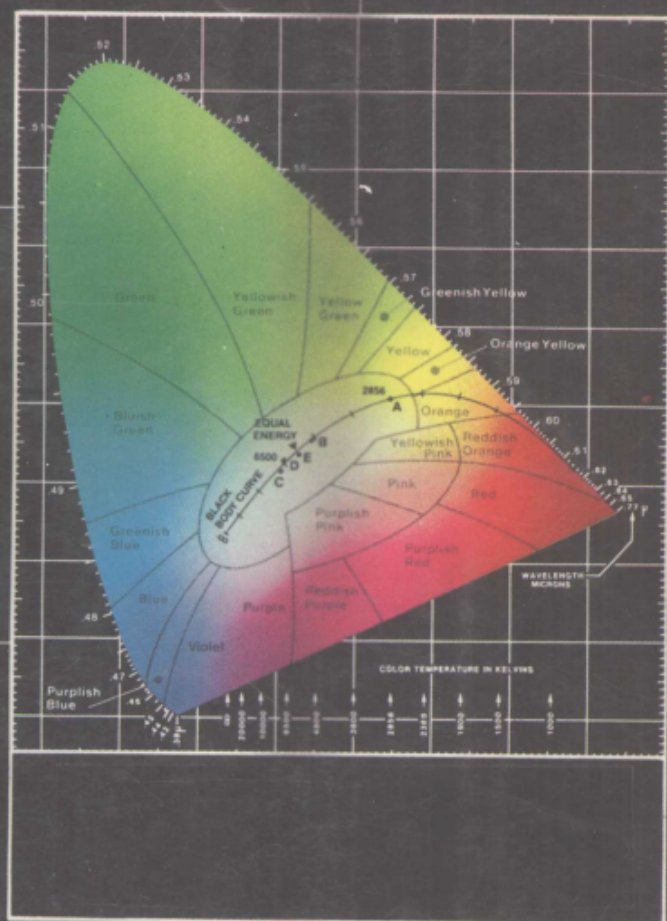




应用色度学

蒋继旺 王秀泽
王 荣 马轩文

编著

解放军出版社

责任编辑：张世涛

封面设计：苏 刚



ISBN 7-5065-2505-4/TB · 1

应 用 色 度 学

蒋继旺 王秀泽 编著
王 荣 马轩文

解 放 军 出 版 社

一九九四年十一月

京新登字 117 号

0432.3 /

书名：应用色度学

编著者：蒋继旺 王秀泽 王 荣 马轩文

出版者：解放军出版社

〔北京地安门西大街 40 号/邮政编码 100035〕

印刷者：国防大学第二印刷厂

发行者：解放军出版社发行部

开 本：787×1092 毫米 1/16

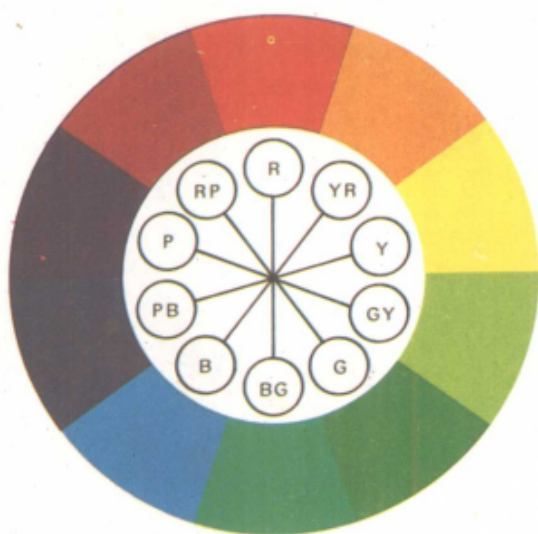
印 张：21.75

字 数：540 千字

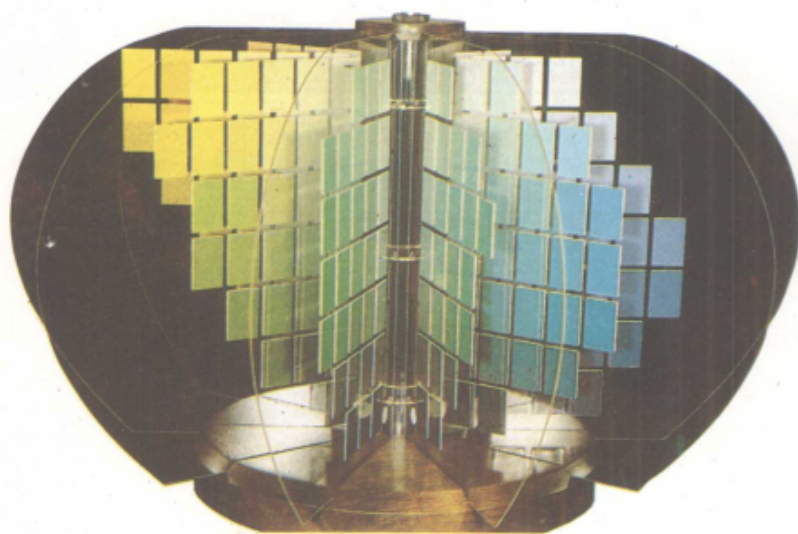
版 次：1995 年 2 月第 1 版

印 次：1995 年 2 月(北京)第 1 次印刷

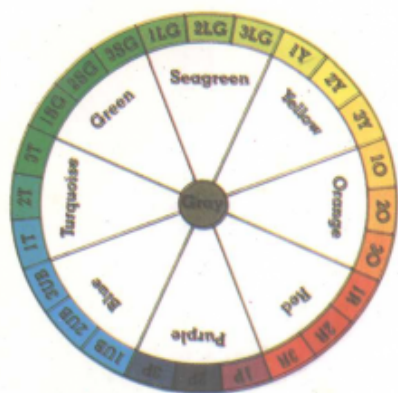
书 号：ISBN 7-5065-2505-4/TB·1



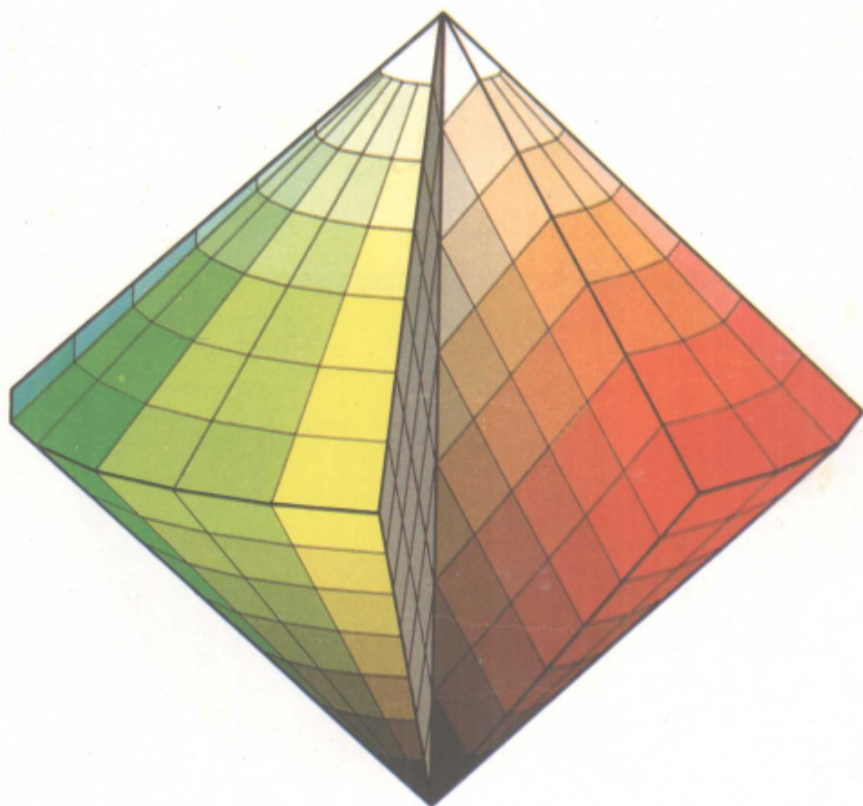
Munsell 色相环



Munsell 色立体



Ostwald 色相环



Ostwald 色立体

内 容 简 介

色度学是研究人眼的颜色视觉规律、颜色测量的理论和技术的科学，是近半个世纪才发展起来的一门综合性学科。本书系统地论述了色度学的基础理论和颜色测量技术的基本原理，较全面地说明了色度学在多领域中的重要应用。内容包括 CIE（国际照明委员会）规定和推荐使用的各种色度标准、色空间、色差公式、主要测色方法和仪器、国际上主要应用的色卡图册以及色度学在印染、印刷、颜料涂料、摄影、电视、测绘等领域中的应用。书末附有色度学主要的常用数据表。

本书可作为高等院校有关专业本科或研究生教材，亦可供上述有关部门科技工作者参考。

序 言

色度学是研究人眼的颜色视觉规律、颜色测量的理论和技术的科学。这是一门近半个世纪以来才发展起来的新兴边缘性学科，内容涉及物理光学、视觉生理学、视觉心理学、心理物理学等多个学科领域。

人类生活和工作在一个色彩斑斓的世界上，人们随时随地都在跟颜色打交道。从古代的壁画、装饰品、染织品开始，人类在生产活动中很早就在使用和研究颜色。我国劳动人民在历史上就积累了丰富的颜色知识，并运用于纺织印染、工艺美术、绘画、陶瓷等部门，创造出光辉灿烂的文化艺术作品。但是在漫长的历史发展中，颜色的科学奥秘却长期没有被揭开。颜色的本质是什么？它有哪些基本属性？颜色视觉有些什么规律？产生颜色视觉的生理机制是什么？颜色能否定量地表示和测量？这些就是在各相关学科基础上发展起来的色度学所要解答的问题。

1666年 Isaac Newton 让一束阳光透过玻璃三棱镜，成功地实现了阳光的色散。他还进行了色光混合的实验研究，提出了颜色环的概念和定量表示色光混合规律的所谓“重心系统”。1807年，T. Young 和 H. L. F. von Helmholtz 提出了颜色视觉的“三色学说”。1854年 H. Grassmann 总结了前人对色光混合的研究成果，归纳出以其名字命名的四条定律，奠定了色度学的实验基础。1865年前后，J. C. Maxwell 系统总结了电学和磁学的新成就，提出了著名的电磁场理论，使人类认识了光的电磁本性。1878年 E. Hering 提出了颜色视觉的“四色学说”。1915年美国出版了最早版的《孟塞尔颜色图谱》(Munsell Atlas of color)，制成了一种比较完整的颜色编序系统。

此后的颜色科学研究集中在两个方向上进行。一个方向的研究集中在制作大量的标准颜色样品，并且按人眼视觉特性对所挑选的这些标准色样进行编序排列。以美国画家孟塞尔研究的这种表色系统为代表，先后连续发展了多种这类所谓显色表色系。这方面的研究提高了人类对人眼颜色空间性质的认识，并给出了凭肉眼观察标定颜色的方法。另一个方向的研究集中在根据色光混合的心理物理实验定量表示颜色。国际照明委员会(CIE)综合了 W. D. Wright、J. Guild 和 W. S. Stiles、J. M. Burch、N. I. Speranskaya 的实验成果，分别在1931年和1964年制定了两套表示心理物理色的标准(分别对应 2° 和 10° 现场)，构成所谓混色表色系。现代色度学正是在这两套颜色标准的基础上发展起来的。鉴于这两套标准的色差不均匀性，在以上两种研究方向的基础上，后来又发展起一批所谓均匀表色系或颜色空间，CIE 推荐使用其中的几种，例如 CIELUV 及 CIELAB 色空间是1976年制订的。在此期间，颜色视觉理论综合了“三色学说”和“四色学说”的理论、根据神经生理学的新发现，发展成为现代的颜色视觉“阶段学说”。在现代色度学发展中作出重大贡献的科学家还有 D. B. Judd、G. Wyszecki、D. L. MacAdam 等人。

光电探测技术、电子技术、计算机技术引入颜色测量工作以后，才真正开辟了色度学在科研、生产中实践应用的新篇章。随着各种类型的颜色测量仪的不断涌现，色度学科技知识

迅速普及,颜色理论和技术的研究越来越深入,色度学对科技和经济发展正在产生巨大的影响。今天,可以说每件工业产品都涉及到颜色。颜色是衡量某些产品质量的重要指标之一,对于象印染、印刷、电影、电视等产品来说,颜色质量则成为它们消费生命所在。在军事测绘领域,航片和卫片、遥感资料的采集和判读、地图的设计和印刷等都涉及到颜色理论和技术问题。一个熟悉颜色理论知识的工作者与对颜色空间一无所知的人,在地图设计或阅读上效果是截然不同的。

我国在色度学研究方面起步较晚,1978年才出版了一本系统介绍色度学理论和技术的专门著作,但在应用技术方面发展非常迅速,从1984年第一种型号的色差计问世以来,已有各种类型的颜色测量仪投放市场,国家在近几年也制订了一系列的颜色测量标准。

本书是总结多年色度学课程教学的实践,在二种内部教材的基础上编写的。它系统地介绍了色度学的基础理论和颜色测量技术的基本原理,并较全面地说明了它们在多领域中的重要应用。书中从讲解辐射度学和光度学有关的基本概念入手,循序渐进地论述了颜色视觉的产生、性质和基本规律,详细介绍了CIE正式推荐的各种表色系、色空间、色差公式、CIE规定的颜色测量方法、测量标准、主要的测色仪器及国际上常用的色卡图册及其颜色标定方法。其中对于OSTWALD、NCS、DIN、OSA、COLOROID等显色表色系、ANLAB表色系、光源显色指数测量和计算、光源色异谱同色指数、光源色温测量、荧光表面色测量、白度测量、近年出现的色差公式等都作了阐述。在应用部分分别讲述了色度学及现代颜色测量技术在印染、印刷、颜料和涂料、彩色摄影、彩色电视、计算机彩色影像配色、地图设色等领域中的重要应用。每章后附有练习题,书中附有大量的图表。

本书的编写工作是在蒋继旺主持下进行的,参加编著工作的还有王秀泽、马轩文、王荣三位同志,具体分工是:蒋继旺第一、二、七章,王秀泽第三、五章,马轩文第四章,王荣第六章,最后由蒋继旺负责统稿。由于我们水平有限,疏漏之处在所难免,请读者批评指正。

本书可作为高等院校有关专业本科或研究生教材,亦可供印染、印刷、摄影、电视、轻工、测绘等部门的科技工作者参考。

编著者

1994. 11

目 录

第一章 辐射度学与光度学概要.....	(1)
§ 1.1 辐射度学基本概念	(1)
§ 1.2 CIE 标准光度观察者	(6)
§ 1.3 光度学基本量	(10)
§ 1.4 光度测量	(13)
§ 1.5 颜色测量中的光度标准	(17)
思考题与习题	(23)
第二章 颜色视觉.....	(26)
§ 2.1 颜色视觉的性质	(26)
§ 2.2 颜色混合	(31)
§ 2.3 颜色视觉的形成机理	(41)
思考题与习题	(46)
第三章 CIE 标准表色系.....	(47)
§ 3.1 混色系基本概念	(47)
§ 3.2 RGB 表色系和 $R_{10}G_{10}B_{10}$ 表色系	(53)
§ 3.3 XYZ 表色系和 $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 表色系	(56)
§ 3.4 CIE 的颜色计算公式和计算方法	(68)
§ 3.5 颜色的单色表示	(77)
§ 3.6 边界色和最明色	(81)
思考题与习题	(87)
第四章 显色表色系.....	(89)
§ 4.1 显色系基本概念	(89)
§ 4.2 MUNSELL 表色系	(89)
§ 4.3 OSTWALD 表色系	(96)
§ 4.4 NCS 表色系	(101)
§ 4.5 DIN 表色系	(103)
§ 4.6 OSA 表色系	(107)
§ 4.7 COLOROID 表色系	(110)
§ 4.8 一种玻璃色泽计	(113)
思考题与习题	(113)
第五章 均匀表色系及色差.....	(115)
§ 5.1 XYZ 刺激值空间的差别阈不均匀性	(115)
§ 5.2 均匀色度标尺 (UCS) 与均匀明度标尺 (ULS)	(118)

§ 5.3 均匀颜色空间 (ANLAB, HUNTERLAB, $U^*V^*W^*$, CIELUV, CIELAB)	(127)
§ 5.4 色 差	(142)
思考题与习题	(149)
第六章 颜色测量	(150)
§ 6.1 目视色度计	(151)
§ 6.2 刺激值直读法	(152)
§ 6.3 分光测色法	(156)
§ 6.4 白度及其测量	(164)
§ 6.5 荧光表面色的测量	(170)
§ 6.6 光源特性的测量和计算	(174)
思考题与习题	(181)
第七章 色度学的应用	(182)
§ 7.1 染料与染色	(182)
§ 7.2 彩色摄影	(190)
§ 7.3 彩色印刷中的色度学问题	(198)
§ 7.4 颜色的异谱同色指数	(215)
§ 7.5 色料的颜色混合	(219)
§ 7.6 颜料和涂料	(230)
§ 7.7 计算机彩色影像的配色	(236)
§ 7.8 彩色电视与平板显示	(241)
§ 7.9 色度学在地图设计中的应用	(252)
思考题与习题	(256)
附 表	(257)
1. CIE ILL A、D ₃₅ 、G 的相对光谱功率分布 [300(5)830]	(257)
2. CIE ILL D ₅₀ 、D ₃₅ 、D ₇₅ 、B 的相对光谱功率分布 [300(5)830]	(258)
3. 日光成分的平均值 $S_0(\lambda)$ 及特征矢量 $S_1(\lambda)$ 、 $S_2(\lambda)$ [300(5)830]	(259)
4. CIE 典型日光 (CIE ILL D) 的色品坐标及乘数 M_1 、 M_2	(260)
5. 31 条等相关温线与黑体轨迹交点的坐标及其在 (u, v) 一色品图上的斜率	(261)
6. 黑体辐射的相对光谱功率分布	(262)
7. 色度计算公式集	(263)
8. 相对于 CIE ILL A、B、C、E 的恒定主波长线的斜率	(264)
9. Munsell 色卡的 CIE (Y, x, y) 表色值	(271)
10. DIN 色卡在 (x, y) 一色品图上的坐标及其他参数	(291)
11. CIE ILL A 和代表典型荧光灯的三种照明体 F_1 、 F_2 、 F_3 的相对光谱功率分布 [380 (10) 780]	(296)
12. 用于计算物体色异谱同色指数的三种异谱同色样品的光谱辐亮度因数 [380 (10) 760]	(297)
13. 用于计算光源色可见光部分异谱同色指数的五对异谱同色样品的光谱辐亮度因数 [400 (5) 700]	(298)

14. 用于计算光源色紫外光部分异谱同色指数的三种荧光异谱同色样品的光谱特性 [300 (5) 700]	(301)
15. 用于计算光源色紫外光部分异谱同色指数的三对非荧光异谱同色样品的光谱辐亮因数 [400 (5) 700]	(303)
16. 用于计算 CIE 一般显色指数的 1—8 号色样的光谱辐亮度因数 [380(5)780]	(304)
17. 用于计算 CIE 一般显色指数的 9—15 号色样的光谱辐亮度因数 [380(5) 780]	(306)
18. 参照明体 P2300—4900K 的 CIE 1960 UCS 图 (u, v) 色品坐标及 C_r 、 d_r 值	(308)
19. 参照明体 D 5000—25000K 的 CIE 1960 UCS 图 (u, v) 色品坐标及 C_r 、 d_r 值	(309)
20. CIE 标准照明体的 CIE 1960 UCS 图 (u, v) 色品坐标及 C_r 、 d_r 值	(309)
21. 参照明体 P2300—4900K 的 CIE 试验色样品 $U^* V^* W^*$ 数据	(310)
22. 参照明体 D5000—25000 的 CIE 试验色样品 $U^* V^* W^*$ 数据	(320)
23. CIE 标准照明体的 CIE 试验色样品 $U^* V^* W^*$ 数据	(329)
24. 反射比 R 与 K/S 值数据关系表	(330)
主要西文人名译文	(335)
参考文献	(336)

第一章 辐射度学与光度学概要

§ 1.1 辐射度学基本概念

1.1.1 电磁波谱

随着科学和技术的不断进步，人类逐步发现和认识了各种波长（或频率）的电磁波。根据波长、波速、频率之间的关系

$$c = \lambda \nu$$

以及光子能量公式

$$E = h \nu$$

($c \approx 3 \times 10^8 \text{m/s}$ ，真空中的光速； $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ ，普朗克常数)，波长长则频率低，波长短则频率高，且频率越高光子能量越大。

波长最长的是交流电波，其波长达几百甚至几千公里。以下按波长从大到小的顺序，依次是无线电波、微波、红外辐射、可见光、紫外辐射、x射线、γ射线和宇宙射线，宇宙射线的波长仅为千万分之一埃($1\text{\AA} = 10^{-10} \text{m}$)。电磁波的波长范围相当大，前后跨越大约 23 个数量级，其中无线电波和微波是由电磁振荡和谐振腔产生的，用于广播、电视、通讯、雷达等；红外辐射、可见光和紫外辐射是由原子分子的电子运动产生的，合称为光辐射 (Optical radiation)。红外辐射的热效应明显，紫外辐射的化学效应明显。光辐射是电磁波谱中极小的一个波长段，可见光是光辐射中更小的一个波长段，我们所观察到的色彩斑斓的外部世界就是由这一微小波段的电磁波表现出来的。X射线由原子的内层电子运动产生，γ射线由核内运动状态变化产生，它们的穿透能力很强，因为它们的光子能量大。宇宙射线是从太空射向地球的一种射线，其光子能量更大。表 1·1 列出了各种电磁波的频率和波长范围。

表 1·1 电磁波谱

电磁波谱	频率 ν (Hz)	真空中的波长 λ (单位)
交流电	1~3000	$10^8 \sim 10^5$ (m)
无线电波	3000~ 3×10^8	$10^5 \sim 1$ (m)
微波	$3 \times 10^8 \sim 5 \times 10^{11}$	$1 \sim 6 \times 10^{-4}$ (m)

续表 1·1

电 磁 波 谱			频 率 ν (Hz)	真空中的波长 λ (单位)
光 辐 射	红 外 辐 射		$5 \times 10^{11} \sim 3.85 \times 10^{14}$	600~0.78 (mm)
	可 见 光	红 (R)	$3.85 \times 10^{14} \sim 4.8 \times 10^{14}$	780~622 (nm)
		橙 (O)	$4.8 \times 10^{14} \sim 5.0 \times 10^{14}$	622~597 (nm)
		黄 (Y)	$5.0 \times 10^{14} \sim 5.2 \times 10^{14}$	597~577 (nm)
		绿 (G)	$5.2 \times 10^{14} \sim 6.1 \times 10^{14}$	577~492 (nm)
		蓝 (B)	$6.1 \times 10^{14} \sim 6.6 \times 10^{14}$	492~455 (nm)
紫 (P)		$6.1 \times 10^{14} \sim 7.9 \times 10^{14}$	455~380 (nm)	
紫 外 辐 射		$7.9 \times 10^{14} \sim 6.0 \times 10^{16}$	380~5 (nm)	
X(伦琴)射线 γ 射线 宇宙射线		$6.0 \times 10^{16} \sim 7.5 \times 10^{16}$ $10^{18} \sim 10^{22}$ $10^{22} \sim 10^{24}$	50~0.4 (Å) $1 \sim 10^{-4}$ (Å) $10^{-4} \sim 10^{-6}$ (Å)	

光 (Light) 一词有三种含义。最广义的光包括光辐射的三个波段加上 X 射线和 γ 射线，次一种含义的光只包括三种光辐射，狭义的光专指可见光。本书采用最后一种含义，即光专指可见光。

可见光是能够使正常人的视觉产生光亮感觉的光辐射。光在传播中可被光学元件反射、折射、成象或色散，也可用光电器件探测。可见光的波长范围是 380—780nm，不同波长的可见光使人眼产生不同的颜色感觉，说明人眼具有辨别可见光波长 (频率) 的能力。1666 年 Isaac Newton 让一束太阳光通过三棱镜得到第一个可见光光谱，他认为白光是由红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫七种色光组成的。

1.1.2 辐射度学 (Radiametry) 量

光辐射同其它电磁波一样具有能量，这一能量可从一辐射源发射，也可被某一曲面接受。从能量角度研究各种电磁波的发射、传播、接收的光学分科叫辐射度学。辐射度学的主要研究对象是光辐射。

(1) 辐射能 (Radiant energy) 就是以光辐射的形式发射、传播、接收的能量，用符号 Q 表示，单位为 J (焦耳)。

(2) 辐射通量 (Radiant flux)，简称辐通量 某一曲面在单位时间内以光辐射形式发射、传播或接收的能量叫做该曲面所发射、穿过该曲面或该曲面接收的辐射通量。辐射通量又称辐射功率或功率，用符号 P 表示，单位为 W (瓦特)。它与辐射能的关系可用下式表示

$$P=dQ/dt \qquad (W) \qquad (1.1.1)$$

经常要测量研究某一曲面所接收的从一个点辐射源传来的辐通量，因此我们引入立体角概念。一个曲面与一点共同包围的立体空间称为立体角，如图 1·1 所示。如果曲面元的面积用 ds 表示，该曲面元到点 F 的距离用 r 表示，则 ds 对 F 点所张的立体角 dΩ 定义为

$$d\Omega=ds_{\perp}/r^2=ds \cdot \cos\alpha/r^2(Sr) \qquad (1.1.2)$$

式中 α 代表曲面 ds 的法线与立体角所在方向间的夹角，ds_⊥ 表示 ds 在立体角所在方向的投影。立体角的单位是球面度，用符号 Sr 表示。辐射源 F 发射的光辐射被 ds 所接收，穿过 ds 的辐射通量与穿过立体角 dΩ 的相同。

整个球面的面积是 $4\pi R^2$ ，它对球心所张的立体角

$$\Omega = 4\pi R^2 / R^2 = 4\pi \quad (\text{Sr}) \quad (1.1.3)$$

因此我们说整个空间对一点所张的立体角是 4π 球面度。同理，某一个平面上半部的半空间对平面上一点所张的立体角是 2π 球面度。

(3) 辐射源的辐射强度 (Radiant intensity) 在给定方向上单位立体角内的辐射通量称为辐射源在该方向上的辐射强度，用符号 I 表示，单位为 $\text{W} \cdot \text{Sr}^{-1}$ (瓦特每球面度)。

$$I = dP / d\Omega \quad (\text{W} \cdot \text{Sr}^{-1}) \quad (1.1.4)$$

如果一个点辐射源的总辐射通量为 P ，并且在空间各方向上的分布是均匀的，则它在各个方向的辐射强度为

$$I = P / 4\pi \quad (\text{W} \cdot \text{Sr}^{-1})$$

辐射强度简称辐强度。

(4) 辐射源的辐射亮度 (Radiance)

面辐射源在给定方向上单位垂直辐射面积、在单位立体角内的辐射通量，用符号 L 表示，单位为 $\text{W} \cdot \text{Sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ (瓦特每球面度每平方米)，如图 1·2 所示。

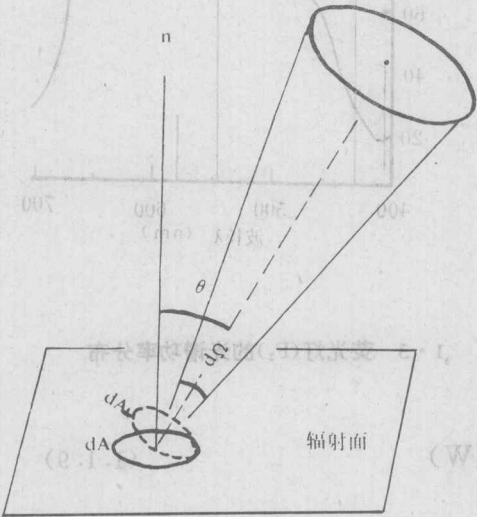


图 1·2 辐射亮度定义

图 1·1 立体角的定义

面辐射源在给定方向上单位垂直辐射面积、在单位立体角内的辐射通量，用符号 L 表示，单位为 $\text{W} \cdot \text{Sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ (瓦特每球面度每平方米)，如图 1·2 所示。

设辐射面元面积为 dA ，其法线与所考察方向的夹角为 θ ，则它在该方向上的垂直投影面积为 $dA_{\perp} = dA \cdot \cos\theta$ ，接受面元 ds 在远处对该辐射面元所张的立体角为 $d\Omega$ ，则

$$\begin{aligned} L &= d^2P / (d\Omega dA_{\perp}) \\ &= d^2P / [d\Omega (dA \cdot \cos\theta)] \\ &= dI / (dA \cdot \cos\theta) \end{aligned} \quad (\text{W} \cdot \text{Sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (1.1.5)$$

式中 $dI = dP / d\Omega$ 是该辐射面元在给定方向上的辐射强度。辐射源的辐射亮度在数值上等于单位面积的辐射表面在其法线方向上单位立体角内的辐射通量。辐射亮度简称辐亮度。

(5) 辐射出射度 (Radiant exitance)

辐射源单位表面所发射的辐射通量，用符号 M 表示，单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ (瓦特每平方米)。辐射出射度简称辐出度。

$$M = dP / dA \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (1.1.6)$$

(6) 辐射照度 (Irradiance) 被照射的表面上单位面积所接收的辐射通量，用符号 E 表示，单位也为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，辐射照度简称辐照度。

$$E = dP / dA \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (1.1.7)$$

E 与 M 两个量的单位相同，但所描写的对象不同，辐照度是描写被照射面的，辐出度是描写辐射源的。

1.1.3 辐射度学量的光谱分布 (Spectral distribution)

一束光辐射可能包含多种波长，我们可以对光辐射进行色散，分别研究各种波长的上述辐射度学量（辐通量、辐强度、辐亮度、辐照度等）。但是在色散时由于技术上的原因一般难以得到单一波长，只能得到在一定波长间隔内的光辐射，上述辐射度学量的测量值也是在这波长间隔内的测量值。设在波长 λ 附近 $\lambda \sim \lambda + d\lambda$ 间隔内的上述辐射度学量之一的量值为 dF ，则在 λ 附近单位波长间隔内的辐射度学量用 F_λ 表示：

$$F_\lambda = dF / d\lambda \quad (1.1.8)$$

F_λ 称为该光辐射的光谱密度 (Spectral concentration)。波长 λ 的位置不同，所对应的 F_λ 一般也不同，就是说光谱密度 F_λ 是波长 λ 的函数，这种函数关系用 $F(\lambda)$ 表示， $F(\lambda)$ 称为该光辐射的光谱分布。

辐射通量 P 的光谱密度用 P_λ 表示，光谱分布用 $P(\lambda)$ 表示，分别叫做光谱功率密度和光谱功率分布（或光谱能量分布），它在色度学中具有特别重要的地位。

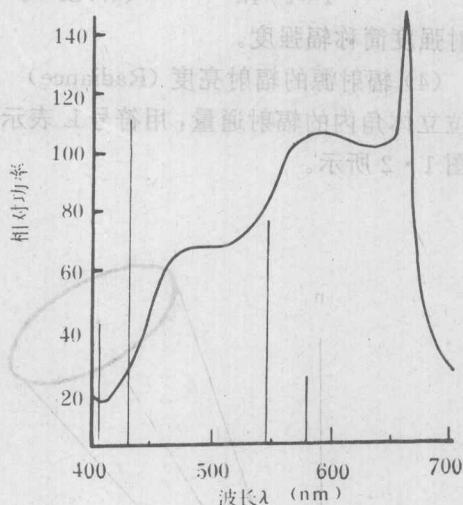
上述光谱密度 F_λ 及光谱分布 $F(\lambda)$ 、光谱功率密度 P_λ 及光谱功率分布 $P(\lambda)$ 都是指的绝对量值。其实，在应用中经常用其相对值。在光辐射所覆盖的整个波长范围内，常取绝对值最大处的光谱密度为 1，其它各波长处的值则按比例地取为小数，这样得到的分别称为相对光谱密度及相对光谱分布。对于辐射通量，相对光谱功率密度用符号 S_λ 表示，相对光谱功率分布用 $S(\lambda)$ 表示。图 1·3 给出了荧光灯 (F_2) 的光谱功率分布曲线，它把某个重要波长处的光谱密度取为 1。

如果一束光辐射的光谱功率分布已知为 $P(\lambda)$ ，则各种波长的总辐射通量可用下式计算：

$$P = \lim_{\Delta\lambda \rightarrow 0} \sum P_\lambda \Delta\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_\lambda d\lambda \quad (W) \quad (1.1.9)$$

式中 λ_1 、 λ_2 分别为光辐射中的最短和最长波长。

实验测量各种辐射度学量最终归结为测量某接收面的辐射通量（功率）。测量所用的器件有光电池、热电偶、炭斗、光电倍增管、光电二极管等。光辐射投射到这些器件上就能输出与辐射通量相应的电流（或电压）。但一般来说，这些器件对不同波长的光辐射的灵敏度是不同的，器件的这种特性称为它的光谱灵敏度。每种器件都有自己独特的光谱灵敏度曲线（或称光谱响应曲线）。我们希望这种曲线是水平的，也就是说它的光谱响应特性是不随波长而变化的，这样当进行波长扫描时，输出的电流（电压）波形就与光辐射的光谱功率分布曲线一致。但事实上没有一种探测器件的光谱响应曲线是水平的。图 1·4 是光电二极管的光谱灵敏度曲线。



1·3 荧光灯 (F_2) 的光谱功率分布

1.1.4 测量标准

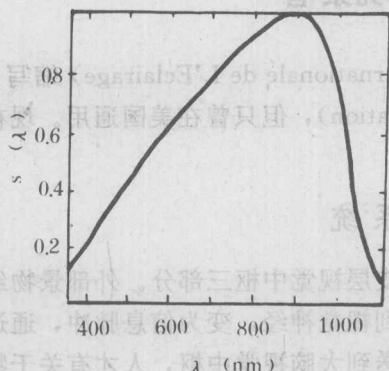


图 1·4 典型的硅光电二极管
相对光谱响应曲线

在光辐射测量中，需要选取某些特定的光谱分布或辐射体作为测量标准，才能定量地标定测量对象。

(1) 等能光谱 (Equi-energy spectrum)

等能光谱是在可见光波长范围内光谱功率密度恒定的光谱。这种光谱在现实中是不存在的，它是一种理想模型。

(2) 黑体 (Black body)

黑体又称绝对黑体或完全辐射体、Planck (普朗克) 辐射体。这种辐射体在任何温度下对入射到它表面的任何波长的辐射全部吸收，即光谱吸收比恒等于 1，光谱反射比恒等于 0。黑体在自然界中是不存在的，人工也难以制造，它也是一个理想模型。根据 Planck 黑体辐射定律，黑体辐射的辐射出射度 M 只与波长 λ 及温度 T 有关：

$$M(\lambda, T) = C_1 \cdot \lambda^{-5} (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-1} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (1.1.10)$$

式中 $c_1 = 3.74150 \times 10^{-16} \text{W} \cdot \text{m}^2$ ， $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{m} \cdot \text{K}$ ，为 Planck 辐射常数； T 为绝对温度，单位是 K； λ 为波长，单位是 m。(1.1.10) 式称为 Planck 黑体辐射公式。根据这一公式，一定温度 T 的黑体辐射的光谱分布是确定的，因而一个温度值就有唯一的一条光谱分布曲线。以后我们会知道，正是因为这一点，一个温度值就对应黑体辐射的一种颜色，黑体辐射的颜色是温度 T 的单值函数。图 1·5 是黑体辐射的几条相对光谱功率分布曲线，随着温度的升高其曲线峰值位置逐渐由红色的长波长端向蓝色的短波长端移动。

(3) 余弦辐射体

如果一个辐射体表面在各个方向的辐射强度 $I(\theta)$ 与该方向离开法线的夹角 θ 的余弦成正比，则这种辐射体称为余弦辐射体或 Lambert 辐射体，简称 Lambert 体。这种辐射在各个方向上单位立体角内所发出的辐射通量与其夹角 θ 的余弦成正比。根据辐射亮度的定义可知，它在各个方向上的辐射亮度都是相同的。

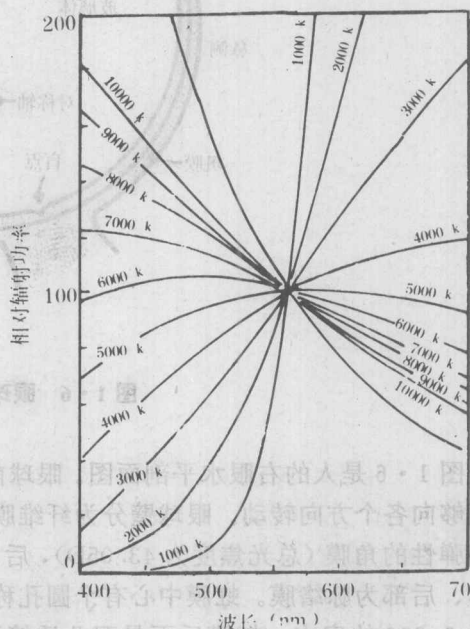


图 1·5 黑体的相对光谱功率分布曲线