

# 基于 ADAMS 的机械臂刚柔耦合动态特性分析

边兵兵

(平顶山工业职业技术学院, 平顶山 467001)

**摘要:** **目的** 为了考察机械臂在自动包装线上的动态特性, 对机械臂进行不同工况和不同参数组合的研究。**方法** 采用 UG 软件对机械臂进行三维结构建模, 利用 ADAMS 和 Ansys 软件对机械臂进行刚柔耦合动力学仿真分析, 得到不同工况下大臂的受力曲线和规律。**结果** 仿真结果表明, 在不同参数组合下, 机械臂的大臂最大应力值为 241.49 MPa, 铰链处的作用力和扭矩变化不大, 强度满足使用要求。**结论** 通过 ADAMS 和 Ansys 的联合仿真, 可有效预测机械臂的运动规律和应力分布。

**关键词:** 刚柔耦合; 动力学; ADAMS; 应力分布

**中图分类号:** TB486; TP241 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)09-0177-05

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.09.031

## Rigid-flexible Coupling Dynamic Characteristics of Manipulator Based on ADAMS

BIAN Bing-bing

(Pingdingshan Industrial College of Technology, Pingdingshan 467001, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the dynamic characteristics of the manipulator on the automatic packaging line, and research the combination of different working conditions and different parameters of the manipulator. The three-dimensional structural modeling of manipulator was conducted by UG software. The rigid-flexible coupling dynamic simulation analysis was carried out with ADAMS and Ansys software to obtain the stress curve and law of the boom under different working conditions. The simulation results showed that, under the combination of different parameters, the maximum stress of the boom of the manipulator was 241.49 MPa, the force and torque fluctuation at the hinge was small, and the strength satisfied the usage requirement. The co-simulation of ADAMS and Ansys can effectively predict the motion law and stress distribution of the manipulator.

**KEY WORDS:** rigid-flexible coupling; dynamic; ADAMS; stress distribution

随着虚拟样机技术和有限元技术的出现, 目前已经广泛应用于机械、兵器、航空航天等诸多领域。如何实现高速运动并具有较高的跟踪精度, 一直是机器人研究和开发的热点问题<sup>[1-4]</sup>。目前, 大多数研究针对以非冗余机器人的单轴或多轴协调运动为控制目的的系统, 而针对冗余机器人的控制和刚柔耦合动力学的研究则相对较少<sup>[5-8]</sup>。文中结合自动化生产线的需求, 拟设计一种小型的工业机械臂。

### 1 机械臂的工作原理

结合自动化生产线对包装后的产品需要切换工

位的需求, 在满足效率的情况下, 设计一种小型的机械臂结构, 其结构及工作原理见图 1。

机械臂主要由底座、腰部、大臂、小臂、末端执行器和 3 个电机组成。底座与大地固定, 在机械臂需要旋转时, 电机 1 启动, 在齿轮系统的作用下, 腰部等部件开始绕着底座的轴线做旋转运动; 在电机 2 和电机 3 的组合下, 可以使得末端执行器到达机械臂运动空间的任意位置, 最终使机械臂的末端执行器将产品推至指定周转位置。该机械臂主要应用在自动化生产线上, 当产品完成包装后, 由机械臂推动下线, 从而在叉车的作用下, 将产品进行堆放和入库。

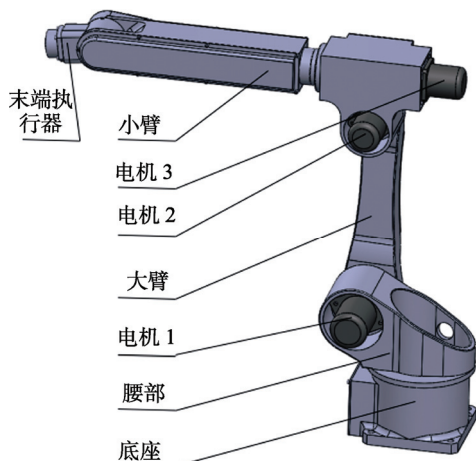


图1 机械臂的系统组成

Fig.1 The system composition of the manipulator

## 2 机械臂的运动学模型

为了考察机械臂每个关节的运动情况,采用 D-H 表示法对机械臂的每一个关节均建立局部坐标系(所有关节的轴线均用  $z$  轴表示,建立右手坐标系)。机械臂的机构简图见图 2。

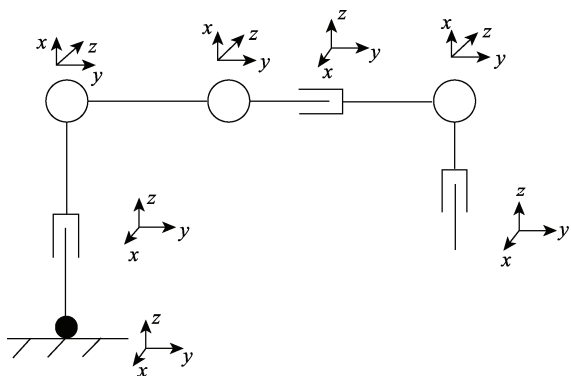


图2 机械臂的机构简图

Fig.2 Schematic diagram for the mechanism of the manipulator

对于转动的关节  $i$ , 规定它的转动平行于坐标轴  $z_{i-1}$ , 坐标轴  $x_{i-1}$  对准从  $z_{i-1}$  到  $z_i$  的法线方向。如果  $z_{i-1}$  与  $z_i$  相交, 则  $x_{i-1}$  取  $z_{i-1} \times z_i$  的方向。关节参数概括为: 轴旋转  $\theta_i$  将  $x_{i-1}$  和  $x_i$  旋转至相互平行位置; 沿着  $z_{i-1}$  轴平移  $d_i$  将  $x_{i-1}$  和  $x_i$  得到共线; 沿旋转过的  $x_{i-1}$  轴平移  $a_i$  将  $x_{i-1}$  和  $x_i$  坐标系的原点重合; 将  $z_{i-1}$  轴绕  $x_i$  轴旋转  $\alpha_i$  得到  $z_{i-1}$  和  $z_i$  对准。

经过上述的步骤, 可以得到坐标之间的齐次变换, 见式 (1) [9]。

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

式中:  $\theta_i$  为第  $i$  个关节绕着  $z$  轴的旋转角;  $d_i$  为第  $i$  个关节在  $z$  轴上相邻共垂线的距离;  $a_i$  为第  $i$  个连杆的长度;  $\alpha_i$  为第  $i$  个关节与相邻  $z$  轴之间的旋转角度。

重复上述的步骤, 可以得到任意坐标系的姿态。

$${}^0T_i = {}^0T_{i-1} {}^{i-1}A_i \quad (2)$$

式中:  ${}^0T_i$  为坐标系  $i$  相对于基础坐标系的位置与姿态。

结合图 1 所示的机械臂, 可以得到各个关节的变换矩阵:

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & a_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & a_1 \sin \theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & a_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & a_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & \sin \theta_3 & a_3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & 0 & -\cos \theta_3 & a_3 \sin \theta_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & \sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & -\cos \theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & 0 & \sin \theta_5 & a_5 \cos \theta_5 \\ \sin \theta_5 & 0 & -\cos \theta_5 & a_5 \sin \theta_5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$${}^5T_6 = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & 0 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

通过式 (3—8) 的推导, 可以得到每个关节的姿态位置。

## 3 动力学模型的建立

### 3.1 刚体模型的建立

建立刚体动力学仿真模型有多种方法, 考虑到模型的复杂性, 使用三维建模软件 (UG) 建立模型, 将建立好的模型保存成 parasolid (.x\_t) 格式, 导入至机械动力学仿真软件 ADAMS 中, 得到刚体动力学模型。

### 3.2 刚柔耦合模型的建立

大臂是机械臂的关键零部件之一, 为了得到其在

整个过程中的受力情况,文中对其进行柔性化处理,建立刚柔耦合动力学分析。

将建立好的大臂零件导入有限元软件 Ansys 中进行模型模态分析,对其进行划网格,见图 2。分析其前 10 阶模态,最后使用 ADAMS 与 Ansys 的接口,导出 ADAMS 所需求的中性文件 (.mnf 文件)。

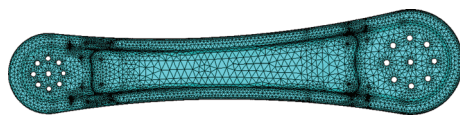


图 3 大臂有限元模型  
Fig.3 Finite element model of the boom

在 ADAMS 中,使用有限元分析后得到的柔性体文件替换大臂的刚体模型,最终完成刚柔动力学模型的建立。刚柔耦合动力学模型见图 4。

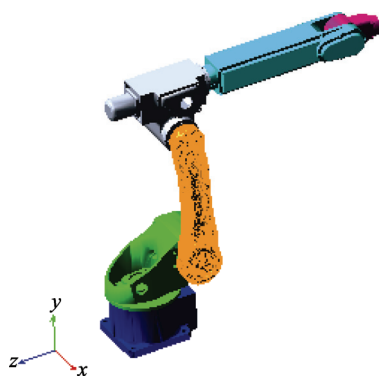


图 4 机械臂刚柔耦合动力学模型  
Fig.4 The rigid-flexible coupling dynamic model of the manipulator

## 4 ADAMS 动力学仿真

### 4.1 模型的简化和假设

由于自动化生产线上的机械臂模型非常复杂,为了能够更加深入浅出地得到其运动规律,对机械臂模型进行适当的简化和假设就显得非常重要。文中对模型做出以下的检核和假设<sup>[10—13]</sup>:对于机械臂内部的不参与传动运动的部件进行布尔运算;对于模型的尺寸公差和装配误差不进行考虑<sup>[10]</sup>;机械臂的刚柔耦合模型中,除了 Ansys 柔性化处理的大臂外,其余零部件均作为刚体进行处理。

### 4.2 约束和驱动的添加

文中按照实际情况对模型进行添加零件的材料属性、参数、模型的约束以及驱动参数,最终完成约束和驱动添加<sup>[14—15]</sup>。

### 4.3 仿真结果分析

由高等动力学可知,不同的参数组合对模型有着

不同的影响,为了考察不同的参数组合,文中进行了多种工况的分析,从而得到其运动规律和动力学曲线。由于自动化生产线的复杂性,机械臂需要能够完成在臂长范围内的任何空间运动。针对其不同工况的要求,开展多工况的研究。

1) 工况 1。机械臂腰部绕着底座旋转  $30^\circ$ ,小臂开始向前运动 260 mm,将自动化生产线上的货物推至下一工位待工作区。仿真结果见图 5—7。由图 5 可知,机械臂的大臂在整个过程中最大应力为 106.99 MPa,安全系数取 1.5,大臂的应力小于材料的最大应力,强度满足要求。由图 6—7 可知,底座与腰部铰链处的作用力在  $\pm 100$  N 之间波动,最大值为 340.2 N,发生在启动的瞬间;当旋转速度得到平

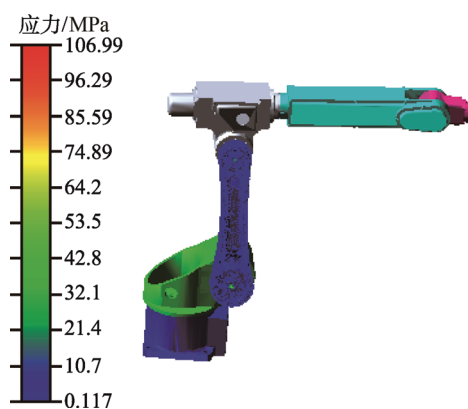


图 5 机械臂的应力云图  
Fig.5 The stress nephogram of the manipulator

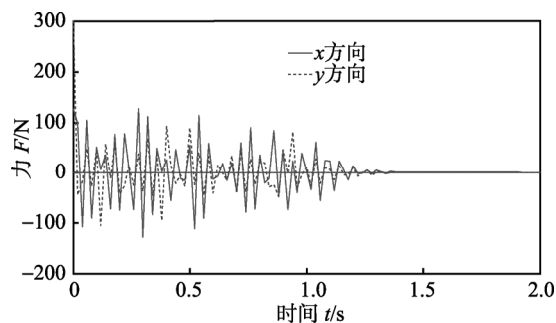


图 6 底座与腰部铰链处的受力曲线  
Fig.6 The curve of stress at base and waist hinge

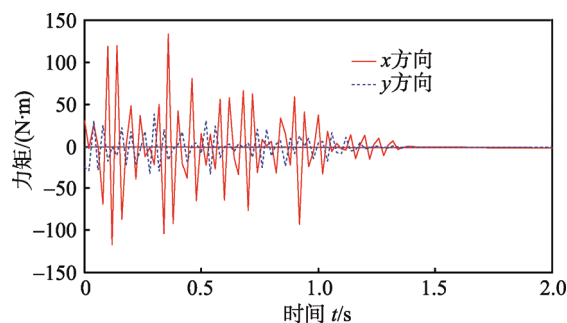


图 7 底座与腰部铰链处的扭矩曲线  
Fig.7 The curve of torque at base and waist hinge

稳状态时,作用力的曲线也随之呈现出平稳状态;之后,随着腰部转速的减速,作用力曲线缓慢趋向于0。扭矩曲线的趋势与作用力的趋势相似,在整个过程中,扭矩的最大值为128 N·m。

2) 工况2。在工况1的基础上,使得机械臂所有关节均能活动,实现机械臂的空间运动。仿真结果见图8—10。由图8可知,机械臂的大臂在整个过程中最大应力为241.49 MPa,强度仍旧满足设计要求。由图9—10可知,底座与腰部铰链处的作用力曲线和扭矩曲线的趋势与工况1类似,其最大值分别为430.6 N和223 N·m。

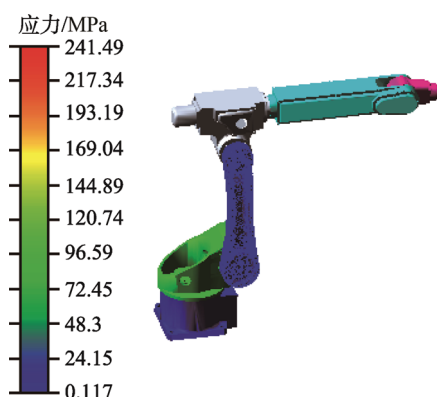


图8 机械臂的应力云图

Fig.8 The stress nephogram of the manipulator

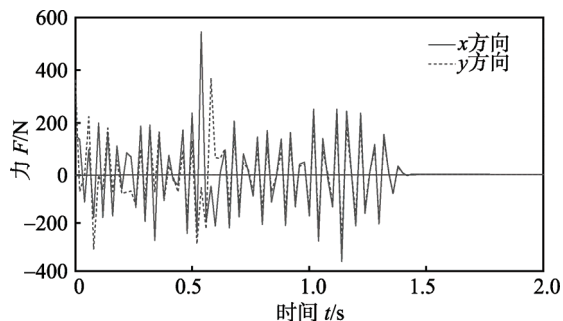


图9 底座与腰部铰链处的受力曲线

Fig.9 The curve of stress at base and waist hinge

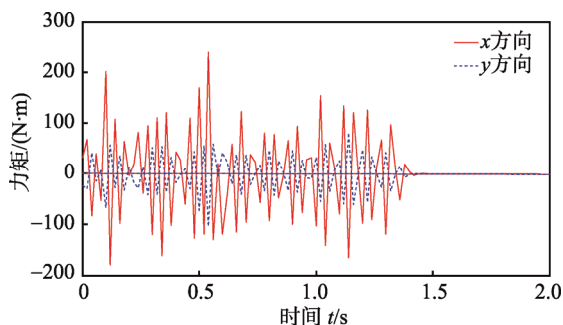


图10 底座与腰部铰链处的扭矩曲线

Fig.10 The curve of torque at base and waist hinge

3) 工况3。大臂绕着腰部旋转25°,并且保证小臂始终处于水平状态。仿真结果见图11—13。由图

11—13可知,大臂的最大应力为144.86 MPa,这与工况2相比,应力明显减小。这主要是因为机械臂的小臂仅有一个方向的运动,机械臂的整体扭矩小。底座与腰部铰链处的作用力曲线和扭矩曲线的最大值分别为237.3 N和195 N·m。

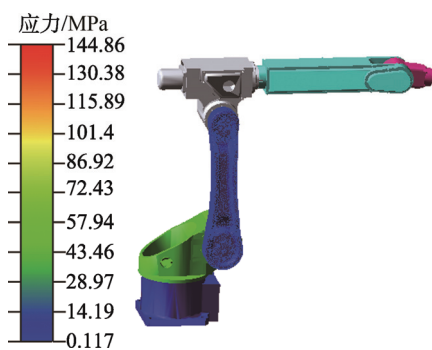


图11 机械臂的应力云图

Fig.11 The stress nephogram of the manipulator

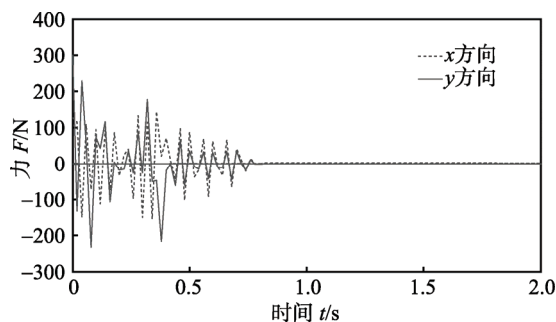


图12 底座与腰部铰链处的受力曲线

Fig.12 The curve of stress at base and waist hinge

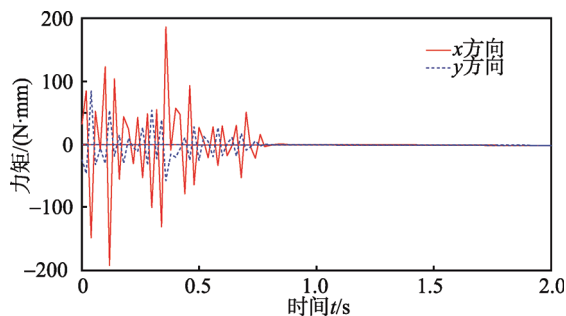


图13 底座与腰部铰链处的扭矩曲线

Fig.13 The curve of torque at base and waist hinge

综合对比3种工况可知,刚柔耦合仿真不仅可以高效准确地得到大臂的应力分布,还可以得到铰链处的作用力和扭矩。仿真结果表明,机械臂在执行空间运动时,大臂的应力值最大,其值为241.49 MPa。底座与腰部铰链处的作用力和扭矩的趋势在3种工况下相似,但是最大值也发生在机械臂空间运动情况下,此时,机械臂最容易发生故障。

## 5 结语

根据自动化生产线的需求,设计了一种小型的适

合自动化生产线使用的机械臂结构;为了得到机械臂中大臂的应力分布、铰链处的动态作用力和扭矩,对机械臂进行了刚柔耦合动力学仿真。仿真结果表明,大臂强度满足设计要求,应力最大值为 241.49 MPa;由于大臂的强度足够,后期可以对大臂进行优化设计,从而进一步提高机械臂的性能。通过对比 3 种工况可知,机械臂在执行空间工作时,大臂所受的应力和扭矩最大;在设计控制系统时,在保证效率的前提下,应使机械臂的运动速度尽量小,从而可以有效地避免作用力急剧增加。

#### 参考文献:

- [1] 田强, 刘铖, 刘丽坤, 等. 柔性抓取机械臂-太阳翼耦合动力学与控制研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(7): 1609—1616.  
TIAN Qiang, LIU Cheng, LIU Li-kun, et al. Study on Coupling Dynamics and Control of Flexible Capturing Robot and Solar Panel[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(7): 1609—1616.
- [2] 荣吉利, 杨永泰, 李健, 等. 空间机械臂建模方法与控制策略研究[J]. 宇航学报, 2012, 33(11): 1564—1569.  
RONG Ji-li, YANG Yong-tai, LI Jian, et al. Research on Modeling and Control Scheme of Space Manipulator[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(11): 1564—1569.
- [3] MINH H V, UHN J N. A New 6-DOF al. Research Haptic Device for Tele Operation of 6-DOF Serial Robots[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement (S0018-9456), 2011, 60(11): 3510—3522.
- [4] NONAMI K, YUASA R, WATERMAN D, et al. Preliminary Design and Feasibility Study of a 6-Degree of Freedom Robot for Excavation of Unexploded Landmine[J]. Autonomous Robots (S1573-7527), 2005, 18(3): 293—301.
- [5] 席晓燕. 基于 ADAMS 的含间隙柔性酒瓶装箱机构的优化设计与动力学仿真[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(8): 1195—1199.  
XI Xiao-yan. Kinematics Simulation and Optimization Design of Flexible Wine Bottle Packing Machine with Clearance Based on ADAMS[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32(8): 1195—1199.
- [6] 潘媛. 柔性机械臂的建模及智能控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.  
PAN Yuan. Modeling and Intelligent Control of Flexible Manipulator[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015.
- [7] 黄毅, 鄂加强, 郭岗, 等. 超长柔性臂架回转振动主动控制研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(6): 137—140  
HUANG Yi, E Jia-qiang, GUO Gang, et al. Research on Active Vibration Control of Long Flexible Boom Boom[J]. Vibration and Impact, 2016, 35(6): 137—140.
- [8] 陈斌. 组合柔性机械臂抑振性能研究[J]. 机床与液压, 2012, 40(11): 83—84.  
CHEN Bin. Research on Restraining Vibration Performance of Combined Flexible Manipulator[J]. Machine Tool and Hydraulic, 2012, 40(11): 83—84.
- [9] 焦有宙, 丁攀, 赵大旭. 温室 3P3R 机械臂系统动力学建模与分析[J]. 农业机械学报, 2012, 43(5): 179—183.  
JIAO You-zhou, DING Pan, ZHAO Da-xu. Dynamic Modeling and Analysis for 3P3R Universal Manipulator in Greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 179—183.
- [10] 邱枫, 杨臻, 原永亮. 一种新型电磁式锁紧机构设计与仿真分析[J]. 包装工程, 2015, 36(17): 80—83.  
QIU Feng, YANG Zhen, YUAN Yong-liang. Design and Simulation of a New Type of Electromagnetic Locking Mechanism[J]. Packing Engineering, 2015, 36(17): 80—83.
- [11] 刘志全, 危清清, 王耀兵. 载人航天器柔性机械臂的动力学建模方法[J]. 航天器工程, 2013, 22(5): 34—41.  
LIU Zhi-quan, WEI Qing-qing, WANG Yao-bing. Dynamics Modeling Method of Flexible Manipulator of Spacecraft Spacecraft[J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(5): 34—41.
- [12] RAN Mao-peng, WANG Qing, HOU De-long, et al. Back Stepping Design of Missile Guidance and Control Based on Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014, 27(3): 634—642.
- [13] NEILA M B R, TARAK D. Adaptive Terminal Sliding Mode Control for Rigid Robotic Manipulators[J]. International Journal of Automation & Amp Computing, 2011, 8(2): 215—220.
- [14] 夏链, 肖传清, 韩江, 等. 基于 Adams 的多连杆机械式压力机动力学分析[J]. 重型机械, 2011(6): 67—70.  
XIA Lian, XIAO Chuan-qing, HAN Jiang, et al. Adams-based Analysis of Dynamics for Multi-link Mechanical Press[J]. Heavy Machinery, 2011(6): 67—70.
- [15] 丁晓红, 李国杰. 箱型支撑结构加筋板布局设计方法研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(4): 449—453.  
DING Xiao-hong, LI Guo-jie. Layout Design Optimization of Stiffener Plates Inside Housing Structures[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 23(4): 449—453.