

非接触式温度测量的理论和应用

Walter Glockmann, Capintec Instruments, Inc.

对于小尺寸、不断运动或者无法接近的物体、对于要求快速响应的动态过程,以及对于温度小于1000°C (1832°F)的应用,非接触式温度测量是首选技术。要为具体应用选择最适合的非接触式温度测量设备,重要的是要了解温度测量技术的基础知识、温度测量参数以及当前市售的各种测量系统的特点。

定义术语

温度。温度是物质中振动的原子和分子具有的动能的一种表现形式。动能可以通过各种间接现象来衡量:例如,体积或压力的变化、电阻、电磁力、电子表面电荷或者电磁辐射的发射。最常用的温标是摄氏温标和华氏温标,它们分别把水的凝固点与沸点之间的差值分成100°和180°。

热力学温标以绝对零度或开氏0度为起始温度,在此温度下,所有原子停止振动并且不会消耗任何动能。

$$0\text{ K} = -273.15^\circ\text{C} = -459.67^\circ\text{F}$$

红外线辐射。红外线是电磁波光谱中人眼可见光(蓝色到红色,0.4 ~ 0.75 μm)以外的一部分光谱。红外线波长为0.75 μm ~ 1000 μm,微波波长(雷达波)是该范围的起始波长。由于红外线辐射主要由热量产生,因此称它为热辐射。

对于辐射测温法,只有部分红外线光谱是重要的。该光谱通常划分为多个“大气窗区”,可提供穿透空气中水汽的最大无损透射:

0.7-1.3 μm; 1.4-1.8 μm; 2.0-2.5 μm; 3.2-4.3 μm; 4.8-5.3 μm; 8-14 μm

温度计。大多数众所周知的温度计(例如玻璃水银或玻璃酒精温度计、热电偶或者电阻式温度计)必须和温度源直接接触。它们的可用测量范围是-100°C ~ 1500°C。

辐射温度计。这种非接触式温度计通过截取并测量物体发射的热辐射来确定物体的表面温度。

发射率。该特性确定的是与相同温度的理想辐射体(黑体)发射的辐射量相比物体发射出的一部分辐射量。发射率部分程度上取决于材料类型及材料的表面状况,其变化范围从接近零(反射性极强的镜子)到几乎达到1(黑体模拟器)。发射率用来根据测量的亮度或光谱辐射强度计算物体的真实温度。由于物体

的发射率也会随波长变化,应该为具体应用选择其光谱响应与高发射区波段相符的辐射温度计。发射率值在多种材料和光谱带的资料中给出,或者也可以主要根据经验来确定发射率值。

亮度/单色高温计。这些设备测量并计算截取的热辐射的强度或亮度。强度或更加广泛地说光谱辐射在热辐射光谱的较窄波长带内测量。波长带的选择取决于温度范围以及待测量材料的类型。

最古老的亮度高温计通过将发光物体与红热的“隐灭式”灯丝比较,在波长为0.65 μm的可见光(红色)光谱内比较光学亮度。术语“单色”来源于用户看见的单个红色窄波长带。对于在红外线区测量温度比较敏感的仪器也叫做光谱辐射高温计或者光谱辐射温度计。

比值/双色高温计。这种辐射温度计以两种(或多种)不连续的波长为基础测量温度。不同波长中亮度的比值对应于可见光谱中的颜色。一直都在广泛使用两种明显不同的可见颜色(通常为红色和绿色)推断色温。最近,该术语拓宽了最初的使用范围,将红外线光谱中的波长包括在内。比值测量法的优势在于温度读数在很大程度上与发射率波动和/或瞄准通道遮蔽物无关。这项技术通常用来测量白炽温度(700°C, 1300°F)以上的温度,但也可以测量最低至200°C (400°F)的低温。

表1: 在线温度测量仪器

低温	高温
通用 0 ~ 500°C (30 ~ 1000°F) 8-14波段辐射温度计 <ul style="list-style-type: none"> • 热电堆探测器 • 光学分辨率: 4 mm目标 (测量距离比15:1) • 响应时间: 0.5秒 • 发射率调整 • 模拟输出 (mV/°C, mV/°F) 	通用 400 ~ 2000°C (750 ~ 3600°F) 窄光谱带辐射温度计(0.7-1.1 μm; 0.9-1.9 μm) <ul style="list-style-type: none"> • 固态光电探测器(硅、锗) • 光学分辨率: 1 mm目标 (测量距离比60:1) • 响应时间: 3秒 • 发射率调整 • 模拟输出 (mV/°C, mV/°F)
扩大的温度范围 -30°C ~ 800°C (-20°F ~ 1500°F) 高稳定性8 ~ 14 μm温度计 <ul style="list-style-type: none"> • 热电探测器 • 斩波器稳定化以便对环境温度快速变化进行补偿 • 光学分辨率: 直径3 mm (测量距离比30:1) • 响应时间: 50毫秒 • 4 ~ 20 mA模拟输出 	高稳定性/复杂应用 300 ~ 2500°C (600 ~ 4500°F) 窄光谱带辐射温度计 <ul style="list-style-type: none"> • 用于测量玻璃和/或穿透热气体(3.9 μm) • 用于测量玻璃表面(5.0 μm) • 用于测量燃烧气体(4.2、4.5、5.3 μm) • 热电探测器 • 斩波器稳定化 • 光学分辨率: 1 mm目标 (测量距离比100:1) • 响应时间: 30毫秒 • 4 ~ 20 mA模拟输出
高精度/复杂应用 50°C ~ 800°C (-60°F ~ 1500°F) 窄光谱带辐射温度计 <ul style="list-style-type: none"> • 用于测量具有CH吸收光谱带的塑料薄膜(3.4 μm; 6.8 μm) • 用于测量聚酯薄膜/碳氟薄膜(8.0 μm) • 用于测量薄玻璃和陶瓷(7.8 μm) • 光学分辨率: 直径1.5 mm (测量距离比100:1) 	高速、双色 150 ~ 2500°C (300 ~ 4500°F)窄光谱带(0.8/0.9 μm; 2.1/2.4 μm) <ul style="list-style-type: none"> • 很大程度上与发射率波动和/或瞄准通道上的干扰无关 • 对运动目标进行自动补偿 • 内部校准检查
可编程/高性能 -100°C ~ 2500°C (-150°F ~ 4500°F) 带有内置式信号调节和数字计算功能,可在2 μm与20 μm之间的宽带或窄带中进行光谱带选择 <ul style="list-style-type: none"> • 数字式RS232双向接口 • 最大值/最小值/差异/保持功能 • 可编程环境温度 • 可选择透过镜头瞄准、LED或激光 	

非接触式温度测量 (续)

测量参数

先进的光学和电子信号处理模块大幅扩展了非接触式温度测量的精度和性能。对于过程控制，可以使用标准化接口，以便提供针对具体应用进行优化的调节后信号输出。

辐射能量探测

发射率调整。温度读数的精度依靠根据目标发射率恰当地调整仪器。预设发射率值可供在线传感器使用，用来监测发射率恒定不变的目标。而测量发射率不断变化的材料时，需要进行精确并且可重复进行的发射率调整。

周围环境温度。目标的热辐射中总是包括目标区域的周围环境发射的杂散辐射以及目标表面反射的杂散辐射。在实践中，时常假定环境温度与传感器的温度相同。如果目标处于不同的热环境中（例如在加热炉内、在冷却室中或者在室外露天环境中），要获得精确的测量，调整必不可少。可将检测目标周围环境的单独传感器用于自动温度计算。

瞄准通道遮蔽物。瞄准通道中的气体、水蒸汽、灰尘及其它悬浮颗粒物可能会影响温度读数。利用红外线区域中的“大气窗体”可以显著减少测量误差。由于两条光通道受到同等程度的衰减，比值高温计通常不会受到瞄准通道遮蔽物的影响，并且信号色比保持不变。

环境温度漂移。由于其设计本质，环境温度变化对辐射温度计有着显著影响。为了确保高测量精度，需要对这种温度漂移进行精确的补偿。温度漂移规定为环境温度变化引起的误差，即误差/°C或误差/°F。

光学系统

光学器件。反射（镜子）和折射（透镜）光学器件在非接触式温度传感器中使用，用于分离并且限定来自被测量物体的辐射。

视场。视场(FOV)用立体角（度数）或弧度表示。视场(FOV)简化了每个工作距离处最小目标尺寸的计算。一种方便的度量方式是距离目标比，例如20:1，表示在测量距离为20英寸处最小目标尺寸为1英寸。

目标对焦。非接触式温度传感器中的光学器件通常是固定焦距型。如果目标区域小于仪器的入口光圈（透镜直径），则不需要在较长测量距离处对焦。

小目标。对于微小物体，可使用固定焦距近距光学器件，并且要指定最小目标尺寸。可以确定最小为0.5 mm的目标。

光纤。在受限空间或恶劣环境中，通过光纤可以将镜头组件与探测器和信号处理电路隔开。光纤的可用测量范围的起始温度是400°C (750°F)。最小目标区域如同上面定义的一样。

目标扫描。如果直接观测有困难或者不合实际情况，可使用反射面镜改变测量传感器的视角。摆镜用来让截取的辐射偏转并且扫描目标区域中预定的温度曲线。

一系列在目标上方的预设空间段内获取的扫描温度曲线可以显示为热像或者热相图。

瞄准目标。有多种光学瞄准技术用于非接触式温度传感器：

- 简单的准星-枪膛式枪械瞄准器
- 一体式或分体式探视器
- 透过镜头瞄准器
- 一体式或分体式光束标识器

信号处理

直接输出。非接触式传感器将截取的热辐射转换成与目标发射的光谱辐射强度成比例的电信号。

线性化输出。电子网络将热辐射信号转换成与温度成比例的电流/电压。

采样和保持。由外部触发器选择的瞬间温度读数将一直保持（冻结），直到为下一个采样周期中的新值所取代。

最大值或峰值保持。显示在特定测量周期内最高的温度读数。复位由外部信号触发。

最小值或谷值保持。显示在特定测量周期内最低的温度读数。复位由外部信号触发。

峰峰值。显示在特定测量周期内最高温度读数与最低温度读数之间的差值。

响应速度。要监控快速变化的动态温度过程，需要较短的响应时间。较长响应时间集成特定测量周期内所有信号变化，并提高了温度分辨率，以便对变化的值求平均值或者提高测量精度。

自动触发器（波动功能）。探测并显示最高温度读数。当信号达到可调节阈值时，将自动触发复位，但是上一个峰值将一直显示直到被下一个峰值替代。该技术适合对间歇性目标值进行快速的采样和分析，无需使用外部触发器信号。

报警。当信号达到预设温度值时，输出信号（继电器）激活。一般情况下，提供两个独立的设定值HI/LO。

配件

水冷护套。水冷将传感器的环境温度范围扩大到高达400°C (752°F)或更高。

表2：在线温度测量仪器

低温	
通用 0 ~ 500°C (30 ~ 1000°F) 8-14 μm宽带 <ul style="list-style-type: none"> • 热电堆探测器 • 光学分辨率：直径4 mm (测量距离比15:1) • 发射率调整 • 最大/最小值 	扩大的温度范围 -50 ~ 1400°C (-60 ~ 2550°F) 8-14μm 带内置信号调节功能 <ul style="list-style-type: none"> • 光学分辨率：32 mm目标 (测量距离比30:1) • 数据采集 • 峰值/谷值/平均值功能 • RS232数字输出
高稳定性 -30 ~ 800°C (-30 ~ 1500°F) 8-14 μm <ul style="list-style-type: none"> • 热电探测器 • 斩波器稳定化 • 可选择光学器件 	微型探头 -50 ~ 500°C (-60 ~ 1000°F) 8-14 μm 带用于长距离应用或小目标应用的可互换探头 <ul style="list-style-type: none"> • 大型LCD信息显示屏 • 最大值/最小值/差异/保持信号调节 • 光学分辨率：直径2.5 mm (测量距离比7:1) • LED或激光辅助目标瞄准
高温	
通用 250 ~ 2500°C (500 ~ 4500°F) 窄光谱带辐射辐射温度计 (0.65 μm; 0.7-1.1 μm; 0.9-1.9 μm) <ul style="list-style-type: none"> • 固态光电探测器 (硅、锗) • 光学分辨率：0.9 mm目标 (250:1 测量距离比250:1) 	高精度、双色比值高温计 650 ~ 2500°C (1200 ~ 4500°F) 光谱带0.8/0.9 μm <ul style="list-style-type: none"> • 很大程度上与发射率波动和/或瞄准通道上的障碍物无关 • 对运动目标进行自动补偿

空气净化接头。带压缩空气接头的透镜筒和透镜配件设计成可将洁净的空气流对准整个透镜表面。它们可以让光学瞄准通道上始终没有蒸汽、烟雾和灰尘。

黑体校准器。

在均匀分布的温度中控制的深空腔可以作为黑体模拟器，用来校准辐射温度计。为了适应多种仪器，它们提供了1英寸（25 mm）的有效光圈，并且针对其工作温度范围进行了优化：

- 搅动型水浴槽：30-100°C (86-212°F)
- 铝芯：50-400°C (122-752°F)
- 不锈钢芯：350-1000°C (662-1832°F)
- 便携式电池供电现场校准器：固定温度，可在40°C ~ 100°C (104 ~ 212°F)范围内选择

选择在线式还是便携式？

在线仪器。这些设备通常用于不间断的过程监测和控制。有低温和高温型号，每种型号都有自己的工作规格（参见表1）。

便携式仪器。便携式设备一般更加适合过程检查、预防/预知保养、热辐射测量、研发以及临时温度监控。低温款和高温款在性能上有差别，如表2中所示。

应用

表3中总结了在线式和便携式非接触式温度测量仪器的成功应用案例。

经

Capintec, Inc.许可转载

表3：过程控制中的温度测量。

成功应用	在线式			便携式		
	R	H	L	R	H	L
水泥窑 烧制区、预热器	X	X		X	X	
节能 隔热和热流研究、热测绘			X			X
灯丝 退火、回火、热处理	X			X		
食品 烘焙、糖果-巧克力加工、罐头生产、冷冻 煎炸、混合、包装、烘烤			X			X
熔炉 火焰、锅炉管、催化裂化器	X	X		X	X	
玻璃 回火、生产/加工灯泡、容器、 电视显像管、玻璃纤维	X	X	X	X	X	X
维护 器械、轴承、电流过载、驱动轴 隔热、电源线、热泄漏探测			X			X
金属（含铁的和不含铁的） 退火、坯料挤压、渗碳、铸造、锻造、 热处理、感应加热、轧制/钢带轧机、 烧结、冶炼	X	X		X	X	
质量控制 印刷电路板、钎焊、万向节、焊接、 计量学	X	X	X	X	X	X
油漆 固化、烘干			X			
纸张 喷涂、油墨烘干、印刷 照相乳胶、全幅质量			X			X
塑料 吹塑、RIM、薄膜挤压、 片材热成型、铸塑			X			X
远程感应（热测绘） 云层、地球表面、湖、河、道路、火山研究			X	X		X
橡胶 混炼、铸造、成型、型材挤压 轮胎、乳胶手套			X			X
硅 晶体生长、硅丝/纤维、晶片退火、 外延淀积	X		X	X		X
纺织品 定型、烘干、纤维、纺纱			X			X
真空室 精炼、加工、沉积	X			X		

R=比值/双色 H=高温 L=低温