

## 主動磁浮軸承系統與控制技術的研究現狀

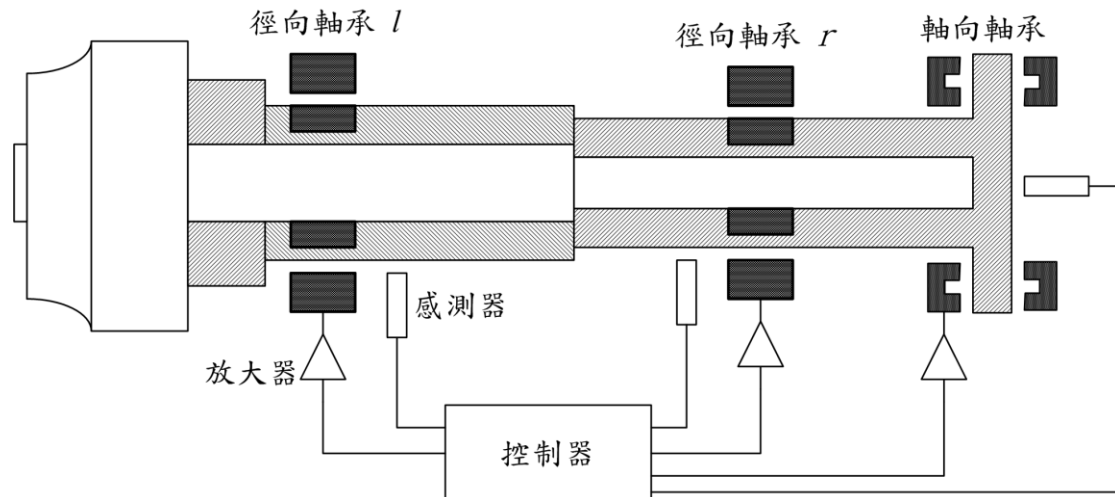
### 一、磁浮軸承的發展

軸承之應用範圍相當廣泛。然而，由於傳統軸承，其機械結構都是由轉子與軸承相互接觸所產生的一種動力傳遞結構。然而其缺點為，當轉子在運作時，轉子與軸承會因為其機械設計方式而導致接觸摩擦，進而造成轉子與軸承之間的磨損。雖然在機構設計上可加入潤滑之設計，然而此方式卻容易造成能量耗損。此外，由於高速運轉之工業機械應用，其需求度日益越增，若轉子軸承仍是使用如滾珠軸承之傳統軸承，那麼於轉子與軸承之間的磨損及能量耗損將越嚴重。有鑑於此，非接觸式軸承之機構設計則為解決上述問題的最好方法。因此，磁浮軸承則被開發用來取代傳統軸承之新型轉子軸承設計方式。磁浮軸承是透過磁場感應所產生的磁浮力，將旋轉的轉子懸浮。其優點為轉子與軸承之間互不接觸，因此無接觸摩擦之耗損，且無需潤滑之設計。此優點便可輕易的解決傳統轉子軸承之問題。

一般來說，磁浮軸承的種類可初為三種。1)被動式磁浮軸承：軸承是以永久磁鐵或是以定電流的電磁鐵所設計的，所產生的磁浮力亦為固定。2)主動式軸浮軸承：軸承設計是以電磁鐵的方式，然而與被動式磁浮軸承的不同處是在於可透過改變外加電流的大小來控制磁浮力的變化。3)混合式磁浮軸承：即是結合被動式磁浮軸承與主動式磁浮軸承的一種設計方法。因此，由上述可知，由於被動式磁浮軸承只能以固定的磁浮力來懸浮轉子負載，其工業應用範圍則被限制。反觀，主動式磁浮軸承可透過改變輸入至電磁鐵的電流來改變感應磁場的大小，進而可調整磁浮力的大小，針對高速旋轉之轉子動態可進行控制。因此，以主動式磁浮軸承為主的轉子軸承設計方式為現今轉子機械應用的主流。

### 二、主動磁浮軸承控制技術的種類

一般來說，磁浮軸承系統的組成包含五大要件。(1)電磁鐵，即軸承(定子)、(2)轉子、(3)感測器、(4)控制器、(5)功率放大器。電磁鐵為安裝在定子上，其作用為藉由電磁鐵所產生的磁場產生磁浮力讓轉子進行懸浮。而於軸承內的電磁鐵上安裝一個或多個感測器，用以量測轉子的位移量或軸承與轉子之間的間隙大小，並藉由感測器的量測訊號並將其迴授至主動式磁浮軸承控制器計算控制力，且透過功率放大器產生可校正轉子位移量的控制電流，控制電磁鐵的磁浮力，使得轉子於高速度旋轉下達到平衡且穩定的需求。因此由圖一的磁浮軸承架構圖可得知，其工作原理可簡單描述為，位移感測器量測出轉子距平衡點的位移量，作為控制器調整磁浮力的參考訊號，而功率放大器將控制器所產生的控制訊號轉換成控制電流，控制電流使得定子之電磁鐵產生磁浮力讓轉子維持其穩定性且達到理想的精度。此外，磁浮系統的剛性，阻尼及穩定度皆是由所設計的磁浮軸承控制器來決定。



圖一、磁浮軸承架構圖。

### 三、主動式磁浮軸承控制器理論的發展

傳統的主動式磁浮軸承控制器大部分都是採用 PID 控制器。其理由為比例迴授控制器可調整磁承軸承的剛性，微分迴授控制器可調整磁浮軸承的阻尼特性，積分迴授控制器可利用來提高系統的靜剛度及幫助系統的穩態誤差逐漸縮小。雖然 PID 控制器其控制理論簡單易實現、控制器增益值容易調整結構簡單、可靠性好、應用廣泛。然而隨著磁軸承轉速的不斷提高和運行工況的不斷複雜，如轉速需求為 32000rpm 的離心式冰水機。傳統的 PID 控制器已經無法滿足實際工業應用的需求。因此，近年來較為流行高等控制理論的研究可分為以下種類。

#### (1) Balancing control algorithm

由於磁浮軸承的轉子高速的旋轉中，轉子的旋轉慣性中心與定子的幾何中心未一致。將導致軸承產生振動，因為引起整個轉子機械的振動與噪音。引起振動的因子，稱為非平衡力(unbalance force)。因此，抑制非平衡力的控制方法可分為：

##### (a) 自動平衡控制技術(auto-balancing control algorithm)

此控制技術主要是針對由剛性體設計之轉子。其原理為只要轉子與軸承之間的間隙保持足夠大的距離，就可以使慣性中心繞著幾何中心旋轉，就可以使其繞自身的慣性軸旋轉。此時不論轉子的轉速多高，皆無非平衡力的產生，因而轉子對定子的反作用力也完全消除。自動平衡控制搬術的實現方法是在控制迴路中加入可隨著轉速變化的並與其同頻率的 notch filter。讓非平衡力所產生的 peak 影響消除。然而自動平衡控制技術的主要缺點是，notch filter 的使用不僅抑制了主軸振動，同時也使控制器在轉動頻率處失效，當轉子的轉速超過臨界速度(critical speed)時，磁浮軸承系統會發生不穩定的現象。

#### (b) Observer-based control algorithm

此控制技術是利用觀測器原理，此原理是來自現代控制理論中的 state observer。其原理為將非平衡力視為系統的外擾(external disturbance)，透過磁浮軸承數學模型及所設計的低通濾波器(low-pass filter)估測出非平衡力。雖然此控制技術可消除非平衡力的影響，然而其缺點為需要高準確度的系統鑑別技術來取得磁浮軸承數學模型，且濾波器的設計將會影響到觀測器對較高頻的干擾，其估測的精確性。

#### (c) 週期學習控制法

此方法的控制原理是應用反傳遞函數補償法計算出補償信號並加入控制迴路中，藉由消除轉子振動使控制電流的 peak 接近零。引入補償信號的位置有兩種設計方式，一種是將信號直接加到控制電流中，另一種是將信號從迴授控制器的輸入端引入。然而此技術主要是針對週期性擾動而加以抑制。然而，當磁浮軸承系統運作於較複雜或突發事件，週期學習控制法顯然是不夠強健。

### (2) 最佳化控制技術

最佳化控制技術利用二次型式所設計的評價函數(cost function)，使得轉子位移量及控制電流達到最小化的目的。此技術又稱為 Linear Quadratic Regulator(LQR)。通常此技術的應用都會搭配狀態觀測器或 Kalman filter 來估測系統的狀態，用以增加系統的控制效果。而結合觀測器的最佳化控制技術又稱為 LQG 法。然而，此技術的缺點在於轉子數學模型的鑑別必須相當的精確，否則將影響控制的效果及精確性，進而影響轉子的穩定性。

### (3) 智慧型控制

智慧型控制技術的優點在於不須要磁浮軸承的數學模型，其原理是透過即時的學習達到理想的控制效果。如類神經網路(neural network)與模糊控制(fuzzy control)。最常見的應用方式，即時將類神經網路或模糊控制根據轉子的位移量來即時調變 PID 控制的增益值。或是結合干擾觀測器，用以提升非平衡力的估測能力。然而此類的智慧型控制在工業應用上卻顯少使用，原因在於其控制演算法較為複雜，需要較大的運算量。因此在實際的應用，尚無法觀察出成效。除非，將來可開發出高容量、高運算速度的晶片，或是此方法值得使用。

### (4) 適應性控制理論(Adaptive control)

適應性控制技術的精神在於，透過所設計的控制律及磁浮軸承數學模型來調變 PID 控制器的參數。雖然此技術對於轉子狀態的變化可快速度反應。然而，對於無法建模的動態行為，如系統的外部干擾，卻無法透過適應律的設計來加以抑制。因此此控制技術近年較少已經越來越少單獨使用在磁浮軸承系統。

### (5) 強健控制理論 (Robust control)

最年來，最常被應用於磁浮軸承的強健控制理論，即是 H-infinite 控制技術及可變結構控制(sliding mode control)。H-infinite 控制理論的應用是將系統的最壞情況給考慮進去，若是系統連最壞的情況都可以應用，那想信其他的狀況也可以解決。可變結構控制技術是設計一順滑平面，其控制目的即是讓系統的運動狀態快速且平滑的進行順滑平面，藉此達到控制目的。由近年來的研究文獻顯示，H-infinite 及可變結構控制對於系統的外擾具有良好的強健性。此外，美國維吉尼亞大學的 ROMAC 實驗室即是提出了 H-infinite optimal control 又稱為  $\mu$ -synthesis 控制技術，此控制技術是應用了靈敏度函數、權重函數及最小增益理論(small gain theory)來判定控制的效果。

#### 四、較常見的控制技術之綜合評比

將上述的控制技術，以表列的方式歸納來說明其優缺點，如下所示。

| 控制方法           | 控制理論   | 優點                      | 缺點                                    |
|----------------|--------|-------------------------|---------------------------------------|
| Model-based 技術 | 觀測器技術  | 可估測出系統的外擾，即非平衡力。        | 需要精確的磁浮軸承數學模型，及精確的低通濾哈之 trade-off 經驗。 |
|                | 最佳化控制  | 可讓轉子平衡及控制電流最小化          | 需要精確的磁浮軸承數學模型。                        |
|                | 適應性控制  | 可藉由適應律調變控制器參數。          | 需要精確的磁浮軸承數學模型，且消除無法建模之外擾影響。           |
|                | 強健控制   | 對於系統的外擾抑制具有良好的強健性。      | 若系統數學模型的階數過高，恐較難實現。                   |
| Non-based 技術   | 自動平衡控制 | 可消除非平衡力所產生的 peak。       | 無法應用於轉速超過臨界速度。                        |
|                | 週期學習控制 | 可抑制轉子振動使控制電流的 peak 接近零  | 當系統有突然的外擾時，則技術將不夠強健。                  |
|                | 類神經網路  | 無需 AMB 數學模型，便可調整控制器的參數。 | 由於演算法較為複雜，則需要較大的運算量。                  |
|                | 模糊控制   | 同上                      | 不夠強健。                                 |