

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905624

基于过程控制的机载高光谱定标光源的快速 稳定恒流源研制*

王智宏, 孙澎勇, 王豫哲, 千承辉, 刘杰

(吉林大学仪器科学与电气工程学院 长春 130012)

摘要:定标光源的稳定性及稳定速度直接影响机载高光谱仪光谱辐射定标的准确性和效率。为实现定标光源的快速稳定,提出并设计了基于数字过程控制的恒流源快速稳定调节方法和系统。该快速稳定恒流源系统,在场效应管恒流源的基础上,加入数字过程控制环节,弥补场效应管恒流源反馈振荡调节及系统热稳定时间长的不足。快速稳定调节方法分为能够快速产生热量的大预置值启动快速预热、减小过冲振荡现象的缓冲快稳和输出稳定电流的模拟闭环稳流三阶段。快速稳定恒流源与场效应管恒流源对比实验表明:输出 1 500.00 mA 电流,纹波系数达到 1‰的时间由 670 s 缩短到 66 s;作为标准光源中卤钨灯的驱动电路,上电 2 min 后连续测量 20 min 获得的 400~2 500 nm 光谱数据全谱平均基线漂移由 0.5% 降低到 0.06%。

关键词:光谱辐射定标;数字过程控制;快速稳定恒流源系统;电流纹波;光谱基线漂移

中图分类号: TP271.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Development of fast and stable constant current source of onboard hyperspectral calibration light source based on process control

Wang Zhihong, Sun Pengyong, Wang Yuzhe, Qian Chenghui, Liu Jie

(College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: The stability and steady speed of the calibration light source directly affect the accuracy and efficiency of spectral radiation calibration of the onboard high-resolution spectrometer. To realize the rapidness and stabilization of calibration light source, a fast stabilization regulation method and a system of constant current source based on digital process control are proposed and designed. Based on the constant current source of field effect tube, the rapid constant current source is added with digital process control link to make up for the shortage of feedback oscillation regulation of field effect tube constant current source. The long thermal stabilization time of the system can also be improved. The adjustment method of rapid stabilization can be divided into three stages, including large preset value starting fast preheating to produce heat quickly, buffer fast stabilization to reduce the overshoot oscillation and constant current of simulated closed-loop to output the stable current. Comparison experiments between the fast stable constant current source and the field effect tube constant current source show that the time decreases from 670 s to 66s for outputting a current of 1 500.00 mA and ripple coefficient 1‰ decreases from 670s to 66 s. In addition, as the drive circuit of the halogen tungsten lamp of standard light source, the full-spectrum mean baseline drift of the 400 nm~2 500 nm data reduces from 0.5% to 0.06% under the output spectrum of the standard light source for 20 minutes after being electrified for 2 minutes.

Keywords: spectral radiation calibration; digital process control; the fast stable constant current source; ripple of current; spectrum average baseline drift

0 引言

遥感技术对地球资源和环境变化的监测与管理有着重要的作用,辐射定标是量化遥感的关键技术之一,是研究光谱辐射传感器的输出与已知的、入射光辐射之间定量关系的技术^[1]。不同应用目的的光学有效载荷对辐射定标的精度有不同的要求。国际权威学者 Slater 等^[2]在 1987 年曾提出典型空间遥感研究对辐射定标精度的基本要求,其中机载仪器要求定标系统精度达到 0.5% 以内。

现在机载高光谱仪器在地球观测、矿产勘探、天文学等方面都有应用^[3],但所处温度环境恶劣,光学系统各镜面将产生面形变化和刚体位移,导致视轴漂移和波前畸变^[4],最终影响仪器整体性能。为进一步提高机载高光谱仪工作的精度、稳定性及工作效率,对快速辐射定标提出新的要求,定标系统在 3 min 内 400~2 500 nm 光谱的平均基线漂移达到 0.1% 以内。

光谱辐射定标和标准传递有两种基本方法^[5]:一种基于标准灯光谱辐射,传递标准是各种级别的标准灯;另外一种基于标准探测器的辐射定标方法,采用高稳定的半导体探测器作为传递标准,长春理工大学张健等^[6]提出了一种新型的校准能见度仪用标准散射体定标系统,能够实现对装调误差进行标定。机载高光谱机上定标系统选择标准灯光谱辐射定标方法对系统进行定标,其基本结构是“标准照度灯+积分球”^[7],标准照度灯的稳定性将直接影响机载高光谱仪器定标的稳定性。

卤钨灯是一种较为理想的具有连续、稳定发光光谱的光源^[8],它在可见光和近红外波段光强较强,能够提供 400~2 500 nm 波段复合光,选择卤钨灯作为辐射定标系统的标准照度灯。国内外对卤钨灯光谱稳定性都有一定研究,并提出了改善方法。

2004 年,复旦大学的周小丽等^[9]对卤钨灯光源的稳定性进行了测试,实验结果表明,光源在开机约 15 min 以后,光谱相对平均误差为 0.4%。2005 年,荷兰阿姆斯特丹大学的 Ferreira 等^[10]利用 Perkin Elmer 近红外光谱仪进行光谱测量,采用偏移、漂移+水带预处理技术对光谱标准偏差进行纠正,纠正后 1 100~1 250 和 1 360~1 500 nm 两个波段的基线漂移为 0.17%。2010 年,中国人民解放军后勤工程学院王帅等^[11]分别对采用“恒温+恒流”及光功率负反馈两种控制方式的近外光谱仪的光源的稳定性进行测试,光源为卤钨灯,光谱测量范围 1 595.70~2 396.30 nm;连续测量 4 h,“恒温+恒流”方式控制光源的平均光谱基线漂移为 1.566 6%,采用光功率负反馈控制方式的光源平均光谱基线漂移在 0.5% 以内。2016 年,中国原子能科学研究院王玲等^[12]利用 AvaSpec-

NIR256 近红外光谱仪连续测定 2 h 的 1 400~1 660 nm 光谱数据基线漂移为 0.5%。2017 年,杨国杰等^[13]研制出日照计定标系统,其模拟误差为 3.75%。从上述文献中可知,采用“恒温+恒流”、光功率负反馈方式对卤钨灯发光强度稳定性进行控制,光谱稳定性能够达到 0.5%,虽然采用光谱辐射测量仪器温度修正、数据预处理等方法对获取光谱数据进行处理,能够使光谱仪上电 2 min,稳定性达到 0.17%,但光谱辐射定标要求标准照度灯发光强度不能经过光谱数据处理。为进一步提高标准照度灯稳定性,缩短稳定时间,保证标准照度灯供电系统的稳定性和稳定时间成为关键技术。

卤钨灯灯丝电压变化 0.1% 或电流变化 0.05%,辐通量约变化 0.4%,故多采用高稳定度的稳流装置供电^[14]。而要满足辐通量变化在 0.1%,则要求电流纹波在 0.012% 以内。2011 年,苏州大学吴茂成^[15]设计高精度恒流源,输出电流最大为 1.000 A,预热 10 min 开始测量,输出电流稳定性误差为 0.047%。2018 年, Du^[16]设计了高精度宽量程恒流源,输出电流范围 10~2 000 mA,稳定性为 1% 左右。目前能够输出 2 A 电流的恒流源,稳定性能够达到 0.047%,但前期有 10 min 的预热时间。因此为提高供电恒流源的稳定性、缩短调节时间,本文提出基于数字过程控制的快速稳定调节方法,设计快速稳定恒流源。

1 数字过程控制快速稳定恒流源调节方法设计

为加快标准光源稳定速度,设计数字过程控制快速稳定调节方法,缩短标准光源驱动系统稳定时间,以加快标准光源稳定。

1.1 场效应管恒流源工作基本原理

场效应管恒流源基本原理如图 1 所示,通过反馈环节调整,保证系统稳定性。

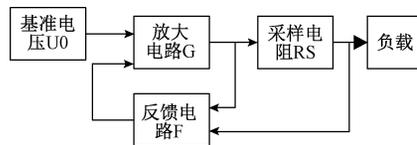


图 1 场效应管恒流源基本原理

Fig.1 Basic principle diagram of FET constant current source

场效应管恒流源包括基准电压电路、放大电路、反馈电路、采样电阻等环节^[15-17],输出电流 I 为:

$$I = \left(U_0 \cdot \frac{A}{1 + AF} / R_s \right) \quad (1)$$

式中: U_0 为基准电压值; A 为放大电路放大倍数; F 为反馈电路放大倍数; R_s 为采样电阻阻值。设置反馈电路放

大倍数 $F=1$, 放大电流中放大器为开环放大, A 趋近于无穷大。则:

$$I = U_0 / R_s \quad (2)$$

1.2 场效应管恒流源调节时间长原因分析

由图 1 可知, 场效应管恒流源为电压负反馈调节电路, 在工作初期输出电流存在调节过程。利用 MATLAB 对场效应管恒流源电路进行仿真, 场效应管恒流源电流调节过程如图 2 所示, 该过程可分为调节阶段和工作阶段。调节阶段: t_0 时刻系统上电后, 系统输出电流增大到期望电流值 I_{REC} 后会存在过冲现象, 在 t_p 时刻, 会出现超调量, 之后回落, 出现在 I_{REC} 附近的振荡减弱。工作阶段: t_s 时刻, 输出电流纹波能够达到工作要求。场效应管恒流源调节阶段 $t_0 - t_s$ 可持续几秒钟。

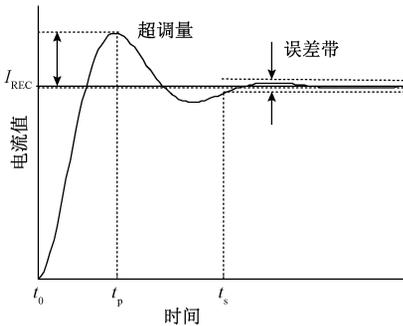


图 2 场效应管恒流源电流调节过程

Fig.2 Current regulation process diagram of MOS constant current source

除此之外, 场效应管恒流源运行过程中, 温度会发生变化, 温度变化会引起输出电流的变化, 作为标准灯的驱动电路, 电流的变化会导致发光强度出现变化。2015 年, 夏晓东^[18]对场效应管恒流源运行中系统温度变化进行测试, 其中场效应管模拟恒流源系统温度变化如图 3 所示。可将场效应管恒流源系统温度变化过程分为: 快变区、缓变区、稳定区。快变区: 在上电初期, 场效应管恒流源系统温度会快速上升; 缓变区: 在上电中期, 温度上升速度会减慢, 该过程持续时间较长; 稳定区: 上电后期,

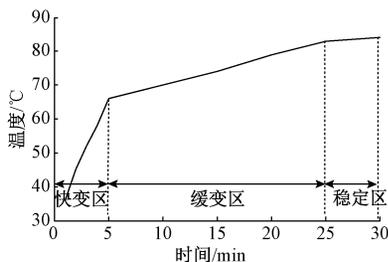


图 3 场效应管模拟恒流源系统温度变化

Fig.3 Temperature change diagram of FET constant current source system

温度会逐渐趋于稳定, 达到热平衡。具体每个恒流源系统的温度变化过程会有差异, 但基本变化过程一致。温度的变化会引起系统采样电阻、放大电路、反馈电路参数变化, 导致输出电流变化。

1.3 数字过程控制快速稳定调节方法设计

根据 1.2 节的分析, 要提高恒流源的稳定速度, 应从减小电流过冲调节时间和温度变化过程两方面考虑。对于过冲调节时间, 可通过控制电流缓慢递增和递减的变化过程减小过冲量, 缩短调节阶段时间 t_s 。对于场效应管恒流源温度变化时间, 根据温度随电流的递增的特性, 可控制在上电初期大电流输出, 快速产生热量, 使系统提前达到温度稳定区。基于上述思想, 本文提出数字过程控制快速稳定调节方法, 在场效应管恒流源中引入数字调节环节, 构成数字过程控制快速稳定恒流系统。快速稳定恒流源调节过程如图 4 所示。数字过程控制快速稳定调节方法将系统调节分为 3 个环节。

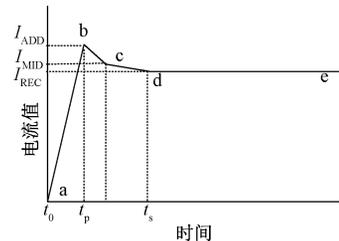


图 4 快速稳定恒流源调节过程

Fig.4 Regulating process diagram of fast stable constant current source

1) 大预置值启动快速预热环节 (a~b): 缓慢增加灯电流值, 输出电流从 0 开始增加到 I_{ADD} , 步进 $step_1$, 耗时 t_p , 其中 I_{ADD} 为期望电流值 I_{REC} 的 1.2 倍, 快速产生热量, 使系统快速达到热稳定状态, 减少预热时间。

2) 缓冲快稳环节 (b~d): 电流增加到 b 点后, 以步进 $step_2$ 缓慢减小, 达到一合适的电流值 I_{MID} (c 点), 对应电流 I_{MID} 为 I_{REC} 的 1.02 倍, 定义此电流值为预缓冲电流值。c-d 阶段: 通过数字调节使输出电流缓慢减小到期望电流值 I_{REC} 处, 步进 $step_3$, 在 t_s 时刻内调节完成。在设计过程中, 保证 $t_s \leq 90$ s;

3) 模拟闭环稳流环节 (d~e): 该阶段关闭数字调节, 通过场效应管恒流源对该系统进行调节。

其中 a~d 为调节过程, 该过程采用数字过程控制的方式对该系统进行调节。利用数字过程控制改变输出电流值改变模拟恒流源的调节过程, 达到电流快速稳定的目的, 进而实现光谱的快速稳定。

2 实 验

为验证快速稳定恒流源的稳定性及稳定速度, 进行场效

应管恒流源与快速稳定恒流源电流稳定及光谱稳定对比实验。

2.1 输出电流对比实验

对场效应管恒流源与快速稳定恒流源输出电流过程、稳定性、稳定时间进行对比试验。

实验设备:卤钨灯(64425 HLX 20 W 12 V)与积分球

组成的标准光源、场效应管恒流源、快速稳定恒流源、6 位半高精度台式万用表 FLUKE8 842 A、APS3005D-3D 恒压源。其中快速稳定恒流源为设计电路,快速稳定恒流源调节过程如图 5 所示,场效应管恒流源为快速稳定恒流源的一部分。

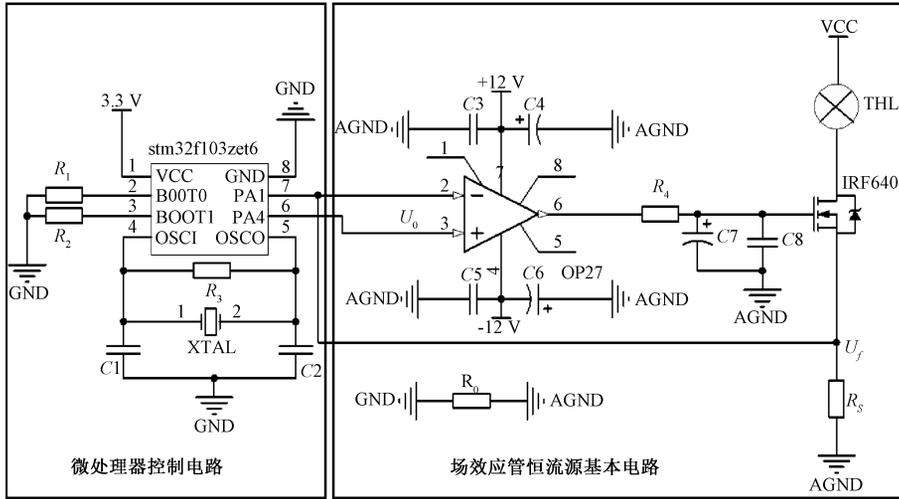


图 5 快速稳定恒流源基本原理

Fig.5 Basic principle diagram of the fast stable constant current source

实验条件:设置大预置值电流值 $I_{ADD} = 1.7600\text{ A}$, 预缓冲电流值 $I_{MID} = 1.5320\text{ A}$, 期望电流值 $I_{REF} = 1.5000\text{ A}$, 步进值 $step_1 = 160\text{ mA}$ 、 $step_2 = 12\text{ mA}$ 、 $step_3 = 4\text{ mA}$, 每步耗时 1 s , 根据设计到达 I_{ADD} 、 I_{MID} 、 I_{REF} 的时间分别为 11 、 33 、 41 s 。环境温度 ($25 \pm 5^\circ\text{C}$)，APS3005D-3D 恒压源为恒流源提供供电电压(电压 18 V , 纹波 $r \leq 1\text{ mV}_{\text{rms}}$)。

实验步骤具体如下:

1) 分别用场效应管恒流源和快速稳定恒流源驱动卤钨灯,利用万用表 FLUKE8842A 测量输出电流,由于万用表 FLUKE8842A 不带测量值输出功能,录制电流输出过程视频,启动后开始录制,录制时间:20 min。录制一次场效应管恒流源电流视频,每 10 s 记录一个电流数据,得数据 I_0 ;录制 5 次快速稳定恒流源电流数据,为反映输出电流过程,前 90 s,每 1 s 记录一个电流数据,之后每 10 s 记录一个电流数据,得数据 $I_i (i = 1:5)$ 。

2) 数据处理:计算不同时刻 t 开始的 $I_i (i = 0:5)$ 数据纹波系数 $r_i (i = 0:5)$,计算数据段起始时刻 t 从 30 s 到 15 min,间隔为 10 s,结束时刻 20 min。

$$r = \frac{\delta I}{I} \quad (3)$$

式中: I 为起始端到结束端测量的电流数据; δI 为这一段电流数据的极差,确定 $I_i (i = 0:5)$ 纹波达到 10^{-4} 的时间,

并计算 $I_i (i = 0:5)$ 起始段为 90 s 的纹波系数。

场效应管恒流源输出电流、场效应管恒流源纹波系数 I_0 、 r_0 如图 6、7 所示。由图 6 可以看出,电流 I_0 中, $a_0 \sim b_0$ 阶段:有明显的调节现象,该过程为电流反馈调节阶段,耗时 70 s; $b_0 \sim c_0$ 阶段:随着工作时间增长,温度逐渐上升,电流存在缓慢爬升现象(采样电阻为负温度系数时),该过程为电流热稳定阶段。由图 7 可知,场效应管恒流源在 670 s 时,系统纹波系数能够达到 1‰,在系统运行 90 s 时,文纹波系数为 3.34‰。

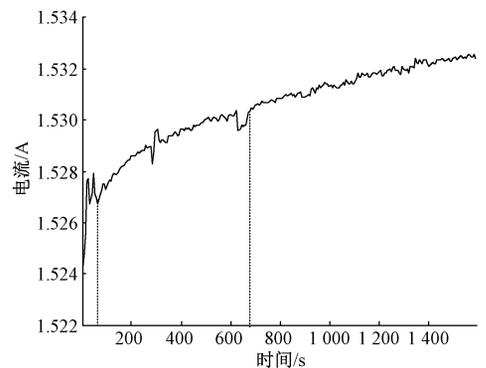


图 6 场效应管恒流源输出电流

Fig.6 Output current of the FET constant current source

$I_i (i = 1:5)$ 在 50 s ~ 20 min 的测试数据及 I_1 整体调

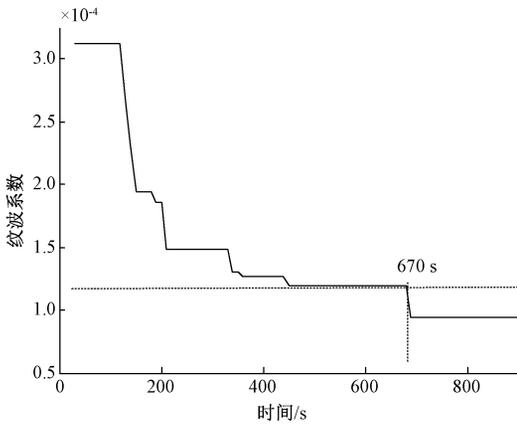


图7 场效应管恒流源纹波系数

Fig.7 Ripple coefficient of the FET constant current source

整过程如图8所示,快速稳定恒流源稳定变化 $r_i(i=1:5)$ 如图9所示。图8中, $a_0 \sim b_0$ 为大预置值启动快速预热环节, $b_0 \sim d_0$ 为缓冲快稳环节, $d_0 \sim e_0$ 为模拟闭环稳流环节。对应 $b_0、c_0、d_0$ 点时间分别为11、33、41s与设计值相同。由图9可以看出快速稳定恒流源稳定性达到1‰的时间比场效应管恒流源明显减小。快速稳定恒流源的稳定时间、稳定性进行对比,场效应管恒流源及快速稳定恒流源关键参数对比如表1所示。可以看出,快速稳定恒流源纹波系数达到1‰的时间稳定时间在82s内,5次的平均稳定时间为66s;90s以后的纹波系数平均值为0.86‰。比场效应管恒流源在稳定速度和稳定时间上都

有明显提高。

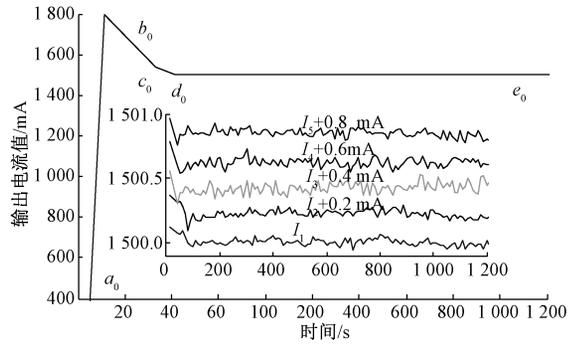


图8 快速稳定恒流源输出电流数据

Fig.8 Output current of the fast stable constant current source

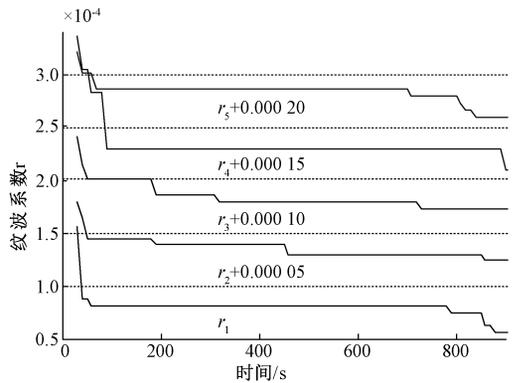


图9 快速稳定恒流源稳定变化

Fig.9 Ripple coefficient of the fast stable constant current source

表1 场效应管恒流源及快速稳定恒流源关键参数对比

Table 1 contrast table of Key parameters of the FET constant current source and fast stability constant current source

记录电流	5 s 电流/mA	11 s 电流/mA	33 s 电流/mA	41 s 电流/mA	50 s 电流/mA	稳定时间 s	90 s 后纹波系数 $r_{‰}$
I_1	398.2	1 761.3	1 529.5	1 498.5	1 500.03	47	0.80
I_2	394.7	1 756.6	1 532.5	1 496.2	1 500.13	76	0.90
I_3	399.8	1 765.9	1 530.8	1 493.2	1 500.12	75	1.00
I_4	398.3	1 759.7	1 532.6	1 499.3	1 500.25	82	0.77
I_5	397.7	1 760.5	1 536.2	1 498.4	1 500.04	52	0.85
均值	398.4	1 760.8	1 532.3	1 497.1	150 013.4	66	0.86
理论值	400.0	1 760.0	1 532.0	1 500.0	1 500.00	41	1.00

2.2 标准光源光谱稳定性稳定时间对比实验

为验证快速稳定恒流源比场效应管恒流源驱动标准光源获得光谱稳定性、稳定时间有提高,并能够满足机载光谱仪机上定标系统要求3min内稳定性达到0.1%的要求,进行两恒流源的对比实验。

实验设备:卤钨灯与积分球组成的标准光源、场效应管恒流源及快速稳定恒流源、光谱仪、ASD公司FieldSpec3。

实验条件:设置大预置值电流值 $I_{ADD} = 1.7600\text{ A}$,预缓冲电流值 $I_{MID} = 1.5320\text{ A}$,期望电流值 $I_{REF} = 1.5000\text{ A}$,步进值 $step_1 = 160\text{ mA}$ 、 $step_2 = 12\text{ mA}$ 、 $step_3 = 4\text{ mA}$ 。每步耗时1s,则理论上达到稳定的时间为41s。环境温度 $25 \pm 5^\circ\text{C}$,APS3005D-3D恒压源为恒流源提供供电电压(电压18V,纹波 $r \leq 1\text{ mV rms}$),光谱仪波长范围400~2500nm、波长间隔1、积分时间1000ms,积分次数1。

实验步骤具体如下。

1) 分别用场效应管恒流源和快速稳定恒流源驱动标准光源,光谱仪开机 2 min 后连续测量 20 min,分别采集 1200 次全谱数据 $D_{1i}(\lambda)$ 和 $D_{2i}(\lambda)$ 。

2) 数据处理:由光谱数据 $D_{1i}(\lambda)$ 和 $D_{2i}(\lambda)$ 计算光谱仪在两个光源下的基线 $G_{1i}(\lambda)$ 和 $G_{2i}(\lambda)$,以及两者的基线漂移 $RSD1(\lambda)$ 和 $RSD2(\lambda)$ 。

$$G_i(\lambda) = \frac{D_i(\lambda)}{\text{mean}(D_i(\lambda))} \quad (4)$$

$$RSD(\lambda) = \frac{\text{std}G_i(\lambda)}{\text{mean}(G_i(\lambda))} \quad (5)$$

式中: $D_i(\lambda)$ 表示 i 次测量的全波段光谱数据; λ 为波长; $\text{std}(D_i(\lambda))$ 为波长 λ 下 1 200 次测量光谱数据标准差; $\text{mean}(D_i(\lambda))$ 为波长 λ 下 1 200 次测量光谱数据平均值, $i = 1 \sim 1\ 200$ 。计算基线漂移 $RSD1(\lambda)$ 和 $RSD2(\lambda)$ 的平均值 $AVE1$ 、 $AVE2$ 。

场效应管恒流源驱动下的光谱数据及快速稳定恒流源驱动下的光谱数据 $D_{1i}(\lambda)$ 、 $D_{2i}(\lambda)$,如图 10、11 所示。基线 $G_{1i}(\lambda)$ 和 $G_{2i}(\lambda)$ 如图 12、13 所示。可以看出,快速稳定恒流源驱动标准光源获得的光谱数据漂移比场效应管恒流源驱动下获得光谱更小,基线漂移对比如图 14 所示。400~2 500 nm 全谱基线漂移的平均值 $AVE1$ 、 $AVE2$ 分别为 0.5% 和 0.06%。

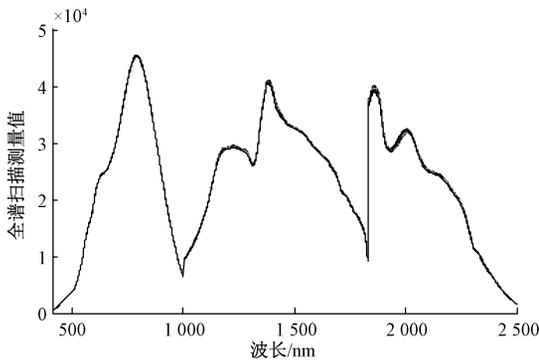


图 10 场效应管恒流源驱动下的光谱数据

Fig.10 Spectral Data by FET constant current source driving

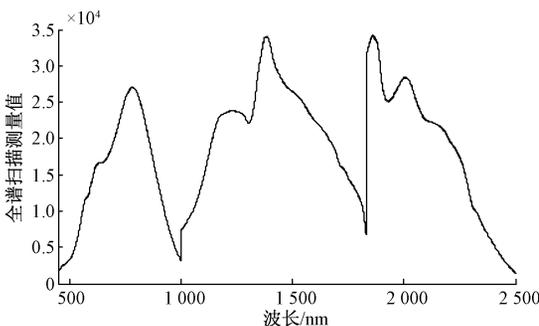


图 11 快速稳定恒流源驱动下的光谱数据

Fig.11 Spectral data by the fast stable constant current source driving

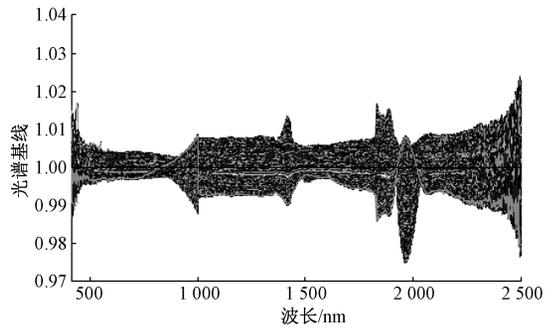


图 12 场效应管恒流源驱动光谱基线

Fig.12 Spectral baseline by the FET constant current source driving

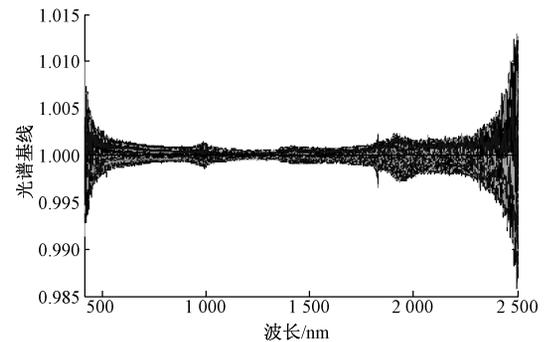


图 13 快速稳定恒流源光谱基线

Fig.13 Spectral baseline of the fast stable constant current source

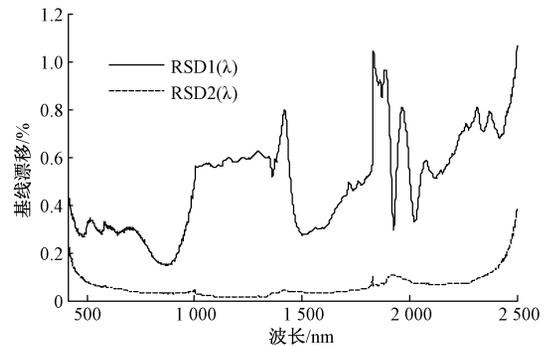


图 14 基线漂移对比

Fig.14 Comparison of baseline drift

3 结 论

基于数字过程控制的恒流源快速稳定调节方设计的快速稳定恒流源,调节过程中分为大预置值启动快速预热、缓冲快稳、模拟闭环稳流 3 个阶段。该恒流源与场效应管恒流源对比实验结果表明,快速稳定恒流源系统输出电流稳定性能够在 90 s 内达到 1‰,比场效应管恒流源的稳定时间缩短了 10 倍。以该恒流源作为卤钨灯与

积分球组成的标准光源的驱动电路,采用 ASD 公司的 FieldSpec3 光谱仪对上电 2 min 的标准光源输出连续测量 20 min,获得 400~2 500 nm 光谱数据的平均基线漂移由场效应管恒流源的 0.5%降低到 0.06%。基于数字过程控制的快速稳定调节方法能够有效地缩短场效应管恒流源的稳定时间,满足机载高光谱定标系统上电 3 min 稳定性达到 0.1%的要求。

参考文献

- [1] SELLER P J, HALL F G, ASRAR G, et al. An overview of the first international satellite land surface climatology project field experiment [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997(D17):18345-18371.
- [2] SLATER P N, BIGGAR S F, HOLM R G, et al. Reflectance and radiance-based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensor [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1987, 22(1):11-27.
- [3] JIA J X, WANG Y M, CHENG X Y, et al. Destriping algorithms based on statistics and spatial filtering for visible-to-thermal infrared pushbroom hyperspectral imagery [J]. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(6):4077-4091.
- [4] 张军强,董德义,吴清文,等.光学遥感器镜面面形误差及刚体位移处理方法[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(6):242-247.
ZHANG J Q, DONG D Y, WU Q W, et al. Treatment of surface figure error and rigid body motion for mirror/lens in optical remote sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(6):242-247.
- [5] 李照洲,郑小兵,唐伶俐,等.光学有效载荷高精度绝对辐射定标技术研究[J]. *遥感学报*, 2007, 11(4):581-588.
LI ZH ZH, ZHENG X B, TANG L L, et al. An advanced technology of absolute radiometric calibration for optical remote sensors [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(4):581-588.
- [6] 张健,张国玉,孙高飞,等.校准能见度仪用标准散射体定标系统装调技术[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(5):1207-1215.
ZHANG J, ZHANG G Y, SUN G F, et al. Alignment technology for standard scatter plate calibration system used in calibrating forward scattering visibility meter [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(5):1207-1215.
- [7] 郑小兵,张黎明,吴浩宇,等.面向光学遥感的先进光谱辐射定标技术[C]. *海洋科学进展*, 2004, 22(增刊1):16-22
ZH X B, ZHANG L M, WU H Y, et al. Advanced radiometric calibration techniques for optical remote sensing. [C] *Advances in Marine Science*, 2004, 22(Suppl.1):16-22.
- [8] 隋成华,杜春年,徐丹阳.基于卤钨灯和 LED 的复合光源设计与实现[J]. *浙江工业大学学报*, 2017, 45(3):351-354.
SUI CH H, DU CH N, XU D Y. Design and implementation of compound light source based on halogen lamp and LEDs [J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2017, 45(3):351-354.
- [9] 周小丽,刘木清.近红外光源的稳定性控制[J]. *光源与照明*, 2004(4):4-5,8.
ZHOU X L, LIU M Q. Stability control of near infrared light source [J]. *Lamps and Lighting*, 2004(4):4-5,8.
- [10] FERREIRA A F P, HANS F M, WESTERHUIS J A, et al. Inline monitoring of butane isomers adsorption on mfi using near-infrared spectroscopy: Drift correction in time based experiments [J]. *Langmuir*, 2005, 21(15):6830-6835.
- [11] 王帅,冯新泸,管亮.近红外光谱仪光源稳定性的控制研究 [J]. *计算机与应用化学*, 2010, 27(12):1687-1690.
WANG SH, FENG X L, GUAN L. Study on NIR light source power stability control [J]. *Computers and Applied Chemistry*, 2010, 27(12):1687-1690.
- [12] 王玲,李定明,钱红娟,等.近红外分析中的基线漂移及校正方法[J]. *分析实验室*, 2016, 35(10):1203-1208.
WANG L, LI D M, QIAN H J, et al. Baseline drift and calibration methods in NIR analysis [J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2016, 35(10):1203-1208.
- [13] 杨俊杰,张国玉,孙高飞,等.光电式日照计定标系统与校准方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(11):2805-2812.
YANG J J, ZHANG G Y, SUN G F, et al. Research on the calibration system and calibration method of photoelectric sunshine duration recorder. [J] *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(11):2805-2812.
- [14] 金伟其.辐射度光度与色度及其测量[M].北京:北京理工大学出版社, 2006.

JIN W Q. Photometry, Radiometry, Colorimetry & Measurement [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 20067.

- [15] 吴茂成.高精度宽范围恒流源设计[J].电测与仪表, 2011,48(1):64-66.

WU M CH. Design of a high-precision wide-range constant-current source [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2011,48(1):64-66.

- [16] DU Y D. Advanced information management, communicates [C]. Electronic and Automation Control Conference, 2018;2521-2525.

- [17] 尉广军,朱宇虹.几种恒流源电路的设计[J].电子与自动化,2000(1):44-45.

WEI G J, ZHU Y H. Design of several constant current source circuits [J]. Electronics & Automation, 2000 (1): 44-45.

- [18] 夏晓东.高精度双向数控恒流源的设计[D].长春:吉林大学,2015.

XIA X D. The design of programmable high-accuracy two-way constant current source [D]. Changchun: Jilin University, 2015.

作者简介



王智宏,1990年于天津大学获得学士学位,分别在1999年和2005年于吉林大学获得硕士学位和博士学位,现为吉林大学教授博士生导师,主要研究方向为近红外光谱及应用技术的研究。

E-mail: zhwang@jlu.edu.cn

Wang Zhihong received her B.Sc. degree from Tianjin University in 1990, received her M.Sc. degree and Ph.D. degree both from Jilin University in 1999 and 2005, respectively. She is currently a professor and a Ph.D. advisor at Jilin University. Her main research interests include the near infrared spectrum technology and application.



刘杰(通信作者),1991年于吉林工业大学获得学士学位,1994年于长春光机所获得硕士学位,现为吉林大学教授,主要研究方向为光电传感仪器。

E-mail: l_jie@jlu.edu.cn

Liu Jie (Corresponding author) received her B.Sc. degree from Jilin University of Technology in 1991 and M.Sc. degree from the Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS in 1994. Now she is a professor at Jilin University. Her main research is engaged in photoelectric sensor instrument.