

永磁式同步交流馬達對變化負載之無軸感測器速度控制
Shaft-Sensorless Speed Control of the Permanent Magnet Synchronous Motor
under Periodically Time-Varying Load

計畫編號：NSC 87-2212-E-009-027

執行期限：86年8月1日至87年7月31日

主持人：金甘平 kanping@cc.nctu.edu.tw

執行單位：交通大學機械工程系

一、中文摘要

本報告主要是研究無速度感測器之永磁式同步馬達，在受變動負載時之速度控制。我們將使用觀測器以估測方式計算出馬達之位置、速度，以期能取代光學編碼器。本文中將根據 Utkin 所提出之滑動觀測器理論，依照負載的型式不同，分別建立定力矩及變動力矩之永磁式同步馬達負載觀測器。藉由數值模擬及實驗結果證明，受變動力矩負載時，變動力矩之負載觀測器對永磁式同步交流馬達之閉迴路速度控制有較佳的強韌性。

關鍵字：無軸感測器、速度控制、永磁式同步交流馬達、負載觀測器

二、計畫緣由與目的

在工業不斷的發展下，自動化已是不可避免的一種趨勢，一般工廠的生產線上，馬達扮演重要的角色，馬達控制之好壞將直接影響製造的精度及可靠度。傳統上伺服馬達之轉子位置，皆由光學編碼器 (encoder) 或解角器 (resolver) 量得，其轉速則由轉速器 (tachometer) 或由轉子的位置微分而獲得，這些裝置不但佔空間、易損壞、而且不便宜，所以我們希望使用「觀測器」來取代上述裝置。除此之外，馬達所受的外在負載亦會影響製造的精度，因此觀測器亦能預測外在負載，以此作回饋補償，減少外在負載對馬達的影響。

馬達無軸感測器之研究大致可分為馬達之物理性質及狀態估測兩個方向。其中馬達之物理性質乃是運用馬達定子電流之

波形與轉子的相對關係，可經計算獲得轉子之特定角度，如 0 度、90 度、180 度或 270 度，其餘位置則可由內插法獲得，而將所得之位置微分可得其轉速。除此之外，量測馬達之反電動勢 (back emf) 亦能獲得轉子位置 [1~3]。此兩種方式皆容易受電流量測雜訊所影響，因此較難估測得正確的位置與速度。

由馬達之物理性質所偵測的方式，易受電流雜訊所影響，故多數的研究方向皆以狀態估測為主，主要是利用馬達之數學模型，量測定子電流以計算其轉子位置與速度。因為其數學模型是在理想狀態下推算而得，因此需外加一補償項來修正其估測誤差，利用不同之誤差補償方式，將產生不同之狀態估測觀測器。例如 Jones & Lang [4] 及 Low, Lee & Chang [5] 依照 Luenberger [6] 所建立之線性觀測器理論，使用在非線性系統馬達上，所以只能證明此觀測器為局部穩定 (locally stable)。Cho, Hong, Oh, & Youn [7] 依照 Walcott & Zak [8] 所建立之觀測器理論，以轉子座標系之馬達數學模型為主，因無法以實際之轉子 i_a, i_b 位置作座標轉換，所以無法以估測之轉子位置作此觀測器之穩定性分析。Hu, Zhu, Li, & Gao [9] 依照 Utkin [10] 所建立之觀測器理論，以馬達之定子座標數學模型設計速度觀測器。許金城 [11] 與王洪儒 [12] 亦以 Utkin 與 Walcott & Zak 之觀測器理論設計速度觀測器，王洪儒 [12] 並以實驗證明其無軸感測器能使估測速度誤差及實際速度追蹤誤差收斂。

王洪儒 [12] 亦進行永磁式同步馬達之可觀性探討，證明量測馬達之定子電流

i_a, i_b ，可觀測其轉子位置、速度及外在力矩。Chen & Chin [13] 則證明只要馬達之速度及加速度不同時為零，則馬達之位置、速度及力矩均為可觀測。因此我們在本報告中將設計一個觀測器，估測其轉子位置、速度及外在力矩，同時討論馬達在受週期性之變動負載下，永磁式同步馬達之速度響應如何。

三、研究方法

假設永磁式同步馬達為平滑氣隙，在定子座標系上之數學模型表示如下：

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{R}{L}i_a + \frac{KN}{L}\omega \sin(N\theta) + \frac{1}{L}v_a \quad (1)$$

$$\frac{di_b}{dt} = -\frac{R}{L}i_b - \frac{KN}{L}\omega \cos(N\theta) + \frac{1}{L}v_b \quad (2)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (3)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{KN}{H}i_a \sin(N\theta) + \frac{KN}{H}i_b \cos(N\theta) - \frac{B}{H}\omega - \frac{1}{H}\tau \quad (4)$$

其中 i_a 和 i_b 為定子電流， v_a 和 v_b 為輸入電壓， τ 為外在力矩， H 為轉子慣量， B 為馬達阻泥係數， R 為定子電阻， L 為定子自感， K 為磁性常數。

因為轉子角度 θ 會隨時間改變，所以 (1)~(4) 為一組非線性時變系統，為了簡化控制方式，可經由座標轉換 (Park transformation [14])，將馬達轉換至轉子座標上，形成一非時變的系統，系統之輸入及狀態在兩座標系上之轉換矩陣為 $\exp(-JN\theta)$ ，其表示如下：

$$\mathbf{i}_{dq} = \exp(-JN\theta)\mathbf{i}_{ab} \quad (5)$$

$$\mathbf{v}_{dq} = \exp(-JN\theta)\mathbf{v}_{ab}$$

(6)

$$\text{其中 } \mathbf{i}_{ab} = [i_a \ i_b]^T, \quad \mathbf{i}_{dq} = [i_d \ i_q]^T, \\ \mathbf{v}_{ab} = [v_a \ v_b]^T, \quad \mathbf{v}_{dq} = [v_d \ v_q]^T, \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

將(5)、(6)式代入(1)~(4)可得

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L}i_d + N\hat{i}_q\omega + \frac{1}{L}v_d \quad (7)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L}i_q - \frac{KN}{L}\omega - N\hat{i}_d\omega + \frac{1}{L}v_q \quad (8)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (9)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{KN}{H}i_q - \frac{B}{H}\omega - \frac{1}{H}\tau \quad (10)$$

因為要估測馬達外在力矩，所以必須建構馬達外在力矩之數學模型，例如定力矩可表示如下：

$$\tau = \tau_0 \quad (11)$$

其中 τ_0 為一常數，其動態方程式可表示如下：

$$\dot{\tau} = 0 \quad (12)$$

除此之外，頻率 ω 之週期性變動力矩可表示如下：

$$\tau = \tau_0 + A \sin(\omega t + \phi) \quad (13)$$

$$\dot{\tau} = A\omega \cos(\omega t + \phi) \quad (14)$$

$$\ddot{\tau} = -A\omega^2 \sin(\omega t + \phi) = -\omega^2(\tau - \tau_0) \quad (15)$$

其中 τ_0 為力矩之平移常數， A 為變動力矩之變動振幅，而 ϕ 表示力矩之相位。假設 $\tau_1 = \tau$ 及 $\tau_2 = \dot{\tau}$ ，(13)~(15) 可表示如下：

$$\begin{Bmatrix} \dot{\tau}_0 \\ \dot{\tau}_1 \\ \dot{\tau}_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \omega^2 & -\omega^2 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tau_0 \\ \tau_1 \\ \tau_2 \end{Bmatrix} \quad (16)$$

我們依照許金城[11]與王洪儒[12]所使用之 Utkin 滑動觀測器 (Sliding modes observer) 設計原理，在永磁式同步馬達之定子座標系上設計觀測器。當馬達承受外在力矩時，馬達之狀態可分為兩部份，可量測狀態為馬達之定子電流，需觀測之狀態為馬達之轉子位置、速度及外在力矩。依照觀測器設計理論，定義兩個滑動曲面如下：

$$S_a = \hat{i}_a - i_a \quad (17)$$

$$S_b = \hat{i}_b - i_b \quad (18)$$

永磁式同步馬達所受之外在力矩為定力矩時，此滑動模式觀測器表示如下：

$$\dot{\hat{i}}_a = -\frac{R}{L}\hat{i}_a + \frac{KN}{L}\hat{\omega} \sin(N\hat{\theta}) + \frac{1}{L}v_a - K_s \cdot \text{sgn}(S_a) \quad (19)$$

$$\dot{\hat{i}}_b = -\frac{R}{L}\hat{i}_b - \frac{KN}{L}\hat{\omega} \cos(N\hat{\theta}) + \frac{1}{L}v_b - K_s \cdot \text{sgn}(S_b) \quad (20)$$

$$\dot{\hat{\theta}} = \hat{\omega} \quad (21)$$

$$\dot{\hat{\omega}} = -\frac{KN}{H}\hat{i}_a \sin(N\hat{\theta}) + \frac{KN}{H}\hat{i}_b \cos(N\hat{\theta}) - \frac{B}{H}\hat{\omega} - \frac{1}{H}\hat{\tau}$$

$$+G_1 \cdot K_s \cdot \text{sgn}(S_a) + G_2 \cdot K_s \cdot \text{sgn}(S_b) \quad (22)$$

$$\dot{\hat{\tau}} = G_3 \cdot K_s \cdot \text{sgn}(S_a) + G_4 \cdot K_s \cdot \text{sgn}(S_b) \quad (23)$$

其中 \hat{i}_a 、 \hat{i}_b 、 $\hat{\theta}$ 、 $\hat{\omega}$ 和 $\hat{\tau}$ 是估測狀態。將(1)~(4)和(12)與(19)~(23)相減，再將之在 $\hat{\theta}$ 及 $\hat{\omega}$ 附近線性化，可獲得受定力矩之永磁式同步馬達的誤差動態方程式：

$$\begin{aligned} \dot{S}_a = & -\frac{R}{L} S_a + \frac{KN^2}{L} \hat{\omega} \cos(N\hat{\theta}) e_\theta + \frac{KN}{L} \sin(N\hat{\theta}) e_\omega \\ & - K_s \cdot \text{sgn}(S_a) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \dot{S}_b = & -\frac{R}{L} S_b + \frac{KN^2}{L} \hat{\omega} \sin(N\hat{\theta}) e_\theta - \frac{KN}{L} \cos(N\hat{\theta}) e_\omega \\ & - K_s \cdot \text{sgn}(S_b) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\dot{e}_\theta = e_\omega \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_\omega = & -\frac{KN}{H} S_a \sin(N\hat{\theta}) - \frac{KN^2}{H} \hat{i}_a \cos(N\hat{\theta}) e_\theta \\ & + \frac{KN}{H} S_b \cos(N\hat{\theta}) - \frac{KN^2}{H} \hat{i}_b \sin(N\hat{\theta}) e_\theta \\ & - \frac{B}{H} e_\omega - \frac{1}{H} e_\tau + G_1 \cdot K_s \cdot \text{sgn}(S_a) \\ & + G_2 \cdot K_s \cdot \text{sgn}(S_b) \end{aligned} \quad (27)$$

$$e_\tau = G_3 \cdot K_s \cdot \text{sgn}(S_a) + G_4 \cdot K_s \cdot \text{sgn}(S_b) \quad (28)$$

其中 $e_\omega = \hat{\omega} - \omega$ ， $e_\theta = \hat{\theta} - \theta$ 及 $e_\tau = \hat{\tau} - \tau$ 。

如果 K_s 足夠大且符合下列條件

$$K_s > \max \left\{ \left| \frac{KN^2}{L} \hat{\omega} \cos(N\hat{\theta}) e_\theta + \frac{KN}{L} \sin(N\hat{\theta}) e_\omega \right|, \left| \frac{KN^2}{L} \hat{\omega} \sin(N\hat{\theta}) e_\theta - \frac{KN}{L} \cos(N\hat{\theta}) e_\omega \right| \right\}, \quad (29)$$

此時滿足滑動條件，即系統狀態將會在有限時間內被推到滑動曲面上，而 \dot{S}_a 、 S_a 、 \dot{S}_b 及 S_b 將等於零，因此可求得此時之等效控制：

$$[K_s \cdot \text{sgn}(S_a)]_{eq} = \frac{KN^2}{L} \hat{\omega} \cos(N\hat{\theta}) e_\theta + \frac{KN}{L} \sin(N\hat{\theta}) e_\omega \quad (30)$$

$$[K_s \cdot \text{sgn}(S_b)]_{eq} = \frac{KN^2}{L} \hat{\omega} \sin(N\hat{\theta}) e_\theta - \frac{KN}{L} \cos(N\hat{\theta}) e_\omega \quad (31)$$

假設

$$G_3 = M_1 (\sin(N\hat{\theta}) + \cos(N\hat{\theta})) \quad (32)$$

$$G_4 = M_1 (\sin(N\hat{\theta}) - \cos(N\hat{\theta})) \quad (33)$$

將(30)~(33)代入(26)~(28)可得：

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_\theta \\ \dot{e}_\omega \\ \dot{e}_\tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{KN^2}{H} \hat{i}_a \cos(N\hat{\theta}) & -\frac{B}{H} + G_1 \frac{KN}{L} \sin(N\hat{\theta}) & -\frac{1}{H} \\ +G_1 \frac{KN^2}{L} \hat{\omega} \cos(N\hat{\theta}) & -G_2 \frac{KN}{L} \cos(N\hat{\theta}) & e_\omega \\ +G_2 \frac{KN^2}{L} \hat{\omega} \sin(N\hat{\theta}) & & \\ M_1 \frac{KN^2}{L} \hat{\omega} & M_1 \frac{KN}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_\theta \\ e_\omega \\ e_\tau \end{bmatrix} \quad (34)$$

假設 $-\lambda_\theta$ 、 $-\lambda_\omega$ 和 $-\lambda_\tau$ 為(34)式之特徵值，可得觀測器之增益值

$$M_1 = \frac{(\lambda_\theta \cdot \lambda_\omega \cdot \lambda_\tau) HL}{KN^2 \hat{\omega}} \quad (35)$$

$$\begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} -(\lambda_\theta \lambda_\omega + \lambda_\omega \lambda_\tau + \lambda_\theta \lambda_\tau) \\ + \frac{\lambda_\theta \lambda_\omega \lambda_\tau}{N\hat{\omega}} \\ -\frac{KN}{L} \cos(N\hat{\theta}) - \frac{KN^2}{L} \hat{\omega} \sin(N\hat{\theta}) \\ -\frac{KN}{L} \sin(N\hat{\theta}) \quad \frac{KN^2}{L} \hat{\omega} \cos(N\hat{\theta}) \\ + \frac{KN^2}{H} \hat{i}_a \cos(N\hat{\theta}) \\ + \frac{KN^2}{H} \hat{i}_b \sin(N\hat{\theta}) \\ -(\lambda_\omega + \lambda_\omega + \lambda_\tau) + \frac{B}{H} \end{bmatrix}}{-\frac{K^2 N^3}{L} \hat{\omega}} \quad (36)$$

若設計永磁式同步馬達在變動負載下之觀測器，以(29)~(32)為主，再加上變動負載觀測器表示如下：

$$\dot{\hat{\tau}}_0 = G_3 \cdot K_s \cdot \text{sgn}(S_a) + G_4 \cdot K_s \cdot \text{sgn}(S_b) \quad (37)$$

$$\dot{\hat{\tau}}_1 = \hat{\tau}_2 + G_5 \cdot K_s \cdot \text{sgn}(S_a) + G_6 \cdot K_s \cdot \text{sgn}(S_b) \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\tau}}_2 = & \hat{\omega}^2 (\hat{\tau}_0 - \hat{\tau}_1) + G_7 \cdot K_s \cdot \text{sgn}(S_a) + G_8 \cdot K_s \cdot \text{sgn}(S_b) \end{aligned} \quad (39)$$

觀測器之增益值為(32)、(33)及下列式子：

$$G_5 = M_2 (\sin(N\hat{\theta}) + \cos(N\hat{\theta})) \quad (40)$$

$$G_6 = M_2 (\sin(N\hat{\theta}) - \cos(N\hat{\theta})) \quad (41)$$

$$G_7 = M_3 (\sin(N\hat{\theta}) + \cos(N\hat{\theta})) \quad (42)$$

$$G_8 = M_3 (\sin(N\hat{\theta}) - \cos(N\hat{\theta})) \quad (43)$$

依照相同之步驟，求得其線性化誤差動態方程式如下：

$$\begin{cases} \dot{e}_\theta \\ \dot{e}_\omega \\ \dot{e}_{r_0} \\ \dot{e}_{r_1} \\ \dot{e}_{r_2} \end{cases} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{KN^2}{H} \hat{i}_a \cos(N\hat{\theta}) & -\frac{KN^2}{H} \hat{i}_b \sin(N\hat{\theta}) & -\frac{B}{H} + G_1 \frac{KN}{L} \sin(N\hat{\theta}) & 0 & -\frac{1}{H} \\ +G_1 \frac{KN^2}{L} \hat{\omega} \cos(N\hat{\theta}) & -G_2 \frac{KN}{L} \cos(N\hat{\theta}) & 0 & 0 & 0 \\ +G_2 \frac{KN^2}{L} \hat{\omega} \sin(N\hat{\theta}) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_1 \frac{KN^2}{L} \hat{\omega} & M_1 \frac{KN}{L} & 0 & 0 & 0 \\ M_2 \frac{KN^2}{L} \hat{\omega} & M_2 \frac{KN}{L} & 0 & 0 & 1 \\ M_3 \frac{KN^2}{L} \hat{\omega} & 2\hat{\omega}(\hat{\tau}_0 - \hat{\tau}_1) + M_3 \frac{KN}{L} \hat{\omega}^2 & -\hat{\omega}^2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{cases} e_\theta \\ e_\omega \\ e_{r_0} \\ e_{r_1} \\ e_{r_2} \end{cases} \quad (44)$$

其中 $e_{r_0} = \hat{\tau}_0 - \tau_0$ 、 $e_{r_1} = \hat{\tau}_1 - \tau_1$ 、 $e_{r_2} = \hat{\tau}_2 - \tau_2$ 。
假設 $-\lambda_1$ 、 $-\lambda_2$ 、 $-\lambda_3$ 、 $-\lambda_4$ 、 $-\lambda_5$ 為(44)式之特徵值，求得觀測器之增益值 M_1 、 M_2 、 M_3 、 G_1 及 G_2 ：

$$M_1 = \frac{P_5 HL}{KN^2 \hat{\omega}^3} \quad (45)$$

$$M_2 = \frac{L}{KN^2 \hat{\omega}} (H(P_3 - P_1 \hat{\omega}) - Q_1) \quad (46)$$

$$M_3 = \frac{L}{KN} (Q_1 - 2\hat{\omega}(\hat{\tau}_0 - \hat{\tau}_1)) \quad (47)$$

$$\begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} -\frac{KN}{L} \cos(N\hat{\theta}) & -\frac{KN^2}{L} \hat{\omega} \sin(N\hat{\theta}) \\ -\frac{KN}{L} \sin(N\hat{\theta}) & \frac{KN^2}{L} \hat{\omega} \cos(N\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -P_2 + \frac{Q_2}{H} + \hat{\omega}^2 \\ +\frac{KN^2}{H} \hat{i}_a \cos(N\hat{\theta}) \\ +\frac{KN^2}{H} \hat{i}_b \sin(N\hat{\theta}) \\ -P_1 + \frac{B}{H} \end{bmatrix}}{-\frac{K^2 N^3}{L^2} \hat{\omega}} \quad (48)$$

其中 $P_1 = \sum_{i=1}^5 \lambda_i$ 、 $P_2 = \sum_{i=1, j=1, i \neq j}^5 \lambda_i \lambda_j$ 、 $P_3 = \sum_{i=1, j=1, k=1, i, j, k \neq}^5 \lambda_i \lambda_j \lambda_k$ 、

$$P_4 = \sum_{i=1, j=1, k=1, l=1, i, j, k, l \neq}^5 \lambda_i \lambda_j \lambda_k \lambda_l$$

$$P_5 = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5$$

$$Q_1 = \frac{1}{H + N^2 \hat{\omega}} (HP_3 + HNP_4 - \frac{HP_5}{\hat{\omega}} - NH(P_2 - \hat{\omega}^2) \hat{\omega}^2 + 2N^2 \hat{\omega}^2 (\hat{\tau}_0 - \hat{\tau}_1) - HP_1 \hat{\omega})$$

$$Q_2 = \frac{1}{N\hat{\omega}} (H(P_3 - P_1 \hat{\omega}) - Q_1)$$

四、結論與成果

我們先利用電腦模擬，驗證前述之永磁式同步馬達滑模觀測器的可行性。所使用之馬達參數如表一所示，模擬的取樣頻率為 2.5 kHz。

$$\underline{R = 2.5 \ (\Omega)} \quad \underline{H = 6.45 \times 10^{-5} \ (\text{kg} \cdot \text{m}^2)}$$

$$\underline{N = 4} \quad \underline{K = 5.795 \times 10^{-3} \ (\text{V} \cdot \text{s} / \text{rad})}$$

$$\underline{L = 597 \times 10^{-3} \ (\text{H})} \quad \underline{B = 8.06 \times 10^{-5} \ (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad})}$$

表一：馬達參數
(信儂 #7CB30-2SE6F)

模擬所使用之控制律是依據 [12] 之雙迴路控制律 (two-loop controller)，控制器之位置誤差、速度誤差與電流誤差的閉迴路收斂頻寬，分別為 $\lambda_p = 3$ Hz、 $\lambda_\omega = 30$ Hz 及 $\lambda_c = 300$ Hz，速度指令為 1000rpm 之步階指令。

我們分別針對三種 Utkin 滑動觀測器，速度觀測器 [12] 及前述之兩種觀測器，當馬達承受週期性之變動負載：

$$\tau = 0.2 + 0.2 * \sin(\omega t) \text{ Nm} \quad (49)$$

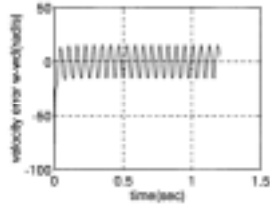
假設觀測器之參數與馬達相同，三種觀測器之模擬結果為圖一 ~ 三。可知道變動負載觀測器在速度指令與外在力矩改變時，其暫態響應較差，但是對週期性之變動負載追蹤誤差較小。

我們使用信儂公司所製作之 #7CB30-2SE6F 型伺服馬達 (參數同表一)，後級驅動器為微鋒公司所生產之 UT-90 型單板，前級則為本實驗室自製之控制板 (包含電流量測、位置解碼及空間向量之脈寬調變訊號)，並以 586 之個人電腦計算控制律及觀測器。整個無軸感測器之工作方塊圖如圖四所示，速度指令則如圖五所示，其速度迴路與電流迴路之 PI 控制器取樣頻率，分別為 1 kHz 與 4 kHz，此兩迴路之收斂頻寬分別設在 20 Hz 與 300 Hz。

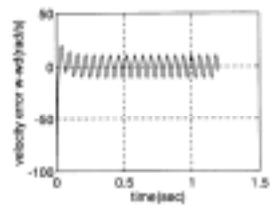
實驗時使用一偏心圓盤，將之固定於馬達上，馬達轉動時便能產生一變動負載，控制器所用之轉子位置、速度及外在力矩皆由觀測器所估測得知。實驗同時又利用編碼器量得實際轉子位置，但此位置資訊僅作為觀測器之效能分析之用。實驗結果如圖六 ~ 八，其中變動負載觀測器能估測出實際負載的頻率，其穩態誤差及追蹤誤差皆比其餘兩種觀測器較小，但當馬達啟動時之速度誤差較其餘兩者為大。

由模擬與實驗的結果可知，當馬達承受變動負載時，利用 Utkin 之滑動觀測器理

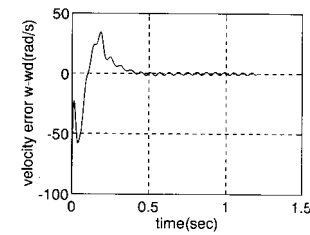
論所推導之變動負載觀測器，能估測出較正確之馬達狀態，並且其穩態誤差亦較小，但因實驗所使用之偏心轉盤較小，所以定力矩與變動力矩觀測器之差異不易比較，未來需使用其他方式產生此變動負載。



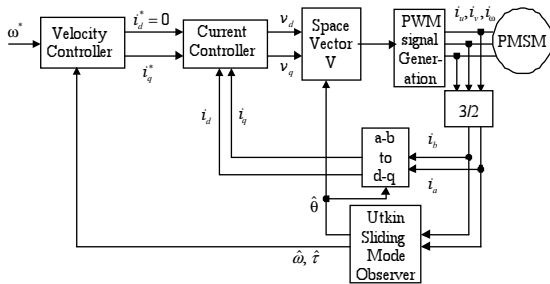
圖一：速度觀測器模擬結果



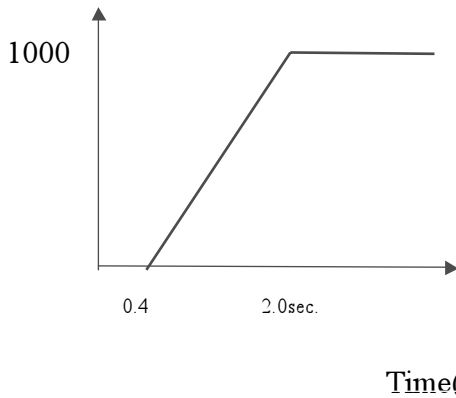
圖二：定力矩觀測器模擬結果



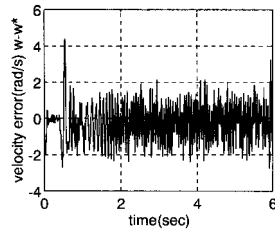
圖三：變動力矩觀測器模擬結果



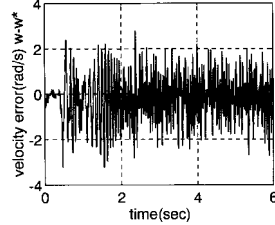
圖四：無軸感測器之方塊圖



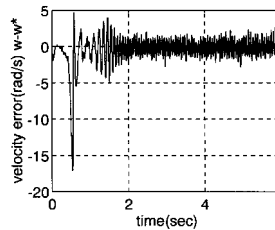
圖五：實驗之速度指令



圖六：速度觀測器之速度響應



圖七：定力矩觀測器之速度響應



圖八：變動力矩觀測器之速度響應

五、參考文獻

1. Wu, R. and G.-R. Slemon, "A Permanent Magnet Motor Drive without a Shaft Sensor," Conference Record-IAS Annual Meeting, pp.553~558, 1990.
2. Hoque, M.-A. and M.-A. Rahman, "Speed and Position Sensorless Permanent Magnet Synchronous Motor Drives," Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, v.2, pp.689~692, 1994.
3. Xiang, Y.-Q. and S.-A. Nasar, "Estimation of Rotor Position and Speed of a Synchronous Reluctance Motor for Servodrives," IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol.142, No.3, May 1995.
4. Jones, L.-A. and J.-H. Lang, "A State Observer for the Permanent-Magnet Synchronous Motor," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.36, No.3, pp.374~382, 1989.
5. Low, T.-S., T.-H. Lee, and K.-T. Chang, "A Nonlinear Speed Observer for Permanent-Magnet Synchronous Motors," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.40, No.3, pp.307~316, 1993.
6. Luenberger, D.-G., "An Introduction to Observers," IEEE Trans. Auto. Control, Vol.AC-16, No.6, pp.594~602, 1971.
7. Cho, K.-Y., S.-S. Hong, D.-s. Oh and M.-J. Youn, "Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Using Boundary Layer State Observer," Electronics Letters, 6th, Vol.26, No.25, pp.2081~2082, 1990.
8. Walcott, B.-L. and S.-H. Zak, "Observation of Dynamical Systems in The Presence of Bounded Nonlinearities/Uncertainties," Proceedings of 25th

- Conference on Decision and Control, Athens, Greece, pp.961~966, 1986.
9. Hu, J., D. Zhu, Y. Li and J. Gao, "Application of Sliding Observer to Sensorless Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System," PSEC Record-IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, v.1, pp.532~536, 1994.
 10. Utkin, V.-I., Sliding Modes in Control and Optimization, Springer-Verlag, New York, pp.207~210, 1992.
 11. 許金城, 電動機之無速度感測器變速度控制, 國立交通大學機械研究所碩士論文, 1994.
 12. 王洪儒, 永磁式同步馬達之無軸感測器速度控制, 國立交通大學機械研究所碩士論文, 1996.
 13. Chen, J.-J. and K.-P. Chin, "The Complete Observability of Speed Sensorless PMSM Control Systems", submitted for publication, 1998.
 14. Fitzgerald, Kingsley C., Jr and S. Umans D., Electric Machinery, McGraw-Hill, 1990.