

一种基于脉冲宽度调制和脉冲幅度调制的发光二极管驱动器

吴玉香¹ 尚俊¹ 王孝洪¹ 文尚胜^{2,3*}

¹华南理工大学自动化科学与工程学院, 广东 广州 510641

²华南理工大学材料科学与工程学院, 广东 广州 510641

³华南理工大学发光材料与器件国家重点实验室, 广东 广州 510641

摘要 发光二极管(LED)的结温变化、老化等问题会导致色温、色度等参数的漂移,目前的模拟调光和脉冲宽度调制(PWM)调光方式都不能解决这一问题,研究发现平均电流影响光通量,峰值电流影响色温,因此提出了一种PWM和脉冲幅度调制(PAM)调光技术,在保持驱动电流脉冲平均值不变的情况下,调节电流脉冲的幅值来补偿色温漂移。设计了一个基于PWM和PAM的LED驱动器,实验验证了当平均电流相等时,光通量相等,改变峰值电流时,色温改变。因此,提出的一种PWM和PAM调制技术在实际调光过程中可以对色温进行补偿,解决了LED结温变化、老化等问题导致的色温漂移问题。

关键字 光学设计; 驱动器; 脉冲宽度调制; 脉冲幅度调制; 色温漂移

中图分类号 TN702 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0922003

A Light Emitting Diode Driver Based on Pulse Width Modulation and Pulse Amplitude Modulation Diming

Wu Yuxiang¹ Shang Jun¹ Wang Xiaohong¹ Wen Shangsheng^{2,3}

¹College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China

²School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China

³State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China

Abstract Light emitting diode (LED) junction temperature variation, aging and other issues will lead to drift color temperature, color and other parameters. Current analog dimming and pulse width modulation (PWM) dimming can not solve this problem. Study found that average current affect flux, and peak currents affect color temperature. Therefore, a PWM and pulse amplitude modulation (PAM) dimming technology is proposed. Without changing the average value of the driving current pulse, we adjust the current pulse amplitude to compensate the color temperature drift. A PWM and PAM LED driver is shown, the experiment verifies that when average current is equal, luminous flux are equal, color temperature change along with peak current. Therefore, a PWM and PAM modulation technique proposed can compensate color temperature drift in actual dimming process, solve the problem of color temperature drift caused by LED junction temperature variation, aging and other problems.

Key words optical design; driver; pulse width modulation; pulse amplitude modulation; color temperature drift

OCIS codes 220.4840; 220.4830

收稿日期: 2015-03-09; 收到修改稿日期: 2015-05-14

基金项目: 广东省科技计划项目(2011A081301017, 2012A080304001, 2012A080304012, 2013B090600048)

作者简介: 吴玉香(1968—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事非线性系统的自适应神经网络控制、机器人控制及转子系统故障诊断等方面的研究。E-mail: xyuwu@scut.edu.cn

*通信联系人。E-mail: wss64@163.com

1 引 言

发光二极管(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^[1],广泛应用在室内外照明、景观设计、指示灯等方面。另外为了适应实际生产和节电的需要通常需要调光^[2]。LED的亮度是随着正向电流的变化而呈现近似比例变化的,当改变正向电流平均值时相应地也能改变光输出的大小。

目前LED的调光方式主要有两种:模拟调光方式和脉冲宽度调制调光方式。模拟调光是通过调节流过LED的正向电流大小来改变光通量输出,流过LED的电流是连续的。模拟调光方式在调光时改变了LED电流幅值,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^[3]。但其在发光效率方面有优势,脉冲驱动的流明效率较恒流驱动时低,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^[4]。

脉冲宽度调制(PWM)调光是给LED提供周期性的占空比可调的电流脉冲,使LED周期性的点亮和熄灭,当驱动脉冲频率足够高时,由于人眼的视觉暂留效应,人眼就会感觉到LED一直处于常亮状态^[5],通过调节占空比调节LED的平均电流,实现PWM调光。与模拟调光相比,PWM调光具有显著优势,它不改变LED电流脉冲幅值,通过调节电流脉冲占空比实现光输出调节,调光性能灵活^[6],同时LED峰值波长基本不漂移,颜色稳定性好。

此外,研究发现,在人眼视觉功效方面,当两种驱动方式下的LED感知亮度相等时,脉冲驱动的LED以更小的亮度达到了与恒流驱动的LED相同的照明亮度要求^[7]。这是因为在脉冲驱动时,产热散热条件不同于恒流驱动下的LED,更为有效的散热使得脉冲驱动下的LED光衰更小^[8]。因此,目前越来越多地采用PWM调光方式。此外,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^[9]和LED的耐用性^[10]。

但无论是模拟调光还是PWM调光,都无法避免一个问题,那就是因为LED的结温变化、老化等问题导致的色温、色度等参数的漂移问题,研究发现平均电流影响LED光通量,峰值电流影响LED的色温、色度等光学参数,因为目前最常采用的实现白光的方案是蓝光LED激发黄色荧光粉,蓝光LED芯片发出的一部分蓝光在荧光粉层中被吸收转换为主波长为455~470 nm波段的黄光,然后与其余的蓝光混合得到白光。当电流加大后,芯片发出的蓝光增多,黄色荧光粉层的厚度是一定的,则在出射的白光中蓝光成份增加,从而使器件的色温增加^[11]。因此,仅仅采用PWM调光也无法避免LED因结温变化、老化等问题导致的色温、色度等参数的漂移问题。本文提出一种调制技术,在实际调光过程中可以对色温进行补偿,解决了LED结温变化、老化问题导致的色温漂移问题。

2 主要研究内容与验证

2.1 原理分析

LED是电致发光器件,输入功率中大部分是以热能的形式消耗掉,当电流密度增加,热量在工作过程中不断地积累,引起工作温度的变化,工作温度的变化会引起主波长的漂移,严重影响LED的光通量、发光效率、寿命以及可靠性^[12],温度的升高也会使荧光粉会产生老化,从而造成光谱、色温发生漂移。此外,随着LED的使用时间越长,LED的荧光粉也会老化,同样会造成LED的色温漂移问题。这是目前大功率白光LED所存在的主要问题^[13]。实验也发现,LED工作电流的变化也会引起主波长漂移^[14]。因此在驱动和调光过程中需要考虑这些影响。

因此,为了在调光过程中解决这些问题,提出了PWM和脉冲幅度调制(PAM)调光方案,即在原来PWM调光方式的基础上结合了PAM调光方式,调光原理如图1所示。

相对于PWM方式,PWM和PAM方式输出的驱动脉冲的宽度和幅值均可调,为此可以在保证驱动电流平均值不变的情况下,调节驱动脉冲的占空比和幅值。如图1所示,从脉冲1到脉冲2,调节了占空比,从脉冲2到脉冲3调节了幅值,从脉冲1到脉冲3则既调节了占空比,也调节了幅值,当脉冲1和脉冲3平均值相等时,LED的光通量相等,但脉冲3比脉冲1高出的电流值 $\Delta i = i_2 - i_1$ 用于补偿因为LED结温变化、老化等因

素导致的色温漂移。前文提到,LED的光通量和平均电流近似成比例,色温受峰值电流影响,因此调节幅值

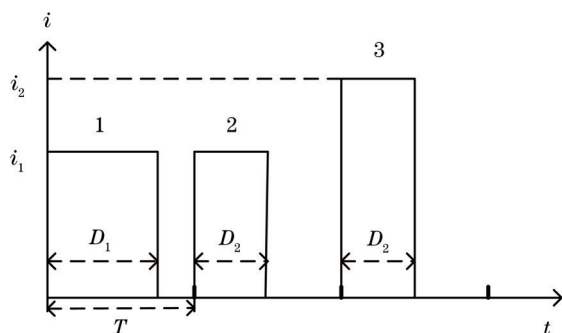


图 1 PWM 和 PAM 的调光波形

Fig.1 Dimming waveform of PWM and PAM

的作用是解决因结温变化、老化等问题带来的色温漂移问题。保持驱动电流脉冲的平均值不变,在原驱动电流脉冲的基础上改变驱动电流脉冲的幅值和占空比。下面将给出了实验过程和结果,对提出的 PWM 和 PAM 方案进行论证。

2.2 实验验证与结果

验证方案是一个基于 PWM 和 PAM 调光的 LED 驱动控制板,主要包括驱动部分、DALI 接口部分、控制器部分、ZigBee 部分等,该驱动控制板系统结构图如图 2 所示。驱动部分为本方案的主电路部分,为 LED 提供电流脉冲,控制器通过 DALI 有线接口或者 ZigBee 无线接口接收数据信号,对其处理后来产生驱动部分的控制信号:VR 和 PWM 信号。通过该实验来验证 LED 的光通量与平均电流和色温与电流峰值的关系。实验设计的 PWM 和 PAM 调光电源的结构图如图 3 所示,采用的是基于单级 PFC 的反激拓扑结构的设计,输入交流电压范围:85~265 V,输出为:30V/1.5 A,效率:≥85%,PWM 控制芯片采用的是安森美的 NCL30001,芯片开关频率为 100 kHz。

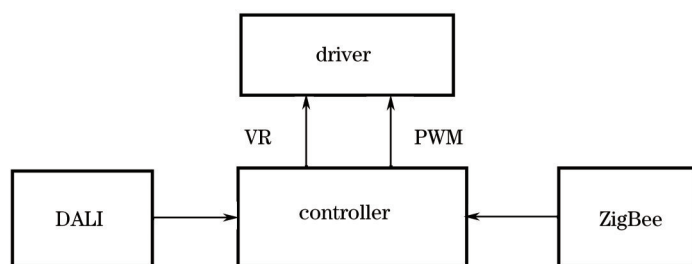


图 2 系统结构框图

Fig.2 Block diagram of system

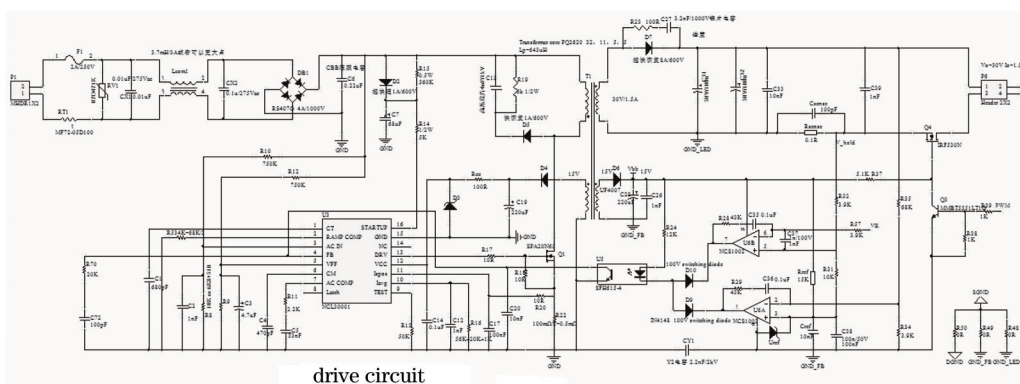


图 3 系统驱动部分

Fig.3 Drive circuit of system

从图 3 可以看出,PWM 和 PAM 调光电源由两部分组成,功率回路和控制环路。功率回路即电源主回路,包括输入整流滤波电路、功率变换电路和输出整流滤波电路。开关管 Q1 的源极电阻 R20 起到感测初级电

流的作用。R3、C7、D7组成RCD吸收电路起到抑制金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)峰值电压的

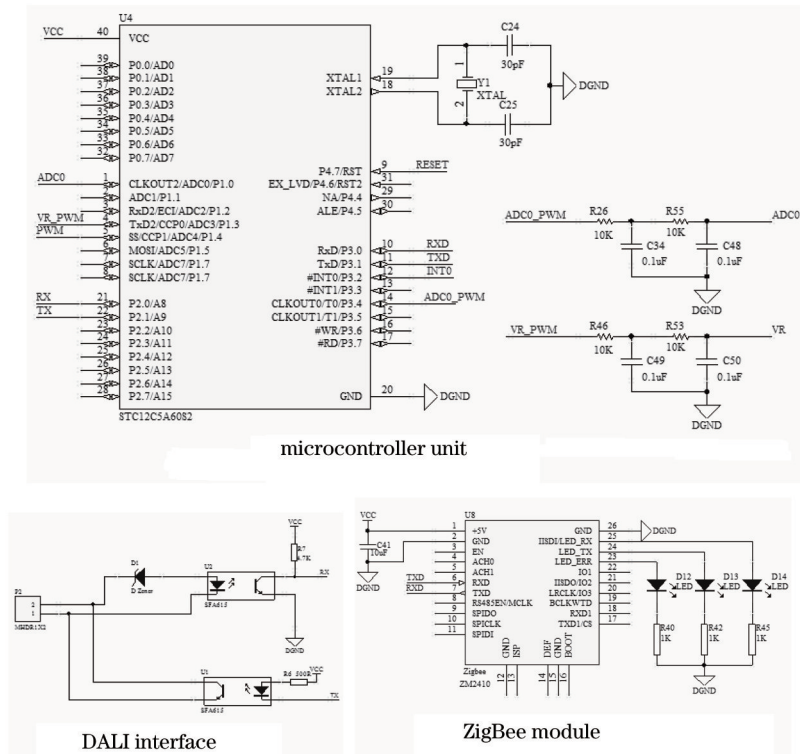


图4 系统控制器、DALI和ZigBee部分

Fig.4 Controller, DALI and ZigBee module of system

作用。次级采用NCS1002双运放组成恒流限压反馈电路。次级辅助绕组输出15V的电压,给芯片NCS1002(U6)供电和给光耦二极管提供偏置电流。NCS1002的pin3与内部的 U_{ref} 基准相连。比较器U6A的pin2通过电阻R34、R35使输出最高电压限制在 $U_{ref} \times \frac{R_{34} + R_{35}}{R_{34}}$ 。对于误差放大器U6B,因为

$$I_{out} = U_{sense} / R_{sense}, \quad (1)$$

式中, U_{sense} 是检测电阻 R_{sense} 上的电压,通过电阻分压网络连接到误差放大器U6B的pin5端,U6B的pin5端的电压 U_5 值为

$$U_5 = (U_{ref} - U_{sense}) \times \frac{R_{32}}{R_{31} + R_{32}} + U_{sense}, \quad (2)$$

$$U_6 = V_R. \quad (3)$$

该控制环路通过反馈调节使得 $U_6 = U_5$,得到

$$U_{sense} = \left(1 + \frac{R_{32}}{R_{31}}\right) \times V_R - U_{ref} \times \frac{R_{32}}{R_{31}}, \quad (4)$$

$$I_{out} = 10 \times \left(1 + \frac{R_{32}}{R_{31}}\right) \times V_R - 10 \times U_{ref} \times \frac{R_{32}}{R_{31}}. \quad (5)$$

式中 $U_{ref} = 2.46V$, $R_{32} = 3.9K$, $R_{31} = 10K$ 。当 $V_R = 798mV$ 时, $I_{out-high} = 1.5A$,当 $V_R = 690mV$ 时, $I_{out-low} = 0A$ 。可以通过 V_R 来调节输出电流 I_{out} 的大小,即电流幅值。输出整流滤波电路中的Q4将输出电流进行斩波,斩成一定占空比的脉冲电流,占空比信号由PWM信号决定,为了在Q4关断期间反馈环路不失效,在Q4导通期间,控制器通过P1.0引脚采集 R_{sense} 电阻 V_{hold} 端的电压模拟数字转换(A/D)后存储起来,在Q4关断期间通过P3.4引脚输出并通过积分电路转换成模拟电压输出到 R_{sense} 电阻 V_{hold} 端,保持Q4导通时的电压不变,使反馈环路继续正常工作。实验板还包括DALI接口和ZigBee部分,DALI是专用LED照明协议,用于实现对LED的有线控制,ZigBee为低成本无线通信协议,用于实现对LED的无线控制。实验板通过这两个接口可以接入到LED照明控制系统中去,通过这两个接口接收外部控制信号,控制器处理后通过2个控制信号VR和PWM对LED的驱

动电流脉冲进行调节。因此,通过本方案可以实现 LED 驱动脉冲电流波形的幅值和占空比可调,即实现了对 LED 的 PWM 和 PAM 的调光。

表 1 系统规格

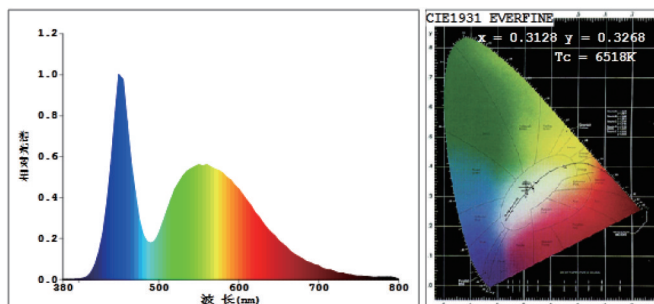
Table 1 System specifications

Properties	Value
Output voltage /V	30
Output current /A	1.5
Output capacitor / μF^2	100
f_{PWM} /Hz	200
f_{switch} /kHz	70

通过设计的 LED 驱动板来验证该驱动方式的正确性,下面将通过两组数据来分析,第一组数据验证 LED 光通量与平均电流的关系,第二组数据验证色温与电流峰值的关系。

1) 首先给出第一组数据

① 输出电流幅值 I_{out} : 600 mA, 输出电流脉冲占空比 D_{Q4} : 75%, 输出电流平均值 I_{avg} : 450 mA。图 5 是占空比为 75%, 输出电流幅值为 600 mA 时的 LED 相关参数。



颜色参数:
 色品坐标: $x=0.3128$ ($dx=-0.0005$) $y=0.3268$ ($dy=0.0041$)
 色品坐标: $u'=0.1987$ $v'=0.4671$ ($duv=2.01e-03$)
 相关色温: $T_c=6518\text{K}$ 主波长: $\lambda_d=487.5\text{nm}$ 色纯度: $\text{Pur}=7.4\%$ 质心波长: 543.0nm
 色比: $R=13.8\%$ $G=81.7\%$ $B=4.5\%$ 峰值波长: $\lambda_p=450.0\text{nm}$ 半宽度: $\Delta\lambda_p=29.2\text{nm}$
 显色指数: $R_a=76.5$
 R1 =74 R2 =81 R3 =83 R4 =76 R5 =75 R6 =72 R7 =86
 R8 =65 R9 =-11 R10=52 R11=72 R12=46 R13=76 R14=90 R15=71

光度参数:
 光通量: 632.68 lm 辐射通量: 2.0345 W
 白光分类: ANSI_6500K

图 5 D_{Q4} 为 75%, I_{out} 为 600 mA 时的 LED 相关参数

Fig.5 LED related parameters when $D_{Q4} = 75\%$ and $I_{\text{out}} = 600\text{mA}$

② 输出电流幅值 I_{out} : 450 mA, 输出电流脉冲占空比 D_{Q4} : 100%, 输出电流平均值 I_{avg} : 450 mA。图 6 是占空比为 100%, 输出电流幅值为 450 mA 时的 LED 相关参数。

从实验结果中可以看出,当输出电流平均值 I_{avg} 相等时,光通量几乎相等,一个为 632.68 lm, 一个为 639.31 lm, 在误差允许范围内。

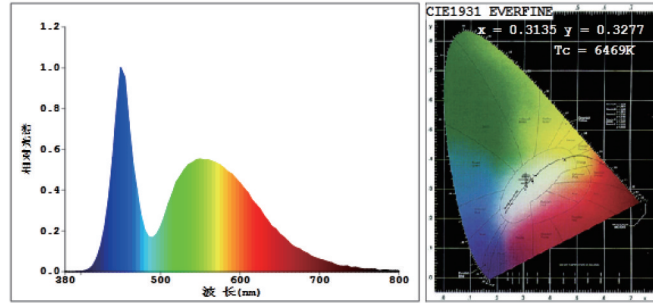
2) 下面给出第二组数据

输出电流脉冲占空比 D_{Q4} 相等,都为 20%时,输出电流幅值 I_{out} 分别为 180 mA、360 mA、500 mA 和 600 mA 时的数据。图 7~图 10 分别是输出电流幅值为 180 mA、360 mA、500 mA 和 600 mA 时所对应的 LED 相关参数。

① 输出电流幅值 I_{out} 为 180 mA 时

② 输出电流幅值 I_{out} 为 360 mA 时

③ 输出电流幅值 I_{out} 为 500 mA 时

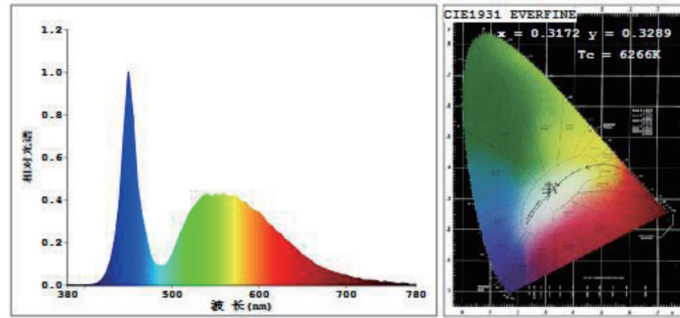


颜色参数:
 色品坐标: $x=0.3135$ ($dx=-0.0005$) $y=0.3277$ ($dy=0.0041$)
 色品坐标: $u'=0.1989$ $v'=0.4677$ ($duv=2.07e-03$)
 相关色温: $T_c=6469K$ 主波长: $\lambda_d=488.0nm$ 色纯度: $Pur=7.1\%$ 质心波长: $543.0nm$
 色比: $R=13.9\%$ $G=81.8\%$ $B=4.4\%$ 峰值波长: $\lambda_p=450.0nm$ 半宽度: $\Delta\lambda_p=28.1nm$
 显色指数: $R_a=76.3$
 R1 =74 R2 =81 R3 =82 R4 =76 R5 =75 R6 =72 R7 =85
 R8 =65 R9 =-12 R10=51 R11=72 R12=46 R13=76 R14=90 R15=71

光度参数:
 光通量: 639.83 lm 辐射通量: 2.0486 W
 白光分类: ANSI_6500K

图 6 D_{Q4} 为 100%, I_{out} 为 450 mA 时的 LED 相关参数

Fig.6 LED related parameters when $D_{Q4} = 100\%$ and $I_{out} = 450$ mA



颜色参数:
 色品坐标: $x=0.3172$ ($dx=-0.0004$) $y=0.3289$ ($dy=0.0033$)
 色品坐标: $u'=0.2010$ $v'=0.4689$ ($duv=9.03e-04$)
 相关色温: $T_c=6266K$ 主波长: $\lambda_d=488.1nm$ 色纯度: $Pur=5.8\%$ 质心波长: $545.0nm$
 色比: $R=14.0\%$ $G=82.3\%$ $B=3.7\%$ 峰值波长: $\lambda_p=450.0nm$ 半宽度: $\Delta\lambda_p=18.1nm$
 显色指数: $R_a=73.7$
 R1 =72 R2 =77 R3 =78 R4 =75 R5 =73 R6 =68 R7 =83
 R8 =64 R9 =-16 R10=43 R11=71 R12=38 R13=73 R14=87 R15=70

光度参数:
 光通量: 295.62 lm 辐射通量: 0.92378 W

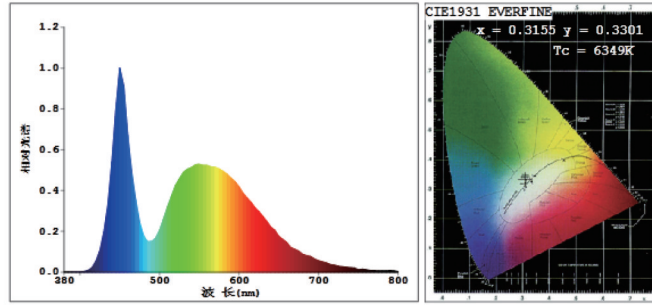
图 7 D_{Q4} 为 20%, I_{out} 为 180 mA 时的 LED 相关参数

Fig.7 LED related parameters when $D_{Q4} = 20\%$ and $I_{out} = 180$ mA

④输出电流幅值 I_{out} 为 600 mA 时

从实测数据可以看出,当输出电流脉冲占空比 $D_{Q4} = 20\%$ 保持不变,输出电流幅值 I_{out} 不相等时,色温分别是 6266 K(180 mA)、6349 K(360 mA)、6415 K(500 mA)和 6482 K(600 mA),验证了色温受电流峰值影响,根据上述数据绘制了色温与电流幅值的关系曲线如图 11 中实线所示,表现出近似线性的关系,近似线性曲线如图 11 中虚线所示。

因此,在实际调光过程中,一般只需调节电流脉冲的占空比,保持电流脉冲的幅值不变,即调节 PWM 信号并保持 VR 不变。当随着 LED 结温变化、老化等问题导致色温漂移时,可以根据色温与老化的关系调节电流脉冲的幅值和占空比,并保证平均电流不变即亮度不变,通过改变电流峰值来补偿色温漂移。



颜色参数:

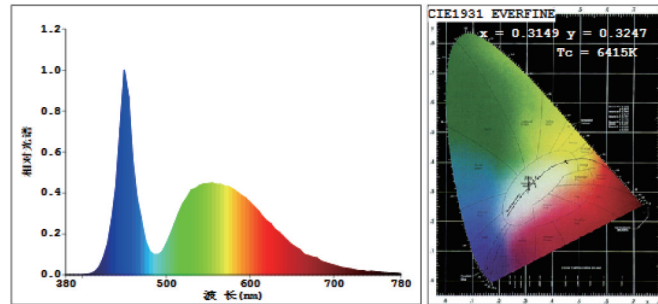
色品坐标: $x=0.3155$ ($dx=-0.0005$) $y=0.3301$ ($dy=0.0041$)
 色品坐标: $u'=0.1993$ $v'=0.4693$ ($duv=2.40e-03$)
 相关色温: $T_c=6349K$ 主波长: $\lambda_d=489.4nm$ 色纯度: $Pur=6.3\%$ 质心波长: $544.0nm$
 色比: $R=13.8\%$ $G=82.0\%$ $B=4.2\%$ 峰值波长: $\lambda_p=450.0nm$ 半宽度: $\Delta\lambda_p=25.6nm$
 显色指数: $R_a=75.7$
 $R1=74$ $R2=80$ $R3=81$ $R4=76$ $R5=74$ $R6=71$ $R7=85$
 $R8=65$ $R9=-13$ $R10=49$ $R11=72$ $R12=44$ $R13=75$ $R14=89$ $R15=70$

光度参数:

光通量: $580.83 lm$ 辐射通量: $1.8393 W$
 白光分类: $ANSI_6500K$

图8 D_{04} 为 20%, I_{out} 为 360 mA 时的 LED 相关参数

Fig.8 LED related parameters when $D_{04} = 20\%$ and $I_{out} = 360 mA$



颜色参数:

色品坐标: $x=0.3149$ ($dx=0.0002$) $y=0.3247$ ($dy=-0.0015$)
 色品坐标: $u'=0.2010$ $v'=0.4663$ ($duv=-1.53e-04$)
 相关色温: $T_c=6415K$ 主波长: $\lambda_d=485.5nm$ 色纯度: $Pur=6.9\%$ 质心波长: $544.0nm$
 色比: $R=13.9\%$ $G=82.1\%$ $B=3.9\%$ 峰值波长: $\lambda_p=450.0nm$ 半宽度: $\Delta\lambda_p=20.6nm$
 显色指数: $R_a=74.7$
 $R1=74$ $R2=79$ $R3=78$ $R4=76$ $R5=74$ $R6=69$ $R7=84$
 $R8=65$ $R9=-13$ $R10=46$ $R11=71$ $R12=40$ $R13=74$ $R14=88$ $R15=71$

光度参数:

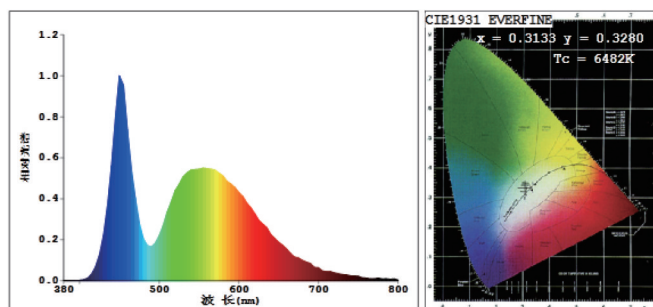
光通量: $621.32 lm$ 辐射通量: $1.9718 W$
 白光分类: $ANSI_6500K$

图9 D_{04} 为 20%, I_{out} 为 500 mA 时的 LED 相关参数

Fig.9 LED related parameters when $D_{04} = 20\%$ and $I_{out} = 500 mA$

3 结 论

上述实验可以验证提出的基于 PWM 和 PAM 的调光方案的可行性, 因此在实际调光过程中, 可以通过调节平均电流调节 LED 的光通量并尽量使用大占空比信号, 因为用大占空比电流脉冲驱动 LED 时光效更高; 此外, 针对 LED 结温变化、老化等问题导致的色温漂移问题, 可以在不改变平均电流的情况下, 调节电流峰值来补偿色温漂移。因此提出的基于 PWM 和 PAM 的调光方案及其驱动器具有现实意义。



颜色参数:

色品坐标: $x=0.3133$ ($dx=-0.0005$) $y=0.3280$ ($dy=0.0041$)
 色品坐标: $u'=0.1986$ $v'=0.4679$ ($duv=2.42e-03$)
 相关色温: $T_c=6482K$ 主波长: $\lambda_d=488.3nm$ 色纯度: $Pur=7.2\%$ 质心波长: $543.0nm$
 色比: $R=13.8\%$ $G=81.9\%$ $B=4.4\%$ 峰值波长: $\lambda_p=450.0nm$ 半宽度: $\Delta\lambda_p=28.0nm$
 显色指数: $R_a=76.1$
 R1 =74 R2 =80 R3 =82 R4 =76 R5 =74 R6 =72 R7 =85
 R8 =65 R9 =-12 R10=50 R11=72 R12=45 R13=75 R14=90 R15=71

光度参数:

光通量: $642.24 lm$ 辐射通量: $2.0554 W$
 白光分类: $ANSI_6500K$

图 10 D_{04} 为 20%, I_{out} 为 600 mA 时的 LED 相关参数

Fig.10 LED related parameters when $D_{04} = 20\%$ and $I_{out} = 600 mA$

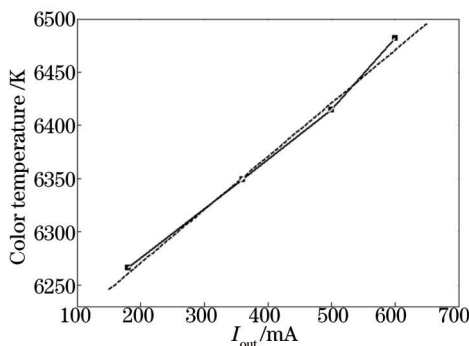


图 11 色温与电流幅值关系曲线

Fig.11 Curve of color temperature and current amplitude

参 考 文 献

- 1 Yao Kai, Ruan Xinbo, Wang Beibei, *et al.*. The 4th generation of light source LED[J]. The World of Power Supply, 2008(3): 21-26.
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 Zhen Qingliang, Lin Weiming. An LED driver portfolio dimming strategy and implement[J]. Journal of Power Supply, 2013(4): 71-75.
郑清良, 林维明. 一种 LED 驱动电源组合调光策略与实现[J]. 电源学报, 2013(4): 71-75.
- 3 Liu Zhuo, Dong Xuwen, Wang Yalin, *et al.*. A Colorless Floating LED Linear Dimming System Based on PFM: China, 2009201193260[P]. 2009-05-12.
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, 2009201193260[P]. 2009-05-12.
- 4 Sauerlander G, Hente D, Radermacher H, *et al.*. Driver electronics for LEDs[C]. Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First I As Annual Meeting, 2006, 5: 2621-2626.
- 5 Wang hao, Chen Dongying. A Method Utilizes Duty Cycle to Control LED Brightness: China, 200510063068.5[P]. 2005-08-24.
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, 200510063068.5[P]. 2005-08-24.
- 6 Lun W K, Look H, Tan S C, *et al.*. Bilevel current driving technique for LEDs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24 (12): 2920-2932.
- 7 Gao Weixi, Gu Xin, Liu Muqing. A comparative study of pulse and constant current driver for LED efficacy visual effects[J]. The Nineteenth Cross-Strait Lighting Technology and Marketing Seminar, 2012: 194-197.
高维惜, 顾 鑫, 刘木清. 脉冲和恒流驱动对于 LED 视觉功效影响的对比研究[J]. 海峡两岸第十九届照明科技与营销研讨

- 会, 2012: 194-197.
- 8 Zhao Weiqiang, Liu Hui, Liu Jian, *et al.*. Discussion on using pulse-current source to drive LED to reduce heat-accumulation[J]. *China Measurement & Test*, 2010, 36(6): 16-17.
赵伟强, 刘 慧, 刘 建, 等. 探讨利用脉冲源供电减少节能LED的热积累[J]. *中国测试*, 2010, 36(6): 16-17.
- 9 Cho J, Yoon E, Kim H, *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): 1190-1192.
- 10 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: 1987-1991.
- 11 Li Junfei, Xia Dingzhi, Li Jun, *et al.*. The influence on optical parameters for power white-LED with current[J]. *Light & Lighting*, 2009, 33(2): 37-38.
李君飞, 夏鼎智, 李 军, 等. 电流对功率型白光LED光学参数的影响[J]. *灯与照明*, 2009, 33(2): 37-38.
- 12 Petroski J. Thermal challenges facing new generation light emitting diodes (LEDs) for lighting applications[J]. *SPIE*, 2002, 4776: 215-222.
- 13 Wang Li, Fang Bingfeng, Xian Yulun, *et al.*. Performance evaluation of GaN based white LEDs under DC and pulsed bias conditions [J]. *Semiconductor Technology*, 2008(33): 183-186.
王 力, 范冰丰, 冼钰伦, 等. GaN基白光LED在直流与脉冲驱动下的性能比较[J]. *半导体技术*, 2008(33): 183-186.
- 14 Wang Huafeng. Influence of temperature and current on colorimetric uniformity of LED display[J]. *Advanced Display*, 2008(87): 85-87.
王化峰. 温度及电流对LED显示屏色度一致性的影响[J]. *现代显示*, 2008(87): 85-87.

栏目编辑: 韩 峰