

# 主動式磁浮軸承技術評析

## 一、磁浮軸承基本架構

磁浮軸承是結合機械、電子以及控制軟體三者的系統，藉由磁力使旋轉機械懸浮，支撐旋轉機械並控制該旋轉機械位置。其磁浮力來源可分為超導磁鐵、永久磁鐵以及電磁鐵，支撐旋轉機械之磁浮力可分為吸力和斥力，由於斥力較不易控制，所以一般皆以吸力做為懸浮力量的來源。超導磁鐵與永久磁鐵之磁浮力與主軸剛性為定值，構造簡單但不能控制外力對旋轉機械系統之干擾；而電磁鐵可以藉由電流大小控制磁浮力，並由偏壓電流 (Bias current) 及控制參數設定軸承剛性。主動式磁浮軸承系統是由電磁鐵磁浮致動器、位置感測器、控制器以及線性功率放大器構成之伺服控制系統。位置感測器可感測旋轉軸測靶 (Sensor target) 之位置，方法包括利用電容、電感以及渦電流，其中以電容感測器感測精確度最高；功率放大器則將控制器之電壓信號轉換成電磁鐵驅動電流，有線性放大器及脈波頻寬調變放大器；控制器包括類比 PID 控制器，以及電腦數位控制器，如圖 1 所示。

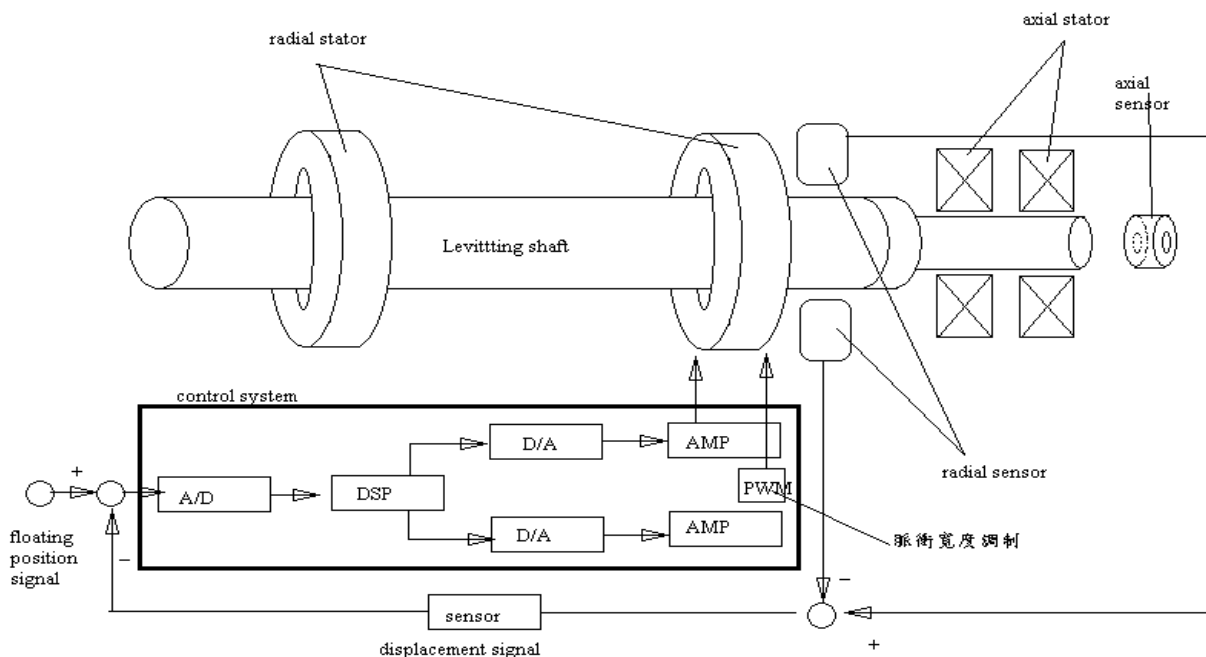


圖 1 、磁浮軸承基本架構

## 二、磁浮軸承結構型式

一般而言，磁浮軸承按控制方向可分為徑向磁浮軸承和軸向(推力)磁浮軸承，徑向磁浮軸承按結構型式可分為三極式、四極式、八極式或16極式等，目前大多數的磁浮軸承皆採用八極式磁浮軸承。圖2.為徑向磁浮軸承結構，八磁極成四對，形成四組獨立磁路，分別成對控制兩個方向，為最常見之磁浮軸承。靜子內的磁極設計可分為同極式(Homopolar)：磁路(磁力線之路徑)平行於轉子軸向，和異極式(Heteropolar)：磁路(磁力線之路徑) 垂直於轉子軸向。此二型式磁極磁路如圖3.所示。此兩種磁極型式的優缺點比較請見表1，一般以異極式較常見。

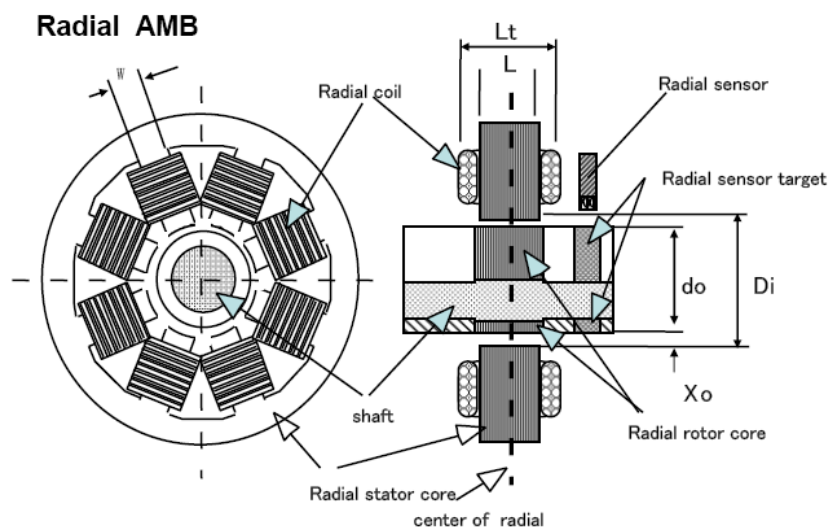


圖2、八極徑向磁浮軸承結構

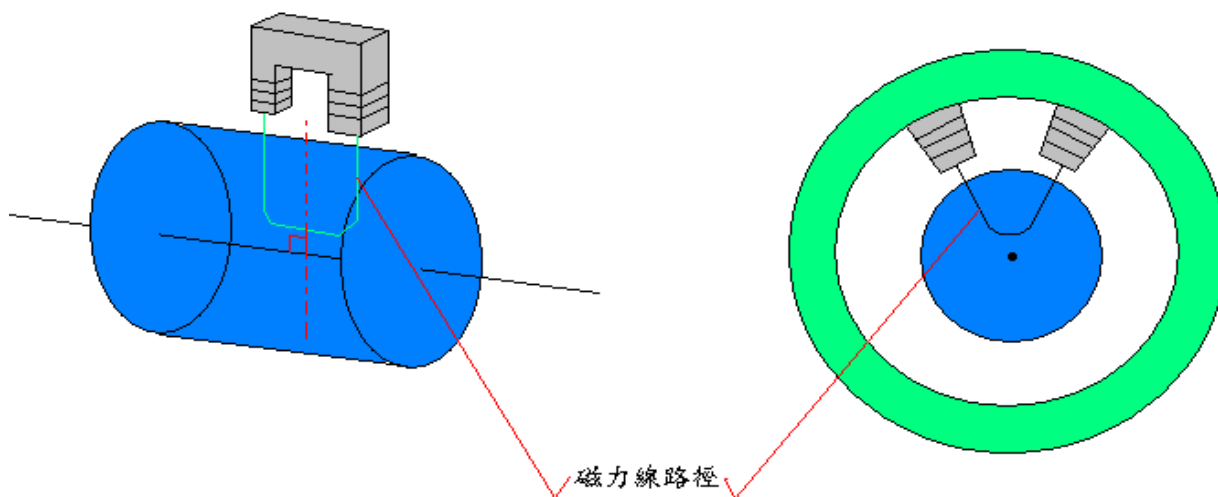


圖3、同極式(左)和異極式(右)磁浮軸承

表 1、磁極型式比較

磁極型式	同極式	異極式
優點	磁通較不易耦合、再磁化頻率較低	磁極的堆疊較容易
缺點	磁極的堆疊較困難、所佔體積較大	磁通較易耦合、再磁化頻率較高

磁浮軸承繞線的方法又可分為差分驅動和差分繞線，如圖4和圖5所示，差分驅動為同一磁路之磁極共用一組繞線，偏磁電流與控制電流混合輸入一組繞線，相對應的磁極控制電流方向相反，因此控制一個方向需兩個放大器。差分繞線為所有偏磁電流由一組獨立繞線提供相對應的磁極共用一組繞線，但繞線方向相反，用以提供控制電流，因此控制一個方向僅需一個放大器。差分驅動與差分繞線的比較為差分驅動銅損較低、需4組功率放大器，差分繞線偏磁電流永遠存在、銅損較高但僅需2組功率放大器，一般以差分驅動較常見。圖6.為軸向磁浮軸承結構，除推力盤和前後電磁鐵之結構較徑向磁浮軸承不同外，其它如感測器方式皆相同。

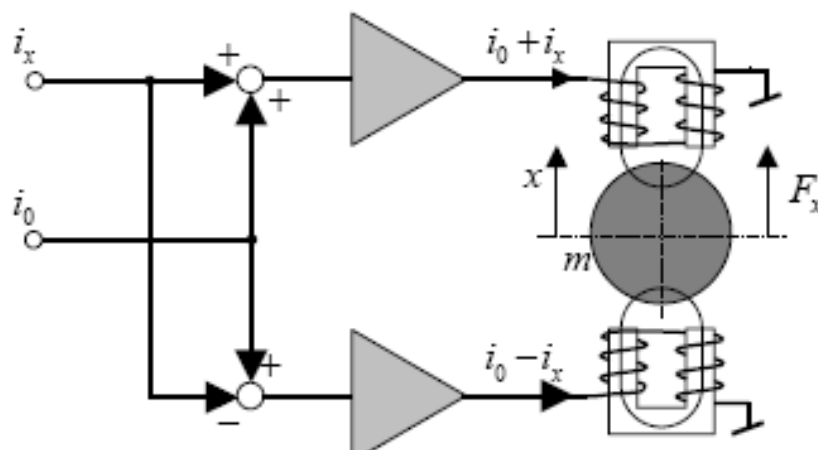


圖4、差分驅動法

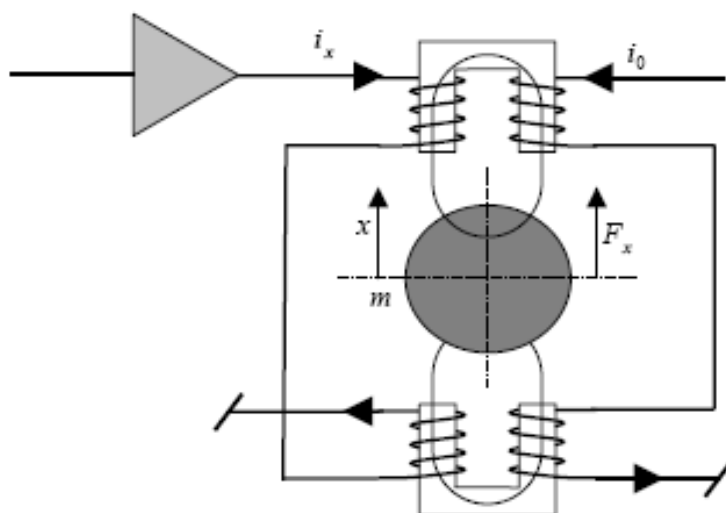


圖5、差分繞線法

## Axial AMB

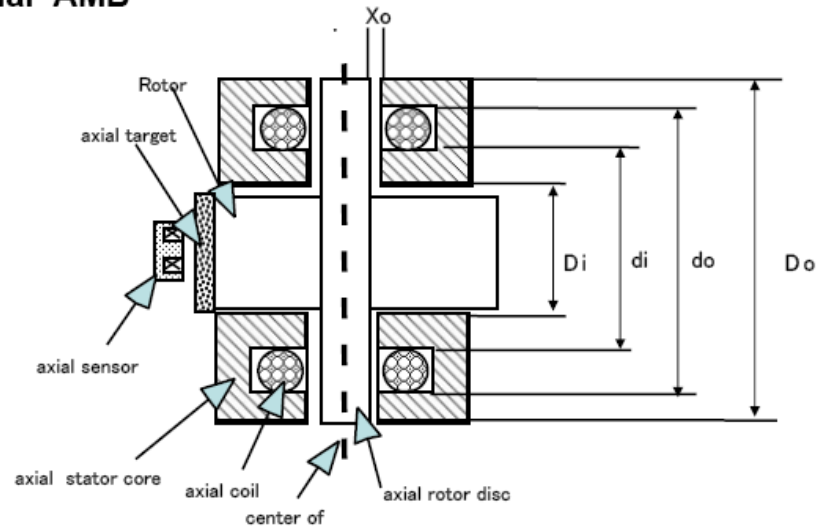


圖6、軸向磁浮軸承結構

一般磁浮軸承在設計時之評估重點包括：

- 成本：本體結構(包含材料、製造、及裝配等)約2成，電控軟硬體(包含感測器、功率放大器、及控制軟體等) 約8成。
- 能量損耗：銅損(正比於電流平方) 較多，鐵損(包含遲滯損及渦流損，約正比於再磁化頻率及磁通密度之平方)較少。
- 性能：負載能力、剛性及阻尼、精度、及最高轉速等。

一般減低鐵損的方法為降低再磁化頻率，可藉由矽鋼片的堆疊(利用導磁不導電之膠水黏合) 方式製造定子與轉子，如圖7.所示。

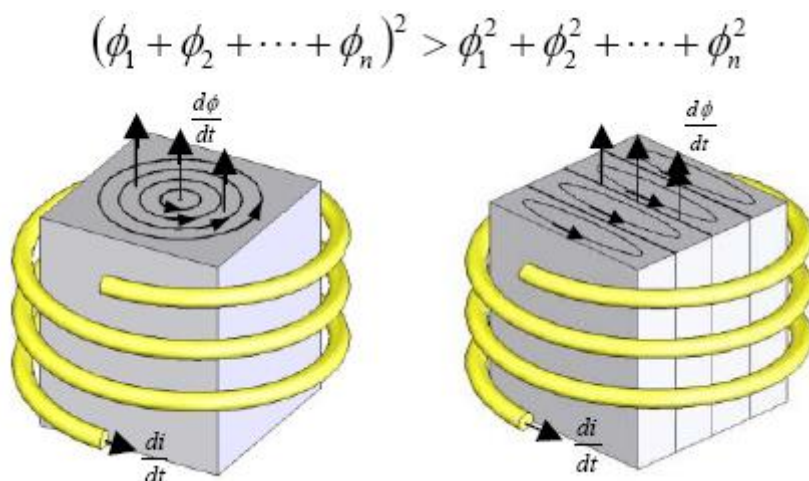


圖7、利用矽鋼片堆疊以降低鐵損

## 三、位置感測器

為了提高磁浮軸承的性能和承載能力，軸承和旋轉軸之間的氣隙應盡可能地小，一般在幾十分之一毫米到零點幾毫米之間，如此小的間隙，對旋轉軸偏心位移的測量精度自然要求很高，在實際應用中，要保證磁力軸承的性能優點，必須採用非接觸的方式高精度地測量旋轉軸的位移，並嚴格控制旋轉軸的偏心度，否則將會嚴重降低磁力軸承的性能，甚至發生碰撞而造成損壞。位移感測器其種類包含：

- 1) 感應式：利用感測器上之線圈電感改變來偵測轉子位移，易受PWM之切換頻率干擾。
- 2) 渦電流式：利用高頻(1-2MHz)電流之電磁感應在轉子上所產生之渦電流，來偵測其位移。  
易受轉子表面之粗糙度與材料之均質性影響，感測器間也易互相干擾。
- 3) 磁感式：一通過轉子之磁場，其磁通密度與轉子位移有關，故可用以偵測轉子位移。易受外在磁場干擾。
- 4) 電容式：利用平板電容之電容值與其間隙成正比之原理做量測。易受轉子表面之靜電干擾，也對灰塵敏感。
- 5) 光學式：利用光學原理偵測轉子位移。不受外在磁場影響，但對灰塵敏感。

位移感測器之比較如表 2 所示，設計者可按實際的需求與考量，例如成本、結構和製作技術困難度等，選擇合適的感測器。

表2、位移感測器之比較

	解析度	頻寬	量測範圍	價格(台幣)
感應式	微米	20 KHz	毫米	幾萬元
渦電流式	微米	20 KHz	毫米	幾萬元
磁感式	微米	20 KHz	毫米	幾萬元
電容式	微米至奈米	100 KHz	毫米	幾十萬元
光學式	微米至奈米	100 KHz	厘米	幾十萬至百萬元

#### 四、功率放大器

從控制角度來看，電流控制的磁力軸承是由位置迴路和電流迴路組成的一個雙閉迴路控制系統，位置迴路為外迴路，而電流迴路為內迴路。位置控制器根據來自感測器的位移信號，通過相應的最佳化控制法則，得到期望的電流信號，並經由數學模型轉換，作為功率放大器的實施參考電壓，而控制內迴路則根據給定的參考電壓對磁浮軸承線圈的電流進行控制。功

率放大器和電磁線圈完成內迴路的功能，接受來自外迴路控制器的電流指令，並使得流過電磁鐵的電流隨著電流指令而變化，因此功率放大器可以視為一個電流追蹤系統。磁力軸承性能的好壞與功率放大器是息息相關的，功率放大器應具有良好的動態性能和穩態性能，具有足夠的頻寬。一般功率放大器可分為線性放大器和切換式放大器，線性放大器以類比電路組成，不會產生電磁干擾，但功率損耗大，適用於中低功率(0.6 KW以下) 系統使用。切換式放大器以脈衝寬度調變(Pulse Width Modulation, PWM) 技術實現，功率損耗低，但易產生電磁干擾，適用於高功率(0.6 KW以上) 系統使用。功率放大器又可分為電流控制與電壓控制，電流控制直接輸入電流，產生磁力，電壓控制產生磁力之電流間接由輸入電壓提供。電流控制無驅動電路，系統動態較單純，磁力產生較快，較易於設計控制器，但較昂貴。電壓控制因包含驅動電路，系統動態較複雜，磁力產生之動態延遲較明顯，控制器較難設計，但較便宜，目前以電流控制較為普遍。

## 五、控制器

控制系統可採用類比控制或數位控制，類比控制依靠類比電路完成特定運算，故類比控制運算速度快、成本低，但控制器一旦選定，參數不易修改，且很難實現複雜的控制運算，一般類比控制器主要用於小軸承。數位控制較為靈活，相對類比控制器具有其特定的優越性：

- 1) 使用靈活，調適方便，無需硬體設備做任何改變，只需改變程序就可以改變控制系統的參數和性能；
- 2) 系統體積小，可靠性高，元件可靠，抗干擾能力強；
- 3) 可實現複雜的控制器，可以獲得比類比控制更好的控制性能；
- 4) 系統的更新由於常常只涉及軟體而更為容易；
- 5) 對意外和緊急情況以及相應的安全問題可以作出智能反應。

控制器在設計時考量的因素需包括：

- 1) 穩定性(Stabilization)：使轉子穩定於定子中心；
- 2) 強健性(Robustness)：所設計之控制器能對抗磁浮軸承之不確定量，來源包括不精確之磁浮力模型(線性假設、忽略遲滯、磁漏、及磁飽和等)、系統參數誤差(量測誤差、製造及裝配誤差、材料不完美等)、雜訊與外在干擾(感測器雜訊、環境與結構之振動干擾)；

- 3) 性能要求：閉迴路系統須能達到所設定之規格，如負載能力、剛性及阻尼、精度、及最高轉速等；
- 4) 控制力(Control Effort)限制：磁浮力有所限制；
- 5) 能量損耗：控制所需之能量必須合理。

一般控制系統採用的控制方法包括線性控制、比例-積分-微分(PID) 控制、最佳化控制、線性狀態回授控制、非線性控制、回授線性化(Feedback Linearization) 控制、滑動模式控制、適應性控制(Adaptive Control)、模糊與類神經網路(Neural Network) 控制等。數位控制系統以 PC/DSP-Based 即時控制之方式實現，主要架構包括類比-數位轉換器(A/D Converter)、數位-類比轉換器(D/A Converter)、與一數位訊號處理(DSP) 晶片等。控制法則在PC 上以軟體(如 MATLAB 或C 語言) 寫成後，下載至DSP 晶片，形成一數位控制器。當感測器量測到轉子訊息，經由A/D 轉換成數位訊號後，將其傳送至DSP 晶片進行計算，所得之控制命令經由D/A 轉換成類比訊號(通常D/A 輸出只能在10 Volts 內)，再以功率放大器放大後，即時控制轉子。控制系統控制方塊圖請見圖8。

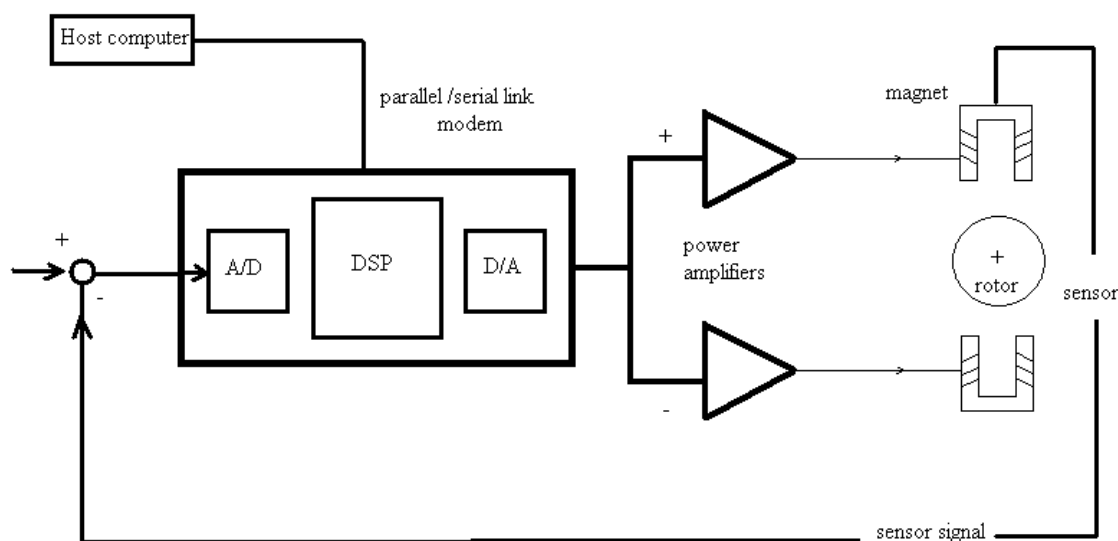


圖 8、磁浮軸承之控制架構

控制器常遇到的相關問題包括：

- 1) 取樣頻率之選擇：一般而言，取樣頻率愈高愈能進行即時控制，但主要受限於硬體(A/D、D/A、與DSP) 速度與成本。另外，控制法則所需之運算若太複雜，無法於一個取樣時間內完成，即時控制將無法進行，此時須降低取樣頻率。
- 2) 參數校準與系統鑑別：磁浮軸承系統存有許多不確定量，實際安裝控制器前，須先進行參

數校準或系統鑑別以儘量減少不確定量，否則即使採用強健性控制器也無法運作良好。

3) 雜訊之處理：良好之控制仰賴精確之量測，但量測皆有雜訊。若雜訊太大時，應先以濾波器加以濾除後，再進行處理。

## 六、磁浮軸承國際標準 ISO 14839

目前在國際上對磁浮軸承的技術評定，以 ISO- 14839 為主要的標準，共分三個部份，ISO- 14839-1:2002【5】為磁浮軸承專業詞彙定義，ISO- 14839-2:2004【6】為振動評估，ISO-14839-3:2006【7】為穩定邊界評估，ISO- 14839-2 以軸心最大位移  $D_{\max}$  和轉子與定子之最小間隙  $C_{\min}$  的比例為判斷標準，ISO- 14839-3 以尖峰靈敏度  $G_{S_{\max}}$  的 dB 值為判斷標準，如表 3 所示。

表 3 磁浮軸承 ISO 14839 振動評估標準【6】【7】

Zone Limit	Displacement, $D_{\max}$	Peak Sensitivity, $G_{S_{\max}}$
Zone A/B	$<0.3 C_{\min}$	9.5 dB
Zone B/C	$<0.4 C_{\min}$	12 dB
Zone C/D	$<0.5 C_{\min}$	14 dB

其中 Zone A/B/C/D 為磁浮軸承判斷由優至劣標準的四個等級，圖 9 和圖 10 分別表示磁浮軸承評估標準在軸心最大位移和靈敏度頻譜圖上的限制區域，各等級評定內容定義如下：

Zone A：一般新運轉機器的振動位移/靈敏度都會落在這個區域。

Zone B：振動位移/靈敏度落在這個區域的機器，通常被認為可接受在沒有限制條件下長時間地作業。

Zone C：振動位移/靈敏度落在這個區域的機器，通常被認為令人不滿意在長時間下連續作業。一般機器也許可在某一狀況下於一個有限的期間內被操作直到一個適當的矯正動作出現。

Zone D：振動位移/靈敏度落在這個區域的機器，通常被認為十分地嚴重地將造成對機器的損傷。



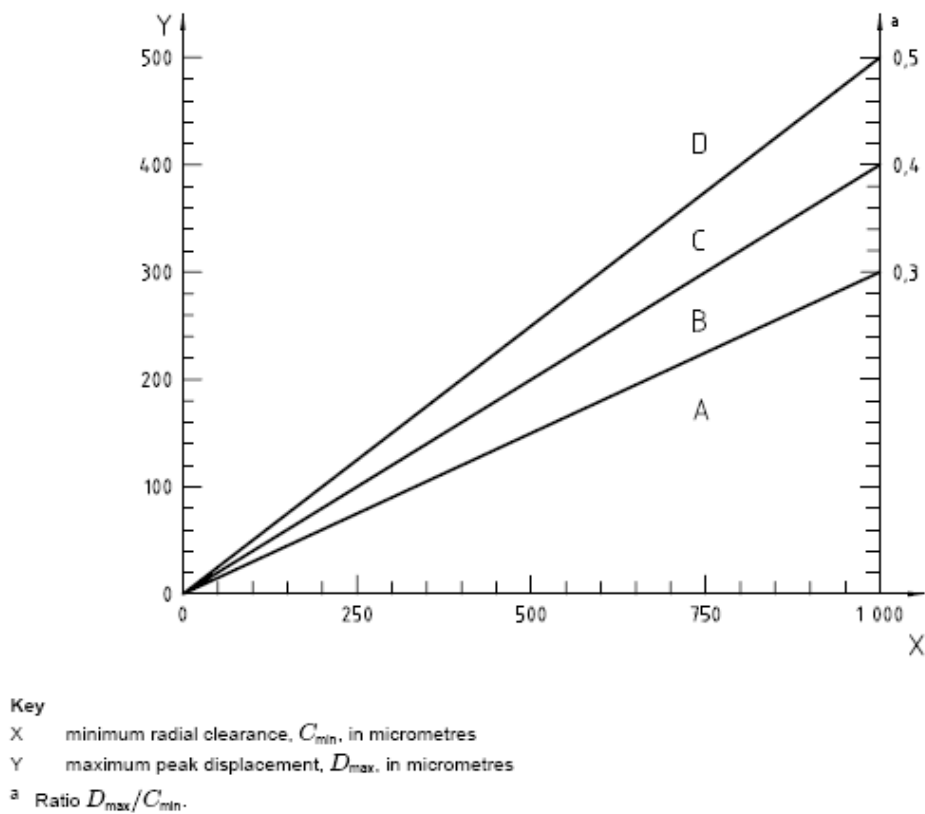


圖9、磁浮軸承振動標準限制區域

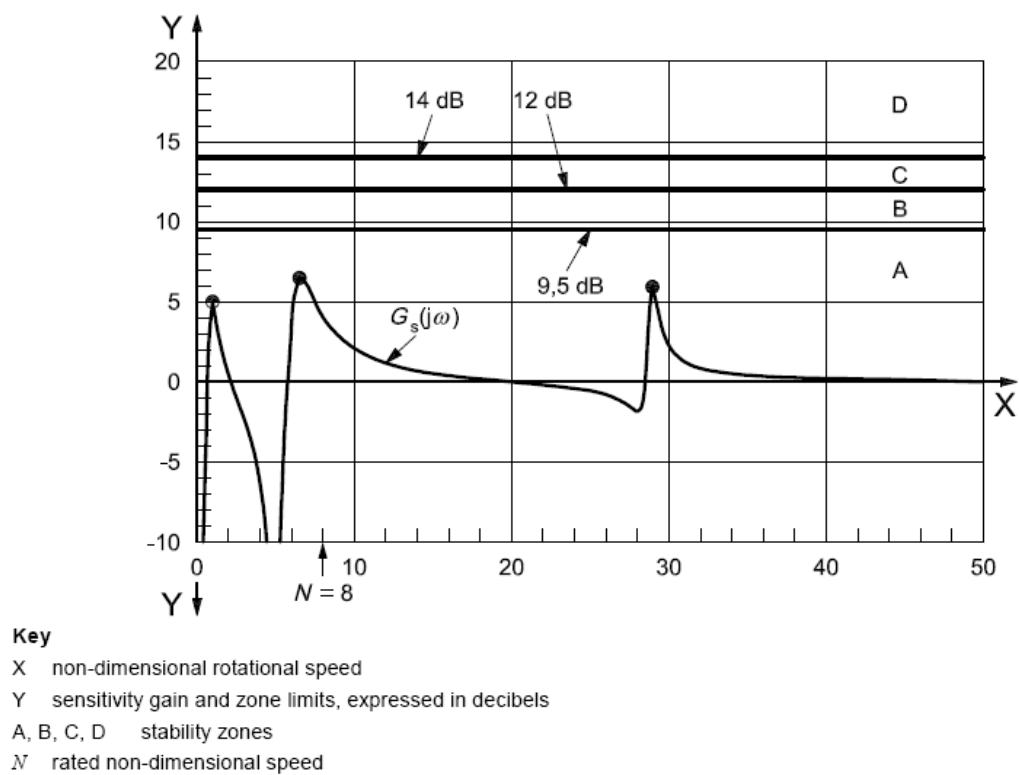


圖10、磁浮軸承穩定邊界限制區域

## 七、評論與建議

縱觀國內外磁力軸承的應用，21 世紀有關磁力軸承的理論研究與發展呈現以下趨勢：

- 1) 從類比控制轉向數位控制；
- 2) 從 PID 穩定性控制轉向採用現代控制理論、強健控制理論、非線性控制理論、適應性控制理論、智慧控制理論的應用研究；
- 3) 從剛性轉子的研究轉向撓性轉子的研究；
- 4) 將感測器與軸承進行混合控制，提出無感測器的磁力軸承；
- 5) 將驅動器與軸承進行混合控制，引入無軸承馬達的概念；
- 6) 提出零功耗磁浮軸承，即超導磁力軸承等。

儘管磁浮控制技術得到迅速的發展，目前在磁力軸承的研究方面仍存在以下問題：

- 1) 將轉子作為撓性體進行處理導致磁浮軸承控制系統的複雜化，如何處理轉子結構的非線性與控制系統的非線性；
- 2) 探索更為有效的磁浮軸承先進控制理論與方法；
- 3) 磁浮軸承控制系統與轉子結構動態特性之間的協調與匹配；
- 4) 磁浮軸承支撐特性對轉子特性的影響；
- 5) 磁浮軸承結構與控制的耦合、各控制系統間的耦合；
- 6) 磁浮軸承結構與控制系統的綜合最佳化設計。

另外，為了有效地推廣磁浮軸承在工業上的應用，未來必須達成以下重點：

- 1) 磁浮軸承系統化的設計理論和設計方法，例如導入系統工程的概念，開發通用的設計軟體，可以針對客戶的需求，快速完成客製化的產品；
- 2) 磁浮軸承量產的標準化品質規範，使品質達到信賴的標準；
- 3) 材料、電子元件成本的降低與可靠度提升；
- 4) 轉子與定子間隙的減少、轉速及控制精度的提升；
- 5) 磁浮軸承元件的模組化、通用與嚴密的標準規範訂定；
- 6) 更為簡易、快速、容易上手的操作流程與人機介面、更快速且本土化的售後服務與技術支援；
- 7) 善用磁浮軸承數位控制與現今網路發達的優點，達到易於監控、診斷與保護的目的，使故障而導致生產或財產的損失降至最低。

目前在經濟部能源局支持下，工研院正積極發展採用磁浮軸承的無油離心冷媒壓縮機，預計 2013~2016 將逐步導入國內壓縮機製造廠的試量產階段。期望在未來幾年可以打破歐美壟斷此一新產品的現象，提升我國傳統產業競爭力，由競爭毛利的紅海時代，轉型成具高附加價值的藍海經濟產品。未來除了將進一步開發全系列磁浮無油冰水機系統外，也將積極拓展此一無油、高速與智慧化技術應用範圍，如再生能源或低溫廢熱回收之磁浮無油吸附式製冷系統、應用於半導體面板產業之高速磁浮無油空壓機、應用於水資源污水處理之 100~400kW 高效率無油曝氣機、半導體真空製程渦輪分子真空泵、超高速工具機主軸等。另一方面，也將積極開發應用磁浮軸承於潔淨能源的前瞻性產品，如應用在 ORC 廢熱回收之高速磁浮發電機，或應用於工廠商辦的無限充放電次數磁浮飛輪儲能系統，利用磁浮特有的『無接觸、無能損』的特性，提高能源的使用效率，進一步達到節能減碳與環境保護永續經營的目的。