

基于行波电帘的太阳能电池板微尘自清洁研究

周传德¹, 何高法¹, 张杰², 黎泽伦¹, 邓显玲¹

(1. 重庆科技学院机械与动力工程学院, 重庆 401331; 2. 重庆大学机械工程学院, 重庆 400042)

摘要:微尘累积会导致太阳能电池板发电效率大幅下降甚至损坏。以微尘在行波电帘空间下的运动规律和可控操纵理论及行波电帘电极参数最优化为目标开展应用基础研究,从地球微尘电学和力学特性着手,掌握微尘颗粒分布,带电或高压电场中电离和极化,以及微尘在电池板表面附着力等特性;采用边界元及离散元方法研究带电和不带电微尘在行波电帘空间受静电力、介电泳力、重力、阻力及粒子间电荷力等多力作用下的力学和运动学模型,揭示地球大气环境下微尘在行波电帘空间的运动规律及实现定向运动的控制理论;进而采用数值模拟仿真和正交试验研究行波电帘的电学参数(波形、电压和频率)、机械参数(电极宽度、电极间距、薄膜厚度)与除尘效率的关系,建立行波电帘除尘效率的数学模型和电帘电极参数多变量函数最优化方法,为建立一种适用于中国西部气候条件下的大规模电池板阵列和其他光电及仪器系统的自清洁方法提供理论和工艺支撑。

关键词:微尘;离散元;行波电帘;电池阵列;自清洁

中图分类号:TM153

文献标志码:A

Research on the motion pattern of dust particles and self-cleaning mechanism of solar cells under traveling-wave electric curtain

ZHOU Chuande¹, HE Gaofa¹, ZHANG Jie², LI Zelun¹, DENG Xianling¹

(1. College of Mechanical and Power Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China; 2. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400042, China)

Abstract: Accumulation of dust can substantially decrease efficiency and even damage solar cells. Previous research suggests that one feasible method of dust removal is high-voltage wave electric curtain, which is also confirmed by our work. This project aims to investigate the movement pattern of dust particles under traveling-wave electric curtain condition and subsequent optimization of the parameters of wave electric curtain. Firstly, the property of earth dust particles is studied, including particle size distribution, charges, ionization and polarization, and especially the electronic characteristics which are the basis to study the movement rule of dust particles. Secondly, distinct element method and boundary element method are employed to build the moving model of dust particles, charged or uncharged, under the forces of electrostatic, dielectric electrophoresis, resistance and charges. As a result, the movement pattern of the dust particles in the earth's atmosphere environment and corresponding removal mechanism are revealed. Furthermore, numerical simulation and orthogonal experiment are conducted to investigate the relationship between the dust removal efficiency and the parameters of electric curtain, including electrical power parameters (waveform, voltage and frequency), mechanical parameters (electrode width, gap, thin-film thickness) and etc. The mathematical model of the dust removal efficiency and the optimization method for electric curtain design are established by using multivariate

收稿日期:2013-02-23;修回日期:2013-03-12;责任编辑:李穆

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51205431);重庆市科技攻关项目(CSTC2012gg-yyjs70012)

作者简介:周传德(1978-),男,湖北宜昌人,教授,博士,主要从事机电传感器与机电测试方面的研究。

E-mail: zcd0013@163.com

function optimization methods. The research may provide theoretical basis for the development of self-clean techniques for large solar cells and other photoelectric instrument systems under the weather of western China.

Key words: dust particle; discrete element method; traveling-wave electric curtain; solar cell; self-cleaning

目前对微尘颗粒监测和除尘方法有较多研究,针对太阳能电池板阵列除尘方法的研究较少^[1-2],中国有一些机械式除尘的方法和专利,国外的研究包括了在火星探测器或月球车太阳能板的除尘方法、自清洁材料等^[3-8]。概括起来主要有自然除尘、机械除尘、纳米自清洁薄膜除尘、静电除尘和行波电帘除尘等。

自然除尘是利用自然力量如风吹、雨水冲刷或重力的自然作用来清除灰尘,除尘效果较差。振动或超声波等方式来清除微尘也是一种行之有效的机械除尘方法,其关键在于大面积电池阵列振动的驱动方法及其与除尘效果的关系等。California Institute of Technology 的 WILLIAMS 等研究了以压电陶瓷来驱动自清洁火星探测器太阳能电池板振动特性^[3]。纳米自清洁薄膜覆盖于太阳能电池板阵列表面,是保持太阳能电池板处于清洁状态的有效方法之一,主要包括超亲水性(Superhydrophilicity)材料自清洁薄膜和超疏水性(Superhydrophobic)材料自清洁薄膜 2 种方式。对超亲水性材料研究较多的是 TiO₂。目前的研究热点:1) 制备工艺;2) 掺杂和改性。超疏水材料薄膜的自清洁原理是基于“荷叶效应”。国内外学者对纳米自清洁表面太阳能电池板进行了卓有成效的研究工作。但纳米自清洁薄膜自清洁方法距离大面积、低成本制备及应用还有一定的距离。

静电除尘是一种最简单的电子除尘方法。研究人员在研究火星太阳能电池翼除尘方法时,提出微尘在紫外线照射或在与大气摩擦过程中会带上电荷;如果太阳能电池表面具有很高的电位,将会吸引带有异性电荷或中性电荷的微尘。那些被吸附到表面的微尘,最终也会带上与太阳能电池板同符号的电荷,在电场力的排斥作用下离开太阳能电池的表面。

目前,美国、日本和欧洲的一些大学和科研机构开展模拟火星、月球等电帘除尘仿真、实验及相关研究,特别是美国近年来重返月球计划,使得电帘除尘及其在月球和火星探测器除尘中的应用等技术得到较多研究,NASA 等实验室开展了相关研究和试验^[9-17]。在中国,目前在这方面的研究刚起步,北京东方计量测试研究所对该技术在月球和火星探测器上的应用做了前期调研工作,重庆科技学院对电帘除尘进行了相关研究和实验。

CALLE 等通过实验和仿真分析的方法研究了行波电帘中在静电力和介电泳力作用下的除尘效果,分别使用不透明和透明材料做电帘基体作为实验原型,并在高真空的环境进行了除尘实验,证明其除尘效果好^[4,15-16]。ATTEN 等研究了驻波电帘技术及其在火星探测器太阳能电池单元上的应用,在大气环境下以及用低压腔模拟的火星气压环境下实验了驻波电帘的除尘效果,结果表明驻波电帘可以去除大部分带电微尘^[15]。MARSHALL 等分析了微尘在驻波电帘和行波电帘作用下的运动情况,为电帘除尘技术的应用提供了较为系统的理论基础^[12-13]。CALLE 等基于行波电帘技术提出柔性 electrodynamic screen (EDS) 的概念,设计了该装置,采用实验方法研究了其在模拟火星环境下的除尘效率等相关内容,并首次提出了将 EDS 应用于地球光伏发电系统中太阳能板除尘,并研究了该系统在太阳能板中应用的相关问题,证实将电帘除尘理论应用于地球太阳能电池板除尘是切实可行的^[18]。

针对作为行波电帘除尘中较为复杂的作用力之一的电泳力,除了上述机构在研究电帘除尘时,对电帘作用力进行一些分析外,目前世界上从事介电泳力作用研究的院校和科研机构有塞维利亚大学、南安普敦大学、田纳西大学、圣巴巴拉大学、卡内基梅隆大学、加利福尼亚大学等,在中国,中国科学院、哈尔滨工业大学等在从事该项技术的理论研究和具体实验研究,他们主要针对生物领域,利用 MEMS 技术对微纳胶体颗粒的粒子进行操纵。MEMS 技术使用的电压一般较低,常用来操作微小粒子或细胞,与行波电帘相差较大,行波电帘体积较大,操作颗粒较大,电压达到千伏级或更高,电极形状和距离也较大。

上述对电帘除尘技术的研究主要集中在火星和月球探测器的太阳能电池板除尘和防护方面,主要通过电磁学研究静电力、介电泳力的计算模型,从理论上证明电帘除尘的可行性;研究各种电极及高压信号源,模拟各种真空环境,从实验上证实除尘效果及电帘电极参数与除尘效果的基本规律。研究结果表明,基于行波电帘的除尘方法在理论上是可行的,但没有考虑大气环境灰尘的重力、附着力以及风力、灰尘自身电场对电帘电场的反作用影响等,没有从力学和运动学上,分析粒子受力及空间运动轨迹。

1 行波电帘

电帘由许多平行电极组成,在平行板电极上施加单相或多相电压信号产生驻(或行)波电帘。带电微尘在行波电场的作用下实现特定轨迹的定向移动,达到微尘被移除电池板边界的效果。该类方法应用的环境适应面广,也可推广至其他光学器件和科学仪器等相关领域。

行波电帘实验系统主要包括高压激励信号和电帘,电帘如图 1 所示,其主要参数为电极宽度、电极间距和绝缘层厚度。高压激励信号主要参数包括信号波形、信号电压、信号频率等参数,为了方便实验参数的可调,采用模块思路,信号的加载方式采用图 2 中所示 3 相或 4 相 2 种方案。

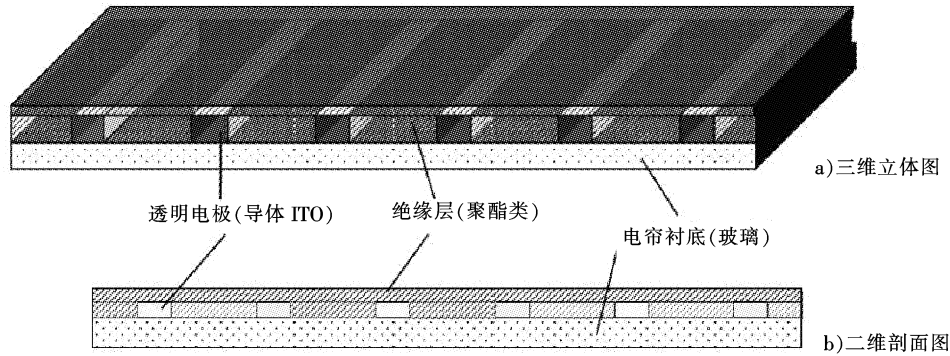


图 1 电帘结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of electric curtain

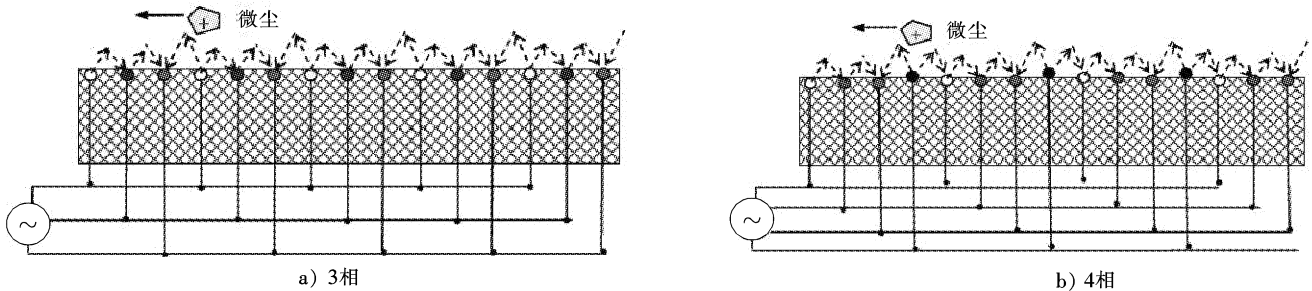


图 2 行波电帘加载模式

Fig. 2 Driver for electric curtain

根据电磁学原理和实现微尘颗粒定向运动的控制理论,求解理想电场强度(E)时间-空间分布模型,建立电场强度(E)时间-空间分布与电极间距(d)、信号波形(s)、信号幅值(u)、信号频率(fr)、绝缘层介电常数(ξ_1)和厚度(h)的数学模型,模拟仿真在不同参数的电场分布,并带入微尘颗粒力学和运动模型,求解较优化的电极参数。并利用主要影响因素进行正交试验,局部优化和全局优化电极参数优化经验公式,见式(1):

$$E_{x,z,t} = f(x/d, z, \nabla s, u, fr, \xi_1, h)。 \quad (1)$$

2 介电泳力

对于重力、阻力、电荷力,在微尘特性参数已知的条件下,已有成熟的公式和模型。对于电场力,区分带电微尘颗粒和不带电微尘颗粒进行不同处理。

带电微尘颗粒所受的运动微分方程可表示为式(2):

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = qE \cos \omega t - 6\pi\eta \frac{dr}{dt} - mg。 \quad (2)$$

式中: m 为微尘的质量; r 为微尘的位移; q 为微尘的带电量; E 为电帘的电场强度; η 为黏性系数; g 为重力加速度。

运动轨迹 r 与电场强度 E 之间具有耦合效应,且是非线性的。研究解耦方法获得其精确解析解;同时

利用数值分析方法,模拟仿真微尘的运动轨迹。

不带电微尘颗粒受到的平均介电泳力在时间和空间上都与电场强度有关,参考相关研究,可以简化为式(3):

$$\langle F \rangle = \frac{1}{2} \text{Re}[(p \cdot \nabla) \cdot E^*],$$

$$p = 4\pi\epsilon_m r^3 f_{\text{CM}} E. \quad (3)$$

其中: E^* 为电场强度的复共轭; p 为感应电偶极矩; ϵ_m 为介质的复介电常数; f_{CM} 为 Clausius-Mossotti (克劳修斯-莫索蒂) 因子。

利用解析法可以计算颗粒所受介电泳力及其运动速度,在此基础上,通过有限元仿真方法计算电场内介电泳力分布情况,进而分析各点的运动状态。

3 微尘空间运动

带电微尘在行波电帘作用下受电场作用力,不带电微尘在行波电帘作用下电离或极化后受介电泳力。静电力和诱导偶极矩大小是微尘受力分析的基础。微尘颗粒大小是基本物理参数,是行波电帘电极设计(结构、间距、激励参数)的初始条件,也是离散元分析时带电粒子简化模型、重力计算的依据。

微尘颗粒可分为自然带电粒子和不带电粒子,带电粒子又分为正电粒子和负电粒子。不带电粒子在高压电场作用下极化,粒子边界分别具有等量的正负电荷,在不均匀电场空间里受力并不相等,产生等效合力和力矩,即介电泳力,图3所示不同粒子的电场力受力情况。

微尘受力与电场空间位置相关,微尘粒子的运动中可分为极化及初始运动阶段,在电场力、介电泳力、重力和阻力作用下的受迫运动阶段,远离电场的自然运动及着陆阶段,3个阶段的受力种类和大小如图4所示。在受迫运动阶段可能存在沿程滑动、沿程滚动和空间漂移3种运动形态。利用边界元和离散元算法,由初始位置计算受力(F)、加速度(a)、速度(v)和位移(s),根据新位置建立新的作用力,进而迭代计算获得微尘被去除全过程的阶段运动分析,包括力及加速度曲线、速度曲线和位移曲线,位移曲线是除尘效率优化和节能优化的基础。

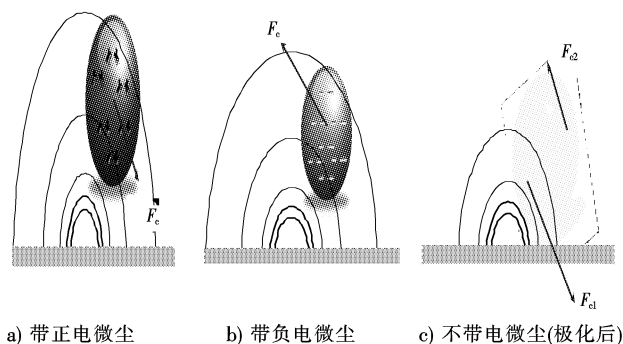
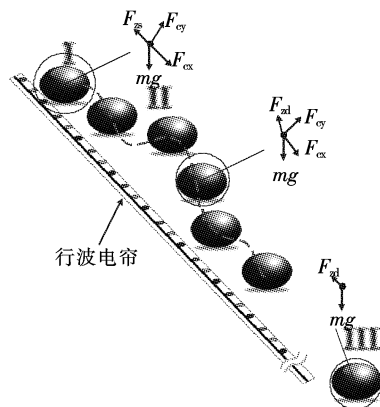


图3 微尘粒子分类及电场力描述

Fig. 3 Dust particle and its electric force



F_x —电场力; F_y —附着力; F_z —空气阻力; mg —重力

图4 微尘粒子运动过程阶段及基本受力描述

Fig. 4 Motion stage of dust particle and its forces

4 结 语

1) 开展了机械式清洁车和电帘除尘的实验研究和对比,机械式清洁车重点研究机械手运动(人工驱动车辆定期清扫,效率高但实施困难);电帘除尘微电子自动控制,具有使微尘明显搬移的效果,可实施和可控性强。

2) 通过文献资料和电极安全理论,掌握了电极尺寸、激励电压等与除尘效果的定性关系,计算和设计了行波电帘的电极和高压激励源基本参数。

3) 将微尘运动划分为初始运动、受迫运动和着陆运动3个阶段,受迫运动阶段存在沿程滑动、沿程滚动

和空间漂移 3 种运动形态的假设。

参考文献/References:

- [1] 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):89-94.
YUAN Yafei, LIU Min, BAI Xiangchun. Research of electrode screen as dust mitigation technology[J]. Spacecraft Engineering, 2010, 19(5):89-94.
- [2] HE Gaofa, ZHOU Chuande, LI Zelun. A review of self-cleaning method for solar cell array[J]. Procedia Engineering, 2011, 16: 640-645.
- [3] WILLIAMS R B, TANIMOTO R, SIMONYAN A, et al. Vibration characterization of self-cleaning solar panels with piezoceramic actuation[A]. 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference[C]. [S. l.]:[s. n.], 2007. 512-520.
- [4] CALLE C I, BUHLER C R, JOHANSEN M R, et al. Active dust control and mitigation technology for lunar and Martian exploration [J]. Acta Astronautica, 2011, 69:1 082-1 088.
- [5] CALLE C I, MCFALL J L, BUHLER C R, et al. Dust particle removal by electrostatic and dielectrophoretic forces with applications to NASA exploration missions[A]. ESA Annual Meeting on Electrostatics[C]. [S. l.]:[s. n.], 2008. 1-14.
- [6] PARK Y B, IM H, IM M, et al. Self-cleaning effect of highly water-repellent microshell structures for solar cell applications [J]. Journal of Materials Chemistry, 2011, 21:633-636.
- [7] ZHU Jia, HSU Chingmei, YU Zongfu, et al. Nanodome solar cells with efficient light management and self-cleaning[J]. Nano Letter, 2010, 10:1 979-1 984.
- [8] NIU Junjie, WANG Jiannong, XU Qianfeng. Synthesis of superhydrophobic silicon oxide nanowires surface on silicon wafer[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2009, 9(3): 1 819-1 824.
- [9] KAWAMOTO H, UCHIYAMA M, COOPER B L, et al. Mitigation of lunar dust on solar panels and optical elements utilizing electrostatic traveling-wave[J]. Journal of Electrostatics, 2011, 69:370-379.
- [10] ADRIENNE D, GENEVIEVE D, XU Wang, et al. Mitigation of lunar dust adhesion by surface modification[J]. Planetary and Space Science, 2011, 59:1 784-1 790.
- [11] KAWAMOTO H, MIWA T. Mitigation of lunar dust adhered to mechanical parts of equipment used for lunar exploration[J]. Journal of Electrostatics, 2011, 69:365-369.
- [12] LIU G, MARSHALL J S. Effect of particle adhesion and interactions on motion by traveling waves on an electric curtain[J]. Journal of Electrostatics, 2010, 68:179-189.
- [13] LIU G, MARSHALL J S. Particle transport by standing waves on an electric curtain[J]. Journal of Electrostatics, 2010, 68:289-298.
- [14] MASANORI E, HIROKO I, TAKESHI Y W. Measurement of propulsion force on particles under travelling-wave electric fields[A]. World Automation Congress[C]. [S. l.]: TSI Press, 2010. 72-89.
- [15] ATTEN P, PANG Hailong, REBOUD J L. Study of dust removal by Standing-Wave electric curtain for application to solar cells on mars[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(1):75-84.
- [16] CALLE C I, BUHLER C R, MCFALL J L, et al. Particle removal by electrostatic and dielectrophoretic forces for dust control during lunar exploration missions[J]. Journal of Electrostatics, 2009, 67: 89-92.
- [17] SHARMA R, WYATT C A, ZHANG Jing, et al. Experimental evaluation and analysis of electrodynamic screen as dust mitigation technology for future Mars missions[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(2):591-596.
- [18] ZHAO Shulin, WANG Jianshi, YE Fanggui, et al. Determination of uric acid in human urine and serum by capillary electrophoresis with chemiluminescence detection[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2008, 37(8):127-131.

向本期载文的审稿专家致谢

本期《河北科技大学学报》共发表论文 14 篇。这些论文的发表是与有关专家的认真审读、细查资料、推敲分析、中肯评价分不开的。对此,本编辑部特向这些专家表示敬意,对他们的辛勤劳动表示感谢。本期载文的审稿专家名单如下(按姓名的汉语拼音顺序排列):

常志东 崔海亭 崔洪斌 方忆湘 冯黎波 郭秀荣 胡 鑫
黄 翔 李庆国 刘 义 毛国梁 全向春 沈明威 史福贵
司伟建 王少刚 杨春利 殷国栋 尹爱军 印建平 于志强
张 建 张 涌 张振国 赵地顺

(本刊编辑部)