

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.06.07

航空发动机试车台数据采集器原位综合校准技术研究

刘杰, 刘琴, 张宇

(中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘要: 为满足航空发动机试车台使用的精密数据采集器现场原位校准需求, 研发数据采集器原位综合校准系统。研制低热电势扫描开关, 并开发数据采集器校准软件用于控制多功能校准源、低热电势扫描开关和精密数据采集器以实现现场原位校准, 利用低热电势通路切换技术自动转换采集多种信号, 通过多线程校准技术自动化、并行化执行校准程序。开展试验对航空发动机试车台数据采集器原位综合校准系统的应用效果进行测试, 结果表明该系统准确性符合要求, 且利用该系统校准单台数据采集器所需时间仅为 3 h, 相较传统手动校准方法效率提高了 6 倍以上。该系统为实现多通道数据采集器高效化、便捷化、现场化校准提供了有力支撑, 并为其他测量设备现场原位自动化校准技术研究提供了重要借鉴。

关键词: 航空发动机测试; 发动机试车台; 数据采集器; 原位校准; 低热电势扫描开关; 多线程校准

中图分类号: TB9; V263

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2024) 06-0069-10

Research on in-situ comprehensive calibration technology of aircraft engine test bench data acquisition unit

LIU Jie, LIU Qin, ZHANG Yu

(AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

Abstract: To meet the on-site in-situ calibration requirements of precision data collectors used in aircraft engine test benches, a comprehensive in-situ calibration system for data collectors has been developed. A low thermoelectric potential scanning switch was designed, and the data collector calibration software was developed for controlling multifunctional calibration sources, low thermoelectric potential scanning switches, and precision data collectors to achieve on-site in-situ calibration. The low thermoelectric potential path switching technology was used to automatically convert and collect multiple signals. Automated and parallelized execution of calibration programs was realized through multi-threaded calibration technology. The application effect of the in-situ comprehensive calibration system for aircraft engine test bench data collectors was verified through experiments. The results showed that the accuracy of the system met the requirements, and the time required to calibrate a single data collector using the system was only 3 hours, which was more than 6 times more efficient than traditional manual calibration methods. This system provides strong support for achieving efficient, convenient, and on-site calibration of multi-channel data collectors, and provides important reference for the research of in-situ automation calibration technology for other measuring equipment.

Key words: aircraft engine testing; engine test bench; data collector; in-situ calibration; low thermoelectric potential scanning switch; multi-threaded calibration

收稿日期: 2024-10-03; 修回日期: 2024-10-10

基金项目: 国家科技重大专项项目(J2019-II-0009-0029)

引用格式: 刘杰, 刘琴, 张宇. 航空发动机试车台数据采集器原位综合校准技术研究[J]. 计测技术, 2024, 44(6): 69-78.

Citation: LIU J, LIU Q, ZHANG Y. Research on in-situ comprehensive calibration technology of aircraft engine test bench data acquisition unit[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(6): 69-78.



0 引言

航空发动机试车台使用的数据采集器是航空发动机试验参数关键采集设备,其性能直接关系到测试数据是否准确。航空发动机试车台数据采集器种类繁多,用于测量温度、电压、频率等多种试验参数,在整机、压气机、燃烧室、涡轮等试验中应用广泛,为航空发动机型号设计提供了重要支撑^[1-2]。为了确保试验参数测量的准确性,需对数据采集器进行周期校准^[3-6]。目前的校准方式以单通道手动校准为主,需要先拆卸数据采集器与航空发动机试车台相连的测试线路,然后将数据采集器运送至计量实验室进行校准,需要耗费大量人力和时间成本,且无法复现航空发动机试验设备的真实使用环境。此外,校准过程中频繁地切换校准通道可能引入额外的质量隐患^[7-9]。

针对上述问题,本文基于低热电势转换和多线程校准技术,研发了一套航空发动机试车台精密数据采集器现场原位综合校准装置,并编写了配套的校准软件,实现校准数据的自动化、高效化采集。

1 校准系统

现场原位综合校准系统主要包含三部分——集成式多功能校准源、多参数自动切换装置和测试软件。采用多功能校准源与低热电势多路程控开关相配合,在不拆卸连接线的情况下,利用多功能校准源进行各参数标准信号输出,并通过校准软件自动控制低热电势多路程控开关进行通道切换,对航空发动机试车台使用的多路精密数据采集器进行现场原位校准^[10]。校准系统原理如图1所示。

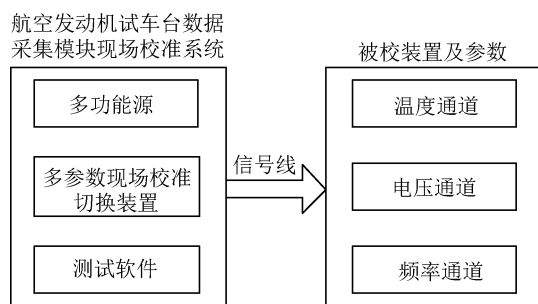


图1 校准系统原理框图

Fig.1 Calibration system principle block diagram

多路精密数据采集器原位校准技术具体实现方式为:利用LabVIEW软件开发校准程序,通过GPIB接口控制多功能校准源输出航空发动机测试电压、频率和温度等各类信号,按照计量量值传递要求,通过TCP/IP接口控制48路转换开关,对精密数据采集器每个通道进行自动化校准数据采集。校准后可迅速恢复多路精密数据采集器与试车台传感器的连接^[11-12],缩短校准时间。校准系统硬件结构如图2所示。

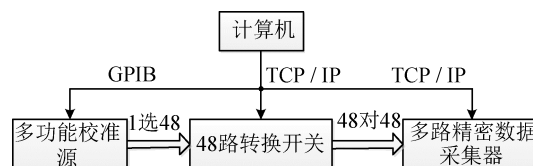


图2 校准系统硬件结构框图

Fig.2 Hardware structure diagram of calibration system

2 低热电势通路切换技术

多路精密数据采集器的最小测量范围低至微伏级,最大允许误差为 $\pm 0.02\%$,为避免程控开关的热电势对测量不确定度产生影响,基于低热电势转换连接技术以及程控扫描及接口技术,研制了一种能实现多通路切换的低热电势多路程控开关,该低热电势程控开关可实现数据采集器多参数校准信号的无扰动自动转换连接,其对测量结果不确定度的影响可以忽略不计。低热电势程控开关关键指标要求:①能够在 $10 \sim 30^\circ\text{C}$ 的环境条件下工作;②接触热电势不高于 $0.2 \mu\text{V}$;③能够同时扫描切换48路。

2.1 低热电势扫描开关类型分析

当前低热电势多路程控开关主要包括3种类型:①机械运动型,利用机械运动部件执行动作实现通道切换;②半导体型,通过电信号控制半导体结节实现通道切换;③继电器型,通过电信号控制线包产生磁场实现接触点位置的变化,从而实现通道切换。

1) 机械运动型扫描开关

机械运动型扫描开关包含一个公共触片和多个触点,通过步进电机旋转带动公共触片选择触点,实现“一通多”的目的。机械运动型扫描开

关的优点是体积较小,且能够提高系统运行的可靠性;缺点是响应速度低、精度较差。为了减小扫描开关旋转时因触片摩擦导致的接触热电势,该型开关接触压力值较低;为了降低材料本身引起的接触热电势,该型开关由特殊的低热电势材料制造。机械运动型扫描开关原理如图3所示。

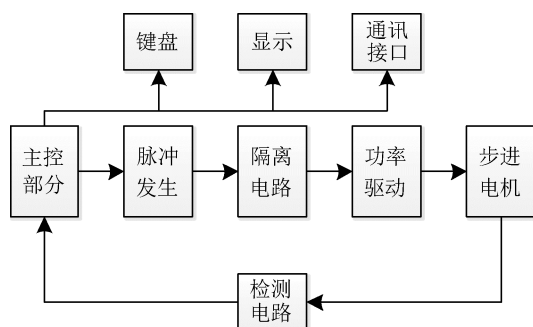


图3 机械运动型扫描开关原理图

Fig.3 Schematic diagram of mechanical motion scanning switch

2) 半导体型扫描开关

半导体型扫描开关基于电子作用过程,通过控制开关两极之间载流子类型和数量,达到导通和截止的目的。但是由于半导体器件本身有漏电流和门限电压,通断电路时不能完全接通和切断,所以该开关适用范围受限。半导体型扫描开关原理如图4所示。

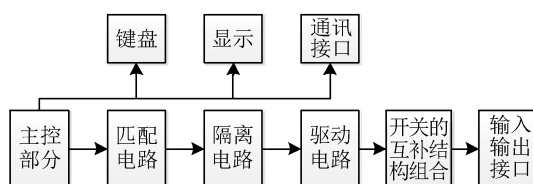


图4 半导体型扫描开关原理图

Fig.4 Schematic diagram of semiconductor scanning switch

3) 继电器型扫描开关

继电器型扫描开关相较机械型扫描开关成本更低,结构和电路控制更简单,便于通道扩展及商业推广。但是继电器型低热电势扫描开关的通道热电势受继电器选型制约,国内成熟商用化的继电器型扫描开关的热电势仅低于400 nV^[13]。

通过对以上3种类型低热电势扫描开关进行分析,并结合扫描开关装置在本设计中的实际应用

情况和自身技术实力,最终采用继电器型低热电势扫描开关,并选用模拟开关元件的方案,采用N沟道金属-氧化物半导体场效应晶体(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOS)开关管。通过对开关管进行均热、开关管控制回路隔离、开关管互补连接等一系列措施,降低电路中的热电势,并减少其他回路引入的干扰。对该类型开关管进行了相关试验,测试结果表明:在标准实验室环境和10~30℃温度环境下,该类型开关管均能满足热电势不高于200 nV的要求。

2.2 低热电势扫描开关总体实现方案

整个低热电势扫描开关采用“6×8矩阵”的模块化设计理念,主要包括硬件实现部分、软件实现部分、结构设计部分。低热电势扫描开关总体方案如图5所示。

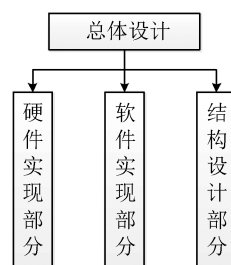


图5 低热电势扫描开关总体方案

Fig.5 Overall scheme of low thermoelectric potential scanning switch

2.2.1 硬件实现部分

硬件实现部分主要包括电源转换部分、通讯接口部分、主控部分、隔离电路部分、通道驱动部分、接口部分、显示部分等。低热电势扫描开关硬件结构如图6所示。

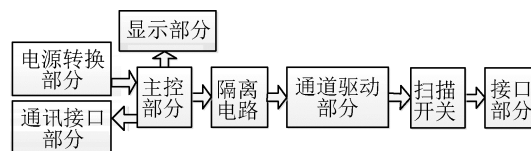


图6 低热电势扫描开关硬件结构

Fig.6 Hardware structure of low thermoelectric potential scanning switch

电源转换部分的主要功能是将市电转换为内部电路所需电源,包括交直流转换和直流到直流的转换部分。通讯接口部分为设备提供远程控制

能力, 提供了RS232串口通讯和网络通讯, 其他设备可以通过这些接口远程控制开关状态。主控部分将程控开关的状态传送至显示部分进行显示, 将远程控制命令转换为内部控制命令对开关状态进行转换。隔离电路部分将数字控制电路与开关通道部分隔离, 减少装置的输出数字电路对开关通道的影响。开关驱动部分用于增加控制信号的驱动能力, 控制开关的闭合和断开。扫描开关部分通过合理的开关矩阵布局, 减少开关本身对通道性能的影响。接口部分具有过压过流保护功能, 提升了开关设备的可靠性^[14]。显示部分选用基于NXP的以I.MX6ULL为核心的Cortex-A7硬件平台, 搭载电容触摸屏实现人机交互。

2.2.2 软件实现部分

软件实现部分包括主控部分的控制程序和显示部分的人机交互界面。

1) 主控部分的控制程序主要包括远程控制命令和显示部分控制命令的接收、解析、发送等。主控部分控制原理如图7所示。

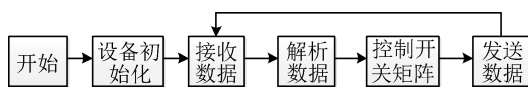


图7 主控部分控制原理

Fig.7 Control principle of the main control section

2) 显示部分人机交互界面主要包括开关控制显示、开关状态显示、远程设置显示等, 交互界面基于Linux系统开发。低热电势扫描开关人机交互界面如图8所示。



图8 低热电势扫描开关人机交互界面

Fig.8 Low thermoelectric potential scanning switch human-machine interaction interface

2.2.3 结构设计部分

结构设计部分采用子母板结构框架, 外部选用4U标准机箱结构, 内部子母板结构包括1个电源模块、1个母板、1个液晶显示平台、1个LED指示灯显示模块以及6个子板, 每个子板上包含一个8选1的开关阵列, 通过6块子板的组合实现48选1的开关阵列^[15]。低热电势扫描开关设备内部结构如图9所示。

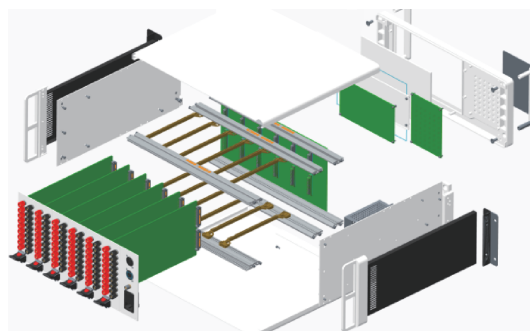


图9 低热电势扫描开关设备内部结构图

Fig.9 Internal structure diagram of low thermoelectric potential scanning switch equipment

3 多线程校准技术

3.1 软件框架

基于NI公司的LabVIEW进行软件开发工作。LabVIEW可以增强用户构建自己的科学和工程系统的能力, 大多数主流的测试设备和数据采集仪器都提供了专门的LabVIEW驱动程序^[16], 因此用户可以使用LabVIEW软件非常便捷地控制这些硬件设备, 从而快速编制出具有人机交互界面的多线程校准软件^[17-18]。所编写的校准软件框架如图10所示。

1) 表示层

表示层位于整个软件框架的最上层, 作为用

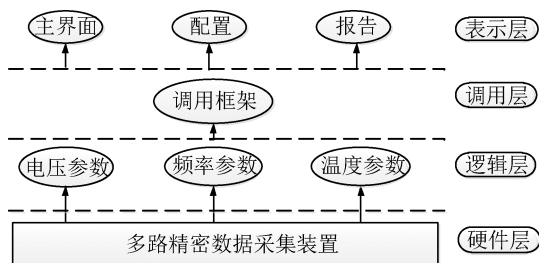


图10 校准软件框架

Fig.10 Calibration software framework

户界面接口,负责完成测试条件设置、被检仪器信息输入、校准报告配置,并呈现校准过程中产生的数据、及时处理发生的错误等。

2) 调用层

调用层通过编程配置 VI Server 动态调用,通过统一接口(输入/输出)形式完成插件程序 VI 调用机制的编写,按照一定的策略进行动态调用;并实现了故障冗余设计,能够定时保存测试过程数据,防止计算机硬件崩溃或者误操作致使已测结果数据大量丢失。

3) 逻辑层

逻辑层的每个子程序都是针对某个特定的测试项目编写的。子程序中按照常规的通用测试程序进行大块切分,包括资源初始化配置、循环单点复测测试、资源关闭等,一般采用顺序加上循环的逻辑结构。为了快速完成一项专用测试项目的序列开发,特别开发了单位转换功能函数、上下限判断函数以及支持单点复测的队列数据抽象类型,这些公共软件工具类子程序可以极大提升软件测试开发的效率^[19]。

3.2 多线程校准软件结构

多线程程序是指能够实现多个线程并发执行的程序。在一个程序中,独立运行的程序片段被称为“线程”。在单 CPU 环境下,多个线程是轮流执行的;在多 CPU 环境下,可同时在不同的 CPU 上执行多个线程。采用多线程技术可并发执行程序,使得程序运行更加连贯、流畅,从而提高应用程序的性能和效率。结合实际校准工作需求,基于多线程技术,通过校准软件控制执行策略,并与标准多功能源和通道转换开关等设备进行配合,实现自动校准的目的^[20]。

如图 11 所示,自动校准软件结构共分为 4 层,其中前两层为框架层,后两层为应用程序层。综合校准软件负责对整个软件的任务调用、资源分配和人机交互等进行总体控制;第二层和第三层是本软件的服务层和核心层,位于这两层的 4 个上层模块/机制实现了软件的全部功能。在配置模块中,可对被校设备信息、标准仪器信息、用户信息以及环境条件、测量结果不确定度和校准所依据的规程规范等进行配置。在报告生成模块中,

可选择报告类型(检定或校准)和报告模板,并可对报告保存的路径进行个性化设置等^[21]。最后两层是针对不同型号仪器和校准参数编写的底层测试子 VI 程序,由于底层测试程序的数量极为庞大,在本校准软件的结构框图中没有全部展开,仅举例示意。

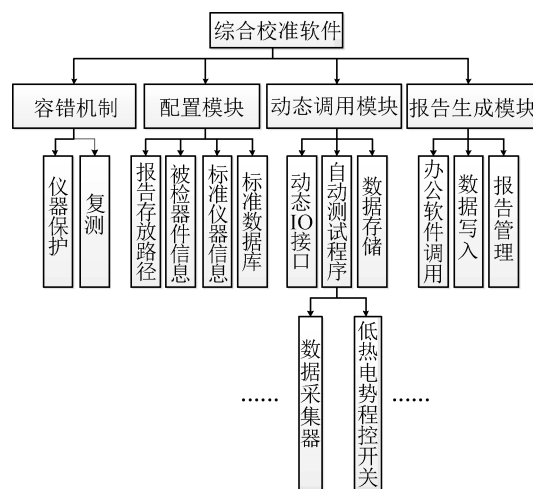


图 11 自动校准软件结构

Fig.11 Automatic calibration software architecture

3.3 软件开发

1) 自动校准功能

通过设置不同的地址和配置不同的底层 VI 驱动即可实现多功能校准源装置、扫描开关、被校精密数据采集器三者的协同控制^[22],软件编程局部图如图 12 所示。在上层调用框架中编写配置校准系统与被校设备信息、依据规程/规范的配置模块,分别编写各型号仪器设备对应的电压、频率和温度参数校准子 VI。通过调用相应的子 VI 即可完成数据采集器电压、频率、温度等参数的全自动校准,而且可以很方便地对源代码进行二次开发,以满足不同型号数据采集器的校准需求^[8]。

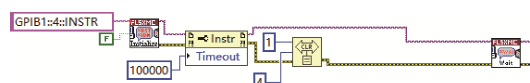


图 12 软件编程局部图

Fig.12 Partial diagram of software programming

2) 数据处理功能

通过底层 VI 驱动对各参数的校准数据进行处理,自动生成校准原始记录及证书,同时可以自

动计算测量不确定度^[23]。部分数据处理功能代码示例如图13所示。

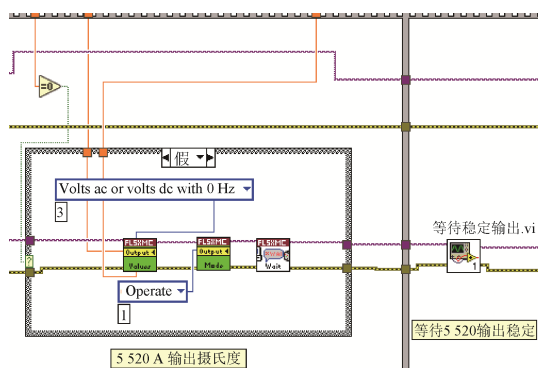


图13 数据处理功能代码

Fig.13 Data processing function code

软件操作界面简单明了,分为配置、测试、报告生成三部分,软件运行界面如图14所示。

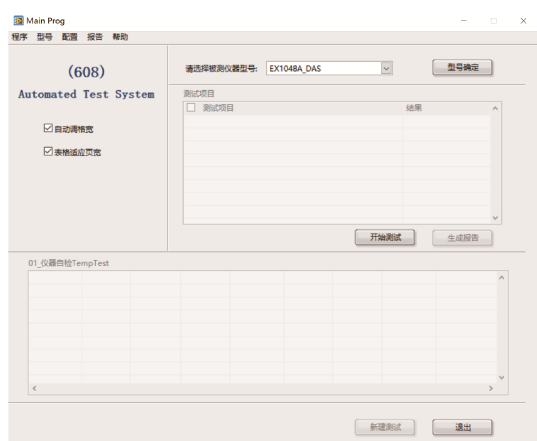


图14 软件运行界面

Fig.14 Software operation interface

该软件能够实现对多功能校准源、多路精密数据采集器和低热电势程控扫描开关的自动控制;能够同步自动采集校准数据、计算校准结果,并自动生成校准记录及证书。软件运行时,首先利用人机交互界面对被校准设备和标准仪器以及环境条件等信息进行选择和配置;测试开始后软件会根据用户选择的被测仪器型号,通过动态调用模块调用对应的底层测试子VI程序;完成相关调用后,软件会按顺序自动运行该型号仪器的所有测试程序,同时通过 GPIB 和 LAN 标准接口总线分别与标准仪器和被测设备进行采集数据交互,并将全部校准信息保存在数据库中;全部测试项目

完成之后,根据用户预先配置的相关信息自动生成原始记录和校准证书/报告,并将证书/报告自动保存到用户配置的文件路径中。在软件运行过程中还能实现校准数据的实时可视化,并对校准状态(正常/异常)进行监控^[24]。自动校准软件运行流程如图15所示。

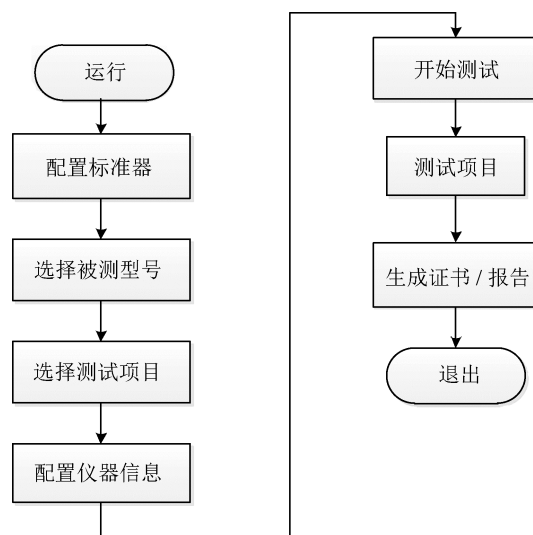


图15 自动校准软件运行流程图

Fig.15 Flowchart of automatic calibration software operation

3.4 软件特点与优势

1) 本软件具有完全自主知识产权,可随规程规范更新而同步更新。

2) 本软件充分模拟了计量人员在数据采集器校准过程中的操作,具备简洁的校准参数配置界面,并能自动实现数据采集、异常报警、比较判断、结果存储、数据处理、证书/报告生成等。

3) 软件具备强大兼容性,可满足用户对实验室校准和试车台现场原位校准的不同需求,并可自主定制校准项目;对于无法实现全自动校准的仪器,还可以支持半自动校准。

4) 可自动、高效计算测量不确定度,满足 CNAS 对于测量结果表述的最新要求。

5) 软件具有可扩展性,可根据用户需求对校准程序进行扩展及修改,与不同计量标准设备整合构建不同的校准系统,具备较高的实用和推广价值。

6) 软件具有自我保护机制,在使用者误操作或者误动作情况下,软件会在第一时间自动执行相应保护策略,识别错误风险并弹出报警提醒窗

口, 操作者可根据报警提示信息排查确认错误出处, 避免对标准设备和被校仪器等造成损坏。

7) 软件通过调用 OFFICE 文档办公软件可自动生成符合用户格式要求的校准证书。

8) 根据仪器生产厂家提供的调整方法编制了相应的调整程序, 在校准超差时, 用户可根据需要调用相应的调整程序, 对被校仪器的量值进行调整, 使其满足技术指标要求。

9) 软件整体架构采用模块化设计, 根据程序功能要求遵循自上而下、由粗到细的思想。将整个软件划分为若干个功能模块, 分别进行设计和调试, 调试及修改都限制在模块内部进行, 不会对其他模块及主程序造成影响。这大幅提高了软件的可维护性和可扩展性。

4 试验及分析

对航空发动机试车台数据采集器原位综合校准系统的实际应用效果进行测试。由于测试的数据量极为庞大, 仅列举部分具有代表性的测试结果。使用航空发动机试车台数据采集器原位综合校准系统和手动校准方法分别对数据采集器 EX1048-TC 模块的 CH0 通道进行温度校准, 部分测试结果如表 1 所示; 使用该系统 and 手动校准方法分别对数据采集器 EX1000A 模块的 CH16 通道进行电压校准, 部分测试结果如表 2 所示; 使用该系统 and 手动校准方法分别对数据采集器 EX1206A 模块的 CH1 通道进行频率校准, 部分测试结果如表 3 所示。

表 1 EX1048-TC 模块部分测试结果
Tab.1 Partial test results of EX1048-TC module

通道	热电偶类型	标准值/℃	自动校准示值/℃	自动校准测量不确定度($k=2$)/℃	手动校准示值/℃	手动校准测量不确定度($k=2$)/℃
CH0	T	0.0	-0.1	0.1	-0.1	0.1
CH0	T	100.0	100.0	0.1	100.1	0.1
CH0	T	400.0	400.1	0.1	400.1	0.1
CH0	E	300.0	300.1	0.1	300.1	0.1
CH0	E	500.0	500.1	0.1	300.1	0.1
CH0	E	800.0	800.2	0.1	800.3	0.1
CH0	K	300.0	300.1	0.1	300.1	0.1
CH0	K	500.0	500.1	0.1	500.2	0.1
CH0	K	900.0	900.3	0.1	900.4	0.1
CH0	B	800.0	800.6	0.1	800.6	0.1
CH0	B	1 000.0	999.6	0.1	999.6	0.1
CH0	B	1 200.0	1 200.3	0.1	1 200.3	0.1

通过表 1 ~ 表 3 的数据可以看出, 自动校准和人工手动校准结果基本保持一致, 特别是校准过程中应用扫描开关的 EX1048-TC 和 EX1000A 模块。经过对比发现, 扫描开关的热电势对校准结果的影响完全可以忽略。试验结果表明: 研制的校准系统完全可以满足航空发动机试车台数据采集器

温度、电压、频率等基本参量的校准需求, 校准数据准确可靠。而在校准时间方面, 人工手动完成单台数据采集器的全部参数校准耗时约 20 h, 而采用航空发动机试车台数据采集器原位综合校准系统完成单台数据采集器的全部参数校准耗时仅 3 h, 校准效率提升明显。

表2 EX1000A 模块部分测试结果
Tab.2 Partial test results of EX1000A module

通道	量程/mV	标准值/mV	自动校准 示值/mV	自动校准测量 不确定度($k=2$)/%	手动校准 示值/mV	手动校准测量 不确定度($k=2$)/%
CH16	100	0.000 0	0.000 4	0.002	0.000 4	0.002
CH16	100	50.000 0	50.008 9	0.002	50.008 8	0.002
CH16	100	100.000 0	100.012 9	0.002	100.013 0	0.002
CH16	1	0.000 0	0.000 0	0.002	0.000 0	0.002
CH16	1	0.500 0	0.500 1	0.002	0.500 0	0.002
CH16	1	1.000 0	1.000 1	0.002	1.000 2	0.002
CH16	10	0.000 0	-0.000 2	0.002	-0.000 2	0.002
CH16	10	5.000 0	5.000 5	0.002	5.000 6	0.002
CH16	10	10.000 0	10.001 4	0.002	10.001 5	0.002

表3 EX1206A 模块部分测试结果
Tab.3 Partial test results of EX1206A module

通道	幅值/V _{rms}	标准值/Hz	自动校准 示值/Hz	自动校准测量 不确定度($k=2$)/Hz	手动校准 示值/Hz	手动校准测量 不确定度($k=2$)/Hz
CH1	1	10.000 0	10.000 3	0.000 2	10.000 5	0.000 2
CH1	1	20.000 0	19.999 2	0.000 5	19.999 4	0.000 5
CH1	1	50.000 0	49.998 9	0.001 2	49.999 0	0.001 2
CH1	1	100.000	99.998	0.002	99.998	0.002
CH1	1	200.000	199.996	0.005	199.997	0.005
CH1	1	500.000	499.990	0.012	499.991	0.012
CH1	1	1 000.00	999.98	0.02	999.98	0.02
CH1	1	2 000.00	1 999.96	0.05	1 999.96	0.05
CH1	1	5 000.00	4 999.90	0.12	4 999.92	0.12
CH1	1	10 000.0	9 999.8	0.2	9 999.7	0.2

5 总结

现场原位校准是计量领域中的重要发展方向。本文基于低热电势转换扫描开关和多线程控制技术,研发了航空发动机试车台数据采集器原位综合校准系统,实现了多通道数据采集器的自动化、高效化校准。现场测试结果表明:该系统的校准

效率相较传统手动校准方法提高了6倍以上。航空发动机试车台数据采集器原位综合校准系统具有准确可靠、操作便捷等优势,对于降低一线计量人员工作强度、保障航空发动机试车台试验数据准确性、提高试车成功率具有重要意义,为加快航空发动机研发进度、提升航空发动机研制质量提供了有力支撑。

参考文献

- [1] 汪才, 陈仁桢, 单雪, 等. 航空发动机露天试车台测试计量校准研究[J]. 郑州航空工业管理学院学报, 2023, 42(4): 12-15.
- WANG C, CHEN R Z, SHAN X, et al. Research on measurement and calibration of aircraft engine outdoor test stand testing[J]. Journal of Zhengzhou University of Aeronautics, 2023, 42(4): 12-15. (in Chinese)
- [2] 林山. 航空发动机试车台校准技术研究[C]//2013年航空试验测试技术峰会暨学术交流会论文集. 张家界, 2013: 397-400.
- LIN S. Thrust calibration of the aero-engine test cell[C]//Proceedings of the 2013 Aviation Test Technology Summit and Academic Exchange Conference. Zhangjiajie, 2013: 397-400. (in Chinese)
- [3] 国家技术监督局. 数据采集系统校准规范: JJF 1048-1995[S]. 第1版. 北京: 中国计量出版社, 1995.
- National Technical Supervision Administration. Calibration specification of data acquisition system: JJF 1048-1995[S]. First Edition. Beijing: China Metrology Publishing House, 1995. (in Chinese)
- [4] Performance characteristics and calibration methods for digital data acquisition systems and relevant software: IEC 62008-2005[S]. 2005.
- [5] UNDERWOOD C, PELLEGRINO S, LAPPAS V J, et al. Using CubeSat/ micro-satellite technology to demonstrate the Autonomous Assembly of a Reconfigurable Space Telescope (AAReST) [J]. Acta Astronautica, 2015, 114: 112-122.
- [6] LIU Y, PENG Y, WANG B L, et al. Review on cyber-physical systems[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(1): 27-40.
- [7] 郑志清, 余鹏, 庞莉, 等. 温度计量技术在航空发动机试车台健康管理中的应用[J]. 宇航计测技术, 2022, 42(2): 73-75.
- ZHENG Z Q, YU P, PANG L, et al. Application of temperature measurement technology in health management of aero engine test bed[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2022, 42(2): 73-75. (in Chinese)
- [8] 郑锐, 付雷杰, 刘振涛, 等. 基于LabVIEW的多数据采集器自动监控软件设计与开发[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(6): 107-110.
- ZHENG R, FU L J, LIU Z T, et al. Design and development of multi-data acquisition unit monitor software based on LabVIEW [J]. Computer Measurement & Control, 2017, 25(6): 107-110. (in Chinese)
- [9] 许兴明, 刘国伟. 多路数据采集器自动校准系统的设计与实现[J]. 宇航计测技术, 2012, 32(5): 45-48.
- XU X M, LIU G W. Designing and implementation of automatic calibration system for multi-channel data collector [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2012, 32(5): 45-48. (in Chinese)
- [10] 阿拉塔, 石峰, 吴忠燕, 等. 基于LabVIEW的原位自动校准软件设计[J]. 计测技术, 2015, 35(增刊1): 221-225.
- A L T, SHI F, WU Z Y, et al. Design of in-situ automatic calibration software based on LabVIEW [J]. Metrology & Measurement Technology, 2015, 35 (supplement 1) : 221-225. (in Chinese)
- [11] 曾光, 陈若晞. 基于虚拟仪器的多通道数据采集器全自动校准系统[J]. 工业计量, 2024, 34(2): 14-17.
- ZENG G, CHEN R X. Automatic calibration system for data acquisition unit based on virtual instrumentation [J]. Industrial Metrology, 2024, 34(2): 14-17. (in Chinese)
- [12] 殷贤华, 彭彪. 基于LabVIEW的LAN结构自动测试平台设计[J]. 电子测量技术, 2010, 33(8): 1-4.
- YIN X H, PENG B. Design of LAN automatic test platform based on LabVIEW [J]. Electronic Measurement Technology, 2010, 33(8): 1-4. (in Chinese)
- [13] 王磊, 刘瑞珉. 多路低热电势程控开关的研制[J]. 电测与仪表, 2004, 41(10): 44-46.
- WANG L, LIU R M. Development of programmable low EMF multi-switch [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2004, 41(10): 44-46. (in Chinese)
- [14] 钱璐帅. 低热电势多通道扫描开关研制[D]. 杭州: 中国计量大学, 2017.
- QIAN L S. Development of the low thermal EMF multi-channel scanner [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2017. (in Chinese)
- [15] 胡永建. 基于ATmega8515的低热电势程控扫描开关[J]. 微型机与应用, 2011, 30(7): 16-18.
- HU Y J. A program controlled scanner with low thermal EMF based on ATmega8515 [J]. Microcomputer & Its Applications, 2011, 30(7): 16-18. (in Chinese)
- [16] 陈树学, 刘萱. LabVIEW宝典[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- CHEN S X, LIU X. LabVIEW encyclopedia [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011. (in Chinese)

- Chinese)
- [17] National Instruments. LabVIEW simple messaging reference library[Z]. 2010.
- [18] 郑敬华, 刘晨, 高超. 一种基于 GPIB 的自动测试系统实现方法研究[J]. 信息通信, 2012, 26(117): 90-92.
ZHENG J H, LIU C, GAO C. Research of methods on GPIB - based automatic test system [J]. Information & Communications, 2012, 26 (117): 90-92. (in Chinese)
- [19] 张玉扣. 一种基于 LabVIEW 技术的 LAN 结构自动测试平台的设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2015, 35(9): 197-199.
ZHANG Y K. Design of LAN architecture based on LabVIEW Technology [J]. Automation and Instrumentation, 2015, 35(9): 197-199. (in Chinese)
- [20] 何进. 基于 GPIB 总线技术的自动测试系统设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2019, 19(10): 75-77.
HE J. Design of automatic test system based on GPIB bus technology [J]. Single Chip Microcontroller and Embedded System Applications, 2019, 19 (10) : 75-77. (in Chinese)
- [21] 王晶, 黄玲娟. 基于多线程的航空发动机数据采集系统软件设计[J]. 测控技术, 2017, 36(5): 119-123.
WANG J, HUANG L J. Design of aero-engine data acquisition system based on multi-threading [J]. Measurement & Control Technology, 2017, 36(5): 119-123. (in Chinese)
- [22] 黄硕. 基于 LabVIEW 的自动化校准系统设计[J]. 工业计量, 2022, 32(1): 41-44.
HUANG S. Design of an automated calibration system based on LabVIEW [J]. Industrial Metrology, 2022, 32 (1): 41-44. (in Chinese)
- [23] 朱晓香. 基于 LabVIEW 的多路并行数据采集器软件系统的设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
ZHU X X. Design and realization of the software about the parallel and multi-channel data acquisition system based on LabVIEW [D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [24] 张文锋, 曾建华. 基于 LabVIEW 的原始记录和校准证书自动生成方法[J]. 计量与测试技术, 2018, 45(9): 95-97.
ZHANG W F, ZENG J H. Automatic generation method of original record and calibration certificate based on LabVIEW [J]. Measurement and Testing Technology, 2018, 45(9): 95-97. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 刘杰(1983—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为无线电和电学计量校准技术。