

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.03.004

基于 ADAMS 的安全阀自动上料 机械手运动学研究

刘明亮, 朱海清, 李超

(江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214122)

摘要:针对目前安全阀离线校验阀体上料时,存在的效率低、空间要求高等问题,课题组提出了一种安全阀自动上料机械手,并根据安全阀离线校验的工况需求,在 SolidWorks 软件中建立了该机械手的三维模型。为了更好地制定运动控制方案及制造物理样机,课题组对该机械手进行运动学研究:采用 D-H 法建立了机械手的运动学方程,并基于 ADAMS 软件对机械手整体上料过程进行了运动学仿真分析,得到了机械手在上料过程中的位移、速度和加速度等运动特性曲线。研究表明:所有运动特性曲线变化平稳,无突变现象,验证了该自动上料机械手物理样机制造的可行性,提高了安全阀离线校验效率。

关键词:安全阀;机械手;D-H 法;ADAMS 软件;运动特性曲线

中图分类号:TH122 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2020)03-0019-05

Kinematic Study of Safety Valve Auto-Loading Manipulator Based on ADAMS

LIU Mingliang, ZHU Haiqing, LI Chao

(School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: In view of the problems of low efficiency and high space requirement existing in the current off-line verification of valve body loading of safety valve, an auto-loading manipulator of safety valve was proposed. According to the requirements of off-line verification of safety valve, a three-dimensional model of the manipulator was established in SolidWorks software. In order to make a better motion control scheme and make a physical prototype, it was necessary to study the kinematics of the manipulator. The kinematics equation of the manipulator was established by D-H method, and the kinematics simulation analysis of the whole loading process of the manipulator was carried out based on ADAMS software. The movement characteristic curves of displacement, velocity and acceleration of the manipulator in the loading process were obtained. The results show that all the motion characteristic curves change smoothly without mutation, prove the feasibility of the physical prototype manufacturing of the manipulator, and improve the efficiency of safety valve off-line calibration.

Keywords: safety valve; manipulator; D-H method; ADAMS; kinematic characteristic curve

安全阀是承压类设备必不可少的安全附件,其动作可靠性直接关系到设备和人身安全,因此国家规定,安全阀每年至少需要校验一次^[1]。安全阀离线校验时需将待校验的安全阀搬运提升至一定高度的校验座上,该过程称为阀体上料。目前国内大多数校验站并

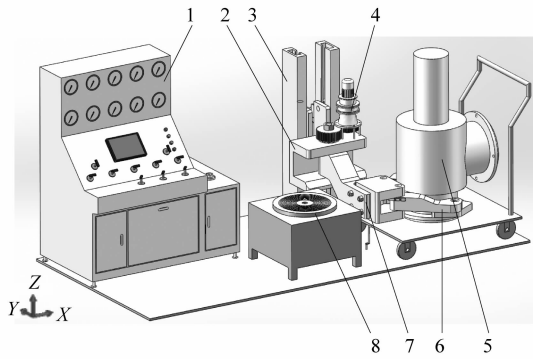
没有投入使用成型的专用阀体上料设备,目前常用的人工搬运上料和借助行车、叉车的人机辅助上料方式,都存在着效率低、安全系数低以及对空间要求高等问题,这些问题都亟待解决。

收稿日期:2019-11-27;修回日期:2020-01-20

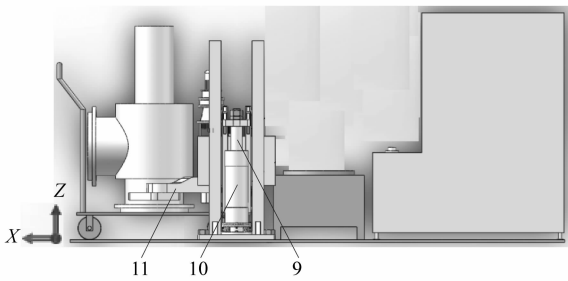
第一作者简介:刘明亮(1995),男,安徽天长人,硕士研究生,主要研究方向为安全阀离线校验自动上料技术。E-mail: 975305708@qq.com

1 自动上料机械手整体结构

针对上述安全阀离线校验时阀体上料存在的问题,课题组设计了一种安全阀自动上料机械手。该机械手工作效率高,对空间要求低,最大负载工况可完成质量约为 1 t 的安全阀阀体上料。利用 SolidWorks 软件建立了该自动上料机械手整机三维模型如图 1 所示。



(a) 轴测图



(b) 后视图

1—数字化安全阀校验台;2—工作平台;3—机架;4—电机;5—待校验安全阀;6—右末端夹持器;7—转动大手臂;8—校验座;9—液压油缸活塞杆;10—液压油缸缸体;11—左末端夹持器。

图 1 SolidWorks 中的机械手三维模型

Figure 1 3D model of manipulator in SolidWorks

机械手运动学主要研究的是固连在机械手与各个关节上各坐标系之间的运动变换关系,是对机械手运动控制的先行准备,是建立机械手各构件与末端执行器的位置、姿态关系的一种方法^[2]。

2 自动上料机械手运动学数学分析

2.1 运动学分析方法

对机械手运动学研究主要通过建立 D-H 坐标系进行矩阵运算来实现^[3]。D-H 法是 1955 年 Denavit 和 Hartenberg 提出的一种机器人的通用描述方法,用连杆的参数描述机构的运动关系,这种方法使用 4×4 的齐次变换矩阵来描述 2 个相邻连杆之间的空间关系,把正向运动学计算问题转换为齐次变换矩阵的运算问题,以矩阵来描述机器人末端执行器相对于参考坐标系的变换关系^[4]。

2.2 运动学方程的建立

为便于使用 D-H 法推导机械手的运动学方程,需将机械手机构进行简化,根据其构件几何特点,将机械手抽象为机构学上容易分析的机构杆系,建立机械手的连杆坐标系^[5]如图 2 所示,其中 $X_0Y_0Z_0$ 为建立在底座上的基坐标系。由此可得到相应的连杆参数如表 1 所示。

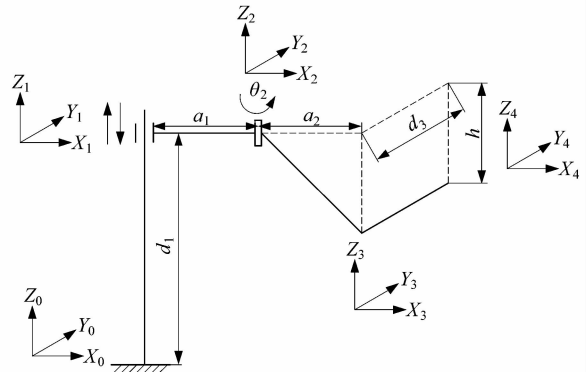


图 2 机械手连杆坐标系

Figure 2 Manipulator linkage coordinate system

图 2 中: d_1 表示工作平台距离底座的高度; a_1 表示工作平台的长度; a_2 表示转动大手臂的长度; d_3 表示转动大手臂到末端夹持器的距离; h 表示转动大手臂的高度; θ_2 表示电机带动转动大手臂转过的角度。

表 1 安全阀自动上料机械手 D-H 参数

Table 1 D-H parameter of auto-loading manipulator of safety valve

i	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	a_{i-1}/mm	d_i/mm	$\theta_i/(^{\circ})$
1	0	0	d_1	0
2	0	a_1	0	θ_2
3	0	a_2	$-h$	0
4	-90	0	d_3	0

表 1 中: a_{i-1} 表示连杆长度; α_{i-1} 表示连杆转角; d_i 表示连杆偏距; θ_i 表示关节角。

利用连杆参数可以得到相应各个连杆的变换矩阵,用齐次变换矩阵 ${}^i_{i-1}T$ 描述某局部坐标系相对于前一坐标系的位姿^[6]。

针对于广义连杆, ${}^i_{i-1}T$ 的变换通式为:

$${}^i_{i-1}T = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -d_i \sin \alpha_{i-1} \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & d_i \cos \alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

则末端夹持器坐标系相对于基坐标系的位姿矩阵为:

$${}^0_4T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T \quad (2)$$

将表 1 中的数据代入公式(1)可得:

$$\left. \begin{aligned} {}^0_1T &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \\ {}^1_2T &= \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & a_1 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \\ {}^2_3T &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \\ {}^3_4T &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

将公式(3)代入公式(2)可得末端夹持器相对于基坐标系的位姿变换矩阵,即为安全阀自动上料机械手的运动学方程:

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & -\sin \theta_2 & a_1 + a_2 \cos \theta_2 - d_3 \sin \theta_2 \\ \sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 & d_3 \cos \theta_2 + a_2 \sin \theta_2 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 - h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

3 自动上料机械手运动学仿真分析

ADAMS 是集建模、求解和可视化技术于一体的虚拟样机软件,是世界上目前使用范围最广、最富盛名的机械系统仿真软件^[7]。

本次自动上料机械手运动学仿真分析的目的模拟整个阀体上料过程,求得机械手在上料过程中的位移、速度及加速度等运动特性曲线。

3.1 三维模型导入

首先将 SolidWorks 中装配好的机械手整机三维模型转换为 Parasolid (*.x_t) 的文件格式,然后利用 ADAMS 和 SolidWorks 的接口,将三维模型导入 ADAMS 中的 View 模块,如图 3 所示。

3.2 定义运动函数

ADAMS 中驱动主要用运动函数来表示,最常见的为 STEP, AKISPL 以及 IF 函数。课题组采用 STEP 函数作为驱动的运动函数。STEP 使用三阶函数拟合空间 2 个点,函数表达式为 $STEP(x, \text{Begin At}, \text{Initial}$

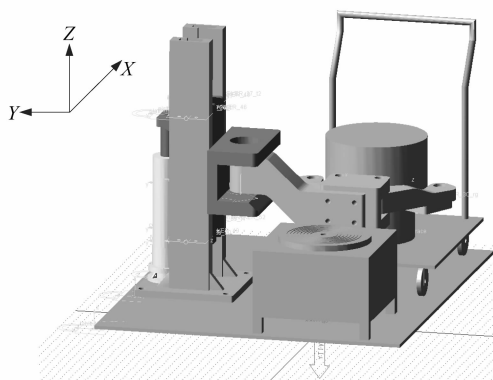


图 3 ADAMS 中机械手三维模型

Figure 3 3D model of manipulator in ADAMS

Function Value, End At, Final Function Value)^[8]。其中 x 为自变量, Begin At 和 End At 分别表示初始时刻和终止时刻, Initial Function Value 和 Final Function Value 分别对应初始时刻和终止时刻的值。

根据自动上料机械手的工作状态,分别定义了液压油缸驱动和电机驱动的运动函数。

液压油缸驱动: $STEP(\text{time}, 0, 0, 10, 335) + STEP(\text{time}, 20, 0, 25, -10)$ 。

电机驱动: $-STEP(\text{time}, 10, 0, 20, 90) * 1d$ 。

这 2 个驱动函数表示:在 0 ~ 10 s 内液压油缸活塞杆带动工作平台从而使安全阀沿 Z 轴正方向上升 335 mm,随后 10 ~ 20 s 内电机启动带动转动大手臂从而使安全阀绕 Z 轴顺时针旋转 90°,最后 20 ~ 25 s 内液压油缸活塞杆沿 Z 轴负方向移动,使安全阀下降 10 mm 落在校验坐上,完成阀体上料过程。

3.3 运动学仿真结果分析

设置仿真时间为 25 s,仿真步数为 1 000,可得自动上料机械手在整个阀体上料过程中的运动特性曲线。课题组选取液压油缸活塞杆、转动大手臂及末端夹持器组成的转动机构作为重点分析对象。

3.3.1 液压油缸活塞杆运动学分析

液压油缸活塞杆是提升安全阀的动力来源,其在上料过程中的运动特性曲线如图 4 ~ 6 所示。由于液压油缸活塞杆直接关系到阀体提升过程的平稳性,故有必要对其进行运动学分析。

由图 4 ~ 6 可知,液压油缸活塞杆在阀体上料过程中最大速度为 50.25 mm/s,方向沿 Z 轴正方向,最小速度为 3.00 mm/s,方向沿 Z 轴负方向;最大加速度和最小加速度大小均为 20 mm/s²,方向相反。并且不论是位移、速度及加速度曲线,均变化平稳,无突变冲击现象,验证了该自动上料机械手设计方案的可行性。

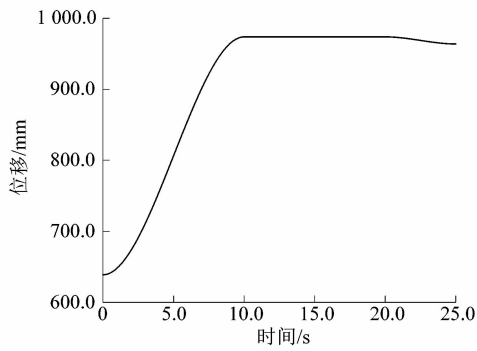


图4 液压油缸活塞杆位移变化曲线
Figure 4 Displacement curve of piston rod of hydraulic cylinder

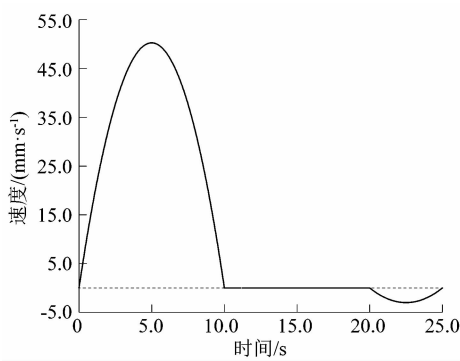


图5 液压油缸活塞杆速度变化曲线
Figure 5 Velocity curve of piston rod of hydraulic cylinder

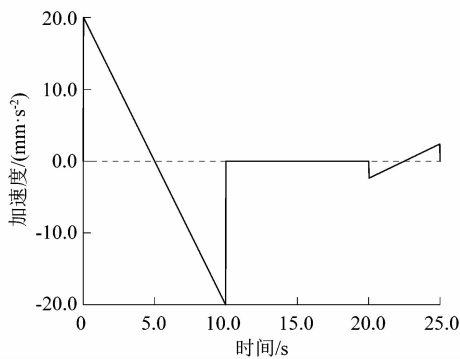


图6 液压油缸活塞杆加速度变化曲线
Figure 6 Acceleration curve of piston rod of hydraulic cylinder

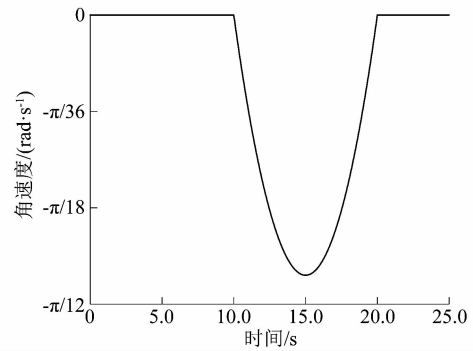


图7 转动机构角速度变化曲线
Figure 7 Angular velocity curve of rotating mechanism

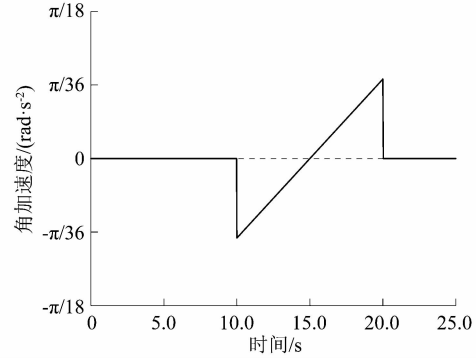


图8 转动机构角加速度变化曲线
Figure 8 Angular acceleration curve of rotating mechanism

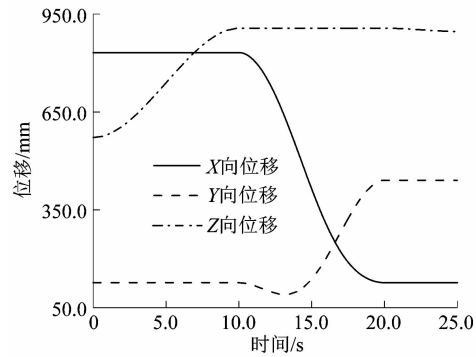


图9 转动机构位移变化曲线
Figure 9 Displacement curve of rotating mechanism

3.3.2 转动机构运动学分析

转动机构由转动大手臂和末端夹持器组成,其在上料过程中的运动特性曲线如图7~11所示。由于转动机构直接关系到夹持安全阀的稳定性,故有必要对其进行运动学分析。

由图7~11可知,转动机构在阀体上料过程中最大角速度为 $3\pi/40 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$,方向为绕Z轴顺时针方向;最大角加速度和最小角加速度大小均为 $3\pi/100 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$,方向相反。并且不论是角速度、角加速度、位移、速度及加速度曲线,均变化平稳,无突变冲击现象,验证了该自动上料机械手设计的可行性。

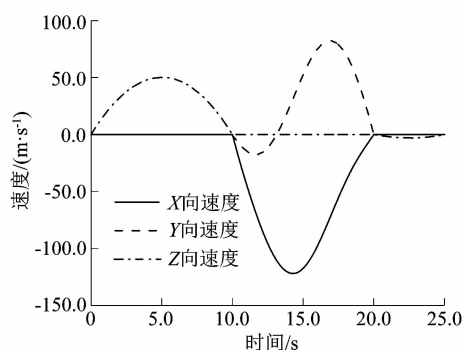


图 10 转动机构速度变化曲线

Figure 10 Velocity curve of rotating mechanism

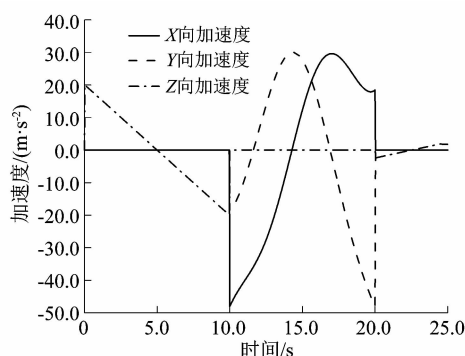


图 11 转动机构加速度变化曲线

Figure 11 Acceleration curve of rotating mechanism

4 结论

课题组设计了一种效率高、空间要求低的安全阀自动上料机械手;采用 D-H 法计算得到了自动上料机械手末端夹持器的位姿变换矩阵及运动学方程;利用 ADAMS 软件对自动上料机械手进行了运动学仿真分析,获得了机械手在上料过程中位移、速度及加速度等运动特性曲线。运动特性曲线变化平稳,无突变冲击现象,验证了该自动上料机械手物理样机制造的可行性,提高了安全阀离线校验效率。

参考文献:

- [1] 朱海清,王海龙,陆顺丰,等. 安全阀搬运用卡钳:CN104440882A [P]. 2015-03-25.
- [2] 吴俊利. 搬运机械手的抓取设计及轨迹控制研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2016:19.
- [3] 李飞,黄维刚,梁鹏. 基于 ADAMS 的六自由度串联机器人运动学仿真研究[J]. 重型机械,2019(2):38-42.
- [4] 蔡自兴,谢斌. 机器人学[M]. 北京:清华大学出版社,2015:35.
- [5] 陈铁,闫九祥,孙洁,等. 基于 ADAMS 的刹车片上下料机器人运动学建模与仿真[J]. 山东科学,2019,32(4):114-120.
- [6] 王建伟,薛芳喜. 基于 ADAMS 的搬运机器人运动学分析与动态仿真[J]. 机械工程师,2016(4):26-28.
- [7] 陈峰华. ADAMS 2016 虚拟样机技术从入门到精通[M]. 北京:清华大学出版社,2017:1-2.
- [8] 杜娥. 基于 ADAMS 的巡检机器人运动学、动力学仿真[D]. 武汉:武汉大学,2005:28.

(上接第 18 页)

- [6] FREUDENSTEIN F. Approximate synthesis of four-bar linkages[J]. Resonance,2010,15(8):740-767.
- [7] NARIMAN-ZADEH N,FELEZI M,JAMALI A, et al. Pareto optimal synthesis of four-bar mechanisms for path generation[J]. Mechanism and Machine Theory,2009,44(1):180-191.
- [8] 华大年,华志红. 连杆机构设计与应用创新[M]. 北京:机械工业出版社,2008:23-41.

- [9] 戚伟岸,李小宁,涂炜. 基于 ADAMS 的砂轮磨齿机加工过程的动力学分析与仿真[J]. 机械制造与自动化,2013(3):104-106.
- [10] 何伟,李震,王建彬,等. 基于铰链四杆机构运动学的解析法及 ADAMS 仿真[J]. 巢湖学院学报,2011,11(6):80-84.
- [11] 杨可桢,程光蕴,李仲生. 机械设计基础[M]. 北京:高等教育出版社,2006:28-32.
- [12] 刘海柱,雷秀,李杨,等. 基于 ADAMS 锻造操作机钳杆机构的优化设计[J]. 锻压技术,2008,33(3):106-108.

