

# 阴影遮挡下空间太阳能电池串联组件输出特性分析

李国良<sup>1</sup> 李明<sup>1,2</sup> 王六玲<sup>1</sup> 项明<sup>1</sup> 黄波<sup>2</sup> 郑士逢<sup>1</sup> 魏生贤<sup>2</sup> 王云峰<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 云南师范大学物理与电子信息学院, 云南昆明 650092)  
(<sup>2</sup> 云南师范大学太阳能研究所, 云南昆明 650092)

**摘要** 考虑雪崩击穿效应,以光伏电池元双二极管模型为基础,建立了适用于分析光伏电池部分被遮光问题的数学仿真模型,并利用户外实验验证了模型的正确性。运用此模型分析了单片空间太阳能电池在反向偏压下的输出特性和串联组件在不同阴影遮挡情况下的  $I-V$ 、 $P-V$  特性及输出能力。结果表明,空间太阳能电池串联组件从无阴影遮挡到 40% 阴影遮挡,最大输出功率下降 40%。串联组件输出功率随单片空间太阳能电池遮挡比例的增大迅速下降;从遮挡 1/5 片,2/5 片到整片被阴影遮挡,相应最大输出功率分别下降 7.36%,25.81% 与 97.94%。

**关键词** 光电子学;空间太阳能电池;输出特性;实验与模拟;部分遮挡;串联组件

**中图分类号** TK519 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0125001

## Analysis of Output Characteristics of Super Cells Serial Module with Partial Shading

Li Guoliang<sup>1</sup> Li Ming<sup>1,2</sup> Wang Liuling<sup>1</sup> Xiang Ming<sup>1</sup> Huang Bo<sup>2</sup>  
Zheng Tufeng<sup>1</sup> Wei Shengxian<sup>2</sup> Wang Yunfeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650092, China

<sup>2</sup> Solar Energy Research Institute, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650092, China

**Abstract** Based on a circuit model of a photovoltaic (PV) cell with an extension term considering avalanche effect, the model of PV module with partial shading is established for the analysis of shadow effect. The validity of the model is verified with outdoor experimental test under real solar radiation condition. The output characteristics of one super cell at reverse bias-voltage, the  $I-V$  characteristics,  $P-V$  characteristics and yield of the serial module under different shadow block are analyzed by use of the model. The results indicate that the maximum output power drops 40% when the serial module has 40% partial shading. The output power of the module declines rapidly with shading increasing of one super cell. The maximum power decrease 7.36%, 25.81% and 97.94% respectively when each cell is shaded 1/5, 2/5 and the whole.

**Key words** optoelectronics; super cell; output characteristics; experiment and simulation; partial shading; serial module

**OCIS codes** 250.0250; 350.6050

## 1 引言

表面被部分遮挡、光强分布不均匀或单体光伏

(PV)电池输出功率不匹配等因素均会导致光伏组件输出电流及功率降低<sup>[1]</sup>。光伏电池被遮挡时相当

收稿日期: 2010-03-22; 收到修改稿日期: 2010-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(50966004)、教育部博士点基金(20095303110001)、云南省自然科学基金重点项目(2007C0016Z; 2007GA008)和教育部长江学者和创新团队发展计划资助课题。

作者简介: 李国良(1986—),男,硕士研究生,主要从事太阳能热利用和光伏发电等方面的研究。

E-mail: liguobang@foxmail.com

导师简介: 李明(1964—),男,博士,教授,主要从事太阳能利用方面的研究。E-mail: lmllldy@126.com(通信联系人)

于负载会消耗电能,随着耗能的增加将会产生过热甚至击穿的热斑现象,严重影响光伏组件的输出特性和使用寿命。针对光伏组件接收光强不均、电池被部分遮挡问题,许多研究者建立了仿真模型从理论上分析了部分遮光对光伏组件输出性能的影响<sup>[1~9]</sup>;也有研究者利用太阳模拟器对多晶硅太阳能电池组件部分遮光的输出特性进行了实验分析<sup>[1]</sup>,上述理论和实验研究虽然给出了一些结果,但与太阳能电池户外实际运行有一定差距。为了能够真实反映太阳能电池部分遮光对其组件输出特性在户外应用中的影响,本文建立了适用于分析户外太阳能电池部分遮光问题的数学模型,并在户外自然光照射下进行实验验证了模型的可行性。运用此模型分析了单片空间太阳能电池在反向偏压下的输出特性和串联组件在局部阴影遮挡情况下的  $I-V$ 、 $P-V$  特性及输出能力。

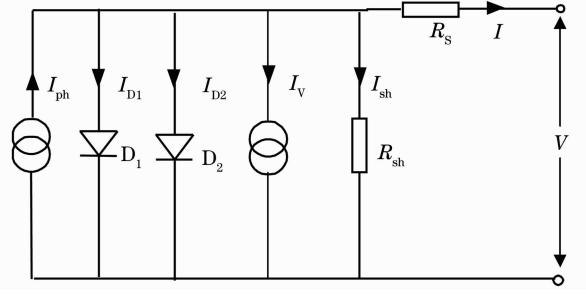


图 1 光伏电池元等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of PV cell

$$I_{D1} = I_{s1} \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + IR_s)}{A_1 kT} \right] - 1 \right\}, \quad (3)$$

$$I_{D2} = I_{s2} \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + IR_s)}{A_2 kT} \right] - 1 \right\}, \quad (4)$$

$$I_V = a(V + IR_s) \left( 1 - \frac{V + IR_s}{V_{br}} \right)^{-n}, \quad (5)$$

$$I_{sh} = (V + IR_s) / R_{sh}. \quad (6)$$

(2)~(6)式中,  $I_{ph}$  为光生电流,  $c_1, c_2$  分别是光强影响系数和温度影响系数,  $G$  为光强,  $A_C$  为电池的面积,  $T$  为太阳能电池的工作温度,  $T_{ref}$  为电池的参考温度,  $I_{D1}, I_{D2}$  为流过二极管  $D_1, D_2$  的电流,  $I_{s1}, A_1$  分别为二极管  $D_1$  的反向饱和电流和品质因子,  $I_{s2}, A_2$  分别为二极管  $D_2$  的反向饱和电流和品质因子, 电荷常量  $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ,  $R_s$  为串联电阻, 波尔兹曼常数  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ,  $I_V$  为反向雪崩击穿电流,  $a, n$  为雪崩击穿特征常数,  $V_{br}$  为雪崩击穿电压,  $I_{sh}$  为流过并联电阻的电流,  $R_{sh}$  为并联电阻。

描述光伏组件的伏安输出特性需要确定  $V$  与  $I$  的对应关系, 上述等式并未给出确定的计算方式。根据基尔霍夫电压定律和电流定律, 利用牛顿迭代法确定串联组件的  $I-V$  对应关系, 可得

## 2 数学模型的建立

### 2.1 光伏电池元数学模型

串联光伏组件由多个单体光伏电池元串联而成, 要建立阴影遮挡下光伏组件输出特性的数学模型, 就应从单体光伏电池元的数学模型入手<sup>[3]</sup>。单体光伏电池有类似于二极管的 p-n 结特性, 为更好地描述阴影遮挡下太阳能电池的输出特性, 通常采用考虑雪崩击穿效应的双二极管模型<sup>[4]</sup>, 如图 1 所示。

根据等效电路模型可得单体光伏电池元的输出电压  $V$  和电流  $I$ <sup>[2]</sup>:

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_V - I_{sh}, \quad (1)$$

其中

$$I_{ph} = c_1 GA_C + c_2 (T - T_{ref}), \quad (2)$$

$$f(V, I) = I_{ph} - I_{s1} \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + IR_s)}{A_1 kT} \right] - 1 \right\} - I_{s2} \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + IR_s)}{A_2 kT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} - I - a(V + IR_s) \left( 1 - \frac{V + IR_s}{V_{br}} \right)^{-n} = 0. \quad (7)$$

### 2.2 阴影遮挡下太阳能电池串联组件的数学模型

未被遮挡的电池和被遮挡电池在组件中是串联关系, 因此输出电压  $V$  和输出电流  $I$  满足<sup>[5]</sup>

$$I = I_1 = I_2, \quad (8)$$

$$V = V_1 + V_2, \quad (9)$$

$$I_1 = I_{ph1} - I_{s1} \left\{ \exp \left[ \frac{q(V_1/m + I_1 R_s)}{A_1 kT} \right] - 1 \right\} - I_{s2} \left\{ \exp \left[ \frac{q(V_1/m + I_1 R_s)}{A_2 kT} \right] - 1 \right\} - \frac{V_1/m + I_1 R_s}{R_{sh}} - \alpha(V_1/m + I_1 R_s) \left( 1 - \frac{V_1/m + I_1 R_s}{V_{br}} \right)^{-n}, \quad (10)$$

$$I_2 = I_{ph2} - I_{s1} \left\{ \exp \left[ \frac{q(V_2 + I_2 R_s)}{A_1 k T} \right] - 1 \right\} - I_{s2} \left\{ \exp \left[ \frac{q(V_2 + I_2 R_s)}{A_2 k T} \right] - 1 \right\} - \frac{V_2 + I_2 R_s}{R_{sh}} - a(V_2 + I_2 R_s) \left( 1 - \frac{V_2 + I_2 R_s}{V_{br}} \right)^{-n}, \quad (11)$$

式中  $m$  为电池串联片数,  $I_{ph1}$  为普通光照下电池的光生电流,  $I_{ph2}$  为被遮挡电池的光生电流。对应被遮挡以后的光强  $G'$  表示为<sup>[6]</sup>

$$G' = \frac{A_u}{A_c} G_u + \frac{A_{sh}}{A_c} G_{sh}, \quad (12)$$

式中  $A_u$  ( $A_{sh}$ ) 为未遮挡(遮挡)部分的电池面积,  $G_u$  ( $G_{sh}$ ) 为未遮挡(遮挡)部分的光强。

### 3 阴影遮挡下空间太阳能电池串联组件的输出特性

#### 3.1 模型验证

以 19 片空间太阳能电池串联组件为研究对象, 空间太阳能电池原名 Super cell, 为国外生产的单晶硅材料电池, 在高温时输出性能稳定, 被用做空间卫星电源系统, 因而被称为空间太阳能电池, 电池相关参数如表 1 所示。实验所用测量仪器为 TRM-FD1 太阳能发电测试仪, TBQ-2 型总辐射表(精度  $\pm 2\%$ ), Fluke 红外测温仪(精度为  $\pm 1\%$ ), TFC40/450 光伏方阵/组件测试仪(精度为  $\pm 1\%$ )。选择晴天在户外

自然光照下进行实验。标准测试条件: AM1.5 光谱, 光强  $1000 \text{ W/m}^2$ , 环境温度  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

表 1 单片电池参数

Specification of cell / cm	7.1 × 6.2
$U_{oc}/\text{V}$	0.546
$I_{sc}/\text{A}$	1.45
FF / %	75.34

根据上述建立的阴影遮挡下太阳能电池串联组件的数学模型, 使模拟工况与太阳能电池在户外实测工况一致, 模拟所用参数如表 2 所示。模拟和实验结果如图 2 和表 3 所示。

表 2 模型参数

Parameters	Set value	Parameters	Set value
$A_1$	1	$R_s/\Omega$	0.025
$I_{s1}/\text{A}$	$3.6 \times 10^{-9}$	$R_{sh}/\Omega$	257
$A_2$	1.3	$V_{br}/\text{V}$	-50
$I_{s2}/\text{A}$	$4.5 \times 10^{-7}$	$a$	$2.3 \times 10^{-3}$
$T_{ref}/\text{K}$	298.15	$n$	3

表 3 单片电池被遮挡不同比例的串联组件输出特性实验与模拟对比

Table 3 Comparison between experimental and simulated output characteristics of serial module with one cell shaded with different proportion

Shading proportion	$U_{oc}/\text{V}$		$I_{sc}/\text{A}$		$P_{max}/\text{W}$	
	Measured	Simulated	Measured	Simulated	Measured	Simulated
0	9.89	9.883	1.424	1.433	10.24	10.11
1/4 of one piece	9.69	9.773	1.156	1.147	8.77	8.92
2/4 of one piece	9.64	9.719	0.796	0.804	6.34	6.42
1 piece	9.59	9.626	0.147	0.151	0.72	0.72

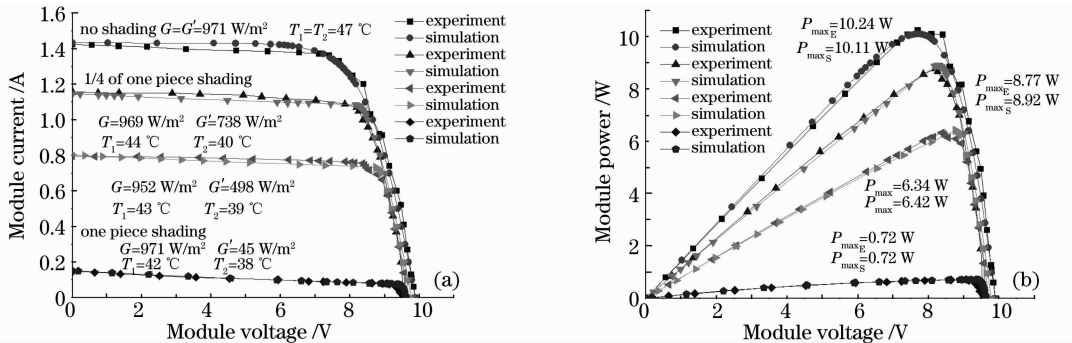


图 2 单片电池被遮挡不同比例的串联组件  $I-V$ ,  $P-V$  实验与模拟曲线对照

Fig. 2 Comparison between experimental and simulated  $I-V$  and  $P-V$  curve of serial module with one cell shaded with different proportion

由图 2 可知,在工况一致情况下,串联组件中单片电池被遮挡不同比例时,实验与模拟的  $I-V$ ,  $P-V$  曲线均很接近。随着单片电池遮挡比例的增大,组件开路电压有很小幅度的下降,短路电流和输出功率下降很快。实验测量值和模拟值之间吻合较好,最大误差在 2% 以内,从而验证了模型的正确性。因此,利用此模型分析阴影遮挡下太阳电池串联组件的输出特性是可行的。

在户外实际工况下进行多次实测实验,电池被遮挡部分与未被遮挡部分温度平均相差 4 °C,普通光强下电池平均工作温度为 42 °C,因此在建模分析中设置被遮挡电池工作温度为 38 °C,普通光强均为 1000 W/m<sup>2</sup>。

### 3.2 反向偏压下单体光伏电池的伏安特性模拟

串联组件中单片电池最小输出电流决定整个组件的输出电流。当组件中电池被部分阴影遮挡时,组件的输出电流变化很大。电池由于被遮挡带反向偏压,成为电路中的负载消耗电能,随着耗能的增加将会产生过热甚至击穿现象,通常叫做热斑现象<sup>[7]</sup>。产生反向偏压的原因是单体光伏电池有类似于二极管的 p-n 结特性,具有反向雪崩击穿现象。根据基尔霍夫电压与电流定律,当加在二极管两端的反向偏压增大到一定值时通过的反向电流会急剧增大,当电路中的电流比被遮挡单体光伏电池能提供的最大电流(即短路电流)还要大时,会造成二极管雪崩击穿。所以在光伏组件中有电池被遮挡时,必须考虑光伏电池在反向偏压下的伏安特性。不同类型的电池雪崩击穿电压一般不同,其取值范围一般为 -30 ~ -14 V<sup>[3]</sup>。空间太阳电池雪崩电压为 -30 V 由生产厂家提供的数据。

图 3 为反向偏压下单片空间太阳电池的伏安特性模拟。电池被完全遮挡时,辐照光强为零,随着反

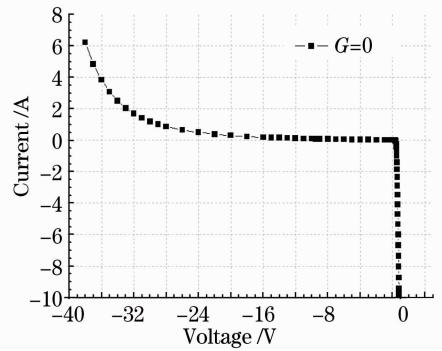


图 3 反向偏压下单片空间太阳电池的伏安特性

Fig. 3  $I-V$  characteristic of one super cell under reverse bias voltage

向偏压的增大,输出电流由慢到快增大;当到达雪崩电压后,输出电流急剧增大。

### 3.3 阴影遮挡下空间太阳电池串联组件输出特性

图 4 为串联光伏组件在不同辐射强度下的  $I-V$ ,  $P-V$  特性曲线。光强与阴影分别对应:1000 W/m<sup>2</sup>(无阴影),800 W/m<sup>2</sup>(20%阴影),600 W/m<sup>2</sup>(40%阴影),400 W/m<sup>2</sup>(60%阴影),200 W/m<sup>2</sup>(80%阴影),0(完全阴影)。由图可知从无阴影遮挡到完全遮挡,串联组件开路电压缓慢降低,但短路电流和最大输出功率均下降较快,短路电流从 1.45 A 下降到 0.017 A,最大输出功率从 10.19 W 下降到 0.07 W。串联组件从无阴影遮挡到 40%阴影遮挡,开路电压、短路电流、最大输出功率分别下降了 3.1%,39.5%和 40%。

当电池被遮挡后,被遮挡电池的输出电流减小,导致整个组件输出电流和输出功率都减小。图 5 为单片电池遮挡不同比例时串联组件的  $I-V$ ,  $P-V$  特性曲线。未被遮挡的 18 片串联电池辐射强度均为 1000 W/m<sup>2</sup>,被遮挡的单片电池从上至下分别对应于辐射强度 800 W/m<sup>2</sup>(遮挡 1/5)、600 W/m<sup>2</sup>(遮挡 2/5)、400 W/m<sup>2</sup>(遮挡 3/5)、200 W/m<sup>2</sup>(遮挡 4/5)、0(完全遮挡)。

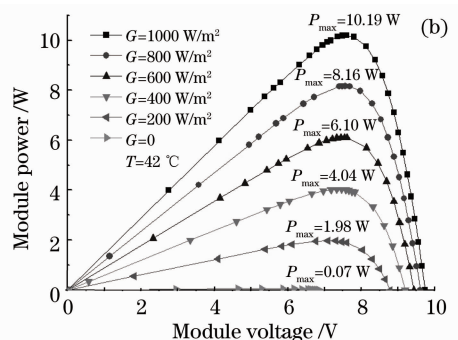
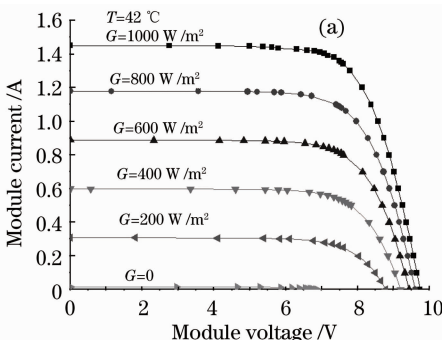


图 4 串联组件在不同辐射下  $I-V$ ,  $P-V$  特性

Fig. 4  $I-V$  and  $P-V$  characteristics of serial module at different radiation

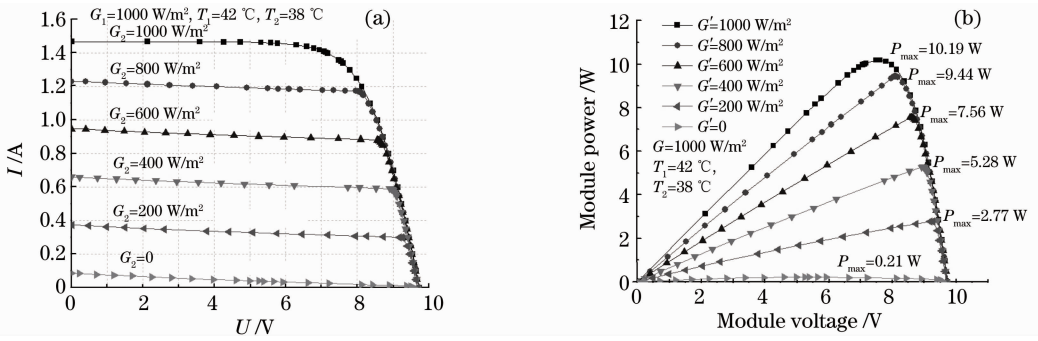


图5 单片电池遮挡不同比例时串联组件的  $I-V$ 、 $P-V$  特性

Fig. 5  $I-V$  and  $P-V$  characteristics of serial module with one cell shaded with different proportion

随单片电池辐射强度的降低(即遮挡率的增加),串联组件开路电压基本保持不变,短路电流下降很快。与图4中整个组件在不同光强下的  $I-V$  曲线相比,单片电池被部分遮挡时组件输出电流有所变化,从最大功率点电流到短路电流一段不再是接近恒流的水平直线而有逐渐上偏的趋势,且电池被遮挡的比例越大,上偏的趋势越明显。这是因为串联组件的输出电流由光生电流和暗电流组成,电池被部分遮挡时,被遮挡部分暗电流作用较明显,未被遮挡部分光生电流作用较明显。辐照度恒定,光生电流也恒定,暗电流增加,则输出电流也增加。

对比图4中整个组件在不同辐射强度下的  $P-V$  特性曲线,最大输出功率下降幅度增大,从遮挡1/5片,2/5片到整片被阴影遮挡,串联组件相应最大输出功率分别下降7.36%,25.81%与97.94%。当单片电池被遮挡2/5或更大比例后输出功率下降幅度

较大。随着输出功率的降低,最大输出功率点电压逐渐右移增大。

上述分析为串联电池片数一定时单片电池被遮挡不同比例对组件输出性能的影响,图6为不同片数串联的空间太阳能电池组件中有1片电池被完全遮挡时的  $I-V$ 、 $P-V$  特性曲线。由图可知,不同电池片数串联的组件中单片电池被阴影完全遮挡时,整个组件的输出电流急剧降低,输出不再是常规的  $I-V$  特性曲线,而是呈阶梯状,相应  $P-V$  曲线呈现多峰状。当串联组件中有1片电池被阴影完全遮挡,最大输出功率损失超过90%。串联组件的电池片数越多,被遮挡的单片电池两端反向偏压越大,当通过被遮挡电池两端的反向偏压达到雪崩击穿电压(约-30V)时,流过电池的电流急剧上升,被遮挡的电池容易发热产生击穿损坏。说明阴影遮挡对串联光伏组件输出性能的影响是致命的。

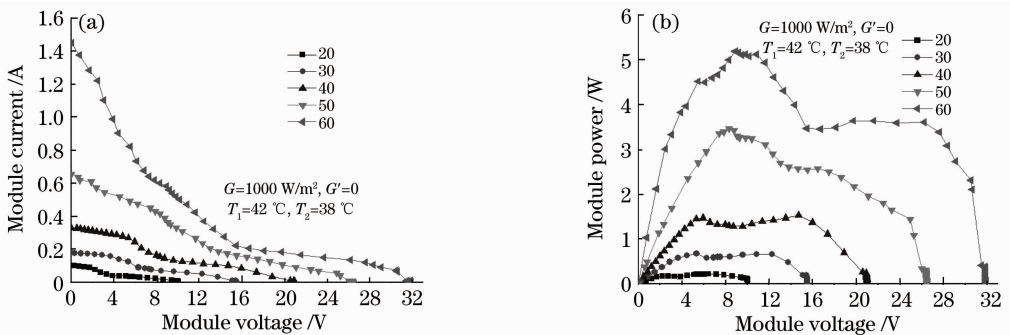


图6 遮挡单片时不同片数串联组件的  $I-V$ 、 $P-V$  特性曲线

Fig. 6  $I-V$  and  $P-V$  characteristics curves of serial modules with different pieces of cell as one piece is shaded

## 4 结 论

本文建立了适用于分析光伏电池部分被遮光问题的数学仿真模型,找出适用于模拟空间太阳能电池的相关参数,并利用户外自然光强下实测实验验证了模型的正确性。运用此模型模拟分析了单片空间太阳能电池在不同反向偏压下的输出特性和串联组件

在局部阴影遮挡情况下的  $I-V$ 、 $P-V$  特性及输出能力,得出如下结论:

- 1) 单片电池被完全遮挡时,随着电池两端反向偏压的增大,输出电流由慢到快增大;当到达雪崩电压后,输出电流急剧增大,电池可能发生雪崩击穿。
- 2) 整个串联组件随着光强的降低,开路电压缓



慢降低,但短路电流和最大输出功率均下降很快;串联组件从无阴影遮挡到40%阴影遮挡,开路电压、短路电流、最大输出功率分别下降了3.1%,39.5%和40%。

3) 串联组件输出功率随单片空间太阳能电池遮挡比例的增大迅速下降;从遮挡1/5片,2/5片到整片被阴影遮挡,串联组件相应最大输出功率分别下降7.36%,25.81%与97.94%。随着输出功率的降低,最大输出功率点电压逐渐右移增大。

4) 当串联组件中有单片电池被阴影完全遮挡,最大输出功率损失超过90%。组件串联的电池片数越多,被遮挡的电池越容易击穿损坏。

### 参 考 文 献

- Zhang Zhen, Shen Hui, Zhu Jiabin *et al.*. Experimental study on solar cell PV module with partial shading [C]. The Tenth National Photovoltaic Conference, 2008, 964~971  
张臻,沈辉,朱家劲等. 太阳能电池组件阴影遮挡问题实验研究[C]. 第十届中国太阳能光伏会议, 2008, 964~971
- Liu Bangyin, Duan Shanxu, Kang Yong. Modeling and analysis of characteristics of PV module with partial shading [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2008, **29**(2): 188~192  
刘邦银,段善旭,康勇. 局部阴影条件下光伏模组特性的建模与分析[J]. 太阳能学报, 2008, **29**(2): 188~192
- Chen Ruliang, Cui Yan, Li Dayong *et al.*. Study on simulation model of PV module under non-uniform insolation [J]. *J. System Simulation*, 2008, **20**(7): 1681~1686  
陈如亮,崔岩,李大勇等. 光照不均匀情况下光伏组件仿真模型的研究[J]. 系统仿真学报, 2008, **20**(7): 1681~1686
- Volker Quaschnig, Rolf Hanitsch. Numerical simulation of current-voltage characteristic of photovoltaic systems with shaded solar cells[J]. *Solar Energy*, 1996, **56**(6): 513~520
- Yun Zhigang, Yang Hong, Li Wenzhi. The relationship between shaded solar cells of P-V module and I-V curve characteristics [C]. The Eighth National Photovoltaic Conference, 2004, 356~359  
云志刚,杨宏,李文滋. 光伏组件中电池遮挡与I-V曲线特性变化关系[C]. 第八届全国光伏会议, 2004, 356~359
- Liu Hong. The theoretical model and experiments of amorphous silicon solar cells under shadow condition[C]. China Solar Energy Society Annual Conference, 2003, 366~369  
刘宏. 非晶硅太阳能电池遮挡性能的理论模型与测试实验[C]. 中国太阳能学会学术年会论文集, 2003, 366~369
- Achim Woyte, Johan Nijs, Ronnie Belmans. Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: literature review and field test results[J]. *Solar Energy*, 2003, **74**(3): 217~233
- Li Dayong, Chen Ruliang, Cui Yan *et al.*. A research of hot spot on P-V module with Pspice [J]. *J. Harbin Institute of Technology*, 2006, **38**(11): 1888~1897  
李大勇,陈如亮,崔岩等. 基于Pspice的光伏组件热斑现象仿真[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, **38**(11): 1888~1897
- Cui Yan, Liu Sumei. Solutions of hot spot problem based on PSpice simulation [C]. System Simulation and Application of Academic Exchange, 2006, 1888~1897  
崔岩,刘素梅. 基于Pspice的热斑现象解决方案[C]. 系统仿真及其应用学术交流, 2006, 1888~1897
- Zhai Caiteng, Cheng Xiaofang, Ding Jinlei *et al.*. Characteristics of partially shadowed serial P-V module output [J]. *J. University of Science and Technology of China*, 2009, **39**(4): 398~402  
翟载腾,程晓舫,丁金磊等. 被部分遮挡的串联光伏组件输出特性[J]. 中国科学技术大学学报, 2009, **39**(4): 398~402
- M. C. Alonso-Garcia, J. M. Ruiz, F. Chenlo. Experimental study of mismatch and shading effects in the I-V characteristic of a photovoltaic module [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2006, **90**(3): 329~340
- M. Drif, P. J. Perez, J. Aguilera *et al.*. A new estimation method of irradiance on a partially shaded P-V generator in grid-connected photovoltaic systems [J]. *Renewable Energy*, 2008, **33**(9): 2048~2056
- Engin Karatepe, Mutlu Boztepe, Metin Colak. Development of a suitable model for characterizing photovoltaic arrays with shaded solar cells[J]. *Solar Energy*, 2007, **81**(8): 977~992
- Xiang Ming, Li Ming, Wang Liuling *et al.*. Investigation of performance on trough concentrating solar photovoltaic/thermal system based on super cells [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 482~489  
项明,李明,王六玲等. 空间太阳能电池槽式聚光热电联供系统特性分析[J]. 光学学报, 2009, **29**(2): 482~489
- Wang Yunfeng, Li Ming, Lin Wenxian *et al.*. The performance analysis on solar cell modules of flat-plate and trough concentrating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2287~2292  
王云峰,李明,林文贤等. 平板式与槽式聚光太阳能电池组件性能分析[J]. 光学学报, 2009, **29**(8): 2287~2292