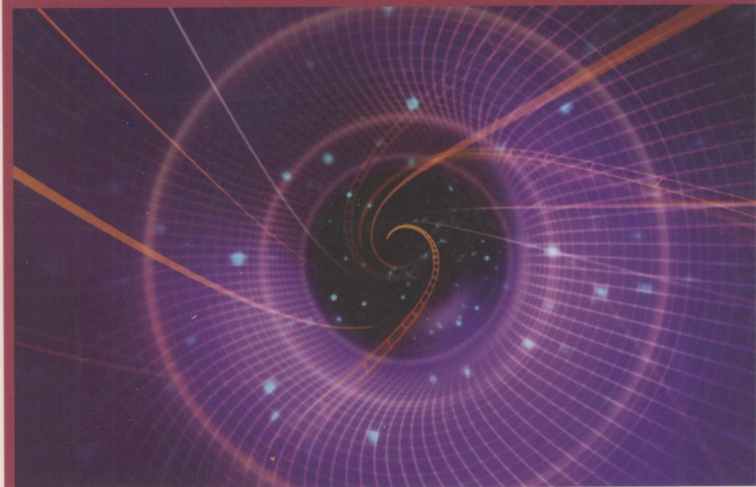


李吉林 肖功弼 俞伦鹏 编著



辐射测温 and 检定/校准技术

FUSHE CEWEN HE JIANDING
/JIAOZHUN JISHU



中国计量出版社

CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

辐射测温 and 检定 / 校准技术

李吉林 肖功弼 俞伦鹏 编著

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

辐射测温 and 检定、校准技术/李吉林, 肖功弼, 俞伦鹏编著. —北京: 中国计量出版社, 2009. 6

ISBN 978 - 7 - 5026 - 3008 - 9

I. 辐… II. ①李…②肖…③俞… III. 辐射感温器
IV. TH811. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 058815 号

内 容 提 要

本书主要介绍目前国内外先进的辐射测温仪表 (光电、红外、比色温度计) 的工作原理、结构、正确使用方法和检定、校准技术。对检定用辐射源“黑体”单立一章, 重点介绍高温黑体、中温黑体及低温面源的设计、检测方法, 详细介绍了发射率的理论与计算。

本书可供从事温度计量测试和检定人员阅读, 也可供大专院校相关专业的师生参考。

中国计量出版社出版
北京和平里西街甲 2 号
邮政编码 100013
电话 (010)64275360
<http://www.zgjl.com.cn>
三河市灵山红旗印刷厂
新华书店北京发行所发行
版权所有 不得翻印

*

850 mm×1168 mm 32 开本 印张 7.875 字数 195 千字
2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷

*

印数 1—2 000 定价: 22.00 元

编者的话

常用的辐射测温仪表被广泛地应用于生产和生活中，从冶金、机械、化工到石油、电力等科研各个领域，凡是有测温的地方，几乎都要应用辐射测温仪表。随着科学技术的飞速发展，自动化技术突飞猛进，辐射测温仪表的使用及检定技术也向前推进了一大步。

本书主要介绍目前国内外先进的辐射测温仪表（光电、红外、比色温度计）的工作原理、结构、正确使用方法和检定、校准技术。对检定用辐射源“黑体”单立一章，重点介绍高温黑体、中温黑体及低温面源的设计、检测方法，详细介绍了发射率的理论与计算。本书可供从事温度计量测试和检定人员阅读参考。

本书第一章由李吉林编写，第二章由肖功弼编写，第三章、第四章由俞伦鹏编写，全书由李吉林统稿。

由于编者水平所限，书中的错误及不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编者

2008年12月

目 录

第一章 辐射理论基础	1
第一节 概述	1
一、热辐射	2
二、常用参数	3
三、辐射能的分配	9
四、黑体空腔	10
第二节 黑体辐射定律	13
一、普朗克定律	13
二、维恩位移定律	16
三、斯忒藩-玻耳兹曼定律	19
四、基尔霍夫定律	20
第三节 表观温度与真实温度的关系	22
一、亮度温度和亮度法测温仪表	23
二、辐射温度和全辐射温度计	26
三、颜色温度和比色温度计	28
第四节 有效波长	30
一、有效波长的意义	30
二、有效波长	31
三、极限有效波长	33
四、有效波长的应用	34
第五节 实际物体的发射率	34
第二章 辐射温度计的工作原理、结构、技术指标和功能	
特点	43
第一节 辐射温度计的发展概况	43

第二节 辐射温度计的构成	49
一、光学系统	50
二、辐射探测器	55
三、信号处理装置	62
第三节 亮度温度计	63
一、标准辐射温度计	65
二、工业用辐射温度计介绍	70
第四节 全辐射温度计	73
一、辐射感温器的分类	76
二、辐射感温器的结构和主要技术性能	76
第五节 比色温度计和多波长温度计	82
一、比色温度计的基本结构和工作原理	87
二、WBH 型单通道比色温度计	87
三、双通道光电比色高温计	93
四、带微处理器的比色温度计	96
五、比色温度计专业标准	99
六、多波长温度计介绍	104
第六节 三种基本辐射测温方法比较	106
第七节 辐射温度计在工业现场应用中的问题	110
一、光路中的干扰	111
二、外来光的干扰	115
三、发射率变化产生的测量误差	118
第三章 黑体	123
第一节 黑体介绍	124
一、黑体的发展	124
二、黑体产品介绍	126
三、黑体的用途和选择	132
第二节 黑体发射率	133
一、黑体发射率的定义和基本定律	133
二、无等温腔或无等温段黑体炉发射率分析	138

三、黑体面源发射率分析·····	141
四、黑体发射率最新研究成果·····	142
第三节 黑体发射率的验证·····	171
一、直接测量·····	172
二、间接测量·····	172
第四节 国内黑体产品介绍·····	178
一、低温黑体·····	178
二、中温黑体·····	180
三、高温黑体·····	182
四、热管黑体·····	185
五、面源黑体·····	186
六、固定点黑体·····	186
第五节 国外黑体产品介绍·····	189
一、英国黑体·····	189
二、美国黑体·····	194
第六节 黑体的发展动态·····	198
第四章 辐射温度计的检定/校准·····	200
第一节 概述·····	200
一、国内检定现状·····	200
二、国外检定现状·····	201
三、检定设备状况·····	201
第二节 检定中应该注意的问题·····	202
一、黑体问题·····	202
二、聚焦问题·····	202
三、黑体发射率问题·····	209
四、被检辐射温度计固定测量发射率而不是1·····	211
五、面源黑体的问题·····	211
第三节 工作用辐射温度计检定系统框图·····	212
一、以接触式温度标准的系统建议框图·····	214
二、以非接触式温度标准的系统建议框图·····	216

三、以黑体为标准的系统框图(建议草案)	216
第四节 辐射温度计的检定装置	217
一、以接触式温度标准建立的装置	217
二、以非接触式温度标准建立的装置	224
三、以黑体为辐射温度标准建立的装置	229
第五节 热像仪的校准	233
一、装置的组成	233
二、校准方法	234
三、校准系统不确定度分析	234
第六节 辐射温度计检定的发展趋势	238
一、从黑体的发展方面	238
二、从标准光电高温计的发展方面	240
三、以接触式温度为标准方面	240
 参考文献	 242

第一章 辐射理论基础

第一节 概 述

热辐射温度计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型式的辐射温度计，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。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，故测温上限可以根据所选用的测温元件的性质来决定。这种测温方法称为非接触测温或间接测温，亦可称为辐射测温法。

例如，红外、光电、比色测温法及全辐射测温法等，这些都属于辐射测温法范围。它们都是以物体的热辐射测量为基础的。

在 19 世纪各国科学家致力于发现各种热辐射定律，如基尔霍夫 (Kirchhoff) 定律 (1859)、斯忒藩-玻耳兹曼 (Stefan-Boltzmann) 定律 (1879~1884)、维恩 (Wein) 位移定律 (1894)、普朗克 (Planck) 定律 (1900) 等。在 20 世纪，则主要是着重于应用。60 年前，辐射测温主要用于高温范围 (800°C 以上)，但随着红外技术的发展，它已逐步扩展到中温、常温甚至低温范围。由于电子技术在辐射测温方面的应用，快速测温与动态测量，毫秒级甚至微秒级的辐射温度计的问世，在工业生产、科学研究、国防事业等的进步和发展中起到了极大的推动作用。

辐射测温的主要优点：

(1) 从理论上讲，测温上限是没有限制的，因而可以测量相当高的温度。

(2) 辐射测温探测器不直接接触被测物体，因此，它不扰动

和不破坏被测物体的温场和热平衡，并具有较高的准确度。

(3) 探测器的动态响应好、滞后时间短、精度高，易于快速测量和动态测量。

(4) 在一定的条件下，可以实现连续测量、自动记录和自动控制。

辐射测温的主要缺点：

(1) 由于被测物体是非黑体，测得的是辐射温度而不是真实温度，其测值需要进行材料发射率的修正，而发射率是一个影响因素相当复杂的参数，使测温的数据处理难度较大。

(2) 辐射温度计测出的温度是被测物体的表面温度，当被测物体内部温度分布不均时，它不能测出物体的内部温度。

(3) 辐射测温原理相对复杂，温度计的结构要求各不相同，如比色温度计测值精度较高，接近真温，但价格较昂贵，因而不能被广泛使用。

(4) 由于是非接触测温，所以受客观环境中介质影响较大，特别是工业现场周围、环境恶劣(如烟雾、灰尘、水蒸气、二氧化碳等)对测量准确度有一定的影响。

一、热辐射

从一个辐射热源，没有经过任何媒介物，又没有实际接触，就把热传递给另外一个物体，这种传热现象称为热辐射。

人们在日常生活中的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运动的结果，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，其波长范围为 $10^{-3} \sim 10^{-8} \text{m}$ ；可见光谱仅是其中的很小

一部分，约在 $0.38\sim 0.78\mu\text{m}$ 之间；比 $0.38\mu\text{m}$ 更短的一段波长的辐射属紫外辐射；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，如 700nm 呈红色、 510nm 呈绿色、 470nm 呈蓝色。

电磁辐射波与可见光的波长分布如图 1-1 所示。

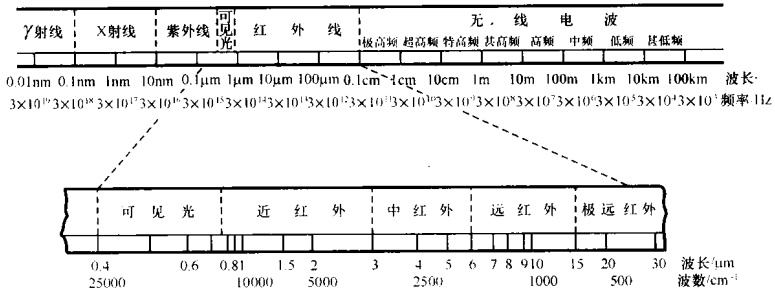


图 1-1 电磁频谱

严格地讲，在任意温度下物体都存在热辐射，并不是只有灼热物体才存在热辐射，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，同时辐射光谱渐渐地往短波方向移动。例如，当物体温度升至 500°C 时，其辐射光谱才开始包括可见光部分，而绝大多数仍为红外辐射；到 800°C 时，可见光成分大大增加，即呈现出“红热”；加热至 3000°C 时，辐射光谱就包含更多的短波成分，使得物体呈现“白热”。因此，有经验的工作人员能从观察物体的“颜色”来大致判断物体的温度，就是这个道理。当然，这样的判断是相当粗糙的，精确地决定物体的热辐射及其温度之间的定量关系是辐射测量的重要内容。

二、常用参数

1. 辐射能量 Q

由辐射源发出的全部辐射光谱的总的能量称为该辐射源的

辐射能量(包括紫外线、可见光和红外线)。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称作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

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

式中 Φ ——辐射通量;

Q ——辐射能量。

辐射通量又称辐射功率或辐射能流密度。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

辐射源在给定方向上的单位立体角内所发出的辐射通量。若一个点辐射源在微小立体角 $d\omega$ 内的辐射通量是 $d\Phi$,则使点源在此方向上的辐射强度为

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad (1-2)$$

式中 I ——辐射强度;

ω ——立体角。

即辐射强度在数值上等于单位立体角内的辐射通量。

当辐射点源向空间各个方向发出的辐射通量为均匀分布时,即沿任何方向的辐射强度都相同,对式(1-2)进行积分可得到该点光源的全空间辐射强度:

$$I = \Phi/4\pi \quad (1-3)$$

在辐射源各向异性的情况下,其辐射强度随方向而变化,此时, $\Phi/4\pi$ 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. 辐射出射度 M 和辐射照度 E

一个具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 , 则该辐射表面 S 的辐射出射度为

$$M = \frac{\Phi}{S} \quad (1-4)$$

式中 M ——辐射出射度, W/m^2 ;

Φ ——离开辐射源表面的辐射通量, W ;

S ——辐射源表面的面积, m^2 。

一般来讲,辐射源表面各处的辐射出度是不相同的,所以常取某一面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

$$M = \frac{d\Phi}{dS} \quad (1-5)$$

与辐射出度相对应的物理量是辐照度,是指周围其他辐射到物体单位面积上的辐射通量。依靠反射或散射其他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 越大,则其辐射出射度 M 也就越大。它们之间的关系为

$$M = kE \quad (1-6)$$

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。对于具有不同散射或反射系数的物体来讲,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。

辐射度与辐射出度的单位相同,即瓦特每平方米(W/m^2)。

5. 辐射亮度 L 和单色辐射亮度 L_λ

辐射源的表面元 dS (图 1-2),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的

辐射通量。

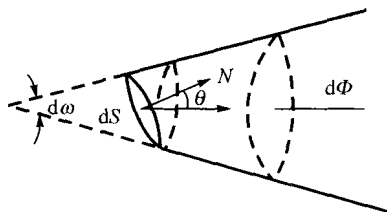


图 1-2 辐射亮度的确定

上述定义的数字表达式为

$$L(\varphi, \theta) = \frac{d^2 \Phi(\varphi, \theta)}{dS \cos \theta \cdot d\omega} \quad (1-7)$$

或

$$L(\varphi, \theta) = \frac{dI(\varphi, \theta)}{dS \cos \theta} \quad (1-8)$$

上式表明，面元 dS 在给定方向上的辐射亮度就是该面元在此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 $[W/(sr \cdot m^2)]$ 。

朗伯余弦定律这样描述：“黑”表面或完全漫射的表面，从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。

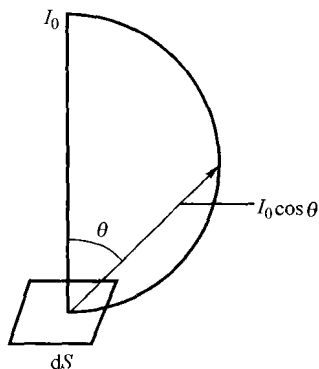


图 1-3 余弦辐射体

符合朗伯余弦定律的辐射源称为余弦辐射体，如图 1-3 所示。

余弦辐射体在各个方向上的辐射亮度都相等，而其辐射强度存在余弦关系。

余弦辐射体的辐射出度 M 在数值上等于辐射亮度 L 的 π 倍:

$$M = \pi L \quad (1-9)$$

辐射亮度实际上是包括所有波长在内的辐射能。为了研究单一波长的辐射亮度, 必须引入单色或光谱辐射的概念。

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, 则该辐射量度被称为此波长下的单色或光谱辐射亮度, 其定义式为

$$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda} \quad (1-10)$$

单色辐射亮度 L_λ 是波长的函数, 取决于辐射物体的性质以及发射辐射的条件。在整个波长间隔内, 其辐射亮度为

$$L = \int_0^\infty L_\lambda d\lambda \quad (1-11)$$

由此可见, 单色辐射亮度是表示辐射物体在某一特定方向上、单位时间、单位波长间隔、单位投影面积以及单位立体角内所发出的辐射能量。

表 1-1 辐射测温名词的物理概念与单位

名称	符号	物理概念	单位
辐射能量	Q	以电磁波形式所传递的能量	焦[耳](J)
辐射通量 (辐射功率)	Φ	单位时间内所传递的辐射能	瓦(W)
辐射强度 (辐射亮度)	I	垂直辐射方向上, 辐射体表面的单位面积在单位立体角内的辐射功率	瓦每球面度(W/sr)
辐射出度 (离开表面)	M	在数值上等于辐射源单位表面上所发出的辐射通量	瓦每平方米(W/m ²)
辐射照度 (入射表面)	E	与辐射出度对应的物理量是辐射照度, 指周围其他物体辐射到物体单位面积上的辐射通量	瓦每平方米(W/m ²)

续表

名称	符号	物理概念	单位
辐射温度	T_p	温度为 T 的物体单位面积发射的全辐射功率与温度 T_p 的黑体单位面积发射的全辐射功率相等时, 将 T_p 称为物体的辐射温度	开[尔文](K)
亮度温度	T_s	物体在某一波长的单色辐射亮度同黑体在同波长的单色辐射亮度相等时, 将黑体的温度称为物体的亮度温度	开[尔文](K)
颜色温度 (比色温度)	T_c	当温度为 T 的物体和温度为 T_c 的黑体, 在两个波长 λ_1, λ_2 的光谱辐射亮度之比相等时, 将 T_c 称为物体的颜色温度	开[尔文](K)
有效波长	λ_e	用亮度法测温时, 在有效波长处, 对应黑体温度为 T_1 和 T_2 时光谱发射功率之比, 等于测温仪接收到黑体 T_1 和 T_2 时辐射功率之比。 λ_e 称为适用于温度范围 $T_1 \sim T_2$ 的平均有效波长 当 $T_1 \rightarrow T_2 = T$ 时, 将 λ_e 称为测温仪在温度为 T 的极限有效波长	微米(μm)
表观温度		辐射温度、亮度温度、颜色温度(比色温度)的统称	开[尔文](K)
吸收率	α	$\alpha = \text{吸收的辐射能} / \text{入射的辐射能}$	比值
反射率	ρ	$\rho = \text{反射的辐射能} / \text{入射的辐射能}$	比值
透过率	τ	$\tau = \text{透射的辐射能} / \text{入射的辐射能}$	比值
黑体	b	$\alpha = 1$ 的物体(对任何波长的辐射能, 能全部吸收)	
发射率	ϵ	物体单位面积的辐射功率与同温度下黑体单位面积的辐射功率之比, 称为物体的发射率, 该比值在 $0 \sim 1$ 之间	比值

续表

名称	符号	物理概念	单位
灰体		发射率 <1 ,且不随温度波长变化的辐射体	
光谱发射率	ϵ_λ	物体单位面积在某波长的单色辐射功率与同温度下黑体单位面积,在同一波长的单色辐射功率之比值, ϵ_λ 值在 $0\sim 1$ 之间	比值
定向发射率	ϵ_θ	物体在偏离法线 θ 角方向的辐射亮度与同温度下黑体的辐射亮度之比值, ϵ_θ 值在 $0\sim 1$ 之间	比值
定向光谱发射率	$\epsilon_{\theta\lambda}$	物体在偏离法线 θ 角方向单色辐射亮度与同温度下黑体,在同一波长单色辐射亮度之比值, $\epsilon_{\theta\lambda}$ 值在 $0\sim 1$ 之间	比值

三、辐射能的分配

当物体遇到热辐射能以后,根据物体本身的性质,将该能量进行吸收、透过和反射。假设落在该物体上的热辐射总能量为 Q ,其中一部分被吸收(以 Q_α 表示),一部分被反射(以 Q_ρ 表示),另一部分被穿透(以 Q_τ 表示),如图1-4所示。用公式表示为

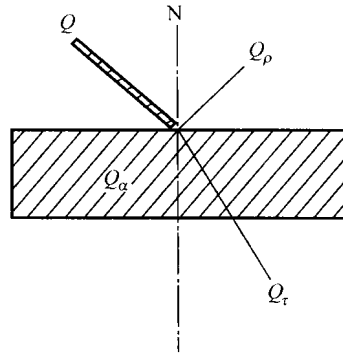


图1-4 辐射能的分配

$$Q = Q_\alpha + Q_\rho + Q_\tau \quad (1-12)$$

或

$$\frac{Q_\alpha}{Q} + \frac{Q_\rho}{Q} + \frac{Q_\tau}{Q} = 1 \quad (1-13)$$