

控制与决策

Control and Decision

基于黑洞多目标进化算法的永磁直线同步电机优化设计

吴涛, 商慧丽, 张煜葵, 周颖

引用本文:

吴涛, 商慧丽, 张煜葵, 周颖. 基于黑洞多目标进化算法的永磁直线同步电机优化设计[J]. *控制与决策*, 2022, 37(6): 1567–1572.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0869>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于多种群分解预测的动态多目标引力搜索算法

Dynamic multi-objective gravitational searching algorithm based on multi-population decomposition prediction

控制与决策. 2021, 36(12): 2910–2918 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1002>

一种求解约束多目标问题的协作进化算法

A collaborative evolutionary algorithm for solving constrained multi-objective problems

控制与决策. 2021, 36(11): 2656–2664 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0791>

自适应Jaya算法求解多目标柔性车间绿色调度问题

Multi-objective flexible job shop green scheduling problem with self-adaptive Jaya algorithm

控制与决策. 2021, 36(7): 1714–1722 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1773>

基于弱关联的自适应高维多目标进化算法

A weak association-based adaptive evolutionary algorithm for many-objective optimization

控制与决策. 2021, 36(8): 1804–1814 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1723>

基于分解的多目标多因子进化算法

A multiobjective multifactorial evolutionary algorithm based on decomposition

控制与决策. 2021, 36(3): 637–644 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0525>

基于黑洞多目标进化算法的永磁直线同步电机优化设计

吴涛^{1,2†}, 商慧丽^{1,2}, 张煜葵¹, 周颖^{1,2}

(1. 中国地质大学(武汉) 自动化学院, 武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)
复杂系统先进控制与智能自动化湖北省重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 应用一种改进的黑洞多目标进化算法(MOBH), 实现对圆筒型无槽无铁芯直线永磁同步电机(LPMSM)的多目标优化设计. 黑洞进化算法在不同 Pareto 区域的收敛速度、种群多样性、种群收敛性和亚种群获取等方面具有良好的性能. 在分析无槽无铁芯圆筒直线电机的电磁解析模型和 MOBH 算法基础上, 建立电机推力、推力体积比、铜损(效率)多目标优化模型, 为 3 个目标对应的 Pareto 占优解空间提供更加全面和直观的最优解空间. 可以根据应用需求和目标函数实际物理值分布范围来综合选取最终最优解, 探讨单一目标函数情况下 Pareto 占优解分布与主要设计变量的关系. 最后通过样机实验验证主要设计指标的计算准确性.

关键词: 直线永磁电机; 多目标算法; 多目标优化; 黑洞算法

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.0869

引用格式: 吴涛, 商慧丽, 张煜葵, 等. 基于黑洞多目标进化算法的永磁直线同步电机优化设计[J]. 控制与决策, 2022, 37(6): 1567-1572.

Optimization of a tubular coreless linear PM synchronous machine based on multi-objective blackhole evolutionary algorithm

WU Tao^{1,2†}, SHANG Hui-li^{1,2}, ZHANG Yu-kui¹, ZHOU Ying^{1,2}

(1. School of Automation, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 2. Hubei Key Laboratory of Advanced Control and Intelligent Automation for Complex Systems, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: In this paper, an improved multi-objective blackhole(MOBH) evolutionary algorithm is applied to optimization of a tubular linear permanent magnet synchronous motor (LPMSM). The MOBH evolutionary algorithm has good performance in convergence rate, population diversity, population convergence and subspecies acquisition in different Pareto regions. Based on the motor model and introduction of the MOBH algorithm, a multi-objective optimization model regarding to thrust, ratio between thrust and volume and copper loss (efficiency) is established. The Pareto dominated solution space corresponding to the three objectives provides a more comprehensive and intuitive optimal solution space. The final optimal solution can be comprehensively selected according to the application requirements and the actual physical value distribution range. The relationship between the distribution of Pareto dominant solutions and the main design variables under a single objective condition is discussed. Finally, the accuracy of the calculation of the main design indexes is verified by the prototype experiment.

Keywords: tubular LPMSM; multi-objective algorithm; multi-objective optimization; blackhole algorithm

0 引言

直线永磁同步电机(linear permanent magnet synchronous motor, LPMSM)在工业等领域有着越来越广泛的应用,特别是在高速高精度伺服系统和线性振荡执行器系统(冰箱/压缩机)中^[1](LPMSM)避免了旋转到线性的转换机制,直接产生直线运动,有利于结构简化和工作效率的提高. 由于圆筒型有铁芯叠层制造工艺的复杂性,无槽无铁芯 LPMSM 是一种经济实用、推力波动小、重量轻、加速度性能高的直线

电机. 它不像平板直线电机具有横向边缘效应,非常适合一些圆柱形应用,如线性压缩机、电力开关柱塞螺线管、电磁锤等^[2].

为了提高永磁同步电机在不同工况下的性能,多目标优化方法常常被应用于电机设计中^[3]. 电机常用的计算模型包括有限元模型和解析模型^[4]. 对于一般电机来说,其复杂结构和非线性磁路难以建立精确的优化分析模型. 因此,有限元与优化方法耦合得到了广泛的应用,特别是在高维问题中^[5]. 对于无铁芯

收稿日期: 2020-06-30; 录用日期: 2021-04-07.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(62073305); 湖北省自然科学基金面上项目(2020CFB556).

†通讯作者. E-mail: wutao@cug.edu.cn.

永磁同步电机,由于其近似线性磁路,以往的许多前人的研究都推导和分析了磁场、推力和反电势的解析模型.文献[6]提出了一种基于多层模型的空气芯LPMSM(平面)多目标优化方法.

电机的优化目标通常包括平均推力、功率密度的最大化、转矩脉动、损耗和材料成本的最小化.在这些约束下,这些目标往往相互冲突.实际上,电机中几乎所有的多目标优化问题(multi-objective optimization problems, MOPs),都是利用权重函数将MOPs转化为单目标优化问题(single-objective optimization problems, SOPs)来简化求解过程^[7].然而,MOPs转化为SOPs需要一定的先验知识来分配权重系数,并且只能得到Pareto占优解集的一个解^[8].在文献[9]中,宋俊材等对传统的粒子群算法进行了改进,对双级永磁同步直线电机进行了优化设计.文献[10]中使用了多种遗传算法对直线电机进行了优化,但权重系数的确定将在很大程度上决定优化的结果,这可能会降低该方法的适用性和可操作性.因为权重系数的选择具有人为因素和偶然性,所以给优化结果带来很多不确定性.

与SOPs不同,在MOPs中存在多个全局最优解,称为Pareto占优解^[11].文献[12]介绍了一种新的多目标优化算法,该算法基于黑洞搜索策略,在收敛速度、种群多样性、种群收敛、不同Pareto区域的子种群保持等方面具有良好的性能,能够避免传统粒子群算法早熟和易陷入局部最优的问题.本文研究的主要目的是尝试将这种新的多目标进化算法应用于直线电机多目标优化设计中,利用MOPs满足约束条件的占优解集直观性和全局性特点,可以直接利用求得的实际物理值来选取最优设计方案,并探讨目标函数与主要变量的直接关系.

1 圆筒型永磁直线电机建模与分析

1.1 电机结构

圆筒型LPMSM驱动的电磁锤的实际设计结构包括冲击砧、缓冲垫、缓冲弹簧、定子(环形永磁体和铁棒)和动子(线圈和铁轭).为了保证电机的平稳运动,采用了直线轴承来固定并减少电机与壳体之间的摩擦.由于特殊的工作条件,冲击电锤的外径小于90 mm(钻杆的通过直径),LPMSM的直径应小于68 mm.为了获得足够的冲击能量,电机的推力应尽可能大.此外,井下温度较高,冷却条件较差,电机的铜损也应尽可能小.图1为圆筒型永磁同步电机的结构,其中: b 为环型永磁体的半宽, τ_p 为极距, τ_{wp} 为等于 τ_p 的线圈轴向距离, τ_w 为单相线圈的轴向宽度, R_{s1} 为线圈(动子)的外半径, R_{s2} 为线圈(动子)的内半径, R_{m1} 为永磁同步电机(定子)的外半径,

为永磁同步电机(定子)的内半径.

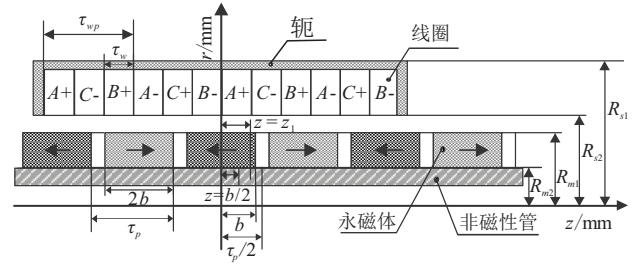


图1 圆筒型无芯永磁同步电动机结构

1.2 LPMSM解析模型

文献[13]对模型的磁场进行了分析,通过简化模型和变量分离的方法得到永磁体工作点处的平均磁场强度 H_{pm} .

H_{pm} 可以表示为如下方程:

$$H_{pm} = \frac{B_{r0} - B_{pm}}{\mu_0 u_r}. \quad (1)$$

其中: B_{pm} 是永磁体工作点的平均磁通密度, B_{r0} 是永磁体的剩余磁通密度, u_r 是永磁体的相对磁导率.

圆筒型无芯永磁同步电动机磁场解析模型是轴对称模型,标量磁势与 θ 无关,因此

$$\nabla^2 \varphi(r, z) = 0. \quad (2)$$

定解的边界条件为

$$\begin{aligned} r = R_m, R(r) = \varphi_m, R(r) = 0, \\ r = \infty \approx 10R_s = R_{s1}. \end{aligned} \quad (3)$$

采用分离变量法可解得

$$\varphi(r, z) = \frac{\varphi_m}{\Delta_1} \Delta_2(r) \sin(mz). \quad (4)$$

其中

$$m = \frac{(2n-1)\pi}{\tau_p}, \varphi_m = \frac{4\varphi_0 \sin(mb)}{m^2 \tau_p}, F_m = \frac{4 \sin(mb)}{(m\tau_p)},$$

$$\Delta_1 = I_0(mR_{s1})K_0(mR_m) - I_0(mR_m)K_0(mR_{s1}),$$

$$\Delta_2 = I_0(mR_{s1})K_0(mr) - I_0(mr)K_0(mR_{s1}),$$

$$\Delta_3 = I_0(mR_{s1})K_1(mr) + I_1(mr)K_0(mR_{s1}),$$

I_0 和 K_0 为第1类和第2类零阶变型贝塞尔函数, I_1 和 K_1 为第1类和第2类一阶变型贝塞尔函数.

可解得径向磁通密度为

$$B_r(r, z) = -\mu_0 \frac{d\varphi(r, z)}{dr},$$

$$B_r(r, z) = \sum \frac{\mu_0 m |H_{pm} F_m|}{\Delta_1} \Delta_3 \sin(mz). \quad (5)$$

作用在电枢上的推力是由绕组电流和永磁体磁场之间的相互作用产生的,其表达式为

$$dF(r, z) = 2\pi B_r(r, z) J_m r dr dz, \quad (6)$$

J_m 是线圈绕组的电流密度.无槽无铁芯永磁同步电动机的推力可描述为

$$F = \sqrt{2} J_m \sum_{n=1}^{\infty} K_{Tn} \left[\cos(m(z - \tau_p)) \sin(\omega t) + \right.$$

$$\cos\left(m\left(z - \frac{7\tau_p}{6}\right)\right) \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(m\left(z + \frac{\tau_p}{6}\right)\right) \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right). \quad (7)$$

一般来说,在圆筒型永磁同步电动机中,线圈通常由环形绕组组成.每相的峰值反电动势可描述为

$$E_m = 8\pi\tau f N_x k_q \sum_{i=1}^{N_r} B_r m(r_i) r_i. \quad (8)$$

假定槽满率系数为 $S_p = 0.8$ (虽然线圈中没有槽),漆包线的横截面积可描述为

$$s_d = \frac{s_1 s_p}{N}. \quad (9)$$

单相的电阻可描述为

$$R = \rho N_x \sum_{i=1}^{N_r} 2\pi \frac{R_{s2} + \frac{R_{s1} - R_{s2}}{N_r i}}{s_d}. \quad (10)$$

通过相电阻可以求得铜损,即

$$P_{cua} = 3(J_m s_d)^2 R. \quad (11)$$

其中: ρ 是铜的电阻率, J_m 是当前电流密度.

圆筒型永磁直线电机主要采用环形磁极,可以用圆柱体体积公式计算求得单个永磁体的体积,即

$$V = 2\pi(R_2^2 - (R_2 - D_2)^2)b. \quad (12)$$

其中: D_2 为每个永磁体厚度, b 为每个永磁体宽度.

2 基于黑洞算法的改进粒子群算法

粒子群算法是基于群体协作的随机搜索算法,初始化为一群随机粒子(随机解),然后通过迭代演化找到最优解.在每次迭代中,每个粒子的位置和速度都会根据其自身先前的最佳位置和种群中所有粒子的当前最佳位置进行更新.黑洞算法基本思想是空间区域附近的物体无法逃脱,先确定黑洞解,再确定恒星解,最后确定黑洞吞噬半径.步骤如下:黑洞算法针对目标函数,计算初始优化问题的候选解,建立候选星集合;每次迭代时,将最佳候选恒星选为黑洞,其余恒星选为正常星,恒星将被黑洞拉到周围搜索最优解;距离黑洞太近的恒星将被吞噬,此时,将随机产生一个新星(候选解)并将其放置在搜索空间中,然后将进行新的搜索.本文应用一种较新的黑洞多目标进化算法,使用全新的个体细胞密度评估手段,并采用基于信息熵的自适应进化策略,相比于传统的NSGA-II^[14]、SPEA-II、PESA-II和MOEA/D,在多目标优化问题求解中,其具有更强的可延展性和更好的计算性能.同时,在Pareto解集的多样性与收敛性上,相对于前述方法其能维持一种更好的平衡.

2.1 平行单元坐标系(PCCS)

平行单元坐标系(parallel cell coordinate system, PCCS)转换公式为

$$S_{n,m} = \begin{cases} \left[\frac{N(t) f_{n,m} - f_m^{\min}}{f_m^{\max} - f_m^{\min}} \right], & f_{n,m} \neq f_m^{\min}; \\ 1, & f_{n,m} = f_m^{\min}. \end{cases} \quad (13)$$

平行坐标是高维几何可视化和多元数据分析的常用方法^[15].平行坐标将近似Pareto解集从笛卡尔坐标映射到整数坐标的二维平面上,其中 S 是 $N(t) \times M$ 单元组成的二维平面网格, $n = 1, 2, \dots, N(t)$, $N(t)$ 是当前迭代 t 中的成员数, $m = 1, 2, \dots, M$, f_m^{\min} 和 f_m^{\max} 分别是当前近似Pareto解集中目标 M 的最小值和最大值.

2.2 细胞密度

当存储近似Pareto解集的档案满了以后,新解和档案中旧解互不占优,这时需要判断用新解替换档案中旧解对档案中解的多样性的影响.而多样性的评判指标为种群的细胞密度,以往单元密度计算有使用聚类、拥挤距离、最大最小适应度等计算方式,但这些指标较为复杂,且效果不佳.在此提出一种新的简单计算单元密度的方法,适用于整数坐标系下的单元密度计算,其计算公式为

$$D_i = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^{N_s} (C_{i,m} = C_{j,m})}{V}. \quad (14)$$

其中: D_i 为解 i 的单元密度, M 为目标个数, N_s 为解的个数.

当档案存满时,有 $N_s = N + 1$, N 是档案容量的上限, $C_{i,m}$ 和 $C_{j,m}$ 是解 i 和 j 的目标 m 值投影到平行坐标后的整数坐标, V 为面积,在这里设为1.若一个新解的单元密度低于档案中最大单元密度的旧解,则将新解替换旧解,否则拒绝进入档案.

2.3 香农熵

香农熵(H)的定义如下:

$$H(t) = -N(t) \sum_{n=1}^{N(t)} \sum_{m=1}^M p_i(t) \log_2 p_i(t),$$

$$p_i(t) = \frac{cNum_{n,m(t)}}{N(t)M}. \quad (15)$$

其中: $cNum_{n,m(t)}$ 是映射到单元网格中具有索引 N 和 M 的平行坐标的目标向量的数目; $N(t)$ (映射到单元网格中的目标向量的个数)是当前迭代 t 中档案中的解数,它将随着档案中解的数目的变化而变化; M 是目标熵的个数,表示近似Pareto最优解的均匀性和多样性.更大的熵意味着更好的一致性和多样性.

2.4 档案管理策略

在黑洞算法中使用两个准则来确定计算结果是否被接受为Pareto解集(归档).第1个标准是Pareto优势评估:有两个目标向量.其中 W 是一个 m 维目标

空间,如果满足以下条件:

$$\begin{aligned} v_i < u_i, \exists i \in M, \\ v_j < u_j, \forall j \in M, j \neq i, \end{aligned} \quad (16)$$

则可以认为 v 相对于 u 占主导地位. Pareto 优势评估用来保证算法的收敛速度.

2.5 黑洞多目标优化算法

基于前面的分析,改进的黑洞多目标优化算法(MOBH)主要步骤如下,流程如图2所示.

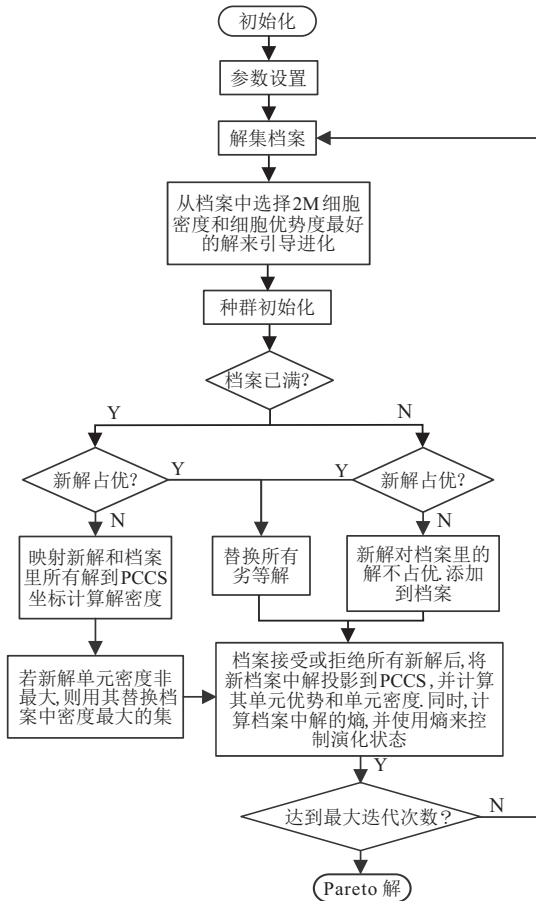


图2 MOBH优化算法流程

step 1: 初始化,在搜索空间内随机生成一个初始种群,选择适应度最高的解为初始黑洞,其余解为星体.

step 2: 迭代求解,黑洞吸引星体,吸引星体公式如下:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \text{rand}(x_{bh} - x_i(t)),$$

x_{bh} 是黑洞解,rand是0~1范围内随机值, t 为迭代次数.

step 3: 星体进入黑洞吸收边界将被完全吞噬,边界计算公式为

$$R_{j,k} = \left| FB_{j,k} / \sum_{i=1}^K F_{i,k} \right|, k = 1, 2, \dots, M,$$

$R_{j,k}$ 是黑洞 j 的第 k 维, $FB_{j,k}$ 是 j 的第 k 维适应度, $j = 1, 2, \dots, N_B$, N_B 是黑洞的总数, $F_{i,k}$ 是星体 i 的第 k 维适应度.

step 4: 黑洞吸收星体判断条件如下: $\exists i \in 1, 2, \dots, K, j \in 1, 2, \dots, 2M, \forall k \in 1, 2, \dots, M, |F_{i,k} - FB_{j,k}| \leq R$, 则 $S_i(t+1) = (S_{\max} - S_{\min})\text{rand} + S_{\min}$, S_{\max} 和 S_{\min} 分别为搜索空间上下界,rand是[0, 1]区间随机数.

3 圆筒型直线电机多目标优化

本文研究的圆筒型直线电机应用于石油地质行业井下作业. 应满足钻杆直径的限制尽可能地提高冲击能. 此外,井下环境温度可能很高,冷却条件也很差,需要尽可能降低热损. 优化目标定义为:最大限度地提高推力和推力效率(推力体积比),最大限度地减少铜损. 在优化设计中,选取5个主要设计变量作为优化变量,如表1所示. 其他设计参数如表2所示,其中气隙和极距是恒定的.

表1 圆筒型LPMSM的优化设计输入变量

输入变量	符号	单位	初始值	范围
线圈外半径	R_{s1}	mm	34	$R_{s2} < R_{s1} \leq 34$
永磁体外半径	R_{m1}	mm	17	$R_{m2} + 5 < R_{m1} < R_{s1}$
永磁体内半径	R_{m2}	mm	10	$5 < R_{m2} < 28$
永磁体宽度	b	mm	28	$0.25\tau_p < b < 0.45\tau_p$
线圈匝数	N	-	330	-

表2 圆筒型LPMSM的其他设计参数

参数	符号	单位	初始值
气隙	σ_s	mm	2
极距	τ_p	mm	90
线圈内径	R_{s2}	mm	$R_{m1} + \sigma_s$
电流密度	J_m	A/mm ²	4.0

目标函数的定义如下:

$$\begin{aligned} \min f_1(x) &= \frac{C_f V}{F}, f_2(x) = \frac{C_f}{F}, \\ f_3(x) &= \frac{C_f P_{cua}}{P_{out} + P_{cua}} = \frac{C_f P_{cua}}{F_v N + P_{cua}}; \\ \text{s.t. } 180 &\leq g_1(x) = E_m \leq 400, \\ g_2(x) &= F > 220. \end{aligned} \quad (17)$$

其中: F 是通过式(7)求出的推力; P_{cua} 是通过式(11)得到的铜损; C_f 是惩罚函数,在满足限制条件时 $C_f = 1$,不满足限制条件时 $C_f = 100$. 本文中MOBH算法参数如表3所示, MOBH优化程序整体运算时间约为2604 s.

表3 MOBH算法中的参数

参数	符号	初始值
输入向量维数	Vin	5
目标数	nobjs	3
档案大小	Ns	100
Pareto档案数量	narc	80
最大学习速率	Els-max	0.5
最小学习速率	Els-min	0.05
最大迭代次数	Tmax	200

与SOPs不同,MOPs的解集满足限定条件的Pareto解有多个,这里选取了4组特征明显的占优解进行分析,如表4所示.

表4 MOBH多目标优化Pareto解设计参数

参数	优化设计1	优化设计2	优化设计3	优化设计4
定子线圈外径 R_{s1} /mm	34	34	34	34
永磁体外径 R_{m1} /mm	19.73	10.72	29.28	22.94
永磁体内径 R_{m2} /mm	5.97	5.64	6.31	5.57
永磁体宽度 b /mm	35.29	35.31	35.39	35.11
永磁体厚度 D_2 /mm	13.77	5.07	22.97	17.37
轴向绕组匝数 N_2 /匝	25	35	35	26
径向绕组匝数 N_r /匝	12	26	5	9
反感应电动势 E_{emf} /V	345.51	259.64	330.13	299.74
推力体积比 N/mm^3	0.00333	0.00762	0.00071	0.00230
推力 F /N	523.21	281.09	260.44	502.49
铜损百分比/%	3.05	7.96	2.00	2.54

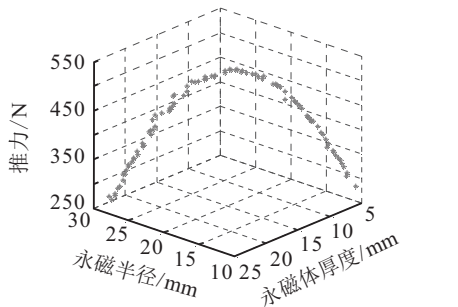
* 推力是由三组相同的线圈绕组合并计算得到的。

设计1中推力最大(523 N),而其他参数不占优;设计2中推力体积比最大(0.0076),但是铜损最大(7.96%);设计3中的铜损百分比最小(2.0%),但是推力却最小(260 N)。不同Pareto解之间的优势不同,体现了解集的多样性。真正的优化设计需要根据面向应用的需求来选择。在本文井下直线电机应用中,应该优先考虑推力目标,先选择推力较大的Pareto解集(例如 $F > 500$ N),然后再根据铜损大小进一步缩小

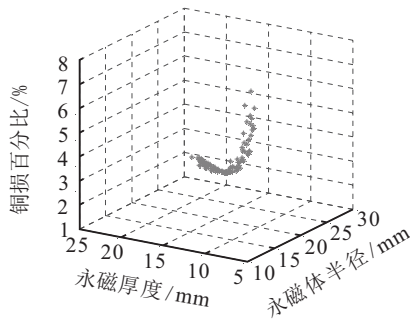
范围,最后根据永磁体推力体积比确定最终的最优解(优化设计4)。

图3是Pareto解集中目标函数与主要优化设计变量的关系图。可以看出:永磁体的厚度和永磁体的半径大致在20 mm和15 mm区域,推力处于最大峰值。线圈的外径 $R_{s1} = 34$ mm,在永磁体半径与线圈半径比值 $R_{s1}/R_{m1} = 0.6$ 时,推力趋于最大。铜损与推力体积比两个目标正相关,都随着永磁体厚度和半径的增大而降低。

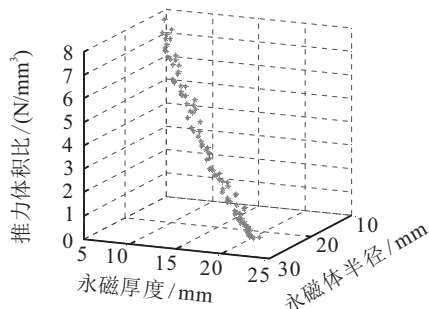
将MOBH与MOEA/D和NSGA-II两个流行的多目标进化算法进行性能比较,结果如图4所示。其中MOBH消耗约2604 s,NSGA-II消耗约3423 s,MOEA/D消耗约1837 s,尽管MOEA/D最快,但其Pareto解集过于集中;从一致性和多样性来看,MOBH和NSGA-II的性能更好。故总体而言,MOBH的综合性能最好,使整个求解时间大大缩短,几乎与一次TS-2D FEA相同。



(a) 推力与永磁体半径和永磁体厚度的分布关系



(b) 铜损百分比与永磁体半径和永磁体厚度的分布关系



(c) 推力体积比与永磁体半径和永磁体厚度的分布关系

图3 MOBH、MOEA/D及NSGA-II算法结果比较

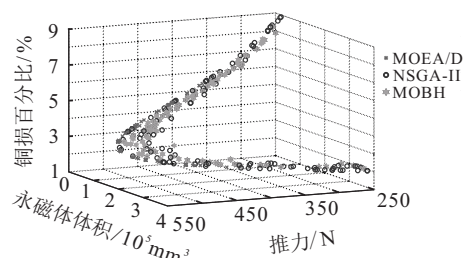


图4 MOBH、MOEA/D及NSGA-II算法结果比较

4 实验结果验证

为了验证本文优化方法的可行性,按照优化设计4的参数调整永磁直线电机样机设计,对样机反电动势、推力、铜损进行有限元仿真和实验测量,图5为实物测试图。

测试结果如表5所示,解析法计算的推力略大于有限元模型。两个推力波纹波形非常接近,解析法与实验的推力误差接近9%;反电动势的实验结果也具有相同规律。比较结果表明,采用解析计算模型的优化方法的计算误差比较小。

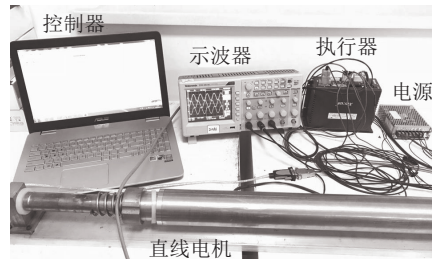


图5 永磁直线振荡电机实物测试图

表5 圆筒型LPMSM电磁性能实验与仿真结果对比

参数	解析法	有限元法	实际测量
推力/N	502	485	459
反电动势峰值/V	299	294	285

5 结论

本文应用了一种黑洞多目标进化算法对圆筒型无槽无铁芯永磁同步电机进行多目标优化设计. 由于电机电磁模型复杂, 现有优化方法通常将多目标问题通过权重函数变成单目标优化问题, 由于权重系数选择带有很大主观随意性, 造成结果可信度较低. 本文在建立电机多目标优化模型基础上, 得到了全局Pareto占优解空间, 可以根据应用需求和Pareto解实际物理值分布更加全面和直观地选取最优解, 为电机设计优化提供一种新的方法和途径.

参考文献(References)

- [1] Romero Gómez J, Ferreiro Garcia R, Carbia Carril J, et al. A review of room temperature linear reciprocating magnetic refrigerators[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 21: 1-12.
- [2] Wu T, Tang Y R, Tang S W, et al. Design and analysis of a new down-the-hole electromagnetic hammer driven by tube linear motor[J]. IET Electric Power Applications, 2017, 11(9): 1558-1565.
- [3] Lei G, Liu C C, Zhu J G, et al. Techniques for multilevel design optimization of permanent magnet motors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(4): 1574-1584.
- [4] Vaez-Zadeh S, Isfahani A H. Multiobjective design optimization of air-core linear permanent-magnet synchronous motors for improved thrust and low magnet consumption[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(3): 446-452.
- [5] Lei G, Liu C C, Jafari M, et al. Multilevel robust design optimization of a superconducting magnetic energy storage based on a benchmark study[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(7): 1-5.
- [6] Wang J B, Howe D. Tubular modular permanent-magnet machines equipped with quasi-Halbach magnetized magnets—Part II: Armature reaction and design optimization[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(9): 2479-2489.
- [7] Lei G, Zhu J G, Guo Y G, et al. A review of design optimization methods for electrical machines[J].

Energies, 2017, 10(12): 1962.

- [8] 李飞, 刘建昌, 石怀涛, 等. 基于分解和差分进化的多目标粒子群优化算法[J]. 控制与决策, 2017, 32(3): 403-410.
(Li F, Liu J C, Shi H T, et al. Multi-objective particle swarm optimization algorithm based on decomposition and differential evolution[J]. Control and Decision, 2017, 32(3): 403-410.)
- [9] 宋俊材, 董菲, 赵吉文, 等. 基于重心邻域算法的无铁芯永磁同步直线电机优化设计研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3594-3601.
(Song J C, Dong F, Zhao J W, et al. Design optimization research of air-core permanent magnet permanent magnet synchronous linear motor based on gravity neighborhood center algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3594-3601.)
- [10] 李立毅, 唐勇斌, 刘家曦, 等. 多种群遗传算法在无铁芯永磁直线同步电机优化设计中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(15): 69-77.
(Li L Y, Tang Y B, Liu J X, et al. Application of the multiple population genetic algorithm in optimum design of air-core permanent magnet linear synchronous motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(15): 69-77.)
- [11] 刘建昌, 李飞, 王洪海, 等. 进化高维多目标优化算法研究综述[J]. 控制与决策, 2018, 33(5): 879-887.
(Liu J C, Li F, Wang H H, et al. Survey on evolutionary many-objective optimization algorithms[J]. Control and Decision, 2018, 33(5): 879-887.)
- [12] Wu C, Wu T, Fu K, et al. AMOBH: Adaptive multiobjective black hole algorithm[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2017, 2017: 6153951.
- [13] 赵镜红, 张晓锋, 张俊洪, 等. 圆筒永磁直线同步电机磁场和推力分析[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(1): 12-17.
(Zhao J H, Zhang X F, Zhang J H, et al. Field and thrust analysis of tubular permanent magnet linear synchronous motor[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(1): 12-17.)
- [14] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [15] Inselberg A. Parallel coordinates: Visual multi-dimensional geometry and its applications[M]. New York: Springer, 2009: 279-281.

作者简介

吴涛(1979—), 男, 副教授, 博士, 从事电机控制与优化、伺服运动控制系统等研究, E-mail: wutao@cug.edu.cn;

商慧丽(1995—), 女, 硕士生, 从事永磁直线电机的研究, E-mail: huili.shang@cug.edu.cn;

张煜葵(1999—), 男, 硕士生, 从事机器人智能控制的研究, E-mail: 205741807@qq.com;

周颖(1995—), 男, 硕士生, 从事电机控制与优化、伺服运动控制系统的研究, E-mail: 1348210618@qq.com.

(责任编辑: 孙艺红)