

光伏组件干式除尘刷工作参数优化

王小康¹ 龚俊^{1,2}

(1.兰州理工大学机电工程学院,甘肃 兰州 730050;

2.兰州理工大学数字制造技术与应用省部共建教育部重点实验室,甘肃 兰州 730050)

摘要:为解决风沙大、水源匮乏等环境恶劣地区光伏组件表面灰尘清洁困难的问题,本课题组提出了一种集起尘、掸尘、输尘于一体的光伏组件干式除尘双滚刷。首先基于该模型搭建实验平台,确定光伏组件干式除尘刷的旋转速度和沿着光伏板面的牵引速度两个重要工作参数的最优值范围,然后利用 matlab 优化工具箱,建立真实的非线性规划问题数学模型,通过计算获得最优的工作参数。结果表明,该光伏组件干式除尘双滚刷通过移动载体的牵引,达到了无水高度清洁的理想效果。

关键词: 光伏组件;干式除尘刷;非线性规划问题;最优工作参数

中图分类号:TH16;TM615 文献标识码:A 文章编号:1001-3997(2020)04-0270-04

DOI:10.19356/j.cnki.1001-3997.2020.04.065

Working Parameter Optimization of Dry Dusting Brush for Photovoltaic Modules

WANG Xiao-kang¹, GONG Jun^{1,2}

(1.School of Mechanical and Electrical Engineering Lanzhou University of Technology, Gansu Lanzhou 730050, China 2.Key Laboratory of Digital Manufacturing Technology and Application, the Ministry of Education, Gansu Lanzhou 730050, China)

Abstract In order to solve the dust cleaning problems of photovoltaic component surface in windy desert and water-deficient areas, a new kind of photovoltaic modules dry dusting brush is proposed in this research, which combines the advantage of dust remover and dust elimination. Firstly, the optimal range of the two most important of working parameters was determined by constructing the experimental platform on the model, such as the rotating speed of photovoltaic modules dry dusting brush and the pulling speed along the photovoltaic panel. Then the mathematical model of nonlinear programming problem was established in the optimization toolbox of matlab to acquire the optimal working parameters. The results demonstrated that the proposed photovoltaic modules dry dusting brush can achieve the desired waterless cleaning effect through the traction of the mobile carrier.

Key Words Photovoltaic Modules; Dry Dusting Brush; Nonlinear Programming Problem; Optimal Working Parameters

1 引言

光伏发电所在的地区多是风沙大、水资源匮乏的环境,造成光伏组件表面形成积尘,从而影响光伏发电的效率,严重时还会造成“热岛效应”损坏光伏板,缩短其使用寿命^[1-3]。为此,国内外很多学者对光伏板干式除尘技术做了大量的研究,但是大多数都没有得到广泛的应用。如利用机器人除尘、电帘除尘、自清洁玻璃等方式。日本最早发现 TiO₂ 这种化合物具有光催化性能,利用这种化合物制备出来的自清洁玻璃可以实现光伏板面的自清洁,但是目前的相关研究仍处于理论阶段,未实现广泛应用。2000 年,日

本 Soda 公司与日本东京大学先进科学技术中心 Toshiya Watanbe 等合作制备了 TiO₂ 薄膜,文献^[4-5]采用化学气相沉积法生产了自清洁玻璃产品并投入市场,但是由于成本较高,市场反应一般,板上机器人的除尘去垢效果较差,而且对于以固定式倾角运行的光伏电站,板上机器人则无法从一块太阳能板上自动转移到另一块太阳能板上,清洁起来较复杂,难以广泛应用于实际生产中^[6-11]。而且由于前期投入费用很高,后期的维修工作量大、代价高,对于大规模的光伏场地并不适用。

因此,在课题组研发的干式除尘刷模型基础上,通过实验确定

来稿日期:2019-09-06

基金项目:兰州市科技发展计划项目(2015-3-118)

作者简介:王小康,男(1993-) 陕西安康人,硕士研究生,主要研究方向:光伏组件干式除尘刷除尘机理研究;

龚俊,男(1963-) 四川中江人,硕士研究生,博士生导师,教授,主要研究方向:精密制造装备与数控加工技术、特种装备及控制

刷体最为关键的两个工作参数的范围,建立真实的非线性规划问题数学模型,利用 matlab 优化工具箱计算获得最优的工作参数值。使得该新型的光伏组件干式除尘刷,通过移动载体的牵引,可以在无水、无清洁剂条件下,高效完成光伏组件表面的清洁工作。

2 光伏组件干式除尘刷工作原理

双辊刷组件由一对毛刷辊组成,其刷体平面截图,如图 1 所示。工作时转向相反,空气会随着旋转的刷辊而旋转,这时流动的空气会使灰尘脱离光伏板面呈悬浮状态。浮尘在离心力的作用下向刷辊的顶端移动,刷体旋转到上方时其刷毛部分碰到了掸土杆,浮尘会沿着刷毛旋转的切线方向飞入环形窄缝中。这样可以对刷毛进行实时掸土清理,保证了刷毛的洁净程度,且掸掉的灰尘在槽面的引导下进入倒 U 型的腔体内。同时引风机实时吸尘,使吸尘圆管内形成负压,灰尘更容易通过长条孔进入输尘圆管,然后被彻底吸入除尘袋,保证除尘效果。输尘圆管是由一个内径稍小的半圆形圆管和一个内径稍大的圆管反向衔接而成,它的两侧形成了一个渐扩形流道,起到增压的作用,使引尘效果更好。

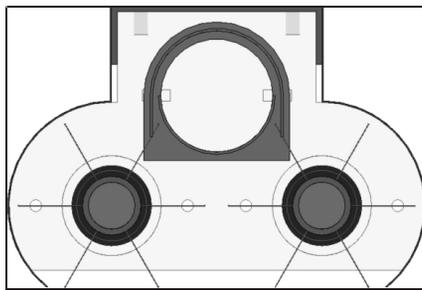


图 1 刷体平面截图

Fig.1 The Plane Screenshots of Brush Body

由上述工作过程中可知,首先灰尘在被滚刷扫起的过程中,刷体旋转速度的快慢决定了尘粒能否被全部扬起,从而顺利地送入到 U 型管口。当刷体单位时间内所移动的光伏板面距离一定时,单位时间内转速越快,所形成的空气流场越强,刷毛上粘复的尘粒获得的线速度就越大,能量更强,被送入到 U 型管内的效果就越好,进一步保证了后续吸尘过程的效果。但是刷体速度如果过快,刷毛受到离心力作用过大,刷毛与地面接触时的压力减小,从而会影响到起尘的效果。所以,刷体的转速直接决定了起尘的效果,同时,这一过程中刷体的移动速度对起尘的效果影响重大。如果单位时间内刷体的移动速度过快,会造成光伏板面和刷体接触时间过短,起尘效果不理想,吸尘过程便会受到影响,最终直接影响整个光伏板面的清洁效果。若单位时间内移动速度过慢,由于该清洁过程是无水清洁,所以一旦刷体单位时间内和光伏板面接触时间过长,刷毛上的尘粒无法全部被掸土杆清洁掉,会导致“二次污染”。

3 除尘刷关键工作参数对起尘效率的影响研究

根据工作原理过程可知,干式除尘刷的旋转速度、牵引速度是两个最为关键的工作参数。查阅相关资料,我们只能获得一个经验值,为了测试该光伏组件干式除尘刷的实际工作参数,利用

课题组装配的实验样机以及光伏组件实验平台,如图 2 所示。采用控制变量法,对以上两个重要的工作参数进行实验,将得到的实验数据进行分析比较,从而得出一个最优工作参数的范围数值,为得到最优工作参数值确定参考目标。

实验指标:在本实验中影响清洁效率最重要的就是扬尘过程和除尘过程,所以定义起尘率作为该除尘刷性能检验指标。以 K_1 表示起尘率,则有如下公式:

$$K_1 = \frac{W-Q}{W} \quad (1)$$

式中: W —每一份样品总量;

Q —清扫之后玻璃板面上余留的灰尘量。

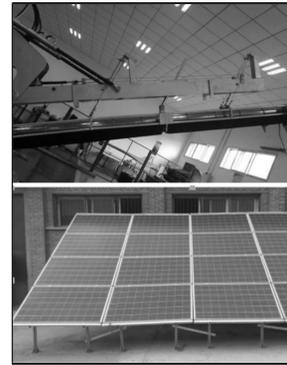


图 2 光伏组件干式除尘刷试验机

Fig.2 The Testing Machine of Dry Dusting Brush for PV Modules

4 除尘刷工作参数优化研究

4.1 实验过程及分析

为了研究刷体移动速度和转速对刷体起尘率的影响,本实验中设定辊刷转速为 300r/min,在 0.2m/s、0.35m/s、0.5 m/s、0.65 m/s、0.8 m/s、0.95m/s、1.1m/s 六种刷体移动速度下分别实验 14 次。然后对转速以 100 为步长递增,仍然以上述的六种移动速度进行多组实验。试验中,每次在光伏板面上均匀布置灰尘总量 $W=20g$,实验样机清扫以后,对得到 Q 值进行多次测量取平均值,通过式 (1)对起尘率进行计算,得到起尘率的实验数据,如表 1 所示。

4.2 数学模型的建立

在表 1 的实验数据中,刷体移动速度和刷辊速度为自变量,起尘率为因变量,故可采用线性回归(Linear Regression)的方式对 2 个自变量和因变量之间的关系进行建模,然后根据设定的模型应用最小二乘法对模型参数进行估计,最后利用 F 检验和 t 检验对所建立模型的可行性进行分析,具体如下:

$$(1) \text{模型设定 } Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon$$

式中: Y —起尘率;

x_1 —刷体移动速度(m/s);

x_2 —刷辊速度(r/min);

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ —模型参数;

ε —误差项。

(2) 回归参数估计

用 Eviews 软件对表 1 中的数据进行 OLS 回归,其拟合关系如下:

$$\hat{y} = 37.48 - 30.28x_1 + 0.08x_2 \quad (2)$$

表 1 不同刷体牵引速度和转速下的起尘率

Tab.1 The Dusting Rate under Different Moving Speed of Brush Body and Rotating Speed of Brush Roll

起尘率(%)	刷体移动速度(m/s)						
	0.2	0.35	0.5	0.65	0.8	0.95	1.1
300	51.5	42.5	43.1	39.7	36.4	31.5	28.3
400	62.1	54.9	51.6	46.4	42.7	35.8	32.5
500	78.6	72.8	67.8	59.6	56.5	51.4	47.9
600	86.8	80.9	81.2	71.1	67.4	59.6	54.1
700	88.7	83.8	79.9	73.5	69.6	66.4	63.7
800	86.2	85.1	79.7	75.8	72.4	67.3	64.5
900	82.1	80.9	78.5	74.3	70.8	68.9	65.1

采用 Eviews 软件对表 1 中的数据进行 OLS 回归时的拟合结果如图 3 所示。

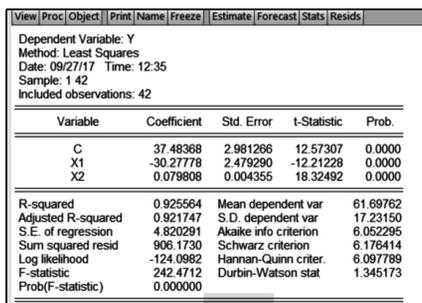


图 3 OLS 回归拟合结果

Fig.3 The Fitting Results of OLS Regression

分析实验结果,刷辊转速、移动速度与起尘率的关系曲线图,如图 4 所示。

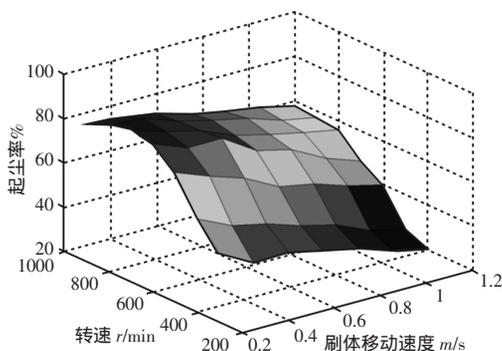


图 4 不同刷体牵引速度和转速下的起尘率

Fig.4 The Dusting rate under Different Moving Speed of Brush Body and Rotating Speed of Brush Roll

(3) 检验分析

用估计结果说明,其他变量不变的情况下,刷体移动速度每增加一个单位,起尘率平均下降 30.28 个单位,在其他变量不变的情况下,刷辊速度每增加一个单位,起尘率平均上升 0.08 个单位,这与理论分析和经验判断相一致,通过检验。

统计检验的目的是为了检验估计值的统计可靠性和准确性,为此,进行如下检验:

①拟合优度 指回归直线对观测值的拟合程度 R 的值越接近于 1,说明回归直线对观测值的拟合程度越好。而在本实验中,由 Eviews 输出拟合结果可知 $R^2=0.925564$,接近于 1,说明模型对样本拟合的较好。

②F 检验 检测模型总体是否显著

针对 $H_0: \beta_1=\beta_2=0$ 给定显著性水平 $\alpha=0.01$,在 F 分布表中查自由度为 $k-1=1$ 和 $n-k=41$ 的临界值为 7.08,由回归参数估计得 $F=242.47$ 远大于临界值 7.08,因此拒绝原假设,说明回归方程显著,即刷体移动速度和刷辊速度联合对起尘率的影响作用比较显著。

③t 检验 分别检验各个变量的显著性

分别针对 β_1 和 β_2 给定显著性水平 $\alpha=0.01$,查得自由度为 $n-k=41$ 的 t 值的临界值的绝对值为 2.42,由本实验的回归输出结果得 β_1 和 β_2 的 t 值分别为 -12.21、18.32,其绝对值均大于 2.42,因此拒绝原假设。也就是说,在其他变量不变的情况下,解释变量“刷体移动速度”和“刷辊速度”分别对“起尘率”有显著影响。

4.3 变量关系的确定

利用 Matlab 的优化工具箱,可以求解非线性规划问题。清洁效率问题是通过起尘率指标进行定量描述。为了得到理想清洁效果,即通过对两个关键工作参数的控制获得最优的起尘率。利用 matlab 工具箱来实现对工作参数的优化设计,属于带约束的非线性规划问题。起尘率作为优化设计的目标函数,刷体的旋转速度、光伏板面牵引速度作为函数变量。因为这两个工作参数之间存在着复杂的耦合关系,所以利用上述分析中得到的数学模型,设定约束条件,基于 matlab 工具箱进行非线性规划问题的最优求解。

过程如下:

$$\vec{V}_B = \vec{V}_牵 + \vec{V}_刷 \quad (3)$$

式中: \vec{V}_B —滚刷与地面接触点的绝对速度; $\vec{V}_牵$ —滚刷沿着光伏板面行走作业的速度; $\vec{V}_刷$ —刷体旋转速度, $V_刷 = \omega r$ (ω 为刷体的旋转角速度, r 为刷体半径)

由式(3)可计算滚刷与地面接触点的绝对速度的大小为:

$$V_B = \sqrt{V_牵^2 + (\omega r)^2 - 2V_牵\omega r \cos\alpha} \quad (4)$$

由式(4)可计算太阳能光伏板与地面的倾角为:

$$\cos\alpha = \frac{V_B^2 + V_牵^2 - (\omega r)^2}{2V_牵V_B} = \frac{V_牵 - \omega r \cos\alpha}{\sqrt{V_牵^2 + (\omega r)^2 - 2V_牵\omega r \cos\alpha}}$$

约束条件的建立:

(1)起尘率必须大于 95%:

$$g_1 = 0.95 - \left(\frac{916.8748x_1^2 + 0.0064x_2^2 - 2.4224x_1x_2}{1134.8944x_1 + 2.9984x_2 + 1401.7504} \right) \leq 0 \quad (5)$$

(2)由于干式除尘刷的滚刷的转速边界条件为(300~900)r/min,牵引速度边界条件为(0.2~1.1)m/s。光伏板的倾角一般为(30~45)°。得到如下约束条件:

$$g_2 = \sqrt{x_2^2 + x_1^2} - 1.59x_1x_2 - 1.1 \leq 0 \quad (6)$$

$$g_3 = 0.2 - \sqrt{x_2^2 + x_1^2} - 1.59x_1x_2 \leq 0 \quad (7)$$

$$g_4 = \frac{x_2 - 0.79x_1}{\sqrt{x_2^2 + x_1^2} - 1.59x_1x_2} - \cos 30^\circ \leq 0 \quad (8)$$

$$g_5 = \cos 45^\circ - \frac{x_2 - 0.79x_1}{\sqrt{x_2^2 + x_1^2} - 1.59x_1x_2} \leq 0 \quad (9)$$

(3)边界条件分别为：

$$g_6 = x_1 - 3.75 \leq 0 \quad (10)$$

$$g_7 = 1.25 - x_1 \leq 0 \quad (11)$$

$$g_8 = x_2 - 1.1 \leq 0 \quad (12)$$

$$g_9 = 0.2 - x_2 \leq 0 \quad (13)$$

4.4 参数优化及其 Matlab 实现

光伏组件干式除尘刷工作参数的优化设计问题为典型的约束非线性最优化问题。序列二次规划法(SQP)被认为是目前最先进的非线性规划计算方法,采用 Matlab 优化工具箱中的 fmincon 函数进行求解。

其程序设计如下：

(1)目标函数

function f = objfun(x)

```
f=916.8784 * x(1)^2 + 0.0064 * x(2)^2 - 2.4224 * x(1) * x(2) - 1134.8944 * x(1) + 2.9984 * x(2) + 1404.7504 ;
```

(2)约束条件

function [c, cep] = confun(x)

```
c=[ 0.95 -(916.8748*x(1)^2+0.0064*x(2)^2-2.4224*x(1)*x(2)-1134.8944*x(1)+2.9984*x(2)+1404.7504) ;
```

```
sqrt(x(1)^2+x(2)^2-1.59*x(1)*x(2))-1.1 ;
```

```
0.2-sqrt(x(1)^2+x(2)^2-1.59*x(1)*x(2)) ;
```

```
((x(2)-0.79*x(1))/sqrt(x(1)^2+x(2)^2-1.59*x(1)*x(2)))-cos(30*pi/180) ;
```

```
cos(45*pi/180)-((x(2)-0.79*x(1))/sqrt(x(1)^2+x(2)^2-1.59*x(1)*x(2))) ;
```

```
cep=[] ;
```

(3)在主程序中调用 fmincon 函数结果如下：

```
[X FVAL EXITFLAG OUTPUT]=fmincon (@objfun x0 [], [], [], [], [], [], [], [], [], @confun)
```

通过对工作参数的优化可知:在干式除尘刷转速 750r/min,牵引速度 0.24m/s 时起尘效率最高。在该组工作参数下,干式除尘刷以较高的清洁效率实现了从起尘到最后的吸尘整个工作过程,达到较理想的清洁效果。

5 结论

(1)针对本课题组目前提出的这种集起尘、掸尘、输尘于一体的光伏组件干式双滚刷,通过实验证明可以实现在无水、无清洁剂条件下实现光伏组件高效清理。

(2)通过搭建的实验平台,反复大量的改变工作参数得到大量实验数据。然后利用数学统计学软件 EVIEW 对实验数据进行科学有效的分析,得到起尘率和干式除尘刷工作参数之间的数学关系,建立真实的数学模型。基于 Matlab 的工具箱对非线性规划问题进行有效的求解,确定了实验样机的最优工作参数,为样机的进一步结构参数以及工作参数的优化打下良好的基础。

参考文献

[1] 岑先富,朱超林.光伏组件积尘对发电量的影响及自动清洁经济效益研究[J].太阳能 2013(21):45-48.

(Cen Xian-fu, Zhu Chao-lin. Effect of dust to PV modules generation and the research of automatic cleaning economic benefits[J]. Solar Energy 2013 (21):45-48.)

[2] 孟伟君,朴铁军,司德亮.灰尘对光伏发电的影响及组件清洗研究[J].太阳能 2015(2):22-27.

(Meng Wei-jun, Piao Tie-jun, Si De-liang. Effect of dust to photovoltaic power generation and research of modules cleaning [J]. Solar Energy, 2015(2):22-27.)

[3] 龚恒翔,巫江.光伏组件最优化除尘方案设计原则分析[J].重庆理工大学学报:自然科学版 2013 27(6):58-60.

(Gong Heng-xiang, Wu Jiang. Analysis of the general principles of optimal dust removal plan of photovoltaic modules [J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science 2013 27(6):58-60.)

[4] Jelley, Nick, Smith. Concentrated solar power: Recent developments and future challenges[J]. Thomas Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 2015(7).

[5] 鲍官军,张林威,蔡世波.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):910-912.

(Bao Guan-jun, Zhang Lin-wei, Cai Shi-bo. Review on dust depositing on PV module and cleaning techniques[J]. Journal of Mechanical and Electrical Engineering 2013 30(8):910-912.)

[6] 龚芳馨,刘晓伟,王靓.光伏电站太阳能板的清洁技术综述[J].水电与新能 2015 21(5):72-73.

(Gong Fang-xin, Liu Xiao-wei, Wang Jing. Discussion on cleaning technology of the PV module in photovoltaic power stations[J]. Hydropower and New Energy 2015 21(5):72-73.)

[7] 王海峰,李凤婷,贾言争.适用于大规模光伏阵列的无水清扫机器人[J].可再生资源 2015 33(10):1440-1443.

(Wang Hai-feng, Li Feng-ting, Jia Yan-zheng. A waterless cleaning robot for large-scale PV array [J]. Renewable Energy Resources 2015 33(10):1439-1444.)

[8] E.Lorenzo, R.Moreton, J.Luque. Dust effects on PV array performance: in-field observations with non-uniform patterns[J]. Prog. Photovolt. Res. Appl. 2014, Vol.22(6):52-57.

[9] Muhammed J.Adinoyi, Syed A.M. Said. Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules[J]. Renewable Energy 2013, Vol.60:633-636.

[10] 王珊,孟广双,高德东.太阳能电池板表面灰尘擦除试验研究[J].水电能源科学 2015 33(8):207-210.

(Wang Shan, Meng Guang-shuang, Gao De-dong. Experiment study on removing surface dust of solar panel[J]. International Journal Hydroelectric Energy 2015 33(8):207-210.)

[11] 孟广双.荒漠光伏太阳能电池板表面灰尘作用机理及其清洁方法研究[D].西宁:青海大学 2015:12-23.

(Meng Guang-shuang. Research on mechanism of dust particle adhesion and removal from solar panel surface in desert area[D]. Xining: Qinghai University 2015:12-23.)