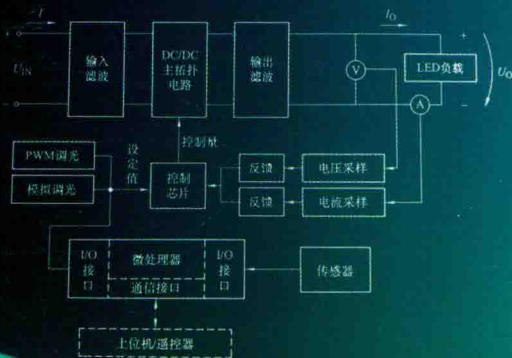


电力电子  
新技术系列图书

New Technology Series in  
Power Electronics



◎刘廷章 赵剑飞 汪飞 等编著

# LED照明驱动电源 模块化设计技术

LED ZHAOMING QUDONG DIANYUAN  
MOKUAIHUA SHEJI JISHU



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

电力电子新技术系列图书

# LED 照明驱动电源 模块化设计技术

刘廷章 赵剑飞 汪 飞 叶 冰 编著



机械工业出版社

随着 LED 照明技术的迅速发展和 LED 灯具的规模化应用,对 LED 驱动电源的要求也越来越高。本书结合近年来该领域的技术进步,采用模块化设计思想,将千变万化的 LED 驱动电路纳入一个统一的整体架构,并较为全面系统地介绍了主电路、电磁兼容、功率因数校正、反馈控制、调光调色等模块的原理与设计方法,进一步介绍了基于模块组配的 LED 驱动电源整体集成设计,还介绍了电源去电解电容方案及整体效率优化设计方法,以引导读者通过搭积木的方式,迅速提高对 LED 驱动电源的分析解剖能力和设计优化水平。

本书注重系统性、先进性和实用性,可供从事 LED 照明设计、研发、应用的工程技术人员及电力电子、电源领域的技术人员阅读和参考,也可作为高等院校相关专业教师、研究生的参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

LED 照明驱动电源模块化设计技术/刘廷章等编著. —北京:机械工业出版社, 2018. 7

(电力电子新技术系列图书)

ISBN 978-7-111-60312-2

I. ①L… II. ①刘… III. ①发光二极管-电源电路-电路设计  
IV. ①TN383.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 141417 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: 罗 莉 责任编辑: 罗 莉

责任校对: 樊钟英 封面设计: 马精明

责任印制: 孙 炜

天津嘉恒印务有限公司印刷

2018 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 17 印张 · 347 千字

0001-3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-60312-2

定价: 85.00 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

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

010-88379203

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

第2届  
电力电子新技术系列图书  
编辑委员会

主任：徐德鸿

副主任：白继彬 牛新国 康勇 李崇坚 杨耕

委员：（按姓名拼音字母排序）

白继彬 陈坚 陈道炼 陈守良 陈治明

高艳霞 郭宏 郭世明 康勇 李崇坚

李永东 刘进军 吕征宇 牛新国 潘三博

阮新波 孙流芳 孙玉坤 王旭东 王兆安

肖湘宁 徐德鸿 徐殿国 杨耕 杨旭

查晓明 张波 张兴 张承慧 张卫平

赵善麒 赵争鸣 钟彦儒 周波 周维维

秘书组：陈守良 孙流芳 杨旭 罗莉

# 电力电子新技术系列图书

## 序言

1974年美国学者 W. Newell 提出了电力电子技术学科的定义, 电力电子技术是由电气工程、电子科学与技术和控制理论三个学科交叉而形成的。电力电子技术是依靠电力半导体器件实现电能的高效率利用, 以及对电机运动进行控制的一门学科。电力电子技术是现代社会的支撑科学技术, 几乎应用于科技、生产、生活各个领域: 电气化、汽车、飞机、自来水供水系统、电子技术、无线电与电视、农业机械化、计算机、电话、空调与制冷、高速公路、航天、互联网、成像技术、家电、保健科技、石化、激光与光纤、核能利用、新材料制造等。电力电子技术在推动科学技术和经济的发展中发挥着越来越重要的作用。进入 21 世纪, 电力电子技术在节能减排方面发挥着重要的作用, 它在新能源和智能电网、直流输电、电动汽车、高速铁路中发挥核心的作用。电力电子技术的应用从用电, 已扩展至发电、输电、配电等领域。电力电子技术诞生近半个世纪以来, 也给人们的生活带来了巨大的影响。

目前, 电力电子技术仍以迅猛的速度发展着, 电力半导体器件性能不断提高, 并出现了碳化硅、氮化镓等宽禁带电力半导体器件, 新的技术和应用不断涌现, 其应用范围也在不断扩展。不论在全世界还是在我国, 电力电子技术都已造就了一个很大的产业群。与之相应, 从事电力电子技术领域的工程技术和科研人员的数量与日俱增。因此, 组织出版有关电力电子新技术及其应用的系列图书, 以供广大从事电力电子技术的工程师和高等学校教师和研究生在工程实践中使用和参考, 促进电力电子技术及应用知识的普及。

在 20 世纪 80 年代, 电力电子学会曾和机械工业出版社合作, 出版过一套“电力电子技术丛书”, 那套丛书对推动电力电子技术的发展起过积极的作用。最近, 电力电子学会经过认真考虑, 认为有必要以“电力电子新技术系列图书”的名义出版一系列著作。为此, 成立了专门的编辑委员会, 负责确定书目、组稿和审稿, 向机械工业出版社推荐, 仍由机械工业出版社出版。

本系列图书有如下特色:

本系列图书属专题论著性质, 选题新颖, 力求反映电力电子技术的新成就和新经验, 以适应我国经济迅速发展的需要。

理论联系实际, 以应用技术为主。

本系列图书组稿和评审过程严格，作者都是在电力电子技术第一线工作的专家，且有丰富的写作经验。内容力求深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于阅读学习。

本系列图书编委会中，既有一大批国内资深的电力电子专家，也有不少已崭露头角的青年学者，其组成人员在国内具有较强的代表性。

希望广大读者对本系列图书的编辑、出版和发行给予支持和帮助，并欢迎对其中的问题和错误给予批评指正。

电力电子新技术系列图书  
编辑委员会

# 前 言

进入 21 世纪，能源紧张、环境污染已经成为全球面临的共同问题，节能减排、绿色环保成为国际共识。LED 照明具有节能高光效、长寿命、绿色环保等显著优点，被公认为最具有发展前景的高效照明技术，具有巨大的产业辐射力和带动力。为此，各国相继出台半导体照明产业促进计划，有力地推动了 LED 照明的技术突破、产业升级和市场拓展。我国从 2003 年开始持续推动国家半导体照明工程，并将其列入战略性新兴产业，同时开始逐步淘汰白炽灯，使 LED 照明产业呈现高速发展的态势，LED 照明已经成为当之无愧的主流照明形式。总体上讲，目前我国 LED 照明产业已经形成巨大市场并具备了内生发展动力，发展型态正在从“政府推动型”转为“市场拉动型”，发展重点将是充分结合 LED 的优点以及传统灯具不具备的独特优势，进行技术创新、产品研发及市场应用。

LED 驱动电源是 LED 照明灯具的重要组成部分，其功能必须满足 LED 光源需要的能量转换及灵活的调控要求，其性能不仅影响 LED 器件及灯具的光、色性能，而且极大地影响整灯的可靠性、使用寿命、效率及电磁兼容性能，因此，驱动电源已经成为高性能 LED 灯具设计的关键，近年来备受学术界关注。新技术、新方案的不断涌现，推动着 LED 驱动电源技术的发展。然而，LED 驱动电源的电路结构千变万化，控制模式多种多样，控制芯片层出不穷，产品研发工程师和技术研究者在设计时往往眼花缭乱、茫无头绪，迫切需要对其设计方法进行系统性的梳理。模块化方法可以通过整体结构的把握和模块知识的积累，提高对驱动电路的分析解剖能力，迅速掌握各电路的创新点，提升设计优化水平。为此，本书作者参阅了大量国内外相关文献资料，并总结了作者多年来在 LED 驱动电源技术研究中形成的模块化设计方法，撰写了本书，以期抛砖引玉，切磋于同道。

本书撰写过程中力图体现以下特点：

1) 内容的系统性。全书较为全面地介绍了 LED 驱动电源的组成原理、实现形式及设计方法，覆盖了主电路、EMC、PFC、反馈控制、调光调色等关键技术，并以模块化设计思想构建了统一的 LED 驱动电源整体模块化架构，其中，第 1、2 章

为整体概述,介绍LED照明及其驱动电源的系统架构;第3~7章为各模块介绍;第8~10章为整体集成,包括集成设计、去电解电容设计和效率优化设计。以期提供一种通过模块化设计整体集成,从而快速设计高性能电源的技术方法。

2) 技术的先进性。近年来LED驱动电源技术有了很大发展,出现了许多无电解电容的新型拓扑电路,在控制策略、色温调节、效率优化等方面也有新的进展。本书吸收了这方面的一些新技术和新方法,特别是总结了作者的相关研究成果,方便读者在产品的设计时拓展思路、推陈出新。

3) 方法的实用性。LED驱动电源设计是一项与生产实践紧密结合的应用技术,因此本书在介绍设计方法的基础上,以少而精为原则,选择了一些作者前期研发的实际案例,结合案例较为详细地展示了LED驱动电源的设计脉络,方便读者迅速掌握在工程应用中的设计要点,以期举一反三,触类旁通。

本书共10章,刘廷章教授撰写了第1、2、6、7章,与叶冰工程师共同撰写了第8章,赵剑飞博士撰写了第3~5章,汪飞副教授撰写了第9、10章,全书由刘廷章教授进行统稿。

以前在拜读本领域的一些学术经典时,每每叹服其思虑精详、脉络清晰、深入浅出、恰中关窍,展读之余,不胜仰慕风采。见贤而思齐,虽不能至,然心向往之。感谢电力电子新技术系列图书编辑委员会和机械工业出版社诸君,他们的出版理念与作者不谋而合,本书书稿虽然一再拖期,但他们没有刻期求效,而是屡屡以书稿质量见囑,使作者能够静心推敲,不致面对读者时惶愧无地。

感谢作者历年的研究生栾新源、宋适、王世松、沈晶杰、郑祺、曹凌云、乔波、陈斌瑞、胡力元、刘晓石、闫斌、徐晟、刘建波等,他们在LED驱动电源方面的研发工作为本书提供了丰富的素材和案例;研究生植俊、卢航宇绘制了本书大部分的插图,邢琛、李林、蒋青松对一些公式进行了核查及推导,刘勇、钟元旭对一些波形图进行了仿真和实验验证,在此一并表示感谢。

由于作者水平所限,书中难免有舛误与不妥之处,恳请广大同行、读者批评指正。

作 者

2018年2月1日于上海大学



# 目 录

## 电力电子新技术系列图书序言

### 前 言

<b>第1章 LED照明与驱动技术概述</b> .....	1
1.1 LED照明发展概况.....	1
1.1.1 LED照明发展简史.....	1
1.1.2 LED照明的特点与应用领域.....	2
1.1.3 LED照明快速发展的外在推动力.....	5
1.2 LED的发光原理与基本特性.....	7
1.2.1 LED的发光原理.....	7
1.2.2 LED的结构.....	9
1.2.3 LED的光特性.....	9
1.2.4 LED的伏安特性.....	12
1.2.5 LED的热特性.....	14
1.3 LED的分类与产业链.....	15
1.3.1 LED的分类.....	15
1.3.2 LED的产业链.....	15
1.4 LED灯具的基本组成.....	17
1.4.1 LED光源.....	17
1.4.2 二次配光.....	18
1.4.3 驱动电源.....	19
1.4.4 散热器.....	19
1.4.5 控制器.....	19
1.4.6 结构件.....	20
1.5 LED照明的发展趋势.....	21
1.5.1 LED器件的发展趋势.....	21
1.5.2 LED应用系统的发展趋势.....	22
1.5.3 LED应用市场的发展趋势.....	24
参考文献.....	26

<b>第2章 LED驱动电源的基本原理及模块化</b>	27
2.1 LED驱动电源的设计要求	27
2.1.1 LED光源的基本驱动要求	27
2.1.2 LED驱动电源的功能要求	30
2.1.3 LED驱动电源的性能要求	31
2.2 LED驱动电源的分类	35
2.2.1 按输出形式分类	35
2.2.2 按输入形式分类	35
2.2.3 按主电路结构分类	36
2.3 LED驱动电源的基本原理	39
2.3.1 DC/DC驱动电源的基本原理	39
2.3.2 AC/DC驱动电源的基本原理	42
2.4 LED驱动电源的模块化设计	44
2.4.1 模块化设计方法简介	44
2.4.2 LED驱动电源的模块化	45
2.4.3 LED驱动电源的模块化设计流程	50
参考文献	51
<b>第3章 LED驱动电源的主电路设计</b>	52
3.1 常用主电路拓扑结构及选型	52
3.2 升压式(Boost)主电路设计	53
3.2.1 工作原理	53
3.2.2 主电路参数设计	55
3.3 降压式(Buck)主电路设计	56
3.3.1 工作原理	56
3.3.2 主电路参数设计	57
3.4 降压-升压式(Buck-Boost)主电路设计	59
3.4.1 工作原理	59
3.4.2 主电路参数设计	61
3.5 反激式(Flyback)主电路设计	62
3.5.1 工作原理	62
3.5.2 高频变压器的参数设计	65
3.5.3 钳位电路的选择	66
3.6 LLC谐振式主电路设计	68
3.6.1 谐振变换器的分类	68
3.6.2 半桥LLC谐振变换器拓扑	69
3.6.3 半桥LLC谐振变换器的工作原理	70
3.6.4 半桥LLC谐振变换器的参数设计	75
参考文献	80

<b>第4章 LED驱动电源的EMC设计</b>	81
4.1 LED驱动电源电磁干扰的产生机理	81
4.1.1 电磁兼容性基本分析	81
4.1.2 LED驱动电源电磁干扰的原因	85
4.1.3 LED驱动电源的干扰源	86
4.1.4 LED驱动电源的干扰途径	88
4.2 LED驱动电源电磁干扰的抑制技术	89
4.2.1 干扰源的抑制	90
4.2.2 电源线EMI滤波器	92
4.2.3 接地设计	94
4.2.4 屏蔽设计	96
4.2.5 印制电路板设计	98
4.2.6 开关技术	100
4.3 EMC设计应用实例	101
4.3.1 设计要求	101
4.3.2 LED驱动电源基本方案	101
4.3.3 LED驱动电源的传导干扰分析与抑制	103
参考文献	107
<b>第5章 LED驱动电源的PFC设计</b>	108
5.1 功率因数校正(PFC)技术	108
5.1.1 功率因数与总谐波畸变	108
5.1.2 功率因数校正	109
5.1.3 PFC分类	110
5.2 无源PFC	110
5.2.1 电感补偿式无源PFC电路	110
5.2.2 二阶填谷式无源PFC电路	111
5.2.3 三阶填谷式无源PFC电路	112
5.3 有源PFC	113
5.3.1 有源PFC电路	113
5.3.2 单级有源PFC电路拓扑	115
5.3.3 两级有源PFC电路拓扑	117
5.3.4 有源PFC电路控制模式	118
参考文献	122
<b>第6章 LED驱动电源的反馈控制电路设计</b>	123
6.1 LED驱动电源的反馈控制电路设计概述	123
6.2 LED驱动电源的反馈控制策略	124
6.2.1 PWM	124
6.2.2 PFM	127
6.2.3 PSM	127
6.2.4 滞环调制	128

6.3 输出采样电路设计 .....	130
6.3.1 电压采样电路 .....	130
6.3.2 电流采样电路 .....	130
6.4 设定与参考电压电路 .....	131
6.5 控制电路 .....	133
6.6 保护电路 .....	135
6.7 控制芯片 .....	135
6.7.1 PWM + PFM 控制方式的 IC 芯片 HV9910B .....	135
6.7.2 PWM + PFM 一次侧控制方式的 IC 芯片 iW3620 .....	140
6.7.3 PSM 控制方式的 IC 芯片 TinySwitch-III .....	142
6.7.4 滞环控制方式的 IC 芯片 LM3404/HV .....	146
参考文献 .....	150
<b>第7章 LED 驱动电源的调光与色温调节设计 .....</b>	<b>151</b>
7.1 LED 调光方式 .....	151
7.2 LED 模拟调光的设计及应用 .....	153
7.3 LED PWM 调光的设计及应用 .....	158
7.4 LED 晶闸管调光的设计及应用 .....	162
7.5 LED 色温调节方式 .....	166
7.6 LED 色温调节的设计及应用 .....	167
7.6.1 LED 混光理论 .....	167
7.6.2 基于三基色混光的 LED 色温调节方法 .....	169
7.6.3 基于两基色混光的 LED 色温调节方法 .....	170
7.6.4 基于三基色混光的 LED 灯具亮度、色温独立调节设计 .....	172
参考文献 .....	176
<b>第8章 基于模块化技术的 LED 驱动电源集成设计 .....</b>	<b>178</b>
8.1 基于模块化技术的 LED 驱动电源集成设计方法 .....	178
8.1.1 总体方案集成设计方法 .....	178
8.1.2 电路及参数集成设计方法 .....	180
8.2 Boost DC/DC LED 驱动电源的集成设计 .....	181
8.2.1 设计要求 .....	181
8.2.2 方案设计 .....	181
8.2.3 参数设计 .....	183
8.3 反激变换式 AC/DC LED 驱动电源的集成设计 .....	184
8.3.1 反激变换式 AC/DC 恒压驱动电源设计 .....	184
8.3.2 反激变换式 AC/DC 恒流驱动电源设计 .....	190
8.3.3 反激变换式一次侧反馈 AC/DC 驱动电源设计 .....	191
8.4 半桥 LLC 谐振型 AC/DC 驱动电源设计 .....	197
8.4.1 设计要求 .....	197
8.4.2 方案设计 .....	197
8.4.3 前级 AC/DC 恒压电路参数设计 .....	200

8.4.4 后级 DC/DC Buck 恒流电路参数设计 .....	204
参考文献 .....	206
<b>第9章 LED 驱动电源的去电解电容设计 .....</b>	<b>208</b>
9.1 去电解电容的基本思想与原理 .....	208
9.1.1 去电解电容的基本思想 .....	209
9.1.2 基于优化控制策略去电解电容 .....	211
9.1.3 基于优化拓扑结构去电解电容 .....	213
9.1.4 去电解电容技术分析与讨论 .....	215
9.2 基于三端口变换器的无电解电容驱动电路拓扑 .....	216
9.2.1 三端口变换器拓扑构造方法 .....	216
9.2.2 基于反激的三端口变换器拓扑 .....	219
9.3 基于双反激集成拓扑的驱动电路工作原理 .....	223
9.3.1 主电路拓扑推演 .....	224
9.3.2 主电路控制策略 .....	224
9.3.3 主电路功率因数校正实现 .....	224
9.3.4 主电路工作原理分析 .....	225
9.4 基于双反激集成拓扑的 LED 驱动电源设计 .....	229
9.4.1 主电路参数设计思路 .....	229
9.4.2 控制电路设计方案 .....	233
9.4.3 仿真结果与分析 .....	235
9.4.4 实验结果与分析 .....	237
参考文献 .....	239
<b>第10章 LED 驱动电源的效率优化设计 .....</b>	<b>241</b>
10.1 反激式 LED 驱动电路的损耗分析 .....	241
10.1.1 开关管的损耗 .....	242
10.1.2 变压器的损耗 .....	244
10.1.3 钳位电路的损耗 .....	248
10.1.4 输出整流器的损耗 .....	249
10.2 基于双反激集成驱动电路的功率损耗计算 .....	250
10.2.1 开关管损耗分析与计算 .....	250
10.2.2 变压器损耗分析与计算 .....	251
10.2.3 钳位电路损耗分析与计算 .....	253
10.2.4 输出整流二极管损耗分析与计算 .....	253
10.2.5 各部分损耗比较 .....	253
10.3 驱动电路优化设计与测试分析 .....	254
10.3.1 变压器工作参数优化设计 .....	254
10.3.2 缓冲电路结构优化设计 .....	255
10.3.3 开关管器件优化选择 .....	257
10.3.4 整机性能测试 .....	258
参考文献 .....	260

# 第 1 章

## LED照明与驱动技术概述

### 1.1 LED 照明发展概况

#### 1.1.1 LED 照明发展简史

照明是人类生活和工作的基本条件，照明技术的发展与人类发展的历史共始终。火的发现和利用，使人类摆脱了自然光源的束缚和限制，产生了人造光源，实现了照明技术的第一次革命。此后，人类不断探索更加稳定的照明技术，随着 18 世纪电的发现和利用（1809 年，英国化学家戴维首次由电产生了光；1879 年，爱迪生发明了白炽灯，这是人类历史上第一个人造电光源），从此人类从火的照明时代进入电的照明时代，实现了照明技术的第二次革命。由于白炽灯电-光转化效率较低，其后人们不断寻找更加高效的照明技术，20 世纪 30 年代，气体放电产生可见光的技术出现（1938 年，美国 GE 公司的科学家伊曼发明了荧光灯，之后出现了其他各种气体放电灯，如钠灯、汞灯、金卤灯等），实现了照明技术的第三次革命。上述两类电光源是靠通电情况下的白炽化或气体放电来工作的，工作过程涉及高温或斯托克斯位移，因此较大的能量损失是这两种工作原理的固有特性。20 世纪末出现的 LED 照明（也称为半导体照明或固态照明），提供了产生光的另一种方法，它在通电情况下通过注入载流子使过剩电子和空穴复合释放光子，能量损失很小，因此，以其长寿命、高效节能、可调可控等优点，得到广泛应用，引发了照明技术的第四次革命。

LED（Light - Emitting Diode，发光二极管）在照明领域的发展可谓异军突起。最初发明 LED 并不是以照明为目标的，1907 年，Round 首次发现碳化硅（SiC）电致可发出微弱黄光，1962 年，Holonyak 基于磷砷化镓半导体材料发明第一个可见光 LED——红光 LED，此时商用化的红光 LED 光效大约为  $0.1\text{lm/W}$ ，比一般的  $60\sim 100\text{W}$  白炽灯（ $15\text{lm/W}$ ）低 100 多倍。随后利用氮掺杂工艺的发展，磷砷化镓器件的效率达到了  $1\text{lm/W}$ 。20 世纪 70 年代，黄光 LED、绿光 LED 相继出现。

20世纪80年代,砷化镓、磷化铝的使用催生了第一代高亮度LED,红光LED的光效达到了 $10\text{lm/W}$ 。其后,LED的亮度一直得不到很大提高,而且其发光颜色也比较单调,所以直到20世纪末,LED主要实现显示、指示功能,广泛用于各种信号、数字、文字显示等领域,但LED仍然不够进入照明领域的门槛,原因有三:一是LED还无法发出白光;二是光效低于白炽灯;三是单颗LED的功率小,在十几~几十 $\text{mW}$ 之间,即使光效高也无法输出大的光通量。

蓝光LED的发明是LED进入照明领域的里程碑。1996年,日本Nichia公司科学家中村修二在GaN基片上研制出了第一只蓝光二极管,自此三基色(红色、绿色和蓝色)LED均研制成功,使得LED产生白光成为可能,引发了LED照明的研究与应用热潮,其为此荣获了2014年诺贝尔物理学奖。白光LED主要通过两种方法实现:①利用荧光粉对LED单色光波长进行变换,如YAG荧光粉将蓝光LED的部分蓝光转换成黄光,黄光与未转换的蓝光合成白光;三色荧光粉将紫外光泵浦后会发出三基色光,从而也可合成白光。通过蓝光激发YAG荧光粉产生白光的LED于2000年研制成功,此后由于这种方法构造简单、成本低廉、技术成熟度高,所以成为制备白光LED的主要方法。②把不同基色的LED所发出的单色光合成,进而实现白光,如用三原色LED芯片或者色光互补的黄、蓝LED芯片合成。这种方法必须精确控制各LED芯片的电流大小才能发出白光,电路复杂,成本较高。

LED照明的白光问题解决后,其单管功率和光效也迅速提升。最初的LED单管功率一般均在几十 $\text{mW}$ ,1999年单管输入功率达 $1\text{W}$ 的LED就商品化,2002年就有 $5\text{W}$ LED出现,这段时间的LED光效大约为 $20\text{lm/W}$ 。其后,美国Cree公司的LED芯片光效不断提升,成为行业的标杆,其白光LED光效在2003年达到 $65\text{lm/W}$ ,2005年达到 $70\text{lm/W}$ ,2007年达到 $129\text{lm/W}$ (实验室光效),2008年达到 $161\text{lm/W}$ ,2009年达到 $186\text{lm/W}$ ,2010年达到 $208\text{lm/W}$ ,2011年达到 $231\text{lm/W}$ ,2012年达到 $254\text{lm/W}$ ,2013年达到 $276\text{lm/W}$ ,2014年达到 $303\text{lm/W}$ ,其后基本稳定在这个水平。

在LED芯片突破光色、光效和功率的门槛之后,配套的驱动技术、配光技术、散热技术及灯具集成技术随之跟进,各种LED灯具在照明领域开始得到推广应用,LED照明的独特优点逐渐体现,在全球节能减排浪潮的推动下,LED照明的新时代已经到来。

## 1.1.2 LED照明的特点与应用领域

### 1. LED照明的特点

与白炽灯、荧光灯等传统照明技术相比,LED照明技术可以将电能直接转化为光能,明显提高了能量转化效率,其应用于照明领域具有以下优点:

1) 节能高光效。白炽灯和卤钨灯的发光效率为 $12\sim 24\text{lm/W}$ ,荧光灯和HID(氙气)灯的光效为 $50\sim 120\text{lm/W}$ ,LED经过不断的发展其发光效率一直在不断提

高,目前LED芯片实验室光效已经达到 $303\text{lm/W}$ (Cree公司,2014年),LED灯具光效达到 $134\text{lm/W}$ (Cree公司,暖白色,2016年),已经超过白炽灯和荧光灯。在光输出相同的情况下,LED灯具的能耗较白炽灯可减少80%。

2) 使用寿命长。白炽灯的使用寿命为 $1000\sim 2000\text{h}$ ,荧光灯、节能灯的寿命为 $5000\sim 10000\text{h}$ ,LED芯片的寿命一般可达 $80000\sim 100000\text{h}$ 。从技术上讲,LED整灯的使用寿命达到 $30000\text{h}$ 已经不成问题,但实际上往往考虑成本因素选用质量较差的驱动电源及散热模块,从而导致LED整灯的使用寿命大幅下降。

3) 响应时间快。白炽灯响应时间为ms级,LED的响应时间一般只有几ns~几十ns。

4) 色彩丰富。白炽灯和荧光灯基本上为冷白色和暖白色,如要产生彩色光,需要在灯具表面刷涂料或遮盖有色片,或者在灯具中充惰性气体,因此色彩的丰富性受到了限制。LED目前已有多种单色芯片,包括红、绿、蓝三原色芯片,因此理论上可以组合出任意颜色。

5) 控制灵活。白炽灯和荧光灯等传统灯具一般适宜于开关控制,LED灯具不仅可以开关控制,而且可以方便地实现连续调光,对于多种基色混光的LED灯具还可实现连续调节色温或颜色;LED的开关次数与寿命无关,因此也可实现丰富多彩的动态变化效果,成为景观照明、情景照明的理想选择。

6) 绿色环保。一般荧光灯含有汞,废弃后如处理不当会污染环境。LED不含汞、铅等危害健康的物质,废弃物易回收再利用、不污染环境。

7) 电气安全性好。传统的光源大多在高压下工作,使用升压逆变环节又降低了能源利用率,而LED采用低压直流供电,电气安全性好。

8) 属于冷光源。LED不是由于被加热到高温状态才发光,属于由于电子能级跃迁而释放光能的冷光源,而且LED光谱比较集中,因此不会像白炽灯、荧光灯那样辐射大量的红外线和紫外线(除专用的红外LED灯、紫外LED外),热辐射少,在对于热辐射、紫外辐射敏感的照明场合特别适用。

9) 小型化。常见的大功率(1W)白光LED器件尺寸在 $1\text{mm}\times 1\text{mm}$ 左右,单颗灯珠尺寸也在 $3\sim 5\text{mm}$ 见方,容易制成各种形状,体积小、重量轻、易集成、易隐蔽,容易实现景观照明中“见光不见灯”的梦想。

10) 全固态器件。LED芯片为半导体器件,完全封装在环氧树脂内,属于全固态发光体,抗振动、耐冲击、不易破碎,坚固耐用。

## 2. LED照明的主要应用领域

LED光源具有其他照明方式不可替代的优点,因此它在照明及相关拓展领域具有广阔的应用市场与前景,下面主要从成熟市场、成长市场和新兴市场三个方面进行介绍。

### (1) 成熟市场

1) 景观照明:LED功耗低、控制灵活、色彩丰富,因此在用电量巨大的景观



照明市场中具有很强的竞争力，景观及装饰照明是LED率先进入的照明领域之一，在奥运会和世博会等重大LED示范工程的带动下，LED景观及装饰照明逐渐从一线城市推广到中小城市，实现了规模化应用，2013年市场规模达528亿元。

2) 汽车车灯：LED低功耗、长寿命和响应速度快的特点在汽车车灯领域具有优势，目前LED已应用到汽车内部和外部照明，在汽车内部主要应用在仪表盘、背光照明、汽车阅读灯、显示系统等，在外部主要应用在制动灯、尾灯、转向灯、倒车灯、雾灯等（前照灯也已开始应用），2014年LED汽车灯市场规模约134亿元。

3) 显示屏显示器件：我国LED显示屏起步较早，市场上出现了一批具有较强实力的生产厂商，已经形成了一个配套齐全的成熟行业，2014年LED显示屏市场规模约302亿元，国内LED显示屏市场的国产率接近100%。

4) LED背光源：随着LED背光技术的逐渐成熟，LED背光源已经成为液晶产品的主流形式，目前，LED在以手机、平板电脑、笔记本电脑等为主的中小尺寸背光源市场和以液晶电视为主的大尺寸背光源市场渗透率均已达100%，使用比例不断扩大，2014年LED背光源市场规模已达到约468亿元。

5) 交通信号灯：目前，高亮度LED城市交通信号灯也已广泛应用，我国交通信号及指示灯市场规模达到数十亿元。另外，LED在铁路信号系统中也有广阔的应用前景。

6) 太阳能LED照明：太阳能光伏板与LED灯具均为低压直流，新能源与绿色光源可以完美匹配，主要形式为太阳能LED路灯、草坪灯、庭院灯等，市场规模达到数十亿元。

## (2) 成长市场

1) 室内普通白光照明：目前LED已经进入室内普通白光照明领域，特别是在环境要求不间断照明的室内公共照明场所，如加油站、地下停车场、医院、星级酒店、商务会馆、商品展示柜台、高档商用写字楼等商用场所。随着技术的成熟和成本的下降，LED将逐步进入家庭、办公室等通用照明领域，这将成为未来推动LED照明新一轮爆发式增长的主要驱动力，普通白光LED照明有非常大的潜在市场需求。

2) 道路照明：LED路灯的优点是省电、方向性强，环保、安全、长寿命，易维护，耐开关，易控制。用LED路灯替代传统路灯，一盏灯每年可节电约1000kW·h，目前珠三角多个城市已经开始换装LED路灯。我国用于城市道路照明的路灯存量约为2850万只，年增量150~200万只，市场潜力巨大。此外，全国隧道总长近5000km，隧道灯市场潜力也很大。

3) 智能照明：智能照明不仅能满足工作、学习、生活的基本照度要求和照明品质，还可以根据用户意愿来自行营造光环境，照明系统也可根据环境变化进行自适应调控，并可通过互联网+实现更广的功能拓展，以更大程度地发挥LED照明的高效