

LED

相控调光与应用

路秋生 © 编著

LED XIANGKONG TIAOGUANG YU YINGYONG



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



LED

相控调光与应用

路秋生 © 编著

LED XIANGKONG TIAOQUANG YU YINGYONG

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书共分4章,主要内容有LED照明与有关技术特性,LED照明对驱动电路的要求,LED相控调光及常用LED相控调光电路与应用等。

本书适合从事LED照明的有关工程技术人员和有关LED驱动电路的设计和应用人员阅读,也适合有关院校电子技术专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

LED相控调光与应用/路秋生编著. —北京:机械工业出版社,2013.6
ISBN 978-7-111-42413-0

I. ①L… II. ①路… III. ①发光二极管—照明光源②发光二极管—电子电路 IV. ①TN383

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第093375号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:江婧婧 责任编辑:江婧婧

版式设计:常天培 责任校对:丁丽丽

封面设计:赵颖喆 责任印制:李洋

中国农业出版社印刷厂印刷

2013年7月第1版第1次印刷

184mm×260mm·18.75印张·460千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-42413-0

定价:49.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前言

LED (Light Emitting Diode) 照明具有发光效率高、使用方便、体积小、启动方便、启动时间短、易于调光控制、节能、环保等一系列优点,被公认为是继白炽灯、荧光灯和高强度气体放电灯 (HID 灯) 之后有广泛应用前景的第 4 代电光源。

目前 LED 在室内外照明、汽车照明、信号指示、大屏幕显示、背光照明等场合得到了广泛应用。

节能、环保、构建和谐和环境友好社会,促进社会和谐可持续发展是当前社会关注的主题。

LED 调光具有节能的优良特性,适应人们对照明效果的需求。利用照明调光可以营造舒适的照明环境和特殊的照明效果,也可以使照明效果灵活多变。

LED 照明调光在我们日常生活和工作中得到了广泛的应用。例如液晶显示 (Liquid Crystal Display, 简称 LCD) 平板电视的 LED 背光照明亮度调节,台式电脑和笔记本电脑 LCD 显示屏幕亮度调节,LED 照明效果的亮度调节等都对调光提出了技术要求,而在这些应用场合 LED 都得到了广泛的应用。

LED 照明调光的具体实现方法有多种,例如利用线性调节通过 LED 的正向工作电流大小可以实现 LED 的发光亮度控制,但是这种调光控制方法会产生 LED 发光颜色也随之变化的问题,在对发光颜色要求严格的应用场合,这种调光控制方法的应用受到限制。

利用调节通过 LED 正向工作电流脉冲宽度的方法也可以实现 LED 发光亮度的调节,这种调光控制方法由于通过 LED 的电流幅值保持稳定,可以避免线性调节通过 LED 正向工作电流调光存在的问题,但是须有相关的脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, 简称 PWM) 信号产生电路和控制电路,对电路的实现成本有一定要求。

由于目前在社会上存在大量白炽灯相控调光控制电路,这些相控调光电路具有电路实现简单,电路造价低和易于使用的一系列优点,在社会上得到了广泛的应用。特别是晶闸管前沿相控调光电路结构简单,电路造价比相控后沿调

光电路低，也更易于实现，应用面广。

而 LED 照明调光为了和现已有的调光设备配合使用，充分利用现有的投资，LED 前沿相控晶闸管调光是个很热的主题。有很好的市场需求和应用前景。目前世界上许多著名的半导体集成电路生产厂商推出了许多 LED 调光驱动控制电路，有的利用模拟控制技术实现 LED 的调光驱动控制，有的利用数字技术实现 LED 的调光驱动控制，性能优异。而其中就有许多是针对 LED 相控调光控制的，为扩展 LED 相控调光驱动控制电路的适用范围，许多公司推出的是既可以适用于前沿相控晶闸管调光驱动控制，也可以适用于后沿相控调光控制和无调光控制驱动的自适应驱动控制集成电路。可以自动识别电路中连接的相控调光控制器类型，使电路工作于相应的工作状态。

集成电路是一种知识集成和解决方案集成的产品，极大简化了具体电路的实现，丰富了电路功能，在 LED 驱动控制电路中得到了很好的应用。

据美国电气制造商协会（简称 NEMA）的统计，目前市面上有 200 余种前沿相控晶闸管调光器，在制作 LED 相控调光电路时需注意电路的相控调光器种类的适用范围，使制作出的 LED 相控调光电路应用范围更广，使用效果更佳。

为了使读者能更好地了解相控调光的有关内容，作者列出了有关参考文献来源，供参考。由于水平有限，书中难免有许多不足之处，望读者多多批评指正。

作 者

2013 年 2 月 26 日

目 录

前言

第 1 章 LED 照明与有关技术特性	1
1.1 LED 照明与有关术语	1
1.1.1 LED 照明的优点	1
1.1.2 LED 照明的有关术语	3
1.2 LED 的工作特性	6
1.2.1 LED 的 V/I 特性	6
1.2.2 LED 的温度工作特性	8
1.2.3 LED 的光学特性	10
1.3 LED 的分类与特点	12
1.3.1 LED 的分类	12
1.3.2 高亮度 LED (HB-LED)	13
1.3.3 交流 LED (AC LED)	14
1.3.4 OLED	15
第 2 章 LED 照明对驱动电路的要求	21
2.1 LED 驱动电路的主要功能和技术要求	21
2.1.1 LED 驱动电路的主要功能	21
2.1.2 LED 驱动电路的技术要求	21
2.1.3 LED 照明测试的有关项目和有关评价机构	24
2.2 LED 常用驱动电路与特点	25
2.2.1 常用变换器电路拓扑与特点	25
2.2.2 LED 对驱动电路的要求	38
2.2.3 LED 驱动电路的设计	39
2.3 LED 光引擎与 Zhaga 联盟	42
2.3.1 LED 光引擎	42
2.3.2 Zhaga 联盟与有关活动	43
第 3 章 LED 相控调光	56
3.1 LED 常用调光方法与特点	56
3.1.1 LED 调光	56
3.1.2 LED 调光工作原理与特点	59
3.2 LED 相控调光工作原理与分类	61
3.2.1 LED 相控调光工作原理	61
3.2.2 LED 相控调光分类	62

3.2.3 泄放电路与阻尼电路	67
3.2.4 数字相控调光	72
3.3 LED 相控调光的有关技术要求	72
3.3.1 LED 相控调光的主要技术指标	72
3.3.2 LED 相控调光需注意的有关问题	73
第4章 常用 LED 相控调光电路与应用	75
4.1 TI 公司常用 LED 相控调光驱动电路	75
4.1.1 采用 LM3450/A 的 LED 相控调光驱动电路	75
4.1.2 采用 LM3445 的 LED 相控调光驱动电路	103
4.1.3 采用 LM3447 的 LED 相控调光驱动电路	123
4.1.4 采用 TPS92210 的 LED 相控调光驱动电路	141
4.1.5 采用 TPS92010 的 LED 相控调光驱动电路	150
4.1.6 采用 TPS92070 的 LED 相控调光驱动电路	156
4.2 Fairchild 公司常用 LED 相控调光驱动电路	164
4.2.1 采用 FL7730 的 LED 相控晶闸管调光驱动电路工作原理	164
4.2.2 采用 FL7730 的 8W 相控晶闸管调光 LED 驱动电路	166
4.3 NXP 公司常用 LED 相控调光电路与应用	167
4.3.1 采用 SSL2101 的 LED 相控调光驱动电路	167
4.3.2 采用 SSL2102 的 LED 相控调光驱动电路	175
4.3.3 采用 SSL2103 的 LED 相控调光驱动电路	183
4.3.4 采用 SSL1750 的 LED 相控晶闸管调光驱动电路	192
4.4 ICL8001G 相控晶闸管 LED 调光驱动电路与应用	205
4.4.1 ICL8001G 的特点与工作原理	205
4.4.2 采用 ICL8001G 的 LED 相控晶闸管 9W 调光应用电路	207
4.5 Onsemi 公司常用相控调光驱动电路与应用	209
4.5.1 NCL30000 的特点与工作原理	209
4.5.2 采用 NCL30000 的 17W 相控晶闸管 LED 调光驱动电路	212
4.6 iWatt 公司常用相控调光 LED 驱动电路	218
4.6.1 iW3612 的工作原理与应用	218
4.6.2 iW3614 的工作原理与应用	227
4.7 Marvell 公司常用 LED 相控调光驱动电路与应用	231
4.7.1 Marvell 88EM8080/81 的工作原理与应用	231
4.7.2 Marvell 88EM8183 的工作原理与应用	236
4.8 PI 公司常用 LED 相控调光驱动电路与应用	239
4.8.1 PI 公司 LED 驱动器 LinkSwitch-PL 系列产品的工作原理与应用	239
4.8.2 PI 公司 LED 驱动器 LinkSwitch-PH 系列产品的工作原理与应用	249
4.9 Cirrus Logic 公司常用 LED 相控调光驱动电路与应用	257
4.9.1 CS1610/11/12/13 相控 LED 调光驱动电路的工作原理与应用	257
4.9.2 CS1631 两路输出相控 LED 调光驱动电路的工作原理与应用	267
4.10 Maxim 公司常用 LED 相控调光驱动电路与应用	280
4.10.1 MAX16841 的特点与工作原理	280
4.10.2 采用 MAX16841 的 10W 相控晶闸管 LED 调光电路	284
参考文献	288

第 1 章 LED 照明与有关技术特性

1.1 LED 照明与有关术语

1.1.1 LED 照明的优点

1962 年 Nick Holonyak, Jr. (Nick Holonyak, Jr. 是 IEEE 的资深会员) 和他的两个研究生 M. George Craford [M. George Craford 是 LumiLeds 公司 (现 Philips 公司) 的技术负责人] 和 Russell Dean Dupuis 一起做出了世界上第一只 LED (Light Emitting Diode)。Nick Holonyak, Jr. 是 IEEE 荣誉金奖的获得者, 自 1963 年以来是美国伊利诺伊州大学教授。

M. George Craford 在 1972 年做出了第一只黄光 LED, 是目前美国获得国家技术金奖和国家科学金奖的 13 人之一^[1]。

至今, LED 的出现已有 50 余年的历史, LED 在应用范围、技术性能上已有很大进步。起初, LED 主要用于指示灯的应用场合, 发光亮度有限。现 LED 已广泛用于室内外照明、汽车照明、LCD 背光照明、大屏幕显示等场合。由于 LED 的发光效率较白炽灯的发光效率高许多, 比荧光灯、金卤灯、钠灯等 HID 灯的发光效率高、体积小、易于使用、无环境污染、调光控制灵活, 被认为是应用前景非常好的第 4 代电光源。

据有关资料报道, 目前 LED 实验室水平的发光效率已高达 208 lm/W (APEC 2011 年会议介绍), 并且随着技术进步 LED 的发光效率还会进一步提高。

LED 是一种 PN 结结构, 其端电压具有一定势垒, 对 LED 施加正向电压, 势垒下降, P 区和 N 区的多子互相扩散, 而空穴比电子的迁移率小得多, 所以大量电子向 P 区扩散, 对 P 区注入少数载流子。价带上的空穴与电子复合, 得到的能量以光能的形式释放。这就是 LED 的发光原理。

至今, LED 的技术性能已有很大提升, 在手机、平板电视、室内外照明等场合得到了广泛的应用。

安捷伦公司的前任科学家 Roland Haitz 从 1965 年 LED 商业化至今的发展历程观察得出, LED 的价格每 10 年将为原来的 1/10, 性能则提高 20 倍。以此为基础提出了关于 LED 发展的 Haitz 定律, 给 LED 发展留出很大的想象空间。实际工作中得出的结论与预测如图 1-1 所示^[2], 能很好地和 Haitz 定律吻合。LED 发展演进 (DOE 2011 MYPP) 如表 1-1 所示, LED 发光效率的进展如图 1-2 所示^[3]。

表 1-1 LED 发展演进 (DOE 2011 MYPP)^[4]

LED 技术指标	单 位	2010 年	2012 年	2015 年	2020 年
LED 发光效率 (暖白光)	lm/W	96	141	202	253
LED 价格 (暖白光)	\$/klm	18	7.5	2.2	1
LED 发光效率 (冷白光)	lm/W	134	176	224	258

(续)

LED 技术指标	单 位	2010 年	2012 年	2015 年	2020 年
LED 价格 (冷白光)	\$/klm	13	6	2	1
OEM 灯价格	\$/klm	50	23	10	5

注: 1. 对冷白光封装 LED 假定: 相关色温 (CCT) = 4746 ~ 7040K 和显色指数 (CRI) = 70 ~ 80, 对暖白光封装 LED 假定: 相关色温 = 2580 ~ 3710K 和显色指数 = 80 ~ 90。

2. 发光效率是在 25℃ 和驱动电流密度为 35 A/cm² 的条件下测得的。

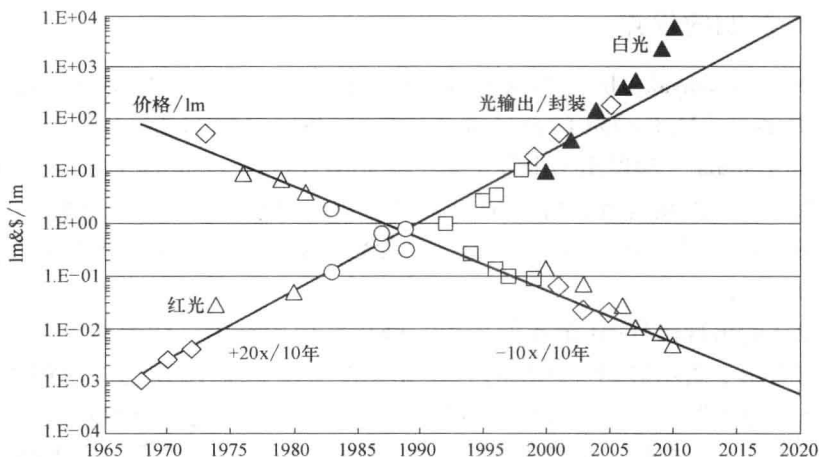


图 1-1 实际工作中得出的结论与预测

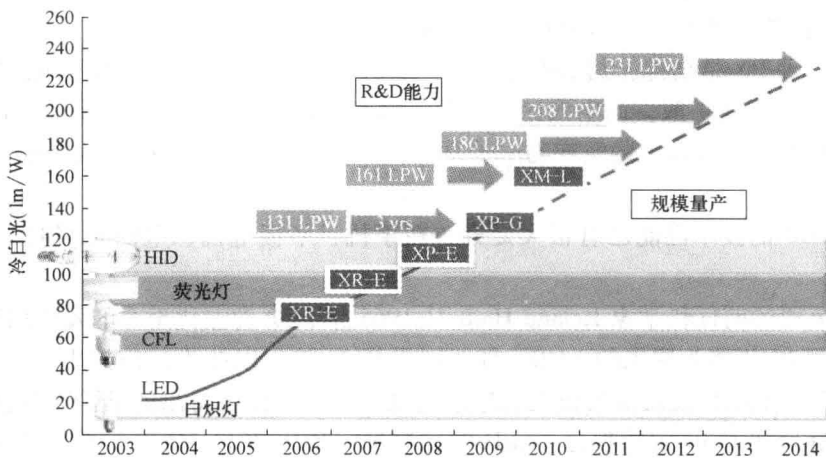


图 1-2 LED 发光效率的进展 (Cree 公司 2012 年给出的数据)

LED 照明主要有以下优点:

- 1) 使用安全, 工作电压在 1.5 ~ 3.5V 之间;
- 2) 在低温环境下工作效果好, 没有冷启动的问题;
- 3) 发光方向性好, 没有浪费的发光, 发光形式易于安排和设置;
- 4) 环境友好, 无汞等重金属环境污染, 不像荧光灯一样含有汞成分, 废弃物可回收;

5) 启动时间短(纳秒级),而HID则需要不小于10m的时间,适用于频繁开关以及高频开关运作的应用场合;

6) 工作寿命长,L70(70%的发光输出流明维持率)的条件下;光通量衰减到70%的标准寿命大于50000h。一个LED灯一天使用按8h计算,可以使用12年。使用寿命方面的问题最多出在驱动电源上;

7) 使用灵活、体积小,可以平面封装,易于开发成轻薄短小的产品,做成点、线、面各种形式的产品。易于调光和控制、节能,可以创造出许多新的发光效果;

8) 没有用灯丝和玻壳等容易损坏的部件,所以抗振性好,非正常报废率很小,使用维护费用极低;

9) 发光效率高,据报道,2011年Cree公司实验室水平已达208lm/W。光谱几乎全部集中于可见光频率,发光效率可以高达80%~90%。由于光谱中没有紫外线和红外线,没有热辐射,属于典型的绿色照明光源。而白炽灯可见光发光效率仅为10%~20%,作为光源,在同样亮度下耗电量仅为普通白炽灯的1/10~1/8。

1.1.2 LED照明的有关术语

LED:发光二极管,当被电流激发时通过传导电子和空穴的再复合产生自发辐射而发出非相干光的一种半导体二极管。

半导体照明(Semiconductor Lighting):采用发光二极管作为光源的照明方式。

固态照明(Solid State Lighting,简称SSL):采用固体发光材料(如发光二极管LED、场致发光EL、有机发光OLED等)为光源的照明方式。

发光二极管芯片(Light Emitting Diode Chip):具有PN结结构、有独立正负电极、加电后可以辐射发光的分立半导体晶片。

LED模块(LED Module):由单个或多个发光二极管芯片和驱动电路、控制电路封装在一起,带有连接接口并具有发光功能并且不可拆卸的整个单元。

LED组件(LED Discreteness):由LED或LED模块和电子元器件组合在一起,具有一定功能并可维修或拆卸的组合单元。

内量子效率(Internal Quantum Efficiency):有源区产生的光子数与所注入有源区的电子-空穴对数之比。

出光效率(Light Extraction Efficiency):逸出LED结构的光子数与有源区产生的光子数之比。

注入效率(Injection Efficiency):注入LED的电子-空穴对数与注入有源区的电子-空穴对数之比。

外量子效率(External Quantum Efficiency):逸出LED结构的光子数与注入LED的电子-空穴对数之比,等于内量子效率与出光效率和注入效率的乘积。

单色光LED(Monochromatic Light LED):发出单一颜色光的LED,有红色、绿色、蓝色、黄色、紫色等。

白光LED(White Light LED):用单色芯片加荧光粉或多色芯片组合成白光的LED。

直插式LED(Dual In-line Package LED):带有正负极引线、适用于通孔插入安装工艺的LED。

贴片式 LED (Surface Mounted Devices LED): 正负电极在封装基板上, 适用于表面安装工艺的 LED。

小功率 LED (Low Power LED): 单芯片工作电流在 100mA (含 100mA) 以下的发光二极管。

功率 LED (Power LED): 工作电流在 100mA 以上的发光二极管。

LED 数码管 (LED Nixietube): 采用 LED 显示数字或字符的器件或模块。

LED 显示器 (LED Display): 采用 LED 显示数字、符号或图形的器件或模块。

LED 背光源 (LED Backlight): 采用 LED 作光源, 为被动显示器件提供光源的 LED 器件或模块。

量子阱 (Quantum Well): 组分不同或掺杂有不同的半导体超薄层材料交替排列成载流子势垒或势阱, 并且具有量子效应的材料结构。

单量子阱 (Single Quantum Well): 只有一个量子阱的材料结构。

多量子阱 (Multi-Quantum Well): 包含多个单量子阱的材料结构。

LED 封装 (LED Package): 将 LED 芯片和焊线包封起来, 并提供电连接、出光和散热通道、机械和环境保护及外形尺寸。

可见光 (Visible Light) / 可见辐射 (Visible Radiation): 能直接引起视觉的光学辐射。其波长范围一般在 380 ~ 780nm。

流明 (Lumen) / lm: 光通量的 SI 单位, 由一个发光强度为 1cd 的均匀点光源在单位立体角 (球面度) 内发射的光通量。

眩光 (Glare): 由于光亮度的分布或范围不恰当, 或对比度太强, 而引起不舒适感或分辨细节或物体的能力减弱的视觉条件。眩光分为失能性眩光和不舒适性眩光, 眩光是影响照明质量的重要因素。

发光效能 (Luminous Efficacy): 光源发射的光通量 Φ 与其消耗的电功率 P 的比值, 单位为 lm/W。

光源在给定方向的发光强度 (Luminous Intensity): 离开光源的在包含给定方向的立体角元 $d\Omega$ 内传播的光通量 $d\Phi$ 除以该立体角元。单位为 cd。

发光效率 (Luminous Efficiency): 光源消耗每一瓦电能所发出的光。单位为 lm/W。

显色指数 (Color Rendering Index): 光源显色性的度量。以被测光源下物体的颜色和参照光源下物体的颜色相符程度来表示。国际照明委员会 (CIE) 把太阳的显色指数定为 100。

显色性 (Color Rendering Properties): 光源显现被照物体真实颜色的能力。物体的真实颜色是指在参照照明体 (通常为完全辐射体) 下所呈现的颜色。

相关色温 (Correlated Color Temperature): 黑体轨迹上, 和某一光源的色品坐标相距最近的那个黑体的绝对温度, 即为该光源的相关色温。

结温 (Junction Temperature): 器件中主要发热部分半导体结的温度。

额定结温 (Rated Junction Temperature): LED 正常工作时所允许的最高结温。在这个温度下, 一切有关的额定值和特性都可以得到保证。

管壳温度 (Case Temperature): LED 工作时管壳规定点的温度。

热阻 (Thermal Resistance): 器件的有效温度与外部规定参考点温度之差除以器件中的稳态功率耗散所得的商。

结-管壳热阻 (Thermal Resistance from Junction to Case): LED PN 结到管壳之间的热阻。

结-环境热阻 (Thermal Resistance from Junction to Ambient): LED PN 结到环境之间的热阻。它提供在最少热流失的特殊环境里结到环境的热阻值。

总电容 (Capacitance): 在规定正向偏压和规定频率下, 发光二极管两端的电容。

寿命 (Life Time): LED 在规定工作条件下光输出功率或光通量衰减到初始值 50% 或 70% 时的工作时间。单位为小时 (h)。

正向电流 I_F (Forward Current): 发光二极管正常发光时, 流过 LED 器件的电流。

正向电压 V_F (Forward Voltage): 通过 LED 器件的正向电流 I_F 为规定值时, 在两极之间产生的电压降。

反向电流 I_R (Reverse Current): 加在 LED 器件两端的反向电压为规定值时, 流过 LED 器件的电流。

反向电压 V_R (Reverse Voltage): 通过 LED 器件的反向电流 I_R 为规定值时, 在两极之间产生的电压降。

最大正向电流 I_{FM} (Maximum Forward Current): 允许通过 LED 的最大正向直流电流。

最大正向峰值电流 I_{FPM} (Forward Peak Current): 允许加于 LED 两端正向脉冲电流的最大值。

额定功率: 指电光源正常工作时所消耗的电功率。单位为瓦特 (W)。

额定电流: 指电光源正常工作时的的工作电流。单位为安培 (A) 或毫安 (mA)。

额定电压: 指维持电光源正常工作所需的工作电压。单位为伏特 (V)。

寿命: 指电光源燃点至明显失效或光电参数低于初始值的某一特定比率 (如 50%) 时的累计使用时数。单位为小时 (h)。

平均寿命: 指一批产品测得的寿命平均值。单位为小时 (h)。

色温 (Color Temperature): 色温单位为绝对温度开尔文 (K), 即将一标准黑体加热, 温度升高到一定程度时颜色开始由深红-浅红-橙黄-白-蓝, 逐渐改变, 某光源与黑体的颜色相同时, 我们将黑体当时的绝对温度称为该光源之色温。光源色温不同, 光色也不同。色温在 3300K 以下, 光色偏红给以温暖的感觉; 有稳重的气氛, 温暖的感觉。色温在 3000 ~ 6000K 为中间, 人在此色调下无特别明显的视觉心理效果, 有爽快的感觉; 故称为“中性”色温。色温超过 6000K, 光色偏蓝, 给人以清冷的感觉。采用低色温光源照射, 能使红色更鲜艳。采用中色温光源照射, 使蓝色具有清凉感。

显色性: 光源对物体本身颜色呈现的程度称为显色性, 也就是颜色逼真的程度; 光源的显色性是由显色指数来表明, 它表示物体在光下颜色比基准光 (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表现较好, 我们所见到的颜色也就接近自然色, 显色性低的光源对颜色表现较差, 我们所见到的颜色偏差也较大。国际照明委员会 (CIE) 把太阳的显色指数定为 100, 各类光源的显色指数各不相同, 例如, 高压钠灯的显色指数为 23, 荧光灯的显色指数为 60 ~ 90。

显色指数: 又称显色性, 指物体用电光源照明显现的颜色和用标准光源或准标准光源照明显现的颜色的接近程度。单位为数字, 国际上规定正常日光的显色指数为 100。

光通量: 指光源在单位时间内向周围空间辐射并引起视觉的总能量。单位为流明 (lm)。

光通维持率: 指电光源使用一段时间后的光通量与其初始值之比。单位为百分数。

光衰：表示电光源使用一段时间后其光通量的衰减情形。光衰大，光通维持率小，光衰小，光通维持率大。可以说，光衰是电光源衰减快慢的定性描述，而光通维持率是电光源衰减快慢的定量描述。

照度：单位面积内入射的光通量，也就是光通量除以面积所得到的值。单位为勒克斯(lx)。照度分为水平照度和垂直照度。水平照度为光通量入射水平表面的照度，垂直照度为光通量入射到垂直面的照度。

1.2 LED 的工作特性

影响 LED 工作特性有三大因素，它们是 LED 的电气特性 (V/I 特性)、LED 热学特性和 LED 光学特性。下面分别加以讨论。

1.2.1 LED 的 V/I 特性

LED 是一个半导体二极管，它和所有二极管一样具有一个伏安 (V/I) 特性，也和所有的半导体二极管一样，这个伏安特性有一个温度特性。其特点就是当温度上升的时候，伏安特性左移。图 1-3 所示为 LED 工作的 V/I 工作特性曲线。具有和一般半导体二极管相似的 V/I 特性曲线。

假定对 LED 以 I_0 恒流供电，在结温为 T_1 时，结电压为 V_1 ，而当结温升高为 T_2 时，整个伏安特性左移为 V_2 ，电流 I_0 不变。这两个电压差除以温度差，就可以得到以 $\text{mV}/^\circ\text{C}$ 表示的 LED 温度系数。对于普通硅二极管，这个温度系数大约为 $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$ 。但是 LED 大多数不是用硅材料制成的，所以温度系数会有所不同。例如 Cree 公司的 XLamp7090 XR-E 大功率 LED，温度系数为 $-4\text{mV}/^\circ\text{C}$ ，是普通硅二极管的 2 倍。

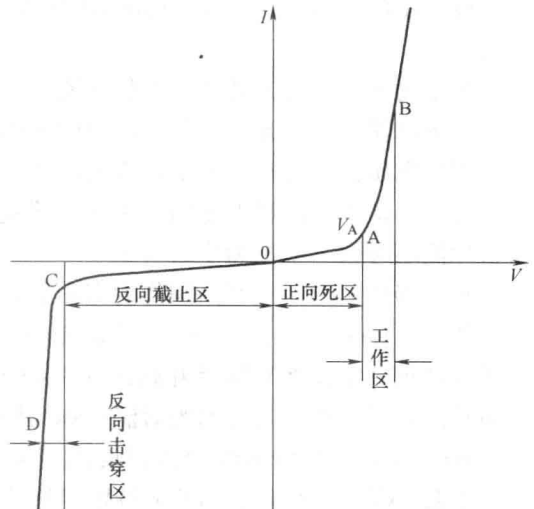


图 1-3 LED 工作的 V/I 工作特性曲线

在图 1-3 中，OA 段为 LED 的正向死区， V_A 为 LED 发光的开启电压。红色（黄色）LED 的开启电压一般为 $0.2 \sim 0.25 \text{ V}$ ，绿色（蓝色）LED 的开启电压一般为 $0.3 \sim 0.35 \text{ V}$ 。LED 处于正向工作状态，在达到它的开启电压值时，LED 开始发光。继续加大 LED 的正向工作电压，LED 的发光亮度急剧增加。如果继续加大 LED 的正向工作电压，LED 有可能很快损坏。所以，LED 属于电流器件，正是由于这一工作特性，决定了 LED 必须在恒流工作状态下才可以安全工作。

AB 段为 LED 的工作区，在这一工作区段，LED 一般随着正向电压的增加正向工作电流随之增加，发光亮度也随之增大。但在这个工作区内要特别注意，如果不加任何保护，当 LED 的正向工作电压增加到一定值后，LED 的正向电流会很大。如果没有保护电路，LED 会因为电流过大而烧坏。

0C 段为 LED 的反向截止区, LED 在反向电压工作区不发光 (不工作), 但有反向电流, 这个反向电流通常很小。

CD 段为 LED 的反向击穿区, LED 的反向电压一般要大于 10V, 最大不超过 15V。超过这个电压, LED 就会出现反向击穿, 导致 LED 损坏。

如图 1-4 所示, 一般 LED 的光输出随 LED 的正向工作电流的加大而加大, 但是 LED 的发光效率会随 LED 的正向工作电流的加大而下降, 所以实用中需在 LED 光输出、发光效率和正向工作电流之间合理选择。

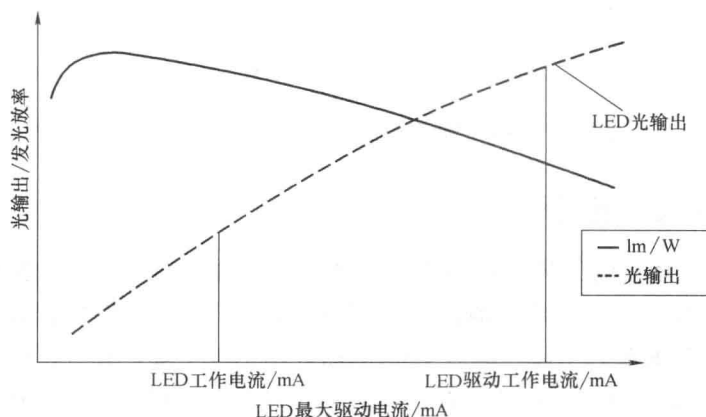


图 1-4 LED 的光输出、发光效率和正向工作电流的关系曲线

LED 的发光波长和 LED 的正向工作电流有关, 如图 1-5 所示, LED 的正向工作电流发生变化时, LED 的主要发光波长也会发生变化, 即 LED 的输出光颜色也发生变化。为确保 LED 的光输出颜色稳定, 实用中需保持 LED 的正向工作电流不变。LED 的相关色温与驱动电流的关系曲线如图 1-6 所示, 即随 LED 的正向工作电流加大, LED 发光色温加大 (具体变化规律和 LED 的型号有关)。

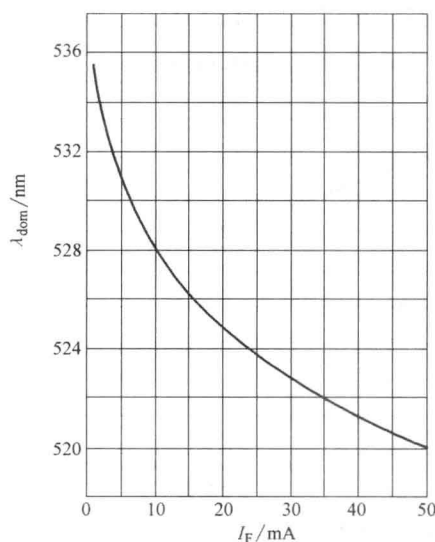


图 1-5 LED 的发光波长和正向工作电流的关系曲线

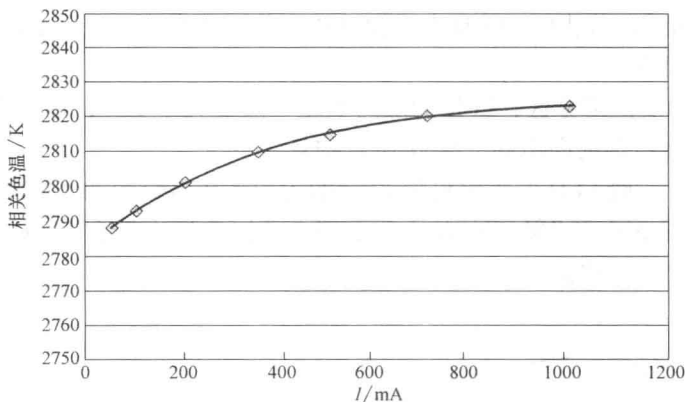
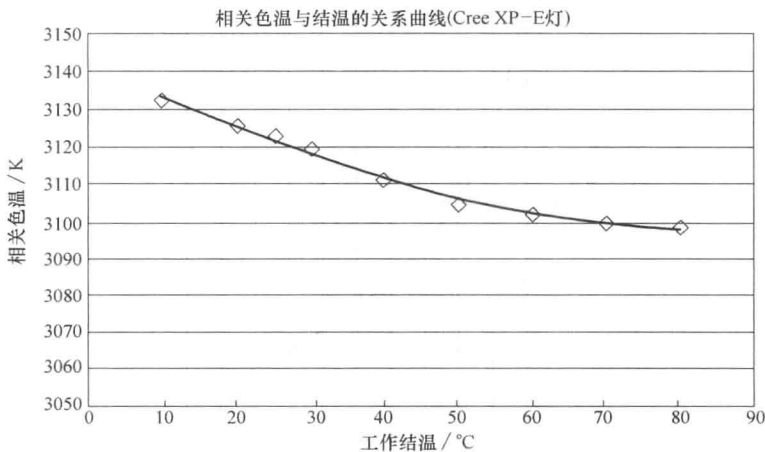


图 1-6 LED 的相关色温与驱动电流的关系曲线

1.2.2 LED 的温度工作特性

LED 的结温和环境之间的热阻对 LED 的最大正向工作电流有很大的影响，减小这个热阻对提高 LED 的工作寿命和改善 LED 的光学特性有很大的帮助。例如，LED 随着结温 T_j 的上升，LED 的正向电压降 V_F 下降，同时 LED 的输入功率也下降。并且，LED 内部和外部环境的改变都会影响 LED 的正向电压降 V_F 和结温 T_j 。LED 驱动电路的印制电路板（PCB）的设计是否合理，机械部件的设计和安装和 LED 的热管理是否合理，LED 驱动器的外壳设计和垫片/密封剂（密封材料）的安装和设计是否合理，LED 工作时的色漂移（LED 工作温度的变化对它的色漂移会有影响）等因素都会对 LED 的热工作特性有所影响，LED 的相关色温和结温 T_j 的关系曲线如图 1-7 所示，可见随 LED 的工作结温 T_j 加大，LED 发光的相关色温下降。即温度升高，LED 的颜色发生红移。如图 1-8 所示，随 LED 工作结温的加大，LED 的工作寿命显著下降。并且，随着 LED 工作环境温度的加大，LED 的最大正向工作的电流也随之下降，图 1-9 给出了不同热阻情况下，LED 正向工作电流随环境温度的变化规律（具体变化规律和 LED 的型号有关），所以温度对 LED 的工作有明显的影

图 1-7 LED 的相关色温和结温 T_j 的关系曲线

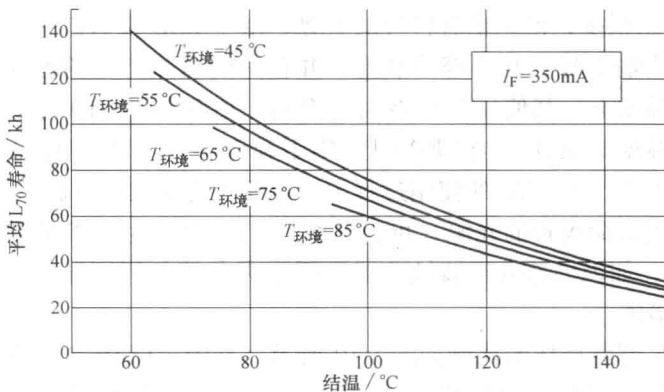


图 1-8 Cree 公司的 XLamp XR-E 白光 LED 的寿命预测

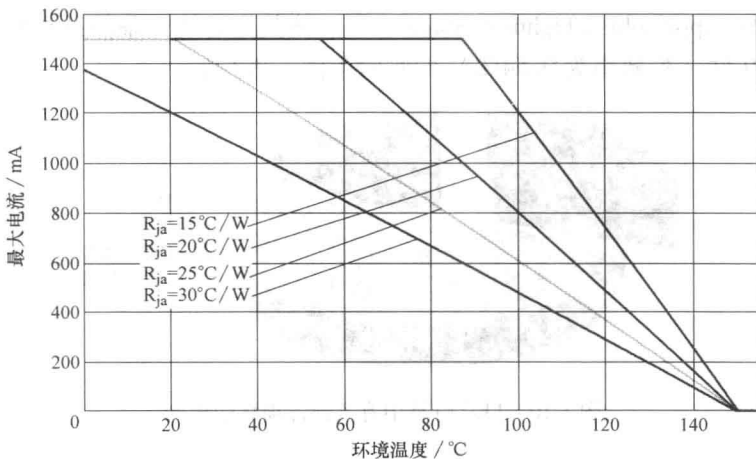


图 1-9 不同热阻情况下 LED 正向工作电流随环境温度的变化规律

使用中 LED 的焊接温度应在 250℃ 以下，焊接时间需控制在 3 ~ 5s 之间。应注意避免 LED 温度过高从而使芯片受损。LED 的亮度输出与温度成反比，温度不仅影响 LED 的亮度输出，也影响它的寿命。使用中尽量减少 LED 驱动电路发热，并做好驱动电路的散热处理。

LED 和其他照明光源的有关数据比较如表 1-2 所示（由于 LED 的技术指标变化很快，表中所示有关数据仅供参考），可见在白炽灯中只有 8% 的输入功率被转换为光输出，92% 的输入功率被转换为红外热和热传导输出。而在 LED 中，输入能量以光和热的两种形式转换，25% 的输入功率被转换为可见光输出，而热传导占总输入能量的 75%，LED 的发光效率比白炽灯高得多，节能效果非常明显。如果 LED 照明采用调光控制，则节能效果更为明显。但是 LED 的散热是个很重要的问题，LED 的功率越大，这个问题越重要。

表 1-2 LED 和其他照明光源的有关数据比较表

光 源	发光效率/(lm/W)	可见光(%)	紫外线(%)	红外线(%)	热传导(%)
白炽灯	15	8	0	73	19
金卤灯	70	27	19	17	37
荧光灯	90	21	0	37	42
LED	60	25	0	0	75

虽然 LED 的优点很多，但是也有自身的劣势。由于 LED 没有红外及紫外辐射，其消耗的能量除转换为光能输出外，几乎都是热能，并且只能以热传导的形式传出。如果让 LED 长期工作在较高的温度下，其使用寿命将大打折扣，甚至有烧毁的危险。又由于 LED 亮度与电流成正比，与温度成反比。当 LED 因散热不利而导致 LED 温度升高时，会严重影响 LED 的发光亮度。因此，在 LED 的使用过程中一定要考虑好散热问题。

LED 是一种使用寿命极长的光源（可长达 5 万 h），需要为 LED 提供适当的保护，因为偶尔 LED 也会失效，如因局部的组装缺陷或因瞬态现象等都可能失效。必须对这些可能的失效提供预防措施。

LED 灯具中有关部件损坏的比例如图 1-10 所示，其中，LEDs（多个 LED）的损坏率为 10%，控制电路为 7%，LED 灯具的安装为 31%，LED 驱动器为 52%。可见在 LED 灯具中 LEDs 的损坏率并不高，LED 驱动电路失效率相对较高为 52%，LED 灯具失效 90% 并非来自 LED（数据来源：Appalachian Lighting Systems）^[6]。该数据的统计条件是在 5400 件 LED 灯具中失效灯具为 29 件（失效率为 0.54%）的实验条件下进行的。

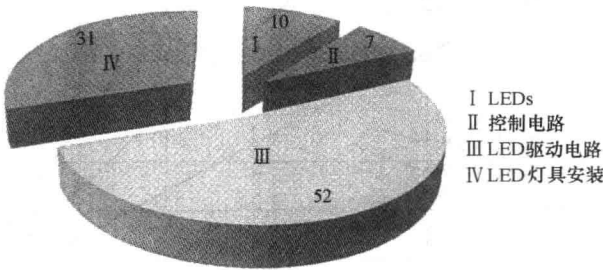


图 1-10 LED 灯具中有关部件损坏的比例

由于 LED 研发的不断升入，产品技术指标不断更新，表 1-3 给出了暖白光和冷白光 LED 的发光效率和每千流明输出单价的变化趋势^[4]。

表 1-3 LED 技术指标进展表

指 标	单 位	2011 年	2013 年	2015 年	2020 年
LED 发光效率（暖白光）	lm/W	98	129	162	224
LED 价格（暖白光）	\$ /klm	12.5	5.1	2.3	0.7
LED 发光效率（冷白光）	lm/W	135	164	190	235
LED 价格（冷白光）	\$ /klm	9	4	2	0.7

1.2.3 LED 的光学特性

发光二极管有非可见（例如红外发光二极管）与可见光两个系列，前者可用辐射度，后者可用光度学来量度其光学特性。LED 的光学特性主要有以下技术指标。

1. 发光角分布及法向光强

（1）发光强度的角分布是描述 LED 发光在空间各个方向上光强分布。它主要取决于封装的工艺（包括支架、模粒头、环氧树脂中添加散射剂与否）。

（2）发光强度（法向光强）是表征发光器件发光强弱的重要性能。LED 大量应用要求是圆柱、圆球封装，由于凸透镜的作用，故都具有很强指向性。LED 发光位于法向方向光