

团 体 标 准

T/CPIA 0019.2—2020

双面发电光伏组件电参数测试方法 第2部分：公式法

Test method for electrical parameters of bifacial photovoltaic (PV) module-

Part2: Equation method

中国光伏行业协会
China Photovoltaic Industry Association

2020-03-10 发布

2020-03-20 实施

中国光伏行业协会 发布

前 言

T/CPIA 0019《双面发电光伏组件电参数测试方法》分为两个部分：

——第1部分：双面同步光照法；

——第2部分：公式法。

本部分为T/CPIA 0019的第2部分。

本部分按照GB/T 1.1-2009给出的规则编写。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本部分由中国光伏行业协会标准化技术委员会归口。

本部分起草单位：英利能源（中国）有限公司、北京鉴衡认证中心有限公司、中国电子技术标准化研究院、常熟阿特斯阳光电力科技有限公司、陕西众森电能科技有限公司、天合光能股份有限公司、隆基乐叶光伏科技有限公司、泰州中来光电科技有限公司、国家太阳能光伏产品质量监督检验中心、南德认证检测中国有限公司上海分公司、国家电投集团西安太阳能电力有限公司、苏州腾晖光伏技术有限公司、中国建材检验认证集团股份有限公司、河北流云新能源科技有限公司、汉能装备科技集团有限公司、协鑫集成科技股份有限公司。

本部分主要起草人：倪健雄、李亚彬、李英叶、宋登元、蒋京娜、陈晓达、纪振双、麻超、刘莹、王赶强、冯亚彬、张光春、曾祥超、闫萍、吕俊、朱海滨、胡旦、薄祥喜、宋志成、倪志春、杨帆、李晨、武雁榕。



双面发电光伏组件电参数测试方法 第2部分：公式法

1 范围

T/CPIA 0019的本部分规定了模拟太阳光下，双面发电光伏组件电参数公式测试方法的术语和定义、方法原理、测试条件、试验样品、测试步骤、数据处理和报告等。

本部分适用于双面发电光伏组件电参数的室内测试。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

IEC 60891 光伏器件 – 测试IV特性的温度和辐照度修正方法(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 标准光伏器件要求 (Photovoltaic devices - Part 2: Requirements for photovoltaic reference devices)

IEC 60904-4 光伏器件 第4部分 光伏校准溯源链的建立 (Photovoltaic devices - Part 4: Photovoltaic reference devices – Procedures for establishing calibration traceability)

IEC 60904-9 光伏器件 第9部分：太阳模拟器性能要求 (Photovoltaic devices – Part 9: Solar simulator performance requirements)

IEC 61215-1 地面用光伏 (PV) 组件 设计鉴定和定型 第1部分：试验要求 (Terrestrial photovoltaic (PV) modules — Design qualification and type approval – Part 1: Test requirement)

IEC/TS 61836 太阳光伏能源系统 术语、定义和符号 (Solar photovoltaic energy systems-Terms, definitions and symbols)

3 术语和定义

IEC/TS 61836界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

双面发电光伏组件 bifacial PV module

正面和背面都能将光能转换为电能的光伏组件。

3.2

正面 front side

同等测试条件下，光伏组件中功率相对较高的一面。

3.3

背面 rear side

同等测试条件下，光伏组件中功率相对较低的一面。

3.4

双面标准测试条件 bifacial standard test condition (BSTC)

满足大气质量为AM1.5、测试环境温度为25℃、正面辐照度为1000W/m²及背面辐照度为100W/m²的测试条件。

4 方法原理

在标准测试条件下，用非反射背景材料先后遮挡双面发电光伏组件正面和背面，测试双面发电光伏组件背面和正面短路电流值，将所测背面和正面短路电流比值与反射系数进行乘积得到双面发电光伏组件电流增益率，使用双面发电光伏组件电流增益率等参数并结合半导体物理学原理对双面发电光伏组件的正电参数进行修正，最终得到双面发电光伏组件的双面电参数。双面发电光伏组件测试等效电路图如图1所示。

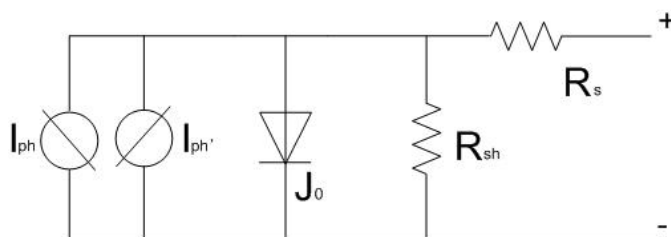


图1 双面发电光伏组件测试等效电路图

说明：

I_{ph} —— 双面发电光伏组件正面光生电流；

$I_{ph'}$ —— 双面发电光伏组件背面光生电流；

J_0 —— 双面发电光伏组件暗饱和电流；

R_{sh} —— 双面发电光伏组件并联电阻；

R_s —— 双面发电光伏组件串联电阻。

双面发电光伏组件电流增益率按公式（1）进行计算：

$$R = \alpha \times \frac{I_{sc_{rear}}}{I_{sc_{front}}} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

R —— 双面发电光伏组件电流增益率；

α —— 反射系数，与组件运行条件有关，包括地理位置、光照条件、地面/水面条件、组件安装方式和角度、时间/季节等。本标准根据适合于双面发电光伏组件应用的双面标准测试条件，实验室模拟测试及实证数据，统一取值0.1；

$I_{sc_{rear}}$ —— 双面发电光伏组件背面短路电流，单位为安培（A）；

$I_{sc_{front}}$ —— 双面发电光伏组件正面短路电流，单位为安培（A）。

5 测试条件

5.1 测试设备要求

5.1.1 太阳模拟器

用于测量组件的太阳模拟器，要求最高辐照度不小于 $1000\text{W}/\text{m}^2$ ，同时满足IEC 60904-9中规定的AAA级要求，有效光照面积大于组件面积。

5.1.2 标准器件

满足IEC 60904-2和IEC 60904-4规定的标准组件的要求。

5.1.3 非反射背景材料

在组件光谱响应波长范围内反射率不大于7%，非反射背景材料的两面要一致。

5.1.4 测试平台

包括测试支架或轨道，使测试样品与双面发电标准光伏组件在与中心入射光线方向垂直的相同平面。

5.1.5 温度测试仪

用于测试组件温度，要求精度 $\pm 1^\circ\text{C}$ ，重复性 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

5.2 测试环境条件

温度为 $(25\pm 2)^\circ\text{C}$ ；
相对湿度为不大于75%。

6 试验样品

双面发电光伏组件试验样品无IEC 61215-1中规定的外观缺陷。

7 测试步骤

7.1 将双面发电光伏组件正面朝向光源放置在太阳模拟器测试支架或轨道上（见图2）与标准器件校准测试放置位置保持一致，确保组件背面及支架与双面发电光伏组件接触边缘部分用非反射背景材料完全覆盖。

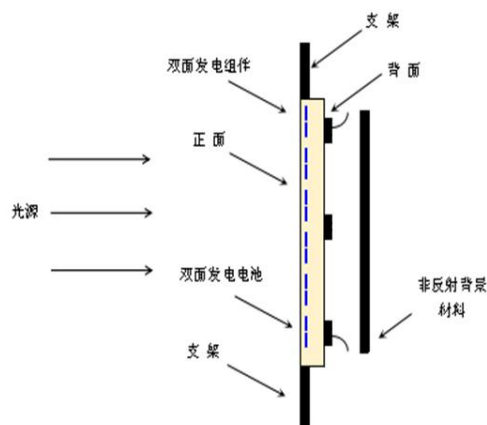


图2 双面发电组件测试示意图

7.2 按照 IEC 60904-1 进行 I-V 测试，记录测量值。如在非标准条件下测试数值，则根据 IEC 60891 的相关规定，将实测电流-电压特性修正到 STC 条件。

7.3 记录双面发电光伏组件正面开路电压 V_{oc_front} 、双面发电光伏组件正面短路电流 I_{sc_front} 、双面发电光伏组件正面填充因子 FF_{front} 、双面发电光伏组件正面最大功率点电流 I_{m_front} 、双面发电光伏组件正面最大功率点电压 V_{m_front} 、双面发电光伏组件正面最大功率 P_{max_front} 。

7.4 如图 2 所示，将选定的双面发电光伏组件背面朝向光源放置在太阳模拟器测试支架或轨道上，与正面测试放置位置保持一致，确保组件正面及支架与双面发电光伏组件接触边缘部分用非反射背景材料完全覆盖。

7.5 重复步骤 7.2 的测试，记录双面发电光伏组件背面短路电流 I_{sc_rear} 。

8 数据处理

8.1 双面发电光伏组件开路电压 V_{oc_BiFi} 按照公式（2）进行计算：

$$V_{oc_BiFi} = V_{oc_front} + \beta \dots\dots\dots (2)$$

式中：

V_{oc_front} —— 双面发电光伏组件正面开路电压，单位为伏特（V）；

β —— 电压修正值。

电压修正值按照公式（3）进行计算：

$$\beta = \frac{NkT}{Aq} \ln(1 + \alpha) \dots\dots\dots (3)$$

式中：

N —— 双面发电光伏组件等效串联电池片数；

k —— 玻尔兹曼常数，单位为焦耳每开（J/K）；

T —— 温度，单位为开尔文（K）；

A —— 光伏组件理想因子，推荐取值 1.2；

q —— 电子电荷，单位为库仑（C）。

8.2 双面发电光伏组件短路电流 I_{sc_BiFi} 按照公式（4）进行计算：

$$I_{sc_BiFi} = I_{sc_front} (1 + R) \dots\dots\dots (4)$$

式中：

I_{sc_front} —— 双面发电光伏组件正面短路电流，单位为安培（A）。

8.3 双面发电光伏组件最大功率点电压 V_{m_BiFi} 按照公式（5）进行计算：

$$V_{m_BiFi} = V_{m_front} + \beta - R N r_s I_{m_front} \dots\dots\dots(5)$$

式中：

V_{m_front} —— 双面发电光伏组件正面最大功率点电压，单位为伏特（V）；

$N r_s$ —— STC条件下双面发电光伏组件等效串联电阻，单位为欧姆（ Ω ）；

I_{m_front} —— 双面发电光伏组件正面最大功率点电流，单位为安培（A）。

8.4 双面发电光伏组件最大功率点电流 I_{m_BiFi} 按照公式（6）进行计算：

$$I_{m_BiFi} = I_{m_front} (1 + R) \dots\dots\dots(6)$$

8.5 双面发电光伏组件填充因子 FF_{BiFi} 按照公式（7）进行计算：

$$FF_{BiFi} = \frac{[V_{m_front} + \beta - R N r_s I_{m_front}] \times I_{m_front} (1 + R)}{[V_{oc_front} + \beta] \times I_{sc_front} (1 + R)} \dots\dots\dots(7)$$

8.6 双面发电光伏组件最大功率 P_{max_BiFi} 按照公式（8）进行计算：

$$P_{max_BiFi} = V_{oc_BiFi} \times I_{sc_BiFi} \times FF_{BiFi} \dots\dots\dots(8)$$

8.7 以上电参数的推导过程参见附录 A。

9 报告

报告应至少包含以下内容：

- a) 样品规格型号、编号；
- b) 测试仪器名称和型号；
- c) 测试所用辐照度；
- d) 双面发电光伏组件正面测试项目及测试结果，测试结果至少包含双面发电光伏组件正面最大功率（ P_{max_front} ）、正面短路电流（ I_{sc_front} ）、正面开路电压（ V_{oc_front} ）、正面最大功率点电流（ I_{m_front} ）、正面最大功率点电压（ V_{m_front} ）、正面填充因子（ FF_{front} ）；

- e) 双面发电光伏组件测试项目及测试结果，测试结果至少包含双面发电光伏组件最大功率（ $P_{max_{BiFi}}$ ）、双面发电光伏组件电流增益率（ R ）、双面发电光伏组件短路电流（ $I_{sc_{BiFi}}$ ）、双面发电光伏组件开路电压（ $V_{oc_{BiFi}}$ ）、双面发电光伏组件最大功率点电流（ $I_{m_{BiFi}}$ ）、双面发电光伏组件最大功率点电压（ $V_{m_{BiFi}}$ ）、双面发电光伏组件填充因子（ FF_{BiFi} ）；
- f) 本标准编号；
- g) 测量单位名称、地址和测量者；
- h) 测试日期。

附录 A
(资料性附录)
电参数的推导

A.1 开路电压 V_{oc} _{BiFi}

双面发电光伏组件开路电压 V_{oc} _{BiFi} 公式推导过程如下:

由半导体物理学原理, 光伏组件开路电压计算公式按公式 A.1 计算:

$$V_{oc} = \frac{NkT}{Aq} \ln \frac{\Delta p(\Delta p + N_D)}{n_i^2} \dots\dots\dots (A.1)$$

其中,

- V_{oc} —— 光伏组件开路电压, 单位为伏特 (V);
- N —— 双面发电光伏组件等效串联电池片数;
- k —— 玻尔兹曼常数, 单位为焦耳每开 (J/K);
- T —— 温度, 单位为开尔文 (K);
- A —— 光伏组件理想因子;
- q —— $q=1.6 \times 10^{-19}C$. 电子电荷, 单位为库仑 (C);
- Δp —— 光伏组件非平衡空穴浓度;
- N_D —— 施主浓度;
- n_i —— 本征载流子浓度。

则双面发电光伏组件正面、背面的开路电压理论计算公式分别按公式 A.2 和 A.3 计算:

$$V_{oc_{front}} = \frac{NkT}{Aq} \ln \frac{\Delta p_{front}(\Delta p_{front} + N_D)}{n_i^2} \dots\dots\dots (A.2)$$

$$V_{oc_{rear}} = \frac{NkT}{Aq} \ln \frac{\Delta p_{rear}(\Delta p_{rear} + N_D)}{n_i^2} \dots\dots\dots (A.3)$$

其中,

- $V_{oc_{front}}$ —— 双面发电光伏组件正面开路电压, 单位为伏特 (V);
- $V_{oc_{rear}}$ —— 双面发电光伏组件背面开路电压, 单位为伏特 (V);
- Δp_{front} —— 双面发电光伏组件正面非平衡空穴浓度;
- Δp_{rear} —— 双面发电光伏组件背面非平衡空穴浓度。

则有, 双面发电组件正背面开路电压计算关系式 A.4:

$$V_{oc_{front}} - V_{oc_{rear}} = \frac{NkT}{Aq} \ln \frac{\Delta p_{front}(\Delta p_{front} + N_D)}{\Delta p_{rear}(\Delta p_{rear} + N_D)} \dots\dots\dots (A.4)$$

其中, 双面发电光伏组件正面、背面的非平衡空穴浓度相同 A.5, 即

$$\Delta p_{front} = \Delta p_{rear} \dots\dots\dots (A.5)$$

由此可得, 双面发电组件正背面开路电压相等, 如 A.6 计算所示:

$$V_{oc_{front}} - V_{oc_{rear}} = 0$$

$$\text{即, } V_{oc_{front}} = V_{oc_{rear}} \dots\dots\dots (A.6)$$

另, 由半导体物理学原理可知, 短路电流与开路电压关系如 A.7 所示:

$$\frac{I_{sc}}{I_0} = e^{\frac{AqV_{oc}}{NkT}} - 1 \dots\dots\dots (A.7)$$

其中,

- I_{sc} —— 光伏组件短路电流, 单位为安培 (A);
- I_0 —— 双面发电光伏组件反向饱和电流, 单位为安培 (A)。

则双面发电光伏组件正面、背面的短路电流理论计算公式 A.8 和 A.9 分别为,

$$\frac{I_{sc_{front}}}{I_{0_{front}}} = e^{\frac{AqV_{oc_{front}}}{NkT}} - 1 \dots\dots\dots (A.8)$$

$$\frac{I_{sc_{rear}}}{I_{0_{rear}}} = e^{\frac{AqV_{oc_{rear}}}{NkT}} - 1 \dots\dots\dots (A.9)$$

其中,

$I_{0_{front}}$ ——双面发电光伏组件正面反向饱和电流, 单位为安培 (A);

$I_{0_{rear}}$ ——双面发电光伏组件背面反向饱和电流, 单位为安培 (A)。

综上可得, 双面发电组件开路电压计算公式如 A.10 计算:

$$V_{oc_{front}} = \frac{NkT}{Aq} \ln \left(\frac{I_{sc_{front}}}{I_{0_{front}}} + 1 \right) \dots\dots\dots (A.10)$$

将双面发电光伏组件的开路电压对辐照强度进行求导可以得到开路电压和辐照强度的关系, 即

$$\frac{\partial V_{oc_{BiFi}}}{\partial \Phi} = \frac{NkT}{Aq} \frac{\partial \ln \left(\frac{I_{sc_{front}}}{I_{0_{front}}} + 1 \right)}{\partial \Phi} = \frac{NkT}{Aq} \times \left(\frac{1}{\Phi_{rear}} \right)$$

$$V_{oc_{BiFi}} = V_{oc_{front}} + \frac{NkT}{Aq} \times \ln \left(\frac{\Phi_{rear} + \Phi_{STC}}{\Phi_{STC}} \right)$$

即, 最终得到双面发电组件开路电压与单面组件开路电压和背面光强计算公式 A.11:

$$V_{oc_{BiFi}} = V_{oc_{front}} + \frac{NkT}{Aq} \times \ln(1 + \alpha) = V_{oc_{front}} + \beta \dots\dots\dots (A.11)$$

其中,

$V_{oc_{BiFi}}$ ——双面发电光伏组件开路电压, 单位为伏特 (V);

Φ_{rear} —— 双面发电光伏组件背面辐照强度, 单位为瓦每平方米 (W/m^2);

Φ_{STC} ——双面发电光伏组件标准测试条件辐照强度, 单位为瓦每平方米 (W/m^2);

α ——反射系数, 取 $\alpha = \frac{\Phi_{rear}}{\Phi_{STC}}$ 。与组件运行条件有关, 包括地理位置、光照条件、地面/水面条件、组件安装方式和角度、时间/季节等;

β ——修正因子, 取 $\beta = \frac{NkT}{Aq} \times \ln(1 + \alpha)$ 。

A.2 短路电流 $I_{sc_{BiFi}}$

双面发电光伏组件短路电流 $I_{sc_{BiFi}}$ 公式推导过程如下:

从宏观角度分别计算双面发电组件正背面整体光学反射和吸收情况, 推导出双面发电组件正背面短路电流计算方程 A.12 和 A.13:

$$I_{sc_{front}} = (I_{sc_{STC_{front}}} + k\Delta T) \times \frac{\Phi_{front}}{\Phi_{STC}} = I_{sc_{front}} \times \left[1 + \frac{a_{rear} \times (1 - R_{rear}) \Phi_{rear}}{a_{front} \times (1 - R_{front}) \Phi_{STC}} \right] \dots\dots\dots (A.12)$$

$$I_{sc_{rear}} = (I_{sc_{STC_{rear}}} + k\Delta T) \times \frac{\Phi_{rear}}{\Phi_{STC}} = I_{sc_{rear}} \times \left[1 + \frac{a_{front} \times (1 - R_{front}) \Phi_{front}}{a_{rear} \times (1 - R_{rear}) \Phi_{STC}} \right] \dots\dots\dots (A.13)$$

$$\Delta T = 0$$

从微观角度采用黑体辐射吸收理论计算双双面发电组件正背面短路电流 A.14, A.15, 和 A.16:

$$I_{sc_{BiFi}} = -e \int_{\epsilon_G}^{\infty} a(\hbar W) dj_{\gamma} (\hbar W) \dots\dots\dots (A.14)$$

$$I_{sc_{front}} = -e \int_{\epsilon_G}^{\infty} a_{front} (1 - R_{front}) dj_{\gamma} (\hbar W) \dots\dots\dots (A.15)$$

$$I_{sc_{rear}} = -e \int_{\epsilon_G}^{\infty} a_{rear} (1 - R_{rear}) dj_{\gamma} (\hbar W) \dots\dots\dots (A.16)$$

为简化计算过程，按照等式 A.17 引入 BiFi，得到双面系数进一步表达方程 A.17:

$$BiFi = \frac{I_{SCrear}}{I_{SCfront}} = \frac{\alpha_{rear} \times (1 - R_{rear})}{\alpha_{front} \times (1 - R_{front})} \dots\dots\dots (A.17)$$

将上述方程 A.12 和 A.13 分别代入方程 A.13, A.14, A.15 和 A.16 中，结合 BiFi 等式 A.17，推导出下列公式 A.18:

$$I_{SCBiFi} = I_{SCfront} + \frac{\phi_{rear}}{\phi_{STC}} \times BiFi \times I_{SCfront} \dots\dots\dots (A.18)$$

即：双面发电组件短路电流与单面电路电流计算公式 A.19:

$$I_{SCBiFi} = I_{SCfront}(1 + \alpha \times BiFi) = I_{SCfront} (1 + R) \dots\dots\dots (A.19)$$

其中:

- I_{SCBiFi} —— 双面发电光伏组件短路电流，单位为安培 (A)；
- $I_{SCfront}$ —— 双面发电光伏组件正面短路电流，单位为安培 (A)；
- I_{SCrear} —— 双面发电光伏组件背面短路电流，单位为安培 (A)；
- $I_{SCSTCfront}$ —— STC 测试条件下双面发电光伏组件正面短路电流，单位为安培 (A)；
- $I_{SCSTCrear}$ —— STC 测试条件下双面发电光伏组件背面短路电流，单位为安培 (A)；
- ϕ_{front} —— 双面发电光伏组件正面辐照强度，单位为瓦每平方米 (W/m²)；
- α_{front} —— 双面发电光伏组件正面吸收因子；
- α_{rear} —— 双面发电光伏组件背面吸收因子；
- R_{front} —— 双面发电光伏组件正面反射系数；
- R_{rear} —— 双面发电光伏组件背面反射系数；
- h —— 约化普朗克常数，单位为焦耳秒 (J·s)；
- hW —— 光子能量，约化普朗克常数乘以圆频率，单位为焦耳秒 (J·s)；
- j_{γ} —— 单位波长光谱能量密度；
- $BiFi$ —— 双面发电光伏组件双面性系数；
- R —— 双面发电光伏组件双面发电增益率，取 $R = \alpha \times BiFi$ 。

A.3 最大功率点电压 $V_{m_{BiFi}}$

双面发电光伏组件最大功率点电压 $V_{m_{BiFi}}$ 公式推导过程如下:

由半导体物理学原理和功率最大点特性 A.20, 可知双面发电组件电参数关系式 A.21:

$$dP/dV=0 \dots\dots\dots (A.20)$$

$$P = V \times I = V \times \left[I_{ph} - I_0 \left(\exp \frac{Aq(V - I_{nrS})}{NkT} - 1 \right) \right] \dots\dots\dots (A.21)$$

其中:

- P —— 双面发电光伏组件功率，单位为瓦特 (W)；
- V —— 双面发电光伏组件电压，单位为伏特 (V)；
- I —— 双面发电光伏组件电流，单位为安培 (A)；
- I_{ph} —— 双面发电光伏组件光生电流，单位为安培 (A)；
- I_{nrS} —— STC 条件下双面发电光伏组件等效串联电阻，单位为欧姆 (Ω)。

采用边界条件 A.20, 对 A.21 方程进行微分处理，可得电压与电流关系式 A.22:

$$\frac{NkT}{Aq} = \frac{2V_m - V_{oc}}{\frac{I_{sc}}{I_{sc} - I_m} + \ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right)} \dots\dots\dots (A.22)$$

其中,

- V_m —— 双面发电光伏组件最大功率点电压，单位为伏特 (V)；
- I_m —— 双面发电光伏组件最大功率点电流，单位为安培 (A)。

综上可得，光伏组件最大点电压和最大点电流关系式 A.23 和 A.24:

$$Nr_s = \frac{\frac{NkT}{Aq} \ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right) - V_m + V_{oc}}{I_m} \dots\dots\dots (A.23)$$

即,

$$V_m = V_{oc} + \frac{NkT}{Aq} \ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right) - I_m \dots\dots\dots (A.24)$$

将双面发电光伏组件的最大功率点电压对辐照强度进行求导可以得到最大功率点电压和辐照强度的关系 A.25, A.26 和 A.27, 即

$$\frac{\partial V_m}{\partial \phi} = \frac{NkT}{Aq} \times \frac{1}{1 + \frac{\phi_{rear}}{\phi_{STC}}} - Nr_s \times \frac{\partial I_m}{\partial \phi} \times \frac{\phi_{rear}}{\phi_{STC}} \dots\dots\dots (A.25)$$

$$V_{m_{BiFi}} = V_{m_{front}} + \frac{NkT}{Aq} \ln\left(1 + \frac{\phi_{rear}}{\phi_{STC}}\right) - \frac{\phi_{rear}}{\phi_{STC}} \times \frac{I_{sc_{rear}}}{I_{sc_{front}}} \times Nr_s I_{m_{front}} \dots\dots (A.26)$$

即，双面发电组件最大点电压最终表达式 A.27:

$$V_{m_{BiFi}} = V_{m_{front}} + \beta - RNr_s I_{m_{front}} \dots\dots\dots (A.27)$$

其中:

$I_{m_{front}}$ ——双面发电光伏组件正面最大功率点电流功率，单位为安培 (A)。

A.4 最大功率点电流 $I_{m_{BiFi}}$

双面发电光伏组件最大功率点电流 $I_{m_{BiFi}}$ 公式推导过程如下:

由半导体物理学原理和功率最大点特性，在 A.23 基础上类似推导出最大点电流计算方程 A.28: ,

$$I_m = \frac{(I_{ph} + I_0) \left(\frac{AqV_m}{NkT}\right)}{1 + \left(\frac{AqV_m}{NkT}\right)} \dots\dots\dots (A.28)$$

将双面发电光伏组件的最大功率点电流对辐照强度进行求导可以得到最大功率点电流和辐照强度的关系 A.29, 即

$$\frac{\partial I_m}{\partial \phi} = \frac{\partial (I_{sc} \times \frac{AqV_m}{NkT}) / (1 + \frac{AqV_m}{NkT})}{\partial \phi} \dots\dots\dots (A.29)$$

其中, $\frac{AqV_m}{NkT} \gg 1$, $\frac{AqV_m}{NkT} / (1 + \frac{AqV_m}{NkT}) \approx 1$

则，进一步简化 A.29 得到 A.30:

$$\frac{\partial I_m}{\partial \phi} = \frac{\partial I_{sc}}{\partial \phi} = \frac{\phi_r}{\phi_{STC}} \dots\dots\dots (A.30)$$

综上可得，双面发电光伏组件最大点电流与单面最大点电流与光强关系式 A.31 和 A.32:

$$I_{m_{BiFi}} = I_{m_{front}} + \frac{\phi_{rear}}{\phi_{STC}} \times BiFi \times I_{m_{front}} \dots\dots\dots (A.31)$$

即,

$$I_{m_{BiFi}} = I_{m_{front}} (1 + R) \dots\dots\dots (A.32)$$

A.5 填充因子 FF_{BiFi}

双面发电光伏组件填充因子 FF_{BiFi} ，根据半导体物理意义方程 A.33, 将 A.26, A.32, A.11 和 A.19 代入 A.33 后得到双面发电光伏组件填充因子方程 A.34:

$$FF_{BiFi} = \frac{V_{m_{BiFi}} I_{m_{BiFi}}}{V_{oc_{BiFi}} I_{sc_{BiFi}}} \dots\dots\dots (A.33)$$

$$FF_{BiFi} = \frac{[V_{m_{front}} + \beta - R N r_s I_{m_{front}}] \times I_{m_{front}} (1+R)}{[V_{oc_{front}} + \beta] \times I_{sc_{front}} (1+R)} \dots\dots\dots (A.34)$$

其中：

FF_{BiFi} ——双面发电光伏组件填充因子。

A.6 最大功率 $P_{max_{BiFi}}$

双面发电光伏组件最大功率 $P_{max_{BiFi}}$ ，其计算过程如公式 A.35：

$$P_{max_{BiFi}} = V_{oc_{BiFi}} \times I_{sc_{BiFi}} \times FF_{BiFi} \dots\dots\dots (A.35)$$

