

文章编号 1004-924X(2010)01-0212-08

星上定标积分球标准光源—稳流源驱动器的研制

李东景^{1,2}, 于平¹, 王小朋¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:星上定标是成像光谱仪光谱图像数据量化应用的基础。为了提高星上定标积分球系统的光源稳定性,减少积分球辐亮度变化率,针对积分球系统定标用的光源—卤钨灯对定标精度的影响,研制了一种控制卤钨灯发光强度稳定性的稳流电源。介绍了具有软启动特性的标准灯稳流驱动电源的工作原理及应用电路,研究了输入电压负载、温度等参数对电源性能的影响,并对稳流源电路进行了测试。通过改变三极管增益的方法调整软启动时间,采集串联在电路中的高精度电阻两端的电压,并计算电路中的电流,得到电流稳定性达到0.037%;增加重复性后,电流稳定性为0.043%。实验结果表明,得到的电流稳定精度满足了积分球系统光的变化不超过1%的要求。此积分球系统已成功应用于某型号成像光谱仪的星上定标。

关键词:星上定标;标准灯;标准光源;稳流源;软启动特性

中图分类号:TM923.32;TM44 **文献标识码:**A

Development of current stabilized source of standard lamp for spaceborne calibration integrating sphere

LI Dong-jing^{1,2}, YU Ping¹, WANG Xiao-peng¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: The onboard calibration is a basis of a spaceborne Hyper-spectral Imager(HSI) to obtain accurately quantified spectral imaging data. In order to enhance the stability of the tungsten-halogen lamps of the spaceborne calibration integral sphere and to reduce the change of the integral sphere radiance, a kind of current stabilized source for the tungsten-halogen lamps was developed. The operating principle and current stabilized circuit with a soft start characteristic were introduced. And the effects of some performance parameters, inputting voltage load, temperature and so on, on the properties of current stabilized source were analyzed. Then a test was carried out for the current stabilized source. Experimental results show that the current stability can be up to 0.037% by changing the transistor's gain to adjust the time of soft start, collecting the voltage of the high precision resistor and computing the value of the current. Furthermore, the current stability can be up to 0.043% after the

收稿日期:2008-11-04;修订日期:2008-12-23.

基金项目:国防预研基金资助项目(No. 05001SA050)

repetition. These results also indicate that the accuracy of the current stability can satisfy the requirements that the change of integrating sphere radiance should be less than 1%. The integrating sphere system has been successfully applied to a HSI onboard calibration.

Key words: onboard calibration; standard lamp; standard lamp-house; current stabilized source; soft start

1 引言

成像光谱仪是获取地物图像和光谱信息的新一代光学遥感仪器,其应用以量化的数据为基础。由于在发射及在轨运行的过程中,成像光谱仪的光学系统和电子学结构极易发生性能改变,必须对这些改变进行校正,才能得到准确的光谱图像数据,因此,在实验室定标的基础上对成像光谱仪进行星上定标非常重要。

星上定标光源作为辐射定标内部参考标准,多数采用光谱辐射特性已经标定好的宽谱灯或宽谱灯照明的积分球,如 MOS、HRIS 等成像光谱仪都配有微型定标灯用于相对辐射定标。积分球接收来自定标灯的光,持续稳定地为星上定标提供满足星上定标要求的朗伯面光源,并定量地给出稳定的辐射输出。标准光源包括两部分,标准灯和与之配套的专用电源。标准灯是经过精心制作和检验的优质灯,经国家计量部门标定并发给相应检定数据和测试证书的方能使用;而标准灯专用电源应确保标准灯发光强度的稳定性和准确性,提供相应稳定和准确的电流和电压,才能保证光源效果。

传统的标准光源供电为 220 V/50 Hz,体积较大,稳定精度较高。现代稳流源已经可以用 PCB 板实现其功能,但精度不高,且软启动多依靠手动旋转电位计的旋钮改变输出电流值。软启动过程多依靠电容和电阻搭建的积分电路,软启动时间只有几秒钟。本文运用高等级、高精度、低温漂的元器件研制了高稳定性的稳流源电路,电流变化满足标准灯对电路的要求,运用 PNP 晶体管 3CG110 的 E、B 之间 PN 结的漏电流对钽电容进行充电,使软启动时间达到 30 s,大大延长了标准光源的使用寿命。

2 标准灯稳流电源供电与稳压电源供电比较

标准灯发光强度的稳定性和准确性除了与其

灯具本身质量有关外,还取决于供电电源的稳定性和准确性。

2.1 工作电压对发光强度的影响

不考虑其它因素的影响,根据通用电气公司给出的灯的光辐射输出的稳定性与供电的稳定性如以稳压的方式工作,电压和发光强度二者之间具有如下关系:

$$\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^{3.38},$$

进行简化分析,最终可得如下结果:

$$\frac{dL}{L} = 3.38 \frac{dU}{U},$$

式中, dL/L 为发光强度的变化, dU/U 为工作电压的变化。如果要求发光强度的变化 $dL/L \leq 0.01$, 则电压的变化 $dU/U \leq 0.01/3.38 = 0.0029$, 即电压变化不得超过 0.29%。

2.2 工作电流对发光强度的影响

以稳流的方式进行工作,最终可得以下公式

$$\frac{dL}{L} = 6.25 \frac{dI}{I},$$

式中: dI/I 为电流的变化。同样,如 $dL/L \leq 0.01$, 则 $dI/I \leq 0.01/6.25 = 0.0016$, 即电流的变化必须控制在 0.16% 以内。

上述结果表明标准灯工作电流的变化对发光强度的影响更为灵敏,因此给标准灯供电时,采用稳流电源比稳压电源供电更为合理和优越。

从长期工作的可靠性考虑,设定定标灯在不超过其 90% 的满功率状态下工作,同时为了避免瞬间的开关对灯所造成的冲击的不利影响,采用缓冲启动的控制方式。根据以上要求设计出具有软启动功能的标准灯稳流源电路。

3 电路设计

设计的带软启动功能的稳流源设计原理框图如图 1 所示。由提供的 +12 V 电源对稳流电路的标准灯稳流调整回路和稳流控制单元供电。稳流控制单元再通过两个稳压模块分别为误差放大器供电和提供基准电压。由电容的充电控制晶

体管的基极电压来保证软启动,当基极电压能够驱动调整电路工作时,调整电路时时调整其内阻,电路进入平衡状态,从而达到稳流目的。

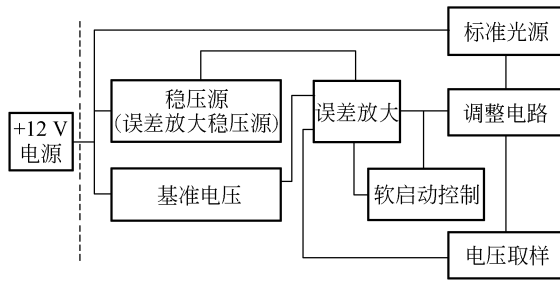


图 1 稳流源电路原理框图

Fig. 1 Block diagram of current stabilized circuit

稳流源中运算放大器的噪声对稳流精度有很大影响,许多稳流源对放大器的电源都是直接供给,由于供电电源的纹波和噪声都会影响放大器的工作状态,进而影响稳流电路的精度。

为减小误差放大器件的噪声,由稳压源为其提供供电电源。图 1 中稳压源选择 LM117,由于器件对输入和输出电压的要求是 $3\text{ V} \leq U_{\text{IN}} - U_{\text{OUT}} \leq 40\text{ V}$,供电电源 12 V,设计输出 +8.9 V 电压提供给误差放大器(CC7F3140)。基准电压源选择 LM199,其标准输出 +6.95 V,通过电阻分压网络提供给 CC7F3140TC 一固定电压基准,采样电阻(电压取样)以此基准电压来调节回路中的电流。改变基准电压时,放大器输出电压会改变,调整电路选用晶体管调整内阻保证电路中电流的稳定性。

3.1 晶体管的选择

本系统中选择大功率晶体管 3DD159D^[2] 作为驱动器件,其放大倍数是 50~100,集电极和发射极之间击穿电压为 200 V,最大功率为 50 W。要求电路中通过灯的电流约为 1.1 A,因此 3DD159D 基极电流要求大于 22 mA,而放大器最大输出电流为 10 mA,因此需要选择复合管的结构,用 3DG111C 推动 3DD159D,因为 3DG111C 放大倍数为 80~120 倍,因此基极电流最大只需 0.275 mA 就可以,其集电极和发射极之间击穿电压为 45 V。 I_{CM} 为 50 mA, P_{CM} 为 0.5 W,完全满足推动要求。由于 3DD159D 的饱和压降 U_{CES} 为 1.2 V,而 3DG111C 的饱和压降 U_{CES} 为 0.3

V,为达到稳流的目的,要求复合管的基极和发射级的压差 $> 1.5\text{ V}$,因此放大器选择大阻值的反馈电阻。但由于阻值在 1 M Ω 以上的电阻精度较差,为提高放大倍数,在放大电路中采用 T 型反馈电阻网络。这时放大倍数 $K = R_{89}/R_6$ (注 $R_{89} = R_8 + R_9 + R_8 \times R_9/R_{10}$)。

3.2 软启动电路

由于系统要求定标灯泡至少能够正常工作两年,为不使灯泡在开机瞬间钨丝温度产生剧烈的变化,延长灯泡的寿命,需要对启动时间进行处理。本系统选择小功率的晶体管 PNP 型 3CG110C,其放大倍数为 55~80, P_{CM} 为 300 mW,集电极和发射极之间击穿电压为 45 V。在 3CG110C 的基极和地之间加入钽电容,通电开始,放大器 CC7F3140TC 处于饱和状态,输出电压接近供电电源电压,此时电流通过 3CG110C 的 EB 级 PN 结给电容充电,随着电容充电电压的升高, R_{21} 输出端电压也在逐渐升高, R_{21} 输入端电压在逐渐降低,电流一部分流向 3CG110C,一部分流向 3DG111C 的基极。同时 CC7F3140TC 也处于时时调整状态,最后从饱和区稳定到放大区,电路中电流稳定,电容充电也会很快结束,从而使灯逐渐亮起来。当断电的一瞬间,二极管通过和电源连接端泄放电容储存的电压。二极管导通电压 0.3 V 则需要通过电容的漏电流泄放掉,图 2 是线性软启动电路原理图。

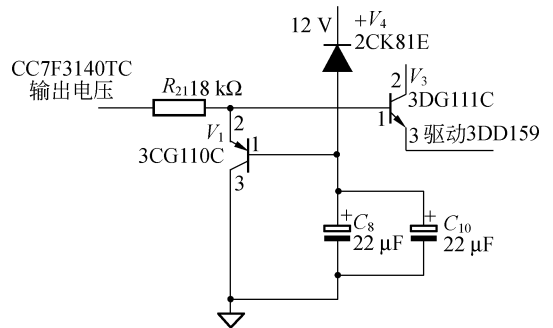


图 2 软启动电路

Fig. 2 Soft start circuit

3.3 其它元器件的选择

根据经验公式,采样电阻的选择在 1 Ω 以内,约等于电路中电流的倒数,根据工程需要,电路中电流要求达到 1~1.1 A 左右,因此选择 0.75 Ω

的电阻。由于流过采样电阻的电流随着基准电压的改变而改变,当电路中基准电压不变时,影响电路中电流的稳定性因素主要是采样电阻。选择

RX76-2 型电阻,具有 $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 的低温漂性能。在整个电路中选择 RJK52 系列精密电阻,其温度系数为 $25 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,精度选择为 1%。

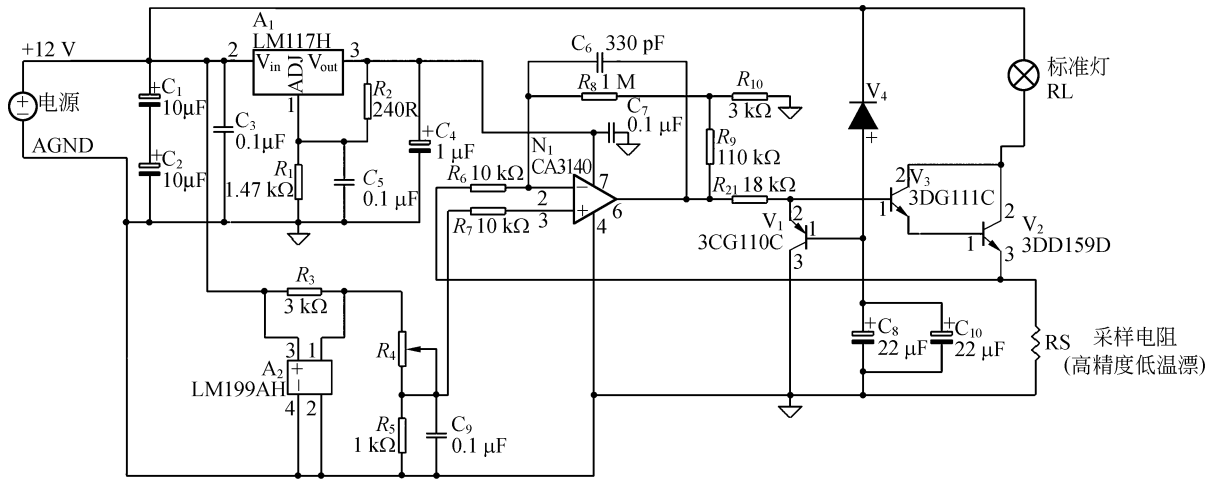


图 3 驱动定标灯工作原理图

Fig. 3 Schematic diagram of driving calibration lamp

4 性能分析

直流稳流电源有稳流系数和电阻两项主要性能参数^[3]。稳流系数是指稳流电源在输入电压变化时对电源输出电流的稳定性的影响,也叫电流调整率。内阻指的是稳流电源在负载变化时对稳流电源稳定性的影响。稳流系数越小,稳定性越好。内阻越大,电源的稳定性就越好。电压放大倍数 K 越大,稳定系数越小,内阻越大。因此为提高稳定性,可以提高放大倍数。

从电路图可看出,流过负载 R_L 的电流不完全等同于流过取样电阻 R_S 的电流,有如下关系:

$$I_S = I_L + I_{B1}.$$

由于晶体管为复合形式,所以 $I_{B1} \ll I_L$,几乎可忽略,为了简化下面的分析,在此假定:

$$I_S = I_L.$$

假定晶体管电压放大因数 μ_{T1} 和 μ_{T2} 为 300 (一般晶体管都大于此值),则两管复合后的等效 μ_T 可近似为:

$$\frac{1}{\mu_T} \approx \frac{1}{\mu_{T1}} + \frac{1}{\mu_{T2}},$$

得 μ_T 约为 150。计算可得稳流系数 S_1 近似为:

$$S_1 \approx \frac{U_i}{K \mu_T U_s}$$

式中, U_i 为输入电压 +12 V; U_s 为取样电阻 R_S 上的压降,约 0.825 V。

通过 T 型反馈电阻网络设计成 $K=3411$,代入计算最终得 $S_1=0.000028$ 。

稳流源输出电阻:

$$R_o \approx \mu_T K R_s,$$

其中 R_s 取值 0.75 Ω 。

有关参数代入计算得稳流源输出电阻 R_o 约为 383.7 K。下面将对电路中的各个参数对稳流电路中的稳流精度影响加以介绍,确定稳流精度能否确定到 0.16%。

4.1 输入电压和负载的影响

(1) 供电电源 +12 V 是通过 DC/DC 模块提供,在此考虑输入电压有 $\Delta U_i = \pm 0.4$ V 的波动,根据定义,稳流系数表示为:

$$S_1 = \frac{\Delta I_L}{I_L} \frac{\Delta U_i}{U_i}, \quad (1)$$

式中: I_L 为流过负载溴钨灯 R_L 的电流,则

$$\frac{\Delta I_L}{I_L} = S_1 \frac{\Delta U_i}{U_i} = 0.000028 \frac{0.4}{12} = 0.00009\%.$$

(2) 在输入电压和环境温度不变时,输出电阻表示为:

$$R_0 = -\frac{\Delta U_L}{\Delta I_L}, \quad (2)$$

式中: ΔU_L 为溴钨灯的阻值 R_L 变化引起其上压降的变化, 如以 1 V 计(即 R_L 变化了约 10%, 实际不会有如此大变化), 则

$$\Delta I_L = \frac{\Delta U_L}{R_0} = \frac{1}{383\ 700} = 0.000\ 002\ 6,$$

$$\frac{\Delta I_L}{I_L} = \frac{0.000\ 002\ 6}{1.1} = 0.000\ 4\% .$$

4.2 温度对电源性能的影响

通过稳流系数 S_I 和输出电阻 R_0 分析了输入电压 U_i 和负载 R_L 变化时, 电源输出电流稳定性情况^[4]。

实际上, 组成电源的每个元件由于受温度等因素的影响其参数都不会绝对稳定。因此, 即使输入电压 U_i 和负载 R_L 不变, 输出电流也会有微小变化。

影响该稳流电路输出稳定性的内部因数主要有基准电源、误差放大器 and 取样电阻三个环节。考虑该电路主要是受环境温度的影响, 因此对元器件的选用主要从其温度特性加以考虑, 所选用的关键器件以低温漂为主要依据。

基准电压源使用 LM199, 取样电阻 R_S 选用 RX76-2 型, 都具有 $5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 的低温漂性能; 分压网络电阻可选用 RJK 同系列电阻, 虽然其温度特性较以上两种元件稍差, 但由于其组成的是分压网络, 只要温度特性一致, 则分压比不会随温度的变化而有大的改变。

运放的低频噪声和输入失调电压 U_{os} 最终要反映到输出上, CC7F3140TC 其输入失调电压最大为 2 mV, 输入失调电压温漂 $6\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, 输入噪声电压密度 $40\ \text{nV}/(\text{Hz})^{1/2}$ ($f_0 = 1\ \text{kHz}$)。

现以温度变化 $20\ ^\circ\text{C}$ 为例:

(1) 基准电压 E_B 的影响

根据放大器正负输入端虚短路的原理, 在正输入端基准电压改变了 ΔE_B , 则在负输入端也产生 ΔE_B 的变化:

$$\Delta E_B = \Delta U_O \frac{R_6}{R_6 + R_{89}} + \Delta U_S \frac{R_{89}}{R_6 + R_{89}}, \quad (3)$$

式中: ΔU_O —误差放大器输出电压变化值; ΔU_S —取样电阻 R_S ($=0.75$) 上压降改变值。

$$\Delta U_S = \Delta I_S R_S, \quad (4)$$

式中: ΔI_S —取样电阻 R_S 上的变化电流。

本电路中, 流过取样电阻 R_S 上的电流 I_S 为流过负载 R_L 的电流 I_L 与复合三极管 T_1 基极电流 I_{BT1} 之和, 由于 $I_{BT1} \ll I_L$, 因此 $I_L = I_S$, 同理:

$$\Delta I_L = \Delta I_S$$

$$\Delta I_L = \frac{\Delta U_O - \Delta U_S}{R_{21}} \beta_T, \quad (5)$$

式中: β_T 为三极管 3DG111C 和 3DD159D 复合电流放大系数。

假设 $\beta_T = \beta_1 \beta_2 = 10\ 000$ [β_1 (80~120)、 β_2 (50~100)]

$$\Delta U_S = \frac{\Delta U_O - \Delta U_S}{R_{21}} \beta_T R_S, \quad (6)$$

$$\Delta U_O = \frac{\Delta U_S R_{21}}{\beta_T R_S} + \Delta U_S, \quad (7)$$

代入式(3)

$$\Delta E_B = \left(\frac{\Delta U_S R_{21}}{\beta_T R_S} + \Delta U_S \right) \frac{R_6}{R_6 + R_{89}} + \Delta U_S \frac{R_{89}}{R_6 + R_{89}}$$

$$\Delta E_B = \Delta U_S \left[\frac{R_{21} R_6}{\beta_T R_S (R_{89} + R_6)} + 1 \right], \quad (8)$$

式(4)与(8)合并, 得

$$\Delta I_L = \Delta E_B / R_S \left[\frac{R_{21} R_6}{\beta_T R_S (R_6 + R_{89})} + 1 \right], \quad (9)$$

有关参数代入, 得

$$\Delta I_L = \frac{\Delta E_B}{0.751}. \quad (10)$$

该电路经分压后得到基准电压约为 0.825 V, 在温度上升 $20\ ^\circ\text{C}$ 的情况下, 电压变化:

$$\Delta E_B = 8.25 \times 10^{-5},$$

$$\Delta I_L = 1.10 / 10^{-4},$$

从而,

$$\Delta I_L / I_L = 1.46 \times 10^{-4},$$

即电流相对变化了 0.015%。

(2) 取样电阻 R_S 的影响

同上, 根据放大器正负输入端虚短的原理, 放大器的负端输入电压等于基准电压 E_B 。当基准电压不变, R_S 变化, 取样电压 U_S 随之变化, 破坏了放大器的平衡工作条件, 为了维持平衡状态, 经放大闭环反馈, 使得输出电流变化 ΔI_L , 控制放大器负端输入电压仍然近似等于 E_B , 即:

$$\Delta U_O \frac{R_6}{R_6 + R_{89}} + \Delta U_S \frac{R_{89}}{R_6 + R_{89}} = \Delta E_B = 0,$$

$$\Delta U_o = \frac{\Delta U_s R_{21}}{\beta_T R_s} + \Delta U_s,$$

$$\Delta U_s = 0$$

由于

$$U_s = (I_L + \Delta I_L)(R_s + \Delta R_s). \quad (11)$$

在温度上升 20 ℃ 的情况下, R_s 的阻值增加了:

$$\Delta R_s = 0.75 \times 20 \times 5 \times 10^{-6} = 7.5 \times 10^{-5},$$

所以

$$\Delta I_L = \frac{0.8175}{0.75 + 7.5 \times 10^{-5}} - 1.090 = -1.09 \times 10^{-4},$$

$$\frac{\Delta I_L}{I_L} = \frac{1.09 \times 10^{-4}}{1.09} = 1 \times 10^{-4},$$

即电流相对减小了 0.01%。

(3) 放大器对稳流性能的影响

放大器对输出电流的影响因素主要是其零点漂移和低频噪声,这相当于在 E_B 上叠加了一个等效的漂移和噪声电压 $e = \Delta E_B$ 。由于 CC7F3140TC 的输入噪声电压密度为 40 nV/(Hz)^{1/2} ($f_0 = 1$ kHz) 很小,故在此重点分析输入失调电压温漂对稳流性能的影响。

在温度变化 20 ℃ 的情况下,相当于 ΔE_B 改变了:

$$\Delta E_B = 20 \times 6 \times 10^{-6}.$$

代入式(10)得:

$$\Delta I_L = \frac{\Delta E_B}{0.751} = \frac{20 \times 6 \times 10^{-6}}{0.751} = 1.6 \times 10^{-4},$$

$$\frac{\Delta I_L}{I_L} = \frac{1.6 \times 10^{-4}}{1.09} = 1.46 \times 10^{-4},$$

即电流相对改变了 0.015%。综合以上分析,在温度变化 20 ℃ 的范围内,从极端的情况看(如基准电压和取样电阻的温度向反方向变化),输出电流的不稳定性可控制在 0.041%。以上只是理论分析,还涉及到其他不确定因素的影响,但该电路在元器件性能参数保证的前提下,输出电流的不稳定性控制在 0.16% 以内是可实现的。

5 试验结果与分析

5.1 试验数据

常温常压下,通过多功能数据采集器采集的数据经整理如表 1~表 4 所示。

表 1 第一次测试点灯时间和稳流源电流值对应表

Tab.1 Lighting time and values of current stabilized source in the first test

t/s	5	10	15	20	25	60	120	180	...	680	880	1 080	1 280
I/A	0	0.303 6	0.628 3	0.910 3	1.081	1.080	1.081 2	1.081 4	...	1.081 4	1.081 5	1.081 4	1.081 6

表 2 第二次测试点灯时间和稳流源电流值对应表

Tab.2 Lighting time and values of current stabilized source in the second test

t/s	5	10	15	20	25	60	120	180	...	680	880	1 080	1 280
I/A	0	0.410 6	0.687 6	0.954 8	1.080 9	1.081 2	1.081 4	1.081 4	...	1.081 7	1.081 6	1.081 7	1.081 7

表 3 第三次测试点灯时间和稳流源电流值对应表

Tab.3 Lighting time and values of current stabilized source in the third test

t/s	5	10	15	20	25	60	120	180	...	680	880	1 080	1 280
I/A	0	0.391 5	0.699 2	0.977 4	1.080 6	1.080 9	1.812	1.081 4	...	1.081 6	1.081 7	1.061 6	1.081 7

表 4 输入电路板电压值和稳流源电流值对应表

Tab.4 Input voltage and values of current stabilized source

U/V	11	11.5	11.8	11.9	12	12.5	12.8	13
I/A	1.081 4	1.081 6	1.081 7	1.081 6	1.081 7	1.081 6	1.081 7	1.081 6

从上述表格可以看出,标准灯软启动时间为 20 s,20 s 后进入电流稳定状态,5 s 采样,在每隔 3 min 进行数据整理,其稳定度达到 0.037%,把重复误差加入其稳定度可以达到 0.043%。说明电路具有良好的稳定性和重复性。

5.2 电路局限性

电路中电流的调试范围:由于灯最大电流不超过 1.2 A,电流过小会使 3DD159 集电极和发射极之间的压差很大,热量增加。因此,整个电路根据工程需要电流能够稳定的区间是 0.8~1.2 A,这是器件原因导致的电路局限性。当然可以改变负载的耐流能力,电路中的电流调整范围会适当增大。

参考文献:

- [1] 闻春教. 具有软启动特性的标准灯驱动电源[J]. 中国照明电器,2002,2(9):22-25.
WEN CH A. With the soft start up characteristic standard lamp to actuate power source [J]. *Chinese Illumination Electric Appliance*, 2002, 2(9): 22-25. (in Chinese)
- [2] 李锦春. 新编常用晶体三级管手册[M]. 北京:人民邮电出版社,1991.
LI J CH. *Newly Organized Commonly Used Crystal Third-level Tube Handbook* [M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Publishing House,1991. (in Chinese)
- [3] 曲学基,王增福,曲敬锐. 稳定电源实用手册[M]. 北京:电子工业出版社,1994.
QU X J, WANG Z F, QU J K. *Regulated Supply Practical Guide* [M]. Beijing: Electronics Industry Publishing House,1994. (in Chinese)
- [4] 毛英泰. 误差理论与精度分析[M]. 北京:国防工业出版社.
MAO Y T. *Theory of Error and Precision and Analysis* [M]. Beijing: National Defense Industry Press. (in Chinese)
- [5] 刑进,王淑荣,李福田. 紫外-真空紫外辐射标准光源

6 结 论

本文针对星上定标积分球系统要求光的辐亮度变化优于 1%,进而要求提供卤钨灯稳流电源的电流变化优于 0.16%,设计了一种控制卤钨灯发光强度稳定性的稳流电源。该稳流电源采用的元器件较少,且等级较高,温漂很小。运用 PNP 晶体管 3CG110 的 E、B 之间 PN 结的漏电流对钽电容进行充电,使软启动时间达到了 30 s。研究了输入电压负载、温度等参数对电源性能的影响,并对稳流源电路进行了测试。测试结果表明,设计的稳流电源的电流稳定性达到 0.037%,增加重复性后,电流稳定性为 0.043%,从电子学的角度考虑,已满足了星上定标的要求。此积分球系统已成功应用于某型号成像光谱仪的星上定标。

- 的比对 [J]. 光学 精密工程,2004,12(4):373-379.
XING J, WANG SH R, LI F T. Comparisons between radiometric scales on UV-VUV radiant standard light sources [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4):373-379. (in Chinese)
- [6] 刑进,王淑荣,李福田. 利用积分球光源定标空间紫外遥感光谱辐射计 [J]. 光学 精密工程,2006,14(2):185-190.
XING J, WANG SH R, LI F T. Spectral radiance responsivity calibration of ultraviolet remote sensing spectro-radiometer in space using three integrating sphere[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(2):185-190. (in Chinese)
- [7] 李幼平,禹秉熙,王玉鹏,等. 成像光谱仪辐射定标影响量的测量链与不确定度 [J]. 光学 精密工程,2006,14(5):822-828.
LI Y P, YU B X, WANG Y P, et al.. Measurement chain of influence quantities and uncertainty of radiometric calibration for imaging spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(5):822-828. (in Chinese)
- [8] SPERFELD P, STOCK K D, RAATZ K H, et al.. Characterization and use of deuterium lamps as transfer standards of spectral irradiance [J]. *Metrologia*,2003,40:111-114.

作者简介:



李东景 (1981—),男,吉林长春人,助理研究员,主要从事空间遥感技术与辐射定标方面的研究。E-mail: ldj880@tom.com



王小朋 (1978—),男,山东济南人,助理研究员,2001年,2007年于山东大学分别获得学士、硕士学位,主要从事空间电源与控制系统方面的研究。E-mail: sdwangxp@163.com

导师简介:



于平 (1963—),男,辽宁大连人,研究员,硕士生导师,1985年于长春光机学院获得学士学位,主要从事空间光学遥感器嵌入式系统的设计。E-mail: yuping0203@163.com

● 下期预告

超音速光学导引头整流罩优化

魏群^{1,2},艾兴乔^{1,2},姜湖海^{1,2},宣明¹,贾宏光¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

导引头整流罩形状既影响导引头内光学系统成像质量,同时也影响导弹总体飞行阻力,进而影响导弹射程。整流罩形状分外曲线与内曲线两部分,以优化导引头整流罩内外曲线形状为目的,本文首先进行了 CFD 数值仿真与风动试验对比,得到准确的仿真参数,在此基础上,通过 CFD 数值仿真得到整流罩外曲线长径比与整流罩阻力系数的归一化关系函数,采用光程差的评价方法得到整流罩外曲线长径比与成像质量的归一化关系函数,在确定空气动力学性能与成像质量权重后,得到优化后的整流罩外曲线,外曲线为 $R=37.5, C=-0.75$ 的椭圆。在获得外曲线形状的基础上,以光线经过整流罩后偏折最小为优化目标,运用光线追迹方法,建立优化函数,最终得到优化的整流罩内曲线,内曲线为 $R=33.31, c=-0.78$ 的椭圆。至此,得到整流罩的内外曲线方程,通过分析,这种优化的整流罩及有良好的空气动力学性能,也有良好的光学性能。