

红外线温度测量的理论和应用

作者和演示人：John Merchant, Mikron Instrument Company Inc. 销售经理

摘要

在非接触式温度测量中使用的红外线温度计是发展成熟的传感器，它们在工业加工与研究中应用广泛。本文以非数学化的语言介绍了这种测量技术的核心理论，以及如何应用该理论处理目标用户遇到的各种各样的应用参数

引言

红外线温度计通过探测所有温度在绝对零度（开氏0°）以上的材料发射的红外线能量来测量温度。最基本的设计包括将透镜和探测器，透镜将红外线(IR)能量聚焦到探测器上，而探测器将该能量转换成电信号，并经过对环境温度变化进行补偿后以温度单位显示。这种结构方便了无需与被测量物体接触的远距离温度测量。因此，在由于各种原因热电偶或其它探头类传感器无法使用或者不能产生精确数据的情况下，可以使用红外线温度计来测量温度。常见的这类情况如下：待测量物体在运动；物体周围是电磁场（例如在感应加热中）；物体在真空或其它受控气氛中；需要快速响应的应用。

自从19世纪末红外线温度计(IRT)的设计就已经存在，费氏的各种概念由Charles A. Darling(1)在其1911年出版的书“测高温学”中进行了论述。

然而，将这些概念转变成实用测量仪器的技术直到20世纪30年代才出现。自此，这种设计有了长足的发展，大量测量和应用专门技术应运而生。如今，这项技术已经得到普遍接受，并且在工业与研究广泛使用。

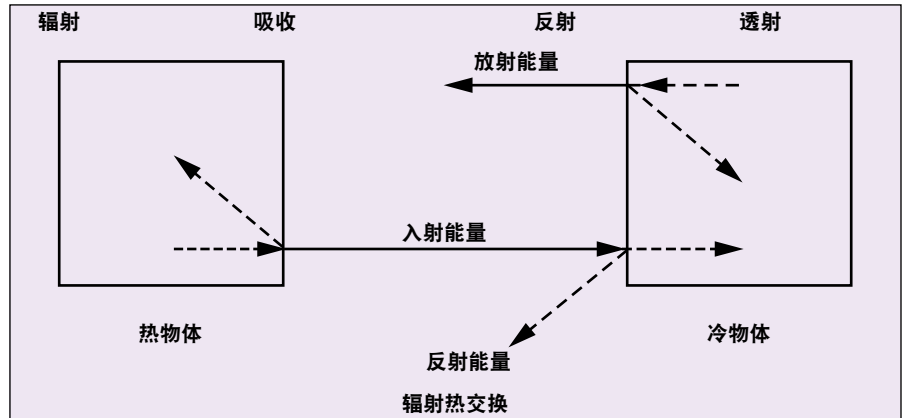


图2

测量原理

如前所述，红外线能量是由所有温度高于0°K的材料发射的。红外线辐射是电磁波频谱的一部分，其频率在可见光与无线电波之间。光谱中红外线部分的波长在0.7微米~1000微米(micron)之间。图1。在此波段内，只有波长在0.7微米~20微米的频率用于实际的日常温度测量。这是因为目前工业中使用的红外线探测器灵敏度不足，无法检测到20微米以外波长上的极少量能量。

虽然人眼看不到红外线辐射，但是在研究测量理论以及考虑应用时想像可以看见红外线辐射是有帮助的，因为在许多方面，红外线的表现与可见光一样。辐射源放射的红外线能量沿直线传播，可被传播路径上材料的表面反射和吸收。对于人眼无法看透的大多数固体，碰到物体表面的一部分红外线能量将被吸收，一部分将被反射。在物体吸收的能量中，一部分将被再次发射出来，一部分将在内部反射。眼睛能看透的透明材

料也是如此，例如玻璃、气体以及透明的薄塑料等。但是，此外，一些红外线能量将穿透物体。上述内容如图2所示。这些现象综合起来构成了所谓的物体或材料的反射率。

既不反射也不透射任何红外线能量的材料称为黑体，我们知道自然界中不存在黑体。然而，在进行理论计算时，给真正黑体赋予值1.0。在现实中，最接近黑体发射率1.0的近似值可以在图3中所示的、带有小管状入口并且红外线无法透过的球形空腔中得到。这种球体内表面的发射率为0.998。

不同种类的材料与气体有着不同的发射率，因此将在给定温度发射出不同强度的红外线。材料或气体的发射率是其分子结构和表面特性的函数。一般而言，发射率并不是颜色的函数，除非颜色来源与材料主体是放射性不同的物质。包含大量铝的金属漆可以作为一个实例来说明这一点。大部分漆的发射率与颜色无关，但是铝的发射率却大不相同，因此其发射率将改变金属漆的发射率。

如同可见光的情况一样，一些表面的抛光程度越高，表面反射的红外线能量越多。因此，材料的表面特性也会影响其发射率。在温度测量中，对于发射率本身较低的红外线无法透过的材料，这一点最为重要。因而，抛光程度很高的一块不锈钢与同一块粗糙加工表面的不锈钢相比，发射率要低得多。这是因为加工形成的沟槽阻止了更多的红外线能量被反射。除了分子结构和表面状况外，影响材料或气体的表现发射率的第三个因素是传感器的波长灵敏度，又称为传

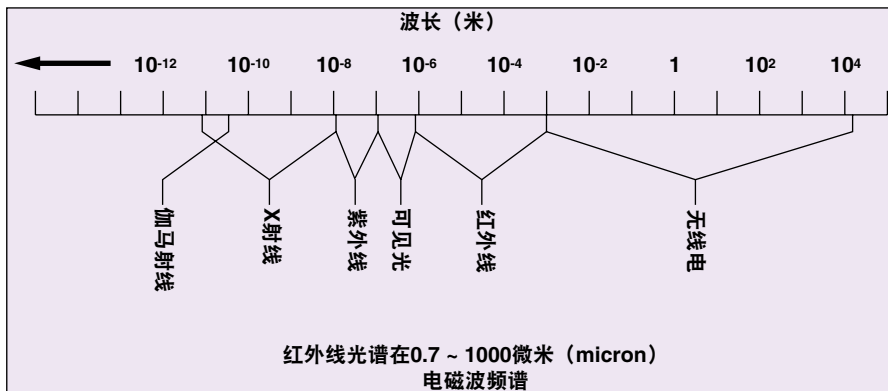


图1

红外线测温 (续)

传感器的光谱响应。如前所述,只有波长在0.7微米到20微米之间的红外线才在实际测温中使用。在这一整个波段内,个体传感器可能仅在较窄的一部分波段内工作,例如0.78~1.06微米或者4.8~5.2微米,原因将在后面解释。

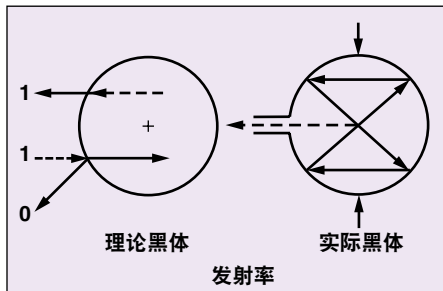


图3

红外线温度测量的理论基础

作为红外线温度测量基础的公式已经由来已久、确定无疑并且得到了充分论证。大多数IRT用户不大可能需要使用这些公式,但是了解这些公式就可以理解一些变量之间的相关性,可以解释前面的文字。下面是一些重要公式:

1. 基尔霍夫定律

物体达到热平衡时,吸收量将等于辐射量。

$$a = e$$

2. 斯蒂芬-玻尔兹曼定律

越热的物体放射出的红外线能量越多。

$$W = \epsilon_0 T^4$$

3. 维恩位移定律

随着温度升高,放射出最多能量的波长将变得更短。

$$\lambda_{\max} = 2.89 \times 10^3 \mu\text{mK}/T$$

4. 普朗克方程式

描述光谱发射率、温度与辐射能量之间的关系。

$$W_\lambda = C_1 \epsilon_\lambda [\lambda^5 (\epsilon^{\lambda T} - 1)]^{-1}$$

红外线温度计的设计与结构

基本红外线温度计(IRT)的设计包括以下部分:汇聚目标放射出能量的透镜;将能量转换成电信号的探测器、让IRT校准与被测目标的发射特性相符的发射率调整部件;以及环境温度补偿电路,该电路确保环境变化造成的IRT内部温度变动不会传递到最终输出。多年以来,大多数市售IRT遵循着这一概念。尽管这些IRT非常耐用并且足以满足当时的要求,但它们的应用非常有限,并且回顾过去大部分情况,它们的测量也不尽如人意。图4中说明了这一概念。

现代IRT以这一概念为基础,但在技术方面更加复杂,从而拓宽了其应用范围。主要差别在于使用了多种多样的探测器;红外线信号的选择性滤光;探测器输出信号的线性化和放大;提供:4~20mA、0~10Vdc等标准的最终输出信号。图5为典型的现代IRT的示意图。

也许,红外线测温法最重大的进展是引入了接收红外线信号的选择性滤光,由于可以使用更加灵敏的探测器,以及更加稳定的信号放大器,选择性滤光成为可能。早期的IRT需要较宽的红外线光谱带以获得可用的探测器输出,而现代IRT通常使用波长仅为1微米的光谱响应。由于常常需要透过瞄准通道上的某种气体或其它干涉物,或者实际中常需要获得对气体或其它物质的测量值而较宽的红外线能量却测不到的,对选择性的窄光谱响应的需求就出现了。

选择性光谱响应的一些常见示例为波长8-14微米的波段,可避免长距离测量空气中的水分造成的干扰;用于测量某些薄膜塑料的7.9微米波长;3.86微米波长可避免火焰和燃烧气体中的二氧化碳(CO₂)和水(H₂O)蒸汽造成的干扰。选择较短波长

光谱响应还是选择较长波长光谱响应,还要由温度范围决定,因为,如普朗克方程式所示,随着温度升高,峰值能量会移向较短波长。图6中的图形说明了这一现象。由于上述原因不需要选择性滤光的应用可能往往受益于尽可能接近0.7微米的窄光谱响应。这是因为材料的有效发射率在较短波长处最大,并且光谱响应窄的传感器的精度受目标表面发射率变化的影响更小。

根据上述信息,显而易见,在红外线温度测量中发射率是一个极其重要的因素。除非被测材料的发射率已知并且纳入到测量中,否则获得精确数据的可能性不大。以下是两种获得材料发射率的方法:a)参考公布的表格,以及b)将IRT测量值与使用热电偶或电阻式温度计同时测量所得的测量值进行比较,并调整发射率设置直到IRT的读数相同。幸运的是,IRT厂商和一些研究组织提供的公开数据数量庞大,因此很少有必要进行试验。作为经验之谈,大多数不透明的非金属材料有着很高而且稳定的发射率(在0.85~9.0范围内),大多数未氧化金属材料有着中低发射率(在0.2~0.5范围内),但金、银和铝是例外,它们的发射率大约在0.02~0.04范围内,很难用IRT测量它们的温度。

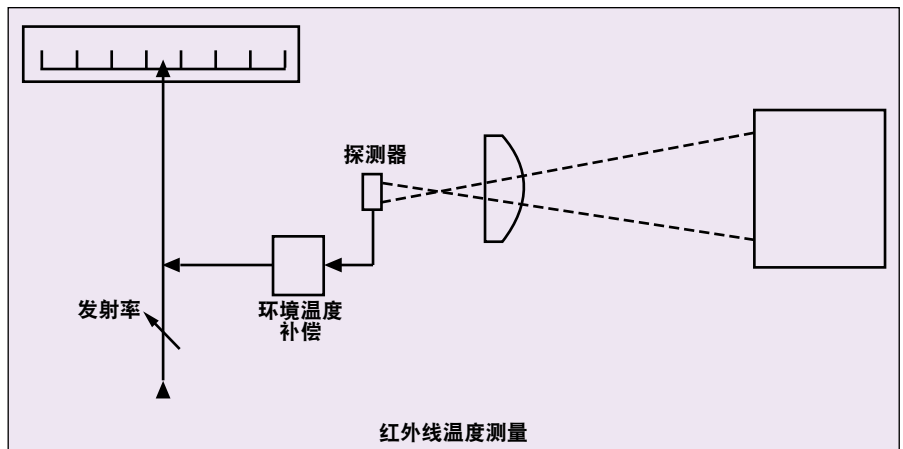


图4

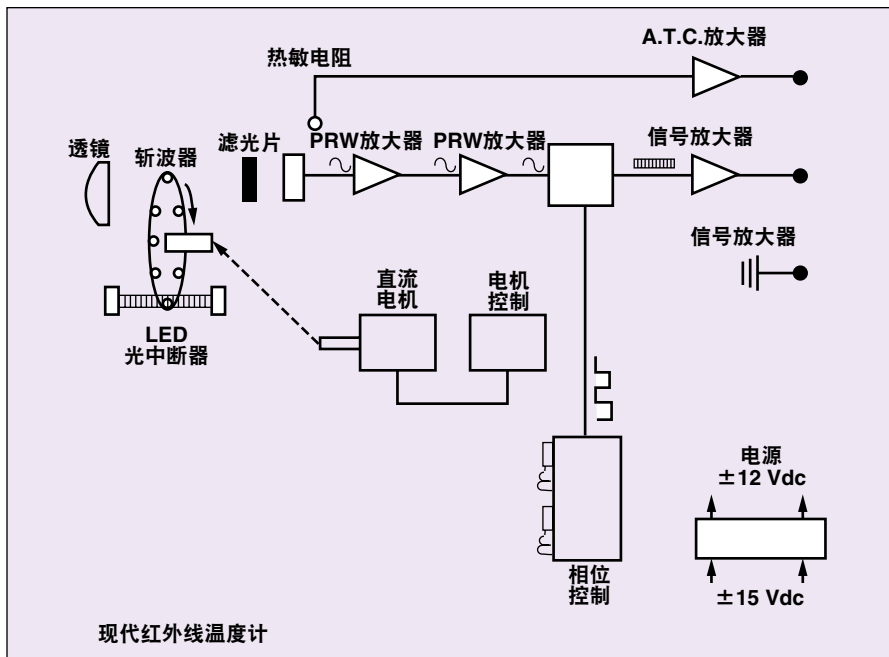


图5

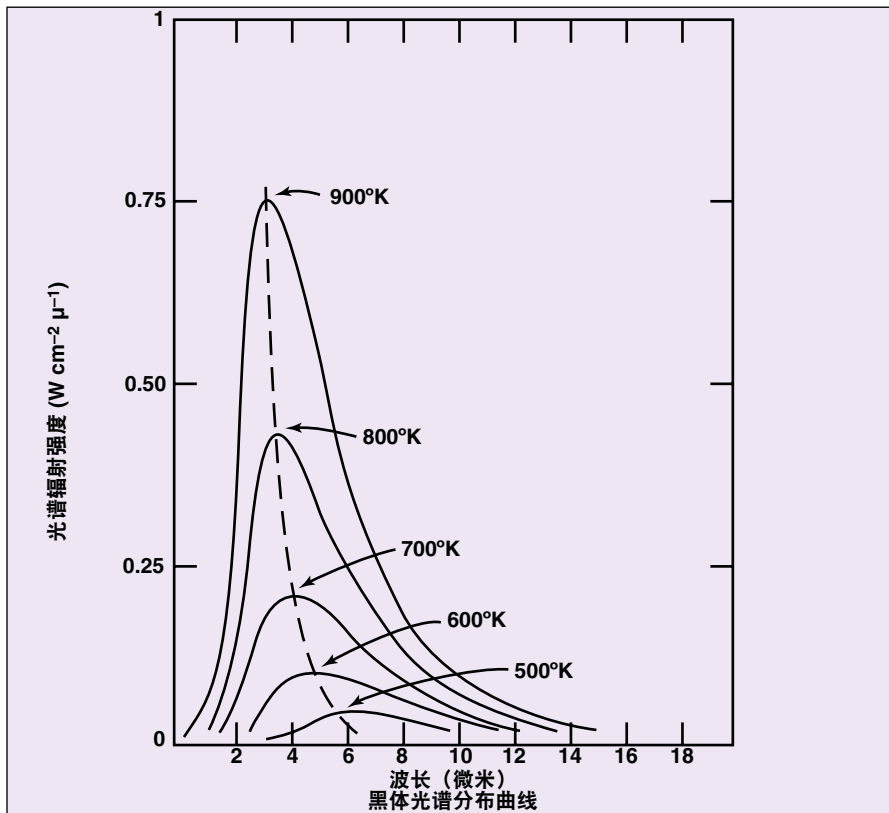


图6

尽管总是有可能确定被测量基本材料的发射率，但对于发射率随温度变化的材料（例如大部分金属）以及硅和高纯度

单晶体陶瓷等其它材料，情况会变得复杂。使用双色测温法可以解决存在这种现象的一些应用。

双色测温法

由于发射率在用红外线温度计提供精确的温度数据方面起着如此重要的作用，不断地尝试设计能够独立于该变量进行测量的传感器也就不足为奇了。这些设计中，最负盛名并且应用最为广泛的的就是双色温度计。该技术与到此为止介绍的红外线温度计没有什么不同，但它测量的是材料在不同波长放射的红外线能量的比值，而不是测量在一个波长或波段内放射的绝对能量。在此上下文中使用词组“颜色”有点儿过时，但是这种用法却仍未被取代。它源于将可见颜色与温度相关联的古老做法，因此有了“色温”的说法。

双色测温法行之有效的基础是两个探测器会把被测量材料表面发射特性的任何变化或者传感器与材料之间瞄准通道中发生的任何变化“看作”是相同的，因此比值以及传感器输出将不会因为这种变化而变动。图7中是简化的双色温度计示意图。

由于比值法在规定的环境下将避免由变化的或未知的发射率、瞄准通道中的遮蔽物以及测量未占满视场的物体而产生的不精确测量，它对解决一些应用难题非常有效。这些应用难题包括金属的快速感应加热、水泥窑烧制区温度以及通过逐渐模糊不清的窗口进行测量，例如金属的真空熔炼。但是应该注意，在用于计算比值的两个波长，传感器必须将这些动态变化“看作”相同，然而并非始终如此。在两个不同的波长，所有材料发射率的变化并不相同。发射率变化相同的材料称为“灰体”。发射率变化不同的称为“非灰体”。

并非所有形式的瞄准通道遮蔽物都会对计算比值的波长进行同样的衰减。如果瞄准通道中主要是与使用中的一个波长具有相同微米尺寸的颗粒物，将会显著扰乱比值。本质上为非动态的现象（例如材料的“非灰体性”）可以通过偏置该比值处理，这种调整称为“斜坡”。然而，合适的斜坡设置往往必须通过经验才能得到。尽管存在这些限制，比值法在许多由来已久的行业内行之有效，并且在其它行业中即使不是最受欢迎的解决方案，它也是最佳方法。

红外线测温 (续)

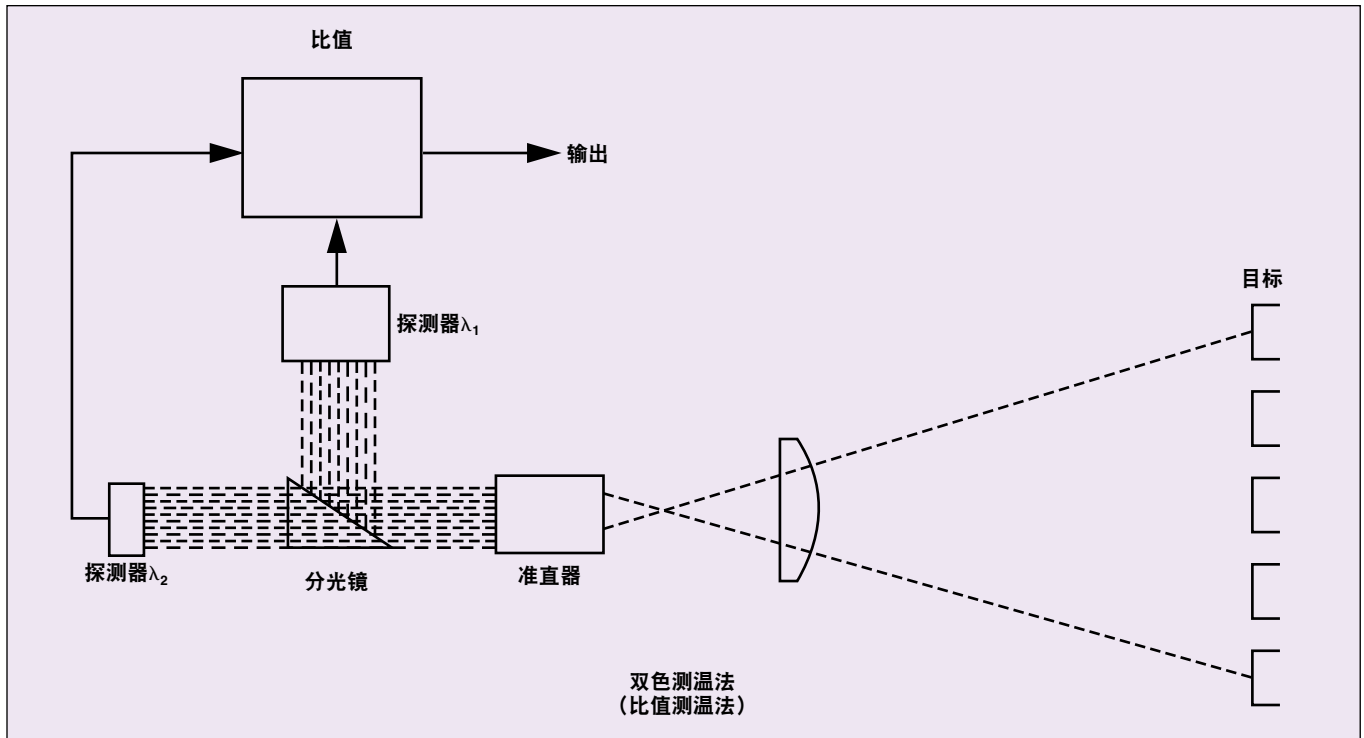


图7

总结

红外线测温法是一种成熟却又充满活力的技术，它赢得了很多行业和机构的尊重。对于许多温度测量应用，它是一种不可或缺的技术，而对于另一些应用，它也是首选方法。在用户充分了解该技术、所有相关应用参数都得到适当考虑后，如果设备得到仔细认真的安装，通常应用将取得成功。仔细认真的安装指的是，确保传感器在其规定的环境限值范围内工作，确保已经采取充分的措施保持光学器件洁净并且没有障碍物。在选型过程中考虑厂商时的一个因素应该是保护性附件及安装附件的供货能力，以及这些附件对快速拆卸和更换传感器以便进行保养的支持程度。如果遵循这些准则，在许多情况下，现代红外线温度计的工作可靠性将超出热电偶或电阻式温度计。

参考文献

1. Darling, Charles R.; "Pyrometry. A Practical Treatise on the Measurement of High Temperatures." Published by E.&F.N. Spon Ltd. London. 1911.

经作者

John Merchant,
MIKRON INSTRUMENT
COMPANY, INC. 公司的销售经理
许可转载。