DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.3.309 **中图分类号**：TM930.12 **文献标志码**：A

太阳能电池伏安特性测试方法及其应用的评述

严由康[1,2]，肖文波[1,2]，周 恒[1,2]，李 傲[1,2]，孙雪琴[1,2]，吴华明[1,2]
(1.南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室，南昌 330063；2.南昌航空大学江西省光电检测技术工程实验室，南昌 330063)

摘要：太阳能电池伏安(*I-V*)特性是准确评估电池性能并排查其故障的重要参数。为此，首先对近年来太阳能电池伏安特性的5类测量方法(可变电阻负载法、电子负载法、DC-DC转换器负载法、四象限电源法和电容负载法)进行了系统性地总结，并指出它们的优缺点。其次，分析*I-V*测量方法在提取电池参数与诊断电池及组件老化、局部遮阴、尘埃堆积和短路故障方面的应用情况。最后，展望了电池伏安特性测量方法的发展趋势，预测DC-DC转换器负载法和电容负载法将成为未来伏安特性测量的主流方法。

关键词：太阳能电池；*I-V*曲线；测量方法；参数提取；故障诊断

Current-voltage Measurement Methods for Solar Cells and Their Applications: A Review

YAN Youkang[1,2], XIAO Wenbo[1,2], ZHOU Heng[1,2], LI Ao[1,2], SUN Xueqin[1,2], WU Huaming[1,2]
(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. Jiangxi Engineering Laboratory for Optoelectronics Testing Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: The current-voltage (*I-V*) characteristics of solar cells are an important means to accurately evaluate their performance and diagnose their faults. In this context, five kinds of *I-V* measurement methods for solar cells (e.g., variable resistance load method, electronic load method, DC-DC converter load method, four-quadrant power supply method and capacitive load method) proposed in recent years are systematically summarized, and their advantages and disadvantages are pointed out. Then, the applications of these *I-V* measurement methods in extracting the cell parameters and diagnosing the aging of cells and components, partial shading, dust accumulation and short-circuit faults are analyzed. Finally, the development trend of *I-V* measurement methods for solar cells in the future is prospected, and it is predicted that the DC-DC converter load method and capacitive load method will be the mainstream methods for measuring the current-voltage characteristics.

Keywords: Solar cell; *I-V* curve; measurement method; parameter extraction; fault diagnosis

由于化石能源价格不断上涨以及使用化石能源会对环境造成恶劣影响等因素，可再生清洁能源成为当前人们关注的重点。可再生清洁能源生产过程中，太阳能电池由于长期运行在室外恶劣环境下，易受沙尘、雷电、腐蚀、辐射等影响，产生材料老化、电路短路、热斑等故障，不仅会导致其发电效率降低，严重时甚至会引发火灾，危害生命财产安全。因此，太阳能电池的伏安(*I-V*)特性检测十分重要。简单有效的*I-V*测量方法不仅

收稿日期：2022-04-30；**修回日期**：2022-07-02，2022-07-26，2022-08-05；**录用日期**：2022-08-15；**网络首发日期**：2022-10-11
基金项目：国家自然科学基金资助项目(12064027，62065014，12464010)；研究生创新专项(YC2022-113，YC2022-118)；九江浔城英才项目(JJXC2023032)；九江基础研究项目(2025)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 12064027, 62065014 and 12464010; Graduate Innovation Project under the grant YC2022-113 and YC2022-118; Jiujiang "Xuncheng Talents" under the grant JJXC2023032; Jiujiang Basic Research Program Project (2025)

是评估电池效率的有效手段，更是光伏阵列故障诊断的基础[1]。

目前，*I-V* 曲线不仅可以提供开路电压 V_{oc}、短路电流 I_{sc} 等电气参数[2]以评估电池工作状态，还可以用于提取电池模型参数(如光生电流、二极管反向饱和电流等)来为光伏电站进行精确建模及系统优化[3]。*I-V* 测量的基本原理是检测太阳能电池的输出从开路状态变为短路状态(或者相反)的过程，从而获取其电压和电流的信息。根据电池负载方式的不同[4-5]，测量方法可以分为实际负载测量法(可变电阻负载法、电子负载法)和虚拟负载测量法(DC-DC 转换器负载法、四象限电源法和电容负载法)。为此，本文首先对 *I-V* 测量方法的研究进展进行评述。其次，分析 *I-V* 测量方法在提取太阳能电池性能参数及其故障诊断方面的应用。最后，对 *I-V* 测量方法的适用情况进行总结，并对其未来发展方向进行预测。

1 实际负载测量法

可变电阻负载法和电子负载法，都是通过调整实际负载阻值来测量 *I-V* 曲线。可变电阻负载法是直接调整负载电阻值，而电子负载法则是通过电流等控制负载阻值。

1.1 可变电阻负载法

在电池组件光伏 PV(photovoltaic)两端连接可变电阻器件 *R*，如图 1(a)所示，将 *R* 的阻值从最小值到最大值逐步调整，测量每一步负载电阻两端的电压及流经的电流，获得 PV 输出的 *I-V* 曲线。由于手动调节滑线变阻器带来的不稳定性，会使得实测的 *I-V* 曲线产生“毛刺”，如图 1(b)所示[6]。

为了解决上述问题，有研究[7]采用分离固定电阻负载(由 0.1 Ω 到 100 Ω 不等的 6 个电阻负载 R_1~R_6 构成)的方法，如图 1(c)所示。通过依次切换开关，测量 PV 两端电压及流经的电流，从而获得每个电阻值对应 *I-V* 曲线上的数据点，然后用平滑曲线将这些点依次连接获得 *I-V* 曲线，如图 1(d)所示，但是该方法可以获得的步数或点数有限。

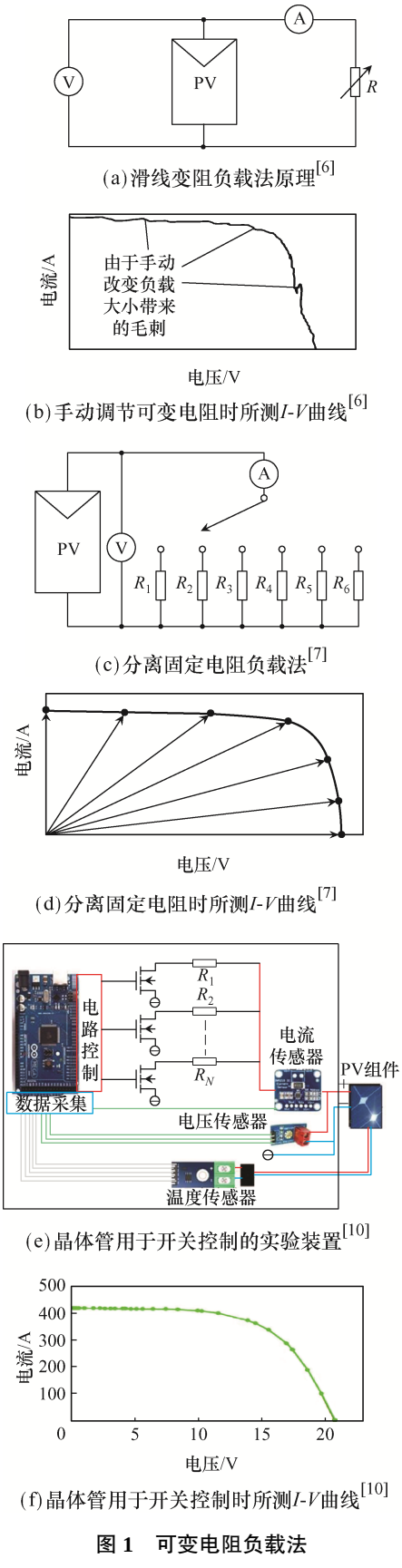


图 1 可变电阻负载法

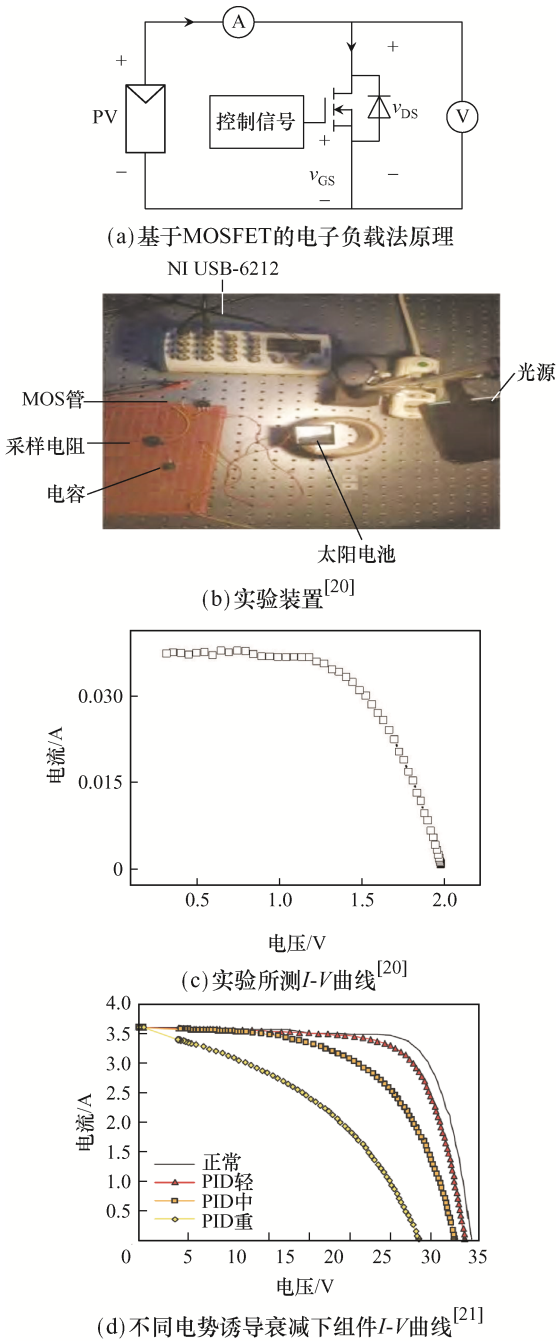
Fig. 1 Variable resistance load method

手动改变负载电阻的过程缓慢，不适用于非均匀气候条件下的实际工况，且测量精度不高[8]。为了同时提高滑线变阻负载法的灵活性和分离固定电阻负载法的精度，有研究[9]引入微控制器控制继电器切换负载电阻的方法，控制由 8 种阻值形成的二进制电阻(有 255 种阻值选择)，不仅可以自动、快速调节电阻负载值还能增强 *I-V* 曲线的平滑度。为了进一步提高控制速度，有研究[10]提出使用晶体管进行开关控制，可在 1 ms 内获取 1 个电流−电压数据点，实验装置如图 1(e)所示。该系统包括分离负载电阻、开关 MOSFET IRF540N、控制板 Arduino Mega 2560、电流传感器 INA 219、电压传感器和温度传感器 MAX 6675。图 1(f)为温度 49 °C、辐照度 900 W/m^2 下的 *I-V* 曲线，可以看出，由于分离负载电阻无法做到连续变化，电池最大功率点电压和最大功率点电流附近的测量数据有限，由此导致电池填充因子、转换效率[11]、提取的二极管理想因子、串联电阻[12-14]等无法进行可靠获取。因此通过 *I-V* 曲线诊断电池故障存在识别困难[15]。此外，虽然可变电阻负载法简便易行，但仅限于测量低功率电池模块，这是由于市面上大功率可变电阻器件较少，如若用于表征高功率电池阵列会使设备变得笨重且昂贵。

1.2 电子负载法

电子负载法一般使用晶体管(如金属氧化物半导体场效应晶体管 MOSFET(metal-oxide-semiconductor field effect transistor))作为负载。MOSFET 在线性区域工作时可模拟为可变电阻器，即采用栅极−源极驱动电压 v_{GS} 控制漏极和源极之间的电阻 R_{DS}，其原理如图 2(a)所示。由于 v_{GS} 可以通过 PIC18F46K80 可编程微控制器控制，从而对 R_{DS} 的值进行快速调制，故该电路可以快速扫描 PV 两端的电压及流经的电流[16]。

实际上，由于 R_{DS} 和电池内阻的匹配问题，需要考虑如何正确选择晶体管[17]。与 MOSFET 负载类似的还有双极型晶体管 BJT(bipolar junction transistor)[18]或绝缘栅双极型晶体管 IGBT(insulated-gate bipolar transistor)[19]。与 BJT 负载相比，MOSFET 和 IGBT 负载更易控制，有更大的可变电阻范围和更快的扫描速度。以 MOSFET 和采样电阻为负载、以数据采集卡 NI USB-6212 为数据采集和处理模块、以电容与电池并联接地用作平稳输出的测量电路如图 2(b)所示[20]，实验结果如图 2(c)所示。图 2(c)中测试系统的电池输出电压无法到 0，即无法得到 I_{sc}，这是由于 MOSFET 管导通电阻和采样电阻的存在，负载电路不能短路。电势诱导衰减 PID(potential



(a)基于MOSFET的电子负载法原理

(b)实验装置[20]

(c)实验所测*I-V*曲线[20]

(d)不同电势诱导衰减下组件*I-V*曲线[21]

图 2　电子负载法

Fig. 2 Electronic load method

induced degradation)下故障组件与正常组件测试对比结果如图 2(d)所示，可以看出，由于 *I-V* 中 I_{sc} 无法精确测量，导致电势诱导衰减轻、中的区别不明显[21]。

综上所述，可编程微控制的电子负载法除了具有测量速度快的优点外，还可以进行双向扫描。但该方法也存在不足之处：①由于功率损耗大，使其工作时间受限；②晶体管有开启电阻且无法在截止区内产生电流，导致 I_{sc}、V_{oc} 附近的测量数据不准确[22]；③由于晶体管寄生电容和电感的影响，导致电池在快速变温、变光强等情况下有测量误差[23-24]。

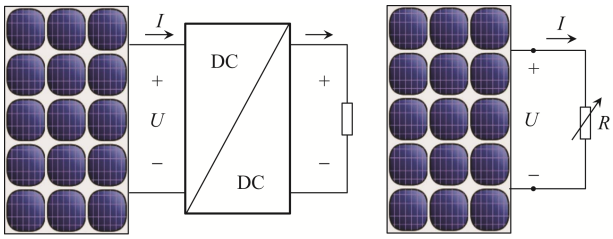
2 虚拟负载测量法

DC-DC 转换器负载法、四象限电源法和电容负载法是根据电子元器件的工作原理将特定器件/结构等效为可变负载，统称为虚拟负载测量法。

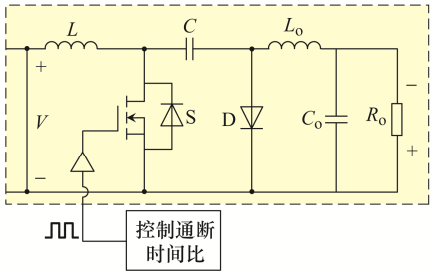
2.1 DC-DC 转换器负载法

DC-DC 转换器负载法是利用电感和电容等元件转变输入电压并有效调制输出电压的方法，即控制通断时间比来调整电压(或电流)，实现电池输出电压从 0 到开路电压值变化，继而跟踪其电压变化点所对应的电流值，以绘制 *I-V* 曲线。DC-DC 转换器可理解为等效可变电阻 *R*，如图 3(a)和(b)所示[25]。传统 DC-DC 转换器大致可以分为 3 类：升压型(Boost)DC-DC 转换器[26-27]、降压型(Buck)DC-DC 转换器[28]及升降压型(Buck-Boost)DC-DC 转换器[29]。为了扫描完整的 *I-V* 曲线，等效电阻 *R* 需要从无穷大到 0 变化，然而实际上，只有 Buck-Boost 转换器能够满足这个条件。Buck 转换器的 *R* 不能到 0，故无法绘制接近 I_{sc} 的曲线点；Boost 转换器的 *R* 不能到无穷大，故无法绘制接近 V_{oc} 的曲线点。

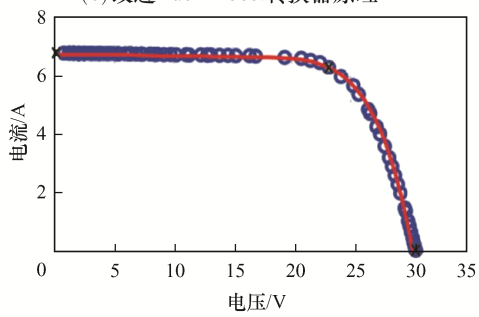
改进 Buck-Boost 转换器原理如图 3(c)所示[25]，图中 *C* 为传递能量的耦合电容。当三极管 S 导通时，电容 *C* 的能量通过 L_o、C_o、R_o 构成的回路释放并向 C_o、L_o 充电，同时电源 *V* 向 *L* 充电；在三极管 S 关闭时，*L* 上的电流通过二极管 D 续流，同时向 *C* 充电。图 3(d)为光伏模块在温度 44 ℃、辐



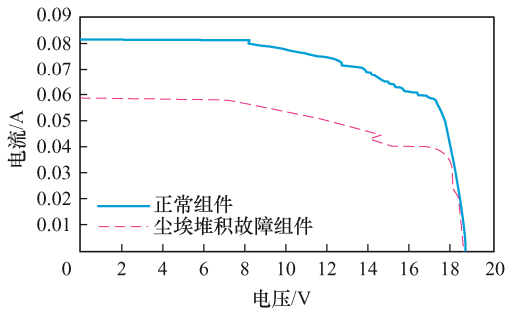
(a) DC-DC转换器负载法原理[25] (b) 将DC-DC转换器理解为等效可变电阻原理[25]



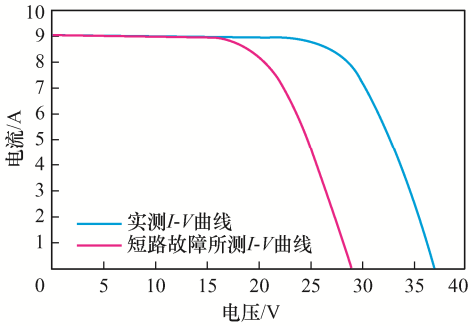
(c) 改进Buck-Boost转换器原理[25]



(d) 改进Buck-Boost转换器实验所测*I-V*曲线[25]



(e) 正常与尘埃堆积故障*I-V*曲线[30]



(f) 正常与短路故障*I-V*曲线[31]

图 3 DC-DC 转换器负载法

Fig. 3 DC-DC converter load method

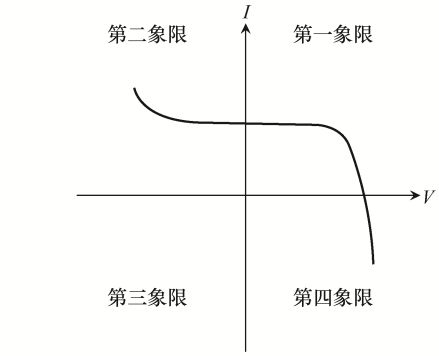
照度 830 W/m^2 下所测 *I-V* 曲线，可以看出 *I-V* 曲线十分完整。图 3(e)为尘埃堆积故障下的电池 *I-V* 曲线[30]，电池 I_{sc} 减小明显，但 V_{oc} 变化不大[30]；图 3(f)为短路故障下的电池 *I-V* 曲线[31]，对比短路与正常情况，可知短路导致 V_{oc} 减小明显，但 I_{sc} 仍然保持相同[31]。因此，尽管各种故障类型下都会出现电池输出功率下降，但它们在 *I-V* 曲线上体现的特点不同[32]。由此看出，为了识别所对应的故障类型，需要所测 *I-V* 曲线在 I_{sc}、V_{oc} 及电池最大功率点 P_{max} 等处有较高的分辨率与精度。

综上所述，在辐照度快速变化和部分遮阴情况下，DC-DC 转换器负载法提供了高度的稳定性。但由于 DC-DC 转换器内部元件(电感等)的换向需要，测量时会引入噪声[33]，因而可以使用改进后的转换器来降低换向引起的 *I-V* 曲线纹波[34]。

2.2 四象限电源法

四象限电源法是 1 种为电池提供电压(或电流)，测量响应电流(或电压)的方法。使用该方法不但可以测得太阳能电池在第一象限中的 *I-V* 曲线，而且其 I_{sc} 和 V_{oc} 在第二象限和第四象限的外推曲线也可以取得，它们都可用于太阳能电池的性能评估及故障诊断。太阳能电池四象限测量结果如图 4(a)所示，*I-V* 曲线中电流和电压可以为正或为负，即该方法可以用来评估太阳能电池的正反特性。四象限电源法使用的典型设备是 Keithley 2400 数字源表，如图 4(b)所示。可以测得电池的电流电压特性如图 4(c)所示[35]。

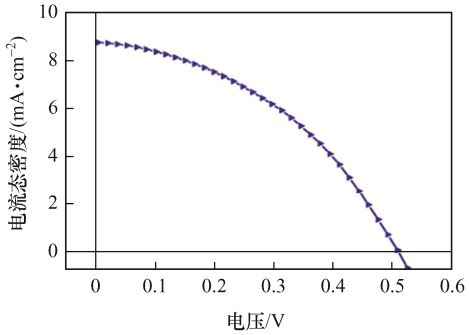
实际上，四象限电源法的扫描方式可以通过手动控制[36]或线性电压控制[37]。在染料敏化太阳能电池 *I-V* 测量中，为了正确评估其效率，电压需要以一定的扫描速率逐级增加[38-39]，如果扫描速度过快，会导致电流未稳定下的 *I-V* 误差，以至于无法正确评估电池性能。虽然数字源表与器件的连线方式(二线与四线接法)对太阳能电池 *I-V* 的实验结果有影响[40]，但是不会削弱四象限电源法的优势。总之，四象限扫描的 *I-V* 特性曲线为评估电池性能提供了宝贵信息。但是该方法成本高，设计难度大，且所需设备体积较大，灵活性不足，目前仅限于实验室使用。



(a)第一、第二和第四象限的*I-V*曲线



(b)Keithley 2400实验设备



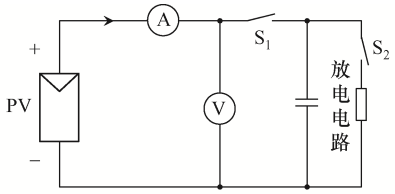
(c)实验所测*I-V*曲线[35]

图 4　四象限电源法

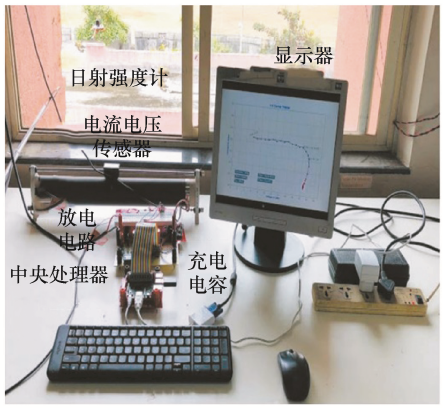
Fig. 4 Four-quadrant power supply method

2.3 电容负载法

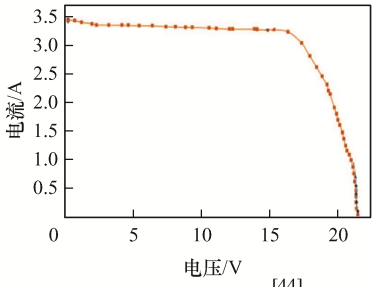
电容负载法是将电容用作可变电阻[41-43]，其原理如图5(a)所示。开始时，断开 S_1，闭合 S_2，使电容连接放电电阻完成放电；随后闭合 S_1，断开 S_2，电池给电容短路充电，随着电容的电荷量增加，电容两端电压逐渐升高至与电池两端电压相等后趋于稳定；电容充电完成后，电流变为 0，达到开路状态。记录充电过程中 *I-V* 数据点来描绘 *I-V* 曲线。电容负载法实验装置如 5(b)所示[44]，系统包括中央处理器 Raspberry Pi、日射强度计 SP110SS、电流电压传感器、超级电容负载和放电电路等。图 5(c)为光伏模块在温度 47.38 °C、辐照度 902.03 W/m^2 下所测 *I-V*



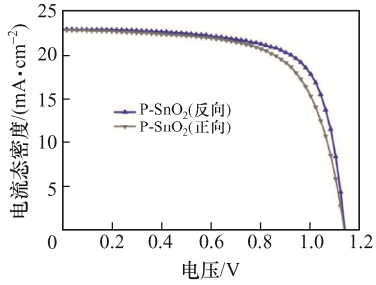
(a) 电容负载法原理



(b) 实验装置[44]



(c) 实验所测*I-V*曲线[44]



(d) 染料敏化电池正向、反向扫描时所测*I-V*曲线[48]

图 5 电容负载法

Fig. 5 Capacitive load method

曲线，曲线十分完整且采样点基本均匀。

由于充放电速度快，电容负载法是 1 种快速 *I-V* 测试方法，其扫描时间可以通过调整电容器的电容大小来控制[45]。此外，由于电容的两端电压不会突然变化，而是随着电荷的增加而逐渐增加，因此，所获 *I-V* 曲线连续且光滑，易于实现电池最大功率点[46-47]的跟踪。对比上述 4 种测量方法，电容负载法不但可在 *I-V* 曲线跟踪过程中获取精确的 I_{sc} 和 V_{oc} 值，而且降低了电压和电流波纹影响，提高了精度。但是该方法存在以下不足：①需要额外的放电电路来消散电容器储存的电荷；②由于所测 *I-V* 曲线的再现无法循环，因而不能实现短路点与开路点之间的双向扫描，如图 5(d)所示，正向、反向扫描的染料敏化电池 *I-V* 曲线差异测量就无法实现[48]；③对于高额定功率太阳能电池的测量，电容器的尺寸变得大而笨重。

3 结论

随着太阳能电池行业的高速发展，*I-V* 测量已成为光伏发电领域关注的热点技术。*I-V* 测量法不仅可以从宏观电学参数(开路电压、短路电流、最大功率点等)识别出电池故障类型，还可以从提取的参数(理想因子、串联电阻、并联电阻等)判断电池是否有其他缺陷，而这需要依赖于快速准确地获取 *I-V* 测量结果。为了获得太阳能电池 *I-V* 曲线，实际负载测量法和虚拟负载测量法各有特点。

(1)测量精度。四象限电源法和电容负载法优势明显，其次是电子负载法和 DC-DC 转换器负载法，最低的是可变电阻负载法。

(2)扫描速度。四象限电源法和电容负载法因其扫描时间易于控制而具有优势，电子负载法和 DC-DC 转换器负载法同样较快，最慢的是可变电阻负载法。

(3)实现太阳能电池最大功率测量及跟踪。电容负载法和 DC-DC 转换器负载法优势明显，原因是其易于通过算法控制。

(4)成本因素。可变电阻负载法成本最低，但仅限于低功率电池，其次是电容负载法，电子负载法和 DC-DC 转换器负载法用于开关元件和线圈方面的成本都很高，四象限电源法成本最高。

实际上，兼顾所有优势(成本、速度、精度、方便性等)的 *I-V* 测量系统并不存在。未来商业测量技术的发展趋势重点在于充分考虑 *I-V* 测量方法的适用性，以便在电池故障诊断等方面提供更强有力

的手段。可变电阻负载法由于仅限于低功率模块等诸多缺点难以普及，电子负载法由于功率损耗太大使其工作时间受限，而四象限电源法由于成本高、设计难度大且所需设备体积较大，基本已被弃用。DC-DC 转换器负载法是一个发展趋势，因其测量速度快、稳定性高且易于操作。当前，基于电容性负载的跟踪器由于其低成本和高扫描速度在工业中被广泛使用。

参考文献：

[1] 张晓阳, 李田泽, 张涵瑞, 等. 应用于光伏阵列故障诊断的 DA-SOM 算法研究[J]. 电源学报, 2022, 20(2): 122-128.
Zhang Xiaoyang, Li Tianze, Zhang Hanrui, et al. Study on DA-SOM algorithm applied to fault diagnosis of photovoltaic array [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(2): 122-128. (in Chinese)

[2] Yang Bo, Wang Jingbo, Zhang Xiaoshun, et al. Comprehensive overview of meta-heuristic algorithm applications on PV cell parameter identification [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 208: 112595.

[3] Mehta H K, Warke H, Kukadiya K, et al. Accurate expressions for single-diode-model solar cell parameterization [J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2019, 9(3): 803-810.

[4] Zhu Y, Xiao W. A comprehensive review of topologies for photovoltaic *I-V* curve tracer [J]. Solar Energy, 2020, 196: 346-357.

[5] Sayyad J, Nasikkar P. Design and development of low cost, portable, on-field *I-V* curve tracer based on capacitor loading for high power rated solar photovoltaic modules [J]. IEEE Access, 2021, 9: 70715-70731.

[6] Morales-Aragonés J I, Dávila-Sacoto M, González L G, et al. A review of *I-V* tracers for photovoltaic modules: Topologies and challenges [J]. Electronics, 2021, 10(11): 1283.

[7] Willoughby A A, Omotosho T V, Aizebeokhai A P. A simple resistive load *I-V* curve tracer for monitoring photovoltaic module characteristics [C]// 2014 5th International Renewable Energy Congress (IREC). Hammamet, Tunisia, 2014: 1-6.

[8] Mahmoud M M. Transient analysis of a PV power generator charging a capacitor for measurement of the *I-V* characteristics [J]. Renewable Energy, 2006, 31(13): 2198-2206.

[9] Rivai A, Rahim N A. Binary-based tracer of photovoltaic array characteristics [J]. IET Renewable Power Generation, 2014, 8(6): 621-628.

[10] Amiry H, Benhmida M, Bendaoud R, et al. Design and implementation of a photovoltaic *I-V* curve tracer: Solar modules characterization under real operating conditions [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 169: 206-216.

[11] Ma Xuan, Huang Weiheng, Schnabel E, et al. Data-driven *I-V* feature extraction for photovoltaic modules [J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2019, 9(5): 1405-1412.

[12] 颜奕, 黄宇, 陈鸣, 等. 基于电容阵列 *I-V* 测试仪的光伏 STC 曲线拟合研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(2): 272-279.
Yan Yi, Huang Yu, Chen Ming, et al. Research on photovoltaic STC curves fitting based on capacitors array *I-V* tracer [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(2): 272-279. (in Chinese)

[13] Bai Jianbo, Liu Sheng, Hao Yuzhe, et al. Development of a new compound method to extract the five parameters of PV modules [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 79: 294-303.

[14] Humada A M, Hojabri M, Mekhilef S, et al. Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 56: 494-509.

[15] 肖文波, 刘萌萌, 胡方雨, 等. 基于 Lambert W 函数提取太阳电池五参数的方法及光强对参数影响的规律[J]. 科学通报, 2014, 59(36): 3615-3620.
Xiao Wenbo, Liu Mengmeng, Hu Fangyu, et al. Solar cell five-parameter extraction method based on the Lambert W function and characteristic parameters influenced by light intensity [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(36): 3615-3620. (in Chinese)

[16] Vega A, Valiño V, Conde E, et al. Double sweep tracer for *I-V* curves characterization and continuous monitorring of photovoltaic facilities [J]. Solar Energy, 2019, 190: 622-629.

[17] Willoughby A A, Osinowo M O. Development of an electronic load *I-V* curve tracer to investigate the impact of Harmattan aerosol loading on PV module pern2tkformance in southwest Nigeria [J]. Solar Energy, 2018, 166: 171-180.

[18] Duran E, Piliougine M, Sidrach-de-Cardona M, et al. Different methods to obtain the *I-V* curve of PV modules: A review [C]// 2008 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference. San Diego, CA, USA, 2008: 1-6.

[19] Campos R E, Sako E Y, Moreira H S, et al. Experimental analysis of a developed *I-V* curve tracer under partially shading conditions [C]// 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America). Gramado, Brazil, 2019: 1-5.

[20] 雷剑鹏, 肖邦治，肖文波, 等. 基于数据采集卡及电子负载的太阳能电池伏安特性测试系统[J]. 中国测试, 2024, 50(2): 79-84.
Lei Jianpeng, Xiao Bangzhi, Xiao Wenbo, et al. Current-voltage test system of solar cell based on data acquisition card and electronic load [J]. China Measurement & Testing Technology, 2024, 50(2): 79-84. (in Chinese)

[21] 马铭遥, 张志祥, 刘恒, 等. 基于 *I-V* 特性分析的晶硅光伏组件故障诊断[J]. 太阳能学报，2021，42(6): 130-137.
Ma Mingyao, Zhang Zhixiang, Liu Heng, et al. Fault diagnosis of crystalline silicon photovoltaic module based on *I-V* characteristic analysis [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(6): 130-137. (in Chinese)

[22] Leite V, Batista J, Chenlo F, et al. Low-cost I-V tracer for photovoltaic modules and strings [C]// 2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. Ischia, Italy, 2014: 971-976.

[23] Sahbel A, Hassan N, Abdelhameed M M, et al. Experimental performance characterization of photovoltaic modules using DAQ [J]. Energy Procedia, 2013, 36: 323-332.

[24] Spertino F, Sumaili J, Andrei H, et al. PV module parameter characterization from the transient charge of an external capacitor [J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2013, 3(4): 1325-1333.

[25] Pereira T A, Schmitz L, dos Santos W M, et al. Design of a portable photovoltaic *I-V* curve tracer based on the DC-DC converter method [J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2021, 11(2): 552-560.

[26] Gaiotto S, Laudani A, Fulginei F R, et al. An advanced measurement equipment for the tracing of photovoltaic panel *I-V* curves [C]// 2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). Palermo, Italy, 2015: 1010-1014.

[27] 蔡慧, 陈俐宏, 魏缪宇, 等. 一种用于光伏发电系统特性测试的能馈型电子负载[J]. 太阳能学报，2021, 42(10): 61-67.
Cai Hui, Chen Lihong, Wei Miaoyu, et al. Design of energy feedback electronic load for photovoltaic system characteristic testing [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(10): 61-67. (in Chinese)

[28] Garg P, Priyanshi, Bhuvaneswari G. Power electronic circuit based implementation of a solar PV emulator using a power factor corrected buck converter [C]// 2018 IEEMA Engineer Infinite Conference (eTechNxT). New Delhi, India, 2018: 1-6.

[29] Banaei M R, Bonab H A F. A high efficiency nonisolated Buck-Boost converter based on ZETA converter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(3): 1991-1998.

[30] Rao A, Pillai R, Mani M, et al. Influence of dust deposition on photovoltaic panel performance [J]. Energy Procedia, 2014, 54: 690-700.

[31] Sarikh S, Raoufi M, Bennouna A, et al. Fault diagnosis in a photovoltaic system through *I-V* characteristics analysis [C]// 2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC). Hammamet, Tunisia, 2018: 1-6.

[32] Zhang Zhixiang, Ma Mingyao, Wang Hai, et al. A fault diagnosis method for photovoltaic module current mismatch based on numerical analysis and statistics [J]. Solar Energy, 2021, 225: 221-236.

[33] Erkaya Y, Moses P, Marsillac S. On-site characterization of PV modules using a portable, MOSFET-based capacitive load [C]// 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). Portland, OR, USA, 2016: 3119-3122.

[34] Duran E, Galan J, Sidrach-de-Cardona M, et al. A new application of the Buck-Boost-derived converters to obtain

the *I-V* curve of photovoltaic modules [C]// 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference. Orlando, FL, USA, 2007: 413-417.

[35] Pham B, Willinger D, McMillan N K, et al. Tin(IV) oxide nanoparticulate films for aqueous dye-sensitized solar cells [J]. Solar Energy, 2021, 224: 984-991.

[36] Malik A Q, Bin Haji Damit, Salmi Jan. Outdoor testing of single crystal silicon solar cells [J]. Renewable Energy, 2003, 28(9): 1433-1445.

[37] Fernández-Reche J, Cañadas I, Sánchez M, et al. PSA solar furnace: A facility for testing PV cells under concentrated solar radiation [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2006, 90(15): 2480-2488.

[38] Yang Xudong, Yanagida M, Han Liyuan. Reliable evaluation of dye-sensitized solar cells [J]. Energy & Environmental Science, 2013, 6(1): 54-66.

[39] Andualem A, Demiss S. Review on dye-sensitized solar cells (DSSCs) [J]. Edelweiss Applied Science and Technology, 2018: 145-150.

[40] 翟涵, 谢华清, 吴子华, 等. 测量方式对太阳电池输出性能测试的影响[J]. 太阳能学报, 2021, 42(1): 36-42.
Zhai Han, Xie Huaqing, Wu Zihua, et al. Influence of measurement methods on photovoltaic parameters of solar cells [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(1): 36-42. (in Chinese)

[41] Aguilar H M, Maldonado R F, Navarro L B. Charging a capacitor with a photovoltaic module [J]. Physics Education, 2017, 52(4): 045016.

[42] Basu Pal S, Das A, Das Bhattacharya K, et al. Design of a low-cost measuring and plotting device for photovoltaic modules [J]. Measurement and Control, 2019, 52(9-10): 1308-1318.

[43] Velilla E, Cano J B, Jaramillo F. Monitoring system to evaluate the outdoor performance of solar devices considering the power rating conditions [J]. Solar Energy, 2019, 194: 79-85.

[44] Sayyad J K, Nasikkar P S. Capacitor load based I-V curve tracer for performance characterisation of the solar photovoltaic system [J]. Applied Solar Energy, 2020, 56(3): 168-177.

[45] Chen Zhicong, Lin Wencheng, Wu Lijun, et al. A capacitor based fast *I-V* characteristics tester for photovoltaic arrays [J]. Energy Procedia, 2018, 145: 381-387.

[46] Spertino F, Ahmad J, Ciocia A, et al. Capacitor charging method for *I-V* curve tracer and MPPT in photovoltaic systems [J]. Solar Energy, 2015, 119: 461-473.

[47] Spertino F, Ahmad J, Di Leo P, et al. A method for obtaining the *I-V* curve of photovoltaic arrays from module voltages and its applications for MPP tracking [J]. Solar Energy, 2016, 139: 489-505.

[48] Ye Jiajiu, Li Yuze, Medjahed A A, et al. Doped bilayer tin(IV) oxide electron transport layer for high open-circuit voltage planar perovskite solar cells with reduced hysteresis [J]. Small, 2021, 17(5): 2005671.



严由康

作者简介：

严由康(1997—)，男，硕士研究生。研究方向：光伏检测。E-mail：771717758@qq.com。

肖文波(1975—)，男，通信作者，博士，教授。研究方向：半导体光电检测。E-mail：wbxiao@semi.ac.cn。

周恒(1996—)，男，硕士研究生。研究方向：半导体传输性质。E-mail：zhlx625@163.com。

李傲(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：光伏检测。E-mail：778453430@qq.com。

孙雪琴(1998—)，女，硕士研究生。研究方向：钙钛矿太阳能电池。E-mail：1648049064@qq.com。

吴华明(1975—)，男，博士，副教授。研究方向：光纤传感及探测。E-mail：Cookey106@126.com。

(责任编辑：郭凯凯)