

一种新型非接触式电能表校验装置研究

陈 旭,张浩淼,张 超,程志强,许寅哲,苏迎春

(国网宁夏营销服务中心(国网宁夏计量中心),宁夏 银川 750000)

摘要:为应对电能表现场校验中遇到的导线密集、空间受限等难题,设计了一种新型的非接触式校验装置。该装置集电压与电流采集于一身,被测导线的电压采用非接触式测量,电压信号经由精密放大、有源滤波及相位补偿处理后,与电流信号接入至高性能的 HLW8032 电能计量集成电路,实现高效数据处理。在设计上,电压测量探头创新性地融合了线夹与导电海绵结构,紧密贴合导线,确保了良好的耦合电容稳定性,通过外置电容的智能调控,有效消除了耦合电容变量对测量的干扰。小开口 U 型电流钳,专为狭小空间优化设计,大大提升了电流采样的便捷性和灵活性。单片机控制系统负责实时采集并处理电压、电流及功率数据,确保测量结果的即时显示,增强了装置的智能化操作体验。样机测试验证了该非接触式电能表校验装置能够提高现场校验的安全性和操作便利性,测量误差小于 1.5%,为电能计量的现场校验工作提供了高效、可靠的现代化工具。

关键词:电能表;非接触式测量;耦合电容;U 型小开口电流钳

中图分类号:TM932

文章编号:1000-0682(2024)06-0056-07

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.06.011

Research on a non-contact watt-hour meter calibration device

CHEN Xu, ZHANG Haomiao, ZHANG Chao, CHENG Zhiqiang, XU Yinzhe, SU Yingchun

(State Grid Ningxia Marketing Service Center (State Grid Ningxia Metrology Center), Ningxia Yinchuan 750000, China)

Abstract: To tackle challenges like congested wiring and confined spaces in watt-hour meter calibration, this paper introduces a novel non-contact calibration apparatus. Integrating both voltage and current measurements, it employs non-invasive voltage sensing, with the voltage signals undergoing precise amplification, active filtering, and phase compensation before being fed into a high-performance HLW8032 energy metering IC for efficient data handling. The design innovation lies in the voltage measurement probe, ingeniously marrying a wire clamp with a conductive sponge. This design ensures intimate contact with wires, stabilizing coupling capacitance and ingeniously mitigating measurement errors from variable capacitance through intelligent external capacitor adjustments. Furthermore, the adoption of a compact U-shaped current clamp with a narrow opening is tailored for spatially restrictive environments, significantly enhancing the ease and agility of current sampling. A SCM control system oversees the real-time acquisition and processing of voltage, current, and power parameters, ensuring immediate display of measurement results. This not only bolsters the device's intelligence but also enriches the user's operational experience. The prototype test verifies that the non-contact watt-hour meter calibration device can improve the safety and operational convenience of on-site calibration, and the measurement is less than 1.5%, which provides an efficient and reliable modern tool for on-site calibration of electric energy measurement.

Keywords: watt-hour meter; non-contact measurement; coupling capacitance; U-type small opening current clamp

收稿日期:2024-05-07

基金项目:国网宁夏营销服务中心群创项目(5229YX230003)

第一作者:陈旭(1989—),男,高级工程师,硕士,主要从事电能计量、故障测距等研究。E-mail:chenxu89@126.com

0 引言

电网智能化升级驱使配电网电能表校验追求更

快的现场反应速度与高效故障诊断能力^[1-3]。传统接触式电压测量因需破坏导线绝缘层、操作复杂及具有安全隐患日益显得不合时宜^[4]。相反,非接触式测量技术凭借其环境适应性强、操作安全简便的特性,有效促进了电力设施的实时监控与检测效率,成为提升电网智能化监测水平的关键手段,为现场校验带来了革命性的改变。

非接触式测量方法无需破坏绝缘层,通过电磁感应原理实现无损检测,大大提升了作业的安全性和便捷性,当前主要应用于电流测量场景^[5-6]。针对非接触式电压测量,文献[7]根据电场耦合原理进行探测电极分析,导线穿过圆筒型的探测电极的耦合电容相对稳定性较好,但实际应用时,易受到干扰。文献[8]提出一种基于拓扑变换的非接触式电压测量方法,通过在开始测量前校正耦合电容,计算原始电压有效值,该方法的测量精度依赖贴片元件精度和采样芯片精度。文献[9]利用电容耦合原理,通过在导线外包裹铜皮形成圆柱形电容器,发现导线穿过圆筒型的探测电极的耦合电容相对稳定性较好,但实际应用时,探测电极易受到环境干扰。非接触式电压测量,由于受线路型号差异、多线路复杂交错、环境干扰、断电测量损失等问题影响,测量精度与便捷性有待进一步提高^[10]。

在电能表现场校验实践中,电流测量环节通常依赖电流钳表来完成,但现有设备通常配备较大钳口,在面对布线密集且空间受限的电能表现场时,这无疑增加了测量的难度和复杂性。另外,传统互感器在应用中存在局限性,如铁芯可能诱发铁磁谐振现象,以及由杂散电容等因素构成的复杂电路,这些都会影响互感器对一次侧电流暂态变化的响应能力,有时甚至无法准确监测到瞬态波形的变化^[11-15]。这些问题严重限制了其在动态电能质量监测中的效能。因此,针对电能表现场校验的特定需求,推进微型小开口电流钳的研发不仅是对现有技术局限的一种突破,也是提升现场检测灵活性、准确度及响应速度的关键措施。

针对上述问题,该文提出一种新型非接触式的电能表现场校验装置研究,集电压、电流测量于一体。该装置通过改进非接触式传感方法,结合硬件设计与智能软件算法,不仅集成了电压与电流的同步测量,还高效完成了功率的精确计算。通过理论分析,精心布局硬件电路与数字信号处理策略,有效缩减了测量误差源,确保装置在遭遇异常状况时能迅速响应,同时展现出卓越的抗干扰能力。其紧凑

便携的设计,为复杂现场环境下的灵活操作提供了便利。样机测试验证,该非接触式功率测量装置成功彰显了其价值,极大提升了电能表现场校验的作业效率,有力保障了计量数据的准确性和可靠性,为促进电力系统智能化管理与计量精度的全面提升开辟了新路径。

1 非接触式电能表校验装置总体框架

非接触式测量技术运用电磁感应的原理,无需接触带电导体方便测量电压、电流参数,具有制造成本低、安装便捷的优点,同时也存在耦合电容大小不确定、波形还原失真、相位识别不准确等问题^[16-17]。该文非接触式电能表校验装置研究包括硬件电路设计和软件编程,经优化测量探头将被测线路电压电流引入电路板,电路板具有可变阻抗的微电流放大器,与钳口内侧的导电海绵相连接;采样电压通过电容分压方式获取,利用单片机控制外加电容的接入,可以消除导线绝缘皮耦合电容的影响;电流采样采用U型小开口电流钳设计,满足现场小空间、导线密集的需求。通过专用电能计量芯片计算出被测功率。装置硬件电路设计包括:钳表取样、电容匹配选择、高阻电压放大器、滤波器相移器、电能计量芯片、CPU、电池管理、电源变换、蓝牙。非接触式电能表校验装置总体框架图如图1所示。

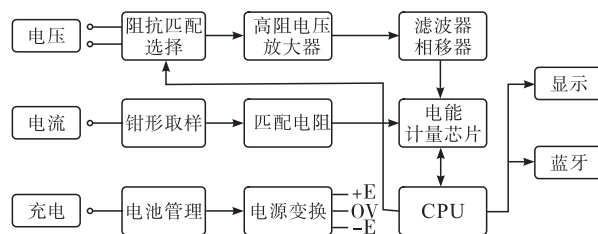


图1 非接触式电能表校验装置总体框架图

该装置由测量探头、一个模拟测量前端和一个基于微控制器的数字信号处理模块组成。通过选取合适的元器件与参数后完成硬件选型,研制样机进行装置测试。被测电压通过绝缘皮的电容耦合送入放大器,一般绝缘皮的电容很小,电容容抗很大,各种电线的绝缘皮厚度、材料不尽相同,测量数值不确定。待测电压经过电容耦合探头采样后,幅值和相位均发生变化^[18-20],通过单片机编程控制调节接入电容的大小改变 U_0 的输出变化,可计算出绝缘皮容抗以及待测电压大小。设计U型小开口钳表引入被测电流,单片机控制模块可从专用芯片中读出被测功率。测试装置示意图如图2所示。

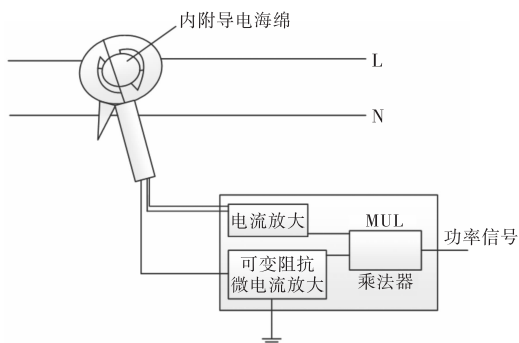


图2 非接触式电能表校验装置示意图

2 非接触式电能表校验装置原理与设计

非接触式电能表校验装置集电压与电流测量功能于一身,设计时着重考虑了小型化、抗干扰能力及对复杂现场环境的适应性。该装置的核心硬件架构精心整合了输入通道、高精度采样电路、强大的数字信号处理器、高效供电模块以及直观的显示界面,旨在实现在有限空间内的高效运作和精准读数。

针对电能测量中常见的挑战,尤其是导线绝缘层导致的耦合电容效应与探测位置的敏感性,装置创新采用了圆形夹子式钳形探头设计,内部配备导电海绵材料。这一独特设计不仅增强了探头与目标导线的紧密贴合度,确保了稳定的电容耦合,还有效减少了外部环境因素的干扰,提升了测量的稳定性和准确性。通过优化的物理接触结构,装置能在确保安全的同时,对抗现场复杂条件,实现快速且无损的电能表校验操作,彰显了其在电力系统维护和检测领域的先进性和实用性。

2.1 非接触式电压测量原理

非接触式电压测量原理电路如图3所示,其中L代表火线,N代表接地线。将待测电压通过导线绝缘皮的电容和钳口内侧的导电海绵引到T1端子上,导电海绵与火线铜芯之间的绝缘材料包裹性好,可以耦合等效的圆柱形电容1pF,耦合电容值的大小与导线形式、绝缘材料等因素有关,实际应用时需要消除耦合电容误差。

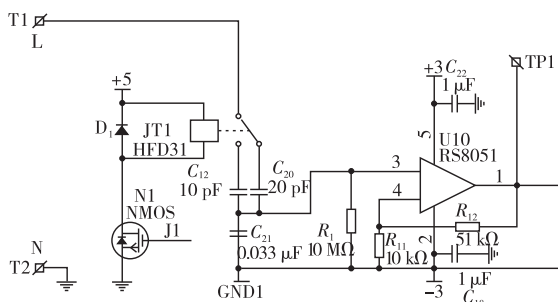


图3 非接触式电压测量原理

放大器采用电压放大形式,由于RS8051运放的输入电流极小可以忽略,通过调节外加电容的大小实现电压的测量。设计选择了2个已知电容 C_1 和 C_2 ,测量时,开关分别连通1和2,读取2个输出电压 U_o ,把2次的测量结果建立方程。可列出方程式如下:

$$\begin{cases} U_{o1} = \frac{C_0 U_x}{C_x + C_1 + C_0} \\ U_{o2} = \frac{C_0 U_x}{C_x + C_2 + C_0} \end{cases} \quad (1)$$

式中: C_x 、 C_0 、 C_1 和 C_2 均代表容抗,其值大小如图3中所示。

联立方程组求解,可得出 U_x 。

$$U_x = \frac{(C_1 - C_2) U_{o1} U_{o2}}{C_0 (U_{o2} - U_{o1})} = \frac{C_1 - C_2}{C_0} \cdot \frac{U_{o1} U_{o2}}{U_{o2} - U_{o1}} \quad (2)$$

$$\text{令 } k = \frac{C_1 - C_2}{C_0}, \text{ 则 } U_x = k \cdot \frac{U_{o1} U_{o2}}{U_{o2} - U_{o1}}.$$

C_1 和 C_2 可通过实验方法求得,通过上式可消除耦合电容对测量结果的影响。

测量步骤:

(1) 接入电容 C_1 ,测得电压 U_{o1} ;

(2) 接入电容 C_2 ,测得电压 U_{o2} ;

(3) 根据公式 $U_x = k \times U_{o1} \times U_{o2} / (U_{o2} - U_{o1})$ 计算出被测 U_x 。

电容 C_1 和 C_2 的大小对 U_o 产生影响, C_1 和 C_2 的数值是有限制的, C_1 选取太大,即容抗很小,加入后对电流 I_i 影响不大,使得 U_{o2} 与 U_{o1} 相差很小, ($U_{o2} - U_{o1}$)数值很小,它在分母上,会出现很大的计算误差;如果 C_1 和 C_2 选取太小,也就是容抗很大,会使得 I_i 很小,导致 U_{o2} 很小,测量不准确,同样会影响计算精度。选取 C_1 和 C_2 与绝缘皮电容相同数量级,可以得到较高的计算精度。

U_{o1} 和 U_{o2} 是单片机从AD芯片读取到的数值,跟实际电压线性呈比例关系,但是需要乘以比例系数才能得到真实电压数值,这个比例系数,就是 k 。 k 值通过实际电压校准来确定,运用高精度校验手段实测获取,此法简便准确,全面涵盖各类分布参数,确保了测量的综合性与准确性。

电压信号经采集后,必须经过精心设计的预处理步骤,以满足AD转换器的输入标准,这包括共模转换与抗混叠滤波。在此过程中,采用RS8051系列CMOS运算放大器是一个优选方案,它利用自动调零技术实现了极低的失调电压(最大不超过 $5 \mu\text{V}$),确保了测量的高精度。通过配置 $100 \text{ M}\Omega$ 的

高输入阻抗(R_i),不仅稳定了电压信号,还便于信号的导出与后续分析,增强了信号采集的一致性和可靠性。

值得注意的是,为纠正可能的电压相移问题,系统内嵌了相移补偿机制。这一设计不仅能提升系统的功率因数,还有助于改善电压质量,确保了单位增益跟随器操作下的系统性能恒定,从而在根本上加强了整个电压测量与处理链路的精确度与鲁棒性。

2.2 微型小开口电流钳设计

在现有技术背景下,传统的便携式小开口钳表大多依赖于封闭式铁芯结构,这一设计虽已相当精巧,但在面对导线密集、空间受限的应用场景时,其操作灵活性与测量准确性仍面临挑战。鉴于此,该文提出了一项创新设计,即采用U型结构的小开口电流钳,旨在突破传统设计的局限,实现更高效、更精确的电流测量。

该设计的核心在于其独特的U型结构,这一构型不仅显著减小了钳表的物理占用空间,使得在布线复杂、间距狭小的电气设备中也能轻松接入,而且提高了测量的便捷性和适应性。U型结构的设计灵感来源于对实际应用场景的深入理解,它能够环绕在紧密排列的导线上方,而非传统意义上需要“夹住”导线,从而避免了在高密度接线环境中操作的不便。

为了确保测量信号的准确度与稳定性,微型小开口电流钳的设计细节经过了精心考量。铁芯尺寸的确定基于对目标测量电流范围的精确计算,旨在最大限度地减少磁滞和涡流损耗,提升测量灵敏度。同时,线圈匝数经过优化配置,以平衡灵敏度与带宽的需求,确保在不同频率下的电流测量都能保持高

度准确性。

此外,设计中还融入了高性能的引出屏蔽线,有效抑制外部电磁干扰,保证测量结果的纯净度,这对于在电气噪声较大的工业环境中进行精准测量至关重要。屏蔽线的选择与布置策略,充分考虑了信号完整性与环境适应性,进一步增强了该电流钳的实用性与可靠性。

手持手柄部分的设计则侧重于用户体验,采用符合人体工程学的形状与材质,确保长时间使用下的舒适握持感,减少操作疲劳。手柄表面处理兼顾了防滑与耐用性,即便在潮湿或油腻的环境下也能稳定操作。

综上所述,设计的小开口电流互感器(如图4所示)通过U型结构的创新应用,结合对铁芯尺寸、线圈匝数、屏蔽线以及手持手柄的综合优化,不仅克服了传统钳表在特定应用场景下的局限,还提升了测量的精度、便捷性和用户友好度,为电气测量领域提供了一个更加高效、灵活的解决方案。



图4 U型小开口电流互感器

电流信号经改进的互感器采样, T_7 和 T_8 是电流采样端。通过分压、滤波处理后将电流信号接入计量芯片。电压、电流接入计量芯片完成功率的计算和数据的输出。测量电路如图5所示。

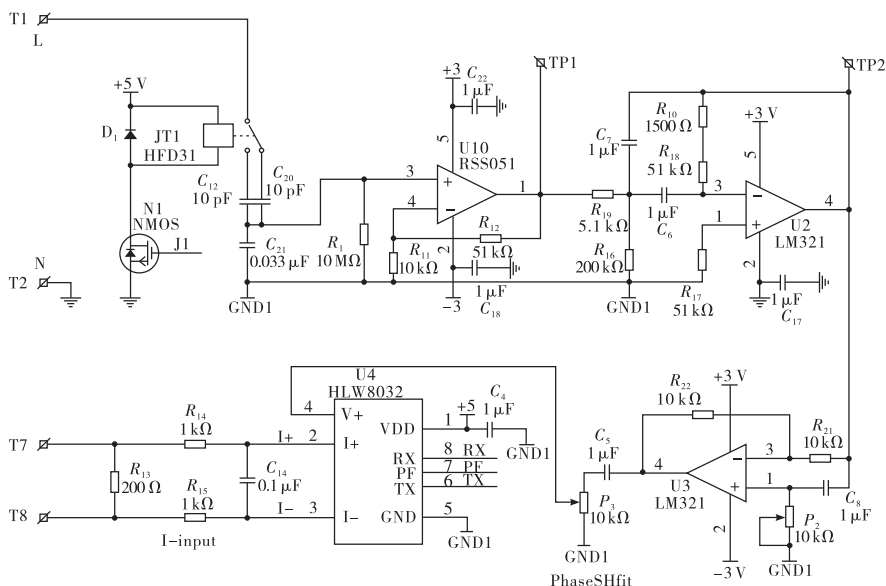


图5 测量电路图

HLW8032 是一款高性能的电能测量集成电路,采用先进的 CMOS 工艺制造,专为单相电能计量应用设计。其核心功能包括精确测量线电压、电流,并能实时计算出有功功率、视在功率及功率因数,是实现高效电能管理的关键组件。该芯片在数据通信时,每轮完整的数据传输包含 24 字节,这些数据分布在寄存器 1 至寄存器 11 的连续 11 个寄存器中。数据采集流程始于单片机对电压和电流信号的预处理及计算初始化,一旦检测到首个信号下降沿,即标志着 24 字节数据采集序列的启动。在这一过程中,至关重要的是识别并提取出关键寄存器中的信息,包括电压参数寄存器、实际电压值寄存器、电流参数寄存器、实际电流值寄存器、功率参数寄存器及功率值寄存器。通过对这些特定寄存器数据的解析与计算,系统能够准确获知当前的电压、电流及功率的实际数值,为电能表的现场校验与监控提供了坚实的数据支撑。

2.3 功率检测电路设计

电能表检验中,信号检测是确保电能计量精确度的核心步骤,其重点在于精准捕获和解析电能表脉冲输出信号,以便有效监控和计量电能消耗。该过程依托一套精密的信号检测电路,涵盖信号增强、波形整形、噪声抑制及电气隔离等多个技术环节,以保障信号在复杂电气条件下的稳定性和可靠性传递至数据处理单元。功率检测电路如图 6 所示。

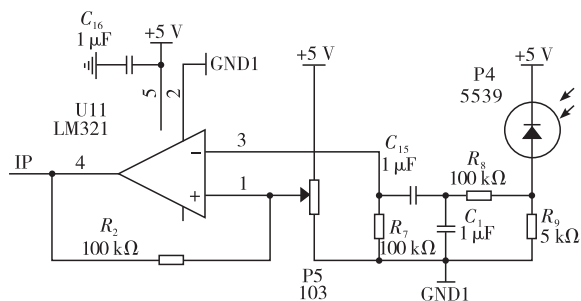


图 6 电源变换电路

电气隔离:利用光电耦合器等元件,实现信号传输路径上的电气隔离,既保证了数据通信的完整性,也保护了后端电路免受高压或干扰影响。

滤波处理:集成 RC 滤波器,有效滤除高频背景噪声,净化信号质量。

信号整形:通过电路设计,将脉冲信号调整为标准形状,便于准确计数。

信号放大:采用运算放大器增强电能表输出的微弱脉冲信号,确保信号强度足以被后续电路精确识别。

功率检测环节通常涉及对同一时段内电能消耗的检测,该过程通过累计电能表输出的脉冲数量实现。系统收集这些脉冲信号,并借助专门软件进行深入分析,计算出实际的功率和电能消耗值。所得数据随后与电能表内置的 HLW8032 计量芯片提供的结果进行对比,据此评估计量误差是否维持在可接受的误差限内。

这一系列检测和验证过程,不仅强化了电能计量的准确度,还为电能表的性能评价与故障排查提供了科学依据,是确保电力系统计量公正与高效运行的基础。

2.4 数据显示与传输

STC15W204S 单片机,以其强大的 8051 内核为核心,广泛服务于多样化的应用领域,涵盖工业控制、高端通信装备、精密电子仪器、智能家居电器、汽车电子系统、安防监控技术等多个重要行业。这款单片机凭借其融合的前沿技术和丰富的外设接口资源,成为实现复杂系统控制与数据处理的理想选择,尤其擅长于实时显示采集到的电压与电流参数,为用户提供直观的数据反馈。

在具体应用中,数据显示电路设计如图 7 所示,STC15W204S 不仅展现了其在信号采集与处理方面的高效能力,还充分利用其内置的 A/D 转换器及多种通讯接口,确保了从传感器读取的电压与电流信息能够被迅速、精确地转化并传递至显示单元。这种设计优化了数据的可视化过程,使得系统状态监控更为直接且易于理解,极大提升了用户在操作与维护过程中的体验与效率。

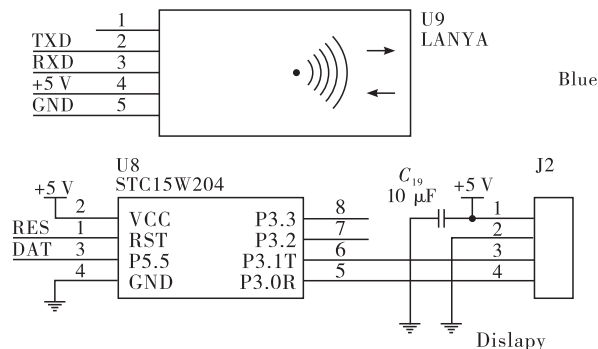


图 7 数据显示电路

蓝牙技术作为一种低功耗、高性价比的短距离无线通信解决方案,成功地消除了固定与移动设备间的通信鸿沟,实现了灵活便捷的互连。在电能表的现场检验领域,这一技术的应用尤为突出,它革新了数据传输方式,使得实时电能数据能够即时展示,极大地提升了检验工作的效率与便利性。无需复杂

的布线,检验人员仅需通过蓝牙连接便能迅速获取电能表的详细读数,不仅简化了操作流程,还确保了检验结果的即时性和准确性,为电能计量与管理系统注入了新的活力。

3 非接触式电能表校验装置测试

非接触式电能表校验装置测试样机的研制,涵盖了多个关键技术和工艺步骤,包括 PCB 设计与布局的精心规划、关键电子器件的科学选型、实物电路的精密焊接作业,以及单片机的定制编程,以确保装置的高性能与稳定性。实验装置测试如图 8 所示。

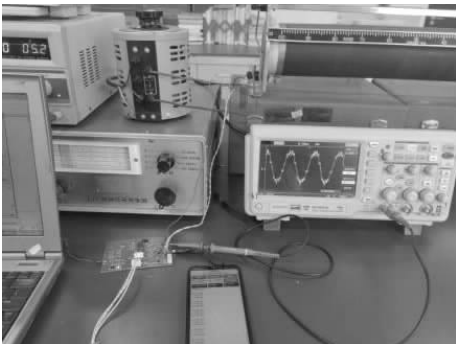


图 8 实验装置图

该装置设计用于在标准工频条件下工作,即测试线路的电压设定为 220 V,频率保持在 50 Hz,以此模拟常见的电网运行环境。为了全面评估其性能,测试覆盖了多种负载条件,这样做旨在检验装置在不同负载下对电压、电流、功率测量的适应性和准确性。

通过对比实验装置显示的电压、电流、功率读数与测试线路的实际测量数值,系统性地评估非接触式电能表校验装置的测量精度与可行性,旨在证明装置在实际应用场景中的测量精度和可靠性。实验

结果不仅需要展示两者之间的高度一致性,还应体现出装置在消除测量误差、提高现场工作效率及保障操作安全等方面的优越性能,从而充分证实该非接触式电能表校验装置设计的有效性与实用性。

3.1 电阻负载

针对电阻负载大小变化,采用滑线变阻器进行试验,被测电压和测试电压波形如图 9 所示,电压、电流和功率测试结果如表 1 所示。

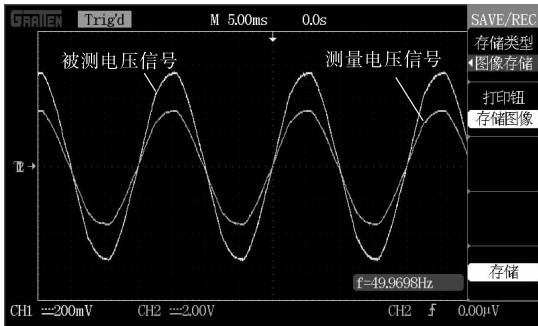


图 9 待测电压与输出电压波形

图 9 清晰展示了被测电压信号与经过放大、滤波和移相处理后的测量电压信号之间的对比。从图中可以看出,两者的变化趋势保持高度一致,这表明测试电路设计能够准确捕捉并反映被测信号的动态特性,验证了电路设计的可靠性和精度。进一步分析,我们可以看到,尽管经过了一系列的信号处理步骤,测量电压信号依然能够保持与原始信号的高度同步,这说明电路设计中的放大、滤波和移相等环节并未引入显著的延迟或失真。这不仅保证了信号的完整性,也提高了测量的精确度。

以上分析,证实了测试电路设计的有效性,也为后续的电路优化和性能提升提供了重要的参考依据。

表 1 电阻变阻器测试结果

序号	实际电压/V	实际电流/A	实际功率/W	测试电压/V	测试电流/A	测试功率/W	功率误差/%
1	215.0	1.100	236.5	216.7	1.093	237.0	0.21
2	220.0	1.122	346.8	221.8	1.115	247.3	0.20
3	225.0	1.150	258.8	226.8	1.143	259.3	0.19

表 1 中数据显示,非接触式电能表校验装置显示电压、电流和功率与实测值比较接近,误差分别为 0.8%、0.6% 和 0.2%,测试结果比较准确,能够满足电能表的现场校验需求。

3.2 感性负载

针对感性负载大小变化,采用 500 W 的单相电动机进行试验,测试结果如表 2 所示。

表 2 500 W 单相电动机测试结果

序号	实际电压/V	实际电流/A	实际功率/W	测试电压/V	测试电流/A	测试功率/W	功率误差/%
1	215.0	1.500	258.0	216.7	1.491	261.7	1.43
2	220.0	1.530	369.3	221.8	1.521	273.2	1.05
3	225.0	1.570	282.6	226.8	1.561	286.7	1.45

表 2 中数据显示,在感性负载下,非接触式功率测试装置显示电压、电流和功率与实测值相比较,误差分别为 0.8%,0.5% 和 1.52%,测试结果比较准确,可以满足电能表现场校验要求。

电能表校验装置的测试结果显示,其测量所得的电压、电流及功率值与实际线路参数极为接近,验证了该装置的测量准确性。该装置的一大亮点在于,通过精心设计的测试方案,有效解决了电压测量过程中耦合电容不确定性带来的影响,显著提升了测量的可靠性。同时,装置中创新的电流测量方法极大地简化了现场电流测定的流程,加之其出色的误差控制能力,确保了测试结果的高度精确性。

在结果显示方面,该装置展现出高度的灵活性与便利性。测试数据经由高效的单片机编程处理,不仅能够实现中文、英文字符及数字的清晰展示,还支持在低功耗的 LCD 12864 液晶屏上直接呈现丰富的测量信息。此外,该装置还具备通过蓝牙技术将测试结果无线传输至智能手机的能力,为用户提供多样的查看选项,进一步增强了使用的便捷性和实用性。该电能表校验装置成为了兼具精确度、低能耗与友好交互性的理想选择,充分满足了现代电能计量与监测的高标准要求。

4 结论

该文研究了一种新的非接触式电能表现场校验装置,该装置集成了电压和电流的精密测量功能,专为提升现场校验的安全性、操作便捷度及测量准确性而设计。其核心优势与技术创新点可概括为以下几点:

(1)装置采用线夹与导电海绵组合设计的电压非接触测量探头,显著增强与电线的贴合度,形成稳定的耦合电容效应。通过智能化调节接入电容值,该设计有效解决了耦合电容变化对电压读数的干扰问题,确保了测量结果的稳定性和精确度,同时保障了操作人员的安全;

(2)利用 U 型小开口电流钳的独特设计,该装置克服了传统电流测量工具在狭小空间应用的局限,极大地方便了电能表现场的电流检测,提高了检测效率和便捷性,尤其适合于导线密集的复杂环境;

(3)综合性能优越:该校验装置结构紧凑,操作简便,测量精度达到 $\pm 1.5\%$ 以内,完全符合现场校验的高标准要求。它不仅能够实时显示电压、电流及功率数据,还具备成本效益,为电力系统维护、能

源管理和计量审计等领域提供了高效、可靠的解决方案。

参考文献:

- [1] 张泽林,刘希喆. 基于非接触式电压测量的电压监测系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2022: 1-10.
- [2] 宋宏天,肖霞,徐雁,等. 配电网故障指示器中电压测量的研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(3): 110-115.
- [3] 陈秋鹭. 负荷终端在低压配电网电压监测中的应用[J]. 科技与创新, 2021(23): 157-158.
- [4] 邓永生,张昊,张旭东. 非接触式电压测试系统及关键技术研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2019, 39(6): 99-102.
- [5] 李嘉贤,刘灏,毕天姝. 非接触式电压相量测量算法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 168-178.
- [6] 江兵,王俊刚,陈丽娟,等. 一种非接触电能传输系统的原边控制方法[J]. 电测与仪表, 2014, 51(11): 86-90.
- [7] 张伟,李晓建,梁军生. 非接触式电压传感器电极仿真分析[J]. 机电工程技术, 2021, 50(10): 41-45.
- [8] 江陶然,刘希喆. 基于拓扑变换的非接触式电压传感器[J]. 电工技术学报, 2019, 34(1): 153-159.
- [9] 周正伟,晏国华,李丹. 基于电容耦合原理的非接触式家用电压测量装置研究[J]. 电气自动化, 2020, 42(2): 98-100.
- [10] 邓永生,张昊,张旭东. 非接触式电压测试系统及关键技术研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2019, 39(6): 99-102.
- [11] BI T, SHEN R, PLANS J, et al. A novel method for single phase - to ground fault location based on wavelet analysis and correlation [C]. Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2013, IEEE PES, 2013: 1-4.
- [12] 黄学红,刘惠农,谈航,等. 基于非接触式电压电流一体化测量的配电网在线监测系统[J]. 电工技术, 2016: 20-22.
- [13] 周睿旒. 电子式电流互感器采样电路的计算与测试[J]. 电子测试, 2017(12): 18-19.
- [14] 张卫,张健. 非接触式静电电压测量仪校准装置设计与开发[J]. 计量与测试技术, 2018, 45(06): 21+25.
- [15] 刘岑岑,王委,夏天,等. 电能表检定装置的检定及其测量不确定度评定[J]. 电测与仪表, 2018, 55(S1): 55-58+63.
- [16] LAWRENCE D, DONNAL J S, LEEB S, et al. Non-contact measurement of line voltage[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(24): 8990-8997.
- [17] 郑磊,曾妍,杨剑,等. 数字化电能表校验方法及校验装置研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(17): 100-105.

(下转第 96 页)

的 Lambda 算法对系统整定^[11-12]。该算法指出在控制器增加 10% 给定后建模, PI 控制器整定参数由下列公式确定:

$$K_c = \frac{T}{K(\lambda + \tau)} \quad (4)$$

$$T_i = T \quad (5)$$

式中: K_c 为标准 PID 的比例系数; T_i 为标准 PID 的积分时间; T 为反馈响应至变化幅度的 63.2% 时所需时间; K = (反馈变化量占表计量程的比例) / (控制器给定比例); τ 为反馈响应延时; λ 为整定控制变量。

对于恒压供水要求其有较好的鲁棒性, 且相对波动不大, 采取 PI 控制器, $\lambda = 3\tau$ 。

对于调节阀, 由于调节间隔时间较长, 而水流量会在阀体开度到一定程度时突然变化, 需要对控制量在稳态附近时有一定抑制, 采取 PID 控制器, $\lambda = \tau$, 同时设置 $T_d = T/4$ 。

3 总结

系统在 23 年 9 月完成改造并试运行, 经过连续 7 个月的监测, 在该运行方式下电耗同比减少 43 716 kWh, 且无系统振荡情况发生。

水泵作为暖通系统中能耗的主要部分之一, 在设计阶段除了满足《工业建筑节能设计统一标准》外还应该考虑具体工况去优化, 针对冷却水泵根据经验总结了以下几条选型建议并已在新建项目中开展实施:

(1) 多联式空调机组冷却水选择全变频, 并配备一用一备小用量辅机, 在低温天气下使用辅机运行;

(2) 冷水机组及热泵机组冷却水的使用量相对稳定, 若安装位充足优先采用变频大泵和定频小泵

组合;

(3) 冷却水终端设备为空压机组等散热量恒定设备时, 冷却水旁路考虑增加水源蒸汽热泵加强对余热的利用, 该设备设置在在谷电时段启用。

参考文献:

- [1] 赵金鑫. 露点和湿球温度计算在工业领域的应用方法研究[J]. 机电信息, 2022, 22(5): 83-85.
- [2] 杨玉鹏, 杨玲, 陈卓, 等. 公共建筑冷却塔台数调节节能运行分析[J]. 建筑节能(中英文), 2021, 49(7): 91-94.
- [3] 龚思越, 郭勇, 江宋标. 冷却水变流量节能分析与计算探讨[J]. 制冷, 2023, 42(04): 3-7.
- [4] 王彤, 朱多林, 周晓, 等. 二次供水并联泵组节能优化研究[J]. 给水排水, 2021, 47(3): 125-131.
- [5] 邵光明, 缪小平, 彭福胜. 并联变频水泵调速特性试验研究[J]. 暖通空调, 2018, 48(11): 120-125.
- [6] 赵倩, 林建泉, 黄忠, 等. 工业循环冷却水变频恒压供水系统水泵并联运行策略研究[J]. 制冷与空调(四川), 2015, 29(02): 157-161+168.
- [7] 胡明, 侯书亮, 刘玲. 并联循环冷却水泵的参数选择与系统设置[C]//中国建筑学会建筑给排水研究分会第四届第一次全体会员大会暨学术交流会论文集. 2022, 651-660.
- [8] 陈涵. 基于灰狼算法的水轮机调速器参数优化[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [9] 任宇希. 车用永磁同步电机 MTPA 控制优化策略研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2022.
- [10] 王鹏程. 基于模糊 PID 控制的双级射流在线混药系统研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
- [11] 冯少辉, 袁海雷. 基于 Lambda 方法的自衡对象 PID 整定研究[J]. 石油化工自动化, 2021, 57(4): 31-34.
- [12] 臧春华, 张帅杰, 苏宝玉. 流程工业最优 PID 参数整定[J]. 工业仪表与自动化装置, 2021(06): 95-100.
- [13] al. Non intrusive energy meter for nontechnical losses identification[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and measurement, 2020, 69(4): 1140-1147.
- [14] 周文斌, 李红斌, 蒋紫娟, 等. 基于标准电能表高频脉冲的数字化电能表快速校验方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(23): 125-131.
- [15] REZAM, RAHMAN HA. Non-invasive voltage measurement technique for low voltage AC line[C]. 2021 IEEE 4th International Conference on Electronics Technology (ICET). Cheng-du, China. IEEE, 2021: 143-148.
- [16] MARTINSAV, BACURAU RM, DOS SANTOSAD, et

(上接第 62 页)