

文章编号:1007-2780(2018)09-0778-09

一种大功率低噪声的智能可调 LED 驱动设计方法

季志博¹, 王 辉¹, 王 磊¹, 董兴法¹, 王 军^{1,2*}

(1. 苏州科技大学, 江苏 苏州 215009;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春, 130033)

摘要:针对大型 LED 显示屏驱动中恒流源功率较小、调光不便捷,其开关特性导致的噪声大的问题,提出一种体积小,适用功率大且纹波效果较好的智能优化式恒流 LED 驱动设计方法。该设计在以往低电流的基础上进行改进,通过运放反馈调节将输出电流的开关特性转换为线性,辅以通断 RCD 回路(峰值吸收回路)和构建优化式大电流环式 PCB 布局,能进行光源检测的电流转脉宽式精准调光,输出能够较完善地抑制开关噪声。该设计方法能实现上位机网络远程数字调光,内、外部模拟调光,多路板载级联的智能控制。实验表明:该恒流驱动输出电流可达 10 A,功率可达 370 W,输出电流误差小于 1%,驱动光源光功率稳定,光照分布均匀,具有较好的纹波效果,稳定可靠。

关键词:LED 恒流驱动;大功率;低噪声

中图分类号:TP272 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20183309.0778

Design method for high power and low noise intelligent adjustable constant current source

JI Zhi-bo¹, WANG hui¹, WANG lei¹, DONG Xin-fa¹, WANG Jun^{1,2*}

(1. Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Aiming at the problem that small constant current source power, inconvenient dimming, and the noise caused by its switching characteristics is large, an intelligent optimized constant current driving design method with small size, high power, and good ripple effect is proposed. The design is improved on the basis of the previous low current, and the switching characteristics of the output current are converted to linear through feedback regulation, supplemented by switching the RCD loop (peak absorption loop) and constructing an optimized high-current loop PCB layout. The light source detects the current-to-pulse-width precision dimming, and the output can perfectly suppress the switching noise. The design method can realize remote digital dimming of the upper computer network, internal and external analog dimming, and intelligent control of multiple on-board cascades.

收稿日期:2018-03-30; **修订日期:**2018-06-13.

基金项目:苏州科技大学研究生创新项目(SKCX17_024);江苏省研究生工作站项目;“十三五”江苏省重点学科项目(No.20168765)

Supported by Suzhou University of Science and Technology graduate student innovation project(SKCX17_024);Jiangsu Postgraduate Workstation Project;Jiangsu Key Disciplines of Thirteen Five-Year Plan(No. 20168765)

* 通信联系人, E-mail: wjyhl@126.com

Experiments show that the constant current drive output current can reach 10 A, the power can reach 370 W, the output current error is less than 1%, the drive light source has stable optical power, uniform illumination distribution, good ripple effect, stable and reliable.

Key words: LED constant current drive; high power; low noise

1 引言

面对市场上种类越来越多的LED负载,电源的选取要求也越来越高^[1-2],如在驱动大功率LED灯珠阵列及相应的LED显示屏方面,对此,国外的许多芯片厂商已经设计出了可调光的LED驱动芯片,如LT(凌特)公司的Boost(升压)型LT3762、LT3903等可用于设计恒流或者恒压稳压器,因LED是一种非线性和温度敏感的半导体器件,在工作状态下温度的略微变化会使流过LED上的电流发生较大的变化,这种电流的不稳定变化不仅会影响光源的正常发光,也会影响光源的老化,直接影响LED光源使用寿命^[3-7]。所以针对LED光源,一般选择恒流源。除了LT公司,TI(德州仪器)也推出了一款基于LM3433的4~20A LED驱动板,它可以通过连接两个输出脚调滑阻的方式调节LED灯所需电流,驱动效果较好,但因整版集成度和开发成本问题,价格也较高。目前国内一般的中大功率LED驱动器的输出电流都低于额定电流,且输出电流噪声大。对此国内的一些研究者诸如华中科技大学的刘中锋等基于SG3525芯片设计了一种直流转高频,高频通过变压器降压整流最后输出的LED驱动方式。但其恒压恒流模式依赖负载的大小,且其最大输出功率为240 W,实验测试结果偏仿真过于理想化。此外,国内一些电源公司也推出非隔离式250 W升压恒流模块,其利用国外的电源管理芯片设计成0.2~8 A恒流效果,搭配铝板外壳可有效散热,但该产品设计的输出电流与输入输出压差有关,当压差过大时,可能导致不适用于负载串联LED灯过少的情况。且本身芯片不带线性反馈调节功能,难以满足现LED驱动市场下多场景的要求,输出的纹波噪声因为芯片的开关性质又难以有较好的解决方法^[8-9]。因此,一款能够输出稳定大电流,纹波效果好的小型可调节恒流驱动是目前市场上最为需要的。此外,为了

应对更大功率的适应环境,加入了级联机制,同时可配合上位机实时调节电流或者脱机下模拟、数字调光皆可。

在LED调光上选取了LT公司可支持最大输出电流20 A的降压系列芯片,并且该芯片支持PWM和外部电压调光。通过输入的信号占空比来控制芯片内部PWM开通关断时间,当PWM信号接地时关断,此时可以通过外部输入电压来直接对输出电流进行调节^[10-12]。输出端加入线性调节反馈机制,可以优化开关芯片的开关纹波效果差的缺点。通过选取合适的开关管和采样电阻,并在发热量大的地方加上散热片,能够有效稳定的输出纹波效果好的大电流。

2 恒流调光原理

对于开关电源的恒流主要是通过两个高频开关管循环开通关断的原理,在高端MOS管导通期间,输入电流为电感充电,当其关断,低端MOS管导通期间,电感放电,两个时间间隔内,电流流经负载为负载供电。对电感 L 而言,在 t 时刻的电流值为

$$I_L = I_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (1)$$

其中: I_0 为稳定电流,时间常数 $\tau = L/R$,电感电流随着时间逐渐升高最终达到最大值,放电过程与之相似,在负载上会表征出来一条围绕所需电流上下摆动的三角波。

对于调光方式,芯片支持模拟调光和数字调光两种方式,模拟调光是直接改变电压进行连续线性调节,而数字调光是通过外部给不同的占空比控制两个MOS管的导通时间,让其处于关闭状态。所调节电流为

$$I_{\text{DIM_LED}} = D_{\text{DIM}} \times I_{\text{LED}}, \quad (2)$$

其中: $D_{\text{DIM}} = \frac{T_{\text{ON}}}{T_{\text{ON}} + T_{\text{OFF}}}$, I_{LED} 是最大输出电流。如图1是由满量程转由PWM数字调光理想输出波形示意图, ΔI_{LED} 为电流波动幅度。

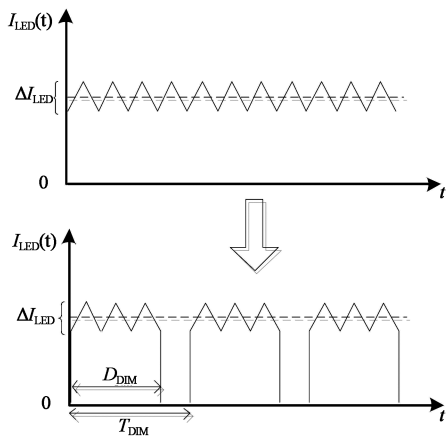


图 1 数字调光理想波形

Fig.1 Digital dimming ideal waveform

3 级联式恒流调光系统实施方案

3.1 系统方案架构

大功率低噪声的恒流调光原理如图 2 所示, 主要由控制器、外部模拟调光电路、TPS 恒流优化控制电路、显示模块 LCD、通讯模块、上位机、以及系统的开关电路、两个级联口组成。控制器用来工控中上位机控制数字量的 PWM 调光。通讯模块使用网络代替传统的 RS232 串口通信, 会在屏蔽性和通用性上都优于串口。外部模拟调光通过外部输入可调电压直接改变电流大小以此改变负载 LED 的亮度。显示模块 LCD 用来实时显示芯片输出电流值。系统开关电路能够利用外部信号通断和控制器来开关整个调光系统。预留的级联口可以在多块驱动板上进行级联, 级联的信号为外部模拟调光输入信号、外部 PWM 数字信号和开关信号。外部信号为 0~10 V 旋转编码器调节, 为保证级联正常工作, 板上加入射极跟随器。分别位于 PCB 板的左侧入口和右侧出口处, 第一块板的右侧级联口通过 6X2 双排弯口自由选择需要级联的信号, 插入同样电气属性的口, 如果级联, 可统一控制, 否则, 可单独控制。级联方式如图 2 中虚线所示。

3.2 恒流驱动优化控制电路

恒流驱动优化控制电路如图 3 所示。该控制电路在 EN 使能情况下可通过对 CTRL 脚输入 0~1.5 V 电压模拟调光或者输入 PWM 脉冲信号进行数字调光, 外置开关管高频开关导通关断并加入优化电路实现可实现输出稳定电流的功能。

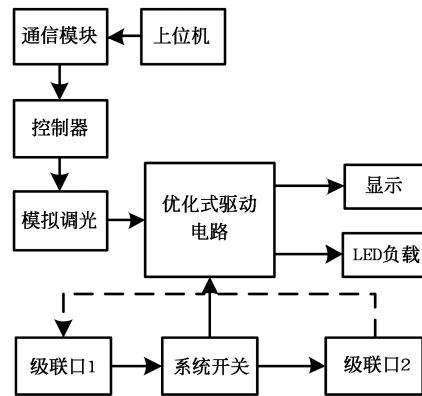


图 2 恒流调光系统框图

Fig.2 Constant current adjustable optical-intensity system block diagram

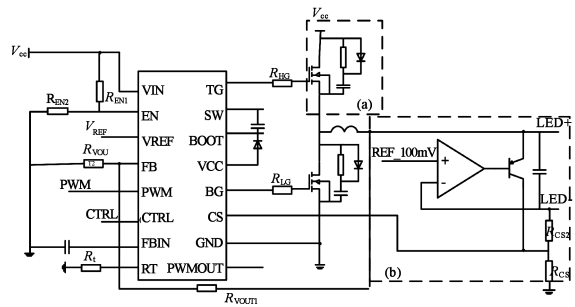


图 3 恒流驱动优化控制电路

Fig. 3 Constant current drive optimization control circuit

该驱动支持 6~60 V 宽量程输入电压, 20 A 的输出电流。此次设计使用工业中常用的 48 V 输入电压, 支持高达 1 MHz PWM 开关响应速度, 因此能够有效减小输出电流的波动误差。电流调整由外部输入 CTRL 脚电压决定, 其内部是个 1.5 V 的比较器, 输入电压高于 1.5 V 时调光无效。输出电压由采样电阻和外部模拟输入电压共同决定。

$$I_{LED} = \frac{V_{CTRL}/30}{R_{CS}}, \quad (3)$$

设计中采用最高频率的约一半 400 Hz 作为冗余频率, 同时也能够合理降低所使用的外部 MOS 管的工程设计成本, 频率的调节由图 3 中的电阻其中 R_i 决定, 此处选择 100 k 配比频率 400 kHz, 输出电压由 FB 脚的两个输出电阻决定, 如果输出电压达到稳定电压的 125% 时, 内部过压标志置位, 终止开关。

$$V_{OUT} = 1.206V \times \left(1 + \frac{R_{VOUT1}}{R_{VOUT2}}\right), \quad (4)$$

在输出部分,采用了以下3个优化方法来降低开关电流纹波。

第一:栅极串联电阻加RCD吸收回路

芯片的TG、BG管脚用于连接开关电源外置MOS管,由于输出电流达到10A,开关频率达到400kHz,在MOS选型时采用最大允许电流达20A,漏级电压支持60V的低结电容高速开关管,尽管该NMOS栅极电容较小,但由于MOS管是压控型器件,随着栅压的增高,栅压噪声容限降低,容易导致栅极击穿,所以MOS管最好做防击穿处理,且为了减小寄生振荡,在栅极前串入低阻抗电阻,见图3中 R_{TG} 、 R_{BG} ,一般取0~50 Ω 不等。且在开关管开通关断的过程中会有过电压、过电流的产生,所以在MOS管漏源极之间增添如图3中(a)所示RCD吸收回路,栅极电压开关波形如图4和图5所示。

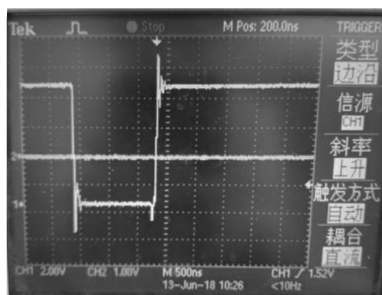


图4 未加入RCD吸收回路波形

Fig.4 Loop current waveform without absorption

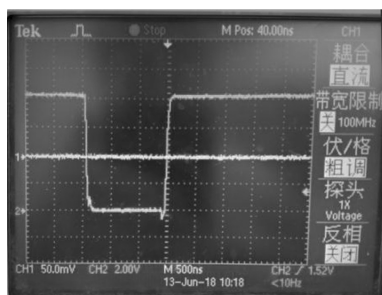


图5 加入RCD吸收回路波形

Fig.5 Loop circuit waveform with absorption

由波形图可看出开关毛刺优化较好。减小了过流过冲导致的开关处高频振荡。

第二:开关转线性负反馈调节电路

如图3中(b)所示为开关转线性负反馈调节

电路,通过运放做一个反馈比较机制,运放正极参考点REF_100mV是在 R_{CS2} 上的电压,实际可调在0.3V以下作为一个线性电源压差, R_{CS2} 选取5m Ω 精密电阻, R_{CS1} 是采样电阻,取5m Ω 精密电阻,输出10A电流时,在该采样电阻上理想输出电压为50mV,当输出电流 I_{LED} 增大时, R_{CS2} 电阻上对地电压升高,反馈到运放负端,输出电压减小,PNP管 U_{be} 电压增大, I_C 增大,从总电流 I_{LED} 分到的电流增大,总电流 I_{LED} 减小,形成一个负反馈调节机制。能够有效地解决电流开关效应的纹波问题。未加入线性负反馈调节电路后的实际示波器采样电阻上的表征输出电压波形和改进后的对比图如图6所示,可见其纹波效果有了较明显的改善。

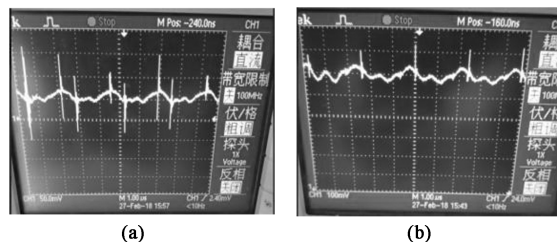


图6 (a)未进行调节的波形;(b)调节后波形

Fig.6 Not-adjusted waveform;(b) Adjusted waveform

第三:电流转脉宽的精密式调光

该驱动支持并联FET调光操作,驱动光源后,流经后级LED光源的电流通过一个0.1 Ω 的电阻,在电阻两端连接至差动放大器的正负输入端,将电阻两端电压放大合适比例,信号输出到比较器正端,负端连接可调参考源,当大于参考电压时,输出高电平,此信号接入主控制器IO口,通过此控制口可以判别是否启动精密调光功能。该功能可通过主控芯片自主选择是否开启。示意框图如图7所示。

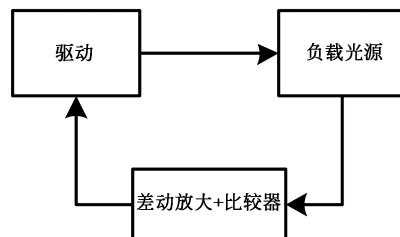


图7 精密调光框图

Fig.7 Precision dimmer block diagram

该驱动芯片支持 20 000 : 1 的高精度数字 PWM 调光,所采用主控芯片允许输出 16 位 PWM,在实测中,使用 10 位精度即千分之一 PWM 调光测试。测试以满亮度为基础,可见调节精度稳定在电流小数点一位,后一位根据输入稳定跳动。调光精度最高约为 0.2% 左右。当 PWM 输入精度更高时,示数不会变化。产生这种问题的原因一方面是 PCB 布局的板级限制,另一方面也与外接测量设备固有误差有关。

表 1 调光精度测试表

Tab.1 Dimming accuracy test table

PWM 变化/%	实际电流变化/A	调光精度/%
100—99.8	9.88—9.86	0.202
99.8—99.5	9.86—9.83	0.304
99.5—99.0	9.83—9.78	0.508

第四:优化型高频大电流 PCB 布局

在大电流开关电源中,输入 VIN 或输出 VOUT 与地之间的 SW 摆幅会有很大的 dV/dt 速率,这就是导致开关会有过压和过流的高幅值尖峰情况产生的原因,在这个结点上往往带有高频噪声分量,而常用的 EMI 噪声源的方法就是减小该结点与敏感信号线直接的耦合,常采用的方法就是尽可能地减小 SW 的铺铜面积。然而在输出是大电流的情况下需要更大的铺铜面积甚至是绿油开窗处理,方便传导大的电感电流和冷却散热。而由于较高频率的开关状态下,还会产生不希望的寄生电感,对 PCB 走线和 MOS 管上产生大的振铃和尖刺。为此要较好地解决以上两个问题,可以采用开关结点下铺接地铜箔,方便散热的同时也增强了屏蔽性。针对寄生电感的产生的振铃尖刺问题,采用环形回路的布局减小整个热回路。

此外,为保证电路测试便捷性和可靠性,采取电流驱动电路和主控电路隔离的模式,PGND 通过磁珠隔离到控制器的地。具体如图 8 所示。

3.3 兼容式模拟输入电路

外部模拟量调节采用兼容方式,一种通过内部电源用滑动变阻器直接分压保证输出在 0~1.5 V 调压连接到芯片的 CTRL 管脚,另一种外部提供可调 0~10 V 电压,现采用运放将输入的电压

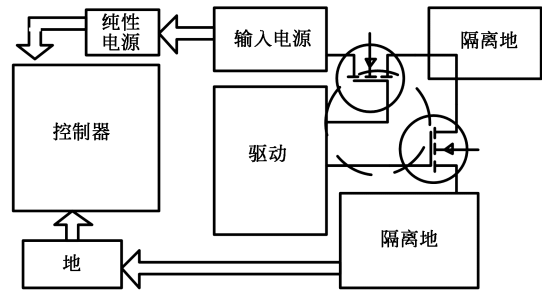


图 8 优化型布局图

Fig.8 Optimized layout

同比缩小 6.6 倍后输出到 CTRL 端,在调节比例的同时充分利用运算放大器输出阻抗低驱动能力强的特点。电路图如图 9 所示。

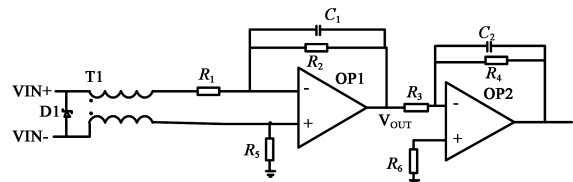


图 9 兼容式模拟输入电路图

Fig.9 Compatible with analog input circuit diagram

其中 D1 是输入端防冲击的 TVS 管,T1 是共模电感,去除外部输入的共模信号,OP1 是比例调节,OP2 反向, $R_2/R_1 = 1/5$, $R_3/R_4 = 1/1$ 。 $R_5 = R_1 // R_2$, $R_6 = R_3 // R_4$ 。 C_1 及 C_2 是高频通路,可以优化频率特性。输出计算公式如下:

$$V_{OUT} = -V_{OUT}' = \frac{1}{5}V_{IN} . \quad (5)$$

4 智能网络调光和显示

4.1 网络调光程序流程

在实际工业应用中,往往会有大量的电源信号线引出,在模拟调光时也需要人工进行旋转编码器的调整,为了应对工业现场没有人工操作的情况,设计了 PC 端网络调光的功能,方便室内人员进行远程调光,实现利用 PC 端智能调控的目的。

上位机通过网口与下位机进行通信,设计中的以太网控制芯片可以通过 EECS 引脚设置其数据位宽,当 EECS 引脚上拉时以太网控制器选择 8 位数据位宽,否则选择 16 位数据位宽。当前数据通过读写命令加载到内部数据缓冲区,存储器

地址会自动增加,接着下一个地址数据会自动加载到内部数据缓冲区。控制器的接口与主控芯片通过16位数据线以FSMC形式相连接。FSMC一种可变静态存储器控制设备,能够根据不同的外部存储器类型,发出相应数据/地址/控制信号类型以匹配信号的速度,同时也能够视为一种类似“总线”的控制方式。软件中以太网控制芯片的收发流程步骤和FSMC的协议时间配置表如图10。

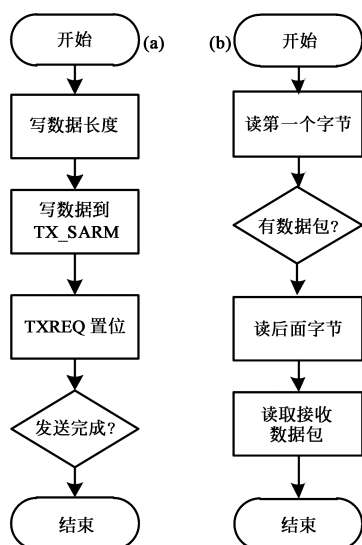


图10 (a)发送数据包流程图, (b)接收数据包流程图
Fig.10 (a) send packet flow diagram, (b) receive the packet flow chart

4.2 LCD 液晶驱动程序流程

为了较好地显示实时驱动负载电流,设计了4位段码液晶来显示输出值。目前,对于段码LCD的驱动方式主要有由自带LCD驱动的主控芯片或者IO口连接LCD驱动芯片来驱动LCD两种方式,但因所选主控芯片并不具有自驱动LCD功能,故设计中采用TM1621D驱动芯片实

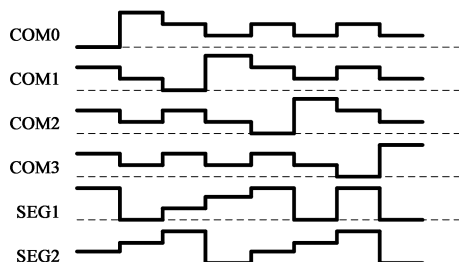


图11 时序波形图
Fig.11 Temporal waveform

现段码液晶驱动。依次对COM2,COM3,COM4进行轮寻即可完成一个扫描。驱动芯片为1/4复用,1/3偏压。只有当COM口和对应的SEG段差两个偏压值才能点亮。其时序如图11。

5 实验平台与结果

5.1 实验搭建测试实物图

实验中搭建的测试平台由48V开关电源,恒流驱动,LED阵列式灯珠,散热风扇等构成,进行一个LED显示驱动的模拟实测,具体如图12。

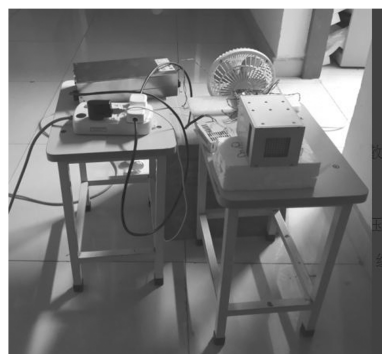


图12 系统测试实物图
Fig.12 System test physical picture

5.2 系统仿真测试波形与比较分析

5.2.1 驱动仿真波形图验证

为测试所设计恒流驱动的可行性以及其优劣性,现基于TI(德州仪器)和LT(凌特)平台搭建仿真环境并测试驱动波形图。平台中横坐标统一为时间,左列纵坐标为电压值,右列纵坐标为电流值。

图13中V(n022)是外部输入的PWM脉冲信号,信号幅值5V,图中占空比60%,V(n011)是设定的开关频率,I(D2)是输出电流,趋于10A稳定不变。当外部输入脉冲信号时,输出也是在高电平的时候有效,以此也可看出数字调光原理。

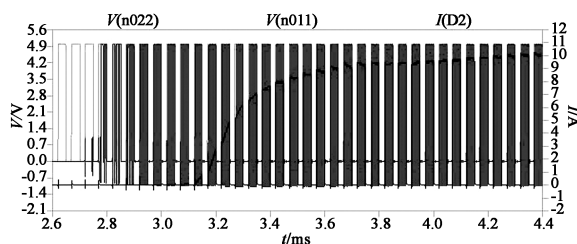


图13 PWM输入驱动仿真图
Fig.13 PWM input driving simulation

图 14 显示的是电源主开关频率,通过波形可以开出周期 T 大约为 $2.4\ \mu\text{s}$,则频率 f 在 400 kHz 左右,与硬件配置中相一致。

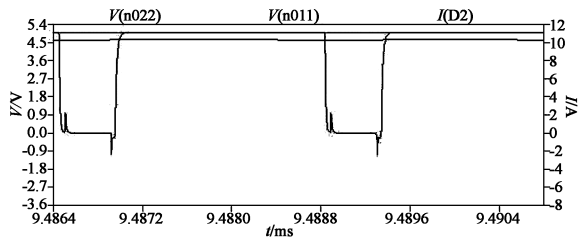


图 14 400 kHz 开关频率图
Fig.14 400 kHz switching frequency

5.2.2 测试对比与误差分析

如图 15 所示, $V(n006)$ 为输出电压, $I(D1)$ 为输出电流, 波形图为 LT 的某款双通道升压驱动, 同样常用于 LED 驱动, 使用与本设计一致的 PWM 脉冲输入时, 结合图 12, 对比两幅图相应速度, 这款升压芯片响应速度更快, 在稳定性方面, 可见输出电压波形在下降沿结束到上升沿呈现尖波趋势, 电流在起始时刻也会有过冲现象。相比较图 16 中改进优化的 LED 恒流驱动, 在驱动电流稳定性方面更优。且该恒流驱动设计在阵列式灯珠驱动的应用下更具有实用价值, 原因在于恒流在驱动并联灯珠时采用各灯珠全部并串联的方式可以有效降低灯珠的损坏率, 即使坏一个也不会让其他灯珠过流太多。而用图 15 的方式串联驱动就会导致整串不亮。

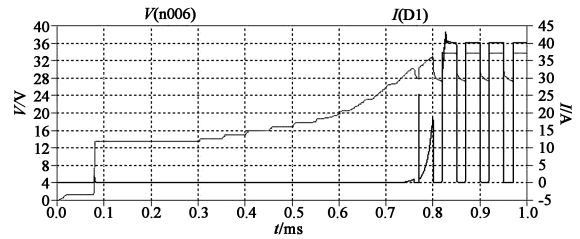


图 15 其他某款 LED 驱动波形图
Fig.15 Some other LED driving waveform

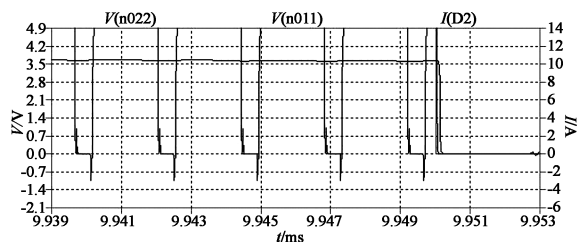


图 16 改进式的 LED 驱动波形图
Fig.16 Improved LED driving waveform

在测试的过程中, 大功率 LED 光源的持续发热会造成一系列的问题, 其中在实测中发热最严重的是 MOS 管和功率电感, MOS 管的过热一方面是电流过大, 另一方面是开关频率过高, 若选型不合适会直接导致 MOS 烧毁, 此外, 在 LED 驱动中, 电感值的合理选择是输出电路纹波的因素之一, 如果输出固定电流, 建议按照输出电流选择最贴近理论计算的电感值, 如果用于调光, 一般大电流建议选择偏小电感以降低误差。最后, 在本设计的基础上, 做好散热机制, 适当提高开关频率有利于进一步降低纹波, 减小误差。

5.3 实验搭建测试实物图

实验中设置电源开关频率是 400 kHz, 输入电源电压 48 V, 实测输出电压为 36.5 V 左右, 电流最大输出 10.002 A。根据数字或模拟调光可以线性输出稳定电流。使用组维功率计在距离约 15 cm 处可以测得如图 17 曲线数据, 测试时间为 30 s, 数值稳定在 $23\ \text{mW}/\text{cm}^2 \sim 24\ \text{mW}/\text{cm}^2$ 之间, 可见驱动光源稳定。

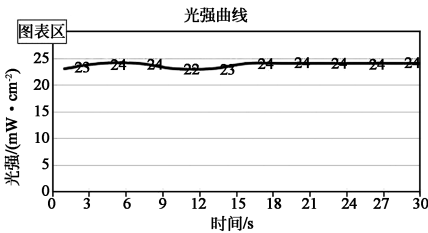


图 17 稳定度曲线
Fig.17 Stability curve

实验中调压实测电流实验, 分别进行占空比 100%, 70%, 50%, 20%, 10% 的测试, 其电流波动误差在 1% 左右。具体参见实验数据表 2。

表 2 实验数据表

Tab.2 Experimental data table				
调压/ V	调空 比/%	电流理 论值/A	电流实 测值/A	误差/%
1.5	100	10	9.8 ± 0.08	0.8
1.05	75	7	7.0 ± 0.05	0.7
0.75	50	5	5.0 ± 0.03	0.6
0.3	20	2	2.0 ± 0.02	1.0
0.15	10	1	1.1 ± 0.01	0.9

6 结 论

所设计的可调恒流源在输出功率大小、噪声的优化设计细节上有较完善的方法和思路。采用反馈式线性调节、精密式调光和RCD吸收回路有

效地减小开关峰值,附加PCB优化设计,10 A输出纹波效果在0.1 A左右,整体电流输出误差在1%左右,模拟数字调节输出线性变化合理。此外,整个调光系统搭载上位机调光和LCD输出显示,板级尺寸为12 cm×4.5 cm,方便使用时实时调节、显示以及板级级联。

参 考 文 献:

- [1] 张普雷,史永胜,史耀华,等. 大功率背光源用LED驱动电路的研究现状与进展[J]. 液晶与显示,2010,25(1): 68-74.
ZHANG P L, SHI Y S, SHI Y H, *et al.* Research status and progress of high power backlight LED driving circuit [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(1): 68-74. (in Chinese)
- [2] 陈浩,席光,刘胜. 一种精确调光的LED电源设计[J]. 电源技术,2011,35(2):218-220.
CHEN H, XI G, LIU S. Design of precise dimming LED power supply[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2011, 35(2): 218-220. (in Chinese)
- [3] 陈恩果,周心禹,郭太良. 基于多通道实时动态反馈的LED智能照明系统[J]. 激光与光电子学进展,2017,54(1):012301.
CHEN E G, ZHOU X Y, GUO T L. LED intelligent lighting system based on multi-channel real-time dynamic feedback[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 012301. (in Chinese)
- [4] 花卉,毛祥龙,谭家海,等. 基于LED阵列的动态照明设计方法[J]. 激光与光电子学进展,2017,54(10):102202.
HUA H, MAO X L, TAN J H, *et al.* Dynamic illumination design method based on LED array[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 102202. (in Chinese)
- [5] 刘中锋,刘春,倪文斌. 基于SG3525芯片的大功率恒压/恒流LED电源研制[J]. 电源技术,2016,40(2):404-407.
LIU Z F, LIU C, NI W B. Design of high-power CV/CC LED source based on SG3525[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2016, 40(02): 404-407. (in Chinese)
- [6] 尹勇生,叶明远,刘言言,等. 一种分段线性高压LED恒流驱动芯片[J]. 微电子学,2017,47(1):55-59.
YIN Y S, YE M Y, LIU Y Y, *et al.* A Segment linear high voltage LED constant current drive chip[J]. *Microelectronics*, 2017, 47(1): 55-59. (in Chinese)
- [7] 黄永俊,王双喜,叶家星,等. 基于STM32的多功能LED驱动电源[J]. 电子器件,2017,40(6):1527-1533.
HUANG Y J, WANG S X, YE J X, *et al.* Develop of LED driver with extended function based on STM32[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2017, 40(6): 1527-1533. (in Chinese)
- [8] 汪福林,林羽静,林国庆,等. 基于反激变换器的低纹波LED驱动电源研究[J]. 电力电子技术,2016,50(11):75-77.
WANG F L, LIU Y J, LIN G Q, *et al.* Research on the low-ripple LED driver based on flyback converter[J]. *Power Electronics*, 2016, 50(11): 75-77. (in Chinese)
- [9] 周锦荣,黄闻铭. 高功率因数LED恒流可调驱动电源设计[J]. 电子技术应用,2015,41(8):120-123.
ZHOU J R, HUANG W M. Design of adjustable high power factor constant current LED drive[J]. *Application of Electronic Technique*, 2015, 41(8): 120-123. (in Chinese)
- [10] 付贤松,王婷,任梦奇,等. 新型隔离式PWM调光LED驱动器设计[J]. 电工技术学报,2015,30(S1):75-79.
FU X S, WANG T, REN M Q, *et al.* Design of a novel isolating PWM Dimming led driver[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(S1): 75-79. (in Chinese)
- [11] 何素梅,傅锦良,吴海彬. LED隧道照明自动调光系统的设计[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(4):622-629.
HE S M, FU J L, WU H B. Design of automatic dimming system for tunnel LED lighting[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2015, 29(4): 622-629. (in Chinese)
- [12] 苑乔,李晓青,梁银川. 16通道恒流LED驱动芯片的PWM调光功能设计[J]. 现代电子技术,2014,37(7): 157-159.

YUAN Q, LI X Q, LIANG Y C. Design of PWM dimming function for 16-channel LED driver[J]. *Modern Electronics Technique*, 2014, 37(7): 157-159. (in Chinese)

作者简介:李志博(1993—),男,江苏苏州人,硕士研究生,2016 年获得常熟理工学院学士学位,主要从事光电信息与处理方面的研究。E-mail:jzb1155@126.com

王军(1979—),男,江苏苏州人,副教授,主要从事测控技术与仪器方面研究。E-mail:wjyhl@126.com