

ICS 27.160

CCS K 83



T

团体标准

T/CI 973—2025

钙钛矿光伏器件测试用稳态太阳模拟器技术规范

Technical specification for steady-state simulator for testing perovskite photovoltaic devices

2025 - 04 - 21 发布

2025 - 04 - 21 实施

中国国际科技促进会

发布

目 次

前言	II
引言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 稳态太阳模拟器的技术要求	2
5 检测程序	2
5.1 检测条件	2
5.2 检测用的标准测量设备和其他设备	3
5.3 检测项目和方法	3
附录 A（规范性） 稳态太阳模拟器产品检验数据表	5
参考文献	7

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。

本文件由中国国际科技促进会归口。

本文件起草单位：上海太阳能工程技术研究中心有限公司、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、郑州大学、中国质量认证中心有限公司、吉林大学、武汉爱疆科技有限公司、浙江大学、中国科学院电工研究所、中节能太阳能科技(镇江)有限公司、北京卓立汉光仪器有限公司、天祥太阳能科技(广州)有限公司、北京普瑞姆赛斯科技有限公司、江苏东方航天校准检测有限公司、德雷射科(廊坊)科技有限公司、上海交通大学、国电河南新能源有限公司、华东理工大学、苏州谦航检测技术有限公司、上海电力大学。

本文件主要起草人：杜鹤源、庄英豪、顾国超、李哲、邵国胜、张伟、郑向阳、周凯旋、董庆锋、宋益龙、袁五辉、袁驰、王顺、陈红征、左立见、刘海涛、沈永龙、董红言、刘阳、朱锋、张素侠、蔡宏太、罗小平、孙向平、熊炜、张娟、陈小枫、张志魁、王衍明、李博伟、张高智、田会普、宋红超、米泽亚、郝国强、李红波、李政、陈志宇、林佳、王涛、刘海波、秦平力、杨磊、赵桂香、陈海霞、丁官元、朱光波、艾钊、魏晏。

引 言

钙钛矿光伏器件测试用稳态太阳模拟器需具备AM1.5G光谱匹配性、辐照度空间均匀性 ($NU \leq 2\%$) 及时间稳定性 ($TI \leq 1\%$)，并支持多光源（氙灯/LED）叠加以适应不同带隙材料。现有模拟器仍存在光谱匹配偏差（尤其在紫外-近红外扩展波段）、长期辐照不稳定（ $>1000\text{h}$ 动态应力测试不足）及光子辐照度精准控制缺失，难以量化光机械诱导分解效应，亟需标准规范测试条件与分级要求，确保数据可比性与器件可靠性评估。

本文件提出了针对钙钛矿光伏器件测试用稳态太阳模拟器的技术规范，结合国内外现有标准框架，针对钙钛矿材料的特性需求，明确了光谱匹配度、辐照均匀性等基础指标的分级要求，并引入光谱偏差值（SPD）和光谱覆盖率（SPC）等参数，以适配新型技术指标的测试需求。

钙钛矿光伏器件测试用稳态太阳模拟器技术规范

1 范围

本文件规定了钙钛矿光伏器件测试用稳态太阳模拟器的技术要求和检测程序。

本文件适用于钙钛矿光伏器件的I-V特性的稳态太阳模拟器的制造与检测，稳态太阳模拟器检测范围包括光伏组件与光伏电池。本文件适用于确认制造商提供的太阳模拟器分级、已投入使用的太阳模拟器分级，能作为光伏器件I-V特性检测报告所列太阳模拟器分级以及量化太阳模拟器对检测结果影响的依据。

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 6495.3 光伏器件 第3部分：地面用光伏器件的测量原理及标准光谱辐照度数据

GB 19517 国家电气设备安全技术规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

测试用稳态太阳模拟器 steady-state solar simulator for test

用于钙钛矿光伏器件功率测试的装置，能提供满足钙钛矿光伏器件测试对长时间持续、稳定地模拟太阳光辐照条件的要求。

3.2

测试区域 test area

评估稳态太阳模拟器辐照度不均匀度的测试平面范围。

3.3

测试位置 test position

测试点

进行辐照度测量的位置。

3.4

数据采样时间 data sampling time

获取单一数据组（如：电压、电流、功率、辐照度）的时间。

3.5

数据采集时间 data acquisition time

采集整个或部分I-V特性曲线的时间。

注：数据采集时间取决于I-V特性数据点的数目和可调节的延迟时间。

3.6

光谱范围 spectral range

用于评估太阳模拟器的波长范围。

3.7

光谱匹配度 spectral match

稳态太阳模拟器光谱辐照度分布相对AM 1.5G参考太阳光谱辐照度分布的匹配程度。

3.8

辐照度不均匀度 non-uniformity of irradiance

在稳态太阳模拟器的指定测试平面内，最大辐照度与最小辐照度的归一化差异，最大辐照度和最小辐照度是在指定测试平面内检测器在指定点的测量值（已对辐照不均匀度进行修正）。计算方法如下：

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

式中：

J ——辐照度不均匀度；

E_{\max} ——在稳态太阳模拟器的指定测试平面内的最大辐照度；

E_{\min} ——在稳态太阳模拟器的指定测试平面内的最小辐照度。

3.9

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

在太阳模拟器的指定测试平面内任意位置，在数据采样时间或数据采集时间内，最大辐照度与最小辐照度的归一化差异。计算方法如下：

$$W = \frac{E_{T\max} - E_{T\min}}{E_{T\max} + E_{T\min}} \times 100\% \quad (2)$$

式中：

W ——辐照度时间不稳定性；

$E_{T\max}$ ——在稳态太阳模拟器的指定测试平面内任意位置，在数据采样时间或数据采集时间内的最大辐照度；

$E_{T\min}$ ——在稳态太阳模拟器的指定测试平面内任意位置，在数据采样时间或数据采集时间内的最小辐照度。

3.10

长期不稳定性 long term instability; LTI

在曝晒实验过程中，数据采集时间内的辐照度时间不稳定性。

注：对于持续性辐射曝晒，是与曝晒时间有关的辐照度不稳定性。

4 稳态太阳模拟器的技术要求

4.1 稳态太阳模拟器外表面应无机械性损伤和锈蚀。

4.2 稳态太阳模拟器电气安全应符合 GB 19517 的规定。

4.3 稳态太阳模拟器标识牌应有制造商名称、型号、适用范围、制造日期、可追溯的序列号、辐照度有效面积标识。

4.4 稳态太阳模拟器应有产品检验合格证的检验数据表，检验数据表应符合附录 A 的 A.1 的要求。

4.5 稳态太阳模拟器应根据其光谱匹配度、辐照度不均匀度、辐照度时间不稳定性测量结果，按照表 1 的规定确定光谱匹配度、辐照度不均匀度、辐照度时间不稳定性级别，按照其中最低的级别确定模拟器的级别。

注1：限定波长范围（400nm~1100nm）：对应的参考辐照度见表A.1。

注2：扩展波长范围（300nm~1200nm）：对应的参考辐照度见表A.2。

表1 AM 1.5G 参考太阳光谱辐照度分布

分级	光谱匹配度	辐照度不均匀度%	长期不稳定性 (LTI), %
A+	0.875~1.125	1	1
A	0.75~1.25	2	2
B	0.6~1.4	5	5
C	0.4~2.0	10	10

4.6 稳态太阳模拟器应根据产品合同，可设定或调校测试平面的辐照度，并且在当前辐照度下测量光谱匹配度、辐照度不均匀度和辐照度时间不稳定性，确定模拟器的级别。

5 检测程序

5.1 检测条件

5.1.1 环境条件

温度变化范围为 $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度不大于75%RH。

5.1.2 电网电压波动

电网的电压波动应符合GB 19517的规定。

5.1.3 检测地点的其他要求

应无影响模拟器测量工作辐照度和光谱匹配度的杂散光、电磁场和机械振动。

5.2 检测用的标准测量设备和其他设备

5.2.1 光谱辐射计

5.2.1.1 用于测量稳态太阳模拟器光谱辐照度分布，确定模拟器 $300\text{ nm} \sim 1200\text{ nm}$ 之间6个波长段（按照表A.2波长范围的划分）辐照度与总辐照度的比例。

5.2.1.2 传感器光谱响应和响应时间应适应太阳模拟器光谱范围，光谱辐射计的光谱采样间隔不大于 5 nm ，信噪比不小于100:1，应经过校准。

5.2.2 辐照度检测器或辐照度检测器组

5.2.2.1 可以采用晶体硅太阳能电池或硅探测器作为辐照度检测器，或采用多个辐照度检测器组成辐照度检测器组。辐照度检测器的光谱响应和响应时间应适应稳态太阳模拟器的光谱范围，在测量过程中稳定性优于0.2%。

5.2.2.2 辐照度检测器的最大优先面积应小于或等于测试平面面积的 $1/64$ 或 400 cm^2 （二者取最小值）。

5.2.2.3 辐照度检测器的有效面积应大于或等于测试点面积的80%。

5.2.3 辐照度监测器

采用与辐照度检测器相同或近似光谱响应和响应时间的太阳能电池或硅探测器，面积应小于辐照度检测器的面积，测量过程中稳定性优于0.2%。

5.2.4 I-V 转换器

用于将辐照度检测器、辐照度检测器组和辐照度监测器测量模拟器辐照度所产生的短路电流转换为电压信号，精度为0.1级。测量转换电压信号的仪器精度应优于0.1%。

5.2.5 数据采集器

用于采集在稳态太阳模拟器照射下的辐照度检测器、辐照度检测器组和辐照度监测器所产生的信号，精度应优于0.1%。

5.3 检测项目和方法

5.3.1 外观检查

目测检查表面是否存在机械性损伤或锈蚀。

5.3.2 电气安全检查

检查产品技术资料是否通过GB 19517的检测。

5.3.3 产品标识检查

目测检查产品外观是否包含4.3中要求的各项信息。

5.3.4 产品检验合格证和检验数据表检查

检查产品检验合格证和检验数据表是否包含A.1中所要求的各项信息。

5.3.5 检查稳态太阳模拟器的使用环境条件

应符合稳态太阳模拟器的工作条件并满足5.1中所有检测条件。

5.3.6 预热太阳模拟器及调校辐照度

按照稳态太阳模拟器的操作规程预热光源和电源，设定或调校测试区域的辐照度达到规定的要求。模拟器配有I-V特性测量装置的也应按照规定要求预热和设置参数。

5.3.7 光谱匹配度检测

5.3.7.1 将光谱辐射计传感器垂直置于测试区域中间，测量模拟器在优先波段范围 400 nm~1100 nm 内各个波长范围的光谱辐照度。

5.3.7.2 计算各个波长范围的光谱辐照度占总辐照度的百分比，与表 A.1 中各个波长范围辐照度与总辐照度的百分比之比值为各个波长范围的光谱匹配度。

5.3.7.3 将各个波长范围的光谱匹配度与表 1 中光谱匹配度数值对比验证，由各个波长范围的最差光谱匹配度等级确定模拟器的光谱匹配度级别。

5.3.8 辐照度不均匀度检测

5.3.8.1 将稳态太阳模拟器的测试区域均匀划分成若干个测试位置，用于测量太阳能电池组件的太阳模拟器应不少于 64 个测试点，各个测试点的测试面积应不大于辐照度检测器面积；用于测量太阳能电池的一般不少于 64 个测试点。

5.3.8.2 用辐照度检测器或辐照度检测器组在每个测试点测量辐照度，产生与辐照度成正比的短路电流；用 I-V 转换器和数据采集器测量、采集短路电流转换的辐照度等效的电压信号 E_{ij} (i, j) 分别是测试点所在的行数和列数，以下相同)，找出最大值和最小值，根据以下公式计算辐照度不均匀度：

$$J = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\% \dots\dots\dots (3)$$

式中：

J —— 稳态太阳模拟器辐照度不均匀度；

E_{\max} —— 用 I-V 转换器和数据采集器测量、采集短路电流转换的辐照度等效的电压信号的最大值；

E_{\min} —— 用 I-V 转换器和数据采集器测量、采集短路电流转换的辐照度等效的电压信号的最小值。

5.3.9 辐照度时间不稳定性检测

5.3.9.1 安装辐照度检测器

将辐照度检测器或辐照度监测器地安装在测试区域内任意位置，建议使用两个及以上检测器均匀地分布在测试区域内消除多灯的影响。

5.3.9.2 稳态太阳模拟器辐照度的长期不稳定性检测

新安装制造的太阳模拟器根据合同规定，使用中的根据使用要求，用于长期辐射曝晒的根据曝晒实验规定的曝晒时间、辐照度及其不稳定性度的要求，在指定时间内，测量辐照度转换的等效电压信号 V ，找出最大值和最小值，根据以下公式计算长期不稳定性度：

$$W = \frac{E_{T\max} - E_{T\min}}{E_{T\max} + E_{T\min}} \times 100\% \dots\dots\dots (4)$$

式中：

W —— 稳态曝晒辐照度长期不稳定性度；

$E_{T\max}$ —— 辐照度转换的等效电压信号的最大值；

$E_{T\min}$ —— 辐照度转换的等效电压信号的最小值。

5.3.9.3 辐照度时间不稳定性级别的判别

将计算的辐照度长期不稳定性度与表1中长期不稳定性度分级规范确定稳态太阳模拟器辐照度长期不稳定性度的级别，并且以级别较低者确定太阳模拟器辐照度时间不稳定性度的级别。

附录 A (规范性)

稳态太阳模拟器产品检验数据表

A.1 稳态太阳模拟器产品检验数据表应列出（但不局限于）的条款。

- a) 制造商名称。
- b) 型号。
- c) 适用范围（电池或组件）。
- d) 制造日期。
- e) 可追溯的序列号。
- f) 数据表的发布日期。
- g) 光谱匹配度级别和光谱辐照度分布。
- h) 辐照度不均匀度级别和额测试平面的辐照度不均匀度表。
- i) 辐照度时间不稳定度级别。

j) AM1.5 光谱偏差值 (SPD): 在表2定义的波长范围内, 光谱辐照度值可能低于或高于GB/T 6495.3中规定的标准高光谱辐照度。光谱匹配无法检测这些偏差, SPD参数代表两条曲线之间的总偏差, 这表征了两列统一模拟器光谱辐照度于AM 1.5光谱辐照度的匹配程度, 计算公式如下:

$$SPD = \sum_{300nm}^{1200nm} |E_{SIM}(\lambda) - E_{AM1.5}(\lambda)| \cdot \Delta\lambda / \sum_{300nm}^{1200nm} E_{AM1.5}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot 100\% \dots\dots\dots (A.1)$$

k) AM1.5 光谱覆盖率 (SPC): 光谱覆盖率参数可确定太阳模拟器光谱辐照度大于GB/T 6495.3中规定的AM1.5标准光谱辐照度10%的波长范围。对于满足这一条件的所有数据点, 将响应的AM1.5标准光谱辐照度进行积分。SPC是所得值与300nm至1200nm内AM1.5太阳总辐照度的比值, 计算公式如下:

$$SPC = (\sum_{E_{SIM}(\lambda) > 0.1 \cdot E_{AM1.5}(\lambda)} E_{AM1.5}(\lambda) \cdot \Delta\lambda / \sum_{300nm}^{1200nm} E_{AM1.5}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot 100\% \dots\dots\dots (A.2)$$

- l) 测量依据的标准。
- m) 确定级别的辐照度范围。
- n) 用于I-V特性测量时的数据采集时间。
- o) 对于分级有影响的操作或运行环境等因素（电源电能质量、装置稳定性等）。
- p) 确定分级的测试区域。
- q) 标称的等辐照度设定值和测量分级时的辐照度水平。
- r) 必要情况下, 为达到I-V特性测量稳定所需要的预热时间。
- s) 必要情况下, 为达到辐照度稳定所需要的预热时间。

A.2 不同波长范围对应的参考辐照度分布见表 A.1 和表 A.2。

表 A.1 400nm~1100nm 波长范围内对总辐照度的占比

序号	波长范围/nm	占波长400nm~1100nm范围对总辐照度的百分比, %	综合累计辐照度, %
1	400~500	18.4	18.4
2	500~600	19.9	38.3
3	600~700	18.4	56.7
4	700~800	14.9	71.6
5	800~900	12.5	84.1
6	900~1100	15.9	100.0

表 A.2 AM 1.5G 参考太阳光谱辐照度分布

序号	波长范围/nm	各波长范围辐照度与总辐照度的百分比, %	综合累计辐照度, %
1	300~470	16.61	16.61
2	470~561	14.74	33.35

序号	波长范围/nm	各波长范围辐照度与总辐照度的百分比, %	综合累计辐照度, %
3	561~657	16.67	50.02
4	657~772	16.63	66.65
5	772~919	16.66	83.31
6	919~1200	16.69	100.0

全国团体标准信息平台

参 考 文 献

- [1] GB/T 6495.9 光伏器件 第9部分：太阳模拟器性能要求
 - [2] IEC 60904-9:2020 Photovoltaic devices—Part 9: Classification of solar simulator characteristics
 - [3] IEC 61215-2 Terrestrial photovoltaic (PV) modules—Design qualification and type approval—Part 2: Test procedures
-