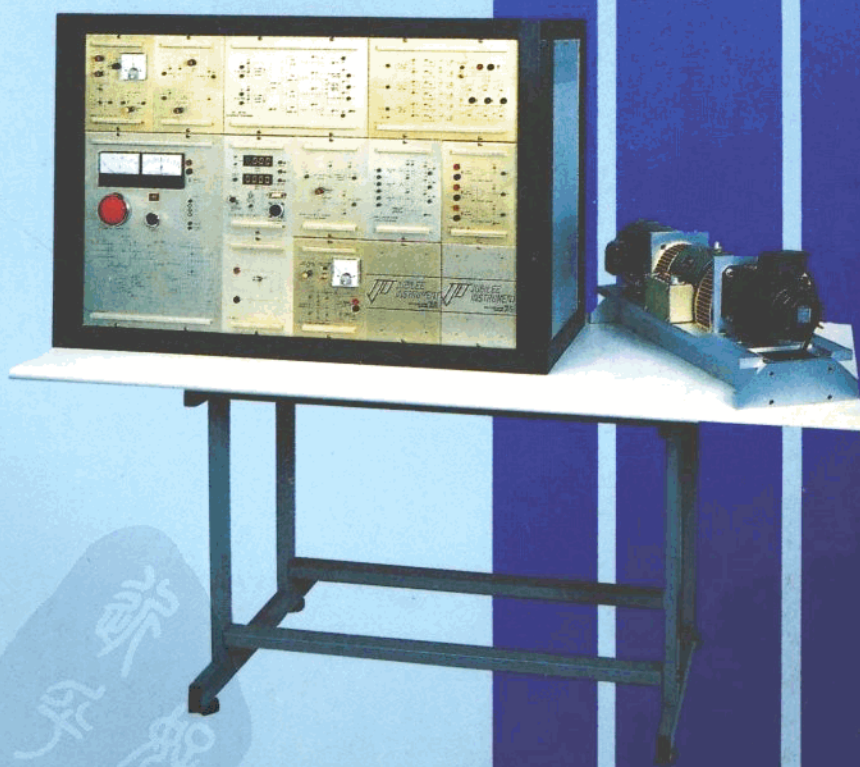


交流感應伺 服馬達控制

仲成儀器股份有限公司

編輯部 編著



TM383/4

全華科技圖書股份有限公司 印行

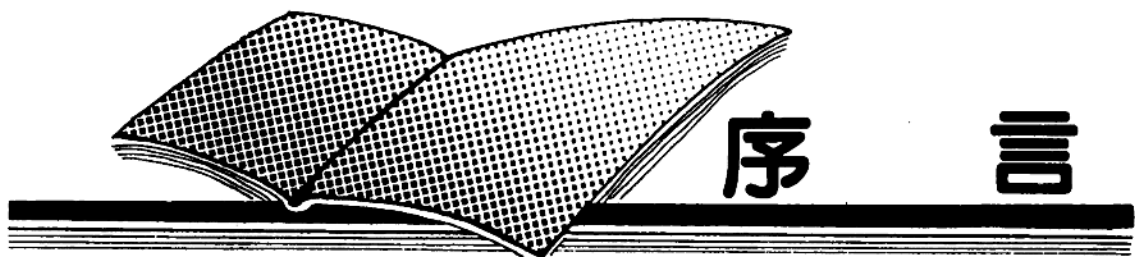
PDG

我們的宗旨：

**提供技術新知
帶動工業升級
為科技中文化再創新猷**

資訊蓬勃發展的今日，
全華本著「全是精華」的出版理念
以專業化精神
提供優良科技圖書
滿足您求知的權利
更期以精益求精的完美品質
為科技領域更奉獻一份心力！

為保護您的眼睛，本公司特別採用不反光的米色印書紙！！



交流感應伺服馬達為所有伺服馬達中最新發展上市之產品，其具有慣性小，響應速度快之特性，且具有堅固耐用、價格經濟及不用維護的優點，因此交流感應伺服馬達為現今最新之主流產品。

交流感應伺服馬達之電壓、磁場與電流的關係非線性時變，且互相耦合，以致控制器之設計相當複雜且困難。仲成公司投入龐大之財力、人力，耗時多年，利用時下最新之磁場導向控制理論（field-oriented control）或向量控制理論（vector-control）研展出一完整之交流感應伺服馬達控制系統。

其所謂磁場導向控制理論亦即先測出磁場位置（角度），依磁場方向加入激磁電流，且垂直方向加入電樞電流（轉矩電流），使得定子電流分成此二部份，則轉矩之控制將如直流馬達一樣簡單。

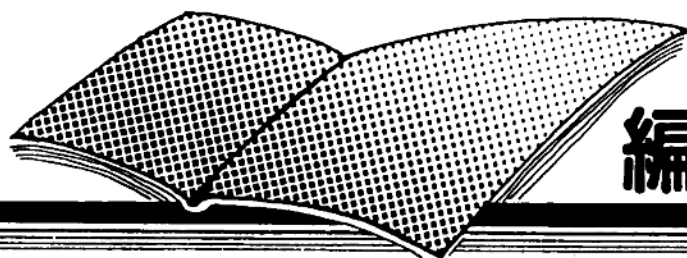
本實驗系統除可作類比式交流感應伺服馬達各類控制外，系統本身備有數位監控電路，可與個人電腦或單晶片處理器連線作命令設定、控制信號監督及負載信號變動之諧波分析記錄及取樣時間之量測。

本產品延聘富有教學經驗及實作理論之教授執筆，並加以電腦輔助設計套裝軟體之圖表繪製，期使本書達到詳實精美的

目標。

本書內容從電流控制型 PWM-VSI 控制電路 (current-controlled inverter CKT)、變頻功率驅動電路 (inverter driver power CKT) 之功率電路，到較為艱深難懂之座標轉換控制電路 (dq-abc transformation axis CKT)、向量控制電路 (vector control CKT)、滑差頻率計算電路 (slip frequency control CKT) 均有詳細之闡述及深入之探討。然倉促付梓，疏漏之處尚祈諸先進不吝指正。

仲成儀器股份有限公司編輯部



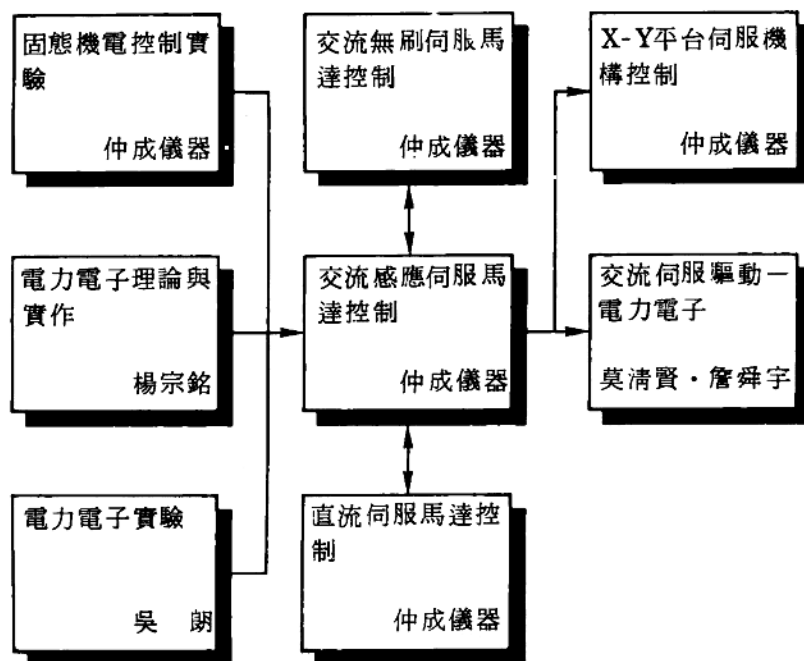
編輯部序

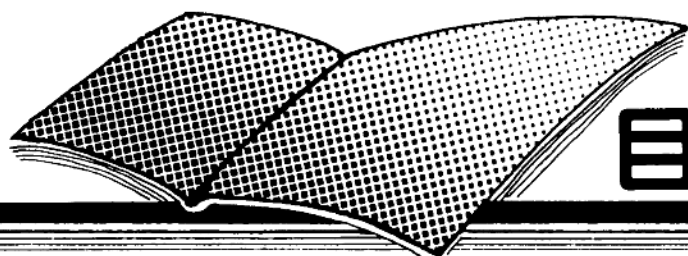
「系統編輯」是我們的編輯方針，我們所提供給您的，絕不只是一本書，而是關於這門學問的所有知識，它們由淺入深，循序漸進。

本書特色是將複雜艱澀的磁場導向伺服馬達控制理論簡單化，並將其非常數學化的控制理論，利用硬體系統的功能運作，加以闡述說明，使磁場導向的理論更容易了解。適合大專電機、控制科系學生，配合仲成儀器股份有限公司所開發的「交流感應伺服馬達控制裝置」學習使用。

同時，為了使您能有系統且循序漸進研習相關方面的叢書，我們以流程圖方式，列出各有關圖書的閱讀順序，以減少您研習此門學問的摸索時間，並能對這門學問有完整的知識。若您在這方面有任何問題，歡迎來函連繫，我們將竭誠為您服務。

流程圖





目

錄

一、驅動器電路模組功能說明	1
(一)命令電壓產生器模組	1
(二)P. I. 控制電路模組	3
(三)座標軸轉換控制電路模組	5
(四)向量控制及滑差頻率計算電路模組	8
(五)電流控制型 PWM - V S I 控制電路模組	9
(六)變頻器功率驅動電路模組	11
(七)電流回授模組	13
(八)轉速、轉矩計電路模組	15
(九)激磁控制電路模組	17
(十)功率電阻負載箱模組(一)	21
(十一)功率電阻負載箱模組(二)	21
(十二)數位監控系統電路模組	21
(十三)電源供應器電路模組	23
 二、實驗操作說明	 26
實驗一 交流感應伺服馬達閉迴路速度控制實驗	26
實驗二 向量控制或磁場導向控制實驗	31
實驗三 交流感應伺服馬達閉迴路比例、積分式速度控制 電路實驗	33

實驗四	交直 (d 、 q) 軸對三相 (a 、 b 、 c) 軸轉換電路 實驗	34
實驗五	電流控制型 PWM-VSI 控制電路實驗	35
實驗六	數位式交流感應伺服馬達閉迴路比例、積分式 速度控制電路實驗	36

一、驅動器電路模組功能說明

(一) 命令電壓產生器模組

命令電壓產生器模組 (COMMAND VOLTAGE SETTING MODULE) 的主要功能為設定馬達轉速命令之電壓。本模組可同時設定兩種不同轉速之命令電壓，其分別由板面上 V_{s1} 及 V_{s2} 兩個紅色可變電阻設定， V_{s1} 及 V_{s2} 的設定範圍均為 $+10V \sim -10V$ (即最大正轉轉速 $\sim$ 最大反轉轉速)。面板 V_{s1}/V_{s2} 切換開關用以選擇 V_{s1} 或 V_{s2} 的設定電壓為使用的命令電壓。上述的設定電壓 (V_{s1} 或 V_{s2}) 由面板上 RUN/STOP 切換開關決定是否要由面板上 V_{s0} 端子輸出，當置於 RUN 位置時， V_{s0} 之輸出值為 V_{s1} 或 V_{s2} 所設定的電壓值；當置於 STOP 時 V_{s0} 之輸出為 $0V$ (即接地)。

為避免速度命令變化太快 (如快速正反轉)，對整個裝置造成危害，本模組提供斜坡產生電路 (ramp generator)；以限制轉速命令的斜率 (變化率)，由面板上 SLOPE ADJ. 之黃色可變電阻設定，設定範圍為 $1V / 0.8 \text{ sec} \sim 1V / 7 \text{ m sec}$ ，實驗時如欲使用斜坡產生器，則以小信號線連接 V_{s0} 端子及 IN 端子，再由 OUT 端子送出轉速命令電壓到 P.I. 控制電路模組的命令輸入端 ω^* 。

本模組上 VOLTMETER INPUT SELECTOR 多段選擇開關，可分別選擇觀察 V_{s1} 、 V_{s2} 或 OUT 三者的電壓值，由面板上的電壓表讀數，本模組之面板圖如圖 1 所示。

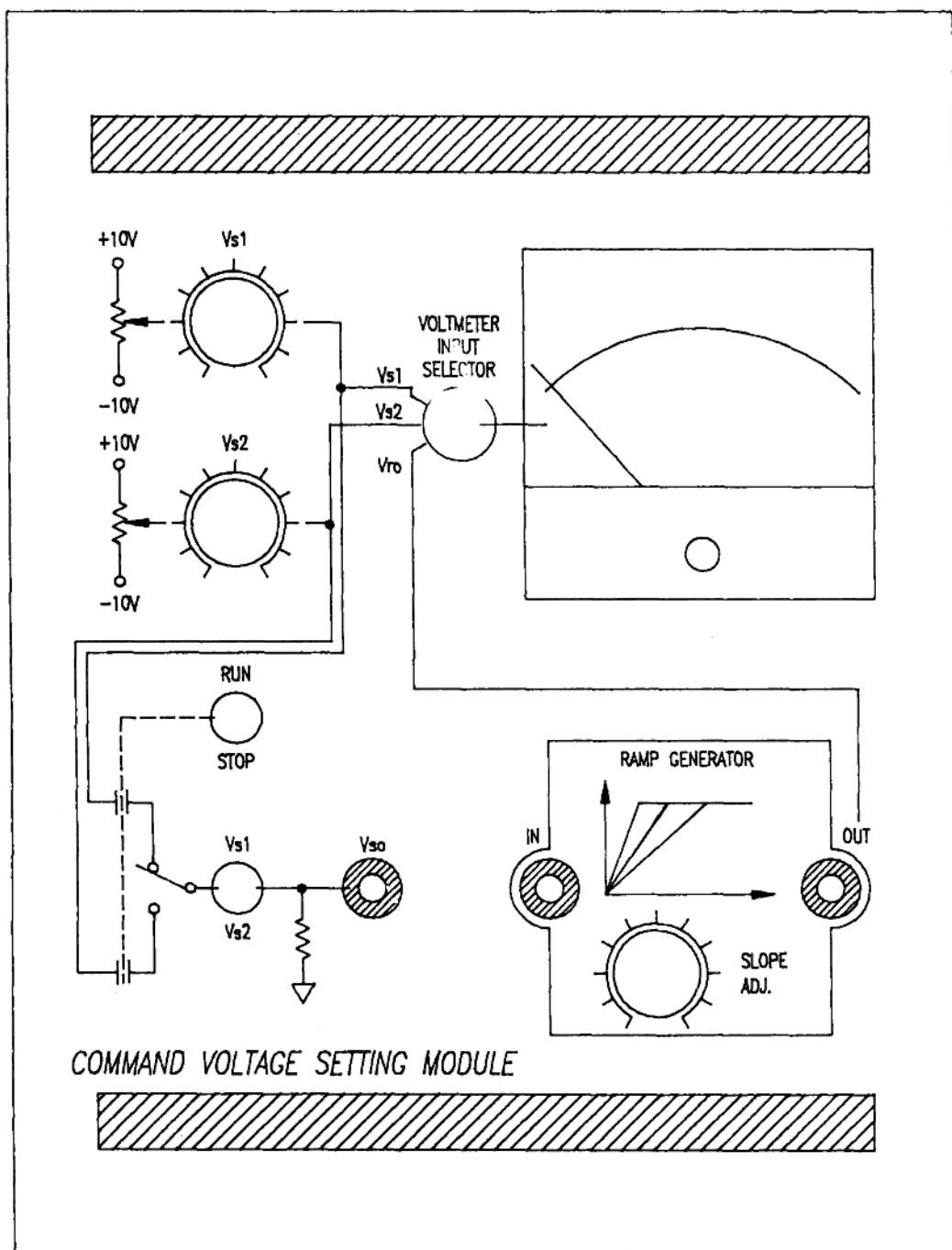


圖 1 命令電壓產生器模組之面板圖

(二) P.I. 控制電路模組

P.I. 控制電路模組 (P.I. CONTROLLER MODULE) 的功能是提供一個可變控制參數的控制器 (controller) , 供 INS - 6A 系統使用。本模組所提供的控制器為比例 - 積分控制器, 其轉移函數 $G(S)$ 為

$$G(S) = K_p + K_i / S$$

K_p : 比例控制常數

K_i : 積分控制常數

而本模組之 K_p 為 0 ~ 5 連續可調, K_i 為 4 ~ 20 連續可調。

本模組基本上由減法器、比例控制器、積分控制器及加法器組成。減法器的兩個輸入端分別為轉速命令信號 ω_r^* 及轉速回授信號 ω_r 。 ω_r^* 係接到命令電壓產生器模組 OUT 端子, 亦即轉速命令信號; ω_r 係接到轉速、轉矩計電路模組之 ω_r 端子, 亦即馬達速度回授信號。

$$\Delta \omega_r = \omega_r^* - \omega_r$$

$\Delta \omega_r$: 轉速誤差信號

其中 ω_r^* 、 ω_r 及 $\Delta \omega_r$ 可分別由本模組面板上 TP₁、TP₂ 及 TP₃ 測試端子觀察之。

轉速誤差信號 $\Delta \omega_r$ 經比例 - 積分控制器及加法器執行運算為

$$i_{qs}^* = (K_p + K_i / S) \cdot \Delta \omega_r$$

上述中 i_{qs}^* 為感應馬達轉矩電流命令信號。利用此 P.I. 控制器使馬達實際轉速等於設定命令轉速。實驗時, 本模組

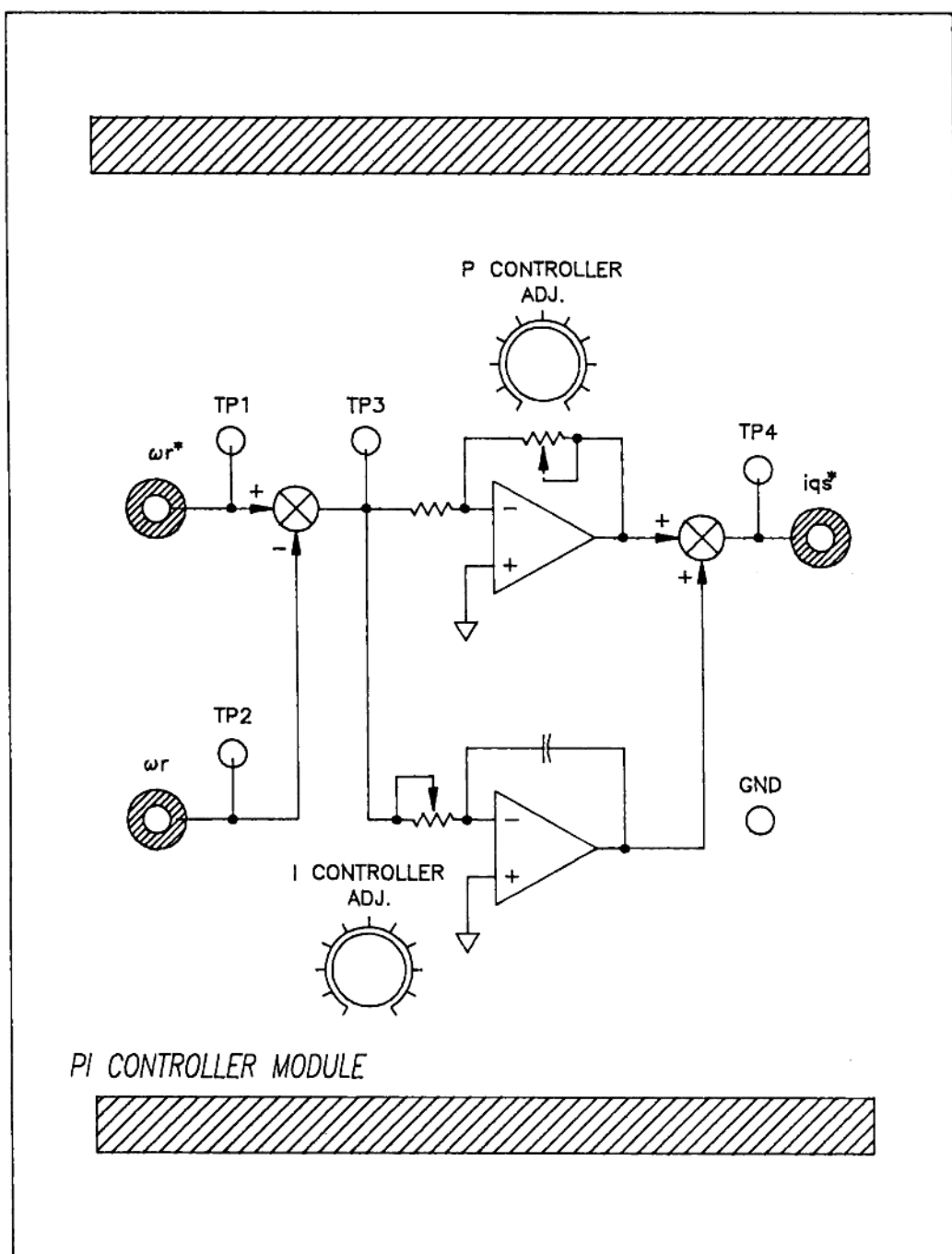


圖 2 P.I. 控制電路模組之面板圖

面板上 i_{qs}^* 端子須接到 $dq-abc$ 軸轉換電路模組面板上之 i_{qs}^* 端子。本模組之面板圖如圖 2 所示。

(三) 座標軸轉換控制電路模組

座標軸轉換控制電路模組 ($dq-abc$ AXIS TRANSFORMATION CIRCUIT MODULE) 之功能係計算同步旋轉位置 (θ_e)，並將交直軸之電流命令 i_{qs}^* 、 i_{ds}^* 轉換為三相平衡電流命令 i_a^* 、 i_b^* 及 i_c^* ，提供此三相電流命令 (i_a^* 、 i_b^* 、 i_c^*) 給電流控制型 PWM-VSI 控制電路模組。

三相 a 、 b 、 c 對交直 (dq) 軸之同步旋轉座標 (synchronously rotation-frame) 轉換數學式為：

$$\begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \cos(\theta_e - 120^\circ) & \cos(\theta_e + 120^\circ) \\ \sin \theta_e & \sin(\theta_e - 120^\circ) & \sin(\theta_e + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

上式中假設三相平衡電路，則 0 軸值 i_{os} 為零。則交直 (dq) 對三相 (a 、 b 、 c) 轉換數學式為：

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \sin \theta_e \\ \cos(\theta_e - 120^\circ) & \sin(\theta_e - 120^\circ) \\ \cos(\theta_e + 120^\circ) & \sin(\theta_e + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix}$$

所以三相電流命令 i_a^* 、 i_b^* 及 i_c^* 爲

$$i_a^* = i_{qs}^* \cdot \cos \theta_e + i_{ds}^* \sin \theta_e$$

$$i_b^* = i_{qs}^* \cdot \cos(\theta_e - 120^\circ) + i_{ds}^* \sin(\theta_e - 120^\circ)$$

$$i_c^* = -(i_a^* + i_b^*)$$

其中 $\cos \theta_e$ 、 $\sin \theta_e$ 、 $\cos(\theta_e - 120^\circ)$ 及 $\sin(\theta_e - 120^\circ)$ 是使用查表法 (look-up table) 產生再經 D/A 轉換成類比信號。而同步旋轉位置 θ_e 是由伺服馬達軸之轉速 (由編碼器的脈波輸出) 及計算滑差 (slip) 轉速, 分別經計數器 (counter) 而相加得之。

實驗時, 本模組面板上 f_r 及 f_r - up/down 端子分別與轉速、轉矩計電路模組之 f_r 及 f_r - up/down 端子相連結。而 f_{sl} - up/down 接至向量控制及滑差計算電路模組上。面板上 i_{qs}^* 端子接到 P.I. 控制電路模組上。 i_{ds}^* 內部設定爲 2V, 即爲 2A 的電流量。 i_a^* 、 i_b^* 及 i_c^* 端子可輸出給電流控制型 PWM-VSI 電路模組, 做變頻器之 PWM 控制用。由 TP₅ ~ TP₁₃ 測試端子, 可分別觀測 $\cos \theta_e$ 、 $\cos(\theta_e - 120^\circ)$ 、 $\sin \theta_e$ 、 $\sin(\theta_e - 120^\circ)$ 、 i_{qs}^* 、 i_{ds}^* 、 i_a^* 、 i_b^* 及 i_c^* 之信號。本模組之面板圖如圖 3 所示。

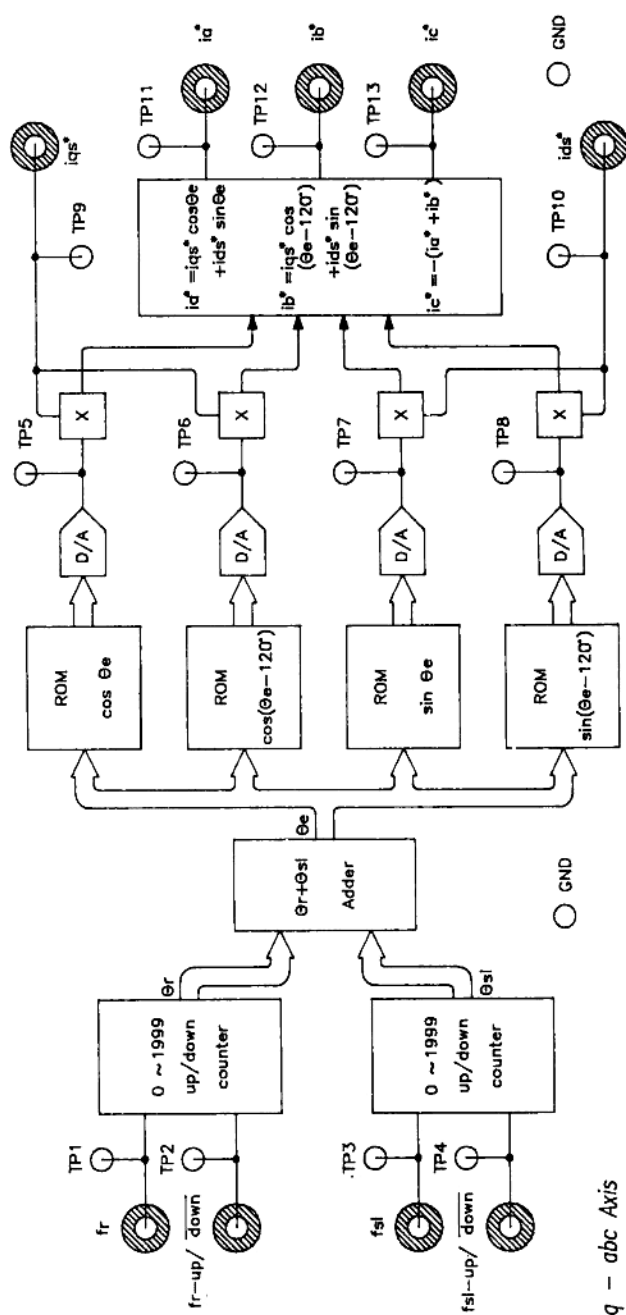


圖 3 座標軸轉換控制電路模組之面板圖

(四) 向量控制及滑差頻率計算電路模組

向量控制及差頻計算電路模組 (VECTOR CONTROL AND SLIP FREQUENCY CONTROL CIRCUIT MODULE) 將提供滑差頻率 f_{sl} (換算為脈波信號) 及滑差頻率方向 $f_{sl} - \text{up/down}$ 之信號, 給座標軸轉換電路模組, 以完成同步旋轉座標軸之轉換。

感應馬達間接式磁場導向控制 (indirect field oriented control) 理論, 其同步旋轉頻率為 ω_e 。

$$\omega_e = \omega_r + \omega_{sl}$$

式中 ω_r : 馬達軸轉速 (軸頻率)

ω_{sl} : 滑差頻率

若將 q 軸之轉子磁場 λ_{qr} 設定為零, 則估測 d 軸之轉子磁場位置 θ_e 為

$$\theta_e = \int \omega_r dt + \int \omega_{sl} dt$$

上式中之滑差頻率 ω_{sl} 可由 i_{qs} 及 i_{ds} 電流量計算得穩態值。

$$\omega_{sl} = \frac{i_{qs}}{T_r i_{ds}}$$

式中 $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ 為轉子時間常數

感應馬達電磁轉矩 T_e 穩態時為

$$T_e = K_i i_{qs} \lambda_{dr}$$

$$K_t = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r}$$

L_r ：馬達等效轉子側感

L_m ：馬達等效耦合電感

P ：馬達之極數

若將馬達之 d 軸轉子磁場 λ_{dr} 固定，即為穩態時 i_{ds} 固定，則電磁轉矩 T_e 與 i_{qs} 之 q 軸電流將成線性比例。且整個交流感應伺服控制採用電流控制型 PWM-VSI 之驅動，使得實際電流追隨電流命令即 i_{qs} 及 i_{ds} 很接近 i_{qs}^* 、 i_{ds}^* 值，則調整 i_{qs}^* 之值即調整電磁轉矩。

本模組配合使用感應伺服馬達，內部設定 i_{ds}^* 為 2V（電流量的轉換為 1V/1A），而 i_{ds}^* 之值依馬達而設定之。本模組面板之 Frequency Adjust 旋鈕可調整轉子時間常數（ T_r ），若能適當調整使電磁轉矩與 i_{qs}^* 電流成線性比例，則達到磁場導向控制；否則為滑差調整控制。

實驗時，若電流 i_{qs}^* 的絕對值 $|i_{qs}^*|$ 越大，產生滑差頻率 f_{sl} （換算脈波）頻率越高。當 $i_{qs}^* > 0$ ，則 $f_{sl} - \text{up/down}$ 端子輸出為邏輯高位準之信號；當 $i_{qs}^* < 0$ 時，則 $f_{sl} - \text{up/down}$ 為邏輯低位準之信號，此可由 TP3 測試端子觀測之，本模組面板圖如圖 4 所示。

（五）電流控制型 PWM-VSI 控制電路模組

電流控制型 PWM-VSI 模組（CURRENT-CONTROLLED INVERTER CONTROL CIRCUIT MODULE）的功用為電流命令與實際電流之誤差值，經 P.I. 控制器之補償，利用三角波之載波比較，而得到電流