

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.08.003

光伏面板积灰及除尘清洁技术研究综述*

鲍官军¹, 张林威¹, 蔡世波¹,
蒋建东¹, 胥芳¹, 贾桂红²

- (1. 浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310032;
2. 华北电力大学 机械工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 针对光伏面板积灰、影响因素、积灰对面板转换效率的降低效应等问题,综述分析了国内外相关研究成果,总结提出了今后研究的主要方向。介绍了灰尘的来源及组成,着重综述了国内外关于光伏面板积灰形成过程及积灰引起的面板输出效率降低或太阳辐射透过率降低等研究文献,分析了面板倾角、风速风向、灰尘性质、环境湿度等主要因素对光伏面板积灰的形成和面板效率/太阳辐射透过率的影响。总结了基于灰尘性质、降尘、降雨等因素建立的积灰模型及其对面板效率的影响模型。介绍了目前常用的光伏面板清洁技术:电帘除尘和机械除尘。最后,总结了目前研究中存在的不足,并指出了今后应进一步加强积灰实验完整性、灰尘特性、积灰沉积机理、面板除尘清洁技术等方向的研究。

关键词: 光伏面板; 积灰模型; 除尘技术

中图分类号: TK513.3; TM925.31 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)08-0909-05

Review on dust depositing on PV module and cleaning techniques

BAO Guan-jun¹, ZHANG Lin-wei¹, CAI Shi-bo¹,
JIANG Jian-dong¹, XU Fang¹, JIA Gui-hong²

- (1. Key Laboratory of E&M, Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China;
2. College of Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Aiming at the problems of PV module dust depositing, affecting factors, the reducing effect on conversion efficiency, the related researches were overviewed and the main researching aspects in the future were proposed. The source and components of dust were introduced. Research documents about the PV module dust depositing process and the PV efficiency decline or solar radiation transmittance decline caused by dust depositing were emphasized and reviewed. The main factors of module angle, wind speed and orientation, dust property, environment humidity, which will influence the dust depositing, PV efficiency and solar radiation transmittance, were analyzed. The dust depositing model and its impacting model on PV efficiency from the perspective of dust property, dust falling and raining were summarized. The commonly used PV module cleaning techniques, that is electrode screen dust mitigation and mechanical dust cleaning, were introduced. Finally, the shortages of present research were abstracted and the main research aspects in the future, such as the integrality of the dust depositing experiment, dust characteristics, dust depositing mechanism and PV panel cleaning techniques, were pointed out.

Key words: PV module; dust depositing model; cleaning technique

收稿日期: 2013-01-22

基金项目: 国家高技术研究发展计划("863"计划)资助项目(SS2013AA050405); 国家国际科技合作资助项目(S2013ZR0609); 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室(浙江工业大学)开放基金资助项目(2011EM001); 浙江省教育厅资助项目(Y201225592)

作者简介: 鲍官军(1979-), 男, 安徽寿县人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事机器人技术及控制、光伏微网与控制等方面的研究. E-mail: gjbao@zjut.edu.cn

0 引言

能源和环境问题已经成为当前全球关注的焦点之一。与传统石化能源相比,太阳能具有取之不尽、用之不竭、清洁无污染等优点,已经成为新能源的主要形式之一。太阳能发电的两种主要形式是光伏发电和集热发电。在光伏发电系统研究中,除面板材料及转换效率、功率预测、逆变效率、最大功率点跟踪(MPPT)、离并网控制、孤岛保护、电能质量管理等关键技术之外,对于长期运行的光伏系统而言,面板积灰及其影响也是一个不容忽视的问题。光伏面板积灰对太阳辐射具有反射、散射和吸收作用,即降低太阳辐射的透过率,导致光伏面板接收到的太阳辐射量减少、输出功率下降,并随着积灰厚度的增大而更为明显。另外,由于灰尘吸收太阳辐射升温 and 腐蚀性化学成分的存在,积灰还会对光伏面板形成一定程度的保温和腐蚀作用,加剧降低其光电转换效率。

本研究主要综述分析光伏面板积灰的影响因素、积灰机理和面板除尘清洁等方面的研究工作,并对今后的研究方向提出看法和建议。

1 灰尘来源及组成

光伏面板积灰主要来源于大气灰尘。大气灰尘是一种悬浮在大气中的颗粒物,来源于大气沉降、城市交通、建筑、工业、表土等所产生的地表颗粒,包括自然来源和人为来源。自然来源主要是土壤、沙尘和岩石,风化作用使其分裂成细小的颗粒并在空气动力系统作用下被输送到大气中。人为来源主要指工业扬尘、建筑扬尘、交通扬尘等。另外,生物质也是积灰的主要来源之一,如鸟类粪便、花粉等。

灰尘颗粒直径一般在百分之一毫米到几百分之一毫米之间,为人眼所不可见。就其化学成份而言,大气灰尘主要是氧化物,如 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 Na_2O 、 CaO 、 MgO 、 TiO_2 、 K_2O 等,其中 SiO_2 、 Al_2O_3 含量最高,分别为68%~76%和10%~15%^[1]。

另外,大气灰尘的来源和组成因所处的地理位置、气候条件、季节和人类活动等不同而差异较大,如沙漠地区的大气灰尘主要来源于沙土、红土和沙粒^[2],而城镇环境中的大气灰尘则含有大量的来自于建筑材料的石灰石^[3]、汽车尾气排出的碳化物以及织物纤维^[4]等。

2 积灰的影响因素

大气灰尘在光伏面板上的沉积、附着和固结受到多种因素的影响,如面板倾角、风速风向、灰尘性质、

环境湿度等等。

2.1 面板角度的影响

Goossens等^[5]对沙漠地区光伏面板灰尘积累问题进行研究时发现灰尘在处于水平状态的面板表面的积累效应最大。Salim等^[6]在沙特阿拉伯地区进行24.6°固定角度的光伏面板积灰效应对比研究,8个月后,从未清理的面板输出功率比每天清理的面板降低了32%。然而,Hottel和Woertz^[7]在多雨雪的美国波士顿地区进行为期3个月的倾角为30°的光伏面板积灰对比实验表明积灰对面板性能的影响仅仅为4.7%。Garg^[8]在印度Roorkee地区进行的实验结果则显示:由于积灰的遮挡作用,45°倾角的玻璃板在10天之后的平均透过率将会下降8%。

上述研究均针对固定的面板角度,并不能反映出面板倾角变化对灰尘积累的影响。Sayigh等^[9]进行了0°~60°范围内间隔15°设置的5组光伏面板积灰效应研究,结果显示38天之后的太阳辐射透过率分别降低了64%、48%、38%、30%和17%,表明光伏面板倾角越大,则灰尘越难以在其表面上滞留和附着。这一结论同样适用于多雨气候地区,只是积灰效应较弱,对面板输出功率影响也相对较小,如Dietz^[10]进行的0°~50°范围面板倾角实验显示仅有5%的输出功率下降,同样,美国加利福尼亚Palo Alto地区的实验结果显示光伏面板上的积灰仅导致2%的电流下降^[11]。Elminir等^[12]进行了倾角为0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°的面板积灰实验,实验结果表明:灰尘积累密度随面板角度增大而逐渐降低,由15.84 g/m²降至4.48 g/m²,太阳辐射透过率下降幅度也是逐渐降低,由52.54%递减至12.38%。陈菊芳,沈辉等^[13]对广州地区3个不同区域的灰尘情况进行观测分析,分析结果表明:灰尘主要降低玻璃对450 nm~880 nm波长的太阳辐射的透过率,1~3个月内透过率降低1.3%~4.0%。Cano^[14]于2011年1月~3月期间在美国亚利桑那州进行倾角分别为0°、5°、10°、15°、20°、23°、30°、33°和40°光伏面板发电实验,实验结果表明:0°倾角的光伏面板因积灰而导致2.02%的损失,23°和33°倾角情况下分别损失1.05%和0.96%。

Qasem等^[15]从光伏面板积灰的均一性角度进行了实验研究,实验结果表明:30°倾角的面板非一致性为4.4%,而90°倾角的面板仅为0.2%。

2.2 风的影响

上述的研究中几乎没有涉及风速对于光伏面板积尘的影响,事实上,即便是很小的风速也会对水平平面上的积灰沉积结构产生显著的影响^[16]。Goossens等在Negev沙漠的长期观测数据显示,往往在最高风

速的时候才会形成最大程度的灰尘沉积;另外,风洞内光伏面板性能试验结果表明:因风速对灰尘沉积结构的特殊影响,高风速时形成的积灰会具有较高的光线透过率^[17]。当然,较大的风速也会对面板表面的非粘结性积灰具有一定的清除作用^[18-19]。

Goossens^[20]还研究了不同时段、不同风向对于积灰过程的影响,指出:吹向面板的风会提高积灰效果,而吹向面板背面的风基本不会影响积灰过程。

2.3 灰尘性质的影响

光伏面板积灰效应具有显著的区域敏感性,即不同区域的气候条件、环境因素等决定了其灰尘具有不同的性质和特点。

Neil等在研究沙漠地区的层级积沙对太阳辐射的遮挡作用时,采用颗粒直径为 (170 ± 20) mm的 SiO_2 沙粒在倾斜玻璃面板上进行堆积和承沙实验。Kaldellis等^[21]认为灰尘中常见的颗粒来源于红土、石灰石和灰烬。Sulaiman等^[22]则使用干土和滑石粉模拟大气灰尘进行光伏面板积尘实验。Haeblerlin和Graf等^[23]做了有关混合轻工业区、林区和农场的光伏面板特性测试,测试结果显示由于生物质(鸟粪、花粉等)的沉积作用使得光伏系统的能量输出减少了8%~10%。

Hegazy等^[24]对暴露在埃及的某强污染农业区的倾角为 0° 、 30° 、 90° 的清洁玻璃平板进行试验,30天后的太阳辐射透过率分别损失了27%、17%和3%。但未进行该地区灰尘的成分分析研究。

Goossens等^[25]的实验所使用的灰尘包含95%的粉尘(直径 $2\ \mu\text{m}$ ~ $63\ \mu\text{m}$)和5%的粘土(直径 $<2\ \mu\text{m}$),平均直径 $30\ \mu\text{m}$,其大小非常接近大气灰尘颗粒。Hai Jiang等进行的实验采用的模拟大气灰尘直径范围为 $1\ \mu\text{m}$ ~ $100\ \mu\text{m}$,其中直径 $20\ \mu\text{m}$ 的灰尘比重为74%,灰尘密度为 $2.65\ \text{g}/\text{cm}^3$ 。

2.4 环境湿度的影响

湿度是固体颗粒粘附的必要前提条件^[26],是影响光伏面板(尤其是设置在城镇等人类活动频繁区域的面板)积灰的一种重要因素。在大气和灰尘组成的低浓度气固两相流中,灰尘颗粒分布比较均匀,集中程度较低。在这样的条件下,较高体积分数的水分(即较大的环境湿度)有助于局部粘附的形成;并且,灰尘经水分的浸润将增大表面张力,更易于粘结沉积^[27]。Hai Jiang等进行室内实验时使用空调系统对环境温度和湿度进行控制,使湿度保持在 $RH=60\%$ 。

一般而言,环境湿度因气候、天气等因素而变化,不具有均一性和可控性,故而多数文献并未提及进行光伏面板积灰相关研究时的环境湿度因素及其详细数据。

3 积灰机理及模型

Kaldellis等根据红土、石灰石和灰烬的模拟实验结果,总结形成了一个理论模型,可根据面板所在地区的空气污染情况估算积灰对光伏发电性能的影响,但是依然没有涉及积灰过程本身的机理研究。

居发礼^[28]系统性地研究了光伏积灰理论:从积灰对光伏发电影响的角度将积灰按物理性质、化学性质和积灰的附着形态进行了分类,提出了光伏面板表面积灰基准“三情景”模型,即无冲刷模型、非充分冲刷模型和充分冲刷模型,形成了光伏面板表面积灰量的统一表达式。同时,提出了评价积灰对光伏发电性能的影响因子—光伏积灰系数,指出其主要影响因素为:气象条件、灰尘性质、光伏面板安装倾角、积灰状态。

马俊^[29]对平板型太阳能集热器表面的积灰进行了理论研究。主要对积灰的属性、来源及形成过程进行分析,建立了降尘量与被冲刷灰尘量模型,从光学、热学及化学3个角度研究了积尘对集热器性能的影响机理,并提出了评价积尘对集热器光学与热学性能影响的参数—积尘遮挡系数与积尘效率下降度。实验研究结果表明,积尘对平板型太阳能集热器的遮挡效应显著。

4 积灰清理技术

目前建成的多数光伏发电系统没有配备专用的灰尘清理设施,主要依赖于降雨、风等自然作用对光伏面板的积灰进行清除。一些小型的光伏电站,尤其是户用屋顶系统,则根据使用者的习惯随机进行人工喷水除尘或扫尘,随意性较大,效果一般。

在月球表面悬浮着厚厚的一层由于长期环境作用而形成的直径为 $40\ \mu\text{m}$ ~ $130\ \mu\text{m}$ 的微小粒子,这些悬浮的微尘具有较低的导电率特性和较高的比表面积。在光电效应和太阳风的作用下很容易带上静电,并在相当长的时间内保持着带电状态。带静电的微尘具有很强的粘附性。在火星上,风暴席卷着微小的尘埃布满了整个火星表面,细小的微尘被吹浮到数千米的高空,并悬浮数月之久。这些微尘积聚在光伏面板表面上将降低其转换效率,影响航天设备的正常供电和工作。据火星探路者测试,积聚和粘附微尘使光伏面板的转换效率每个火星日下降约0.28%。据此估算,2年后光伏面板的电性能下降将大于22%^[30-31]。故而在航天领域必须考虑光伏面板表面的积灰清除问题,一般采用较为成熟的电帘除尘技术。

1967年NASA为了解决Apollo计划中的太阳能电池板除尘问题,提出了电帘除尘概念^[32]。Masuda等^[33]

在大气环境中证明了利用电磁行波能够搬运宏观带电微尘:利用连接交流电源的平行电极产生行波的方法成功地进行非接触式的微尘搬运,微尘根据所带电荷的极性顺着或逆着电场的方向移动,最终被移除。目前,电帘除尘技术已经成功地应用于探月工程、火星计划等航天领域的太阳能光伏系统^[34]。

此外也有机械除尘技术,如文献[35]所描述的由电机驱动刷子结合喷水冲洗的光伏面板自动除尘装置等。

5 光伏面板积灰研究的思考

5.1 实验完整性及可比性问题

虽然不同研究者对光伏面板的积灰问题,尤其是积灰影响因素、积灰对面板的出力降低作用等进行了大量的实验研究和分析,但是多数实验过程存在完整性问题,例如:少有实验的时间历程超过1年,文献记录实验过程多在同一个地区或实验室内进行,缺乏对实验过程所有影响参数(面板参数、雨雪、霜露、温度、湿度、光照、风向风速、灰尘成分及组成、积灰类型、积灰厚度和形貌特征等)的记录或综合分析,以至于实验过程不具有可重复性,无法应用于其他光伏系统。

由于不同实验所处的环境和实验系统参数差异较大,造成文献记录的实验数据和结果相差较大,彼此之间缺乏可比性,也难以评价其优劣。

5.2 灰尘特性研究有待深入

虽然有部分文献提到灰尘的组成,但是极少有从灰尘自身的化学成分、物理特性、电学特性、几何形貌等角度进行深入的分析讨论,对灰尘的特性缺乏深层次的全面了解和掌握。目前的研究尚不能从微观层面揭示灰尘影响面板出力的作用机制。

5.3 加强对积灰沉积机理的研究

光伏面板积灰按其附着/固着形式可以分为干松积灰和粘结积灰。干松积灰形成于自然降尘的物理过程,灰尘颗粒松散,在风的作用下容易清除。粘结积灰则是由雨露、油烟等因素的作用使得灰尘颗粒吸附于面板表面,并进一步吸附空气中的颗粒,形成坚硬或粘性的结晶外壳。随着时间的推移,粘结积灰的厚度、粘性或硬度将越来越大,需要外力强制清除。

对于光伏面板而言,粘结积灰对输出功率的影响更大并且更久远。为了洞悉粘结积灰形成机制、对光伏面板出力影响的作用机制以及清除方法,需要对粘结积灰的形成过程和特性进行深入的探索,即进行积灰的沉积机理研究。

5.4 面板除尘清洁技术有待创新

虽然电帘除尘技术较为成熟并已应用于航空航

天等小面积光伏面板的除尘,但是若应用于地面光伏发电系统将会遇到诸如增加面板成本、提高光伏面板温度而降低转换效率、微尘搬移造成的二次扬尘和积灰等问题,目前尚无电帘除尘在地面大面积光伏发电系统中应用的研究文献资料。而机械式的面板清洁技术存在增加系统成本、机械结构庞大而不适用于大面积光伏阵列安装等问题。所以面板的清洁技术在原理、方法和新技术等方面都有待突破。

光伏面板的除尘清洁技术研究需要充分掌握并结合光伏系统自身的特性,如光伏系统结构及特点、面板阵列拓扑、地域环境特征、气候/天气条件、灰尘性质和积灰特性、新技术新工艺等。

6 结束语

光伏发电是极具前景的新能源技术之一,随着全球光伏系统的大规模推广应用,面板积灰对光伏发电输出功率、面板寿命、系统投资回报率等的影响也逐渐引起重视。本研究综述分析了国内外在光伏面板积灰相关的研究成果,并进一步指出了目前研究中存在的不足和将来应该重点关注的研究方向。

参考文献(References):

- [1] JIANG H, LU L, SUN K. Experimental investigation of the impact of airborne dust deposition on the performance of solar photovoltaic (PV) modules [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(25): 4299-4304.
- [2] KALDELLIS J K, CHALVATZIS K J, SPYROPOULOS G C. Transboundary air pollution balance in the new integrated European environment [J]. *Environmental Science and Policy*, 2007, 10(7): 725-733.
- [3] FRAGOS P, PALIATSOS A G, KALDELLIS J K. Experimental analysis of the air pollution impact on photovoltaic panels' energy yield [C]//Proceedings of the World Renewable Energy Congress (WREC). Glasgow, Scotland: [s.n.], 2008: 324-328.
- [4] KALDELLIS J K, FRAGOS P. Ash deposition impact on the energy performance of photovoltaic generators [J]. *Cleaner Production*, 2011, 19(4): 311-317.
- [5] GOOSSENS D, OFFER Z Y. Comparisons of day-time and night-time dust accumulation in a desert region [J]. *Journal of Arid Environments*, 1995, 31(3): 253-281.
- [6] SALIM A, HURAI B, EUGENIO N. PV power study of system options and optimization [C]//Proceeding of the 8th European PV Solar Energy Conference. Florence, Italy: [s.n.], 1988: 688-692.
- [7] HOTTEL H, WOERTZ M. Performance of flat plate solar heat collectors [J]. *Transactions on ASME*, 1942(64): 91-104.
- [8] GARG H P. Effect of dirt on transparent covers in flat-plate solar energy collectors [J]. *Solar Energy*, 1973, 15(4):

- 299–302.
- [9] SAYIGH A, AL-JANDAL S, AHMED H. Dust effect on solar flat surfaces devices in Kuwait [C]//Proceedings of the Workshop on the Physics of Non-conventional Energy Sources and Materials Science for Energy. Trieste, Italy: [s. n.], 1985:353–367.
- [10] DIETZ A. Introduction to the Utilization of Solar Energy [M]. New York: McGraw-Hill, 1963.
- [11] KATZ G B. Effect of Dust on Solar Panels [EB/OL]. [2006-10-01]. <http://www.gregorybkatz.com/Home/effect-of-dust-on-solar-panels>.
- [12] ELMINIR H K, GHITAS A E, HAMID R H, et al. Effect of dust on the transparent cover of solar collectors [J]. **Energy Conversion and Management**, 2006(47):3192–3203.
- [13] 陈菊芳, 沈 辉, 李军勇, 等. 广州地区空气洁净度对光伏电站的影响 [J]. **太阳能学报**, 2011, 32(4):481–485.
- [14] CANO J. Photovoltaic Modules: Effect of Tilt Angle on Soiling [D]. Phoenix: Arizona State University, 2011.
- [15] QASEM H, BETTS T R, MÜLLEJANS H, et al. Dust-induced shading on photovoltaic modules [EB/OL]. [2012-06-06]. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pip.2230/abstract;jsessionid=C34C6BD447D11DE3CCF9F508B06FCEE6.d04t02?systemMessage=Wiley+Online+Library+will+be+disrupted+on+15+December+from+10%3A00-12%3A00+GMT+%2805%3A00-07%3A00+EST%29+for+essential+maintenance&userIsAuthenticated=false&deniedAccessCustomisedMessage=>.
- [16] GOOSSENS D. Aeolian dust ripples: their occurrence, morphometrical characteristics, dynamics and origin [J]. **Catena**, 1991, 18(3–4):379–407.
- [17] GOOSSENS D, VAN K E. Aeolian dust deposition on photovoltaic solar cells – the effects of wind velocity and airborne dust concentration on cell performance [J]. **Solar Energy**, 1999, 66(4):277–289.
- [18] MANI M, PILLAI R. Impact of dust on solar photovoltaic performance – research status, challenges and recommendations [J]. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2010, 14(9):3124–3131.
- [19] NEIL S B, ROBERT S M, CHARLSLEE C, et al. Understanding the effects of sand and dust accumulation on photovoltaic modules [J]. **Renewable Energy**, 2012 (48):448–452.
- [20] GOOSSENS D, OFFER Z Y, ZANGVIL A. Wind tunnel experiments and field investigations of eolian dust deposition on photovoltaic solar collectors [J]. **Solar Energy**, 1993, 50(1):75–84.
- [21] KALDELLIS J K, KAPSALI M. Simulating the dust effect on the energy performance of photovoltaic generators based on experimental measurements [J]. **Energy**, 2011, 36(8):5154–5161.
- [22] SULAIMAN S A, HUSSAIN H H, LEH N S H N, et al. Effects of dust on the performance of PV panels [J]. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, 2011 (58):588–593.
- [23] HAEBERLIN H, GRAF J D. Gradual reduction of PV generator yield due to pollution [C] // Proceedings of Second-World conference and exhibition on photo-voltaic solar energy conversion. Austria: [s.n.], 1998:2764–2767.
- [24] HEGAZY A A. Effect of dust accumulation on solar transmittance through glass covers of plate type collectors [J]. **Renewable Energy**, 2001, 22(4):525–540.
- [25] GOOSSENS D, VAN E K. Aeolian dust deposition on photovoltaic solar cells the effects of wind velocity and airborne dust concentration on cell performance [J]. **Solar Energy**, 1999, 66(4):277–289.
- [26] 王青军. 余热锅炉引风机叶轮积灰成因分析与处理 [J]. **化工装备技术**, 2011, 32(2):44–45.
- [27] 陈丽君, 林世鸿. 静电除尘清洗方法在包装与食品机械中的应用 [J]. **包装与食品机械**, 2012(5):57–59.
- [28] 居发礼. 积灰对光伏发电工程的影响研究 [D]. 重庆: 重庆大学城市建设与环境工程学院, 2010.
- [29] 马 俊. 积尘对平板型太阳能集热器性能影响的研究 [D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2011.
- [30] LANDIS G, JENKINS P. Dust on Mars: materials adherence experiment results from mars pathfinder [C]//Proceedings of the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Anaheim, CA: [s.n.], 1997:865–869.
- [31] LANDIS G, JENKINS P. Measurement of the settling rate of atmospheric dust on mars by the MAE instrument on Mars pathfinder [J]. **Geophysical Research**, 2000, 105(E1):1855–1857.
- [32] TATOM F B, SREPEL R D, JOHNSON N A. Lunar Dust Degradation Effects and Removal/prevention Concept [R]. Washington: NASA, 1967.
- [33] MASUDA S, AOYOMA M. Characteristics of electric dust collector based on electric curtain [C]//Proceedings of the General Conference of the Institute of Electronic Engineers in Japan. Japan: [s.n.], 1971:821.
- [34] 袁亚飞, 刘 民, 柏向春. 电帘除尘技术的研究现状 [J]. **航天器工程**, 2010, 19(5):89–93.
- [35] 李智祥, 杨红兵, 陈 瑞. 一种自动清除太阳能电池板灰尘的方法和装: 中国, ZL200710051235.3 [P]. 2007-01-09.

[编辑:张 翔]