

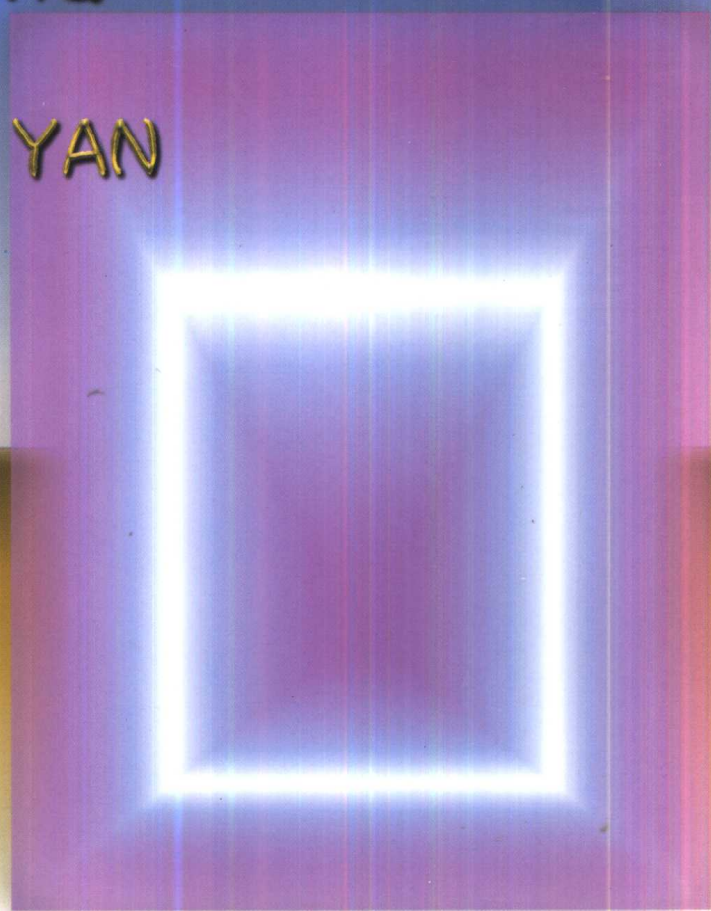


高等 学校 规划 教材  
电 子 信 息 类

# 光电技术与实验

江月松 主编

GUANG DIAN  
JI SHU  
YU  
SHI YAN



北京理工大学出版社

# 光电技术与实验

江月松 阎平 刘振玉 编

北京理工大学出版社

## 内 容 简 介

本教材由理论讲授和实验操作指导两部分组成。理论讲授部分从了解和熟悉光电系统的角度出发,讨论光电系统中的主要技术问题。主要内容包括:辐射度学和光度学的基本物理量;光电系统中常用的光源;各类光电探测器的工作原理、特性参数及光电信号检取的基本线路;光学调制器;光电探测方法及光电信号处理方法简述以及一些典型系统简介。实验操作指导部分总共有 22 个项目,内容包括:光电探测器性能参数测试;弱光信号探测方法;光学调制器原理和信号解调方法;摄像机信号应用原理及光电系统举例五个部分。

全书内容新颖、系统、全面,实验部分与理论部分紧密配合,注重实用,可作为测控技术与仪器、物理电子技术、精密仪器及办公自动化等专业本科生教材,也可作为仪器仪表、自动控制等相关专业本科生、研究生和有关科技人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

光电技术与实验/江月松主编. —北京:北京理工大学出版社,2000.9

ISBN 7-81045-717-9

I. 光… II. 江… III. ①光电子技术-理论 ②光电子技术-实验 IV. TN2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 62473 号

责任编辑:刘京凤 责任校对:郑兴玉

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路 7 号)

邮政编码 100081 电话 (010)68912824

各地新华书店经售

北京国马印刷厂印刷

\*

787 毫米×1092 毫米 16 开本 29 印张 700 千字

2000 年 9 月第 1 版 2000 年 9 月第 1 次印刷

印数:1-3000 册 定价:38.00 元

※图书印装有误,可随时与我社退换※

# 出版说明

为做好全国电子信息类专业“九五”教材的规划和出版工作,根据国家教委《关于“九五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》和《普通高等教育“九五”国家级重点教材立项、管理办法》,我们组织各有关高等学校、中等专业学校、出版社,各专业教学指导委员会,在总结前四轮规划教材编审、出版工作的基础上,根据当代电子信息科学技术的发展和面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的要求,编制了《1996—2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》。

本轮规划教材是由个人申报,经各学校、出版社推荐,由各专业教学指导委员会评选,并由我部教材办与各专指委、出版社协商后,审核确定的。本轮规划教材的编制,注意了将教学改革力度较大、有创新精神、特色风格的教材和质量较高、教学适用性较好、需要修订的教材以及教学急需,尚无正式教材的选题优先列入规划。在重点规划本科、专科和中专教材的同时,选择了一批对学科发展具有重要意义,反映学科前沿的选修课、研究生课教材列入规划,以适应高层次专门人才培养的需要。

限于我们的水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能存在不少缺点和不足,希望使用教材的学校、教师、同学和广大读者积极提出批评和建议,以不断提高教材的编写、出版质量,共同为电子信息类专业教材建设服务。

电子工业部教材办公室

## 前 言

本教材系按电子工业部的《1996—2000年全国电子信息类专业教材编审出版规划》，由全国高校光电子技术专业教学指导委员会编审、推荐出版，本教材由北京理工大学江月松担任主编、责任编委卢亚雄。申报工作和大纲确定由蓝天完成。

本教材由课堂理论讲授和实验室实验操作指导两部分组成。其中理论讲授部分由江月松、阎平和蓝天编写。江月松编写了第一章至第五章，第八章的§8.4、§8.5和§8.6，第十一章和第十二章；阎平编写了第六章、第七章、第九章和第十章，并重写了实验操作指导部分的实验八和实验二十一；蓝天编写了第八章的§8.1、§8.2和§8.3。实验操作指导部分的主要内容仍是刘振玉主编的《光电技术实验》(兵器工业出版社，1993年)的内容，由李翠玲对其中的部分内容作了修改和补充。全书由江月松统编，由卢亚雄教授担任主审。主审非常认真负责地审稿，为保证本教材的质量提出许多宝贵建议，在此表示衷心的感谢！本教材编写过程中还得到北京理工大学光电工程系领导和教务处同志的关心和支持，也在此表示衷心的感谢！

在教材编写过程中，随着教学改革的深入和专业设置的调整，本教材整合了光电探测器、光电检测技术和光电变换系统的一些内容，编入了一些光电技术新发展的内容，因而使得理论讲授部分的内容比原计划内容有所增加，内容共分十二章。第一章介绍了光辐射度学和光度学的基本概念和定律，光电技术系统中常用光源的基本原理和特性参数。第二章概述了光电探测器分类、性能参数和噪声特性等。第三章至第七章分别依次介绍了光电子发射探测器、光电导探测器、光伏探测器、热探测器、多元和多色探测器、电荷耦合固体成像器件、真空成像器件以及光机扫描探测的工作原理、主要特性参数以及基本的信号耦合电路等。第八章介绍了光电探测系统中各种调制的原理和方法，主要是调制盘、莫尔条纹、声光调制、电光调制、磁光调制和轴角编码调制。第九章和第十章分别介绍了直接探测、相干探测的原理、特点和系统。第十一章是光电信号处理方法，介绍光电探测器的前置放大器及其设计原则，讨论了光电探测系统的频率特性、光电信号的采样保持以及微弱光电信号的处理方法。第十二章为光电系统应用举例，介绍光电探测技术在光纤通讯、光学系统的传递函数测试、跟踪与制导、测距、红外遥感及测速等方面的应用。

近年来，出现了不少光电技术及系统方面的优秀教材和著作，为推动我国光电技术专业学科的教学与科研以及光电产业的发展作出了重要的贡献。在编写本教材的过程中，编者有幸参考了这些教材和著作，并根据教材体系的安排与需要，有的地方采用了其中的部分章节内容，这些都在每章末以参考文献形式给出。

因编者水平所限并加之时间紧迫，虽经认真选材，尽可能保持教材体系的情况下吸收新技术发展内容，但完稿时仍感有许多缺憾、不足与错漏之处，诚请读者批评指正。

注：本书第一章至第五章是编者江月松以访问学者身份在东南大学毫米波国家重点实验室访问期间完成的，并得到该访问学者基金资助，特表示感谢！

编 者

2000年5月

# 目 录

<b>第一章 光辐射与光源</b>	
§ 1-1 辐射的基本概念	( 1 )
§ 1-2 热辐射的基本定律	( 5 )
§ 1-3 光源的基本特性参数和光源的选择	( 17 )
§ 1-4 光电技术中常用光源简介	( 22 )
<b>第二章 光电探测器概述</b>	
§ 2-1 发展简况与分类	( 35 )
§ 2-2 光电探测器的性能参数	( 43 )
§ 2-3 噪声的统计特性	( 47 )
§ 2-4 光电探测器的噪声	( 57 )
<b>第三章 光电子发射探测器</b>	
§ 3-1 光电子发射效应	( 63 )
§ 3-2 光电子发射材料	( 65 )
§ 3-3 光电倍增管	( 70 )
§ 3-4 微通道板光电倍增管	( 85 )
<b>第四章 光电导探测器</b>	
§ 4-1 光电导探测器的工作原理	( 90 )
§ 4-2 光电导探测器的性能参数	( 98 )
§ 4-3 实用光电导探测器及输出信号	( 105 )
<b>第五章 光伏探测器</b>	
§ 5-1 光生伏特效应与光伏探测器的工作原理	( 119 )
§ 5-2 光伏探测器的性能参数	( 125 )
§ 5-3 光电池与光电二极管	( 129 )
§ 5-4 光电三极管及其它光伏探测器	( 141 )
<b>第六章 热探测器</b>	
§ 6-1 热探测器的一般原理	( 153 )
§ 6-2 热释电探测器	( 155 )
§ 6-3 热敏电阻	( 162 )
§ 6-4 测辐射热电偶	( 167 )
<b>第七章 其它光电探测器件</b>	
§ 7-1 电荷耦合器件	( 171 )
§ 7-2 电子束摄像管	( 181 )
§ 7-3 多元及多色探测器件	( 184 )
§ 7-4 光机扫描探测方式	( 191 )
<b>第八章 光辐射的调制</b>	
§ 8-1 调制的基本原理	( 196 )
§ 8-2 调制盘	( 209 )

§ 8-3	莫尔条纹	(222)
§ 8-4	声光调制	(227)
§ 8-5	电光调制	(235)
§ 8-6	其他光学调制	(244)
<b>第九章 直接探测系统</b>		
§ 9-1	光电系统的类型和指标	(252)
§ 9-2	直接探测系统的基本工作原理	(254)
§ 9-3	直接探测系统的作用距离	(257)
§ 9-4	直接探测系统的视场	(262)
<b>第十章 相干探测</b>		
§ 10-1	相干探测原理	(268)
§ 10-2	相干探测的特点	(270)
§ 10-3	相干探测的空间条件和频率条件	(273)
§ 10-4	相干探测系统举例	(275)
<b>第十一章 光电信号处理方法</b>		
§ 11-1	前置放大器	(280)
§ 11-2	光电信号探测系统的频率特性	(292)
§ 11-3	光电信号的采样保持	(298)
§ 11-4	微弱光电信号处理方法	(303)
<b>第十二章 光电系统应用举例</b>		
§ 12-1	光纤通信系统	(314)
§ 12-2	光学传递函数测试仪	(317)
§ 12-3	红外跟踪系统中的位标器	(321)
§ 12-4	脉冲激光测距仪	(324)
§ 12-5	光电相位测距仪	(327)
§ 12-6	红外遥感仪	(329)

## 光电技术实验

### 第一部分 光电探测器

实验一	光电探测器光谱响应度的测量	(336)
实验二	光电探测器响应时间的测试	(340)
实验三	光电探测器探测度的测量	(343)
实验四	光电倍增管的静态和时间特性的测试	(346)
实验五	雪崩光电二极管	(353)

### 第二部分 光电弱信号探测

实验六	低噪声放大器	(359)
实验七	有源滤波器	(364)
实验八	锁相环及其应用	(368)
实验九	取样积分原理	(378)
实验十	光子计数	(382)

### 第三部分 光学调制器原理及信号解调方法

实验十一	光学调制盘	(389)
实验十二	光栅莫尔条纹测长原理	(394)

实验十三	声光调制器	(398)
实验十四	光外差原理	(404)
<b>第四部分</b>	<b>摄像器件的使用及其信号处理方法</b>	
实验十五	光电信号的采样和保持	(409)
实验十六	摄像机信号应用原理	(413)
实验十七	线阵 CCD 像传感器的驱动原理	(421)
实验十八	二维光强分布的立体显示	(428)
<b>第五部分</b>	<b>光电技术综合应用</b>	
实验十九	光电报警(半自拟)	(432)
实验二十	光电定向	(435)
实验二十一	激光多卜勒测速	(442)
实验二十二	莫尔三维测量	(446)



# 第一章 光辐射与光源

光是电磁波,通常是指电磁波谱中对应于真空中的波长在  $0.38\mu\text{m}$  到  $0.78\mu\text{m}$  范围内的电磁辐射,它对人眼能产生目视刺激而形成“光亮”感。人们把此波段的电磁辐射叫光辐射,把发出光辐射的物体叫光源。广义地讲,x射线、紫外辐射、可见光和红外辐射都可以叫光辐射,相应的辐射系统称为光源。在光电系统中,光源是必不可少的,实用光源是某一波长或某一段波长范围的辐射。

光电技术中所用的光源可简单地划分为自然光源和人造光源两类。自然光源可组成被动光电探测系统;人造光源可组成主动光电探测系统。

## § 1-1 辐射的基本概念

在光学中,用来定量地描述辐射能强度的量有两类,一类是物理的,叫作辐射度量,是用能量单位描述光辐射能的客观物理量;另一类是生理的,叫作光度学量,是描述光辐射能为平均人眼接受所引起的视觉刺激大小的强度,即光度量是具有标准人眼视觉特性的人眼所接收到辐射量的度量。因此,辐射度量和光度量两者在研究方法和概念上非常类似,它们的基本物理量也是一一对应的。在衡量光电探测器的性能时,或者是评价光电测量系统的指标时,辐射度量和光度量是紧密相关的。

### 一、辐射度的基本物理量

1. **辐射能  $Q_e$** 。辐射能是一种以电磁波的形式发射、传播或接收的能量,单位为 J(焦耳)。当辐射能被物质吸收时,可以转换成其它形式的能量,如热能、电能等。当物质吸收了强度调制的辐射能后,可以以检测热波、声波等形式的能量来研究物质的性质。

2. **辐射通量  $\Phi_e$** 。辐射通量又称辐射功率  $P_e$ ,是辐射能的时间变化率,单位为 W(瓦),是单位时间内发射、传播或接收的辐射能,  $\Phi_e = dQ_e/dt$ (J/s,焦耳每秒)。

3. **辐射强度  $I_e$** 。辐射强度定义为点辐射源在给定方向上单位立体角内的辐射能量,单位为 W/sr(瓦每球面度),  $I_e = d\Phi_e/d\Omega$ 。

在所有方向上辐射强度都相同的点辐射源在有限立体角内发射的辐射通量为

$$\Phi_e = I_e \Omega \quad (1.1-1)$$

在空间所有方向( $\Omega = 4\pi$ )上发射的辐射通量为

$$\Phi_e = 4\pi I_e \quad (1.1-2)$$

实际上,一般辐射源多为各向异性的辐射源,其辐射强度随方向而变化,即  $I_e = I_e(\varphi, \theta)$ ,如图 1-1 所示,这样,点辐射源在整个空间发射的辐射能量为

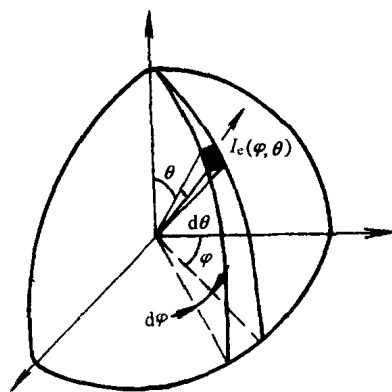


图 1-1 某一方向上的发光强度

$$\Phi_e = \int I_e(\varphi, \theta) d\Omega = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi I_e(\varphi, \theta) \sin\theta d\theta \quad (1.1-3)$$

4. **辐射照度  $E_e$**  辐射照度为投射在单位面积上的辐射通量, 即  $E_e = d\Phi_e/dA$ , 单位为  $W/m^2$  (瓦每平方米)。dA 是投射辐射通量  $d\Phi_e$  的面积元。

5. **辐射出射度  $M_e$**  辐射出射度为扩展辐射源单位面积所辐射的通量, 即  $M_e = d\Phi/dS$ ,  $d\Phi$  是扩展源表面 dS 在各方向上(通常为半空间  $2\pi$  立体角)所发出的总的辐射通量, 单位为  $W/m^2$  (瓦每平方米)。

$E_e$  和  $M_e$  的单位相同, 其区别仅在于前者是描述辐射接收面所接收的辐射特性, 而后者则为描述扩展辐射源向外发射的辐射特性。

6. **辐射亮度  $L_e$**  辐射亮度定义为扩展源表面一点处的面元在给定方向上单位立体角、单位投影面积内发出的辐射通量, 如图 1-2 所示。即

$$L_e = \frac{dI_e}{dS \cos\theta} = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dS \cos\theta} \quad (1.1-4)$$

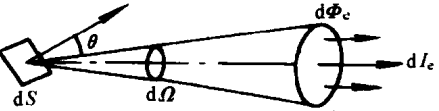


图 1-2 辐射源的辐射亮度

单位为  $W/sr \cdot m^2$  (瓦每球面度平方米)。对于非自发光表面也可以类似定义。 $L_e$  的数值与扩展辐射源表面的性质有关, 并且随方向而变。因此, 辐射源辐射亮度的一般表达式为

$$L_e = \frac{d^2\Phi_e(\varphi, \theta)}{d\Omega dS \cos\theta} \quad (1.1-5)$$

7. **光谱辐射量** 光谱辐射量也叫辐射量的光谱密度。辐射源所辐射的能量往往由许多不同波长的单色辐射所组成, 为了研究各种波长的辐射通量, 需要对某一波长的单色光的辐射能量作出相应的定义。光谱辐射量是辐射量随波长的变化率。

光谱辐射通量  $\Phi_e(\lambda)$ : 辐射源发出的光在波长  $\lambda$  处的单位波长间隔内的辐射通量。辐射通量与波长的关系如图 1-3 所示。其关系式为

$$\Phi_e(\lambda) = \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \quad (1.1-6)$$

单位为  $W/\mu m$  (瓦每微米), 或  $W/nm$  (瓦每纳米)。

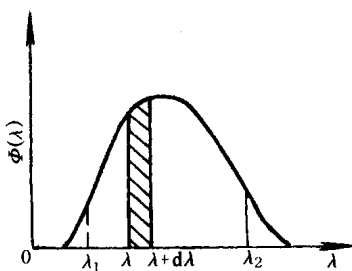


图 1-3 光谱辐射通量与波长的关系

前面介绍的几个重要的辐射量, 都有与光谱辐射量相对应的关系:

光谱辐照度

$$E_e(\lambda) = \frac{dE_e}{d\lambda} \quad (1.1-7)$$

光谱辐射出射度

$$M_e(\lambda) = \frac{dM_e}{d\lambda} \quad (1.1-8)$$

光谱辐射亮度

$$L_e(\lambda) = \frac{dL_e}{d\lambda} \quad (1.1-9)$$

辐射源的总辐射通量是

$$\Phi_e = \int_0^\infty \Phi_e(\lambda) d\lambda \quad (1.1-10)$$

对其他辐射量也有类似的关系。

对于波长不连续的辐射源,具有线光谱或带光谱特征,其总辐射通量为

$$\Phi_e = \sum \Phi_e(\lambda)\Delta\lambda \quad (1.1-11)$$

## 二、光度的基本物理量

**1. 光谱光视效率** 人的视神经对各种不同波长光的感光灵敏度是不一样的。对绿光最灵敏,对红、蓝光灵敏度较低。另外,由于受视觉生理和心理作用,不同的人对各种波长光的感光灵敏度也有差异。国际照明委员会(CIE)根据对许多人的大量观察结果,确定了人眼对各种波长光的平均相对灵敏度,称之为“标准光度观察者”光谱光视效率,或称之为视见函数。如图 1-4 所示,图中实线是亮度大于  $3\text{cd}/\text{m}^2$  时的明视觉光谱光视效率,用  $V(\lambda)$  表示,此时的视觉主要由人眼视网膜上分布的锥体细胞的刺激所引起的; $V(\lambda)$  的最大值在  $555\text{nm}$  处。图中虚线是亮度小于  $0.001\text{cd}/\text{m}^2$  时的暗视觉光谱光视效率,用  $V'(\lambda)$  表示,此时的视觉主要由人眼视网膜上分布的杆状细胞刺激所引起的; $V'(\lambda)$  的最大值在  $507\text{nm}$  处。表 1-1 给出了人眼的光谱光视效率的数值。

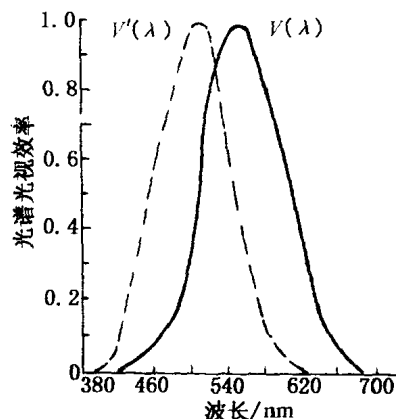


图 1-4 光谱光视效率(视见函数)曲线

表 1-1 明视觉和暗视觉的光谱光视效率(最大值=1)

波长(nm)	明视觉 $V(\lambda)$	暗视觉 $V'(\lambda)$	波长(nm)	明视觉 $V(\lambda)$	暗视觉 $V'(\lambda)$
380	0.00004	0.000589	590	0.757	0.0655
390	0.00012	0.002209	600	0.631	0.03315
400	0.0004	0.00929	610	0.503	0.01593
410	0.0012	0.03484	620	0.381	0.00737
420	0.0040	0.0966	630	0.265	0.003335
430	0.0116	0.1998	640	0.175	0.001497
440	0.023	0.3281	650	0.107	0.000677
450	0.038	0.455	660	0.061	0.0003129
460	0.060	0.567	670	0.032	0.0001480
470	0.091	0.676	680	0.017	0.0000715
480	0.139	0.793	690	0.0082	0.00003533
490	0.208	0.904	700	0.0041	0.00001780
500	0.323	0.982	710	0.0021	0.00000914
510	0.503	0.997	720	0.00105	0.00000478
520	0.710	0.935	730	0.00052	0.000002546
530	0.862	0.811	740	0.00025	0.000001379
540	0.954	0.650	750	0.00012	0.000000760
550	0.995	0.481	760	0.00006	0.000000425
560	0.995	0.3288	770	0.00003	0.0000002413
570	0.952	0.2076	780	0.000015	0.0000001390
580	0.870	0.1212			

2. 光度的基本物理量 我们在辐射度量学中介绍的各个基本量  $\Phi_e$ 、 $M_e$ 、 $I_e$ 、 $L_e$  和  $E_e$  对整个电磁波谱都适用;而在光度学中光度量和辐射度量的定义、定义方程是一一对应的,只是光度量只在光谱的可见波段(380~780nm)才有意义。为避免混淆,在辐射度量符号上加下标“e”,而在光度量符号上加下标“v”。光度学中相应量  $\Phi_v$ 、 $M_v$ 、 $I_v$ 、 $L_v$  和  $E_v$  与辐射度量  $\Phi_e$ 、 $M_e$ 、 $I_e$ 、 $L_e$  和  $E_e$  之间的对应关系由表 1-2 给出。由于人眼对等能量的不同波长的可见光辐射能

表 1-2 辐射度量和光度量的对照表

辐射度量	符号	单位	光度量	符号	单位
辐[射]能	$Q_e$	J	光量	$Q_v$	lm·s
辐[射]通量或 辐[射]功率	$\Phi_e$	W	光通量	$\Phi_v$	lm
辐[射]照度	$E_e$	$W \cdot m^{-2}$	[光]照度	$E_v$	lx = $lm \cdot m^{-2}$
辐[射]出度	$M_e$	$W \cdot m^{-2}$	[光]出射度	$M_v$	$lm \cdot m^{-2}$
辐[射]强度	$I_e$	$W \cdot sr^{-1}$	发光强度	$I_v$	cd = $lm \cdot sr^{-1}$
辐[射]亮度	$L_e$	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	[光]亮度 光谱光视效率	$L_v$ $V(\lambda)$	$cd \cdot m^{-2}$

所产生的光感觉是不同的,因而按人眼的视觉特性  $V(\lambda)$  来评价的辐射通量  $\Phi_e$  即为光通量  $\Phi_v$ , 这两者的关系为

$$\Phi_v = K_m \int_{380}^{780} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (1.1-12)$$

式中  $K_m$  为明视觉的最大光谱光视效率函数,亦称为光功当量,它表示人眼对波长为 555nm [ $V(555) = 1$ ] 光辐射产生光感觉的效能。按国际实用温标 IPTS-68 的理论计算值为

$$K_m = 680 \text{ lm/W} \quad (1.1-13)$$

$K_m$  确定之后,根据式(1.1-12)即可对光度量和辐射度量之间进行准确的换算。由此可进一步探讨辐射度和光度基准的统一。

同理,其它光度量也有类似的关系。用一般的函数表示光度量与辐射量之间的关系,则有

$$X_v = K_m \int_{380}^{780} X_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (1.1-14)$$

光度量中最基本的单位是发光强度单位——坎德拉(Candela),记作 cd,它是国际单位制中七个基本单位之一。其定义是发出频率为  $540 \times 10^{12}$  Hz(对应空气中 555nm 波长)的单色辐射,在给定方向上的辐射强度为  $1/683 W \cdot sr^{-1}$  时,在该方向上的发光强度为 1cd。

光通量的单位是流明(lm),它是发光强度为 1cd 的均匀点光源在单位立体角(1sr)内发出的光通量。

光照度的单位是勒克斯(lx),它相当于 1lm 的光通量均匀地照在  $1m^2$  面积上所产生的光照度。

### 三、热辐射的基本物理量

由于外界热量传递给物体而发生的辐射称为热辐射。热辐射源的特性是它的辐射能量直

接与它的温度有关。如果物体从周围物体吸收辐射能所得到的热量恰好等于自身辐射而减少的能量,则辐射过程达到平衡状态,这称为热平衡辐射,这时辐射体可以用一个固定的温度  $T$  来描述。在研究热平衡辐射所遵从的规律时,我们假定物体发射能量和吸收能量的过程中,除了物体的热状态有所改变外,它的成分并不发生其他变化。因此,辐射能量的发出和吸收有特殊意义。

**1. 辐射本领  $M'_\lambda(\lambda, T)$**  辐射本领是辐射体表面在单位波长间隔单位面积内所辐射的  
通量,即

$$M'_\lambda(\lambda, T) = \frac{d\Phi_e}{d\lambda dA} \quad (1.1 - 15)$$

式中  $d\Phi_e$  为元表面  $dA$  在波长  $\lambda$  到  $\lambda + d\lambda$  间隔内的辐射通量。 $M'_\lambda(\lambda, T)$  是辐射波长  $\lambda$  和辐射的温度  $T$  的函数。单位为  $W/\mu m \cdot m^2$  (瓦每微米平方米)。

**2. 吸收率  $\alpha(\lambda, T)$**  吸收率  $\alpha(\lambda, T)$  是在波长  $\lambda$  到  $\lambda + d\lambda$  间隔内被物体吸收的通量与射通量之比,它与物体的温度  $T$  及波长  $\lambda$  有关,定义式为

$$\alpha(\lambda, T) = \frac{d\Phi'_e(\lambda)}{d\Phi_e(\lambda)} \quad (1.1 - 16)$$

式中,  $d\Phi_e(\lambda)$  是在波长  $\lambda$  到  $\lambda + d\lambda$  间隔内入射到物体上的通量,而  $d\Phi'_e(\lambda)$  则是在相应的波长间隔内物体吸收的通量。由上式可知  $\alpha(\lambda, T)$  是一个无量纲的量。

**3. 绝对黑体** 任何物体,只要其温度在绝对零度以上,就向外界发出辐射,这称为温度辐射。黑体是一种完全的温度辐射体,定义为吸收率  $\alpha(\lambda, T) = 1$  的物体为绝对黑体,其辐射本领以  $M'_{\lambda b}(\lambda, T)$  表示,则

$$M'_{\lambda b}(\lambda, T) = \frac{M'_\lambda(\lambda, T)}{\alpha(\lambda, T)} \quad (1.1 - 17)$$

因为一般物体的  $\alpha(\lambda, T) < 1$ , 所以  $M'_{\lambda b}(\lambda, T) > M'_\lambda(\lambda, T)$ 。这表明:在同一温度  $T$  中对任何波长,物体的辐射本领不会大于黑体的辐射本领。

**4. 物体的发射率  $\epsilon(\lambda, T)$**  物体的发射率  $\epsilon(\lambda, T)$  定义为物体的辐射本领  $M'_\lambda(\lambda, T)$  与绝对黑体辐射本领  $M'_{\lambda b}(\lambda, T)$  之比,即

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{M'_\lambda(\lambda, T)}{M'_{\lambda b}(\lambda, T)} \quad (1.1 - 18)$$

由式(1-17)可以看出,  $\epsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T)$ , 这说明任何具有强辐射吸收的物体必定发出强的辐射。

非黑体( $0 < \epsilon < 1$ )的辐射能力不仅与温度有关,而且与表面材料的性质有关。在自然界中,理想的黑体是不存在的,吸收本领最多只有  $0.96 \sim 0.99$ 。实际工作时,黑体往往是用表面涂黑的球形或柱形空腔来人为地实现。

## § 1-2 热辐射的基本定律

热辐射基本上可分为两类,即黑体辐射和线状、带状辐射源。一些不透明物体或炽热稠密气体接近黑体,辐射为连续光谱,而一些被激励的气体发光则为线状或带状光谱。我们可用若干个基本定律对热辐射进行较为完善的描述。

## 一、基尔霍夫定律

基尔霍夫发现,在任一给定温度的热平衡条件下,任何物体的辐射发射本领  $M'_\lambda(\lambda, T)$  和吸收率  $\alpha(\lambda, T)$  的比值与物体的性质无关,只是波长  $\lambda$  及温度  $T$  的普适函数,且恒等于同温度下绝对黑体的辐射本领,这就是基尔霍夫定律,是符合能量守恒定律的。

根据近代研究,非黑体的发射率和吸收率有四种,即方向光谱发射率  $\epsilon'_\lambda$  和方向光谱吸收率  $\alpha'_\lambda$ ;半球光谱发射率  $\epsilon_\lambda$  和半球光谱吸收率  $\alpha_\lambda$ ;方向总发射率  $\epsilon'$  和方向总吸收率  $\alpha'$ ;半球总发射率  $\epsilon$  和半球总吸收率  $\alpha$ 。

由于方向光谱发射率和吸收率是方向、波长及温度的函数,故它们可表示为  $\epsilon'_\lambda(\lambda, \theta, \varphi, T)$  及  $\alpha'_\lambda(\lambda, \theta, \varphi, T)$ 。基尔霍夫定律确切的表达式应为

$$\epsilon'_\lambda(\lambda, \theta, \varphi, T) = \alpha'_\lambda(\lambda, \theta, \varphi, T) \quad (1.2-1)$$

如果把  $\epsilon'_\lambda$  对波长范围取平均,就用“总”来表示此均值,例如方向总发射率  $\epsilon'$  就是指某个方向的光谱发射率对整个波长范围取的平均值

$$\begin{aligned} \epsilon'(\theta, \varphi, T) &= \frac{\pi \cos\theta \int_0^\infty \epsilon'_\lambda(\lambda, \theta, \varphi, T) L_{\lambda, b, N}(\lambda, T) d\lambda}{\pi \cos\theta \int_0^\infty L_{\lambda, b, N} d\lambda} \\ &= \frac{\pi \int_0^\infty \epsilon'_\lambda(\lambda, \theta, \varphi, T) L_{\lambda, b, N}(\lambda, T) d\lambda}{\sigma T^4} \end{aligned} \quad (1.2-2)$$

式中  $\sigma$  是斯蒂芬—玻尔兹曼常数<sup>①</sup>,  $L_{\lambda, b, N}(\lambda, T)$  为黑体在辐射面法线方向的光谱辐射亮度。

如果把  $\epsilon'_\lambda$  对半球空间取平均值,就用“半球”来表示此平均值。例如半球光谱发射率  $\epsilon_\lambda$  就是指光谱发射率在半球范围内取的平均值

$$\epsilon_\lambda(\lambda, T) = \frac{\pi \int_{\Delta} \epsilon'_\lambda(\lambda, \theta, \varphi, T) L_{\lambda, b, N}(\lambda, T) \cos\theta d\omega}{\pi \int_{\Delta} L_{\lambda, b, N}(\lambda, T) \cos\theta d\omega} \quad (1.2-3)$$

式中的积分  $\int_{\Delta}$  表示对半球积分,式中  $L_{\lambda, b, N}(\lambda, T)$  在半球范围内是常数,故上式就变为

$$\epsilon_\lambda(\lambda, T) = \frac{1}{\pi} \int_{\Delta} \epsilon'_\lambda(\lambda, \theta, \varphi, T) \cos\theta d\omega \quad (1.2-4)$$

如果把  $\epsilon'_\lambda$  既对波长范围又对半球空间取均值,则可用“半球总”发射率  $\epsilon$  来表示

$$\epsilon(T) = \frac{\int_0^\infty \int_{\Delta} \epsilon'_\lambda(\lambda, \theta, \varphi, T) L_{\lambda, b, N}(\lambda, T) \cos\theta d\lambda d\omega}{\sigma T^4} \quad (1.2-5)$$

与发射率相同,吸收率也有上面四种形式,即方向光谱、方向总、半球光谱和半球总吸收率。

方向总吸收率  $\alpha'$  可表示成

$$\alpha'(\theta, \varphi, T) = \frac{\int_0^\infty \alpha'_\lambda(\lambda, \theta, \varphi, T) L'_{\lambda, i}(\lambda, \theta, \varphi) d\lambda}{\int_0^\infty L'_{\lambda, i}(\lambda, \theta, \varphi) d\lambda} \quad (1.2-6)$$

<sup>①</sup>  $\sigma$  定义见本节稍后内容。

式中  $L'_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \varphi)$  是研究方向  $(\theta, \varphi)$  入射到所研究表面的光谱辐射亮度。考虑到(1.2-1)式有

$$\alpha'(\theta, \varphi, T) = \frac{\int_0^{\infty} \epsilon'_{\lambda}(\lambda, \theta, \varphi, T) L'_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \varphi) d\lambda}{\int_0^{\infty} L'_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \varphi) d\lambda} \quad (1.2-7)$$

若入射的  $L'_{\lambda,i}$  与研究物体同温度的黑体的光谱辐射亮度的光谱分布规律相似, 即

$$\begin{aligned} L'_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \varphi) &= CL_{\lambda,b}(\lambda, \theta, \varphi, T) \\ &= CL_{\lambda,b,N}(\lambda, T) \cos\theta \end{aligned} \quad (1.2-8)$$

式中  $C$  为常数。那么(1.2-7)式就可写为

$$\begin{aligned} \alpha'(\theta, \varphi, T) &= \frac{\int_0^{\infty} \epsilon'_{\lambda}(\lambda, \theta, \varphi, T) L_{\lambda,b,N}(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} L_{\lambda,b,N}(\lambda, T) d\lambda} \\ &= \frac{\pi \int_0^{\infty} \epsilon'_{\lambda}(\lambda, \theta, \varphi, T) L_{\lambda,b,N}(\lambda, T) d\lambda}{\sigma T^4} \end{aligned} \quad (1.2-9)$$

对比(1.2-2)和(1.2-9)式, 就可发现在满足(1.2-8)式的条件下

$$\epsilon'(\theta, \varphi, T) = \alpha'(\theta, \varphi, T) \quad (1.2-10)$$

半球光谱吸收率  $\alpha_{\lambda}$  是方向光谱吸收率  $\alpha'_{\lambda}$  在半球上取的平均值。

从球面微面积  $dA_e$  入射到球心处的  $dA$  上的功率  $dQ_{\lambda}$  为(参考图 1-5)

$$\begin{aligned} dQ_{\lambda} &= L'_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \varphi) dA_e d\omega_e \\ &= L'_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \varphi) dA_e \frac{dA}{R^2} \cos\theta \\ &= L'_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \varphi) dA d\omega \cos\theta \end{aligned} \quad (1.2-11)$$

所以半球光谱吸收率  $\alpha_{\lambda}$  可表示为

$$\alpha_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{\int_{\Delta} \alpha'_{\lambda}(\lambda, \theta, \varphi, T) L'_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \varphi) \cos\theta d\omega}{\int_{\Delta} L'_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \varphi) \cos\theta d\omega} \quad (1.2-12)$$

如果入射的光谱辐射亮度的值不随方向而变, 则

$$\alpha_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{1}{\pi} \int_{\Delta} \alpha'_{\lambda}(\lambda, \theta, \varphi, T) \cos\theta d\omega \quad (1.2-13)$$

考虑到(1.2-1)和(1.2-4)式可得

$$\alpha_{\lambda}(\lambda, T) = \epsilon_{\lambda}(\lambda, T) \quad (1.2-14)$$

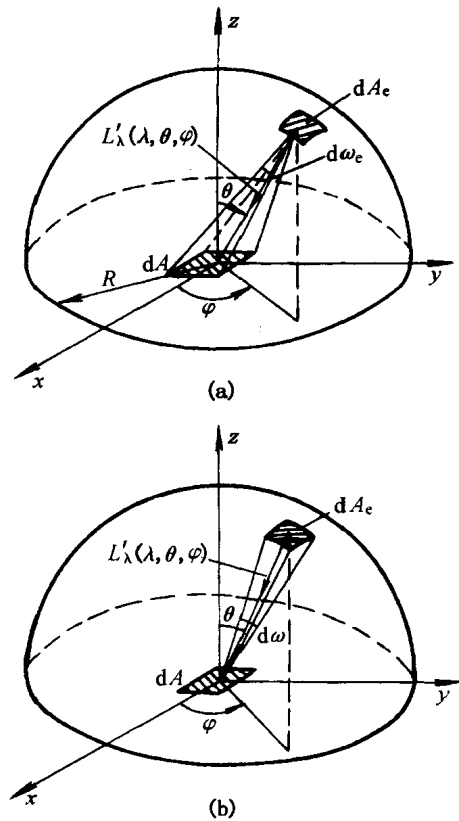


图 1-5  $dA_e$  和  $dA$  的转换

(a) 微立体角  $d\omega_e$  示意图;

(b) 微立体角  $d\omega$  示意图

半球总吸收率  $\alpha$  是  $\alpha'_\lambda$  对光谱范围和半球空间范围取的平均值

$$\alpha(T) = \frac{\int_0^\infty \int_{\Omega} \alpha'_\lambda(\lambda, \theta, \varphi, T) L'_{\lambda, i}(\lambda, \theta, \varphi) \cos\theta d\omega d\lambda}{\int_0^\infty \int_{\Omega} L'_{\lambda, i}(\lambda, \theta, \varphi) \cos\theta d\omega d\lambda} \quad (1.2-15)$$

如果入射辐射不随方向而变并满足(1.2-8)式的条件,考虑到  $\epsilon'_\lambda(\lambda, \theta, \varphi, T) = \alpha'_\lambda(\lambda, \theta, \varphi, T)$ , 则

$$\alpha(T) = \frac{\int_0^\infty \int_{\Omega} \epsilon'_\lambda(\lambda, \theta, \varphi, T) L_{\lambda, b, N}(\lambda, T) \cos\theta d\lambda d\omega}{\sigma T^4} \quad (1.2-16)$$

对比(1.2-5)和(1.2-16)式就得

$$\alpha(T) = \epsilon(T) \quad (1.2-17)$$

由上可见,除了(1.2-1)式只需满足热平衡的条件外,其他三种发射率和吸收率的相等关系均需满足一定的条件。方向总发射率等于方向总吸收率的条件为:入射光的光谱分布应与黑体辐射的光谱相似;半球光谱发射率等于半球光谱吸收率的条件为:入射光的辐射亮度不随方向而变;而半球总发射率等于半球总吸收率的前提是必须使上述两个条件均满足。

## 二、兰伯特定律

兰伯特定律描述了黑体辐射源向半球空间内的辐射亮度沿高低角的变化规律。兰伯特定律规定,若面积元  $dF$  (见图 1-6) 在法线方向的辐射亮度为  $L_N$ , 则它在高低角  $\theta$  的方向上的辐射亮度  $L'_\theta$  为

$$L'_\theta = L_N \cdot \cos\theta \quad (1.2-18)$$

所以,兰伯特定律也称为兰伯特余弦定律。

兰伯特定律还有一种表达形式,将辐射亮度定义为辐射源的单位投影面积(指面积元  $dF$  在与  $\theta$  表示的射线相垂直的方向投影的单位面积)在  $\theta$  方向的单位立体角内的辐射功率。按这种方式定义辐射亮度时,设在  $\theta$  方向的辐射亮度为  $L_\theta$ , 显然

$$L_\theta dF \cdot \cos\theta = L'_\theta dF = L_N \cos\theta dF$$

可得

$$L_\theta = L_N \quad (1.2-19)$$

上式说明,在任一方向的辐射亮度均相等且等于法线方向的辐射亮度。符合此规律的辐射面称为兰伯特面。

对于绝对黑体,兰伯特定律极为正确。对于不光滑物体,经验证明这一定律可适用于  $\theta = 0^\circ \sim 60^\circ$  的情况。图 1-7 是某些材料的  $\epsilon_\theta$  随  $\theta$  角的变化曲线。 $\epsilon_\theta$  称为方向发射率。它表示某材料在  $\theta$  方向的辐射亮度与黑体辐射亮度之比。从图可见,金属导体和非导体材料的方向辐射特性是不同的。对后者,在  $\theta = 0^\circ \sim 60^\circ$  范围内,  $\epsilon_\theta$  变化不大;当  $\theta > 60^\circ$  后,  $\epsilon_\theta$  就明显地减小。对金属材料,从  $\theta = 0^\circ$  开始,在一个范围的方向发射率是常数;然后随  $\theta$  的增加而增加,在  $\theta = 90^\circ$  的极小角度范围内,  $\epsilon_\theta$  又有减小。由于它只是在很小的角度范围内减小,故在图上未表示出来。实验表明,物体半球平均发射率与法向发射率之比,对高度磨光的金属表面约为 1.20, 对其他光滑表面的物体约为 0.95, 对表面粗糙的物体约为 0.98。

根据兰伯特定律可以推算出兰伯特面的单位面积向半球空间内辐射出去的总功率(即辐

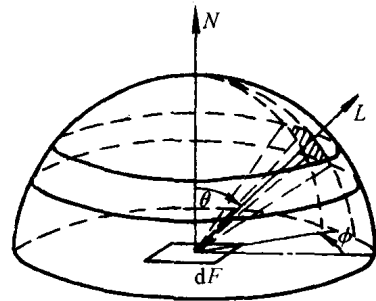


图 1-6 辐射的空间角



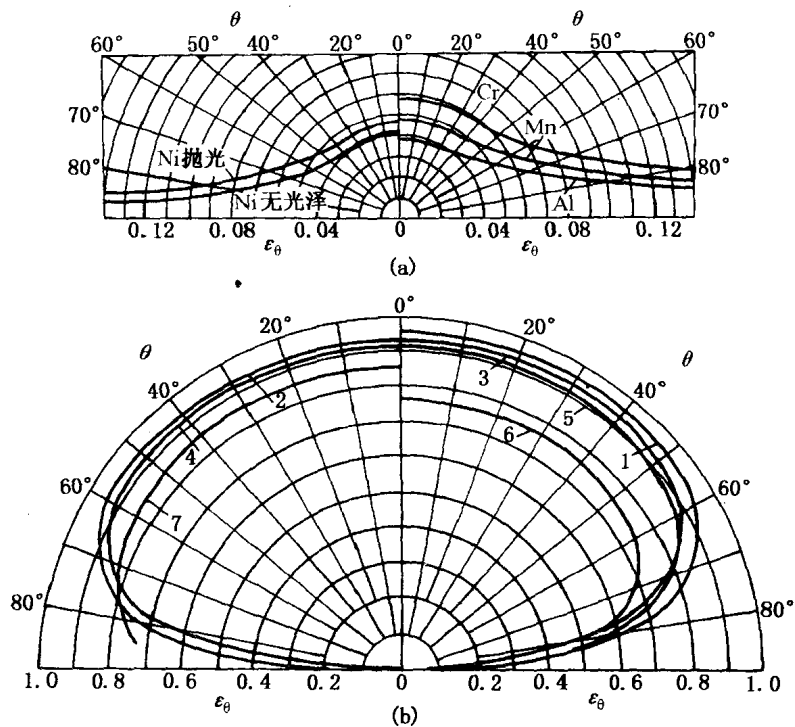


图 1-7 若干材料的方向发射率

(a) 几种金属导体在不同方向的方向发射率  $\epsilon_\theta$  ( $t = 150^\circ\text{C}$ )；

(b) 几种非导体材料在不同方向的方向发射率  $\epsilon_\theta$  ( $t = 0 \sim 93.3^\circ\text{C}$ )。

1—潮湿的冰；2—木材；3—玻璃；4—纸；5—粘土；6—氧化铜；7—氧化铝

射出射度  $M_e$ ) 与该面元的法向辐射亮度  $L_N$  之关系

$$M_e = \int_{\Omega} L_N \cos\theta d\Omega \quad (1.2-20)$$

由图 1-8 可知

$$\begin{aligned} d\Omega &= \frac{r^2 \sin\theta d\theta d\phi}{r^2} \\ &= \sin\theta d\theta d\phi \end{aligned} \quad (1.2-21)$$

将  $d\Omega$  代入(1.2-20)式,得

$$\begin{aligned} M_e &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L_N \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L_N \frac{\sin 2\theta}{4} d(2\theta) d\phi \\ &= \pi L_N \end{aligned} \quad (1.2-22)$$

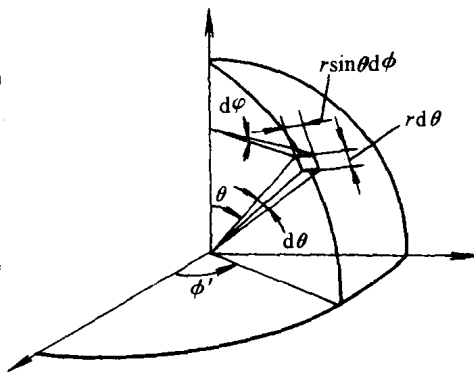


图 1-8 微立体角关系图

考虑到  $L_\theta = L_N$ , (1.2-22)式表明,符合兰伯特定律的辐射源,在任意方向的辐射亮度  $L$  均等于法线方向的辐射亮度且等于  $M_e/\pi$ 。这个结论与一般想象的有差别。一般想象,由于兰伯特面的各个方向的亮度均相等,而半球共有  $2\pi$  个球面度,故而认为单位立体角内的辐射功率应为  $M_e/2\pi$ ,这是不正确的。其主要问题在于他们忽略了兰伯特定律的第二种表达形式中定义辐射亮度的特点。

对于扩展辐射源,若辐射面的线尺寸相对它至观察点的距离不是很小时,不满足点源的要