

辐射定标光源多路 LED 恒流驱动设计

李海星, 隋修宝, 姚哲毅, 陈 钱, 顾国华

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 为应对积分球辐射定标光源系统中 LED 阵列的电流稳定可控性对积分球开口处光谱匹配度的影响, 设计了一款多通道、高精度以及高稳定性的 LED 电流驱动电路。该电路是一种压控恒流驱动电路, 可通过模拟调光的方式实现对 LED 阵列驱动电流的线性控制, 其以 FPGA 为控制核心, 通过 SPI 接口对 AD5371 芯片寄存器进行读写操作, 通过 AD5371 数模转换电路实现对 LED 驱动电流的高精确度控制。基于循环液体制冷设备和水槽制冷底座实现对 LED 阵列的温度控制。实验结果表明, 该电路可实现 LED 阵列驱动电流在 0~1050 mA 连续线性可调, 电流调节精度可达量程的 0.14%。在控制 LED 灯座温度为 10 °C 时, LED 输出光光谱稳定性为 0.2%。

关键词: LED 驱动; 辐射定标光源; 积分球; 线性控制

中图分类号: TN202 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210902

Design of multi-channel LED constant current driver in radiometric calibration light source

Li Haixing, Sui Xiubao, Yao Zheyi, Chen Qian, Gu Guohua

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to deal with the influence of the current stability controllability of LED array in integrating sphere radiometric calibration light source system on the spectrum matching degree at the opening of integrating sphere, a multi-channel, high-precision and high-stability LED current driving circuit was designed. This circuit was a voltage controlled constant current driving circuit, which can realize the linear control of LED array driving current by means of analog dimming. It took FPGA as the control core, read and wrote the AD5371 chip register through SPI interface, and realized high precision control of LED driving current through AD5371 digital-to-analog conversion circuit. The temperature control of LED array was realized based on circulating liquid refrigeration equipment and sink refrigeration base. The experimental results show that the current of LED array can be continuously and linearly adjustable in the range of 0-1 050 mA, and the current adjustment accuracy can reach 0.14% of the range. When the LED lamp holder temperature is controlled at 10 °C, the LED output light spectral stability is 0.2%.

Key words: LED driver; radiometric calibration light source; integrating sphere; linear control

收稿日期: 2021-11-25; 修订日期: 2022-01-21

基金项目: 国家自然科学基金 (11773018, 61727802)

作者简介: 李海星, 男, 硕士生, 主要从事 LED 驱动和积分球光源稳定性方面的研究。

导师简介: 隋修宝, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事红外探测理论与仪器研制以及光计算等领域的研究。

0 引言

辐射定标^[1]是光学遥感器研制中的一项关键技术。长期在轨工作的光学传感器由于受到各种因素的影响,数据精度有所下降,所以需经常对其进行辐射定标校准。利用月球^[2]进行卫星在轨对月定标是提高辐射定标效率、监测探测器成像稳定性的重要手段之一,但星上定标成本较高。积分球光源^[3]一般是由积分球和各类不同光谱分布的发光单元组成,具有输出光均匀、开口面积大和可重复性高的特点,近些年来成为了辐射定标光源的首选方式。根据光谱叠加原理,可以使用程控技术控制积分球内发光单元的驱动电流大小或者占空比,从而使积分球开口处形成特定的辐亮度和光谱分布。由于光谱的不匹配度会对定标精度造成影响,且实验室光源的光谱同各类遥感观测目标的光谱具有很大差异,因此光谱可调的辐射定标光源一直是各国科研人员比较感兴趣的研究方向。

目前,国内外很多高校与研究所对积分球光源驱动控制系统投入研究,取得了一定成果。美国研制的 Terra Vega 光源^[4]是一款比较成功的外场辐射定标光源,其以 1000 mm 内径的积分球和 4 个独立可控的 1 kW 高压钠灯为主体,可实现星载微光辐射器的外场辐射定标与性能测试,遥感器测量辐亮度能达到 $3 \times 10^{-9} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。Terra Vega 光源的缺点是高压钠灯工作时会产生短暂的辐亮度闪烁,对辐射定标结果产生不利影响。发光二极管(LED)作为目前主要的发光单元,同传统光源相比具有发光效率高、寿命长、单色性好等优点。美国国家标准物质中心(NIST)提出了用大量不同波长分布 LED 发光单元组合成光谱可调光源来模拟 380~1050 nm 波段的不同光源,这类方法开始广泛地应用在光谱辐射定标领域。国内的空天信息创新研究院也做了相关方面的研究,在中国遥感卫星辐射校正场敦煌戈壁场区进行了相关的积分球辐射定标实验。

根据积分球光源的先验知识,常规用于辐射定标的积分球光源有着控制精度低、同时可控发光单元数量少以及发光效率低的缺点,不能精准进行光谱匹配。文中设计了一种 40 通道高精度可控电流的 LED 驱动电路方案,选用了 40 组不同光谱分布的 LED 集成阵列,同时精准控制每一组 LED 电流大小,实现积分球光源对任意光谱分布的模拟。

1 辐射定标光源的组成

文中辐射定标光源是由积分球、LED 灯组、循环液体制冷系统以及 LED 驱动电路组成。积分球上留有特殊结构灯座,安装不同光谱分布的 LED 集成阵列。通过恒流驱动的方式来控制每一种波长的 LED 电流大小,从而控制积分球光源的光谱输出。

1.1 LED 驱动技术

LED 发光^[5]光谱分布较窄,不同峰值波长的产品丰富。单色 LED 在光轴方向上单位立体角内的辐射功率随光谱的分布模型可以用高斯分布函数来近似,且一般积分球出口处的光谱辐射亮度与内部单色 LED 的控制电流成正比关系。

$$L_{\lambda} = \alpha I_{LED} \exp\left[\frac{-2(\lambda - \lambda_c)^2}{W^2}\right] \quad (1)$$

$$W_{FWHM} = W \sqrt{\ln 4} \quad (2)$$

式中: L_{λ} 为单个 LED 在光轴方向的光谱辐射强度; α 为 LED 电流与光功率的转换系数(单一波长下近似为常数); I_{LED} 为 LED 控制电流; λ_c 为光谱分布的峰值波长; W_{FWHM} 为 LED 辐射强度光谱的半峰全宽,对于特定波长的 LED 近似为常数。一般情况下,流过 LED 的电流与 LED 发光的光输出能量有着如图 1 所示的曲线,在电流小于 350 mA 时,理论 LED 的光输出的特性曲线与实测的光输出特性曲线几乎重合,电流大于 350 mA 时热损耗影响逐渐加大,LED 发光效率变低,所以实验室采用的单个 LED 电流范围控制在 0~350 mA。

为避免单个 LED 芯片的输出光功率较低,将 30 个同类型 LED 灯珠采用“10 串 3 并”的方式组合在一

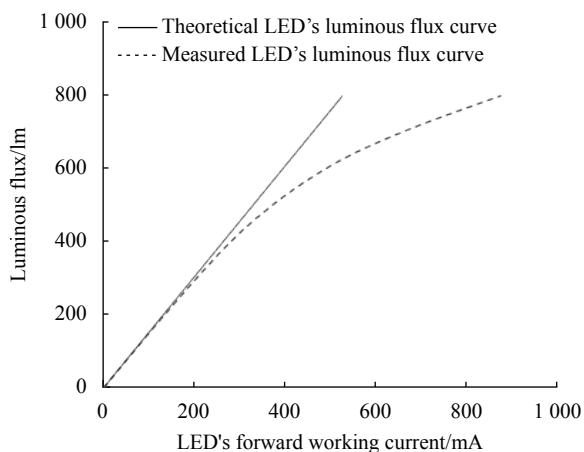


图 1 LED 光通量与正向工作电流关系曲线

Fig.1 Relationship curves of LED's luminous flux and forward working current

起成为 LED 阵列, 获得较高的光功率。LED 正向压降随电流变化范围较大, 最大导通压降为 3 V 左右, 根据电路串并联定律, LED 阵列驱动电压控制在 10~35 V, 单个 LED 阵列的最大通过电流为 1050 mA。

根据光谱叠加原理^[6-8], 要得到复合的宽光谱波段, 需要不同波长的 LED 阵列共同作用, 基本的数学模型如公式 (3) 所示:

$$\hat{L}(\lambda) = \sum k_i S_i(\lambda) \quad (3)$$

式中: $S_i(\lambda) \propto L_i$, $S_i(\lambda)$ 为单个特定波长的 LED 在额定电流时的光谱分布; k_i 为未知的系数。通过仿真实验, 最终确定了 40 种不同峰值波长的 LED 灯组, 使用光谱仪实际测得的部分光谱分布曲线如图 2 所示。

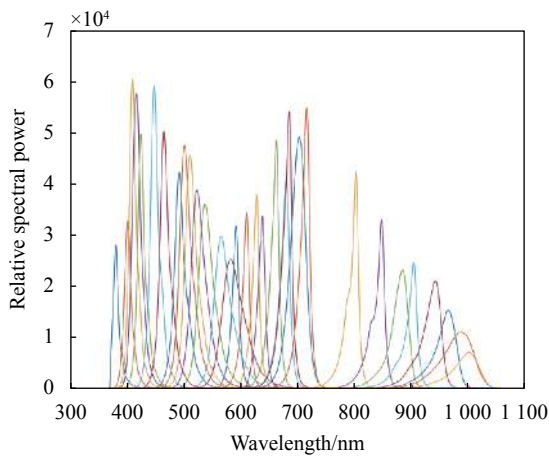


图 2 所选 LED 光谱曲线

Fig.2 Spectral curves of selected LED

LED 具有单向导电特性, 且正向压降随电流改变也会发生改变, 因此笔者选用恒流驱动的方式来保证 LED 电流不受正向压降的影响。在设计 LED 驱动的过程中, 还需控制 LED 产生的热量。文中采用的 LED 阵列密集度较大, 容易造成热量的积累, 影响 LED 发光效率。同时结温还会对 LED 峰值波长造成影响。

$$\lambda_d(T_2) - \lambda_d(T_1) = \Delta T \cdot 0.2 \text{ (nm/}^\circ\text{C)} \quad (4)$$

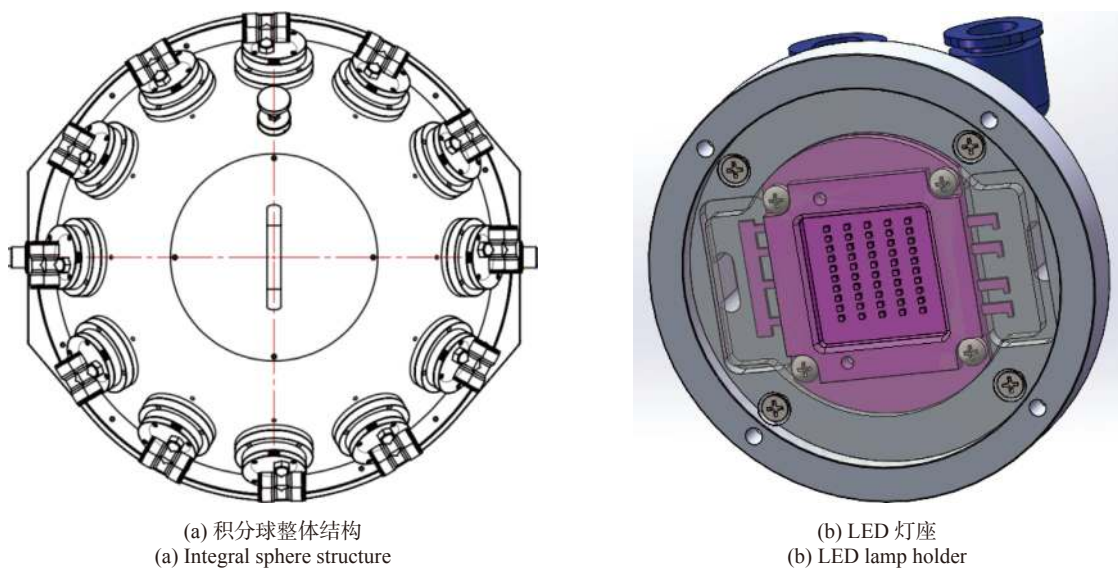
根据该经验关系式, 温度每升高 1 °C, 峰值波长移动 0.2 nm。峰值波长的移动会对最后光源合成的光谱分布产生很大的影响, 所以需要对 LED 结温进行控制。

1.2 积分球结构

积分球^[9]的作用是将光源发出的光进行混合和匀化。笔者用硫酸钡作为积分球内部的漫反射材料, 经由中国计量科学研究院校准^[10], 该涂料对光谱范围 350~900 nm 的光反射率在 96% 以上。根据漫反射面组成的空腔内的辐射传递公式, 可得出积分球出射的辐亮度为:

$$L_s = \frac{\Phi}{\pi A_s} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho(1 - f)} \quad (5)$$

式中: A_s 为积分球内表面面积; ρ 为内壁漫反射涂层反射率; f 为积分球的开口比; Φ 为入射辐射通量。再根据积分球尺寸和开口大小的关系, 最终确定积分球的内径为 400 mm, 出光口为直径 230 mm 的圆形。积分球前半球上间隔 30° 均匀留有 12 个灯座安装 LED 光源, 灯座上有循环水冷结构用于控制 LED 温度, 结构图如图 3 所示。



(a) 积分球整体结构
(a) Integral sphere structure

(b) LED 灯座
(b) LED lamp holder

图 3 积分球结构图

Fig.3 Structure diagram of integrating sphere

2 驱动电路设计

电路采用恒流式驱动电路,通过模拟调光方式线性调节 LED 控制电流大小。模拟调光的优势在于电流精度高、温漂小以及控制精度高,同时避免了在调光过程中产生的噪声。在采用模拟调光的技术时,LED 的正向导通压降会随着 LED 电流的减小而降

低,使得 LED 的能耗也有所降低。如图 4 所示,LED 驱动电路主要包括恒流驱动模块、数模转换控制模块。采用 XILINX 的 ZYNQ7000 系列芯片作为核心处理器。FPGA 主要用于控制数模转换模块输出相应的电压值,系统采用 SPI 串口与上位机进行通信,保证了系统能进行稳定的信息传输。

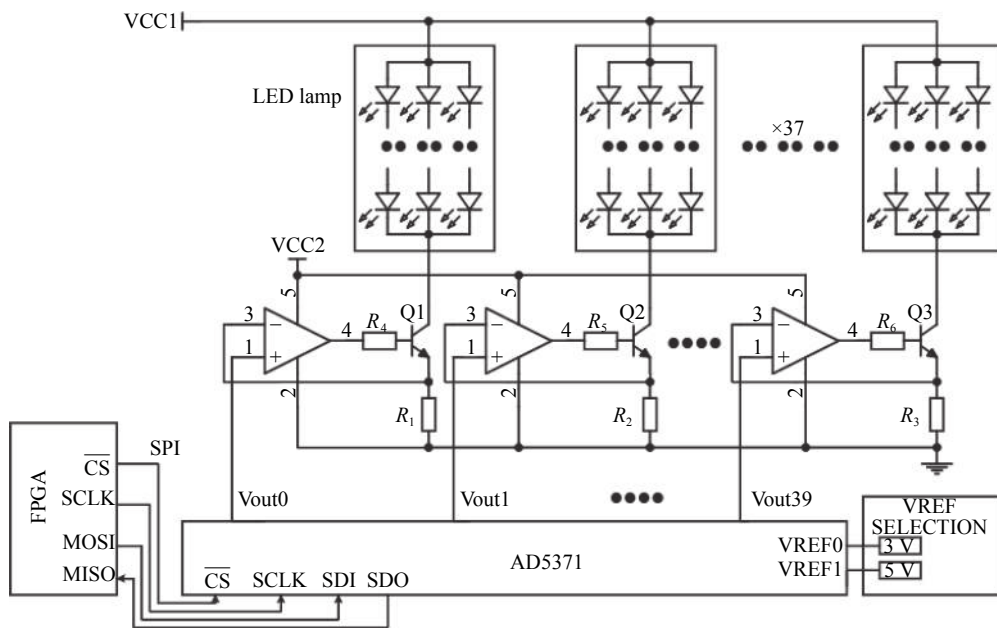


图 4 总体设计框图

Fig.4 Overall design block diagram

2.1 恒流驱动模块

LED 恒流驱动电路设计如图 5 所示。主要器件包括运算放大器 (U2)、高直流增益三极管 (Q1) 和高精度采样电阻 (R_1)。U2 选用的是 ADI 公司的精密轨到轨输入和输出运算放大器 ADA4097-1, 具有稳定的单位增益, 输入可以承受高达 80 V 的差分电压。Q1 选用的是东芝半导体的 NPN 型三重扩散硅晶体管 2SC5200, 具有较高的稳定性和直流增益。采样电阻选用的是南京精密电阻公司的 EE/BWL 型精密采样电阻, 阻值为 0.5 Ω , 精度为 $\pm 0.1\%$, 实际最大功耗为 3 W。采用 LTspice XVII 软件对该电路进行仿真, 将正相输入端电压控制为如图 6 (a) 所示随时间线性递增的电压信号, 得到的 LED 电流仿真结果如图 6 (b) 所示。

根据仿真结果可以看出该电路能够实现线性调

节电流的功能。

由于运算放大器“虚短”的特性, 反相输入端电压 V_- 近似于正相输入端电压 V_+ , 由高精度采样电阻 R_1 实时反馈 LED 负载的电流 I_{LED} :

$$V_+ = V_- = V_{R_1} \quad (6)$$

$$I_{LED} = \frac{V_{R_1}}{R_1} = \frac{V_+}{R_1} \quad (7)$$

LED 阵列与三极管集电极串联, 可认为集电极电流等于 I_{LED} 。当 R_1 流过的电流变大时, 与 R_1 相连的运放反相输入端电压增加至高于正相输入端的电压, 运放输出端为低电平, 三极管截止, 使得 I_{LED} 值减小; 当 I_{LED} 减小时, 由于 LED 两端电压差值减小, 运放反相输入端的电压比正相输入端的电压低, 运放输出高电平, 使三极管导通, 负载电流增大。流经 LED 的电流经过采样电阻实时反馈, 生成只受正相输入端电压控

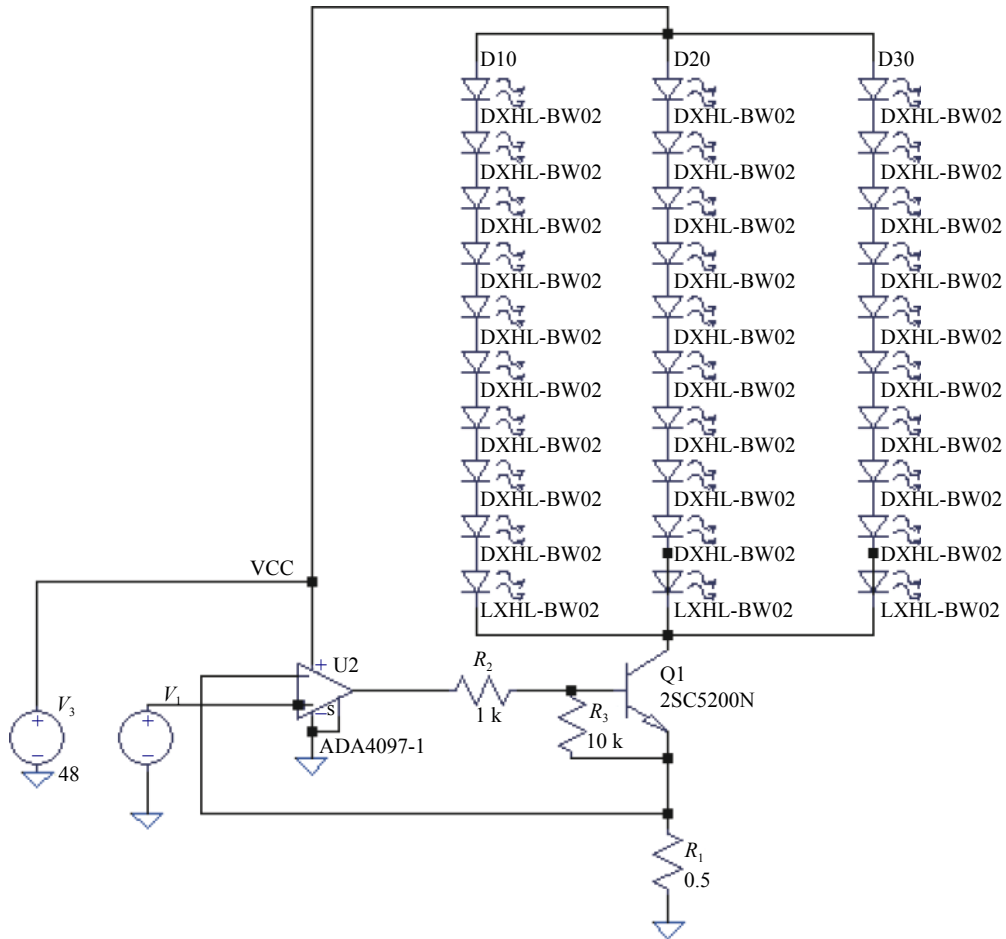


图 5 LED 恒流驱动电路图

Fig.5 Diagram of LED constant current driving circuit

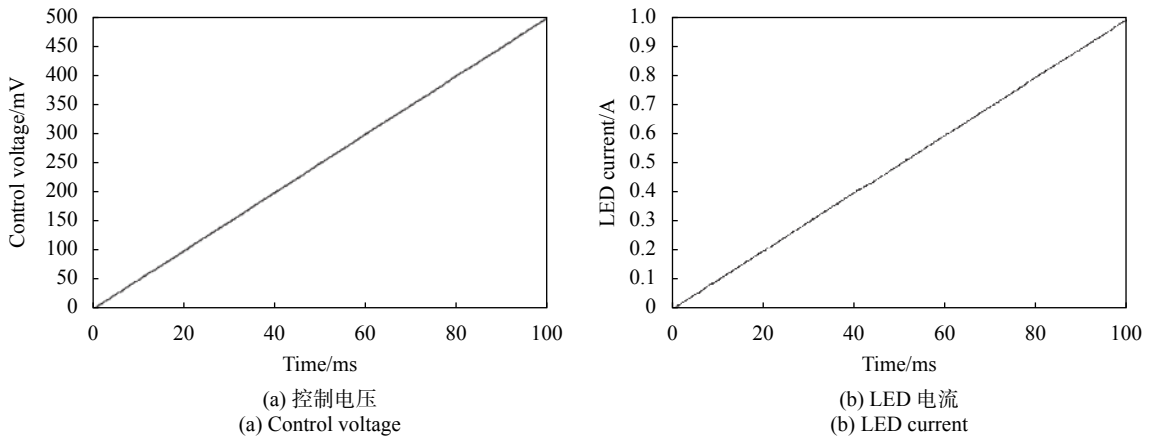


图 6 仿真结果

Fig.6 Simulation results

制的稳定电流,实现模拟调光的功能。

2.2 数模转换模块

由公式 (7) 可知,在采样电阻阻值恒定的情况下,

LED 的电流值由正相输入端电压 V_+ 决定。该电压信号由数模转换模块来提供,数模转换模块是将对应数字信号转换为实际电压值的电路。AD5371 是 ADI

公司的一款 40 通道、14 位分辨率、串行输入、高精度电压输出型数模转换器芯片。该芯片能提供 4 倍基准电压的电压输出范围,每个通道的增益和失调均可根据情况进行调整来消除误差。ADR423 为一款 3 V 低噪声高精基准电压源芯片,使用 ADR423 芯片电路作为基准电压源给数模转换电路提供基准电压,具体电路如图 7 所示。

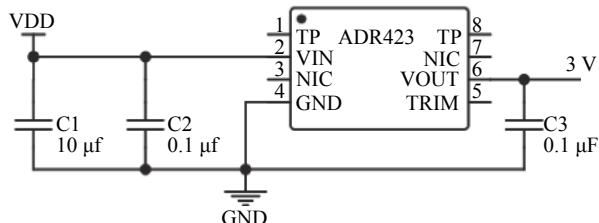


图 7 基准电压源电路

Fig.7 Reference voltage source circuit

AD5371 芯片留有串行外围设备接口 (SPI), SPI 是一种高速、全双工、同步的通信总线。芯片每一个 DAC 通道包含 7 个数据寄存器, FPGA 可通过 SPI 接口对芯片内寄存器进行读写操作,完成数字信号到模拟信号的转换。AD5371 的基准电压 V_{ref} 选为 3 V, 芯片本身可提供基准电压 4 倍的输出范围 (-4 ~ 8 V), 可得 V_+ 电压值的最小调节量 V_{lim} 表达式为:

$$V_{lim} = \frac{V_{ref} \times 4}{2^{14}} \quad (8)$$

电流值的最小调节量 I_{lim} 表达式为:

$$I_{lim} = \frac{V_{lim}}{R_1} \quad (9)$$

则 LED 驱动电流的控制精度可达到 1.4 mA, 约为总工作电流的 0.14%, 符合驱动设计要求。

3 实验结果与分析

3.1 LED 恒流输出特性

图 8 为辐射定标光源测试平台。选用定制型号为 JH-120ORRR14G42 灯组中波长为 605~610 nm 的一路 LED 灯串进行实验,该灯串的工作电流范围为 0~1 050 mA。由预先确定的控制电压与电流的关系可知,控制电压范围为 0~0.525 V。在实验过程中,通过高精度 DAC 芯片电路来控制同相输入端电压即采样电阻两端的电压值,使用 FLUKE-179C 数字万用表电流档来测量流过 LED 电路的实际电流。针对 LED 灯串工作时温度过高导致电流稳定性下降的问题,在实验过程中需保持水冷系统一直处于工作状态。单次实验时间控制在 10 min,每分钟测试一次 LED 电流,实际电流值取每次测试的平均值。最终得到的实验数据如表 1 所示。

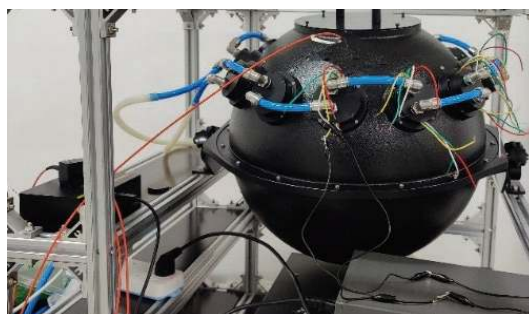


图 8 辐射定标光源测试平台

Fig.8 Test platform of radiometric calibration light source

表 1 LED 驱动电流的理论值和实验值

Tab.1 Theoretical value and experimental value of LED driving current

V_+/V	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
Theoretical current/mA	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Experimental current/mA	99.42	198.65	297.30	396.13	494.86	595.33	693.85	792.52	894.35	992.52

根据实验数据对正相输入端电压值和 LED 实际工作电流进行拟合,拟合曲线如图 9 所示。

从拟合结果可知正相输入端的控制电压与 LED

工作电流具有良好的线性度,说明电流控制精确度良好。实际电流和理论电流存在的一定误差可以通过优化电路设计和控制温度来调节。

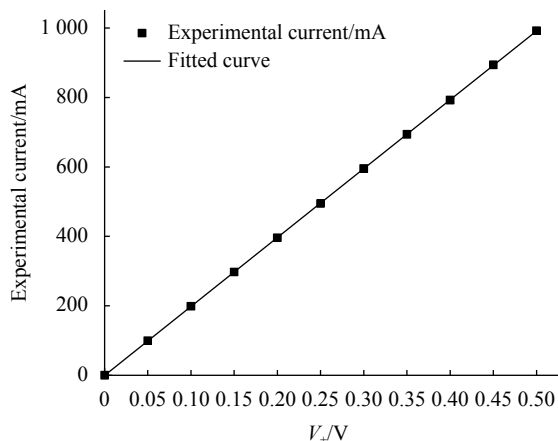


图 9 控制电压与工作电流拟合曲线

Fig.9 Fitting curve of control voltage and operating current

3.2 LED 驱动稳定性测试

使用复享光学的 PG2000 光谱仪进行 LED 光源光谱稳定性测试。在单个 LED 灯组测试实验中, 光谱仪选择为连续测量模式, 此模式能够对光源的光谱进行不间断的测试并保留测试数据。以 605~610 nm 波长 LED 灯为例, 电流控制为 100 mA, 每分钟记录 LED 发光光谱的峰值波长, 持续 10 min。测量结果如图 10 所示。

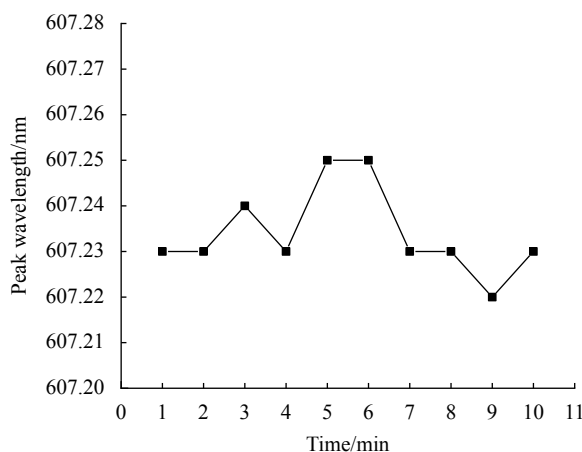


图 10 输出光谱稳定度

Fig.10 Stability of the output spectral

实验结果表明, 10 min 内 LED 发光光谱峰值波长变化率在 $\pm 0.2\%$, 即 LED 驱动电路能够提供稳定的发光表现。

4 结 论

文中设计了一款以恒流驱动方式为核心的辐射

定标光源 LED 驱动系统。该电路是电流负反馈电路, 由于所用的采样电阻精度较高温漂极小, 且 DAC 基准电压以及输出电压精度较高, 所以控制精度高。模拟调光的方式能对 40 路 LED 驱动电流进行精确稳定的线性控制。数模转换电路使用 AD5371 芯片电路, 通过 FPGA 对芯片寄存器的读写实现每通道 14 位分辨率的电压输出。同目前常见的积分球光源 LED 驱动相比, 文中设计的 LED 恒流驱动电路具有控制通道多, 控制精度高的优点。实验结果表明, 各通道 LED 阵列驱动电流在工作范围内连续线性可调, 电流调节精度符合实验要求。循环液体制冷系统控制 LED 阵列温度处于特定温度范围, 长时间工作峰值波长漂移较小, 保证 LED 输出光谱稳定。可实现对多路 LED 驱动电流的高稳定控制, 保证了其输出电流的精度, 满足辐射定标光源对光谱合成精确度的需求。

参考文献:

- [1] Liu Li, Gu Xingfa, Yu Tao, et al. HJ-1 B thermal infrared band in-flight radiometric calibration and validation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1119-1125. (in Chinese)
- [2] Zhu Jun, Li Yongchang, Bai Zhaoguang, et al. Lunar calibration method through attitude maneuver of low-earth-orbit and high-resolution remote sensing satellites [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(9): 1913-1923. (in Chinese)
- [3] Wang Shaoshui, Zhao Facai, Sun Quanshe. Research on brightness adjustable integral sphere light source technology and its application [J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(3): 586-590. (in Chinese)
- [4] Gan Tao, Yuan Yinlin, Zhai Wenchao, et al. Design and test of in-site radiometric calibration reference light source for spaceborne low light level remote sensors [J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(1): 140-144. (in Chinese)
- [5] Wu Fupei, Xie Xiaoyang, Li Shengping. A thermal dissipation design method for LED array structure illumination [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 670-684. (in Chinese)
- [6] Wang Lihui. Solar spectrum synthesis technology based on LED array light sources[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [7] Huang Sijia, Yuan Yinlin, Zhai Wenchao, et al. Design optimi-

- zation and performance test of infrared integrating sphere radiation source with wide dynamic range(Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(10): 20210516. (in Chinese)
- [8] Liu Hongxing, Liu Zexun, Li Baoyong, et al. Spectrum-tunable light source based on multi-sources [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(9): 2345-2351. (in Chinese)
- [9] Wang Lingyun, Li Guangxi, Ma Yue, et al. Study on simulation technology of multi-color temperature and multi-magnitude starlight source [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(8): 20210053. (in Chinese)
- [10] Li Yuan, Zhang Yong, Hu Liqin, et al. Investigation of optical environment changes in the Dunhuang gobi-site of the Chinese radiometric calibration sites [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(5): 1231-1242. (in Chinese)