



經濟部標準檢驗局 101 年度  
自行研究計畫

報告書編號：10150

應用永磁無刷馬達，  
將小家電融入節能減碳之設計研究

經濟部標準檢驗局臺南分局 編印  
中華民國 101 年 10 月 12 日

「本報告書僅供政府機關參考，請勿轉載」

標準檢驗局台南分局 101 年度自行研究報告提要表			填表人：吳福正 填表日期：100.12.1
研究報告名稱	應用永磁無刷馬達，將小家電融入節能減碳之設計研究		
研究單位 及研究人員	第六課 劉玫玲、吳福正、黃詒賢	研究 期程	自 101 年 01 月 01 日 至 101 年 10 月 12 日
報 告 內 容 提 要			
<p>(一) 研究緣起與目的：</p> <p>高效率馬達過去都使用於電冰箱、冷氣機等大家電上；家庭中最普遍的小家電則注重在量產，研發偏重於外觀設計，電力消耗卻常被忽略；近來由於節能減碳成為趨勢，馬達效率遂成為相關產業在國際市場上競爭的要點。永磁無刷馬達因為轉子為磁性材料，不需激磁電流，可減少轉子功率損失，提昇運轉效能；本研究主要為探討永磁無刷馬達特性，其相容於傳統小家電的效果，並改善此類馬達之效能(降低頓轉扭矩)，讓其融入低碳的設計理念，實現「節能環保、綠色低碳」。</p> <p>(二) 研究方法與過程：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 以 14 吋 5 片式扇葉風扇為樣品，以同樣轉速，輸出相同之風量，比較感應馬達及永磁無刷馬達於強速、低速耗能之表現。</li> <li>2. 比較無刷馬達與有刷馬達之差異。</li> <li>3. 就馬達產生轉矩之原理，於期刊、書籍… 等等加以搜集與研讀，以建立相關知識及概念。</li> <li>4. 建立永磁式無刷馬達之特性曲線圖。</li> <li>5. 以特性曲線圖評估小家電產品之適用性。</li> <li>6. 由轉矩公式，建立降低造成馬達的振動與噪音之「頓轉扭矩」方法。</li> </ol> <p>(三) 研究發現與建議：</p>			

以 14 吋 5 片式扇葉風扇為樣品，經過 110V/60Hz 實際測試，1000rpm 轉速，輸出 51.2m<sup>3</sup>之風量，感應馬達(110VAC)強速消耗功率為 49.1W，能源效率 1.18 公尺<sup>3</sup>/分/瓦，但永磁無刷馬達(單相八極八槽)則僅有 19.2W，能源效率 3.19 公尺<sup>3</sup>/分/瓦，省電達 60.9%之表現，而在弱速運轉時更可省電高達 70%。

且電器用品的馬達時常是在低負載運轉，但是傳統感應馬達則採用分段式的定轉速來對應；永磁無刷馬達則係藉由電力電子驅動，可使輸出轉矩隨輸入電流呈正線性關係(如研究報告圖 19.)，故在可變速驅動及運動控制等領域的發展，有相當好的表現。再者，無刷永磁馬達在低轉速區可具有高扭力輸出之特點(如研究報告圖 20.)，非常適合用於需要低速連續運轉的家電產品。

另如何消除或降低頓轉扭矩的產生，又能保有直流無刷馬達的特性，在此次研究中有提出幾種建議。

## 目 錄

壹、研究題目.....	1
貳、前言.....	1
參、無刷馬達與有刷馬達之差異.....	4
肆、無刷馬達與感應馬達及各類型無刷馬達之特性表現..	5
伍、永磁式無刷馬達之架構.....	11
陸、永磁式無刷馬達特性.....	16
柒、頓轉扭矩.....	17
捌、效益.....	20
玖、結論.....	21

## 壹、研究題目

應用永磁無刷馬達，將小家電融入節能減碳之設計研究。

## 貳、前言

高效率馬達過去都使用於電冰箱、冷氣機等大家電上；家庭中最普遍的小家電則注重在量產，研發偏重於外觀設計，電力消耗卻常被忽略；近來由於節能減碳成為趨勢，馬達效率遂成為相關產業在國際市場上競爭的要點。永磁無刷馬達因為轉子為磁性材料，不需激磁電流，可減少轉子功率損失，提昇運轉效能；以 14 吋 5 片式扇葉風扇為樣品，經過 110V/60Hz 實際測試，1000rpm 轉速，輸出 51.2m<sup>3</sup> 之風量，感應馬達(110VAC)強速消耗功率為 49.1W，能源效率 1.18 公尺<sup>3</sup>/分/瓦，但永磁無刷馬達(單相八極八槽)則僅有 19.2W，能源效率 3.19 公尺<sup>3</sup>/分/瓦，省電達 60.9% 之表現，而在弱速運轉時更可省電高達 70%。本研究主要為探討永磁無刷馬達特性，其相容於傳統小家電的效果，並改善此類馬達之效能，讓其融入低碳的設計理念，實現「節能環保、綠色低碳」。

表 1 常用電器每年耗電量估計表

類別	電器名稱	消耗電力 (W)	每年使用時間估計 (時)	年耗電量 (度)	備註
一、空調類	冷氣機	900	5 時×30 日×6 月=900	810.0	2000Kcal/Hr，冬季較少使用
	吹風機	800	1/6 時×15 日×12 月=30	24.0	
	電暖爐	700	3 時×30 日×3 月=270	189.0	季節性使用
	除濕機	285	3 時×30 日×6 月=540	153.9	16.6 升/日，季節性使用
	電扇	66	3 時×30 日×8 月=720	47.5	16 吋，季節性使用
	抽風機	30	4 時×10 日×12 月=480	14.4	
二、照明類	燈泡(60W)	60	3 時×30 日×12 月=1,080	64.8	
	日光燈(20W)	25	5 時×30 日×12 月=1,800	45.0	
	省電燈泡	17	5 時×30 日×12 月=1,800	30.6	
	神龕燈	10	24 時×30 日×12 月=8,640	86.4	
三、廚房類	微波爐	1200	5 時/月×12 月=60	72.0	
	電磁爐	1200	2 時/月×12 月=24	28.8	
	開飲機	800	2 時×30 日×12 月=720	576.0	
	電鍋	800	1/2 時×30 日×12 月=180	144.0	10 人份
	電烤箱	800	2 時/月×12 月=24	19.2	

	抽油煙機	350	1/3 時×30 日×12 月 =120	42.0	
	果菜榨汁機	210	1 時/月×12 月=12	2.5	
	烘碗機	200	1/2 時×30 日×12 月 =180	36.0	
	電冰箱	130	12 時×30 日×12 月 =4,320	561.6	320 公升
四、衣著類	乾衣機	1200	1/3 時×10 日×10 月 =33	39.6	夏季較少使用
	電熨斗	800	3 時/月×12 月=36	28.8	
	洗衣機	420	1/2 時×10 日×12 月 =60	25.2	
五、視聽類	電視機	140	4 時×30 日×12 月 =1,440	20.16	28 吋彩色
	音響	50	1 時×30 日×12 月 =360	18.0	
	收音機	10	1 時×30 日×12 月 =360	3.6	



## 參、無刷馬達與有刷馬達之差異



圖 1. 有刷馬達：以機械式整流子或電刷來控制換向動作

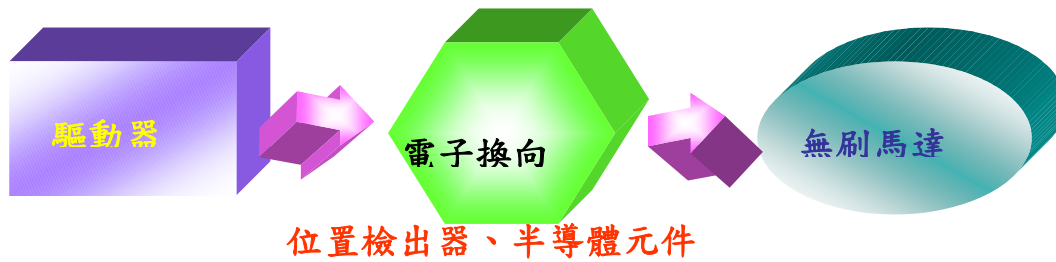


圖 2. 無刷馬達：

1. 以電子式的電晶體來控制換相動作。
2. 利用磁場力的吸引及磁場的變化(換向)來達成旋轉輸出的動作。
3. 電子式的換向器主要是利用 Hall Sensor 感應馬達磁極位置的變化，藉以控制電晶體的開或關。

相對於有刷直流馬達(brushed DC motor)，永磁無刷馬達  
(brushless PM motor) 無碳刷及換向片的存在，其具以下特性：

1. 換向時不易產生高溫之電弧及金屬屑。
2. 電氣雜訊少，可靠度高、壽命長且易高速化。
3. 低電壓、起動快、易控制。
4. 製造容易、體積小。
5. 可適用於高溫環境下。
6. 在電刷部分不產生碳粉、油霧等之污垢。

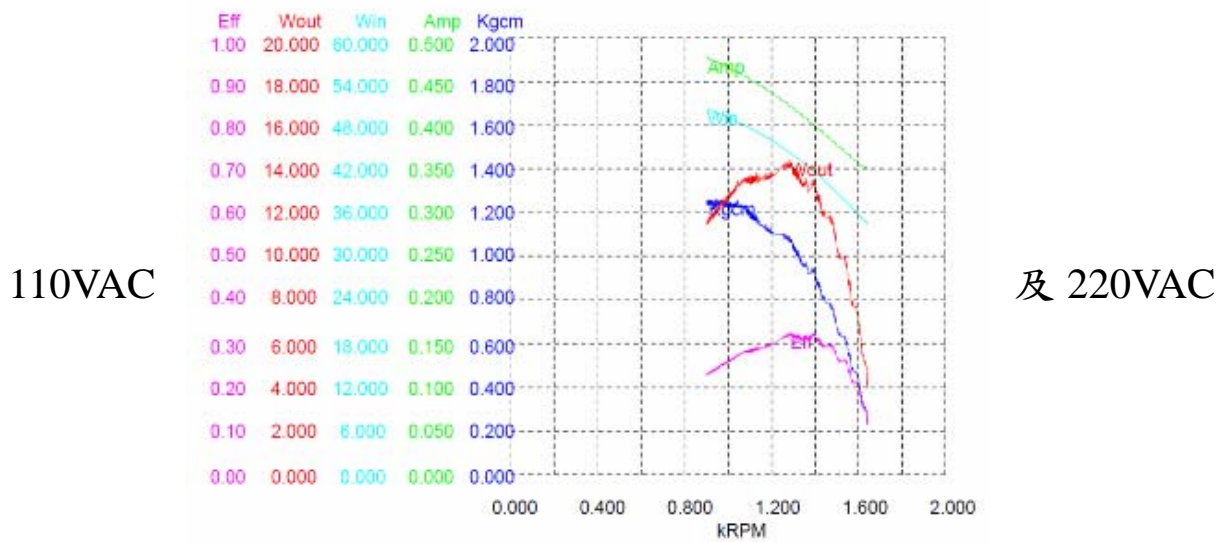
- 7. 不產生電氣之雜訊(不產生電波干擾)。
- 8. 不產生火花。

**肆、無刷馬達與感應馬達及各類型無刷馬達之特性表現**

以馬達特性曲線測試平台量測馬達特性曲線，分析特性曲線與馬達額定負載點關係。



圖 3 馬達特性曲線測試平台



感應馬達，經由動力計量測後可得到以下之特性曲線。

圖 4 110VAC 感應馬達特性曲線

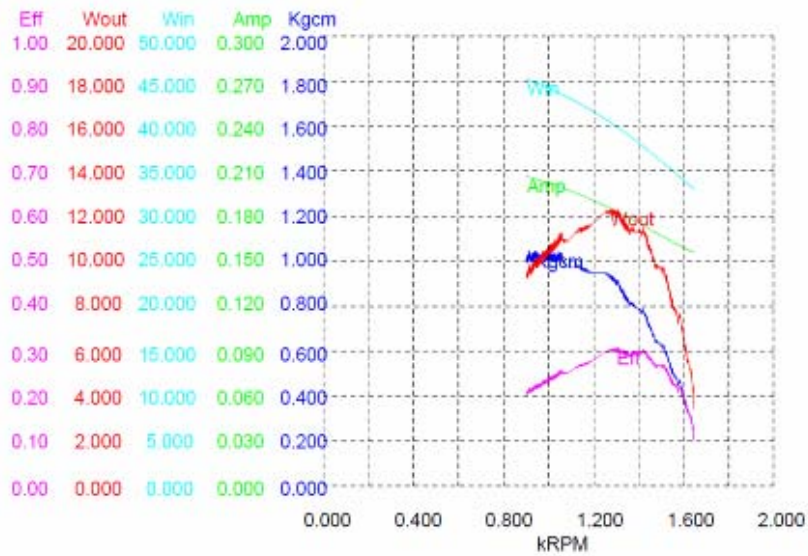


圖 5 220VAC 感應馬達特性曲線

由於風扇馬達的最高額定轉速約為 1000rpm，故訂定此點為馬達操作點，表 2 詳列出操作點資訊。

表 2 額定點資料

輸入電壓 (VAC)	輸入電流 (A)	輸入功率 (W)	輸出功率 (W)	效率 (%)	轉矩 (Kg-cm)	轉速 (rpm)
110	0.47	49.1	12.7	26	1.2	1000
220	0.21	44	11.2	25	1.1	1000

由上表可得知一般用於風扇的感應馬達效率約 26%。

## 六極無刷馬達之特性表現

表 3 六極馬達額定點資料

版本	輸入電壓(VAC)	輸入電流(A)	輸入功率(W)	輸出功率(W)	效率(%)	轉矩(Kg-cm)	轉速(rpm)
3	110	0.41	30	14.6	48.4	1.4	1000
4	220	0.22	21	10.8	51.3	1.1	1000

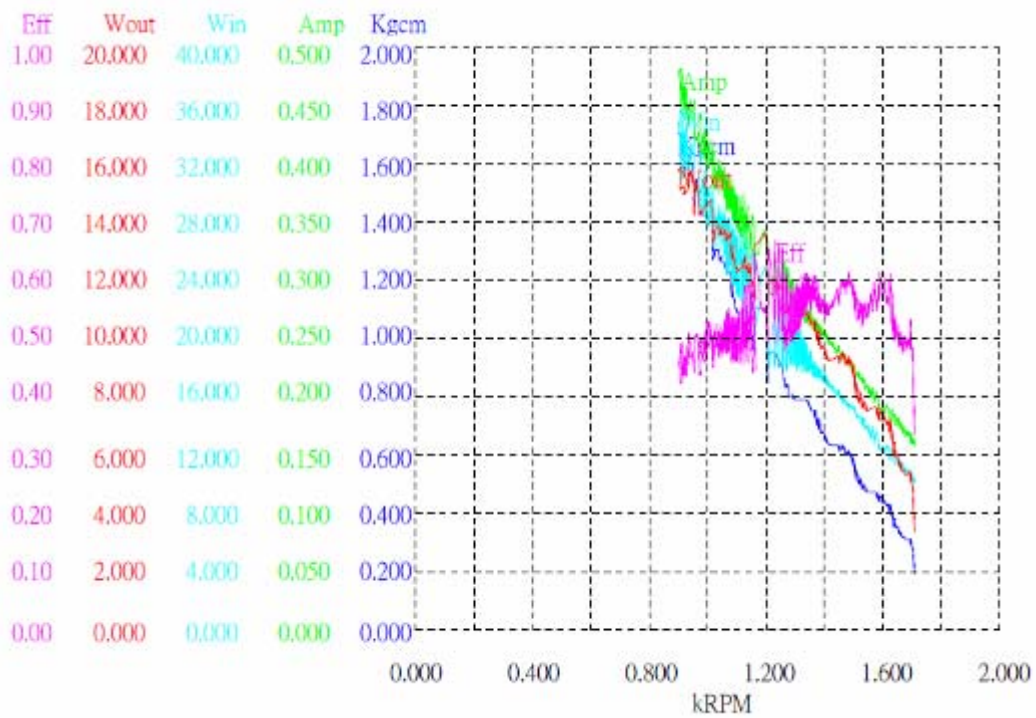


圖 6 六極馬達特性曲線



## 八極無刷馬達之特性表現

表 4 及圖 7 分別為馬達的特性曲線及額定點的測試結果。

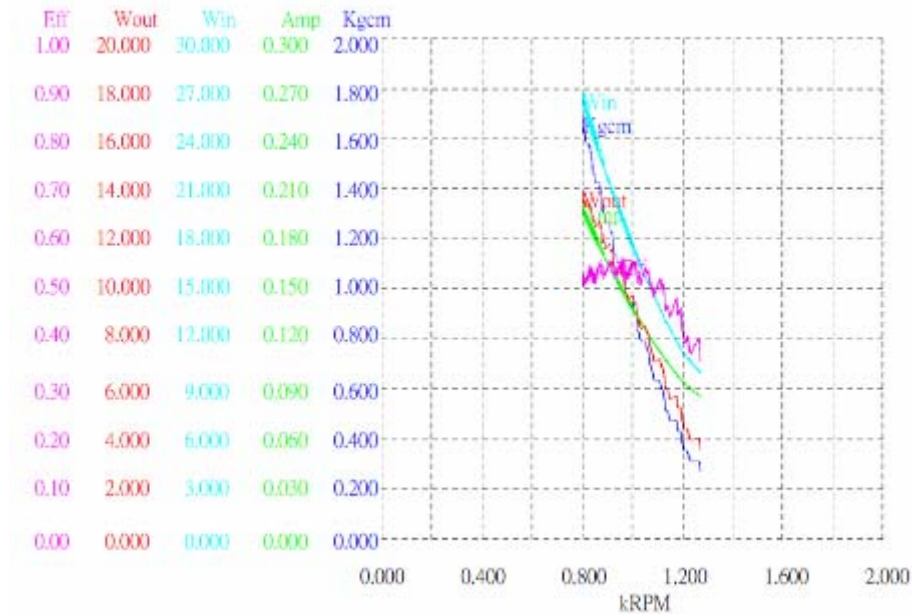


圖 7 八極馬達特性曲線測試

表 4 八極馬達額定點資訊

輸入電壓 (VAC)	輸入電 流(A)	輸入功 率(W)	輸出功 率(W)	效率 (%)	轉矩 (Kg-cm)	轉速 (rpm)
220	0.15	19.2	10.8	56	1.1	1000

八極馬達的測試結果顯示效率高達 56%。

圖 8 及圖 9 分別為六極及八極馬達的定子圖面，而圖 19 則為馬達試做樣品。



圖 8 六極馬達定子



圖 9 八極馬達定子

表 5 為各種馬達所做之比較表格。編號 1、2 分別為感應馬達，編號 3 為三相無刷馬達風扇，編號 4、5、6 則為單相高壓無刷馬達。其中編號 4、5 為六極六槽，編號 6 為八極八槽。比較表中可見，在相同馬達轉速下，編號 4、5、6 之無刷馬達效率約可達編號 1、2 之感應馬達的 2 倍，也較編號 3 之三相無刷馬達高。



圖 10 馬達試做樣品

表 5 馬達性能比較(模擬負載為 14 吋 5 片式扇葉時之轉速 1000rpm)

編號	輸入電壓	輸入電流 (A)	輸入功率 (W)	輸出功率 (W)	效率 (%)	轉矩 (Kg-cm)	轉速 (rpm)
1	110VAC	0.47	49.1	12.7	26	1.2	1000
2	220VAC	0.2	44	11.2	25	1.1	1000
3	24VDC	1	24	9.6	41.6	1.0	1000
4	110VAC	0.41	30	14.6	48.4	1.4	1000
5	220VAC	0.22	21	10.8	51.3	1.1	1000
6	220VAC	0.15	19.2	10.8	56	1.1	1000

## 能源效率指標比較

### 風量測試

針對風扇的風量輸出進行檢測，計算產品的能源效率是否符合節能標章的標準值，計算方式如式(3)。

$$\text{能源效率指標} = \frac{\text{每分鐘輸出風量 (m}^3/\text{min)}}{\text{輸入瓦數 (W)}} \quad (3)$$

。量測方式如圖 11 所示：

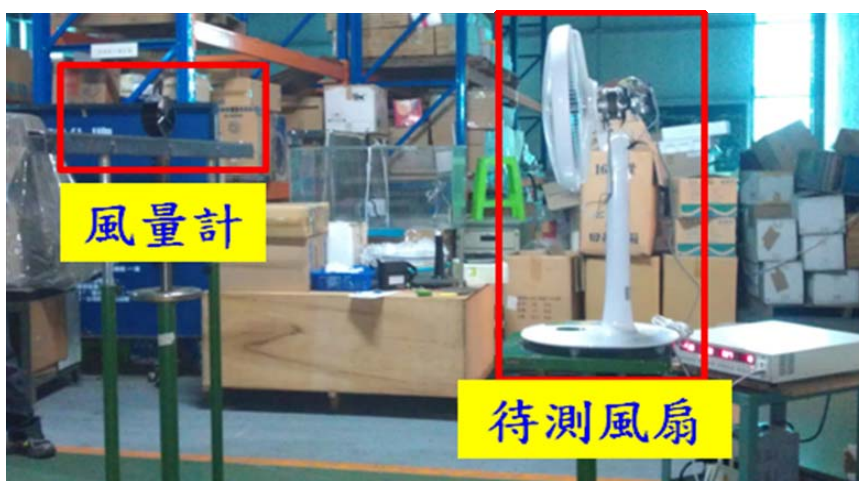


圖 11 風量量測示意圖

風量計主要功能為量測每分鐘在特定位置所蒐集到之風量。將該風量值與電源供應器的輸出功率相除後，即可得知該產品之能源效率指標。表 6 為各類馬達之結果比較。

表 6 能源效率指標比較

項目	規範	感應馬達	市售三相無刷	單相六極六槽	單相八極八槽
能源效率指標	1.33	1.18	1.95	2.91	3.19

由上表可知，單相六極六槽、單相八極八槽符合未來即將施行之規範，且亦優於感應馬達。

## 伍、永磁式無刷馬達之架構

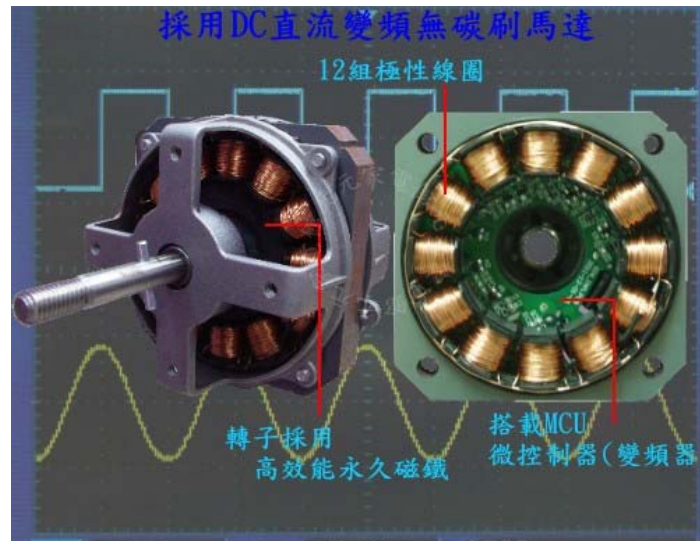


圖 12. 永磁式無刷馬達之架構

馬達設計流程，大致可以分為設計規格確立、磁路設計、電氣設計三大部分，最後再以有限元素分析做最終的設計驗證。

馬達設計者在設計馬達之前，必須對設計之馬達的使用場合有相當的了解，包括馬達的負載需求及尺寸限制等。此部份在整個馬達設計過程中為關鍵性的一環，因為馬達設計過程中許多因素都是相互影響的。基本設計條件決定之後，便可立足於基本設計條件上進行磁路設計與電氣設計。馬達的磁路設計包括：設計磁鐵尺寸，等效磁路分析及定子細部尺寸。磁路設計的主要目的在於設計足夠的氣隙磁通，且在定子不發生飽和的情況下，使電流產生的電樞磁場與轉子磁極產生的氣隙磁場交互作用後，能夠產生一電磁轉矩並滿足負載需求，圖 13 為磁路設計所需決定的尺寸參數。電氣設計的目的在於決定出適當的電流與匝數，包括繞線配置、匝數與線徑的計算，電流密度與佔槽率的檢驗等，圖 14 為馬達繞組配置示意圖。



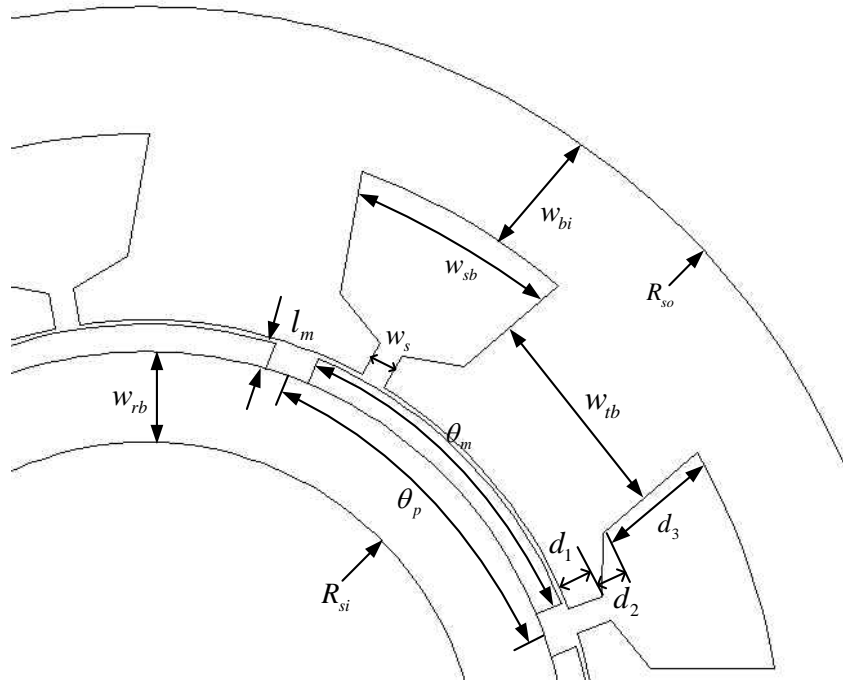


圖 13 馬達設計尺寸參數

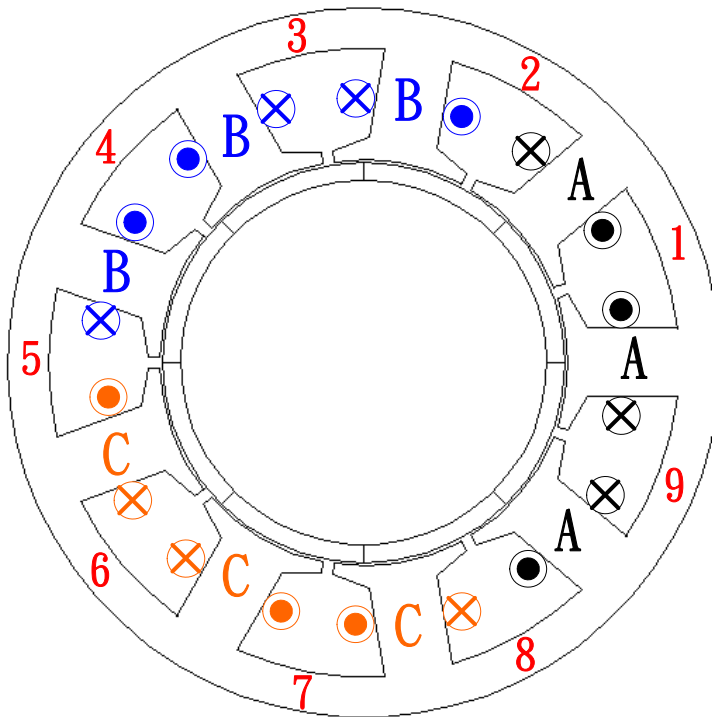


圖 14 繞組配置示意圖

## 5.1. 基本永磁馬達磁路構造

永磁式無刷馬達由永磁體轉子、多極繞組定子、驅動器等組成，

不管是內轉式，外轉式，或扁平式，其基本磁路構造共有四部分：

- (1) 定子鐵心及繞組。
- (2) 氣隙。
- (3) 轉子永久磁鐵。
- (4) 轉子軛鐵。

## 5.2. 基本永磁馬達磁通路徑：

磁通由一個磁鐵 N 極出發，經氣隙、定子軛鐵、氣隙、至相鄰的磁鐵、由轉子軛鐵，回到磁鐵 S 極，形成封閉的磁路。

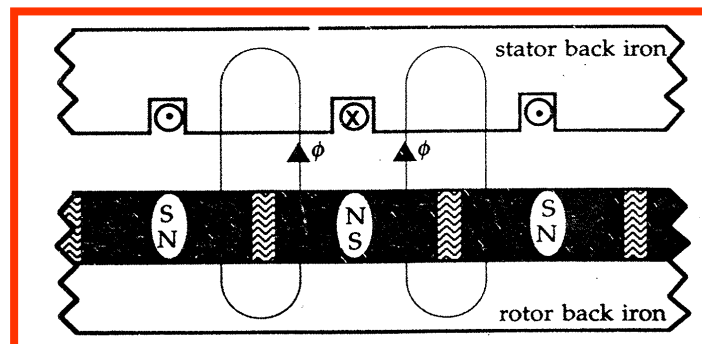


圖 15. 基本永磁馬達磁通路徑

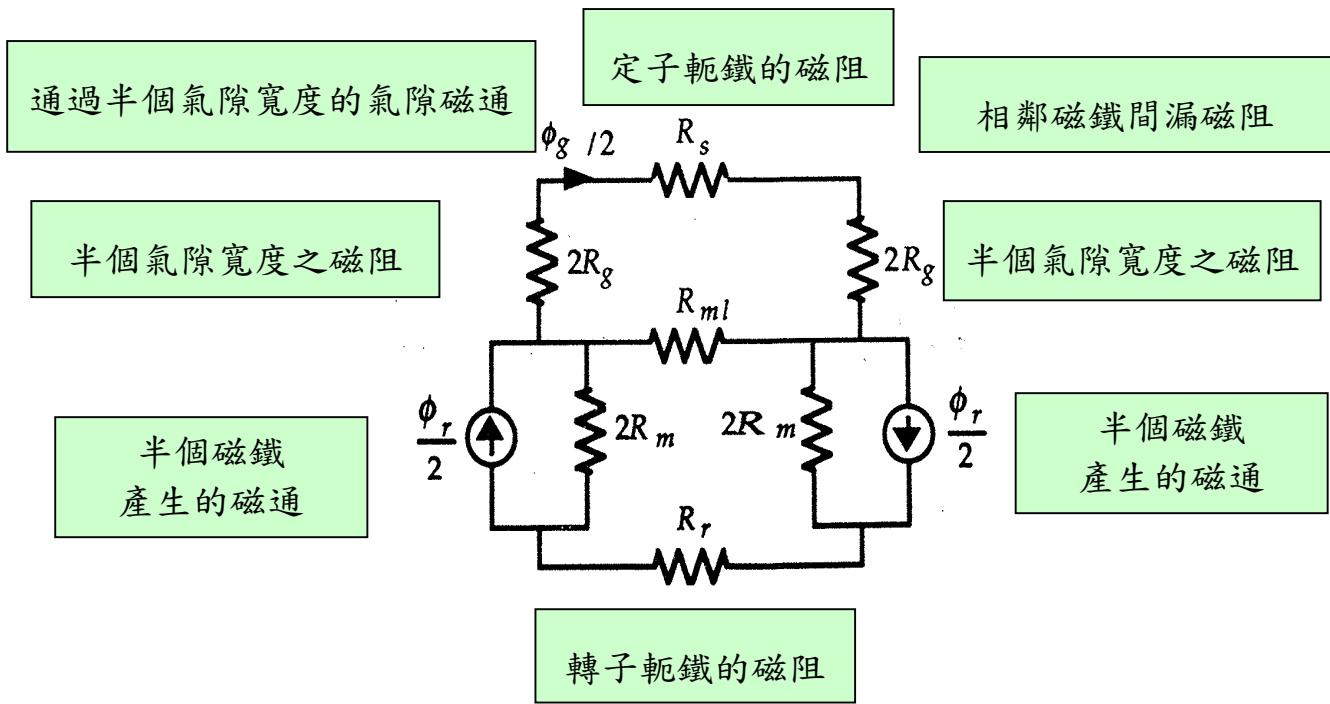


圖 16. 等效電路

### 5.3. 馬達產生之轉矩(電能→磁能→機械能)

$$T_{motor} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\theta} - \frac{1}{2} \phi_m^2 \frac{dR}{d\theta} + NI \frac{d\phi_m}{d\theta}$$

第一項為線圈所產生的磁通因氣隙磁阻變化所產生的磁阻力矩

第二項為磁鐵產生的磁通因氣隙磁阻變化所產生的頓轉扭矩

第三項為線圈與永久磁鐵的磁通鏈所產生的對正力矩

要使馬達輸出轉矩最大則必須使馬達轉子產生之磁通和電樞電流產生之磁動勢保持垂直的位置，但無刷馬達之轉子磁極位置隨時間變化，為了保持順序轉動及獲得最大之轉矩，就必須檢知永久磁鐵轉子之磁極位置，然後通知驅動電路提供相對應之電樞電流給電樞線圈，使其磁動勢和轉子磁極隨時保持垂直狀態。

5.4. Radial-filed and axial-filed PM brushless machines 永磁直流無刷馬達的種類，從磁通方向可以大略分為徑向磁通(RFPM)與軸向磁通(AFPM)兩大類，而 RFPM 因為磁石放置位置的不同可以分為表面型、嵌入型與內藏型等永磁直流無刷馬達，而 AFPM 的產生是起源於放置空間的限制，在許多應用領域上，必須減少重量以及節省空間來降低阻力以便提昇效率，所以現今習慣使用的 RFPM 與過去常用的感應電動機無法在比較狹小的空間中提供所需的驅動性能，而 AFPM 改變了磁通方向來節省軸向長度以降低體積，並且具有相當廣的磁通面積來提供所需的性能。

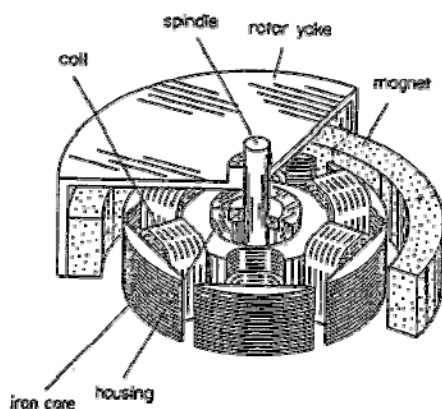


圖 17. 徑向磁通架構

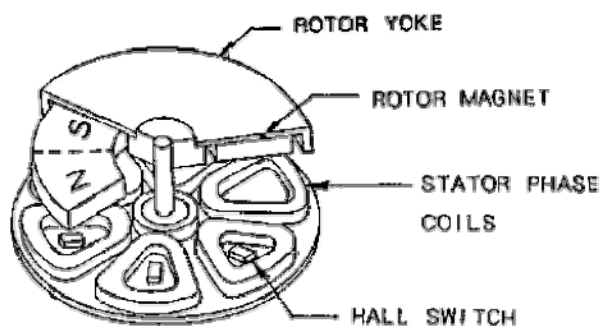


圖 18. 軸向磁通架構



## 陸. 永磁式無刷馬達特性

### 6.1. 低損失、高效率

轉子為永久性磁鐵，不需激磁電流，可減少轉子功率損失，提昇運轉效能。

### 6.2. 馬力大、體積小

使用永久性磁鐵型轉子，轉子不需激磁電流，電機內部發熱量小，故相同馬力數之下，可有較小的散熱表面積，也就是體積相對減小。即相同產熱量、體積、表面積之下，同框號可設計較大馬力數。

### 6.3. 有非常線性的電流對應轉矩曲線(可無段變速)

馬達藉由電力電子驅動，可達成輸入馬達與輸出轉矩呈線性關係(即，輸出轉矩=常數 X 輸入電流)，比傳統 DC 有刷馬達有更精準的轉矩控制(電流控制)。

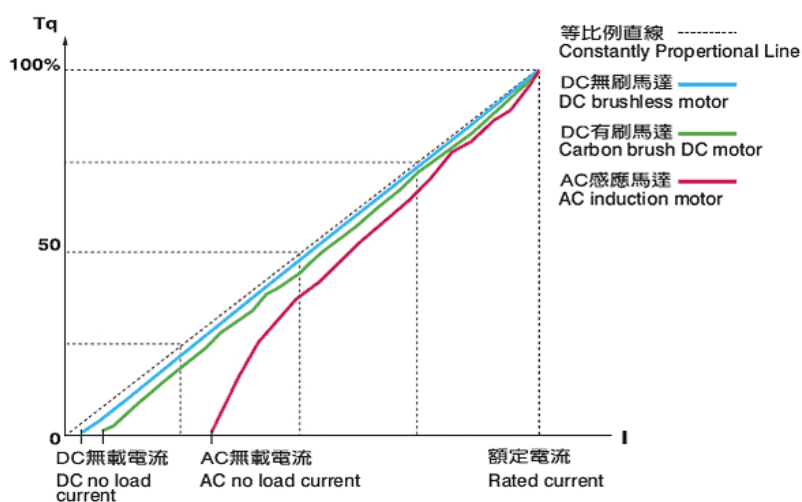


圖 19. I-T 特性曲線

## 6.4. 有非常高的「低速連續轉矩」(高效率低速運轉)

無刷永磁馬達在低轉速區可具有高扭力輸出之特點，非常適合用於需要低速連續運轉，非常適合用於需要低速連續運轉。

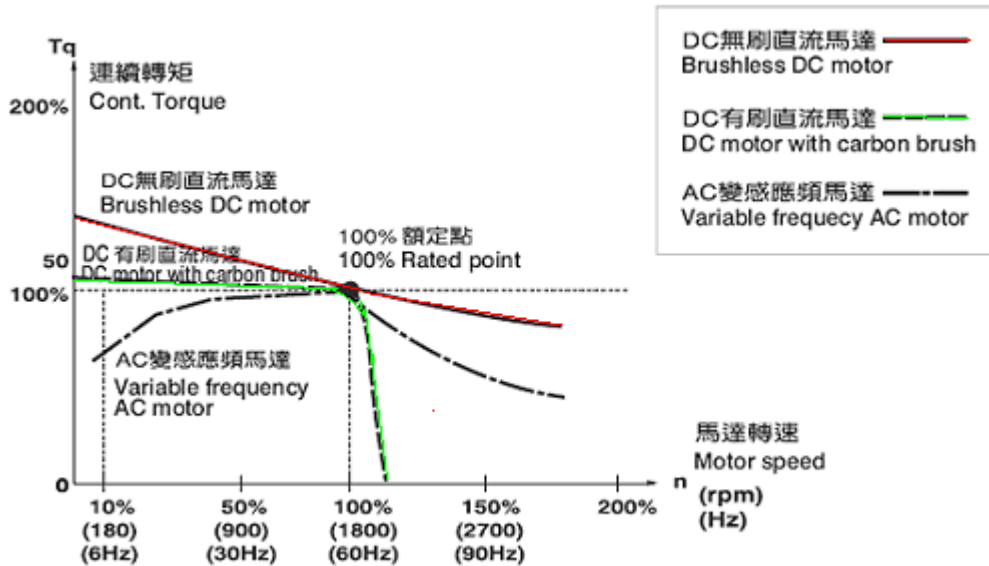


圖 20. 轉速-轉矩特性曲線

## 柒. 頓轉扭矩

在含有永久磁石的直流無刷馬達中，因磁石與槽齒間的磁交互作用，會因不同的相對位置，而有不同的作用力，所以馬達在不激磁旋轉的狀態下，會產生週期性的力矩變化，稱之為頓轉扭矩

頓轉扭矩會造成馬達的振動與噪音，除了會影響馬達本身的壽命外，也會使馬達使用之精密度受到限制。

因此我們首先便就頓轉扭矩產生之原理，於期刊、書籍… 等等加以搜集與研讀，以建立相關知識及概念。

磁石與槽齒間的磁交互作用產生之頓轉扭矩原因為：1、切線電磁

力；由於切線方向電磁力之擾動易造成輸出轉矩不穩定，進而形成轉矩漣波、造成馬達振動。2、徑向電磁力；此電磁力沿著半徑方向直接作用於馬達定子與轉子，易於馬達運作時，造成馬達形變而引起振動。3、馬達偏心；此為馬達製造上常見的問題，造成馬達機械與電氣之不平衡，進而使馬達振動。

由公式：

$$T_{motor} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\theta} - \frac{1}{2} \phi_m^2 \frac{dR}{d\theta} + N I \frac{d\phi_m}{d\theta}$$

$\phi_m$ ：永久磁鐵氣隙磁通

$R$ ：氣隙磁阻

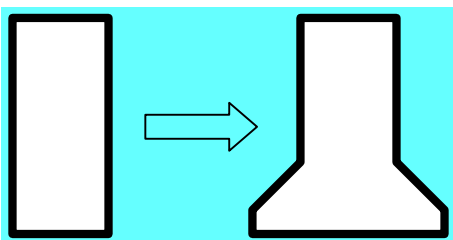
$\theta$ ：轉子旋轉角度

第二項( $\frac{1}{2} \phi_m^2 \frac{dR}{d\theta}$ )為磁鐵產生的磁通因氣隙磁阻變化所產生的頓轉扭矩。

由此可知氣隙磁通( $\phi_m$ )、磁阻的變化( $\frac{dR}{d\theta}$ )為影響頓轉扭矩的大小，故降低永久磁鐵的磁場強度，及加大定子與轉子間的間隙，可降低頓轉扭矩。

因此我們提出降低頓轉扭矩的方法有：

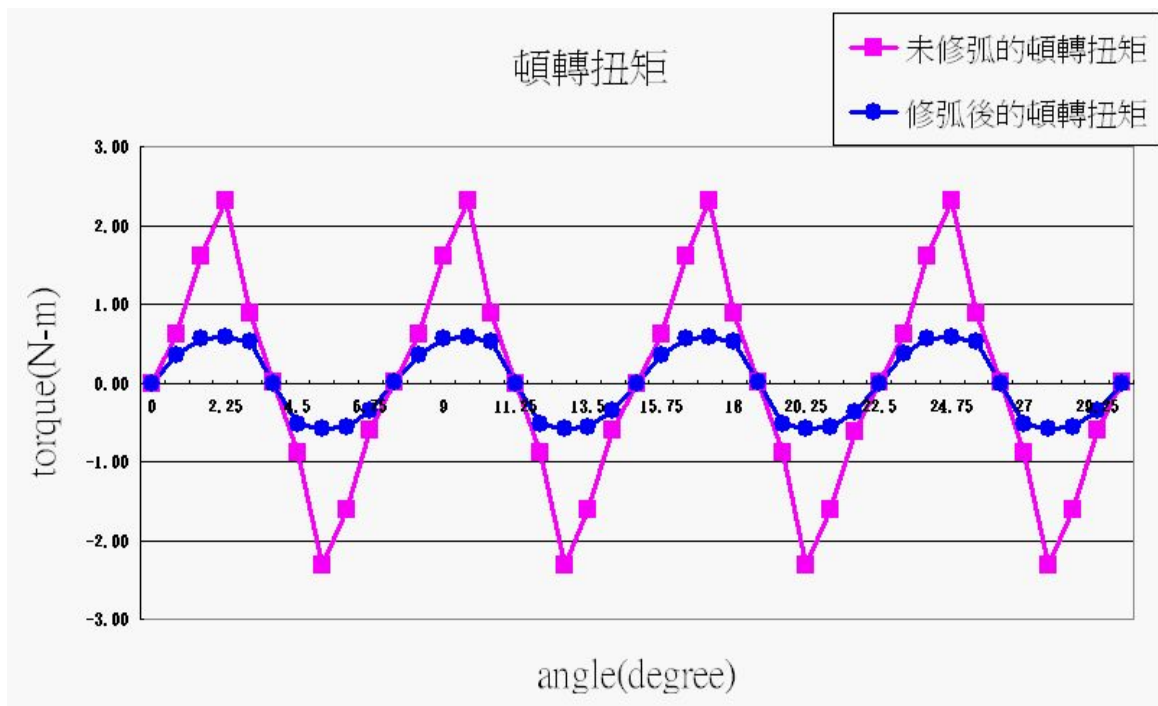
### 7.1. 使用極鞋以減小氣隙磁阻的變化





## 7.2. 定子鐵心修一些弧形

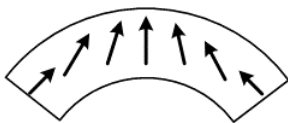
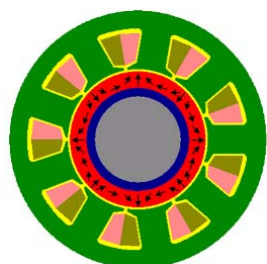
未修弧與修弧後頓轉扭矩的比較



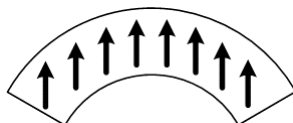
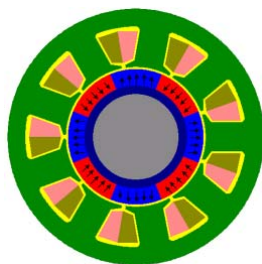
## 7.3. Halbach 磁化

磁鐵磁化型態的不同會影響馬達的特性

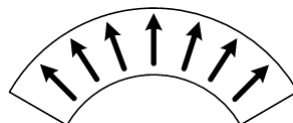
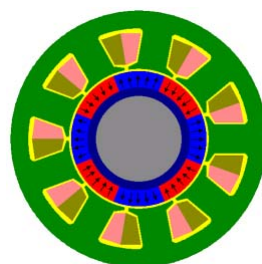
### 7.3.1. 三種永磁無刷馬達的比較



型態 I - Halbach 磁化



型態 II - 平行磁化



型態 III - 徑向磁化



### 7.3.2. 頓轉扭矩比較

型態 I	頓轉扭矩
頓轉扭矩最大值與最小值差	0.0038
型態 II	頓轉扭矩
頓轉扭矩最大值與最小值差	0.0147
型態 III	頓轉扭矩
頓轉扭矩最大值與最小值差	0.0158

7.3.3. Halbach 磁環具有極佳的磁通分布，在不改變馬達幾何結構的前提下，具有較低之頓轉扭矩。

7.3.4. 一般磁鐵多採用徑向或平行陣列結構，而 Halbach 磁環陣列是將徑向與平行陣列結合在一起，則是將永久磁鐵以節段式聯結，並對每極之磁鐵以正弦規律充磁，使得磁環表面磁通分佈呈現弦波分佈。因此可大幅降低永磁無刷電動機之頓轉扭矩及漣波轉矩效應，進一步改善電動機震動與噪音問題。

### 捌. 效益

電器用品的馬達時常是在低負載運轉，但是傳統感應馬達則採用分段式的定轉速來對應；永磁無刷馬達則係藉由電力電子驅動，可使輸出轉矩隨輸入電流呈正線性關係(如圖 19.)，故在可變速驅動及運動控制等領域的發展，有相當好的表現。再者，無刷永磁馬達在低轉速區可具有高扭力輸出之特點(如圖 20.)，非常適合用於需要低速連

續運轉的家電產品。

## 玖. 結論

永磁無刷馬達的「節能表現」及「有非常線性的電流對應轉矩曲線(可無段變速)」及「有非常高的「低速連續轉矩」(高效率低速運轉)」非常適合用於需要低速連續運轉的家電產品上；且截稿時，電扇以額定電壓連續運轉已逾 5000hr 未有異狀；然而，因永磁無刷馬達需搭配驅動器才能運轉，驅動控制器是永磁無刷馬達的重要零組件之一，除了負責輸入電力的開啟與轉換以驅動馬達轉動之外，還要接受設備系統對功能需求的感測資訊，以進行解析與決策，而使系統設備達成高效能的運轉，其在成本上較難與單純市電即可運轉的感應馬達或僅需相對簡單之變壓和變流裝置的直流馬達競爭，其馬達及電路基板的價格比一般交流馬達貴了約 1000~2000 元，如何運用新科技，降低節能家電的製造成本，就成了積極發展的方向。

另如何消除或降低頓轉扭矩的產生，又能保有直流無刷馬達的特性，是朝向高精密度馬達發展的一項重要課題。