

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司
支持

郭艺伟, 谷爱昱, 曹文耀.
基于SVM-MOCDE算法的永磁同步电机
多目标优化.
电机与控制应用, 2021, 48(12): 43.

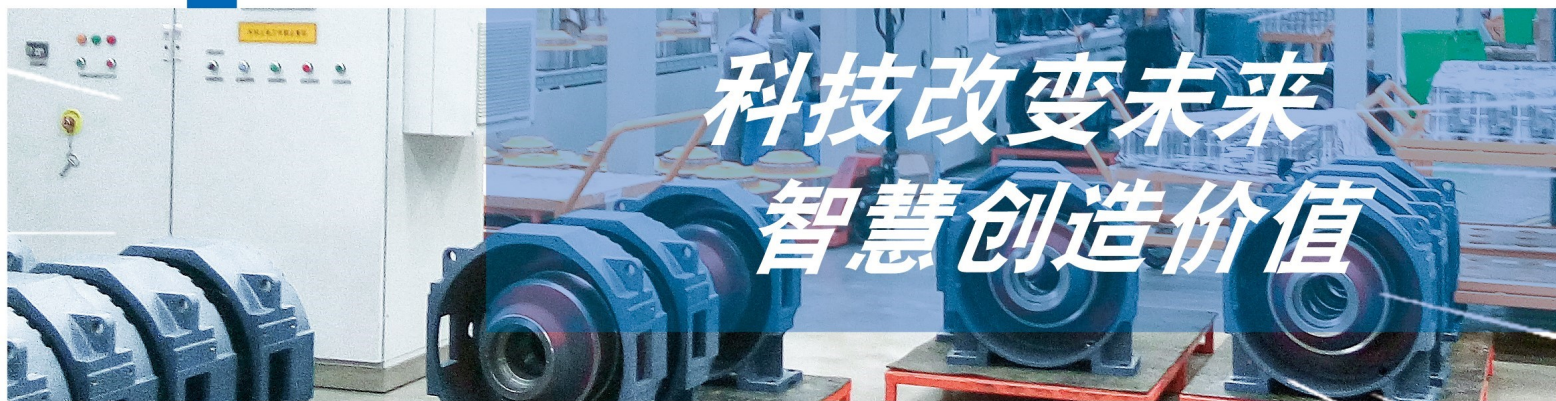


SEARI
上电科

NCMS
上科电机

www.nems.com.cn

掌握电机行业制造核心技术,
辐射智能制造产业发展



科技改变未来
智慧创造价值

· 业务范围 ·



异步电机装配线



永磁电机装配线



悬挂链电机喷漆线

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.nems.com.cn

地址: 上海市武宁路505号 手机: 18918357509 电话: 021-62574990-436

传真: 021-62163904 邮箱: wangcj@seari.com.cn

基于 SVM-MOCDE 算法的永磁同步电机 多目标优化

郭艺伟, 谷爱昱, 曹文耀
(广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要: 为了提高永磁同步电机(PMSM)的性能,选取磁钢厚度、偏心距和极弧系数作为变量,优化电机的齿槽转矩和气隙磁密畸变率。首先通过正交设计法仿真获得各变量的样本空间,然后采用支持向量机(SVM)对仿真数据集进行拟合,得到齿槽转矩和空载气隙磁密畸变率的拟合模型,最后应用多目标文化差分进化(MOCDE)算法进行优化。以一台 48 槽 8 极的 PMSM 为例进行仿真验证,分析结果表明基于 SVM 的模型准确可靠,结合 MOCDE 算法能有效优化齿槽转矩和气隙磁密畸变率。

关键词: 永磁同步电机; 齿槽转矩; 气隙磁密畸变率; 支持向量机; 差分进化算法

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2021)12-0043-05

doi: 10.12177/emca.2021.148

Multi-Objective Optimization for PMSM Based on SVM-MOCDE Algorithm

GUO Yiwei, GU Aiyu, CAO Wenyao

(School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to improve the performance of permanent magnet synchronous motor (PMSM), the magnetic steel thickness, eccentric distance and pole arc coefficient are selected as variables to optimize the cogging torque and air-gap magnetic density distortion rate of the motor. Firstly, the sample space of each variable is obtained through orthogonal design method simulation. Secondly the support vector machine (SVM) is used to fit the simulation data set to obtain the fitting model of cogging torque and no-load air gap magnetic density distortion rate. Finally, multi-objective cultural differential evolution (MOCDE) algorithm is used to optimize the model. A 48-slot 8-pole PMSM is taken as an example for simulation verification. The simulation results show that the model based on SVM is accurate and reliable, and combined with MOCDE algorithm, it can effectively optimize the cogging torque and air-gap magnetic density distortion rate.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); cogging torque; air-gap magnetic density distortion rate; support vector machine (SVM); differential evolution algorithm

0 引言

永磁同步电机(PMSM)由于具有结构简单、功率密度高和体积小等特点,其在日常生活中得到越来越广泛的应用。振动和噪声是衡量电机性能的重要指标,减小 PMSM 的空载气隙磁密畸变

率和齿槽转矩是改善电机振动和噪声性能的重要途径^[1]。

对 PMSM 的空载气隙磁密畸变率和齿槽转矩的优化是国内外研究的热点。文献[2-4]讨论了极弧系数、磁极偏移和辅助槽等方法对齿槽转矩的影响,并制作了样机与理论分析结果进行对

收稿日期: 2021-09-26; 收到修改稿日期: 2021-11-30

作者简介: 郭艺伟(1997—),男,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机设计。

谷爱昱(1970—),女,博士,副教授,研究方向为电机及其系统研究。

曹文耀(1994—),男,硕士研究生,研究方向为智能算法在电机中的应用。

比;文献[5]采用遗传算法求解永磁电机最优极弧系数与定子槽口宽度组合,减小齿槽转矩,并利用有限元方法进行验证;文献[6]分析了磁极形状与齿槽转矩的关系,采用磁极不等厚的方法削弱齿槽转矩;文献[7]利用粒子群算法(PSO),以气隙磁密波形正弦畸变率为优化目标对磁钢进行优化设计;文献[8]推导了气隙磁场波形畸变率与偏心距之间的解析关系,得出了最优偏心距和极弧系数的组合;文献[9]针对嵌入式PMSM和表贴式PMSM进行研究,分别讨论了气隙长度、极弧系数、磁钢长度以及磁极对数对电机气隙磁密的影响。

本文首先分析了电机极弧系数、偏心距、磁极厚度对齿槽转矩和空载气隙磁密波形的影响,然后采用支持向量机(SVM)与多目标差分进化(MOCDE)算法相结合的SVM-MOCDE算法,对上述3个电机磁极结构变量进行优化,并通过有限元仿真,对比分析优化前后电机齿槽转矩和气隙磁密波形。

1 电机模型建立

本文以一台48槽8极的表贴式PMSM为原始模型,有关参数如表1所示,Maxwell 2D模型如图1所示。

表1 PMSM参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定功率/kW	28.3	偏心距/mm	20
极数	8	定子槽数	48
定子内外径/mm	230/149	极弧系数	0.7
铁心长度/mm	200	磁钢厚度/mm	4.5

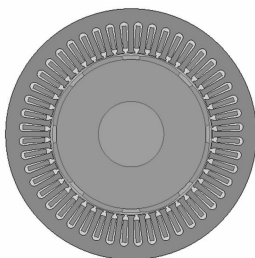


图1 电机模型

将电源激励设置为零,并删去绕组,应用有限元软件进行仿真分析,可得齿槽转矩曲线,如图2所示,此时齿槽转矩值为2.154 N·m。

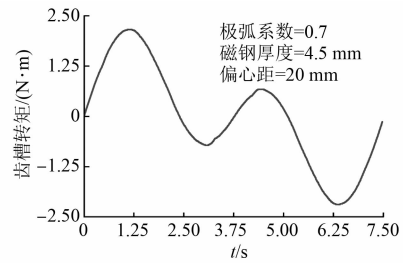


图2 齿槽转矩曲线图

通过静态场仿真,获得电机优化前径向气隙磁密波形,如图3所示,其傅里叶分析谐波分量如图4所示,谐波畸变率为14.13%,可以看出,基波幅值为0.925 5 T,主要谐波成分为奇数次,图4只绘制前11次的谐波分量。

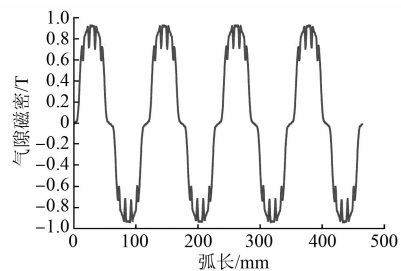


图3 气隙磁密波形图

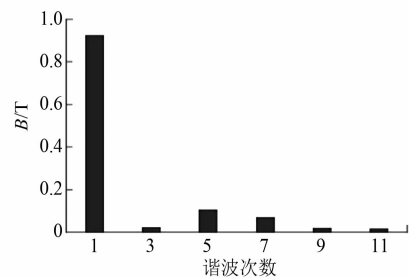


图4 谐波分量

2 正交设计与样本空间建立

本文以磁钢厚度、偏心距、极弧系数为设计变量,结合实际情况,确定各变量在寻优过程中的取值范围如下:磁钢厚度4.2~4.5 mm,偏心距18~21 mm,极弧系数0.6~0.9。3个变量的搭配数量多,会导致仿真时间较长。本文采用正交设计法选择有代表性的组合进行仿真,仿真分析得到不同搭配下的齿槽转矩和谐波畸变率值,如表2所示。

表 2 正交表与正交试验结果

标号	正交表			畸变率/齿槽转矩/	
	磁钢厚度/mm	偏心距/mm	极弧系数	%	(N·m)
1	4.1	18	0.600	25.02	5.823 2
2	4.2	21	0.600	24.61	4.907 1
3	4.3	19	0.600	24.96	5.791 0
4	4.4	22	0.600	24.81	4.791 2
5	4.5	20	0.600	24.77	5.906 7
6	4.1	18	0.675	16.34	3.512 2
7	4.2	21	0.675	16.11	2.999 4
8	4.3	20	0.675	16.12	3.639 8
9	4.4	18	0.675	16.26	3.983 0
10	4.5	21	0.675	15.94	3.557 8
11	4.1	19	0.750	11.96	2.553 3
12	4.2	22	0.750	12.91	3.062 0
13	4.3	21	0.750	11.61	2.387 3
14	4.4	19	0.750	12.53	2.832 5
15	4.5	22	0.750	11.25	2.219 0
16	4.1	21	0.825	11.40	2.795 1
17	4.2	19	0.825	13.24	3.181 2
18	4.3	22	0.825	10.94	2.662 6
19	4.4	20	0.825	12.76	3.059 7
20	4.5	18	0.825	14.46	3.492 6
21	4.1	22	0.900	12.51	1.290 8
22	4.2	20	0.900	15.04	1.473 1
23	4.3	18	0.900	17.33	1.697 3
24	4.4	21	0.900	14.50	1.399 6
25	4.5	19	0.900	16.77	1.537 0

3 SVM-MOCDE 算法优化

齿槽转矩和气隙磁密谐波畸变率与电机设计参数之间呈高度非线性关系,因此难以得到其具体数学表达式。本文基于上述分析处理的数据集,先采用 SVM 回归算法对两个优化目标建模,然后通过 MOCDE 算法进行寻优。

3.1 SVM 回归

SVM 是统计理论的核心,主要用于解决二值分类问题。SVM 在机器学习方面性能优良,其应用已拓展至一类分类问题、多类分类问题及回归问题。本文引入高斯径向基核函数,通过 SVM 降低维度以便解决非线性问题。

给定 n 组样本数据 $\{x_k, y_k\}, k = 1, 2, \dots, n$, 通过非线性映射将数据 x 映射到高维特征空间 G , 并在 G 内执行线性逼近操作。对于上述训练集 $\{x_k, y_k\}$, 基于结构风险最小化原则并使用核函数来求解凸二次规划,进而获得 SVM 模型^[10]:

$$f(x) = \sum_{i=1}^l \alpha_i K(x_i, x) + b \quad (1)$$

式中: l 为支持向量的数量; α_i 为拉格朗日常数; $K(x_i, x)$ 为核函数; b 为阈值。

以上述 25 组参数配合为样本集,通过 SVM 算法进行训练,得到实际值与预测值的对比情况分别如图 5 和图 6 所示,可见 SVM 算法对齿槽转矩和谐波畸变率的拟合效果良好。

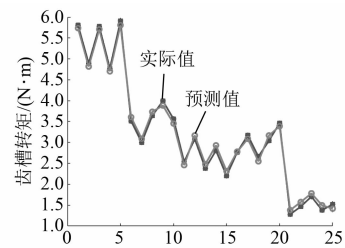


图 5 齿槽转矩拟合

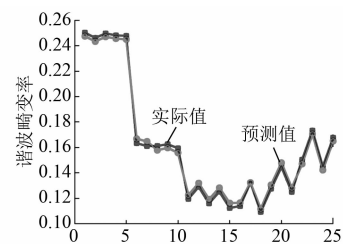


图 6 谐波畸变率拟合

3.2 MOCDE 算法

MOCDE 算法以文化算法为基础,结合差分进化算法进行群体空间演化,提高了收敛速度并能克服早熟问题。

3.2.1 文化算法

文化算法的主要特点是利用领域的先验知识以及在进化过程中获得的知识来引导搜索过程,其基本框架如图 7 所示。

文化算法包括群体空间和信念空间两个独立进化的空间,两者通过 accept 函数和 influence 函数进行通信。群体空间在进化过程借助 accept 函数中挑选经验知识,储存在信念空间中。群体空

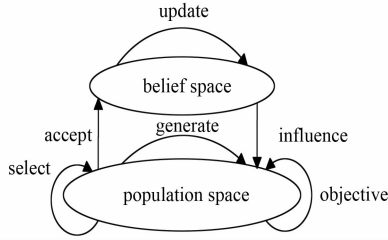


图7 文化算法框图

间的个体借助 influence 函数在群体知识的指导下进化。信念空间获得个体经验,再利用相关的运行方式,借助 update 函数使群体知识获得更新。

3.2.2 差分进化算法

差分进化算法主要包括变异、交叉和选择3个算子^[11]。设种群大小为 N_p , 个体决策变量个数为 n 。

(1) 变异算子。对第 g 代种群的每个个体 $x_i^g (i = 1, 2, \dots, N_p)$, 随机取3个不同的个体 $x_{r_1}^g, x_{r_2}^g, x_{r_3}^g, (r_1, r_2, r_3 \in [1, N_p], (r_1, r_2, r_3 \neq i))$, 生成变异个体 $v_{i,j}^{g+1}$:

$$v_{i,j}^{g+1} = x_{r_3}^g + F(x_{r_1}^g - x_{r_2}^g), i = 1, 2, \dots, N_p \quad (2)$$

式中: F 为比例因子。

(2) 交叉算子。对变异个体 $v_{i,j}^{g+1}$ 和父代个体 x_i^g 按维交叉, 得到试验个体 $u_{i,j}^{g+1}$:

$$u_{i,j}^{g+1} = \begin{cases} v_{i,j}^{g+1}, & \text{if } (\text{rand}() \leq C_r) \text{ or} \\ & j = \text{rand}(1, n) \\ x_i^g, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

式中: rand 为 $[0, 1]$ 之间的均匀随机数; C_r 为交叉概率; j 为 $[1, n]$ 间的随机整数。

(3) 选择算子。比较父代个体和试验个体的适应度值, 其中较优者进入下一代种群:

$$x_i^{g+1} = \begin{cases} u_i^{g+1}, & \text{if } u_i^{g+1} \text{ is better than } x_i^g \\ x_i^g, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

本文中 MOCDE 算法以磁钢厚度、偏心距和极弧系数为优化变量, SVM 回归模型为目标函数, 其具体参数设定: 种群数量为 60, 形势知识规模为 20, 最大进化代数为 5 000, 差分比例因子 $F=0.3$, 初始交叉概率 C_r 。优化结果得到的 Pareto 曲线如图 8 所示, 这里通过模糊决策得到最优折中解的极弧系数为 0.856 7, 磁钢厚度为 4.277 3 mm, 偏心距为 21.022 5 mm。

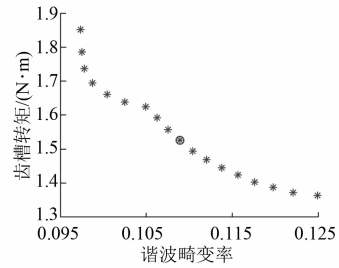


图8 多目标优化 Pareto 曲线

3.3 仿真验证

将 SVM-MOCDE 算法优化后的电机结构参数代入 Maxwell 2D 仿真, 结果如图 9~图 11 所示。经过优化后的齿槽转矩为 1.533 3 N·m, 谐波畸变率为 11.3%, 与算法求解值 1.526 7 N·m 和 10.8% 接近, 可以看出, 齿槽转矩比优化前降低了 28.8%, 谐波畸变率比原来降低了 2.83%。验证了本方法的有效性。

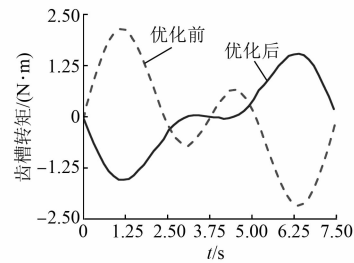


图9 优化前后的齿槽转矩对比

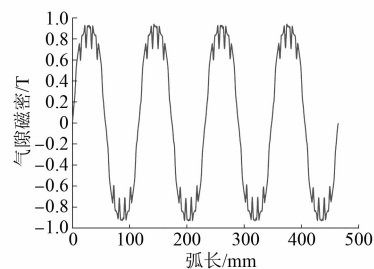


图10 优化后的气隙磁密

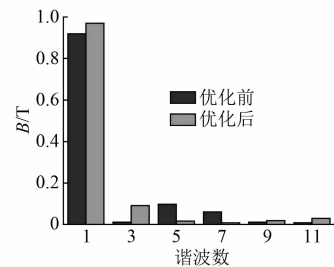


图11 优化前后的谐波分量对比

4 结 语

针对 PMSM 齿槽转矩和气隙磁密谐波畸变率的多目标优化问题,本文以磁钢厚度、偏心距和极弧系数为变量,提出 SVM-MOCDE 算法优化模型。该模型基于样本空间,通过 SVM 算法拟合目标函数,并使用 MOCDE 算法求解得到最优参数值。通过有限元仿真软件验证结果表明 SVM-MOCDE 算法优化模型能降低齿槽转矩和实现谐波畸变率多目标优化,为电机结构参数优化提供了一种新思路。

【参考文献】

- [1] 负剑虹, 姜幸媛, 梁爽. 表贴式永磁同步电机磁极不对称化齿槽转矩削弱方法[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(4): 247.
- [2] 王春梅, 王艾萌, 王慧. 优化极弧系数和磁极偏移对齿槽转矩影响的研究[J]. 微电机, 2014, 47(10): 1.
- [3] 陈亚新, 徐余法, 孙明伦, 等. 基于磁极分组偏移削弱永磁电机齿槽转矩[J]. 微特电机, 2017, 45(3): 31.
- [4] 王轶楠, 唐冲, 颜钢锋. 定子齿冠开辅助凹槽抑制永磁电机齿槽转矩[J]. 微电机, 2014, 47(10): 20.
- [5] 周晓燕, 王德鹏, 徐志凯. 基于解析-遗传算法的永磁电机齿槽转矩优化[J]. 微特电机, 2020, 48(11): 18.
- [6] CHIKOUCHE B L, BOUGHRARA K, IBTIOUEN R. Cogging torque minimization of surface-mounted permanent magnet synchronous machines using hybrid magnet shapes [J]. Progress in Electromagnetics Research B, 2015, 62(1): 49.
- [7] 杜晓彬, 邓建华. 基于 GPR-PSO 模型的永磁同步电机气隙磁密波形优化[J]. 防爆电机, 2017, 52(6): 20.
- [8] 胡鹏飞, 王东, 靳栓宝, 等. 偏心磁极永磁电机气隙磁场正弦优化模型[J]. 电工技术学报, 2019, 34(18): 3759.
- [9] 王钊. 变频调速永磁同步电动机及气隙磁场优化设计的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [10] 曹文耀, 胡弼, 胡土雄, 等. 基于 SVM-CSO 算法的 PMSM 齿槽转矩优化[J]. 防爆电机, 2018, 53(4): 1.
- [11] GU A, RUAN B, CAO W, et al. A general SVM-based multi-objective optimization methodology for axial flux motor design: YASA motor of an electric vehicle as a case study [J]. IEEE Access, 2019, 7: 180251.

[期刊简介]

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于 1959 年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月 10 日出版,国内外公开发行,邮发

代号 4-199。在半个多世纪的岁月中,本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,在全国科技期刊界拥有广泛的知名度,是“中国学术期刊综合评价数据库来源期刊”、“中国科学引文数据库来源期刊”、“中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊”,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。