

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.02.039

基于 ADAMS 的六关节工业机器人模态仿真分析研究

孔令超^{1,2}, 钟成堡^{1,2}, 王长恺^{1,2}

(1. 广东省高性能伺服系统企业重点实验室, 广东 珠海 519030; 2. 珠海格力电器股份有限公司, 广东 珠海 519030)

摘要:针对工业机器人的动态特性,以六关节工业机器人为研究对象,应用有限元软件 NASTRAN 和多体动力学软件 ADAMS 搭建刚柔耦合模型,引入关节柔性,对其进行整机模态仿真分析方法的研究,采用试验模态分析法进行了模态测试。通过对比仿真和试验得到前 10 阶固有频率和振型,其固有频率仿真相对误差控制在 10% 以内,振型基本保持一致,从而验证了六关节工业机器人整机模态仿真分析方法的准确性。进一步分析研究关节和关节臂刚性对机器人整机模态的影响规律,为整机刚柔耦合动力学分析、结构动态特性分析、结构优化设计和改进提供了一定的参考意义。

关键词:工业机器人;关节柔性;刚柔耦合;模态分析;ADAMS;刚性

中图分类号:TP242;TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2024)02-0182-06

Research on Modal Simulation Analysis of Six-axis Industrial Robot Based on ADAMS

KONG Lingchao^{1,2}, ZHONG Chengbao^{1,2}, WANG Changkai^{1,2}

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of High Performance Servo System, Zhuhai 519030, China;

2. GREE Electric Appliances, Inc of Zhuhai, Zhuhai 519030, China)

Abstract:Based on the dynamic characteristics of industrial robot, and the six-axis industrial robot taken as the research object, the rigid-flexible coupling model is built by the finite element software NASTRAN and the multi-body dynamics software ADAMS. Joint flexibility is introduced to conduct the study on whole machine modal simulation analysis method, and the modal test is carried out by the experimental modal analysis method. By comparing the first 10 natural frequencies and modes obtained from simulation and test, the relative error of natural frequency simulation is controlled within 10%, and the modes are basically consistent, which verifies the accuracy of the whole machine modal simulation analysis method of six-axis industrial robot. The influence of joint stiffness and arm stiffness on robot mode is further analyzed and studied, providing references for the whole machine rigid flexible coupling dynamic analysis, structural dynamic characteristic analysis, structural optimization design and improvement.

Keywords:industrial robot; joint flexible; rigid flexible coupling; modal analysis; ADAMS; stiffness

0 引言

随着工业机器人市场的快速增长,机器人厂家之间的竞争愈发激烈,机器人的设计面临更轻的质量、更快的操作速度、更高的定位精度的挑战,这对机器人的动态特性有很高的要求。传统的机器人动态特性分析方法主要采用理论方程或有限元软件对单关节臂和整机进行模态分析,为机器人结构动态特性的评估和改进提供了依据。徐稀文等^[1]应用 ANSYS 软件针对弧焊机器人的大臂分别进行了有、无预应力模态分析,但对机器人整机的模态分析研究更具有实际意义。程丽

等^[2]应用 SolidWorks 软件对 165 kg 焊接机器人 3 种典型位姿进行了模态分析,并针对结构薄弱环节提出优化设计建议,但其关节连接处的连接处理方式同真实情况具有一定的差异性。李世杰等^[3]应用 ANSYS 对六自由度工业机器人典型姿态进行模态仿真和实验分析,但机器人姿态无法快速调整,计算其他姿态模态需要重新建模。刘静等^[4]应用 ANSYS 和 ADAMS 对双自由度机械臂进行刚柔耦合运动学分析,但仅考虑了机械臂的柔性,没有引入关节的柔性。于靖军等^[5]分别从理论建模、有限元软件、试验测试 3 个方面对全柔性机器人进行了整机模态方面的研究,分析其

基金项目:广东省高性能伺服系统企业重点实验室项目(2020B121202017)

第一作者简介:孔令超(1985—),男,山东济宁人,高级工程师,硕士,研究方向为工业机器人结构设计和仿真,klc03@163.com。

动态特性,但3种方法所得的固有频率相差较大。此外,单纯应用有限元软件进行模态分析存在位姿不同需重新建模的过程,同时也不便于后续进行刚柔耦合动力学仿真分析,难以有效、准确地评估机器人的动态特性参数,使得机器人样机无法满足设计要求。因此,本文针对六关节工业机器人,应用有限元软件 NASTRAN 和多体动力学软件 ADAMS 搭建六关节工业机器人刚柔耦合模型,进行整机模态分析,得到了机器人水平伸直位姿的各阶固有频率和振型。同时,本文应用试验模态分析法对该机器人在同种位姿下进行了模态测试,从而验证了六关节工业机器人刚柔耦合模型建立方法的准确性,为机器人整机刚柔耦合动力学分析、结构动态特性分析、结构优化设计和改进提供了理论依据。

1 几何模型建立

六关节工业机器人主要由基座、第一节臂至第五关节臂、末端法兰盘、第一电机至第六电机、第一减速机至第六减速机、各关节臂侧板等组成,整机结构复杂。此外,进行整机模态试验分析时,机器人安装在底座上,因此,需要对底座进行同步建模。本文应用 Creo 软件建立工业机器人的三维实体模型并忽略螺钉、密封圈、编码器线、动力线、护线板等质量较轻、对整机仿真计算影响不大的零件。此外,为保证模型柔性处理时网格划分的均匀性和质量以及计算效率,在建模过程中对模型进行一些简化处理,主要处理有:1)删除冗余倒角、圆角及螺纹孔;2)删除螺钉、气管接头、皮带等质量较轻而结构较复杂的零件。在对模型进行简化的过程中,需经多次仿真验证以确保模型简化不会对仿真分析造成不可接受的影响。简化后的六关节工业机器人结构示意图如图1所示。

2 仿真模态分析

模态分析是机械结构动态特性分析的一种方法,即分析机械系统的振动特性,包括固有频率和振型^[6]。通过对机器人整机的模态分析,可以在设计阶段对整机结构的动态特性进行预测,进而找到机器人本体的薄弱环节,提出改进意见,实现机器人本体结构的动态设计。六关节工业机器人主要由关节臂和关节组成,两者的柔性化均对整机模态分析具有较大的影响。本文应用 NASTRAN 软件对关节臂进行柔性化处理,应用

ADAMS/View 模块对关节进行柔性化处理并搭建整机刚柔耦合模型,最后应用 ADAMS/Vibration 模块求解各阶固有频率和振型。

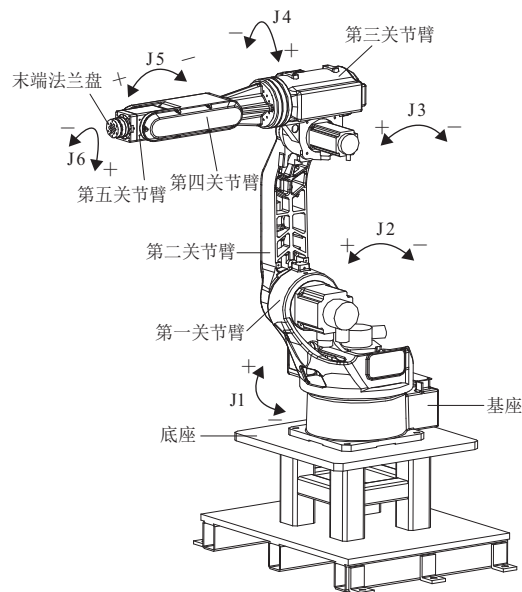


图1 六关节工业机器人整体结构

2.1 柔性关节臂的建立

通过 ADAMS/Flex 模块从 NASTRAN 有限元软件中读取关节臂的模态中性文件(modal neutral file, MNF),从而实现机器人关节臂的柔性化处理。关节臂柔性化过程主要有:导入模型、赋予材料属性、网格划分、建立刚性区域和生成中性文件。

本文中需进行柔性化的关节臂有:底座、基座、第一节臂至第五关节臂,分别将三维模型导入 NASTRAN 中,根据实际情况赋予材料属性。由于关节臂模型结构复杂,选用四面体单元进行网格划分。刚性区域包括刚性点和刚性面,其选取依据机器人装配情况和运行情况,刚性点用于后续施加旋转副、固定副等约束副,刚性面与刚性点连接。最后导出 MNF 文件。MNF 文件主要包含了关节臂各节点的位置坐标与连通性、各节点质量与转动惯量、各阶模态、应力应变等信息。第四关节臂柔性模型如图2所示。

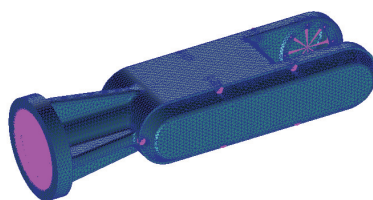


图2 第四关节臂柔性模型

2.2 柔性关节的建立

根据 SPONG M W 等^[7-9]提出的柔性关节臂模型,目前在 ADAMS 中,主要采用扭转弹簧或力矩的方式来表示机器人的关节柔性特性,但这两种方式只有 1 个自由度,仅表示了机器人关节轴向的柔性而忽略了关节径向的柔性,这对整机模态仿真分析具有一定的影响。

本文在此基础上,提出采用 Bushing 单元(衬套)来表示机器人关节柔性。Bushing 单元具有 3 个平移自由度和 3 个旋转自由度,限制其平移自由度以保持关节臂与减速机不发生平移分离,轴向旋转自由度采用减速机的扭转刚度以近似等效关节轴向扭转刚度,径向旋转自由度采用减速机主轴的刚度以近似等效关节径向扭转刚度。机器人柔性关节示意图如图 3 所示。

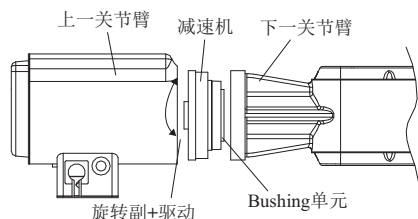


图 3 机器人柔性关节示意图

由图 3 可知,机器人关节的柔性化采用等效模拟的方法,上一关节臂和减速机之间施加旋转副和驱动,减速机和下一关节臂之间施加 Bushing 单元。

2.3 刚柔耦合模型的建立

将六关节工业机器人三维模型导入 ADAMS 模型并用 2.1 节中生成的 MNF 文件替换原刚体模型。根据机器人实际运行情况施加固定副、旋转副、Bushing 单元等约束副,各轴施加驱动并赋予各驱动初始位置,使机器人初始平衡位姿为模态分析选取的整机位姿。本文选取水平伸直位姿进行有限元模态分析,机器人水平伸直刚柔耦合模型如图 4 所示。

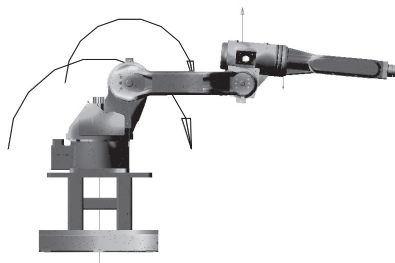


图 4 机器人刚柔耦合模型

2.4 模态仿真

应用 ADAMS/Vibration 模块对机器人整机刚柔耦合模型进行模态分析,通过 ADAMS 后处理得到各阶模态的固有频率和振型。本文提取了前 10 阶的模态。

3 试验模态分析

为验证基于 ADAMS 的六关节工业机器人整机模态仿真分析的准确性,采用多点激励、多点测量的脉冲激振法对机器人在水平伸直位姿下进行模态试验。模态测试数据采集分析方案如图 5 所示。

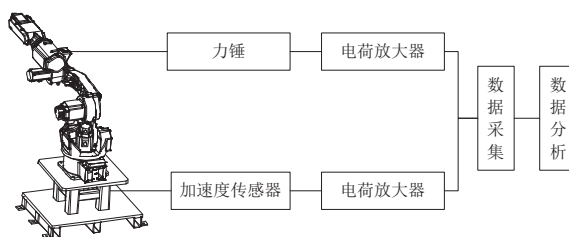


图 5 模态测试数据采集分析方案

根据六关节工业机器人整机以及各部件的结构特点,在机器人上均匀布点:敲击点和拾振点,采用力锤分别对敲击点进行激振,采用加速度传感器分别测试拾振点的响应信号。力锤内的力传感器和拾振点的加速度传感器同时记录脉冲激励和响应,传入计算机中进行模态分析,得到六关节机器人在水平伸直位姿下各阶固有频率和振型。实验测试如图 6 所示。

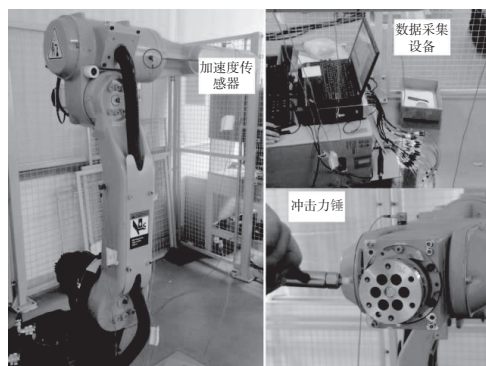


图 6 模态实验测试系统图

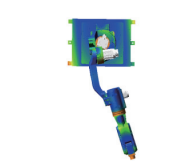
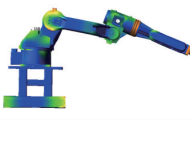
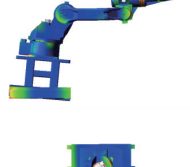
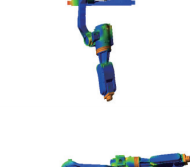
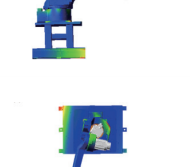
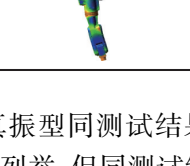
4 结果分析

4.1 振型

从仿真模态分析和试验模态分析中分别提取机器人整机前 10 阶振型,由于篇幅限制,仅列举

前 6 阶振型进行对比,如表 1 所示。

表 1 机器人整机前 6 阶振型对比

阶数	测试振型	仿真振型
1		
2		
3		
4		
5		
6		

由表 1 可知,前 6 阶仿真振型同测试结果基本一致,第 7—10 阶振型虽未列举,但同测试结果基本一致,从而验证了基于 ADAMS 刚柔耦合模型的整机模态仿真方法在振型方面的准确性。观察水平伸直位姿下的模态振型可知,低阶模态主要为整机的摆动、扭转、弯曲模态。

4.2 固有频率

仿真与试验模态分析固有频率对比结果如表 2 所示。

由表 2 可知,除第 1 阶和第 3 阶固有频率仿真相对误差略大于 10% 以外,其他阶固有频率仿真相对误差均在 10% 以内。从第 1 阶和第 3 阶的模态振型可知,其模态特性与底座具有一定的关系,通过对比底座实物和三维模型发现,底座实物存在较大的加工误差。

表 2 仿真与试验模态频率对比

阶数	试验频率/Hz	仿真频率/Hz	仿真相对误差/%
1	11.001	12.195	10.854
2	12.985	12.789	-1.509
3	29.502	32.658	10.698
4	38.514	40.770	5.858
5	46.145	42.282	-8.371
6	65.672	71.020	8.144
7	82.641	76.787	-7.084
8	99.726	108.627	8.925
9	124.100	118.102	-4.833
10	140.110	145.638	3.945

由模态固有频率可知,整机固有频率较低,易发生共振现象,对机器人的精度会有较大影响,尤其是第 1 阶和第 2 阶模态,其振型为正交的整机摆动模态,固频在 11~13 Hz 之间,应重点关注。

5 刚度影响分析

在建立的仿真方法的基础上,以某型号机器人作为研究对象,分析研究关节刚度和关节臂刚度对机器人整机模态的影响规律。

首先对机器人水平伸直姿态(图 7)和初始“7”字型姿态(图 8)开展整机模态仿真计算,得到前 6 阶模态频率,然后分别对关节臂和关节进行刚性化处理,对比前后机器人模态频率的变化情况。



图 7 机器人水平伸直姿态

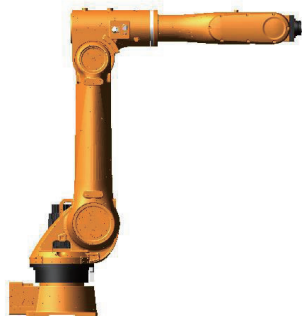


图 8 机器人初始“7”字型姿态

5.1 关节臂刚性影响分析

将机器人的基座和5个关节臂分别设置为刚体并分别进行机器人整机模态仿真,将各关节臂刚性情况下模态频率与原模态频率做差,求得模态的变化率,分析各关节臂刚度对整机模态的影响。

1) 水平伸直姿态下不同关节臂刚性化对整机模态的影响如图9所示。1阶模态频率主要受第一和第二关节臂的刚度影响较大,第二关节臂影响的模态频率变化率达到20.6%;2阶和3阶模态频率受关节臂刚度影响较小,模态频率变化率都在6%以内;4阶模态频率主要受第二关节臂刚度影响显著,模态频率变化率达到34.4%;5阶模态频率主要受第一和第二关节臂刚度影响较大,6阶模态频率受第一关节臂影响较大。

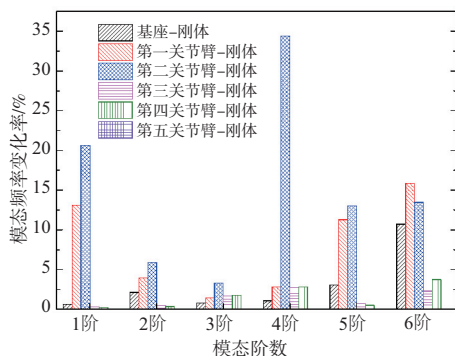


图9 水平伸直姿态下不同关节臂刚性化对模态影响

水平伸直姿态下,第一关节臂和第二关节臂刚度对前6阶模态有主要的影响,这进一步表明第一关节臂和第二关节臂的刚度相对较为薄弱,其中对比1阶和2阶模态频率的变化率,结合模态的振型,说明第一和第二关节臂在左右摆动方向的刚度较弱。

2) 初始“7”字型姿态下不同关节臂刚性化对整机模态的影响如图10所示。1阶模态频率主要受第一和第二关节臂的刚度影响较大,但频率变化率都在10%以内;2阶模态频率同样主要受第一和第二关节臂的刚度影响,第一关节臂影响的频率变化率为18.9%;3阶模态频率受关节臂刚度影响较小;4阶模态频率主要受第一和第二关节臂刚度影响较大,第二关节臂影响的频率变化率约21.6%;5阶和6阶模态频率都主要受第二关节臂刚度影响较大,其中第二关节臂影响的5阶模态频率变化率达到35.8%。

在“7”字型姿态下,第二关节臂的刚度对整

机各阶模态有很重要的影响,相比于水平伸直姿态,因姿态的差别致使模态振型差异,第二关节臂刚度对各阶模态影响的程度不同。

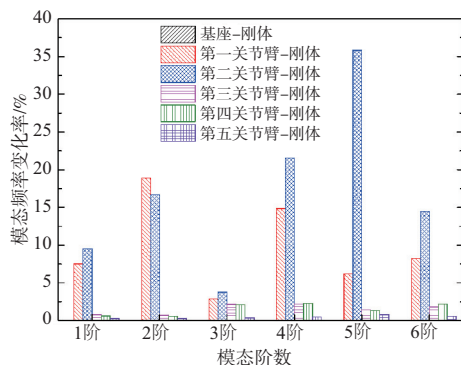


图10 “7”字型姿态下不同关节臂刚性化对模态影响

综合以上分析可知,在水平伸直姿态和“7”字型姿态下,第一和第二关节臂刚度对前6阶模态有显著的影响,其他关节臂影响较小,第一和第二关节臂刚度本身较为薄弱。

5.2 关节刚性影响分析

将机器人的6个关节分别设置为刚性连接并分别进行机器人整机模态仿真,将各关节刚性情况下模态频率与原模态频率做差,求得模态的变化率,分析各关节刚度对整机模态的影响。

1) 水平伸直姿态下不同关节刚性化对整机模态的影响如图11所示,1阶模态频率主要受J1关节刚度影响,频率变化率约为18.6%;2阶模态频率主要受J2关节刚度影响,频率变化率约为36%;3阶模态频率受J2和J3关节刚度影响较大,频率变化率分别为16.6%和26.4%;4阶模态频率主要受J3关节刚度影响较大,频率变化率达到46.3%;5阶模态频率受关节刚度影响较小;6阶模态频率受J1和J2关节刚度影响相对较大。

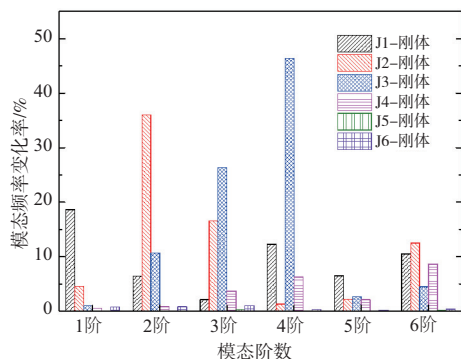


图11 水平伸直姿态下不同关节刚性化对模态影响

水平伸直姿态下,J1、J2和J3关节刚性对前6

阶模态有主要影响,结合水平伸直姿态下各阶模态的振型,关节刚度影响程度高的模态振型与关节旋转方向一致,即关节扭转刚度是影响机器人模态的主要因素。

相比于关节臂刚性的影响,关节刚性对机器人2/3/4阶的模态影响程度更大,因为低阶模态振型主要以摆动、弯曲振型为主,与关节旋转方向一致。

2)初始“7”字型姿态下不同关节刚性化对整机模态的影响如图12所示。1阶模态频率受关节刚度影响相对较小;2阶模态频率主要受J2关节刚度影响较大,频率变化率约31.9%;3阶模态频率受J2和J3关节的刚度影响较大,其中J3关节刚度影响的频率变化率约为17.8%;4阶模态频率受J3关节刚度影响较大,频率变化率达到58.6%;5阶和6阶模态主要受J1关节刚度影响较大,6阶模态频率变化率约为30%。

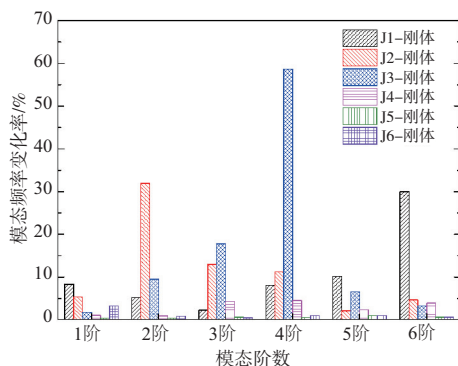


图12 “7”字型姿态下不同关节刚性化对模态影响

“7”字型姿态下,J1、J2和J3关节刚性仍对前6阶模态有主要影响,同样因与水平伸直姿态的差异致使模态振型差别,致使对各阶模态影响程度不同。

相比于关节臂刚性的影响,关节刚性对2/3/6阶整机模态影响程度更大,主要因关节刚度小于关节臂本身的结构刚度。

综合以上分析可知,在水平伸直姿态和“7”字型姿态下,J1、J2和J3关节刚度对前6阶整机模态的影响占主导地位,其他关节影响较小。

6 结语

本文采用有限元软件对机器人关节臂进行柔性化处理,采用Bushing单元对机器人关节进行柔性等效模拟,建立了六关节工业机器人整机刚柔耦合模型,开展整机模态仿真和试验测试验证,

同时分析关节臂和关节刚性对整机模态的影响,得出以下结论。

1)六关节机器人整机模态仿真与试验模态对比分析,模态频率相对误差在10%以内,振型基本保持一致。结果表明,所建立的机器人整机模态仿真分析方法具有较高的准确性,可用于后续整机刚柔耦合动力学仿真分析,结构动态特性分析,为结构优化设计和改进提供理论依据。

2)六关节工业机器人整机的模态主要集中在低频段,振型主要为整机的摆动、扭转和弯曲,其中,第1阶和第2阶模态振型为正交的整机摆动模态,且固频较低,有必要对机器人结构进行改进设计,以提高整机刚性。

3)六关节工业机器人在水平伸直姿态和“7”字型姿态下,第一和第二关节臂刚度对前6阶模态有显著的影响,其他关节臂影响较小。J1、J2和J3关节刚度对前6阶整机模态的影响占主导地位,其他关节影响较小。

参考文献:

- [1] 徐稀文,平雪良,陈鲁刚,等. 弧焊机器人手臂结构模态分析[J]. 机械设计与制造,2012(6):151-153.
- [2] 程丽,刘玉旺,骆海涛,等. 165 kg 焊接机器人有限元模态分析[J]. 机械设计与制造,2012(1):147-149.
- [3] 李世杰,李飞,马建龙,等. 六自由度工业机器人的模态仿真与实验[J]. 机械设计与制造,2018(12):157-159,163.
- [4] 刘静,林冲,郭世财. 基于ADAMS和ANSYS的机械臂刚柔耦合运动学分析[J]. 机床与液压,2020,48(17):25-28,107.
- [5] 于靖军,毕树生,宗光华,等. 全柔性机器人机构结构动力学分析方法研究[J]. 机械工程学报,2004,40(8):54-58.
- [6] 赵欣翔. 考虑关节柔性的重载工业机器人结构优化研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [7] SPONG M W. Modeling and control of elastic joint robots[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control,1987,109(4):310-318.
- [8] ABELE E, BAUER J, BERTSCH C, et al. Comparison of implementations of a flexible joint multibody dynamics system model for an industrial robot[C]// 6th CIRP International Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, Naples, Italy: [s.n.],2008.
- [9] ABELE E, BAUER J, HEMKER T, et al. Comparison and validation of implementations of a flexible joint multibody dynamics system model for an industrial robot[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology,2011,4(1):38-43.

收稿日期:2022-10-17