

TURING

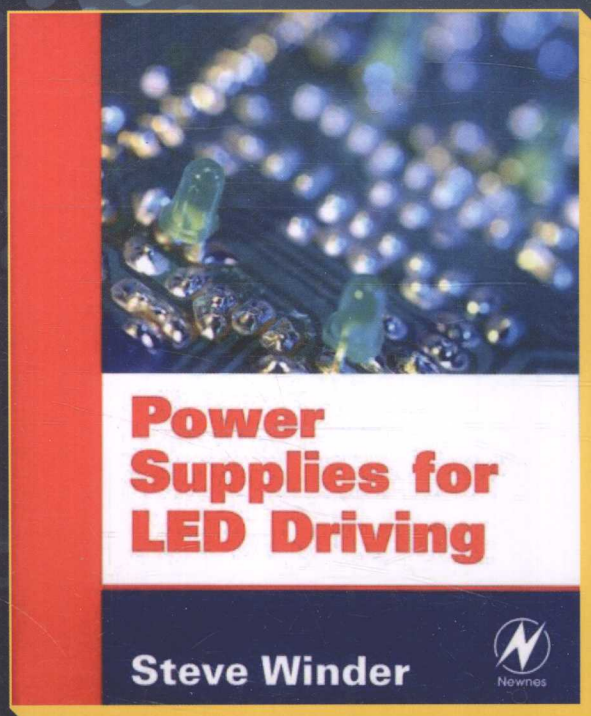
图灵电子与电气工程丛书



# LED驱动电路设计

## Power Supplies for LED Driving

[美] Steve Winder 著  
谢运祥 王晓刚 译



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

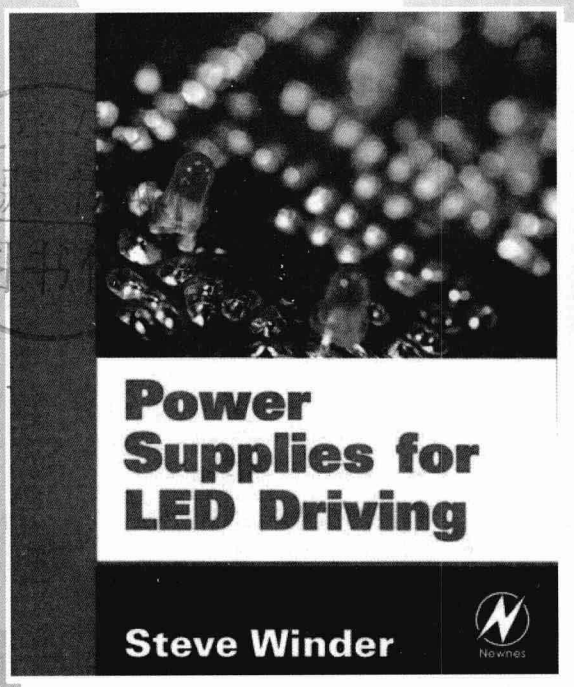
TURING

图灵电子与电气工程丛书

# LED驱动电路设计

Power Supplies for LED Driving

[美] Steve Winder 著  
谢运祥 王晓刚 译



人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目 (CIP) 数据

LED驱动电路设计/ (美) 温德尔 (Winder, S. ) 著;  
谢运祥, 王晓刚译. —北京: 人民邮电出版社, 2009.10  
(图灵电子与电气工程丛书)  
书名原文: Power Supplies for LED Driving  
ISBN 978-7-115-21382-2

I. L… II. ①温… ②谢… ③王… III. 发光二极  
管—电路设计 IV. TN383.02

中国版本图书馆CIP数据核字 (2009) 第159359号

## 内 容 提 要

本书以LED光源及其驱动技术为主线, 全面系统地介绍了LED的特性、LED驱动电路及其相关技术, 并结合实例介绍了各种LED驱动电路的详细设计方法, 加深读者对LED驱动电源设计过程的理解。

本书兼顾了不同读者的需要, 由浅入深, 层次清晰, 通俗易懂, 实用性强, 可作为电气工程类专业本科生及研究生的入门教材, 也可供从事LED驱动电源设计的工程技术人员参考。

图灵电子与电气工程丛书

## LED驱动电路设计

- 
- ◆ 著 [美] Steve Winder  
译 谢运祥 王晓刚  
责任编辑 舒立
  - ◆ 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>  
北京艺辉印刷有限公司印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 9.75  
字数: 231千字 2009年10月第1版  
印数: 1-3 000册 2009年10月北京第1次印刷  
著作权合同登记号 图字: 01-2009-5540号  
ISBN 978-7-115-21382-2
- 

定价: 35.00元

读者服务热线: (010) 51095186 印装质量热线: (010) 67129223

反盗版热线: (010) 67171154

# 版 权 声 明

*Power Supplies for LED Driving* by Steve Winder, ISBN: 978-0-7506-8341-8.

Copyright © 2008 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

ISBN: 978-981-272-225-6.

Copyright © 2009 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. All rights reserved.

**Elsevier (Singapore) Pte Ltd.**

3 Killiney Road

#08-01 Winsland House I

Singapore 239519

Tel: (65)6349-0200

Fax: (65)6733-1817

First Published 2009

2009年初版

Printed in China by POSTS & TELECOM PRESS under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由人民邮电出版社与Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 合作出版。本版仅限在中华人民共和国（不包括香港特别行政区和台湾地区）出版及标价销售。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。



# 前 言

LED 已经问世多年，从早期的红色指示灯，到稍后的黄、绿光 LED，直至最后出现的蓝光 LED，每一次革新都带来了应用量的激增。应用领域涉及交通信号灯、车用灯、洗墙灯（用于气氛照明）等多个方面。近来，蓝光 LED 成功结合了黄色荧光粉，得以发出白光。同时，LED 的发光亮度也不断上升，单颗功率等级达到 1W、3W 和 5W 的 LED 已十分常见。

驱动单颗 LED 或一长串串联的 LED，对于小电流等级（20mA）的 LED 来说比较容易，但电流等级高达 350mA、700mA、1A 或者更高的 LED，驱动起来就不那么容易了。当然，若对功率消耗没有限制，可以采用简单的线性驱动电源的形式；若对电流的控制要求不高，采用直接串联电阻的方法也是可行的。然而，在大多数场合，使用的还是高效的开关型驱动电源。当 LED 灯串的导通电压高于供电电压时，或当供电电压大范围变动时，就必须使用开关型驱动电源。但使用开关电源又意味着会带来 EMI（电磁干扰）问题，这一点必须予以考虑。

本书描述了多种 LED 驱动方法，主要目标如下：（1）针对特定的应用场合，给出适用的 LED 驱动电路拓扑；（2）研究一些设计实例；（3）避免工程师们在设计中常犯的一些错误。限于篇幅，书中无法穷尽所有和 LED 驱动电源技术相关的内容，读者还需参阅其他相关书籍。

本书编写过程中，Supertex 公司的同仁们，特别是 Rohit Tirumala 和 Alex Mednik，为我提供了大量的数据资料，这些资料来自于超能公司的数据手册、应用指南和培训资料以及同仁间的探讨。

Steve Winder  
2007 年

# 目 录

第 1 章 绪论	1	4.3 局限性	23
1.1 本书目标和讲述方法	1	4.4 设计线性 LED 驱动电路时的 常见错误	23
1.2 内容介绍	2	第 5 章 基于降压变换器的 LED 驱动电路	24
第 2 章 LED 的特性	4	5.1 一款降压变换器控制芯片	24
2.1 LED 的应用	4	5.2 直流应用中的降压电路	25
2.2 光源的测量	7	5.2.1 设计规格	26
2.3 LED 的等效电路	8	5.2.2 开关频率和电阻 ( $R_1$ ) 的选择	26
2.4 导通压降与颜色和电流的关系	9	5.2.3 输入电容 ( $C_1$ ) 的选择	26
2.5 常见错误	9	5.2.4 电感 ( $L_1$ ) 的选择	26
第 3 章 LED 的驱动	10	5.2.5 MOSFET ( $Q_1$ ) 和二极管 ( $D_2$ ) 的选择	27
3.1 电压源驱动	10	5.2.6 检测电阻 ( $R_2$ ) 的选择	27
3.1.1 无源电流控制	11	5.2.7 设计低压降压电路时的 常见错误	28
3.1.2 有源电流控制	12	5.3 交流输入时的降压电路	28
3.1.3 短路保护	14	5.3.1 设计规格	29
3.1.4 故障检测	14	5.3.2 开关频率和电阻 ( $R_1$ ) 的选择	29
3.2 电流源驱动	15	5.3.3 输入二极管桥 ( $D_1$ ) 和热敏 电阻 (NTC) 的选择	29
3.2.1 均流电路的自调节	16	5.3.4 输入电容 ( $C_1$ 和 $C_2$ ) 的选择	30
3.2.2 电压限制	17	5.3.5 电感 ( $L_1$ ) 的选择	31
3.2.3 开路保护	17	5.3.6 MOSFET ( $Q_1$ ) 和二极管 ( $D_2$ ) 的选择	31
3.2.4 检测 LED 故障	17	5.3.7 检测电阻 ( $R_2$ ) 的选择	32
3.3 测试 LED 驱动电路	18	5.4 由交流相位调光器供电的 降压电路	32
3.4 常见错误	19	5.5 交流输入降压变换器的常见错误	35
3.5 小结	19	5.6 双降压变换器	35
第 4 章 线性电源	20		
4.1 简介	20		
4.1.1 电压调节器	20		
4.1.2 电压调节器用作电流源或 电流陷	21		
4.1.3 恒流电路	22		
4.2 优点和缺点	22		

5.7 滞环降压变换器	38	6.4.1 设计规格	53
<b>第6章 升压变换器</b>	<b>39</b>	6.4.2 典型电路	54
6.1 升压变换器工作模式	40	6.4.3 开关频率 ( $f_s$ ) 的选择	54
6.2 HV9912 升压变换器控制器	40	6.4.4 计算最大电感电流 ( $I_{in,max}$ )	54
6.3 连续导电模式升压 LED 驱动 电路的设计	43	6.4.5 计算输入电感值 ( $L_1$ )	55
6.3.1 设计规格	43	6.4.6 计算变换器导通和关断时间	56
6.3.2 典型电路	43	6.4.7 开关 MOSFET ( $Q_1$ ) 的选取	56
6.3.3 开关频率 ( $f_s$ ) 的选择	44	6.4.8 开关二极管 ( $D_1$ ) 的选取	57
6.3.4 计算最大占空比 ( $D_{max}$ )	44	6.4.9 输出电容 ( $C_o$ ) 的选取	57
6.3.5 计算最大电感电流 ( $I_{in,max}$ )	44	6.4.10 “切断 MOSFET” ( $Q_2$ ) 的选择	58
6.3.6 计算输入电感值 ( $L_1$ )	45	6.4.11 输入电容的选取 ( $C_1$ 和 $C_2$ )	59
6.3.7 开关 MOSFET ( $Q_1$ ) 的选择	45	6.4.12 定时电阻 ( $R_T$ ) 的选择	59
6.3.8 开关二极管 ( $D_1$ ) 的选择	45	6.4.13 电流检测电阻 ( $R_1$ 和 $R_2$ ) 的 选择	59
6.3.9 输出电容 ( $C_o$ ) 的选择	46	6.4.14 电流参考电阻 ( $R_3$ 和 $R_4$ ) 的 选择	60
6.3.10 “切断 MOSFET” ( $Q_2$ ) 的 选择	47	6.4.15 电感电流 ( $R_5$ 和 $R_6$ ) 的 限定	60
6.3.11 输入电容 ( $C_1$ 和 $C_2$ ) 的 选择	47	6.4.16 VDD 引脚和 REF 引脚 连接的电容	61
6.3.12 定时电阻 ( $R_T$ ) 的选择	48	6.4.17 过压临界值的设定 ( $R_8$ 和 $R_9$ )	61
6.3.13 电流检测电阻 ( $R_1$ 和 $R_2$ ) 的 选择	48	6.4.18 补偿网络设计	61
6.3.14 电流参考电阻 ( $R_3$ 和 $R_4$ ) 的 选择	48	6.5 常见错误	63
6.3.15 斜坡补偿的设计 ( $R_{slope}$ 和 $R_7$ )	49	6.6 小结	64
6.3.16 电感电流的限定 ( $R_5$ 和 $R_6$ )	49	<b>第7章 升-降压变换器</b>	<b>65</b>
6.3.17 VDD 引脚和 REF 引脚连接的 电容	50	7.1 库克变换器	65
6.3.18 过压临界值的设定 ( $R_8$ 和 $R_9$ )	50	7.1.1 库克升-降压变换器的 工作原理	66
6.3.19 补偿网络设计	51	7.1.2 升-降压变换器的 滞环控制	68
6.3.20 输出钳位电路	53	7.1.3 滞环控制中延时的影响	69
6.4 断续导电模式升压 LED 驱动电路的设计	53	7.1.4 升-降压变换器的 稳定性	71

7.1.5 使用 PWM 调节亮度比	74	11.2.1 电容	118
7.1.6 基于 HV9930 的升压-降压 变换器设计	74	11.2.2 电感	120
7.2 SEPIC 降-升压变换器	85	11.2.3 电阻	122
7.3 降-升压拓扑	90	11.3 PCB	123
7.4 升-降压电路的常见错误	90	11.3.1 过孔 PCB	123
7.5 小结	90	11.3.2 表面贴装 PCB	124
<b>第 8 章 带功率因数校正的 LED 驱动器</b>	<b>91</b>	11.4 运算放大器和比较器	124
8.1 功率因数校正	91	<b>第 12 章 电感和变压器的磁性材料</b>	<b>126</b>
8.2 Bi-Bred 电路	92	12.1 铁氧体磁心	127
8.3 BBB 电路	93	12.2 铁屑磁心	127
8.4 PFC 电路的常见错误	95	12.3 特殊磁心	127
8.5 小结	95	12.4 磁心的形状和尺寸	127
<b>第 9 章 反激变换器</b>	<b>96</b>	12.5 磁饱和	128
9.1 双绕组反激变换器	97	12.6 铜损	129
9.2 三绕组反激变换器	99	<b>第 13 章 EMI 和 EMC 问题</b>	<b>131</b>
9.3 单绕组反激变换器	102	13.1 EMI 标准	131
<b>第 10 章 开关电源要素</b>	<b>104</b>	13.1.1 与交流电网连接的 LED 驱动电路	131
10.1 线性调节器	104	13.1.2 适用于所有设备的 一般要求	132
10.2 开关调节器	104	13.2 良好的 EMI 设计技术	132
10.2.1 降压调节器的注意事项	105	13.2.1 降压电路实例	132
10.2.2 升压调节器的注意事项	108	13.2.2 库克电路实例	136
10.2.3 升-降压调节器的 注意事项	108	13.3 EMC 标准	138
10.2.4 功率因数校正电路	109	13.4 EMC 技术实践	139
10.2.5 反激变换器的注意事项	109	<b>第 14 章 热考虑</b>	<b>141</b>
10.2.6 浪涌抑制电路	110	14.1 效率和功率损耗	141
10.2.7 软启动技术	112	14.2 温度计算	141
<b>第 11 章 为 LED 驱动电路选择器件</b>	<b>113</b>	14.3 对热的处理——冷却技术	143
11.1 分立半导体器件	113	<b>第 15 章 安全规范问题</b>	<b>146</b>
11.1.1 MOSFET	114	15.1 交流电源的隔离	146
11.1.2 双极晶体管	116	15.2 断路器	146
11.1.3 二极管	116	15.3 爬电距离	146
11.1.4 电压钳位器件	117	15.4 电容等级	147
11.2 无源器件	118	15.5 低电压操作	147
		<b>参考文献</b>	<b>148</b>



# 第 1 章 绪 论

作为一名现场应用工程师，我是最早从事 LED（发光二极管）驱动电路开发的设计者之一，遇到过许多该领域的潜在客户，他们对于如何正确驱动 LED 都知之甚少。20mA 电流的老式 LED 曾在一定程度上被滥用。现在，LED 功率等级正不断提高，30mA、50mA、100mA、350mA 甚至更高的电流等级变得越来越常见。已有多家制造商能制造单颗功率达 20W 以上的 LED。这类大功率 LED 多采用芯片阵列的型式。如果 LED 不按功率等级使用，极易导致其使用寿命锐减。

大功率 LED 在越来越多的场合得以应用，如导航灯、交通信号灯、路灯、车灯、洗墙灯、影院中的台阶和紧急出口提示灯等。诸如高亮度 LED 和超高亮 LED 之类的名称正变得毫无意义，因为还会有更大功率等级的 LED 不断出现。本书内容覆盖了各种类型的 LED 驱动方式，包含自低功率 LED 到超高亮 LED，甚至更高的多种功率等级。

大功率 LED 驱动技术简单吗？不，通常都不是那么简单的。在某些应用场合，可以简单地使用线性电源，但大多数场合需要使用恒流输出的开关电源。采用线性电源驱动效率低，易产生大量的热。而使用开关电源，则需要解决驱动效率、电磁干扰和驱动成本等问题。总之，要设计合理的驱动方式，既要满足相关规范的要求，同时还要做到高效率、低成本。

## 1.1 本书目标和讲述方法

本书从实用角度阐述问题，但为了有助于后续章节的理解，也引入了一些必要的理论。例如，为了有效地使用元件，了解元件特性是很有必要的。

多数章有“常见错误”一节，介绍了实际应用中易出现的问题，以及如何避免，意在提醒读者不要犯同样的错误。常言道：吃一堑，长一智。同样，我们也要从他人的失误中获得经验。自己的失误带来的教训往往印象深刻，但是代价也更为高昂。

通常，设计中遇到的第一个问题是选择合适的驱动电路拓扑。什么情况下降压电路优于升压电路或降-升压电路？为什么库克（升-降压）电路优于反激电路？诸如此类的问题，书中将在开关电源章节的开头部分谈到。

对于驱动电源的设计公式和具体的设计过程，书中将会给出清楚透彻的阐述。就开关电源而言，设计公式对于选择正确的元件参数具有重要意义，元件参数选择不当往往需要很多弥补措施。大功率 LED 在很小的面积上产生大量的热，这使得热管理成为难题。因此，相邻的驱动电源更需要保证高效率，以免增加散热的困难。

书中还谈到如何根据计算得到的元件参数去选择实际的标准化元件。客户往往倾向于选用不需定制的标准件，因为它们易于采购且价格较低。但计算推导得出的元件参数很少能和标准参数完全吻合，因而在实际选用上需要作出折中。在某些场合下，由此带来的参数差异所

造成的影响可忽略不计。但有些场合却需要设计者充分评估参数差异的影响，以做出更妥当的标准化参数选择。

书中的设计实例均经过实际验证，可以帮助读者较好地理解设计过程，同时也教会读者如何根据计算得到的元件参数去选择实际的标准化元件。

## 1.2 内容介绍

第2章介绍了LED的物理特性在应用中所展现出的优势，以及LED广阔的应用前景。理解好LED的物理特性对于掌握正确的驱动方法是非常重要的。LED一个重要的物理特性是颜色，LED所发出光的光谱带极窄，因而颜色极纯。LED的导通电压由其颜色决定，同时还受电流等级的影响。电流等级决定其亮度等级，对于同一LED，通过的电流越大，亮度就越高。LED发出的光具有强度大、集束传播的特点。

第3章指出，LED驱动具有多种方式。由于大多数电子电路通常由电压源驱动，设计者们自然容易沿袭这一做法来驱动LED。这会给LED驱动带来功率管理上的麻烦。恒流负载需要恒压源，而恒压负载（如LED）则需要恒流源。

因此，若用恒压源供电，就还要给LED串联上某种形式的电流调节电路。可以采用串联电阻，也可以串联有源式的调节电路，来实现LED的恒流源驱动。串联电路中的任何部分出现短路故障都可能对整个电路造成灾难性的影响，因此需要采取相应的保护措施。可以采用电流监测电路来检测LED有无损坏，或检测电路有无开路故障。相比使用恒压源加限流电路的方案，直接使用恒流源驱动LED的方案似乎更为合理。恒压源加电流调节电路的驱动方案也具有一些优点，这将会在第4章中谈到。

第3章还谈到恒流电路的特点。应用恒流源需要采取限制输出电压的措施，以防在负载断开时，输出电压过高。开路保护有多种形式。负载短路故障对于恒流源的输出没有影响。监测输出电压可以作为故障检测机制。发生开路故障时，电压上升到故障检测电路设定的限值，就能被检测到了。

第4章介绍了线性电源。这种驱动电源使用简单，以调整电压的方式实现恒流输出。其优点在于没有电磁干扰问题，因而也不需要滤波电路。缺点是热损耗较大，输出负载电压不能高于电源电压，这一点限制了电源的电压范围。

第5章介绍最基本的开关型LED驱动电源：降压变换器。降压变换器输出驱动电压低于输入电压，属于降压型电路拓扑。读者可通过设计实例了解其设计过程。

第6章介绍升压变换器。升压变换器常应用于电视、电脑和卫星导航显示屏的LCD背光驱动。该变换器的输出电压高于输入电压，属于升压型电路拓扑。读者可通过该章对于电流连续和电流断续两种导电模式下的设计实例介绍，了解其设计步骤。

第7章介绍升-降压变换器。该变换器输出电压既可高于也可低于输入电压。但这种变换器效率低于简单的降压和升压变换器。

第8章介绍专用变换器：BBB变换器和Bi-Bred变换器。这些变换器应用于交流输入场合，如交通信号灯、路灯、普通照明等。它们兼具功率因数校正和恒流输出的功能，在许多场合可

以设计成不使用电解电容的形式，并因此可用于对可靠性要求很高的场合。但实现这一特别功能的代价是，其效率要低于标准的离线式降压变换器。

第 9 章描述了反激变换器。这一章介绍了可用于恒压或恒流输出的简单开关电路。该电路采用两个或多个线圈的形式可以实现输出隔离。若使用单线圈的形式，就成了不具备隔离功能的降-升压电路。降-升压电路有时用于 LED 驱动，相对它而言，库克变换器和 SEPIC 变换器电磁噪声较小，但却需要附加电感。

第 10 章涉及了设计开关电源时必须考虑的各个方面。探讨了各种应用场合下最适合的电路拓扑。这一章同时结合适用电压范围和实现功率因数校正的能力，分析了各种拓扑的优缺点和使用限制条件；介绍了有利于减少电磁噪声和提高效率的缓冲器技术，利用浪涌电流抑制器或软启动实现的启动电涌抑制技术。

第 11 章介绍了用于电源的各种电子元件。最合适的元件通常并不是显而易见的选择。开关元件有多种类型，如 MOSFET、双极型功率晶体管和二极管等。开关元件的自身特性对电源的整体性能有很大的影响。电流检测可通过电阻或变压器实现，而电阻或变压器型号的选取则至关重要。电容和滤波元件的选取也同样重要。

第 12 章简要介绍了广大电子工程师相对陌生的磁性元件。磁性材料多种多样，有铁氧体磁心、铁粉磁心，还有特殊材料的磁心。磁心的形状和尺寸同样多种多样，这些在书中都有介绍。从电源设计的角度看，磁性元器件的磁化和避免磁饱和是必须考虑的重要的物理特性。

第 13 章的主题是 EMI（电磁干扰）和 EMC（电磁兼容）。法律明确要求产品要满足 EMI 相关标准。优良的 EMI 设计技术可以减少在滤波和屏蔽方面所需的措施。为了减小电源的尺寸和成本，有必要认真考虑 EMI 设计。在许多场合中，满足 EMC 相关标准也是法律上的要求。电子电路若不能抵御外部的电磁干扰，就存在受损的危险，即便其他方面性能卓越，也没有意义。在许多领域，EMC 措施和 EMI 措施是一致的。

第 14 章探讨了 LED 和 LED 驱动器的发热问题。LED 驱动器存在效率和功率损耗问题。尽管 LED 制造商们不断致力于提升其发光效率，但 LED 本身所吸纳的能量（伏安）大部分也都以发热的形式耗散掉，只有小部分可以转化为光能。处理这部分损耗发热需使用冷却技术，从而涉及机械加工方面的问题，方法是采用散热片和风扇带走热量。由于半导体器件具有一定的工作温度限值，在设计中计算元件的温度很重要。

法律对产品的安全性能也做出了要求，这在第 15 章中将有概述。产品在使用过程中不应对人体构成危险，这一要求涉及产品的工作电压。出于这方面的考虑，设计者们会尽力使产品工作在 SELV（安全超低电压）以下。对于由交流电源供电的产品，电气隔离、断路器保护和爬电距离等方面的问题都需考虑。

## 第 2 章 LED 的特性

大多数半导体是通过将其他材料掺杂在硅中形成自由负电荷（N 型）或是自由正电荷（P 型）制成的。相应地，固定的原子则产生极性相反的正电荷或是负电荷。在两种材料的连接处，两种电荷相结合，从而形成了一个没有自由电荷的狭窄区域。这一“本征区”含有带正电荷或是负电荷的固定不动的原子，原子所带的电荷阻止了极性相反的两种自由电荷的进一步结合。实际上，这形成了一条能量上的势垒，产生了一个二极管结（PN 结）。

要让 PN 结导电，需使 P 型半导体材料的电势高于 N 型半导体。电场力迫使更多的正电荷进入 P 型材料，更多的负电荷进入 N 型材料。当 PN 结两侧的电势差达到 0.7 V 左右时，PN 结就会导电。电势差给予电子足够的能量以流过 PN 结。

LED 也是由 PN 结构成的。但硅材料并不合适，因为硅材料形成的 PN 结能量势垒太低。最早的 LED 是由砷化镓（GaAs）制成的，能发出波长约为 905nm 的红外光线。之所以发出这种光，是由砷化镓中自由电子导电带和分子最低能级的价带间的能级差决定的。当 LED 施加了外部电压时，电子获得足够的能量而跃迁到导电带，并且产生电流。而电子失去能量，重新回到低能级价带时，就发出了光。如图 2-1 所示。

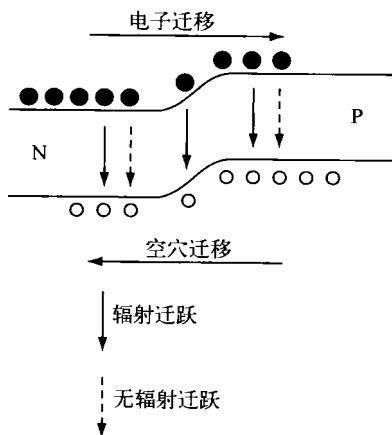


图 2-1 PN 结半导体的能带图

### 2.1 LED 的应用

后来人们很快就开发了新的半导体材料 GaAsP，用于制造 LED。由于 GaAsP 分子的能隙高于 GaAs，因而发出的光波长较短。这种材料制成的 LED 发出红色的光，最初用作指示灯。典型的应用有设备通电指示或收音机立体声功能开启指示等。实际上，这类发红光的 LED 主要在收音机、录放机和声响系统之类的消费产品上大量应用。

当黄色和绿色的品种出现后, LED 的用量大增。这样一来, 发光的颜色可以产生变化了, 能显示更多的信息, 并能指示更紧急的情况。比如, 可以用绿色表示正常, 黄色表示需要引起注意, 红色表示故障。LED 最重要的功能是能用在交通信号灯中。

LED 发出的光有一个重要的特点, 就是光谱带很窄, 仅 20nm 宽, 颜色很纯。相比之下, 用于通信的半导体激光光谱带则更窄, 仅仅 2nm 宽。在光纤系统中, 激光狭窄的光谱带, 具有重要的意义, 它使系统具有了较大的带宽。而对于普通用途的 LED 来说, 光谱带宽度则不会有太大的影响。

LED 发光的另一个重要特点在于, 流经 LED 的电流会被转换成光量子。这意味着, 电流加倍可以使亮度加倍; 同样, 通过降低电流来调光也是可行的。要特别指出, 在有一定的电流流过时, LED 会发出一定波长的光; 若流经的电流发生变化, 光的波长就会随之有相应的、微小的变化。通过 PWM (脉冲宽度调制) 的手段调节发光强度也是一种可行的办法, 且应用较广。PWM 调光使用频率在 100~1000Hz 范围内的信号, 控制 LED 的导通和关断。减小脉冲的宽度可以调弱发光, 增大脉冲的宽度则可以增强发光。

最好的 LED 是蓝光 LED, 它由氮化镓 (InGaN) 制成。把红绿蓝光加在一起, 就形成了看上去的白光。之所以说是“看上去”的白光, 是因为人眼中有感受红绿蓝光的锥状体。三种颜色在光谱带上的分布是不连续的, 只是人眼察觉不到而已。白光 LED 有时通过在蓝光 LED 的发光面上掺入黄色发光点而制成。黄色发光体有较宽广的光谱带, 当和蓝光混合时, 就呈现出白光。

蓝光 LED 一个有趣的应用是在牙科领域。用蓝光照射牙齿填充材料, 可以使它们变得坚固。人们发现波长为 465nm 的光是这一应用领域的最佳选择, 但光要足够强, 以便能照透填充材料。

另外一些有趣的应用则是利用了 LED 光纯度高这一特点。比如可用 LED 光照射新鲜食物, 原因在于 LED 光中不含紫外线。照相暗室的照明需使用不影响底片的光线——以往常用红光白炽灯, 如今同样可以采用 LED 照明。即便是交通信号灯, 也需要用特定颜色范围内的灯光, 这在国家标准中有相应的规定。

LED 的颜色会随自身温度的变化发生改变。温度的变化受外部环境的影响, 如邻近发热机构; 也会受内因的影响, 如流经它的电流发生改变。控制环境温度的办法并不多, 比如采用风扇, 或使 LED 的位置尽量远离热源。在 LED 上安装良好的散热片也有助于控制内部温升。

早期的 LED 电流等级大多为 20mA, 红光 LED 的正向压降约为 2V, 其他颜色的略高一些。稍后出现了电流等级约为 2mA 的 LED。随后, LED 的电流等级逐步增加, 30mA、50mA, 甚至 100mA 都变得非常普遍。Lumileds 公司是由惠普和飞利浦公司于 1999 年合资建立的, 可以生产 350mA 电流的 LED。如今, 已有许多大功率 LED 的制造商, 能生产 350mA、700mA、1A 及更高电流等级的 LED。大功率 LED 也使用得越来越广, 常见的应用场合有管道灯、交通信号灯、路灯、车灯、洗墙灯以及影院中的台阶和紧急出口的照明用灯等。

管道灯这一特殊称谓得名于 LED 的安装方式——LED 安装在管道中。这种管道常拼装成字母形状, 用于公司的招牌照明 (如图 2-2 所示)。以往, 管道灯多使用冷阴极管或荧光管,

但这两种灯管都存在可靠性不高的缺陷。有关人身健康和安全的法令禁止使用汞这类有害物质，而冷阴极管中却使用了汞。因此，既要满足灯管形状多变的需要，又要满足环保的要求，LED 成为首选。

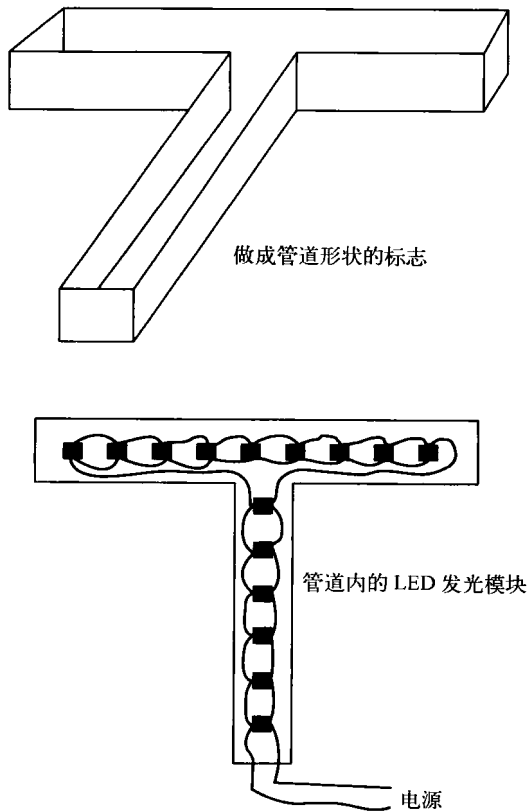


图 2-2 管道灯

多年来，交通信号灯一直使用低功率的 LED，如今制造商们开始使用大功率 LED 取而代之。这在应用上存在一些难题。难题之一在于有效控制黄光的波长，黄光 LED 相比其他颜色的 LED 更容易产生光谱漂移，这容易使发出的光超出允许的光谱范围。另一个难点则在于器件失效带来的安全问题。相关部门允许交通指示灯中有一定数量的 LED 在使用中失效，但不能超过总量的 20%。若超过这个比例，交通信号灯就需要关闭，并报给维修人员进行处理。

灯具壳内较高的环境温度容易导致 LED 驱动器发生故障。尤其当 LED 驱动器中含有电解电容时，电解电容容易产生热老化和电解液泄漏，并最终耗尽容量。一些新型的 LED 驱动器不使用电解电容，因而可以在较高的温度下使用好几年。LED 驱动器失效问题处理不好，会给 LED 灯具带来不好的影响——倘若 LED 灯具的电源部分的工作寿命只有 10 000h，即使 LED 本身能工作 100 000h 又有什么意义呢？

中等功率和大功率 LED 已经应用在路灯中。这一应用看上去比较简单，但环境高温和大功



率 LED 还是给驱动器提出了较高的要求。某些场合下，人们需要把白光 LED 和黄光 LED 用在一起，以产生“暖白”效果的光照。但白光 LED 是由蓝光 LED 芯片和黄色荧光粉合成的，其蓝光部分易产生“冷白”效果，这也是应用中的一个难点。

车用灯包含多个方面，如车内照明灯、前灯、刹车灯、日行灯（DRL）、后雾灯和倒车灯等。车用领域最大的问题在于，EMI 相关规定要求极低的电磁发射，而开关电路很难做到这一点。当不关心效率问题时，可以使用线性驱动电源解决这个问题。线性驱动器可以与车体的金属部件连接来实现散热。

与使用白炽灯泡的刹车灯相比，采用 LED 的刹车灯具有较大的优势。LED 的驱动响应时间是以纳秒计的，而白炽灯泡的响应时间则需要大约 300ms。以车速 100km/h 计，即每分钟 1.6km，每秒 27m。300ms 的时间，一辆车可以前行 8m。也就是说，提早停车 300ms（即提早观察到前面车给出的刹车灯信号），就有可能避免一次交通伤亡。LED 刹车灯的另一个优势还在于，发生故障的可能性更低。

情绪灯通过变幻表面颜色来形成视觉效果，根据人类心理学的原理来影响人的心情。它可用于医疗设备中来安抚病人的情绪，也可用于飞机上来放松乘客心情（或唤醒乘客）。通常，情绪灯系统在投影仪上使用红绿蓝（RGB）三色 LED 组成洗墙灯，可产生光谱中的任何颜色。RGB 系统还可应用于歌厅中。

背光显示领域，如平板电视，也采用 RGB LED 阵列来产生“白”光。在这些场合中，光颜色的变化很小——最理想的情况是没有变化。控制系统需要精确地控制三种颜色的输出量，并通过混色再呈现出逼真的电视画面。冷阴极管也可用作计算机显示器的背光源，但通常是在对颜色的精确性要求不高的场合下使用。

## 2.2 光源的测量

总的光通量是以流明（lm）为单位来计量的。流明是以正常人眼的感应程度为衡量标准，对 1W 功率的光照效果进行衡量的光学计量单位。对应波长为 555nm 的黄绿色光谱成分，人眼对它的感应效果是最明显的，该波长下的 1W 光照等效为 683lm。

堪得拉（candela, cd）也是一种光学单位。它相当于一盏灯在各个方向出射的光线都均匀的前提下，在每一度球面角内产生的流明数。公式关系为  $1\text{cd}=1\text{lm}/\text{sr}$ 。一度球面角在距离光源 1m 的球面上产生的投影面积为  $1\text{m}^2$ 。出射强度为 1cd 的光源，在距离 1m 远的位置产生的光照强度为 1 lux（勒克斯），或  $1\text{lm}/\text{m}^2$ ，如图 2-3 所示。

LED 的发光效率可按流明数每瓦来描述。不同的 LED 制造商之间的产品竞争表现在获得更高的发光效率上。但在比较时，要注意是不是在相同功率等级下进行的。低功率 20mA 电流等级的 LED 比高功率 700mA 的 LED 能获得更高的发光效率。

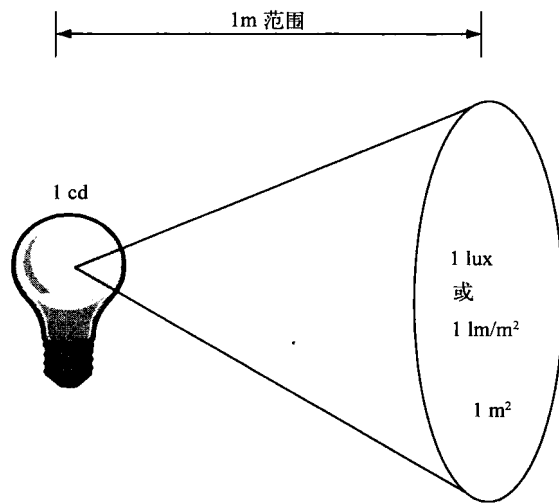


图 2-3 光的测量

## 2.3 LED 的等效电路

LED 可以看成恒压负载。它的电压降取决于内部光子发射所需跃过的能量势垒。能量势垒由颜色决定，即电压降也取决于发光颜色。是否所有红光 LED 都具有相同的电压降呢？并非如此，生产过程的差异使得波长不尽相同，因此也造成了电压降上的差异。最高波长的偏差带通常为+10%。

两个 LED 之间的温度不同也会带来颜色上的不同，从而造成电压降的差异。温度较高时，电子更容易越过能量势垒。电压降以每度两毫伏的比例，随温度上升而减少。

半导体并非完美的导体，其中存在与恒压负载串联的电阻，如图 2-4 所示。这意味着电压降随流经的电流值增大而上升。低功率 20mA 电流等级 LED 的等效串联电阻 (ESR) 约为  $20\Omega$ ，而单颗 1W、350mA 电流等级的 LED 的 ESR 则为  $1\sim 2\Omega$ （取决于使用何种半导体材料）。ESR 与 LED 的电流等级大致成反比。同种 LED 的 ESR 也受生产过程的影响，存在一定范围的偏差。

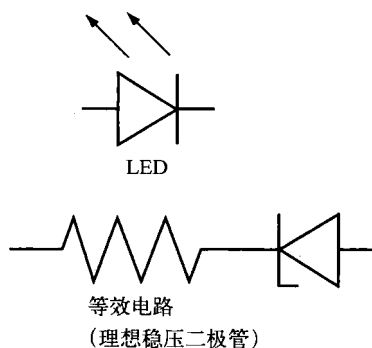


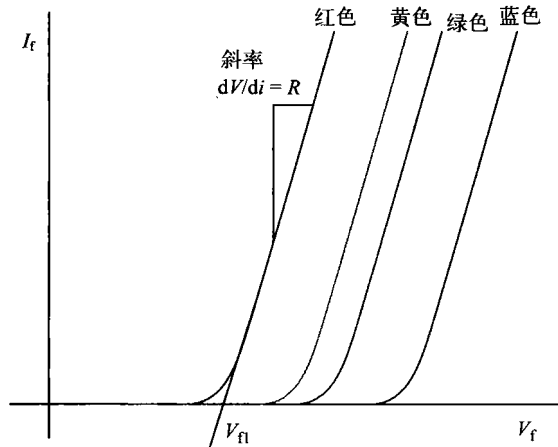
图 2-4 LED 的等效电路

等效串联电阻的大小等于正向导通压降的增加值除以流经电流的增加值。例如，如果流经的电流从 10mA 增加到 20mA，对应的导通压降从 3.5V 增加到 3.55V，那么可以计算得到 ESR 为  $50\text{mV}/10\text{mA}=5\Omega$ 。

图 2-4 中，稳压二极管被当作理想器件。实际上，稳压二极管也有 ESR，其值比 LED 的还要大。在 LED 驱动电源的早期测试阶段，5W、3.9V 的稳压二极管可用来替代（白光）LED 作为负载。若驱动电源不能按照设计正常工作，稳压二极管就会发生损坏。稳压二极管损坏的成本，要比大功率 LED 低得多。而且，稳压二极管在工作过程中，不会发出使测试工程师目眩的光。

## 2.4 导通压降与颜色和电流的关系

图 2-5 中所示的是 LED 正向导通压降与颜色和电流的关系曲线。在导通起始点，红光 LED 的导通电压降  $V_f$  约为 2V，蓝光 LED 的导通压降约为 3.5V。具体的压降值取决于不同制造厂商选用的掺杂材料和波长。某一电流值下的导通压降，则取决于初始导通压降和 ESR。



典型正向压降  $V_f$   
 红色 = 2V  
 蓝色 = 3.5V

图 2-5 导通压降与颜色和电流的关系

## 2.5 常见错误

最常见的错误是基于 LED 正向导通压降典型值  $V_{f, \text{typ}}$  进行设计。这种设计思路包括把多个 LED 串并联起来，并认为各 LED 串的总正向导通压降是相同的，流经各串的电流也是相等的。实际上，LED 正向导通压降的偏差很大。例如，单颗 1W 的 Luxeon Star 型白光 LED 的正向导通压降典型值为  $V_f=3.42\text{V}$ ，但实际值中最小的仅 2.79V，最大的达 3.99V。正向导通压降的偏差高达  $\pm 15\%$  以上。