

國產磁浮離心式壓縮機磁浮控制器性能概述

一、前言

冰水機作為民生與工業應用的重要設備，佔我國總耗電量達 10% 以上，因此冰水機效率對於節能至關重要。其中主動式磁浮軸承技術在推進效率提升上扮演關鍵腳色，應用磁浮軸承技術能使旋轉機械達到非接觸式特色，能大幅度減少摩擦損耗，除了噪音低，正常使用下軸承免維護，且直驅式的馬達不存在齒輪傳動損耗，另外無油的系統可降低熱交換效率損失。因此相較於傳統技術產品效率提升 20~30% 以上，鑒於上述諸多優點，磁浮離心式壓縮機儼然成為各國際冰水機大廠爭相投入研發之產品，隨著磁浮壓縮機相關技術的進步，各型磁浮機種也逐漸壓縮到傳統冰水機的市場。

針對國產磁浮離心式壓縮機，工研院研發高速磁浮主軸專用磁浮位置感測器與磁浮軸承驅控器，整合磁浮軸承驅動、控制、位移感測等功能，可感測主軸微米等級之位移，完成五個自由度的控制，分別為前徑向 X-Y、後徑向 X-Y、軸向 Z。驅動級功率晶體的選用注重體積和散熱的平衡，讓電路適合安裝於磁浮離心式壓縮機側邊。並透過元件佈局以及訊號佈線的優化，降低磁控系統受雜訊的影響。此外電路板相關連接器注重磁浮軸承替換時拆卸的方便性，亦利用實場運轉測試連接器以改善偶發性接觸不良的問題，提升自主研發之磁浮離心式壓縮機產品穩定度。

磁浮控制技術整合線性控制器、增益排程(Gain-scheduling)、偏心力抑制控制(Unbalance Force Rejection Control, UFRC)、數位濾波器(Digital Filter)等，以數位訊號處理器(Digital Signal Processor, DSP)予以實現。其中增益排程是透過系統鑑別，找出磁浮系統剛性弱點頻段，依照頻段進行增益與阻尼調整，以強化磁浮控制器在所有操作頻段的剛性，同時規劃適當參數切換斜率，確保參數變動不會過於劇烈影響穩定性。而偏心力抑制控制讓磁浮主軸能依照質心旋轉，降低因偏心

力導致的振動，同時提升控制電流裕度，以應對如離心機喘振之極端情況。所研發的磁浮控制技術能依照需求穩定運轉於高負載變化之場域，滿足全年不同環境不同負載變化的使用需求，成為打造國產 1 級能源效率之冰水機機種關鍵技術之一。圖 1 即為國產 1 級能源效率 250 RT 級磁浮離心式冰水機。

為了強化使用者體驗，磁浮軸承驅動控制器能夠與冰水機主控端之可編程序控制器（Programmable Logic Controller, PLC）進行通訊，持續監控轉子位移、控制電流、錯誤警報等參數，磁浮控制器以主控端之可編程序控制器為中繼點，如發生轉子軌跡過大，電流過大等情況，第一時間通知變頻器，並做對應處置。



圖 1、國產 1 級能源效率 250 RT 級磁浮離心式冰水機

二、磁浮驅動性能評斷方法

冰水機性能係數(COP)是評斷節能與否之指標，主要包含流力機構、葉輪、馬達、變頻器全數整合後在冰機系統的表現。以 300 RT 級國產磁浮離心式冰水機為例，依照 CNS12575[1]全載性能規範，額定能力運轉範圍為 250~320 RT，滿載運轉條件下，磁浮軸承靜態懸浮所消耗的功率小於 200W，這對於額定 150kW 的馬達顯然微不足道，磁浮軸承並不會對性能係數造成太大影響。

評斷磁浮驅動控制器性能主要根據 ISO-14839-2 振動相關規範[2]，以及 ISO-14839-3 靈敏度相關規範[3]。圖 2 為 ISO-14839-2 內振動標準的區域限制，振動

即為磁浮主軸在受到外力擾動時所呈現之運動軌跡，劃分為 A、B、C、D 區，其中 A 區域：新調適機器的振動位移通常屬於此區域；B 區域：於此區域內具有振動位移的機器，通常被認為是可不受限制的長期運作；C 區域：於此區域內具有振動位移的機器，通常被認為是不建議長期連續運轉，但機器可以在這種情況下運行一段有限的時間；D 區域：通常認為發生於該區域內的振動位移足以危害機器導致機器損壞。由此得知，只要磁浮主軸的振動位移在 B 區域以上，即可不受限制的長期運作。但振動位移在 D 區域內則需非常注意，需要重新調適控制器降低振動位移，一般而言磁浮系統仍會配置輔助軸承，即傳統滾珠軸承，用於承接主軸在低速懸浮結束，或主軸高速運轉但是失控碰撞時。然而輔助軸承承受高速碰撞次數有限，超過承受範圍即會危害機器導致機器損壞。

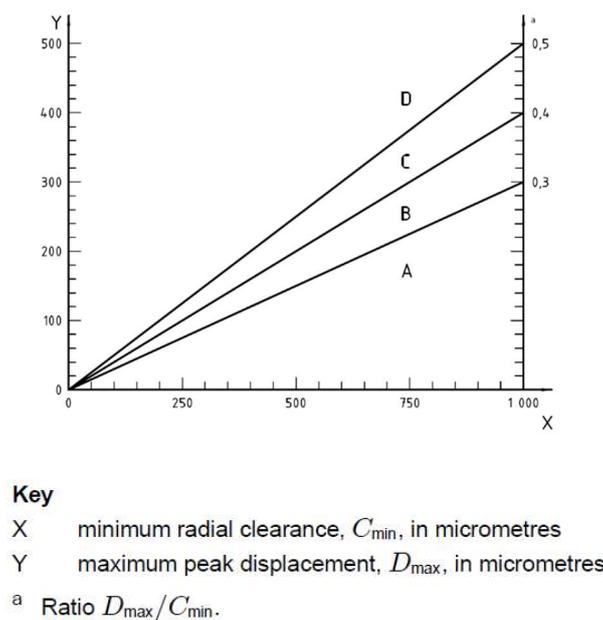


圖2、振動標準的區域限制

三、實驗測試方法

本設備由工研院 TAF 認證冰水機性能測試實驗室進行性能測試，依 CNS 12575 蒸氣壓縮機式冰水機組與 AHRI 551/591(SI)-2018[4]測試標準，進行冰水機組在 300 RT、250 RT 全載與 75%、50%、25%部分負載條件下的磁浮驅動控

制器性能測試。主軸振動軌跡透過串列通訊界面(Serial Communications Interface, SCI)由磁浮驅動控制器傳送至個人電腦。除此之外，人機介面還可進行軌跡頻譜分析，支援控制器參數調整、位移和電流監控，顯示電源低電壓、過電壓、過電流、轉子位移過大等警告，並直接透過光耦合器通知冰水機主控端之可編程序控制器進行即時保護。

四、實驗結果與討論

國產磁浮冰水機可運轉於額定能力 300 RT、250 RT，兩者使用不同葉輪。圖 3 至 6 分別為額定能力 300RT 全載、75%、50%、25%工況條件下磁浮離心式壓縮機驅動控制器性能。全載工況壓縮機電氣頻率 562Hz(人機介面顯示的 281Hz 為機械頻率，因四極馬達所以兩者相差一倍)、壓比 2.43、前徑向軌跡峰值 18.72%、後徑向軌跡峰值 21.46%、軸向軌跡峰值 7.35%。75%工況壓縮機電氣頻率 498Hz、壓比 2.037、前徑向軌跡峰值 18.56%、後徑向軌跡峰值 17.38%、軸向軌跡峰值 3.92%。50%工況壓縮機電氣頻率 412Hz、壓比 1.638、前徑向軌跡峰值 13.60%、後徑向軌跡峰值 12.82%、軸向軌跡峰值 2.69%。25%工況壓縮機電氣頻率 396Hz、壓比 1.54、前徑向軌跡峰值 9.22%、後徑向軌跡峰值 9.92%、軸向軌跡峰值 2.24%。由此可見經過增益排程、偏心力抑制控制、數位濾波器調校等等磁浮控制技術整合後的國產磁浮離心式壓縮機驅動控制器，在 300RT 所有標準工況點均操作在 ISO-14839-2 規範的最佳 Zone A 區域內。

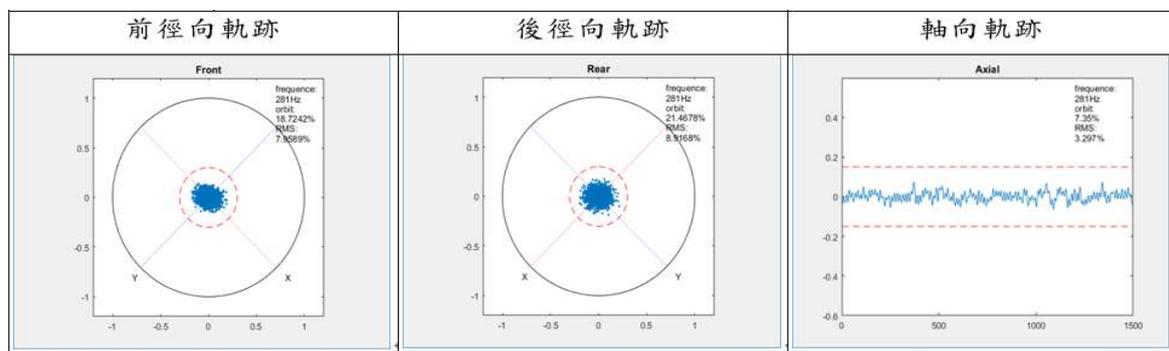


圖 3、額定能力 300RT 全載工況下磁浮離心式壓縮機驅動控制器性能

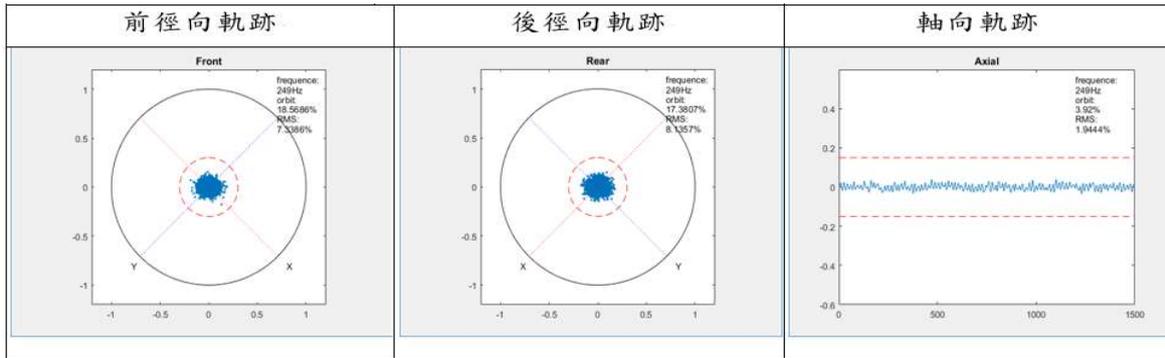


圖 4、額定能力 300RT 75%工況下磁浮離心式壓縮機驅動控制器性能

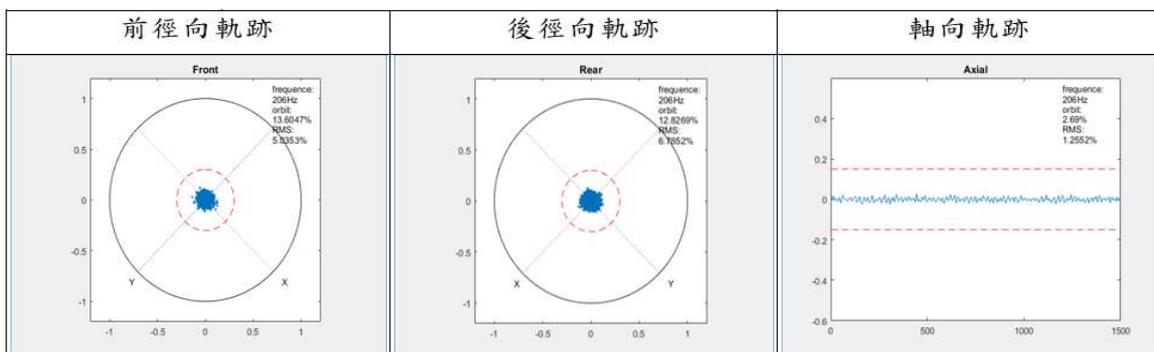


圖 5、額定能力 300RT 50%工況下磁浮離心式壓縮機驅動控制器性能

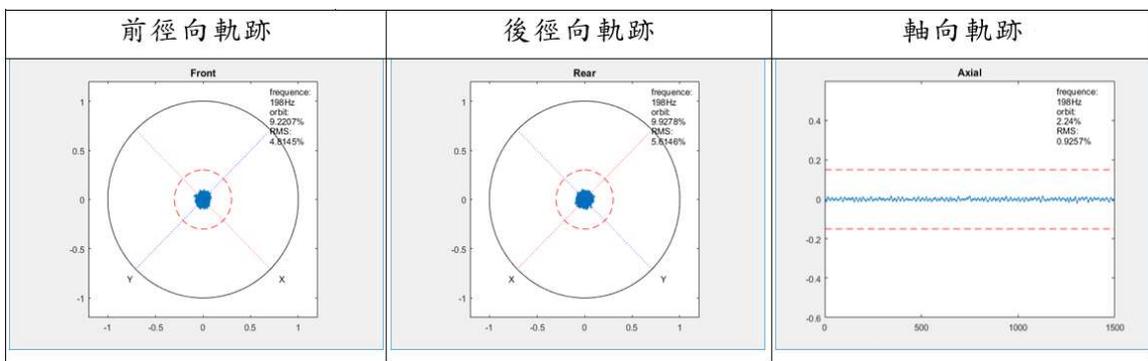


圖 6、額定能力 300RT 25%工況下磁浮離心式壓縮機驅動控制器性能

國產磁浮冰水機運轉於額定能力 250 RT 時，磁浮驅動控制器性能整理如表一，在四個標準工況條件下的主軸軌跡均保持在 ISO-14839-2 規範的最佳 Zone A 區域內。由此可見自主研發的國產磁浮驅動控制器無論是應用在 300RT 或 250RT 機型均成果優良。

表一、國產磁浮冰水機運轉於額定能力 250 RT 時磁浮驅動控制器性能

工況點	壓縮機電氣頻率 (Hz)	壓縮機壓比	前徑向軌跡峰值 (%)	後徑向軌跡峰值 (%)	軸向軌跡峰值 (%)
100%	600	2.412	14.42	22.88	11.35
75%	533	2.020	9.65	16.41	9.72
50%	433	1.620	7.14	10.36	9.18
25%	417	1.590	7.42	10.79	9.49

對離心式壓縮機而言，最容易造成危害的就是喘振(Surge)，簡單來說就是壓縮機無法建立壓力，流體產生逆流，對磁浮主軸造成巨大的外力，此時如果軸承響應不足，無法快速的應對就會發生碰撞。一般而言冰水機主控端的可編程序控制器會設定喘振線避免喘振發生，但如果喘振仍不幸發生，磁浮驅動控制器仍要有能力避免主軸碰撞，並等待冰水機脫離喘振。圖 7 和 8 分別為 466Hz、500Hz 的喘震測試，x 座標記錄著 25 秒內的數據，y 座標記錄著五個自由度個別的位移。由此可見即便發生喘振，國產磁浮驅動控制器仍能將主軸軌跡控制在一定範圍，不會發生碰撞，只要等待冰水機脫離喘振區即可繼續安全運轉。如果不幸無法脫離喘振區，主軸軌跡越發嚴重，則會透過發送錯誤訊號給冰水機主控端的可編程序控制器，要求立即停止變頻器運轉，降低機器發生傷害的機會。

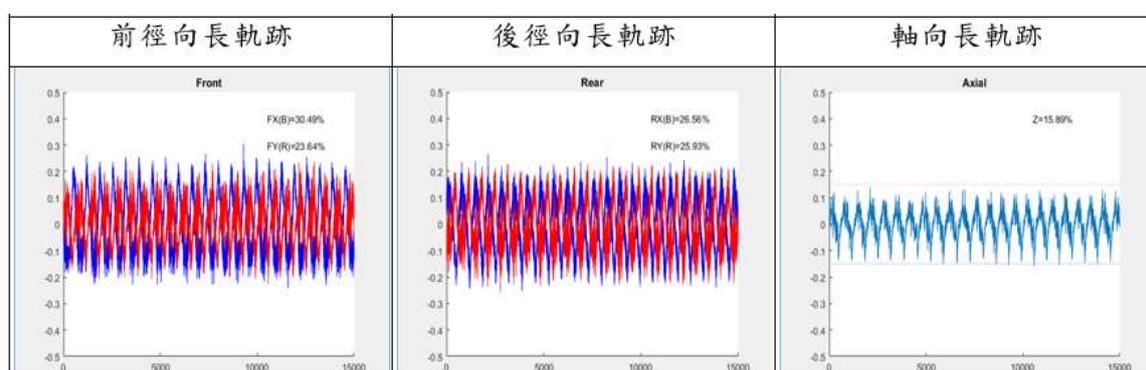


圖 7、466Hz 喘震測試

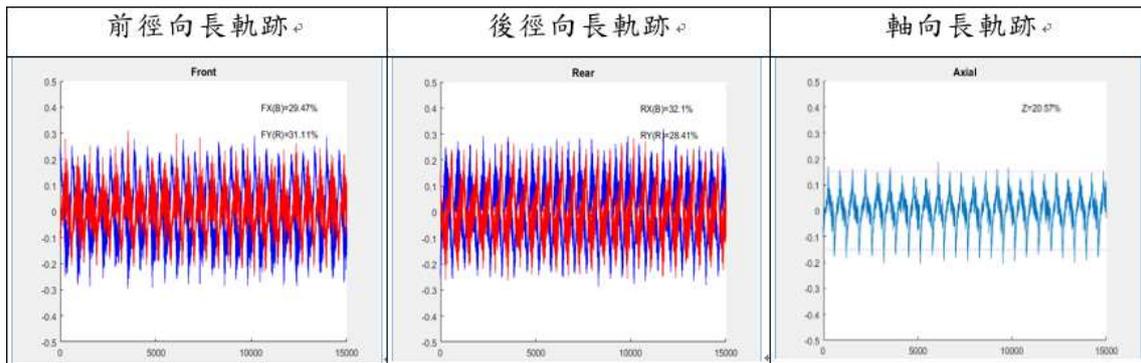


圖 8、500Hz 喘震測試

五、結論與展望

國產磁浮離心式壓縮機驅動控制器性能在冰水機額定能力 300RT、250RT 無論是全載或部分負載，均符合國際 ISO-14839-2 振動規範的 Zone A 標準，冰水機能不受限制的長期運作。能提供空調業主與技師依照使用情境之需求選定操作點，代表國產磁浮離心式壓縮機驅動控制器性能和穩定度都有所保證。且面對離心機喘振時，磁浮驅動控制器仍能將主軸軌跡控制在一定範圍，不會發生碰撞，只要等待冰水機脫離喘振區就可繼續安全運轉。

本單位目前除了研製額定能力不同的高效率感應、永磁馬達機型，積極進行單體與整合測試。控制軟體研發也不遺餘力，所研發的磁浮控制技術能依照需求穩定運轉於高負載變化之場域，滿足全年不同環境不同負載變化的使用需求，成為打造國產 1 級能源效率的冰水機機種關鍵技術之一。相關軟硬體技術都在加速商品化工程，以拓展國產冰水機機種供國人選用。亦在研發使用低溫室效應冷媒之冰水機，期望在保護環境的同時維持冰水機高效節電，協助國產冰水機跟上國際趨勢，能與國際品牌競爭。

六、參考文獻

- [1] 蒸氣壓縮式冰水機組容許耗用能源基準 CNS12575 與能源效率分級標示事項方法及檢查方式。

- [2] Mechanical Vibration-Vibration of Rotating Machinery Equipped with Active Magnetic Bearings-Part 2:Evaluation of Vibration:ISO14839-2, 2004.
- [3] Mechanical Vibration-Vibration of Rotating Machinery Equipped with Active Magnetic Bearings-Part 3:Evaluation of Stability Margin:ISO14839-3, 2006.
- [4] AHRI Standard ANSI/AHRI Standard 551/591 (SI) , Performance Rating Of Water – Chilling and Heat Pump Water-Heating Pckages Using the Vapor Compression Cycle , 2018.