

团 体 标 准

T/CPIA 0068—2024

适用于钙钛矿光伏器件的太阳模拟器性能 要求

Solar simulator performance requirements applying to perovskite
photovoltaic devices

2024 - 03 - 10 发布

2024 - 03 - 15 实施

中国光伏行业协会 发 布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 太阳模拟器要求 2

 4.1 总辐照度 2

 4.2 光谱匹配度 2

 4.3 辐照度空间不均匀度 4

 4.4 辐照度时间不稳定度 5

 4.5 光谱分级标准 5

 4.6 性能检查 5

5 数据单 6

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。

本文件由中国光伏行业协会标准化技术委员会提出。

本文件由中国光伏行业协会标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司、中国电子技术标准化研究院、华能新能源股份有限公司、中国计量科学研究院、无锡市检验检测认证研究院、陕西众森电能科技有限公司、福建省计量科学研究院、德雷射科（廊坊）科技有限公司、江苏益舜电工有限公司、天合光能股份有限公司、隆基绿能科技股份有限公司、杭州众能光电科技有限公司、通威太阳能（成都）有限公司、华中科技大学。

本文件主要起草人：赵志国、周养盈、张赟、李其聪、孟海凤、王森、恽旻、朱冰洁、黎健生、刘皎、张鹤仙、张志魁、张庆、夏锐、陈鹏、黄艳梅、龙巍、刘宗豪。

适用于钙钛矿光伏器件的太阳模拟器性能要求

1 范围

本文件规定了适用于钙钛矿光伏电池及组件的太阳模拟器的参数术语和定义、测试及计算方法、设备分级要求和数据单。

本文件适用于稳态太阳模拟器的设计与制造。包括单光源太阳模拟器（例如滤光氙灯）；双光源太阳模拟器（例如滤光氙灯-卤素灯）；多光源太阳模拟器（例如基于LED的多通路光源）等。其用于为钙钛矿光伏电池及组件的电流-电压（I-V）特性测量、长期稳定性测试等提供室内测试光源。

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。

IEC 60904-3 光伏器件 第3部分：基于标准光谱辐照度数据的地面光伏器件测量原理（Photovoltaic devices—Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data）

IEC 60904-9 光伏器件 第9部分：太阳模拟器特性分级（Photovoltaic devices—Part 9: Solar simulator performance requirements）

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

太阳模拟器 solar simulator

光谱分布类似于自然太阳光的光源设备，用于评估光伏器件的特性。

注1：模拟器通常由三个主要组件组成：a) 光源和相关电源；b) 用于调节输出光束使其满足分类要求所需的光学元件或滤光片；c) 操作模拟器所需的控制装置。

注2：I-V特性数据采集、电子负载和操作软件可能作为太阳模拟器的组成部分，其技术要求和检测方法不包含在本文件中。

注3：适用于钙钛矿光伏的太阳模拟器一般为稳态单光源或多光源设备，待测光伏器件一般放置于单光源模拟器的指定测试区域或多光源模拟器的光锥叠加区域。

3.2

指定测试区域 designated test area

用于样品测试及太阳模拟器等级评价测试的平面区域。

注：太阳模拟器测试样品的面积应不超过指定测试区域面积。

3.3

光谱范围 spectral range

根据IEC 60904-3定义的大气质量1.5G（AM 1.5G）标准太阳光谱分布，用于评估太阳模拟器性能的波长范围。

3.4

光谱能量匹配度 spectral match

在光谱范围及划分的各波段内，太阳模拟器光谱辐照度与IEC 60904-3中规定的AM 1.5G参考光谱辐照度的匹配度。

3.5

光子辐照度 photon irradiance; P_I

光照体在单位时间内，接受所有方向入射到（光照）小球某一表面元的光子数（辐射量子数或光子通量）除以元的面积，单位为 $\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ 。

3.6

辐照度空间不均匀度 spatial non-uniformity of irradiance; NU

太阳模拟器的辐照度空间不均匀度，按公式（1）计算：

$$NU = \left(\frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中：

NU ——太阳模拟器在指定测试区域内的辐照度空间不均匀度，单位为百分比（%）；

$E_{\max}$ ——在太阳模拟器的指定测试区域内的最大辐照度，单位为瓦特每平方米（ W/m^2 ）；

$E_{\min}$ ——在太阳模拟器的指定测试区域内的最小辐照度，单位为瓦特每平方米（ W/m^2 ）。

3.7

辐照度时间不稳定性 temporal instability of irradiance; TI

太阳模拟器的辐照度时间不稳定性，按公式（2）计算：

$$TI = \left(\frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中：

TI ——太阳模拟器的辐照度时间不稳定性，单位为百分比（%）；

$E_{\max}$ ——在太阳模拟器的指定测试区域内任意位置，在相关时间间隔内测量的最大辐照度，单位为瓦特每平方米（ W/m^2 ）；

$E_{\min}$ ——在太阳模拟器的指定测试区域内任意位置，在相关时间间隔内测量的最小辐照度，单位为瓦特每平方米（ W/m^2 ）。

注：辐照度时间不稳定性分为两类，由相关时间间隔定义。a)短期不稳定性，相关时间间隔指获取单一数据集（如：辐照度、电压、电流）的时间；b)长期不稳定性，相关时间间隔指采集部分或整个I-V特性曲线的时间。

3.8

太阳模拟器分级 solar simulator classification

太阳模拟器从光谱匹配度、辐照度空间不均匀度、辐照度时间不稳定性这三个方面进行分级，每个性能分为A+、A、B、C四个等级。太阳模拟器分级用三个字母表示，顺序依次为光谱匹配度、辐照度空间不均匀度、辐照度时间不稳定性。

4 太阳模拟器要求

4.1 总辐照度

太阳模拟器应能够在指定测试区域内达到测试指定的辐照度。对于标准测试条件，应达到 $1000 \pm 50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的标准辐照度。

4.2 光谱匹配度

4.2.1 通则

太阳模拟器光谱分布应与标准AM 1.5G光谱相匹配。根据IEC 60904-9，在指定测试区域内，利用合适的探测器对太阳模拟器光谱辐照度进行测试，计算各个波长范围的光谱能量匹配度或光子辐照度匹配度，用于评估太阳模拟器的光谱匹配度。

4.2.2 光谱能量匹配度

4.2.2.1 针对单结钙钛矿光伏器件，设置通用波长范围（300 nm~900 nm），通用波长范围划分为6个波段，各波段的波长范围、AM 1.5G标准光谱下各波段辐照度占通用波长总辐照度的比例及累积积分辐照度比例如表1所示。

表 1 通用波长范围下 AM 1.5G 标准光谱各波段对总辐照度贡献

序号	波长范围 nm	波段辐照度占通用波长总辐照度比例 %	累计积分辐照度比例 %
1	300~453	16.6	16.6
2	453~527	16.7	33.3
3	527~603	16.7	50.0
4	603~683	16.6	66.6
5	683~782	16.7	83.3
6	782~900	16.7	100.0

4.2.2.2 为了适应不同带隙的钙钛矿及叠层器件的测试，设置扩展波长范围（300 nm~1200 nm），扩展波长范围划分为 6 个波段，各波段的波长范围、AM 1.5G 标准光谱下各波段辐照度占扩展波长总辐照度的比例及累计积分辐照度比例如表 2 所示。

表 2 扩展波长范围下 AM 1.5G 标准光谱各波段对总辐照度贡献

序号	波长范围 nm	波段辐照度占扩展波长总辐照度比例 %	累计积分辐照度比例 %
1	300~470	16.6	16.6
2	470~561	16.7	33.3
3	561~657	16.7	50.0
4	657~772	16.6	66.6
5	772~919	16.7	83.3
6	919~1200	16.7	100.0

光谱能量匹配度为每个波长范围实际测试的总光谱辐照度的百分比与表 1 或表 2 列出的 AM 1.5G 标准光谱辐照度分布的百分比的比率。

4.2.3 光谱光子辐照度匹配度

4.2.3.1 对于表 1 中通用波长范围所划分的 6 个波段，各波段的波长范围、AM 1.5G 标准光谱下各波段光子辐照度占通用波长总光子辐照度的比例及累计积分光子辐照度比例如表 3 所示。

表 3 通用波长范围下 AM 1.5G 标准光谱各波段对总光子辐照度贡献

序号	波长范围 nm	波段光子辐照度占通用波长总光子辐照度比例 %	累计积分光子辐照度比例 %
1	300~453	10.9	10.9
2	453~527	13.3	24.2
3	527~603	15.5	39.7
4	603~683	17.4	57.1
5	683~782	20.0	77.1
6	782~900	22.9	100.0

4.2.3.2 对于表 2 中扩展波长范围所划分的 6 个波段，各波段的波长范围、AM 1.5G 标准光谱下各波段光子辐照度占扩展波长总光子辐照度的比例及累计积分光子辐照度比例如表 4 所示。

表 4 扩展波长范围下 AM 1.5G 标准光谱各波段对总光子辐照度贡献

序号	波长范围 nm	波段光子辐照度占扩展波长总光子辐照度比例 %	累计积分光子辐照度比例 %
1	300~470	10.0	10.0
2	470~561	12.5	22.5
3	561~657	14.8	37.3
4	657~772	17.1	54.4
5	772~919	20.3	74.7
6	919~1200	25.3	100.0

光谱光子辐照度匹配度为每个波长范围实际测试的总光子辐照度的百分比与表 3 或表 4 列出的 AM 1.5G 标准光谱总光子辐照度的百分比的比率。

4.2.4 测试方法

将光谱辐射计置于指定测试区域内，测量太阳模拟器在光谱范围内各个波长范围的光谱辐照度。光谱辐照度应在指定测试区域的至少4个位置进行测量，以消除光谱分布的潜在空间非均匀性效应。参考 IEC 60904-9，对于矩形或圆形指定测试区域，宜选择图1所示的测试位置。

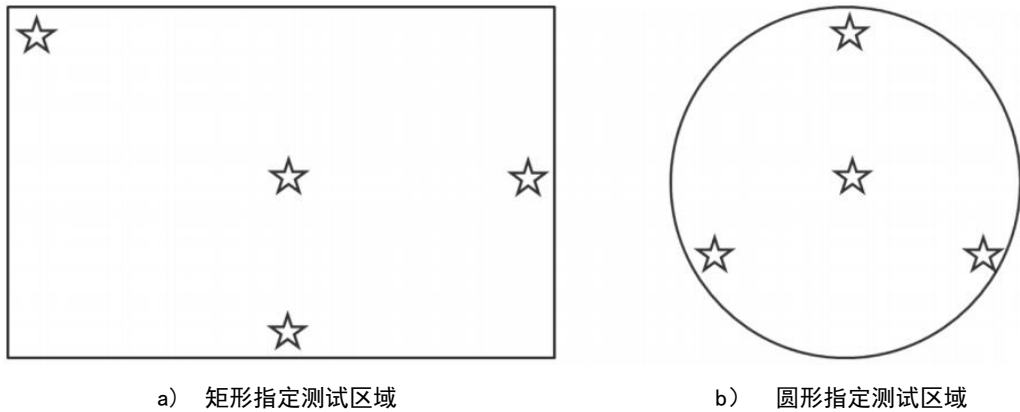


图 1 矩形和圆形指定测试区域的光谱辐照度测试位置

在指定测试区域内所有测试位置采集的光谱辐照度数据，数据点波长间隔应不大于5 nm，数据应在光谱范围内积分，确定表1或表2中定义的6个波长范围的光谱辐照度对总积分辐照度的贡献百分比。

在指定测试区域内所有测试位置采集的光谱光子辐照度数据，数据点波长间隔应不大于5 nm，数据应在光谱范围内积分，确定表3或表4中定义的6个波长范围的光谱光子辐照度对总光子辐照度的贡献百分比。

注：宜采用光谱辐射计测量太阳模拟器光谱辐照度分布，其光谱响应需适应太阳模拟器光谱范围，在测量过程中的稳定性优于0.2%。

4.3 辐照度空间不均匀度

在指定测试区域内，利用合适的探测器对太阳模拟器辐照度进行测试，计算其辐照度空间不均匀度。

宜采用封装的晶硅太阳能电池或阵列模块作为辐照探测器，通过测量其短路电流评估指定测试区域内的辐照度空间不均匀度。对于指定测试区域面积较小的太阳模拟器，宜采用含掩模板的晶硅太阳能电池或光敏二极管作为辐照探测器。

对于单个电池和小型电池模组测试，辐照探测器最大有效测试面积应不大于指定测试区域面积的1/25。对于组件测试，辐照探测器最大有效测试面积应不大于指定测试区域面积的1/25或400 cm²，二者中取较小值。

光谱辐照度应在指定测试区域的至少25个位置进行测量，对于双光源或多光源模拟器，宜引入更多的测试位置进行测量。

将太阳模拟器的指定测试区域均匀划分为不少于25个测试位置。将其中一个位置作为辐照探测器的起始位置，在整个指定测试区域内移动辐照检测器，两个空间方向的最小步长宜为探测器尺寸。用辐照探测器在每个测试位置测量辐照度，确定指定测试区域内的最大辐照度和最小辐照度，根据公式（1）计算辐照度空间不均匀度。

注：测试过程中需考虑探测器微裂痕、模拟器和环境光反射、测试电池高度等因素对于辐照均匀性的影响，如测试时间较长，可在任意位置引入第二探测器修正辐照稳定性对辐照度测试结果的影响。

4.4 辐照度时间不稳定性

4.4.1 通则

在相关时间间隔内，在指定测试区域内任一位置，利用合适的探测器对太阳模拟器辐照度进行测试，计算其辐照度时间不稳定性。

辐照度时间不稳定性分为辐照度短期不稳定性和辐照度长期不稳定性。

4.4.2 辐照度短期不稳定性

对于 I-V 特性数据采集系统能同时采集并储存辐照度、电压、电流数据集的太阳模拟器，其辐照度短期不稳定性直接定义为 A+级。

对于 I-V 特性数据采集系统不能同时采集并储存辐照度、电压、电流数据集的太阳模拟器，其辐照度短期不稳定性取决于数据采集期间连续两个数据集间的辐照度变化。

4.4.3 辐照度长期不稳定性

对于辐照度、电流、电压三通道I-V测试方法，太阳模拟器辐照度长期不稳定性测试时间为I-V特性曲线测试时间。对于电流、电压双通道I-V测试方法，太阳模拟器辐照度长期不稳定性取决于I-V测试过程中辐照度变化。

对于长时辐照测试，使用合适的辐照探测器和合适的平均时间来记录相关时间间隔中的辐照度变化。对于多灯系统，应明确指定测试区域内的代表性位置。宜在光照期间以不小于5分钟的时间间隔采集至少100个辐照度值，确定最大辐照度和最小辐照度，根据公式（2）计算辐照度时间不稳定性，用于评估太阳模拟器辐照度长期不稳定性。

4.5 光谱分级标准

太阳模拟器应根据其光谱匹配度、辐照度空间不均匀度、辐照度时间不稳定性的测量结果，按照表5的规定确定光谱匹配度、辐照度空间不均匀度、辐照度时间不稳定性的级别，按照顺序确定太阳模拟器的级别。对于光谱匹配度，以光谱能量匹配度和光子辐照度匹配度的最低评级为最终分级。对于辐照度时间不稳定性，以辐照度长期不稳定性为最终分级。

表 5 太阳模拟器光谱分级标准

评级	光谱匹配度		辐照度空间不均匀度	辐照度时间不稳定性	
	能量匹配度	光子辐照度匹配度		短期	长期
A+	0.875~1.125	0.875~1.125	≤1 %	≤0.25 %	≤1 %
A	0.75~1.25	0.75~1.25	≤2 %	≤0.5 %	≤2 %
B	0.6~1.4	0.6~1.4	≤5 %	≤2 %	≤5 %
C	0.4~2.0	0.4~2.0	≤10 %	≤10 %	≤10 %

4.6 性能检查

太阳模拟器遇到下列情况时，应及时检查4.1到4.4所描述太阳模拟器的特性：

- a) 器件老化导致技术参数发生变化；

- b) 太阳模拟器光源和相关的电源损坏更换或性能变化；
- c) 用来调整输出光线的光学器件或滤光片损坏更换或性能变化；
- d) 测试腔室内反射条件发生较大改变。

这些变化可能造成模拟器超过允许的范围。探测器应该有足够的视角，以便能够接受测试面内任意一点所有的入射光。

5 数据单

每台适用于钙钛矿光伏器件性能测试的太阳模拟器均应附有一份数据单，包含但不限于以下数据资料。

- a) 制造商；
 - b) 型号；
 - c) 太阳模拟器类型；
 - d) 制造日期；
 - e) 可追溯的序列号；
 - f) 数据单的发布日期；
 - g) 测量依据标准；
 - h) 对于分级有影响的操作、运行环境（如环境温湿度等）；
 - i) 光谱匹配度级别和光谱辐照度分布；
 - j) 确定分级时的指定测试区域位置和标称面积；
 - k) 确定分级时的辐照度水平；
 - l) 辐照度空间不均匀度；
 - m) 指定测试区域内测量的辐照度的平均和标准偏差；
 - n) 用于 I-V 特性测量时的数据采集时间；
 - o) 辐照度时间不稳定性；
 - p) 必要情况下，为达到辐射稳定和 I-V 特性测量稳定所需的最低预热时间。
-