

基于低压配电网络中的非直接接触式电压测试技术的研究

徐京波

(中冶赛迪电气技术有限公司, 重庆 401122)

摘要: 为了不破坏低压配电网络的绝缘层的电压测量工作, 提出了一种非直接接触式的电压测试方法。通过在非接触式的电压测量的应用化设计方面开展深入研究, 验证了该设计产品的指标性能。该方法对非接触式电压测量技术产品在数字领域内的应用推广具有积极作用, 最后通过实物样机开展非接触式电压的现场实测, 结合测试结果说明测量误差控制在合理范围内, 论证了所提的非直接接触式的电压测试方法具有推广应用的价值。

关键词: 电压测量; 非接触式电压测量; 电路设计; 电磁场

Research based on indirect contact voltage test technology in low-voltage distribution network

XU Jingbo

(China Metallurgical Saidi Electric Technology Co., Ltd., Chongqing 401122, China)

Abstracts: In order to measure the voltage of the insulation layer of the low-voltage distribution network without breaking the loop, this paper proposes a voltage test method of indirect contact. Conduct in-depth research on the applied design of non-contact voltage measurement and verify the specification performance of the design product. This method has a positive effect on the application and promotion of non-contact voltage measurement technology products in the digital field, and finally the on-site measurement of non-contact voltage is carried out through physical prototypes, and the measurement error is controlled within a reasonable range in combination with the test results, thus demonstrating that the non-direct contact voltage test method proposed in this paper has the value of popularization and application.

Key words: voltage measurement; non-contact voltage measurement; circuit design; electromagnetic field

0 引言

近年来, 直接式电压测量^[1-2]作为电压测试的典型技术手段得到广泛应用, 但考虑到直接式电压测量技术应用本身的局限性, 在诸如电力施工、野外电力维护、设备日常运维和智能供电系统检测过程中, 很多检测科目须开展多次测试才能完成, 这将影响城市电网的供电可靠性。同时

受限于用户条件允许的情况, 使得电力测量的效率低下, 提高了测试中的风险。传统方式下的电压测量需要测试设备同被测带电体直接接触后, 利用传导电流的形式来进行测量。但该种测量带电体电压的手段也存在很多弊端。文献[3]详细分析了通过装置直接接触的方式测量心电信号, 测试电极需采用导电膏和人体皮肤相接触, 从而

易诱发皮肤过敏现象,引起皮肤不适症状。此外,接触式测量电路通常伴随有时延的特点。文献[4]详细介绍了接入直接式测量电路后,将改变原电路网络模型中的传输特性,增加了测量的时延特性,提高了测量结果不准确性。另外直接接触式测量带电物体电压也增加了测量危险性。

众多学者和工程技术人员对非接触式电压测量^[5-8]的电路拓扑进行了广泛研究。但受限于技术研究的局限性,大部分研究人员和厂家仅对用于测试火线和零线的验电笔装置进行相应的研究,未将验电笔和非接触式电压测量装置综合起来使用。国内对于非接触式电压测试装置的应用研发还处在尝试阶段,对非接触式电压测量技术的理论研究也处于起步阶段。另外,在面对农村低压配电网问题时,所涉及的220 V/380 V电压等级待测线路用传统的非接触式测量方法将受测量环境、待测线路型号未知的影响而无法准确测量。

基于此,本文进行一种无须破坏低压配电路外绝缘,仅将测量探头紧贴在待测线路绝缘层表面就能完成线路电压测量的非接触式电压测量装置的开发。通过测试可有效降低待测线路和装置探头间形成的寄生电容值所引起的测量不同类型线路时出现测量误差,且系统信噪比较低,同时测试结果可说明测量误差能保持在合理范围内,有效论证了本文所开发的非接触式电压测量装置具有较大的实用价值。

1 非接触式电力电压测量原理

1.1 电磁场理论

依据电磁场理论^[9],空间中若存在两个物体间有电动势 ε ($\varepsilon=U_a-U_b \neq 0$),就会产生电场 E ,电场分布的原理如图1所示。若将线圈置于该电场中,只要电动势 $\varepsilon \neq 0$,则线圈就会产生感应电流。图1中,设定 U_b 为供电线路上的运行电压, U_a 为利用非接触式电压测试仪所测的电压^[10-11]。

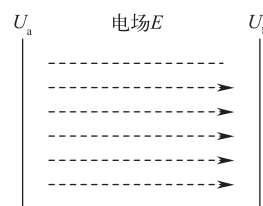


图1 电场分布简图

Fig. 1 Schematic diagram of the electric field distribution

1.2 非接触式电力电压测量原理

传统的电压测试装置需将测试表笔直接与待测导电触点接触,这显然不利于电压测量的各种工况,而非接触式测试技术可适用于电压测量的各种环境,其原理可类比磁力装置测量磁场,替代与电气设备直接连接,利用电容耦合的方式,通过位移电流感应实现带电设备表面电压测量^[12]。将传感器的电极端置于电场之中,在感应电极和信号源之间形成相应的耦合电容,经测量系统和大地之间形成分压电路,测量原理如图2所示。

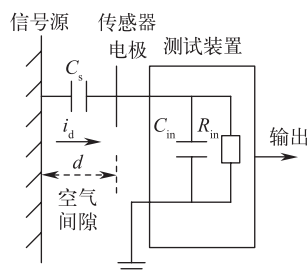


图2 测量原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the measurement principle

由图2可知,假定信号源电压设置为 V_s ,利用分压结构可获得输入端电压为

$$V_{in} = V_s Z_{in} / (Z_{in} + Z_s) \quad (1)$$

假设图2前置放大电路的放大倍数为 A ,输出端的电容、电阻分别设置为 C_{in} 、 R_{in} ,可获得输出电压为

$$V_{out} = \frac{j\omega C_s R_{in}}{1 + j\omega C_s R_{in} + j\omega C_{in} R_{in}} V_s A \quad (2)$$

结合式(2)可知,若忽略耦合阻抗和系统输入阻抗的比值,该系统可视为一个理想电压测量装置,有助于提升电压测量的准确性。为增加电压测量的灵敏性,设计中采用反馈的方式增加

系统前端的输入电阻值。通过测量两点电压差，利用电压与电场关系推导出电场的分布^[13]。

两端法非接触式电压测量过程主要是运用测量表笔探头和电缆间的电容效应原理，获取供电线路电压中的频率、波形信息，通过对采集的微弱电流信号进行检测和处理，完成对供电线路电压的非接触式测量，测试过程如图3所示。

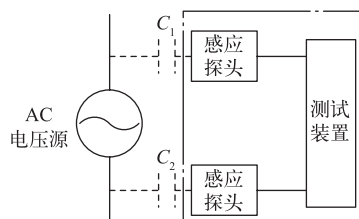


图3 非接触式电力电压测试仪测试示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the test principle of non-contact power voltage tester

由图3可知，测量仪两探头间可产生同频率且幅值相等的电压信号，利用装设的电流检测线圈对线路电压进行测量^[8]。当电压测试仪的两探头布置好与电力线的测试位置时，其探头和电力线间会产生图3中显示的电容 C_1 、 C_2 。因为电力线存在交流电压，故测试探头能产生感应电流信号。

2 非接触式传感器处理电路设计

为了获取供电线路上的电压信号，非接触式电压测试装置需重点对以下四个方面进行详细探讨：①对电力线路的火线与零线开展非接触式检测方法的研究；②对电力线路上的电压波形和频率参数的获取开展研究；③对电力线路上同频率且幅值相等的电压信号开展研究；④对微弱电流信号进行检测。利用仪器探头和电缆间的电场以及感应的电压信号开展检测研究，获取电力线上的电压幅度，达到准确检测电压数值的目的。

系统采用低功耗单片机作为控制器，利用敏感电极采集位移电流信号，输入到前置放大电路，经放大处理后输出给A/D转换模块，并显示转换后的信号。考虑到系统输入阻抗值对装置的灵敏度有重要影响，在系统回路设计中，应重点

对敏感电极和前置放大电路的设计进行难点把控，其结构简图如图4所示。

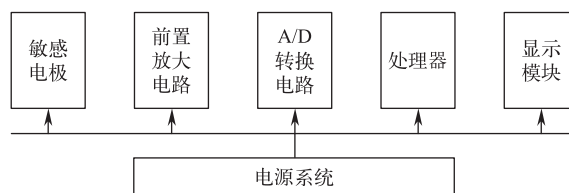


图4 非接触电压测量结构简图

Fig. 4 Contactless voltage measurement structure schematic

2.1 敏感电极

检测系统的敏感电极主要分为感应层、有源屏蔽层和接地屏蔽层。利用三同轴电缆和后面前置放大电路进行连接。感应层与有源屏蔽层由直径约3.5 cm的标准双面印制电路板组成。感应层由铜覆盖，其外围一圈覆铜和电路板背面相连作为有源屏蔽层，接地屏蔽层选择为其最外层金属壳。电极的整体直径约3.7 cm，厚度约0.5 cm。结构如图5所示。

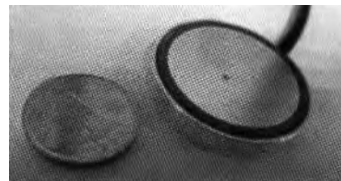


图5 电极结构图

Fig. 5 Electrode structure diagram

2.2 前置放大电路

通过增加系统输入阻抗大小，提升被测物体表面电压信号的灵敏性，在前置放大电路中考虑保护、自举、有源驱动屏蔽以及接地屏蔽等技术，其原理如图6所示。利用三同轴电缆前置放大电路，可通过前端敏感电极获取被测物体的感应电压信号，经AD549静电型运算放大器放大后传递给信号处理模块。虽然前置放大电路可获得较为稳定的直流工作点，但同时降低系统侧的输入电阻，因此需利用反馈技术在尽可能保证输入电阻的前提下对前置放大电路进行偏置设计。同时综合考虑到电阻 R_1 和 R_2 对偏置电路阻抗的影响，本文选取阻值为100 M Ω 的电阻。利用正反

馈方式,设计出自举结构搭建偏置电路,偏置电路的等效输入阻抗计算式为

$$R_b^* = \frac{V^+}{V^+ - V^-} R_l \quad (3)$$

式中, R_b^* 为等效输入电阻; V^+ 、 V^- 分别为直流正、负极电压。

为了降低传输线的等效寄生电容,增加系统的输入阻抗,降低感应信号的传输损耗。本文在设计前置放大电路时采用电容抵消技术,通过电容 C_f 和电位器 R_p 共同建立输入电容抵消结构,其等效输入电容表达式为

$$C_i^* = C_{in} - (\mu - 1)C_f \quad (4)$$

式中, C_i^* 为等效输入电容; μ 为电位器的反馈系数。

通过采取精确调节措施,匹配好合适的参数,该结构可降低运放模块的输入电容值,有利于提升系统的输入阻抗,可实现被测物体的微弱电压信号的强力耦合。

前置放大电路原理如图6所示。在图6中,该系统采用32位的DSP模块作为控制器,可实现密集型的复杂控制功能,且不需要较高的供电电压,具备多时钟功能。因此,该控制模块功耗低,适合便携式检测设备低功耗的要求。

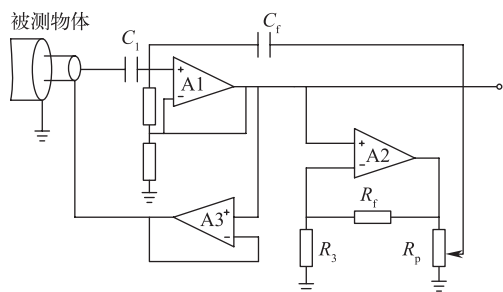


图6 前置放大电路原理图

Fig. 6 Schematic diagram of preamplifier circuit

此外,由于所检测的电压信号是微弱信号,为提高检测装置的分辨率,采用24位宽频带A/D转换芯片进行模数转换。该芯片可单电源供电,利用外部参考电压进行差分输入。同时在A/D转换前考虑一个电压提升电路,其作用是将测量到的电压信号叠加一个2.5 V的直流偏移。这样能满足芯片输入端的电压要求,又增加了电压的测量范围。

3 非接触式电压测试装置结构及过程

3.1 非接触式测试装置结构

非接触式电压测试仪的结构如图7所示。

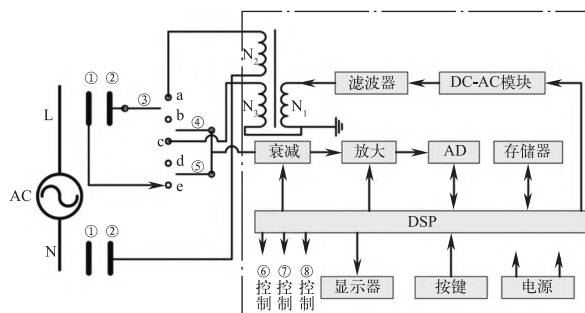


图7 非接触式电力电压测试架构图

Fig. 7 Non-contact power voltage test architecture diagram

由图7知,节点①、节点②封装在测试装置的探头中,节点①表示感应线圈,节点②表示探头中装设的金属极板,节点③、节点④和节点⑤表示测试装置的切换开关。点画线框内的内容为设计的主电路部分^[14]。

3.2 电力线上火线和零线的确定

利用非接触式电压测试仪进行测试时,首先需要确定电力线上各回路的相序分布。因此,使用验电笔测试电压时,需实现非接触式的功能开发。具体设计思路为:使用两探头接近测试的两条电力线路,靠近火线L探头中的金属极板节点②和机壳与人体构成一个完整回路,数字信号处理(Digital Signal Processor, DSP)模块控制开关的节点⑥和b点接触,开关⑦和b点接触,开关⑧和d点接触,由此可确定出电力线的火线和零线^[15]。

3.3 获取电力线上正弦波形

考虑到测试设备感应的电压应与电力线上的运行电压具备同频且同幅值的特点,且电力线上的正弦波可能存在失真的现象,需对获取的相关参数进行耦合校准操作,耦合的电压信号如图8所示。

图8中的设计思路: DSP控制开关选取节点⑥和b接触,节点⑦和b接触,节点⑧和d接触,电力线上的电压信号通过耦合效应汇入测试探头,其后利用衰减器、放大器等元件基于DSP的控制

功能,将电容 C 耦合得到的电压信号控制在合理水平,满足A/D转换器输入信号的电平要求。DSP控制器主要作用是引导A/D转换器采集调节后的电压信号,并将采集结果存储到存储器中。鉴于仪器探头与电力线间的电容 C 值较小,因此仅靠电容 C 不能完全将电力线上的电压信号耦合到探头上,获取的电压信号的幅值不能作为电力线上的电压参考使用,但其电压波形可被完整记录。

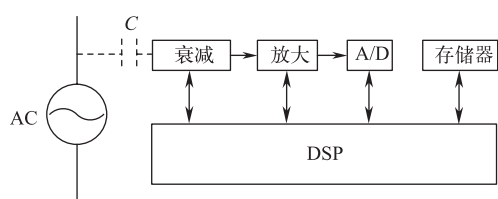


图8 电压波形采集电路框图

Fig. 8 Block diagram of a voltage waveform acquisition circuit

3.4 获取电力线上的正弦波频率参数

鉴于电力线上的电压频率并非时刻都为50 Hz,故需获取电力线上电压频率参数。通过快速傅里叶变换^[16]解析获取电力线上的电压频率信息。

3.5 获取电力线上同频且同幅值的电压波形

若采用非接触式电压测试仪的两探头捕获电力线上同频且同幅值的电压信号,在采用检测探头中的线圈①感应出的电流为0时,表明探头极板上捕获的电压和电力线上的电压相等,由此测出电力线上的电压。非接触式电压测试仪的研究主要为电力线敷设和维护提供方便,需具备可移动便携式功能,应选取电池供电方式,将电池的直流低压转换成交流高压。综合运用直接数字频率合成(Direct Digital Synthesizer, DDS)技术和正弦脉宽调制(Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM)逆变技术所需的电压信号。具体设计流程:

1) 在图4中,采取DSP控制开关的节点⑥与a接触,开关节点⑦与b接触,开关节点⑧与c接触,再结合DDS技术将图2中采集电力线上的电压信号经SPWM技术处理后,输出到DC-AC模块的开关管中,将直流信号转变为交流方波信号。该方波信号经滤波器滤波后形成与电力线上

相同的电压信号,且输出电压信号的幅值可利用PWM信号的占空比值实现,最后将滤波器输出的信号接入至变压器的 N_1 端,这样非接触电力变压器的 N_2 和 N_3 端可产生电压信号,其中 N_2 端可模拟出电力线上的电压信号。

2) 获取非接触装置的输出电压,同时对DSP检测线圈①所产生的感应电流进行数值测试。

3) 若DSP检测线圈①所产生的感应电流数值为0时,DSP控制开关的节点⑥与a接触,开关节点⑦与c接触,开关节点⑧与d接触,并采集变压器 N_3 端电压。鉴于变压器线圈的 N_2 和 N_3 匝数可知,捕捉变压器 N_3 端电压后即可获取 N_2 端电压,从而测试出电力线上的电压。

综上,重复上述步骤并按照设定次数进行多次测量,根据文献[17]给出的多次测量求取算数平均值原理进行分析,该操作有利于减小电力线上电压的测量误差。

3.6 算法流程

为了促进非接触电压测试装置对电力线路运行电压的准确测量,提升对捕获数据的精确分析处理能力,具体测试算法流程如图9所示。

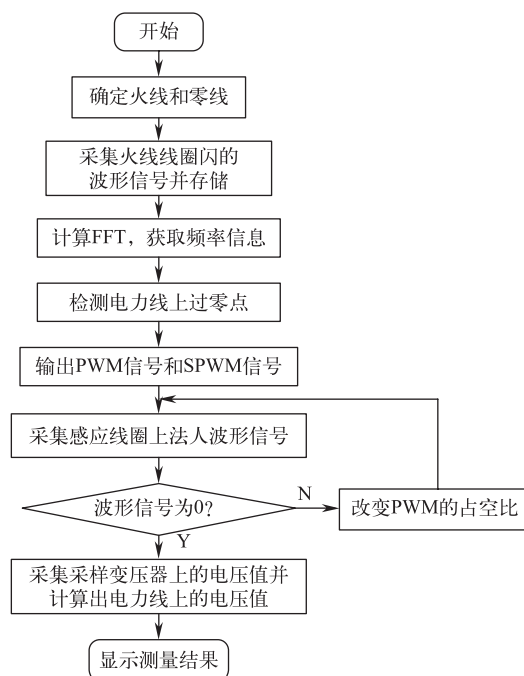


图9 测试算法流程图

Fig. 9 Test algorithm flowchart

4 仿真分析

本文利用设计的硬件完成样机制作和数据采集,并结合MATLAB软件完成对数字滤波器系统函数的开发设计。非接触式电压测量装置的FPGA核心板、继电器单元、放大单元、采集单元、供电单元、通信单元和外围功能单元采用模块化设计,每个功能模块可单独进行功能调试。本文设计的非接触式电压测量装置选取的测试场景为低压配电网系统环境下进行,待测线路型号参数未知,在实验室中搭建好测试环境。将测量装置的外置探头固定安装在 2.5 mm^2 三芯排插电源线上,样机图如图10所示。

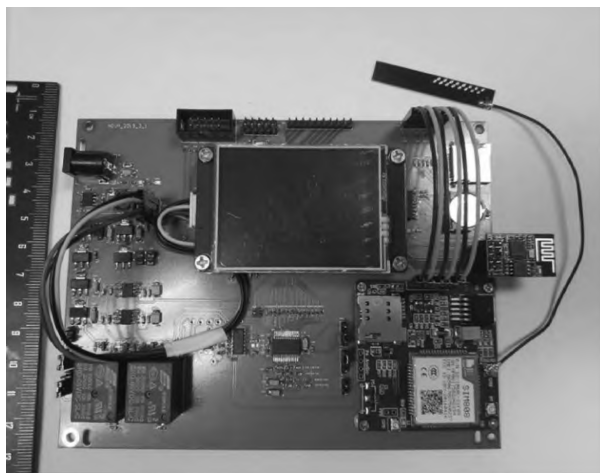


图 10 样机实物图

Fig. 10 Prototype physical drawing

将测试样机分别固定安装在县级供电管辖的三种不同类型的低压供电线路上,开展非接触式电压测量测试,测试的结果见下表,低压供电线路的原始电压和重构电压波形如图11所示。

表 电压测量结果

Tab. Voltage measurement results

类型	线路电压 /V	测量电压 /V	误差值 (%)
线路 1	233	235.85	1.22
线路 2	233	234.47	0.63
线路 3	233	236.36	1.44

注:线路1为截面积 2.5 mm^2 的三芯电源线;线路2为截面积 2.5 mm^2 的二芯电源线;线路3为截面积 6 mm^2 的BVR的电源线。

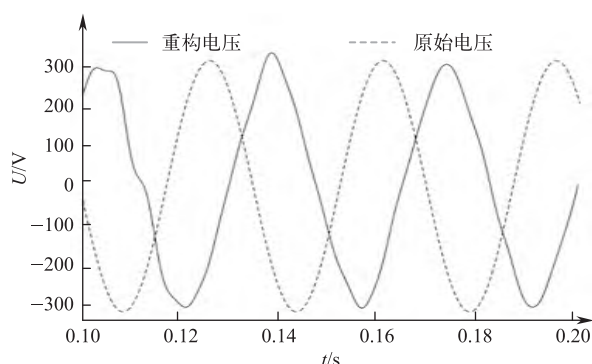


图 11 待测线路的原始电压和重构电压对比图

Fig. 11 Comparison chart of the original voltage and reconstructed voltage of the line to be measured

由图11可知,待测线路的原始电压和重构电压会存在一定的相位偏差,但电压的幅值基本一致,满足电压幅值的测量要求。由上表可知,利用非接触式电压测量装置,其测量准确度满足样机的测试要求。

5 结束语

通过在非接触式的电压测量的应用化设计方面开展深入研究,将非接触式电压测量技术进行实用化应用,结合测试结果表明,设计的非接触式的电压测量装置能实现 400 V 及以下的电压信号有效测量,且电压测量的准确度能控制在 1.0% 上下浮动,满足非接触电压测量的准确度要求。该技术产品已经满足 400 V 及以下的测量准确度要求,但在高压的测量环境下,测量的准确度下一步应进行深入研究。

参考文献

- [1] 周应旺,曲鹏.一种高精度正脉冲电压测量电路设计[J].微电机,2018,51(6):59-62.
- [2] 王静,孙谦浩,刘国伟,等.基于电容电压精确计算的MMC环流抑制方法[J].电气传动,2021,51(24):9-15.
- [3] 梁嘉琪,邱强,何理,等.家用心电信号检测系统设计[J].电子测量技术,2020,43(2):162-166.
- [4] 吴可玉,庄建军,李楠,等.一种简易电路特性

- 测试仪设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(14): 160-164.
- [5] 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.
- [6] 张时开, 张宇青, 李玉玲, 等. 非接触式静电电压测量仪校准方法研究[J]. 宇航计测技术, 2022, 42(1): 24-28.
- [7] 周正伟, 爰国华, 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.
- [8] 罗睿希. 基于电场耦合原理的电压测量装置设计研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [9] 安新磊, 乔帅, 张莉. 基于麦克斯韦电磁场理论的神经元动力学响应与隐藏放电控制[J]. 物理学报, 2021, 70(5): 40-59.
- [10] 袁佳歆, 雷洋, 熊信恒. 一种基于多导体静电耦合原理的非接触式过电压测量方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 524-530.
- [11] 史坤涛, 林纪凌, 江和. 电场感应原理在高压带电体电压在线监测中的应用[J]. 电工电气, 2014(10): 41-43, 51.
- [12] 周正伟, 爰国华, 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.
- [13] 陈建东, 王东鹏. 一种非接触式高电压检测装置的设计[J]. 电子技术, 2017, 46(5): 33-35, 29.
- [14] 陈明星, 时斌, 陈益果. 基于DSP的新型SPWM采样方法[J]. 电气自动化, 2011, 33(5): 45-47.
- [15] 曹莉凌, 刘雨青, 杨琛, 等. 基于555定时器的湿度检测电路的设计与Multisim仿真[J]. 电子设计工程, 2015(12): 159-162.
- [16] 樊永顺, 贺庆, 戴凤智. 基于ARM的嵌入式超声传播时间测量装置[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(2): 382-384.

作者简介

徐京波(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为高低压配电系统及检测仪表。

(收稿日期: 2023-06-11)