

中华人民共和国国家标准

GB 6494—86

航天用太阳能电池电性能测试方法

Measurement procedures for electrical
characteristics of astronautic solar cells

1986-06-18发布

1987-06-01实施

国家标准局 批准

航天用太阳能电池电性能测试方法

Measurement procedures for electrical characteristics of astronautic solar cells

本标准适用于无聚光器的航天用单体太阳能电池、太阳能电池组件、太阳能电池组合板和太阳能电池方阵，以及工作标准太阳能电池电性能的测试*。

本标准不适用于一级和二级标准太阳能电池的测试。

1 原理

测量太阳能电池的电性能归结为测量它的伏安特性。由于伏安特性与测试条件有关，必须在统一规定的标准测试条件下进行测量，或将测量结果换算到标准测试条件。标准测试条件包括标准阳光（标准光谱和标准辐照度）和标准测试温度。测试光源可选用人造测试光源（太阳模拟器或其他模拟阳光光源）或自然阳光。使用人造测试光源时，辐照度用标准太阳能电池的短路电流标定值来校准。为了减少光谱失配误差，测试光源的光谱应尽量接近标准阳光光谱，或选用和被测电池光谱响应基本相同的标准太阳能电池。

2 电性能测试的一般规定

2.1 标准测试条件

2.1.1 本标准规定AM0标准阳光光谱为空间标准阳光光谱（见附录D）。

2.1.2 空间阳光的标准辐照度规定为 1367 W/m^2 。

2.1.3 标准测试温度规定为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.1.4 标准测试温度的允差为 $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.2 测量仪器与装置

2.2.1 标准太阳能电池

2.2.1.1 标准太阳能电池用于校准测试光源的辐照度。

2.2.1.2 对AM0工作标准太阳能电池进行测试时，用AM0二级标准太阳能电池校准辐照度。

2.2.1.3 在非定标测试中，一般用AM0工作标准太阳能电池校准辐照度。要求高时，用AM0二级标准太阳能电池。

2.2.2 电压表（包括一切测量电压的装置）

2.2.2.1 电压表的精确度应不低于0.5级。

2.2.2.2 电压表的内阻应不低于 $20\text{ k}\Omega/\text{V}$ ，推荐使用数字式电压表。

2.2.3 电流表（包括一切测量电流的装置）

2.2.3.1 电流表的精确度应不低于0.5级。

2.2.3.2 电流表内阻应小到能保证在测量短路电流时，被测电池两端的电压不超过开路电压的3%。当要求更精确时，在开路电压的3%以内可利用电压和电流的线性关系来推算完全短路时的短路电流。

* 在本标准中，工作标准太阳能电池的测试简称定标测试，其他统称非定标测试。

2.2.3.3 推荐用数字毫伏表测量取样电阻两端电压降的方法来测量电流。

2.2.4 取样电阻

2.2.4.1 取样电阻的精确度应不低于 $\pm 0.2\%$ 。

2.2.4.2 必须采用四端精密电阻。

2.2.4.3 电池短路电流和取样电阻阻值的乘积应不超过电池开路电压的3%。

2.2.5 负载

2.2.5.1 负载电阻应能从零平滑地调节到画出完整的伏安特性曲线为止。

2.2.5.2 必须有足够的功率容量，以保证在通电测量时不会因发热而影响测量精确度。

2.2.5.3 当可变电阻不能满足2.2.5.1和2.2.5.2时，应采用等效的电子可变负载。

2.2.6 函数记录仪

2.2.6.1 函数记录仪用于记录太阳电池的伏安特性曲线。

2.2.6.2 函数记录仪的精确度应不低于0.5级。

2.2.6.3 对函数记录仪内阻的要求和对电压表内阻的要求相同，见2.2.2.2。

2.2.7 温度计

2.2.7.1 温度计或测温系统的仪器误差应不超过 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

2.2.7.2 测温系统的时间响应应不超过1s。

2.2.7.3 测温探头的体积和形状应保证使它能尽量靠近太阳电池的 P_n 结安装。

2.2.8 室内测试光源见3.1。

2.3 测试项目

2.3.1 开路电压 V_{oc} 。

2.3.2 短路电流 I_{sc} 。

2.3.3 最佳工作电压 V_m 。

2.3.4 最佳工作电流 I_m 。

2.3.5 最佳输出功率 P_m 。

2.3.6 光电转换效率。

2.3.7 填充因数 FF 。

2.3.8 伏—安特性曲线或伏安特性。

2.3.9 短路电流温度系数 α ，简称电流温度系数（附录B）。

2.3.10 开路电压温度系数 β ，简称电压温度系数（附录B）。

2.3.11 内部串联电阻 R_s （附录C）。

2.4 基本测试方法和电路

2.4.1 2.3所规定的测试项目中，开路电压和短路电流可以用电表直接测量，其他参数从伏安特性求出。

2.4.2 太阳电池的伏安特性应在标准地面阳光、太阳模拟器或其他等效的模拟阳光光源下测量。

2.4.3 太阳电池的伏安特性应在标准测试条件下测试，如受客观条件所限，只能在非标准条件下测试，则测试结果应换算到标准测试条件；换算的方法见附录A。

2.4.4 在测量过程中，单体太阳电池的测试温度必须恒定在标准测试温度。

2.4.5 太阳电池组件、组合板或方阵的测试温度允许用遮光法控制。

2.4.6 测试平面上的辐照度必须用标准太阳电池来校准，不允许用其他辐射测量仪表。

2.4.7 用于校准辐照度的标准太阳电池应和待测太阳电池具有基本相同的光谱响应*。

2.4.8 测量伏安特性的电路框图见图1：

* 同材料、同结构、同工艺的太阳能电池具有基本相同的光谱响应。

测量太阳电池的电压和电流时，应从被测件的端点单独引出电压线和电流线。

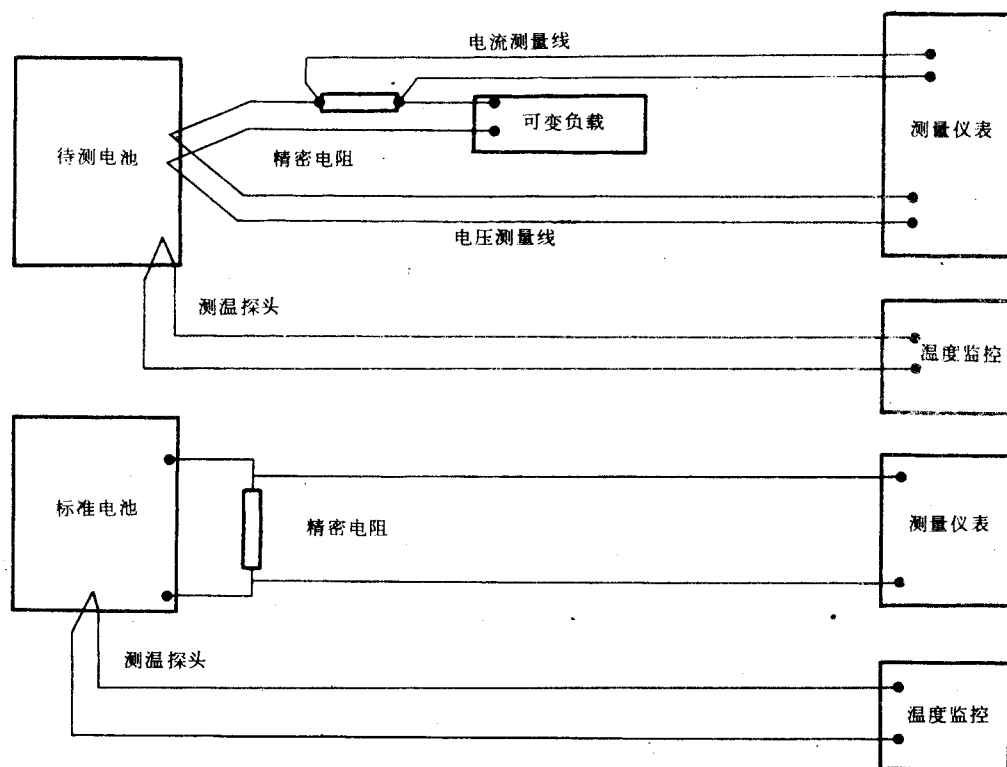


图 1 测量伏安特性的电路框图

2.5 从非标准测试条件换算到标准测试条件

当测试温度、辐照度和标准测试条件不一致时，可用附录 A 的换算公式校正到标准测试条件。

2.6 数据处理及测试报告

2.6.1 测试报告应给出测试设备电测系统的系统误差及重复性误差。

2.6.2 定标测试除要求 2.6.1 外，当被测电池和标准电池的光谱响应不符合基本相同的条件时，还必须给出能计算光谱失配误差的光谱数据。

2.6.3 测试数据应取不少于 3 次的算术平均值，并给出不确定度。

2.6.4 转换效率应按包括栅线面积在内的电池受光总面积来计算。

2.6.5 测试报告必须写明：被测电池概况、测试条件、实测数据、以及换算到标准测试条件的数据，测试时所使用的标准电池的等级、编号和主要电性能数据等。详见附录 E。

3 室内人造测试光源下测试

3.1 测试光源的选择

3.1.1 测试平面上的辐照度：应能在 600 W/m^2 到 1500 W/m^2 范围内调节。

3.1.2 光谱匹配及辐照不均匀度应不低于附录 F 的要求。

3.1.3 辐照不均匀度

3.1.3.1 在测量单体电池时，辐照不均匀度用不超过被测电池面积 $1/4$ 的单体电池来检测。

3.1.3.2 在测量组件、组合板时，辐照不均匀度用不超过被测组件面积 $1/10$ 的单体电池来检测。

3.1.3.3 辐照不均匀度是对测试平面上不同点的辐照度来说的,当辐照度不随时间改变时,辐照不均匀度按下式计算。

$$\text{辐照不均匀度} = \pm \frac{\text{最大辐照度} - \text{最小辐照度}}{\text{最大辐照度} + \text{最小辐照度}} \times 100\%$$

3.1.4 辐照的不稳定度

测试平面上同一点的辐照度随时间改变时,辐照不稳定度按下式计算,并注明时间间隔。

$$\text{辐照不稳定度} = \pm \frac{\text{最大辐照度} - \text{最小辐照度}}{\text{最大辐照度} + \text{最小辐照度}} \times 100\%$$

3.1.5 辐照的准直性要求

照射到被测器件表面的辐射光束中,非准直光束的辐照度应不超过总辐照度的25%。

3.1.6 关于辐射光束的视角和准直部分的规定

3.1.6.1 辐射光束的视角:系指辐射光束中,照射到测试平面上任一点的两条辐射线的最大夹角(见图2)。

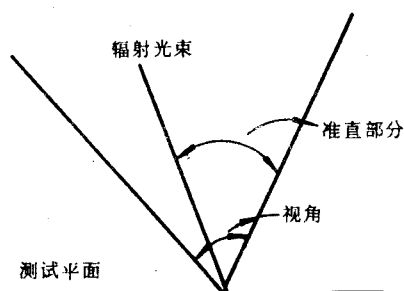


图2 视角示意图

3.1.6.2 辐射光束的准直部分是从视角中划分出来的一部分,该部分的角平分线垂直于测试平面。

3.1.6.3 在非定标测试中,要求准直部分不超过 10° 。

3.1.6.4 在定标测试中,要求准直部分不超过 5° 。

3.1.7 作定标测试的光源必须给出从 0.3 到 $1.2\mu\text{m}$ 范围内,每一波长间隔($\Delta\lambda = 0.1\mu\text{m}$)和AM0标准阳光在同一区间的光谱能量分配的百分比的比值,以便计算光谱失配误差。

3.1.8 当被测电池与标准电池的光谱响应基本相同时,对测试光源的光谱不作严格要求,其测试效果和标准阳光相同,称为等效辐照法。

3.1.9 调节辐照度时,光谱的改变应保证失配误差不超出允许范围。

3.2 测量方法

3.2.1 温度的测量和控制

3.2.1.1 单体电池的测试温度必须恒定在标准测试温度。

3.2.1.2 温度的测试点应尽量靠近Pn结。

a. 在定标测试中,测试点的温度和Pn结的工作温度相差应不超过 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

b. 在非定测试中,测试点的温度和Pn结的工作温度相差应不超过 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

3.2.1.3 太阳能电池的组件、组合板、方阵的温度测量和控制。

3.2.1.3.1 组件、组合板、方阵允许在非标准测试温度下测量。

3.2.1.3.2 在测量周期中,不同点的温度差不超过 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。同一点的温度变化不超过 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。

3.2.1.3.3 在没有恒温控制的情况下,应使被测件的温度和环境温度达到平衡,然后测量。

3.2.1.3.4 为了保证在测量过程中温度基本保持不变,并和环境温度一致,推荐用以下二种方法。

- a. 使用脉冲式太阳模拟器（见附录F）。
- b. 在测试前后用遮光板和挡风板将被测件围住，仅在测试周期内让被测件受光照。

3.2.2 辐照度的校准：

将标准太阳电池放在待测电池的位置，调节辐照度，使标准电池的短路电流重现其标定值。然后用待测电池代替标准电池，即可进行测试。在辐照均匀区范围内，也可将标准电池和待测电池并排放置。

3.2.3 按图1接好测试线路，平滑地调节负载电阻或等效的电子负载，用函数记录仪或其他等效的方法记录所测电池的伏安特性。

3.2.4 从伏安特性可以得到所需的电性能参数。

4 室外阳光下测试

4.1 测试场地及周围环境

- 4.1.1 测试场地周围应空旷，无遮光、反光及散光的任何物体。
- 4.1.2 测试场地周围的地面上应无高反射的物体，如冰雪、白灰和亮沙子等。
- 4.1.3 测试场地周围应空气清洁，尽量避开灰尘、烟雾或其他大气污染。

4.2 气候及阳光条件

- 4.2.1 天气晴朗，太阳周围无云。
- 4.2.2 阳光总辐照度不低于标准总辐照度的80%。
- 4.2.3 散射光所占比例不大于总辐射的15%。
- 4.2.4 在测试周期内，辐照的稳定度应不大于 $\pm 1\%$ 。

4.3 安装要求

被测电池、标准电池应安装在同一平面上，并尽量靠近。测试平面的法线和人射光线的夹角应不大于 5° 。

4.4 温度的测量和控制

- 4.4.1 单体太阳电池温度的测量和控制同3.2.1。
- 4.4.2 组件、组合板或方阵的温度测量：用二支或二支以上温度计，紧靠在被测件周围遮光部分不同的点。当温度计的读数稳定，各温度计的读数相差不超过 1°C 时，以各温度计读数的平均值作为被测件的温度。

4.5 测量伏安特性

测量伏安特性同3.2.3，并同时记录标准电池的短路电流。

4.6 数据的换算

参照附录A，或采用其他等效的方法将测量结果换算到标准测试条件，或其他所需的环境条件。

4.7 在地面阳光条件下测试航天用太阳电池时应符合下列规定。

- 4.7.1 被测电池和标准电池的光谱响应基本相同的条件应从严要求。
- 4.7.2 将被测电池和标准电池都装在准直筒内，以满足3.1.5和3.1.6。

附录 A
从非标准测试条件换算到标准测试条件
(参考件)

A.1 当测试温度、辐照度和标准测试条件不一致时,可用以下公式校正到标准测试条件。

$$I_2 = I_1 + I_{sc} \left[\frac{I_{SR}}{I_{MR}} - 1 \right] + \alpha (T_2 - T_1) \dots\dots\dots (A1)$$

$$V_2 = V_1 - R_s (I_2 - I_1) - KI_2 (T_2 - T_1) + \beta (T_2 - T_1) \dots\dots\dots (A2)$$

式中: I_1 、 V_1 ——待校正特性曲线上,点的坐标;

I_2 、 V_2 ——校正后的特性曲线上,对应点的坐标;

I_{sc} ——所测电池的短路电流;

I_{MR} ——标准电池在实测条件下的短路电流;

I_{SR} ——标准电池在标准条件或所需条件下的短路电流;

T_1 ——测试温度;

T_2 ——标准测试温度;

R_s ——所测电池的内部串联电阻;

K ——曲线校正因子;

α ——所测电池在标准辐照度下,以及在所需的温度范围内(在 α 可视为常数的温度范围内)的短路电流温度系数;

β ——和上述短路电流温度系数相对应的开路电压温度系数。

注:以上各参数的单位必须统一。

A.2 曲线校正因子 K 的确定。

A.2.1 把辐照度调节在这样的范围内:不低于标准辐照度的70%,不超过标准辐照度的130%。

A.2.2 在所需的温度变化范围内选择3个不同的测试温度 $T_3 > T_4 > T_5$ 。而且 T_3 和 T_5 至少应相差30℃。

A.2.3 用下列公式把电流和电压从测试温度 T_3 换算到 T_4 。

$$I_4 = I_3 + \alpha (T_4 - T_3) \dots\dots\dots (A3)$$

$$V_4 = V_3 - KI_4 (T_4 - T_3) + \beta (T_4 - T_3) \dots\dots\dots (A4)$$

式中: I_3 、 V_3 ——温度为 T_3 时,伏安特性曲线上点的坐标;

I_4 、 V_4 ——温度为 T_4 时,伏安特性曲线上对应点的坐标。

式中 K 用试探法确定。把试探值 K_0 代入上式,和实测曲线相比较,如相差较大,适当改变试探值,再比较。直到上式和实测曲线基本吻合,记下这个 K_1 。对于单晶硅和多晶硅电池,推荐取试探值 $K_0 = 1.25 \times 10^{-3} \Omega / ^\circ\text{C}$ 。

A.2.4 在 T_4 和 T_5 之间, T_3 和 T_5 之间,重复执行A.2.3,分别得到 K_2 和 K_3 。

A.2.5 取 K_1 、 K_2 和 K_3 的平均值作为曲线校正因子 K 。

附录 B
太阳电池电流和电压温度系数的测量
 (参考件)

太阳电池的短路电流温度系数 α 和开路电压温度系数 β 随辐照情况而改变,并与温度有关,因此必须在规定的辐照条件下进行测量。而测量结果只在所测的温度范围内适用,温度范围根据需要来确定。

- B.1** 测试光源用太阳模拟器或其他模拟阳光,推荐使用脉冲式太阳模拟器。
- B.2** 温度传感器附着在被测的太阳电池上,尽量靠近Pn结。
- B.3** 被测件安装在能控制温度的测试架上,接触面应有良好的热传导。温度恒定在标准测试温度。
- B.4** 工作标准电池和被测电池并排放置在测试平面的有效辐照区内。
- B.5** 用工作标准电池校准辐照度。校准的方法见3.2.2。
- B.6** 把温度调节到所需温度范围的最低点。测量开路电压和短路电流。
- B.7** 把温度升高10℃,稳定后再测量开路电压和短路电流。
- B.8** 重复B.7,直到所需温度范围的最高点。
- B.9** 用统计方法处理数据,画出短路电流—温度以及开路电压—温度二条曲线。
- B.10** 在所需温度范围的中点,求出上述二条曲线的斜率,即 α 和 β 。
- B.11** 太阳电池组件、组合板和方阵的温度系数可根据单体电池的温度系数,以及单体电池的串、并联个数算出。

$$\alpha = n_p \cdot \alpha_c \quad \dots\dots\dots (B1)$$

$$\beta = n_s \cdot \beta_c \quad \dots\dots\dots (B2)$$

式中: α_c 和 β_c —— 单体电池的电流和电压温度系数;
 α 和 β —— 组件、组合板或方阵的电流和电压温度系数;
 n_p —— 单体电池的并联个数;
 n_s —— 单体电池的串联个数。

- B.12** 当温度低于环境温度时,为了防止被测件的表面生成冷凝水珠,可以用干燥的氮气保护,必要时在高真空中测试。

附录 C
 太阳电池内部串联电阻的测量
 (参考件)

测量太阳电池内部串联电阻可用以下方法,也可采用其他精度不低于本方法的测量方法。

C.1 本方法在太阳模拟器或其他模拟阳光下测量太阳电池的内部串联电阻。所用的装置和测量伏安特性的装置相同,但要求测试平面上的辐照度大致能在 600 W/m^2 到 1200 W/m^2 范围内调节。

C.2 用二种不同的辐照度,分别测量二条伏—安特性曲线,画在同一坐标上,如图C₁。二种辐照度大致取为 900 W/m^2 和 1100 W/m^2 ,不需知道正确的数值。辐照度改变时要求温度变化不超过 $2\text{ }^\circ\text{C}$ 。

C.3 下图中,在二条曲线的最大功率点附近各选择一点P和Q,使满足 $I_{sc1} - I_P = I_{sc2} - I_Q$

C.4 按下式算出 R_{s1} :

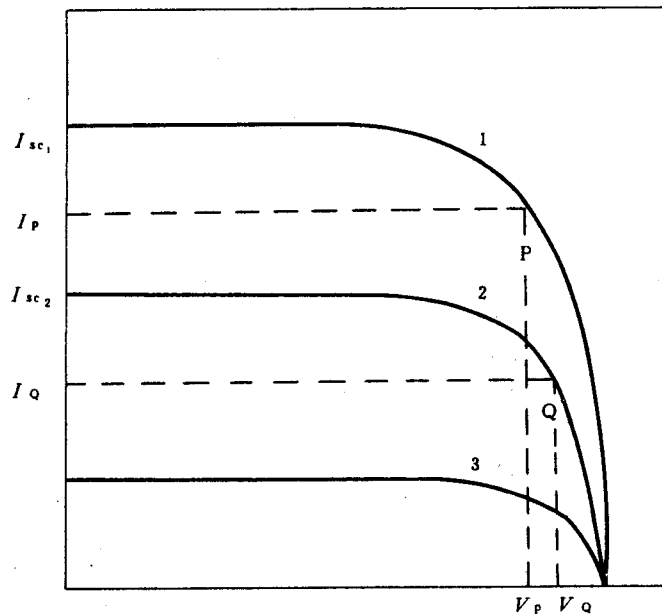
$$R_{s1} = \frac{V_Q - V_P}{I_{sc1} - I_{sc2}} \dots\dots\dots (C1)$$

C.5 保持温度不变,把辐照度调节到 700 W/m^2 左右,再描绘一条伏—安特性曲线3。

C.6 重复C.3和C.4,从曲线2和3算出 R_{s3} ,从曲线1和3算出 R_{s2} 。

C.7 被测太阳电池的内部串联电阻

$$R_s = \frac{R_{s1} + R_{s2} + R_{s3}}{3} \dots\dots\dots (C2)$$



附录 D
AM0 标准太阳光谱数据
(参考件)

中心波长 μm	平均光谱辐照度 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$	中心波长 μm	平均光谱辐照度 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$
0.300	536	0.530	1894
0.310	625	0.540	1897
0.320	714	0.550	1891
0.330	968	0.560	1856
0.340	898	0.570	1839
0.350	983	0.580	1839
0.360	973	0.590	1769
0.370	1117	0.600	1751
0.380	1109	0.610	1728
0.390	1039	0.620	1690
0.400	1487	0.630	1659
0.410	1704	0.640	1636
0.420	1736	0.650	1598
0.430	1591	0.660	1516
0.440	1843	0.670	1512
0.450	2005	0.680	1474
0.460	2042	0.690	1421
0.470	1990	0.700	1432
0.480	2027	0.710	1393
0.490	1896	0.720	1375
0.500	1907	0.730	1361
0.510	1926	0.740	1311
0.520	1831	0.750	1271

中心波长 μm	平均光谱辐照度 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$	中心波长 μm	平均光谱辐照度 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$
0.760	1225	0.990	762
0.770	1191	1.000	744
0.780	1181	1.010	733
0.790	1151	1.020	711
0.800	1147	1.030	696
0.810	1114	1.040	687
0.820	1069	1.050	666
0.830	1041	1.060	646
0.840	1021	1.070	639
0.850	993	1.080	623
0.860	1002	1.090	611
0.870	972	1.100	606
0.880	966	1.110	600
0.890	945	1.120	580
0.990	913	1.130	568
0.910	875	1.140	560
0.920	841	1.150	551
0.930	830	1.160	543
0.940	801	1.170	532
0.950	778	1.180	518
0.960	771	1.190	511
0.970	764	1.200	499
0.980	769		

本附录用于计算光谱失配误差。表中“平均光谱辐照度”是以“中心波长”为中心，波长间隔为 $0.01\mu\text{m}$ 范围内光谱辐照度的积分平均值。

附录 E
太阳能电池测试报告单
(补充件)

被测太阳能电池概况									
名称	编号	品种	类型	并联数	串联数	面积 A	重量 W	尺寸	测试要求
单体									
组件									
组合板									
方阵									
制造日期				交件人					
制造单位				交件日期					
测试条件			实测数据			换算到标准测试条件			
环境	地点		I_{sc}	mA, A		mA, A			
	气温	°C	V_{oc}	mV, V		mV, V			
	湿度	% (相对)	P_m	mW, W		mW, W			
测试温度		°C	V_m	mV, V		mV, V			
辐照度			I_m	mA, A		mA, A			
光谱		AM	FF						
视角			η	%		%			
光源	自然阳光		p_m/A	mW/cm ² , W/m ²		mW/cm ² W/m ²			
	模拟阳光		P_m/W	mW/g, W/kg		mW/g W/kg			
主要测试仪器与装置									
标准太阳能电池		室内测试光源			电测系统				
编号		等级或特性			仪器	型号	精确度		
等级		电光源种类			电压表				
短路电流		有效辐照面积			电流表				
标定值		制造单位			标准电阻				
光谱响应和待测电池相比较	完全一致	鉴定部门			电压测量系统				
	基本相同	光谱数据			电流测量系统				
	差别很大				功率测量系统				
	不清楚				记录仪				
测试单位				审核		主管公章			

注：本报告单的内容根据需要填写。

附录 F
选用AM0人造测试光源的要求
(参考件)

AM0人造测试光源包括各种AM0太阳模拟器(稳态的和脉冲式的),以及各种AM0模拟阳光光源。

- F.1** 对光谱响应未知的太阳电池进行非定标测试时,光谱失配误差应不大于2%。
- F.2** 在二级标准电池和工作标准电池光谱响应基本相同的条件下,工作标准电池的定标测试允许用任何人造测试光源,但其辐照不均匀度应不大于±3%。
- F.3** 单体电池进行非定标测试时,辐照不均匀度应不大于±3.5%。
- F.4** 组件、组合板进行非定标测试时,辐照不均匀度应不大于±5%。
- F.5** 在被测电池和工作标准电池光谱响应基本一致的条件下,非定标测试可以选用任何人造测试光源。但辐照不均匀度应满足F.3或F.4。
- F.6** 光谱失配误差按下式计算:

$$\text{光谱失配误差} = \int \left[\frac{S_T \cdot E_0}{\int S_T \cdot E_0 d\lambda} - \frac{S_s \cdot E_0}{\int S_s \cdot E_0 d\lambda} \right] \left[\frac{E_s}{E_0} - 1 \right] d\lambda$$

式中: S_T —— 被测电池的光谱响应;
 S_s —— 标准电池的光谱响应;
 E_0 —— AM0标准太阳光谱;
 E_s —— 太阳模拟器的光谱。

附加说明:

本标准由中华人民共和国电子工业部提出。
 本标准由西安交通大学、电子部十八所负责起草。
 本标准主要起草人黄嘉豫。

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
航天用太阳能电池电性能测试方法
GB 6494—86

*
中国标准出版社出版
(北京复外三里河)

中国标准出版社北京印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
版权专有 不得翻印

*
开本 880×1230 1/16 印张 1 字数 21,000
1986年11月第一版 1986年11月第一次印刷
印数 1—2,000

*
书号: 15169·1-4197 定价 0.52 元