

拉伸机专用上下料机械手的运动学研究

申浩, 李耀明, 张煌, 任丽娟, 廖科伟

(中北大学 机械工程学院, 太原 030051)

摘要: **目的** 为了提升金属拉伸工作的效率和安全性, 适应人们对拉伸产品不断提升的高要求。**方法** 根据拉伸机的结构和工作流程设计具有四自由度的拉伸机专用上下料机械手, 运用 D-H 法构建机械手的运动学关系式, 并进行运动关系的计算。最后, 采用 Matlab 软件中的 Robotics Toolbox 工具箱来建立机械手的结构模型, 以及仿真机械手的工作运动状态。**结果** 模拟机械手的运动, 得出各关节的姿态和末端执行器的行径轨迹, 分析得出 3 个关节速度与角速度在初始与结尾处为 0, 且连续光滑。**结论** 根据仿真结果可知, 所设计的机械手运动符合加工实际, 可以顺利完成上下料的工作。

关键词: 拉伸机; 机械手; 运动学分析; Matlab

中图分类号: TH16; TP241.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)23-0128-04

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.23.022

Kinematics of Loading and Unloading Manipulator Special for the Stretcher

SHEN Hao, LI Yao-ming, ZHANG Huang, REN Li-juan, LIAO Ke-wei

(School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the efficiency and safety of metal stretching work, and adapt to people's high requirements for the continuous improvement of tensile products. According to the structure and workflow of the stretcher, the loading and unloading manipulator special for the stretcher with four degrees of freedom was designed. The kinematic relation of the manipulator was constructed in D-H method and calculated. Finally, the structural model of manipulator was established with the Robotics Toolbox in Matlab, and the operating movement state of the manipulator was simulated. Through the simulation of manipulator movement, the posture of each joint and the trajectory of end actuator were obtained. The analysis showed that the three joint velocities and angular velocities were zero at the beginning and end and continuously smooth. According to the simulation results, the movement of the designed manipulator conforms to the actual processing and can smoothly complete the loading and unloading work.

KEY WORDS: stretcher; manipulator; kinematics analysis; Matlab

拉伸机是将金属板拉伸成型的生产机器, 拉伸冲压是诸如铝制易拉罐等食品包装主要的加工方法^[1]。随着社会经济的发展, 工业水平的不断提高, 对拉伸机生产效率和安全性能的要求也随之提高, 但是在传统的加工过程中, 拉伸机的上下料由人工完成, 这就大大增加了生产的时间成本和不安全性。

机械手的问世为人们在提高生产自动化和生产效率等方面提供了新的思路, 1972 年我国生产出第

一台机械手, 随后机械手在很多加工领域和环节都扮演着不可替代的角色, 喷绘机械手、焊接机械手和装卸机械手等在生产中得到广泛的应用, 装备制造业得到了长足的发展^[2]。基于以上条件, 文中对拉伸工作中的上下料过程设计专用机械手, 以取代在待加工件在上下料时的人工操作, 机械手在金属拉伸中的应用会大大提高拉伸过程的安全性和效率^[3-4], 同时为后续食品的包装提供便利。

收稿日期: 2000-00-00

基金项目: 山西省先进制造技术重点实验室开放基金项目 (XJZZ201602)

作者简介: 申浩 (1993—), 男, 中北大学硕士生, 主要研究方向为先进深孔加工技术。

通信作者: 李耀明 (1977—), 男, 中北大学副教授, 主要研究方向为先进制造技术。

1 机械手的结构组成

拉伸机上下料机械手首先要将待拉伸的金属抓取到工作台，等到拉伸完成后，再将工件取下^[5]。根据拉伸机的结构和工作路径，设计图 1 所示的机械臂结构，分别是固定底座、腰部转台、大臂、小臂、腕部和末端夹取结构。其中有 4 个自由度：腰部转台的旋转运动、大小臂部结构的俯仰运动和腕部的回转运动。

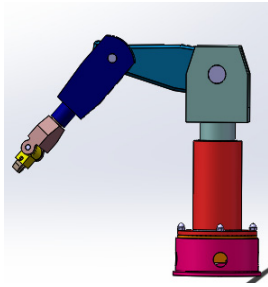


图 1 机械手结构
Fig.1 Manipulator structure

2 运动学分析

2.1 运动坐标系的建立

根据所设计机械臂的三维结构，采用 D-H 法建立机械手的运动学关系，推导末端执行器相对于极坐标的位姿状态。所谓 D-H 法，即在机械手的各个运动关节上建立固定坐标系，将各关节的位姿状况表示为 4×4 的矩阵形式，在通过矩阵之间的变换和计算来建立整个机械手的运动学方程^[6]。机械手坐标简化结构见图 2，在忽略手抓部分的抓取运动时，以固定基座为绝对坐标系，其余各关节处为相对坐标系建立计算模型。 θ 为各关节绕垂直旋转方向的回转角度； d 为两相邻关节在 z 轴方向上的公垂线之间的偏移距离； a 为各关节上公垂线之间的最短距离； α 为 2 个相邻关节间公垂线的偏移角度^[7]。

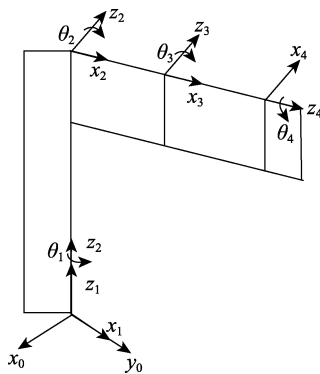


图 2 机械手坐标简化结构
Fig.2 Simplified coordinate structure of manipulator

根据机械手上下料的工作轨迹和位置关系，设计

机械手在上下料工作时的运动参数，见表 1。

表 1 机械手各关节 D-H 参数
Tab.1 D-H parameters of manipulator joints

杆件	l_i	α_i	d_i	参数 θ_i	回转范围/(°)
1	l_1	0	0	θ_1	-90 ~ 60
2	l_2	90°	0	θ_2	30 ~ 60
3	l_3	0	0	θ_3	-45 ~ 30
4	l_3	90°	0	θ_4	-180 ~ 180

2.2 运动学正解问题计算

运动学的正解问题是指通过各连杆的参数和关节运动量的矩阵表达式来计算末端执行器的运动轨迹。而描述两连杆 i 和 $i-1$ 之间的变换矩阵 ${}^{i-1}T_i$ 见式 (1)^[8-9]。

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & l_{i-1} \\ \cos \alpha_{i-1} \sin \theta_i & \cos \alpha_{i-1} \cos \theta_i & -\sin \alpha_{i-1} & -d_i \sin \alpha_{i-1} \\ \sin \alpha_{i-1} \sin \theta_i & \sin \alpha_{i-1} \cos \theta_i & \cos \alpha_{i-1} & d_i \cos \alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (i=1,2,3,4) \quad (1)$$

将表 1 中的参数分别代入到式 (1)，就可以得出式 (2) 的各连杆相邻坐标的变换矩阵的坐标表示。

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, {}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & l_2 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^3T_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & l_3 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

通过式 (2) 中 4 个公式的连续右乘可以得到在此运动参数的情况下，末端机械手抓最终的位姿状态。末端执行器的姿态用 0T_4 表示：

$${}^0T_4 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & l_2 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & l_3 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

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

2.3 机械手逆解问题

机械手的逆运动学问题是指在已知关节位姿状态验证连杆参数与关节变量的选取是否可以达到要求。文中采用代入法,根据式(4)连续左乘其他关节的逆矩阵,得到某一关节的角度或者位移^[10]。即:

$${}^0T_1 = ({}^1T_2)^{(-1)} ({}^2T_3)^{(-1)} ({}^3T_4)^{(-1)} = ({}^1T_2)^{(-1)} ({}^2T_3)^{(-1)} ({}^3T_4)^{(-1)} = {}^0T_1 T_2 T_3 T_4 \quad (4)$$

则各关节坐标的变换逆矩阵如下:

$$\begin{aligned} ({}^0T_1)^{(-1)} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ ({}^1T_2)^{(-1)} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & \sin \theta_2 & 0 & -l_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ ({}^2T_3)^{(-1)} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & \sin \theta_3 & 0 & -l_2 \\ -\sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ ({}^3T_4)^{(-1)} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & \sin \theta_4 & 0 & -l_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_4 & -\cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

将式(5)中4个矩阵带入到式(4)中,则末端执行器到达指定位置时,每个关节的转动角度为:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= -\arccos \left(\frac{p_x n_y}{\sqrt{p_x^2 + p_y^2}} + \frac{p_y n_x}{\sqrt{p_x^2 + p_y^2}} \right) \\ \theta_2 &= \arcsin \left(\frac{p_z - L_4 \sin \theta_4 + a_z \cos \theta_4}{L_2} \right) \\ \theta_3 &= \sin \theta_4 n_z - a_z \cos \theta_4 - \theta_2 \\ \theta_4 &= -\arctan(p_y / p_x) \end{aligned} \quad (6)$$

3 机械手的运动学仿真

以文中设计的机械手为结构基础在 Matlab 中建立三维模型^[11],根据之前部分的参数设计和逆运动学的计算进行仿真,根据拉伸机的结构,以机械手基座为坐标原点,设定机械手在开始时的坐标变量为 $[0 \ \pi/3 - \pi/4 \ 0]$,设机械手在结束时的关节变量为 $[\pi/3 \ \pi/6 - \pi/6 \ 0]$,4个部分对应连杆的长度分别为 0.15, 0.35, 0.35, 0.2 m,以此在仿真软件中设定初始状态和结束状态,在根据表1设置运动参数,则可以规划出机械手手抓在工作过程中的轨迹^[12]。拉伸机上下料机械手末端执行器的取料工作轨迹见图3。从图3中可以看出,在设定好起点与终点的前提下,执行器可以

顺利地工作过程,到达预期的位置^[13]。

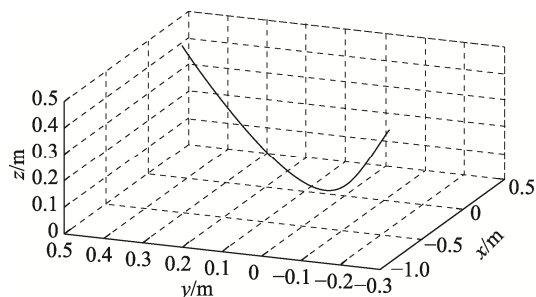


图3 机械手末端执行器轨迹规划

Fig.3 Trajectory planning of end actuator of the manipulator

机械手的运动是各关节协同运动的结果^[14],所以通过对手抓运动轨迹的模拟,不仅能够得到机械手末端执行器的空间轨迹,还能通过逆运动学的分析绘制出机械手每一个关节的位移(角位移)、速度(角速度)和加速度(角加速度)随时间的变化曲线。设计的机械手共有4个关节,在进行仿真时,在研究末端执行器位姿的过程中,将机械手手腕关节看作固定于小臂上的关节,静止不动。则其余3个关节的运动情况见图4—6。

3个关节的位移、速度和加速度随时间变化的仿真曲线见图4—6。三关节在工作过程中做单方向运动,关节1和关节2先加速运动,后做减速运动,在起始和末尾处,各个关节的速度都为零即为停止状态,且各关节的加速度曲线都为正弦曲线,说明关节在运动过程中,加速度连续,没有速度的突然改变,

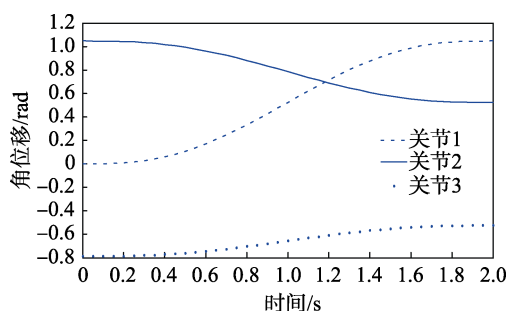


图4 3个关节的位移曲线

Fig.4 Displacement curve of three joints

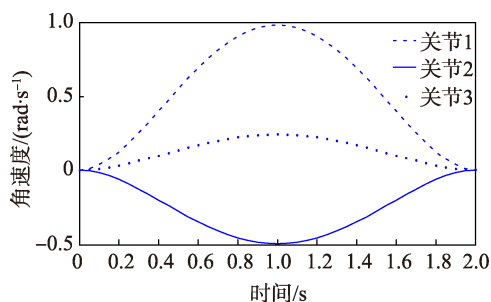


图5 3个关节的速度曲线

Fig.5 Velocity curve of three joints

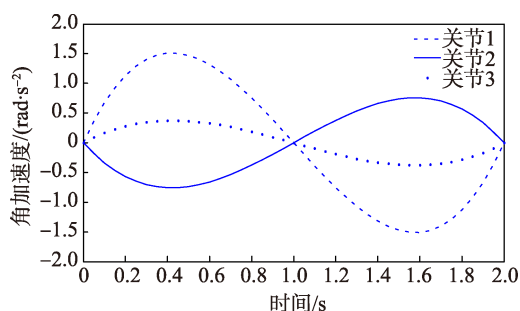


图6 3个关节的角加速度曲线

Fig.6 Angular acceleration curve of three joints

关节1和关节2在工作中的运动变化比较大, 关节3的运动变化比较小。由此可知, 机械手在工作过程中运行平稳, 可以顺利完成上下料的工作^[15]。

4 结语

根据对金属拉伸机结构和工作流程的深入分析, 文中设计了具有四自由度的拉伸机专用上下料机械手的总体结构, 并依据D-H法对机械手的上料过程进行正、逆运动学分析。依据理论分析, 再利用Matlab对腰部、肩部和肘部3个关节进行运动状态仿真, 得到了每个关节的位姿状态, 仿真实验结果表明各关节运行加速度连续、平稳, 从而验证了连杆参数设计和结构设计的合理性, 为机械手进一步的设计与研制提供了参考。

参考文献:

- [1] 常云. 我国工业机器人发展现状浅析[J]. 数码世界, 2016(7): 72—73.
CHANG Yun. Analysis on the Development Status of Industrial Robots in China[J]. Digital Space, 2016 (7): 72—73.
- [2] BODEN M, BRYSON J, CALDWELL D, et al. Principles of Robotics: Regulating Robots in the Real World[J]. Connection Science, 2017, 29(2): 124—129.
- [3] 武金艺, 黄金凤, 李炜. 基于SolidWorks和ADAMS的装车机械手运动仿真[J]. 机床与液压, 2016, 44(9): 52—56.
WU Jin-yi, HUANG Jin-feng, LI Wei. Kinematics Simulation of Loading Manipulator Based on Solid-Works and ADAMS[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44(9): 52—56.
- [4] 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
CAI Zi-xing. Robotics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015
- [5] 杨森, 沈惠平, 强恒存, 等. 轮胎上下料机械手的设计及其动力学特性分析[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2018, 30(1): 61—69.
YANG Seng, SHEN Hui-ping, QIANG Heng-cun, et al. Design and Dynamic Analysis of Gripper for

- Loading and Unloading Tyres[J]. Journal of Changzhou University(Natural Science Edition), 2018, 30(1): 61—69.
- [6] OZAWA R, HASHIRII K, YOSHIMURA Y, et al. Design and Control of a Three-fingered Tendon-Driven Robotic Hand with Active and Passive Tendons[J]. Autonomous Robots, 2014, 36(1/2): 67—78.
- [7] REN X, MALIK J. Learning a Classification Model for Segmentation[C]// IEEE International Conference on Computer Vision, Proceedings IEEE, 2008(1): 10—17.
- [8] 陆佳皓, 平雪良, 李朝阳. 基于MATLAB Robotic Toolbox的关节型机器人运动仿真研究[J]. 机床与液压, 2017, 45(17): 60—62.
LU Jia-hao, PING Xue-liang, LI Chao-yang. Research on Simulation of Revolute Robot Motion Based on MATLAB Robotics Toolbox[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(17): 60—62.
- [9] MARCHESE A D, TEDRAKE R, RUS D. Dynamics and Trajectory Optimization for a Soft Spatial Fluidic Elastomer Manipulator[J]. International Journal of Robotics Research, 2015(8): 2528—2535.
- [10] 刘兴. 5R 关节型上下料机械手的动力学分析及其仿真的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
LIU Xing. The Dynamics Analysis and Simulation of 5R Multi-joint Loading-uploading Manipulator[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2015.
- [11] 李瑞峰, 马国庆. 基于Matlab 仿人机器人双臂运动特性分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(S1): 343—347.
LI Rui-feng, MA Guo-qing. Dual-arm Kinematic Characteristics Analysis of Humanoid Robot Based on Matlab[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2013, 41(S1): 343—347.
- [12] 雷韶. 6R 工业机器人的运动轨迹规划及仿真研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.
LEI Shao. The Motion Trajectory Planning and Simulation of 6R Industrial Robot[D]. Taiyuan: North University of China, 2017
- [13] YANG S, MACLACHLAN R A, RIVIERE C N. Manipulator Design and Operation for a Six-Degree-of-Freedom Handheld Tremor-Canceling Microsurgical Instrument[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 20(2): 761—772.
- [14] 姜立. 多关节机器人运动学与轨迹规划及仿真研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
JIANG Li. Multiple Joint Robotic Kinematics and Trajectory Planning and Simulation Research[D]. Changchun: Jilin University, 2016
- [15] 史小华, 王洪波, 孙利, 等. 外骨骼型下肢康复机器人结构设计及动力学分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(3): 41—48.
SHI Xiao-hua, WANG Hong-bo, SUN Li, et al. Design and Dynamic Analysis of an Exoskeletal Lower Limbs Rehabilitation Robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(3): 41—48.