作用在馬達上，切換成單相旋轉就不會遇到死點，故馬達必定能在單相模式下旋轉。但假使定義的霍爾感測器 H_a ，其輸出訊號有錯誤，故無法給予到正確的電流換相，馬達就無法切換在單相模式下旋轉。

在馬達單相旋轉時，擷取三相端電壓波形，加以計算並積分過後，可得到馬達某相的扭矩常數 K_t ，又 $K_t = K_e$ ， K_e 為馬達某相的電壓常數。視窗上由於單位不同故造成數量級有差。而根據視窗化所設定的上下限，告知測試人員其測試結果是否通過測試，積分結果的波形同時繪於右邊的視窗上。整個流程圖如圖 5.16。

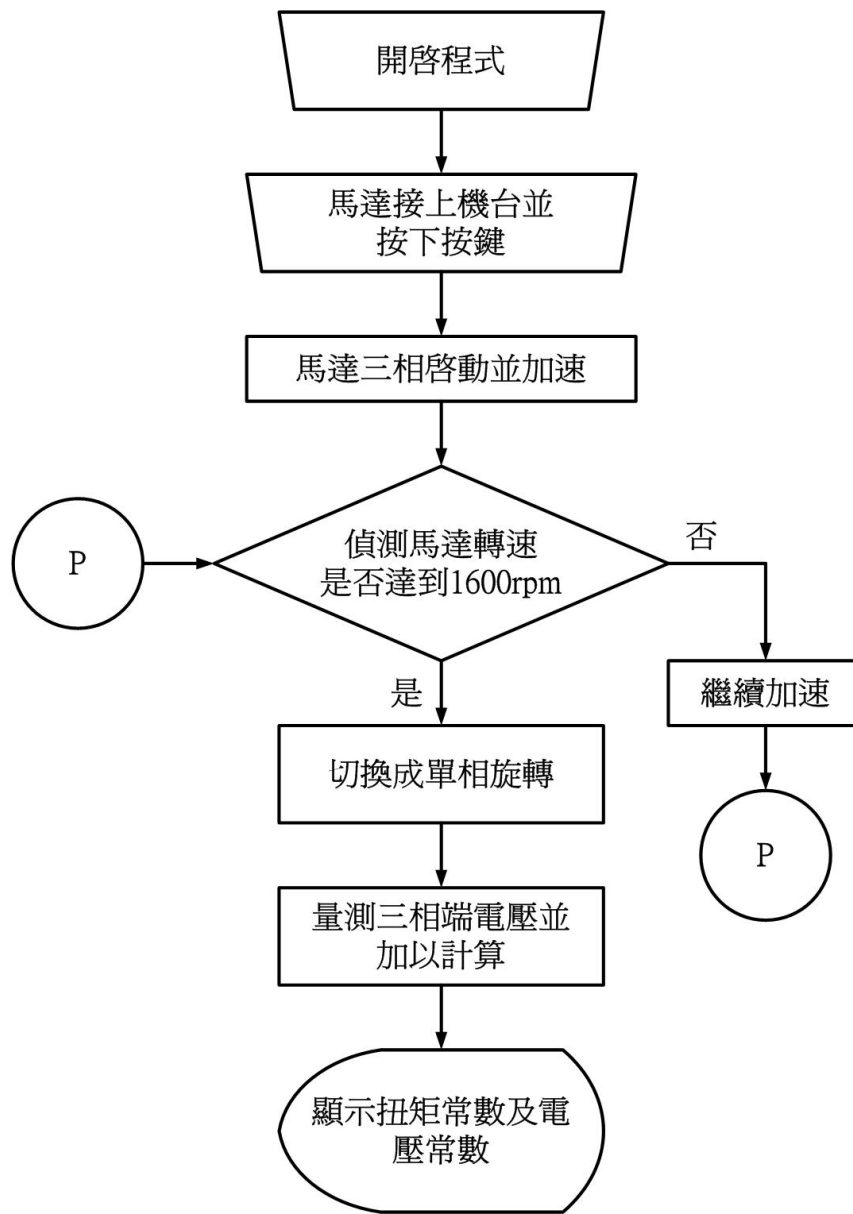


圖 5.16: 馬達扭矩常數量測流程圖

積分的結果爲一弦波（圖 5.17），其振幅再加以計算後即爲馬達的扭矩常數 K_t 與電壓常數 K_e 。假使扭矩常數 K_t 位於使用者所設定上下限之間，符合標準，顯示『PASS』；當不符合標準時，顯示『FAIL』，在生產線上，可以快速的更換轉子檢測，如此可以作爲品管的依據。

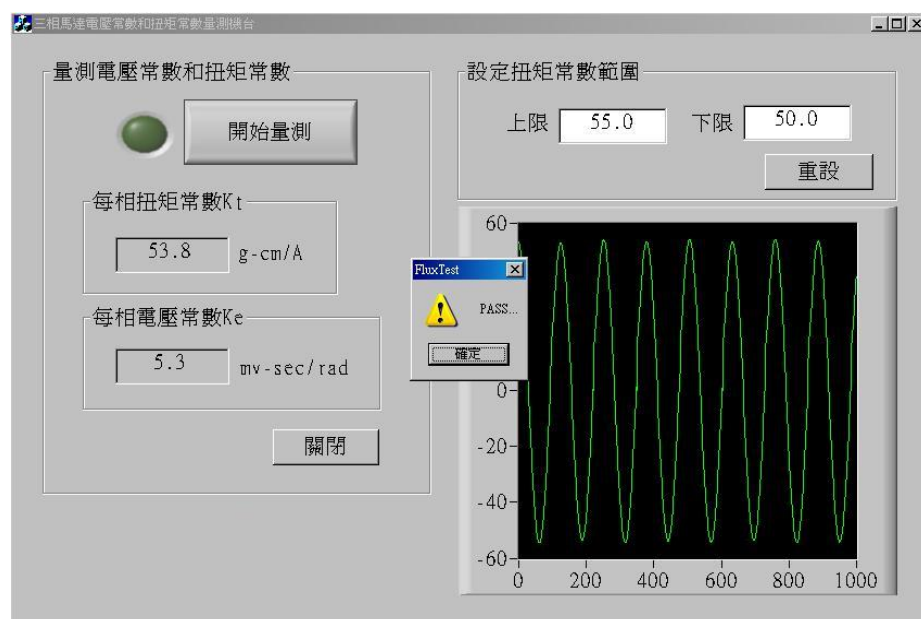


圖 5.17: 馬達扭矩常數與電壓常數量測結果

5.3 馬達電阻與電感量測機台

當要量測馬達電阻及電感時，同樣設計了一個視窗化的操作介面，透過 GPIB 卡與 LCR METER 連接，在電腦螢幕上即可操作 LCR METER，電阻與電感量測結果即顯示在電腦螢幕上，實體控制的機台如圖 5.18。當然也必須預先得知馬達的三相線圈接腳位置，再利用 LCR METER 的測試勾，與馬達的任意兩相線圈相連，即可開始量測馬達的線電阻與線電感，如圖 5.19。利用同樣的量測方法，假使為四線式的馬達，將測試勾連到馬達的中心相以及任意一相線圈，即可量得馬達的相電阻及相電感。

量測時設定 LCR METER 為量測 $Z\angle\theta$ 的大小 $|Z|$ 及相位 θ ，又已知馬達的電阻與電感串聯 $Z = R + j\omega L$ ，故

$$Z = |Z| \cos \theta + j|Z| \sin \theta = R + j\omega L$$

計算之後可得量測結果，其中 ω 為設定的激磁量測頻率。

$$R = |Z| \cos \theta, \quad L = |Z| \sin \theta / \omega$$

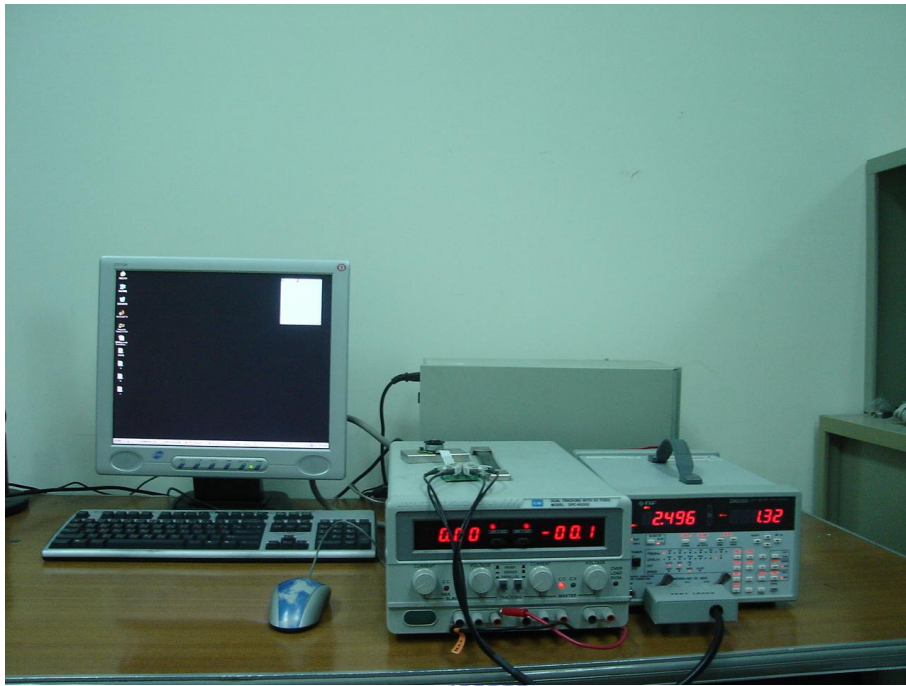


圖 5.18: 馬達電阻與電感量測機台實體

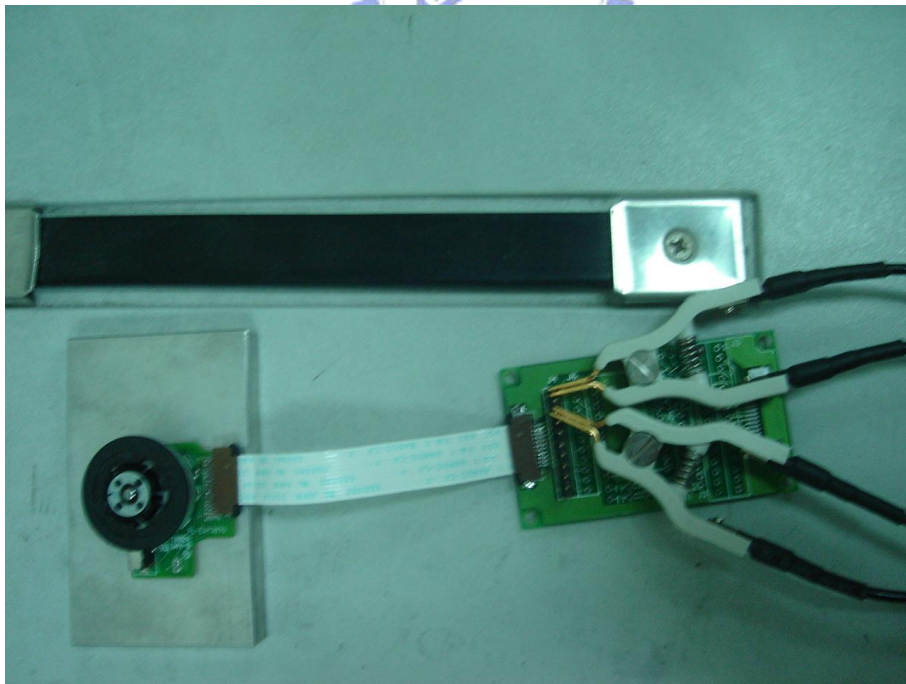


圖 5.19: 馬達與 LCR METER 測試勾連接圖

其視窗化操作介面如圖 5.20，可以設定為無偏壓、內部偏壓或是外部偏壓為不同的量測模式，用以驗證本文提出的方法。



圖 5.20: 馬達電阻與電感量測機台之視窗化操作介面

其量測流程圖如下，量測的結果最後會顯示在視窗化的操作介面上。

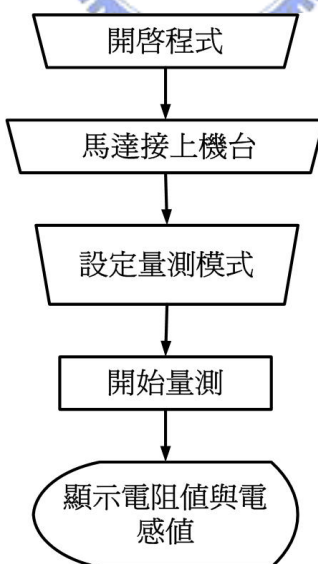


圖 5.21: 馬達電阻與電感量測流程圖

5.4 馬達轉速與電流量測機台

此時已經知道馬達的正確接腳及扭矩常數和電阻電感值，配合產業界的要求，本論文也同時利用了比例積分控制器，同樣撰寫 Visual C++ 的視窗化操作介面，用來控制馬達轉速，得知控制馬達轉速時的狀態，同時可以量測不同馬達在同樣驅動電壓下，可達到的最大轉速。透過電流量測電流，可觀察控制馬達在不同轉速時，線圈上電流的穩定度。

不同的馬達也由於其扭矩常數和電阻電感有差異，故控制時的穩定度也不一樣，在視窗內建可調整的兩個增益值，調整不同的增益來符合不同的馬達。以下為控制方塊圖：

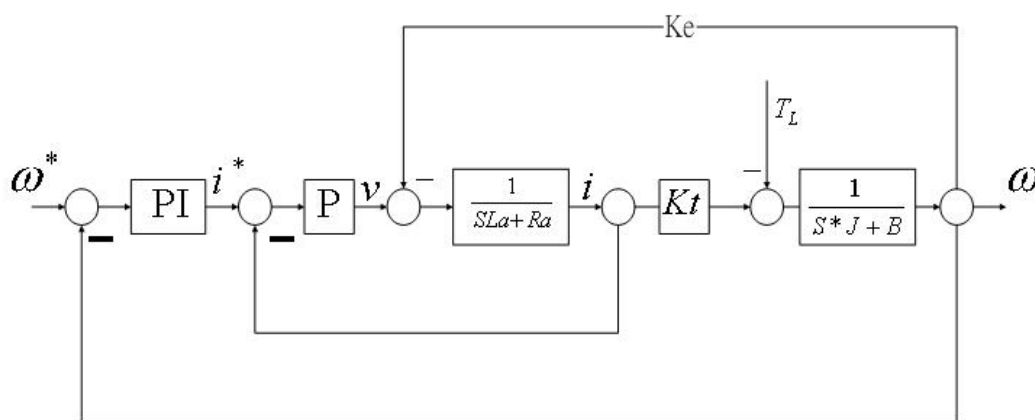


圖 5.22: 速度控制方塊圖

經由 BA6849 的 E_C 和 E_{CR} 的電壓差，可以使馬達加速或減速，利用此種特性，設計比例積分控制器，以控制馬達的轉速。轉速量測的操作介面如下圖。可控制 1000 到 10000rpm 的轉速，設定轉速後，按下按鍵便開始讓馬達在固定轉速下旋轉，並可以偵測為是否有負載的狀態，在有負載的情況時，相同轉速下電流值較大。視窗上進階的按鍵可以調整在不同狀況時，為了要控制馬達轉速，所需的增益值大小。如圖 5.24



圖 5.23: 馬達轉速與電流量測之視窗化操作介面

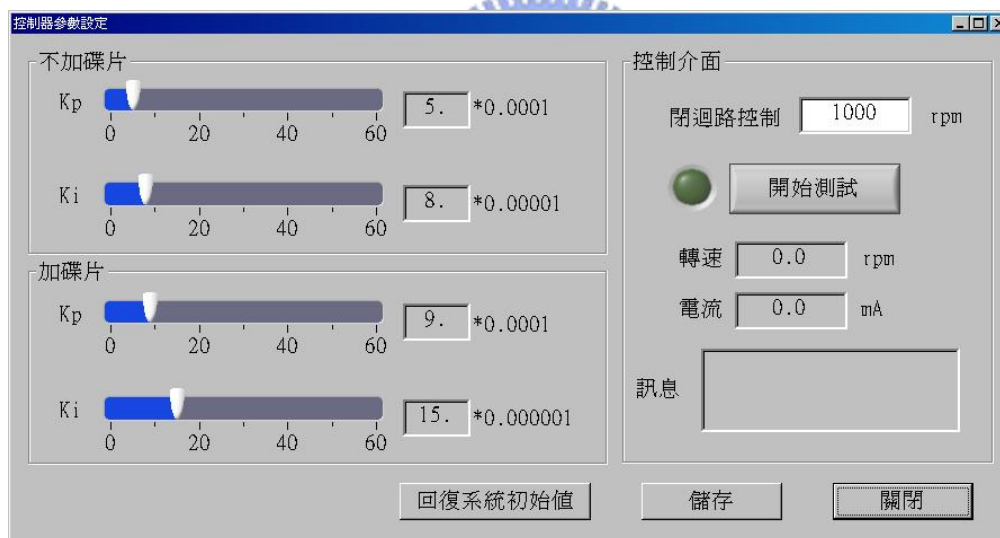


圖 5.24: 調整增益值來符合不同狀況

而整個轉速與電流量測機台的硬體實體系統與扭矩常數量測機台類似，BA6849 為主要的驅動 IC。外接電流表將流經馬達線圈上的電流值量測之後，顯示在操作介面上。程式控制轉速是用調整輸入 BA6849 的 E_C 及 E_{CR} 來控制，所以同樣透過 AD/DA 卡的類比輸出通道，來改變輸入的電壓，藉以作控制的動作，而馬達的轉速同樣由 BA6849 上的 FG 所產出，與輸入的命令速度作比較，將誤差以比例積分控制器調整為近似於零。

第六章

結論與未來發展

6.1 結論



馬達製造廠的測試人員欲測試不同廠牌的光碟機馬達時，必須預先得知馬達的接腳，才能將馬達接到本身的驅動器，使馬達正常運作。也在得知正確接腳後，才可以與本身出廠的馬達，本身設計的電路作比較，故本論文提供一個快速且方便的鑑別馬達接腳的方法，提供給馬達測試人員，節省利用試誤法的時間。

扭矩常數 K_t 關係到馬達本身的性能、出力大小與可操作的工作轉速。本論文的貢獻在於能夠快速、方便、且準確的量測出扭矩常數，此方法的發現，能幫助馬達生產廠提高其品質保證，經過全面且快速的鑑定，挑出不良品，以提供使用者高品質的保證。

馬達的電阻與電感量測亦為馬達鑑別內很重要的議題，較佳的電阻與電感匹配可以使馬達的線性度較佳，故控制性也比較好。馬達廠製造馬達時檢測馬達的電阻與電感，檢測結果可作為生產線上作為品管的依據。以簡單的 LCR METER，提供具有直流偏壓的交流激磁電流，即可使馬達轉子固定，因此量測結果也較為精確。

6.2 未來發展

目前所規劃的馬達腳位自動識別機台僅為雛型機台，必須使用人工來切換接線狀態，未來規劃可利用透過 AD/DA 卡的數位輸出，來控制開關的切換，同樣利用 AD/DA 卡擷取不同接線方式所量測到的結果，快速的將量測的結果顯示在電腦螢幕上。

而馬達扭矩常數檢測機台方面，以本文提出的方法同樣可以套用到單相風扇馬達，擷取單相風扇馬達兩端的感應電動勢後，加以計算可以求得單相風扇馬達的扭矩常數及感應電動勢常數。而此時不需接上驅動器，只需以噴氣或是撥動方式，單相風扇馬達即可旋轉，透過 AD/DA 卡的類比輸入通道，即可計算求得結果。

在馬達電阻與電感量測機台部份，由於本次實驗使用的 LCR METER 的最低頻率，僅能設定在 40Hz，無法看出在更低頻時，馬達量測電阻與電感的結果。未來可以選用不同的 LCR METER，以本文提出的方法，觀察在不同頻率下，馬達的電阻與電感的量測結果。



參考文獻

- [1] C. Delecluse, and D. Grenier, "A measurement method of the exact variations of the self and mutual inductances of a buried permanent magnet synchronous motor and its application to the reduction of torque ripples," *Proceedings of the 1998 5th International Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 191-197, 1998.
- [2] T. Takaharu, and M. Nobuyuki, "Sensorless brushless DC motor drive with emf constant identifier," *IECON Proceedings*, Vol. 1, pp. 14-19, 1994.
- [3] T. Hisashi, K. Takashi, and T. Hirokazu, "Real-Time estimation method of brushless DC servomotor parameters," *Proceedings of the Power Conversion Conference*, Vol. 2, pp. 673-678, 1997.
- [4] S. J. Wang, C. C. Chang, S. K. Lin, J. J. Ju, and D. R. Huang, "An Automatic Pin Identification Method for a Three-Phase DC Brushless Motor," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.41, No. 10, Oct. 2005.
- [5] S. J. Wang, C. H. Fang, and S. K. Lin, "A flux estimation method of a permanent-magnet synchronous motor," *ISAMT2003*, pp. 281, 2003.
- [6] S. J. Wang, and S. K. Lin, "Inductance and resistance measurement of a permanent-magnet synchronous motor," *World Congress on Intelligent Control and automation*.
- [7] S. J. Wang, C. H. Fang, and S. K. Lin, "A approach to the measurement of the inductance of a permanent-magnet synchronous motor," *ISAMT2003*, pp.275, 2003.

- [8] 王世杰， 三相三相直流無刷馬達特性參數鑑別方法，國立交通大學電機與控制學系博士論文，2004。
- [9] 侯捷， C++Primer 3rd 中文版，碁峰資訊股份有限公司，2001。
- [10] 趙貴祥， DC 無刷電動機與控制電路，文笙書局股份有限公司，1995。
- [11] 陳家宏， 小型電動機的基礎知識，文笙書局股份有限公司，1995。
- [12] 蔡明志， Visual C++6 教學手冊，碁峰資訊股份有限公司，1999。
- [13] 羅沐電子股份有限公司網站 [http：//www.rohm.com](http://www.rohm.com)。
- [14] 美商國家儀器股份有限公司 [http：//www.ni.com.tw](http://www.ni.com.tw)。

