



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2309312

引用格式:冯立杰,付帅帅,张虎翼.基于改进粒子群算法和RMxpirt的永磁滚筒多目标优化设计[J].科学技术与工程,2025,25(5):1936-1943.

Feng Lijie, Fu Shuashuai, Zhang Huiyi. Multi-objective optimization design of permanent magnet roller based on improved particle swarm optimization algorithm and RMxpirt[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(5): 1936-1943.

电工技术

基于改进粒子群算法和RMxpirt的永磁滚筒多目标优化设计

冯立杰¹,付帅帅¹,张虎翼²

(1.上海海事大学物流工程学院,上海201306;2.上海飞机制造有限公司航空制造技术研究所,上海201324)

摘要 针对基于专家经验对永磁滚筒优化设计时,寻优效率比较低的问题,构建了一种基于改进粒子群优化算法和RMxpirt联合仿真的永磁滚筒多目标优化设计方法。首先,提出了一种改进粒子群优化算法,提高了寻优收敛速度;其次,在永磁滚筒结构参数与性能参数关系分析的基础上明确了面向改进粒子群优化算法的变量参数、约束参数和优化参数;最后,通过MATLAB编写改进粒子群优化算法程序,利用改进粒子群优化算法程序实现RMxpirt输入参数与输出参数的闭环迭代与比较寻优,提高了永磁滚筒优化设计的效率和优化效果。

关键词 永磁滚筒;改进粒子群优化算法;多目标优化设计;联合仿真

中图分类号 TM351; **文献标志码** A

Multi-objective Optimization Design of Permanent Magnet Roller Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm and RMxpirt

FENG Li-jie¹, FU Shuai-shuai¹, ZHANG Hu-yi²

(1. College of Logistics Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Aviation Manufacturing Technology Research Institute, Shanghai 201324, China)

[Abstract] A novel multi-objective optimization design method for permanent magnet roller based on improved particle swarm optimization algorithm and RMxpirt co-simulation was developed to address the issue of low optimization efficiency when relying solely on expert experience. Firstly, an improved particle swarm optimization algorithm was proposed to enhance the convergence speed of the optimization process. Secondly, based on the analysis of the relationship between the structural and performance parameters of the permanent magnet roller, the variable parameters, constraint parameters, and optimization parameters for the improved particle swarm optimization algorithm were determined. Lastly, a MATLAB program for the improved particle swarm optimization algorithm was developed to achieve closed-loop iteration and comparative optimization of the input and output parameters in RMxpirt, thereby improving the efficiency and effectiveness of the optimization design for the permanent magnet roller.

[Keywords] permanent magnet roller; improved particle swarm optimization algorithm; multi-objective optimization design; co-simulation

永磁滚筒作为一种新型外转子表贴式永磁电机,与传统滚筒相比,省去了减速器、联轴器,拥有体积小、故障率低、系统效率高、占地空间小、重量轻等优点,在煤矿行业中被高度重视^[1-3]。传统的永磁滚筒设计多基于专家经验选择电机参数;然后通过仿真求出性能指标;最后对比多种方案,考虑成本和电机性能,最终确定最优方案。但是该设计

流程较多依赖专家经验,同时寻优效率比较低。因此,亟须寻找一种快速优化设计方案的新流程和新方法。

针对电机优化设计方法,众多学者进行了多种探索。主要通过构建优化效率更高的优化算法^[4-7]以及准确性更高的电机模型。其中电机模型主要分为解析模型^[8]和代理模型^[9-12]两种,针对

收稿日期:2023-11-27 修订日期:2024-11-15

基金项目:国家重点研发计划(2022YFF0608700)

第一作者:冯立杰(1966—),男,汉族,河南焦作人,博士,教授。研究方向:智能电气、特种电机与控制。E-mail:ljfeng@shmtu.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

解析模型,佟文明等^[13]基于磁场解析模型与遗传算法相结合的方法,对轴向磁通永磁电机的电磁转矩平均值和电机有效成本进行优化;倪有源等^[14]提出了一种其转子含有半圆形辅助槽的解析模型,推导齿槽转矩峰值与槽型尺寸的解析关系,并对辅助槽型尺寸进行优化分析,获得齿槽转矩脉动的极小值。

针对代理模型,赵玫等^[15]提出一种表面响应法与粒子群算法相结合的多目标优化设计方法,对一种新型定子三面墙聚磁式结构的横向磁通永磁直线电机进行优化。Han 等^[16]基于响应面法构建周向励磁永磁电机的效率、功率因数、转矩波动和永磁体的涡流损耗代理模型,并应用粒子群优化算法对其代理模型进行优化;Pan 等^[17]基于机器学习算法构建混合励磁双定子永磁同步电机的优化目标代理模型,并利用非支配排序遗传算法对其反电动势、反电动势谐波、转矩和转矩波动进行优化;Verma 等^[18]基于田口法构建表面嵌入式永磁同步电机的优化目标代理模型,并利用遗传算法对其转矩、转矩波动和齿槽转矩进行优化。

综上所述,各位学者均取得了较好的优化效果,但是解析模型对公式的精确度要求高,代理模型则需要大量的数据支持。而基于 RMxpirt 的电机模型可避免上述问题,却鲜有人将其与智能优化算法结合起来进行永磁电机的多目标优化设计。

基于此,现以永磁滚筒为研究对象,提出基于改进粒子群优化(improved particle swarm optimization, IPSO)算法和 RMxpirt 的联合仿真,对永磁滚筒进行多目标优化设计。首先,介绍粒子群优化算法,并对其改进,通过标准测试函数 Ackley's Function 进行测试;然后,在分析永磁滚筒结构参数和性能参数关系的基础上,设计面向 IPSO 算法的优化变量、约束条件和优化目标,建立永磁滚筒优化模型;最后,论述 IPSO 和 RMxpirt 联合仿真的机理,并以 55 kW 永磁滚筒为例开展多目标优化设计,对优化前后的目标和约束条件进行对比分析。

1 改进粒子群优化算法

1.1 粒子群优化算法的原理

粒子群优化算法属于群智能优化算法,因易于理解,参数少且容易实现,常用于解决全局优化问题^[19]。

粒子群优化算法主要步骤如下。

步骤 1 构建增广适应度函数。首先,构建适应度函数 $f(x)$ 。

其次,加入约束条件,约束条件如下。

$$\begin{cases} g_1(X) = g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \\ g_2(X) = g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \\ \vdots \\ g_m(X) = g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $g_m(X)$ 为约束函数。

最后,利用惩罚函数将有约束问题转化为无约束问题,采用惩罚函数 $P(X, \gamma)$, 对应的增广适应度函数为 $F(X, \gamma)$ 。

$$P(X, \gamma) = \gamma \sum_{j=1}^M \max[0, g_j(X)] \quad (2)$$

$$\min F(X, \gamma) = f(X) + P(X, \gamma) \quad (3)$$

式中: γ 为惩罚因子。

步骤 2 设定粒子维数、粒子群个数、迭代次数及第 k 次迭代的位置和速度为

$$X_i^k = (x_{i1}^k, \dots, x_{ij}^k, \dots, x_{iD}^k) \quad (4)$$

$$V_i^k = (v_{i1}^k, \dots, v_{ij}^k, \dots, v_{iD}^k) \quad (5)$$

式中: D 为粒子维数; N 为粒子群个数; T 为迭代总次数; i 为第 i 个粒子; j 为空间的维数; k 为迭代次数; X_i^k 和 V_i^k 分别为 k 次迭代时,第 i 个粒子的位置和速度; x_{ij}^k 和 v_{ij}^k 分别为 k 次迭代时,第 i 个粒子第 j 维的位置和速度分量。

步骤 3 求解出每个粒子的个体最优解和全局最优解,可表示为

$$P_i^k = (p_{i1}^k, \dots, p_{ij}^k, \dots, p_{iD}^k) \quad (6)$$

$$P^k = (p_1^k, \dots, p_j^k, \dots, p_D^k) \quad (7)$$

式中: p_{ij}^k 为第 k 次迭代第 i 粒子的 j 维个体最优位置分量; p_j^k 为第 k 次迭代的 j 维全局最优位置分量。

步骤 4 更新粒子的速度及位置。

$$v_{ij}^{k+1} = \omega v_{ij}^k + c_1 r_1 (p_{ij}^k - x_{ij}^k) + c_2 r_2 (p_j^k - x_{ij}^k) \quad (8)$$

$$x_{ij}^{k+1} = x_{ij}^k + v_{ij}^{k+1} \quad (9)$$

式中: v_{ij}^{k+1} 和 x_{ij}^{k+1} 为第 $k+1$ 次迭代第 i 粒子的 j 维速度和位置分量; ω 为惯性权重; c_1 和 c_2 为学习因子; r_1 和 r_2 为 $0 \sim 1$ 的随机数。

步骤 5 处理速度和位置边界条件。速度取值范围为 $[V_{\min}, V_{\max}]$, 位置取值范围为 $[X_{\min}, X_{\max}]$, 速度和位置取值为

$$V_{id}^{k+1} = \begin{cases} r(V_{\max} - V_{\min}) + V_{\min}, & V < V_{\min} \\ r(V_{\max} - V_{\min}) + V_{\min}, & V > V_{\max} \\ V_{\text{new}}, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

$$X_{id}^{k+1} = \begin{cases} r(X_{\max} - X_{\min}) + X_{\min}, & X < X_{\min} \\ r(X_{\max} - X_{\min}) + X_{\min}, & X > X_{\max} \\ X_{\text{new}}, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中: r 为 $0 \sim 1$ 的随机数。

1.2 粒子群优化算法的改进

传统粒子群优化算法易陷入局部最优,故需要对其进行改进^[20]。因惯性权重影响全局寻优能力和局部寻优能力,所以通过寻优前期较大的惯性权重可以增强全局寻优能力,避免陷入局部最优。同时,在后期迅速减小的惯性权重可以增强局部寻优能力,收敛性更好。

对于惯性权重的改进,虽然线性递减惯性权重是常用的方法,但是式(12)表示的改进惯性权重更新公式更具有优越性。因为改进惯性权重比线性递减惯性权重在搜索初期惯性权重更大,搜索后期惯性权重变小的速度更快。

$$\omega(k) = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min})(2^{\frac{k}{T}} - 1) \times \tan\left(\frac{\pi}{4} \frac{k}{T}\right) \quad (12)$$

为验证所选用的惯性权重可行性,运用 Ackley's Function 测试函数分别对固定惯性权重、线性递减惯性权重和改进惯性权重进行测试。测试情况如图 1 所示。

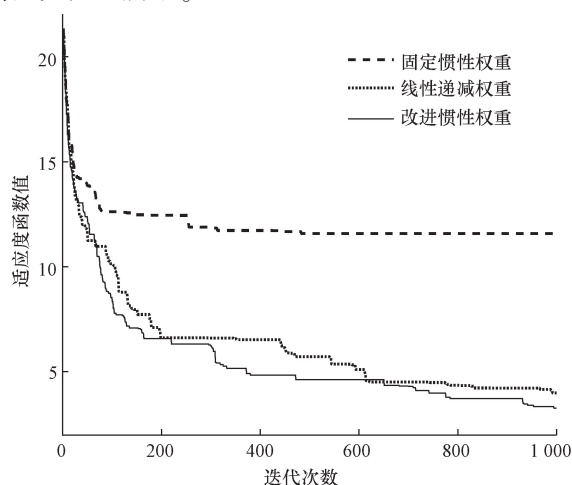


图 1 适应度值曲线

Fig. 1 Fitness value curve

从图 1 中可以看出,改进的惯性权重收敛速度明显高于线性递减惯性权重和固定惯性权重的收敛速度。因此,所提出的惯性权重更新公式使 IPSO 有更优的收敛速度。

2 基于 IPSO 的永磁滚筒优化模型设计

2.1 永磁滚筒参数关系分析

为简化永磁滚筒成本计算,只考虑电机主材料成本,主要包括电机铜线、铁芯和永磁体的成本,简化后的电机成本构成如下。

$$C = C_1 m_{Cu} + C_2 m_{Fe} + C_3 m_{ci} \quad (13)$$

$$m_{Cu} = 2pq\pi N_s d_1^2 N_l a L_1 \rho_{Cu} \quad (14)$$

$$m_{Fe} = \pi[(D_2 - D_{i2})^2 + (D_1 - D_{i1})^2 - 2pqA_s] L_1 \rho_{Fe} \quad (15)$$

$$m_{ci} = \pi(D_1 + 2\delta)\alpha_i h_{MP} L_1 \rho_{ci} \quad (16)$$

式中: m_{Cu} 为铜质量; m_{Fe} 为铁的质量; m_{ci} 为永磁体质量; C_1 为铜的价格; C_2 为铁的价格; C_3 为永磁体的价格; p 为极对数; q 为每极每相槽数; N_s 为每槽导体数; α_i 为极弧系数; a 为并联支路数; N_l 为并绕根数; d_1 为绕组线规; L_1 为电机有效长度; D_1 为定子外径; δ 为气隙; ρ_{Cu} 为铜的密度; ρ_{Fe} 为铁的密度; ρ_{ci} 为永磁体的密度; h_{MP} 为永磁体厚度; A_s 为槽面积; D_{i1} 为定子内径; D_2 为转子外径; D_{i2} 为转子内径。

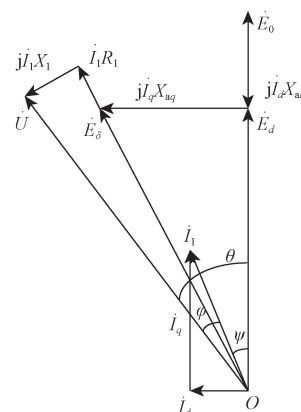
影响成本的参数在优化后,会改变电机内部相应部件阻值的变化,继而对电压产生影响,所以需要电压进行分析,根据双反应理论可知永磁滚筒电压方程为

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{E}_0 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1 + j\dot{I}_d X_{ad} + j\dot{I}_q X_{aq} \\ &= \dot{E}_0 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_d X_d + j\dot{I}_q X_q \end{aligned} \quad (17)$$

式(17)中: \dot{U} 为外部输入相电压有效值; \dot{E}_0 为每相空载感应电动势有效值; \dot{I}_1 为定子相电流有效值; R_1 为定子绕组相电阻; X_1 为定子漏抗; \dot{I}_d 为直轴电枢电流; X_{ad} 为直轴电枢反应电抗; \dot{I}_q 为交轴电枢电流; X_{aq} 为交轴电枢反应电抗; X_q 和 X_d 为交、直轴同步电抗。

由电压方程绘制永磁滚筒稳定运行时的相量图如图 2 所示。

其中功率因数、定子绕组相电阻、定子漏抗、交、直轴电枢反应电抗和交、直轴电枢电流分别为



θ 为转矩角,代表 \dot{U} 超前 \dot{E}_0 的角度; ψ 为内功率因数角,代表 \dot{I}_1 超前 \dot{E}_0 的角度; φ 为功率因数角,代表 \dot{U} 超前 \dot{I}_1 的角

度; \dot{E}_d 为直轴电动势; \dot{E}_δ 为气隙合成电动势

图 2 相量图

Fig. 2 Vector diagram

$$\left\{ \begin{array}{l} \cos\varphi = \cos(\theta - |\psi|) \\ R_1 = \frac{2\rho L_{av} p q N_s}{\pi a^2 N_t (d_1/2)^2} \\ X_1 = \frac{15.5 f p q N_s^2 L_1 \sum \lambda}{10^8 a^2} \\ X_{aq} = \frac{L_1 (D_1 + 2\delta) K_{dq} q N_s B_{aq1}}{a I_q 10^4} \\ X_{ad} = \frac{L_1 (D_1 + 2\delta) K_{dq} q N_s B_{ad1}}{a I_d 10^4} \\ I_d = \frac{R_1 U \sin\theta + X_q (E_0 - U \cos\theta)}{R_1^2 + X_d X_q} \\ I_q = \frac{X_d U \sin\theta - R_1 (E_0 - U \cos\theta)}{R_1^2 + X_d X_q} \end{array} \right. \quad (18)$$

式(18)中: f 为频率; ρ 为电阻率; L_{av} 为绕组平均匝长; $\sum \lambda$ 为总漏磁导系数; K_{dq} 为绕组因数; B_{aq1} 和 B_{ad1} 分别为交、直轴电枢反应基波磁密幅值。

永磁滚筒的效率为

$$\eta = \left(1 - \frac{\sum P}{m U I_1 \cos\varphi} \right) \times 100\% \quad (19)$$

$$\sum P = K_i P_i m_i + K_j P_j m_j + K_e m I_1^2 R_1 + P_{fw} + P_s \quad (20)$$

式中: $\sum P$ 为总损耗; m 为相数; K_i 为定子齿部铁耗校正系数; K_j 为定子轭部铁耗校正系数; P_i 和 P_j 分别为齿部单位铁耗和轭部单位铁耗,分别与齿磁密和轭磁密有关; m_i 为定子齿质量; m_j 为定子轭质量; P_s 为杂散损耗; P_{fw} 为机械损耗,参考同系列电机实测数据。

每相感应电压为

$$E = \frac{4.44 f K_{dq} p q N_s K_\phi \Phi}{a} \quad (21)$$

式(21)中: K_ϕ 为气隙磁通波形系数; Φ 为每极气隙磁通。

由图2可得随转矩角变化的转矩倍数为

$$T_{po} = \frac{mU[E_0(X_q \sin\theta - R_1 \cos\theta) - 0.5UX_q \sin(2\theta)]}{P_N(R_1^2 + X_d X_q)} + \frac{mU[R_1 U + 0.5UX_d \sin(2\theta)] - (R_1^2 + X_d X_q) \sum P}{P_N(R_1^2 + X_d X_q)} \quad (22)$$

式(22)中: P_N 为额定功率。

热负荷公式为

$$T = \frac{2mpqN_s I_1^2}{a^2 \pi^2 D_1 N_t (d_1/2)^2} \quad (23)$$

综上,影响成本因素的变化会引起定子漏抗、定子绕组相电阻和交、直轴电枢反应电抗变化,影

响相感应电压、功率因数、最大转矩倍数和热负荷的大小,继而影响电机的性能。其中由相感应电压换算的线感应电压反映永磁滚筒电能向机械能转化的强弱,功率因数反映永磁滚筒对电能利用率的高低,通过转矩倍数求出的最大转矩倍数反映电机的过载能力,热负荷反映电机的温升,所以在优化成本时须将以上性能指标设为约束参数。

2.2 选择优化目标

在保证永磁滚筒电气性能和机械性能的前提下,需要降低其制造成本,并增加效率。所以选择成本和效率为优化目标。目标函数为

$$F(X) = G_1 \frac{C}{C_r} + G_2 \frac{\eta_r}{\eta} \quad (24)$$

式(24)中: C_r 为成本参考值; C 为成本优化值; η 为效率优化值; η_r 为效率参考值; G_1 和 G_2 为成本和效率的权重函数。

2.3 设定约束条件

添加功率因数、线感应电压、最大转矩倍数和热负荷为约束目标。约束条件为

$$\left\{ \begin{array}{l} g_1(X) = \frac{\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2}{\cos\varphi_1} \leq 0 \\ g_2(X) = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \leq 0 \\ g_3(X) = \frac{T_{po1} - T_{po2}}{T_{po1}} \leq 0 \\ g_4(X) = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \leq 0 \end{array} \right. \quad (25)$$

式(25)中: $\cos\varphi_1$ 、 E_1 、 T_{po1} 和 T_1 分别为功率因数、线感应电压、最大转矩倍数和热负荷符合要求的标准值; $\cos\varphi_2$ 、 E_2 、 T_{po2} 和 T_2 分别为优化解的功率因数、线感应电压、最大转矩倍数和热负荷。

2.4 构建增广目标函数

改进粒子群优化算法是无约束算法,通过增加惩罚函数将有约束问题转化为无约束问题。增广目标函数 $F(X, \gamma)$ 为

$$F(X, \gamma) = G_1 \frac{C}{C_r} + G_2 \frac{\eta_r}{\eta} + \gamma \sum_{j=1}^M \max[0, g_j(X)] \quad (26)$$

2.5 选择优化变量

制约成本的核心参数是铜的质量、铁的质量和永磁体的质量。铁的质量主要由定子内径、定子外径和电机有效长度决定;永磁体的质量主要由极弧系数、永磁体厚度、定子内径、气隙和电机有效长度决定;铜的质量主要由绕组线径、每槽导体数和电机有效长度决定,每槽导体数通过选定线径和槽满率来确定。所以选择定子内径、定子外径、气隙、极

弧系数、永磁体厚度、绕组线径,槽满率,电机有效长度为约束变量。

3 IPSO 和 RMxpirt 联合优化设计

3.1 RMxpirt 建模

RMxpirt 建模主要基于电机等效电路和磁路的设计理念来计算、仿真各种电机模型。因其仿真准确性高,经常被用于电机设计仿真验证中。图 3 为 RMxpirt 仿真设置框图,首先,选择适合的电机模块;其次,设置电机转子和定子相关参数;最后,设置仿真参数。

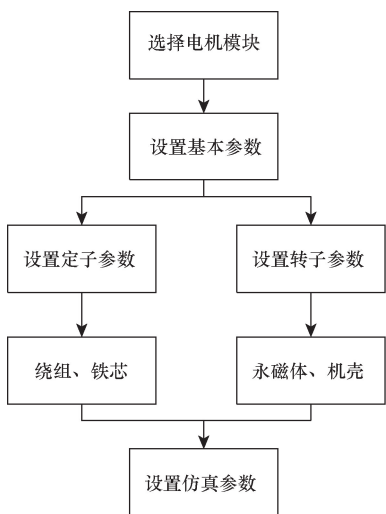


图 3 RMxpirt 仿真设置框图

Fig. 3 Schematic diagram of RMxpirt simulation settings

3.2 RMxpirt 和 IPSO 联合仿真

RMxpirt 和 IPSO 联合仿真的基本原理是利用 MATLAB 软件编写 IPSO 算法,通过程序调用 RMxpirt 软件,实现电机参数的自动输入,并将仿真结果输出到 MATLAB 中进行比较寻优^[21]。其具体流程图如图 4 所示。

由图 4 可知, RMxpirt 和 IPSO 之间通过优化变量、约束条件和优化目标来实现联合操作。具体为 IPSO 通过优化变量控制 RMxpirt 生成新的电机结构; RMxpirt 根据新的电机结构,输出新的约束条件和优化目标数值; IPSO 根据读取的新的约束条件和优化目标数值来调整优化变量。

4 优化结果分析

以 55 kW 永磁滚筒为例,基于 RMxpirt 和 IPSO 联合仿真对永磁滚筒的成本和效率进行多目标优化。

4.1 永磁滚筒参数

通过 RMxpirt 建立基础的永磁滚筒模型,以便 IPSO 调用。永磁滚筒主要参数见表 1。

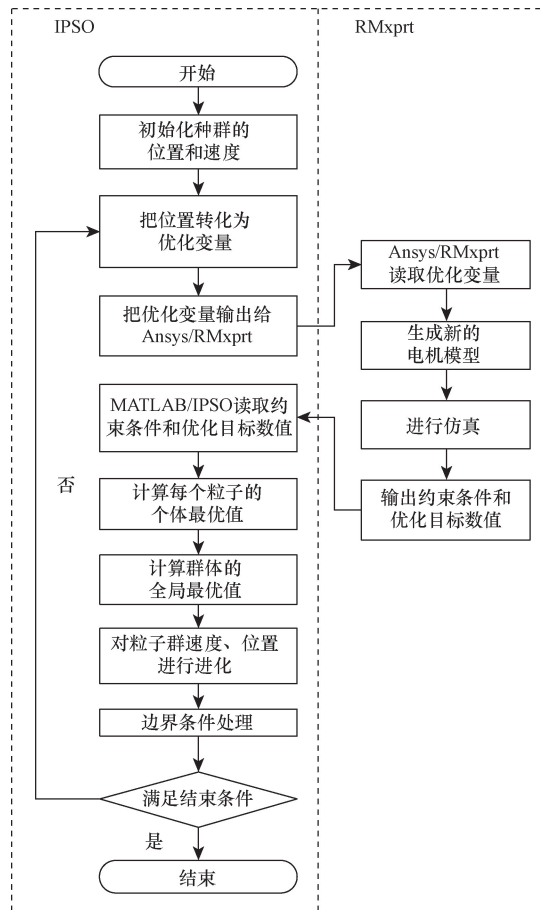


图 4 RMxpirt 和 IPSO 联合仿真流程图

Fig. 4 Flowchart of joint simulation process of RMxpirt and IPSO

表 1 主要参数

Table 1 Main parameters

基本参数	值	基本参数	值
额定功率/kW	55	额定频率/Hz	16
额定电压/V	1 140	额定转速/(r·min ⁻¹)	60
额定功率因数	0.97	转子外径/mm	630
极数	32	槽数	36

4.2 变量取值范围

优化变量为定子内径、定子外径、气隙、极弧系数、永磁体厚度、绕组线径、槽满率和电机有效长度,考虑工艺要求,表 2 为变量合理的取值范围。

表 2 变量取值范围

Table 2 Range of variable values

优化变量	最小值	最大值
定子内径/mm	250	350
定子外径/mm	500	575
槽满率/%	0.75	0.78
电机有效长度/mm	600	720
永磁体厚/mm	10	15
线径/mm	1	1.5
气隙/mm	1.5	2.5
极弧系数	0.7	0.75

4.3 优化结果

G_1 和 G_2 分别取 0.5、0.5, 设置 10 个粒子, 每个粒子维数为 8, 共经过 50 次迭代寻优后, 得到适应度函数随迭代次数变化图。如图 5 所示。可知, 适应度值在逐渐减小, 全局最优点适应度值为 0.933 289。

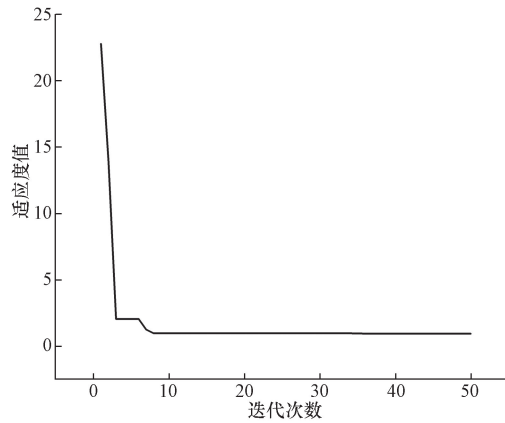


图 5 迭代曲线
Fig. 5 Iteration curve

4.4 仿真结果分析

优化变量在优化前后的对比值见表 3。根据优化前后的变量值, 在 RMxpri 中搭建物理模型。并通过仿真求出中间变量、优化目标和约束条件优化前后的数值, 以及效率和输出功率随转矩角的变化曲线、线感应电压随时间变化的曲线、转矩倍数随转矩角变化的曲线。

表 4 为电机中间变量优化前后的数值。根据 RMxpri 仿真结果、原理分析和表 4 可知, 铁质量减少, 与定子内径减小和电机有效长度减小有关; 铜的质量减少和定子绕组相电阻减少, 与电机有效长度减小、每槽导体数减少和线径增加有关; 永磁体质量减少, 与极弧系数降低、永磁体厚度降低、定子外径增加和气隙降低有关; 交、直轴同步电抗同时降低, 与定子外径、气隙、电机有效长度、每槽导体数有关; 内功率因数角绝对值增加, 与定子绕组相电

表 3 电机优化变量优化前后数值

Table 3 Values of motor optimization variables before and after optimization

优化变量	优化前	优化后
定子内径/mm	271	262
定子外径/mm	501	562
槽满率/%	0.778	0.760 71
电机有效长度/mm	701	690
极弧系数	0.75	0.701
永磁体厚度/mm	13.6	10.59
线径/mm	1.35	1.4
气隙/mm	2	2

阻、线感应电压和交、直轴同步电抗有关; 定子相电流有效值减少, 与定子绕组相电阻、线感应电压和交、直轴同步电抗有关。

图 6 为效率和输出功率随转矩角的变化曲线, 可知, 优化后在达到额定功率时, 所对应的效率高于优化前。

图 7 为线感应电压随时间变化的曲线以及输出功率倍数随转矩角变化的曲线, 可知, 优化后线感应电压和最大输出功率倍数明显优于优化前。

表 5 为约束条件和优化目标优化前后数值。由仿真结果和理论分析可知, 效率的增加主要与定子相电流降低、定子绕组相电阻降低和铁的质量降低有关; 线感应电压的增加主要与定子绕组相电阻降低、定子相电流降低和交、直轴同步电抗降低有关; 最大转矩倍数的增加主要与定子绕组相电阻降低、总损耗降低和交、直轴同步电抗降低和线感应电压增加有关。功率因数的增加与转矩角降低和内功率因数角绝对值增加有关; 热负荷的降低与每槽导体数减少、定子相电流降低、定子外径增加和线径增加有关。

综上可得, 优化后, 成本降低了 11.97%, 效率增加了 1.293%, 功率因数增加 0.028 4, 线感应电压有效值增加 11.2 V, 最大转矩倍数增加了 0.295 4,

表 4 电机中间变量优化前后数值

Table 4 Values of intermediate variables in motor before and after optimization

参数	优化前	优化后
m_{Cu}/kg	186.807	181.784
m_{Fe}/kg	1 203.25	936.8
m_{ci}/kg	86.205	68.660 8
X_q/Ω	10.784 96	9.690 280
X_d/Ω	10.784 96	9.690 280
R_1/Ω	1.213 86	1.021 3
I_1/A	31.077 4	29.779 2
$\psi/(^\circ)$	-12.995 2	-15.771 9

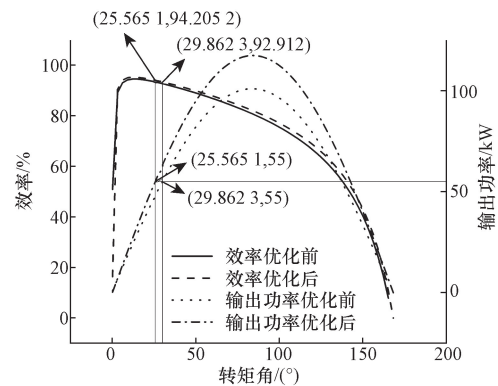


图 6 优化前后效率对比

Fig. 6 Efficiency comparison before and after optimization

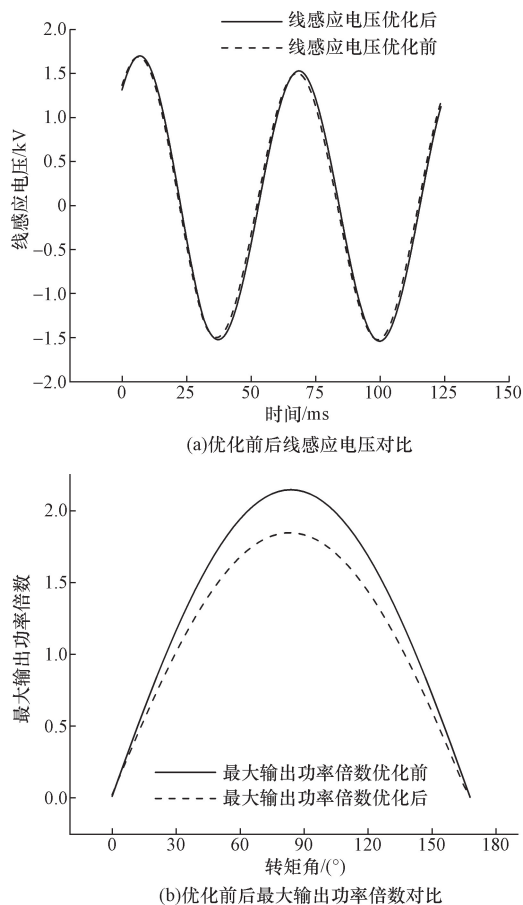


图7 优化前后线感应电压和输出功率倍数对比
Fig. 7 Comparison of induced voltage and output power multiplier before and after optimization

表5 约束条件和优化目标优化前后数值

Table 5 Values of constraint conditions and optimization objectives before and after optimization

类别	参数	优化前	优化后
约束条件	功率因数	0.957	0.985 4
	线感应电压有效值/V	1 087.3	1 098.5
	最大转矩倍数	1.838 6	2.134
	热负荷/($A^2 \cdot mm^{-3}$)	131.177	91.030 9
优化目标	效率/%	92.912	94.205
	成本/元	40 037	35 245.072

热负荷降低了 $40.146 1 A^2/mm^3$ 。因此所提出的基于 IPSO 和 RMxprt 联合仿真对永磁滚筒成本和效率有较好的优化效果。

5 结论

提出了一种改进粒子群优化算法与 RMxprt 联合仿真进行多目标优化设计的方法,并以永磁滚筒为例开展验证研究。在永磁滚筒结构参数与性能参数关系进行分析的基础上,明确了面向 IPSO 的变量参数、约束参数和优化参数,参数与目标函数的

设计满足永磁滚筒优化仿真的实际需求;通过 MATLAB 编写 IPSO 算法程序,利用 IPSO 算法程序实现 RMxprt 输入参数与输出参数的闭环迭代与比较寻优。仿真结果表明:成本降低了 11.97%,效率增加了 1.293%,提高了永磁滚筒优化设计的效率,达到了预期的优化效果。该方法不仅能使永磁滚筒得到较好的优化,也可以为其他电机开展优化设计提供参考。

参考文献

- [1] 鲍晓华,刘佳伟,孙跃,等. 低速大转矩永磁直驱电机研究综述与展望[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1148-1160.
Bao Xiaohua, Liu Jiwei, Sun Yue, et al. Review and prospect of low-speed high-torque permanent magnet machines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1148-1160.
- [2] 郑立允,张程,赵立新,等. 稀土永磁电机永磁体优化研究进展[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(31): 13615-13625.
Zheng Liyun, Zhang Cheng, Zhao Lixin, et al. Research progress of optimization of permanent magnet for rare earth permanent magnet motor[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(31): 13615-13625.
- [3] 蔡治华,郑祝平,蒋卫良. 转子辅助槽对永磁滚筒齿槽转矩影响研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(7): 213-216.
Cai Zhihua, Zheng Zhuping, Jiang Weiliang. Influence of rotor auxiliary slot on cogging torque of permanent magnet roller[J]. Coal Technology, 2022, 41(7): 213-216.
- [4] 黄朝志,张文进,孙燕文. 开关磁阻电机定子两侧极靴和转子两侧开槽的优化[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(28): 12115-12121.
Huang Chaozhi, Zhang Wenjin, Sun Yanwen. Optimization of both sides of stator pole shoe and rotor slot of switched reluctance motor[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(28): 12115-12121.
- [5] 邹琳,陶凡,徐汉斌,等. 用于流致振动发电的直线电机设计及优化[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(23): 10102-10108.
Zou Lin, Tao Fan, Xu Hanbin, et al. Optimal design of linear motor used for flow-induced vibration power generation[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(23): 10102-10108.
- [6] 邹声奇,陈亮亮,伍家驹,等. 开关磁阻电机结构优化设计及其三维图解法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(8): 3080-3086.
Zou Shengqi, Chen Liangliang, Wu Jiajun, et al. Structural optimization design of switch reluctance motor and its three-dimensional graphic method[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(8): 3080-3086.
- [7] Mutluer M. Analysis and design optimization of permanent magnet motor with external rotor for direct driven mixer[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2021, 16(3): 1527-1538.
- [8] Farrokh F, Vahedi A, Torkaman H, et al. Design and optimization of the dual-stator axial-field flux-switching permanent magnet motor with high-torque density and low-cost[J]. International Journal of Engineering, Transactions A: Basics, 2024, 37(7): 1357-1368.
- [9] Taran N, Rallabandi V, Heins G, et al. Systematically exploring the effects of pole count on the performance and limits of ultrahigh efficiency fractional hp axial flux PM machines[J]. IEEE Transac-

- tions on Industry Applications, 2020, 56(1): 117-127.
- [10] Pan Z, Fang S, Wang H, et al. Accurate and efficient surrogate model-assisted optimal design of flux reversal permanent magnet arc motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(9): 9312-9325.
- [11] Chu J, Cheng H, Sun J, et al. Multi-objective optimization design of hybrid excitation double stator permanent magnet synchronous machine[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(4): 2364-2375.
- [12] Chen Q, Fan Y, Lei Y, et al. Multiobjective optimization design of unequal halfbach array permanent magnet vernier motor based on optimization algorithm[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(5): 6014-6023.
- [13] 佟文明, 马雪健, 位海洋, 等. 基于磁场解析模型与遗传算法的轴向磁通永磁电机多目标优化设计[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(1): 39-45.
Tong Wenming, Ma Xuejian, Wei Haiyang, et al. Multi objective optimization design of axial flux permanent magnet motor based on magnetic field analysis model and genetic algorithm[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(1): 39-45.
- [14] 倪有源, 崔征山, 王群京. 转子有辅助槽的表贴式永磁电机解析法建模与优化[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(2): 65-71.
Ni Youyuan, Cui Zhengshan, Wang Qunjing. Analytical modeling and optimization of a surface-mounted permanent magnet machine with auxiliary slots in rotor[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(2): 65-71.
- [15] 赵玫, 于帅, 邹海林, 等. 聚磁式横向磁通永磁直线电机的多目标优化[J]. 电工技术学报, 2021, 36(17): 3730-3740.
Zhao Mei, Yu Shuai, Zou Hailin, et al. Multi-objective optimization of transverse flux permanent magnet linear machine with the concentrated flux mover[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(17): 3730-3740.
- [16] Han J, Bian X, Qiu J, et al. Design and analysis of the high torque density circumferentially excited permanent magnet motor based on PSO [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2024, 39(1): 772-780.
- [17] Pan Z, Fang S. Combined random forest and NSGA-II for optimal design of permanent magnet arc motor[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(2): 1797-1812.
- [18] Verma M, Singh M, Sreejeth M. Integrated taguchi method-assisted polynomial metamodelling & genetic algorithm based optimisation of a surface inset permanent synchronous motor for performance improvement[J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2022, 12(1): 26-35.
- [19] 冯茜, 李擎, 全威, 等. 多目标粒子群优化算法研究综述[J]. 工程科学学报, 2021, 43(6): 745-753.
Feng Qian, Li Qing, Quan Wei, et al. Overview of multiobjective particle swarm optimization algorithm[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(6): 745-753.
- [20] 华逸舟, 刘奕辰, 潘伟, 等. 基于改进粒子群算法的无轴承永磁同步电机多目标优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(11): 4443-4452.
Hua Yizhou, Liu Yichen, Pan Wei, et al. Multi-objective optimization design of bearingless permanent magnet synchronous motor using improved particle swarm optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(11): 4443-4452.
- [21] 蒋维, 李新, 王圣, 等. 含储能的多端口柔性合环开关协调控制研究[J]. 广东电力, 2024, 37(4): 38-48.
Jiang Wei, Li Xin, Wang Sheng, et al. Research on coordinated control strategy of multi-port flexible closed-loop switch with energy storage system [J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(4): 38-48.