

高温阀用电磁机构温度场分析与结构参数优化^{*}

胡智敏, 蔡志远, 马少华

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 针对高温阀用电磁机构(EM-HTV)应用环境温度高(约 200 ℃)的特点, 首先采用电磁场及温度场分析方法, 研究了 EM-HTV 的电磁场损耗分布、温度场分布。随后, 提出了一种“线圈分段+段间导热环+外壳散热板”的新型结构, 基于正交试验原理对所提出结构中的关键尺寸进行了优化设计, 对现有电磁机构进行了改进, 并对提出的新结构进行温升试验验证, 试验数据与仿真数据的误差在合理范围内, 证明了电磁场及温度场分析方法应用于线圈温升分析的可行性。最后, 研究了新型结构高温阀用电磁机构的温度分布, 发现最高温度由优化前的 278.29 ℃ 下降至 241.23 ℃, 温度降低了约 13.32%, 低温区域明显增多, 满足可靠运行温升要求。此外, 所提出的新型结构具有绕线方便、便于排除故障、易模块化加工以及易对现有产品改造的优点。

关键词: 高温阀; 正交试验; 散热板; 温升

中图分类号: TM 574 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)02-0057-07

doi: 10.12177/emca.2020.203

Temperature Field Analysis and Structural Parameter Optimization of Electromagnetic Mechanism for High Temperature Valve^{*}

HU Zhimin, CAI Zhiyuan, MA Shaohua

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: According to the characteristics of high temperature (about 200 ℃) of electromagnetic mechanism for high temperature valve (EM-HTV), firstly, the electromagnetic field loss distribution and temperature field distribution of EM-HTV are studied by using electromagnetic field and temperature field analysis method. Then, a novel structure of “coil grading with interstage heat conduction ring and shell cooling plate” is proposed. Based on the principle of orthogonal experiment, the key dimensions of the proposed structure are optimized. The existing electromagnetic mechanism is improved, and the new structure is verified by temperature rise test. The error between the test data and the simulation data is within a reasonable range, which proves the feasibility of applying the electromagnetic field and temperature field analysis method to the coil temperature rise analysis. Finally, the temperature distribution of the high temperature electromagnetic drive mechanism of the new structure is studied, and it is found that the maximum temperature decreases from 278.29 ℃ by about 13.32% to 241.23 ℃, and the low temperature area increases obviously, which can meet the requirement of reliable operation temperature rise. In addition, the proposed structure has the advantages of convenient winding and easy troubleshooting, modular processing and modification of existing products.

Key words: high temperature valve; orthogonal experiment; cooling plate; temperature rise

收稿日期: 2020-11-06; 收到修改稿日期: 2021-01-06

^{*} 基金项目: 辽宁省教育厅科学技术研究项目(LZGD2017041)

作者简介: 胡智敏(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为智能电器。

蔡志远(1962—), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能电器。

马少华(1963—), 女, 博士, 教授, 研究方向为智能电器。

0 引 言

高温阀用电磁机构(简称高温电磁机构)广泛应用于船舶重工、航空航天、测试、加热、液压设备等温度较高的导热系统领域^[1-2],其工作环境相对极端,因此高温电磁机构的性能研究、优化设计和多物理场分析受到广泛关注。

近年来,国内外的学者针对高温电磁机构开展了丰富的研究。文献[1-3]从机械结构、控制系统、温升分析的角度研究了航空电磁阀,并在工程中进行了应用。其中,文献[2]耦合计算了电磁阀的电磁性能和热性能,进行了温度场仿真,但是未针对散热结构进行优化和改进;文献[3]分析了应用于航空领域的高温放气阀的作用及必要性,给出了设计思路和参考原则。

但是已有文献关于高温电磁机构的温升及结构优化问题,尤其是散热结构的优化研究较少。综合考虑高温电磁驱动机构应用场合和工程需要,开展高温电磁机构的温升研究及结构优化对发挥驱动性能、拓宽其应用领域、提升极端工况下的可靠运行时间具有重要的理论意义和应用价值。

综合以上分析,本文以1台已批量化生产应用的24 V直流高温阀用电磁机构为研究对象,采用电磁场及温度场分析方法研究了该电磁机构的电磁场和温度场分布。为了满足应用于高温环境的需要,在现有结构上提出了一种“线圈分段+段间导热环+外壳散热板”的新型结构,并对新型结构中的关键参数进行了综合优化和优化结果仿真检验,得到了新型结构的温度场分布,并综合对比评价:(1)原结构;(2)原结构+散热板;(3)原外壳+线圈分段;(4)线圈分段+段间导热环+外壳散热板的温度分布。最后,对优化后的电磁机构进行了试验验证,证明了该研究的正确性和合理性。

1 高温电磁驱动机构的结构

1.1 高温电磁驱动机构的结构及参数

图1为24 V直流高温电磁机构主要结构图,包括静铁心、外壳、线圈、隔磁环、动铁心、下端盖等部件。

控制器可根据指令信号向线圈通电和断电,进而控制动铁心处于释放和吸合状态。高温航空电磁阀参数如表1所示。

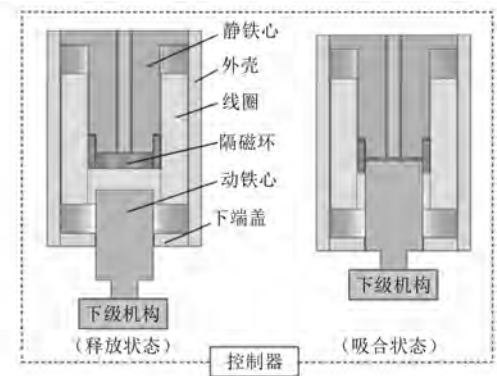


图1 高温阀用电磁机构结构图

表1 高温航空用电磁阀参数表

参数名称	参数值
工作电压/V	DC24
工作气隙/mm	0.4
匝数 <i>N</i>	1 500
线圈截面施加安匝电流/A	600
工作环境温度/℃	200
可靠运行温度限值/℃	≤250

本文所研究的电磁机构是已批量化生产应用的产品,原工作环境温度低于200 ℃,其安全运行的温度限值为250 ℃。为了对现有产品进行改造,使其具有在高温下安全可靠运行的能力,避免因重新生产高绝缘等级的产品,造成产品及资源的浪费,以下内容均是在现有结构上进行的改进和优化设计。

1.2 高温电磁驱动机构的部件材料

动铁心材料为1J22,属于高饱和磁感应强度的铁钴钒软磁合金;静铁心材料为DT4E,具有价格便宜、加工方便的优势^[4],外壳及下端盖也采用DT4E材料。

图2为2种材料的*B-H*测试曲线图。测试时1J22的磁感应强度达到了2.43 T,DT4E的磁感应强度达到了1.67 T。

线圈采用铜合金,电导率为 5.8×10^7 s/m 隔磁环采用铝合金,电导率为 3.3×10^7 s/m^[5]。

2 优化前的高温电磁机构温度场分析

2.1 温度场分析基础理论

高温电磁机构的线圈采用24 V直流电源供

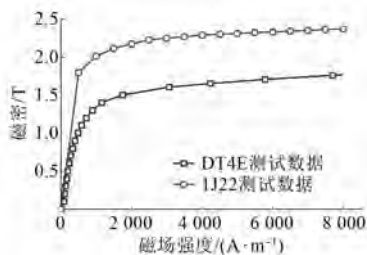


图2 导磁材料的B-H曲线

电,损耗为线圈的直流铜耗。由传热学基本理论可知,热量总是自发的由高温区域传递至低温区域,因此部件温度最终会趋于稳定。稳态热分析的能量平衡方程以矩阵形式表示:

$$[K]\{T\} = \{Q\} \quad (1)$$

式中:[K]为热传导矩阵,包含热系数、对流系数及辐射和形状系数; $\{T\}$ 为节点温度向量; $\{Q\}$ 为节点热流率向量,包括生成热。

传热方式主要包括3种:热传导、热对流和热辐射^[6]。理论公式为

$$\begin{cases} Q_{\text{con}} = -\lambda A_1 \frac{dT}{dx} \\ Q_{\text{con2}} = h A_2 \Delta T \\ Q_{\text{rad}} = \sigma_1 \varepsilon_1 A_3 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \end{cases} \quad (2)$$

式中: Q_{con} 、 Q_{con2} 、 Q_{rad} 分别表示热传导、热对流、热辐射时的流量; λ 为导热系数; A_1 为导热面积; dT/dx 为温度梯度; h 为对流换热系数; A_2 为对流面积; ΔT 为对流时两介质的温度差; σ_1 为斯特藩-玻尔兹曼常数(黑体常数); ε_1 为热辐射率(黑度); A_3 为辐射面1的面积; F_{12} 为辐射面1到辐射2面的形状系数; T_1 为辐射面1的热力学温度; T_2 为辐射面2的热力学温度。

结合该模型的实际工况,因为该温度下电磁机构材料颜色、结构所对应的热辐射强度较低,所以考虑的传热方式主要为热传导和热对流。同时需要说明的是,式(1)和式(2)均为温度场分析的理论基础或矩阵表征,下文将给出求解时的边界条件以及材料属性。

2.2 电磁场分析及损耗计算

图3为高温电磁机构额定工况下的铜耗分布。损耗主要集中在该线圈处,损耗密度平均值约为 $1.11 \times 10^6 \text{ W/m}^3$ 。

由图3可知,直流铜耗在部分区域分布不均

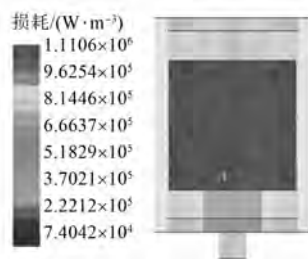


图3 额定工况下的直流铜耗分布

匀,这是由于在模型求解时,有限元计算的是高斯积分点上的损耗,而显示的则是节点上的损耗^[7]。

2.3 温度场求解边界条件

在进行温度场求解时,将电磁场中求得的线圈损耗作为温度场求解时的热源,此外依据电磁机构的实际结构,考虑装配间隙和接触方式,正确添加相应的边界条件,由第2.1节的相关理论:散热方式为热传导以及热对流,设置不同材料的热导率以及材料的表面散热系数,模型各部件材料的热导率如表2所示。

表2 电磁机构各部件材料的热导率 W/(K·m)

材料	1J22	DT4E	铝合金	铜	绝缘
数值	42	36	144	400	0.22

同时,设置外壳与空气之间的对流换热系数,主要为自然对流方式,采用简化空气模型所对应的对流散热系数,数值为 $5 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$,以上便是边界条件的设置。

2.4 优化前的温度场求解

基于以上分析,对优化前的高温电磁机构温度分布进行研究,结果如图4所示(环境温度:200℃)。

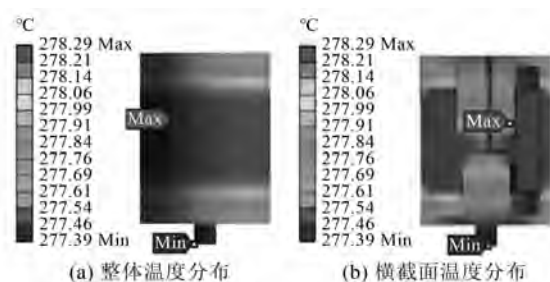


图4 优化前的温度分布

从图4可以看出,优化前的高温电磁机构达到稳态时最高温度为278.29℃,主要分布在线圈

处;最低温度为 277.39 ℃,主要分布在动铁心底部。这是由于线圈为内部生热源,动铁心底部远离线圈,温度相对较低。由于各部件相对紧凑、益于传热,整个机构温度差小于 1 K。结合表 1 可知,优化前的结构不能满足该要求。

3 高温电磁机构的优化设计及分析

由第 2 节分析可知,高温电磁机构的结构需要进行优化,在考虑安装尺寸限制的情况下,进一步提升散热能力,满足高温环境下的工作要求。本节分别从线圈的角度和外壳的角度出发,提出了一种“线圈分段+段间导热环+外壳散热板”新型结构。

3.1 线圈分段+段间导热环结构设计

“线圈分段+段间导热环”结构示意图如图 5 所示。

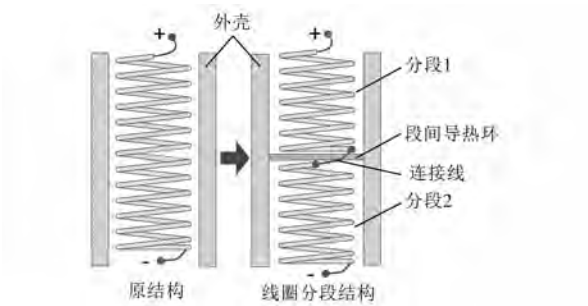


图5 “线圈分段+段间导热环”结构

原设计方案中的线圈设计匝数为 1 500 匝,总电阻设计为 R ;在所提出的“线圈分段+段间导热环”结构中,将线圈分为 2 段式结构,每段匝数为 750 匝,分段之间用截面积较大、长度较短的铜导线链接,连接点焊接,因此连接线电阻及接触电阻可以忽略,即两段式线圈总电阻依然保持为 R ,2 个分段线圈之间加装段间导热环,导热环采用传热率较高的铝合金,能更快降低线圈温升。

3.2 外壳散热板结构设计及优化

3.2.1 正交试验设计及结果

为了进一步改进散热结构,在原外壳的基础上设计了外壳散热板结构(图 6),将以下 3 个参数作为优化变量:散热板径向高度 h 、散热板的厚度 w 以及散热板的个数 n 。

从散热的角度分析,散热板径向高度 h 越大,散热效果越明显^[8];但工程中要根据产品的实际

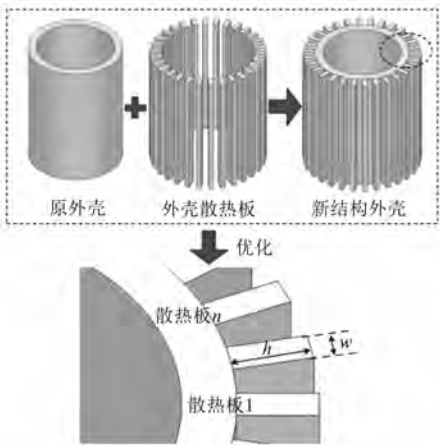


图6 “外壳散热板结构”结构示意图

尺寸来正确设计,此外散热板的厚度 w 和个数 n 也会影响散热面积,因此需要从正交试验的角度,确定 h 、 w 和 n 最佳组合,最大程度降低温升。试验因素和水平表如表 3 所示。

表 3 试验因素和水平			
水平/因素	个数 n	高度 h /mm	厚度 w /mm
1	15	1.5	0.6
2	20	2.0	0.8
3	25	2.5	1.0
4	30	3.0	1.2

考虑安装尺寸限制和加工工艺的情况下,设置了 4 个水平,即优化任务包含三因素四水平。采用全因素分析,分析次数至少为 64 次,而采用正交试验的方法仅需要 16 次^[9]。

在温度场中进行 16 组仿真求解温度分布,对求解出的 16 组最高温度进行直观极差分析,为了便于对比,将散热板的厚度 w 作为第三变量,温度变化如图 7 所示。

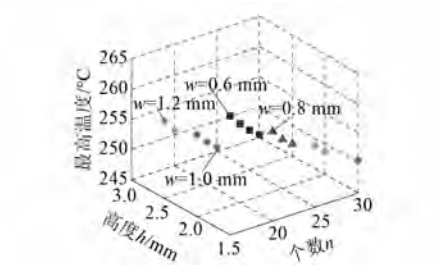


图7 三因素四水平下的最高温度分布

通过极差分析和图 7,得到影响散热效果的

主次因素依次为 $n>h>w$, 最优参数组合为 $n=30$, $h=3.0\text{ mm}$, $w=1.2\text{ mm}$ 。

3.2.2 正交试验方差分析

考虑极差分析存在不足, 即不能分析试验的误差, 同时也不能充分的利用试验数据所提供的信息^[10-11]。为了评估正交试验的误差大小并精确地估计出各个因素对试验结果的重要程度, 需开展显著性检验, 采用方差检验对结果验证, 结果如表 4 所示。

表 4 方差分析表

差异源	n	h	w	误差
SS	33.3	13.7	5.3	0.36
df	3	3	3	3
MS	11.1	4.6	1.8	0.12
F 值	92.5	38.3	15	—
F 临界值	$F_{0.01}(3,3) = F_{0.05}(3,3) = F_{0.10}(3,3) =$			—
	29.46	9.28	5.39	

表 4 中, SS 表示离差平方和, df 表示自由度, MS 表示平均离差平方和, F 为 F 值。本文完成了 $\alpha=0.01$ 、 $\alpha=0.05$ 、 $\alpha=0.10$ 3 个不同水平的显著性检验。由检验结果可知, 因素 n 对试验指标存在明显影响, 其次是因素 h , 最后是因素 w , 方差检验与极差法直观分析所示的结果相一致。

4 优化设计后的高温阀用电磁机构温度场分析及对比

4.1 优化设计后的温度分析结果

4.1.1 原外壳+线圈分段+段间导热环结构

图 8 为“线圈分段+段间导热环”的温度分布。与优化前的温度(图 4)相比, 温度平均下降了 10 K。由于所研究的高温电磁机构结构紧凑、尺寸较小, 线圈分段对于温度分布影响较小, 但是对于体积较大的电磁机构产品, 可以尝试将线圈分为合适的段数, 增大散热面积以优化温度分布。

4.1.2 外壳散热板+原线圈结构

添加散热板, 散热板材料为导热性良好的铝合金材料, 散热板与周围空气之间的换热方式依然为自然对流换热, 边界条件具体数值的设定同第 2.3 节。为了保证求解精度的准确性, 在电磁场和温度场中均应该对模型进行合理的剖分, 模



图 8 “线圈分段+段间导热环”的温度分布

型剖分如图 9 所示。

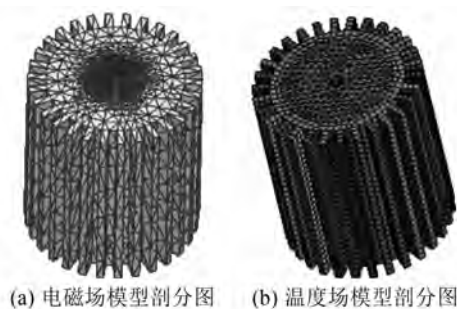


图 9 外壳散热板+原线圈结构剖分图

图 10 为“外壳散热板+原线圈”结构的温度分布, 即线圈不分段, 但是采用外壳散热板结构。与优化前的温度(图 4)相比, 温度平均下降了 36 K, 散热效果明显。

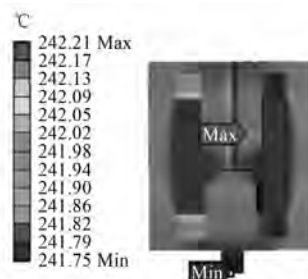


图 10 外壳散热板+原线圈结构温度分布

4.1.3 线圈分段+段间导热环+外壳散热板新型结构

图 11 为新结构的温度分布。

与优化前的温度(图 4)相比, 最高温度平均下降了 37 K。虽然与第 4.2 节中的“外壳散热板+原线圈”结构的温度分布相差较小, 但是整个机构中低温区域明显增多, 且线圈分段结构利于批量化、模块化生产, 在电磁机构线圈出现故障时, 容易分段排查故障并进行替换, 可以避免浪费导

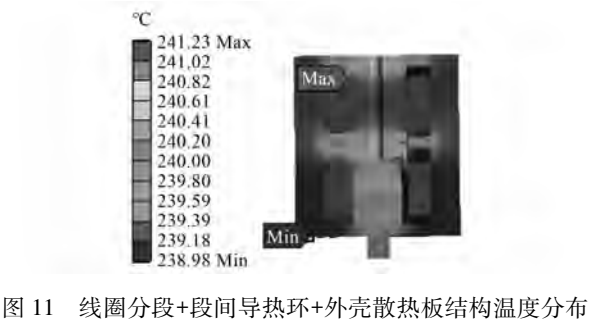


图 11 线圈分段+段间导热环+外壳散热板结构温度分布

线材料。

4.2 优化后的温度结果对比

图 12 为原结构、原外壳+线圈分段+段间导热环、外壳散热板+原线圈结构及优化后的新结构最高温度、最低温度的对比情况。

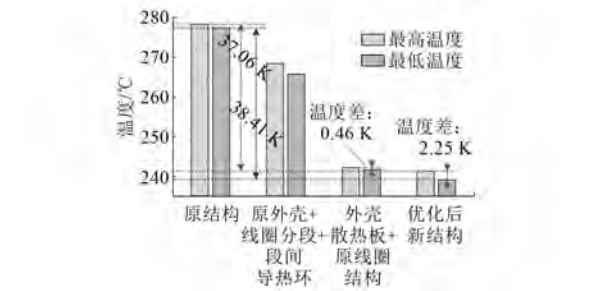


图 12 优化前后的最高、最低温度结果对比

可以看出：(1) 原结构中的最高温度为 278.29 ℃,最低温度为 277.39 ℃,采用所提出的“线圈分段+段间导热环+外壳散热板”新型结构后最高温度下降为 241.23 ℃,最低温度为 238.98 ℃,最高温度降低了 37.06 K,最低温度降低了 38.41 K,以原结构为基值,温度下降约 13.32%；(2) 在原线圈结构的基础上增加外壳散热板,散热能力明显增强,温度降低效果显著；(3) 优化后采用“线圈分段+段间导热环+外壳散热板”结构,温度降低最为明显,虽然与“外壳散热板+原线圈结构”相比温度降低不太明显,但部件的最高温度与最低温度之间的温度差由 0.46 K 增加至 2.25 K,且线圈分段结构在实际生产安装及故障检测时具有明显优势。

5 优化设计前后的电磁机构试验验证

为了验证所提出结构的合理性以及上述温度场分析结果的准确性,对优化设计前后的电磁驱

动进行温升试验。试验中温升试验箱最高保持温度为 150 ℃,受试验条件限制,选择 2 个温度点进行试验(140 ℃和 150 ℃)。试验设备以及对现有结构的改进实物如图 13 所示。

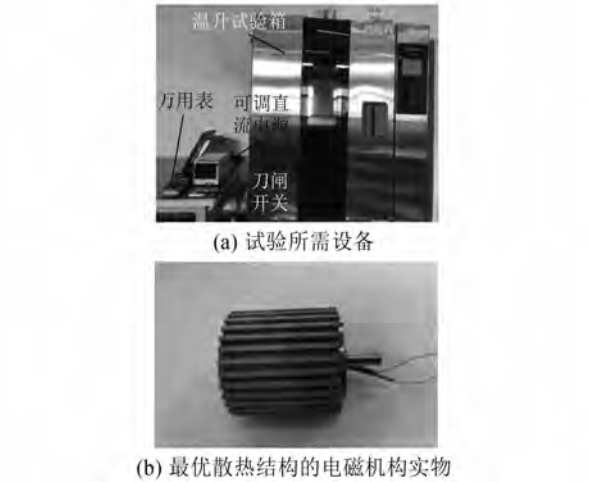


图 13 电磁机构试验验证

采用电阻法测线圈温升,热电偶和红外线测温测表面温升。电阻法测线圈温升的原理为

$$\Delta t = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (k + t_1) - (t_2 - t_1) \quad (3)$$

式中:Δt 为所求线圈温升;R₁ 为冷态电阻;R₂ 为热态电阻;铜导线时 k 的取值为 234.5,t₁ 为开始时的温度;t₂ 为结束时的温度。

因为温升试验箱为恒温箱,所以在本试验中,t₂-t₁ 接近为零,可忽略不计。

按照试验原理,测得的不同温度下的电阻值如表 5 所示。

表 5 不同温度下测量的电阻值				
测试温度/℃	原结构		新结构	
	R ₁ /Ω	R ₂ /Ω	R ₁ /Ω	R ₂ /Ω
140	48.1	53.5	48.1	50.7
150	50.2	56.2	50.2	53.0

由式(3)求得的试验温升数值与温度场仿真计算的数值对比,如表 6 所示。

由表 6 数据分析对比可知,试验温升与仿真温升在数值上相差较小,在误差允许范围内。由此,证明了上述分析的合理性以及所提新结构的工程实用性。

表 6 试验温升与仿真温升对比

测试 温度/℃	原结构/K		新结构/K	
	仿真	试验	仿真	试验
140	45.27	42.04	23.61	20.24
150	48.20	45.97	24.91	21.45

6 结 语

本文针对高温阀用电磁机构行业的工程需求,提出了一种“线圈分段+段间导热环+外壳散热板”新型结构,采用电磁场、温度场分析方法及正交试验优化原理,对其温度场分布进行了研究,并与优化前的结构进行了对比,最后加工样机进行了试验验证。主要创新及结论如下。

(1) 该机构中各部件相对紧凑、导热良好,因此各部件的稳态温差相对较小,高温区域较多,优化前的线圈温升较高,不能满足运行要求。

(2) 基于现有结构,提出了一种“线圈分段+段间导热环+外壳散热板”新型结构,采用正交试验原理得到的参数优化结构,在考虑安装尺寸的情况下最大程度发挥了机构的散热能力,以原结构中温度为基值,温度下降了约 13.32%。

(3) 分别研究了原结构、原结构+散热板、原外壳+线圈分段、线圈分段+段间导热环+外温度分布壳散热板,其中“线圈分段”结构便于线圈的模块化绕制,工程应用中可以以有限个最小线圈单元进行级连,发生故障时易排查替换故障单元;“段间导热环”利于线圈单元的热量向外壳散热;“外壳散热板”进一步增强了机构的散热能力,降低机构温升,实现了可靠运行,工程中可根据需要选择“仅线圈分段”、“仅外壳散热板”和“线圈分段+外壳散热板”等结构,以满足实际应用。

综合以上结论,本文中所涉及的分析及优化思路、新型散热结构对于研究高温阀用电磁机构

的温度场分布、热性能评价具有重要参考,为其他电磁线圈的工程应用领域提供了有价值的参考。

【参考文献】

- [1] 张光建,姚凯学,申时全. 航空电磁阀计算机测试系统的设计及实现[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(26): 200.
- [2] 孙玉慧,蔡志远. 航空阀用电磁铁的温升研究[J]. 电器与能效管理技术, 2019(7): 12.
- [3] 邵飞,王洪铭. 航空用燃气发生器和高温放气阀的设计原则及试验[J]. 航空动力学报, 2014, 29(3): 719.
- [4] 高风云. 1J22 软磁材料的真空退火[J]. 金属热处理, 2001(2): 32.
- [5] 秦鑫,安跃军,张志恒,等. 化工泵用新型复合鼠笼结构屏蔽电机驱动性能及多物理场分析[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(5): 53.
- [6] 毕晓舜,安跃军,杨维国,等. 真空干泵用屏蔽电机温度场仿真分析与试验[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(5): 64.
- [7] ZHANG Z, AN Y, LI M, et al. Influence of asymmetrical stator axes on the performance and multi-physical field of canned permanent magnet machine for vacuum dry pump with vector converter supply[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(4): 2129.
- [8] 吕遥. 液压外骨骼机器人油箱散热性能研究[D]. 成都:西南交通大学, 2019.
- [9] 肖旭东,雷武涛,钱瑞战,等. 基于正交试验设计方法的短舱涡流片空间位置优选[J]. 飞行力学, 2020, 38(5): 27.
- [10] 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.
- [11] 庞超明,黄弘. 试验方案优化设计与数据分析[M]. 南京:东南大学出版社, 2018.

欢迎订阅 2021 年《电机与控制应用》

联系地址:上海市武宁路 505 号《电机与控制应用》编辑部

邮编: 200063

电话: 021-62574990-462

邮箱: eec@seari.com.cn

国内邮发代号: 4-199

每册定价: 12.00 元

全年定价: 144.00 元