

面向数字孪生的变电站开关设备综合监测系统设计

张一茗¹, 金喜洋², 李少华¹, 张文涛¹, 何莉鹏¹, 王子聪¹

(1. 平高集团有限公司, 河南 平顶山 467001; 2. 河南平高电气股份有限公司, 河南 平顶山 467001)

摘要: 随着一、二次设备的深度融合, 数字电网要求智慧高压开关设备更加智能、可靠, 但存在智能监测设备繁多复杂、集成度低的问题。为了解决智能传感设备数量多、成本高的问题, 文中设计的一套综合监测系统对不同状态监测参量进行融合分析, 提高智慧高压开关设备状态分析、故障诊断能力。通过试验对比分析综合监测系统和不同类型标准传感器测量的数据, 结果表明文中设计的综合监测系统测量误差满足标准技术要求, 具有较高的可靠性, 为智慧型高压开关设备推动未来数字电网的发展奠定了坚实的基础。

关键词: 智慧 GIS; 全状态感知; 多参量融合; 边缘计算; 数字孪生; 人机交互; 故障诊断; 智能运维

Design of Integrated Monitoring System for Substation Switchgear for Digital Twin

ZHANG Yiming¹, JIN Xiyang², LI Shaohua¹, ZHANG Wentao¹, HE Lipeng¹, WANG Zicong¹

(1. Pinggao Group Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China; 2. Henan Pinggao Electric Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China)

Abstract: With the deep integration of primary and secondary equipment, digital power grid requires intelligent high-voltage switchgear to be more intelligent and reliable, but there are problems of various and complex intelligent monitoring equipment and low integration. In order to solve the problem of large number and high cost of intelligent sensing equipment, a comprehensive monitoring system designed in the paper conducts fusion analysis of different state monitoring parameters, so as to improve the state analysis and fault diagnosis ability of intelligent high-voltage switchgear. Through the comparative analysis of the data measured by the comprehensive monitoring system and different types of standard sensors, the results show that the measurement error of the comprehensive monitoring system designed in the paper meets the standard technical requirements and has high reliability, which lays a solid foundation for the intelligent high voltage switchgear to promote the development of digital power grid in the future.

Key words: intelligent GIS; full state perception; multi-parameter fusion; edge computing; digital twin; human-computer interaction; fault diagnosis; intelligent operation and maintenance

0 引言

随着国家“双碳”发展战略以及新型电力系统建设的逐步深入, 数字电网的发展正欣欣向荣, 各个设备厂家以及网省公司在新型电力系统各环节中全面开展人工智能、移动互联等现代前沿技术探索, 着力达到新型电力系统各阶段万物互联、人机交互的目的, 致力中国电网转型为全面状态感知、高效数据处理、功能灵活快捷的智慧型数字电网系统^[1-4]。高压开关设备作为新型电力系统中不可或缺的组成部分, 其能否可靠工作涉及到整个数字电网的安全^[5-8], 为推进智慧高压开关设备的全状态感知和智能运维, 传感器、高清摄像头等监测装置是状态感知技术的基础, 其需要监测的物理量越来越多, 如何统一、规范地管理监测的数据是目前各个设备厂家重点解决的问题^[9-11]。随着高压开关设备的监测参量逐渐细化, 每类在线监测参量皆需配备一个智能监测装置 (IED)^[12-14] 以实现数据的采集、分析处理, 产生了 IED 种类繁多的问题。过多的 IED 不仅导致许多功能重复, 浪费大量的软硬件资源, 不利于设备状态感知技术的推广, 而且占用了开关设备内部大量的物理空间, 制约了开关设备小型化的发展, 故按照硬件标准化、软件集成化的原则, 开发统一的硬件平台是目前

亟需解决的难题。

文中利用容器技术开发了开放式硬件平台, 通过软件定义的方式, 灵活升级、扩展硬件平台业务功能, 以轻量级、高性能操作系统为支撑, 实现了高压开关设备多源数据的一体化监测。

1 系统架构

面向变电站的智慧高压开关设备数字孪生系统架构见图 1。

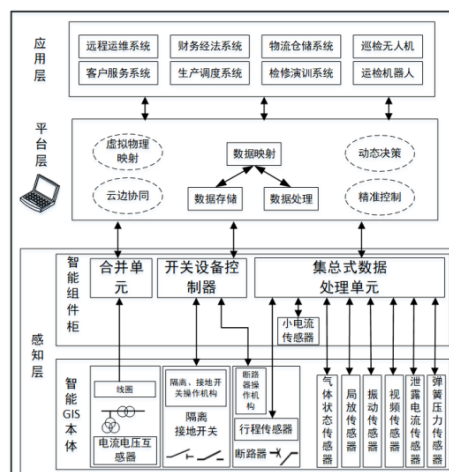


图 1 数字孪生系统架构

Fig. 1 System Architecture of digital twin

如果将数字孪生类比成智慧生命，基于数字孪生的开关设备智能运维系统可分为以下 3 个部分：第 1 部分，感知层，相当于神经系统，是信息采集的关键；第 2 部分，平台层，相当于智慧大脑，是信息决策的地方；第 3 部分，应用层，相当于运动系统，是数字孪生功能的实现主体。其中感知层主要分为智能控制系统、互感器系统和综合监测系统^[15-17]。智能控制系统主要包括开关设备控制器和传统控制回路；互感器系统主要包括互感器和合并单元；综合监测系统包括不同类型传感器和集总式数据处理单元，各传感器采集各状态量并就地数字化，可通过 Modbus、TCP/IP 协议或无线通讯方式上传至集总式数据处理单元，集总式数据处理单元中对应 APP 模块对上传的数据进行解析、计算和分析，并实现状态评估和预警。综合

监测系统是数字孪生的基础，为其提供设备状态数据。平台层将实测数据与孪生体数据互相映射与更新，实现运维系统的动态决策。应用层是在数字孪生体仿真的基础上，支撑开关设备全生命周期过程中不同环节的业务，包括远程运维系统、客户服务系统、生产调度系统等。

文中以 252kV 智慧高压开关设备为研究对象，其智慧核心在于状态全要素感知，感知状态主要分为：气体、机械、振动、绝缘、隔离开关触头等状态，各状态感知的物理量见表 1^[18-21]。其中，断路器机械状态要根据行程和线圈电流两个物理量计算出新的参量，如分合闸时间、速度等，所以对于行程和线圈两类传感器的同步偏差要求较高，不超过 1 ms。

表 1 高压开关设备状态全要素感知项目和物理量

Table 1 Total factor perception items and physical quantities of high voltage switchgear status

序号	感知项目	感知物理量
1	气体状态	SF ₆ 气体压力、密度、温度、微水
2	机械状态	断路器行程、线圈电流、辅助开关通断、弹簧压力、储能电机电流，计算开关分合闸时间、速度
3	振动状态	断路器操作过程中振动信号、母线运行时振动信号
4	绝缘状态	特高频局放信号、超声波信号，计算放电信号强度、放电频率
5	隔离开关触头状态	隔离开关触头位置状态、电机电流、主触头温升
6	避雷器状态	避雷器泄漏电流，包括全电流、阻性电流、容性电流
7	系统负荷	一次电压、电流

针对开关设备全状态感知的数据吞吐量，根据物联网环境下边缘计算平台的需求，提出一种轻量级边缘计算平台架构，其轻量级特点体现在轻量级边缘节点、轻量级网络交换、轻量级虚拟化等方面。基于边缘计算平台架构完成方案中各功能模块技术细节的设计，对所有开关设备进行状态监测时，采用低成本、低功耗、小体积的单板机设备构成边缘计算节点，利用轻量级虚拟化技术及软件定义网络技术进行资源抽象、控制和编排，实现集组网、监控管理、服务提供于一体的轻量级边缘计算平台。

2 综合监测系统设计

文中设计的综合状态监测系统包含 1 台装置和 9 类传感器，外观见图 2。

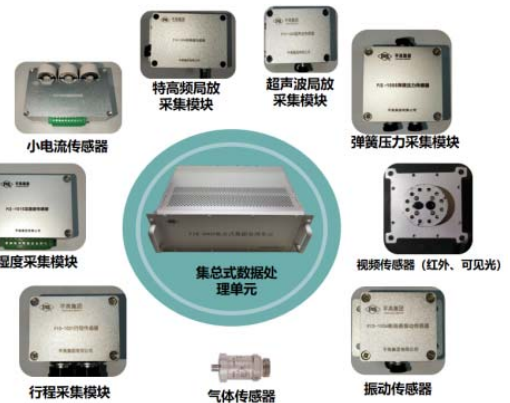


图 2 集总式数据处理单元及传感器外观

Fig. 2 Appearance of the total data processing unit and sensor

2.1 集总式数据处理单元

集总式数据处理单元的整体硬件研究分为以下 4 部分：

1) 基于 RK3399 的主控板设计。在硬件平台的基础上安装嵌入式 Linux 操作系统，根据不同通信场景需求挂载丰富的通信接口，通过网口收集传感器数据以满足数据采集的时效性，并以 JS 开发友好的人机

交互界面，实现对 GIS 设备状态的实时监测与控制。

2)基于 ZYNQ 的低速物理量采集板设计。基于 ARM+FPGA 的 ZYNQ 芯片实现的串口采集设计，利用 FPGA 的硬件可编程与 ARM 的处理能力，通过 IP 核对 FPGA 功能设置，编辑 48 路并行串口，支持串口配置，通过 RS-485 转换电路，实现传感器数据的采集，并通过网口将采集数据上传至主控板。

3)基于 RTL8316EI 的高速物理量采集板设计。考虑大数据上传和数据传输时效性的需求，采用基于 RTL8316EI 芯片实现的高速物理量采集设计，考虑数据上传时效性的需求。由硬件电路完成芯片配置，无需 EEPROM 及单片机配置实现交换机功能，共扩展 28 路百兆网口用于连接传感器，实现主控端对红外可见光与特高频局部放电传感器数据采集。

4)基于 STM32 的开关量感知输入和控制输出板设计。以 STM32F103 为核心，通过网络通信和 GPIO 功能，控制与读取光电耦合器引脚电平，实现开关设备内控制与开关量感知功能。

集总式数据处理单元的设计依据装置应用的场合并考虑到装置的可拆卸、可组装的要求^[22]。综合以上分析，监测系统采用标准 4U 机箱，从左到右 9 块电路板依次为 RK3399 主控板 1 块、高速物理量采集板 2 块、开关量感知输入板 1 块、开关量控制输出板 1 块、ZYNQ 低速物理量采集板 3 块、电源板，各功能电路板通过母板内的数据交互接口进行数据传输，监测系统硬件电路板堆叠方式及尺寸见图 3。

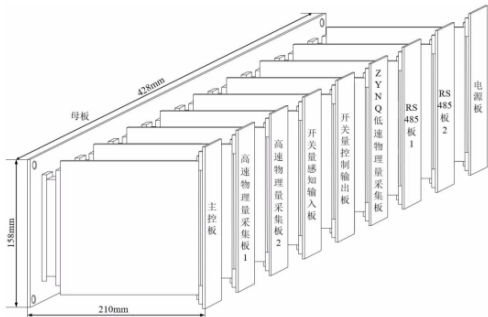


图 3 装置堆叠方式与尺寸图

Fig. 3 Stacking mode and dimensions of the device

2.2 同步方案设计

监测系统需要同步采集断路器行程、分合闸线圈电流、弹簧压力、断路器振动等多路下位机信号。在分立式测量的情况下，文中提出基于 RTC 实时时钟实现软件同步，RTC 软件同步说明图见图 4。基于 MODBUS 通信协议^[23]，上位机每隔一段时间通过广播对各个下位机进行对时，下位机将 RTC 时间修改为广播时间并继续运行 RTC。因 RTC 运行时间只同晶振有关而同程序运行优先级无关，可在计时中取得

较高精度。

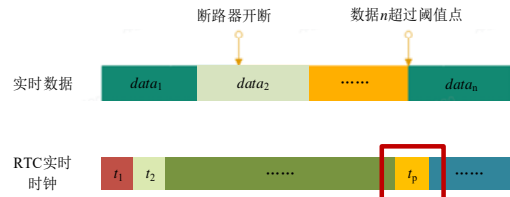


图 4 RTC 软件同步说明图

Fig. 4 RTC software synchronization diagram

2.3 边缘计算平台设计

基于轻量级边缘计算平台方案开发开关设备中各个测量功能模块，在低成本、低功耗的单板机上实现集网络转发、计算存储功能于一体的边缘智能服务器；使用边缘智能服务器按照主从分布式架构搭建边缘分布式集群；结合 Docker 和 Kubernetes 技术实现平台的服务交付及容器编排；利用 Open vSwitch 和 SDN 技术实现平台的网络交换及网络控制，通过控制器对组网中网络交换节点的流表预配置来动态构建平台低时延网络。

根据轻量级边缘计算平台方案搭建测试环境进行平台性能分析，包括网络转发时延、请求处理能力、功耗、迁移效率、容器编排性能等。利用容器技术，软件定义监测装置功能，实现高压开关设备多源信息融合的状态监测与评估功能，其系统架构见图 5。硬件层用于实现本地通讯、远程通讯、数据采集和其他硬件的连接，完成开关设备检测量的就地采集以及通信传输，同时完成信息的边缘处理。系统层为基于可扩展硬件接口和嵌入式 Linux 操作系统完成采集信息的集中管理。APP 层在系统层的基础上进行开发，完成应用程序的容器化设计。研究高压开关设备不同状态监测参量在同一硬件平台上实现的可能性，提出具有统一硬件平台监测方案，实现对获得的各种类型的数据的统一储存、管理、智能分析与诊断。

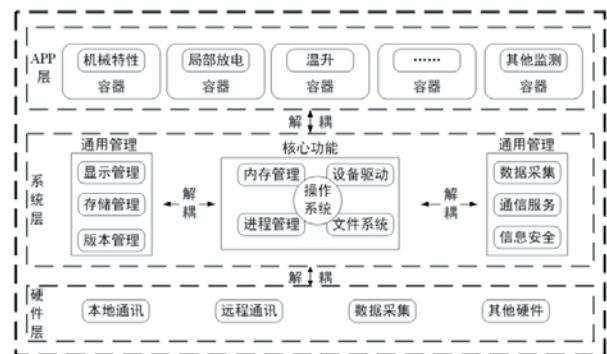


图 5 软件系统架构

Fig. 5 Software system architecture

考虑到整个监测系统的监测点较多且在空间上

分布较广，监测数据量大且时效性要求较高，需要兼顾稳定性与可靠性。后台软件定义监测装置功能，负责数据的实时显示、故障录波、远程控制等，实现信息的集成与共享。

2.4 人机交互界面设计

综合监测系统配套设计了人机交互界面，可直观显示智慧高压开关设备各个部件的状态监测参量、曲线分析、报警信息和故障诊断结果，状态评价主界面见图 6。

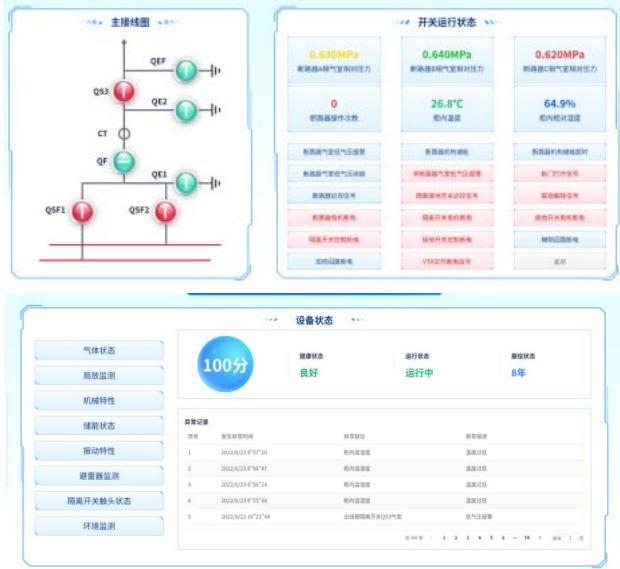


图 6 状态评价主界面

Fig. 6 State evaluation main interface

3 试验验证

以 252 kV 智慧高压开关设备为研究对象，对状态监测系统的设计进行试验验证，试验姿态图见图 7。



图 7 智慧高压开关试验姿态图

Fig. 7 Test attitude diagram of intelligent high voltage switch

在智慧高压开关设备准备整体联调前，要安装好所有智能组件和传感器，且尽量按照现场状态保证智能组件柜和开关设备本体的距离，同时保证电源独立和接地。在试验联调期间，保证集总式数据处理单元采集的数据完整且信息交互功能正常，开关设备控制

器必须顺利接收由模拟站控层装置传输的各种控制命令，从而成功掌握受控部件的工作状态，形成闭环控制状态^[24]。整体联调详细试验项目如下。

3.1 断路器机械状态监测

在同样的试验条件下，采用标准的机械特性仪与集总式数据处理单元同时对断路器的操作进行监测，试验姿态为分闸—合闸—分闸、分闸、合闸各 5 次，保障开关设备控制器能够准确地接收和执行控制命令，并且能够反馈出最佳的控制状况，以标准机械特性仪为参照，检验集总式数据处理单元的机械特性监测数据是否满足误差标准。

合闸检测结果见表 2，分闸检测结果见表 3，分合分检测结果见表 4。行程测量绝对误差最大为 1.29 mm，相对误差最大为 0.8%，满足测量相对误差不大于 1%的要求；分、合闸时间的测量绝对误差最大 1 ms，满足测量绝对误差不大于 1 ms 的要求；分合闸线圈电流峰值测量绝对误差最大为 0.02 A，相对误差最大 3.2%，满足测量相对误差不大于 5%的要求；储能时间的测量绝对误差最大 0.32 s，满足测量绝对误差不大于 0.5 s 的要求。

表 2 合闸检测结果

Table 2 Closing test results

数据来源	行程/mm	合闸时间/ms	合闸线圈电流/A	储能时间/s
机械特性仪	170.13	85.2	0.64	2.44
综合监测系统	170.18	84.4	0.64	2.76
误差	0.05	-0.80	0.00	0.32

表 3 分闸检测结果

Table 3 Test results

数据来源	行程/mm	分闸时间/ms	分闸线圈电流/A
机械特性仪	170.17	29.8	0.62
综合监测系统	171.46	28.9	0.60
误差	1.29	-0.9	-0.02

表 4 分—合—分检测结果

Table 4 The score-in-score test results

数据来源	行程/mm	一分时间/ms	合闸时间/ms	二分时间/ms	线圈电流/A	储能时间/s
机械特性仪	170.27	28.40	85.00	48.40	0.65	2.47
综合监测系统	170.18	28.00	85.60	49.40	0.67	2.67
误差	-0.09	-0.40	0.60	1.00	0.02	0.20

断路器机械状态监测典型示波图见图 8。

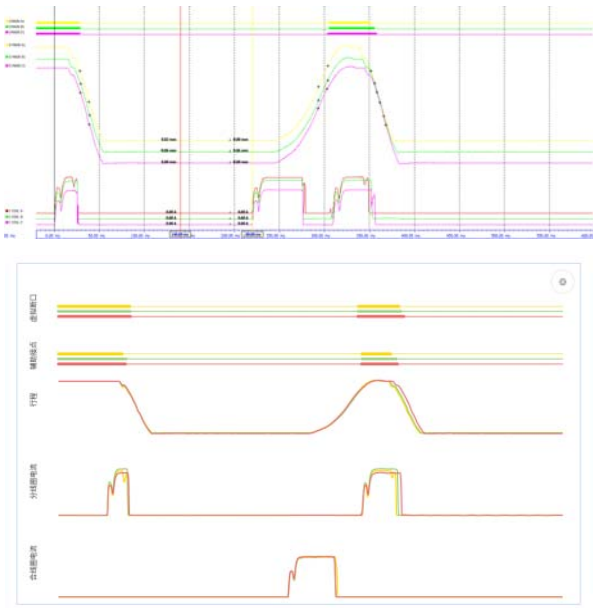


图 8 断路器机械状态监测示波图

Fig. 8 Oscilloscope of mechanical state monitoring of circuit breaker

3.2 SF₆ 气体状态监测

在同样的试验条件下，采用集总式数据处理单元和标准的 SF₆ 密度测试仪同时对试验样机气室的 SF₆ 气体状态进行检测，在充入额定压力气体半小时后进行检测，8 个传感器分别检测一次，以标准 SF₆ 密度测试仪为参考，检验集总式数据处理单元的气体状态参数是否满足误差标准。

表 5 隔离开关电机电流检测结果

Table 5 Current detection results of the isolating switch motor

数据来源	电流 A									
	分 1	合 1	分 2	合 2	分 3	合 3	分 4	合 4	分 5	合 5
机械特性仪	13.51	12.28	12.63	12.03	13.81	13.15	13.41	12.50	13.16	13.59
综合监测系统	13.35	12.38	12.44	12.19	13.75	12.89	13.60	12.34	13.29	13.36
相对误差/%	1.2	0.8	1.5	1.3	0.4	2.0	1.4	1.3	1.0	1.7

隔离开关状态监测典型示波图见图 10。

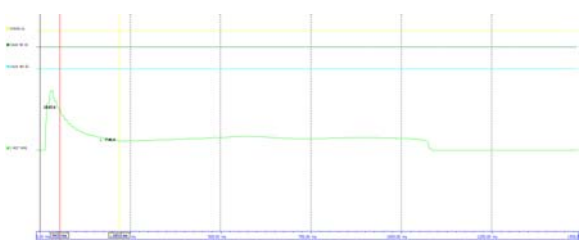


图 10 隔离开关状态监测示波图

Fig. 10 Oscilloscope of isolating switch status monitoring

3.3.2 隔离开关分合状态监测

对隔离开关进行分合闸操作，不少于 5 次，每次操作后，集总式数据处理单元进行隔离开关分合状态

不同位置的气体压力检测结果见图 9：集总式数据处理单元检测的所有数据，其相对误差最大值为 0.78%，满足相对误差不大于 2.5%的要求。

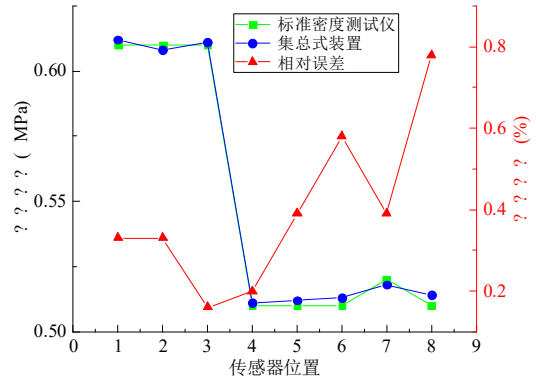


图 9 气体压力检测结果

Fig. 9 Results of gas pressure monitoring

3.3 隔离开关状态监测

3.3.1 隔离开关电机电流监测

在同样的试验条件下，采用标准的机械特性仪与集总式数据处理单元同时对隔离开关的操作进行监测，试验姿态为分闸、合闸各 5 次，集总式数据处理单元与机械特性仪监测的电机电流误差应不大于 ±2.5%。

隔离开关电机电流检测结果见表 5，电机电流测量相对误差最大为 2.0%，满足测量相对误差不大于 2.5%的要求。

判断, 检测结果见表 6, 隔离开关触头姿态见图 11, 5 次分合状态判断均正确, 准确率达到 100%。

表 6 隔离开关操作状态识别

Table 6 Operation status identification of the isolation switch

switch					
数据来源	第 1 次分	第 2 次合	第 3 次分	第 4 次合	第 5 次分
状态判断结果	分	合	分	合	分
状态判断是否正确	是	是	是	是	是
数据来源	第 6 次合	第 7 次分	第 8 次合	第 9 次分	第 10 次合
状态判断结果	合	分	合	分	合
状态判断是否正确	是	是	是	是	是



(a) 分闸状态



(b) 合闸状态

图 11 隔离开关触头姿态

Fig. 11 Disconnecting switch contact attitude

3.3.3 隔离开关温升状态监测

利用准确的温升测试仪与集总式数据处理单元同时监测隔离开关触头温度, 隔离开关分别通额定电流的 25%、50%、75%、100%, 到达每档电流 5 min 后开始测试, 集总式数据处理单元与温升测试仪测量结果见表 7, 集总式数据处理单元对隔离开关触头温度测量绝对误差最大为 0.8 °C, 最大相对误差 1.2%, 满足测量绝对误差应不超过±2 °C或相对误差不超过 2%的要求。

表 7 隔离开关温升监测结果

Table 7 Monitoring results of disconnecting switch

数据来源	25% 额定电流 (1)	50% 额定电流 (2)	75% 额定电流 (3)	100% 额定电流 (4)
综合监测系统显示/°C	56.9	65.1	79.7	88.1
温升测试仪显示/°C	57.6	65.9	80.5	88.8
偏差/°C	0.7	0.8	0.8	0.7
相对误差/%	1.2	1.2	1.0	0.8

	000 A)	000 A)	A)	000 A)
综合监测系统显示/°C	56.9	65.1	79.7	88.1
温升测试仪显示/°C	57.6	65.9	80.5	88.8
偏差/°C	0.7	0.8	0.8	0.7
相对误差/%	1.2	1.2	1.0	0.8

3.4 环境温湿度监测

利用标准的温湿度测试仪与集总式数据处理单元同时监测智能组件柜或机构箱内的温度和湿度, 每个传感器检测 1 次, 检测结果见表 8, 集总式数据处理单元的温度测量绝对误差最大为 0.4°C, 满足测量绝对误差不超过±1°C的要求; 湿度测量绝对误差最大为 2%RH, 满足测量绝对误差不超过±3%RH 的要求。

表 8 环境温湿度检测结果

Table 8 Test results of ambient temperature and humidity

数据来源	传感器 1		传感器 2	
	温度/°C	湿度/%RH	温度/°C	湿度/%RH
标准测试仪	31.2	50.4	31.5	48.2
综合监测系统	30.9	52.4	31.1	49.8
偏差	-0.3	2.0	-0.4	1.6

4 结语

文中分析了变电站开关设备数字孪生技术需求, 设计的综合监测系统位于高压开关设备数字孪生系统架构中的感知层, 通过部署具有感知精准、通信多样、边缘计算能力强的综合监测系统, 采集多种传感信息, 形成协同化的智能感知系统, 实现感知监测数据的就地整合、分析和协同。研究了集总式数据处理单元、通信方案、人机交互界面等内容, 并通过试验验证了文中设计的综合监测系统测量误差满足技术要求, 具有较高的可靠性, 为智慧型高压开关设备推动未来数字电网的发展奠定了坚实的基础。

参考文献:

- [1] 严伟, 王凯, 顾健雨, 等. GIS 一二次智能化融合研究[J]. 电力系统装备, 2020(11): 83-84.
YAN Wei, WANG Kai, GU Jianyu, et al. Research on primary and secondary intelligent fusion of GIS[J]. Electric Power System Equipment, 2020(11): 83-84.
- [2] 林翔宇, 王晓明, 周柯, 等. 一二次融合的高压智能断路器技术研究[J]. 广西电力, 2020, 43(5): 1-4.
LIN Xiangyu, WANG Xiaoming, ZHOU Ke, et al. Research on the primary and secondary fusion based High-Voltage

- intelligent circuit breaker technology[J]. Guangxi Electric Power, 2020, 43(5): 1-4.
- [3] 赵 谦, 殷建荣, 程 成, 等. 基于就地控制器的变电站 GIS 智能化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 149-155.
- ZHAO Qian, YIN Jianrong, CHENG Cheng, et al. Study on intelligent GIS based on on-site control unit[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 149-155.
- [4] 韩筛根, 朱孟周, 李玉凌, 等. 一二次融合配电开关的融合决策及故障诊断研究[J]. 高压电器, 2021, 57(2): 14-20.
- HAN Shaigen, ZHU Mengzhou, LI Yuling, et al. Study on fusion decision and fault diagnosis of primary and secondary fusion distribution Switch[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 14-20.
- [5] 仇文倩. 一二次融合智能型高压开关的研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2019.
- QIU Wenqian. Research on intelligent high-voltage Switch combining primary and secondary equipment[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2019.
- [6] 王 勇. 智能高压开关设备的技术分析[J]. 集成电路应用, 2022, 39(12): 47-49.
- WANG Yong. Analysis of intelligent high voltage switchgear technology[J]. Applications of IC, 2022, 39(12): 47-49.
- [7] 钟建英, 陈 刚, 谭盛武, 等. 高压开关设备关键技术及发展趋势[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2769-2782.
- ZHONG Jianying, CHEN Gang, TAN Shengwu, et al. Key technology and development trend of high-voltage switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2769-2782.
- [8] WANG Wei, SHI Hongjie, YAN Lin, et al. Online monitoring of high-voltage switchgear installation[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(16): 1238-1240.
- [9] 彭在兴. 高压开关设备在线监测技术策略研究[J]. 高压电器, 2015, 51(10): 132-137.
- PENG Zaixing. Study on the technical strategy of on-line monitoring for high voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10): 132-137.
- [10] 闫站正, 程丽华, 张煜烽. 智能高压开关设备的在线监测技术探讨[J]. 通信电源技术, 2020, 37(8): 268-270.
- YAN Zhanzheng, CHENG Lihua, ZHANG Yufeng. Discussion on online monitoring technology of intelligent high voltage switchgear[J]. Telecom Power Technologies, 2020, 37(8): 268-270.
- [11] 侯建华, 刘雪芬, 张 凯. 一种高压开关综合数据采集与监测系统[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(4): 19-24.
- HOU Jianhua, LIU Xuefen, ZHANG Kai. Design of data acquisition and monitoring system for High-Voltage switchgear[J]. Computer Measurement & Control, 2021, 29(4): 19-24.
- [12] 谭佳明, 陈玲玲, 蒋佳成, 等. 交流中压真空断路器机械特性在线监测装置的研制[J]. 高压电器, 2020, 56(7): 69-76.
- TAN Jiaming, CHEN Lingling, JIANG Jiacheng, et al. Development of on-line monitoring device for mechanical characteristics of AC medium voltage vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(7): 69-76.
- [13] 周锡雷, 杨秀领, 刘利军, 等. 一二次融合开关操作机构状态监测装置: ZL202020500324.2[P]. 2020-10-27.
- ZHOU Xilei, YANG Xiuling, LIU Lijun, et al. Condition monitoring device for primary and secondary fusion switch operating mechanism: ZL202020500324.2[P]. 2020-10-27.
- [14] 申春红, 苏晓毅, 潘巧梅, 等. 智能高压开关控制系统检测装置[J]. 高压电器, 2015, 51(4): 19-23.
- SHEN Chunhong, SU Xiaoyi, PAN Qiaomei, et al. Test device of intelligent high voltage switchgear control system[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4): 19-23.
- [15] 张 鑫, 牟龙华, 徐志宇. 基于电力物联网的高压开关柜状态监测系统[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(6): 74-80.
- ZHANG Xin, MU Longhua, XU Zhiyu. Design of condition monitoring system for high voltage switchgear based on power Internet of things[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2021, 40(6): 74-80.
- [16] 曾星宏, 程延远, 李海涛, 等. 高压开关设备本体状态监测系统的设计研究[J]. 湖北电力, 2020, 44(3): 80-86.
- ZENG Xinghong, CHENG Yanyuan, LI Haitao, et al. Research on the design of online monitoring system for high voltage switchgear[J]. Hubei Electric Power, 2020, 44(3): 80-86.
- [17] 蔡 杰, 陈富国, 陈 亮, 等. 一种智能联动型高压隔离开关触头状态监测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2022(3): 68-73.
- CAI Jie, CHEN Fuguo, CHEN Liang, et al. Intelligent linkage high-voltage isolating switch contact state monitoring system[J]. Instrument Technique and Sensor, 2022(3): 68-73.
- [18] 陈 志, 许红盛, 高 博, 等. 变电站设备状态智能感知系统研究与应用[J]. 电气开关, 2020, 58(5): 94-97.
- CHEN Zhi, XU Hongsheng, GAO Bo, et al. Study and application on the intelligent perception system of equipment status for a substation[J]. Electric Switcher, 2020, 58(5):

94-97.

- [19]陈富国, 杨爱军, 马慧珍, 等. 高压隔离开关状态智能感知系统设计与实现[J]. 自动化技术与应用, 2021, 40(8): 131-135.
- CHEN Fuguo, YANG Aijun, MA Huizhen, et al. Design and implementation of intelligent state sensing system for high voltage disconnecter[J]. Techniques of Automation and Applications, 2021, 40(8): 131-135.
- [20]李超, 谢辰璐, 徐铖, 等. 面向开关柜状态监测的多感知集成智能传感终端设计与实现[J]. 电测与仪表, 2021, 58(11): 179-185.
- LI Chao, XIE Chenlu, XU Cheng, et al. Design and implementation of multi-sensing integrated smart sensor terminal for state monitoring of switchgear[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(11): 179-185.
- [21]KARUNAKARAN P, LEE M D, TING K H, et al. A high voltage switchgear switching system[C]//2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON). India: IEEE, 2020: 1-7.
- [22]JI T, XIE W, WANG X, et al. The research of high voltage switchgear detecting unit[J]. IOP Conference Series. Materials Science and Engineering, 2017, 222(1): 1-7.
- [23]ZHAO Liang, QU Shaocheng, ZHANG Weigang. Design of multi-channel data collector for highway tunnel lighting based on STM32 and Modbus protocol[J]. Optik , 2020(213): 1-35.
- [24]王华清, 黄道春, 陈鑫, 等. 一二次融合开关设备操作电磁骚扰特性及防护研究进展[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 269-280.
- WANG Huaqing, HUANG Daochun, CHEN Xin, et al. Research progress in electromagnetic disturbance characteristics and protection due to switching operations of primary and secondary integrated switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 269-280.

张一茗(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为高压开关设备智能化及运维关键技术研究、产品研制等(E-mail: yiming0321@163.com)。

金喜洋(1996—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为高压开关设备智能化设计技术、数字孪生技术(通信作者)(E-mail: 1027913369@qq.com)。