



眼应用光学

高祥璐 郭俊来 主编



天津科学技术出版社

ISBN 978-7-5308-5451-8



9 787530 854518 >

定价：30.00元

眼应用光学

高祥璐 郭俊来 编著

天津科学技术出版社

内 容 简 介

本书系统介绍了眼应用光学的基本原理、方法和应用、从基本的光学定律开始,讨论了光学成像的基本要求和基本条件,讨论几何像差和波差的概念,重点介绍了眼球光学,其中包括模型眼、简化眼、眼调节、眼的屈光不正矫正、眼的像差、双眼视觉以及人工晶体眼的光学。

本书可作为眼视光学专业学生的光学教材,也可作为视光专业教师、相关眼科医生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

眼应用光学 / 高祥瑞, 郭俊来主编. ——天津: 天津科学技术出版社, 2009.12

ISBN 978-7-5308-5451-8

I. ①眼… II. ①高… ②郭… III. ①眼科学: 应用光学 IV. ①R778.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 218958 号

责任编辑: 刘 磊

责任印制: 王 莹

天津科学技术出版社出版

出版人: 蔡 颖

天津市和平区西康路 35 号 邮编: 300051

电话 (022) 23332393 (发行部) (022) 23332400 (编辑室)

网址: www.tjkjcs.com.cn

新华书店经销

河北省玉田吴达印刷有限公司印刷

开本 787 × 1092 1/16 印张 15 字数 300 000

2010 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

定价: 30.00 元

前 言

本书是为眼视光学和眼科专业读者编写的一本光学教材，主要讨论作为成像光学系统的眼球所涉及的一系列光学问题。

根据眼球成像的特点，重点推导了透镜两侧介质不同的成像公式、推导了厚透镜和理想光学系统成像公式。对于眼科学和视光学习习惯使用成像公式给予比较详细的介绍和使用方法的举例。对于眼球光学中模型眼的数据、不同屈光状态眼调节的公式、眼屈光矫正的公式、人工晶体焦度的计算公式和双眼视差的公式等都进行了详尽的计算和推导。

第一章以能量的角度介绍了光发出和受照的光度学基本原理，介绍了几何光学的基本定律和原理。

第二章讨论了光学成像的基本概念和要求，然后从小孔成像、单界面平面反射成像和折射近轴成像、单球面反射近轴成像和折射近轴成像、单透镜（薄透镜和厚透镜）近轴成像，最后讨论理想光学系统的成像。

第三章介绍了拦光的光学器件——光阑，分别讨论了限制成像光束粗细的光阑——孔径光阑及相关的像——光瞳和限制成像范围的光阑——视场光阑及其像——窗。介绍了渐晕现象、景深和焦深，最后讨论了远心光学系统。

第四章讨论了像差的基本概念和分类，介绍了球差、彗差、像散、畸变和像场弯曲等五种单色像差；以及轴向和横向色差等初级几何像差。讨论了波像差及其数学表达。

第五章讨论了光的干涉、衍射、偏振和散射。

第六章讨论眼球的光学，涉及模型眼、简化眼、眼调节、眼的屈光不正矫正、眼的像差、双眼视觉以及人工晶体眼的光学。

第七章讨论了放大镜、显微镜和望远镜等目视光学仪器的光学。

本书可作为眼视光学专业学生的光学教材，也可作为视光专业教师、相关眼科医生的参考用书。

本书作者长期从事眼应用光学和眼屈光和验光的教学工作，书中的部分内容是对这些年教学工作的体会和总结。高祥璐编写了第二章、第四章、第五章和第六章，郭俊来编写了第一章、第三章和第七章。由于作者水平有限，难免有不够全面或不够周全的地方，希望读者对书中的不足给予批评指正。

编 者

2009年7月于天津医科大学眼视光学院

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 光与光源	(1)
第二节 光度学基本概念	(6)
第三节 几何光学基本定律与原理	(17)
第四节 惠更斯原理	(23)
第五节 费马原理	(24)
习 题	(26)
第二章 几何光学成像	(27)
第一节 成像的基本条件	(27)
第二节 小孔成像	(30)
第三节 单平面光学系统成像	(32)
第四节 薄三棱镜的成像	(37)
第五节 单球面光学系统的近轴成像	(42)
第六节 透镜的近轴成像	(53)
第七节 理想光学系统成像	(72)
习 题	(84)
第三章 光学系统的光阑与光束限制	(86)
第一节 孔径光阑和光瞳	(86)
第二节 视场光阑与窗	(89)
第三节 渐晕	(90)
第四节 景深与焦深	(91)
第五节 远心光路	(96)
习 题	(99)
第四章 光学系统的像差	(100)
第一节 概述	(100)
第二节 轴上物点的单色像差	(101)
第三节 轴外物点的单色像差	(114)

第四节 轴上物点和轴外物点的色像差·····	(129)
第五节 波像差·····	(133)
第五章 波动光学基础 ·····	(137)
第一节 光的叠加·····	(137)
第二节 光的干涉·····	(140)
第三节 光的衍射·····	(145)
第四节 光的偏振·····	(153)
第五节 光的散射·····	(161)
习 题·····	(165)
第六章 人眼与双眼视觉的光学 ·····	(166)
第一节 眼球结构 ·····	(166)
第二节 模型眼与简化眼 ·····	(175)
第三节 眼球的轴和角 ·····	(179)
第四节 调节与屈光 ·····	(181)
第五节 近视眼和远视眼的光学透镜矫正 ·····	(189)
第六节 人眼的分辨 ·····	(193)
第七节 人眼的像差·····	(195)
第八节 视野·····	(200)
第九节 双眼单视与立体视·····	(201)
第十节 人工晶体眼光学·····	(207)
习 题·····	(215)
第七章 目视光学仪器 ·····	(216)
第一节 目视光学仪器的视放大率 ·····	(216)
第二节 放大镜 ·····	(217)
第三节 目镜 ·····	(219)
第四节 显微镜 ·····	(222)
第五节 望远镜 ·····	(226)
习 题·····	(230)

第一章 绪 论

从生命的意义讲，光是地球上生命的来源之一，是人类生活的依靠，是人类认识外部世界的载体。人们之所以能够看到客观世界中斑驳陆离、瞬息万变的景象，必要的前提条件是因为人眼可以接收物体发射、反射或散射的光。

人们对光的认识经过了一段漫长的摸索，17 世纪开始，存在着两种学说。以牛顿为代表的一些人提出了粒子学说，认为光是由微小的粒子组成的，该学说可以解释光的直线传播、反射和折射等现象。与此同时，惠更斯提出了光的波动学说，认为光是一种在特殊弹性介质中传播的机械波，该学说也能解释光的反射和折射现象。现代人们认识到光是一种特殊的客体，它在某些条件下显现的行为像经典的“波动”，在另一些条件下显现的行为却像经典的“粒子”。

第一节 光与光源

一、电磁辐射与光

1. 电磁辐射

自然界中的一切物体，只要温度在绝对零度（ $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）以上，都会以电磁波的形式，不断地向外发送能量，我们将这种发送能量的方式称为辐射或电磁辐射，有时我们也将电磁波称为辐射。电磁波按波长从短到长可分为 γ 射线、X 射线、紫外线、可见光、红外线、微波和无线电波等，见图 1-1。

2. 光

在自然科学中常将在空气中波长为 $1\text{ nm}\sim 1\text{ mm}$ 范围内的电磁辐射称为光辐射或光。该范围的电磁波包含了紫外线、可见光和红外线，见图 1-1。其中 $10\sim 380\text{ nm}$ 的波长段叫做紫外光， $380\sim 760\text{ nm}$ 的波长段由于可被人眼感知，所以叫做可见光， $760\text{ nm}\sim 1\text{ mm}$ 波长段叫做红外光。

3. 光波的几何描述

波是振动在空间的传播。对同一个振动源来说，振动同时传播到具有相同相位的点构成的面叫做波阵面或波面。波面的形状可以是任意曲面、球面或平面。对于一个点状的振动源发出的波来说，在各向同性的均匀介质中传播时，形成的波面为球面，所以称这样的波为球面波。离振动源很远的部分波面由于半径非常大可近似视为平面，波面为平面的波称为平面波。

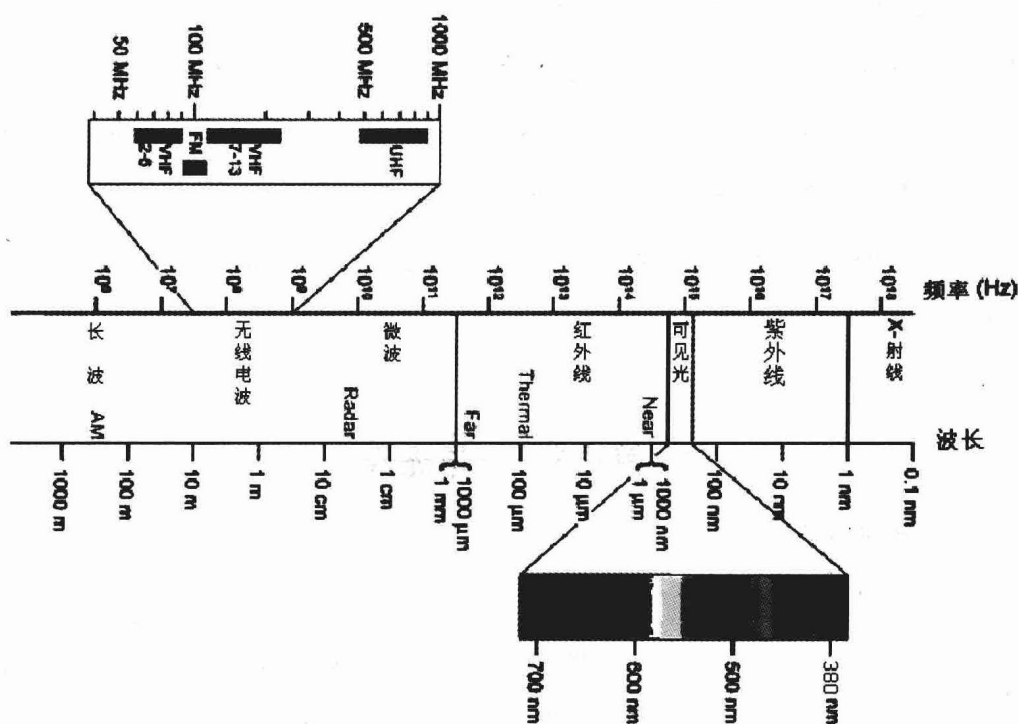


图 1-1 电磁波和光谱

在波传播的空间（称为波场）中，波面各点的法线称为波法线或波线。波线代表振动传播的方向。其实，波线代表着光能量流动的方向。几何光学中的光线指的就是波线。用波面和波线来描述波传播的方法称为波的几何描述。

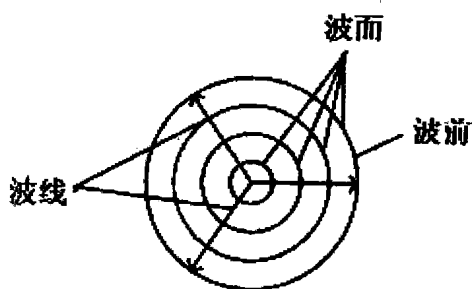


图 1-2a 球面波

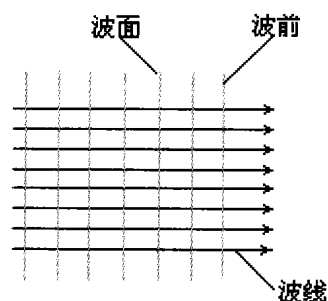


图 1-2b 平面波

4. 光速

光，乃至所有的电磁波在真空中的传播速度都是相同的，通常用 c 表示，其数值为

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

根据波动理论可知，波速 c 、波长 λ 和周期 T 或频率 ν 关系为

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu \quad (1-1)$$

依此可计算出可见光的频率范围为 $7.89 \times 10^{14} \sim 3.95 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 。由波的形成过程可知，振源振动时，经过一个振动周期，波沿波线方向传出一个完整的波形，所以有

$$\text{波的传播周期} = \text{波源的振动周期}$$

由此可知，波在不同的介质中其传播周期 T (或频率 ν) 是不变的，只是波速 ν 和波长 λ 发生相应的变化。例如，在空气中，光速近似为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，在水中，光速近似为 $2.25 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

二、光源

1. 光源

任何能发出光的物体或表面均称为光源。如太阳、火焰、日光灯、激光器等。

2. 光源的分类

(1) 根据光源的尺寸在所讨论的问题中的作用分类。

① 点光源

光源的尺寸在所讨论的问题中可以忽略时，则将光源称为点光源。比如，研究太阳照射到地面的受照问题时，由于太阳的尺寸远比太阳到地球的距离小，故常将太阳看做点光源。

② 扩展光源

光源的尺寸在所讨论的问题中不能忽略时，则将光源称为扩展光源。在研究问题时，常将扩展光源看做是点光源的集合。比如，日光灯照射到桌面，日光灯的大小不能忽略，日光灯就是扩展光源。

(2) 根据发光机制分类

① 热发光光源

通过不断给物体加热来维持物体保持一定温度从而使物体发光的光源叫做热发光光源。太阳、白炽灯等均属这类光源。

② 非热发光光源

热发光光源之外的光源均为非热发光光源。如电致发光的日光灯和水银灯，光致发光的荧光等。

三、光谱

1. 单色光

我们把具有单一波长的光称为单色光。如 587.56 的黄光，这里说的“单色”与日常生活中所说的“单色”有一定区别，日常生活中所说的单色常指红色、绿色等，其实同为红色、由于它们的波长不同，引起人的感觉也不相同，比如 760 nm 的红光与 690 nm 的红光感觉是不同的。可以发出单色光的光源是很少的。波长与颜色的对应关系见图 1-3。

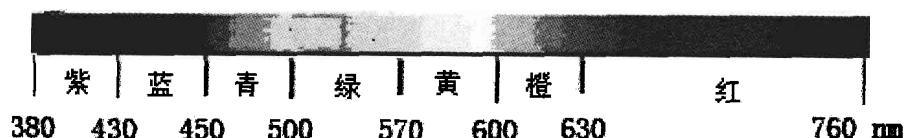


图 1-3 可见光的光谱

以上各种颜色的分界线是人为的，不同学科，划分略有不同。

2. 复色光

多种波长的光混合在一起称为复色光。我们用棱镜或其他分光仪对各种普通光源进行分光，均可分成多种单色光。

3.光谱

复色光单位波长的光强 $i(\lambda)$ (称为谱密度) 按波长的分布图叫做光谱。设 $dI(\lambda)$ 代表波长在 $\lambda \sim \lambda + d\lambda$ 之间的光强, $i(\lambda) = \frac{dI(\lambda)}{d\lambda}$ 为单位波长的光强, 叫做光谱密度。各种波长的总光强为:

$$I = \int_0^{\infty} dI(\lambda) = \int_0^{\infty} i(\lambda) d\lambda \quad (1-1)$$

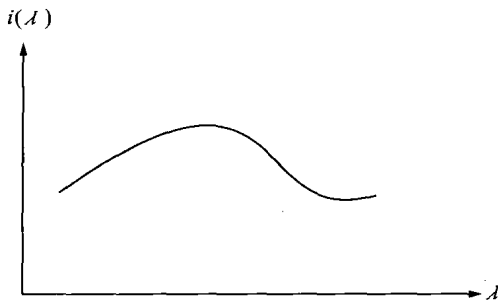


图 1-4a 连续光谱

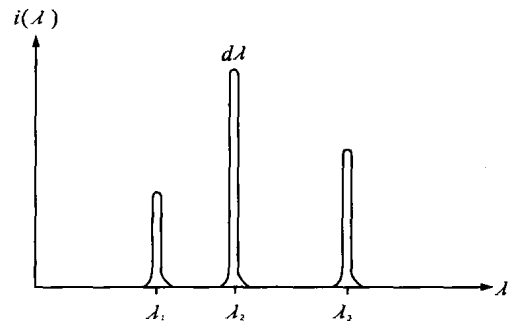


图 1-4b 线光谱

光源不同, 所产生的光谱也不同。图 1-4a 是热辐射光源光谱, 谱密度在很大的波长范围内连续分布, 这种光谱叫连续光谱。图 1-4b 是气体 (或金属蒸汽) 放电发射光源光谱, 谱密度集中在一些分离的波长值 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、……附近, 形成一条条的线, 每种线叫做谱线, 这样的光谱叫做线光谱。不同化学元素的物质各有自己的特征谱线, 由于谱线的谱密度值分布在一定波长范围 $\Delta\lambda$ 内, 所以每条谱线为近似的单色光, 该波长范围 $\Delta\lambda$ 叫做谱线宽度。谱线宽度越窄, 谱线的单色性越好。激光器的谱线宽度比普通光源的谱线宽度小得多, 所以单色性也好。表 1-1 为各种单色光的谱线。

表 1-1 单色光的谱线

颜 色	红	橙红	黄		绿	青绿	青	蓝	紫
谱线名称	A'	C	D	d	e	F	g	G'	h
发光元素	K	H	Na	He	Hg	H	Hg	H	Hg
波长 (nm)	768.2	656.27	589.3	587.56	546.1	486.13	435.8	434.0	404.7

第二节 光度学基本概念

一、辐射能与辐射能通量

1. 辐射能

物体通过辐射所发出的能量称为辐射能 (radiant energy), 辐射能的单位为焦耳, 用符号 J 表示。

2. 辐射能通量

图 1-5 是一个电磁辐射体的表面, 用 S 表示。辐射体通过该表面向各个方向发出多种波长的电磁辐射。显然辐射体所发出的辐射能与辐射时间有关, 辐射时间越长, 辐射出的能量越多。为了比较不同辐射体的辐射强弱, 我们在不同的辐射体表面选取相同的面积元 dS , 比较相同时间内通过该面积元 dS 辐射出的所有波长的辐射能的多少。依此我们定义: 单位时间内, 辐射体通过面积元 dS 辐射出的所有波长的辐射能称为通过面积元 dS 的辐射能通量 (radiant energy flux) 或辐射功率 (radiant power), 用 Φ_e 表示, 单位为瓦 (焦耳/秒), 用符号 W (J/s) 表示。用辐射通量就可以反映辐射体的辐射强弱, 辐射通量越大, 则辐射越强; 辐射通量越小, 则辐射越弱。

从能量的角度考虑, 不同波长的电磁辐射的辐射能量大小不同, 所以辐射通量也是不同的。总的辐射通量应该是辐射体发出的所有波长的电磁辐射的辐射通量之和。为此我们引入一个分布函数 $\varphi(\lambda)$, 它表示单位时间内, 通过辐射体表面上面积元 dS 中, 某一波长 λ 附近的单位波长间隔内的辐射能量, 称为辐射通量谱密度。这样, 辐射体表面上面积元 dS 辐射出来的波长在 λ 到 $\lambda+d\lambda$ 间的辐射通量为:

$$d\Phi_e = \varphi(\lambda)d\lambda \quad (1-2)$$

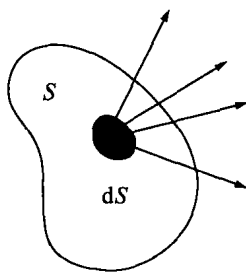


图 1-5 辐射体表面

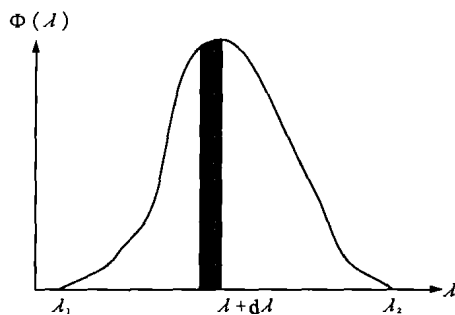


图 1-6 辐射通量谱密度

于是，从面积元 dS 发出的各种波长电磁辐射的总辐射通量为：

$$\Phi_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda) d\lambda \quad (1-3)$$

3. 接收器的光谱响应和视见函数

一般条件下，接收器所能感受的电磁辐射波长是有选择性的。一种接收器只能感受一定波长范围的电磁辐射，并且对所能感受的各种波长的电磁辐射的响应程度，即敏感性也是不同的。接收器对不同波长电磁辐射的响应程度用光谱响应度或光谱灵敏度表示。例如，GD-35 光电管的光谱响应范围为 185~260 nm 的紫外光。

人眼也是一种接收器，对电磁辐射也有选择性。大量的实验表明，对于视力正常的人来说，在明亮的环境中，对波长为 555 nm 的黄绿色光最敏感；对红色和紫色光的敏感性（响应）较差；而对红外线和紫外线，则无视觉响应。

为了确定人眼对不同波长的电磁辐射的敏感程度，可以在得到相同亮度感觉的条件下，测量各种波长的电磁辐射的辐射通量（辐射功率） Φ_e 。显然，需要的 Φ_e 越大，人眼对该波长的电磁辐射越不敏感（响应差）；而需要的 Φ_e 越小，人眼对它越敏感（响应好）。于是，我们就用人眼视觉最敏感 555 nm 的光与任一波长 λ 的电磁辐射产生相同亮度感觉所需的光辐射通量 $\Phi_e(555)$ 和 $\Phi_e(\lambda)$ 的比值 $\frac{\Phi(555)}{\Phi(\lambda)}$ 来定量表示人眼视觉对不同电磁辐射的敏感程度。并定义为：

$$V(\lambda) = \frac{\Phi(555)}{\Phi(\lambda)} \quad (1-4)$$

将 $V(\lambda)$ 称为视见函数（visibility function）或光谱光视效率（spectral luminous efficiency）。

[例1-1] 与辐射通量为 1 mW 的 555 nm 绿黄光相同亮暗感觉的 400 nm 紫光的辐射通量为 2.5 W，则 400 nm 紫光的视见函数或光谱光视效率为：

$$V(400) = \frac{1 \text{ mW}}{2500 \text{ mW}} = 0.0004$$

显然，除 555 nm 之外，各波长的视见函数 $V(\lambda)$ 都是小于 1 的。通过对大量视力正常者的实验统计，可得到图 1-7 所示的视见函数曲线。

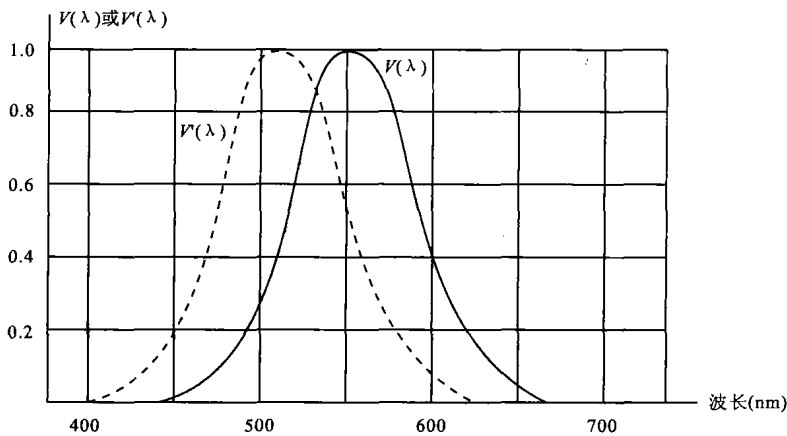


图 1-7 视见函数曲线

由图 1-7 可见，在辐射通量（辐射功率）相同的条件下，人眼感觉 555 nm 的黄绿光最亮，波长自 555 nm 起向左和向右逐渐减小，亮度感觉逐渐下降。图 1-7 中 $V(\lambda)$ 曲线（实线）是明视觉（锥状视细胞起作用）的视见函数曲线，也称光谱灵敏度曲线或光谱响应曲线。图 1-7 中 $V'(\lambda)$ 曲线（虚线）是暗视觉（杆状视细胞起作用）的视见函数曲线，暗视见函数曲线的峰值向短波移动大约 50 nm，曲线的最大值在 507 nm 处。其曲线的变化规律与 $V(\lambda)$ 基本相同。表 1-2 是各波长光视见函数。

表 1-2 波长光视见函数

λ (nm)	$V(\lambda)$	λ (nm)	$V(\lambda)$	λ (nm)	$V(\lambda)$	λ (nm)	$V(\lambda)$
390	0.0001	490	0.208	590	0.757	690	0.0082
400	0.0004	500	0.323	600	0.631	700	0.0041
410	0.0012	510	0.503	610	0.503	710	0.0021
420	0.0040	520	0.710	620	0.381	720	0.00105
430	0.0116	530	0.862	630	0.265	730	0.00052
440	0.023	540	0.954	640	0.175	740	0.00025
450	0.038	550	0.995	650	0.107	750	0.00012
460	0.060	560	0.995	660	0.061	760	0.00006
470	0.091	570	0.952	670	0.032	770	0.00003
480	0.139	580	0.870	680	0.017	780	0.000015

二、光通量

能引起人眼视觉的那部分辐射通量称为光通量 (luminous flux), 以 Φ_v 表示。由于人眼视觉只和可见光有关, 所以光通量应与辐射通量和视见函数都有关系。在某一波长 λ 附近对于波长间隔为 $d\lambda$ 的单色光来讲, 其光通量为:

$$d\Phi_v = K(\lambda)d\Phi_e = K_{\max}V(\lambda)d\Phi_e \quad (1-5)$$

复色光的光通量需对所有波长的光通量求和:

$$\Phi_v = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K(\lambda)d\Phi_e = K_{\max} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V(\lambda)d\Phi_e = K_{\max} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V(\lambda)\rho(\lambda)d\lambda \quad (1-6)$$

式中系数 $K(\lambda)$ 称为光谱光视效能(spectral luminous efficacy), $K_{\max}$ 是波长为 555 nm 的光谱光视效能, 也是 $K(\lambda)$ 的最大值, 称为最大光谱光视效能。光谱光视效能的单位由 Φ_e 和 Φ_v 的单位决定。光通量的国际单位制 (SI) 单位为流明, 用 lm (lumen) 表示。则最大光谱光视效能为:

$$K_{\max} = 683 \text{ lm} / \text{w}$$

三、发光强度

在讨论光辐射的问题时, 往往都要涉及空间范围的概念, 所以我们首先来讨论立体角的概念。

1. 立体角

一个圆锥面所围成的空间部分称为立体角 (solid angle)。立体角是以锥的顶点为心, 半径为 r 的球面所截得的面积 dS 来度量的。弧度是平面角度的单位之一, 其定义为弧长除以半径, 将其推广到三维空间中, 定义立体角为圆锥所截得的球面面积 dS 与球面半径平方 r^2 的比值, 即:

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2} \quad (1-8)$$

立体角的单位为球面度 (steradian), 用符号 sr 表示。球面度定义为: 当半径为 r 的圆球中心为顶点的立体角所截取的球面面积等于 r^2 时, 该立体角的大小为 1 球面度, 见图 1-8。

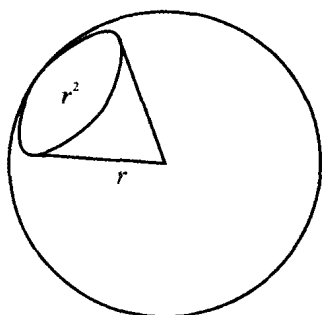


图 1-8 球面度的定义

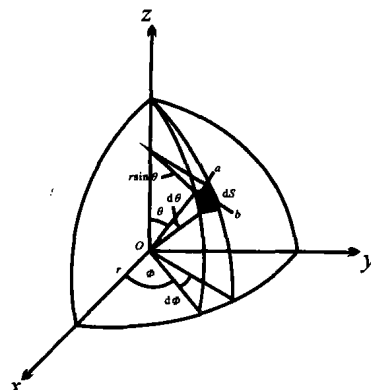


图 1-9 立体角的计算

下面我们用球面坐标（也叫空间极坐标）来计算立体角。设立体角的顶点 O 位于极坐标的原点处，以 O 为圆心，以 r 为半径作一球面，球面上的一个小面积 dS 对 O 点形成立体角 $d\Omega$ 。由图 1-9 可知，面积元 dS 的两个边长 a 和 b 分别为：

$$a = r \sin \theta d\varphi$$

$$b = r d\theta$$

小面积元 dS 为

$$dS = a \times b = r^2 \sin \theta d\theta d\varphi$$

小面积对应的立体角为

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2} = \sin \theta d\theta d\varphi \quad (1-9)$$

我们可以通过二重积分得到整个球面的立体角

$$\Omega = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} \sin \theta d\theta = 4\pi \quad (1-10)$$

2 发光强度

前面我们已介绍过，光源的尺寸很小，或离受照物体足够远时，光源的大小是可以不考虑的，比如星星，我们把这样的光源称为点光源。实际情况中，我们遇到的光源都有一定大小或离受照物体是有限远的，光源的大小不能忽略，我们把这样的光源称为面光源或扩展光源。

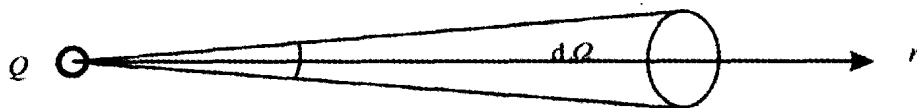


图 1-10 发光强度