

数字化换流站运行状态监测系统 及关键技术设计

徐东东[†], 魏华兵, 薛鑫新, 陈剑飞, 贾红光

(国网浙江电力有限公司超高压分公司, 浙江 杭州 311199)

摘要:针对目前换流站的运维工作监控工作开展困难、监测数据采集精度低等问题,提出了一种基于红外与可见光测温技术的换流站远距离视觉运维系统。该系统采用电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)和互补金属氧化物半导体作为见光传感器,通过设置 Visio Studio C# 编程语言和 SQL Server 数据库,实现了换流站开关柜高压线以及上下母排连接点及断路器触点等多个位置的温度在线监测。与此同时,采用基于有限元算法模型进行换流站温度场仿真分析,通过实例试验分析,本方法的拟合曲线具有较低的误差,在1000测点环境下误差占比只有0.4%。

关键词:红外与可见光;多源信息融合;FPGA 主控芯片;阻抗变换电路;注意力机制;图像编码
中图分类号:TP37 **文献标识码:**A

Digital Converter Station Operation Condition Monitoring System and Key Technology Design

XU Dongdong[†], WEI Huabing, XUE Xinxin, Chen Jianfei, JIA Hongguang

(Ultra-high Voltage Branch of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311199, China)

Abstract: In view of the difficulties in monitoring the operation and maintenance work of the current converter station and the low accuracy of monitoring data acquisition, a remote visual operation and maintenance system of the converter station based on infrared and visible light temperature measurement technology was proposed, which adopted the charge coupled device (CCD) and complementary metal oxide semiconductor as light sensors, through the setting of Visio Studio C# programming language and SQL server database, the converter station switch cabinet high voltage line, upper and lower busbar connection points and circuit breaker contacts and other positions of temperature online monitoring. At the same time, the finite element algorithm model was used to simulate the temperature field of the converter station. Through the case test analysis, the fitting curve of this research method has a low error, and the error ratio is only 0.4% in the environment of 1000 measuring points.

Key words: infrared and visible light; multi-source information fusion; FPGA main control chip; impedance conversion circuit; attention mechanism; image coding

换流站在高压直流输电系统中具有重要的作用,能够实现不同数值的电流或电压转换,系统通常包含有换流阀、换流变压器、平波电抗器、交流开

关设备、交流滤波器及交流无功补偿装置、直流开关设备、直流滤波器、控制与保护装置、站外接地极以及远程通信系统等。这些部件都有出现故障的

可能性,换流站运维通常包括换流站巡视、日常信号处置、现场检修、操作、事故处理等多项内容,在运维中的多种任务中,故障检测尤为重要,如何及时发现换流站故障、对换流站运行漏电检测是涉及人身安全的重要问题^[1]。常规技术中,通常采用检测设备实现换流站故障或者漏电检测,这种方法虽然也能实现故障检测,但一旦检测设备出现故障,就难以实现故障的实时监控,同时,智能电网的通信只能在有限的区域内建立,即配电线路能够到达的区域。这也是智能电网的一大弱点,其仍然受配电系统物理通信区域的限制^[2]。

为此,世界各地的研究人员都致力于换流站的运维工作。文献[3]提出了±800 kV 柔直换流站电气系统可靠性分析,该方法对高压直流断路器的运维状态进行诊断,并根据±200 kV 高压直流断路器在系统操作合闸过程中出现的位置信号未及时返回控制系统运行状况进行诊断,通过将分位传感器调整至正常工作位置的方法解决了该问题。文献[4]根据模块化多电平换流器(Modular Multi-level Converter, MMC)直流侧发生接地短路时,故障电流具有上升快,峰值高的特点,对换流站的运维状况进行故障诊断,将故障时电容部分能量馈入交流侧,达到了降低故障时电流上升率和电流峰值的目的,该控制方式不仅抑制交流侧电源向故障点放电,而且减小了直流电容向故障点的放电电流。但是上述方法智能化程度差。文献[5]基于改进关联规则对直流换流站典型运维事件进行诊断,通过改进型关联规则优化了直流换流站的智能化诊断,但该方法控制能力滞后。针对上述问题,本研究进行以下技术研究。

1 换流站远距离监控系统设计

由于换流站运维过程中容易出现漏电等多种安全隐患,涉及工作人员的人身安全问题,本研究提出远程监控方法,该方法中,通过将红外与可见光多源信息融合,建立远距离视觉系统,如图 1 所示。

本研究的见光传感器采用电荷耦合器件和互补金属氧化物半导体,红外图像采集模块能够实现换流站异常数据信息的采集与计算。通过测温装置实现换流站异常数据信息的温度测量,通过设置 Visio Studio C# 编程语言和 SQL Server 数据库,实现了换流站开关柜高压线以及上下母排连接点及断路器触点等多个位置的温度在线监测。本研究采用 IEC 61850《换流站网络与通信协议》标准实现换流站监测数据信息的测量、汇聚和分析。数

据获取通过可见光摄像头和红外摄像头进行,由于采集图像数据信息的多源化,将可见光图像和红外图像进行数据融合,通过 H. 26x 视频编解码技术实现视频图像的压缩处理,提高数据利用率。数据传递时,通过支持流媒体的传输协议,比如实时传输协议(Real-time Transport Protocol, RTP)、实时传输控制协议(Real-time Transport Control Protocol, RTCP)和实时流协议(Real-time Streaming Protocol, RTSP)等^[6-7]。图像应用时通过解码模块实现数据解码,通过 JNI 技术实现对 FFMPEG 动态库的调用,应用灵活。

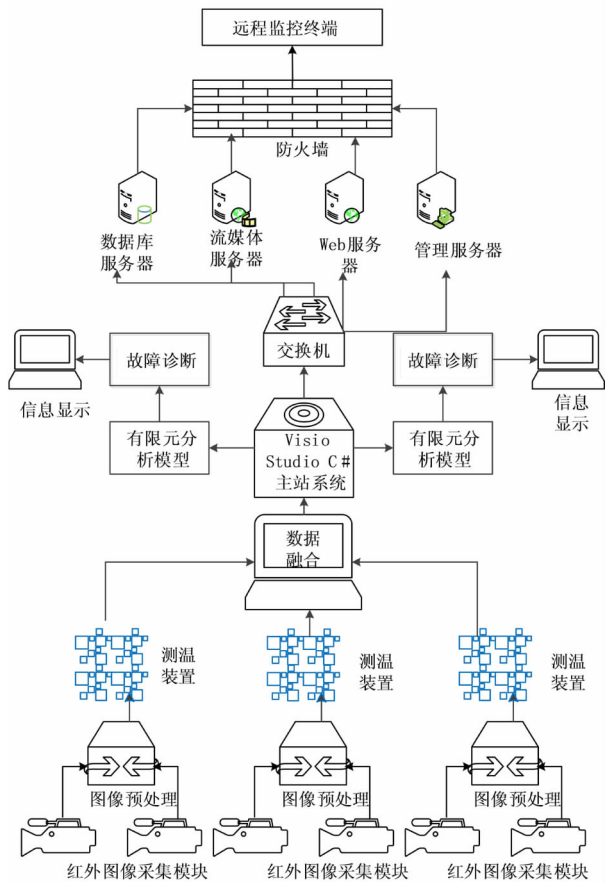


图 1 换流站远距离监控系统方案设计图

对多源数据信息处理时,采用红外与可见光图像融合方法。该模型在结构上包括生成器和两个鉴别器,框架如图 2 所示。

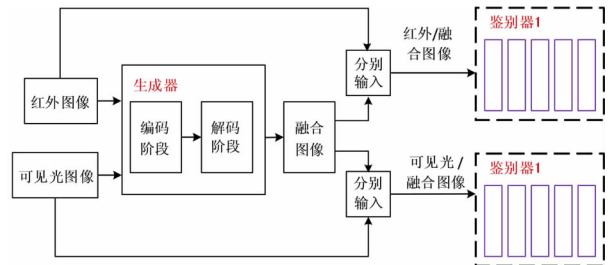


图 2 红外与可见光图像融合算法框架

生成器采用编解码网络结构,由于红外与可见光图像具有不同的模态,图像特征存在差异,在生成器中的编码阶段采用两个数据流分别编码,具体应用时,通过两个单独的编码结构,将编码结果在通道方向连接通过解码器求解融合图像。编码器包含两个结构相同的数据流,每个数据流包含三个卷积模块,卷积模块使用 PReLU 作为激活函数,卷积核设置为 3。编码器中也包含三个卷积模块,卷积步长设置为 2,卷积核数量分别设置为 128、128、64。生成器的编码阶段使用注意力模块,从不同的尺度提取多尺度注意力图^[8]。

换流站在运行过程中通常承载高压或者通过大电流,本研究采用铂电阻测温法,通过红外方式对测量数据信息进行传递,通过有限元分析方法分析,下文对该技术进行项目描述。

2 红外测温技术设计

采取红外测温技术实现换流站数据信息获取时,通过光信号转换为数据信息,即光信号转换为模拟电信号,再转换为数字信号,最后转换为模拟信号。红外图像与可见光图像不同,红外图像显示的是灰度级图像,当背景温度越低时红外图像显示的亮度就会越暗。为了使采集到的红外图像的视觉效果更清晰易于观察,本研究设计出基于 FPGA 的红外图像采集模块,采用单片 FPGA 进行红外图像采集模块的开发^[9]。红外图像采集模块硬件结构如图 3 所示。

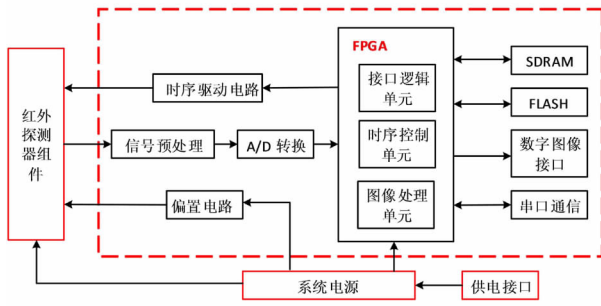


图 3 红外图像采集模块硬件结构

本研究使用的红外探测器满足中波 $640 \times 512 \text{HgCdTe}$ 红外焦平面探测器组件,探测响应波段为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 。红外图像采集模块的 FPGA 主控芯片为 EP4CE40F23C8,具有丰富的 I/O 接口,可以实现模块的多种功能^[10-11],采用并行数据处理,具有极高的数据处理速度。在架构上主要包括偏置电路,预调理电路、模数转换电路,主控 FPGA 电路、数据存储电路、串口通信电路、时钟电路和其他外围电路。主控芯片产生时序控制信号,为

探测器提供正常工作的时钟信号和积分信号等数字信号。

在温度测量时,本研究方法采用 TEP1-142T300 型温差发电片实现温度的测量,该温度片应用的材料为 Bi_2Te_3 ,内阻较小,仅为 3Ω ,具有较理想的导热能力,其导热系数为 $1.5 \text{W/m} \cdot \text{K}$ 。在测温过程中,将该电路设置在换流站不同位置上,电路设计时,设置了基准二极管,其电压为 2.5V ,能够产生基准源,在测温时,为铂电阻和基准精密电阻 R_{ref} 提供正常工作需求的电压值。关于测温电路如图 4 所示。

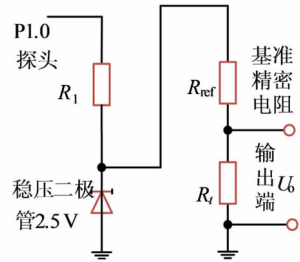


图 4 测温电路

在温度测量时,铂电阻的型号采用的是 PT1000,其测温原理是根据不同温度的变化,其阻值不同。比如当温度为 $0 \sim 200^\circ\text{C}$ 时,电阻值可以为 $1000.00 \sim 1758.56 \Omega$ 。电压范围可以为:

$$\Delta U = \left(\frac{R_{t200}}{R_{\text{ref}} + R_{t200}} - \frac{R_{t0}}{R_{\text{ref}} + R_{t0}} \right) U_{\text{ref}} \quad (1)$$

为了更精细地表达温度变化规律,则电压变化比例可以为:

$$\frac{\Delta U}{U_{\text{ref}}} = \frac{R_{t200}}{R_{\text{ref}} + R_{t200}} - \frac{R_{t0}}{R_{\text{ref}} + R_{t0}} \quad (2)$$

通过式 (1) 和式 (2) 可以总结,当 $R_{\text{ref}} = \sqrt{R_{t0} R_{t200}} = 1300 \Omega$ 时,测温电路中电压变化幅度较大。电压基准可以通过下式:

$$U_o = \frac{R_t}{R_t + R_{\text{ref}}} U_{\text{LM385}} \quad (3)$$

其中的基准二极管工作过程中的电压值输出可以为 2.5V ,该电阻值输出电压值具有较高的精度,其值可以为:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta U_o}{U_o} = & \frac{R_{\text{ref}}}{R_t(R_t + R_{\text{ref}})} \alpha_{R_t} + \frac{1}{R_t + R_{\text{ref}}} \alpha_{R_{\text{ref}}} \\ & + \frac{1}{U_{\text{LM385}}} \alpha_{\text{LM385}} + \sigma_{\text{QE}} + \frac{\alpha_{\text{ADref}}}{V_{\text{ADref}}} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, α_{R_t}/R_t 为铂电阻的相对误差,该误差值为 0.04% , $\alpha_{R_{\text{ref}}}/R_{\text{ref}}$ 为参考电阻的相对误差,该误差值为 0.01% 。电路中的稳压二极管输出的电压误差 α_{LM385} 为 $120 \mu\text{V}$; ADC 的 σ_{QE} 误差可以为 2^{-13} ; ADC 电压精度 $\alpha_{\text{ADref}}/V_{\text{ADref}}$ 可以设置为 2^{-11} 。

$$R_{\min} = \frac{U_{\text{Pl},0} - U_{\text{LM385}}}{i_{\text{LM385}} + \frac{U_{\text{LM385}}}{R_{\text{ref}} + R_t}} = 0.451 \text{ k}\Omega \quad (5)$$

通过式(5)计算出红外测温信息采集精度。红外测电路能够将采集到的温度信息转换为光信号,最终输出信息通过单片机的 I/O 口,信息通过驱动三极管,对外界进行数据显示,通过红外发光管点亮,向外界发送采集到的换流站异常、故障数据信息红外光信号^[12]。

3 基于有限元算法模型的换流站温度场仿真分析

在应用有限元算法模计算换流站检测到的温度场数据信息时,首先需要确定换流站温度场仿真参数。将计算出的电力换流站故障数据信息转化成的热量,通过设置换流站温度场仿真模拟参数,通过将求解区域离散成若干个单元将温度场的混合边值问题转化成相应的等价变分问题,最终准换为数学方法实现换流站温度场数据信息计算^[13],基于有限元算法模型的换流站温度场模型示意图如图 5 所示。

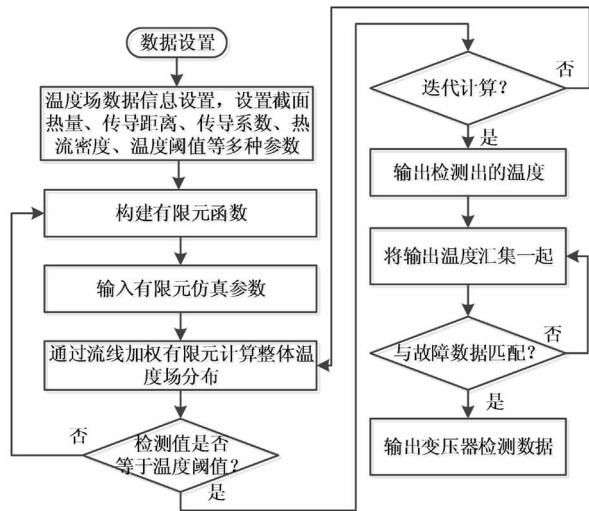


图 5 基于有限元算法模型的换流站温度场流程

通过构建如图 5 所示的换流站温度场信息,构建傅里叶导热定律函数,进而计算出从换流站检测到的故障数据信息,通过以下函数为:

$$\Phi = S \cdot k \cdot \frac{T_1 - T_2}{x} \quad (6)$$

式中, Φ 为热通量, T_1 与 T_2 为换流站发热部件进行热传导的温度, x 为发热部件进行热传导时遍历路径, S 为换流站发热部件实现发热的表面积, k 为换流站发热部件进行热传导的系数, q 为换流站发热部件进行发热的热流密度,则存在以下函数关

系式:

$$q = \frac{\Phi}{S} = \lambda \cdot \left(\frac{T_1 - T_2}{x} \right) \cdot \sigma \quad (7)$$

式中, σ 表示传热材质系数,由于换流站体积大,工作在较大的单位,在计算温度场仿真参数时,需要对换流站周围固有温度场进行持续更替,才能计算出换流站检测到的数据信息^[14]。在计算换流站周围固有温度场时,又引入了牛顿对流换热公式,则有:

$$\begin{cases} q = h \cdot (T_w - T_f) \\ q = h \cdot (T_f - T_w) \end{cases} \quad (8)$$

式中, T_w 、 T_f 分别为换流站发热部件检测物体的壁面温度及换流站温度场分析时的流体温度, h 为换流站温度场仿真计算过程中的传热系数。换流站工作中,为了测量母排温度、汇聚终端温度等分布式换流站温度时,由于热在空间范围内会出现辐射传热,为了提高计算精确度,计算两种热辐射反应的仿真参数,则:

$$\Phi_1 = S_1 \cdot \epsilon \cdot \left[C_0 \cdot \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - C_0 \cdot \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (9)$$

式中, Φ_1 是换流站不同发热物体表面 1 与表面 2 通过热辐射形式发生对流的热量, S_1 为换流站不同发热物体表面 1 中一个的表面积, ϵ 为换流站不同发热物体 1 的黑度, C_0 为换流站不同发热物体辐射系数。

为了提高有限元算法分析能力,将计算出的所有值通过离散数据点 (x_i, y_i) 实现数据记录,通过最小二乘法实现数据信息的计算,其中 $i=0, 1, 2, \dots, m$,假设检测到的所有点记作为 $y = S^*(x)$,将该函数与数据信息进行拟合,拟合误差函数表示为:

$$\delta_i = S \times (x) - y_i \quad (10)$$

为了提高数据精度,将最小误差平方和计算的函数, $S^*(x)$ 输出为最小值,则有:

$$\sum_{i=0}^m (\delta_i)^2 = \sum_{i=0}^m [S^*(x_i) - y_i]^2 = \min_{S(x) \in \varphi} \sum_{i=0}^m [S(x_i) - y_i]^2 \quad (11)$$

换流站多种数据信息中,由于采集到的数据多样,在数据信息具有一般性的前提下,利用最小二乘法,采用 $\|\delta\|^2$ 实现数据信息加权平方求和,则公式可以写为:

$$\sum_{i=0}^m \omega(x_i) [S^*(x_i) - y_i]^2 = \min_{S(x) \in \varphi} \sum_{i=0}^m \omega(x_i) [S(x_i) - y_i]^2 \quad (12)$$

式中, $\omega(x) \geq 0$, $S^*(x)$ 为最小二乘解。通

过这种方式,能够将换流站中的多种数据信息提炼出来。通过对多种数据求解,温度场仿真参数控制方程可以表示为:

$$k_2 \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q_A = 0 \tag{13}$$

式中, k_2 是换流站油和换流站固体域的导热系数, ∂ 为换流站内测量物体的比热容, q_A 为换流站固体域的热流密度。使用整场离散、整场求解方法对式(13)进行数值计算。

通过有限元算法模型模拟仿真后,在换流站耦合界面进行温度场控制,在任意一点的温度模拟参数函数为:

$$\int_s \frac{\partial}{\partial x} (\rho u T) dv + \int_s \frac{\partial}{\partial y} (\rho u T) dv = \int_s \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial x} \right) dv + \int_s \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial y} \right) dv \tag{14}$$

式中, Γ 为有限元算法模型温度场中设置的扩散系数, S 为有限元算法模型温度场中的源项, u 为有限元算法模型温度场中速度矢量 $\boldsymbol{U}$ 在 x, y 轴上的速度分量。通过式(14)实现换流站任意一点温度计算。

为了提高热流密度能力,通过 Fourier 定律^[15]实现热流密度仿真参数计算,计算式为:

$$q_1 = \frac{T_p - T_w}{\frac{(\delta x)_w}{\Gamma_w}} \tag{15}$$

式中, q_1 表示为有限元算法模型温度场中热流密度, Γ_w 为有限元算法模型温度场中不同物体受热交界面处 w 的扩散系数。温度场换流站的所有仿真参数可以显示出来,本研究基于有限元的换流站流场及温度场仿真方法模拟仿真换流站内的流场及温度场特性,具有突出的技术效果。

4 实验结果与分析

为了验证基于有限元的换流站流场及温度场的效果及可行性,设置仿真实验。准备 640×480 红外像素画质、IFOV 参数为 0.93 mrad 、最小检测目标尺寸在 0.14 mm 、测温范围在 $-20 \sim 650^\circ\text{C}$ 的热成像仪进行实验。选择某郊外换流站工作区域,将该区域划分为若干点,比如 A 点、B 点、C 点和 D 点等,如图 6 所示。

通过上文介绍,通过图像信息采集单元提取图像信息,采集 640×480 红外像素,其中 IFOV 参数为 0.93 mrad 、最小检测目标尺寸在 0.15 mm 左右,人工在安全区域制造测温范围 $0 \sim 600^\circ\text{C}$ 的故障区域,为了试验的安全可以在换流站绝缘处放置高温金属或者安全炉。然后通过有限元算法模型

对故障区域进行分析。提取的信息特征如图 7 所示。



图 6 试验示意图

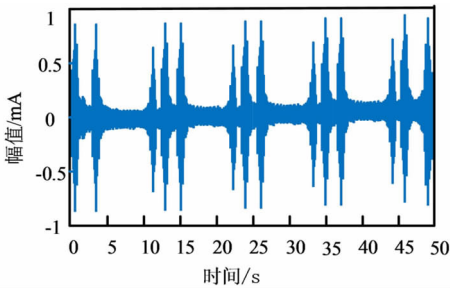


图 7 提取的区域数据信息特征波形示意图

假设在图 6 中的 A、B、C、D、E、F 点均设置有故障异常点,假设在 D 点进行测量,则温度波形如图 8 所示。



图 8 温度波形示意图

通过 TEP1-142T300 型温差发电片实现温度的测量时,经过 1 h 的测量,不同区段误差计算表如表 1 所示。

通过表 1 可看出不同位置处以及不同区段的阻值变化和计算误差示意图,通过最小二乘法实现换流站多种数据信息拟合,拟合曲线示意图如图 9 所示。

表 1 不同区段的误差

位置	温度区段	阻值	表达式	最大误差
A	0~100℃	100.00~139.07Ω	$T=2.5874R_t-258.9537$	0.18%
B	101~200℃	139.07~176.93Ω	$T=2.6780R_t-273.1238$	0.09%
C	201~300℃	176.93~213.43Ω	$T=2.7211R_t-281.1043$	0.10%
D	301~400℃	213.43~249.84Ω	$T=2.8761R_t-315.6433$	0.06%
E	401~500℃	249.84~284.61Ω	$T=2.9621R_t-341.5472$	0.08%
F	501~600℃	284.61~318.99Ω	$T=3.0461R_t-369.3129$	0.10%

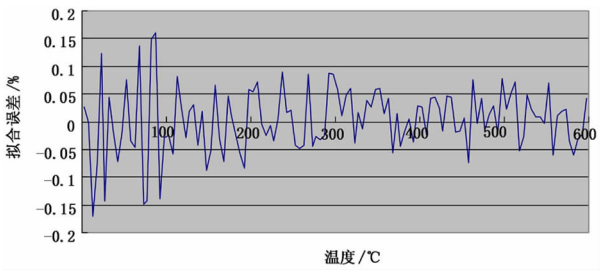


图 9 最小二乘法校正后误差拟合曲线示意图

通过图 9 可以看到,本研究方法的拟合曲线具有较低的误差,为了对比本研究方法的分析能力,将本研究方法分别与文献[4]方法和文献[5]方法进行对比。通过放置智能传感器在换流站 A~E 位置上总计 1000 个测点,每个监测数据的采样时间在 1~10 min 之间,统计监测到的温度参数数据的精准度并绘制成柱状图如图 10 所示。

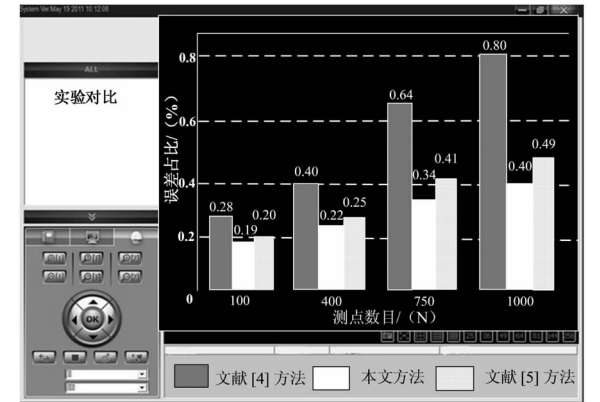


图 10 三种不同系统监测数据精准度对比

从图 10 可以看出,在不同数量测点环境下,本研究换流站远距离视觉运维系统误差更小,精准度更高,在 1000 测点环境下误差占比只有 0.4%。

5 结 论

应用红外与可见光多源信息融合技术,建立换流站远距离监控系统,采取红外测温技术实现换流站数据信息获取时,将光信号转换为数据信息,即光信号转换为模拟电信号,再转换为数字信号,最后转换为模拟信号。为了使采集到的红外图像的视觉效果更清晰、易于观察,系统基于 FPGA 的红外图像采集模块,采用单片 FPGA 进行红外图像采集模块的开发,通过将求解区域离散成若干个单元将温度场的混合边值问题转化成相应的等价变分问题,最终准换为数学方法实现换流站温度场数据信息计算,同时,经过实验验证了换流站远距离监控系统的可实用性,为换流站运维建设领域提供了新的思路。

参考文献

[1] 朱亚辉. 基于潜在低秩表示及导向滤波的红外与可见光图像融合方法[J]. 计算机系统应用, 2021, 30(9): 295—301.

[2] 马琼, 李通, 赵巨峰, 等. 使用局部视觉显著分析的红外图像增强[J]. 光学技术, 2021, 47(5): 601—607.

[3] 束洪春, 董海飞, 赵红芳, 等. ±800 kV 柔直换流站电气系统可靠性分析[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(2): 119—126.

[4] 唐欣, 黄晨, 潘一彬, 等. 直流故障下基于交流侧馈能的 MMC 换流站主动限流策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 56—64.

[5] 刘可真, 林铮, 骆钊, 等. 基于改进关联规则的直流换流站典型运维事件集诊断方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(4): 8.

[6] 李海锋, 许灿雄, 梁东升, 等. 计及换流站控制响应的多端混合直流线路后备保护设计[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 155—163.

[7] 田珊. 基于 D-S 证据理论的红外图像行人检测[J]. 科技通报, 2021, 37(7): 52—56.

[8] 侯春萍, 王霄聪, 夏晗, 等. 基于双通路生成对抗网络的红外与可见光图像融合方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(14): 326—335.

[9] 罗娟, 王立平. 基于非下采样 Contourlet 变换耦合特征选择机制的可见光与红外图像融合算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(7): 163—169.

[10] 蔡伟, 徐佩伟, 杨志勇, 等. 复杂背景下红外图像弱小目标检测[J]. 应用光学, 2021, 42(4): 643—650.

[11] 巩稼民, 吴艺杰, 刘芳, 等. 基于 NSST 域结合 SCM 与引导滤波的图像融合[J]. 光电子·激光, 2021, 32(7): 719—727.

[12] 沈瑜, 苑玉彬, 彭静. 基于变换域 PCNN 的近红外与彩色可见光融合[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(7): 2023—2027.

[13] 刘沛津, 王曦, 贺宁. 改进 GSO 与二维 OTSU 融合的红外图像多阈值分割方法[J]. 应用光学, 2021, 42(4): 671—677.

[14] 崔晓荣, 沈涛, 黄建鲁, 等. FABEMD 和改进局部能量窗口的红外中波和长波图像融合[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(7): 2043—2049.

[15] 路黎明. 基于局部能量与 NSCT 的红外与可见光图像融合[J]. 数字技术与应用, 2021, 39(6): 100—102.