

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.03.13

新型多通道温度扫描阀全自动原位校准方法研究

丛钰涛*, 王鹏, 孔祥雪, 金振涛

(中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 针对传统温度扫描阀校准方法效率低、成本高、需拆卸设备且易造成器件损伤等问题, 本文提出一种基于“四层架构”的温度扫描阀全自动原位校准方法。构建温度扫描阀原位全自动校准系统, 采用“标准信号层-信号切换层-数据采集层-控制分析层”四层架构设计, 通过专用计量航插实现现场校准, 避免了传统方法中的设备拆装环节。开展系统化的参数优化实验, 针对测量时间、数据采集间隔、两点校准标准值组合及通道切换稳定时间四类关键参数进行对比分析, 确定兼顾准确度与效率的最优参数配置。开发全自动化校准流程, 实现从设备接入、数据采集到系数计算写入的完整自动化执行, 简化操作流程并降低误差。研究结果表明: 在测量时间为 8 s、数据采集间隔为 250 ms、校准标准值(10 mV, 40 mV)、通道切换稳定时间为 3 750 ms 的参数配置下, 系统测量重复性(标准差)为 0.003 3 mV, 等效温度误差 0.083 °C, 满足误差不超过 ± 0.5 °C 的要求。本文提出的校准方法为温度扫描阀的工程化应用提供了可靠的计量保障。

关键词: 原位校准; 温度扫描阀; 全自动检定; 参数优化; 多通道测量; 数据采集; 控制分析; 工程应用
中图分类号: TB9; TP2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2026) 03-0121-11

Novel in-situ automatic calibration approach for multi-channel temperature scanning valves

CONG Yutao*, WANG Peng, KONG Xiangxue, JIN Zhentao

(AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Aiming at the problems of low efficiency, high cost, equipment disassembly requirement and potential equipment damage in traditional calibration methods for temperature scanning valves, this paper proposes a fully automatic in-situ calibration method based on a "four-layer architecture". A fully automatic in-situ calibration system for temperature scanning valves was constructed, adopting a four-layer architecture design consisting of standard signal layer, signal switching layer, data acquisition layer, and control and analysis layer. By using dedicated metering aviation plugs, on-site calibration was realized, eliminating the equipment disassembly and assembly steps required in traditional methods. Systematic parameter optimization experiments were performed, in which four key parameters including measurement time, data acquisition interval, two-point calibration standard value combination, and channel switching stabilization time were comparatively analyzed, and the optimal parameter configuration balancing accuracy and efficiency was determined. A fully automated calibration workflow was developed, enabling complete automatic execution from equipment connection, data acquisition to coefficient calculation and writing, which simplifies the operation process and reduces errors. The

收稿日期: 2026-03-03; 修回日期: 2026-04-12; 录用日期: 2026-04-13; 发表日期: 2026-06-28

基金项目: 科工局科研项目(JSJL2024XXXXXXXX-062)

引用格式: 丛钰涛, 王鹏, 孔祥雪, 等. 新型多通道温度扫描阀全自动原位校准方法研究[J]. 计测技术, 2026, 46(3): 121-131.

Citation: CONG Y T WANG P, KONG X X, et al. A novel in-situ automatic calibration approach for multi-channel temperature scanning valves[J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(3): 121-131.



results show that under the optimal configuration (measurement time of 8 s, data acquisition interval of 250 ms, calibration standard values of (10 mV, 40 mV), and channel switching stabilization time of 3 750 ms), the measurement repeatability (standard deviation) of the system is 0.003 3 mV, corresponding to an equivalent temperature error of 0.083 °C, which meets the requirement of an error not exceeding ± 0.5 °C. The proposed calibration method provides a reliable metrology support for the engineering application of temperature scanning valves.

Key words: in-situ calibration; temperature scanning valve; fully automatic verification; parameter optimization; multi-channel measurement; data acquisition; control analysis; engineering application

0 引言

温度扫描阀作为航空航天、制造、能源等工业领域多通道热电偶温度测量的核心设备,已广泛应用于航空发动机试车台、高温风洞等关键实验场景^[1-2],其校准准确度直接影响温度采集的准确性^[3]。随着航空实验对温度测量准确度要求的不断提高,温度扫描阀的校准已成为保障实验数据可靠性的关键环节,然而,传统校准方法存在效率低、成本高、易损伤设备等问题,亟须发展更高效、更精准的校准技术^[4-7]。

赵琪等人^[8]针对DTS系列温度扫描阀完成了不确定度评定,但该方法仍需拆卸设备外壳、配备专用套件,预热时间长达3 h;胡冰等人^[9]提出基于LabVIEW的多通道温度校准系统,显著提升了传感器校准准确度,但未实现原位校准;曾光等人^[10]基于虚拟仪器、多路复用开关与继电器模块,搭建了多通道数据采集器全自动校准系统,采用LabVIEW实现仪器程控、通道切换与数据处理全流程自动化,较人工校准时间节省了90%,可完成多参数全自动校准。周似冰等人^[11]面向航空发动机试车台数据采集器研制了现场原位校准系统,通过集成式多功能校准源、低热电势程控开关与自动软件实现免拆卸原位校准,解决了拆卸送检、现场工况不匹配的难题;高颖等人^[12]针对气体压力扫描阀实现了高效准确的现场原位校准;刘杰等人^[13]研发的集成低热电势扫描开关的原位系统,效率较传统方法提升了6倍;吴卓昊等人^[14]研制了高准确度原位校准装置,其“现场准确度评定”的技术思路为温度扫描阀的原位校准提供了准确度参考;邢威等人^[15]开发了压力扫描阀全自动并行校准系统,效率提升了4~8倍。然而,目前适用于温度扫描阀的实际原位校准方法仍较少。以

Scanivalve公司的DTS4050温度扫描阀为例,其校准流程需预热至少3 h^[16],拆卸设备外壳并使用专用校准套件手动连接^[17],32通道总计耗时约5~7 h,严重制约了校准效率。

针对上述问题,本文提出了一种面向多通道温度测量校准的“标准信号层-信号切换层-数据采集层-控制分析层”4层架构原位全自动校准方法。以扫描开关、标准器及上位机程序为基础,通过计量航插结构实现原位接入。建立基于两点校准模型的通道级误差修正方法,针对测量时间、数据采集间隔、校准标准值组合和通道切换稳定时间四类关键参数进行对比分析,确定兼顾准确度与效率的最优参数配置。开发全自动化校准流程,简化操作步骤、提升工作效率,为多通道温度扫描阀的原位快速计量提供重要技术支撑。

1 温度扫描阀原位校准系统设计

温度扫描阀是一类多通道温度采集设备,用于实现多点温度的同步监测与记录。设备在使用过程中,元器件老化、环境漂移等因素会使各通道产生增益与零点偏差,导致测量准确度下降,需要定期校准以修正通道误差。为此,本文设计了一套基于4层架构的新型全自动原位校准系统。

1.1 新型全自动原位校准系统设计

新型全自动原位校准系统架构如图1所示。该系统采用“标准信号层-信号切换层-数据采集层-控制分析层”的4层架构,以标准器输出的可溯源信号为基准,通过扫描开关完成通道级分配与切换,由温度扫描阀完成多通道测量,上位机软件完成流程设计、数据处理与系数生成/写入。图2为4层架构的实际设备连接图。系统通过计量航插实现扫描开关与温度扫描阀的快速对接,在不拆卸设备的条件下完成全自动检定与校准。

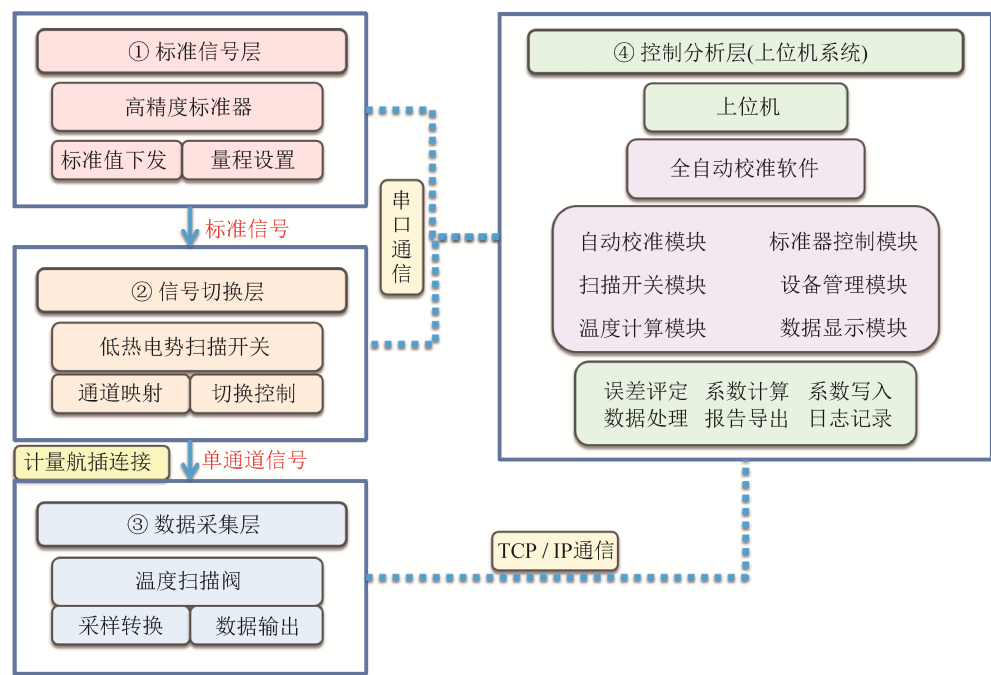


图 1 原位校准系统架构
Fig.1 In-situ calibration system architecture



图 2 实际设备连接图
Fig.2 Actual equipment connection diagram

1) 标准信号层

标准信号层以信号标准器为核心硬件，负责在校准过程中输出稳定的热电偶等效电压/标准电信号，作为全系统的量值基准。对应的软件功能由上位机校准程序实现，包括标准值序列下发、输出量程/单位设置、稳定等待与状态查询等。该层的关键在于保证标准信号的准确性与短时稳定性，为后续各通道误差评定提供统一参考。

2) 信号切换层

采用低热电势多通道扫描开关将标准信号路由至指定通道，支持单通道逐点测量与多通道批量处理两种工作模式。在软件层面实现通道号映射、切换时序控制及异常状态处理等功能，确保信号切换

的准确性与可靠性。系统通过计量航插连接扫描开关与温度扫描阀，实现设备的原位接入，保持现场接线与工况一致。该层主要解决通道切换过程中的可靠性、隔离性与低热电势引入问题，保证标准信号能够以可控方式作用于目标通道。

3) 数据采集层

数据采集层以待校准的温度扫描阀为硬件基础，负责在标准信号作用下完成信号采样、模数转换与数据输出。上位机通过以太网 TCP/IP 协议^[18]实现对温度扫描阀的远程控制与数据读取，包括采集参数配置、测量值获取及设备状态监控。该层的关键性能指标包括通道增益特性、零点偏差及通道间一致性，这些参数直接影响系统的测量准确度。

4) 控制分析层

控制分析层以上位机为硬件平台，运行全自动校准软件，实现对标准器、扫描开关及温度扫描阀的协同控制与统一调度。该层负责测量数据的统计分析、误差评定、校准系数计算与写入、结果存储及报告生成等功能。在工程实现层面，通过多设备通信时序协调与异常状态处理机制，确保“标准值设定→通道切换→数据采集→系数

计算→写入验证”的闭环流程自动化执行。

本系统基于 iTDAS 温度扫描阀的通用接口标准设计，通过标准化计量航插实现物理层兼容。虽然本研究以 32 通道温度扫描阀为验证对象，但该架构方法和参数优化策略可扩展至其他 16/32/64 通道温度采集设备，以及不同量程范围的热电偶温度测量系统，具有良好的方法普适性和架构可扩展性。

1.2 原位校准装置工作流程

原位校准装置工作原理如图 3 所示，具体流程可概括为准备、检定与校准三个阶段。以标准器输出的可溯源信号为基准，通过扫描开关将标准信号依次施加到温度扫描阀各通道，上位机完成多设备时序协调、数据采集与误差评定，并在需要时生成并下发校准系数，从而实现全自动原位校准。

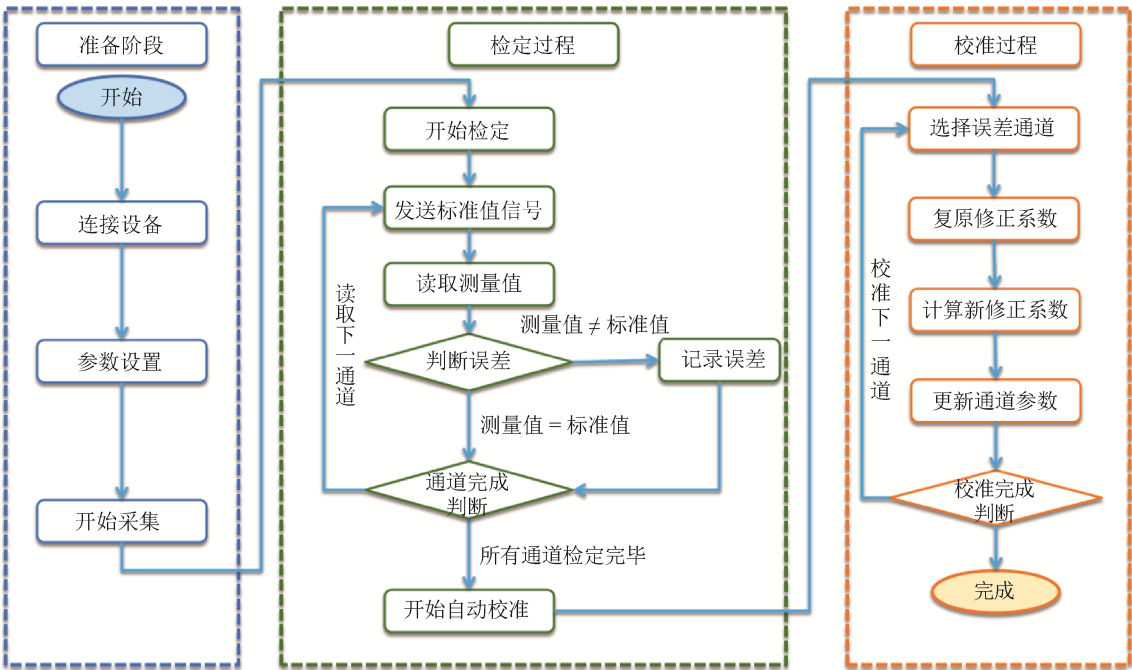


图 3 原位校准装置工作原理
Fig.3 Operating principle of in-situ calibration device

准备阶段主要完成设备原位接入、通信建立与参数初始化。现场将温度扫描阀切换至计量模式，并通过计量航插实现扫描开关与温度扫描阀的快速对接；上位机分别通过 RS485-USB 接口与扫描开关及 RS232-USB 接口与标准器建立通信，同时完成检定、校准所需参数加载与采集任务初始化。参数配置以标准值稳定等待时间、通道切换稳定等待时间、采样间隔时间、单通道测量时长等时序参数为核心，并结合标准器/开关矩阵配置、计量规范文件设备等配置及通道数、量程模式等通道配置，为后续自动执行提供一致的控制基准。准备阶段配置如表 1 所示。

检定过程用于评估各通道示值误差，并判定是否满足准确度要求^[19]。上位机按预设标准值序

表 1 准备阶段配置	
Tab.1 Preparation phase configuration	
配置	说明
通道切换稳定时间 T_{ch}	通道切换后等待时间
标准值稳定时间 T_{std}	标准值切换后等待时间
数据采集间隔 ΔT	相邻 2 次采样的时间间隔
测量总时间 T_{meas}	单通道测量持续时间
通道切换超时 $T_{timeout}$	通道切换最大等待时间
标准值组合 (V_1, V_2)	两点校准模型的标准输入
开关矩阵	开关信号设置
计量规范文件	证书要求规范
通道电压模式	大电压/小电压模式切换
标准器型号和相关文件	

列驱动标准器输出，并在每次标准值切换后等待信号稳定；随后控制扫描开关依次切换通道，在通道稳定后按设定的采样策略采集温度扫描阀输出数据，计算通道统计量与误差指标，并依据计量判据给出合格或不合格结论。检定结果同时用于更新通道状态并形成可追溯的数据记录，为校准阶段提供“待校准通道集合”与误差分布依据。检定过程原理如图4所示。

校准阶段主要针对检定不合格通道进行示值误差的补偿修正。在前期校准测试中，采用两点校准模型对检定不合格通道进行补偿修正具有很高的可靠性。系统筛选待校准通道后，在2个校准标准点下采集对应通道的测量数据，基于两点校准模型计算通道校准系数(如斜率与偏置)，将系数写入设备并进行复测验证。若验证通过，则更新通道状态并保存系数与验证结果；若未验证通过，则按策略重新采集或标记异常。上述3个阶段自动衔接，系统在保持现场接线与工况不变的条件下，依次完成温度扫描阀通道级检定与校准，兼顾效率与一致性。校准过程如图5所示。

1.3 实验环境

相关实验依据JJF 385-2024《温度扫描仪校准规范》^[20]在标准实验室环境下开展。实验环境温度控制在(20±5)℃，相对湿度维持在25%~75%，无机械振动、电磁场干扰及气流扰动，确保外部因素对实验结果的干扰降至最低。实验设备包括：

iTDAS系列32通道温度扫描阀作为待测设备，测量范围-200~1 820℃；Fluke 7526A精密温度校准器，模拟热电偶输出准确度优于0.02级，标准信号输出准确度优于0.01级，输出范围±(0~100)mV，已检定且在有效期内；以低热电势多通道扫描开关作为信号切换设备，寄生电势小于1μV，实现标准信号到各通道的精确分配；运行校准软件的上位机负责实验控制和数据处理。所有设备在实验前通电预热，温度扫描阀预热60 min，确保设备工作状态稳定。

2 检定校准原理与实验方法

检定的作用是判断温度扫描阀各通道在给定标准输入下的示值是否满足计量要求。检定时，通过标准器输出标准电压 V_{std} ，温度扫描阀获得测量值 V_{meas} ，计算电压误差 ΔV 为

$$\Delta V = V_{meas} - V_{std} \tag{1}$$

为与温度指标对应，利用电压-温度转换函数 $f(\cdot)$ 将电压量映射为温度量，得到温度误差 ΔT_0 为

$$\Delta T_0 = f(V_{meas}) - f(V_{std}) \tag{2}$$

允许温度误差阈值为 δ_T ，如果满足式(3)，则认定此通道合格。

$$|\Delta T_0| \leq \delta_T \tag{3}$$

检定结果用于区分合格通道与待校准通道，并为后续校准提供误差分布与修正目标。

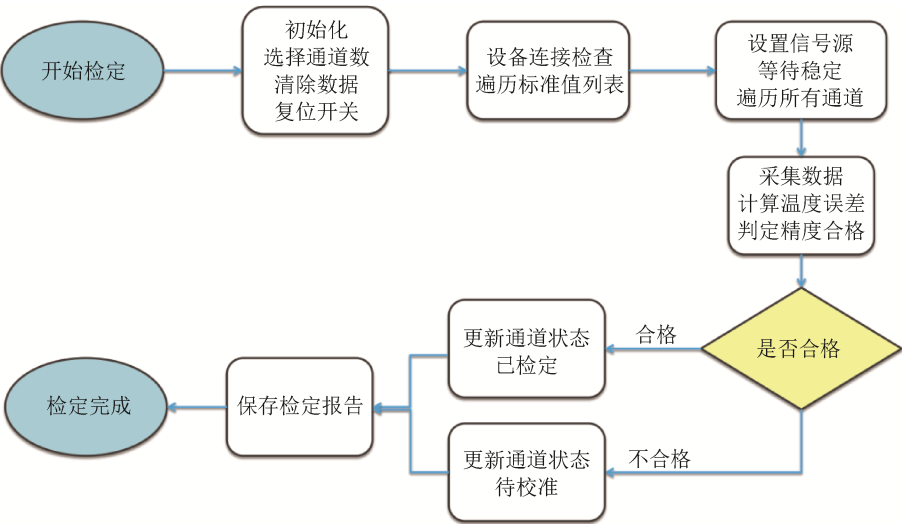


图4 检定过程原理

Fig.4 Principle of verification process

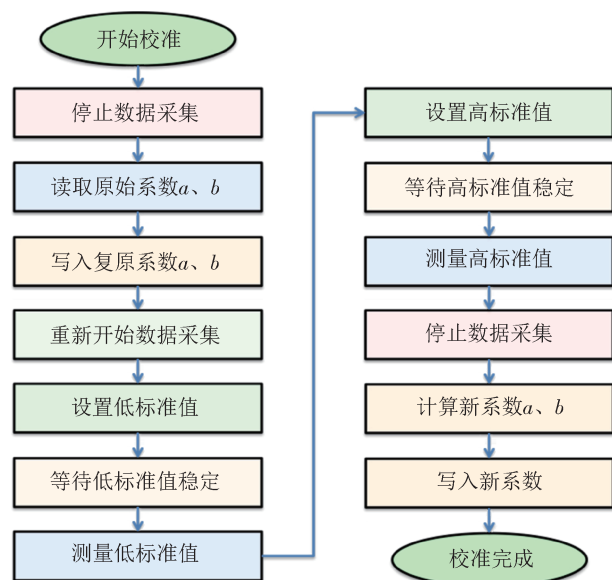


图5 校准过程

Fig.5 Calibration process

校准的方法为：针对检定不合格通道，通过建立通道测量值与真实值之间的修正模型补偿系统性偏差。温度扫描阀采用高精度 A/D 转换器实现电压信号数字化，转换链路在标称量程内具有优异的线性度；通道增益与零点偏差主要来源于前端调理电路，呈现良好的线性特性。因此，在电压量域上采用线性修正可有效补偿通道系统误差，可将“测量值-真实值”关系表示为

$$y = kx + b \quad (4)$$

式中： y 为测量值， x 为真实值， k 为增益系数， b 为偏置系数。

选取两个已知标准点 (x_1, y_1) 与 (x_2, y_2) ，可得

$$\begin{cases} k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \\ b = y_1 - kx_1 \end{cases} \quad (5)$$

可将测量值反算为修正后的真实值估计 x' ，即

$$x' = \frac{y - b}{k} \quad (6)$$

上述线性修正针对的是温度扫描阀电压测量链路的增益和偏置误差，温度量值的最终输出需通过电势-温度换算，该非线性转换环节独立于通道校准过程，不影响线性修正模型在全量程的适用性。在误差评定与校准计算中，电势-温度换算是实现电压量与温度量相互转换的关键环节。由

于热电偶的电势-温度关系呈现显著的非线性特征，国际温标 ITS-90^[21] 采用分段多项式方法对其进行数学拟合。在常用温区内，可用多项式形式表示温度 T 与热电势 E 的关系，即

$$T = \sum_{i=0}^n a_i E^i \quad (7)$$

式中： a_i 为多项式系数， n 为多项式阶数。

参数优化实验采用控制变量原则，对每个测量时间点进行多次重复测量，每次仅改变一个待研究参数，其余参数固定为基准配置，记录最大误差、平均误差和标准差等关键指标；每组实验重复 3 次，剔除明显异常的偏离数据后，以算术平均值作为测量结果，确保数据的代表性和可靠性符合要求。

各关键参数定义如下：测量时间 T_{meas} 为单通道进入测量阶段后持续采样的时间；数据采集间隔 ΔT 为相邻两次采样的时间间隔，用于控制固定测量时间内的采样密度与采样相关性；两点校准标准值组合 (V_1, V_2) 为两点校准模型的标准输入，决定了线性修正模型的覆盖范围与内插/外推比例；通道切换稳定时间 T_{ch} 为完成通道切换后等待信号稳定的时间。单次工况的测试流程可概括为：标准器输出指定标准值，扫描开关接入目标通道，通道切换后等待 T_{ch} 以完成瞬态衰减与热电势稳定，进入测量阶段后按 ΔT 采集数据并持续 T_{meas} ，对重复测量数据计算误差统计量与耗时指标。

3 实验结果与讨论

为实现温度扫描阀全自动原位校准系统的检定效率与准确度协同优化，本文针对影响系统性能的 4 类关键参数开展系统性对比实验，通过误差统计与耗时指标的综合评价，确定各参数的最优取值，并与主流商用温度扫描阀进行性能对比验证。

3.1 测量时间优化

在 $\Delta T = 1\,000\text{ ms}$ 、 $T_{\text{ch}} = 10\,000\text{ ms}$ 与 $(V_1, V_2) = (10\text{ mV}, 40\text{ mV})$ 条件下，设置不同 T_{meas} 进行对比实验，每组实验重复 3 次，取平均值绘制误差曲线，结果如图 6 所示。根据图 6 可以看出：3 条曲线均呈现明显的非线性波动特征。 $T_{\text{meas}} = 8\text{ s}$ 时，

标准差达到最小值 0.000 439 mV，对应温度误差仅为 0.011 ℃，符合误差不超过±0.5 ℃的要求，平均误差和最大误差在 8 s 时同样保持在较低水平，满足准确度要求。单通道检定耗时为 11.75 s，在保证高准确度的同时兼顾了检定效率。

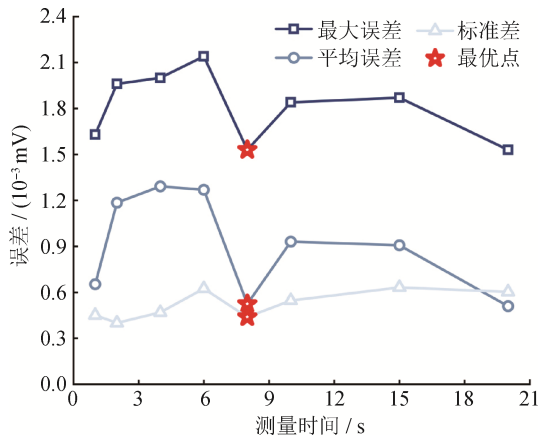


图6 测量时间-误差关系曲线
Fig.6 Measurement time-error relationship curves

研究结果表明：标准差作为衡量测量系统重复性和稳定性的核心指标，在 8 s 时达到最优。此时可进行 32 次采样(采集间隔 250 ms)，统计平均效果显著增强，有效抑制了随机噪声，然而继续延长测量时间并不能等比例提升性能，反而会增加温度漂移、工频干扰等低频扰动的累积影响，导致在 5 ~ 7.5 s 区间误差指标出现显著波动。综合考虑测量重复性和检定效率，推荐测量时间取 8 s。

3.2 数据采集间隔优化

在 $T_{\text{meas}} = 10 \text{ s}$ ， $T_{\text{ch}} = 10\ 000 \text{ ms}$ ， $(V_1, V_2) = (10 \text{ mV}, 40 \text{ mV})$ 条件下，设置不同 ΔT 进行对比实验，每组实验重复 3 次，取平均值绘制误差曲线，结果如图 7 所示。根据图 7 可以看出：3 条曲线均呈现明显的“U 型特征”。 $\Delta T = 250 \text{ ms}$ 时，标准差(0.000 254 mV)、平均误差(0.000 226 mV)和最大误差(0.000 7 mV)同时达到最小值，对应温度误差仅为 0.006 ℃，符合误差不超过±0.5 ℃的要求。250 ms 的标准差比 100 ms 降低 27.4%，比 500 ms 降低 20.6%；平均误差比 100 ms 降低 67.6%，比 500 ms 降低 24.7%。

分析结果表明：在固定测量时间内采样策略存在最优平衡点。 $\Delta T = 250 \text{ ms}$ 对应 1 s 内采样 4 次，

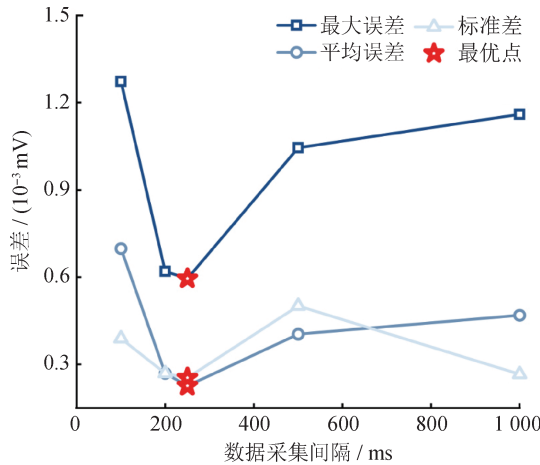


图7 采集间隔-误差关系曲线
Fig.7 Sampling interval-error relationship curves

在“样本独立性”与“统计充分性”之间取得最优权衡。当采样间隔过密(如 100 ms，采样 10 次)时，相邻样本时间间隔过短，信号相关性增强，新增样本对噪声抑制的边际贡献有限，且更易引入瞬时噪声脉冲；当采样间隔过疏(如 500 ms，采样 2 次)时，样本数量不足，统计量的稳定性和代表性下降，无法充分发挥统计平均的噪声抑制作用。因此，推荐数据采集间隔取 250 ms。

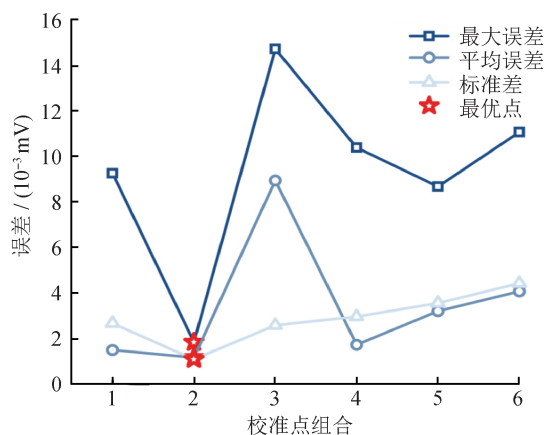
3.3 校准标准值组合优化

为比较两点校准标准值组合对校准效果的影响，设计了 6 组不同跨度和位置的校准点配置进行对比实验，如表 2 所示。

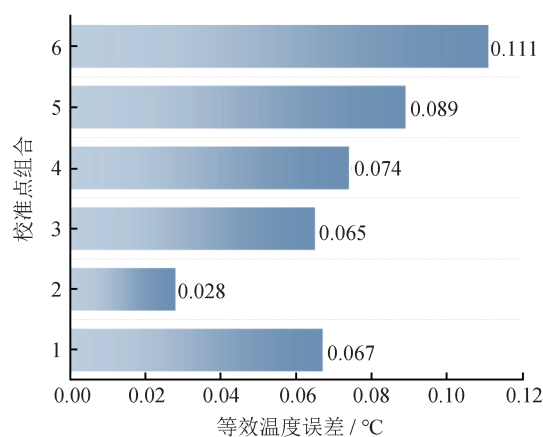
表 2 校准点组合设计			
Tab.2 Calibration point combination design			
组号	校准点 1/mV	校准点 2/mV	跨度/mV
1	5	45	40
2	10	40	30
3	15	35	20
4	0	50	50
5	20	40	20
6	10	50	40

每组校准点组合实验重复 3 次，不同组合的校准效果统计结果见图 8。根据图 8 可以看出：不同校准点组合的误差存在显著差异。组 2(10 mV，40 mV)在标准差(0.001 100 mV)、平均误差

(0.001 178 mV)和最大误差(0.001 855 mV)等指标上综合表现最优,对应温度误差仅为0.028 °C,满足误差不超过 ± 0.5 °C的要求。组2的温度误差比组1降低了58.2%,比组4降低了62.2%,平均误差比组3降低了86.8%。



(a) 误差指标对比
(a) Comparison of error indicators



(b) 等效温度误差对比
(b) Comparison of equivalent temperature errors

图8 不同校准点组合的误差对比

Fig.8 Error comparison of different calibration point combinations

为进一步验证两点校准模型的适用性,依据JJF 385-2024《温度扫描仪校准规范》,在-3~60 mV条件下选取9个标准电压点(-3、0、5、10、15、20、40、50、60 mV),采用(10 mV, 40 mV)校准点确定的增益与偏置系数进行校准验证,结果显示:各验证点的残余误差均小于0.01 mV,表明两点校准系数在全量程内具有良好的外推稳定性和误差修正效果,满足温度扫描校准的准确度要求。

分析结果表明:将校准点布置在量程中段

(10 mV, 40 mV),可避开端点区域的非线性与饱和效应,使多数工作点落在两点之间的内插区间,从而在覆盖范围与线性拟合稳定性之间达到最优平衡。因此,综合误差指标与全量程验证结果,两点校准标准值组合推荐取(10 mV, 40 mV)。

3.4 通道切换稳定时间实验

在 $T_{\text{meas}} = 10$ s, $\Delta T = 1\ 000$ ms, $(V_1, V_2) = (10\text{ mV}, 40\text{ mV})$ 条件下,取不同 T_{ch} 进行扫描测试,每组时间点实验重复3次,误差统计的动态变化趋势见图9。由9图可知: $T_{\text{ch}} = 3\ 750$ ms时标准差达到最小值(0.000 117 mV),表明信号完全稳定。信号稳定过程可分为3个阶段:①快速稳定阶段(0~1.5 s),标准差快速下降;②波动稳定阶段(1.5~3.5 s),标准差波动下降;③完全稳定阶段(3.75 s及以后),标准差达到最小并保持稳定。

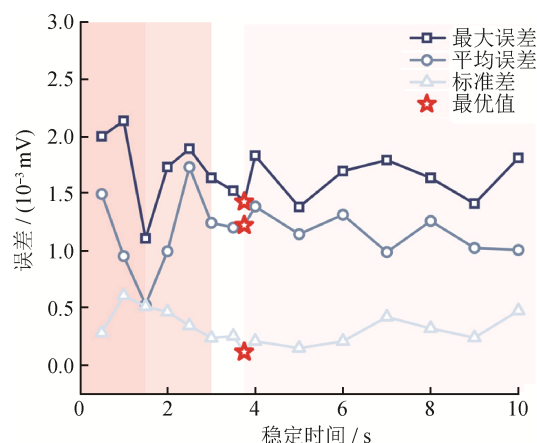


图9 通道切换信号稳定曲线

Fig.9 Stable signal curves for channel switching

分析结果表明:通道切换后信号需要约3.75 s才能完全稳定。若稳定等待时间过短,会将未衰减的切换扰动带入测量窗口,导致标准差偏大;若稳定等待时间过长,不仅无法进一步降低误差,反而可能因环境扰动导致标准差略有回升,同时显著增加检定耗时。 $T_{\text{ch}} = 3\ 750$ ms时标准差达到最小值,可视为准确度与效率之间的最优平衡点。因此,推荐通道切换稳定时间取3 750 ms。

3.5 对比实验结果分析

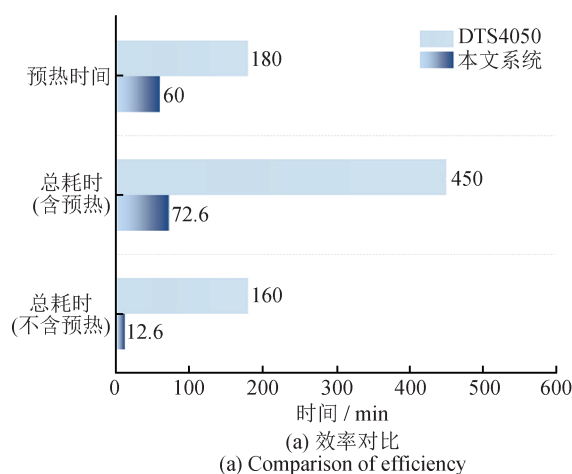
为实现检定效率与准确度的协同优化,对测量时间、数据采集间隔、两点校准标准值组合及通道切换稳定时间4类关键参数开展对比实验。基

于误差统计与耗时指标综合评价,确定系统推荐参数配置如表3所示,在该配置下,单通道检定耗时11.75 s,32通道检定总耗时72.6 min。

表3 推荐参数配置

Tab.3 Recommended parameter configuration

T_{meas}/s	$\Delta T/\text{ms}$	(V_1, V_2)	T_{ch}/ms
8	250	(10 mV, 40 mV)	3 750



为验证本文提出的校准方法及参数优化策略的普适性,选取主流商用多通道温度扫描阀^[22]及对应的传统校准方法作为对照,开展系统性能评估。现有主流商用设备广泛应用于航空发动机测试、风洞实验等领域,其配套校准流程也是当前多通道温度计量的典型实施方式。在表3的参数配置条件下,本文系统与主流商用设备性能对比如图10所示。

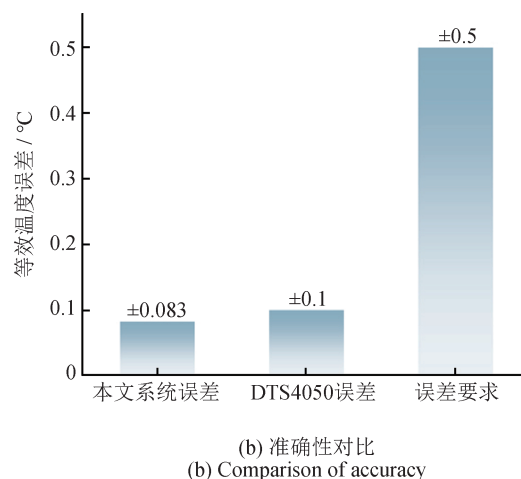


图10 本文系统与主流商用设备性能对比

Fig.10 Performance comparison between the proposed system and mainstream commercial devices

校准速度方面,本文系统的预热时间、测量总耗时均显著小于主流商用设备。测量准确性方面,本文系统的测量重复性(标准差)为0.003 3 mV,等效温度误差为0.083 °C,满足误差不超过±0.5 °C的要求。操作复杂度方面,本文系统采用计量航插实现原位接入,无需拆卸设备或使用专用工具额外操作,全自动化流程运行,无需人工干预,操作简便且损伤风险低。利用主流商用设备进行校准时,需要拆卸温度扫描阀外壳,并使用专用校准套件逐个通道手动连接测量,每个步骤均需人工确认,操作复杂。综合对比结果表明:本文提出的新型多通道温度扫描阀全自动原位校准方法的效率、准确度和操作便捷性均显著优于传统方法。

4 结论

本文针对温度扫描阀全自动原位校准问题,提出了“标准信号层-信号切换层-数据采集层-控

制分析层”4层架构的原位全自动校准方法,主要贡献体现在4个方面:

1) 设计了4层架构的全自动原位校准系统,通过计量航插实现扫描开关与温度扫描阀的快速对接,建立了不拆卸设备条件下的闭环全自动校准流程。

2) 针对测量时间、数据采集间隔、两点校准标准值组合及通道切换稳定时间等关键参数开展了系统性对比实验,基于误差统计与耗时指标的综合评价,确定了兼顾准确度与效率的最优参数配置,即测量时间为8 s、数据采集间隔为250 ms、校准标准值为(10 mV, 40 mV)、通道切换稳定时间为3 750 ms。

3) 提升了校准效率:在最优配置下,系统单通道检定耗时为11.75 s,32通道检定耗时12.6 min(不含预热),相比传统方法效率提升了13倍,包含预热的总耗时从450 min缩短至72.6 min。

4) 提升了测量准确度与适用性:系统测量重

复性(标准差)为0.003 3 mV, 等效温度误差为0.083 °C, 满足误差不超过 ± 0.5 °C的要求, 且两点校准模型在-3 ~ 60 mV全量程内具有良好的外推稳定性。

本文的研究成果为温度扫描阀原位快速检定/校准提供了可复用的技术方案和参数配置依据, 为提升航空实验及其他工业领域多通道温度测量系统的计量效率提供了重要参考。

参考文献

- [1] 赵俭. 小惯性热电偶动态校准及频域分析[J]. 计量学报, 2024, 45(5): 666-670.
ZHAO J. Dynamic Calibration and frequency domain analysis of small inertia thermocouples [J]. Acta Metrologica Sinica, 2024, 45(5): 666-670. (in Chinese)
- [2] 廖理. 热学计量[M]. 北京: 原子能出版社, 2002.
LIAO L. Thermal metrology [M]. Beijing: Atomic Press, 2002. (in Chinese)
- [3] 王德兵, 卿斌, 唐杲. 温度仪表自动校准系统设计[C]//第十九届中国航空测控技术年会论文集. 北京: 航空工业测控技术发展中心, 2022: 148-151.
WANG D B, QING B, TANG G. Design of automatic calibration system for temperature instruments [C]// Proceedings of the 19th China Aviation Measurement and Control Technology Annual Conference. Beijing: Aviation Industry Measurement and Control Technology Development Center, 2022: 148-151. (in Chinese)
- [4] 国家技术监督局. 数据采集系统校准规范: JJF 1048-1995[S]. 北京: 中国计量出版社, 2004.
State Bureau of Quality and Technical Supervision. Calibration specification of data acquisition system: JJF 1048-1995 [S]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2004. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 梁志国, 吕国义, 尹肖, 等. 一种适用于现场原位校准的双输入激励方法[J]. 计量学报, 2019, 40(1): 140-145.
LIANG Z G, LYU G Y, YIN X, et al. A novel on site calibration method by using double stimulations [J]. Acta Metrologica Sinica, 2019, 40(1): 140-145. (in Chinese)
- [7] 李志勋, 王宏亮, 赵印明, 等. 液体火箭发动机多维力测量装置原位校准技术研究[J]. 计测技术, 2018, 38(5): 26-30.
LI Z X, WANG H L, ZHAO Y M, et al. Research on in-situ calibration techniques of multi-dimensional force measuring device for liquid rocket engine [J]. Metrology & Measurement Technology, 2018, 38(5): 26-30. (in Chinese)
- [8] 赵琪, 王舜禹, 蔡珏. DTS温度扫描阀校准方法及测量不确定度分析[J]. 科学与信息化, 2022(8): 122-124.
ZHAO Q, WANG S Y, CAI J. DTS temperature scanning valve calibration method and measurement uncertainty analysis [J]. Science and Informatization, 2022(8): 122-124. (in Chinese)
- [9] HU B, LIU X J. Design and research of multi-channel temperature calibration system based on the LabVIEW [J]. Advanced Materials Research, 2011, 304: 241-246.
- [10] 周似冰, 王胜微, 叶子奎, 等. 数据采集器现场原位校准技术研究[J]. 工业计量, 2026, 36(1): 92-98.
ZHOU S B, WANG S W, YE Z K, et al. Research on field in-situ calibration system technology of data collector [J]. Industrial Metrology, 2026, 36(1): 92-98. (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] 高颖, 任智勇, 杨志, 等. DSA3217型气体压力扫描阀现场原位校准方法[J]. 中国科技信息, 2017(13): 33-34.
GAO Y, REN Z Y, YANG Z, et al. On-site in-situ calibration method of DSA3217 gas pressure scanning valve [J]. China Science and Technology Information, 2017(13): 33-34. (in Chinese)
- [13] 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.
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. (in Chinese)
- [14] 吴卓昊, 范百兴, 王德利, 等. 工业测量系统现场精度

- 原位校准装置及方法研究[J]. 工程勘察, 2019, 47(4): 55-59.
- WU Z H, FAN B X, WANG D L, et al. Research on in-situ calibration device and method for assessing field accuracy of industrial measurement system [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2019, 47(4): 55-59. (in Chinese)
- [15] 邢威, 程昊, 吴红肖, 等. 航空发动机压力扫描阀并行校准系统设计与建立[J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(4): 55-57.
- XING W, CHENG H, WU H X, et al. Design and establishment of parallel calibration system for aero engine pressure scanning valve [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2022, 12(4): 55-57. (in Chinese)
- [16] Scanivalve Corporation. Tempcal temperature calibration software version 1.04 user manual [CP/OL]. (2017-01-01) [2026-02-02]. <https://scanivalve.com/wpcontent/uploads/2017/01/TempCal V104.pdf>.
- [17] Scanivalve Corporation. DTS4050 frequently asked questions [EB/OL]. (2024-01-28) [2026-02-02]. <https://scanivalve.com/products/temperature-measurement/dts4050-16-channel-thermocouple-scanner/faqs/>.
- [18] 常广晖, 张亚超, 苏攀. 基于工业以太网的热电偶测温模块设计[J]. 测控技术, 2021, 40(10): 43-49.
- CHANG G H, ZHANG Y C, SU P. Thermocouple temperature measurement module based on industrial Ethernet [J]. Measurement & Control Technology, 2021, 40(10): 43-49. (in Chinese)
- [19] 王鹏, 赵俭, 张轩铭. 温度传感器测温偏差试验研究[J]. 工业计量, 2016, 26(增刊1): 78-81.
- WANG P, ZHAO J, ZHANG X M. Experimental study on temperature measurement deviation of temperature sensor [J]. Industrial Metrology, 2016, 26(supplement 1): 78-81. (in Chinese)
- [20] 国家国防科技工业局. 温度扫描仪校准规范: JJF 385-2024[S]. 北京: 中国计量出版社, 2024.
- National Administration of Science, Technology and Industry for National Defence. Calibration specification for temperature scanners: JJF 385-2024[S]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2024. (in Chinese)
- [21] 国家技术监督局计量司. ITS-90 国际温标宣贯手册 [M]. 北京: 中国计量出版社, 1990.
- Department of Metrology, State Bureau of Technical Supervision. ITS-90 international temperature scale promotion manual [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1990. (in Chinese)
- [22] Scanivalve Corporation. DTS4050 digital temperature scanner [EB/OL]. (2024-01-28) [2026-02-02]. <https://scanivalve.com/products/temperature-measurement/dts-4050-intelligent-temperature-scanner/>.
- (本文编辑: 刘圣晨 刘宇轩)



第一 / 通信作者: 丛钰涛(1999—), 男, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为动态温度测量校准。