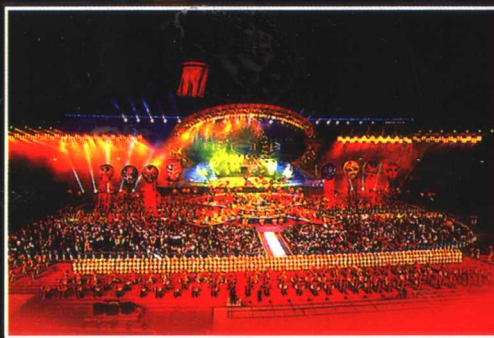
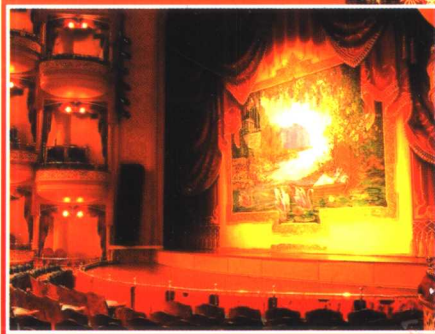


现代灯光设备

与系统工程



彭妙颜
编著

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

现代灯光设备与系统工程

彭妙颜 编著

人民邮电出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

现代灯光设备与系统工程/彭妙颜编著. —北京: 人民邮电出版社, 2006. 2
ISBN 7-115-13816-8

I. 现... II. 彭... III. 建筑—照明设计 IV. TU113.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 001678 号

内 容 提 要

本书介绍了照明概念、照明光源、照明灯具、照明计算、照明测量及照明控制与调光系统等内容,重点讲述现代灯光领域中的新器件(如 LED、激光灯、冷极管、光纤、成像灯、电脑灯)、新技术(如智能照明控制)、新系统(如数字调光、网络调光)和新的设计手段(如灯光系统的计算机辅助设计),并列举大量最新的剧场、体育馆、会议厅、歌舞厅、景观及影视照明,数字网络调光系统和智能照明控制系统等工程实例。

本书可作为照明工程、装饰及环境设计、影视舞台灯光等专业的教材或参考教材,也可供从事上述专业的设计人员和工程技术人员参考,同时也适合工厂企业、机关学校、文艺团体、体育馆、剧场、音乐厅、歌舞厅、电视演播厅和电化教学等部门从事灯光技术和管理工作的人员阅读。

现代灯光设备与系统工程

- ◆ 编 著 彭妙颜
责任编辑 申 苹
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京密云春雷印刷厂印刷
新华书店总店北京发行所经销
- ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 29 插页: 1
字数: 725 千字 2006 年 2 月第 1 版
印数: 1-5 000 册 2006 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-13816-8/TN·2573

定价: 45.00 元

读者服务热线:(010)67129264 印装质量热线:(010)67129223

前 言

从爱迪生发明灯泡至今已有一百多年的历史,近年来电子技术和信息技术的飞速发展促进了照明技术的新飞跃,现代照明领域内出现了大量的新器件(如 LED、光纤、激光、电脑灯、成像灯、冷极灯)、新技术(如智能化照明控制)、新系统(如数字调光、网络调光)、新的设计理念(如绿色照明、景观照明)和新的设计手段(如灯光系统的计算机辅助设计)。另外随着我国文化产业的迅速发展,各种大型娱乐场所、体育场馆等如雨后春笋般出现,因此社会急需大批灯光行业的技术人员和管理人员。为了帮助广大技术人员了解灯光工程的最新技术,指导其进行工程实践,笔者在广大照明设备生产和照明工程企业的支持下,根据长期从事灯光技术的教学、科研和工程实践的经验编写了此书。

现代灯光系统工程是一门技术与艺术相结合的“边缘学科”。本书本着“技术为艺术服务”的指导思想,侧重介绍技术方面的内容,在照明技术的两个分支——一般照明与艺术照明中,则是侧重介绍艺术照明的内容。书中详细介绍了照明概念、照明光源、照明灯具、照明计算、照明测量及照明控制与调光系统等内容,重点讲述现代灯光领域中的新器件、新技术、新系统,同时列举了大量最新的数字网络调光系统和智能照明控制系统的工程实例。书中所述及的主要专业名词首次出现时都尽量附上英文,这也是本书的特色之一。

本书内容新、涉及面广,可作为照明工程、装饰与环境设计、影视舞台灯光等专业的教材或参考教材,也可供从事上述专业的设计人员和工程技术人员参考。

本书编写力求理论与实践相结合。在讲述一定深度的理论知识的基础上,给出大量最新的工程实例,从一般剧场、会议厅、歌舞厅、体育场馆到大型的景观照明系统、数字网络调光系统(深圳电视台)和智能照明控制系统(海南南山观音、广州国际会展中心)均有详细的介绍,具有较强的实践指导意义,因此也适合工厂企业、机关学校、文艺团体、体育场馆、剧场、音乐厅、歌舞厅、电视演播厅和电化教学等部门从事灯光技术和管理工作的有关人员阅读。

本书的出版得到了广州大学教材出版基金的支持。本书在编写过程中得到了河东、斯全德、珠江、雅江、马田、南艺、合和、天鹰、世奇、邦奇、凯图、奇胜、飞利浦、泰立、南视、飞达、方达、艾普、新舞台、南特、真明丽、奥罗拉、ETC、环宇激光和北京电光源研究所等国内外知名灯光企业及科研机构的大力支持,他们为本书提供了宝贵资料及编写意见和建议。另外,张承云、罗裕军、池秀萍、叶永祥等同志为本书的出版做了大量工作,广州大学周锡韬副教授对本书做了全面的审校和补充,在此一并表示深切谢意。本书在编写过程中还参阅了大量的著作、刊物和网站文献,在此特向这些文献的作者表示衷心的感谢。

鉴于编者水平有限,错漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

彭妙颜

广州大学声像与灯光技术研究所

E-mail: gzhuaui@21cn.com

Http: //avl. gzhu. edu. cn

目 录

第 1 章 光与颜色的基本概念	1
1.1 光和光谱	1
1.2 光度量	1
一、光通量	2
二、照度	2
三、发光强度	3
四、亮度	4
1.3 照度定律	4
1.4 颜色	5
一、颜色的基本特性	5
二、颜色的匹配和混合	6
三、颜色的定量——表色系统	9
四、光源颜色——光源的色表和显色性	13
五、艺术照明的色彩运用	18
第 2 章 电光源	21
2.1 电光源的分类	21
2.2 白炽灯	21
一、白炽灯的结构和特性	21
二、白炽灯的类型	22
2.3 卤钨灯	23
一、卤钨灯的结构和特性	23
二、卤钨灯的类型	24
2.4 荧光灯	28
一、荧光灯的结构和工作原理	28
二、荧光灯的工作电路	32
2.5 高压汞灯	35
2.6 金属卤化物灯	36
一、金卤灯的结构和工作原理	36
二、金卤灯的主要类型	37
三、金卤灯的工作特性	38
四、金卤灯的发展	39
五、金卤灯常见的品牌型号简介	40

2.7	高压钠灯	43
	一、高压钠灯的结构	43
	二、高压钠灯的类型和工作特性	43
2.8	管形氙灯	44
	一、脉冲氙灯	44
	二、长弧氙灯	45
	三、短弧氙灯	45
2.9	其他照明电光源	46
	一、低压钠灯	46
	二、无极荧光灯	46
	三、微波硫灯	47
	四、冷阴极荧光灯	47
2.10	发光二极管 (LED)	48
	一、LED 的工作原理	48
	二、白光 LED 的结构和工作原理	49
	三、LED 的特点	51
	四、LED 在照明领域中的应用	51
2.11	激光灯	58
	一、激光灯的结构原理	58
	二、激光表演系统的组成及功能	59
	三、激光安全保护	61
	四、激光表演系统典型产品介绍	62
2.12	艺术照明用特殊光源	63
	一、霓虹灯	63
	二、彩虹灯	65
	三、满天星、蛇管灯和串灯	66
	四、紫外线灯	68
	五、荧光软管	68
	六、频闪灯和雷光管	68
	七、配合灯光使用的效果设备	69
2.13	照明电光源的性能比较和选用	70
	一、电光源的性能比较	70
	二、电光源的选用	71
第 3 章	照明灯具	72
3.1	灯具的作用和特性	72
	一、灯具的作用	72
	二、灯具的主要特性	72
3.2	灯具的分类和选用	76
	一、按光通量在空间的分配分	76

二、按光强分布分	77
三、按安装方法分	77
四、按电光源分	81
五、按使用场所和范围分	82
3.3 影视舞台照明灯具	82
一、舞台灯具的基本结构	83
二、舞台灯具的反光镜和透镜	83
三、舞台灯具的分类	87
四、舞台灯具的功能、特性和应用	89
3.4 电脑灯	105
一、电脑灯的分类和特点	107
二、电脑灯的结构和功能	111
第4章 照明计算	116
4.1 照明计算的基本概念	116
一、照明计算的内容	116
二、照度计算的基本方法	116
4.2 直射照度的计算	116
一、平方反比法	117
二、空间等照度曲线法	118
4.3 平均照度的计算	120
一、利用系数法	121
二、单位容量法	131
三、容量估算法	136
第5章 照明控制电器及供配电系统	137
5.1 照明控制电器	137
一、电弧的形成和熄灭	138
二、刀开关	138
三、接触器	139
四、热继电器	141
五、按钮开关和行程开关	141
六、自动空气断路器	141
七、熔断器	145
八、低压配电柜(屏)	145
九、动力和照明配电箱	146
十、照明开关和电源插座	146
5.2 三相电动机的控制电路	148
一、直接起动单向控制电路	148
二、正反转控制电路	149

三、限位控制电路	150
5.3 照明供配电系统	151
一、照明供配电系统的组成和分级	151
二、照明配电电路的基本形式和要求	152
三、照明负荷计算	155
四、导线、电缆的选择	160
五、导线、电缆的敷设	165
六、常用电工图例及符号	170
七、保护接地、保护接零和漏电保护	170
第6章 照明控制及调光系统	180
6.1 照明控制的基本概念	180
一、照明控制的目的	180
二、照明控制的内容	180
三、照明系统的开关(通断)控制	181
四、照明系统的调光控制	181
五、照明系统的色彩控制	184
六、影视舞台调光控制系统的发展历程	185
七、影视舞台调光控制系统的组成和分类	185
6.2 模拟调光控制系统	188
一、晶闸管的基本特性	189
二、晶闸管触发电路	192
三、晶闸管电路干扰的产生与抑制	194
四、模拟调光器	197
五、模拟调光台	201
6.3 数字调光控制系统	209
一、数字化的基本概念	209
二、调光控制系统的数字化和 DMX-512 协议	213
三、数字调光器	220
四、数字调光器典型产品介绍	228
五、数字调光台	237
六、数字调光台典型产品介绍	244
6.4 网络调光控制系统	248
一、网络化与 TCP/IP 协议	248
二、常用网络灯光设备	248
三、网络调光控制系统工程实例之一	251
四、网络调光控制系统工程实例之二	259
6.5 电脑灯控制系统	264
一、电脑灯控制系统的组成	264
二、电脑灯控制台的特点	264

三、电脑灯典型控制系统之一	265
四、电脑灯典型控制系统之二	269
五、电脑灯典型控制系统之三	281
6.6 换色器	293
一、换色器的工作原理	293
二、换色器的控制	294
第7章 智能照明控制系统	296
7.1 智能照明控制的基本概念	296
一、智能照明控制系统的类型和特点	298
二、智能照明控制系统的控制效果	298
三、智能照明控制系统的控制方式和目标	299
7.2 智能照明控制系统的结构原理	301
一、邦奇典型系统	301
二、邦奇大型网络系统	305
三、邦奇图形用户界面和系统集成	307
四、凯图智能环境控制系统	309
五、世奇智能照明控制系统	310
六、几种智能照明控制系统的对比	312
7.3 智能照明控制系统的工程应用	313
一、多功能会议室（及多功能厅）智能照明控制系统	313
二、会展中心智能照明控制系统	317
三、大会堂智能照明控制系统	320
四、酒店智能照明控制系统	320
五、体育馆智能照明控制系统	323
六、写字楼（办公楼）智能照明控制系统	325
七、机场智能照明控制系统	326
第8章 照明系统工程设计	328
8.1 照明系统工程设计基础	328
一、照明系统的组成	328
二、照明系统的分类	328
三、照明系统工程设计的内容及步骤	329
8.2 照明系统工程设计常用的标准及规范（摘录）	330
一、照明系统工程设计常用标准及规范	330
二、照明设计标准的典型数据	331
三、照明数量和质量	331
四、照明光源选择	338
8.3 照明系统工程设计实例	339
一、剧场及歌舞厅照明系统	339

二、影视演播厅照明系统	369
三、体育馆照明系统	372
四、景观照明系统	378
第 9 章 照明系统的计算机辅助设计	389
9.1 Martin Show Designer Martin 专业灯光设计软件	390
一、MSD 金装版	390
二、MSD 银装版	390
三、MSD 的主要功能	390
9.2 Lighting Studio 灯光设计软件	393
一、Lighting Studio 2004 版本	393
二、Lighting Studio 2005 版本	395
9.3 DASLight Virtual 3D Simulator 视像三维设计软件	398
9.4 Sunlite Easy View 专业灯光设计软件	401
一、Sunlite Easy View 专业灯光设计软件简介	401
二、3D 视像软件	401
第 10 章 光学测量技术	410
10.1 测光基础	410
一、测光基本定律	410
二、光电探测器件	411
10.2 测光仪器	413
一、照度计 (illuminance meter)	413
二、直尺光度计 (光轨)	414
三、亮度计 (luminance meter)	414
四、球形光度计	415
五、分布光度计	416
六、色温计	417
七、色彩照度计	418
10.3 光源的光学参数及电参数测量	419
一、光强测量	419
二、光通量测量	420
三、光效测量	421
四、电参数测量	421
10.4 灯具的光学测量	422
一、灯具的光学参数	422
二、灯具的光学参数测量	422
三、舞台灯具光学质量的测试与评价	423
10.5 室内现场照明测量	427
一、室内现场照明测量的目的	427

二、室内现场照明测量的主要内容·····	427
三、室内现场照明测量的设备与条件·····	427
四、照度测量·····	427
五、颜色测量·····	429
附录 A 常用电工图例及符号·····	431
附录 B 安全用电知识·····	442
附录 C 建设部 JGJ57—2000 《剧场建筑设计规范》(摘录)·····	446
附录 D 广电部 GYJ45—92 《电视演播室灯光系统设计规范》(摘录)·····	448
附录 E 建设部 JGJ31—2003 《体育建筑设计规范》(摘录)·····	449
参考文献·····	452

第 1 章 光与颜色的基本概念

1.1 光和光谱

光是能引起视觉的辐射能，它以电磁波的形式在空间传播，人眼所感觉到的光仅是电磁波中很小的一部分，称为可见光。可见光的波长一般在 $370\sim 780\text{nm}$ 范围内 ($1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$)。可见光又可分为红 ($780\sim 630\text{nm}$)、橙 ($630\sim 600\text{nm}$)、黄 ($600\sim 570\text{nm}$)、绿 ($570\sim 490\text{nm}$)、青 ($490\sim 450\text{nm}$)、蓝 ($450\sim 430\text{nm}$) 和紫 ($430\sim 370\text{nm}$) 七种单色光 (由单一波长组成的光)。严格地说单色光几乎是不存在的，激光可以说是最接近于理想单色光的光源。

人眼对各种波长的可见光具有不同的敏感性。实验证明，正常人眼对于波长为 555nm 的黄绿色光最敏感，也就是这种波长的辐射能引起人眼最大的视觉，而越偏离 555nm 的辐射，可见度越小。图 1-1 所示为电磁波谱及可见光谱。

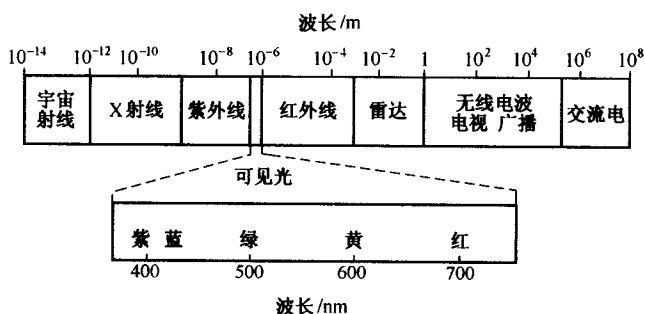


图 1-1 电磁波谱及可见光谱

光源辐射的光往往由许多不同波长的单色光组成。把光线中不同强度的单色光，按波长长短依次排列所形成的光带，称为光源的光谱。白炽灯是辐射连续光谱的光源，气体放电光源除了辐射连续光谱外，还在某些段上辐射很强的线状或带状光谱。具有连续光谱的光源，对物体颜色的显现性能较好。

1.2 光度量

人们进行照明系统的设计和评价时离不开定量的分析和说明，因此在光度学中涉及到一

系列的物理光度量，用以描述光源与光环境的特征。常用的光度量有光通量、[光]照度、发光强度和 [光]亮度等。下面参照建设部 JGJ/T 119—98《建筑照明术语标准》，对常用的光度量加以说明。

一、光通量

光通量 (luminous flux) 是光源在单位时间内发出的光的总量。它表示光源的辐射能量引发人眼产生的视觉强度。

根据辐射对标准光度观察者的作用导出的光度量，对于明视觉有

$$\Phi = K_m \int_0^{\infty} \frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1-1)$$

式中 $d\Phi_e(\lambda)/d\lambda$ ——辐射通量的光谱分布；

$V(\lambda)$ ——光谱光(视)效率；

K_m ——辐射的光谱(视)效能的最大值，单位为流明/瓦 (lm/W)，在单色辐射时，明视觉条件下的 K_m 值为 683lm/W ($\lambda_m=555\text{nm}$ 时)。

光通量的物理量符号为 Φ ，单位为流明 (lm)， $1\text{lm}=1\text{cd} \cdot \text{sr}$ 。

在国际单位制和我国规定的计量单位中，流明是一个导出单位。1lm 是发光强度为 1cd 的均匀点光源在 1sr 立体角内发出的光通量。

在照明工程中，光通量是说明光源发光能力的基本量。例如，一只 40W 白炽灯发出的光通量为 350lm，一只 40W 荧光灯发出的光通量为 2100lm，一只 220V、2000W 溴钨灯的光通量为 45000lm。

发光效率是照明工程中常用的概念。不同的电光源消耗相同的电能，其辐射出的光通量也并不相同，即不同的电光源具有不同光电转换效率。电光源所发出的光通量 Φ 与其消耗的电功率 P 的比值称为该电光源的发光效率。由定义可得发光效率公式为

$$\eta = \Phi/P$$

发光效率 η 的单位是流明/瓦 (lm/W)。

二、照度

表面上一点的照度 (illuminance) 用 E 表示，它是指射入在包含该点的面元上的光通量 $d\Phi$ 除以该面元面积 dA 所得之商，即

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (1-2)$$

简言之，照度是表示受照物体表面每单位面积上接收到的光通量。如果受照表面均匀受光，即受照表面上照度处处相等，则受照表面所接受的光通量为 $E = \frac{\Phi}{A}$ 。

照度的物理量符号是 E ，单位是勒克斯，其符号为 lx。1lx 等于 1lm 的光通量均匀分布在 1m^2 表面上所产生的照度，即 $1\text{lx}=1\text{lm}/\text{m}^2$ 。勒克斯是一个较小的单位，例如：夏季中午日光下，地平面上照度可达 10^5lx ；在装有 40W 白炽灯的书写台灯下看书，桌面照度平均为 $200\sim 300\text{lx}$ ；月光下的照度只有几勒克斯。

照度可以直接相加。如果房间里有 4 盏灯，它们对桌面上 A 点的照度分别为 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 ，则 A 点总照度 E_A 等于 4 个照度值之和，写成通用的表达式就是

$$E = \Sigma E_i \quad (1-3)$$

照度是照明工程各项标准和规范中最常用的物理量。例如，文化部 WH 0201—94 《歌舞厅照明及光污染限定标准》规定歌舞厅表演区照度标准值下限为 100lx，自娱区照度下限值为 20lx；国家标准 GB 50034—2004 规定多功能厅照度标准为 300lx，如此等等。照度的数值可用照度计直接测量读出。

三、发光强度

发光体在给定方向上的发光强度 (luminous intensity) 是该发光体在该方向的立体角元 $d\Omega$ 内传输的光通量 $d\Phi$ 除以该立体角元之商，即单位立体角的光通量，其表达式为

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (1-4)$$

发光强度 (本书中又简称光强) 的符号为 I ，其单位名称是坎德拉 (candela)，单位符号为 cd。坎德拉在过去称为国际烛光，简称烛光。

发光强度是表征光源发光能力大小的物理量，亦即是表示光源向空间某一方向辐射的光通密度。在数量上 1 坎德拉等于 1 流明每球面度 ($1\text{cd}=1\text{lm}/\text{sr}$)。

如果在有限立体角 Ω 内传播的光通量 Φ 是均匀分布的，式 (1-4) 可写成

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \quad (1-5)$$

式中的 Ω 为立体角，其概念可用图 1-2 说明。以任一锥体顶点 O 为球心，任意长度 r 为半径作一球面，被锥体截取的一部分球面面积为 S ，则此锥体限定的立体角 Ω 为

$$\Omega = \frac{S}{r^2} \quad (1-6)$$

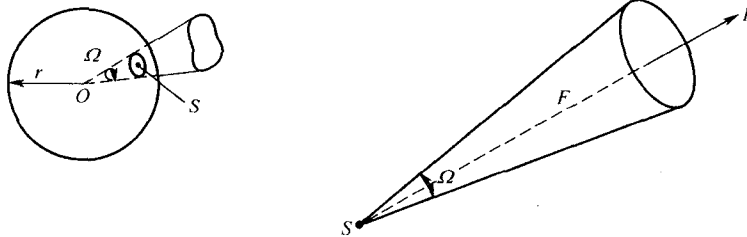


图 1-2 立体角和光强定义

立体角的单位是球面度 (符号为 sr)。当 $S=r^2$ 时， $\Omega=1\text{sr}$ 。因为球的表面积为 $4\pi r^2$ ，所以立体角的最大数值为 4π 球面度。

坎德拉 (cd) 是我国法定单位制与国际单位制的基本单位之一，其他光度量单位都是由坎德拉导出的。1979 年 10 月第 10 届国际计量大会通过的坎德拉定义如下：“一个光源发出频率为 540×10^{12} Hz 的单色辐射，若在一定方向上的辐射强度为 $1/683$ (W/sr)，则光源在该方向上的发光强度为 1cd。”

光强常用于说明光源和照明灯具发出的光通量在空间各方向或在选定方向上的分布密度。例如，一只 40W 白炽灯发出 350lm 光通量，它的平均光强为 $350/4\pi=28\text{cd}$ 。在裸灯上面装一盏白色搪瓷平盘灯罩，灯的正下方光强能提高到 70~80cd。如果配上一个聚焦合适的镜面反射罩，则灯下方的光强可以高达数百坎德拉。在后两种情况下，灯发出的光通量并

没有变化，只是光通量在空间的分布更为集中了。

四、亮度

光源或受照物体反射的光线进入眼睛，在视网膜上成像，使人们能够识别物体的形状和明暗。视觉上的明暗知觉取决于进入眼睛的光通量在视网膜物像上的密度——物像的照度。这说明，确定物体的明暗要考虑两个因素：物体（光源或受照体）在指定方向上的投影面积——这决定物像的大小；物体在该方向上的发光强度——这决定物像上的光通量密度。根据这两个条件，可以建立一个新的光度量——亮度（luminance）。

亮度是由式 $d\Phi/(dA \cdot \cos\theta \cdot d\Omega)$ 定义的量，即单位投影面积上的光强，其表达式为

$$L = d\Phi/(dA \cdot \cos\theta \cdot d\Omega) \quad (1-7)$$

式中 $d\Phi$ ——由给定点的束元传输的并包含给定方向的立体角 $d\Omega$ 内传播的光通量；

dA ——包括给定点的辐射束截面积；

θ ——辐射束截面积与射束方向间的夹角。

亮度的物理量符号为 L ，单位名称为坎 [德拉] 每平方米，符号为 cd/m^2 。

换句话说，光源的亮度是指光源表面沿法线方向上每单位面积的光强。在亮度均匀的条件下，亮度可用式 (1-8) 计算

$$L = \frac{I}{A} \quad (1-8)$$

应当注意，亮度常常在各方向上不相同，所以在谈到一点或一个有限表面的亮度时需要指明方向。

太阳的亮度达 $2 \times 10^9 \text{cd}/\text{m}^2$ ，白炽灯灯丝的亮度为 $(3 \sim 5) \times 10^6 \text{cd}/\text{m}^2$ ，而普通荧光灯的亮度只有 $(6 \sim 8) \times 10^3 \text{cd}/\text{m}^2$ 。

本节介绍的四个光度量有不同的应用领域，并且可以互相换算，可用专门的光度仪器进行测量。光通量表征光源辐射能量的大小。光强用来描述光通量在空间的分布密度。照度说明受照物体的照明条件（受光表面光通密度），它的计算和测量都比较简单，在光环境设计中广泛应用这一概念。亮度则表示光源或受照物体表面的明暗差异。图 1-3 是上述四个物理量的通俗表述。

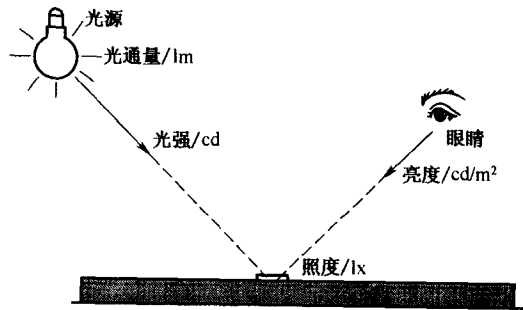


图 1-3 光通量、光强、照度和亮度

1.3 照度定律

“点”光源发出微光束，在景物表面产生的照度为

$$E = \frac{dF}{dS} = \frac{I}{r^2} \cdot \cos\theta \quad (1-9)$$

式中 I ——“点”光源在该方向上的发光强度；

r ——光源到受光处的距离；

θ ——微光束中轴线与受光处表面法线之间的夹角。

由式(1-9)可知，“点”光源在景物表面某处所产生的照度与光源在该方向上的光强成正比，与投光距离的平方成反比，并且与光线入射角的余弦成正比，这个规律称为照度定律。如图1-4所示为照度定律导出示意图。

这里所说的“点”光源，是泛指各种发光的光源或灯具，只要其实体的线度或灯口与投光距离相比足够小，都可将它们视作“点”光源。从这个意义上，舞台照明光源和灯具通常都是“点”光源。

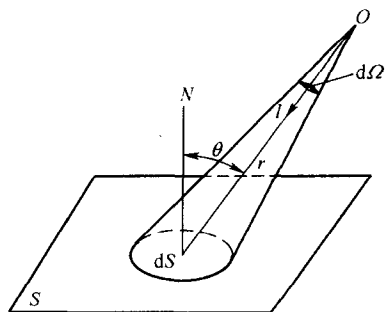


图1-4 照度定律导出示意图

照度定律又可引出两个子定律：照度平方反比定律和照度余弦定律。

1. 照度平方反比定律

当“点”光源在该受光处表面 dS 的法线上，即 $\theta=0^\circ$ 时，式(1-9)又可改写成： $E_0=I/r^2$ 。由此可知，当光线入射角为 0° 时，“点”光源在景物表面上所产生的照度与投光距离的平方成反比，这个规律称为照度第一定律，通常也称为照度平方反比定律。

2. 照度余弦定律

当投光距离不变，光线入射角为 θ 时，则照度定律的表达式可改写成： $E=E_0 \cdot \cos\theta$ 。显然，景物表面各处的照度与光线入射角的余弦成正比。这个定律称为照度第二定律，也称为照度余弦定律。 $\cos\theta$ 是递减函数，即随着光线入射角度 θ 的增大， $\cos\theta$ 函数值减小。因此，对于同一投光距离，光线入射角度愈小，其产生的照度愈大；反之，光线入射角度愈大，则照度愈小。

1.4 颜 色

颜色同光一样，是构成光环境的要素。颜色设计需要运用物理学、心理学及美学等多方面的规律，本节主要讨论颜色的基本特性、表色系统及规定色表与显色性能的方法。这些是颜色科学的基础。

一、颜色的基本特性

1. 颜色的形成

颜色来源于光。可见光包含的不同波长单色辐射在视觉上反映出不同的颜色。在两个相邻颜色范围的过渡区，人眼还能看到各种中间颜色。

一个光源发出的光经常是由许多不同波长单色的辐射组成的，每个波长单色的辐射功率也不一样。光源的各单色辐射功率，按波长进行的相关分布称作光源的光谱功率分布（或称光谱能量分布），它决定着光的色表和显色性能。

物体色是物体对光源的光谱辐射有选择地反射或透射对人眼所产生的感觉。例如，用白光照射物体某一表面，物体吸收白光包含的绿光和蓝光，反射红光，这一表面就呈红光。若用蓝光照射同一表面，它将呈现黑色，因为光源中没有红光成分。反之，若用红光照射该表

面，它将呈现出鲜艳的红色。这个例子说明，物体色决定于物体表面的光谱反射率，同时，光源的光谱组成对于显色也是至关重要的。

2. 颜色的分类

颜色可分为无彩色和彩色两大类。

① 无彩色：指白色、黑色和中间深浅不同的灰色。它们只有明度变化，没有色调和彩度的区别。

② 彩色：指黑白以外的各种颜色。

3. 色彩三要素

任何一种有彩色的表观颜色，都可以按照三个独立的主观属性分类描述，这就是色调、明度和色饱和度，称为颜色感觉三特性，或称为色彩三要素。

① 色调（也称色相，hue，符号为 H）：是指各彩色彼此区分的特性，如红、橙、黄、绿、蓝等。可见光谱不同波长的辐射，在视觉上表现为各种色调取决于该种颜色的主要波长。各种单色光在白色背景上呈现的颜色，就是光谱色的色调。

② 明度（lightness value，符号为 V）：是指颜色相对明暗的特性。彩色光的亮度愈高，人眼愈感觉明亮，它的明度就愈高。物体色的明度则反映为光反射比的变化，反射比大的颜色明度高，反之明度低。

③ 色饱和度（也叫彩度，chroma，符号为 C）：是指彩色的纯洁性，是描述颜色的深浅程度的物理量。可见光谱的各种单色光彩度最高。光谱色掺入白光成分愈多，彩度愈低，当光谱色掺入白光成分比例很大时，有彩色看起来就像无彩色了。

二、颜色的匹配和混合

把一种颜色调节到视觉上与另一种颜色相同或相等的方法叫做颜色匹配。颜色匹配通常是采用不同的颜色混合而得。颜色混合方法分为加混色和减混色两种：

不同的颜色光相混合，属于颜色的相加混合，称为加混色，常用于不同颜色光的灯具同时在舞台布光以及彩色电视的颜色合成等范畴。加混色常采用红（R）、绿（G）、蓝（B）三种颜色光作为三基色。

将不同的物体色（颜料）相混合或不同颜色滤光片的组合，属于颜色的相减混合，称为减混色，常用于彩色绘画、印染技术和舞台灯光的滤光片组合等范畴。减混色常采用加法三基色红、绿、蓝的补色，即青（Cyan，C）、品红（Magenta，M）、黄（Yellow，Y）三种物体色作为三基色。

下面对颜色混合的规律及其在舞台灯光技术中的实际应用作进一步的阐述。

1. 格拉斯曼颜色 [光] 混合定律

实验证明，人眼能够感知和辨别的每一种颜色都能用红、绿、蓝三种颜色匹配出来。但是，这三种颜色中无论哪一种都不能由其他两种颜色混合产生。因此，在色度学中将红、绿、蓝称为三基色或三原色。颜色的相加混合服从于格拉斯曼（H. Grassmann）颜色 [光] 混合定律，其内容如下。

① 人眼视觉只能分辨颜色的明度、色调、彩度三种变化。

② 凡两种颜色按适当比例混合能产生白色或灰色，则这两种颜色称为互补色，如黄和蓝、红和青、绿和品红等。非互补色的任何两种颜色混合，可以产生中间色。色调决定两种颜色的相对比例，它偏向于比重大的颜色。