

具軛鐵軸向雙環扇型式之磁性耦合器傳動性能分析

朱力民*，楊哲豪

摘要

本研究之目的使用釹鐵硼 (NdFeB) N35 高磁能積永久磁鐵之吸力設計一個軸向雙環扇型式磁性聯軸器，使用虛功原理及有限元素法，分析內、外盤間傳輸扭矩及磁力與滑差角、磁極距離、偏位量與扭矩的關係。傳輸扭矩可取內、外盤相對應磁極間氣隙中之磁儲能對滑差角之微分而求得。並比較有無導磁軛鐵(Iron yokes)的效應。在固定軸向距離條件下，傳輸扭矩越大，滑差角越大，滑差角在磁極一半角度時有最大扭矩。在相同滑差角條件下，其軸向距離越小，傳輸扭力就越大，加裝軛鐵可提升的扭矩，最大可提升近 1 倍。使用磁性聯軸器能夠在一定程度的偏軸不對心的情況下工作，軸心偏位時會造成，側向力增加、軸向力減少，進而影響扭力值，造成磁力及扭力不對稱會造成震動現象。

關鍵字：軛鐵、軸向式、雙扇型、磁性聯軸器、扭矩、磁力

朱力民(通訊作者)，國立臺東大學綠色與資訊科技學士學位學程教授、E-mail: lmchu@gm.nttu.edu.tw
楊哲豪，國立臺東大學綠色與資訊科技學士學位學程學生、E-mail: 10622120@gm.nttu.edu.tw
投稿日期：2020 年 12 月 02 日；修改日期：2020 年 12 月 10 日；通過日期：2020 年 12 月 13 日。

Analysis of Transmission Performance of Axial Double Ring Sector Type Magnetic Coupling with Yoke

Li-Ming Chu*, Jhe-Hao Yang

Abstract

The purpose of this study is to design an axial double ring sector type magnetic coupling by using the N35 (NdFeB) magnetic attraction of a permanent magnet. The principle of virtual work and finite element method (FEM) were used to analyze the transmission torque and magnetic force between the inner and outer disks versus slip angle, magnetic pole distance, and offset. The transmission torque was obtained from the differential between the magnetic energy storage and the slip angle in the corresponding magnetic pole gap between the inner and outer disks. And compare the effect of iron yokes or not. The results reveal that the transmission torque of axial double ring sector type magnetic coupling increases with decreasing the axial distance. For the same axial distance, the greater the slip angle, the greater the transmission torque. The slip angle has the maximum torque at half the angle of the magnetic pole. For the same slip angle, the smaller the axial distance, the greater the transmission torque. The transmission torque can be increased by installing an iron yoke, the maximum increasement is nearly 1 times. The axial double ring sector type magnetic coupling can work in a few amounts of shaft offset. When the axis is offset, it will cause the lateral force to increase and the axial force to decrease, which will affect the torque value, and cause the asymmetry of the magnetic force and torque and cause vibration phenomenon.

Keywords: yoke, axial type, double ring sector type, magnetic coupling, torque, magnetic force

Li-Ming Chu (Corresponding Author), Professor, Interdisciplinary Program of Green and Information Technology, National Taitung University. E-mail: lmchu@gm.nttu.edu.tw

Jhe-Hao Yang, student, Interdisciplinary Program of Green and Information Technology, National Taitung University. E-mail: 10622120@gm.nttu.edu.tw

壹、前言

傳統的機械運作所存在的摩擦、震動與噪音等問題是機械工業發展中不可忽視的重要問題，這些問題大多是發生在機械元件之間的相互接觸摩擦產生噪音振動所導致的，以非接觸式的作動方式來改善機械元件之間的接觸作動方式是一個必須探討的課題。隨著高磁能積永久磁鐵材料之進步與發展，使得永磁式機電元件在性能上不斷地被提升，其應用領域也大量地被開發。磁性聯軸器係利用永久磁鐵之磁力作為兩轉軸間扭力傳輸的裝置，其特色是主、從動軸之間不直接接觸之動力傳輸方式，當最大扭矩超過聯軸器之傳輸扭矩時，只會造成聯軸器磁極間之滑移，對於結構無不良影響；所以具過負載保護特性，也具有絕佳的密封特性，又因其未直接接觸，無磨耗及摩擦阻力之損失，可使用於高速運轉中，無機件之磨耗與能源之損失；也可吸收一定程度的軸向或角向位移誤差；因沒有接觸及碰撞，所以無震動噪音現象。

關於軸向型磁性聯軸器已有許多相關之研究文獻，大部分皆將磁塊的幾何形狀設定為扇型，再進行磁力與傳動特性之分析，Baran及Knorr(Baran & Knorr, 1976)以等效磁荷(Equivalent magnetic charges)觀念分析，將兩排磁極展開成平面模式(Plane model)，並且也考慮了導磁軛鐵(Iron yokes)的效應，假設軛鐵未達磁飽和且具有高導磁係數，則軛鐵之效應可視為將永久磁鐵厚度加倍所產生的效果。Fellows(Fellows, 1979)用能量法(Energy method)求解兩不同磁極間的作用力，當一磁極對另一磁極產生相對位移時，假設其磁極間之總通量不變，且集中在位移後之磁極間，則場能量的變化量對位移微分則可得到磁極間因相對位移所產生的力，將磁力乘以施力處的平均半徑及磁極數即可得傳輸扭矩。

有鑑於前人之傳統分析忽略了漏磁效應及磁化非線性，故利用有限元素法(finite-element method-FEM)對航天裝置之徑向型磁性聯軸器進行設計分析(Ferreira, C. & Vaidya, J., 1989)，並使用麥斯威爾應力(Maxwell stress)和虛擬功(virtual-work)法進行結果討論，並比較二維與三維模式的誤差值，結果發現當存在較大的端部洩漏時，由於較大的氣隙或較小的長徑比，二維有限元分析的準確性會降低。但由於三維分析還包括了磁極之端面磁通效應，因此結果較以前研究更為準確。

Yao等人(Yao et al., 1996)以Furlani所導出的扭矩公式進行理論計算，並與FEM的模擬值比較，發現兩者結果非常接近。從其模擬可發現磁性聯軸器的扭力大小與

磁極數目有關，且兩個磁環的間隙距離愈小，其扭力的輸出愈大。Wu等人(Wu et al., 1997)使用2D和3D有限元素法(finite-element method)對磁性聯軸器進行準確分析和優化設計，並與實驗比較，其發現以3D有限元素法計算分析雖然較耗時但較準確，並提出了一種校正2D有限元素法端洩漏的方法。

Huang及Sung (Huang & Sung, 2002)採用片電流模式(Current sheet model)分析方法對同軸型磁性聯軸器進行傳輸扭矩之理論分析，在片電流模式分析方法中，將永久磁鐵之磁極所產生的磁動勢(Magnetomotive force)以分佈於磁鐵厚度方向一層層的薄片電流所產生之磁場等效替代之，推導所得之解析公式並與有限元素法分析結果做比較驗證，證明此解析方法的正確性與實用性。除此之外，以2D及3D有限元素法軟體分析磁性聯軸器之傳輸扭矩，其中3D之分析因考慮了端邊效應，其誤差與實測值相差較小。

Lubin等人(Lubin et al., 2014)以2D理論模型，解析解速度快，但卻缺乏3D有限元素數值解的準確度與實驗數據的誤差較大，為了改善誤差值，一修正因子以被加入解析解公式。2015年Dolisy等人(Dolisy et al., 2015)使用變數分離法求解三維(3D)Maxwell方程式獲得扭矩表達式，此文提出了一種簡單而準確的解析表達式來計算軸向式磁性聯軸器的扭矩。其採用在平均半徑處線性化的假設，然後在3D卡氏坐標中解析此問題。為了顯示扭矩公式的準確性，將結果與3D有限元素法模擬和實驗測試獲得的結果進行比較。由於所提出的公式需要非常少的計算時間，並且直接取決於幾何參數，因此可用於使用多目標基因演算法進行最佳化設計。

本研究利用永久磁鐵之吸力，設計一個新型具軛鐵徑向扇型式之磁性聯軸器，使用虛功原理與有限元素法分析滑差角、磁極距離、偏位量與扭矩的關係，並比較有無導磁軛鐵(Iron yokes)的效應。以期能達到對此磁性聯軸器使用特性上有更深一層的瞭解。

貳、理論分析

本研究採用虛功原理(Principle of virtual work)及有限元素法，分析內、外環間傳輸扭矩及磁力。傳輸扭矩可取內、外環相對應磁極間氣隙中之磁儲能對滑差角之微分而求得。

$$T_c = \frac{\partial W}{\partial \theta} = \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{1}{2} \int_V \left(\int_0^H H \cdot dB \right) dV \right] \quad (1)$$

磁力可取內、外環相對應磁極間氣隙中之磁儲能對位置座標之微分而求得。

$$F = \frac{\partial W}{\partial q_i} = \frac{\partial}{\partial q_i} \left[\frac{1}{2} \int_V \left(\int_0^H H \cdot dB \right) dV \right] \quad (2)$$

式中 W 為氣隙中之磁儲能， θ 為滑差角， B 為磁通密度， H 為磁場強度， V 為內外環相對應磁極間之氣隙體積， q_i 為在 i 方向的廣義座標。

本研究之目的在於利用永久磁鐵之吸力，設計一個新型的雙環扇型之軸向式的磁性聯軸器。磁性聯軸器磁盤示意圖如圖 1 所示，其第一轉盤，係設有磁性件，且磁性件係由二個以上 N-S 磁極交互排列方式佈列為二扇型環狀者，第二轉盤之構造與磁塊排列，與第一轉盤相同，兩盤異極相對。磁性聯軸器的結構以不導磁的鋁合金為基材，其底部為軛鐵，軛鐵為低碳鋼 1010，磁性聯軸器之磁塊部分，則選用釹鐵硼 (NdFeB) 磁能積較高的材料，其殘留磁通密度 (Br) 約為 1.23Tesla，是目前較常被使用的材料，本研究在磁盤上使用 10 個磁極以 N-S 磁極交互排列方式佈列為二扇型環狀者，如圖 1 所示，本研究是採用有限元素分析法進行模擬分析，以各不同磁盤間距及角度進行分析。

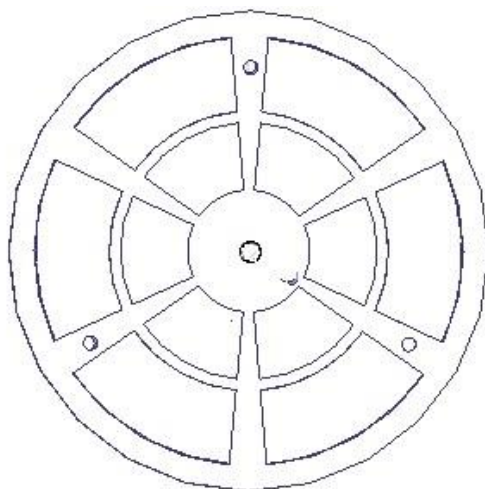


圖 1. 磁性聯軸器磁盤示意圖

參、結果與討論

本研究為具軛鐵軸向雙環扇型式之磁性耦合器，使用有限元素法進行模擬分析。圖 2 是聯軸器的軸向扭力誤差與格點數量的關係圖，圖中顯示，格點較少時扭力誤差值較大，但當格點超過 6000 時其扭力誤差值結果趨於穩定，本研究採用 10000 格點進行計算。

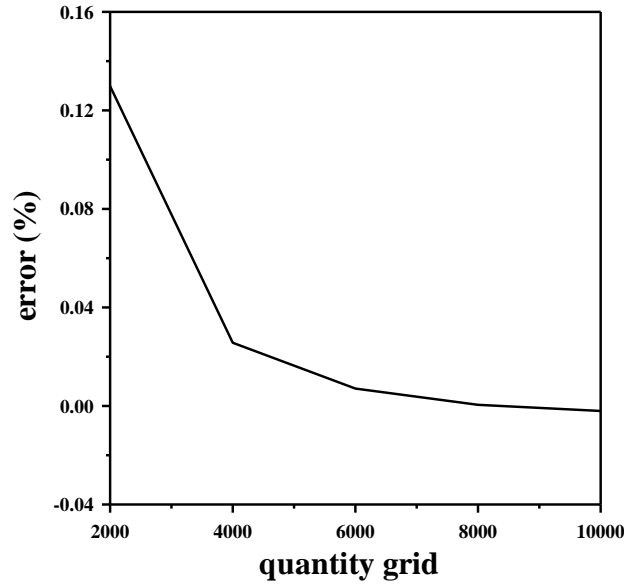


圖 2. 軸向扭力誤差與格點關係圖

圖 3 是使用有限元素法計算在 $B_r=1.23\text{Tesla}$ 、磁極數為 12、磁盤間距為 10mm、滑差角為 30 度的條件下有、無軛鐵聯軸器之磁通密度與向量分佈圖。圖中顯示磁盤設計漏磁現象並不明顯，磁盤滑移 30 度時為最大滑差角致使磁極交錯排列，藉著同極相斥及異極相吸而產生連結的作用。

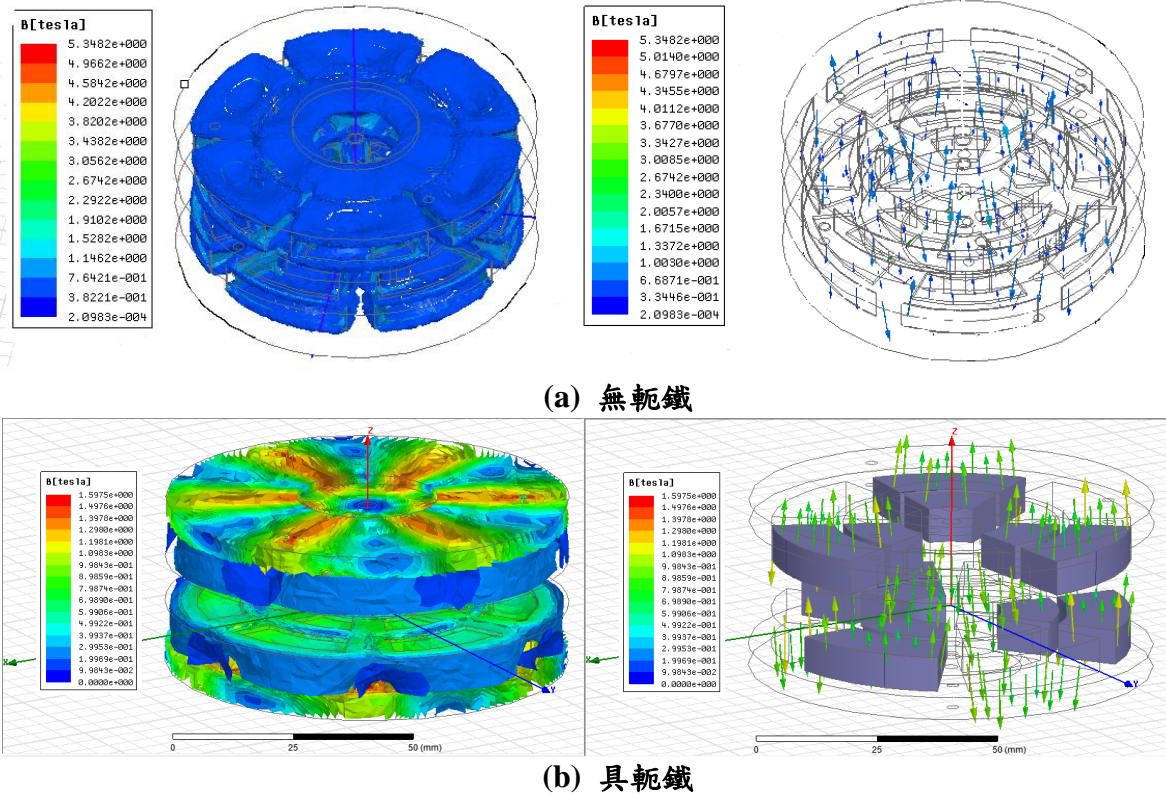


圖 3. 磁性聯軸器扭矩分析磁通密度與向量分佈圖

圖 4 是使用有限元素法計算在 $B_r=1.23\text{Tesla}$ 、磁極數為 12、滑差角為 0 度的條件下，有、無軛鐵聯軸器的軸向磁力與磁極間隙大小模擬值的關係圖，圖中顯示，軸向磁力大小與磁極間隙的平方成反比，加裝軛鐵之後軸向磁力值明顯的上升，在磁盤間距為 5mm，有軛鐵軸向磁力值為 433.58 N，無軛鐵軸向磁力值為 210.06 N，加裝軛鐵之軸向磁力值提升 106.41%。在磁盤間距為 9mm，有軛鐵軸向磁力值為 228.53 N，無軛鐵軸向磁力值為 111.23 N，加裝軛鐵之軸向磁力值提升 105.46%。在磁盤間距為 14mm，有軛鐵軸向磁力值為 110.32 N，無軛鐵軸向磁力值為 53.50 N，加裝軛鐵之軸向磁力值提升 106.21%。在磁盤間距為 19mm，有軛鐵軸向磁力值為 55.97 N，無軛鐵軸向磁力值為 25.16 N，加裝軛鐵之軸向磁力值提升 122.46%。在磁盤間距為 23mm，有軛鐵軸向磁力值為 33.16 N，無軛鐵軸向磁力值為 15.61 N，加裝軛鐵之軸向磁力值提升 112.43%。

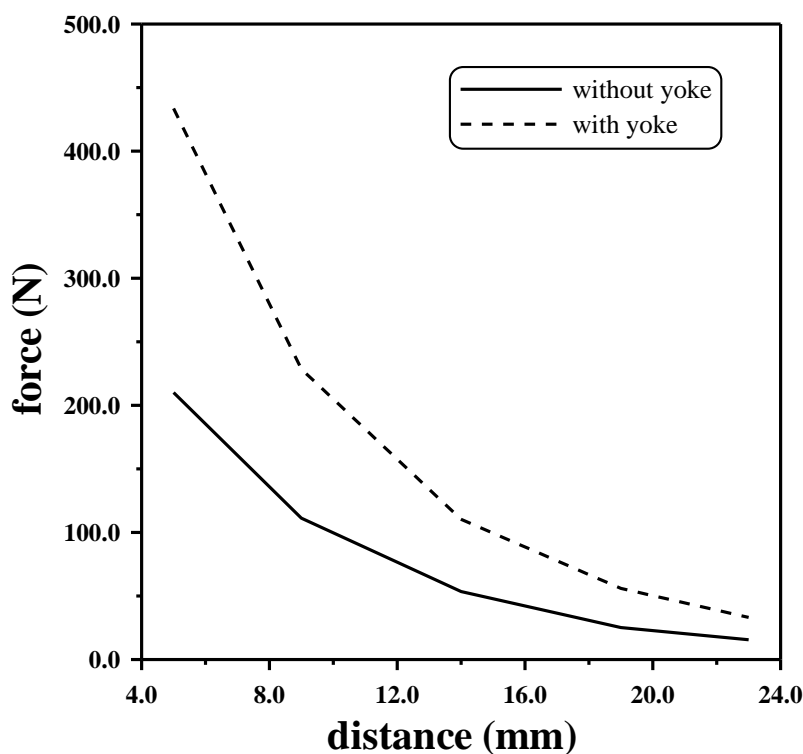


圖 4. 有、無軛鐵軸向磁力與磁極間隙大小關係圖

圖 5、6 分別是使用有限元素法計算在 $B_r=1.23\text{Tesla}$ 、磁極數為 12、在不同磁盤間距的條件下，有、無軛鐵聯軸器的軸向磁力與滑差角大小模擬值的關係圖，因滑差角為 0 度時，磁塊異極相對，軸向磁力最大，軸向磁力會隨著滑差角增大而漸減，當滑差角趨近於單一磁極所跨角度約一半時，總軸向磁力會為零，再隨著滑差角增大，磁力會變成斥力並隨著滑差角增大而漸增。此軸向磁力會影響到磁性聯軸器的

傳輸效率，軸向磁力愈大，其對磁性聯軸器傳輸效率之影響愈大。圖中顯示，加裝軛鐵之後軸向磁力值明顯的上升，在磁盤間距為 5mm，滑差角為 0 度時，有軛鐵軸向磁力值為 433.57 N，無軛鐵軸向磁力值為 210.06 N，加裝軛鐵之軸向磁力值提升 106.41%。滑差角為 15 度時，有軛鐵軸向磁力值為 309.12 N，無軛鐵軸向磁力值為 140.23 N，加裝軛鐵之軸向磁力值提升 120.44%。在磁盤間距為 9mm，滑差角為 0 度時，有軛鐵軸向磁力值為 228.53 N，無軛鐵軸向磁力值為 111.22 N，加裝軛鐵之軸向磁力值提升 105.47%。滑差角為 15 度時，有軛鐵軸向磁力值為 163.57N，無軛鐵軸向磁力值為 76.30 N，加裝軛鐵之軸向磁力值提升 114.36%。在磁盤間距為 14mm，滑差角為 0 度時，有軛鐵軸向磁力值為 110.32 N，無軛鐵軸向磁力值為 53.50N，加裝軛鐵之軸向磁力值提升 106.22%。滑差角為 15 度時，有軛鐵軸向磁力值為 78.49 N，無軛鐵軸向磁力值為 37.19 N，加裝軛鐵之軸向磁力值提升 111.05%。在磁盤間距為 19mm，滑差角為 0 度時，有軛鐵軸向磁力值為 55.97 N，無軛鐵軸向磁力值為 25.16 N，加裝軛鐵之軸向磁力值提升 122.48%。滑差角為 15 度時，有軛鐵軸向磁力值為 39.83 N，無軛鐵軸向磁力值為 17.10 N，加裝軛鐵之軸向磁力值提升 132.95%。在磁盤間距為 23mm，滑差角為 0 度時，有軛鐵軸向磁力值為 33.16 N，無軛鐵軸向磁力值為 15.61 N，加裝軛鐵之軸向磁力值提升 112.43%。滑差角為 15 度時，有軛鐵軸向磁力值為 23.69 N，無軛鐵軸向磁力值為 10.84 N，加裝軛鐵之軸向磁力值提升 118.58%。

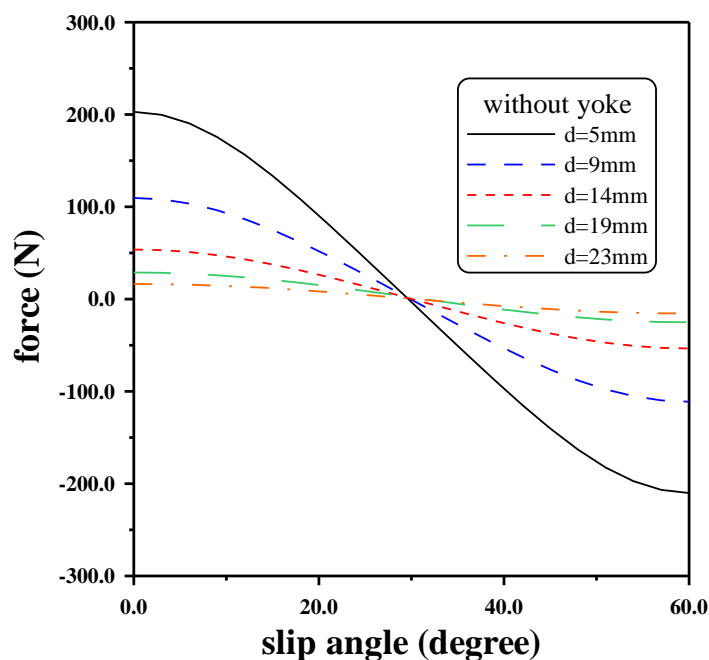


圖 5. 無軛鐵軸向磁力與滑差角關係圖

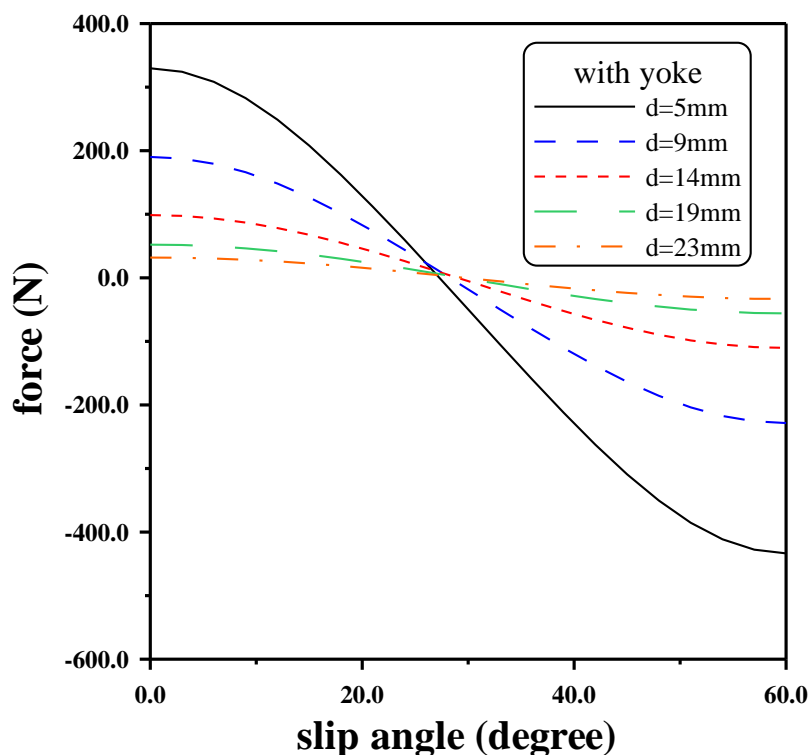


圖 6. 有軛鐵軸向磁力與滑差角關係圖

圖 7、8 分別是使用有限元素法計算在 $B_r=1.23\text{Tesla}$ 、磁極數為 12、在不同磁盤間距的條件下，有、無軛鐵聯軸器的扭矩與滑差角大小模擬值的關係圖，圖中顯示，扭矩愈大所產生的滑差角愈大，當扭矩大到其產生之滑差角為單一磁極所跨角度的一半時即 30 度，此時之扭矩值為最大值，軸向磁力會為零，當滑差角超過 30 度時，其扭矩值會隨著滑差角度增加而減小。圖中顯示，加裝軛鐵之後扭矩值明顯的上升，在磁盤間距為 5mm，滑差角為 15 度時，有軛鐵軸向扭矩值為 5.86 Nm，無軛鐵軸向扭矩值為 3.04 Nm，加裝軛鐵之扭矩值提升 92.56%，滑差角為 30 度時，有軛鐵軸向扭矩值為 7.94 Nm，無軛鐵軸向扭矩值為 4.04 Nm，加裝軛鐵之扭矩值提升 96.65%。在磁盤間距為 9mm，滑差角為 15 度時，有軛鐵軸向扭矩值為 3.39 Nm，無軛鐵軸向扭矩值為 1.71 Nm，加裝軛鐵之扭矩值提升 97.96%，滑差角為 30 度時，有軛鐵軸向扭矩值為 4.70 Nm，無軛鐵軸向扭矩值為 2.36 Nm，加裝軛鐵之扭矩值提升 99.45%。在磁盤間距為 14mm，滑差角為 15 度時，有軛鐵軸向扭矩值為 1.78 Nm，無軛鐵軸向扭矩值為 0.87 Nm，加裝軛鐵之扭矩值提升 104.60%，滑差角為 30 度時，有軛鐵軸向扭矩值為 2.49 Nm，無軛鐵軸向扭矩值為 1.22 Nm，加裝軛鐵之扭矩值提升 104.10%。在磁盤間距為 19mm，滑差角為 15 度時，有軛鐵軸向扭矩值為 0.96 Nm，無軛鐵軸向扭矩值為 0.46 Nm，加裝軛鐵之扭矩值提升 108.56%，滑差角為 30 度時，

有軛鐵軸向扭矩值為 1.36Nm，無軛鐵軸向扭矩值為 0.65Nm，加裝軛鐵之扭矩值提升 108.46%。在磁盤間距為 23mm，滑差角為 15 度時，有軛鐵軸向扭矩值為 0.60 Nm，無軛鐵軸向扭矩值為 0.28 Nm，加裝軛鐵之扭矩值提升 114.94%，滑差角為 30 度時，有軛鐵軸向扭矩值為 0.85 Nm，無軛鐵軸向扭矩值為 0.40 Nm，加裝軛鐵之扭矩值提升 112.88%。

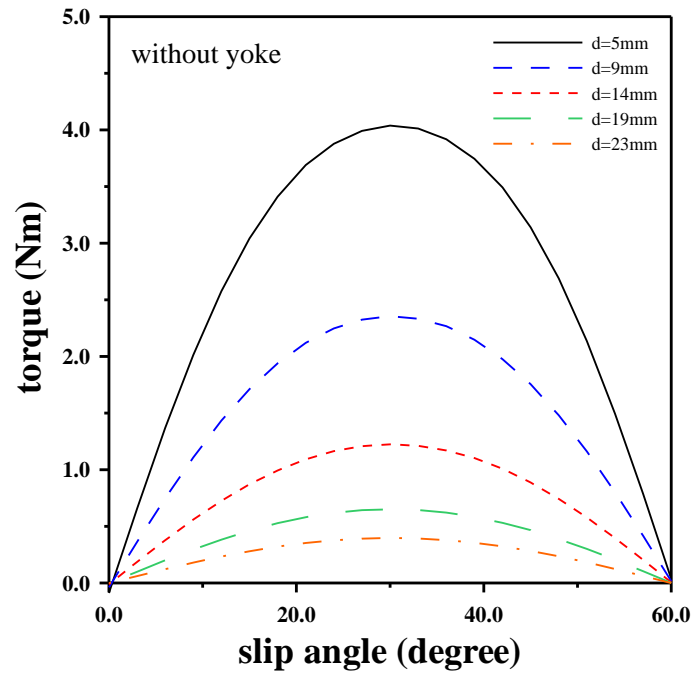


圖 7. 無軛鐵扭矩與滑差角關係圖

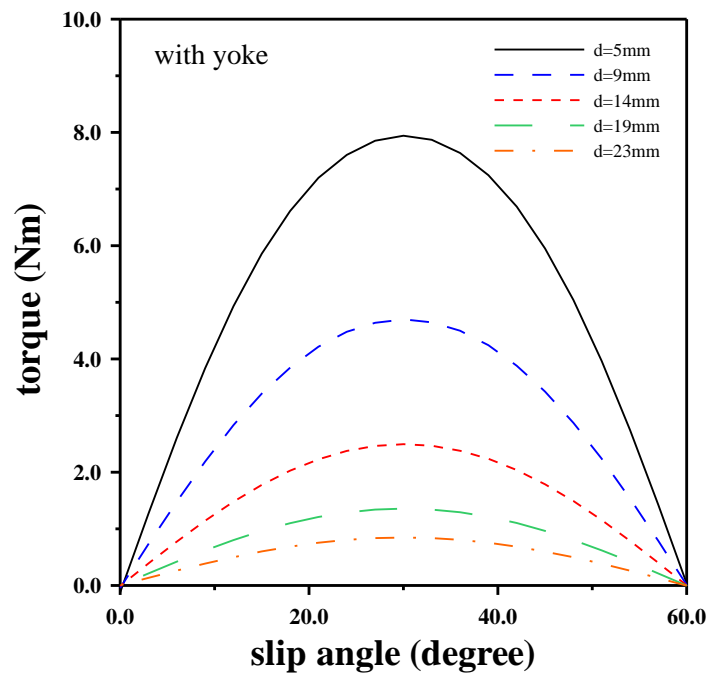


圖 8. 具軛鐵扭矩與滑差角關係圖

圖 9 是使用有限元素法計算在 $B_r=1.23\text{Tesla}$ 、磁極數為 12、滑差角為 30 度時，在不同磁盤間距的條件下，有、無軛鐵聯軸器的最大扭矩與磁極間隙大小模擬值的關係圖，圖中顯示，在最大扭矩值部分，最大扭矩值會隨著磁極間隙愈大而減小，扭矩與磁極間隙平方約成反比，這是因為磁力大小是與距離的平方成反比。圖中顯示，最大扭矩值會隨著磁極間隙愈大而減小，扭矩與磁極間隙平方約成反比，這是因為磁力大小是與距離的平方成反比。圖中顯示，加裝軛鐵之後扭矩值明顯的上升，在磁盤間距為 5mm，有軛鐵最大扭矩值為 7.94 Nm，無軛鐵最大扭矩值為 4.04 Nm，加裝軛鐵之扭矩值提升 96.53%，在磁盤間距為 9mm，有軛鐵最大扭矩值為 4.70 Nm，無軛鐵最大扭矩值為 2.36Nm，加裝軛鐵之扭矩值提升 99.15%，在磁盤間距為 14mm，有軛鐵最大扭矩值為 2.49 Nm，無軛鐵最大扭矩值為 1.22 Nm，加裝軛鐵之扭矩值提升 104.10%，在磁盤間距為 19mm，有軛鐵最大扭矩值為 1.36 Nm，無軛鐵最大扭矩值為 0.65 Nm，加裝軛鐵之扭矩值提升 109.23%，在磁盤間距為 23mm，有軛鐵最大扭矩值為 0.85 Nm，無軛鐵最大扭矩值為 0.4 Nm，加裝軛鐵之扭矩值提升 112.50%，

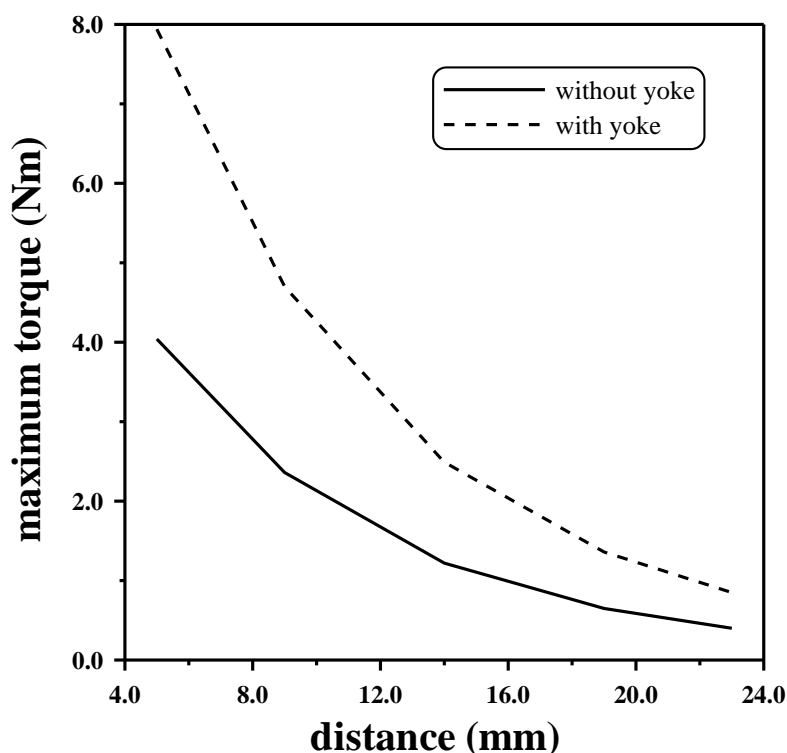


圖 9. 有、無軛鐵最大扭矩與磁極間隙大小比較圖

在傳動軸架設過程中難免會有誤差的產生，本文亦針對聯軸器軸中心的徑向偏移誤差及角向偏位誤差對傳輸扭矩的影響進行探討。圖 10 是使用有限元素法計算在 $B_r=1.23\text{Tesla}$ 、磁極數為 12、有、無軛鐵聯軸器在磁極間隙為 7mm 條件下，不同徑

向偏移量時，滑差角與傳輸扭矩的模擬值，圖中顯示，無軛鐵聯軸器在 Y 方向之徑向偏移 4mm 時，相同滑差角的條件下，其傳輸扭矩變化率為-340.70%~374.70%，滑差角越小，扭力減少率越大，當滑差角超過 30 時，滑差角越大，扭力增加率越大，扭力最大值為 3.36N，其所對應的滑差角為 42 度，Y 方向之徑向偏移 8mm 時，相同滑差角的條件下，其傳輸扭矩變化率為-575.86%~593.44%，滑差角越小，扭力減少率越大，當滑差角超過 33 時，滑差角越大，扭力增加率越大，扭力最大值為 3.71N，其所對應的滑差角為 48 度。圖中顯示，具軛鐵聯軸器在 Y 方向之徑向偏移 4mm 時，相同滑差角的條件下，其傳輸扭矩變化率為-322.68%~340.33%，滑差角越小，扭力減少率越大，當滑差角超過 30 時，滑差角越大，扭力增加率越大，扭力最大值為 6.53N，其所對應的滑差角為 39 度，Y 方向之徑向偏移 8mm 時，相同滑差角的條件下，其傳輸扭矩變化率為-558.41%~555.49%，滑差角越小，扭力減少率越大，當滑差角超過 33 時，滑差角越大，扭力增加率越大，扭力最大值為 7.15N，其所對應的滑差角為 48 度。偏移量為 0 時，扭力最大值所對應的滑差角為 30 度，然而隨著偏移量越大，其扭力最大值所對應的滑差角會越大。

圖 11 是使用有限元素法計算在 $B_r=1.23\text{Tesla}$ 、磁極數為 12、有、無軛鐵聯軸器在磁極間隙為 7mm 條件下，X 及 Y 方向之不同徑向偏移量時，滑差角與傳輸扭矩的模擬值，圖中顯示，無軛鐵聯軸器，徑向偏移 $X=4\text{mm}$ 及 $Y=4\text{mm}$ 時，相同滑差角的條件下，其傳輸扭矩變化率為-147.99%~87.05%，滑差角越小，扭力增加率越大，當滑差角超過 15 時，滑差角越大，扭力減少率越大，扭力最大值為 2.71N，其所對應的滑差角為 24 度，徑向偏移 $X=8\text{mm}$ 及 $Y=8\text{mm}$ 時，相同滑差角的條件下，其傳輸扭矩變化率為-248.90%~99.76%，滑差角越小，扭力增加率越大，當滑差角超過 6 時，滑差角越大，扭力減少率越大，扭力最大值為 1.75N，其所對應的滑差角為 21 度，圖中顯示，具軛鐵聯軸器，徑向偏移 $X=4\text{mm}$ 及 $Y=4\text{mm}$ 時，相同滑差角的條件下，其傳輸扭矩變化率為-133.94%~84.79%，滑差角越小，扭力增加率越大，當滑差角超過 15 時，滑差角越大，扭力減少率越大，扭力最大值為 5.38N，其所對應的滑差角為 27 度，徑向偏移 $X=8\text{mm}$ 及 $Y=8\text{mm}$ 時，相同滑差角的條件下，其傳輸扭矩變化率為-230.67%~100.63%，滑差角越小，扭力增加率越大，當滑差角超過 6 時，滑差角越大，扭力減少率越大，扭力最大值為 3.54N，其所對應的滑差角為 21 度，偏移量為 0 時，扭力最大值所對應的滑差角為 30 度，然而隨著 X 及 Y 的徑向偏移，偏移量越大，其扭力最大值所對應的滑差角會越小。

圖 12 是使用有限元素法計算在 $B_r=1.23\text{Tesla}$ 、磁極數為 12、無軛鐵聯軸器在磁極間隙為 7mm 條件下，不同徑向偏移量時，滑差角與磁力的模擬值，圖中顯示，無軛鐵聯軸器在 Y 方向之徑向偏移時，偏移量越大， f_z 值越小， f_y 值越大， f_x 值變動不大。側向力增加、軸向力減少。圖 13 是使用有限元素法計算在 $B_r=1.23\text{Tesla}$ 、磁極數為 12、具軛鐵聯軸器在磁極間隙為 7mm 條件下，不同徑向偏移量時，滑差角與磁力的模擬值，圖中顯示，具軛鐵聯軸器在 Y 方向之徑向偏移時，偏移量越大， f_z 值越小， f_y 值越大， f_x 值變動不大。側向力增加、軸向力減少。

圖 14 是使用有限元素法計算在 $B_r=1.23\text{Tesla}$ 、磁極數為 12、無軛鐵聯軸器在磁極間隙為 7mm 條件下，不同 X 及 Y 方向徑向偏移量時，滑差角與磁力的模擬值，圖中顯示，無軛鐵聯軸器在 X 及 Y 方向徑向偏移時，偏移量越大， f_z 值越小， f_y 值越大， f_x 值越大。側向力增加、軸向力減少。圖 15 是使用有限元素法計算在 $B_r=1.23\text{Tesla}$ 、磁極數為 12、具軛鐵聯軸器在磁極間隙為 7mm 條件下，不同 X 及 Y 方向徑向偏移量時，滑差角與磁力的模擬值，圖中顯示，具軛鐵聯軸器在 X 及 Y 方向徑向偏移時，偏移量越大， f_z 值越小， f_y 值越大， f_x 值越大。側向力增加、軸向力減少。由上述所示，軸心偏位時會造成，側向力增加、軸向力減少，進而影響扭力值，磁力及扭力不對稱會造成震動現象。

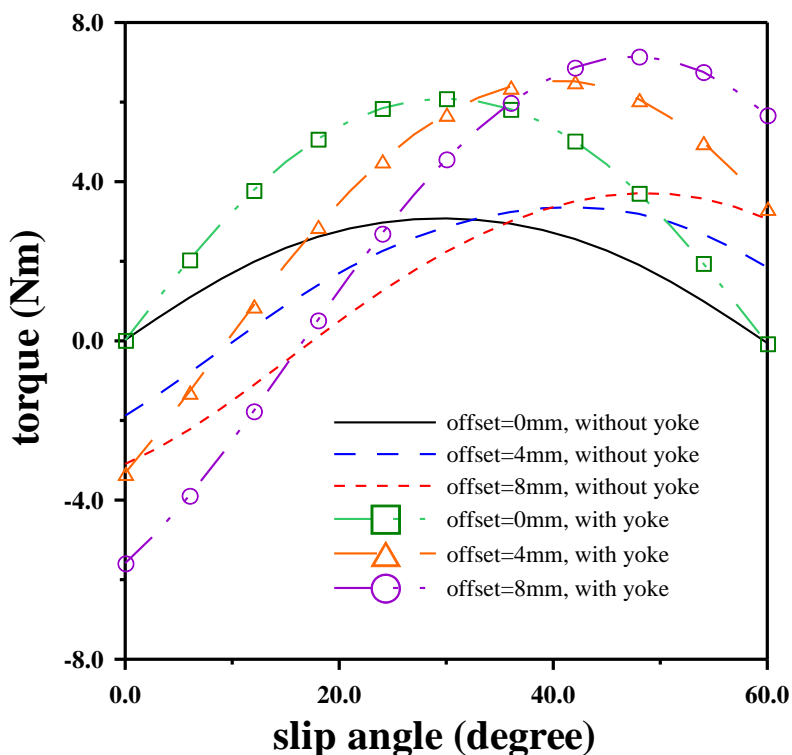


圖 10. 無軛鐵偏移量、扭矩與滑差角關係圖

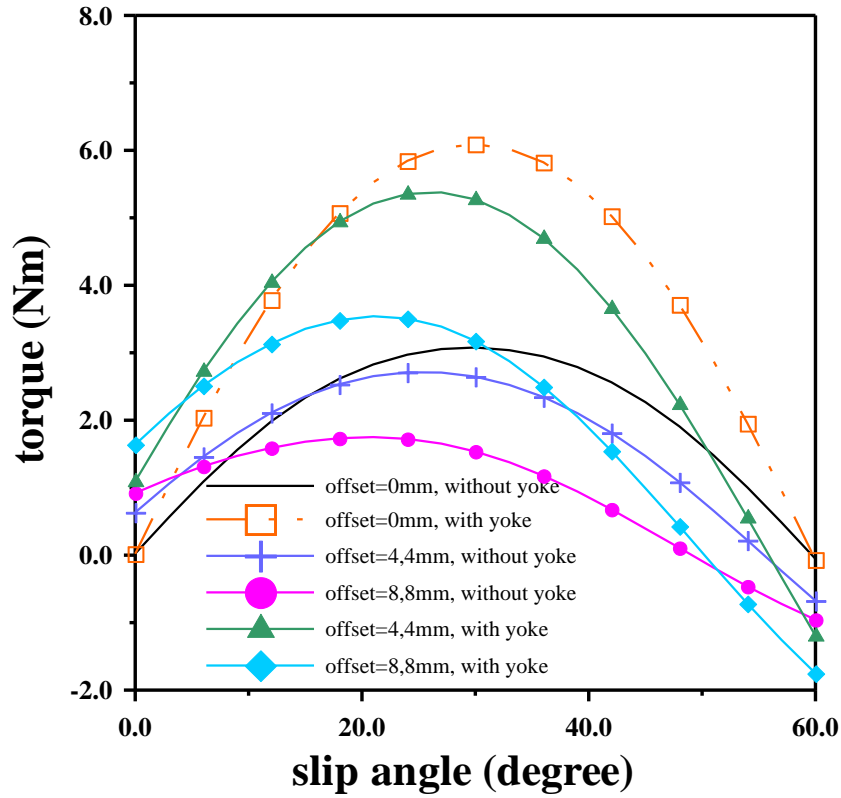


圖 11. 具軛鐵偏移量、扭矩與滑差角關係圖

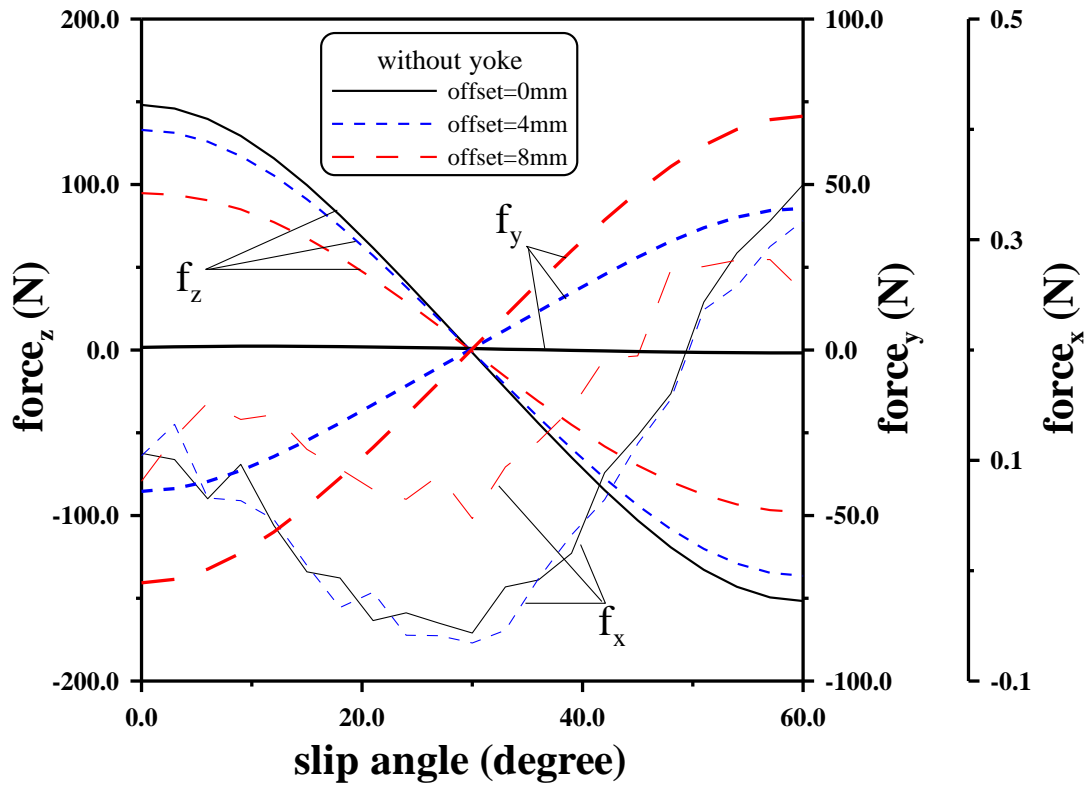


圖 12. 無軛鐵偏移量、磁力與滑差角關係圖

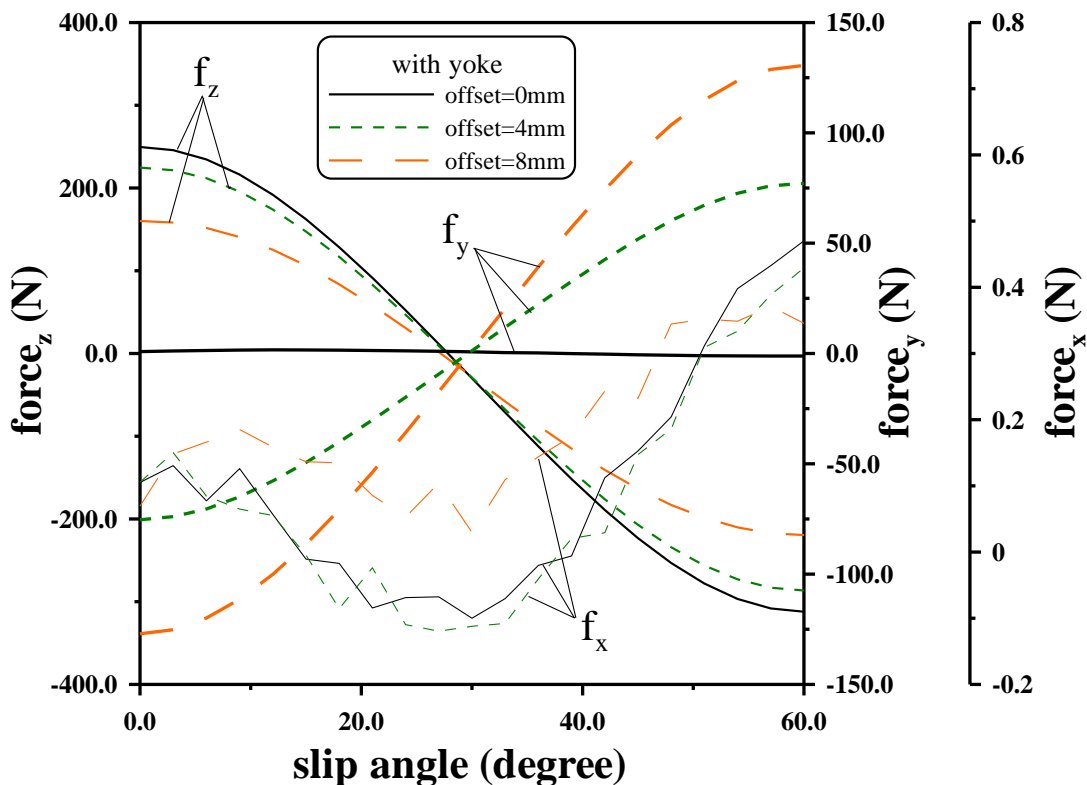


圖 13. 具軛鐵偏移量、磁力與滑差角關係圖

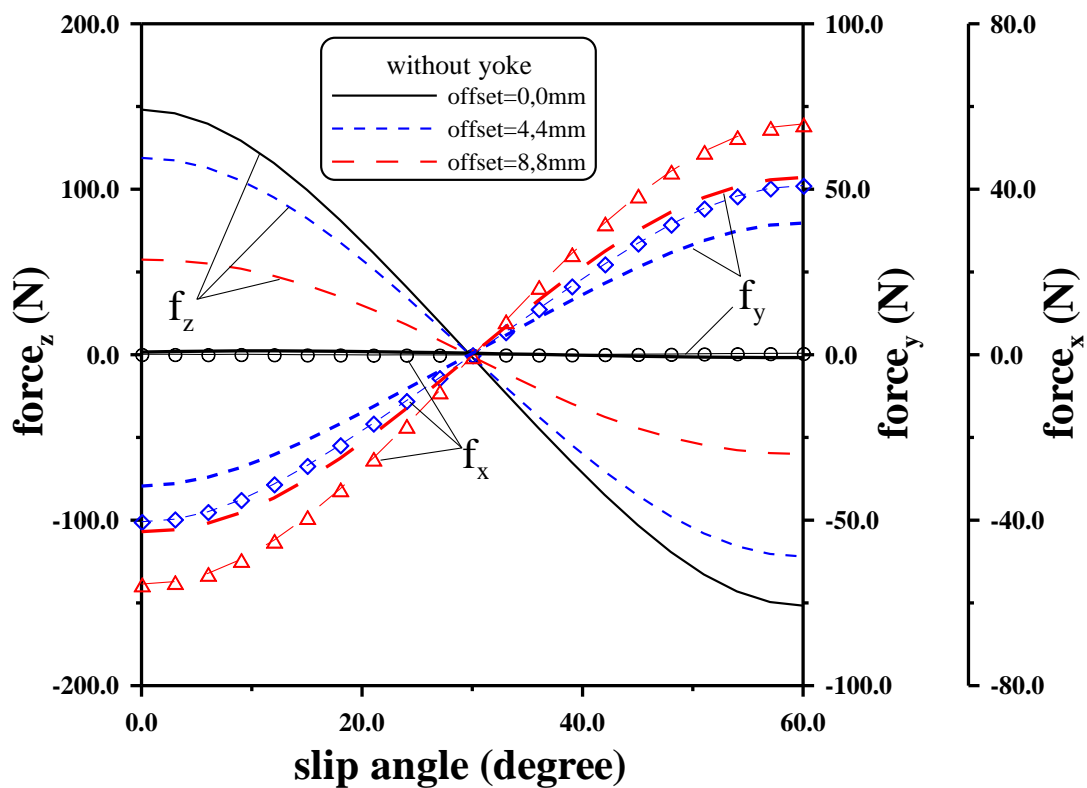


圖 14. 無軛鐵雙偏移量、磁力與滑差角關係圖

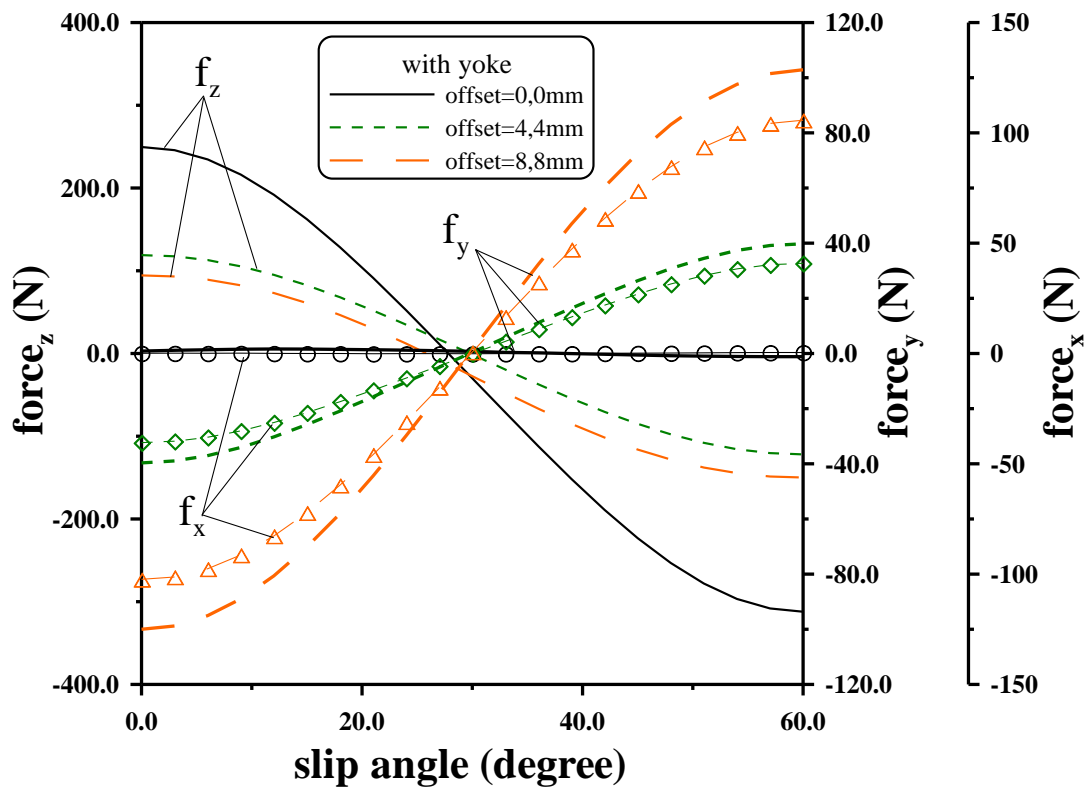


圖 15. 具軛鐵雙偏移量、磁力與滑差角關係圖

肆、結論

本研究使用釹鐵硼 (NdFeB) N35 高磁能積的材料設計一個具軛鐵軸向雙環扇型式之磁性耦合器，使用虛功原理與有限元素法分析滑差角、磁極距離、偏位量與磁力及扭矩的關係，並比較有、無導磁軛鐵(Iron yokes)的效應。總結以上的結果可得到以下的結論：

1. 本研究所設計之雙環扇型式磁性聯軸器會隨著磁極間隙越大而軸向磁力越小、傳輸扭矩也越小。
2. 加裝軛鐵可提升近一倍的磁力及扭力。
3. 在固定的磁極間隙條件下，傳輸扭矩越大，滑差角越大，滑差角在磁極一半角度時有最大扭矩。
4. 軸心偏位時會造成，側向力增加、軸向力減少，進而影響扭力值，磁力及扭力不對稱會造成震動現象。
5. 磁極間隙固定的條件下，單向徑向偏移時，滑差角越小，扭力減少率越大，當滑差角超過一交會點時，滑差角越大，扭力增加率越大。
6. 磁極間隙固定的條件下，雙向徑向偏移時，滑差角越小，扭力減少率越大，當滑差角超過一交會點時，滑差角越大，扭力減少率越大。

引用文獻

- B. Dolisy, S. Mezani, T. Lubin, J. L  v  que (2015). A new analytical torque formula for axial field permanent magnets coupling, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 30(3).
- C.J. Fellows (1979). *Permanent Magnet Couplings*, CME June, pp. 70-84
- Ferreira, C. and Vaidya, J., (1989). Torque Analysis of Permanent Magnet Coupling Using 2D and 3D Finite Elements, *IEEE Transactions on Magnetics*, 25(4), 3080-3082.
- S.M. Huang and C.K. Sung (2002). Analytical Analysis of Magnetic Couplings with Parallelepiped Magnets, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 239/1-3, 614-616.
- T. Lubin, S. Mezani, A. Rezzoug (2014). Experimental and Theoretical Analyses of Axial Magnetic Coupling Under Steady-State and Transient Operations, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(8).
- W. Baran and M. Knorr (1976). Synchronous Couplings with SmCo5 Magnets, **2nd Int. Workshop on Rare-Earth Cobalt Permanent Magnets and Their Applications**, Daton, Ohio.
- W. Wu, H. C. Lovatt, and J. C. Dunlop (1997). Analysis and design optimisation of magnetic couplings using 3D finite element modelling, *IEEE Trans Magn.*, 33(5), 4083–4085.
- Y.D. Yao, D.R. Huang, C.C. Hsieh, D.Y. Chiang, S.J. Wang, and T.F. Ying (1996). The RadialMagnetic Coupling Studies of Perpendicular Magnetic Gears, *IEEE Transactions on Magnetics*, 32(5), 5061-5063.