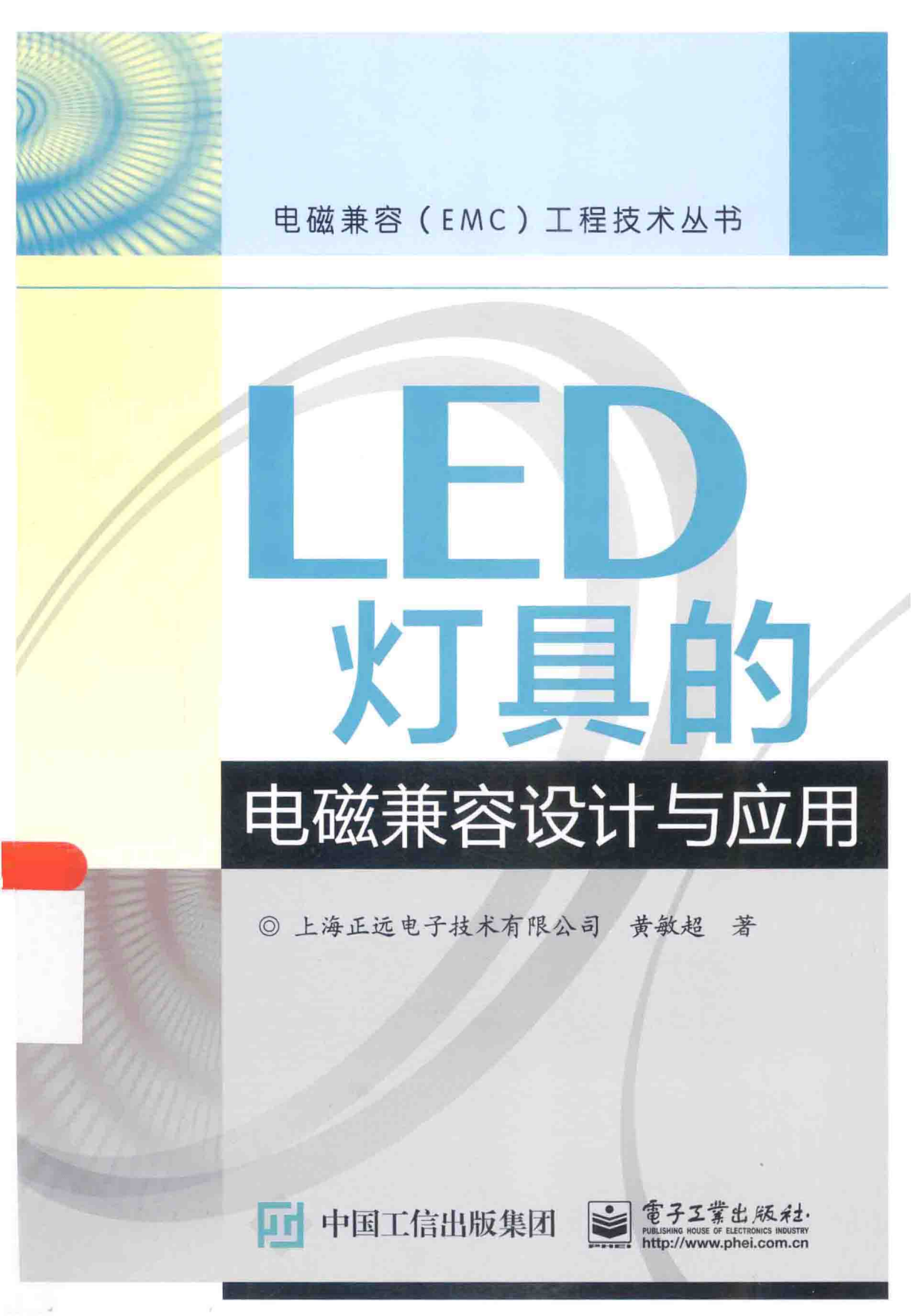




电磁兼容 (EMC) 工程技术丛书

LED 灯具的 电磁兼容设计与应用

© 上海正远电子科技有限公司 黄敏超 著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

电磁兼容 (EMC) 工程技术丛书

LED 灯具的电磁兼容设计与应用

上海正远电子科技有限公司 黄敏超 著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书从电磁兼容三要素出发,结合电磁兼容法规,深入介绍了电磁兼容问题的基本原理、具体的设计方法和解决措施,并以实际案例进行佐证。

本书最后介绍了两种快捷实用的电磁干扰和抗干扰解决方法:时频穿越法和递进应力法。时频穿越法借助近场探头和频谱分析仪,准确定位噪声源和传播途径,根据时域和频域下的噪声特性找到针对性的 EMI 解决方案;递进应力法通过递进干扰源强度的方法来确认产品受到影响的机理,然后采取有效的抗干扰措施。

本书介绍的电磁兼容的设计理念和解决方案,不仅适用于 LED 灯具,也适用于通信电源、医疗电源、充电器、光伏逆变器、电动机驱动以及存在 di/dt 和 du/dt 骚扰源的应用场合。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

LED 灯具的电磁兼容设计与应用 / 黄敏超著. —北京:电子工业出版社, 2015.4

(电磁兼容(EMC)工程技术丛书)

ISBN 978-7-121-25874-9

I. ①L… II. ①黄… III. ①发光二极管—灯具—电磁兼容性—设计 IV. ①TN383②TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 074545 号

策划编辑:柴 燕

责任编辑:苏颖杰

印 刷:三河市双峰印刷装订有限公司

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:720×1000 1/16 印张:14.5 字数:195 千字

版 次:2015 年 4 月第 1 版

印 次:2015 年 4 月第 1 次印刷

定 价:58.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前 言

随着现代电子技术的飞速发展，各种各样的电子设备在家庭、工业、医疗、交通和国防等领域广泛应用。然而，这些设备在工作的同时会产生各种各样的电磁干扰，再加上自然界的电磁干扰影响，不仅使得这些设备本身无法正常工作，而且严重时会造成设备损坏，导致动车追尾、通信瘫痪和飞机失事等灾难性后果。

电磁干扰问题也同样出现在照明灯具和照明系统中，轻者出现灯具闪烁、忽明忽暗，重者造成死灯、严重的交通事故、医疗事故甚至火灾等灾害性事故。

LED 照明技术正方兴未艾，目前正处于替换传统光源的时期，比如 LED 球泡灯替换白炽灯、LED 荧光灯管替换 T8 荧光灯和 LED 筒灯替换卤素射灯等。在替换过程中，LED 灯具出现了各种各样奇怪的现象和问题，比如，灯具做常规绝缘测试时灯珠损坏，灯具的使用寿命远比设计寿命短得多，灯具安装后刚点亮就损坏，LED 路灯在雨天后就大面积死灯等现象。对上述的失效现象已经有很多解释，如 LED 灯珠的质量问题、生产工艺问题、驱动器的可靠性、结构设计问题、系统兼容性问题 and 电磁兼容问题等，本书希望从电磁兼容的角度进行深入的讨论和分析失效机理，提出相应的解决方案，并进行验证。

电磁兼容 (EMC) 问题可以分为两大类：设备对外界的电磁骚扰和外界对设备的电磁骚扰。电磁骚扰由交变的电场和磁场产生，即由 dv/dt 和 di/dt 噪声源产生，然后以传导和辐射的方式进行传播。目前，流行的 EMC 问题

解决方法可以分为两大类，简称为“路”和“场”。“路”的方法以电路的方式进行分析 and 解决 EMC 问题，比如用共模和差模滤波来抑制共模和差模噪声的方法就极具代表性，有很多开关电源工程师在“路”的解决方法上积累了很多经验；“场”的方法以电磁场分布的角度进行分析和解决 EMC 问题，以近场和远场的判断场源特性为主要代表，无线通信工程师在场的解决方法上往往具有很多丰富的经验。

无论是“路”的方法还是“场”的方法，都有各自的优势和用武之地，而两者提出的解决方案都离不开对隐藏于实际产品和电路原理图后的噪声源、传播途径和周边电磁环境的分析。然而，噪声源的确切位置和其传播途径在实际设计和调试中却一直很模糊，通常依赖工程师的经验进行估计和猜测，甚至有人戏称 EMC 的调试为“玄学”。那么是否有实用的工具能直观、快捷地发现噪声源的位置和其传播途径？如果有这样的工具，如何使用这个工具来解决电磁兼容问题？

本书以“实践不离理论指导，理论不离实践验证”为宗旨，以 LED 灯具为切入点，内容共 7 章，探讨 LED 灯具及其应用的电磁兼容问题，从电磁兼容基本概念的角度，透过看得到的实际产品和电路原理图来确认隐藏其后的交变电磁场分布，找到准确的噪声源位置和传播途径；结合电磁兼容法规和相关的标准测试方法，阐述 EMC 常见解决方法的理论基础，并结合实际案例进行验证；最后，推介两种快捷实用的电磁兼容解决方法——时频穿越法和递进应力法，来解决产品中的电磁干扰问题和抗干扰问题。

第 1 章介绍 LED 灯具面临的市场竞争、法规、可靠性和应用场合的挑战，指出产品电磁兼容性的重要性。

第 2 章从系统和空间环境的角度主要介绍基础的电磁兼容三要素、共模和差模的理念、交变电场和磁场天线的特性、近场干扰与远场干扰的特性区

别,以及噪声的典型抑制方法。

第3章详细解读了各项电磁兼容法规的内容,并阐述各项法规与电磁兼容基本概念之间的关系,以及各项法规中的标准测试方法。

第4章先介绍了网侧输入功率因数PF矫正的目的和定义,再结合最新的欧盟ErP和北美的能源之星法规,对主流的无源和有源功率因数的解决方案进行介绍,并列举了一些实际应用案例和相关的控制芯片。

第5章先从灯具整体结构角度阐述如何进行LED灯具的EMI设计,再深入讨论LED驱动器内部的EMI设计,包括安规电容选型、电路工作模式、布线和关键磁性器件的EMI设计,最后结合一些实际案例进一步验证EMI解决措施的效果;当面对电磁兼容的解决措施与灯具整体结构布局、安规、散热设计和灯具安装方式冲突时,推荐了一些处理这些冲突的思路。

第6章主要讨论LED灯具的防雷设计,不仅从LED驱动器的防雷设计出发,而且从灯具本身的电气和机械结构设计以及应用环境的防雷要求出发,结合共模和差模雷击理念,介绍如何选择防雷电路、如何选型防雷器件,并介绍了一个实际的LED灯具雷击失效的解决方法案例。

第7章主要介绍了一种实用快速的时频穿越法解决EMI问题和递进应力的雷击浪涌测试方法,并结合实际案例介绍了具体的实现步骤和验证结果。

衷心感谢我的父母和夫人郑丹叶对我撰写本书的倾力支持;感谢恩师林渭勋老师的教诲;感谢宁波远东照明有限公司提供的实际案例;感谢师兄弟和同事的技术交流和讨论;最后要感谢一起参与撰写本书的黄彭序、潘小莹、郑吉安、虞素婉、郑丹叶、张曦春、顾殷嘉和黄青蓝。

由于作者水平所限,书中难免有错误和不足之处,恳请各位专家、同行和读者批评指正。

黄敏超

— V —

目 录

第 1 章 LED 灯具面临的挑战	1
1.1 LED 灯具的兴起	1
1.2 价格的挑战	2
1.3 光效的挑战	4
1.4 全球法规的挑战	6
1.5 兼容性的挑战	8
1.6 可靠性的挑战	11
1.7 电磁兼容性的挑战	14
1.8 小结	16
第 2 章 电磁兼容设计基本概念	18
2.1 电磁干扰 (EMI) 和电磁抗干扰 (EMS)	18
2.2 电磁干扰源	19
2.2.1 自然干扰源	20
2.2.2 人为干扰源	21
2.2.3 电磁场的基本特性	22
2.2.4 辐射天线	24
2.3 传播途径	32
2.3.1 差模干扰和共模干扰	33

2.3.2 近场干扰和远场干扰	34
2.4 敏感设备	35
2.5 噪声的常见抑制方法	37
2.5.1 传导噪声的常见抑制方法	37
2.5.2 辐射噪声的常见抑制方法	38
2.6 小结	39
第3章 详解LED灯具的电磁兼容法规	41
3.1 面对电磁兼容法规的困惑	41
3.1.1 法规中的法规	41
3.1.2 不同国家和地区的要求	43
3.1.3 灯具和配件要求不同	45
3.2 国内外电磁兼容的历史背景	46
3.3 电磁兼容标准的框架	47
3.4 电磁兼容测试分类	50
3.5 电磁干扰(EMI)	50
3.5.1 传导骚扰测试(EN55015)	51
3.5.2 辐射骚扰测试(EN55015)	55
3.5.3 输入电流谐波测试(EN61000-3-2)	59
3.5.4 注入公共电网的骚扰电压测试(EN61000-3-3)	63
3.6 电磁抗干扰(EMS)(EN61547)	63
3.6.1 静电放电(IEC61000-4-2)	67
3.6.2 射频电磁场(IEC61000-4-3)	70

3.6.3	电快速瞬变脉冲群 (IEC61000-4-4)	73
3.6.4	浪涌 (雷击) (IEC61000-4-5)	77
3.6.5	注入电流 (IEC61000-4-6)	80
3.6.6	工频磁场 (IEC61000-4-8)	81
3.6.7	电压跌落和中断 (IEC61000-4-11)	84
3.6.8	电磁抗干扰测试小结	84
3.7	小结	86
第 4 章	输入功率因数 PF 的设计考虑	87
4.1	功率因数校正 (PFC) 的目的	87
4.2	电路解决方案	90
4.2.1	无源填谷式 PFC 电路	90
4.2.2	无源 PFC 降压恒流驱动电路 (PPFC+Buck)	93
4.2.3	无源 PFC 反激式恒流驱动电路	94
4.2.4	APFC 降压恒流驱动电路	94
4.2.5	APFC 反激式恒流驱动电路	96
4.2.6	两级功率变换的恒流驱动电路	98
4.2.7	高压分段线性恒流驱动电路	102
4.3	驱动器控制芯片的选择	104
4.4	实际应用案例	105
4.4.1	单级 Buck 降压非隔离驱动器	105
4.4.2	单级 PFC 反激式隔离恒流驱动器	106
4.4.3	多串变压器 LLC 隔离恒流驱动器	107

4.4.4	高压分段线性恒流驱动器	110
4.5	小结	114
第 5 章	EMI 设计考虑	115
5.1	为何结构设计会影响 EMC 性能	115
5.1.1	LED 灯具机械结构如何影响其 EMC 性能	116
5.1.2	安全法规中的传统灯具分类	119
5.1.3	灯具的接地结构	120
5.1.4	驱动器的接地结构	121
5.1.5	灯珠模块的寄生电容 C_{stray}	122
5.2	安规电容	124
5.2.1	X 电容的作用	125
5.2.2	X 电容的分类	125
5.2.3	X 电容的限制	126
5.2.4	Y 电容的作用	127
5.2.5	Y 电容的分类	127
5.2.6	Y 电容的限制	127
5.3	驱动器工作模式	128
5.3.1	准谐振反激式变换器 (Quasi-Resonant Flyback Converter)	129
5.3.2	电流临界连续功率因数校正变换器 (CRM PFC Converter)	129
5.3.3	LLC 谐振隔离变换电路	131
5.4	布线设计考虑	131
5.4.1	PCB 布局	131

5.4.2	回路面积	135
5.4.3	VCC 和 VSS 回路面积	137
5.4.4	回路磁场抵消	138
5.4.5	接地技术	138
5.4.6	地平面和功率平面	139
5.4.7	PCB 走线的寄生参数	140
5.4.8	过孔	141
5.5	无 Y 电容的解决方案	143
5.6	实际应用案例	144
5.6.1	案例 1: 40W 非隔离 LED 驱动器的 LED 三防灯	144
5.6.2	案例 2: 20W 隔离 LED 驱动器的工作灯	148
5.7	电磁兼容设计面对的冲突	151
5.7.1	灯具的结构	151
5.7.2	安规的冲突	154
5.7.3	热设计的冲突	154
5.7.4	冲突的权衡	156
5.8	小结	156
第 6 章	雷击浪涌的设计考虑	158
6.1	应用场合与防雷要求	158
6.1.1	室内灯具的防雷	159
6.1.2	室外灯具的防雷	160
6.1.3	实际应用场合的雷击浪涌强度	161

6.2	整体电气结构、机械结构与雷击浪涌电流	163
6.3	防雷器件的选型及使用	166
6.3.1	雷击浪涌吸收器件	166
6.3.2	放电间隙	167
6.3.3	气体放电管	167
6.3.4	压敏电阻选型	168
6.3.5	智能型压敏电阻	172
6.4	雷击浪涌实际案例	174
6.5	小结	177
第 7 章	电磁兼容 (EMC) 问题的诊断和调试技巧	179
7.1	产品开发周期的主要瓶颈——电磁干扰 (EMI)	179
7.2	不同频率段下的 EMI 诊断和解决措施	180
7.3	时频穿越法解决 EMI 问题	184
7.3.1	近场探头的特性及其使用方法	185
7.3.2	案例 1: 时频穿越法快速解决 EMI 问题	190
7.3.3	案例 2: 25W 隔离型 LED 驱动器	197
7.4	递进应力的雷击浪涌测试方法	203
7.4.1	法规要求的确认	205
7.4.2	测试准备	205
7.4.3	测试设备的确认	205
7.4.4	递增雷击浪涌应力测试	207



7.4.5 确认原因.....	208
7.4.6 解决措施.....	210
7.4.7 余量验证.....	211
7.5 小结.....	212
参考文献.....	214

第 1 章 LED 灯具面临的挑战

白光 LED 光源的出现，彻底打破了成熟照明行业的垄断，各种各样的企业纷纷涌入照明行业的上下游。随着 LED 灯具进入普通照明市场，价格的激烈竞争使得 LED 灯具替换传统灯具面临全方位的考验和挑战。现有很多流行的 LED 灯具替代方案不仅受到光效、兼容性和法规的挑战，而且不断地暴露出各种各样的电磁兼容和可靠性问题。

1.1 LED 灯具的兴起

低碳节能是当前人类社会关注的焦点之一，减少用电量，就是减少二氧化碳排放量和对环境的污染。根据不完全统计，全球约有 25% 以上的电能耗用于照明应用，若能在日常照明应用中引入有效的节能手段，对于减少全球的能源消耗将能产生显著的成效。

LED 光源作为新兴半导体光源，属于冷光源，自身对环境没有汞污染，与主流在白炽灯、卤素灯和荧光灯光源相比，节电效率可以分别达到 90% 和 60% 以上。考虑 LED 光源的单向和炫光特点，LED 灯具需要做专门的配光处理，解决炫目问题，因此在同样亮度下，实际耗电量约为普通白炽灯的 1/8、荧光灯具的 1/2。

为了适应全球绿色环保及节能减排的趋势，各国政府积极通过政策、法规与产业辅导使社会朝照明节能化应用方向发展。比如，北美的能源之星推

出 LED 灯具的补贴政策；中国政府于 2012 年 5 月提出的《国家基本公共服务体系“十二五”规划》中，有 22 亿元支持推广节能灯和 LED 灯计划，同时各地方政府也推出类似“十城万盏灯”的 EMC 补贴推广计划。

在不少室内应用场合，LED 光源和 LED 灯具已经成功替换了传统光源和灯具，如手电筒、射灯和天花灯；但在很多其他应用场合，遇到了传统光源和灯具多方位的挑战，如价格、光效、兼容性、全球法规、可靠性和电磁兼容性的挑战。即使政府有上述的多项扶持政策，在过去 5 年中，LED 灯具还是陆陆续续地出现了各种各样的品质问题，比如 LED 路灯忽明忽暗、LED 灯具的使用寿命远达不到标称寿命等。

1.2 价格的挑战^[1]

自 2014 年 1 月 1 日起，美国禁止生产和进口 40W、60W 白炽灯。当这条禁令来临时，原来只要 0.25 美分的 43W 白炽灯，现在就要 1.5 美元了。随后全球的禁用白炽灯禁令也陆续登场。

早在 2013 年第一季度，在上述禁令之前，CREE 就以迅雷不及掩耳之势推出了 9.97 美元的 LED 球泡灯，以替代 43W 白炽灯。于是，LED 球泡灯的价格大战在 2013 年拉开序幕，国际照明大厂也不能置身事外。Philips 立即将球泡灯降价 20%，台湾亿光也随后降价 33%。到 2013 年 10 月，美国零售业巨鳄 Walmart 宣布旗下的 LED 球泡灯自有品牌 Great Value 最低价格降至 8.88 美元，以替代 60W 白炽灯。而当年率先打响价格战的 CREE 也不示弱，旗下的球泡灯通过能源之星认证，9.5W 球泡灯获得补贴后售价仅为 4.97 美元，虽然这些 LED 灯泡只通过家得宝（Home Depot）出售。

从 4.97 美元的价格可以看到，LED 照明价格的甜蜜点开始浮现，2014

年照明行业将出现 LED 照明的换灯潮。据宁波海关的统计, 2013 年宁波地区的 LED 灯具出口量已超过所有灯具总出口量的 50%。

正当国际市场 LED 照明业价格激战如火如荼的时候, 国内市场也已于 2012 年开始进入价格的混战中, 有人戏称“LED”的缩写开始为“Let Everyone Dance”, 最终虽不至于“Lead Everyone Die”, 但绝不会让每位都活着。

这些参与价格战的企业由多路人马组成:

第一路人马为 LED 照明企业。领头人鱼龙混杂, 有海归、教授、地产商, 还有五金店、杂货店转行的老板。他们有的仅懂开关电源, 有的仅懂照明灯具的配件, 却代表着要把传统照明打进历史博物馆的“革命军”。

第二路人马为传统照明企业。就是目前占据全国大部分流通地盘的大小企业, 如雷士、佛照、欧普、阳光、三雄极光、远东照明、古镇等诸多照明企业和分散在各地的经销商。

第三路人马为国有企业。这主要是由于政府项目开始大量推出。

第四路人马为国际企业。它们带着高价的技术、设备、原材料, 经过国内代工企业做成“物美价廉”的产品, 一部分在销售到中国前, 设置了各种检测认证, 购买时就得出高价; 其余作为国际品牌产品卖给政府和形形色色的商业高端客户。

第五路人马是来自中国台湾的 LED 企业。尤其是上游和中游, 通常通过本地化、并购或合资的方式进行渗透。

上述五路人马几乎覆盖了中国的主要照明市场和渠道, 里面也掺杂了许多缺乏实力的逐利型厂商。逐利型厂商的加入, 容易导致产品的品质和价位迥异, 使得国内 LED 照明市场鱼龙混杂, 产品质量良莠不齐。比如, 3W 的 LED 球泡灯最低的只有 2 元, 最高的有 60 元; 质量差的 LED 灯具甚至不能连续工作超过 1000h, 还不如白炽灯。

这些低价劣质的 LED 产品和厂商,用简化的 LED 灯具替换传统灯具,通过牺牲灯具的安全性、电磁兼容性和不容易判断的使用寿命,以偷梁换柱的光效标称,来实现低价高性能,蒙骗了用户,搅乱了国内 LED 照明市场。

1.3 光效的挑战

要讨论节能的差异,灯具行业有一套系统和规范的评估方法来衡量光源或灯具能效指标,即光源或灯具的输出光通量与输入电功率之比。因此,照明行业多采用每瓦流明数 (lm/W) 作为基准进行光源和灯具能效差异评估。

通用照明市场涵盖的应用领域非常广泛,包括建筑物照明、标志、景观照明、零售、信号灯、街道照明和住宅照明等。在通用照明市场,目前常用的光源包括白炽灯、紧凑型荧光灯 (CFL, Compact Fluorescent Lamp)、线性荧光灯、高强度气体放电灯 (HID)、卤素灯以及新颖的高亮度发光二极管 (High-Brightness LED) 等。表 1-1 所示为各种光源的性能对比。

表 1-1 各种光源的性能对比

光源种类	显色指数 Ra	光效/ (lm/W)	寿命/h	主要应用场合
白炽灯	100	15	1000	酒店床头灯、住宅、市场
卤钨灯	100	25	2000	酒店主体照明
T5 直管	85	90~100	12000	办公照明、间接照明
T8 直管	85	90~100	12000	办公照明、商场、停车场
紧凑型节能灯	75	75~80	6000	办公、住宅、公共空间
陶瓷金卤光源	95	95	15000	商业店铺、高大空间
高压钠灯	95	150	6000	路灯
LED 灯具	85	75~80	>30000	任何空间