

GUANGDU CELIANG
JISHU

光度测量技术

● 刘 慧 杨臣铸 编著



中国计量出版社

CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

光度测量技术

刘 慧 杨臣铸 编著

中国计量出版社

图书在版编目(CIP)数据

光度测量技术/刘慧,杨臣铸编著. —北京:中国计量出版社, 2011.1

ISBN 978-7-5026-3387-5

I. ①光… II. ①刘… ②杨… III. ①光度学-测量 IV. ①0432.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 238585 号

内 容 提 要

本书介绍了光度基本知识和光度量单位量值的复现原理、装置和方法,以及光度量量值的传递和保存方法。着重讨论了各种光度量的测量技术、测量仪器和测量不确定度评估。

本书可作为光度计量、检测人员的参考书,也可供照明、电光源、建筑物理及光电子等专业有关人员及高等院校师生学习和参考。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010)64275360

<http://www.zgjl.com.cn>

北京市媛明印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

850 mm×1168 mm 32 开本 印张 3.875 字数 78 千字

2011 年 1 月第 1 版 2011 年 1 月第 1 次印刷

*

印数 1—1000 定价:15.00 元

前 言

我们生活在光的世界里,白天有阳光,夜晚有月光、星光,还有各式各样的人造光源。我们从事的各种生产活动,参加的各类社会活动,以及生活、娱乐,无一不是在一定的光环境下进行的。光和空气一样,都是我们须臾不能离开的。

我们对光的感知,主要是依靠视觉系统。而视觉系统对光环境的适应能力是非常强的。在强烈阳光直射的晴天和在微弱星光掩映的夜晚,都能感知周围环境,获得视觉信息。为了创造适宜的光环境,人类在建筑物上用开窗的方位和开窗的大小来调节进入室内的光量,又发明人造光源来满足夜间活动的需要。这就是早期的采光和人工照明。

随着社会的进步和科学技术的发展,对照明的合理性和经济性提出了要求,由此而催生了光度理论及测量技术,并成为照明(采光)科学技术的一项重要基石。

经过近两个世纪的发展,光度学已经发展成一门体系完备的学科。光度测量技术也与时俱进,不仅能适应照明技术对测量的要求,还有力地促进照明科学技术的发展。

近 30 年来我国的照明事业有了很大的发展,我国是电光源产品的生产和使用大国,我国的光度测量仪器也逐渐进入了国际舞台。然而不少从业人员对基本知识缺乏了解,这种状况不仅影响其业务工作的开展,也不利于我国电光源和照明事业的发展。

为此我们根据多年的光度计量工作的经验,不揣浅陋,编写了这本书,以期为照明、电光源、建筑物理等专业有关工作者,高等院校相关专业本科生及研究生提供参考和帮助。

本书由刘慧和杨臣铸编著,高执中参加了发光强度章节有关内容的编写。在本书的编写过程中得到了于靖研究员和林延东研究员很多支持,在此表示感谢。

因编者水平所限,书中疏漏及不妥之处在所难免,敬请广大读者及同行批评指正。

编者

2010年11月

目 录

第 1 章 绪言	(1)
第 2 章 眼睛与视觉	(4)
2.1 视觉器官	(4)
2.2 眼睛对亮度的适应与三种视觉	(6)
第 3 章 基本概念	(10)
3.1 光和辐射,光度学和辐射度学	(10)
3.2 光度和辐射量	(11)
3.3 光度和辐射量之间的关系	(16)
第 4 章 光度学的基本定律	(19)
4.1 相加性原理	(19)
4.2 距离平方反比定律	(19)
4.3 照度的余弦法则	(20)
4.4 朗伯(余弦)定律与朗伯面	(22)
第 5 章 光度计算	(25)
5.1 点光源在平面上建立的照度的一般表达式	(25)
5.2 圆盘形光源在垂直于通过圆心的法线的面元上 建立的照度	(26)
5.3 直线状光源在垂直于其中垂线的面元上建立的 照度	(28)
5.4 朗伯面产生的照度	(30)

5.5	圆球形漫射光源产生的照度	(31)
5.6	立体角投影法计算照度	(32)
第6章	光度基准、发光强度副基准与工作基准	(34)
6.1	光度基准(光度原级标准)	(34)
6.2	发光强度副基准与工作基准	(39)
第7章	发光强度的测量	(40)
7.1	光度测量装置	(40)
7.2	光度测量方法	(41)
7.3	发光强度标准灯	(43)
7.4	发光强度测量方法	(49)
7.5	测量不确定度评定	(53)
第8章	光照度基准、标准与光照度计的标定	(58)
8.1	光照度基准与标准	(58)
8.2	光照度计	(58)
8.3	照度计的标定	(65)
第9章	光亮度的测量与亮度计的标定	(70)
9.1	亮度基准与标准	(70)
9.2	光亮度的测量方法	(71)
9.3	成像式亮度计及其特征	(73)
9.4	遮光筒式亮度计	(76)
9.5	标定亮度计的方法	(77)
9.6	关于亮度单位	(80)
第10章	光源发光的空间分布及总光通量的测量	(82)
10.1	概述	(82)
10.2	分布光度计的测量原理和类型	(83)

10.3	理想积分球理论	(90)
10.4	球形光度计	(93)
10.5	总光通量标准灯	(97)
10.6	电源与电参数测量电路	(101)
10.7	用球形光度计测量光源的总光通量	(104)
10.8	不确定度评定实例	(110)
主要参考文献		(115)

第 1 章 绪 言

电磁辐射即电磁波,是一个庞大的家族,它包含从波长极短的电离辐射(γ 射线)到波长极长的无线电辐射。其中波长在大约 $1\text{ nm}\sim 1\text{ mm}$ 之间的电磁辐射称“光学辐射”,简称“光辐射”。波长约为 $380\text{ nm}\sim 780\text{ nm}$ 的光学辐射作用于人的视觉器官,会使人产生“光亮”的感觉,即能引起视觉效应。故这一部分光学辐射称“可见辐射”,俗称“可见光”。这是人类最早认识的电磁辐射。

很早的时候人们就开始了光学现象的观察和研究。然而对光的“多少”进行定量测量还是 15 世纪以后的事。随着天文观测的发展和大规模人工照明的出现,要求确切表述光源和光照场的各种特性及它们之间的关系,并要求对这些特性进行定量测量,于是诞生了光度学和早期的光度计量。

随着科学技术的发展,人们逐渐认识到,进行光度测量所得到的结果仅表示可见辐射所具有的“光视”效应,而不是可见辐射本身“强弱”的直接度量。而且不同波长的可见辐射不仅使人感到具有不同的颜色,而且产生“光视”效应的强弱也不相同。另一方面也可以说人眼对不同波长的辐射具有不同的灵敏度。由于个体之间的差异,由不同人进行同一目视光度测量所得结果也会不同。为了规范测量,国际照明委员会(CIE)在 1924 年公布了明视觉光谱光视效率函数,即 $V(\lambda)$,作为统一评价辐射光视效应的

加权函数。这是光度计量(测量)有别于其他计量专业的重要特点。

早期,用特制的蜡烛在规定条件下点燃,规定火焰水平方向的发光强度为光度测量的基本单位,叫“烛光”(candle),这是光度计量最早的原级标准(即基准)。由于蜡烛的稳定性和复现性差,不能满足精密测量的需要,曾先后出现过使用液体燃料的火焰灯代替蜡烛复现烛光的量值,效果均不理想。而且各国光度单位量值的一致性差。直至 20 世纪 30 年代用铂凝固点黑体复现光强单位的技术趋于成熟,各国一致同意用以取代蜡烛和火焰灯成为新一代光度原级标准。新复现的光强单位后来定名为“坎德拉”(candela),并自 1948 年 1 月 1 日起实行。

从 1948 年到 1969 年,先后进行了五次光度标准(含发光强度和光通量)的国际比对,结果比预想的差得多。另一方面,铂凝固温度的值受国际实用温标变动的影响,使得对铂凝固点黑体辐射特性的描述是不确定的。因此,光度量和辐射量之间的关系也是变动不定的,这在理论上和实践上都造成很大困难。随着辐射绝对测量技术的成熟,经过国际上多年的协同工作,首先确定了 K_m 值,并在 1979 年第 16 届国际计量大会上重新定义了坎德拉。这标志光度计量进入了一个新的发展时期。

20 世纪 60 年代以前的光度测量完全用目视法,参与观测的人眼也就成为测量仪器的一部分,因此测量结果也受到个体视觉特性的影响。为了减少个体的影响,测量时往往由几位具有正常视觉的观测者参加,取他们观测的平均作为测量结果,因此工作效率低。随着光辐射探测器性能的提高和 $V(\lambda)$ 修正技术的完善,用模拟人眼的物理光度计逐步取代目视法进行光度测量就是顺

理成章的事了。

随着测量对象的变化和技术进步,用做量值传递的光度计量标准也在发展。主要表现为:

(1) 增加高色温的标准光度源,以适应新型光源光度测量的需要;

(2) 用标准光度探测器保持和传递量值;

(3) 光度标准的量值向高、低两个方向扩展。

光度计量与人类视觉活动有着密切的关系,在照明工程、影视工业、光电子学、生理光学、光学仪器等领域均有重要和广泛的应用。

第 2 章 眼睛与视觉

视觉器官是人体的重要器官之一,依靠视觉器官对外界光刺激产生的反应,形成了明暗、颜色、形态、动态、远近等视知觉,以获得外部世界的信息,从而做出相应的反应。一个正常人从外界获取信息的 90% 以上依赖于视觉,由此可见其重要性。光度学所处理的问题直接与人类的视觉活动相关,是为人类的视觉活动服务的。人类视觉器官的生理特性正是光度学考虑问题的出发点,是光度学的重要基础,因此应该了解视觉器官的构成、生理特性及其与光度学的关系。

2.1 视觉器官

视觉器官包括眼睛、视神经和大脑有关部分。如图 2-1 所示,眼睛好像照像机,它将外界景物成像在视网膜上。眼睛近似球形,球体外层的前端为透明的角膜,约占 $1/6$,其余部分为不透明的白色巩膜。角膜之后是虹膜,其上的开孔就是瞳孔,它可以随着光线的强弱变化而自动地缩小或放大。瞳孔直径的变化约在 $1.5\text{ mm} \sim 8\text{ mm}$ 之间,类似一可变光阑,控制进入眼内的光。紧靠虹膜的是双凸透镜形状的晶状体,它受睫状肌控制来改变前后表面的曲率,从而使晶状体的焦距变化。这样,在观察不同距

离的物体时,都能使像成在视网膜上。晶状体和视网膜之间充满了一种透明的半流体,叫玻璃体。视网膜覆盖在眼球内壁对着晶状体的区域。视网膜的外层为视神经,中间为双极细胞,内层分布着两种感光细胞,即锥体细胞和杆体细胞。视网膜对着瞳孔的中央部分呈黄色,叫做黄斑。黄斑中央有一下陷的区域叫中央窝。在以中央窝为中心的 2° 视场附近,几乎全是锥体细胞,密度很高。由中央窝到四周,密度急剧下降。杆体细胞的分布则相反,中央窝区域分布极少,往外逐渐增多,到 4° 视场处明显增加,到离视轴 20° 附近,杆体细胞的密度达到最大,再往外又逐渐减少。视网膜上两种细胞感受光信号后,转变为复杂的神经兴奋。通过神经纤维传给大脑,形成视觉。

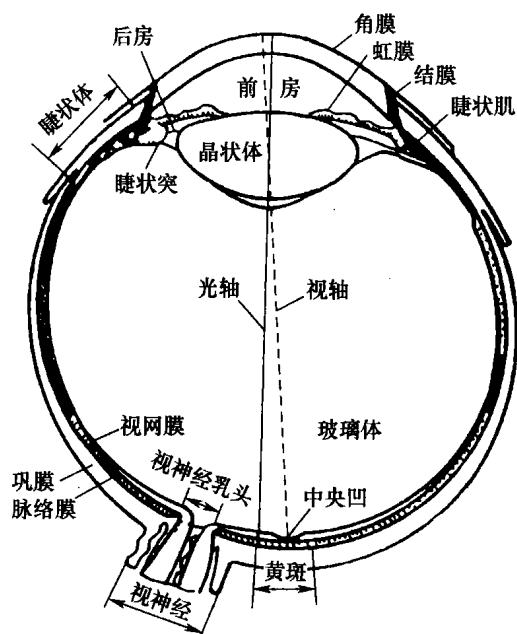


图 2-1 人右侧眼球水平剖面简图

2.2 眼睛对亮度的适应与三种视觉

人眼适应的亮度范围很宽,既可以看清高亮度的物体,也能直接看到夜空中很暗的六等星。这样宽的适应能力,一方面是靠改变瞳孔的大小来调节进入眼内的光;另一方面,主要是由杆体细胞与锥体细胞功能的转换来实现的。

在明亮的环境中,锥体细胞发挥作用。这时,不仅能分辨明暗,识别物体形状,对细节有很高的分辨能力,还能辨别颜色。而杆体细胞在强光作用下,其所含视紫红素会退色而失去作用。当处于暗环境时,锥体细胞失去活性而没有感光能力,而杆体细胞的视紫红素重新合成而恢复紫红色,发挥感光功能。但是它只能辨别明暗,不能分辨颜色。当由明亮环境进入暗环境时要经过30min~40min的适应,才能分辨四周的物体。而从暗环境进入亮环境,刚开始有强烈的刺激感,但很快就能适应。有意思的是红色光不会破坏杆体细胞的视紫红素。因此,从暗环境到亮环境时,若戴上红色眼镜,而再回到暗环境时,则很快就能适应了。

人类视觉器官不仅能感受波长从380 nm~780 nm范围的辐射,而且对不同波长辐射的敏感程度也不一样,即对不同波长的辐射有不同的灵敏度。人眼的这种光谱灵敏度还受到所处环境亮度水平的影响。当亮度在几个坎每平方米(cd/m^2)以上时,正常人眼的适应状态叫明适应,这时的视觉叫明视觉。亮度在百分之几坎每平方米以下时,正常人眼的适应状态叫暗适应,相应于暗适应的视觉叫暗视觉。处于明视觉和暗视觉之间的视觉叫中间视觉。人眼光谱灵敏度的另一面可看做不同波长的辐射对人

眼具有不同的光视效应。辐射的光谱光视效率定义为:在规定的观测条件下(如视场大小、视场亮度、观测方法等),波长为 λ_m 和 λ 的两辐射通量所引起的光亮度感觉相同时两辐射通量之比。通常 λ_m 选在最大比值等于 1 处。

1924 年国际照明委员会(CIE)公布了 2° 视场的明视觉光谱光视效率值(旧称视见函数)(表 2-1),符号为 $V(\lambda)$ 。1933 年国际计量委员会采用 CIE 公布的 $V(\lambda)$ 值定义标准光度观察者。1951 年 CIE 又公布了青年人眼的暗视觉光谱光视效率值,符号为 $V'(\lambda)$,1976 年得到国际计量委员会批准。中间视觉的光谱光视效率正在研究,至今还没有一致公认的值。相应于明视觉 $V(\lambda)$ 最大值的波长为 555 nm,这就是说,人眼对波长为 555 nm 的绿色光最为敏感。当亮度降低,进入中间视觉后,人眼最敏感的单色辐射的波长随着亮度水平的降低而向短波方向移动。如图 2-2 所示,整个光谱光视效率曲线也向短波方向移动,不存在一条固定的曲线。在这个范围内,锥体细胞和杆体细胞同时起作用。亮度水平较高时,还能分辨颜色。当亮度水平接近暗视觉

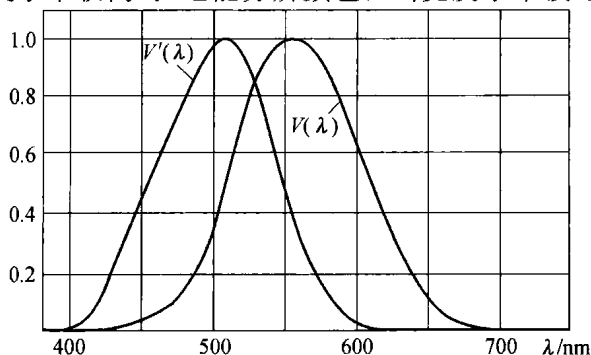


图 2-2 辐射的光谱光视效率曲线

时,杆体细胞起主要作用,颜色感觉消失。到暗视觉时,最敏感的单色辐射的波长为 507 nm。

表 2-1 CIE 光谱光视效率

波长 /nm	明视觉 $V(\lambda)$	暗视觉 $V'(\lambda)$	波长 /nm	明视觉 $V(\lambda)$	暗视觉 $V'(\lambda)$
380	0.0000	0.000589	590	0.757	0.0655
390	0.0001	0.002209	600	0.631	0.03315
400	0.0004	0.00929	610	0.503	0.01593
410	0.0012	0.03484	620	0.381	0.00737
420	0.0040	0.0966	630	0.265	0.003335
430	0.0116	0.1998	640	0.175	0.001497
440	0.023	0.3281	650	0.107	0.000677
450	0.038	0.455	660	0.061	0.0003129
460	0.060	0.567	670	0.032	0.0001480
470	0.091	0.676	680	0.017	0.0000715
480	0.139	0.793	690	0.0082	0.00003533
490	0.208	0.904	700	0.0041	0.00001780
500	0.323	0.982	710	0.0021	0.00000914
510	0.503	0.997	720	0.00105	0.00000478
520	0.710	0.935	730	0.00052	0.000002546
530	0.862	0.811	740	0.00025	0.000001379
540	0.954	0.650	750	0.00012	0.000000760
550	0.995	0.481	760	0.00006	0.000000425
560	0.995	0.3288	770	0.00003	0.000000241
570	0.952	0.2076	780	0.000015	0.000000139
580	0.870	0.1212			

相对光谱灵敏度曲线与 $V(\lambda)$ 或 $V'(\lambda)$ 曲线一致的辐射接收器分别称为 CIE 明视觉标准光度观察者或 CIE 暗视觉标准光度观察者。如没有特别说明时,均是在明视觉范围讨论问题。