

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2023.05.017

# 电晕辐射成像仪测试平台研制及性能测试方法研究

路永玲<sup>1\*</sup>, 王真<sup>1</sup>, 胡成博<sup>1</sup>, 杨景刚<sup>1</sup>, 卢航<sup>2</sup>

(1 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2 上海紫光光电技术有限公司, 上海 201600)

**摘要:** 电晕辐射成像仪在电力等领域已得到广泛应用, 为了实现对电晕放电等缺陷故障的精确定位检测, 建立了核心性能统一、科学可靠的测试平台和测试方法。首先, 对传统的电晕辐射成像仪高温黑体灵敏度测量法进行了关键性改进, 提出了一种新的基于标准日盲紫外光源和平行光管的测量方法, 通过光源、积分球及控制系统来实现光学成像测试、紫外灵敏度测试和带外抑制性测试。最后, 基于新方法研制了一套全新的电晕辐射成像仪光学成像性能、紫外灵敏度及带外抑制性能测试平台。研究表明: 所提出的测试方法和搭建的测试平台更易评估电晕辐射成像仪性能的真实情况, 满足电晕辐射成像仪实际测试的需求。

**关键词:** 紫外成像; 电晕辐射成像仪; 电晕放电; 日盲法; 性能测试

中图分类号: TN23

文献标识码: A

文章编号: 1007-5461(2023)05-00780-09

## Research on performance test method and test platform of ultraviolet imager

LU Yongling<sup>1\*</sup>, WANG Zhen<sup>1</sup>, HU Chengbo<sup>1</sup>, YANG Jinggang<sup>1</sup>, LU Hang<sup>2</sup>

(1 State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China;

2 Shanghai UVIR Technology Co. Ltd., Shanghai 201600, China)

**Abstract:** Ultraviolet imagers have been widely used in electric power and other fields. In order to accurately locate and detect defects and faults such as electric discharge, a scientific and reliable test platform and the corresponding test methods with unified core performance have been established. Firstly, the sensitivity measurement method for traditional ultraviolet imager high temperature blackbody is critically improved, and a new measurement method based on the standard solar-blind ultraviolet light source and collimator is proposed, in which the light source, integrating sphere and control system are used to achieve optical imaging test, UV sensitivity test and out-of-band suppression test. Finally, a new test platform for the optical imaging performance, ultraviolet sensitivity and out-of-band suppression performance of the ultraviolet imager is developed based on the new method. It is shown that the test

作者简介: 路永玲 (1988 -), 女, 甘肃白银人, 硕士, 高级工程师, 主要从事输变电设备智能运检等方面的研究。E-mail: 15105182955@163.com

收稿日期: 2021-08-11; 修改日期: 2022-01-05

\*通信作者。

method and the developed test platform proposed in this work can better evaluate the real performance of the ultraviolet imager and meet the actual test requirements of the ultraviolet imager.

**Key words:** ultraviolet imaging; ultraviolet imager; corona discharge; solar corona method; performance test

## 0 引言

随着电力系统的发展,电晕等微弱放电现象越来越多地出现在各地的输电线路和不同电压等级变电站的电力设备中<sup>[1]</sup>,这也使得对高精度、高灵敏度电晕辐射成像仪的需求大幅增加。通常电晕辐射成像仪可分为两个光谱带响应的双光谱相机:日盲紫外波段(UV-C)和可见光波段,用于生成紫外和可见光的融合图像,它仅对280 nm以下的紫外光敏感。电晕辐射会产生230~405 nm的紫外辐射;太阳光290 nm以下的紫外辐射被大气层臭氧吸收而难以到达地球表面,因此采用240~280 nm波段的日盲电晕辐射成像仪可以捕捉到电晕信号而有效地避开太阳光的紫外辐射干扰。日盲电晕辐射成像仪已广泛应用于很多行业,对于存在潜在问题的电力设施进行巡检是其中一个最为重要的应用,它可以在无论白天还是黑夜的条件下检测高压输电线路绝缘子和电力设备的电晕放电现象,这些放电往往是存在故障的信号,例如绝缘子裂缝<sup>[1]</sup>,这种故障最终可导致代价巨大的大面积停电事故<sup>[2]</sup>。

然而,目前缺乏国际上统一的标准或相关国家标准来规范电晕辐射成像仪的性能测试,关于电晕辐射成像仪详细测试方法的文献也很少。电晕辐射成像仪的性能指标很多,其中灵敏度是其关键参数。据统计,根据全球主要的四家电晕辐射成像仪生产厂家所公开的技术参数中,灵敏度值大都在 $2 \times 10^{-18} \sim 3 \times 10^{-18} \text{ W/cm}^2$ 的相对窄的范围内变化。不同厂家并未说明采用了何种具体方法测试,也未对测试条件进行详细描述,这些灵敏度测试方法的合理性有待验证,电晕辐射成像仪实际上能否检测出如上所述 $10^{-18}$ 数量级的紫外光辐射出射度有待验证。比如,在相同条件下,两个不同的电晕辐射成像仪宣称具有相同的灵敏度,但在真正测试同一光源时它们所表现出的灵敏度性能差异明显<sup>[3,4]</sup>。目前,从非公开发表的信息来看,黑体法并不是测试电晕辐射成像仪相机灵敏度的最好选择<sup>[5-11]</sup>。

本文提出了一种新的基于紫外光源和平行光管的电晕辐射成像仪灵敏度测量方法,并通过光源、积分球及控制系统来实现测试带外抑制性能。通过标准探测器读出当前背景光日水平以及紫外光子数,重复调节以获取不同强度等级的日光条件,可以模拟出各种太阳光强度条件以准确评估出电晕辐射成像仪在不同太阳光环境下的性能特征。

## 1 基本原理

电晕辐射成像仪通过电晕放电点与可见光背景图像的融合来确定电晕的具体位置,并通过对测试特定区域内的光子计数来评估电晕放电强度。根据不同的国际行业应用检测导则,对电晕辐射成像仪的光学成像性能、灵敏度以及带外抑制性能提出了要求<sup>[12]</sup>。

### 1.1 电晕辐射成像仪主要技术指标

本研究所采用的电晕辐射成像仪工作原理如图1所示,其中探测通道有两个:上方为紫外光通道,包括紫外图像增强器MCP和CCD相机两个部分,其中紫外镜头接收电晕辐射的紫外信号,电晕辐射产生的紫外

信号入射至紫外 CCD 相机进行光电转换和信号增强,再输出至图像分析单元;下方是可见光通道,主要由可见光成像物镜和可见光 CCD 相机组成,其中可见光镜头接收成像视场中的可见光辐射信号,入射至可见光 CCD 相机进行信号转换,最终和紫外信号一起输出至图像合成单元,进行图像融合并显示。光路上采用紫外通道和可见光通道共享的视场,保证最终叠加的图像能够正常融合、匹配和成像。

除灵敏度外,带外抑制性能与紫外/可见光图像叠加精确度也是电晕辐射成像仪的重点参数。带外抑制是指电晕辐射成像仪对规定的紫外工作波段以外信号的抑制能力;紫外/可见光图像叠加精确度是指电晕辐射成像仪紫外线通道图像和可见光通道图像对应像素点叠加显示时的角偏差度,单位为 mrad。

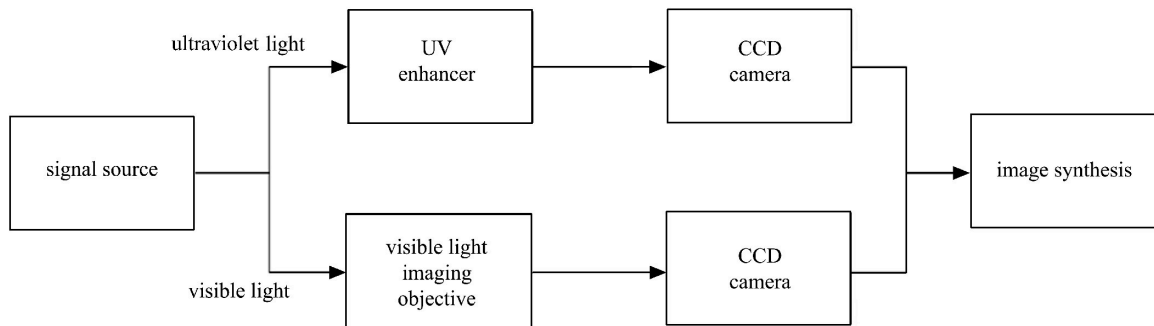


图1 电晕辐射成像仪原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ultraviolet imager

## 1.2 性能测试原理

### 1.2.1 紫外-可见光叠加精度测试

图2为紫外-可见光叠加精度测试系统示意图,由图2可见,紫外积分球装置的光源能够发出由紫外和可见光混合组成的光线,通过十字分划板和平行光管后出射的平行光由紫外全日盲成像仪接收,在电晕辐射成像仪上可以观察到经过分划板所成的像,通过软件可以计算出紫外-可见光的叠加精确度。

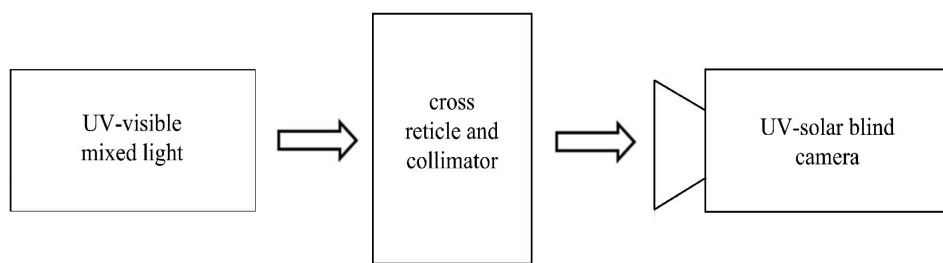


图2 紫外-可见光叠加精度测试系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of UV-visible light superposition accuracy test system

紫外和可见光叠加精度测试即仪器拍摄紫外图片和可见光图片的重合度测试,装置提供星点光源,仪器固定位置和角度拍摄星点,根据两张图片的光斑位置坐标进行差值计算,计算公式为

$$d_0 = \left[ \frac{\theta_w}{N_w} (d_x^2 + d_y^2) \right], \quad (1)$$

式中:  $d_x$ 、 $d_y$ 分别为紫外图像与可见光图像中心坐标  $x$ 轴、 $y$ 轴的差值,即两个光斑质心的直线距离,单位为 mm;  $\theta_w$ 为可见光水平方向的视场;  $N_w$ 为紫外图像水平方向的像素数目;叠加精确度  $d_0$  单位为 mrad。

### 1.2.2 紫外光检测灵敏度测试

日盲电晕辐射成像仪所能检测的最小紫外光强度即为紫外光检测灵敏度, 可表示为

$$E_{\min} = \frac{W}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \times 10^x}, \quad (2)$$

式中:  $x$  为衰减片的衰减密度,  $W$  为光源发光功率;  $d$  为功率计的感光面直径。

### 1.2.3 紫外光角分辨率测试

成像仪器角分辨率的测试原理为光源经过条纹镜头, 仪器可以清楚地分辨出条纹并显示出条纹图像, 由条纹间距  $d_x$  或  $d_y$  和平行光管焦距  $f$  (本装置为 650 mm) 计算出的角分辨率为该仪器的最小角分辨率, 可表示为

$$\rho_x = \frac{d_x}{f}, \quad (3)$$

$$\rho_y = \frac{d_y}{f}, \quad (4)$$

式中  $\rho_x$  和  $\rho_y$  分别为  $x$  轴或者  $y$  轴的角分辨率, 角分辨率的大小取决于光学系统的分辨能力, 而分辨能力又与有效孔径大小和波长有关。在给定波长下, 有效孔径越大, 分辨能力就越高, 角分辨率也就越小。因此, 当两者等效时, 取较小值可以使得角分辨率更高, 从而使光学系统的分辨能力更强。

### 1.2.4 紫外成像带外抑制测试

带外抑制表示日盲电晕辐射成像仪在白天检测时克服日光干扰的能力, 测试带外抑制性能时需要将测试紫外灵敏度的衰减器由积分球出光孔取下。通过钨灯模拟日光环境, 测试被测成像仪在太阳下的带外抑制性能。带外抑制性能测试主要是模拟不同天气条件下抗太阳光干扰的情况, 不同天气下太阳光强度不同, 仪器的抗太阳光干扰能力也不同。比较同等强度的日光水平下电晕辐射成像仪所获得的每分钟光子数的数值大小, 数值越小则其带外抑制性能越好。

带外抑制可表示为  $N/T$ , 其中  $N$  为特定时间 (5~10 s) 内的光子数总和,  $T$  为时长, 装置提供日光等波长的背景光源, 仪器进行拍摄, 光子数为指定时长的每秒读数累加。例如 1~5 s 光子数每秒显示为 10、20、30、20、25, 则光子总数为  $10 + 20 + 30 + 20 + 25 = 105$ , 带外抑制为  $105/5 = 21$ 。

## 2 测试平台研制

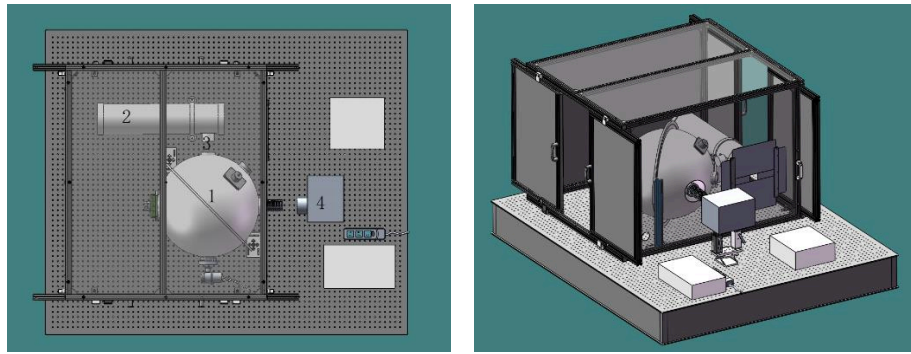
电晕辐射成像仪性能测试平台如图 3 所示, 主要由以下部分组成: 积分球、可见光光源、紫外光光源、平行光管、紫外光强计、可调光衰减器、平行光管及衰减器底座支架、电动可调狭缝、星点板、标准探测器、数据采集系统、系统或模块封装、操作平台、系统总成和软件等。

### 2.1 紫外积分球光源

积分球光源包含宽光谱可见光光源和紫外光光源, 其中前者由卤钨灯产生, 而 20~400 nm 紫外光源由氘灯产生, 以此双光源作为一个稳定的标准光源用于测试电晕辐射成像仪。

电晕辐射成像仪灵敏度性能测试模块包括可升降载物台、平行光管、用于提供均匀光源的积分球组,

该积分球组的两端固定在可升降载物台上, 平行光管设置在积分球组的测试光出口处。积分球组包括积分球、紫外光源、用于调整当前光强的衰减片和用于获取当前光强的光功率计。紫外光源和衰减片依次设置在积分球上端, 光功率计设置在积分球下端。该装置紫外灵敏度性能测试模块的主要参数设定如下: 积分球出光处光源的光谱范围为260~270 nm; 积分球出光处光源的出光口径 $\geq 50$  mm; 积分球出光处光源的辐射出射度为 $10^{-14} \sim 10^{-19}$  W/cm<sup>2</sup>可调。



1: integrating sphere group; 2: collimator; 3: star point hole/target plate; 4: imager

图3 光学性能测试、紫外灵敏度及带外抑制测试系统组成

Fig. 3 Optical performance test, UV sensitivity and out-of-band suppression test system composition

## 2.2 紫外平行光管

平行光管的光源来自于积分球, 光线经过星点标靶形成光斑, 并通过棱镜的反射, 进入平行光管, 最终到达仪器镜头, 用于测试光学系统的叠加精度。其中平行光管的理论焦距为650 mm。电晕辐射成像仪带外抑制性能测试模块包括可升降载物台、平行光管、提供均匀光源的积分球和获取当前背景光日水平以及紫外光子数的探测器。电晕辐射成像仪光学成像性能测试模块的主要参数如表1所示。

表1 光学成像性能测试模块主要参数

Table 1 Main parameters of the optical imaging performance test module

Performance	Parameter
Focal length of collimator/mm	850 (1±1%)
Diameter of collimator/mm	$\geq 50$
Working band of light source	260~270 nm & visible band
Field of view of collimator	$\geq 2^\circ$
Angular resolution of target plate/mrad	$< 0.3$

进行紫外光、可见光的重合度测试时, 在平行光管焦面上设有星点孔, 将被测成像仪放置于平行光管前接收平行光管出射的平行光, 该星点孔在被测成像仪的像面上成像为一个亮的光斑, 在可见光、紫外光模式下通过该星点孔分别对同一目标进行成像, 得到可见光模式和紫外光模式下的成像光斑, 通过计算这两个不同模式下的成像光斑中心位置偏差即可获得紫外光、可见光的重合度。

进行不同波段处的分辨率测试时, 在平行光管焦面上设有靶标板, 将被测成像仪置于平行光管出光口处, 光源照明靶标板, 靶标上均匀分布多处小孔, 通过成像仪对靶标进行测试, 根据成像可辨识靶标两个最小可辨目标所占角度大小, 从而评估成像仪的空间分辨率。

### 2.3 紫外成像测试平台

积分球的两端固定在可升降载物台上,且平行光管设置在积分球的测试光出口处。该积分球组包括积分球、日光光源、用于调整当前光强的衰减片和用于获取当前光强的光功率计,日光光源和衰减片依次设置在所述积分球的上端,光功率计设置在积分球的下端。探测器设置在积分球的正前方,且该探测器内置自动估算带外抑制性能参数的太阳曲线。此外,光强计用来计量光照射强度;衰减镜头对紫外光进行衰减,用来测试灵敏度;条纹标靶用于测试角分辨率,即仪器的可分辨最小单位;滤光片用于测试带外抑制,可以选择日光波段光辐射进行带外抑制测试。

研制的电晕辐射成像仪性能测试平台如图 4 所示。经过试验和测试,获得的紫外像管的光谱响应曲线如图 5 所示。

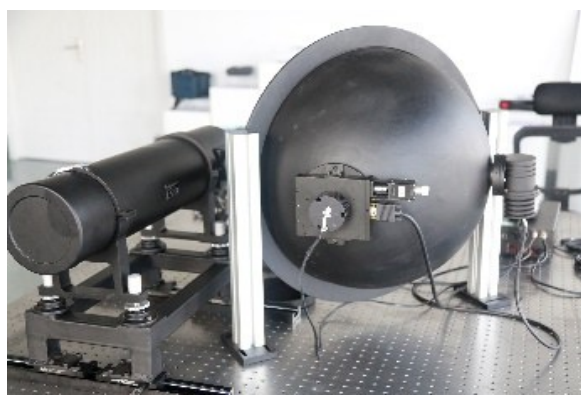


图 4 研制出的电晕辐射成像仪性能测试平台

Fig. 4 Performance test platform of the developed UV imager



图 5 紫外像管的光谱响应曲线

Fig. 5 Spectral response curve of UV image tube

单色仪探测流程图如图 6 所示,假定从单色仪出来的光全部被标准探测器(硅探测器)及被测探测器(像管)接收。被测像管的光谱响应值可表示为

$$I_{\text{si}}/R_{\text{si}}=W_{\text{si}}=W_{\text{mg}}=I_{\text{mg}}/R_{\text{mg}}, \quad (5)$$

$$R_{\text{mg}}=R_{\text{si}}I_{\text{mg}}/I_{\text{si}}, \quad (6)$$

式中:  $I_{\text{si}}$  为硅探测器的响应电流;  $R_{\text{si}}$  为硅探测器的光谱响应值;  $W_{\text{si}}$  为硅探测器接收的辐通量;  $W_{\text{mg}}$  为被测像管的阴极面接收的辐通量;  $I_{\text{mg}}$  为被测像管的响应电流;  $R_{\text{mg}}$  为被测像管的光谱响应值。

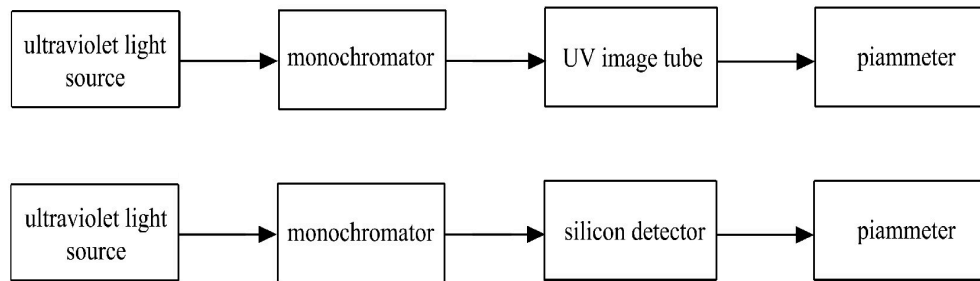


图6 单色仪探测流程图

Fig. 6 Flow chart of monochromator detection

### 3 测试平台性能测试

#### 3.1 紫外灵敏度检测

紫外灵敏度检测主要用于测试电晕辐射成像仪的紫外线最小可探测强度, 分别将市场上的三款电晕辐射成像仪编码为 A、B、C 并进行测试, 分别使用两种方法测量电晕辐射成像仪的灵敏度。1) 传统的黑体法。灵敏度测量为成像仪光学平面的日盲紫外波段的辐照度, 黑体在最小温度下工作产生被测电晕辐射成像仪可测紫外光源。测试条件为: 光谱范围 240~280 nm, 距离  $R = 200$  cm, 黑体孔径  $D = 2.2$  cm。2) 本研究提出的标准电晕辐射成像仪光源方法。灵敏度为电晕辐射成像仪检测到的最小出射度, 这个最小出射度等于一个校准好的大面积日盲紫外光源产生的电晕辐射。假设测试条件为: 光谱范围 255~270 nm, 光源直径  $D = 50$  mm, 光源与测试成像仪的距离  $R = 200$  cm, 其中  $D$  和  $R$  可以不同, 使电晕辐射成像仪显示光源图像像素大于 20 pixel, 达到灵敏度识别基准后呈现检测到电晕辐射。

上述两种方法的灵敏度测试结果如表 2 所示, 在表 2 的 A、B、C 三款电晕辐射成像仪开始检测到电晕辐射, 即达到其灵敏度可识别数值时, 传统的黑体法测量的灵敏度与使用标准电晕辐射成像仪光源方法分别需要产生对应数值的电晕辐射值。由表 2 可见: 1) 使用典型的黑体方法测量的电晕辐射成像仪相机的灵敏度比测试证书的数据要差得多, 比如成像仪 A 的差异是 23.6 倍。然而, 需要指出的是, 该实验所使用成像仪 A 已经用过一年, 而证书中的数据是新生产出来的成像仪测试的, 旧的成像仪相比较新的成像仪在灵敏度上可能存在些许差别。2) 传统的黑体法测量结果和标准电晕辐射成像仪光源法测量结果存在巨大差异, 后者的结果几乎差了  $10^6$  倍。后者的测试方式让 A、B、C 三款电晕辐射成像仪在更低的电晕辐射值下测试到电晕辐射, 更好地体现出三款电晕辐射成像仪检测低强度紫外光源的能力。3) 使用传统的黑体法测量的灵敏度与使用标准电晕辐射成像仪光源方法测量的灵敏度之间不存在关联性, 使用标准电晕辐射成像仪光源方法测量的灵敏度可以让电晕辐射成像仪的灵敏度特征更加精确, 从而使电晕辐射成像仪的性能得到更好的体现。

表 2 使用两种不同方法测量紫外灵敏度的结果

Table 2 Results of measuring UV sensitivity using two different methods

	Sensitivity		
	Nominal parameter	Traditional black body method	UV light source method
A	$3 \times 10^{-18}$	$71 \times 10^{-18}$	$5.1 \times 10^{-12}$
B	$2.2 \times 10^{-18}$	$13 \times 10^{-18}$	$5.3 \times 10^{-12}$
C	$3.8 \times 10^{-18}$	$4.9 \times 10^{-18}$	$9.5 \times 10^{-12}$

### 3.2 叠加精度性能测试

叠加精度性能测试主要用于测试电晕辐射成像仪的紫外光与可见光的光学分辨率及其重合度, 测试界面如图 7 所示, 点击上传紫外和可见光图像, 系统会自动计算两个光斑的坐标插值, 进而求出叠加精度。

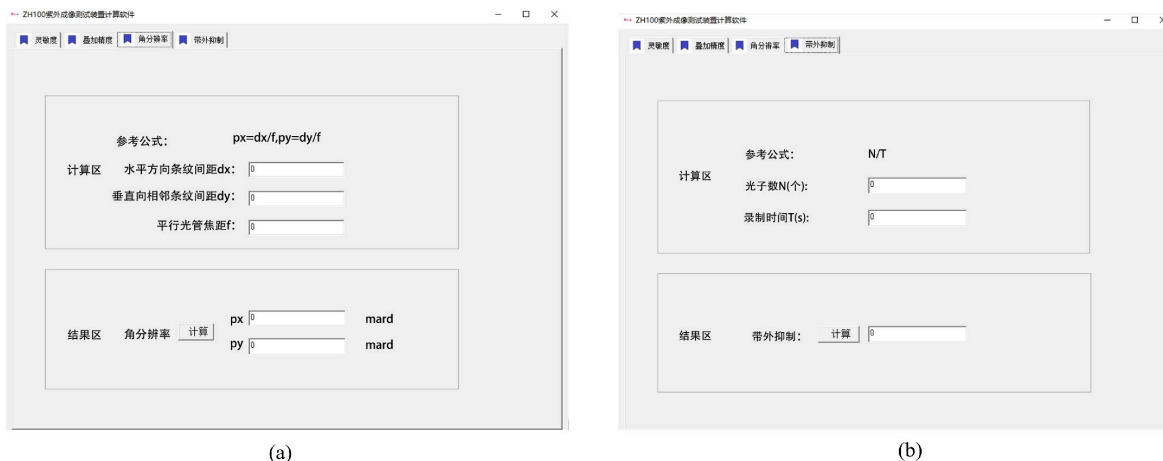


图 7 叠加精度测试图

Fig. 7 Test chart of superposition accuracy

### 3.3 角分辨率和带外抑制测试

角分辨率界面如图 8(a)所示, 输入水平条纹和垂直条纹的间距  $dx$  和  $dy$  及平行光管的焦距  $f$ , 点击计算得



(a)

(b)

图 8 (a) 角分辨率和 (b) 带外抑制测试图

Fig. 8 Test chart of (a) angular resolution and (b) out-of-b and suppression



出角分辨率;带外抑制性能检测界面如图8(b)所示,用于对电晕辐射成像仪的带外抑制性能进行评估,测试出被测仪器在日光波段的响应度,输入特定测试时间(5~10 s)的光子数总和,输出时间完成后点击计算得出机器带外抑制能力。

## 4 结 论

使用新的标准紫外光源法对电晕辐射成像仪紫外核心性能(包括光学成像性能、灵敏度及带外抑制性能)进行了综合测试。传统黑体测试方法测得的灵敏度与实际检测低强度紫外光源的灵敏度之间没有很好的相关性,而新的标准紫外光源法使用不同方法测量的电晕辐射成像仪相机的灵敏度差异倍级大。紫外光源法方法测试结果更加科学,根据标准紫外光源法研制的测电晕辐射成像仪性能测试平台能客观反映紫外成像设备的核心性能,并满足实际测试的需要。

### 参考文献:

- [1] Yi L, Chen J W, Peng X Y, *et al.* Experimental research of influence factors for ultraviolet imaging technology [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2016, 31(3): 159-164.  
易琳,陈聚文,彭向阳,等.紫外成像技术影响因素的实验研究[J].*电力科学与技术学报*, 2016, 31(3): 159-164.
- [2] Wu T, Wang F, Xin H S, *et al.* Application and analysis of ultraviolet imaging technology in finding insulation defects of power equipment [J]. *Electronics World*, 2018, 15: 91-93.  
吴甜,王飞,辛海松,等.紫外成像技术对发现电力设备绝缘缺陷的运用分析[J].*电子世界*, 2018, 15: 91-93.
- [3] Gu Y, LYU Y, Yang F, *et al.* Testing system for UV imager superposition accuracy [J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(8): 695-698.  
顾燕,吕扬,杨锋,等.紫外成像仪的紫外可见光图像叠加精确度测试系统[J].*红外技术*, 2019, 41(8): 695-698.
- [4] Nicolaas S D T. Calibration of UV-sensitive camera for corona detection [J]. *Electrical and Electronic Engineering*, 2007, 3: 1-10.
- [5] Zhang L, Cai J, Lu L F. Analysis of factors affecting application of blackbody radiator for radiation thermometry [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2020, 40(4): 1-4.  
张岚,蔡静,路林锋.影响辐射测温用黑体辐射源应用的因素分析[J].*计测技术*, 2020, 40(4): 1-4.
- [6] 郭芳,张曦雯.校准工作用辐射温度计选用计量标准探讨[J].*计量技术*, 2020, 1: 55-57.
- [7] 武佳,郭沈辉,李莉,等.使用黑体辐射源作为参考标准校准辐射温度计的不确定度分析[J].*计量技术*, 2018, 4: 60-61.
- [8] Zhang M C, Song H Y, Zhou Y, *et al.* Calibration for SBUV corona detection system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(4): 135-140, 146.  
章明朝,宋慧营,周跃,等.“日盲”紫外电晕探测系统定标[J].*光电工程*, 2010, 37(4): 135-140, 146.
- [9] Zhang Y F, Shao Z F, Wu Y Q. Calibration method for spectral responsivity of infrared detector based on blackbody at multiple temperature [C]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9623: 227-233.
- [10] 黄永义.普朗克黑体辐射定律的建立过程[J].*广西物理*, 2011, 32(3): 32-36.
- [11] Li H M, Wang S H, Lv F C, *et al.* Study on insulator contaminant discharge characteristics based on ultraviolet imaging [J]. *Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition)*, 2010, 37(3): 1-6.  
李和明,王胜辉,律方成,等.基于紫外成像的污秽绝缘子放电特性研究[J].*华北电力大学学报(自然科学版)*, 2010, 37(3): 1-6.
- [12] 中国电力科学研究院有限公司带电设备紫外诊断技术应用导则: DL/T 345-2019 [S]. 北京:中国电力出版社, 2019: 2-4.