

电子工程技术丛书

LED照明技术 与应用电路 (第2版)

● 周志敏 纪爱华 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

电子工程技术丛书

LED 照明技术与应用电路

(第2版)

周志敏 纪爱华 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书结合我国绿色照明工程计划,以LED照明技术和LED照明实用电路为核心内容,结合目前国内外LED技术发展动态,全面系统地阐述了LED的基础知识和最新应用技术。全书共5章,深入浅出地阐述了照明基础知识、LED固态光源、大功率LED驱动电路、大功率LED应用电路、LED照明灯具及设计等内容。本书题材新颖实用,内容丰富,深入浅出,文字通俗,具有很高的实用价值,是从事LED照明设计和应用的工程技术人员的必备读物。

本书可供电信、信息、航天、汽车、国防及家电等领域从事LED照明研发、设计、应用和生产的工程技术人员及相关专业高等院校的师生阅读参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

LED照明技术与应用电路/周志敏,纪爱华编著. —2版. —北京:电子工业出版社,2013.1
(电子工程技术丛书)

ISBN 978-7-121-18806-0

I. ①L… II. ①周… ②纪… III. ①发光二极管-照明-电子电路 IV. ①TN383

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第253616号

策划编辑:富 军

责任编辑:徐 萍

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:16.5 字数:422千字

印 次:2013年1月第1次印刷

印 数:4000册 定价:45.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

“绿色照明”是20世纪90年代初提出的照明领域的新方针，它是从节约能源、保护环境的角度提出来的。“绿色照明”是对节约电能、保护环境照明系统的形象性说法。绿色照明的质量和水平已成为人类社会现代化程度的一个重要标志之一，成为人类社会可持续发展的一项重要措施。“中国绿色照明工程”的宗旨是节约能源，保护环境，提高照明质量，是要在我国发展和推广高效照明器具，节约照明用电，建立优质高效、经济舒适、安全可靠、有益环境和改善人们生活质量，提高工作效率，保护人民身心健康的照明环境，以满足国民经济各部门和人民生活对照明质量、照明环境的更高要求。

我国照明用电在总用电量中仅次于电动机占据第二位，而且以低效照明光源为主，虽然我国组织实施了绿色照明工程，但仍与国外发达国家有着较大的距离。随着新材料、新技术的发展和运用，高效照明产品趋于向小型化、高光效、长寿命、无污染、自然光色的方向发展。

LED是一种可将电能转变为光能的半导体发光器件，属于固态光源。高亮度的白光LED的开发成功，使得LED在照明领域得以推广应用，使照明技术面临一场新的革命。LED属于典型的绿色照明光源。LED作为新型光源，具有寿命长、启动时间短、无紫外线、色彩丰富饱满、可做全彩变化、低压安全等特点。LED不仅可用于大型广告显示屏、建筑和交通照明、城市重点建筑的夜景照明，而且正在迅速成为非豪华汽车的标准配置，白光LED已经成为便携式电子产品显示屏的主要光源，并朝日常照明应用的方向发展。LED技术的发展引起了国内外光源界的普遍关注，现已成为具有发展前景和影响力的一项高新技术产品。LED产品的开发研制生产已成为发展前景十分诱人的朝阳产业。目前，随着LED技术的广泛应用及潜在的市场需求，LED显示出了强大的发展潜力。

本书第1版于2009年出版以来，以其内容通俗、具体实用而深受广大读者欢迎。但是，由于LED照明技术的高速发展，第1版中的一些章节已不能很好地满足读者的需求。鉴于此，本书第2版结合目前国内外LED照明技术的发展动向，在第1版的基础上，对LED固体照明技术、大功率LED驱动技术、LED照明的工程应用等内容做了一定的删减和补充，以使本书的第2版具有技术新颖、实用等特点，更加贴近现代从事LED照明技术开发、设计、应用的技术人员，

本书在写作中尽量做到有针对性和实用性，并在保证科学性的同时注重通俗性。力求做到通俗易懂和结合实际工程应用，使从事LED照明技术的开发、设计、应用的技术人员从中获益，读者可以以此为“桥梁”，系统、全面地了解 and 掌握LED照明的设计和应用技术。

参加本书编写的有周志敏、纪爱华、周纪海、纪达奇、刘建秀、顾发娥、刘淑芬、纪达安、纪和平等。本书在写作过程中无论从资料的收集还是技术的信息交流上都得到了国内专业学者和同行及LED生产企业的大力支持，在此表示衷心的感谢。

编著者

目 录

第 1 章 照明基础知识	1
1.1 光的基础知识	1
1.1.1 光的特性	1
1.1.2 光的质量	3
1.2 光源	6
1.2.1 电光源	6
1.2.2 固体发光光源	10
1.3 照明灯具	16
1.4 LED 绿色照明工程	22
第 2 章 LED 固态光源	28
2.1 LED 的发光原理及主要参数	28
2.1.1 LED 的发光原理及发光效率	28
2.1.2 LED 的主要参数与特性	34
2.2 白光 LED 基础知识	42
2.2.1 白光 LED 的发展与特点	42
2.2.2 白光 LED 的实现方法	47
2.3 大功率白光 LED 的结构与特性	57
2.3.1 大功率白光 LED 的结构特点	57
2.3.2 照明用白光 LED	63
2.4 大功率白光 LED 的散热及封装	67
2.4.1 大功率白光 LED 的散热	67
2.4.2 大功率白光 LED 的封装	75
第 3 章 大功率 LED 驱动电路	80
3.1 LED 驱动技术	80
3.1.1 LED 驱动方案	80
3.1.2 LED 与驱动器的匹配	83
3.2 白光 HI-LED 驱动电路	89
3.2.1 白光 HI-LED	89
3.2.2 HI-LED 驱动器具备的要素	91
3.2.3 白光 HI-LED 驱动电路	93
3.2.4 白光 HI-LED 驱动电路设计	97
3.2.5 HI-LED 驱动器的优化设计	99
3.2.6 超低电压大功率 LED 恒流驱动器	110

3.3	交流驱动 LED 前级电路	117
3.3.1	EMI 的滤波器	117
3.3.2	整流技术	121
3.3.3	功率因数校正技术	123
第 4 章	大功率 LED 应用电路	144
4.1	大功率 LED 恒流驱动器	144
4.1.1	基于 MAX16802 的 LED 恒流驱动器	144
4.1.2	基于 LM3402 的 LED 驱动器	148
4.1.3	基于 MAX16800 高压、可调恒流 LED 驱动器	149
4.1.4	基于 NCP101X 的 LuxeonStar LED 驱动器	152
4.1.5	基于 HV991X 大功率 LED 驱动器	154
4.1.6	基于 LT3474 大功率 LED 驱动器	157
4.1.7	基于 DD311/DD312 单通道大功率 LED 恒流驱动器	160
4.1.8	基于 PT4107 的 LED 驱动器	162
4.1.9	基于 XLT604 大功率 LED 驱动器	165
4.1.10	基于 AP3706 隔离式 AC/DC LED 驱动器	168
4.1.11	基于 LTC3490 的白光 LED 驱动器	169
4.1.12	基于 PAM2842 的 LED 驱动器	171
4.1.13	基于 LT3478 和 LT3478-1 高调光比 LED 驱动器	173
4.1.14	基于 HA22004P 高压 LED 恒流源驱动器	178
4.1.15	基于 SP6648 的手电筒 LED 驱动器	179
4.2	基于单片开关电源的 LED 驱动器	181
4.2.1	基于 LinkSwitch-TN 系列器件 LED 驱动器	181
4.2.2	基于 TOPSwitch-GX 系列器件 LED 驱动器	193
4.2.3	基于 TinySwitch-III 系列器件 LED 驱动器	205
第 5 章	LED 照明灯具及设计	211
5.1	LED 照明灯具及结构	211
5.1.1	LED 照明灯具	211
5.1.2	LED 照明灯具结构	218
5.2	LED 灯具设计	240
5.2.1	LED 灯具设计程序	240
5.2.2	LED 道路照明灯具设计	246
参考文献		255

第 1 章 照明基础知识



1.1 光的基础知识

1.1.1 光的特性

1. 光的定义

光是一种重要的自然现象。当一束光投射到物体上时，会发生反射、折射、干涉及衍射等现象。人们之所以能够看到客观世界中斑驳陆离、瞬息万变的景象，是因为眼睛能够接收物体发射、反射或散射的光。光不仅是人类视觉能感知的光，还包括人类视觉感知不到的红外线和紫外线等，光就其本质而言是一种电磁波，覆盖了电磁频谱一个相当宽（从 X 射线到远红外线）的范围，只是波长比普通无线电波更短。人类肉眼所能看到的可见光只是整个电磁频谱的一部分。光具有波粒二象性，即可把光看做是一种频率很高的电磁波（ $10^{12} \sim 10^{15}$ Hz），也可把光看成是一个粒子，即光子。

电磁波刺激人的眼睛，经过视觉神经传达到人的大脑，使人可以看到物体的形状和颜色，这段波长的电磁波称为可见光，可见光的波长不同，人眼感觉到的颜色也不同。这类射线的波长范围在 360 ~ 830 nm 之间，仅仅是电磁辐射光谱中非常小的一部分。波长的范围不同，决定了各种不同波长光的性质。780 ~ 380 nm 的光依次是红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七色光，两种颜色之间没有明显的分界。将全部可见光波混合在一起就形成日光，即白光。波长大于 780 nm 的电磁波是红外线、微波和广播无线电波等。波长小于 380 nm 的电磁波是紫外线、X 射线和宇宙射线等。

光和其他所有的电磁辐射一样，在真空中以 30 万千米每秒的速度沿直线传播。当光通过某种物质时，如水或空气，其传播速度会减慢。光在真空中的速度和在媒质中的速度比值称为该媒质的折射率，在折射率不同的两种媒质的界面上，入射光线产生折射与反射现象。另外，光在传播过程中还会产生散射、漫反射、漫透射等现象。

人们通常所说的光是指“可见光”，它是由光源发出的辐射能中的一部分，并能产生视觉效应。从量子物理的观点看，光具有二重性：粒子性和波动性。单个光子呈粒子性，密集光子的集合衍射便呈现出波动性。所以，光是一种电磁辐射能，即电磁波，光线的方向也就是波传播的方向。

太阳光和光源在发出可见光的同时，都会有紫外和红外辐射，只是眼睛视觉反应不出来而已。在太阳光谱中，波长大于 1 400 nm 的光波被大气层中的水蒸气和二氧化碳强烈吸收；

波长小于 290 nm 的光波被大气层中的臭氧所吸收。

人的眼睛对不同颜色光的视觉灵敏度不同,对光谱中心部位的黄绿色光最灵敏,对两边的紫光和红光都不灵敏。人类在进化过程中紫外光和红外光对眼睛不产生视觉反应。紫外线会伤害人的眼睛,红外线只能刺激人的皮肤产生热的感觉。

眼睛视觉灵敏度会随着光的波长而变化,在白昼明亮环境时,眼睛对中波长黄绿色光(555 nm)最敏锐。由此,若在波长 555 nm 环境下一个电源能量(瓦特)转换成一个光能量(瓦数),则在不同波长的可见光下一个瓦特能量,将会随着白昼眼睛视觉灵敏度的光谱中各种因素而改变,这个变化曲线称为白昼视觉曲线 $V(\lambda)$ 。如此一来,光的瓦特数取决于光的波长。例如,一个波长 490 nm 光是坐落在波长 555 nm 白昼眼睛视觉灵敏度曲线中百分之二十的位置,且一个波长 490 nm 光只能将一个电源能量(瓦特)转换成 0.2 个光能量(瓦数)。在低亮度水平,整个眼睛视觉灵敏度曲线会左移(相当于靠近较短波长)而其最敏锐的高点是 507 nm 位置,这个曲线被称为夜晚视觉灵敏度曲线。

2. 光的数量

衡量光源发出光的多少的单位为光通量,光通量是指单位时间内光源发出(可见)光的总和,符号为 Φ ,单位是流明(lm)。光通量就是人眼对能量辐射通量的评价。

光源所发出的光能是向所有方向辐射的,对于在单位时间里通过某一面积的光能,称为通过这一面积的辐射能通量。各色光的频率不同,眼睛对各色光的敏感度也有所不同,即使各色光的辐射能通量相等,在视觉上并不能产生相同的明亮程度,在各色光中,黄绿色光能激起最大的明亮感觉。

光通量的单位是流明,是英文 lumen 的音译,简称为 lm。绝对黑体在铂的凝固温度下,从 $5.305 \times 10^3 \text{ cm}^2$ 面积上辐射出来的光通量为 1 lm。为表明发光强度和光通量的关系,发光强度为 1 cd 的点光源在单位立体角(1 球面度)内发出的光通量为 1 lm。

一般情况下,同类型灯的功率越高,光通量也越大。而不同类型的灯即使功率相同,光通量也有很大差别。例如,一只 40 W 的普通白炽灯的光通量为 350 ~ 470 lm,而一只 40 W 的普通直管型荧光灯的光通量为 2 800 lm 左右,是白炽灯的 6 ~ 8 倍。

3. 照度

单位被照面上接收到的光通量称为照度,如果每平方米被照面上接收到的光通量为 1 lm,则照度为 1 lx。照度单位:勒克斯(lx)。夏季阳光强烈的中午地面照度约 5 000 lx,冬天晴天时地面照度约为 2 000 lx,晴朗的月夜地面照度约为 0.2 lx。

从其定义不难看出照度就是由 lm/m^2 得到的,但这是在绝对理想的环境下才适用的,即光源发出的所有光全部照射在计算平面内,但这几乎是不太可能的,在实际运用中要考虑灯具、墙面、空气等对光源的遮挡、反射等,这样的计算往往就比较烦琐。通常情况下,照明设计会借助一些专业的照明计算软件,通过计算机来完成。

4. 亮度

亮度是指光源在某一方向上单位投影面积、单位立体角中发射的光通量。如果把每个物体都视为光源的话,那么亮度就是描述光源光亮的程度。在同一房间同一位置一块白布和一

块黑布的照度是相同的，而亮度是不同的。

光亮度是表示发光面明亮程度的，指发光表面在指定方向的发光强度与垂直于指定方向的发光面的面积之比，单位是坎德拉/平方米 (cd/m^2)。对于一个漫散射面，尽管各个方向的发光强度和光通量不同，但各个方向的亮度都是相等的。

1.1.2 光的质量

人的视觉器官在色彩刺激作用下引起大脑反应，即视觉器官受不同波长光线的物理刺激的同时产生色彩刺激信号并传给大脑，大脑将其接收的色彩信号不断地译成色彩概念，并与储存在大脑里的视觉经验结合起来加以解释，形成了颜色知觉。颜色分非彩色和彩色。非彩色是指白色、黑色的各种深浅不同的颜色。彩色是指黑白系列以外的各种颜色。

由于感情效果和对客观事物的联想，色彩对视觉的刺激产生了一系列的色彩知觉心理效应。这种效应随着具体的时间、地点、条件（如外观形状、自然条件、个人爱好、生活习惯、形状大小及环境位置等）的不同而有所不同，一般来讲，色彩可以产生温度感、距离感、重量感、空间感、阴暗感等。

1. 光源的色温

开尔文认为，假定某一纯黑物体，能够将落在其上的所有热量吸收，而没有损失，如果同时又能够将热量生成的能量全部以“光”的形式释放出来的话，它便会因受到热力温度的高低而变成不同的颜色。例如，当黑体受到的热力温度为 $500 \sim 550 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，就会变成暗红色，达到 $1050 \sim 1150 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，就变成黄色……因而，光源的颜色成分是与该黑体所受的热力温度相对应的。

当光源所发出光的颜色与黑体在某一温度下辐射的颜色相同时，黑体的温度就称为该光源的色温，用绝对温度 K (Kelvin, 或称开氏温度) 表示。黑体辐射理论是建立在热辐射基础上的，所以白炽灯一类的热辐射光源的光谱功率分布与黑体在可见光区的光谱功率分布比较接近，都是连续光谱，用色温的概念完全可以描述这类光源的颜色特性。

当一个黑体（如铁）被加热到一定的温度时开始发出暗红色的光，温度再升高时光的颜色就变成黄白色、白色、蓝白色。低色温呈暖色，高色温则呈冷色。例如，烛光的色温是 2000 K ，晴天中午时太阳的色温是 6500 K 。

根据 MaxPlanck 的理论，将一具有完全吸收与放射能力的标准黑体加热，温度逐渐升高光颜色亦随之改变。CIE 色坐标上的黑体曲线 (Blackbodylocus) 显示黑体的红—橙红—黄—黄白—白—蓝白的过程。黑体加温到出现与光源相同或接近光色时的温度，定义为该光源的相关色温，单位为 K。由于气体放电光源一般为非连续光谱，与黑体辐射的连续光谱不能完全吻合，所以都采用相关色温来近似描述其颜色特性。色温（或相关色温）在 3000 K 左右时，颜色偏黄。色温在 3300 K 以下的光源，颜色偏红，给人一种温暖的感觉。色温超过 5300 K 时，颜色偏蓝，给人一种清冷的感觉。不同色温的光，具有不同的照明和视觉效果。通常气温较高的地区，人们多采用色温高于 4000 K 的光源，而气温较低的地区则多用 4000 K 以下的光源。不同光源环境的相关色温见表 1-1。

表 1-1 不同光源环境的相关色温

光源	色温	光源	色温
北方晴空	8 000~8 500 K	高压汞灯	3 450~3 750 K
阴天	6 500~7 500 K	暖色荧光灯	2 500~3 000 K
夏日正午阳光	5 500 K	卤素灯	3 000 K
金属卤化物灯	4 000~4 600 K	钨丝灯	2 700 K
下午日光	4 000 K	高压钠灯	1 950~2 250 K
冷色荧光灯	4 000~5 000 K	蜡烛光	2 000 K

光源色温不同,光色也不同,色温在 3 300 K 以下有稳重的气氛,温暖的感觉;色温在 3 000 ~ 5 000 K 为中间色温,有爽快的气氛;色温在 5 000 K 以上有冷的气氛,清凉的感觉。不同光源的不同光色组成的气氛效果见表 1-2。

表 1-2 不同光源的不同光色组成的气氛效果

色温	光色	气氛效果
>5 000 K	清凉(带蓝的白色)	冷的气氛
3 300~5 000 K	中间(白)	爽快的气氛
<3 300 K	温暖(带红的白色)	稳重的气氛

在高色温光源照射下,如果亮度不高则给人们一种阴冷的气氛;在低色温光源照射下,亮度过高会给人们一种闷热的感觉。在同一空间使用两种光色差很大的光源,其对比将会出现层次效果,光色对比大时,在获得亮度层次的同时,又可获得光色的层次。不同的色温会引起人们在情绪上不同的反应,一般把光源的色温分成三类。

① 暖色光:暖色光的色温在 3 300 K 以下,暖色光与白炽灯光色相近,红光成分较多,给人以温暖、健康、舒适的感觉,适用于家庭、住宅、宿舍、医院、宾馆等场所,或者温度比较低的地方。

② 暖白光:又称中间色,它的色温在 3 300 ~ 5 300 K 之间。暖白光光线柔和,使人有愉快、舒适、安祥的感觉,适用于商店、医院、办公室、饭店、餐厅、候车室等场所。

③ 冷色光:又称日光色,它的色温在 5 300 K 以上,光源接近自然光,有明亮的感觉,使人精力集中,适用于办公室、会议室、教室、绘图室、设计室、图书馆的阅览室、展览橱窗等场所。

2. 光源的显色性

牛顿在 1664 年用棱镜把白色的太阳光色散成不同色调的光谱,奠定了光颜色的物理基础。1860 年麦克斯韦用不同强度的红、黄、绿三色光配出了从白光一直到各种颜色的光,奠定了三色色度学的基础。在此基础上,1931 年国际照明委员会建立了 CIE 色度学系统,并不断完善。如今 CIE 色度学系统已广泛用于定量地表达光的颜色。

颜色离不开照明,只有在光照下物体才有可能显示出颜色,而且光的颜色对人们的心理有非常大的影响。在不同光源照射下,同一个物体会显示出不同的颜色。例如,绿色的树叶在绿光照射下,呈鲜艳的绿色,在红光照射下近于黑色。由此可见,光源对被

照物体颜色的显现，起着重要的作用。光源在照射物体时，能否充分显示被照物颜色的能力，称为光源的显色性。1965年，国际照明委员会推荐在CIE色度学系统中，用一般显色指数 R_a 来描述光源的显色性。

光源对物体颜色呈现的程度称为显色性，也就是颜色的逼真程度。光源的显色性是由显色指数来表明的，它表示物体在光源下颜色比基准光（太阳光）照明时颜色的偏离，能较全面反映光源的颜色特性。显色性高的光源对颜色的表现较好，人们所看到的颜色也就较接近自然颜色，显色性低的光源对颜色的表现较差，所看到的颜色偏差也较大。

显色性有高低之分，其关键在于该光的特性。可见光的波长在380～780 nm之间，也就是在光谱中见到的红、橙、黄、绿、青、蓝、紫光的范围，如果光源所放射的光中所含的各色光的比例与自然光相近，则眼睛所看到的颜色也就较为逼真。

光源对物体的显色能力是通过与同色温的参考或基准光源（白炽灯）下物体外观颜色的比较得出的。光所发射的光谱内容决定光源的光色，但同样光色可由许多、少数甚至仅仅两个单色的光波合成，对各个颜色的显色性亦大不相同。相同光色的光源会有相异的光谱组成，光谱组成较广的光源较有可能提供较佳的显色品质。当光源光谱中很少或缺乏物体在基准光源下所反射的主波时，会使颜色产生明显的色差（colorshift）。色差程度越大，光源对该色的显色性越差。显色分为如下两种。

① 忠实显色：能正确表现物质本来的颜色需使用显色指数（ R_a ）高的光源，其数值接近100。

② 效果显色：要鲜明地强调特定色彩，表现美的生活可以利用加色的方法来加强显色效果。采用低色温光源照射，能使红色更加鲜艳；采用中等色温光源照射，能使蓝色具有清凉感；采用高色温光源照射，能使物体有冷的感觉。

太阳光和白炽灯均辐射连续光谱，在可见光的波长（380～760 nm）范围内，包含着红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等各种色光。物体在太阳光和白炽灯的照射下，显示出它的真实颜色，但当物体在非连续光谱的气体放电灯照射下，颜色就会有不同程度的失真。为了对光源的显色性进行定量的评价，引入显色指数的概念。以标准光源为准，将其显色指数定为100，其余光源的显色指数均低于100。显色指数用 R_a 表示， R_a 值越大，光源的显色性越好。在国际照明协会中一般把显色指数分成五类，见表1-3。

表1-3 国际照明协会对显色指数的分类

类别	R_a	显色性	适用范围
1A	>90	优良	需要色彩精确对比的场所，美术馆、博物馆及印刷等行业及场所
2B	80～90		需要色彩正确判断的场所，家庭、饭馆、高级纺织工艺及相近行业
2	60～80	普通	需要中等显色性的场所，办公室、学校、室外街道照明
3	40～60		对显色性的要求较低的场所，重工业工厂、室外街道照明
4	20～40	较差	对显色性无具体要求的场所，室外道路照明及一些要求不高的地方

光源显色指数表示光源的色彩还原性能，即所谓灯下辨色性能。为了自然真实表现被照物色彩，光源的显色指数应大于80以上。把白炽灯的显色指数定义为100，视为理想的基准光源。



1.2 光源

人类在大约 50 万年前就以燃烧树木产生的火焰及光作为光源使用, 这就是最早的光源。随着人类文明的进步, 之后用烧植物油及矿物油来产生光。1879 年爱迪生发明了白炽灯, 它以碳棒作为灯丝, 是照明技术的巨大改进; 1938 年发明的日光灯 (或称为荧光灯) 可以减少热的损失, 节省能源的消耗, 这又是一大进步, 后来紧凑型日光灯的开发使其应用更为普遍; 同时高压气体放电 (High Intensity Discharge, HID) 灯, 如水银灯、金属卤素灯及钠灯等的发明可在室外实现照明, 满足了各方面的需要。目前约有 21% 的电能用于照明, 如果能在固体照明领域节省一半的能源, 则会对人类节约能源做出巨大的贡献。

1.2.1 电光源

光是由光源产生的, 如太阳、蜡烛和电灯。其中太阳是天然光源, 蜡烛和电灯是人工光源。由于可利用的天然光源所产生的光仅占整个光家族的很小部分, 所以人类一直在努力开发和利用各种各样的人工光源。任何一种新人工光源的发明和利用, 都标志着人类文明新的进步, 美国发明家爱迪生成功地制造出第一只可使用的白炽灯泡, 开创了人类电气照明的新纪元。1905 年奥地利人优斯特与哈纳曼采用积压绕结的方法第一次成功地制造出钨丝白炽灯泡, 也是一个重要的里程碑。

电光源是指将电能转换为光能的器件或装置, 广泛用于日常照明、工农业生产、国防和科研等方面。人类对电光源的研究始于 18 世纪末。19 世纪初, 英国的戴维发明碳弧灯。1879 年, 美国的爱迪生发明了具有实用价值的碳丝白炽灯, 使人类从漫长的火光照明进入电气照明时代。1907 年采用拉制的钨丝作为白炽体。1912 年, 美国的朗缪尔等人对充气白炽灯进行研究, 提高了白炽灯的发光效率并延长了寿命, 扩大了白炽灯的应用范围。20 世纪 30 年代初, 低压钠灯研制成功。1938 年, 欧洲和美国研制出荧光灯, 发光效率和寿命均为白炽灯的 3 倍以上, 这是电光源技术的一大突破。20 世纪 40 年代, 高压汞灯进入实用阶段。20 世纪 50 年代末, 体积和光衰极小的卤钨灯问世, 改变了热辐射光源技术进展滞缓的状态, 这是电光源技术的又一重大突破。20 世纪 60 年代开发了金属卤化物灯和高压钠灯, 其发光效率远高于高压汞灯。20 世纪 80 年代出现了细管径紧凑型节能荧光灯、小功率高压钠灯和小功率金属卤化物灯, 使电光源进入了小型化、节能化和电子化的新时期。

电光源自 19 世纪 80 年代发明以来, 至今已有 100 多年的历史。人类社会的发展, 科学技术的进步, 使电光源技术获得了突飞猛进的发展。配合各种光源的使用, 产生了造型多姿多彩、风格各异的灯具, 为照明设计提供了广阔的发挥空间。今天的人工照明已不是单一的灯光, 而是将多种照明电器与环境装饰紧密结合, 形成了一门照明电器装饰综合艺术。

近年来, 装饰与艺术照明在建筑中的美化作用与日俱增, 灯光不仅为人们的工作、学习和生活提供了良好的视觉条件, 并体现出一定的风格, 增加了建筑艺术的美感, 使环境空间更加符合人们的心理和生理上的需求, 从而得到美的享受和心理平衡。

现代建筑物不仅注重室内空间的构成要素, 更为重视的是电气对室内空间环境的美学效果及由此对人们所产生的心理效应。因此, 一切居住、娱乐、社交场所的照明设计的首要任务是艺术主题和视觉的舒适性, 电光源的迅速发展, 使现代设计不但能提供良

好的光照条件，而且在此基础上可利用光的表现力对室内空间进行艺术加工，从而共同创造现代生活的文明。

不同的国家，不同的人在不同的时期，由于生活习惯、经济文化和环境的差异，人们对照明的要求是不同的，于是产生了不同的照明设计风格和手法。所以在照明设计时要考虑上述情况，并要结合当时的光源、灯具及使用环境等因素。

电光源的发明促进了电力装置的建设。电光源的转换效率高，电能供给稳定，控制和使用方便，安全可靠，并可方便地用仪表计量耗能，故在其问世后 100 多年中，很快得到了普及。它不仅成为人类日常生活的必需品，而且在工业、农业、交通运输及国防和科学研究中，都发挥着重要作用。电光源的发光方法有：

① 电阻发光，这是一种利用导体自身的固有电阻通电后产生热效应，达到炽热程度而发光的方法，如常用的白炽灯、碘钨灯等。

② 电弧发光，这是一种利用两个电极放电产生高热电弧而发光的方法，如碳精灯。

③ 气体发光，这是一种在透明玻璃管内注入稀薄气体和金属蒸气，利用两个电极放电使气体高热而发光的方法，如钠灯、镝灯等。

④ 荧光粉发光，这是一种在透明玻璃管内注入稀薄气体或微量金属，并在玻璃管内壁涂上一层荧光粉，利用两个电极放电后借气体的发光作用使荧光粉吸收再发出另一种光的方法，如荧光灯等。

电光源的形态有千万种，按其发光源划分可分为固体发光和气体发光两大类。固体发光光源包括白炽类光源和 LED（发光二极管）。凡可以将其他形式的能量转换成光能，从而提供光通量的设备、器具统称为光源；而其中可以将电能转换为光能，从而提供光通量的设备、器具则称为电光源。电光源一般可分为照明光源和辐射光源两大类。照明光源是以照明为目的的，辐射出的光谱主要为人眼视觉的可见光谱（380 ~ 780 nm），其规格品种繁多，功率从 0.1 W 到 20 kW，产量占电光源总产量的 95% 以上。辐射光源是不以照明为目的的，能辐射大量紫外光谱（1 ~ 380 nm）和红外光谱（780 ~ 1×10^6 nm）的电光源，它包括紫外光源、红外光源和非照明用的可见光源。以上两大类光源均为非相干光源。此外，还有一类相干光源，它通过激发态粒子在受激辐射作用下发光，输出光波波长从短波紫外线直到远红外线，这种光源称为激光光源。

照明光源品种很多，按发光形式分为热辐射电光源、气体放电电光源和电致发光电光源三类。

① 热辐射电光源。电流流经导电物体，使之在高温下辐射光能的光源。包括白炽灯和卤素灯两种。

② 气体放电电光源。电流流经气体或金属蒸气，使之产生气体放电而发光的光源。气体放电有弧光放电和辉光放电两种，放电电压有低气压、高气压和超高气压三种。弧光放电电光源包括：荧光灯、低压钠灯等低气压气体放电灯，高压汞灯、高压钠灯、金属卤化物灯等高强度气体放电灯，超高压汞灯等超高气压气体放电灯，以及碳弧灯、氙灯；此外，还有某些光谱光源。辉光放电电光源包括：利用负辉区辉光放电的辉光指示光源和利用正柱区辉光放电的霓虹灯，二者均为低气压放电灯；此外，还有某些光谱光源。

③ 电致发光电光源。在电场作用下，使固体物质发光的光源。它将电能直接转变为光能。包括场致发光光源和发光二极管两种。

在这三类电光源中,各种电光源的发光效率有较大差别,热辐射电光源如白炽灯,它利用斯忒藩-玻耳兹曼定律:物体温度越高,它辐射出的能量越大。这可用下式表示:

$$E = \mu \xi T^4 \quad (1-1)$$

式中, E 为物体在温度 T 时单位面积和单位时间内的辐射总能量; μ 为斯忒藩-玻耳兹曼常数 ($\mu = 5.6697 \times 10^{-12} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^4)$); ξ 为比辐射率,即物体表面辐射本领与黑体辐射本领的比值; T 为物体的绝对温度。

利用热致发光原理制成电光源的特点是:制作简单、成本低,但发光效率低,其余的能量则以热的形式消耗掉。白炽灯的发光效率一般为 $7 \sim 20 \text{ lm/W}$,仅有 11%,红外、热能消耗分别占 69%、20%,大部分能量被发热损耗了。

由于气体放电灯的功率可以做得较大(数千瓦),发光效率又高,所以是一种绿色照明电光源。常用照明电光源分类图如图 1-1 所示。

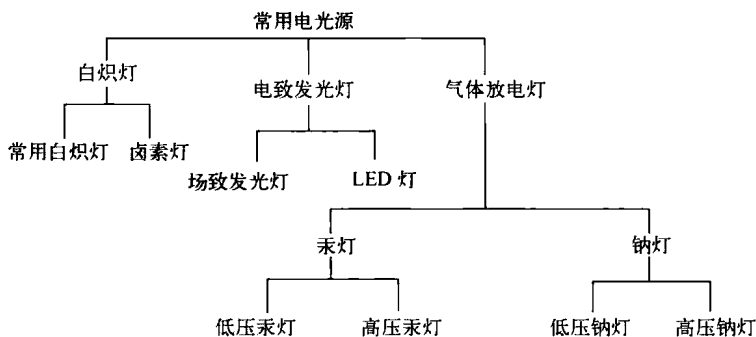


图 1-1 常用照明电光源分类图

由于气体放电电光源在灯的发光效率和工作寿命方面具有白炽灯无可比拟的优势,因此,从它诞生之日起就一直受到人们的广泛关注,由此派生的产品可谓异彩纷呈。目前,市场上已有约 5 000 多种电光源。热辐射电光源以普通白炽灯泡和卤钨系列灯泡为代表。气体放电电光源,主要是指弧光放电电光源和辉光放电电光源,如荧光灯、高强度气体放电灯和霓虹灯等。弧光放电电光源又可分为低气压气体放电电光源和高强度气体放电电光源。

低气压气体放电电光源以荧光灯及节能灯为代表;高强度气体放电电光源以高压水银荧光灯、高压钠灯和金属卤化物灯为代表。例如,高压钠灯的发光效率是白炽灯的 $8 \sim 10$ 倍,寿命长、特性稳定、光通量维持率高,适用于显色性要求不高的道路、广场、码头、室内高大的厂房、仓库等场所。

(1) 气体放电电光源按放电形式划分为弧光放电灯、辉光放电灯。

① 弧光放电灯。这类气体放电电光源主要利用弧光放电柱产生光。阴极工作在较高温度下,所以又叫热阴极气体放电电光源。这类气体放电电光源通常需要专门的启动器才能工作,主要有荧光灯、汞灯、钠灯等。

② 辉光放电灯。这类气体放电电光源由辉光放电柱产生光,放电时阴极温度不高,所以又叫冷阴极气体放电电光源。阳极到阴极的电压降较大(100 V 左右),电流密度小。霓虹灯即属此类。

(2) 气体放电电光源按放电时电流经过的媒质划分为气体放电灯、金属蒸气灯。

① 气体放电灯。利用气体的放电发光,如氙灯、荧光灯和氖灯等。

② 金属蒸气灯。利用金属蒸气（如汞蒸气、钠蒸气等）产生光，如汞灯、钠灯等。

(3) 气体放电电光源按放电时灯内大气压的高低划分为低气压灯、高气压灯和超高气压灯。

① 低气压灯。放电时，灯内气压为1%个大气压左右，如荧光灯、低压钠灯等。

② 高气压灯。放电时，灯内气压为1~5个大气压，如高压汞灯、高压钠灯、高压氙灯等。

③ 超高气压灯。放电时，灯内气压大于10个大气压，如镝灯、铊钠灯、钠铊烟灯等。

其中高压汞灯的发光效率可达50 lm/W，显色指数 R_a 超过65，色温为4 000~6 000 K，寿命也可达到10 000 h，功率规格有35~3 500 W，已形成系列化。高压钠灯发光效率达到120 lm/W，显色指数 R_a 为25，寿命达到24 000 h，功率规格有30~1 000 W。HID灯所散发的热量只是卤素灯的一半，灯具寿命可达2 500 h以上。

荧光灯比白炽灯节电70%，适用于在办公室、宿舍及顶棚高度低于5 m的车间等室内场合。紧凑型荧光灯发光效率比普通荧光灯高5%，细管型荧光灯比普通荧光灯节电10%，因此，紧凑型 and 细管型荧光灯是当今“中国绿色照明工程”实施方案中推出的高效节能电光源。

不同类型的电光源有不同的结构，但一般都具有以下几部分的零部件：作为发光体的灯丝、电极、荧光粉；作为发光体外壳的玻璃、半透明陶瓷管、石英管；作为引线的导丝、芯柱、灯头；作为填充物的各类气体、汞、金属及其卤化物；消气剂、各类涂层、绝缘件及黏结剂等。

电光源主要性能指标有以下六项。

① 光量特性指标。包括总光通量、亮度、发光强度、紫外线量和热辐射量等。光源的光通量表着光源的发光能力，是光源的重要性能指标。光源的额定光通量是指光源在额定电压、额定功率的条件下工作，并能无拘束地发出光的工作环境下的光通量输出。

光源的光通量随光源点燃时间会发生变化，即点燃时间越长，光通量因衰减而变得越小。大部分光源在点燃初期光通量衰减较多，随着点燃时间的增长，衰减也逐渐减小。光源的额定光通量有两种情况：一种指电光源的初始光通量，即新光源刚开始点燃时的光通量输出，它一般用于在整个使用过程中光通量衰减不大的光源，如卤钨灯；另一种情况是指光源使用了100 h后的光通量输出，它一般用于光通量衰减较大的光源，如荧光灯。

② 光色特性指标。包括光色、色温、显色性、色度和光谱分布等。显色性是光源的一个重要性能指标。通常情况下，光源一般用显色指数衡量其显色性，大概分为四组，在对某些颜色有特殊要求时则采用特殊显色指数。

光源的色表是指其表观颜色，它和光源的显色性是两个不同的概念。例如，高压汞灯的灯光从远处看又白又亮，色表较好，但在该灯光下人的脸部呈现青色，说明它的显色性并不是很好。色表同样是电光源的重要性能指标。光源的色表虽然可以用红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等形容词来表示，但为了定量表示，常用相关色温来度量。

③ 电气特性指标。包括消耗功率、灯电压、灯电流、启动特性和干扰噪声等。电光源启燃时间是指电光源启燃后达到额定光通量输出所需的时间。热辐射电光源的启燃时间一般不足1 s，可认为是瞬时启燃的；气体放电电光源的启燃时间从几秒到几分钟不等，取决于光源的种类。

电光源的再启燃时间是指正常工作的光源熄灭后再将其点燃所需的时间，大部分高压气

体放电电光源的再启燃时间比启燃时间更长,这是因为再启燃时要求这种光源冷却到一定的温度才能正常启燃,即增加了冷却所需要的时间。

④ 机械特性。包括几何尺寸、灯结构和灯头等。

⑤ 经济特性。包括发光效率、寿命、价格和电费等。光源的光通量输出与它取用的电功率的比称为光源的发光效率,简称光效,单位是 lm/W 。在照明设计中应优先选用光效高的光源。

- 平均寿命。光源从第一次点燃起,一直到损坏熄灭为止,累计点燃小时数称为光源的全寿命。电光源的全寿命有相当大的离散性,即同一批电光源虽然同时点燃,却不会同时损坏,它们将有先有后陆续损坏,且可能有较大的差别,因此常用平均寿命的概念来定义电光源的寿命。取一组电光源作试样,从一同点燃起计时,到 50% 的电光源试样损坏为止,所经过的小时数就是该组电光源的平均寿命。一般光通量衰减较小的光源常用平均寿命作为其寿命指标。

- 有效寿命。电光源在使用过程中光通量将随时间的增加而逐渐衰减。有些电光源的光通量衰减到一定程度时,虽然光源尚未损坏,但它的光效明显下降,继续使用极不经济。电光源从点燃起,一直到光通量衰减到某个百分比所经过的点燃小时数称为光源的有效寿命。一般取 70% ~ 80% 额定光通量作为更换光源的依据。荧光灯一般用有效寿命作为其寿命指标。

⑥ 心理特性。包括灯外观和舒适性等。

电光源的主要发展趋势是:提高发光效率,开发体积小的高效节能光源,改善电光源的显色性,延长寿命。达到上述目的的具体途径是开发研制新型材料、采用新工艺,以及进一步研究新的发光机理,开发新型电光源,而最为现实的途径则是改进现有电光源的制造技术,采用新型的、自动化性能好的生产设备。

1.2.2 固体发光光源

1. 普通白炽灯

以爱迪生为代表发明的白炽灯,经过几代科技人员 120 多年的努力,白炽灯的发光效率平均每年增长 0.11 lm/W ,至今发光效率增加了 10 倍、寿命提高了 500 倍、价格下降了 10 倍,满足了人们对 $400 \sim 2000 \text{ lm}$ 光通量的室内照明的需要。

白炽灯是人们熟悉的电光源,它是利用电流通过钨丝将其加热到白炽状态而发光的,所以白炽类电光源又被称为热辐射电光源。白炽灯消耗的电能绝大部分都转换成了热能,转换为光的效率非常低(大约 7% 的电能被转换成光)。

白炽灯是用黑体发热的,主要以钨丝作灯丝,因为钨有高熔点 (3683 K) 及低蒸发率。只是白炽灯大部分的光是红外线,钨丝放热比黑体稍微蓝移,即向短波长方向移,如图 1-2 所示,所以发光效率比较高,而蓝移也不影响显色性 (Color Rendering Index, CRI)。一般钨丝都卷成螺旋形放在球形玻璃壳中,并充入不起反应的惰性气体,如氩气及少数氮气,而 40 W 以下的白炽灯则多数是抽真空。灯丝通电后,钨丝呈炽热状态并辐射发光。灯丝温度越高,辐射的可见光比例就越高,即灯丝将电能转换为可见光的效率就越高。随着白炽灯光效率的增加,灯丝温度的升高,钨灯丝的蒸发速度也增加,从而使灯的寿命缩短。

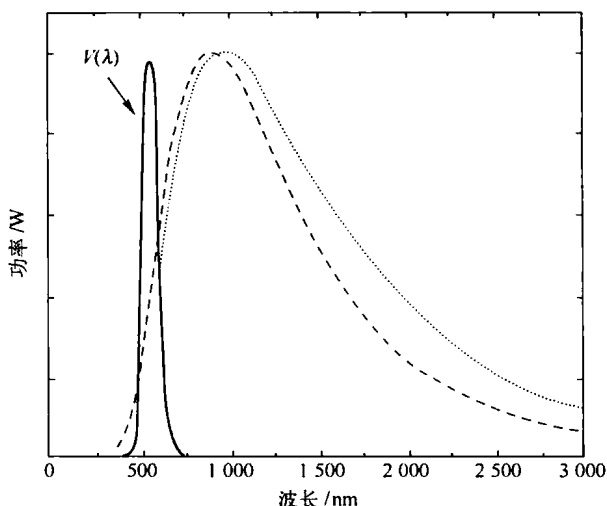


图 1-2 黑体（点虚线）及钨丝发热体（短虚线）在 3 000 K 时的光谱

因为白炽灯的大部分辐射光是红外线，所以 120 V 白炽灯的发光效率在 2 400 K 时约为 8 lm/W，一般 100 W 白炽灯只有 7% 的电能转变为可见光。白炽灯寿命衰减的主要原因是钨丝蒸发，白炽灯的一般寿命为 750 ~ 1 000 h，但是因为白炽灯廉价，所以被大量应用在住宅。

白炽灯的重要特性是：辐射的色表随着辐射体的温度的升高从暗红经过橘黄到发白，最后到炽蓝。色温也随着辐射体的温度升高而提高。

白炽灯之所以使用钨做灯丝材料是因为钨在高温下的低蒸发率及可以被抽成细丝等其他性质。电流在金属导线中流过时会有一定的消耗，当输入功率与辐射功率及其他功率损失的总和精确平衡时，就达到了一个稳定态。

普通照明白炽灯显色性好 ($R_a = 100$)、开灯即亮、可连续调光、结构简单、价格低廉，但寿命短、光效低。白炽灯有较宽的工作电压范围，从电池提供的几伏电压到市电电压，不需要附加电路。灯头是白炽灯电连接和机械连接部分，按形式和用途主要可分为螺口式灯头、聚焦灯头及特种灯头。在普通白炽灯中，最常用的螺口式灯头为 E14、E27；最常用的插口式灯头为 B15、B22。白炽灯常用于住宅基本照明及装饰照明，具有安装容易、立即启动、成本低廉等优点。白炽灯主要部件有：灯丝、支架、泡壳、填充气体、灯架。

2. LED 照明技术

自从 1968 年第一批 LED 开始进入市场，至今已有 40 多年，随着新材料的开发和工艺的改进，LED 趋于高亮度化、全色化，在氮化镓基底的蓝色 LED 出现后，更是扩展了 LED 的应用领域，LED 的主要应用领域包括：大屏幕彩色显示、照明灯具、激光器、多媒体成像、LCD 背景光源、探测器、交通信号灯、仪器仪表、光纤通信、卫星通信、海洋光通信、图形识别等，但目前还主要是作为照明和显示用。

LED 由超导发光晶体产生超高强度的光，它发出的热量很少，不像白炽灯浪费太多热量，也不像荧光灯因消耗高能量而产生有毒气体，也不像霓虹灯要求高电压而容易损坏，LED 已被全球公认为新一代的环保高科技光源。