

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.05.08

位移传感器校验装置的研制

张英, 吕佳, 李军

(江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 为解决大量程位移传感器检定过程中, 传统人工手动检定法操作复杂、耗时长、测量准确度低的问题, 研制了大量程位移传感器自动校验装置。详细介绍了该装置的硬件组成和软件设计, 并阐述其创新特色。利用该装置对 LVDT 位移传感器进行校准, 并对其测量不确定度进行评定。试验证明, 该位移传感器校验装置测量准确度高、运行稳定性好, 可有效提高检定效率, 能够替代人工对位移传感器进行自动化检定, 具有重要技术借鉴意义。

关键词: 位移传感器; 硬件组成; 软件设计; 准确度评价

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)05-0044-07

Development of Displacement Sensor Calibration Device

ZHANG Ying, LYU Jia, LI Jun

(Jiangsu Frontier Electric Technology Co., LTD, Nanjing 211102, China)

Abstract: In order to solve the problems of complex operation, long time-consuming and low measurement accuracy of traditional manual calibration method in the calibration process of large-range displacement sensors, an automatic calibration device for large-range displacement sensors was developed. The hardware composition and software design of the device are introduced in detail, and its innovative features are expounded. The device is used to calibrate LVDT displacement sensor and its measurement uncertainty is evaluated. Experiments show that the displacement sensor calibration device has high measurement accuracy and good operation stability, can effectively improve the verification efficiency, and can make automatic verification of displacement sensors, which has important technical reference significance.

Key words: displacement sensor; hardware composition; software design; accuracy evaluation

0 引言

大量程位移传感器广泛应用于发电厂设备运行状态监测过程。在发电机组启动及运行期间, 利用大量程位移传感器监测胀差变化, 再结合绝对膨胀、轴向位移等汽轮机滑销系统参数变化以判断汽轮机动静部分的状态, 在出现异常时采取相应的调整措施, 避免停机等故障造成严重经济损失。因此, 对大量程位移传感器的准确检验是发电设备安全运行的重要保障。

火电厂常用的大量程位移传感器有: 3300XL 型 50 mm 差胀涡流传感器(最大量程为 28 mm); 24765 型 LVDT 传感器(最大量程为 50 mm); PR6426 型涡流传感器(量程为 8~24 mm)。而核电厂汽轮机安全监测中所使用的位移传感器量程则较大: 监测汽水分离再热器阀位的位移传感器量程为 90 mm; 监测旁排阀位的位移传感器量程为 100 mm; 监测高压主调门阀位的位移传感器量程为 160 mm; 监测低压主调门阀位的位移传感器量程为 300 mm。TSI 实验室采用的位移测量标

准器是 BENTLY-330187 型静校仪, 其量程为 50 mm, 最大误差为 0.005 mm, 能满足火电厂的校验需求。而对于大于 50 mm 量程的位移传感器则采用普通直尺测量法进行校准(直尺最小刻度为 1 mm), 这种校验方法存在三个主要问题: ①测杆移动控制准确度难以保证, 因为手动拉动测杆时不仅会产生水平位移方向的移动, 还会造成径向偏移, 手动操作所产生的偏差约为 1 mm; ②长度测量标准器准确度低, 用最小分度值为 1 mm 的直尺作标准, 产生的估读误差约为 0.5 mm; ③人工手动检测操作复杂, 检定效率低。为解决以上问题, 本文研制了全自动大量程位移传感器校验装置, 在提高检定准确度的同时节约操作时间, 为自动化、数字化、智能化位移计量提供有力保障。

1 硬件组成

本文研制的位移传感器全自动校验系统的硬件主要由电脑、运动控制器、校验平台和数字多用表组成, 如图 1 所示。

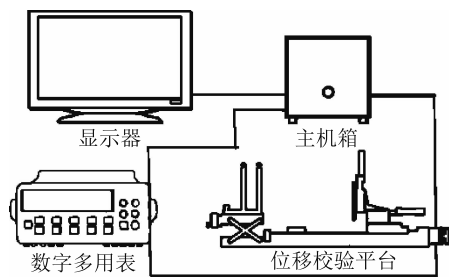


图1 位移传感器全自动校验系统

1) 主机通过校验系统软件向系统控制器发送控制命令, 并接受系统控制器的反馈信号。系统控制器的作用为: ①通过 USB 接口连接到精密游标卡尺, 读取精密游标卡尺位移反馈信号; ②通过串口连接到位移校验平台, 发送控制信号给步进电机; ③通过 USB 接口连接到数字多用表, 控制数字多用表的测量和读数。

2) 位移校验平台的结构组成如图 2 所示, 其中精密游标卡尺是闭环反馈部件, 负责反馈位移测量信号; 步进螺杆、步进导轨、步进电机、步进限位开关是运动控制部件, 起到机械化调整被测传感器位置的作用; 步进手动旋钮起手动控制作用, 当自动校验功能故障时可手动移动校验台; 步进固定台、传感器靶标、传感器升降固定支架、支架三维微调旋钮是传感器夹持部件, 起固定支撑作用。

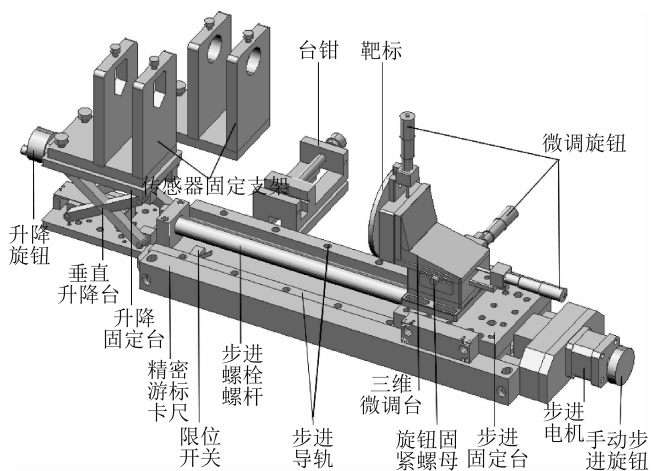


图2 位移校验平台的结构示意图

位移校验平台采用整体数控加工中心技术, 以降低平台的俯仰和偏摆, 保证了运动的直线度和平行度。步进导轨采用精密线性滑块双导轨设计, 能够有效防止螺杆松动及轴向窜动, 使平台能够快速、稳定地往复移动。平台内置驱动性能优良的精密步进电机驱动器, 其采用进口精密滚珠螺杆驱动, 有效提高了运动

重复性和绝对定位准确度。

实际操作时, 首先将位移校验平台通过运动控制器连接上位机并接通电源, 之后固定传感器并使其靶面接触靶标, 调节步进旋钮、垂直升平台、三维微调台, 使位移测量仪表等传感器处于测量范围内, 通过主机命令运动控制器驱动步进电机旋转步进螺杆, 推动步进固定台在步进导轨上移动, 并通过步进电机和精密游标卡尺、限位开关反馈位移信息到运动控制器, 闭环修正步进固定台水平位移, 读取主机示数作为标准位移, 进行传感器测量校准。

3) 数字多用表由系统控制器控制, 测量被测位移传感器输出的电信号, 读取校验数据, 上传给主机显示并保存。通过系统软件可以设置数字多用表的测量功能, 如直流电压或直流电流等。

2 软件设计

校验系统软件可实现闭环控制, 执行驱动部件运动和位移定位反馈。软件自动比较传感器探头的实际位移和给定位移是否一致, 如果存在偏差则调整算法, 直至到达设定位置。校验系统软件通过执行预先编辑的宏命令, 实现位移传感器的全自动化校验。

2.1 工作流程

校验系统软件程序写入命令控制硬件系统, 驱动电机接收脉冲信号转动, 带动步进固定台移动行程, 通过精密游标卡尺测量当前实际位移量, 再把数据反馈到校验系统软件程序。通过比较行程偏差, 发送修正命令, 直至位移达标, 再通过数字多用表读取被测位移传感器输出的直流电压或直流电流信号, 完成一次校验程序的控制任务。最后绘制电压-位移曲线或电流-位移曲线, 并以表格的形式存储记录每个测量点对应的电压、电流值。校验系统工作流程如图 3 所示。

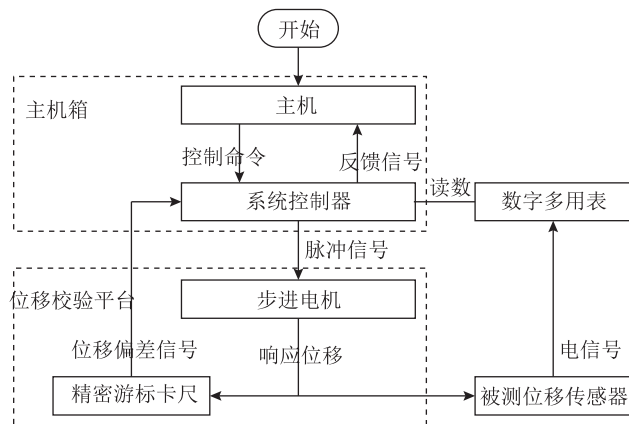


图3 校验系统工作流程

2.2 软件功能

软件界面如图 4 所示，包含三个主要区域：功能

区、状态配置区、数据反馈区。

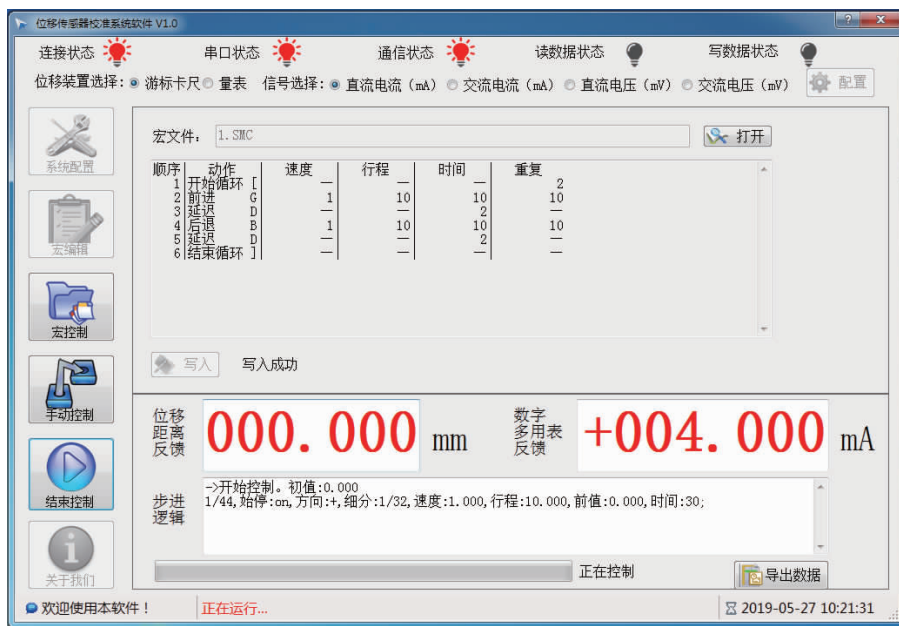


图 4 软件界面

1) 功能区包括六个主要功能模块：系统配置(如图 5 所示)、宏编辑(如图 6 所示)、宏控制、手动控制(如图 7 所示)、开始/结束控制(如图 8 所示)、关于我们。其中，“系统配置”模块用来配置系统步进电机、游标卡尺、存储、数字多用表的基本参数，实现自定义功能；在“宏编辑”模块可实现自定义宏命令列表的编辑，使位移校准系统控制更便捷；在“宏控制”模块

可加载已编辑好的宏文件的命令列表，以实现位移校准流程控制；在“手动控制”模块可自定义一条简单控制命令，用于快速位移调整；“开始控制”模块可执行已写入的命令；“结束控制”模块可中止执行当前命令并取消控制，命令执行完成也会自动结束控制；“关于我们”中介绍本系统的概要信息，可通过此模块查看本系统使用说明及注意事项。

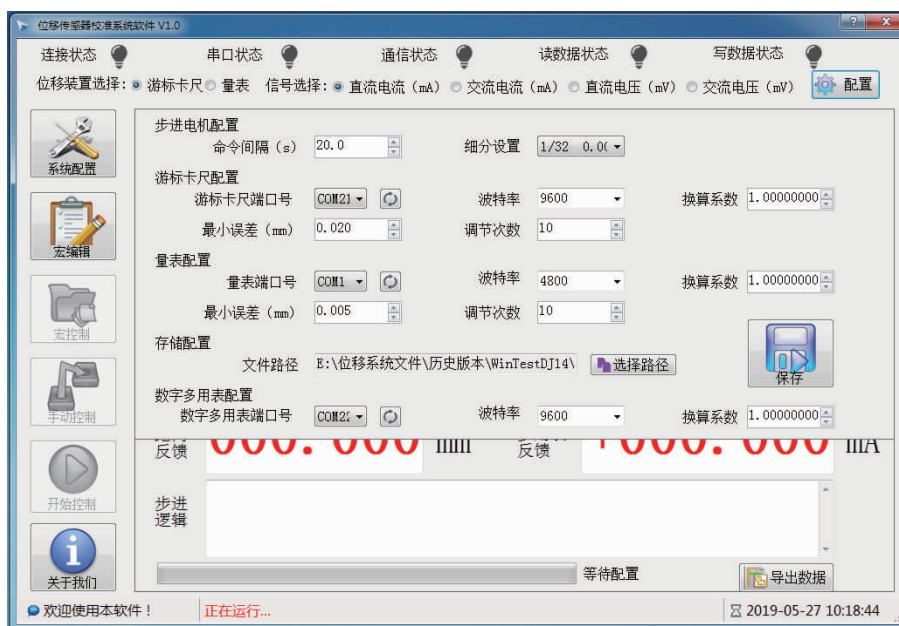


图 5 系统配置界面

2) 状态配置区用来调整连接方式, 并显示系统连接状态。“位移装置选择”可选精密游标卡尺或者电子千分尺量表; “信号选择”用来选择数字多用表反馈的信号类型, 包括: 直流电压、直流电流、交流电压或

交流电流。

3) 数据反馈区负责显示系统数据信息, 包括位移距离、数字多用表参数、步进逻辑等, 并设有导出校验数据按钮。

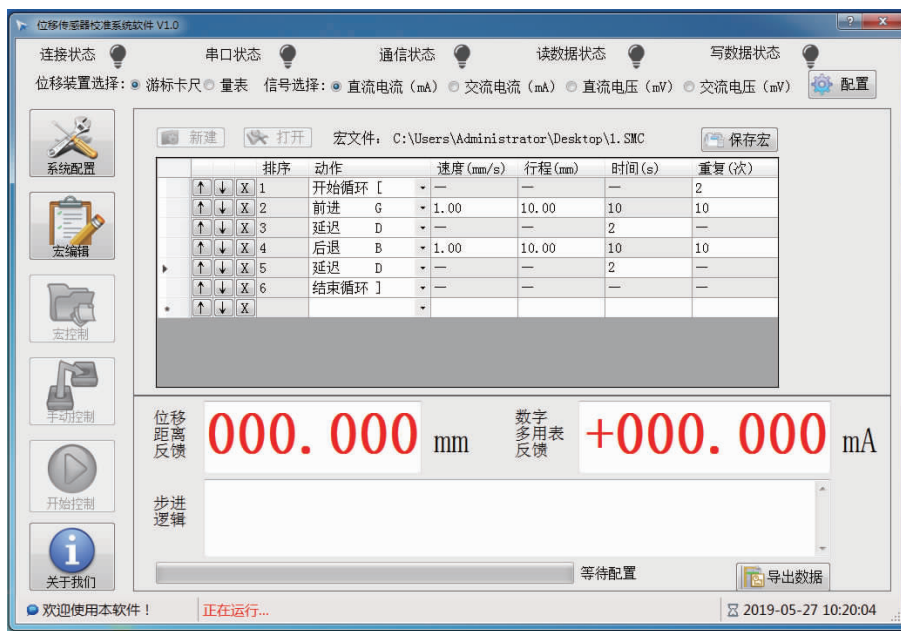


图6 宏编辑界面

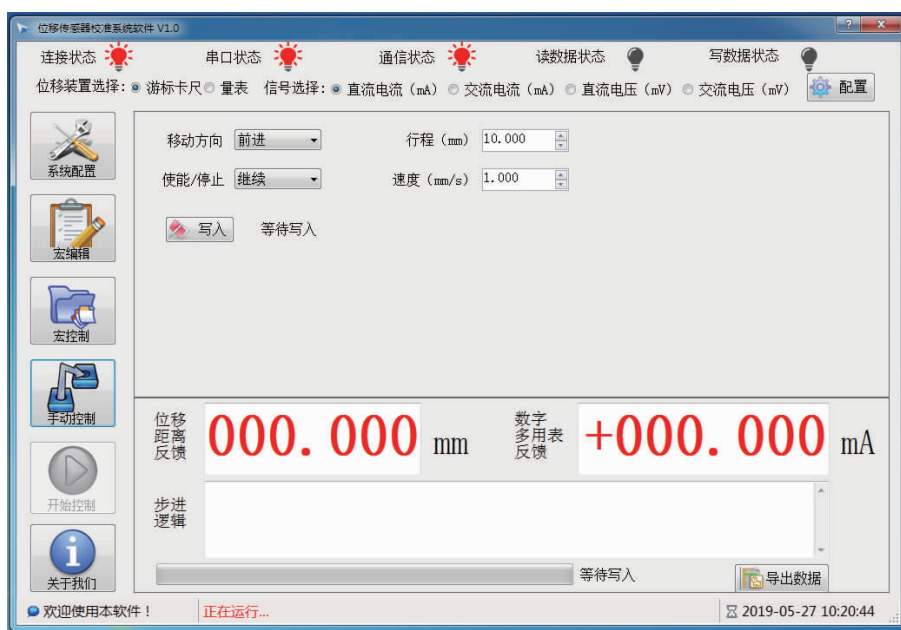


图7 手动控制界面

2.3 校验过程

实际校验操作过程为: 先安装并固定好被校准的位移传感器, 打开系统软件; 点击“系统配置”按钮,

选择配置内容; 点击“宏编辑”按钮, 编辑本次校验的宏并保存; 观察位移校验平台, 确认平台剩余行程足够预设位移, 若不足, 点击“手动控制”按钮, 调整平

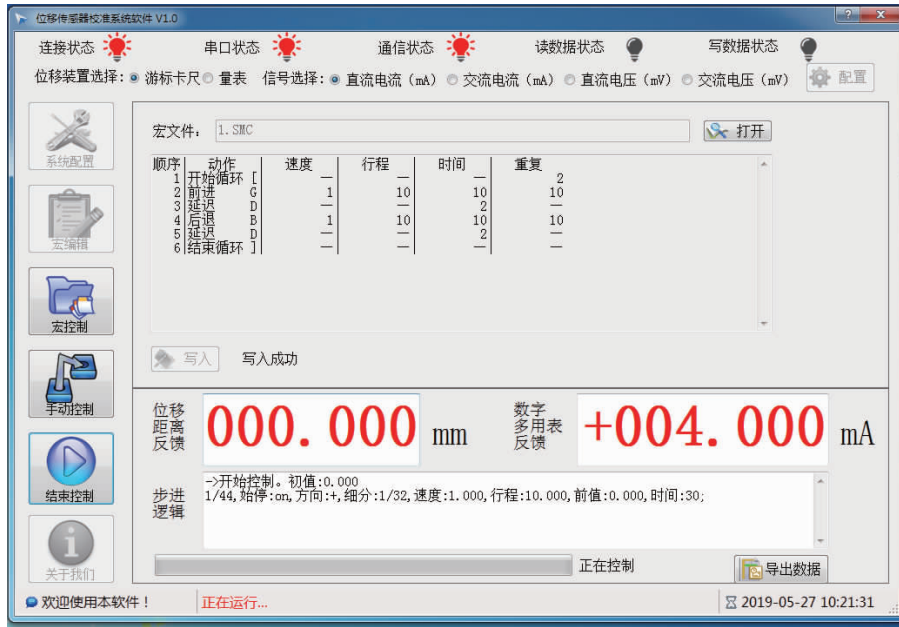


图 8 开始/结束控制界面

台剩余行程；再点击“宏控制”按钮，加载宏命令到控制器；点击“开始控制”按钮，执行已写入的命令；命令执行完成后，点击数据反馈区按钮“导出数据”，校验工作完成。

2.4 校验软件修正测量装置线性系统误差

将位移传感器校验装置上级校准证书值输入 office 自带的图表工具软件，可以得出最小二乘法拟合直线，其线性方程为： $y = kx + b$ ，忽略固定项 b 的影响， $b = 0$ ，则线性方程为

$$y = kx \quad (1)$$

式中： x 为受检点，即标称值(真值)； y 为实际值，即装置示值； k 为方程斜率

方程斜率 k 反应了装置的准确度，斜率为 k 时，装置误差为 $(100 \times |1 - k|)\%$ 。当 $k = 1$ 时为理想状态， $y = x$ ，误差近似为 0。

将“换算系数”设置为斜率的倒数 $1/k$ ，可以修正测量装置线性系统误差。具体推导过程为：程序输入受检点 x ，没有设置“换算系数”时(相当于 $k = 1$)，装置示值为 kx ，设置“换算系数”为 $1/k$ ，装置示值变为 $y = kx \times \text{换算系数} = kx \times \frac{1}{k} = x$ ，即装置示值与受检点一致(忽略固定项 b 的影响)。

图 9 为位移传感器校验装置上级校准证书值生成的图表，其线性方程为 $y = 1.0001x - 0.0166$ ，即 $k = 1.0001$ ，装置误差为 0.01%，忽略固定项 b 分量 -0.00166 的影响，线性方程为 $y = 1.0001x$ ，设置“换

算系数”为 $\frac{1}{1.0001} = 0.9999$ ，装置示值变为 $y = kx \times \text{换算系数} = 1.0001x \times 0.9999 = x$ ，可以最大限度地修正线性系统误差。

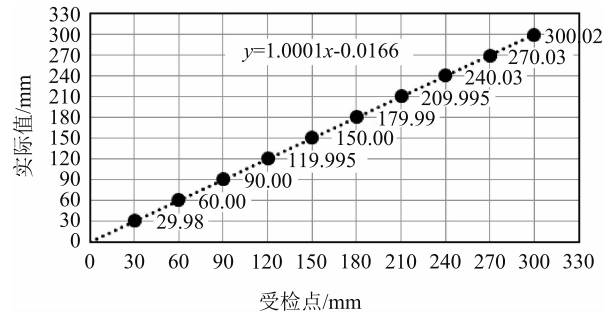


图 9 位移校准结果线性方程

3 位移传感器校验装置校准结果的不确定度评定

3.1 校准方法

采用研制的位移传感器校验装置校准一种 LVDT (差动变压器)位移传感器。将被校准的位移传感器安装在校准装置台上，之后遵循阿贝原则安装测杆，使测杆的运动直线对准传感器工作台移动轴线，以减少余弦误差。工作台移动时，传感器输出与测杆位移成比例的电信号，校准装置的精密游标卡尺测量传感器位移，采用 34401A 型数字多用表读取传感器输出的电信号——直流电压值，按 JJF1305 - 2011《线位移传感

器校准规范》规定的方法校准传感器的基本误差, 进行测量结果的不确定度评定。

已知被校准的 LVDT(差动变压器)位移传感器量程为 0~300 mm; 输出电压为 ± 10 V; 最大允许误差为 $\pm 1\%$ 。

3.2 不确定度分析与讨论

根据 JJG1305-2011《线位移传感器校准规范》的校准方法, 传感器各校准点的基本误差计算式为

$$\delta_{ij} = \frac{y_{ij} - Y_i}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: Y_i 为校准点处输出量的拟合输出值; Y_{FS} 为满量程值; y_{ij} 为校准点实测的输出值。 Y_i 和 Y_{FS} 当作常量处理, 只考虑影响一个变量 y_{ij} 的相对不确定度。

3.3 不确定度来源分析

影响位移传感器校准结果的主要因素有: 位移传感器校验装置的测距误差、数字多用表的测量误差、测量重复性、回程误差、环境条件、安装误差等。

3.4 不确定度分量的评定

3.4.1 位移传感器校验装置测距误差引入的标准不确定度分量 u_1

由省计量院的校准证书可知, 位移传感器校验装置最大误差为 -0.03 mm。被校准传感器的最大引用误差为 $\frac{-0.03}{300} \times 100\% = -0.01\%$, 因此, 相对于 300 mm 的测量值而言, 传感器位移校准装置测距误差引入的不确定度分量 u_1 由下式估算, 按均匀分布处理, $k = \sqrt{3}$ 。

$$u_1 = \frac{0.01\%}{\sqrt{3}} = 0.006\%$$

3.4.2 数字多用表测量引入的标准不确定度分量 u_2

所用数字多用表在 10 V 直流电压量程处, 示值误差限为读数的 0.0035%, 量程误差限为量程的 0.0005%, 按均匀分布考虑, $k = \sqrt{3}$, 数字多用表读数引入的标准不确定度分量 u_2 为

$$u_2 = \sqrt{(0.0035\%)^2 + (0.0005\%)^2} / \sqrt{3} = 0.002\%$$

3.4.3 传感器安装误差引入的标准不确定度分量

经过多次重复正确安装传感器, 对传感器校准结果几乎没有影响, 因此, 传感器安装误差引入的不确定度分量可以忽略不计。

3.4.4 传感器重复性引入的标准不确定度分量 u_3

根据 JJF1305-2011《线位移传感器校准规范》表 2 的要求, 对于基本误差为 $\pm 1\%$ 的差动变压器位移传感器, 重复性应小于 0.4%, 传感器重复性引入的标准不

确定度分量 u_3 为

$$u_3 = 0.4\%$$

3.4.5 传感器回程误差引入的标准不确定度分量 u_4

根据 JJF1305-2011《线位移传感器校准规范》表 2 的要求, 对于基本误差为 $\pm 1\%$ 的差动变压器位移传感器, 回程误差应小于 0.4%, 按均匀分布处理, $k = \sqrt{3}$, 传感器回程误差引入的标准不确定度分量为

$$u_4 = \frac{0.4\%}{\sqrt{3}} = 0.23\%$$

3.4.6 环境条件引入的标准不确定度分量

在校准规范规定的环境条件下进行校准, 环境条件的影响可以忽略不计。

3.5 合成标准不确定度的计算

假设以上 4 个不确定度分量互不相关, 按下式求合成标准不确定度。

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = \sqrt{(0.006\%)^2 + (0.002\%)^2 + (0.4\%)^2 + (0.23\%)^2} = 0.46\%$$

3.6 扩展不确定度

取包含因子 $k = 2$, 扩展不确定度为

$$U = ku_c = 2 \times 0.46\% \approx 1\%$$

由上述分析可知, 对于差动变压器位移传感器的测量, 重复性和回程误差是主要误差来源, 由位移校准装置和数字多用表带来的误差可以忽略不计, 说明位移传感器校验装置作为位移传感器的标准器准确度足够高。

4 装置测量准确度评价

由表 1 可知, 本文研制的位移传感器校准装置在 0~300 mm 范围内的最大测量误差为 ± 0.03 mm。由位移标准装置产生的最大引用误差为 $\frac{0.03}{300} \times 100\% = 0.01\%$, 被测传感器最大允许误差为 1%, 位移标准装置的最大误差为被测传感器最大允许误差的 1/100, 因此, 本位移校准装置在测量位移传感器过程中产生的误差完全符合标准要求。

5 结束语

本文研制的位移传感器校准装置具有以下创新特色:

1) 具有闭环位置控制功能, 通过精密游标卡尺实现实时反馈, 使定位更加准确。用精密的步进电机产

表 1 江苏省计量科学研究院校准结果 mm

受检点	正行程示值误差	反行程示值误差
0	0.00	+0.02
30	+0.01	+0.03
60	0.00	0.00
90	0.00	0.00
120	0.00	+0.01
150	0.00	0.00
180	+0.01	+0.01
210	0.00	+0.01
240	-0.03	-0.03
270	-0.03	-0.03
300	-0.02	-0.02

生位移, 最小步进位移可达 $1 \mu\text{m}$, 相比传统的手动控制方式更稳定可靠, 极大地提高了控制准确度。

2) 软件设置修正系数, 可修正测量中的线性系统误差, 提高测量的线性度。用带反馈功能的精密游标卡尺(最大误差为 $\pm 30 \mu\text{m}$)代替普通直尺, 极大地提高了长度测量的准确度。

3) 测量过程由计算机程序控制, 零位设定方便, 简化了操作流程。自动记录保存校验数据, 缩短了校验时间, 提高工作效率。

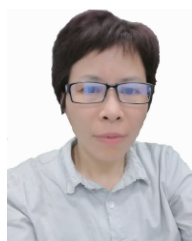
本装置通过了江苏省计量院激光干涉仪检测, 在 $0 \sim 300 \text{ mm}$ 范围内其最大测量误差为被测传感器最大允许误差的 $1/100$, 符合 JJF1305-2011《线位移传感器校准规范》中标准器最大测量误差应小于等于被测仪器最大允许误差的三分之一的要求。该装置已对多种型号位移传感器进行校准, 长期使用证明, 其性能完全满足位移传感器的校准要求, 能够替代人工标定系统对位移传感器进行自动化检定, 具有重要技术推广价值。

参 考 文 献

- [1] JJF1305-2011 线位移传感器校准规范[S]. 2011.
- [2] 李之中, 李杰, 郑水华, 等. 位移、应变类传感器自动标定装置的研制[J]. 水电与抽水蓄能, 2012, 36(3): 54-57.
- [3] 郭丽萍, 张艳荣, 林思苗. 基于 AVR 单片机的激光电源闭环控制系统设计[J]. 中国测试, 2017, 43(3): 78-82.
- [4] 肖鹏, 王林, 余晓曦. 高压开关机械特性测试仪校验装置的研制[J]. 中国测试, 2013, 39(1): 73-75.
- [5] 何亚洲, 张强, 赵峰, 等. 液位计自动检测装置的研制[J]. 中国测试, 2012, 38(2): 73-76.
- [6] 廖旭辉, 郑永明, 徐恒, 等. 嵌入温场型温度记录仪的设计与实现[J]. 中国测试, 2014, 40(6): 71-73.
- [7] 游彦辉, 徐济松, 高春雷, 等. 一种钢轨平直度测量仪的研制[J]. 铁道建筑, 2016(5): 152-153.
- [8] 陈欢, 潘璐, 程华焯. 基于 LVDT 的数显针规测量装置的研制[J]. 工业计量, 2016, 26(4): 20-22.
- [9] 赵朋波. LVDT 传感器原理及在发动机装配线的应用[J]. 装备制造技术, 2015(8): 147-148.
- [10] 韦宣, 瞿丽莉, 任智江, 等. 一种 LVDT 位移测量仪表的校准[J]. 工业计量, 2017, 27(2): 72-74, 77.

收稿日期: 2019-04-15; 修回日期: 2019-05-27

作 者 简 介



张英(1969-), 女, 浙江东阳人, 工程师, 主要从事发电厂汽轮机保护装置检测研究。