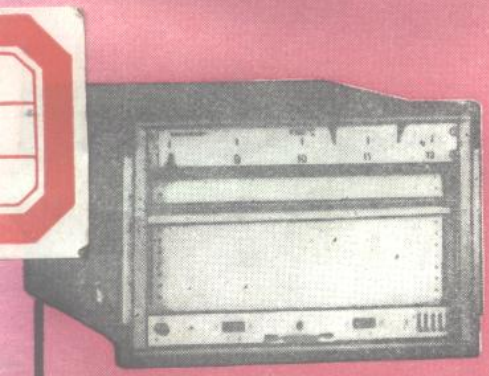
CHANGYONG FUSHE
CEWEN YIQI
JIQI JIANDING

崔志尚 等编著

常用辐射测温仪器及其检定



计 量 出 版 社

常用辐射测温仪器及其检定

崔志尚等 编著

计量出版社
1986 · 北京

内 容 提 要

本书对辐射测温理论和方法作了较为全面的介绍，特别是对目前常用的辐射测温仪器及其检定进行了系统的叙述与总结。此外，本书还对我国目前高温检定中实际存在的各级传递误差作了概述与说明。

本书主要供高温计量测试、检定人员阅读，对于高温计量研究人员以及高等院校有关专业的师生也有参考价值。

常用辐射测温仪器及其检定

崔志尚等　编著

责任编辑　吴全

计量出版社出版

（北京和平里11区7号）

煤炭部出版社印刷厂排版

河北省三河县中赵甫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行　　各地新华书店经售

开本787×1092 1/32　印张9 1/4

字数213千字　　印数 1—6000

1986年2月第一版　　1986年2月第一次印刷

统一书号 15210·479

定价2.20元

前　言

为了正确说明和贯彻现有的四个高温计量检定规程：《标准光学高温计检定规程》、《标准温度灯检定规程》、《工业用光学高温计检定规程》和《工业用辐射感温器检定规程》，我处委托规程主要起草人崔志尚、赵琪、李琪和李吉林四同志编写了这本检定参考书。其中第一、二、三、四、五、六、十、十一、十四章由崔志尚同志编写；第七、九章由赵琪同志编写；第八、十三章由李琪同志编写；第十二章由李吉林同志编写；最后由崔志尚同志统稿。

本书是在两次全国辐射测温学习班讲义基础上，几经修改编写而成的，因而具有一定的系统性和实用性。本书可供广大高温计量人员参考。

国家计量局法规处

一九八三年十一月

目　录

第一章　基本概念和定律……（1）

§1-1　热辐射……（1）

§1-2　辐射度量和朗伯特定律……（3）

§1-3　基尔霍夫定律……（11）

§1-4　黑体辐射和光谱发射率……（13）

第二章　绝对黑体辐射定律……（19）

§2-1　普朗克定律……（19）

§2-2　维恩位移定律……（22）

§2-3　斯忒藩-玻耳兹曼定律……（24）

第三章　假定温度……（27）

§3-1　概念的引入……（27）

§3-2　亮度温度……（28）

§3-3　辐射温度……（30）

§3-4　颜色温度……（32）

第四章　有效波长理论……（37）

§4-1　概念的引入……（37）

§4-2　有效波长和极限有效波长……（39）

§4-3　有效波长的应用……（44）

§4-4　有效波长的修正……（51）

§4-5　有效波长的计算……（62）

§4-6　有效波长的误差……（64）

第五章　辐射测温方法和仪器……（69）

§5-1　概述……（69）

§5-2　亮度测温方法和仪器……（70）

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

§5-3 全辐射测温方法和仪器…… (79)
§5-4 颜色测温方法和仪器…… (84)
第六章 光学高温计…… (88)
§6-1 结构原理…… (88)
§6-2 相对视见函数…… (90)
§6-3 光学系统…… (93)
§6-4 高温计灯泡…… (97)
§6-5 红色滤光片…… (102)
§6-6 吸收玻璃…… (106)
§6-7 电测系统…… (110)
第七章 温度灯…… (114)
§7-1 概述…… (114)
§7-2 结构原理…… (115)
§7-3 稳定度…… (119)
§7-4 复现性…… (122)
§7-5 温度灯的$\Delta T_s/\Delta\lambda$的确定…… (127)
第八章 辐射感温器…… (134)
§8-1 概述…… (134)
§8-2 工作原理…… (134)
§8-3 分类和结构…… (137)
§8-4 分度表…… (142)
第九章 基准复现…… (144)
§9-1 金凝固点以上温标的复现…… (144)
§9-2 基准光电高温比较仪…… (146)
§9-3 金点黑体和金凝固曲线…… (147)
§9-4 温标延伸方法…… (149)
§9-5 有效波长的测定…… (151)
第十章 标准光学高温计的检定…… (153)
§10-1 概述…… (153)

§10-2 技术要求……(154)
§10-3 检定设备……(156)
§10-4 检定方法……(160)
§10-5 检定结果的处理……(165)
第十一章 标准温度灯的检定……(173)
§11-1 概述……(173)
§11-2 技术要求……(174)
§11-3 检定设备……(178)
§11-4 检定方法……(183)
§11-5 检定结果的处理……(186)
第十二章 工业用光学高温计的检定……(190)
§12-1 概述……(190)
§12-2 技术条件……(191)
§12-3 检定设备……(195)
§12-4 检定方法和数据处理……(198)
§12-5 常见故障及其排除……(201)
第十三章 工业用辐射感温器的检定……(207)
§13-1 概述……(207)
§13-2 技术条件……(208)
§13-3 检定设备……(211)
§13-4 检定方法……(216)
§13-5 检定结果的处理……(220)
§13-6 检定中的有关问题……(226)
第十四章 高温检定的误差分析……(230)
§14-1 概述……(230)
§14-2 误差来源……(233)
§14-3 各级传递误差的分析……(249)
附表……(264)
后记……(287)

第一章　基本概念和定律

§1-1　热　辐　射

热力学定律指出：若两个系统各自与第三个系统处于热平衡，则它们之间也必然处于热平衡。由此可知，存在着一个描述相互之间处于热平衡的各系统所共有的热力学状态的特性，该特性就叫做“温度”。换言之，一个系统的温度决定了该系统是否与其它系统处于热平衡的条件。在两个乃至更多个系统处于热平衡时，可以说这些系统具有相同的温度。

热辐射是指系统处于热平衡状态下的辐射，因此也称为平衡辐射。在这种情况下，一个系统从周围物体所吸收的能量恰好补偿了由于自身辐射所减少的能量，即辐射过程达到平衡。此时，辐射物体可以用一个确定的温度加以描述。

当物体从外界得到的能量不足以补偿其全部辐射能时，那么该物体的一部分辐射能量要靠物体本身所贮藏的内能来提供。这时，物体内能的平衡分布将遭到破坏，从而导致物体的辐射不再处于平衡。但是，如果物体辐射的变化发生得如此缓慢，以致物体的内能还来得及达到其平衡分布，则辐射仍将具有平衡的特性。在这种情况下，尽管物体的温度会逐渐地缓慢地下降，但就每个瞬间而言，物体的辐射状态仍然可以被看作是处于平衡态的，因而仍可用一定的温度予以表征。这样的辐射状态叫做准辐射平衡态，而这样的辐射叫

做准平衡辐射。

实际受热物体的辐射绝大多数都近似地被当作准平衡辐射，因此，根据物体的热辐射进行温度测量是有意义的。但在某些化学反应过程中出现的发光现象，则不能认为是热辐射，温度对它们来说是没有意义的。

热辐射也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。热辐射只是整个电磁波的一个组成部分。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。它们的波长范围是10^{-3}～10^{-8}m，而可见光谱仅是其中很小一部分，约在380～780 nm之间。比380nm更短的一段波长的辐射属紫外辐射；而比780nm更长的一段波长的辐射是红外辐射。在可见光谱范围内，不同的波长会引起人眼不同的颜色感觉：700nm呈红色；580nm呈黄色；510nm呈绿色；而470nm则呈蓝色。关于电磁波与可见光的波长分布示于图1-1。

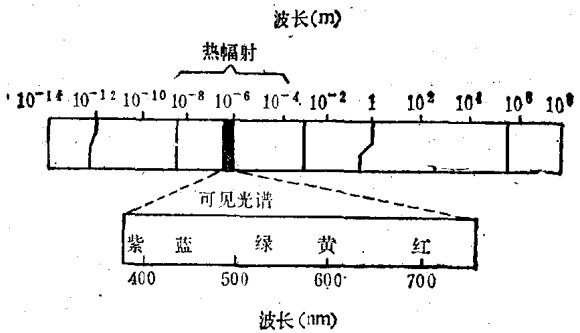


图 1-1 辐射频谱

应该指出，并不是只有灼热的物体才存在热辐射。严格

地讲，在任何温度下物体都存在热辐射，只是它们的辐射光谱范围不同罢了。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，同时辐射光谱逐渐地往短波方向移动。例如，当物体的温度升至500℃时，其辐射光谱才开始包括可见光谱的红光部分，而绝大多数仍为红外辐射；到800℃，红光成分大大增加，即呈现出“红热”；而加热到3000℃，辐射光谱就包含更多的短波成分，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，是辐射测温学的重要研究内容。

§ 1-2 辐射度量和朗伯特定律

在本书中将要用到一些有关热辐射的物理量，这里，先对这些物理量进行介绍。

1. 辐射能量Q

由辐射源发出的全部辐射光谱（包括红外线、可见光和紫外线）的总的能量称为该辐射源的辐射能量。该物理量不受时间、空间（或方向）、辐射源的表面积以及波长间隔的限制。辐射能量的单位是焦耳(J)。

2. 辐射通量Φ

在单位时间内通过某一面积的辐射能量，称为经过该面积的辐射通量；而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，即

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \tag{1-1}$$

辐射通量又称辐射功率或辐射能流，它的单位与功率的单位相同，即焦耳每秒（J/s）或瓦特（W）。

3. 辐射强度I

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。若一个点辐射源在无限小立体角 $d\omega$ 内的辐射通量是 $d\Phi$，则该点源在此方向上的辐射强度为

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \tag{1-2}$$

这就是说，辐射强度在数值上等于单位立体角内的辐射通量。

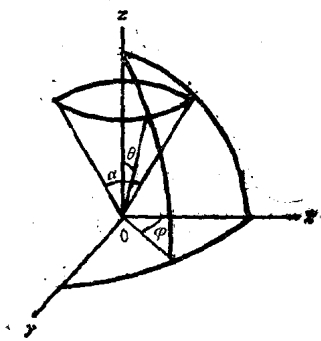


图 1-2 张角为α的锥体内辐射通量的计算

一般地说，辐射通量与强度随方向而变，这样，上式就变为

$$I(\varphi,\theta) = \frac{d\Phi(\varphi,\theta)}{d\omega} \tag{1-2}'$$

式中的φ和θ是极坐标（见图1-2）。

用极坐标表示无限小立体角$d\omega$，就有

$$d\omega = \sin\theta d\theta d\varphi$$

代入式（1-2）′得

$$d\Phi(\varphi,\theta) = I(\varphi,\theta)\sin\theta d\theta d\varphi \tag{1-3}$$

在一个有限立体角Ω范围内的辐射通量为

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

$$\Phi(\varphi,\theta)=\int_{\Omega} I(\varphi,\theta)\mathrm{d}\omega=\int_{\theta}\int_{\varphi} I(\varphi,\theta)\sin\theta\mathrm{d}\theta\mathrm{d}\varphi \quad (1\text{-}4)$$

式中的$\Phi(\varphi,\theta)$是指张角为α的圆锥体（立体角为Ω）范围内的辐射通量，见图1-2。

如点辐射源各向同性，辐射强度与方向无关，均为I，则式（1-4）就变为

$$\Phi=I\int_{\theta}\int_{\varphi}\sin\theta\mathrm{d}\theta\mathrm{d}\varphi=I\int_{0}^{2\pi}\mathrm{d}\varphi\int_{0}^{\alpha/2}\sin\theta\mathrm{d}\theta$$

$$=2\pi\left(1-\cos\frac{\alpha}{2}\right)I \quad (1\text{-}5)$$

把$1-\cos\frac{\alpha}{2}=2\sin^2\frac{\alpha}{4}$代入式（1-5）得

$$\Phi=4\pi I\sin^2\frac{\alpha}{4} \quad (1\text{-}5)'$$

考虑到整个空间，实际上$\alpha=2\pi$，把它代入式（1-5）′得

$$\Phi=4\pi I \quad (1\text{-}6)$$

由此可见，当辐射源向空间各个方向发出的辐射通量为均匀分布时，则沿任何方向的辐射强度都相同，即$I=\Phi/4\pi$。在辐射源各向异性的情况下，其辐射强度则随方向而变。此时，$I=\Phi/4\pi$表示辐射源的平均球面辐射强度。

辐射强度的单位是瓦特每球面度（W/sr）。

4. 辐射出度M和辐照度E

一个有一定表面积的辐射源，如其表面上的某一面积S在各个方向上（半个空间）的总的辐射通量为Φ，则该辐射面S的辐射出度为

$$M=\frac{\Phi}{S} \quad (1\text{-}7)$$

因而，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。它的单位是瓦特每平方米(W/m^2)。

一般说来，辐射源表面各处的辐射出度是不相同的，所以常取某一面积元来研究它的辐射出度。面元dS的辐射出度是指该面元在全部方向上（半个空间）所发出的辐射通量$d\Phi$与面元面积的比值，即

$$M=\frac{d\Phi}{dS} \tag{1-8}$$

与辐射出度相对应的物理量是辐照度，它是指周围其它辐射源入射到物体单位表面积上的辐射通量。依靠散射或反射其它辐射源的辐射而辐射的物体，其辐射出度取决于辐照度，物体的辐照度E愈大，其辐射出度M也就愈大。它们之间存在着下述依赖关系

$$M=kE \tag{1-9}$$

式中：k——物体表面的散射（或反射）系数。

对于一切实际物体，k均小于1。对具有不同散射（或反射）系数的物体来说，即使处于同一辐照度的条件下，它们的辐射出度也各不相同。

辐照度的单位与辐射出度的单位相同。

5. 辐射亮度L和单色辐射亮度L_λ

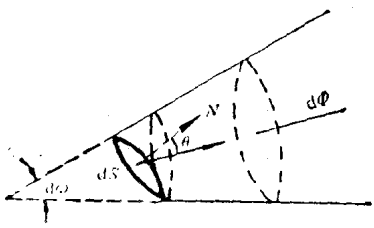


图 1-3 辐射亮度的确定

辐射源的表面元dS（见图1-3）在给定方向上的辐射亮度$L(\varphi,\theta)$是指该面元在此方向上的单位投影面积和单位立体角内的辐射通量。上述定义的数学表达式为

$$L(\varphi,\theta)=\frac{\mathrm{d}\Phi(\varphi,\theta)}{\mathrm{d}S\cos\theta\mathrm{d}\omega} \tag{1-10}$$

或

$$L(\varphi,\theta)=\frac{\mathrm{d}I(\varphi,\theta)}{\mathrm{d}S\cos\theta} \tag{1-11}$$

式（1-11）表明，面元$\mathrm{d}S$在给定方向上的辐射亮度就是该面元在该方向的单位投影面积内的辐射强度。辐射亮度的单位是瓦特每球面度平方米[$\mathrm{W/(sr\cdot m^2)}$]。

如辐射亮度不随方向变化而保持恒定（等于L），式(1-11)就变为

$$L=\frac{\mathrm{d}I(\theta)}{\mathrm{d}S\cos\theta}$$

则

$$\mathrm{d}I(\theta)=L\mathrm{d}S\cos\theta \tag{1-12}$$

在这种情况下，有限表面积S的辐射强度应为

$$I(\theta)=LS\cos\theta=I_0\cos\theta \tag{1-13}$$

式中：I_0——辐射源表面在法线方向上的辐射强度。

上式指出，在辐射源亮度均匀的情况下，一给定方向上的辐射强度与该方向同法线方向夹角的余弦成正比。这就是朗伯特（Lambert）余弦定律的表示式。此式对所有的"黑"表面或完全漫射的表面都成立，而对于其它表面的辐射，只是近似地成立。

朗伯特余弦定律可以这样表述："黑"表面或完全漫射表面是这样的一种表面，从表面一定面积上发出的任意方向上的辐射强度，是随着该方向与表面法线夹角的余弦而变化的。在这种条件下，单位投影面积的辐射强度是一个常量，因而无论从哪个方向观察这个表面，都会有相同的辐射

亮度。

满足朗伯特余弦定律的辐射源称为余弦辐射体，如图1-4所示。余弦辐射体在各个方向上的辐射亮度都相等，而辐射强度则存在余弦关系。这就解释了为什么白炽球体和圆柱体看上去好象是平面的圆盘和长条。对太阳来说，由于它不是一个完全的漫射体，所以对它的像进行精密的光度测量之后，发现其四周有暗边存在。

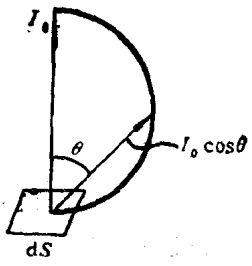


图 1-4 余弦辐射体

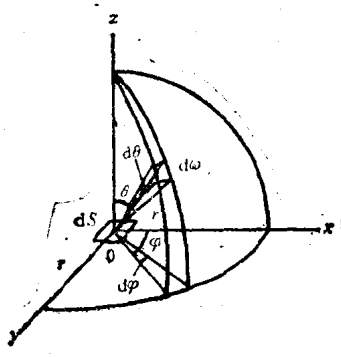


图 1-5 辐射通量的计算

现在来研究辐射亮度与辐射出度之间的关系。为此，研究面积元dS在各方向发出的辐射通量$d\Phi(\varphi,\theta)$（见图1-5）。根据辐射通量与强度的关系，就有

$$d\Phi(\varphi,\theta)=\int_{\theta}\int_{\varphi} dI(\varphi,\theta)\sin\theta\, d\theta\, d\varphi \qquad (1-14)$$

把 $dI(\varphi,\theta)=L(\varphi,\theta)dS\cos\theta$ 代入上式得

$$d\Phi(\varphi,\theta)=\int_{\theta}\int_{\varphi} L(\varphi,\theta)dS\sin\theta\cos\theta d\theta d\varphi \qquad (1-14)'$$

对于余弦辐射体来说，$L(\varphi,\theta)=L$，因而面元dS在半个空间内的辐射通量为

$$d\Phi = LdS\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \cos\theta \sin\theta \, d\theta = \pi L dS \quad (1\text{-}15)$$

由于$M = d\Phi/dS$，所以

$$M = \pi L \quad (1\text{-}16)$$

由式（1-16）可以得出如下结论：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在内的辐射能量。为了研究单一波长下的辐射亮度，必须引入单色辐射亮度的概念。

如在辐射光谱中的某一波长λ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。它的表示式为

$$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda} \quad (1\text{-}17)$$

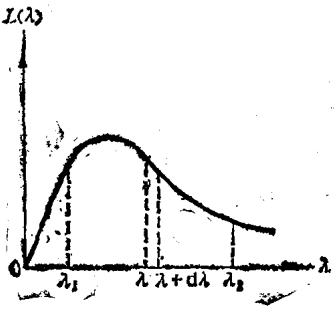


图 1-6 单色辐射亮度按波长分布

单色辐射亮度L_λ是波长的函数，其函数形式取决于辐射物体的性质以及发生辐射的条件。

如单色辐射亮度L_λ随波长λ的分布曲线如图1-6所示，则在λ到$\lambda + d\lambda$这一微小波长间隔内的辐射亮度为

$$dL_{\lambda;\ \lambda+d\lambda} = L_\lambda d\lambda \quad (1\text{-}18)$$

在λ_1到λ_2的有限波长间隔内的辐射亮度为

$$L_{\lambda_1,\lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda d\lambda \quad (1\text{-}19)$$

表 1-1 基本辐射度量的名称、符号、定义式、表示式和单位

基本辐射度量	定义式	用L_λ的表示式	单位
辐射能量 Q		$Q=\int\int\int\int L_\lambda\cos\theta\,d\omega dS d\lambda dt$	焦耳（J）
辐射通量 Φ	$\frac{dQ}{dt}$	$\Phi=\int\int\int L_\lambda\cos\theta\,d\omega dS d\lambda$	瓦特（W）
辐射强度 I	$\frac{d\Phi}{d\omega}$	$I=\int\int L_\lambda\cos\theta\,dS d\lambda$	瓦特每球面度（W/sr）
辐射出度 M（离开表面）	$\frac{d\Phi}{dS}=\int L\cos\theta\,d\omega$	$M=\int\int L_\lambda\cos\vartheta\,d\omega d\lambda$	瓦特每平方米（W/m²）
辐照度 E（入射表面）	$\frac{d\Phi}{dS}=\int L\cos\theta\,d\omega$	$E=\int\int L_\lambda\cos\theta d\omega d\lambda$	瓦特每平方米（W/m²）
辐射亮度 L	$\frac{dI}{dS\cos\theta}$	$L=\int L_\lambda d\lambda$	瓦特每球面度平方米〔W/(sr·m²)〕
单色辐射亮度 L_λ	$\frac{dL}{d\lambda}$	L_λ	瓦特每球面度立方米〔W/(sr·m³)〕

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com