

## 紫外天体模拟器辐射参数现场校准技术

李 涵<sup>1</sup>, 孙红胜<sup>2</sup>, 王加朋<sup>2</sup>, 高书敏<sup>2</sup>

(1. 海装合同监督管理部, 北京 100841; 2. 北京振兴计量测试研究所, 北京 100074)

**摘 要:** 紫外天体模拟器为空间探测工程中紫外有效载荷的重要测试和仿真设备。为了解决紫外天体模拟器辐射参数现场校准存在的难题, 建立一套便携式紫外天体模拟器辐射参数现场校准装置, 实现紫外模拟器瞬态辐射参数校准和高灵敏度辐射参数校准。校准参数包括光谱辐亮度、光谱辐照度等。校准的光谱范围为 200~400 nm, 该装置的建立完善国内的紫外校准技术研究体系, 填补我国现场计量型的紫外标准的空白。

**关键词:** 紫外; 光谱辐亮度; 光谱辐照度; 校准

中图分类号: TN21 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)05-1568-06

## Calibration device for UV radiation celestial body simulator

Li Han<sup>1</sup>, Sun Hongsheng<sup>2</sup>, Wang Jiapeng<sup>2</sup>, Gao Shumin<sup>2</sup>

(1. Navy Department of Equipment, Beijing 100841, China;

2. Beijing Zhenxing Institute of Metrology and Measurement, Beijing 100074, China)

**Abstract:** Importance of ultraviolet calibration is growing fast as ultraviolet payloads are widely used in national space plan. Calibration device for UV radiation celestial body simulator was established especially for the calibration of instantaneous radiation parameters and high-sensitivity radiation parameters. Parameters such as spectral radiance, spectral irradiance can be calibrated from 200 nm to 400 nm. The calibration device is perspective for its application in national system.

**Key words:** ultraviolet; spectral radiance; spectral irradiance; calibration

### 0 引 言

近些年,随着空间技术的发展,紫外有效载荷的应用越来越广。紫外天体模拟器<sup>[1-3]</sup>是紫外有效载荷的重要测试设备,对其校准技术的需求也越来越迫切。

国际上相关的公司和研究机构开发出了一些可在现场使用的紫外测量设备。美国 Biospherical 仪器公司设计的 Spectro320 型紫外光谱辐射计<sup>[4]</sup>,波长范围为 250~2 500 nm,采用光纤传输方式,集光面为多

个光纤阵列的集合面,设计结构为双单色仪形式,自动控制单色仪狭缝宽度,探测器为光电倍增管,曝光时间可调。整个装置结构较复杂,体积庞大。在 250~400 nm 波长范围内,测量不确定度为 15%。但在 250 nm 波段附近,信噪比会严重降低,测量误差很大。

国内的相关研究机构如浙江大学、北京理工大学等也研制了一些相应的紫外波段的辐射计,用于测量干扰弹、太阳模拟器干扰源的紫外辐射强度等,

收稿日期:2013-09-09; 修订日期:2013-10-14

作者简介:李涵(1985-),工程师,主要从事装备管理方面的研究。Email: [lihan@163.com](mailto:lihan@163.com)

其测量波段范围一般只能到 300 nm,测量误差很大。而国内针对紫外有效载荷相关调试测试设备的紫外现场型校准设备未见有公开报导。

目前国内虽然建立有较完整的实验室内紫外辐射计量标准(200 nm 以上),但紫外现场型的计量标准设备的研究目前还处于空白,而这些标准关系到卫星的紫外敏感器、紫外成像仪、紫外成像光谱仪等重要有效载荷的量值校准溯源问题,以及武器系统紫外光电对抗中测量数据正确性和可靠性问题,因此研究建立完整的紫外现场型计量标准是很有必要的。

### 1 总体技术方案

#### 1.1 瞬态型紫外天体模拟器辐射参数现场校准方案

为实现紫外模拟器瞬态光谱校准或分析短时间内紫外辐射的光谱特性,提出一套瞬态型紫外模拟器辐射参数校准和测量装置实现方案,校准参数包括光谱辐亮度、光谱辐照度等。紫外天体模拟器瞬态光谱辐亮度现场校准的工作原理详见图 1。

如图 1 所示,瞬态型紫外天体模拟器辐射参数校准装置硬件主要包括紫外物镜、视场分束器、观测目镜或 CCD 相机、消偏振器、紫外光谱仪、光电紫外天体模拟器辐射参数现场校准装置及信号放大处理系统、信号采集和控制系统。校准装置的定标光源为紫外标准氙灯和紫外标准漫反射板,覆盖波长范围 115~400 nm,为便于外场工作,只在大气中进行紫外光谱校准,故响应波段为 200~400 nm。视场分束器为带小孔的反射镜,被测紫外天体模拟器或光源经紫外物镜和视场分束器后分为两部分光束,一部分经视场分束器后汇聚并将被测目标成像到 CCD 相机光敏区上,最后在终端输出显示测量目标的位置,另外也可采用目镜观测。另一部分光束经过视场分束器小孔入射到消偏振器上,消除偏振效应后,进入光谱仪的色散系统,在阵列紫外天体模拟器辐射参数现场校准装置的焦面上光谱平直并且分布均匀,200~400 nm 波段光谱信息由阵列紫外天体模拟器辐射参数现场校准装置探测接收记录。测量结果与标准光源光谱辐亮度结果比对并加入修正系数,得到被校准目标的紫外光谱辐亮度,同时绘出光谱辐亮度曲线。

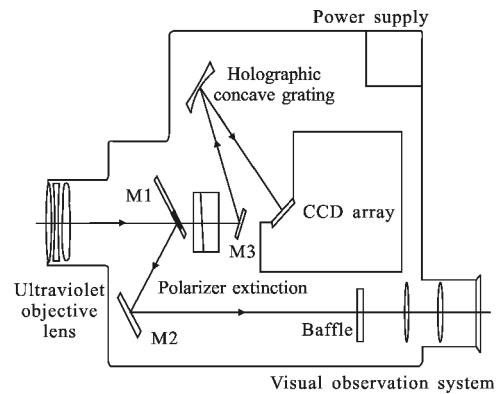


图 1 瞬态型紫外天体模拟器辐射参数现场校准装置设计方案图  
Fig.1 Program plan for calibration device of instantaneous celestial body simulator

考虑到紫外现场校准装置的便携性,将紫外光谱辐亮度校准装置的紫外镜头换成紫外漫透射器,就可以进行紫外光谱辐照度测量和校准。被测紫外天体模拟器或紫外光源经漫透射器均匀化后,由视场分束器分为两部分,其后消偏振、分光、信号采集、处理和显示与紫外光谱辐亮度校准装置一致。测量结果与标准光源光谱辐照度结果比对并加入修正系数,得到被校准目标的紫外光谱辐照度,同时绘出光谱辐照度曲线。根据测得的光谱辐射照度和距离光源的距离也可估算被校准光源处的光谱辐射强度。

#### 1.2 高灵敏度型紫外天体模拟器辐射参数现场校准方案

为满足紫外天体模拟器或紫外光源的高灵敏度、大动态范围的光谱辐亮度校准需求,在瞬态型紫外天体模拟器辐射参数校准方案的基础上提出高灵敏度校准方案。图 2 为高灵敏度光谱辐亮度校准工作原理图。

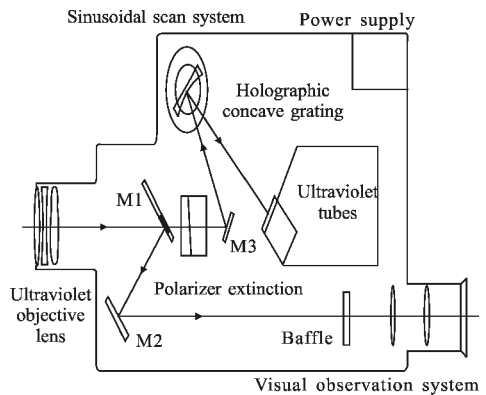


图 2 高灵敏度型紫外天体模拟器辐射参数现场校准装置设计方案图

Fig.2 Program plan for calibration device of high-sensitivity celestial body simulator

该校准装置主要由紫外物镜、视场分束滤光器、消偏振器、分光系统、观测瞄准系统、紫外光电倍增管及其后续电子学系统组成。通过计算机控制转动凹面光栅,使紫外波长顺次从出射狭缝射出,由高性能光电倍增管探测接收。紫外光栅扫描一周,才能实现 200~400 nm 波段光谱辐射亮度测量,整个扫描过程需要一定的时间。

高灵敏度型紫外辐射参数校准装置与瞬态型紫外辐射参数校准装置不同之处在于,此紫外天体模拟器辐射参数现场校准装置为紫外光电倍增管,紫外光谱响应能力强,而瞬态型校准装置中为阵列紫外天体模拟器辐射参数现场校准装置,紫外光谱响应能力稍弱。另一不同之处在于瞬态型紫外模拟器校准装置中光栅不需要转动,即较短时间内就可实现全波段 200~400 nm 光谱辐射度测量和校准。而高灵敏度型紫外天体模拟器校准装置中光栅需要转动,实现不同波段光谱数据的捕获和校准,整个波段的扫描工作时间相对较长,适合固定目标或辐射量变化缓慢的紫外弱信号测量。

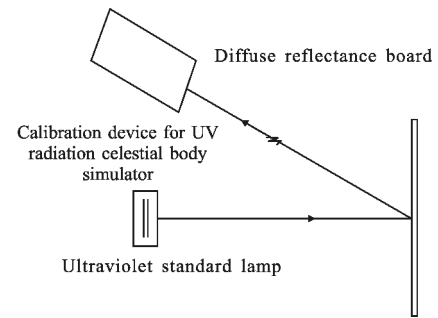
紫外天体模拟器高灵敏度光谱辐照度校准装置主要由紫外漫透射器、视场分束滤光器、消偏振器、分光系统、高性能光电倍增管及其后续电子学系统组成。整个校准装置的结构与紫外光谱辐亮度校准装置基本相同,只需将紫外物镜更换为紫外漫透射器即可。

## 2 校准装置的标定

紫外天体模拟器光谱辐射参数现场校准装置在标定之前,输出的信号值是没有任何物理意义的,也不能进行光谱辐射度参数校准,所以校准装置在使用前或使用一段时间内必须进行辐射定标。

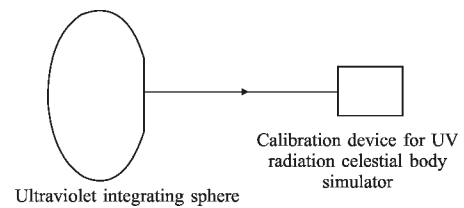
在紫外光谱辐照度标定中,可以将标准灯放置在距离光谱辐照度校准装置有限距离处,根据标准灯辐照度距离平方反比定律进行量值传递。

在紫外光谱辐亮度校准装置中,紫外光谱辐亮度标准(高温黑体或者氙灯)都没有足够大的发射面积来充满辐射校准装置的视场,因此多使用标准漫反射板或积分球产生近似朗伯体的大面积辐射源。在该校准方案中光谱辐亮度定标分为两个步骤:首先为积分球辐照度标定,其次为积分球对辐射度校准装置的光谱辐亮度标定。如图 3 所示。



(a) 辐照度标定

(a) Calibration of irradiance



(b) 辐亮度标定

(b) Calibration of radiance

图 3 利用积分球光源标定校准装置的光谱辐照度和辐亮度  
Fig.3 Calibration of irradiance and radiance by using integrating sphere

漫反射板经光谱辐照度标准灯照明,在辐照度校准装置观测方向上的平均光谱辐照度由公式(1)计算:

$$E(\lambda) = E_1(\lambda) \cos \theta \omega(x, y) f(x, y) \quad (1)$$

式中: $E_1(\lambda)$ 为标准紫外光源在一定距离处的光谱辐照度; $\theta$ 为观测方向和漫反射板法线之间的夹角; $\omega(x, y)$ 为由光源尺寸决定的离轴照明修正因子; $f(x, y)$ 为在校准装置视场投影面积上标准光源光谱辐射度随角度的变化函数。

由于标准光源尺寸较小,修正因子 $\omega(x, y)$ 可以忽略不计,在将标准光源看做均匀亮源的情况下,公式(1)沿观测视场的积分可以表述为:

$$E(\lambda) = E_1(\lambda) \times I^2 / (h^2 + r^2) \quad (2)$$

式中: $h$ 为标准灯与漫反射板之间的距离; $r$ 为投影视场等效面积半径; $I$ 为给定标准照度时标准灯与漫反射板之间的距离。

即使用同一台光谱辐射度校准装置分别对准漫反射板和积分球测量,就完成了积分球开口处辐照度的标定。

在假设积分球为朗伯辐射体的情况下,距离积

分球开口  $d$  处的照度可以由公式(3)表示:

$$E_d(\lambda)=[\pi r^2/(d^2+r_1^2+r_2^2)]L(\lambda)=G(d,r_1,r_2)L(\lambda) \quad (3)$$

式中: $E_d(\lambda)$ 为距离积分球开口  $d$  处的光谱辐照度; $L(\lambda)$ 为积分球开口处的光谱辐亮度; $r_1$ 为积分球开口半径; $r_2$ 为紫外天体模拟器辐射参数现场校准装置接收面半径; $d$ 为积分球孔径到漫反射板的距离。

利用公式(3)可以推导出光谱辐亮度,从而得到光谱辐射度校准装置光谱辐亮度响应度,可以表示为公式(4):

$$L(\lambda)=E_d(\lambda)/[\pi r^2/(d^2+r_1^2+r_2^2)] \quad (4)$$

### 3 测试结果

#### 3.1 瞬态型紫外天体模拟器辐射参数现场校准装置对氙灯和积分球的测试数据

##### 3.1.1 对氙灯的照度测试

利用氙灯对瞬态型紫外天体模拟器辐射参数现场校准装置进行照度测试,将氙灯放置在离瞬态型紫外天体模拟器辐射参数现场校准装置一定距离处。

氙灯是较为理想的紫外光源,在 200~400 nm 的光谱辐射连续且没有尖峰,适合做紫外测量。照度测试数据如图 4 所示。其中灰线为氙灯在 200~400 nm 的标准数据,黑线为测试数据。

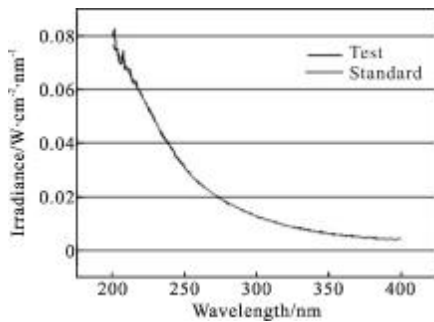


图 4 瞬态型紫外天体模拟器辐射参数现场校准装置对氙灯辐照度测试数据图

Fig.4 Irradiance test data of deuterium lamp by using calibration device for instantaneous celestial body simulator

照度测试数据与标准数据的偏差用测试数据与标准数据的差除以标准数据来表示,如图 5 所示。

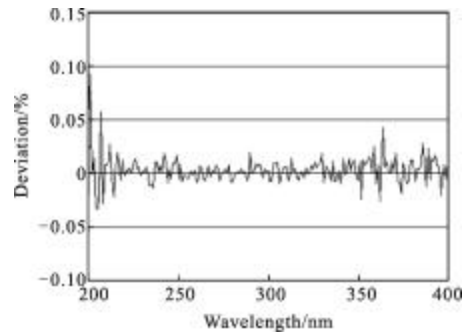


图 5 瞬态型紫外天体模拟器辐射参数现场校准装置对氙灯辐照度测试数据偏差图

Fig.5 Irradiance deviation data of deuterium lamp by using calibration device for instantaneous celestial body simulator

##### 3.1.2 对积分球的辐亮度测试

利用紫外积分球形成大面积光源对瞬态型紫外天体模拟器辐射参数现场校准装置进行亮度测试,光源近似朗伯体,在紫外波段光谱能量变化平缓。

亮度测试数据如图 6 所示。其中灰线为紫外积分球在 200~400 nm 的标准数据,黑线为测试数据。

亮度测试数据与标准数据的偏差用测试数据与标准数据的差除以标准数据来表示,如图 7 所示。

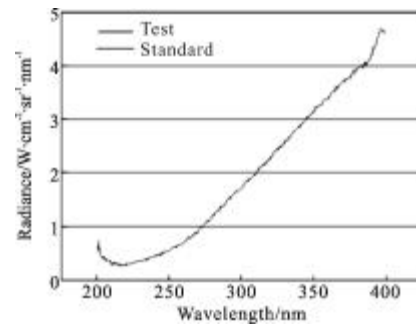


图 6 瞬态型紫外天体模拟器辐射参数现场校准装置对积分球辐亮度测试数据图

Fig.6 Radiance test data of integrating sphere by using calibration device for instantaneous celestial body simulator

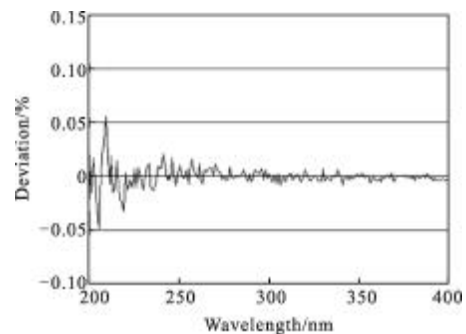


图 7 瞬态型紫外天体模拟器辐射参数现场校准装置对积分球辐亮度测试数据偏差图

Fig.7 Radiance deviation data of integrating sphere by using calibration device for instantaneous celestial body simulator

### 3.2 高灵敏度型紫外天体模拟器辐射参数现场校准装置对氙灯和积分球的测试数据

#### 3.2.1 照度测试

利用氙灯<sup>[5]</sup>对高灵敏度型紫外天体模拟器辐射参数现场校准装置进行照度测试,照度测试数据如图 8 所示。其中灰线为氙灯在 200~400 nm 的标准数据,黑线为测试数据。

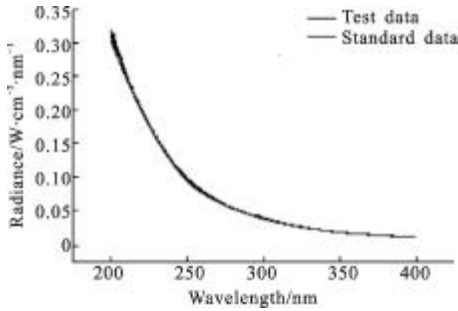


图 8 高灵敏度型紫外天体模拟器辐射参数现场校准装置对氙灯辐照度测试数据图

Fig.8 Irradiance test data of deuterium lamp by using calibration device for high-sensitivity celestial body simulator

实验数据与标准数据的偏差用测试数据与标准数据的差除以标准数据来表示,该比率如图 9 所示。

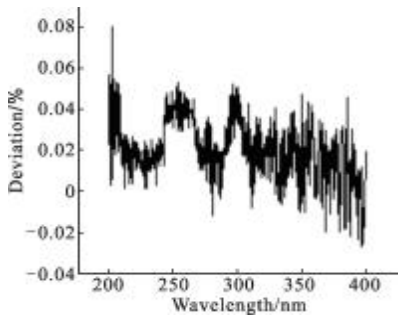


图 9 高灵敏度型紫外天体模拟器辐射参数现场校准装置对氙灯辐照度测试数据偏差

Fig.9 Irradiance deviation data of deuterium lamp by using calibration device for high-sensitivity celestial body simulator

#### 3.2.2 亮度测试

利用氙灯对高灵敏度型紫外天体模拟器辐射参数现场校准装置进行亮度测试,亮度测试数据如图 10 所示。其中灰线为氙灯在 200~400 nm 的标准数据,黑线为测试数据。

亮度实验数据与标准数据的偏差用测试数据与标准数据的差除以标准数据来表示,该比率如图 11 所示。

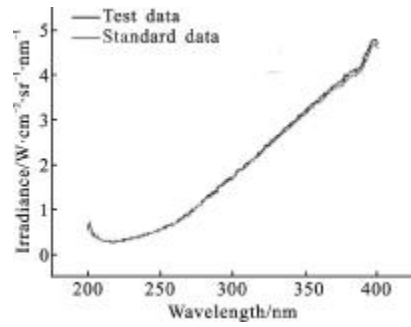


图 10 高灵敏度型紫外天体模拟器辐射参数现场校准装置对积分球辐亮度测试数据图

Fig.10 Radiance data of integrating sphere by using calibration device for high-sensitivity celestial body simulator

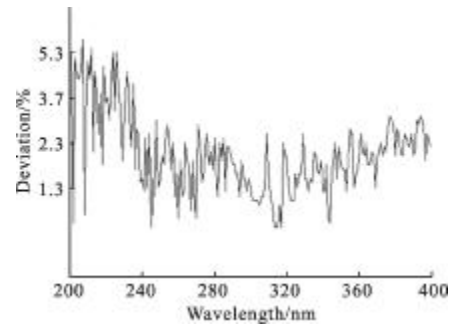


图 11 高灵敏度型紫外天体模拟器辐射参数现场校准装置对积分球亮度测试的偏差

Fig.11 Radiance deviation data of integrating sphere by using calibration device for high-sensitivity celestial body simulator

## 4 结论

建立一套便携式紫外天体模拟器辐射参数现场校准装置,实现紫外模拟器瞬态辐射参数校准和高灵敏度辐射参数校准。校准参数包括光谱辐亮度、光谱辐照度等。校准装置实物装置如图 12 所示。该装



图 12 紫外天体模拟器辐射参数现场校准装置实物图

Fig.12 Calibration device for UV radiation celestial body simulator 置的建立完善了国内的紫外校准技术研究体系,填补了我国现场计量型的紫外标准的空白。

## 参考文献:

- [1] Wang Shurong, Li Futian, Song Kefei, et al. Measurement of extraterrestrial solar ultraviolet spectrum [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(6): 1272-1277. (in Chinese)
- [2] Ji Wei, Wang Xinyuan, Guo Zhenya, et al. Retrospect and prospect of the moon exploration technologies and researches [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2011, 27(2): 6-10. (in Chinese)
- [3] Hao Yuncai, Wang Li. Several critical problems about ultraviolet lunar sensor for lunar exploration mission [J]. *Aerospace Control*, 2005(1): 87-91. (in Chinese)
- [4] Saunders D R, Ott W R, Bridges M. Spectral irradiance standard for the ultraviolet: the deuterium lamp [J]. *Applied Optics*, 1978, 17(4): 593-600.
- [5] Hollandt J, Becker U, Paustian W M. et al. Ulm: New developments in the radiance calibration of deuterium lamps in the UV and VUV spectral range at PTB, Physikalisch-Technische Bundesanstalt; Abstr. 2-12, D- 10587 Berlin, Germany.