

**Intelligent Lighting
& Art Lighting System Engineering**

**智能照明
与艺术照明系统工程**

彭妙颜 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

智能照明 与艺术照明系统工程

**Intelligent Lighting
& Art Lighting System Engineering**

彭妙颜 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 简 介

本书内容包括电气照明基础和艺术照明与智能照明两篇。在讲述照明概念、光源、灯具、照明计算及照明控制与调光系统等内容的基础上,重点讲述“艺术照明”和“智能照明”这两个当前迅速发展的领域中应用的新光源(如 LED、激光、冷极管、光纤、等离子体光源)、新灯具(如电脑灯、PIGI灯、多媒体数字灯)、新系统(如数字调光、网络调光、正弦波调光)、新设计理念(如绿色照明、艺术照明)、新设计手段(如灯光系统的计算机辅助设计)和新控制技术(如表演控制 Show Control、智能控制以及视频和灯光融合的控制),并列举了大量最新的数字网络调光、艺术照明和智能照明控制系统的工程实例。

本书可作为智能建筑、照明工程、装饰及环境设计、电化教育(教育技术)、应用电子技术及影视舞台技术等专业的教材或参考教材,也可供从事上述专业设计、生产、研发的人员和工程技术人员参考,并适合工厂企业、机关学校、文艺团体、娱乐场所、体育场馆、剧场影院、音乐厅、博物馆、科技馆、主题公园、广播电视、影像制作和电化教学等部门从事灯光技术和管理工作的人员和照明技术爱好者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

智能照明与艺术照明系统工程/彭妙颜编著. —北京: 中国电力出版社, 2010. 6

ISBN 978-7-5123-0400-0

I. ①智… II. ①彭… III. ①照明-智能系统-系统工程
IV. ①TU113. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 080457 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

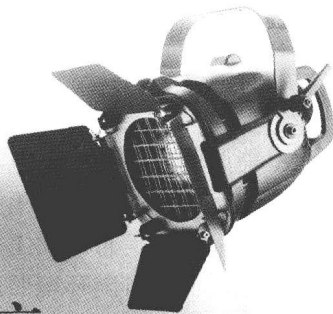
*

2011 年 1 月第一版 2011 年 1 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 31.125 印张 765 千字
印数 0001—3000 册 定价 58.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



前 言

从 1879 年爱迪生发明白炽灯至今,人类应用电光源已有一百多年历史,其间经历了第一代的白炽灯、第二代的荧光灯和第三代的高压气体放电灯(HID)。随着电子技术和信息技术的快速发展,照明技术有了新的飞跃,出现了大量的新光源(如光纤、激光、冷极灯以及被称为第四代的 LED 和等离子体光源)、新灯具(如电脑灯、PIGI 灯、多媒体数字灯)、新系统(如数字调光、网络调光、正弦波调光)、新设计理念(如艺术照明、绿色照明)、新设计手段(如灯光系统的计算机辅助设计)和新控制技术(如表演控制 Show Control、智能控制以及视频和灯光融合的控制)。本书的编写力求紧密围绕上述内容,突出一个“新”字,并把侧重点放在智能照明和艺术照明这两个照明技术新兴领域的工程应用。

全书共 12 章,分为上、下两篇。上篇为电气照明基础,含第一~第六章,讲述要掌握智能照明和艺术照明技术需具备的电气照明基础知识;下篇为艺术照明与智能照明,含第七~十二章,讲述艺术照明及智能照明控制系统的概念、特点、设备、系统组合设计和工程实例。详见内容导读。

艺术照明近年已发展成为现代照明技术中一个引人注目的分支。长期以来照明工程按传统观点分为一般照明(或功能照明)和装饰照明两大类。前者主要指学校教室、实验室、办公室、医院诊室、工厂车间和体育场馆等以功能为主的照明系统;后者则是指广告、橱窗、庭院和景观等以装饰为主的照明系统。但随着照明技术和设计理念的发展,使“照明”的功能和应用出现了新的发展动向。“装饰照明”这个词已无法覆盖这个正在发展的新领域,例如影视舞台照明,就无法列入“装饰”的范畴。而 2008 年北京奥运会开幕式由 44 000 个 LED 组成的“地面卷轴”,以及由 63 套多媒体数字灯投射出 14m 高、500m 长的巨大鸟巢“碗边”和“地球”影像等场景,把灯光与音响、视频、机械动作加上人的动作等元素组合起来的同步表演,给人们带来强烈的视觉冲击和震撼!这种场合的“照明”已上升为一种精心设计的艺术创作,呈现在观众眼前的是一场色彩缤纷的“照明艺术”表演!

从更深一层的意义上看,艺术照明涵盖建筑学、光学、美学、电学、数字技术、计算机和网络技术等多种学科的知识,并涉及艺术素养、文化背景和心理学等多方面的内容,成为技术与艺术紧密结合的一门边缘学科。本书是在讲述电气照明知识的基础上,辟出专门章节深入讲述艺术照明的概念、内容、分类、特点以及艺术照明常用的特殊光源和灯具,如霓虹灯、PIGI 灯、LED 灯、激光灯、等离子体光源和多媒体数字灯等的结构、原理和应用。结合实际重点讲述剧场、影剧院、歌舞厅、多功能厅、音乐喷泉、城市亮化、电视演播厅和体育场馆等照明系统的技术标准、设计要求和设计步骤,并列举了包括 2008 年北京奥运会、2009 年中央电视台春节联欢晚会等多个最新的艺术照明工程典型实例。

现代照明技术的另一引人注目的发展动向是智能照明控制系统技术的推广应用。现代智

能照明控制系统是电子技术、计算机技术、控制技术、网络技术与照明控制技术紧密结合、相互渗透的产物，集强电的供配电和弱电的控制于一体。它具有技术参数的设定、现场数据的采集、信息的加工处理、控制信号的输送、受控对象被控和被控后信息的反馈等先进功能。例如可随环境照度或时间自动控制灯具的开关，根据设定自动调光，按照预先设定的各项照明参数随机控制，以及采用人体感应或动静感应等方式自动控制开关灯等，从而达到满足生产、工作、学习、生活、运营及节约能源和节省劳动力等多方面需求的目的。

本书辟出专门章节深入讲述智能控制的概念、功能、特点、适用范围、系统组成和技术指标，并列举了多个智能家居、智能会议室、智能演播厅、多功能厅、智能酒店、智能会展中心、智能科技馆、智能主题公园以及声像灯光同步表演等控制系统的典型工程实例。

随着我国经济发展、人民生活提高，特别是文化艺术、体育事业的蓬勃发展，急需大批从事电气照明(包括艺术照明、智能照明)设备与系统设计、安装、调试、维修、管理和操作的人员，他们迫切需要掌握有关的技术知识。行业内许多单位亦需要进行员工的技术培训。各大、中专和职业技术学院开设与智能照明和艺术照明相关的专业课程，同样需要这方面的教材。本书的编写一方面是作为广州大学声像灯光工程专业(本科)课程的教材，同时也是希望能在艺术照明和智能照明这个技术领域的传播、推广和普及工作中发挥一点微薄的力量。

照明技术涵盖的范围很广，本书以有限的篇幅，力求理论与实践相结合，使内容深入浅出。在系统而简要地讲述一般电气照明技术基本原理知识的基础上，把侧重点放在艺术照明和智能照明控制设备与系统的结构、原理、系统集成和工程设计应用，并举出较多的工程实例。为便于与国际接轨，本书所涉及的主要专业名词首次出现时都尽量给出对应的英文名称，这也是本书的特色之一。

本书编写过程中得到广大电气照明设备的生产、销售、工程企业和系统集成商等单位的支持，是他们提供了大量最新的技术资料及编写意见和建议，使本书能较好地反映出当今国内外艺术照明和智能照明控制系统领域方面的新技术、新工艺、新设备、新设计思想和最新的工程实例。在此特别鸣谢以下单位：河东、SMART HOME、励丰、High End、斯全德、珠江、雅江、马田、南艺、天鹰、世奇、邦奇、凯图、奇胜、路创、飞利浦、泰立、南视、飞达、GE、方达、新舞台、南特、ETC、Crestron、Alcorn McBride、联盛、环宇激光、浩洋、AMX、ACE、复旦大学、中国建筑标准设计研究院、北京电光源研究所等国内外知名灯光及智能系统企业和科研机构。

本书的出版得到广东省工业攻关项目(“大型场馆数字网络声像灯光智能控制与科学管理系统研究开发”，编号：2006B11501006，项目主持：彭妙颜)、广州市科技攻关项目(“声像灯光网络化中央集控平台及校准”，编号：2006Z3-D0171，项目主持：彭妙颜)和广州大学教材出版基金的支持。

罗宇敏、叶煜晖、钟锐等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，在此一并向他们表示感谢。本书编写过程中还参阅和引用了大量的著作、刊物和网站上的文献，在此特向这些文献的作者表示衷心的感谢。

本书可作为大专院校智能建筑、照明工程、电化教育(教育技术)、应用电子技术、装饰与环境设计及影视舞台技术等专业相关课程的教材或参考教材，也可供从事上述专业设计、生产、研发的人员及工程技术人员参考。由于书中大量深入浅出的讲述和实例，因而也适合工厂企业、机关学校、文艺团体、娱乐场所、体育场馆、剧场影院、博物馆、科技馆、主题

公园、广播电视、影像制作、电化教学(教育技术)等部门从事灯光技术和管理工作的人员和照明技术爱好者阅读。

作者祈望能以本书为桥梁,与广大从事照明技术的同行进行交流,也希望对新入门的专业照明工作者和广大照明技术爱好者有所帮助。

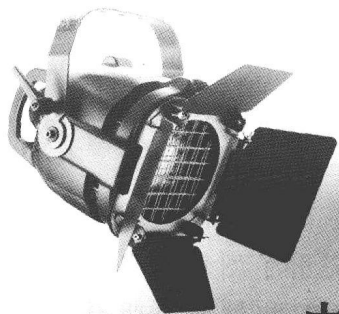
由于本书内容较新、涉及面广,加上编者水平有限,不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

E-mail: gzhuvl@21cn.com

<http://avl.gzhu.edu.cn>

广州大学声像与灯光技术研究所
广东中南声像灯光设计研究院

彭妙颖



内容导读

全书共 12 章，分为上、下两篇。

上篇为电气照明基础，含第一～第六章，讲述为掌握智能照明和艺术照明技术需具备的电气照明基础知识。

下篇为艺术照明与智能照明，含第七～十二章，讲述艺术照明及智能照明控制系统的概念、特点、设备、系统组合设计和工程实例。

各篇章的主要内容和重点扼要介绍如下：

上篇 电气照明基础

第一章 光与颜色。讲述光与颜色的基本概念，重点讲述光度量(光通、照度、亮度)、色彩三要素、加混色、减混色、色温和显色指数等概念，其中表色系统部分内容涉及较多光学理论，非光学专业的读者了解即可。

第二章 电光源。讲述常用照明电光源(白炽灯、卤钨灯、荧光灯、高压汞灯、金属卤化物灯、钠灯、氙灯等)，重点介绍近年在艺术照明和智能照明领域广泛应用且迅速发展的新光源，如 LED、冷阴极荧光灯和等离子体光源等的结构、特点和工程应用。

第三章 照明灯具。讲述一般照明灯具的分类、特点和应用，重点突出影视舞台常用灯具和新型的 LED 灯具。

第四章 照明计算。讲述照明计算的内容、基本定律和计算方法，重点突出艺术照明设计常用的单位容量法、容量估算法和概算曲线法等。

第五章 照明供配电系统。讲述照明供配电系统的组成，控制电器和导线电缆的选择，照明负荷计算和系统接地的要求。

第六章 照明控制及调光系统。主要讲述影视舞台灯光的控制系统，包括模拟调光、数字调光、网络调光及正弦波调光系统的结构、原理及应用。

下篇 艺术照明与智能照明

第七章 艺术照明特殊光源和灯具。介绍艺术照明的概念和特点，重点讲述主要用于景观照明、歌舞厅照明和“表演控制”照明等场合的特殊光源和灯具，如霓虹灯、紫外线灯、频闪灯、激光灯、光纤照明、PIGI 灯、电脑灯和多媒体数字灯等的结构、原理和应用，并列举出北京第 29 届奥运会开幕式和 2009 年

中央电视台春节联欢晚会等工程应用方案实例。

第八章 照明系统工程设计。在介绍照明系统的组成、分类、设计内容和步骤的基础上，讲述国内外有关各类场所的照明标准，其中突出了剧场、影剧院、会议电视会场、歌舞厅、多功能厅、电视演播厅、体育场馆和景观照明系统的设计要求和步骤；并列举了琴台大剧院、1800m²电视演播厅、黄埔足球场和古镇多功能体育馆等多个照明系统工程实例，附有详尽的设计资料。

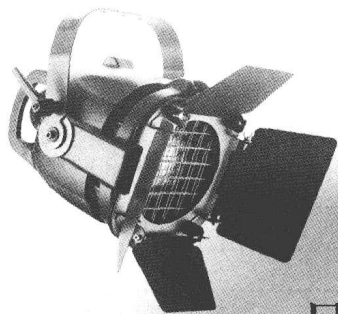
第九章 智能照明控制系统的结构原理。介绍智能照明控制的内容、功能、特点和适用范围，重点讲述智能照明系统的组成、技术指标(对国内外 14 个常见的智能照明品牌的指标列表对比)以及信号发生/接收器、传感器、控制器、执行器、调光器等部件的结构原理；并列举出智能家居、智能演播厅、多功能厅和智能酒店客房等的照明控制系统集成方案。

第十章 智能照明控制系统的工程应用。具体介绍多个智能家居(SMART HOME)、电视演播室、多功能会堂、会展中心、多功能会议室、酒店(客房、宴会厅、停车场)、体育馆、写字楼、机场和声像灯光同步表演等不同类型的智能照明控制系统工程设计实例。其中重点举出 50 万 m² 的大型国际会议展览中心、电视台小型演播室、中型多功能(会议、文艺演出、放映电影)会堂、上海杜莎夫人蜡像馆、广州珠江两岸灯光/音响/视频表演控制系统和海南南山观音景观照明等典型智能照明控制系统工程实例，均附有较详细的工程设计资料和文字说明。

第十一章 照明系统的计算机辅助设计。扼要介绍影视舞台灯光(特别针对电脑灯具)系统常见的 Martin Show Designer、Lighting Studio、Daslight 和 Sun-life 等设计软件的应用。

第十二章 照明测量。介绍常用的光学测量仪器，包括“光色电检测分析系统”等新型测量设备的特点和应用，并结合有关的国家标准，讲述各类影视舞台灯具的数据测量方法和室内外现场(重点突出体育场馆)的照度、色温和显色指数的测量方法，并有具体实例。

附录 低压电器的图形符号与文字符号，供照明系统设计出图参考。



目 录

前言
内容导读

上篇 电气照明基础

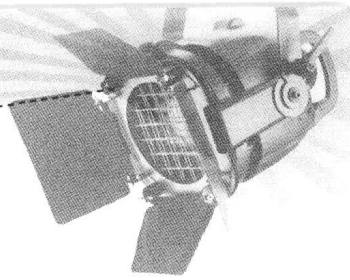
第一章 光与颜色	1
第一节 光.....	1
第二节 光度量.....	2
第三节 颜色.....	4
第二章 电光源	17
第一节 白炽灯	17
第二节 卤钨灯	18
第三节 荧光灯	20
第四节 高压汞灯	23
第五节 金属卤化物灯	24
第六节 高压钠灯	25
第七节 氙灯	26
第八节 低压钠灯	27
第九节 冷阴极荧光灯(冷极管)	28
第十节 发光二极管(LED)	28
第十一节 等离子体无极光源	33
第十二节 照明电光源性能比较	48
第三章 照明灯具	50
第一节 灯具的作用和特性	50
第二节 灯具的分类	51
第三节 灯具光强和照度的空间分布	55
第四节 影视舞台灯具	59
第五节 LED 艺术照明灯具	68

第四章 照明计算	80
第一节 照明计算的基本概念	80
第二节 直射照度的计算	81
第三节 平均照度的计算	86
第五章 照明供配电系统	104
第一节 照明供配电系统的组成	104
第二节 照明控制电器	104
第三节 照明供配电系统	111
第四节 照明负荷计算	117
第五节 导线、电缆的选择和敷设	122
第六节 系统接地	127
第六章 照明控制及调光系统	135
第一节 照明控制的基本概念	135
第二节 模拟调光控制系统	142
第三节 数字调光控制系统	151
第四节 网络调光控制系统	168
第五节 正弦波调光系统	179

下篇 艺术照明与智能照明

第七章 艺术照明特殊光源和灯具	183
第一节 概述	183
第二节 艺术照明用特殊光源	184
第三节 艺术照明用效果灯具	193
第四节 电脑灯	196
第五节 电脑灯控制系统	201
第六节 从 LED 到多媒体数字灯	220
第七节 换色器	235
第八章 照明系统工程设计	238
第一节 照明系统工程设计基础	238
第二节 照明标准	240
第三节 剧场及歌舞厅照明系统工程设计	250
第四节 多功能会议厅照明系统工程设计	279
第五节 影视演播厅照明系统工程设计	283
第六节 体育场馆照明系统工程设计	289
第七节 景观照明	309
第九章 智能照明控制系统的结构原理	326

第一节	概述	326
第二节	智能照明控制系统的技术特性	332
第三节	智能照明控制系统的结构原理	335
第四节	HDL-BUS 智能照明系统简介	345
第十章	智能照明控制系统的工程应用	357
第一节	智能家居	357
第二节	小型电视新闻演播室	364
第三节	多功能会堂	367
第四节	会议展览中心	372
第五节	多功能会议室	374
第六节	贵宾接待厅	378
第七节	小型餐馆	382
第八节	酒店	384
第九节	体育馆	390
第十节	写字楼(办公楼)	391
第十一节	机场	392
第十二节	智能化声像灯光同步表演系统	393
第十一章	照明系统的计算机辅助设计	406
第一节	Martin Show Designer 马田专业灯光设计软件	406
第二节	Lighting Studio 灯光设计软件	411
第三节	Daslight Virtual 3D Simulator 视像三维设计软件	415
第四节	Sunlite Magic 3D Easy View 专业灯光设计软件	419
第十二章	照明测量	427
第一节	光电探测器件	427
第二节	照明测量仪器	428
第三节	光源的参数测量	434
第四节	灯具的光学参数测量	439
第五节	照明效果的现场测量	449
附录	低压电器的图形符号与文字符号	470
参考文献		486



上篇 电气照明基础

第一章 光 与 颜 色

第一节 光

一、可见光

光 (light) 是一种属于一定波长范围内的电磁辐射。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 380~780nm 范围内 ($1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$)。可见光又可分为红 (780~630nm)、橙 (630~600nm)、黄 (600~570nm)、绿 (570~490nm)、青 (490~450nm)、蓝 (450~430nm) 和紫 (430~370nm) 7 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, 即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。

二、紫外线和红外线

波长比紫光短的光称为紫外线 (ultraviolet, UV); 波长比红光长的光称为红外线 (infrared, IR)。两者都是人眼看不见的。紫外线有杀菌和激发黑光荧光材料的功能; 红外线则可用于加热、理疗和某些工业用途。

三、光谱

光源辐射的光往往由许多波长的单色光组成。把光线中不同强度的单色光按波长长短依次排列, 称为光源的光谱 (spectrum, 见图 1-1)。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。

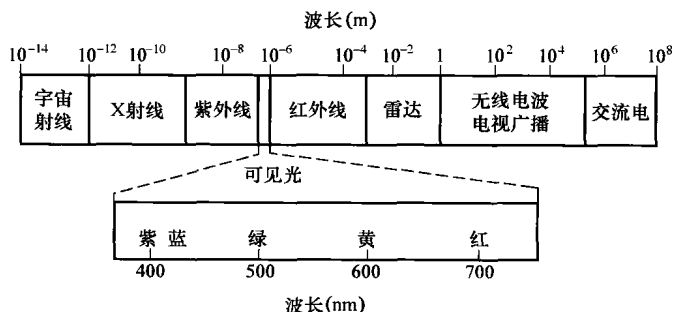


图 1-1 电磁波谱及可见光谱

第二节 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。下面参照建设部标准 JGJ/T 119—1998《建筑照明术语标准》和 GB 50034—2004《建筑照明设计标准》,对常用的光度量加以说明。

一、光通量

光源在单位时间内发出的光的总量称为光源的光通量 (luminous flux),符号为 Φ ,单位为流明 (lm)。它是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

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

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,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), lm/W。

在国际单位制和我国规定的计量单位中,流明 (lm) 是一个导出单位。1lm 是发光强度为 1cd 坎德拉的均匀点光源在 1sr 球面度立体角内发出的光通量, $1\text{lm}=1\text{cd} \cdot 1\text{sr}$ 。

在照明工程中,光通量是说明光源发光能力的基本量。它表示光源的辐射能量引发人眼产生的视觉强度。例如,一只 40W 白炽灯发射的光通量为 350lm;一只 40W 荧光灯发射的光通量为 2100lm,一只 220V 2000W 溴钨灯的光通量则达到 45 000lm。

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的光电转换效率。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

$$\eta = \Phi / P$$

式中 η ——发光效率, lm/W。

二、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 $d\Phi$ 除以该立体角元所得之商,即单位立体角的光通量,其公式为

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (1-2)$$

发光强度简称光强,符号为 I ,单位是坎德拉 (candela),符号为 cd。发光强度过去称为国际烛光,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 (1-2) 可写成

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \quad (1-3)$$

发光强度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 白炽灯泡发出 350lm 光通量，它的平均光强为 $350/4\pi=28$ (cd)。在裸灯泡上面装一盏白色搪瓷平盘灯罩，灯的正下方发光强度能提高到 70~80cd。如果配上一个聚焦合适的镜面反射罩，则灯下方的发光强度可以高达数百坎德拉。在后两种情况下，灯泡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。

三、照度

表面上一点的照度 (illuminance) 是入射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

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (1-4)$$

简言之，照度是表征被照明程度的量，它等于受照物体表面每单位面积上接收到的光通量数。如果受照表面均匀受光，即表面上照度处处相等，则受照面所接受的光通量为

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (1-5)$$

照度的单位是勒克斯，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 $1lx=1lm/m^2$ 。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 200~300lx；月光下的照度只有几个勒克斯。

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

$$E = \sum E_i \quad (1-6)$$

照度是照明工程各项标准和规范中最常用的物理量。例如文化部标准 WH 0201—1994《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；GB 50034—2004《建筑照明设计标准》规定学校教室课桌面照度标准为 300lx，如此等等。照度的数值可用照度计直接测量读出。

四、亮度

亮度 (luminance) 是由公式 $d\Phi/(dA\cos\theta d\Omega)$ 定义的量。光源在给定方向上的亮度是指光源在该方向的单位投影面上的发光强度，其公式为

$$L = dI/(dA\cos\theta) \quad (1-7)$$

将式 (1-7) 与式 (1-2) 比较，可得

$$L = d\Phi/(dA\cos\theta d\Omega) \quad (1-8)$$

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 ——包括给定点的射束截面积；

θ ——射束截面积与射束方向间的夹角。

亮度的符号为 L ，单位为坎德拉每平方米 (cd/m^2)。

在被光均匀照射的条件下，亮度 L 可用下式计算

$$L = I/A \quad (1-9)$$

式中 I ——发光强度，cd；

A ——沿法线方向的发光面积， m^2 。

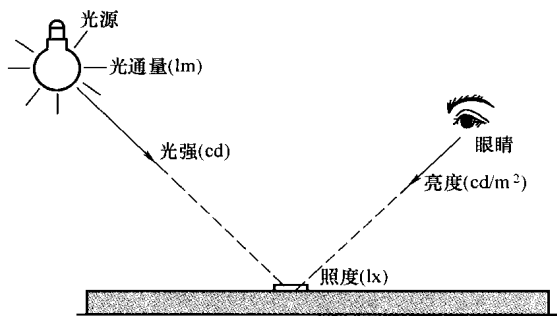


图 1-2 光通量、发光强度、照度和亮度

五、小结

本节介绍的 4 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；发光强度用来描述光通量在空间的分布密度；照度说明受照物体被照明的程度（受光面的光通密度），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的明暗差异。图 1-2 所示是上述 4 个物理量的通俗表述。

第三节 颜 色

一、颜色的特性

（一）颜色的定义

颜色（colour）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。GB/T 2900.65—2004《电工术语照明》中对“颜色”的定义为：由彩色和非彩色成分的任意组合所构成的目视知觉的属性。该属性可以用彩色名称，例如：黄色、橙色、棕色、红色、粉色、绿色、蓝色、紫色等；或用非彩色名称，如白色、灰色、黑色等；并用光亮、暗淡、明亮、黑暗等修饰词；或用这些名称的组合来描述。

（二）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。

（三）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，即色调、明度和彩度，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 H ）。是各彩色彼此区分的特性，亦即是指颜色的类别，如红、橙、黄、绿、蓝等。光源的色调取决于辐射的光谱组成对人眼所产生的感觉；物体的色调取决于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。

（2）明度（lightness，符号 V ）。是指颜色相对明暗的特性。彩色光的亮度越高，人眼越感觉明亮，它的明度就越高。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（saturation，符号 S ，也叫彩度 chroma，符号 C ）。指的是彩色光的纯洁度，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越多，彩度越低；当光谱色掺入白光成分比例很大时，看起来有彩色就变成无彩色了。通常把色调和色饱和度合称为色度（chromaticity），它既说明彩色光的颜色亮度，又说明颜色的深浅程度。色度再加上亮度，就能对颜色作完整的说明。非彩色光只有亮度的差别，因而

设有色调和饱和度这两种特性。

二、颜色的混合

不同颜色混合在一起，能产生新的颜色，这种方法称为混色法。颜色混合方法分为加混合色和减混合色两种（见图 1-3）。

（一）颜色光相加混合的规律

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。实验证明人眼能够感知和辨认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（red，简称 R）、绿（green，简称 G）、蓝（blue，简称 B）称为三原色或三基色（three primary colors）。加混色常采用红（R）、绿（G）、蓝（B）三种颜色光作为三原色，称为 RGB 混色。

从图 1-3（a）中可见相加混色的一些规律，如：红色 + 绿色 = 黄色；绿色 + 蓝色 = 青色；红色 + 蓝色 = 紫色；蓝色 + 黄色 = 白色；红色 + 青色 = 白色；绿色 + 紫色 = 白色；红色 + 绿色 + 蓝色 = 白色。

凡两种颜色按适当的比例混合能产生白色或灰色，则这两种颜色称为互补色。因为“蓝色 + 黄色 = 白色”，所以称蓝色是黄色的补色，黄色是蓝色的补色。同样，红色和青色互为补色，绿色和紫色互为补色。

颜色光的相加混合有以下三种方法：

（1）直接混色法（光谱功率混合法）。例如把三种色光同时投射到一个舞台的白色天幕幕布上，通过三种基色的不同比例直接合成彩色，称为直接混色法。来自各灯位的光束的交汇和叠加，能产生极其丰富的颜色光混合的效果。三管式投影机配置红、绿、蓝三支投影管也是按这种三基色叠加方式工作的。

（2）空间混色法。如彩色显像管是把三基色的光以同一表面上每三个（红、绿、蓝）很小且靠得很近的光点（像素）表现出来，人眼在一定距离上观看就会产生三基色混合的感觉。LED 显示屏中，红、绿、蓝三种发光二极管靠得很近，远看就是一幅彩色的图像。

（3）时间混色法。将三基色光按一定顺序快速地轮流作用于人的眼睛，只要轮换的速度足够快，由于人眼的视觉惰性（视觉暂留特性），看到的就是三基色的混合色。在 20 世纪 50 年代彩色电视发展的初期，曾采用过“顺序制彩色电视系统”，发射台用一个通道快速地轮流传送三个基色电信号，在用户的接收机端即能显示一幅完整的彩色图像。

（二）颜色相减混合的规律

不同的物体色（彩色涂料）的混合，或者不同颜色滤光片的组合，属于颜色的相减混合，称为减混色。这是一种将混合光中减去（滤去或吸收掉）某一种或几种色光的方法，常用于色彩绘画、印染技术和舞台灯光的滤光片组合等领域。彩色涂料对于光的选择反射就是

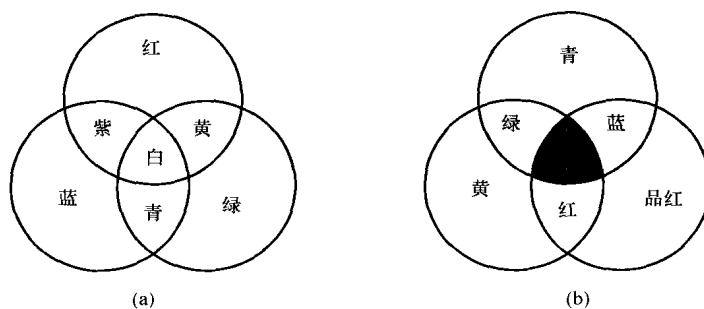


图 1-3 加混合色和减混合色
(a) 相加混合（光）；(b) 相减混合（物体色）

颜色相减的过程。深红色的颜料吸收了白光中大量的蓝和绿，只反射红色。

几种颜色混合之后表现出来的彩色，是被各种颜料共同吸收之后剩余的色光。例如黄色颜料，能吸收蓝光而反射红光与绿光，所以在白光照射之下红光和绿光混合而呈现黄色；青色颜料则吸收红光而反射绿光和蓝光，所以在白光照射之下绿光与蓝光混合而呈现青色；当把黄色和青色两种颜料混合之后，既能吸收蓝光，又能吸收红光，所以在白光照射之下（可以看成是红、绿、蓝的混合体）只有绿光被反射出来，而呈现为绿色。同样的道理，舞台灯具加上滤色片，入射光通过滤色片被减掉一部分光谱辐射功率。例如一块黄色的滤光片由于减掉了蓝色，透过红色和绿色，红光和绿光混合而呈现黄色（见图 1-4）。

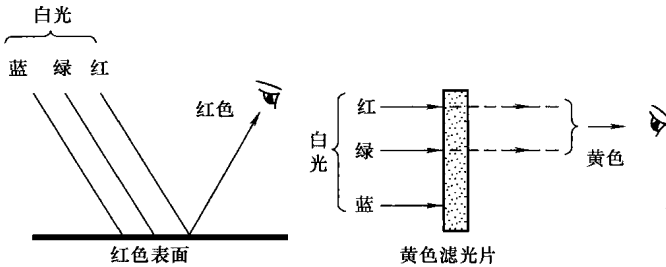


图 1-4 颜料与彩色滤光片的减色原理

在颜色减法混合中应用的三个减法原色，分别是加法三原色红、绿、蓝的补色，即青（cyan，简称 C）、品红（magenta，简称 M）和黄（yellow，简称 Y）[见图 1-3（b）]，因而被称为 CMY 混色。它们能分别吸收各自的补色光，即红、绿、蓝光。例如：青色吸收光谱中红色部分，反射其他波长辐射，称为“减红”原色，“减红”原色印在白纸上用白光照射时呈现蓝绿色，即青色。品红为“减绿”原色，印在白纸上为红紫色，称为品红。“减蓝”原色印在白纸上则呈现黄色。

当两种颜料混合或两个滤光片重合时，有重叠相减的效果，并且相减混合得到的颜色总要比原有的颜色暗一些。例如，将黄色滤光片与青色滤光片重合，由于黄片减蓝，青片减红，重叠相减只透过绿色。同样，品红和黄色颜料混合，因品红减绿，黄色减蓝而呈红色。若将品红、黄、青三种减法原色混合在一起，则所有彩色全被减掉而呈现黑色。

三、颜色的定量——表色系统

日常我们习惯用自然界的景物来描述颜色，如海蓝、桃红、苹果绿等。这种叫法不能正确地表达颜色特征和说明颜色之间的细微差别。为了精确地规定颜色，不但要定性，而且要建立定量表示光源和物体颜色的系统，称为表色系统。

目前国际上使用较普遍的表色系统有两大类，即孟塞尔表色系统和 CIE 表色系统。下面分别作一简介。

（一）孟塞尔表色系统

颜色有三个基本特性，即色调 H 、明度 V 和彩度 C 。孟塞尔系统采用一个三维的颜色立体将这三个特性全部表示出来 [见图 1-5（a）]。在模型的中央是一根表示明度的轴线，它代表无色白黑系列中性色。白色在顶部，黑色在底部。将理想白色和理想黑色的明度值分别定为 10 和 0，孟塞尔明度值共分成 0~10 共 11 个在感觉上等距的等级。

图 1-5（b）所示为孟塞尔颜色立体的水平剖面图，每一个水平剖面对应于一个明度值，水平剖面上的各个方向代表不同的色调。图中画出了 5 种主要色调：红（R）、黄（Y）、绿（G）、蓝（B）和紫（P）。还画出了 5 种中间色调：黄红（YR）、绿黄（GY）、蓝绿（BG）、紫蓝（PB）和红紫（RP）。每一色调又分成从 1~10 的 10 个等级，并规定主要色调和中间色调的等级值都为 5。颜色沿径向的变化则代表颜色饱和度（即深浅）的变化，在孟塞尔系