

计量检定参考丛书

光电、红外、比色温度计 原理与检定

李吉林 等编
师克宽 审



中国计量出版社

计量检定参考丛书

光电、红外、比色温度计 原理与检定

李吉林 等编

师克宽 审

中国计量出版社

内 容 提 要

本书主要介绍辐射测温仪表——光电、红外、比色温度计的结构、工作原理、检定设备、检定方法以及有效发射率的理论与计算；此外，对我国现行生产辐射测温仪表主要厂家的产品技术性能也作了适当介绍。

可供从事高温计量、测试和检定工作的人员阅读，亦可作为温度计量人员的培训教材，对大专院校有关专业的师生也有参考价值。

计量检定参考丛书

光电、红外、比色温度计原理与检定

李吉林 等编

责任编辑 寒绪昕

—♦—

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲2号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

—♦—

开本 787×1092/32

印张 6.625 字数 125 千字

1990年10月第1版

1990年10月第1次印刷

印数 1—6 500

ISBN 7-5026-0341-7/TB·280

定价 3.70 元

前 言

为了正确理解和贯彻《工作用辐射温度计检定规程》，我处委托规程主要起草人李吉林同志编写了这本检定规程参考书。其中第一、三、四、五、七章由李吉林同志编写，第二、六章由褚载祥、孙毓星同志编写，师克宽教授主审。

本书是在全国《工作用辐射温度计检定规程》宣贯讲义的基础上几经修改编写而成，因而具有一定的实用性。本书可供广大温度计量人员参考。

国家技术监督局

计量司法规处

一九八九年三月

目 录

第一章 绪 论	(1)
第二章 辐射理论基础	(3)
2.1 热辐射	(3)
2.2 辐射能的分配和黑体模型	(7)
2.3 热辐射定律和发射率的概念	(11)
第三章 辐射温度计	(17)
3.1 辐射温度计的分类	(17)
3.2 全辐射温度计和部分辐射温度计	(19)
3.3 光反馈型光电温度计	(23)
3.4 非光调制型光电高温计	(40)
3.5 光电比色温度计	(47)
3.6 前置反射型辐射温度计	(57)
3.7 便携式红外辐射温度计	(62)
第四章 辐射温度计的检定	(71)
4.1 概述	(71)
4.2 技术条件	(71)
4.3 电测仪器的选用	(73)
4.4 检定设备	(75)
4.5 辅助设备	(79)
4.6 检定方法	(81)
4.7 检定结果的处理	(86)
4.8 检定结果的误差分析	(91)
4.9 高温黑体炉窗口温度修正值的测定	(95)

4.10 辐射测温仪检定系统	(插页)
第五章 黑体辐射源	(96)
5.1 高温黑体炉	(96)
5.2 中温黑体炉	(106)
第六章 黑体空腔的理论分析和计算方法	(112)
6.1 黑体空腔的辐射特性	(113)
6.2 空腔辐射理论简介	(117)
6.3 积分方程法	(125)
6.4 实际空腔计算	(137)
6.5 简要总结及展望	(141)
第七章 辐射温度计的发展概况	(143)
7.1 国内概况	(143)
7.2 国外概况	(145)
7.3 发展动态	(147)
附录	(151)
附录一 某些材料在 $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$ 时的单色发射率 ϵ_λ	(151)
附录二 某些材料在不同温度下的全发射率 ϵ	(152)
附录三 国产光电、红外、比色温度计的技术特性	(154)
附录四 国外光电、红外、比色温度计的技术特性	(163)

第一章 绪 论

辐射测温是以物体的辐射强度与温度成一定的函数关系为基础的，利用这种原理制成的各种形式的辐射温度计，当测温时只需把辐射温度计的探测器对准被测物体，即可测出被测物体的温度，这种测温方法称为非接触测温或间接测温。由于辐射温度计的探测器所接收的是辐射能量，所以探测元件自身就不必达到被测温度，其测温上限可以根据所选用的测温元件性质来决定。

利用辐射温度计测温有许多优点：如动态响应好、输出信号大、滞后时间短、精度高。利用辐射温度计测量物体表面温度时，由于不与被测物体接触，故不会破坏被测物体的温度分布；对远距目标、运动物体、带电物体及其他不可接触的被测目标，都可以使用辐射温度计进行非接触测量。由于它采用光电敏感元件，反映速度快，所以就不必象热电偶那样必须与被测物体达到热平衡，只要接收到辐射能，即可转换成温度值。

辐射能的传播速度是 $2.997\,925 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，红外辐射测温仪表的反映速度只取决于测温显示仪表的响应时间，这个时间一般在十分之几秒之内，对一般温度测量来讲，基本满足要求。

辐射测温仪表有很高的灵敏度，只要被测物体的温度稍有变化，显示仪表就能反映出来。还有一个优点就是测温范围宽，从零下几十度到几千度均可采用辐射温度计。

由于辐射温度计有许多优点，故在国防、航天、气象、医疗、冶金、机械、纺织、科研、计量等部门中得到广泛的应用。在国际实用温标中规定，从 $1\,064.43^{\circ}\text{C}$ 以上采用光学（光电）高温计作为标准仪器。

我国从 50 年代末期开始对辐射测温进行研究，到 70 年代中期形成热潮，当时以故障预测为中心，在铁路系统和电力系统进行了应用试验，全国其他行业也随之展开。尽管经历了许多挫折和失败，可是人们对它的期望和信心仍不断增长，到目前为止，全国从事这方面研究和生产的工厂、研究所和高等院校已达 40 余家，趋势仍在不断发展。

我国研究辐射测温的技术力量主要集中在北京、上海两地；其次是云南、江苏、湖北、辽宁、浙江、河北、四川、天津等地。如中国计量科学研究院研制了光电比较仪，作为辐射测温的基准；中国计量测试研究院研制了采用反馈稳定的钨带灯作为光电温度计的计量标准；云南仪表厂和中国计量科学研究院联合研制了精密光电温度计替代了目测标准光学高温计；上海工业自动化仪表研究所研制了从 $-50\sim 3200^{\circ}\text{C}$ 系列黑体辐射源，为辐射温度计的标定创造了条件；哈尔滨工业大学在有效发射率的理论与计算方面，做了许多有益的研究工作，其他不一一列举。

第二章 辐射理论基础

2.1 热 辐 射

热辐射就是从一个辐射热源，不需经过任何媒介物，也不必实际接触物体，就能把热传递给其他物体，这种传热现象就称为热辐射。

人们在日常生活中所接触和感觉到的热辐射现象是很多的。冬天当你坐到火炉旁烤火或在外边晒太阳，就会感到温暖；而夏天又要用伞遮住阳光的照射。这些现象都是由于火炉和太阳的热量经过辐射过程传到人们身上的缘故。

热辐射是指能量从一切物体表面的连续发射，并以电磁波的形式表现出来。这种电磁波的产生是由于物体内部的带电粒子在原子和分子内振动的结果，它们是整个电磁辐射波的一部分，热辐射电磁波由波长相差很大的红外线、可见光以及紫外线所组成。它们的波长范围从 10^{-3}m ~ 10^{-8}m ，而可见光谱仅是其中的很小一部分，约在 $0.38\mu\text{m}$ 与 $0.78\mu\text{m}$ 之间，比 $0.38\mu\text{m}$ 更短的一段波长的辐射属紫外辐射，而比 $0.78\mu\text{m}$ 更长的一段波长辐射是红外辐射。在可见光谱范围内，不同波长会引起人眼的不同颜色感觉， 700nm 呈红色、 510nm 呈黄色、 470nm 呈蓝色，关于电磁辐射波与可见光的波长分布见图 2-1 所示。

应该指出，并不是只有灼热物体才存在热辐射，严格地讲，在任意温度下（高于绝对零度时）物体都存在热辐射，

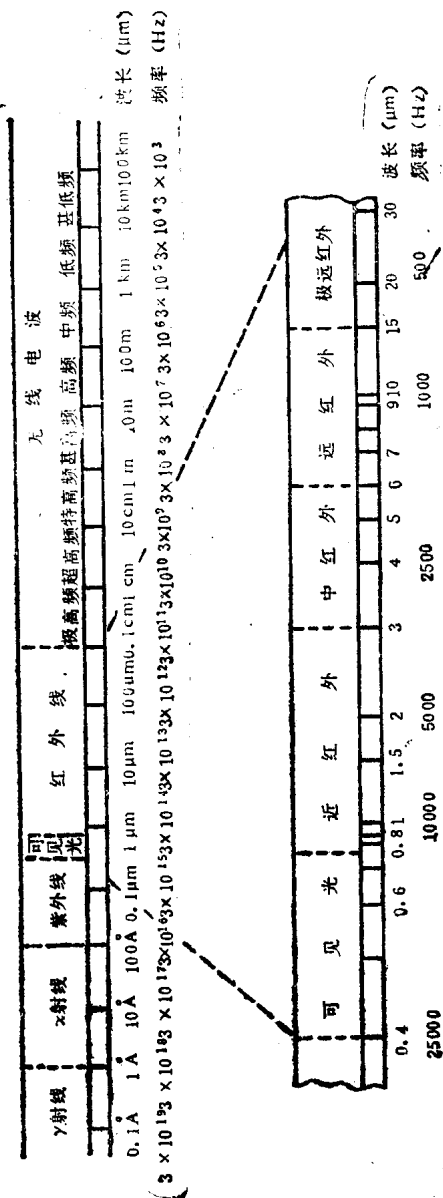


图 2-1 电磁频谱

只是它们的辐射光谱范围不同而已。低温时，辐射能量非常小，而且主要是发射波长较长的红外线，随着温度的升高，辐射能量急剧增加，辐射光谱逐渐地往短波方向移动，例如：当物体的温度升至700℃时，其辐射光谱才开始包括可见光谱的红色部分，而绝大多数仍为红外辐射，到800℃时，可见光谱的红色成分大大增加，即呈现出“红热”，而加热到3000℃时，辐射光谱就包括更多的短波成分，使得物体呈现出“白热”。因此，有经验的工作人员能从观察灼热物体的“颜色”来大致判断物体的温度。当然，这样的判断是相当粗糙的，准确地确定物体的热辐射和温度之间的定量关系，是辐射测温的重要内容。

常用的热辐射参数简述如下

2.1.1 辐射能量

由辐射源发出的全部辐射光谱（包括红外线、可见光、紫外线）的总能量称为该辐射源的辐射能量，符号为 Q ，单位为焦耳（J）。

2.1.2 辐射通量

在单位时间内，通过某一面积的辐射能量称为该面积的辐射通量。辐射源在单位时间内发出的辐射能量叫做该辐射源的辐射通量。因此，辐射通量是辐射能量随时间的变化率，符号为 ϕ ，单位为瓦特，即：

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \quad (2-1)$$

式中： ϕ ——辐射通量；

Q ——辐射能量。

辐射通量又称辐射功率，它的单位与功率的单位相同（J/s）或瓦特（W）。

2.1.3 辐射强度

辐射源在某一特定方向上的辐射强度是指辐射源在包括该方向在内的单位立体角内所发出的辐射通量，符号为 I ，单位为瓦特每球面度。

辐射强度在数值上等于单位立体角内的辐射通量。

2.1.4 辐射出度和辐照度

一个有一定面积的辐射源，如果其表面上的一块面积 (S) 在各方向上 (在半个空间内) 的总的辐射通量为 Φ ，则该辐射面 S 的辐射出度为：

$$M = \frac{\Phi}{S} \quad (2-2)$$

式中： M ——辐射出度；

Φ ——辐射通量；

S ——辐射面积。

辐射源的辐射出度在数值上等于辐射源单位表面积上所发出的辐射通量，辐射出度的单位以 W/m^2 表示。

与辐射出度相对应的辐射量是辐照度，辐照度是指其他辐射源入射到物体单位面积上的辐射通量。物体的辐照度愈大，其辐射出度也愈大，它们之间存在下列关系：

$$M = KE \quad (2-3)$$

式中： M ——辐射出度；

K ——散射 (或反射) 系数，对一切物体， K 均小于 1；

E ——辐照度 (单位 W/m^2)。

2.1.5 辐射亮度和单色辐射亮度

辐射亮度为单位投影面积和单位立体角内的辐射通量。在辐射亮度均匀的情况下，给定方向上的辐射强度与该方向

同法线方向之间夹角的余弦成正比,这就是郎伯特(Lambert)余弦定律。

郎伯特余弦定律可以这样表述:黑色表面或完全漫反射表面,从表面的给定面积发出的任意方向的辐射强度,随着该方向与表面法线夹角的余弦而发生变化,满足郎伯特余弦定律的辐射源称为余弦辐射体。余弦辐射体在各个方向上的辐射亮度相等,而辐射强度则存在余弦关系,这就解释了为什么白炽的球体看上去象是平面的圆盘和长条,余弦辐射体的辐射出度在数值上等于辐射亮度的 π 倍。

辐射亮度实际上是包括所有波长的辐射能量,为了研究单一段波长 λ 下的辐射亮度,必须引入单色辐射亮度的概念。

若在辐射光谱中的某一波长附近的单位波长间隔内存在辐射亮度,则该辐射亮度被称为在此波长下的单色(光谱)辐射亮度。

单色辐射亮度的定义为辐射体在某一特定方向上、在单位时间和单位波长间隔以及单位投影面积、单位立体角内所发出的辐射能量。单位辐射亮度是一个最基本的辐射度量。

2.2 辐射能的分配和黑体模型

一般说来,热辐射遵循可见光的传播规律,当热射线投射到物体表面时,物体将该能量进行吸收、反射和透过。假设落在该物体上的热辐射总能量为 Q ,其中一部分将被吸收(以 Q_a 表示),一部分被反射(以 Q_r 表示),另一部分可能

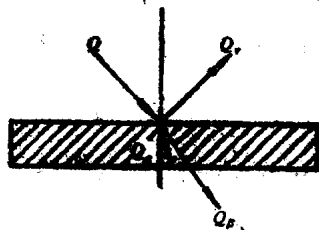


图 2-2 辐射能的分配

被穿透 (以 Q_t 表示), 如图 2-2 所示。

以公式表示, 则有

$$Q = Q_a + Q_r + Q_t, \quad (2-4)$$

或
$$\frac{Q_a}{Q} + \frac{Q_r}{Q} + \frac{Q_t}{Q} = 1$$

式中: $\frac{Q_a}{Q} = \alpha$ 称为吸收率, 表示物体吸收辐射能量所占的比率;

$\frac{Q_r}{Q} = r$ 称为反射率, 表示物体反射辐射能量所占的比率;

$\frac{Q_t}{Q} = \beta$ 称为透过率, 表示物体透过辐射能量所占的比率。

当 $\frac{Q_a}{Q} = 1$ 时, $\frac{Q_r}{Q} = 0$, $\frac{Q_t}{Q} = 0$, 说明辐射到物体上的辐射能量全部被物体吸收, 既无反射也无透过, 具有这种性质的物体, 称为“绝对黑体”或“黑体”。

当 $\frac{Q_r}{Q} = 1$ 时, $\frac{Q_a}{Q} = 0$, $\frac{Q_t}{Q} = 0$, 说明辐射到物体上的辐射能量全部被反射出去, 若物体表面平整光滑, 反射具有一定规律, 该物体称之为“镜体”; 若反射无一定规律, 则该物体称之为“绝对白体”。

当 $\frac{Q_t}{Q} = 1$ 时, $\frac{Q_a}{Q} = 0$, $\frac{Q_r}{Q} = 0$, 说明辐射到该物体上的辐射能量全部穿透过去了, 具有这种性质的物体, 称之为“透明体”。

在自然界中, 实际上的绝对黑体、绝对白体和绝对透明

体并不存在。物体的吸收率、反射率和透过率主要取决于物体本身的性质、表面状态和物体所处的温度等。

黑体、灰体和选择性辐射体的光谱辐射强度参见图 2-3, 光谱发射率参见图 2-4, 黑体光谱辐射分布特性参见图 2-8。

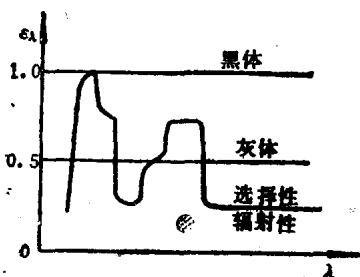


图 2-3 三类辐射物体的
光谱辐射强度

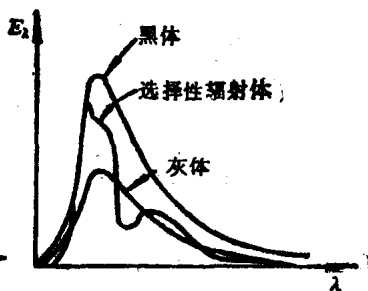


图 2-4 三类辐射物体的
光谱发射率

一般固体和液体的透过率比较小, 有的根本不透过, 气体的透过率较大。如果物体不是透明的, 则 $\frac{Q_t}{Q} = 0$, $\frac{Q_e}{Q} + \frac{Q_r}{Q} = 1$, 一般工程材料大多属于这一类型。

根据能量守恒定律, 应当满足

$$Q_e + Q_r = Q$$

上式两边同除以 Q , 得到

$$\alpha + r = 1 \quad (2-5)$$

式中: α ——吸收率;

r ——反射率。

同样可以定义某一波长 λ 下的光谱吸收率 α_λ 和光谱反

射率 r_1 ，它们亦满足式 2-5 所表达的关系。反射现象可以有两种理想的情况，如果反射角等于入射角，称为镜反射；若

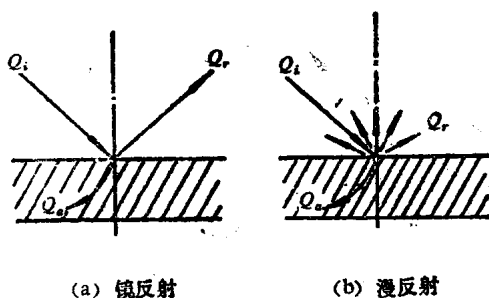


图 2-5 热辐射在物体表面的吸收和反射

反射线均匀分布在各个方向，则称为漫反射。对于多数工程材料，当表面比较粗糙，而且辐射波长不是很长时，可以视为漫反射。当表面比较光滑，而辐射多在中、远红外波段时，则应考虑到在漫反射之外尚存在部分镜反射，呈现一种漫镜反射混合的形态。纯镜反射表面一般是在光滑表面上镀以高反射率金属膜（如金、银、铝等）制成。

如果物体能够全部吸收投射在它表面的热辐射，即 α 或 α_1 恒等于 1，则称这样的物体为绝对黑体，简称黑体。

理想的黑体在自然界是不存在的，但可以用人工方法制造黑体的模拟物，这就是黑体空腔。黑体空腔模型可以用图 2-6 说明。空腔内壁由较“黑”的、即吸收率较大的材料制成，其面积远远大于开孔的面积。当射线经小孔射入空腔以后，经过多次反射和吸收，可以认为绝大多数被腔壁所吸收，只有极少部分能从小孔逸出。也就是说，作为腔口的小孔具有黑体的特征，这就是建立人工黑体模型的理论依据。

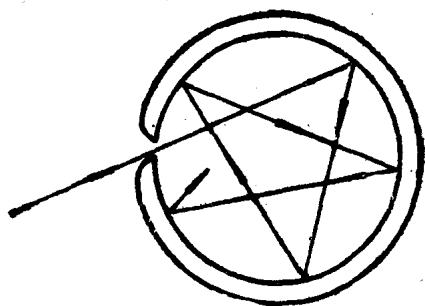


图 2-6 人工黑体模型

显然，上述模型无论从结构上还是机理上都显得粗糙，远不能满足作为标准源的要求。为了充分地描述、准确地分析和测算辐射源的特性，必须进一步研究有关热辐射的基本理论。

2.3 热辐射定律和发射率的概念

2.3.1 基尔霍夫 (Kirchhoff) 定律与热辐射的关系

热力学指出，倘若一个与外界绝热的封闭系统内有几个物体 (图2-7)，它们之间通过热辐射交换能量，经过一段时间以后总可以达到热平衡状态，即处于等温状态。显然，这时每个物体在单位时间内发出的能量必然等于它在同一时间内所吸收的能量，也就是说，吸收本领大的物体，其辐射本领也强。基尔霍夫进一步证明，

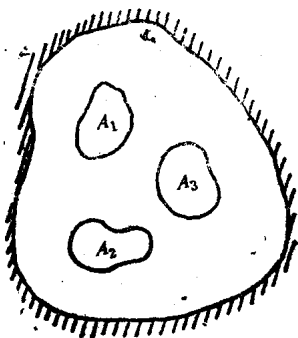


图 2-7 封闭系统示意图