

基于多目标粒子群算法的异步起动 永磁同步电机优化设计

李伟起, 林荣文, 陶涛

(福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要: 为了获得效率高、起动性能好、运行稳定的电机, 引入改进的多目标粒子群算法对 1 台三相四极的异步起动的永磁同步电机(PMSM)进行优化。基于 PMSM 结构特点, 建立了数学模型, 选择铁心长度、定子每槽导体数、定子槽型尺寸和永磁体的尺寸为优化变量, 效率、功率因数、起动电流倍数、起动转矩倍数和失步转矩倍数为目标。利用 MATLAB 编写电磁计算程序, 将改进的多目标粒子群算法与电磁计算程序相结合, 优化电机的效率、功率因数和起动性能。通过对优化结果的分析, 证明在满足其他各项性能要求的前提下, 优化取得了预期的效果。验证了该算法的有效性。

关键词: 异步起动永磁同步电机; 多目标粒子群算法; 优化设计; 多目标优化

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)11-0056-06

doi: 10.12177/emca.2020.141

Optimal Design of Asynchronous Starting Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Multi-Objective Particle Swarm Optimization

LI Weiqi, LIN Rongwen, TAO Tao

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In order to obtain a motor with high efficiency, good starting performance and stable operation, an improved multi-objective particle swarm algorithm is introduced to optimize a three-phase four-pole asynchronous starting permanent magnet synchronous motor (PMSM). Based on the structural characteristics of the PMSM, a mathematical model is established. The length of the core, the number of conductors per slot of the stator, the size of the stator slot and the size of the permanent magnet are selected as optimization variables, and the efficiency, power factor, starting current multiple, starting torque multiple and the out-of-step torque multiple are the optimization targets. An electromagnetic calculation program is written with MATLAB. By combining the improved multi-objective particle swarm algorithm with electromagnetic calculation program, the efficiency, power factor and starting performance of the motor are optimized. Through the analysis of the optimization results, it is shown that the optimization has achieved the expected results under the premise of meeting the requirements of other performances. The effectiveness of the algorithm is verified.

Key words: asynchronous starting permanent magnet synchronous motor; multi-objective particle swarm optimization; optimal design; multi-objective optimization

收稿日期: 2020-08-07; 收到修改稿日期: 2020-09-04

作者简介: 李伟起(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新型电机理论与控制。

林荣文(1963—), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为新型电机理论与控制。

陶涛(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新型电机理论与控制。

0 引言

传统的电机优化设计方法,需要依靠设计者的经验并与试验结合^[1-3]:根据经验给出电机的初始方案,然后计算初始方案的电磁性能,判断是否满足设计要求,如不满足则调整参数,直到满足设计要求。因为电机设计是一个多峰值的问题,所以只依靠传统的方法很难找到最优解^[4-7]。

为了更好地解决电机优化问题,有学者提出引入粒子群优化(PSO)算法^[8]。PSO是一种启发式算法,具有全局搜索和并行计算的能力,对电机优化问题的求解非常有效,因此本文应用PSO解决电机优化问题,并且对惯性权重改进。

1 建立异步起动 PMSM 优化数学模型

异步起动 PMSM 的优化设计是在满足约束条件下调整结构参数,使得电机的一个或多个性能达到最优。

若把电机要优化的结构变量表示为 x_1, x_2, \dots, x_n , 则电机的各项技术性能指标是关于这些结构变量的函数,这些技术性能指标在电机的优化设计中是作为约束条件来处理的,可以表示成如下形式:

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

式中: m 为约束函数数量。

电机优化设计中的目标函数也可以表示为结构变量的函数:

$$f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

因此,可得电机的优化数学模型:

$$\begin{cases} \min/\max f(x), x \in D \in R^n \\ D = \{x | g_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m\} \end{cases} \quad (3)$$

由式(1)~式(3)可以看出,优化数学模型包括:目标函数、优化变量和约束条件^[9]。

本文采用的异步起动 PMSM 基本参数如表 1 所示。

1.1 目标函数的选择

设计者可以根据电机的不同需求设置不同的目标函数,电机的优化设计包括多目标优化和单

表 1 异步起动 PMSM 基本参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定功率/kW	15	额定功率因数	0.95
相数	3	额定线电压/V	380
定子槽数	36	额定效率	93.5
转子槽数	32	绕组形式	单层交叉、Y接
极对数	2	永磁体材料	NTP264H
额定相电流/A	25.66	铁心材料	DW315-50
定子外径/mm	260	定子每槽导体数	13
定子内径/mm	170	转子导条材料	铸铝导条
转子外径/mm	168.7	转子内径/mm	60

目标优化,单目标优化以电机的单个性能目标作为目标函数,多目标则是选择电机的多个性能目标同时加以优化。

本文选取起动电流倍数、失步转矩倍数、起动转矩倍数、功率因数和效率多个优化目标。

电机的效率可以表示为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum P} \quad (4)$$

式中: P_1 为电机输入功率; P_2 为电机输出功率; $\sum P$ 为电机的机械损耗、铜耗、铁耗等损耗。

功率因数与同步电机 d 、 q 轴的电流分量有关,可以表示为

$$\psi = \arctan\left(\frac{I_d}{I_q}\right) \quad (5)$$

$$\cos\varphi = \cos(\theta - \psi) \quad (6)$$

式中: I_d 为 d 轴电流分量; I_q 为 q 轴电流分量; θ 为功率角。

起动电流倍数是电机起动时的重要参数之一,其表达式为

$$I_{st}^* = \frac{I_{st}}{I_N} = \frac{U_N}{I_N Z_{st}} \quad (7)$$

式中, I_{st} 为起动电流; I_N 为额定相电流; U_N 表示额定相电压; Z_{st} 为起动阻抗。

起动转矩倍数表示电机起动转矩与额定转矩的比值,是电机起动的重要参数,表达为

$$T_{st}^* = \frac{T_{av(s=1)}}{T_N} = \frac{T_c + T_g}{T_N} \quad (8)$$

式中: T_{av} 为电机起动转矩; T_N 为电机额定转矩; T_c 为异步起动转矩; T_g 为电磁制动转矩。

失步转矩反映了电机能够稳定运行的能力,

一般用失步转矩倍数表示,具体计算式如下:

$$T_{po}^* = \frac{P_{max}}{P_N} \quad (9)$$

$$\frac{dp_{em}}{d\theta} = \frac{mU_N E_0}{X_d} \cos\theta + mU_N^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos 2\theta \quad (10)$$

$$P_{max} = \frac{mU_N E_0}{X_d} \sin\theta + \frac{mU_N^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta \quad (11)$$

式中: p_N 为电机额定功率; p_{max} 为电机最大输出功率; X_d 为电机 d 轴电抗; X_q 为电机 q 轴电抗。

令式(10)等于零,求得的 θ 代入到式(11)得到最大功率。

1.2 优化变量的选择

异步起动 PMSM 中包含的结构变量多达几十个,因此选取哪几个变量对于电机的优化设计非常关键,对于影响电机性能较小的变量,一般根据经验和工艺要求而定,对于影响电机性能较大的结构参数根据目标函数的选取而定。原则上应该选择对目标函数和约束条件有直接影响或影响较大且尽可能少的变量,而且变量应能比较容易确定其变化范围。各变量之间尽量相对保持独立,能方便确定其他有关参数。

根据目标函数的选择和以上的分析,本文选取的优化变量包括:电机的铁心长度 l (假设定转子铁心长度和永磁体长度相同),定子每槽导体数 z ,永磁体磁化方向长度 b_m ,永磁体宽度 h_m ,定子槽型尺寸 bs_1, bs_2, hs_{12} 。定子槽型如图 1 所示。

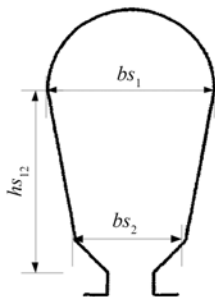


图 1 定子槽型

用公式表示为

$$\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7]^T = [l \ z \ b_m \ h_m \ bs_1 \ bs_2 \ hs_{12}] \quad (12)$$

1.3 约束条件的选择

电机优化设计中除要满足设计的目标函数外,还要受到一定的约束,约束包括性能约束和边界约束,以保证在使优化目标最优的同时,其他一些性能指标满足基本的要求,即电机的优化设计均是在确保电机各项技术性能在合理范围内进行的。本文选取的性能约束:槽满率 Sf ,效率 η ,功率因数 $\cos\varphi$,起动电流倍数 I_{st}^* ,起动转矩倍数 T_{po}^* ,失步转矩倍数 T_{st}^* 。约束条件式可以表示如下:

$$\begin{cases} g_1(x) = \eta - \eta_0 \geq 0 \\ g_2(x) = \cos\varphi - \cos\varphi_0 \geq 0 \\ g_3(x) = I_{st0}^* - I_{st}^* \geq 0 \\ g_4(x) = T_{st0}^* - T_{st}^* \geq 0 \\ g_5(x) = T_{po0}^* - T_{po}^* \geq 0 \\ g_6(x) = Sf_0 - Sf \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

其中,下标带“0”的表示初始设计的值,不带“0”的表示电机的优化结果。

除性能约束外,优化设计中的结构变量也应该约束在一定范围内,变量的范围太大会对电机的其他性能影响过大。例如铁心长度变化过大会显著影响电机的功率,定子槽型尺寸的会对定子轭部的机械强度产生影响,因此,本文把设计变量的变化范围控制在 $\pm 15\%$ 。即边界条件表示为

$$\begin{cases} 0.85L_0 \leq l \leq 1.15L_0 \\ 0.85Z_0 \leq z \leq 1.15Z_0 \\ 0.85BS_1 \leq bs_1 \leq 1.15BS_1 \\ 0.85BS_2 \leq bs_2 \leq 1.15BS_2 \\ 0.85HS_{12} \leq hs_{12} \leq 1.15HS_{12} \\ 0.85B_M \leq b_m \leq 1.15B_M \\ 0.85H_M \leq h_m \leq 1.15H_M \end{cases} \quad (14)$$

2 改进 PSO

2.1 标准 PSO

假设一个有 m 个粒子的种群在 D 维的目标空间内搜索,则第 i 个粒子的位置可以表示为

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}), i = 1, 2, \dots, m \quad (15)$$

第 i 个粒子的速度可以表示为

$$v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}), i = 1, 2, \dots, m \quad (16)$$

则第 i 个粒子的个体极值表示为

$p_{best} = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id}), i = 1, 2, \dots, m$ (17)
 粒子群的全局极值表示为

$$g_{best} = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd}) \quad (18)$$

第 i 个粒子更新速度和位置如下

$$\begin{cases} v_{id} = \omega \cdot v_{id} + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}) \\ x_{id} = x_{id} + v_{id} \end{cases}, \quad d = 1, 2, \dots, D \quad (19)$$

式中: r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 的随机数; c_1, c_2 为学习因子, 通常为常数; ω 为惯性权重系数。

用矢量图表示粒子位置的更新方式, 如图 2 所示。

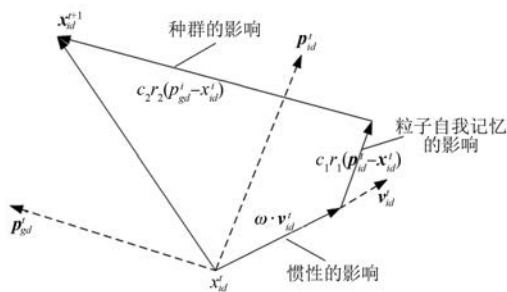


图 2 粒子位置的更新矢量图

图 2 中, x_{id}^t 表示粒子更新之前的位置, v_{id}^t 表示粒子更新之前的速度, p_{id}^t 表示第 i 个粒子的个体极值, p_{gd}^t 表示粒子群全局极值。

2.2 惯性权重的改进

粒子群优化算法从其速度和位置的更新可以看出, 在种群进化过程中不仅有全局性搜索还有局部搜索。如果加快全局搜索能力, 则算法可能会陷入到局部最优降低搜索精度, 相反, 加强局部搜索, 会导致全局的优化进程变慢, 因此本文为了解决以上问题, 提出对惯性权重因子 ω 进行改进。

惯性因子 ω 反映粒子对之前速度和方向的继承权重。将其引入 PSO, 较小的 ω 有利于局部搜索, 较大的 ω 有利于全局搜索。随迭代次数增加而减小的 ω 计算式如下^[10]:

$$\omega(k) = \omega_{start} - (\omega_{start} - \omega_{end}) \left(\frac{k}{T_{max}} \right)^2 \quad (20)$$

式中: k 为当前迭代代数; ω_{start} 为初始权重系数; ω_{end} 为代数最大的权重系数; T_{max} 为最大迭代代数。

因为式 (20) 可以前期惯性权重重大, 所以全

局寻优能力较强。随着迭代代数的增加惯性权重减小, 局部搜索能力加强, 加快算法后期收敛速度。惯性权重的改进除了式 (20), 还有以下几种:

$$\omega(k) = \omega_{start} - (\omega_{start} - \omega_{end}) k / T_{max} \quad (21)$$

$$\omega(k) = \omega_{start} - (\omega_{start} - \omega_{end}) \left[\frac{2k}{T_{max}} - \left(\frac{k}{T_{max}} \right)^2 \right] \quad (22)$$

$$\omega(k) = \omega_{end} \left(\frac{\omega_{start}}{\omega_{end}} \right)^{1/\left(\frac{1+k}{T_{max}}\right)} \quad (23)$$

上述不同改进方法的惯性权重随迭代次数的变化如图 3 所示。

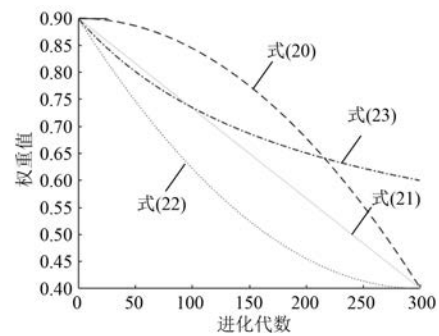


图 3 改进权重系数随迭代次数的变化

4 种不同的惯性权重改进在算法中应用的优化效果如图 4 所示。

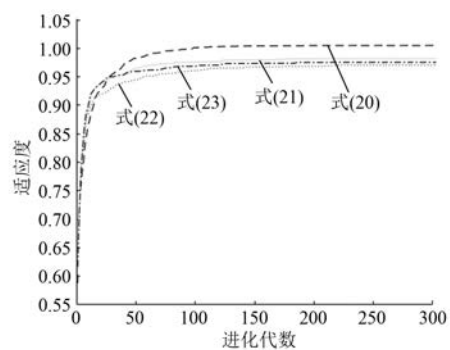


图 4 不同惯性权重系数的进化收敛曲线

由图 4 可以看出, 对于 4 种改进的惯性权重, 式 (20) 的改进比另外 3 种初期收敛更快, 末期局部搜索能力更强, 能以最大概率寻求到全局最优, 对于优化问题的解决具有更好的效果, 因此本文的惯性权重改进采用第一种方式。

2.3 多目标优化

多目标优化是在实际的工程优化中比较常见

的一类优化,然而多数情况下在多目标优化中,所求取的目标之间是相互冲突和制约的,一个目标性能指标的提高往往就会可能导致另外一个或多个目标性能的下降,因此多目标优化并不是每个目标都可以取到最优值,而是多个目标协调权衡综合达到最优^[11]。

多目标优化结果不是唯一的,而是一个解集,即 Pareto 最优解。在多目标函数的定义域内(这里求解目标函数最小值为例),存在变量 x_1, x_2 , 且 $x_1 < x_2$, 所有的目标函数 $f_k(x_1) \leq f_k(x_2)$, 且至少存在一个 k 使得 $f_k(x_1) < f_k(x_2)$, 则称 x_1 支配 x_2 。如果在函数的定义域内不存在其他变量支配 x_1 , 则称 x_1 为多目标函数的非劣解, 由如 x_1 非劣解组成的集合成为该目标函数的 Pareto 解集。

在 Pareto 解集内,各个 Pareto 解之间有优劣区别,但是解集里面的解无法直接作为多目标问题优化的结果,因此需要设计者根据自己的设计意图去有目的地选择一组解作为最终结果。

本文基于单目标优化的思想将多目标问题转化为单目标来确定最终的解。目前比较常用的方法有:线性加权法和约束法。为了更加明确设计者的选择意图,本文选择线性加权法,将目标函数均乘以权重系数然后相加组成单目标函数求解,目标函数如下:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n k_i f_i(x) \quad (24)$$

函数 $F(x)$ 的大小与每个目标前的权重系数 k_i 有很大联系,设计者可以根据意图有意地把认为比较重要的目标权重系数加大。

3 参数优化过程

3.1 PSO 流程

多目标 PSO 计算流程如图 5 所示。

经过多次计算,为了平衡各目标量的数量级和突出各目标量的重要程度,本文效率权重系数 k_η 取 1,功率因数权重系数 $k_{\cos\phi}$ 取 10,起动转矩倍数权重系数 k_T 取 2,起动电流倍数权重系数 k_I 取 2.4,失步转矩倍数权重系数 k_{p0} 取 0.8,求 F 最大值。槽满率为约束条件,需要在优化程序中设置为小于 0.78 作为约束,槽满率大于 0.78 的电机设计方案不作为 Pareto 解集,因此最优解集中槽满率全部满足设计的基本要求,不参与最终目标

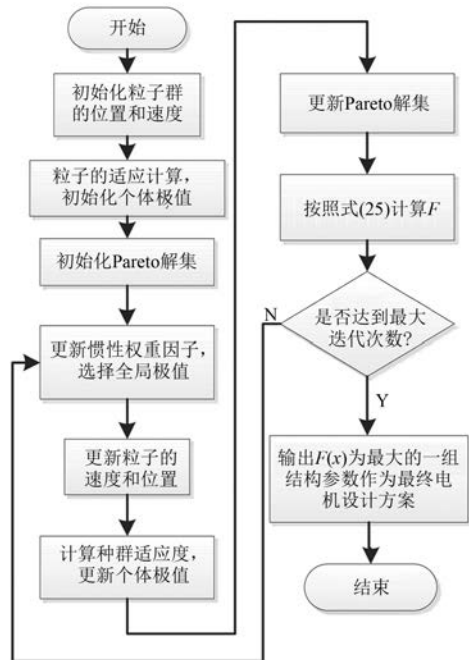


图 5 多目标 PSO 计算流程图

函数 F 的求解。Pareto 前沿优选决策依据 F 的值选择,具体表达式如下:

$$F = 100[(\eta - 93.5) + 10(\cos\phi - 0.95) + 2(T_{st} - 2.9) + 2.4(9.0 - I_{st}) + 0.8(T_{p0} - 1.8)] \quad (25)$$

3.2 优化结果分析

本文采用 MATLAB 软件根据以上原理编制了异步起动 PMSM 的电磁计算和粒子群优化程序。对 1 台 15 kW 的异步起动 PMSM 进行优化计算。将优化的结构参数利用 Ansoft 软件画出电机并进行有限元计算。本文设置种群规模为 100,迭代次数为 300,学习因子 c_1, c_2 为 0.8,最大惯性因子为 0.9,最小惯性因子为 0.4。输入目标量和约束条件槽满率的期望值。进化代数与每代最佳个体函数值 F 关系曲线如图 6 所示。

F 值最大个体对应的结构参数如表 2 所示。表 2 中第 2 列原始参数为电机初始设计的结构参数,在设置变量范围时作为变量的中心点初始化种群,并且把初始种群数据作为一组变量直接放进初始种群中;第 3 列优化结果为优化之后的电机设计方案,性能参数为 MATLAB 电磁计算程序计算结果;第 4 列为用 Ansoft 软件有限元计算仿

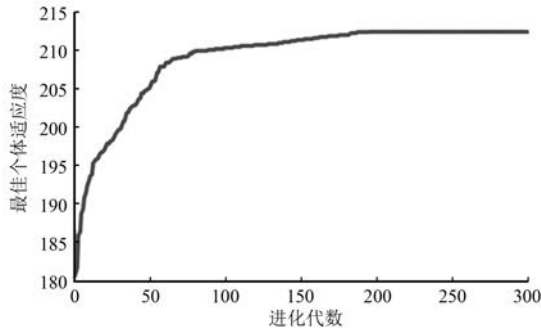


图6 进化代数与当代最佳个体适应度关系曲线

真的结果。

表2 优化前后参数对比表

优化变量	原始参数	优化结果	有限元计算结果
每槽导体数 z	13	14	14
铁心长度 l/mm	190	179	179
定子槽宽 bs_1/mm	10.2	10.6	10.6
定子槽宽 bs_2/mm	7.7	9.3	9.3
定子槽高 hs_{12}/mm	15.2	16.1	16.1
永磁体磁化方向长度 b_m/mm	5.3	5.7	5.7
永磁体宽度 h_m/mm	110	106	106
效率 $\eta/\%$	93.500 0	93.927 9	93.927 9
功率因数 $\cos\varphi$	0.950 0	0.992 3	0.991 5
起动转矩倍数 T_{st}^*	2.900 0	3.113 4	3.044 2
起动电流倍数 I_{st}^*	9.000 0	8.822 2	8.830 3
失步转矩倍数 T_{po}^*	1.800 0	2.328 6	2.339 6
槽满率 S_f	0.780 0	0.718 2	0.718 2

由表2可以看出,多目标 PSO 优化后,在设计可行域内,铁心长度和永磁体长度略有减小,定子槽尺寸和永磁体磁化长度略有增加。电机的性能参数效率增加了 0.427 9%,功率因数上升了 4.23%,起动转矩倍数提高了 7.36%,起动电流倍数减少了 2%,失步转矩倍数提高了 29.4%,槽满率减少了 7.92%,并且电磁计算结果和有限元计算结果基本一致,验证了电磁计算和以上分析的正确性。显著地提升了异步起动 PMSM 的性能。

4 结 语

本文结合异步起动 PMSM 的特点构建电机优化的数学模型,采用改进的多目标 PSO 对电机的效率、功率因数、起动电流倍数、起动转矩倍数和失步转矩倍数进行优化设计。利用 MATLAB 软件编写电磁计算程序和多目标 PSO。程序优化的参数再运用 Ansoft 软件进行有限元计算,最终结果显示电机的优化目标性能有不同程度的提高,验证了改进多目标 PSO 的有效性。

【参考文献】

- [1] 王艾萌,温云. 基于混合遗传算法的内置式永磁同步电机的优化设计[J]. 电机与控制应用,2017,44(3):59.
- [2] 冯桂宏,丁宏龙. 基于混合 Taguchi 遗传算法的永磁同步电机优化设计[J]. 电工电能新技术,2015,34(1):23.
- [3] 王艾萌,温云. 田口法在内置式永磁同步电机优化设计中的应用[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2016,43(3):39.
- [4] 张海峰,董志. 基于 VS2010 的永磁同步电机优化设计与分析[J]. 微电机,2017,50(10):6.
- [5] 金永星,王爱元,王涛,等. 基于粒子群算法的核屏蔽感应电机多目标优化设计[J]. 电机与控制应用,2019,46(9):53.
- [6] 郭鑫,张炳义,冯桂宏. 基于混合粒子群算法的低速大转矩直驱永磁同步电机多目标优化研究[J]. 机电工程,2018,35(11):1214.
- [7] 曹雪景. 基于遗传粒子群算法的永磁同步电机多目标优化设计[D]. 合肥:安徽大学,2017.
- [8] 彭冲,郑玲,李以农. 基于粒子群优化算法主动悬架作动器多目标优化设计[J]. 中南大学学报(自然科学版),2017,48(4):968.
- [9] 韩红桂,阿音嘎,张璐,等. 自适应分解式多目标粒子群优化算法[J]. 电子学报,2020,48(7):1245.
- [10] 郁磊,史峰,王辉,等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2015.
- [11] 杨景明,穆晓伟,车海军,等. 多策略改进的多目标粒子群优化算法[J]. 控制与决策,2017,32(3):435.