内蒙古自治区地方计量技术规范

JJF（蒙）5002—2024

光伏组件校准规范

Calibration Specification for photovoltaic module

2024-05-16 发布　　2024-07-01 实施

内蒙古自治区市场监督管理局 发布

光伏组件校准规范

Calibration Specification for

photovoltaic module

JJF(蒙)5002—2024

归 口 单 位： 内蒙古自治区市场监督管理局

主要起草单位： 天津市计量监督检测科学研究院

参加起草单位： 北京市计量检测科学研究院

河北省计量监督检测研究院

山西省检验检测中心

本规范委托天津市计量监督检测科学研究院负责解释

本规范主要起草人：

冯　宇 (天津市计量监督检测科学研究院)

刘　宇 (天津市计量监督检测科学研究院)

柳云秀 (天津市计量监督检测科学研究院)

参加起草人：

于彩娟 (天津市计量监督检测科学研究院)

张　磊 (北京市计量检测科学研究院)

贾祎冬 (河北省计量监督检测研究院)

崔　泓 （山西省检验检测中心）

目 录

引 言……（Ⅱ）
1 范围……（1）
2 引用文件……（1）
3 术语和定义……（2
4 概述……（3）
5 计量特性……（3）
6 校准条件……（3）
6.1 环境条件……（3）
6.2 测量标准及其他设备……（3）
7 校准项目和校准方法……（4）
7.1 校准项目……（4）
7.2 校准前检查……（4）
7.3 校准方法……（5）
8 校准结果……（6）
9 复校时间间隔……（7）
附录A 校准结果内页推荐格式……（8）
附录B 校准原始记录内页推荐格式……（10）
附录C 校准结果不确定度评定示例……（12）
附录D 标准光伏器件量值传递链示意图……（23）

引　言

本规范依据国家计量技术规范 JJF 1071-2010 《国家计量校准规范编写规则》和 JJF 1059.1-2012 《测量不确定度评定与表示》为基础性系列规范进行编写。使用本规范时，引用文件的最新版本（包括所有的修改草案）适用于本规范。

本规范为首次发布。

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，光伏组件中的二级标准光伏组件的光电性能校准。其他测试条件下二级标准光伏组件的光电性能校准可参照本规范执行。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1001-2011 通用计量术语及定义

JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示

JJF 1071-2010 国家计量校准规范编写规则

JJF 1622-2017 太阳电池校准规范：光电性能

JJF 2061-2023 一级标准光伏组件校准规范

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-Part1: 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-Part2: 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-Part4: Reference solar 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-Part7: 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-Part9: Solar simulator performance requirements）

使用本规范时，应注意使用上述引用文件的有效版本。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用本规范；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

下列术语和定义适用于本规范：

3.1 太阳电池 solar cell

满足 IEC 60904-2 《光伏器件 第 2 部分：标准光伏器件的要求》设计要求，依据 JJF 1622-2017 《太阳电池校准规范：光电性能》的溯源方法，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，本规范中太阳电池对应于量值传递链中“二级标准”等级。

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

在自然或模拟太阳光下，以一级标准光伏器件为标准器校准的标准光伏组件。

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

在自然或模拟太阳光下，以一级标准光伏组件或太阳电池为标准器校准的标准光伏组件。

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)

用于光伏组件测量的光源总辐照度为 1000W/m2，并具有 AM1.5G 太阳光谱辐照分布，温度为 25℃。

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（I_{sc}-V_{oc}）。

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（V_{oc}-I_{sc}）。

3.7 光电性能 photoelectric properties

光伏组件的光电性能即电流-电压（I-V）特性（如图 1），主要体现在如下关键参数：短路电流 I_{sc}，开路电压 V_{oc}，最大输出功率 P_{max}，最佳工作电压 V_{Pmax}，最佳工作电流 I_{Pmax}。

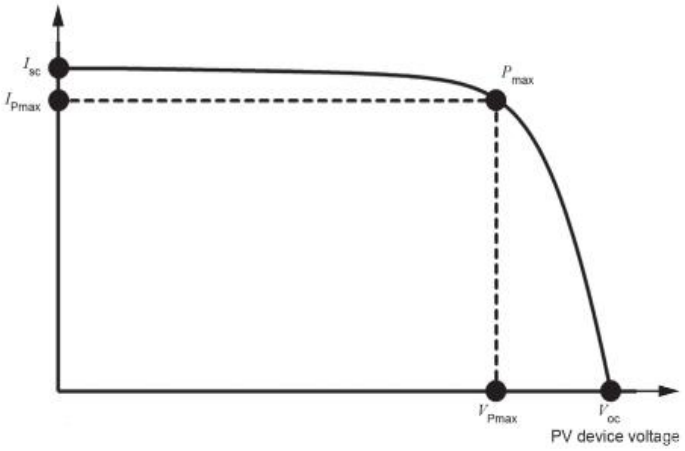

图 1　光伏组件的电流-电压（I-V）特性曲线

4　概述

光伏组件，是一种基于光伏效应可以将太阳辐射能量转化成为电能且具有量值传递功能的光伏器件，是由若干单体太阳电池通过串、并联方式进行链接，并经过胶膜、玻璃、背板等封装而成。光伏组件的光电性能参数是衡量其性能优劣的关键指标，包括短路电流、开路电压、最大输出功率、最佳工作电流、最佳工作电压等。

5　计量特性

光伏组件光电性能参数范围如下：

5.1　短路电流 I_{sc}：0.1A～30A。

5.2　开路电压 V_{oc}：0.1V～150V。

5.3　最大输出功率 P_{max}：0.1W～1000W。

5.4　最佳工作电流 I_{Pmax}：0.1A～30A。

5.5　最佳工作电压 V_{Pmax}：0.1V～150V。

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　环境温度：（25±1）℃。

6.1.2　环境湿度：≤75%RH。

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、机械振动等不利因素，应具有光学暗室条件。

6.2　测量标准及其他设备

6.2.1　太阳模拟器：要求其光谱匹配度、辐照度不均匀度和辐照度不稳定度均需符合 IEC 60904-9：2020《光伏器件 第 9 部分：太阳模拟器性能分级》中所规定的 A+A+A+级要求，要求太阳模拟器的有效光照面上的辐照度能在 200W/m^{2}到 1200W/m^{2}范围内调节。

6.2.2　太阳电池：满足 IEC 60904-2 《光伏器件 第 2 部分：标准光伏器件的要求》设计要求，依据 JJF 1622-2017《太阳电池校准规范》的溯源方法，标定的太阳电池 CV 值，不确定度优于 2.0%（k=2）。

6.2.3　一级标准光伏组件：标准测试条件下，由标准太阳电池标定的标准光伏组件，其短路电流不确定度优于 2.0%（k=2）。

6.2.4　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 ±0.2%。

6.2.5　测温仪：用于测量光伏组件温度，可选用接触式测温仪或者红外测温仪，测量范围覆盖（20～30）℃，测量不确定度优于 1℃（k=2）。

表 1　校准用标准器主要技术指标

序号	标准器具	技术指标
1	太阳模拟器	符合 IEC 60904-9:2020《光伏器件 第 9 部分：太阳模拟器性能分级》中所规定的 A+A+A+级要求，辐照度范围 200W/m^2～1200W/m^2
2	太阳电池	依据 JJF 1622-2017《太阳电池校准规范》的溯源方法，标定的太阳电池 CV 值，不确定度优于 2.0%（k=2）
3	一级标准光伏组件	其短路电流不确定度优于 2.0%（k=2）
4	I-V曲线测试仪	电流、电压测量最大允许误差 ±0.2%
5	测温仪	测量范围（20～30）℃，测量不确定度优于 1℃（k=2）

注：校准用计量器具和测量标准应经计量技术机构检定合格或校准，并在有效期内。

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条件下的短路电流、开路电压和最大输出功率。

7.2　校准前检查

7.2.1　核对检查被校光伏组件的名称、规格型号、生产厂商、出厂编号等。

7.2.2　检查被测光伏组件的外观状况，清洁程度，有无裂纹、斑点、气泡和划痕等影响测量的缺陷，以及封装盒表面有无缺损和变形。

7.2.3　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。

如发现以上影响校准数据的问题，应停止校准，和客户沟通之后再进行校准。

7.3　校准方法

7.3.1　使用太阳电池或一级标准光伏组件对太阳能模拟器1000W/m^{2}辐照度进行预先校准。如太阳电池或一级标准光伏组件与被校准二级标准光伏组件的电池片技术/材料/工艺不一致，或两者光谱失配因子大于0.5%，应参照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》的溯源方法对太阳电池或一级标准光伏组件的标定值（CV值）进行光谱失配修正，将修正后的CV值作为1000W/m^{2}辐照度校准的依据。光谱失配修正因子计算方法公式（1）：

$$MMF=\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}E_{ref}(\lambda)s_{ref}(\lambda)d\lambda\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}E_{source}(\lambda)s_{test}(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}E_{ref}(\lambda)s_{test}(\lambda)d\lambda\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}E_{source}(\lambda)s_{ref}(\lambda)d\lambda} \tag{1}$$

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}——太阳模拟器光谱辐照度分布；

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，保证光伏组件与太阳电池或一级标准光伏组件平行共面，共面度偏差小于 1cm，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 小时以上，保证光伏组件各区域温差控制在 1.0℃范围内，并且平均温度维持在（25.0 ± 1.0）℃。

7.3.4　开始测试，分别以正向扫描（I_{sc}–V_{oc}）和反向扫描（V_{oc}–I_{sc}）方式测量光伏组件 I–V 曲线，同时测量被校准光伏组件温度和测试面内的辐照度，依据 IEC 60891《光伏器件实测 I–V 特性的温度和辐照度校正方法》中所述方法对测得 I–V 数据进行 STC 修正，获得光伏组件 STC 下的关键光电参数数据。利用公式（2）计算正向扫描和反向扫描条件下测得最大功率偏差 RD：

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

式中：

RD ——正向扫描和反向扫描最大功率偏差；

P_r ——反向扫描测得的最大功率，W；

P_f ——正向扫描测得的最大功率，W。

如正向扫描和反向扫描测得最大功率值偏差大于 0.5%，则需要增加 I-V 曲线扫描时间，直至两种方式测得最大功率偏差 RD 等于或小于 0.5%。

7.3.5 测试并记录正向扫描和反向扫描所测得光电性能关键参数数据（开路电压 V_{oc}，短路电流 I_{sc}，最大输出功率 P_{max}，最佳工作电压 V_{Pmax}，最佳工作电流 I_{Pmax}），取正反扫平均值作为单次测量结果。重复上述过程3次，取3次结果的平均值作为最终测试结果。

8 校准结果

校准结果应在校准证书上反映，校准证书应至少包含以下信息：

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）客户的地址和名称；

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应用相关时，应对被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）校准结果仅对被校对象有效的声明；

p）未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

校准结果内页格式具体参照附录 A，格式上可依据实际情况做合理改动。被校准二级标准光伏组件的电性能参数如短路电流、开路电压、最大功率、最佳工作电流、最佳工作电压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光伏组件的使用情况、使用者、光伏组件本身质量问题等诸因素所决定的，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

一、校准方法：

二、校准结果：

1、标准光伏组件 STC 条件下电流-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 条件下关键光电参数

被测光伏组件 STC 条件下关键光电参数校准结果如下：

短路电流 I_{sc}(A)	开路电压 V_{oc}(V)	最大功率 P_{max}(W)	最佳工作电流 I_{Pmax}(A)	最佳工作电压 V_{Pmax}(V)

注：最佳工作电流、最佳工作电压不作为量传参数。

三、不确定度描述：

短路电流 $U_{rel}(I_{sc})$=　(k=2)；

开路电压 $U_{rel}(V_{oc})=$ （k=2）；

最大功率 $U_{rel}(P_{max})=$ （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

1.基本信息

<table>
<tr><td>客户名称</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>器件名称</td><td colspan="2"></td><td>型号规格</td><td></td></tr>
<tr><td>出厂编号</td><td colspan="2"></td><td>生产厂家</td><td></td></tr>
<tr><td>客户地址</td><td colspan="2"></td><td>测试地址</td><td></td></tr>
<tr><td>计量器具名称</td><td>测量范围</td><td>不确定度/
准确度等级/最大允许误差</td><td>证书编号</td><td>证书有效期至</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>依据技术文件</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>校准环境条件</td><td>温度：</td><td>湿度：</td><td rowspan="2">校准日期：　　年　　月　　日</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>人员</td><td>校准员：</td><td>核验员：</td></tr>
</table>

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

一、校准方法：

二、校准结果：

1、标准光伏组件 STC 条件下电流-电压特性曲线

2、标准光伏组件 STC 条件下关键光电参数

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)	最佳工作电流 I_{Pmax}(A)	最佳工作电压 V_{Pmax}(V)
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

短路电流 I_{sc}(A)	开路电压 V_{oc}(V)	最大功率 P_{max}(W)	最佳工作电流 I_{Pmax}(A)	最佳工作电压 V_{Pmax}(V)

注：最佳工作电流、最佳工作电压不作为量传参数。

三、校准不确定度：

短路电流 $U_{rel}(I_{sc})=$ （k=2）；

开路电压 $U_{rel}(V_{oc})=$ （k=2）；

最大功率 $U_{rel}(P_{max})=$ （k=2）。

附录 C

校准结果不确定度评定示例

C.1　测量模型

标准光伏组件测试结果包括短路电流、开路电压和最大功率等关键参数，根据各影响因子，其函数关系表示如下：

$$y = f(x_1, x_2, \ldots, x_N) \tag{C.1}$$

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，测试面辐照度不均匀度，标准太阳电池与光伏组件辐照度不均匀度，辐照度长期不稳定度，被测组件温度测量及温度不均匀性，太阳模拟器负载电压、电流和功率测量准确度，一级标准组件与被测光伏组件平行度，一级标准组件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。假设各影响量互不相关，灵敏系数为 1，则不确定度为：

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot u(x_i)\right)^2} \tag{C.2}$$

相对不确定度为：

$$u_c(y) \equiv \frac{u_c(y)}{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{1}{y}\frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot u(x_i)\right)^2} \tag{C.3}$$

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，数据如下表 1 所示：

表 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	13.633	49.779	541.369
	反扫	13.640	49.789	543.141
	测量值 1	13.637	49.784	542.255

表 1（续）

次数	扫描方式	I_{sc} /A	V_{oc} /V	P_{max} /W
2	正扫	13.644	49.851	542.696
	反扫	13.640	49.861	544.322
	测量值 2	13.642	49.855	543.510
3	正扫	13.644	49.810	541.883
	反扫	13.645	49.822	543.812
	测量值 3	13.645	49.816	542.848

采用极差法利用下述公式计算三次测量值的相对标准差：

$$S = \frac{X_{max}-X_{min}}{\overline{X}\cdot C} \qquad (C.4)$$

式中：

X_{max} ——测量值最大值；

X_{min} ——测量值最小值；

$\overline{X}$ ——测量值平均值值；

C ——极差系数，取为 1.69。

计算结果如下表 2 所示：

表 2　相对标准差数据

I_{sc}	V_{oc}	P_{max}
0.03%	0.08%	0.13%

由于实际测量过程中，通常三次测试正反结果扫取平均值作为最终结果，故重复性引入不确定度为$u_{rel1} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{S}{\sqrt{3}}$，计算结果如下表 3 所示：

表 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}	0.02%	0.05%	0.08%

C.3.2　辐照度定标引入的不确定度u_{rel2}

C.3.2.1　标准太阳电池定标引入的不确定度$u_{rel2.1}$

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 JJF1622-2017 所描述的方法对标准太阳电池的短路电流进行标定，其校准不确定度为U_{rel}=2.0%（k=2），$u_{rel2.1}$=1.0%。

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

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。判定矩形分布，标准太阳电池短路电流测量准确性引入的不确定度：$u_{rel2.2} = 0.1\%/\sqrt{3} = 0.06\%$。

C.3.2.3　标准太阳电池稳定性引入不确定度$u_{rel2.3}$

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%。判定矩形分布，标准太阳电池校准周期内长期稳定性引入的不确定度：$u_{rel2.3} = 0.49\%/2/\sqrt{3} = 0.14\%$。

C.3.2.4　标准太阳电池温度偏差引入不确定度$u_{rel2.4}$

考核标准太阳电池温度控制偏差对其短路电流，进而对辐照度定标的影响。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 ± 1.0）℃。判定矩形分布，由于标准太阳电池温度偏差引入不确定度为：$u_{rel2.4} = 0.05\%/\sqrt{3} = 0.03\%$。

C.3.2.5　标准太阳电池与被测组件光谱失配引入不确定度$u_{rel2.5}$

光谱失配计算过程为：（1）测量标准太阳电池光谱响应度；（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 标准太阳光谱数据带入光谱失配因子计算公式（IEC 60904-7），计算光谱失配因子 *MMF*:

$$MMF=\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}E_{ref}(\lambda)s_{ref}(\lambda)d\lambda\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}E_{source}(\lambda)s_{test}(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}E_{ref}(\lambda)s_{test}(\lambda)d\lambda\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}E_{source}(\lambda)s_{ref}(\lambda)d\lambda} \qquad (C.5)$$

式中：

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}——太阳模拟器光谱辐照度分布；

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，判定为矩形分布，故由于光谱失配引入的不确定度为：$u_{\mathrm{rel2.5}}=(1.01-0.99)/2/\sqrt{3}=0.57\%$。

不确定度分量 C3.2.1～C3.2.5 共同引起辐照度定标不确定度，总结 C2.1～C2.5 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。

C3.2.1～C3.2.5 部分引起辐照度定标不确定为:

$$u_{\mathrm{rel2}}=\sqrt{u_{\mathrm{rel2.1}}^2+u_{\mathrm{rel2.2}}^2+u_{\mathrm{rel2.3}}^2+u_{\mathrm{rel2.4}}^2+u_{\mathrm{rel2.5}}^2}=\sqrt{1.0\%^2+0.06\%^2+0.14\%^2+0.03\%^2+0.57\%^2}=1.2\% \qquad (C.6)$$

扩展不确定度为：U_{rel2}=2.4%

调节太阳模拟器辐照度范围（980W/m^2～1020W/m^2）,各关键光电参数变化情况如下表4所示：

表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
980	13.451	49.720	533.991
1000	13.644	49.816	542.848
1020	13.927	49.744	553.105

由上述数据得到由辐照度定标引入短路电流、开路电压、最大功率的不确定度分量为表5所示：

表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}	1.2%	0.06%	1.2%

C.3.3　测试面辐照不均匀度引入不确定度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性能影响分析数据表格，分析辐照不均匀度对光伏组件 I-V测量结果的影响。

测量光伏组件各电池片位置处辐照不均匀度，数据如下表6所示：

表6　辐照不均匀度数据　　mV

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	105.97	106.06	106.16	106.29	106.37	105.20	106.65	106.67	106.39	106.12
B	105.89	106.10	106.55	106.65	106.83	106.84	107.02	106.90	106.81	106.61
C	105.81	105.87	106.00	106.24	106.27	106.50	106.70	106.71	106.34	106.27

表6（续）

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D	105.82	106.14	106.21	106.52	106.52	106.58	106.52	106.56	106.60	106.22

E	106.08	106.59	106.07	106.37	106.65	106.42	106.54	106.57	106.71	106.42
F	105.81	106.27	106.13	106.40	106.81	106.45	106.73	106.65	106.49	106.23

辐照不均匀度为：0.86%。

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小程序，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监控电池辐照度至 1000W/m^2），两种情况下各光电参数计算结果和偏差如下表 7 所示：

表 7　理想辐照度条件和实际辐照度条件下光电参数计算结果

辐照度分布情况	I_{sc} /A	V_{oc} /V	P_{max} /W
均匀辐照度分布	13.678	49.784	548.887
实际辐照度分布	13.637	49.784	542.255
偏差	−0.3%	0.0%	−0.3%

由于辐照度不均匀度引入不确定度u_{rel3}为下表 8 所示：

表 8　辐照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}	0.3%	0.0%	0.3%

C.3.4　标准太阳电池与光伏组件辐照不均匀度引入不确定度u_{rel4}

测量光伏组件位置处辐照不均匀度，数据如下表 9 所示：

表 9　辐照不均匀度测试数据　　mV

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	106.15	105.85	105.90	106.37	106.79	106.79	106.83	106.66	106.49	106.59
B	106.04	105.97	106.06	106.16	106.29	106.37	105.20	106.65	106.67	106.39
C	105.57	105.89	106.10	106.55	106.65	106.83	106.84	107.02	106.90	106.81
D	106.08	105.81	105.87	106.00	106.24	106.27	106.50	106.70	106.70	106.34
E	105.87	105.82	106.14	106.21	106.52	106.52	106.58	106.52	106.56	106.60
F	106.57	106.08	106.59	106.07	106.37	106.65	106.42	106.54	106.57	106.72

光伏组件测试面内平均辐照度转换为：106.378mV，测量标准太阳电池位置处辐照度转换为：106.376mV，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：0.999。

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，由于标准太阳电池位置辐照不均匀性引入的不确定度u_{rel4}为表10所示：

表10　标准太阳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　辐照长期不稳定度引入的不确定度u_{rel5}

测量IV采集过程中的辐照度不稳定度，根据不稳定度大小和有无辐照度修正及修正公式进行判定。本实验用太阳模拟器辐照度长期不稳定度小于0.1%，不稳定度较小，且设备具备基于标准太阳电池进行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不确定度非常小可忽略不计。

C.3.6　被测组件温度测量及温度不均匀性引入不确定度u_{rel6}

评估项目包括：（1）组件不同位置温度分布；（2）组件温度系数；（3）测温仪器校准不确定度；（4）测温偏差；（5）判定组件背板温度与电池片温度差异。

C.3.6.1　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、降温部分光伏组件温度为25℃±3℃，不同加热条件下，被测光伏组件关键光电参数如下表11所示：

表 11　不同加热条件下光伏组件关键光电参数

参数	I_{sc} /A	V_{oc} /V	P_{max} /W
无加热	13.972	49.76	543.97
加热 1 块电池片	13.971	49.72	543.52
加热 4 块电池片	13.974	49.58	542.31
加热 9 块电池片	13.974	49.41	540.76
加热 12 块电池片	13.975	49.28	549.58

各加热条件下引起的偏差与电池片数目的比值如下表 12 所示：

表 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

参数	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：

1）温度不均匀对 I_{sc} 影响可忽略；

2）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；

3）温度对“组件 P_{max} 的影响”与对“各电池片 P_{max} 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不确定度 $u_{rel6.1} = 0$，可忽略。

C.3.6.2　测量被校准光伏组件温度系数，I_{sc}、V_{oc}、P_{max} 的温度系数分别如下表 13 所示：

表 13　光伏组件温度系数

I_{sc}	V_{oc}	P_{max}
0.06%	−0.30%	−0.40%

红外测温仪经过校准，校准不确定度为：U=1.0℃（k=2）。故由测温仪器校准引入不确定度 $u_{rel6.2}$ 如下表 14 所示：

表 14　测温仪校准引入相对标准不确定度

参数	I_{sc}	V_{oc}	P_{max}
$u_{rel6.2}$	0.03%	0.15%	0.2%

C.3.6.3　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±0.5℃内，判定均匀分布，由此引入的不确定度$u_{rel6.3}$如下表 15 所示：

表 15　温度偏差引入相对标准不确定度

参数	I_{sc}	V_{oc}	P_{max}
$u_{rel6.3}$	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不确定度u_{rel6}如下表 16 所示：

表 16　温度测量引入相对标准不确定度

参数	I_{sc}	V_{oc}	P_{max}
u_{rel6}	0.04%	0.17%	0.23%

C.3.7　太阳模拟器电子箱电压、电流、功率测量准确度引入不确定度u_{rel7}

本系统电子负载经过校准，本次校准结果相对扩展不确定度：U_{rel}=0.5%(k=2)

由电子负载箱测量准确度引入相对标准不确定度u_{rel7}见下表 17 所示：

表 17　电学测量引入相对标准不确定度

参数	I_{sc}	V_{oc}	P_{max}
u_{rel7}	0.25%	0.25%	0.25%

C.3.8　标准太阳电池与被测光伏组件平行度引入不确定度u_{rel8}

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，测量数据如下表 18 所示：

表 18　光伏组件关键光电参数随入射角度变化数据

偏离角度/°	I_{sc}/A	V_{oc}/V	P_{max}/W
0	13.868	49.723	552.285

1	13.870	49.732	552.553

判定不确定度满足矩形分布，由于标准太阳电池和被测组件平行度引入不确定度u_{rel8}如下表 19 所示：

表 19　平行度引入相对标准不确定度

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 1cm 范围内。分别如下测量两种条件下测试光伏组件 I-V特性，测量数据如下表 20 所示：

表 20　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	13.860	49.359	558.234
1	13.877	49.365	558.777

判定不确定度满足矩形分布，由于标准太阳电池和被测组件前后距离引入不确定度u_{rel9}如下表 21 所示：

表 21　距离偏差引入相对标准不确定度

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 2.5mΩ；两个接头总共引入接触电阻 5mΩ。通过理论计算得到由于接触电阻引入的不确定度u_{rel10}如下表 22 所示：

表 22　接触电阻引入相对标准不确定度

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反向测量结果差异小于 0.5%，短路电流和开路电压正反向差异小于 0.2%。

测试过程中选取正反扫平均值作为最终结果，判定不确定度满足矩形分布，由于光伏组件的容性引起测试过程中磁滞效应引入的不确定度u_{rel11}如下表 23 所示：

表 23　磁滞效应引入相对标准不确定度

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、最大功率的合成标准不确定度u_{rel}：

$$u_{\mathrm{rel}} = \sqrt{u_{\mathrm{rel1}}^2 + u_{\mathrm{rel2}}^2 + u_{\mathrm{rel3}}^2 + u_{\mathrm{rel4}}^2 + u_{\mathrm{rel5}}^2 + u_{\mathrm{rel6}}^2 + u_{\mathrm{rel7}}^2 + u_{\mathrm{rel8}}^2 + u_{\mathrm{rel9}}^2 + u_{\mathrm{rel10}}^2 + u_{\mathrm{rel11}}^2} \tag{C.7}$$

C.5　扩展不确定度

短路电流、开路电压、最大功率的扩展不确定度U_{rel}(k=2)分别为表 24 所示：

表 24　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_{rel}	2.4%	0.7%	2.4%

附录 D

标准光伏器件量值传递链示意图

参照 IEC 60904-4:光伏器件 第 4 部分：标准光伏器件的溯源链建立程序，标准光伏器件量值传递链示意图如下，本校准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，二级标准光伏组件对应于量值传递链中的工作标准。

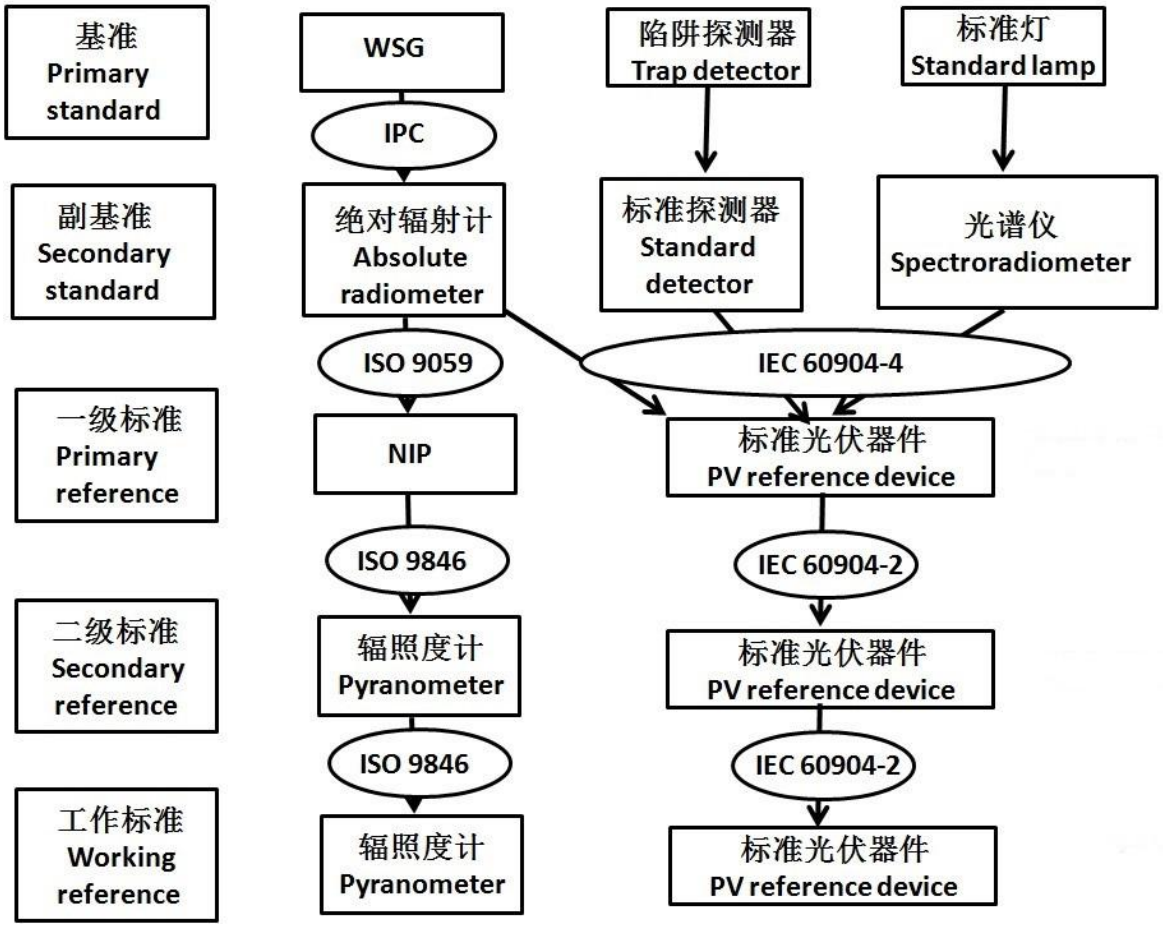

图 D　标准光伏器件量值传递链示意图