

光源原理与设计

周太明 编著

GUANG YUAN YUAN LI YU SHE JI



复旦大学出版社

光源原理与设计

周太明 编著



复旦大学出版社

(沪)新登字 202 号

光源原理与设计

周大明 编著

复旦大学出版社出版

(上海国权路 579 号)

新华书店上海发行所发行 复旦大学印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 26.5 字数 656,000

1993 年 12 月第 1 版 1993 年 12 月第 1 次印刷

印数 1—5,000

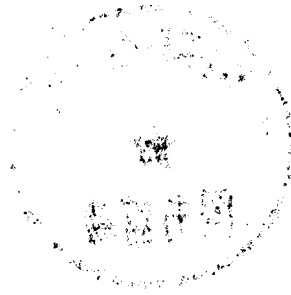
ISBN 7-309-01162-7/O·124

定价: 18.00 元

内 容 提 要

本书论述了各种热辐射光源和气体放电光源的原理、特性和设计方法。为便于读者掌握以上内容,也对光辐射、气体放电以及色度等加以简要介绍。本书重视系统的理论分析,又注意理论和实际的结合,反映了国内外光源科技的最新成果和发展动态。

本书是电光源专业的教材,也可供从事灯和照明电器生产、开发和研究的工程技术人员,高等院校师生和科学研究人员参考。



前 言

1972年本人编写了一本与本书同名的讲义，应读者的要求，《电光源通讯》将其连载了三年。以此为基础，在蔡祖泉教授的指导下，由本人主要负责，与朱绍龙教授等一起编写了《电光源原理》一书，于1977年由上海人民出版社出版。10年之后，台湾凡异出版社还将该书作为物理丛书翻印以精装本出版。这本书受到读者的普遍欢迎，在国内照明行业中有较大的影响。然而，现在再回过头来看，这本书还有很多不足之处；更何况这15年来，光源科学和技术又有了飞跃的发展。为此，本人根据近几年来国内外的最新发展动态，结合我们研究和教学的体会，又编写成此书。

本书是复旦大学光源与照明工程系的基础课教材，但考虑到照明行业广大工程技术人员的需要，书中增加了与此相关的内容，如气体放电和色度学等方面的基础知识。希望这本书能对我们照明行业的人材培养起到一定的作用。

在本书的出版过程中，得到亚明灯泡厂、个旧灯泡厂、镇江灯泡厂、徐州灯泡厂、徐州照明器材总厂和扬州荧光材料厂等的大力支持，得到沈季平、王建荣、陈洪顺、张家林、徐晓波、翟东升、李长斌、陶孟桁、李松基和陆坚培等同志的热情帮助，周详、周宇飞和李庆华等在本书文稿的整理中做了很多工作，在此一并表示衷心的感谢。

书中如有谬误，请不吝指正。

编著者

1993年11月

目 录

前 言

第一章 光源的特性参量

1.1	光源的辐射特性	1
1.2	人眼的视觉	4
1.3	照明光源的光学特性	6
1.3.1	光强度、光通量、光照度和光亮度	7
1.3.2	发光效率	11
1.3.3	光源的色温和显色性	11
1.4	光源的电气特性和寿命	13
1.4.1	光源的电气特性	13
1.4.2	灯的寿命	14

第二章 白 炽 灯

2.1	热辐射	15
2.1.1	基尔霍夫定律	15
2.1.2	黑体辐射的基本规律	16
2.1.3	实际辐射体	20
2.2	白炽灯的材料和结构	22
2.3	白炽灯的充气问题	26
2.3.1	气体稳定层及其计算	26
2.3.2	充气对抑制钨蒸发的作用	28
2.3.3	气体的热损失	29
2.4	白炽灯灯丝的设计	31
2.4.1	白炽灯灯丝设计的统一公式	31
2.4.2	灯丝设计的经验公式	36
2.4.3	灯丝设计的外推法	36
2.5	白炽灯的运用特性	38
2.6	白炽灯的发展动向	40
2.6.1	白炽灯的小型化	40
2.6.2	反射型白炽灯的发展	41
2.6.3	带红外反射层的白炽灯	44

第三章 卤钨灯

3.1	卤钨循环的原理	47
3.2	卤钨循环剂	49
3.3	卤钨灯的结构和制造	53
3.3.1	泡壳和封接	53
3.3.2	灯丝和支架	55
3.3.3	卤钨灯的充气考虑	55
3.3.4	卤钨灯的红外反射膜	56
3.4	卤钨灯的应用	59

第四章 气体放电灯的基本原理

4.1	气体放电的基础知识	66
4.1.1	电子发射和电极	66
4.1.2	碰撞、激发和电离	69
4.1.3	带电粒子在气体中的运动	74
4.1.4	气体放电的形成和分类	77
4.2	气体放电的辐射	86
4.2.1	原子和分子的量子态	86
4.2.2	原子发光和分子发光	90
4.3	光谱线的放宽	93
4.3.1	光谱线的轮廓	93
4.3.2	谱线的自然宽度	94
4.3.3	谱线的多普勒放宽	96
4.3.4	谱线的压力放宽	98
4.4	辐射转移	107
4.4.1	光谱发射系数和吸收系数	107
4.4.2	辐射转移方程	109
4.4.3	光性薄圆柱光源的发射	111
4.4.4	光性厚圆柱光源的发射	113
4.5	气体放电灯的稳定工作	118
4.5.1	气体放电灯的负阻特性	118
4.5.2	电阻镇流	119
4.5.3	电感镇流	123
4.5.4	电容镇流	126
4.5.5	电感-电容镇流	127

第五章 低压水银荧光灯

5.1	低压汞蒸气放电的实验研究	129
-----	--------------	-----

5.1.1	低压汞蒸气放电的最佳汞蒸气压	131
5.1.2	惰性气体的作用	132
5.1.3	低压汞灯的直径和长度	133
5.1.4	电流密度的选定	134
5.2	荧光灯放电正柱的理论分析	134
5.2.1	激发态原子的连续性方程	135
5.2.2	带电粒子的平衡方程	137
5.2.3	能量平衡方程	139
5.2.4	电流方程	140
5.2.5	计算步骤	141
5.3	荧光粉层的光学特性	143
5.3.1	灯用荧光粉	143
5.3.2	荧光粉的效率	147
5.3.3	荧光粉层光学特性的分析	148
5.3.4	荧光灯最佳光谱的模拟计算	151
5.4	荧光灯的设计要点	155
5.4.1	灯的尺寸和电参数	155
5.4.2	荧光粉层	158
5.4.3	电极的设计	159
5.4.4	惰性气体的种类和压强	162
5.4.5	灯中汞蒸气压的控制	162
5.5	荧光灯的特性和应用	164
5.5.1	荧光灯的工作电路	164
5.5.2	荧光灯的高频工作特性	166
5.5.3	荧光灯的能量平衡	168
5.5.4	光输出维持特性	169
5.5.5	荧光灯的应用	170

第六章 高压汞灯

6.1	高压汞蒸气放电	172
6.1.1	高压汞蒸气放电的电弧温度	172
6.1.2	爱伦巴斯的通道模型	174
6.1.3	高压汞电弧的汞蒸气压	177
6.1.4	高压汞气放电的辐射光谱	178
6.2	高压汞灯	180
6.2.1	高压汞灯的设计要点	180
6.2.2	高压汞灯的制造	186
6.2.3	高压汞灯的工作特性	187
6.3	超高压汞灯	191

6.3.1	超高压汞气放电	191
6.3.2	球形超高压汞灯	192
6.3.3	毛细管超高压汞灯	197

第七章 钠 灯

7.1	低压钠灯	201
7.1.1	低压钠蒸气放电	201
7.1.2	低压钠灯的结构和设计	204
7.1.3	低压钠灯的工作特性	213
7.2	高压钠蒸气放电	217
7.2.1	高压钠蒸气放电的辐射	217
7.2.2	高压钠电弧的热导损失和电场强度	220
7.2.3	高压钠电弧的温度分布	222
7.3	高压钠灯	225
7.3.1	高压钠灯的结构	225
7.3.2	影响高压钠灯光效因素的分析	227
7.3.3	高压钠灯的设计	229
7.3.4	高压钠灯显色性能的改善	232
7.3.5	高压钠灯的工作特性	233

第八章 金属卤化物灯

8.1	金属卤化物灯的基本原理	237
8.1.1	金属卤化物循环	237
8.1.2	汞在金属卤化物灯中的作用	239
8.1.3	金属卤化物灯的分类	241
8.2	钠-铊-铟金属卤化物灯	242
8.2.1	铊原子绿线辐射强度的计算	242
8.2.2	钠-铊-铟灯的实验设计	245
8.2.3	金属卤化物灯对工作电路的要求	250
8.2.4	钠-铊-铟灯的工作特性	252
8.3	稀土金属卤化物灯和分子发光灯	254
8.3.1	灯的结构和特性	254
8.3.2	电弧收缩问题	259
8.3.3	金属卤化物灯模型	261
8.4	小功率金属卤化物灯	264
8.4.1	电弧管形状和尺寸的设计	265
8.4.2	小功率金属卤化物灯的开发技术	268
8.4.3	金属卤化物灯的高频工作	273
8.5	特殊的金属卤化物灯	275

8.5.1 产业用金属卤化物灯	275
8.5.2 装饰照明光源	275

第九章 氙 灯

9.1 长弧氙灯	279
9.1.1 长弧氙灯的结构与设计	279
9.1.2 长弧氙灯的性能和应用	283
9.2 短弧氙灯	284
9.2.1 短弧氙灯的结构和电弧稳定问题	284
9.2.2 短弧氙灯的亮度	286
9.2.3 短弧氙灯的设计	288
9.2.4 采用水冷电极的大功率短弧氙灯	291
9.2.5 短弧氙灯的应用	293

第十章 脉 冲 灯

10.1 脉冲灯放电的基本过程	295
10.2 脉冲灯的电特性	298
10.2.1 脉冲灯的启动特性	298
10.2.2 脉冲灯的触发方式	300
10.3 脉冲灯的光输出特性	301
10.3.1 脉冲放电的波形和闪光持续期	301
10.3.2 脉冲灯的光谱和效率	304
10.4 脉冲灯的寿命和极限负载	308
10.4.1 脉冲灯损坏的原因	308
10.4.2 脉冲灯的极限负载	309
10.4.3 脉冲灯的寿命	312
10.5 脉冲灯的频闪工作	312
10.5.1 最小充电电阻	313
10.5.2 灯的最大工作频率	314
10.5.3 谐振充电	315
10.6 脉冲灯的放电模型和灯的设计	316
10.6.1 脉冲灯放电模型	316
10.6.2 脉冲灯的设计	317
10.7 管状脉冲灯放电回路的设计	319
10.7.1 电容放电回路设计	320
10.7.2 电感放电回路设计	322
10.7.3 电容电感放电回路设计	322
10.7.4 传输线放电回路设计	324
10.7.5 对微秒脉冲放电回路的考虑	325

第十一章 辐射量和光度量的测量

11.1	标准光源和光探测器	326
11.1.1	标准光源	326
11.1.2	光探测器	327
11.2	单色仪	333
11.2.1	棱镜和光栅的色散	333
11.2.2	单色仪的结构	335
11.2.3	单色仪的波长定标	336
11.2.4	单色仪的分辨率	337
11.2.5	线色散和线色散的倒数	337
11.2.6	单色仪出射光的波长范围	338
11.3	光强度的测量	338
11.3.1	目视法	338
11.3.2	物理法	339
11.3.3	光强分布和分布光度计	339
11.4	光照度的测定	340
11.5	光亮度的测定	342
11.6	光通量的测量	343
11.6.1	由配光曲面求光通量	343
11.6.2	积分球法	347
11.7	光源光谱功率分布的测定	351
11.8	光谱辐射光度计	352

第十二章 光色的测量

12.1	CIE 色度学系统	354
12.1.1	RGB 系统	354
12.1.2	XYZ 系统	358
12.1.3	CIE 均匀颜色空间	371
12.2	色度学的几个相关标准	377
12.2.1	CIE 标准照明体和标准光源	377
12.2.2	反射率因数的标准	384
12.2.3	CIE 标准照明和观测条件	386
12.3	色度坐标的计算和测量	387
12.3.1	色度坐标的计算	387
12.3.2	色度坐标的测量	388
12.4	色温的计算和测量	392
12.4.1	从色坐标图求色温	392
12.4.2	计算色温的罗伯逊法	392

12.4.3 双色法测色温	396
12.5 光源显色性的测定	397
12.5.1 孟塞尔颜色样品	398
12.5.2 参照(基准)光源(照明体)	404
12.5.3 显色指数的计算	405
参考文献	411

第一章 光源的特性参量

1.1 光源的辐射特性

光是一种电磁波，它的波长区间从几个 nm ($1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$) 到 1mm 左右。这些光并不是都能看得见的，人眼所能看见的只是其中的一部分，我们把这一部分光称为可见光。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，其中红光的波长最长。在不可见光中，波长比紫光短的光称为紫外线，比红光长的叫做红外线。表 1.1.1 列出紫外、可见光和红外区的大致的波长范围。波长小于 200 nm 的光之所以称为真空紫外，是因为这部分光在空气中很快被吸收，因此它只能在真空中传播。

表 1.1.1 光的各个波长区域

波长区域(单位: nm)	区域名称
1~200	真空紫外区
200~300	远紫外区
300~380	近紫外区
380~420	紫光
420~450	蓝光
450~490	青光
490~560	绿光
560~590	黄光
590~620	橙光
620~780	红光
780~1500	近红外区
1500~10000	中红外区
10000~1000000	远红外区

现在常用的光波波长单位是 μm 、nm 和 \AA (埃)，它们之间的关系是：

$$1\ \mu\text{m} = 10^3\ \text{nm} = 10^4\ \text{\AA}$$

光除具有波动性之外，还具有粒子性。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 $h = 6.626 \times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$ 是普朗克常数， $\nu = c/\lambda$ 是光的频率， $c = 2.99792458 \times 10^8\ \text{m/s}$ 是真空中光速。 ν 的单位是 s^{-1} 。量子电动力学较好地反映了光的波粒二象性。

为了研究光源辐射现象的规律，测定供给光源的能量(比如说电能)转换成辐射能效率的高低，通常用下面的一些基本参量来描写光源的辐射特性。

(1) 辐射能量 Q。

光源辐射出来的光(包括红外线、可见光和紫外线)的能量称为光源的辐射能量。当这些能量被物质吸收时，可以转换成其他形式的能量，如热能、电能等。

辐射能的单位是: cal、erg 和 J，它们之间的关系是：

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

(2) 辐射通量 P_e

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，而光源在单位时间内辐射出去的总能量就叫做光源的辐射通量。辐射通量也可称为辐射功率。辐射通量的单位是 $\text{W}(=\text{J/s})$ 、 erg/s 和 cal/s 等。

(3) 辐射强度 I_e

光源在某一方向上的辐射强度 I_e 是指光源在包含该方向的立体角 Ω 内发射的辐射通量 P_e 与该立体角 Ω 之比：

$$I_e = P_e / \Omega \quad (1.1.1)$$

由于光源在各个方向上的辐射强度一般是不均匀的，所以(1.1.1)式表示的辐射强度是在立体角 Ω 内的平均辐射强度。要表明在某一方向的辐射强度，必须将立体角取得很微小（见图 1.1.1）。在包含该方向的微小立体角 $d\Omega$ 内发射的辐射通量 dP_e 与该微小的立体角 $d\Omega$ 之比就定义为光源在该方向的辐射强度 I_e ：

$$I_e = dP_e / d\Omega \quad (1.1.2)$$

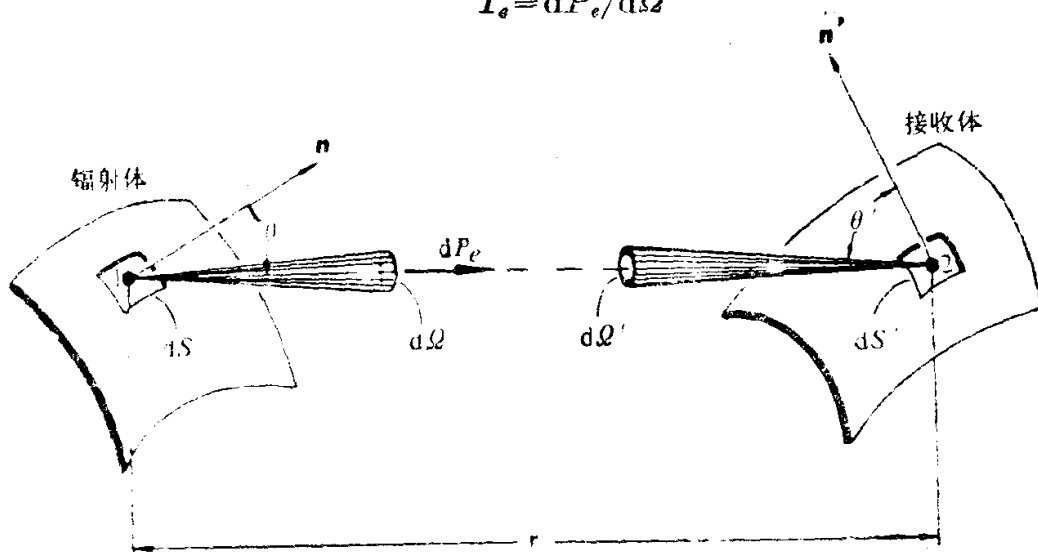


图 1.1.1 辐射和接收

如果光源近似为点光源，可以它为球心，以单位长度为半径，作一球面(图 1.1.2)。在球面上取一微小面积，它对球心所张的微小立体角为 $d\Omega$ ，通过它的辐射通量为 $dP_e(\phi, \theta)$ 。在这个方向的辐射强度为：

$$I_e(\phi, \theta) = dP_e(\phi, \theta) / d\Omega \quad (1.1.2')$$

可以算出 $d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi$ ，因而

$$dP_e(\phi, \theta) = I_e(\phi, \theta) \sin \theta d\theta d\phi \quad (1.1.3)$$

而光源的辐射通量为：

$$P_e = \int dP_e(\phi, \theta) = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi I_e(\phi, \theta) \sin \theta d\theta \quad (1.1.4)$$

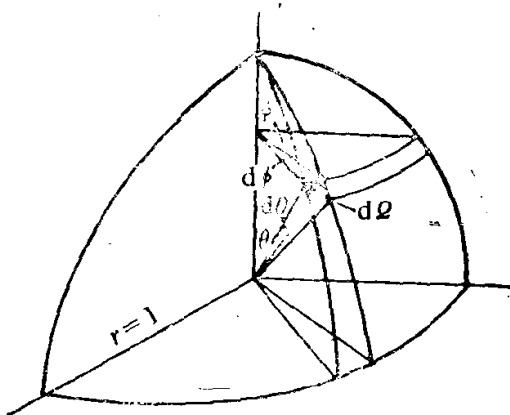


图 1.1.2 微小立体角的表示

如果光源在各个方向的辐射是均匀的，即辐射强度 $I_e(\phi, \theta)$ 是一个常数($=I_e$)，则(1.1.4)式就变成：

$$P_e = I_e \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi \sin\theta d\theta = 4\pi I_e \quad (1.1.5)$$

这就是说,当光源在空间各个方向发出的辐射通量均匀分布时, $I_e = P_e/4\pi$ 是沿任何方向的真正的辐射强度。而在辐射通量分布不均匀时,辐射强度随方向而变, $P_e/4\pi$ 只代表平均的球面辐射强度。对于辐射强度 $I_e(\phi, \theta)$ 随方向而变的各向异性光源,常用图示的方法来描述。从某一原点起,向各个方向引矢径,取矢径长度之比与相应方向上的辐射强度成比例。将各矢径的端点联接起来,就得到光源辐射强度的分布曲面。辐射强度的单位是 W/sr 。

(4) 辐射出(射)度 M_e 和辐照度 E_e

一个有一定面积的光源,如果它表面上的一个发光面积 S 在各个方向(在半个空间内)的总辐射通量为 P_e ,则该发光面 S 的辐射出(射)度为:

$$M_e = P_e/S \quad (1.1.6)$$

M_e 相当于单位面积的辐射通量,常以 W/m^2 表示。

和讨论辐射强度的情况相似,一般光源发光面上各处的辐射出度是不均匀的,所以严格地讲,在发光面某一微小的面积 dS 上的辐射出度应该是该发光面向所有方向(在半个空间内)发出的辐射通量 dP_e 与该面积 dS 之比:

$$M_e = dP_e/dS \quad (1.1.7)$$

表示物体被辐射程度的量称为辐照度 E_e ,它是每单位面积上所接收到的辐射通量数,即

$$E_e = dP_e/dS' \quad (1.1.8)$$

注意在式(1.1.8)中的 dS' 与前面式子中的不同,它是表示接收器的面积元(见图 1.1.1)。

(5) 辐射亮度 L_e

光源在给定方向上的辐射亮度 $L_e(\phi, \theta)$ 是光源在该方向上的单位投影面积、在单位立体角中的辐射通量,即

$$L_e(\phi, \theta) = P_e(\phi, \theta)/(S \cos\theta \Omega) \quad (1.1.9)$$

其中 L_e 的单位是 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$, S 代表发光面的面积, θ 是在给定方向和发光面法线之间的夹角, Ω 是给定方向的立体角, $P_e(\phi, \theta)$ 是在该立体角内的辐射通量。

和讨论辐射强度的情况相似,一般光源发光面上各处的辐射亮度以及同一发光面向各方向的辐射亮度都是不均匀的,因此必须规定辐射亮度 L_e 为某一微小的发光面积 dS 向某一特定方向 (ϕ, θ) 在一微小的立体角 $d\Omega$ 内辐射的通量 d^2P_e 和在该方向上的投影面积 $dS \cos\theta$ 以及立体角 $d\Omega$ 之比:

$$L_e(\phi, \theta) = d^2P_e(\phi, \theta)/(dS \cos\theta \cdot d\Omega) \quad (1.1.10)$$

比较(1.1.2')和(1.1.10),可得:

$$L_e(\phi, \theta) = dI_e(\phi, \theta)/(dS \cdot \cos\theta) \quad (1.1.11)$$

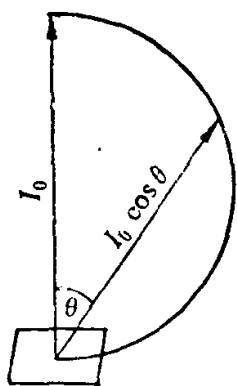
此式说明给定方向上的辐射亮度也就是在该方向上的单位投影面积内的辐射强度。

$L_e(\phi, \theta)$ 通常与方向有关,若 $L_e(\phi, \theta)$ 不随方向而变,则 $I_e(\phi, \theta)$ 正比于 $\cos\theta$, 即

$$I_e(\phi, \theta) = I_0 \cos\theta \quad (1.1.12)$$

此式可用图 1.1.3 表示。满足(1.1.12)式的特殊辐射体称为余弦辐射体,黑体就是这样的辐射体。

将(1.1.10)式改写成 $d^2P_e(\phi, \theta) = L_e(\phi, \theta)dS \cos \theta d\Omega$, 并在 2π 立体角内积分, 就得出微小发光面积 dS 在半个空间内的辐射通量 dP_e :



$$dP_e = \int d^2P_e(\phi, \theta) = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} L_e(\phi, \theta) dS \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (1.1.13)$$

对余弦辐射体, $L_e(\phi, \theta)$ 是常数 L_e , 故

$$\begin{aligned} dP_e &= \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} L_e dS \cos \theta \sin \theta d\theta \\ &= 2\pi L_e dS \int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta \\ &= \pi L_e dS \end{aligned} \quad (1.1.14)$$

图 1.1.3 余弦辐射体

从(1.1.7)和(1.1.14)式, 可得:

$$M_e = \pi L_e \quad (\text{或 } L_e = M_e / \pi) \quad (1.1.15)$$

即余弦辐射体的辐射出度在数值上为其辐射亮度的 π 倍。

(6) 光谱辐射量(辐射量的光谱密度)

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分别辐射的能量, 还需对单一波长的光辐射作相应规定。

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(简称谱辐通量, 也可称为辐射通量的光谱密度) P_λ :

$$P_\lambda = \Delta P_e / \Delta \lambda \quad (1.1.16)$$

由于光源发出的各种波长的光谱辐射通量 P_λ 一般是不同的, 所以应取微小的波长间隔 $d\lambda$ 。在 λ 到 $\lambda + d\lambda$ 间隔内的辐射通量是 $dP_e(\lambda)$, 则该波长(λ)处的光谱辐射通量为:

$$P_\lambda = dP_e(\lambda) / d\lambda \quad (1.1.17)$$

P_λ 的单位是 W/m 。

同样, 可将光源发出的光在每单位波长间隔内的辐射出度称为光谱辐射出(射)度 M_λ :

$$M_\lambda = dM_e(\lambda) / d\lambda \quad (1.1.18)$$

光谱辐射出度 M_λ 的单位是 W/m^3 。

而光源发出的光在每单位波长间隔内的辐射亮度为光谱辐射亮度 L_λ :

$$L_\lambda = dL_e(\lambda) / d\lambda \quad (1.1.19)$$

光谱辐射亮度 L_λ 的单位为 $W/(m^3 \cdot sr)$ 。

1.2 人眼的视觉

在光辐射中有一部分是人眼能够看见的。人眼怎么会感到这部分光的呢? 原来在人眼的视网膜上布满了大量的感光细胞。感光细胞有两种: 柱状细胞和锥状细胞。前者灵敏度高, 能感受极微弱的光; 后者灵敏度较低, 但能很好地区别颜色。在柱状细胞和锥状细胞里都含有一种感光物质, 当光线照到视网膜上时, 感光物质发生化学变化, 刺激神经细胞, 最后由神经传到大脑, 产生视觉。如同感光片对各种颜色光的感光灵敏度不同一样, 人眼对各种颜色光的灵敏度也不一样, 它对绿光的灵敏度最高, 而对红光的灵敏度则低得多。也就是说, 相同能量的绿光和红光, 前者在人眼中引起的视觉强度要比后者大得多。研究的结果表

表 1.2.1 明视觉的光谱光效率 $V(\lambda)$

$\lambda(\text{nm})$	$V(\lambda)$	$\lambda(\text{nm})$	$V(\lambda)$	$\lambda(\text{nm})$	$V(\lambda)$
380	0.0000	515	0.6082	650	0.1070
385	0.0001	520	0.7100	655	0.0816
390	0.0001	525	0.7932	660	0.0610
395	0.0002	530	0.8620	665	0.0446
400	0.0004	535	0.9149	670	0.0320
405	0.0006	540	0.9540	675	0.0232
410	0.0012	545	0.9803	680	0.0170
415	0.0022	550	0.9950	685	0.0119
420	0.0040	555	1.0000	690	0.0082
425	0.0073	560	0.9950	695	0.0057
430	0.0116	565	0.9786	700	0.0041
435	0.0168	570	0.9520	705	0.0029
440	0.0230	575	0.9154	710	0.0021
445	0.0298	580	0.8700	715	0.0015
450	0.0380	585	0.8163	720	0.0010
455	0.0480	590	0.7570	725	0.0007
460	0.0600	595	0.6949	730	0.0005
465	0.0739	600	0.6310	735	0.0004
470	0.0910	605	0.5668	740	0.0003
475	0.1126	610	0.5030	745	0.0002
480	0.1390	615	0.4412	750	0.0001
485	0.1693	620	0.3810	755	0.00009
490	0.2080	625	0.3210	760	0.00006
495	0.2586	630	0.2650	765	0.00004
500	0.3230	635	0.2170	770	0.00003
505	0.4073	640	0.1750	780	0.00002
510	0.5030	645	0.1382		

表 1.2.2 暗视觉的光谱光效率 $V'(\lambda)$

$\lambda(\text{nm})$	$V'(\lambda)$	$\lambda(\text{nm})$	$V'(\lambda)$	$\lambda(\text{nm})$	$V'(\lambda)$
380	0.0006	520	0.935	660	0.0003
390	0.0022	530	0.811	670	0.0001
400	0.0093	540	0.650	680	0.00007
410	0.0348	550	0.481	690	0.00004
420	0.0966	560	0.3288	700	0.00002
430	0.1998	570	0.2076	710	0.000009
440	0.3281	580	0.1212	720	0.000005
450	0.455	590	0.0655	730	0.000003
460	0.567	600	0.0332	740	0.000001
470	0.676	610	0.0159	750	0.0000008
480	0.793	620	0.0074	760	0.0000004
490	0.904	630	0.0033	770	0.0000002
500	0.982	640	0.0015	780	0.0000001
510	0.997	650	0.0007		