

# 太阳能电池等效电路模型与仿真算法

孙天歌<sup>1</sup>, 刘冬雪<sup>1</sup>, 焦书迪<sup>2</sup>, 沙威<sup>2\*</sup>

(1. 中国长江三峡集团有限公司 科学技术研究院, 北京 101199;

2. 浙江大学 信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310058)

**摘要:**当前,在太阳能电池仿真领域,普遍采用漂移扩散和等效电路模型相结合的方法预测太阳能电池的性能并提供优化方案。但是,等效电路模型无法精确量化各复合损失对太阳能电池效率的影响,同时由于节点数限制,SPICE 等商业软件亦无法对大规模太阳能电池组件进行高效仿真。针对任意太阳能电池组件仿真,该文提出了四参数等效电路模型和基于修正节点法、多维牛顿法的电路仿真算法,并在非线性元件等效、多维牛顿迭代、约束条件等方面进行数值优化,实现了高精度快速仿真。

**关键词:**太阳能电池等效电路;多物理场仿真;数值模拟;修正节点法;牛顿法

中图分类号:TM914

文献标志码:A

文章编号:1000-2162(2025)02-0068-07

## Equivalent circuit model and simulation algorithm for solar cells

SUN Tiange<sup>1</sup>, LIU Dongxue<sup>1</sup>, JIAO Shudi<sup>2</sup>, SHA Wei<sup>2\*</sup>

(1. Science and Technology Research Institute, China Three Gorges Corporation, Beijing 101199, China;

2. College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:**Currently, in the field of solar cell simulation, a combination of drift-diffusion and equivalent circuit models is commonly used to predict solar cell performance and provide optimization solutions. But equivalent circuit models cannot accurately quantify the impact of various recombination losses on solar cell efficiency. Additionally, due to node number limitations, commercial software like SPICE cannot efficiently simulate large-scale solar cell modules. To address the simulation of any solar cell module, this paper proposed a four-parameter equivalent circuit model and a circuit simulation algorithm based on the modified nodal analysis method and the multi-dimensional Newton method. This paper achieved high-precision rapid simulation through numerical optimization in areas such as nonlinear component equivalence, multi-dimensional Newton iteration, and constraint conditions.

**Keywords:** the equivalent circuit of solar cells; multiphysics simulation; numerical simulation; modified node analysis; Newton's method

随着能源危机的日益加重,光伏、核能等清洁能源将发挥越来越重要的作用。其中,光伏能源作为一种重要的可再生能源,具有可再生、效率高、低成本等优点,将在新型能源体系中占据主导地位。经过

收稿日期:2024-08-05

基金项目:中国长江三峡集团科研项目(202203092)

作者简介:孙天歌(1992—),女,北京人,中国长江三峡集团有限公司中级工程师,博士, E-mail: sun\_tiang@ctg.com.cn;

\* 沙威(通信作者),浙江大学长聘副教授,博士生导师,博士, E-mail: weisha@zju.edu.cn.

多年的研究与实践,光伏能源呈现出以晶硅太阳能电池为主,钙钛矿、有机等多种新型太阳能电池蓬勃发展的状态<sup>[1-3]</sup>. 目前,晶硅太阳能电池作为一种可靠、高效并具有良好经济性的太阳能利用方式,已逐步形成相对成熟的工业化生产. 与晶硅太阳能电池相比,钙钛矿太阳能电池具有较高的理论光电转换效率以及较低的成本<sup>[4-7]</sup>等优势,但是由于其复杂的内部结构,在实际应用中受温度、光照、湿度等因素影响,其稳定性与寿命显著降低.

国内外很多团队通过五参数电路模型对太阳能电池进行分析研究<sup>[8-10]</sup>. 图1为传统五参数等效电路模型,在该电路模型中,输出电流表示为  $J = J_{ph} - J_{rad} - J_r$ . 其中:  $J_{ph}$  为光生电流密度;  $J_{rad}$  为复合电流密度,可通过推导玻尔兹曼方程得到,具体表达式为  $J_{rad} = J_0 \{ \exp[q(V + JR_s)/(nk_B T)] - 1 \}$ ,  $V$  表示太阳能电池的偏置电压,  $R_s$  为太阳能电池串联阻抗,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为工作温度,  $n$  为理想因子;  $J_r$  为漏电流损失,具体表达式为  $J_r = (V + JR_s)/R_{sh}$ ,  $R_{sh}$  表示漏电阻损失. 因此,需要拟合的参数为光生电流密度  $J_{ph}$ 、复合对应的暗电流密度  $J_0$ 、理想因子  $n$ 、串联电阻  $R_s$ 、并联电阻  $R_{sh}$ . 在该电路模型中,理想因子  $n$  表示不同的复合损失,但该模型无法精确量化太阳能电池中各复合损失的影响. 针对这一问题,该文提出一种新颖的四参数太阳能电池等效电路模型,研究了晶硅太阳能电池及钙钛矿太阳能电池的工作原理与特性,并对两种太阳能电池进行验证分析,精确量化出晶硅太阳能电池和钙钛矿太阳能电池中辐射复合、SRH 体复合、SRH 表面复合损失;此外,基于修正节点法(MNA)和牛顿法还设计了用于仿真太阳能电池组件的电路仿真算法,可准确地预测真实天气条件下太阳能电池组件被遮蔽时的性能,为实际电网调配提供实践指导. 此电路模型可应用于不同材料体系的太阳能电池组件.

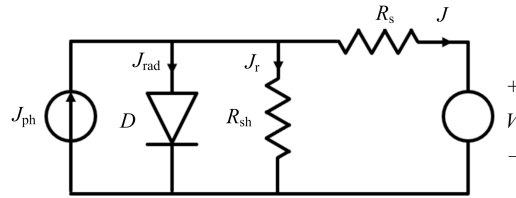


图1 传统五参数等效电路模型

## 1 方法

### 1.1 太阳能电池等效电路模型

图2为四参数太阳能电池等效电路模型<sup>[11-12]</sup>. 在此图中的太阳能电池输出电流  $J_{out}$  可表示为

$$J_{out} = J_{ph} - J_{rad} - J_{bulk} - J_{surf} - J_r. \quad (1)$$

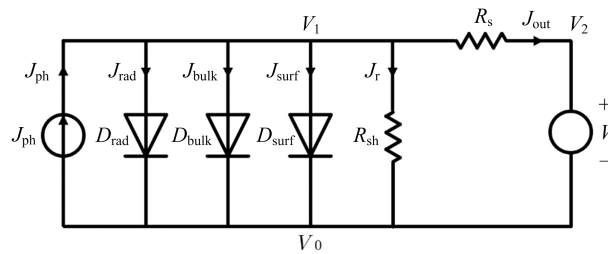


图2 四参数太阳能电池等效电路模型

$J_{ph}$  表示光生电流,根据量子理论,光生载流子数等于吸收能量除以光子能量,其中吸收率  $\alpha$  可由麦克斯韦方程组推导得到,具体由式(2)与式(3)表示.

$$J_{ph} = q \int_0^{\infty} \alpha(\lambda) \frac{\Gamma(\lambda)\lambda}{hc_0} d\lambda, \quad (2)$$

$$\alpha(\lambda) = \frac{\int n(\lambda)k(\lambda) \frac{2\pi c_0}{\lambda} |E(\lambda)|^2 d\lambda}{\int \Gamma(\lambda) d\lambda}, \quad (3)$$

其中: $\Gamma(\lambda)$ 为 AM 1.5 G 光谱, $h$  为普朗克常数, $c_0$  为光速, $n(\lambda)$ 和  $k(\lambda)$  分别为折射率的实部和虚部; $E(\lambda)$ 为太阳能电池活性层内的电场.

$J_{\text{rad}}$  表示辐射复合电流,具体由式(4)表示.

$$J_{\text{rad}} = J_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + J_{\text{out}} R_s)}{k_B T} \right] - 1 \right\}, \quad (4)$$

其中: $J_0$  为辐射复合暗电流密度,由黑体辐射定律推导得到,具体由式(5)表示.

$$J_0 = \int q \frac{\alpha(\lambda) B_\lambda(\lambda) \lambda}{h c_0} d\lambda, \quad (5)$$

其中: $\alpha(\lambda)$ 为吸收率, $B_\lambda(\lambda)$ 为黑体辐射谱.

$J_{\text{bulk}}, J_{\text{surf}}$  分别表示 SRH 体复合电流、SRH 表面复合电流,可根据半导体理论推导得到,具体由式(6)与式(7)表示.

$$J_{\text{bulk}} = U_{\text{bulk}} \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + J_{\text{out}} R_s)}{2k_B T} \right] - 1 \right\}, \quad (6)$$

$$J_{\text{surf}} = U_{\text{surf}} \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + J_{\text{out}} R_s)}{k_B T} \right] - 1 \right\}, \quad (7)$$

其中: $U_{\text{bulk}} = q\gamma_{\text{bulk}} n_0 L_{\text{bulk}}, U_{\text{surf}} = q\gamma_{\text{surf}} (n_0^2/p_0^h) L_{\text{surf}}$  分别表示 SRH 体复合暗密度、SRH 表面复合暗电流密度<sup>[12]</sup>,  $n_0$  为热平衡载流子浓度,  $L$  为活性层厚度,  $\gamma_{\text{bulk}}, \gamma_{\text{surf}}$  为 SRH 复合系数.

太阳能电池寄生电阻由串联电阻  $R_s$  表示,漏电阻由  $R_{\text{sh}}$  表示,因此,漏电流损失  $J_r$  可表示为

$$J_r = \frac{V + J_{\text{out}} R_s}{R_{\text{sh}}}. \quad (8)$$

在这里,需要拟合的参数为 SRH 体复合暗电流密度  $U_{\text{bulk}}$ 、SRH 表面复合暗电流密度  $U_{\text{surf}}$ 、串联电阻  $R_s$ 、并联电阻  $R_{\text{sh}}$ .

## 1.2 节点网表与非线性元件转换

基于修正节点法(MNA)和牛顿法可实现对太阳能电池等效电路的求解. MNA 在电路仿真软件中被广泛使用<sup>[13-14]</sup>,可通过电路元件值及电路输入电流源求解出各节点电压值,进而得到电路的全部参数. MNA 公式为  $\mathbf{G} \cdot \mathbf{V} = \mathbf{J}$ ,其中: $\mathbf{G}$  为电路电导矩阵,电路各元器件两端节点数与  $\mathbf{G}$  中相应位置相对应; $\mathbf{J}$  为电路相应节点的输入电流源矩阵; $\mathbf{V}$  为节点电压矩阵,即未知数矩阵. 在太阳能电池等效电路模型中,偏置电压源  $V$  为确定的参数,应填入  $\mathbf{J}$  矩阵;而流过电压源的电流  $J_{\text{out}}$  为未知数,应填入  $\mathbf{V}$  矩阵. 对于单个太阳能电池等效电路,当  $V_0$  节点接地时,电路中节点数等于 2,由于电压源的存在,在  $\mathbf{J}$  矩阵和  $\mathbf{V}$  矩阵中各增加一行,并对  $\mathbf{G}$  矩阵中相应位置补全以保证电路方程的准确性,因此节点数变为 3,如式(9)所示.

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & 0 \\ G_{21} & G_{22} & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ J_{\text{out}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{\text{ph}} \\ 0 \\ V \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中: $J_{\text{ph}}, V, J_{\text{out}}$  与图 2 中电路元件对应; $V_1, V_2$  为节点 1,2 对应的电压.

在该电路模型中,二极管电流可表示为  $J'_d = J'_0 [\exp(V_1/V_T) - 1]$ ,为非线性形式. 其中: $J'_0$  为饱和电流,如式(4)~(7)中  $J_0, U_{\text{bulk}}, U_{\text{surf}}$  表示; $V_T = k_B T/q$ ,为热平衡电压,在不同复合二极管中应乘以对应的理想因子,在修正节点电压矩阵中只允许以线性电导形式填入矩阵中. 因此,应将二极管等效为每次迭代中各节点电压表示的线性元件,图 3 为非线性元件转换, $V_0$  与  $V_1$  为二极管两端的电压, $J'_d$  为该偏置电压下流过二极管的电流,转换为线性元件后等于流过等效电导  $G'_{\text{diode}}$  的电流与等效电流源  $J'_{\text{diode}}$  的电流之和. 在图 3 中,当电压  $V_0$  接地时,可以通过式(10)~(11)将二极管等效为等效电导和等效电流源的并联,即

$$G'_{\text{diode}} = \frac{\partial J'_d}{\partial V_1} = \frac{J'_0}{V_T} \exp\left(\frac{V_1}{V_T}\right), \quad (10)$$

$$J'_{\text{diode}} = J'_d - V_1 G'_{\text{diode}} = J'_0 \left[ \exp\left(\frac{V_1}{V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V_1 J'_0}{V_T} \exp\left(\frac{V_1}{V_T}\right). \quad (11)$$

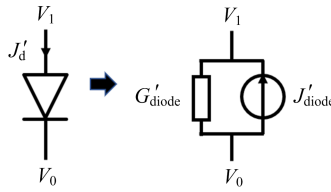


图3 非线性元件转换

假设  $J'_d$  为流过二极管的电流,在太阳能电池即式(4),(6),(7)中,  $G'_{\text{diode}}$  为二极管等效电导,  $J'_{\text{diode}}$  为二极管等效电流源.  $V_1$  为节点1的电压,在迭代过程中由前一次迭代过程得到,则为已知量,因此等效电导与等效电流源均为已知量.

在实际仿真中,当工作电压接近于0时,等效电导亦趋近于0,则会导致计算时出现奇异矩阵.在该工作中,将等效电导并联一个不影响电路整体效果的小电导  $G'$ ,即实际等效电导、等效电流源  $J_{\text{diode}}$  由式(12)与式(13)表示.

$$G_{\text{diode}} = G'_{\text{rad}} + G'_{\text{bulk}} + G'_{\text{surf}} + G, \quad (12)$$

$$J_{\text{diode}} = J_d - V_1 G_{\text{diode}}, \quad (13)$$

其中:  $G_{\text{diode}}$  为等效电路中所有二极管的等效电导之和,  $J_{\text{diode}}$  为所有等效电流源之和.

根据式(9),将等效后的非线性元件代入等效电路后,节点矩阵如式(14)所示,等式右侧部分为MNA公式中电流源矩阵  $\mathbf{J}$ ,等式左侧为电导矩阵  $\mathbf{G}$  乘以节点电压矩阵  $\mathbf{V}$ .

$$\begin{bmatrix} G_{\text{diode}} + \frac{1}{R_{\text{sh}}} + \frac{1}{R_s} & -\frac{1}{R_s} & 0 \\ -\frac{1}{R_s} & \frac{1}{R_s} & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ J_{\text{out}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{\text{ph}} - J_{\text{diode}} \\ 0 \\ V \end{bmatrix}. \quad (14)$$

在迭代过程中,首先对  $\mathbf{V}$  矩阵中  $V_1, V_2, J_{\text{out}}$  设定初始值.其次将初始值代入二极管等效公式中,可得到在当前节点电压下  $G_{\text{diode}}$  与  $J_{\text{diode}}$  的值,  $J_{\text{ph}}, V, R_s, R_{\text{sh}}$  均为已知,至此节点电压方程构建完成.最后通过牛顿法可得到下次迭代的  $\mathbf{V}$  矩阵,重复以上操作直到节点电压方程收敛.

### 1.3 多维度牛顿法

许多研究已经提出通过牛顿法可较准确地求解非线性方程<sup>[15-17]</sup>.在该工作中,由于自变量矩阵  $\mathbf{V}$  的大小为节点个数  $m$ ,该文则将牛顿法扩展为多个维度.此外,还对设置约束条件以及非线性元件的等效策略进行优化.在该算法中,将需求解的方程定义为  $\mathbf{F}(\mathbf{V}) = \mathbf{V} - \mathbf{G}^{-1} \mathbf{J} = 0$ ,其中,电导矩阵  $\mathbf{G} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ 、源矩阵  $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^m$ 、节点电压矩阵  $\mathbf{V} \in \mathbb{R}^m$ .在该工作中,为了减少迭代次数,加快算法计算速度,应选取合适的初始工作点.首先,将电路模型中电流源忽略,在给定初始电压源后,电路中只有一个源,其他均为与初始电压有关的元件和电阻,且均为已知参数,因此通过基尔霍夫电压、电流定律可求解出所有节点电压,并将该电压矩阵作为初始工作点.其次,工作点迭代过程扩展为多自变量维度,具体可表示为

$$\mathbf{F}(\mathbf{V}^{(k+1)}) = \mathbf{F}(\mathbf{V}^{(k)}) + \mathbf{J}_a(\mathbf{V}^{(k+1)} - \mathbf{V}^{(k)}), \quad (15)$$

其中:矩阵  $\mathbf{V}^{(k)} = [V_1^{(k)} \dots V_m^{(k)}]^T$ ,  $\mathbf{F}(\mathbf{V}^{(k)}) = [F_1(\mathbf{V}^{(k)}) \dots F_m(\mathbf{V}^{(k)})]^T$ .根据式(15)可对矩阵进行泰勒展开,经过迭代后即可得到该给定电压源下的最终解.由于太阳能电池等效电路中不存在电容、电感等高频器件,为得到太阳能电池等效电路的伏安特性,只需要将电压源离散化后对电路进行直流仿真.因此,可将每次给定电压源求解出的最终解作为下一次给定电压源求解的初始值,这样可加快仿真速度.使用上述方法求解初始工作点时需求解电导矩阵的逆矩阵,且只需计算一次逆矩阵即可得到所有初始工作点.雅可比矩阵  $\mathbf{J}_a: \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^{m \times m}$  表示对电压矩阵的微分,即

$$\mathbf{J}_a = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(\mathbf{V}^{(k)})}{\partial V_1^{(k)}} & \cdots & \frac{\partial F_1(\mathbf{V}^{(k)})}{\partial V_m^{(k)}} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial F_m(\mathbf{V}^{(k)})}{\partial V_1^{(k)}} & \cdots & \frac{\partial F_m(\mathbf{V}^{(k)})}{\partial V_m^{(k)}} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

在太阳能电池等效电路中,可以将所有元件均等效为线性元件. 根据欧姆定律  $i = gv$ , 线性元件的电导为  $g = \partial i / \partial v$ , 那么多维牛顿法中雅可比矩阵  $\mathbf{J}_a$  在该算法中完全等于电导矩阵  $\mathbf{G}$ , 因此在每次迭代中可无需求解  $\mathbf{J}_a$  矩阵的逆矩阵.

因此,上述工作通过修正节点法和多维牛顿法可实现对任意规模太阳能电池组件仿真. 在大规模太阳能电池组件仿真中,出于对实际情况的考虑,组件中单个太阳能电池面积较小,因此树叶、云层等遮蔽物对电池片的遮挡则会对吸收率产生较大影响,并影响该部分的输出电流,进而引发热斑效应. 因此,该文还对电池组件仿真算法增加了对遮蔽等真实环境的考虑. 如图 4 所示为部分遮蔽条件下的太阳能电池组件,当被遮蔽的太阳能电池与组件中其他太阳能电池被遮蔽的面积相差较大情况下,在总输入电压接近于 0 时,随着迭代的进行,由于求解结果过小,导致牛顿法迭代步长过小,进而导致迭代方向发生混乱,计算结果不收敛. 该文创新性地提出组件的仿真约束条件及其数值设置,传统意义上的约束条件是对每次迭代的结果进行约束,以便在误差达到约束条件后停止迭代并输出结果. 由于牛顿法的迭代特性以及初始工作点的选取,无需对牛顿法设置约束区间,亦可快速得到准确结果. 在该工作中,对电压接近于 0 的情况下牛顿法迭代中节点电压值上限设置约束条件,则会限制牛顿法迭代方向.

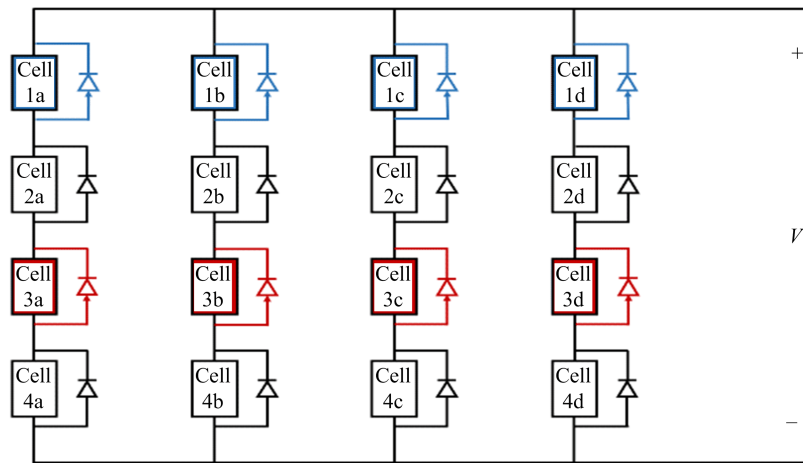


图 4 部分遮蔽条件下的太阳能电池组件

## 2 实 验

为验证上述所提等效电路模型拟合准确性,该文通过 COMSOL 软件仿真得到晶硅太阳能电池和钙钛矿太阳能电池伏安曲线作为参考曲线.

TOPCon 晶硅太阳能电池参考结构为  $\text{Ag} [70 \text{ nm}] / \text{c-Si}(\text{P}+) [300 \text{ nm}] / \text{c-Si}(\text{n}) [200 \mu\text{m}] / \text{SiO}_2 [1 \text{ nm}] / \text{c-Si}(\text{n}++) [30 \text{ nm}] / \text{Ag} [1 \mu\text{m}]$ <sup>[18]</sup>. 如图 5(a)所示为晶硅太阳能电池  $J$ - $V$  曲线拟合结果,黑色实线为参考曲线,红色虚线为等效电路模型拟合结果. 另外,选择  $\text{ITO} [50 \text{ nm}] / \text{NiO}_x [20 \text{ nm}] / \text{MAPbI}_3 [500 \text{ nm}] / \text{C}_{60} [50 \text{ nm}] / \text{Ag} [120 \text{ nm}]$  作为钙钛矿太阳能电池参考结构,并在非辐射复合中只考虑 SRH 体复合<sup>[12]</sup>. 通过等效电路模型对钙钛矿太阳能电池  $J$ - $V$  曲线进行拟合,拟合结果如图 5(b)所示,黑色实线为漂移扩散模型  $J$ - $V$  曲线,红色虚线为等效电路模型拟合结果.



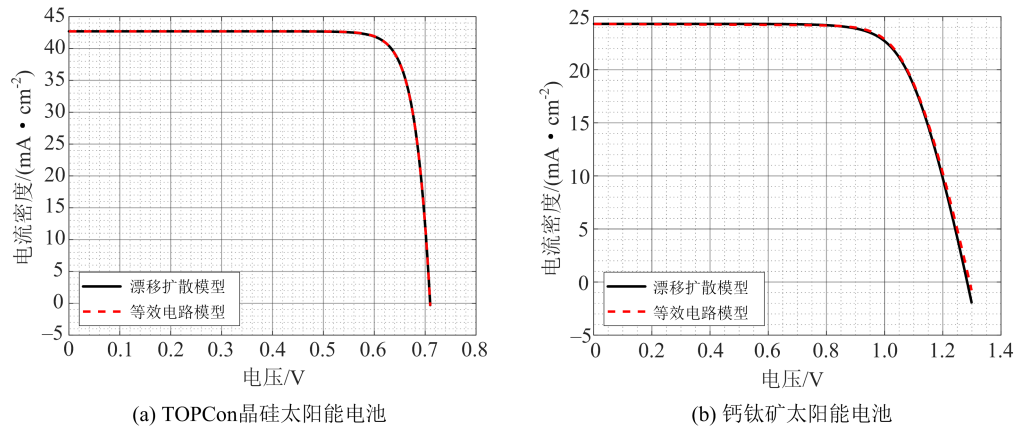


图 5 等效电路模型拟合结果

等效电路模型拟合参数如表 1 所示,其中 SRH 表面复合暗电流密度为 0,因此等效电路模型可很好地拟合漂移扩散模型.

表 1 等效电路模型拟合参数

	$U_{\text{bulk}} /$ ( $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	$U_{\text{surf}} /$ ( $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	$R_s /$ Ohm	$R_{\text{sh}} /$ Ohm	$J_{\text{sc}} /$ ( $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	$V_{\text{oc}} /$ V	FF/ %	PCE/ %
晶硅太阳能电池	$1.08 \times 10^{-9}$	$4.98 \times 10^{-14}$	0.08	$1.00 \times 10^5$	42.70	0.71	84.05	25.45
钙钛矿太阳能电池	$3.37 \times 10^{-13}$	0	6.33	$9.27 \times 10^3$	24.34	1.29	72.77	22.86

将表 1 中的拟合数据代入该文算法中,如图 6 所示即为仿真算法结果与拟合结果对比图,其中黑色实线为漂移扩散模型  $J$ - $V$  曲线,红色虚线为拟合结果,黄色圆为该算法仿真结果.从图 6 可以看出,该算法仿真结果与拟合结果完全一致,因此该算法可很好地仿真太阳能电池  $J$ - $V$  曲线特性.

此外,该文还对如图 4 所示的晶硅太阳能电池组件进行仿真,并分析其在遮蔽条件下的响应,如图 7 所示即为  $4 \times 4$  串并联组件仿真结果,其中黑色实线为无遮蔽的情况,蓝色实线为图 4 中被标注为蓝色的太阳能电池被遮蔽 50% 的情况,红色实线为图 4 中被标注为蓝色的和被标注为红色的太阳能电池均被遮蔽 50% 的情况.在遮蔽条件下,被遮蔽的太阳能电池输出电流减小,其并联的旁路二极管开始工作.当输入电压增加至总输出且电流下降至与被遮蔽太阳能电池电流相等时,旁路二极管则停止工作,组件与被遮蔽部分呈现相同的表现.因此,太阳能电池组件被部分遮蔽时则会导致组件输出电流下降过快,进而导致组件无法正常工作.

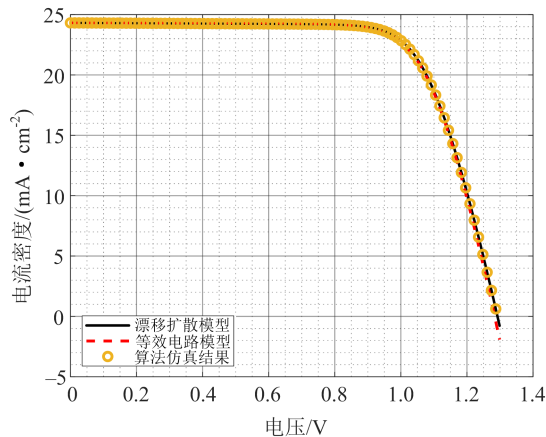


图 6 仿真算法结果与拟合结果对比图

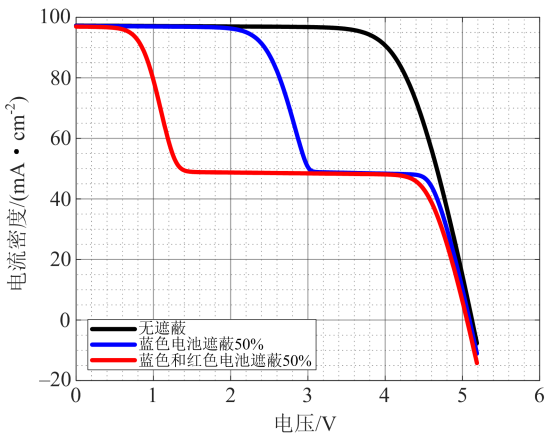


图 7  $4 \times 4$  串并联组件仿真结果

### 3 结束语

该文首先提出了四参数等效电路模型. 利用该模型, 太阳能电池中全部复合损失可被量化, 解决了经典电路模型中无法定量分析的难题. 其次, 该文基于修正节点法和多维牛顿法提出了针对相关电路模型的求解方法, 即对非线性元件进行线性等效, 并对多维牛顿法求解的电导矩阵  $\mathbf{G}$  进行优化, 解决了小电压下电路短路问题. 最后, 对组件仿真的约束条件做出优化, 解决了组件中部分太阳能电池被遮蔽情况下出现的计算发散情况, 极大地提高了计算精度. 该文工作为太阳能电池领域提供了一种稳定可行的等效电路及其组件仿真算法.

### 参考文献:

- [1] 张秀清, 李艳红, 张超, 等. 太阳能电池研究进展[J]. 中国材料进展, 2014, 33 (7): 436-441.
- [2] CAO L Q, HE Z, SHA W E I, et al. Influence of geometry of metallic nanoparticles on absorption of thin-film organic solar cells: a critical examination[J]. IEEE Access, 2020 (8): 145950-145959.
- [3] CHEN X, JIA Z Y, CHEN Z, et al. Efficient and reproducible monolithic perovskite-organic tandem solar cells with low-loss interconnecting layers[J]. Joule, 2020, 4 (7): 1594-1606.
- [4] 白宇冰, 王秋莹, 吕瑞涛, 等. 钙钛矿太阳能电池研究进展[J]. 科学通报, 2016, 61 (4/5): 489-500.
- [5] SNAITH H J. Perovskites: the emergence of a new era for low-cost, high-efficiency solar cells[J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2013, 4 (21): 3623-3630.
- [6] GREEN M, DUNLOP E, HOHL-EBINGER J, et al. Solar cell efficiency tables (version 57)[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2021, 29 (1): 3-15.
- [7] 金胜利, 寿春晖, 黄绵吉, 等. 钙钛矿太阳能电池稳定性研究进展及模组产业化趋势[J]. 材料导报, 2023, 37 (5): 21030201.
- [8] JORDEHI A R. Parameter estimation of solar photovoltaic (PV) cells: a review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 61: 354-371.
- [9] ARAKI K, YAMAGUCHI M. Novel equivalent circuit model and statistical analysis in parameters identification[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2023, 75 (3/4): 457-466.
- [10] RIQUELME A J, VALADEZ-VILLALOBOS K, BOIX P P, et al. Understanding equivalent circuits in perovskite solar cells. Insights from drift-diffusion simulation[J]. Physical Chemistry Chemical Physics: PCCP, 2022, 24 (26): 15657-15671.
- [11] SHA W E I, ZHANG H, WANG Z S, et al. Quantifying efficiency loss of perovskite solar cells by a modified detailed balance model[J]. Advanced Energy Materials, 2018, 8 (8): 1-7.
- [12] 徐婷, 王子帅, 李炫华, 等. 基于等效电路模型的钙钛矿太阳能电池效率损失机理分析[J]. 物理学报, 2021, 70 (9): 098801.
- [13] HO C W, RUEHLI A, BRENNAN P, et al. The modified nodal approach to network analysis[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1975, 22 (6): 504-509.
- [14] 赵春江. 短路电流为控制量的节点电压法分析[J]. 西昌学院学报(自然科学版), 2020, 10 (4): 58-60.
- [15] AVRIEL M. Nonlinear programming: analysis and methods[M]. Hoboken: Prentice hall, 1976: 216-221.
- [16] 张新华. 等式约束非凸优化问题的修正牛顿算法[J]. 数学杂志, 2015, 35 (2): 1-11.
- [17] GILBERT S. Computational science and engineering[M]. Cambridge: Wellesley-Cambridge Press, 2007: 171-185.
- [18] TIAN L, SHA W E I, XIE H, et al. Carrier transport simulation methods for electronic devices with coexistence of quantum transport and diffusive transport[J]. Journal of Applied Physics, 2024, 135(22): 225703.

(责任编辑 刘中飞)