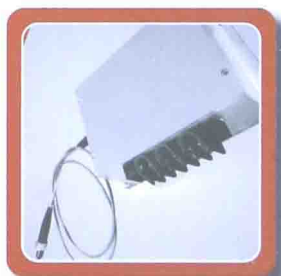




全国高等院校仪器仪表及自动化类“十二五”规划教材

光电传感器件 与应用技术

◎ 郝晓剑 主 编



通过典型光电探测系统设计方法和实现过程体现创新设计
力求反映光电传感技术领域中的新思想、新工具、新手段
结合实例，全面提升读者的光电传感系统设计与应用能力



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

全国高等院校仪器仪表及自动化类“十二五”规划教材

光电传感器件与应用技术

		郝晓剑	主 编
	刘 吉	赵 辉	副主编
赵 宇	王艳红	王小燕	参 编
		李仰军	主 审

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry

内 容 简 介

本书以编者多年从事光电传感技术及其应用方面的研究为基础,结合编者在光电传感技术领域的最新研究成果,参考近年来光电传感技术的最新进展,主要讲述了光电传感系统中所涉及的基础理论、光(辐射)源、光电导器件、结型光电器件、光电发射器件、光电成像器件、平板显示器件及各种光电器件的典型应用。全书内容丰富,概念清晰,能引导读者正确掌握光电传感器件的基本原理、使用技巧和光电测试系统的设计思想和方法。

本书力求为测控技术与仪器、光电信息科学与工程、电子信息工程等专业的本科生及仪器科学与技术、光学工程、信息与通信工程等学科的研究生和工程技术人员提供光电传感系统分析、设计的基本理论、先进的前沿技术和最新方法。

图书在版编目(CIP)数据

光电传感器件与应用技术/郝晓剑主编. —北京:电子工业出版社, 2015. 1

全国高等院校仪器仪表及自动化类“十二五”规划教材

ISBN 978-7-121-25101-6

I. ①光… II. ①郝… III. ①光电传感器—光电器件—高等学校—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第292683号

策划编辑:郭穗娟

责任编辑:陈韦凯

文字编辑:孙志明

印 刷:北京四季青印刷厂

装 订:北京四季青印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:18.5 字数:473.6千字

版 次:2015年1月第1版

印 次:2015年1月第1次印刷

定 价:45.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

《全国高等院校仪器仪表及自动化类“十二五”规划教材》

编委会

主任委员：许贤泽

副主任委员：谭跃刚

委	员：	刘波峰	郝晓剑	杨述斌	付 华
		赵 燕	黄安贻	郭斯羽	武洪涛
		靳 鸿	陶晓杰	戴 蓉	李建勇
		秦 斌	王 欣	黎水平	孙士平
		冯先成	白福忠	张国强	王后能
		张雪飞	谭保华	周 晓	王 敏

前 言

现代科学技术中,光电传感技术是以激光、红外、微光、光纤、微电子等现代光电子器件为基础,和光学、电子学、精密机械、计算机、仪器科学相结合的新兴科技领域,在国民经济和国防建设中占有十分重要的地位。利用光电传感技术,能将人眼不易或看不见的X射线,紫外辐射、红外辐射和极微弱的光信号甚至瞬变的目标景物逼真地再现或记录下来,从而弥补了人眼在空间、时间、能量和光谱分辨能力上的局限性。光电传感器件是光电传感技术的一个重要组成部分。在测试过程中,光电传感器件的作用是发现信号、测量信号,并为随后的应用提取某些必需的信息。光电传感技术不仅具有重要的军用价值,而且还具有广阔的民用市场,它渗透到科学实验和生产技术的各个领域,是科学实验和工程技术检测的基础。

本书强调光电传感技术的系统性,从内容构成上以光电传感系统设计思想和方法为导航,介绍了光电传感系统中所涉及的基础理论、光(辐射)源、光电传感器件及其典型应用,以及最新进展。用创新设计思想组织光、机、电、计算机相结合的几个典型探测系统设计方法和实现过程。本书力求反映光电传感技术领域中的新思想、新工具、新手段,通过实际应用范例,将最新的科研成果融入本书中以供读者借鉴,使读者循序渐进地理解和掌握光电传感系统设计的主要理论、方法、知识点及最新发展,全面提升读者的光电传感系统设计及应用能力。

本书由中北大学郝晓剑担任主编,中北大学刘吉和赵辉担任副主编,第2、9章和10.5节由郝晓剑编写,第1、6章和10.2节由刘吉编写,第5、8章和10.4节由赵辉编写,第3章由中北大学王小燕编写,第7章和10.3节由中北大学王艳红编写,第4章和10.1节由中北大学赵宇编写。郝晓剑负责统编全稿,李仰军作为本书的主审。

本书在编写过程中,参阅了很多文献,在此向这些文献的作者表示谢意。同时,感谢电子工业出版社的热情帮助。

本书得到了仪器科学与动态测试教育部重点实验室、电子测试技术国家重点实验室、中北大学的资助,在此表示衷心感谢。

尽管全体编者都尽心尽力,但终因水平有限,书中难免有不足之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2014年12月

目 录

第 1 章 光电传感技术基础	1
1.1 光电传感系统的描述	1
1.2 辐射度学和光度学	1
1.2.1 辐射度学	1
1.2.2 光度学	3
1.2.3 辐射度与光度学的基本定律	5
1.2.4 黑体辐射	7
1.3 半导体基础	9
1.3.1 半导体结构	9
1.3.2 半导体中的载流子	11
1.4 半导体的光电效应	15
1.4.1 光电导效应	16
1.4.2 光伏效应	17
1.4.3 光电发射效应	19
1.5 光热效应	20
1.6 光电传感器的噪声和特性参数	21
1.6.1 光电传感器的噪声	22
1.6.2 光电传感器的主要特性参数	23
思考与练习	25
第 2 章 光电传感系统中的常用光源	27
2.1 光源的基本特性参数	27
2.1.1 辐射效率和发光效率	27
2.1.2 光谱功率分布	28
2.1.3 空间光强分布	28
2.1.4 光源的颜色	29
2.1.5 光源的色温	29
2.2 热辐射源	30
2.2.1 太阳与黑体模拟器	30
2.2.2 白炽灯与卤钨灯	31
2.3 气体放电光源	31
2.4 发光二极管	33
2.4.1 普通亮度的 LED	33
2.4.2 超高亮度的 LED	35

2.4.3 白光 LED	36
2.5 激光器	38
2.5.1 激光器的基本原理	38
2.5.2 激光器的分类及应用	39
2.5.3 激光的特性	46
思考与练习	47
第3章 光电发射器件	48
3.1 光电发射阴极	48
3.1.1 光电发射阴极的主要参数	48
3.1.2 常用光电阴极材料	49
3.2 光电管与光电倍增管结构原理	51
3.2.1 光电管	51
3.2.2 光电倍增管	52
3.3 光电倍增管的主要特性参数	54
3.4 光电倍增管的供电和信号输出电路	58
3.4.1 高压分压电路	58
3.4.2 信号输出方式	60
3.5 微通道板光电倍增管的结构、分类及性能特点	61
3.5.1 微通道板的结构和工作原理	61
3.5.2 微通道板光电倍增管的结构、分类及性能特点	62
3.6 像增强器	64
3.7 应 用	66
3.7.1 光电倍增管的典型应用	66
3.7.2 像增强器的典型应用	68
思考与练习	69
第4章 光电导探测器	70
4.1 光电导探测器的工作原理	70
4.2 光电导材料及结构特点	72
4.2.1 材料及分类	72
4.2.2 结构特点及原理	73
4.3 光电导探测器的主要特性参数	74
4.3.1 光电流及光电导增益	74
4.3.2 光电特性	75
4.3.3 光谱特性	77
4.3.4 伏安特性	78
4.3.5 时间响应及频率特性	78
4.3.6 前历效应	81
4.3.7 温度特性	82
4.4 光电导探测器的变换电路	82
4.4.1 基本偏置电路	82

4.4.2 恒流电路	83
4.4.3 恒压电路	84
4.5 光电导探测器的应用实例	85
4.5.1 自动调光台灯光电控制电路	85
4.5.2 火焰探测报警器	85
4.5.3 热电制冷型红外测温仪	86
思考与练习	87
第5章 半导体结型光电器件	89
5.1 结型光电器件基本原理	89
5.1.1 热平衡状态下的 P-N 结	89
5.1.2 光照下的 P-N 结	90
5.2 硅光电池	92
5.2.1 硅光电池的基本结构	92
5.2.2 硅光电池的工作原理	92
5.2.3 硅光电池的特性参数	93
5.3 硅光电二极管	95
5.3.1 硅光电二极管基本结构	96
5.3.2 硅光电二极管的工作原理	96
5.3.3 光电二极管的电流方程	96
5.3.4 光电二极管的基本特性	97
5.4 硅光电三极管	100
5.4.1 硅光电三极管基本结构	100
5.4.2 硅光电三极管工作原理	101
5.4.3 光电三极管的特性	102
5.5 结型光电器件的偏置电路	104
5.5.1 反向偏置电路	104
5.5.2 零伏偏置电路	107
5.5.3 其他光电变换电路	107
5.6 特殊结型光电二极管	109
5.6.1 PIN 光电探测器	109
5.6.2 雪崩光电二极管	109
5.7 象限探测器和光电位置传感器	111
5.7.1 象限探测器	111
5.7.2 光电位置传感器 (PSD)	114
5.8 半导体光电器件的特性参数与选择	118
5.8.1 半导体光电器件的特性参数	118
5.8.2 半导体光电器件的应用选择	120
思考与练习	121
第6章 光电成像器件	123
6.1 真空成像器件	123

6.1.1	像管	123
6.1.2	摄像管	126
6.2	固体成像器	128
6.2.1	电荷耦合器件 (CCD)	128
6.2.2	CMOS 图像传感器	135
6.2.3	工业相机介绍	140
6.2.4	机器视觉系统及其应用	142
	思考与练习	151
第7章	红外探测器概述	152
7.1	红外探测器分类	152
7.1.1	热敏探测器	152
7.1.2	光子型探测器	153
7.1.3	红外探测器的工作条件与性能指标	154
7.2	常用红外探测器	161
7.2.1	光电导型红外探测器工作原理与性能分析	161
7.2.2	光电导型红外探测器——SPRITE 探测器原理与结构	164
7.2.3	光伏型红外探测器的工作原理与性能分析	166
7.2.4	肖特基势垒光电探测器工作原理	167
7.2.5	量子阱红外探测器	169
7.3	常用热探测器	170
7.3.1	热敏电阻	170
7.3.2	热电偶和热电堆	171
7.3.3	热释电探测器	173
7.3.4	高莱管	175
7.4	其他红外探测器	176
7.4.1	铋化钢红外探测器	176
7.4.2	碲镉汞探测器	177
7.4.3	碲锡铅探测器	177
7.4.4	砷化镓探测器	178
7.4.5	光子牵引探测器	178
7.4.6	MOS 探测器	179
7.5	红外探测器的应用——红外夜视系统	180
7.5.1	红外夜视仪的原理	180
7.5.2	红外热成像仪的原理	181
	思考与练习	182
第8章	平板显示器件	183
8.1	液晶显示器件	183
8.1.1	基本概念	183
8.1.2	光电特性	184
8.1.3	动态散射型液晶显示器件	186

8.1.4 扭曲向列液晶显示器件	186
8.1.5 超扭曲向列液晶显示器件	188
8.1.6 有源矩阵液晶显示器件	189
8.1.7 LCD 工作环境及特点	191
8.2 等离子体显示器件	191
8.2.1 彩色 AC-PDP 的工作原理	191
8.2.2 彩色 AC-PDP 的特点和应用	192
8.3 有机发光器件	193
8.3.1 OLED 器件发光原理	194
8.3.2 OLED 器件的分类	194
8.4 数字微反射镜器件	195
8.4.1 DMD 结构和工作原理	195
8.4.2 DLP 投影显示及特点	196
思考与练习	196
第9章 典型光电传感系统	197
9.1 瞬态表面高温测量及校准系统	197
9.1.1 瞬态表面高温光电传感系统	197
9.1.2 可溯源瞬态表面温度传感器动态校准系统	206
9.1.3 瞬态超高温测试的外推方法探索	215
9.2 激光光幕靶光电传感系统及校准	216
9.2.1 分离型激光光幕靶	220
9.2.2 激光光幕靶的校准	226
9.2.3 激光光幕靶的应用拓展	227
9.3 其他光电传感系统	229
9.3.1 归一化植被指数光电传感系统	229
9.3.2 光纤传像元件光学特性光电传感系统	233
9.3.3 基于 PSD 的自动机运动参数光电传感系统	236
9.3.4 导弹轨上运动参数光电传感系统	237
9.3.5 纯镁与镁合金燃点比色测温系统	239
思考与练习	241
第10章 光电传感新技术及应用	242
10.1 光电薄膜技术	242
10.1.1 光电薄膜技术概述	242
10.1.2 光电薄膜的制作	247
10.1.3 光电薄膜器件的技术特点	251
10.1.4 光电薄膜器件的应用	253
10.2 光 MEMS, MOEMS	255
10.2.1 MEMS 器件概述	255
10.2.2 MOEMS 器件——MEMS 与光的结合	255
10.2.3 MOEMS 的应用	256

10.3 激光散斑测试技术	260
10.3.1 散斑的数学描述	261
10.3.2 激光散斑测量方法	261
10.4 太赫兹技术的应用	264
10.4.1 太赫兹频段及特点	264
10.4.2 THz 成像技术的应用	266
10.5 光存储技术	271
10.5.1 光存储器概述	271
10.5.2 光盘存储器的工作原理	273
10.5.3 超高密度光存储技术	276
10.6 太阳能技术	278
10.6.1 太阳能电池	278
10.6.2 太阳能电池的种类	278
10.6.3 太阳能新技术	279
10.6.4 应用领域	281
思考与练习	282
参考文献	283

第1章 光电传感技术基础

1.1 光电传感系统的描述

光电传感系统就是以光波作为信息和能量的载体而实现传感、传输、检测等功能的测量系统。它不仅在军事、国防领域得到了广泛的应用，而且已经渗透到许多科学领域，并得到迅猛发展。光电探测技术是建立在现代光、机、电、计算机等科技成果基础上的综合学科，它所涉及的基础理论和工程技术内容十分广泛，光电探测系统的典型配置如图 1-1 所示。它包括了光源（或辐射源）、信息载体、光电传感器及信息处理装置。



图 1-1 光电传感系统的组成

1.2 辐射度学和光度学

为了对光辐射进行定量描述，需要引入计量光辐射的物理量。而对于光辐射的探测和计量，存在着辐射度单位和光度单位两套不同的体系。

在辐射度单位体系中，辐通量（又称为辐射功率）或者辐射能是基本量，是只与辐射客体有关的量。其基本单位是瓦特（W）或者焦耳（J）。辐射度学适用于整个电磁波段。

光度单位体系是一套反映视觉亮暗特性的光辐射计量单位，被选作基本量的不是光通量而是发光强度，其基本单位是坎德拉（cd）。光度学只适用于可见光波段。

以上两类单位体系中的物理量在物理概念上是不同的，但所用的物理符号是相互对应的。为了区别起见，在对应的物理量符号标角标“e”表示辐射度物理量，角标“v”表示光度物理量。下面重点介绍辐射度单位体系中的物理量。光度单位体系中的物理量可对比理解。

1.2.1 辐射度学

1. 辐射量

（1）辐射能。辐射能是以辐射形式发射或传输的电磁波（主要指紫外、可见光和红外辐射）能量。辐射能一般用符号 Q_e 表示，其单位是焦耳（J）。

（2）辐[射]通量。辐射通量 Φ_e 又称为辐射功率，定义为单位时间发射、传输或接受

的辐射能量，即

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad (1-1)$$

单位：瓦特（W）或焦耳每秒（J/s）。

（3）辐[射]出射度。辐射出射度 M_e 是用来反映物体辐射能力的物理量。定义为辐射体单位面积发射的辐射通量，即

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad (1-2)$$

单位：瓦每平方米（W/m²）。

（4）辐[射]强度。辐射强度 I_e 定义为点辐射源在给定方向上发射的在单位立体角内的辐射通量，用 I_e 表示，即

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad (1-3)$$

单位：瓦[特]每球面度（W/sr）。

一个任意形状的封闭锥面所包含的空间称为“立体角”，用 Ω 表示。立体角的求法是以锥顶为球心，以 r 为半径做一圆球，如果锥面在圆球上所截面积等于 r^2 ，则该立体角为一个“球面度”（sr），如图 1-2 所示。

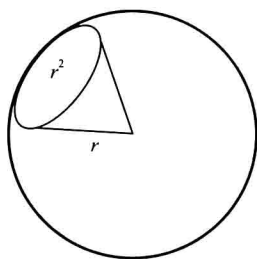


图 1-2 立体角及球面度的定义图

因为整个空间球面面积为 $4\pi r^2$ ，因此整个空间球面度

$$\Omega = 4\pi r^2 / r^2 = 4\pi \text{ (sr)} \quad (1-4)$$

由辐射强度的定义可知，如果一个置于各向同性均匀介质中的点辐射体向所有方向发射的总辐射通量是 Φ_e ，则该点辐射体在各个方向的辐射强度 I_e 是常量，有

$$I_e = \frac{\Phi_e}{4\pi} \quad (1-5)$$

对于一个圆锥面，如图 1-3 所示，当其半顶角为 α 时，圆锥所包含球缺面积为

$$A = 2\pi rh = 2\pi r^2 (1 - \cos\alpha) \quad (1-6)$$

则圆锥所包含立体角为

$$\Omega = 2(1 - \cos\alpha) = 4\pi \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (1-7)$$

如果 α 很小，则公式（1-7）可以简化为

$$\Omega = \pi\alpha^2 \quad (1-8)$$

（5）辐[射]亮度。辐射亮度 L_e 定义为面辐射源在某一给定方向上的辐射通量。如图 1-4 所示。

$$L_e = \frac{dI_e}{dS \cos\theta} = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dS \cos\theta} \quad (1-9)$$

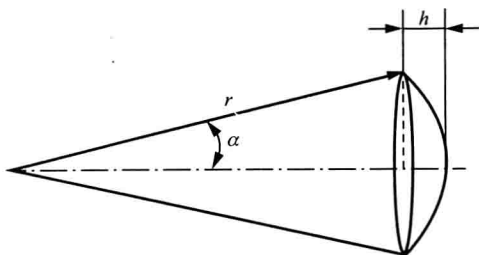


图 1-3 圆锥所包含立体角

式中, θ 是给定方向和辐射源面元法线间的夹角, 单位为瓦特/球面度·米² ($\text{W}/\text{sr} \cdot \text{m}^2$)。

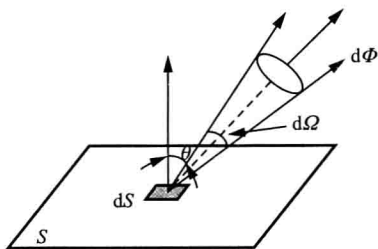


图 1-4 辐射亮度示意

(6) 辐[射]照度。在辐射接收面上的辐照度 E_e 定义为照射在面元 dA 上的辐射通量 $d\Phi_e$ 与该面元的面积 dA 之比。即

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (1-10)$$

单位为 (W/m^2)。

(7) 单色辐[射]度量。对于单色光辐射, 同样可以采用上述物理量表示, 只不过都定义为单位波长间隔内对应的辐射度量, 并且对所有辐射量 X 来说单色辐射度量与辐射度量之间均满足

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

1.2.2 光度学

由于人眼的视觉细胞对不同频率的辐射有不同响应, 故用辐射度单位描述的光辐射不能正确反映人的亮暗感觉。光度单位体系是一套反映视觉亮暗特性的光辐射计量单位, 在光频区域光度学的物理量可以用与辐射度学的基本物理量 $Q_e, \Phi_e, I_e, M_e, L_e, E_e$ 对应的 $Q_v, \Phi_v, I_v, M_v, L_v, E_v$ 来表示, 其定义完全一一对应, 其关系如表 1-1 所示。

光视效能。光视效能描述某一波长的单色光辐射通量可以产生多少相应的单色光通量。即光视效能 K_λ 定义为同一波长下测得的光通量与辐射通量的比之, 即

$$K_\lambda = \frac{\Phi_{v\lambda}}{\Phi_{e\lambda}} \quad (1-12)$$

单位为流明/瓦特 (lm/W)。

通过对标准光度观察者的实验测定, 在辐射频率 $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ (波长 555 nm) 处, K_λ 有

表 1-1 常用辐射度量和光度量之间的对应关系

辐射度物理量				对应的光度量			
物理量名称	符号	定义或定义式	单位	物理量名称	符号	定义或定义式	单位
辐射能	Q_e		J	光量	Q_v	$Q_v = \Phi_v dt$	$\text{lm} \cdot \text{s}$
辐射通量	Φ_e	$\Phi_e = dQ_e/dt$	W	光通量	Φ_v	$\Phi_v = I_v d\Omega$	lm
辐射出射度	M_e	$M_e = d\Phi_e/dS$	W/m^2	光出射度	M_v	$M_v = d\Phi_v/dS$	lm/m^2
辐射强度	I_e	$I_e = d\Phi_e/d\Omega$	W/sr	发光强度	I_v	基本量	cd
辐射亮度	L_e	$L_e = dI_e/(dS\cos\theta)$	$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$	(光) 亮度	L_v	$L_v = dI_v/(dS\cos\theta)$	cd/m^2
辐射照度	E_e	$E_e = d\Phi_e/dA$	W/m^2	(光) 照度	E_v	$E_v = d\Phi_v/dA$	lx

最大值，其数值为 $K_m = 683 \text{ lm/W}$ 。单色光视效率是 K_λ 用 K_m 归一化的结果，其定义为

$$V_\lambda = \frac{K_\lambda}{K_m} = \frac{1}{K_m} \frac{\Phi_{v\lambda}}{\Phi_{e\lambda}} \tag{1-13}$$

国际照明委员会（CIE）根据对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，成为“标准观察者”光谱光视效率，或视见函数，如图 1-5 所示。 $V(\lambda)$ 表示明视觉效率曲线， $V'(\lambda)$ 表示暗视觉效率曲线。

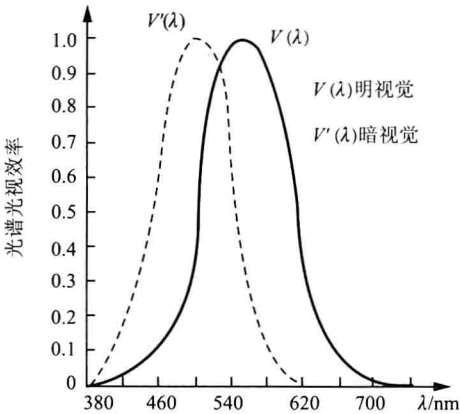


图 1-5 光谱光视效率曲线

表 1-2 给出了人眼的明视觉光谱效率的数值。与辐射度量体系不同，在光度学单位体系中，被选作基本单位的不是光量或光通量，而是发光强度，其单位是坎德拉（cd）。坎德拉不仅是光度体系的基本单位，而且也是国际单位制（SI）的七个基本单位之一。

表 1-2 明视觉光谱光视效率（最大值=1）

波长/nm	$V(\lambda)$	波长/nm	$V(\lambda)$	波长/nm	$V(\lambda)$
380	0.00004	510	0.503	640	0.175
390	0.00012	520	0.710	650	0.107
400	0.0004	530	0.862	660	0.061
410	0.0012	540	0.954	670	0.032
420	0.0040	550	0.995	680	0.017
430	0.0116	560	0.995	690	0.0082
440	0.023	570	0.952	700	0.0041

续表

波长/nm	$V(\lambda)$	波长/nm	$V(\lambda)$	波长/nm	$V(\lambda)$
450	0.038	580	0.870	710	0.00210
460	0.060	590	0.757	720	0.00105
470	0.091	600	0.631	730	0.00052
480	0.139	610	0.503	740	0.00025
490	0.2088	620	0.381	750	0.00012
500	0.323	630	0.265	760	0.00006

对辐射度学和光度学中的物理量的换算关系总结如图 1-6 所示。

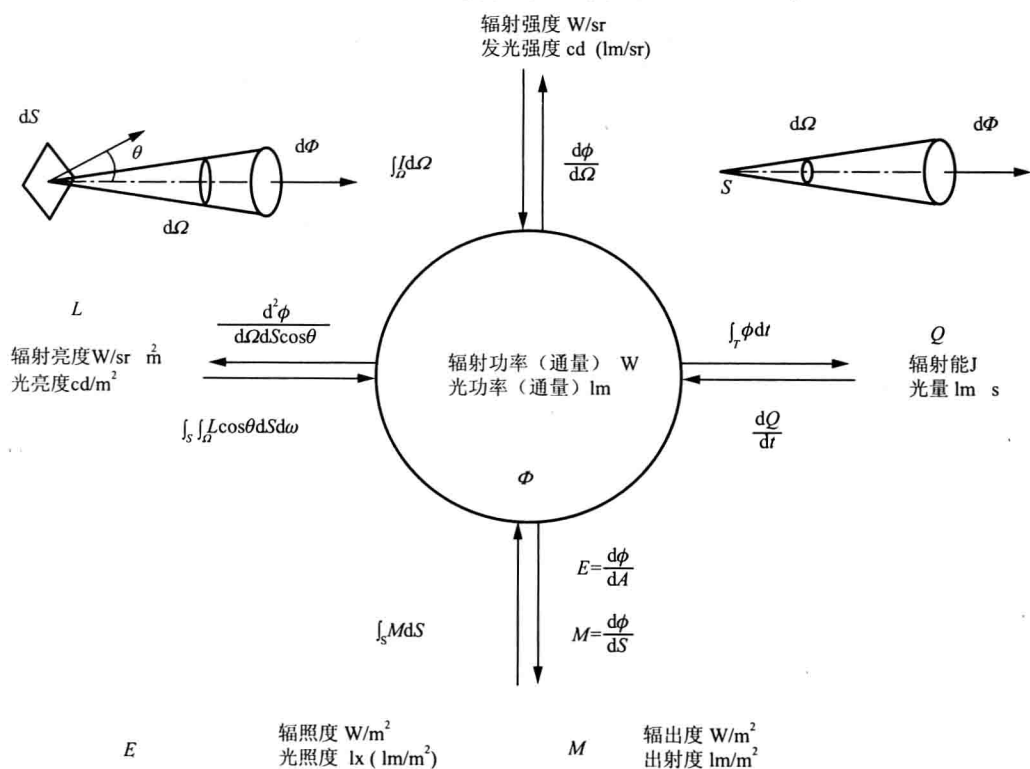


图 1-6 辐射度学和光度学物理量换算关系

1.2.3 辐射度与光度学的基本定律

1. 辐照度的余弦定律

如图 1-7 所示，与光束成 θ 角的表面积 S' 和它在垂直传播方向上的投影 S 对 O 点所张的立体角 Ω 是相同的，在该立体角内点光源发出的辐射通量不随传输距离而变化。就有

$$E = \frac{\Phi}{S}, \quad E' = \frac{\Phi}{S'}$$

因为 $S = S' \cos \theta$ ，所以

$$E' = E \cos \theta \quad (1-14)$$

任一表面上的辐照度随该表面法线和辐射能传输方向之间夹角的余弦而变化，称为辐照度的余弦定律。

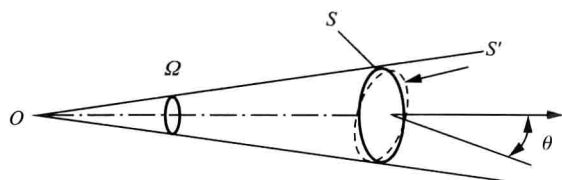


图 1-7 点光源光能量的传输

另外一种情况是相对完全漫反射体而言的，也称为朗伯余弦定律。朗伯表面是一个对入射辐射提供均匀的漫射的表面，从不同角度观察该表面，其明暗程度是一样的。如乳白玻璃、聚四氟乙烯（Teflon）、毛石英玻璃可认为是朗伯表面。图 1-8 表明了光在朗伯表面发生折射和反射的情况。

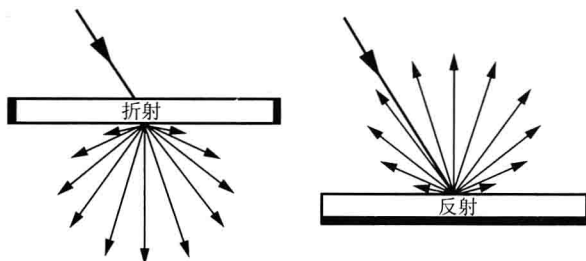


图 1-8 朗伯表面发生折射和反射的情况

如图 1-9 所示，法线方向上辐射强度为 I_0 ，表面积为 dA 的辐射表面，其辐射亮度为 I_0/dA ，对于朗伯表面有 $I_\theta/dA = I_0(dA \cos \theta)$ ，所以

$$I_\theta = I_0 \cos \theta \quad (1-15)$$

朗伯辐射表面在某方向上的辐射强度随与该方向和表面法线之间夹角的余弦而变化。

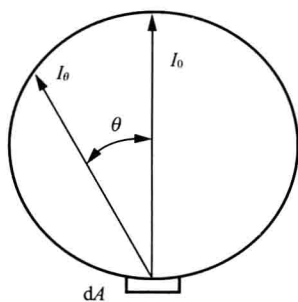


图 1-9 朗伯表面的余弦定律

2. 距离平方反比定律

一定的立体角内，所张的立体角所截的面积与球半径平方成正比。若无损失，则点光源在此空间发出的辐射通量不变，因此，点光源在传输方向上某点的辐照度和该点到点光源的距离平方成反比。如果是非点光源，尺寸较小，距表面足够远，那么用平方反比定律不会产生明显的误差。

3. 亮度守恒定律

光束传输路径上两个面源 1 和 2，面积为 dA_1 和 dA_2 ，通过 dA_1 的光束都通过 dA_2 。

$$d\Omega_1 = \frac{dA_2 \cos \theta_2}{r^2} \quad d\Omega_2 = \frac{dA_1 \cos \theta_1}{r^2} \quad (1-16)$$

面源 1 作光源，面源 2 接收的辐通量：