



公司核心业务包括自控系统集成、自动化仪表、环境气象仪器和电气控制装置四大板块，产品涉及温度、压力、流量、电气、环境气象仪器，主要产品：电磁流量计、电磁水表、涡轮流量计、涡街流量计、热量表、压力/差压变送器、雷达物位计、热电偶/阻、电气柜。

**中环天仪股份有限公司**  
ZHONGHUAN TIG CO., LTD.

地址:天津新技术产业园区华苑产业区(环外)海泰发展二路1号  
电话: 022-58389533 58359555 58389566  
传真: 022-58389557  
邮编: 300384  
http://www.tig.com.cn



基于 FPGA 的屏蔽泵电机线圈温度鲁棒性设计

郑书林, 郝成旭, 王睿, 等

针对 Android 平台的渗透测试技术研究

宋玉言

基于单色照明光源系统的能量监测系统

汪杰君, 陈志, 胡亚东, 等

基于 WPT-SVM 电动调节阀故障诊断研究

李朝雅, 孙建平, 田乐乐, 等

延安某气田单井流量计存在的问题及解决方法

强帅, 杨勉, 李勇

低压系统短路电流计算和断路器整定

庄馨, 张浩

基于 <sup>60</sup>N 特征  $\gamma$  谱的 HFETR 功率监测研究

刘鹏, 雷鸣, 屈国普, 等

煤化工系统供电电源突发脱网下的安全运行技术研究

李锋, 赵慧勉

中国核心期刊(遴选)数据库期刊  
中国期刊评价数据库来源期刊  
中国科技期刊网全文上网期刊  
中国期刊网全文上网期刊  
中国学术期刊(光盘版)  
中国知网

万方 维普 超星

邮局订阅代号: 18-226 定价: 20元



月刊 1994年创刊 CN12-1334/TH ISSN1671-1041 YIQIYIBIAO YONGHU

# 仪器仪表用户

指导: 中国仪器仪表学会 主办: 天津仪表集团有限公司



**艾坦姆流体控制技术**  
UTMOST FLOW CONTROL TECH



**超低温上装式球阀**

- 应用领域:** 应用于LNG的液化装置、LNG的接收站、LNG接收站、空分装置、液氮液氧介质、低温乙烯等超低温介质的控制阀。
- 结构特点:**
  - 阀体采用上装式可在检修结构。
  - 阀座采用O形-2密封结构,可实现中腔自卸压功能。
  - 主密封采用Ugears+石墨+40超硬合金密封结构。
  - 填料采用超低温设计,填料采用超低温超硬Hiperco密封结构。
  - 密封材料适用于超低温工况,原材料经深冷处理工艺,密封性能好。
  - 球体经超低温设计,球体经深冷处理工艺,密封性好。
  - 采用防火防静电设计,主密封飞出设计,安全性高。
- 性能参数:**
  - 公称尺寸: NPS1/2(DN15)~NPS24(DN600)
  - 公称压力: Class150 (PN20)~Class1500(PN260)
  - 工作温度: -196°C~80°C
  - 密封性能: 满足ISO 15848、ISO 15849、MSS SP-134的要求
  - 材料规格: ISO 15948-1:2015的要求



**超低温蝶阀**

- 应用领域:** 广泛应用于液化天然气、空分及其他低温行业。
- 结构特点:**
  - 蝶板受力均匀,密封比压均匀。
  - 特殊的密封设计,保证使用安全。
  - 蝶板为可拆卸结构,可实现在线维修与更换。
  - 采用三偏心或双偏心三偏心(四偏心)结构,开启力小,不磨衬里。
  - 采用三偏心或双偏心三偏心(四偏心)结构,具有硬化处理工艺,保证密封可靠。
  - 密封可靠,启闭扭矩小,低温稳定性高,使用寿命长等优点。
- 性能参数:**
  - 公称尺寸: NPS6(DN150)~NPS48(DN1200)
  - 公称压力: class150 (PN20)~class600(PN110)
  - 工作温度: -196°C~80°C
  - 介 质: LNG、液氧、液氮等超低温介质



**氧气切断球阀**

- 应用领域:** 广泛应用于煤化工、石油化工、空分装置等行业。
- 结构特点:**
  - 特殊的密封材料,抗金属颗粒、超硬颗粒的磨损配合。
  - 双向密封,密封等级达到ANSI/API 70-2 VI 级,密封可靠。
  - 密封材料设计,弹性系数稳定,受温度影响小。
  - 球体密封结构经超硬合金密封,密封可靠。
  - 主密封采用超低温设计,密封可靠,密封性好,密封性好。
  - 密封材料设计,密封可靠,密封性好,密封性好。
  - 密封材料设计,密封可靠,密封性好,密封性好。
  - 密封材料设计,密封可靠,密封性好,密封性好。
- 性能参数:**
  - 公称尺寸: NPS1/2(DN15)~NPS16(DN400)
  - 公称压力: Class150 (PN20)~Class1500(PN260)
  - 工作温度: -196°C~500°C
  - 介 质: 氧气、氮气、氩气、液氧等介质



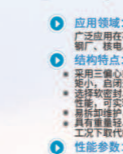
**煤化工专用耐磨球阀**

- 应用领域:** 广泛应用于煤化工、精细化工、炼化、造纸、石化、电力、石油加工、冶金等行业。
- 结构特点:**
  - 采用金属对金属的密封方式,特殊的硬化处理工艺,密封可靠。
  - 高、刚度大和耐磨损,密封面具有可靠的密封性能。
  - 球体采用三偏心或双偏心三偏心(四偏心)结构,密封可靠。
  - 主密封采用超低温设计,密封可靠,密封性好,密封性好。
  - 密封材料设计,密封可靠,密封性好,密封性好。
  - 密封材料设计,密封可靠,密封性好,密封性好。
  - 密封材料设计,密封可靠,密封性好,密封性好。
  - 密封材料设计,密封可靠,密封性好,密封性好。
- 性能参数:**
  - 公称尺寸: NPS10(DN25)~NPS24(DN600)
  - 公称压力: Class150 (PN20)~Class1500(PN260)
  - 工作温度: 40°C~425°C
  - 介 质: 渣水、黑灰水、煤粉、煤泥等



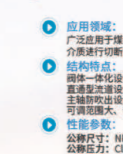
**三/四偏心蝶阀**

- 应用领域:** 广泛应用于石油化工、煤化工、冶金、炼化、电厂、水处理、制药、核电、造纸、石化、食品、天然气等行业。
- 结构特点:**
  - 采用三偏心或双偏心三偏心(四偏心)设计,利用压力密封,启闭扭矩小,密封可靠。
  - 密封材料设计,密封可靠,密封性好,密封性好。
  - 密封材料设计,密封可靠,密封性好,密封性好。
  - 密封材料设计,密封可靠,密封性好,密封性好。
  - 密封材料设计,密封可靠,密封性好,密封性好。
  - 密封材料设计,密封可靠,密封性好,密封性好。
  - 密封材料设计,密封可靠,密封性好,密封性好。
  - 密封材料设计,密封可靠,密封性好,密封性好。
- 性能参数:**
  - 公称尺寸: NPS2(DN50)~NPS64(DN1600)
  - 公称压力: Class150 (PN20)~Class900(PN110)
  - 工作温度: 40°C~425°C
  - 介 质: 水、油、氨气、氮气、渣油、天然气、煤粉、蒸汽等介质



**偏心旋转调节阀**

- 应用领域:** 广泛应用于石油化工、石化、电力、造纸、轻工、食品、医药等行业。
- 结构特点:**
  - 球体一体化设计,球体采用动态加硬结构,主密封面连接,密封可靠。
  - 密封材料设计,密封可靠,密封性好,密封性好。
  - 密封材料设计,密封可靠,密封性好,密封性好。
  - 密封材料设计,密封可靠,密封性好,密封性好。
  - 密封材料设计,密封可靠,密封性好,密封性好。
  - 密封材料设计,密封可靠,密封性好,密封性好。
  - 密封材料设计,密封可靠,密封性好,密封性好。
  - 密封材料设计,密封可靠,密封性好,密封性好。
- 性能参数:**
  - 公称尺寸: NPS1 (DN25)~NPS16(DN400)
  - 公称压力: Class150 (PN20)~Class900 (PN110)
  - 工作温度: 40°C~425°C
  - 介 质: 各种介质,特别适用于含固体颗粒的液固两相介质



北京公司地址: 北京市顺义区南法信镇宏远航城广场A座201  
山东公司地址: 山东省济宁市邹城市北宿镇恒发路1号  
Email: sales@utmost-valve.com  
网站: www.utmost-valve.com



# 目次

《仪器仪表用户》杂志 第28卷 第6期（总第196期）2021年6月

## 工程设计与研究

本栏目与“北京博工兴业工程咨询有限公司、仪控工程网”联合主办

- 1 基于FPGA的屏蔽泵电机线圈温度鲁棒性设计  
——郑书林, 郝成旭, 王睿, 周雅兰
- 6 针对Android平台的渗透测试技术研究  
——宋玉言
- 14 基于准单色照明光源系统的能量监测系统设计  
——汪杰君, 陈志, 胡亚东, 崔珊珊, 张爱文, 叶松, 洪津
- 19 基于WPT-SVM电动调节阀故障诊断研究  
——李朝雅, 孙建平, 田乐乐, 张文广
- 24 X光透镜参数自动测量系统探究  
——何佳霖, 王烁, 何斯琪, 谭俊龙, 付嘉佳

## 解决方案与应用实例

- 28 延安某气田单井流量计存在的问题及解决方法  
——强帅, 杨勉, 李勇
- 33 低压系统短路电流计算和断路器整定  
——庄馨, 张浩
- 38 软逻辑解决快开风门开工过程中的隐患  
——任志光

## 发电自动化

本栏目与“中国自动化学会发电自动化专业委员会”联合主办

- 42 基于 $^{16}\text{N}$ 特征 $\gamma$ 谱的HFETR功率监测研究  
——刘鹏, 雷鸣, 屈国普, 陈启兵, 赖立斯, 邓云李, 肖盾, 李松发
- 47 华龙一号非能动安全壳热量导出系统管道布置优化分析  
——兰燕华, 甘同昌, 费罗杰
- 50 仪控一层PDF数据自动建模的仿真研究  
——陈杰, 张玉峰

- 53 基于FPGA的存储内建自测试的研究  
——薛凯, 侯荣彬, 李勇
- 58 CANDU-6重水堆二号停堆系统ROPT标定通道意外脱扣问题分析及改进  
——林熙, 张振超, 王晓峰, 刘铮, 王仕博, 关永淳
- 62 重水机组环隙气体系统露点仪标定方法改进及应用  
——王仕博, 陆惠强, 左建新, 于超, 代济岭, 林熙, 江沈伟, 卢辉
- 66 基于华龙一号验证平台的应急柴油机容量仿真验证  
——陈杰, 张立群
- 69 反应堆厂房事故工况下乏燃料水池液位计国产化研究  
——董保录
- 74 核电厂数字化仪控系统通讯网络优化方案及应用  
——黄逸, 管运全, 穆海洋, 庞宇琦
- 79 M310核电机组主给水泵调速优化研究  
——庞伟, 池通, 胥敬德
- 82 中国先进研究堆高温高压试验回路数字化保护系统设计  
——贾玉文, 段晓, 张明葵, 徐启国, 李松
- 86 基于频率分析的核电厂疏水泵异常振动分析  
——唐德伟
- 89 煤化工系统供电电源突发脱网下的安全运行技术研究  
——李锋, 赵慧勉
- 96 基于改进磷虾群算法的火电厂负荷优化分配  
——杨如意
- 101 红外热成像技术在发电机碳刷滑环中的应用  
——沈琦, 刘刚, 季学友, 潘明泽

## 综述

- 104 浅谈中俄东线远维系统建设与部署  
——张小俊, 贾立东, 史威, 艾月乔, 刘雅
- 107 海上油气田仪控系统智能化方案探讨  
——张颖, 何骁勇, 郑伟, 徐正海, 钟雨桐
- 110 运用CENTUM VP系统顺控SFC模块实现压缩机杆沉降最大最小值精确统计  
——黄军政, 张磊, 张彦军, 叶琳

## 红外热成像技术在发电机碳刷滑环中的应用

沈琦<sup>1</sup>, 刘刚<sup>2</sup>, 季学友<sup>2</sup>, 潘明泽<sup>2</sup>

(1. 浙江浙能嘉华发电有限公司, 浙江 嘉兴 314000; 2. 杭州中为电子科技有限公司, 杭州 310012)

**摘要:** 碳刷滑环是发电机组进行正常发电必不可少的一部分, 各大电厂在实际生产过程中, 对碳刷滑环的运行状况缺少有效的监控措施, 在碳刷发生故障时不能及时发现及时处理, 继而引起环火或非计划停机事故, 给企业带来巨大损失。红外热成像技术具有测温范围广、测温效果直观等优势, 近年来在工业领域已得到广泛应用。在发电机碳刷滑环中引入红外热成像技术, 利用红外热像仪对碳刷滑环进行 24h 在线监测, 能有效地监控碳刷滑环的运行状况, 同时利用碳刷温度数据与励磁电流数据及有功功率数据建立数学模型, 分析计算出发电机组在既定负荷下工作时碳刷合理的温度范围, 进而对碳刷滑环的运行状况进行超前预判, 保障机组的安全运行。

**关键词:** 红外热成像; 励磁电流; 有功功率; 碳刷; 滑环; 数据库

DOI: 10.3969/j.issn.1671-1041.2021.06.023

中图分类号: TM407

文献标志码: A

文章编号: 1671-1041(2021)06-0101-03

## Application of Infrared Thermal Imaging Technology in Carbon Brush Slip Ring of Generator

Shen Qi<sup>1</sup>, Liu Gang<sup>2</sup>, Ji Xueyou<sup>2</sup>, Pan Mingze<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Zheneng Jiahua Power Generation Co., Ltd., Zhejiang, Jiaying, 314000, China;  
2. Hangzhou Zhongwei Electronic Technology Co., Ltd., Hangzhou, 310012, China)

**Abstract:** The carbon brush slip ring is an indispensable part of the normal power generation of the generator set. In the actual production process, the major power plants lack effective monitoring measures for the operating status of the carbon brush slip ring. When the carbon brush fails, it cannot be detected and dealt with in time, which then caused a ring fire or unplanned downtime accidents, causing huge losses to the enterprise. Infrared thermal imaging temperature measurement technology has the advantages of fast response, accurate temperature measurement, long temperature measurement distance, and not affected by light and dust. The introduction of infrared thermal imaging technology into the generator carbon brush slip ring, the use of infrared thermal imaging camera to carry out 24-hour online monitoring of the carbon brush slip ring, which can effectively monitor the operating status of the carbon brush slip ring, and use carbon brush temperature data and excitation current data and active power data to establish a mathematical model, analyze and calculate the reasonable temperature range of the carbon brushes when the generator set is working under a given load, and then pre-judge the operating conditions of the carbon brush slip ring to ensure the safe operation of the unit.

**Key words:** infrared thermography; excitation current; active power; carbon brush; slip ring; database

### 0 引言

大型发电机的磁场一般都是通过在转子电枢绕组中通

入直流电流产生的, 而电流则是通过碳刷滑环引入发电机转子电枢绕组中的。因此, 碳刷滑环是发电机组进行正常

收稿日期: 2021-04-09

作者简介: 沈琦(1981-), 男, 浙江绍兴人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 调度自动化。

发电必不可少的一部分。碳刷滑环运行状况的好坏直接影响着发电机运营的安全,而目前发电机碳刷滑环还是一个比较薄弱的环节,各大电厂对碳刷滑环的监测一般是通过励磁电流、励磁电压等参数的检测来判断其运行状况,实际上在事故发生的前期,很长一段时间内,由于励磁系统的调控、励磁电参数的数据都正常,所以当数据发生明显异常情况时,事故已经非常严重了。这类由发电机碳刷滑环故障引起的发电机组强迫停机事故,造成的非计划内停机事故在国内各大电厂内每年都会发生,对发电企业造成重大的经济损失,对人民的稳定用电需求造成影响。

## 1 碳刷滑环故障分析

碳刷是以碳为主体的刷子形状的部件,在发电机碳刷滑环系统起到导电的重要作用,是发电机组中滑动部件与静止部件直接接触的重要部位,碳刷通过恒压弹簧与滑环一直处于紧密贴合的状态。碳刷发生故障最直观的表现是温度发生变化,碳刷与滑环之间是直接接触并发生滑动摩擦,摩擦本身会产生大量的热量,若碳刷或者滑环表面有油渍、粉尘等污染,会增加其表面滑动摩擦系数,而摩擦力增加,发热量也相对增加。碳刷是一个具有逆温度特性曲线的元件,即外部温度越高,碳刷的电阻值越小。当发电机碳刷出现卡涩、受力不均、接触面积小等情况时,会造成每个碳刷所分担的电流值不同,电流越大,发热量就越大,碳刷的电阻值就越小,这个特性导致碳刷温度升高得很快。温度越高,造成碳刷电阻值越小,使得分担的电流值就越多,从而形成一个恶性循环,如得不到及时处理,最终可能导致环火、非计划停机事故<sup>[1]</sup>。

碳刷滑环在发生事故前期都会伴随着温度的变化,单个或者部分碳刷温度的偏高、偏低都是碳刷出现故障的早期表现。碳刷温度偏高,可能是由于接触面清洁度不够或者恒压弹簧的压力过大引起的;碳刷温度偏低,可能是由于碳刷与滑环的接触面积过小、恒压弹簧的压力过低、碳刷与刷握之间出现卡涩等原因,造成其分担的励磁电流过小,而其他碳刷分担的电流将会加大,在机组高负荷运行时也容易引发事故。因此,对发电机碳刷滑环进行温度监测在保障机组的安全运行中有着至关重要的作用。

## 2 现有测温方案对比

通过对多家发电厂的调查,发现目前大多数电厂对发电机组励磁碳刷滑环的温度监测都是通过人工点巡检的方式。人工点巡检测温是按照特定的标准,按时使用点温枪或者手持红外热像仪,对设备的重点区域进行检查测温。点巡检主要是依靠巡检人员长期累积的经验来判断设备的运行状况,虽然能发现很多故障隐患,但是也存在很多不稳定的客观因素。例如,两次巡检之间的间隔难以具体把控,碳刷从轻微故障到严重故障,再到发生环火事故过程往往只有十几到几十分钟,难以及时发现问题<sup>[2]</sup>;巡检人

员态度是否认真,能否每次巡检到各个隐蔽角落,能否全面检查发电机碳刷滑环系统可能存在的隐患;巡检之后形成的巡检报告多数由纸质版表格保存,巡检人员能否详细记录巡检时间、巡检内容;巡检人员的不同,可能会导致巡检报告内容不统一,对同一问题现象的描述五花八门。

在调查中,也发现有部分电厂在发电机碳刷滑环系统中,使用红外线进行测温。红外线测温采用有线式连接,对目标进行点对点的非接触式测温。在碳刷滑环中进行应用,可以对目标点进行24h的在线监测,但是在实际应用中发现红外线测温有许多问题无法克服。例如,一个红外线测温仪只能对应一个测温点,对于碳刷滑环这种需要大面积监测温度的系统来说是远远不够的。若想测得每个碳刷的温度,必须大量安装红外测温传感器,传感器的数据传输必须靠有线传输,这样布线就会变得非常麻烦;常规的红外线传感器有效安装距离约为15cm~30cm,随着红外热像仪与测温点之间距离越远,测得温度的精度越差。由于发电机组碳刷滑环的特殊性,无法在原有设备上安装红外测温传感器,只能根据现场实际情况定制安装支架进行安装,额外增加了碳刷滑环安全运行的风险,而且红外线传感器数据通常使用4mA~20mA模拟量进行有线传输,相对的数据传输距离较短<sup>[3]</sup>,温度监测显示装置只能放在现场,出现报警信息时,巡检人员只有到达现场才能发现问题,大大延误了报警响应时间;红外线测温显示的数据属于实时的温度数据,数据一般保存在装置处理器的内存中,但内存空间小,储存数据源有限,无法长时间保存,也无法为后期检修维护提供可靠的依据。

## 3 红外热成像技术的应用

### 3.1 基本原理

在自然界中,一切高于绝对零度(-273℃)的物体都会辐射出电磁波,这种电磁波被称为热红外线。而这种热红外线处于肉眼不可见的光波频段,但是几乎自然界中的所有物体却都在时时刻刻不间断地辐射出热红外线。热红外成像通常是指3μm~5μm的中红外成像和8μm~12μm的远红外成像。人眼对约0.4μm~0.7μm的波段敏感,看不到较长波长的热能量。要记录这些能量,需使用特殊的探测器或传感器,成像光学系统也必须有效地传输这些波长的光。

### 3.2 优势

随着红外热像技术的突破,人们对红外热像仪的应用不断增多,红外热像仪在各个领域的应用也愈来愈广泛。红外热成像技术作为一个新兴测温技术,相比传统测温技术而言,有着无可比拟的优势。例如,红外热成像测温的面积非常广,传统测温主要是针对某一点的测温,如果想进行大面积测温,则必须使用多个传感器进行配合测温。这样也不可能兼顾所有点,而红外热成像测温是对镜头可

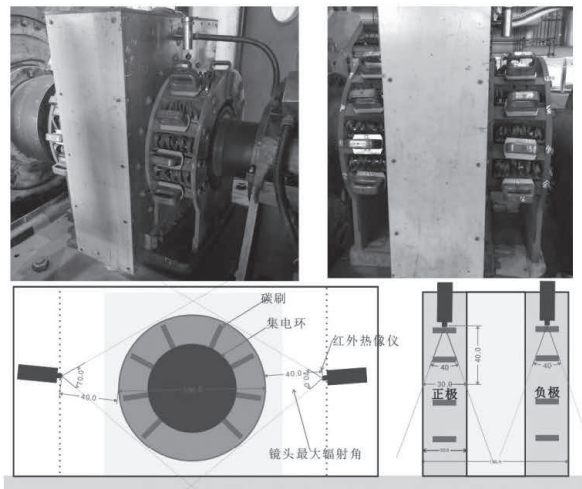


图1 设备安装图

Fig.1 Equipment installation diagram

覆盖的区域内所有点进行测温，能兼顾所有部位；红外热成像测温响应时间极大幅度优于传统测温方式，传统如热电偶测温，一般通过热传导的形式使得温度传感器的温度发生变化，进而计算出温度数值，因材料的差异其响应时间一般为秒级，而红外热成像测温直接通过热辐射电磁波进行测温，电磁波的传输速度是光速的。这样使红外热像仪测温的响应时间通常是毫秒级别，部分热像仪响应时间甚至达到微秒级别；在此基础上，红外热成像测温抗干扰能力极强，红外热成像技术接收物体表面发射的红外光波，采集热辐射进行测温，而自然界中除绝对零度外任何物体都会向外发射红外辐射能，不受电磁干扰。这个特性使红外测温方式具有极强的穿透能力，不会受到环境、空气中的杂质影响，包括在粉尘环境及一些复杂的工作环境下，红外热像仪的成像效果基本不受影响<sup>[4]</sup>。同时，红外热成像仪成像区别于传统光学成像，不需要借助照明光和环境光，而是采集被测物体辐射，经专业系统软件处理，自动生成物体图像。基于这个原理，红外热成像系统24h进行全天候工作成像，不受环境、光照等外界因素影响，是工业生产中重要的监测手段。

### 3.3 在碳刷滑环中的应用

在线式红外热成像系统一般是由红外热像仪、交换机、硬盘录像机、计算机等组成。红外热像仪安装在前端，用于采集目标物体的红外热图像数据，采集到的数据经光纤或者网线传输到交换机中进行数据交互，硬盘录像机连接交换机后进行视频数据的刻录保存，计算机通过专有软件

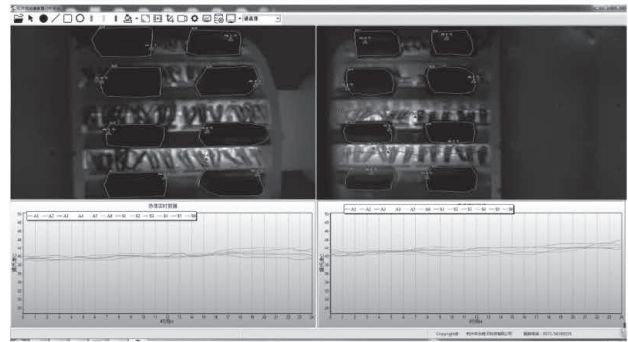


图2 红外热成像图

Fig.2 Infrared thermal imaging

对交换机里的数据进行调用后处理分析，并在显示器上显示出来。

发电机碳刷滑环一般是处在碳刷室内，碳刷室内部空间较小，碳刷安装位置与碳刷室墙壁的距离也比较近，在不影响原有设备运行的情况下，利用红外热像实现了对发电机碳刷滑环的全面覆盖。这样对红外热像仪的安装距离、自身体积、镜头可视角，安装角度等有一些硬性的要求。通过在现场的实际测试与后期模拟计算，为对碳刷滑环的红外热图像全面覆盖，最少安装4套红外热像仪，分别安装在正极的左右两侧与负极的左右两侧，镜头的可视角应选择大于70度的广角镜头，镜头与被测区域的中心位置垂直距离不低于30cm。这样既能保障红外热像仪能全面覆盖所有碳刷，也能保证测温的可靠性与安全性，同时也能节约一定的生产成本<sup>[5]</sup>。

运行人员掌握碳刷滑环的运行情况，除了通过红外热图像直观地了解碳刷滑环的温度分布情况外，还需要对红外热像仪采集到的数据进行智能分析处理。传统测温设备一般是通过数值对比，设置温度阈值报警。在线式红外热像系统在阈值报警的基础之上，增加了温升速率报警与温升趋势报警。温升速率报警是针对温度上升过快的事故：例如，温度在5min之内上升10℃，这时虽然温度没有达到设定阈值，但是此时设备的运行状况明显异常，如不及时处理很可能造成环火事故；温升趋势报警是针对温度缓慢上升的故障进行超前预警：例如，温度阈值设置120℃，当前温度110℃，温度在过去1h之内上升了15℃，按当前上升趋势在1h之后温度将达到125℃，会超出阈值报警值，此时发出温升趋势预警能尽早通知运行人员提前排除故障，减少损失。

在线式红外热成像系统在运行过程中能检测到大量的温度数据，系统根据碳刷编号、系统时间等信息对温度数

(下转第5页)

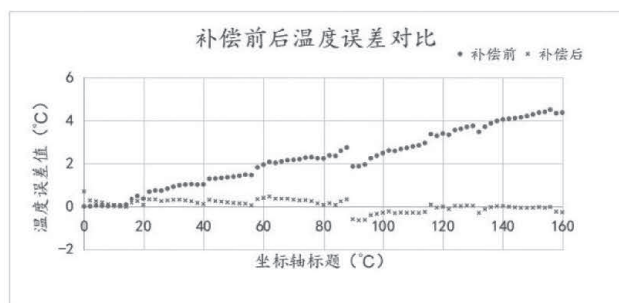


图6 补偿前后温度误差对比  
Fig.6 Comparison of temperature error before and after compensation

统,能够及时有效地采集屏蔽泵电机定子绕组的温度参数。相比于单片机等器件而言,本系统具有传输数据较快、成本较低、精度高,可以实现屏蔽泵电机定子绕组的在线检测,改变了以往屏蔽泵电机定子温度无法采集并实时显示的瓶颈,在技术创新上具有一定的优越性。

通过FPGA硬件系统设计、波形仿真和实验验证,本系统能够及时有效地获得屏蔽泵电机工作时的温度信息,

测量范围满足屏蔽泵工作环境要求。借助神经网络的算法补偿,使温度测量系统准确度可达 $0.5^{\circ}\text{C}$ ,极大地提高了测量精度,并为提高系统鲁棒性提供了先决条件,对屏蔽泵智能化及稳定性评估和改进提供了一定的参考,本设计具有较高的实际工程意义。

#### 参考文献:

- [1] 陈长燕.屏蔽电泵国内基本情况与发展趋势分析[J].防爆电机,2017,52(5):54-57.
- [2] 李雅范,李梦启,秦斌,等.第三代核主泵屏蔽电机的关键部件金属材料国产化综述[J].大电机技术,2017(2):26-30.
- [3] 王利伟.高效屏蔽泵的性能研究[D].江苏 镇江:江苏大学,2010.
- [4] 顾言林,刘淼,耿杨,等.基于PT100的高精度温度测量电路的设计[J].测控技术,2018,37(5):101-103.
- [5] 李鑫,韩会山,李凌雁,等.简易可调电流源的应用[J].邢台职业技术学院学报,2009,26(3):75-77.
- [6] 李蒙.基于FPGA的UART接口设计与实现[D].安徽:安徽大学,2015.
- [7] 周鑫.全连接神经网络在FPGA上的实现与优化[D].安徽:中国科学技术大学,2018.
- [8] 张泽旭.神经网络控制与MATLAB仿真[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2011.
- [9] 马建国,孟宪元.FPGA现代数字系统设计[M].北京:清华大学出版社,2010.
- [10] 宋慧敏,杨社堂,赵栋栋.基于人工神经网络的无线传感器定位算法[J].计算机测量与控制,2014,22(2):473-475,502.

(上接第103页)

据进行整理归档,形成有效的数据库文件。系统通过温度数据库生成月度总结报表、年度总结报表等,帮助运行人员掌握当月、当年碳刷滑环的整体运行情况。同时,系统可采集机组运行的励磁电流数据,再结合温度数据建立数学模型,通过对碳刷温度数据与励磁电流数据的对比分析,可以得出在既定励磁电流下碳刷的理想工作温度范围,从而通过温度偏差确定碳刷的工作状态及工作环境<sup>[6]</sup>。

#### 4 结束语

红外热成像测温技术具有响应速度快、测温精准、测温距离远,不受光线粉尘影响等优势,适合在重要工业场景应用。在线式的红外热成像系统,通过温度阈值报警、温升速率报警、温升趋势报警等多重报警规则,对已发生事故提前报警,以减少事故带来的损失;通过大数据的对比分析,辅助运行人员判断设备的运行状况,以减少事故

的发生。因此,在线式的红外热成像系统能有效地对发电机碳刷滑环实施在线监测。

#### 参考文献:

- [1] 王杰.集电环-碳刷红外热成像在线监测系统[J].电力系统装备,2020,1(1):140-141.
- [2] 魏静微.大型汽轮发电机励磁碳刷电流在线检测与分析[J].传感器与微系统,2016, 35(8):33-36.
- [3] 牛野.同步发电机励磁碳刷电流监测系统[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2016.
- [4] 魏燕军.发电机碳刷故障分析及在碳刷电流线监测技术运用[J].电力技术,2015,11(S1):74-77.
- [5] 高劲松.葛洲坝电站发电机励磁系统在线监测技术初探[J].水电厂自动化,2014,35(2):44-46.
- [6] 陈碧辉.发电机滑环温度的红外在线监测[J].云南水力发电,2006,22(5):80-82.