

基于正交设计试验的永磁同步牵引电机散热的数值模拟研究

武永和^{1,2}, 李祥成¹, 秦转丽^{1,2}, 杨 成^{1,2}

(1. 中车永济电机有限公司, 陕西 西安 710016;

2. 西安中车电气研究院, 陕西 西安 710016)

摘 要: 基于 Taguchi 正交设计试验, 以定子绕组最高温度为试验指标, 采用数值模拟方法分析了机座的散热筋参数对电机散热性能的影响。通过极差分析, 发现影响定子绕组最高温度的各因素主次顺序依次为, 散热筋高度、散热筋间距、散热筋宽度。综合考虑材料成本和电机减重要求, 得到最佳的水平组合方式为散热筋高度 30 mm、散热筋宽度 4 mm、散热筋间距 20 mm。

关键词: 永磁同步牵引电机; Taguchi 正交设计试验; 散热; 数值模拟

中图分类号: TM351; TM922.71 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)01-0077-06

doi: 10.12177/emca.2022.153

Numerical Simulation on Heat Dissipation of Permanent Magnet Synchronous Traction Motor Based on Taguchi's Orthogonal Design Experiment

WU Yonghe^{1,2}, LI Xiangcheng¹, QIN Zhuanli^{1,2}, YANG Cheng^{1,2}

(1. CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Xi'an 710016, China;

2. Xi'an CRRC Electric Research Institute, Xi'an 710016, China)

Abstract: Based on the Taguchi's orthogonal design experiment, taking the maximum temperature of the stator winding as the experimental index, the influence of the parameters of the cooling ribs on the heat dissipation performance of the motor is analyzed by the numerical simulation. Through the range analysis, it is found that the order of the factors affecting the maximum temperature of the stator winding is, the height of the cooling ribs, the spacing of the cooling ribs, and the width of the cooling ribs. Considering the material cost and the weight reduction requirements of the motor, the best level combination is obtained as the height of the cooling rib is 30 mm, the width of the cooling rib is 4 mm, and the spacing of the cooling rib is 20 mm.

Key words: permanent magnet synchronous traction motor; Taguchi's orthogonal design experiment; heat dissipation; numerical simulation

0 引 言

永磁同步电机因功率因数高、效率高、起动转矩大、体积小、质量轻、全封闭、噪声小等优点, 广泛应用于机车牵引, 但电机散热量也较大^[1-2]。电

机合理的散热结构能有效将电机各部件温升控制在安全的工作范围内。风冷、液冷和蒸发冷却散热系统是三种常用的电机散热系统^[3]。为提高散热效果, 电机风冷散热系统的外风路需要在电机机座和端盖上加装散热筋。要研究外风路的散热

收稿日期: 2022-09-30; 收到修改稿日期: 2022-11-03

作者简介: 武永和(1993—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电机流动与传热数值分析。

李祥成(1986—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为牵引电机设计。

秦转丽(1979—), 女, 本科, 高级工程师, 研究方向为电机设计。

性能,就要综合考虑散热筋的高度、散热筋的宽度和散热筋的间距对电机散热的影响。正交设计试验法以极差分析模型为基础,是研究多因素、多水平的一种优化设计试验方案^[4],在电机设计和优化方面已有广泛应用^[5-10]。为提高试验效率并考虑各因素对试验目标的综合影响,本文结合正交设计试验法和数值模拟分析机座的散热筋参数对电机散热性能的影响,旨在得到最佳散热组合。

1 数值计算模型

1.1 物理模型

本文所涉及的永磁同步牵引电机外风路采用自然散热,具体结构如图 1 所示。该样机的基本参数如表 1 所示。

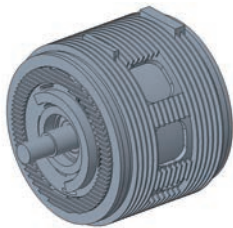


图 1 永磁同步牵引电机结构图

表 1 电机基本参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定功率/kW	100	额定转速/(r·min ⁻¹)	612
额定电流/A	216	额定电压/V	300

样机机座铸造的散热筋高度 H 为 30 mm,宽度 W 为 6 mm,间距 S 为 20 mm,机座散热筋局部结构如图 2 所示。

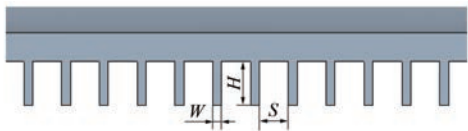


图 2 机座散热筋局部结构图

1.2 数学模型

假设电机处于稳定运行状态,近似认为电机内空气物性随其温度线性变化,忽略电机内其他材料的导热系数随温度的变化;假设电机的损耗在同一部件上均匀分布,则计算域的连续性方程为

$$\operatorname{div}(\rho U)=0 \tag{1}$$

式中: ρ 为空气密度; U 为空气的速度。

动量方程、能量方程可写成如下通用形式^[11]:

$$\operatorname{div}(\rho V \varphi)=\operatorname{div}(\Gamma \operatorname{grad} \varphi)+S \tag{2}$$

式中: φ 代表 $u、v、w、T$ 四种变量, $u、v、w$ 为空气在 $x、y、z$ 方向的速度分量,其对应的广义扩散系数为 $\eta_{\text{eff}}=\eta+\eta_t, T$ 对应的广义扩散系数为 $\eta / \Gamma+\eta_t / \sigma_T, u、v、w$ 所对应的源项分别为, $-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\eta_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\eta_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\eta_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial x}\right),-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\eta_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\eta_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\eta_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial y}\right),-\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\eta_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial z}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\eta_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial z}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\eta_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial z}\right), T$ 对应的源项为各发热部件的体积损耗。

1.3 边界条件

为提高计算效率,同时满足工程实际需要,将定子绕组、绝缘等复杂结构等效为一个均匀的发热体^[12-13]。经计算,额定工况下永磁同步牵引电机的损耗如表 2 所示。

表 2 电机各部件损耗 kW

定子铜耗	定子铁耗	转子铁耗	永磁体涡流损耗	杂散损耗
1.590	1.219	0.052	0.012	0.740

两侧轴承冷却风扇的进、出口边界条件均为压力边界条件。

旋转流体域和静止流体域交界面采用 interior 边界^[11]。

流体和固体交界面速度采用无滑移固壁边界条件,即 $u_{\text{air}}=u_{\text{wall}} \circ$

流固界面和固固界面热边界采用耦合边界条件^[14]。

机座和端盖向周围空间自然散热,表面传热系数按下式计算^[15]:

$$\alpha=14\left(1+0.5 \sqrt{\omega_i}\right) \sqrt[3]{\frac{\theta}{25}} \tag{3}$$

式中: α 为表面传热系数; ω_i 为吹拂机座内壁的风速; θ 为机座壁外表面的温度。

2 正交设计试验

2.1 试验指标和因素

本文选取定子绕组最大温度作为衡量机座散

热能力的试验指标。散热筋的高度、宽度、间距为本文的研究变量,即确定正交表为 3 因素。

2.2 正交表和水平选择

各因素水平数的确定应满足实际情况和正交试验的原则,标准表的水平数均相等且只能取素数或素数幂^[6],本文选取 3 水平,各因素水平表如表 3 所示。

表 3 各因素水平表

因素	水平		
	1	2	3
散热筋高度 H/mm	22	26	30
散热筋宽度 W/mm	4	6	8
散热筋间距 S/mm	20	24	28

本文试验研究为 3 因素 3 水平,进行全面组合方案需进行 27 次试验,若采用正交表 $L^9(3^4)$ 进行试验,只需做 9 次。正交设计试验方案见表 4。

表 4 正交设计试验方案

试验序号	散热筋高度/ mm	散热筋宽度/ mm	散热筋间距/ mm
1	22	4	20
2	22	6	24
3	22	8	28
4	26	4	24
5	26	6	28
6	26	8	20
7	30	4	28
8	30	6	20
9	30	8	24

2.3 结果分析

根据正交设计试验方案,采用 ANSYS Fluent 软件对电机流场、温度场进行耦合计算,得到的仿真计算结果如表 5 所示。A 代表散热筋高度,B 代表散热筋宽度,C 代表散热筋间距。

2.3.1 直观分析

根据正交设计试验方案和仿真计算结果可以直观看出,所有试验中,试验 8 的定子绕组最大温度的值最小,说明该方案下电机的散热能力最好,所以最佳的水平组合为 $A_3B_2C_1$ 。

表 5 正交设计试验方案和仿真计算结果

试验序号	A	B	C	定子绕组最大温度/ $^{\circ}\text{C}$
1	1	1	1	118.53
2	1	2	2	121.11
3	1	3	3	121.36
4	2	1	2	117.36
5	2	2	3	119.71
6	2	3	1	117.03
7	3	1	3	117.14
8	3	2	1	114.47
9	3	3	2	117.43

2.3.2 极差分析

根据计算结果,对试验指标进行极差分析,结果如表 6 所示。从表 6 可以看出,3 个因素中,散热筋宽度的极差最小,对定子绕组最高温度影响最小,散热筋高度的极差最大,对定子绕组最高温度影响最明显。根据极差 R 值的大小,影响定子绕组最高温度的各因素主次顺序依次为散热筋高度、散热筋间距、散热筋宽度。

表 6 定子绕组最高温度极差分析

试验因素	A	B	C
1	120.33	117.68	116.68
2	118.03	118.43	118.63
3	116.35	118.61	119.40
R	3.98	0.93	2.72

各因素水平对指标的影响如图 3 所示。从图 3 中可以看出,定子绕组最大温度随着散热筋高度的增加而降低,这是因为散热筋高度增加后机座表面有效散热面积增加,电机散热能力提高;定子绕组最大温度随着散热筋宽度的增加先升高后基本保持水平,说明散热筋宽度的逐步增加并不能有效提高电机的散热能力;定子绕组最大温度随着散热筋间距增加而升高,这是因为散热筋间距增大,机座表面有效散热面积减小,电机散热能力降低。通过各因素水平对指标的影响分布图可以确定最佳的组合为 $A_3B_1C_1$ 。

综上所述,散热筋的高度取 30 mm,散热筋的间距取 20 mm,考虑到材料成本和电机减重要求,取散热筋的宽度为 4 mm。所以最佳的水平组合为 $A_3B_1C_1$ 。

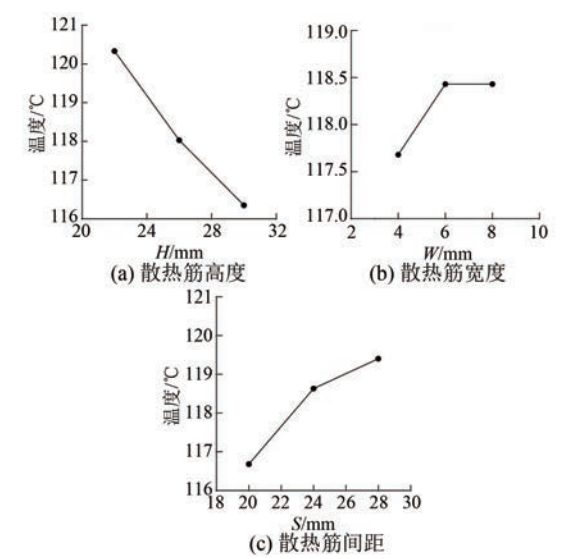


图3 各因素水平对指标的影响分布图

3 试验验证

分别采用电阻法和预埋温度传感器的方法对样机额定状态下稳态运行时的定子绕组平均温升和定子铁心温度进行测量,测试方法和过程均参照相关标准^[16]。图4为定子铁心周向埋置温度传感器的位置,温度传感器的轴向位置在定子铁心正中心。



图4 定子铁心测温点周向埋置位置

样机温升试验系统如图5所示。试验的相关参数如表7所示。试验过程中样机保持在额定工况下运行,温升持续时间为420 min。

表7 试验相关参数			
参数名称	参数值	参数名称	参数值
输出功率/kW	100.5	输出转速/(r·min ⁻¹)	612
输出转矩/(N·m)	1 568	环境温度/°C	18.1

定子绕组平均温升和定子铁心测温点温度的数值计算结果与试验结果对比如表8所示,对比



图5 电机温升试验系统

结果表明,仿真的最大相对误差小于8%,满足工程要求,验证了本文数值计算方法的可靠性。

表8 数值计算结果与试验结果对比

参数名称	仿真结果	试验结果
定子绕组平均温升/K	88.64	82.00
定子铁心测温点温度/°C	102.74	97.20

4 数值计算结果分析

图6为电机轴向截面温度分布云图,从图6中可以看出,定子线圈端部和定子铁心齿部位置的温度明显高于其他位置,这是因为电机转速慢,电机内部空气流动速度小,定子绕组端部和定子铁心齿部槽口位置换热慢。两端轴承位置分别装有冷却风扇,风扇周围的空气域温度低于附近的固体温度。

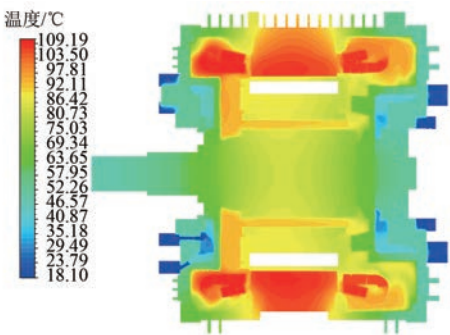


图6 电机轴向截面温度分布云图

图7为电机径向截面温度分布云图,从图7中可以看出,转子组件整体温度低于定子组件,这是因为转子组件损耗小于定子组件;有散热筋的定子铁心位置温度明显低于无散热筋的位置,这是因为散热筋增加了散热面积,有效增强了散热。

为研究定子铁心不同位置的温度分布,在定

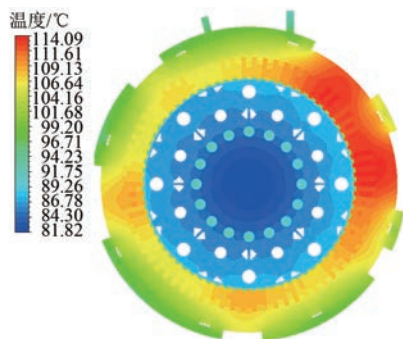


图7 电机径向截面温度分布云图

子铁心四个位置分别取线 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 ，取样线在定子铁心上的位置如图8所示。

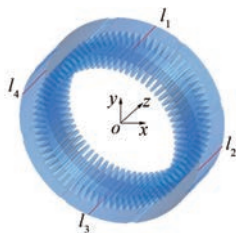


图8 取样线在定子铁心上的位置

图9为不同试验模型的 l_1 沿轴向的温度分布。从图9中可以看出,不同计算模型的 l_1 沿轴向的温度分布趋势相同,均呈抛物线分布。在同一位置,试验8的 l_1 沿轴向的温度最低,试验3的 l_1 沿轴向的温度最高。所有模型的非传动端温度略低于传动端,这是因为非传动端侧的绕组端部空间较大,转子转动时带动空气流动,非传动端侧的换热能力更好。

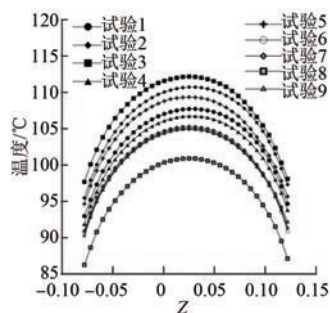
图9 l_1 沿轴向的温度分布

图10为不同试验模型的 l_2 沿轴向的温度分布,从图10中可以看出,不同模型的 l_2 沿轴向的温度分布趋势相同,均呈“几字形”分布,沿轴向在-0.058 m和0.102 m范围内,温度变化较小,这是因为定子铁心在这个区间局部裸露在空气中,

定子铁心表面直接与空气进行对流换热,换热量恒定。在同一位置,试验8的 l_2 沿轴向的温度最低,试验3的 l_2 沿轴向的温度最高。

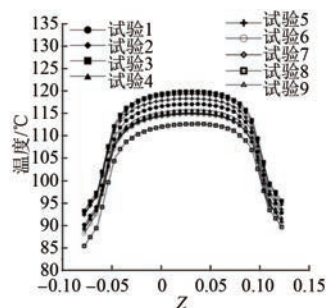
图10 l_2 沿轴向的温度分布

图11为不同试验模型的 l_3 沿轴向的温度分布,从图11中可以看出,不同模型的 l_3 沿轴向的温度分布趋势相同,均呈“几字形”分布,在同一位置,试验8的 l_3 沿轴向的温度最低,试验3的 l_3 沿轴向的温度最高。在-0.058 m和0.102 m位置温度变化比较剧烈,是因为这两个位置是机座和裸露空气的交界处,定子铁心散热方式由导热转为对流换热。

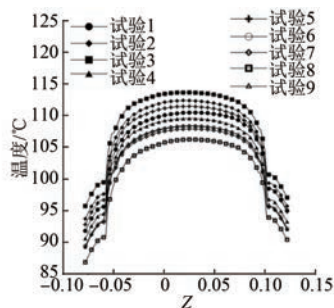
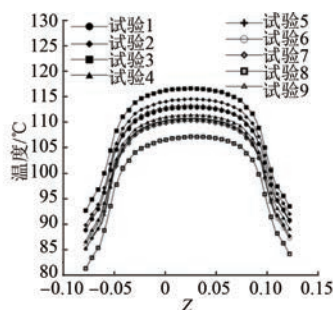
图11 l_3 沿轴向的温度分布

图12为不同试验模型的 l_4 沿轴向的温度分布,从图12中可以看出,不同模型的 l_4 沿轴向的温度分布趋势相同,均呈“几字形”分布,在同一位置,试验8的 l_4 沿轴向的温度最低,试验3的 l_4 沿轴向的温度最高。所有模型的非传动端温度略低于传动端。

5 结 语

本文以定子绕组最高温度为试验指标,结合正交设计试验法和数值模拟方法分析机座的散热筋参数对电机散热性能的影响进行了研究,发现影响定子绕组最高温度的各因素主次顺序依次为

图 12 l_4 沿轴向的温度分布

散热筋高度、散热筋间距、散热筋宽度。与试验结果进行了对比验证,最大相对误差小于 8%,满足工程要求。从计算结果可知,定子线圈端部和定子铁心齿部位置的温度较高,转子组件整体温度低于定子组件。不同计算模型的 l_1 沿轴向的温度均呈抛物线分布, $l_2 \sim l_4$ 沿轴向的温度均呈“U 字形”分布。

【参考文献】

- [1] 耿振,李光友. 轴向磁通永磁同步电机发展综述[J]. 微特电机,2015,43(9):88.
- [2] 张济民,苏辉,任乔,等. 轨道交通永磁同步牵引系统发展概况与关键技术综述[J]. 交通运输工程学报,2021,21(6):63.
- [3] 汤勇,孙亚隆,郭志军,等. 电机散热系统的研究现状与发展趋势[J]. 中国机械工程,2021,32(10):1135.
- [4] 刘瑞江,张业旺,闻崇炜,等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理,2010,27(9):52.
- [5] 王超,何雅玲,刘迎文,等. 基于正交设计试验的电机散热的数值模拟研究[J]. 工程热物理学报,2011,32(1):89.
- [6] 王淑旺,高月仙,张磊. 基于正交试验法的永磁同步电机散热系统数值模拟研究[J]. 电机与控制应用,2016,43(11):103.
- [7] 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.
- [8] 张晨,张萌,郭军献,等. 基于正交法的分数槽永磁电机电感仿真优化[J]. 探测与控制学报,2018,40(4):90.
- [9] SI J K, ZHAO S Z, FENG H C, et al. Multi-objective optimization of surface-mounted and interior permanent magnet synchronous motor based on Taguchi method and response surface method[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2018, 4(1):67.
- [10] SHARMA U, SINGH B. Design and development of energy efficient single phase induction motor for ceiling fan using Taguchi's orthogonal arrays[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(4):3562.
- [11] 梁雪琪,罗慧强,吴一宁,等. 地铁用电机传热特性数值模拟与实验研究[J]. 西安交通大学学报,2018,52(9):148.
- [12] XYPTRAS J, HATZIATHANASSIOU V. Thermal analysis of an electrical machine taking into account the iron losses and the deep-bar effect[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(4):996.
- [13] 张琪,王伟旭,黄苏融,等. 高密度车用永磁电机流固耦合传热仿真分析[J]. 电机与控制应用,2012,39(8):1.
- [14] 吴建华,胡杰浩,陈昂,等. 全封闭 R32 滚动活塞压缩机的热分析[J]. 西安交通大学学报,2015,49(3):14.
- [15] 魏永田,孟大伟,温嘉斌. 电机内热交换[J]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 三相永磁同步电动机试验方法:GB/T 22669—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部