

电能变换与应用丛书

DIANNENG BIANHUAN YU YINGYONG CONGSHU

高频交流电子镇流 技术与典型应用电路

路秋生 编著

- 第1章 照明技术基础知识
- 第2章 电子镇流器常用电路与工作原理
- 第3章 电子镇流器常用电子元器件
- 第4章 电子镇流器的设计
- 第5章 功率因数校正
- 第6章 DALI数控可调光电子镇流器
- 第7章 电子镇流器典型应用电路

TM 923.61
694
1-

电能变换与应用丛书

高频交流电子镇流技术与典型应用电路

路秋生 编著

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (CIP) 数据

高频交流电子镇流技术与典型应用电路 / 路秋生编著. —北京: 人民邮电出版社, 2007.8
(电能变换与应用丛书)

ISBN 978-7-115-16248-9

I. 高... II. 路... III. 高频—交流—镇流器—电子电路 IV. TM923.61

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 071316 号

内 容 提 要

本书共分为 7 章, 全面系统地介绍了电子镇流器的工作原理、电路结构和设计方法, 主要内容包括照明技术基础知识、电子镇流器常用电路与工作原理、电子镇流器常用电子元器件、电子镇流器的设计、功率因数校正、DALI 数控可调光电子镇流器以及电子镇流器典型应用电路等内容。

本书具有理论联系实际、内容新颖、资料翔实、系统性强、注重实用等特点, 适合从事电子镇流器研究、开发、生产和制作的工程技术人员以及电子技术爱好者阅读, 也可以供大专院校相关专业的师生参考。

电能变换与应用丛书

高频交流电子镇流技术与典型应用电路

- ◆ 编 著 路秋生
责任编辑 刘 朋
- ◆ 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>
人民邮电出版社河北印刷厂印刷
新华书店总店北京发行所经销
- ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 29
字数: 711 千字
印数: 1—5 000 册
- 2007 年 8 月第 1 版
2007 年 8 月河北第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-16248-9/TN

定价: 45.00 元

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

丛 书 前 言

电能变换技术是一种应用功率半导体器件, 综合电力变换技术、现代电子技术、自动控制技术的多学科的边缘交叉技术。随着科学技术的发展, 电能变换技术又与现代控制理论、材料科学、电机工程、微电子技术等许多领域密切相关, 目前已逐步发展成为一门多学科互相渗透的综合性技术学科。

电能变换技术是实现电能变换和功率传递的关键技术, 能够对电能变换过程的参数实现精确的控制和高效率的处理, 特别是能够实现大功率电能的频率变换, 从而为现代通信、电子仪器、计算机、工业自动化、电力工程及某些高新技术提供高质量、高效率、高可靠性的电源支持。因此, 电能变换技术不但本身是一项高新技术, 而且还是其他许多高新技术发展的基础。电能变换技术及其产业的进一步发展必将为大幅度节约电能、降低材料消耗以及提高生产效率提供重要的技术手段, 并对现代生产和生活产生深远的影响。

当前, 电能变换技术作为节能降耗、自动化、智能化、机电一体化的基础, 正朝着应用技术高频化、硬件结构模块化、产品性能绿色化的方向发展。同时, 各行各业的迅猛发展对电能变换产业提出了更多更高的要求, 如节能节电、防止污染、改善环境、安全可靠等。这又无形地带动了相关技术的高速发展, 也对电能变换技术提出了新的挑战。相信在不久的将来, 电能变换技术将更加成熟、经济、实用, 实现高效率和高品质用电相结合。

进入 21 世纪以后, 电能变换技术已经成为应用最广泛和最受关注的技术之一。发达国家对电能变换技术的创新十分重视, 并且投入了大量的人力、物力和财力, 形成了具有一定规模的产业, 而我国与发达国家相比尚有较大差距。我国政府和社会各界对此十分重视, 并把解决能源约束和提高能源利用效率问题提升到了战略的高度。为此, 我们结合目前产业发展状况, 特组织有关专家、学者和技术人员编写了这套“电能变换与应用丛书”, 目的在于介绍目前国内外电能变换技术领域的新器件、新产品、新工艺、新技术和新方法, 推广和普及电能变换技术的应用。本丛书在编写时力求突出实用性和先进性, 希望本套丛书的出版能够解决电能变换技术应用中的一些实际问题, 促进电力电子技术的广泛应用。

本套“电能变换与应用丛书”主要包括《LED 驱动电路设计与应用》、《开关电源设计技术与应用实例》、《太阳能发电原理与应用》、《高频交流电子镇流技术与典型应用电路》、《便携式电子设备电源设计与应用》、《单片开关电源集成电路应用设计实例》等, 将陆续出版, 恳请广大读者批评指正。

本套丛书题材新颖, 内容丰富, 文字通俗, 深入浅出, 具有很高的实用价值, 可供电力、工控、电信、信息、航天、军事及家电等领域从事电源开发、设计和应用的工程技术人员阅读, 也可供高等院校相关专业的师生参考。

前 言

目前世界上各发达国家和有关发展中国家纷纷制定了“绿色照明计划”，我国也于 1997 年 10 月 1 日正式启动了“绿色照明工程”。这是我国照明技术领域内的一项重大决策和举措，必将对我国的能源、电光源和照明技术，甚至环境保护等各个领域产生巨大的影响，对确保我国国民经济可持续发展具有非常重要的意义。

在照明技术领域，气体放电灯是应用非常广泛的一种电光源。由于气体放电灯具有负阻工作特性，要使其稳定工作，在使用过程中需配备一只镇流元件，即镇流器。与电感式镇流器相比，电子镇流器具有节省原材料、节能等优点，易于实现调光、智能化和联网控制，所以得到了广泛应用。

高性能电子镇流器应该是既具有功率因数校正功能，又具有灯丝预热、调光和灯电路故障保护等功能的产品。据了解，可调光电子镇流器、高强度放电灯电子镇流器、数控可调光电子镇流器、紧凑型冷阴极荧光灯（CCFL）电子镇流器今后的市场前景看好。特别是随着 LCD 显示器逐渐取代 CRT 显示器，今后市场对 CCFL 电子镇流器的需求量将会有较大的增长，所以，本书对 CCFL 电子镇流器作了相应介绍。

由于照明调光具有节能的优点，更符合人们的使用要求，所以目前照明调光的单控、组控、群控、网络控制技术得到了很大的发展，并且随着楼宇自动控制技术的不断发展，照明调光控制技术更是受到了进一步的重视。

本书全面系统地介绍了电子镇流器的工作原理、电路结构和设计方法，主要内容包括照明技术基础知识、电子镇流器常用电路与工作原理、电子镇流器常用电子元器件与特性、电子镇流器的设计、功率因数校正、DALI 数控可调光电子镇流器以及电子镇流器典型应用电路等内容。为了反映电子镇流技术的发展动向，本书对有关照明控制新技术、新产品和典型电子镇流器电路作了重点介绍、分析，以期能对读者在电子镇流器的相关技术和制作方面能有一点儿帮助。

在本书编写过程中得到了杨超英、田淑华、汪赵强、李萍、赵红、毛华风、曹德跃、陈媛、唐继芳、张玲、李世友、赵晶、秦拥军、王甜、宫晓梅、刘蕊、孟利民等同事的大力支持和帮助，在此表示感谢。

由于作者水平有限，书中可能存在许多问题和不足，敬请广大读者批评指正。

作者：路秋生

目 录

第 1 章 照明技术基础知识	1
1.1 有关光的基础知识	2
1.1.1 光的本质	2
1.1.2 照明的有关术语	4
1.1.3 光的常用度量单位	8
1.1.4 颜色的分类和特性	8
1.2 原子结构与气体放电	9
1.2.1 原子结构与能级	10
1.2.2 原子的激发与电离	10
1.2.3 原子光谱	11
1.3 气体放电的伏安特性和辉光放电的发光区	12
1.3.1 常用电光源的特点	13
1.3.2 气体放电的伏安特性	14
1.3.3 辉光放电的发光区	16
1.4 荧光灯	18
1.4.1 荧光灯的工作原理与结构	18
1.4.2 荧光灯的分类	22
1.4.3 影响荧光灯工作效率的有关因素	25
1.4.4 荧光灯的工作特性与交流供电频率的关系	25
1.4.5 频闪效应	27
1.5 荧光灯的工作电路和有关参数	28
1.5.1 荧光灯的工作电路	28
1.5.2 荧光灯的负阻特性与电感镇流	29
1.5.3 荧光灯的有关电压、电流和光电参数	32
1.5.4 荧光灯的型号与命名	39
1.6 镇流器	40
1.6.1 镇流电感的阻抗	40
1.6.2 电子镇流器	41
1.7 气体放电灯的点火与故障保护	44
1.7.1 气体放电灯的点火	44
1.7.2 电子镇流器电路的故障保护	46
1.8 电路的连接	46
1.8.1 照明系统的内部、外部电气连接	46
1.8.2 电子镇流器的接地	47

1.8.3 电子镇流器耐压能力和引线绝缘能力的测试	47
1.8.4 灯控制电路的发展趋势	48
1.9 霓虹灯	48
1.10 常用电光源	49
1.10.1 常用电光源的特性	50
1.10.2 常用电光源的分类	51
1.10.3 常用电光源简介	52
第2章 电子镇流器常用电路与工作原理	57
2.1 电子镇流器应具备的功能与电路构成	57
2.2 电子镇流器常用逆变电路与谐振(软)开关	60
2.2.1 电子镇流器常用逆变电路的分类	60
2.2.2 电子镇流器常用逆变电路工作原理分析	61
2.2.3 开关逆变电路中干扰的抑制	69
2.2.4 电子镇流器的发展趋势	70
2.3 电压型、电流型逆变电路	72
2.3.1 电压型、电流型逆变电路的特点	72
2.3.2 电压型、电流型逆变电路在电子镇流器中的应用	73
2.4 气体放电灯常用镇流电路及其工作原理	82
2.4.1 镇流器的主要功能	82
2.4.2 常用镇流电路及其工作原理	83
2.4.3 电子镇流器与驱动电路	94
2.5 直流供电的电子镇流器	99
2.5.1 应急照明的定义和分类	100
2.5.2 应急照明系统	100
2.6 电子镇流器的相关术语和灯电极预热电路	102
2.6.1 电子镇流器的相关术语	102
2.6.2 电子镇流器的灯丝预热	104
2.7 电子镇流器的有关使用要求与正确选用	110
2.8 可调光电子镇流器	113
2.8.1 电子镇流器的调光	113
2.8.2 荧光灯的模拟调光和数字调光系统	114
2.8.3 电子镇流器常用的调光控制方法及其工作原理	117
2.9 电子镇流器对荧光灯的影响	122
2.9.1 电子镇流器的启辉方式及其对灯管寿命的影响	122
2.9.2 灯管故障对电子镇流器的影响	123
2.9.3 电子镇流器生产应注意的问题	124
2.9.4 荧光灯阴极的工作状态	124
2.9.5 灯负载寿命终止检测	125

2.9.6 常用阻抗匹配电路与基本等效变换	126
2.10 霓虹灯镇流器	128
第3章 电子镇流器常用电子元器件	133
3.1 双极型晶体管	133
3.1.1 双极型晶体管的特性	133
3.1.2 双极型开关晶体管的基极驱动电路	136
3.1.3 双极型晶体管的二次击穿和安全工作区	139
3.1.4 双极型晶体管的保护电路	141
3.1.5 新型功率半导体器件 H2BIP	142
3.2 功率场效应晶体管	144
3.2.1 功率场效应晶体管的主要特点	145
3.2.2 功率场效应晶体管的结构和工作原理	146
3.2.3 功率场效应晶体管的开关特性	148
3.2.4 功率场效应晶体管的主要参数	149
3.2.5 功率场效应晶体管的驱动电路	149
3.2.6 功率场效应晶体管的保护电路	150
3.3 功率晶体管	150
3.3.1 功率晶体管的结构和工作原理	151
3.3.2 功率晶体管的开关特性	152
3.3.3 功率晶体管的驱动电路	154
3.4 绝缘栅双极型晶体管	156
3.5 电子镇流器用功率开关晶体管的选用	156
3.5.1 双极型功率开关晶体管的选用	156
3.5.2 功率开关场效应晶体管的选用	160
3.6 电容器	161
3.6.1 电解电容器	162
3.6.2 用于功率因数校正的电容器	162
3.7 电子镇流器的工作寿命	163
3.7.1 电子镇流器的故障率与环境工作温度之间的关系	163
3.7.2 交流市电供电电压波动对电子镇流器工作的影响	164
3.8 电子镇流器常用磁性元件	166
3.8.1 电子镇流器对磁性材料性能的要求	166
3.8.2 电子镇流器用磁性材料的选用	169
第4章 电子镇流器的设计	171
4.1 电子镇流器的有关技术要求	171
4.2 荧光灯的工作和典型电感镇流电路	172
4.2.1 荧光灯的工作	172

4.2.2	荧光灯的典型电感镇流电路	172
4.3	气体放电灯的工作与电子镇流	174
4.3.1	高频交流电子镇流	174
4.3.2	推挽变换式高频交流电子镇流器	176
4.3.3	半桥变换电路	178
4.3.4	电子镇流器工作频率的选择	180
4.4	电子镇流器电路设计	180
4.4.1	半桥变换电路的设计	180
4.4.2	电子镇流器的保护电路	187
4.4.3	电子镇流器相关电感和变压器的设计	190
4.4.4	可调光电子镇流器中的功率开关管	201
4.4.5	电子镇流器的设计与生产技术难点	202
4.4.6	CE 认证	204
第 5 章	功率因数校正	206
5.1	功率因数和谐波电流	206
5.1.1	功率因数的定义和总谐波失真系数	206
5.1.2	不良功率因数的来源与改善	207
5.1.3	谐波电流对电网的危害	210
5.1.4	IEC61000-3-2 关于电气设备的分类	211
5.1.5	实施功率因数校正的意义	212
5.2	功率因数校正的实现方法	213
5.2.1	概述	213
5.2.2	无源功率因数校正	215
5.2.3	有源功率因数校正	230
5.2.4	具有功率因数校正功能的电子镇流器的研究进展	238
5.2.5	无源滤波和有源滤波电子镇流器性能、特点比较	240
5.3	典型有源功率因数校正电路	240
5.3.1	NCP1337 的工作原理与典型应用	240
5.3.2	L6561/L6562 的工作原理与典型应用	249
5.4	电磁兼容、射频干扰和电磁干扰	265
5.4.1	关于电磁兼容	265
5.4.2	电磁干扰和射频干扰	270
5.5	常用 APFC 控制集成电路	274
第 6 章	DALI 数控可调光电子镇流器	280
6.1	数字式可寻址照明调光接口 (DALI)	280
6.1.1	DALI 标准和控制功能	280
6.1.2	DALI 控制系统的构成	289

6.1.3 照明系统的构置	291
6.2 DALI 数控可调光电子镇流器	295
6.2.1 DALI 数控可调光电子镇流器的控制	295
6.2.2 DALI 数控可调光电子镇流器的结构和照明系统的控制	297
第 7 章 电子镇流器典型应用电路	302
7.1 常用荧光灯电子镇流器电路与应用	302
7.1.1 采用逐流电路的荧光灯电子镇流器电路	302
7.1.2 采用热敏电阻预热的电子镇流器电路	304
7.1.3 采用自激振荡电路的 1×18W HF-TL 荧光灯电子镇流器电路	308
7.1.4 采用自激振荡电路的 25W CFL 荧光灯电子镇流器电路	313
7.1.5 采用 KA7531、TFA3351 的电子镇流器电路	317
7.1.6 采用 IR2155 的电子镇流器电路	320
7.1.7 IR2520 的特点及典型应用	324
7.1.8 两级变换电子镇流器电路	336
7.1.9 UBA2014 的特点及应用	339
7.1.10 采用 L6574 的可调光电子镇流器电路	356
7.1.11 采用 IR21593 的可调光电子镇流器电路	362
7.1.12 具有 PFC 功能的电子镇流控制集成电路 L6585D	369
7.1.13 IR2166 和 IR2167 的特点与典型应用电路	371
7.1.14 采用微控制器控制的电子镇流器控制集成电路 L6382D	376
7.2 TI 公司的可调光冷阴极荧光灯电子镇流器电路	382
7.2.1 CCFL 背光照明控制集成电路 TPS68000 及其典型应用	382
7.2.2 CCFL 背光照明控制集成电路 UC3871 及其典型应用	382
7.2.3 CCFL 背光照明控制集成电路 UCC3972 及其典型应用	387
7.2.4 CCFL 背光照明控制集成电路 UCC3974 及其典型应用	391
7.2.5 CCFL 背光照明控制集成电路 UBA2070 及其典型应用	398
7.2.6 采用 SMBus 的 CCFL 控制集成电路 MAX8759 及其典型应用	406
7.3 高强度放电灯电子镇流器	428
7.3.1 高强度放电灯	428
7.3.2 高强度放电灯电子镇流器的组成与工作原理	430
7.3.3 金卤灯电子镇流器	433
7.3.4 低压钠灯电子镇流器	435
7.4 电子变压器	437
7.4.1 低电压输出电子变压器	437
7.4.2 卤素灯电子变压器控制集成电路 IR2161 及其应用	439
7.4.3 常用霓虹灯电子变压器	444
参考文献	452

第1章 照明技术基础知识

自从我国在 20 世纪 80 年代末、90 年代初研制并生产电子镇流器和电子节能灯以来，这一新兴的绿色照明产业已经得到了长足的发展，目前我国已成为世界上照明电器产品生产规模最大的国家，产量居世界首位。我国现在是世界上第一大照明电器生产国和第二大照明电器出口国。目前世界上 80% 以上的紧凑型荧光灯（Compact Fluorescent Lamp, CFL）都是由我国生产的，许多国际知名照明生产企业，像 GE、OSRAM 和飞利浦等都在中国生产节能灯。我国于 1997 年 10 月 1 日正式提出绿色照明后，绿色照明将以节约能源和资源，保护地球生态环境，提高照明质量、舒适性和健康性为发展目标。

白炽灯的发光效率仅为 11%，红外、热能消耗分别占 69% 和 20%，大部分能量被发热而损耗了。而气体放电灯，如荧光灯（Fluorescent Lamp）、高强度气体放电灯（High Intensity Discharge, HID）等发光器件的发光效率为普通白炽灯的几倍。由于气体放电灯的功率可以做得较大（上千瓦），发光效率又高，因此，它是一种目前得到广泛应用的照明光源，是一种绿色照明光源。但是，由于气体放电发光器件 V/I 工作特性的负阻性，为了使气体放电灯正常工作，使用时需配用镇流器。

绿色照明这一概念最早由美国环保局（EPA）于 1991 年提出并开始实施，美国、日本等发达国家和一些发展中国家先后制定了绿色照明工程计划，取得了明显的效果。事实上，照明的质量和水平已成为衡量社会现代化程度的一个重要标志，成为衡量人类社会可持续发展的一项重要指标。

全球镇流器市场分布如图 1-1 所示（2005 年的数据），亚洲和欧洲分别占了 31% 的市场，北美占了 29%，这三者之和占全球市场的 91%，可以说是三足鼎立，各分秋色。从图 1-2（2005 年的数据）来看，全球镇流器制造商的 72% 在亚洲，占据了很大的制造商份额，其余 28% 的镇流器制造商在欧美及其他国家。全球镇流器市场在 2005 年的出货量大约为 9.68 亿只，2005 年全球各类镇流器所占的市场份额如图 1-3 所示。

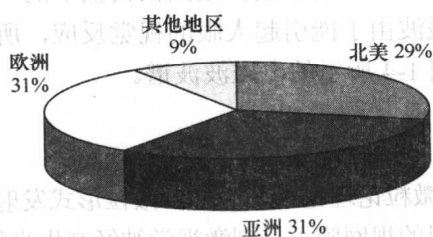


图 1-1 全球镇流器市场分布

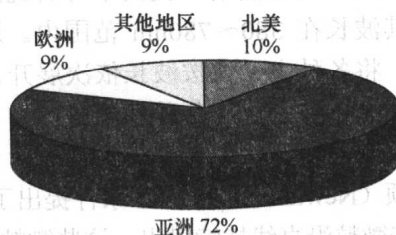


图 1-2 全球镇流器制造商分布

从图 1-3 可以看出，电子镇流器所占市场份额为 73%，其余 27% 是电感镇流器，其中紧凑型荧光灯（CFL）电子镇流器的市场份额最大，为 37%。通过近几年的发展可以看出，电感镇流器所占的份额在逐年下降，这是必然的趋势。随着能源供应的日益紧迫，以实现可持

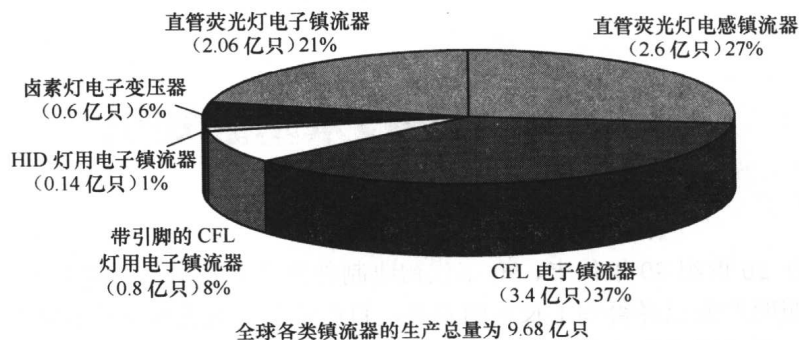


图 1-3 全球各类镇流器所占市场份额

续发展、保护环境为目的的节能和提高能源利用效率是每个国家近些年来都非常关注的重要问题。最近欧盟又有了新动作，继 WEEE（报废电子电气设备指令）和 RoHS（有害物质限制指令）之后，又通过了耗能产品生态设计框架指令（EUP），对照明设备提出了新的要求。现在欧盟对电感镇流器使用的限制很严格。绿色照明是一项系统工程，该工程将首先从节能型环保电子镇流器开始着手实施。

1.1 有关光的基础知识

良好的照明环境是保证人们正常工作、学习和生活的必要条件。无论是天然照明还是人工照明，都离不开“光”。实质上，照明技术就是有关光的应用技术。因此，掌握照明技术，应首先掌握一些光学的基本知识。

1.1.1 光的本质

1. 关于光的有关理论

光是指由光源发出的辐射能中的一部分，即能产生视觉的辐射能，又被称为可见光。

按照麦克斯韦（Maxwell）的电磁理论，光是一种电磁波。电磁波的波长范围极其宽广，最短的如宇宙线，其波长仅为 $10^{-12} \sim 10^{-14} \text{m}$ ，最长的电磁波波长可达数千公里，各种波长的电磁波构成了电磁波谱。我们平时所说的光波仅是电磁波谱中波长范围极其狭窄的一部分电磁波，其波长在 $380 \sim 780 \text{nm}$ 范围内。这部分电磁波由于能引起人眼的视觉反应，所以称为可见光。将各种电磁波按波长依次展开，就成为图 1-4 所示的电磁波波谱。

关于光主要有以下几种理论。

(1) 微粒论

牛顿（Newton）基于以下条件提出了关于光的微粒论理论：发光体以微粒形式发射光辐射能；这些微粒沿直线持续射出；这些微粒作用在人眼的视网膜上，刺激视觉神经产生光的感觉。

(2) 波动论

惠更斯（Huygens）基于以下条件提出了关于光的波动论理论：光是由于发光材料中的分子振动而产生的；这种振动通过“以太”像水波一样传播出去；这种传播的振动作用在人眼的视网膜上，刺激视觉神经而产生视觉。

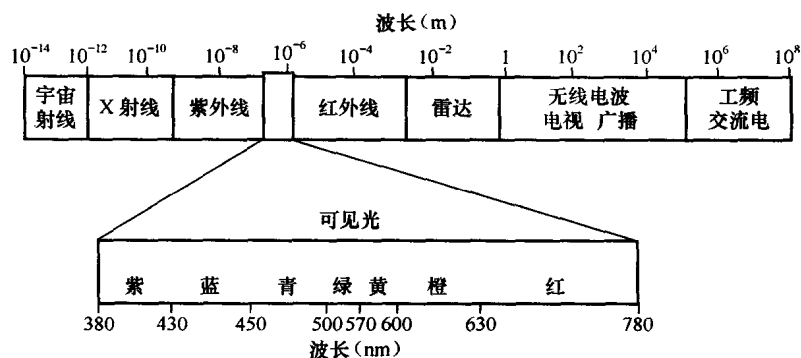


图 1-4 电磁波谱及可见光光谱

(3) 电磁论

麦克斯韦基于以下条件提出了关于光的电磁论理论：发光体以辐射能的形式发射光；这种辐射能以电磁波形式传播；这种电磁波作用在人眼的视网膜上，刺激视觉神经而产生光的感觉。

(4) 量子论

普朗克 (Planck) 基于以下条件提出了关于光的量子论理论：光能量以不连续的量子形式 (光子) 发射和吸收；每个光量子的能量 $E=h\nu$ ，式中 $h=6.626\times 10^{-34}\text{Js}$ (普朗克常数)， ν 表示光量子的频率 (Hz)。

(5) 统一论

德波洛格里 (De Broglie) 和海申堡格 (Heisenberg) 基于以下条件提出了关于光的统一论理论：每一运动质量元伴随着波动，波动的波长 $\lambda = \frac{h}{mV}$ ，式中 λ 表示波动的波长， h 表示普朗克常数， m 表示微粒的质量， V 表示微粒的速度；波动论或微粒论不能同时确定光的全部性质。

光的量子论和电磁波论给对光的辐射能特性作了说明。光的波动论认为光是波动性质的光子传播，更确切的说法是光是由电子波动过程产生的辐射。在白炽灯、气体放电灯或固体电光源中，被激励的电子返回到原子中的较低能级位置时，被激发电子的多余能量便以辐射能的形式对外产生光辐射。

目前科学家们常用电磁波理论和量子论来阐述光的本质。电磁波理论认为发光体以辐射能的形式发射光，而辐射能又以电磁波的形式向外传输，电磁波作用在人眼上就产生光的视觉。量子论认为发光体以分立的波束形式发射辐射能，这些波束沿直线发射出来，作用在人眼上而产生视觉。可见光在空间的运动可以用电磁波理论圆满地加以解释，光对物体的作用 (例如光电效应) 可以用量子论圆满地加以解释。

一般而言，电磁波的辐射波长范围为 $10^{-16}\sim 10^5\text{m}$ ，而可见光的波长范围为 $(380\sim 780)\times 10^{-9}\text{m}$ ，即 $380\sim 780\text{nm}$ 。可见光只是电磁辐射波长范围中很窄的一部分。

紫外线的波长范围为 $100\sim 380\text{nm}$ ，人眼是看不见紫外线的；红外线的波长范围为 $780\text{nm}\sim 1\text{mm}$ ，人眼也是看不见红外线的。

2. 人眼对可见光的颜色感觉

从电磁波波谱中可以看出可见光仅占电磁波波谱中很小的一部分，并且不同波长的可见

光给人的颜色感觉也不同。波长为 400nm 左右的光呈紫色，波长从 380nm 向 780nm 增加时，光的颜色从紫色开始，按蓝、青、绿、橙、红的顺序逐渐变化。全部可见光波混合在一起就形成日光（白色光）。

当人眼接收了 380~780nm 范围内的不同波长的电磁波后，就会引起不同的颜色视觉。表 1-1 给出了各种颜色光波的波长范围，但是表 1-1 中的划分也只是定性的，因为颜色实际上是随波长而逐渐变化的。每两种颜色之间没有明显的分界，而是按一种颜色逐渐减少而另一种颜色逐渐增多进行过渡的。

表 1-1

各种颜色光波的波长

光的颜色	大致的波长范围 (nm)
红色	780~630
橙色	630~600
黄色	600~570
绿色	570~500
青色	500~450
蓝色	450~430
紫色	430~380

只有单一波长的光才表现为一种颜色，称为单色光。位于波长大于 780nm 的红光外侧的光称为红外光或红外线。而波长短于 380nm 的电磁波在紫光的外侧，所以称为紫外光或紫外线。紫外线、红外线均不能被人眼所感觉，但作用在皮肤上可以产生一些其他的感受，如红外线可以引起热感，而紫外线可以引起疼痛感。在太阳所辐射的电磁波中，波长大于 1400nm 的电磁波被低空大气层中的水蒸气和二氧化碳强烈地吸收，波长小于 290nm 的电磁波被高空大气层中的臭氧所吸收。能到达地球表面的电磁波，其波长正好与可见光的波长相符。这说明人眼对光的视觉反应是人类在进化过程中，对地球大气层透光效果适应的结果。

1.1.2 照明的有关术语

常用的有关照明术语如下。

1. 发光强度

发光体发出的光通量辐射在它周围的一定空间范围之内，但大多数光源在不同方向上辐射的光通量并不相等。通常引入发光强度 I 来描述发光体在某一方向上的发光特性。

发光强度是指光源在给定方向上单位立体角内所辐射的光通量，简称为光强。发光强度的单位是坎德拉 (Candela)，也叫烛光，记作 cd， $1\text{cd}=1\text{lm/sr}$ 。

2. 发光效率（光效）

光源所输出的总流明数并不能确切地反映一个光源的内在发光特性，常常需要知道光源是消耗了多少功率才获得这样的输出流明数的。因此，光源每消耗 1 瓦 (W) 功率可以发出的流明 (lm) 数就是标志光源性能的一个重要指标，通常称之为光源的发光效率或光效，它的单位是流明/瓦 (lm/W)。人们总是希望得到发光效率尽可能高的光源。常用电光源的发光

效率如表 1-2 所示。

表 1-2 常用电光源的发光效率

光源类型	热辐射光源	气体放电光源						
	白炽灯/卤钨灯	低显色 荧光汞灯	高显色 荧光汞灯	高压 荧光汞灯	金属卤 化物灯	高压 钠灯	低压 钠灯	短弧 氙灯
发光效率 η (lm/W)	10~20/20~33	66~78	45	50~60	75~85	80~130	130~220	40~45

3. 光源的色温（色温度）

如果将一块铁逐渐加热，铁块将会发光，其发光的颜色随温度的升高会由最初的红色变为黄色，然后由黄色变为白色，最后变为强烈的蓝青色。这说明炽热物体的发光颜色与它的温度有着密切的关系。

为了描述炽热物体的发光颜色与温度的关系，人们把炽热物体的光色同作为标准的黑体（黑体是一种能把投射于其上的一切波长的辐射全部吸收的物体）加热到一定温度时的光色相比较，若两者所发出的光色相同，就把黑体在该发光颜色时的温度定为该炽热物体光源的色温，用绝对温标来表示。例如，一个光源的光色与加热到绝对温度 4500K 的标准黑体（绝对黑体）所发的光色相同，这个光源的色温就是 4500K。

在荧光灯的生产和应用中，色温是一个非常重要的指标。表 1-3 列出了自然光源的色温数值。表 1-4 给出了几种非自然光源的色温数值。

表 1-3 自然光源的色温数值

自然光		色温 (K)
天空光	西北方蓝天空	28000
	薄云蓝天空	16000
	蓝天空	12000
日光	阴天天空	8000
	平均中午阳光	6000
	下午	(15: 30) 5500
		(16: 30) 5000
	日出后时间	(2h) 4500
		(1.5h) 4000
		(45min) 3500
		(30min) 3000
		(20min) 2500
		(日出) 2000

表 1-4 几种常用非自然光源的色温

电光源名称	色温 (K)	电光源名称	色温 (K)
白炽灯	2800~2900	荧光高压汞灯	5500
卤钨灯	3000~3200	高压钠灯	2000~2400
日光灯色荧光灯	4500~6500	钠铊灯	5500
白色荧光灯	3000~4500	镝灯	5000~6000
暖色荧光灯	2900~3000	卤化锡灯	5000
氙灯	5500~6000	蜡烛灯	2000
镨灯	5000	锡灯、金属卤化物灯	4500
溴钨灯	3500~4000	碘钨灯	3000

色温为 2000K 的光源所发出的光呈橙色, 2500K 左右呈浅橙色, 3000K 左右呈黄色, 4000K 左右时白中略带橙色, 4500~7500K 时近似白色 (其中 5500~6000K 时最接近白色)。日光的平均色温为 6000~6500K。

4. 光源的显色性与显色指数 (R_a)

显色性是指光源的照明与具有相同或相近色温的黑体或日光的照明相比, 各种颜色在视觉上的失真程度。光源的显色性一般以显色指数 R_a 来表示。显色指数是在特定条件下, 物体用光源照明和用标准光源照明时, 其颜色符合程度的量度, 一般用数字来表示。它是被某光源照射的物体颜色还原好坏的定量描述, 其数值越高, 则表示颜色还原性越好。日光是显色性最好的光源。光源的显色性是衡量光源的视觉质量的重要指标。

长期以来, 人类一直在日光下生活。尽管不同季节、不同天气及白天的不同时间内自然光的光谱能量分布和色温有很大的差异, 而人眼对颜色的辨别却是恒定的。这种恒定性是人类长期适应日光所形成的。因此, 可以把日光作为标准的参照光源, 认为在日光下物体的颜色为真实颜色, 用以衡量物体在其他光源照射下的颜色失真程度。

热辐射光源 (例如白炽灯、卤钨灯等) 的光谱能量分布与黑体的光谱能量分布大体一致, 但是色温与白炽灯的实际温度有一定的内在联系, 两者并不相等。例如, 当白炽灯的色温为 2878K 时, 其灯丝的实际温度为 2800K。光源的色温与显色性之间没有必然的联系, 因为具有不同的光谱能量分布的光源可能有相同的色温, 但显色性却可能差别很大。例如, 荧光高压水银灯的色温高达 5500K, 从远处看它发出的光又白又亮, 如同日光 (6500K), 但它的光谱能量分布却与日光相差很大, 其光谱内青、蓝、绿光多而红光很少, 被照的人或物体显得发青, 显色性差 (R_a 仅为 22~51)。

白炽灯的色温为 2800~2900K, 从远处看它的光呈黄红色, 但它的显色指数可以高达 97。这表明白炽灯的色温差而显色性好。白炽灯的光谱能量分布是连续的, 且红光成分较多。

如果有色物体在光源照射下的颜色效果与标准昼光照射下的颜色相比有失真, 则说明该光源的显色指数低, 光源的显色性差。光源的显色性越差, 其显色指数就越低。例如, 高压汞灯照射下的人脸看起来像抹上了一层青灰色, 与标准昼光照射下的人脸有很大的颜色失真, 所以高压汞灯的显色指数不高。而在普通白炽灯照射下的物体却很少会产生颜色失真, 因此普通白炽灯的显色指数很高。

规定当光源和标准昼光显色一样时,光源的显色指数为 100,若两者的颜色显示出差别,光源的显色指数就小于 100,差别愈大光源的显色指数就愈小于 100。显色指数是衡量光源是否具有实用性的重要指标,常用电光源显色指数的有关数据如表 1-5 所示。一个光源发出的光是由许多不同波长的光辐射组成的,其中各个波长的光辐射能量(功率)不同。光源的光谱辐射能量(功率)按波长的分布叫做光谱能量(功率)分布。图 1-5 示出了几种常见电光源的光谱能量(功率)分布曲线,其中可见白炽灯、卤素灯的光谱是连续的,而气体放电灯的光谱曲线是不连续的。

表 1-5 常用电光源的显色指数 (R_a)

电光源名称	显色指数	电光源名称	显色指数
白炽灯	97	荧光高压汞灯	22~51
卤钨灯	80~94	高压钠灯	20~30
日光色荧光灯	75~85	钠铊灯	60~65
白色荧光灯	80~90	镨灯	≥ 85
暖色荧光灯	95~99	卤化镱灯	93
氙灯	95~97	高亮度碘弧灯	95~98
钨灯	90~93	镱灯	92~95
低显色荧光灯	52~77	高显色荧光灯	93
金属卤化物灯(钠铊钨灯)	60~65	高显色高压钠灯	80

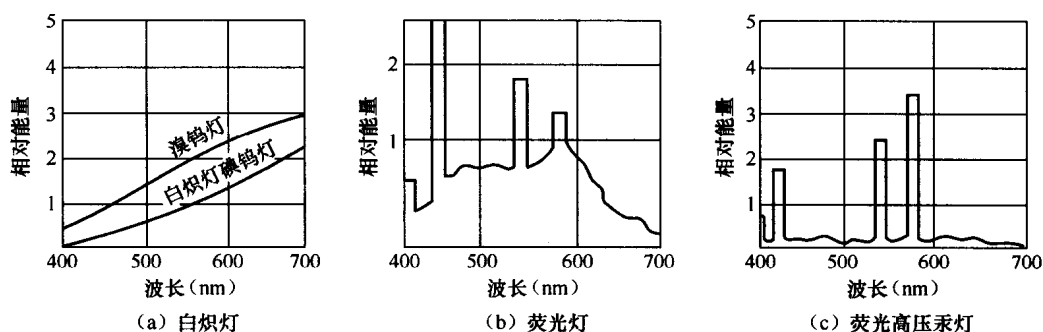


图 1-5 常用照明电光源相对光谱能量分布

5. 流明系数

荧光灯在与镇流器配套工作时的光输出与荧光灯和基准镇流器配套工作时的光输出之比,称为流明系数。

6. 光通维持率

在规定的条件下点燃,灯在工作寿命期内一特定时间的光通量与该灯的初始光通量之比,称为光通维持率,用百分数来表示。

7. 单端荧光灯

一种具有单灯头的装有内启动装置或使用外启动装置并连接在外电路上工作的荧光灯,称为单端荧光灯。