

# 工业热电偶测温计量误差的成因与校准对策

王小栋, 刘志杰, 张海鹏

(山东寿光检测集团有限公司, 山东 寿光 262700)

**摘要** 热电偶作为工业生产中温度测量的核心传感器, 其计量准确性直接决定工艺控制精度、产品质量稳定性及生产安全水平。在复杂工况下, 热电偶测温容易受到多种因素的影响而产生计量误差, 严重时脱离工艺允许的范围, 造成生产隐患。本文分析了工业热电偶测温计量误差得分类及产生误差的主要原因, 从技术、管理两个方面提出相应的防控措施, 从实际应用环节证明这些对策的可行性和有效性, 以期为提高工业场景下的热电偶测温精度提供技术参考, 进而促进精准、稳定的测温计量体系的建立。

**关键词** 工业热电偶; 测温计量; 误差成因; 精度校准

中图分类号: TK3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.022

## 0 引言

在石油化工、冶金锻造、电力能源等现代工业领域, 温度参数的精确测量可以实现生产过程闭环控制、提高节能降耗水平、保证产品质量。热电偶由于结构简单、测温范围广、响应速度快、适应恶劣环境等特点, 在工业测温场景中使用最为广泛。其工作原理是利用热电效应, 通过对热电极两端的热电势差进行测量来实现对被测介质温度的换算, 在实际的应用过程中, 由于热电偶自身的性能、安装位置、环境干扰、操作规范等因素的影响, 不可避免地会存在计量误差。随着工业生产向着高精尖、智能化方向发展, 对温度测量的精度要求越来越高, 误差控制成为工业测温领域的重要课题。明确误差种类及原因, 创建一套行之有效的防控对策系统, 对于减小误差的影响、提高计量的可靠性具有重大的实践意义。

## 1 工业热电偶测温计量误差的主要类型

### 1.1 系统误差

系统误差是由于测量系统本身固有的缺陷或者固定的、不变的影响因素所引起的误差, 它的数值大小和方向都是确定的, 并且有一定的规律性。可以通过技术手段修正或补偿。工业热电偶测温中系统误差主要是由热电偶分度特性偏差、冷端补偿机制失灵、测量仪表精度不够、补偿导线和热电偶型号不匹配等引起的误差, 此类误差不会因测量次数增加而减小, 如果不提前进行校准修正, 将会一直影响测量结果的准确性, 使整个测温体系出现系统性偏差, 不能用统计

的方法来消除, 只能通过改进测量系统、完善补偿机制等方式加以控制<sup>[1]</sup>。

### 1.2 随机误差

随机误差是由于测量过程中不能预知的偶然因素而产生的误差, 它的数值大小和方向, 无固定的规律性, 具有随机波动的特点, 符合统计分布规律, 可以通过多次测量、用统计方法减弱影响。在工业场景下, 环境温度微小的变化、被测介质流动状态的改变、电磁信号瞬间的干扰、接线端子的接触电阻变化等都会造成热电偶测温产生随机误差。此种误差在单次出现的时没有规律性, 但是多次测量之后则会呈正态分布, 总体均值趋于零, 可以采用改善测量环境、提高信号的抗干扰能力、用多次测量取平均值等方法来减小它的影响。

### 1.3 粗大误差

粗大误差又叫异常误差, 是由于测量过程中突然发生故障、操作失误或者异常工况所引起的超出正常误差范围的极大误差, 它的数值明显偏离真实的量值, 属于不合理的误差, 需要被剔除。工业热电偶测温中出现的粗大误差大多是由热电偶丝断了、保护管破了、接线极性接错了、仪表故障跳变、操作时测温点选错了等原因造成的, 这类误差和正常的测量误差差别很大, 会严重影响到测量的结果, 如果不能及时发现并剔除掉, 则会对工艺判断以及生产决策产生误导。粗大误差可以经过建立异常监测系统、规范操作流程、定期对设备进行检查等方式加以控制或者防止<sup>[2]</sup>。

作者简介: 王小栋 (1994), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 质量工程。

## 2 工业热电偶测温计量误差的成因分析

### 2.1 热电极材料特性变异

热电极是热电偶的主要部分，它的材料均匀性、化学稳定性决定了热电势转换的准确性，材料特性变异是产生误差的根本内在原因。热电偶热电极要具有稳定的好热电性，在高温、腐蚀、氧化等恶劣的工业环境下，热电很容易发生成分和结构的变化，比如铂铑热电偶的铑元素挥发、镍铬热电偶的择优氧化，使热电势与温度的对应关系偏离分度表的标准。同时热电极生产过程中成分偏析、晶粒长大不均匀、使用过程中应力积累、机械磨损都会产生不均匀的电势，叠加到总的热电势上就形成附加误差，而且这种误差随着使用时间的增长而不断累积，从而影响测温的准确性<sup>[3]</sup>。

### 2.2 冷端补偿系统失效

热电偶热电势的测量是以冷端温度保持在 0℃ 为前提条件，但是在实际的工业场合下冷端经常处于外界环境之中，温度变化很大，需要通过补偿系统来修正误差，补偿系统失灵属于引起系统误差的主要外部因素之一。补偿导线型号不对、正负极接反会造成补偿信号失真，既不能抵消冷端温度变化的影响，反而会放大误差；电子冷端补偿模块精度不够、环境温度超过其工作范围，都会使补偿值偏离实际值，如 K 型热电偶每 1℃ 冷端温度波动则会引起约 2.5℃ 的温度误差；补偿导线和热电偶连接处温度不一致、接头氧化生锈增大接触电阻，也会加大冷端补偿偏差，造成最终测温结果出现偏差。

### 2.3 安装与换热工况不当

安装方式和换热工况会影响热电偶同被测介质的热交换效率，造成测温端温度与介质真实温度产生偏差，这是工业场景里常见的误差来源。插入深度不够属于典型的故障，当金属保护管热电偶插入深度小于保护管直径的 15 倍到 20 倍、陶瓷保护管小于 10 到 15 倍时，测温端受到管壁温度和环境温度的影响，不能有效地接触被测介质的核心部分，造成示值滞后及偏差。同时测温点选取不当，例如靠近加热元件、炉门或者介质流动死角，会使测量结果不能真实地反映出整个介质的温度；安装角度不正确、保护管表面积灰结垢，会阻碍热传递，增大热阻，使测温响应变慢，在高温工况下还会因热辐射换热加剧而产生误差。

### 2.4 环境与系统干扰影响

工业环境中复杂的因素很容易给热电偶测温系统带来各种各样的干扰，使信号的传递、转换存在附加误差，从而影响测量的结果。强电磁干扰为最主要的

干扰源，工业现场的变频器、大功率电机、变压器等设备会发出较强的电磁场，影响热电偶回路中热电势信号的传递，使仪表读数出现跳跃、失真。另外潮湿的环境会减小热电偶绝缘电阻，在绝缘层老化或者破损的情况下会引起回路短路或者漏电，造成热电势损耗；高温条件下保护管腐蚀、破损，使热电极直接暴露在腐蚀介质中，加快材料特性的变化；环境温度梯度大时，会产生附加的热电势，扩大误差范围。

## 3 工业热电偶测温计量误差的防控对策

### 3.1 热电极全生命周期管控

对热电极材料特性变化造成的误差，要建立全生命周期管控体系，在选型、使用、维护等各个环节保证热电极热电特性稳定。选型阶段要根据工况参数来选择合适的电极材料，高温腐蚀性工况采用铂铑合金等贵金属电极，配以耐腐蚀保护管，常温工况用镍铬—镍硅热电偶，保证精度和降低成本。使用时要注意热电极的工作温度在规定的范围内，不能超过额定值而造成材料挥发、晶粒变粗，定期对热电极进行退火处理，消除应力积累，改善组织结构的均匀性，减小不均匀电势的影响。同时建立热电极使用台账，记录安装时间、工况参数、维护情况，为以后校准和更换提供依据<sup>[4]</sup>。

### 3.2 智能冷端补偿技术优化

改善冷端补偿系统来减少系统误差的一种主要方法，即根据工作需要选择合适的方式，提高补偿的精度和稳定性。低温常温工况用专用补偿导线，严格保证补偿导线的分度号、温度范围与热电偶相匹配，使补偿导线和热电偶连接处的温度保持一致，温差不得超过 5℃，防止靠近热源或者冷源。高精度测温场合使用电子冷端补偿模块，再配合 Pt100 温度传感器实时测量环境温度，用微处理器自动计算补偿值，对热电势信号进行补偿，提高补偿精度到  $\pm 0.1$ ℃。另外，建立补偿系统定期校准制度，及时发现并纠正补偿导线接反、接头氧化、模块故障等现象，保证补偿系统的正常工作。

以石油化工常减压装置测温为例，该场景冷端区域受装置散热、环境气流影响，温度波动范围可达 15~40℃，传统的补偿方法不能达到  $\pm 0.5$ ℃ 的测量精度。为此用带有智能补偿模块的数显仪表代替传统的补偿方式，该模块内有进口 Pt100 传感器，每 0.1 s 采集一次冷端温度数据，利用嵌入式的算法快速匹配 K 型热电偶分度表，自动完成热电势修正和温度转换。同时用液压压接工艺处理补偿导线接头，涂抹导电膏降低接触电阻到 5 mΩ 以下，外层包裹耐高温保温棉和

防水缠带,保证接头温度稳定、不被潮湿氧化。经过实际运行检验,与传统的补偿方法相比,冷端补偿误差变小了,测温示值的稳定性明显提高了,有效地解决了由于环境温度变化造成测温不准的问题,给常减压装置分馏效率的提高提供准确的温度数据支持。

### 3.3 安装结构与换热工况改进

通过规范安装流程、优化换热结构来减小安装和换热工况不当时产生的误差,保证测温端同被测介质充分高效地进行热量交换。安装时严格按照插入深度的标准,金属保护管热电偶插入深度不小于保护管直径的15倍,陶瓷保护管不小于10倍,保证测温端处在介质的核心流动区域,远离管壁、炉门和加热元件。高温工况下在热电偶保护管外面加上金属遮热罩,表面抛光处理来降低发射率,减小与环境的辐射换热,通过对流换热系数修正辐射误差,提高高温测温精度。定时清除保护管表面的结垢、积灰,防止热阻增大引起响应迟滞。

例如:在电力锅炉烟道测温场景中,原有热电偶插入深度仅80 mm,保护管直径10 mm,未达到标准插入深度要求,且无遮热措施,造成测温误差为 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,示值滞后时间为30 s,不能准确地反映出烟道内实际的温度。为此对安装结构进行优化,把热电偶的插入深度调到150 mm,完全符合保护管直径是热电偶直径的15倍的要求,保证测温端深入到烟道介质的核心部位。另外在保护管上加装弧形不锈钢遮热罩,遮热罩和保护管的距离控制在50 mm左右,构成空气隔热层,隔绝烟道外壁的辐射及环境温度的影响。经过改造之后,用标准热电偶和实际温度传感器进行对比试验可知,烟道介质温度测量误差由原来的 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降到现在的 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,示值滞后时间也缩短到10秒以内,提高了测温精度,并且给锅炉燃烧调整、能耗优化提供实时准确的温度数据。

### 3.4 多维度干扰抑制体系构建

针对环境与系统干扰,构建电磁、绝缘、环境多维度干扰抑制体系,保障热电势信号传输与转换稳定。电磁干扰抑制采用热电偶信号电缆穿金属屏蔽管敷设的方式,屏蔽管一端接地,接地电阻不大于 $4\text{ }\Omega$ ,远离动力电缆和变频器、电机等强电磁源,电缆长度不超过100 m,超过100 m的段落加装信号放大模块,保证信号不衰减、无干扰。绝缘防护,每个月用兆欧表测热电偶的绝缘电阻,常温时保证绝缘电阻不小于 $100\text{ M}\Omega$ ,高温时不小于 $10\text{ M}\Omega$ ,潮湿环境使用密封式接线盒,防止绝缘层受潮老化。同时改善环境条件,防止测温

区域温度梯度太大,减小附加热电势的产生<sup>[5]</sup>。

以化工反应釜测温为例,该场景反应釜搅拌电机、加热装置产生强电磁干扰,且釜体周边湿度较高,造成热电偶测温信号经常变化,误差为 $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,严重影响了反应工艺的控制。经过建立多维干扰抑制体系的优化之后,对原来的热电偶信号电缆进行更换,用双屏蔽聚四氟乙烯护套电缆代替它,在反应釜侧壁上穿 $\phi 20\text{ mm}$ 镀锌金属管,与搅拌机电缆保持2 m距离,金属管在釜体接地端处只接一点地线。接线盒用IP67防水密封型,内部装有工业级防潮硅胶,每半个月拆机检查硅胶并更换。同时在信号输入端加装高频电磁滤波模块,对50 kHz以上的高频干扰信号进行过滤,保证热电势信号纯净地传递出去。经过实际使用证明,干扰引起的数值跳变现象完全消失,有效地保证了反应釜内化学反应的精确温度控制,提高了产品的合格率和工艺稳定性。

## 4 结束语

工业热电偶测温计量误差的产生是材料、补偿、安装、干扰等多因素综合作用的结果,误差防控需立足全流程、多维度构建系统性解决方案。依靠对热电极整个生命周期的控制来保证材料特性稳定,采用智能冷端补偿技术来减小系统的误差,改善安装结构以提高换热效率,从多个角度上抑制外界干扰,可以有效地把测温误差控制在工艺允许范围内,提高计量的可靠性。随着工业智能化的发展,未来要进一步地融合边缘计算、物联网等技术来达到实现误差实时检测、智能修正和预测性维护的目的,从而形成一个以精准感知为基础、以智能预警为途径、以自主优化为核心特征的测温计量体系,为高端工业生产提供更加坚固的温度计量支撑,并促进工艺革新与产品质量提升。

## 参考文献:

- [1] 蔡诚.新型耐磨防护PVD测温涂层设计与应用[D].广州:广东工业大学,2024.
- [2] 刘智慧.热电偶合金成分解析及溅射薄膜生长表面温度测量研究[D].大连:大连交通大学,2023.
- [3] 鄂明锋.基于新型引线连接技术的薄膜热电偶表面温度传感器研究[D].大连:大连交通大学,2023.
- [4] 杜冠廷.热电偶测量表面温升的误差和优化研究[D].广州:华南理工大学,2020.
- [5] 冀晓明.基于热电能采集的无线传感测温系统研究[D].保定:华北电力大学,2020.