

文章编号:0254-0096(2020)10-0167-07

光伏电站清灰设备机械臂动力学研究

宁会峰, 王伟志, 闵浩晨, 鄢志彬, 师志鹏, 高远

(兰州理工大学机电工程学院, 兰州 730050)

摘要: 针对光伏电站清灰设备现状和西北地区环境,在清灰设备机械臂三维模型基础上,对清灰设备机械臂进行静力学分析求解,得到其数学解析式。首先,采用拉格朗日平衡法对机械臂进行动力学建模,然后用机械系统动力学仿真分析软件(ADAMS)建立清灰设备机械臂虚拟样机模型,并对其进行动力学仿真分析,得到机械臂末端运动轨迹、各关节角速度、角加速度、力及力矩特性曲线,为机械臂结构优化设计提供了理论依据,最后用刷体清灰实验验证所选方法的有效性以及所建模型的正确性。

关键词: 光伏电站; 机械臂; 静力学分析; 动力学建模; 动力学分析

中图分类号: TH113

文献标志码: A

0 引言

光伏发电和光热发电为太阳能发电的2种主要方式,目前光伏发电占据主导地位。据国际能源署(International Energy Agency, IEA)的相关数据显示,如果在全球4%的沙漠上安装太阳能光伏系统,就足以满足全球的能源需求^[1]。但有很多因素制约着太阳能光伏发电的效率,灰尘是影响光伏电站发电量的关键因素之一^[2]。

移动机械臂通常由移动平台和固定在其上的机械臂组成,兼具移动和机械臂的操作功能。对于移动机械臂,尤其是机械臂动力学建模,国内外许多学者进行了大量研究,如文献[3]提出一种改进的牛顿-欧拉动力学建模方法,较传统方法具有高效和简化的特点,可基本满足实时计算的要求。文献[4]研究非完整移动机械手的动力学模型,同时利用多体系统动力学的递归公式,得到移动机械手系统的控制方程,并讨论模型的实现问题。文献[5]获得了移动机械手系统的简化模型。但其模型不能应用于具有旋转能力的移动机械手。文献[6]提出运动螺旋坐标描述机器人运动的方法,更为简洁、直接,因此易确定机器人的

运动学方程,进而建立机器人的动力学方程,同时也有利于研究机器人的运动。文献[7]运用牛顿-欧拉动力学递推法对四自由度串联机械手进行动力学分析,总结了其逆动力学模型,即机械手矩阵形式的逆动力学方程。文献[8]将拉格朗日方程和虚功原理应用于混凝土泵车臂架系统的柔性多体动力学方程建模,其数值求解表明各个臂杆转角能够逐渐拟合期望值,但方程中非线性项的存在致使臂杆有轻微的扰动。

本文用拉格朗日能量平衡方法建立机械臂的运动学模型,对机械臂进行动力学分析,对各关节速度进行仿真分析,并对仿真结果进行实验验证,表明此机械臂能够很好地完成光伏组件的清灰工作。

1 光伏电站清灰设备机械臂静力学分析

1.1 清灰设备结构模型

太阳能光伏组件清灰设备由移动平台、液压旋转平台、大小臂、连杆机构及末端执行器(双辊刷)构成。设备工作位示意图如图1所示。

收稿日期: 2018-10-09

基金项目: 甘肃省省级引导科技创新发展专项资金(2018ZX-13); 兰州市科技发展计划项目(2015-3-118); 甘肃省自然科学基金(18JR3RA139)

通信作者: 宁会峰(1977—), 男, 博士、副教授, 主要从事精密加工技术、特种装备及自动化、快速成型技术方面的研究。
ninghflut@163.com

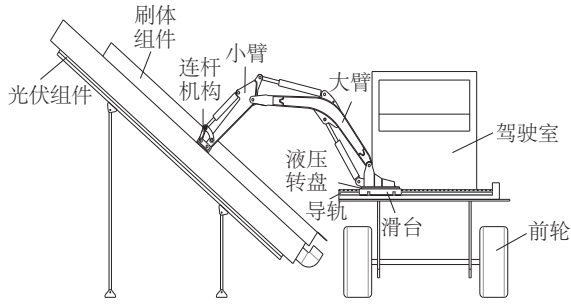


图1 清灰设备工作位示意图

Fig. 1 Schematic diagram of working position of cleaning equipment

移动平台采用轮式移动平台,后轮驱动,前轮负责转向;在驾驶室前端底板平台上装有水平导轨,导轨上安装滑台,滑台沿导轨方向移动可使机械臂到达工作位置。滑台上安装液压旋转平台,从一个光伏阵列到另一个阵列时可调整刷体组件方向,以使刷体组件完成从左工作位到右工作位的转换,同时在刷体组件上安装有传感器,实时检测刷体组件和光伏组件间边缘距离,并在一定范围内微调。机械臂安装在液压旋转平台上,采用关节式连接,通过大小臂及连杆机构协调运动(通过压力传感器与距离传感器反馈信号调节刷体组件和光伏组件表面之间距离),可使刷体组件与光伏板组件安装角度一致。刷体组件采用双辊刷结构,工作时反向转动,扫起灰尘,使灰尘呈悬浮状态,灰尘在气流作用下进入刷体组件内部,通过引风管排出。

1.2 清灰设备机械臂静力学分析

对机械臂进行静力学分析是动力学仿真的前提。清灰设备在工作过程中存在 2 个工作位置:1)左工作位,即机械臂在车体的左侧,刷体与车体垂直;2)右工作位,即此时液压旋转平台转过 180°角,机械臂在车体的右侧。当清灰设备处于工作位置时,机械臂处于外伸的状态,从受力的角度来说,此时是设备机械臂受力状态最恶劣的极限位置,车体将会在左右位置处受到一个倾覆力矩,此倾覆力矩会对清灰设备运行的平稳性造成影响,因此需对上述 2 个位置进行机械臂的静力学分析。由于移动平台在车体上对称布置,故取左工作位进行研究,机械臂受力分析如图 2 所示。

根据静力学平衡方程,以机械臂系统为研究对象,系统的力和力矩方程为:

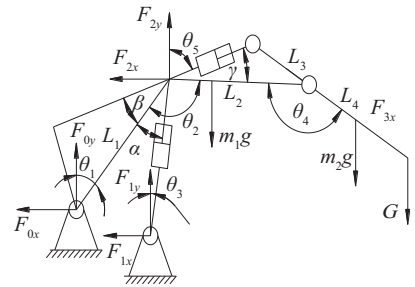
$$\sum F_x = 0, \text{即:} \quad F_{0x} + F_{1x} + F_{2x} = 0 \quad (1)$$

$$\sum F_y = 0, \text{即:}$$

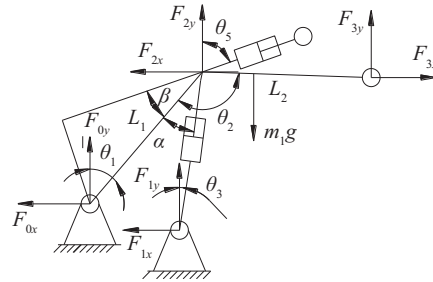
$$F_{0y} + F_{1y} + F_{2y} - m_1g - m_2g - G = 0 \quad (2)$$

$$\sum M_i(F) = 0, \text{即:}$$

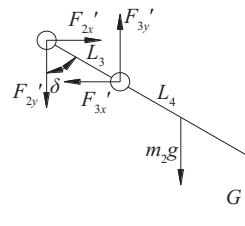
$$\begin{aligned} &F_1L_1 \sin \alpha + F_2L_2 \sin \beta - \\ &\frac{1}{4}m_1g(2L_1 \sin \theta_1 - L_2 \cos \theta_2) - \\ &\frac{1}{8}m_2g(L_1 \sin \theta_1 - L_2 \cos \theta_3) - \\ &3m_2g(L_1 \sin \theta_1 + L_2 \cos \theta_2) - \\ &G(L_1 \sin \theta_1 + L_2 \cos \theta_3 + L_4 \cos \theta_4) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$



a. 机械臂总体受力分析



b. 大臂受力分析



c. 小臂受力分析

图2 清灰设备机械臂受力分析

Fig. 2 Force analysis of mechanical arm of cleaning equipment

以机械臂小臂为研究对象,小臂受力和力矩方程如下。

$$\sum F_x = 0, \text{即:}$$

$$F'_{0x} + F'_{1x} + F'_{2x} = 0 \quad (4)$$

$$\sum F_y = 0, \text{即:}$$

$$F'_{2y} + F'_{3y} - m_2g - G = 0 \quad (5)$$

$\sum M_i(F) = 0$, 即:

$$F_3 L_3 \sin \theta_4 - L_{\text{small}} \cos(\gamma + \theta_5 - \theta_4) \cdot \left(G - \frac{1}{2} m_2 g \right) = 0 \quad (6)$$

式中, L_{small} —— 变量替换, $L_{\text{small}} = L_3 + L_4$, 其中 L_3 为小臂油缸到大臂连接点的长度 ($L_3 = 260 \text{ mm}$), L_4 为大小臂连接点到末端执行件的长度 ($L_4 = 747.5 \text{ mm}$); F_{0y} —— F_0 在 y 轴方向的分力; θ_1 —— F_{0y} 与大臂 L_1 段之间夹角, $\theta_1 = 41^\circ$; F_{ix} —— F_i 在 x 轴方向上的力, $i = 1, 2, 3$; F_{iy} —— F_i 在 y 轴方向上的力; θ_2 —— 大臂 L_1 ($L_1 = 1135 \text{ mm}$) 与 L_2 ($L_2 = 975 \text{ mm}$) 之间夹角, $\theta_2 = 130^\circ$, 其中 L_1 为大臂油缸到固定点的长度, L_2 为大臂油缸到小臂连接点的长度; θ_3 —— 大臂油缸与竖直方向夹角, $\theta_3 = 33^\circ$; θ_4 —— 大臂与小臂之间夹角, $\theta_4 = 138^\circ$; θ_5 —— 小臂油缸与竖直方向夹角, $\theta_5 = 78^\circ$; m_1 、 m_2 —— 大、小臂的质量; G —— 刷体组件与连杆机构所受重力, $G = 2842 \text{ N}$, 重力 $g = 9.8 \text{ N/kg}$; α —— 大臂油缸与大臂 L_1 段之间夹角, $\alpha = 8^\circ$; β —— 小臂油缸与大臂 L_1 段之间夹角, $\beta = 39^\circ$; γ —— 机械臂小臂油缸与大臂 L_2 段之间夹角, $\gamma = 12^\circ$; δ —— F_{2y} 与 L_3 之间夹角 (图 2c), $\delta = 36^\circ$ 。

联立式(1)~式(6), 代入数值得:

$$F_{1x} = 14365.4 \text{ N}; F_{1y} = 22120.77 \text{ N}; F_{2x} = 25799.62 \text{ N}; F_{2y} = 5483.88 \text{ N}; F_{3x} = 25799.62 \text{ N}; F_{3y} = 8717.19 \text{ N}.$$

2 光伏电站清灰设备机械臂动力学分析

多关节的清灰设备机械臂的各个关节都可以在液压缸的驱动下独立运动, 其数学模型具有明显的非线性和复杂性。基于能量平衡原理的拉格朗日法 (Lagrange method), 通过建立拉格朗日函数, 得到标准的拉格朗日方程。解算过程中, 可直接得到各关节的速度和加速度, 推导过程相对简单。因此, 本文采用能量平衡的拉格朗日方法来对动力学方程进行结算。

由于机械臂连杆机构质量较大臂和小臂较轻, 故在本解中忽略, 此时机械臂关节节点变为 2 个, 可在二维空间中进行计算。

大臂动能:

$$T_1 = \frac{1}{2} m_1 \left(\frac{L_1}{L_1 + L_2} L_1^2 + \frac{L_2}{L_1 + L_2} H \right) \dot{q}_1^2 \quad (7)$$

小臂动能:

$$T_2 = \frac{1}{2} m_2 \left(\frac{L_3}{L_3 + L_4} L_3^2 + \frac{L_4}{L_3 + L_4} L_4^2 \right) \dot{q}_2^2 \quad (8)$$

系统动能:

$$T = T_1 + T_2 \quad (9)$$

大臂势能:

$$V_1 = \frac{1}{2} m_1 g \left[\frac{L_1^2 \cos \theta_1 + L_1 L_2 \cos \theta_1 + L_2^2 \sin(\theta_1 - \theta_2)}{L_1 + L_2} \right] \quad (10)$$

小臂势能:

$$V_2 = \frac{1}{2} m_2 g \cdot \left[\frac{L_1 L_4 \cos \theta_1 - L_4 L_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + L_4 \cos(\theta_1 - \theta_2 - \theta_4)}{L_3 + L_4} \right] \quad (11)$$

系统势能:

$$V = V_1 + V_2 \quad (12)$$

可求出清灰设备机械臂的拉格朗日函数为:

$$L = T - V \quad (13)$$

将式(13)代入拉格朗日方程有:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = Q_j, \quad j = 1, 2 \quad (14)$$

得到各关节力:

$$Q_1 = m_1 \left(\frac{L_1 L_2^2 + L_2 H}{L_1 + L_2} \right) + \frac{1}{2} m_1 g \left(\frac{L_1^2 a + L_1 L_2 a - L_2^2 b}{L_1 + L_2} \right) - \frac{1}{2} m_1 \left(\frac{L_1 L_2^2 + L_2 H}{L_1 + L_2} \right) \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 g \left(\frac{L_1 L_4 a + L_4 L_2 b + L_4 c}{L_3 + L_4} \right) \quad (15)$$

同理可得:

$$Q_2 = \frac{1}{2} m_2 \left[\frac{(L_3^3 + L_4^3)(2\dot{q}_2 - \dot{q}_1^2)}{L_3 + L_4} \right] + \frac{m_2 g L_4 c}{2(L_3 + L_4)} \quad (16)$$

式中, q_1 、 q_2 —— 大臂、小臂的角速度, $q_1 = \theta_1$, $q_2 = \theta_2 - \frac{\pi}{2}$; a 、 b 、 c —— 变量替换, $a = \cos q_1 + \sin q_1$, $b = \sin(q_1 - \theta_2) - \cos(q_1 - \theta_2)$; $c = \sin(q_1 - q_2 - \theta_2) - \cos(q_1 - q_2 - \theta_2)$; H —— 变量替换, $H = L_1^2 + L_2^2 - 2L_1 L_2 \cos \theta_2$ 。

3 清灰设备机械臂动力学仿真分析

清灰设备从收车状态到工作位的过程中, 主要包括底座的水平移动、转盘的转动、大小臂及连杆液压缸的运动。机械臂在收车状态时, 大臂液压缸伸至最长 (行程 465 mm), 小臂油缸收缩至最短 (行程 365 mm), 连杆机构液压缸收缩至行程的一半 (总行程 275 mm), 此时刷体组件与地面垂直。从收车状态到任一工作位的过程中, 大臂液压缸收缩 80 mm, 小臂伸出 90 mm, 连杆机构伸出 43 mm, 水平工作台距车边沿 365 mm。

3.1 驱动(Step)函数的确定

光伏电站清灰设备机械臂采用液压驱动,为模拟设备实际工作过程中液压缸的进油规律,将活塞杆的推出速度分为启动、稳定运行和制动 3 个阶段。

采用 3 次多项式逼近海塞阶跃函数^[9]Step 来定义活塞杆的推出速度,Step 在 ADAMS 软件中的表达式为 Step(time, X_0 , H_0 , X_1 , H_1),其中 X_0 为起点自变量值; H_0 为阶跃起点处的函数值; X_1 为阶跃终点自变量的值; H_1 为阶跃终点的函数值。清灰设备工作过程流程图如表 1 所示。

表 1 流程函数

Table 1 Process function

关节变量	Step 函数表达式
d_1	Step(time,0,0,10,435)
θ_1	Step(time,0,0,10,-90d)
d_2	Step(time,0,26376,10,0)
d_3	Step(time,0,26376,10,0)
d_4	Step(time,0,20194,10,0)

注:d 代表旋转。

3.2 仿真与分析

根据清灰设备机械臂工作需要及特点在零件间添加约束后,还需在相应的约束副上添加相应的驱动和外力^[10]。根据已定义的变量和参数,进行动力学仿真分析,仿真时间为 10 s,仿真步数为 500 步,利用 ADAMS 软件的后处理模块对各个关节进行测试。得到清灰设备机械臂末端(刷体组件)的运行轨迹如图 3 所示。机械臂各关节角速度变化如图 4 所示,关节 5(水平移动)为速度的变化,关节 9(大臂关节)、关节 15(小臂关节)以及关节 26(液压转盘)为角速度变化曲线。从曲线可看出各关节速度变化平缓,无峰刺存在。

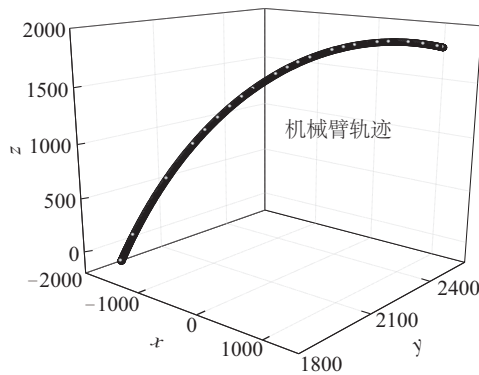


图 3 机械臂末端运动轨迹

Fig. 3 End path of manipulator

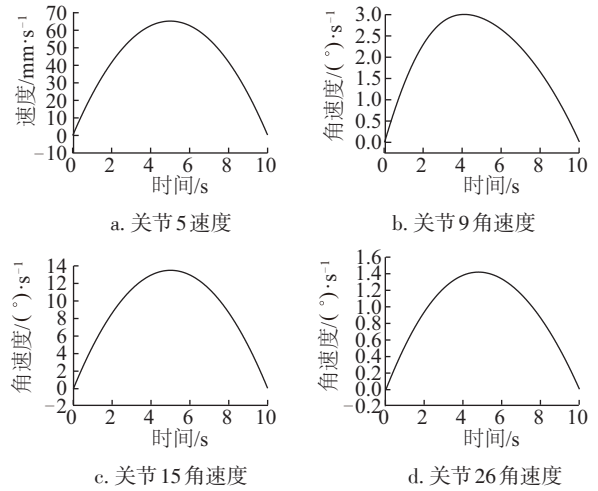


图 4 机械臂(角)速度变化曲线

Fig. 4 Curve of velocity and angular velocity variation of manipulator

机械臂各关节(角)加速度如图 5 所示,其中关节 5 为加速度变化曲线,关节 9、关节 15、关节 26 为角加速度变化曲线。(角)加速度过渡不平滑,存在突变,需要调整驱动函数、优化末端轨迹来进行改善。

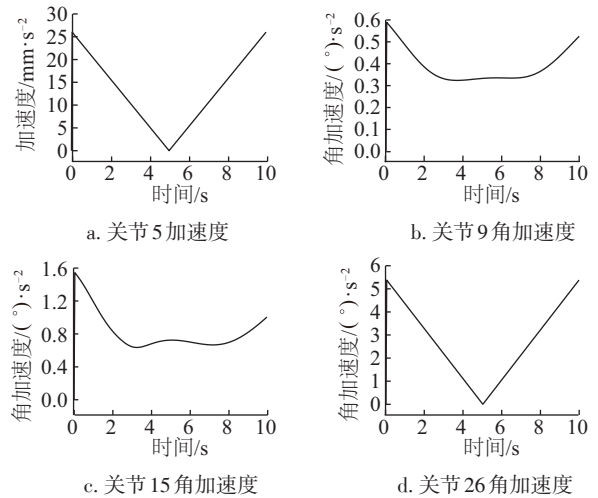
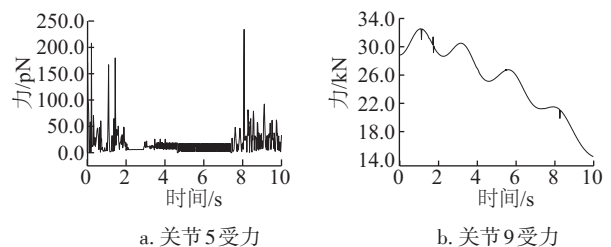


图 5 机械臂(角)加速度曲线

Fig. 5 Curve of acceleration and angular acceleration of manipulator

机械臂各关节受力和力矩变化曲线如图 6 所示,从图 6 中可看出力和力矩变化曲线存在突变,多次达到峰值。



a. 关节 5 受力

b. 关节 9 受力

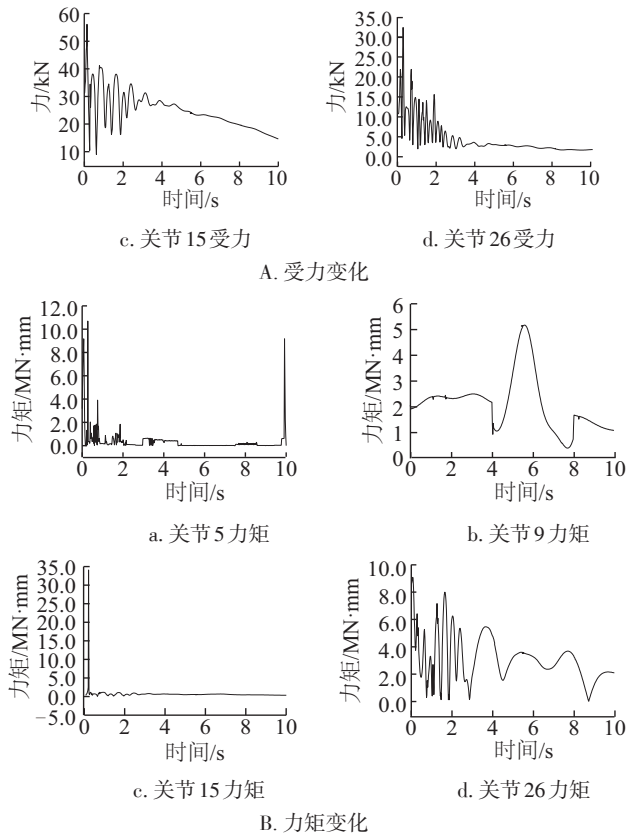


图6 机械臂力受力和矩变化曲线
Fig. 6 Curve of velocity force and torque variation of manipulator

值,在开始时刻曲线变化较剧烈,这主要是由于液压缸启动时加速度较大引起的,表现为机械臂在启动瞬间不必要的振动,可通过调节驱动函数,以使机械臂平稳运动。

4 实验

本课题组自行开发的光伏组件清灰设备在第一代的基础上用机械臂代替了原有的立柱结构,保留了水平移动导轨和液压转动平台,以适应不同角度安装的光伏组件,提高了设备的使用范围,为设备的产业化奠定了基础。

考察甘肃省武威市某光伏电站(50 MW),其光伏组件安装方式为横装,宽度为4 m(长度不定),安装角度为37°(角度不可调),清灰设备主要结构参数如表2所示。

表2 清灰设备主要结构参数

构件参数	数值
水平导轨/mm	2200.00
大臂(等效长度)/mm	1838.17
小臂(等效长度)/mm	754.16
刷体组件/mm	4200.00

清扫实验初始位姿如图7所示,实验过程中采用37°角度布置的光伏组件作为清扫对象。首先让清灰设备靠近太阳能光伏组件(距光伏组件下沿800~100 mm,本实验中距离为800 mm,光伏阵列下边缘距地面500 mm),然后机械臂开始运动,直到刷子和光伏组件板接触(刷毛压缩量为12 mm),此时机械臂到达清扫起始点。



图7 机械臂初始状态图
Fig. 7 Initial state diagram of mechanical arm

机械臂从清灰起始点(收车状态)到末端状态(刷体组件贴近光伏组件,刷毛压缩量为12 mm)的过程中,检测机械臂各个关节的(角)速度和(角)加速度的数值,把得到的数值进行拟合,得到如图9所示的变化曲线。

根据所得实验数据,从机械臂各个关节(角)速度变化曲线可知:机械臂各个关节的最大速度均大于平均(角)速度且在设计范围内。通过对比实验所得变化曲线和仿真分析所得变化曲线可知:仿真结果(角)速度曲线光滑过渡,最大值存在于一点,这种变化为理想状态;而实验所得曲线是先增大到(角)速度最大值,以最大角速度运动一段时间,最后速度减小为零。

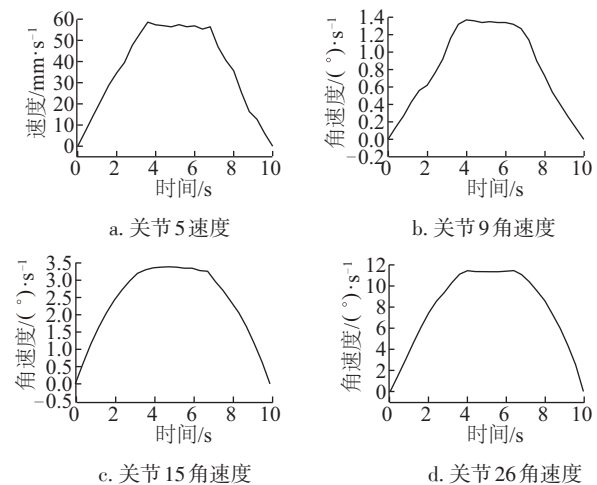


图9 机械臂关节角速度变化曲线

Fig. 9 Velocity and angular velocity curve of manipulator

实验所得结果与仿真结果的平均速度基本相同,仿真角速度大于实验角速度最大值,说明实验所得的速度

变化并非最优,所以需要对机械臂的驱动函数进行改进。但实验过程中刷体组件的运动轨迹基本符合清灰要求,满足设备清灰的需要。

5 结 论

本文对光伏电站清灰设备结构进行三维建模,清灰设备由移动平台加机械臂构成。对机械臂进行静力学分析,为动力学仿真分析奠定了基础。基于拉格朗日方程建立机械臂虚拟样机,通过动力学仿真得到设备机械臂关节的角速度、角加速度、力及力矩特性曲线,为机械臂的设计优化奠定了基础。实验所得数据与仿真结果对比基本一致,说明所选方法的有效性以及建立的机械臂动力学模型的合理性,所得结果为清灰设备机械臂的轨迹规划提供了依据。但设备机械臂的力和力矩曲线在启动瞬间存在较大的波动和峰刺,下一步将对机械臂的结构和清灰设备轨迹进行优化,以提高设备机械臂的平稳性,满足未来光伏电站清灰作业需要和地形环境特点。

[参考文献]

- [1] 刘峰,张俊,李承辉,等. 光伏组件封装材料进展[J]. 无机化学学报, 2012, 28(3): 429-436.
LIU F, ZHANG J, LI C H, et al. Progress in packaging materials for photovoltaic modules[J]. Journal of inorganic chemistry, 2012, 28(3): 429-436.
- [2] 孟伟君,朴铁军,司德亮,等. 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 W J, PIAO T J, SI D L, et al. Influence of dust on photovoltaic power generation and component cleaning research[J]. Solar energy, 2015(2): 22-27.
- [3] 韩佩富,王常武,孔令富,等. 改进的6-DOF并联机器人 Newton-Euler 动力学模型[J]. 机器人, 2000, 22(4): 315-318.
HAN P F, WANG C W, KONG L F, et al. Improved newton-euler dynamics model of 6-DOF parallel robot [J]. Robotics, 2000, 22(4): 315-318.
- [4] YU Q, CHEN I M. A general approach to the dynamics of nonholonomic mobile manipulator systems[J]. Journal of dynamic systems measurement & control, 2002, 124(4): 512-521.
- [5] LIU K, LEWIS F L. Decentralized continuous robust controller for mobile robots [C]//IEEE International Conference on Robotics And Automation, Proceedings IEEE Xplore, Cincinnati, Ohio, USA, 1990, 3: 1822-1827
- [6] 荆学东,尚久浩. 应用旋量理论建立闭链机器人的动力学方程[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(1): 58-60.
JING X D, SHANG J H. Application of rotation theory to establish dynamic equations of closed-chain robots [J]. Mechanical science and technology, 2003, 22(1): 58-60.
- [7] 师名林,赵新华. 四自由度串联机械手的逆动力学建模及仿真[J]. 天津理工大学学报, 2006, 22(5): 37-40.
SHI M L, ZHAO X H. Inverse dynamics modeling and simulation of a four degrees of freedom series manipulator [J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2006, 22(5): 37-40.
- [8] 刘杰,戴丽,赵丽娟,等. 混凝土泵车臂架柔性多体动力学建模与仿真[J]. 机械工程学报, 2007, 43(11): 131-135.
LIU J, DAI L, ZHAO L J, et al. Modeling and simulation of flexible multi-body dynamics of concrete pump truck boom [J]. Journal of mechanical engineering, 2007, 43(11): 131-135.
- [9] 巫世晶,李菲,胡基才,等. 含多间隙副特高压断路器传动机构动力学特性研究[J]. 中国机械工程, 2015, 26(13): 1719-1724.
WU S J, LI F, HU J C, et al. Dynamics characteristics of transmission mechanism of multi-gap auxiliary UHV circuit breaker [J]. China mechanical engineering, 2015, 26(13): 1719-1724
- [10] 彭祺攀,李海阳. 基于虚拟样机技术的机械臂建模与仿真[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2007, 33(Sup1): 58-62.
PENG Q B, LI H Y. Modeling and simulation of robotic arm based on virtual prototype technology [J]. Journal of East China University of Science and Technology (natural science), 2007, 33(Sup 1): 58-62.

DYNAMIC SIMULATION ANALYSIS OF MECHANICAL ARM OF CLEANING EQUIPMENT FOR PHOTOVOLTAIC POWER STATION

Ning Huifeng, Wang Weizhi, Min Haochen, Yan Zhibin, Shi Zhipeng, Gao Yuan
(School of Mechanical & Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Considering the status of cleaning equipment for photovoltaic power stations and the environment of Northwest China, and based on the three-dimensional model of the mechanical arm of cleaning equipment, the mathematical analysis formula of the cleaning equipment's mechanical arms is obtained through the static analysis. The mathematical expression is obtained. At first, the dynamics of the manipulator is modeled by using the Lagrangian balance method. Then the virtual prototype model of cleaning equipment robot arms built by the Mechanical System Dynamics Simulation Analysis Software (ADAMS) is dynamically simulated and analyzed to obtain the end trajectory of the arm, the angular velocity of each joint, the angular acceleration, the force and the moment characteristic curve, which provides a theoretical basis for the optimization design of the robotic arm structure. Finally, the brush cleaning experiment is used to verify the effectiveness of the selected method and the correctness of the model.

Keywords: PV power station; robotic arms; static analysis; dynamic models; dynamics analysis