

## 码垛机器人刚柔耦合动力学仿真分析

熊楚良, 黄松和, 朱鹏飞  
(西南交通大学, 成都 610031)

**摘要:** **目的** 以码垛机器人为例, 探讨刚柔耦合系统的运动学、动力学仿真分析方法, 分析杆件弹性变形对机器人末端运动精度的影响。 **方法** 利用 Matlab/Robotics 工具箱编程, 对码垛机器人进行运动学仿真, 获取各关节角位移曲线; 利用 ADMAS 建立虚拟样机, 对码垛机器人进行动力学仿真; 同时, 利用 Ansys 对机械臂等杆件进行柔性化处理, 生成 mnf 中性文件, 导入 ADAMS 中建立刚柔耦合模型进行仿真分析。 **结果** 得出了码垛机器人在高速重载运动过程中机械手末端的位移偏差曲线, 以及各关节的驱动扭矩。 **结论** 刚柔耦合分析方法更加直观、准确地模拟了机器人的实际工作状况, 提高了在动载荷作用下对零部件动态响应分析的准确性, 为码垛机器人的设计优化及驱动选型分析提供了理论依据。

**关键词:** 码垛机器人; Robotics toolbox; 有限元分析; 刚柔耦合; 动态特性

**中图分类号:** TB486+.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)19-0084-05

## Rigid-flexible Coupling Dynamics Simulation Analysis of Palletizing Robot

XIONG Chu-liang, HUANG Song-he, ZHU Peng-fei  
(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**ABSTRACT:** With a palletizing robot as an example, the paper focused on the method of kinematics and dynamics simulation analysis of the rigid-flexible coupling palletizing robot system, and the analysis on the impact of the rod elastic deformation on the motion accuracy of the robot end effector. Matlab/Robotics toolbox was used to program and perform kinematics simulation for the palletizing robot, getting the angular displacement curves of the joints. A virtual prototype of the palletizing robot was created by ADAMS, and dynamics simulation was conducted. Meanwhile, the MNF neutral file was generated by flexible treatment of the arm rods in Ansys, and was then imported into ADAMS to build the rigid-flexible coupling model to conduct simulation analysis. As a result, the displacement deviation curve of the robot end-effector when the palletizing robot moved under loads was drawn and the driving torque of each joint was obtained. In conclusion, the analysis method of rigid-flexible coupling was more intuitive and accurate to simulate the actual working condition of the robot, and could improve the accuracy of dynamic response analysis of parts under dynamic loading. Thus, this could provide a theoretical basis for the optimization design and driver selection of the palletizing robot.

**KEY WORDS:** palletizing robot; Robotics toolbox; FEM; rigid-flexible coupling; dynamic characteristic

码垛是自动化流水包装线领域的一门新技术, 它可以将不同形状、不同大小的产品, 按照拟定的模式和次序堆放在托盘上, 如箱状、袋状及板状等产品。可方便快速地完成产品的搬运、堆垛、装卸、运输等物

流活动。码垛机器人是实现自动化码垛技术的关键, 可满足从低速到高速、从轻载到重载、从包装袋到纸箱、从码垛 1 种产品到码垛多种不同产品的码垛要求。近几年来, 码垛机器人发展迅速, 它的使用已经

收稿日期: 2015-02-01

基金项目: 四川省应用基础计划(2011JY0028)

作者简介: 熊楚良(1990—), 男, 江西丰城人, 西南交通大学硕士生, 主攻工程机械。

通讯作者: 黄松和(1960—), 男, 福建浦城人, 西南交通大学副教授、硕导, 主要研究方向为工程机械。

成为判断一个企业自动化程度高低的标准,在喷涂、搬运、焊接等行业应用广泛<sup>[1-2]</sup>。

码垛机器人主要由机器人主体、控制系统和末端执行器组成,机器人主体是由基座、臂部以及末端组成的执行器。驱动系均采用模块式数字化伺服电机和减速器,取消了末端关节驱动电动机和平衡块,大大优化了整机机构。然而,随着机器人技术的发展及自动化生产的需求,对码垛机器人的要求也越来越高,轻型化、高速化、高精度化成为码垛机器人发展的主要方向。轻型化则导致机器人杆件柔性增大,固有频率降低;高速化则导致系统运动惯性力增大,造成机器人杆件产生较大的弹性变形,引起振动,难以满足码垛作业高精度化的要求。因此,码垛机器人杆件的柔性是影响高速、高精度码垛机器人动态性能的主要因素<sup>[3]</sup>。

以IRB660码垛机器人为研究对象,结合实际情况推导出一种极限工况,运用D-H法建立了码垛机器人的杆件坐标系,用Matlab/Robotics工具箱建立对应的运动学仿真模型,联合Ansys有限元分析和ADAMS动力学分析软件,采用刚柔相结合的分析方法,研究码垛机器人在动载条件下,构件的弹性变形对码垛机器人末端的位移影响及各关节驱动的力矩曲线。该方法直观而有效,为码垛机器人的综合性能评估和后续的设计选型奠定了良好基础。

### 1 码垛机器人运动学分析

#### 1.1 结构原理及工况分析

IRB600码垛机器人为4关节驱动、4自由度串并混联式结构,见图1。关节①驱动回转台与基座的相对转动,关节②驱动大臂的俯仰,关节③驱动小臂的俯仰,关节④驱动末端执行器旋转。同时,借助双平行四边形结构,实现末端始终保持水平<sup>[4]</sup>。

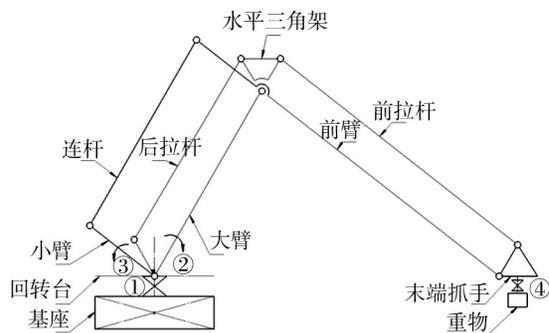


图1 IRB660结构简化

Fig.1 Simplification sketch of IRB660

参考码垛机器人的实际工作流程,以正常码垛速度1200包/h计算,平均完成码垛的时间为3s/包,其运动参数为: $T_1=0\text{ s}$ , $T_2=0.2\text{ s}$ , $T_3=1.3\text{ s}$ , $T_4=1.5\text{ s}$ ,选定典型工况为研究对象,运动规划为:

- 1) 在 $[T_1, T_2]$ 区间,抓起上升,上升 $\Delta Z=150\text{ mm}$ ;
- 2) 在 $[T_2, T_3]$ 区间,回转至垛盘上,回转台转动 $\Delta \gamma=57^\circ$ 、末端下降 $\Delta Z=400\text{ mm}$ 、伸长 $\Delta r=750\text{ mm}$ ;
- 3) 在 $[T_3, T_4]$ 区间,末端下放。下降 $\Delta Z=150\text{ mm}$ 。

#### 1.2 建立D-H坐标系

D-H法是机器人运动学研究的一种重要方法,但只适用于串联机器人,应用前述对IRB660码垛机器人进行的结构简化<sup>[5-6]</sup>,建立杆件坐标系见图2。根据杆件参数的定义规则,机器人的杆件参数见表1。表1中的杆件参数为关节变量。

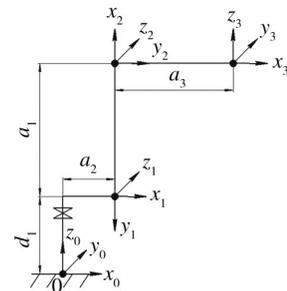


图2 杆件D-H坐标系

Fig.2 D-H rod coordinate system

表1 码垛机器人杆件D-H坐标参数

Tab.1 D-H rod coordinate parameters of the palletizing robot

| 关节 <i>i</i> | $\alpha_i/(^\circ)$ | $a_i/\text{mm}$ | $\theta_i/(^\circ)$ | $d_i/\text{mm}$ | 变量范围/ $(^\circ)$ |
|-------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|------------------|
| ①           | -90                 | $a_1$           | 0                   | $d_1$           | -180~180         |
| ②           | 0                   | $a_2$           | 90                  | 0               | -5~132           |
| ③           | 90                  | $a_3$           | -90                 | 0               | -120~20          |
| ④           | 0                   | 0               | 0                   | 0               | -300~300         |

#### 1.3 基于Matlab/Robotics 运动学分析

Robotics Toolbox是一种以Matlab为平台的机器人工具箱,采用七阶多项式实现点到点的轨迹规划,可以满足机器人的运动轨迹规划<sup>[7-8]</sup>。通过Link函数建立码垛机器人的关节模型,调用jtraj函数进行机器人的轨迹规划,格式为 $[q, q_d, q_{dd}]=\text{jtraj}(Q_1, Q_2, t)$ 。其中, $Q_1$ 为各关节变量的初始值, $Q_2$ 为各关节变量的终点值, $t$ 为采样时间,得到的 $q, q_d, q_{dd}$ 为各关节的角位移、角速度、角加速度。代入D-H杆件坐标参数,调用函数,部分程序为:

```

L1=link([-pi/2 300 0 350 0], 'standard');
L2=link([0 1280 pi/2 0 0], 'standard');
L3=link([pi/2 1350 -pi/2 0 0], 'standard');
L4=link([0 0 0 0 0], 'standard');
r=robot({L1 L2 L3 L4}, 'Manipulator');
plot(r);
drivebot(r);
m=pi/180;
Q1=[0 -60*m 105*m 0];
Q2=[0 -64.6479608*m 103.82443871*m 0];
t1=(0:0.01:0.2);
[q, qd, qdd]=jttraj(Q1, Q2, t1);

```

经仿真分析得到机器人运动模型及末端轨迹见图3。运用Robotics运动学正解函数fkine,得到关节④的位置坐标变化,即码垛机器人末端的运动轨迹(图3b)。可见,采用Robotics工具箱得到的轨迹规划曲线平滑连续,表明码垛机器人在运动过程中平稳且连续。

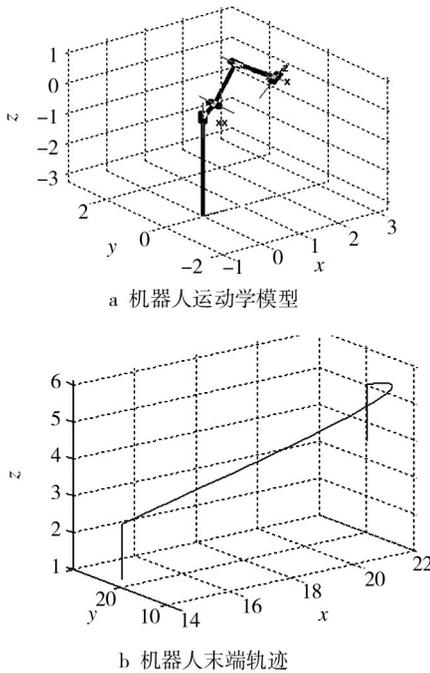


图3 机器人运动学模型及末端轨迹

Fig.3 Kinematic model and end-effector trajectory of the robot

## 2 基于ADAMS的刚柔耦合动力学仿真

### 2.1 虚拟样机建立

采用三维建模软件Solidworks对码垛机器人关键零部件进行简化,建立机器人的三维模型,另存为Parasolid(.x\_t)格式,导入ADAMS中<sup>[9-11]</sup>。分析机器人

结构特性,这里将大臂、小臂、前臂、连杆、前拉杆和后拉杆等杆件作为柔性件处理,其他部件仍为刚性件。利用有限元软件Ansys对零部件进行网格划分,通过模态计算,将零部件转换建立成柔性体mnf文件,其流程<sup>[12-13]</sup>见图4。

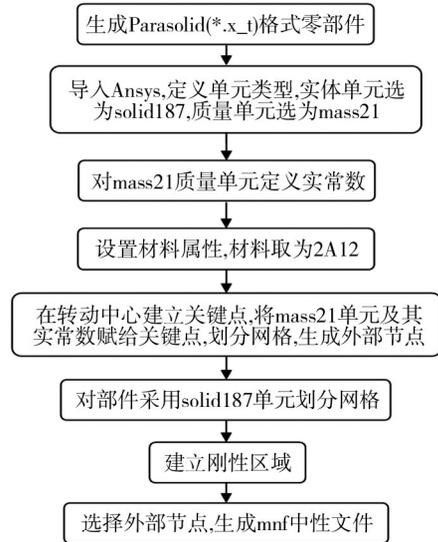


图4 Ansys中性文件生成流程

Fig.4 Generation procedure of the Ansys neutral file

### 2.2 刚柔耦合动力学仿真

在ADAMS中重新定义各零部件的材料属性,采用轻质铝合金材料。将Ansys生成的mnf中性文件,替换为ADAMS中多刚体动力学模型的相应部件,并重新添加运动副关系,加载驱动,得到码垛机器人的刚柔耦合动力学模型。将matlab中得到的关节角位移曲线保存成为txt文本格式,通过样条曲线CUBSPL函数添加到驱动中,末端施加恒定载荷1000 N;仿真时间设为1.5 s,采样步长设为0.01 s,考虑到关节④和关节①的相似性,这里只对关节①、关节②、关节③进行仿真分析和求解<sup>[14-16]</sup>。截取码垛机器人刚柔耦合动力学模型运动中的柔性体模型,见图5。



图5 码垛机器人柔性体模型

Fig.5 Flexible model of the palletizing robot

### 3 结果与分析

#### 3.1 末端质心位移偏差

通过对刚柔耦合动力学模型进行运动仿真计算,

进入后处理模块 ADAMS/Postprocessor, 获取机器人末端质心的位移变化曲线(在此定义关节④中心为末端质心)导入 Matlab 中, 与多刚体运动位移曲线进行对比(见图6)得到如下结果。

1) 从位移偏差曲线(图6b、图6d和图6f)可知, 考虑了杆件柔性化的刚柔耦合系统所得到的末端质心

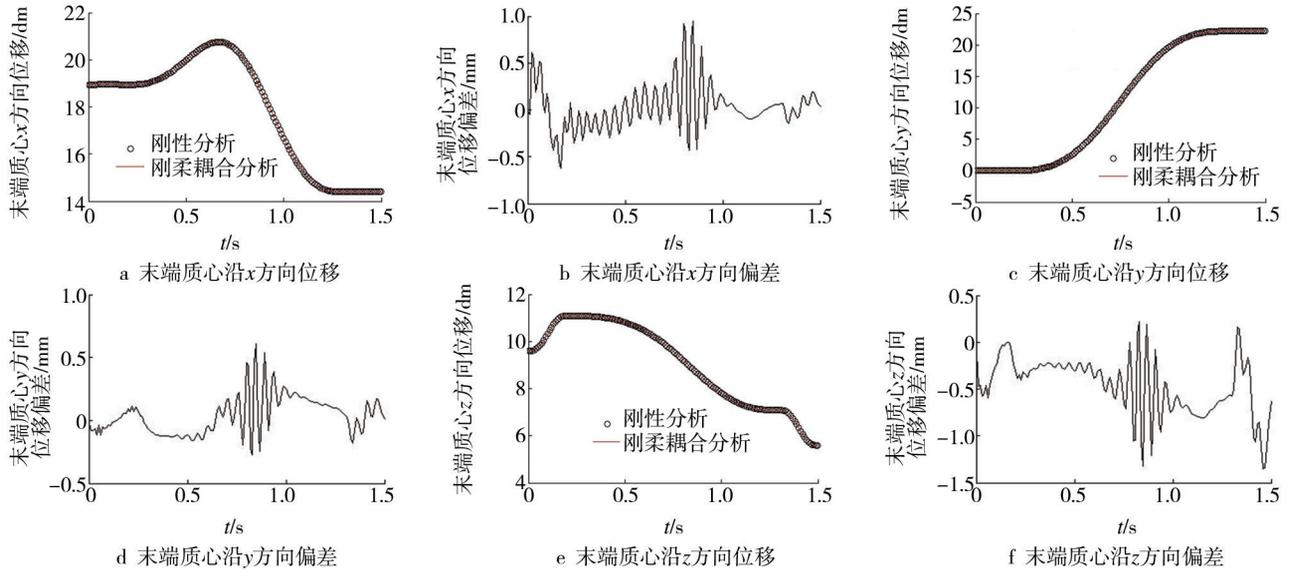


图6 末端质心位移曲线及偏差

Fig.6 Displacement curves and deviation of the robot end-effector centroid

的位移曲线, 与刚体系统相比存在振动现象, 但从位移曲线(图6a、图6c和图6e)可知, 其总体变化趋势与刚体系统变化趋势一致。

2) 从位移偏差曲线(图6b、图6d和图6f)可以看出, 在 $[T_1, T_2]$ 和 $[T_3, T_4]$ 区间, 机器人末端位移波动最大区域发生在关节②和关节③加速度最大点附近; 而在 $[T_2, T_3]$ 区间, 机器人末端波动最大区域发生在关节①加速度最大点附近。

经分析可知, 波动发生在加速度最大点区域, 且加速度越大, 对末端位移波动的影响越大。

3) 在机器人的整个运动过程中, 柔性杆件所引起

机器人末端质心在z方向偏差最大, 约为1.3 mm, 为负偏差; 在x方向偏差约为0.9 mm, y方向为0.6 mm, 并在零线附近上下震荡; 偏差最大值方向为所施加恒定载荷方向, 即重力方向。由此可见, 仿真结果合理。

#### 3.2 关节驱动扭矩曲线

对码垛机器人分别进行刚体动力学和刚柔耦合动力学仿真, 得到各关节驱动扭矩曲线, 导入 Matlab 进行对比, 见图7。从图7中可以看出, 机器人刚柔耦合系统各关节驱动扭矩曲线与多刚体系统相比波动现象明显, 但变化规律基本与刚性分析规律一致。分

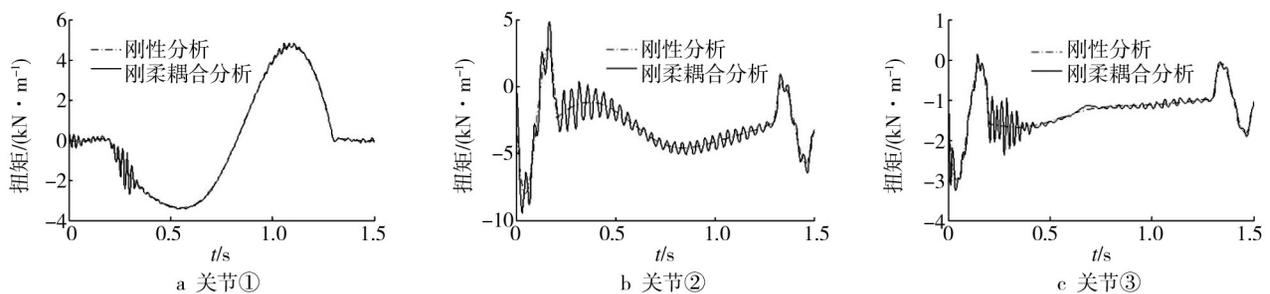


图7 关节扭矩

Fig.7 Joint Torque

析关节驱动扭矩曲线可知,关节②扭矩波动最大,关节③波动相对较小,回转关节①扭矩波动最小,且波动较明显区域均发生在加速度拐点附近,而当运动趋于平稳时,关节扭矩曲线波动幅值变小。

## 4 结语

将机器人运动学、动力学仿真常用的3个软件 Matlab、ADAMS 和 Ansys 相结合,运用联合仿真的方法,对码垛机器人建立刚柔耦合多体系统动力学模型,并进行运动学、动力学仿真分析,验证了刚柔耦合系统存在振动波动,并得到了机器人末端的位移偏差曲线及各关节的驱动扭矩,可通过优化加速度曲线、增强部件结构强度等方法减小振动。这种利用刚柔耦合的分析方法,结合了 Matlab 运动分析、ADAMS 动力分析及 Ansys 有限元计算的优势,克服了单独使用时的局限性,提高了在动载作用下,机器人各部件动态响应的准确性及仿真分析效率,更加直观、准确地模拟了码垛机器人的实际工况,为码垛机器人的优化设计及选型分析提供了有效的理论依据。

## 参考文献:

- [1] 李晓刚,刘晋浩. 码垛机器人的研究与应用现状、问题及对策[J]. 包装工程, 2011, 32(3): 96—102.  
LI Xiao-gang, LIU Jin-hao. Research and Application Situation, Problems and Solutions of Palletizing Robot[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(3): 96—102.
- [2] 王田苗,陶永. 我国工业机器人技术现状与产业化发展战略[J]. 机械工程学报, 2014, 50(9): 1—13.  
WANG Tian-miao, TAO Yong. Research Status and Industrialization Development Strategy of Chinese Industrial Robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(9): 1—13.
- [3] 丁九华,莫晔. 3-RPS 并联机器人刚柔耦合动力学分析[J]. 沈阳大学学报, 2013, 25(4): 307—311.  
DING Jiu-hua, MO Ye. Rigid-flexible Coupling Dynamics Analysis of 3-RPS Parallel Robot[J]. Journal of Shenyang University, 2013, 25(4): 307—311.
- [4] 张明,何庆中,郭帅. 酒箱码垛机器人的机构设计与运动仿真分析[J]. 包装工程, 2013, 34(1): 83—87.  
ZHANG Ming, HE Qing-zhong, GUO Shuai. Mechanical Design and Motion Simulation Analysis of Liquor Automated Production Line Palletizing Robot[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(1): 83—87.
- [5] 杨传民,田沙龙,杨钰. 码垛机器人的工作空间分析[J]. 包装工程, 2014, 7(35): 86—91.  
YANG Chuan-ming, TIAN Sha-long, YANG Meng. Workspace Analysis of the Palletizing Robot[J]. Packaging Engineering, 2014, 7(35): 86—91.
- [6] 杨延栋,管会生. 码垛机器人运动学与动力学仿真[J]. 起重运输机械, 2013(1): 60—64.  
YANG Yan-dong, GUAN Hui-sheng. Kinematics and Dynamics Simulation for the Palletizing Robot[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2013(1): 60—64.
- [7] CORKE P I. A Robotics Toolbox for MATLAB[J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 1996, 3(1): 24—32.
- [8] 段鹏,何庆中. 白酒包装线搬运机器人轨迹曲线研究[J]. 包装工程, 2014, 35(3): 22—27.  
DUAN Peng, HE Qing-zhong. Trajectory Curve of the Liquor Packing Line Moving Robot[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(3): 22—27.
- [9] 赵浩东,郭培全. 平行分度凸轮刚柔耦合动力学仿真[J]. 机械设计, 2013, 29(1): 53—57.  
ZHAO Hao-dong, GUO Pei-quan. Rigid-flexible Coupling Dynamic Simulation on Parallel Indexing Cam Mechanism[J]. Journal of Machine Design, 2013, 29(1): 53—57.
- [10] WU Guang-qiang, FAN Guo-dong, GUO Jian-bo. Ride Comfort Evaluation for Road Vehicle Based on Rigid-flexible Coupling Multibody Dynamics[J]. Theoretical & Applied Mechanics Letters, 2013, 3(1): 39—43.
- [11] 贺兵. 基于虚拟样机技术的包装机械系统仿真研究[J]. 包装工程, 2008, 29(2): 47—50.  
HE Bing. Simulation Study of Packaging Machine Based on Virtual Prototyping[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(2): 47—50.
- [12] LI Jin-quan, DING Hong-sheng. Dynamic Analysis and Structural Optimization of a Novel Palletizing Robot[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2010, 19(3): 274—279.
- [13] GAO Shu-de, XIE Gao-lan. Dynamic Analysis of Computer Based on Rigid-Flexible Coupling Model[C]// Proceedings of the 2011 International Conference on Advance in Construction Machinery and Vehicle Engineering, 2011.
- [14] 张俊俊,王基生. 混凝土泵车臂架刚柔耦合动力学分析[J]. 机械设计与制造, 2014(8): 62—66.  
ZHANG Jun-jun, WANG Ji-sheng. Rigid-flexible Coupling Dynamic Analysis on Concrete Pump Truck Boom[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(8): 62—66.
- [15] 王西珍,李言,成刚虎. 模切机主切机构刚柔耦合动力学特性研究[J]. 包装工程, 2010, 31(21): 68—71.  
WANG Xi-zhen, LI Yan, CHEN Gang-hu. Research of Dynamic Property of Die Cut Machine Main Mechanism with Rigid-flexible Coupling[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(21): 68—71.
- [16] XIAO Xiao-hui, WU Gong-ping. Impacts of Flexible Obstructive Working Environment on Dynamic Performances of Inspection Robot for Power Transmission Line[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008(5): 869—876.