

文章编号:0254-0096(2019)12-3541-07

# 移动式光伏组件清扫机械臂 D-H 模型与运动规划

宁会峰, 鄢志彬, 李 晓, 车国栋, 王伟志, 高 远

(兰州理工大学机电工程学院, 兰州 730050)

**摘 要:** 针对光伏电站清扫作业和地形环境特点,设计一款移动式光伏组件清扫机器人。采用 D-H(Denavit-Hartenberg)模型法建立机械臂运动学模型,通过特定的代数方法求解运动学逆解,推导出机械臂末端的空间位姿参数与各关节变量的解析关系。已知末端位姿对机械臂进行轨迹规划,用 Matlab 对机械臂做仿真得到各关节运动参数;将仿真结果与实验所得数据进行对比分析。结果表明,建立的运动学模型及通过逆解求得的各关节的运动参数解析关系适合清扫机械臂的运动规划,可为移动式清扫机器人的控制规划提供依据。

**关键词:** 移动机器人; 光伏发电; 运动学分析; 运动规划; D-H 模型

**中图分类号:** TH113

**文献标识码:** A

## 0 引 言

随着经济社会的持续发展,对能源的需求日渐增加,化石能源燃烧后的污染变得严重且化石能源不可再生,发展清洁可再生的能源是必然的趋势<sup>[1,2]</sup>。平板光伏发电是目前太阳能光伏发电的主要方式<sup>[3]</sup>,光伏组件上的灰尘将影响发电的效率,使用机器人有效地清理光伏组件上的灰尘有重大意义。

移动机械臂的研究是为了减少人处于危险环境下作业需要而产生的<sup>[4,5]</sup>,它由一个机械臂安装在一个移动平台上构成。目前,对于移动机械臂的控制与规划,国内外学者对移动机械臂进行了很多研究,如 Yamamoto 等<sup>[6]</sup>提出一种平台的规划和控制算法,使机械手始终处于其可操纵性的首选配置中,但由于此方法使得整个移动机械臂在运动过程中要保持静止不动,因此不足以满足移动机械臂执行任务时的要求,降低了移动机械臂的工作效率。Yu Qing 等<sup>[7]</sup>研究了非完整移动机械手的动力学建模,利用多体系统动力学的递归公式,获得移动机械手系统的控制方程,并讨论模型的实现问题。在移动机器人在线协调控制中,文献[8]讨论基础移动性对末端执行器可操作性指数的影响,提出一种简单

的在线控制方案,并展示移动性和操纵性的在线协调,但未提及动力学模型。文献[9]提出一种确定非完整移动机械手在 2 个固定配置之间的可行路径的方法,但只给出简单的方法和一些仿真。本文用 D-H(Denavit-Hartenberg)模型法建立机械臂的运动学模型,求解机械臂的逆解,对移动式清扫机器人末端执行器进行轨迹规划及仿真分析,表明此机器人能很好地完成光伏组件的清扫。

## 1 机器人本体结构与清扫过程轨迹规划

### 1.1 机器人本体结构

太阳能光伏组件清扫机器人的清扫作业三维模型如图 1 所示,模型中包括移动平台、清扫机械臂以及安装在支架上的太阳能光伏组件。移动平台为轮式移动平台,前轮为舵轮,后轮为驱动轮;在车承载平台的前轮一端安装有导轨(导轨方向与车子前行方向垂直),整个清扫机械臂与水平滑台连接,水平滑台在导轨内滑动,实现整个机械臂的左右滑动。清扫机械臂由立柱、大臂、小臂(即末端执行器)组成,进行清扫时移动平台靠近太阳能光伏组件使得移动平台处于可清扫域(此区域由计算得到,移动平台在此区域内均可通过机械臂的运动达

收稿日期: 2018-07-26

基金项目: 甘肃省省级引导科技创新发展专项资金支持项目(2018ZX-13); 兰州市科技发展计划(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

到清扫目的)范围内,即使得移动平台离光伏组件为合适的距离;当移动平台处于可行域内时,立柱向光伏组件一侧靠近达到合适距离,大臂在立柱上做上下滑动以达到清扫光伏组件的合适高度,小臂(即末端执行器)与大臂为关节式连接,此时小臂通过转动使得毛刷的倾斜角度与光伏组件的安装角度一致;通过立柱左右移动、大臂上下移动、小臂的转动使得毛刷离光伏组件为合适距离(通过压力传感器和距离传感器反馈调整得到合适距离),与此同时移动平台向前行驶最终完成光伏组件的清扫工作。

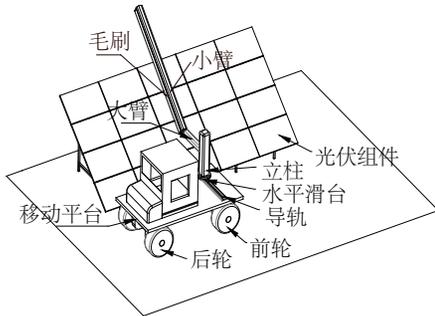


图1 机器人清扫作业三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of robot cleaning operation

### 1.2 清扫过程运动轨迹规划

清扫机器人工作过程如下:首先轮式移动平台开始朝向光伏组件运动,直到离光伏组件合适的距离;此时机械臂从零点状态开始动作,机械臂移动机构和转动机构同时向光伏组件一侧靠近使得机械臂到达开始清扫状态;然后通过移动平台上的机械臂各关节转动调节使得末端毛刷达到可清扫位姿,与此同时移动平台向前行驶最终完成对太阳能光伏组件的清扫;如果在移动平台前进的路径中前方有障碍物,此时移动平台对障碍物进行躲避,在躲避障碍物的过程中机械臂各个关节做出相应的动作,以保证末端清扫毛刷始终与光伏组件保持相对固定距离。因此,在清扫光伏组件的过程中移动平台的运动路径将会影响到机械臂各个关节的相关参数。

下面将对机械臂在动作过程中各个关节的相应参数进行分析。

## 2 光伏组件清扫机器人运动学模型及分析

### 2.1 机械臂运动学

为实现机器人的运动规划首先需要建立机器

人的运动学模型,且运动学模型是建立机器人控制系统的基础;目前 D-H 坐标变换法是应用最广泛的机器人建模方法,该方法可用于任何结构的机器人<sup>[10]</sup>。如下将采用 D-H 法对所开发的清扫机器人的机械臂进行运动学建模。

#### 2.1.1 D-H 模型坐标变换与参数

根据已构建的清扫机器人三维模型,建立机器人几何示意图如图 2 所示。其中连杆 0 为移动平台(车体)、连杆 1 为滑轨、连杆 2 为立柱、连杆 3 为大臂、连杆 4 为小臂即末端执行器(与清扫毛刷相连接);关节 1 与关节 3 为移动副、关节 2(绕竖直轴旋转)与关节 4 为转动副。

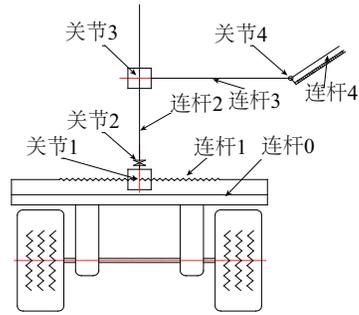


图2 机器人几何示意图

Fig. 2 Robot geometry sketch map

清扫机械臂共有 4 个自由度,考虑清扫机器人末端执行器的空间位置和姿态,共需建立 5 个坐标系,即  $x_0-z_0$  到  $x_4-z_4$ 。机械臂的 D-H 模型三维坐标系如图 3 所示,其中  $x_0-z_0$  固结于移动平台上建立在导轨的最右端,为基坐标系;  $x_1-z_1$  固结于滑块中心即关节 1;  $x_2-z_2$  固结于旋转平台中心即关节 2;  $x_3-z_3$  固结于上下运动的滑块中心即关节 3;  $x_4-z_4$  固结于机械臂转动关节即关节 4。图 3 中的  $y_i$  轴由右手法则确定,让右手拇指指向  $x_i$  轴的正方向,中指

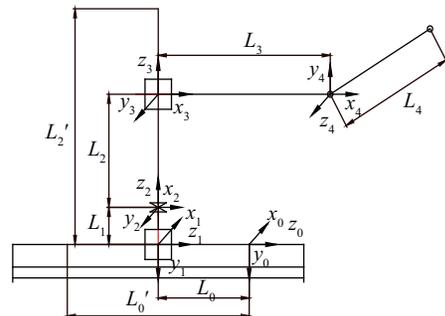


图3 机械臂的D-H模型三维坐标系

Fig. 3 Three-dimensional coordinate system of D-H model of manipulator

能指向  $z_i$  轴的正方向, 则此时食指的指向为  $y_i$  轴的正方向, 称该坐标系为右手直角坐标系。

按照 D-H 方法所确定的连杆坐标系, 每个连杆可用  $\theta_i$ 、 $\alpha_i$ 、 $a_i$  和  $d_i$  这 4 个参数来描述, 这 4 个参数可完全表示出各个关节的移动或转动。采用 D-H 坐标法表示, 首先需确认各个关节的参数然后制成 D-H 参数表, 表 1 为清扫机械臂的 D-H 参数。其中转动关节的关节变量为  $\theta_i$ ; 移动关节的关节变量为  $d_i$ 。

表1 清扫机械臂D-H参数表

Table 1 Cleaning picker D-H parameter table

关节 $i$	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$	关节变量
1	$\pi$	$L_0$	0	$-\pi/2$	$L_0$
2	$\theta_2$	0	$L_1$	$-\pi/2$	$\theta_2$
3	$\pi$	$L_2$	0	0	$L_2$
4	$\theta_4$	0	$L_3$	$\pi/2$	$\theta_4$

表 1 中的关节变量为  $L_0$ 、 $\theta_2$ 、 $L_2$  和  $\theta_4$ , 各值由清扫机械臂的关节运动决定:  $L_2$  为移动副, 其取值范围为 150~1410 mm;  $d_1$ 、 $a_3$ 、 $a_4$  是定值, 由清扫机械臂的机械结构决定, 在设计中  $d_1 = L_1 = 100$  mm,  $a_3 = L_3 = 1300$  mm,  $a_4 = L_4 = 4200$  mm,  $L_0$  为移动副, 其取值范围为 -900~900 mm。

### 2.1.2 机械臂运动学模型

机械臂可看作一系列由关节连接起来的连杆组成的一个开式运动链, 由这一系列连杆通过转动或移动关节连接而成, 为了研究机械臂的运动学, 在机械臂的每一连杆上建立一个坐标系, 然后用其次变换的方法来描述这些坐标系之间的相对位置和位姿<sup>[11]</sup>。

根据运动学数学基础知识和机械臂 D-H 参数表建立清扫机械臂的运动学模型即系统的总变换矩阵  $T$ , 各个关节的坐标变换矩阵  $T_0^1$ 、 $T_1^2$ 、 $T_2^3$ 、 $T_3^4$  为:

$$\begin{aligned} T_0^1 &= \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & L_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, T_1^2 = \begin{pmatrix} c_2 & 0 & -s_2 & L_1 c_2 \\ s_2 & 0 & c_2 & L_1 s_2 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ T_2^3 &= \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, T_3^4 = \begin{pmatrix} c_4 & 0 & s_4 & L_3 c_4 \\ s_4 & 0 & -c_4 & L_3 s_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

上述矩阵中, 令  $s_i = \sin \theta_i$ ,  $c_i = \cos \theta_i$ , 将已求得各个关节坐标变换矩阵相乘可得到系统的总变换矩阵  $T$ , 即:

$$T = T_0^1 T_1^2 T_2^3 T_3^4 = \begin{pmatrix} c_2 c_4 & s_2 & c_2 c_4 & u \\ -s_4 & 0 & c_4 & -L_3 s_4 \\ c_4 s_2 & -c_2 & s_2 s_4 & v \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中,  $u = L_2 s_2 - L_1 c_2 + L_3 c_2 c_4$ ,  $v = L_0 - L_2 c_2 - L_1 s_2 + L_3 c_4 s_2$ , 式(2)即为机械臂的运动学模型。

### 2.1.3 机械臂逆运动学分析

在已知机械臂末端位置和位姿的条件下, 求解各个关节变量的过程称为求机械臂运动学逆解, 求解出的逆解可为机械臂运动轨迹控制。

假设清扫机器人的机械臂末端位姿矩阵  $B$  在基坐标  $x_0$ - $z_0$  中的表达式为:

$$B = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

使式(2)和式(3)相等:

$$T = B \quad (4)$$

由式(4)左右两端(1,1), (1,2)元素对应相等:

$$\begin{cases} n_x = \cos \theta_2 \cos \theta_4 \\ o_x = \sin \theta_2 \end{cases} \quad (5)$$

求得  $\theta_2 = \arcsin o_x$ ,  $\theta_4 = \arccos \left[ \frac{n_x}{\cos(\arcsin o_x)} \right]$ 。

又由式(4)左右两端(1,4), (2,3), (3,2), (3,4)元素对应相等:

$$\begin{cases} p_x = L_2 \sin \theta_2 - L_1 \cos \theta_2 + L_3 \cos \theta_2 \cos \theta_4 \\ a_y = \cos \theta_4 \\ o_z = -\cos \theta_2 \\ p_z = L_0 \cos \theta_2 - L_1 \sin \theta_2 + L_3 \cos \theta_4 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (6)$$

求得  $L_0 = \frac{L_3 a_y o_x - p_z - L_1 o_x}{o_z}$ ,  $L_2 = \frac{p_x - L_1 o_z + L_3 o_z a_y}{o_x}$ 。

由上述求得的解, 可得出清扫机器人机械臂逆运动学解析关系式为:

$$\begin{cases} L_0 = \frac{L_3 a_y o_x - p_z - L_1 o_x}{o_z} \\ \theta_2 = \arcsin o_x \\ L_2 = \frac{p_x - L_1 o_z + L_3 o_z a_y}{o_x} \\ \theta_4 = \arccos \left[ \frac{n_x}{\cos(\arcsin o_x)} \right] \end{cases} \quad (7)$$

给定机械臂的末端位姿矩阵,根据式(7)就可求出各个关节变量。

### 3 机械臂运动学仿真

在对太阳能光伏组件清扫之前,首先对清扫机器人机械臂进行简单的轨迹规划,以验证上文中机械臂的运动学方程求解算法。机械臂末端毛刷的运动轨迹、速度和位姿是连续的,因此需要采用连续路径运动的轨迹规划法确定各个关节变量的运动规律。根据上文的 D-H 参数表,用 Matlab Robotic Toolbox 建立机械臂模型。关节 1 为移动副,实现机械臂的左右移动,在建立机械臂模型时其移动范围为 0~900 mm;关节 2 为转动副,其转动范围为  $-\pi\sim\pi$ ;关节 3 为移动副,实现机械臂的上下移动,在建立机械臂模型时其移动范围为 150~1410 mm;关节 4 为转动副连接末端执行器,其转动范围为  $-\pi/2\sim\pi/2$ ;其中立柱长度为 1410 mm,大臂长度为 1300 mm;根据已知参数在 Matlab Robotic Toolbox 中编写程序得到机械臂仿真模型,运行 Matlab 程序得机械臂初始状态位姿,如图 4 所示。

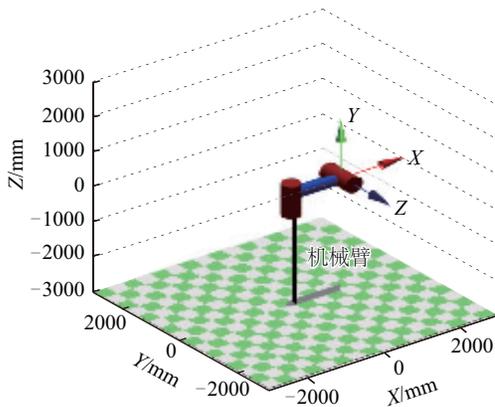


图4 机械臂初始位姿

Fig. 4 Initial pose of manipulator

用建立的 Matlab 机械臂模型进行模拟仿真,设置各个关节的初始状态为  $C=[0,0,0,0]$ ,末端状态为  $D=[900, \pi/2, 1500, \pi/2]$ 。在 Matlab 程序中把初始状态和末端状态参数编入其中,机械臂动作时间为 18 s。运行 Matlab 程序得到机械臂末端位姿及整个运动过程中的运行轨迹路线,如图 5 所示。

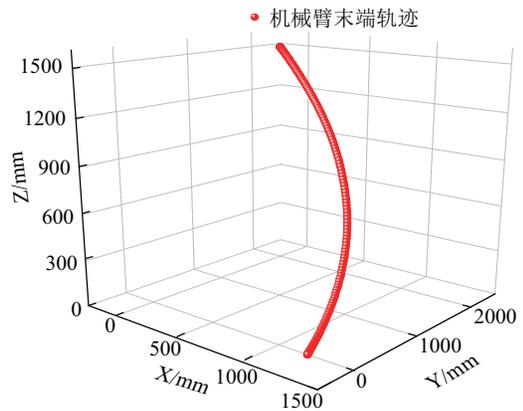


图5 机械臂末端位姿及运行轨迹路线

Fig. 5 End position and path of manipulator

在仿真程序运行结束后,得到仿真过程中各个关节的位置变化曲线,如图 6 所示。

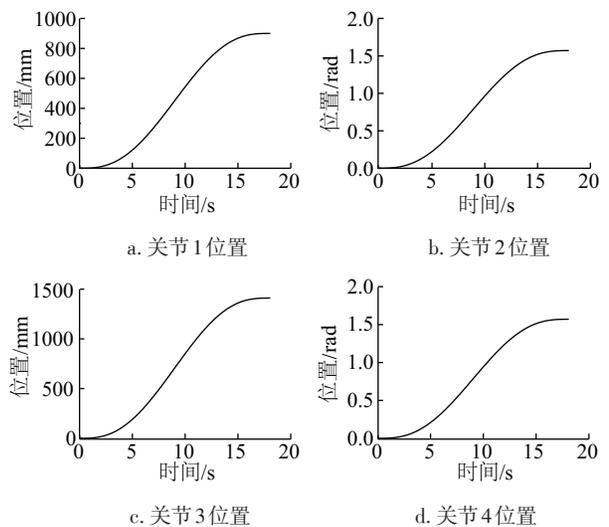
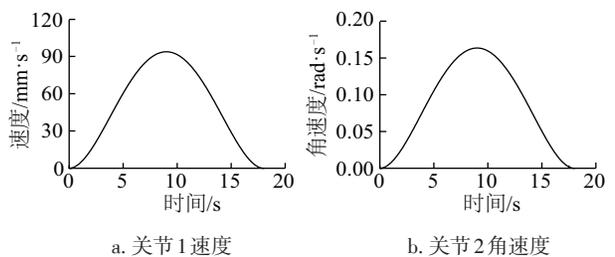


图6 机械臂各关节位置变化曲线图

Fig. 6 Curve of position change of each joint of manipulator

机械臂各个关节的速度变化曲线如图 7 所示,关节 1 与关节 3 为速度的变化,关节 2 和关节 4 表现为角速度的变化。从图 7 中可知,各个关节的速度变化都是从零开始增加到一个最大值然后慢慢减小为零,速度变化较平缓,无突变的情况。



a. 关节 1 速度

b. 关节 2 角速度

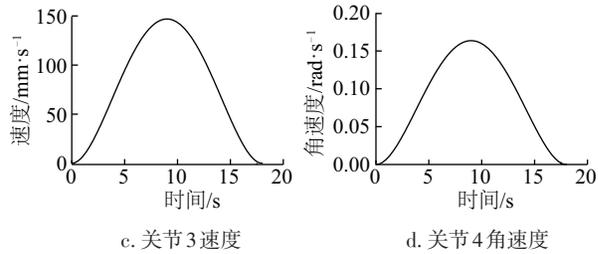


图7 机械臂各关节(角)速度变化曲线图

Fig. 7 Curve of velocity and angular velocity variation of each joint of manipulator

机械臂各个关节的加速度和角加速度变化曲线如图8所示,其中关节1与关节3为加速度随时间变化曲线,关节2与关节4为角加速度随时间的变化曲线。从图8中可看出,各个关节的加速度都是按照余弦函数曲线的方式变化,说明运动过程加速度平缓,因此得到的速度变化是光滑曲线。

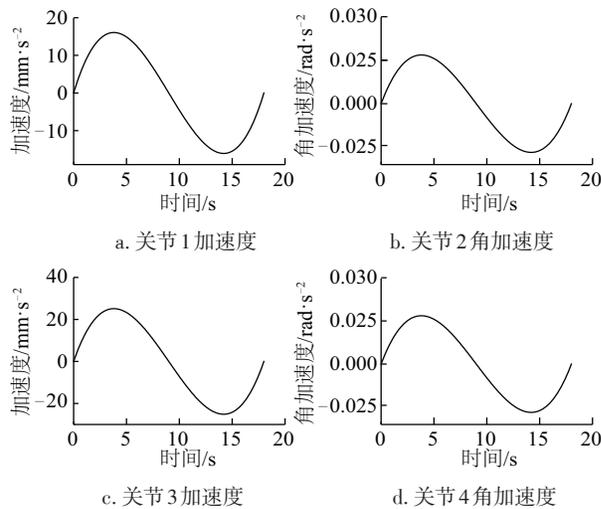


图8 机械臂各关节(角)加速度变化曲线图

Fig. 8 Curve of acceleration and angular acceleration change of each joint of manipulator



a. 初始状态

b. 中间状态

c. 末端状态

图9 机器人状态图

Fig. 9 Initial state diagram of robot

从仿真结果可看出,机械臂从零点到清扫起始点末端执行器(毛刷)的轨迹光滑且连续;各个关节的速度、角速度变化平缓,无突变的情况,可看出当各个关节从初始位置开始运动到末端位置停止时,速度变化为零开始增加达到最大后开始慢慢减小到零。各个关节的加速度和角加速度变化曲线均呈正弦曲线变化。

## 4 实验

依托本课题组自行开发的太阳能光伏组件干式清扫机器人进行实验。光伏组件最佳安装角度与当地纬度、太阳高度角、太阳直接辐射量等因素有关,以甘肃省武威市(北纬 $37.93^\circ$ )某大型光伏发电厂(50 MW)的光伏组件安装角度 $37^\circ$ 为依据,实验中光伏组件安装角度与之相同。光伏组件安装高度为光伏组件最低处离地面400 mm。实验中清扫机器人的主要结构参数如表2所示。清扫机器人初始位姿如图9a所示,首先让移动平台靠近太阳能光伏组件,然后机械臂开始动作,运动过程中的一个状态如图9b所示,最后机器人达到末端状态(清扫起始点)如图9c所示。

表2 清扫机器人主要结构参数表

Table 2 Main structure parameters of cleaning robot

构件参数	数值	构件参数	数值
水平导轨长度/mm	1800	大臂长度/mm	1300
立柱高度/mm	1510	毛刷长度/mm	4200

测量机械臂从零点状态到达末端状态过程中,各个关节的速度和角速度的数值,把得到的数值拟合成曲线,如图10所示。

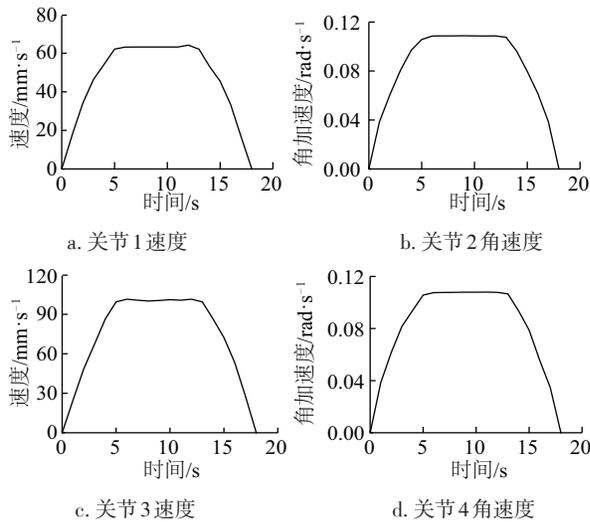


图 10 机械臂各关节(角)速度变化曲线

Fig. 10 Velocity and angular velocity curve of each joint of manipulator

根据实验数据,可得出水平机构移动的平均速度为 49.38 mm/s, 竖直机构的升降速度为 73.80 mm/s, 转动关节 2 的平均角速度为 0.0815 rad/s, 转动关节 4 的平均角速度为 0.0809 rad/s。从机械臂各关节(角)速度变化曲线图(图 10)可知,各个关节的最大速度均大于平均速度且均在设计范围之内。由实验所得速度变化曲线与仿真所得速度变化曲线对比可知:仿真结果速度为光滑曲线,其变化过程为先增加到最大速度后逐渐减小为零,这种速度变化为理想状态;而实验结果速度变化是先快速增加到速度最大值,在速度最大值时运动一段距离,最后速度减小为零。

实验结果与仿真结果的平均速度基本相同,仿真实验在理想状态下完成,未考虑外界和机器本身的影响因素,在实验中由于阻尼、振动和机构间的摩擦等影响因素导致仿真得到的速度最大值都大于实验速度的最大值,说明实验所得的速度变化不是最优,所以对机械臂的控制需进一步改进。但实验结果机械臂末端执行器(毛刷)的运动轨迹与目标轨迹的误差较小,满足机械臂运动的要求。

## 5 结 论

1) 介绍一种移动式太阳能光伏组件清扫机器人的结构,用 SolidWorks 建立机器人三维模型,清扫机器人三维模型由移动平台和机械臂组成。清扫机器人在对光伏组件的清扫过程中移动平台到

达最优位置后机械臂动作完成光伏组件的清扫。

2) 采用 D-H 方法建立机械臂运动学模型,根据运动学数学基础知识和机械臂的 D-H 参数得到机械臂系统的总变换  $T$ 。对机械臂进行运动学分析,通过逆解的求解得出清扫机器人末端空间位姿参数与各个关节运动参数的解析关系。

3) 用 Matlab Robotic Toolbox 对机械臂进行仿真研究,在仿真中得到末端执行器的运动轨迹、各个关节的速度、各个关节的加速度等;分析仿真数据,确定理论求得的运动学模型及通过逆解求得的各个关节运动参数解析关系完全适合于该清扫机器人的运动规划。

4) 实验测量所得数据与仿真结果对比基本一致,说明所用方法的有效性以及建立的机械臂运动学模型的正确性,所得结果可为清扫机器人机械臂的控制规划提供依据。

## [参考文献]

- [1] 李启明, 郑建涛, 徐海卫, 等. 西藏太阳能热发电探讨[J]. 太阳能学报, 2012, (增刊): 57—62.
- [1] Li Qiming, Zheng Jiantao, Xu Haiwei, et. Discussion on solar thermal power in Tibet region[J]. Acta Energeiae Solaris Sinica, 2012, (Sup 1): 57—62.
- [2] 车永毅. 平板型太阳能集热器关键参数变化对其集热效率影响的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
- [2] Che Yongyi. Study on the effect of the key parameters of flat type solar collectors on its thermal efficiency [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016.
- [3] 刘 阳, 杨安礼, 潘健昌, 等. 平板光伏阵列间隔处的太阳能利用及评估[J]. 太阳能学报, 2015, 36(9): 2112—2116.
- [3] Liu Yang, Yang Anli, Pan Jianchang, et. Solar energy utilization and assessment at the interval of flat panel photovoltaic array[J]. Acta Energeiae Solaris Sinica, 2015, 36(9): 2112—2116.
- [4] 王庆鹏. 基于网络的机器人遥操作研究[D]. 沈阳: 中国科学院沈阳自动化研究所, 2001.
- [4] Wang Qingpeng. Research on teleoperation of robot based on network [D]. Shenyang: Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2001.
- [5] 宋佐时, 易建强. 移动机械手控制研究进展[J]. 机器人, 2003, 25(5): 465—470.
- [5] Song Zuoshi, Yi Jianqiang. Research progress of mobile manipulator control [J]. Robot, 2003, 25(5):

- 465—470.
- [6] Yamamoto Y, Yun X. Coordinating locomotion and manipulation of a mobile manipulator [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1992, 39 (6) : 1326—1332.
- [7] Yu Qing, Chen I-Ming. A general approach to the dynamics of nonholonomic mobile manipulator systems [J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 2002, 124(4): 512.
- [8] Seraji H. An on-line approach to coordinated mobility and manipulation[A]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1993. Proceedings [C]. IEEE, 1993, 1: 28—35.
- [9] Perrier C, Dauchez P, Pierrot F. A global approach for motion generation of non-holonomic mobile manipulators [A]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998. Proceedings [C], IEEE, 1998, 4: 2971—2976.
- [10] 朱志明, 马国锐, 刘 晗, 等. 箱型钢结构轨道式焊接机器人D-H模型与连续轨迹规划[J]. 焊接学报, 2017, 38(12): 95—98.
- [10] Zhu Zhiming, Ma Guorui, Liu Yan, et al. The D-H model and continuous trajectory planning of the box-type steel structure orbital welding robot [J]. Journal of Welding, 2017, 38(12): 95—98.
- [11] 勾治践. 工业机器人路径规划及轨迹优化研究[D]. 长春: 吉林大学出版社, 2016.
- [11] Gengi. Path planning and trajectory optimization of industrial robots [D]. Changchun: Jilin University Press, 2016.

## D-H MODEL AND MOTION PLANNING OF MOBILE CLEANING MANIPULATOR FOR PHOTOVOLTAIC MODULE

Ning Huifeng, Yan Zhibin, Li Xiao, Che Guodong, Wang Weizhi, Gao Yuan  
(School of Mechanical & Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** A mobile photovoltaic module cleaning robot was designed for the cleaning operation of the photovoltaic power station terrain environment. The kinematic model of the manipulator is established by using the D-H method. The inverse kinematics solved through specific algebraic method so as to deduce the analytic relationship between the spatial pose parameters and the joint variables at the end of the manipulator. The trajectory planning of the manipulator has been carried out under the condition of given end pose, the motion state of each joint is simulated by Matlab, and then the simulation results are compared with the experimental data. The results show that the established kinematic model and the analytical relationships of each joint motion parameters obtained by the inverse solution are suitable for the motion planning of the cleaning robot arm, which provides a basis for the control planning of the mobile cleaning robot.

**Keywords:** mobile robots; photovoltaic; kinematics analysis; motion planning; D-H model