

基于 D-H 位移矩阵法的溢油回收系统 扫油臂运动学建模

杨前明¹, 闫九祥¹, 王世刚², 郭建伟²

(1. 山东科技大学 机械电子工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 青岛华海环保工业有限公司, 山东 青岛 266400)

摘要:为实现溢油回收系统扫油臂机构的精准运动控制,运用 D-H 位移矩阵法建立了扫油臂机构运动学模型。根据变量的性质,将扫油臂机构分为驱动空间、关节空间、位姿空间;从运动学问题求解出发,利用机构的几何特征,分别推导出各工作空间之间的映射关系。在建立运动学模型基础上,进行了 Matlab 仿真,验证了所建数学模型的正确性和精确性,为扫油臂机构合理设计和运动点轨迹规划提供了一种高效便捷的方法。

关键词:D-H 位移矩阵;扫油臂;运动学;工作空间;建模

中图分类号:TH113.2

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2014)01-0092-06

Kinematic Modeling for Telescopic Jib Arm of Oil Spill Recovery System Based on D-H Displacement Matrix Method

Yang Qianming¹, Yan Jiuxiang¹, Wang Shigang², Guo Jianwei²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering,

Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Qingdao Huahai Environmental Protection Industry Co. Ltd, Qingdao, Shandong 266400, China)

Abstract: The kinematic model was established using the D-H displacement matrix method in order to achieve accurate kinematic control for telescopic jib arm mechanisms of the oil spill recovery system. The mechanisms were divided into actuator space, joint space and pose space according to the properties of the variables. Each mapping relationships among the three kinds of space was figured out respectively for the kinematics utilizing the geometrical characteristic of the mechanisms. The result provides the theoretical basis for kinematics point trajectory planning and kinematic simulation as well as dynamic analysis of telescopic jib arm clamping device.

Key words: D-H displacement matrix; telescopic jib arm; kinematics; work space; modeling

随着我国海洋经济的持续快速发展,海上航运交通、海洋石油勘探开发、海洋渔业等生产活动日益频繁。资料统计^[1]表明,1973—2006年,我国沿海共发生船舶溢油事故2 635起,总溢油量超过37 000 t。从《海洋灾害公报》以及国际邮轮船东防污染联合会每年更新的数据统计中可以看出,海面溢油事故随着人类海洋活动的增加已经成为海洋主要灾害之一。我国海洋表面溢油应急响应与回收处理技术的总体水平与发达国家相比,还存在较大差距^[2-4],近年来,面向海面溢油回收综合机械化技术的研究与装备制造业得到普遍重视与发展。

船载溢油回收系统由机身本体、扫油臂-围油栏、收油机、液压动力站、电气与计算机控制系统等组成,其中扫油臂是该装备关键核心部件之一,其端点运动控制方案及精度优劣直接影响到抓握机械手对于浮筒抓

收稿日期:2013-11-11

作者简介:杨前明(1960—),男,江苏如皋人,教授,博士,主要从事机电一体化、液压传动与控制方面教学与研究工作。

E-mail: yqm8396@163.com

闫九祥(1989—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要从事机电液一体化方面的研究。

握的定位精度与运动稳定性。船载收油机扫油臂的驱动是由电液比例阀控马达驱动本体旋转运动、电液比例阀控缸驱动变幅油缸和扫油臂伸缩缸实现端部在水平与垂直两个方向的直线(或复合)运动。为方便分析,将其简化为连杆机构进行运动学或动力学分析。

臂架机构运动学建模方法中有 D-H(Denavit-Hartenberg)位移矩阵法、平面解析法等,通过机构变量模型以及构件之间的几何关系对工作装置进行运动学分析^[5-8]。文献[5]通过解析法得出泵车臂架机构在二维平面中的运动学模型,运用三维变换公式得出运动仿真所用的三维公式,根据三维公式编写仿真程序对机构进行运动学仿真。文献[6-8]在笛卡尔坐标系中建立了挖掘机工作装置的运动学模型。文献[7]通过 D-H 法建立了挖掘机工作装置运动学数学模型,根据挖掘机机构的几何特点以及执行机构运动速度,通过计算机软件得到了挖掘机工作装置空间轨迹包络图。文献[8]将挖掘机工作装置定义为驱动空间、关节空间、位姿空间、测量空间四种工作空间,在笛卡尔坐标系中运用 D-H 法推导出挖掘机工作装置各工作空间之间的运动学映射关系。本研究在相关文献的基础上,以船载收油机扫油臂杆系为研究对象,运用 D-H 位移矩阵方法,导出其运动学模型,探讨扫油臂机构浮筒抓握点运动学特性,为后续计算机运动学仿真提供依据。

1 运动空间描述

图 1 为船载收油机扫油臂杆系机构结构示意图,主要由机身本体、机架、小臂-变幅缸、大臂-伸缩缸、夹紧装置等组成。在笛卡尔坐标空间中,以船舶甲板面与基座回转轴线相交点为坐标原点,建立基系 $O-x_0y_0z_0$ 。以各个关节为原点,建立关节坐标系 $O_0-x_0y_0z_0, O_1-x_1y_1z_1, O_2-x_2y_2z_2, O_3-x_3y_3z_3$ 。图 1 中:垂直纸面为 y 轴方向; θ_1 为液压马达回转角, θ_2 为大臂转角, θ_4 为机构末端回转角; λ_1, λ_2 为大臂与变幅缸尺寸长度; L_0, L_1, L_2, L_3 分别为扫油臂机构几何尺寸^[9]。

根据变量不同,可将机构分为驱动空间、关节空间、位姿空间。扫油臂运动学研究问题可归结为求解驱动空间、关节空间、位姿空间之间的相互转换关系。如图 2 所示,关节空间与位姿空间之间的关系是运动学正、逆解问题,驱动空间与关节空间的关系由机构的几何特点决定^[6]。

2 运动学建模

2.1 关节空间与位姿空间映射

在关节角 θ_i 和大臂伸出距离 λ_1 变化时,扫油臂末端夹紧装置在空间中的位置与姿态会随之发生改变。参考机器人运动学 D-H 分析法,对图 1 进行简化,得到便于运动学分析的连杆坐标系简图,如图 3 所示。

规定各关节角 θ_i 逆时针方向为正,夹紧装置在基系中的坐标位置为 (x, y, z) ,姿态角为 θ_v 。则连杆 i 坐标系相对连杆 $i-1$ 坐标系的齐次坐标变换矩阵为^[10]

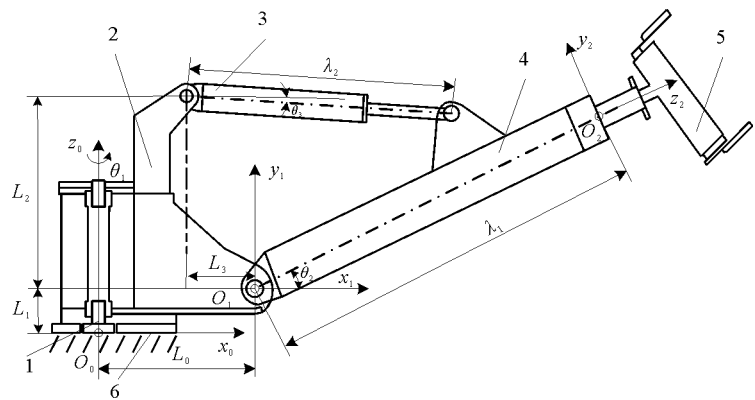


图 1 扫油臂机构与连杆坐标示意图

Fig. 1 Structural sketch and link coordinates of telescopic jib arm mechanisms

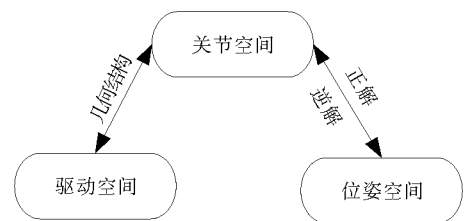


图 2 空间转换关系图

Fig. 2 Conversion relationship of spaces

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (1)$$

夹紧装置坐标相对基系坐标的位姿矩阵 T 为

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

由杆件几何参数、关节运动参数可得 D-H 参数如表 1 所示,其中杆件 3 关节运动为平移运动。

根据表 1 列出的 D-H 参数和连杆坐标简化图(图 3),由坐标齐次变换式(1)、式(2)可得夹紧装置坐标系相对基系坐标的位姿矩阵^[11]:

$${}^0T_4 = \begin{bmatrix} c_1 c_{24} & -c_1 s_{24} & s_1 & c_1 (\lambda_1 c_2 + L_0) \\ s_1 c_{24} & -s_1 s_{24} & -c_1 & s_1 (\lambda_1 c_2 + L_0) \\ s_{24} & c_{24} & 0 & \lambda_1 s_2 + L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

其中: $s_i = \sin \theta_i$, $c_i = \cos \theta_i$, $s_{mm} = \sin(\theta_m + \theta_n)$, $c_{mm} = \cos(\theta_m + \theta_n)$ 。

设夹紧装置末端在坐标系 $O_3 - x_3 y_3 z_3$ 中的位置坐标为: ${}^4Q = [0 \ 0 \ 0 \ 1]$, 则该点相对于基系坐标的位置为 ${}^0Q = {}^0T_4 {}^4Q$, 将式(2)结果代入可得位置坐标为

$${}^0Q = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 (\lambda_1 c_2 + L_0) \\ s_1 (\lambda_1 c_2 + L_0) \\ \lambda_1 s_2 + L_1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

在机构运动过程中,设夹紧机构末端相对基系的方向角为 θ_v , 由 $\theta_v = \theta_2 + \theta_4$ 唯一确定。记末端位姿矩阵为 $[x \ y \ z \ \theta_v]$, 则关节空间到位姿空间的映射为

$${}^0Q = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \theta_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 (\lambda_1 c_2 + L_0) \\ s_1 (\lambda_1 c_2 + L_0) \\ \lambda_1 s_2 + L_1 \\ \theta_2 + \theta_4 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

2.2 位姿空间与关节空间的映射

机构运动学方程的求解方法很多,若末端连杆的位姿已经给定,求关节变量的值称为运动学反解,即已知 $[x \ y \ z \ \theta_v]$, 求解各关节角变量 θ_i 的过程。运动学反解的求解方法主要有代数法、迭代法、几何法^[9], 当扫油臂机构自由度较少,几何结构较简单时,可选用几何法。

已知扫油臂机构末端的位姿矩阵为 $[x \ y \ z \ \theta_v]$, 由机构几何关系可得:

$$\theta_1 = \arctan(x/y), \quad (7)$$

新坐标系的位姿矩阵为

$$\begin{cases} x' = x - L_0 \cos \theta_1 \\ y' = y - L_0 \sin \theta_1 \\ z' = z - L_1 \end{cases}. \quad (8)$$

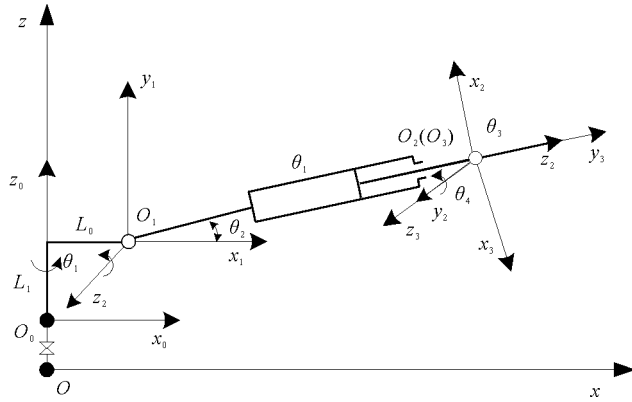


图 3 扫油臂连杆坐标系简图

Fig. 3 Link coordinates of telescopic jib arm mechanisms

表 1 扫油臂机构 D-H 参数表

Tab. 1 D-H parameter of telescopic jib arm mechanisms

杆件 i	θ_i	$\alpha_i / (^\circ)$	a_i	d_i	变量
1	θ_1	0	0	L_1	θ_1
2	θ_2	90	L_0	0	θ_2
3	0	0	λ_1	0	λ_1
4	θ_4	0	0	0	θ_4

由扫油臂机构几何关系可得：

$$\theta_2 = \arctan \left[\frac{z - L_1}{x - L_0 \cos(\arctan(x/y))} \right] \quad (9)$$

综合式(7)~(9)可得扫油臂机构关节变量的运动学反解结果,则位姿空间与关节空间的映射关系为

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan(x/y) \\ \theta_2 = \arctan \left[\frac{z - L_1}{x - L_0 \cos(\arctan(x/y))} \right] \\ \theta_4 = \theta_v - \theta_2 \end{cases} \quad (10)$$

2.3 驱动空间与关节空间的映射

扫油臂驱动空间包括机身本体旋转的液压马达、扫油臂伸缩油缸、变幅油缸、控制夹紧机构角度的液压马达。马达回转角度、油缸长度与关节空间中关节角 θ_i 、杆件长 a_i 通过机构的几何结构规律相互映射^[12]。通过分析扫油臂机构的几何结构可将两者的映射关系通过数学模型表达。图 4 所示为扫油臂的几何结构示意图。图中： L_0, L_1, L_2 为机架尺寸； L_3, L_5, s_1, s_2 分别为油缸 AE, CD 缸筒长度和行程； L_3 为两臂连接长； h_1 为 AB 的长度； θ_2 为液

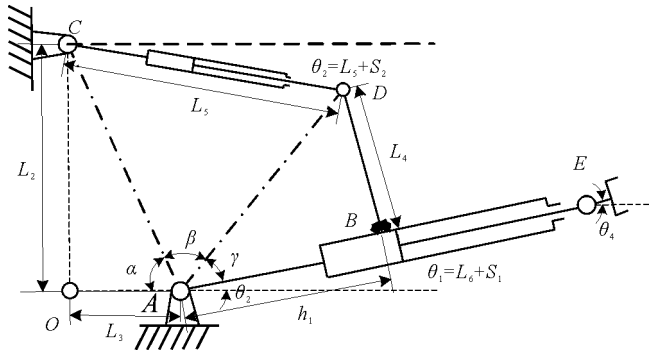


图 4 机构几何关系图

Fig. 4 Geometrical relationship of telescopic jib arm mechanisms

压缸 AE 绕 A 点的旋转角度； θ_1 为底座液压马达的回转角度； θ_4 为夹紧机构回转马达的回转角度。如图 4 所示将五边形 OABDC 分解为 3 个三角形,根据机构几何关系可得：

$$\pi = \alpha + \beta + \gamma + \theta_2 \quad (11)$$

$\triangle AOC$ 和 $\triangle ABD$ 为直角三角形,则有：

$$\alpha = \arctan \left(\frac{L_2}{L_3} \right); \gamma = \arctan \left(\frac{L_4}{h_1} \right) \quad (12)$$

在 $\triangle ACD$ 中,根据三角形余弦定理可得：

$$\beta = \arccos \left(\frac{l_{AC}^2 + l_{AD}^2 - l_{CD}^2}{2l_{AC}l_{AD}} \right) \quad (13)$$

通过以上参数可知驱动空间与关节空间的映射关系为

$$\begin{cases} \lambda_1 = L_6 + S_1 \\ \lambda_2 = L_5 + S_2 \\ \theta_1 = \theta_1 \\ \theta_2 = \pi - \arctan(L_2/L_3) - \arctan(L_4/h_1) - \\ \arccos[(L_3^2 + L_2^2 + L_4^2 + h_1^2 - \lambda_2^2)/(2\sqrt{L_3^2 + L_2^2} \cdot \sqrt{L_4^2 + h_1^2})] \\ \theta_4 = \theta_4 \end{cases} \quad (14)$$

将式(14)结果代入关节空间与位姿空间的映射关系(6)可推出驱动空间与位姿空间的映射关系,则夹紧机构末端相对基系的位置可表示为

$${}^0\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \theta_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1[(L_6 + s_1)\cos\theta_2 + L_0] \\ s_1[(L_6 + s_1)\cos\theta_2 + L_0] \\ (L_6 + s_1)\cos\theta_2 + L_1 \\ \theta_2 + \theta_4 \end{bmatrix} \quad (15)$$

综上所述,扫油臂机构夹紧装置在笛卡尔空间中,其位置坐标由机身回转角度 θ_1 , 变幅缸与伸缩缸伸出

长度 s_1 和 s_2 共同确定。夹紧装置在笛卡尔空间中的位姿角为伸缩缸与夹紧装置调整马达绕关节点回转角 θ_2 和 θ_4 之和。

3 端点的速度、加速度求解

在扫油臂机构驱动空间中,将参数代入式(15)可得驱动空间与位姿空间的映射关系为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \theta_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_1 t)[(L_6 + v_1 t)\cos\theta_2 + L_0] \\ \sin(\omega_1 t)[(L_6 + v_1 t)\cos\theta_2 + L_0] \\ (L_6 + v_1 t)\cos\theta_2 + L_1 \\ \omega_2 t + \omega_4 t \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中: ω_1 为机身本体驱动马达转速,rad/s; v_1 为伸缩油缸的速度,m/s; v_2 为变幅油缸的速度,m/s; ω_2 为夹紧装置调整马达转速,rad/s。

综上所述,当机身本体旋转驱动马达静止时,夹紧机构在平面 $x-z$ 中的位置坐标随 v_1 , v_2 和 ω_2 的变化而变化,并受执行机构的工作行程与摆角约束。可以推知:当本体驱动马达旋转、扫油臂机构作业时,夹紧装置在 xyz 空间轨迹为起点与终点不变的变曲率曲线束。

将矩阵方程(16)对时间 t 求导^[5],可知驱动空间与位姿空间时域中速度映射关系为

$$\mathbf{v} = [\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{z} \quad \dot{\theta}_v]^T \quad (17)$$

4 仿真分析

按照工况要求,扫油臂机构设计参数为 $L_0 = 1\,025$ mm, $L_1 = 540$ mm, $L_2 = 1\,060$ mm, $L_3 = 450$ mm, $L_4 = 800$ mm, $L_5 = 1\,501$ mm, $L_6 = 5\,800$ mm,伸缩缸仰俯角理论值范围为 $20^\circ \sim -30^\circ$ 。为验证机构数学模型的正确性,假定机构回转角速度为 0.52 rad/s,伸缩缸速度为 321 mm/s,变幅缸速度为 82.1 mm/s, θ_4 恒为 10° 。在 Matlab 软件中,根据驱动空间与位姿空间映射关系式(16)建立 M 文件,对机构进行仿真分析。将上述参数代入仿真程序,可求解机构位姿矩阵。再将位姿矩阵代入式(10)对机构进行运动学反解,结果如图 5 和图 6 所示。

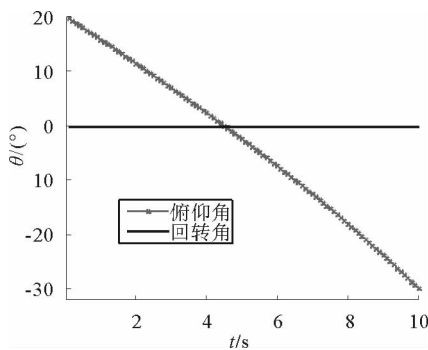


图 5 关节空间转角变化规律仿真图

Fig. 5 Change law of joint space angle

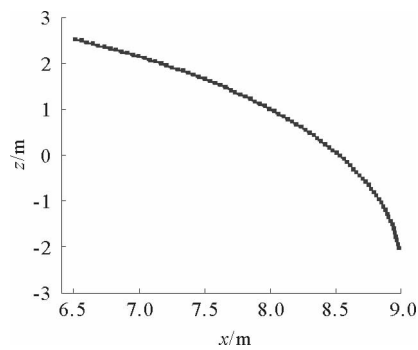


图 6 $x-z$ 平面内端点轨迹图

Fig. 6 End point trajectory in $x-z$ plane

将图 5 和图 6 所示结果代入式(6),求得的位姿矩阵与假定驱动空间参数下的位姿矩阵一致,由此可证明上述空间映射关系数学模型的正确性与可靠性。由图 5 可知,伸缩缸的仰俯角范围为 $20^\circ 12' \sim -30^\circ 16'$,可得伸缩缸仰俯角最大误差为 0.26% ,该误差范围完全满足扫油臂机构性能要求;图 6 反映了扫油臂自最大仰角至最大俯角变化时,其端部的变化轨迹曲线,由图可知,端部在 x 与 z 两个方向的运动变化范围符合本机构的设计要求。

5 结束语

运用 D-H 齐次变换矩阵法,通过建立扫油臂机构运动学数学模型,获得溢油回收系统扫油臂机构运动学一般规律;将研究机构划分为驱动、关节与位姿三种工作空间,通过描述扫油臂机构几何运动规律,分析夹紧机构运动空间变量要素,并推导出各变量间的映射关系;在分析各空间之间的映射关系的基础上,获得扫油臂夹紧装置运动轨迹规律。利用 Matlab 软件编制 M 文件对数学模型进行仿真分析,仿真结果验证了模型的正确性和精确性。模型为扫油臂浮筒抓握点运动点轨迹合理规划、计算机仿真、动力学分析等提供必要的理论依据。

参考文献:

- [1]周斌,梁刚,赵益栋.我国沿海港口船舶溢油事故分析及对策研究[J].海洋技术,2009(3):87-90.
Zhou Bin,Liang Gang,Zhao Yidong. Analysis and countermeasure study of oil spilling from ship in Chinese coastal ports [J]. Ocean Technology,2009(3):87-90.
- [2]张同成,张德文,任良成.国内外船携式溢油回收系统比较[J].中国水运:下半月,2009(2):7-9.
- [3]郑建中,王静,王晓燕.不同类型海岸的溢油清理方法[J].环境工程学报,2008(4):557-562.
Zheng Jianzhong,Wang Jing,Wang Xiaoyan. Oil spill cleanup methods for different types of coasts[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2008(4):557-562.
- [4]王世刚,杨前明,郭建伟,等.船携式海面溢油回收机液压控制系统设计与实现方法[J].现代制造技术与装备,2012(3):1-2.
Wang Shigang,Yang Qianming,Guo Jianwei,et al. The design and realization of hydraulic control system for the ship carrying oil spill recycling machine[J]. Modern Manufacturing Engineering,2012(3):1-2.
- [5]张光宇,张国忠,周淑文,等.混凝土泵车臂架布料机构及其运动学仿真[J].中国工程机械学报,2003(1):87-90.
Zhang Guangyu,Zhang Guozhong,Zhou Shuwen,et al. Computer emulation of placing system and kinematics of concret pump truck[J]. Chinese Journal of Construction Machinery,2003(1):87-90.
- [6]任志贵,陈进.基于运动学分析的挖掘机器人轨迹规划新方法[J].中国工程机械学报,2012(2):151-155.
Ren Zhigui,Chen Jin. Novel method for trajectory planning on robotic excavators based on kinematical analysis[J]. Chinese Journal of Construction Machinery,2012(2):151-155.
- [7]袁开磊,史青录,曲德韵.挖掘机工作装置的运动学建模与仿真[J].矿山机械,2012(3):33-36.
Yuan Kailei,Shi Qinglu,Qu Deyun. Kinematic modeling and simulation of excavator working device[J]. Mining & Processing Equipment,2012(3):33-36.
- [8]黎波,严峻,曾拥华,等.挖掘机工作装置运动学建模与分析[J].机械设计,2011,28(10):9-10.
Li Bo,Yan Jun,Zeng Yonghua,et al. Kinematic modeling and analysis for excavator working device[J]. Journal of Machine Design,2011,28(10):9-10.
- [9]张大庆.液压挖掘机工作装置运动控制研究[D].长沙:中南大学,2006:20-29.
- [10]Koivo A J,Thoma M,Kocaoglan E,et al. Modeling and control of excavator dynamics during operation[J]. Journal of Aerospace Engineer,1996(2):10-18.
- [11]蔡自兴.机器人学[M].北京:清华大学出版社,2009:52-95.
- [12]王北战,何清华,郝鹏,等.挖掘机器人铲斗连杆机构优化研究[J].机械设计,2010(2):30-32.
Wang Beizhan,He Qinghua,Hao Peng,et al. Optimization research on bucket connecting rod mechanism of excavation robot[J]. Journal of Machine Design,2010(2):30-32.

(责任编辑:吕文红)