

# 清洗机械手结构设计及其路径规划



孙新龙, 李昀芮, 田明政, 张俊宇, 晁永生\*

新疆大学机械工程学院, 新疆乌鲁木齐 830017

**摘要:** 机器人可以代替人完成很多复杂和重复性的工作, 同时还可以代替人从事危险和有毒有害环境下的工作。目前的汽车清洗方式多为人力清洗, 费时且费力, 还容易损伤汽车表面及各种脏污会危害工作人员健康。汽车清洗机械手能够替代人进行清洗。清洗机械手的结构和清洗路径对清洗效率有重要影响, 论文对清洗机械手的结构进行设计并对其清洗路径进行规划。首先通过调研分析出所研究机械手需要具备的功能; 根据所需功能确定清洗机械手总体结构, 确保能完成轿车全方位的清洗; 其次对六自由度清洗机械手进行详细的结构设计, 通过连杆结构完成对抹布及其他清洗工具的夹持, 在连杆两侧装配滚筒, 确保机械手高效的完成对汽车的清洗, 并进行数字化三维建模; 最后, 在 matlab 环境下对机械手清洗路径进行规划, 保证机器人运动的平稳, 通过正向和逆向运动学求解, 完成清洗机械手的数字化运动仿真。

**关键词:** 清洗机械手; 结构设计; 路径规划

**DOI:** [10.57237/j.cst.2023.02.002](https://doi.org/10.57237/j.cst.2023.02.002)

## Structure Design and Path Planning for Cleaning Manipulator

Sun Xin-long, Li Yun-rui, Tian Ming-zheng, Zhang Jun-yu, Chao Yong-sheng\*

School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China

**Abstract:** Robots can replace people to complete many complex, and repetitive tasks, and can also replace people to work in dangerous and toxic and harmful environments. At present, most of the car cleaning methods are manual cleaning, which is time-consuming and laborious. It is also easy to damage the car surface and dirt will endanger the health of staff. The car cleaning robot can replace people to clean. The structure and cleaning path of the cleaning manipulator have an important impact on the cleaning efficiency. The paper designs the structure of the cleaning manipulator and plans its cleaning path. Firstly, the functions of the studied manipulator are analyzed through investigation; Determine the overall structure of the cleaning manipulator according to the required functions to ensure that the car can be cleaned in all directions; Secondly, carry out detailed structural design for the 6-DOF manipulator, complete the clamping of rags and other cleaning tools through the connecting rod structure, and assemble rollers on both sides of the connecting rod to ensure that the robot can effectively complete the cleaning of the car, and carry out digital 3D modeling; Finally, the cleaning path of the manipulator is planned in the MATLAB environment to ensure the smooth motion of the robot. The digital motion simulation of the manipulator is completed by solving the forward.

**Keywords:** Cleaning Manipulator; Structure Designation; Path Plan

---

基金项目: 新疆自治区大学生创新项目 (S202110755057).

\*通信作者: 晁永生, [cys21st@sina.com.cn](mailto:cys21st@sina.com.cn)

收稿日期: 2023-02-07; 接受日期: 2023-03-17; 在线出版日期: 2023-03-28

<http://www.computscitech.com>

## 1 引言

在私人汽车使用数量的迅猛增长以及汽车应用领域不断扩大的市场动力驱动下, 汽车清洗行业如雨后春笋, 迅速占据市场中的核心地位[1]。机械手已运用于化工项目[2]、临床医学[3]、水下作业[4]等领域, 设计汽车的全自动清洗机械手是为了节约时间和资源, 同时降低劳动强度和提高工作效率, 就成了未来发展方向[5]。在综合学习了美国、德国、日本等发达国家对飞机表面[6]和汽车清洗机械[7]的研究成果的基础上, 本项目结合中国当前的汽车市场现实情况清洗工作绝大多数仍依靠于手工清洗这一实际情况下提出的[8]。手工清洗操作上虽然简单便捷, 但其效率甚微以及清洗的效果不佳[9]; 同时, 工人将面临劳动强度大, 耗体力, 身体健康被威胁的风险。由于工人技术的良莠不齐导致污水的浪费[10], 而且还会造成严重污染, 对汽车也会造成明显的损害[11]。经过调研, 汽车清洗主要集中在小型车辆上[12]。基于此, 本项目设计一款自动式机械手, 对于复杂清洗轨迹的运动, 能够自主、灵活地规划、设计小型汽车的清洗工作, 该机械手可完全代替原有的工人, 它可广泛应用于汽车清洗行业, 解决汽车清洗行业的难题, 具有很高的实用价值[13]。

## 2 清洗机械手结构设计

### 2.1 清洗过程描述

机械手先运动到目标位置, 然后让腰关节和肩关节转动对准目标物。接下来肘关节和 2 个腕关节同时运动, 机械手从瞄准位置运动至目标物进行清洗, 机械头通过齿轮带动连杆使清洗端按照轨迹进行开合运动, 滚筒轴进行自转, 带动清洗棉进行旋转, 这样机械手就具有良好的空间姿态调节功能。

### 2.2 机械手组成

机械手的执行机构分为手部、手臂、躯干。

**手部:** 手部安装在手臂的前端。手臂的内孔中装有传动轴, 可把运用传给滚筒轴, 以转动开闭滚筒轴。

**手臂:** 手臂的作用是引导手指准确地抓住工件, 并运送到所需的位置上。为了使机械手能够正确地工作, 手臂的自由度都要精确地定位。

**躯干:** 躯干是安装手臂、动力源和各种执行机构的支架。一个具有四个转动关节的清洗机械手。机械手组成部分为: 底座基板, 齿轮杆, 连杆, 滚筒轴。其中, 电机带动齿轮运转, 从而牵动连杆使其带动滚筒轴的清洗工作, 滚筒轴在电机带动下可进行自转。

基板是安装手臂、动力源和各种执行机构的支架。机械手结构, 包括基板, 表面两侧中心对称均开有圆形安装孔, 且两个圆形安装孔内均插接有轴承, 两个所述轴承内圈表面分别插接有第一螺纹杆和第二螺纹杆, 且第一螺纹杆和第二螺纹杆外壁螺纹方向相反, 所述第一螺纹杆底端外壁与第二螺纹杆顶端外壁焊接, 所述第一螺纹杆和第二螺纹杆一侧外壁均螺纹连接有移动块, 且两个移动块一侧外壁均通过螺栓固定有连接块, 两个所述连接块一侧外壁均有螺钉连接的夹爪臂, 两个所述夹爪臂相对两侧外壁均焊接有轴套, 且两个轴套内分别插接有套管和套杆, 所述夹爪臂远离移动块的一端焊接有安装板, 且安装板一侧外壁通过螺栓固定有连接板, 所述连接板一侧外壁焊接有夹持板, 且夹持板顶部外壁焊接有三角板, 所述三角板一侧外壁与连接板外壁焊接。所述基板底部外壁焊接有固定杆, 且固定杆底端焊接有固定板。所述固定板底部外壁通过螺栓固定有电机, 且电机输出轴穿过固定板顶部外壁套接有联轴器。所述联轴器顶端插接有连接杆, 且连接杆远离联轴器的一端与第二螺纹杆底端焊接。

连杆底座部分, 用于将各部分手臂以及传动工具连接在一起, 使其进行灵活运转。

齿轮杆为传动的关键部分, 将电机的机械能转化为动能, 由两部分构成, 齿轮一侧焊接了一节连杆, 并在前端位置开出螺纹孔以便连接连杆等结构。连杆末端最终连接的为滚筒轴部分, 可由电机带动进行自转。

### 2.3 清洗机械手的运动学分析

机械手末端工作空间代表了机械手的活动范围, 是机械手运动灵活性的重要指标[14]。理论上讲, 前述机械手末端的运动范围可以覆盖机器人所在位置前后的一个球状区域。但实际上, 在关节结构和机构运动奇异性等因素的影响下, 机械手末端的运动空间受到了限制。因此, 如何在保证机械手运动便利的情况下, 使其各部分尺寸实现最优化, 以扩展机械手的工作空间, 增加运动灵活性, 是机器人总体设计和运动规划过程中的一个重要课题。运动学分析的是末端执行器

的位置和姿态与各关节变量之间的关系，是机械手空间研究的基础[15]。

## 2.4 仿真运算及分析

齿轮参数的计算：齿轮杆的模数  $m=1.5$ ，齿数  $z=16$ ，设计为渐开线圆柱齿轮，按正常齿制，齿高系数=1.0，径向间隙系数为0.25。由公式 $d=mz$ ,  $h=h_a+h_f$ ,  $h_a=h_a^* \times m$ ,  $h_f=h_a^* \times c^*$

因此齿宽取14mm, 杆柄宽度取8mm, 厚为10mm, 长为23.68mm。

机械手末端执行器的参数计算：由杠杆定理 $F_1l_2 = F_2l_1$ ，得到腕部负载分别如下：

$$F_3 = 10N$$

$$F_2 = \frac{F_3 l_3}{l_2} = 25N$$

$$F_1 = \frac{F_3 l_3}{l_1} = 10N$$

由扭矩公式：

$$T = FL \quad (1)$$

可得齿轮上的扭矩为：

$$T = T_1 - T_2 = 10 \times 31 + 25 \times 31 = 1.09N$$

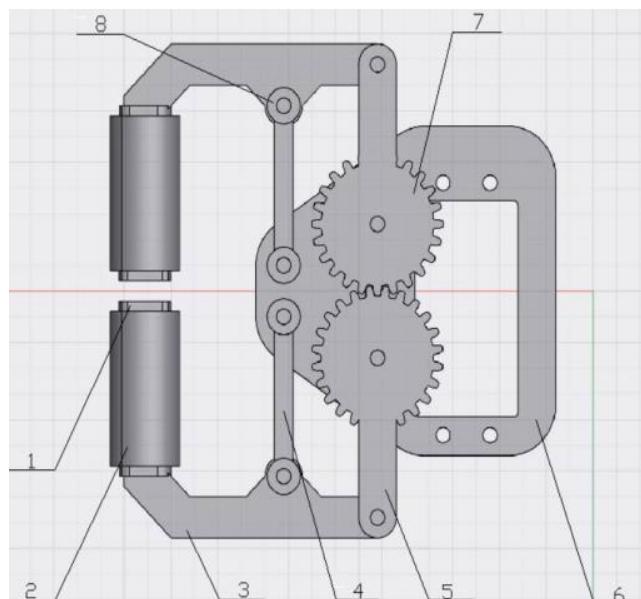
$$P = \frac{M_n}{9550} = \frac{609 \times 750}{9550} KW = 0.478KW$$

$$d = C^2 \sqrt{\frac{P}{N}} = 11.9mm < 15mm$$

通过计算验证设计参数合理。

## 2.5 零件参数选择

根据上述计算，确定零件参数表如表1，电动机参数如表2，机械手末端执行器如图1所示：



1-夹板；2-滚筒；3-连杆；4-机械连杆；5-齿轮杆；6-基板；7-齿轮；8-挡圈。

图1 末端执行器

表1 零件参数表

序号	名称	数量	材料	备注
1	夹板	2	Q235B	
2	滚筒	2	PVA	
3	连杆	2	Q235A	
4	机械连杆	2	Q235A	
5	齿轮杆	2	45	$m=1.5, z=16$
6	基板	1	Q235B	
7	齿轮	1	45	$m=1.5, z=24$
8	挡圈	8	Q235B	GB/T 894.1-1986

表2 电动机参数表

拓达交流伺服电机	功率: kw	额定转速: r/min	最高转速: r/min	法兰面最大尺寸: mm
SCGA-08C11AB	0.75	3000	4000	90

### 3 路径规划

#### 3.1 机械手模型的建立

机械手一般由数个移动或转动关节(运动副)通过刚体连杆串联而成。由于动力源的成本相比以前已经大幅降低,一般来说,每个关节都是一个相对独立的原动件,会提供一个平移(滑动或移动副)或转动(转动副)的自由度。在机械手工作时,通过关节的运动来改变相邻连杆之间的相对角度与位置,从而使其末端达到预定的位置与姿态。我们采用 D-H 参数法[16]在 MATLAB 软件上构建简易机械手模型。首先根据所选机械手的各段长度填写机械手 D-H 参数,使用 Link 函数,输入机械手关节的四个参数( $\alpha$ ,  $a$ ,  $d$ ,  $\theta$ ),其中四个参数分别对应关节角、连杆偏距、连杆长度、连杆转角;然后使用 qlim 函数限制关节转动角度或是移动距离;最后使用 SerialLink 函数来定义机械手,此处机械手命名为“six link”,由此得到在 matlab 中机械手模型如图 2 所示:

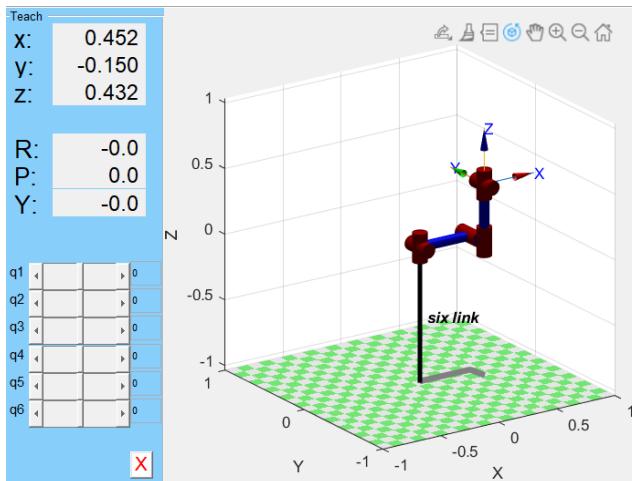


图 2 机械手模型

#### 3.2 工作空间可视化

首先我们对市面上大部分汽车车窗的大小进行调查、计算车窗面积求其平均值,由此确定机械手的大致工作空间;工作空间就是在实际作业时机械手末端所能到达的所有空间点的集合,是机械手运动灵活性的重要指标。在 MATLAB 的关节空间中运用 rand 函数随机生成变量,即

$$q = q_{min} + rand \cdot (q_{max} - q_{min}) \quad (2)$$

通过正向运动学求解出变换矩阵,最后运用 transl

函数得到点的三维坐标,本次选用 30000 个点来描述机械手的工作空间,其工作空间如图 3 所示:

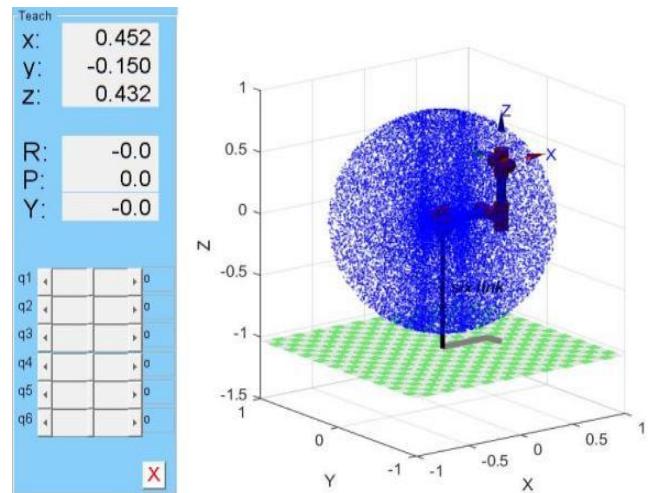


图 3 机器人工作空间

#### 3.3 轨迹规划仿真

考虑到机械手用来清洗汽车车窗,故设计出“S”型路径。先指定六个笛卡尔位姿,这六个位姿同时包含了末端执行器的方位与姿态信息,他们都位于  $x=0.6$  的平面之内。

设定运动时间的相关参数。为方便观察,设定整个运动发生在 5 秒之内,采样的时间间隔为 0.1 秒。

现在我们需要机械手在笛卡尔空间中做直线运动,而这种运动称作笛卡尔运动。该运动可以通过使用工具箱中 ctraj 函数来实现,即

$$Ts = ctraj(T1, T2, length(t))$$

其输入参数为初始与最后位姿,以及其时间步数。它将返回一个三维矩阵形式的轨迹。如果把这个三维矩阵看成是一个由数个二维矩阵叠起来的立方体,那么它的每一层就是每个采样点上机械手的位姿信息。

机械手的正运动学通常表述为如下的函数形式:

$$\xi_E = k(q) \quad (3)$$

它表明了末端执行器的位置和姿态是基于关节坐标的一个函数。而对于一个具有 N 个轴的机械手,则有

$$\xi_E \sim {}_E^0T = {}_1A_1^1A \cdots {}_{N-1}A_N^{N-1} \quad (4)$$

在已知机械手关节角求解机械手末端执行器位置

和姿态时，如果已经定义了两坐标系和相应的连杆参数，就能直接建立运动学方程。分别计算出各个连杆变换矩阵就能得出各个连杆参数的值。把这些连杆变换矩阵连乘就能得到一个坐标系{N}相对于坐标系{0}的变换矩阵：

$${}^0T = {}^0T_1 T_2 T_3 \cdots {}^{N-1}T_N \quad (5)$$

得到关节位置传感器的值，机械手末端连杆在笛卡尔坐标系里的位置和姿态就可以通过该矩阵计算出来。

进行逆向运动学求解，在给定期望的末端执行器位姿下求出所需要的的关节坐标，其函数形式如下：

$$q = k^{-1}(\xi) \quad (6)$$

通过 ikine6s 命令对这六个位姿对应的初始与最终关节坐标向量求解。再运用 squeeze 函数将各段轨迹连

接起来，运用画图命令，使其在一张图上显现出来轨迹，如图 4 所示：

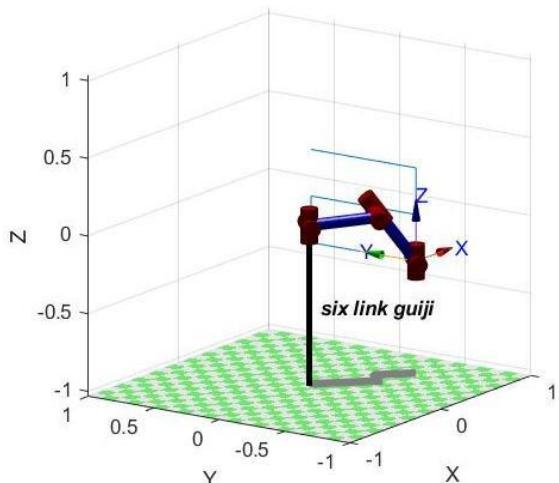
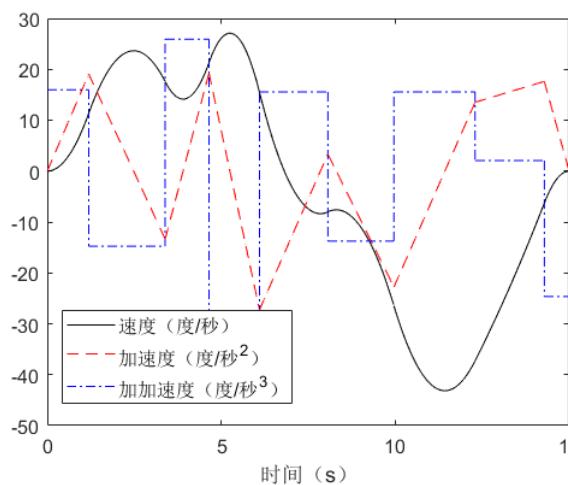
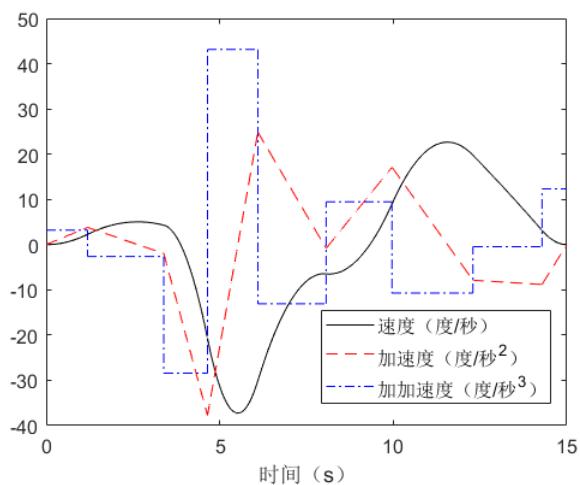


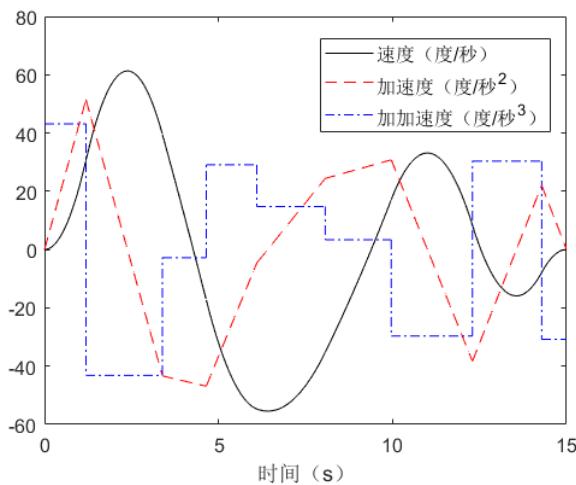
图 4 机械手末端轨迹



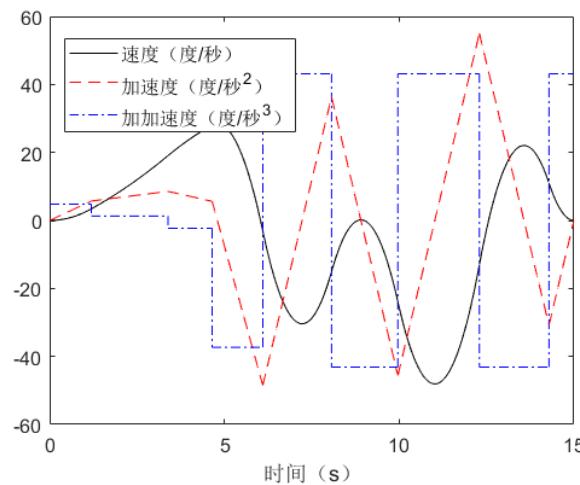
(a) 关节 1



(b) 关节 2



(c) 关节 3



(d) 关节 4

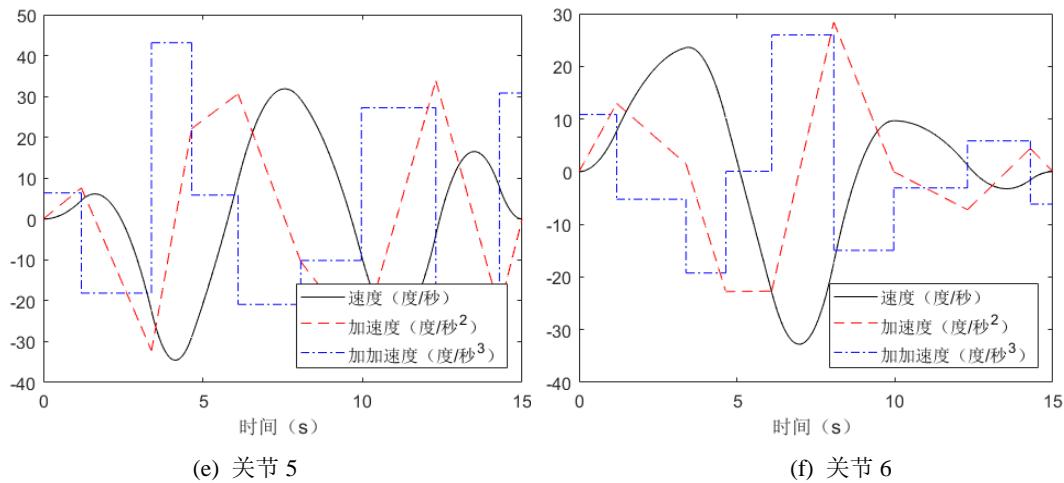


图 5 6个关节速度、加速度和加加速度变化

### 3.4 各关节运动状态的分析求解

运用 ikine6s 函数求出六个坐标下的关节值分别为  $t_1$ 、 $t_2$  等，再运用  $jtraj(t_1,t_2,t)$  函数生成不同时间内各个关节的角度  $q$  角速度  $qd$  角加速度  $qdd$ 。最后运用 subplot 函数将多个图画到同一平面内。各关节角速度、角加速度和角加加速度随时间的变化曲线如下图 5 所示。从图中可以看出，机械手的速度变化连续，没有发生突变，表示其运动较平稳。

4 结论

通过对中国汽车清洗行业现状的分析、清洗机械手的结构设计以及路径规划，得到以下结论：

- (1) 完成了机械清洗手的设计以及 3D 建模，在原有夹抓结构的基础上进行了改造，使前端夹抓处更改为轴承式海绵设计，有利于更好的接触车窗玻璃，并完成清洗。
  - (2) 采用 matlab 对机械手进行了建模，对运动路径进行了优化，然后进行了运动仿真，获取运动过程中的角度、速度和加速度，保证机械手运行的平稳。

## 参考文献

- [1] 张远望. 国内外汽车清洗机的发展现状 [J]. 科技与企业, 2015 (21): 174. DOI: 10.13751/j.cnki.kjyqy.2015.21.154.
  - [2] 李小燕. 化工业企业生产线搬运机械手电气控制系统的设计——评《化工企业管理》[J]. 塑料工业, 2020, 48 (04): 176.

- [3] 姚方辉, 扶玉珍, 李文仿. 一种临床微创手术用刚性可控机械手设计与研究 [J]. 中国医疗设备, 2022, 37 (10): 37-40.
  - [4] 张斌, 陈建文, 冷慧玲, 祝沛桢. 水下相关组件单棒转移机械手的轨迹规划与控制 [J]. 机械工程师, 2022 (07): 101-105.
  - [5] 陈洁. 采用机械手清洗转向架 [J]. 国外机车车辆工艺, 2002 (06): 36.
  - [6] 何鑫. 飞机表面清洗机械臂的路径规划方法研究 [D]. 中国民航大学, 2014.
  - [7] 赵明理. 汽车全自动清洗机的设计研究 [J]. 清洗世界, 2017, 33 (02): 34-38.
  - [8] 胡韧. 汽车表面清洗机械手液压系统与电控系统设计 [J]. 轻工科技, 2017, 33 (06): 66-68.
  - [9] 李景春, 蒋玉杰, 张国忠. 飞机表面清洗机械手液压与电控系统设计 [J]. 机床与液压, 2005 (09): 92-94.
  - [10] 陈翠萍. 我国汽车清洗行业亟待规范 [J]. 交通与运输, 2009, 25 (03): 48-49.
  - [11] 滕俊杰. 基于 PLC 控制的汽车自动清洗机 [J]. 电声技术, 2019, 43 (03): 60-62.
  - [12] 王玥琦. 龙门式自动汽车清洗机的外形设计 [J]. 科技经济市场, 2016 (09): 9-10.
  - [13] 徐进, 石小龙. 全自动小型龙门式洗车机系统设计 [J]. 机械研究与应用, 2018, 31 (02): 91-92.
  - [14] 罗中正, 谢良喜, 罗刚, 加闯, 李昭. 基于摆缸关节的液压机械臂运动学及工作空间分析 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019 (02): 19-22. DOI: 10.13462/j.cnki.mmtamt.2019.02.006.
  - [15] 蔡文泉. 液压机械臂运动学及工作空间分析 [J]. 工程机械文摘, 2022 (05): 1-5.
  - [16] John J. Craig. 机器人学导论 [M] 北京: 机械工业出版社, 2006.