

中华人民共和国国家标准

GB/T 43817—2024

紫外辐射源的辐射测量方法

Radiometric measurement methods of ultraviolet radiation sources

2024-03-15发布

2024-10-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会

发布

目 次

前言 I

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 测量条件 3

5 测量设备 5

6 测量 6

7 测量结果的表达 13

8 防护要求 14

附录 A（资料性）紫外辐照度计的光谱特性及表征指标 15

参考文献 18

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国轻工业联合会提出。

本文件由全国照明电器标准化技术委员会(SAC/TC 224)归口。

本文件起草单位：杭州远方光电信息股份有限公司、广东省广研标准化技术有限公司、国家电光源质量监督检验中心(北京)、中国计量科学研究院、佛山市国星光电股份有限公司、复旦大学、广东省中山市质量计量监督检测所、彩融电光源技术(上海)有限公司、东莞锐视光电科技有限公司、宁波大榭开发区佑威光电有限公司、昕诺飞(中国)投资有限公司、广州赛西标准检测研究院有限公司。

本文件主要起草人：李倩、张俊斌、张伟、刘慧、麦家儿、沈海平、彭振坚、程星、王华、吴琼、倪伟、黄胜华、王彦飞、潘建根。

紫外辐射源的辐射测量方法

1 范围

本文件描述了紫外辐射源在200nm~400 nm 波段范围内的光谱分布、(有效)辐通量、(有效)辐射剂量、(有效)辐强度和(有效)辐照度及其空间分布等辐射度量的测量方法。

本文件适用于实验室条件下的紫外辐射源的辐射测量。生产线和应用现场的紫外辐射量测量，以及光辐射源在400 nm~450 nm 波段范围内的辐射量测量参照使用。

本文件不适用于相干辐射源(如紫外激光器)和自然辐射源(如太阳光)的测量，也不适用于旨在发射200 nm 以下真空紫外辐射以产生臭氧的紫外辐射源的测量。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

- GB/T 2900.65—2023 电工术语 照明
- GB/T39394—2020 LED 灯、LED 灯具和 LED 模块的测试方法
- GB/T42219—2022 大功率 LED 的光学测量

3 术语和定义

GB/T 2900.65—2023 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

紫外辐射 ultraviolet radiation;UVR

UV 辐射 UV radiation;UVR

波长小于可见辐射波长的光辐射。

注1: 对于波长100 nm~400nm范围的紫外辐射通常细分为:

- UV-A:315 nm~400 nm;
- UV-B:280 nm~315 nm;
- UV-C:100 nm~280 nm。

注2: 200 nm以下的紫外辐射也被称为真空紫外。

[来源: GB/T 2900.65—2023, 845-21-008, 有修改]

3.2

紫外辐射源 ultraviolet radiation source;UV radiation source

产生紫外辐射(3.1)的源。

注1: 紫外辐射源包括发射紫外辐射的器件、模组、灯和灯具以及类似产品或装置。

注2: 紫外辐射源发射的辐射可能包括紫外波段以外的其他辐射。

3.3

作用光谱 action spectrum
光谱加权函数 spectral weighting function
 $S(\lambda)$

在一个特定的系统中，针对特定生物效应或化学效应，代表光辐射相对光谱有效性的函数。

注1:归一化作用光谱是与诱导某种(生物或化学)反应所需的单色辐射剂量成反比的波长依赖特性；作用光谱通常在“最大作用”的波长上归一化为1,即此处最小的剂量就足以诱导所需的效应。

注2:本文件中作用光谱包括红斑反应光谱(见GB/T 20150)、非黑色素瘤皮肤癌作用光谱(见 ISO/CIE 28077: 2016)、杀菌作用光谱以及光化学紫外危害加权函数(见GB/T20145)等。

注3:对于无光谱加权的辐射量测量， $S(\lambda)$ 视作在目标波段范围内光谱响应度均为1,而在目标波段范围外的光谱响应度均为0的矩形函数。

[来源：GB/T 2900.65—2023,845-26-027,有修改]

3.4

有效辐照度 effective irradiance
 E_{act}

由所关注效应的作用光谱(3.3)加权的辐照度。
见式(1)。

$$E_{act} = K \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda}(\lambda) \cdot S_{act}(\lambda) \cdot d\lambda \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- K —— 所关注效应的光辐射转换效率；
- λ_2 —— $S_a(\lambda)$ 的终止波长；
- λ_1 —— $S_a(\lambda)$ 的起始波长；
- $E_{\lambda}(\lambda)$ —— 辐射源产生的光谱辐照度；
- $S(\lambda)$ —— 所关注效应的作用光谱；
- λ —— 波长。

注：有效辐照度的单位为瓦每平方米(W · m²)。

3.5

有效辐通量 effective radiant flux
 φ

由所关注效应的作用光谱(3.3)加权的辐通量。
见式(2)。

$$\Phi_{act} = K \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda}(\lambda) \cdot S_{act}(\lambda) \cdot d\lambda \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- $\Phi_{\lambda}(\lambda)$ —— 辐射源的光谱辐通量。

注：单位为瓦(W)。

3.6

有效辐强度 effective radiant intensity
 I_{mt}

由所关注效应的作用光谱(3.3)加权的辐强度。
见式(3)。

$$I_{act} = K \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{\lambda}(\lambda) \cdot S_{act}(\lambda) \cdot d\lambda \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中：
 $I_4(\lambda)$ —— 辐射源产生的光谱辐强度。
注：单位为瓦每球面度($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$)。

3.7

光谱分布 spectral distribution
光谱密集度 spectral concentration
 X_4

在波长 λ 处，辐射量或光度量或光子量相对于波长 λ 的密度。
见式(4)、

$$X_4 = \frac{dX(\lambda)}{d\lambda} \dots\dots\dots (4)$$

注1:当所涉及的函数 $X_2(\lambda)$ 在宽的波长范围，而不是某一特定的波长时，术语“光谱分布”比“光谱密集度”更为适宜。
注2:通常 X_2 也是 λ 的函数，在这种情况下，为了强调这一点，可以写成 $X_2(\lambda)$ ，而不改变任何意义。
注3:辐通量的光谱分布单位为瓦每纳米($\text{W}\cdot\text{nm}^{-1}$)，光通量的光谱分布单位为流明每纳米($\text{lm}\cdot\text{nm}^{-1}$)，光子通量的光谱分布单位为负一次方纳米(nm^{-1})。其他量的光谱分布单位类似。
注4:量 X 也可以表示为频率 ν 、波数 σ 等的函数，其相对应的符号为 $X(\nu)$ 、 $X(\sigma)$ 等；同样密集度可表示为频率 ν 、波数 σ 等的函数，其相对应的符号为 X_ν 、 X_σ 等，在这种情况下，单位表达方式也会相应改变。
[来源：GB/T 2900.65—2023,845-21-029]

3.8

参考温度 reference temperature

测量紫外辐射源(3.2)辐射度量时所指定的参考点的温度，紫外辐射源(3.2)的辐射度量一般也在该温度下宣称。

4 测量条件

4.1 实验室和环境条件

4.1.1 实验室条件

测量应在环境(如烟、尘、水汽和振动等)对被测量的影响可忽略不计的房间内进行。除非制造商或委托方有特殊要求，实验室应符合下列要求：
——温度：25.0 °C±5.0 °C；
——相对湿度：不超过65%；
——大气压力：86 kPa~106 kPa。

4.1.2 空气流动

被测紫外辐射源宜尽可能在无对流风的环境中进行测量，当处于非工作状态下周围空气的流动速度应不超过0.25 m·s⁻¹。
使用分布(光谱)辐射度计测试时，如移动被测紫外辐射源所引起的气流速度无法满足上述要求，则应进行相应的修正。
注：高气流速度下的测量修正因子见 GB/T 39394—2020。

常规积分球关闭时视为满足以上要求，但当球内安装有风冷温控系统时，球内出风口应安装有挡板或类似装置，使气流不直接到达被测紫外辐射源及标准辐射源。如果由于被测紫外辐射源产生的热量使封闭积分球内温度超过允许范围时，测试前可部分敞开积分球用于稳定被测紫外辐射源，达到稳定条

件后，缓慢关闭球体，避免空气进入球内引起被测紫外辐射源表面的气流。

4.1.3 环境背景

测量环境中不应使用具有荧光效应的物质。

使用分布(光谱)辐射度计测量辐射分布或辐照度计测量辐照度的环境中，周围应黑化处理，空间壁面宜涂黑色亚光漆或布置黑绒布。

4.2 供电要求

除非另有规定，紫外辐射源应在额定电压或额定电流下进行测量。如额定值是一个范围，则取其中间值。

被测紫外辐射源为 LED 封装时，由矩形脉冲或恒流供电，测试电流应稳定在额定电流值 $\times (1 \pm 0.2\%)$ 之间；其他类型直流供电的紫外辐射源，电源电压应稳定在额定值 $\times (1 \pm 0.2\%)$ 之间，电压纹波含量不超过0.5%；交流供电的紫外辐射源，电源电压均方根值(RMS) 应稳定在额定值 $\times (1 \pm 0.2\%)$ 之间，电源的谐波失真度应小于3%。

需要外置控制装置(如镇流器或驱动器)的紫外辐射源，测量时应在基准控制装置或等效驱动条件下由电源供电或专用装置直接供电，供电电源或专用装置的输出电压或电流或功率应稳定在额定值 $\times (1 \pm 0.2\%)$ 之间。如相关产品标准中另有规定，则以相关产品标准为准。在未规定基准控制装置的情况下，应由紫外辐射源的制造商或委托方规定适宜的试验用控制装置。试验用控制装置应在测量报告中说明。

4.3 测量电路

所有导线和连接应牢固可靠。测量电路应按照相关国际标准或国家标准的规定，或按照制造商或委托方指定的测量电路。如无特殊规定，电压采用四线法测量。

注：对于高频工作的被测紫外辐射源，使用不合适的导线或不合适的连接方式会造成电压和电流测量偏差。

4.4 被测紫外辐射源

4.4.1 参考温度及温度设置

被测紫外辐射源为 LED 封装时，参考温度为结温 t_j, t_j 由相关标准规定或由制造商或委托方指定，按照GB/T42219—2022 描述的方法进行结温设置和测量。

被测紫外辐射源为 LED 模组时，参考温度为模组外壳上参考点的额定性能温度 t_a, t_p 由制造商或委托方指定，允差区间为 $\pm 2.5^\circ\text{C}$ 。使用温控箱或温控测量系统(如温控积分球)等热管理装置使参考点稳定在 t_p ，使用温度传感器测量参考点的温度。

若制造商或委托方要求低气压汞蒸气放电灯的参考温度为外壳上指定测温点(如冷端)，并指定温度时，使用温度传感器测量参考点的温度，温度允差区间为 $\pm 1.2^\circ\text{C}$ 。

除非制造商或委托方有特殊要求，其他类型的紫外辐射源以环境温度为参考温度；如无另行规定，被测紫外辐射源周边的环境温度应为 $25.0^\circ\text{C} \pm 1.2^\circ\text{C}$ 。环境温度的测试点与被测紫外辐射源的距离 $\leq 0.5\text{ m}$ ，且与被测紫外辐射源具有相同高度。使用积分球时，温度传感器应放置在球内且应安装挡板阻挡光辐射直射到温度传感器；如被测紫外辐射源安装于 2π 积分球顶部或底部，温度传感器可安装在球内靠近被测紫外辐射源高度的位置。

测量温度时，温度传感器不应受到紫外辐射源直射辐射，也不应干扰辐射测量路径，且温度测量不影响被测紫外辐射源的热传递。测量结果的接受区间考虑其测量不确定度而收窄。

示例：温度测量的不确定度是 $0.2^\circ\text{C} (k=2)$ ，接受区间是 $\pm 1.0^\circ\text{C}$ 。

如实际测量中被测紫外辐射源的温度不是标准规定值或委托方指定值，可首先报告被测紫外辐射源在该温度条件下的测量结果，然后确定转换因子，将测量值转换为标准规定或委托方指定温度下的值。转换因子可通过测量处于温控装置中被测辐射源的辐射度相对变化的比值得到。

注1: 如有必要，使用水冷或风冷等方式控制温度稳定。

注2: 转换因子通过相对辐射度测量得到，通常用独立的表格或图线给出转换因子。

4.4.2 测量前的准备

被测紫外辐射源应按照适用的产品标准进行老炼。若无相关标准规定老炼要求，则紫外辐射源在达到稳定工作状态后，可直接测量。被测紫外辐射源的老炼情况应在测量报告中说明。

被测紫外辐射源表面应保持清洁干净。

4.4.3 工作姿态和模式

如无特殊规定，被测紫外辐射源应工作在自由空气中，在预热稳定和测量中其工作姿态应符合适用产品标准要求或依据制造商规定的预期使用方式，安装所使用的辅助装置不应影响被测紫外辐射源的散热。若不能达到本条要求，则应将测量值校正为规定工作姿态下的值。

被测紫外辐射源有多种工作模式(如多种工作姿态、功率可调或光谱可调等)时，测量时的工作模式信息应在测量报告中说明。

注1: GB/T 39394—2020 的附录C中提供了工作姿态的校正因子的测量方法。

注2: 安装方式与散热途径密切相关，并可能对测试结果产生较大影响，例如积分球中使用的安装辅助装置要避免将被测紫外辐射源产生的热量传导到积分球壁。

4.4.4 预热稳定

若无特殊规定，测试前被测紫外辐射源应达到稳定工作状态。

判定被测紫外辐射源稳定工作的条件为：在15 min 内以不大于5 min 的时间间隔测量辐射输出值，其最大读数和最小读数之间的差异小于最小读数的0.5%。若被测紫外辐射源点燃45 min 仍未达到稳定工作条件且读数为随意波动，则可开始测量并记录观测到的波动；若观测到的读数值并非随意波动，而是变化梯度缓慢减小，则只有当达到稳定条件时才开始测量。

如果被测紫外辐射源有多种工作模式，在每种工作模式测量前应分别进行预热稳定，不同工作模式及稳定时间信息应在测量报告中说明。

5 测量设备

5.1 紫外辐照度计

紫外辐照度计的响应波长范围应覆盖被测紫外辐射源所需测量的波长范围或目标作用光谱的范围，且相对光谱响应度应与对应的作用光谱相匹配。理想的测量辐射度的紫外辐照度计，其目标作用光谱为在目标波段范围内光谱响应度均为1, 而在目标波段范围外的光谱响应度均为0的矩形函数；测量有效辐射度量的紫外辐照度计，根据其关注的光化学效应或光生物效应作用确定作用光谱。对于测量单谱线的紫外辐照度计，其相对光谱响应度曲线在谱线波长处宜较为平坦，以免响应波长漂移造成测量误差。理想的紫外辐照度计的光谱特性以及光谱失匹配带来的测量不确定度评估方法见附录A。

此外，紫外辐照度计还应满足以下要求：

- 余弦特性(方向性响应)误差：UV-A 波段≤6% , UV-B 波段≤10% , UV-C 波段≤10%；
- 非线性误差：在±1.0%范围内；
- 长波(波长大于光谱响应波段的光辐射)响应误差：UV-A 波段≤10%, UV-B 波段≤10%,

UV-C 波段 $\leq 30\%$ 。

5.2 光谱辐射计

光谱辐射计的响应波长范围应覆盖被测紫外辐射源的辐射波长范围或目标作用光谱的范围。根据被测波段范围选择合适的光谱辐照度标准灯对光谱辐射计进行校准。

此外，光谱辐射计还应满足以下要求：

- 波长最大允许误差 $\pm 0.5\text{ nm}$ ；
- 带宽(半峰全宽) $\leq 2\text{ nm}$ ，波长采样间隔 $\leq 0.2\text{ nm}$ ；
- 每个波长下对辐射输入都具有线性响应，光谱非线性度在 $\pm 1\%$ 范围内；
- 谱段范围内杂散辐射系数 $\leq 10^{-3}$ ，当被测紫外辐射源具有较强的可见光或红外辐射时，谱段范围外杂散辐射系数 $\leq 10^{-5}$ ；

注：光谱辐射计的谱段范围内杂散辐射是指来自紫外波段内的非期望辐射，谱段范围外杂散辐射是指可见辐射和红外辐射产生的非期望辐射。

- 测量光谱辐照度的紫外光谱辐射计具备余弦修正器，余弦特性(方向性响应)误差：UV-A 波段 $\leq 6\%$ ，UV-B 波段 $\leq 10\%$ ，UV-C 波段 $\leq 10\%$ 。

5.3 积分球

积分球的球壁上应具有安装紫外辐照度计或紫外光谱辐射计的探测窗口。积分球内壁的涂层应具备漫反射特性且荧光效应可忽略。

积分球的探测窗口和被测光源之间应设置挡板，挡板的尺寸宜尽量小，但要使探头不会被标准灯或被测紫外辐射源直接照射。

积分球宜配备辅助灯以实施自吸收测量，辅助灯也应有挡板，使其直射光线不会照射到探测器接受面或被测样品上，辅助灯的光谱应与被测紫外辐射源的光谱相同或接近。

当被测紫外辐射源安装在积分球中心时(4π 方法)，紫外辐射源的总表面积不应超过积分球内部总面积的2%，紧凑型紫外辐射源的直径宜小于积分球直径的1/10；当被测紫外辐射源安装在积分球开口时(2π 方法)，积分球开口直径不应超过积分球直径的1/3。

5.4 分布(光谱)辐射度计的旋转工作台

分布(光谱)辐射度计的旋转工作台应符合GB/T39394—2020 中4.5.3的要求，扫描角度范围应能覆盖整个被测紫外辐射源的角度，角度精度应在 $\pm 0.5^\circ$ 以内，角度显示分辨率应为 0.1° 或更高。

机械装置(如支承辐射源的灯臂)遮挡辐射源发射光的角度区域(称为死角)不应超过 0.1 sr (半锥角约为 10° 的圆锥)。

5.5 平移测量台

探测器移动范围应满足空间指定(有效)辐照度测量区域需求，并满足以下要求：

- 探测器位置移动精度在 $\pm 0.5\text{ mm}$ 范围内；
- 探测器位置移动分辨率 $\leq 0.1\text{ mm}$ ；
- 探测器定位重复性 $\leq 0.2\text{ mm}$ 。

注：部分平移测量台具有探测器角度调节功能。

6 测量

6.1 光谱分布的测量

使用紫外光谱辐射计测量被测紫外辐射源的相对光谱功率分布，以图形或表格形式报告。

可采用的光辐射接收方法及对应的绝对量值包括：

- 具有余弦修正的紫外光谱辐射计测量指定位置的光谱辐照度；
- 具有余弦修正的紫外光谱辐射计与积分球相结合测量紫外光谱辐通量；
- 分布光谱辐射计测量指定角度的紫外辐强度或通过扫描积分测量紫外光谱辐通量。

通过相对光谱功率分布进一步得到被测紫外辐射源的光谱参数。

紫外辐射源的峰值波长 λ_p 。为测量光谱分布中最高幅值对应的波长。

基于LED 的紫外辐射源的质心波长 λ_c 、中心波长 λ_o 和光谱带宽 $\Delta \lambda$ 应分别按式(5)、式(6)和式(7)计算。

$$\lambda_c = \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda \cdot P(\lambda) d\lambda \right] / \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) d\lambda \right]$$

..... (5)

式中：

- λ_1 —— $P(\lambda)$ 的起始波长，单位为纳米(nm)；
- λ_2 —— $P(\lambda)$ 的终止波长，单位为纳米(nm)；
- λ ——波长，单位为纳米(nm)；
- $P(\lambda)$ —— 被测紫外辐射源的相对光谱功率分布。

$$\lambda_{0.5} = (\lambda'_{0.5} + \lambda''_{0.5}) / 2$$

..... (6)

式中：

- $\lambda_{0.5}$ 、 $\lambda_{0.5}'$ 、 $\lambda_{0.5}''$ ——分别表示分布在峰值波长两侧且辐射功率为峰值波长辐射功率一半(50%)所对应的波长，单位为纳米(nm)，如图1所示。

$$\Delta \lambda = |\lambda_{0.5}' - \lambda_{0.5}''|$$

..... (7)

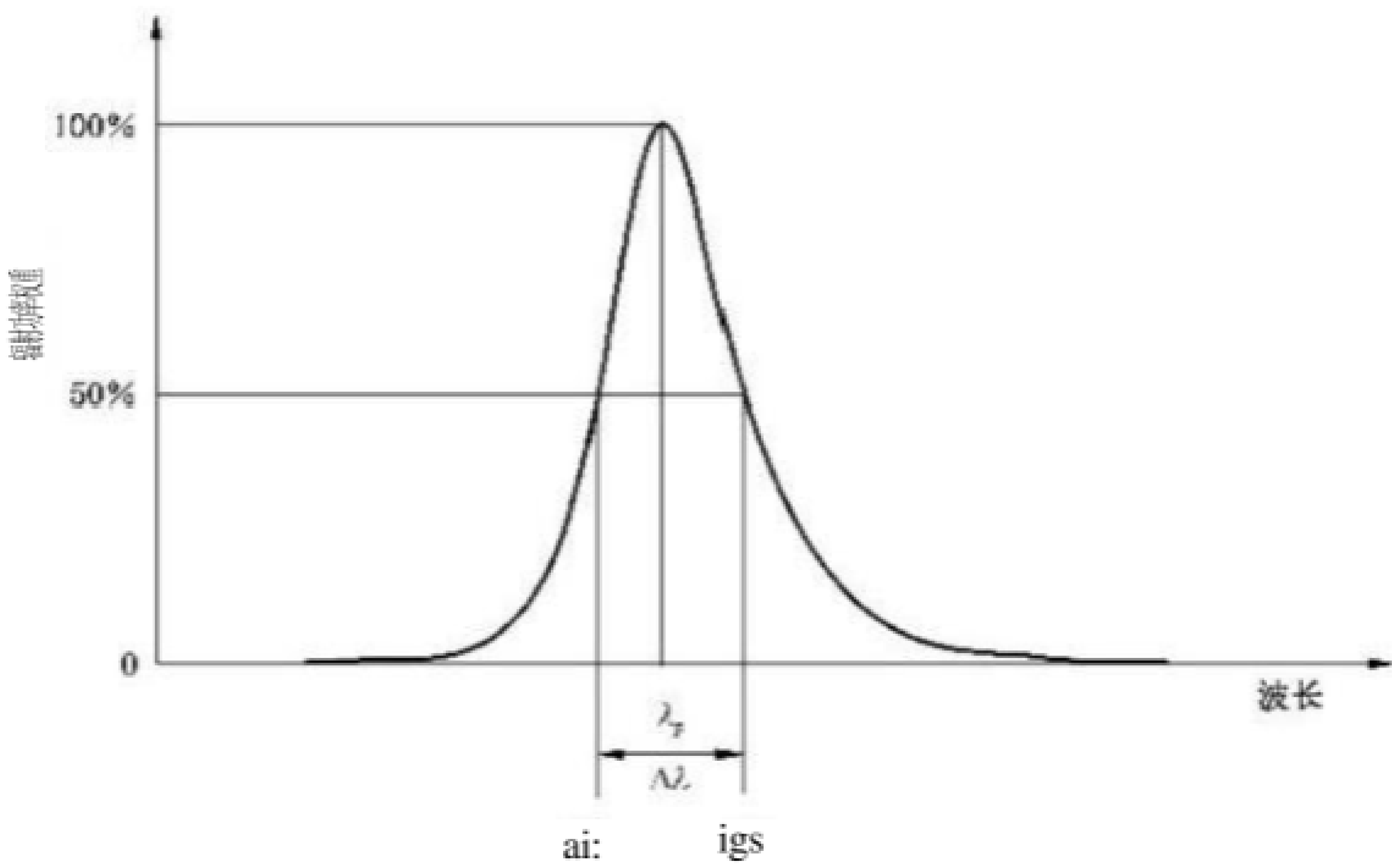


图1 相对光谱辐射功率分布

6.2 辐照度和有效辐照度的测量

6.2.1 使用紫外光谱辐照度计

使用紫外光谱辐照度计测量指定被测面的光谱辐照度，进而积分计算出辐照度或有效辐照度。使用紫外光谱辐照度计进行测量时，根据被测对象选择光谱测量范围合适的测量设备，注意杂散辐射和测量设备校准溯源的影响，并纳入不确定度分析中。

注：当被测紫外辐射源的发射面尺寸较大或者测量的距离较短时，紫外光谱辐照度计/紫外辐照度计的余弦特性误差对于辐照度测量结果的影响较大。

6.2.2 使用紫外辐照度计

应使用经校准的紫外辐照度计(见5.1)快速测量指定被测面的紫外(有效)辐照度,包括下列两种测量方法。

——使用光谱失匹配指数 $f_i \leq 5\%$ 的紫外辐照度计测量紫外(有效)辐照度。使用辐照度值已知的参考辐射源 R 校准紫外辐照度计,参考辐射源 R 发射的紫外光谱在紫外辐照度计的目标波段范围内。

注1:紫外辐照度计光谱失匹配指数 f_i 计算方法见附录 A。

——使用与被测辐射源具有相同或相似光谱功率分布的参考辐射源 Z 校准紫外辐照度计的响应度,用校准过的紫外辐照度计进行(有效)辐照度测量,校准方式包括以下两种:

● 基于源的方法:

使用光谱辐照度已知的参考辐射源 Z 校准紫外辐照度计,此时紫外辐照度计的响应度 $SE_{act,Z}$ 可表示为式(8)。

$$SE_{act,Z} = \frac{Y_Z}{K \cdot \int_{\lambda} E_{\lambda,Z}(\lambda) \cdot S_{ref}(\lambda) d\lambda} \dots\dots\dots (8)$$

式中:

- Y_Z —— 被校紫外辐照度计的输出信号或读数;
- K —— 所关注效应的光辐射转换效率,在大多数情况下,其取值为1;
- $S(\lambda)$ —— 所关注效应的作用光谱函数;
- $E_{\lambda,Z}(\lambda)$ —— 参考辐射源 Z 的光谱辐照度,单位为瓦每平方米(W·m⁻²)。

参考辐射源 Z 可是被测紫外辐射源本身,使用合适的测量方法(如较高精度的光谱辐射计)精确地确定被测紫外辐射源在某一位置的光谱辐照度,通过替代比较法校准紫外辐照度计的响应度。

● 基于探测器的方法:

使用已针对参考辐射源 Z 校准的参考辐照度计对紫外辐照度计校准,参考紫外辐照度计对参考辐射源 Z 的有效响应度 $SE_{ref,Z}$ 已知,则被校紫外辐照度计对参考辐射源 Z 的响应度 S_{PT} , 可表示为式(9)。

$$S_{PT} = SE_{ref,Z} \cdot Y_Z^{(PT)} / Y_Z^{(Ref)} \dots\dots\dots (9)$$

式中:

- Y_T —— 待校紫外辐照度计对紫外辐射源 Z 的读数;
- Y —— 参考紫外辐照度计对紫外辐射源 Z 的读数。

注2:参考紫外辐照度计一般是光谱辐照度计。

6.2.3 辐照度和有效辐照度随时间变化的测量

使用光谱辐射计或紫外辐照度计以一定的时间间隔测量指定被测面的紫外(有效)辐照度随时间的变化。如无特殊规定,一般从被测紫外辐射源点燃时开始测量。光谱辐射计或紫外辐照度计的响应速度宜快于待测紫外辐射源的变化速度。

注:有些类型的紫外辐射源,以峰值辐照度来宣称辐照度性能,这些类型的紫外辐射源一般为特定使用环境所设计。

6.3 辐射剂量和有效辐射剂量的测量

对于稳定后(有效)辐照度不随时间变化的紫外辐射源,辐射剂量和有效辐射剂量直接采用辐照度

和有效辐照度与时间的乘积获得，见式(10)。

$$H=E\times t \dots\dots\dots (10)$$

式中：
H— (有效)辐射剂量；
E ——(有效)辐照度。

对于(有效)辐照度随时间变化的紫外辐射源，根据6.2.3测量获得辐照度或有效辐照度随时间的变化的曲线，进行时间积分以获得辐射剂量或有效辐射剂量，见式(11)。

$$H = \sum_{t=t_1}^{t_2} E(t) \Delta t \dots\dots\dots (11)$$

式中：
E(t)——t 时刻的(有效)辐照度；
△t —— (有效)辐照度的持续时间；
t₁ —— 计算辐射剂量的起始时间；
t₂ —— 计算辐射剂量的终止时间。

注：空气消毒应用场所通常使用紫外辐射的流率(球面辐照度)剂量进行评价，与本文件中的平面辐照度剂量有所区别。

6.4 辐通量和有效辐通量的测量

6.4.1 使用分布(光谱)辐射度计

采用分布(光谱)辐射度计测量被测紫外辐射源的辐通量和有效辐通量。

分布光谱辐射计集成了紫外光谱辐射计和旋转工作台；分布辐射度计集成了紫外辐射计和旋转工作台。如图2所示，被测紫外辐射源应按其设计的方向安装在分布(光谱)辐射度计，其辐射中心应是分布(光谱)辐射度计的旋转中心；在空间各个角度上测量被测紫外辐射源的(光谱)辐照度或(有效)辐照度，并通过式(12)积分方法计算出总(有效)辐通量。

$$\Phi_e = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} r^2 E_e(e,\eta) \sin e \, de \, d\eta \dots\dots\dots (12)$$

式中：
φ ——被测紫外辐射源的总(有效)辐通量，单位为瓦(W)；
r —— 探测器与被测紫外辐射源之间的测量距离，单位为米(m)；
e —— 空间天顶角度，单位为度(°)；
n —— 空间方位角度，单位为度(°)；
E(e,η)—— 空间角度为(e,η) 时对应的(有效)辐照度。

使用紫外光谱辐照度计测量辐照度时，应按照6.2.1中所述方法；使用紫外辐照度计测量辐照度时，应按照6.2.2中所述方法。

分布(光谱)辐射度计在夹持紫外辐射源时会造成一定角度区域内的辐射遮挡，在测量全向辐射的被测紫外辐射源时宜尽量减小该“死角”区域，或者对辐射遮挡进行校正。使用溯源至国家计量机构的辐通量标准源验证分布(光谱)辐射度计的测量值。

注1:受结构影响，许多紫外辐射源只能在其正常的安装位置进行辐通量和有效辐通量测试，测试前做好预防措施以避免重要的光学部件的下垂、变形或移动等引起的机械干扰。
注2:分布(光谱)辐射度计中被测紫外辐射源中心到探测器之间的测量距离要能保证旋转测量过程中不发生碰撞；当被测紫外辐射源的发射面尺寸较大(如线性长灯管)时，增加测量距离能够减小或者避免(光谱)辐照度计的余弦特性误差带来的影响。

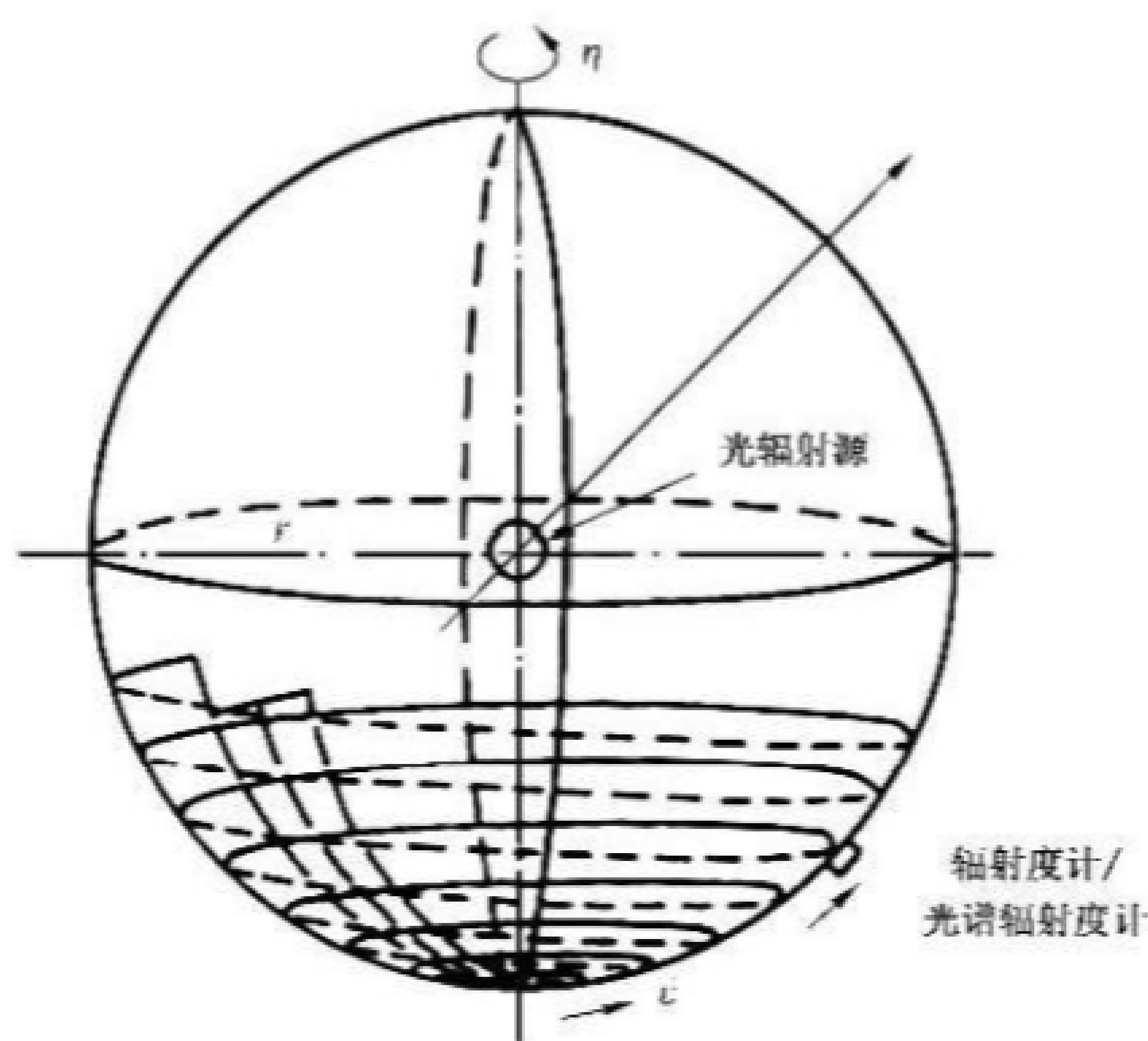


图 2 基于辐射计的辐通量测量原理

分布(光谱)辐射度计应在被测紫外辐射源发射辐射的角度范围内扫描测量，若存在采样死角则应予以校正。一般情况下，相邻测量平面的空间天顶角度 ε 间隔不大于 10° ，平面内的空间方位角度 η 间隔不大于 5° 。对于光束角小于 50° 的紫外辐射源，其角度增量应不大于光束角的 $1/10$ 。

6.4.2 使用积分球系统

积分球系统根据探测器的不同，可分为积分球-辐射计系统和积分球-光谱辐射计系统。积分球-辐射计系统仅适用于定标积分球系统的参考辐射源与被测紫外辐射源具有相同或相似的光谱功率分布和空间辐强度分布的情况。以积分球-光谱辐射计系统为例，其 4π 方法和 2π 方法两种测量原理如图3所示。

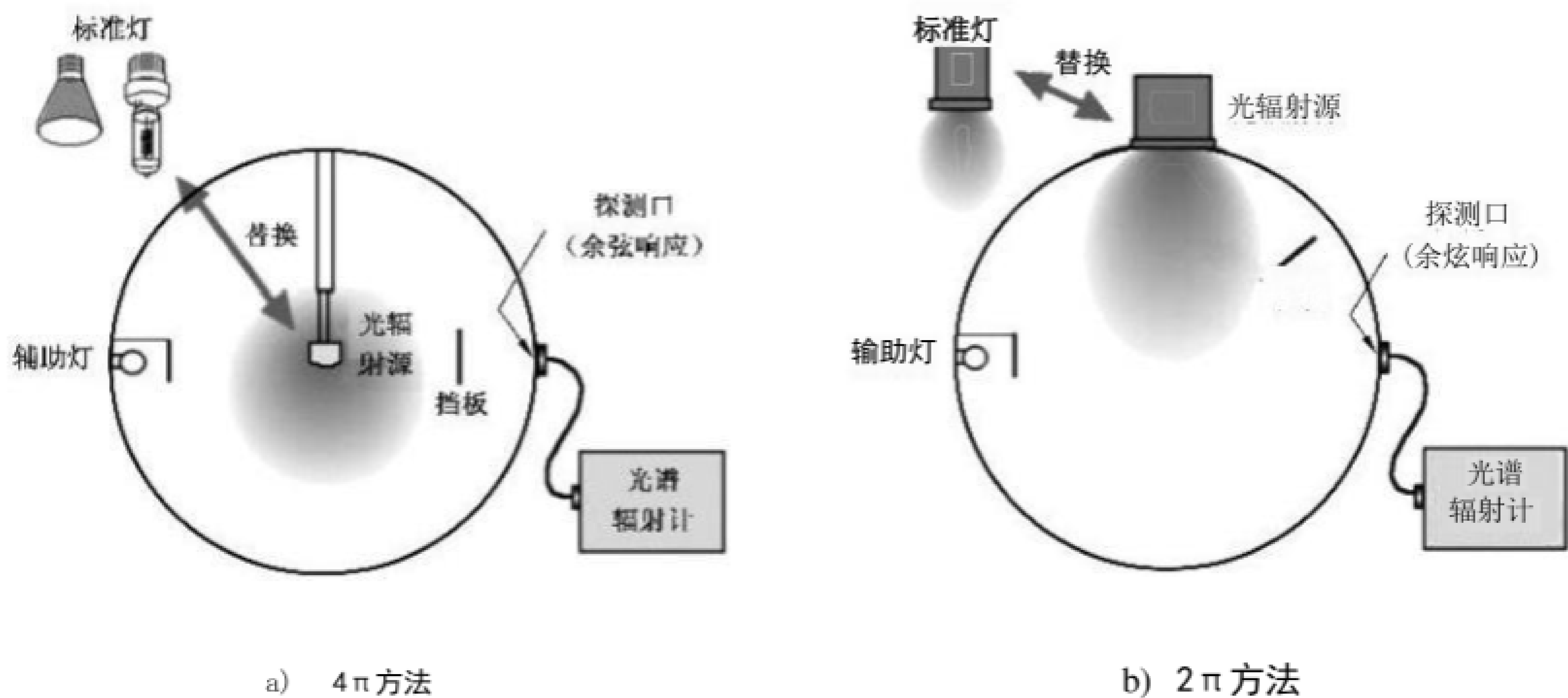


图 3 积分球-光谱辐射计系统测量(有效)辐通量的原理示意图

4π 方法适用于各种辐射分布类型的紫外辐射源。被测紫外辐射源以规定的方位安装在积分球中心，如果可能，被测紫外辐射源的安装应使落在挡板上的直射紫外辐射最少。线状辐射源应使其基准轴与探头和积分球中心的连线共轴。使用放置在同一位置处的光谱辐通量标准灯校准积分球。

2 π 方法只能用于具有半球或定向辐射分布且无后发射的紫外辐射源。对于2 π 积分球系统, 安装被测辐射源的孔径应小于1/3球直径。被测紫外辐射源应安装于圆孔内侧, 使紫外辐射源前面的边缘和孔边缘平齐。应使用一块小挡板阻挡被测紫外辐射源辐射直射光谱辐射计取样装置。使用具有半球辐射分布的光谱辐通量标准灯放置在与被测紫外辐射源相同的位置来校准积分球。

除非被测紫外辐射源与定标积分球-光谱辐射计的参考辐射源的尺寸和反射、吸收特性都相近, 且在测量报告中说明使用的标准灯及被测紫外辐射源的类型, 否则应采用辅助灯按照式(13)进行光谱自吸收系数校正。

$$a(\lambda)=y_{aux}.rE_{sr}(\lambda)/y_{sux}.RE_r(\lambda) \dots\dots\dots (13)$$

式中:
a(λ) ——200 nm~400 nm波长范围内各个波长下的自吸收校正系数;
y_{tsr}(λ)—— 被测紫外辐射源位于测量位置时辅助灯点亮时的光谱辐射计读数;
y_{wx}. RE_r(λ)——标准灯位于测量位置时辅助灯点亮时的光谱辐射计读数。

应使用与被测紫外辐射源具有相同或相似空间辐强度分布和光谱分布的参考辐射源定标积分球系统, 该参考辐射源的辐通量可通过6. 4. 1的辐照度积分法测量得到。

6.5 紫外辐射效率和紫外有效辐射效率的测量

基于辐通量和有效辐通量的测量, 可通过式(14)计算紫外(有效)辐射效率 η。(η), 即紫外(有效)辐通量 Φ。(Φ)与消耗的电功率 P 的比值。

$$\eta_e=\phi_c/P \dots\dots\dots (14)$$

注: 默认条件下, 紫外辐通量指200 nm~400nm范围内的紫外辐通量, 也能根据实际需要选择200 nm~400nm范围内某个波段范围的紫外辐通量。

6.6 辐强度和有效辐强度的测量

一般基于空间辐射计系统或空间光谱辐射计系统进行辐强度分布和有效辐强度分布的测量。空间某一方向的(光谱)辐强度基于该方向测量得到的(光谱)辐照度和平方反比关系计算得到, 如式(15)和式(16)所示:

$$I(e,\eta)=d^2\cdot E(e,\eta) \dots\dots\dots (15)$$

$$I(\lambda,e,\eta)=d^2\cdot E(\lambda,e,\eta) \dots\dots\dots (16)$$

式中:
I(e,η)——(e,η) 方向上被测紫外辐射源的辐强度, 单位为瓦每球面度(W·sr⁻¹);
I(λ,e,η)——(e,η) 方向上被测紫外辐射源的光谱辐强度, 单位为瓦每球面度纳米(W·sr⁻¹·nm⁻¹);
d —— 测量距离, 单位为米(m);
E(e,η)——(e,η) 方向上被测紫外辐射源的辐照度, 单位为瓦每平方米(W·m²);
E(λ,e,η)——(e,η) 方向上被测紫外辐射源的光谱辐照度, 单位为瓦每平方米纳米(W·m⁻²·nm⁻¹)。

需要注意的是, 式(15)和式(16)成立的条件是被测紫外辐射源能近似看作点光源, 此时, 测量距离不应超出(光谱)辐射计的探测能力并满足以下条件:

- 测量距离至少为被测紫外辐射源出光面最大尺寸的5倍;
- 对于辐强度分布曲线与朗伯余弦分布明显不同的被测紫外辐射源, 辐强度分布测量距离至少为被测紫外辐射源出光面最大尺寸的10倍。

此外, 应根据(光谱)辐射计的探测能力, 在满足精度要求的前提下确定适当的距离。

基于辐强度和有效辐强度的测量, 用极坐标系表示(有效)辐强度分布, 读取峰值(有效)辐强度的一半(50%)所对应的两角度θ₁和θ₂, 按式(17)计算(有效)辐射角度θ_{0.2}。

$$\theta_{0.2} =|\theta_1 -\theta_2 | \dots\dots\dots (17)$$

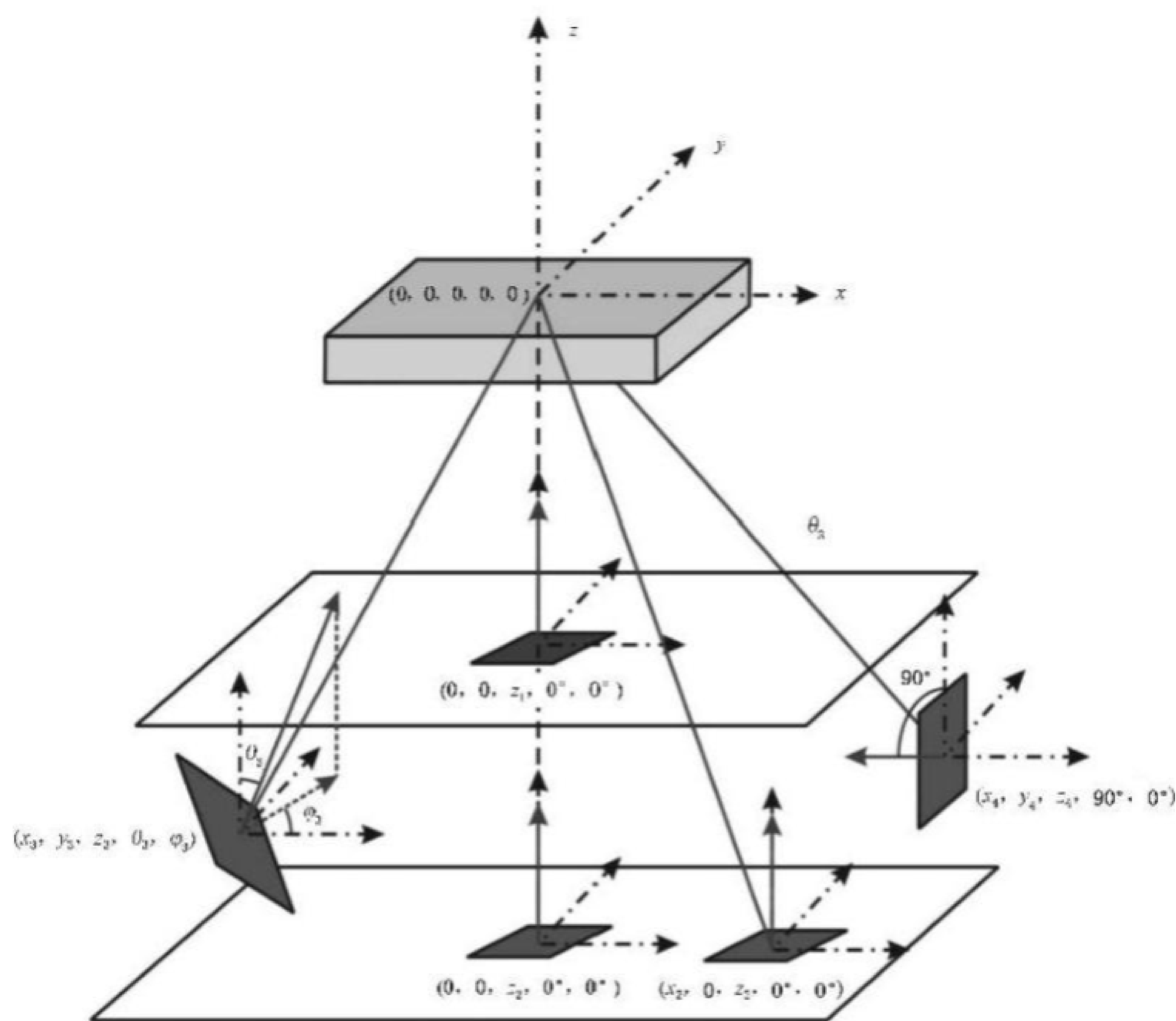
6.7 部分辐通量和部分有效辐通量的测量

通过被测紫外辐射源的(有效)辐强度分布在空间角度范围内的积分计算得到部分(有效)辐通量和部分有效辐通量，计算公式参照GB/T 39394—2020。

6.8 空间指定区域的辐照度分布和有效辐照度分布的测量

利用紫外辐照度计探测器或光谱辐照度系统通过空间扫描方式获取被测紫外辐射源在空间指定区域的辐照度分布和有效辐照度分布。如图4所示，以被测紫外辐射源为原点，空间任意面元的坐标表示为 $(x_i, y_i, z_i, \theta_i, \phi_i)$ ，其中下标*i*表示面元序号(*i*为大于0的整数)， (x_i, y_i, z_i) 表示该面元的位置， (θ_i, ϕ_i) 表示该面元方向相对于竖直线(即z轴)的角度；该面元处的(有效)辐照度表示为 $E_e(x_i, y_i, z_i, \theta_i, \phi_i)$ ，光谱辐照度表示为 $E_\lambda(\lambda; x_i, y_i, z_i, \theta_i, \phi_i)$ 。

使用可平移测量台或平移测量台与分布辐射度计的旋转工作台相结合，进行辐照度的扫描测量。



注：深灰色平面代表测量面元。

图4 空间(光谱)辐照度测量坐标系统示意图

示例：如图5所示，被测紫外辐射源为两种典型的安装在天花板上的固定式消毒灯具，在距离地面2.1 m 处的平面上测量空间有效紫外辐照度分布。使用紫外辐照度计在该平面上进行位置平移和角度旋转的扫描测量。

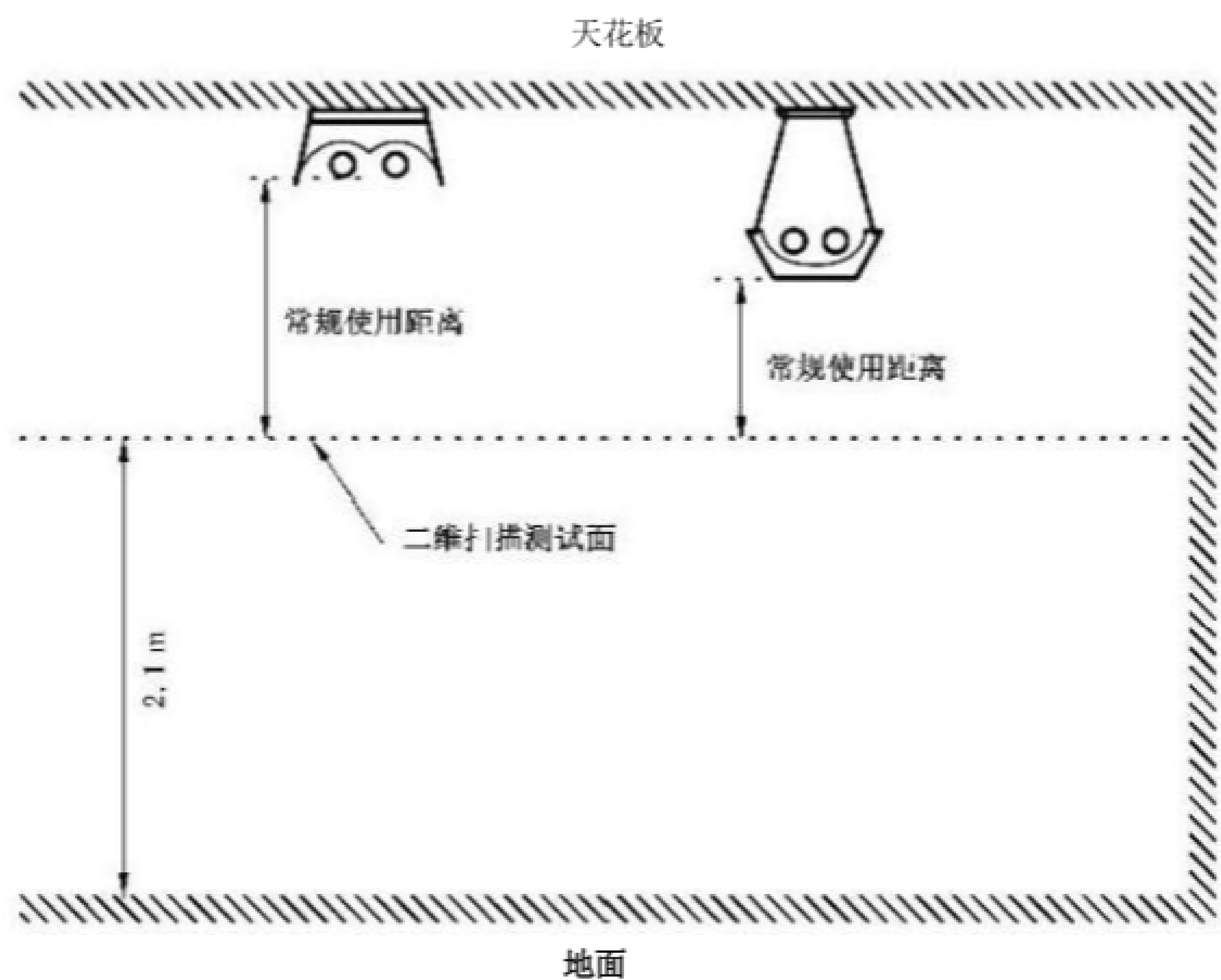


图 5 空间(光谱)辐照度扫描测量的应用场景示例

7 测量结果的表达

在紫外辐射源的辐射测量报告中宜包括以下列出的项目。

——被测对象的信息：

- 电参数的额定值、辐射度参量的宣称值，若包括多种工作模式(如功率可调或光谱可调等)则分别予以说明；
- 紫外辐射源的外形尺寸、重要光学组件(例如折射透镜、反射透镜等),可使用图片的形式；
- 参考温度点和参考温度值；
- 对于 LED 封装：最高允许结温；
- 对于 LED 模块：最高允许性能温度 t_{c} , ..., 若使用热沉则给出具体描述；
- 对于低压高强汞灯：稳定工作条件和用额外散热方式情况；
- 对于其他紫外辐射源：最高允许环境温度 t_{qn} (有宣称时)；
- 臭氧产生情况。

——测量程序信息：

- 辐射测量方法和使用设备的简要说明：对于紫外辐照度计，包括校准该辐照度计的辐射源类型；对于分布辐射度计或分布光谱辐射计，包括类型、辐射度测试距离、探测单元和校准探测单元的辐射源类型；对积分球辐射计或积分球光谱辐射计，包括直径、 4π 方法或 2π 方法，校准该积分球系统的辐射源类型，辅助灯类型；
- 采用本文件中的标准测量条件或指定的测量条件；
- 被测紫外辐射源的工作姿态；
- 辐照度测量的测量距离和方位；
- 对于辐强度分布，测量中被测紫外辐射源的工作姿态和倾角，紫外辐射源的辐射度中心；
- 实验室环境条件，测量电压和频率；
- 参考温度点和测量中的参考温度值；

- 老炼和稳定时间;
- 溯源性, 传递辐射度量值的标准器及标准器的校准证书编号。

—辐射度数据:

- 在测量报告中所提供的辐射度数据都要针对特定被测紫外辐射源;
- 进行测量不确定度的评估, 并在报告中给出;
- 若辐射度值不是在规定测量条件下进行的, 应给出实际测量条件、实际测量值、转换因子以及经过校正后的辐射度值;
- 若辐射度值不是在稳定状态下给出的, 应报告辐射度值对应的取值时间和取值依据。

8 防护要求

测量紫外辐射源时, 操作人员应采取安全防护措施, 避免人眼或皮肤的裸露部分接受到紫外辐射, 如佩戴紫外防护眼镜、穿戴紫外防护服、涂抹防晒品(剂)等, 必要时加装带光阑的挡屏, 用于测试的探测器前应加快门, 仅在测量时打开快门。

测量紫外辐射源时, 也应防止周边环境的仪器设备受到紫外辐射影响而老化, 必要时加装挡屏。

部分紫外辐射源可能会产生微量臭氧(微量臭氧对于紫外辐射测量的影响忽略不计), 在测量中以及测量后应采用佩戴防护罩、通风等措施, 避免臭氧对人体造成伤害及腐蚀设备。

测量场所应配备二氧化碳灭火器材, 不应含有带荧光剂的纸张、人造纤维等受紫外照射容易起火的物质以及其他易燃、易爆物。

测量结束后, 应立即切断紫外辐射源电源。

附录 A
(资料性)
紫外辐照度计的光谱特性及表征指标

A.1 紫外辐照度计光谱特性

按照紫外辐射计的测量用途，紫外辐照度计的相对光谱响应度 $S(\lambda)$ 与指定波段(如 UV-A, UV-B, UV-C)的矩形函数或目标光生物或光化学的作用光谱一致。

注：矩形函数视为一种特殊的作用光谱，当 $S(\lambda)$ 为指定波段内的矩形函数时，所述的有效辐射量为该波段内的辐射量，下文中为了方便描述，统一使用 $S(\lambda)$ 来描述紫外辐照度计需要匹配的作用光谱。

对于测量253.7 nm、365 nm 等单谱线辐射度的紫外辐照度计，其响应度带宽可相对较窄，但在对应谱线波长处的相对光谱响应度宜尽量平坦。因为若在该波长处的响应度变化较大的话，测量谱线波长的微小漂移也会带来较大的测量误差。

示例：图 A.1为测量 UV-A、UV-B、UV-C 波段辐射度和测量光化学紫外危害辐照度的作用光谱示例。

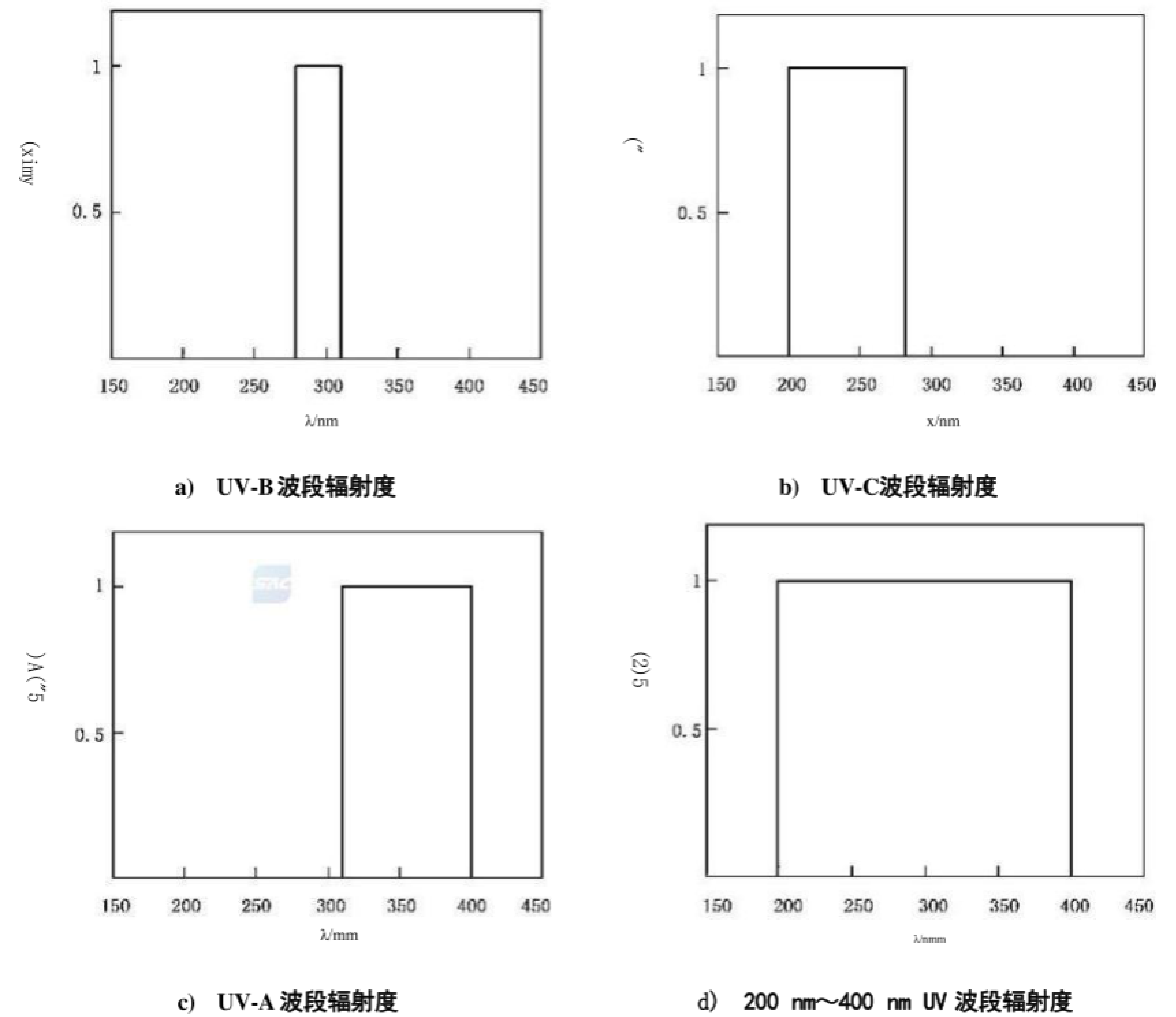
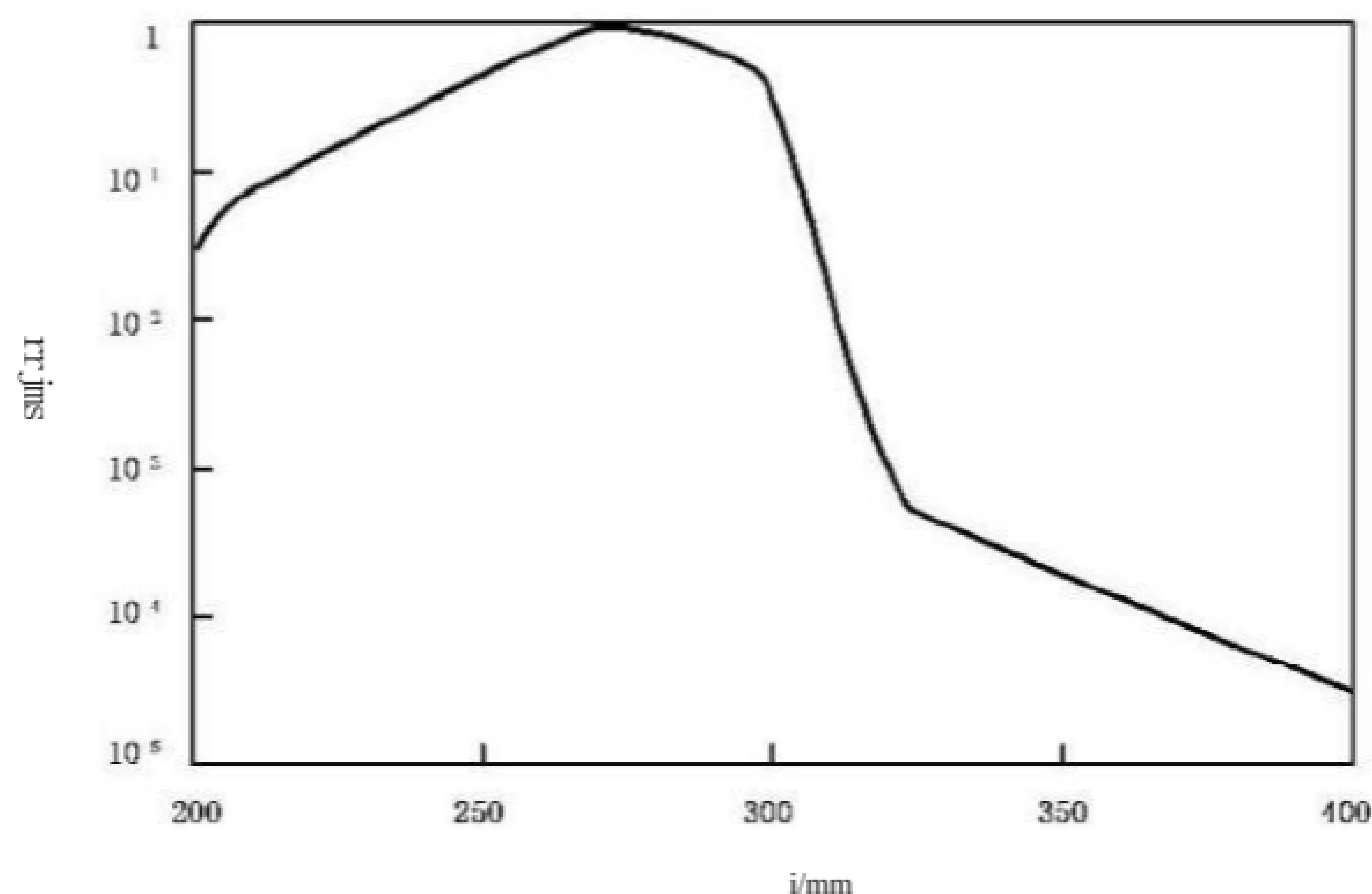


图 A.1 作用光谱示例



e) 光化学紫外危害有效辐射度(对数坐标)

图 A.1 作用光谱示例（续）

A.2 光谱失匹配

A.2.1 光谱失匹配指数

使用光谱失匹配指数 $f_{1,act}$ 来表征紫外辐照度计的相对光谱响应度与目标作用光谱 $S_{act}(\lambda)$ 的匹配一致性程度，如式(A.1)所示。

$$f_{1,act} = \frac{\int_a^b |S_{rel,rel}(\lambda) - S_{act}(\lambda)| d\lambda}{\int_a^b S_{act}(\lambda) d\lambda} \dots\dots\dots(A.1)$$

其中：

$$S_{rel,rel}(\lambda) = \frac{\int_a^b X_{4,R,rel}(\lambda) S_{act}(\lambda) d\lambda}{\int_a^b X_{4,R,rel}(\lambda) S_{rel}(\lambda) d\lambda} \cdot S_{rel}(\lambda) \dots\dots\dots(A.2)$$

式中：

- $S_{rel}(\lambda)$ ——归一化的辐射计探头的相对光谱响应度；
- $X_{4,R,rel}(\lambda)$ ——参考光源R的相对光谱功率分布；
- $S_{act}(\lambda)$ ——辐射计探头的相对光谱响应度；
- $S_{act}(\lambda)$ ——所关注效应的作用光谱。

根据光谱失匹配指数 $f_{1,act}$ 的定义，参考光源R的光谱功率分布可根据特定应用给定。

注1:对于完美匹配[即在每个波长下， $S_{rel}(\lambda)=S_{act}(\lambda)$], $f_{1,act}=0$ 。

注2:光谱失匹配指数 $f_{1,act}$ 描述了紫外辐射计响应度与目标作用光谱的匹配程度，其值与光谱不匹配所引起的误差无直接关系。

A.2.2 光谱失匹配测量误差

光谱失匹配带来的测量误差与校准用参考辐射源和被测紫外辐射源的光谱功率分布(SPD)有关，若被测紫外辐射源与校准辐射源具有相同或相似的相对光谱功率分布时，测量误差比较小；反之，若两者的相对SPD具有较大差异时，则会出现比较大的测量误差。

注：如紫外光源的相对光谱功率分布在其寿命周期内可能会随时间变化，则不适合用光谱失匹配较大的紫外辐射计进行监测，例如光源的老化监测。

紫外辐照度计在实际测量中产生的光谱失匹配误差可通过比较紫外辐射计在被测辐射源 Z 下和参考光源R 下的响应得到，见式(A.3):

$$e_{\text{rel},k,z}^s = \left[\frac{\int_0^\infty X_{\lambda,Z,\text{rel}}(\lambda) \cdot S_{\text{rel}}(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty X_{\lambda,Z,\text{rel}}(\lambda) \cdot S_{\text{rel}}(\lambda) d\lambda} \bigg/ \frac{\int_0^\infty X_{\lambda,R,\text{rel}}(\lambda) \cdot S_{\text{rel}}(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty X_{\lambda,R,\text{rel}}(\lambda) \cdot S_{\text{rel}}(\lambda) d\lambda} - 1 \right] \times 100\%$$

.....(A.3)

式中：
X_{2 .m}(λ)—— 参考光源 R 的相对光谱功率分布；
X_{xz. ra}(λ)——光源 Z 的相对光谱功率分布。

A.3 长波响应指数

紫外辐照度计应对其预设作用光谱波段外的辐射无响应。长波响应指数f. . 由紫外辐照度计的相对光谱响应度直接计算得到，如式(A.4) 所示。

$$f_{\text{long}} = \frac{\int_{\lambda_{\text{lo}},\lambda_{\text{upper}}}^{\lambda_{\text{hi}},\lambda_{\text{upper}}} S_{\text{rel}}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_{\text{lo}},\lambda_{\text{lower}}}^{\lambda_{\text{hi}},\lambda_{\text{upper}}} S_{\text{rel}}(\lambda) \cdot d\lambda}$$

.....(A.4)

λ s - 在长波长侧，紫外辐照度计的响应度可忽略不计的波长；
λ A—— — 作用光谱的长波长边界；
λ - 作用光谱的短波长边界；
S(λ)—— 紫外辐照度计的相对光谱响应度。

注1:如果作用光谱的下限低于紫外辐射计响应度的下限，或如果作用光谱的上限高于紫外辐射计的上限，则对应谱段范围外响应指数f_h. 或f_l. 设为0。

短波响应指数f... 和长波响应指数fio. 仅用于表征紫外辐照度计性能，不用于测量误差的评估和误差校正。

注2:在紫外辐射测量中，紫外辐照度计的长波响应更容易带来测量误差。尤其是在具有较强可见或红外辐射的现场环境条件下测量紫外辐照度，或被测辐射源本身中具有丰富可见和/或红外辐射时，长波响应较大的紫外辐照度计会带来相当大的测量误差。

注3:在存在自然光照的现场环境中测量UV-C 波段的紫外辐射时，由于日光从 UV-B,UV-A 到可见和红外波段的辐射都非常强烈，可能是被测 UV-C 波段紫外辐射的千倍以上，紫外辐照度计极易产生巨大的长波响应误差。此时使用日盲型紫外辐照度计能够降低这种误差，日盲型紫外辐照度计只对280 nm 以下的 UV-C 波段紫外辐射产生响应，而对280 nm 以上的UV-A、UV-B、可见光和红外辐射响应度为0或趋近于0。

参 考 文 献

1] GB/T 20145—2006 灯和灯系统的光生物安全性
[2] GB/T 20150—2023 红斑基准作用光谱及标准红斑剂量
[3] (GB/T 32092—2015 紫外线消毒技术术语
[4] JJG 879—2015 紫外辐射照度计
[5] ISO/CIE 28077:2016 Photocarcinogenesis action spectrum(non-melanoma skin cancers)
[6] CIE 155:2003 Ultraviolet air disinfection
[7] CIE 220:2016 Characterization and calibration methods of UV radiometers
[8] CIE 239:2020 Goniospectroradiometry of optical radiation sources

