

照明自动控制技术

刘木清 周小丽 等编著



照明自动控制技术

刘木清 周小丽 等编著



机械工业出版社

本书对照明控制系统设计中各个部分：光源、灯具、核心硬件设计、通信设计及照明控制系统的执行机构做了一个较为完整的介绍，使得读者对照明控制系统设计各个环节有深入的了解。

本书主要介绍了各类光源（包括白炽灯、卤钨灯、荧光灯、高压钠灯、高压汞灯、金属卤化物灯和 LED 等）的结构、类型、特性和应用，照明的视觉基础，照明灯具的功能、分类和光学特性，照明设计的基础知识，点照度计算和平均照度计算的基本方法；照明控制系统中常用的几种微处理器（包括 MCS-51 单片机、片上系统、FPGA 和 ARM 处理器）的概况、原理、编程和在照明控制系统中的应用；照明控制系统的发展史和照明控制的策略，基于 DALI 的照明控制方式，无线网络（Zigbee 和 IEEE802.15.4）在照明控制系统中的应用，电力载波通信技术的发展、技术特点和电力载波通信系统软件、硬件设计要点；照明自动控制的一些基本执行电路，包括照明自动控制的常用执行元件继电器、晶闸管及步进电动机，并介绍了可编程控制器及其在照明自动控制中的应用；并简要介绍了照明控制系统的主要产品及工程实例。

本书可作为大专院校建筑、光源与照明相关专业的研究生和本、专科学生教材，也可以作为从事光源照明和建筑行业的工程师及照明控制系统爱好者的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

照明自动控制技术/刘木清等编著. —北京：机械工业出版社，2007.8
ISBN 978-7-111-21835-7

I. 照… II. 刘… III. 电气照明 - 照明设计 - 自动控制
IV. TM923.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 102878 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑：王 玫 版式设计：张世琴 责任校对：王 欣
封面设计：王奕文 责任印制：杨 曦
北京机工印刷厂印刷 (北京双新装订有限公司装订)
2008 年 1 月第 1 版第 1 次印刷
184mm × 260mm · 20 印张 · 490 千字
0 001—4 000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-21835-7
定价：33.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
销售服务热线电话：(010) 68326294
购书热线电话：(010) 88379639 88379641 88379643
编辑热线电话：(010) 88379768
封面无防伪标均为盗版

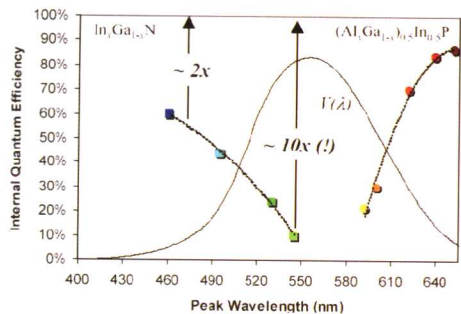
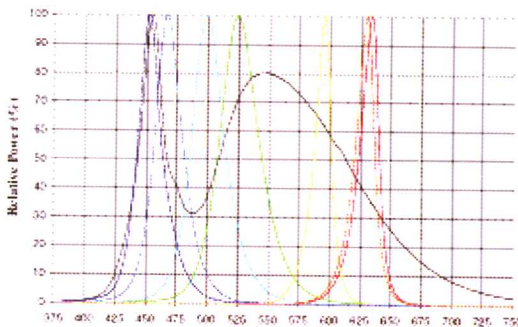


图 5-4 内量子效率和峰值波长的关系



a) LED 光谱能量分布

图 5-7 LED 的光输出性能

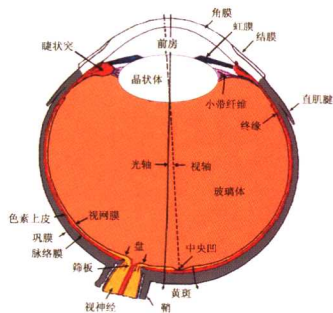


图 6-1 人眼右眼的水平俯视剖面图

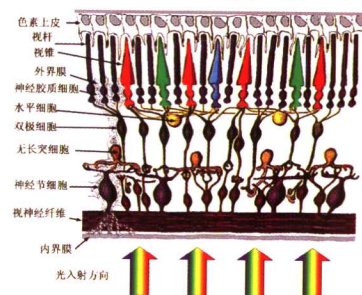


图 6-2 视网膜的结构

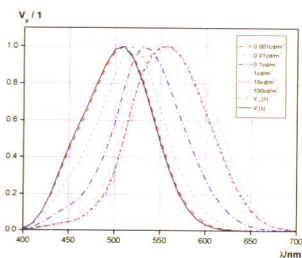


图 6-4 光谱光视效率函数
随亮度降低而向短波方向偏移

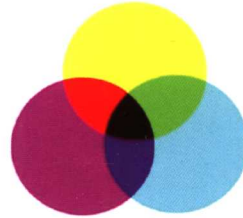
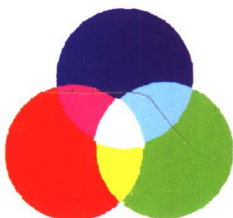


图 6-8 加法混和和减法混和

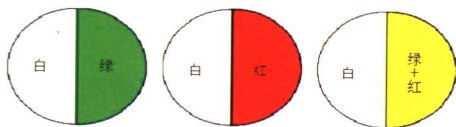


图 6-9 视亮度的相加性问题



图 6-13 黑体辐射不同色温呈现表现



a) 花灯



b) 壁灯



c) 吊灯

图 7-3 常用室内居住空间照明灯具



a) 工业照明灯具



b) 道路照明灯具



c) 泛光照明灯具

图 7-5 常见投光灯具

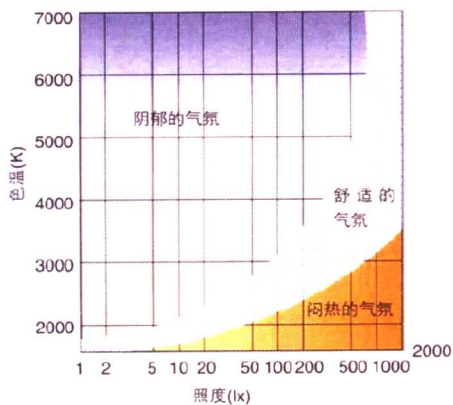


图 8-1 照度、色温与空间气氛

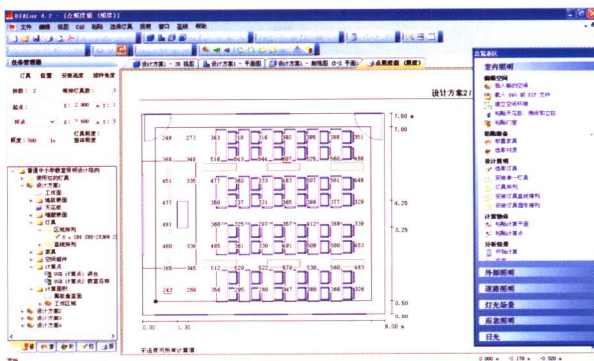


图 8-12 Dialux 软件计算界面



图 8-13 渲染效果

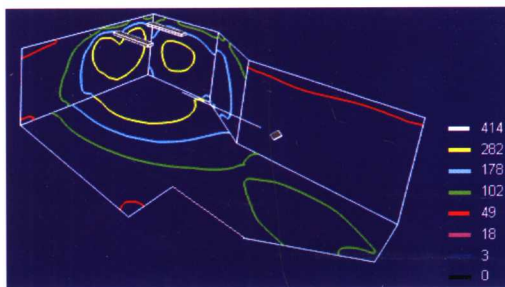
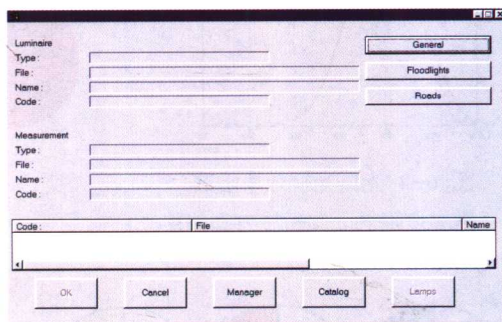


图 8-14 LITESTAR 软件灯具的选择界面及计算结果的 3D 等照度曲线

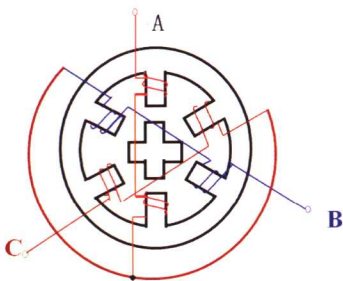


图 19-1 反应式步进电动机的结构示意图



图 23-1 绍尔兰会议中心

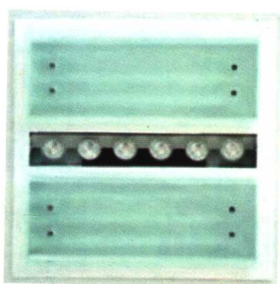


图 23-2 Varius II 平壁式天花灯

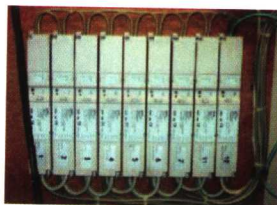


图 23-3 DALI 单元模块



图 23-4 照明控制触摸屏

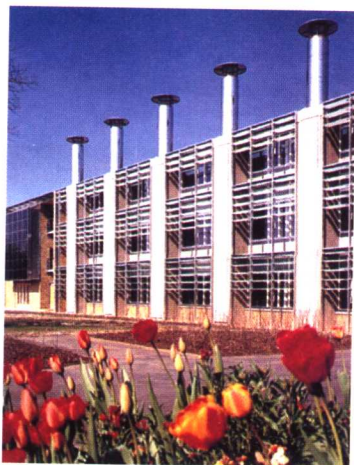


图 23-5 新建的伦敦建筑研究所的外观。
建筑立面上约 50% 的面积为窗



图 23-6 建筑的外部采用了透明玻璃格栅



图 23-7 朝南的大开间办公室内每个天花单元内装设了 5 盏连续的悬吊灯具，同时走廊上沿垂直方向装设一只

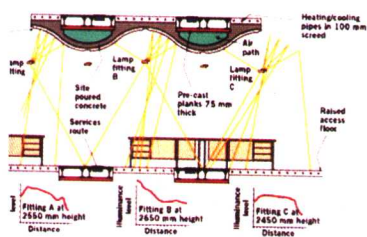


图 23-9 采用悬吊式 TL5 光源的格栅灯具光线分析

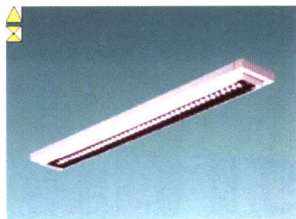


图 23-10 TCS600 系列悬吊格栅灯具采用的 TL5 光源



图 23-11 该建筑群由四座围绕着中心庭院的单体建筑和紧临中心庭院的两层建筑所组成，包括中庭



图 23-12 中庭主要采用天然采光，显示出更加自然的氛围，可利用立面上的金属格栅控制眩光

图 23-13 法庭内也利用了天然采光，通过曲面顶棚，日光被引到法官的办公桌上，辅助的人工照明由 TL5 灯具提供，采用了 28W、35W 和 49W 光源



图 23-14 在 600 个左右的房间中，大多是小的个人办公室，采光窗很大，为室内提供了充足的采光



图 23-16 办公室的人工照明可被个人控制，照度在 25~800lx 之间变化。灯具采用了单管 TL5/49W 的 TBS600 嵌入式格栅灯



图 23-15 走廊上采用 PL/26W 的筒灯来提供照明

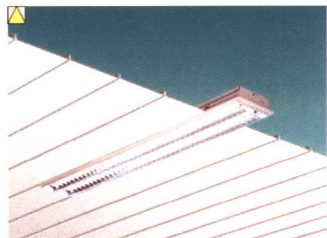
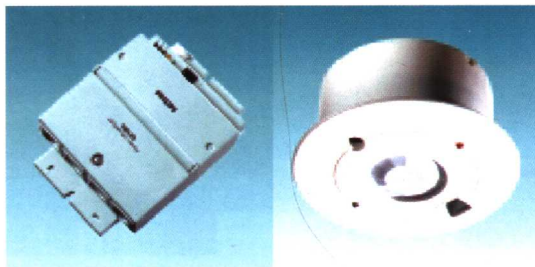


图 23-17 TBS600



LRC 5040/10

LRI 5133/10

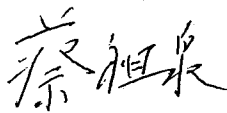
图 23-18 为 HELIO 和 Scenio 照明控制系统

序

20 世纪,石油、煤炭、天然气等主要能源面临资源枯竭的危险,同时其燃烧造成了全球的环境污染和生态破坏。国家“十一五”规划也把节能和环保作为两个主题。国家节能中长期专项规划也明确提出照明用电占全国用电量的 13%,可见照明节能显得非常重要。照明节能除有条件时采用太阳能外,现有的方法分为三个部分:①光源节能,采用高光效光源进行照明,以实现节能;②提高灯具的利用效率实现节能;③通过照明自动控制系统,在满足照明要求的情况下,通过调节光输出实现光能的合理利用,即智能化照明并能节约能源。

长期以来,作为建筑智能化系统之一的智能照明一直在国内未引起足够的重视,大多数建筑仍采用传统的照明控制方式,随着当今建筑科学技术的不断进步,智能化控制也成为了当今建筑发展的主流技术之一。智能照明自动控制系统不但能够节约能源,减少维护费用,改善照明质量,还可以实现楼宇智能照明控制,使照明在全自动状态下运行,可根据天气状态按照预先设置的场景自动切换,同时通过照明控制可以对建筑空间的色彩、明暗进行调整,创造出不同的意境和感观效果,还能够改善照明的环境,为人们工作提供健康、舒适的工作环境。智能照明控制系统可以将照明和建筑融为一体,可以预见,智能照明控制系统将会给我们提供更加美好的工作和生活环境。

目前很多高校和企业都在做智能照明控制系统的研究,很多大的企业也已经有成熟的产品推向市场。我们在进行相应的研究工作时,结合目前国内外照明控制的发展新技术等编写本书。本书从照明控制系统的几个方面:光源、照明灯具、控制核心、通信系统以及执行机构,对照明控制系统做详细的介绍。由于市场上目前照明控制技术方面的书籍出版缺乏,相信本书对于光源与照明、建筑等相关行业的读者会有较大的帮助。



2007 年 2 月 1 日

前 言

随着人们对节能的要求,照明节能也越来越重要,智能照明控制系统应运而生。本书对照明控制系统设计中各个部分:光源、灯具、核心硬件设计、通信设计及照明控制系统的执行机构做了一个较为完整的介绍,使得读者对照明控制系统设计各个环节有更深入的了解。

全书共分为6篇。第1篇主要介绍了各类光源(包括白炽灯、卤钨灯、荧光灯、高压钠灯、高压汞灯、金属卤化物灯和LED等)的结构、类型、特性和应用。第2篇主要介绍了照明的视觉基础;照明灯具的功能、分类和光学特性,照明设计的基础知识,同时也介绍了进行点照度计算和平均照度计算的基本方法。第3篇主要介绍了照明控制系统中常用的几种微处理器(包括MCS-51单片机、片上系统、FPGA和ARM处理器)的概况、原理、编程和在照明控制系统中的应用。第4篇讨论了照明控制系统的发展史和照明控制的策略,介绍了基于DALI的照明控制方式,无线网络(Zigbee和IEEE802.15.4)在照明控制系统中的应用,并介绍了电力载波通信技术的发展、技术特点和电力载波通信系统软件、硬件设计要点。第5篇介绍了照明自动控制的一些基本执行电路。包括照明自动控制的常用执行元件继电器、晶闸管及步进电动机,并介绍了可编程序控制器及其在照明自动控制中的应用。第6篇简要介绍了照明控制系统的主要产品及工程实例。

本书可作为大专院校建筑、光源与照明相关专业的研究生和本、专科学生教材,也可以作为从事光源照明和建筑行业的工程师及照明控制系统爱好者的参考书。

本书由复旦大学电光源研究所的几位老师共同编写。参加编写的有周莉(第1篇大部分),林燕丹(第2篇),周小丽(第3篇),孙耀杰(第4篇),刘木清(第1篇LED章节,第5、6篇),全书由刘木清、周小丽统稿。在本书的编写过程中,周太明及张善端两位老师给予了很大的帮助,在此深表感谢!

由于作者水平有限,错误之处在所难免,望广大读者批评指正。如果遇到技术方面的问题,请与作者取得联系。Email: mqliu@fudan.edu.cn。

编者

2007年1月

目 录

序 前言

第1篇 光源基础

第1章 辐射与光的产生	1	3.2.1 荧光灯工作原理	20
1.1 辐射过程	1	3.2.2 荧光灯结构	21
1.1.1 自发辐射	1	3.2.3 荧光灯类型	23
1.1.2 吸收	2	3.2.4 荧光灯特性	24
1.1.3 受激辐射	2	3.2.5 荧光灯工作电路	27
1.1.4 能级	2	3.2.6 荧光灯应用	30
1.1.5 电离	3	3.3 高压汞灯	31
1.1.6 复合辐射	3	3.3.1 高压汞灯工作原理	31
1.1.7 谱线放宽	3	3.3.2 高压汞灯结构	32
1.1.8 更复杂系统的辐射	4	3.3.3 高压汞灯的类型及应用	33
1.2 固体热辐射	4	3.3.4 高压汞灯特性	33
1.3 气体放电辐射	5	3.4 高压钠灯	35
1.4 光致发光	8	3.4.1 高压钠灯工作原理	35
1.5 电致发光	8	3.4.2 高压钠灯结构	36
1.6 光源分类	9	3.4.3 高压钠灯特性	36
1.7 光源的性能参数	9	3.4.4 高压钠灯的类型及应用	38
第2章 热辐射光源	11	3.4.5 高压钠灯工作电路	42
2.1 白炽灯	11	3.5 金属卤化物灯	43
2.1.1 白炽灯工作原理	11	3.5.1 金属卤化物灯工作原理	43
2.1.2 白炽灯结构	12	3.5.2 金属卤化物灯结构	44
2.1.3 白炽灯类型	13	3.5.3 金属卤化物灯的类型及应用	46
2.1.4 白炽灯工作特性	14	3.5.4 金属卤化物灯特性	47
2.2 卤钨灯	15	3.5.5 金属卤化物灯进展	48
2.2.1 卤钨灯工作原理	15	3.6 其他气体放电光源	52
2.2.2 卤钨灯类型和结构	15	3.6.1 低压钠灯	52
2.2.3 卤钨灯特性	18	3.6.2 无极荧光灯	53
2.2.4 卤钨灯的应用	18	3.6.3 微波硫灯	54
第3章 气体放电光源	20	3.7 各类光源性能的比较	55
3.1 气体放电光源概述	20	第4章 光源镇流器和触发器	57
3.2 荧光灯	20	4.1 电感镇流器	57
		4.1.1 确定节能型电感镇流器的方法	57

4.1.2 节能型电感镇流器应用状况	58	5.1 LED 的发光机理	68
4.2 电子镇流器	60	5.1.1 LED 芯片	69
4.2.1 电子镇流器的组成	60	5.1.2 LED 的光引出与封装	70
4.2.2 荧光灯电子镇流器	61	5.1.3 LED 的发光效率	70
4.2.3 HID 灯电子镇流器	62	5.1.4 LED 的驱动	71
4.3 触发器	63	5.2 LED 的性能与测试	72
4.3.1 触发器的构造、原理和特性	63	5.2.1 LED 的光电性能	72
4.3.2 叠加发生式触发器	63	5.2.2 LED 的测试方法	73
4.3.3 两端倍压式单向脉冲触发器	65	5.2.3 LED 的应用	76
4.3.4 金属卤化物灯专用触发器	66	第 1 篇参考文献	79
第 5 章 发光二极管	68		

第 2 篇 灯具与照明基础

第 6 章 照明的视觉基础	81	7.2.6 按灯具所使用的光源分类	105
6.1 人眼的视觉	81	7.2.7 按安装面材料分类	106
6.1.1 视觉的生理基础	81	7.3 灯具的光学特性	106
6.1.2 视觉特性	84	7.3.1 灯具的光度学数据	106
6.1.3 视觉功效	87	7.3.2 遮光角和眩光限制曲线	110
6.2 光度学基础	88	7.3.3 灯具效率和利用系数	111
6.2.1 基本光度量	88	第 8 章 照明设计	114
6.2.2 光度学心理量	89	8.1 照明设计的基本内容	114
6.3 色度学基础	90	8.1.1 照明光照设计	114
6.3.1 颜色视觉	90	8.1.2 照明电气设计	115
6.3.2 颜色的特性	91	8.2 照明光环境的评价	116
6.3.3 表色系统	93	8.2.1 影响照明光环境质量的因素	116
6.3.4 光源的色参数	95	8.2.2 照明设计标准	118
第 7 章 照明灯具	97	8.3 照度计算基本方法	120
7.1 灯具的功能	97	8.3.1 点光源直射照度的计算	120
7.1.1 控光作用	97	8.3.2 线光源直射照度的计算	121
7.1.2 为光源提供电气连接	98	8.3.3 面光源照度的计算	123
7.1.3 对光源起保护作用	98	8.3.4 从圆盘形光源产生的照度	124
7.1.4 保证照明安全	99	8.3.5 从矩形面光源产生的照度	125
7.1.5 装饰美化环境	99	8.3.6 利用系数法	126
7.2 灯具的分类	99	8.4 常用的照明计算软件	126
7.2.1 按灯具光通量分布分类	99	8.4.1 DIALux 软件	127
7.2.2 按防尘、防固体异物和防水等级 分类	101	8.4.2 AGI32 软件	127
7.2.3 按防触电保护分类	102	8.4.3 LITESTAR 软件	128
7.2.4 按应用场所分类	103	8.4.4 Lumen Micro 和 Lumen Designer 软件	129
7.2.5 按灯具的安装方式分类	104	8.4.5 Reality 软件	129

第2篇参考文献	130
---------------	-----

第3篇 照明控制系统核心元件

第9章 微处理器概述	132	11.2.3 CIP-51 内核	166
9.1 MCU 的定义	132	11.2.4 存储器	167
9.2 MCU 的发展	132	11.2.5 JTAG 调试和边界扫描	168
9.3 MCU 在照明控制系统中的应 用	133	11.2.6 可编程数字 I/O 和交叉开关	169
第10章 MCS-51 单片机	135	11.2.7 可编程计数器阵列	169
10.1 单片机概述	135	11.2.8 串行接口	170
10.1.1 单片机的发展历史	135	11.2.9 12 位模/数转换器	170
10.1.2 常用的单片机系列	135	11.2.10 8 位模/数转换器	172
10.1.3 MCS-51 单片机的特点	136	11.2.11 比较器和 DAC	173
10.2 MCS-51 单片机的结构及引 脚	137	第12章 FPGA 简介	174
10.2.1 MCS-51 单片机的内部 结构	137	12.1 可编程逻辑器件的发展	174
10.2.2 MCS-51 的引脚功能	137	12.2 FPGA 概述	175
10.2.3 MCS-51 的时序及相关概念	139	12.3 FPGA 生产厂商及主要产品	176
10.3 MCS-51 单片机的主要组成 部分	140	12.3.1 Altera 公司	176
10.3.1 中央处理器	140	12.3.2 Xilinx 公司	177
10.3.2 存储器组织	141	12.3.3 Lattice 公司	180
10.3.3 并行 I/O 口	143	第13章 ARM 处理器简介	183
10.3.4 定时/计数器	145	13.1 ARM 技术的应用领域及其特 点	183
10.3.5 MCS-51 单片机的串行接口	148	13.2 ARM 体系结构的版本及命名 方法	184
10.4 MCS-51 系列单片机指令系 统	150	13.2.1 ARM 体系结构的版本	184
10.4.1 寻址方式	151	13.2.2 ARM 体系的变种	185
10.4.2 指令说明	152	13.3 ARM 处理器系列	186
第11章 片上系统	160	13.3.1 ARM7 系列	187
11.1 SOC 概述	160	13.3.2 ARM9 系列	187
11.1.1 SOC 的特点	160	13.3.3 ARM9E 系列	187
11.1.2 SOC 发展现状	160	13.3.4 ARM10E 系列	188
11.2 C8051F $\times\times\times$ 高速 SOC 单片 机	162	13.3.5 SecurCore 系列	189
11.2.1 C8051F $\times\times\times$ 高速 SOC 单片机 概述	162	13.3.6 StrongARM 微处理器系列	189
11.2.2 C8051F02 $\times$ 系列 MCU 的主要 特点	164	13.3.7 Xscale 处理器	189
		13.4 以 ARM 为核心的单片机	189
		13.5 ARM 处理器模式	190
		13.6 ARM 微处理器结构	191
		13.6.1 RISC 体系结构	191
		13.6.2 ARM 微处理器的寄存器结构	192
		13.6.3 ARM 微处理器的指令结构	193

13.7 ARM 微处理器的选型	194	第3篇参考文献	194
------------------------	-----	---------------	-----

第4篇 照明控制数据通信

第14章 网络化照明控制系统	196	用	227
14.1 照明控制系统的发展历程	196	16.3.4 ZigBee 和现有移动网的比较	229
14.1.1 照明控制系统的作用	196	16.3.5 ZigBee 和 WLAN 技术的比较	230
14.1.2 照明控制系统的发展	198	16.3.6 ZigBee 和 Bluetooth 的比较	230
14.1.3 功能照明的发展	201	16.3.7 物理设备和网络类型	231
14.2 照明控制系统的一般策略	201	16.3.8 网络拓扑的形成过程	232
14.2.1 控制系统的一般策略	202	16.4 IEEE802.15.4 网络协议栈	234
14.2.2 分类场景照明要求	202	16.4.1 IEEE802.15.4 协议层次图	234
14.3 控制系统的一般组成方式	205	16.4.2 物理层	235
14.3.1 控制器和操作面板	205	16.4.3 MAC 子层	236
14.3.2 调光镇流器	206	16.4.4 网络配置	237
14.3.3 传感器	207	16.4.5 网络关联	238
14.3.4 窗帘控制器	212	16.4.6 端点、接口、群集、属性和配置文件	238
14.4 网络化的照明控制系统	212	16.4.7 端点绑定	240
第15章 基于 DALI 的照明控制方式	216	16.4.8 数据传输机制	241
15.1 DALI 的定义及系统架构	216	16.5 协议栈架构	241
15.2 DALI 控制器	217	16.5.1 协议栈层	241
15.2.1 镇流器编址	217	16.5.2 协议栈 API	242
15.2.2 DALI 设备	218	16.5.3 应用支持子层	242
15.3 DALI 的软件核心指令	219	16.5.4 网络层	242
15.4 DALI 系统的优缺点及适用范围	220	16.5.5 ZigBee 设备对象	242
15.5 DALI 技术与模拟技术的比较	221	16.5.6 ZigBee 设备配置层	243
第16章 无线网络在照明控制系统中的应用	224	16.5.7 介质访问控制层	243
16.1 无线网络在照明控制系统中的应用	224	16.6 ZigBee 硬件组成	243
16.2 ZigBee 的涵义	225	16.7 与 DALI 灯光控制系统的对比	243
16.3 ZigBee 联盟	225	第17章 电力线载波	245
16.3.1 ZigBee 的广泛应用	226	17.1 电力载波通信技术介绍	245
16.3.2 ZigBee 技术的优势及运用	227	17.1.1 电力载波技术基本原理	245
16.3.3 ZigBee 在照明控制系统中的使		17.1.2 电力线载波技术的发展方向	249
		17.2 电力载波通信信道特性分析	250
		17.3 电力载波通信系统设计	252
		第4篇参考文献	254

第5篇 实用照明自动控制技术

第18章 照明自动控制常用执行元件

之一——晶闸管 256

18.1 晶闸管概述 256

18.1.1 晶闸管的结构 256

18.1.2 晶闸管的工作原理 257

18.1.3 晶闸管的阳极伏安特性 258

18.1.4 晶闸管的型号和主要技术参数 259

18.1.5 晶闸管使用中的保护问题 259

18.2 双向晶闸管 259

18.3 其他硅类控制器件 260

18.3.1 双基极二极管 260

18.3.2 双向二极管 261

18.3.3 门极关断 (GTO) 晶闸管 262

18.3.4 光控晶闸管 264

第19章 照明自动控制中常用执行元

件之二——步进电动机 266

19.1 步进电动机的工作原理与结构 266

19.1.1 单三拍 266

19.1.2 六拍 266

19.1.3 双三拍 267

19.2 步进电动机的驱动 268

第20章 照明自动控制电路分析 270

20.1 光源通断控制 270

20.2 光源输出调节控制 273

20.2.1 电阻性负载光源的基本调光电路 273

20.2.2 电阻性负载光源的计算机控制

调光 274

20.2.3 非阻性负载光源的调光概述 274

20.3 光源方向控制 276

20.4 霓虹灯控制技术 280

20.4.1 高压跳机控制 280

20.4.2 滚筒控制 280

20.4.3 电子程序式霓虹灯控制器 280

20.4.4 电脑霓虹灯控制器 281

第21章 可编程序控制器在照明控制

中的应用 286

21.1 可编程序控制器的主要功能及

特点 286

21.1.1 PC 的主要功能 286

21.1.2 PC 的主要特点 287

21.2 可编程序控制器的结构和工作

原理 288

21.2.1 可编程序控制器的结构 288

21.2.2 PC 程序的工作原理 289

21.2.3 PC 中的存储区 290

21.3 可编程序控制器的分类 290

21.3.1 按照输入输出点数分类 290

21.3.2 按照结构分类 290

21.4 可编程序控制器的程序设计

方法 291

21.4.1 编程语言概述 291

21.4.2 梯形图的主要特点 293

第5篇参考文献 293

第6篇 照明控制系统主要产品及工程实例

第22章 主要厂家产品介绍 294

第23章 照明控制系统工程实例 300

23.1 工程实例1 300

23.2 工程实例2 302

23.3 工程实例3 304

第1篇 光源基础

光源是照明控制系统的控制对象，本篇主要介绍各类光源（包括热辐射光源的白炽灯和卤钨灯，气体放电光源中的荧光灯、高压钠灯、高压汞灯、金属卤化物灯等）的结构、类型、特性和应用；还将介绍半导体发光器件 LED 的原理、应用及测试，并介绍光源镇流器，包括电感镇流器和电子镇流器等。

第1章 辐射与光的产生

世界上大多数的人造光由四类过程产生：热态物体特别是固体的白炽发光；气体放电中原子和分子的直接发射；由紫外转换为可见辐射的光致发光以及电致发光。因此，我们将着重讲述这四类过程与灯的工作是怎样联系起来的。

1.1 辐射过程

原子、离子、分子和固体能级间的量子跃迁产生光辐射。辐射过程包括激发、电离、自发辐射、吸收、受激辐射、复合辐射和谱线放宽等。

1.1.1 自发辐射

钠原子由 11 个电子围绕带 11 个正电荷的原子核构成，最外层电子处于基态时，具有能量 E_g 。假设一个具有能量 E_u 的高能自由电子从钠原子近旁经过，这个自由电子将排斥原子中的电子。在某种情况下，这种扰动足够突然地导致原子中电子运动的变化，产生一个不连续的量子跳跃。入射的电子速度慢下来而损失能量。而钠原子获得了能量后，处于一个较高的激发态，具有能量 E_u 。原子和电子的能量均改变 $E_u - E_g$ ，符合能量守恒定律。

在大约 10^{-8} s 后，钠原子的激发态电子回到基态，一个频率为 5×10^{14} Hz、波长为 589nm 的光子被发射出来。激发原子自发发射前平均弛豫时间的倒数为跃迁几率 A_{ug} (s^{-1})，每一条谱线都有唯一的值。经过这种过程，自由电子的动能转变为黄光，其能量为

$$E = E_u - E_g = h\nu \quad \text{或} \quad E = h\nu/e = 2.1 \quad (\text{eV}) \quad (1-1)$$

式中， h 是普朗克常量， $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J·S； ν 是光子的频率； e 是电子的电量 (1.6×10^{-19} C)。E 的单位是焦耳 (J) 或电子伏特 (eV)。这个过程如图 1-1 所示。

上面的例子显示了共振辐射的产生，这在汞灯与钠灯中是很重要的。共振辐射是指激发态与基态之间的辐射，因为正是这些跃迁产生了最强烈的光谱线。按照量子理论，还有许多两个能级之间的辐射跃迁，这些跃迁对发光也有贡献。光子能量总是等于跃迁中两个能级的

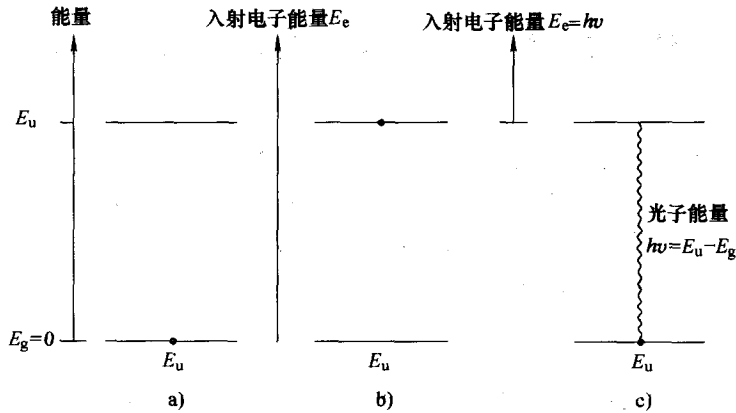


图 1-1 原子激发和辐射过程示意图

a) 基态原子 b) 电子碰撞激发原子 c) 原子中的激发电子产生光辐射回到基态

能量差 $E_u - E_g$ 。

原子也能够被频率为 ν 的光子激发。对于一定的上能级和下能级，处于激发态的原子以跃迁几率 A_{ug} (s^{-1}) 辐射，与激发方法无关。

1.1.2 吸收

吸收是发射的逆过程，这在灯与发光中是非常重要的。在如图 1-1a 所示的两个能级中，处于基态的原子可以强烈吸收带有能量 $h\nu$ 的光子。这个过程使原子从较低能级的 E_g 跃迁到较高能级的激发态 E_u 。比如，低压钠蒸气能够强烈吸收能量为 2.105 eV 的光子 (589 nm)，但对能量是 2.102 eV (590 nm) 的光子是透明的。吸收控制一个辐射体发出的光谱，它控制了钠蒸气与汞蒸气在高气压与低压放电中自反光谱线的形成。这些灯的特征受重复发生的吸收-再发射过程支配。

1.1.3 受激辐射

还有另一个过程叫做受激辐射，它在灯的发射中的作用微乎其微。在这种情况下，带有频率为 ν 的能量的人射光子可以刺激处于激发态的原子而发射一个相同能量的光子，发射的光子与人射光子具有相同的频率和方向。它们也是相干的，因此当把光看作波时，这些波是同步的。这个过程使激光产生成为可能。激光的相干性、非常高的亮度以及窄光束意味着它们有许多应用，也正是这些性质决定了它们不适用于普通照明。

1.1.4 能级

大多数原子的能级已被测定。钠原子与汞原子的某些能级如图 1-2 所示，它们在人造光的产生过程中扮演着重要的角色。

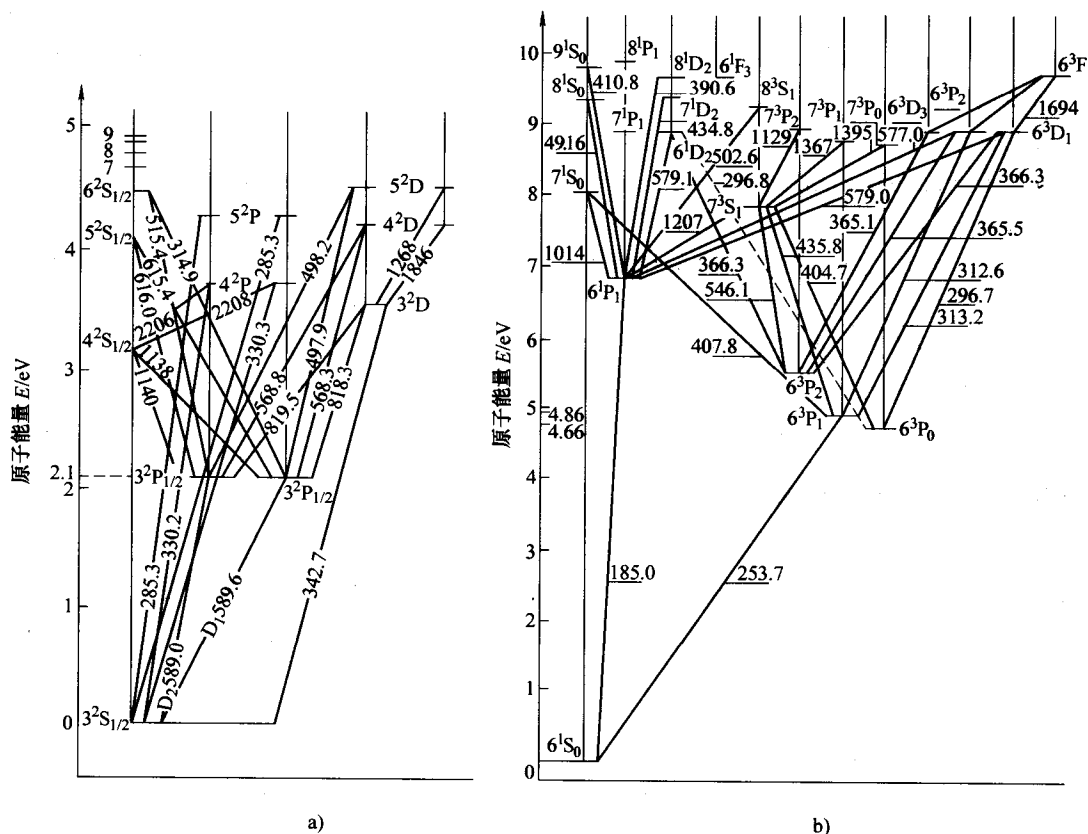


图 1-2 钠原子与汞原子能级图

a) 钠原子能级图 b) 汞原子能级图

注：波长的单位为 nm。

1.1.5 电离

当入射电子的能量足以从一个原子中打出另一个电子时，就可形成电离现象，产生一个正离子。电离过程对气体击穿，从而使之能导电并形成稳定的放电是必要的。在等离子体中，带电粒子流形成放电电流，激发原子发光。由于离子的质量比电子大得多，它们被电场加速后的速度小得多，这意味着一般情况下放电电流大部分由电子携带。

1.1.6 复合辐射

在放电中，带有能量 E_e 的电子可能会与带有能量 E_i 的离子复合，原子的末态可为任意能级 E_1 ，包括基态。能量差 $E_e + (E_i - E_1)$ 以光子的形式发射。由于复合电子可能带有任意能量，所以复合过程中产生波长连续的光谱。这种过程是高压汞放电的主要辐射形式，是高压钠放电中某种蓝色辐射的来源。

1.1.7 谱线放宽

原子发射的光谱线总有些放宽。对于照明光源有两个过程特别重要：多普勒放宽和压力