

Research on the Influence of Cold End Compensation of Thermocouple on Temperature Measurement

Hongbo Wen Maolong Niu Puhuang Wei Ke Zhu

CGN Research Institute Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518100, China

Abstract

This study conducts an in-depth investigation into cold junction compensation techniques for thermocouple temperature measurement systems in thermal-hydraulic experiments. It systematically analyzes the principles, characteristics, and implementation considerations of various compensation methods, including ice point tank compensation, internal board compensation, external thermal resistance compensation, and ice point device compensation. By integrating the laboratory's existing Siemens PCS 7 and NI PXIe data acquisition system platforms, the research evaluates the performance differences among these compensation methods in terms of accuracy, stability, and applicable scenarios through theoretical analysis and experimental validation. The study also provides optimization recommendations tailored to different experimental conditions, offering both theoretical foundations and practical guidance for enhancing the reliability of laboratory temperature measurement systems.

Keywords

thermohydraulic experiment; thermocouple temperature measurement; cold end compensation; compensation accuracy;

热电偶冷端补偿实施方式对测温影响的研究

温宏波 牛茂龙 魏溥煌 朱科

中广核研究院有限公司, 中国 · 广东 深圳 518100

摘 要

本文针对热工水力实验过程中热电偶测温系统的冷端补偿技术进行深入研究, 系统分析了冰点槽补偿、板卡内部补偿、外接热电阻补偿及冰点器补偿等不同冷端补偿方式的原理、特性及实施要点。结合实验室现有的西门子PCS 7和NI PXIe数采系统平台, 通过理论分析与实验验证, 评估了各种补偿方式在精度、稳定性、适用场景等方面的性能差异, 并提出了针对不同实验条件的优化选择建议, 为提升实验室温度测量系统的可靠性提供了理论依据和实践指导。

关键词

热工水力实验; 热电偶测温; 冷端补偿; 补偿精度

1 引言

热电偶作为工业测温领域应用最为广泛的温度传感器之一, 其工作原理是基于塞贝克效应, 即两种不同材质的导体或半导体在连接点处存在温度梯度时会产生热电势。这一热电势大小取决于热端(测量端)与冷端(参考端)之间的温度差, 而非热端的绝对温度, 因此冷端温度的准确确定与补偿成为保证热电偶测温精度的关键环节。

目前工业界和实验室环境中采用了多种冷端补偿方法, 不同的补偿方法在精度、稳定性、实施复杂度和适用场景等方面存在显著差异。需根据实验的具体要求, 如温度范围、精度需求、环境条件及系统资源等因素, 选择合适的冷端补偿方法。

【作者简介】温宏波(1991-), 男, 中国山西吕梁人, 工程师, 从事热工水力实验仪控运行研究。

本文基于热工水力实验室的实际条件, 以西门子PCS 7系统和NI PXIe数采系统为实验平台, 系统研究并比较了冰点槽补偿、板卡内部补偿、外接热电阻补偿和冰点器补偿等不同冷端补偿方式的特性及其对测温结果的影响, 旨在为实验室温度测量系统的优化设计提供理论指导和技术支持。

2 热电偶的测温原理

当两种不同的金属导体(A和B)两端连接形成闭合回路, 且两个连接点(热端和冷端)处的温度不同(T 和 T_0)时, 回路中就会产生热电动势 $E_{AB}(T, T_0)$ 。该热电动势由接触电动势和温差电动势两部分组成, 接触电动势源于两种金属接触面的珀耳帖效应, 而温差电动势则是由汤姆逊效应引起的单一导体内部因温度梯度产生的电势。热电偶产生的总热电动势可用函数关系表示为: $E_{AB}(T, T_0) = f(T) - f(T_0)$, 其中 T 为热端温度, T_0 为冷端温度。当冷端温度 T_0 保持恒定时, 热电动势 $E_{AB}(T, T_0)$ 成为热端温度 T 的单值函数, 即: $E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T, 0) - E_{AB}(T_0, 0)$ 。因此通过测量热电动

势值并已知冷端温度 T_0 ，即可确定热端温度 $T^{[1]}$ 。

3 冷端补偿的技术指标

温度的精确测量在很大程度上取决于冷端补偿方法的性能，该方法性能的主要技术指标包括：

补偿精度：补偿后温度值与实际温度的最大偏差，通常以℃表示。

温度稳定性：在环境温度波动时，补偿系统维持准确性的能力。

响应时间：冷端温度变化后，补偿系统达到稳定所需的时长。

实施复杂度：包括硬件配置难度、维护需求及系统集成复杂度。

多点兼容性：单个补偿系统能否同时为多个热电偶提供补偿。

4 常用冷端补偿方法的技术特性分析

4.1 冰点槽补偿法

冰点槽法是一种传统而精确的冷端补偿方法，其原理是将热电偶的冷端置于冰水混合物中，使冷端温度恒定维持在实际 0℃。这种方法利用了冰水混合物的相变特性，在一个标准大气压下，冰水混合物的温度会严格保持在 0℃。实施冰点槽补偿时，必须保证冰水混合物的纯净度，使用蒸馏水和去离子水可避免杂质引入的电势干扰；另外热电偶的冷端连接点需通过玻璃试管等绝缘材料与冰水直接接触，防止因导电引起的短路问题。

在热工水力实验室的高精度标定实验中，冰点槽补偿法可作为基准参考，用于验证其他补偿方法的准确性。

4.2 板卡内部补偿法

板卡内部补偿法是现代数据采集系统中应用最为广泛的冷端补偿方式。该方法利用安装在数据采集板卡上的集成温度传感器实时监测接线端子处的温度，并通过软件算法对测得的热电势进行补偿。

在 NI PXI 系统中 PXIe-4353 模块提供了专用的内部通道用于测量 I/O 连接器的温度，作为冷端补偿的依据 [2]。同样西门子 PCS 7 系统中的热电偶模块（如 6DL1134-6JH00-0PH1）也集成了冷端补偿功能，用户可根据应用需求选择不同的补偿模式 [3]。

板卡内部补偿的主要优势在于实施简便和系统集成度高。用户无需额外的硬件配置，即可实现自动补偿。然而这

种方法的精度受到一定限制，主要原因包括补偿传感器自身的精度及传感器测温点与实际接线端子的温度可能存在一定温差。

4.3 外接热电阻补偿法

外接热电阻补偿法采用高精度铂电阻温度计（如 PT100 或 Cu50）直接测量热电偶冷端接线区的实际温度，从而实现更为精确的冷端补偿。这种方法将补偿温度传感器安装在尽可能靠近热电偶接线端子的位置，有效减少了温度梯度带来的误差。实施时将热电偶冷端和高精度铂电阻共同置于密闭的恒温盒中，可显著提高补偿精度。这是因为恒温盒能够减小环境温度波动对冷端的影响，提供更加稳定的温度参考。

外接热电阻补偿法在精度和实用性之间达到了良好平衡。在热工水力实验室的多数应用中，这种方法能够满足高精度测温需求，特别是在系统长期运行的稳定性方面表现优异。

4.4 冰点器补偿法

冰点器补偿法是一种基于热电效应原理的电子式补偿装置，它利用半导体致冷元件维持一个恒定的参考温度，通常是 0℃。与物理冰点槽不同，冰点器通过电子控温实现参考温度，无需实际的冰水混合物。

这种方法结合了传统冰点槽的高精度特性和现代电子技术的便利性。冰点器内部集成温度传感器和反馈控制系统，能够自动调节制冷功率，维持参考端的恒温条件。当环境温度变化时，控制系统能够快速响应，保持参考端温度稳定。

4.5 其它补偿方法

除了上述四种主要补偿方法外，在实际工程中还应用着多种其它补偿技术：

补偿电桥法：在测量回路中接入一个不平衡电桥，该电桥的输出电压特性与热电偶的冷端温度变化相反，从而自动补偿因冷端温度变化引起的热电势变化。

软件补偿法：在计算机数据采集系统中，通过编程方式实现冷端补偿算法。系统同时采集热电偶的热电势和冷端温度，通过查表或计算公式自动修正测量结果。这种方法在 NI PXI 系统和西门子 PCS 7 系统等现代化数据采集系统中得到了广泛应用。

4.6 不同补偿方法的适用场景

针对以上介绍的多种冷端补偿方法，从适用温度范围、适用场景及限制条件等方面进行对比分析，形成结果如表 1 所示。

表 1 不同冷端补偿方法的适用适用范围

补偿方法	适用温度范围	适用场景	限制条件
冰点槽法	-10~100℃	实验室标定	高精度测量，维护频繁，不适用于工业现场
板卡内部补偿	0~50℃	一般工业测量	多点巡检，精度一般，受机箱温度影响
外接热电阻补偿	-50~150℃	过程监控	精度要求较高的实验，需要额外布线
冰点器补偿	5~40℃	实验室精密测量	标准传递，成本较高，功耗较大
补偿电桥法	0~50℃	常规工业应用	模拟补偿方案，补偿精度有限，调试复杂
软件补偿法	全范围	计算机采集系统	多点测量，需要额外温度采集通道

5 常用补偿方法的实验对比分析

5.1 实验结果与分析

为评估不同冷端补偿方式在真实热工水力实验环境下的性能表现，我们设计了对比实验方案。实验平台基于实验室现有的西门子 PCS 7 系统和 NI PXIe 系统搭建，选用 N 型热电偶作为温度传感器，测量范围覆盖 50~400℃，模拟热工水力实验中常见的温度区间。通过实验形成测试结果如表 2 所示。

表 2 不同冷端补偿方法在实验中的误差比较（单位：℃）

温度点	冰点槽补偿	外接热电阻补偿	冰点器补偿	板卡内部补偿
50℃	+0.08	+0.18	+0.32	+1.1
100℃	+0.15	+0.35	+0.56	+1.6
200℃	+0.20	+0.42	+0.68	+1.8
400℃	+0.24	+0.45	+0.72	+2.1

在不同温度点下，四种冷端补偿方法的表现存在显著差异。实验结果显示，在 50~400℃ 的全测量范围内，冰点槽补偿法的整体精度最高，外接热电阻补偿法表现出接近冰点槽的性能，冰点器补偿法的整体精度略低于前两种方法，板卡内部补偿法的精度相对最低。

5.2 环境温度波动对补偿精度的影响

为评估环境温度变化对不同补偿方法的影响，我们进行了长时间的稳定性测试。测试结果显示，冰点槽补偿法和冰点器补偿法受环境温度变化的影响最小，在整个测试期间波动范围分别保持在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$ 以内。外接热电阻补偿法受环境温度变化的影响适中，波动范围为 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 。通过将热电偶冷端和补偿电阻共同置于绝缘良好的接线盒中，可以显著减小这种影响，波动范围可降低至 $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$ 。板卡内部补偿法受环境温度变化的影响最为显著，波动范围达到 $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$ 。且随着系统负载变化，内部温度也会相应波动。

5.3 电磁干扰环境下的补偿稳定性

热工水力实验中常伴有大量电流设备运行，产生较强的电磁干扰。为此我们模拟干扰环境，评估了不同补偿方法的抗干扰能力。实验发现在强电磁干扰环境下，所有补偿方法的稳定性均有所下降，但下降程度存在差异。未采取抗干扰措施时，板卡内部补偿法的误差波动幅度最大，达到 $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ ；而外接热电阻补偿和冰点器补偿的波动幅度约为 $\pm 1.2^{\circ}\text{C}$ ；冰点槽补偿法表现最佳，波动幅度仅为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

通过采取适当的抗干扰措施，包括将 PXIe 机箱接地、传感器屏蔽层接地及将热电偶信号通过隔离器转换等，以上方法均可以显著降低电磁干扰的影响。

6 应用实践

在某大型热工水力实验装置中，温度测量系统的可靠性直接关系到实验结果的科学价值和工程指导意义。该实验回路原有温度测量系统采用单一的板卡内部补偿方式，在长期运行中发现温度数据存在不可忽略的漂移现象。通过对实验回路温度测量系统的全面评估，我们制定了分层级的冷端补偿优化方案：

第一层级：对于涉及安全关键参数的温度测点，采用双重冷端补偿策略，即同时使用外接热电阻补偿和冰点器补偿，两套系统相互验证，确保测量的可靠性。

第二层级：对于一般实验参数的温度测点，采用高精度外接热电阻补偿，将补偿电阻安装在专门设计的恒温接线盒内，减少环境温度波动的影响。

第三层级：对于监测类温度测点，保留板卡内部补偿，但增加了实时校正算法，根据机箱内部温度与环境的温差动态修正补偿值。

实施这一优化方案后，实验回路温度测量系统的长期稳定性显著提高，在连续多天的运行测试中，最大温度漂移从原来的 1.8°C 降低至 0.5°C 以内，为实验验证提供了更为可靠的数据支持。

7 结语

本文通过理论分析和实验验证，系统研究了热电偶冷端补偿实施方式对温度测量结果的影响。不同冷端补偿方法的精度差异显著。在热工水力实验环境下，冰点槽补偿法精度最高，可作为基准参考；外接热电阻补偿法在精度和实用性方面达到了最佳平衡，适合大多数实验场景；板卡内部补偿法精度相对较低，但实施简便，适合一般性监测用途。在工程应用实践中，采用差异化的混合补偿策略能够平衡精度、可靠性和经济性要求。根据测量点的重要性和精度需求，灵活选择适当的补偿方法，可以有效提升系统整体性能。

参考文献

[1] 王魁汉,温度测量实用技术[M].机械工业出版社,2021
[2] NI PXIe-4353 Specification[EB/OL].National Instruments,2012
[3] 模拟量输入模块AI 16×TC/8×RTD 2/3/3线制HA(6DL1134-6JH00-0PH1)设备手册[EB/OL].Siemens,2019