

文章编号: 1003-501X(2010)04-0135-06

“日盲”紫外电晕探测系统定标

章明朝^{1, 2}, 宋慧营³, 周 跃^{1, 2}, 高松涛^{1, 2},闫 丰¹, 隋永新¹, 杨怀江¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 空军航空大学 军事仿真技术研究所, 长春 130022)

摘要:“日盲”紫外电晕探测是电力设备检修与维护的主要手段之一。为了提供更为准确和客观的评价依据, 需要对“日盲”紫外电晕探测系统进行辐亮度定标, 从而确定目标辐亮度与增益控制电压、系统输出灰度值之间的关系。为此构建了由高稳定氘灯光源、积分球、光纤光谱仪等组成的定标装置。采用可溯源美国 NIST 的紫外标准氘灯对光纤光谱仪进行光谱辐照度标定, 并以光纤光谱仪作为标准探测器对电晕探测系统进行定标。通过实验拟合出 ICCD 增益控制电压与系统增益之间的关系曲线, 并给出了系统的标定方程。随后进行了三组不同增益的验证实验, 实验结果表明在线性区内辐亮度推算值与测量值之间的最大相对误差为 6.11%, 均方根为 3.22%。经分析, 文中所采用的系统定标方案的不确定度为 9.1%, 基本可以满足“日盲”紫外电晕探测系统的需求。此外, 不同增益条件下的系统响应特性可以为“电晕”探测过程中进行自动增益调整算法的设计提供参考依据。

关键词:“日盲”紫外; 电晕探测; 系统定标; ICCD

中图分类号: TN23; O434.1

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2010.04.026

Calibration for SBUV Corona Detection System

ZHANG Ming-chao^{1,2}, SONG Hui-ying³, ZHOU Yue^{1,2}, GAO Song-tao^{1,2},YAN Feng¹, SUI Yong-xin¹, YANG Huai-jiang¹

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;

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

3. The Military Simulation Technology Institute, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: Corona detection via spectral rang in Solar Blind Ultraviolet (SBUV) is an efficient method for power system maintenance. It is necessary to implement luminance calibration for SBUV detection system to ensure the test results' reliability, including object luminance vs. gain control voltage and object luminance vs. gray level of the image. The calibrating system was established, which mainly consists of high stable deuterium lamp, integral ball and fiber optic spectrometer. A calibrated ultraviolet deuterium lamp which can be traced back to the American NIST was adopted to calibrate the fiber optic spectrometer, which was used as calibrated detector to calibrate the corona detection system. The relative curve between ICCD gain control voltage and system gain was fitted from the test results and the calibration equation of system was also given. Three experiments with different gain level were implemented to validate the equation. Test results show that the maxim luminance relative error between calculated value and measured value is 6.11% and the

收稿日期: 2009-10-19; 收到修改稿日期: 2009-12-20

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20080516)

作者简介: 章明朝(1982-), 男(汉族), 浙江苍南人。博士研究生, 主要从事光电探测信号处理和辐射定标技术等方面的研究。

E-mail: zmchao2008@sina.com。

通信作者: 隋永新(1970-), 男(汉族), 吉林长春人。副研究员, 主要从事信息安全、辐射定标技术等研究。E-mail: suiyx@sklao.ac.cn。

Root Mean Square (RMS) is 3.22% when ICCD works in its linear area. Analysis of the calibration scheme shows the uncertainty is 9.1%. It can satisfy the precision requirements of corona detection system. The response characteristics under different gain levels of detection system can also be used as a reference in designing auto-gain adjustment algorithm for corona detection.

Key words: solar blind ultraviolet; corona detection; system calibration; ICCD

0 引言

在电力设备的检修与维护中,电晕探测^[1-2]对于确定故障点的位置,提高检修效率具有重要作用。电晕所辐射的光谱涵盖了紫外、可见和红外谱段。一般情况下,若电晕呈现出明显的可见光辐射,则意味着设备已经损坏或者是尖端放电,而红外谱段的探测在日光环境下很难进行,因此利用“日盲”紫外谱段进行电晕探测便成为首选。

目前,“日盲”紫外电晕探测系统通常采用定性探测的方式,只能确定故障点的位置,而不能给出故障点所产生辐射的具体数值。在此情况下,工作人员只能根据电晕图像进行主观判断来评价电力设备的损害程度。此方法缺乏严格客观的度量标准,因此难以准确地反映电力设备损伤的真实情况,由此导致的误判会造成不必要的浪费,甚至引发安全隐患。另外,该方法对工作人员的素质和经验也提出了较高的要求。显然,若能在观测到电晕图像的同时测量出电晕的辐射强度,就可以定量地评价电力设备的损坏程度,为及时、有效地对电力设备进行维护提供更为准确和客观的评价依据。

为了实现定量检测,必须首先对电晕探测系统进行辐射定标。其基本过程是针对已知辐亮度的目标进行测量,从而建立目标辐亮度与 ICCD 输出灰度值之间的关系。

电晕在“日盲”紫外波段的辐射非常微弱,因此“日盲”紫外电晕探测系统通常采用 ICCD 作为探测器。ICCD 的典型特点是具有强大的电子倍增能力,其最大增益值一般都在 10^4 以上。在此情况下,电晕探测系统应该根据目标的强度对增益进行自适应调节,因此定标过程必然要考虑不同增益下的响应,这与普通 CCD 成像系统的辐射定标是有明显区别的。

1 辐射定标方案

“日盲”紫外电晕探测系统如图 1 所示。其中,物镜系统对电晕目标进行成像;深度截止“日盲”紫外滤光片用于滤除“日盲”区以外的辐射,该滤光片的透过率曲线如图 2 所示,其透过峰值波长为 269 nm,峰值透过率为 0.94%,有效工作谱段可以取透过率高于峰值 10% 的波长范围,该谱段带宽为 11 nm (262~273 nm);而 ICCD 实现电晕图像的光电转换。

设电晕的辐亮度为 L ,当 ICCD 处于线性区时电晕探测系统的输出 U 为

$$U = \tau \cdot R \cdot G \cdot \frac{\pi}{4} \cdot L \cdot \left(\frac{D}{f}\right)^2 \quad (1)$$

其中: D/f 为探测系统物镜的相对孔径, τ 为探测系统的透射率, G 为 ICCD 的增益, R 是增益为 1 时 ICCD 的响应度。ICCD 的增益由控制电压 V_g 决定,二者之间呈现指数式关系^[3]。

目前,我国没有“日盲”紫外波段的辐射量值基准,因此选用经过美国国家标准和技术研究院(NIST)标定的氙灯作为次级标准光源^[4-5]。同时,为了减少标准氙灯的使用时间(一般超过 50 h 就要重新标定),利用标准氙灯对高精度探测器进行标定,从而将标准传递给探测器。此后便可以采用标准

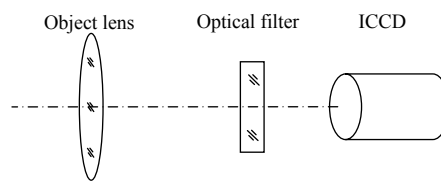


图 1 “日盲”紫外电晕探测系统

Fig.1 Block diagram of SBUV corona detection system

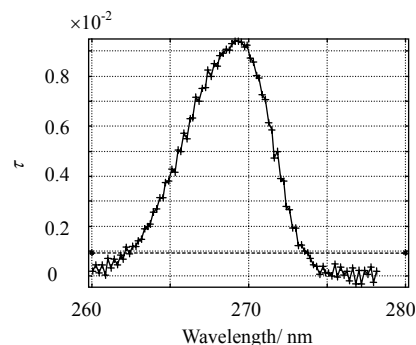


图 2 滤光片透过率曲线

Fig.2 Transmission rate of filter

探测器法进行辐亮度定标。上述标准传递方案如图 3 所示。其中标准氙灯在 220~1050 nm 范围内其光谱辐照度的不确定度为 5%；参考探测器(光纤光谱仪)，其线性度大于 99.8%，积分时间可长达 15 min，基本能够满足低照度测量的要求；光谱仪的光纤通过 SMT 接口与标准氙灯进行连接。

利用标准探测器对“日盲”紫外电晕探测系统进行辐亮度定标的方案如图 4 所示。定标装置由氙灯光源、光学衰减器、积分球、光纤光谱仪、计算机(包含图像采集卡)等组成。采用另外一个具有较高稳定性的氙灯作为紫外光源，光线经过光学衰减器后照射积分球的入口。光学衰减器内部的光阑可实现 0~100%的衰减比，据此可以连续地调节积分球内的辐照度。电晕探测系统对积分球的出口进行成像，通过采集卡获取电晕探测系统输出的视频图像。光谱仪的光纤连接到积分球的内表面，由此可以测量积分球内表面的绝对辐照度 E ，换算为积分球开口处的辐亮度值 L 是^[6]：

$$L = E / \pi \quad (2)$$

为减小杂散光的影响，对该定标装置使用了屏蔽罩进行遮盖。另外，ICCD 的响应能力要比光纤光谱仪强，则光谱仪需要延长积分时间才能得到可信的测量数据，为了减小光源波动所导致的测量误差，因此选用低漂移的氙灯作为光源。

2 辐射定标过程

在使用上述方案进行“日盲”紫外电晕探测系统定标之前，需要对光纤光谱仪进行标定。如图 3 所示，利用可溯源于 NIST 的标准氙灯对光纤光谱仪进行标定可得如图 5 所示的光谱辐照度响应曲线，其纵坐标单位是 $(\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1})^{-1}$ ，表示当辐照度为 $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的单色光照射时光谱仪输出的 A/D 采样值(16 位 A/D)。系统中 ICCD 的光谱响应度如图 6 所示，在探测系统有效工作谱带内(262~273 nm)ICCD 与光纤光谱仪的光谱响应度是相类似的，其最大偏差为 4.4%，如图 7 所示。因此，经标定后的光纤光谱仪便可以作为绝对辐照度计使用了。

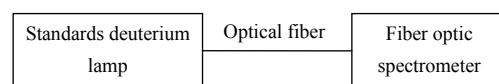


图 3 光纤光谱仪定标

Fig.3 Fiber optic spectrometer calibration

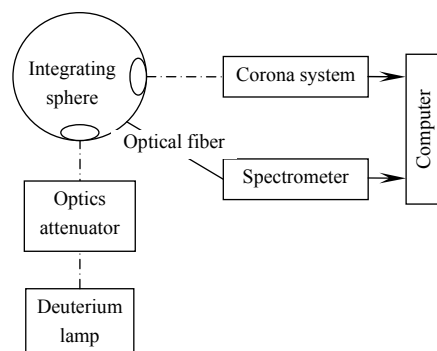


图 4 系统辐亮度定标装置图

Fig.4 Equipment of calibration system

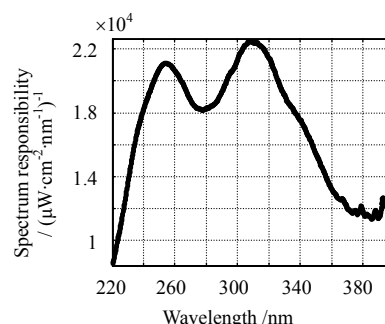


图 5 光纤光谱仪的光谱辐照度响应曲线

Fig.5 Spectrum irradiance response of spectrometer

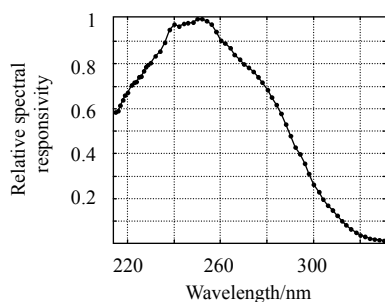


图 6 ICCD 相对光谱响应度

Fig.6 Relative spectral responsivity of ICCD

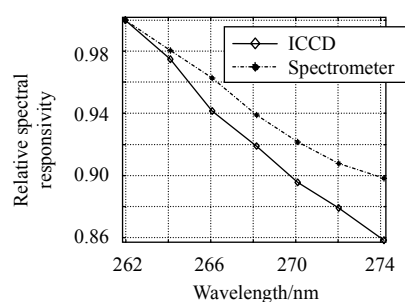


图 7 ICCD 与光谱仪在有效工作谱段的相对光谱响应度

Fig.7 Relative spectral responsivity of ICCD and spectrometer at work spectrum

实验中，采用美国国家仪器公司(NI)的高精度 8/10 位黑白图像采集卡 PCI1410 对相机输出的视频信号

进行数据的采集。采用 NI 的可视化编程环境 Labview 及配套的视觉开发模块 IMAQ Vision 开发了实时数据处理程序, 该软件可以实现对特定区域(ROI: Region of Interest)进行“像素级”的运算操作, 编程高效。

为减小随机误差, 数据处理采用多幅图像取平均值的方式, 同时还应当减去无光照时 ICCD 的本底灰度值 U_d 。采集光照条件下成像区域的 N 帧图像灰度值 U_s , 则系统净输出灰度值的计算公式为

$$U = \frac{\sum U_s}{N} - U_d$$

(3)

在电晕探测系统装调完成后, 式(1)中与系统相关的参数也就确定了, 此时式(1)可简化为

$$U = k \cdot G \cdot L$$

(4)

其中: k 为与系统相关的常数。可以将 k 、 G 合并为系统增益 G_s , 显然该增益由 ICCD 的控制电压 V_g 决定, 即

$$G_s = k \cdot G = f(V_g) = U / L$$

(5)

由式(5)可知, 对电晕探测系统进行辐射定标实际上就是确定增益控制电压 V_g 与系统增益 G_s 之间的关系。具体的实验步骤如下:

1) 按照图 4, 在暗室中搭建好定标装置, 在积分球出口处放置分辨率板, 调节探测系统的焦面使分辨率板的图像最清晰, 保证积分球出口处能较为精确地成像在 ICCD 的光电阴极上。调节完成后将分辨率板取下。

2) 在无光照情况下, 采集 100 帧电晕探测系统的图像, 并以此计算本底灰度值 U_d 为 17.64。

3) 打开普通氙灯预热 45 min, 调节光学衰减器的光阑使电晕探测系统的图像在较大控制电压时(0.6 V)接近于饱和, 利用光纤光谱仪测量积分球内的辐照度为 $1.03\text{E-}03(\mu\text{W}/\text{cm}^2)$, 由式(2)计算积分球出口处的辐亮度为 $3.29\text{E-}04(\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{Sr}^{-1})$ 。

4) 保持积分球出口处的辐亮度不变, 调节增益控制电压, 通过图像卡采集针对不同控制电压条件下的图像, 每个控制电压均采集 100 帧图像。

依据式(3)计算每个控制电压条件下的系统净输出灰度值, 带入式(5)分别求得系统增益 G_s , 结果列于表 1。其中增益控制电压 V_g 的单位是伏特(V), 系统增益 G_s 的单位是 $(\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{Sr}^{-1})^{-1}$ 。

利用表 1 的数据可对控制电压 V_g 与系统增益 G_s 之间的关系曲线进行最小二乘拟合, 所得拟合的多项式如下:

$$G_s = c_1 V_g^4 + c_2 V_g^3 + c_3 V_g^2 + c_4 V_g^1 + c_5$$

(6)

其中: $c_1 = -4.901\text{E} + 06$, $c_2 = 4.79\text{E} + 06$, $c_3 = -2.496\text{E} + 05$, $c_4 = 2.688\text{E} + 05$, $c_5 = 5.222\text{E} + 04$ 。

拟合的可信度为 0.99, 所得的多项式曲线如图 8, 其中“十字”点表示测量所得到的数据。

表 1 增益控制电压与系统增益的实验数据

Table 1 Measured data of control voltage vs. gain

V_g/V	U	$G_s/(\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{Sr}^{-1})^{-1}$	V_g/V	U	$G_s/(\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{Sr}^{-1})^{-1}$
0.011	19.68	6.178E+04	0.340	77.02	2.361E+05
0.031	19.88	6.239E+04	0.360	84.80	2.597E+05
0.050	21.51	6.735E+04	0.380	91.20	2.792E+05
0.070	23.12	7.224E+04	0.399	97.89	2.995E+05
0.089	25.29	7.883E+04	0.419	106.74	3.264E+05
0.108	27.51	8.559E+04	0.438	114.69	3.506E+05
0.127	30.24	9.387E+04	0.458	120.29	3.676E+05
0.146	32.18	9.978E+04	0.477	129.08	3.943E+05
0.166	36.09	1.117E+05	0.496	135.69	4.145E+05
0.185	39.73	1.227E+05	0.516	143.12	4.370E+05
0.205	42.63	1.316E+05	0.536	151.76	4.633E+05
0.224	46.78	1.441E+05	0.555	156.57	4.779E+05
0.243	51.12	1.573E+05	0.575	164.23	5.012E+05
0.263	55.67	1.712E+05	0.594	169.02	5.158E+05
0.282	61.37	1.885E+05	0.614	175.87	5.366E+05
0.302	66.30	2.035E+05	0.633	181.05	5.524E+05
0.321	71.24	2.185E+05	-	-	-

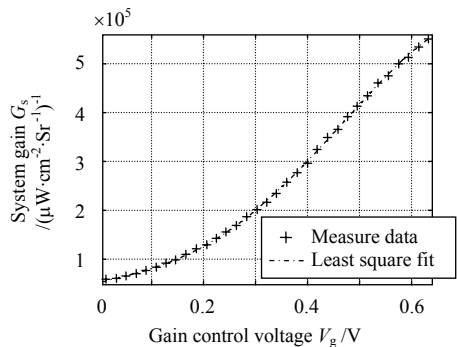


图 8 系统增益与增益控制电压的关系曲线

Fig.8 System gain vs. gain control voltage

由此可以确定“日盲”紫外电晕探测系统辐亮度定标方程为

$$L=U/(c_1V_g^4+c_2V_g^3+c_3V_g^2+c_4V_g^1+c_5)$$

(7)

在实际应用中，上述经过定标的“日盲”紫外电晕探测系统即可以按照式(7)由系统净输出灰度值和控制电压推算电晕目标的辐亮度。

3 定标结果验证

为了对定标结果进行验证，继续在图 3 所示的定标装置中进行实验验证。三组实验所设置的增益控制电压分别为 0.108 V、0.205 V 及 0.496 V，每组实验的步骤如下：

- 1) 调整增益控制电压到希望值，在一组实验内保持控制电压不变；
- 2) 调节积分球前的光学衰减器，利用光纤光谱仪监测积分球内的辐照度，使积分球出口处的辐亮度不断增大；
- 3) 在调节过程中，分别在 10~11 个辐亮度点处采集 100 帧图像并计算系统净输出灰度值，同时利用光谱仪测量的积分球内辐照度计算出口的辐亮度。

上述三组实验所得数据分别见表 2、表 3 和表 4，其中第二行为数据的单位。由此可绘制出三种增益控制电压条件下的系统响应曲线(对应图 9 中的实线部分)。图 9 中的纵坐标表示图像净输出灰度值，由图可知图像净输出灰度值在 35~180 之间时电晕探测系统的响应具有较好的线性关系。因此，在实际使用时电晕检测系统应保证工作在响应的线性区。当目标图像净输出灰度值大于 180 时，表明 ICCD 已经处于或接近于饱和状态，此时需要降低增益以使测量的结果更准确。在“日盲”紫外电晕探测系统实际应用中需要自动地实现增益调整，上述定标结果为自动增益调整算法提供了设计依据。

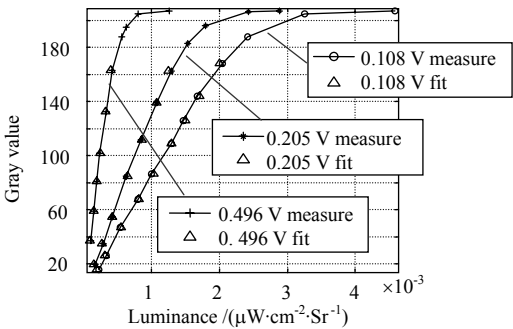


图 9 不同增益条件下的系统响应曲线
Fig.9 System response curve at different gain

表 2 增益控制电压为 0.108 V 的系统响应数据
Table 2 System response data at gain control voltage 0.108 V

L $/(\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{Sr}^{-1})$	U	L_d $/(\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{Sr}^{-1})$	$(L_d-L)/L$ $/(\%)$
4.59E-03	206.81	-	-
3.26E-03	204.62	-	-
2.42E-03	187.53	-	-
2.05E-03	168.27	2.00E-03	-2.14
1.67E-03	143.70	1.71E-03	2.41
1.47E-03	125.83	1.50E-03	2.05
1.29E-03	108.84	1.29E-03	0.11
1.00E-03	86.21	1.03E-03	2.15
8.01E-04	68.06	8.10E-04	1.05
5.41E-04	46.75	5.56E-04	2.78
3.32E-04	26.31	3.13E-04	-5.65

表 3 增益控制电压为 0.205 V 的系统响应数据
Table 3 System response data at gain control voltage 0.205 V

L $/(\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{Sr}^{-1})$	U	L_d $/(\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{Sr}^{-1})$	$(L_d-L)/L$ $/(\%)$
2.89E-03	206.91	-	-
2.43E-03	206.26	-	-
1.79E-03	196.08	-	-
1.53E-03	182.97	-	-
1.29E-03	162.77	1.25E-03	-4.00
1.07E-03	138.82	1.07E-03	-1.32
8.43E-04	111.41	8.57E-04	0.90
6.28E-04	84.74	6.52E-04	3.16
4.25E-04	54.87	4.22E-04	-0.91
2.85E-04	35.22	2.71E-04	-4.57

表 4 增益控制电压为 0.496 V 的系统响应数据
Table 4 System response data at gain control voltage 0.496 V

L $/(\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{Sr}^{-1})$	U	L_d $/(\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{Sr}^{-1})$	$(L_d-L)/L$ $/(\%)$
1.26E-03	206.89	-	-
8.01E-04	204.57	-	-
6.28E-04	194.66	-	-
5.66E-04	187.74	-	-
4.20E-04	163.04	3.96E-04	-5.82
3.29E-04	132.34	3.21E-04	-2.35
2.40E-04	101.61	2.47E-04	2.90
1.96E-04	80.92	1.96E-04	0.08
1.50E-04	58.99	1.43E-04	-4.70
9.54E-05	36.91	8.96E-05	-6.11

将控制电压和系统输出灰度值代入到系统辐亮度定标方程之中即可推算出目标的辐亮度 L_d ，图 9 中“三

角形”点表示推算得到的辐亮度值,其与实际测量的辐亮度值 L 的相对误差列于表 2~4,由此可见推算值与测量值之间的最大相对误差为 6.11%,均方根为 3.22%。

4 不确定度分析

“日盲”紫外电晕探测系统定标过程中的不确定度来源主要有以下几个方面:

- 1) 标准氙灯光谱辐照度的不确定度小于 5%;
- 2) 光谱仪响应非线性引入的不确定度为 0.2%^[7];
- 3) 在系统有效工作谱带内, ICCD 的相对光谱响应度与光纤光谱仪的相对光谱响应度最大相对偏差为 4.5%;
- 4) 光源稳定性的影响。实验中所用氙灯光源在波长为 250 nm 时每小时漂移小于 0.5%,因此在最长积分时间(15 min)内光源漂移引入的不确定度小于 0.5%;
- 5) 辐亮度定标过程中各环节产生的误差,如光纤光谱仪的暗电流、积分球出口处的不均匀性、面阵 ICCD 各像素响应的不均匀性、光电阴极暗电子发射噪声以及图像采集卡的 A/D 噪声都会引入测量误差,而且这些误差的影响难以评定,而从实验的角度来看,此方面的误差可以由推算值(根据定标方程得到)与测量值之间的最大相对误差(6.11%)来描述。

因此,采用上述方式进行系统定标,其不确定度为

$$\sqrt{0.05^2 + 0.002^2 + 0.045^2 + 0.005^2 + 0.0611^2} \approx 9.1\%$$

5 结 论

本文首先利用可溯源于 NIST 的标准氙灯对光纤光谱仪进行绝对光谱辐照度的定标,此后以光纤光谱仪作为标准探测器对“日盲”紫外电晕探测系统进行了辐亮度定标。有别于普通 CCD 成像系统定标,电晕探测系统中的 ICCD 相机具有较大范围的增益,因此文中通过实验拟合出增益控制电压与系统增益之间的关系曲线,并给出了系统的标定方程。随后进行了三组不同增益的验证实验,结果表明在线性区内辐亮度推算值与测量值之间的最大相对误差为 6.11%。经分析,文中所采用的系统定标方案的不确定度为 9.1%,基本可以满足“日盲”紫外电晕探测系统的需求。此外,不同增益条件下的系统响应特性可以为“电晕”探测过程中进行自动增益调整算法的设计提供了参考依据。

在本文所采用的方案中可以采取以下两种方式提高定标精度:1) 采用更高精度的辐射标准,如以低温辐射计建立高精度光辐射初级标准,并采用基于陷阱探测器的标准传递方法,在 200~400 nm 的光谱范围内,相对标准不确定度可达到 0.5%^[8];2) 采用噪声更低的探测器,本文所使用的光纤光谱仪的 CCD 可制冷到 -15 °C,其暗电流的典型值为 30e/(pixel·s),当积分时间较长时(针对弱光探测)暗电流将会影响积分球内辐照度的测量精度,并最终影响定标的精度。若能够将上述 CCD 制冷到 -50 °C,其暗电流的典型值将会降低到 0.1e/(pixel·s),则辐照度的测量精度会随之提高。

参考文献:

- [1] 闫丰,于子江,于晓,等. 电晕探测紫外 ICCD 相机图像噪声分析与处理[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(4): 709-713.
YAN Feng, YU Zhi-jiang, YU Xiao, *et al.* Noise analysis and processing of ultraviolet ICCD for corona detection [J]. **Opt. Precision Eng.**, 2006, 14(4): 709-713.
- [2] 赵玉环,闫丰,娄洪伟,等. 紫外 ICCD 的线性测量[J]. 光电工程, 2008, 35(8): 88-91.
ZHAO Yu-huan, YAN Feng, LOU Hong-wei, *et al.* Linearity Measurement of Ultraviolet ICCD Detector [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2008, 35(8): 88-91.
- [3] 白廷柱,金伟其. 光电成像原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
BAI Ting-zhu, JIN Wei-qi. **The Principle and Technology of Photoelectronic Imaging** [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006.

(下转第 146 页)

参考文献:

- [1] Veldkamp W B, Mchugh T J. Binary optics [J]. **Scientific American**(S0036-8733), 1992, **265**(5): 92-97.
- [2] Petit R. **Electromagnetic Theory of Gratings** [M]. Berlin Springer-Verlag, 1980.
- [3] Gaylord T K, Moharam M G. Analysis and Applications of Optical Diffraction by Gratings [J]. **Proceedings of the IEEE** (S0018-9219), 1985, **73**(5): 894-937.
- [4] Moharam M G, Grann E B, Pommet D A, *et al.* Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings [J]. **J. Opt. Soc. Am. A**(S0740-3232), 1995, **12**(5): 1068-1076.
- [5] 周传宏, 王磊, 聂娅, 等. 介质光栅导模共振耦合波分析[J]. 物理学报, 2002, **51**(1): 27-32.
ZHOU Chuan-hong, WANG Lei, NIE Ya, *et al.* The rigorous coupled-wave analysis of guided-mode resonance in dielectric gratings [J]. **Acta Physica Sinica**, 2002, **51**(1): 27-32.
- [6] 孔伟金, 云茂金, 孙欣, 等. 基于严格耦合波理论的多层介质膜光栅衍射特性分析[J]. 物理学报, 2008, **57**(8): 4904-4910.
KONG Wei-jin, YUN Mao-jin, SUN Xin, *et al.* Diffraction property of multilayer dielectric gratings studied by rigorous coupled-wave analysis [J]. **Acta Physica Sinica**, 2008, **57**(8): 4904-4910.
- [7] 孔伟金, 云茂金, 崔春玲, 等. 梯形介质膜光栅衍射特性分析[J]. 光学学报, 2008, **28**(7): 1415-1419.
KONG Wei-jin, YUN Mao-jin, CUI Chun-ling, *et al.* Diffraction property of multi-Layer dielectric grating with trapezium groove [J]. **Acta Optica Sinica**, 2008, **28**(7): 1415-1419.

~~~~~  
( 上接第 140 页 )

- [4] 黄煜, 王淑荣, 张振铎, 等. 用 150 W 氙灯标定 200~300 nm 光谱辐照度[J]. 光学 精密工程, 2007, **15**(8): 1215-1219.  
HUANG Yu, WANG Shu-rong, ZHANG Zhen-duo, *et al.* Calibration of 200~300 nm spectral irradiance using 150 W deuterium lamp [J]. **Opt. Precision Eng**, 2007, **15**(8): 1215-1219.
- [5] 黄煜, 王淑荣, 张振铎, 等. 空间遥感紫外光谱辐射计辐照度定标研究[J]. 光电子·激光, 2008, **19**(4): 466-469.  
HUANG Yu, WANG Shu-rong, ZHANG Zhen-duo, *et al.* Spectral irradiance calibration of remote sensing ultraviolet spectral radiometer in space [J]. **Journal of Optoelectronics · Laser**, 2008, **19**(4): 466-469.
- [6] 车念曾, 阎达远. 辐射度学与光度学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990.  
CHE Nian-zeng, YAN Da-yuan. **Radiometry and Photometry** [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990.
- [7] Ocean Optics, Inc. OOI Spectrometer Linearity Report [R]. 2007.
- [8] Richter M, Johannsen U, Kuschnerus P, *et al.* The PTB high-accuracy spectral responsivity scale in the ultraviolet [J]. **Metrologia**(S0026-1394), 2000, **37**(5): 515-518.