

整合式伺服運動控制平台的功率後級架構說明

工研院機所/馮元掄

前言：

產業用的伺服控制系統經過多年來的發展，不論是在理論或者實務層面都已進入成熟的階段。但是隨著科技持續的進步，會讓我們有機會運用更現代的技術來實現伺服系統的設計。例如在硬體的資源(CPU 或 DSP 等)取得和成本的考慮下，實現全數位化的伺服控制(甚至是全軟體伺服控制)就是現階段已經可以實現的目標。再加上網路的發達，和省配線的要求下，分散式控制也是另一個工業界努力的方向。而近年來工研院機械所在整合式伺服控制平台的努力，除了相關軟硬體技術的開發外，功率後級也是一個重要的項目。因為控制信號必須透過功率元件放大來驅動馬達，而且閉迴路控制所須要的迴授信號也必須經過適當的處理。本文以介紹該後級的架構為主，期望一個穩定且可靠的放大器，能夠應用在不同的馬達和控制器上。

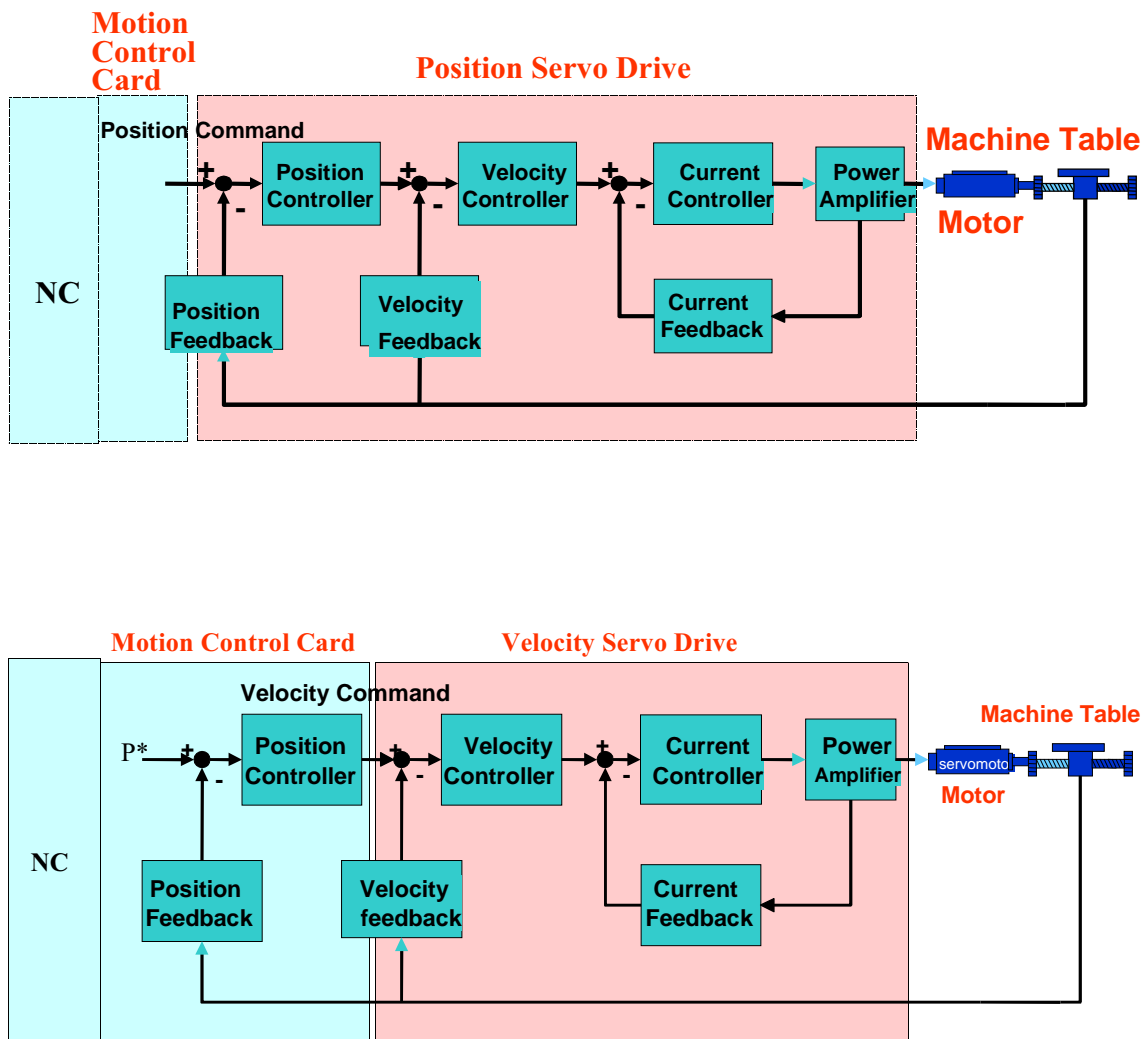
本文：

一、伺服控制的架構說明：

傳統上產業機台的伺服馬達驅動器是如圖一的泛用型架構，以類比式速度指令或數位式的位置脈波指令輸入方式為主。但是這種架構存在著一些缺點：

- (一) 類比速度指令易受雜訊干擾，而且有漂移的現象。
- (二) NC(數值控制：處理命令解譯，路徑規劃和插值的工作)和馬達驅動器分開設計的結果，對於機械系統的整合和補償功能將受限。
- (三) 一般位置指令型驅動器常見於步進馬達等開迴路的控制，只能適用於低加工精度要求的系統。

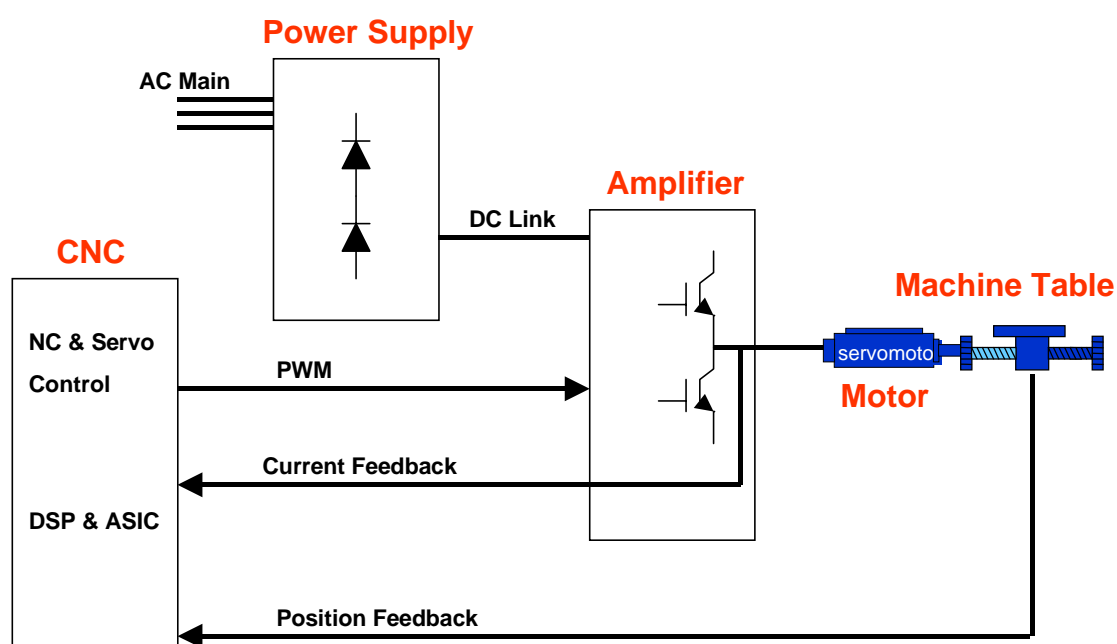
(四) 因為此型驅動器已將馬達控制的參數設計在內，在使用上幾乎注定要將驅動器和馬達搭配使用才行，所以不同驅動器/致動器間的可替代性差，對於系統整合者而言，也較困難去瞭解這些泛用型驅動器的內部差異。



圖一：泛用型驅動器架構

另外一個是日本 FANUC 公司的全數位式伺服控制器的架構，FANUC 在工具機領域享有盛名，雖然它的 NC 和伺服控制器是一個封閉的系統，卻是一個整合性伺服最好的範例。在伺服部份，不論是電流與換向迴路，速度迴路乃至位置迴路，都是利用軟體程式在 DSP 中執行，並且配合專用的 ASIC 來處理介面信號。

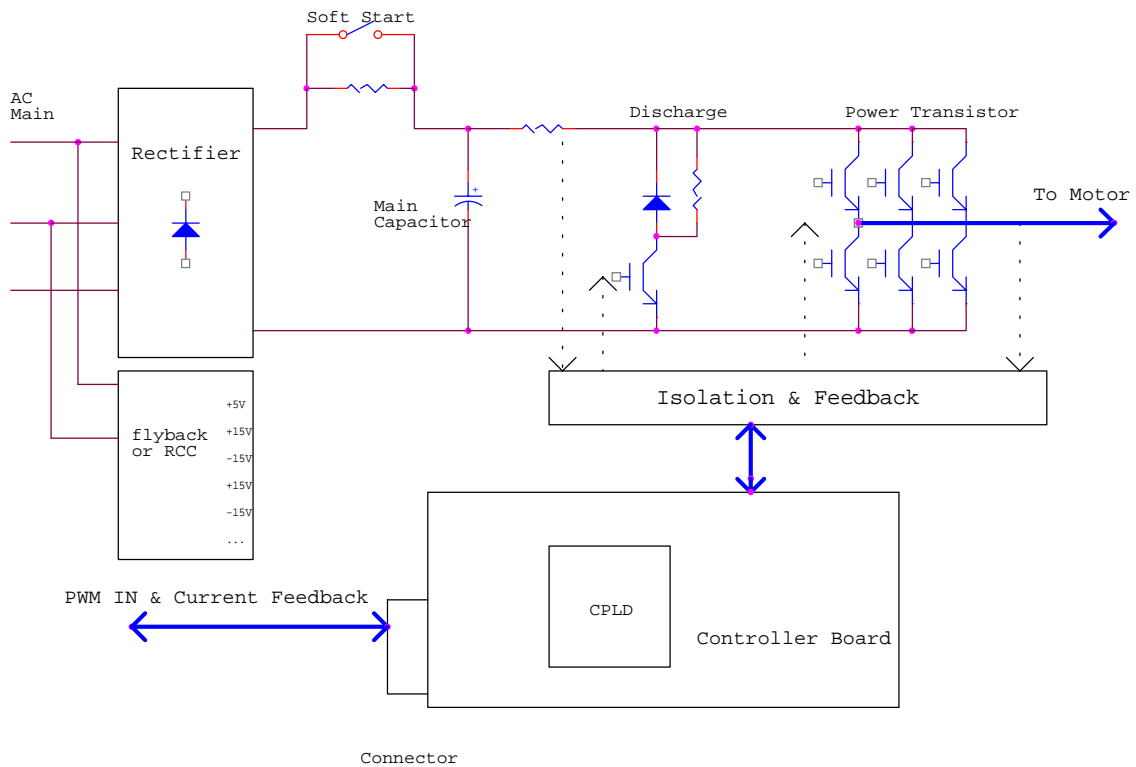
如此一來，伺服迴路的輸出就已經是 PWM 的訊號，再利用功率放大器將其輸出給馬達就達成了控制的目的。這種整合式伺服的架構，在工業自動化發展的過程來看絕對是必然的趨勢，除了能夠解決上述傳統伺服驅動器的缺點外，目前硬、軟體技術的成熟也會自然迫使系統朝向高整合度及高智慧型的方向發展。



圖二：FANUC 整合式伺服控制器

二、功率後級(放大器)的架構說明：

在 FANUC 的系統中，功率後級又包含了電源和放大器等兩個部分，而 α 系列之後的產品，又將其拆成兩個模組(即圖二所示)。因為功能上的類似，我們的功率後級基本上是參考 FANUC 的規格設計，另一方面也可以利用交替的測試來做驗證的工作。功率後級的架構如下圖三，並且分項說明如後：



圖三：功率後級簡圖

(一)三相橋整

功率放大器將伺服迴路送來的 PWM 訊號放大，但是能量的來源仍是三相的交流市電。交流電必須經過此橋式整流以及濾波電容後形成直流的 DC Link 電壓，這是標準的 2 級式(rectifier-inverter)架構。設計上要考慮流經二極體的電流波型(如：峰值電流和均方根值電流大小)及反相耐壓等。在 FANUC α 系列中，因為有獨立的電源模組可提供 DC Link 電壓給好幾個不同的放大器模組使用，為了確保此 DC 電壓的穩定，以及處理在馬達剎車狀況下負載能源回生的功能，會利用三相(6 個上下臂)的開關模組來替代二極體橋整，藉由控制而達成能量可雙向流動的目的(AC---DC)，並可以同時改善功率因素。

(二)主濾波電容

濾波電容的選擇要考慮耐壓，漣波電流值和 ESR 值，而且在 PWM 高頻漣波的操作下，電解電容常常是產品可靠度的關鍵。另外是在啓動時(電容充電過程)要設計柔性的啓動的步驟，可避免突波電流產生。

(三)放電迴路

當馬達操作在刹車的模式時能量會倒流至 DC Bus 上，在沒有負載回生的設計時，需要有 DC Bus 電壓檢測以及能夠透過放電電阻釋放能量的機制。放電電阻的選擇有外掛式(開放給使用者決定)或者內建固定式兩種。

(四)保護功能

一個穩定且可靠的伺服系統是必須能夠容忍錯誤發生的，否則一遇到危險發生就造成損壞，這是在工業控制上不允許的設計，更何況有些情形會和“人”的安全有關係，在處理這些信號上是必須小心謹慎的。有那些保護功能呢？參考下表一：

7-Segment	Status		PWM A\ (ALM 0)	PWM B\ (ALM 1)	PWM C\ (ALM 2)
0	Ready		1	1	1
1	OC	過電流	1	0	0
2	OV	過電壓 (DC Bus)	0	1	0
3	N/A		1	1	0
4	OH	放大器過熱	0	0	1
5	OS	PWM 頻率過高	1	0	1
6	N/A		0	1	1
7	PF	控制電源 +5V 失效	0	0	0
8	Reset		x	x	x
supplement					
	EF	漏電流 (Earth Fault)			
	UV	低電壓 (DC Bus)			
	OL	過負載 (Over Load)			
	LP	欠相 (Loss Phase)			
	SE	迴授元件失效 (Sensor Error)			

表一：Alarm 說明

在目前的設計中，發生上述 alarm 的情形後除了可以從放大器面板上的 7 段顯示器知道 alarm 的來源外，也可以透過 PWM 信號的腳位讀回此 alarm 的碼(此時後級開關已經被 disable 了)，方便控制器作判斷。

(五)功率晶體

典型的三相 PWM 控制須要 6 顆功率晶體，設計上的考慮有耐壓、電流大小及導通的損耗等。在低電壓的應用中還可見到用功率 MOS 作切換開關的，其它大部份的選擇都是用 IGBT。目前也常見模組化的包裝是將三相橋整，放電晶體和後級的 6 顆功率晶體放在一起，在體積和佈線的考量上是有幫助的。此外因為硬式切換(hard-switching)所造成的突波電壓以及晶體切換損耗等也是非常重要的課題，在大功率後級的設計上，也有應用柔性切換的技術。還有一種也已經

被日本大量使用的 IPM (Intelligent Power Module)是藉由半導體製程的整合，將 BiCMOS 和高壓 MOS 的元件積體化在一起，除了上述的功率元件外，閘極驅動線路，保護功能線路，甚至電流迴授的信號都包含在內，是典型的 SOC(系統在晶片)設計，可是目前仍以小功率模組為限。

(六)信號的隔離與回授

因為放大器本身有許多高功率的信號不停地在做暫態的變化，它所引發的電磁干擾及雜訊是很可觀的，所以必須適當地將功率側和控制側的參考位準隔離開，而隔離的方式又不外乎利用光或者磁耦合的原理。在 6 個上下臂的閘極側就常見使用光耦合器作隔離的例子，光耦合器的頻寬，驅動能力和隔離耐壓是主要的考慮。另外是各種電壓電流回授信號的隔離，因為是類比的信號，除了利用像是霍爾效應的電流感測器外，也有將串聯電阻取得的電壓信號經過適當地調變後，再由光耦合器(或變壓器)隔離並把信號還原的方法。用在電流迴路的馬達三相迴授電流，還必須要提供增益大小可調整的功能，以便使放大器能對應不同範圍的馬達及伺服控制器的使用。

(七)控制用電源

在此放大器上有一塊控制板，必須提供+5V，±15V 為 IC 的工作電壓，另外是所有功率晶體閘極驅動用的±15V 電源。這些電源有的可以共用，有的是必須互相隔離的，通常我們會用 flyback 或者 RCC 的方式來設計這些控制用的電源，並且藉由變壓器的繞組產生多組輸出。要注意的是，在表一中我們會嘗試檢查控制板用的+5V 電源，做為 power failure alarm 的依據，事實上這是不夠的，閘極驅動用的電源品質一樣是很重要的，在成本可以接受的原則下，應該將它們全

部納入保護線路的設計。

(八)控制板

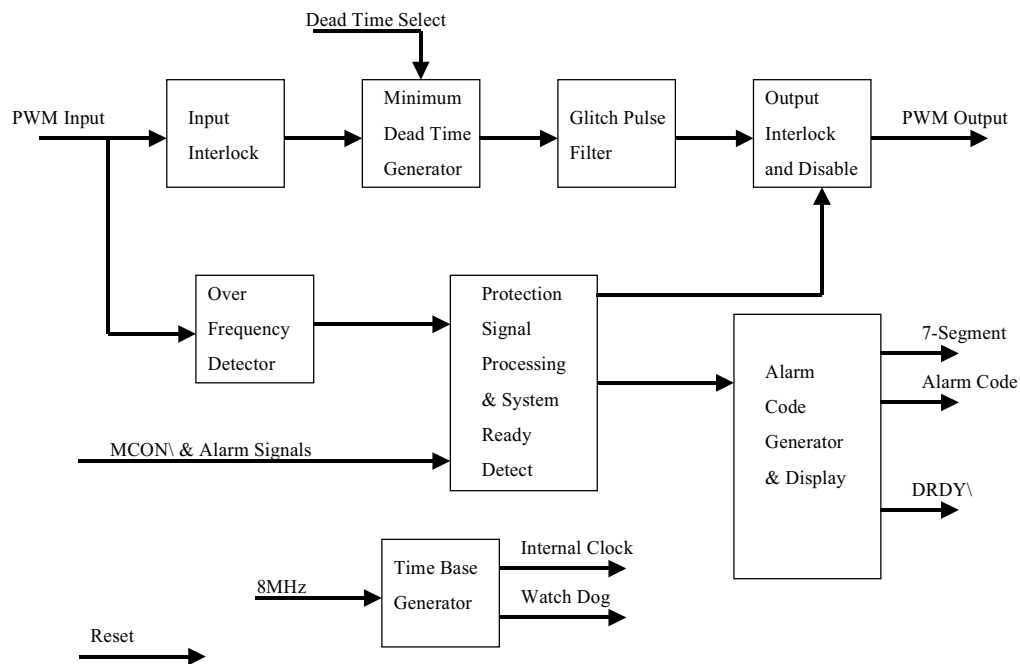
見下圖四。有一個 20 pin 的接頭可以和伺服控制器連接，其中的定義可參見表二(和 FANUC 系列定義相同)。控制板是用來處理輸入的 PWM 信號以及輸出電流迴授的信號，因為放大器是採開放性的架構，為了避免從控制器來的 PWM 信號有誤，有一顆 CPLD 作信號處理的工作，它的方塊圖如下圖五。



圖四：放大器上的控制板

Pin #	Name	State	
1	PWM A\	I/O	U 相上臂 (ALM 0\)
2	COM A		
3	PWM B\	I/O	U 相下臂 (ALM 1\)
4	COM B		
5	PWM C\	I/O	V 相上臂 (ALM 2\)
6	COM C		
7	DRDY\	O	Amplifier Ready
8	IUF	O	
9	IUF GND		U 相電流迴授
10	IVF	O	
11	IVF GND		V 相電流迴授
12	MCON\	I	伺服控制器 Ready
13	GND		
14	PWM D\	I	V 相下臂
15	COM D		
16	PWM E\	I	W 相上臂
17	COM E		
18	PWM F\	I	W 相下臂
19	COM F		
20	NC		

表二：放大器介面定義



圖五：控制板 CPLD 方塊圖

圖五的說明如下：

1. Interlock：是指 PWM 上下臂的互鎖，用來避免短路發生。
2. Over Frequency Detector：內部設定 25 kHz 為 PWM 切換的上限頻率，超過會切除並產生 alarm，用來避免功率晶體過熱。
3. Minimum Dead Time Generator：此乃根據使用者外部的設定，依此最小 dead time 為準，觀察 PWM 輸入信號的上下臂間 dead time 是否足夠，若是大於此設定值即以原信號為準，否則此線路會自動補至設定值。
4. Glitch Pulse Filter：為了保護後級功率晶體，當 PWM turn-on 或 turn-off 的脈波小於 500 nsec 時，會當作 glitch 濾除掉，以避免晶體無意義之 on/off。

5. Protection Signal Processing & System Ready Detect：將保護信號 latch，並且和控制器致能信號一起產生放大器的 ready 信號。
6. Alarm Code Generator & Display：處理 alarm 碼(可以讓伺服控制器讀回)並且解碼後驅動面板上的 7 段顯示器。
7. Time Base Generator：內部除頻線路，提供給各方塊線路所需。

(九)輔助元件

在放大器上還有一些重要的元件不可被忽視，例如：

1. Magnetic Contactor，提供放大器開關作順序控制用，要注意額定容量和跳脫的規格。
2. Fuse，保護用，要注意熔斷速度及電路上擺放的位置。
3. 散熱的設計，通常配合機構作散熱片，有的要利用風扇強制風冷，甚至對風扇失效的情形作適當的保護。
4. Snubber，用來吸收晶體切換時暫態的突波。

結論：

這型功率後級已經在工研院機械所內的數個運動控制平台上測試無誤，包括取代 FANUC α 系列放大器並搭配其 O 系列的控制器(見圖六)，另外用於 Delta-Tau 公司的 PMAC 2 整合式運動控制軸卡以及所內自行發展的 PMC32-DSP 運動控制軸卡上做為 PWM 放大器使用。而在 PC-based 控制器方面，美國的 Delta-Tau 和 Soft-Servo 兩家公司(分別以 DSP 運動控制卡和 PC 軟體伺服為不同發展方向的兩家公司)都有了自己的功率後級產品。其它如 Kollmorgen，Baldor 和日本的 Panasonic，Yaskawa，Sanyo 等大廠也都先後地推出了屬於整合式伺服中的 PWM 放大器，筆者亦曾仔細研究 FANUC β 系列的功率後級產品，這一型是 FANUC 寄望用於產業機台上的整合式伺服驅動器，

相較於上述所內在這方面的研發投資和產出是一點都不遜色的。

最後是利用串列傳輸來達成省配線的設計。不論是標準的 SERCOS，1394，Internet 或者廠商自行定義專屬的協定，大家的努力目標就是要降低伺服控制器和功率後級之間配線的複雜度(SERCOS 目前尚不支援傳送 PWM 的指令)。以目前馬達上的編碼器信號為例，目前的作法是直接將這一把線由馬達側回到控制器上，這是很花成本(因為距離遠)而且也容易受干擾的系統架構。我們可以利用整合式伺服的優點，亦即功率後級可以靠近馬達側，而編碼器等迴授信號也就就近接到此放大器上，再藉由串列傳輸線便可以把馬達位置和電流等信號傳回給遠方的伺服控制器；同理伺服控制器也透過串列傳輸線把 PWM 信號送給各個功率後級。這樣的架構或許就是整合式伺服與功率後級下一階段的發展方向。



圖六：MIRC Amplifier & FANUC System

參考文獻：

- 1.馮元掄， “1 KW PWM Amplifier 設計報告書” 。
- 2.FANUC， “FANUC Control Motor Amplifier α series Descriptions” 。