

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 2061—2023

一级标准光伏组件校准规范

Calibration Specification for Primary Reference Photovoltaic Modules



2023-06-30 发布

2023-12-30 实施

国家市场监督管理总局 发布

一级标准光伏组件校准规范

Calibration Specification for Primary Reference
Photovoltaic Modules

JJF 2061—2023

归口单位：全国光伏专用计量器具计量技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

天合光能股份有限公司

参加起草单位：中国信息通信研究院

国家太阳能光伏产品质量监督检验中心

常州合创检测技术有限公司

本规范委托全国光伏专用计量器具计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

张俊超（中国计量科学研究院）

熊利民（中国计量科学研究院）

闫 萍（天合光能股份有限公司）

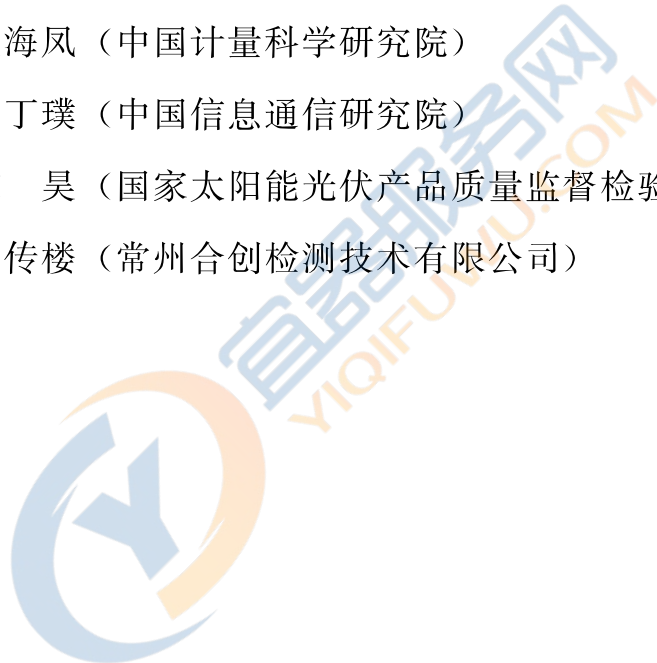
参加起草人：

孟海凤（中国计量科学研究院）

刘丁璞（中国信息通信研究院）

宋 昊（国家太阳能光伏产品质量监督检验中心）

高传楼（常州合创检测技术有限公司）



目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语和定义	(1)
4 概述	(2)
5 计量特性	(2)
6 校准条件	(2)
6.1 环境条件	(2)
6.2 测量标准及其他设备	(2)
7 校准项目和校准方法	(3)
7.1 校准项目	(3)
7.2 校准前检查	(3)
7.3 光电性能校准	(3)
8 校准结果表达	(4)
9 复校时间间隔	(4)
附录 A 校准结果内页推荐格式	(5)
附录 B 校准原始记录内页推荐格式	(6)
附录 C 校准结果不确定度评定示例	(8)
附录 D 标准光伏器件量值传递链示意图	(17)

引 言

本规范依据 JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》编制，并按照 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》的要求评定和表示测量不确定度。

本规范为首次发布。



一级标准光伏组件校准规范

1 范围

本规范适用于基于太阳模拟光源的标准测试条件下，一级标准光伏组件的光电性能校准。其他测试条件下一级标准光伏组件的光电性能校准可参照执行。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 2297—1989 太阳光伏能源系统术语

IEC 60891 光伏器件 实测 I-V 特性的温度和辐照度校正方法 (Photovoltaic devices-Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics)

IEC 60904-1 光伏器件 第 1 部分：光伏电流-电压特性的测量 (Photovoltaic devices—Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics)

IEC 60904-2 光伏器件 第 2 部分：标准光伏器件的要求 (Photovoltaic devices—Part 2: Requirements for reference solar devices)

IEC 60904-4 光伏器件 第 4 部分：标准光伏器件 溯源链建立程序 (Photovoltaic devices—Part 4: Photovoltaic reference devices-Procedures for establishing calibration traceability)

IEC 60904-7 光伏器件 第 7 部分：光伏器件测量中光谱失配修正的计算 (Photovoltaic devices—Part 7: Computation of the spectral mismatch correction for measurements of photovoltaic devices)

IEC 60904-9 光伏器件 第 9 部分：太阳模拟器性能分级 (Photovoltaic devices—Part 9: Classification of solar simulator characteristics)

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语和定义

以下术语和定义适用于本规范。

3.1 标准太阳电池 reference solar cell

用规定的标定方法标定过的太阳电池，其标准测试条件下的短路电流（标定值/CV 值）用作测量光源的辐照度。

注：参照 IEC 60904-4 等级定义（见附录 D），本规范中标准太阳电池对应于量值传递链中“一级标准”等级。

3.2 一级标准光伏组件 primary reference photovoltaic module

以一级标准光伏器件（通常为标准太阳电池）为标准器校准的光伏组件。

注：参照 IEC 60904-4 等级定义（见附录 D），本规范中一级标准光伏组件对应于量值传递链中“二级标准”等级。

3.3 二级标准光伏组件 secondary reference photovoltaic module

以一级标准光伏组件为标准器校准的光伏组件。

注：参照 IEC 60904-4 等级定义（见附录 D），本规范中二级标准光伏组件对应于量值传递链中“工作标准”等级。

3.4 标准测试条件 standard test conditions; STC

总辐照度为 $1\,000\text{ W/m}^2$ ，具有 AM1.5G 太阳光谱辐照度分布，电池结温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的测试条件。

3.5 正向扫描 forward scan

为获得电流-电压 (I - V) 曲线，由短路电流向开路电压方向扫描。

注：正向扫描简称正扫。

3.6 反向扫描 reverse scan

为获得电流-电压 (I - V) 曲线，由开路电压向短路电流方向扫描。

注：反向扫描简称反扫。

4 概述

一级标准光伏组件是一种基于“光伏效应”可将太阳辐射直接转化成电能且具有量值传递功能的光伏器件，由若干单体太阳电池通过某种串、并联方式进行连接，并经胶膜、玻璃、背板等封装而成。主要用于二级标准光伏组件光电性能校准、测试过程中光伏组件测试仪的校准，其量值溯源至一级标准光伏器件（通常为标准太阳电池）。

5 计量特性

5.1 短路电流 I_{sc} ：一般为 $(1\sim 20)\text{ A}$ ，相对不确定度不大于 2.5% ($k=2$)。

5.2 开路电压 V_{oc} ：一般为 $(0.6\sim 150)\text{ V}$ ，相对不确定度不大于 1.5% ($k=2$)。

5.3 最大功率 P_{max} ：一般为 $(4\sim 1\,000)\text{ W}$ ，相对不确定度不大于 2.5% ($k=2$)。

注：以上指标不适用于合格性判别，仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 温度： $(25\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

6.1.2 相对湿度： $\leq 75\%$ 。

6.1.3 其他条件：环境清洁通风，无影响仪器正常工作的电磁场、机械振动，光学暗室条件。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 标准太阳电池：满足 IEC 60904-2 设计要求，其标定值通过 IEC 60904-4 所述量值传递方法校准，不确定度优于 1.8% ($k=2$)，用作测量光源的辐照度。

6.2.2 太阳模拟光源：要求其光谱匹配度、辐照度不均匀度和辐照度不稳定性均需符

合 IEC 60904-9: 2020 中所规定的 A+A+A+ 级要求, 即与标准光谱辐照度相对分布的光谱失配偏差不大于 $\pm 12.5\%$; 光源辐照度不均匀度不大于 $\pm 1\%$; 光源辐照度短期不稳定性不大于 $\pm 0.25\%$; 光源辐照度长期不稳定性不大于 $\pm 1\%$ 。

6.2.3 I-V 曲线测试仪: 用于采集太阳模拟器的辐照条件下标准光伏组件所产生的电信号, 电流、电压测量最大允许误差 $\pm 0.2\%$ 。

6.2.4 测温仪: 用于测量一级标准光伏组件温度, 可选用接触式测温仪或者红外测温仪, 测量范围涵盖 $(20\sim 30)^\circ\text{C}$, 测量不确定度优于 1°C ($k=2$)。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

本规范校准项目为: STC 下的短路电流、开路电压和最大功率。

7.2 校准前检查

7.2.1 检查被校准光伏组件的外观状况, 清洁程度, 有无裂纹、斑点、气泡和划痕等影响校准的缺陷。

7.2.2 采用电致发光原理即 EL 测试方法, 检查光伏组件中电池片是否存在肉眼无法观察的隐裂、虚焊、断栅等缺陷。

7.3 光电性能校准

7.3.1 当标准太阳电池和被校准一级标准光伏组件的光谱失配因子大于 0.5% , 应参照 IEC 60904-7 对标准太阳电池 CV 值进行光谱失配修正, 将修正后的 CV 值作为 $1\,000\text{ W/m}^2$ 辐照度校准的依据。光谱失配修正因子计算方法如下:

$$\text{MMF} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\text{ref}}(\lambda) S_{\text{ref}}(\lambda) d\lambda \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\text{source}}(\lambda) S_{\text{test}}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\text{ref}}(\lambda) S_{\text{test}}(\lambda) d\lambda \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\text{source}}(\lambda) S_{\text{ref}}(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

式中:

MMF —— 光谱失配修正因子;

S_{test} —— 被校准光伏组件光谱响应度;

S_{ref} —— 标准太阳电池光谱响应度;

E_{source} —— 太阳模拟光源光谱辐照度分布;

E_{ref} —— AM1.5G 标准太阳光谱辐照度分布。

注: 积分波长范围的选取需涵盖被校准光伏组件和标准太阳电池的光谱响应波段。

7.3.2 将被校准光伏组件置于测试面内, 保证光伏组件与标准太阳电池平行共面, 共面度偏差小于 1 cm , 平行度偏差小于 1° , 并连接测试引线。

7.3.3 开启并调节控温装置, 恒温被校准光伏组件 2 h 以上, 保证光伏组件各区域温差控制在 1.0°C 范围内, 并且平均温度维持在 $(25.0 \pm 1.0)^\circ\text{C}$ 。

7.3.4 开启电子负载箱和采集软件, 分别以正扫 ($I_{\text{sc}}-V_{\text{oc}}$) 和反扫 ($V_{\text{oc}}-I_{\text{sc}}$) 方式测量光伏组件输出 I-V 数据, 同时测量被校准光伏组件温度和测试面内辐照度, 依据 IEC 60891 所述方法对测得 I-V 数据进行 STC 修正, 获得光伏组件 STC 下的关键光电参数。利用如下公式计算正扫和反扫条件下测得最大功率值的偏差:

$$RD = \frac{2 \times (P_r - P_f)}{P_r + P_f} \times 100\% \quad (2)$$

式中：

RD ——正扫和反扫最大功率偏差；

P_r ——反扫测得最大功率，W；

P_f ——正扫测得最大功率，W。

如果 RD 大于 0.5%，则需要增加 I - V 曲线扫描时间，直至两种扫描方式测得最大功率偏差不大于 0.5%。

7.3.5 测试并记录正扫和反扫所测得光电性能关键参数数据（短路电流 I_{sc} ，开路电压 V_{oc} ，最大功率 P_{max} ），取正扫和反扫测量结果的平均值作为单次测量结果。

7.3.6 重复 7.3.4 和 7.3.5 所述过程 3 次，取 3 次结果的平均值作为最终校准结果。

8 校准结果表达

校准结果应在校准证书上反映。校准证书应至少包括以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
- h) 如果与校准结果的有效性或应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- m) 对校准规范的偏离的说明；
- n) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识；
- o) 校准结果仅对被校太阳电池有效的声明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

校准结果内页格式参照附录 A，格式上可依据实际情况做合理改动。被校准一级标准光伏组件的电性能参数如短路电流、开路电压和最大功率等数据应记入校准原始记录，按附录 B 的格式给出。

9 复校时间间隔

建议复校时间间隔为 1 年。由于复校时间间隔的长短是由被校对象使用情况、使用者及其本身质量等诸因素所决定的，因此送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

附录 A

校准结果内页推荐格式

证书编号 * * * * * - * * * *

校 准 结 果

1. 标准光伏组件 STC 下电流-电压特性曲线
被测光伏组件电流-电压特性曲线如下图所示：

2. 标准光伏组件 STC 下关键光电参数
被测光伏组件 STC 下关键光电参数校准结果如下：

参数	短路电流 I_{sc} /A	开路电压 V_{oc} /V	最大功率 P_{max} /W
校准值			

3. 不确定度描述：
短路电流 $U_{rel}(I_{sc}) = \quad (k=2)$ ；
开路电压 $U_{rel}(V_{oc}) = \quad (k=2)$ ；
最大功率 $U_{rel}(P_{max}) = \quad (k=2)$ 。

附录 B

校准原始记录内页推荐格式

记录编号： 证书编号： 第 页 共 页

标准光伏组件光电性能校准记录

B.1 基本信息

客户名称				
器件名称		型号规格		
出厂编号		生产厂家		
客户地址		测试地址		
计量器具名称	测量范围	不确定度/ 准确度等级	证书编号	证书有效期至 (YYYY-MM-DD)
依据技术规范				
校准环境条件	温度：	相对湿度：	校准日期： 年 月 日	
人员	校准员：	核验员：		

B.2 光电性能参数校准数据记录

标准光伏组件标准测试条件（STC）下关键光电参数校准。

B.2.1 标准光伏组件 STC 下电流-电压特性曲线

B.2.2 标准光伏组件 STC 下关键光电参数

测量次数	扫描方向	短路电流 I_{sc}/A	开路电压 V_{oc}/V	最大功率 P_{max}/W
1	正向			
	反向			
	平均值 1			
2	正向			
	反向			
	平均值 2			
3	正向			
	反向			
	平均值 3			

取上述 3 次校准结果的平均值作为最终校准结果，如下表所示。

参数	短路电流 I_{sc}/A	开路电压 V_{oc}/V	最大功率 P_{max}/W
校准值			

B.3 校准不确定度

短路电流 $U_{rel}(I_{sc}) = \quad (k=2)$;

开路电压 $U_{rel}(V_{oc}) = \quad (k=2)$;

最大功率 $U_{rel}(P_{max}) = \quad (k=2)$ 。

附录 C

校准结果不确定度评定示例

C.1 测量模型

标准光伏组件短路电流、开路电压和最大功率与各影响量函数关系均可表示如下：

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (\text{C.1})$$

C.2 相对合成标准不确定度计算公式

影响量主要包括：测量重复性、辐照度校准、测试面辐照不均匀度、标准太阳电池与光伏组件辐照不均匀度、辐照长期不稳定性、被测组件温度测量及温度不均匀性、太阳模拟器电子箱电压、电流和功率测量准确度、标准太阳电池与被测光伏组件平行度、标准太阳电池与被测光伏组件前后距离偏差、测试端与组件接头接触电阻、光伏组件的容性引起测试过程中磁滞效应。

各影响量不相关，且灵敏系数为 1，相对不确定度为：

$$u_{\text{rel}}(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{y} u(x_i) \right)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_{\text{rel}}^2(x_i)} \quad (\text{C.2})$$

C.3 不确定度来源及其标准不确定度评定

C.3.1 测量重复性引入相对标准不确定度 u_{rel1}

通过开关设备，在不同时间段，分别测量光伏组件的 I - V 特性，每次测量分别采用正扫、反扫模式进行，数据见表 C.1。

表 C.1 重复性测试数据

次数	扫描方式	I_{sc}/A	V_{oc}/V	P_{max}/W
1	正扫	8.883	37.893	254.879
	反扫	8.873	37.888	255.376
	测量值 1	8.878	37.891	255.128
2	正扫	8.891	37.882	254.749
	反扫	8.88	37.875	255.365
	测量值 2	8.886	37.879	255.057
3	正扫	8.885	37.865	254.697
	反扫	8.87	37.859	254.912
	测量值 3	8.878	37.862	254.805

采用极差法利用下述公式计算 3 次测量值的相对标准差：

$$S = \frac{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}}{\bar{X} \cdot C} \quad (\text{C.3})$$

式中：

$X_{\max}$ ——测量值最大值；

$X_{\min}$ ——测量值最小值；

$\bar{X}$ ——测量平均值；

C ——极差系数，取为 1.69。

计算结果如下见表 C.2。

表 C.2 相对标准差数据

参数	I_{sc}	V_{oc}	$P_{\max}$
S	0.09%	0.08%	0.13%

由于实际测量过程中，通常 3 次测试正反结果扫取平均值作为最终结果，故重复性引入相对标准不确定度为 $u_{rel1} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{S}{\sqrt{3}}$ ，计算结果见表 C.3。

表 C.3 重复性引入相对标准不确定度数据

参数	I_{sc}	V_{oc}	$P_{\max}$
u_{rel1}	0.05%	0.05%	0.08%

C.3.2 辐照度校准引入的相对标准不确定度 u_{rel2}

C.3.2.1 标准太阳电池校准引入的相对标准不确定度 $u_{rel2.1}$

采用与被测光伏组件光谱响应度类似的标准太阳电池标定太阳模拟器的辐照度时，通过 IEC 60904-4 所描述的 DSR 方法对标准太阳电池的光谱响应度测量，计算得出 STC 下的短路电流，即标定值，其校准扩展不确定度为 $U_{rel} = 0.9\% (k=2)$ ， $u_{rel2.1} = 0.45\%$ 。

C.3.2.2 标准太阳电池电学测量准确性引入相对标准不确定度 $u_{rel2.2}$

即太阳模拟器电子负载箱测量标准太阳电池短路电流值时，电学测量偏差引入的不确定度。此电路测量准确性经过太阳模拟器供应商出厂校准，最大允许误差在 0.1% 之内。判定为均匀分布，标准太阳电池短路电流测量准确性引入的相对标准不确定度： $u_{rel2.2} = 0.1\% / \sqrt{3} \approx 0.06\%$ 。

C.3.2.3 标准太阳电池稳定性引入相对标准不确定度 $u_{rel2.3}$

考核标准太阳电池在 1 年校准周期内，校准值的变化情况。标准太阳电池近 3 年来校准最大偏差为 0.49%。判定为均匀分布，标准太阳电池校准周期内长期稳定性引入的相对标准不确定度： $u_{rel2.3} = 0.49\% / 2 / \sqrt{3} \approx 0.14\%$ 。

C.3.2.4 标准太阳电池温度偏差引入相对标准不确定度 $u_{rel2.4}$

考核标准太阳电池温度控制偏差对其短路电流，进而对辐照度校准的影响。标准太阳电池温度系数经过校准，短路电流温度系数为 0.05%/K。实验室品控可实现实际测试过程中保持 $(25.0 \pm 1.0) ^\circ\text{C}$ 。判定为均匀分布，由于标准太阳电池温度偏差引入相对标准不确定度： $u_{rel2.4} = 0.05\% / \sqrt{3} \approx 0.03\%$ 。

C.3.2.5 标准太阳能电池与被测组件光谱失配引入相对标准不确定度 $u_{\text{rel}2.5}$

光谱失配计算过程为：1) 测量标准太阳能电池光谱响应度；2) 测量太阳模拟器光谱分布；3) 测量被测组件光谱响应度或者与被测组件相同批次封装电池片样品光谱响应度；4) 将光谱响应度数据、太阳模拟器光谱数据及 AM1.5G 标准太阳光谱数据代入光谱失配因子计算公式（IEC 60904-7），计算光谱失配修正因子 MMF：

$$\text{MMF} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\text{ref}}(\lambda) S_{\text{ref}}(\lambda) d\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\text{source}}(\lambda) S_{\text{test}}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\text{ref}}(\lambda) S_{\text{test}}(\lambda) d\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\text{source}}(\lambda) S_{\text{ref}}(\lambda) d\lambda} \quad (\text{C.4})$$

式中：

S_{test} ——被校准光伏组件光谱响应度；

S_{ref} ——标准太阳能电池光谱响应度；

E_{source} ——太阳模拟光源光谱辐照度分布；

E_{ref} ——AM1.5G 标准太阳光谱辐照度分布。

根据所测数据积累统计，在实验室所用太阳模拟器光谱分布条件下，各被测光伏组件样品与标准太阳能电池标准器之间的光谱失配因子可限制在（0.99~1.01）之间，判定为均匀分布，故由于光谱失配引入的相对标准不确定度： $u_{\text{rel}2.5} = (1.01 - 0.99)/2/\sqrt{3} \approx 0.57\%$ 。

不确定度分量 C.3.2.1~C.3.2.5 共同引入辐照度校准不确定度，总结 C.3.2.1~C.3.2.5 的合成不确定度，判定辐照度合成不确定度引起太阳模拟器辐照度的变化范围，实验判定模拟器辐照度在此范围内引起各关键光电参数变化情况。

C.3.2.1~C.3.2.5 部分辐照度校准引入的相对合成标准不确定为：

$$\begin{aligned} u_{\text{rel}2} &= \sqrt{u_{\text{rel}2.1}^2 + u_{\text{rel}2.2}^2 + u_{\text{rel}2.3}^2 + u_{\text{rel}2.4}^2 + u_{\text{rel}2.5}^2} \\ &= \sqrt{(0.45\%)^2 + (0.06\%)^2 + (0.14\%)^2 + (0.03\%)^2 + (0.57\%)^2} \\ &\approx 0.75\% \end{aligned} \quad (\text{C.5})$$

相对扩展不确定度： $U_{\text{rel}2} = 1.5\% (k=2)$ 。

调节太阳模拟器辐照度范围（985~1 015）W/m²，各关键光电参数变化情况如表 C.4 所示。

表 C.4 光伏组件关键光电参数随辐照度变化数据

辐照度/(W/m ²)	I_{sc}/A	V_{oc}/V	P_{max}/W
985	8.751	37.81	250.1
1 000	8.886	37.83	253.9
1 015	9.019	37.86	257.6

由上述数据得到由辐照度校准引入短路电流、开路电压、最大功率的相对标准不确定度分别见表 C.5。

表 C.5 辐照度引入相对标准不确定度数据

参数	I_{sc}	V_{oc}	P_{max}
u_{rel2}	0.75%	0.04%	0.74%

C.3.3 测试面辐照不均匀度引入相对标准不确定度 u_{rel3}

评估方法为：1) 实际测量辐照面内光伏组件中各电池对应位置辐照不均匀度；2) 利用太阳电池等效理论及光伏组件中电池片串并联关系，编写不均匀度对光伏组件 I - V 性能影响分析软件，分析辐照不均匀度对光伏组件 I - V 测量结果的影响。

C.3.3.1 测量光伏组件各电池片位置处辐照不均匀度，数据见表 C.6。

表 C.6 辐照度不均匀度数据

单位：mV

不均匀度 划分区域	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	184.8	184.9	184.8	184.8	185.0	184.7	184.4	184.6	184.5	185.1
B	184.8	185.2	185.3	185.2	185.1	185.1	185.2	185.2	184.9	185.6
C	184.3	185.1	185.4	185.9	185.4	184.9	185.1	184.9	184.8	185.6
D	184.9	185.3	184.9	184.6	184.6	184.5	184.6	184.4	184.4	184.6
E	184.0	184.3	184.5	184.4	184.4	184.4	184.3	184.3	184.3	184.3
F	184.8	184.5	184.1	184.2	184.3	184.3	184.2	184.6	184.5	184.6

辐照不均匀度为 0.5%。

C.3.3.2 由太阳电池等效理论结合光伏组件中电池片串并联关系编写计算分析程序，分别计算理想辐照度分布和实际辐照度分布情况下光伏组件的关键光电参数：1) 辐照度完全均匀；2) 实际辐照度分布（取平均值位置调节标准太阳电池监控电池辐照度至 $1\,000\text{ W/m}^2$ ），两种情况下各光电参数计算结果和偏差见表 C.7。

表 C.7 理想辐照度条件和实际辐照度条件下关键光电参数计算结果

辐照度分布情况	I_{sc}/A	V_{oc}/V	P_{max}/W
均匀辐照度分布	9	45.62	258.4
实际辐照度分布	8.98	45.62	258.3
偏差	-0.22%	0.00%	-0.04%

由于辐照度不均匀度引入相对标准不确定度 u_{rel3} 见表 C.8。

表 C.8 辐照度不均匀度引入相对标准不确定度数据

参数	I_{sc}	V_{oc}	P_{max}
u_{rel3}	0.22%	0.00%	0.04%

C.3.4 标准太阳电池与光伏组件辐照不均匀度引入相对标准不确定度 u_{rel4}

测量光伏组件位置处辐照不均匀度，数据见表 C. 9。

表 C. 9 辐照不均匀度测试数据

单位：mV

不均匀度 划分区域	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	184.8	184.9	184.8	184.8	185.0	184.7	184.4	184.6	184.5	185.1
B	184.8	185.2	185.3	185.2	185.1	185.1	185.2	185.2	184.9	185.6
C	184.3	185.1	185.4	185.9	185.4	184.9	185.1	184.9	184.8	185.6
D	184.9	185.3	184.9	184.6	184.6	184.5	184.6	184.4	184.4	184.6
E	184.0	184.3	184.5	184.4	184.4	184.4	184.3	184.3	184.3	184.3
F	184.8	184.5	184.1	184.2	184.3	184.3	184.2	184.6	184.5	184.6

光伏组件测试面内平均辐照度为 184.75，测量标准太阳能电池位置处辐照度为 184.47， I - V 测量过程中引入由此辐照度不均匀度产生的辐照度修正因子为 1.001 5。

考虑实际操作过程中，校准周期范围内，辐照不均匀度可能随时间变化，根据长期监控数据，一个校准周期内平均辐照度和标准电池位置辐照度修正因子发生变化小于 0.3%，由此引入的不确定度判定为均匀分布，由于标准太阳能电池位置辐照不均匀性引入的相对标准不确定度 u_{rel4} 见表 C. 10。

表 C. 10 标准太阳能电池位置处辐照不均匀度变化引入相对标准不确定度数据

参数	I_{sc}	V_{oc}	P_{max}
u_{rel4}	0.17%	0.00%	0.17%

C. 3. 5 辐照长期不稳定性引入的相对标准不确定度 u_{rel5}

测量 I - V 采集过程中的辐照度不稳定性，根据不稳定性大小和有无辐照度修正及修正公式进行判定。由于本实验用太阳模拟器辐照度长期不稳定性为 0.2%，不稳定性较小，且设备具备基于标准太阳能电池进行 I - V 测试结果的辐照度修正功能，故由 I - V 采集过程中长期辐照不稳定性引入的相对标准不确定度 u_{rel5} 可忽略。

C. 3. 6 被测组件温度测量及温度不均匀性引入的相对标准不确定度 u_{rel6}

C. 3. 6. 1 评估项目包括：

- 组件不同位置温度分布；
- 组件温度系数；
- 测温仪器校准不确定度；
- 测温偏差；
- 判定组件背板温度与电池片温度差异。

C. 3. 6. 2 本校准实验室采用中央空调控温，光伏组件竖直放置，光伏组件温度上下存在对称温差。以下通过实验加热光伏组件某部分电池片，分析光电参数随温度均匀性的关系，室温为 25℃，加热部分光伏组件温度为 (37 ± 3) ℃，不同加热条件下，被测光伏组件关键光电参数见表 C. 11。

表 C.11 不同加热条件下光伏组件关键光电参数

加热条件	光电参数量值		
	I_{sc}/A	V_{oc}/V	P_{max}/W
无加热	8.972	45.76	313.97
加热 1 块电池片	8.971	45.72	313.5
加热 4 块电池片	8.974	45.58	312.3
加热 9 块电池片	8.974	45.41	310.76
加热 12 块电池片	8.975	45.28	309.58

各加热条件下引起的偏差与电池片数目的比值如表 C.12 所示。

表 C.12 不同加热条件下光伏组件关键光电参数偏差与电池片数目比值

加热条件	偏差/电池片数目		
	I_{sc}/A	V_{oc}/V	P_{max}/W
加热 1 块电池片	-0.001	-0.040	-0.47
加热 4 块电池片	0.001	-0.045	-0.42
加热 9 块电池片	0.000	-0.039	-0.36
加热 12 块电池片	0.000	-0.040	-0.37

通过上述实验数据，得到如下结论：

- a) 温度不均匀对 I_{sc} 影响可忽略；
- b) 温度对“组件 V_{oc} 的影响”与对“各电池片 V_{oc} 影响的线性叠加”等效，即组件 V_{oc} 取决于各电池片温度的平均值；
- c) 温度对“组件 P_m 的影响”与对“各电池片 P_m 影响的线性叠加”近似等效。

基于以上结论，且校准实验室温度探头置于光伏组件中心位置，上下温度差分布均匀，故由于温度温差分布引入的相对标准不确定度 $u_{rel,1}$ 可忽略。

C.3.6.3 测量被校准光伏组件温度系数， I_{sc} 、 V_{oc} 、 P_m 的温度系数分别如表 C.13 所示。

表 C.13 光伏组件温度系数

参数	I_{sc}	V_{oc}	P_{max}
温度系数	0.06%	-0.30%	-0.40%

红外测温仪经过校准，校准不确定度为 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($k=2$)，故由测温仪器校准引入相对标准不确定度 $u_{rel,2}$ 见表 C.14。

表 C.14 测温仪校准引入相对标准不确定度数据

参数	I_{sc}	V_{oc}	P_{max}
$u_{rel,2}$	0.01%	0.05%	0.06%

根据品控情况，温度平均值测量偏差及组件背板温度与电池片结温偏差可控制在 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内，判定为均匀分布，由此引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}6.3}$ 见表 C.15。

表 C.15 温度偏差引入相对标准不确定度数据

参数	I_{sc}	V_{oc}	P_{max}
$u_{\text{rel}6.3}$	0.02%	0.09%	0.12%

综上，基于上述两温度分量合成，得到由被测组件温度测量偏差及温度不均匀性引入的合成相对标准不确定度 $u_{\text{rel}6}$ 见表 C.16。

表 C.16 温度测量引入相对标准不确定度数据

参数	I_{sc}	V_{oc}	P_{max}
$u_{\text{rel}6}$	0.02%	0.10%	0.13%

C.3.7 太阳模拟器电子箱电压、电流、功率测量准确度引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}7}$ 对被评估太阳模拟器电子负载箱电学测量准确性进行校准，测试数据见表 C.17。

表 C.17 电子负载校准数据

参数	I_{sc}/A	V_{oc}/V	P_{max}/W
标准值	8.841	45.33	309.1
被测值	8.838	45.47	309.7

由太阳模拟器负载箱电学测量偏差引入相对标准不确定度 $u_{\text{rel}7.1}$ 见表 C.18。

表 C.18 电子负载偏差引入相对标准不确定度数据

参数	I_{sc}	V_{oc}	P_{max}
$u_{\text{rel}7.1}$	0.04%	0.32%	0.18%

电学校准相对扩展不确定度 $U_{\text{rel}7.2}$ 见表 C.19。

表 C.19 电子负载校准引入相对标准不确定度数据

参数	I_{sc}	V_{oc}	P_{max}
$U_{\text{rel}7.2}$	0.2% ($k=2$)	0.2% ($k=2$)	0.3% ($k=2$)

综合上述两项因素，由于电子负载箱测量准确度引入相对合成标准不确定度 $u_{\text{rel}7}$ 见表 C.20。

表 C.20 电学测量引入相对标准不确定度数据

参数	I_{sc}	V_{oc}	P_{max}
$u_{\text{rel}7}$	0.11%	0.34%	0.24%

C.3.8 标准太阳电池与被测光伏组件平行度引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}8}$

实验室通过角度控制可实现标准太阳电池和组件平行度在 1.0° 范围内。分别如下测量两种条件下测试光伏组件 I - V 特性，测量数据如表 C.21 所示。

表 C.21 光伏组件关键光电参数随入射角度变化数据

偏离角度/ $^\circ$	I_{sc}/A	V_{oc}/V	P_{max}/W
0	8.868	37.723	252.285
1	8.870	37.732	252.553

判定不确定度满足均匀分布，由于标准太阳电池和被测组件平行度引入相对标准不确定度 u_{rel8} 见表 C.22。

表 C.22 平行度引入相对标准不确定度数据

参数	I_{sc}	V_{oc}	P_{max}
u_{rel8}	0.02%	0.01%	0.06%

C.3.9 标准太阳电池与被测光伏组件前后距离偏差引入的相对标准不确定度 u_{rel9}

实验室通过距离控制可实现标准太阳电池和组件纵向距离在 1 cm 范围内。分别如下测量两种条件下测试光伏组件 I - V 特性，测量数据如表 C.23 所示。

表 C.23 光伏组件关键光电参数随前后距离变化数据

移动距离/cm	I_{sc}/A	V_{oc}/V	P_{max}/W
0	8.860	38.359	258.234
1	8.877	38.365	258.777

判定不确定度满足均匀分布，由于标准太阳电池和被测组件前后距离引入相对标准不确定度 u_{rel9} 见表 C.24。

表 C.24 距离偏差引入相对标准不确定度数据

参数	I_{sc}	V_{oc}	P_{max}
u_{rel9}	0.12%	0.01%	0.12%

C.3.10 测试端与组件接头接触电阻引入的相对标准不确定度 u_{rel10}

测量测试端与组件接头的接触电阻，分析接触电阻对组件功率的影响。由统计知测量测试端与组件接头的接触电阻，约为 2.5 m Ω ；两个接头总共引入接触电阻 5 m Ω 。通过理论计算得到由于接触电阻引入的相对标准不确定度 u_{rel10} ，见表 C.25。

表 C.25 接触电阻引入相对标准不确定度数据

参数	I_{sc}	V_{oc}	P_{max}
u_{rel10}	0.00%	0.00%	0.13%

C.3.11 光伏组件的容性引起测试过程中磁滞效应引入的相对标准不确定度 u_{rel11}

在单次闪光条件下，采用正扫和反扫两种模式测量组件功率，分析正扫、反扫差别引起测量不确定度。采用 split 模式，分别在正扫和反扫条件下测量光伏组件 I - V 特性，测量过程中通过调整闪光次数，可满足测量过程中最大功率正扫、反扫测量结果差异小于 0.5%，短路电流和开路电压正扫、反扫差异小于 0.2%。

测试过程中选取正扫、反扫平均值作为最终结果，判定不确定度满足均匀分布，由于光伏组件的容性引起测试过程中磁滞效应引入的相对标准不确定度 u_{rel11} 见表 C.26。

表 C.26 磁滞效应引入相对标准不确定度数据

参数	I_{sc}	V_{oc}	P_{max}
u_{rel11}	0.06%	0.06%	0.14%

C.4 合成标准不确定度

基于上述不确定分析，通过如下公式分别计算短路电流、开路电压、最大功率的相对合成标准不确定度，计算结果见表 C.27。

$$u_{\text{rel}} = \sqrt{u_{\text{rel1}}^2 + u_{\text{rel2}}^2 + u_{\text{rel3}}^2 + u_{\text{rel4}}^2 + u_{\text{rel5}}^2 + u_{\text{rel6}}^2 + u_{\text{rel7}}^2 + u_{\text{rel8}}^2 + u_{\text{rel9}}^2 + u_{\text{rel10}}^2 + u_{\text{rel11}}^2} \quad (\text{C.6})$$

表 C.27 光伏组件关键光电参数测量结果标准不确定度数据

参数	I_{sc}	V_{oc}	P_{max}
u_{rel}	0.82%	0.37%	0.84%

C.5 扩展不确定度

短路电流、开路电压、最大功率的相对扩展不确定度 ($k=2$) 计算结果见表 C.28。

表 C.28 光伏组件关键光电参数测量结果扩展不确定度数据

参数	I_{sc}	V_{oc}	P_{max}
$U_{\text{rel}} (k=2)$	1.6%	0.7%	1.7%

附录 D

标准光伏器件量值传递链示意图

参照 IEC 60904-4：2019，标准光伏器件量值传递链示意图如图 D.1 所示。本规范所述一级标准光伏组件对应于量值传递链中的“二级标准”等级。

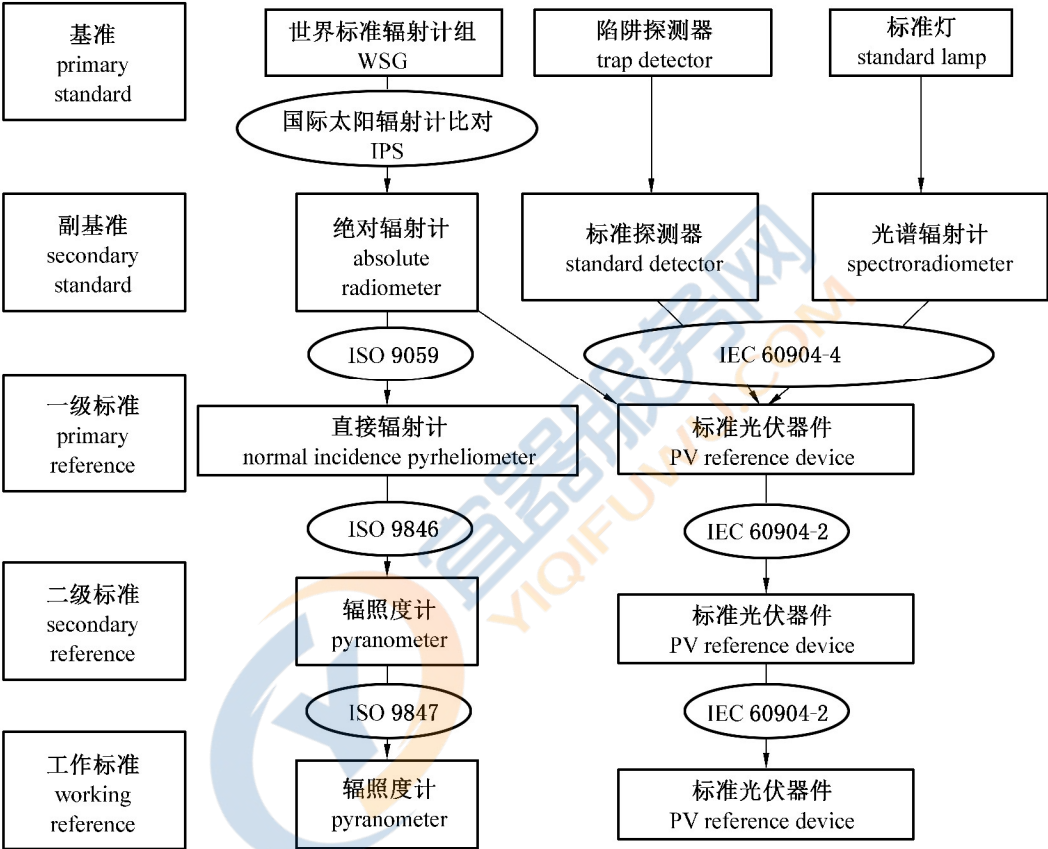


图 D.1 标准光伏器件量值传递链示意图