

视觉与照明

庞蕴凡

中国铁道出版社

1993年·北京

序

照明是为国民经济服务的。随着我国改革开放步伐的加快,照明设计也在蓬勃发展。因此进一步提高照明技术和艺术水平,满足人们生活中的使用以及生理和心理要求,已成为照明界十分紧迫的任务。

照明技术是照明设计的主要部分,它主要以物理学为基础,旁及光度学、色度学、生理学和卫生学等学科。但是照明效果最终要由人们生理中的视觉来评价,因此照明和视觉有着密切的联系。为了保证照明技术的质量,要求采用适宜的照度标准进行照明计算,排除眩光、闪烁等干扰因素,利用测试手段评价视觉效果。

本书是作者根据对上述有关方面长期研究的结果而撰写的,内容丰富,有较高的学术价值,能作为指导照明设计的理论基础,是值得推荐的。我希望照明界的同行予以关注和参考,从而把当前的照明设计水平更推进一步。

高履泰

1992. 7

(京)新登字063号

内 容 简 介

全书共分八章。主要内容包括三部分：一是与视觉和照明技术有关的光度量和色度量等有关的基本概念，同时简要给出常用光源特性及其应用，以及有关灯具性能、测试和设计知识。二是照明的视觉基础，主要结合作者的一些科研成果论述视觉、视度、照明数量和质量的评价方法，眩光和视觉的测量仪器等问题。同时介绍了国内外的概况和趋势。三是简明并联系实际地介绍照明的计算和设计方法。

本书可作为照明技术、建筑光学、卫生学、心理学、人类工效学等学科的科研设计和教学参考书，也可作为有关高等院校教学参考用书。

视觉与照明

庞薰凡



中国铁道出版社出版、发行

(北京市东单三条14号)

责任编辑 孙燕澄 封面设计 陈东山

各地新华书店经售

北京顺义燕华印刷厂印

开本：850×1168 毫米1/32 印张：10 字数：255千

1993年3月 第1版 第1次印刷

印数：1—1500册(平)

1—400册(精)

(平)ISBN7-113-01320-1/TU·290 定价：6.95元

(精)ISBN7-113-01392-9/TU·299 定价：9.65元

前 言

本书主要内容曾是原四机部全国卫生培训班授课用的讲稿。1982年应陕西省计量测试学会邀请,为“视觉与照明”学术讲座重新做了补充,并由该学会印成讲义。之后应天津市照明学会邀请,做了进一步修改和补充后,分别于1983年和1984年做为天津市举办的“视觉与照明”学术讲座的讲稿。北京建筑工程学院于1985和1986年曾将该讲稿列为建筑系建筑光学研究生的专业基础课讲义。1987年应邀为西北大学物理系开设“视觉与照明技术”课时,也曾做为西北大学的教学讲义。

由于种种原因该讲义在数量上一直不能满足需要,在质量上也很不尽人意。这次经修改补充后写成此稿,想做为照明技术领域中的基础理论用书。做为基础的东西,首先必须讲到光的概念及光与色的基本量,这也是以后各章节中常用到的基本知识和术语。照明是离不开光源和灯具的,所以本书,也从应用的角度介绍了光源和灯具的基本特性和发展方向。上述三个内容简要的形成本书的第一章。

第二章“视觉特性”和第三章“视度和视功能”是视觉的理论基础。是照明技术的生理、心理和卫生方面的实验资料。

第四章“制定照度标准的方法和照度标准值”总结了国际上制定照度标准的方法,也总结了我国以中国建筑科学研究院建筑物理研究所主编或负责的《工业企业照明设计标准》TJ34—79、《中小学校建筑设计规范》GBJ99—86中的采光和照明部分、《中小学校教室采光和照明卫生标准》GB7793—87和《民用建筑照明设计标准》GBJ133—90四本国家标准和规范中的理论和实验依据,以及国内外照度标准值发展变化的比较与分析。并且应用国际上的一些图表和资料说明今后照度标准值的发展趋势。本章是

该书的重点，也是理论与实际，国内与国外相结合的核心。

第五章“照明质量与视觉效果”是照明技术理论的再提高。因为照度标准值的理论发展和完善到一定程度后，照明质量就是突出的问题。本章除包括作者所从事的视觉实验研究的结果外，还收集了国内外的有关资料。

第六章“照明技术中的眩光”是照明质量中的重点，因此有必要另列一章详细论述。这一章的核心内容是中国建筑科学研究院建筑物理研究所负责的《工业企业车间照明眩光评价方法及其限制标准的研究》专题内容。其中以不舒适眩光为重点，包括国际上三种主要的眩光限制系统和方法。本章还汇总了国内外研究失能眩光的方法及其应用，并探讨了心理眩光和生理眩光之间的关系。

第七章“视觉测量仪器”主要是以中国建筑科学研究院建筑物理研究所负责的《SD-1型视度仪的研制和应用》专题内容为中心，并归纳和汇总了国际上视度仪的研制概况及视觉的定量测量方法。

第八章“照明设计”是上述各章节内容的综合应用，包括照明的设计和计算实例。

随着科学技术的进步、生产的发展和人们生活水平的不断提高，对照明技术和照明工程的要求也越来越高。这就要求有更多的照明科学和技术的知识进行交流，希望本书能够对广大读者有所帮助，也希望得到同行的帮助和指导。

全书经西安交通大学蒋孟厚教授审阅，在此特致以衷心的感谢。同时对在有关课题中合作和给予支持的同事和朋友也在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，谬误之处难免，敬请读者批评指正。

作 者

1991·11

目 录

第一章 光、光源和灯具	(1)
第一节 光的概念及其基本量	(1)
第二节 光 源	(22)
第三节 灯 具	(34)
第二章 视觉特性	(54)
第一节 眼睛的视觉机构与视觉阈限	(54)
第二节 视角、视力和照度	(63)
第三节 视觉的识别和适应	(72)
第三章 视度和视功效	(81)
第一节 视度和相对视度	(81)
第二节 视 功 效	(84)
第三节 实际工件的视度	(95)
第四节 视功效解析图	(101)
第五节 视觉心理满意度的实验研究	(103)
第四章 制定照度标准的方法和照度标准值	(110)
第一节 根据视功效制定照度标准值	(110)
第二节 根据视疲劳制定照度标准值	(119)
第三节 根据现场调研制定照度标准值	(122)
第四节 根据经济分析方法制定照度标准值	(128)
第五节 阅读视觉作业照度标准值的变化	(130)
第六节 我国照度标准值的变化与发展	(136)

第七节	照度标准值的比较与分析	(143)
第八节	照度标准值提高的速度和发展趋势	(153)
第五章	照明质量与视觉效果	(135)
第一节	视觉效果及其评价方法	(165)
第二节	照度分布与视觉效果的关系	(167)
第三节	反射光幕与视觉效果的关系	(170)
第四节	照明方式与视觉效果的关系	(171)
第五节	荧光灯与白炽灯的视觉效果	(182)
第六节	天然光与人工光的视觉效果	(187)
第七节	光的质量与视觉效果	(189)
第六章	照明中的眩光	(194)
第一节	眩光的种类和作用	(194)
第二节	不舒适眩光的实验研究	(198)
第三节	不舒适眩光的限制方法	(223)
第四节	失能眩光	(242)
第七章	视觉测量仪器	(253)
第一节	视觉疲劳的测量方法和仪器	(253)
第二节	视度测量仪器	(258)
第八章	照明设计	(277)
第一节	照明方式和照明种类	(277)
第二节	照明设计的一般视觉要求	(279)
第三节	照度计算方法	(287)
第四节	照明设计实例——学校教室的照明 设计	(297)
参考文献		(304)

第一章 光、光源和灯具

第一节 光的概念及其基本量

一、光的本质

“光”这个词，人们的理解是有区别的，它具有很广泛的、纯粹的物理意义，在物理学上它是指所有形式的辐射能量。所以在物理学上有人把辐射能量的科学的总体叫做“光的学说”。

我们把对光的感受，或者确切一点说就是把“亮”（光刺激到眼睛上引起的）叫做光。实际上并不是所有辐射能都能引起人们的这种感觉，而仅仅是整个光谱段上的一部分（可见部分）才能引起这种感觉。因此，在很多情况下，人们所说的“光”或“亮”，就是指那一段可见光谱的辐射能，即引起人们视感觉的那一部分辐射能。在这种情况下，红外线和紫外线及其以外的那些辐射能，就都不是“光”的范畴了。然而，就是这段作用到人们眼睛上的可见部分的辐射能，它的效果也是不同的。因为可见光谱段的波长不同，使得视觉器官产生的视感觉程度也不同。有的光谱段的作用较强，使人们产生明显的视感觉；有的光谱段对视觉器官的作用很微弱，几乎让人们察觉不到或很少察觉到。所以人们说看见光，还要深入研究可见光的不同波段的作用程度。

人们说有“光”或“亮”，就是说人们有足够强的光感觉。而人们说黑暗，就是说没有引起这种感觉或者感觉太弱了。对于盲人，那就是说丧失了视觉，无论怎样强的光，也不能引起视感觉，照明对他是无意义的。相反，对于眼睛极好的人，在完全黑暗里，即在没有任何光线的地方，他也什么都看不见。因此可以说，光是一定种类和数量的、能对健康的视觉器官起作用的辐射

能。人们所说的看见“光”包含了三层意思，一是可见光；二是有良好的视觉器官；三是二者作用引起感觉的效果。

一定种类和数量的光，能引起人们丰富的光和色的视感觉。这些光和色能使人们看到周围物体的形状、大小、色彩和位置等特征，使人们有效地判断自己的方位，并且掌握自己的运动和作用。

人们在认识自然和改造自然中，视觉与其它感觉（如听觉、嗅觉、触觉和味觉）相比占有重要的地位。当然，所有的其他感觉器官都是有用的，而且是必要的。但是，就其作用来讲都不如视觉，因为视觉的信息不但来得广而且远，例如用眼睛观察星空，研究分子、原子及其构造，这是任何其他感觉器官都望尘莫及的。人们与外界接触所收集到的信息，有87%是从视觉而来，而视觉的最基本条件就是光。

那么人们看东西，为什么有时候看得见有时候看不见？为什么有时候看得容易有时候看得很难？这都是眼睛和光作用的结果。一是从物体上射出的光到达眼睛过程中的状况，二是接收光的正常眼睛的能力。照明技术工作者的任务就是要深入研究上述问题，并且为人们创造良好的光环境。

我们在上面谈到了光的种种概念，也揭示了在观察客观世界、认识宇宙中光的作用，那么光的本质到底是什么？光又有什么属性？

光能够被眼睛感觉到。用辩证唯物主义的观点来看，感觉是对客观物质或现象的反映。首先是物质，而不是感觉，物质是感觉的源泉，物质是第一位的，感觉是第二位的。毫不例外，光也是一种物质。由于光的存在和运动，并作用在视觉器官上，才引起视感觉。“光”作为物质存在，具有微粒性；“光”作为运动状态，具有波动性。光的微粒是光的最小存在单位，称为光子。光子很小，单个光子是很难看到的，通常我们看到的都是光子的集合。光波也是电磁波的一部分，是能引起视感觉的电磁辐射波，可以从光源向外辐射或传播，所以有时也称光的辐射。

总之，光是能引起视感觉的电磁辐射能，它具有微粒和波动双重属性。光的任何现象都可以用微粒性和波动性来加以解释。

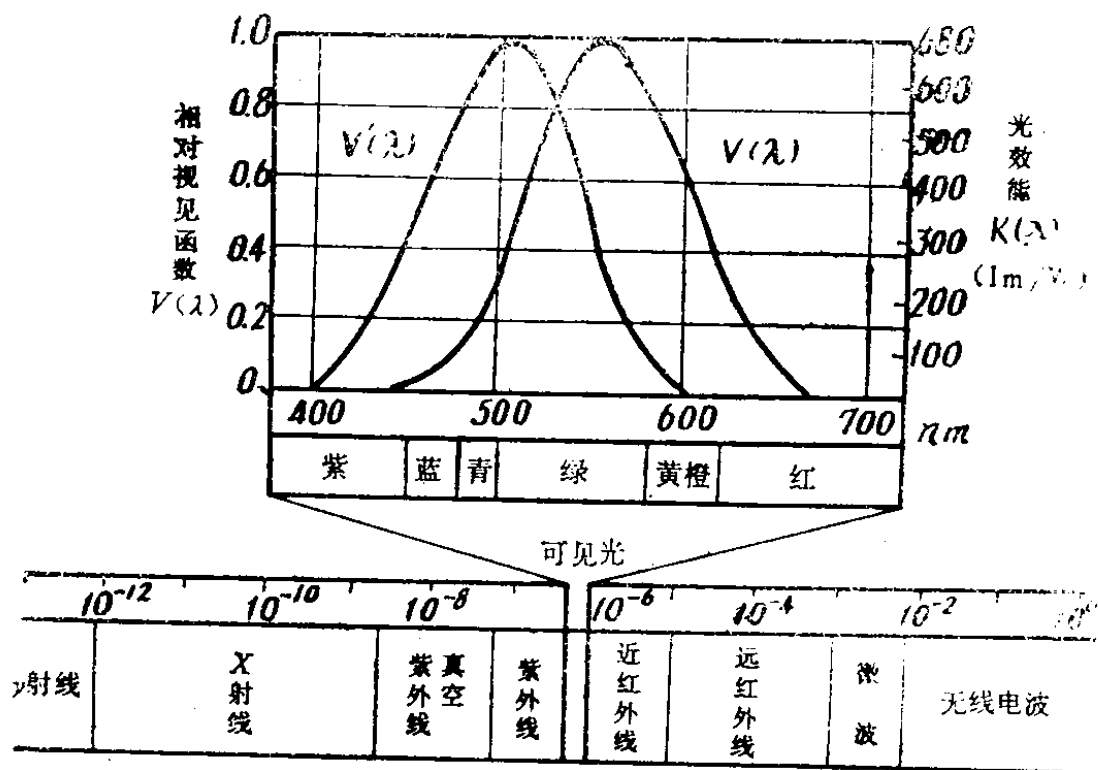
二、光谱光视效率曲线

人们的眼睛能够感知可见光辐射能。但是，可见光谱段内的每一小段光辐射能对眼睛的作用到底有什么不同呢？换句话说，眼睛对可见光谱内的不同波长辐射的响应灵敏度有什么不同呢？这种不同是照明技术中各种光度量和色度量的基础。我们把这种眼睛对不同波长可见光的光谱响应变化用曲线表示出来，就称为光谱光视效率曲线或光谱视见函数曲线。这种曲线是经过实验获得的。

我们知道，电磁波的一端是无线电波，其波长从几毫米到几十公里；另一端是 x 射线和 γ 射线等，其波长极短，在 10^{-10}m 以下。光波只占整个电磁波很小的一段而落在它们中间。如果以人眼能否看得见来衡量可见辐射波（光波）的波长范围的话，则这一范围是无法精确定下来的。因为人眼对相同波长的辐射反应各人之间是略有不同的，这种不同称为个体差异。通常，光的波长范围的下限取 $380\sim 400\text{nm}$ ，上限取 $760\sim 780\text{nm}$ 。在上述整个可见辐射波长范围内，人们可以凭眼睛，随着波长的不同区分出红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等颜色，见图1.1.1。图中把颜色分成七段是一种习惯上粗略的方法，实际上在整个可见光谱范围内，光的颜色是按色调由一种向另一种连续过渡的。例如黄和绿中间就包含着无数个黄绿色。颜色的数量是无穷的，人眼可以区别出一百多种不同的颜色。

在带有多光谱成分的光源中，如果某一部分特别显著，就呈现出那种显著的颜色。具有一定比例的几种单色光可合成白光或称无色光，太阳光就是无色光。光的混合与颜色的混合完全不同。众所周知，一定比例的各种颜料的总和，不呈白色，而呈黑色。

尽管在可见光谱区域内，能区别出不同波长的光有不同的颜



紫	380~424	绿	492~565	红	640~780
蓝	424~455	黄	565~595		
青	455~492	橙	595~640		

图 1.1.1 光谱波段和光视效率曲线

色，但是人眼睛对不同颜色的光的敏感程度也不同，就是说，人眼对能量相同的，而波长不同的光所感觉到的明亮程度也不同。例如一个红光和一个绿光，当它们辐射通量相同时，人们会感觉到绿的比红的亮得多。

通过大量的实验证明，在明视觉条件下（高于 3cd/m^2 的亮度水平），眼睛对波长为 555nm 的光最灵敏。也就是说，波长为 555nm 处的辐射有最大的光效率，称为最大光谱光视效率，其数值为 683lm/W 。在多数情况下，感兴趣的是光谱光视效率的相对值，假定波长 555nm 处的光谱光效率为1，记为 $V(\lambda)_{555}=1$ ，而越远离这个波长，眼睛就越不灵敏，发光效率越小于1。在可见光波段（ $380\sim780\text{nm}$ ）以外，眼睛失去光的感觉，辐射的发光效率为

零。不同的波长有不同的 $V(\lambda)$ 值,按波长 λ 及其相对应的光谱光视效率 $V(\lambda)$ 作出的曲线,在明视觉条件下,其最大值在 $\lambda=555\text{nm}$ 处,称为明视觉的光谱光视效率曲线或光谱灵敏度曲线。

在暗视觉条件下(适应亮度低于 0.05cd/m^2),眼睛的最大灵敏度在波长为 510nm 处,其最大值为 16991lm/W ,用 $V'(\lambda)$ 表示。

光谱光视效率曲线也称视见函数,通常简称 $V(\lambda)$ 曲线。由于每个人眼睛的光谱灵敏度不完全相同,为统一起见,国际照明委员会(CIE)于1924年确认并颁布了具有如图1.1.1中的标准人眼光谱灵敏度曲线。经过多年实践发现,这条曲线与实际略有差异,特别是在紫端,其数值低于近年来实验所获得的数值。现在,一些国家的有关部门正在进行这方面的研究工作, $V(\lambda)$ 曲线的数值是否进行修改,应由CIE以后来决定。

三、有关的光度量

光度学与色度学分别是研究光与色度量的科学,它们都是系统的,比较完整的科学。为便于问题的阐述,本节仅就它们的某些量作简单的介绍。

1. 辐射通量和光通量

辐射体以电磁辐射的形式向四面八方辐射能量。在单位时间内辐射的能量就是辐射功率 P ,可以用一般的功率单位表示。一个辐射体可能含有各种波长的辐射功率,如果在某一波长 λ ,它辐射出的功率为 P ,则可记为该辐射体在波长 λ 的辐射功率为 P_λ ,也可称为该辐射体在波长 λ 的辐射通量。

将辐射体的各个波长的辐射通量按波长依次排列起来就称为该辐射体的辐射通量分布或辐射功率分布,用 $P(\lambda)$ 表示。

一个辐射体的辐射通量 F_e 就是该辐射体的各个波长的单色辐射通量的总和,可以由辐射通量分布的积分式表示

$$F_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) d\lambda \quad (1.1.1)$$

F 的单位可用一般功率单位表示。

相应的辐射通量中有视感觉的那一部分称为光通量，可由下式表示

$$F = K_m \int_{380}^{780} V(\lambda) P(\lambda) d\lambda \quad (1.1.2)$$

式中 F ——光通量，简称光通 (lm)；

K_m ——最大光谱光视效率，对于明视觉说来，其数值为 683 lm/W；

$V(\lambda)$ ——光谱光视效率函数。

从前述可知，只有波长为 380nm 至 780nm 之间的辐射通量才是可见辐射，能够转换成有视感觉作用的光。因此积分的波长范围只取 380nm 至 780nm。波长单位的换算见表 1.1.1。

波长单位换算表

表 1.1.1

单 位	埃 (Å)	微米(μm)	纳米 (nm)	埃(Å)
米 (m)	1	10^6	10^9	10^{10}
微米(μm)	10^{-6}	1	10^3	10^4
纳米(nm)	10^{-9}	10^{-3}	1	10
埃 (Å)	10^{-10}	10^{-4}	0.1	1

2. 发光强度

光源在某一方向的光强就是光源在包括该方向的单位立体角内所发出的光通。若光源包括某一方向的一小立体角为 $d\omega$ ，它在 $d\omega$ 中发射出光通为 dF ，光源在该方向的发光强度为 I ，则光强可表示为

$$I = dF / d\omega \quad (1.1.3)$$

若取光通的单位为 lm，立体角单位为 sr，则光强的单位是坎德拉，用 cd 表示。

如果所取的立体角足够大，我们用 ω 表示，则光源在立体角内发射的光通 F 与 ω 的比值称为光源在角 ω 中的平均光强 I_m ，可表

示为

$$I_m = F/\omega \quad (1.1.4)$$

光强的定义虽然是由光通引伸出来的,但在一般光度测量中,对于某一光源说来,要获得其光强值往往比获得它的光通量更为容易,而光源的光通量就可通过上面有关公式算出来。即

$$F = \int dF = \int I d\omega \quad (1.1.5)$$

由于一般光源在各个方向的强度是不同的,因此公式(1.1.5)中的 I 此时就不是一个单一的数值,它是随方向而变的量,就是说它是 ω 的函数。光强分布在一定坐标中作出的曲线叫做光强分布曲线,对于包括控光灯具(灯罩)在内的光源的光强分布曲线也称为其配光曲线。

如果有一光源,它在所有方向的发光强度都同样为 I_0 ,因为包含某一点(光源)的整个空间是 4π 个单位立体角($4\pi\text{sr}$),则此时光源的光通为 $F = 4\pi I_0$ 。反之,若我们知道某一光源的光通为 F ,则可求出其平均发光强度为

$$I_m = F/4\pi \quad (1.1.6)$$

3. 照度

光源落在包括某一点在内的单位受照面的光通叫做光源在该点所产生的照度,用符号 E 表示。如果光源各方向的光通量不是均匀分布的,则用无限小的受照面上的无限小的光通量表示,即照度 E 为

$$E = dF/dS \quad (1.1.7)$$

照度的国际通用单位是勒克斯(lx , $1\text{lx} = 1\text{lm}/\text{m}^2$)。但由于历史上的原因,形成了其他的照度单位,如英尺烛光(fc)、辐透(Phot)、毫勒克斯(mlx)等,这些单位在某些文献、书籍上或在某些国家仍与勒克斯这一单位同时应用,特别是一些较早期的文献、书籍。现将这些照度单位及它们之间的转换系数列于表1.1.2,以供参考。

4. 平方反比定律

假设有一点光源(见图1.1.2)它在立体角 ω 中的光强度为 I ,

光照度单位换算表

表 1.1.2

单 位	勒 克 斯 (lx)	辐 透 (phot)	毫 辐 透 (Milliphot)	英尺烛光 (Footcandle)	流明/面积 (lm/S)
1 勒 克 司 (lx)	1	10^{-4}	10^{-1}	9.290×10^{-2}	1 lm/m ²
1 辐 透 (ph)	10^4	1	10^3	9.290×10^4	1 lm/cm ²
1 毫辐透 (mph)	10	10^{-3}	1	9.290×10^{-1}	10^3 lm/cm ²
1 英尺烛光 (fc)	1.076×10	1.076×10^{-3}	1.076	1	1 lm/ft ²

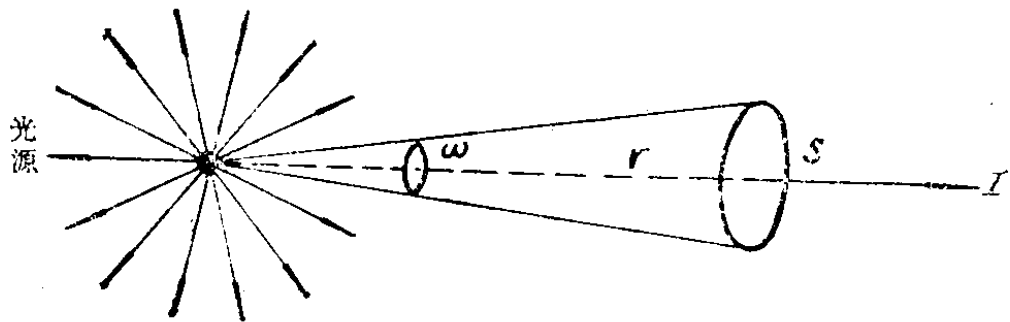


图 1.1.2 点光源的光强和光通量

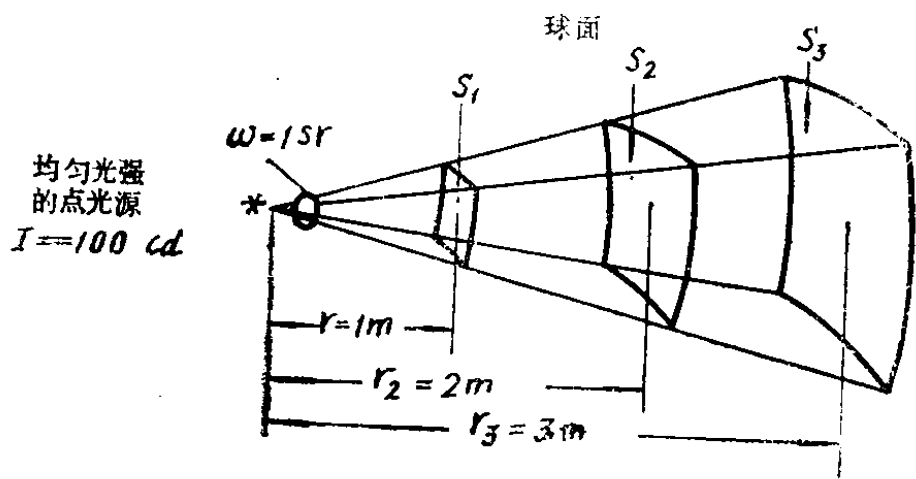


图 1.1.3 平方反比定律

则该光源在立体角 ω 中发出的光通为 $F = \omega \cdot I$ 。同样，与 ω 相对应的，与光源的距离为 r 的平面 S 上也获得相同的光通 F 。于是按照照度的定义可计算出照度

$$E = F/S = \omega I / \omega r^2 = I/r^2 \quad (1.1.8)$$

由公式(1.1.8)可以看出，光强为 I 的光源，在与其距离为 r 处的平面上的照度与其光强成正比，而与该点和光源的距离平方成反比。即照度的平方反比定律。

在图 1.1.3 中，若光源的发光强度为 100cd，则与其距离为 1m、2m 和 3m 处的三个平面 S_1 、 S_2 和 S_3 上的照度分别为

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{I}{r_1^2} = \frac{100}{1^2} = 100 \text{lx} \\ E_2 &= \frac{I}{r_2^2} = \frac{100}{2^2} = 25 \text{lx} \\ E_3 &= \frac{I}{r_3^2} = \frac{100}{3^2} = 11.11 \text{lx} \end{aligned}$$

平方反比定律也可以从光通量的观点得出。假定一组球面与一个单位立体角相对应，其面积 S_1 、 S_2 和 S_3 分别为 1m^2 、 2^2m^2 和 3^2m^2 。如果该立体角的顶端有一个 100cd 的均匀辐射的点光源，根据光通量的定义 $F = I\omega = 100 \times 1 = 100 \text{lm}$ ，再根据照度的定义，可以得到

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{F}{S_1} = \frac{100}{1} = 100 \text{lx} \\ E_2 &= \frac{F}{S_2} = \frac{100}{2^2} = 25 \text{lx} \\ E_3 &= \frac{F}{S_3} = \frac{100}{3^2} = 11.11 \text{lx} \end{aligned}$$

这个结果与通过光强的概念所获得的结果是一致的。但是，这里应该注意到，光强的概念适用于点光源的照度，而光通量的概念适用于较大面积的情况。如果光通量不是均匀地分布在一个平面上时，照度只能取其平均值。对于点光源来说，当计算点与光源之间的距离大于光源直径的四倍时，平方反比定律就能成立。该

