

铁路信号继电器的温度场分析及试验验证

李文华, 马思宁, 沈培根

(河北工业大学, 天津 300130)

摘要: 建立了铁路信号继电器在热-电耦合作用下的数学模型, 通过得到的有限元模型分析了不同环境温度下铁路信号继电器温度场的变化情况, 仿真计算过程中考虑了环境温度以及温度的冲击。结果表明: 铁路信号继电器的温升随环境温度的升高而降低; 触头的温度从室温到稳态温度呈对数增长, 并计算得到触头的热时间常数, 推导出触头温升的理论曲线; 温度冲击对铁路信号继电器影响较大, 触头温度与环境温度呈正相关。

关键词: 铁路信号继电器; 温度场分析; 有限元计算; 热电耦合

中图分类号: U284.71

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2016.06.013

Railway Signaling Relay Temperature Field Analysis and Experimental Verification

LI Wenhua, MA Sining, SHEN Peigen

(Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Mathematical model of the railway signaling relay was established under the effect of heat-electricity coupling. Railway signaling relay temperature field variation under different temperature was analyzed with the finite element model considering environment temperature, and impact of the temperature was taken into consideration in the process of simulation calculation. It indicated that relay temperature rise decreased with the environmental temperature rise; Contact temperature from room temperature to the steady state temperature exponentially raised, and the thermal time constant of the resistance was calculated to deduce the theory of contact resistance temperature rise curve; Temperature had a greater impact on the contact, and contact temperature and environmental temperature were positively correlated.

Keywords: railway signaling relay; thermal field analysis; FEM analysis; heat-electricity coupling

0 引言

铁路信号继电器是铁路系统中重要的部件, 其工作可靠性直接影响到铁路系统的可靠性和安全性。影响铁路信号继电器寿命的主要影响因素有热、电、机械、化学等方面, 铁路信号继电器损耗最多的元件为触头^[1], 而造成触头磨损主要是热和电。因此研究铁路信号继电器在环境温度改变的条件下的发热, 可以有效地避免因为温度过高而导致使用寿命降低甚至损坏。同时, 在铁路信号继电器的设计中, 温度场的分析研究对铁路信号继电器的缩小体积、节约原材料等方面有着重

要的意义。

本文参考相关文献^[1-11]对铁路信号继电器在不同环境温度下进行了稳态温度场分析研究, 并通过瞬态热分析方法研究了触头在通电开始时的温度变化曲线, 以及温度冲击对触头温度的影响。此外, 通过温度试验对仿真结果进行验证, 分析了误差的来源。

1 有限元分析

铁路信号继电器在工程应用中, 由于铁路信号继电器模型的负载、载荷以非线性居多, 通过常规解析法和数值法很难对其进行温度场仿真研究, 故本文选择有限元分析方法, 通过有限元分析软件 ANSYS 对铁路信号继电器正常工作状态下的温度场进行分析研究。

1.1 建模

本文的研究对象为铁路信号系统中某型号安全型无极电磁继电器（文中简称铁路信号继电器），主要用于铁路信号控制设备中，具有动作可靠，性能稳定等特点。在实际工程应用中，触头间的相互接触并不是两者之间的完全接触，真正接触的仅仅是粗糙表面凸出来的极小的接触斑点。因此需在触头之间建立等效电阻从而模拟触点吸合时的接触斑点及接触电阻^[4]。通过 Pro/E 软件建立铁路信号继电器的三维立体模型如图 1 所示，并将建好的模型导入 ANSYS 中。

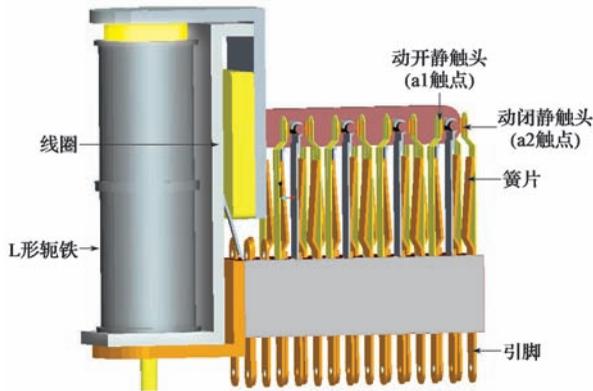


图 1 铁路信号继电器几何模型

将导入 ANSYS 的几何模型定义工程数据、零件行为以及连接关系。由于铁路信号继电器模型的几何形状不规则，因此选择协调分片算法进行网格划分，考虑了零件实体间的相互影响采用小公差，应用网络控制对模型进行适当的网格划分。

1.2 载荷与边界条件

由于铁路信号继电器工作时温度场和电场的交叉作用，故采用热-电耦合思路模拟施加电流时所引起的发热情况。将铁路信号继电器的温度场与电场进行顺序耦合，分析铁路信号继电器在热电应力作用下温度场的变化，具体耦合步骤如下：在电场分析中计算出热源数据；将计算得出的数据作为温度场的分析载荷进行温度场计算；温度场的分析结果又影响电场分析数据，如此循环直至达到平衡。

分析铁路信号继电器的热电效应时，对线圈通以 DC 24 V 电源，对继电器接点通以 DC 24 V 1A 阻性负载，为减少电磁系统与接点系统相互影响，在进行仿真时只选择一个触点回路进行仿真计算。

当铁路信号继电器工作时，热传导方程为：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{(\nabla \varphi)^2}{\rho_E} = \rho C \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (1)$$

式中： K 为导热系数； T 为物体温度； $\frac{(\nabla \varphi)^2}{\rho_E}$ 为铁路信号继电器热源^[5]； ρ 为质量密度； C 为物体比热容。

进行稳态热传导分析时 $\rho C \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)$ 为 0。

铁路信号继电器的电势呈轴对称形式，其电势传导方程为

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho_E} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\rho_E} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{\rho_E r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0 \quad (2)$$

式中： φ 为电压； ρ_E 为材料电阻率。

在铁路信号继电器温度场分析时，根据热量传递的 3 种基本方式（热传导、热对流、热辐射），推导计算出各环境温度下的综合散热系数，并将综合散热系数和电应力作为载荷施加在铁路信号继电器模型上。

2 稳态热分析

当铁路信号继电器触点长期闭合时，铁路信号继电器内部处于稳态传热状态，系统的净热流为零^[7]，发热功率等于散热，其热分析的能量平衡方程为

$$[K]\{T\}=[Q] \quad (3)$$

式中： $[K]$ 为传导矩阵； $\{T\}$ 为节点温度矢量； $[Q]$ 为节点热流率矢量。

2.1 常温环境下温度场分布

当铁路信号继电器的环境温度为 25℃ 时，对线圈通 DC 24 V 电源，对触点回路通以 DC 24 V 1A 阻性负载。常温环境下铁路信号继电器的温度场分布云图如图 2 所示。

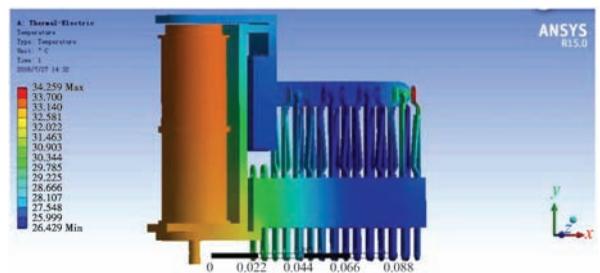


图 2 常温条件下铁路信号继电器温度场分布云图

根据常温环境下的温度云图，可以得出铁路信号继电器在工作时主要的热源是电磁系统的线圈和接触导电系统的触头。在接触导电系统内，触头接触处的温度最高，由于热电效应，触头处热梯度最高，导致触头处热应力集中，在长期工作的冲击下，容易造成触头的磨损和材料转移。

2.2 环境温度对温度场的影响

根据稳态热分析原理，针对不同的环境温度情况，对铁路信号继电器进行温度场分析研究。由于铁路信号继电器的工作环境温度为 -40~60℃，因此在仿真时选取低温 -40℃、-10℃，常温 25℃，高温 40℃、55℃，作为仿真参考环境温度^[8]。通过有限元仿真软件，对环境温度进行仿真研究。当铁路信号继电器工作时，选择铁路信号继电器 6 个元件作为参考点，研究环境温度对铁路信号继电器的影响，参考点的选取

如图 1 所示, 在不同环境温度下参考点的温升如图 3 所示。

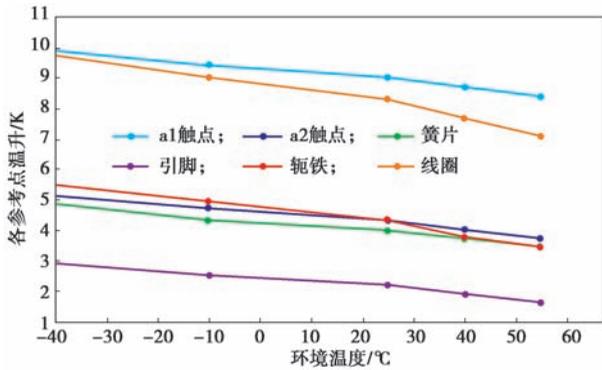


图 3 参考点的温升随环境温度的变化

当铁路信号继电器工作时, 铁路信号继电器的温度随环境温度的升高而升高, 铁路信号继电器整体的温升随着环境温度的升高而下降, 这主要是因为铁路信号继电器温度升高导致空气的对流增加并且铁路信号继电器对外辐射热量增多, 散热量的增幅大于热效应产热的增幅, 从而导致铁路信号继电器内部的温升下降。由于各参考点元件的材料属性不同, 材料属性随温度变化也不尽相同, 导致参考点温升的下降速率不同, 线圈的温升下降速率大于其他参考点温升的下降速率。

3 瞬态热分析

铁路信号继电器的温度随时间而变化的导热过程称为非稳态导热。在工作条件电应力不变的条件下, 铁路信号继电器非稳态导热根据实际情况可以分为两大类: 铁路信号继电器工作时内部热量的堆积导致温度趋于恒定值; 铁路信号继电器外部环境温度的改变。进行非稳态研究时, 在工程上一般用瞬态热分析的计算方法分析研究温度场, 在这个过程中铁路信号继电器的生热、边界条件以及系统内能随时间都有明显的变化。根据能量守恒原理, 此时系统平衡方程可以表示为

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q\} \quad (4)$$

式中: $[K]$ 为传导矩阵, 包含热导率, 对流换热系数及热辐射率的形状参数; $[C]$ 为比热矩阵, 考虑系统内能的增加; $\{T\}$ 为接点温度矢量; $\{\dot{T}\}$ 为温度对时间的导数; $\{Q\}$ 为节点热流率矢量, 包含热生成。

在瞬态分析时, 载荷是与时间有关的函数, 同时铁路信号继电器瞬态温度场分析时各参数除了和时间有关外, 还和温度有关, 为非线性分析^[8]。将温度 T 、时间 t 带入上式, 式 (4) 可以表示为

$$[C(T)]\{\dot{T}\} + [K(T)]\{T\} = \{Q(T, t)\} \quad (5)$$

由于触头是铁路信号继电器损耗最多的元件, 因此本文主要研究接点系统触头 (包含接触电阻) 的温

度变化曲线。

3.1 铁路信号继电器通电触头瞬态分析

本文研究铁路信号继电器的工作制均为长期工作制, 在稳态仿真研究中, 对其达到稳定状态的温升的情况进行分析研究。当铁路信号继电器通电开始时, 触头的温度从室温到稳定温度存在一个上升阶段, 因此, 利用瞬态热分析方法, 对铁路信号继电器正常工作状态下通电 1 h 进行仿真研究。通过有限元分析软件, 对触头的温度变化进行求解分析, 其温度变化曲线如图 4 所示。

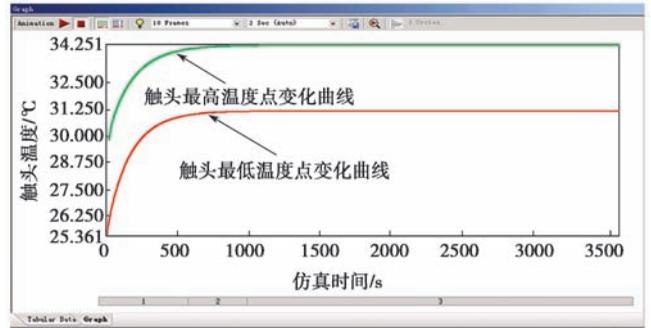


图 4 触头瞬态温升仿真结果

本文将触头最高温度点作为触头温度的研究对象, 当铁路信号继电器通电后, 触头的温度随时间按对数规律增长。当铁路信号继电器的发热情况与散热情况达到平衡时, 触头的温度不再明显变化, 并稳定在 34.2°C。

由于电场与温度场是顺序耦合关系, 先计算电场在不考虑热应力条件下的情况, 再计算两场相互作用下的温度场, 因此在瞬态热分析的起始点, 触头存在一定的温升。

当铁路信号继电器工作状态平衡时, 铁路信号继电器产生的功率损耗等于散失到周围的介质中的热量, 根据牛顿公式可得

$$\tau_w dt = \tau dt + \frac{cm}{K_T A} d\tau \quad (6)$$

式中: K_T 为综合散热系数; A 为有效散热面积; τ 为发热体的温升; c 为比热容; m 为发热体的质量。

令

$$T = \frac{cm}{K_T A} \quad (7)$$

式中: T 为热时间常数。

热时间常数与其比热容 c 、质量 m 、综合散热系数 K_T 、有效散热面积 A 有关, 表示电器热惯性的大小^[10]。当电器长期工作时, 按理论推导可得: 当 $t=4T$ 时, $\tau=0.98\tau_w$; 当 $t=T$ 时, $\tau=0.632\tau_w$ 。结合触头温度仿真曲线可以计算出热时间常数为 159 s, 达到稳定温升的时间为 636 s。通过式 (6) 的推导计算得到触头的温升 τ 与时间 t 的理论曲线, 如图 5 所示。

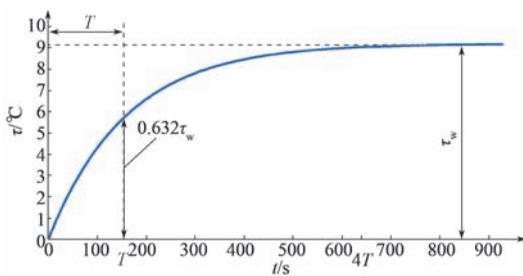


图 5 触头温升理论曲线

3.2 温度冲击仿真研究

将高温与低温间的转换时间小于 3 min 的温度循环试验称为温度冲击试验,各温度保持时间为 30 min,循环次数至少 3 次。铁路信号继电器工作时,其系统突然开启有可能造成铁路信号继电器环境温度的快速升高,环境温度的剧烈变化,又有可能造成材料开裂、接触不良、产品性能退化等问题,因此,本文利用瞬态热分析方法,对铁路信号继电器进行温度冲击仿真。

考虑到铁路信号继电器的工作环境温度,温度冲击仿真的温度选择 25~55℃,从室温变化到高温的时间为 3 min,并且高温和室温各持续 30 min。为减少仿真计算工作量,选 3 个周期进行仿真研究。

温度冲击仿真的温度与时间变化关系如图 6 所示。

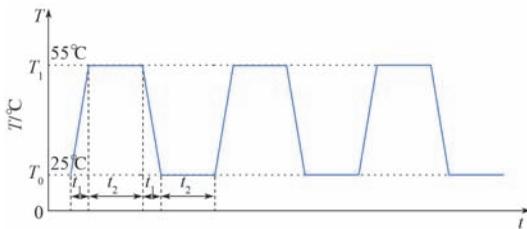


图 6 温度冲击仿真温度与时间关系

图 6 中 T_0 为 25℃, T_1 为 55℃, t_1 为温度转换时间 180 s, t_2 为温度保持时间 1 800 s。

利用有限元软件对设计的温度冲击试验进行温度场瞬态仿真,触头的温度变化情况如图 7 所示。

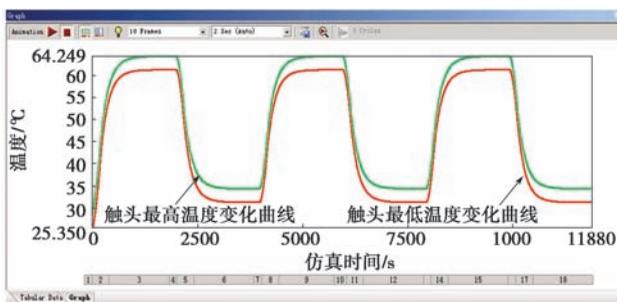


图 7 温度冲击仿真中触头温度变化曲线

通过温度的变化图形可知,当环境温度突然变化时,触头的温度随环境快速改变。此时,环境温度的升高导致触头周围环境的热量增加,通过对流以及热辐射环境温度对触头的影响大于其本身的热电效应,触头温升的增加与环境温度的提高呈线性关系。当环境温度开始稳定时,空气的对流与热辐射趋于稳定,

触头温升的变化受本身的热电效应影响,按对数形式趋于平衡。同理,当环境温度下降时,触头通过周围环境空气的对流和热辐射,使触头的散热量增加,此时触头温度与环境温度变化呈正相关,当环境温度达到室温时,触头自身温度在热电效应的作用下,开始趋于平衡。

根据触头的温度仿真曲线可知:当环境温度剧烈变化时,铁路信号继电器的温度随环境温度线性变化;当环境温度趋于平衡时,由于铁路信号继电器的热电效应,铁路信号继电器的温度按对数形式达到稳态温度。

4 试验验证

根据铁路信号继电器的稳态研究分析,以及光纤温度传感器的适用温度范围,本文在 25℃、40℃、55℃环境温度下,对铁路信号继电器进行了温度测试试验。为确保环境温度的稳定,并减少湿度对试验的影响,本文选取 3 个综合试验箱。同时,选择光纤温度传感器进行温度测量,以提高试验温度测量的准确性。考虑到光纤探头对铁路信号继电器工作的影响,选择簧片、引脚、轭铁 3 个元件作为参考点进行数据测量。

4.1 试验数据

在各环境温度下,试验湿度为 40%,利用 DC 24 V 电源和可调电阻箱,对线圈通 DC 24 V 电源,对触点回路连接 DC 24 V 1A 阻性负载。利用光纤温度传感器记录簧片、轭铁、引脚的温度,当生热和散热平衡时,记录试验数据。将试验测得数据与仿真结果进行对比,其结果如表 1 所示。

表 1 试验温度与仿真结果对比

环境温度	测试点	实测温度/℃	仿真温度/℃	误差
25℃	簧片	29.6	29.048	1.86%
	引脚	27.3	27.212	0.32%
	轭铁	28.6	29.369	2.69%
40℃	簧片	43.7	43.757	0.13%
	引脚	41.5	41.916	1.00%
	轭铁	43.2	43.803	1.39%
55℃	簧片	58.2	58.491	0.50%
	引脚	56.1	56.666	1.01%
	轭铁	57.6	58.460	1.49%

为了更好地分析研究仿真数据与实测数据的区别,定义仿真数据为 T_0 、稳定状态下的实测数据为 T_1 。通过 $\frac{|T_1 - T_0|}{T_1} \times 100\%$ 计算得到各环境温度下试验数据与仿真数据之间的误差。

对比实测数据与仿真数据的差异可以发现,引脚的测试温度低于仿真结果值,这是因为引脚与铁路信号继电器内部元件相比,与外界空气的对流较多,便于其产生的热量向外扩散,导致仿真结果偏高。通过

表1可知, 轭铁的实测温度一直低于仿真温度值, 其原因主要是由于轭铁的温度主要受线圈发热的影响, 在仿真模型中将多扎铜线进行了相应简化, 将线圈模型简化为空心圆柱, 其散热面积减小, 导致仿真结果偏高。

通过数据对比, 可知本文选择的有限元分析方法具有一定的可靠性, 其仿真结果与实际情况相比, 吻合较好。

4.2 结果误差分析

测量数据与仿真数据存在一定的误差, 这是由于本文的综合散热系数是由公式推导而得, 与铁路信号继电器真实工作情况有一定的差异, 通过计算得出的对流系数的施加是铁路信号继电器仿真误差的一个来源^[11]。另外, 有限元仿真未考虑触头的材料损耗, 同时试验测量簧片、轭铁、引脚的测试点与仿真选取点不能做到完全一致。虽然本文选取精度较高的光纤传感器进行温度测量, 但是仍不可避免存在一定的误差。

5 结语

本文利用稳态热分析方法, 对铁路信号继电器温度场进行了分析研究, 结果表明随着环境温度的升高, 铁路信号继电器整体的温升下降, 且线圈的温升速率下降较快。同时采用瞬态热分析研究方法, 对铁路信号继电器通电初期和环境温度冲击变化下的触头温度变化进行了仿真, 得到了触头在通电初期的温度变化情况和触头的理论温升曲线, 并对模型进行了环境温度冲击的仿真研究, 仿真结果表明触头的温度变化和环境温度呈正相关。

最后, 本文针对环境温度仿真对铁路信号继电器

进行了温度测试试验, 将试验数据与仿真结果进行对比, 并对存在误差的原因进行了分析研究。

参考文献:

- [1] 刘幅巾, 陆俭国, 王海涛, 等. 接触器式继电器的失效分析[J]. 电工技术学报, 2011(1): 81-85.
- [2] 陈锡栋, 杨婕, 赵晓栋, 等. 有限元法的发展现状及应用[J]. 中国制造信息化, 2010, 39(11): 6-8.
- [3] Chari M V K, Silvester P P. Finite elements in electrical and magnetic field problems[M]. London: Wiley, 1980.
- [4] 梁盼望, 李震彪, 何整杰, 等. 反复短时工作制下密封电磁继电器瞬态热分析仿真[J]. 电工技术学报, 2011(1): 57-62.
- [5] 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 1998.
- [6] 谭志龙, 陈松, 管伟明, 等. AgNi10 触头材料闭合接触阶段的热-电-力耦合分析及实验研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2012(2): 276-280.
- [7] 杨志铭. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 33
- [8] 铁路信号继电器试验方法: GB/T 6902—2010[S].
- [9] 谢龙汉. ANSYS FLOTTRAN 流体及热分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [10] 徐志红. 电器理论基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [11] 苏秀苹, 陆俭国, 刘幅巾, 等. 小型直流电磁继电器温度场仿真分析[J]. 电工技术学报, 2011(8): 185-189.



作者简介: 李文华(1973-), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能电器及其通信技术、电器可靠性及检测技术。

动态消息

《机车电传动》微信公众号 上线试运行

为加快期刊数字化进程, 更好地传播学术和服务读者, 《机车电传动》微信公众平台于2016年11月上线试运行。这是《机车电传动》期刊在数字化建设上的又一新举措。

《机车电传动》微信公众平台将通过图文、论文下载、资讯消息推送等多种形式, 让读者共享本刊优秀论文和最新资讯, 共建学术期刊互动交流的新家园。由此,

读者通过一部手机, 即可不择时地遍享期刊网站平台发布的信息, 同时也可分享微信公众平台推送的国内外最新研究动态及发展前沿技术等资讯。

期待各位专家、作者、读者积极建言献策, 共同建设好本刊微信公众平台。欢迎大家查找公众号“机车电传动”、“jcdcd1960”或直接扫描二维码关注期刊的官方微信公众平台。

