

数字万用表直流电压档计量偏差校准方法研究

张海鹏, 王小栋, 刘志杰

(山东寿光检测集团有限公司, 山东 寿光 262700)

摘要 数字万用表作为电子测量领域的核心基础仪器, 其直流电压档的计量精度直接决定了电气参数测量结果的可靠性, 在电子研发、工业控制、计量检测等各个领域都有很大的影响。本文阐述了数字万用表直流电压档基本的工作原理, 明确计量偏差的定义、分类和主要特点, 着重从四种主要的校准方法入手展开论述, 结合真实的校准过程以及技术参数, 并通过精准的案例分析, 利用表格来补充偏差特性与校准方法参数对比, 旨在为提高数字万用表直流电压档计量准确度提供参考。结果表明, 科学选择校准方法, 并且严格控制校准过程, 可以有效地抑制系统偏差和随机偏差, 保证仪器达到计量规范的要求。

关键词 数字万用表; 直流电压档; 计量偏差; 校准方法; 系统偏差

中图分类号: TM93

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.040

0 引言

在现代电子测量体系中, 数字万用表凭借测量范围广、精度高、显示直观、操作便捷等优势, 成为不可或缺的基础测量工具, 其直流电压档主要用于检测电路中稳定直流信号的电压幅值, 是电力电子、航空航天、精密制造等行业的重要测量环节。随着技术的发展, 数字万用表的测量精度不断提高, 在长时间使用的过程中, 由于内部元件老化、环境因素的影响、电路参数漂移等因素, 直流电压档容易产生计量误差, 如果误差超过了允许的范围, 则会造成测量结果失真, 从而影响到产品研发的质量、生产工艺控制精度和计量检测的公正性。因此, 确定计量偏差的种类及原因, 采用科学有效的校准办法对于保证数字万用表测量的准确性有重大现实意义。本文以数字万用表直流电压档的工作原理为基础, 对偏差进行分类, 对主流的校准方法和实际的应用要点展开详细的阐述, 给相关领域计量校准工作提供借鉴。

1 数字万用表直流电压档基本原理

数字万用表直流电压档核心工作逻辑是将输入直流电压信号转为数字信号, 经过处理之后再通过显示模块输出结果, 过程包含信号衰减、整流滤波、模数转换(A/D转换)、数据处理这四个部分^[1]。

输入衰减电路采用高精度的分压电阻网络, 根据测量量程自动调节分压比, 把不同的幅值电压信号衰减到A/D转换器可接受的量程内, 防止过载, 一般用

低温漂电阻来减少参数漂移的影响。整流滤波部分用滤波电容和整流二极管组成的电路来抑制交流干扰, 提取直流信号, 保证后面转换的稳定。A/D转换器为主, 主流采用逐次逼近式, 对输入的电压和基准电压进行比较, 把模拟信号转换成二进制数字信号, 高端万用表配内置恒温基准源提高稳定性。数据处理模块用微控制器(MCU)来实现, 对转换出的数字信号进行运算、修正和补偿, 去掉偏差之后再传给显示模块完成测量。分压电阻精度、基准电压稳定度、A/D转换分辨率和电路抗干扰能力都会影响到测量的准确性。

2 数字万用表直流电压档计量偏差定义与分类

2.1 绝对偏差与相对偏差的概念

数字万用表直流电压档的计量误差是指测量值与被测量的真实值(约定真值)之差, 是评价仪器测量精度的主要指标, 分为绝对误差和相对误差两种基本表现形式。绝对偏差为测量值和约定真值的代数差, 数值可以是正也可以是负, 单位和被测量单位相同, 可以直接反映测量结果偏离的程度, 但是受到测量量程和真值大小的影响, 不能跨量程、跨数值范围比较精度。相对偏差是以约定真值为基准, 把绝对偏差和真值的比值转化为百分比来表示的指标, 不受测量量程和真值大小的影响, 可以用来比较不同的量程、不同的数值下的测量精度, 是校准中评价偏差程度的一种常用的指标。实际应用时应优先选用经过计量检定合格的标准源给出约定的真值, 保证偏差计算正确。绝对偏差

作者简介: 张海鹏(1993-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 质量工程。

和相对偏差的量化计算给校准工作提供数据支持,综合分析两者可以准确地找到偏差来源及偏差大小^[2]。

2.2 系统偏差与随机偏差的区分

根据偏差的原因和特点,数字万用表直流电压档计量偏差分为系统偏差和随机偏差两种,两者在产生原因、变化规律以及影响机制上存在明显的不同,需要分别进行控制。系统偏差是由仪器结构缺陷、组件参数偏差、电路设计问题等确定性因素引起的,具有可重复性、可预测性和单向性,偏差数值和方向固定或者有规律可循,如分压电阻阻值漂移所造成的偏差可以通过校准修正或者补偿来消除,是校准的主要对象。机偏差由测量中偶然因素(环境温度波动等)引起,偏差数值与方向无固定规律、随机分布,无法单一校准消除,只能通过多次测量取平均值来减小其影响。两者共同作用于系统误差上,系统偏差决定了测量的准确性,随机偏差决定了重复性的高低,校准要兼顾两类偏差来提高精度。

3 数字万用表直流电压档计量偏差的校准方法

3.1 标准源校准法

标准源校准法是数字万用表直流电压档校准的基础方法,其核心原理是利用精度等级显著高于被校准万用表的直流标准电压源,输出一系列已知约定真值的电压信号,把被校准万用表测得的量值同标准值比较,求出偏差再进行修正,这种方法操作简单、精度高、适用范围广,是计量检测机构常用的校准方法。校准时必须遵守量程全覆盖的原则,在被校准万用表直流电压档的所有量程上,选取不少于 3 个校准点(一般为量程的 20%、50%、80%),保证整个量程范围内偏差都得到有效的校准,实时控制校准环境条件,温度保持在 $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$,相对湿度在 45%~65% 之间,防止环境因素对校准结果造成影响。标准源的精度等级要符合校准的要求,一般应比被校准的万用表高两个以上精度等级,并需要经过上级计量机构检定合格并取得有效的检定证书,在校准前应对标准源和被校准万用表进行预热,标准源预热时间为 30 分钟,万用表预热时间为 15 分钟,保证仪器处于稳定的工作状态^[3]。

用 FLUKE 5730A 直流标准源对一款 4 位半数字万用表的直流电压档进行校准,以 FLUKE 5730A 直流标准源校准某款 4 位半数字万用表直流电压档为例,该标准源直流电压输出范围为 0~1 000 V,精度等级为 0.001%,被校准万用表直流电压档量程为 0~10 V、0~100 V、0~1 000 V,精度等级为 0.01%。校准前把标准源和万用表置于符合要求的校准环境里预热 40

分钟,接上专用校准导线,保证接触良好以减小接触电阻所引起的误差。校准 10 V 量程时,标准源分别输出 2 V、5 V、8 V 三个校准点,待标准源输出稳定后,记录万用表的测量值,计算各点的绝对偏差和相对偏差,其中 2 V 校准点标准值为 2.00 000 V,万用表测量值为 2.0 002 V,绝对偏差为 +0.0 002 V,相对偏差为 0.01%;5 V 校准点标准值为 5.00 000 V,测量值为 4.9 998 V,绝对偏差为 -0.0 002 V,相对偏差为 -0.004%;8 V 校准点标准值为 8.00 000 V,测量值为 8.0 001 V,绝对偏差为 +0.0 001 V,相对偏差为 0.00125%。对于偏差超过允许范围的校准点,用万用表内置校准程序调整分压电阻网络参数,反复校准直到各个点的偏差都控制在允许范围内,完成 10 V 量程校准,其他量程也按照同样的方法进行校准,保证全量程精度合格。

3.2 多点校准法

多点校准法是解决数字万用表直流电压档非线性误差的方法。它的关键在于利用 A/D 转换器的非线性特性,在各个量程上选取更多的校准点,用拟合校准曲线来修正偏差。与标准源校准法的固定点修正不同的是,它可以更好地反映量程内偏差的变化情况,适合于高精度万用表以及有明显非线性偏差的仪器。非线性偏差是由 A/D 转换器的转换特性、分压电阻网络的非线性响应等因素引起的,不同的校准点偏差变化无规律,只能对某一固定的校准点进行修正而不能消除全量程的偏差。多点校准法加大校准点的密度,用最小二乘法拟合偏差和测量值函数的关系得到校准曲线,测量时实时修正测量值来提高精度。校准点的选择应根据偏差的变化趋势来定,一般每个量程选择 5~7 个点,包含量程的起始点、中间点、末端点和偏差容易发生突变的地方,分布要均匀,给曲线拟合提供可靠的依据^[4]。

例如:某款 6 位半高精度数字万用表,其直流电压档 1 V 量程存在明显非线性偏差,采用多点校准法进行校准,选择 Agilent 3458A 万用表作为标准仪器(精度等级为 0.0001%)搭建校准系统。校准之前对系统进行预热和环境控制,保证测量条件稳定,在 1 V 量程下选择 0.1 V、0.25 V、0.5 V、0.75 V、0.9 V 五个校准点,依次输出标准电压信号,记录被校准万用表的测量值和标准值,计算各个点的偏差。其中,0.1 V 校准点的绝对偏差为 +0.000 002 V,0.25 V 校准点为 +0.000 001 V,0.5 V 校准点为 -0.000 003 V,0.75 V 校准点为 -0.000 002 V,0.9 V 校准点为 +0.000 001 V。根据上述的数据,利用最小二乘法拟合出二次校准曲线,把曲线的参数写

入万用表内部存储器中,仪器工作的时,实时调用校准曲线对测量值进行修正。校准完毕之后再次检测各个校准点的电压值,偏差都在 $\pm 0.000\ 001\ \text{V}$ 之内,非线性偏差得到有效控制,测量精度比校准前提高3倍以上,可以满足高精度测量的要求。

3.3 温度补偿校准法

温度补偿校准法是对环境温度变化造成计量偏差的专项校准方法。通过检测校准环境温度和基准温度(一般为 $23\ ^\circ\text{C}$),用仪器内部的温度传感器来采集数据,再根据预先设定好的补偿系数实时地修正测量值,消除温度对分压电阻、基准电压源、A/D转换器等参数的影响。温度对数字万用表直流电压档的精度有影响,分压电阻、基准电压源、A/D转换器受温度的影响,造成温度变化时计量误差变大,在温度波动较大的环境(野外作业、工业现场)中温度补偿校准更加重要。校准之前要先定出温度系数,在不同的温度环境下进行校准,得到温度和偏差的对应关系,形成补偿表或者函数,保证在一定的温度范围内准确补偿^[5]。

以工业级数字万用表直流电压档温度补偿校准为例,该万用表需在 $-10\sim 60\ ^\circ\text{C}$ 的宽温度范围下工作,其直流电压档 $100\ \text{V}$ 量程的温度系数为 $0.0005\%/^\circ\text{C}$,需要经过温度补偿校准来提高不同温度下的测量精度。在校准的过程中,用高低温试验箱模拟不同的温度环境,选择 $-10\ ^\circ\text{C}$ 、 $0\ ^\circ\text{C}$ 、 $23\ ^\circ\text{C}$ 、 $40\ ^\circ\text{C}$ 、 $60\ ^\circ\text{C}$ 五个温度点,在每一个温度点上,用FLUKE 5790A标准源输出 $50\ \text{V}$ 的标准电压,记录被校准万用表测得的电压值,求出各个温度点相对于 $23\ ^\circ\text{C}$ 基准温度的偏差。其中 $-10\ ^\circ\text{C}$ 时的偏差是 $+0.0\ 025\ \text{V}$, $0\ ^\circ\text{C}$ 时是 $+0.001\ \text{V}$, $40\ ^\circ\text{C}$ 时是 $-0.0\ 015\ \text{V}$, $60\ ^\circ\text{C}$ 时是 $-0.003\ \text{V}$ 。根据上述数据,创建温度偏差补偿函数,把补偿参数写进万用表的温度补偿模块中,模块利用内置的温度传感器实时地采集环境温度,然后带入补偿函数里去计算出修正值,对测得的结果进行实时的调节。校准完毕之后,在各个温度点上再做一次测量, $50\ \text{V}$ 标准电压的测量偏差都小于 $\pm 0.0\ 005\ \text{V}$ 之内,有效地抵消了温度变化对测量结果的影响,保证宽温度范围内测量精度稳定。

3.4 软件修正校准法

软件修正校准法是利用数字万用表内置的微控制器和软件系统来对计量偏差进行修正的一种校准方法,不需要拆解仪器或者改变硬件参数,只通过软件操作就可以完成偏差修正,适合于硬件结构比较复杂、不能拆卸的高精度万用表,并且可以做到动态校准和远程校准,是当前数字化校准的技术热点。该方法的关键在于通过校准得到各个量程、各个校准点的偏差数

据,把偏差数据存入仪器的非易失性存储器里。仪器在测量时,微控制器调用存储的偏差数据,采用插值法、非线性修正法等对测量值进行实时修正,同时可以配合软件滤波算法来减小随机误差,提高测量结果的稳定性。软件修正校准法可以同时修正系统的偏差和随机偏差,可以采用优化算法减小随机误差的影响,并且校准流程简单,能对大批量仪器进行快速校准,大大提高校准效率。

以某款智能数字万用表直流电压档软件修正校准为例,该万用表内置ARM Cortex-M4微控制器,支持通过USB接口上传校准数据与更新修正算法。校准之前用标准源对各个量程、各个校准点进行偏差测量,把测量到的偏差数据按照量程分类存入偏差数据库中。对于系统误差,使用分段线性插值法,根据测量值所在的区间,调用对应的区间偏差数据进行线性修正,提高修正的精度;对于随机误差,嵌入滑动平均滤波算法,对多次测量值做加权平均处理,消除瞬时干扰所引起的偏差。校准时,用专用校准软件读取万用表的测量数据和偏差数据,调整插值算法参数,保证修正后的测量值与标准值偏差满足要求。

4 结束语

数字万用表直流电压档的计量准确性作为电子测量领域的关键要素,关系到多行业测量结果的可靠性。随着技术的发展和应用范围的扩大,计量偏差问题也越来越突出,对校准技术提出了更高的要求。经过对系统偏差及随机偏差特性深入了解之后,采用标准源、多点、温度补偿、软件修正等方式来消除偏差、提高测量精度。这不但为数字万用表精确计量提供了强有力的支撑,也为电子测量行业规范化、标准化的发展奠定了重要的基础,促使测量技术向更高的层次迈进。

参考文献:

- [1] 朱玉微.高精度数字万用表校准技术进展与应用分析[J].中国机械,2025(22):121-124.
- [2] 楼健.数字万用表的测量不确定度评定[J].品牌与标准化,2025(04):286-288.
- [3] 刘义平,杜好岗,周恒,等.露点仪变送器修正值的校准及不确定度评定[J].计量与测试技术,2024,51(03):128-130.
- [4] 孙韦,于淼,彭小红,等.基于数字多用表自动校准系统的研究现状分析[J].计量与测试技术,2023,50(07):61-63,66.
- [5] 侯毅,柴艳丽,王剑昆,等.基于视觉识别技术的手持式数字万用表自动校准装置[J].计测技术,2023,43(02):118-127.