DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.04.015

# 三相行波电帘除尘的抗风干扰实验研究\*

孟明辉1,周传德1,张 杰2\*,苗纯正1,冯 淼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 400030)

**摘要:**针对位于野外有风环境下的太阳能电池板表面易于积累灰尘,利用三相行波电帘技术进行除尘时,风力可能会对除尘效率以 及灰尘的定向移动情况产生干扰的问题,分别在面板倾斜角度 θ为0°、10°、20°和30°以及风力等级分别为0级、1级、2级和3级的 情况下,利用析因分析法设计了分组实验,研究了三相行波电帘除尘技术的抗风干扰性能,测试了倾斜角度在0°~30°和风力等级 在0级~3级范围内的除尘效率,并拍照记录了0级、1级、2级和3级风速下的灰尘定向移动情况。研究结果表明,三相行波电帘 除尘技术具有较好的抗风干扰性能,风力不会降低除尘效率,各种风速和倾斜角度下的除尘效率均在96%以上,无风情况下的灰尘 具有较好的定向移动特征,但有风情况下的定向移动会被破坏。

文章编号:1001-4551(2016)04-0453-05

# Anti-wind interference in dust mitigation by traveling wave electric curtain

MENG Ming-hui<sup>1</sup>, ZHOU Chuan-de<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>2</sup>, MIAO Chun-zheng<sup>1</sup>, FENG Miao<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Power Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China; 2. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract**: Aiming atsolving the problems of dusts accumulation on solar power generation system (SPGS), traveling wave electric curtain method was investigated. As the SPGS was usually located in wild environment, dust removing efficiency and particle's directional movement may be interfered by the wind in the wild environment. Thus, the analysis of anti-interference of wind force was proposed. The ability of anti-interference of wind force was tested by comparing the performance in 0, 1st, 2nd, and 3rd level windand inclining angle of  $0^{\circ}$ ,  $10^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$  and  $30^{\circ}$  by using Factor Analysis Approach (FAA). The results indicate that dusts removal efficiency in all the cases are above 96%, but directional migration is disturbed in the wind speed  $0.5 \text{ m/s} \sim 1.7 \text{ m/s}$  and nearly all the dusts leaped out from electric curtain are fly-off in wind speed larger than 3.5 m/s. Therefore, the electric curtain method is able to anti-interference of wind force and suitable for wild environment. **Key words**: dust mitigation; electric curtain; removal efficiency; anti-wind interference; traveling wave

0 引 言

大规模的太阳能发电系统往往位于满是沙尘的沙 漠中,例如我国的新疆、甘肃和宁夏等地,太阳能电池 板上往往会积累很多沙尘,为提高太阳能发电效率,保 护太阳能电池阵列,对太阳能电池板进行除尘的研究 就显得至关重要<sup>[1-2]</sup>。

常用的除尘方法主要有<sup>[3-5]</sup>:自然除尘、机械除尘、 纳米自清洁薄膜除尘和电帘除尘等。自然除尘是利用

收稿日期:2015-09-01

基金项目:国家自然科学基金(青年)项目(51205431)

作者简介:孟明辉(1989-),男,河南驻马店人,硕士研究生,主要从事太阳能电池板除尘技术以及机械测试技术等领域的研究. E-mail: 492997556@qq.com

通信联系人:张杰,男,博士研究生. E-mail:zhangjiejsp05@163.com

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;机械除尘是采用擦拭、喷吹、振动 或超声波等机械方式除尘,由于微尘的尺寸比较小而 且又具有很强的粘附性,清除较困难,且机械方法容易 对太阳能电池阵列表面产生损伤;使用纳米自清洁薄 膜覆盖于太阳能电池阵列表面,是保持太阳能电池板 处于清洁状态的有效方法之一。这种自清洁薄膜主要 包括超亲水性(Superhydrophilicity)材料自清洁薄膜和 超疏水性(Superhydrophilicity)材料自清洁薄膜两种 方式。

行波电帘除尘<sup>[6-12]</sup>是利用由一组平行电极组成的 行波电帘,在电极上施加三相交流电压激发电场,产生 行波,处于行波电场中的带电微尘颗粒将会受到重力、 粘附力、电场力和介电泳力等力的共同作用,其中库仑 力是主要的动力,粘附力是最主要的阻力,通过设计合 适的电帘参数可以控制电场中的微尘颗粒的受力和运 动状况,从而使微尘颗粒在竖直方向发生起跳并在水 平方向做持续定向移动,最终将微尘颗粒移除电帘 表面。

电帘除尘技术是在实验室无风环境下提出的,而 太阳能电池板一般位于野外环境,因此起跳后的微尘 颗粒,在移动过程中经常会受到风力的影响,之前的文 献中在电帘除尘技术的抗风干扰实验方面的研究较 少,而电帘除尘技术应用于实际时必须验证其抗风干 扰性能。本研究通过实验研究电帘除尘在无风环境和 有风环境下的除尘情况。

- 1 三相行波电帘除尘原理
- 1.1 三相行波电帘结构

三相行波电帘的结构如图1所示。



图1 三相行波电帘结构示意图

电帘由一组平行电极组成,电极刻蚀在基板上,电 极表面覆盖一层厚度为h的绝缘层材料,防止电压击 穿。接通三相交流激励时,电极间产生行波,处于行波 电帘上的带电颗粒,在行波电场的作用下将发生运动, 通过控制行波电帘参数可以实现对微尘运动的控制, 进而达到将微尘颗粒移除电帘板的目的。

### 1.2 微尘颗粒的受力和运动

利用三相行波电帘除尘时,有效的方法是通过行 波电场的驱动使微尘颗粒起跳并沿水平方向做持续的 定向移动。而微尘颗粒起跳前主要受到粘附力、库仑 力、介电泳力和重力的作用,其中粘附力是微尘起跳最 主要的阻力,库仑力是微尘起跳最主要的驱动力;微尘 起跳后,离开电帘板表面,粘附力随之消失,同时运动 的微尘将受到空气阻力,因此起跳前后,微尘颗粒的受 力和运动情况并不完全相同,故可将微尘的运动过程 分为起跳阶段和水平移动阶段分别进行分析。

起跳阶段的微尘运动可表示为[13]:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = qE_x + F_{depx} \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = qEy + F_{depy} - mg - F_{adh} \end{cases}$$
(1)

在水平移动阶段,微尘颗粒将受到库仑力、介电泳力、 重力和空气阻力,故水平运动阶段的微尘运动可表示为:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = qE_x + F_{depx} - 6\pi r\eta \frac{dx}{dx} \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = qEy + F_{depy} - mg - 6\pi r\eta \frac{dx}{dx} \end{cases}$$
(2)

2 实验及结果分析

## 2.1 实验器材

150 目的试验筛(孔径 106 μm)、高精度电子天平 (精度 0.000 1 g)、三相行波电帘板、三相交流高压电 源(电压可调)、风扇(风速可调)、风速计(型号: GM8901,量程 0.3 m/s~45 m/s,精度±3%)。

### 2.2 实验步骤

(1)利用 150 目的试验筛将沙尘进行筛分,取粒 径小于 106 μm 的沙尘进行实验;

(2)实验系统连接图如图 2 所示,按图 2 所示连 接实验装置;



图 2 实验系统连接图

(4)调节风扇的风速,通过风速计测定风速,使实际风速达到预定的实验风速(0 m/s、0.5 m/s、1.7 m/s和 3.5 m/s);

(5)通过试验筛将微尘均匀分布在电帘板表面, 结果如图 3(a)所示。

(6)利用高精度天平称量布尘后的重量  $m_e$ ,则灰 尘重量  $m_0 = m_s - m_e$ ;

(7)固定电帘板,使电帘板倾斜一定角度(0°、10°、20°和30°)

(8)接通高压电源,灰尘开始移动,结果如图 3(b)所示。

(9)10 s 后断开电源, 拍照记录灰尘在除尘后的 分布情况;

(10)利用高精度天平称量除尘后的电帘板重量  $m_h$ ,则未除掉的灰尘重量为 $m_1 = m_h - m_c$ ;

(11)重复3组平行实验,记录实验数据;

(12)重复以上步骤,分别完成风速0 m/s、0.5 m/s、
1.7 m/s 和 3.5 m/s 以及倾斜角度在 0°、10°、20°和 30°下的实验数据。

2.3 结果分析

2.3.1 风力对除尘效率影响的分析

利用三相行波电帘除尘时,假设电帘板上的微尘质 量为 $m_0$ ,通电10 s后,电帘板上剩余的微尘质量为 $m_1$ , 则除尘效率为: $(m_0 - m_1)/m_0$ 。为了验证风力对三相行 波电帘除尘效率的影响,实验时分别在无风0 m/s (0级)、风速0.5 m/s(1级)、1.7 m/s(2级)和3.5 m/s (3级)以及电帘板倾斜角度为0°、10°、20°和30°的情况 下进行实验,根据析因分析法的原则设计分组实验,并 计算除尘效率。除尘前的微尘分布如图3(a)所示;除 尘后的情况如图3(b)所示。



效率的估算边际均值如图 4 所示。横坐标为倾斜 角度  $\theta$ ,纵坐标为除尘效率  $\eta$ 。



主体因子倾斜角度和风力等级如表1、表2所示。

表1 角度因子

角度/(°)	0	10	20	30
水平数 N	4	4	4	4

表 2 风力因子

风力/级	0	1	2	3
水平数 N	4	4	4	4

不同倾斜角度和风力等级下的除尘效率如表3所示。

表 3 描述性统计

θ∕(°)	风力/级	效率均值/%	标准偏差	N
0	0	96.167	0.000	1
	1	96.216	0.000	1
	2	96.136	0.000	1
	3	97.064	0.000	1
	总计	96.395	0.446	4
10	0	97.077	0.000	1
	1	97.032	0.000	1
	2	97.408	0.000	1
	3	98.514	0.000	1
	总计	97.507	0.691	4
20	0	96.730	0.000	1
	1	96.264	0.000	1
	2	97.082	0.000	1
	3	98.163	0.000	1
	总计	97.059	0.808	4
30	0	96.552	0.000	1
	1	96.113	0.000	1
	2	96.481	0.000	1
	3	97.425	0.000	1
	总计	96.642	0.556	4
总计	0	96.631	0.378	1
	1	96.406	0.421	1
	2	96.776	0.574	1
	3	97.191	0.664	1
	总计	96.904	0.720	4

主体间效率的检验如表4所示。 主休间效应的检验

≢ ⁄

农; 工件内众应的运运					
源	III 型平方和	df	均方	偏 Eta 方	
校正模型	7.781 <sup>a</sup>	15	0.519	1.000	
截距	150 238.489	1	150 238.489	1.000	
角度(°)	2.861	3	0.954	1.000	
风力(级)	4.504	3	1.501	1.000	
角度(°) * 风力	0.416	9	0.046	1.000	
误差	0.000	0	0.000		
总计	150 246.270	16			
校正的总计	7.781	15			

a. R方=1.000(调整R方=0.000)

从上述实验结果可以看出:随着倾斜角度的增加, 除尘效率先增大后回落,在倾斜角度为10°时除尘效 率最高:随着风力的增加,除1级风速下的除尘效率降 低了 0.4% 外,除尘效率逐步上升;在 10° 和 3 级风的 情况下,除尘效率达到峰值98.514%。因此,风力不 会降低除尘效率,三相行波电帘除尘方法的抗风干扰 性能较强,能够适应野外有风的工作环境。

2.3.2 风力对微尘起跳和定向移动的影响

利用三相行波电帘除尘时,首先使微尘颗粒起跳, 然后驱动微尘颗粒沿水平方向做定向移动是顺利清除 微尘颗粒的有效方法。野外有风环境下,起跳后的微 尘颗粒在风力的作用下,有可能会重新落回电帘板表 面,且水平定向移动也可能受到影响。因此,实验时, 笔者分别在风速0 m/s(0 级)、0.5 m/s(1 级)、 1.7 m/s(2级)和3.5 m/s(3级)时,拍照观察微尘运 动情况。

无风情况下通电10s后的情况如图5(a)所示,从 图 5(a) 中可以看出, 通电后, 大部分微尘颗粒沿水平 方向向右移动,落入电帘板的右方,少量灰尘落入电帘 板左方以及上、下两侧;在1级风(风速0.5 m/s,风向 如箭头所示)的情况下通电 10 s 后的情况如图 5(b) 所示,从图5(b)中可以看出,在风力的作用下,落在右 方的灰尘有所减少,落入左方和下侧的灰尘略有增加: 在2级风(风速1.7 m/s,风向如箭头所示)的情况下通 电 10 s 后的情况如图 5(c) 所示, 从图 5(c) 中可以看 出,在风力的作用下大部分灰尘落入了左方;在3级风 (风速3.5 m/s,风向如箭头所示)的情况下通电10 s 后的情况如图 5(d) 所示, 从图 5(d) 中可以看出, 在 3.5 m/s的风力作用下,灰尘几乎全部被吹走了,没有 落在电帘板附近:

对比图 5(a~d)可以看出:风力会对灰尘的定向 移动产生较大影响,无风情况下,灰尘的定向移动特征

较好,1~2级风会破坏灰尘的定向移动,风力大于 3.5 m/s(3级)时,灰尘起跳后直接被风吹走。



图 5 在 0~3级风速下通电 10 s 后的灰尘分布情况

#### 结束语 3

太阳能发电系统往往位于野外环境中,电池板上 极易沉积灰尘,三相行波电帘除尘具有除尘效率高,结 构简单,成本低,且无机械接触,不损伤太阳能电池板 等优点。三相行波电帘除尘主要利用三相行波电场对 微尘产生的驱动力,使微尘颗粒起跳并沿水平方向定 向移动,从而达到除尘的目的。而野外环境下的风力 会对微尘的起跳和运动产生一定的影响,因此,三相行 波电帘除尘需要具备较好的抗风干扰的能力。

本研究通过析因分析法设计分组实验,对比研究 了无风和风速 0.5 m/s、1.7 m/s 和 3.5 m/s(0 级、1 级、2级和3级)和倾斜角度在0°、10°、20°和30°的情 况下对除尘效率以及微尘颗粒的起跳和水平移动的影 响。结果表明风力不会对除尘效率产生明显影响,各 种风速下的除尘效率均在96%以上,其中在面板倾斜 角度为10°和风速为3级的情况下,除尘效率达到峰 值98.514%。;但风力会破坏微尘颗粒的定向移动,无 风情况下微尘颗粒有较好的定向移动,1~2级风会在 一定程度上破坏微尘颗粒的定向移动,3级以上的风 力会直接吹走起跳的微尘颗粒。因此,三相行波电帘 除尘具有较好的抗风干扰性能,能够适应野外有风环 境下的工作要求。

#### 参考文献(References):

- [1] HE Gao-fa, ZHOU Chuan-de, LI Ze-lun, et al. A Review of Self-Cleaning Method for Solar Cell Array [C]//Procedia Engineering. 2011, 16: 640-645.
- MAZUMDER M K, SHARMA R, BIRIS A S, et al. Self-[2] Cleaning Transparent Dust Shields for Protecting Solar Panels

and Other Devices [C]// Particulate Science and Technology. 2007, 25: 5-20.

- [3] 周传德,何高法,张 杰,等.基于行波电帘的太阳能电池 板微尘自清洁研究[J].河北科技大学学报,2013,34
   (2):97-101.
- [4] ZHOU Chuan-de, XIAO Hong-bo, ZHANG Jie, et al. Electric curtain method of dust removal and measurement of particle size and density on solar cell[C]//2014 internationalconference on energy and environmental engineering. HongKong:[s. n. ],2014: 33-37.
- [5] 鲍官军,张林威,蔡世波,等.光伏面板积灰及除尘清洁技术研究综述[J].机电工程,2013,30(8):909-913.
- [6] TATOM F B, SREPEL R D V, JHOHNSON N A, et al. Lunar dust degradation effects and removal prevention concepts[R]. Washington: NASA, 1967.
- [7] MASUDA S, FUJIBAYASHI K, ISHIDA K, et al. Confinement and transportation of charged aerosol clouds via electric curtain [J]. Electrical Engineering in Japan, 1972, 92 (1):43-52.
- [8] ATTEN P, HAI Long-pang, RBOUND J L. Study of dust re-

moval by standing-wave electric curtain foraApplication to solar cells on mars[J]. **IEEE TRANSACTIONS ON IN-DUSTRY APPLICATIONS**, 2009, 45(1):75-86.

- [9] CALLE C I, BUHLER C R, JOHANSEN M R, et al. Active dust control and mitigation technology for lunar and Martian exploration[J]. ActaAstronautica, 2011,69(S11-12): 1082-1088.
- [10] 孙旗霞,杨宁宁,肖志坤,等. 驻波电帘除尘效率的实验 研究[J]. 航天器工程. 2012,3(21):72-79.
- [11] SUN Qi-xia, YANG Ning-ning, CAI Xiao-bing, et al. Mechanism of dust removal by a standing wave electric curtain[J]. SCIENCE CHINA,2012,55(6):1018-1025.
- [12] QIAN D, MARSHALL J S, FROLIK J. Control analysis for solar panel dust mitigation using an electric curtain [J].
   Renewable Energy,2012,41(2):134-144.
- [13] CALLE C I, BUHLER C R, MCFALL L, et al. Particle removal by electrostatic and dielectrophoretic forces for dust control during lunar exploration missions [J]. Journal of Electrostatics, 2009, 67(2):89-92.

[编辑:张 豪]

#### 本文引用格式:

孟明辉,周传德,张 杰,等. 三相行波电帘除尘的抗风干扰实验研究[J]. 机电工程,2016,33(4);453-457. MENG Ming-hui, ZHOU Chuan-de, ZHANG Jie, et al. Anti-wind interference in dust mitigation by traveling wave electric curtain[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(4):453-457. 《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn

(上接第433页)

#### 参考文献(References):

- [1] TONY B, NICK J, DAVID S, ERVIN B. Wind energy handbook (Second Edition) [M]. England: John Wiley and Sons Ltd., 2011.
- [2] 周年勇,蒋彦龙,刘志丽,等.3MW海上风力发电机组机 舱热平衡设计[J].世界科技与发展,2011,33(5):854-857.
- [3] 刘海涛,章双全,王海龙.海上双馈机组的散热布置优化 研究[J].机电工程,2014,31(5):634-638.
- [4] 元伟伟.风力发电机组冷却系统研究[D]. 江苏:南京航 天航空大学机电学院,2008.
- [5] 方世蓉,吴桂珍,任胜伟.双馈风力发电机冷却计算方法

研究[J]. 大电机技术,2014,42(2):32-35.

- [6] AREZKI S, ALI T, CHRISTIAN M. Thermal analysis of wind turbine nacelle operating in Algerian Saharan climate [J]. Energy Procedia, 2012,18(143):187-196.
- [7] 马富银,吴九汇,王广基.双向流固耦合动态换热的分析 方法[J].应用力学学报,2013,30(6):894-898.
- [8] 丁树业,葛云中,徐殿国,等.1.5MW 双馈风力发电机内 流体场分析[J].中国电机工程学报,2012,32(21):93-98.
- [9] 张建文,杨振亚,张 政.流体流动与传热过程的数值模 拟基础及应用[M].北京:化学工业出版社,2009.
- [10] 杨世铭,陶文銓. 传热学[M].4 版. 北京:高等教育出版 社,2006.