

基于和声差分进化混合算法的 横向磁场电机优化设计

袁小庆, 周彤, 姬俊杰, 刘宇轩, 杜晓东

(西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072)

摘 要:横向磁场电机传统优化设计大多结合电磁关系公式和有限元分析凭借经验选取结构参数,难以得到各参数的全局最优解并满足多目标优化的需要。提出了一种将和声搜索算法和差分进化算法相结合的和声差分进化混合算法,并引入精英保留策略改进。介绍了该算法的原理,利用算法性能测试验证了该算法的优越性。通过电磁分析揭示了电机各主要尺寸参数对最大转矩密度的影响,为优化设计提供依据。结合该算法,在 2 组权重系数下以最大转矩密度和生产成本为目标函数对电机进行优化,仿真结果表明,优化后的电机与原型机相比最大转矩密度提高,生产成本降低。所提算法对横向磁场电机的优化设计有一定的参考价值。

关 键 词:横向磁场电机;电机优化设计;和声差分进化算法;转矩密度;生产成本

中图分类号:TM351 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2758(2021)06-1289-07

横向磁场电机(transverse flux motor,TFM)最早是由德国的 Weh 教授和他的合作者提出^[1],TFM 运动方向与磁场方向不在同一个平面内,实现了结构上的电磁解耦^[2],进一步提高了最大转矩密度。国内外的学者关于 TFM 提出了很多新型拓扑结构^[3-6],但对于 TFM 具体参数的优化研究较少,大多凭借经验公式和有限元分析对其进行优化设计,难以得到全局最优解。也有部分学者将智能优化算法^[7]应用到 TFM 优化设计中,如中国科学院大学邱书恒等利用遗传算法对一款圆筒形错相式 TFM 进行优化^[8],增大了齿磁密,减少了漏磁。兰州理工大学包广清等利用改进的粒子群算法对一款 TFM 进行优化^[9],提高了工作效率,缩减了制造成本。

本文将和声搜索(harmony search,HS)算法^[10]与差分进化(differential evolution,DE)算法^[11]相结合,并引入精英保留策略^[12],得到一种改进的和声差分进化混合(improved harmony search and differential evolution,IHSDE)算法。基于该算法,以最大转矩密度和生产成本为优化目标对一种新型盘式双向交链横向磁通永磁电机^[13](disk-type bipolar

crosslinking transverse flux permanent-magnet motor,DBC-TFPM)进行优化设计,通过 Matlab 仿真得到了优化变量的全局最优解,验证了算法的有效性。

1 IHSDE 算法原理

IHSDE 算法同时具有 HS 算法与 DE 算法的优点,以 HS 算法为主体,在新和声的生成方式上加入了 DE 算法的思想,在更新和声记忆库时引入精英保留策略有效改善了算法的性能。

1.1 初始记忆库

在进行优化前,采用 HS 算法生产初始记忆库的方式来随机化初始记忆库 $\mathbf{H}_M = \{x_1, x_2, \cdots, x_N\}$,通过如下方式生成

$$x_{i,j} = l_j + r \cdot (u_j - l_j), j = 1, 2, \cdots, d, i = 1, 2, \cdots, N \quad (1)$$

式中: $x_{i,j}$ 为第 i 个和声的第 j 维分量; u_j 和 l_j 为 $x_{i,j}$ 取值的上下界; N 为和声的总数; d 为和声的维度; r 为 $0 \sim 1$ 之间的随机数。

1.2 生成新和声

标准 HS 算法主要通过记忆选择、局部调谐和随机生成 3 种方式来寻找合适的新解,在这个过程中融合 DE 算法,即基于 2 个个体的差分项产生新个体,可以减少随机生成的新个体数量,从而提高运算的收敛速度,该步骤为

$$x_{\text{new},j} = \begin{cases} x_{r_a,j} & r' < H_{\text{MCR}} \\ x_{i,j} + F \cdot (x_{r_2,j} - x_{r_3,j}) & H_{\text{MCR}} < r' < c_r \\ l_j + r' \cdot (u_j - l_j) & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $x_{\text{new},j}$ 为新的和声分量; r_a 为 1 ~ N 的随机数; r' 为 0 ~ 1 的随机数; H_{MCR} 为记忆选择概率; $r_2, r_3 \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$ 为互不相等的整数且都不等于 i ; F 为 DE 算法的比例因子,取值是 0 ~ 1 之间的数; c_r 为个体中变量交叉概率。

对于 $r' < H_{\text{MCR}}$ 时的新的和声分量 $x_{\text{new},j}$, 根据 HS 算法以音调微调概率 P_{AR} 进行调整,方式为

$$x_{\text{new},j} = \begin{cases} x_{\text{new},j} \pm b_w \times r'' & r'' < P_{\text{AR}} \\ x_{\text{new},j} & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: r'' 和 r''' 分别为 0 ~ 1 的随机数; b_w 为音调微调带宽。

1.3 精英保留策略

图 1 为 IHSDE 算法流程图。对每一代和声依据其适应度值进行升序排列,选择第一组和声与上一代的第一组和声进行比较,若该和声适应度更好,则将其加入精英和声数据库,其余和声依据算法规则进行调整,之后将该精英和声加入调整后的记忆

库并重新进行升序排列。精英保留策略保证了在迭代过程中产生的最优和声不会被破坏,提高了 IHSDE 算法在搜索过程中的收敛性。

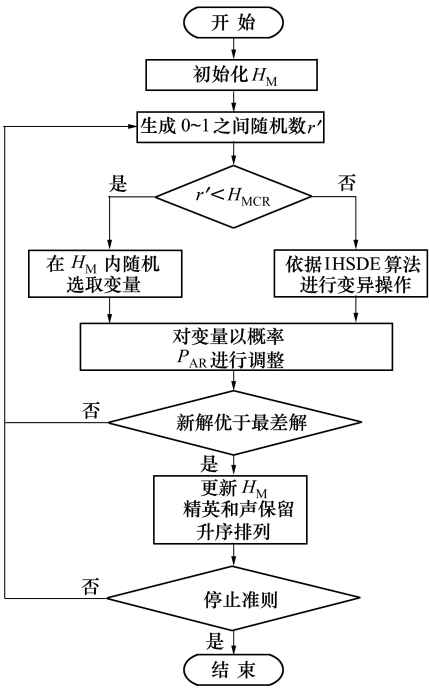


图 1 IHSDE 算法流程图

2 算法性能测试

为了验证该混合算法有效性,基于 Matlab 编写 HS 算法、HSDE 算法以及 IHSDE 算法,利用含有 30 个变量的标准测试函数 Schwefel 2.26^[14] 进行测试,3 种优化算法的函数测试情况如图 2 所示。

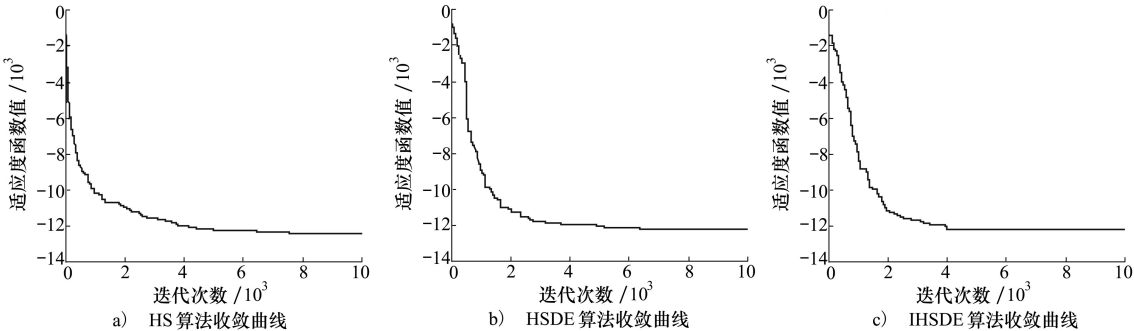


图 2 3 种优化算法的函数测试情况

Schwefel 2.26 函数表达式

$$f(x) = 418.982\ 9d - \sum_{i=1}^d x_i \sin(\sqrt{|x_i|}), \quad |x_i| \leq 500 \quad (4)$$

其最优状态和最优值为

$$\min(f(x^*)) = f(420.968\ 7, \dots, 420.968\ 7) = -12\ 569 \quad (5)$$

当计算出的最优解大于 -12 000 时,认为本次

求解属于早熟。每种算法均重复计算该函数 50 次,其搜索能力如表 1 所示。从表 1 中可知,HSDE 算法的收敛速度虽然比 HS 算法有了很大提高,但也造成了早熟概率的提高。在加入精英保留策略后,IHSDE 算法收敛速度有所提升,同时早熟概率大大降低,接近 0,结果更为可靠。测试结果说明了 IHSDE 算法可有效求解并优化多维复杂函数的极值问题,也可以用于电机优化设计中多维函数求解问题。

表 1 3 种优化算法搜索能力比较

算法	收敛时的迭代次数平均值	最优解平均值	早熟次数
标准 HS	9 583	-12 443.1	2
HSDE	6 332	-12 062.9	13
IHSDE	3 928	-12 398.4	0

3 DBC-TFPM 尺寸和性能分析

本文在如图 3 所示的 DBC-TFPM 的基础上进行优化设计。计算最大转矩密度之前,给出了铁心和永磁体的主要尺寸的几何定义,如图 4 所示。

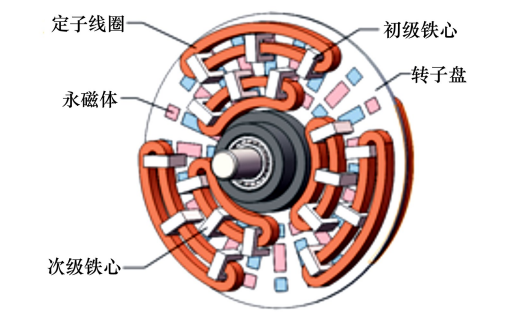


图 3 DBC-TFPM 结构图

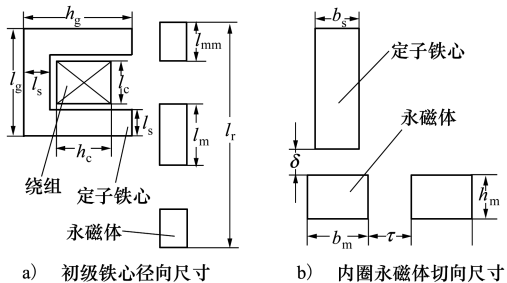


图 4 铁心和永磁体尺寸平面图

(6)式给出了最大转矩密度公式,具体推导过程可参考文献[13]。

$$s_{T_{\max}} = \frac{T_{\max}}{V} = \frac{\sqrt{2}mn^2N\varphi_{\delta}I_a}{\pi(D/2)^2L} \tag{6}$$

式中: m 为电机的相数; I_a 为单相绕组电流有效值; φ_{δ} 为每极气隙磁通量; n 为单相绕组内的铁心数; N 为单相绕组的有效匝数; V 为电机体积, D 为电机直径; L 为电机轴向长度。

每极气隙磁通量 φ_{δ} 估算为

$$\varphi_{\delta} = B_{\delta}A_s = B_{\delta}l_s b_s \tag{7}$$

式中: A_s 是定子铁心齿部面积, $A_s = l_s b_s$; B_{δ} 为气隙剩磁密度。

气隙剩磁密度 B_{δ} 可表示为

$$B_{\delta} = B_r \frac{h_m}{h_m + \delta} \tag{8}$$

电机单相绕组电流 I 和匝数 N 与电流密度 J 关系可以表示为

$$NI = J s_d = J l_c h_c s_f \tag{9}$$

式中: s_f 为槽满率,其值与绕线的工艺和所选线径及材质相关; s_d 为导线横截面积。

为方便计算,令

$$\begin{cases} \alpha = \frac{b_m}{b_s} \\ \beta = \frac{l_g}{l_r} \end{cases} \tag{10}$$

由图 4 可知

$$\begin{cases} l_g = 2l_s + l_c + 2\varepsilon \\ h_g = l_s + h_c + 2\varepsilon + z \end{cases} \tag{11}$$

式中: ε 为线圈与定子铁心内圈的间隙, $\varepsilon = 1 \text{ mm}$; z 为定子铁心压线盘到定子铁心齿部的距离。考虑到螺钉的安装和磁导的大小,取 $z = 5 \text{ mm}$ 。

电机轴向长度 D 和定子盘直径 L 满足

$$\begin{cases} D = \frac{2p_z(b_m + \tau)}{\pi} + 2l_r \\ L = 2h_g + h_m + 2\delta \end{cases} \tag{12}$$

式中, p_z 为电机转子极对数。

将(7) ~ (12) 式带入(6) 式中,得

$$s_{T_{\max}} = \frac{\sqrt{2}mn^2s_fh_mB_rJ}{4\pi(h_m + \delta)V}l_sb_s(L - h_m - 2\delta - 2l_s - 14) \cdot (\pi\beta D - 2p_z\alpha\beta b_s - 2p_z\beta\tau - 4\pi l_s - 4\pi) \tag{13}$$

4 DBC-TFPM 参数优化

4.1 选择优化目标函数

电机的优化设计本质上是多目标优化问题,此类问题一般可以描述为

$$\begin{cases} \max f(\mathbf{X}) \\ g_i(\mathbf{X}) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ 为电机的优化变量,如结构参数等; $f(\mathbf{X})$ 为优化的目标函数; $g_i(\mathbf{X})$ 为优化约束条件。

DBC-TFPM 应用于新能源汽车时,作为动力核心部件需要提供足够的输出转矩,由于车内空间紧凑,还需尽可能减小电机体积。此外,横向磁场电机特殊的结构设计导致其生产成本较高,在保证性能的前提下,应尽可能地降低成本。因此,本文选择最大转矩密度和生产成本为优化子目标。为了消除数量级不同带来的优化误差,设计优化目标函数为

$$f(\mathbf{X}) = q_1 \frac{S_{T_m}}{S_{T_{m0}}} - q_2 \frac{C}{C_0} + 10 \quad (15)$$

式中: S_{T_m} 和 $S_{T_{m0}}$ 分别为优化后电机和原型机的最大转矩密度; C 和 C_0 分别为优化后电机和原型机的有效物料成本; q_1 和 q_2 为子目标函数的权重系数; 10 是为了使函数计算结果为正而引入的常数。

电机的有效物料成本 C 为

$$C = C_{Cu} \cdot G_{Cu} + C_{Fe} \cdot G_{Fe} + C_{PM} \cdot G_{PM} + C_{Al} \cdot G_{Al} \quad (16)$$

式中: C_{Cu} , C_{Fe} , C_{PM} , C_{Al} 分别为铜、硅钢片、钕铁硼永磁体、铝的价格; G_{Cu} , G_{Fe} , G_{PM} , G_{Al} 分别为铜、硅钢片、钕铁硼永磁体、铝的质量。

本文中,假设铜的价格为 60 元/kg,硅钢片的价格为 10 元/kg,钕铁硼永磁体的价格为 120 元/kg,铝的价格为 30 元/kg。

4.2 选择优化设计变量

结合公式(13),选取对 DBC-TFPM 性能影响较大的气隙长度 δ 、绕组匝数 N 、铁心齿部径向宽度 l_s 和铁心齿部切向宽度 b_s 为优化设计变量 $\mathbf{X}$,如下所示

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta \\ N \\ l_s \\ b_s \end{pmatrix} \quad (17)$$

4.3 设定约束条件

电机的约束条件是为了让电机优化后满足一些实际生产中的工艺要求、客户需求和技术规范等。约束条件均为不等式约束,按照约束的性质,可以分为性能约束和几何约束。选择约束条件时需要考虑以下几个方面:①符合电机生产制造的工艺标准,比如绕组的槽满率应当符合嵌线工艺的要求;②电机的性能指标符合产品的技术规范及客户的需求;③电机的各零部件几何尺寸符合电机的设计规范。

综上,约束条件表达式为

$$\begin{cases} g_1(\mathbf{X}) = T_0 - T \leq 0 \\ g_2(\mathbf{X}) = V - V_0 \leq 0 \\ g_3(\mathbf{X}) = s_{f0} - s_f \leq 0 \\ g_4(\mathbf{X}) = C - C_0 \leq 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中: T_0 为原型机的输出转矩; V_0 为原型机体积; s_{f0} 为原型机绕组线圈槽满率; C_0 为原型机成本。

由于各约束条件数量级相差巨大,不能直接用于电机的优化设计,对其进行规范化处理,表示为如下相对值形式

$$\begin{cases} g_1(\mathbf{X}) = (T_0 - T)/T_0 \leq 0 \\ g_2(\mathbf{X}) = (V - V_0)/V_0 \leq 0 \\ g_3(\mathbf{X}) = (s_{f0} - s_f)/s_{f0} \leq 0 \\ g_4(\mathbf{X}) = (C - C_0)/C_0 \leq 0 \end{cases} \quad (19)$$

4.4 构造增广目标函数

由于 IHSDE 算法是一种无约束优化算法,只能用来计算无约束问题,需要把目标函数转化为无约束极值问题,为此引入罚函数构造增广目标函数。本文选用的罚函数^[14]为

$$P_i(\mathbf{X}) = \begin{cases} 0 & g_i(\mathbf{X}) \leq 0 \\ U + \omega_i g_i^2(\mathbf{X}) & g_i(\mathbf{X}) > 0 \end{cases} \quad (20)$$

式中: U 为一个常数,表示当函数违反约束时施加的最小约束值; ω_i 为惩罚系数,对于不同的约束,根据其影响大小使用不同的惩罚系数。

最终构造出来的增广目标函数 $F(\mathbf{X})$ 为

$$F(\mathbf{X}) = f(\mathbf{X}) - \sum_{i=1}^4 P_i(\mathbf{X}) \quad (21)$$

4.5 主要参数和变量搜索范围确定

电机散热要求较高,选择水冷散热,电流密度选择 10 A/mm²。槽满率大小的选择与绕线的工艺和所选线径及材质相关,本文初选 0.65。DBC-TFPM 单相定子铁心数 n 为 6,转子极对数 p_z 为 11。

在编写优化程序时,选定各优化变量的变化范

围以及搜索步长如表 2 所示。

表 2 变量取值范围及搜索步长		
变量名称	搜索范围	搜索步长
气隙长度 δ/mm	0.8~1.2	0.1
铁心齿部径向长度 l_s/mm	6.5~10	0.1
铁心齿部切向宽度 b_s/mm	8~12	0.1
绕组匝数 $N/\text{匝}$	180~220	1

4.6 优化分析

为体现不同权重系数对优化效果的影响,选取 2 组权重系数做对比:① $q_1 = 0.4, q_2 = 0.6$,侧重于减

小生产成本;② $q_1 = 0.6, q_2 = 0.4$,侧重于增大最大转矩密度。用 Matlab 编写优化程序,仿真计算得到优化目标函数相关变化曲线如图 5 所示,优化设计变量相关变化曲线如图 6 所示。由图 5 可知,在迭代运算过程中,虽然子目标函数中的成本、转矩和最大转矩密度曲线有所波折,但总体目标的适应度函数值一直在稳步增长,说明整个记忆库中的和声群体趋向于最优化。在算法计算后期,总适应度函数值基本保持不变,此时已经满足收敛条件。由图 6 可知在迭代过程中不断有新的随机变量生成,在达到一定迭代次数后整体慢慢收敛。

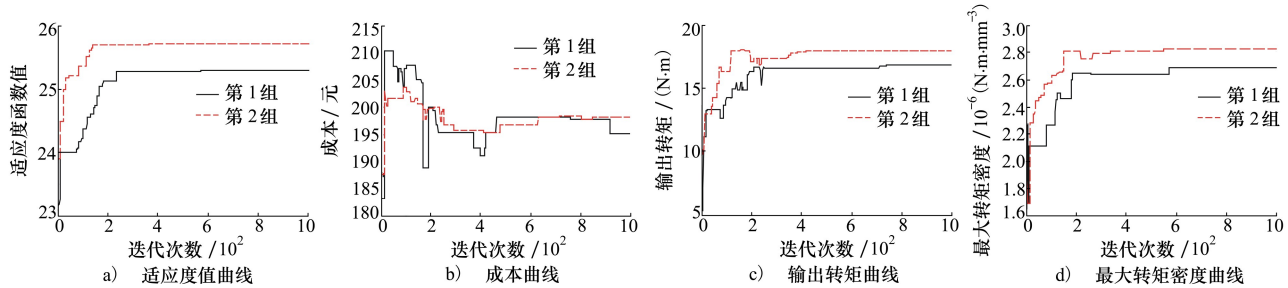


图 5 优化目标函数相关变化曲线

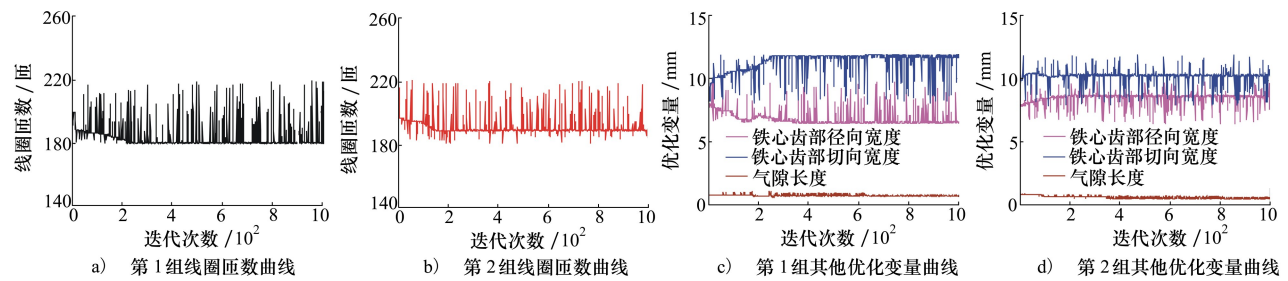


图 6 优化设计变量变化曲线

经过优化算法程序计算,得到优化后的相关电机参数,将其与原型机的参数进行对比,如表 3 所示。

表 3 电机优化前后参数对比			
变量名称	优化前	优化后	
		第一组	第二组
气隙长度 δ/mm	1	0.8	0.8
铁心齿部径向长度 l_s/mm	8	6.5	8.7
铁心齿部切向宽度 b_s/mm	10	12	10.3
绕组匝数 $N/\text{匝}$	200	180	184
最大输出转矩/ $(\text{N} \cdot \text{m})$	13.31	16.81	17.92
最大转矩密度/ $10^{-6}(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^{-3})$	2.12	2.63	2.81
生产成本/元	201.85	195.12	198.17

分析上表数据可知,第一组权重系数下电机的最大转矩提高 26.3%,最大转矩密度提高 24.1%,生产成本降低了 3.3%;第二组权重系数下电机的最大转矩提高 34.6%,最大转矩密度提高 32.5%,生产成本降低了 1.8%,均取得了预期的优化效果。

5 结 论

本文提出了 IHSDE 算法,利用标准测试函数 Schwefel 2.26 对 HS 算法、HSDE 算法和 IHSDE 算法进行性能测试,得出 IHSDE 算法收敛速度更快、早熟概率更低并且全局搜索能力更好,满足电机优化设计的要求。在 Matlab 平台编写 IHSDE 算法程序

对 DBC-TFPM 进行参数优化,仿真结果验证了该算法的正确性。该算法不仅适用于横向磁场电机的优化设计,也为解决其他多目标优化问题提供了参考,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] WEH H, MAY H. Achievable force densities for permanent magnet excited machines in new configurations[C]//Proceedings of International Conference on Electrical Machines, München, 1986
- [2] 贾周,林鹤云,黄允凯,等. 一种新型双 C 型定子横向磁通永磁发电机[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2831-2837
JIA Zhou, LIN Heyun, HUANG Yunkai, et al. A novel transverse flux permanent magnet generator with double-C stator hoops[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2015, 35(11): 2831-2837 (in Chinese)
- [3] 寇宝泉,杨国龙,李鹏,等. 双向交链横向磁通圆筒型直线永磁同步电机的基础研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(36): 61-63
KOU Baoquan, YANG Guolong, LI Peng, et al. Basic research on bidirectional cross link transverse flux cylindrical linear permanent magnet synchronous motor[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2012, 32(36): 61-63 (in Chinese)
- [4] 颜建虎,冯奕. 聚磁式横向磁通永磁盘式风力发电机设计与分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2694-2701
YAN Jianhu, FENG Yi. Design and analysis of magnetic concentrating transverse flux permanent disk wind turbine[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2017, 37(9): 2694-2701 (in Chinese)
- [5] WATANABE R, SHIN J S, KOSEKI T, et al. Optimal design for high output power of transverse-flux-type cylindrical linear synchronous generator[J]. IEEE Trans on Magnetic, 2014, 50(11): 8202704
- [6] UEDA Y, TAKAHASHI H, AKIBA T, et al. Small cogging-torque transverse-flux motor with magnetic short circuit under unloaded condition[J]. IEEE Trans on Magnetics, 2014, 50(11): 820-904
- [7] 梁旭,黄明. 现代智能优化混合算法及其应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2011
LIANG Xu, HUANG Ming. Modern intelligent optimization hybrid algorithm and its application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011 (in Chinese)
- [8] 邱书桓,黄元峰,艾程柳,等. 新型圆筒型错相式横向磁通永磁直线发电机结构及其漏磁分析与优化[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24): 7357-7365
QIU Shuhuan, HUANG Yuanfeng, AI Chengliu, et al. The structure of a new cylindrical staggered transverse flux permanent magnet linear generator and its magnetic flux leakage analysis and optimization[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2019, 39(24): 7357-7365 (in Chinese)
- [9] 包广清,郑文鹏,江建中. 一种改进粒子群算法在横向磁通永磁电机优化中的应用[J]. 电机与控制应用, 2008, 35(8): 27-31
BAO Guangqing, ZHENG Wenpeng, JIANG Jianzhong. Application of an improved particle swarm algorithm in the optimization of transverse flux permanent magnet motors[J]. Electric Machines and Control Applications, 2008, 35(8): 27-31 (in Chinese)
- [10] OMRAN M G H, MAHDAVI M. Global-best harmony search[J]. Applied Mathematics & Computation, 2008, 198(2): 643-656
- [11] 王凌,钱斌. 混合差分进化与调度算法[M]. 北京:清华大学出版社, 2012
WANG Ling, QIAN Bin. Hybrid differential evolution and scheduling algorithm[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012 (in Chinese)
- [12] 王胜兵,张鹏飞. 一种利用精英保留改进的量子遗传算法[J]. 海军工程大学学报, 2010, 22(1): 5-7
WANG Shengbing, ZHANG Pengfei. An improved quantum genetic algorithm using elite retention[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2010, 22(1): 5-7 (in Chinese)
- [13] 郝凌霄. 盘式双交链横向磁场永磁电机设计与研究[D]. 西安:西北工业大学, 2017
HAO Lingxiao. Design and research of disc type bipolar crosslinking transverse magnetic field permanent magnet motor[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017 (in Chinese)
- [14] 余修武,张可,刘永. 基于罚函数和水波优化的 WSN 定位算法[J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43(4): 107-112

YU Xiuwu, ZHANG Ke, LIU Yong. WSN positioning algorithm based on penalty function and water wave optimization[J]. Journal Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020, 43(4):107-112 (in Chinese)

Optimal design of transverse field motor based on hybrid algorithm of harmony search and differential evolution

YUAN Xiaoqing, ZHOU Tong, JI Junjie, LIU Yuxuan, DU Xiaodong

(School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The traditional optimal design of a transverse magnetic field motor mainly uses the electromagnetic relational formulas and the finite element analysis to empirically select its structural parameters, therefore making it difficult to obtain the global optimal solution of each parameter and meeting the requirements for multi-objective optimization. This paper suggests a hybrid algorithm of harmony search and differential evolution and introduces the elite retention strategy to improve the hybrid algorithm. It presents the principles of the hybrid algorithm, and then the algorithm performance test is used to verify the superiority of the hybrid algorithm. The electromagnetic analysis demonstrates the influence of the main dimensional parameters of the transverse magnetic field motor on its maximum torque density, therefore providing the basis for its optimal design. Jointly with the hybrid algorithm, the maximum torque density and the production cost are used as the objective function to optimize the transverse magnetic field motor under two groups of weighted coefficients. The simulation results show that the maximum torque density of the transverse magnetic field motor optimized with the hybrid algorithm is larger compared with the prototype motor but its production cost is lower.

Keywords: transverse magnetic field motor; motor optimization design; hybrid algorithm of harmony search and differential evolution; torque density; production cost

引用格式:袁小庆,周彤,姬俊杰,等. 基于和声差分进化混合算法的横向磁场电机优化设计[J]. 西北工业大学学报,2021, 39(6): 1289-1295

YUAN Xiaoqing, ZHOU Tong, JI Junjie, et al. Optimal design of transverse field motor based on hybrid algorithm of harmony search and differential evolution[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(6): 1289-1295 (in Chinese)