DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.5.121 **中图分类号**：TM206 **文献标志码**：A

光伏组件表面积污时雷击接闪特性及其影响因素研究

周歧斌[1,2]，邓 寅[1]，边晓燕[1]，张 耀[1]
(1.上海电力大学电气工程学院，上海 200090；2.上海大学机电工程与自动化学院，上海 200444)

摘要：光伏发电作为1种清洁无污染的可再生能源，在世界范围内得以大力开发和利用，但其长期暴露于空旷区域，易遭受雷击威胁。现有的相关光伏组件雷击接闪研究均基于表面无积污情况，并未考虑表面积污对雷击接闪特性的影响。针对目前光伏组件表面积污时雷击接闪特性研究中存在的不足，通过建立适用于雷击的光伏组件积污简化模型，并对该模型积污与未积污时的电场强度与电荷密度进行仿真计算，得到与未积污组件相比，积污组件的积污边首末端电场强度分别提高了41.1%和33.8%。同时，在高压实验室中搭建表面积污的光伏组件雷击棒-板模型，展开长间隙放电试验，得到积污组件更易遭受雷击的结果，验证了仿真模型的准确性。最后讨论了光伏组件的安装角度对表面积污时雷击接闪特性的影响，研究结果表明：在任意角度情况下，积污边雷击概率及电场强度均大于未积污边；与安装角度为8°时相比，光伏组件安装角度为45°时积污边末端的电场强度下降了24.8%，即雷击接闪概率下降。

关键词：光伏组件；积污附着；长间隙放电试验；雷击；数值仿真

Research on Lightning Receiving Characteristics of Photovoltaic Module with Fouling Surface and Corresponding Influencing Factors

ZHOU Qibin[1,2], DENG Yin[1], BIAN Xiaoyan[1], ZHANG Yao[1]
(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: As a kind of clean, pollution-free and renewable energy, photovoltaic (PV) power has been vigorously developed and utilized worldwide. However, PV power generation systems are likely to suffer from lightning strikes due to long-term exposure to open areas. Since the existing researches on the lightning receiving of PV modules are all based on the condition that the module surfaces are free of fouling, they do not consider the effect of fouling surface on the lightning receiving characteristics. Aimed at the deficiency in the existing researches on the lightning receiving characteristics of PV modules with fouling surface, a simplified fouling model of PV module suitable for lightning strike is established. Then, through the simulation calculation of electric field intensity and charge density of the PV module with and without fouling, it is found that compared with those of the module without fouling, the electric field intensities at the head and end of the fouled side of the PV module increase by 41.1% and 33.8%, respectively. Meanwhile, a lightning strike rod-plate model of PV module with fouling surface was built in a high-voltage laboratory to carry out long-gap discharge tests, and it was found that the PV modules with fouling surface were more susceptible to lightning strike, thus verifying the accuracy of the simulation model. Moreover, the influence of the installation angle of PV modules on the lightning receiving characteristics in the case of fouling surface was also discussed. Results show that at any angle, the lightning strike probability and electric field intensity of the fouled side were higher than those of the unfouled side. Compared with that in the case of an installation angle of 8°, the electric field intensity at the end of the fouled side decreased by 24.8% when the installation angle

收稿日期：2022-08-02；**修回日期**：2022-09-18；**录用日期**：2022-09-26；**网络首发日期**：2022-12-08

was 45°, indicating a deceased probability of lightning strike.

Keywords: Photovoltaic (PV) module; fouling adhesion; long-gap discharge test; lightning strike; numerical simulation

太阳能作为 1 种清洁、安全、可持续和易于获取的能源，在可再生能源领域受到越来越多的关注，为实现清洁生产和可持续发展目标提供了良好的机遇[1]。太阳能可以通过光伏 PV(photovoltaic)发电的形式由太阳能转化为电能，根据所需发电规模将光伏电池片通过串并联组合在一起形成光伏阵列[2]。光伏阵列由于其较大的表面积和安装位置在开阔区域的特点，容易受到直接或间接大气放电的影响，可能导致设备损坏和故障并中断其正常运行[3]。尽管光伏系统面临着雷击损坏的风险，但许多光伏电站并没有防雷保护，设计人员通常低估或忽视了防雷保护的必要性[4]。

目前，国内外对光伏组件的防雷保护措施研究已经取得了一定的进展，但缺少针对光伏组件表面积污时的雷击特性影响因素研究。由于大多数光伏电池板/阵列安装在屋顶或室外，被闪电直接或间接击中的概率非常高，故可以将光伏组件遭受雷电影响分为直击雷和感应雷 2 种[5-6]。在直击雷方面，Belik [7]通过热成像仪显示出雷击区域的温度，且证明了光伏组件的功能及生命周期受到了温度的影响；Ahmad 和 Jiang 等[8-9]通过向 PV 电池板施加高强度雷电脉冲电流，在实验室中模拟了对 PV 电池板的直接雷击，结果表明 PV 面板的效率降低，且面板可能会因注入高闪电脉冲电压/电流而受到物理损坏。在感应雷方面，Zhang[10]等认为在雷击时，光伏系统会产生感应过电压，这种过电压会损坏连接到直流电缆上的逆变器；董毅等[11]通过建立光伏阵列回路模型，利用电磁感应定律计算光伏阵列回路的感应过电压，研究表明，当光伏阵列周围发生雷击时，阵列上的感应短路过电流可达到 100 A，极易损坏光伏回路设备和太阳能电池板。但目前研究的仿真大多针对整体光伏系统，实验多研究光伏组件处于正常状态下的情况，并未考虑光伏组件在日常工作时极易产生积污现象[12]。

本文根据实际光伏组件积污情况，建立积污状态下光伏组件在空气域中的模型，并基于雷电击距及空气中棒间隙击穿电压公式构建棒−板电极模型，计算光伏组件在表面积污状态下的电场强度和电荷量分布，说明表面积污对雷击概率的影响。同时，在高电压实验室中搭建光伏组件的棒−板电极模型，展开长间隙放电试验，验证模型的准确性。在此基础上研究光伏组件表面积污时其余影响雷击接闪特性的因素，从而为光伏组件的防雷保护提供可靠参考。

1 光伏表面积污电场数学模型

1.1 光伏组件积污简化模型

光伏组件结构如图 1 所示，第 1 层为光伏玻璃，第 2 层和第 4 层为 EVA 胶膜，第 3 层为光伏电池片，底层为背板，外部由金属边框固定，其金属边框材质通常为铝材或铝合金材料。光伏组件各材料参数见表 1。

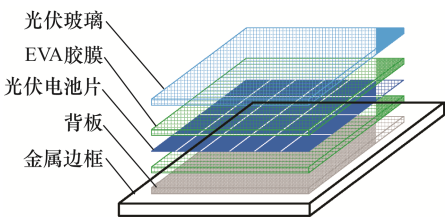


图 1 光伏组件结构

Fig. 1 Structure of PV module

表 1 光伏组件材料参数

Tab. 1 Material parameters of PV module

材料	相对介电常数	电导率/(S/m)
铝边框	1.0	3.774×10^{7}
光伏玻璃	4.2	1.000×10^{-14}
晶硅电池片	11.7	1.000×10^{-12}

当光伏组件长时间暴露在大气环境中时，其表面积污的概率极高，图 2 为光伏组件积污简化模型。如图 2(a)所示，光伏组件由于一定的铺设角度，组件下端边框处总有大量积存灰尘，这是由于在降雨时雨滴和水流的共同作用下，组件表面灰水混合物沿组件玻璃表面向下流动并积存。因组件边框比

玻璃面高出 2~3 mm，总有部分积水无法越过边框，形成不同面积的“堰塞湖”现象，故积污多附着在光伏组件外边框与内部电池片交界位置。为了保证模型的一般性，本文采用薄长方体状的污秽模型，并将其附着在金属边框与太阳能电池片交界位置，如图 2(b)所示，定义光伏电池片长边为 a_1 和 a_2，短边为 b_1 和 b_2。在大气中存在不同类型的粒子，分别为煤烟粒子、灰尘粒子、水溶粒子、海溶粒子等，在多数环境下灰尘粒子占比较大。在不同类型粒子作用下污秽的介电特性不同[13]，从而导致光伏组件表面积污处局部电场强度改变，以致引雷能力的不同，可表示为

$$\varepsilon_{\mathrm{r}} = n_{\mathrm{r}}^2 \tag{1}$$

$$n_{\mathrm{r}} = \sum_{1}^{i} \alpha_i n_{\mathrm{r}i} \tag{2}$$

式中：ε_{r} 为粒子介电常数；n_{r} 为粒子的折射指数的实部[14]；α_i 为积污中不同粒子所占比例。

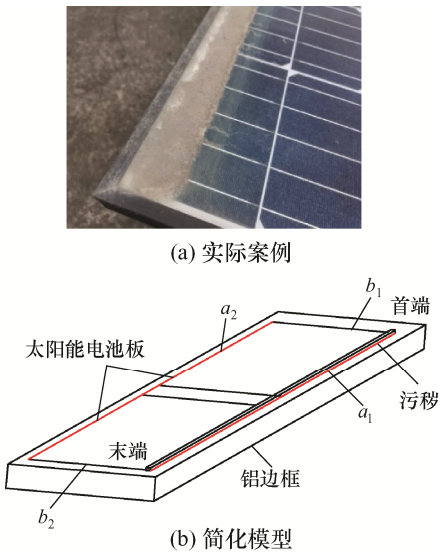


图 2　光伏组件积污简化模型

Fig. 2 Simplified model of PV module with fouling surface

通过现场调查多块表面积污的光伏组件，其污层厚度多为 1~2 mm。本文根据实际情况对尺寸为 238.5 cm×126.5 cm×3.8 cm 的光伏板进行仿真及试验研究。

1.2　下行先导相关参数模型

自然界的雷云对地放电中，下行负地闪约占地闪总数的 90%。云层中向下发展的负极性下行先导与地面物体感应的迎面先导连接，视为产生 1 次雷击。光伏组件上场强越强的位置越容易激发上行先导，继而越容易与下行先导接触实现雷电回击。故本文采用下行先导简化雷电模型，忽略先导分支。用棒状电极等效下行先导头部，电极电压取空气中棒间隙的雷电冲击 50%击穿电压，其负极性和正极性的计算公式[15]分别为

$$U_{\mathrm{n},50\%} = 110 + 6d \tag{3}$$

$$U_{\mathrm{p},50\%} = 75 + 5.6d \tag{4}$$

式中：$U_{\mathrm{n},50\%}$ 和 $U_{\mathrm{p},50\%}$ 为雷电冲击 50%击穿电压，kV；d 为极间距离，cm。d 的取值与下行先导的位置密切相关。

随着下行先导逐渐向下发展，当其与光伏组件上感生的上行先导的距离小于某个阈值时(即 2 个先导之间的电场强度达到一定数值)，2 个先导通道瞬时连通，该阈值称为雷电击距，计算公式[16]为

$$r_{\mathrm{c}} = KI_{\mathrm{P}}^{b} \tag{5}$$

式中：r_{c} 为雷电击距，m；I_{P} 为雷电流幅值，kA；K 和 b 为考虑到杆塔、屏蔽线和地平面不同雷电击距的系数。

针对不同高度的建筑物或输电线路，国内外学者对雷电击距的 3 个重要参数进行了大量的研究[17-22]，见表 2，并得到雷电击距的修正公式为

$$r_{\mathrm{g}} = K_{\mathrm{g}} r_{\mathrm{c}} \tag{6}$$

式中：r_{g} 为修正后的雷电击距；K_{g} 为 r_{c} 的修正因子。

表 2　不同文献中的雷电击距参数

Tab. 2 Striking distance parameters in different references

参数来源	K	b	K_{g}
文献[17]	3.30	0.78	1
文献[18]	27.00	0.32	1
文献[19]	9.40	0.67	1
文献[20]	10.00	0.65	1
文献[21]	8.00	0.65	1
文献[22]	8.00	0.65	1

在有限元软件中建立雷电作用下光伏组件的静电场模型，如图 3 所示。下行先导相当于 1 个棒状电极，r_{g} 为杆电极与光伏组件之间的相对空间距

离。光伏组件由内部的太阳能电池和外部的金属框架组成，金属框架的材料为铝，太阳能电池的材料为硅，并将金属框架设为 0 电位作为接地。通过评估光伏组件上静电场强的分布，可以确定不同光伏组件的雷击位置，场强最大的位置受到雷击的可能性最大。

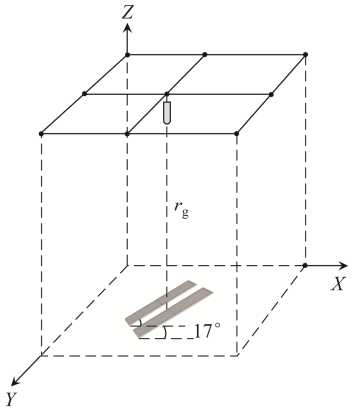


图 3 静电场作用下光伏组件的仿真模型

Fig. 3 Simulation model of PV module under electrostatic interaction

本文根据 IEEE Std 998-2012[22]所给出的雷电击距数据，取 K=8，b=0.65，K_g=1，且 I_P=30 kA[23]，则可计算得雷电击距 r_g=73 m，$U_{n,50\%}$=43.9 MV。

2 光伏组件表面积污对接闪特性影响的仿真分析及试验验证

2.1 表面积污与未积污仿真分析

基于第 1 节模型，首先在有限元仿真软件中对比分析光伏组件在有积污和无积污下的情况，并得到电场强度和电荷量的定性及定量特征，说明有无积污对雷击概率的影响。在仿真中，假设铝边框底部接地，在棒电极底部施加 43.9 MV 电压并建立足够大的空气域，取 2 块光伏组件相隔 1 m 且与地面夹角为 17°。表面积污采用简化模型，并设置为 1 mm。

图 4 为本文所提模型的表面电荷量密度。可知，在积污时表面最大电荷量密度为 35.68 μC/m^2；当此处未积污时，其表面电荷量为 25.10 μC/m^2。相较于未积污情况，积污处的表面电荷量密度提高了 42.1%。在雷电下行先导头部形成的静电场中，空间电荷积聚在光伏组件表面形成电场。由图 4 可知，金属框架的上边缘积污情况比未积污情况更容易聚集电荷，并通过电场强度增强的方式使雷击风险上升。

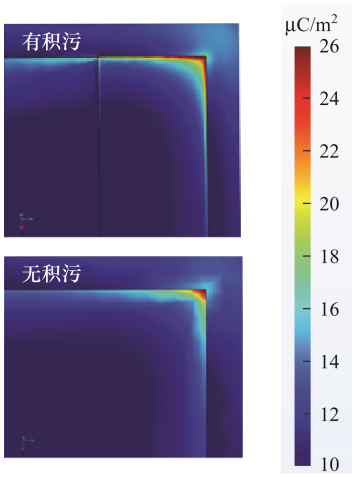
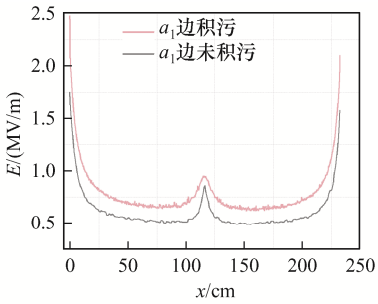


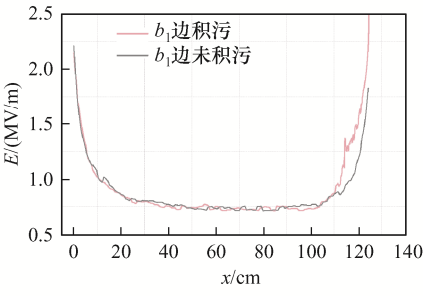
图 4 表面电荷量密度

Fig. 4 Surface charge density

通过数值计算，有积污和无积污光伏组件中 a_1 边及 b_1 边的表面电场强度分布如图 5 所示。可以看出，长边和短边的电场强度最大值均位于两端。a_1 边有积污和无积污时首端表面电场强度分别



(a)a_1边有、无积污



(b)b_1边有、无积污

图 5 表面电场强度

Fig. 5 Surface electric field intensity

为 2.47 MV/m 和 1.75 MV/m，有积污时相对于无积污时的电场强度提高了 41.1%；a_1 边有积污和无积污时末端表面电场强度分别为 2.10 MV/m 和 1.57 MV/m，有积污时相对于无积污时的电场强度提高了 33.8%。b_1 边在 0~110 cm 区间内由于积污未覆盖，有积污和无积污时电场强度基本一致；但 b_1 边在 110.8 cm 处开始受到积污的影响电场强度出现较大变化。

由于积污附着区域的电场强度大、电导率高，因此在放电过程中，光伏组件表面积污处积聚了大量带电粒子，随着带电粒子数量的增加，积污处的电场强度随之升高。当积污处电场强度达到 0.216 MV/m 时，达到上行先导的起始阈值[24]，当电场强度达到 0.500 MV/m 时，达到上行先导的连接阈值[25]，故积污附着区域遭受雷击的概率增加。随着下行先导的进一步发展，积污附着区域周围背景电场逐渐增强，在背景电场的作用下，越来越多的正电荷向积污附着区域运动，因此气隙中会分布有大量的负电荷，降低积污区域周围的空间电位。随着积污附着区域的空间电位下降，下行先导头部与该区域之间的平均电场强度升高，导致积污附着区域遭受雷击的概率增加。

2.2 试验验证

2.2.1 试验样品

为了比较光伏组件表面积污与未积污状态下的雷击接闪特性，验证仿真的准确性。根据 2.1 节数值仿真中的模型，本次试验选择有框双玻光伏组件单元样品作为试验器材，定义 2 块 238.5 cm×126.5 cm 的未积污光伏组件单元为 A 组；定义相同大小但一块表面积污，另一块未积污的光伏组件单元为 B 组。图 6 给出了光伏组件单元分别处于积污与未积污状态时的具体情况。在同一环境下，对 A、B 2 组进行雷击接闪对比试验。



(a)积污状态　　(b)未积污状态

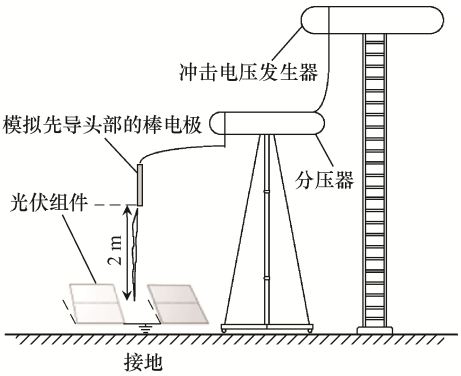
图 6　光伏组件试验样品

Fig. 6 Test sample of PV module

2.2.2 试验方法

为了模拟光伏组件在雷雨云下的雷击，在高压实验室搭建了实验平台。利用 SJTU-3000 型脉冲电压发生器对光伏组件进行长间隙放电[26]，模拟雷电下行导波场景下光伏组件的空间电势和电场分布。由于试验条件的限制，国内外实验室长间隙放电试验的距离均远小于实际雷电的击距，一般都在 1~2 m 的范围内。

试验平台原理如图 7(a)所示，将样品构建与地面呈 17°，与实际情况保持一致，同时保证金属边框良好接地。与 SJTU-3000 连接的杆电极位于光伏组件正上方，离光伏组件中心处 2 m，试验平台布局如图 7(b)所示。采用 SJTU-3000 在 1.2/50 μs 波形下施加负极性冲击电压 20 次，每次放电后，记录雷击附着点位置，最后分别统计有积污与无积污的光伏组件雷击附着情况。



(a) 试验平台示意



(b) 试验平台实物

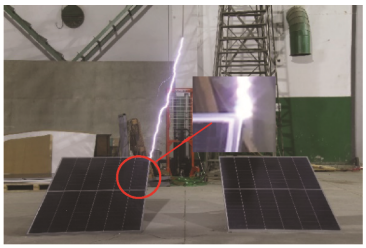
图 7　雷击接闪特性试验

Fig. 7 Test of lightning receiving characteristics

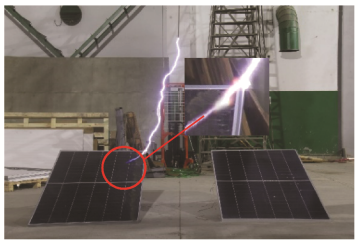
2.2.3 试验结果与分析

据统计，当棒状电极产出负极性雷时，A 组中左光伏板被雷击中 10 次，右光伏板被雷击中 10 次，

且均击中光伏组件金属边框处，如图 8(a)所示。B 组中左光伏板被雷击 16 次，右光伏板被雷击中 4 次。与 A 组相比，有积污的光伏板的雷击概率相对于未积污状态时提升了 30%，且击中积污组件时，有 1 次击中了光伏组件表面玻璃，如图 8(b)所示。结果表明，在负极性雷的作用下，表面积污的光伏组件更易被雷电击中，甚至危害到光伏组件表面玻璃。该试验结果与仿真结果基本吻合，验证了仿真的准确性。



(a)左右光伏板均无污秽



(b)左光伏板轻度积污，右光伏板无积污

图 8 光伏板雷击情况

Fig. 8 PV panels under lightning strike

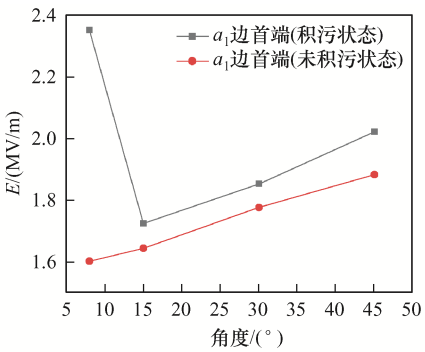
3 光伏组件表面积污时雷击接闪特性的影响因素

3.1 光伏组件角度

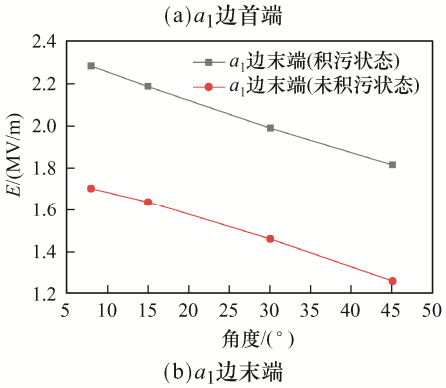
光伏组件的安装角度与安装地区的纬度及光伏电站全年发电量的最大化(经济效益最大化)等因素有关，目前国内外还未出现针对雷击概率和光伏组件安装角度平衡点的相关研究，故本文仅从学术角度考虑光伏组件表面积污时在不同角度下的表面电场强度及雷击概率情况。我国光伏电站的光伏组件安装角度多为 8°～49°，本节分别考虑光伏组件安装角度为 8°、15°、30°、45°时积污对雷击接闪特性的影响。

考虑到在一般情况下，角度越大越不容易产生积污现象，故假定安装角度为 8°时，a_1 边全部被积污覆盖，安装角度为 15°时，a_1 边 70%被积污覆盖，安装角度为 30°时，a_1 边 40%被积污覆盖，安装角度为 45°时，a_1 边 10%被积污覆盖。对上述假定情况进行仿真研究。

由于光伏阵列中组件安装角度的变化使得 a_1 边的首段和末端高度变化最明显，故对这 2 处在不同角度情况下进行仿真研究，结果如图 9 所示。图 9 给出了不同角度下 a_1 边首端和末端的电场强度在有、无积污时的变化趋势，可以看出，光伏组件 a_1 边积污且安装角度为 8°、15°、30°、45°时，首端电场强度分别为 2.38、1.72、1.85、2.02 MV/m。安装角度为 8°时，a_1 边全部被积污覆盖，电场强度较大；15°、30°、45°均为部分积污(即首端未附着积污)，且电场强度呈上升趋势。这是由于随着安装角度的增加，a_1 边首端与外电极之间的空间距离更加接近，二者之间的平均场强大于其他污秽附着区域，因此雷电击中 a_1 边的概率较其他区域更加明显。光伏组件 a_1 边积污且安装角度为 8°、15°、30°、45°时末端电场强度分别为 2.28、2.18、1.99、



(a)a_1边首端



(b)a_1边末端

图 9 a_1 边首末端电场强度

Fig. 9 Electric field intensity at head and end of side a_1

1.82 MV/m，呈下降趋势。a_1 边末端由于空间位置的下降导致二者之间的平均场强下降，雷击 a_1 边末端的概率随角度的增加而降低。同时，由图 9 可看出，在任何角度下光伏组件积污边的电场强度均大于其未积污状态。这是由于积污边相对于未积污状态下更容易聚集电荷，从而增强电场强度，提高雷击风险。

图 10 为光伏组件不同角度时，积污对雷击概率的影响。当安装角度为 8°时，a_1 边首端积污状态相对于未积污状态雷击概率增加 0.307，a_1 边末端积污状态相对于未积污状态雷击概率增加 0.292；当安装角度为 15°时，a_1 边首端积污状态相对于未积污状态雷击概率增加 0.012，a_1 边末端积污状态相对于未积污状态雷击概率增加 0.241；当安装角度为 30°时，a_1 边首端积污状态相对于未积污状态雷击概率增加 0.009，a_1 边末端积污状态相对于未积污状态雷击概率增加 0.147；当安装角度为 45°时，a_1 边首端积污状态相对于未积污状态雷击概率增加 0.006，a_1 边末端积污状态相对于未积污状态雷击概率增加 0.134。由于安装角度为 8°时为全积污，故 a_1 边首端积污状态的雷击概率大于未积污状态，在 15°、30°、45°情况下 a_1 边为部分积污，且由于重力、天气等因素影响，积污多附着于 a_1 末端位置，故在上述 3 种角度情况下，a_1 边首端的雷击概率变化不大。

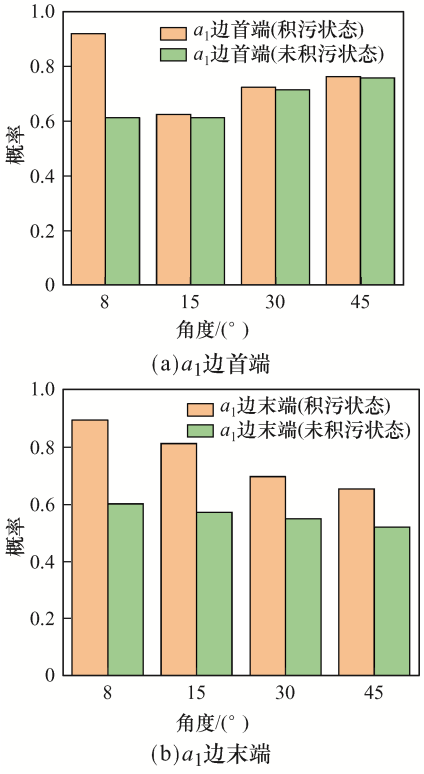


图 10　积污边的雷击概率

Fig. 10 Lightning strike probability of fouled side

4　结论

本文建立了简化的光伏组件积污模型，讨论了光伏组件表面是否积污对雷击情况的影响，并与试验结果进行对比分析，验证了模型的有效性。同时将该模型运用于光伏阵列的相关研究中，得出以下结论。

(1)本文根据实际工况下的积污光伏组件建立了带污秽的光伏组件雷击仿真模型，并通过仿真得到光伏组件在有积污情况下表面积聚的电荷量及电场强度大于无积污情况，与未积污组件相比积污组件的积污边首末端雷击概率分别提高了 41.1%和 33.8%。说明在放电过程中由于积污附着区域的电场强度大、电导率高，光伏组件积污表面积污处积聚了大量带电粒子，增加了该处的接闪概率。

(2)本文参照仿真模型，搭建试验平台，开展长间隙放电试验，利用高速相机拍摄放电路径，记录试验现象。试验结果表明光伏组件表面在有积污的情况下雷击概率更高。试验结果与仿真计算结果一致，证明了模型的有效性。

(3)基于仿真模型，本文讨论了光伏阵列中组件表面积污时雷击接闪特性的影响因素。仿真结果表明，不论在何种角度情况下，积污边雷击概率及电场强度均大于未积污边。与安装角度为 8°时相比，光伏组件安装角度为 45°时积污边末端的电场强度下降了 24.8%，即雷击接闪概率下降。

参考文献：

[1] 任晓琳，杨奕，高龙，等. 基于 IBA-KELM 模型的 TCT 光伏阵列故障诊断研究[J]. 电源学报，2023，21(5): 67-74.

Ren Xiaolin, Yang Yi, Gao Long, et al. Research on fault diagnosis of TCT photovoltaic array based on IBA-KELM model [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(5): 67-74. (in Chinese)

[2] 徐金. 阴影遮挡下光伏电池 MPPT 仿真与实验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
Xu Jin. Simulation and experimental research on MPPT of photovoltaic cell under shadow shading [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021. (in Chinese)

[3] Fallah N, Gomes C, Ab Kadir M Z A, et al. Lightning protection techniques for roof-top PV systems [C]// 2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO). Langkawi, 2013: 417-421.

[4] Ittarat S, Hiranvarodom S, Plangklang B. A computer program for evaluating the risk of lightning impact and for designing the installation of lightning rod protection for photovoltaic system [J]. Energy Procedia, 2013, 34: 318-325.

[5] Sun Qiuqin, Zhong Xiao, Liu Jiayi, et al. Three-dimensional modeling on lightning induced overvoltage for photovoltaic arrays installed on mountain [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 288: 125084.

[6] Dechthummarong C, Thepa S, Chenvidhya D, et al. Lightning impulse test of field-aged PV modules and simulation partial discharge within MATLAB [C]// 2012 9th International Conference on Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. Phetchaburi, Thailand, 2012: 1-4.

[7] Belik M. PV panels under lightning conditions [C]// Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Brno-Bystrc, Czech Republic, 2014: 367-370.

[8] Ahmad N I, Ab-Kadir M Z A, Izadi M, et al. On the performance of a polycrystalline PV panel under different impulse voltages and temperatures [C]// 2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP). Estoril, Portugal, 2016: 1-6.

[9] Jiang Taosha, Grzybowski S. Influence of lightning impulse voltages on power output characteristics of photovoltaic modules [C]// 2014 ICHVE International Conference on High Voltage Engineering and Application. Poznan, Poland, 2014: 1-4.

[10] Zhang Yang, Chen Hongcai, Du Yaping. Considerations of photovoltaic system structure design for effective lightning protection [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 62(4): 1333-1341.

[11] 董毅, 张子建, 孟庆大, 等. 光伏阵列回路雷电感应过电压计算[J]. 电瓷避雷器, 2017(5): 145-148, 154.
Dong Yi, Zhang Zijian, Meng Qingda, et al. Calculation of lightning induced overvoltage in PV arrays [J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(5): 145-148, 154. (in Chinese)

[12] 吕玉坤, 周庆文, 魏子安, 等. 积灰对光伏组件性能影响的试验研究及数值模拟[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 175-182.
Lü Yukun, Zhou Qingwen, Wei Zian, et al. Experimental study and numerical simulation of influence of ash deposition on performance of photovoltaic modules [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 175-182. (in Chinese)

[13] 张锋. 大气气溶胶介电常数的研究[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(8): 3547-3549, 3760.
Zhang Feng. On atmospheric aerosol dielectric constant [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(8): 3547-3549, 3760. (in Chinese)

[14] 于潇萌. 不同风场条件下非球形粒子扩散变化特征及衰减特性的模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020.
Yu Xiaomeng. A study on the diffusion and extinction of non-spherical particles under different wind condition [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2020. (in Chinese)

[15] 赵智大. 高电压技术[M]. 3 版. 北京: 中国电力出版社, 2013: 37-38.
Zhao Zhida. High Voltage Technique [M]. 3rd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2013: 37-38. (in Chinese)

[16] Lightning protection system components (LPSC)—Part 2: requirements for conductors and earth electrodes: IEC 62561-2:2018 [S/OL]. [2018-02-25]. https://webstore.iec.ch/publication/29398.

[17] Golde R H. The frequency of occurrence and the distribution of lightning flashes to transmission lines [J].

Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1945, 64(12): 902-910.

[18] Wagner C F, McCann G D, MacLane G L. Shielding of transmission lines [J]. Electrical Engineering, 1941, 60(6): 313-328.

[19] Whitehead E R. CIGRE Survey of the Lightning Performance of Extra High-voltage Transmission Lines [M]. France: CIGRE, 1974: 63-89.

[20] Love E R. Improvement in lightning stroke modelling and applications to design of EHV and UHV transmission lines [D]. Colorado: University of Colorado, 1973.

[21] Gonen T. Electrical Power Transmission System Engineering [M]. Apple Academic Press, 2014.

[22] IEEE guide for direct lightning stroke shielding of substations: IEEE Std 998-2012 [S/OL]. [2013-04-30]. https://ieeexplore.ieee.org/document/6656813.

[23] Gamerota W R, Elismé J O, Uman M A, et al. Current waveforms for lightning simulation [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2012, 54(4): 880-888.

[24] Wang D, Takagi N, Watanabe T, et al. Observed characteristics of upward leaders that are initiated from a windmill and its lightning protection tower [J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(2): L02803.

[25] Becerra M, Cooray V. On the velocity of positive connecting leaders associated with negative downward lightning leaders [J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(2): L02801.

[26] Bian Xiaoyan, Zhang Yao, Zhou Qibin, et al. Numerical and experimental study of lightning stroke to BIPV modules [J]. Energies, 2021, 14(3): 748.



周歧斌

作者简介：

周歧斌(1977—　)，男，博士，副教授。研究方向：新能源系统的雷电与过电压防护，电气设备的绝缘配合，电磁兼容。E-mail：zhouqibin@shu.edu.cn。

邓寅(1998—　)，男，通信作者，硕士研究生。研究方向：电气设备防雷保护。E-mail：478552041@qq.com。

边晓燕(1976—　)，女，博士，教授。研究方向：电力电子化电力系统稳定分析与控制，新能源并网与消纳，主动配电网与微电网规划运行与控制。E-mail：kuliz@163.com。

张耀(1996—　)，男，硕士。研究方向：电力系统雷电接闪与防护。E-mail：zhangyao8253@163.com。

(责任编辑：郭凯凯)