

光电检测技术

高等学校适用教材

光电检测技术

雷玉堂 王庆有 编著
何加铭 张伟风

IN208
L16

中国计量出版社

7M206
L16

403534

高等学校适用教材

光电检测技术

☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆

雷玉堂 王庆有 编著
何加铭 张伟风
沈邦兴 主审



中国计量出版社

图书在版编目(CIP)数据

光电检测技术/雷玉堂等编著. —北京:中国计量出版社,1997
ISBN 7-5026-0920-2

I. 光… I. 雷… III. 光电检测-技术 IV. TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 05983 号

DIU64 / 13



中国计量出版社出版

北京和平里西街甲2号

邮政编码 100013

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787×1092 毫米 16 开本 印张 18.25 字数 438 千字

1997 年 5 月第 1 版 1997 年 5 月第 1 次印刷

*

印数 1—3000 定价:25.00 元

前 言

随着现代科学技术以及复杂的自动控制系统和信息处理理论和技术的提高,光电信号变换与检测技术的不断涌现,综合性的自动化、智能化的光电系统得到进一步发展,形成了包括光学、精密机械、电子学和计算机科学的高度知识集中的新学科——光学精密机械电子学(Optomechatronics)。这种跨学科的边缘技术就是光电技术。现在,光电技术已广泛地应用于工业、农业、文教、卫生、国防、科研和家庭生活等各领域。在这些应用领域中,几乎都涉及到将光辐射信息转换为电信息的问题,即光辐射的检测问题。因此,光电检测技术是光电技术的核心和重要组成部分。光电检测技术是一种非接触测量的高新技术,它以激光、红外、光纤等现代光电器件为基础,通过对载荷有被检测物体信息的光辐射进行检测,即通过光电检测器件接收光辐射并转换为电信号,由输入电路、放大滤波等检测电路提取有用信息,再经A/D变换接口输入微型计算机运算、处理,最后显示或打印输出所需检测物体的几何量或物理量等参数。因此,光电检测技术是现代检测技术最重要的手段和方法之一,是计量检测技术的一个重要的发展方向。

本书是根据1994年12月在湖北工学院召开的“首届全国质量工程学学术讨论会”通过的指导性教学计划组织编写的。本书的编写大纲参照了湖北工学院的产品质量检验工程专业《光电检测技术》教学大纲与武汉测绘科技大学和天津大学光学技术与光电仪器专业《光电技术》教学大纲,经湖北工学院沈邦兴、武汉测绘科技大学雷玉堂、天津大学王庆有等多次讨论定稿而成。

本书共分十章,有理论,有实践。主要内容有:光电检测技术基础;光电检测器件;热电检测器件;发光与耦合器件;光电成像器件;光电信号检测电路的设计;光电信号的数据采集与微型计算机接口;光电信号的变换与检测技术;光电信号的变换类型与检测方法;光电检测技术的典型应用。概括地说,本书内容包含了5部分:(1)理论基础;(2)各类光电与光电器件;(3)检测电路与微机接口;(4)光电变换检测技术与方法;(5)典型应用。

本书实用性强、适用面广,可作为高等院校质量工程或产品质量检测、光学技术与光电仪器、检测技术与自动化仪表、光电子技术、计量技术、精密仪器、应用物理、应用光学、应用电子、信息工程与自动控制等专业的教材;也是从事光电工程、产品质量检测与控制、自动化仪器仪表、计量工程、信息工程等有关专业工程技术人员与科技人员的参考书。

本书第一章、第四章、第八章、第九章、第十章及第二章第4节由武汉测绘科技大学雷玉堂编写;第五章、第七章由天津大学王庆有编写;第二章第1、2、3节、第三章由中国计量学院何加铭编写;第六章由河南大学张伟风编写。由雷玉堂担任主编,对该书进行了修改、补充、统稿。

本书由湖北工学院沈邦兴教授担任主审。此外,沈教授对本书编写工作的开展起了组织作用,原本要参与二章编写的,后因工作太忙,加上交稿时间急而未能如愿,但他仍关心本书的编写与出版;全国质量工程学科技术委员会的委员们,尤其是中国计量学院的陈丽薇与

河南大学的卜宏建对本书的编写给予了关心与支持；中国计量出版社副总编刘瑞清对本书的编写给予了极大的关心、支持与指导，责任编辑陈小林、王红同志对本书的编审出版付出了辛勤的劳动。在此一并表示真挚的谢意。

由于编者学识水平有限，书中难免存在不少缺点错误，敬请读者批评指正。

作者

1996年12月

目 录

第一章 光电检测技术基础.....	(1)
第一节 辐射度量与光度量	(1)
一、光的基本性质	(1)
二、光辐射度量	(3)
三、光谱辐射度量	(5)
四、光度量	(6)
第二节 半导体物理基础.....	(10)
一、半导体的特性	(10)
二、能带理论	(11)
三、热平衡载流子	(14)
四、非平衡载流子	(15)
五、载流子的运动	(18)
六、半导体对光的吸收	(20)
七、半导体的 PN 结及金属与半导体的接触.....	(22)
第三节 光电效应	(27)
一、光电导效应	(28)
二、光生伏特效应	(33)
三、光电发射效应	(35)
第二章 光电检测器件	(37)
第一节 光电检测器件的基本特性参数.....	(37)
一、有关响应方面的特性参数	(37)
二、有关噪声方面的参数	(39)
三、其它参数	(41)
第二节 真空光电探测器件	(42)
一、光电发射材料	(42)
二、光电倍增管	(44)
第三节 半导体光电检测器件	(50)
一、光敏电阻	(50)
二、光电池	(54)
三、光敏二极管	(59)
四、光敏三极管	(69)
第四节 各种光电检测器件的性能比较和应用选择.....	(74)
一、接收光信号的方式	(74)
二、各种光电检测器件的性能比较	(76)
三、光电检测器件的应用选择	(76)

第三章 热电检测器件	(78)
第一节 热电检测器件的基本原理	(78)
一、热电检测器件的共性	(78)
二、热电检测器件的最小可探测功率	(79)
第二节 热电偶与热电堆	(79)
一、热电偶的构造及工作原理	(79)
二、热电偶的参数	(80)
三、热电堆	(81)
四、使用注意事项	(81)
第三节 热敏电阻	(82)
一、热敏电阻的结构及原理	(82)
二、热敏电阻的参数	(83)
第四节 热释电探测器件	(85)
一、热释电探测器的发展及优点	(85)
二、热释电探测器的工作原理	(86)
三、热释电探测器的类型	(87)
四、热释电探测器的噪声及对前置放大的要求	(90)
第四章 发光与耦合器件	(92)
第一节 发光二极管	(92)
一、发光二极管的结构与工作原理	(92)
二、LED的特性参数	(92)
三、发光二极管的应用	(95)
第二节 激光器	(96)
一、激光的产生	(97)
二、氦氖激光器	(98)
三、半导体激光器	(99)
第三节 光电耦合器件	(103)
一、光电耦合器件的含义和特点	(103)
二、光电耦合器件的特性参数	(104)
三、光电耦合器件的应用	(109)
第五章 光电成像器件	(110)
第一节 概述	(110)
一、光电成像器件的发展	(110)
二、光电成像器件的类型	(111)
三、光电成像器件的基本特性	(111)
第二节 光电成像原理与电视摄像制式	(113)
一、光电成像原理	(113)
二、电视制式	(114)
第三节 真空摄像管	(115)
一、氧化铅视像管的结构	(116)
二、其它视像管的靶结构简介	(116)

三、摄像管的性能参数	(117)
第四节 电荷耦合器件 (CCD)	(119)
一、电荷存储	(119)
二、电荷耦合	(120)
三、电荷的注入和检测	(121)
四、CCD 的特性参数	(124)
五、电荷耦合摄像器件	(125)
第五节 变像管和像增强管	(130)
一、典型结构与工作原理	(130)
二、性能参数	(131)
三、像增强管的级联	(132)
第六章 光电信号检测电路设计	(136)
第一节 缓变光信号检测电路的设计	(136)
一、恒流源型光电检测电路的静态计算	(136)
二、光伏型光电检测电路的静态计算	(140)
三、可变电阻型光电检测电路的静态计算	(144)
第二节 交变光信号检测电路的设计	(146)
一、光电信号输入电路动态工作状态的计算	(146)
二、光电检测电路的频率特性	(148)
第三节 光电信号检测电路的噪声估算	(153)
一、检测电路的噪声等效处理	(154)
二、典型光电检测电路的噪声估算	(156)
第四节 光电信号的放大电路	(157)
一、放大器噪声	(158)
二、前置放大器的低噪声设计	(160)
三、检测器件和放大电路的连接	(162)
第七章 光电信号的数据采集与微机接口	(164)
第一节 光电信号的二值化处理	(164)
一、单元光电信号的二值化处理	(164)
二、视频信号的二值化处理	(165)
三、二值化数据采集接口	(167)
第二节 光电信号的量化处理	(168)
一、CCD 视频信号的量化处理过程	(168)
二、量化过程应用的部件	(168)
第三节 单元光电信号的数据采集与微机接口	(171)
一、微机扩充插槽	(171)
二、单元光电信号 A/D 数据采集卡	(175)
第四节 视频信号的数据采集与微机接口	(176)
一、线阵 CCD 十六位 A/D 数据采集原理	(176)
二、图像的数据采集与微机接口	(177)
三、实时采集 CCD 图像处理系统	(178)
第八章 光电信号的变换和检测技术	(182)

第一节 时变光信号的直接检测	(182)
一、光通量的幅度测量	(182)
二、光通量的频率测量	(186)
三、光通量的相位和时间测量	(188)
第二节 时变光信号的调制检测	(189)
一、调制的基本原理和类型	(189)
二、调制器	(194)
三、调制信号的解调	(197)
第三节 简单光学目标的形位检测	(200)
一、几何中心检测法	(201)
二、亮度中心检测法	(205)
第四节 复杂光学图像的扫描检测	(209)
一、扫描的基本原理和分类	(209)
二、图像扫描	(212)
三、实体扫描	(215)
第九章 光电信号的变换形式与检测方法	(218)
第一节 光电变换的基本形式与类型	(218)
一、光电变换的基本形式	(218)
二、光电变换的类型	(221)
第二节 几何变换的光电检测方法	(221)
一、光电测长技术	(221)
二、轴向测距	(223)
第三节 物理变换的光电检测方法	(226)
一、光电干涉测量技术	(226)
二、单频光相干的条纹检测	(227)
三、双频光相干的差频检测	(230)
第四节 光电编码器与条形码	(235)
一、最简单的编码器——光电开关	(236)
二、增量式光电编码器	(240)
三、绝对式光电编码器	(244)
四、条形码光电编码器	(247)
第十章 光电检测技术的典型应用	(249)
第一节 光电测绘技术	(249)
一、光电准直	(249)
二、光电测距	(253)
三、光电测角	(260)
四、光电自动测图	(265)
第二节 微弱光信号检测技术	(266)
一、锁相放大器	(266)
二、取样积分器	(269)
三、光子计数系统	(272)
第三节 光学传递函数检测技术	(276)

一、OTF 的基本概念	(276)
二、测定 OTF 的扫描调制法	(277)
三、光电傅里叶分析 OTF 测试仪	(279)
参考文献	(281)

第一章 光电检测技术基础

第一节 辐射度量与光度量

一、光的基本性质

很久以前，人们对光学现象进行了研究，并认识到光有直线传播的特点。在17世纪，牛顿根据光直线传播的现象，提出光是由光源飞出的微粒流的假说，认为这些微粒在均匀媒质中沿着直线方向等速飞行，并以微粒流的观点对反射和折射定律作了解释。随着生产和科学技术的发展，又发现了许多用光的直线传播概念不能解释的较为复杂的光现象，如光的干涉、衍射和偏振等。于是惠更斯、杨氏和费涅耳等提出了光的波动学说，认为光是发光材料中分子振动的结果，这些振动通过一种假想的弹性媒质，以水波一样的方式传播出去。光的波动理论能够解释光的干涉和衍射等现象。到1860年，麦克斯韦电磁理论建立后，才认识到光也是一种电磁现象。原来光和无线电波一样，也是一种电磁波，只不过光的波长比无线电波短得多而已。电磁波谱如图1-1所示。

电磁波包括的范围很广，如现在已经发现的宇宙射线，其波长小于几个皮米($1\text{pm} = 10^{-12}\text{m}$)，而广播用的无线电波的波长则达上千米，它们都属于电磁波的范畴。光波仅仅是电磁波中的一小部分，它包括的波长区间约从几个纳米($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$)到1mm左右。这些光并不是人眼都能看得见的。其中只有波长从约 $0.38\mu\text{m}$ 到 $0.78\mu\text{m}$ 范围内的电磁

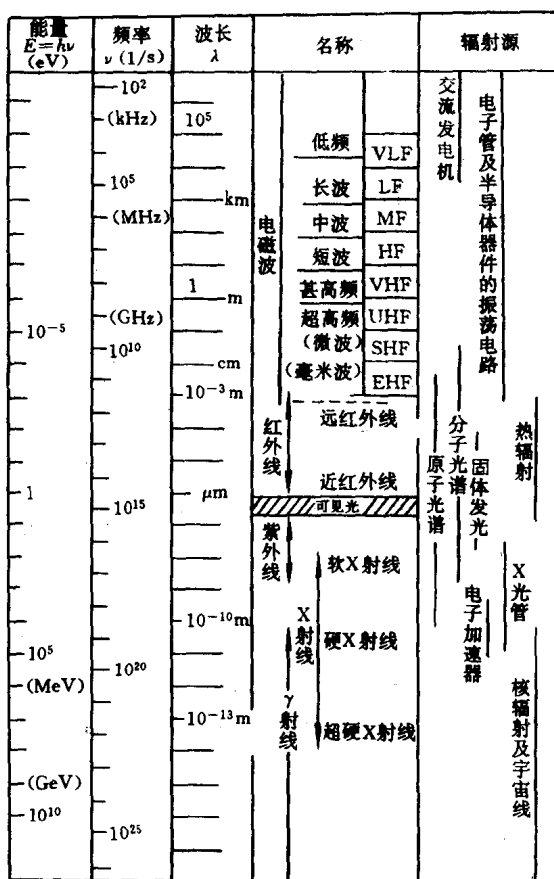


图1-1 电磁波按波长的分类及各波长区域名称

波，才能引起人眼感光细胞的直接感觉。这一段波谱我们称为可见光区。为了清楚起见，分别将紫外、可见和红外光部分放大如图 1—2 所示。在可见光中，波长最短的是紫光，稍长的是蓝光，以后的顺序是青光、绿光、黄光、橙光和红光，红光的波长最长。而在不可见光中，波长比紫光短的光称为紫外线，比红光长的叫红外线。表 1—1 列出了光的各个波长区域。波长小于 200nm 的光称为真空紫外，因为这部分光在空气中很快被吸收，所以只能在真空中传播。

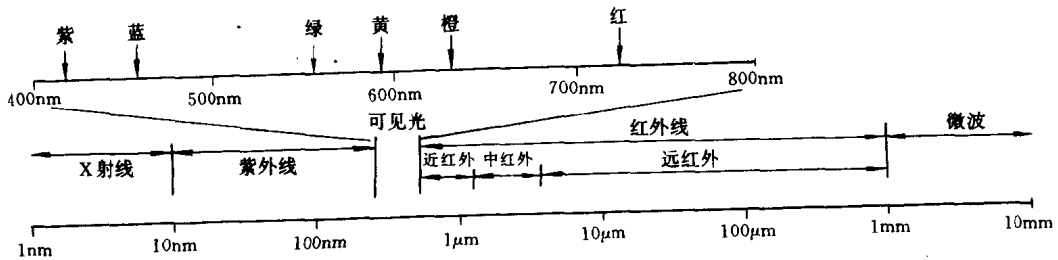


图 1—2 紫外、可见和红外光波长

表 1—1 光的各个波长区域

波长区域 (nm)	区域名称		波长区域 (nm)	区域名称	
1~200	真空紫外区	紫外区	560~590	黄光	可见光区
200~300	远紫外区		590~620	橙光	
300~380	近紫外区		620~780	红光	
380~420	紫光	可见光区	780~1 500	近红外区	红外区
420~450	蓝光		1 500~10 000	中红外区	
450~490	青光		10 000~1 000 000	远红外区	
490~560	绿光				

现在常用的光波波长的单位是微米 (μm)、纳米 (nm)。它们之间的关系为：

$$1\mu\text{m} = 10^3\text{nm}$$

应当指出，图 1—1、图 1—2 和表 1—1 只表示各波长区间的大致范围和相互位置，并没有也不可能给出区间的严格界限。实际上，各个区域之间都是逐步过渡而不是截然分开的。

由于光波也是一种电磁波，因此可以用麦克斯韦方程来描写。由麦克斯韦方程知道，迅速变化着的电磁场必定要向四周传播。电磁波在媒质中传播速度 v 由下式决定：

$$v = \frac{\lambda\nu}{n} \quad (1-1)$$

式中，速度 v 的单位是 m/s； λ 为波长，单位是 m； ν 为频率，单位是 Hz； n 为媒质的折射率。在真空中， $n=1$ ，光传播速度 $c=299\,792\,458\text{m/s}$ ，一般近似记为 $3\times 10^8\text{m/s}$ 。除非特别指明，今后凡提到光的波长、速度，通常均指真空中的波长、速度。

利用麦克斯韦理论能很好地说明光在传播过程中的反射、折射、干涉、衍射、偏振以及光在各向异性介质中的传播等现象。但在研究过程中，人们发现在光与物质的互相作用方面，

如物质对光的吸收、色散和散射等，用电磁理论仍不能给出令人满意的解释。1900年普朗克在研究黑体辐射的能量按波长分布这一问题时认为，谐振子辐射是不连续的，提出了辐射的量子论。1905年，爱因斯坦在解释光电发射现象时也提出了光量子的概念，从而逐渐地形成了新的微粒理论——量子论。量子论认为，光是由许多光量子组成的，这些光量子具有的能量为 $h\nu$ 。其中 $h=6.626\ 075\ 5\pm 0.000\ 004\ 0)\times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$ ，称为普朗克常数。以后的光电效应、X光散射等实验证实了光量子理论，并肯定了光具有粒子性。然而，光的干涉、衍射等现象又必须肯定光具有波动性。事实使人们认识到光具有波粒二重性。后来发展的量子电动力学也较好地反映了光的这种二重性，从而使人们对光的本性有了进一步的认识。当然这种认识仍然是近似的，但它更接近客观实际了。

二、光辐射度量

辐射是一种能的形式。它有电磁本质，又具有量子性质。在光的发射和吸收以及发生辐射和物质——量子 and 电子相互作用的基本过程的光电效应现象中，能表现出辐射的量子特性。在光的衍射、干涉和偏振现象中表现出辐射的波动特性。

光源一般是指发光的物体，它可分为天然的和人造的两种。象太阳、星体以及地球上的各种爆炸物属于天然光源；而白炽灯、汞灯、氙灯、脉冲灯以及各种激光器和固体发光器件等均属人造光源。

光辐射伴随着辐射能的转移。辐射能及其引起的特性以能量或有效的物理量来测量。为了研究光辐射现象的规律，测定出供给光源的能量（如电能）转换成光能效率的高低。通常以表1—2中所列出的一些基本参量来描述光源的辐射特性。为了对辐射度量有比较清楚的认识，下面对各参量作一些简要的说明。

表 1—2 辐射度量与单位

量的名称	符号	定义式	单位	单位符号
辐射能	Q_e		焦耳	J
辐射能密度	w_e	dQ_e/dV	焦耳/米 ³	J/m ³
辐射通量	Φ_e, P	dQ_e/dt	瓦	W
辐射出射度	M_e	$d\Phi_e/dA$	瓦/米 ²	W/m ²
辐射强度	I_e	$d\Phi_e/d\omega$	瓦/球面度	W/sr
辐射亮度	L_e	$dI_e/dA\cos\theta$	瓦/米 ² ·球面度	W/m ² ·sr
辐照度	E_e	$d\Phi_e/dA$	瓦/米 ²	W/m ²

1. 辐射能 Q_e

以辐射的形式发射、传播或接收的能量称为辐射能。当这些能量被物质吸收时，可以转换成其它形式的能量，如电能、热能等。象其他任何形式的能一样，辐射能的法定计量单位是焦耳 (J)，过去曾使用的非法定计量单位卡和尔格与焦耳的关系是：

$$1\text{ cal}=4.18\text{ J} \quad 1\text{ J}=10^7\text{ erg}$$

过去以辐射能 Q_e 来评价辐射性能比较少。自激光器出现以后, 这个参量才开始普遍应用。

2. 辐射能密度 w_e

光源在单位体积内的辐射能称为光源的辐射能密度。它表征辐射能量的空间特性, 可以用它的体密度来表示。其定义式为

$$w_e = dQ_e / dV \quad (1-2)$$

式中, V 为体积。辐射能密度单位是焦耳/米³ (J/m^3)。

3. 辐射通量 Φ_e

在单位时间内通过某一定面积的辐射能称为通过该面积的辐射通量。而光源在单位时间内辐射的总能量称为光源的辐射通量。辐射通量也可称为辐射功率 (用 P 表示) 或辐射能流。其表示式为

$$\Phi_e = dQ_e / dt \quad (1-3)$$

式中, dQ_e 是在 dt 时间内转移的单元能量。

辐射通量的单位为瓦 ($1 W = 1 J/s$)。

4. 辐射强度 I_e

从一个点光源发出的, 在单位时间内、单位立体角 (一个锥体的顶端在球心, 底在球面上, 底面积等于球半径的平方, 这锥体所包的立体角就叫做单位立体角) 所辐射出的能量称为辐射强度。其表达式为

$$I_e = d\Phi_e / d\omega \quad (1-4)$$

式中, $d\Phi_e$ 为辐射源在 $d\omega$ 立体角内所辐射出来的辐射功率。

辐射强度的单位是瓦/球面度 (W/sr)。

5. 辐射出射度 M_e

辐射体在单位面积内所辐射的通量或功率称为辐射出射度或称为辐射发射度 (辐射本领)。这是用来量度物体辐射能力的物理量。其表达式为

$$M_e = d\Phi_e / dA \quad (1-5)$$

式中, $d\Phi_e$ 为辐射体面积元 dA 向一切方向 (在 2π 立体角内) 所发出的辐射通量。

辐射出射度的单位是瓦/米² (W/m^2)

6. 辐射亮度 L_e

由辐射表面定向发射的辐射强度称为辐射亮度。它决定于单位面积的辐射表面所发射的通量的空间分布。在与辐射表面 dA 的法线成 θ 角的方向上, 辐射亮度等于该方向上的辐射强度 dI_e 与辐射表面在该方向垂直面上的投影面积之比。其表达式为

$$L_e = dI_e / dA \cdot \cos\theta \quad (1-6)$$

式中, dA 为光源的表面元; θ 为光源表面的法线与给定方向间的夹角。

辐射亮度的单位为瓦/米²·球面度 ($W/(m^2 \cdot sr)$)。 L_e 的数值与辐射源的性质有关, 并随给定方向而变。若 L_e 不随方向而变, 则 I_e 正比于 $\cos\theta$, 即

$$I_e = I_0 \cos\theta \quad (1-7)$$

此式可用图 1-3 表示。满足式 (1-7) 的特殊光源称为余弦辐射体。余弦辐射体也称均匀漫反射体或朗伯体。除了黑体、灰体外, 实验表明, 抛毛乳白玻璃的透视光或反射光, 抛毛乳白板的反射光以及氧化镁、硫酸钡等表面的反射光很接近于理想的余弦辐射体。白雪对阳光

的反射也符合余弦辐射体的规律。对余弦辐射体，即服从朗伯定律的辐射体，可以推算出：

$$M_e = \pi L_e \quad (1-8)$$

即余弦辐射体的辐射出射度在数值上为其辐射亮度的 π 倍。

7. 辐照度 E_e

为了评定辐射体对装置的作用，要引入辐照度的概念，它表示单位面积内所接收到的辐射通量。其表达式为

$$E_e = d\Phi_e / dA \quad (1-9)$$

辐照度的单位为瓦/米² (W/m²)。

对于理想的散射面，满足条件 $M_e = E_e$ ，于是由公式 (1-8) 可得

$$E_e = \pi L_e \quad (1-10)$$

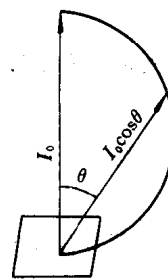


图 1-3 余弦辐射体

三、光谱辐射度量 (辐射量的光谱密度)

为了表征辐射，不仅要知道辐射的总通量和强度，还应知道其光谱组份。因为光源发出的光，往往由许多波长的光组成，为了研究各种波长的光所分别辐射的能量，还需要引入光谱辐射度量的概念。光谱辐射度量是单位波长间隔内的辐射度量，其量和单位见表 1-3。

表 1-3 光谱辐射度量

量的名称	符号	定义式	单位	单位符号
光谱辐射通量	Φ_λ	$d\Phi_e / d\lambda$	瓦/微米	W/ μm
光谱辐射通量	Φ_ν	$d\Phi_e / d\nu$	瓦/赫	W/Hz
光谱辐射出射度	M_λ	$dM_e / d\lambda$	瓦/米 ² ·微米	W/m ² · μm
光谱辐照度	E_λ	$dE_e / d\lambda$	瓦/米 ² ·微米	W/m ² · μm
光谱辐射强度	I_λ	$dI_e / d\lambda$	瓦/球面度·微米	W/sr· μm
光谱辐射亮度	L_λ	$dL_e / d\lambda$	瓦/米 ² ·球面度·微米	W/m ² ·sr· μm

光源发出的光在每单位波长间隔内的辐射通量称为光谱辐射通量 (曾称辐射通量的光谱密度或单色辐射通量)。即

$$\Phi_\lambda = \Delta\Phi_e / \Delta\lambda \quad (1-11)$$

由于光源发出的各种波长的光谱辐射通量 Φ_λ 一般是不同的，所以，若在 λ 到 $\lambda + d\lambda$ 间隔内的辐射通量是 $d\Phi_e$ ，则在波长 λ 处的光谱辐射通量为

$$\Phi_\lambda(\lambda) = d\Phi_e(\lambda) / d\lambda \quad (1-12)$$

若按整个光谱积分该函数，则可求得总的辐射通量值：

$$\Phi_e = \int_0^\infty \Phi_\lambda(\lambda) / d\lambda \quad (1-13)$$

与辐射通量的光谱密度函数 $\Phi_\lambda(\lambda)$ 类似，我们可写出其它辐射度量的光谱密度函数表示式。

光源发出的光在每单位波长间隔内的辐射出射度称为光谱辐射出射度 M_λ :

$$M_\lambda(\lambda) = dM_e(\lambda)/d\lambda \quad (1-14)$$

光源发出的光在每单位波长间隔内的辐射强度称为光谱辐射强度 I_λ :

$$I_\lambda(\lambda) = dI_e(\lambda)/d\lambda \quad (1-15)$$

光源发出的光在每单位波长间隔内的辐射亮度称为光谱辐射亮度 L_λ :

$$L_\lambda(\lambda) = dL_e(\lambda)/d\lambda \quad (1-16)$$

光源发出的光在每单位波长间隔内的辐照度称为光谱辐照度 E_λ :

$$E_\lambda(\lambda) = dE_e(\lambda)/d\lambda \quad (1-17)$$

对这些函数积分,可以得到相应量的总辐射度量值:

$$\int_0^\infty M_\lambda(\lambda)d\lambda = M_e; \int_0^\infty I_\lambda(\lambda)d\lambda = I_e; \int_0^\infty L_\lambda(\lambda)d\lambda = L_e; \int_0^\infty E_\lambda(\lambda)d\lambda = E_e; \quad (1-18)$$

四、光度量

除了特殊用途的光源(如红外光源和紫外光源)外,大量的光源是作为照明用的。照明光源的特性只用前面所叙述的一些能量参数来描述是不够的,因为能量参数并没有考虑到人眼的作用。由于照明的效果最终是以人眼来评定的,因此照明光源的光学特性必须用基于人眼视觉的光学参量即光度量来描述。

表 1—4 列出了基本光度学的量、定义、单位和符号。下面对这些参量作简要的说明。

表 1—4 光度量和单位

量的名称	符号	定义式	单位	单位符号
光通量	Φ	$K_m \int_0^\infty \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda$	流明	lm
光出射度	M	$d\Phi/dA$	流明/米 ²	lm/m ²
光照度	E	$d\Phi/dA$	勒克斯(流明/米 ²)	lx (lm/m ²)
发光强度	I	$d\Phi/d\omega$	坎德拉(流明/球面度)	cd (lm/sr)
光亮度	L	$\frac{dI}{dA \cdot \cos\theta}$	坎德拉/米 ²	cd/m ²
光量	Q	$\int \Phi dt$	流明·秒	lm·s

人的视神经对各种不同波长的光的感光灵敏度是不一样的,对绿光最灵敏,对红光灵敏度要低得多。另外,由于不同的人的视觉生理和心理作用不一样,不同的人对各种波长的光的感光灵敏度也有差别。国际照明委员会(CIE)根据对许多人的大量观察结果,用平均值的方法,确定了人眼对各种波长的光的平均相对灵敏度,称为“标准光度观察者”的光谱光视效率 $V(\lambda)$,或称视见函数。 $V(\lambda)$ 的最大值在 555nm 处。此时, $V(\lambda)=1$,其它波长的 $V(\lambda)$ 都小于 1。各种波长下的 $V(\lambda)$ 值可由 GB 3102.6—93 光及有关电磁辐射的量和单位中的附录 A 查出。

光度量是人眼对相应辐射度量的视觉强度值。由于人眼对不同波长的光的感光灵敏度不一样，能量相同而波长不同的光，在人眼中引起的视觉强度不相同。

1. 光通量

光通量是光辐射通量对人眼所引起的视觉强度值。若在波长 λ 到 $\lambda+d\lambda$ 间隔内光源的辐射通量为 $\Phi_{e,\lambda}d\lambda$ ，则光通量的表示式为

$$\begin{aligned}\Phi &= K_m \int_{\lambda} \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \\ &= K_m \int_{380}^{780} \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda\end{aligned}\quad (1-19)$$

式中， K_m 为辐射度量与光度量之间的比例系数； $V(\lambda)$ 为人眼的光谱光视效率，积分限的变换是由于对波长小于 380nm 和大于 780nm 的不可见光， $V(\lambda) = 0$ 。

上式中等号的左边 Φ 是光通量，其单位是流明 (lm)；而等号的右边的 $\Phi_{e,\lambda}d\lambda$ 是辐射通量，单位是瓦 (W)； $V(\lambda)$ 是一个无量纲 (即量纲为一) 的系数。所以等号右边引进一个系数 K_m ，从而使两边的单位一致。显然， K_m 的单位为流明/瓦。 K_m 称为最大光谱光视效能，过去曾称光功当量或光的力学当量， $K_m = 683 \text{ lm/W}$ 。它表示在波长为 555nm 处，即人眼光谱光视效率最大 ($V(\lambda) = 1$) 处，与 1W 的辐射能通量相当的光通量为 683 lm；换句话说，此时 1 lm 相当于 1/683W。

2. 发光强度 I

光源在给定方向上单位立体角内所发出的光通量，称为光源在该方向上的发光强度：

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad (1-20)$$

式中， $d\Phi$ 为光源在给定方向上的立体角元 $d\omega$ 内发出的光通量。

发光强度的单位为坎德拉 (cd)。坎德拉是国际单位制中 7 个基本单位之一。其定义为：坎德拉 (cd) 是一光源在给定方向上的发光强度。该光源发出频率为 540×10^{12} 赫兹的单色辐射，且在此方向上的辐射强度为 1/683 瓦特每球面度。

3. 光出射度 M

光源表面给定点处单位面积向半空间内发出的光通量，称为光源在该点的光出射度：

$$M = d\Phi/dA \quad (1-21)$$

式中， $d\Phi$ 为给定点处的面元 dA 发出的光通量 (见图 1-4(a))。

光出射度的单位为流明每平方米 (lm/m^2)。

需要指出的是，所研究的光源表面不仅包括自身发光的光源 (如白炽灯的灯丝) 的表面，也可以是这些光源的象或自身并不发光而在受到光照后成为光源的表面，对于后一种情况，其光出射度与该表面被照明的程度有关。

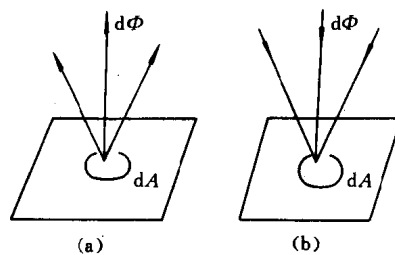


图 1-4 光出射度与光照度

4. 光照度 E

被照明物体给定点处单位面积上的入射光通量称为该点的照度：

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (1-22)$$