

国家骨干院校建设成果

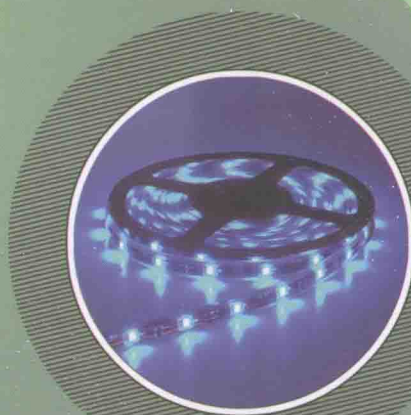
电力电子技术丛书

LED驱动电路应用技术

LED QUDONG DIANLU YINGYONG JISHU

主 编◎梁奇峰

副主编◎廖鸿飞 吴俊强



广东高等教育出版社
Guangdong Higher Education Press

国家骨干院校建设成果

电力电子技术丛书

LED驱动电路应用技术

LED QUDONG DIANLU YINGYONG JISHU

主 编◎梁奇峰

副 主 编◎廖鸿飞 吴俊强

参编人员◎何薇薇 陈 果 张远海 练锦彬 杨 强



广东高等教育出版社
Guangdong Higher Education Press

广州

内容简介

本书结合 LED 在普通照明及公共照明方面的应用情况,重点介绍了 4 种不同类型的 LED 驱动电源电路的分析与设计。全书共分五个模块,模块一:LED 应用市场分析及性能参数;模块二:非隔离的 LED 驱动电路;模块三:隔离的 LED 驱动电路;模块四:带功率因数校正的 LED 驱动电路;模块五:LED 路灯电源。除模块一外,其他模块都遵循“教、学、做”一体化的编写思路,每个模块包括项目中相关知识的介绍、控制芯片及外围电路的介绍、整体电路的分析及部分参数的设计、PCB 板布局注意事项、实验波形的分析、小结和思考与练习等内容。

本书结构合理、层次分明,内容全面、实用。本书可作为高等学校电力电子技术专业及相关专业的教材和参考书,也可作为从事 LED 驱动电源研究开发的工程技术人员与维修人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

LED 驱动电路应用技术/梁奇峰主编. —广州:广东高等教育出版社,2015.12
ISBN 978-7-5361-5369-1

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 147601 号

出版发行	广东高等教育出版社
	地址:广州市天河区林和西横路
	邮政编码:510500 电话:(020) 87554152
	http://www.gdgjs.com.cn
印 刷	佛山浩文彩色印刷有限公司
开 本	787 毫米×1092 毫米 1/16
印 张	13.5
字 数	316 千
版 次	2015 年 12 月第 1 版
印 次	2015 年 12 月第 1 次印刷
定 价	29.80 元



总序

课程，始终是教育最基本、最关键、最重要的部分。离开课程，教育将一事无成。可以说，课程是实现教育架构，使教育者将自身教育理念、教学目标与教学实施连接起来的桥梁，是教育最核心的要素。

与普通教育不同，职业教育至少有两个学习地点：企业和学校。这意味着，职业教育既要关注行业、企业的需求，凸显其职业性；又要关注学校、学生的需求，凸显其教育性。因此，职业教育作为一种跨界的教育，要集成职业性与教育性这两个目标，就必然要有凸显自身规律的课程开发——跨界的课程开发的方法、途径。

一般来说，课程开发要解决两个问题：一是课程内容如何选择，二是课程内容如何排序。在这里，所谓课程内容的排序，指的是课程内容的结构化问题。例如知识，只有在结构化的情况下才能传递。从某种意义上讲，课程内容的排序甚至比课程内容的选择更具决定性的作用。但是，长期以来，我们的教育却一直没有跳出基于知识存储的课程排序，亦即学科知识结构的藩篱，从而导致学习知识旨在应用知识这一根本目标的丧失——不会应用知识何以创新知识！

近年来，借鉴世界各国职业教育改革的成功经验，特别是德国“双元制”职业教育课程开发的丰硕成果，我国在职业教育课程开发领域也进行了可喜的探索。工作过程系统化课程，这一基于知识应用结构且重在人的可持续发展的课程范式的出现，就是这一积极、有益探索的主要标志。而伴随着国家骨干高等职业院校和中等职业学校的建设进程，职业教育已在百花齐放的改革尝试中，逐步完成从单纯的“围城”式的学校教育向校企合作、工学结合的跨界合作转变。且适应这一转变的工作过程系统化课程，也在改革与实践逐渐被认可、接受，并在实施中取得了很多成果。

中山火炬职业技术学院，正是在建设国家骨干高职院校过程中，紧紧抓住课程这个核心环节，开展了近三年的“深海探珠”教师下企业活动，深入



探求各职业岗位（群）对人才职业技能的要求，掌握和了解了大量职业岗位人才能力要求的第一手珍贵资料，并结合现代教育理念和教学理论开发课程。在这一卓有成效的改革中，学院对长期以来只是基于存储知识的学科体系课程进行反思，从应用知识的角度，将“高、新、特、精”的办学理念与课程开发结合，以工作过程系统化课程开发为主线，与企业一起共同开发、建设了一批在实践应用的过程中掌握专业知识的精品课程和教材。

“中山火炬职业技术学院国家骨干院校建设成果”是以职业分析和工作分析为前提，以培养与工作紧密相关的综合职业能力的课程观为指导，按照工作过程系统化课程范式开发的一系列教材和专著，是该院教师与企业技术人员合作的成果，在教育教学的理论创新和实践创新方面都有所突破。其主要特点在于：一是课程结构以工作过程为导向，内容以完成工作任务为目标，而工作任务的设置则来自职业工作岗位（群）的能力要求，更多地关注了知识来源的应用性；二是教学目标参照了相关行业当前的技术规范和职业资格标准，增加了相关职业的具体资料和参数，以及工作内容的规范要求，更多地关注了知识内涵的实时性；三是教学实施强调“教、学、做”一体化的教学模式，以工作任务的目标完成度或达成度进行教学考核，更多地关注了知识考核的实用性；四是教材编写的承载方式有所突破，增加了直观的图形、案例，图文并茂，提高了教材的可读性，更多地关注了知识掌握的有效性。

总之，这套教材是该院教师走出校门、深入企业、实现职业教育课程开发跨界合作的集中展示，是职业教育产教融合、校企合作、工学结合的职业教育特色的整体呈现。

百尺竿头，更进一步。在2014年开年之际，由衷祈盼中山火炬职业技术学院能有更多的收获、更多的成果、更多的欣喜！

2014年1月15日



前言

全球能源紧张、环境恶化，使节能减排成为全球的主旋律，照明节能也刻不容缓。LED 是一种将电能转换为光能的半导体发光器件。它具有能耗低、环保、寿命长、无污染、抗冲击，且控制非常方便等特点，属于真正的绿色节能照明光源，主要应用于商业照明、家庭装饰照明、道路照明、工业照明等领域。

目前有几个趋势正在推动 LED 照明市场的发展：首先是高亮度 LED 效率的不断提升和高效率、高可靠性恒流 LED 驱动电源的不断涌现，其次是全球多个国家正通过立法禁止白炽灯照明，CFL 节能灯也逐渐退出市场（它含有对环境有害的水银）。更重要的是，低成本（包括 LED 灯珠、散热系统和 LED 驱动器）是消费者广泛采用 LED 通用照明的原始推动力。除了节能减排外，LED 相比于其他光源最大的特点是其革命性地丰富人们的用光环境，提供许多新颖的光影世界。而实现这些应用最为关键的环节就是 LED 驱动电源。

本书结合国内外 LED 技术的发展方向，着重于在普通照明及公共照明方面的应用，面向 LED 驱动电源电路工程应用，介绍了 4 种不同类型的 LED 驱动电源电路的分析与设计。全书共分五个模块，即

模块一：LED 应用市场分析及性能参数，主要介绍了 LED 应用市场，LED 的基本知识。

模块二：非隔离的 LED 驱动电路，重点介绍了非隔离降压 LED 驱动电路、带调光的非隔离 LED 驱动电路和无电解电容非隔离 LED 驱动电路等三个项目。

模块三：隔离的 LED 驱动电路，以控制芯片 NCPI014、TNY279 和数字 PWM 芯片 iW3620 为例，详细分析了三种不同的隔离式 LED 驱动电路。在拓展任务中讨论了原边控制的 LED 驱动电路和 PCB 板布局注意事项等。

模块四：带功率因数校正的 LED 驱动电路，首先介绍了 PFC 的基本概念、填谷式无源 PFC 电路和反激式有源 PFC 电路的工作原理；然后详细分析了带填谷式无源 PFC LED 驱动电路和带有源 PFC LED 驱动电路的工作原理及参数设计等；最后在拓展任务中对有源 PFC 方法的比较和电路的测试进行了分析。

模块五：LED 路灯电源，重点介绍了大功率的普通 LED 路灯电源和太阳能 LED 路灯电源；在拓展任务中，对太阳能的主动跟踪控制原理和电路进行了详细的分析。

除模块一外，其他模块都遵循“教、学、做”一体化的编写思路，每个项目中都给出了相关知识、控制芯片及外围电路的介绍，详细分析了整体电路的工作原理及关键元件参数的设计、PCB 板布局注意事项、实验波形的分析，还包括小结和思考与练习等内容。



本书通过应用实例对 LED 驱动电路的设计和应用进行了剖析,从而将 LED 驱动电路的基本理论、控制方法及控制芯片的应用、元器件的选择、PCB 板布局 and 测试波形的分析等内容有机结合起来,并融入了大量的工程资料,有利于培养学生分析 LED 驱动电路的综合应用能力和工程实践能力。

本书由中山火炬职业技术学院的梁奇峰主编,廖鸿飞和吴俊强任副主编。参加本书编写工作的还有中山火炬职业技术学院的何薇薇、张远海,中山职业技术学院的陈果,中山市智观照明科技有限公司工程师练锦彬和珠海晋恒电子科技有限公司工程师杨强。

本书在编写的过程中,参考了诸多论著和教材,在此对参考文献中的各位作者深表感谢。

由于编者水平有限,书中难免有错误和疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2015 年 6 月



目 录

模块一 LED 应用市场分析及性能参数

项目一 LED 应用市场分析	(2)
任务1 LED 应用市场分析	(2)
任务2 LED 在照明节电领域的地位	(7)
小结	(8)
思考与练习	(8)
项目二 LED 的基本知识	(8)
任务1 LED 的发光原理及其基本特性	(8)
任务2 LED 的分类及测试	(14)
任务3 LED 使用注意事项	(20)
小结	(21)
思考与练习	(21)

模块二 非隔离的 LED 驱动电路

项目一 非隔离降压 LED 驱动电路	(24)
任务1 降压式变换器分析	(24)
任务2 控制芯片 DU8618 介绍	(31)
任务3 DU8618 控制的 LED 驱动电路分析与设计	(35)
小结	(38)
思考与练习	(38)
项目二 带调光的非隔离 LED 驱动电路	(39)
任务1 升—降压式变换器分析	(39)
任务2 控制芯片 HUF604 介绍	(43)
任务3 HUF604 控制的 LED 驱动电路分析与调光设计	(46)
小结	(49)
思考与练习	(49)
项目三 无电解电容非隔离 LED 驱动电路	(49)
任务1 控制芯片 DU8623 介绍	(50)
任务2 DU8623 控制的 LED 驱动电路分析与设计	(53)



小结	(56)
思考与练习	(56)

模块三 隔离的 LED 驱动电路

项目一 NCP1014 控制的 LED 驱动电路	(58)
任务 1 反激式变换器分析	(58)
任务 2 控制芯片 NCP1014 介绍	(62)
任务 3 NCP1014 控制的 LED 驱动电路分析与设计	(78)
拓展任务 原边控制的 LED 驱动电路	(81)
小结	(86)
思考与练习	(86)
项目二 TNY279 控制的 LED 驱动电路	(86)
任务 1 控制芯片 TNY273 - 280 介绍	(87)
任务 2 TinySwitch - III 控制器功能和典型波形分析	(98)
任务 3 TNY279 控制的 LED 驱动电路分析与设计	(101)
拓展任务 PCB 板布局注意事项	(105)
小结	(107)
思考与练习	(108)
项目三 数字 PWM 芯片 iW3620 控制的 LED 驱动电路	(108)
任务 1 数字 PWM 芯片 iW3620 介绍	(108)
任务 2 iW3620 工作原理和典型电路分析	(113)
任务 3 iW3620 控制的 LED 驱动电路分析与设计	(116)
小结	(122)
思考与练习	(122)

模块四 带功率因数校正的 LED 驱动电路

项目一 带填谷式无源 PFC LED 驱动电路	(124)
任务 1 PFC 的基本概念及填谷式无源 PFC 介绍	(124)
任务 2 控制芯片 MT7801 介绍	(130)
任务 3 带填谷式无源 PFC LED 驱动电路分析与设计	(135)
小结	(140)
思考与练习	(140)
项目二 带有源功率因数校正的 LED 驱动电路	(140)
任务 1 有源功率因数校正的介绍	(141)
任务 2 临界模式的 PFC 控制芯片 L6562 的介绍	(145)



任务3 带有源 PFC LED 驱动电路的分析与设计	(152)
拓展任务 有源 PFC 方法比较和测试	(155)
小结	(158)
思考与练习	(158)
 模块五 LED 路灯电源	
项目一 普通 LED 路灯电源	(160)
任务1 半桥变换器的分析	(160)
任务2 控制芯片 PLC810PG 介绍	(165)
任务3 LED 路灯电源的分析与设计	(174)
拓展任务 PCB 板布局分析	(184)
小结	(187)
思考与练习	(187)
项目二 太阳能 LED 路灯电源	(188)
任务1 太阳能 LED 路灯系统及能流模型与工作状态分析	(188)
任务2 太阳能 LED 路灯系统主要部件分析	(191)
任务3 独立光伏 LED 照明系统分析	(195)
拓展任务 太阳能跟踪控制分析	(200)
小结	(203)
思考与练习	(203)
参考文献	(204)

模块一

LED 应用市场分析及 性能参数



项目一 LED 应用市场分析

任务1 LED 应用市场分析

学习目标

- ◆熟悉 LED 的应用场合。
- ◆了解 LED 在不同应用场合的特点。

LED (Light Emitting Diode) 即发光二极管, 它利用固体半导体芯片作为发光材料, 当其两端加上正向电压时, 半导体中的载流子复合, 放出过剩的能量, 引起光子发射, 产生可见光。LED 由于发光效率高、耗电量少、使用寿命长、可靠性高、平面发光、方向性强等优点, 在工业和日常生活中得到了广泛的应用。

随着 LED 技术的快速发展, LED 在照明领域的应用日益受到半导体界和照明界的关注。美国、欧盟、日本等先后制订相关研究与发展计划, 以期在该领域有所突破。我国也于 2003 年 6 月启动了“半导体照明工程”。LED 照明被认为是 21 世纪照明领域的一场革命。国内外 LED 应用产品近年来发展迅速, 主要应用在以下几个领域。

1. 背光源

手机显示和电视的背光源是 LED 应用较为广泛的领域 (如图 1-1 所示), 约占 LED 应用的 20%, 主要原因是 LED 体积小、重量轻、厚度薄、坚固耐用, 而且随着全球手机产量的增长, LED 背光源的应用也随之增长。

LED 背光源有几种形式: 静态 LED 背光源、反馈型 LED 背光源、光导板组合式 LED 背光源和高亮度直接型 LED 背光源。LED 背光源已应用于液晶电视。最近几年, 国内外各大品牌电视厂商纷纷采用 LED 作为背光源。而以往的平板电视均使用冷阴极荧光灯 (CCFL) 作为背光源。LED 作为液晶显示背光源的前景非常广阔。



(a) LED电视



(b) 手机

图 1-1 用 LED 作为背光源的电子产品



2. 显示屏幕

LED 用于显示屏幕的应用占到 LED 应用的 20% ~ 25%，显示屏幕可分为单色和彩色。单色显示屏幕一般用于室内外信息显示，主要用于公共场所，如机场、车站、通路、银行等，以显示文字和数字信息为主。彩色显示屏幕用于广告居多，如美国的纳斯达克 (NASDAQ) 显示屏有 8 层楼高，用了 1 800 万个高亮度 LED。全彩色大屏幕显示用于体育场馆和广场等室外场所，可以显示比赛现场的动态画面，如 2002 年世界杯期间，韩国数万人在体育馆外观看大屏幕实况转播，2004 年雅典奥运会的主体育场的大屏幕，在开幕式和比赛过程中均可将实际画面显示于屏幕之上。

LED 显示屏（如图 1-2 所示）的应用涉及社会经济各个领域，主要包括：证券交易、金融信息显示；机场航班的动态信息显示；港口、车站旅客引导信息显示；体育馆信息显示；调度指挥中心信息显示，包括电力调度、车辆调度管理、车辆动态跟踪等；邮政、电信、商场、购物中心等服务领域的业务宣传与信息显示；广告媒体除大型户外广告外，在火车、汽车车厢内也出现了 LED 显示屏，除播出有关信息外，还会插播广告。

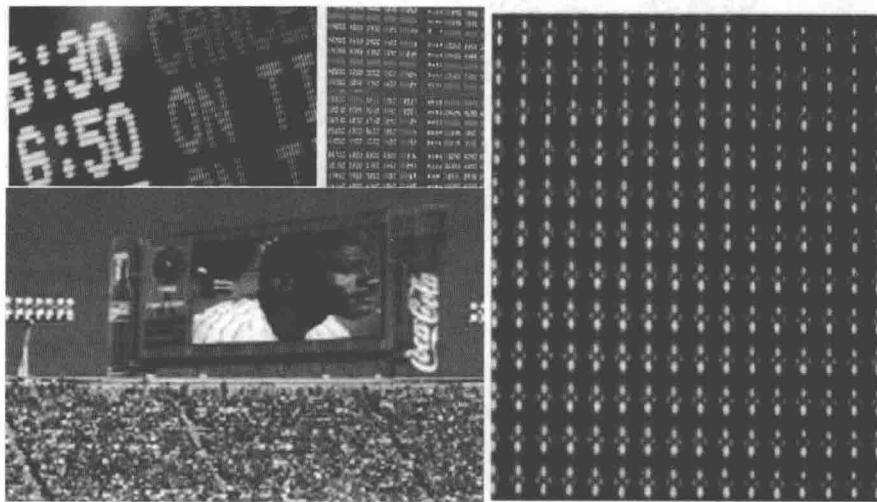


图 1-2 各种显示屏

3. 汽车照明

大功率 LED 已被大量应用于汽车照明中，汽车照明约占 LED 应用的 15%。LED 用于汽车照明最早是在 20 世纪 80 年代中期，当时主要用于汽车的高位刹车灯。首先是在欧洲，之后在美国和日本的市场份额迅速增长。全 LED 后灯总成（包括尾灯、刹车灯、转向灯）已装在 2000 型凯迪拉克和 S 级奔驰车上。现在 LED 已占据绝大部分汽车的尾灯照明（包括倒车灯、牌照灯）。在车厢里 LED 可以用作顶灯、阅读灯、仪表盘灯和门灯（见图 1-3）。LED 前照明灯是目前研究的重点，奥迪等公司已推出概念车 LED 前照明灯的样品。



在汽车生产大国美国、德国和日本,均十分重视 LED 在汽车灯中的应用。德国欧司朗(OSRAM)公司在国际汽车灯生产中处于领先地位,德国生产的高档轿车均采用该公司的汽车灯。OSRAM 公司在 LED 照明方面也处于国际领先地位。

我国在汽车照明中应用 LED 从 1998 年大规模生产安装后雾灯开始,带动了一批企业开发 LED 灯具。从我国目前实际情况来看,近期 LED 主要用于汽车制动灯(刹车灯),包括使用最普遍的高位刹车灯。

目前国内已有公司开发了一种 LED 汽车行驶状态灯,通过安装于汽车后部的 LED 状态灯的灯光变化,显示汽车行驶过程中的各种不同状态,以提示尾随车辆驾驶者,有效防止追尾撞车等事故的发生。该产品除具备一般高位刹车灯显示刹车(红灯亮)的功能外,还可以显示滑行(黄灯亮)和回速(绿灯亮)的行驶状态,同时还可以组合显示汽车左转、右转、倒车、临时停车等十余种状态,使驾驶员在操纵车辆行驶过程中的所有状态都通过信号得以充分表达。

随着 LED 光学性能的不断提高,用于汽车照明的封装设计更有针对性、实用性,它将为汽车的个性化、一体化提供更大的发展空间。

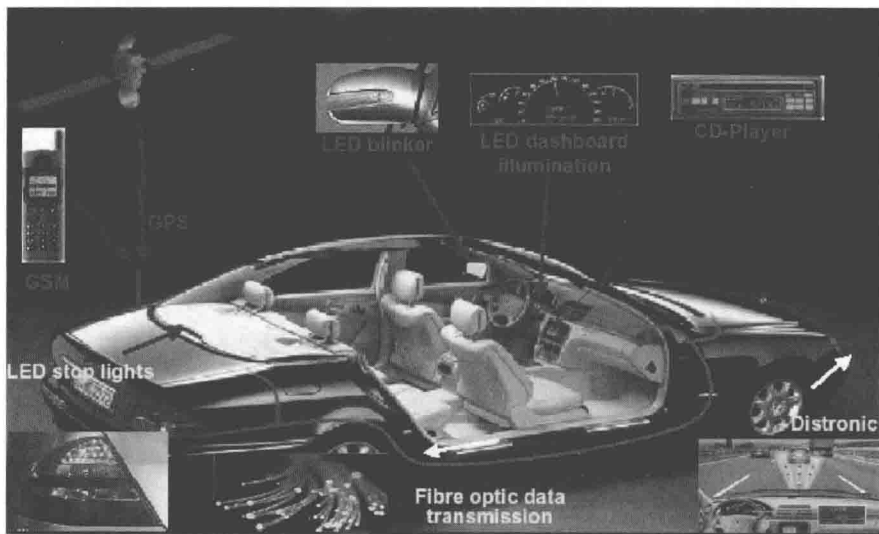


图 1-3 LED 应用于汽车照明系统

4. 交通信号灯

LED 交通信号灯发展可分为三个阶段:第一阶段是 1998 年以前,LED 信号灯为试用期,一方面受 LED 发光器件的限制,使用效果一般;另一方面由于 LED 信号灯刚刚开发出来,其在户外条件下的使用情况需要考察一段时间,这一时期主要在北京、上海使用,未大面积铺开。第二阶段是 1998 至 2000 年,这一阶段 LED 信号灯从试用走向大规模使用。这一阶段,LED 信号灯开始成批量地更换或在新增交通信号控制路口使用,北京、上海、重庆等城市都在这一时期批量使用 LED 信号灯。这一时期的 LED 信号灯技术水平不高,主要靠 LED 发光器件技术水平的提高来达到使用要求。2001 年至今称为第三阶



段,随着 GB14887—1994《道路交通信号技术要求及测试方法》的修订,LED 信号灯的技术水平进入一个总体提高阶段。这一阶段国内许多城市大规模地使用或全面使用 LED 信号灯,这些城市有北京、上海、南京、重庆、宁波等。LED 在交通引导信息显示屏中的应用,既可作为显示屏幕,也可以作为交通信号标志(见图 1-4),对显示路段交通状况和停车场情况等文字信息的显示屏,高亮度是一个重要的发展趋势。LED 在交通标志和倒计时显示器中的应用也日益广泛,主要是可变交通标志,如可限速标志、可变车道标志和配合交通信号灯使用的倒计时显示器。

上面讲的是一般城市道路用的交通信号灯(见图 1-4),实际上广义的交通信号灯还包括航标灯、铁路信号灯、机场相关信号指示灯等。

上海奥星照明电器制造有限公司研制了 LED 航标灯,光源采用碟状结构,与相应光学系统匹配构成了一个相对独立的发光单元,在实际应用中,根据大小河流或沿海的不同需求选择灯具中所使用的单元数目,获得不同的射程。

LED 铁路信号灯在国内也处于研究开发之中,目前已经研制出 LED 手提信号灯,铁路信号灯的研制目前还要克服颜色和光强问题。

航空和机场助航灯光系统也在采用 LED,由上海东风照明器材公司生产的障碍灯、环境灯,已用于国内机场。机场滑行道边灯采用蓝光 LED 的计划也已通过民航总局的认可,拟投入使用。



图 1-4 LED 应用于交通信号

5. 建筑装饰照明

LED 在建筑装饰领域的应用更加广泛,出现了不少创新设计(如图 1-5 所示)。以往对建筑立面照明主要采用投射方式,但许多建筑物没有地方放置传统的投光灯。LED 由于光源尺寸小,可以水平或垂直安装,能与建筑物表面更好地结合,拓展了照明设计师的创作空间。

在景观照明中,LED 在广场、公园、绿地、水面、水下、道路等均有不同的应用,由于 LED 灯具体积小,便于隐藏,因此会产生较好的景观照明效果。



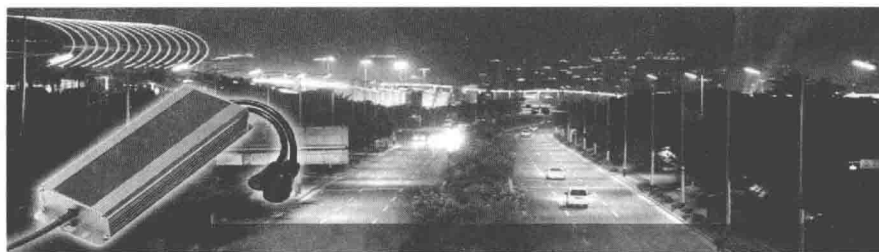
由于景观照明的需求,企业开发出品种繁多的LED灯具,在造型、款式、色彩、功能等方面均富于变化。同时由于采用智能控制,色彩、亮度均可控制,使得灯具色彩丰富、变化多姿。



图1-5 LED 应用于建筑装饰照明

6. 固体照明、室内外和隧道照明

LED 固体照明灯的功耗只有白炽灯的 10% ~ 20%, 白炽灯的寿命一般不超过 2 000 小时, 而 LED 灯的寿命长达数万小时。LED 这种体积小、重量轻、方向性好、节能、寿命长、耐各种恶劣条件的固体光源必将对传统的光源市场造成巨大冲击。近年来在室内外照明、隧道照明的应用越来越普遍 (如图 1-6 所示)。



(a) LED路灯



(b) LED隧道照明

图 1-6 LED 应用于室外和隧道照明

7. LED 其他应用

除了前面讲到的背光源、屏幕显示、交通信号灯、汽车照明和建筑装饰照明外，LED 的应用还渗透到生活的其他领域，以下举几个例子：

白光 LED 已用于各式各样的手电筒，国内一些企业与煤矿合作开发井下矿灯。在今年新开通的城市间直达列车上（Z 字头），全程软卧车厢床头阅读灯已改成由 21 颗白光 LED 组装而成的 LED 灯。同时车辆夜间行驶时，走道的地灯也采用白光 LED。

彩色 LED 应用更加花样繁多，在电视演播厅和一些演出场所，以往的透明地板采用彩色白炽灯，现已改用彩色 LED，配合音乐与表演显示动态彩色变幻的效果。

另外，LED 作为一种装饰还用于一些玩具和纪念品中，如圆珠笔、钥匙链等。

任务 2 LED 在照明节电领域的地位

能源问题是我国全面实现现代化，保证国家稳定发展的一个长期制约因素。我国要在 21 世纪的前 20 年全面建设小康社会，作为有 13 亿人口的发展中国家，我国的能源特别是电力资源相对比较匮乏。改革开放以来，我国电力工业蓬勃发展，成为世界电力生产和消费大国，初步实现了电气化。但是，与发达国家相比，尚有很大的差距。我国人均用电量仅为世界平均水平的 $1/3$ ，还不到发达国家的 $1/10$ 。随着经济的发展，电力需求将继续呈上升趋势，电力供应形势不容乐观。因此，加快电力发展，满足快速增长的电力需求是一项长期的任务，同时我们也应注意到资源节约在能源问题上的关键地位。在这种情况下，继续坚持“资源开发与节约并举，把节约放在首位”的方针，抓好节约用电、合理用电工作，提高能源利用效率，对我国经济建设的可持续发展极为重要。

随着人民生活水平的不断提高，照明用电在电力消费中所占的比例逐年增加。目前，照明用电约占全国用电量的 13%，在终端用电中仅次于电机，居第二位。照明节电是节电工作的一个重要组成部分。在国家发展和改革委员会近日制定的《节能中长期专项规划》的重点节能领域中明确指出要提高照明器具的能效标准，并且将绿色照明工程列为十项重点节能工程之一。

由于 LED 特殊的发光原理，使其在达到同等亮度情况下所需消耗的能量远远低于普通白炽灯，随着关键技术的进一步突破，白光 LED 的光效有可能达到 $150 \sim 200 \text{ lm/W}$ ，大大超越现在所有照明光源的光效，在照明方面有着很好的发展前景。相对于传统的电