大气遥感远紫外光谱仪绝对光谱辐照度响应度定标方法研究

于磊,林冠宇,陈斌

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 主要针对可应用于空间高层大气遥感的远紫外光谱仪的光谱辐照度响应度定标方法进行研究。针 对远紫外波段光谱测试标准装置少,实验系统所需真空度高,实验稳定性难以维持,传统漫反射板和积分球 辐亮度定标方法在远紫外波段局限性大、难以利用等特点,研究了适用于远紫外光谱仪器的光谱辐照度绝 对辐射定标方法,搭建了相应的真空实验系统,以一台远紫外光谱仪原理样机为对象对研究方法进行了实 验验证。实验系统以标准氘灯、真空紫外单色仪和准直系统组成照射系统,将出射准直光辐照度用标准探测 器进行标定,三者共同组成了标准光谱辐照度光源;利用该光源照射原理样机并读出相应信号,最终获得光 谱辐照度响应度,从而实现了利用标准探测器进行照度传递的远紫外光谱仪器绝对光谱辐射定标,有效的 进行了仪器定标。该方法定标不确定度约为 7.7%,对远紫外波段空间高层大气遥感光谱仪的地面辐射定标 研究具有重要意义。

关键词 电离层; 远紫外光谱仪; 光谱辐照度; 辐射定标 中图分类号: O433.1 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2013)01-0246-04

引 言

在未来空间环境和空间天气因果链的研究观测中,高层 大气观测都是重要的组成部分。用于高层大气遥感的远紫外 成像光谱仪可以获取十分重要的信息^[1],国外多个相关应用 仪器已经证明高层大气粒子相关光谱信息的获取对人类具有 重要意义。通过测量各光谱辐射,反演计算出各种粒子的分 布和含量,可以实现对高层大气的实时检测,以帮助人类更 好的进行空间环境天气预报。为了保证获取光谱反演信息的 准确性,需要对光谱仪进行精确的辐射定标。

高层大气实时变化很快,辐射波段信号微弱且完全被低 层大气吸收,需要在地面进行精确的辐射定标以确保仪器的 精度。但是,在地面对相应仪器进行辐射响应度定标具有很 大的实现难度^[2-4],这是由以下几个原因造成的:第一,在地 面进行模拟辐射响应度定标时,光源出射的远紫外光谱被大 气完全吸收,需要定标过程在高真空度(10⁻³ Pa 以上)下才 能完成。如果使用辐亮度标定方法,就必须将光源、积分球 或漫反板置入真空系统内,实施起来非常困难,若待定标仪 器口径较大则相应的实验系统也必须相应增大,不利于实验 的进行。第二,目前可应用于远紫外波段光谱传输的材料传 输效率非常低,使用辐亮度方法进行亮度标定则积分球或漫 反板均无法保证定标时所需要的能量,使得最终探测器等接 收仪器无法响应或响应稳定度极差,因此地面定标必须寻找 其他标定方式对仪器进行标定。第三,可应用于远紫外波段 定标测试的标准仪器如标准灯,标准真空紫外单色仪等较 少,大部分需从国外进口,且这些标准仪器相较其他波段的 标准仪器其自身的不确定度较高,这些问题都会使定标结果 精度受到影响。受方法和仪器的制约,目前国内在该方面的 研究尚不够深入,针对远紫外波段仪器尤其是星载仪器还没 有形成规范的定标理论和工程流程,国外相关研究已经有深 入的开展^[5-7]。

综上所述,我们需要在方法,定标系统和定标精度等方 面对远紫外波段光谱绝对辐射定标技术进行深入的研究,以 为后续相关仪器在空间遥感领域的应用奠定良好的基础。本 文主要研究了远紫外光谱辐照度定标方法和技术,解决了远 紫外光谱仪器难以进行亮度标定的问题,从而提高了相关光 谱定标的精度和定标稳定性。

1 远紫外光谱辐照度定标原理与方法

1.1 定标原理与系统组成

远紫外波段信号微弱,且无合适的透射材料可以使用, 能够应用的反射材料传输效率很低,在115~135 nm 的短波

作者简介:于 磊,1984年生,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所助理研究员

e-mail: top1gods@mail.ustc.edu.cn

收稿日期: 2012-06-27, 修订日期: 2012-09-08

基金项目:国家自然科学基金项目(41074126)资助

处甚至不足 50%,同时反射材料因照射和放置而产生的衰减 很大,导致其反射率无法保持十分稳定,因此难以满足辐亮 度定标所需的能量要求,故较难使用积分球和漫反板进行标 准辐亮度标定,这就增加了定标方法的难度,需要使用其他 方法进行代替。

由于空间遥感仪器在进行空间探测时,探测目标所发出 的光是平行光,为了使定标条件和待观测条件趋向于一致, 可以考虑使用平行光光源来对仪器进行照射,从而对仪器的 光谱辐射响应度进行标定,即绝对标准辐照度定标^[8,9]。在 远紫外波段得到广泛使用的光谱辐射传递标准光源是氘 灯^[10]。这里我们选择了英国 Cathoden 公司制造的 V03 型氟 化镁窗口的氘灯,该灯的工作波段为 115~380 nm,工作电 流为 300 mA, 工作电压 70 V, 功率为 30 W, 采用直热式阴 极,发光区域直径为 1.04 mm,在预热 0.5 h 后,其稳定性 可以优于 0. 03% h⁻¹。由于氘灯出射的光谱为连续谱,因此 需要使用相应的标准单色仪对连续谱进行分色使各谱线分 立。对标准氘灯配合以工作波段为 $115 \sim 380$ nm 的 Czerny-Turner 真空紫外单色仪,该单色仪可通过旋转光栅完成波长 切换,其波长重复性为 0. 01 nm,波长精度为 0. 02 nm,光谱 分辨率优于 0.1 nm, 单色仪出射光为出缝发射出的发散光, 利用准直系统将该发散光转化为平行光。这样,氘灯、单色 仪和准直系统就共同构成了一套辐照度光源系统,其出射光 **束直径为** 20 mm。

使用 NIST 标定过的标准探测器对该辐照度光源系统进 行标定^[11-12],将标准探测器置于该光源系统之后 1 m 处,通 过标准探测器的响应度标准和读出信号值获得光源系统的照 度标准,从而将标准探测器标准传递给该系统,原理图如图 1 所示。



transfer of light source system

依图 1 搭建系统完毕后,使用标准探测器对远紫外波段 信号进行数据采集,由于标准探测器本身具有标准量子效率 值曲线,从而可以根据量子效率值曲线和所采集的信号值对 出射光照度响应度 *R*(λ)进行计算。量子效率和探测器读出 值 *D*(λ)换算关系可表示如下^[13]

$$EQS(\lambda) = \frac{hcD(\lambda)}{ne\phi(\lambda)}$$
(1)

其中 h 为普朗克常数(6. 62×10^{-34} m² · kg · s⁻¹), c 为光速 (3×10^8 m · s⁻¹), n 为光的折射率,真空中稀薄气体的折射 率近于 1, e 为单个电子所带的电荷量,单位为库伦, $D(\lambda)$ 为 探测器读出值,单位可以为 V 也可以为 A, $\phi(\lambda)$ 为探测器接 收的光辐射通量。将已知数值代入可以将(1)式转化为

EQS(
$$\lambda$$
) = 1 239. 85 $\frac{D(\lambda)}{\phi(\lambda)}$ = 1 239. 85 $I(\lambda)$ (2)

式中 *I*(λ)为标准探测器光谱响应度,单位为 A·W⁻¹或 V·W⁻¹,由于标准探测器量子效率曲线已经给出,故可根据其 计算出标准探测器光谱响应度的曲线。再将探测器接收的由 单色仪和标准灯组成的光源系统信号代入,就可以计算出入 射光的辐射通量曲线。准直光在探测器表面入射的面积是已 知的(\$20 mm 的圆),用辐射通量除以面积即得前置光源系 统出射光在待测原理样机前的光谱辐照度 *E*(λ),表示如下

$$E(\lambda) = 1 \ 239. \ 85 \cdot \frac{D(\lambda)}{S \cdot EQS(\lambda)} = 1 \ 239. \ 85 \cdot \frac{D(\lambda)}{\pi r^2 \cdot EQS(\lambda)}$$
(3)

式中,S为光源定标单元出射平行光面积。该标定过的系统 即为标准光谱辐照度照射源系统。在使用该光源系统进行照 度定标之前,还需要现对该单元进行均匀性的考察。为此, 我们使用标准辐射计对准直光束光斑面积内的多个采样点的 相对照度进行了实测,测量结果表明其均匀性优于 0.2%, 因此该光源单元是可以用作照度定标的。

1.2 光谱辐照度响应度传递

 1.1节中建立了氘灯+单色仪+准直系统构成的平行光 定标光源单元,同时获得了该单元的光谱辐照度值,这样一 个标准光源光谱辐照度标准的建立,可以消除多种误差,如 氘灯的不稳定性误差,单色仪误差,准直系统误差等等,从 而最大限度的消除了仪器不稳定性对辐射定标带来的影响。

利用这个系统的响应度值来对远紫外成像光谱仪原理样 机进行标定。将图1中标准探测器所在位置替换为原理样机 并使用真空系统即可进行光谱辐照度定标,原理样机的光谱 辐照度响应度可以表示为

$$R(\lambda) = \frac{E(\lambda)}{D'(\lambda)} = 1 \ 239. \ 85 \cdot \frac{D(\lambda)}{S \cdot \text{EQS}(\lambda) \cdot D'(\lambda)}$$
(4)

式中, $D'(\lambda)$ 是光谱仪原理样机对应波长处的读出值。

全实验装置如图 2 所示。真空系统真空度可达 10⁻³ Pa, 满足空间应用需求。为了检测定标过程中的衰减,使用二维 位移台同时放置标准辐射计和原理样机,每经过一段时间测 试后即使用标准辐射计对辐照度光源系统进行监测,根据监 测值可以实现对衰减的修正,从而一定程度上解决了定标过 程不稳定的问题。



Fig 2 Schematic diagram of the spectrometer

2 光谱辐照度响应度定标

2.1 原理样机及实验定标结果

在完成标准灯与单色仪的标准光源搭建之后,使用标准 探测器标定完成光谱辐射标准传递。之后可以直接使用该光 源照射远紫外成像光谱仪进行光谱辐照度响应度定标和光谱 分辨率测试。这台原理样机工作波段为 130~180 nm,是一 台远紫外波段的空间光学遥感仪器,其光学系统原理图如图 3所示。



Fig. 3 Layout of optical system of imaging spectrometer prototype

对远紫外光谱仪原理样机进行光谱辐射度响应度定标后 获得数据曲线如图 4 所示。



2.2 定标不确定度分析

由式(4)可得误差公式

$$\frac{\Delta E(\lambda)}{E(\lambda)} = \left[\left| \frac{\Delta D(\lambda)}{D(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta EQS(\lambda)}{EQS(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta D'(\lambda)}{D'(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta S}{S} \right| \right]^{\frac{1}{2}}$$
(5)

式中第一项 $D(\lambda)$ 和第三项 $D'(\lambda)$ 是标准探测器和样机探测器的读数,其读数误差约为5%,主要原因是由于探测器自

References

- [1] Meier R R. Space Sci. Rev., 1990, 91:1.
- [2] Lang J, Kent B J, Paustian W, et al. Appl. Opt., 2006, 45(34): 8689.
- [3] Wilson S R, Forgan B W. Appl. Opt., 1995, 34(24): 5475.
- [4] Harvey A R, Beale J, Greenaway, et al. SPIE, 2000, 4132: 13.
- [5] Moos H W, Chen K I, Terry J L, et al. Appl. Opt., 1979, 18(8): 1209.
- [6] ZHANG Zhen-duo, WANG Shu-rong, LI Fu-tian, et al(张振铎,王淑荣,李福田,等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2008, 16(11): 2055.
- [7] HUANG Yu, WANG Shu-rong, ZHANG Zhen-duo, et al(黄 煜, 王淑荣, 张振铎, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2007, 15(8): 1215.
- [8] Dandekar B S, Davis D J. Jr. Appl. Opt., 1973, 12(4): 825.

身标定不确定度决定的,同时也与 30 W 氘灯的信号微弱性 和稳定性,单色仪的波长精度、波长重复性有关;式中第二 项表示的是标准探测器的量子效率误差,约为 2%;式中第 四项是照射面积的误差,准直光照射仪器面积偏差所引入的 误差计算约为 0.05%,将这些误差进行不确定度合成可以获 得原理验证系统的辐照度定标合成不确定度为 7.7%。列表 如表 1 所示。

Table 1 The uncertainties of spectral irradiance calibration

不确定度来源	相关不确定度/%
标准探测器光谱辐照度(量子效率)	2
仪器读数 D(λ)	5
仪器读数 $D'(\lambda)$	5
准直光出射面积	0.05
合计	7.7

3 结 论

对远紫外光谱仪进行光谱绝对辐射定标难点有三:一是 实验过程必须要在良好的真空环境下进行;二是相关的可用 标准装置较少,实验条件严苛;三是实验过程稳定性较难控 制,精度难以保持。针对于此,本文主要完成的工作如下:

(1)专门构建了一套用于远紫外光谱仪定标的实验系统,该系统由标准氘灯、真空单色仪、准直系统、标准探测器、高真空室、抽真空无油装置以及二维运动平台构成。系统中的各装置都是标准应用仪器,稳定性好,全套装置可以满足测试和定标过程中的严格条件;

(2)使用标准氘灯+真空紫外单色仪+准直系统搭建了 一个平行光标准光源系统,将该光源出射光使用远紫外标准 探测器进行照度标定,标定后的这一套系统就成为标准光谱 辐照度系统。这种方法解决了在远紫外波段下光谱辐射定标 难以用积分球和漫反射板完成的问题,同时避免了许多不确 定度的引入,提高了定标的精度,经过照度标定后,原理样 机的辐照度响应度合成不确定度为7.7%。另外,这种方法 使定标条件与空间遥感条件相一致,非常适用于大气下不可 见的微弱信号探测,因此在未来工程化应用中有广泛的应用 前景。

- [9] Bridges J M, Ott W R, Pitz E, et al. Appl. Opt., 1977, 16(7): 1788.
- [10] Finkenzeller U, Labs D. Appl. Opt., 1979, 18(23): 3938.
- [11] McAdams R, Srivastava S K. Appl. Opt., 1983, 22(10): 1551.
- [12] Canfield L R. Appl. Opt., 1987, 26(18): 3831.
- [13] WANG Rui, WANG Shu-rong, LI Fu-tian, et al(王 锐, 王淑荣, 李福田, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2010, 30(4): 1026.

Study on the Absolute Spectral Irradiation Calibration Method for Far Ultraviolet Spectrometer in Remote Sensing

YU Lei, LIN Guan-yu, CHEN Bin

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

Abstract The present paper studied spectral irradiation responsivities calibration method which can be applied to the far ultraviolet spectrometer for upper atmosphere remote sensing. It is difficult to realize the calibration for far ultraviolet spectrometer for many reasons. Standard instruments for far ultraviolet waveband calibration are few, the degree of the vacuum experiment system is required to be high, the stabilities of the experiment are hardly maintained, and the limitation of the far ultraviolet waveband makes traditional diffuser and the integrating sphere radiance calibration method difficult to be used. To solve these problems, a new absolute spectral irradiance calibration method was studied, which can be applied to the far ultraviolet calibration. We build a corresponding special vacuum experiment system to verify the calibration method. The light source system consists of a calibrated deuterium lamp, a vacuum ultraviolet monochromater and a collimating system. We used the calibrated detector to obtain the irradiance responsivities of it. The three instruments compose the calibration irradiance responsivities. It realized the absolute spectral irradiance calibration for the far ultraviolet spectrometer utilizing the calibrated detector. The absolute uncertainty of the calibration is 7. 7%. The method is significant for the ground irradiation calibration of the far ultraviolet spectrometer in upper atmosphere remote sensing.

Keywords Ionosphere; Far ultraviolet spectrometer; Spectral irradiance; Radiometric calibration

(Received Jun. 27, 2012; accepted Sep. 8, 2012)