

基于动力学模型的钙钛矿光伏组件稳态功率快速预测研究

张雅婷

(莱茵技术(上海)有限公司, 上海 200072)

摘要: 针对钙钛矿光伏组件因亚稳态特性导致的功率测量难题, 本文提出一种基于动力学模型的快速预测方法。现行通用测试协议通常要求长时间的光浸润以确保器件达到稳定状态, 严重制约了实验室及工业产线的高通量检测效率。为此, 本研究选取 3 种涵盖不同功率演变模式的商用钙钛矿组件, 对比分析对数模型与双指数模型在描述和预测功率变化过程中的适用性。结果表明, 双指数模型通过引入两个独立的时间常数, 能够准确解耦并捕捉由离子迁移和载流子复合引起的复杂动力学特征; 基于该模型, 仅需约 1.5 h 的光浸润数据, 即可精准外推预测最终的稳态功率输出, 预测相对误差严格控制在 1% 以内。本研究证实了利用数学模型替代全时长光浸润测试的可行性, 为建立高效的钙钛矿组件稳定性评估基准提供了坚实的理论依据。

关键词: 钙钛矿组件; 亚稳态; 动力学模型; 预测

中图分类号: TK511

文献标志码: A

DOI: [10.3724/jfmd.2603033](https://doi.org/10.3724/jfmd.2603033)

CSTR: [32180.14/jfmd.2603033](https://cstr.net.cn/32180.14/jfmd.2603033)

Rapid prediction of stabilized power output for perovskite PV modules based on kinetic modeling

ZHANG Yating

(TÜV Rheinland (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200072, China)

Abstract: To address the power measurement challenges of perovskite photovoltaic (PV) modules arising from their inherent metastability, this study proposes a rapid prediction method based on kinetic modeling. Current testing protocols require extended light soaking to achieve steady-state conditions, severely limiting high-throughput characterization efficiency in both laboratory and industrial settings. Accordingly, three commercial perovskite PV modules exhibiting distinct power stabilization behaviors were selected to evaluate the applicability of logarithmic and bi-exponential models in characterizing power dynamics. The results demonstrate that the bi-exponential model, by incorporating two independent time constants, effectively decouples and captures the complex kinetic processes driven by ion migration and carrier recombination. Critically, this model enables precise extrapolation of the final Stabilized Power Output (SPO) using only approximately 1.5 h of light soaking data, with the relative prediction error maintained below 1%. This work validates the feasibility of replacing full-duration light soaking

收稿日期: 2026-03-04; 修订日期: 2026-05-06

作者简介: 张雅婷(1990—), 女, 博士, 研究方向为光伏组件的测试和性能评估 (E-mail: Yating.Zhang@tuv.com)

with kinetic modeling, providing a robust theoretical foundation for establishing efficient stability assessment benchmarks for perovskite modules.

Key words: perovskite PV module; metastability; kinetic modeling; prediction

0 引言

近年来,钙钛矿光伏器件凭借其优异的功率转换效率和低成本制备潜力,已迅速崛起为最具商业化前景的下一代光伏技术之一^[1-3]。然而,在光照和电场作用下,钙钛矿材料内部的离子迁移、界面电荷积累以及晶格弛豫等复杂物理过程,导致器件表现出亚稳态特性和迟滞效应^[4-5],这给功率的准确测量带来了严峻挑战。针对亚稳态问题,鉴于专门适用于钙钛矿光伏器件测试的国际电工委员会标准尚未正式发布,现行通用的测试协议主要参照 IEC 61215-1-4^[6] 薄膜光伏组件测试标准进行评估。该标准规定,在进行电学特性测量前,器件必须经过强制性的光浸润处理,以确保其达到稳定状态。

尽管此类通用测试方法能够保证测量准确性,但持续数小时的光照不仅占用太阳模拟器资源,还严重限制了实验室测试与器件研发过程中优化的迭代速度,更成为产线中制约产能释放的关键瓶颈。

在追求高通量检测的背景下,如何在牺牲测量精度的前提下大幅缩短测试时间,是当前钙钛矿组件商业化进程中亟待解决的问题。值得注意的是,现有的瞬态响应建模或离子迁移动力学模型多聚焦于微秒至秒级的微观机理研究,通常需输入复杂的材料内部参数^[7-8],难以直接应用于宏观大面积组件的快速评估。因此,本工作并未致力于推导新的微观物理方程,而是从工程测试方法学的角度出发,将经典的对数模型与双指数模型创新性地引入组件级测试场景,提出了一种针对钙钛矿组件稳态功率快速预测的创新方案。

为此,本文选取了3种不同的商用钙钛矿组件作为研究对象,通过实验获取其光浸润全过程的功率时变数据。在此基础上,重点对比分析了对数模型与双指数模型在动力学特征捕捉及稳态功率预测方面的差异,并验证了利用早期数据反演最终稳态功率的精度。本研究旨在证实利用数学模型替代全时长测试的可行性,以为建立高效、低成本的钙钛矿组件稳定性评估体系提供理论依据与技术支持。

1 方法

1.1 实验装置和数据采集

为验证动力学模型对钙钛矿光伏组件光浸润过程中功率时变特性的预测精度,本研究选取了3种不同的商用钙钛矿组件作为研究对象。具体而言,这3种组件分别代表了光照初期快速变化并迅速逼近稳态的过程(Type 1)、长时间平滑单调演变过程(Type 2),以及初期存在非单调波动或迟滞拐点、随后缓慢趋稳的多物理竞争机制(Type 3)。通过对这3种涵盖不同衰减与增长模式的演变曲线进行统一建模分析,可较为全面地评估该数学模型在面对不同动态特征时的适用性与预测能力。

实验采用符合 IEC 60904-9 标准^[9] 的 BAA 级稳态太阳模拟器作为光源,光照强度为 1000 W/m^2 。测试期间,利用温控平台将组件温度精确控制在 $(25 \pm 3)^\circ\text{C}$ 。组件的电学性能数据通过电子负载进行实时采集。在光照开启瞬间,系统同步启动最大功率点追踪模式。

本实验设定的最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)终止条件为:在连续 30 min 的时间窗口内,组件输出功率的波动幅度小于每分钟 0.1%,且无单一方向的单调漂移趋势。满足该条件时的平均功率即被定义为最终稳态功率输出。实验完整记录了从初始时刻至稳态建立全过程的功率随时间变化曲线,用于后续数学模型的拟合与验证。

1.2 动力学模型

钙钛矿组件在光照下的功率变化是一个复杂的非线性动力学过程,其物理机制涉及离子迁移、界面电荷积累或释放以及缺陷态的填充与弛豫^[10-12]。为准确描述该物理过程并实现对稳态功率的快速预测,同时涵盖不同的衰减/增长模式,本研究引入并对比分析了两种经典数学模型:对数模型^[13]与双指数模型^[14]。

1.2.1 对数模型

对数模型通常用于描述由单一主导机制控制

的慢速弛豫过程,例如深能级缺陷的填充或离子的慢速扩散。其数学表达式如下:

$$P(t) = P_0 + A \ln\left(1 + \frac{t}{\tau}\right) \quad (1)$$

式中: $P(t)$ 为 t 时刻的瞬时功率,单位为 W; P_0 为初始功率,单位为 W; A 为幅度系数,无量纲; τ 为特征时间常数,无量纲。

1.2.2 双指数模型

鉴于钙钛矿材料中存在快过程与慢过程共存的现象,双指数模型能够更准确地表征此类多时间尺度的动力学特征。该模型假设功率的时变行为由两个具有不同时间常数的指数衰减或增长项叠加而成,其表达式如下:

$$P(t) = P_0 + A_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right)\right] + A_2 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)\right] \quad (2)$$

式中: A_1 和 A_2 分别为快过程和慢过程的幅度系数,其符号取决于功率处于光浸润增强(正值)还是衰减(负值)阶段; τ_1 和 τ_2 分别为快过程和慢过程的时间常数,无量纲。

相较于对数模型,双指数模型引入了更多的自由度,能够更灵活地捕捉光浸润初期功率的快速变化及随后缓慢趋稳的特征。在本研究中,我们利用实验获取的功率变化数据,通过非线性最小二乘法对上述模型参数进行拟合,并进一步通过截取早期采集数据外推预测功率稳定值,以比较不同模型的预测能力。

2 结果与讨论

钙钛矿光伏组件在光浸润过程中表现出复杂的功率演变趋势。实验数据表明,这些趋势并非单一模式,而是涵盖从平滑的单调衰减或增长,到包含细微拐点甚至非单调波动的多样化特征。为量化分析这些动力学过程并探索快速评估稳态功率的可行性,本节对比了对数模型与双指数模型在全时段数据拟合及早期预测能力方面的表现。

2.1 模型的拟合优度比较

图 1 展示了 3 种不同的商用钙钛矿组件在光浸润下的最大功率随时间变化的趋势。本试验中,光伏组件 MPPT 追踪的终止条件为在连续 30 min 的时间窗口内,组件输出功率的波动幅度小于每分钟 0.1%。为评估模型对实验数据的还原程度,我们首先基于全时段测试数据,采用非线性最小二乘

法对两种模型进行拟合。为全面量化拟合质量,本文选取决定系数 (R^2)、均方根误差 (root mean square error, RMSE) 和平均绝对误差 (mean absolute error, MAE) 作为综合评价指标,具体的拟合指标结果详见表 1。

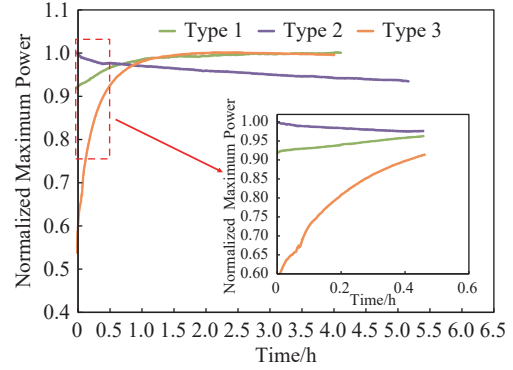


图 1 3 种不同厂家的商用钙钛矿光伏组件在光浸润条件下的功率变化趋势

Fig. 1 Light soaking behavior of perovskite PV modules fabricated by three different manufacturers

表 1 对数模型与双指数模型拟合钙钛矿组件全时段稳定化曲线的性能指标 (R^2 、RMSE 及 MAE) 对比

Table 1 Comparison of performance metrics (R^2 , RMSE, and MAE) for Logarithmic and Double-exponential models fitted to the full stabilization curves of three perovskite PV module samples

Module type		Logarithmic model	Double-exponential model
Type 1	R^2	0.960	0.997
	RMSE	0.004	0.001
	MAE	0.003	0.001
Type 2	R^2	0.989	0.998
	RMSE	0.002	0.001
	MAE	0.001	0.001
Type 3	R^2	0.891	0.999
	RMSE	0.030	0.003
	MAE	0.026	0.002

表 1 数据表明,对数模型虽然形式简洁,但因自由度有限,难以同时捕捉载流子复合与离子迁移的双重动力学特征。该模型在初始瞬态与长期稳态的拟合中存在权衡,导致 R^2 普遍较低,且残差呈现系统性偏差,无法准确描述钙钛矿组件复杂的功率演变规律。

相比之下,双指数模型在描述钙钛矿组件复杂的功率变化方面展现出显著优越性。通过引入两个独立的时间常数(τ_1 和 τ_2),该模型在数学结构上具备将光浸润过程中的快速载流子动力学与慢速离子迁移效应解耦并重构的能力。表1的统计结果显示:双指数模型在绝大多数样本中的 R^2 均接近0.998,且RMSE较对数模型显著降低,表现出极高的拟合保真度。更重要的是,该模型展现出优异的普适性,无论是针对标准的单调衰减趋势,还是具有复杂变化的增长过程,其拟合曲线均能紧密追踪实验数据点,精准捕捉全时域内的功率波动特征。

2.2 模型预测能力对比

除考察模型的拟合优度外,验证其利用短时数据预测最终稳态功率的可行性,对于实现组件的快速评估至关重要。为此,本文分别截取各组件功率演变曲线的前10%~40%数据作为训练集,进行参数提取与全时段外推。预测性能通过两项指标进行量化:全时域RMSE,用于表征预测轨迹与真实演变整体偏离程度;稳态功率相对误差(Rel. Error),即模型预测渐近值与实测终值(最后1分钟均值)的偏差。具体的评估结果汇总于表2和表3。此外,图2以Type 1为例,展示了两种模型预测曲

表2 对数模型与双指数模型预测钙钛矿组件稳态功率输出的性能指标(Rel. error)对比

Table 2 Comparison of the performance (Rel. error) of logarithmic and double-exponential models in predicting the final stabilization power of three perovskite PV module samples

	Rel. error/%	Logarithmic model	Double-exponential model
Type 1	10	8.292	7.069
	20	5.809	1.134
	30	3.684	0.206
	40	2.442	0.222
Type 2	10	1.991	4.055
	20	2.449	0.049
	30	2.133	0.320
	40	1.590	0.467
Type 3	10	32.553	3.824
	20	21.080	17.177
	30	15.939	1.433
	40	12.651	0.686

表3 对数模型与双指数模型预测钙钛矿组件稳态功率输出的性能指标(RMSE)对比

Table 3 Performance comparison (RMSE) of the Logarithmic and Double-exponential models in predicting the final stabilization power of three perovskite PV module samples

	RMSE/%	Logarithmic Model	Double-exponential Model
Type 1	10	0.047	0.045
	20	0.033	0.010
	30	0.020	0.003
	40	0.013	0.001
Type 2	10	0.009	0.021
	20	0.012	0.001
	30	0.010	0.002
	40	0.007	0.002
Type 3	10	0.198	0.035
	20	0.121	0.084
	30	0.087	0.007
	40	0.066	0.003

线与实验测试曲线的对比。

表2和表3的统计数据揭示了对数模型在预测性能上存在显著的系统性偏差。由于对数函数在数学性质上缺乏明确的饱和和边界,其在长时域外推过程中极易产生累积误差。以样品Type 3为例,该缺陷表现得尤为明显:即便输入数据量增加至40%,对数模型的预测相对误差仍高达12.65%,全时域RMSE亦高达0.066。上述结果表明,对数模型无法准确描述功率演变的物理收敛特征,难以满足高精度稳定性分析的需求。

相比之下,双指数模型展现出优异的收敛特性与预测稳健性。针对演变趋势相对单一的样品(如Type 2),该模型表现出极高的参数锁定效率:仅基于20%的实验数据,其预测相对误差即降至0.049%,RMSE降至0.001,表明模型已能精准重构后续80%的功率轨迹。针对具有显著非单调特征或慢速弛豫过程的样品(Type 3),双指数模型同样展现出更强的适应性。尽管在20%数据截断点时,受早期瞬态波动干扰导致预测误差达到17.18%;但随着数据量增至30%,模型迅速捕捉到主导衰减机制,将相对误差大幅收敛至1.43%。当数据量达到40%时,相对误差进一步降低至0.686%,显著优于同等条件下的对数模型。RMSE指标进一步证实

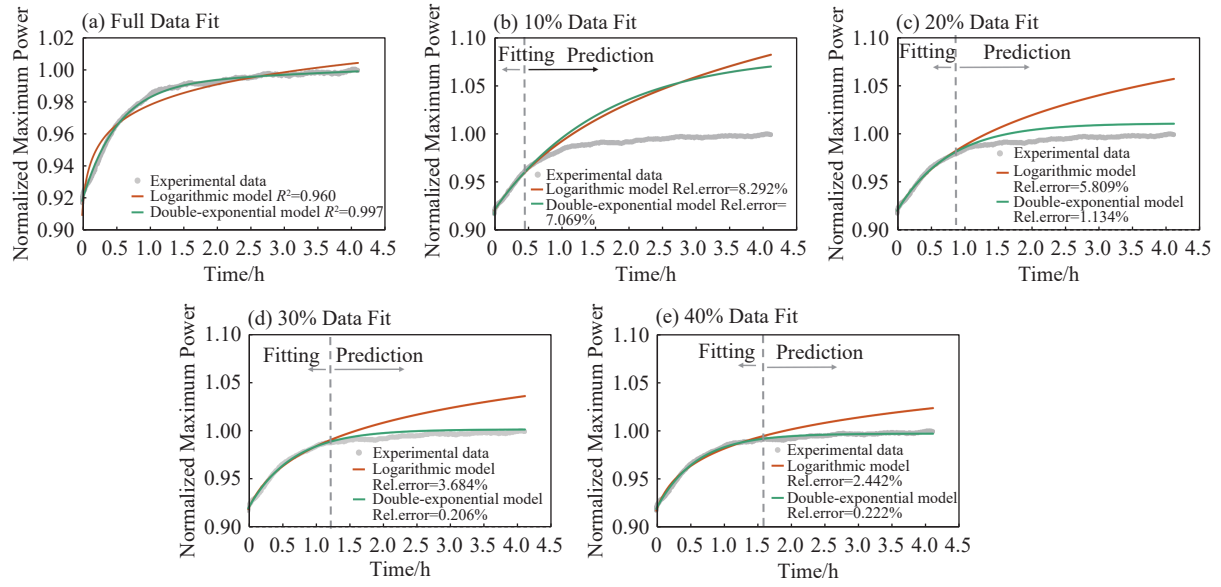


图2 Type 1 钙钛矿光伏组件在不同数据截取比例下的实测稳态功率与模型预测值对比。(a)全时长数据拟合与实测结果; (b)~(e)分别截取前 10%、20%、30% 和 40% 测试数据的拟合结果

Fig. 2 Comparison of the measured steady-state power and model predictions for the Type 1 perovskite PV module under different data truncation ratios. (a) Model predictions from full-duration data versus measured results; (b) - (e) model predictions based on the initial 10%, 20%, 30%, and 40% of the test data, respectively.

了双指数模型的优越性: 在 40% 数据输入条件下, 所有类型样品的 RMSE 均控制在 0.003 以下。这表明该模型不仅能准确预测终点稳态值, 还能高保真地还原全过程的功率动力学演变。

需要注意的是, 双指数模型在极低数据量下存在一定的过拟合风险。如表 2 中 Type 2 样品在 10% 数据截断点时, 双指数模型的预测误差 (4.06%) 略高于对数模型 (1.99%)。这主要是由于早期数据中慢速演变信息较少, 而双指数模型参数较多, 易对初始瞬态噪声产生过拟合。但当数据量增至 20% 时, 该模型误差迅速降至 0.05%, 表现出良好的收敛性。整体而言, 在 30%~40% 的数据量下, 双指数模型的预测误差稳定在 1% 以内, 其整体预测精度和适用性显著优于对数模型。

3 结论

针对钙钛矿光伏组件因离子迁移、电荷累积等物理机制导致的功率亚稳态及测试耗时问题, 本研究提出并验证了一种基于动力学模型的快速稳态功率预测方法。通过对不同结构组件的光浸润数据进行全时域拟合与截断预测分析, 得出以下主要结论:

双指数模型的物理适用性优于对数模型: 拟合

结果表明, 双指数模型通过引入两个独立的时间常数, 能够有效解耦光浸润初期的快速载流子复合过程与随后的慢速离子迁移或晶格弛豫过程。相比于对数模型在复杂曲线拟合中的局限性, 双指数模型在各类组件样本中均展现出极高的拟合保真度, R^2 普遍接近 0.998, RMSE 显著降低, 验证了其描述钙钛矿复杂动力学行为的数学完备性。

短时数据预测的高精度与鲁棒性: 在预测能力评估中, 双指数模型展现了卓越的收敛特性。研究证实, 仅需采集光浸润过程前 30%~40% 的实验数据 (约 1.5 h), 该模型即可精准锁定演变趋势并外推最终稳态功率。在不同组件类型的验证中, 其预测结果与实测稳态值的相对误差普遍控制在 1% 以内, 全时域预测 RMSE 低于 0.003。相反, 对数模型由于缺乏明确的稳态渐近项, 在长时外推中表现出显著的发散特征, 无法满足高精度预测需求。

本工作证实了利用数学模型外推替代传统全时长光浸润测试的可行性。基于双指数模型的快速预测方法, 有望在保证测量准确性的前提下, 将长期稳定性测试的时间成本缩短 60% 以上。这不仅为实验室测试和产线质量监控提供了高效的检测手段, 也为建立更具时效性的钙钛矿光伏组件稳定性评估标准提供了坚实的理论依据与数据支持。

参考文献:

- [1] Green M A, Dunlop E D, Yoshita M, et al. Solar cell efficiency tables (Version 63)[J]. [Progress in Photovoltaics: Research and Applications](#), 2024, 32(1): 3-13.
- [2] Seyisi T, Fouda-Mbanga B G, Mnyango J I, et al. Major challenges for commercialization of perovskite solar cells: a critical review[J]. [Energy Reports](#), 2025, 13: 1400-1415.
- [3] 杨旭东, 陈汉, 毕恩兵, 韩礼元. 高效率钙钛矿太阳能电池发展中的关键问题 [J]. [物理学报](#), 2015, 64(3): 038404.
- [4] Khenkin M V, Katz E A, Abate A, et al. Consensus statement for stability assessment and reporting for perovskite photovoltaics based on ISOS procedures[J]. [Nature Energy](#), 2020, 5(1): 35-49.
- [5] Tress W. Metal halide perovskites as mixed electronic-ionic conductors: challenges and opportunities: from hysteresis to memristivity[J]. [The Journal of Physical Chemistry Letters](#), 2017, 8(13): 3106-3114.
- [6] DS/EN IEC 61215-1-4: 2021 Terrestrial photovoltaic (PV) modules—design qualification and type approval—Part 1-4: special requirements for testing of thin-film Cu(In, Ga)(S, Se) based photovoltaic (PV) modules[S].
- [7] Calado P, Telford A M, Bryant D, et al. Evidence for ion migration in hybrid perovskite solar cells with minimal hysteresis[J]. [Nature Communications](#), 2016, 7: 13831.
- [8] Richardson G, O'Kane S E J, Niemann R G, et al. Can slow-moving ions explain hysteresis in the current-voltage curves of perovskite solar cells[J]. [Energy & Environmental Science](#), 2016, 9(4): 1476-1485.
- [9] IEC 60904-9 Ed. 3.0 b: 2020 Photovoltaic devices—Part 9: classification of solar simulator characteristics[S].
- [10] Calado P, Burkitt D, Yao J, et al. Identifying dominant recombination mechanisms in perovskite solar cells by measuring the transient ideality factor[J]. [Physical Review Applied](#), 2019, 11(4): 044005.
- [11] Almora O, Lopez-Varo P, Cho K T, et al. Ionic dipolar switching hinders charge collection in perovskite solar cells with normal and inverted hysteresis[J]. [Solar Energy Materials and Solar Cells](#), 2019, 195: 291-298.
- [12] 王继飞, 林东旭, 袁永波. 有机金属卤化物钙钛矿中的离子迁移现象及其研究进展 [J]. [物理学报](#), 2019, 68(15): 158801.
Wang Jifei, Lin Dongxu, Yuan Yongbo. Recent progress of ion migration in organometal halide perovskite[J]. [Acta Physica Sinica](#), 2019, 68(15): 158801.
- [13] Levine I, Nayak P K, Wang J T, et al. Interface-dependent ion migration/accumulation controls hysteresis in MAPbI₃ solar cells[J]. [The Journal of Physical Chemistry C](#), 2016, 120(30): 16399-16411.
- [14] Domanski K, Roose B, Matsui T, et al. Migration of cations induces reversible performance losses over day/night cycling in perovskite solar cells[J]. [Energy & Environmental Science](#), 2017, 10(2): 604-613.