

# 云边端协同在线校准技术体系框架的工程应用

白志路<sup>1</sup>, 张广辉<sup>1</sup>, 田文超<sup>1</sup>, 庞乐乐<sup>1</sup>, 赵亚杰<sup>1</sup>, 李鹏飞<sup>1</sup>,  
王章玮<sup>2</sup>, 袁海文<sup>2</sup>, 夏铁新<sup>3</sup>, 黄小荣<sup>3</sup>

(1. 国网冀北电力有限公司张家口供电公司, 河北 张家口 075000;

2. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191;

3. 上海乐研电气有限公司, 上海 201802)

**摘要:** SF<sub>6</sub> 密度继电器作为保障电气设备安全运行的重要设备, 需要花费巨大的人力、物力定期校验, 待校验的密度继电器不仅数量庞大, 而且校验过程存在效率低、成本高、数据录入容易出错等问题, 因此对其校验过程智能化升级具有重要现实意义; 为解决电力系统数量庞大的 SF<sub>6</sub> 密度继电器在维护保障工作中遇到的这些问题, 借助分层分布式思路, 提出了通过云边端协同, 统一完成工业现场重要仪器仪表在线校准的技术体系实现框架; 在此基础上, 对该技术体系开展了工程应用; 在云边端协同在线校准技术体系框架的指导下, 提出了在现有密度继电器上加装轻量化在线校验装置的方案, 使密度继电器能够在电气设备运行过程中自动完成校验和上报校验结果, 有效地解决了现有密度继电器需要在电气设备停电后采用人工校验的问题; 经过实验验证, 以及与 SF<sub>6</sub> 密度继电器校验仪对比测试, 该装置精度与校验仪精度相近, 能够满足 SF<sub>6</sub> 密度继电器的校验需求, 完全可以用于支持为 SF<sub>6</sub> 密度继电器建立云边端协同的统一在线校准大系统, 来解决 SF<sub>6</sub> 密度继电器校验困难这一行业痛点问题。

**关键词:** 云边端协同; 在线校验; 在线监测; 免维护; 密度继电器

## Engineering Application of the Technical System Framework of Online Calibration Through Cloud-side-end Collaboration

BAI Zhilu<sup>1</sup>, ZHANG Guanghui<sup>1</sup>, TIAN Wenchao<sup>1</sup>, PANG Lele<sup>1</sup>, ZHAO Yajie<sup>1</sup>, LI Pengfei<sup>1</sup>,  
WANG Zhangwei<sup>2</sup>, YUAN Haiwen<sup>2</sup>, XIA Tiexin<sup>3</sup>, HUANG Xiaobeng<sup>3</sup>

(1. Zhangjiakou Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Zhangjiakou 075000, China;

2. School of Automatic Science and Electrical Eng. of Beihang University, Beijing 100191, China;

3. Shanghai Roye Electric Co., Ltd., Shanghai 201802, China)

**Abstract:** As an essential equipment to ensure the safe operation of electrical equipment, the SF<sub>6</sub> density relay needs an enormous workforce and material resources to be calibrated regularly. There are not only large density relays to be calibrated but also some problems in the calibration process, such as low efficiency, high cost and error-prone data entry. Therefore, it is of great practical significance to intelligently upgrade the calibration process. In order to solve these problems encountered in the maintenance and support of a large number of SF<sub>6</sub> density relays in the power system, with the help of hierarchical distributed thinking, a technical system implementation framework for unified online calibration of essential instruments and meters in the industrial field through the cloud edge-end collaboration is proposed. On this basis, the technical system has been applied in the engineering. Under the guidance of the technical framework of collaborative online calibration at the cloud edge, a scheme of adding a lightweight online calibration device to the existing density relay is proposed. So the density relay can automatically complete the calibration and report the calibration results during the operation of electrical equipment, which effectively solves the problem that the current density relay needs to be manually calibrated after the power failure of electrical equipment. Experimental verification and comparison test with the SF<sub>6</sub> density relay calibrator have proved that the precision of this device is similar to that of the calibrator, which can meet the calibration requirements of the SF<sub>6</sub> density relay. It can be fully used to support the establishment of a unified online calibration system for SF<sub>6</sub> density relay and solve the painful problem of the SF<sub>6</sub> density relay calibration.

**Keywords:** cloud-side-end collaboration; online verification; online monitoring; maintenance-free; density relay

收稿日期: 2022-05-24; 修回日期: 2022-06-14。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2020AAA0109202)。

作者简介: 白志路(1990-), 男, 河北张家口人, 硕士, 工程师, 主要从事变电站设备检修技术方向的研究。

通讯作者: 袁海文(1968-), 男, 陕西宝鸡人, 工学博士, 教授, 主要从事检测技术与自动化装置方向的研究。

引用格式: 白志路, 张广辉, 田文超, 等. 云边端协同在线校准技术体系框架的工程应用[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(10): 246-252.

## 0 引言

随着经济快速增长, 我国电力事业蓬勃发展, 电力系统容量急剧扩大, 相关电力设备用量飙升, 使得保障电力系统安全、可靠运行日趋重要。SF<sub>6</sub>作为一种优良的绝缘/灭弧气体, 在高压领域应用极其广泛, 目前市场上绝大多数高压设备都采用 SF<sub>6</sub>作为绝缘/灭弧气体。设备中 SF<sub>6</sub>气体含量的变化直接影响绝缘/灭弧性能高低, 如果发生泄漏, 将给电力设备的安全、可靠运行造成重大影响<sup>[15]</sup>。因此, 电网运行规程强制规定, 在设备投运前和运行中都必须对 SF<sub>6</sub>气体的密度进行监测。而用于监测 SF<sub>6</sub>气体密度的密度继电器长期工作中触点易发生表面氧化、机构卡涩、损坏等情况<sup>[6-9]</sup>, 导致不能发出报警/闭锁信号, 使运行维护人员不能及时发现问题, 及时检修, 这将造成严重后果。因此, 必须定期校验密度继电器<sup>[10-11]</sup>。

并且随着电网向智能化发展<sup>[12-17]</sup>, 智能电网利用通信、计算机、控制等技术, 在很多变电站、换流站完成了智能化改造, 实现了 SF<sub>6</sub>设备的密度在线监测, 提升了运维的便利性和设备运行的可靠性。虽然电网设备密度实现了在线监测, 但目前用于在线监测的密度继电器的校验仍必须通过人工校验方式完成<sup>[18]</sup>。我国地域辽阔, 变电站分布极其分散, 实际运行的密度继电器数量异常庞大, 各电力单位为完成每年的校验任务, 需要配备大量测试人员、设备、车辆和 SF<sub>6</sub>气体, 人力、物力投入巨大, 这给电力系统运行维护带来很大的困扰, 在校验过程中还存在诸多问题, 如:

1) 有些未改造的变电站设备老旧, 由于年份久远没有设计校验接口, 校验时需要现场拆卸密度继电器, 拆装过程效率低, 原有密封性能可能被破坏, 导致气体泄漏; 某些密度继电器安装位置高, 拆装或现场校验实施难度大, 存在安全隐患; 另外, 校验过程中的数据采用人工抄录的方式, 极易出现漏写、错写的情况;

2) 某些已改造或新建站采用非拆卸方式现场校验, 需拆装电气信号回路, 带电作业时, 易引起误报警或闭锁信号进入继电保护, 使断路器无法正常动作, 严重时会导致恶性事故, 校验过程会排放较多的 SF<sub>6</sub>气体, 造成大气污染和 SF<sub>6</sub>气体资源的浪费<sup>[19]</sup>;

3) 校验过程受到环境的影响较大, 在一些环境温度变化较大的地方, 校验的结果受到很大的影响<sup>[20-21]</sup>;

4) 人工校验多数情况在白天进行, 易受阳光直射的影响<sup>[22]</sup>。

为解决这些痛点, 考虑到通讯技术的飞速发展, 为现代分布式人工智能在工业现场的实际应用落地奠定了很好的基础。在工业现场, 特别是在一个相对独立的、范围较大但空间尺度不超过数百米的工业生产单元内, 比如在一个大型变电站或者在一个大型生产车间内, 往往使用了许多同类的检测仪表, 对不同部位的同类参数进行检测, 这

些仪表参数是对工业生产过程状态正常与否的重要表征, 对于安全生产非常关键。作为检测仪器, 它在使用中的检测性能如何, 在长期的使用中精度是否发生了变化等等, 是工业生产过程中关注的焦点。回应这些关注, 需要用到校准技术。仪器仪表的校准, 可通过离线或者在线的方式来完成。离线就是仪表拆卸下来, 拿到工厂的计量部门或者专门的计量单位, 用专业仪器完成校准, 这不仅影响生产过程, 而且还有诸多潜在的隐患和不便。针对这种背景, 本文采用云边端协同的思路, 结合分布式人工智能与自动化的思想, 提出了一种统一完成工业现场仪器仪表在线校准的技术体系框架, 如图 1 所示。

然后, 本文进一步通过用户、研究和制造单位三方面的密切配合, 通过多次研讨, 在图 1 所示的云边端协同完成在线校准的技术组成框架的指导下, 针对 SF<sub>6</sub>气体密度继电器在线校准工程实际中进行了应用实践, 取得了比较好的实际效果, 这也验证了这个框架在工程实际中应用的可行性和有效性。在工程实践中, 借助于一个变电站已有的计算机资源(相当于“边”的位置)和现场总线技术, 我们研制了轻量化的在线校准装置, 直接安装于变电站各个设备的 SF<sub>6</sub>气体监测点, 这相当于“端”的位置。变电站的监控计算机可以借助电力骨干通讯网, 将信息上传到一个县、地区、省、甚至国网电力调度中心, 这相当于“云”的位置。在技术实现过程中, 采用云边端协同设计, 为每个“端”处研制一款轻量化校准装置, 统一安装在现场, 与“边”通过现场总线交互协同, 完成 SF<sub>6</sub>气体密度继电器在线校准; 在“边”位置开发计算机软件, 用于管理其区域内全部“端”处继电器的校准流程下载、校准结果换算、分析以及根据需要要将结果上传云端。在本次实践中, “云”端软件功能与“边”端类似, 只是管理的校准仪器数量更多、地域分布更广泛而已。

## 1 云边端协同完成工业现场仪表在线校准的技术框架

参见图 1, 协同完成工业现场仪表在线校准的技术框架一般由云边端三层组成(也可以根据区域规模和实际需要由云边或者边端两层组成)。底层的“端”对应着工业现场每一个具体的仪器仪表安装位置; 中间层“边”对应着一系列处于一个相对独立封闭物理区域的一系列“端”的集合, 比如处在同一个生产车间或者同一个变电站空间的一组分布在不同具体监测点的仪器仪表。这个区域就是中间层“边”, 在这个位置常常配置了一些监控车间或者变电站整体的监控计算机, 它们有比较强的计算及存储能力。每一个边和它所对应区域的端集合之间可以依靠现场总线协议来建立交互链接, 这既简单经济可靠, 又适应性强易于维护。可选择的现场总线类型很多, 如 485、CAN、Profibus、Lonworks、CC-link 和 HART 总线等。连接介质可选择有线或者无线, 有线可选择电缆或光缆。这种多样性

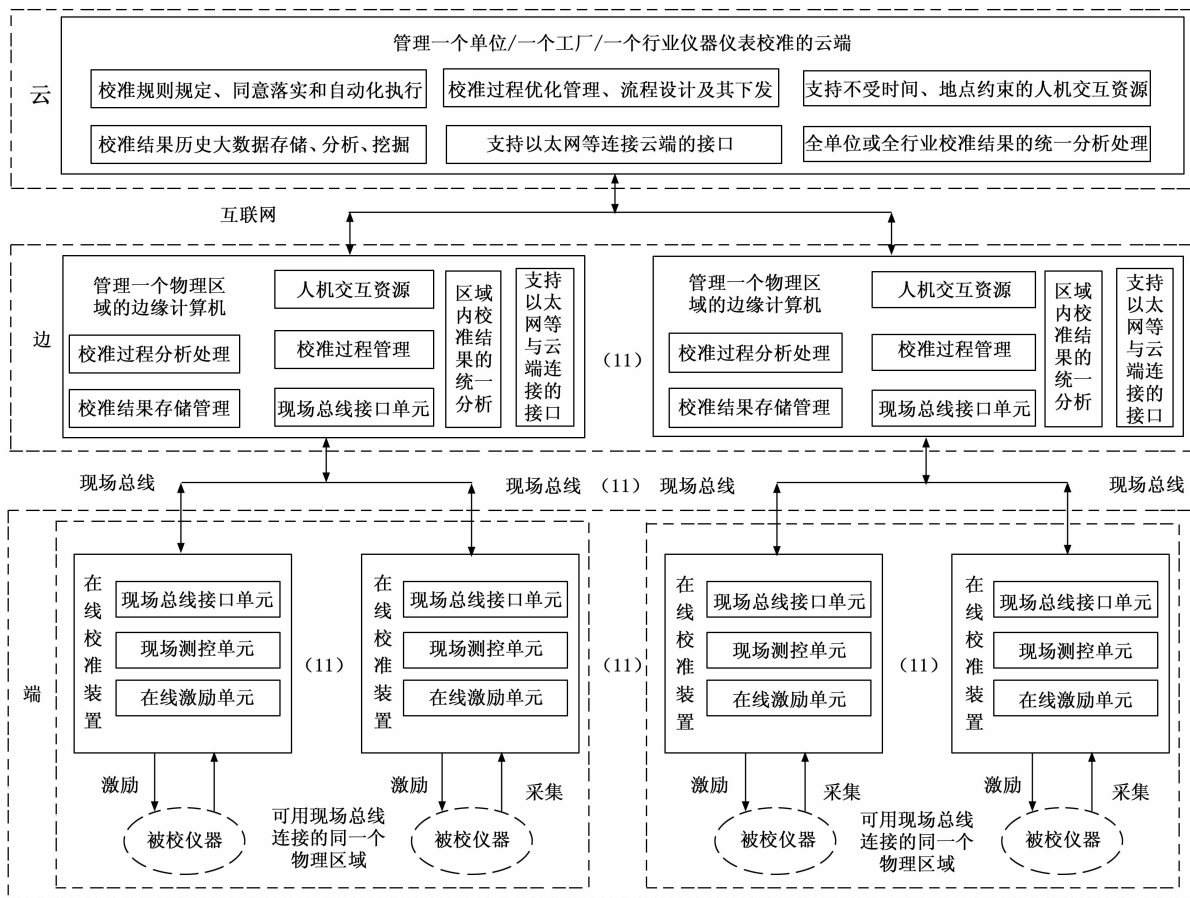


图 1 云边端协同完成在线校准的技术组成框架示意图

也为适应不同门类的工业现场提供了强有力的支持。“云”端可以采用整个工厂、整个供电行业的服务器中心，乃至租用阿里云、百度云等来实现。云端和所有的边端集合可以采用互联网的形式来完成交互连接，从而可使在线校准过程的执行实施不受时间和空间等因素的制约与限制。

有了这个技术框架，我们不仅不用人工进行离线校准、记录并汇总数据，而且能在任何有需要的地域范围内、时间尺度内，通过云边端的协同来建立大范围、跨时空的行业仪器仪表在线校准系统，这种协同优势体现在如下方面：

1) 设计实现协同：针对图 1 框架体系的技术实现过程，在设计阶段，考虑到“端”的数量众多，对于端测点在线校准装置的设计，可以通过借用“边”处的计算存储资源来大幅度简化其机构组成，端处的校准装置可以采用轻量化技术实现，既不配置强大的计算存储资源，也不配置人机交互资源。只要配置紧凑简化的激励控制、响应回采及现场总线接口功能即可，可以采用硬件状态机或者单片机实现。校准流程由“边”直接下载给每一个“端”，“端”处按照固定流程执行并将回采结果上传“边”，由“边”对每一个“端”的校准结果进行处理和管理。

2) 校准使用协同：对于仪器的校准流程，根据管理水平的提高，其流程可能需要改变或者优化。对于全局的、

整体的变化，则可以通过云端把改变后的流程统一分发给边，由边下载给每一个端；如果改变发生在局部，则由云端将流程下发给相应的边，再由边下载给其下诸端。另外，在这个框架中，可以实现任意的校准过程，而不受时空制约，比如对某一批次的仪表校准、对抽检仪表校准、对某一区域的仪表校准等等，这些校准策略都可以非常容易地通过云边端的协同配合，高质高效地用自动化的流程完成。

3) 结果分析协同：云边端协同，可完成校准结果的跨区域、跨时段等条件下的高质量的分析。每个边将所有端的校准结果统一汇总后，上传到云端，借助于云端强大的计算存储资源，既能保存长时间的海量数据，对校准大数据完成大范围的统一处理分析，又能用现代人工智能技术，进行深度地挖掘，发现数据中存在的规律性和知识性的内容，为仪表的高质量生产改进，为仪表使用单位的安全生产、维护保障提供增值服务。

4) 维护保障协同：在这个框架下，通过云端很容易通过对校准结果的综合分析处理，完成整个单位或者整个行业维护保障工作的整体规划。根据云端的处理结果，能够对校准不合格的仪器仪表的安全排查、维护更换工作，根据实际情况按需要制定出统一的维护保障工作计划。这对单位或者行业整体管理绩效提升，意义很大。

## 2 安装于端处的 SF<sub>6</sub> 密度继电器在线校验装置的研制

安装在端部的 SF<sub>6</sub> 密度继电器在线校验装置 (以下简称在线校验装置) 具备在线监测、校验、信号切换、自诊断、信息存储等功能。在达到预设的校验时间后, 在线校验装置会在对密度继电器校验前, 诊断自身各功能单元是否正常, 自检通过后, 在线校验装置按照边 (云) 侧设定的固定流程自动完成在线校验工作。研制的装置实物如图 2 所示。它不仅具备在线校准现有密度继电器的功能, 而且还可替换原来安装于端部的密度继电器, 或者形成备份监测能力。



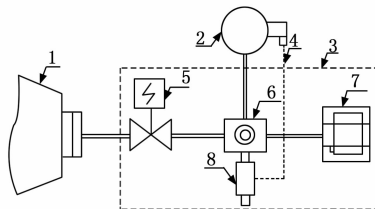
图 2 SF<sub>6</sub> 密度继电器在线校验装置

### 2.1 在线校验装置的结构及工作原理

如图 3 所示, 在线校验装置安装在电气设备和普通密度继电器之间, 用于在线监测、校验、信号切换、信息存储。其结构主要由电控阀、基座、调压机构、智控模块等构成。电控阀的一端与被监测的电气设备连通, 另一端与基座连通, 基座的另外 4 个面, 分别连接普通密度继电器、调压机构、智控模块和补气口; 普通密度继电器、调压机构、智控模块、补气口之间的气路相互连通, 压力始终保持一致。其中, 智控模块内含有压力传感器、温度传感器、采集控制器等元件。在校验时, 智控模块首先切断密度继电器与后台接点信号之间的连通, 保持正常工作时的信号状态; 之后, 电控阀切断被监测电气设备与密度继电器之间的气路连通, 然后调压机构对密度继电器内部的压力进行升压或降压, 触发密度继电器的接点动作; 同时, 智控模块实时采集接点动作压力、温度数据, 并计算出密度继电器动作接点值; 最后, 智控模块基于内部算法数学模型通过程序计算、数据分析, 最终输出校验结果。

### 2.2 在线校验装置的密度换算模型

校验过程中, 压力传感器和温度传感器将实时采集压力、温度信息, 普通密度继电器与压力传感器气路连通, 压力传感器采集的压力与密度继电器的实际压力相等, 而温度由于存在温度梯度, 各个空间点温度存在差异, 假设密度继电器与压力传感器经过充分恒温, 达到温度平衡后, 二者温度相等, 由 Beattie-Bridgman (贝蒂—布里奇曼) 经



1. 电气设备; 2. 普通密度继电器; 3. 在线校验装置; 4. 电控阀;
5. 基座; 6. 调压机构; 7. 智控模块; 8. 接点信号线。

图 3 SF<sub>6</sub> 密度继电器在线校验装置结构示意图

验公式可推算输出信号的密度值。

$$P = (RTB - A)d^2 + RTd$$

$$A = 73.882 \times 10^{-5} - 5.132105 \times 10^{-7} d$$

$$B = 2.50695 \times 10^{-3} - 2.12283 \times 10^{-6} d$$

$$R = 56.9502 \times 10^{-5}$$

式中,  $P$  为压力 ( $\times 0.1$  MPa);  $d$  为密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $T$  为温度 (K)。

由布里奇曼公式可知, SF<sub>6</sub> 气体的状态可由气体压力、密度和温度 3 个参数确定。当温度一定时, 气体的压力和密度一一对应。因此, 按照电力系统的习惯, 气体的密度都统一换算为 20℃ 时的压力值, 用它表征密度。所以本文所述的密度采用气体 20℃ 时的压力来表征。

### 2.3 在线校验装置的软硬件设计

在线校验装置采取轻量化并且替代原有密度继电器全部功能的思路研制, 用 STM32F7xx 系列高性能芯片为核心控制单元, 基于多传感器融合技术思想, 应用多个高精度压力和温度感知单元, 并具有简单的数据存储、诊断分析、总线传输等功能。在线校验装置投运过程中包含两种工作状态: 分别为在线实时监测状态和校验状态。当工作在实时监测状态时, 智控单元实时采集温度、压力传感器数据, 并依据内置算法进行换算, 并响应后台系统 (即“边”位置的监控计算机) 上传数据, 从而实现远程密度在线监测, 参与设备漏气缺陷判断决策。当工作在校验状态时, 装置首先会进行自检, 满足校验条件后再进行信号切换、阀门开闭、调压等一系列操作 (具体见 3.2 校验流程), 最终实现密度继电器接点精度的在线校验。

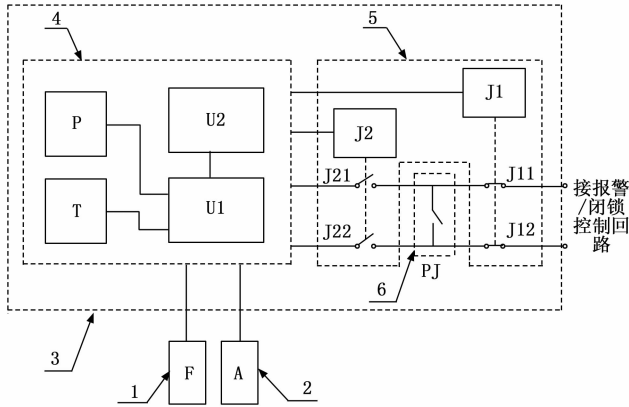
## 3 在线校验装置的工作流程

安装于变电站每个检测点的气体密度继电器输出的触点信号与电力系统继电保护系统直接相连, 校准前必须完成信号状态的暂存与切换。完成信号切换后, 可以按照既定的流程完成在线校准。校准过程结束后, 再恢复原状。

### 3.1 接点信号切换

在线校验装置在校验过程中, 首先需要对密度继电器接点信号经过状态保护及隔离处理, 因为这些接点直接与后台或二次回路连接, 接点动作信号会引发误报警事故, 为了避免这种情况, 在线校验装置设计了接点信号切换电

气回路，该电气回路可在密度继电器校验期间将密度继电器与后台之间的信号切断，使后台信号保持为正常工作时的状态，可避免密度继电器在校验期间发出误报警信号。图 4 为某一接点回路接点信号切换的原理图，以常开接点密度继电器接点信号切换为例，当密度继电器正常工作时，继电器 J1、J2 为常闭状态，继电器 PJ 为常开状态；在校验时，先使 J1、J2、PJ 开路，完成校验后恢复 J1、J2 闭合，PJ 打开状态，后台信号保持为密度继电器正常工作状态。



1. 电控阀；2. 调压机构；3. 智控模块；4. 智控单元；5. 信号切换回路；6. 辅助开关。

图 4 系统原理示意图

### 3.2 校验流程

在线校验装置自动执行密度继电器的校验工作前，必须预先设置校验的开始时间，设置开始校验时间有两种途径，一是在设备投运前设定，另一个是在设备运行过程中由“边”通过 485 通信接口或远程通信接口设定。以三接点密度继电器为例，校验流程如图 5 所示。

步骤 1：安装表计时预设好校验的具体时间，或利用云端软件预设置校验时间；

步骤 2：确认是否到达预设的校验时间；

步骤 3：通过电子电路使后台的信号保持在正常状态，不受密度继电器接点动作的影响；

步骤 4：关闭电控阀、启动升降压机构；

步骤 5：采集接点动作时的温度压力，并判断校验是否完成；

步骤 6：打开电控阀，让本体气室的气体与密度继电器相连；

步骤 7：使密度继电器与后台信号直接相连，恢复到正常工作状态；

步骤 8：根据数学模型计算动作点的密度值，把结果呈现在边云处的指定显示界面；

### 4 边端（或者云端）软件设计

在这里，边端或者云端的软件大部分功能类似，只是管理的校准区域大小和密度继电器规模不同而已。如图 6

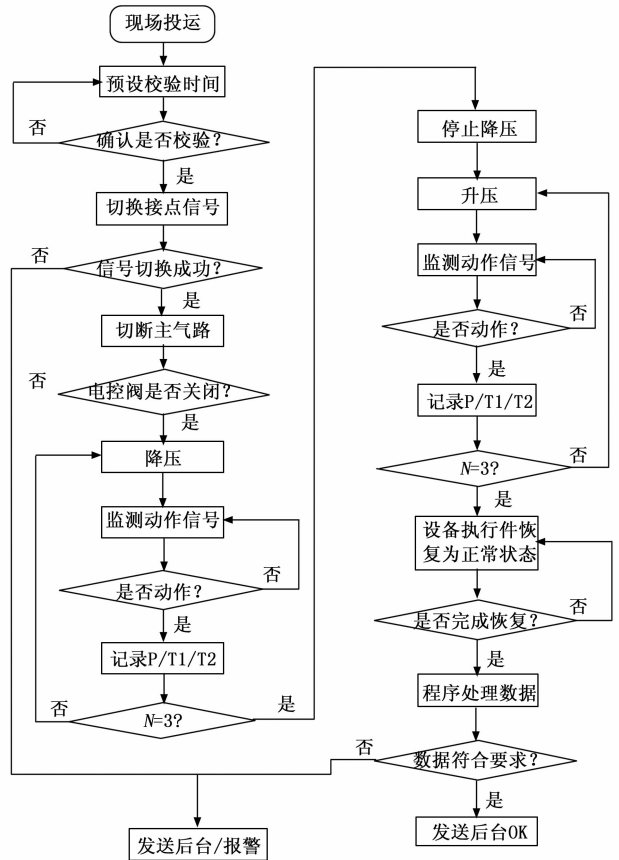


图 5 校准逻辑流程图

所示，边云端的软件界面包括运行数据信息、系统参数配置信息、运行故障信息等。运行数据信息主要显示软件的动作值、返回值、切换差等；系统参数配置主要用于配置监测一般的参数，校验时间，系统保护等信息；运行故障信息通常显示系统识别出的故障，监测系统是否异常。

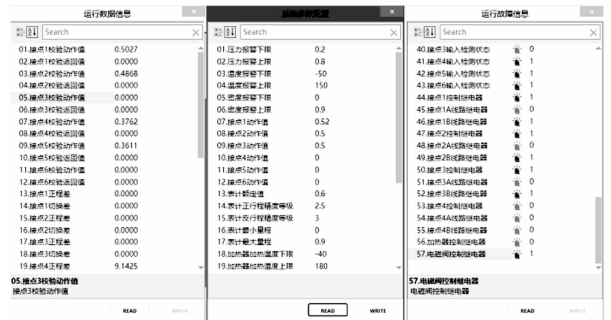
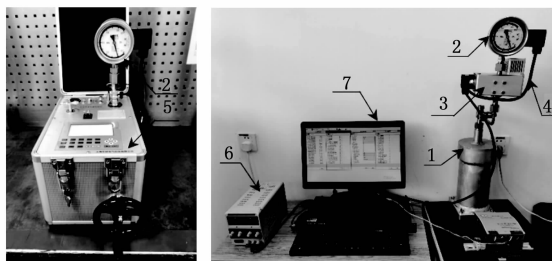


图 6 边（云）端软件交互界面图

### 5 在线校验装置功能、性能的实验测试分析

在同一环境下，选用某一厂家规格型号（产品编号：2106 H574，参数：0.40/35/0.35 MPa）作为被校密度继电器，被校密度继电器与测试设备经过充分恒温后，分别采用在线校验装置和经计量院校准的密度继电器校验仪（以下简称校验仪）对其精度进行对比测试，以验证在线校验

装置与校验仪之间精度的差异, 以及验证在线校验装置自身的一致性和重复性, 测试中, 用一个台式机模拟云边端的计算机资源, 软件在其上运行, 如图 7 所示。



(a) 校验仪测试平台

(b) 在线校验装置测试平台

1. 气罐; 2. 被校密度继电器; 3. 在线校验装置; 4. 接点信号线; 5. 校验仪; 6. 电源; 7. 模拟云边侧的计算机。

图 7 测试环境

表 1 为校验仪和在线校验装置对密度继电器重复校验 30 次的测试结果。结果显示, 校验仪测量该表的表数据在 0.358 4~0.360 8 MPa 之间波动, 在线校验装置数据在 0.358 7~0.361 1 MPa 之间波动, 二者波动范围均为 0.002 4 MPa (如图 8 所示), 其精度相近, 该数值的波动主要来自于普通密度继电器本身和测量仪器的不确定度。

表 2 为 3 台不同的在线校验装置对同一只密度继电器重复校验 30 次的测试结果。结果显示, 3 台在线校验装置的测试数据波动范围为 0.358 2~0.360 9 MPa, 3 台装置的波动范围在 0.002 7 MPa 范围内 (如图 9 所示), 表现出良好的重复性。

## 6 结束语

研究提出了一种云边端协同完成工业仪器仪表免拆卸在线校准的技术实现框架, 在该思路指导下, 选择电力行业

表 1 用校验仪、在线校验装置校验同一密度继电器的数据

设备 \ 次数	动作值/MPa									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
装置	0.360 4	0.359 8	0.360 5	0.358 7	0.361 0	0.360 3	0.358 8	0.359 9	0.360 9	0.359 1
校验仪	0.358 6	0.359 2	0.359	0.360 2	0.359 1	0.360 7	0.358 7	0.358 9	0.359 9	0.359 4
设备 \ 次数	动作值/MPa									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
装置	0.360 3	0.360 5	0.361 1	0.359 7	0.361 0	0.358 7	0.359 8	0.360 6	0.360 4	0.358 9
校验仪	0.358 8	0.359 8	0.360 4	0.359 9	0.359 5	0.360 4	0.359 4	0.359 6	0.359 4	0.360 8
设备 \ 次数	动作值/MPa									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
装置	0.360 7	0.359 5	0.359 8	0.360 7	0.360 3	0.361 0	0.360 0	0.358 7	0.359 6	0.359 0
校验仪	0.360 2	0.359 3	0.360 2	0.358 4	0.360 7	0.360 6	0.359 3	0.359 5	0.358 4	0.360 1

表 2 用 3 台不同的在线校验装置校验同一密度继电器的数据

设备 \ 次数	动作值/MPa									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
装置 1 #	0.359 9	0.359 5	0.358 9	0.359 3	0.358 8	0.358 9	0.359	0.359 4	0.360 7	0.360 2
装置 2 #	0.359 2	0.360 8	0.359 1	0.359 0	0.360 2	0.358 9	0.360 9	0.359 3	0.359 0	0.359 3
装置 3 #	0.360 5	0.36	0.359 1	0.358 9	0.358 8	0.359 5	0.359 4	0.360 3	0.359 4	0.358 8
设备 \ 次数	动作值/MPa									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
装置 1 #	0.359 8	0.359 6	0.360 2	0.360 2	0.359 6	0.359 1	0.359 0	0.359 9	0.360 1	0.358 8
装置 2 #	0.360 1	0.360 0	0.360 1	0.360 1	0.359 3	0.360 2	0.359 8	0.359 5	0.359 6	0.359 7
装置 3 #	0.360 1	0.359 8	0.358 6	0.358 6	0.360 2	0.360 3	0.358 4	0.358 7	0.358 9	0.358 4
设备 \ 次数	动作值/MPa									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
装置 1 #	0.359 8	0.358 8	0.360 3	0.358 7	0.360 7	0.360 5	0.360 4	0.360 0	0.358 6	0.358 6
装置 2 #	0.359 9	0.358 8	0.359 6	0.359 0	0.360 1	0.358 9	0.360 2	0.359 3	0.360 1	0.359 7
装置 3 #	0.358 3	0.358 4	0.359 8	0.358 7	0.358 9	0.358 9	0.358 2	0.358 7	0.359 5	0.360 3

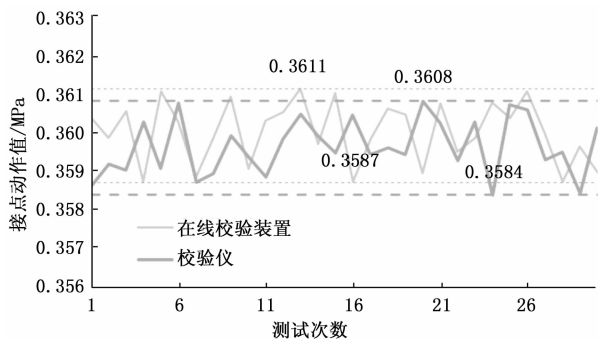


图 8 校验仪、在线校验装置波动性测试结果

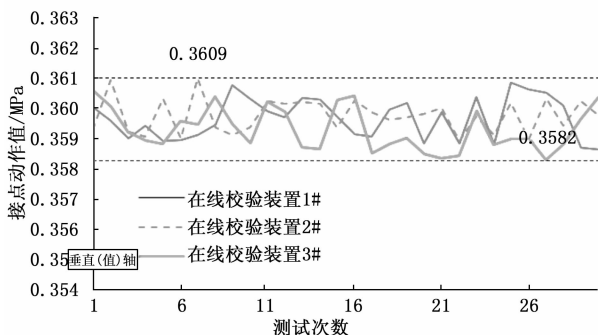


图 9 不同在线校验装置一致性测试结果

普遍采用的 SF<sub>6</sub> 密度继电器的校准问题进行了工程实践。首先研制了适用于边端的在线校准装置，介绍了其工作原理和技术实现过程，并开发了与之配套使用的云边软件。对于整套系统，不仅在实验室完成了功能验证，而且已经开始在变电站现场进行应用示范。

针对其中最重要的环节，用于端部的轻量化在线校验装置，在实验室对其性能和功能进行了实验测试分析，实验结果表明：在线校验装置既能独立使用，又能与现有的普通密度继电器配合使用，可实现显示、接点报警/闭锁、在线监测、校验、信号切换、自诊断、信息存储等功能，满足电网自动化和设备状态检修的需要，对提高系统的安全运行和运行管理水平，开展预期诊断和趋势分析，减少无计划停电检修起到重要作用。这个装置投运后，还能够主动将在线监测数据、自身运行状况和表计的校验诊断信息推送给客户，实现无需人工干预、免维护，有问题时精准定位，可以有效解决以往密度继电器检修时需停电，校验困难的问题。对电网公司节省人工、材料、检测成本，降本增效，减少 SF<sub>6</sub> 气体排放到大气中，具有巨大的经济效益和社会效益。

参考文献:

[1] 刘行谋, 薛金鑫, 杨永明, 等. 变压器铁芯搭接区磁热等效及温升影响研究 [J]. 仪器仪表学报, 2020 (6): 187-196.  
 [2] 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.

[3] 张青山, 段建东, 叶兵, 等. 基于 ZigBee 的开关柜触头温度在线监测预警系统 [J]. 高压电器, 2015, 51 (4): 29-35.  
 [4] 冯颖姣, 沈建位, 黄晓霞, 等. GIS 气室 SF<sub>6</sub> 气体微水密度在线监测实用技术 [J]. 电工技术, 2015 (4): 32-33.  
 [5] 刘庆虹. 环境对 SF<sub>6</sub> 电气设备密度继电器现场校验的影响 [J]. 山西电力, 2006 (4): 16-18.  
 [6] 曲芳, 杨忠礼. SF<sub>6</sub> 密度继电器现场校验方法探讨 [J]. 电工技术, 2012 (3): 23-24.  
 [7] 李秀广, 卢军, 吴旭涛, 等. SF<sub>6</sub> 电气设备中气体内部微水和密度的在线监测装置的研制 [J]. 高压电器, 2015, 51 (4): 72-77.  
 [8] 古玲霞, 贺向前, 蔡巍, 等. 一种 SF<sub>6</sub> 气体密度继电器全温度范围校验装置的研制 [J]. 高压电器, 2015, 51 (1): 127-132.  
 [9] 梁晓雯, 蒋爱平, 王国涛, 等. 参数优化决策树算法的密封继电器多余物信号识别技术 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 32 (1): 178-185.  
 [10] 王乃庆. 中国电力工业部. 电力设备预防性试验规程: DL/T596-2005 [S]. 北京: 中国电力工业部, 2005.  
 [11] 国家电网有限公司. 十八项电网重大反事故措施 [2018 年修订版] 及编制说明 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2018.  
 [12] 刘天羽, 胡晓光, 李险峰, 等. 基于 AVR 单片机 SF<sub>6</sub> 密度继电器校验仪的设计 [J]. 自动化与仪表, 2010 (11): 10-13.  
 [13] 张东霞, 苗新, 刘丽平, 等. 智能电网大数据技术发展研究 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (1): 2-12.  
 [14] 陈昱玮, 刘毅力, 马龙涛, 等. 面向变电站的 AES 与 ECC 算法改进及混合加密研究 [J]. 国外电子测量技术, 2020, 39 (10): 60-65.  
 [15] 张智轶, 赵彬, 梁波, 等. 智能计量装置用电量计量误差监测系统设计 [J]. 电子测量技术, 2021, 44 (7): 7-12.  
 [16] BEDIG VENAYAGAMOORTHY G K, SINGH R, et al. Review of Internet of things (IoT) in electric power and energy systems [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018 (2): 847-870.  
 [17] REKA S S, DRAGICEVIC T. Future effectual role of energy delivery: a comprehensive review of Internet of things and smart grid [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 91: 90-108.  
 [18] 张作鹏, 熊刚. 非接触式 SF<sub>6</sub> 密度继电器校验实验平台的研制 [J]. 电测与仪表, 2012, 49 (1): 41-44.  
 [19] 李伟, 任娜娜, 侯云飞, 等. 基于机器视觉技术的六氟化硫密度继电器智能校验系统 [J]. 仪表技术与传感器, 2016 (3): 69-73.  
 [20] 关艳玲, 付丽君, 关艳艳, 等. 高纬度地区六氟化硫密度继电器校验技术研究 [J]. 黑龙江电力, 2021, 43 (2): 96-98.  
 [21] 李志刚, 蔡巍, 邓春, 等. SF<sub>6</sub> 气体密度继电器在极端温度下的性能校验 [J]. 中国电力, 2012, 45 (10): 73-76.  
 [22] 蔡巍, 等. 六氟化硫气体密度继电器校验规程: DL/T259-2012 [S]. 北京: 国家能源局, 2012.