



馬達特性與選用

機械設計與製作專題

National Chung Hsing University (國立中興大學)
Department of Mechanical Engineering (機械工程學系)
Lian-Wang Lee (李聯旺)

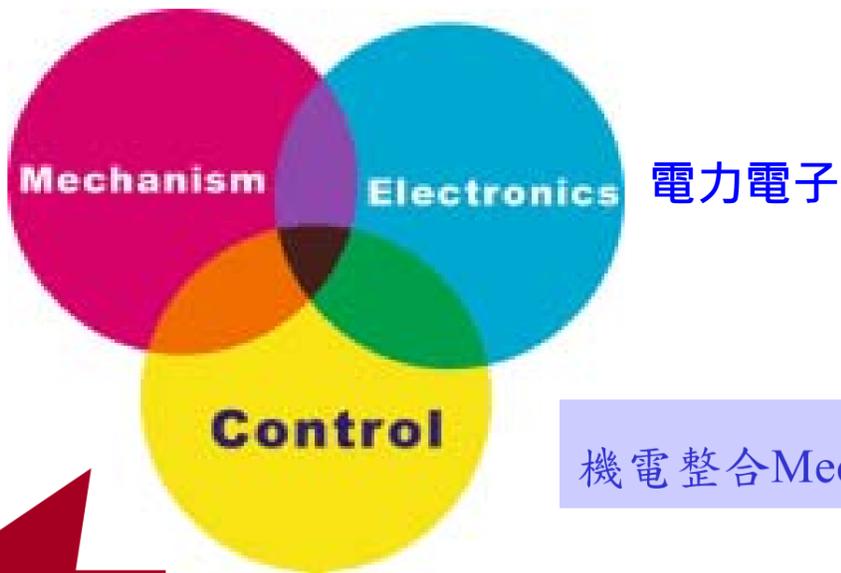
2021. 06. 02



簡介

電動機 = 馬達 = 電機 機械

機械結構



機電整合Mechatronics

馬達為機械主要動力來源

機械為工業之母

馬達為機械之母

Ref. [1]

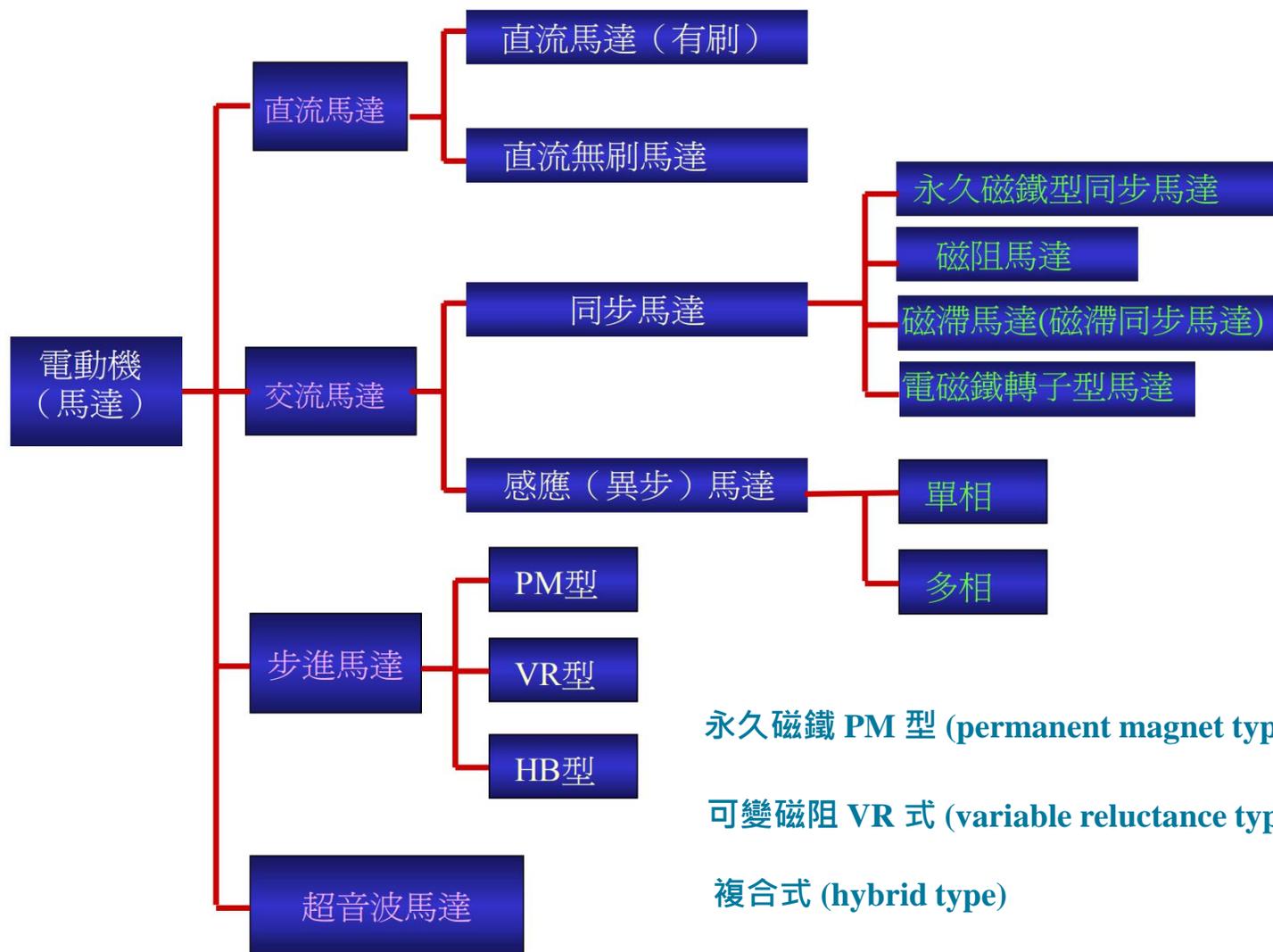
機電整合是結合資訊、機械、電機、電子、電力、通訊的整合性技術 (integration technology)，因此，機電整合主要是藉由信號傳輸與回授控制，將多種工程技術整合，為完成自動控制目的而發展的一種系統工程技術。





馬達的簡單分類

◆ 馬達有構造及動作原理的不同，選用時要了解馬達基本特性的差異，再根據實際需求功能與合適價位來選擇**適當的馬達**。





馬達的簡單分類

◆ 有刷直流馬達

速度調整容易，**啟動轉矩較大**，因此廣泛應用在消費產品上，大功率直流馬達則用在電動車、工具機等。

◆ 無刷直流馬達

以驅動器控制流入馬達的電流量，小型化、高轉矩、調速範圍大且控制較佳，從**低速到高速**可保持**穩定的速度與轉矩**。

◆ 感應馬達

以AC小型馬達為代表，額定轉速在1,400rpm/50Hz, (1,600rpm/60Hz)，一般與**減速機**聯結使用。可搭配電子剎車器進行瞬間剎車、正逆轉切換，也可搭配PLC或工業電腦(IPC)來控制馬達運轉。

◆ 伺服馬達

對使用伺服機構之馬達的總稱。結合編碼器作**閉迴路控制**，偵測結果會返回伺服放大器與指令值做比較，因此不會有不準的現象，但容許慣量較小，**適合高轉速移動量較長的需求**使用。





馬達的簡單分類

- ◆ 步進馬達(Stepping Motor)是1920年在“可立即轉動及停止”與“能快速正確到達目的位置”的兩項需求下所誕生，可用一定角度逐步轉動馬達。透過**控制器**指定脈波數量，就可以獲得精確的運轉與定位，有低轉速、低振動、轉軸保持力、位準精度高、誤差率低且不累積等優點。
- ◆ 一種將脈波轉化為角位移的裝置，當**驅動器**接收到一個脈波信號，它就驅動步進馬達按設定的方向轉動一個固定的角度(**步進角**)。可透過**控制脈波個數**來控制角位移量達到準確定位目的；同時也可透過**控制脈波頻率**來控制轉動速度和加速度達到調速目的。
- ◆ 輸入脈波數與旋轉角成正比，旋轉速度與輸入頻率成正比，這兩個特性使步進馬達能以**數位信號構成開放回路(Open Loop)控制**，達成定位的目的。
- ◆ 使用特點
 - 應用場合廣，對環境等要求較高
 - 體積小，響應快，起動快，定位準確，解析度高等皆為其重要訴求
 - 數位脈波的觀念





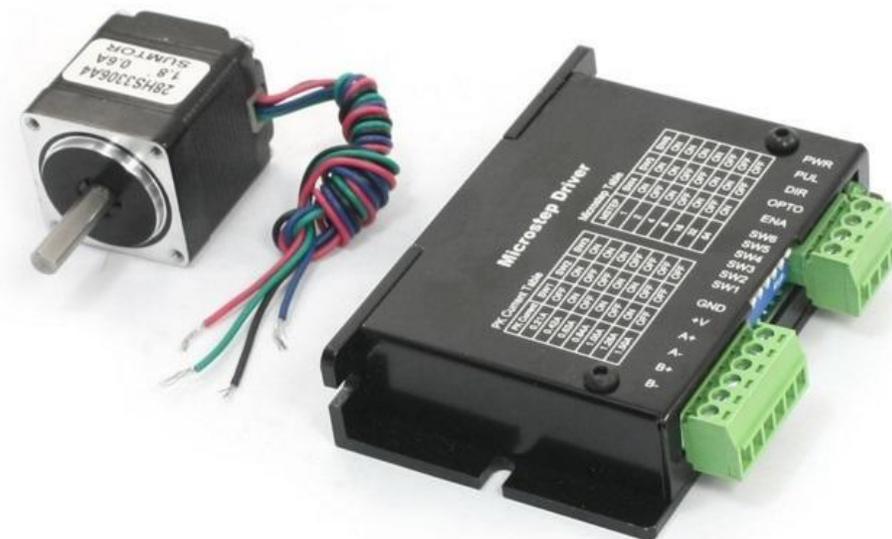
步進馬達特性

Good Side

- ✓ 系統結構簡單
- ✓ 轉速和數位脈波頻率成正比
- ✓ 重複及定位精度高，每步 3~5% 誤差，不因持續運轉而累積
- ✓ 控制容易，無須位置回授
- ✓ 靜止時，具高保持轉矩
- ✓ 價格低 (無需位置感測裝置等...)
- ✓ 易與電腦或數位機器結合
- ✓ 無碳刷滑環等，可靠性高，壽命主要受到軸承限制

Bad Side

- ✓ 高速運轉時容易失步
- ✓ 在某一頻率容易產生振動或共振現象





伺服與步進馬達概論

◆ 控制方式

- 步進馬達是透過控制脈波數量控制轉動角度，一個脈波對應一個步進角。
- 伺服馬達是透過控制脈波時間長短控制轉動角度。



◆ 設備需求與工作流程

- 驅動步進馬達需供電電源(電壓由驅動器參數決定)，脈波產生器、驅動器(設定步進角度，如設定為0.45度，當馬達接收一個脈波會轉動0.45度);驅動步進馬達需要兩個脈波，分別為訊號脈波及方向脈波。
- 驅動伺服馬達需開關式供電電源，其工作流程是電源連續開關，在連接伺服馬達作驅動。

◆ 低頻特性

- 步進馬達最低速時容易出現低頻振動現象，振動頻率與負載和驅動性能有關。
- 伺服馬達運轉非常平穩，即使在低速時也不會出現振動現象。





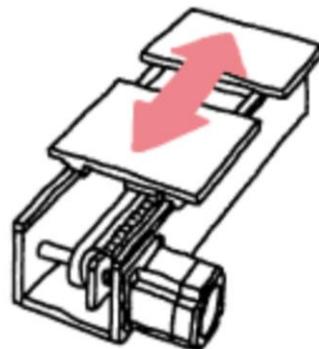
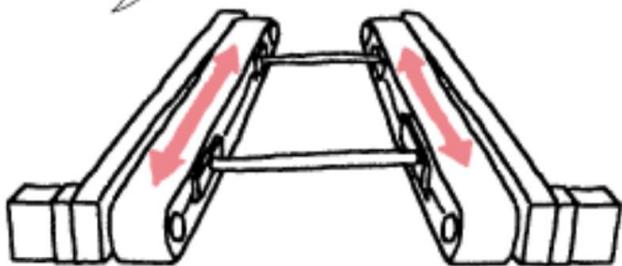
伺服與步進馬達概論

□ 優越同步性

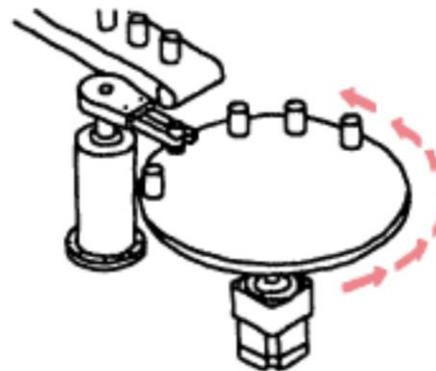
上位控制端傳送指令給馬達，「開迴路控制」，指令追隨性非常高。相較於等待編碼器回授的伺服馬達對指令的反應會『延遲』；步進馬達因為和脈波同步動作幾乎沒有『延遲』。基於上述特性，步進馬達很適合用在複數馬達同步運轉。

□ 適用場域

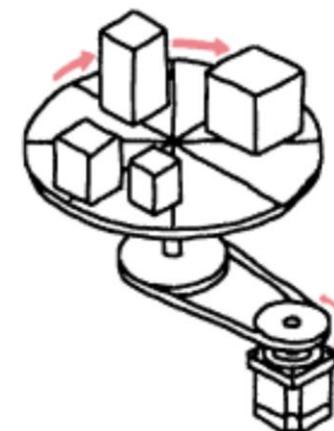
除頻繁起動・停止的寸動外，像視覺檢測這種不能震動的定位用途、伺服馬達不好調整的凸輪驅動、負載變化或皮帶驅動等低剛性機構都適合採用步進馬達。最重要的是負載、慣性、剛性變化也不需調整。



低剛性的機構



頻繁的起動、停止



負載的變動





伺服與步進馬達概論

◆ 工作原理

伺服馬達內部的轉子(rotor)是永磁鐵，透過定子(stator)線圈通電形成電磁場進行驅動控制，轉子在磁場的作用下轉動，內建編碼器迴授訊號給驅動器，**驅動器**根據迴授值與目標值進行比較，調整轉子轉動的角度，精準度取決於編碼器精度。一般與Arduino搭配使用的微型伺服馬達(舵機)內建編碼器，只需外接電源及訊號即可運作。

◆ 轉動幅度

步進馬達可正向或反向旋轉，旋轉角度沒有限制。Arduino搭配使用的微型直流伺服馬達轉動角度為正+180 至-180 度。

【技術參數】

- 產品名稱：SG90 9g 小型舵機 (S版)
- 產品尺寸：23×12.2×29mm
- 重量：9克
- 無載速度：0.12秒/60度 (4.8V)
- 可控角度：0~90°/180°max
- 產品扭矩：1.8kg/cm(6V)；1.4 kg/cm (4.8V)
- 反應速度：0.1sec/60degree (4.8v)
- 工作電壓：3.0V~7.2V (建議5V)
- 使用溫度：-30 ~ +60度
- 動作死區：7us
- 連接線長：25cm
- 齒輪介質：尼龍
- 工作模式：類比





步進馬達的驅動原理

1相激磁方式

步數	Coil4	Coil3	Coil2	Coil1	
1	on	off	off	off	
2	off	on	off	off	
3	off	off	on	off	
4	off	off	off	on	

◆ 力矩較小，振動較大且容易失步

2相激磁方式

步數	Coil4	Coil3	Coil2	Coil1	
1	on	on	off	off	
2	off	on	on	off	
3	off	off	on	on	
4	on	off	off	on	

◆ 振動較低，可接受的PPS較高，不易失步

步進馬達速度以PPS作單位，PPS是Pulse Per Second的縮寫，代表每秒轉多少脈波





步進馬達的驅動原理

1-2相激磁方式

步數	Coil4	Coil3	Coil2	Coil1	
1	on	off	off	off	
2	on	on	off	off	
3	off	on	off	off	
4	off	on	on	off	

5	off	off	on	off	
6	off	off	on	on	
7	off	off	off	on	
8	on	off	off	on	

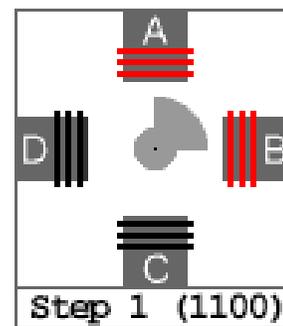
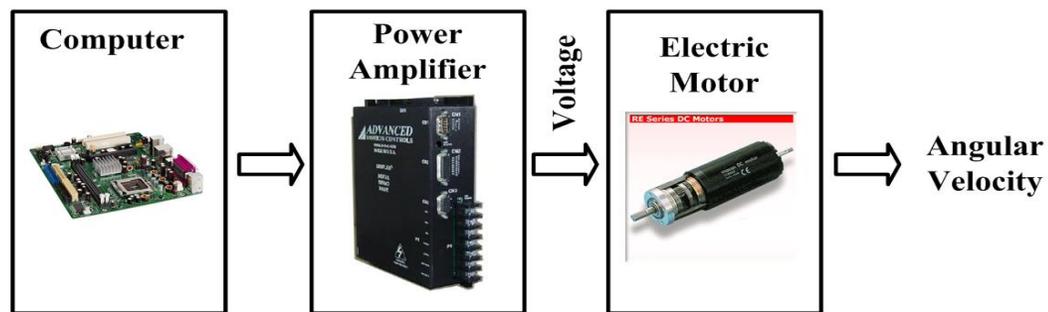
◆ 每次移動半個基本步進角，振動程度最小





Example

- Control an electric motor
 - We want to spin a motor at a given angular velocity.
 - We can apply a fixed voltage to it, and never check to see if it is rotating properly.



Open-loop control \approx Pre-programmed control

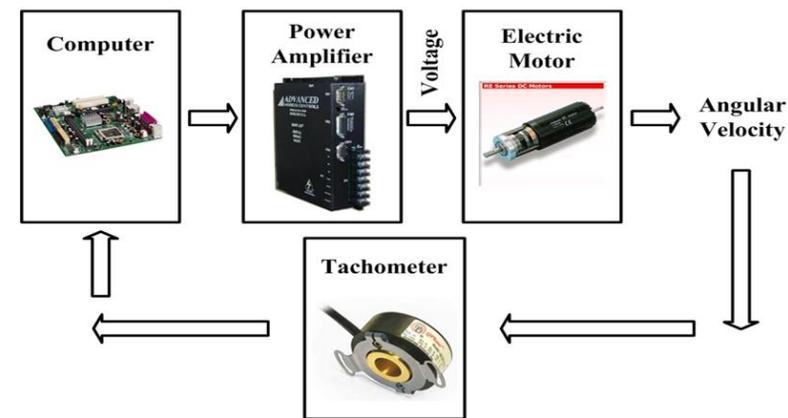




Types of Control System

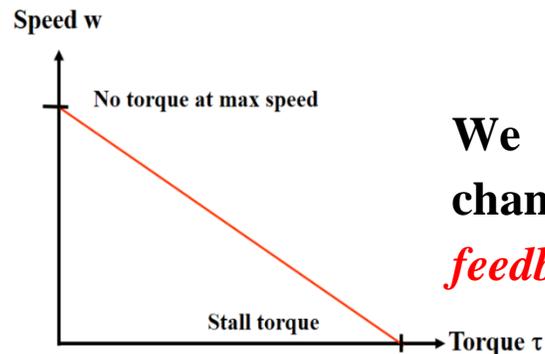
• Closed-Loop Control Systems

- Utilize utilizes feedback to compare the actual output to the desired output response.
- Output has an effect on the control action.
- In other words output is measured fed back.



• What if there is a changing load on the motor ?

- Our output velocity will change!
- Let's measure the actual angular velocities.

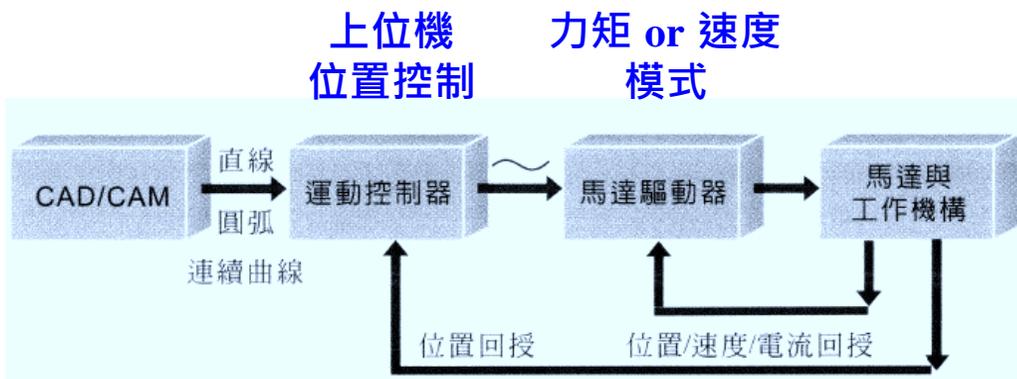


We can compensate for changes in load by *feedback* some information.

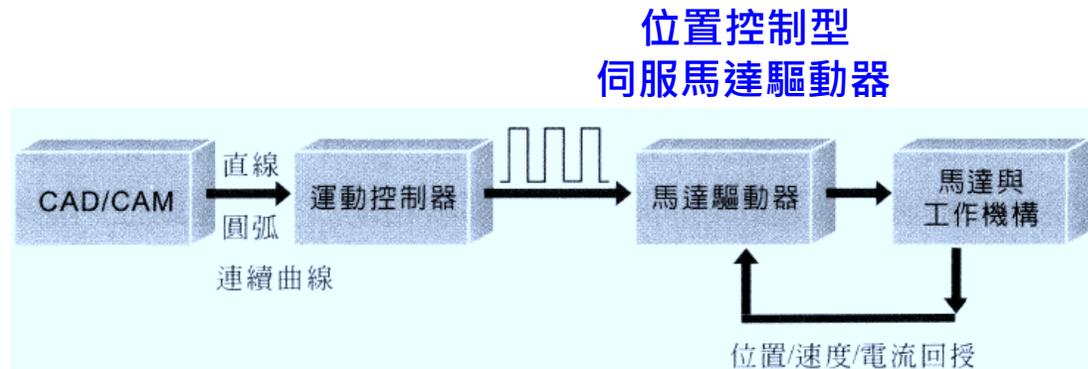




工業運動控制系統的基本架構

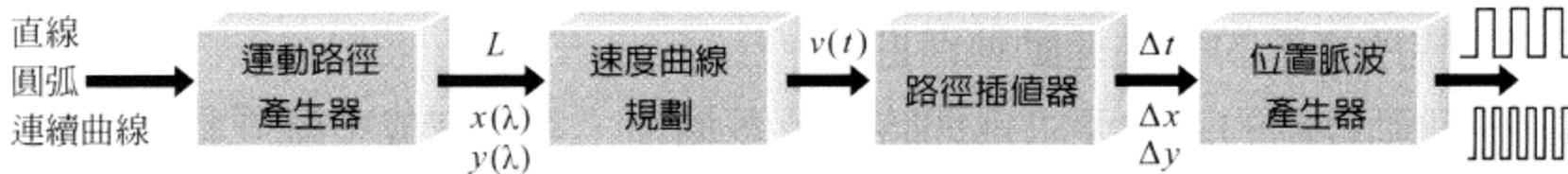


傳統伺服馬達驅動方式



馬達驅動器數位化

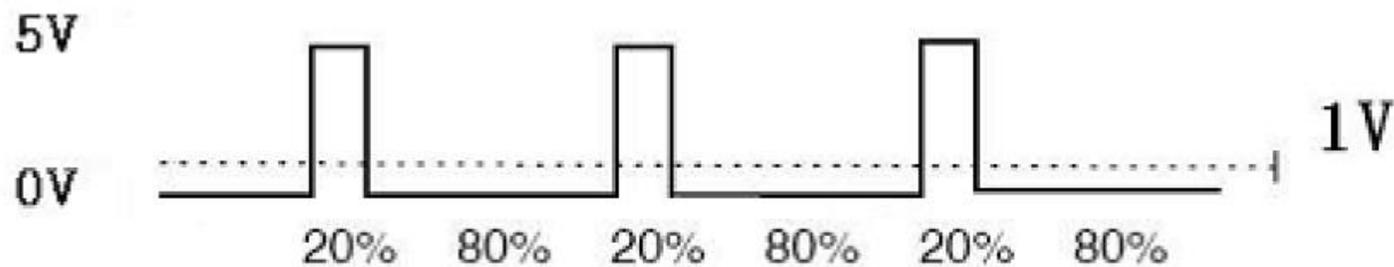
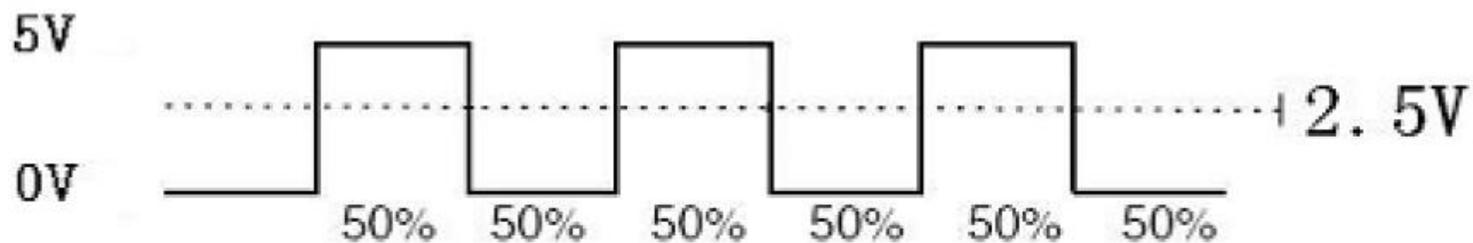
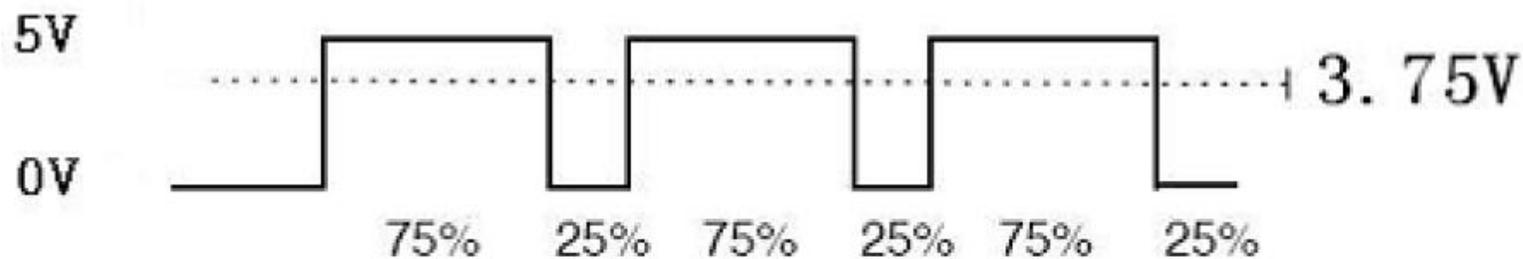
位置控制型伺服馬達驅動器與步進馬達驅動器具有相同的輸入訊號



脈波輸出型運動控制器基本架構

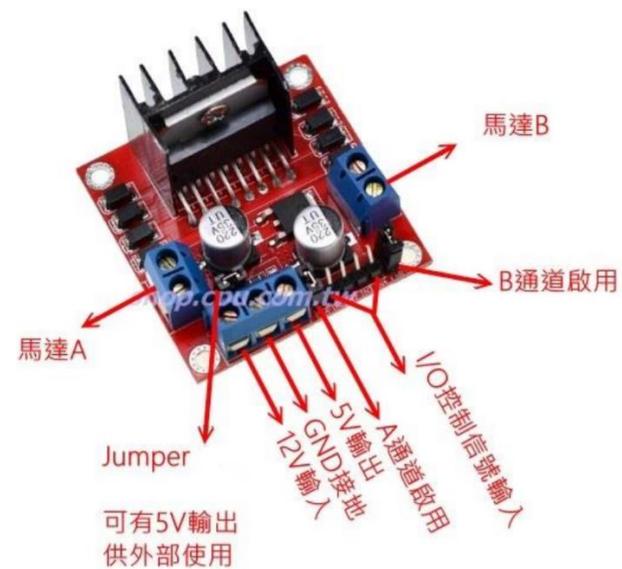
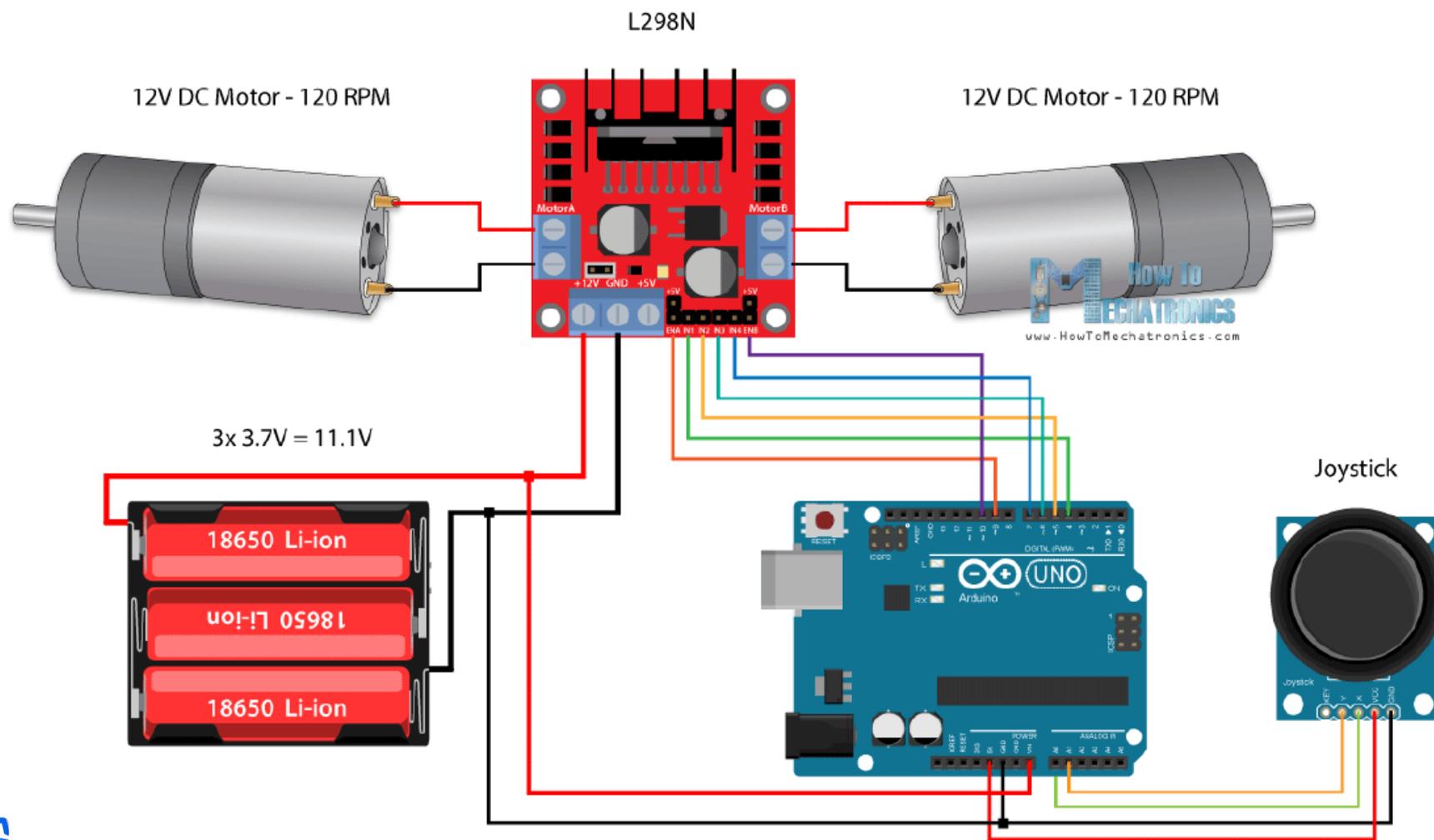


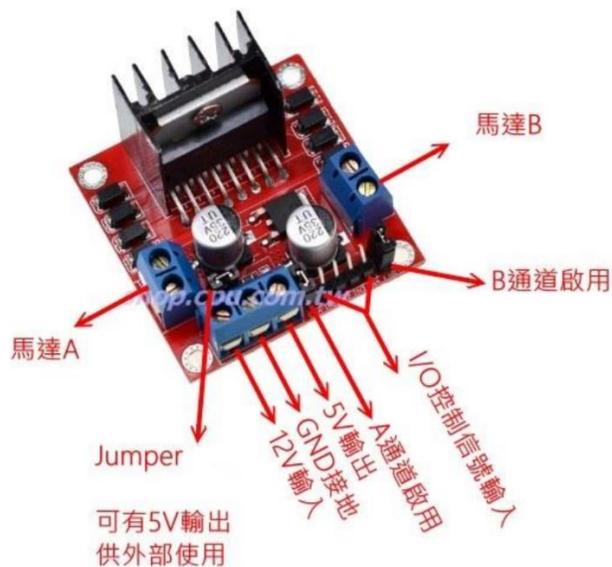
PWM 脈波寬度調變





L298N PWM控制





★ 應用實例

1. 驅動直流馬達

由於本模組是2路的H橋驅動，所以可以同時驅動兩個馬達，使能ENA ENB之後，可以分別從IN1 IN2輸入PWM信號驅動馬達1的轉速和方向可以分別從IN3 IN4輸入PWM信號驅動馬達2的轉速和方向

步進電機	信號輸入	第一步	第二步	第三步	第四步	返回第一步
正轉	IN1	0	1	1	1	返回
	IN2	1	0	1	1	返回
	IN3	1	1	0	1	返回
	IN4	1	1	1	0	返回
反轉	IN1	1	1	1	0	返回
	IN2	1	1	0	1	返回
	IN3	1	0	1	1	返回
	IN4	0	1	1	1	返回

2. 驅動直流馬達

由於本模組是2路的H橋驅動，所以可以同時驅動兩個馬達使能ENA ENB之後，可以分別從IN1 IN2輸入PWM信號驅動馬達1的轉速和方向可以分別從IN3 IN4輸入PWM信號驅動馬達2的轉速和方向信號如圖所示

直流電機	旋轉方式	IN1	IN2	IN3	IN4	調速 PWM 信號	
						調速端 A	調速端 B
M1	正轉	高	低	/	/	高	/
	反轉	低	高	/	/	高	/
	停止	低	低	/	/	高	/
M2	正轉	/	/	高	低	/	高
	反轉	/	/	低	高	/	高
	停止	/	/	低	低	/	高



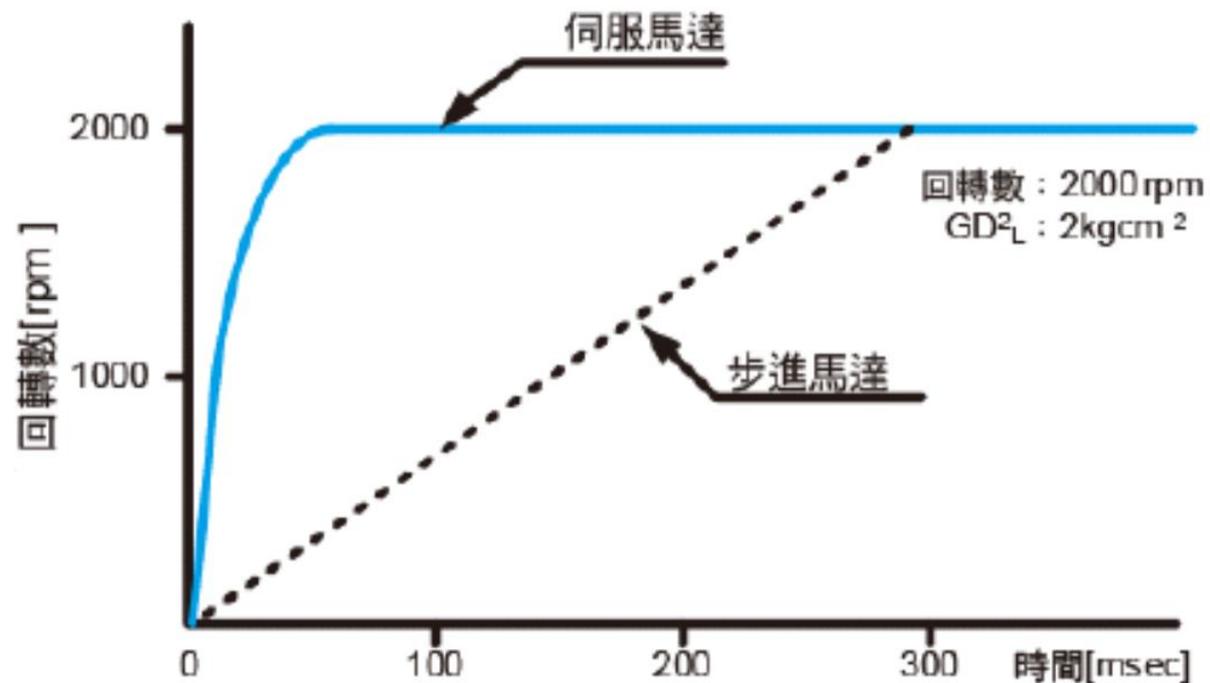


步進馬達VS.伺服馬達使用區分

◆ 依響應速度選擇

伺服馬達：響應**速度**快，可在短時間內達到高速 (200rpm以上)。

步進馬達：響應**速度**較慢，若要達到高速，其所需加減速時間必須很長，相對耗時。



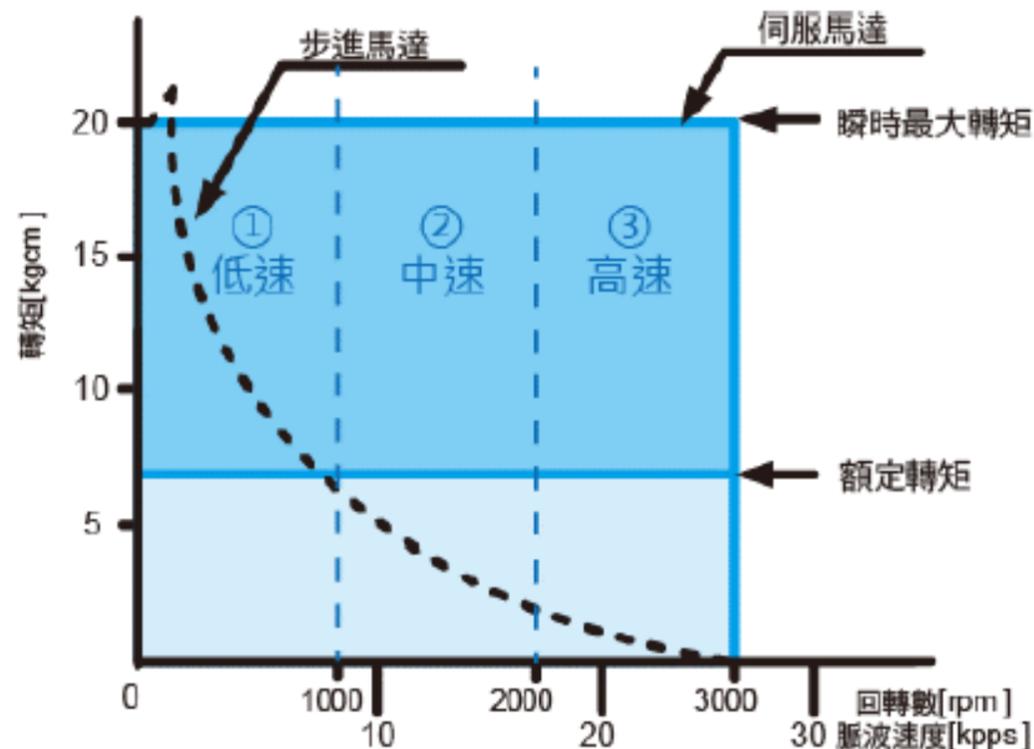


步進馬達VS.伺服馬達使用區分

◆ 依速度-轉矩選擇

伺服馬達：可使用的速度範圍比較寬廣，高轉速達到3000-5000rpm，伺服馬達具備定轉矩的特性，在瞬間轉矩能達到額定轉矩的3-3.5倍。

步進馬達：較適合用在中低速的場合，其在1000rpm以下的轉矩，可看到步進的曲線是高於伺服，步進啟動的扭力就是可使用的最大扭力。

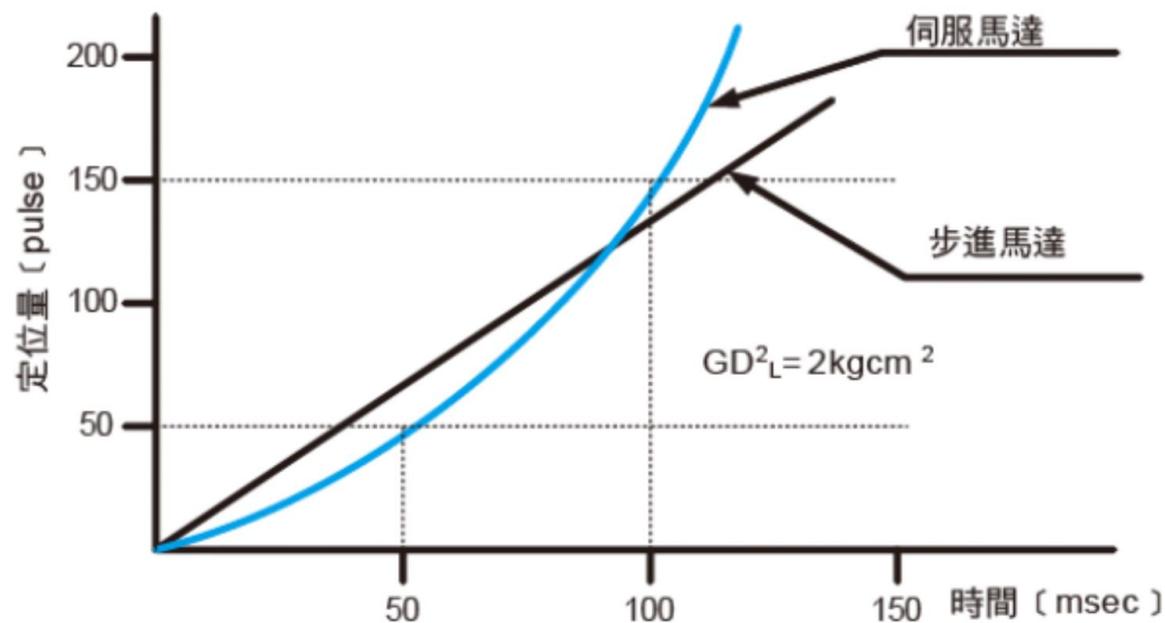




步進馬達VS.伺服馬達使用區分

◆ 依定位量選擇

圖的橫坐標是時間(msec)，縱座標是每次的移動量。以50pulse進行比較，步進馬達需要的時間遠低於伺服馬達，因為步進馬達輸入脈波馬達就動，而伺服馬達因為要用encoder迴授定位，所以會延遲，加上脈波結束後尚須修正時間，所以作動時間短不適合。但如果以移動量150pulse進行比較，就可看出伺服馬達的優越性。所以才會說步進馬達適合短距離，伺服馬達適合長距離。

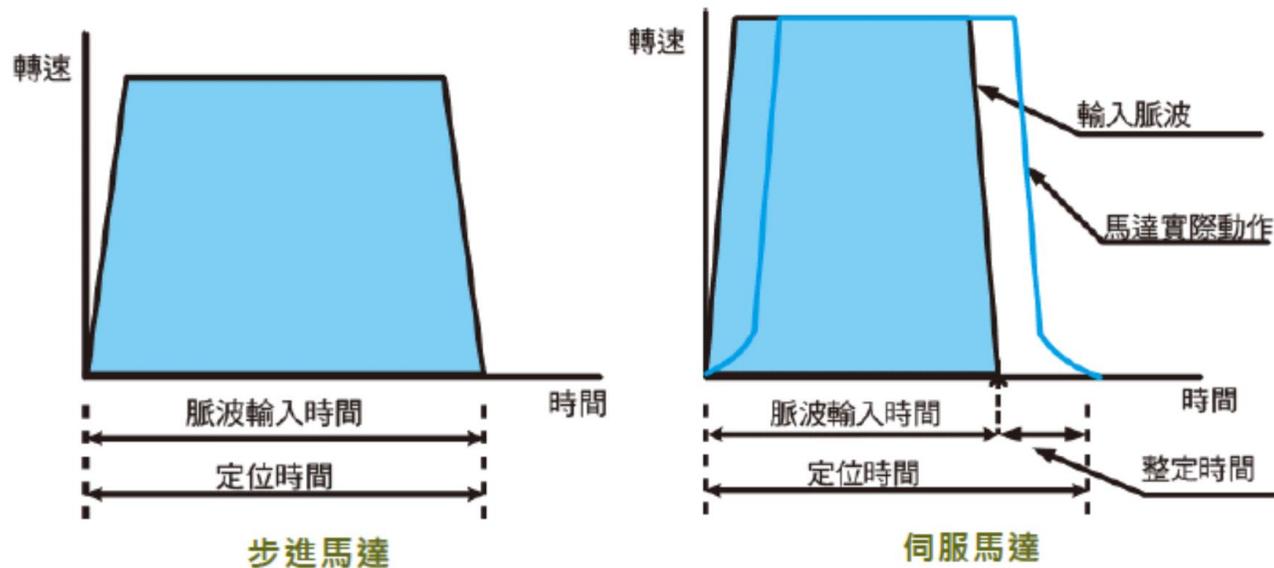




步進馬達VS.伺服馬達使用區分

◆ 依定位時間選擇

步進馬達脈波輸入後馬達就動，脈波停止馬達就停止，有即走即停的特性，所以**脈波輸入時間=定位時間**；伺服馬達脈波輸入後，馬達會有延遲，脈波結束後需要再調整，要進行下一個指令時，必須等調整完成才能開始，故動作頻率高的短距離定位較不合適。





步進馬達VS.伺服馬達使用區分

◆ 依傳動機構剛性選擇

由於剛性不易受外在因素而影響其形狀與結構，所以用以下四種常用機構來看：

1. 滾珠螺桿：剛性最強與伺服馬達搭配最好。
2. 滾珠螺桿+減速機：剛性會低於滾珠螺桿直接傳動。
3. 皮帶：因有韌性，若搭配服馬達，馬達停止時會有調整時間問題，一般不建議。
4. 滾輪機構：會有摩擦力問題，使用上若搭配步進馬達較不會受機構剛性影響。

	機構	剛性
1.	滾珠螺桿	高剛性
2.	滾珠螺桿+減速機	中剛性
3.	皮帶	低剛性或中剛性
4.	滾輪	低剛性或中剛性





伺服與步進馬達特性比較

項目 \ 類型	步進馬達	伺服馬達
轉矩變化	轉矩為速度函數	額定轉速內為固定轉矩
加速度	加速較慢	加速較快
適合轉速	< 2000 rpm	3000~ 5000 rpm
定位調整時間	依馬達磁極分割，調整較快	依編碼器特性，調整較慢
定位後飄移	定位後完全停止	定位後仍持續補正
開/閉迴路	大部分開迴路 (可選擇迴授型步進馬達)	必須是閉迴路
價格	較低	較高
驅動器選擇	可選擇相互匹配的廠牌	需搭配指定廠牌的型號
體積	較小	較大
運轉中抖動	依磁極分割運轉，較容易抖動	伺服運轉較順暢

*馬達實際轉速與扭力，依據不同廠牌和驅動器特性而不同





伺服與步進馬達特性比較

項目 \ 類型	步進馬達	伺服馬達
響應	不會有Overshot定位響應較快，但因加速比伺服系統差所以長距離響應較慢	有Overshot調整需花時間，但高速(2000 rpm以上)響應快可短時間達到長距離的要求
定位失步	即走即停特性，定位精度可達0.05度，但微步進控制不一定比16bit的伺服好，且開迴路控制容易失步	閉迴路控制，由編碼器(可達32bit)及控制器決定精度，失步可用迴授補正處理
扭矩	靜止時有最大扭力，比同級伺服馬達大，但隨速度增加扭力快速減少，不適合高速負荷	額定轉速內，不論高低速扭矩皆為額定扭矩。瞬間轉矩能達額定的3-5倍，可克服起動的慣性與摩擦力
配合機構	沒有停止晃動的問題，傳動機構限制較少	因停止的抖動不適用於中低剛性機構，如：皮帶、凸輪。建議搭配滾珠螺桿傳動
瓦數/重量	相同瓦數步進比伺服馬達重	除同瓦數重量較輕外，可選擇的瓦數範圍也較廣
振動噪音	低轉動會有噪音、振動及共振區的問題	轉動不會有噪音及振動，運轉比步進平滑
溫升	無論荷重與否都會消耗相同電流產生較高溫升	電流依荷重不同而改變，所以溫升很小





步進馬達的應用



食品機械



半導體製造裝置



太陽能面板製造裝置



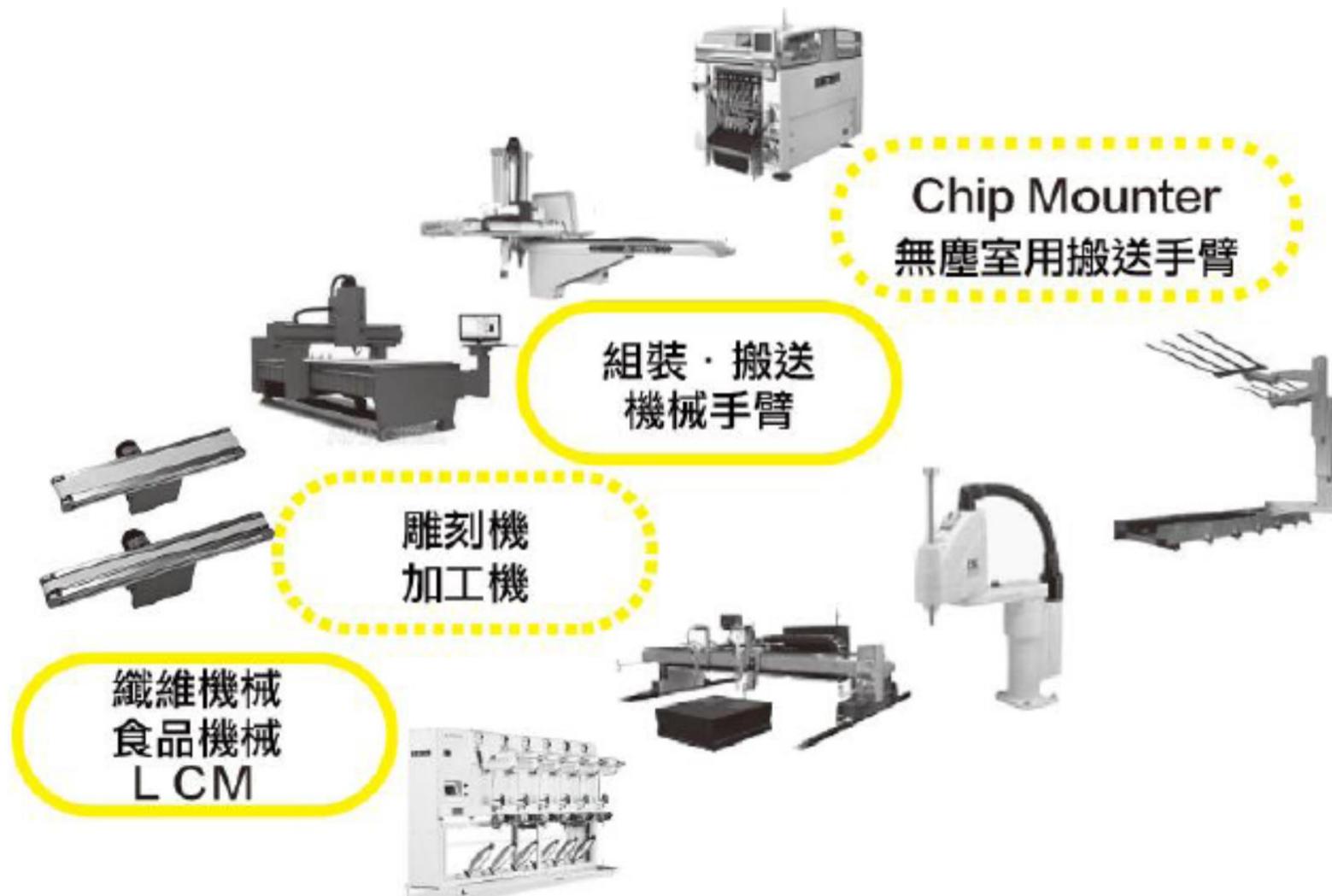
醫療設備



包裝設備



伺服馬達的應用





馬達選用步驟





工業用馬達

- ◆ 馬達在工廠自動化中扮演十分重要的角色，以控制精度來看 伺服馬達及步進馬達是較佳的選擇。
- ◆ 伺服馬達分為直流(DC servo motor)和交流(AC servo motor)兩種
 - 直流伺服馬達因操作容易，旋轉速度由改變施加之電壓控制，因控制簡單是目前使用最多的馬達。
 - 永磁式直流伺服馬達其永久鐵在外，且會發熱之電樞線圈在內，因此散熱較為困難。
 - 交流伺服馬達多用感應馬達與無刷直流馬達。為了讓感應馬達變化旋轉速度，必須改變電源頻率，因此需使用變頻器(Inverter)。雖然稱直流馬達但因沒有電刷，作動原理變成是利用變頻器輸入控制訊號到馬達，馬達控制器會將直流電轉換為交流電。
 - 糾正一個概念，直流變頻實際上是交流變頻，只不過控制對象通常稱之為「直流無刷馬達」。
 - 無刷伺服馬達在高性能伺服應用場合，如：電腦控制數值工具機及工業機器人等均已逐漸取代傳統有刷的直流伺服馬達。





工業用馬達

- ◆ **直流無刷馬達**指的是一個系統，準確地說應該叫「**直流無刷馬達系統**」，它強調的是馬達和控制器的一體設計，是一個整體，相互的依存度非常高，馬達和控制器不能獨立地存在及獨立工作，看的是整體的技術性能。而交流永磁同步馬達指的是一台馬達，強調的是馬達本身就是一台獨立的設備，它可以離開控制器或變頻器而獨立地存在與獨立地工作。
- ◆ 直流馬達的好處為在控速較簡單，只須控制電壓即可控制轉速，但此類馬達不宜在高溫、易燃環境下操作，許多直動馬達中需以碳刷作電流變換器，所以需定期清理碳刷磨擦所產生的污物。直流無刷馬達相對於有刷，因為少了碳刷與軸的摩擦因此較省電也比較安靜，但製作難度及價格較高。
- ◆ 交流馬達可在高溫及易燃環境下操作，且不用定期清理碳刷污物，但控速較困難，因為控制交流馬達轉速需要控制交流電的頻率，控制其電壓只會影響馬達的扭力。一般工業用直流馬達之電壓有 DC 110V (125V) 和DC 220V兩種。





無刷伺服馬達

◆ 無刷伺服馬達主要分為兩大類

- 無刷直流伺服馬達 (Brushless dc servo motor) ，亦稱為永磁同步馬達 (PM synchronous motor) 或 永磁式交流伺服馬達 (PM ac servo motor)
- 感應交流伺服馬達 (Induction ac servo motor)

伺服馬達	交流	無刷	同步電動機	永磁式同步馬達 (PM synchronous motor) 無刷直流伺服馬達 (Brushless dc servo motor) 永磁式交流伺服馬達 (PM ac servo motor)
			感應電動機	感應式交流伺服馬達 (Induction servo motor)
	直流	有刷	直流馬達	永磁式直流伺服馬達 (DC servo motor)



交流伺服馬達

- ◆ **交流伺服馬達**不論是永磁同步或感應式，其造成旋轉磁場之電樞線圈均置於馬達外層，因此散熱較佳，且其功率體積比較高，所以適用於直接驅動系統。
- ◆ 交流馬達依其轉矩產生方式可分為兩大類
 - 同步交流馬達 (Synchronous ac motor):

同步交流馬達因其轉子可由外界電源或由本身磁鐵造成之磁場與定子之旋轉磁交互作用而達到同步轉速。
 - 感應交流馬達 (Induction ac motor)

轉子因定子與轉子間的變壓器效應(Transformer effect)產生轉子感應磁場，為維持此感應磁場以產生旋轉扭矩，轉子與定子之旋轉磁場間必須有一相對運動-滑差(slip;轉差)，因此感應馬達之轉速無法達到同步轉速。





直流無刷馬達的發展

◆ 傳統直流馬達缺點

電刷與換向片的高速滑動造成**電刷與換向片磨擦問題**，產生種種電氣故障。

◆ 改進方式

直流無刷馬達針對此缺點，**以電子元件取代電刷與換向片**，且保留原直流馬達機的優點，故無刷直流馬達是傳統直流馬達的改良版。

◆ 有刷馬達

以機械式整流子或電刷來控制換向動作。

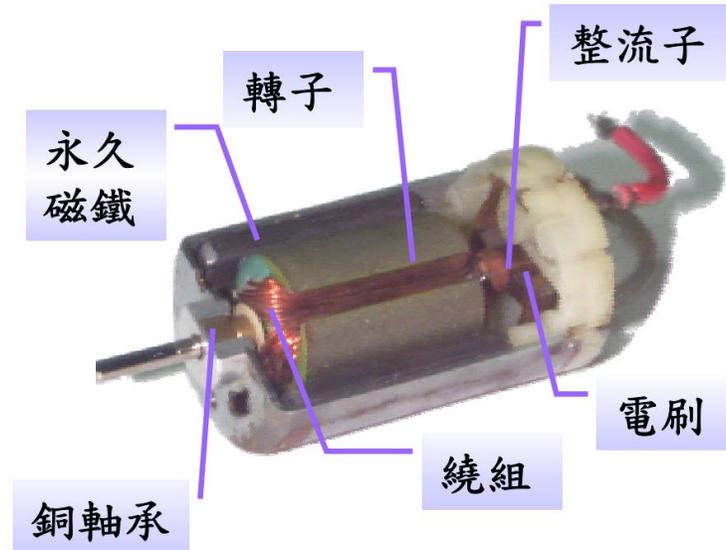
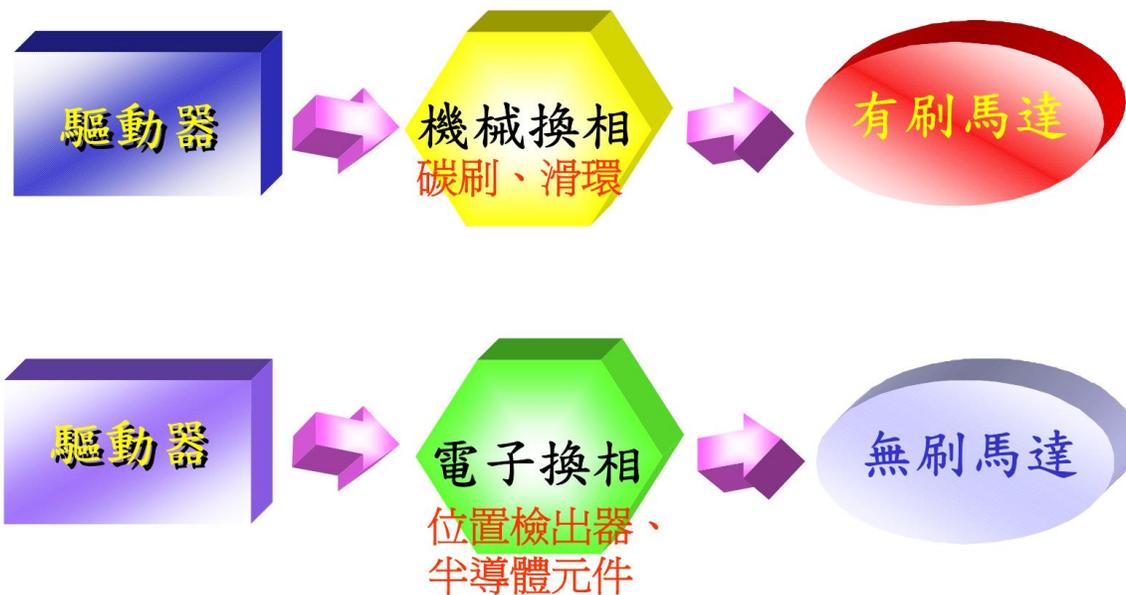
◆ 無刷馬達

- ✓ 以**電晶體**控制換相動作。
- ✓ 利用磁場力的吸引及**磁場**的變化(換向)來達成**旋轉輸出**。
- ✓ 電子換向器主要是用**Hall Sensor**感應馬達位置的變化，藉以控制電晶體的開或關。





有刷馬達與無刷馬達



無刷馬達換向依據



霍耳元件

霍耳元件是直流無刷馬達最重要的元件，用來感應磁場變化以送出馬達控制訊號，使馬達得以持續而穩定的運轉。





有刷馬達與無刷馬達比較

Why Brushless?

- (1) 換向時不易產生高溫電弧及金屬屑。
- (2) 電氣雜訊少，可靠度高、壽命長易高速化。
- (3) 低電壓、起動快、易控制。
- (4) 製造容易、體積小。
- (5) 適用於高溫環境且維修費低。
- (6) 電刷部分不產生碳粉及油霧等污垢。
- (7) 不產生電氣之雜訊 (不產生電波干擾)。
- (8) 不產生火花。

主要缺點

需驅動電路成本較高



電子換向





直流無刷馬達的應用

電動機車

電動機車在外型上與燃油機車類似，最大不同處在於動力系統及使用能源。電動機車機械架構上與燃油機車不同處包括：一個直流無刷馬達負責產生動力，4個電池提供電力，一組傳動器將馬達產生之動力傳送至後輪及一組將交流電轉換成直流電之充電器。

電動機車具有以下特色:

1. 低污染、低噪音、省能源
2. 比二行程機車節省30-50%能量
3. 使用110V電源充電費用低廉
4. 沒有排氣管高溫燙傷問題
5. 免定期檢驗，不必擔心廢氣排放不合格被罰款
6. 適合作為中、短途代步工具



其他如：光碟機之主軸馬達、壓縮機驅動、散熱風扇、除濕機風扇、航空工業等等...





感應馬達

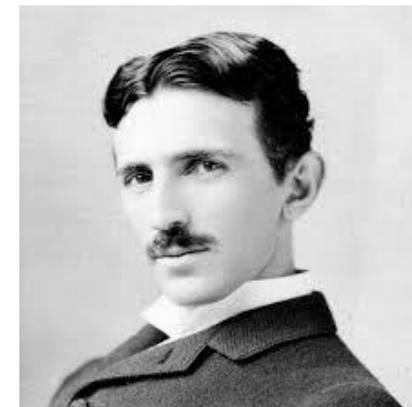
- ◆ 感應馬達在1880年代末和1890年代初被開發出來。1890年代中期三相60Hz的電力系統被開發出來後，感應馬達才成為可實用的產品。感應馬達轉子線圈的電流是由電磁感應，由於造價較低且容易維修是目前極為普遍的電動機。
- ◆ 由於交流電的廣泛供應，因此交流馬達就成了工業的主要動力(佔電動機總數90%以上)，無論大小工廠交流馬達是不可或缺的，日常生活常見的如：電風扇、電冰箱及洗衣機等。感應馬達為現代工業界使用最廣的交流電動機，因有良好的轉速調整特性，及相當不錯的啟動轉矩，並具有構造簡單、價格便宜及維護容易等優點，因此被廣泛應用在各個場合。





被埋沒的天才 - 特斯拉

被埋沒的天才 - 特斯拉 (Tesla, 1856-1943)



誰發明了多相交流發電和供電系統？

誰發明了多相交流感應馬達？

誰發明了隔空送電讓無接線的感應馬達運轉？

誰發明了高週波集膚效應 (熱處理淬火用)？

誰發明了無線電基本裝置？

誰以交流輸配電擊敗愛迪生的直流輸配電？



天才特斯拉Tesla，出生於南斯拉夫的美國人





被埋沒的天才 - 特斯拉

- ◆ 很少人知道發明交流電和供電系統的天才發明家-特斯拉，僅知馬可尼最早發明無線電，但大概沒人知道讓無線電得以成功的基本裝置是特斯拉發明的。特斯拉有許多發明為一系列的現代技術打下基礎，但這一位天才卻很少被人提起。
- ◆ 特斯拉和愛迪生是同一代人，曾經是合作者與死對頭。愛迪生名聞遐邇特斯拉卻默默無名。特斯拉風度翩翩在紐約上流社會曾紅極一時。他口才過人一度贏得一些工業和金融富豪資助。但絕大多數人最後都欺騙他，不但騙走這位天才創造的成果，而且還盜竊他的榮譽。
- ◆ 特斯拉具有科學創造精神與非凡毅力，幾乎喪生在高壓電下仍無所顧忌。他的身體因長期勞累過度被搞垮但他毫不退縮，他說“電給我疲乏衰弱的身體注入最寶貴的東西-生命的活力”。

磁力線密度單位 1 Tesla (特斯拉) = 10000 Gause (高斯)





[1] http://km.emotors.ncku.edu.tw/emotor/worklog/EMTRC/motor_learn/EMOTOR_WEB/main_4_1_4_1.php

[2] <http://romeofan.synology.me/mainhome.files/motor/servo&stepper.html>





Thank you for your attention !

