

基于红外辐射原理的高速滑动电接触温度测量

张玉燕^{1,2} 王 微^{1,2} 王振春³ 温银堂³ 战再吉³

¹ 燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004
² 燕山大学测试计量技术及仪器河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004
³ 燕山大学科学技术学院, 河北 秦皇岛 066004

摘要 在高速滑动电接触过程中,接触表面会产生焦耳热、电弧等电气现象,导致接触温度发生突变,而温度是接触材料的导电性能及磨擦磨损的重要影响因素之一。提出了一种瞬态高温测量方法,用于测量高速滑动接触瞬间产生的温度变化。基于红外辐射原理,考虑大电流条件下的强电磁场测量环境,设计了相应的测量系统,主要包括光纤测温探头、隔离模块和高速采集模块。用黑体炉对该系统进行了标定,在高速滑动试验机上对该系统性能进行了实验验证,结果表明,该系统可对600℃~2000℃温度范围进行非接触有效测量,精度高、响应时间短,适用于高速滑动电接触等特殊环境下的瞬态高温测量。

关键词 测量;光谱学;瞬态高温测量;红外辐射;高速滑动电接触

中图分类号 TN219 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.1112004

Temperature Measurement on High Speed Sliding Electrical Contact Based on Principle of Infrared Radiation

Zhang Yuyan^{1,2} Wang Wei^{1,2} Wang Zhenchun³ Wen Yintang³ Zhan Zaiji³

¹ Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China
² Key Laboratory of Measurement Technology and Instrumentation of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China
³ Institute of Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract In the process of high speed sliding electrical contact, the contact surface will produce electric phenomenon such as joule heat, arc, etc., that will lead to contact temperature mutations. Temperature is one of the key factors of the materials' conductivity and friction and wear. In order to measure the instant changes in temperature of high speed sliding contact, a transient temperature measurement method is proposed. A measurement system is designed based on the principle of infrared radiation in view of the high voltage and large current environment. This system contains optical fiber temperature measuring probe, isolation module and high-speed data acquisition module. Calibration experiment is performed with blackbody furnace, and verification experiment on the performance of the system is performed in the high-speed sliding experimental machine. The results show that the system's effective temperature range for non-contact measurement can be 600℃~2000℃, and it has high accuracy and short response time. It is suitable for transient high temperature measurement such as the special environment of high speed sliding electrical contact.

Key words measurement; spectroscopy; transient high temperature measurement; infrared radiation; high speed sliding electrical contact

OCIS codes 120.6780; 230.2285; 230.5160; 350.5610; 350.2450

1 引 言

电接触作为一种电连接,允许电流连续地通过接触界面^[1]。其应用广泛,不仅包括接触焊接、软焊

连接、粘合连接、夹持连接等静态电接触,也包括滑动电接触及换向整流等动态电接触。在各种类型的电接触中,发生在接触区内的机械电气等过程极其

收稿日期:2013-05-02;收到修改稿日期:2013-05-30

基金项目:河北省自然科学基金(F2012203184)、高等学校博士学科点专项科研基金(20111333120009)

作者简介:张玉燕(1976—),女,博士,副教授,主要从事光电检测、光纤传感等方面的研究。

E-mail: yzhang@ysu.edu.cn

复杂。目前国内外一些学者对滑动电接触做了各种研究^[2-5],但高速滑动电接触理论还不够成熟。对于高速滑动过程,接触表面不仅存在相互运动、张力变形等力学现象,还会产生焦耳热、电弧等一系列电气现象。高速滑动过程中的物体处于强电磁场、强间断温度场环境,背景条件非常复杂、恶劣。对于运动电刷、滑动接触面及滑轨的状态进行实时监测很困难,目前所见到的有关状态参数的测试手段也非常有限。有关温度效应对电接触的影响的研究结果表明,温度不仅对复合材料的导电性能具有重要影响,也对金属合金接触表面的磨损腐蚀作用有很大影响^[6-8]。因此直接测量出滑动接触过程中的温度信息,对于研究高速滑动电接触的物理特性具有重要的意义。但在高速滑动过程中,温度很高且变化迅速,测量过程往往受到强电磁场的干扰。目前多采用光纤传导技术将辐射光波传输到远离磁场环境的地方进行温度测量,实现非接触测温。此种方法具有响应快、寿命长、非消耗性、易实现连续测量等特点。主要的测量方法大致有以下两种:1)辐射式光纤温度测量仪^[9],以普朗克黑体辐射定律为理论基础,根据某一个或某几个特征波段上的辐射而测温,例如红外高温仪。由于一切温度高于绝对零度的物体都存在红外辐射现象,红外辐射测温的应用很广泛^[10-12]。2)基于黑体辐射定律的带有黑体空腔传感器的光纤高温测量系统^[13]。光纤传输信号会有损耗发生,传输距离受到一定限制。在强电磁场环境中,光纤温度传感器后续的电路处理模块仍会受到很大干扰,导致测量结果误差大,或者温度信息不能被正常采集,甚至损坏传感器,因此必须采取有效的屏蔽和抗干扰措施。同时,高速滑动过程中的温度采集属于瞬态测量,要求高速数据采集措施才能有效捕获快速变化的温度信息。

在高速滑动电接触的特殊应用前提下,考虑其复杂的背景条件和恶劣的测量环境,本文提出了一种基于红外辐射测温原理的瞬态高温测量方法,并设计了相应的测量系统。在实验室条件下,在高速滑动实验装置上,采用光纤辐射式高温传感器,安装在合适的测量位置,进行温度测量实验,通过大量的测量数据,对所提测温方法及系统的有效性进行了实验验证。

2 热源分析及测温原理

2.1 高速滑动电接触热源分析

在高速滑动电接触中,接触过程产生的热流主要

有两部分,即摩擦和电加热。摩擦是典型的耗能过程,也是电接触过程中产生附加热量的重要来源,在此过程中机械能转化成热能。热流 q_f (单位 J/m^2)定义为

$$q_f = \mu p v, \quad (1)$$

式中 μ 为摩擦系数, p 为接触压力, v 为滑动速度。

电加热主要表现为电阻的焦耳热,热流密度 q_b 为

$$q_b = (\rho_1 + \rho_2) J^2 / (n^2 \pi^2 \tau_b^4), \quad (2)$$

式中 ρ_1 为基底材料电阻率, ρ_2 为电刷材料电阻率, J 为电流密度, τ_b 为接触面积半径。

摩擦和电流产生的热量影响材料的电导率及接触材料之间的摩擦性能。此外在电刷高速运行过程中,因接触力、接触电压等因素,极易产生电火花、电弧。电弧存在时间极短,但温度极高,对材料可能造成的塑性变形不能忽视。

2.2 测温原理

基于光纤传输技术的辐射式测温方法属于非接触测量方式,具有响应快、抗电磁干扰等特点,但受被测物体发射率影响大。

本文所提出的测温方法基于热辐射原理,即任何温度高于绝对零度的物体都会向外发出红外辐射,物体的红外辐射能量的大小及其波长的分布与它的表面温度有着十分密切的关系。因此,通过对被测物体自身辐射的红外能量的测量,便能准确地测定它的表面温度。

对于绝对黑体,普朗克公式描述了在绝对温度时的光谱辐射出射度^[14]:

$$M_{\lambda,T} = C_1 \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (3)$$

式中 $C_1 = 3.741833 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ 为第一辐射常数, $C_2 = 1.438832 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 为第二辐射常数, T 为绝对温度, λ 为波长。

但实际被测物体并不是黑体,所以根据(3)式得到的温度并不是物体的真实温度。必须知道物体的另一参数即材料发射率才可求得物体的真实温度。假设物体的光谱发射率为 $\epsilon_{\lambda,T}$,则物体的真实光谱辐射出射度 $S_{\lambda,T}$ 为

$$S_{\lambda,T} = \epsilon_{\lambda,T} C_1 \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1}. \quad (4)$$

为了方便处理,用维恩位移公式代替(4)式,得

$$S_{\lambda,T} = \epsilon_{\lambda,T} C_1 \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) \right]^{-1}. \quad (5)$$

然而,影响物体材料发射率的因素很多,包括物体的

组分、表面状态及考察波长温度等,且本身易随表面状态改变而改变,不易在线测量。为了简化研究,引入著名的假设方程 $\ln \epsilon_{\lambda,T} = a + b\lambda$ 。代入(5)式,得

$$S_{\lambda,T} = \exp(a + b\lambda) C_1 \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) \right]^{-1}. \quad (6)$$

设滤光片的中心波长为 λ ,在某一波段范围 $(\lambda - 0.5\Delta\lambda, \lambda + 0.5\Delta\lambda)$ 内的辐射亮度 $L_{\lambda,T}$ 为

$$L_{\lambda,T} = \int_{\Delta\lambda} \exp(a + b\lambda) C_1 \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) \right]^{-1} d\lambda, \quad (7)$$

式中 $\Delta\lambda$ 为光路系统的半波带宽度。引入系数因子 K ,用于表征探测器光谱响应率、光学元件透射率及几何因素等。则光电探测器接收的实际辐射亮度为

$$L_{\lambda,T} = K \cdot \int_{\Delta\lambda} \exp(a + b\lambda) C_1 \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) \right]^{-1} d\lambda. \quad (8)$$

在选定某一个确定的波长后,物体的辐射亮度只与温度有关。光电探测器接收到光信号后,将其转化为电信号,即假设光电探测器输出信号为 Y ,则辐射光谱经一定的窄带滤光后,得 $Y = f(T)$,即物体的温度与输出信号建立了一定的关系。

3 测温系统

测温系统结构框图如图 1 所示,主要由光学传感单元和信号处理与采集单元两部分构成。其中光学传感单元包括红外光学探头、传光光纤及光电转换模块。

被测物体的红外辐射经光学探头透镜会聚投射到光纤前端,通过光纤传输及红外滤光片滤光的红外能量被红外探测器接收并转换成对应的电信号,此电信号被放大、线性化后,通过信号隔离模块以其标准的信号输出代表温度高低。

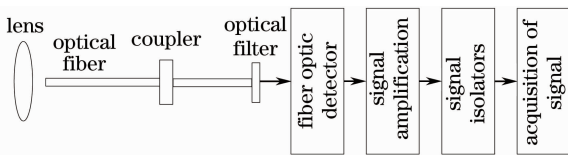


图 1 测温系统结构框图

Fig. 1 Diagram of temperature measuring system structure

3.1 光学传感单元设计

在光纤前端放置光学透镜,为了更好地会聚物体的红外辐射能量,传感光纤采用石英玻璃光纤,石英玻璃光纤传输波长范围宽,适用于紫外到红外各波长信号及能量的传输。

光电探测器选用常用的硅光电二极管,具有响

应快、灵敏度高、性能稳定、测量线性好、噪声低的特点,尤其适用于瞬态光信号的测量。

3.2 信号采集与处理单元

3.2.1 信号转换放大

在强电磁场瞬态温度测量中,测温精度往往受到电磁场等因素的影响,容易增大测温误差。经光电转换把光信号转换成微弱的光电流,再经 I/V 转换,变为电压信号。因测量环境属于恶劣的强电磁场,实验中其他监测和控制设备较多,非常容易在仪表和设备之间信号传输中互相干扰,造成系统不稳定甚至测量数据不准确。因此,要保证整个系统稳定和可靠地运行,“接地环路”问题是在系统信号处理过程中必须解决的问题。测温试验中采用了隔离技术,利用隔离器,不仅可以实现微小电流信号转化并放大为电压信号,而且保证了电源、输入、输出之间完全隔离,断开过程环路,不影响过程信号的正常传输,从而彻底解决“接地环路”问题。

3.2.2 高速信号采集单元的设计

高速滑动过程中接触温度在瞬间大幅度变化,为了获取快速变化的温度信号,需要采用高速采集设备,缩短测量响应时间。目前通用的高速数据采集卡一般都是 PCI 卡或 ISA 卡与计算机连接进行数据处理与显示,不仅安装麻烦,而且受计算机硬件条件的限制,不利于扩展。尤其在强电磁场等条件恶劣的环境现场,计算机经常受高压、振动等影响发生死机现象,影响实验效果。为此,本文设计了一种基于单片机的小型化、智能化采集系统。在实验高速采集的同时,通过软件设计,提高测温系统的抗干扰能力。

S3C2440 是一个 32 位的 ARM 微处理器,应用广泛,但从本质上来讲,ARM 也可以认为是一种功能和速度更复杂的单片机^[15]。它具有专用的模/数转换器(ADC)管脚和相应的寄存器,通过对寄存器编程,即可实现对 ADC 的控制和数据采集。

为了抑制尖峰信号,利用 S3C2440 的看门狗功能,设定一定时器。在定时器等定时到之前,CPU 访问一次定时器等,让定时器等重新开始计时,程序正常运行,该定时器等不会产生溢出脉冲,看门狗也就不会起作用。一旦尖峰干扰出现了“飞程序”,则 CPU 就不会在定时到之前访问定时器等,因而定时信号就会出现,从而引起系统复位中断,保证智能仪器回到正常程序上来。实行电源分组供电,以防止设备间的干扰。采集程序流程图如图 2 所示。

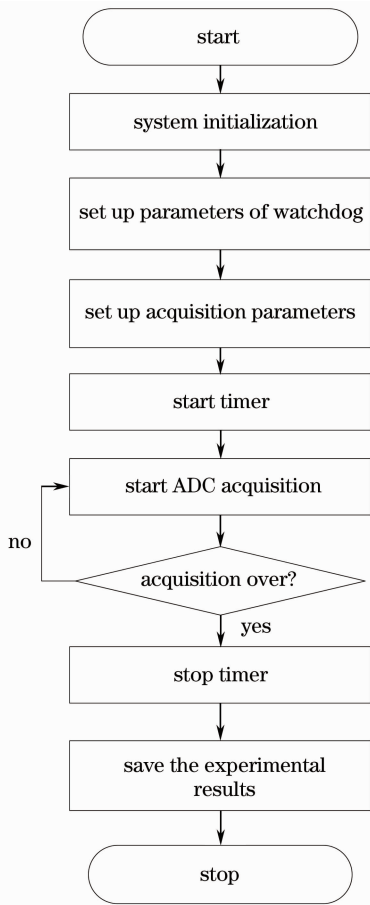


图2 高速采集系统流程图

Fig. 2 Flow chart of high speed data acquisition system

4 实验验证

4.1 对黑体炉温度测量

为了验证该系统的静态测温性能,以黑体炉为被测对象,进行温度测量实验。黑体炉型号为 M390A-2,温度范围为 600 °C~2300 °C,开口孔径为 25 mm。本文中温度传感器测温范围为 600 °C~2000 °C。首先设定黑体炉的参数,调节黑体炉的温度。采用本文的测温系统对不同温度值下的黑体炉进行了多组测量。测量结果如表 1 所示。

由表 1 可见,本文所设计的测温系统测温结果与黑体炉的实际温度相比较,测量误差小,可计算得到 误差 $\delta = 3.0 / 1400 \times 100\% = 2.1\%$ 。精度较高,满足高温测量要求。

4.2 高速滑动电接触实验条件下测温实验

在实验室中,在滑动电接触试验机上安装温度传感探头,进行测温实验。试验机工作在大电流条件下,使得电刷相对于导轨发生高速滑动,在电刷和导轨接触面上会产生高温。将系统的传感器探头对

准接触表面,获取其在滑动接触过程中的温度变化。

表 1 测温结果比较

Table 1 Comparison of temperature measurement results

Actual temperature / °C	Measured temperature / °C	Error / °C
600.5	602.3	1.8
751.3	753.3	2.0
810.6	809.1	1.5
958.6	960.0	1.4
1050.1	1048.5	1.6
1160.3	1161.8	1.6
1120.4	1122.5	2.1
1200.6	1198.6	2.0
1300.4	1302.6	2.2
1400.2	1403.2	3.0
1552.3	1550.8	1.5
1602.8	1604.6	1.8
1800.3	1802.5	2.2
1999.8	1997.2	2.6

图 3 为接触区域某点处电刷经过时的温升曲线。在曲线初始位置处可见有小波动,但并不影响测量结果,在 1 ms 处出现温度尖峰,之后随着温度传导,温度迅速下降至初始温度,整体测温曲线较平滑。测量到的最高温度为 1290 °C,系统采集时间很短,数据采集响应时间小于 1 ms,被测温度变化时间在 2 ms 左右,可进行有效测量,满足高速滑动过程中的瞬态测试要求。

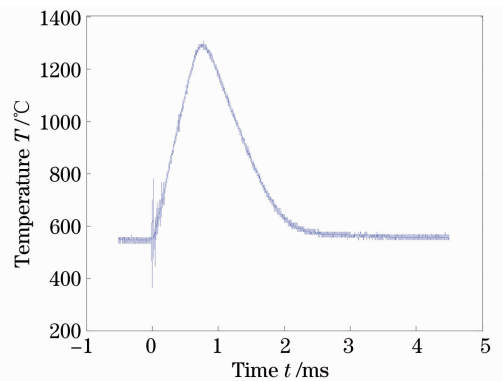


图 3 接触面某点处温度曲线

Fig. 3 Temperature curve at a point of contact area

在同一试验条件下,采用多组光纤传感器构成多通道测温系统同时对电刷高速滑动时经过的不同位置进行测量,多次测量并记录实验数据。表 2 列出了每次测量的最高温度值。

由表 2 中可见,在同一位置处,同一测温系统多次测量到的温度结果有所差异,这是由于采用滑动电接触试验机,在高电压大载荷电流条件下,产生高速滑动过程,因实验的特殊性,每次实验中电加载条

件的重复性较低,实际的温度值不完全相同,所以会导致同一测量点处的温度值不相同,但其误差变化

表2 不同位置处温度的多次测量结果(单位: °C)

Table 2 Temperature results at different locations for many times (unit: °C)

	1	2	3	4	5
Location 1	1104	1165.6	1154.4	1165	1188
Location 2	1104	1115.2	1137.6	1070	1081.6
Location 3	1303.2	1368	1360.8	1332	1389.6

5 结 论

由于温度效应对高速滑动电接触的研究具有重要的意义,本文针对高速滑动电接触的特殊应用条件,研究了基于红外辐射原理的测温方法,设计了相应的测量系统,在传统光纤高温传感器的基础上,加入信号隔离转换模块和高速采集模块,提高了系统在恶劣工作环境中的抗干扰性能。应用此测温系统对高速滑动电接触表面的温度测量做了实验验证,结果显示此测温系统不仅可以实现非接触测量,响应时间短,满足瞬态测量要求,且可以有效避免外界干扰,使得系统更加稳定。此系统可广泛应用于测量环境恶劣的其他高温测量场合。

参 考 文 献

- Milenko Braunovic, Valery V Konchits, Nikolai K Myshkin. Electrical Contacts Fundamentals, Applications and Technology [M]. Xu Liangjun, Lu Na, Lin Xueyan, *et al.* transl. Beijing: China Machine Press, 2010.
布朗诺维克, 康奇兹, 米西金. 电接触理论、应用与技术[M]. 许良军, 芦娜, 林雪燕等译. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- Liu Chuanpu, Yuan Weiqun, Yan Ping, *et al.*. Experimental study of sliding electrical contacts in a multi-shot railgun [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(4): 923-926.
刘传谱, 袁伟群, 严萍, 等. 重复推进滑动电接触的试验研究[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(4): 923-926.
- Jingsong Xie, Jingyong Hou, Yafang Han. A discussion of the contact behaviour of a carbon-fibre composite for electric contact applications [J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(8): 1189-1194.
- Lu Na, Xu Liangjun, Bai Huixian. Dynamic testing system of electric contact simulation [J]. Chinese J Scientific Instrument, 2006, 27(s2): 1429-1432.
芦娜, 许良军, 白惠贤. 动态电接触模拟测试系统[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(s2): 1429-1432.
- Iva Betova, Martin Bojinov, Anders Englund, *et al.*. Contact electric impedance and resistance studies of the conduction mechanism in passive films on ferrous alloys [J]. Electrochimica Acta, 2001, 46(24-25): 3627-3640.
- Dong Guangneng, Li Jian, Xie Youbai, *et al.*. Friction and wear behaviour of low-density polyethylene matrix composites with

positive temperature coefficient characteristics [J]. Tribology, 2001, 21(1): 63-66.

董光能, 李健, 谢友柏, 等. 具有正温度系数特性的导电低密度聚乙烯基复合材料的摩擦磨损性能 [J]. 摩擦学报, 2001, 21(1): 63-66.

- T Ding, G X Chen, J Bu, *et al.*. Effect of temperature and arc discharge on friction and wear behaviours of carbon strip/copper contact wire in pantograph-catenary systems [J]. Wear, 2011, 271(9-10): 1629-1636.
- Yong Woo Park, T S N Sankara Narayanan, Kang Yong Lee. Effect of temperature on the fretting corrosion of tin plated copper alloy contacts [J]. Wear, 2007, 262(3-4): 320-330.
- Wang Xiang, Huang Yimin, Han Yong, *et al.*. Study on the instantaneous radiation optical fiber pyrometer [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(12): 1702-1705.
王翔, 黄毅民, 韩勇, 等. 瞬态辐射光纤高温计系统研制 [J]. 兵工学报, 2009, 30(12): 1702-1705.
- Zhang Jian, Qu Enshi, Cao Jianzhong, *et al.*. Study on a multi-spectral-band infrared sea surface temperature radiometer system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0401003.
张建, 屈恩世, 曹剑中, 等. 自动多波段红外海洋表面温度辐射系统研究 [J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0401003.
- Liang Zhongzhu. Design and experimental study on micro infrared radiometer chip [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1112009.
梁中翥. 微型红外辐射探测芯片的设计及实验研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1112009.
- Wu Jindong, Chen Danping, Lu Weimin, *et al.*. Fabrication of Bi-doped silica fibers with near infrared broadband emission [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0406003.
吴金东, 陈丹平, 卢卫民, 等. 近红外宽带发光掺铋石英光纤的研制 [J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0406003.
- Wang Yutian, Yang Lili, Lu Xinqiong. Transient high-temperature measurement system [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010, 32(3): 346-348.
王玉田, 杨丽丽, 鲁信琼. 瞬态高温测量系统 [J]. 压电与声光, 2010, 32(3): 346-348.
- 王玉田. 光电电子学与光纤传感器技术 [M]. 国防工业出版社, 2003. 116-117.
- Jiang Chunhua, Zhang Shuang, Liu Yao, *et al.*. Research based on S3C2410A of high temperature measurement system [J]. J Liaoning Normal University (Natural Science Edition), 2010, 33(3): 325-327.
姜春华, 张爽, 刘瑶, 等. 基于 S3C2410A 的高温测量系统的研究 [J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 2010, 33(3): 325-327.

栏目编辑: 何卓铭