

2018 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 100003

參展科別 工程學

作品名稱 **Design and Implementation of a Spherical
Induction Wheel Motor in Electric Vehicle**

得獎獎項 大會獎：一等獎
美國 ISEF 正選代表

就讀學校 嘉義市政府教育處

嘉義縣私立協同高級中學

指導教師 謝旻甫

作者姓名 顏伯勳、李尚融

關鍵詞 **Spherical Induction Motor、Electric Vehicle、
Autonomous Car**

作者簡介



我們是來自嘉義市的學生－顏伯勳與李尚融，專長為電機設計、電機驅動與電機控制。我們致力於研究球型馬達，並在成功大學電機研究所、新營南方創客基地與勞動力發展署－雲嘉南職業訓練中心等地點進行我們的研究與實作。

以下是團隊的官方網站：<https://goo.gl/Eiwu0> 與 Youtube 頻道：<https://goo.gl/anJncA>。我們預計在 2018 年完成世界上第一台可實際運作的球形輪胎電動車，並持續鑽研球型電機的控制以發展球型關節等應用。

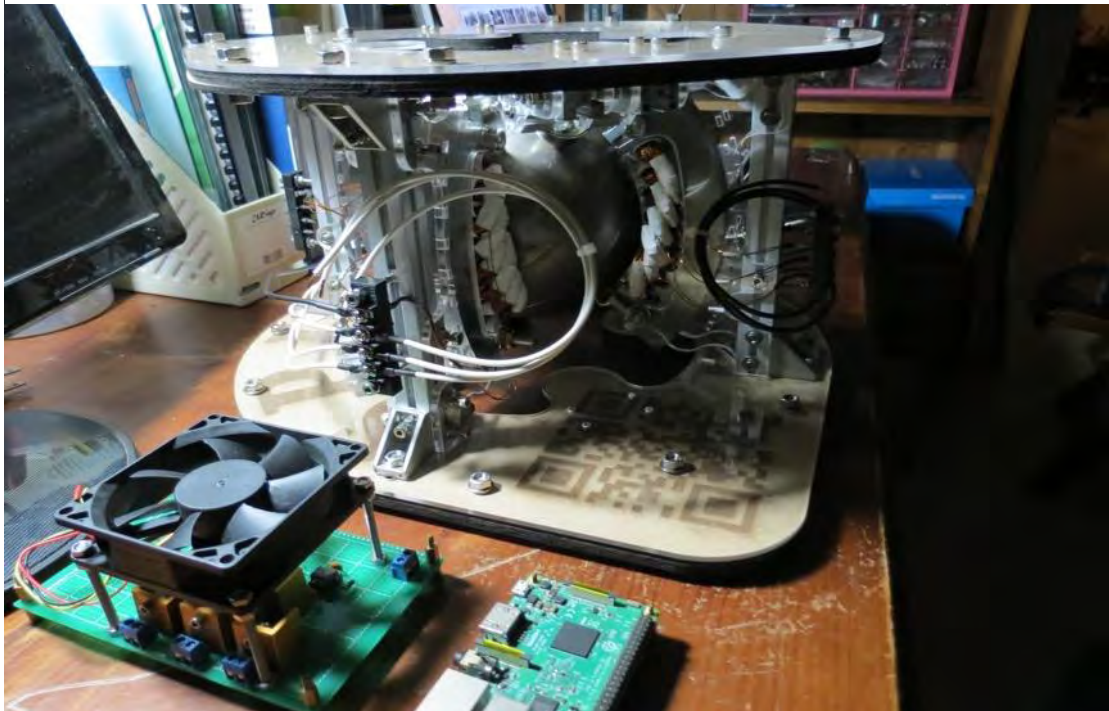
摘要

本研究提出以「球型感應馬達(Spherical Induction Motor)」直接作為電動車球型輪胎的想法。四顆球型輪胎以三軸自由度旋轉的方式，將提供電動車更高的靈活性。

本研究聚焦在「球形感應馬達」原型機的開發。透過四個方法：等效電路理論、有限元素分析、實作與實驗，研究了球型感應馬達的四個面向：電機設計、電機實作、電機驅動與電機控制。以電機設計、電機實作證明了構想的可行性，並在建立了球型感應馬達完整的電機機械理論後，進行了電機驅動與電機控制。

最後，本研究實作出一架可運轉的球形感應馬達，並在建立完整的馬達數學模型後，以 V/F 控制法完成轉速與轉向的開迴路控制。本研究希望這部球型感應馬達，未來將能應用在以球型輪胎為動力裝置的電動載具上。

Figure 1: 作品實體圖- 本研究所設計、製作的球型感應馬達



Abstract

In this paper, researcher proposed a concept of “replace the wheels of Electric Vehicle by Spherical Induction Motor(SIM).” Using four spherical wheels rotate in three degrees of freedom, provide the Electric Vehicles higher agility.

The development of the prototype SIM is focused in this paper. Throughout four ways, Equivalent Circuit, Finite Element Analysis (FEA), motor construction and experiment, researcher present four main aspects, including motor designing, implementation, driving and controlling. Researcher implement a SIM through designing and implementation. SIM driving and controlling is also based on the complete electric machinery theory of SIM that derived in this paper.

To sum up, this research realize a functional SIM. Based on mathematic model, using V/F Open-Loop control method to control the speed and direction of SIM. Researcher hope to apply this SIM as the propulsion system of a Electric Vehicle in the future.

Figure 2: 作品實體圖- 本研究所設計、製作的球型感應馬達本體與驅動器



符號表

d_{max}	磁通到達最遠距離	μ_0	真空磁導率
I_2	二次側電流	τ_d	雙軸造成的最大轉矩
k_1, k_2	由 Eq. 17, 18, 19 定義	τ_{fric}	摩擦轉矩
k_3, k_4		τ_{max}	堵轉轉矩
L_1	一次側漏電感	τ_p	極距
L_{EW}	端部漏電感	τ_s	單軸造成的最大轉矩
L_m	激磁電感	ϕ_{AG}	氣隙磁通
L_t	端部總長度	ω_m	機械轉速
L_t	齒部漏電感	ω_s	同步轉速
N_{fric}	摩擦力	A	向量勢
P_{AG}	氣隙功率	A	截面積
P_{out}	機械功率	B	磁場
P_{rl}	轉子銅損	d	齒寬
R_1	一次側電阻	E	電場
R_2	二次側電阻	f	頻率
R_{AG}	氣隙磁阻	h	氣隙深度
R_c	鐵損電阻	I	電流
R_R	轉子磁阻	J	轉動慣量
T_{Load}	負載轉矩	K	使節距為整數的係數
V_A	A 相電壓	L	電感
V_B	B 相電壓	N	匝數
V_C	C 相電壓	p	極數
V_p	電壓峰值	Q	相數
\hat{V}	交流電壓	R	電阻
w_1	線圈總匝數	S	定子槽數
X_2	二次側電抗	V	電勢
X_m	激磁電抗	E	電動勢
Y_p	繞線截距	λ	磁交鏈
Z_1	一次側阻抗	μ	磁導率
Z_2	二次側阻抗	ρ	電阻率
Z_{BT}	堵轉測試時的單相阻抗	ϕ	磁通量
Z_m	鐵損電阻與電抗並連成的阻抗	ω	轉速
Z_{NL}	無載測試時的阻抗		

壹、前言

一、研究動機

電動車、自駕車的趨勢，已必然為時代的下一個主流。

其中，電動車在能源與環保意識抬頭的今天，各大車廠已逐漸推出油電混合車輛、純電動車輛，來取代以引擎為動力來源的傳統汽車，而這也正是因為電動車有著能源利用率高、空氣污染低與低噪音等傳統車輛所沒有的優勢。而自駕車相關的研究，也隨著近年人工智慧(Artificial Intelligence, AI)的蓬勃發展而興起。這兩種技術的結合，勢必將成為新一代的趨勢，錯不了的。

研究者觀察到，在電動車輛 AI 化的同時，這些採用全新技術的電動車、自駕車，在運動的機械結構上，與 1927 年福特公司出產的最早的汽車：T 型車 (Ford Model T) 幾乎沒有太大差異。傳統車輛從動力來源到傳動、轉向與煞車系統，占用汽車內部大量的體積，只能達成油門所操控的前進與後退、方向盤所操縱的左轉與右轉。

就靈活性而言，倒車入庫、路邊停車與過彎時的迴轉半徑，需要相當大的移動空間，而造成使用者的不方便；就安全性而言，遭遇交通事故或閃避來車的反應上，傳統車輛受到機械結構的限制，通常只具有圓弧形的閃避路徑，而難以快速的因應交通意外。

因此，本研究所提出「以球型感應馬達作為電動車的四輪動力裝置」的構想，整合了汽車傳動、轉向與煞車系統，不只在汽車內部釋出更多空間，更賦予電動車輛往任意角度行駛、避障的能力。這種設計正是為了下一個時代的電動車、自駕車而生，並切合未來人類在擁擠的都市地區內，所需要的高靈活、高安全性所設計的球型輪胎。

二、研究目的

本研究的主軸在於設計、實作出「球型感應馬達」以證明其可行性；並建立球型感應馬達的電機機械特性，進行驅動、控制。以下條列本研究所希望探討的幾項主題：

- (一) 電機設計：以理論、模擬方式訂出機械、電氣規格
- (二) 電機實作：完成球型馬達實體以證明構想的可行性
- (三) 電機驅動：以 SPWM 驅動法實現電壓、頻率控制
- (四) 電機控制：以 V/F 控制法完成轉速開迴路控制

三、文獻回顧

西元 1950 年到 2000 年，學者們對於普通單軸旋轉式的馬達、直線運動的線性馬達，在理論與實作上的研究，已將近完整。此時開始有一批學者開始提出、構思具有兩軸、甚至是三軸自由度的「球型馬達。」

學者們自西元 2000 年開始，提出以各種不同激磁形式所致動的「球型馬達。」根據結構設計可分為以下幾種：永磁同步式、磁阻式、與感應式電動機。除此之外，還有一類體積較小的球型馬達，利用了壓電材料的特性，來完成「球型的」運動模式。

線性、球型馬達等非傳統的「特殊電機」。皆是針對特定的應用、目的而設計。因此，本研究以球型馬達的目的性分類，比較這些特殊電機在應用上的差異。並說明本研究所提出的球型感應馬達，在實用上的優勢。

(一) 球型馬達的種類

近年球型馬達的研究主要有四個種類，以下為研究者對此四種不同球型馬達的歸納。

1. 永磁無刷式球型馬達

- **相關研究**：英國謝菲爾德大學 (J.Wang, G.W.Jewell, & D.Howe, A Novel Spherical Actuator: Design and Control, 1997)、美國約翰霍普金斯大學 (D.Stein & G.S.Chirikjian, 2000)、美國喬治亞理工學院 (L.Yan, 等, 2009)、日本岡山大學 (S.Ikeshita, A.Gofuku, T.Kamegawa, & T.Nagai, 2010)
- **電機特性**：轉子為永久磁鐵排列構成，以定子激磁的方式造成球型旋轉的效果。原理與一般單軸永磁同步式馬達相同，具有高效率與單位體積高轉矩等優勢。然而製作難度高，造價昂貴是最主要的缺點。

2. 感應式球型馬達

- **相關研究**：美國卡內基美隆大學 (A.Bhatia, M.Kumagai, & R.Hollis, 2015)、葡萄牙里斯本大學 (J.F.P.Fernandes, S.M.Vieira, & P.J.C.Branco, 2017)
- **電機特性**：為非同步電動機，轉子為導電材料，定子為線圈進行激磁，給予轉子移動磁場，轉子會隨著移動磁場轉動。有結構簡單耐用、工作環境限制小、造價便宜的優點，但效率普通、控制難精準。

3. 磁阻式球型馬達

- **相關研究**：美國喬治亞理工學院 (K.Lee, H.Son, & J.Joni, 2005)
- **電機特性**：為同步電動機，轉子為導磁材料，定子為線圈，利用磁阻力產生轉矩。有結構簡單、價格低廉的優點，但有轉矩漣波大、效率較差的缺點。

4. 壓電式球型馬達

- **相關研究**：台灣成功大學 (S.Hsiao & M.Tsai, 2010)、台灣中原大學 (Y.Ting, Y.Tsai, B.Hou, S.Lin, & C.Lu, 2010)
- **電機特性**：利用壓電材料在外加電場下會發生形變的特性，推動馬達旋轉。適合應用於推力小、精確度高的場合。

(二) 球型馬達的應用

1. 球型機械手臂關節

如 Figure 3, (a) 機械手臂的球型關節，是最多學者所提出的應用。基於傳統機械手臂關節，如果需要像人體手腕、胳膊般「腕狀」的雙自由度、三自由度關節，往往需要兩組馬達、甚至三組馬達，才能達到這樣的目的 (S.Hungsun & K.Lee, 2010)。

以球型馬達作關節，是一種「直驅式」的機構，可簡化繁複的機構，並減少傳動造成的背隙(backlash)問題，可提升控制的精度並減少損耗。

2. 機器人的球型移動輪

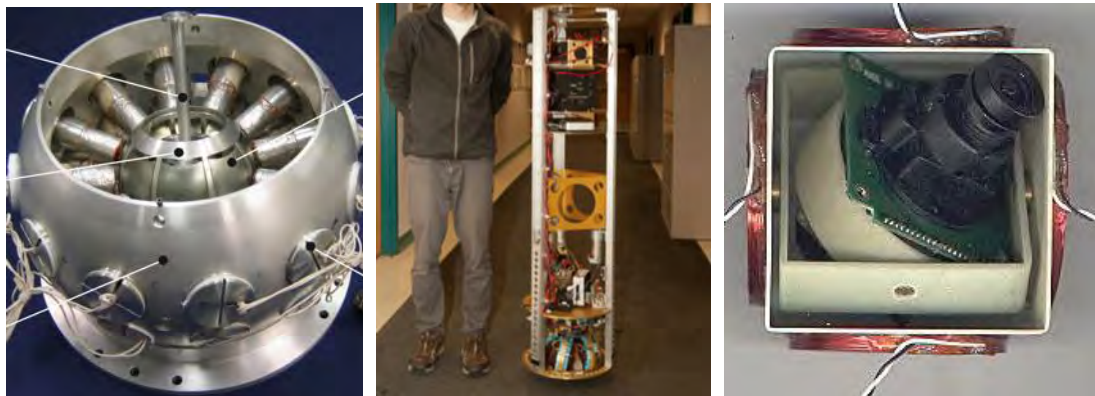
如 Figure 3, (b) 以球型移動輪作為機器人、載具的動力裝置，主要有兩種應用：一者是以單顆球型輪體作為整部動力裝置，如平衡機器人

(Balancing Robot) (G.Seyfarth, 等, 2016); 另一者是以多顆輪體組成動力系統，比如工廠的平面運輸滾輪，能透過球型馬達，來滾動、搬運平面的物體。(D.Stein & G.S.Chirikjian, 2000)

3. 感測器的球型旋轉基座

如 Figure 3, (c) 對於較精密、小型的球型馬達應用，有學者提出以球型馬達作為「機器人的眼睛」的構想，即以球型馬達作為攝影機、感測器的基座，收集多個方向、角度的資料。如壓電馬達這類小型、精度高的致動器 (J.Wang, W.Wang, G.W.Jewell, & D.Howe, 1998)。

Figure 3: 球型馬達的幾種應用場域



a) 機械手臂的球型關節
(L.Yan, 等, 2009)

b) 機器人的球型移動輪
(G.Seyfarth, 等, 2016)

c) 感測器球型旋轉基座
(J.Wang, W.Wang,
G.W.Jewell, & D.Howe,
1998)

(三) 基於球型感應馬達為基礎的電動車設計

如 Figure 4，本研究靈感來自 2004 年的電影—機械公敵 (A.Proyas, 2004)，劇中的未來車以球形輪胎展現了高靈活性的移動方式。如 Figure 5，固特異在 2016 年提出了 Eagle 360 球形輪胎的概念 (Goodyear Unveils the Eagle 360 Urban, a Concept Tire Powered by Artificial Intelligence, 2017)，描繪了一種具有多方向移動、磁懸浮、傳感器與生物再生等功能的概念輪胎。

回顧球型輪胎與球形馬達的資料，本研究欲將此種球形輪胎實現，提出了「以球型感應馬達直接作為輪胎」的想法，以下分為兩點說明：

1. 不同於當前球型馬達的應用

本研究利用球型感應馬達實現球型輪胎的概念，延伸機器人球型移動輪的想法，進一步應用在電動車上。當前機器人移動輪只能應用在室內，或者間接驅動輪子，研究者認為：透過對原型機的深入研究，解析球形感應馬達的系統特性，將有辦法直接應用球型感應馬達在電動車輪胎上。

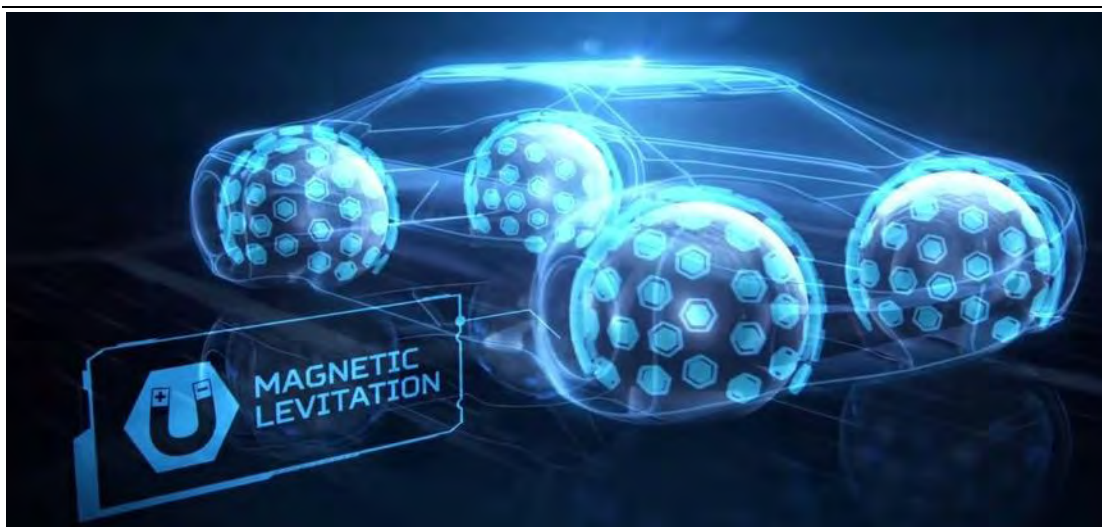
2. 採用感應式的球型馬達

現今的市售電動車款，在選用的馬達種類上，皆以感應馬達居多。感應式馬達雖然在控制響應、效率轉換上有略差的表現。但鼠籠式轉子在結構上有壽命長、環境耐受度高與適合大動力輸出等優勢，因此本研究決定以「感應式」的球型馬達，作為電動車球型輪胎。

Figure 4: 2004 年電影機器公敵中的球型車輛 (A.Proyas, 2004)



Figure 5: 2016 年由 Goodyear 公司所提出的球型磁懸浮概念車 (Goodyear Unveils the Eagle 360 Urban, a Concept Tire Powered by Artificial Intelligence, 2017)



貳、研究過程或方法

一、研究架構

本研究旨在實證「球型感應馬達」構想的可行性，並探討它電機機械上的特性。而作為一種新型的特殊電機的開發，重新建構屬於它的電機理論是必要的。

因此，本研究完整地探討了馬達在電機機械上的四個面向：「電機設計」、「電機實作」、「電機驅動」與「電機控制」。並從理論、模擬、實作與實驗這四個過程，進行歸納與分析。

研究架構條列如下，並搭配 Table 1 進行說明。

Table 1: 研究架構

	電機設計	電機實作	電機驅動	電機控制
理論	推導等效電路理論		以等效電路理論求解 T-N curve 變化	以 V/F 控制法推導轉速開迴路控制
模擬	以 ANSYS 軟體分析、優化		以 ANSYS 軟體模擬 T-N curve 變化	以 ANSYS 軟體模擬暫態響應情形
實作		球型感應馬達實作	以兩組逆變器電路驅動馬達	撰寫球型旋轉的控制程式
實驗		等效電路參數量測	以穩態轉速驗證所預期的 T-N curve 變化	以穩態轉速驗證理論與模擬的正確性

(一) 電機設計

1. 目的：在實作馬達之前，先預期馬達的效能並優化之
2. 方法：等效電路理論與有限元素法
3. 結果：決定出馬達的電氣規格、機械規格

(二) 電機實作

1. 目的：將所設計的球型感應馬達實作出來
2. 方法：運用雷射切割機等數位製造機具
3. 結果：做出符合設計中預期輸出的馬達

(三) 電機驅動

1. 目的：以 SPWM 驅動馬達並討論轉速的電壓、頻率控制
2. 方法：以理論、模擬與實驗觀察電壓、頻率控制下的轉速
3. 結果：以電壓、頻率控制球型感應馬達的轉速

(四) 電機控制

1. 目的：實現以 V/F 控制為基礎的轉速開迴路控制
2. 方法：以理論、模擬與實驗觀察轉速的暫態、穩態情形
3. 結果：以 V/F 控制法控制球型感應馬達的轉速

在研究這四個面向上，本研究以電機設計與電機實作所建立的電機機械特性，來進行電機驅動與電機控制，並觀察結果是否已達到預期中的效果。

二、研究設備與器材

本研究所使用到的設備與器材主要分為兩大類：1)實作工具，實作球型感應馬達所需要的數位製造設備、2)實驗設備，實驗球型馬達所需的量測儀器與電源供應裝置。

如 Figure 6 與 Table 2，研究者呈現了在創客基地所借用的實作工具；如 Figure 7 與 Table 3，則呈現了研究者在實驗室所使用得實驗設備。

Figure 6: 實作工具總圖

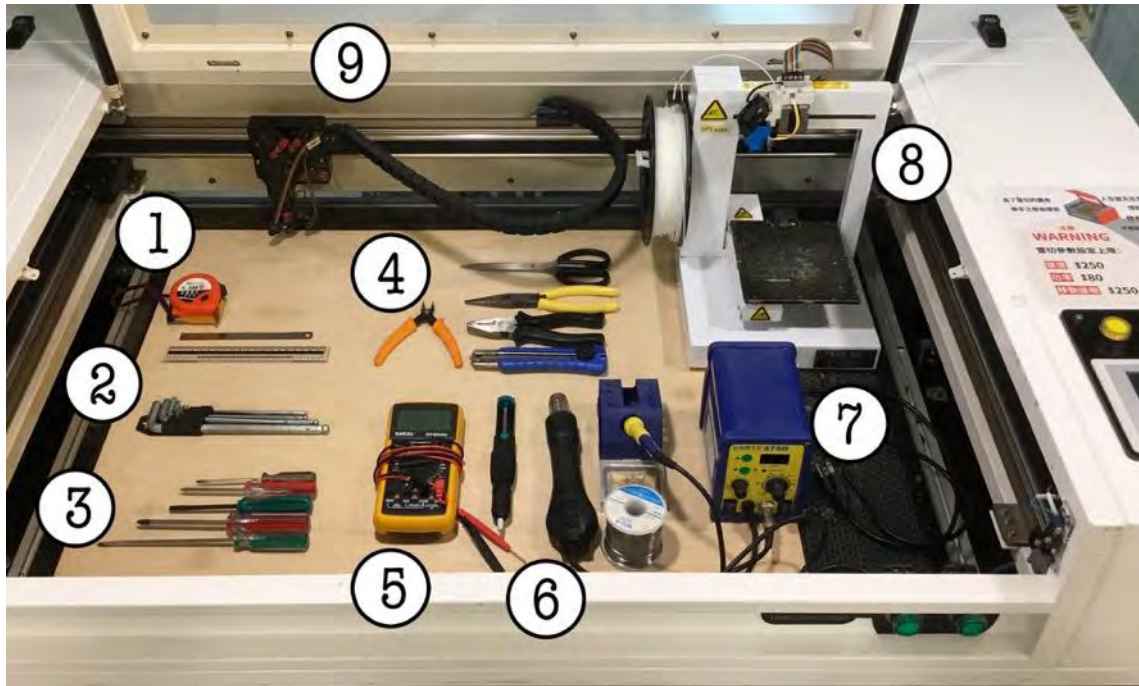


Table 2: 實作工具總表

編號	名稱	型號	用途
1	手工具：量具類	N/A	球型馬達 電機實體製作
2	手工具：六角板手	N/A	
3	手工具：起子類	N/A	
4	手工具：夾鉗類	N/A	
5	電路工具：三用電錶	N/A	球型馬達 驅動電路製作
6	電路工具：焊接周邊工具	N/A	
7	電路工具：焊槍	N/A	
8	數位製造設備：3D 列印機	UP! 3D Printer Plus	球型馬達小零件
9	數位製造設備：雷射切割機	國航科技-雷射切割機	球型馬達主結構

Figure 7: 實驗設備總圖

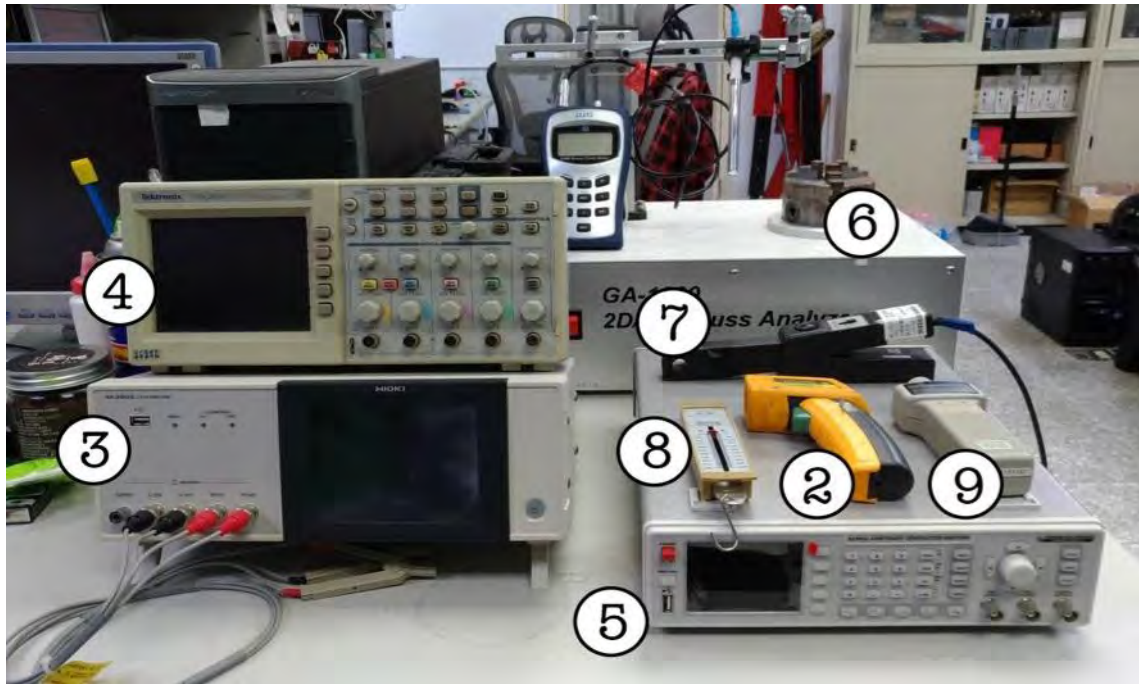


Table 3: 實驗設備總表

編號	名稱	型號	用途
1	大型直流電源供應器	iDRC DSP-200-200HP	馬達輸入電源
2	紅外線測溫槍	FLUKE 62 Mini	檢查線圈發燙情形
3	電感電容電阻計	HIOKI IM3533	量測等效電路數據
4	示波器	Tecktronix TDS-2041	測試、觀察驅動電路是否正常工作
5	訊號產生器	R&S HMF2550	
6	2.5D 磁場量測儀器	究準科技 GA-1000	量測定子磁通分布
7	電流勾表	Techtronix A622	檢查驅動電路輸出
8	拉力計	Jin Yuan 1000g 彈簧秤	量測系統摩擦轉矩
9	轉速計	RROVA RM-1500	量測轉子轉速

三、研究過程

以下研究者將依照順序呈現理論、模擬、實作與實驗這四個研究球型感應馬達的過程。並從這四個研究過程導出電機設計、電機實作、電機驅動與電機控制的研究結果。

(一) 理論

本節討論電機設計、電機實作、電機驅動與電機控制的理論。

從電機機械的基本原理出發，以等效電路理論推導出電機設計上，所需要參考到的轉矩-轉速曲線¹，即 T-N curve；再藉由這組理論，去歸納電機驅動上的電壓、頻率控制；最後，研究者建立了以等效電路理論為基礎的系統模型，並藉由 V/F 控制法²對轉速進行開迴路控制。以下將一一呈現四大面向所用到的理論。

1. 電機設計：球型感應馬達原理說明

(1).三相電與旋轉磁場：

如 Figure 8, a)，三相電是由三組在相位上落差 $\frac{2}{3}\pi$ 電氣角的交流電源，即：

$$V_A = V_p \cdot \cos(\omega t) \quad \text{Eq. 1}$$

$$V_B = V_p \cdot \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \quad \text{Eq. 2}$$

$$V_C = V_p \cdot \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \quad \text{Eq. 3}$$

而馬達定子上，也設置了兩兩相隔 $\frac{2}{3}\pi$ 機械角的三組線圈。通以三相電後，可以得到一組「旋轉磁場(Rotating Magnetic Field)」，如 Figure 8, b)。

(2).轉子感應磁場：

根據法拉第感應定律，可以知道感應電動勢的大小會等於通過一個封閉環路內，磁通的時變率，即：

$$\varepsilon = -N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad \text{Eq. 4}$$

¹以下通稱 T-N curve，即 Torque-Number of revolutions per minute curve

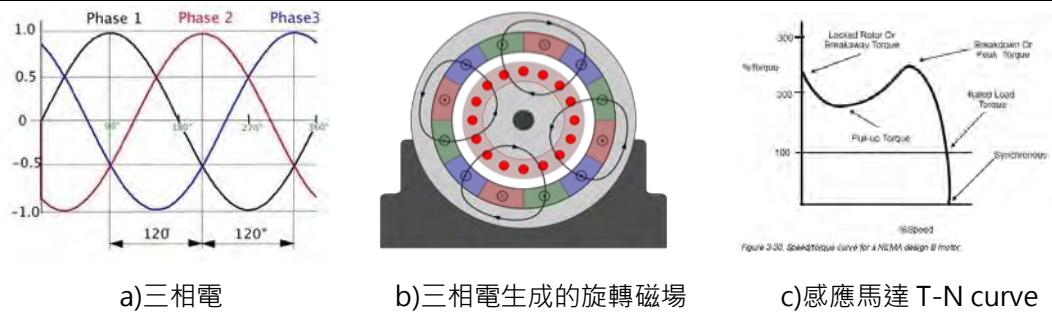
²又稱純量控制法(Scalar Control): 是一種固定電壓、頻率比值的交流馬達控制技巧

依據這個原理，可以預期到：感應馬達的轉子上，生成的感應磁場形式，將會是與定子旋轉磁場類似的感應磁場。

(3). 滑差所造成的轉矩：

根據安培力定律，電流與磁場作用下可生成推力。也因為負載的關係，轉子的機械轉速會落後於定子的旋轉磁場的速度，透過這個落差的標么(pu)訂出滑差(slip)。如 Figure 8, c)，滑差決定了輸出轉矩。

Figure 8: 感應馬達原理說明



2. 電機設計：等效電路理論推導

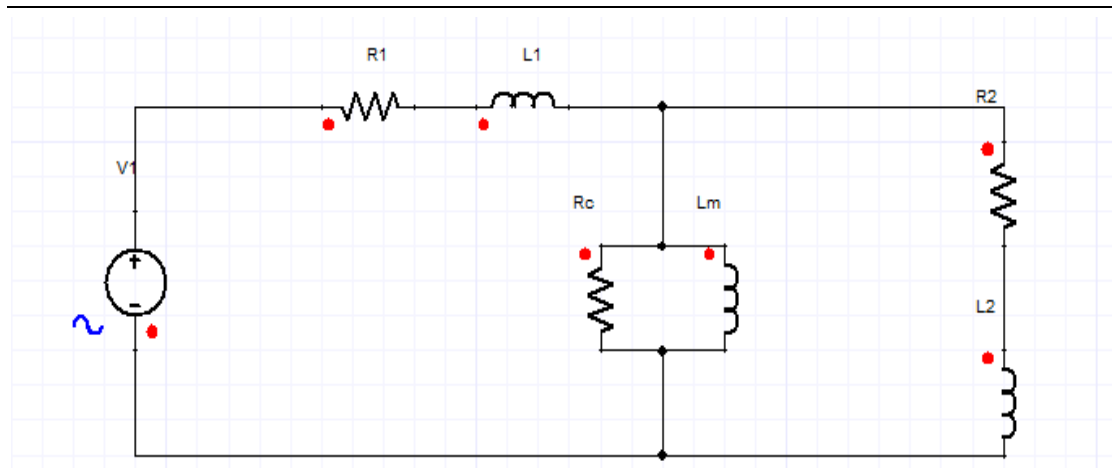
為設計出轉矩、效率較佳的球型感應馬達，研究者首先推導了馬達的轉矩公式，以此作為設計過程中，優化設計的依據。

在等效電路理論的建立上，本研究將透過兩個部分來解釋：第一個部份為等效電路的原理與電路元件說明、第二部份以等效電路推導的轉矩公式。

(1). 等效電路原理與電路元件：

將感應馬達單一相的電路等效如 Figure 9。電路上的電阻、電感元件，代表著馬達磁路等效成電路過後的結果。

Figure 9: 感應馬達等效電路圖



1) 定子電阻 R_1 ：即"Resistance of Stator"，是定子的銅製線圈所帶的電阻，此電阻將造成一次側(定子)的銅損。

2) 定子漏電感 L_1 ：線圈本身具有電感的特性，這份電感被區分為 L_1 與 L_m 。 L_1 代表了由「漏磁通」所造成的漏電感(leakage Inductance)。

3) 激磁電感 L_m ：真正對轉子做功的磁通所造成的電感。激磁電感同樣來自定子線圈，將線圈激磁的現象等效進電路模型的電感。

4) 鐵損電阻 R_c ：包括渦流損與磁滯損。前者來自時變磁場對鐵芯的激磁，產生的感應渦電流；後者來自磁化鐵芯時，磁通所需做的功。在等效電路模型中，將這兩個現象考慮進並聯電阻 R_c 內。

5) 轉子電阻 R_2 ：將二次側(轉子)的磁路等效進電路模型的參數，代表電流對轉子做的功，可計算出消耗於轉子上的功率，而推算轉矩。

6) 轉子電感 L_2 ：將磁路等效進電路的參數，目的在透過電抗的形式，表達電流在轉子上的落後情形。

(2). 基於等效電路所推導的轉矩公式:

根據能量守恆定律，可以知道感應馬達所做的功，僅有：導電體的銅損、導磁體的鐵損，以及機械功。因此，本研究從等效電路的角度出發，透過計算作用在 R_2 上的功率，來推導轉矩。

而轉矩的產生會被轉子與定子磁場間的相對運動所影響，因此必須考慮這個相對運動。於是將轉子的機械轉速，定義為 ω_m ；定子旋轉磁場的速度，定義為 ω_s 。則轉差率 $slip$ 可定義為

$$slip = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad \text{Eq. 5}$$

此時，根據電機機械的原理，可以將定子、轉子在轉速上的落差情形，考慮在二次側電阻 R_2 上，則表為 $R_2/slip$ 。

接著計算 I_2 ，這是等效電路中流經阻抗 Z_2 的電流，藉由 I_2 可推算機械功率。根據歐姆定律與 KCL 定律，可得下式。

$$I_2 = \frac{\hat{V}}{Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_m}{Z_2 + Z_m}} \cdot \frac{Z_m}{Z_m + Z_2} \quad \text{Eq. 6}$$

由於等效電路是考慮單相的情形，因此馬達整體的氣隙功率 P_{AG} ，需乘以相數 q 。

$$P_{AG} = 3 \cdot I_2^2 \cdot \left(\frac{R_2}{slip}\right) \quad \text{Eq. 7}$$

氣隙功率為馬達定子傳遞到轉子上的功率總和，而實際造成機械功的輸出功率 P_{out} 需要將氣隙功率減去轉子銅損 P_{rl} 。

$$P_{out} = P_{AG} - P_{rl} \quad \text{Eq. 8}$$

$$P_{out} = 3 \cdot I_2^2 \cdot \left(\frac{R_2}{slip}\right) - 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2 \quad \text{Eq. 9}$$

$$P_{out} = 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2 \cdot \left(\frac{1 - slip}{slip}\right) \quad \text{Eq. 10}$$

$$P_{out} = (1 - slip) \cdot P_{AG} \quad \text{Eq. 11}$$

根據 Eq. 11，可以推出輸出功率 P_{out} 與氣隙功率 P_{AG} 之間的關係。同時又知機械轉速 ω_m 與機械轉矩 τ_m 的乘積為輸出功率 P_{out} ，可列出機械轉矩，再代入 Eq. 5 中機械轉速與同步轉速間的關係，得 Eq. 12。

$$\tau_m = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{(1 - slip) \cdot P_{AG}}{(1 - slip) \cdot \omega_m} = \frac{P_{AG}}{\omega_s} \quad \text{Eq. 12}$$

至此，解得馬達轉矩。此轉矩是轉差率 $slip$ ，或機械轉速的一個函數，此即這個球型感應馬達的轉矩特性，即 T-N curve。

3. 電機驅動：以等效電路法推算變壓、變頻下的 T-N curve

根據前面推導的等效電路理論，以及下一章節所量測的等效電路參數，本節計算了兩組數據：定頻率為 60Hz、調變電壓於 30V~60V 的電壓控制；定電壓為 40V、調變頻率於 30Hz~90Hz 的頻率控制。以等效電路理論的計算結果，觀察電壓、頻率控制下的 T-N curve 變化。

Figure 10: 理論計算- 30V~60V 電壓控制下的 T-N curve

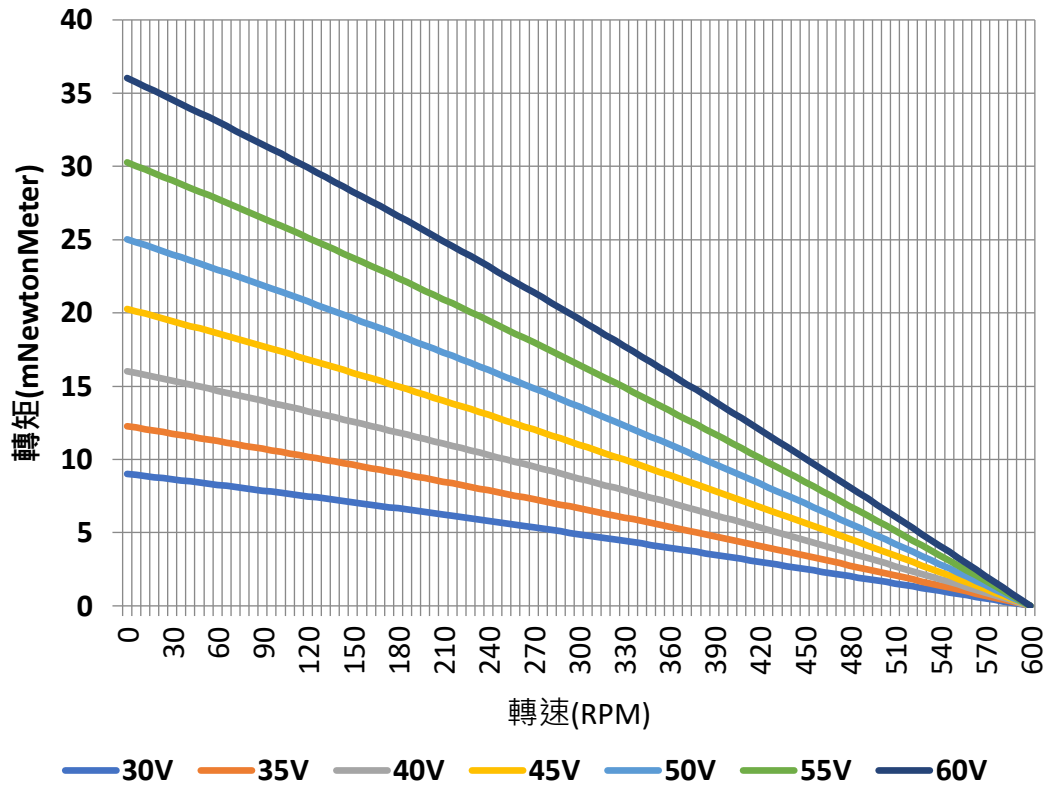
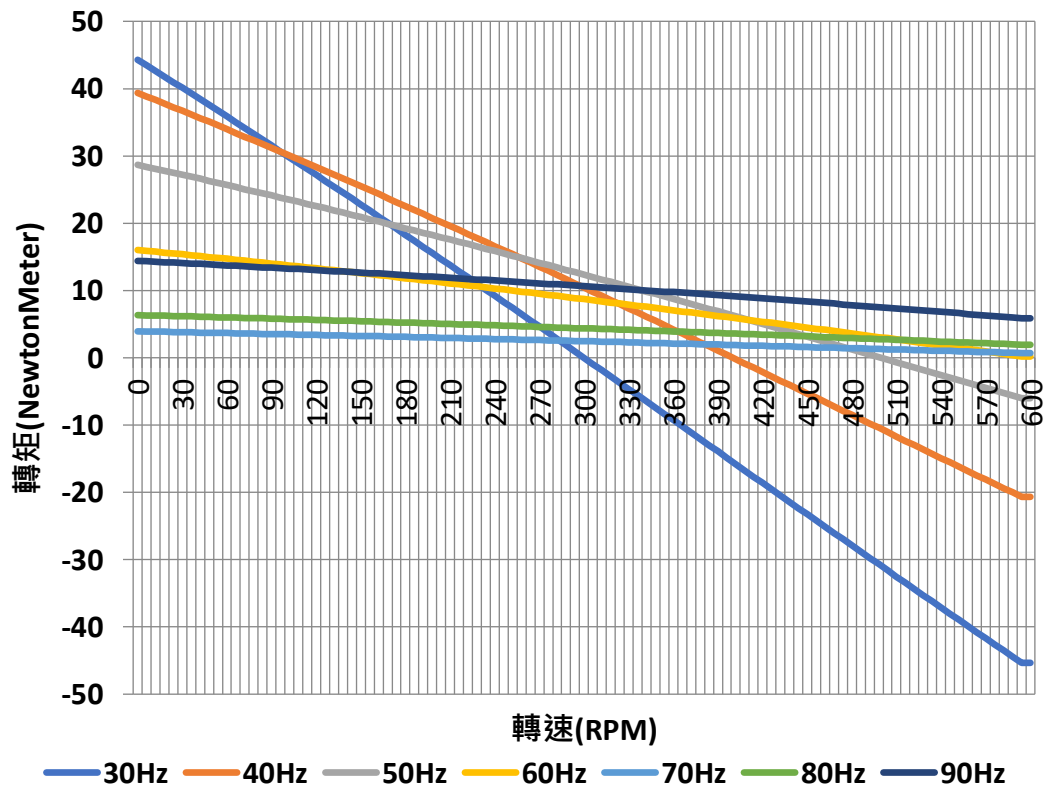


Figure 11: 理論計算- 30Hz~90Hz 頻率控制下的 T-N curve



根據理論的計算結果，推測出兩種控制法的特性：

(1). 電壓控制：定轉速的穩態操作下，轉矩基本上與電壓呈現線性穩定的成長趨勢。但電壓的提高，也意味著輸入功率的增加。

(2). 頻率控制：定轉速的穩態操作下，頻率的提高會降低轉矩，這主要是阻抗上升的緣故。但隨同步速的提升，轉速也增加了。

4. 電機控制：以 V/F 控制為基礎的開迴路轉速控制

在電機控制上，球形感應馬達的提供轉矩的兩組定子互相正交，可利用向量和組成所有方向的旋轉。又因兩組定子互相獨立，接下來的章節推導單組定子的控制，在另一組定子上同樣成立。

本研究引入 V/F 控制法來控制球形感應馬達，即同時調整電壓與頻率，可以用較低的輸入功率，去換取相同的轉速。首先，研究者先建立球型感應馬達的系統模型，以數學式描述馬達的所有物理特性。

(1). T-N curve 的線性化

在等效電路理論中，由於漏電感項 X_1 較大的緣故，T-N curve 比起傳統感應馬達向左偏移，因此在電動機的操作區間內(0~800 RPM)的圖形趨近斜直線，故研究者選擇線性化(Linearization)的方式進行控制。

取電動機操作區間內，與 Y 軸交點的堵轉轉矩(Stall Torque)、與 X 軸交點的同步轉速(Synchronous Speed)，研究者假設一條一次式直線來代表電動機操作區間內的 T-N curve，如 Eq. 13：

$$\tau(t) = -\frac{\tau_{max}}{\omega_s} \cdot \omega(t) + \tau_{max} \quad \text{Eq. 13}$$

(2). 同步轉速與電氣頻率關係的線性化

根據電機機械的原理，定子會產生一個連續旋轉的旋轉磁場(Rotating Magnetic Field)。通常，在三相的交流磁場裡，同步轉速會被定義為：

$$\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{2 \cdot p} \quad \text{Eq. 14}$$

f 代表輸入三相電的頻率、 p 則代表電機的極數。然而，本研究所設計的球型馬達，其定子與繞線設計，與普通的感應馬達線圈繞法不同，於是同步轉速與三相電頻率之間的關係，不單單取決於極數 p 。

因此，本研究從 T-N curve 與 X 軸的交點來取出同步轉速，即找出轉矩為零時的轉速操作點。如 Figure 12 與 Table 4 本研究透過 ANSYS Maxwell 軟體，對三組不同電壓：40V/50V/60V、三組不同頻率：30Hz/60Hz/90Hz 的操作情形下，做了九種組合的 T-N curve 模擬。

Figure 12: 模擬分析- 比較九條不同輸入電壓/頻率的 T-N curve

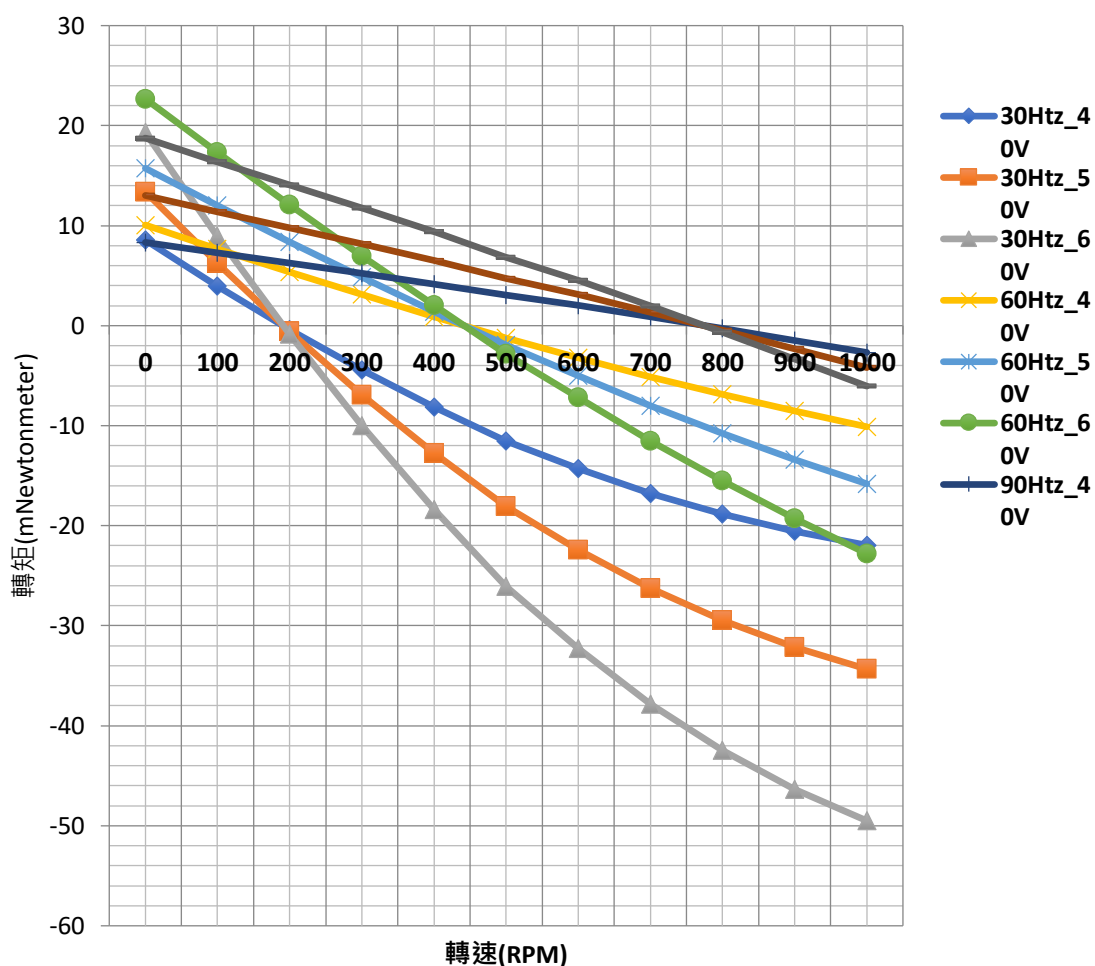


Table 4: 球型馬達在不同電壓/頻率下的同步轉速(RPM)

	30Hz	60Hz	90Hz
40V	191.46 RPM	442.12 RPM	775.85 RPM
50V	191.39 RPM	442.00 RPM	775.74 RPM
60V	191.34 RPM	442.90 RPM	775.62 RPM
平均	191.40 RPM	442.01 RPM	775.74 RPM

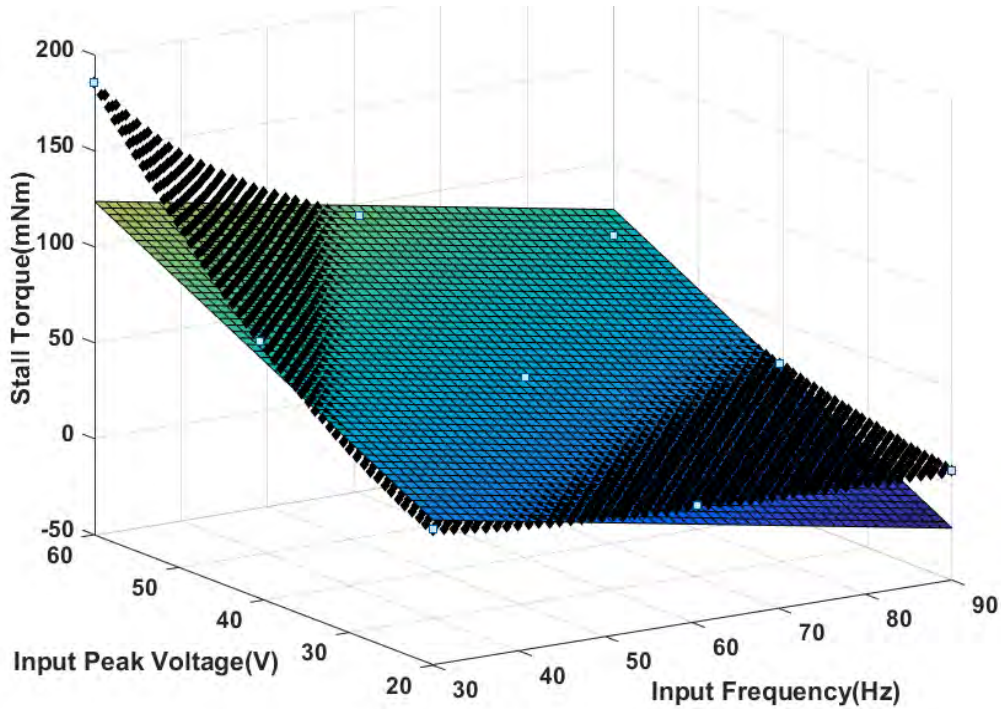
根據模擬結果，可以觀察到電壓的提升與同步轉速幾乎無關，但隨著三相電頻率提高，同步轉速也明顯提高。根據 Eq. 14，頻率與同步速有正比關係，可表示如 Eq.15。則根據模擬結果，得常數 k_1 為2.5。

$$\omega_s = k_1 \cdot \pi \cdot f \quad \text{Eq. 15}$$

(3). 線性化堵轉轉矩與輸入電壓、輸入頻率的關係

接著探討輸入電壓、輸入頻率對堵轉轉矩(Stall Torque)的影響。如 Figure 13，本研究根據等效電路法去計算球型感應馬達的堵轉轉矩在輸入電壓、輸入頻率變化下的三維立體圖。

Figure 13: 理論計算- 輸入電壓/頻率對堵轉轉矩的影響



本系統的操作區間，輸入電壓的範圍在 20V~60V 之間、輸入頻率的區間在 30Hz~90Hz 之間，如 Figure 13 中的黑點曲面所示，為理論推算堵轉轉矩的變化情形。為了方便線性控制器的實作，本研究以最小平方法對曲面作線性迴歸(Linear Regression)，得到近似的二元的平面。

$$\tau_{max} = k_2 \cdot v + k_3 \cdot f \quad \text{Eq. 16}$$

此平面如圖 Figure 13 中的彩色平面所示。得係數 k_2 為-0.81、係數 k_3 為2.45。又此線性迴歸平面的決定係數(R^2 值)為 89%。

(4). 以拉式轉換求解系統的時域特性

接著，本研究以五條描述球型感應馬達系統時域特性的方程組，來推算轉速與輸入電壓、頻率的關係。

$$\omega_s(t) = k_1 \cdot \pi \cdot f(t) \quad \text{Eq. 17}$$

$$\tau_{max}(t) = k_2 \cdot v(t) + k_3 \cdot f(t) \quad \text{Eq. 18}$$

$$f(t) = k_4 \cdot v(t) \quad \text{Eq. 19}$$

$$\tau(t) = -\frac{\tau_{max}}{\omega_s} \cdot \omega(t) + \tau_{max}(t) \quad \text{Eq. 20}$$

$$\tau(t) = J \cdot \dot{\omega}(t) + T_{Load}(t) \quad \text{Eq. 21}$$

Eq. 17 到 Eq. 18 所表示的是球型馬達 ω_s 與堵轉 τ_{max} 線性化的關係；由於本研究採 V/F 控制法，因此電壓與頻率之間所維持的比例被表示在 Eq. 19 中的 k_4 ；Eq. 20 則描述了馬達的 T-N curve；Eq. 21 描述了考慮轉動慣量 J 與負載轉矩的機械特性。

將 $f(t)$ 、 $\omega_s(t)$ 、 $\tau_{max}(t)$ 代換為 $\tau(t)$ 、 $\omega(t)$ 、 $v(t)$ 的關係式，Eq. 22 最後可化簡為：

$$\tau(t) = \frac{-k_2 - k_3 k_4}{\pi k_1 k_4} \omega(t) + (k_2 + k_3 k_4) v(t) \quad \text{Eq. 23}$$

由於控制上所用的變數為頻率，但上述函數皆以時間作為變數，而此系統又符合線性非時變的特性，於是對 Eq. 21 與 Eq. 22 做拉式轉換 (Laplace Transform)，將時域函式化作頻域，頻域函式表示如下：

$$\mathcal{L}[\tau(t)] = T(s) = J s \omega(s) + T_{Load}(s) \quad \text{Eq. 24}$$

$$\mathcal{L}[\tau(t)] = T(s) = \frac{-k_2 - k_3 k_4}{\pi k_1 k_4} \Omega(s) + (k_2 + k_3 k_4) V(s) \quad \text{Eq. 25}$$

Eq. 23 表示了負載造成的機械特性、Eq. 24 表示了馬達本身的電機特性，至此即可得 V/F 開迴路控制法的系統方塊圖，如 Figure 14。

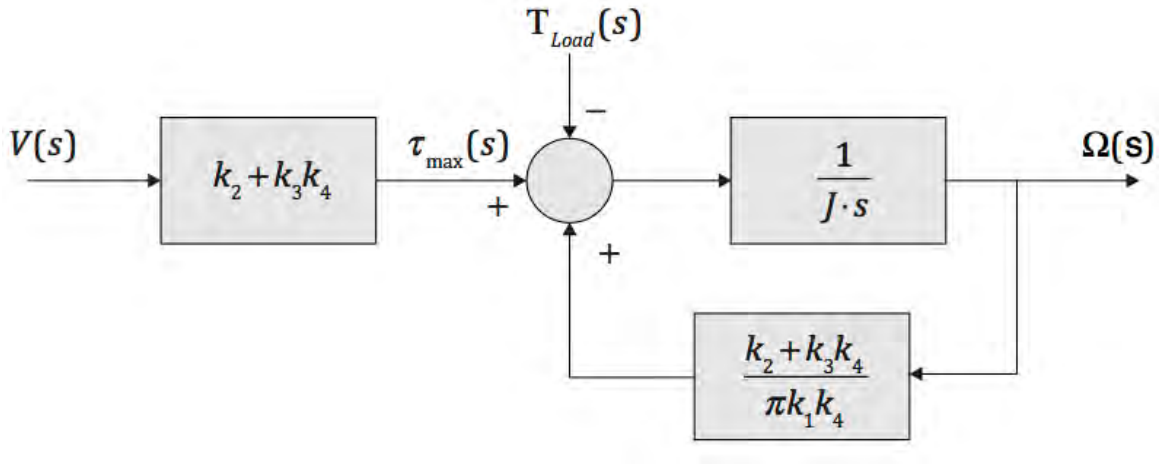
系統輸入為電壓 $V(s)$ 、所控制的特性是轉速 $\Omega(s)$ 。可以整理出兩者之間在頻域下的關係。並將系統的兩個輸入： $V(s)$ 與 $T_{Load}(s)$ ，視為步階響應函數，得 Eq. 25 與 Eq. 26。

$$\mathcal{L}[v(t)] = V(s) = \frac{v}{s} \quad \text{Eq. 26}$$

$$\mathcal{L}[\tau_{Load}(t)] = T_{Load}(s) = \frac{\tau_L}{s} \quad \text{Eq. 27}$$

$$\Omega(s) = \frac{(k_2 + k_3k_4)v - T_L}{Js^2 + \frac{k_2 + k_3k_4}{\pi k_1k_4}s} \quad \text{Eq. 28}$$

Figure 14: 基於 V/F 控制法的轉速開迴路控制方塊圖



欲預測此馬達的響應時間，於是對 Eq. 27 做反拉式轉換(Inverse Laplace Transform)，解得轉速函式在時域下的函數，如下：

$$\mathcal{L}^{-1}[\Omega(s)] = \omega(t) \quad \text{Eq. 29}$$

$$\omega(t) = \pi k_1 k_4 \left(\frac{v(k_2 + k_3k_4) - \tau_L}{k_2 + k_3k_4} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_2 + k_3k_4}{J\pi k_1 k_4} t} \right) \quad \text{Eq. 30}$$

Eq. 29 表示了球型馬達的轉速在輸入電壓為一階躍函式時的響應情形。但事實上，馬達本身為一個由電流激磁，產生轉矩的系統，在這個過程中，還存有電感所造成的電氣時間，即：

$$\frac{L}{R} \cong 2.14 \text{ ms} \quad \text{Eq. 31}$$

這段電感所造成得電氣時間遠小於系統的安定時間，因此本研究不考慮進控制模型中。將參數代入 Eq. 29，得 Figure 15。系統各項參數如 Table 5。

Table 5: 系統的各项參數值

k1	k2	k3	k4	L	J
2.5	-0.81	2.45	1	2.2 mNm	0.2 mkgm ²

Figure 15: 理論計算- 以 Matlab 軟體計算得的轉速響應圖

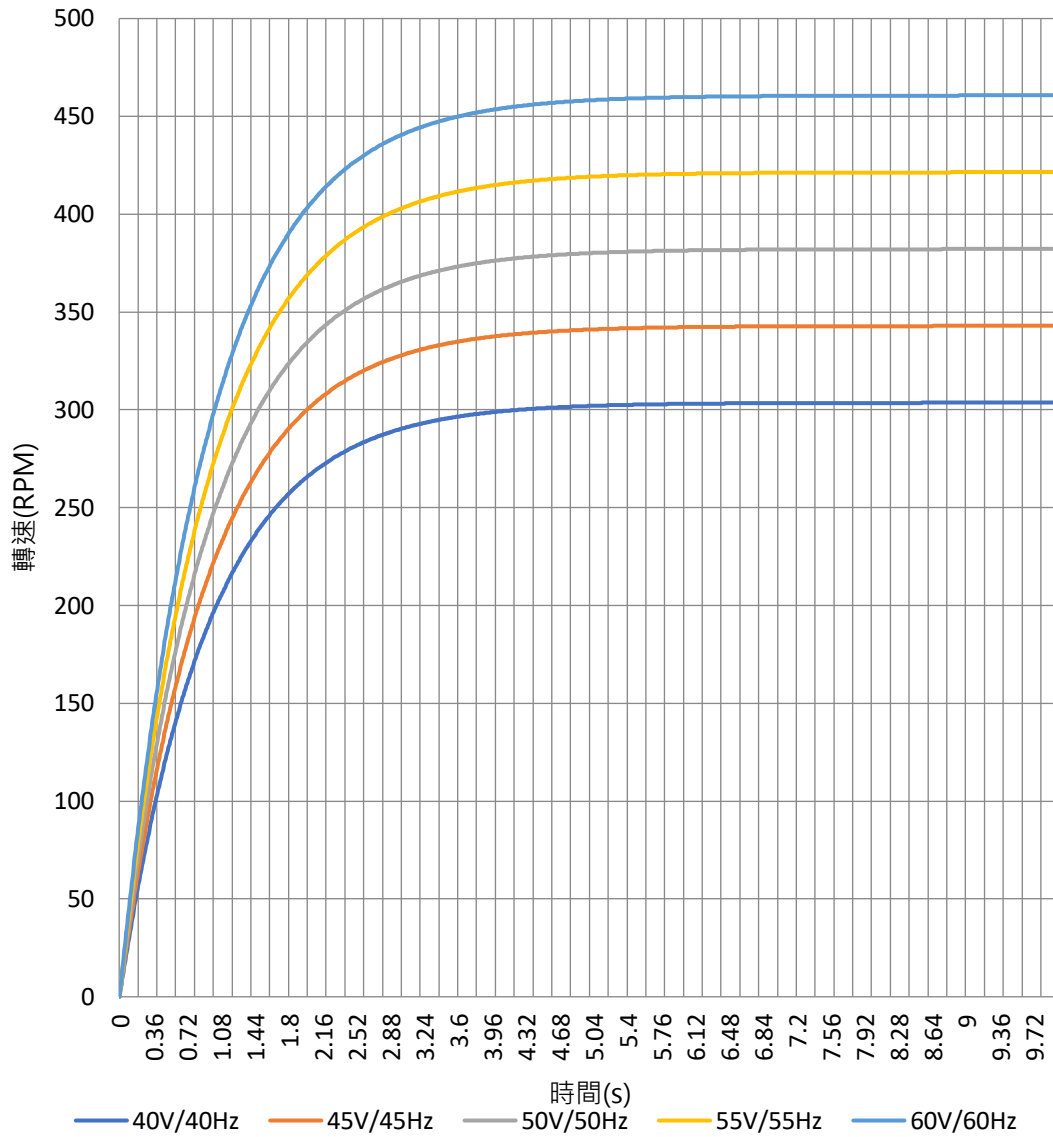


Table 6: 理論計算- V/F 控制下的穩態轉速與安定時間

	40V/40Hz	45V/45Hz	50V/50Hz	55V/55Hz	60V/60Hz
穩態轉速(RPM)	303.6	342.9	382.2	421.4	460.7
安定時間(s)	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75

如 Figure 15，研究者測試了三組輸入電壓：40V、45V、50V、55V、60V，並得到了他們的轉速響應曲線。同時，也因為 V/F 比值為 1，因此頻率也為：40Hz、45Hz、50Hz、55Hz、60Hz。

(二) 模擬

本節將呈現以 ANSYS Maxwell/Simplorer 軟體為基礎的有限元素分析法，對球型感應馬達的磁路、電路設計進行模擬，協助研究者在設計階段的優化，以及驅動、控制方法的探討。本節並將呈現電壓、頻率控制的堵轉轉矩穩態模擬，與考慮了機械特性的暫態模擬。

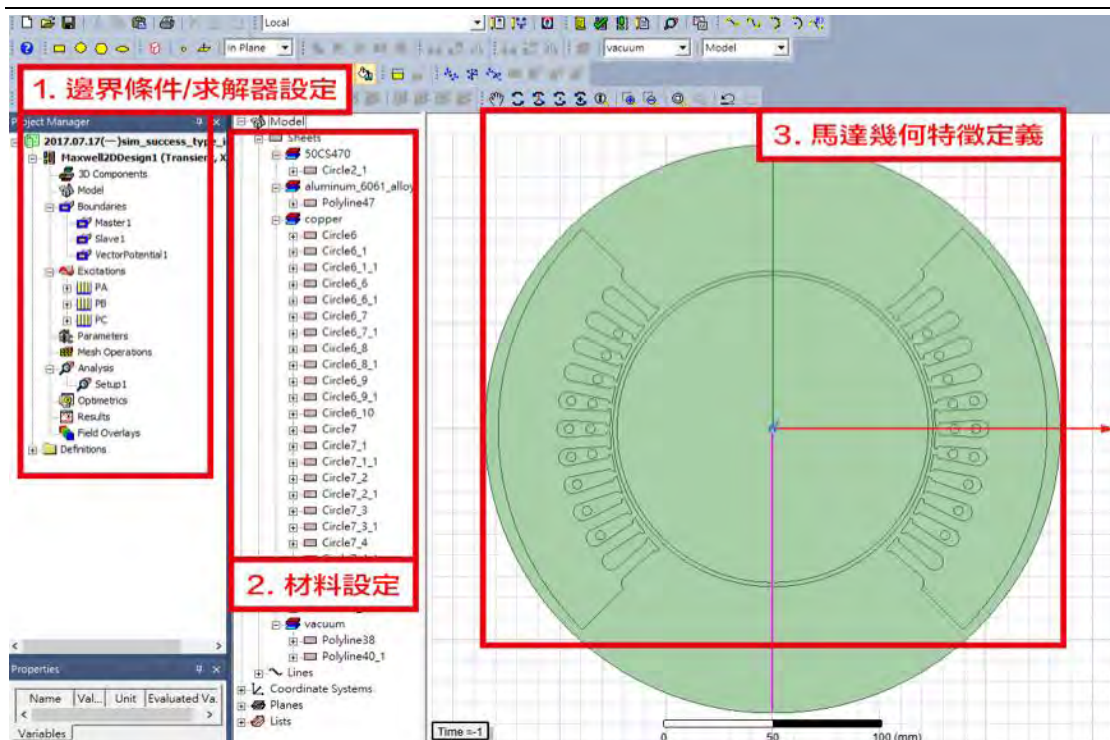
1. 電機設計：以有限元素分析優化馬達設計

本研究使用了 ANSYS 公司的 Maxwell 與 Simplorer 兩套軟體，來實現有限元素分析分析(Finite Element Analysis, FEA)。前者主要應用於磁路的分析、後者則用於電路的分析，兩者合併使用後，可以運用 Co-simulation 的方式，同時分析馬達的磁路與電路，得到最真實的結果，以下將詳細介紹之：

(1).磁路分析(ANSYS Maxwell 軟體)

在 Maxwell 軟體上，基於模擬時間成本的考量，本研究使用 2D 的模型進行模擬。軟體的操作介面與設定，如 Figure 16。

Figure 16: ANSYS Maxwell 磁路分析-參數設定



可由材質、機械規格與電氣規格的訂定，觀察馬達的特性。在本研究中，研究者主要輸出兩種數據以優化設計：1) 輸出轉矩- 給定轉速後，所求解的穩態轉矩、2) 磁通密度分布圖：觀察磁通的分佈、改善磁路設計。

(2). 電路分析(ANSYS Simplorer 軟體)

本研究將 ANSYS Simplorer 軟體應用於分析球型感應馬達的驅動電路，即由六顆 Mosfet 所組成的三相半橋式逆變器電路。

模擬上主要執行瞬態(Transient)分析，能觀察驅動電路在由控制器(Raspberrypi 控制版)的 SPWM 的輸入下(Sin-wave Pulse-Width-Modulation)，逆變器輸出的電壓、電流波形。

這個階段的模擬，可根據等效電路，將球型感應馬達假設為一組三相 Delta 接的負載，即可從結果觀察、驗證驅動電路的輸出，如 Figure 17。

Figure 17: ANSYS Simplorer 電路分析-求解器設定

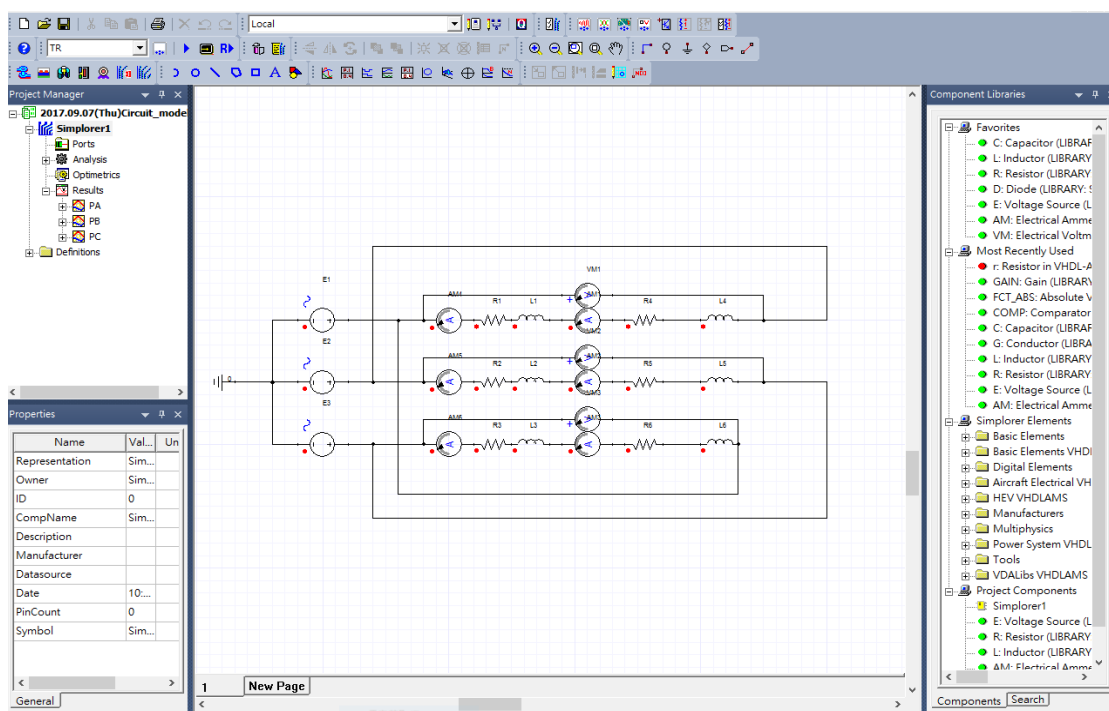
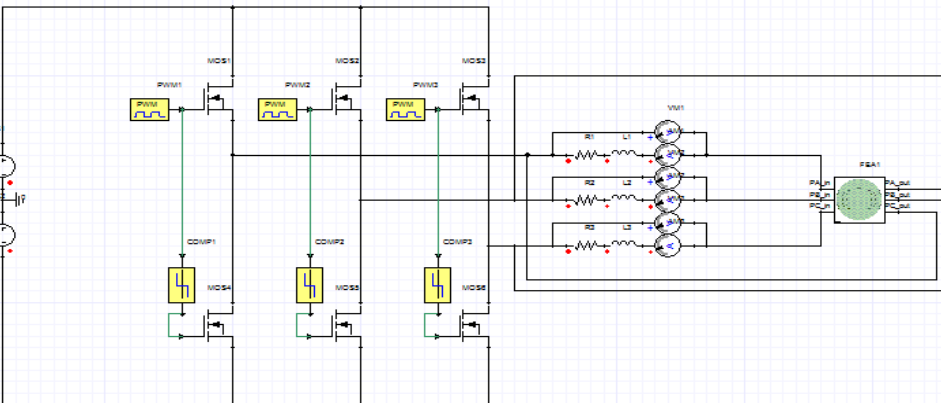


Figure 18: ANSYS Co-Simulation- 磁路電路聯合模擬



(3).磁路電路聯合擬真模擬(Co-simulation)：

由於 Maxwell 的磁路分析上，假定了輸入電源為完美的三相交流電；但實際上由驅動電路所輸出的，是由 SPWM 放大而成的 PWM 波，並非完美的弦波，如 Figure 18。因此透過聯合模擬可以觀察更真實的情況。

由於聯合擬真需要較大的運算量，所以研究者在分別進行電路、磁路分析後，才透過聯合擬真去觀察馬達-電路間的影響。

2. 電機驅動：模擬馬達在電壓、頻率控制下的堵轉轉矩

在研究過程—理論中運用等效電路理論描述了電壓控制與頻率控制，本研究再次以有限元素分析的方式來驗證。

對球型馬達的磁路結構，進行了二維的穩態分析。此時，研究者將機械轉速訂為零，意即所模擬的穩態情形，是轉差率為 1 的情況，即啟動狀態時的堵轉轉矩。得結果如 Figure 19 與 Figure 20：

Figure 19: 模擬分析- 30V~60V 電壓控制下的堵轉轉矩

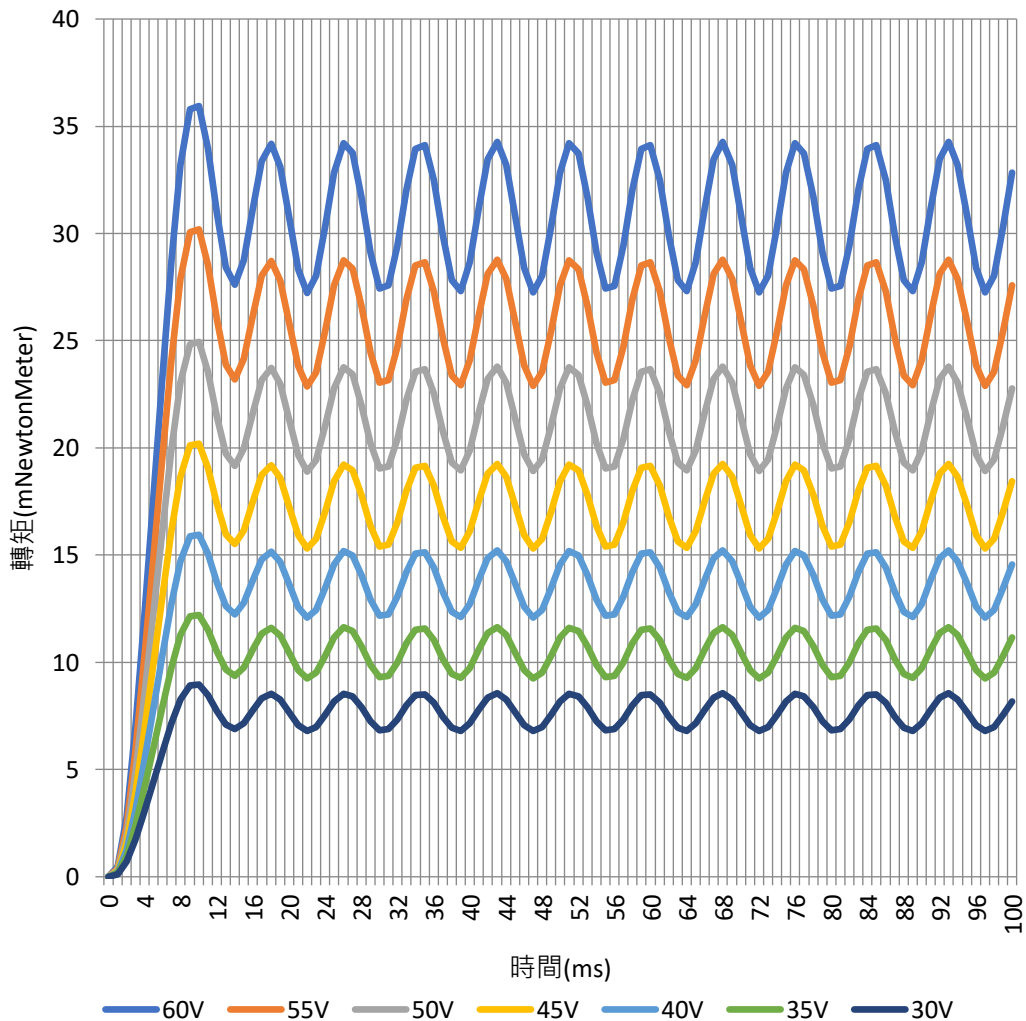
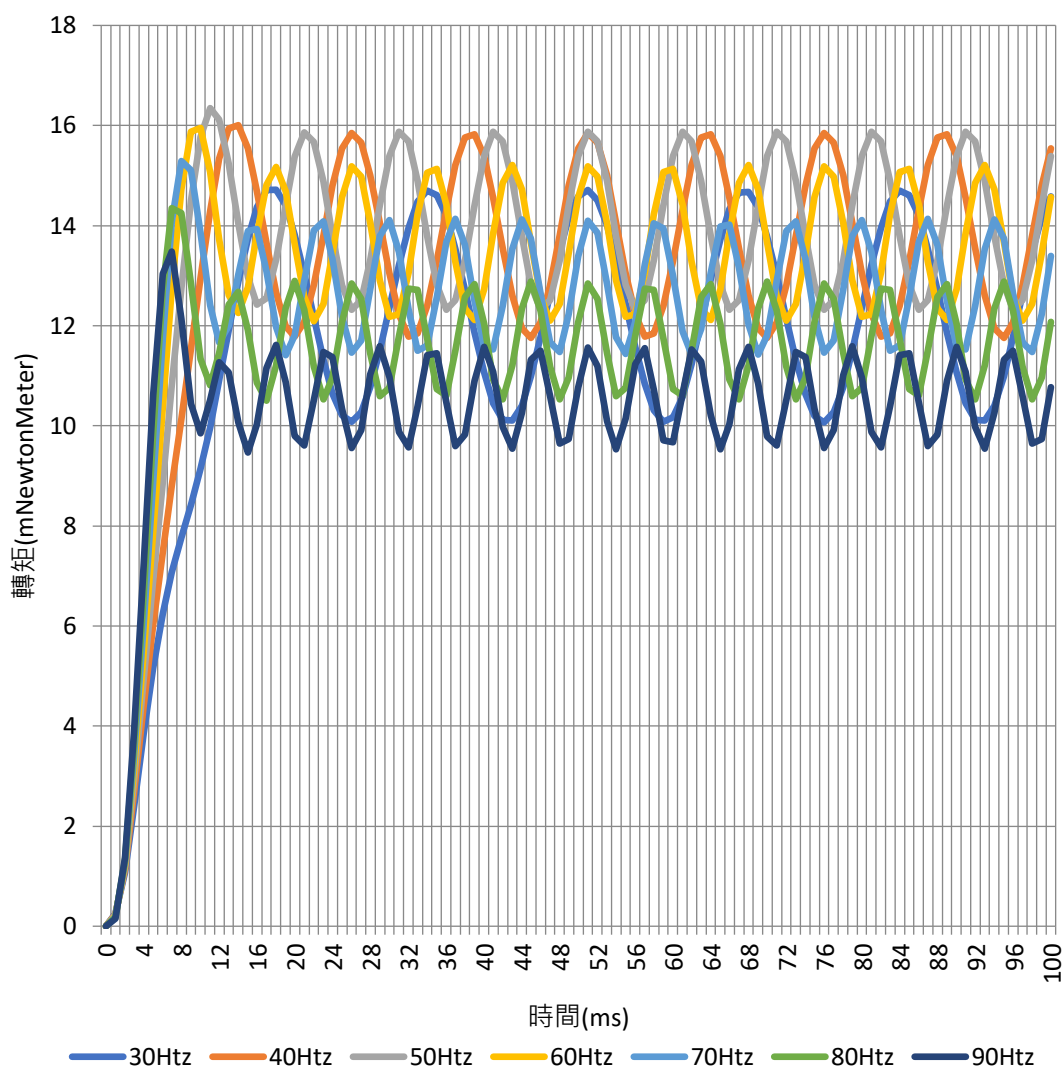


Figure 20: 模擬分析- 30Hz~90Hz 頻率控制下的堵轉轉矩³



藉由磁路的有限元素分析，在球型馬達轉速為零的操作點下，可模擬出一組帶有轉矩漣波(Torque Ripple)⁴的轉矩曲線，穩態的平均轉矩即對應到 T-N curve 上啟動情形的轉矩值。透過模擬，歸納兩種控制法的差異：

- (1). 電壓控制：與理論分析類似，電壓與轉矩呈線性增加。
- (2). 頻率控制：理論分析中，隨頻率的增加，啟動轉矩急劇跌落，但模擬中雖也有降低的趨勢，但並沒有這麼明顯。

³ Stall Torque，馬達在啟動狀態、轉速為零時，擁有最大的輸出轉矩。模擬中研究者設轉速為零，對轉矩做穩態的分析。

⁴ 如 Fig 18，馬達在穩態時所輸出的轉矩，會帶有週期性的波動變化

3. 電機驅動：模擬馬達在暫態加速情形下的輸出轉速、轉矩

接者，本研究將呈現以 ANSYS Maxwell 軟體，所進行的暫態有限元素分析。在兩組模擬中，研究者以電壓控制、頻率控制為變因，並考慮了系統的機械負載特性，包括：轉動慣量、摩擦轉矩等等。

如 Figure 21 與 Table 7，研究者進行了 30V~60V、定頻率 60Hz 的電壓控制；及 Figure 22 與 Table 8 的 30Hz~90Hz、定電壓 40V 的頻率控制。

Figure 21: 模擬- 30V~60V 電壓控制下的輸出轉速

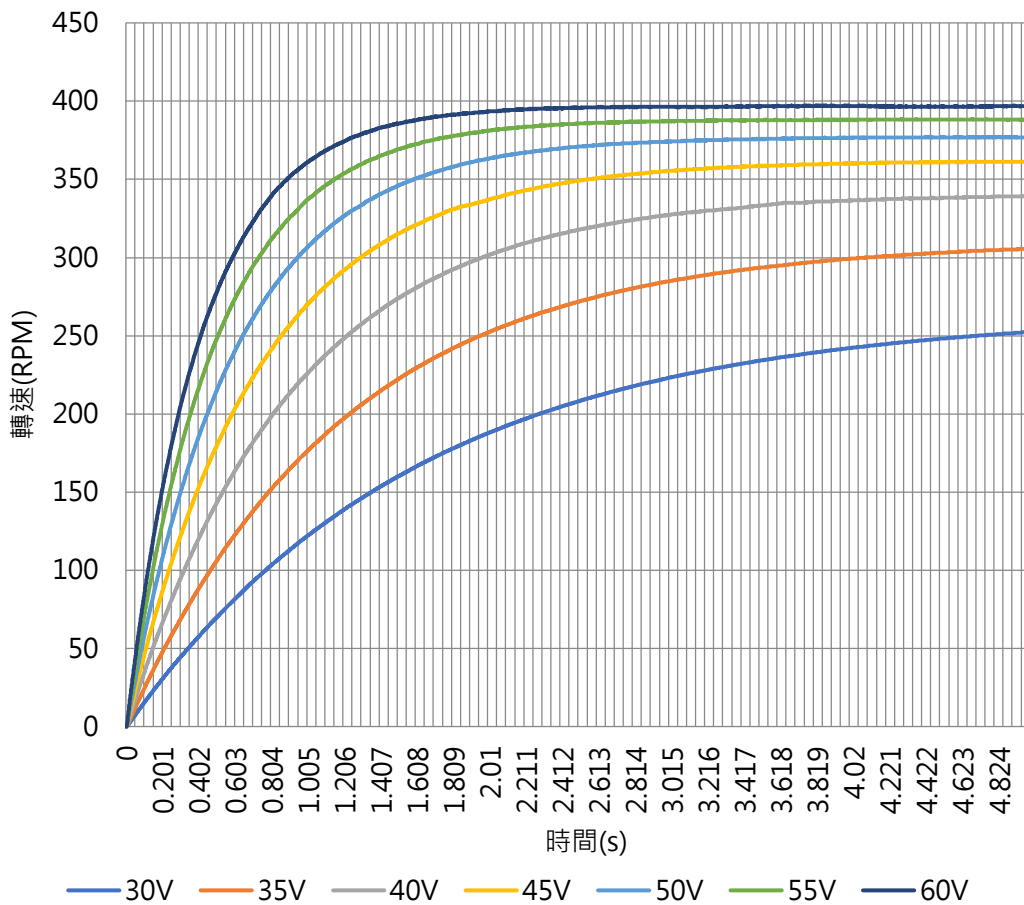


Table 7: 電壓控制下的穩態轉速與安定時間

	30V	35V	40V	45V	50V	55V	60V
穩態轉速 (RPM)	252.35	305.62	339.37	361.22	376.92	388.15	396.74
安定時間(s)	4.44	4.04	3.46	2.87	2.37	1.955	1.65

Figure 22: 模擬- 30Hz~60Hz 頻率控制下的輸出轉速

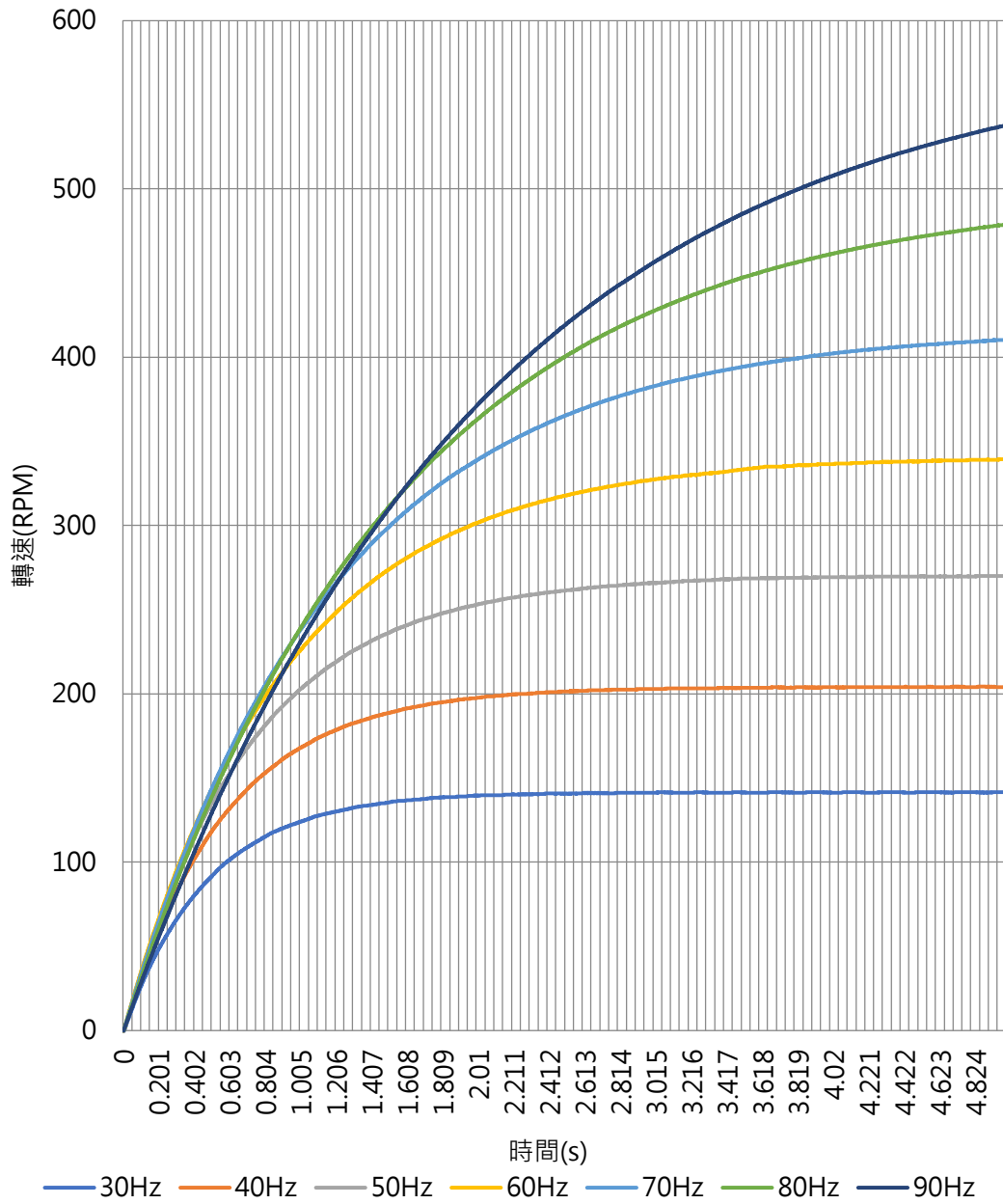


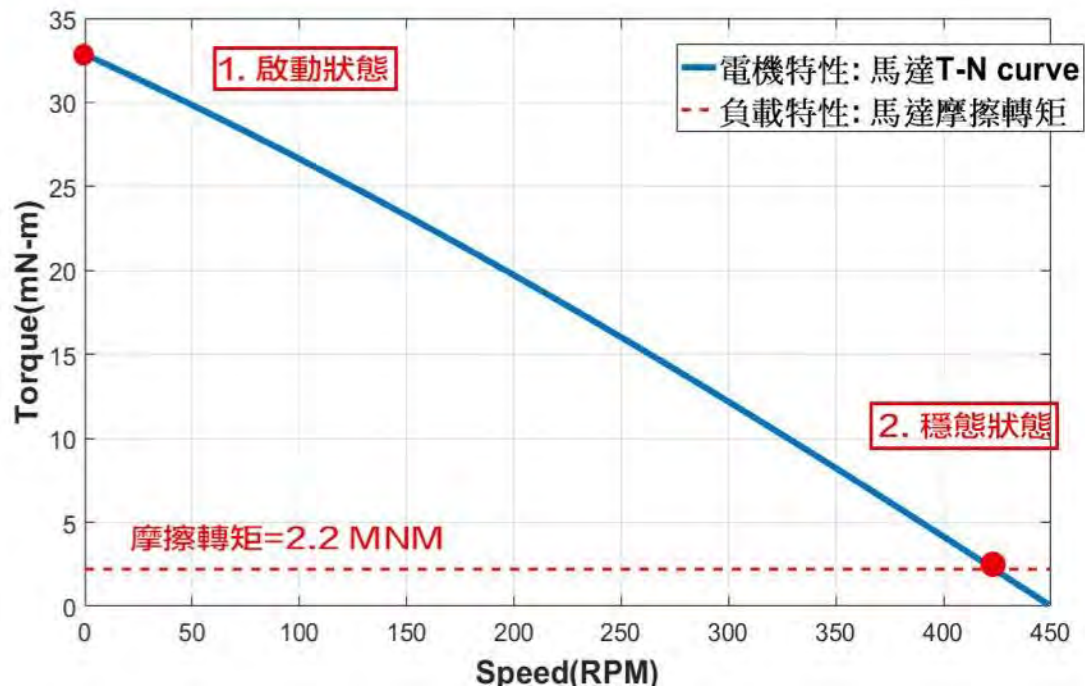
Table 8: 頻率控制下的穩態轉速與安定時間

	30Hz	40Hz	50Hz	60Hz	70Hz	80Hz	90Hz
穩態轉速 (RPM)	141.52	204.18	269.98	339.37	410.36	478.79	537.70
安定時間(s)	1.94	2.29	2.82	3.46	4.02	4.38	4.59

如 Figure 21 與 Figure 22，可以觀察到馬達轉速的加速情形，會在剛啟動時，擁有最大的加速度。隨著轉速的上升，加速度也逐漸下降，最後最終趨近於一個穩態轉速。而研究者也可以從這條代表轉速的曲線上，觀察到馬達的穩態轉速與安定時間，作為評估電機控制效益的重要指標。

而馬達在這個暫態操作下的情形，可以用 Figure 23 來解釋。

Figure 23: 電動機操作區間下的電機、負載特性



(1). 啟動情形：馬達在啟動情形時，轉速為零，輸出轉矩與負載有最大的落差，此時有最大的轉矩輸出與加速度。

(2). 穩態情形：隨轉速升高，T-N curve 上操作點的轉矩值也線性降落，加速度也逐漸趨緩。最後當輸出轉矩等於負載時，馬達進入到穩態，此時的轉速值，即轉速計所量測到的轉速。

研究者也從這兩組電壓、頻率控制暫態轉速曲線中，觀察到兩種控制方法的特性，歸納如下：

- (1). 電壓控制：電壓提高，穩態轉速上升，安定時間也隨之下降。
- (2). 頻率控制：頻率提高，穩態轉速上升，安定時間也隨之上升。

4. 電機控制：模擬馬達在開迴路轉速控制下的轉速響應

以 ANSYS Maxwell 軟體進行磁路的有限元素分析，並考慮了 2.2 mNm 的機械負載與基於 V/F 控制的開迴路控制後，可以得到一條轉速的曲線。

本研究觀察了 V/F 比值為 1 的轉速響應曲線。如 Figure 24，測試了五組數據：40V/40Hz、45V/45Hz、50V/50Hz、55V/55Hz、60V/60Hz，並將模擬結果所得的穩態轉速與安定時間列於 Table 9。

Figure 24: V/F 控制下的轉速響應曲線

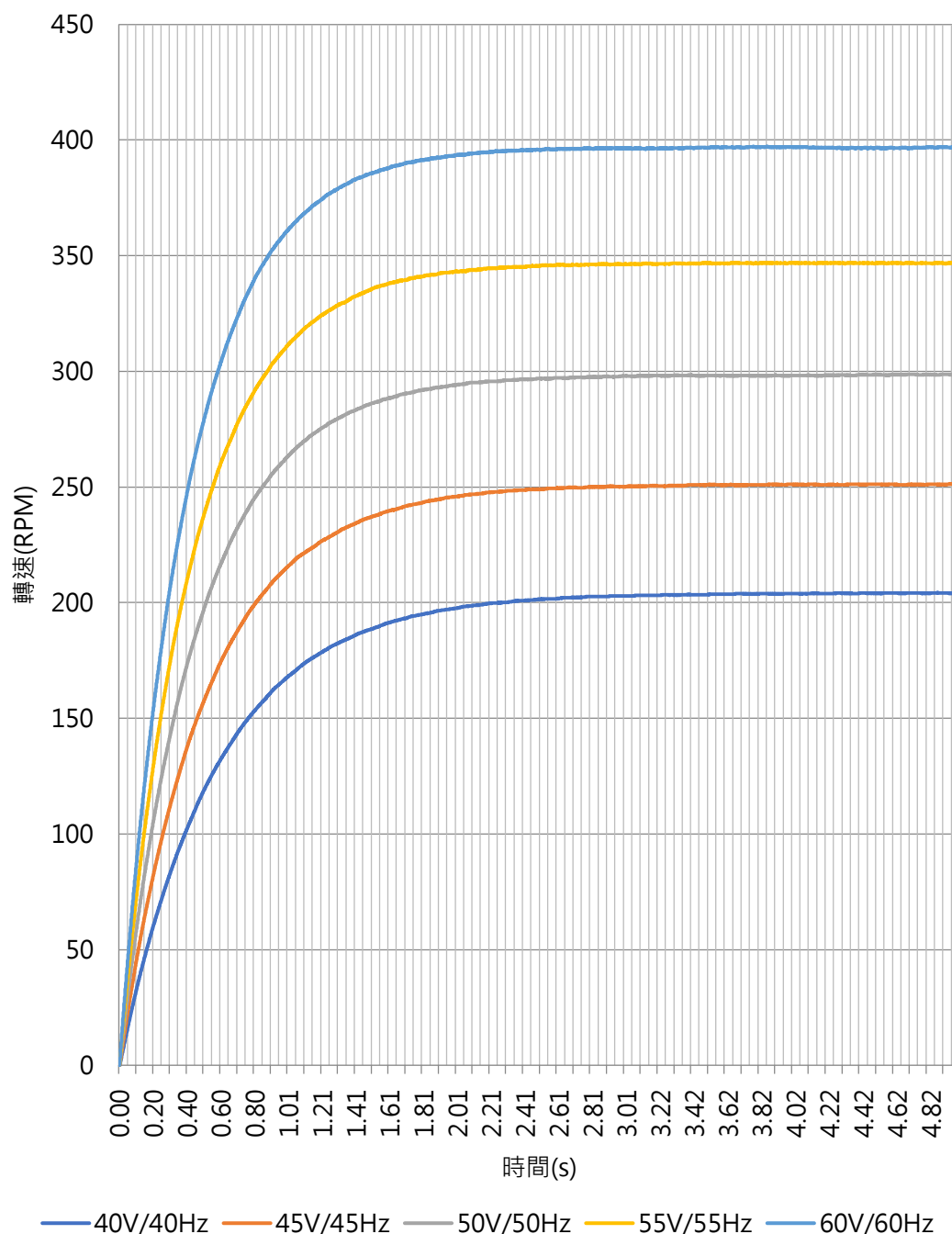


Table 9: 轉速響應曲線的特性資料

	40V/40Hz	45V/45Hz	50V/50Hz	55V/55Hz	60V/60Hz
穩態轉速(RPM)	204.18	251.14	298.58	346.74	396.74
安定時間(s)	2.394	2.036	1.865	1.722	1.638

如 Figure 24，有限元素的分析結果顯示了電壓調升後的轉速響應情形。研究者歸納理論計算與模擬的轉速響應曲線特性如下：

(1). 穩態轉速：與電壓的調升呈現線性的上升趨勢，這部分可以從 Eq. 29 觀察到，轉速將趨近於 $\pi k_1 k_4 \left(\frac{v(k_2+k_3 k_4) - \tau_L}{k_2+k_3 k_4} \right)$ 的大小。

(2). 安定時間：從模擬結果可以發現到安定時間隨著輸入電壓提升略為減少，但在控制理論計算式 Eq. 29 的第二項 $-\frac{k_2+k_3 k_4}{J \pi k_1 k_4} t$ ，代表響應時間與輸入電壓無關，推測是理論中線性化省略了一些參數。

(三) 實作

透過 3D 列印機、雷射切割機等數位製造設備，研究者實作出了一架依電氣規格、機械規格實作的球型感應馬達。以下，將呈現製作的詳細過程。

1. 電機實作：機構組成與電機配置

球型馬達本體為整個系統最關鍵的部分。馬達的電機設計攸關複雜的電磁學理論與經驗，因此本研究採用 ANSYS 有限元素分析軟體輔助設計，優化規格品的轉動表現。以下研究者將一步步說明球型馬達的製作過程。

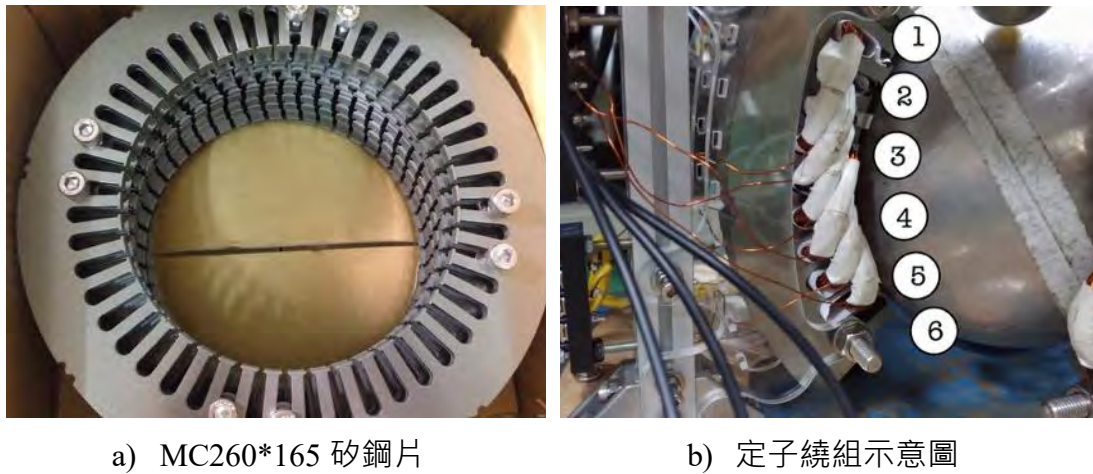
(1). 四組弧形定子的採購與製作：

本研究自矽鋼片廠「麗鋼工業股份有限公司」採購現成標準規格的 MC260*165 型感應馬達定子矽鋼片，如 Figure 26, a)。並以鐵皮剪將圓形的薄片裁切為四塊，作為四組定子的鐵芯。

(2). 四組弧形定子的線圈繞製：

研究者利用了定子鐵芯上的九個槽，手繞了六組線圈。各組匝數 75 匝、跨過三個槽。如 Figure 26, b)，接法上將線圈 1、2 串聯，接上三相電源的 A 相；將線圈 3、4 串聯，接上 B 相；線圈 5、6 串聯，接上 C 相。

Figure 25: 定子設計示意圖



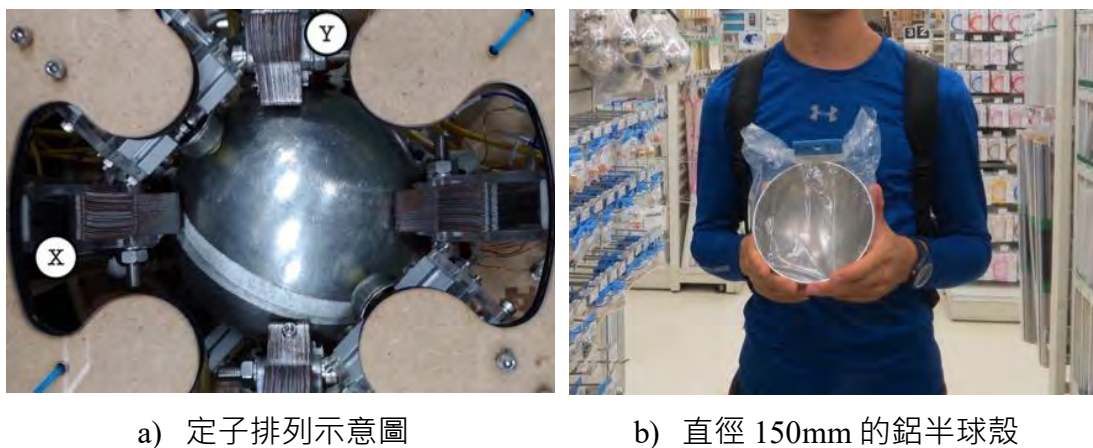
(3). 四組弧形定子的排列形式：

四組定子以 90 度間隔環繞著定子球體，如 Figure 26, a)。相隔 180 度的定子組在 A 相、B 相與 C 相的電源上相互串聯使用同一組電源，形成 X 方向與 Y 方向的獨立控制單元，也藉此操縱轉子球體在空間中的轉向。

(4). 鋁製轉子的採購與製作：

自手工藝材料行購買了兩個外徑 150mm、厚度 2mm 的鋁半球殼，以 AB 膠黏合後，成為我們的內轉子球體，如 Figure 27, b)。

Figure 26: 定子與轉子設計示意圖



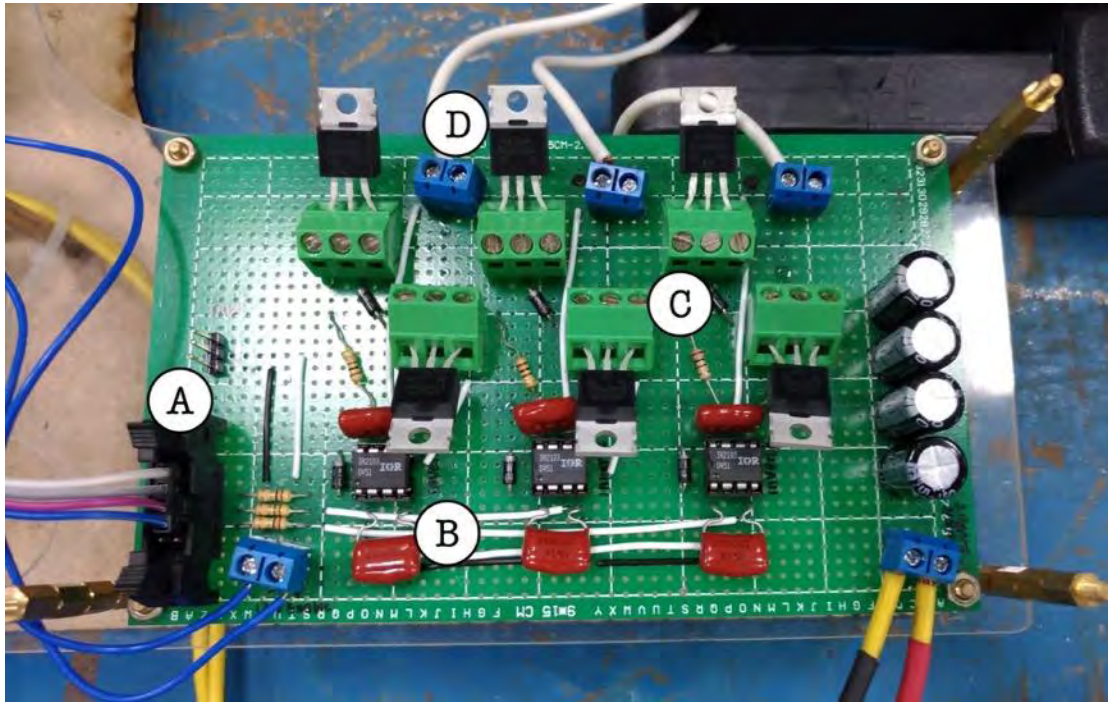
2. 電機實作：球型馬達驅動電路

球型馬達進行球型旋轉的控制邏輯，主要基於兩組獨立調變頻率的定子組。為此，本研究設計了兩組三相的半橋逆變器電路。製作過程如下說明：

(1). 單組三相半橋電路：訊號端

由控制板 Raspberry Pi 輸入等校交流電的 PWM 訊號，如 Figure 28, A，經由驅動晶片 IR2103 的處理，如 Figure 28, B，得以將 3.3V 的數位訊號，放大為 12V 的數位訊號，以推動 MOSFET 電晶體 IRF540N。

Figure 27: 三相半橋式逆變器電路



(2). 單組三相半橋電路：Driver 端

IR2103 這塊驅動晶片內部建制了一組反向器電路，因此會輸出兩組開關邏輯完全顛倒的 PWM 訊號，分別打入上臂 MOSFET 與下臂 MOSFET，如 Figure 28, C，以將 12V 訊號放大為大電所供給的電源。

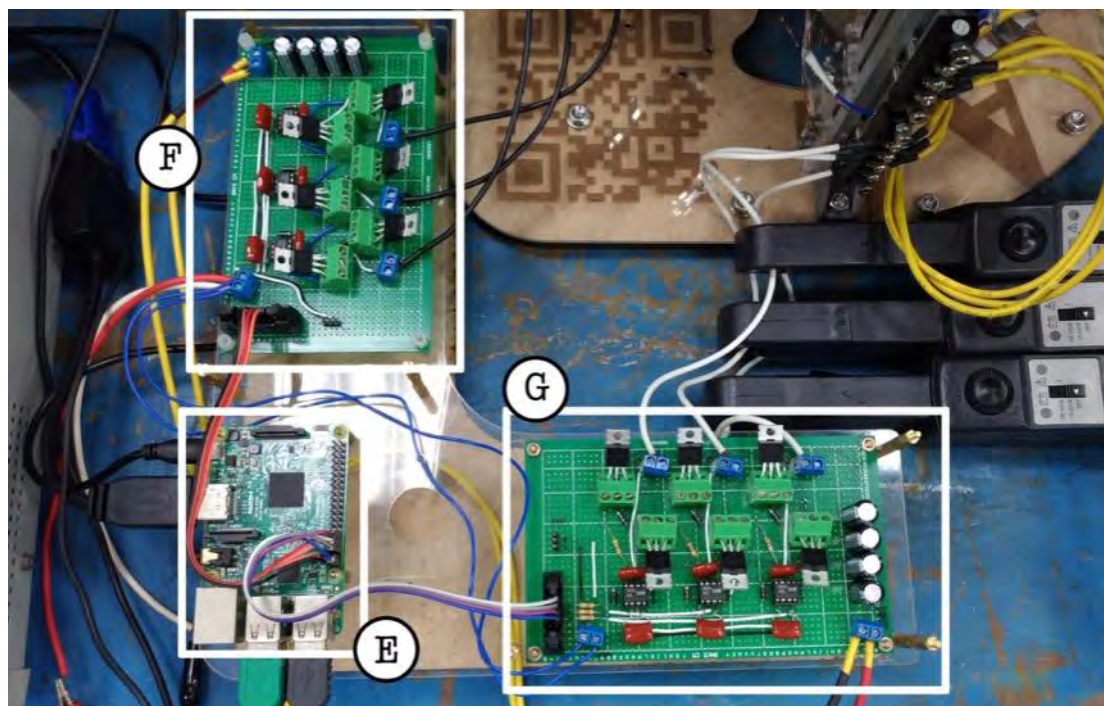
(3). 單組三相半橋電路：MOSFET 端

研究者所採用的 IRF540N MOSFET 電晶體，可以供給 100V, 33A 的大電。當上臂開啟時，該相即導通正極；反之，下臂開啟時，導通負極，以 PWM 方式模擬交流電壓的變化。如 Figure 28, D，為輸出電源。

(4). 整組球型馬達驅動電路：

由控制板 Raspberry Pi 運算兩組相對應頻率的 SPWM，如 Figure 29, E，分別通入兩組三相半橋逆變器電路，如 Figure 29, F/G，放大成為兩組對應於頻率的三相電源，以驅動球型馬達。

Figure 28: 整組球型馬達驅動電路



3. 電機實作：球型馬達控制邏輯

本研究透過 PWM 方式，模擬正弦波電壓變化(Sin-Wave Pulse Width Modulation, SPWM)作為驅動。實作上本研究在控制板 Raspberry Pi 中以 Python 語言撰寫 SPWM 的調變程式。整個程式的控制邏輯如下敘述。

(1). 根據 Joystick 的使用者輸入決定 SPWM 的頻率與電壓：

根據「電機機械」的描述，感應電動機歸屬於「非同步電機」的一類，意即三相電輸入的頻率，會與電動機的實際轉速落差一個 $slip$ 。但在定負載的情形下，本研究仍可以利用輸出轉速、轉矩與輸入電壓、頻率之間的線性關係，進行調速控制，此即前幾章所說的 V/F 控制法。

(2). 根據需求的頻率產生 SPWM：

在調速的控制上，本研究採調變電壓/頻率(V/F control)的開迴路控制。在 Python 語言的實作上，研究者將 PWM 的輸出設為 1000Hz，意即每秒將產生 1000 個方波。而這些方波的佔空比(Duty)決定此時訊號的電壓高低。就能量的角度而言，可以用不同占空比的方波模擬出近似的弦波。

(3). 輸出 SPWM 的限制：

當輸出的 SPWM 的弦波頻率提高時，由於 SPWM 的 PWM 頻率為一

定值，因此代表一個弦波的 PWM 方波數量將會下降，意即由 PWM 所模擬出來的弦波將會有失真的現象。因此顧及 Raspberry Pi 的 PWM 頻率以 1000Hz 為上限，本研究將弦波頻率的調變控制在 30~90Hz。

(4). 三相交流電源在球型馬達定子上做功的方法：

由於本研究採半橋式的逆變器，因此經 PWM 調變後放大的電壓，雖然可以模擬出大小變化的電壓，但終究只能在零到大電壓峰值的區間內做變化，也因此無法呈現出弦波中應該要有的負方向區間的部分。

這部分本研究引入了「線電壓」與「相電壓」的觀念來進行控制。意即：逆變器端所輸出，是製造了一個電壓的變化，我們稱之為「線電壓」；但真正在定子線圈上做功的，是兩兩相之間的電壓差所造成的電流，稱之為「相電壓。」

因此，在 SPWM 的佔空比(Duty)設定上，原有的交流電弦波佔空比列為 Eq. 32，將換作為 Eq. 33 的佔空比設定。

$$V = V_p \cdot \cos(\text{time}) \quad \text{Eq. 32}$$

$$V = V_p \cdot \frac{\cos(\text{time}) + 1}{2} \quad \text{Eq. 33}$$

意即弦波式的電壓波動，只發生在正電壓的區間。即便如此，馬達的三相電路，仍能透過相電壓做功。

4. 電機實作：完成球型感應馬達

完成上述所有的製作後，本研究完成了一架可以實際運轉的球型馬達。整個系統如 Figure 29 所示，其運轉流程如下。

- (1).指令輸入：使用者藉由 Joystick 輸入 X,Y 方向旋轉的指令
- (2).指令解析：以 Raspberrypi 接受 Joystick 的指令，並計算 X,Y 軸應輸出的轉速
- (3).轉速控制：根據 V/F 純量控制法計算 SPWM 訊號，打出 SPWM 給逆變器
- (4).三相半橋式逆變器放大訊號：由 MOSFET 晶體組成的三相半橋逆變器電路⁵，將兩組 SPWM 訊號放大輸入定子
- (5).達成球型旋轉模式：兩組 SPWM 分別輸入兩組互相正交的定子，造成兩組互相垂直的推力，由此組合出全方向的旋轉。

⁵ 由六顆電晶體組成，目的是將輸入的直流電源轉換為輸出的交流電源，詳見“電力電子學”

Figure 29: 球型馬達系統總圖

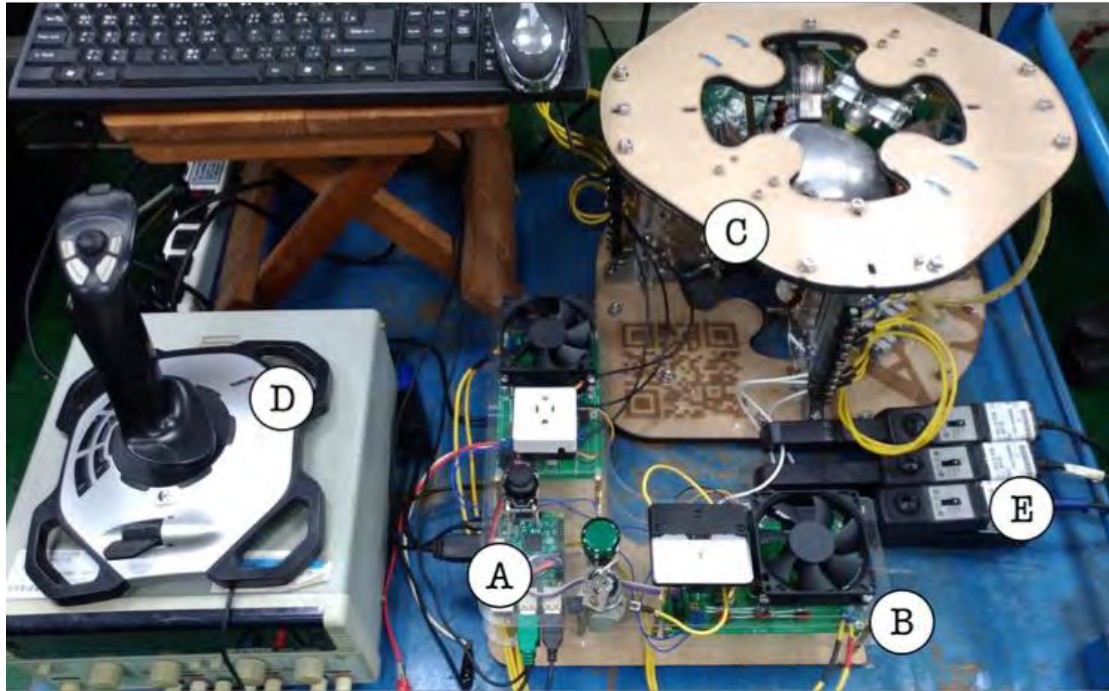


Table 10: 球型馬達系統組成物件說明

物件	名稱	用途
A	Raspberry pi ⁶	讀取 Joystick 的輸入訊號，並透過 Python 程式調變兩組 SPWM 以驅動馬達
B	三相半橋逆變器電路	以驅動晶片 IR2103 與 MOSFET 晶體 IRF540N 為主體的逆變器電路，可以放大 Raspberry Pi 所輸入的 PWM 訊號
C	球型馬達本體	由四組定子構成，各組定子包含六個感應線圈，以感應方式產生轉矩
D	Joystick	輸出使用者所輸入得 X 軸位移、Y 軸位移量，讓使用者能控制球型馬達的轉向
E	電流勾表	監控輸入馬達的三相交流電，從波形判斷驅動器是否正常工作

⁶ 一款基於 Linux 的單板電腦，可以透過 Python、java 等語言編寫，本研究以它作為控制中樞

(四) 實驗

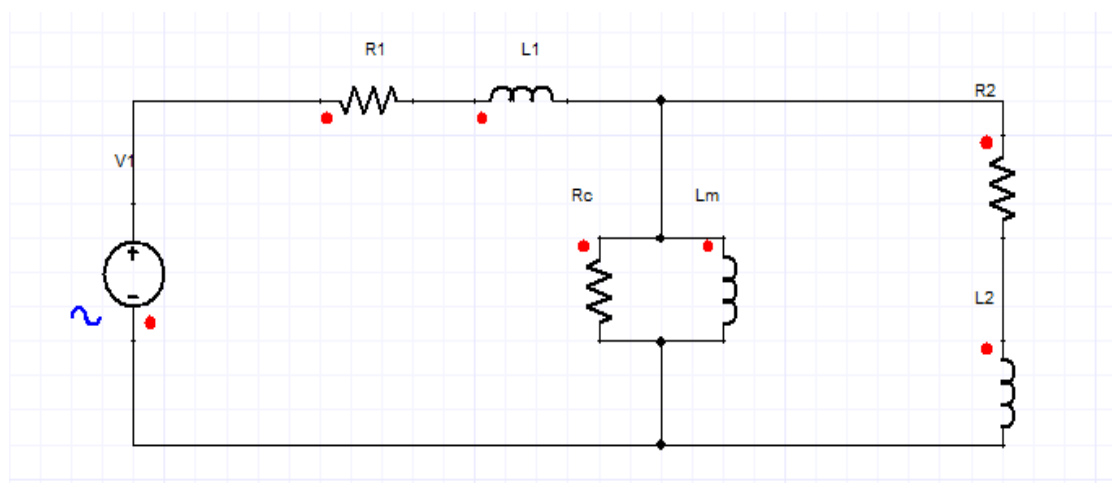
本章將針對球型感應馬達的實體，進行一系列的實驗。包括 1) 第一節中所推導的等效電路理論，在本章以實驗方式決定出等效電路的各項阻抗大小。2) 透過轉速計量測球型馬達的轉速，以驗證理論、模擬中對於電壓控制、頻率控制與 V/F 控制預期結果的正確性。

1. 電機驅動：等效電路參數量測

接續研究過程—理論所推導的等效電路理論，本研究在完成電機實作後，將實驗方式來決定出等效電路上的參數。

首先觀察 Figure 30 的等效電路圖，以下實驗將量測出電路上的被動元件電阻、電感值。測試方法是根據 IEEE Std.112 的多項感應馬達標準測試流程所進行的 (IEEE Power Engineering Society, 2004)。為簡化測試結果的運算過程，本研究先將電路視為三個阻抗的串、並聯，如 Figure 31, a)。詳細方法與步驟如下：

Figure 30: 球型感應馬達-單相等效電路圖



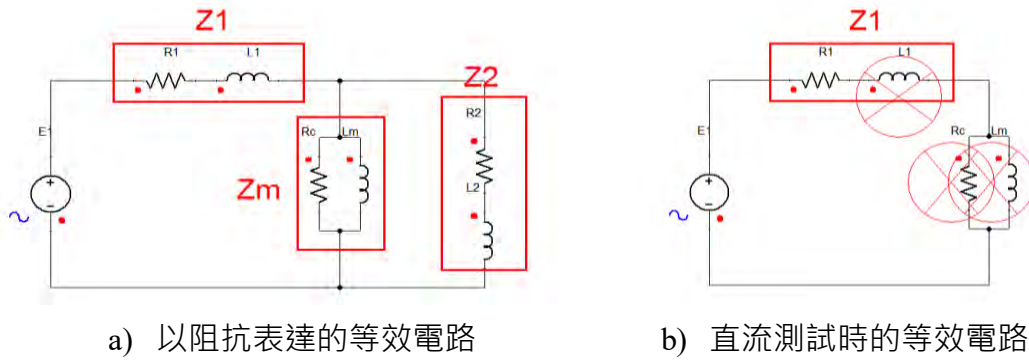
(1). 測量 Z_1 :

單純的實驗量測無法單獨量測到一次側電阻 R_1 與一次側電抗 X_1 。因此，研究者同時以實驗量測、理論公式估測的方式進行了：直流測試(DC Test)決定一次側電阻 R_1 、以計算導出 X_1 ，即可決定 Z_1 。

進行直流測試時，研究者首先移除轉子(鉛球)，因直流時鐵損電阻 R_c 、與激磁電感 L_m 不影響測試，此時的等效電路可簡化如 Figure 31, b)。由 RLC meter 可測得一次側電阻 R_1 。

通常，漏電感的來源有以下幾種。

Figure 31: 測試情況下的等效電路圖



- 1) 槽部漏電感(Slot Leakage Inductance)
- 2) 齒部漏電感(Tooth-Tip Leakage Inductance)
- 3) 端部漏電感(End-Winding Leakage Inductance)

本系統只考慮影響最大的齒部漏電感、端部漏電感的值，來進行整顆馬達的漏電感計算。在標準的感應馬達測試中，測試結果通常無法分開漏電感 L_1 與轉子電感 L_2 ，因此以查表的方式分離。但本研究所研發的球型馬達，是全新的電機機械，沒有經驗比例可查。因此採用了 (T.Tudorache, O.Craiu, A.Machedon, M.Morega, & M.Popescu, 2011)所提出的端部漏電感 L_1 計算公式來分析：

$$L_{EW} = \frac{0.68 \cdot \mu_0 \cdot w_1^2}{p} \cdot (L_t - 0.64\tau_p) \quad \text{Eq. 34}$$

其中， μ_0 為真空導磁率、 w_1 為線圈總匝數、 L_t 為端部總長、 τ_p 則為極距。則可以算得端部漏電感 L_1 約為3.11mH。

接者以磁路的方式來估算齒部漏電感。如 Eq. 35，電感可被定義成為磁交鏈與電流的比值。

$$L = \frac{\lambda}{I} = N \cdot I \quad \text{Eq. 35}$$

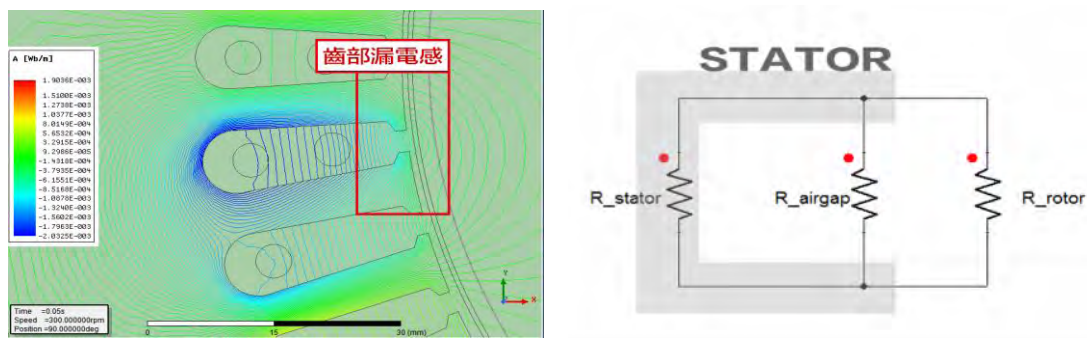
等效電路中將漏電感視為沒有作用到二次側的磁通，所造成的電感因此可以由氣隙磁阻 R_{AG} 的路徑「齒部-氣隙-齒部」與轉子磁阻 R_R 的路徑「齒部-氣隙-二次側-氣隙-齒部」，算得磁阻大小，如 Eq. 36 與 Eq. 37。

$$R_{AG} = \sum_{i=1}^{\left[\frac{\tau_p+2h}{d}\right]} \frac{li}{\mu A} \quad \text{Eq. 36}$$

$$R_R = \sum_{\left[\frac{l+2h}{d}\right]+1}^{\left[\frac{d_{max}}{d}\right]} \frac{li}{\mu A} \quad \text{Eq. 37}$$

其中， h 為氣隙深度， d 則為齒寬。假定磁通的路徑為長方形時，可算得磁阻。如 Figure 32, a)，氣隙磁阻 R_{AG} 與轉子磁阻 R_R 為並聯，因此可由兩者間的比值，推算出氣隙磁通 ϕ_{AG} 與轉子磁通 ϕ_R 。則根據 Eq. 35，得齒部漏電感 L_t 與激磁電感 L_m 的比例約為1.85：1.83。

Figure 32: 馬達磁路示意圖



a) 齒部漏電感示意圖

b) 簡化成磁路形式的定子齒部

在確定了線圈電阻 R_1 與漏電感 L_1 之後，可決定出 Z_1 為：

$$Z_1 = R_1 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_1 \quad \text{Eq. 38}$$

(2). 測量 Z_m ：

透過 RLC Meter 以交流的方式進行無載測試(No Load Test)，由於是在轉子被移除的情況下測量，此時的等效電路如 Figure 33, a)。量測得的結果我們設為 Z_{NL} ，它符合以下關係：

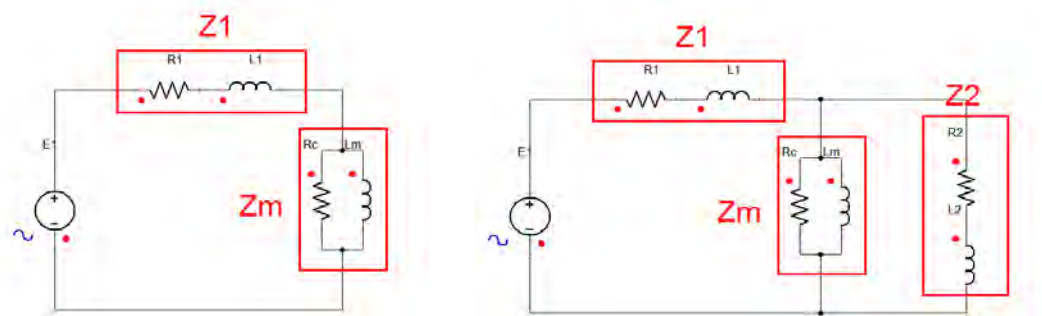
$$Z_{NL} = Z_1 + Z_m \quad \text{Eq. 39}$$

而 Z_m 又是鐵損電阻 R_c 與激磁電感 L_m 並聯的結果，將 Z_{NL} 減去 Z_1 即可得到 Z_m 。求解電路學公式後可得到 R_c 與 L_m ：

$$R_c = \frac{Re[Z_m]^2 + Im[Z_m]^2}{Re[Z_m]} \quad \text{Eq. 40}$$

$$L_m = \sqrt{\frac{Re[Z_m] \cdot R_c^2}{R_c - Re[Z_m]}} \cdot \frac{1000}{2\pi f} \quad \text{Eq. 41}$$

Figure 33: 測試實驗進行時的等效電路圖



a) 無載測試時的等效電路圖

b) 堵轉測試時的等效電路圖

(3). 測量 Z_2 :

透過 RLC Meter 以交流的方式進行堵轉測試(Blocked Rotor Test) , 此時轉子已被放置回球型馬達上。以 1V 的低電壓進行測試 , 因此轉子不會旋轉。

此時轉差率為 1 , 二次測的等效電阻 $R_2/slip$ 即為 R_2 。這時候的堵轉測試阻抗 Z_{BT} 可表如 Eq. 42 。透過電路學運算 , 可以求解得二次測阻抗 Z_2 , 如 Eq. 43 。則可以分別求得 R_2 與 L_m 如 Eq. 44 、 Eq. 45 。研究者將所有等效電路上量測得的參數整理如 Table 11 。

$$Z_{BT} = Z_1 + \frac{Z_m \cdot Z_2}{Z_m + Z_2} \quad \text{Eq. 42}$$

$$Z_2 = \frac{Z_1 \cdot Z_m - Z_{BT} \cdot Z_m}{Z_{BT} - Z_1 - Z_m} \quad \text{Eq. 43}$$

$$R_2 = Re[Z_2] \quad \text{Eq. 44}$$

$$L_2 = \frac{Im[Z_2]}{2\pi f} \quad \text{Eq. 45}$$

Table 11: 等效電路測試結果

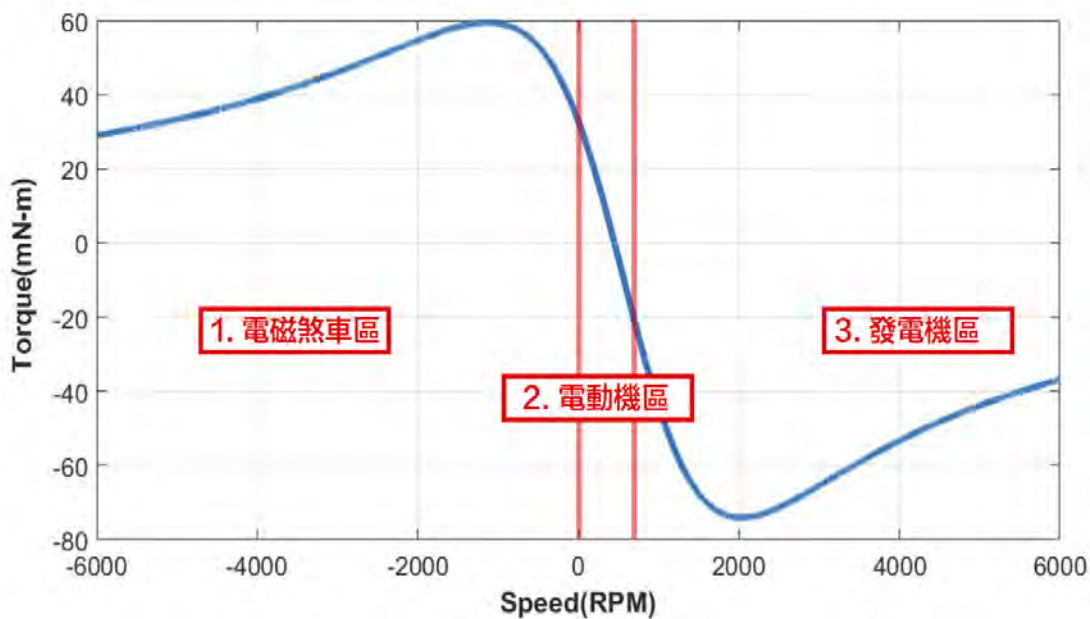
R_1	L_1	R_c	L_m	R_2	L_2
6.51Ω	8.53 mH	170.67 Ω	5.42 mH	16.34 Ω	13.18 mH

2. 電機驅動：以穩態轉速驗證電壓控制、頻率控制的正確性

球型感應馬達在-6000 到 6000 RPM 操作下的 T-N curve，可以被零轉速、同步轉速劃分成三個區域，如 Figure 34，說明如下：

- (1). 電磁煞車區：此時機械轉速為負，與旋轉磁場反向，有煞車的效果
- (2). 電動機區：機械轉速介於零到同步速之間，為球型馬達的操作區
- (3). 發電機區：大於同步速後的區間，此時能以反電動勢發電

Figure 34: 基於等效電路法的球型馬達 T-N curve



馬達的轉速開回路暫態操作情形，會是過阻尼(Over-damping)的狀況，即阻尼比 >1 。即轉速將在一段響應時間後，進入到該操作點的穩態轉速，輸出轉矩等於負載。此時，轉速計會量測得穩態轉速。考慮摩擦是系統的唯一負載，則可量得 N_{fric} ，並計算摩擦轉矩 τ_{fric} ，如 Eq. 46。

$$\tau_{fric} = N_{fric} \cdot r \quad \text{Eq. 46}$$

其中， r 為轉子的半徑。如 Figure 35, a)，透過拉力計進行量測實驗，得 τ_{fric} 約為 2.2 mNm。

由於機械系統的黏滯摩擦係數無法測量，因此本研究不考慮黏滯摩擦造成的影響。將這些關於機械系統的負載特性，代入研究過程—理論中的開迴路控制理論，與研究過程—模擬的有限元素分析法後，可以觀察到馬達的暫態轉速曲線。

Figure 35: 實驗方法



a) 以拉力計進行的摩擦轉矩量測

b) 以轉速計進行的轉速量測

如 Figure 35, a) · 研究者在球型馬達表面黏貼 8 條不反光點，再利用鋁球表面反光的特性，以轉速計的平均速度模式，量測馬達的穩態轉速。

如 Figure 36 與 Table 12，研究者對電壓控制在 30V~60V 的 7 組數據；如 Figure 37 與 Table 13，頻率控制在 30Hz~90Hz 的 7 組數據，分別測試了 10 次，得出 RMS 的平均穩態轉速。數據表列如下：

Figure 36: 30V~60V 電壓控制下的穩態轉速

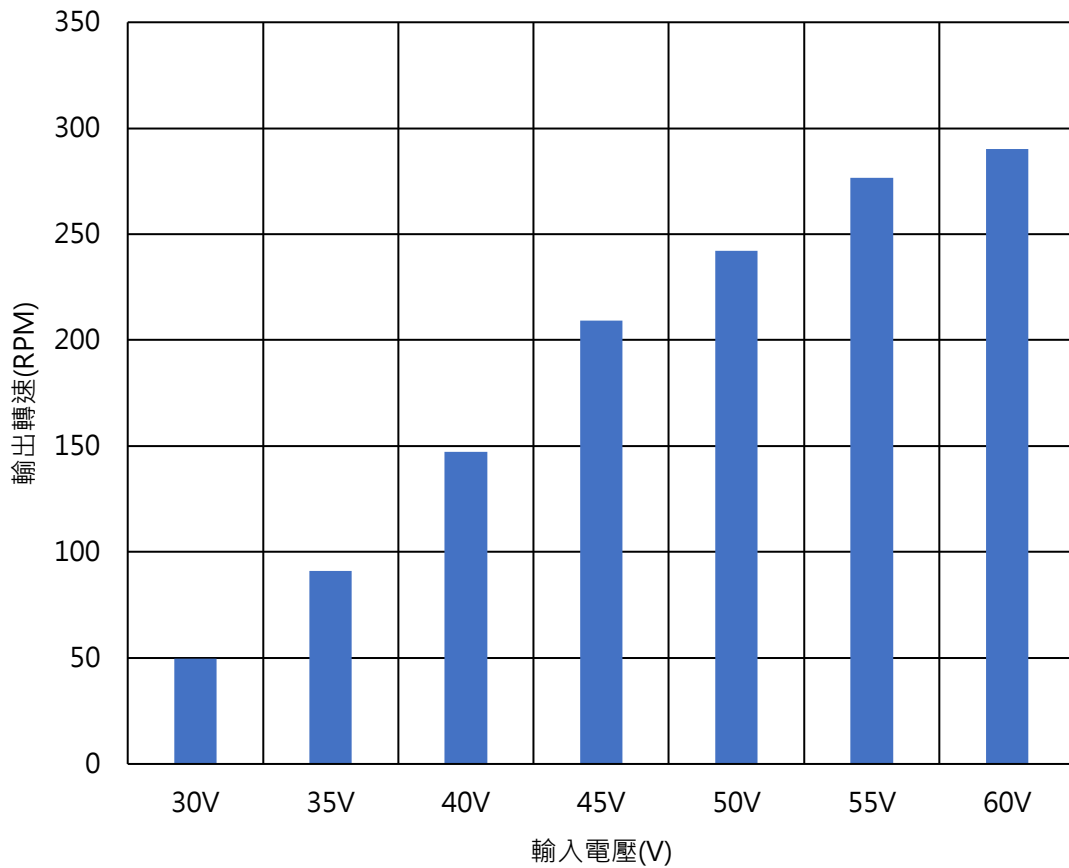


Figure 37: 30Hz~90Hz 頻率控制下的穩態轉速

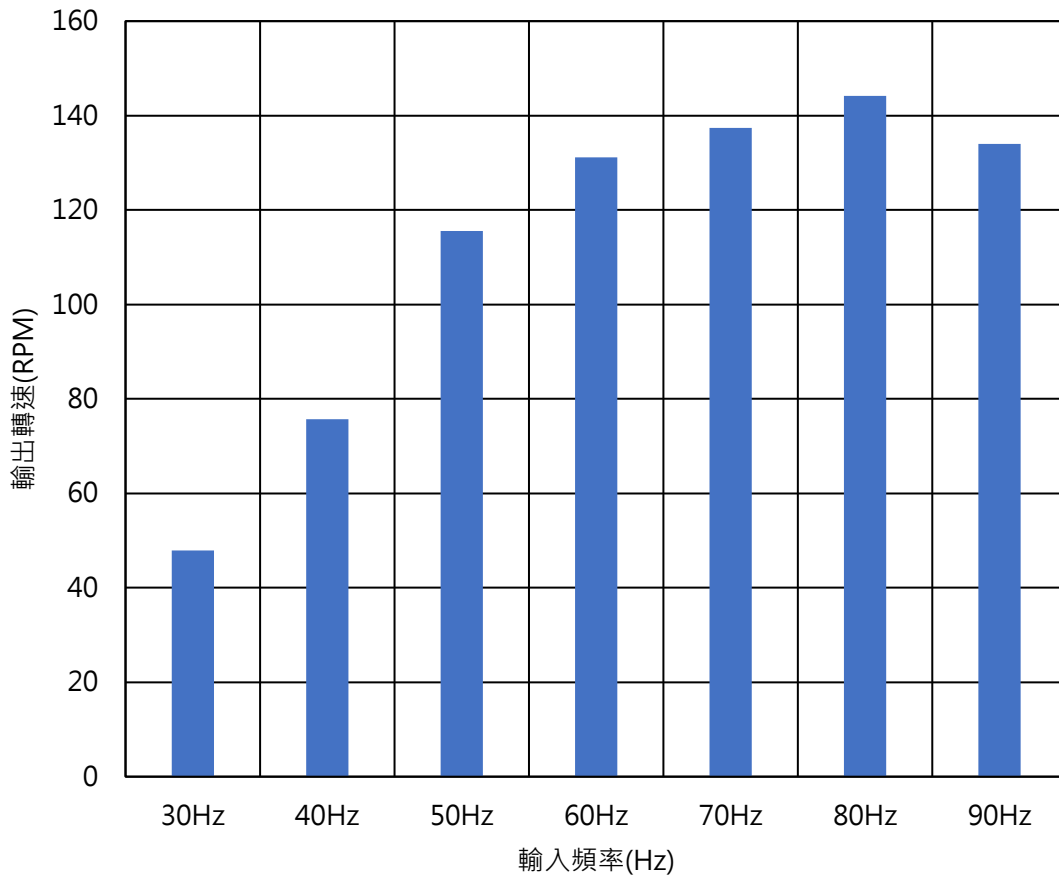


Table 12: 電壓控制下的穩態轉速(RPM)

	30V	35V	40V	45V	50V	55V	60V
轉速 (RPM)	49.7	91.2	147.2	209.2	242.1	276.6	290.2

Table 13: 頻率控制下的穩態轉速(RPM)

	30Hz	40Hz	50Hz	60Hz	70Hz	80Hz	90Hz
轉速 (RPM)	47.9	75.7	115.6	131.1	137.4	144.2	134

參、研究結果與討論

一、研究結果

(一) 電機設計：以模擬方式訂出機械、電氣規格

本節將依序從所能取得的規格品訂出 1)幾何的機械規格、2)由模擬訂出繞線的機械規格，最後再由 3)模擬訂出額定的電氣規格。

1. 機械規格：從規格品訂出材質與定、轉子幾何

在設計與實作上，考量到成本因素，只能從規格品著手。以下為本研究採用的兩種規格品：

- (1). 定子：感應馬達定子矽鋼片
- (2). 轉子：空心鋁合金半球殼

則研究者可以訂出馬達的機械規格如下：

Figure 38: 球型感應馬達機械規格示意圖

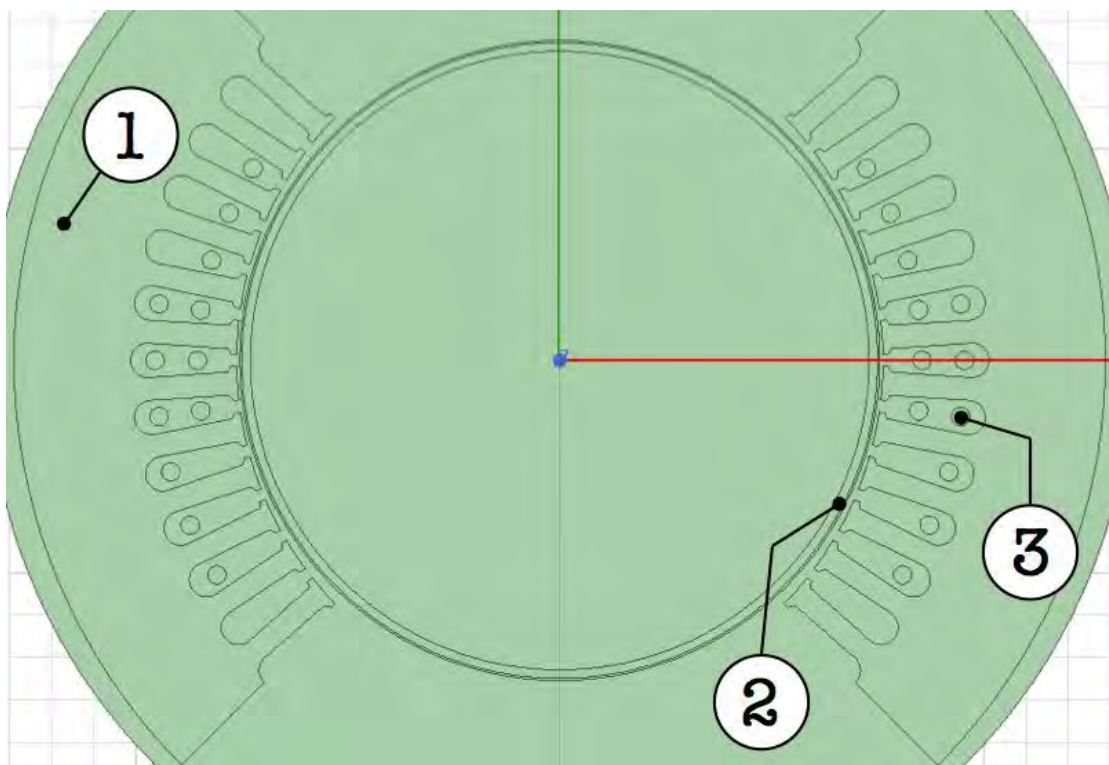


Table 14: 球型感應馬達的機械規格-材質

1.定子	50CS470 矽鋼片
2.轉子	6061 鋁合金
3.線圈	銅

Table 15: 球型感應馬達的機械規格-幾何

氣隙	1mm~3mm
轉子外徑	150mm
轉子內徑	146mm
定子外徑	260mm
定子內徑	165mm

其中，定子的矽鋼片板採用了麗鋼工業的 MC260*165 型的定子規格品。因此，定子的齒槽設計為該公司所發行的規格。

為了契合球型馬達所需，研究者利用鐵皮剪將 48 槽的定子，裁切成 9 槽、各佔 90 度的定子片，作為球型感應馬達的定子，其規格如下。

Figure 39: 球型感應馬達機械規格- 定子齒槽設計

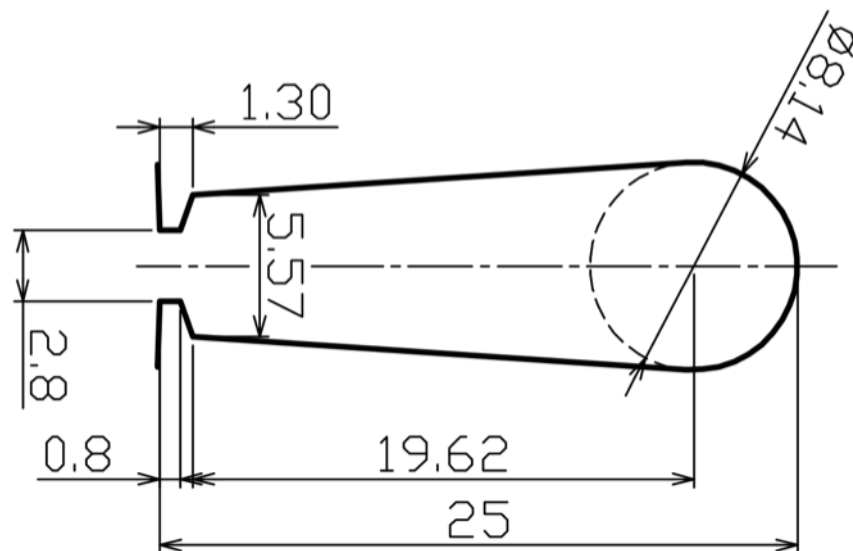


Table 16: 球型感應馬達的機械規格- 定子設計

槽數	9
槽深	25mm

2. 機械規格: 依據有限元素法設計定子繞線

依據定子的齒槽幾何，研究者在有限的 9 個槽、六組線圈內，規畫了兩種繞線方式。參考 Figure 40，所設計的兩種繞法分列如下：

- (1). 兩極繞法：線圈 1 號與 2 號接 A 相、線圈 3 號與 4 號接 B 相、線圈 5 號與 6 號接 C 相
- (2). 四極繞法：線圈 1 號與 4 號接 A 相、線圈 2 號與 5 號接 B 相、線圈 3 號與 6 號接 C 相

Figure 40: 定子繞線示意圖

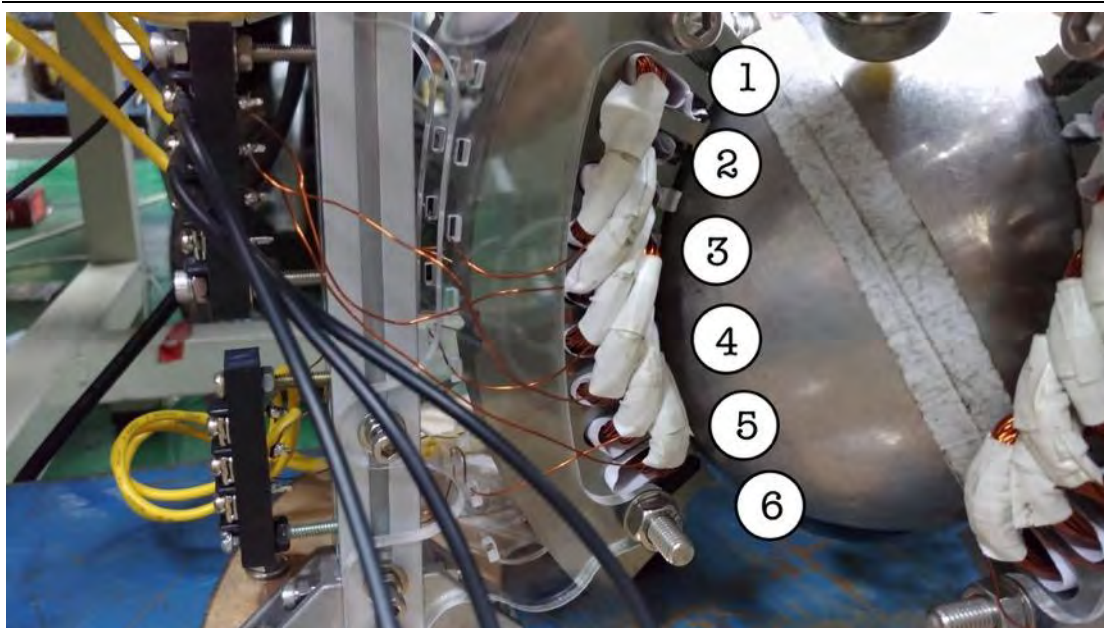
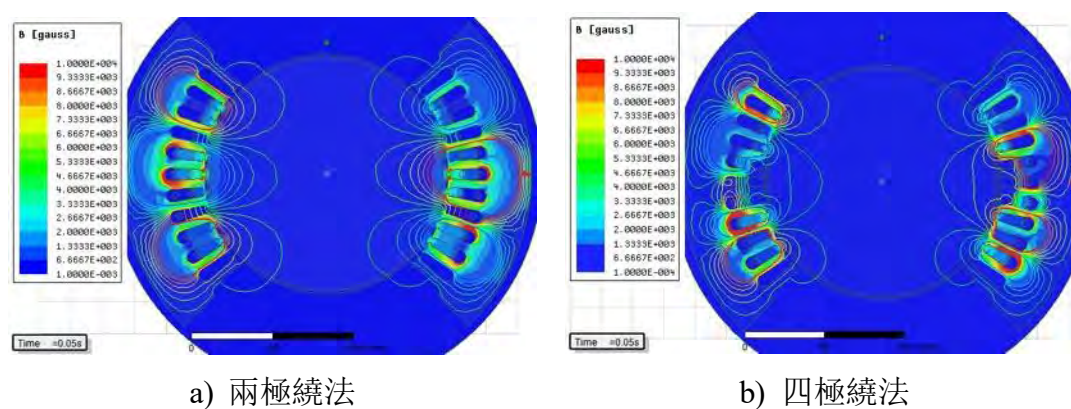


Figure 41: 以有限元素法對兩種繞線方式進行模擬

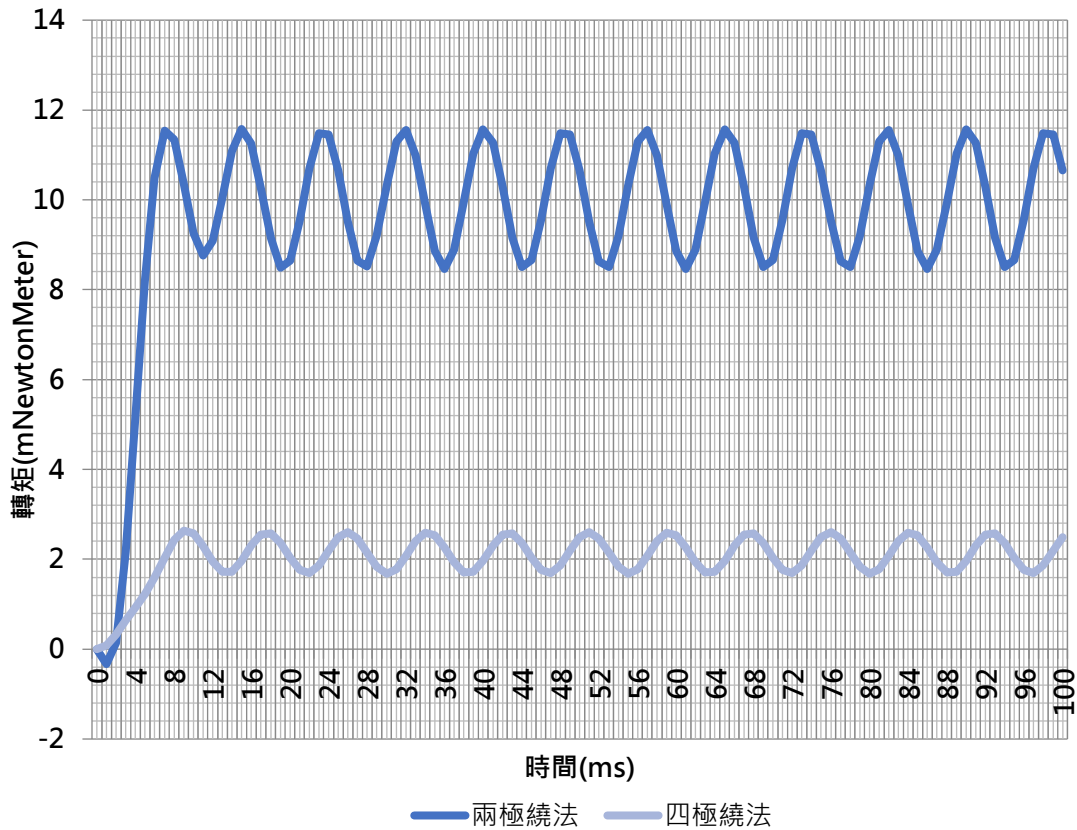


如 Figure 41，研究者對兩種繞線方法進行了磁路的有限元素分析。同樣在 40V、60Hz 的輸入電壓下，模擬出了馬達的磁通密度分佈圖。

透過觀察可以得到，四極繞法的磁通密度在第三、第四組線圈處，有被削弱的情形，因此而得到較弱的磁通密度。

接著比較這兩種操作情形下的堵轉轉矩，如 Figure 42。

Figure 42: 兩種繞線方式的轉矩堵轉比較



根據模擬結果，可以觀察到兩極繞法在輸出的轉矩上，足足高了 4 倍之多。觀察 Figure 41, b)，採用四極繞法會削弱馬達磁通，因為空間過於狹窄，相與相之間繞線重疊的部分過多，導致磁動勢相互抵消。

依據標準的定子線圈繞法，線圈的繞線應符合下列公式：

$$Y_p = \frac{S}{poles} - K \quad \text{Eq. 47}$$

其中， Y_p 代表了繞線的節距，即跨槽數目、 S 則代表了可以繞線的槽數、 $poles$ 為馬達的極數、 K 則為使節距為整數所加入的係數。

依據標準的定子繞法，兩極的電機應配置 6 個槽、使節距為 3；四極的電機應配置 12 個槽、使節距為 3。

然而，本研究所製作的球型感應馬達，槽數只有 9，故而無法採用標準的繞線形式，而必須在兩極、四極的繞線方式做選擇。

依據有限元素法的分析結果，研究者最後採用了兩極的繞法。並歸納球型感應馬達繞線的機械規格如 Table 17。

Table 17: 球型感應馬達的機械規格- 繞線設計

極數	2
節距	3
線圈數目	6
單組線圈匝數	75
單組線圈線徑	0.5mm
線圈絕緣等級	B(耐溫攝氏 130 度)

3. 電氣規格: 由有限元素法決定額定輸入

決定了機械規格後，研究者根據所選用的萬向滾珠與轉子重量，預估系統的負載約為 5mNm，因此在決定電氣規格時，應使輸出轉矩大於 5mNm。以 ANSYS Maxwell 軟體進行有限元素分析，模擬了輸入電壓為 20V、40V、60V、80V、100V 時的穩態的堵轉轉矩，如 Figure 43，並歸納不同輸入電壓與堵轉轉矩的關係如 Table 18。

Figure 43: 20V~100V 輸入時的堵轉轉矩

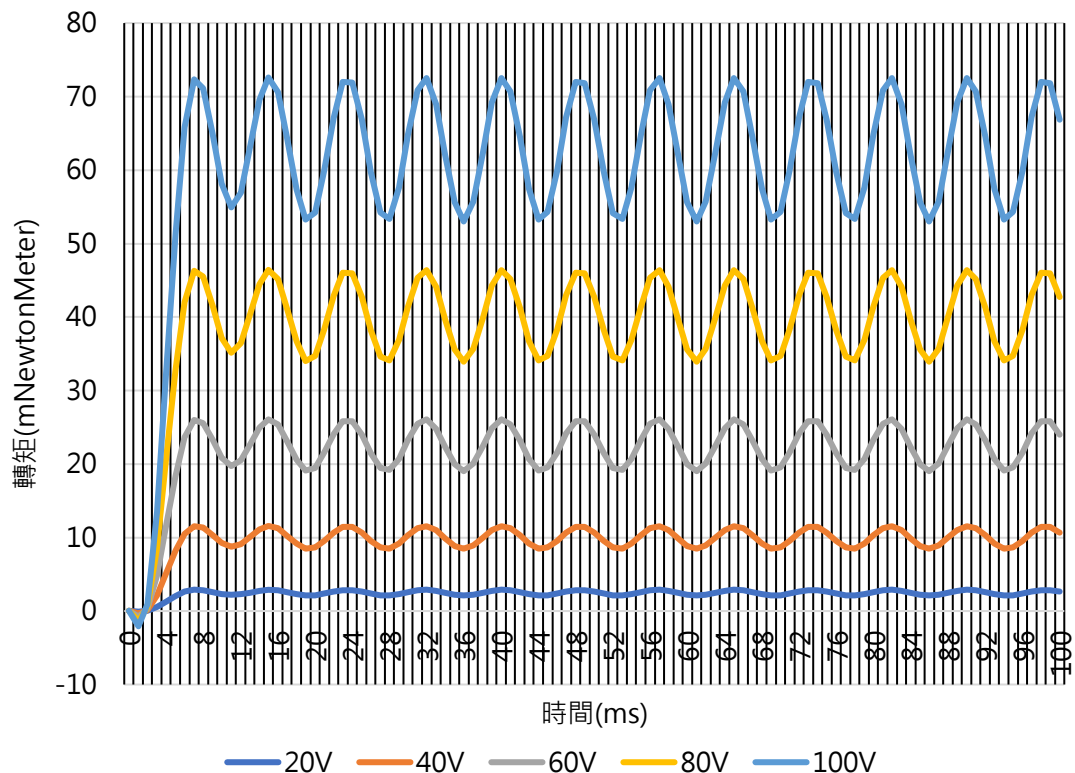


Table 18: 不同輸入電壓下的輸出堵轉轉矩比較

輸入電壓 (V) ⁷	輸入功率 (W) ⁸	堵轉轉矩 (mNm)	線圈電流密度 (A/mm ²)
20	19.8	2.52	6.72
40	79.2	10.11	13.45
60	178.2	22.78	20.17
80	316.8	40.54	26.89
100	495	63.39	33.61

除了必須使轉矩輸出大於負載，研究者也需考量線圈本身所能承受的溫度，以等級 B、耐溫攝氏 130 度的線圈規格而言，線圈所能長時間操作的電流密度介在 6~8 A/mm² 之間。

研究者在輸出轉矩與線圈電流密度之間做了取捨，研究者最後選用 50V、20A、1000W 為輸入電源，將最能符合這顆球型感應電動機的需求。至此訂出了所需要的電氣規格、以及所預期的輸出。

Table 19: 球型感應馬達的電氣規格

輸入電壓	50V
輸入電流	20A
輸入功率	1000W
驅動電路輸出電壓	30V~50V
驅動電路輸出頻率	30Hz~90Hz

Table 20: 球型感應馬達預期機械輸出

預期輸出轉矩	10mNm~30mNm
預期輸出轉速	300RPM~600RPM

⁷ 本研究所指的是輸入三相交流電的電壓峰值

⁸ 本研究所指的實功率

(二) 電機實作：完成球型馬達實體

基於前一節—電機設計所訂出的機械、電氣規格，本研究完成了一架基於感應式激磁的球型感應馬達系統。這部系統包含了控制程式、驅動電路與球型感應馬達本體。系統組成分述如下：

(1). 操作程式：

基於 V/F 控制對 X 軸、Y 軸定子進行開回路的轉速控制。藉由兩道互相正交的推力，組合出球型旋轉。

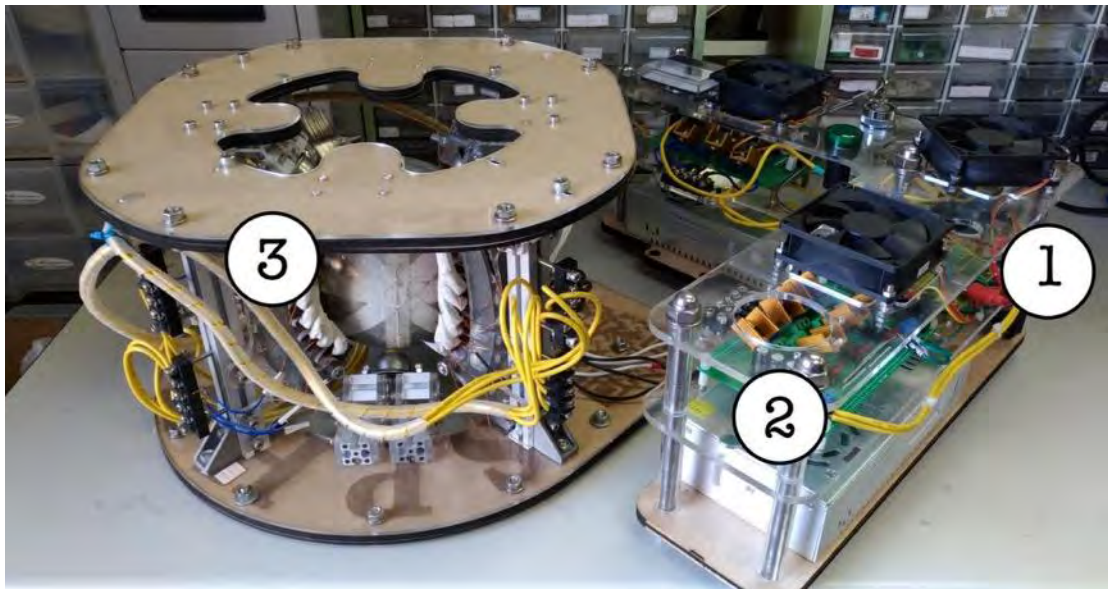
(2). 驅動電路：

由控制版的給出 SPWM 訊號，輸入兩組三相半橋式逆變器電路，放大為供應給馬達的三相電，分別推動 X 軸、Y 軸向的定子。

(3). 球型感應馬達：

由球型的鋁製轉子、兩組 X 軸向/Y 軸向定子組成。接收了驅動電路所供應的三相電，以電磁感應方式產生互相正交的轉矩。

Figure 44: 球型感應馬達系統總圖



(三) 電機驅動：以 SPWM 驅動法實現電壓、頻率控制

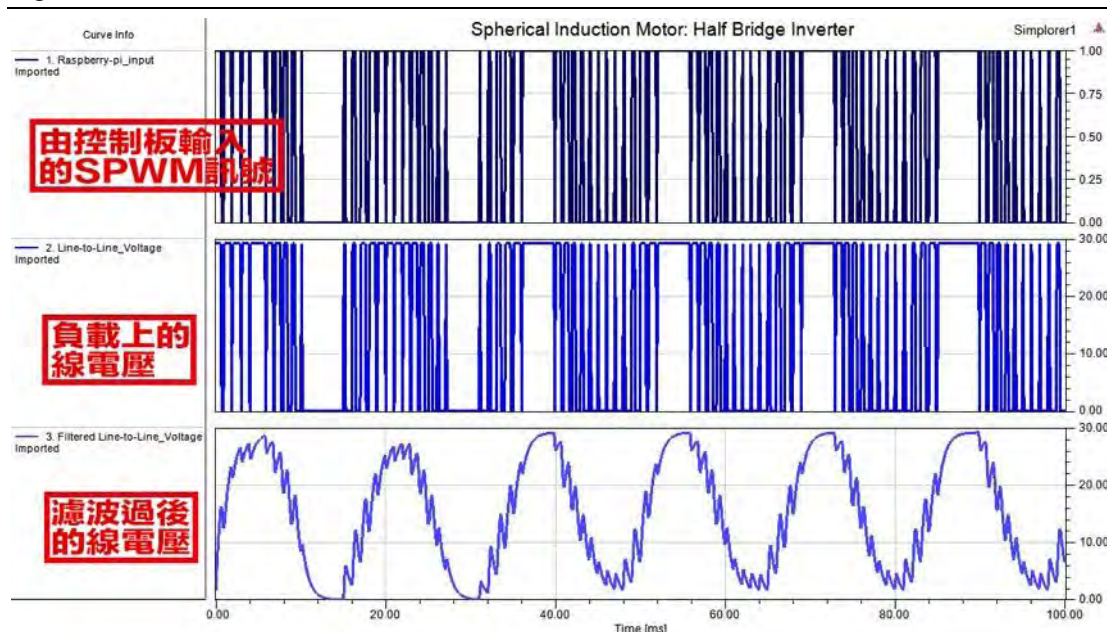
以下，研究者將呈現 1)以 SPWM 與兩組三相半橋式逆變器電路為基礎的電機驅動、2)基於等效電路理論與參數量測結果所預測的球型感應馬達數學模型、3)比較理論、模擬與實驗下的電壓控制、頻率控制。

1. 驅動方法：以 SPWM 對逆變器電路進行變頻、變壓

球型馬達在驅動上採用兩組「三相 SPWM」。因此，研究者可以控制的特性主要有「變頻(Variable-frequency)」與「變壓(Variable-voltage)」兩種。

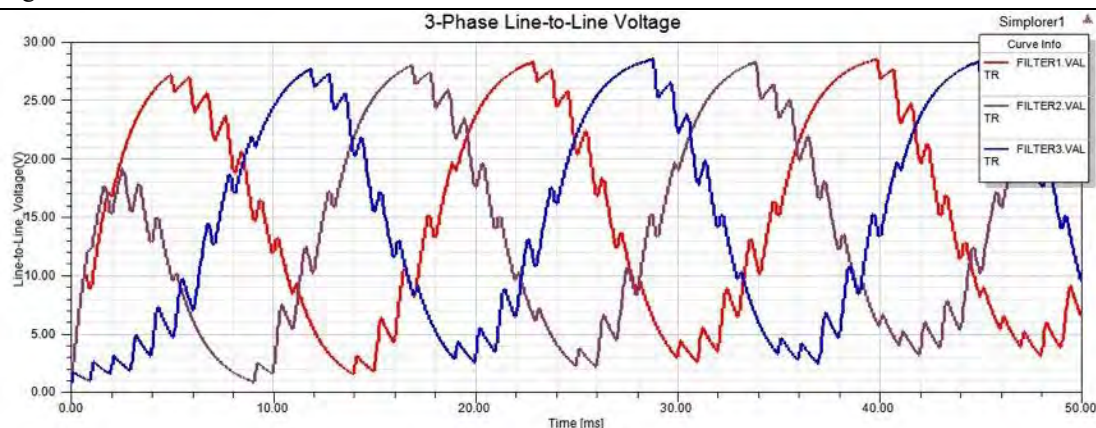
如 Figure 45，本研究透過 ANSYS Simplorer 軟體去觀察驅動電路上各個元件的電壓波型。訊號輸入端的 SPWM 波型模擬了弦波的變化、由 MOSFET 場效電晶體放大為 DC bus 的大功率電源，此時由驅動器輸出的電壓雖然仍呈現數位式的方波，但能量上可以被低通濾波成交流電的正弦波。

Figure 45: 三相逆變器電路元件上的電壓波型



以 Raspberrypi 為控制單元，研究者可以利用 PWM 波的特性來調變電壓、頻率。如 Figure 46，為三相 SPWM 低通濾波後的三相弦波。以縮放 SPWM 占空比(Duty)來調整電壓、調整 SPWM 變化速度來調整頻率。

Figure 46: 驅動電路所輸出的三相電



本研究所開發的球型馬達驅動器，事實上就是兩組直流轉交流的變頻、變壓器，因而能對三相電的電壓、頻率做控制。

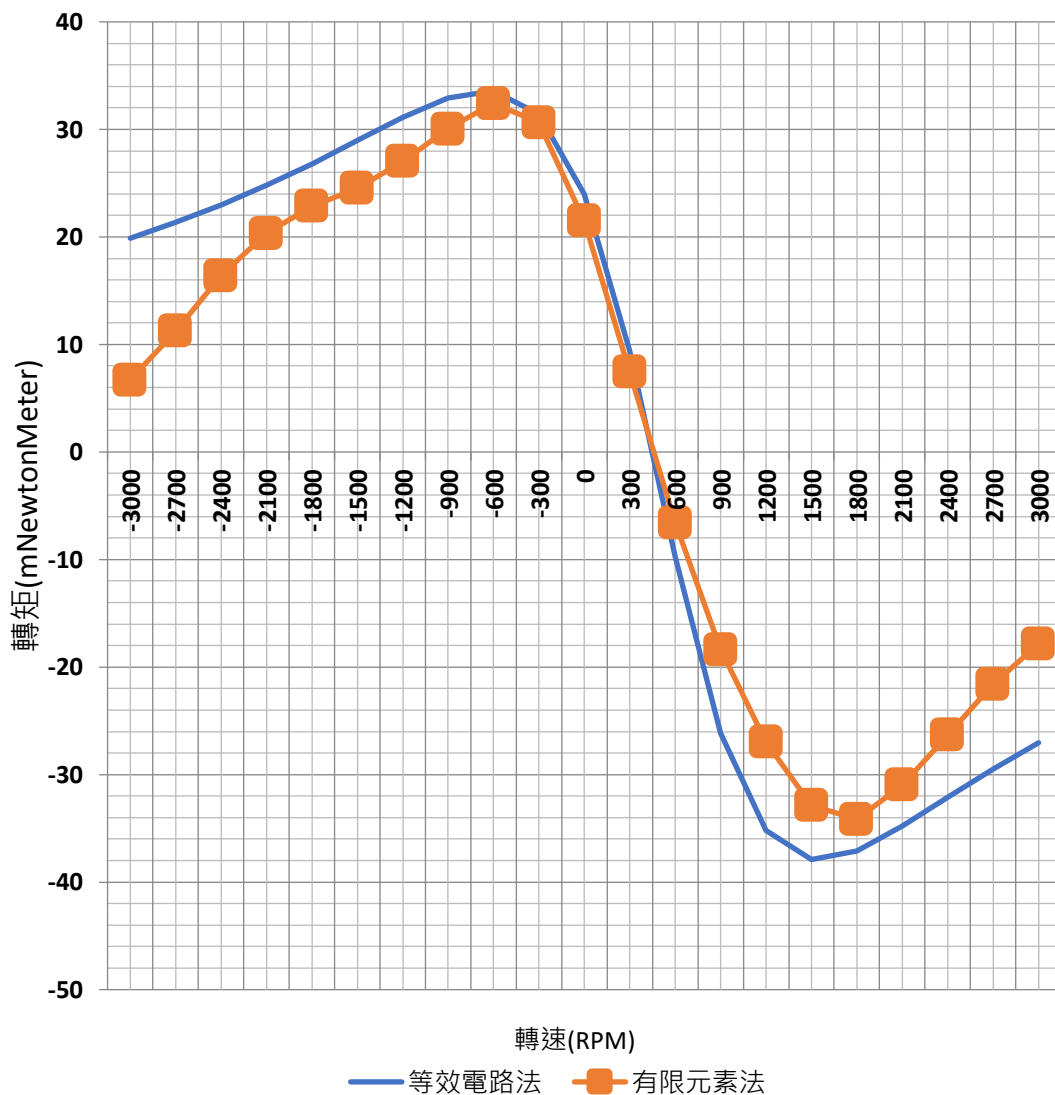
2. 數學模型建立：量測等效電路參數

為了建立出這顆球型感應馬達的輸出特性，研究者對球型馬達的 X 軸向輸出 T-N curve，進行了等效電路理論與有限元素分析法的估測。

基於研究過程中所提到得實驗方法，對所完成的球型感應馬達實體，進行了等效電路參數的量測，並透過研究過程中的理論方法計算得到 Figure 45 藍線。

本研究在-3000RPM 到 3000RPM 的轉速區間內，模擬了 21 個轉速操作點下的穩態轉矩，得 Figure 47 的橘線。

Figure 47: 等效電路法與有限元素法比較



如 Figure 47 的藍色曲線，此條 T-N curve 是基於研究過程—理論中所推導的等效電路轉矩公式，代入了研究過程—實驗中所量測得的等效電路參數所計算的結果，如 Table 21。本研究對 ANSYS Maxwell 與等效電路法所得出的這 21 組數據，分別計算了各組數據的差異，得 Table 22。

Table 21: 等效電路測試結果

R_1	L_1	R_c	L_m	R_2	L_2
6.51Ω	8.53 mH	170.67 Ω	5.42 mH	16.34 Ω	13.18 mH

Table 22: 等效電路法與有限元素法所估測得 T-N curve 比較

轉速	-3000	-2700	-2400	-2100	-1800	-1500	-1200
差異	13.20	10.09	6.55	4.47	3.95	4.45	4.10

轉速	-900	-600	-300	0	300	600	900
差異	2.89	1.17	0.80	2.51	1.97	3.17	7.79

轉速	1200	1500	1800	2100	2400	2700	3000
差異	8.22	5.03	2.93	3.86	5.82	7.90	9.21

(轉速: RPM、差異: mNm)

比較有限元素法與等效電路法結果，可以得到同樣在 50V、60Hz 的三相電輸入下，雖然理論與模擬結果並未完全吻合，但在電動機的操作區間內 (0~900rpm)，差異仍在 2.5~3mNm 之間。

3. 轉速控制：變頻與變壓

本研究在此分別對球型感應馬達的變壓、變頻進行探討。將負載數值代入理論計算，以電機特性曲線與負載特性曲線的交點，得到等效電路法所預測的穩態轉速點。

以下，研究者將呈現理論值、模擬值與實測值在變頻與變壓下，穩態轉速的比較。並歸納出這兩種控制方法的特性。

Figure 48: 電壓控制- 理論、模擬與實驗的穩態轉速比較

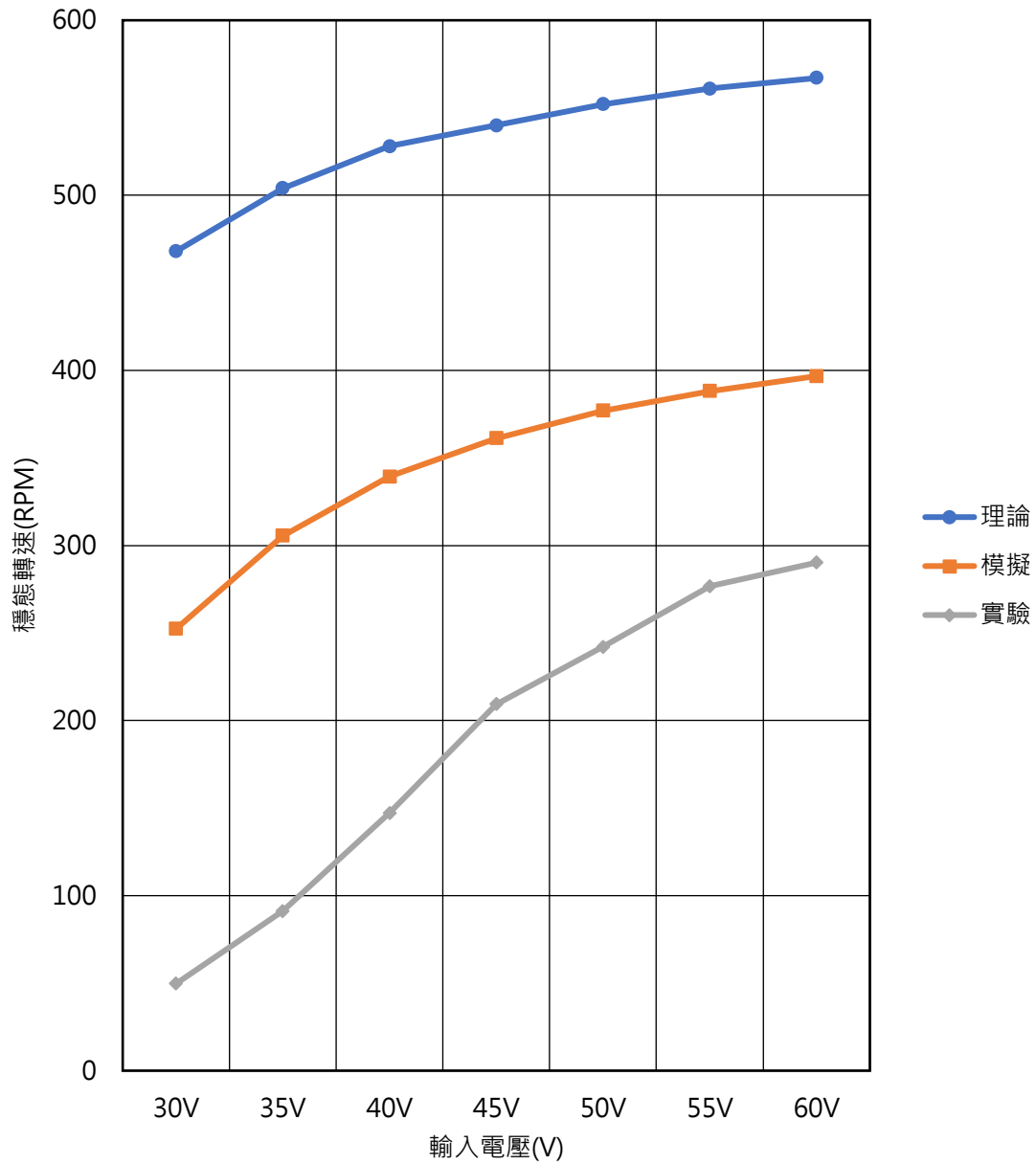


Table 23: 電壓控制-理論、模擬與實驗的穩態轉速(RPM)

	30V	35V	40V	45V	50V	55V	60V
理論	468	504	528	540	552	561	567
模擬	252	305	339	361	376	388	396
實驗	49	91	147	209	242	276	290

(理論、模擬、實驗: RPM)

Figure 49: 電壓控制- 理論、模擬與實驗的穩態轉速比較

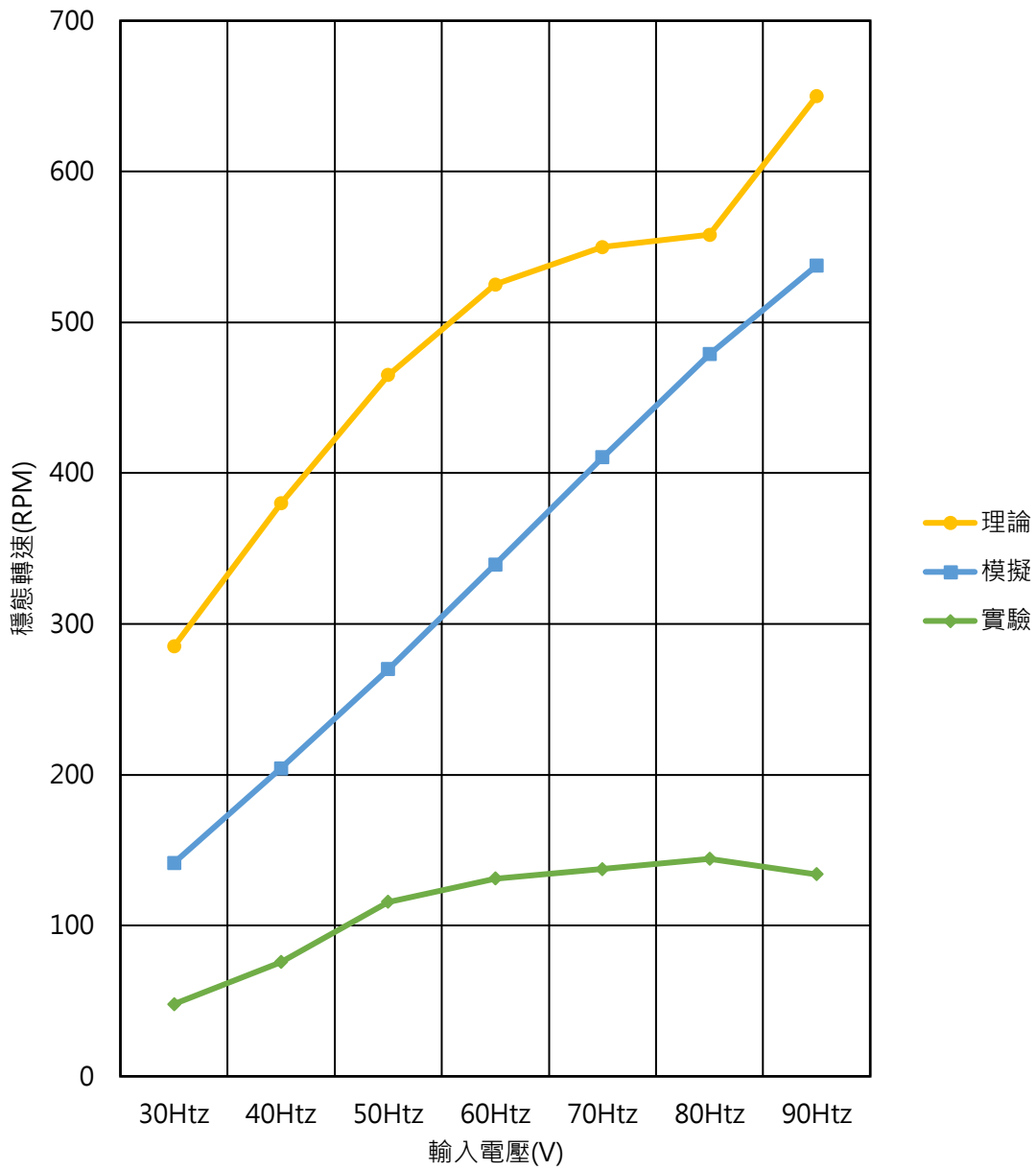


Table 24: 頻率控制-理論、模擬與實驗的穩態轉速(RPM)

	30Hz	40Hz	50Hz	60Hz	70Hz	80Hz	90Hz
理論	285	380	465	525	550	558	650
模擬	141	204	269	339	410	478	537
實驗	47	75	115	131	137	144	134

(理論、模擬、實驗: RPM)

比較 Figure 48 與 Figure 49，可以觀察到理論值、模擬值與實測值之間在量值上有相當大的落差，但趨勢上仍接近。推測原因有三：

- (1). 負載特性誤差- 轉子的真圓度不佳而造成負載的不均勻。
- (2). 電機特性誤差- 轉子晃動造成不固定氣隙，轉矩難維持定值。
- (3). 理論與模擬的差異- 由於理論考慮的端部漏電感量值較小，因此所計算得的 T-N curve 在電動機操作區間內與模擬結果有 2.5~3mNm 的差異，故在穩態轉速的計算上，理論都高於模擬一個定值。

研究者可以從中歸納出電壓控制、頻率控制的特性：

- (1). 提高電壓- 轉速與轉矩同時增加，但輸入功率也隨之提升。
- (2). 提高頻率- 轉矩會因電抗的上升而降低，但因同步速的加快而機械轉速也有一定程度的增加。

因此本研究決定在第四節中引入感應電動機的 V/F 控制法，意即維持輸入電壓與頻率的比值，同時調變電壓與頻率，以較低的功率去換取相同的轉速。

(四) 電機控制：以 V/F 控制法完成轉速開迴路控制

綜合了研究過程中的理論、模擬與實驗，研究者已完整地掌握了系統輸入：電壓、頻率，與系統輸出：轉速之間的關係。以下，將 V/F 開迴路控制法應用於球型感應馬達的球型旋轉操控。

1. 以理論、模擬與實驗驗證 V/F 開迴路控制下的穩態轉速

如 Figure 50 與 Eq. 48，研究者由實驗的方式來驗證開迴路控制理論的有效性。以轉速計的平均轉速模式來量測馬達的穩態轉速；但安定時間卻難以從實驗得知，因此本研究僅以穩態轉速進行驗證。

$$\omega(t) = \pi k_1 k_4 \left(\frac{v(k_2 + k_3 k_4) - \tau_L}{k_2 + k_3 k_4} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_2 + k_3 k_4}{J \pi k_1 k_4} t} \right) \quad \text{Eq. 48}$$

研究者取 40V/40Hz、45V/45Hz、50V/50Hz、55V/55Hz、60V/60Hz 五組進行實驗，分別記錄了 10 次的轉速數據，再取 RMS 的平均轉速。與理論預期、模擬預期的穩態轉速值比較，可以整理成 Figure 50 與 Table 24。

Figure 50: V/F 控制-理論、模擬與實驗的穩態轉速(RPM)

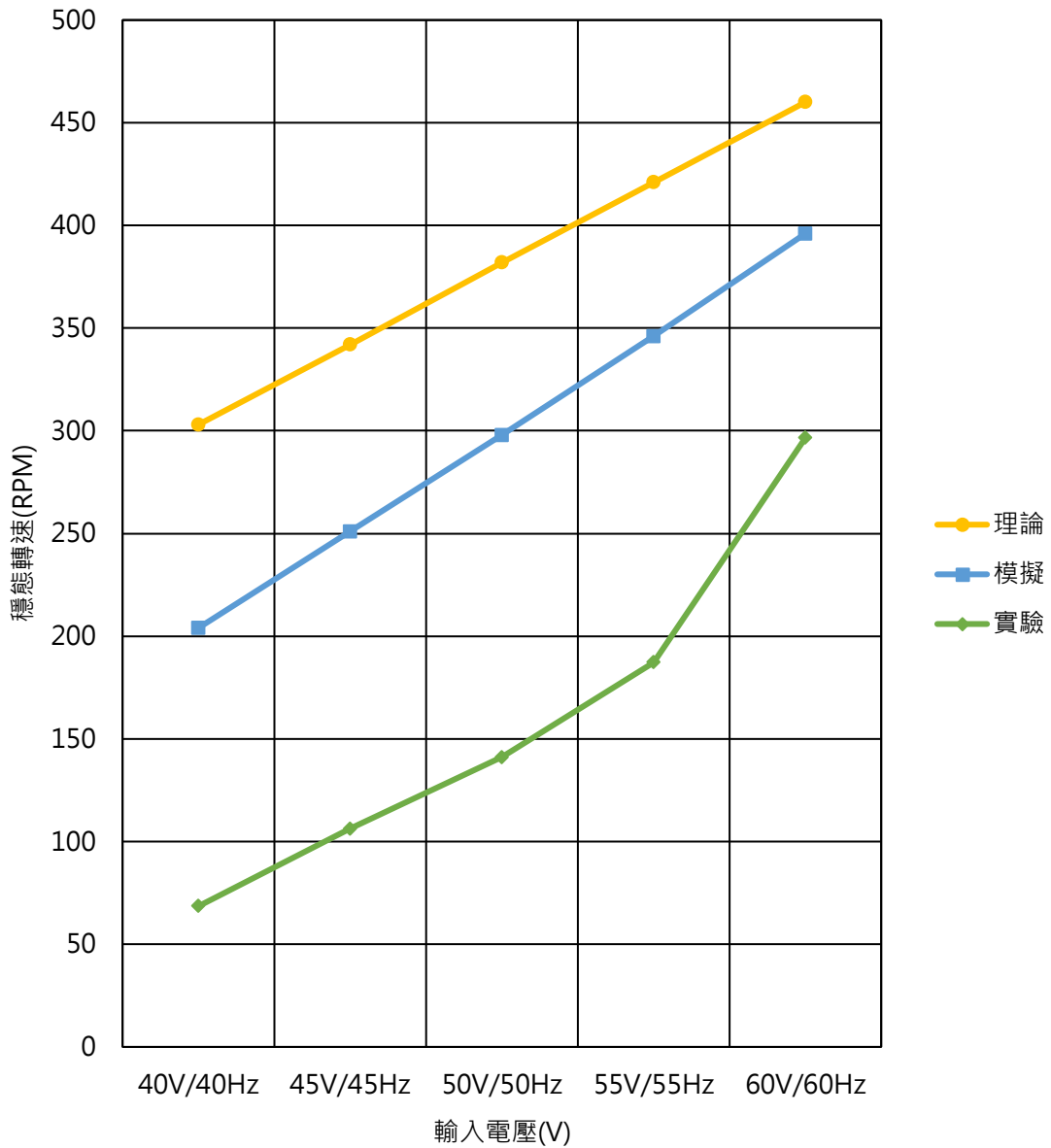


Table 25: V/F 控制-理論、模擬與實驗的穩態轉速(RPM)

	40V/40Hz	45V/45Hz	50V/50Hz	55V/55Hz	60V/60Hz
理論	303	342	382	421	460
模擬	204	251	298	346	396
實驗	68	106	141	187	296

(理論、模擬、實驗: RPM)

以研究過程—理論中所推導的等效電路理論與開迴路控制法，以系統的角度去預期馬達轉速，在時域下的暫態、穩態特性。成功地實現了球型馬達的轉速、轉向開迴路控制。

2. 三維 T-N curve 的計算

依照等效電路法，在電動機區間所計算的 T-N curve 曲線，可以得到馬達在 X 軸向、Y 軸向的轉矩，進而以向量的方式組合出球型旋轉時的三維 T-N curve，呈現如 Figure 51。

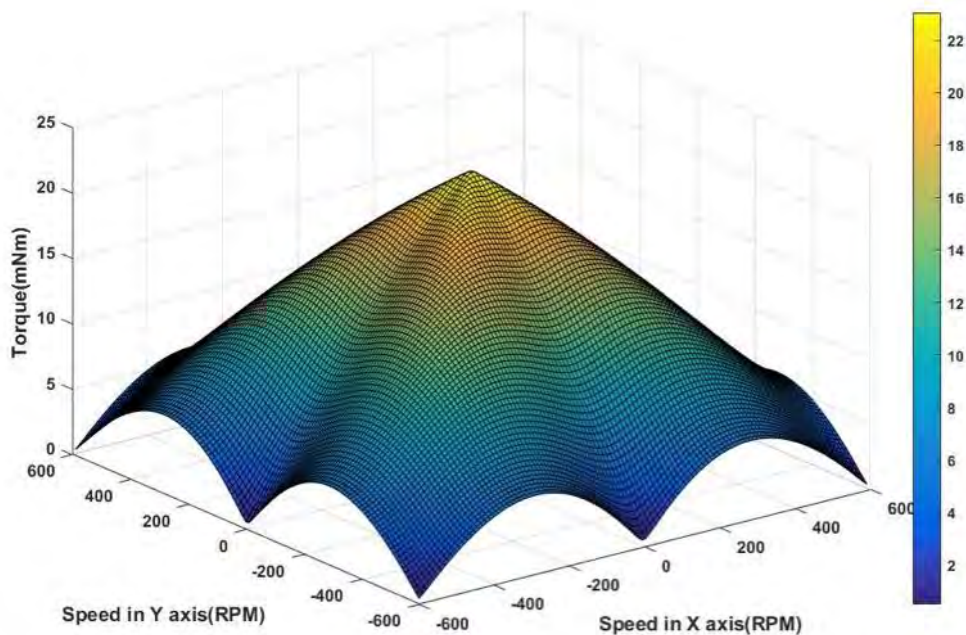
依據 Figure 51，可以觀察到球型感應馬達的最大輸出轉矩，會發生在 X 軸向與 Y 軸向的正中央，即 45 度角處，這是因為轉子同時受到 X 軸向與 Y 軸向的最大推力所致。

將單一軸向的最大輸出轉矩訂為 τ_s ，則發生在 45 度角處的最大輸出轉矩為 τ_d 可以訂為

$$\tau_d = \sqrt{2} \cdot \tau_s \quad \text{Eq. 49}$$

也因為球型旋轉的推力，是來自於向量合成的結果。因此，球型馬達在 45 度角處的輸出效率，效率為總輸出機械功的 $\frac{\sqrt{2}}{2} \cong 71\%$ 。

Figure 51: 球型感應馬達的三維 T-N curve



綜合上述所有研究結果，本研究完成了球型感應馬達的原型機，提出有效的數學模型，並完整的研究新型電機開發所需的四大面向：設計、實作、驅動、控制。

二、討論

以下，研究者提出幾點尚未成熟的想法。包括了基於電磁學理論的分析方法，以及球型感應馬達設計上的缺失，與下一代設計所可以改進的方向。

(一) 以電磁學建立球型感應馬達的數學模型

本研究所開發的球型感應馬達，在電機機械領域中是一種全新的特殊電機，因此研究者有必要自行推導馬達所輸出的轉矩、轉速等特性。

研究過程中呈現了以等效電路法為基礎的轉矩推導方式，這是一種基於能量角度所計算出的轉矩；事實上特殊電機的開發應要搭配更為基礎的古典電磁學進行設計，藉由電磁學可以更清楚的解析特殊電機的物理性質，比如電場與磁場的向量勢，可補足等效電路理論所無法呈現的性質，給予設計者清楚的改良方向，或者讓控制者能使用更高階的控制理論。

以下，研究者將簡單呈現電磁學解的基本概念，並預期能將這套做法應用在下一代原型機中。

1. 應用向量勢與純量勢的概念描述系統中的磁場、電場。

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad \text{Eq. 50}$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla V \quad \text{Eq. 51}$$

2. 利用 $\mathbf{J} = \rho \mathbf{E}$ 帶入恆等式 $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ 解勢場。

$$\nabla \times \left(\frac{\nabla \times \mathbf{A}}{\mu} \right) + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \frac{\nabla V}{\rho} = 0 \quad \text{Eq. 52}$$

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) + \nabla \cdot \left(\frac{\nabla V}{\rho} \right) = 0 \quad \text{Eq. 53}$$

3. 同時加入庫倫規範 $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$ ，方程式才能得出唯一解。

4. 設定邊界條件解系統中的電流。

$$I = \int_S \left(-\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \frac{\nabla V}{\rho} \right) \cdot d\mathbf{S} \quad \text{Eq. 54}$$

5. 藉由安培定理解得轉矩，並由此推導功率、轉矩等性質。

$$F = I \times B \quad \text{Eq. 55}$$

雖然本次研究未能推導、驗證完整的電磁學模型，研究者仍以有限元素法補足等效電路無法呈現的物理特性，然而當球型馬達面臨到工業化或商業化的考驗時，則勢必使用電磁學解配合高階控制理論實際運行。

(二) 球型感應馬達設計與製作上的缺陷

本研究中所呈現的球型感應馬達，最主要的缺陷在於效率過低。電機最主要的損失來自於線圈、轉子的銅損與矽鋼片的鐵損，而缺乏背鐵與過大的氣隙更會讓馬達的漏磁通上升，造成鐵損的增加。

因此，研究者歸納了這一代球型感應馬達在設計與實作上的缺陷，並希望能在下一代的設計上，解決這些問題。

1. **定子積厚**：僅有四組定子且面積過薄，使磁場的感應面積降低。
2. **繞線設計**：線徑過細、匝數過高，前者讓 $P = I^2 R$ 的銅損增加、後者讓電感增加，讓馬達功率因數降低。
3. **轉子設計**：加工精度不佳讓轉子在轉動的過程中受到不規則的負載；缺乏背鐵與過大的氣隙也讓磁通難以完全作用在轉子上。

(三) 下一代球型感應馬達的設計方向

根據這次實作球型感應電動機的研究結果，以及第二點中所提到的缺陷。研究者提出以下幾點未來可能的改良方向：

1. 採正多面體式的定子設計：

感應電機的轉矩產生原理，主要來自定子的旋轉磁場。本研究計畫在第二代球型感應馬達的設計上，採正多面體的定子排列方式，來組合出一個包覆面積更廣的定子。

另一方面，目前所設計的球型感應馬達，轉矩來自 X 軸向、Y 軸向定子的激磁，這種向量合成推力的作法，將造成 $\frac{2-\sqrt{2}}{2}$ 的功率損耗。如 Figure 52, a)與 Figure 52, b)，是研究者所提出的正十二面體式的定子設計，期待能提升球型馬達的效率。

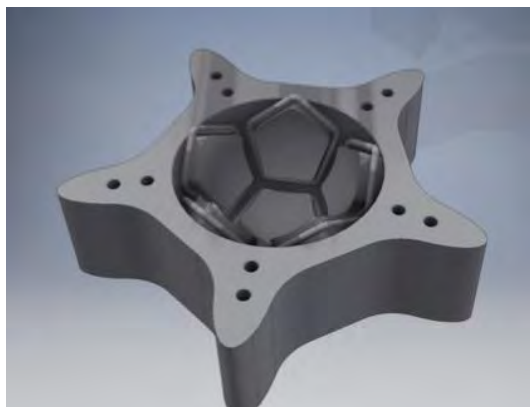
2. 採正多面體式鼠籠式球型轉子：

採感應馬達鼠籠式轉子的設計概念，使磁路走在導磁係數高的區域，讓感應電流感應在周圍導電係數高的區域，減少磁通與電流損耗。

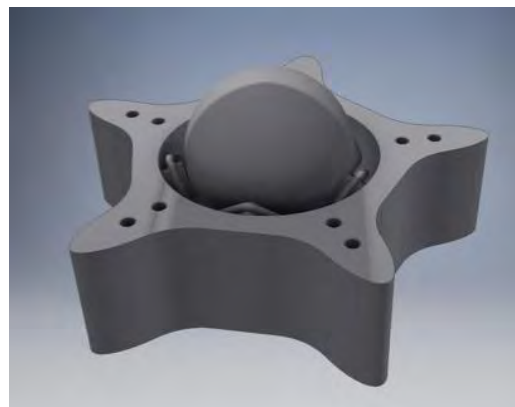
3. 以氣浮軸承取代萬向滾珠：

在定子中加入氣浮軸承的設計，可以有效減少摩擦損耗，同時也因為非接觸式軸承的特性，而可以在轉子上附上一層胎皮。

Figure 52: 下一代球型感應馬達設計概念圖



a) 正十二面體式定子設計



b) 包含轉子的球型感應馬達設計

肆、結論與應用

一、結論

本研究完成了球型感應馬達的設計、實作、驅動到控制，證明構想的可行性。同時，也以等效電路理論、有限元素法、實作與實驗，建立出「球型感應馬達」的電機機械特性，並達成了電機的驅動與控制。

(一) 電機設計

透過有限元素法、等效電路理論分析，在有限的成本下，設計出球型感應馬達的電氣規格與機械規格。

1. 機械規格：從規格品訂出材質與幾何參數
2. 機械規格：依據有限元素法設計定子繞線
3. 電氣規格：由有限元素法決定額定輸入

(二) 電機實作

以雷射切割機等數位製造機具，實作出一部實際能以球型方式旋轉的「球型感應馬達」。這部系統包含控制程式、驅動電路與馬達本體，條列如下。

1. 馬達本體：根據電機設計的規格製作，完成馬達本體
2. 驅動電路：由兩組逆變器組成，給予馬達兩組三相電
3. 控制程式：以 Raspberrypi 控制，給出 SPWM

(三) 電機驅動

以 SPWM 驅動 X 軸向與 Y 軸向的逆變器電路，進行變頻與變壓。並從理論與模擬推算電壓控制、頻率控制下的 T-N curve，再透過實驗以穩態轉速去驗證。

1. 量測等效電路參數，代入理論後解得 T-N curve
2. 以 SPWM 驅動逆變器供電給馬達，完成球型旋轉。
3. 推算並驗證電壓、頻率變化下的穩態轉速關係式。

(四) 電機控制

結合 V/F 控制法與球型感應馬達的電機機械特性，本研究可以穩定地對球型感應馬達的球形旋轉，做出有效的轉速、轉向開迴路控制。

1. 將理論推算的系統數學模型線性化，以利控制。
2. 以控制理論求解系統的穩態轉速與安定時間
3. 完成以 V/F 開迴路控制法為基礎的轉速、轉向控制

本研究以開發一特殊電機的角度，從理論、模擬，完整地分析了球型感應馬達的電機機械特性；並從實作、實驗，去證實這些理論、模擬值的準確性。最後實現了一部可隨著輸入指令產生相對應球型旋轉效果的馬達。

二、應用與未來展望

(一) 應用

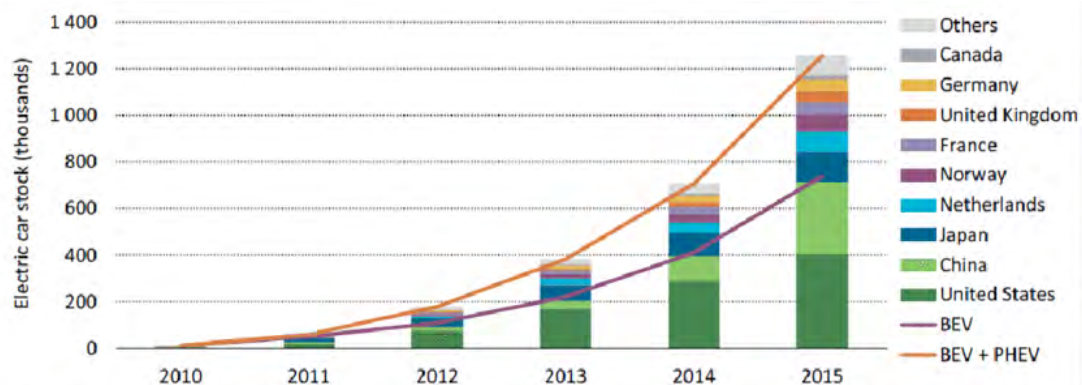
球形感應馬達的球型旋轉方式，能簡化傳統需要三個自由度複雜的電機設計，更可以程式進行高靈活度的操作，提供未來擁擠的生活空間更靈巧的移動方式。

球形電機無疑是新世代特殊電機中極具潛力的一種，無論從機器關節、眼球，到室內機器人，甚至作為未來載具的輪胎，只要是需要多角度移動的物體，都可以以球形電機取代。

(二) 未來展望

如 Figure 53 與 Figure 54，近年來電動車的投資金額與銷量不斷成長，勢必將會取代汽油車，於是如何發揮電動車所具有的優勢來改善現有車輛的困境將成為一門重要的課題。

Figure 53: 2010~2015 年世界電動車投資趨勢 (Global EV Outlook 2017, 2017)



Note: the EV stock shown here is primarily estimated on the basis of cumulative sales since 2005.

Sources: IEA analysis based on EVI country submissions, complemented by EAFO (2016), IHS Polk (2014), MarkLines (2016), ACEA (2016a), EEA (2015) and IA-HEV (2015).

本研究為電動車、無人車面對靈活性、安全性的問題提出一種解決方案：以球型感應馬達直接作為輪胎。

讓電動車可以進行多角度的移動，提高車輛靈活性，同時將傳統車輛的傳動系統、變速系統與剎車系統等等，由馬達定子來取代，提供電動車寬敞的空間給其他零組件，加強車輛性能與安全性。

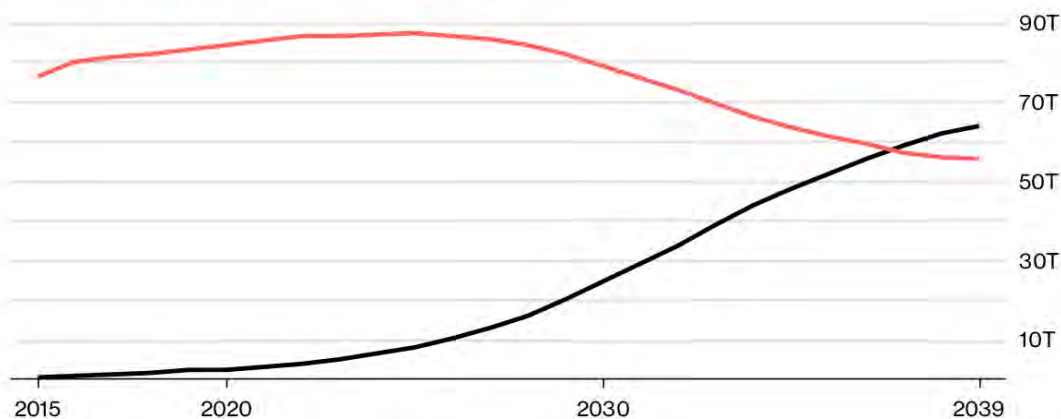
最後，在無人車的應用上，利用球型馬達多角度的移動方式，自動駕駛程式不必為了停車、轉向等動作進行複雜的控制；面對緊急事故時也能以最短的路徑閃避危險。

Figure 54: 2015~2039 年電動車與引擎車銷售趨勢預測 (Global Plug-in Vehicle Sales for 2017, 2017)

Overtaking Lane

Electric vehicle sales will surpass internal combustion engine sales by 2038

■ Electric vehicles ■ Internal combustion engine



世界上每年有一百二十五萬人死於車禍意外，更造成無數人傷殘 (Global status report on road safety 2015, 2015)，每個意外都代表著一個家庭的破碎。研究者期盼在未來電動車普及的時代，能憑藉著球型感應馬達的技術，創造一個零車禍的時代。

伍、參考文獻及其他

一、參考文獻

- [1] A.Arkkio. (1987). Analysis of induction motors based on the numerical solution of the magnetic field and circuit equations. Electrical Engineering Series, 59.
- [2] A.Bhatia, M.Kumagai, & R.Hollis. (2015). Six-Stator Spherical Induction Motor for Balancing Mobile Robots. Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation.
- [3] A.Proyas. (2004). I, Robot. 擷取自 <http://www.imdb.com/title/tt0343818/>
- [4] D.Stein, & G.S.Chirikjian. (2000). Experiments in the Commutation and Motion Planning of a Spherical Stepper Motor. Proceedings of the DETC'00 ASME 2000 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference.
- [5] F.C.Williams, E.R.Laithwaite, & J.F.Eastham. (1959). Development and design of spherical induction motors. Proceedings of the IEE - Part A: Power Engineering , 106.
- [6] G.Seyfarth, A.Bhatia, O.Sassnick, M.Shomin, M.Kumagai, & R.Hollis. (2016). Initial Results for a Ballbot Driven with a Spherical Induction Motor. Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation.
- [7] (2017). Global EV Outlook 2017. International Energy Agency.
- [8] Global Plug-in Vehicle Sales for 2017. (2017). 擷取自 <http://www.ev-volumes.com/country/total-world-plug-in-vehicle-volumes/>
- [9] (2015). Global status report on road safety 2015. World Health Organization.
- [10] Goodyear Unveils the Eagle 360 Urban, a Concept Tire Powered by Artificial Intelligence. (2017). 擷取自 <http://news.goodyear.eu/latest-news/goodyear-unveils-the-eagle-360-urban--a-concept-tire-powered-by-artificial-intelligence/s/9da0b0a2-1bf6-4e98-91a4-26430db82749>
- [11] IEEE Power Engineering Society. (2004). IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators.
- [12] J.F.P.Fernandes, S.M.Vieira, & P.J.C.Branco. (2017). Multi-Objective Optimization of a Shell-like Induction Spherical Motor for Power-Assisted Wheelchair. IEEE Transactions on Energy Conversion, 10.1109/TEC.2017.2761983.
- [13] J.Wang, G.W.Jewell, & D.Howe. (1997). A Novel Spherical Actuator: Design and Control. Proceedings of the IEEE Transactions on Magnetics, 33.

- [14] J.Wang, W.Wang, G.W.Jewell, & D.Howe. (1998). A Novel Spherical Permanent Magnet Actuator with Three Degrees-of-Freedom. *IEEE Transactions on Magnetics*, 34.
- [15] K.Lee, H.Son, & J.Joni. (2005). Concept Development and Design of a Spherical Wheel Motor (SWM). *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
- [16] L.Yan, I.Chen, C.K.Lim, G.Yang, W.Lin, & K.Lee. (2009). Torque Modeling and Analysis of Spherical Actuators with Iron Stator. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
- [17] S.Hsiao, & M.Tsai. (2010). Single-Phase Linear Ultrasonic Motor with Perpendicular Electrode Vibrator. *Japanese Journal of Applied Physics*, 49.
- [18] S.Hungsun, & K.Lee. (2010). Open-Loop Controller Design and Dynamic Characteristics of a Spherical Wheel Motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57.
- [19] S.Ikeshita, A.Gofuku, T.Kamegawa, & T.Nagai. (2010). Development of a spherical motor driven by electro-magnets. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 24.
- [20] T.Tudorache, O.Craiu, A.Machedon, M.Morega, & M.Popescu. (2011). Uncertainty Analysis in the Evaluation of PMSM End-Winding Inductance. *Proceeding of the International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering*.
- [21] Y.Ting, Y.Tsai, B.Hou, S.Lin, & C.Lu. (2010). Stator design of a New Type of Spherical Piezoelectric Motor. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 57.

二、誌謝

本研究歷經約一年半的構思與實作，得到了許多學術單位、私人機構的協助，使球型感應馬達的研究計畫得以生根萌芽，最後成長茁壯。

首先，感謝創客基地提供了一個設備齊全、環境優美的創客空間，並引介研究者至幾項學術單位、機械工廠，能夠運用大量的資源，讓研究者得以在其中發揮想像力，完成球型感應馬達這個構想。

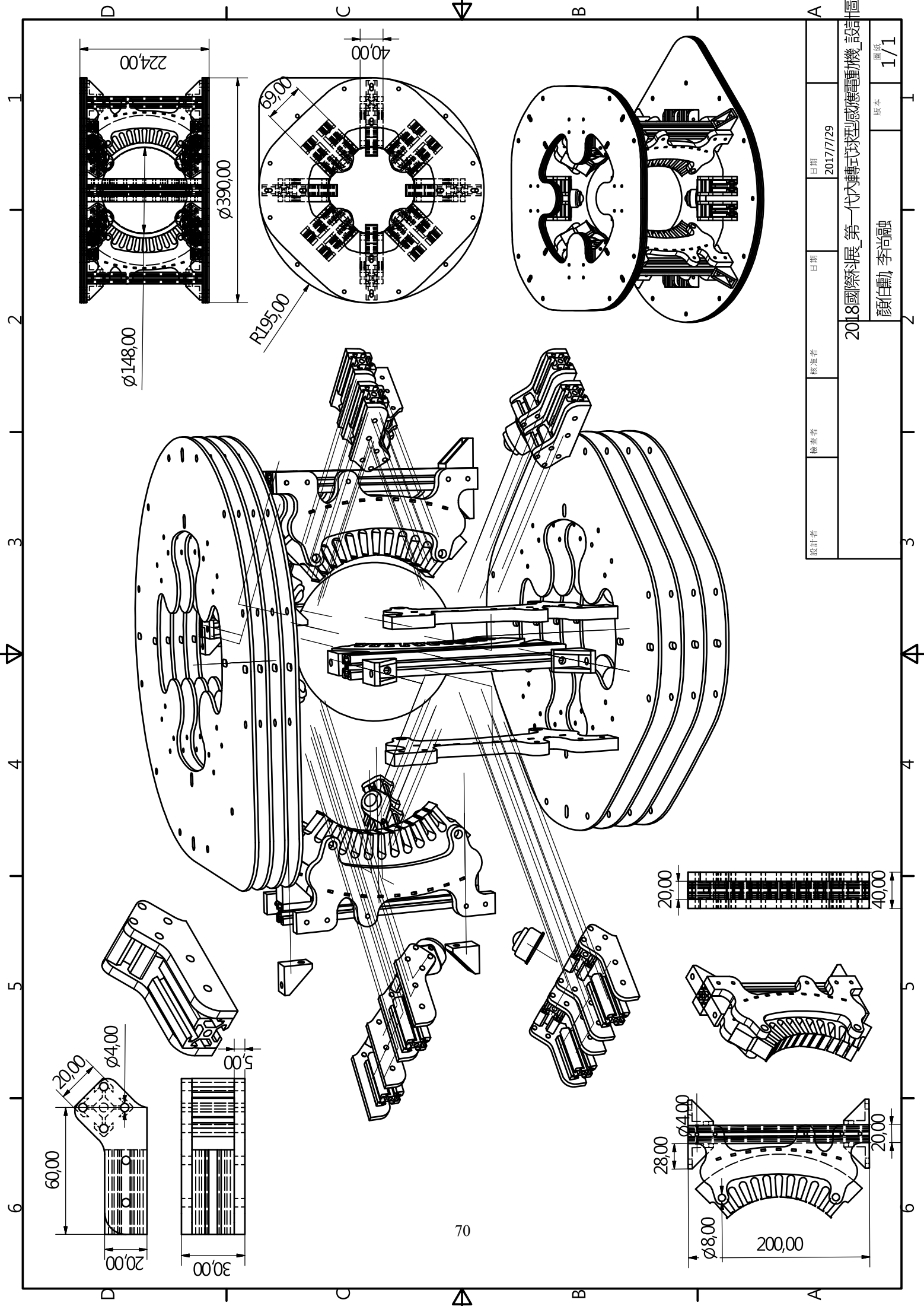
同時感謝 ANSYS、MATLAB 與 Autodesk 等軟體的製作團隊，不斷的改良研發，使本研究在應用軟體進行理論分析時有莫大的幫助，解決了不少難以推測的問題。

再者，感謝研究者女朋友背後默默的支持，在這研究進行的一年半當中，一直陪伴在研究者身邊，無論如何勞累、課業繁重始終不離不棄，這樣的支持使研究者能夠一步一步的走到本研究完成的日子。

最後感謝指導教授不厭其煩地與研究者討論實作上的問題、實驗上的現象、理論分析上的問題等等，讓研究者能突破瓶頸，順利完成這項研究。同時，也感謝實驗室的學長、學姊們，不時抽空與研究者討論研究上的難題，也分享了他們在專業領域中的知識和經驗，是研究者的良師、更是益友。研究者在此致上由衷的謝意。

三、附錄

附錄 A 球型感應馬達設計圖



設計者	核對者	日期	日期
		2017/7/29	2017/7/29
2018國際科展_第一代內轉式球型感應電動機_設計圖		圖紙	
顏仁勳, 李尚融		版本	
		1/1	

【評語】 100003

1. 設計新型的球形馬達做為未來自駕車的輪子系統,創意值得鼓勵.
2. 建議宜量化評估輪子旋轉自由度,與思考提升方案.
3. 建議宜思考定子轉子設計與輪子滾動的需求如何互相搭配
4. 等效電路分析與效率提升方案,可以加強說明