

基于粒子群算法的核屏蔽感应电机 多目标优化设计

金永星, 王爱元, 王涛, 孙健
(上海电机学院 电气学院, 上海 201306)

摘要: 屏蔽感应电机是核反应堆冷却回路的动力源, 提高该电机的效率和降低电磁噪声具有重要的意义。将有限元法和磁路法相结合, 设计了 1 台 20 kW 核屏蔽感应电机。利用有限元软件对其进行额定工况运行状态下噪声和损耗仿真分析, 确定影响电机效率和电磁噪声的主要参数; 选取影响电机效率和噪声的主要参数为优化变量, 电机电磁噪声和效率为优化目标, 输出功率为约束条件; 采用正交试验表获得样本空间; 通过响应面法建立优化目标及约束条件的优化模型, 最后利用粒子群算法对优化模型进行求解。有限元仿真结果表明: 优化后电机效率提高了 2.6%, 电磁噪声降低了 5.2 dB。

关键词: 核屏蔽感应电机; 效率; 电磁噪声; 响应面法; 粒子群算法

中图分类号: TM 358 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)09-0053-05

Multi-Objective Optimization Design of Nuclear Canned Induction Motor Based on Particle Swarm Optimization

JIN Yongxing, WANG Aiyuan, WANG Tao, SUN Jian

(School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Canned induction motor was the power source of nuclear reactor cooling circuit. It was significant to improve the efficiency and reduce the electromagnetic noise of the motor. A 20 kW nuclear canned induction motor was designed by combining the finite element method with magnetic circuit method. The main parameters that affected the motor efficiency and electromagnetic noise were determined by the simulation analysis of noise and loss under the rated operating condition with the finite element software. The main parameters that affected the efficiency and noise of the motor were selected as optimization variables, the electromagnetic noise and efficiency of the motor were the optimization objectives, and output power was the constraint condition. Sample space was obtained by the orthogonal test table, the optimization model was obtained by response surface methodology, and the particle swarm optimization was used to solve the optimization model. The finite element simulation results showed that the efficiency of the optimized motor was improved by 2.6% and the electromagnetic noise was reduced by 5.2 dB.

Key words: nuclear canned induction motor; efficiency; electromagnetic noise; response surface methodology; particle swarm optimization

0 引言

核屏蔽电机与泵配合, 在核反应堆冷却回路中用来输送冷却介质。屏蔽感应电机与普通感应

电机的不同是定子铁心内圆和转子铁心外圆上各有一层非导磁、高电阻率的屏蔽套^[1]。由于屏蔽套的存在, 使定转子之间的有效气隙变长。屏蔽套在气隙交变磁场中受电磁力作用, 产生涡流损

作者简介: 金永星(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机设计与优化。

王爱元(1968—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电动机节能、新型电机设计及控制。

王涛(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机设计与控制。

耗,导致屏蔽感应电机的效率低于普通感应电机约 10 个百分点^[2-3]。

在实际工程中核屏蔽感应电机的设计更加注重高效率和低噪声。文献[4-6]分别以异步电机为例研究了定子槽型参数对电机损耗的影响,得出电机定子槽口宽度、槽宽对电机效率影响较大。文献[7]通过适当的减小定子槽口宽度,以此来降低电机的电磁振动噪声。文献[8-9]探讨了电机绕组类型对感应电动机振动与电磁噪声的影响。文献[10-11]利用响应面法对目标函数进行了拟合,并且精度较高。文献[12-14]利用粒子群算法对多目标优化问题进行了优化,结果表明效果显著。

基于以上研究,本文将有限元法与磁路法相结合^[15],设计了 1 台 20 kW 的核屏蔽感应电机。通过有限元仿真,选取定子槽口宽度 B_{s0} 、气隙长度 δ 、定子槽宽 B_s 、电机长径比 d 为优化变量,将响应面法与正交试验表相结合,建立了以电机效率和电磁噪声为优化目标及输出功率为约束的优化模型,再利用粒子群算法对优化模型优化求解,获得最佳优化变量组合,为电机设计及性能优化提供了一定的依据。

1 核屏蔽感应电动机电磁参数设计

屏蔽感应电机作为核反应堆冷却回路中的动力输出部件,根据二次冷却回路系统中对屏蔽感应电机的实际要求,确定了电机的一些主要设计指标,如表 1 所示。

表 1 屏蔽感应电机的主要设计指标	
技术指标	数值
额定功率/kW	20
额定电压/V	380
极数	4
效率/%	>75
相数	3

传统电机设计方法依靠磁路法对电机进行设计,存在设计周期长、设计的电机性能与设计指标偏差较大等问题。随着有限元软件的发展,电机设计方式也在发生变化。本文将有限元法与磁路法相结合,根据磁路法对电机电磁参数进行初步设计,将电磁参数代入到有限元软件中,对屏蔽感

应电机电磁参数进行设计和调整,利用有限元软件对电机不同运行状态进行仿真研究,以此使设计的电机满足设计要求。本文设计的核屏蔽感应电机主要电磁参数如表 2 所示。

表 2 核屏蔽感应电机主要电磁参数	
参数名称	参数值
定子外径/mm	290
转子外径/mm	176
气隙长度/mm	2
定子屏蔽套厚度/mm	0.8
转子屏蔽套厚度/mm	0.3
定子槽数	48
转子槽数	38
屏蔽套材料	SUS304

2 电机效率及电磁噪声分析

本文研究对象为感应电机,只对电机在额定运行状态下进行效率和噪声仿真分析。屏蔽感应电机的损耗主要包括屏蔽套涡流损耗 P_C 、铁耗 P_{Fe} 、定子绕组铜耗 P_{Cu1} 、转子绕组铜耗 P_{Cu2} 、摩擦损耗 P_B 、杂散损耗 P_S 。核屏蔽感应电机作为电动机运行,电动机效率可以采用功率流的思想进行求解。电动机的输入功率在数值上等于电机输出功率与各种损耗之和。电机的效率和功率平衡关系为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

(1)

$$P_1 = P_2 + P_{Fe} + P_C + P_B + P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_S$$

(2)

式中: P_1 ——输入功率;
 P_2 ——输出功率。

根据式(1)得出最初设计电机的效率为 76.8%。
电机的电磁噪声在电机噪声中占有较大的比重,成为评价一台电机性能的重要指标之一^[15]。利用有限元软件 Workbench 对电机电磁噪声进行仿真分析。本文通过电磁、机械和声场三者耦合进行核屏蔽感应电机电磁噪声仿真^[16]。图 1 所示为电机定子表面径向和切向磁拉力, A~J 为谐波响应中,定子齿上选取的 5 个点的电磁力和转矩。图 2 所示为 3 000 Hz 处电机定子谐波响应形变位移云图。图 3 所示为电机定子振动加速度图。图 4 为 3 000 Hz 处电机初始电磁噪声声压级图。

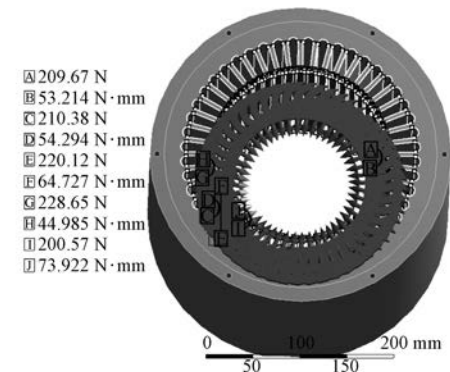


图1 定子内表面径向与切向磁拉力

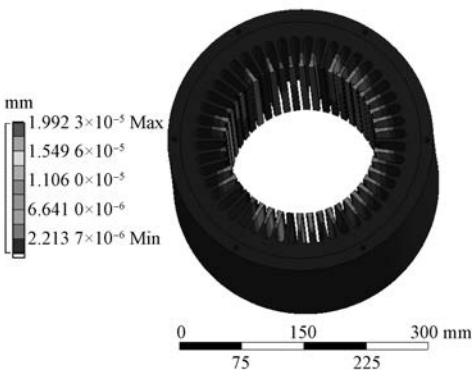


图2 定子谐波响应形变位移云图

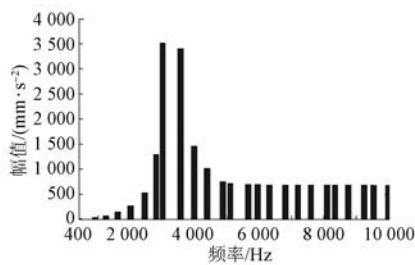


图3 定子振动加速度图

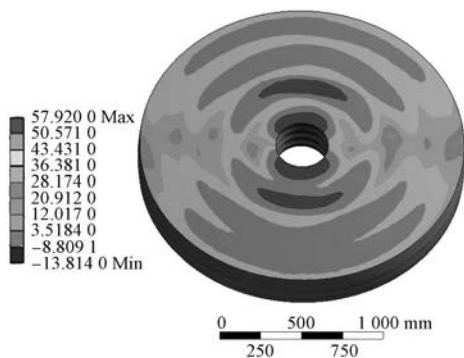


图4 3 000 Hz 处电机初始电磁噪声声压级

根据声压级求和公式可以求出电机在额定负载运行状态下的电磁噪声:

$$L = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{0.1L_{w_i} + C_i} \right) \quad (3)$$

式中: L_{w_j} ——第 j 个频带的声压级值;
 C_j ——第 j 个频带的修正系数。

通过计算可得初始屏蔽感应电机在额定负载运行状态下电磁噪声值为 57.9 dB。

3 参数优化过程

3.1 建立正交试验表

电机设计是一个复杂的过程,为了获取最佳的变量组合,需要研究优化变量对电机效率和电磁噪声的影响。

本文采用正交试验表研究优化变量对优化目标的影响。根据正交性从全面试验中挑选出具有代表性的点进行试验,这些有代表性的点具备了均匀分散和齐整性的特点。考虑到电机的生产工艺、制造公差和前期有限元仿真,选取定子槽口宽度 B_{s0} 最小值为 2.8 mm,水平等级级差为 0.5 mm。选取气隙长度 δ 最小值为 1.5 mm,水平等级级差为 0.3 mm。选取电机长径比 d 的范围为 1~4,水平等级级差为 1。最后选取定子槽宽 B_s 最小值为 6.5 mm,取水平等级级差为 0.5 mm。最终确定 4 个优化变量 4 水平等级的正交试验。优化变量及水平等级如表 3 所示。

表3 优化变量及水平等级

水平等级	1	2	3	4
B_{s0}/mm	2.8	3.3	3.8	4.3
δ/mm	1.5	1.8	2.1	2.4
B_s/mm	6.5	7.0	7.5	8.0
d	1	2	3	4

根据表 3 建立正交试验表,确定 16 次试验并进行电磁噪声和损耗有限元仿真。正交试验表为优化目标数学模型的建立提供了充足和精确的样本空间。

3.2 建立优化目标及约束条件数学模型

本文采用响应面法对优化目标进行回归拟合。响应面法是用多项式方程代替难以显式化的状态方程,通过多次的迭代调整,具有精度高、效率高特点。响应面法根据合理试验得到的相关数据进

行数学模型拟合,得到优化变量与目标函数之间的近似函数关系^[11]。响应面法多采用二次多项式的形式,鉴于目标函数的响应面模型存在交互效应和二次效应。本文采用的响应面表达式为

$$y(x) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i + \sum_{i=1}^n \alpha_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j>i}^n \alpha_{ij} x_i x_j \right) \quad (4)$$

式中: α_i —— x_i 的线性效应;

α_{ii} —— x_i 的二次效应;

α_{ij} —— $x_i x_j$ 之间的交互效应。

为了拟合精度较高的目标函数,需要做 k 次独立试验,有:

$$k \geq (n+1)(n+2)/2 \quad (5)$$

式中: n ——优化变量个数。

本文选取 16 组数据作为拟合目标数学函数的测试集,计算值与拟合的目标函数如图 5 所示。

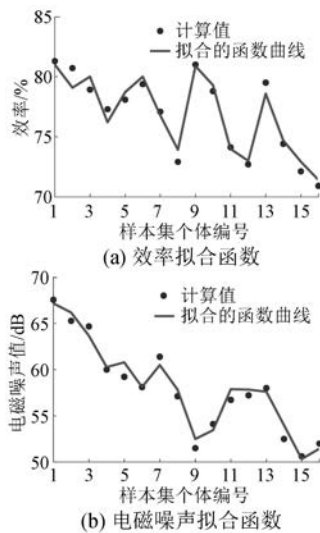


图 5 计算值与拟合目标函数

为了验证拟合的优化目标数学模型是否能够用于后续的优化,需要对模型进行误差分析以此来验证拟合目标函数的准确性。工程中使用复数相关系数 R^2 对拟合的数学模型进行检验。经过对优化目标数学模型的计算得出:拟合效率数学模型的相关系数 $R^2 = 0.924 > 0.9$;拟合电磁噪声数学模型的相关系数 $R^2 = 0.906 > 0.9$ 。说明本文拟合的数学模型具有较高的精确度,可以用来进行后续的优化设计。因此屏蔽感应电机的多目标优化数学模型可表示为

$$\begin{cases} \min L \\ \max \eta \\ P_2 \geq 20 \text{ kW} \\ 2.8 \leq B_{s0} \leq 4.3, 1.5 \leq \delta \leq 2.4 \\ 6.5 \leq B_s \leq 8.0, 1 \leq d \leq 4 \end{cases} \quad (6)$$

3.3 粒子群多目标优化

由式(6)知本文的优化问题属于典型不等式约束的非线性优化问题,利用粒子群多目标优化算法在工程上能很好地解决该类优化问题。粒子群多目标优化需要不断更新粒子的速度和位置,其速度和位置公式为

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (7)$$

$$V_{id}^{k+1} = \omega_k V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{gd}^k - X_{id}^k) \quad (8)$$

式中: ω_k ——惯性权重;

c_1, c_2 ——加速系数;

r_1, r_2 ——2 个在 $[0, 1]$ 范围内变化的随机数;

P_{id}^k ——个体最优位置;

P_{gd}^k ——全局最优位置。

由于 ω_k 是一直变化的,设 K 为迭代总次数,则第 k 次迭代时的惯性权重可表示为

$$\omega_k = \omega_{\max} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min}) \cdot k}{K} \quad (9)$$

式中: $\omega_{\max}, \omega_{\min}$ ——迭代前已设置好的最小值和最大值。

式(8)中 ω_k 的值对寻优能力有很大的影响。粒子群寻优算法分为全局搜索和局部搜索。当全局搜索能力较强时,其算法收敛速度较快;当局部搜索能力较强时,算法收敛精度较高。较大的 ω_k 值有利于前者,较小的 ω_k 值有利于后者。式(9)中对 ω_k 的处理可以同时兼顾这 2 种情况,搜索能力得到加强。

编写粒子群多目标优化算法对式(6)进行优化。优化结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出,优化结果是一个非劣解集,根据电机生产工艺水平、生产成本等现实问题选取最佳的解。综合考虑后选择 (3.9, 2.1, 8.0, 2.2) 为最佳优化变量组合。将最佳优化变量组合代入有限元模型进行效率和电磁噪声分析。电机优化前后效率和电磁噪声值对比如表 4 所示。

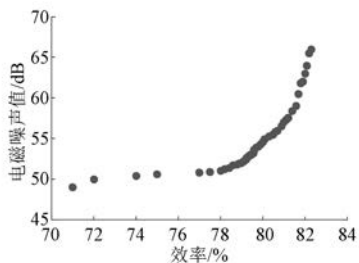


图 6 粒子群多目标优化解集

表 4 电机优化前后效率和电磁噪声值

参数名称	优化前	优化后
效率/%	76.8	79.4
噪声/dB	57.9	52.7

4 结 语

本文根据核屏蔽感应电机设计指标,将有限元法和磁路法相结合设计了 1 台满足要求的电机。通过有限元法确定影响电机电磁噪声和效率的优化变量,使用响应面法建立优化目标和约束条件的优化模型,利用粒子群多目标优化算法对电机多目标优化模型进行优化。优化后电机效率提高了 2.6%,电磁噪声降低了 5.2 dB。仿真结果表明:粒子群优化算法可以有效地对电机效率和电磁噪声进行综合优化,而且优化后效果比较显著。

【参 考 文 献】

[1] 张晓晨,李伟力,曹君慈.屏蔽电机屏蔽损耗与电机性能的计算与分析[J].哈尔滨工业大学学报,2007,39(9): 1422.

[2] 马德鑫.DELPH-(55~160)kW/2p 屏蔽电机电磁设计总结[J].防爆电机,2005,40(5): 1.

[3] 张装生.屏蔽式异步电动机电磁设计特点探讨[J].电工技术杂志,2002(12): 64.

[4] 赵海森,刘晓芳,杨亚秋,等.基于时步有限元分析的超高效电机定子槽形优化设计[J].中国电机工程学报,2011,31(33): 115.

[5] KIM J W, KIM B T, KWON B I. Optimal stator slot design of inverter-fed induction motor in consideration of harmonic losses [J]. IEEE Transactions on Magnetics,2005,41(5): 2012.

[6] 李世征,张学义,史立伟,等.基于杂散损耗分析的感应电机定子齿参数优化[J].微特电机,2018,46(6): 15.

[7] 王伟.异步电机电磁振动计算与分析[J].防爆电机,2019,54(1): 27.

[8] 李泽辰,鲍晓华,徐威.单双层低谐波绕组感应电机振动噪声分析[J].微电机,2018,51(10): 17.

[9] 孙雪,代颖,赵剑飞,等.高速异步电主轴电机的电磁噪声分析[J].电机与控制应用,2017,44(12): 66.

[10] 李化影,李明明,迟长春,等.基于响应曲面法优化永磁轮毂电机辅助槽尺寸的研究[J].微特电机,2018,46(2): 15.

[11] 刘林芽,秦佳良,雷晓燕,等.基于响应面法的槽形梁结构噪声优化研究[J].振动与冲击,2018,37(20): 56.

[12] 凌海风,周献中,江勋林,等.改进的约束多目标粒子群算法[J].计算机应用,2012,32(5): 1320.

[13] 范坚坚,吴建华,黎宪林,等.永磁同步电动机磁钢的多目标微粒群算法优化[J].电机与控制学报,2009,13(2): 173.

[14] 惠杭浩,俞建峰,崔政伟.基于粒子群算法的异步电机效率优化控制研究[J].微电机,2017,50(5): 28.

[15] 董江锋,覃万健,吴贵川.基于 Ansys 航空中频异步电机设计[J].微电机,2018,51(6): 22.

[16] 宋桂英,赵晓明,邢正坤,等.基于多物理场分析开关磁阻电机电磁振动噪声[J].微电机,2017,50(1): 13.

收稿日期: 2019-06-12

[主要栏目]

- 控制与应用技术
- 研究与设计
- 故障诊断与保护
- 新能源发电与局域电网
- 新能源汽车技术
- 发电机组及其控制
- 测试技术与测控系统
- 材料与工艺
- 电机生产及质量管理
- 电力电子变流器技术
- 智能制造
- 节能应用