

南京工业大学教学改革基金资助

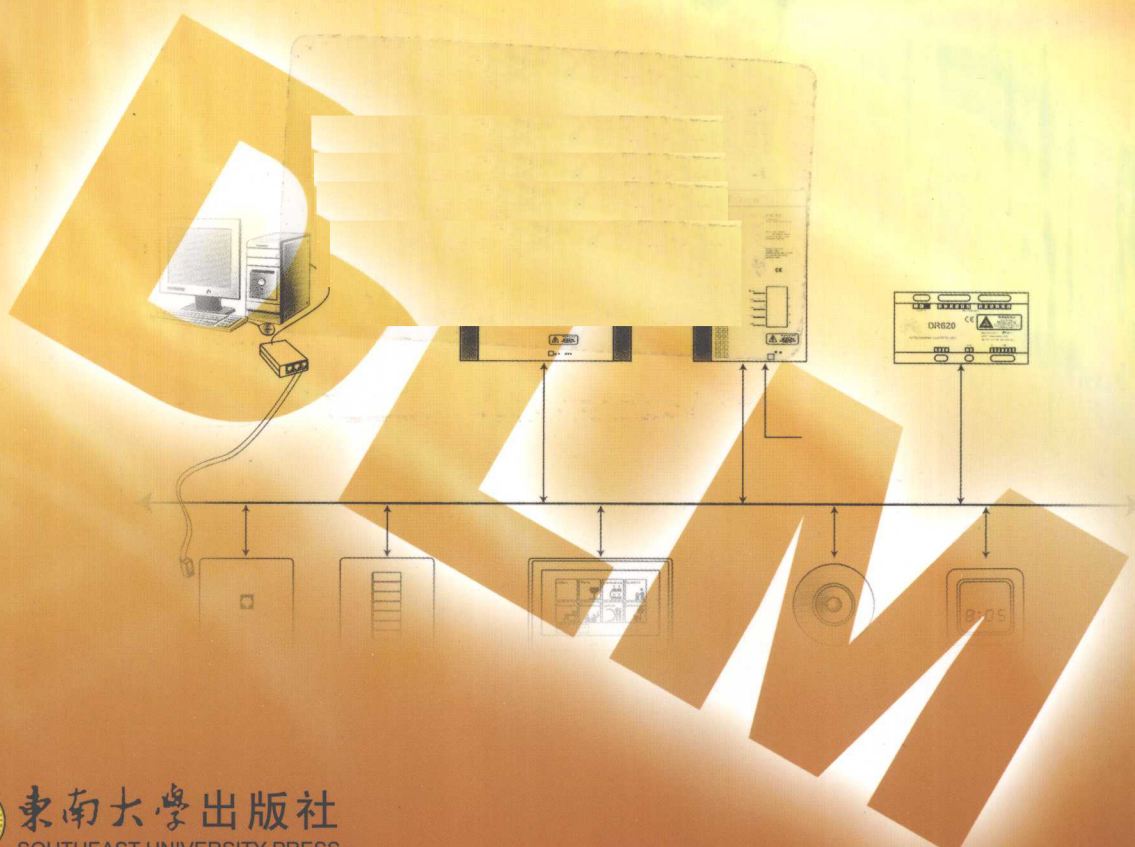
ZHINENG ZHAOMING  
KONGZHI XITONG

# 智能照明控制系统

主 编 马小军

副主编 耿晓春

主 审 张九根



东南大学出版社  
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

# 智能照明控制系统

主 编 马小军  
副主编 耿晓春  
参 编 周玉庭 杨 静  
        孙宏彬  
主 审 张九根

东南大学出版社  
·南京·

## 内 容 提 要

本书分析和介绍智能照明控制系统的工作原理及其在建筑领域的应用知识。全书共7章。第1章介绍照明基础知识。第2、第3章分别介绍照明控制、调光以及网络通信原理和有关智能照明控制的通信协议。第4章介绍智能照明控制系统结构及工作原理,分析智能照明控制方法和策略。第5章介绍建筑智能照明控制系统设计原则、方法和步骤;对系统设备的选择和安装也做了详细介绍,最后举例说明系统工程设计和节能效果。第6、第7章分别介绍国内外知名厂家产品和可供借鉴的应用以及工程设计实例。

本书在编写上力求突出针对性、实用性和先进性。叙述方法深入浅出、主次分明、详略得当,尽可能体现出专业特色。本书适用于高等学校建筑电气与智能化、电气工程及其自动化、光源与照明、工业自动化、信息电子专业及其他相关专业。本书对建筑和环境艺术设计类专业的学生、从事建筑智能化的工程技术人员以及灯光设计师来说也是一本很好的学习教材和技术参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

智能照明控制系统/马小军主编. —南京:东南大学出版社,2009.12

ISBN 978-7-5641-1905-8

I. 智… II. 马… III. 照明-智能控制-控制系统-设计-国集 IV. TU113.6-64

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第189533号

### 智能照明控制系统

---

出版发行 东南大学出版社  
出版人 江汉  
社 址 南京市四牌楼2号  
邮 编 210096

---

经 销 江苏省新华书店  
印 刷 江苏凤凰盐城印刷有限公司  
开 本 787 mm×1092 mm 1/16  
印 张 21.75  
字 数 540千字  
版 次 2009年12月第1版  
印 次 2009年12月第1次印刷  
印 数 1—2000  
书 号 ISBN 978-7-5641-1905-8  
定 价 42.00元

---

(凡因印装质量问题,请与我社读者服务部联系。电话:025-83792328)

# 前 言

照明是建筑电气与智能化专业的一门主干课。随着人民生活水平不断提高,人们对于照明的要求也发生了很大的改变。尤其在一些中高档的建筑中,照明不再单纯地为满足人们视觉上的明暗效果,更应具备多种控制方案,使建筑物更加生动,艺术性更强,给人以丰富的视觉效果和美感。智能照明控制系统正是一个集多种照明控制方式、现代化数字控制技术和网络技术为一体的控制系统,它的出现和发展,不仅为建筑照明提供了多种艺术效果,而且使照明控制和维护管理变得更为简单。现阶段,由于节能环保的需求,智能照明控制系统被越来越广泛地接受和应用,这类产品和生产商更是层出不穷。如何选用最佳的智能照明控制系统,实现经济性与艺术性的良好统一,是值得研究和探讨的一个课题。

目前,国内有关《智能照明控制系统》的专门书籍很少,而教材更是贫乏。在南京工业大学教学改革基金资助下,我们着手编写了这本《智能照明控制系统》教材。本书在编写上力求突出针对性、实用性和先进性。叙述方法深入浅出、主次分明、详略得当,尽可能体现出专业实用的教材特色。本书适用于高等学校建筑电气与智能化、电气工程及其自动化、工业自动化、信息电子、光源与照明等专业及其他相关专业。本书对与建筑和环境艺术设计类相关专业的学生和从事建筑智能化的工程技术人员来说也是一本较好的学习教材和技术参考书。

本书作者均是从事建筑电气与智能化的教学和工程设计人员。本书由南京工业大学马小军任主编,负责全书的编写组织及统稿工作,并编写绪论、第2、4章和第5、6章部分内容;耿晓春任副主编,参与本书策划并编写第7章和部分附录;周玉庭编写第1章;杨静编写第3章;南京市建筑设计院孙宏彬编写第5、6章部分内容及部分附录。本书由南京工业大学自动化与电气工程学院张九根副院长审稿,对书稿提出了许多中肯和建设性意见。

本书在编写过程中参阅了大量的著作、期刊和学术论文以及网站文献,在此特向这些文献的作者表示衷心的感谢。另外,在编写中还得到了邦奇电子上

海办事处、广州河东企业、立维腾公司南京办事处、施耐德-奇胜等国内外知名照明公司的大力支持和帮助,为本书编写提供了大量的技术资料。研究生臧增辉、刘向绘制部分插图和整理文字资料。在此一并表示衷心的感谢。

最后,还要特别感谢东南大学出版社朱珉编辑及相关工作人员,如果没有他们的努力和辛勤劳动,本书不会这样快就出版。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中疏漏或不妥之处,恳请读者批评指正,提出宝贵意见。

为方便教师教学,还将提供电子课件,有需要者请与主编联系,电子邮箱: mayy@jlonline.com。

编 者

2009年9月

# 目 录

<b>0 绪论</b> .....	( 1 )
<b>1 照明基础知识</b> .....	( 4 )
1.1 光、视觉和颜色.....	( 4 )
1.1.1 光的基本概念 .....	( 4 )
1.1.2 光的常用度量 .....	( 5 )
1.1.3 光的传播和材料的光学性质 .....	( 11 )
1.1.4 光与视觉 .....	( 17 )
1.1.5 光与颜色 .....	( 19 )
1.2 照明光源 .....	( 27 )
1.2.1 电光源的种类 .....	( 27 )
1.2.2 热辐射光源 .....	( 27 )
1.2.3 气体放电发光光源.....	( 30 )
1.2.4 其他光源 .....	( 34 )
1.3 照明灯具 .....	( 35 )
1.3.1 照明器的配光特性.....	( 35 )
1.3.2 照明器的亮度分布和保护角 .....	( 36 )
1.3.3 照明器的效率 .....	( 37 )
1.3.4 照明器的分类 .....	( 37 )
1.4 照明计算 .....	( 42 )
1.4.1 等效反射比 .....	( 42 )
1.4.2 一般照明平均照度的计算 .....	( 46 )
习题与思考题 1 .....	( 51 )
<b>2 照明控制及调光</b> .....	( 53 )
2.1 照明控制原理 .....	( 53 )
2.1.1 照明控制设备 .....	( 53 )
2.1.2 开关控制 .....	( 55 )
2.1.3 调光控制 .....	( 59 )
2.1.4 色彩控制 .....	( 68 )
2.2 模拟调光 .....	( 70 )
2.2.1 晶闸管的基本特性及触发电路 .....	( 70 )

2.2.2	模拟调光器 .....	(72)
2.3	数字调光 .....	(74)
2.3.1	数字化的基本概念 .....	(74)
2.3.2	调光控制系统的数字化 .....	(75)
2.3.3	数字调光器 .....	(75)
2.4	传感器 .....	(78)
2.4.1	传感器的分类 .....	(78)
2.4.2	时钟控制器 .....	(78)
2.4.3	人员动静传感器 .....	(79)
2.4.4	照度传感器 .....	(83)
2.4.5	红外遥控传感器 .....	(86)
2.4.6	声控传感器 .....	(87)
	习题与思考题 2 .....	(87)
<b>3</b>	<b>通信与协议</b> .....	(88)
3.1	网络概述 .....	(88)
3.1.1	网络设备简介 .....	(88)
3.1.2	数据通信基础 .....	(90)
3.1.3	传输介质和拓扑结构 .....	(94)
3.1.4	网络体系结构 .....	(95)
3.2	照明控制的网络技术 .....	(97)
3.3	DALI 协议 .....	(103)
3.3.1	DALI 协议概述 .....	(103)
3.3.2	DALI 协议的电气特征和应用 .....	(103)
3.3.3	DALI 协议的数据通信 .....	(105)
3.3.4	DALI 技术与模拟技术的比较 .....	(106)
3.4	DMX 512 协议 .....	(107)
3.4.1	DMX 512 协议概述 .....	(107)
3.4.2	DMX 512 协议的数据格式 .....	(108)
3.4.3	DMX 512 协议的连接与实现 .....	(110)
3.4.4	ACN 协议和 Art-Net 协议 .....	(112)
3.4.5	基于 DMX 512 协议和 Art-Net 协议的调光系统的比较 .....	(114)
3.5	CAN 总线 .....	(115)
3.5.1	CAN 总线的发展历史 .....	(115)
3.5.2	CAN 总线的基本概念 .....	(116)
3.5.3	CAN 总线协议 .....	(117)

---

3.6	EIB 协议	(119)
3.6.1	EIB 协议概述	(119)
3.6.2	EIB 协议的功能	(120)
3.6.3	EIB 网络结构	(121)
3.6.4	EIB 协议主要应用实例	(122)
3.7	TCP/IP 协议	(122)
3.7.1	TCP/IP 协议的历史	(122)
3.7.2	TCP/IP 协议的分层模型	(123)
3.7.3	TCP/IP 协议灯光控制网络	(124)
	习题与思考题 3	(128)
<b>4</b>	<b>智能照明控制系统原理</b>	<b>(129)</b>
4.1	照明控制的发展	(129)
4.2	智能照明控制系统的特点	(131)
4.2.1	智能照明控制系统的基本概念	(131)
4.2.2	智能照明控制系统的基本类型	(133)
4.2.3	传统照明控制系统与智能照明控制系统的比较	(135)
4.3	智能照明控制系统的结构	(136)
4.3.1	输入单元	(137)
4.3.2	输出单元	(138)
4.3.3	系统单元	(139)
4.3.4	辅助单元	(139)
4.3.5	系统软件	(139)
4.4	智能照明控制方式	(140)
4.4.1	典型控制	(140)
4.4.2	无线控制	(142)
4.4.3	特殊控制	(143)
4.5	智能照明控制策略	(144)
4.5.1	节能效果控制策略	(144)
4.5.2	艺术效果控制策略	(146)
	习题与思考题 4	(147)
<b>5</b>	<b>智能照明控制系统的设计</b>	<b>(148)</b>
5.1	概述	(148)
5.1.1	设计原则	(148)
5.1.2	相关设计规范	(148)
5.2	设计过程和步骤	(150)



5.3	系统及设备的选择 .....	(154)
5.3.1	系统的选择 .....	(154)
5.3.2	控制器设备的选择 .....	(154)
5.3.3	动静传感器的选择 .....	(161)
5.3.4	其他设备的选择 .....	(169)
5.4	设计举例 .....	(171)
5.5	系统的安装与调试 .....	(177)
5.5.1	传感器的安装 .....	(177)
5.5.2	控制器的安装 .....	(180)
5.5.3	其他设备的安装 .....	(181)
5.6	系统的节能效果 .....	(182)
	习题与思考题 5 .....	(186)
<b>6</b>	<b>典型照明控制系统</b> .....	<b>(187)</b>
6.1	概述 .....	(187)
6.2	邦奇公司智能照明系统 .....	(188)
6.2.1	系统的工作原理和基本结构 .....	(188)
6.2.2	设备配置设计的内容 .....	(193)
6.2.3	设备配置设计的步骤和方法 .....	(193)
6.3	立维腾公司智能照明系统 .....	(199)
6.3.1	系统的特性 .....	(199)
6.3.2	系统的构成 .....	(200)
6.3.3	几种 Dimensions 智能照明控制系统 .....	(206)
6.4	河东公司智能环境照明系统 .....	(210)
6.4.1	系统原理及组成 .....	(210)
6.4.2	系统的特性及应用范围 .....	(210)
6.4.3	系统的控制方式 .....	(212)
6.4.4	系统设备及软件 .....	(213)
6.4.5	系统设计与使用的注意事项 .....	(215)
6.5	锐高公司数字照明系统 .....	(220)
6.5.1	luxCONTROL 照明控制系统 .....	(220)
6.5.2	照明控制系统的技术特点 .....	(221)
6.5.3	照明控制系统的组成 .....	(226)
6.6	施耐德-奇胜公司场景照明系统 .....	(230)
6.6.1	系统的原理及组成 .....	(230)
6.6.2	系统的特性及应用范围 .....	(231)

---

6.6.3 系统元件功能 .....	(231)
6.6.4 系统软件 .....	(232)
6.6.5 系统设计及使用要求 .....	(233)
6.7 瓦特塞-罗格朗公司照明集成控制系统 .....	(235)
6.7.1 系统的组成 .....	(236)
6.7.2 系统的特点 .....	(236)
6.8 其他厂家的照明系统 .....	(239)
<b>7 系统工程设计与应用 .....</b>	<b>(242)</b>
7.1 办公写字楼 .....	(242)
7.1.1 概述 .....	(242)
7.1.2 系统设计思路和策略 .....	(242)
7.1.3 系统设计方法 .....	(245)
7.2 多功能厅 .....	(248)
7.2.1 演讲厅 .....	(248)
7.2.2 会议室 .....	(252)
7.2.3 宴会厅 .....	(255)
7.3 酒店 .....	(258)
7.4 地下停车场 .....	(261)
7.5 体育馆 .....	(265)
7.6 机场 .....	(271)
7.7 医院 .....	(274)
7.8 别墅 .....	(276)
7.9 景观亮化 .....	(281)
7.10 学校 .....	(282)
7.11 工厂 .....	(284)
<b>附录 生产厂家产品样本 .....</b>	<b>(286)</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>(334)</b>

## 0 绪 论

照明在人们的日常生活和工作中扮演了重要的角色,照明对人们的视觉、视觉心理等都起到很重要的作用,所以有人说,看一个国家发展程度,白天可以看街上跑的汽车,晚上可以看城市照明的应用,这不无道理。

### 1) 智能照明控制技术的发展和现状

照明控制系统作为建筑的组成部分之一,与照明技术一直是同步向前发展的。随着智能建筑的兴起而迅速发展,成为照明技术发展的一个重要方向。自从爱迪生发明电灯而产生灯光照明以来,照明控制也自然产生了。电灯不可能是 24 小时全打开的,必须进行最基本的开关控制,这就是照明控制系统的最初形式。

随着照明系统应用场合的不断变化、应用情况的逐步复杂和丰富多彩,仅仅靠简单的开关控制已经不能完成所需要的控制。因此,照明控制系统也必须不断发展、变化以满足实际应用的要求,达到能够完全实现照明系统设计的控制要求。尤其是现代计算机技术、微电子技术和自动控制技术的发展,使得照明控制技术进入了智能化控制的新阶段。作为建筑智能化组成部分之一的智能照明控制系统随着建筑智能化的发展而迅速发展。

近年来,随着我国经济的快速发展,能源需求大幅增加,能源供需矛盾越发突出,能源的短缺已严重制约着国民经济的发展。为保持国家经济的可持续发展,建设节约型社会,节约能源、降低能源消耗率已成为我国经济社会发展的必然趋势。2004 年 11 月国家发改委与建设部联合发布了《关于加强城市照明管理,促进节约用电工作的意见》,2005 年 8 月建设部再次发出《关于进一步加强城市照明节电工作的通知》等一系列文件。响应国家的战略要求,在进行工业与民用建筑设计时,照明节能成为每位建筑电气设计人员的重要内容,因此必须进行智能照明设计并应用智能照明控制系统。

智能照明控制系统通过与建筑结合提高了建筑照明光环境质量和建筑价值,以及为节约能源和保护环境提供了可靠途径。智能照明控制系统是实现人居环境可持续发展的重要技术之一,具有极为广阔的应用前景。

(1) 提高建筑照明光环境质量。在建筑的照明光环境设计中除充分考虑到视觉作业、合适的照度、亮度分布、视觉舒适性、眩光控制、显色性、照明装置的外观、使用者或参观者的主观感觉等 8 个因素外,还考虑到人体受到季节光照减少而产生“季节性情感紊乱”(SAD)因素和根据含不同光谱分成光源对褪黑素分泌的抑制能力强弱不同,视具体的情况采用不同的光源。

(2) 体现以人为本的照明控制思想。根据人们的行为模式和建筑的光环境决定照明的控制规律,创造个性化、艺术化、舒适、高雅的工作光环境。好的照明光环境使人心情愉快,工作效率提高;而好的照明控制系统不仅能实现好的照明环境,而且节能,维护管理方便,真正实现绿色照明。

(3) 构成智能建筑系统的一部分。智能照明控制系统可以独立运行,实现对光环境的合理控制;同时,其具有通信功能以及可扩展性,可把建筑智能照明控制系统作为智能建筑

系统的子系统,并与家居自动控制系统、电视和多媒体系统、探测和警报系统共同构成建筑智能化网络系统。

(4) 节能环保。随着全球能源价格上涨,各地节能减排政策出台,以及人们环保意识的加强,如何有效地减少能源消耗、提高能源利用率、降低二氧化碳排放,越来越成为人们关注的问题。

随着智能建筑特别是智能办公大厦的出现,使得建筑要求、设计方法与传统的办公楼相比大为不同。照明作为建筑不可缺少的部分,随着国际上智能建筑的大量出现,与之配套的智能照明技术也迅速地发展,并成为 21 世纪照明技术发展的一个重要方向。预计 21 世纪,人工智能技术在建筑与照明中的应用趋势将会进一步扩大。正如英国 Glasgow 市报指出:“Glasgow 正在成为一个研究和发太空时代智能建筑的国际组织的神经中枢。在智能建筑中的智能照明、供热、空调、通信及办公设备将全部由电子计算机进行控制与管理”。

近年来,随着计算机技术、通信技术、控制技术、信号检测技术和微电子技术的迅速发展和互相渗透,照明控制技术也有长足的进步,并且已进入了智能化控制的新纪元。实现照明系统控制的根本目的在于两个:一是提高系统的控制、管理水平,减少系统的维护成本;二是节省能源,减少系统的运营成本。

## 2) 智能照明控制系统的基本概念和作用

智能照明控制系统是利用计算机技术、网络通信技术、自动控制技术、微电子技术等现代化的科学技术,实现可根据环境变化、客观要求、用户预定需求等条件而自动采集系统中的各种信息,并可对所采集的信息进行相应的逻辑分析、推理、判断,同时对结果按特定的形式进行存储、显示、传输、反馈控制等处理,以达到最佳的实际照明控制效果。智能照明控制系统对电气照明实行自动控制,提供适合照明光环境的同时,降低照明系统电能消耗和其他使用费用。智能照明控制系统与手动照明控制系统相比有很多优点,包括创造环境气氛、改善工作环境、提高工作效率、良好的节能效果、延长光源寿命、管理维护方便等。

### (1) 创造环境气氛

多种照明控制方式可以使同一建筑物具备多种艺术效果,为建筑增色不少。现代建筑物中,照明不单纯为满足人们视觉上的明暗效果,更应具备多种控制方案,使建筑物更加生动,艺术性更强,给人以丰富的视觉效果和美感。建筑物内的展厅、报告厅、大堂、中庭等,如果配以智能照明控制系统,按其不同时间、不同用途、不同效果,采用相应的预设置场景进行控制,可以达到丰富的艺术效果。

### (2) 改善工作环境,提高工作效率

智能照明控制系统以调光模块控制面板代替传统的平开关控制灯具,可以有效地控制各房间内整体的照度值,从而提高照度均匀性。同时,这种控制方式有效地解决了频闪效应,不会使人产生不舒服、头昏脑涨、眼睛疲劳等感觉。

### (3) 绿色环保,节约能源

利用最少的能源保证所要求的照度水平,节电效果十分明显,一般可达 30% 以上。当今节能和保护环境已成为世界各国普遍关注的社会问题,并直接关系到社会的持续发展。在我国,照明用电占总发电量的 10% 以上;在英国,应用在照明上的能量大约占总消耗能量的 5%。如果有效地利用照明用电,这个数量可以减少。我国电力主要是来自燃煤,照明节电就意味着减少  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  等有害气体排放,可减少对大气环境的污染。

此外,智能照明控制系统能对荧光灯进行调光控制,由于荧光灯采用了有源滤波技术的

可调光电子整流器,降低了谐波的含量,提高了功率因素,减低了低压无功损耗。

#### (4) 延长光源寿命

智能照明控制系统可以有效地抑制电网的浪涌电压,同时还具备电压限定和交流滤波等功能,避免过电压和欠电压对光源的损害。智能调光器能慢慢地把灯调亮到一个设定的水平。刚打开灯时,这是相当重要的。在这一点上,白炽灯由于冷丝的热冲击易于失败。通过把灯慢慢地调亮到设定的水平,也被称为“软启动”。降低灯泡的亮度也可以延长灯泡的寿命。减低 10% 的亮度,灯泡可以延长 1 倍的寿命,而减低 50%,可以延长到 20 倍。还可以实现“软关断”,使灯光慢慢地熄灭。当切换场景时,灯光的变化是渐变的,使人们不会有突然变化的感觉,充分考虑到人眼对灯光的亮暗适应性。

延长光源寿命不仅可以节省大量资金,而且大大减少更换灯管的工作量,可以降低照明系统的运行费用,管理维护也变得简单。无论是热辐射光源,还是气体放电光源,电网电压的波动是光源损坏的一个主要原因。因此,有效地抑制电网电压的波动可以延长光源的寿命。

#### (5) 管理维护方便

智能照明控制系统对照明的控制是以模块式的自动控制为主,手动控制为辅,照明预置场景的信息存储在内存中。这些信息的设置和更换十分方便,使建筑物的照明管理和设备维护变得更加简单。例如办公楼可以根据工作时间的先后、休息、打扫等不同时间段,执行时间照明控制程序,对办公室、过道、走廊的灯光进行统一的管理,既节约能源,又便于管理。例如在起居室中,可设定晚上 11 时后,场景照明自动切换到睡前场景照明,睡觉前还可以从集中显示器中查看各房间的灯是否关闭。

智能照明控制系统已在下列领域得以应用:

(1) 影视舞台的灯光控制,其特点是突出系统的集中控制功能,由灯光师在灯光控制室操作调光台,对成百上千的舞台灯具进行控制。

(2) 多媒体会议系统,以会议系统作为控制对象,包括音频、视频、灯光甚至环境等设备和系统。

(3) 智能建筑灯光环境控制,是专门针对建筑物的照明控制设计,有时可作为前面两类应用的补充和延伸,如景观亮化工程、主题公园灯光控制等。

#### 3) 本书的使用

本书介绍和分析智能照明控制系统在建筑领域的应用知识。通过本书的学习,掌握智能照明控制系统的基本原理和分析方法;熟悉常用智能照明控制系统和设备的工作原理及特点;深入理解和掌握智能照明控制系统的设计方法和步骤,以及动静传感器、照度传感器、控制器的选择;能够设计常见区域的智能照明控制系统,并能进行节能效果分析。

全书共七章。第 1 章了解(复习)有关照明基础知识,学过《照明技术》课程的读者可跳过此章。第 2 章至第 3 章分别介绍照明控制和调光原理以及网络通信技术和有关智能照明控制的通信协议。第 4 章介绍智能照明控制系统结构及工作原理,分析智能照明控制方法和策略。第 5 章介绍建筑智能照明控制系统设计原则、方法和步骤;对系统设备的选择和安装也做了详细介绍,最后举例说明系统工程设计和节能效果分析。第 6 章至第 7 章分别介绍国内外知名厂家产品和可供借鉴的应用以及工程设计实例。第 1 章~第 5 章后面有习题与思考题,帮助读者理解复习该章的内容。附录选编了 3 家智能照明控制系统厂家的产品,可供设计使用。

# 1 照明基础知识

## 1.1 光、视觉和颜色

### 1.1.1 光的基本概念

光是能量的一种形态,这种能量能从一个物体传播到另一个物体,在传播过程中无需任何物质作为媒介,这种能量的传递方式被称为辐射。

实践证明,光具有波动性,光线的方向也就是波传播的方向。约 100 年前,人们已证实了光的本质是电磁波。光在一种介质(或无介质)中传播时,它的传播路径将是直线,并称之为光线。在另一方面,光与物质的相互作用中,主要显示出微粒性,即光具有波动性和微粒性的二重性。与之相对应,关于光的现象也有两种,即光的波动现象和光的量子现象。

#### 1) 光的波动现象

光的电磁波波动现象认为光是能在空间传播的一种电磁波。电磁波的实质是电磁振荡在空间的传播。

所有的电磁波在真空中传播时具有相同的传播速度  $c$ , 即

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (1.1)$$

式中:  $\epsilon_0$ ——真空的介电常数,  $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \times 8.987\ 55 \times 10^9}$  (F/m);

$\mu_0$ ——真空的磁导率,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  (H/m)。

由此可得电磁波在真空中的传播速度为:  $c = 2.997\ 925 \times 10^8$  (m/s)。

不同的电磁波在真空中的传播速度虽然都相等,但它们的振动频率和波长各不相同,三者的关系为:

$$c = \lambda \nu \quad (1.2)$$

式中:  $\nu$ ——电磁波的频率(Hz);

$\lambda$ ——电磁波的波长(m)。

电磁波在介质中传播时,其频率由辐射源决定而不随介质而变,但传播速度将随介质而变。在介质中电磁波的传播速度  $v$  为:

$$v = \frac{\lambda \nu}{n} \quad (1.3)$$

式中:  $v$ ——电磁波在介质中的传播速度(m/s);

$n$ ——介质的折射率。

电磁辐射的波长范围是极其广泛的,波长不同的电磁波其特性可能有很大的差别,这些

波段不同的电磁波是由不同的辐射源产生的,它们对物质的作用不同,因而有不同的作用和测量方法。若将各种电磁波按波长依次排列可以得到电磁波谱,如图 1.1 所示。

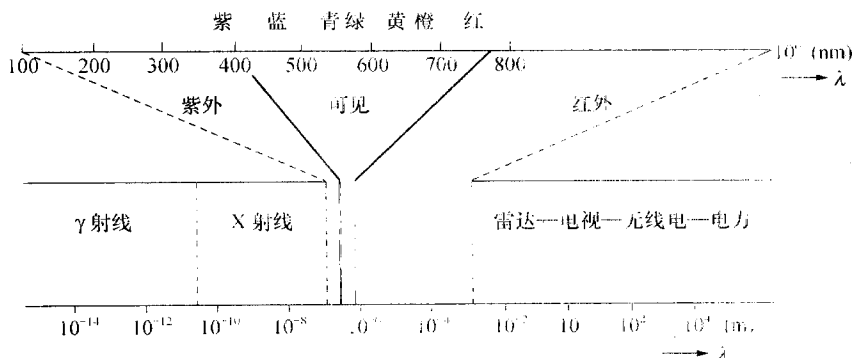


图 1.1 电磁波波谱

电磁波的波长范围极其宽阔,而可见光只占其中极狭窄的一个波段。电磁波可见部分的波长范围约在 380~780 nm 之间,在这个范围内的各种波长,都可凭眼睛的颜色感觉来加以区别。将可见光按波长从 380~780 nm 依次展开,光将分别呈现紫、蓝、青、绿、黄、橙、红色。各种颜色的波长范围大致如下:

紫色:380~450 nm;蓝色:450~480 nm;青色:480~500 nm;绿色:500~580 nm;黄色:580~595 nm;橙色:595~620 nm;红色:620~760 nm。

波长超过可见光谱的紫色和红色两端的电磁辐射,分别称为紫外辐射和红外辐射。紫外辐射的短波段可延伸到 1 nm(1~380 nm),短于 1 nm 的是 X 射线。红外辐射的长波段可到 1 mm 左右,更长的波段属于无线电波的范围。虽然眼睛不能感觉到紫外和红外辐射的存在,但从生理上能感觉得到,其他特性均与可见光极相似。通常把紫外线、红外线和可见光统称为光。

光的电磁理论可以解释光在传播过程中出现的一些现象,如光的干涉、衍射和色散等。这说明光在传播过程中主要表现为波动性。

## 2) 光的量子现象

波动理论虽然能完满地描述光的传播过程,但不能正确地解释光的发射和吸收。实验表明,当光(或其他形式的电磁辐射)发射和吸收时,总含有被称为“量子”的分立的能量值。一个光能量的量子称为一个光子,它所携带的能量  $q$  可由普朗克(Planck)关系式给出:

$$q = h\nu \quad (1.4)$$

式中: $q$ ——光子的能量(J);

$\nu$ ——光子的振动频率(Hz);

$h$ ——普朗克常数, $h=6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。

可见,光的光子所具有的能量极小,1 W 的辐射功率就相当于每秒辐射出  $10^{18}$  个光子。

## 1.1.2 光的常用度量

### 1) 辐射通量

某物体单位时间内发射或接收的辐射能量,或在介质(也可能是真空)中单位时间内传

递的辐射能量,称为辐射通量,或称为辐射功率,通常用符号  $\Phi_e$  表示,即

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad (1.5)$$

在上述定义中,发射、接收或传递的辐射能量并未指明一定是可见光的能量,实际上可以包括任意波长的电感辐射的能量;当辐射的能量用 J 作为单位,时间用 s 作为单位,则辐射通量的单位为 W。

2) 光谱辐射通量及其能量分布

(1) 光谱辐射通量

如果辐射源发出的辐射只含有一种波长成分,这样的辐射称为单色辐射。如果这种辐射是指光辐射,则只含一种波长成分的光辐射称为单色光。在照明工程中,实际照明光源发出的往往是含有多种波长成分的复合光。依据复合光中各种波长的辐射通量的分布情况,又可分为具有线光谱的复合光(只包含有限几种波长)和具有连续光谱的复合光(包含无限多种波长);并用光谱辐射通量来定量地描述复合光中各波长的辐射通量的分布。

光谱辐射通量定义为辐射源在给定波长  $\lambda$  附近取包含该波长的无限小波长范围,辐射源在该范围内产生的辐射通量  $d\Phi_e$  与该波长范围  $d\lambda$  之比称为该给定波长处的光谱辐射通量,即

$$\Phi_{e,\lambda} = \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \quad (1.6)$$

若辐射通量  $d\Phi_e$  的单位为 W,波长范围  $d\lambda$  的单位为 m,则光谱辐射通量的基本单位是 W/m。

(2) 辐射通量的光谱分布

光谱辐射通量实际上可看做是波长的函数,因此,辐射源的辐射能量随波长而变化的规律可以用曲线来表示,并称之为辐射通量的光谱分布,又常称为光谱能量(功率)分布。

图 1.2 表示具有线光谱成分的复合辐射的光谱能量分布。图 1.2(a)表示理想线光谱成分的光谱能量分布,即每一个线光谱成分具有良好的单色性,因此,此时的光谱辐射通量就是某波长的辐射通量,记作  $\Phi_e(\lambda)$ 。但实际辐射源的线光谱成分往往不是理想的,即在其波长附近一定波长范围内均有一定的辐射,如图 1.2(b)所示。在实际测量时,一般不可能也没有必要将每一波长的辐射都测量其辐射通量,而是分成若干波长段,测量其每一波长段的辐射通量。在照明工程的测量中,一般取 5 nm 或 10 nm 作为一波长段。经过处理后,具有线光谱成分的光谱能量分布如图 1.2(c)所示。

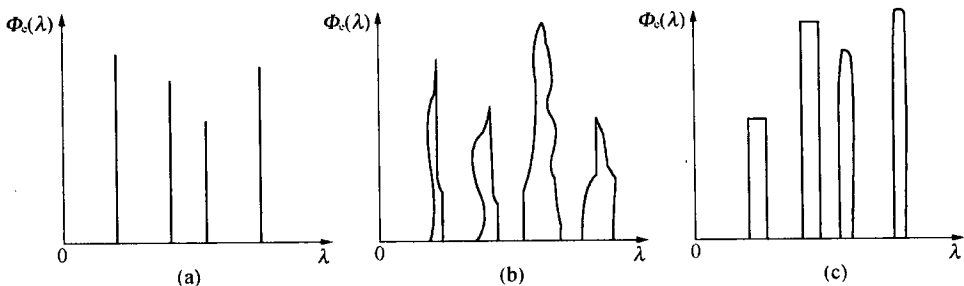


图 1.2 具有线光谱成分的光谱能量分布

实际光源的光谱能量分布可能还要复杂一些,例如气体放电光源通常既含有连续光谱成分,又具有线光谱成分。



已知光谱能量分布,式(1.6)还可改写为:

$$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda} d\lambda \quad (1.7)$$

用上述积分公式求辐射通量时,首先要知道光谱辐射通量随波长变化的函数关系,但通常很难用函数式来表示实际辐射源的光谱辐射通量,而只能用光谱能量分布曲线的形式表示。这时可用近似公式求辐射通量。求辐射通量实际上就是求光谱能量分布曲线与横轴之间所围的面积。在实际计算时,可用阶梯形代替原来的曲线,当波长间隔  $\Delta\lambda$  越小时,阶梯形折线就越接近于曲线,因此计算结果也就越精确。根据光谱能量分布曲线求解辐射通量的近似公式为:

$$\Phi_e = \sum_{i=1}^n \Phi_{e,\lambda} \Delta\lambda_i \quad (1.8)$$

### 3) 光谱光效率

辐射通量是纯客观的物理量,未计及人的视觉效果。人的视觉器官受到可见光的刺激就会产生视觉。事实证明,光刺激所引起的视觉强度(光亮感觉的大小)不仅与光能量的大小有关,还与光的波长有关,在同样的环境条件下(指环境的明亮或昏暗状况),人们对辐射通量相同但波长不同的光,具有不同的灵敏度。通常用光谱光效率(或光谱光效能)来表示人眼的视觉灵敏度。

光谱光效能的意义是单位辐射通量产生的视觉强度,用符号  $K(\lambda)$  表示。光谱光效能的单位是  $\text{lm/W}$ 。

实验证明,光谱光效能是波长的函数,且在某一波长下存在最大值。在明视觉条件下(适应亮度约为  $10 \text{ cd/m}^2$  以上),当波长为  $555 \text{ nm}$  时,光谱光效能最大,称为最大光谱光效能,记作  $K_m$ 。国际光度学和辐射度学咨询委员会规定  $K_m = 683 \text{ lm/W}$ 。

光谱光效率的定义为某波长光的光谱光效能  $K(\lambda)$  与最大光谱光效能  $K_m$  之比,就是该波长光的光谱光效率  $V(\lambda)$ ,即

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m} \quad (1.9)$$

式中: $K(\lambda)$ ——给定波长  $\lambda$  的光谱光效能;

$K_m$ ——最大光谱光效能;

$V(\lambda)$ ——给定波长  $\lambda$  的光谱光效率。

光谱光效率可以看做是光谱光效能的相对值,是波长的函数,其最大值为 1,发生在人们具有最大视觉效果的波长处。若偏离该波长时,光谱光效率将小于 1。

光谱光效率除了与波长有关以外,还与光刺激强度有关,即同一波长的光,在环境适应亮度明暗不同的情况下,人眼对其敏感性是有差别的。此外,光谱光效率既然是评价人眼的视觉灵敏度的,就不可避免地存在着个人差异,这会给光的度量带来很大的困难,所以必须有一个统一的标准。国际照明委员会(CIE)根据各国测试和研究的结果,提出了一个标准光度观察者,称为 CIE 标准光度观察者。根据有关研究,国际照明委员会给出了两种光谱光效率。第一种是在明亮条件下(适应亮度约为  $10 \text{ cd/m}^2$  以上)获得的,称为明视觉光谱光效率,记作  $V(\lambda)$ ,在  $555 \text{ nm}$  波长处视觉效果最高。第二种是在昏暗条件下(适应亮度小于  $10^{-2} \text{ cd/m}^2$ )获得的,称为暗视觉光谱光效率,记作  $V'(\lambda)$ ,最高视觉效果发生在  $507 \text{ nm}$  波长处。表 1.1 列出了各种波长下的 CIE 标准光度观察者光谱光效率。