应用技术

星上定标积分球系统的设计

李东景^{1,2},于 平¹,齐心达¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

要: 星上定标系统是有效监测遥感器辐射响应性能的重要技术构成,成像光谱仪技术的 摘 发展对星上定标系统提出了更高的要求,包括系统小型轻量化及稳定性等技术难题。提出 种较完 整的技术方案,以内置卤钨灯为光源,用小型化的积分球为匀光体,采用色温校正技术调节其光谱 输出,内置安装标准辐射计监视系统的稳定性。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| 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,并对稳流源电路进行了测试,通过改变三级管增益的方法调整 软启动时间,得到电流稳定性误差为0.043%。并对卤钨灯的发光强度进行定量化测量,设计了 种 从光电流转换为频率输出的高性能转换电路。测试系统输出频率的稳定性为0.645%。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:遥感;星上定标积分球;稳流源;标准探测器 中图分类号: 0472+.8 文献标识码: A 文章编号: 1005-488x(2011)01-0057-06

The Design of Spaceborne Calibration Intergrating Sphere System

Li Dongjing, Yu Ping, Qi Xinda

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

2. Gradute University of Chinese Academy of Science of Sciences, Beijing 100039, CHN)

Abstract: On-board calibration system is an important technical component for effectively monitoring the performance of radiometric response of remote sensors. With the development of hyper spectral technique, more advanced on-board calibration system and more high performance index are required, which include challenging problems such as system miniaturization, lightweight and stability. A complete technical solutions to above problems are proposed in this paper, which included halogen lamp as the light source, a miniaturization integrating sphere used as uniform body, color temperature correction technique applied for improving the spectral distribution and a standard radiometer fixed interiorly for monitoring the stability of the system. In order to improve the accuracy of on-board calibration, a kind of stabilized power supply for the tungsten-halogen lamps are developed. The operating principle and current stabilized circuit with the soft start characteristic are introduced. Tested steady flow circuit source, the current s stability can be up to 0.043% by changing third-level tube s plus to adjust the time of soft start, com-

收稿日期: 2010-09-12

作者简介:李东景(1981—),男,硕士研究生,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: 1dj880@ tom.com)

ldj880@ tom.com/ 平(1963—),男,研究员,硕士生导师,主要从事空间光学遥感器嵌入式系统的设计; 994-2012齐心迭(1980—),第,微尘研究生,助理研究贵, 呈要从事型简嵌入式研究。reserved.

第31卷

puting the value of the current, and measured the luminous intensity. A kind of high-performance conversion circuit which converted a photocurrent to frequency are designed, the frequency stability of system is 0.645%. The integrating sphere has been successfully applied to a type of satellite imaging pectrometer.

Key words: remote sensing; on-board calibration; current stabilized; standard detector

引言

成像光谱仪发射及在轨运行的过程中,其光学 和机械结构一定会发生某些改变,为得到准确的光 谱图像数据,必须对这些改变进行校正,因此要求在 实验室定标的基础上,还要增加对成像光谱仪进行 星上定标^{14]}。星上辐射定标已成为空间相机的一个 重要关键技术,正在向高精度、长寿命、高稳定度和 高可靠性等方面发展。将星上全系统、全口径的绝对 定标和实时相对定标相结合,已成为提高辐射定标 精度的重要手段。空间相机星上辐射定标的定标源 一般采用标准灯、发光二极管、高温黑体、常温黑体 等人工辐射源和太阳、月亮、云层、冷空间等自然辐 射源。

由于空间相机技术的发展,对星上定标系统的 设计面临如下难题:一方面,星上定标光源要在体 积小、重量轻、功耗低的前提下,具备高精度的标准 参照特性来满足确定光谱范围的相对与绝对辐射定 标需求;另一方面,成像光谱仪的特点要求定标光 源有合适的光谱分布,即在整个太阳反射波段有高 光谱并适应于各波段动态范围的能量输出,使其在 上百个连续波段上都有较高的定标精度;另外,星上 定标光源要性能稳定、工作可靠。

1 星上定标方式简介

星上定标器可分为太阳或月亮定标、黑体定标 和灯定标等几类。可见光、近红外和短波红外谱段的 定标多用于灯定标和太阳或月亮定标,遥感器中波 红外和长波红外谱段多用于黑体定标。

1) 灯定标

灯定标是指采用定标灯作为星上定标的标准 源,对遥感器进行光谱和辐射定标。灯定标中的定 标周期是每个扫描周期一次,精度在2%以内,部分 或全部的标准光路,尽可能短的上升时间和稳定时 间,体积小,功耗低,能够满足仪器光谱区域和辐射 灵敏度的要求。 黑体定标是指用星载黑体作为星上定标的标定 源。由于黑体的光谱辐射量和温度之间有一定的对 应关系,可以用来作标准源。使用时,只需使用温度 探测器对黑体的温度进行简单的测量就可得到覆盖 整个仪器入射口径的黑体温度,但黑体的选择以及 精确的温控是星载黑体的难点。

3) 太阳或月亮定标

太阳定标是通过引入太阳辐射作为星上定标的 标准源。但是一年四季都能接收到太阳辐射是不现 实的,因此,太阳定标器输出的辐亮度可能会不稳 定。要求在全年太阳对卫星照射角不同的情况下,太 阳定标器输出的辐亮度一致,且太阳定标器能以全 视场、全孔径和点对点的方式通过遥感器的成像系 统,使探测器焦平面内的所有像元得到均匀的光照, 定标工作点要在遥感器响应动态范围内的适当点 上。

2 某型号星上定标系统设计概述

2.1 星上定标方案

星上定标采用卤钨灯照射到积分球输出均匀面 光源,如图1所示。钕镨滤光片放置在星上定标积分 球出口处,用它的特征吸收谱线进行波长定标。滤光 片放置在挡住积分球的1/2出口处,另一半放置定 标窗片,用来固定滤光片;定标光筒的作用是将积分 球出口的面光源经过望远光学系统成像在光谱仪狭 缝处。定标光筒以此光路图为设计依据,固定光学系 统中所需的三片镜子,并且能够调整镜子之间,镜子



图1 定标原理图

©2)黑体定标China Academic Journal Electronic Publishing Hofige.1AlScheduaticediagrach of leadjubrationw.cnki.net

与光栏之间的相对位置。

2.2 积分球的设计

从卤钨灯发出的光经积分球的漫反射球面输出 均匀光,具有良好面均匀性,近似朗伯性的面光源在 积分球出口处会形成,其出射均匀性的优劣决定着 星上定标的准确度。为获得良好的均匀性,要求积分 球的尺寸、质量、涂层、内径和开口尺寸等参数都要 进行优化设计。

积分球辐射输出和匀光效果的重要光学参数受 到积分球内壁涂层的反射率和朗伯性的影响。同时 空间遥感器的特点要求星上定标积分球系统功耗 低、工作谱段宽,因此要求积分球涂层在整个太阳 反射波段具有良好的反射特性。设计时选用目前已 知最高反射率和最具朗伯性与稳定性的聚四氟乙烯 材料为积分匀光器,其具有光源利用率高、出射均匀 和稳定性好的特点。

出射面光源的尺寸、亮度和品质受积分球内径 的影响,而积分球内径尺寸又受到出射面光源大小 的制约,因此,积分球组件要求有内置安装卤钨灯和 监视用的探测器;兼顾考虑小型化和空间的限制, 将其设计成跑道形,这样会使出口面的利用效率提 高。为了提高小型化积分球的出射均匀性,考虑了两 个方面的设计,第一,将卤钨灯对称方式分布于积 分球出口的前表面,避免光源对球口的单次照明同 时减小了单次反射;第二,将卤钨灯下半部分放置于 积分球涂层内,保持灯丝面与内球面平齐,此安装 方式可以有效地消除出射的非均匀性,如图2所示。





Fig. 2 Sketch of light source component structure

灯泡采用石英卤钨灯,具有长期稳定性好的特点,被普遍用于辐射标准传递。单个灯泡的额定功率为10 w,共两只灯泡组成一对点光源。灯泡的灯丝位于积分球的内表面上。为调整光源的色温接近太阳光谱分布,采用耐热稳定的短波塞本无衰减的

GRB 材料制作成滤光罩置于灯泡前进行滤光。光源 灯座采用聚四氟乙烯材料制作,具有稳定、耐热、抗 辐射和一定的柔性特点,易于灯泡的固定和安装。

3 光源驱动器的设计

标准灯发光强度的稳定性和准确性除了与灯具 本身质量有关外,还取决于供电电源的稳定性和准 确性^[9-12]。经验表明: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,我们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。

3.1 原理设计

设计的带软启动功能的稳流源设计原理框图如 图3 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 3 稳流源电路原理框图 Fig. 3 Block diagram of current stabilized circuit

 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 + 6.95V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。

由于要求能够提供1A左右的电流,故一般的 晶体管达不到驱动的要求,通过计算选择合适的功 率晶体管作为驱动器件。经过计算选择3DD159和 3CG110组成了达林顿管作为驱动器件。

3.2 软启动电路

为避免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。选 择小功率的晶体管PNP型3CG110C,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,R21输出端电压 也在逐渐升高,R21输入端电压在逐渐降低,电流一 部分流向3CG110C,同时一部分流向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。图4 是软启动 电路原理图。



图4 软启动电路

Fig. 4 Soft start circuit

4 星上定标系统探测器

4.1 探测器的光机设计

标准探测器是以硅陷阱探测器为基础而研制的。标准探测器直接安装在积分球壳的侧壁与积分球成为554%。0探测器的核心是由运片硅光电----极管

构成的陷阱式光辐射探测器。陷阱探测器的工作原 理如图5所示。







入射光在陷阱探测器的3个光敏面上经历了5 次反射,通过设计可以看到经过反射后光会从原路 返回。此设计的优点是:降低了总反射率,由光敏面 反射损失所引起的测量不确定度也随之降低,甚至 可以忽略不计; PD1、PD2两片硅探测器的入射面互 相垂直,入射角相等,保证PD3硅探测器正入射,从 而保证了探测器对入射光的偏振状态是非敏感的, 光电转换效率和灵敏度经多次反射会得到提高。

为实现陷阱探测器(标准探测器)辐亮度测量, 需要加入视场光阑和孔径光阑,如图6所示。在陷阱 探测器接收光敏面前面固定位置处安装孔径光阑及 视场光阑,以限制探测器接收光通量面积及接收立 体角。



图 6 标准探测器的原理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of standard detector

探测器的输出电流(A)有如下公式:

$$I = {}_{\Delta\lambda} \Phi(\lambda) R \Phi(\lambda) d\lambda =$$

$${}_{\Delta\lambda} L(\lambda) A \Omega R \Phi(\lambda) d\lambda$$
(1)

其中 $Φ(\lambda)$ 是探测器实际接收到的光谱辐射功 率(W · nm⁻¹), RΦ 是陷阱探测器的功率响应率(V · W⁻¹), $L(\lambda)$ 是入射光谱辐亮度(W · m⁻² nm⁻¹ sr⁻¹), A 是探测器的视场面积(m²), Ω 是接收立体 角, $Δ\lambda$ 是由硅光电二极管的光谱响应带宽(nm)。 探测器测得的等效光谱辐亮度(W · m⁻² ·

成为199430 探测器的核心是由运标福光电证极管Publinming Tools为All rights reserved. http://www.cnki.net

$$L_{e}(\Delta\lambda) = \frac{\frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda}L(\lambda)A\Omega}{A\Omega}\frac{R \Phi(\lambda) d\lambda}{R\Phi(\lambda) d\lambda} = \frac{I}{A\Omega}\frac{I}{\Delta\lambda}R\Phi(\lambda) d\lambda \qquad (2)$$

根据图 6 所示的几何关系,视场面积 $_A = \pi(D \tan \theta_c)^2 = \pi (D c/H)^2$,接收立体角 $\Omega = \pi a^2/D^2$,因此可得几何量因子:

$$A \Omega = (\pi a c/H)^2$$
(3)

其中*a*、*c*、*H* 分别是孔径光阑半径、视场光阑半径和这两个光阑之间的距离。

4.2 探测器处理电路设计

探测器光电转换流程如下:首先硅光电二极管 产生的光电流信号经第一级 I/V 变换电路(AD549) 转换成负电压信号,再经第二级电压放大器(OP77) 输出正向电压。电压频率转换器(AD650)将模拟输 入信号转换为与其电压幅值对应的频率输出信号。 放大器最终满量程电压输出为10 V,根据设计要求 对应满量程频率输出为100 kHz。探测器处理电路原 理框图如图7 所示。为保证电路的稳定性和抗干扰 性,输入电路的电源都经稳压电路后再为电路中器 件供电。



图 7 探测器处理电路转换示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the I/V switching circuit

电压/频率转换器(VFC)的基本功能是将输入 的模拟电压(或电流)转换为与之成比例的脉冲串输 出,因此,一定时间内脉冲串的个数便代表了输入模 拟电压的大小。利用计数器对脉冲串进行计数,正是 利用 VFC 实现 ADC 的基本出发点。采用一种以电压/频率转换器 AD650 通过可编程器件 Isplsi1048 与计算机接口组成的高精度、高分辨率、抗干扰能力强的数据采集系统。

5 试验数据

5.1 光谱辐射亮度

采用标准灯-漫射板系统对星上定标积分球进 行预定标,图8 是积分球出口的辐亮度光谱。可以看 出,经色温校正后,红外光谱辐射得到了有效抑制, 定标光源与太阳光谱的匹配程度有了很大改善。其 与大气外太阳照射理想朗伯体辐亮度的比值如表1 所示,在可见近红外波段为0.3~0.9、短波红外波段 为0.5~0.9;经光谱调制后,积分球主备光源辐射 输出有很好的光谱一致性,两光源互换性较好,可 以备份工作,保障了系统工作的可靠性。



图 8 积分球出口的辐亮度光谱



5.2 探测器输出测试

对光源的稳定性和探测器的输出响应进行测 量。常温常压下,通过多功能数据采集器采集的数据 将数据整理,表2是第一次测试的数据(共测试3 次),图9是主份定标灯频率响应输出曲线。

表1 色温校正后积分球辐亮度与大气外太阳照射朗伯面辐亮度比较

Tab. 1 Radiance after color temperature correction comparison with exoatmosphere sun illuminate lambertian

\mathcal{N} n m	500	700	1 700	2 200
祝分球辐亮度/(mW・cm ⁻² ・μm ⁻¹ sr ⁻¹)	18.5	42.1	5. 42	2.3
大气外太阳照射朗伯面辐亮度/ $(_{mW} \cdot cm^{-2} \cdot \mu m^{-1} sr^{-1})$	61.9	47.1	6. 47	2.61
二者比值	0.30	0.89	0.84	0.88

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2 输出电流和输出频率与点灯时间的关系 Tab. 2 The ralation between current, frequency and lighting time

<i>t</i> / s	10	20	60	120	 600	880	1 0 8 0
<i>I/</i> A	0.7594	1.081	1.080	1.080	 1.079	1.079	1.079
f/Hz	3 037	67 479	69 172	72 828	 74 948	74 941	74 948



图9 积分球系统的输出稳定性

Fig. 9 Stability monitoring of integrating sphere system

标准灯软启动时间为20 s, 20 s 后进入电流稳定状态, 10 s 采样, 经过三次测试计算输出电流稳定性为0.043% (增加重复性误差),输出频率稳定性可达到0.645%,从而保证了系统对星上定标灯(输出频率)的变化率不超过1%的要求。

6 总 结

本文针对空间项目的特点,研究了一种新型的 星上定标积分球系统,采用色温校正技术解决了星 上定标器光谱一致性问题,并解决了积分球的出射 均匀性、稳定性等技术难题。结果表明,定标光源在 宽光谱范围内(太阳反射波段)与遥感成像时的辐射 水平量值相当、光谱匹配,适合可见-短波红外高光 谱遥感器定标应用。同时,介绍了星上定标标准光源 ——稳流源的设计思想、设计思路。其电流的稳定性 误差为0.043%。由三片硅光电二极管构成的陷阱式 光辐射探测器设计简单易行,安全可靠,收到了良好 的效果,经测试输出频率稳定性可达到0.645%。此 方法已经成功应用于某型号超光谱成像仪的星上定 标。

参考文献

- Rockey D E. Hi resolution imaging spectrometer(HIRIS): a major advance in imaging spectrometry [J]. Proc of SPIE, 1990, 1298: 93-104.
- [2] Xiong X, Chiang K, Esposito J, et al. MODIS on orbit calibration and characterization [J]. Metrologia, 2003, 40: 89–92.
- [3] Barry P, Segal C, Pearlman J, et al. Hyperion data collection: performance as sessment and science application [C]. IEEE, A erospace Conference Proceedings, California, USA, 2002, 20: 40–50.
- [4] Jarecke P, Yokoyama K, Barry P. On-orbit solar radiometrie calibration of the hyperion instrument[J]. Proc of SPIE, 2002, 4480: 225-230.
- [5] 徐晓峰,王 冀,张黎明,等. 航天积分球面均匀性检测研究
 [J].量子电子学报,2005,22(5):817-820.
- [6] 徐秋云,郑小兵,张 伟,等.利用可调谐激光的积分球光源 辐射特性测试[J].光学学报,2009,29(5):1310-1314.
- [7] 郑小兵,吴浩宇,章骏平,等.不确定度优于0.035%的绝对光 谱响应率标准探测器[J].光学学报,2001,21(6):749-752.
- [8] 陈 风,李 双,王 骥,等.高精度光电探测器的线性测量
 [J].光学学报,2008,28(5):889-893.
- [9] 闻春敖. 具有软启动特性的标准灯驱动电源[J]. 中国照明电器, 2002, 9(2): 22-25.
- [10] 曲学基,王增福,曲敬铠.稳定电源实用手册[M].北京:电子 工业出版社.1994.
- [11] 刑 进, 王淑荣, 李福田. 紫外-真空紫外辐射标准光源的比对
 [J]. 光学精密工程, 2004, 12(4); 373-379.
- [12] 李东景,于 平,王小朋.星上定标积分球标准光源-稳流源驱动器的研制[J].光学精密工程,2010,18(1);212-219.
- [13] 李东景,于 平,李先锋,等.星上定标系统探测器高精度信号处理电路的实现[J].中国光学与应用光学,2009,3(2);211-217.