

工程光度学与辐射度学

[美] A 斯廷森 著

刁永言·于铨林·谢立清 等译
王 英 校

科 学 出 版 社

1987

内 容 简 介

本书系统地阐述了光度学与辐射度的基本原理,详细介绍了光度、辐射度、照度、色温、色度等各种物理量的测量方法及相应器件,并对光度学、辐射度学及与色度有关的各基本量的标准作了专门的讨论。该书尽量略去繁琐的数学推导,叙述简明易懂;书后附录中有大量数据、图表及基本公式,并按照国际标准给出了有关的物理常数及名词、术语的定义和各基本量的单位换算表。

本书内容丰富、数据资料完整,可作为光学、颜色光学、照明工程、轻纺印染、建筑采光等方面工程技术人员的常备工具书,也可供高等院校上述专业高年级师生阅读、参考。

Allen Stinson

PHOTOMETRY AND RADIOMETRY

FOR ENGINEERS

John Wiley & Sons, 1974

工程光度学与辐射度学

[美] A 斯廷森 著

刁永言 于铨林 谢立清 等译

王 英 校

责任编辑 刘海龄

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1987年4月第一版 开本:787×1092 1/32

1987年4月第一次印刷 印张:15 7/8

印数:0001—2,150 字数:362,000

统一书号:15031·798

本社书号:4819·15—4

定价 3.75 元

前 言

本书是为那些在其工作中需要进行光度与辐射度测定，但他们主要从事的工作却属于其它学科的工程师撰写的。尽管光度学的一些术语对多数人是陌生的，而且也不能望文生义，但光度学却不难理解。光度学始创于十七世纪，但精密光度学的建立却是在1909年正式采用白炽灯作亮度标准之后。二十世纪二十年代末，由于发明了能够接收不可见的紫外和红外波长的光电发射管，辐射度学遂成为一门计量科学。由于红外通讯具有高方向性，使敌军无法探测，故早在第二次世界大战期间即为人们所采用。在过去的四十年里，由于大量新传感器被研制出来，并且不断地加以改进，以至在人们尚未觉察之际便进入了光电子学时代。在光度学研究中，光源的功率是凭借人的视觉响应来估计的。而在辐射度学中，总功率是在所有重要波长上进行测量，然后根据选定的探测器——包括标准观察者——的响应来加以估计的。

本书包含了我个人认为对光电子学工程师极为有用的有关光度学与辐射度学方面的资料。尽管其中许多内容在有关其他学科的各类出版物中也可找到，但本书把这些数据简明扼要地汇编为一册。我还从历史的角度把关于亮度标准与色温的资料加以归纳，以便为读者预测未来的发展提供背景材料。辐射度学将伴随光电子学而迅速发展。由于本书中的大量资料均取自最新的文献与期刊，因此本书具有很强的时代感。

有关辐射度学的部分用简明的语言作了讨论，所用的事

实和术语均与最新见解相一致。为便于阅读，数学推导的应用被减少到最低限度。必要的有关内容及技术性较强的方面被安排在附录中，以供打算进行定量分析和寻找背景资料的工程师参阅。

本书对有些内容作了简要处理。例如，在关于传感器的综合性章节后面，有一章对传感器在基本电路中如何使用及其控制方面的知识作了简要介绍，这对于非电子学专业的读者可能有用。此外还包括激光器与纤维光学方面的内容，因为这些新型元件是十分有用的。

在二十世纪七十年代，辐射度测量是一门重要的技术。本书以通俗易懂的语言介绍了光电系统及其子系统的设计所需要的大部分知识。其中多数内容是长期有效的，在八十年代甚至九十年代仍将是十分有用的。

本书中所表达的仅是我个人的见解，不应认为是伊斯曼·柯达公司（或它们所赞同）的见解。书中所附的插图仅作说明用，并不打算引导读者照此行事。

我感谢 D. L. MacAdam 博士，Franc Grum, Stan Saunders, C. N. Nelson, W. Price, William Ewald, Lenard Metzger, Richard Sypula, Swaminathan Madhu 博士，Paul Mauer 博士，R. F. Caldwell 博士，J. P. Carroll, S. E. Ekiert 以及 W. E. Moore 所给予的帮助和耐心地阅读手稿。伊斯曼·柯达 (Eastman Kodak) 公司、通用电气 (General Electric) 公司、E. G. 和 G. Vactec 公司，Clairex 公司，光电研究公司，伽玛科学公司以及国家探测器技术公司在提供材料和协助方面都给予了特别的合作。由于许多出版社的帮助使我得以采用他们的插图。

A. 斯廷森

1974年3月于纽约罗彻斯特

目 录

前言	
第一章 辐射度学导论	1
1.1 光与辐射的传播	3
1.2 电磁波谱	4
第二章 辐射度学与光度学术语	6
2.1 余弦定律	11
2.2 照度与辐射度的关系	12
第三章 辐射与照度传感器	14
3.1 眼睛用作光度测量传感器	16
3.2 光电传感器	17
3.3 热传感器	53
3.4 其它光敏器件	55
第四章 光电传感器电路	58
4.1 零电阻电路	59
4.2 电子开关电路	61
4.3 直流放大电路	65
4.4 光-频转换电路	68
4.5 积分电路	70
4.6 电源	72
4.7 脉冲电路	82
4.8 电子定时电路	82
4.9 终端装置变换器	83
第五章 光源和辐射源	87
5.1 光与辐射的能效	88
5.2 黑体	93

5.3	色温	101
5.4	白炽灯	107
5.5	气体导电灯	114
5.6	荧光灯	118
5.7	氖和氩辉光灯	120
5.8	发光二极管 (LED)	123
5.9	其它光源	132
5.10	闪光灯	133
5.11	电子闪光灯	137
5.12	核动力光源	144
5.13	场致发光灯	145
5.14	光源的比较	147
第六章 光的控制		149
6.1	光源的控制	149
6.2	反射	151
6.3	折射器	154
6.4	棱镜	156
6.5	透镜	158
6.6	衍射光栅	166
6.7	滤光片	169
6.8	偏振	179
6.9	衰减器	183
6.10	漫射器	185
6.11	定向系统	188
6.12	光导管和光导纤维	193
6.13	光学干涉元件	196
第七章 辐射度测量和光度测量实验室		199
7.1	辐射度测量和光度测量实验室设备	201
7.2	实验室设备的应用	202
7.3	测光导轨	204
7.4	平方反比定律	209

7.5	辐射度测量与光度测量标准,维护与保管	212
7.6	实验室设备的标定	213
7.7	标定程序	213
第八章	光辐射的测量	216
8.1	光辐射的测量装置	216
8.2	传感器的响应	217
8.3	照度计或辐射度计的标定	218
8.4	乌布里希(Ulbricht)积分球	221
8.5	投影装置的光度测量	223
第九章	照度的测量	225
9.1	目视光度测量仪器	225
9.2	物理光度测量仪器	227
9.3	测量光电池的标定	231
第十章	发光强度的测量	233
10.1	用辐射度测定法测量发光强度	236
第十一章	色温的测量	239
11.1	比较法测量色温	241
11.2	分光辐射度法测量色温	245
11.3	迈尔德	245
第十二章	亮度的测量	247
12.1	亮度计	253
12.2	亮度的特性	254
第十三章	标定光源	257
13.1	仪器标定光源	257
13.2	标定亮度源或辐射度源	260
13.3	用于标定设备的灯	261
第十四章	分光光度测定法	265
14.1	分光光度计	266
14.2	色度计	269
第十五章	分光辐射度测定法	270

15.1	分光辐射度计的标定	272
15.2	记录式分光辐射度计的结构	275
第十六章	辐射度和光度测量标准	277
16.1	发光标准的历史	278
16.2	辐射度测量与光度测量的比较	279
16.3	发光强度的原标准	280
16.4	拟定标准灯技术条件的方法	282
16.5	对标准灯进行比较	283
16.6	标准灯电源	284
16.7	灯室	287
16.8	标准灯的标定	288
16.9	光谱辐照度标准	289
16.10	作为辐照度标准的传感器	290
16.11	反射标准	290
16.12	理想漫射体(朗伯表面)	292
16.13	亮度标准	292
16.14	波长和光谱透射率标准	295
第十七章	辐射度标准和光度标准的精度	297
17.1	精度	298
17.2	朗伯光源	302
第十八章	色度学	303
18.1	1931 CIE (色度)标准观察者	305
18.2	1931 CIE 色度图	309
18.3	1960 CIE-UCS 色度图	313
18.4	孟塞尔颜色系统	316
18.5	ISCC-NBS 颜色表示法	320
18.6	其他颜色系统	321
第十九章	摄影光度学	323
19.1	摄影感光度测定法	323
19.2	照相曝光表	328

19.3	曝光表的设计	332
19.4	曝光表设计技术	338
19.5	入射光还是反射光?	342
19.6	照相机的自动曝光控制机构	346
19.7	照相机中曝光控制机构的定向系统	348
19.8	曝光精度	352
第二十章 激光器		357
20.1	激光器是如何工作的?	359
20.2	红宝石激光器	360
20.3	气体激光器	361
20.4	半导体激光器	363
20.5	可调谐有机染料激光器	364
20.6	激光器的巨脉冲	367
20.7	激光束的调制	369
20.8	激光辐射的测量	370
20.9	对人眼的激光防护措施	375
附录 A 光度学资料		379
	光度学与辐射度学的有关术语汇编	379
	按字母顺序排列的专用词汇表	383
表 A.1	辐射度学与光度学的基本物理量	394
表 A.2	其他辐射度学与光度学物理量	396
表 A.3	符号的辨别	397
表 A.4	其他量纲单位和具有十进位倍数缩写的物理量及 SI (国际单位制)现状	398
表 A.5	不同单位照度的等量值和转换因子	400
表 A.6	不同单位亮度的等量值和转换因子	401
表 A.7	辐射能的相对光谱发射效率	402
表 A.8	色匹配函数	403
表 A.9	纯光谱色的色品坐标	404
表 A.10	色温和迈尔德的等量值	406

附录 B 补充技术资料	407
B.1 人眼	407
B.2 光电效应	412
B.3 发光二极管	425
B.4 电子电路中的电容器和电感器	429
B.5 黑体	433
B.6 焦平面的曝光	436
B.7 浸没式焦平面镜头	444
B.8 眼睛对红外辐射的灵敏度	447
附录 C 有用的常数和数值表	448
表 C.1 基本物理常数	448
表 C.2 太阳常数值	449
表 C.3 数字常数及较高精度的换算因子	450
表 C.4 等长度度量 and 转换因子	451
表 C.5 不同单位的等面积度量和转换因子	452
表 C.6 不同单位制的能量相等的量和转换因子	452
表 C.7 相等的每单位面积的和转换因子	454
参考文献	455
索引	463

第一章 辐射度学导论

辐射度学是与光谱范围内的辐射能量测量有关的学科。此光谱范围包括紫外、可见光和红外辐射，它之所以被称为光谱，是因为在这些波长范围内，辐射行为均遵循光学定律和光学原理之故。几百年来，人们一直用目测光度计对光进行测量，直到光电传感器研制成功，才用仪器进行辐射测量。今天，人们测量辐射可比测量光精确得多。由于辐射能的光谱发光效率已经确定，光度值可根据相应的光谱辐射度的测量加以计算。预期光度测定将成为辐射度学的一种特殊应用。

在日常生活经历到的所有物理量中，光是人们所最熟悉的；而包括工程研究的任何基本量中，光又能测量得最为准确。要买一只光强优于 $\pm 2\%$ ，其准确度经标定的钨丝灯泡是不可能的。而且，仅仅使灯关闭一次，然后再接通灯的功率变化便可达 0.5% 。由于钨丝在高温下工作，这种灯非常稳定。

直到二十世纪三十年代，用于光测定的光电传感器才问世。在三十年代，四十年代以及五十年代所能得到的传感器与电阻和电池一样不稳定。光电管和光电倍增管是最灵敏的探测器。虽然硒阻挡层光电池较为方便，但它们却显示出大而不可确定的疲劳误差和温度误差。今天，已有光电导体、硅光生伏打电池、光电二极管、光电晶体管、光敏可控硅整流器以及其它光电元件，确实可以说是辐射度学和光度学的黄金时代。

目前，在现有的各种传感器中没有一种对同一波长有与

人眼相同的响应。它们不能直接用来进行光测量，除非对特定的光源加以标定，或配备以合适的滤光片。即使是最好的传感器与滤光片的组合，也不能匹配出优于 $\pm 2\%$ 的适光响应。虽然这已是相当优良的匹配，但就精密测量而言，误差仍然过大。由于各种传感器总是测量某一部分入射辐射，所以用规定光源的辐射单位而不用光度单位标定传感器似乎更有效。

在辐射度测量的许多应用中，仅照明工业和信号灯的用户与可见光的光度测量直接有关。对于光电子学应用来说，辐射度测量比光度测量更为适用，因为光电子学是把输出信号作为输入信号的某种函数来探测、测量、计算和控制的。辐射度学是评价光源、传感器及其性能的技术。

光对于目视观测是不可少的。电磁波谱的亮度约为 25 或 30 个十进位长，而可见光的波长还不到一个十进位的一半。幸运的是，可见波长是很容易产生的。象风一样，光是不可见的，只有通过它所产生的结果才能被观察到。正在通过空间或纯净的空气传播的光是不可见的。只有当它显现为被照明物体或自发光源的亮度或色彩时光才产生一个视觉。

光度学的一个较新的应用是测量用作信号灯或显示元件的发光二极管的发光效率。当与绝缘体中的硅传感器一起使用时，仅可见光谱之外的波长起作用，此时涉及辐射度测量技术。

计算激光束和脉冲是辐射度学的另一个新的应用。由于主要的问题是保护人眼不受激光损伤，而不是确定它们能够在何种程度上被观测到，所以不涉及光度法。人们已经能够使物质产生从紫外、可见，直至波长较长的红外激光。辐射度测量技术被用于测量激光光束。

在辐射度学中使用的一些术语都是用熟悉的单位表示辐

射度参量的工程词汇，但在光度学中，对用不同单位表示的同一参量却使用了若干不同的词汇。这些不同的术语在它们通过使用而为人们熟悉之前经常发生混淆，所以打算用国际单位制对这些单位和命名法加以简化。下一节将解释辐射度和光度学中所使用的某些术语。重要的术语被编入表 A.1、A.2 和 A.3 中，并在附录 A 的词汇表中给出其定义。

1.1 光与辐射的传播

光在空间或真空中的传播速度约为 $3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ 或 186000 mis^{-1} (表 C.1)。过去，人们曾一度假定空间充满着“以太”，而光是通过以太传播的，就象声音通过金属传播一样。由于这要求以太比已知最硬的材料更致密，而且还必须透明，所以关于以太的波动说不符合任何已知的事实。早期的微粒说假设光是沿着微粒流传播的，但关于这些微粒是由眼睛还是由光源发出的这一点人们一直争论不休。在十九世纪，麦克斯韦、赫兹以及其他科学家证明，电磁辐射具有光的许多性质，但电磁说却不能解释行波中的微小能量如何能使光敏材料释放出电子。普朗克和爱因斯坦使微粒说重新复活，并能解释光电效应。他们断定，光能够以离散的能束不连续地辐射和吸收，他们把离散能束称为量子(在光辐射范围则是光子)。每个量子的能量定义为普朗克常数 ($h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J/Hz}^{-1}$) 与辐射频率 ν 的乘积：

$$Q_c = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.1)$$

式中 c 是光速， λ 是波长。今天，量子理论和电磁波理论已被用来解释光的现象及其传输能量的能力。表 1.1 给出了波长单位及换算因子。

表 1.1 波长单位及换算因子

埃 (\AA)	纳米 (nm)	微米 (μm)
埃 (\AA) = 1.0	$= 1.0 \times 10^{-1}$	$= 1.0 \times 10^{-6}$
纳米 (nm) = 1.0×10	$= 1.0$	$= 1.0 \times 10^{-3}$
微米 ^{a)} (μm) = 1.0×10^4	$= 1.0 \times 10^3$	$= 1.0$

纳米是优先选用的单位

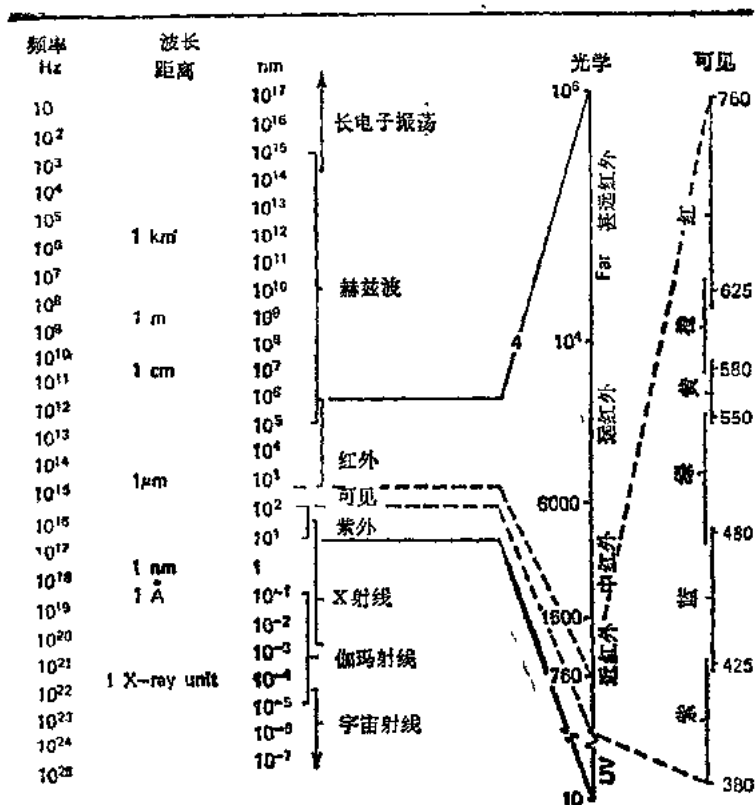
a) micrometer (微米)最初被称为 micron(公丝),但现在后者一般不常使用。米是标准国际单位, $1 \mu\text{m}$ 等于 10^{-6} m 。

1.2 电磁波谱

波动理论为所有辐射能之间的相互关系给出了一个方便的框架。有着不同名称的各谱域列于表 1.2 中,某些谱域有重叠,而在谱域之间则是逐渐过渡的。所有辐射都是振荡的结果。光是电子的激发引起的光子发射,这种电子激发或者是由热扰动造成的,就象在白炽灯中那样,或者是由电子碰撞造成的,就象在气体放电灯中那样。在电磁波中辐射能是以量子(对于光则是光子)的形式周期性地发射的。频率越高,能量也就越高[式(1.1)]。在 X 射线中,振荡是由来自原子内层的电子跃迁引起的。短 γ 射线则是由原子核的放射性裂变引起的。

光辐射的一个重要特性在于它在空间或均匀介质中是直线传播的。外层空间的重力效应超出了本书的范围。在光的波动理论中,光的传播是以波动的形式进行的,这种波动被描述为正弦波,这些波携带着被称为光子的、离散的和不可分割的能量束[式(1.1)]。如果所有波的取向都是随机的,那么这种光便称之为非相干光和非偏振光。如果所有的波都具有相同的频率,并且存在一定的位相关系,那么这种光便称为相干光。激光器(和脉冲)产生的是相干光。

表 1.2 电磁波谱



Frequency = velocity of light \div wavelength

λ = wavelength (nm)

ν = frequency (Hz)

c = velocity of light or radiation (nm s⁻¹) = 3×10^{17}

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

第二章 辐射度学与光度学术语

光辐射是在紫外、可见和红外光谱范围内的电磁辐射,它遵循光学定律。光是可以根据其引起视觉上的感受能力来计算的辐射能。但就物理辐射度学和光度学而言,光是按辐射能量的光谱发光效率来计算的辐射能(图 B. 1)。相对发光效率(表 A. 7)表示标准观察者的相对光谱响应。标准观察者的响应表示在几个国家中许多人的平均视觉响应。关于标准观察者明视觉(普通亮度级)的国际协议是于 1924 年达成的,从那时以来,表 A. 7 中的效率值一直未作过更动。该协议是由国际照明委员会(ICI)通过的,该委员会现在的名称是国际照明技术委员会(CIE)(见附录 A 的词汇表)。

光辐射谱域从 10 nm 一直延伸到 10^6 nm 。其分界不是很精确的,在相邻的谱域之间有重叠。例如,X 射线可长于 10 nm ,但也可短至 10^{-3} nm 。可见光谱大约是从 380 nm 延伸到 760 nm (表 1.2)。

光源的功率是用强度这一术语来描述的,它或者是指发光强度,或者是指辐射强度。在工程中,强度是指“每单位面积”的强度,而在光度学和辐射度学中,强度是指“每单位立体角”的强度。一只灯泡的发光强度是以烛光来度量的,其光通量则以每球面度(单位立体角)的流明数来度量。也就是说,1 烛光(cd)的发光强度是 1 流明/球面度(lm sr^{-1}),或光源的功率为 1 烛光(cp)。

辐射度学的术语与光度学的术语相似,只需用辐射来代替发光一词,参见表 A. 1。辐射度测定与在所研究波长下用

瓦表示的辐射功率有关，而光度测定与在所研究波长下辐射能(图 B. 1)的光谱辐射功率和光谱发光效率的乘积所确定的那部分辐射功率有关。效率是一个无量纲的术语，它表示在特定波长下的功效与在效率最大的波长下的功效之比值。辐射通量的功效以流明/瓦来表示。

辐射能射到一个表面上的过程在光度学中被称为照明(在辐射度学中被称为辐照)，多数科学学派把测量到的量称为照度，另一些学派对量与过程这两者都用照明。光通量和照度这两个量均不能观察到。照度只有通过被照明物体的亮度才能目视显现。

亮度是由观察一个被照明物体或自发光光源所产生的视觉响应。测量到的量，即激励，被称为照度。这两个词的使用有时可以互换，但这两个量并不相同。亮度是观察者的响应，而且由眼睛的感光历程、环境亮度、颜色以及其它因素所决定，可以在很宽的范围内变化。

在辐射度学中对应的术语是辐射度。照明工程师宁愿使用“光度学亮度”来表示而不使用照度一词。

烛光可表示总功率或定向功率，对于一个在所有方向的辐射都相等的理论点光源，总功率可以用球面烛光来表示，同时总流明应为 $4\pi\text{cp}$ (烛光)，因为在一个球体中有 $4\pi\text{sr}$ (球面度)。然而在实际的灯泡中，总光通量接近于每烛光 10 lm (流明)，因为灯座截取了某些光通量。由于这些原因，球面烛光这一术语不常使用。光源的功率最好表示为总流明数。球面烛光这个术语意味着光强在各个方向都相等。这只有在理论点光源的情况下才是如此。

水平烛光在光度学中是更有用的术语，但必须用在“标志方向”一词加以补充，因为多数灯泡不会在所有方向都显现相同的功率。具有单面灯丝的灯更是如此。(见 16.4 节)