

應用遺傳演算法於三相感應電動機之多目標最佳化設計

劉祥樺¹ 謝振中^{2*} 陳仲村¹

摘要

因應設計需求，市面上有著許多有限元分析軟體(Finite Element Analysis, FEA)，但是其僅能提供已知電動機參數的模擬輸出結果。而電動機的各项參數設計仍需仰賴使用者的經驗去設定，且每次進行有限元分析都相當耗時，若參數有變動就需花大量時間重新設定分析。因此，本文利用三相感應電動機結構參數對損失及轉矩特性的關係建立遺傳演算法(Genetic Algorithm, GA)之適應函數尋找電動機效率、啟動轉矩及最大轉矩之最佳解後，再投入有限元分析軟體進行運算，在不增加電動機體積下，同時提升電動機效率、啟動轉矩及最大轉矩並改善轉矩漣波。最後，本文以一4hp 60Hz三相6極鼠籠式感應電動機為例，多目標最佳化設計電動機之結構參數外，模擬並實驗驗證所提應用遺傳演算法於三相鼠籠式感應電動機之多目標最佳化設計之有效性與正確性。

關鍵詞：遺傳演算法，最佳化設計，感應電動機，鼠籠式，有限元素分析

1. 前言

近年來各國都有計畫提高工業及家電產品的效率要求。歐盟於2021年強制要求電動機需要有第三方機構測試並宣告為至少IE3等級以上，並於2023年要將100 hp以上電動機提升至IE4等級要求(陽毅平等，2021)。中國於2021年啟用新本法規，規定電動機最低能效要求為三級能效，等同國際規範IE3效能的需求，而美國及臺灣目前仍維持IE3要求。

有諸多現有文獻探討電動機的單一目標之優化設計，其等主要是藉由損失或與轉矩漣波的降低以優化電動機之效率。許溢适(2007)透過分析電動機等效電路參數，藉由改善各

項損失，以優化電動機之效率。降低鐵損可優化電動機之效率。然而目前常見鐵損計算模型，除常見的貝爾托蒂鐵損模型(Bertotti Iron Losses Model)外，還有具橢圓磁通密度鐵損模型(Iron-Loss Model with Elliptical Flux Density)、含常數係數的正交分解鐵損模型(Orthogonal Decomposition Iron-Loss Model with Constant Coefficient)(Yang *et al.*, 2014)與可變係數的改進鐵損模型(Iron-Loss Model with Variable Coefficient)。由於各種項鐵損模型皆相當複雜，因此優化電動機效率也相當地複雜(徐銘懋，2015；林岳政，2013)。Pyrrhonen *et al.* (2008)找出齒部磁密與顎部磁密的計算方法以精確計算鐵損，進而優化電動機之效率。

¹逢甲大學電機系 研究生

²逢甲大學電機系 教授

*通訊作者，電話：04-24517250#3815，電郵：jjshieh@fcu.edu.tw

收到日期: 2022年09月21日

修正日期: 2023年01月16日

接受日期: 2023年01月24日

Mohamed *et al.* (2017)透過分析三相感應電動機定、轉子槽數的配合條件，藉由有效的改善因槽極配導致的轉矩漣波，以優化電動機之效率。分析研究轉子槽數與極數、定子槽數之間對於轉矩漣波的影響，進而得出極數、槽數配合中較佳的轉子槽極數組合。然而由於Pyrhonen *et al.* (2008)與Mohamed *et al.* (2017)於最佳化效率過程中，都是以同樣轉子槽面積進行實驗，因此效率準確度不佳。

再者，同時優化電動機的多個目標性能，一直是電動機設計所追求的目標之一。劉梁毅(2017)利用模糊田口法(Fuzzy-Taguchi Method, FTM)推論並找尋效率望大值與啟動電流望小值的最佳組合，以進行感應電動機對效率及啟動電流等進行最佳化。雖然模糊田口法具有減少實驗次數的優點，以及適合對已知結果但未知各因子與結果關係的問題進行最佳化，然而田口法只能在離散的有限點找出最佳的設定值，且針對不同規格都需要重新一次建立。Chaudhary *et al.* (2016)先用遺傳演算法做效率與價格的單目標分析後，再利用非支配排序型遺傳演算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA)作效率與價格之雙重目標優化。該優化方法雖然避免優化結果落入局部最佳解，但其需經薛兩道優化程序外，非支配排序型遺傳演算法優化過程也相當複雜。Gupta *et al.* (2020)使用遺傳演算法作為感應電動機效率以及最大轉矩之多目標最佳化結果，其中針對繞組提供的磁場部分，直接使用齒部磁密及電流密度作為基因參數，因此仍需藉由磁場回推繞組設計。杜肇震(2015)利用可變比例混合差分進化法(Variable Scaling Hybrid Differential Evolution, VSHDE)，進行感應電動機最佳化設計與比較。因可變比例混合差分進化法的族群多樣性在求解過程中增加菁英策略(Elitism)可增快收斂時間，然而因其下降速度比其他方法

來的更快，因此更容易使結果落入局部最佳解(Local Optimum)。Stachl *et al.* (2021)利用遺傳演算法計算轉子最佳參數，進而提升效率與可操作轉矩，但因只有進行轉子槽型最佳化，無連同定子及繞組進行最佳化，故效率與轉矩性能提升幅度不高。

綜上觀之，雖然有諸多現有文獻從不同面向對三相感應電動機之單一目標或雙目標作最佳化設計，然而很少有文獻探討三相感應電動機之3個目標之最佳化設計。

另一方面，當傳統的最佳化方法無法解決一個問題或得到令人滿意的優化結果時，遺傳演算法便是一個很有趣且擁有很大潛力去替代部份傳統的優化法。特別當在處理一般演算法不易解決的是非凸函數且多變數型態或更複雜的問題，遺傳演算法就有解決此類問題的能力，且可得到近似全域最佳解(陳育群，2006)。因此，本文應用遺傳演算法(Genetic Algorithm, GA)，在不增加三相鼠籠式電動機體積下，同時提升該電動機效率、啟動轉矩及最大轉矩並改善轉矩漣波。本文所提多目標最佳化設計之三相鼠籠式感應電動機，經樣機實驗測驗證確實可高於IEC60034-30-1之IE4之效能等級要求外，並可同時顯著地提升三相鼠籠式感應電動機之最大轉矩、啟動轉矩及轉矩漣波等多項目目標性能。

2. 三相感應電動機等效電路模型與特性

2.1 三相感應電動機等效電路模型

圖1所示為三相感應電動機轉子(二次)側折回定子(一次側)後的單相等效電路模型(杜肇震，2015)。其中， R_1 、 X_1 、 I_ϕ 、 R_c 、 X_m 、 R_2' 、與 X_2' 分別表示定子繞組電阻、定子電抗、鐵

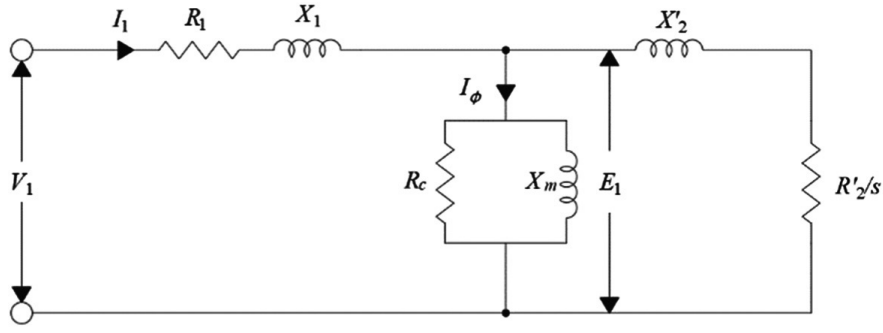


圖1 感應電動機等效電路模型

損電流、鐵心電阻、磁化電抗、轉子電阻與轉子電抗； V_1 、 I_1 、 E_1 以及 s 則分別表示定子側電壓、定子側電流、轉子側電壓以及電動機轉差率。

其中， C_0 為串聯導體數、 K_w 為繞組因數、 P 為極數、 Q_r 為轉子導體數(等同轉子槽數)、 R_{ring} 為轉子端環電阻、 R_{ring} 為轉子導體電阻、 Q_s 為定子槽數。

2.1.1 定子繞組電阻 R_1

$$R_1 = \rho_1 \frac{(C_0/2)L_{ave}}{A_{wire}}, \quad C_0 = C \left(\frac{Q_s}{3a} \right) \quad (1)$$

其中， ρ_1 為導線75°C電阻率(銅電阻率 $1.7 \times 10^{-8} \Omega m$)， L_{ave} 為繞組單匝長、 C_0 為繞組串聯導體數、 A_{wire} 為繞組導線截面積、 C 為各槽導體數(雙層疊繞為匝數兩倍)， a 為並聯迴路數。

2.1.3 定子電抗 X_1 ：

$$X_1 = X_{s1} + X_{e1} + X_{c1} \quad (3)$$

其中， X_{s1} 為定子槽漏電抗、 X_{e1} 為定子繞組末端漏電抗、 X_{c1} 為定子曲折漏電抗。

圖2所示為定、轉子槽截面圖。定子槽漏電抗之計算如下式：

2.1.2 轉子導體電阻 R_2' ：

$$R_2' = 3C_o^2 K_w^2 \left(\frac{R_{bar}}{Q_r} + \frac{R_{ring}}{P^2} \right) \times 10^{-6} \quad (2)$$

$$X_{s1} = K_x \lambda_{s1} \quad (4)$$

其中， K_x 為電抗因數、 λ_{s1} 為定子槽漏磁導。

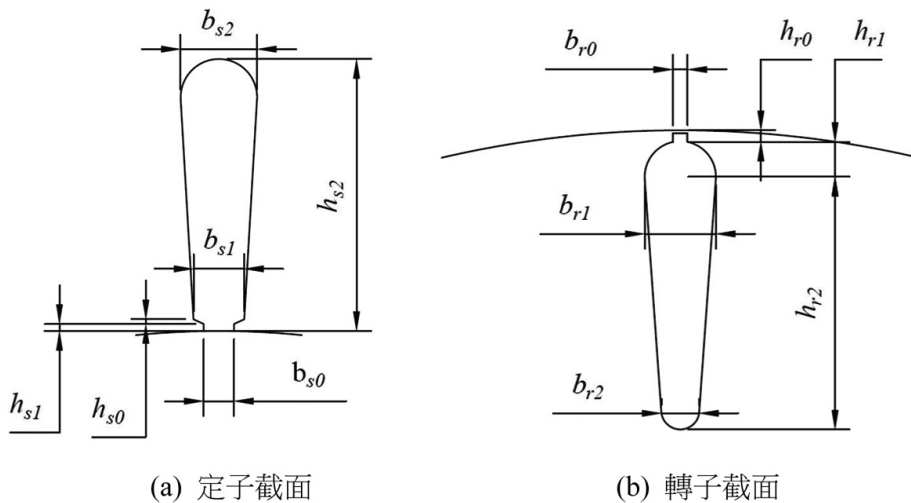


圖2 定、轉子槽截面圖

$$\lambda_{s1} = \frac{20}{mq} \frac{k_{s1}}{K_w^2} \left(\frac{h_{s0}}{b_{s0}} + \frac{2h_{s1}}{b_{s0} + b_{s1}} + \frac{2h_{s2}}{3(b_{s1} + b_{s2})} \right) \quad (5)$$

$$K_x = 4fL_{core}mP(K_wqC/a)^2 \times 10^{-7} \quad (6)$$

上式中 L_{core} 為定子積厚、 f 為電源頻率、 m 為相數、 q 為每相每極槽數、 P 為極數、 K_w 為繞組因素、 C 為各槽導體數、 a 為並聯迴路數、 K_{s1} 為繞組節距常數。

圖3所示為線圈端部截面圖。定子繞組末端漏電抗之計算如下式：

$$X_{e1} = K_x \lambda_{e1} \quad (7)$$

$$\lambda_{e1} = 4(2l_{ea} + l_{eb})/L_{core} \quad (8)$$

其中， K_x 為電抗因數、 λ_{e1} 為定子末端漏磁導、 l_{ea} 為繞組末端延伸直線、 l_{eb} 為線圈彎折高度。

定子曲折漏電抗 X_{c1} 之計算如下式：

$$X_{c1} = K_x \lambda_{c1} \quad (9)$$

$$\lambda_{c1} = \frac{5}{6} X_m \left(\frac{P}{Q_s} \right)^2 \quad (10)$$

其中， K_x 為電抗因數、 λ_{c1} 為曲折漏磁導、 X_m 為激磁電抗、 P 為極數、 Q_s 為定子槽數。

2.1.4 轉子電抗 X_2' ：

轉子電抗 X_2' 與定子漏電抗相同，其中包含轉子槽漏感 X'_{s2} 、端環漏感 X'_{e2} 、轉子曲折漏電抗 X'_{c2} 及轉子斜槽漏電抗 X'_{sk} 。

$$X_2' = X'_{s2} + X'_{e2} + X'_{c2} + X'_{sk} \quad (11)$$

轉子槽漏電抗 X'_{s2} 之計算如下式：

$$X_2' = K_x \lambda_{s2} \quad (12)$$

$$\lambda_{s2} = \frac{20P}{mQ_r} \left(\frac{h_{r0}}{b_{r0}} + \frac{2h_{r1}}{b_{r0} + b_{r1}} + \frac{2h_{r2}}{3(b_{r1} + b_{r2})} \right) \quad (13)$$

其中， K_x 為電抗因數、 λ_{s2} 為轉子槽漏磁導、 m 為相數、 P 為極數、 Q_r 為轉子槽數，其餘各項結構參數如圖2(b)所示。

端環漏電抗 X'_{e2} 之計算如下式：

$$X'_{e2} = K_x \lambda_{e2} \quad (14)$$

$$\lambda_{e2} = \frac{C_r}{L_{core}} \frac{\pi D_{in} h_{cr} / P}{(1.7d + 1.2b_1 + 1.4h_{cr})} \quad (15)$$

其中， K_x 為電抗因數、 λ_{e2} 為端環漏磁導、 P 為極數、 D_{in} 為定子內徑、 C_r 為一計算係數設定為 5.8。

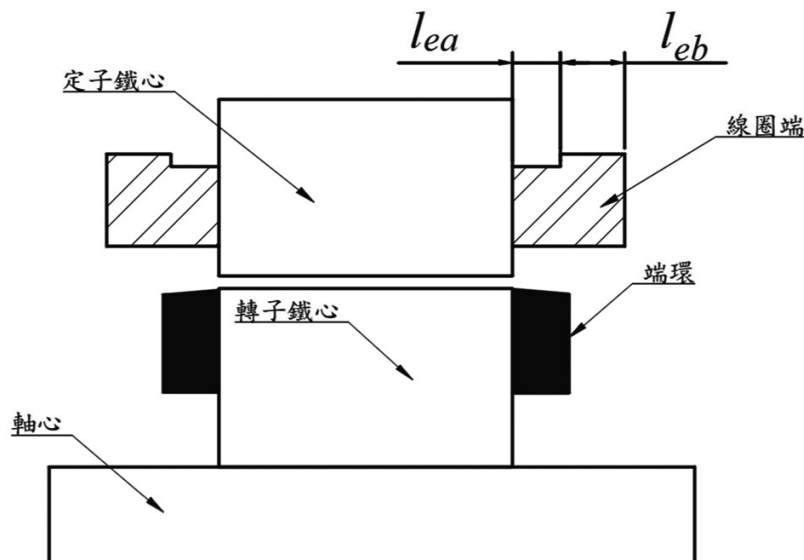


圖3 線圈端部截面圖

轉子曲折漏電抗 X'_{c2} 之計算如下式：

$$X'_{c2} = K_x \lambda_{c2} \quad (16)$$

$$\lambda_{c2} = \frac{5}{6} X_m \left(\frac{P}{Q_r} \right)^2 \quad (17)$$

其中， K_x 為電抗因數， λ_{c2} 為轉子曲折漏磁導， X_m 為磁化電抗、 P 為極數、 Q_r 為轉子槽數。

轉子斜槽漏電抗 X'_{sk} 之計算如下式：

$$X'_{sk} = \frac{V_1}{12I_m} \left(\frac{\pi Q_{sk} P}{Q_r} \right)^2 \quad (18)$$

其中， Q_r 為轉子槽數、 Q_{sk} 為轉子斜槽數、 I_m 為激磁電流、 P 為極數、 V_1 為馬達相電壓。

2.1.5 磁化電抗 X_m ：

磁化電抗可由式(19)求得。

$$X_m = \frac{V_1}{I_m}, \quad I_m = 1.16 \frac{P A T_l}{C_0 K_w} \quad (19)$$

其中， V_1 為電動機相電壓、 I_m 為激磁電流、 $A T_l$ 為總磁動勢、 C_0 為串聯導體數、 K_w 為繞組因數、 P 為極數。

2.1.6 鐵心電阻 R_c ：

計算鐵損電阻需先得出鐵損值，如下式：

$$P_{iron} = P_{Fe} M, \quad P_{Fe} = K_h f B_m^2 + K_c (f B_m)^2 + K_e (f B_m)^{1.5} \quad (20)$$

其中， P_{Fe} 為單位體積鐵損值、 M 為鐵心體積、 K_h 為磁滯損係數、 K_c 為渦流損係數、 K_e 為附加損係數、 f 為電動機頻率、 B_m 為該部位磁通密度。

K_h 、 K_c 與 K_e 可由矽鋼片生產廠商提供或是由矽鋼片生產廠商所提供的鐵損曲線圖，或利用如Ansys Maxwell有限元素電磁模擬分析軟體內的材料庫裡輔助計算得知(Ansys, 2021)。圖4所示為本論文所用之矽鋼片 50CS470 鐵損曲線，其中，x軸為每公斤損失、y軸為磁通密度(中國鋼鐵公司，2016)。

最後利用式(21)計算出鐵損電阻：

$$R_c = \frac{0.97 V_1}{P_{iron} / m} \quad (21)$$

其中， P_{iron} 為鐵損值、 m 為相數、 V_1 為電動機相電壓。

2.2 三相感應電動機滿載特性

本文利用三相感應電動機等效電路模型，建立包含定子繞組電阻及定子電抗、轉子電阻及轉子電抗、鐵心電阻與磁化電抗磁等參數

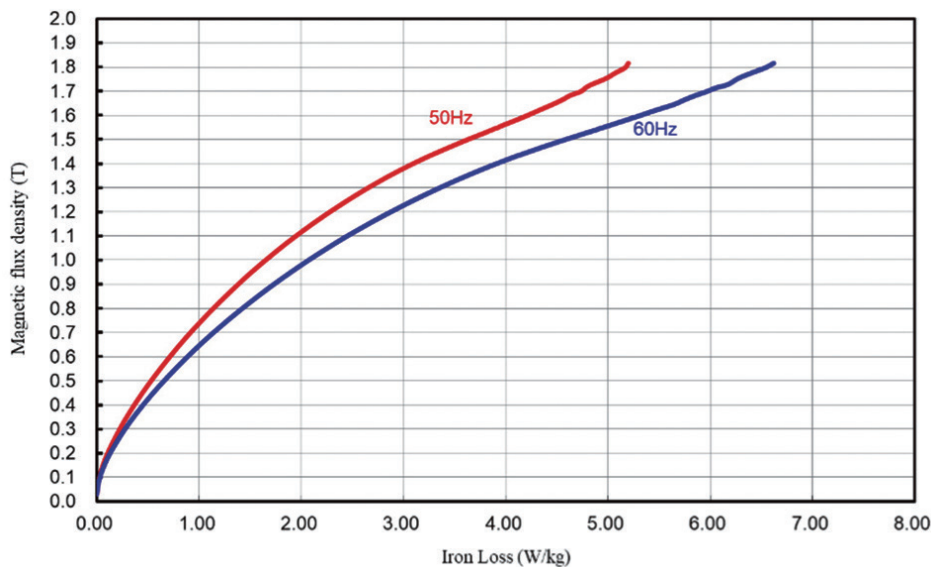


圖4 矽鋼片 50CS470 鐵損曲線(中國鋼鐵公司，2016)

後，計算效率、啟動轉矩與最大轉矩，以供後續遺傳演算法所需之適應函數(Fitness Function, FF)使用。

2.2.1 效率

三相感應電動機滿載效率 η 如下定義：

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (22)$$

$$P_{in} = 3V_1 I_1 pf,$$

$$P_{out} = P_{in} - P_{iron} - P_{closs} - P_{w\&f} - P_{stray}$$

其中， P_{out} 為輸出功率、 P_{in} 為輸入功率，且 V_1 為電動機相電壓、 I_1 為電動機相電流、 pf 為功率因數、 P_{iron} 為鐵損、 P_{closs} 為銅損、 $P_{w\&f}$ 為機械損、 P_{stray} 為雜散損。

2.2.2 啟動轉矩

三相感應電動機啟動轉矩 T_{st} 可由式(23)求得。

$$T_{st} = \frac{3I_{st}^2 R_2'}{4\pi f / P}, \quad I_{st} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (23)$$

其中， I_{st} 為啟動電流、 R_2 為二次電阻、 f 為電源頻率、 P 為極數、 R_1 為一次電阻、 V_1 為電源相電壓、 X_1 為定子電抗、 X_2' 為轉子電抗。

啟動轉矩影響三相感應電動機啟動能力。在限制啟動電流下，如啟動轉矩越大，其啟動加速時間越短(即越容易啟動)外，帶動負載起動能力也越大(Kim, 2017)。

2.2.3 最大轉矩

三相感應電動機最大轉矩 可由式(24)求得。

$$T_m = \frac{3}{\omega_s} \frac{0.5V_1^2}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (24)$$

其中， ω_s 為同步角速度、 R_1 為一次電阻、 X_1 為定子電抗、 X_2' 為轉子電抗、 V_1 為電源相電壓。

最大轉矩影響電機的短時超載能力。最大轉矩越大，電動機承受負載衝擊能力越大。

3. 基於遺傳演算法之電動機最佳化

3.1 遺傳演算法與多目標最佳化

演化論是生物學最基本的理論之一。所謂「演化」(Evolution)是指生物在變異、遺傳與自然選擇作用下的演變發展，物種淘汰和物種產生過程。演化論最早是由查爾斯·達爾文(Charles Darwin)於1859年在其名著「物種起源」(The Origin of Species)提出，並首次提出自然選擇或稱天擇(Natural Selection)是演化的一個機制。根據達爾文的演化理論，生物演化表現不是朝著一個已知的最佳解移動，而是一代會比一代更適應該物種的生活環境。遺傳演算法則抽象生物界演化的機制，以將其應用在學習適應，乃至於搜尋最佳解的問題上面，讓整個系統朝著更佳的方向自我演化。而將這種自然界的選擇方法系統化並發展一可用之模式，最早是由密西根大學的John Holland教授在1975年於Adaption in Natural and Artificial System文中所提出，發展出遺傳演算法搜尋技術的基本架構，並且由其學生Goldberg D. E.成功地運用在工程問題上。之後，有許多研究亦證實了遺傳演算法在多目標最佳化問題的求解上是十分有效率的，除學術界的研究，亦廣泛的運用於各領域上(Goldberg, 1989；Goldberg, 2002)。

遺傳演算法的主要特點為搜尋的方式不同於以往的單點搜尋方式，而是採用多點搜尋，因此不容易掉入局部最佳解外，在優化複雜非線性的問題中，其演算機制可跳脫局部最佳解。此外，遺傳演算法參數優化是經由解碼的過程，而整個演算的機制是在解碼後的

參數集合中進行，不是在參數集合本身，因此演算的機制不受問題函數型能的影響。此外，遺傳演算法係將欲求解的問題變數或參數以一種類似染色體的資料結構(Chromosome-Like Data Structure)來編碼，並應用多點交配(Crossover)、突變(Mutation)等遺傳運算元(Operators)對大量的染色體作運算。運算後產生的子代除保存親代中具優勢的特質外，也有可能因為基因的交換與突變而比親代的表現更佳。

遺傳演算法包含下列幾個基本的主要步驟：

1. 初始(Initialization)：設定族群大小、位元字串大小、交配率與突變率等參數後，接著利用隨機產生器以均勻分佈方式隨機產生所設定範圍內的初始族群。
2. 評估(Evaluation)：評估族群中每一個體的適應函數(Fitness Function, FF)，如求函數之極小，則以函數值小的個體適應度高；反之，函數值大的個體適應度低。
3. 選擇(Selection)：在評估過程中適應度高的個體生存下來，而適應度低的則淘汰，再利用不等分輪盤法進一步選擇要做交配的父代個體。
4. 新世代族群產生 (Generation Production)：以交配與突變來產生新的個體，再來決定代溝率(Generation Gap Rate, GGR)，以保留精英(Elitist)得到下一世代的新族群。
5. 判斷世代數：由上所產生的新族群，判斷世代數是否滿足給定之世代數，若適應函數未能收斂則回到步驟2，繼續進入下一代的演化過程；若適應函數收斂滿足設定值則結束演算法。

3.2 基於遺傳演算法之電動機最佳化設計

圖5所示為本文所提之應用遺傳演算法之電動機最佳化設計流程。其中，各步驟將配合一市售4 hp 60 Hz三相6極鼠籠式感應電動機詳細說明其細節。

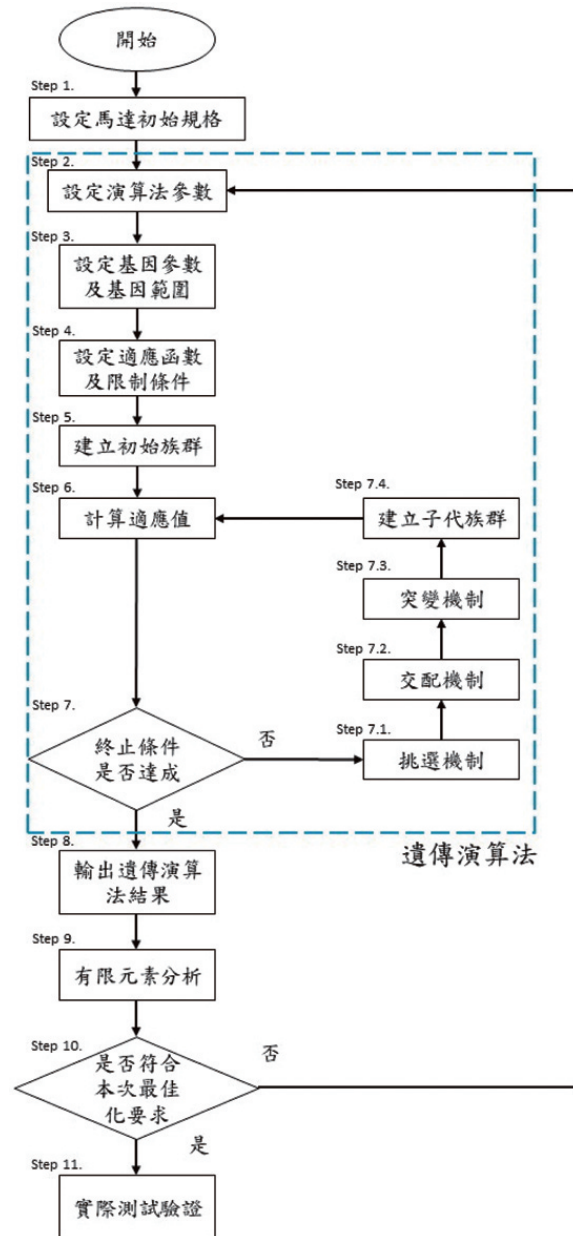


圖5 遺傳演算法設計流程圖

3.1.1 設定電動機初始規格

根據需求訂定電動機初始結構設計，本文以一市售4 hp (約3.1 kW)之60 Hz三相6極感應電動機為研究對象，其規格參數如表1所提供之數據。表2、表3、與表4所示分別為使用之初始係

表1 電動機初始規格參數

框號(132)		定轉子參數		定轉子槽參數		繞組參數	
輸出功率(kW)	3.1	定子外徑(mm)	220	定子齒寬(mm)	4	繞線方式	雙層疊繞
額定電壓(V)	230	定子內徑(mm)	145	定子靴部厚 h_{s1} (mm)	0.6	匝數	24
頻率(Hz)	60	轉子外徑(mm)	144.3	定子斜部厚 h_{s0} (mm)	0.4	節距	1-8
額定電流(A)	11.6	積厚(mm)	125	定子槽開口 b_{s0} (mm)	2.4	銅線截面積 A_{wire} (mm ²)	1.07
		定子槽數	54	定子槽深 h_{s2} (mm)	16	佔積率(%)	55
		轉子槽數	42	轉子齒寬(mm)	6	線電阻(Ω)	0.467
		矽鋼片牌號	50CS470	轉子端厚 h_{r0} (mm)	0.2		

表2 電動機初始係數表

繞組串聯導體數 C_0	432	繞組因數 K_w	0.902
磁滯損係數 K_h	204.206	繞組節距常數 k_{s1}	0.905
渦流損係數 K_c	0.9563	轉子導體面積修正係數 K_{fill}	1
額外損係數 K_e	0	電抗係數 K_x	0.2092
繞組末端修正係數 K_{ew}	1.1	斜槽角度 γ	5.68°

表3 電動機初始等效電路參數

參數	值	備註
R_1	0.709 Ω	$R_1 = \rho_1 \frac{(C_0 / 2) \cdot L_{ave}}{A_{wire}}$
R_2	0.82 Ω	$R_2' = 3C_0^2 K_w^2 \left(\frac{R_{bar}}{Q_r} + \frac{R_{ring}}{P^2} \right) \times 10^{-6}$
X_1	1.57 Ω	$X_1 = X_{s1} + X_{e1} + X_{c1}$
X_2	2.43 Ω	$X_2' = X_{s2}' + X_{e2}' + X_{c2}' + X_{sk}'$
X_m	44.48 Ω	$X_m = \frac{V_1}{I_m}$
R_c	2822.5 Ω	$R_c = \frac{0.97V_1}{P_{iron} / m}$

表4 電動機初始特性值

參數	值	備註
P_{out}	3.1 kW	4 hp
T_{st}	191%	實測紀錄
T_m	293%	實測紀錄
η	89.1%	實測紀錄

數表、初始規格等效電路參數計算值與輸出特性計算值(WEG, 2022；TECO, 2022)。

3.1.2 設定演算法參數

由於遺傳演算法的突變交配為完全機率性的變化，因此有機會讓原先已經較佳的個體被破壞，而無法將較佳的因子進入下一世代循環。菁英政策將會保留世代中較佳的個體，直接進入下一世代，可使演算法演算時間縮短，並有效達到目標值。因此，本文使用菁英演算法來進行電動機設計優化。表5為菁英遺傳演算法之初始參數之設定。

表5 菁英遺傳演算法設定參數表

世代數	400
族群數	500
交配率	80%
菁英數量	1
突變率	1%
交配方法	雙點交配

3.1.3 設定基因參數與基因範圍

基因(Gene)是遺傳演算法中最基本的運算元。本次使用實數編碼形式，各基因編碼直接使用原設計中所有的變數，而一個問題內通常會有許多基因代表各部參數。

將一群基因集合在一起後就稱為染色體(Chromosome)。與基因不同的是，染色體定義為一組完整的解(例如：產品設計最佳組合、最短路徑等)，因此在進行遺傳演算法時，確定問題，並且將問題的解編成染色體就為首要的工

表6 基因參數範圍表

基因序	電動機定轉子結構參數	範圍
X ₁₁	定子槽開口 b_{s0} (mm)	0~3
X ₂₂	定子槽深 h_{s2} (mm)	0~30
X ₃₃	定子齒寬(mm)	0~8
X ₄₄	轉子槽深 h_{r2} (mm)	0~30
X ₅₅	轉子齒寬(mm)	0~8
X ₆₆	繞組匝數	1~50
X ₇₇	繞組佔積率(%)	30~60

作。表6為本文所設立之基因及其參數與其範圍。其中，電動機定轉子結構參數如圖2所示。

3.1.4 設定適應函數及限制條件

遺傳演算法是篩選前面介紹的族群，因此找尋最佳解的過程，需要一個方法來評價每組染色體的優劣，才能模仿達爾文進化論「天擇」的機制，而這個機制就是適應函數。

雖然適應函數能用來評量每組染色體的優劣，但是每次問題的衡量目標方法未必相同，因此需要針對每次問題不同來做調整適應函數，因此建立較佳的適應函數可以說是遺傳演算法中一個相當重要的步驟。

電動機效率、啟動轉矩及最大轉矩三項物理量，但他們為不同物理變數，單位並不同。因此，本文將電動機效率、啟動轉矩及最大轉矩三項物理量，分別以電動機最佳化前之額定效率、啟動轉矩及最大轉矩為基底(Base)，以將電動機效率、啟動轉矩及最大轉矩標么化(Per Unit)。如此一來，根據第二節所計算出效率、啟動轉矩、最大轉矩可整合成如式(25)所示之適應函數(FF)。

$$FF = \alpha_1 \frac{\eta_n}{\eta_{sp}} + \alpha_2 \frac{T_{st,n}}{T_{st,sp}} + \alpha_3 \frac{T_{m,n}}{T_{m,sp}} \quad (25)$$

其中， η_n 、 $T_{st,n}$ 與 $T_{m,n}$ 分別為該染色體之效率值、啟動轉矩、與最大轉矩； η_{sp} 、 $T_{st,sp}$ 與 $T_{m,sp}$ 分別為電動機最佳化前之額定效率、啟動轉

矩與最大轉矩； α_1 、 α_2 與 α_3 分別為電動機之效率、啟動轉矩及最大轉矩之權重係數，且 $\sum_{i=1}^3 \alpha_i = 1$ 。

當電動機效率、啟動轉矩及最大轉矩等目標之重要程度不同時，可將其等目標分別予以加權係數。本文假設每項目標之重要程度皆相同。附錄所示為目標之重要程度不同時，該馬達之多目標優化設計結果。由附錄可知當多個目標之重要程度不同時，雖然相應之優化設計馬達結構與馬達輸出性能略有所差異，但綜觀比較效率、啟動轉矩、最大轉矩及轉矩漣波等電動機之輸出性能，依然可同時高於初始規格。

適應函數之限制條件相關設定如表7所示。其中，當染色體之啟動電流大於7倍額定電流、功率因數小於0.7或效率小於IE3之效能規定89.5%，則須被淘汰以確保阻絕不合格染色體不進入下一代做遺傳運算，故將在限制條件外的適應函數值設定為0。

表7 適應函數之限制條件

限制項目	範圍	適應函數
啟動電流與額定電流比例	>7	0
功率因數	<0.7	0
效率	<89.5%	0

3.1.5 建立初始族群

各種演算搜索法都是在眾多解中找尋當下最佳的解，因此在遺傳演算法中，眾多代表解的染色體，集合起來成為了族群，也就是說，族群就是候選解的集合，而演算法將從候選解中找尋最佳解。

建立初始族群，族群代表解的集合，此一過程為定義在眾多解中要產生甚麼樣的初始值，大略來講有兩種類型，解的範圍內隨機產生以及對解的可能範圍內進行資料分析後取值，本文以隨機產生作為初始族群的方法。

3.1.6 計算適應函數

初始化族群後，就將進行族群內染色體的適應函數評估，在這個步驟內藉由步驟四內提到的適應函數，計算各染色體的適應函數，從而評估各染色體的好壞。

3.1.7 終止條件是否達成

當交配族群適應函數大於本文所設立之終止條件即停止交配。本文所設立之終止條件為執行400次交配突變過程後終止。

3.1.8 輸出遺傳演算法結果

藉由步驟二參數投入遺傳演算法後，可得到最佳適應函數與族群世代數的關係圖，如圖6所示。藍色為族群適應函數平均，黑色為族群中最佳適應函數。由圖6可知其最佳適應函數約在100代接近收斂，最終得到適應函數3.292為最佳適應函數。表8所示為遺傳演算法其結果相應之多目標最佳化設計輸出最佳染色體之基因序。

3.1.9 有限元素分析

將基因演算法計算出及最佳化前之三相感應電動機參數，藉由有限元素電磁模擬分析軟體 Ansys Maxwell模擬分析三相感應電動機輸出特性。表9所示為多目標最佳化設計前、後之電動機參數對照表。

圖7(a)與圖7(b)所示分別為多目標最佳化設計後定子磁通密度分布圖與轉子磁通密度分布圖。由圖7(a)與圖7(b)可知定子磁通密度與轉子磁通密度分別約在1.4~1.6T與在1.4~1.5T之間，因此，本文所設計之電動機其定子與轉子兩者皆未有磁飽和情形。

圖8為多目標最佳化設計前、後有限元軟體模擬之電動機效率-功率圖，圖中紅線為最佳

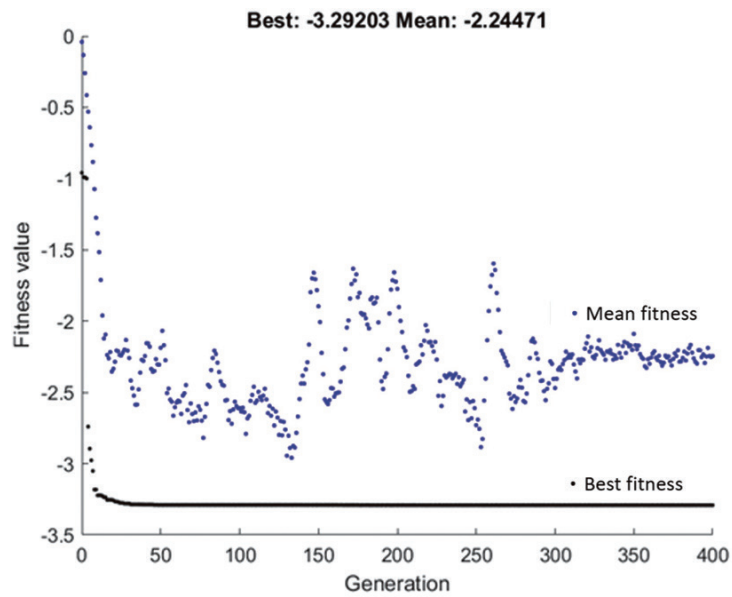


圖6 最佳適應函數演化圖

表8 多目標最佳化設計染色體之基因序

基因序	參數	值
X ₁₁	定子槽開口 b_{s0} (mm)	2.6
X ₂₂	定子槽深 h_{s2} (mm)	19
X ₃₃	定子齒寬 (mm)	4.2
X ₄₄	轉子槽深 h_{r2} (mm)	16
X ₅₅	轉子齒寬 (mm)	5
X ₆₆	繞組匝數	23
X ₇₇	繞組佔積率 (%)	60

表9 最佳化前、後電動機參數對照表

基因序	最佳化設計前	最佳化設計後
X ₁₁	2.4	2.6
X ₂₂	16	19
X ₃₃	4	4.2
X ₄₄	14.9	16
X ₅₅	6	5
X ₆₆	24	23
X ₇₇	55	60

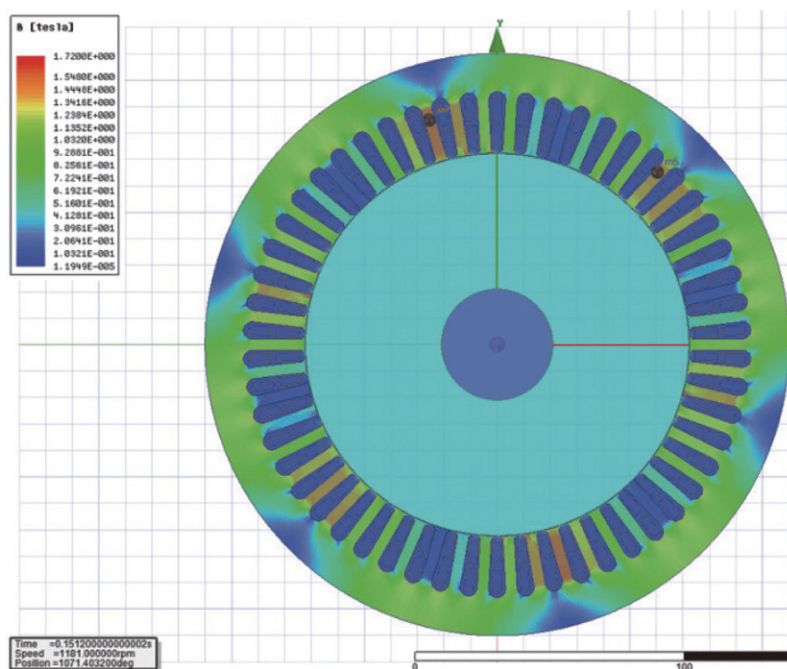


圖7(a) 定子磁通密度分布圖

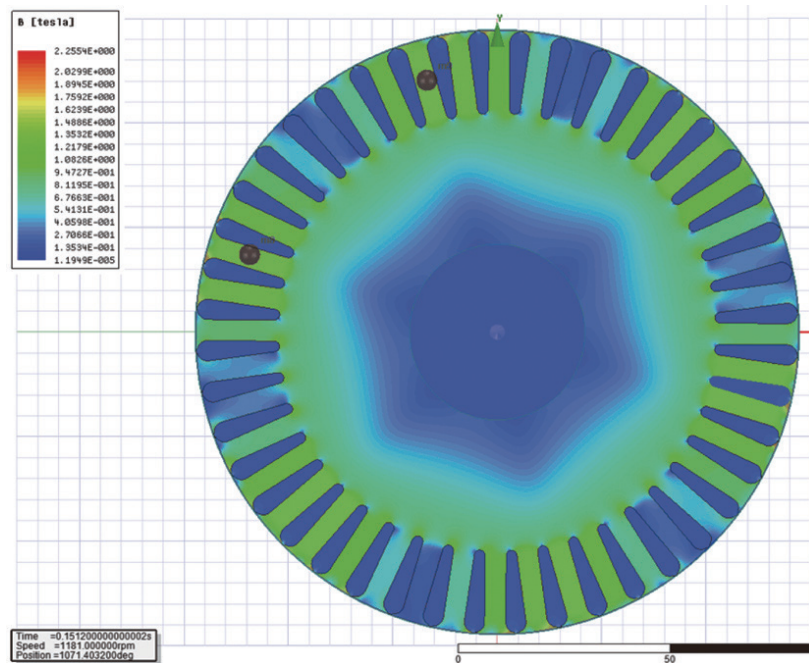


圖7(b) 轉子磁通密度分布圖

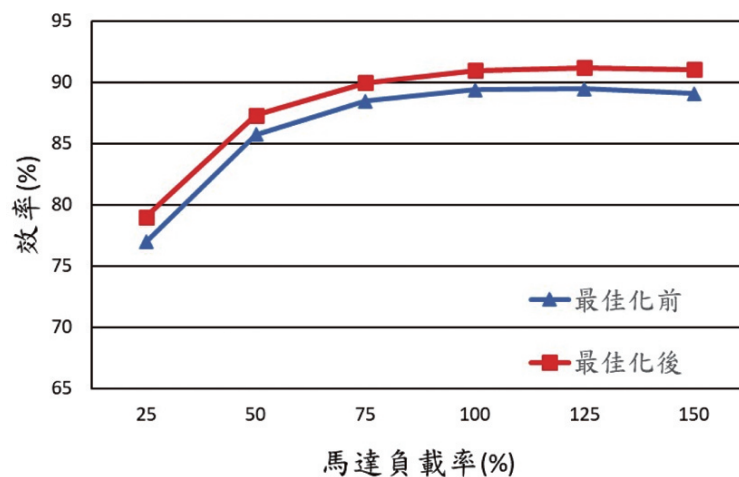


圖8 電動機效率-功率圖

化後曲線，藍線為最佳化前曲線。由圖6可知，在25~150%負載下，多目標最佳化設計後之效率都優於最佳化前。

圖9所示為電動機轉速-轉矩圖(T-N Curve)，圖中紅線為最佳化後曲線，藍線為最佳化前曲線。由圖9可知多目標最佳化設計後之啟動轉矩與最大轉矩皆有提升。

圖10為多目標最佳化設計前、後電動機轉矩漣波比較圖，圖中紅線為最佳化後曲線，藍線為最佳化前曲線。由圖10可知多目標最佳化

設計後轉矩漣波確實顯著改善。

3.1.10 是否符合本次最佳化設計要求

表10為多目標最佳化設計前、後之各目標之模擬值。由表10可知，本文所多目標最佳化設計之電動機其於效率、最大轉矩、啟動轉矩及轉矩漣波最佳化後皆有明顯提升。

3.1.11 實際測試驗證

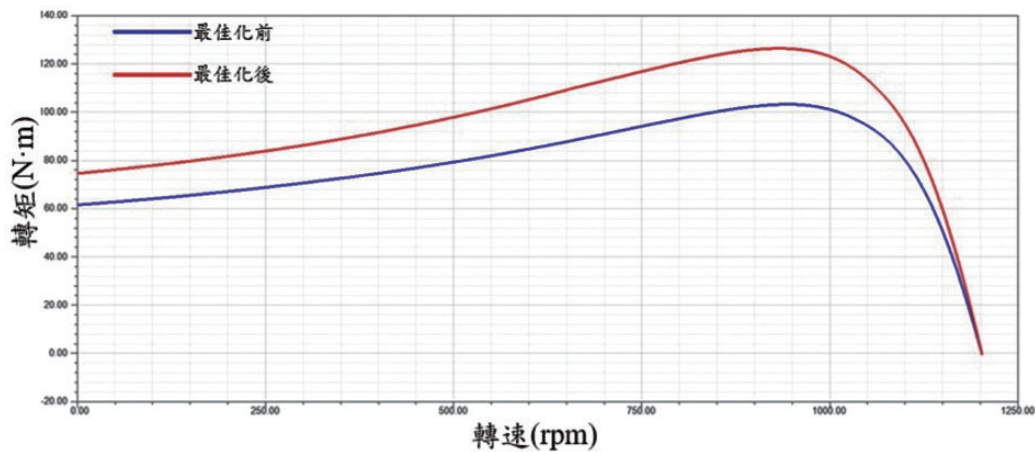


圖9 電動機轉矩-轉速圖

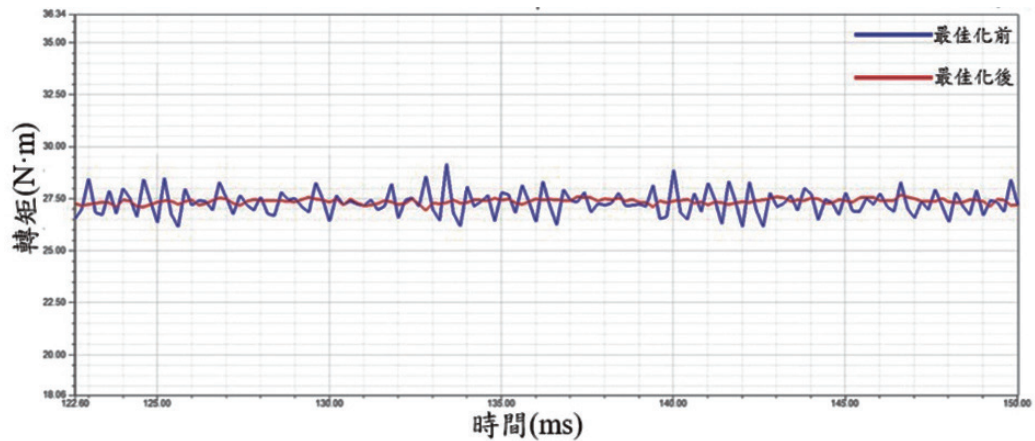


圖10 電動機轉矩漣波圖

表10 多目標最佳化設計前、後多目標值

	效率(%)	轉矩漣波峰對峰值(NT)	最大轉矩(%)	啟動轉矩(%)
最佳化設計前	89.40	3.0334	422	257
最佳化設計後	90.95	0.7423	502	298

為實驗驗證所提遺傳演算法於三相鼠籠式感應電動機之多目標最佳化設計之有效性與正確性，本論文建置一如圖11所示之感應電動機測試系統。其中，實驗設備器材與其規格及其功能，如表11所示。

4. 實驗結果與討論

表12所示感應電動機最佳化設計後於不同負載下之輸出功率、額定電流、轉速、輸入

功率、功因及效率實測結果。感應電動機的效率、轉矩漣波以及最大轉矩與啟動轉矩等多目標之實測結果，則如表13所示。由表12與表13可知本文所設計之電動機，其效率、最大轉矩與啟動轉矩等多個最佳化目標確實同時顯著提升並高於NEMA MG-1外，實測滿載效率(90.8%)，除高於目前之國際規範準 IEC60034-30之IE3能效等級要求(89.5%)，並也超過未來之IEC60034-30-1之IE4能效等級要求(90.2%) (International Electrotechnical Commission,

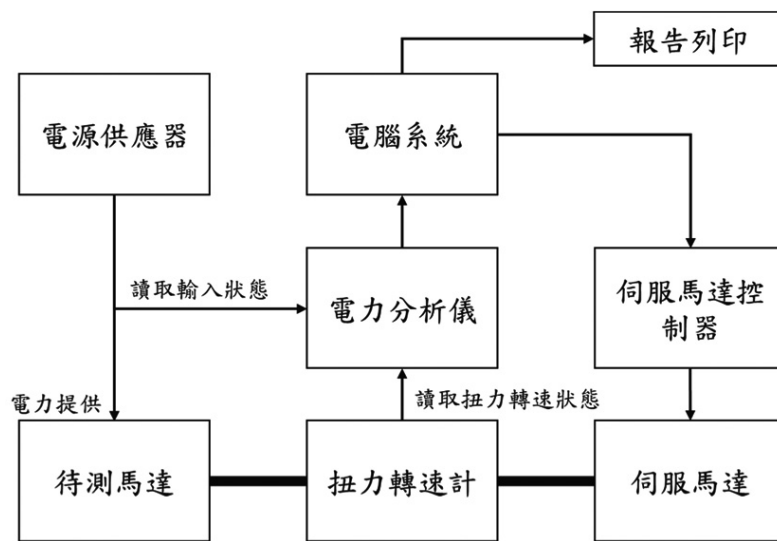


圖11 感應電動機測試系統

表11 實驗器設備

設備名稱	規格(型號)	功能與目的
電力分析儀	HIOKI PW3390	讀取扭力轉速計、電源輸入狀態。
電源供應器	AFC-33150G	提供馬達電源。
扭力計	HBM T21WN	偵測馬達轉速及扭力。
負載電動機	22 kW, 1500 rpm 伺服電動機	模擬負載狀況。
熱電偶線	J-Type	偵測溫度。
聯軸器	ϕ_{38}	連結待測馬達、扭力計及伺服馬達。

表12 最佳化設計之電動機實測結果

額定輸出(kW)	3.1					
穩定溫度(°C)	47					
額定溫度線電阻(Ω)	0.526					
室溫(°C)	22					
啟動轉矩(%)	213					
最大轉矩(%)	340					
負載(%)	25	50	75	100	115	150
輸出功率(kW)	0.775	1.55	2.325	3.1	3.565	4.65
額定電流(A)	6.87	7.99	9.56	11.46	12.73	15.96
轉速(rpm)	1194	1188	1182	1176	1169	1162
輸入功率(kW)	0.947	1.75	2.573	3.416	3.934	5.18
功因	0.346	0.55	0.675	0.748	0.775	0.815
效率(%)	81.9	88.5	90.4	90.8	90.6	89.8

2014)。最後表14列出本文所提出的三相感應電動機之多目標最佳化設計與其他近期文獻之間的比較並強調彰顯其功能與特徵。

5. 結 論

本文以4 hp 60 Hz三相6極鼠籠式感應電動

表13 感應電動機實測性能

	效率(%)	最大轉矩(%)	啟動轉矩(%)
最佳化設計前	89.1	293	191
最佳化設計後	90.8	340	213
NEMA MG-1	90.2 (IEC60034-30-1, IE4)	230	155

表14 本文的三相感應電動機之多目標最佳化設計與相近文獻之間的比較

	杜肇震， 2015	Chaudhary <i>et al.</i> , 2016	劉梁毅， 2017	Gupta <i>et al.</i> , 2020	Stachl <i>et al.</i> , 2021	本文
功率(hp)	3~7.5	40	1	10	15	4
相數	3	3	1	3	3	3
極數	4	6	4	4	2	6
輸入優化參數數	21	8	4	7	7	7
優化目標數(項目)	1 (成本)	2 (效率、價格)	2 (效率、啟動電流)	2 (效率、體積)	2 (效率、輸出轉矩)	3 (效率、最大轉矩與啟動轉矩)
衍生改善項目	效率	---	---	功因、啟動轉矩	---	轉矩漣波
優化演算法	VSHDE	GA	FTM	GA	GA	GA
模擬驗證	v	v	v	v	x	v
實驗驗證	x	x	x	x	x	v

機為研究對象，利用Matlab及其Optimization Toolbox建立三相鼠籠式感應電動機結構參數與繞線之遺傳演算法模型外，並應用於三相鼠籠式感應電動機的效率、最大轉矩與啟動轉矩等多目標改善。由模擬與實驗結果可知本文所提之多目標最佳化目標設計之4 hp三相鼠籠式感應電動機確實可通過IEC60034-30-1之IE4能效等級要求外，並可同時顯著提升感應電動機之最大轉矩、啟動轉矩及轉矩漣波等多項目標性能。另，電動機效率、啟動轉矩及最大轉矩之權重，可依設計者對其關注程度之不同而設定，其相應優化設計之馬達結構與馬達輸出性能也略有所差異。然而由於遺傳演算法係採用多點搜尋方式，因此不容易掉入局部最佳解外，在優化複雜非線性的問題中，其演算機制可跳脫局部最佳解。因此不同全權重之電動機

效率、啟動轉矩及最大轉矩等多個項輸出性能雖略有所不同，然該等多個項輸出性能依然可同時高於初始規格。

參考文獻

- 中國鋼鐵公司，2016。取於：2022年03月，
https://www.csc.com.tw/csc/pd/doc/spec_esc_2016.pdf，電磁鋼捲型錄。
- 杜肇震，2015。三相感應電動機模型之建立及其最佳化分析，明志科技大學電機工程系，碩士論文。
- 林岳政，2013。三相鼠籠式感應電動機分析程式開發，逢甲大學電機工程學系碩士在職專班，碩士論文。
- 林昇甫與、徐永吉，2009。遺傳演算法及其應

- 用，五南圖書出版股份有限公司，臺灣。
- 徐銘懋，2015。符合IE3高效率感應電動機之最佳化設計，大葉大學電機工程學系，博士論文。
- 許溢适，2007。實用電動機設計手冊，強峰印刷企業有限公司，臺灣。
- 陳育群，2006。基於單純形實數型遺傳演算法於高維數全域最佳化問題，國立臺灣海洋大學系統工程暨造船學系，碩士論文。
- 陽毅平、劉達全、解潘祥、張欣宏、林立松、楊可農、林國楨、藍亦維、林君穎與、張柏華，2021。電動車輛動力系統：設計與整合簡介，東華書局，臺灣。
- 劉梁毅，2017。單相感應電動機最佳化分析與變頻驅動器製作，國立高雄應用科技大學電機工程系，碩士論文。
- Ansys, 2021. Maxwell 2021R1 Help. pp. 1004-1015.
- Chaudhary, R., A. Shahpatel and S. Patel, 2016. Optimal Design of Induction Motor Using Genetic Algorithm and Comparison with Conventionally Designed Induction Motor. IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), Delhi, India, pp. 1-4.
- Goldberg, D. E., 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley, Boston, USA.
- Goldberg, D. E., 2002. The Design of Innovation: Lessons From and for Competent Genetic Algorithms. Kluwer Academic Publishers, Norwell, USA.
- Gupta, A., R. Machavaram, T. Kshatriya and S. Ranjan, 2020. Multi-Objective Design Optimization of a Three Phase Squirrel Cage Induction Motor for Electric Propulsion System Using Genetic Algorithm. IEEE First International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC), Visvesvaraya, India, pp.1-6.
- International Electrotechnical Commission, 2014. Rotating Electrical Machines-Part 30-1: Efficiency Classes of Line Operated AC Motors (IE code). International Electrotechnical Commission, pp. 18-21.
- Kim, S. H., 2017. Electric Motor Control: DC, AC, and BLDC Motors. Elsevier Science, Cambridge, United Kingdom.
- Mohamed, M. Y., S. A. A. Maksoud, M. Fawzi and A. E. Kalas, 2017. Effect of Poles, Slots, Phases Number and Sack Length Changes on the Optimal Design of Induction Motor. 2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, Egypt, pp. 466-471.
- Pyrhonen, J., T. Jokinen and V. Hrabovcová, 2008. Design of Rotating Electrical Machines. Wiley, pp. 340-343.
- Stachl, T., A. Fatima, M. S. Toulabi, W. Li, A. Lombardi, J. Tjong and N. C. Kar, 2021. Torque and Loss Optimized Rotor Bar Design for an Induction Machine Using a Nondominated Genetic Algorithm Through Objective Function Modeling. 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Toronto, Canada, pp. 1-6.
- TECO, 2022. Retrieved on June, 2022, from [https://www.teco.com.tw/fa/ecatalogue_file/en/\(Global\)StandardIE2IE3Motor-AESV-AESU-0711.pdf](https://www.teco.com.tw/fa/ecatalogue_file/en/(Global)StandardIE2IE3Motor-AESV-AESU-0711.pdf), Standard Motor Catalogue.
- WEG, 2022. Retrieved on June, 2022, from <https://www.weg.net/>, Multimounting IE3 4 HP 6P

- 132M 3Ph 460//380-415 V 60 Hz IC411-TEFC-B3L (E).
- Yang, G., Z. Cui and L. Song, 2014. Analysis of Iron Losses in Induction Motor with an Improved Iron-loss Model. IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Beijing, China, pp. 1-4.

附 錄

當電動機效率、啟動轉矩及最大轉矩等目標之重要程度不同時，可將其等分別予以加權係數。優化設計後之馬達結構參數與馬達輸出性能如附表A。由附表A可知當多個目標之重要程度不同時，雖然相應之優化設計馬達結構與馬達輸出性能略有所差異，但綜觀比較效率、啟動轉矩、最大轉矩及轉矩漣波等電動機之輸出性能，依然可同時高於初始規格。

附表A 目標重要程度不同時之馬達結構參數與馬達輸出性能

		$\alpha_1:\alpha_2:\alpha_3$ = 0.33:0.33:0.33	$\alpha_1:\alpha_2:\alpha_3$ = 0.50:0.33:0.17	$\alpha_1:\alpha_2:\alpha_3$ = 0.27:0.40:0.33	最佳化設計前
基 因 序	X_{11}	2.6	2.6	2.6	2.4
	X_{22}	19	18.7	17.4	16
	X_{33}	4.2	4.13	4.4	4
	X_{44}	16	18.1	16.3	14.9
	X_{55}	5	4.9	5	6
	X_{66}	23	23	22	24
	X_{77}	60	60	60	55
輸 出	效率(%)	90.95	90.98	90.76	89.40
	最大轉矩(%)	502	501	540	422
	啟動轉矩(%)	298	294	328	257
	轉矩漣波峰 對峰值(NT)	0.7423	0.7713	0.9545	3.0334

Multi-Objective Optimization Design of a Three-Phase Induction Motor Using Genetic Algorithm

Hsiang-Hua Liu¹ Jenn-Jong Shieh^{2*} Zhong-Cun Chen¹

ABSTRACT

According to the design needs, a great deal of finite element analysis softwares are available on the market, but they can only provide the output results of the known inductor motor parameters. Therefore, it still needs to rely on the experience of users to set the parameters of the motor and it is very time consuming every time finite element is analyzed. Furthermore, if there is a change in the settings, a lot of time will be spent on analyzing again and resetting. In this paper, the relationships between the parameters of the loss of three-phase squirrel cage inductor motor and the speed-torque characteristics is used to establish the fitness function of the genetic algorithm, finding the multi-objective optimal solutions of the inductor motor efficiency, start torque, and maximum torque. Without increasing the volume of the three-phase squirrel cage inductor motor the algorithm is then tossed into the finite element analysis software to be analyzed while increasing the three-phase induction inductor motor efficiency, start torque, maximum torque and improving the torque ripple of the three-phase squirrel cage inductor motor simultaneously. Lastly, the feasibility and effectiveness of the proposed multi-objective optimal structure design of the three-phase squirrel cage inductor motor using the genetic algorithm is verified by simulations and the experimental results of the 4 hp 3-phase 6-pole squirrel cage inductor motor with multi-objective optimal structure parameters.

Keywords: Genetic Algorithm, Optimization Design, Induction Motor, Squirrel Cage, Finite Element Analysis.

¹Feng Chia University, Department of Electrical Engineering, Postgraduate.

²Feng Chia University, Department of Electrical Engineering, Professor.

*Corresponding Author, Phone: +886-4-24517250#3815, E-mail: jjshieh@fcu.edu.tw

Received Date: September 21, 2022

Revised Date: January 16, 2023

Accepted Date: January 24, 2023