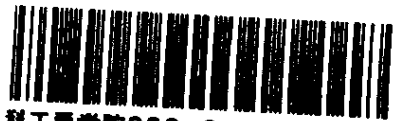


# 电光学手册



国防工业出版社





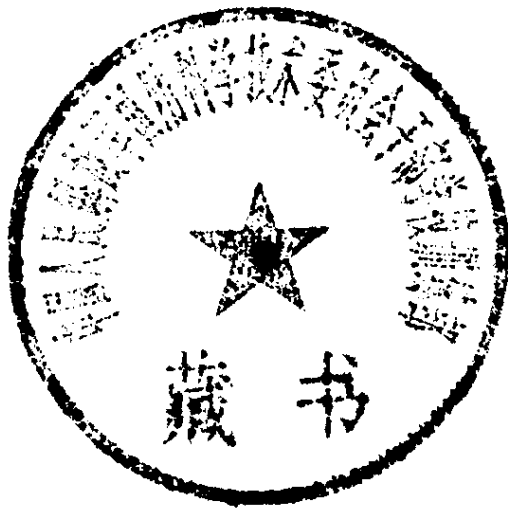
科工委学院802 2 0036861 0

005711

# 电 光 学 手 册

〔美〕 无线电公司 编

史 斯 伍 琐 译 校



国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书是美国无线电公司为适应现代电光学技术的迅速发展而编印的资料性手册。书中收集的数据、图表及曲线，材料较新。

内容主要包括：电光学技术的物理基础，激光器，光电探测器，象管和摄像管以及光学和电光学显示的摄影等（本书据原著1974年版译出）。

供从事红外、微光和激光等电光学技术有关的人员参考。

ELECTRO-OPTICS HANDBOOK

Radio Corporation of America

RCA|Commercial Engineering| Harrison, NJ 07029

1974

\*

## 电 光 学 手 册

〔美〕 无线电公司 编

史 斯 伍 琐 译校

\*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

850×1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张 6<sup>13</sup>/<sub>16</sub> 172千字

1978年9月第一版 1978年9月第一次印刷 印数：00,001—44,000册

统一书号：15034·1685 定价：0.87元

## 译者的话

“电光学”是一门迅速发展的新学科。所属三个分支——红外、微光和激光等新技术已在工农业、国防、医疗、天文以及海底勘察等领域里，得到了愈来愈广泛的应用。为了有助于从事这些新技术的人员方便地查找“电光学”中的有关公式、数据和图表，我们遵照毛主席关于“洋为中用”的教导，主要取材于美国无线电公司编的《Electro-Optics Handbook》(1974年第二版)，同时参考其它有关文献资料，译成这本《电光学手册》。

全手册共分十三章，前八章是电光学技术的物理基础，主要介绍辐射度量和光度量、物理常数和常用单位、黑体辐射、人眼响应和光见度、辐射源、大气透射以及探测、分辨和识别等有关定义、公式和数据图表。第九章到第十一章分别介绍了激光器、光电探测器、象管和摄象管等各种电光学器件的工作原理、结构、性能和实际应用。最后二章给出了电光学中选择光学透镜和材料以及显示摄影的基本原则和公式图表。

翻译中，对于《Electro-Optics Handbook》一书中个别章节和内容作了删改和补充，并改正了该书中明显错误之处。由于水平有限，译文中难免有错误和不妥之处，盼读者指正。

译者

# 目 录

<b>第一章 辐射度量和单位</b> .....	<b>1</b>
1.1 辐射度量的符号、名称和单位 .....	1
1.2 其他辐射度量的定义 .....	3
1.3 辐射转换图 .....	6
1.4 电磁波谱 .....	6
<b>第二章 光度量和单位</b> .....	<b>7</b>
2.1 光度量的符号、名称和单位 .....	7
2.2 光度标准 .....	8
2.3 照度、光出射度和亮度 .....	8
2.4 作为发光强度标准的钨灯 .....	12
<b>第三章 物理常数、角度换算和常用单位</b> .....	<b>13</b>
3.1 物理常数 .....	13
3.2 角度换算 .....	14
3.3 电光学中常用单位的代号和定义 .....	14
3.4 国际单位制的词冠 .....	18
<b>第四章 黑体辐射</b> .....	<b>20</b>
4.1 黑体辐射方程式 .....	20
4.2 最大辐射本领的波长（维恩位移定律） .....	21
4.3 辐射方程中的常数值 .....	21
4.4 黑体辐射曲线 .....	22
<b>第五章 人眼响应和光见度</b> .....	<b>28</b>
5.1 人眼响应 .....	28
5.2 人眼响应的阈值 .....	29
5.3 颜色和人眼 .....	32
5.4 单色光见度和光谱发光效率 .....	36
5.5 光见度和发光效率 .....	38

5.6	有关光见度的实例计算	39
<b>第六章 辐射源</b>		<b>43</b>
6.1	太阳	43
6.2	月亮	45
6.3	恒星	46
6.4	天空	49
6.5	自然光照度等级汇总	52
6.6	自然光照度的时间变异	54
6.7	灯源	55
<b>第七章 大气透射率</b>		<b>60</b>
7.1	全大气	60
7.2	水平路程的透射率	61
7.3	水平能见度	65
7.4	0.4~4微米波段大气透射率的计算	66
7.5	8~14微米红外波段大气透射率的计算	72
7.6	大气对象传感器性能的影响	75
7.7	大气的反向散射——人工照明	80
<b>第八章 探测、分辨和识别</b>		<b>86</b>
8.1	白噪声中的脉冲探测	86
8.2	量子噪声中的脉冲探测	89
8.3	调制传递函数 (MTF) 和对比传递函数 (CTF)	90
8.4	显示诠释	95
8.5	目标的探测-识别模型	98
<b>第九章 激光器</b>		<b>102</b>
9.1	晶体激光器	102
9.2	玻璃激光器	104
9.3	气体激光器	104
9.4	染料激光器	106
9.5	二次谐波产生和参量下转换	107
9.6	P-n 结光源	109
a.	P-n 结激光器	109
b.	发光二极管	115

第十章	光电探测器	118
10.1	光电探测器的基本关系式和定义	119
10.2	光谱响应与光谱探测灵敏度	123
10.3	噪声	134
10.4	光电探测器的时间特性	138
10.5	光源与探测器的匹配	140
第十一章	象管和摄像管	142
11.1	象管	142
11.2	象管的特性	145
11.3	电视摄像管	150
11.4	响应度	156
11.5	信噪比	158
11.6	滞后	159
11.7	调制传递函数与对比传递函数特性	161
11.8	微光观察的限制	164
11.9	识别统计学	164
11.10	透镜和敏感元件的限制	167
11.11	实际探测与识别的参量	170
第十二章	光学	177
12.1	薄透镜特性和公式	177
12.2	厚透镜特性	179
12.3	透镜的象差	180
12.4	透镜的调制传递函数特性	181
12.5	衍射极限	182
12.6	照度和辐照度公式	183
12.7	光学玻璃的性质	184
12.8	材料的光谱透射率	186
12.9	角反射器	187
第十三章	电光学显示的摄影	191
13.1	感光度测量	191
13.2	阴极射线管 (CRT) 记录用的底片选择	199
13.3	阴极射线管图象的拍摄	200
13.4	透镜孔径和曝光表的调节	202
索引		204

# 第一章 辐射度量和单位

## 1.1 辐射度量的符号、名称和单位

表 1-1 给出了物理学度量的标准量，它们是本手册定义辐射度量和光度量术语的基础。

表1-1 物理学度量的基本量

量	符 号	SI 单 位	单 位 代 号
长 度	$l, r, s$	米	m
面 积	$A$	平方米	$m^2$
体 积	$V$	立方米	$m^3$
立体角	$\omega$	球面度	sr
频 率	$\nu$	赫	Hz
波 长	$\lambda$	米	m
时 间	$t$	秒	s

表1-2 辐射度量和单位

量	符 号	定 义 式	SI 单 位	单 位 代 号
辐射能	$Q, Q_e$		焦 耳	J
辐射能密度	$w, w_e$	$w = \partial Q / \partial V$	焦耳/米 <sup>3</sup>	J/m <sup>3</sup>
辐射通量	$\Phi, \Phi_e$	$\Phi = \partial Q / \partial t$	瓦	W
面辐射通量密度				
辐射出射度	$M, M_e$	$M = \partial \Phi / \partial A$	瓦/米 <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>
辐照度	$E, E_e$	$E = \partial \Phi / \partial A$	瓦/米 <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>
辐射强度	$I, I_e$	$I = \partial \Phi / \partial \omega$ ( $\omega$ 为点光源辐射出来的通量所张开的立体角)	瓦/球面度	W/sr
辐亮度	$L, L_e$	$L = \partial^2 \Phi / \partial \omega (\partial A \cos \theta)$ $= \partial I / (\partial A \cos \theta)$ ( $\theta$ 为观察方向与光源表面法线的夹角)	瓦/球面度·米 <sup>2</sup>	W/sr·m <sup>2</sup>

注：第二章中光度量的符号与本章相应辐射度量的符号是相同的。当必须区分时，对于光度量应加下标 $v$ ，而对于辐射度量应加下标 $e$ ，例如， $Q_v$ 和 $Q_e$ 。



表 1-2 和 1-3 概括了基本辐射度和单色辐射度的量、定义、单位和符号。为了与现行的国际标准化一致,表中只是列出了国际制单位(SI单位)。其它制的相应的单位列于表 2-2, 2-3 和 3-3 中。

波长的单位应专门说明一下,在所有图表中,波长  $\lambda$  的单位采用微米 ( $\mu\text{m}$ )或毫微米 ( $\text{nm}$ )。但在象普朗克光谱辐射公式这样的方程中,其波长单位以米 ( $\text{m}$ ) 表示。

表1-3 单色辐射度量度和单位

量	符号	说 明	SI 单 位	单 位 代 号
单色辐射通量	$\Phi_\lambda$	$\partial\Phi/\partial\lambda$ 单位波长间隔的辐射通量	瓦/微米	$\text{W}/\mu\text{m}$
单色辐射通量	$\Phi_\nu$	$\partial\Phi/\partial\nu$ 单位频率间隔的辐射通量	瓦秒或瓦/赫	$\text{W}_\text{s}$ $\text{W}/\text{Hz}$
单色辐射出射度	$M_\lambda$	$\partial M/\partial\lambda$ 单位波长间隔的辐射出射度	瓦/米 <sup>2</sup> ·微米	$\text{W}/\text{m}^2\cdot\mu\text{m}$
单色辐照度	$E_\lambda$	$\partial E/\partial\lambda$ 单位波长间隔的辐照度	瓦/米 <sup>2</sup> ·微米	$\text{W}/\text{m}^2\cdot\mu\text{m}$
单色辐射强度	$I_\lambda$	$\partial I/\partial\lambda$ 单位波长间隔的辐射强度	瓦/球面度·微米	$\text{W}/\text{sr}\cdot\mu\text{m}$
单色辐亮度	$L_\lambda$	$\partial L/\partial\lambda$ 单位波长间隔的辐亮度	瓦/米 <sup>2</sup> ·球面度 ·微米	$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\mu\text{m}$

注: (1) 表中所列举的单位波长  $\lambda$  或单位频率  $\nu$  的辐射度量术语是由表 1-2 中提供的辐射度量冠以“单色(spectral)”二字,并加下标  $\lambda$  或  $\nu$  来构成,表示该量限于各波长的。若该量为波长的函数,则可在名称前冠以“分谱(spectral)”二字。

(2) 此处辐射度各量名称前的 spectral 亦可译成单色集中度,如  $M_\lambda$  为辐射出射度的单色集中度,  $L_\lambda$  为辐亮度的单色集中度等。

## 1.2 其他辐射度量的定义

表1-4 其他辐射度量和单位

量	符 号	定 义 式	单 位
吸收率 <sup>(1)</sup>	$\alpha$	$\alpha = \frac{(*)\text{吸收量}}{(*)\text{入射量}}$	(数 值)
反射率	$\rho$	$\rho = \frac{(*)\text{反射量}}{(*)\text{入射量}}$	(数 值)
透射率	$\tau$	$\tau = \frac{(*)\text{透射量}}{(*)\text{入射量}}$	(数 值)
发射率	$\epsilon$	$\epsilon = \frac{(*)\text{样品发射量}}{(*)\text{与样品温度相同的黑体发射量}}$	(数 值)

注：(\*)表示相应的量 $Q$ 、 $\Phi$ 、 $M$ 、 $E$ 、 $I$ 或 $L$ 。

(1)辐射吸收率不要与7.2节的吸收系数相混淆。

表1-4中给出的吸收率、反射率和透射率既可以说明一个界面的情况，也可以说明一层介质或多层介质的情况，并且也可以是在内部一次反射或多次反射的情况，使用时应具体指明。在任一具体情况中，吸收、反射（包括散射）和透射的过程总是由全部入射辐射所构成的，故吸收率、反射率和透射率之和等于1：

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

若物体没有辐射透过， $\tau = 0$ 。

那么

$$\alpha + \rho = 1 \quad (1-2)$$

通常 $\alpha$ 、 $\rho$ 、 $\tau$ 都是波长 $\lambda$ 的函数（辐射波长不同， $\alpha$ 、 $\rho$ 、 $\tau$ 也不同），即

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \alpha(\lambda) \\ \rho &= \rho(\lambda) \\ \tau &= \tau(\lambda) \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

应当指出，在多色辐射时， $\alpha$ 、 $\rho$ 、 $\tau$ 不但决定于 $\alpha(\lambda)$ 、 $\rho(\lambda)$ 、 $\tau(\lambda)$ ，而且还决定于入射辐射的光谱分布。以辐射通量 $\Phi$ 为例，则有

$$\left. \begin{aligned}
 \alpha &= \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) \alpha(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) d\lambda} \\
 \rho &= \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) d\lambda} \\
 \tau &= \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) d\lambda}
 \end{aligned} \right\} (1-4)$$

式中 $\Phi(\lambda)$ 是入射辐射的分谱辐射通量， $\lambda_1$ 至 $\lambda_2$ 是入射辐射的波长范围。

此外，应该注意入射方向的不同， $\alpha$ 、 $\rho$ 、 $\tau$ 的数值也不同，

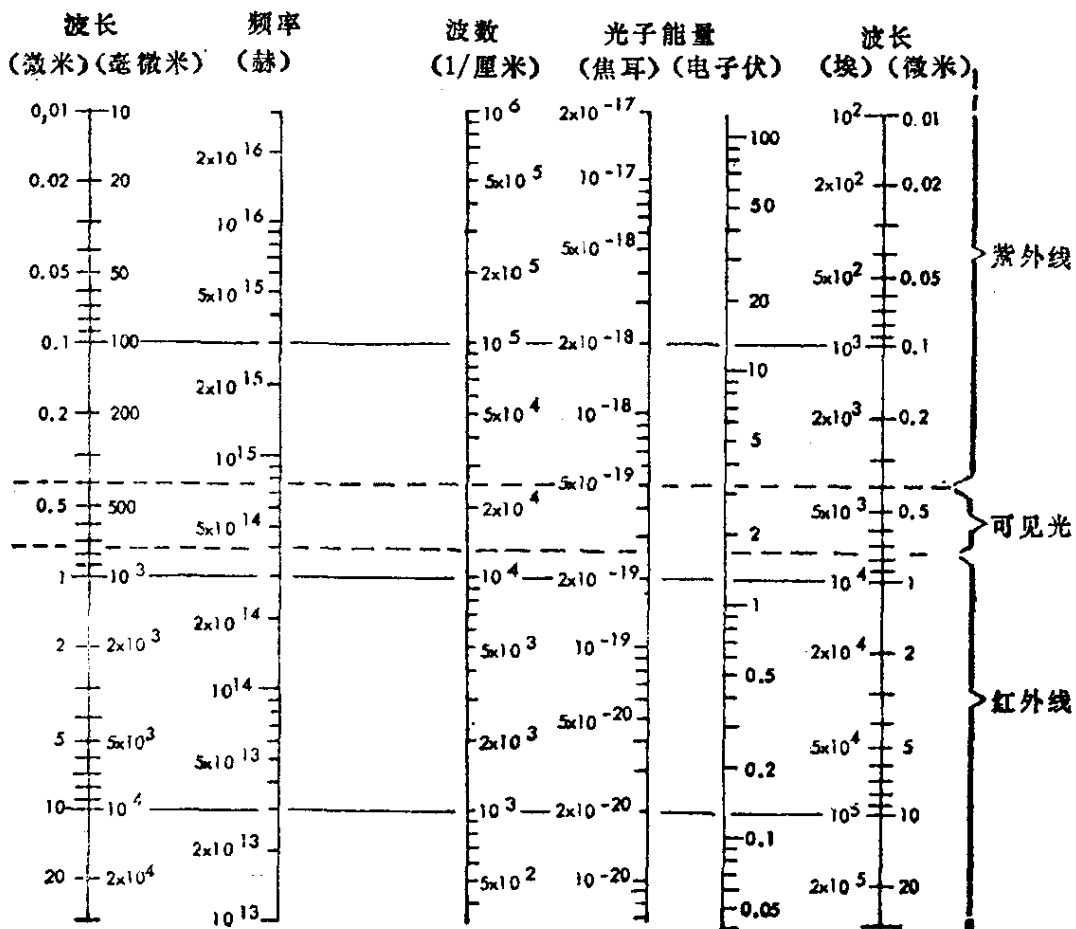


图1-1 辐射转换图

故在计算和检验时应该标明入射方向。

对符合朗伯定律的理想的均匀漫射体，其辐亮度  $L$  与观察方向无关，在各个方向都是定值，它由下式给出：

$$L = \frac{M}{\pi} \quad (1-5)$$

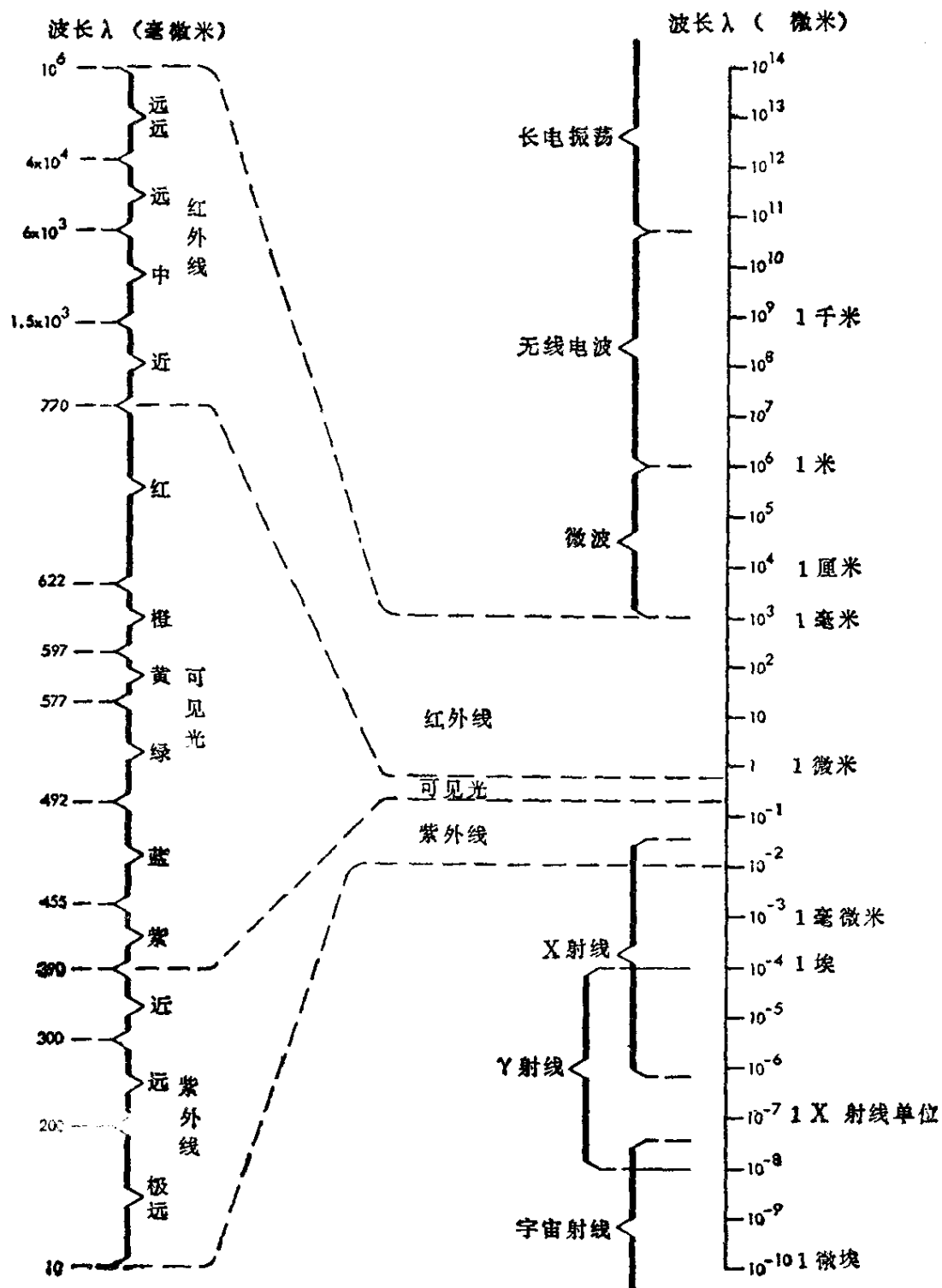


图1-2 电磁波谱

式中，辐亮度  $L$  的单位是瓦/米<sup>2</sup>·球面度，

辐射出射度  $M$  的单位是瓦/米<sup>2</sup>。

这就是说，理想的均匀漫射体的辐射出射度是辐亮度的  $\pi$  倍。

### 1.3 辐射转换图

图 1-1 列出了对于辐射量迅速转换很有用的图表。注意表中两边出现微米标尺便于两端作直线穿过其他标尺。

### 1.4 电磁波谱

图 1-2 列出了波长从  $10^{-10}$  微米到  $10^5$  千米之间的全部电磁波谱。为了更清晰起见，紫外、可见光和红外部分分别地加以放大示出。

### 参 考 文 献

- [1] Blattner, D., "Radiation Nomograph," ELECTRONIC DESIGN, Vol. 14, No. 22, Sept. 27, 1966.

## 第二章 光度量和单位

### 2.1 光度量的符号、名称和单位

表 2-1 概括了基本光度学的量、定义、单位和符号。

表 2-1 与表 1-2 相类似。但是辐射度学的量  $\Phi_e$ 、 $M_e$ 、 $I_e$ 、 $L_e$  和  $E_e$  对整个电磁波谱都有意义；而在光度学的相应量  $\Phi_v$ 、 $M_v$ 、 $I_v$ 、 $L_v$  和  $E_v$  只是在光谱的可见波段 ( $0.38\text{微米} < \lambda < 0.77\text{微米}$ ) 才有意义。

表2-1 光度量和单位

量	符 号	定 义 式	SI 单 位	单 位 代 号
光 能	$Q, Q_v$	$Q_v = \int K(\lambda) Q_e \lambda d\lambda$ ( $K(\lambda)$ 为单色光见度)	流明·秒 (塔尔波特)	lm s
光能密度	$w, w_v$	$w = \partial Q / \partial V$	流明·秒/米 <sup>3</sup>	lms/m <sup>3</sup>
光通量	$\Phi, \Phi_v$	$\Phi = \partial Q / \partial t$	流 明	lm
面光通量密度: 光出射度	$M, M_v$	$M = \partial \Phi / \partial A$	流明/米 <sup>2</sup>	lm/m <sup>2</sup>
照 度	$E, E_v$	$E = \partial \Phi / \partial A$	勒克司(流明/ 米 <sup>2</sup> )	lx
发光强度	$I, I_v$	$I = \partial \Phi / \partial \omega$ ( $\omega$ 为由点光源辐射出来的光通量所张开的立体角)	坎德拉 (流明/球面度)	cd
亮 度	$L, L_v$	$L = \partial^2 \Phi / \partial \omega (\partial A \cos \theta)$ $= \partial I / (\partial A \cos \theta)$ ( $\theta$ 为观察方向与光源表面法线的夹角)	尼 特 (流明/ 米 <sup>2</sup> ·球面度) 或(坎德拉/米 <sup>2</sup> )	nt
光见度	$K$	$K = \Phi_v / \Phi_e$	流明/瓦	lm/w

(续)

量	符 号	定 义 式	SI 单 位	单 位 代 号
单色光见度	$K(\lambda)$	$K(\lambda) = \Phi_{v\lambda} / \Phi_{e\lambda}$	流明/瓦	lm/w
相对光见度	$V(\lambda)$	$V(\lambda) = K(\lambda) / K_m$ $K_m$ 为最大光见度, (是各个 $K(\lambda)$ 值中的 最大值)	(数值)	—

注：光度量的符号与在第一章中介绍的相应的辐射度量的符号相同。当必须区分时，对于光度量应加下标  $v$ ，对于辐射度量则加下标  $e$ ，例如  $Q_v$  和  $Q_e$ 。

## 2.2 光度标准

坎德拉——标准烛光已被重新定义为新烛光或坎德拉 (candela, 代号 cd)。它是在 101325 牛顿每平方米压力下，处于铂凝固温度 (2045K) 的黑体的 1/600000 平方米表面在垂直方向上的发光强度。1 坎德拉就是在单位立体角内发出 1 流明的光 (1 流明/球面度)。

注意，从光源发射出来的发光强度，其光谱分布与标准烛光是有所差别的，这可用相对光谱响应与标准日间视觉是相同的敏感元件来评定 (见第五章)。

流明——流明 (lm) 可用坎德拉来定义。发光强度为 1 坎德拉的光源在 1 球面度内发出的光通量为 1 流明。

## 2.3 照度、光出射度和亮度

通常所用的光度学各单位之间的关系如图 2-1 所示。

### 照度单位

照度  $E = d\Phi/dA$ ，有时叫做光照度 (注意  $E$  和  $M$  之间的差别：在  $E$  的定义中， $dA$  是接受光通量  $d\Phi$  的微元；而在光出射度  $M$  的定义中， $dA$  是发射光通量  $d\Phi$  的微元)。由“X”= 1 坎德拉的光源发出的 1 流明的光通量落到由“DDDD”表示的表面上所得

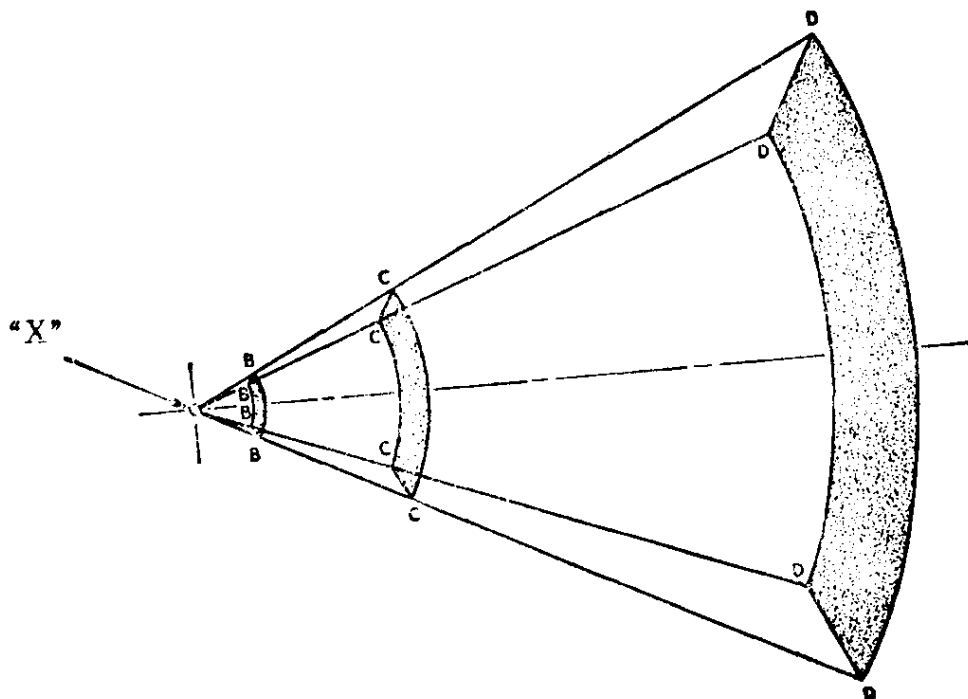


图2-1 光度学各单位示意图

X表示具有1坎德拉的线性发光强度的点光源。图中所示的立体角表示球面度。  
 点“X”到任一“B”点的距离是1厘米；由“BBBB”表示的表面积是1厘米<sup>2</sup>。  
 点“X”到任一“C”点的距离是1呎；由“CCCC”表示的表面积是1呎<sup>2</sup>。  
 点“X”到任一“D”点的距离是1米；由“DDDD”表示的表面积是1米<sup>2</sup>。

到的照度的单位为1勒克司 (SI单位)。由“X”=1坎德拉的光源发出的1流明的光通量落到由“CCCC”表示的表面上所得到的照度单位为1呎烛。由“X”=1坎德拉的光源发出的1流明的光通量落到由“BBBB”表示的表面上所得到的照度单位为1辐脱。

照度单位的换算如表2-2所示。

表2-2 照度单位换算

照 度 单 位	勒 克 司 (lx)	呎 烛 (fc)	辐 脱 (ph)
1 勒克司 (流明/米 <sup>2</sup> )	1	0.0929	$1 \times 10^{-4}$
1 呎烛 (流明/呎 <sup>2</sup> )	10.764	1	0.001076
1 辐脱 (流明/厘米 <sup>2</sup> )	$1 \times 10^4$	929	1

### 光出射度单位

光出射度  $M = d\Phi/dA$  表示每单位面积上输出的光通量。它



既适用于本身发光的物体，也适用于反射的物体。

参阅图2-1，假定由“X”发出的光通量（在所有方向上都是1坎德拉）100%都被“DDDD”、“CCCC”和“BBBB”所示的表面反射，于是

1. “DDDD”将有1流明/米<sup>2</sup>的光出射度。
2. “CCCC”将有1流明/呎<sup>2</sup>的光出射度。
3. “BBBB”将有1流明/厘米<sup>2</sup>的光出射度。

光出射度单位的换算如表2-3所示。

表2-3 光出射度单位换算

光出射度单位	流明/米 <sup>2</sup> (lm/m <sup>2</sup> )	流明/呎 <sup>2</sup> (lm/ft <sup>2</sup> )	流明/厘米 <sup>2</sup> (lm/cm <sup>2</sup> )
1流明/米 <sup>2</sup>	1	0.0929	1 × 10 <sup>-4</sup>
1流明/呎 <sup>2</sup>	10.764	1	0.001076
1流明/厘米 <sup>2</sup>	1 × 10 <sup>4</sup>	929	1

### 亮度单位

亮度  $L = dI/dA \cos \theta$  是垂直于观察线的投射面积上的发光强度。参阅图2-1，假定由“X”发出的光通量（在所有方向上都是1坎德拉）100%都被“DDDD”、“CCCC”和“BBBB”所示的表面以全漫射的方式反射，于是

1. “DDDD”将有1阿熙提 (asb) 或  $1/\pi$  坎德拉/米<sup>2</sup> 即  $1/\pi$  尼特 (nt) 的定向均匀亮度 (SI单位)。
2. “CCCC”将有1呎朗伯或  $1/\pi$  坎德拉/呎<sup>2</sup> 的定向均匀亮度。
3. “BBBB”将有1朗伯或  $1/\pi$  坎德拉/厘米<sup>2</sup> 即  $1/\pi$  熙提 (sb) 的定向均匀亮度。

这些表达式中的因子  $\pi$  是由朗伯辐射体单位面积和单位立体角内发射的光通量对  $2\pi$  球面度的立体角进行积分得到的。因此：

$$M = \int_0^{\pi} \frac{2}{\pi} (L \cos \theta) 2\pi \sin \theta d\theta = \pi L$$