

周志敏 纪爱华 编著

漫步 LED世界

(灯具设计与工程应用篇)



国防工业出版社
National Defense Industry Press

漫步 LED 世界

(灯具设计与工程应用篇)

周志敏 纪爱华 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书作为《漫步 LED 世界》丛书的灯具设计与工程应用篇，在写作上结合国内外 LED 照明灯具设计及工程应用的发展动态，以 LED 照明灯具设计及 LED 照明工程设计为核心内容，全面系统地讲述了 LED 照明灯具及应用特性、LED 照明灯具配光设计、LED 灯具热设计、道路和隧道 LED 照明工程设计、LED 景观照明工程设计等内容。

本书题材新颖实用，内容丰富，深入浅出，语言通俗易懂，具有很高的实用价值，是 LED 照明灯具设计与工程应用领域工程技术人员必备读物。也可供高等院校及职业技术学院相关专业的师生阅读参考。

图书在版编目（CIP）数据

漫步 LED 世界. 灯具设计与工程应用篇/周志敏, 纪爱华编著. —北京:
国防工业出版社, 2013.1

ISBN 978-7-118-08428-3

I. ①漫… II. ①周… ②纪… III. ①发光二极管—照明设计 IV. ①TN383

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 248554 号

※

国防工业出版社出版发行

（北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048）

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 12¾ 字数 317 千字

2013 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 39.00 元

（本书如有印装错误，我社负责调换）

国防书店：（010）88540777

发行邮购：（010）88540776

发行传真：（010）88540755

发行业务：（010）88540717

前 言

LED 作为一种新型的固态照明光源，其应用前景举世瞩目，LED 被誉为 21 世纪最有价值的照明光源，必将引起照明领域一场新的革命。LED 无论是发光原理还是功能方面都具有其他传统光源无法比拟的优势，因此，LED 照明已成为 21 世纪照明领域的一种发展趋势。随着 LED 照明技术的不断创新和发展，人类的照明光源将向更加节能化、健康化、艺术化和人性化方向发展。

LED 照明技术的发展已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业。LED 照明产品的开发、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 照明技术的广泛应用，LED 照明技术显示出了强大的发展潜力，并形成完整的新型照明产业链。

进入 21 世纪，随着 LED 这一绿色环保固态光源在效率、成本、散热等技术瓶颈的不断突破，照明设计将会是以 LED 光源为主流。本书系统地讲述了 LED 照明灯具设计及在道路、隧道、桥梁、广场、园林等照明领域应用的设计原则、方法及施工技术。

本书在写作中尽量做到有针对性和实用性，在保证科学性的同时，注意通俗性。力求做到通俗易懂和结合实际，使得从事 LED 灯具开发、设计及工程应用的技术人员从中获益，读者可以以此书为“桥梁”，系统地全面了解和掌握 LED 的最新工程应用技术。

参加本书编写工作的有周志敏、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。本书在写作过程中从资料的收集和技术信息交流上都得到了国内外的专业学者、同行的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于成书时间仓促，水平有限，难免有错误之处，敬请读者批评指正。

编 者

2013 年 1 月

目 录

第 1 章	LED 照明灯具及应用特性	1
1.1	LED 照明技术及灯具结构	1
1.1.1	LED 照明技术	1
1.1.2	LED 照明灯具	4
1.2	LED 照明灯具特点及技术特性	15
1.2.1	LED 照明灯具特点	15
1.2.2	LED 照明灯具技术特性	18
1.2.3	LED 柔性霓虹灯	30
第 2 章	LED 照明灯具配光设计	33
2.1	LED 典型配光曲线及灯具光学系统	33
2.1.1	配光曲线定义及类型	33
2.1.2	LED 典型配光曲线	36
2.1.3	灯具的光学系统	38
2.1.4	LED 光学透镜	39
2.2	LED 配光及 LED 信号灯、路灯配光方案	42
2.2.1	LED 配光方案	42
2.2.2	LED 信号灯配光方案	50
2.2.3	LED 路灯配光方案	54
第 3 章	LED 灯具热设计	65
3.1	LED 灯具热特性及设计程序	65
3.1.1	LED 灯具热特性	65
3.1.2	LED 灯具设计程序	72
3.2	LED 灯具散热器	78
3.2.1	大功率 LED 散热器	78
3.2.2	LED 散热器的设计要点	86
3.3	LED 路灯热设计	91
3.3.1	LED 路灯热设计要素	91
3.3.2	LED 路灯热衬结构性能分析	94
3.3.3	LED 道路照明灯具设计	98
第 4 章	道路、隧道 LED 照明工程设计	102
4.1	道路 LED 照明的方案设计	102

4.1.1	道路照明要素	102
4.1.2	道路照明规划设计	107
4.1.3	LED 路灯特性及配光	118
4.1.4	LED 路灯照明设计实例	122
4.2	公路隧道 LED 照明设计	124
4.2.1	公路隧道照明设计	124
4.2.2	LED 隧道灯具	132
4.2.3	LED 隧道灯照明设计实例	135
第 5 章	LED 景观照明工程设计	138
5.1	城市灯光环境与景观照明	138
5.1.1	城市灯光环境	138
5.1.2	城市景观照明的规划设计	140
5.1.3	景观照明设计方案	143
5.1.4	景观照明规划设计要点	145
5.1.5	景观照明的亮度和色彩	147
5.1.6	景观泛光照明设计	150
5.1.7	景观照明规划设计的步骤	154
5.2	建筑物及园林景观照明的规划设计	154
5.2.1	建筑物景观照明规划设计	154
5.2.2	园林景观照明规划设计	160
5.3	城市广场 LED 景观照明设计	168
5.3.1	城市广场	168
5.3.2	城市广场灯光环境	171
5.3.3	城市广场 LED 景观照明设计	175
5.4	桥梁 LED 景观照明设计	180
5.4.1	桥梁景观	180
5.4.2	桥梁景观照明	182
5.4.3	桥梁景观照明设计	184
5.4.4	城市立交桥景观照明设计	193
	参考文献	197

第 1 章 LED 照明灯具及应用特性

1.1 LED 照明技术及灯具结构

1.1.1 LED 照明技术

1. LED 灯具设计趋势

LED 作为一种新型的照明技术，其应用前景举世瞩目，尤其是大功率 LED 更被誉为 21 世纪最有价值的光源，必将引起照明领域一场新的革命。自从白光 LED 出现，无论是发光原理还是功能等方面都具有其他传统光源无法比拟的优势，因此，LED 照明已成为 21 世纪照明领域的一种趋势，并将取代传统白炽灯和日光灯，传统照明灯具已面临严峻挑战。LED 新光源促使照明灯具设计开发的创新，从很大程度上改变了传统照明的观念，从传统的点、线光源局限中解放出来，灯具设计的语言和概念可以自由发挥和重新确立，灯具在视知觉与形态的创意表现上具有了更大的弹性空间，照明灯具将向更加节能化、健康化、艺术化和人性化发展。

(1) 节能化。研究资料表明，由于 LED 是冷光源，自身对环境没有任何污染，与白炽灯、荧光灯相比，节电效率可以达到 90% 以上。在同样亮度下，耗电量仅为普通白炽灯的 1/10、荧光灯管的 1/2。如果用 LED 取代目前传统照明的 50%，每年我国节省的电量就相当于一个三峡电站发电量的总和，其节能效率十分可观。

(2) 健康化。LED 是一种绿色光源，直流驱动，没有频闪；没有红外和紫外的成分，没有辐射污染，显色性高并且具有很强的发光方向性；调光性能好，色温变化时不会产生视觉误差；冷光源发热量低，可以安全触摸；这些都是白炽灯和日光灯达不到的。它既能提供令人舒适的光照空间，又能很好地满足人的生理健康需求，是保护视力并且环保的健康光源。

由于目前单只 LED 功率较小，光亮度较低，不宜单独使用，而将多只 LED 组装在一起设计成为实用的 LED 照明灯具则具有广阔的应用前景。灯具设计可根据照明对象和光通量的需求，决定灯具光学系统的形状、LED 的数目和功率的大小；也可以将若干只 LED 组合设计成点光源、环形光源或面光源（二次光源），根据组合成的二次光源来设计灯具。

(3) 艺术化。光色是构成视觉美学的基本要素，是美化居室的重要手段。光源的选用直接影响灯光的艺术效果，LED 在光色上可充分展示灯具的艺术化，目前彩色 LED 产品已覆盖了整个可见光谱范围，且单色性好，色彩纯度高，红、绿、黄 LED 的组合使色彩及灰度（1670 万色）的选择具有较大的灵活性。

灯具是发光的雕塑，由材料、结构、形态和肌理构造的灯具物质形式也是展示艺术的重要手段。LED 光源使灯具将科学性和艺术性更好地有机结合，打破了传统灯具的边边框框，超越了固有的所谓灯具形态的观念，灯具设计在视知觉与形态的艺术创意表现上，以一个全新的角度去认识、理解和表达光的主题。可以更灵活地利用光学技术中明与暗的搭配、光与

色的结合，材质、结构设计的优势，提高设计自由度来弱化灯具的照明功能，让灯具成为一种视觉艺术，创造舒适优美的灯光艺术效果。例如，半透明合成材料和铝制成的类似于蜡烛的 LED 灯具，可随意搁置在地上、墙角或桌上，构思简约而轻松，形态传达的视觉感受和光的体验，让灯具变成充满情趣与生机的生命体。

（4）人性化。光和人的关系是一个永恒的话题，“人们看到了灯，我看见了光”，正是这句经典的话语改变了无数人对灯的认识。灯具的最高境界是“无影灯”，也是人性化照明的最高体现，而没有任何常见灯具的踪迹，让人们可以感受到光亮却找不到光源，体现了把光和人类生活完美结合的人性化设计。不同的光色和亮度对人的生理和心理能产生不同的影响，人们在很多情况下并不需要很亮的白光，可能黄光或其他颜色的光更适合生理和心理的需要。三基色 LED 可以实现亮度、灰度、颜色的连续变换和选择，使得照明从普遍意义上的白光扩展为多种颜色的光。

因此，人们可以根据整体照明需要（如颜色、温度、亮度和方向等）来设定照明效果，实现人性化的智能控制，营造不同的室内照明效果。人们也可以根据各自要求、场景情况以及对环境和生活的不同理解，在不同的空间和时间选择并控制光的亮度、灰度、颜色的变化，模拟出各种光环境来引导、改善情绪，体现更人性化的照明环境。

2. LED 照明灯具的关键技术

1) 灯具系统的热量管理

一般常称 LED 为冷光源，这是因为 LED 发光原理是电子经过复合直接发出光子，而不需要热的过程。但由于焦耳热的存在，LED 在发光的同时也有热量伴随，而且对于大功率和多只 LED 应用的场合，热量将累积，LED 不同于白炽灯、荧光灯等传统照明光源，过高的温度会缩短使用寿命。因 LED 是温度敏感器件，当温度上升时，其发光效率急剧下降，所以系统结构设计及散热技术开发也是 LED 应用需面对的课题。由于强制空气冷却通常在光源中是不可取的，所以随着输入电功率的提高，散热片和其他增强自然对流冷却的方法可在 LED 灯具设计中发挥日益重要的作用。

2) 提高显色性

目前，白光 LED 普遍使用蓝光 LED 叠加由蓝光激发的发黄光的钇铝石榴石（YAG）荧光粉合成为白光，由于其发光光谱中仅含蓝、黄这两个波谱，所以存在色温偏高、显色指数偏低的问题，不符合普通照明要求。人眼对色差的敏感性大大高于对光强弱的敏感性，对照明而言，光源的显色性往往比发光效率更重要。所以加入适量发红光的荧光粉并能保持较高发光效率是白光 LED 在照明领域中应用的一个重要的课题。

3) 灯具系统的二次光学设计

传统灯具长期以白炽灯、荧光灯光源为参照物来决定灯具的光学和形状的标准，因此 LED 灯具设计应摒弃传统灯具加上 LED 发光模块的组装方式，充分考虑其光学特性，为 LED 光源专门设计不同的灯具。光学系统设计内容主要包括如下几个方面。

（1）根据照明对象、光通量的需求，决定光学系统的形状、LED 的数目和功率的大小。

（2）将若干个 LED 组合设计成点光源、环形光源或面光源（二次光源），根据组合成的二次光源，计算照明光学系统。

（3）设计的“二次光源”上的每只 LED 配光分布控制十分重要。

由于 LED 发出的光束集中，更易于控制，且不需要反射器聚光，有利于减少灯具的深度。例如，利用平面镜光学系统，可以只用一两只 LED 就可照亮很大的表面，而灯具深度很薄；

而利用光导技术, LED 直接装于光导管旁, 可大大减少光源及其他组件占用的体积, 制成超薄的灯具。

4) 电源、电路与灯具的集成

采用 LED 的灯具需要专门的驱动电源与其配套, 在设计灯具的时候应考虑驱动电源与灯具系统集成。

5) 提高可靠性

LED 光源有人称它为长寿灯, 作为固体发光器件, 其理论寿命在 $1 \times 10^5 \text{h}$ 以上, 其使用寿命远比传统光源要长, 因此在一些不易更换维护的场合使用, 其维护成本可大为降低。但是目前许多实际应用中却无法看到这项优点, 反而给使用者看到的是光衰严重, 且寿命短, 根本用不到 $1 \times 10^4 \text{h}$ 就坏了, 这是因为在设计中采用的是电子工业界最常使用的指示功能的 $\phi 3 \sim \phi 5 \text{mm}$ 的 LED, 利用简单的电子电路加大电流来增加其发光强度, 使 LED 只获得了短暂的高亮度, 却失去了 LED 应有的寿命。因此, 在 LED 灯具设计中应选用大功率 LED 作为灯具的光源。

6) 提高光通量、降低价格

目前单个 1W 的 LED 器件, 光通量约为 45lm, 质量好的售价要超过 5 美元, 差一些的也要 3 美元。而 25lm 的光通量对于普通照明而言太小了, 一只普通的 60W 白炽灯的光通量大于 700lm, 也就是说, 要代替传统照明需要多个 LED 器件, 还要加上驱动电路、灯壳、灯头等, 如此高的成本是白光 LED 推广到普通照明中应用的最大问题。

3. LED 产品研发亟待解决的问题

LED 是 21 世纪最具发展前景的高技术照明光源, 作为新型高效固体光源, 具有寿命长、节能、环保等显著优点, 将是人类照明史上继白炽灯、荧光灯、高压气体放电灯的又一次飞跃。在 LED 产品的外延生产、芯片制造、器件封装、集成应用等几个环节已初步形成比较完整的产业链, 但白光 LED 在功能化照明方面仍存在着许多制约因素。因此, 在目前的情况下, 对 LED 照明产品开发与设计寄予以下希望。

(1) 满足人们对照明的个性化需求。LED 的模块化, 为照明设计带来了便利, 通过在设计中充分合理地布局, 使 LED 处于良好的工作状态。LED 的产品在满足个性化照明方面是传统光源相形见绌的, LED 产品外形的多样化将达到前所未有的程度。因此, LED 产品个性化的研发与设计是所有 LED 灯具厂商必须要面临的最大挑战。

(2) 面发光 LED 产品考虑建筑的模数化。面发光的 LED 必须与城市设计和建筑设计相结合, 才能满足照明设计的需求。例如作为地面铺装的夜间装饰, 产品的尺寸与地砖的尺寸相协调, 即符合模数的要求: $150\text{mm} \times 15\text{mm}$; $200\text{mm} \times 200\text{mm}$; $200\text{mm} \times 100\text{mm}$; $300\text{mm} \times 300\text{mm}$; $400\text{mm} \times 200\text{mm}$ 等。

(3) 小功率 LED 灯具设计。城市夜景照明追求的不是亮度, 而是艺术的创意设计, LED 发光角度小, 方向性强, 可作局部重点照明。问题是要给照明设计提供足够大的选择范围, 外观上也应有美观的要求。可以肯定地说, LED 将会在未来引领照明的时尚与新潮。

(4) 环保与节能及 LED 的合理利用。绿色照明的概念是全球追随的生态设计目标, 如果能将 LED 与太阳能电池组合, 将会扩大 LED 的应用范围与场所。

(5) 大功率、高光效、高显色性的白光 LED 照明产品研发。LED 在照明领域的使用, 目前还受到技术水准和价格的限制, 目前 LED 在照明领域应用的困难是白光 LED 的光效不高、功率不大、价格贵。但是白光 LED 的发展前景看好, 发光效率将达到 100lm/W , 单只的

输出功率达到 10W，大功率、高亮度 LED 集成封装技术的研究，包括驱动电路及特种灯具的开发，无疑是 LED 最终走入照明领域的关键。一旦光效和价格问题得到解决，LED 将是未来照明的主体。

1.1.2 LED 照明灯具

LED 照明灯具是 LED 灯具的统称，随着 LED 技术的进一步成熟，LED 将会在照明灯具设计开发领域取得更多更好的发展。21 世纪的照明灯具设计将会是以 LED 灯具设计为主流，同时充分体现节能化、健康化、艺术化和人性化的发展趋势，成为灯光文化的主导。在新的世纪里，LED 照明灯具必将成为灯具开发设计的一次伟大变革。

LED 照明灯具主要组成部分有 LED 芯片、驱动电路板、外壳。这三部分构成了 LED 照明灯具的主体，也基本决定了 LED 照明灯具的品质和性能。

1. LED 芯片

LED 芯片大小根据功率可分为小功率芯片、中功率芯片和大功率芯片。根据要求可分为单管数码级、点阵级以及装饰照明用。至于芯片的具体尺寸大小是根据不同芯片生产厂家的实际生产水平而定的，没有具体要求。只要工艺过关，芯片小可提高单位产出并降低成本。光电性能并不会发生根本变化，芯片的单位电流密度基本差不多。如果 10mil (0.254mm) 芯片的工作电流是 20mA，40mil (1.016mm) 芯片理论上使用电流可以提高 16 倍，即 320mA。但考虑到大电流下的散热问题，所以大芯片的发光效率比小芯片低，另一方面由于面积增大，芯片的体电阻会降低，所以正向导通电压会有所降低。

LED 光源的发光亮度是由 LED 裸芯亮度和灯体封装外形决定的，工作寿命是由 LED 芯片工作环境和品质决定的。现在照明灯具所用的 LED 芯片标准尺寸一般为红色、黄色 12mil (0.3048mm)、蓝色、绿色 14mil (0.3556mm)，也有用 8mil~10mil (0.2032mm~0.254mm) 芯片的。不同尺寸的芯片发光亮度可以一样，但其工作寿命完全不一样，因为单位面积芯片的电流密度越大，其工作寿命越短，这也是同样亮度 LED 体价格不一样的原因。

大功率 LED 额定工作电流为 350mA、500mA、700mA、1000mA、1500mA 等几个等级，在采用同样技术的条件下，单颗 LED 功率越大，光效越低，但可减少灯具内 LED 的数量，有利于节省投资；单颗功率越小，光效越大，但每个灯具内需要 LED 的颗数增加，灯体尺寸增大，增加了光学透镜的技术难度，对配光曲线有不利影响。在综合考虑技术、经济以及产品成熟的程度与实际使用经验等因素的基础上，在 LED 照明灯具设计中，通常选择单颗 LED 额定工作电流为 350mA，即功率为 1W。对于工作电流为 350mA 的 LED，其峰值电流有 500mA、700mA 两个系列。峰值电流为 700mA 系列的产品较新，价格较贵。

大功率 LED 主波长是决定 LED 颜色的主要参数，选择正确与否会对场景效果产生影响。设计中应选择 LED 主波长为：R:622nm~629nm；G:520nm~525nm；B:465nm~470nm。LED 半波长宽度与色纯度两个参数实际上表示 LED 的同一个光学性能。LED 半波长宽度选择为：R: 20nm~25nm、G:35nm~40nm、B:25nm~30nm；LED 色纯度选择为：R: $\geq 97\%$ ，G: $\geq 75\%$ ，B: $\geq 95\%$ 。大功率 LED 芯片允许工作结温越高，产品性能越好，价格越贵。选择时应综合考虑产品成熟程度与价格因素，一般应选择 LED 芯片的允许工作结温大于 125℃。

大功率 LED 最大工作壳温是对封装技术要求的一个参数，最大工作壳温越低，对封装散热要求越高。表明封装散热技术越好。最大工作壳温选择 110℃。大功率 LED 光源热阻参数直接反映了封装技术的水平，散热技术越好，热阻越低，光衰越小，灯的寿命越长。应选择

PN 结至封装底座的热阻： $R \leq 12^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ；G、B： $\leq 10^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 的 LED。大功率 LED 的理论寿命为 100000h，但现在国际上实际能达到的是 50000h，即使用 50000h 后，光衰不超过 30%，光通量仍能保持初始值的 70%。

照明用 LED 光源的 V_F 电压都很低，一般 $V_F=2.75\text{V}\sim 3.8\text{V}$ ， $I_F=15\text{mA}\sim 1400\text{mA}$ ；因此 LED 驱动 IC 的输出电压为 $V_F \times N$ 。LED 灯具使用的 LED 光源有小功率（ $I_F=15\text{mA}\sim 20\text{mA}$ ）和大功率（ $I_F>200\text{mA}$ ）两种，小功率 LED 多用来做 LED 日光灯、装饰灯、格栅灯；大功率 LED 用来做家庭照明灯、射灯、水底灯、洗墙灯、路灯、隧道灯、汽车工作灯等。大功率 LED 是低电压、大电流驱动的器件，其发光的强度由流过 LED 的电流大小决定，电流过强会引起 LED 的光衰减，电流过弱会影响 LED 的发光强度，因此，需要提供恒流电源驱动 LED，以保证大功率 LED 使用的安全性，同时达到理想的发光强度。在 LED 照明领域，要体现出节能和长寿命的特点，选择好 LED 驱动 IC 至关重要，没有好的驱动 IC 的匹配，LED 照明的优势无法体现。

就目前情况来看，市场上 LED 单芯片功率通常为 $1\text{W}\sim 5\text{W}$ ，光输出仅几百流明。要使 LED 真正大规模应用于通用照明等公众场所，LED 光源的光通量必须达到几千甚至上万流明，如此高的光输出量是无法通过单芯片来实现的。为满足如此高的光输出要求，目前国内外大多采用多个 LED 芯片（通常为 1W ）组合在一个灯具中来满足高亮度照明的要求，这种方式在一定程度上解决了单芯片 LED 光源亮度不足的问题。但是，这种工艺存在以下问题。

（1）灯具制作过程繁琐，生产效率低、可靠性不高。

（2）灯具的设计受单 LED 排列数量和排布方式的限制，生产的灯具在外形美观和保证性能方面难以兼顾。

（3）灯具的二次配光设计复杂，难以满足各类不同照明设计的要求，而且会造成灯具光效降低。

（4）数百只单芯片 LED 布置在同一灯具中，必须要求各单芯片的光电性能参数一致，否则会降低灯具的光电性能和使用性能。

（5）在使用过程中容易出现因局部故障导致的盲点，产生暗斑，增加维护成本。

为解决上述技术难题，提出了多芯片封装大功率 LED 照明应用技术课题。目前国内生产的 LED 灯具大都是采用 1W 的 LED 芯片多个串、并联进行组装，这种方法热阻较先进封装技术的产品高，不容易造出高品质的灯具。或是采用 30W 、 50W 甚至更大的模组进行组装，以达到所需要的功率，这些 LED 的封装材料有用环氧树脂封装的，有用硅胶封装的。二者的区别是：环氧树脂封装耐温较差，时间久了易老化。硅胶封装则耐温较好，使用时应注意选择。

利用多芯片大型化、改善 LED 发光效率，并采用高取光效率封装及大电流化，可实现高亮度目标，如图 1-1 所示。采用多芯片与散热器整体封装，或采用铝基板多芯片封装再通过相变材料或散热硅脂与散热器相连接，做出的产品热阻比用 LED 器件组装的产品的热阻小，更利于散热。

采用 LED 模组的灯具，其模组基板一般为铜基板，它与外散热器的连接要使用好的相变材料或好的散热硅脂，保证铜基板上的热量能及时传到外散热器上去，如处理不好，则易使热量堆积造成模组芯片升温太高，影响 LED 芯片正常工

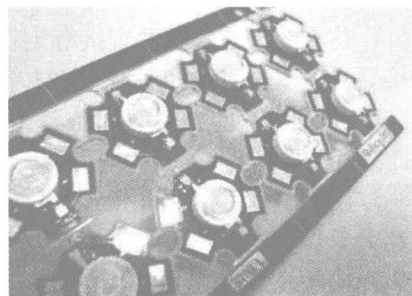


图 1-1 多 LED 芯片示意图

作，多芯片封装适合制造普通照明灯具，模组封装适合空间有限的场合制造紧凑型 LED 灯具（如汽车主照明的头灯等）。

LED 芯片热量的多少并不是影响 LED 的主要问题，热量集中（从而形成热点）才是问题的关键。对一般标准的 LED 芯片而言，1WLED 芯片的热通量约 $100\text{W}/\text{cm}^2$ ，3W 的芯片的热通量则高达 $300\text{W}/\text{cm}^2$ ，而一般的 CUP 的热通量才为 $60\text{W}/\text{cm}^2 \sim 130\text{W}/\text{cm}^2$ 。热量集中在尺寸很小的晶片内，晶片温度升高，引起热应力的分布不均匀、晶片发光效率和荧光粉发射效率下降。当温度超过一定值时，器件失效率呈指数规律增加。当多个 LED 密集排列组成照明系统时，散热问题就更严重了。

LED 芯片的散热途径主要是热传导和热对流，传统上，LED 灯具的散热结构包括基底、散热片以及散热器。基底将晶粒的热能传导出来，可以导热但不导电。散热片将热扩散开来，以免热堆积于 LED 光源处，并且可以提升散热器的效率。散热器将热有效地发散于空气中。若基底材料极低的热导率容易导致器件热阻增加，产生严重的自加热效应，对器件的性能和可靠性带来毁灭性的影响。

均热板能实现超高热流密度传热，可解决高功率 LED 的热点问题。均热板是一个内壁具微结构的真空腔体，当热由热源传导至蒸发区时，腔体里面的工质会在低真空度的环境中产生液相气化的现象，此时介质吸收热能并且体积迅速膨胀，气相的介质会很快充满整个腔体。当气相介质接触到一个比较冷的区域时便会产生凝结现象，由凝结现象释放出在蒸发时累积的热，凝结后的液相介质会由微结构的毛细现象再回到蒸发热源处。此工作将在腔体内周而复始进行，这就是均热板的工作方式。由于工质在蒸发时微结构可以产生毛细力，所以均热板的工作可不受重力的影响。

图 1-2 给出了采用均热板的 LED 器件的散热结构，它去掉了基底，减少一大部分热阻。LED 器件可以紧密排列并直接绑定在均热板上，并以标准打线封装机台直接封装 LED 器件及相关电路，构建成一个独立光源。

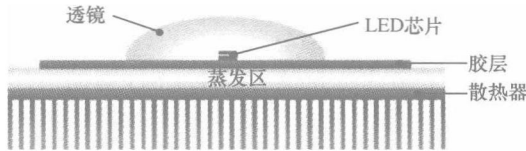


图 1-2 采用均热板 LED 灯的散热结构

这种将 LED 器件直接绑定在均热板上的方法有明显的优点，LED 器件的下方与均热板接触，可以通过均热板把热源扩散并可有效地将热传递至后端，从而降低 LED 的温度 T_j ，提高 LED 寿命。此外，这种方法还可集中摆放 LED 器件，让光源集中，有利于二次光学设计。而采用 SMD 封装的均热板还可以使用 SMD 自动化设备进行大批量生产。

LED 芯片高功率化的常用方式有：芯片大型化、改善发光效率、采用高取光效率的封装及大电流化。这类做法虽然电流发光量会呈比例增加，不过发热量也会随之上升。而改用高热传导陶瓷或是金属树脂封装结构，可解决散热问题和强化原有的电、光及热特性。

针对大功率 LED 封装技术而言，散热问题给其造成了一定程度的困扰，在此背景下具有高成本效益的金属基板技术，就成了 LED 高效率化之后的另一个备受关注的新技术。

过去由于 LED 输出功率较小，因此使用传统 FR4 等玻璃环氧树脂封装基板，并不会引起太大的散热问题，但应用于照明的大功率 LED，虽芯片面积相当小，整体消费功率也不高，

不过单位面积的发热量却很大。

一般来说，树脂基板的散热只能够支持 0.5W 以下的 LED，超过 0.5W 以上的 LED，多改用金属或陶瓷高散热基板进行封装，主要原因是，基板的散热性直接影响 LED 寿命与性能，因此封装基板成为设计大功率 LED 产品的开发重点。

随着 LED 技术的发展，其在照明领域的应用也越来越多，特别是白光 LED 的出现，推动了半导体固态照明技术的发展。但 LED 芯片、封装技术还有待进一步提高，在芯片方面要朝大功率、高光效和降低热阻方面发展。提高功率意味着芯片的工作电流加大，最直接的解决方法是加大芯片尺寸，现在普遍出现的大功率芯片都在 $1\text{mm}\times 1\text{mm}$ 左右，工作电流在 350mA。由于工作电流的加大，散热问题成为突出问题，现在通过芯片倒装的方法基本解决了这一问题。

LED 芯片的封装形式很多，针对不同使用要求和不同的光电特性要求，有各种不同的封装形式，归纳起来有如下几种常见的形式。

(1) 软封装。芯片直接黏结在特定的印制电路板 (PCB) 上，通过焊接线连接成特定的字符或陈列形式，并将 LED 芯片和焊线用透明树脂保护，组装在特定的外壳中。这种软封装常用于数码显示、字符显示或点阵显示的产品中。

(2) 管脚式封装。常见的有将 LED 芯片固定在 2000 系列引线框架上，焊好电极引线后，用环氧树脂包封成一定的透明形状，成为单个 LED 器件。这种管脚式封装按外形尺寸的不同可以分成 $\phi 3$ 、 $\phi 5$ 直径的封装。这类封装的特点是控制芯片到出光面的距离，可以获得各种不同的出光角度： 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° 、 120° 等，也可以获得侧发光的要求，比较易于自动化生产。

(3) 微型封装 (贴片封装)。将 LED 芯片黏结在微小型的引线框架上，焊好电极引线后，经注塑成型，出光面一般用环氧树脂包封。

(4) 双列直插式封装。用类似 IC 封装的铜质引线框架固定芯片，并焊接电极引线后用透明环氧包封，常见的有各种不同底腔的“食人鱼”式封装和超级“食人鱼”式封装，这种封装芯片散热较好，热阻低，LED 的输入功率可达 $0.1\text{W}\sim 0.5\text{W}$ ，大于管脚式器件，但成本较高。

(5) 功率型封装。大功率 LED 封装的特点是黏结芯片的底腔较大，且具有镜面反射能力，热导率要高，并且有足够低的热阻，以使芯片中的热量被快速地传导到器件外，使芯片与环境温度保持较低的温差。

2. 驱动电路板

驱动电路板作为光源的载体直接影响 LED 灯具的寿命和故障率，LED 照明灯具的所有电子线路都在驱动电路板上，驱动电路板的材质和加工工艺将直接影响产品的品质和寿命。驱动电路板材质分为全玻纤、半玻纤、纸板三种。LED 照明灯具的标准材料应为全玻纤双面板，如采用半玻纤或纸单面板其后期焊接品质和防潮、抗老化能力以及电性能都将大打折扣。

LED 是电流型驱动器件，以 350mA 驱动的 1W 白光 LED 通常具有 $3.0\text{V}\sim 4.0\text{V}$ 的正向电压 V_F 。LED 是动态电阻非常小的 PN 结。给 LED 施加超过正向电压 V_F 3 倍的电压会导致电流不受控制。如果将 LED 直接连接到市电交流电压，它会发出很亮的光，然后很快失效。“驱动器”这个术语，被用来形容将市电电压转换为受控直流电流的功率调节电路。LED 光源具有长寿命，可以持续使用数万小时，则与之匹配的驱动器也必须能够使用相同长的时间。这就要求在 LED 灯具设计中，要充分考虑 LED 驱动器的各个设计环节，包括从系统结构到

每个电路元件的选择。

1) LED 通用照明驱动电路拓扑结构

在采用交流/直流 (AC/DC) 电源的 LED 照明应用中, 电源转换结构中包括二极管、开关 (FET)、电感、电容及电阻等分立元件用于执行各自功能, 而脉宽调制 (PWM) 稳压器用于控制电源转换。变压器隔离型 AC/DC 转换电源包含反激、正激及半桥等拓扑结构, 其中反激拓扑结构是功率小于 30W 的中低功率应用的标准选择, 而半桥结构则最适合于提供更高效率和功率密度。就隔离结构中的变压器而言, 其尺寸的大小与开关频率有关, 且多数隔离型 LED 驱动器基本上采用“电子”变压器。

在采用 DC/DC 电源的 LED 照明应用中, 可以采用的 LED 驱动方式有电阻型、线性稳压器及开关稳压器等。在电阻型驱动方式中, 调整与 LED 串联的电流检测电阻即可控制 LED 的正向电流, 这种驱动方式易于设计、成本低, 且没有电磁兼容 (EMC) 问题, 劣势是依赖于电压, 需要筛选 LED, 且效率较低。

线性稳压器同样易于设计且没有 EMC 问题, 还支持电流稳流及过流保护, 且提供外部电流设定点, 但其功率转换效率低, 并要求输入电压要始终高于 LED 正向电压。

开关稳压器通过 PWM 控制不断控制开关的开和关, 进而控制驱动 LED 的电流。开关稳压器具有更高的效率, 与电压无关, 且能控制亮度, 但其成本相对较高, 复杂度也更高, 且存在电磁干扰 (EMI) 问题。常见的 DC/DC 开关稳压器拓扑结构包括降压 (Buck)、升压 (Boost)、降压—升压 (Buck-Boost) 或单端初级电感变换器 (SEPIC) 等不同类型。其中, 在所有工作条件下最低输入电压都大于 LED 串最大电压时采用降压结构, 如采用 24VDC 驱动 6 只串联的 LED; 与之相反, 所有工作条件下最大输入电压都小于最低输出电压时采用升压结构, 如采用 12VDC 驱动 6 只串联的 LED; 而输入电压与输出电压范围有交迭时可以采用降压—升压或 SEPIC 结构, 如采用 12VDC 驱动 4 只串联的 LED, 但这种结构的成本及效率最不理想。

采用交流电源直接驱动 LED 的方式在近年来也获得了一定的发展, 在这种结构中, LED 串以相反方向排列, 工作在半周期, 且 LED 在线路电压大于正向电压时才导通。这种结构具有避免 AC/DC 转换所带来的功率损耗。但是, 在这种结构中人眼可能会察觉到 LED 闪烁现象。此外, 在这种设计中还需要加入 LED 保护措施, 使其免受线路浪涌或瞬态的影响。

2) 功率因数校正

在美国能源部 (DOE) “能源之星” (ENERGYSTAR) 固态照明 (SSL) 规范中, 规定任何功率等级皆须强制提供功率因数校正 (PFC)。这标准适用于一系列特定产品, 如嵌灯、橱柜灯及台灯, 其中, 住宅应用的 LED 驱动器功率因数 (PF) 须大于 0.7, 而商业应用中则须大于 0.9; 但是, 这标准属于自愿性标准。欧盟的 IEC 61000-3-2 谐波含量标准中则规定了功率大于 25W 的照明应用的总谐波失真性能, 其最大限制相当于总谐波失真 (THD) 小于 35%, 而功率因数大于 0.94。虽然不是所有国家都绝对强制要求照明应用中改善功率因数, 但某些应用可能有这方面的要求, 如公用事业机构大力推动拥有高功率因数的产品在公用设施中的商业应用, 此外, 公用事业机构在选购通用照明灯具时, 也可以根据他们的意愿来决定是否要求拥有高功率因数 (通常大于 0.95)。

PFC 技术包括无源 PFC 及有源 PFC 两种。无源 PFC 方案的体积较大, 需要增加额外的元件来更好地改变电流波形, 能够达到约 0.8 或更高的功率因数。其中, 在小于 5W~40W 的较低功率应用中, 几乎标准的选择是反激式拓扑结构, 只需采用无源元件及稍作电路改动,

即可实现高于 0.7 的功率因数。

无源功率因数校正的方案众多，这些方案通常都使用较多的额外元器件，其中的一种方案就是谷底填谷 (Valley-Fill) 整流器，其中采用的电解电容和二极管组合增大了线路频率导通角，从而改善功率因数。实际上，这个过程利用高输入电压时以低电流给串联电容充电，然后在较低电压时以较大电流让电容放电给开关稳压器。典型应用使用 2 个电容和 3 个二极管，而要进一步增强功率因数性能，则使用 3 个电容和 6 个二极管，典型填谷电路如图 1-3 所示。

虽然填谷整流器提高了线路电流的利用率，但并未给开关稳压器提供恒定的输入。提供给负载的功率会有较大纹波，达电源频率的 2 倍。但需要 4 个二极管来对线路电源整流，使这种方案所用的二极管数量达到 7 个或 10 个。这些二极管及多个电解电容增加了方案成本，降低了可靠性，并占用了可观的电路板面积。

有源 PFC 电路结构如图 1-4 所示，通常是作为一个专门的电源转换段增加到电路中来改变输入电流波形。有源 PFC 通常提供升压，在交流 100V~277V 的宽输入范围下，PFC 输出电压范围达直流 450V~480V。如果恰当地设计 PFC 段，可以提供 91%~95% 的高效率。但增加了有源 PFC，仍然需要专门的 DC/DC 转换来提供电流稳流。

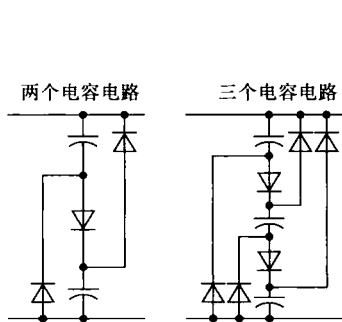


图 1-3 典型填谷电路

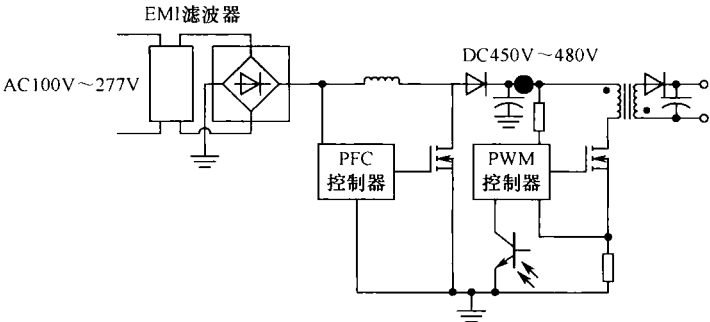


图 1-4 有源 PFC 的应用电路示意图

LED 照明应用的效率需要结合功率输出来考虑，美国“能源之星”固态照明规范规定了照明器具级的效率，但并不涉及单独 LED 驱动器的效率要求。如前所述，采用 AC/DC 电源的 LED 应用可以采用两段式分布拓扑结构，故可采用外部 AC/DC 适配器供电。而“能源之星”包含有关单输出外部电源的规范，其 2.0 版外部电源规范要求标准工作模式下最低效率达 87%，而低压工作模式下最低效率达 86%；在此规范中，功率大于 100W 时才要求 PFC。

而在采用 AC/DC 电源的 LED 照明应用中，要提供更高的 AC/DC 转换效率，就涉及成本、尺寸、性能规范及效率等因素之间的折中问题。例如，若使用更高质量的元件、更低导通阻抗 (R_{Dson}) 开关，就可降低损耗及改善效率；降低开关频率一般会改善效率，但却会增加系统尺寸。诸如谐振这样新的拓扑结构提供更高效率，却也增加设计及元件的复杂度。如果将设计限定在较窄的功率及电压范围，则可以帮助优化效率。

LED 驱动器本身也在不断创新，着重于进一步提高效率、增加功能及功率密度。美国“能源之星”的固态照明规范提出的是照明器具级的效率限制，涉及包括功率因数在内的特定产品要求。而欧盟的 IEC 61347-2-13 (5/2006) 标准针对采用直流或交流供电的 LED 模组的要求包括：

- (1) 特低安全电压不大于 $25V_{rms}$ (35.3VDC)。
- (2) 不同故障条件下安全工作。

(3) 故障时不冒烟或易燃。

此外, ANSIC82.xxxLED 驱动器规范仍在制定之中。而在安全性方面, 需要遵从 UL、CSA 等标准, 如 UL1310 (Class2)、UL60950、UL1012。

3) LED 照明驱动电路解决方案

在 LED 照明设计中, AC/DC 电源转换与恒流驱动这两部分电路可以采用不同配置。

(1) 整体式 (Integral) 配置, 即两者融合在一起, 均位于照明灯具内, 这种配置的优势包括优化效率及简化安装等。

(2) 分布式 (Distributed) 配置, 即两者单独存在, 这种配置简化安全考虑, 并增加灵活性。

LED 驱动器根据不同的应用要求, 可以采用恒定电压输出工作, 即输出为一定电流范围内钳位的电压; 也可以采用恒定电流输出工作, 输出能严格限定电流; 也可能会采用恒流恒压输出工作, 即提供恒定输出功率, 故作为负载的 LED 正向电压确定其电流。总的来看, LED 驱动器设计需要考虑以下几方面的因素。

(1) 输出功率。涉及 LED 正向电压范围、电流及 LED 排列方式等。

(2) 电源。AC/DC 电源、DC/DC 电源、直接采用 AC 电源驱动。

(3) 功能要求。调光要求、调光方式 (模拟、数字或多级)、照明控制。

(4) 其他要求。效率、功率因数、尺寸、成本、故障处理 (保护特性)、要遵从的标准及可靠性等。更多考虑的因素由机械连接、安装、维修、替换、寿命周期等。

高功率因数通常需要输入电流为正弦波, 且要求输入电流及电压之间的相位差极小。设计中需要在开关段前获得极低的电容, 从而得到更贴近正弦波形的输入电流。这使整流电压跟随输入电压, 产生更理想的正弦输入电流。这样, 反激变换器的输入电压就以电源频率的 2 倍跟随整流正弦电压波形。如果输入电流保持在相同波形, 功率因数就高。提供给负载的能量就是电压与电流的乘积, 是一个正弦平方 (Sine-squared) 波形。由于这种正弦平方波形的能量传递, 导致负载电路上有频率 2 倍的纹波, 本质上类似于填谷电路中出现的纹波。

如上所述, 输入电流必须保持在接近正弦波形, 从而实现高功率因数。高功率因数的关键在于通过将反馈输入维持在与线路频率相关的恒定电平, 不允许控制环路针对输出纹波来校正。一种选择是大幅增加输出电容, 从而减小 2 倍电源频率的纹波量。

3. 外壳

外壳作为灯具产品的混光层和保护层, 也影响到灯具产品的效果和寿命。现在所用的工程塑料一般是 PC (聚碳酸酯), 它的抗老化、防紫外线、抗冲击效果是最好的。也有用 PMMA (亚克力) 的, 其耐候性稍差一点, 且脆性较大易碎。PC 材料本身是无色的, 根据需要添加不同的色剂就可加工出不同颜色的 PC 管。一般常用 PC 管为透明和乳白两种。透明管亮度较乳白色高, 但乳白色混色性优于透明管。

室外照明灯具由于工作环境比较恶劣、受风吹雨淋日晒、阳光中紫外线照射、昼夜温差变化、空气中沙尘、化学气体等条件影响, 灯具年复一年地受大自然时效老化处理, 设计时应充分考虑这些因素的影响。

由于要求 LED 路灯、隧道灯产品要求达到 IP65 等级 (防水、防尘), 使灯具内部无法与外部环境进行气体交换。当 LED 灯具长时间工作而导致灯具内部温升使压力增大, 与外部空气产生压力差, 增加灯具内壁压力, 加速灯具老化。采用特制的呼吸系统能完全解决灯具内外压力不平衡问题, 进一步提高了灯具的稳定性, 呼吸系统示意图如图 1-5 (a) 所示。采用特制的呼吸系统能过滤水分子和灰尘进入灯具, 实现空气在灯具内部和外部环境自由流动。

使用石墨材料取代传统的铝基板散热，该材料热导率是铝板的两倍，不同于铜、铝等金属球体导热方式，而为水平导热方式，有效的保证产品均热性，采用呼吸系统及石墨材料基板灯具示意图如图 1-5（b）所示。

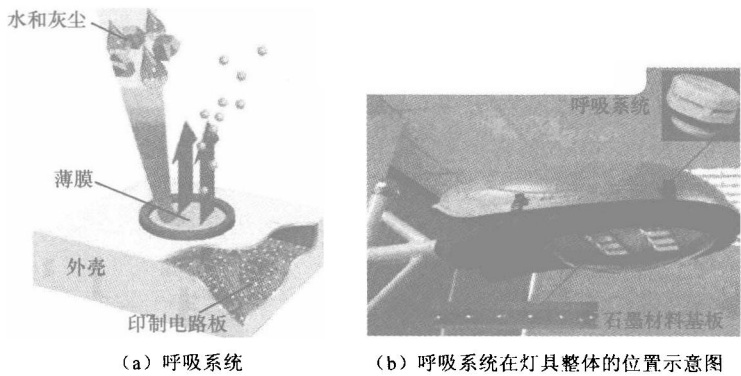


图 1-5 LDE 灯具呼吸系统

LED 灯具外壳和散热器设计为一体，用来解决 LED 的发热问题，这种方式较好，一般选用铝或铝合金、铜材或铜合金，以及导热良好的其他合金。散热有空气对流散热、强风冷却散热和热管散热（喷气致冷散热也是类似热管散热的一种，但结构更复杂一些）。选择什么样的散热方式，对灯具的成本有直接影响，应综合考虑，与设计产品配套选出最佳方案。

灯罩的选材也是至关重要的。目前使用的有透明有机玻璃、PC 材料等，传统的灯罩是透明玻璃制品，究竟选什么样材料的灯罩跟设计的产品档次定位有关。一般来说，室外灯具的灯罩最好是传统的玻璃制品，它是制造长寿命、高档灯具的最佳选择。采用透明塑料、有机玻璃等材料做室内灯具的灯罩较好，用于室外则寿命有限，因为室外阳光、紫外线、沙尘、化学气体、昼夜温差变化等因素使灯罩老化寿命减短，其次是污染了不易清洁干净，使灯罩透明度降低而影响光线输出。

1) 散热设计

灯体的热结构设计是制作 LED 灯具的另一个不容忽视的问题，虽然 LED 是冷光源，工作时自身不是灼热体，但电流流过 LED 时产生的电阻热还是会使得灯体升温，半 LED 在高温下会迅速老化，光效下降。要减缓 LED 的光衰，使 LED 灯有长的使用寿命，必须降低 LED 芯片的结温，要降低结温，就要降低灯体温度，并且要减小 LED 芯片与灯体之间的热阻，这就要求解决好 LED 灯具的散热问题。

解决 LED 灯具的散热问题主要靠合理的灯体结构。一种解决方案是使用 2mm~3mm 的铝基板，大功率 LED 直接安装在铝板上，LED 之间用引线相连。小功率 LED 可以按照使用的 LED 的数目在铝板上打好孔径和 LED 外径相同的孔，再将 LED 紧配合镶嵌到铝板上，LED 管脚在铝板后面相连。灯具的外壳也用金属材料制作，装好 LED 的铝板和金属外壳紧密装配，这样，LED 工作时产生的热量可以通过铝板传导到金属外壳上，金属外壳暴露在空气中，热量就可以通过辐射和对流散去。暴露在空气中的金属外壳的表面积要按照约 50cm²/W 考虑。为了既减小灯具的体积又保证较大的散热面积，灯具外壳应该是带肋条的散热片结构。

LED 的最高结温和热阻造成的 LED 芯片和封装之间的温差是热设计最主要的考虑因素，对于大功率 LED 来说，1W 的大功率 LED 热阻约 20℃，也就是说，给标称功率 1W 的 LED 输入 1W 的电功率，LED 结温就比封装外壳的温度高 20℃。3W 的大功率 LED 热阻约 15℃，