

# LED 驱动方式分析及性能比较

通过大量搜集 LED 驱动相关的论文及专利等文献，归纳和整理出了现有的各种 LED 驱动方式，并按照各种驱动在 LED 上产生的电压或电流波形特性分类，将其分为直流驱动和交流驱动两种基本型式，并详细分析了直流驱动中的恒压型、限流型、恒流型和脉冲型驱动方式及各自优缺点，为选择合适的 LED 驱动方式提供参考。

巢时斌 丘东元 张波 / 华南理工大学电力学院



巢时斌 / 硕士研究生

LED 照明具有发光效率高、节电效果明显、起动时间短、寿命长、无污染及抗振动等显著优点，已受到世界各国的关注，并有望发展成为新一代照明光源<sup>[1]</sup>。但自白光 LED 问世十多年以来，LED 照明的普及面还比较窄，一方面原因是 LED 本体的初次购入成本高和发光效率还有待提高，较传统的照明方式优势不明显；另一方面原因是 LED 驱动电源的性能与 LED 不匹配，寿命低且造成 LED 光衰严重，使 LED 照明系统的实际寿命与理想寿命相差甚远<sup>[2]</sup>。因此，LED 驱动电源性能的提高是 LED 推广的关键因素之一。

在设计 LED 驱动时，首先需根据功率大小、应用场合、驱动性能和经济性等要求选择合适的驱动方式。文献 [3-6] 总结了多种 LED 驱动电路，前两篇主要从驱动器电路构成上对 LED 驱动分类进行比较；后两篇从 LED 的串并联及驱动芯片的选择进行论述和比较，但均没有研究驱动电源对 LED 的影响，近几年出现了更多的 LED 驱动方式。本文通过搜集大量与 LED 驱动相关的论文及专利等文献，补充和概

## 关键词/Keywords

LED 驱动 ·  
恒压 ·  
恒流 ·

括了现有的 LED 驱动方式，并按照各种驱动方式在 LED 上产生的电压或电流波形特性进行分类，分析和比较了各种驱动方式的优缺点，为 LED 驱动方式的选择提供参考。

## LED 特性及驱动要求

LED 是半导体电致发光器件，具有单向导电性，其等效模型如图 1 所示<sup>[7]</sup>，图中  $U_{LED}$  为某一状态时 LED 两端电压， $R_{LED}$  为相应的等效电阻。两者的关系可用式 (1) 表示。

$$U_F = U_{LED} + R_{LED} I_F \quad (1)$$



图 1 直流 LED 等效模型

LED 的主要结构是 PN 结，其  $I-V$  特性曲线呈非线性关系，如图 2 所示为 40 °C 时白光 Luxeon III 的  $I-V$  特性曲线<sup>[7]</sup>。当 LED 两端电压发生微小波动时，流过 LED 的电流将发生剧烈的变化，对 LED 的光输出主波长影响较大，严重时会使 LED 色温发生漂移，因此 LED 对驱动电源提供的电流的稳定性要求较高。

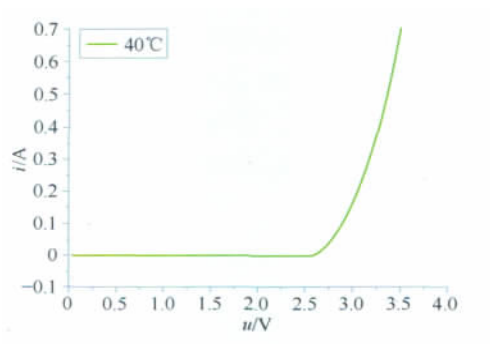


图 2 40 °C 时白光 Luxeon III 的  $I-V$  曲线

粤港关键领域重点突破项目 (2009205109)。

LED 的等效电阻  $R_{LED}$  有负温度效应<sup>[8]</sup>。当 LED 的 PN 结温度升高时, 等效电阻  $R_{LED}$  减小, 若  $U_{LED}$  不变, 电流  $I_F$  会上升, 从而使结温进一步上升, 形成恶性循环; 当 LED 结温较高时, 会加速 LED 荧光粉的老化, 严重时会使荧光粉发黄变质, 严重影响 LED 的光输出性能, LED 使用寿命急剧下降<sup>[9]</sup>, 因此结温是 LED 的一个重要参数。

将多个直流 LED 晶粒按一定规律排列组合, 可以构成交流 LED 灯<sup>[10]</sup>。如图 3 所示, 交流 LED 灯可以流过双向电流, 直接由市电驱动。

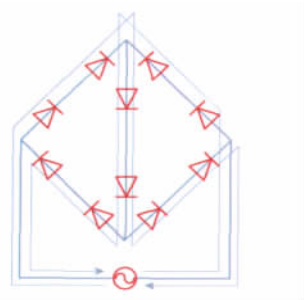


图3 一种交流 LED 灯的结构

## 驱动方式分类

根据 LED 驱动电源输出的电流极性, 可将 LED 驱动方式分为直流型驱动和交流型驱动。直流型驱动主要针对直流 LED, 负载只流过单方向的电流, 而交流型驱动主要针对交流 LED, 负载流过双方向的电流。

### 1. 直流型驱动

目前实际应用的 LED 绝大多数都为直流 LED, 因此直流型驱动是 LED 最常见的驱动方式。根据流过 LED 的电流性质, 可将直流型驱动方式分为恒压驱动、限流驱动、恒流驱动和脉冲驱动。

#### (1) 恒压驱动

恒压驱动时, LED 两端电压保持基本恒定, 但由于电压中存在纹波, 使得 LED 电流随着电压的波动而波动。根据 LED 的伏安特性, 微小的电压波动会引起 LED 电流的较大波动。另外, 由于 LED 负温度效应的影响, 电流波动有可能造成结温和电流的恶性循环, 严重时甚至烧毁 LED<sup>[9]</sup>。因此, LED 采用恒压驱动时, 对驱动电源的恒压精度要求较高。

虽然恒压驱动对 LED 性能的影响较大, 但是

在电源技术的发展过程中, 恒压技术相对恒流技术要成熟得多, 而且在一些要求不高的场合可以通过简单而又经济的方法实现恒压 (如采用稳压芯片 TL431), 所以在一些低端 LED 驱动电源中仍然有少量应用。

#### (2) 限流驱动

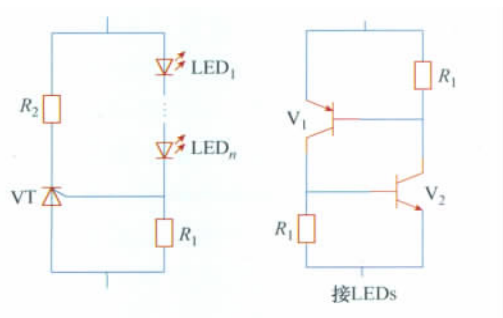
限流驱动是指将 LED 电流限制在设定范围以内的驱动方式。根据限流的实现方式, 又可分为阻抗限流、饱和限流和分流限流。

阻抗限流通过在电流主回路中串联远大于 LED 负载等效阻抗的大阻抗, 减小外界干扰对 LED 负载电流的影响, 从而达到限流的目的。该串联阻抗可以由电阻、电感及电容中的一种或多种组合而成<sup>[11-13]</sup>, 限流效果主要取决于串联阻抗的大小。该驱动方式结构简单, 成本很低, 但驱动性能不理想, 特别是单纯采用电阻限流方案时, 电阻上的大功耗使整机效率很低, 只在小功率 LED 场合有少量应用。

有些元器件如 MOS 管、稳流二极管等, 当满足一定条件时即进入饱和状态, 随着输出端电压上升, 电流几乎不变, 将其与 LED 串联, 可以限制流过 LED 的电流, 即饱和限流。文献 [14] 利用耗尽型 NMOS 管在栅极电压为零时已导通的特性, 及其在漏极电压增加时电流基本在饱和区直到漏极雪崩击穿, 将电流限制在饱和电流值; 文献 [15] 则采用稳流二极管的典型扩流方法将电流限定在希望的范围内。上述驱动方式可以达到较好的驱动性能, 但由于过分依赖于元器件特性, 而实际中同类元器件间的差异较大, 较难大规模推广应用。

分流限流是指当 LED 电流超过预先设定的限定值时, 辅助电路接通, 将超过的电流分流, 从而使流过 LED 的电流基本保持不变, 达到限流的目的。其典型电路有如下两种: 如图 4 (a) 所示的分流支路与 LED 并联<sup>[16, 17]</sup>; 如图 4 (b) 所示的分流支路与 LED 串联<sup>[18]</sup>。其他的分流限流电路都可以看成是上述两种典型电路的演变电路。图 4 (a) 中  $R_1$  与 LED 负载串联, 电流正常时, LED 负载流过全部回路电流; 当电流超过设定的限定值时,  $R_1$  上的电压上升, VT 触发导通, 使过量的电流经  $R_2$

和 VT 分流, 从而维持 LED 电流在设定范围以内, 图 4 (a) 中 VT 可以是半导体晶体管、IC (TL431、TL432 等) 及半导体晶闸管中的一种或多种组合。图 4 (b) 的整体电路与 LED 负载串联实现限流, 电流正常时,  $V_2$  截止,  $V_1$  工作在饱和状态, 电流经  $V_1$ 、 $R_1$  流向 LED; 当电流超过限定值时,  $R_1$  两端电压升高, 使  $V_2$  导通,  $V_1$  逐渐退出饱和, 两端电压升高, 从而调节 LED 负载电压, 并将多余能量消耗在限流电路中, 达到限流目的。



(a) 并联限流电路 (b) 串联限流电路

图 4 LED 分流限流电路

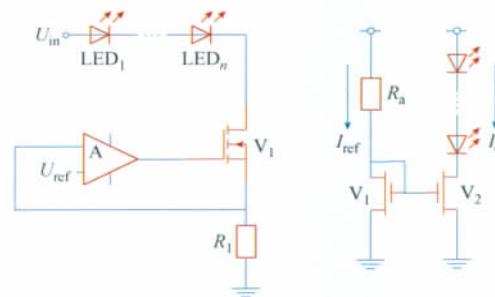
由于分流限流电路结构简单, 成本低, 可靠性高, 在中小功率场合的应用较广泛, 同时还可利用它来抑制和吸收电路中短暂的过饱和电流; 但其串联在负载回路中的元件损耗较大, 电路效率较低。

### (3) 恒流驱动

恒流驱动是指使流过 LED 的电流保持恒定的驱动方式, 当外界干扰使得电流增大或减小时, LED 电流都可以在恒流电路的调节作用下回到预设值。由于 LED 具有非线性  $I-V$  特性, 小电压波动将引起电流的大波动, 因此, 采用恒流驱动 LED 可以达到较好的性能。根据主功率器件的工作状态, 可将恒流驱动分为线性恒流和开关恒流。

在线性恒流电路中, 主功率器件与 LED 负载串联, 且工作在线性放大区<sup>[19-21]</sup>, 其典型电路如图 5 (a) 所示。图 5 (a) 中主功率器件为 NMOS 管  $V_1$ , 工作在线性放大区, 由门极电压调节漏源极间电压, 从而调节相应 LED 上的电压电流。图 5 (a) 中  $V_1$  漏极与 LED 负载相连, 电阻  $R_1$  串联在主回路中, 用于负载电流反馈, 运算放大器 A 的反相输入端接电流反馈信号, 正相输入端与预

先设定的参考电压  $U_{ref}$  相连, 运算后得到相应的  $V_1$  门极控制信号, 控制电阻  $R_1$  上的电压恒定, 即保持了 LED 负载电流恒定。另一种典型的线性恒流电路是镜像恒流电路<sup>[20-22]</sup>, 如图 5 (b) 所示, 主功率管  $V_2$  也工作在线性放大区, 该方式需先由恒流电路产生源电流, 再通过镜像电路传递到负载, 使负载电流保持恒定。



(a) 线性恒流电路 (b) 镜像恒流电路

图 5 LED 恒流驱动电路

线性恒流稳流效果好, 电路成本较低, 且 EMI 小, 在中小功率场合应用较广泛, 但由于串联在电路主回路中的功率管工作在线性放大区, 输出端电压较高, 功率管上的损耗较大, 加上采样电阻上的能耗, 电路效率不高, 因此在大功率场合应用较少。

与线性恒流不同, 开关恒流中主功率管不直接与 LED 串联, 工作在高速开关状态, 它主要利用目前较成熟的开关电源技术, 通过采集 LED 回路的电流信号, 反馈控制功率管的开关状态, 使输出电流保持恒定<sup>[23-26]</sup>。由于目前 LED 照明功率不高, 在 500 W 以内, 所以开关恒流 DC/DC 环节采用的电路拓扑主要有 Buck、Boost、Flyback、Forward 和半桥 (LLC) 等电路。

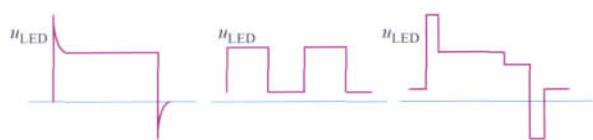
开关恒流稳流效果好, 电路效率高, 适用于大功率 LED 照明场合; 但由于其电路结构较复杂, 成本高, 且 EMI 大, 在中小功率场合应用较少。

### (4) 脉冲驱动

由于塑造电压波形比电流波形更容易, 所以脉冲驱动一般是电压型脉冲驱动, 即 LED 负载两端的电压是脉冲式的, 在一个周期脉冲内, LED 点亮一段时间后会熄灭一段时间, 但由于人眼存在“视觉暂留”效应, 当脉冲频率足够大, 如 100 Hz 时, 人眼会感觉 LED 一直处于“亮”状

态<sup>[27]</sup>，所以 LED 依然可以“连续”发光。

脉冲驱动的最基本驱动波形为方波，但为了提高 LED 的瞬态响应性能，可采用如图 6 (a) 的上下沿尖峰脉冲<sup>[28]</sup>，如图 6 (b) 的为提高脉冲驱动发光效率的双电平波形<sup>[29]</sup>和如图 6 (c) 的综合上述两个优势的多电平波形<sup>[30]</sup>。



(a) 脉冲上下沿尖峰 (b) 双电平脉冲电流 (c) 多电平脉冲电流

图 6 脉冲驱动波形

与其他直流驱动方式相比，脉冲驱动在调光性能方面具有显著优势。它可以在保持 LED 电压脉冲幅值基本不变的情况下，通过调节脉冲占空比实现光输出调节，调光性能灵活<sup>[29]</sup>，同时 LED 峰值波长基本不漂移，颜色稳定性好。其他直流驱动方式在调光时都需改变 LED 电流和电压幅值，会使 LED 峰值波长漂移，色温改变，严重时发出的光会发黄或发灰<sup>[31]</sup>。

在发光效率方面，脉冲驱动的流明效率较恒流或小波动电流驱动时更低，在驱动电流平均值相等的条件下，高占空比时发光效率与恒流相差不大，但随着占空比减小，发光效率下降较大<sup>[32]</sup>，在脉冲关断时间内让 LED 承受一定的反向偏置电压，可以提高发光效率<sup>[33]</sup>和 LED 的耐用性<sup>[34]</sup>。

由于发光效率较低，驱动性能不如恒流驱动，所以目前 LED 脉冲驱动的实际应用较少。

## 2. 交流型驱动

交流 LED 可以简单等效为将两个或两个以上 LED 按一定的规律反向并联的电路，如图 7 所示。

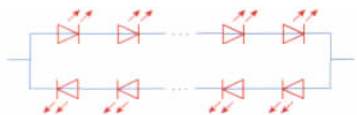


图 7 交流 LED 简单等效电路

交流型驱动电路结构简单，若 LED 的额定参数与电源参数匹配，可直接串联在交流电源上工作<sup>[35]</sup>。为了减小负载电流随正弦输入电压而造成的巨大波动，可在回路中再加上一个电阻、电容或两者组合起来的大阻抗限流元件<sup>[10, 36]</sup>。在调光

应用场合，可以通过控制工作的 LED 数量或外加交流 LED 导通调节控制实现调光<sup>[37, 38]</sup>。

与传统的 LED 直流驱动相比，在市电供电的应用场合，交流驱动有较大优势。它可以不需要整流、变压及变流等能量变换环节，降低了电能损耗，因此具有使用方便、成本低和效率高等优势<sup>[10]</sup>。

但是上述交流驱动只是简单地利用交流市电驱动，还有许多问题有待解决。要使 LED 导通，需要一定的电压，即门槛电压，当多个 LED 串联时，该门槛电压比较高，而电压按正弦变化。因此，如图 8 所示，在一个周期内，有一段时间 LED 不导通，使 LED 的利用率降低<sup>[39]</sup>。文献 [40] 提出了一种应用两相电压驱动的方法，通过控制两相电压的电位差控制 LED 的点亮时长。但 LED 两端电压按正弦波变化，致使 LED 电流波动较大，而 LED 的光输出波长与电流密切相关，LED 发出白光的效率降低了，浪费了大量的光能。

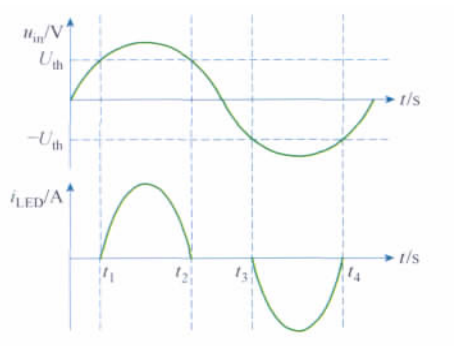


图 8 正弦波输入及点亮时程

交流 LED 问世时间还比较短，发光效率较直流 LED 低，价格比较高，但在工频市电 (110/220 V) 供电的照明应用中对直流 LED 的冲击非常大，前景诱人，但在许多直流供电场合，交流 LED 不能取代直流驱动 LED<sup>[10]</sup>。

## 结束语

综上所述，每种 LED 驱动方式的优点和不足如下表所示。限流驱动结构简单，成本很低，EMI 小，由于其限流特性，在电路中可用作过电流保护；但限流电路串联在回路中，消耗大量能量，效率低。恒流驱动性能好，实际应用较广，经济性好，且 EMI 小，效率较高，开关恒流效率可以达到更高，但结构复杂，成本高。恒流驱动

的不足之处是 LED 持续工作，结温较高，且在调光应用时，需改变 LED 两端电压或电流，LED 峰值波长会发生漂移（不考虑通过增减工作 LED 数量的有级调光情形），影响光线质量。脉冲驱动调光性能好，但 LED 发光效率低，EMI 很大，且要达到较好的驱动性能成本较高。交流驱动只针对交流 LED 应用，结构简单，成本低，LED 交替工作，对结温有所改善，但电流波动大，对 LED 造成较大影响。

表 各种 LED 驱动方式的对比

驱动方式	限流		恒流		脉冲	交流
	电阻	分流	线性	开关		
电流波动	大	中	小	小	/	大
效率	低	较低	较高	高	/	/
调光时峰值波长是否漂移	是	是	是	是	否	/
EMI	小	小	小	大	大	小
经济成本	很低	低	较低	高	高	低
应用	小功率	小功率	中小功率	中大功率	少	少

由此可见，上述各种驱动方式各有优缺点，有待进一步发展和完善，如开发损耗更小的限流方式；寻找更优的恒流驱动控制策略；研究脉冲驱动中脉冲各参数对 LED 性能的影响；解决交流驱动中电流波动大的问题。而另外一个发展方向是将两种或多种驱动方式的优点有机地结合在一起，开发出性能更好的 LED 驱动方式。

### 参考文献

[1] 姚凯, 阮新波, 王蓓蓓, 等. 第四代新光源——发光二极管 [J]. 电源世界, 2008 (3): 21-26.  
 [2] 桂垣, 武斌, 于江利. 提高 LED 道路照明效益的技术方法 [J]. 电气应用, 2009, 28 (15): 46-48.  
 [3] 张祥东, 阎丽永, 夏伟, 等. HB\_LED 驱动方法综述 (上) [J]. 中国照明电器, 2009 (12): 17-19.  
 [4] 张祥东, 阎丽永, 夏伟, 等. HB\_LED 驱动方法综述 (下) [J]. 中国照明电器, 2010 (1): 20-23.  
 [5] 黎平, 周雒维. 高亮度 LED 驱动器概述 [J]. 电气应用, 2007, 26 (6): 6-10.  
 [6] 平立. 白光 LED 驱动综述 [J]. 现代显示, 2006 (6): 44-48.  
 [7] Mineiro Sá Jr E, Antunes F L M, Perin A J. Low cost

self-oscillating ZVS-CV driver for power LEDs [C]. IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2008: 4 196-4 201.  
 [8] 李军伟. LED 的驱动电路研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007.  
 [9] 贺卫利, 郭伟玲, 高伟, 等. 大功率发光二极管可靠性和寿命评价试验方法 [J]. 应用光学, 2008, 29 (4): 533-536.  
 [10] 解学军, 潘文正. 工频市电直接驱动白光交流发光二极管 [J]. 光源与照明, 2009 (3): 15-17.  
 [11] 樊邦弘. 一种改进结构的通用 LED 照明灯泡驱动电路: 中国, CN201114882 [P]. 2008-09-10.  
 [12] 侯建立. LED 高效延时功率控制恒流模块: 中国, CN20134575 [P]. 2009-11-11.  
 [13] 刘世安. 交流 220V LED 恒流驱动电路: 中国, CN2857404 [P]. 2007-01-10.  
 [14] 吴俊纬. LED 灯具节能控制电路: 中国, CN201345763 [P]. 2009-07-08.  
 [15] 张文迅, 张元春. 交流电源直接供电的温度补偿恒流驱动 LED 照明灯. 中国, CN201322279 [P]. 2009-10-07.  
 [16] 肖永军, 周传, 曾庆栋. LED 日光灯驱动电路设计 [J]. 低压电器, 2009 (2): 35-37.  
 [17] 陈刚, 杨思勇, 许岩峰. 用于 LED 的恒流驱动电路: 中国, CN1859820 [P]. 2006-11-08.  
 [18] 陈磊, 董建国, 李标, 等. 一种 LED 驱动电源的控制电路: 中国, CN201018696 [P]. 2008-02-06.  
 [19] Hu Yuequan, Milan M Jovanović. LED driver with self-adaptive drive voltage [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23 (6): 3 116-3 125.  
 [20] Liao Tse Ju, Chen Chern Lin. Robust LED backlight driver with low output voltage drop and high output current accuracy [C]. IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, 2008: 63-66.  
 [21] 董华章. 大功率 LED 矿灯的双恒流驱动模块: 中国, CN1819731 [P]. 2006-08-16.  
 [22] Toyonaka Yohichi Shiyawa, Toyonaka Toshihi Kishioka, Kawanishi Koichi Hagino. Power supply device, and LED device and electronic device using same: USA, US 7564196 [P]. 2009-07-21.  
 [23] Mark Allen Kastner, New Berlin. LED power supply with options for dimming: USA, US 2008/0018261 A1 [P]. 2008-01-24.

(下转第 62 页)

可靠连接。这样在雷电袭来时，避雷针、避雷线或敷设在热水器上方的金属体就能很好地保护太阳能热水器免遭雷击。

其次，将太阳能热水器的金属支架等与屋面避雷带可靠连接。这样一旦遭受雷击，各金属物体均处于等电位状态，提高了安全性。

另外，人们在平时的生活中也应提高对雷电的防范意识和自我保护能力，使太阳能热水器这一节能环保产品更好地为人们服务。

### 配电箱进线总开关的选择

配电箱的电源进线总开关可作为配电箱的电气总隔离，也可作为其馈线回路的后备保护，总进线开关选用带保护功能的开关电器还是不带保护功能的隔离开关，需要具体情况具体分析。

如果向配电箱供电的电源采用树干式供电，

那么，该供电回路所带的每台配电箱总进线开关应采用具有保护功能的开关电器。如果配电箱的电源由上一级配电装置经保护开关以放射式供电，则此配电箱的总进线开关可采用具有隔离功能的开关电器。JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》第7.1.4条第4款也明确指出：由本单位配电所引入的专用回路，在受电端可装设不带保护的开关电器，对于树干式供电系统的配电回路，各受电端均应装设带保护的开关电器。

### 结束语

随着电气专业的设计规范、标准不断更新，电气设计人员应紧跟形势，充分消化理解规范、标准里的具体含义，并结合实际的设计任务，设计出更加合理完善的电气方案。

(收稿日期: 2010-09-20) EA

(上接第44页)

- [24] Yang Ta Yung, Milpitas. Switching LED driver with temperature compensation to program LED current: USA, US 7245090 B2 [P]. 2007-07-17.
- [25] Liu Kwang Hwa, Sunnyvale. Buck converter LED driver circuit: US 2008/0316781 A1 [P]. 2008-12-25.
- [26] 徐申, 孙伟锋, 李杰, 等. 一种自激振荡式大功率LED恒流驱动电路: 中国, CN101227778 [P]. 2008-07-23.
- [27] 王浩, 陈东瑛. 一种利用占空比控制发光二极管亮度的方法: 中国, CN1658730 [P]. 2005-08-24.
- [28] Lisa A Peterson, Stefan A Siegel. High speed driver for an LED communication system or the like: USA, US 5329210 [P]. 1994-07-12.
- [29] Lun Wai Keung, Loo, K H, Bilevel current driving technique for LEDs [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24 (12): 2 920-2 932.
- [30] 铃木贵幸, 廻慎太郎, 浅原敬士. LED驱动电路: 中国, CN100442558 [P]. 2008-12-10.
- [31] 刘卓, 董学文, 王亚林, 等. 一种基于PFM的无色漂LED线性调光系统: 中国, CN101562932 [P]. 2009-10-21.
- [32] Sauerlander G, Hente D, Radermacher H, et al. Driver electronics for LEDs [C]. Conference Record of the 2006 IEEE. 2006: 2 621-2 626.

- [33] Jaehee Cho, Euijoon Yoon, Hyunsoo Kim, et al. Improved emission efficiency in InGaN light-emitting diodes using reverse bias in pulsed voltage operation [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20 (13): 1 190-1 192.
- [34] Cao X A, Sandvik P M, LeBoeuf S F, et al. Defect generation in InGaN/GaN light-emitting diodes under forward and reverse electrical stresses [J]. Microelectronics Reliability, 2003, 43: 1 987-1 991.
- [35] 孙润光. 交流驱动电致发光器件. 中国, CN1526984 [P]. 2004-09-08.
- [36] 王金城, 李有桢, 陈静波, 等. 交流LED驱动电路之研究 [J]. 照明工程学报, 2005, 16 (4): 49-51.
- [37] Boh K Chek. Low voltage LED driver circuit: USA, US 4866430 [P]. 1989-12-12.
- [38] 鞠山满, 冈田正刚. 发光二极管驱动电路和发光二极管发光设备: 中国, CN101257750 [P]. 2008-09-03.
- [39] Hsi Chang, Yen Shin Lai. Novel AC driver and protection circuits with dimming control for light emitting diodes [C]. IEEE Industry Applications Conference, 2007: 696-700.
- [40] 林明德. 发光二极管的交流多相位驱动装置与控制方法: 中国, CN101193479 [P]. 2008-06-04.

(收稿日期: 2011-03-07) EA