 DOI: https://doi.org/10.12345/hgyjxjz.v3i6.29598

Analysis of calibration technology and application of high precision temperature sensor in industrial measurement

Xiuwen Zheng

Shandong Standprui Metrology Testing Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266000, China

Abstract

High-precision temperature sensors, as key components in industrial measurement, are crucial for the accuracy and reliability of process control, quality inspection, and energy efficiency management. As manufacturing processes become more complex and industrial automation advances, higher demands are placed on the precision of temperature measurements. This article systematically reviews the technical principles of high-precision temperature sensors, analyzes the performance differences and suitable applications of various types of sensors, and focuses on the current mainstream calibration methods and their error control strategies, including fixed-point method, constant temperature bath comparison, and digital online calibration. Additionally, it provides a technical analysis of uncertainty assessment and data processing in calibration, drawing on application cases from typical industries such as energy, chemical, and precision manufacturing. The article proposes an integrated approach and optimization direction for integrating temperature sensor calibration into the industrial measurement system, offering theoretical support and technical references for sensor measurement management and application promotion.

Keywords

high precision temperature sensor; industrial measurement; calibration technology; uncertainty assessment; measurement data processing

高精度温度传感器在工业计量中的校准技术及应用分析

郑修文

山东斯坦德普瑞计量检测有限公司，中国 · 山东 青岛 266000

摘　要

高精度温度传感器作为工业计量中的关键测量部件，其校准技术直接关系到过程控制、质量检测与能效管理的准确性与可靠性。随着制造工艺复杂化和工业自动化水平提升，对温度测量精度提出了更高要求。本文系统梳理了高精度温度传感器的技术原理，剖析了不同类型传感器的性能差异与适配场景，并重点探讨了当前主流校准方法及其误差控制策略，涵盖固定点法、恒温槽比对、数字在线校准等路径。同时，针对校准中的不确定度评估与数据处理展开技术分析，结合在能源、化工、精密制造等典型行业的应用案例，提出了温度传感器校准在工业计量体系中的集成思路与优化方向，为传感器计量管理与应用推广提供理论支持与技术参考。

关键词

高精度温度传感器；工业计量；校准技术；不确定度评估；测量数据处理

1 引言

在现代工业生产体系中，温度控制不仅是基础性监测手段，更是影响产品质量、能源效率与设备安全的核心变量。高精度温度传感器因其具备响应快、灵敏度高、长期稳定性好等特性，被广泛应用于各类自动化控制环节与精密测量场景。随着工业生产对测量准确性的依赖程度日益提高，传感器的计量溯源和校准技术逐渐成为计量科学中的研究重点。当前，高精度温度传感器在实际应用中面临诸如环境干扰、设备老化、非线性响应等挑战，需通过科学规范的校准流程与误差评估机制确保其输出结果的可信度。本文围绕校准技术体系构建、不确定度控制方法以及典型工业场景中的应用表现，展开深入探讨与综合分析，旨在为构建高效、稳定、可持续的工业温度测量体系提供支撑。

2 高精度温度传感器的技术原理与性能特性

温度传感器通过材料物理性质随温度变化而产生的电信号进行温度测量，常用的传感原理包括热电效应、电阻效应和半导体热敏效应。依据传感元件与测温方式的不同，可将温度传感器分为热电偶、热电阻、热敏电阻、红外温度传感器、集成温度传感器等类型。热电偶以其宽量程与坚固性适用于高温领域，热电阻则因高精度在中低温场景广泛使用。红外与数字型传感器在非接触与智能化测温中展现出良

【作者简介】郑修文（1991–），男，中国山东青岛人，硕士，工程师，从事计量技术研究。

好发展潜力，各类传感器需依据其测量环境、温度范围与响应速度特点进行合理选型与校准控制。工业现场复杂环境因素会显著干扰温度传感器的输出稳定性与测量准确性。

3 温度传感器校准的计量技术基础

3.1 校准溯源体系与国家标准温度源介绍

温度传感器的高精度测量必须建立在严密的溯源体系基础上，确保其测量结果可追溯至国家或国际计量基准。国家温度计量基准通常由标准固定点装置、高精度温度计和标准恒温槽构成，覆盖从低温至高温各个测量区间。铂电阻温度计和标准热电偶在校准系统中作为主要参比工具，具备优良的线性与稳定性。标准温度源如冰点槽、锡点炉和铝点炉等能够稳定提供已知温度，满足不同类型传感器的校准需求。通过分级溯源链条，传感器的测量准确性与一致性可在多层计量单位间实现有效传递和确认。

3.2 实验室标准设备与比对方法分析

进行高精度温度校准需依赖性能稳定的实验室设备，主要包括标准恒温槽、温度干体炉、高精度数字多用表、数据采集系统与参考传感器。比对校准方法是一种常用技术路径，通过将被测传感器与标准器放置于同一热场中同时测量，以比较其输出偏差判断其准确性。实验中需严格控制恒温槽的稳定性、均匀性与梯度影响，槽体温差通常控制在 ±0.01℃以内。比对测量过程中，需设定多个温点并保持足够平衡时间，以保证温度读数的重复性与代表性，为后续误差修正与校准曲线拟合提供数据基础。

4 高精度温度传感器的校准方法与操作规程

4.1 固定点法与恒温槽校准流程解析

固定点法基于国际温标中定义的纯物质相变温度点，如冰点、锡点、锌点等，利用物质熔融或凝固过程中的恒定温度作为基准，提供极高的稳定性与重复性，适用于一级标准仪器校准。恒温槽法则通过调节槽体内部加热与循环系统，建立温度稳定区域用于比对校准，被广泛应用于现场测量级别的传感器校准中。操作过程中需控制恒温时间、深度一致性与传感器布置均匀性，避免因温度梯度与对流扰动导致的局部偏差。两种方法结合使用，可在高稳定基准与多点分段校正之间实现有效互补，满足不同精度等级需求。

4.2 热电偶与热电阻校准中误差控制策略

热电偶的校准误差来源于热电势测量精度、冷端补偿误差及环境温度波动，对冷端温度稳定性控制要求较高。采用数字补偿模块与稳定冷端控制设备可有效降低此类误差影响。热电阻校准中需重点防止导线接触不良与引线电阻变化带来的误差，推荐使用四线制连接结构以消除引线电阻干扰。电源稳定性、电桥非线性与测量仪表精度是影响热电阻校准结果的关键因素。应定期对测量仪器进行计量检定，使用带屏蔽层的高稳定信号线，降低外界干扰对数据精度的影响，确保整体误差控制在 ±0.05℃以内 [2]。

4.3 数字温度传感器在线校准技术应用

数字温度传感器通过集成芯片内置采样与补偿机制，具备较强的数字信号输出稳定性，适用于工业自动化测控系统的在线校准应用。在线校准主要依赖软件平台与智能算法，将实际采集值与参比值进行实时对比，通过内部补偿系数动态调整输出精度。校准过程中可使用工业协议接口（如 I2C、SPI、Modbus）进行数据对接，实现自动采样、误差分析与参数修正。为确保在线校准有效性，需建立数据缓冲策略与温控采样稳定机制，并对校准频率与参数变更范围进行限制控制，以保持系统长期运行过程中的温度准确性与响应一致性，图 1 为数字温度传感器在线校准技术流程。

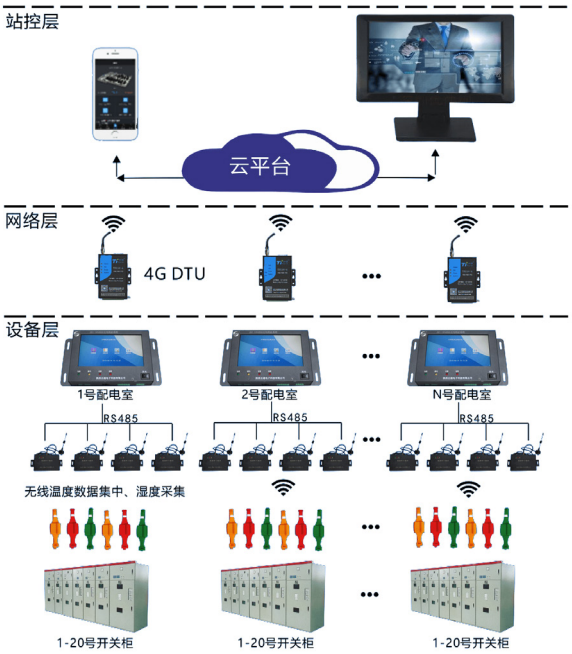

图 1 数字温度传感器在线校准技术流程

5 温度传感器校准过程中的不确定度评估与数据处理

5.1 不确定度来源与量化方法解析

温度传感器校准过程中不确定度的来源包括标准器具精度、环境条件波动、操作者误差、采样分辨率及校准方法本身的系统性偏差。每一项误差源对总不确定度的贡献需通过标准不确定度计算公式进行单独量化，并利用合成不确定度和扩展不确定度模型表达整体误差水平。通常采用 B 类评估方法对环境、器具、方法性误差进行估计，再结合 A 类统计分析获得的标准偏差数据，形成最终合成值。不确定度的可靠表示对于工业测量结果的合规性判断具有重要意义，是传感器计量溯源体系的关键技术支撑 [3]。

5.2 校准曲线拟合与数据回归模型构建

校准过程需依据测得温度点的对应输出值建立函数关系，以形成传感器的校准曲线。常用方法包括线性回归、多项式拟合与分段函数模型，依据传感器响应特性与测量范围

确定拟合形式。数据处理过程中需剔除异常值并进行最小二乘法分析，计算拟合优度、残差平方和与置信区间。合理的回归模型不仅提高数据拟合精度，还能作为后续测量结果修正的参考依据。模型参数需具备良好的稳定性与可复现性，并接受周期性校验与更新，确保在长期应用中维持校准结果的可信性与准确性。

5.3 多通道测量系统的一致性评估方法

在工业应用中，往往采用多个温度传感器组成测量矩阵实现空间温度场的多点监控，传感器间的一致性直接影响测量系统的有效性。评估方法包括多通道输出数据的标准差分析、相对误差比较与偏差分布检验等技术手段。需构建统一参比点，通过同温度源或等效热场进行同步采样，观察各通道间的响应偏移与波动幅度。对不同类型传感器，还需引入归一化处理方法，以统一输出量纲。通过设定一致性判定阈值与统计容差范围，实现对测量系统稳定性的定量评估，有效提升工业监测平台的整体数据可靠性。

6 高精度温度传感器在工业计量中的应用场景分析

6.1 在精密制造过程中的温度监测应用

精密制造中对温度控制精度要求极高，尤其在航空零部件加工、半导体封装、微纳光刻等关键工艺环节，微小温度波动即可导致产品形变、应力积累或工艺偏差。高精度温度传感器通过实时感知工件表面或加工区域的温度变化，实现对温场的动态监控与主动调节。其灵敏度与响应速度能够满足微秒级反馈需求，保障了工艺一致性与产品质量的可重复性。在设备结构复杂、热源集中或热敏性材料工艺中，高精度传感器提供了关键的计量保障，是支撑制造工艺数字化升级与品质控制系统构建的重要基础。

6.2 能源与化工行业的过程控制需求

能源生产与化工反应过程普遍涉及高温高压、热交换与燃烧控制等复杂工况，过程温度的精准控制对反应效率与安全水平具有决定性作用。高精度温度传感器可嵌入反应釜、传热管道、加热设备与压力容器内部或表面，监测关键节点的温度分布与变化趋势，防止超温或热失控事件发生。通过与自动控制系统联动，形成闭环调节机制，在维持工艺参数稳定的同时提高能源利用率与产能稳定性。其在炼油、氨合成、燃气调度等领域的广泛应用，推动了能源与化工产业的计量规范化与装备智能化水平不断提升。

6.3 智能制造中温度数据与系统联动机制

在智能制造体系中，温度不再是孤立监测变量，而是与物联网平台、边缘控制单元与大数据分析系统形成实时交互的关键输入。高精度温度传感器作为智能终端，通过无线传输或总线协议向中央系统回报数据，实现环境感知、状态预测与能耗优化等功能。其数据与设备运转状态、材料性能参数及能效模型关联分析，可为设备维保提供预测性决策依据。传感器通过嵌入式算法实现边缘预处理功能，提升系统响应效率并降低数据带宽压力。在复杂制造单元中，温度信息成为工艺参数、工况预警与质量判定的综合依据，形成以数据驱动的智能决策闭环[4]。

7 结语

高精度温度传感器作为现代工业计量体系的重要组成部分，其校准技术水平直接影响测量结果的准确性与过程控制的可靠性。通过不断完善校准流程、提升不确定度评估能力、优化数据处理模型，可有效增强传感器的工程适应性与长期稳定性。在多场景工业应用中，高精度温度数据已成为支撑智能控制、保障工艺质量与提升能效管理的关键参数。未来传感器技术与计量手段的融合，将进一步推动工业温度测量系统向智能化、系统化、标准化方向发展。

参考文献

[1] 张辰武.基于DCS控制系统的温度传感器精度提升研究[J].装备维修技术,2025,(01):56-59.

[2] 张越.基于热电偶温度传感器数据采集的工业锅炉模糊PID温度控制[J].工业仪表与自动化装置,2025,(01):111-115+119.

[3] 王奇,黄晓宗,廖望.基于BJT特性的数字温度传感器发展现状及趋势[J].微电子学,2024,54(02):243-254.

[4] 金奥.应用于温度传感器的Σ-ΔADC的设计与实现[D].导师：张静;魏琦.北方工业大学,2024.