

温度传感器应用及故障分析

周峰 包海龙 曾永峰
(玉门油田乍得分公司 甘肃 酒泉 735200)

摘要：温度传感器无处不在。无论是办公大厦还是家中，HVAC 系统、冰箱、冷藏库和计算机都离不开温度传感器测量。电机控制、组装生产线过程和生产等工业应用也要求连续监测和温度控制。为了支持各种温度检测需求和应用，出现了不同类型的温度传感器。有些传感器设计用于测量大厦内的环境温度，在不同气候下控制温度，有些传感器则用于恶劣环境下的液体温度测量。本文通过介绍不同类型温度传感器及其优缺点，以及选择温度传感器时的重要考虑事项。最后，通过一个实例讨论温度传感器在实际应用中遇到的故障及防范措施。

关键词：温度传感器；热电偶；插入测量介质的深度

0 引言

本文介绍了目前市面上常用的 5 种温度传感器的类型，并着重讲解了热电偶、电阻温度检测器（RTD）、热敏电阻的工作原理及优缺点。最后讨论了温度传感器在实际使用过程中可能出现的故障和防范措施。

1 温度传感器类型

温度传感器具有不同的形式和各种各样的功能，不同类型的传感器适用于不同场合。在现代化电子设备中，有 5 种最常用的温度传感器：热电偶、电阻温度检测器（RTD）、热敏电阻、本地温度传感器、远端测温二极管 IC 等。

热电偶、RTD 和热敏电阻是可以提供温度特性测量的检测元件，通过电路连接将传感器信号转换为可用的模拟或数字值。电路通常包括模 / 数转换器（ADC）、放大器、电压基准以及其他有源或无源元件，或者专用的传感器信号调理器 IC。本地温度传感器 IC 利用管芯上晶体管的物理特性作为检测元件。使用 ADC、放大器和电平转换等附加电路构成具有模拟或数字接口的传感器。远端温度二极管温度传感器采用外部连接成 PN 结的晶体管作为检测元件，包括使用一个或多个外部晶体管测量温度所需的全部信号调理电路。

1.1 热电偶

热电偶广泛用于各种工业、汽车和消费类设备，采用自供电、无需激励；

与其他常见传感器相比，其工作温度范围宽得多（高达 +2000℃）。裸热电偶具有非常快的响应速度，使系统操作中的温度测量没有明显延迟。

热电偶的类型有多种，分别以字母表示。应用最广的热电偶为 K 型热电偶。表 1 所列为几种常见热电偶的特性汇总。注意不同类型热电偶之间的灵敏度和测温范围的差异。

热电偶利用塞贝克效应检测温度：不同金属类型构成的结之间存在温度差时发生的一种现象。高温区域和低温区域之间的温度差造成两个结之间存在电压差。可

表 1 部分热电偶类型特性

类型	温度范围 / °C (短期)	灵敏度 (μV/°C)	导体合金
K	-180 ~ +1300	41	铬镍 (90%Ni、10%Cr)
			镍铝硅锰 (95%Ni、2%Mn、2%Al、1%Si)
J	-180 ~ +800	55	100% Fe
			铜镍 (55%Cu、45%Ni)
N	-270 ~ +1300	39	镍铬 (84.1%Ni、14.4%Cr、1.4%Si、0.1%Mg)
			镍硅 (95.6%Ni、4.4%Si)
R	-50 ~ +1700	10	87%Pt、13%Rh
			100%Pt
S	-50 ~ +1750	10	90%Pt、10%Rh
			100%Pt
B	0 ~ +1820	10	70%Pt、30%Rh
			94%Pt、6%Rh
T	-250 ~ +400	43	100%Cu
			铜镍
E	-40 ~ +900	68	铬镍
			铜镍

利用这一电压差计算温度。

热电偶由两种连接在一起的异类金属丝制成。产生的输出电压非常小（对于 K 型热电偶，约为 $40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ），需要复杂的信号调理（包括冷端补偿和放大）。

尽管热电偶具有诸多优势，但由于其测量温度时的输出电压非常小，需要高精度放大，具有一定的设计挑战。热电偶对外部噪声的敏感性，特别是热电偶和测量电路之间的导线较长时，也带来了一定的挑战。另一个问题是热电偶引线（或走线）连接点产生的附加热电偶。铜线连接到信号调理电路，形成另一个热电偶。该点被称为冷端，如图 1 所示。金属 A 与金属 B 之间

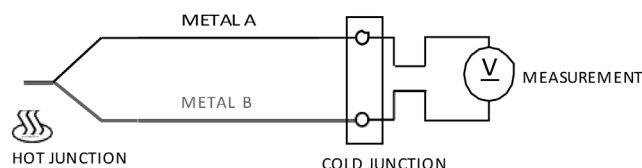


图 1 热电偶电路

的结为主热电偶结（也称为“热端”，尽管其温度可能低于冷端温度）。该电路输出电压表现为热电偶电压减去处于冷端温度下的相似热电偶的电压。

例如，若热电偶所处温度为 $+525^\circ\text{C}$ ，而冷端温度为 $+25^\circ\text{C}$ ， V_{OUT} 指示将为 $+500^\circ\text{C}$ 。为补偿冷端效应，就必须测量冷端温度，并将该温度可能产生的热电偶电压增加到 V_{OUT} 值：

$$V_{\text{OUT}} = V_{\text{TC}} - V_{\text{CJ}}$$

$$V_{\text{TC}} = V_{\text{OUT}} + V_{\text{CJ}}$$

可以在冷端位置放置一个温度传感器，并利用测得的温度对冷端温度进行补偿，从而完成误差修正。

1.2 RTD（电阻温度检测器）

任何金属丝的电阻率都随温度变化。RTD 就是基于这一现象的温度传感器，实际上是具有明确电阻—温度特性的电阻。由于铂的化学稳定性以及温度变化响应的线性度较高，属于 RTD 中最常见、精度最高的金属丝材料。铂 RTD 也称为 PRTD，常用的有 100Ω 和 $1\text{k}\Omega$ 电阻（ 0°C ），分别称为 PT100 和 PT1000。镍、铜和其他金属亦可用来制造 RTD。铂 RTD 具有较宽的温度范围（高达 750°C ）、优异的精度和可重复性，以及适中的线性度。由于 RTD 具备高精度、高稳定度及宽温范围，适用于各种高精度测量，包括仪器和过程控制。

阻值 - 温度关系曲线具有适当的线性度，但有一定弯曲，可由 Callendar-Van Dusen 方程表示：

$$R(T) = R_0[1 + aT + bT^2 + c(T-100)T^3]$$

式中， T 为温度， $^\circ\text{C}$ ； $R(T)$ 为 T 温度下的阻值； R_0 为 $T=0^\circ\text{C}$ 时的阻值。

IEC 751 规定了下列 Callendar-Van Dusen 系数：

$$a = 3.90830 \times 10^{-3}$$

$$b = -5.77500 \times 10^{-7}$$

当 $-200^\circ\text{C} \leq T \leq 0^\circ\text{C}$ 时， $c = -4.18301 \times 10^{-12}$ ；

当 $0^\circ\text{C} \leq T \leq +850^\circ\text{C}$ 时， $c = 0$ 。

与裸热电偶相比，裸 RTD 元件的热稳定性较高，对温度变化的响应较慢。RTD 和热电偶往往被封装在不锈钢壳中，在这种情况下，对这两种传感器类型来说，整体探头的温度质量相当，所以响应时间也相当。

信号调理对 RTD 温度测量非常重要。激励电流通过 RTD，并测量 RTD 的电压。如果已知激励电流（或可推导出），即可计算得到 RTD 电阻。传感器配置可以是 2 线、3 线或 4 线，如图 2 所示。当引线足够短，电阻不会明显影响测量精度时，图 2（a）所示的 2 线配置非常简单。3 线配置中，如图 2（b）所示，第 3 根线连接到 RTD 探头并承载激励电流。如果引线电阻相等，这样能够抵消线阻效应。图 2（c）所示的 4 线开尔文配置中，独立的加载和检测线避免了线阻效应，具有最高精度。

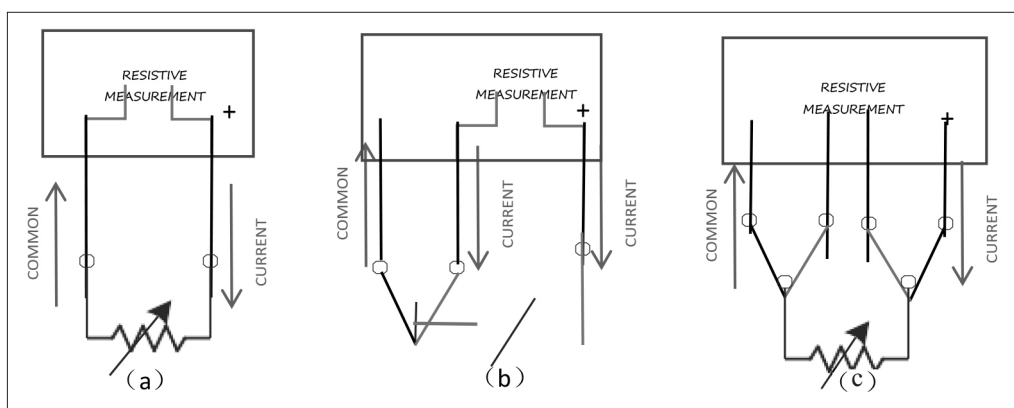


图 2 2 线、3 线和 4 线 RTD

实施 RTD 温度测量的电路结构各有不同。大多数结构要求 2 个激励电流源和高分辨率模拟输入信号链。许多高分辨率 ADC 具有电流源和多路模拟输入，适用于 RTD 或其他温度测量电路。

1.3 热敏电阻

与 RTD 一样，热敏电阻也随温度变化改变阻值。RTD 一般由纯金属组成，而热敏电阻则由聚合物或陶瓷材料制成。一般情况下，热敏电阻比 RTD 便宜、精度较低，但也有例外。大多数热敏电阻采用 2 线配置，如图 2（a）所示的 RTD。负温度系数（NTC）热敏电阻常用于测量系统。顾名思义，NTC 热敏电阻的阻值随温度升高而减

小。热敏电阻的典型温度范围为 -90 ~ +130℃，远低于热电偶和 RTD，当然也有较宽范围的热敏电阻。

热敏电阻的温度—电阻关系具有明显的非线性，需要线性修正。根据 Steinhart-Hart 方程，热敏电阻的阻值是温度的函数，该方程被用于近似绘制各个热敏电阻曲线。

方程为：

$$\frac{I}{T} = A + B \ln(R) + C [\ln(R)]^3$$

式中： R 为热敏电阻的阻值； T 为温度，单位为 K； A 、 B 和 C 为曲线拟合常数，通过针对给定热敏电阻材料的校准过程确定； $\ln$ 为自然对数函数（以 e 为底的对数）。

大多数热敏电阻制造商提供典型温度范围下的系数 A 、 B 和 C 。图 3 所示为常见的热敏电阻测温方法，其中热敏电阻和固定电阻形成一个分压器，其输出由模数转换器（ADC）数字化。

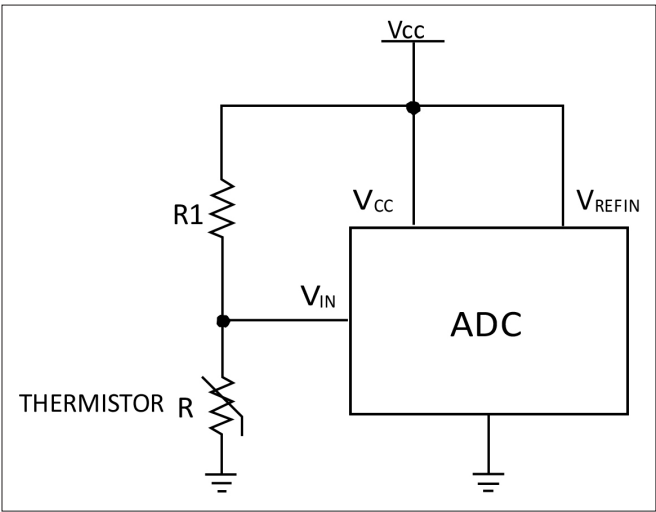


图 3 热敏电阻至 ADC 接口

2 温度传感器故障实例分析

2.1 设备基本信息和故障现象

乍得（恩贾梅纳）炼油股份有限公司聚丙烯原料生产线使用科倍隆（Coperion）AH4000 造粒机，加热磨盘内安装有 18 根加热管和 1 个温度传感器探头。从 2020 年 1 月开始加热管烧坏故障出现频次开始增加，9 月故障开始集中爆发，具体情况如表 2 所示。

加热管再次烧坏，同时温度探头导线被焊渣熔断接触不良，造成温度大幅波动，更换温度传感器。之后的近半年时间里再没有出现加热管烧坏的情况，受到启发分析温度传感器对加热管的影响

2.2 故障原因判断

从 2020 年 9 月加热管出现集中烧毁的情况后，为了找出导致故障的原因从加热管本身故障、加热管供电质量、装置操作流程等三方面进行分析。通过对加热管质量、运行状态、运行时间的长时间比较，最终排除以上三种可能。

2021 年 3 月 25 日模头加热管更换完成，开机过程中模头温度出现剧烈波动，检查发现温度传感器导线破损，造成检测温度出现剧烈波动，更换温度传感器后恢复正常。自 3 月 25 日更换温度传感器算起已将近半年时间，期间多次对加热管进行检测再未出现加热管烧坏。因此怀疑温度传感器和加热管烧坏有关联。

2.3 加热管烧毁原因分析

从 2020 年初故障开始频繁出现后多次对温度传感器进行检查，确认温度传感器本身没有问题。通过表 2 发现需要拆卸温度传感器的作业只有 2 次，分别是 2021 年 2 月 26 日和 2021 年 3 月 25 日。

2 月 26 日更换新模头期间，将原来的温度传感器装入新模头中未进行调整，加热管频繁烧毁的问题未得到解决；3 月 25 日更换新温度传感器时发现原理设深度不足，随后又重新测量调整温度传感器埋设深度。

表 2 加热管烧毁情况一览表

序号	发现日期	更换日期	烧毁数量	更换数量	故障处理过程及分析
1	2020/1/7	2020/4/10	2	2	使用时间较长，判断为加热管老化
2	2020/5/10	2020/6/9	1	1	使用时间较长，判断为加热管老化，并检查加热管控制回路（通电电压、通电电流、通电时间、固态继电器）
3	2020/9/21	2020/9/21	3	3	加热管频繁烧坏，判断为老化和加热管自身质量问题
4	2020/9/25	2020/9/25	6	11	加热管烧坏故障恶化，判断为加热管自身质量问题同时寻求厂家帮助；联系装置改变降温方式
5	2021/2/1	2021/2/1	2	2	对烧坏的加热管进行切割检查未发现异常，厂家答复没有见过类似情况，建议持续观察
6	2021/2/26	2021/2/26	3	18	在更换加热管过程中有两根加热管断裂无法取出，更换模头和所有加热管
7	2021/3/25	2021/3/25	1	1	加热管再次烧坏，同时温度探头导线被焊渣熔断接触不良，造成温度大幅波动，更换温度传感器。之后的近半年时间里再没有出现加热管烧坏的情况，受到启发分析温度传感器对加热管的影响
合计			18	38	

对比 2 次温度传感器安装作业,最大的区别在于调整了埋设深度,因此判断是由于埋深不足造成监测温度低于加热盘实际温度,例如设定温度为 210°C ,但加热盘实际温度已经达到 250°C 或更高,为了保持比需求更高的温度,控制器会增大通电电流、增加通电时间,加热管长期处于过负荷状态而频繁烧坏。

3 结语

由于温度传感器自身具有较强的抗干扰性、抗辐射性,能够满足一些特殊场合的应用,效果也比传统的传感器更好。但是,在温度传感器实际测量中,总是会受到一些因素的影响,导致温度传感器的测量结果出现这样或那样的偏差。

(1) 温度传感器插入测量介质的深度。

在使用常见的插入式温度传感器时,测温点的选择十分重要。对于生产工艺过程而言,测量温度的位置要具有典型性和代表性,不然测量就没意义。在温度传感器插入被测量场所时,沿着传感器的长度方向将会产生一些热流。当环境温度比较低的时候就会有热量损失。导致温度传感器与被测量介质的温度不一致,从而会产生测温误差。

因此,由于热传导而引起的测量误差,跟插入的深度有关,而插入深度又与保护管的材质有关系。

针对不同的材质,由于金属保护管的导热性能好,它插入的深度应该深一些,而陶瓷材料绝热性能好一些,可插入浅一些。有些方面,对于工程测温,插入深度还跟测量对象是静止还是流动的等一些状态有关,例如流动的液体或高速气流温度的测量,不会受上述限制,插入深度也可以浅一些,具体的数值应由试验来确定。

(2) 与测量介质的响应时间。

温度传感器中接触法测温的基本原理是测温元件要跟被测对象达到一个热度的平衡。所以,在测温的时候需要将它们保持一定时间,才能够让两者达到一个热度平衡。而保持时间的长或短,就跟测温元件的热响应时

间有关系了。而热响应时间主要取决于温度传感器的结构以及测量的条件,差别很大。因此,一般普通的温度传感器不仅跟不上被测对象的温度变化,速度出现滞后,而且还会因为达不到热度平衡而产生一些测量误差。

所以选择响应速度比较快的传感器。对温度传感器而言,除了保护管影响外,还有就是感温元件的测量端直径大小也是其主要因素,即感温元件越细,测量端直径越小,其热响应时间就会越短。

(3) 被测介质会使热阻抗增加。

有一种情况,在高温下使用的温度传感器,如果被测量的介质形态为气态时,那么保护管表面积聚的一些灰尘等将烧熔在保护管的表面上,使得保护管变厚,热阻抗增大。

如果被测介质形态是熔体,在使用的过程中会有炉渣沉积在上面,不仅增加了温度传感器的响应时间,而且还会让指示温度偏低,从而出现偏差,所以,除了要定期检查外,还要经常抽查,对温度传感器的使用会很有帮助。

参考文献:

- [1] 李文宏,杨振坤,夏建生. 光纤 Bragg 光栅传感技术及其应用 [J]. 传感技术学报, 2002(3): 215-218.
- [2] 张子栋,吴雪冰,吴慎山. 智能传感器原理及应用 [J]. 河南科技学院学报, 2008(2): 116-119.
- [3] 刘瑞. 基于 PLC 的温度控制系统的设计及其在实训教学楼中的应用 [J]. 中国高新技术企业, 2009(15): 53-55.
- [4] 杨甜甜,郭涛,陈展,等. 温度传感器的应用研究 [J]. 内江科技, 2020(3): 38-42.
- [5] 叶楠. 利用多种教学手段优化传感器课程教学 [J]. 电气电子教学学报, 2020(1): 87-90.

作者简介: 周峰(1986-),男,汉族,甘肃兰州人,本科,工程师,研究方向:电力电子设备检修。

