

汽车智能制动系统(ABS)电磁阀温度场分析

刘伟¹,朱为国²,单东升³,吴柳杰³

(1. 南京工业大学 机械与动力工程学院,江苏 南京 211800; 2. 淮阴工学院 机械工程系,江苏 淮安 223000;
3. 宁波赛福汽车制动有限公司,浙江 宁波 315121)

摘要:隔离电磁阀是汽车智能制动系统的核心部件,温度对电磁阀的控制性能有重要影响。基于傅里叶热传导定律和牛顿冷却方程,利用 Ansys 软件对 ABS 隔离电磁阀内部温度分布及热量传递进行仿真分析,结合实验得出电磁阀长时间工作最终处于一种热平衡状态,仿真结果与实验误差不超过 5%,说明仿真方法具有较高的可行性。运用拟合的方法得出电磁阀稳态温度与影响因数的函数关系,为后续产品检测提供参考。

关键词:汽车智能制动系统;电磁阀;线圈;Ansys;稳态温度

中图分类号:U463 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)01-0154-04

Temperature Field Analysis of Solenoid Valve of ABS

LIU Wei¹, ZHU Weiguo², SHAN Dongsheng³, WU Liujie³

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China;
2. Huaiyin Institute of Technology, Mechanical Engineering Department, Huaian 223000, China;
3. Ningbo Safe Brakes Systems Co., Ltd., Ningbo 315121 China)

Abstract: The isolation solenoid valve is the core component of the automotive intelligent brake system, and temperature has an important influence on the control performance of the solenoid valve. Based on Fourier heat conduction law and Newtonian cooling equation, the internal temperature distribution and heat transfer of ABS isolation solenoid valve are simulated and analyzed by Ansys software. The experimental results show that the solenoid valve is in a state of thermal equilibrium for a long time. The simulation result and experiment errors are not more than 5%. This indicates that the simulation method is of high feasibility. The fitting method is used to obtain the functional relationship between the steady state temperature of the solenoid valve and its influence factor. A reference is given to the subsequent product testing.

Keywords: intelligent automobile braking system; solenoid valve; coil; Ansys; steady state temperature

0 引言

汽车智能制动系统(ABS)具有响应速度快,制动性能好,布置灵活等特点,受到国内外许多汽车厂家和科研机构的重视^[1-2]。

ABS 系统中电磁阀长时间得电,产热散热是产品设计初期不容忽视的问题。王露等研究了直动电磁阀温升过程^[3]。黄琳敏等用瞬态热路法对直流电磁铁进行仿真分析^[4-5]。刘超等分析了线圈参数对焊接过程的影响^[6]。本文以 ABS 中某隔离电磁阀作为研究对象,通过有限元分析线圈产热及热量的传递过程,结合实验研究温度对电磁阀控制性能的影响,为后续设计优化提供参考依据。

1 ABS 结构原理

如图 1 所示,汽车智能制动系统由制动主缸、踏板模

拟器、主动增压模块、ABS 模块和制动轮缸组成。汽车启动时,踏板模拟器与主动增压模块的 6 个隔离阀由高压开启,并用低压保持工作状态,这表示电磁阀需要连续工作几个小时或更长的时间。

2 电磁阀结构及温度场理论分析

2.1 电磁阀结构

电磁隔离阀结构如图 2 所示,组成部件包含隔磁管、动铁、推杆、阀体、弹簧、阀座等。线圈由轭铁、绕组、骨架和封铁组成。

2.2 线圈发热与散热

线圈通电后,电能转化为热能。电阻消耗的热功率 P 在体积 V 的线圈绕组中均匀发热,可定义单位体积生热速率为:

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(11502090);江苏省教育厅高校自然科学研究重大项目(14KJA460001);江苏省六大人才高峰资助项目(2013-ZBZZ-042)

第一作者简介:刘伟(1991—),男,江苏高邮人,硕士研究生,研究方向为汽车制动液压系统。

$$\dot{q} = \frac{P}{V} = \frac{I^2 R}{V} \quad (1)$$

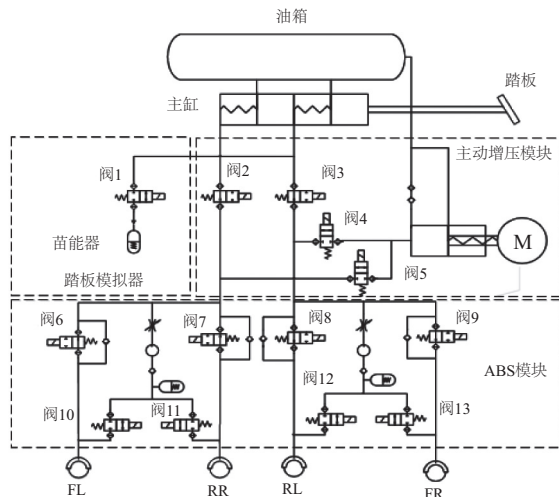


图1-阀5为隔离阀;阀6-阀9为增压阀;阀10-阀13为减压阀。

图1 IBS结构原理图

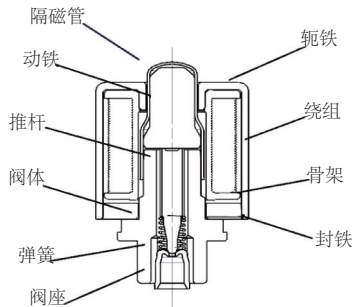


图2 电磁阀的结构

通电线圈作为一个固定的热源,热量散失路径如图3所示。

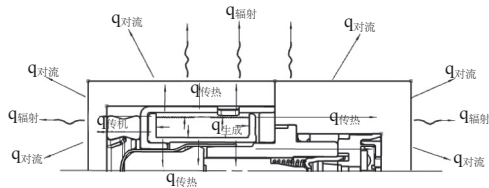


图3 线圈散热简图

2.3 稳态热传导

热传导遵循傅里叶定律:

$$\dot{q} = -k \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

式中: \dot{q} 为热流密度, W/m^2 ; k 为导热系数。

2.4 热对流

ECU和HCU表面与空气直接接触,温度差形成自然对流。自然对流可用牛顿冷却方程表示:

$$\dot{q} = h(T_w - T_f) \quad (3)$$

式中: q 为热流密度, W/m^2 ; h 为对流换热系数 $W/(m^2 \cdot k)$; T_w 为环境温度; T_f 为表面温度。

3 电磁阀温度场的有限元分析与仿真

3.1 网格划分与边界载荷施加

为了节省计算机资源提高仿真效率,采用1/4模型。并对螺纹孔、倒角等进行适当简化。添加的材料属性如表1所示。

表1 材料属性表

名称	材料	密度/ (kg/m^3)	传导率/ (W/mk)	比热/ ($J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)
绕组	漆包线	7 000	344	2 093
轭铁等	冷轧钢	7 200	52	447
阀体等	1215	7 870	52	472
隔磁管	不锈钢	7 750	18	500
ECU等	注塑件	950	0.35	229
HCU	铝合金	2770	155	875
空气	—	1.161 4	0.026 7	1 007

形状规则的结构一般采用扫掠网格或多区网格,不规则的结构采用四面体网格划分。

线圈绕组发热作为内部热源,由式(1)得生热率为 $4.14 \times 10^{-3} W/m^3$,环境温度设定 $40^\circ C$ 。ECU与周围空气之间的对流换热系数为 $6.5 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$,HCU与周围空气之间的对流换热系数为 $12.0 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

3.2 求解及后处理

采用默认求解器,显示仿真结果,如图4-图7所示。

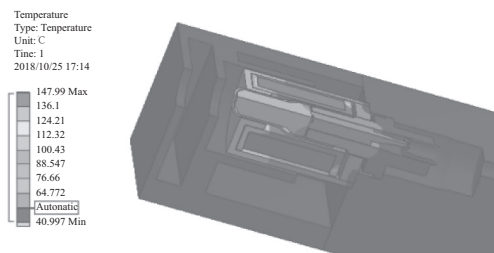


图4 稳态温度场云图

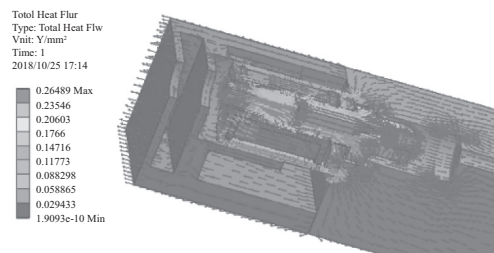


图5 热流量的总量云图

图4所示温度场云图反映了线圈和电磁阀温度分布

情况。最高温度位于绕组下部的中心位置,达到 148℃。图 5 反映了绕组产生的热量在内部的传热情况。最大热流量为 0.26 W/mm²,位于阀体与 HCU 的接触面上。

图 6 和图 7 分别反映了热流量在线圈径向和轴向的传递情况。



图 6 热流量 x 分量矢量云图



图 7 热流量 z 分量矢量云图

4 温度场实验测试

4.1 实验平台搭建

以 ABS 样件为研究对象,模拟电磁阀在实际工作过程中的温升情况。由恒温箱控制环境温度,可变电源控制线圈的输入电流,对样品 6 个位置点进行温度采集,采集点位置如图 8 所示。采集频率为前 30 min 每 2 min 采集 1 次,30 min 后每 5 min 采集 1 次。

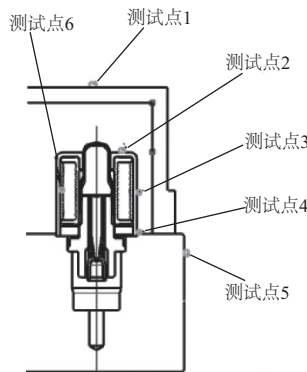


图 8 实验模型

4.2 结果分析

在 40℃ 的环境温度下,分别测得样品 6 个测量点的温度变化,如图 9 所示。48 min 后,各个测量点的温度趋于稳定。仿真和实验测得各点稳态温度对比如表 2 所示,误差不超过 5%。不同条件下线圈表面温升特性见图 10。

表 2 采集温度与仿真对比

编号	位置	仿真温度/℃	实验温度/℃	误差/%
测试点 1	ECU 顶端	40.0	41.0	-2.5
测试点 2	轭铁顶部	82.4	80.7	2.1
测试点 3	轭铁外表面	75.3	72.5	3.7
测试点 4	封铁	55.0	53.9	2.0
测试点 5	HCU 侧面	53.8	51.4	4.4
测试点 6	轭铁绕组之间	112.0	106.6	4.8

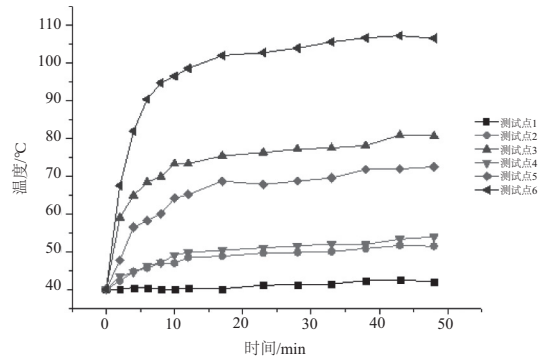
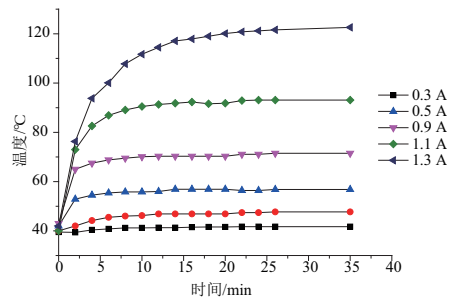
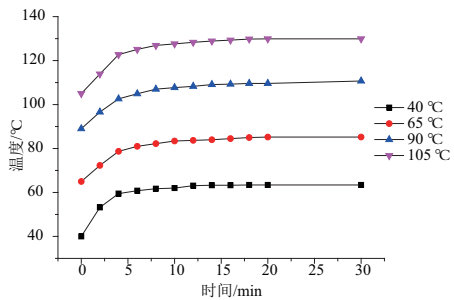


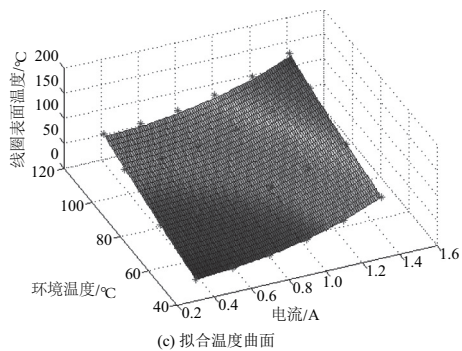
图 9 样件各测量点温升



(a) 输入电流-稳态温度



(b) 环境温度-稳态温度



(c) 拟合温度曲面

图 10 线圈表面温升特性

图 10(a)所示为线圈在 40℃ 环境温度下输入不同的电流得到线圈表面稳态温度。输入电流越大,稳态温度越高。图 10(b)所示为线圈输入 0.8 A 电流在不同环境温度下最后达到的稳态温度。环境温度越高,稳态温度越高。将离散点拟合曲面得到线圈表面稳态温度 (T) 与输入电流 (I)、环境温度 ($^{\circ}\text{C}$) 的关系曲线如图 10(c) 所示,拟合曲面函数为: $T=75.61 I^2-41.18I+5.682+T_0$ 。

5 结语

IBS 系统电磁阀长时间得电线圈产生的热量会使得电磁阀工作环境温度升高,过高的温度会影响电磁阀的控制特性,针对此问题,本文通过有限元方法并结合实验对电磁阀稳态温度场进行研究。

1) 线圈产生的热量使得系统各部分温度升高,最终到达某个稳定温度即系统处于热平衡状态,线圈产生的热量等于系统表面散失的热量。

2) 利用 Ansys 软件对 IBS 隔离电磁阀内部温度分布及热量传递过程进行仿真分析,并将仿真结果与实验结果进行比较,误差不超过 5%,说明本文所采用的仿真方法的可行性。

3) 通过拟合的方法得出电磁阀稳态温度与输入电

流、环境温度的关系函数: $T=75.61 I^2-41.18I+5.682+T_0$,可为后期产品测试提供参考。

参考文献:

- [1] JONNER W D, WINNER H, DREILICH L. Electro—hydraulic brake system—the first approach to brake-by-wire technology, 10.4271/960991[R]. New York: SAE, 1996.
- [2] KWON Y, KIM J, CHEON J, et al. Multi-objective optimization and robust design of brake by wire system components[J]. SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, 2013, 6(3): 1465-1475.
- [3] 王露, 刘潜峰, 薄涵亮. 直动电磁阀线圈温升实验研究[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(9): 479-482.
- [4] 黄琳敏, 陈德桂, 张敬菽, 等. 应用瞬态热路法计算直流电磁铁的温升[J]. 低压电器, 2003(2): 12-15.
- [5] 黄琳敏, 陈德桂, 张敬菽. 计及物理参数随温度变化时螺管电磁铁温度场和瞬态热路的仿真分析[J]. 电工技术学报, 2003(5): 27-31.
- [6] 刘超, 余进, 蒋恺, 等. 基于 ANSYS 铜钢高频感应熔焊不同工况下温度场[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(5): 48-52.

收稿日期: 2019-05-17

(上接第 110 页)

表 3 正交实验安排及结果

编号	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D	应力释放率/%
	激振时间/min	相位差	激振电压/V	工件转速/(r/min)	
1	100	0	10	1	26.4
2	100	$\pi/4$	20	2	19.3
3	100	$3\pi/4$	30	4	15.8
4	150	0	20	4	25.2
5	150	$\pi/4$	30	1	32.2
6	150	$3\pi/4$	10	2	18.5
7	200	0	30	2	23.0
8	200	$\pi/4$	10	4	23.8
9	200	$3\pi/4$	20	1	19.0

表 4 正交实验结果分析 单位: %

编号	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D	应力释放率
I_1	61.5	74.6	68.7	77.6	22.6
I_2	75.9	75.3	70.6	60.8	
I_3	65.8	53.3	71.0	64.8	
\bar{I}_1	20.5	24.9	22.9	25.9	
\bar{I}_2	25.3	25.1	23.5	20.3	
\bar{I}_3	21.9	17.8	23.7	21.6	
T	4.8	7.3	0.8	5.6	

4 结语

1) 本文简单介绍了二维振动合成原理以及二维振动系统各部分的设计。

2) 对二维振动系统进行动力学分析,从理论上验证二维振动系统的可行性;采用 PSV 多普勒激光测振仪对二维振动系统进行固有频率、激振振幅等振动特性的检测,验证了二维振动系统的有效性。

3) 通过测量二维振动法处理前后冷挤压孔周边的残余应力大小,对比发现二维振动法处理后平均消除率达到 22.6%,最高可达 32.2%;通过对正交实验数据处理,发现相位差是影响振动时效处理效果的最关键因素,其次是工件转速、激振时间、激振电压。

参考文献:

- [1] 赵勇, 甘学东, 倪孟龙. 飞机结构抗疲劳强化技术应用思考[J]. 航空制造技术, 2015(3): 8-11.
- [2] 胡晓东. 振动时效技术的应用与发展[C]. 北京: 中国铸造协会会议论文集, 2008: 398-404.
- [3] 庆光蔚. 振动时效衍生新型工艺技术特点与应用[J]. 热加工工艺, 2015, 44(8): 8-11.
- [4] GUO P, KORNEF E. An analysis of the surface generation mechanics of the elliptical vibration texturing process[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2013, 64: 85-95.
- [5] 王壬炎, 王时英. 超声振动时效的机理及实验研究[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(2): 59-62.
- [6] 林书玉. 超声换能器的原理及设计[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [7] 黄志祥. 基于超声振动辅助的钛合金铆钉铆接技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [8] 汪彦军, 贺西平, 张频. 阶梯形变幅杆的放大性能[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2007, 35(4): 52-54.
- [9] 黄兴山, 卢清华, 何琼. 新型直圆柔性铰链的设计与分析[J]. 机电工程技术, 2017, 46(11): 1-4.

收稿日期: 2019-01-02