

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.04.015

基于红外热成像的电梯变频器热响应特性研究*

郑 波¹, 徐金海¹, 汪 宏¹, 徐 雷¹, 唐 波^{2*}

(1. 杭州市特种设备检测研究院, 浙江 杭州 310003; 2. 中国计量大学 计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:针对电梯变频器因电子元器件过热导致电梯停运问题,对红外热成像无损检测系统和电梯变频器的主要发热原因进行了理论研究,在此基础上提出了一种基于红外热成像的非接触式电梯变频器表面温度测量方法。基于热力学理论和红外辐射基本定律,建立了单位面积热辐射率与表面发射率和温度的数学表达式,以电梯控制柜中的变频器为监测对象,对其运行过程瞬态热特性进行了测试。研究表明:电梯变频器表面发热率变化对温度幅值影响较小,获取的热图像能明显区分出电路板中的不同发热区域;测试结果与理论分析基本一致,该技术可实现对电梯变频器在不停机条件下的非接触式温度测量。

关键词:电梯;变频器;热响应;红外热成像;状态监测

中图分类号:TM93;TU857

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)04-0418-05

Thermal response characteristics for elevators inverters based on infrared thermography

ZHENG Bo¹, XU Jin-hai¹, WANG Hong¹, XU Lei¹, TANG Bo²

(1. Hangzhou Special Equipment Inspection Institute, Hangzhou 310003, China; 2. College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problem of elevator stopped operation caused by the overheating of electronic components in the elevator inverter, the nondestructive testing system of infrared thermography and the cause of heating from elevator inverters were analyzed. On this basis, a non-contact measuring method by using infrared thermography was put forward to detect the surface temperature distribution of elevator inverters. Then, based on the thermodynamic theory and the fundamental law of infrared radiation, a mathematical expression of thermal radiance rate per unit area, surface emissivity and temperature was established. The elevator inverter was taken as the monitoring object and this transient thermal behavior during operation process was tested. The results indicate that the variation of the surface emissivity has little influence on the temperature amplitude of elevator inverters, and different heating areas can be clearly distinguished in the circuit board. Experimental results are consistent with the theoretical analysis, and the technology can realize non-contact measurement surface temperature of elevator inverters without stopping.

Key words: elevator; inverter; thermal response; infrared thermography; condition monitoring

0 引 言

电梯变频器是电梯核心部件之一,它的可靠性直接关系到电梯运行的舒适性和安全性^[1]。为保障电

梯设备的安全可靠运行,在线监测是重要手段^[2-4]。因此,开展对电梯变频器运行状态监测具有重要的现实意义。

温度是表征设备结构健康状态最简单、最直接的

收稿日期:2018-11-13

基金项目:国家质量监督检验检疫总局科技计划项目(2016QK144);浙江省自然科学基金资助项目(LQ16F030003)

作者简介:郑波(1983-),男,浙江仙居人,工程师,主要从事机电控制与特种设备等方面的研究。E-mail: 510340924@qq.com

通信联系人:唐波,男,讲师,硕士生导师。E-mail: tang-bo001@163.com

特征参数^[5]。基于红外热成像技术的状态监测法能有效对运行中的电梯设备热状态进行实时监测^[6-7]。近年来,热感技术已经广泛应用于机电设备、电力系统和电梯特种设备等领域的状态监测^[8]。王逸铭等人^[9]采用红外热图像法对电梯闸皮不均匀磨损进行了研究,实现了解决电梯在不解体情况下的定量检测闸皮不均匀磨损问题;宫明文等人^[10]阐述了当前基于红外技术的电路板故障检测存在的不足,提出了一种支持向量机完成电路板故障红外智能诊断方法;JADI-IN M S 等^[11]回顾了红外热成像技术在电气设备可靠性诊断中的应用,分析了环境因素、设备状态等对热异常和测量方法的影响规律;郑祥盘等^[12]阐述了基于红外热成像技术的电梯电气控制系统检测一般方法,并对电气系统元件故障红外热成像缺陷诊断的分析判断方法作了研究。

然而对电梯机械设备或电气设备发热状态的定量研究还鲜有报道,因此,笔者将红外热成像无损检测技术应用于电梯变频器运行过程瞬态热特性研究。

1 红外热成像无损检测原理

根据目标物是否能提供热源这一特征,红外热成像可分为主动热成像和被动热成像两类,两者的主要差别在于热源是外部施加还是自身产生。对于常见的红外热成像无损检测技术^[13-15],主要是指主动热成像,通过激光、大功率闪光灯、电磁感应、热风、超声波、太赫兹波等不同方式的外部热激励,通过裂纹缺陷引起热流的扰动,引起被检对象表面温度场分布异常,从而实现缺陷的检测。

红外热成像无损检测系统如图1所示。

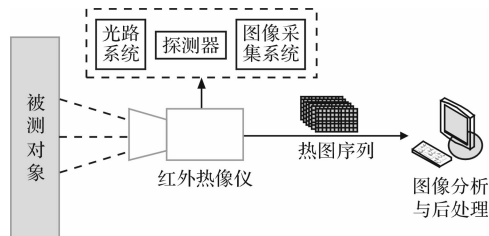


图1 红外热成像无损检测系统

该系统通过红外热像仪实时记录被测对象表面辐射出的热量,将热图序列传输给图像分析与后处理模块,根据热像仪在黑体中标定的灰度与温度转换关系,实现灰度热图像到温度热图像的转换。

在工作过程中,电梯变频器的电子元器件、功率器件由于受电流、电压的作用,将产生3种发热:电阻损耗发热、介质损耗发热、铁损致热。随着温度升

高,电梯变频器的失效率将会呈现指数增长的趋势。研究表明温度每升高10℃时,变频器失效率会增大一倍以上;超过55%的变频器失效是温度过高引起的,为此,有必要对运行中的电梯变频器进行温度监测。

2 红外热成像的数学模型

为了简化理论分析,笔者将复杂的电梯变频器真实模型转换成简化的物理模型,内部三维热传导模型等效为一维热传导模型^[16],其数学表达式为:

$$\rho C_p \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} - \nabla(k \nabla T(z,t)) = Q \quad (1)$$

式中: ρ —材料的密度; C_p —材料的比热容; k —材料的热导率; z —距表面的距离; $T(z,t)$ — t 时刻 z 处的温度; Q —变频器内部的热源。

通过求解热传导方程式(1),可以得到变频器内部距表面 z 处的温度变化为:

$$T(z,t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi \rho C_p k t}} \exp\left(-\frac{z^2}{4 \alpha t}\right) \quad (2)$$

式中: α —热扩散系数。

α 可以表示为:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (3)$$

热扩散系数越大,变频器对外界热环境的改变也越快。在实际检测中,往往只能获得变频器表面的温度场分布,因此试样表面($z=0$)的温度变化可表示为:

$$T(0,t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi \rho C_p k t}} \quad (4)$$

当采用红外探测器记录变频器表面温度时,其遵循斯蒂芬-玻尔兹曼(Stefan - Boltzmann's Law)红外辐射基本定理^[17],其表达式为:

$$\frac{q}{A} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (5)$$

式中: q —辐射能量的速率; A —变频器发射表面的面积; ε —对于固定波长和绝对温度 T 的变频器表面的发射率; σ —斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $\sigma = 5.676 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ 。

由此可见,变频器表面的热辐射与本身的发射率和热力学温度的四次方成正比。

3 实验及结果分析

为了验证理论分析的可行性,本研究搭建了一套基于红外热成像技术的电梯变频器热响应实验测试系

统,具体包括:电梯变频器、红外热像仪、三脚架、数字式温湿度计和笔记本电脑。为实现非接触式测量电梯变频器表面热响应过程的可操作性,实验中选取一台教学用电梯,该台电梯为 2 层梯,变频器功率为 11 kW。实验采用 NEC G100EX 型便携式热像仪作为变频器热响应的测量仪器,其主要技术参数如下:测温范围为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1\,500\text{ }^{\circ}\text{C}$,测量精度一般为 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,帧频为 60 Hz,空间分辨率为 1.78 mrad。

测试中,通过频繁操作电梯上下楼层运行使电梯变频器发热。试验步骤如下:

(1) 红外热像仪通过三脚架架设于被测电梯变频器外表面的正前方,尽量使热像仪的镜头平面与变频器相互平行,两者的垂直距离约等于红外热像仪中设定的焦距 1 000 mm;

(2) 采用数字式温湿度计(环境温度分辨率 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度分辨率 0.1%)测量环境温度和相对湿度,开机后等显示数据稳定后记录,并将该值作为红外热像仪的环境参数;

(3) 将热像仪与电脑相连,打开热像仪电源和操作系统,设置热像仪环境参数,并检测热像仪的运行状态;

(4) 启动电梯,频繁操作电梯启动、制动按钮,使其上下层运行,直至电梯变频器热平衡,试验结束。

3.1 表面发射率对热图温度场分布的影响

由公式(5)可知,物体表面发射率与单位面积热辐射成正比,同时还与被测物体的材料属性、表面状态、发射率和不透明度等因素密切相关,因此正确选择被检对象的表面发射率对表面测温结果的正确性至关重要。

电梯变频器表面组成成分较多,如:含绿油的印制电路板、芯片、接线端子等。

不同元件的表面发射率均不相同,为此,选取芯片区域 A 和含绿油的印制电路板区域 B 两种典型工况,设置区域 A 和 B 的发射率均为 0.9 时,得到变频器数码相机照片和红外热图像,如图 2 所示。

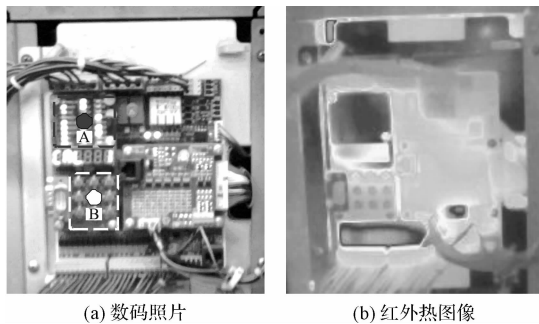


图 2 变频器数码相机照片和红外热图像

由图 2 分析可知:从红外热图中可以发现深色区

域的发热比较大,该区域主要集中分布有电子芯片和接线端子,实验结果与理论分析一致。

为了比较不同发射率对温度幅度的影响程度,结合表面实际发射率选取了 0.8、0.9 和 1 这 3 种情况,得到区域 A 和 B 不同发射率时的温度值,如表 1 所示。

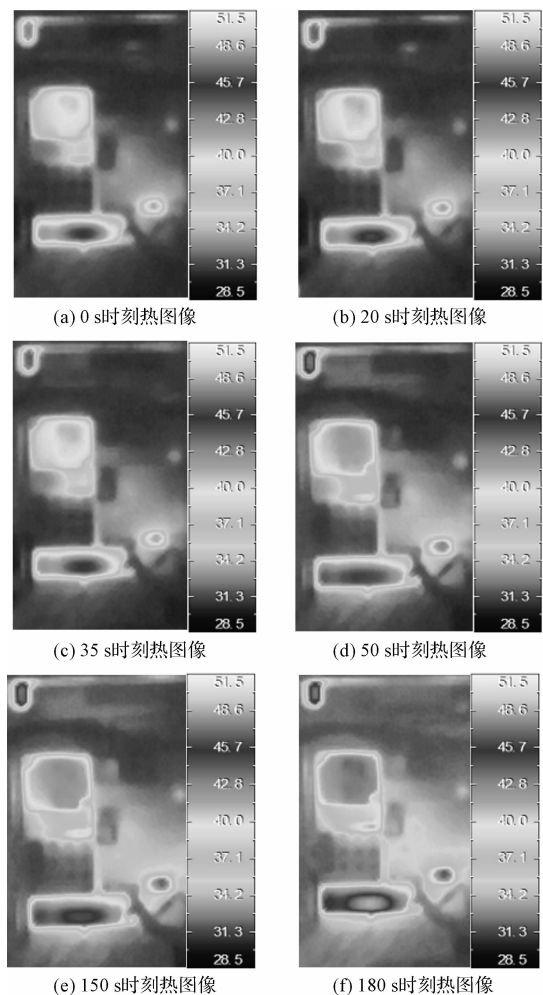
表 1 区域 A 和 B 不同发射率时的温度值

序号	名称	发射率	表面温度/ $(^{\circ}\text{C})$	温差/ $(^{\circ}\text{C})$
1	区域 A	0.8	49.9	13.6
	区域 B	0.8	36.3	
2	区域 A	0.9	48.1	12.3
	区域 B	0.9	35.8	
3	区域 A	1	46.6	11.1
	区域 B	1	35.5	

从表 1 中可以看出:发射率在 0.8 ~ 1 范围变化时,区域 A 和区域 B 的温差从 $13.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 缩小到 $11.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,变化的范围较小,说明在实际测试过程中表面发射率值的稍微变化不会对监测结果的正确性产生影响。

3.2 变频器表面辐射温度分布

为了反映电梯变频器在持续运行过程中瞬态热变化过程,笔者通过红外热像仪获取了变频器表面不同时刻的红外热图像,如图 3 所示。



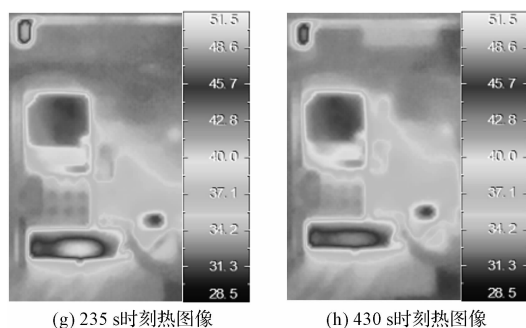


图3 变频器表面不同时刻的红外热图像

本研究约定热像仪获取的第一张热图序列为0时刻,选取其中0 s、20 s、35 s、50 s、150 s、180 s、235 s、430 s, 8个时刻的热图像。由于不同时刻红外热图的温度幅值不同,为了相互比较方便,笔者将温度的色标进行了统一,温度下限为28.5 °C,温度上限为51.5 °C,温度间隔取为2.9 °C。

从图3中可以看出:接线端处和芯片区域的温度明显高于电路板其他区域,究其原因接线端处电阻较大而引起电阻损耗发热,芯片区域由于芯片在工作过程中受电压和电流作用而致热;随着时间的推移,产生的热量的集聚导致温度不断升高,但同时又由于外部环境散热和风扇冷却散热,重新达到温度平衡。

3.3 瞬态热响应过程分析

为了进一步定量获取电梯变频器指定区域温度瞬态变化过程,本研究选取芯片区域A和印制电路板区域B的中心点为两个监测点,得到不同时刻芯片表面A和电路板表面B的温升曲线,如图4所示(其中:带实心正方体的实线—区域A的温度变化过程,带实心圆的虚线—区域B的温度变化过程)。

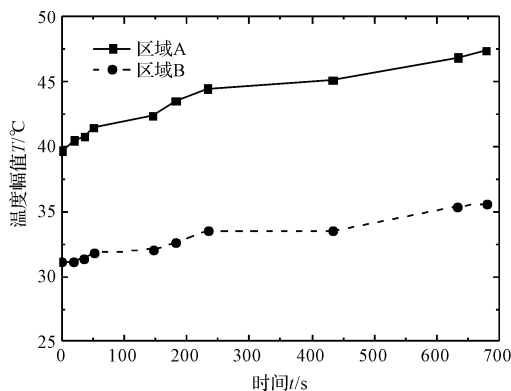


图4 芯片表面A和电路板表面B的温升曲线

从图4可以看出:两者的温升趋势基本一致,起始时刻的温差约为9 °C,在结束时刻的温差约为12 °C,两者温差变量较为稳定;温差值的大小与电梯的持续运行时间、轿厢的负载大小、环境温度、冷却方式等因素有关;温度幅值大小可以从整体上表征变频器电路板存在的发热源位置,至于具体的影响因素不能通过红外热成像的方法实现检测和分类,如电压不稳、线路其他问题等。

4 结束语

针对电梯变频器非接触式表面温度测量的特殊工况,本文提出了一种基于红外热成像的电梯变频器表面热特性检测方法,对电梯变频器运行过程的瞬态热特性进行了研究。

理论分析结果表明:电梯变频器中存在3种主要发热源:电阻损耗发热、介质损耗发热与铁损致热。实验测试结果表明:电梯变频器表面发热率变化对温度幅值影响较小,获取的热图像能明显地区分出电路板中的不同发热区域。

测试结果与理论分析基本一致,由此可以根据温度分布特性寻找电梯变频器主要发热源以及热响应的变化过程。

参考文献 (References):

- [1] 赖军雄. 变频器在电梯控制中的应用研究[J]. 科技资讯, 2017, 15(10): 52-53.
- [2] 周前飞, 丁树庆, 冯月贵, 等. 基于支持向量机的电梯制动器智能监测预警系统[J]. 中国特种设备安全, 2018, 34(5): 22-27.
- [3] 林元海, 吴允平, 王廷银, 等. 基于信息终端的电梯健康实时监测系统研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(8): 159-162.
- [4] 朱明, 王志荣, 郭文杰, 等. 电梯故障率预测模型及其应用[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(9): 74-78.
- [5] EPPERLY R A, HEBERLEIN G E, EADS L G. A tool for reliability and safety: predict and prevent equipment failures with thermography[C]. IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference, Banff, Alta: IEEE, 1997.

(下转第439页)

本文引用格式:

郑波, 徐金海, 汪宏, 等. 基于红外热成像的电梯变频器热响应特性研究[J]. 机电工程, 2019, 36(4): 418-421, 439.

ZHENG Bo, XU Jin-hai, WANG Hong, et al. Thermal response characteristics for elevators inverters based on infrared thermography[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36(4): 418-421, 439.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>