

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.10.015

轻量化行星采样机械臂虚拟样机系统*

孙小肖,张冰蔚*,刘家举,刘 杰
(江苏科技大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212003)

摘要: 针对行星探测车采样机械臂开发效率低及成本高的问题,采用虚拟样机技术,对探测车采样机械臂的结构、功能、功耗及控制系统等方面进行了研究,提出了一种轻量化、低功耗、多功能四自由度采样机械臂的设计方案,确定了各关节的驱动方案,并对驱动部件进行选型。基于SolidWorks软件,实现三维模型的建立,并利用ADAMS软件,建立采样机械臂动力学模型。应用D-H法建立采样机械臂关节坐标并确定连杆参数,求解正、逆运动学公式,采用三次多项式方法对关节空间进行轨迹规划。利用ADAMS和Matlab搭建虚拟样机联合仿真系统,进行联合仿真实验。仿真结果表明,该采样机械臂设计方案合理,达到轻量化、低功耗目的,控制系统稳定可靠,能够实现支起、收回、采样等功能。

关键词: 采样机械臂; 多功能; 轻量化; 虚拟样机; 联合仿真

中图分类号: TH122; TP24 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)10-1301-05

Virtual prototyping system of planet sampling manipulator with lightweight

SUN Xiao-xiao, ZHANG Bing-wei, LIU Jia-ju, LIU Jie

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: Aiming at the problem of efficiency and cost in developing sampling manipulator of planetary rover, virtual prototyping technology was used to research its mechanical structure, function, power consumption and control systems. A4DOF sampling manipulator design was proposed which was lightweight, low-power consumption and multifunctional. Each of joint driveing program was determined and driven parts were selected. 3D model was built in SolidWorks and dynamic model was established in ADAMS. The coordinate systems of sampling manipulator were established and its link parameters were determined by using D-H method. Besides, forward and inverse formulas were built and the cubic polynomial algorithm was used for jiont trajectory planning. The co-simulation system was established through the Matlab and Adams and it was successfully implemented. The simulation results indicate that the design of samping manipulator is reasonal which meets the purposes of lightweight and low power consumption and its control system is stable and reliable which can achieve supporting, recovering and sampling function.

Key words: sampling mechanical arm; multifunction; lightweight; virtual prototype; co-simulation

0 引 言

对外太空的探测一直是人类不懈的追求,美国、俄罗斯、欧空局以及日本都已经陆续发射许多探测器^[1],其中美国已多次成功实现火星探测。中国也成功发射玉兔号月球探测车,实现对月球表面的探测,并计

划2020年实现火星的登录探测,2030年实现火星表面采样返回。相比月球,火星离地球的距离更遥远,对其探测首先考虑的是火箭发射能力和探测车的能耗问题,这要求火星探测车轻量化、低功耗。为减轻重量,多功能采样机械臂是一个发展方向^[2]。采样机械臂是火星探测车的关键部件,用来对火星表面土壤进

收稿日期: 2014-06-26

基金项目: 江苏科技大学研究生创新基金资助项目(YCX13S-10)

作者简介: 孙小肖(1989-),男,江苏赣榆人,主要从事机器人方面的研究. E-mail: sunxiaoxiaoqq@163.com

通信联系人: 张冰蔚,男,教授,硕士生导师. E-mail: zbw33@163.com

行采集分析^[3],其也应具有轻量化、低功耗特性。

为此,本研究设计轻量化、低功耗的多功能采样机械臂,具有采样和导航双重功能^[4],其适用于质量 30 kg~100 kg 的小型或微型探测车。轻量化是指其采用轻质高强碳纤维材料,低功耗是各关节使用高转速低功率的 Maxon 电机,在低耗能情况下通过高减速比来获得大扭矩。

为了研究采样机械的功能和性能,本研究采用虚拟样机方法,相比传统机械和控制独立进行的设计方法,它可以提高工作效率,缩短开发周期,降低设计成本。ADAMS 和 Matlab 是当前虚拟设计方法应用最广泛的两款软件,ADAMS 具有强大的多体动力学仿真能力^[5],Matlab 具有强大的计算能力,其 Simulink 模块可快速搭建控制系统^[6],将这两者结合起来^[7-8],既可对采样机械臂进行运动学、动力学仿真,又可搭建控制系统,通过两者的交互联合仿真,便能实时的看到控制系统对采样机械臂的控制效果,提高采样机械臂的综合性能,为物理样机的研制提供参考。

1 虚拟样机模型系统

1.1 采样机械臂三维模型的建立

ADAMS 软件具有强大的运动学、动力学仿真功能,但弱化了三维建模功能。为此,本研究先在专业三维软件 SolidWorks 中进行三维建模。采样机械臂具有四自由度,分别为腰、肩、肘、腕关节,4 个关节均采用直流伺服电机、行星齿轮减速箱、谐波减速器的驱动方式,各关节电机型号、减速比和驱动力矩如表 1 所示。

表 1 关节电机型号、减速比及力矩

关节	电机及行星齿轮 减速器型号	谐波齿轮 减速器型号	总减速比	提供 最大力矩
1				
2	RE-max21+GP22A	Shd-17-xx-2sh	5 300:1	19.1 Nm
3				
4	RE-13+GP13A	Csf-8-2xh-f	1 700:1	1.8 Nm

采样机械臂三维模型如图 1 所示,设置各零件的材料,通过 SolidWorks 质量属性功能可查看其总质量为 3.68 kg,达到轻量化要求。

1.2 采样机械臂动力学仿真系统的建立

在 ADAMS 中进行采样机械臂动力学仿真,需把 SolidWorks 模型中的零件进行简化合并,最终合并为车体、腰关节、后臂、前臂、挖勺 5 个零件的装配体,然后将其另存为 Parasolid 格式,导入 ADAMS 中。本研究在 ADAMS 中,对每个零件定义材料、质量、转动惯量等相关属性。另外,还需要对模型定义约束和驱

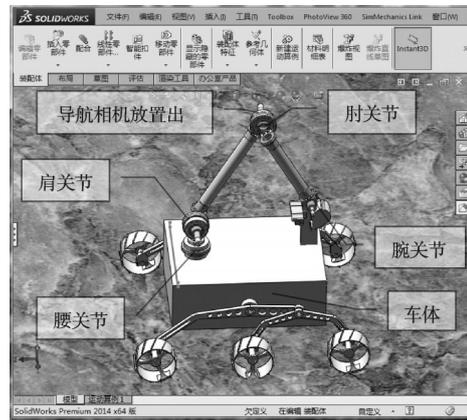


图 1 采样机械臂三维模型

动。采样机械臂是关节型机械臂,在具有相对回转动运动的 4 个关节定义旋转运动副,再将车体与大地定义一个固定连接副,这样机械臂各零件间具有确定约束关系,仿真时各零件能够准确地运动。

2 运动学公式的建立

机器人运动学分为正运动学和逆运动学,对应的是从关节空间到笛卡儿空间(或称工作空间)的映射和从笛卡儿空间到关节空间的映射。正运动学讨论的是已知机械臂的关节角,计算出工具坐标系在工作台坐标系中的位姿问题。逆运动学研究的是已知工具坐标系相对于工作台坐标系的期望位姿,计算机械臂关节角度的问题。

2.1 运动学正解公式建立

机械臂连接每个关节的两个连杆之间都有着特定的几何关系。这里采用改进的 Denavit-Hartenberg 参数法^[9]来描述,按照 D-H 法建立的行星采样机械臂坐标系如图 2 所示,相应的连杆参数如表 2 所示。

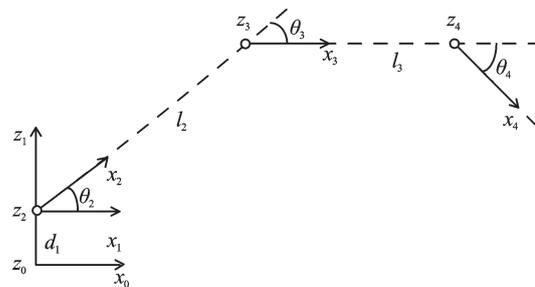


图 2 行星采样机械臂的 D-H 坐标

表 2 连杆参数表

n	关节	$\alpha_{n-1} / (^\circ)$	a_{n-1} / mm	d_n / mm	$\theta_n / (^\circ)$
1	腰关节	0	0	d_1 (38.6)	θ_1
2	肩关节	90	l_1 (0)	0	θ_2
3	肘关节	0	l_2 (353)	0	θ_3
4	腕关节	0	l_3 (105)	0	θ_4

根据行星采样机械臂的连杆参数表,可以推导出终端坐标与基坐标之间的变化矩阵:

$${}^0_4T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T = \begin{bmatrix} c_1c_{234} & -c_1s_{234} & s_1 & c_1(l_3c_{23} + c_2l_2) \\ s_1c_{234} & -s_1s_{234} & -c_1 & s_1(l_3c_{23} + c_2l_2) \\ s_{234} & c_{234} & 0 & l_3s_{23} + s_2l_2 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

初始支起状态时: $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = 60^\circ$, $\theta_3 = -120^\circ$, $\theta_4 = 30^\circ$ 。

将数值代入式(1)得:

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & 79\sqrt{3} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 744.6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2 运动学逆解公式建立

机器人逆运动学主要任务是反解:即已知末端执行器的位姿 0_4T , 求出对应的关节角度 (θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_4)。

假设已知一组期望的末端关节位姿为:

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

则有:

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1s_{234} & c_1s_{234} & -s_1 & c_1(l_4s_{23} + s_2l_3) \\ s_1s_{234} & s_1c_{234} & c_1 & s_1(l_4s_{23} + s_2l_3) \\ c_{234} & s_{234} & 0 & l_4c_{23} + c_2l_3 + d_1 + l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)左边的矩阵元素为已知量,右边的矩阵元素为未知量。通过左右元素对应相等联立求得:

$$\theta_1 = a \tan 2(p_x, p_y) \quad (5)$$

$$\theta_2 = a \tan 2\left(p_z - l_1, \frac{p_x}{c_1}\right) - a \tan 2(l_3s_3, l_3c_3 + l_2) \quad (6)$$

$$\theta_3 = a \tan 2(\sin(\theta_3), \cos(\theta_3)) \quad (7)$$

$$\theta_4 = a \tan 2(r_{31}, r_{32}) - \theta_2 - \theta_3 \quad (8)$$

式中:

$$\sin(\theta_3) = \pm \sqrt{1 - \frac{\left(\left(\frac{p_x}{c_1}\right)^2 + (p_z - d_1)^2 - l_2^2 - l_3^2\right)}{2l_2l_3}}$$

$$\cos(\theta_3) = \frac{\left(\frac{p_x}{c_1}\right)^2 + (p_z - d_1)^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3}$$

式(5~8)是机械臂各关节逆解,其可以应用到下一节轨迹规划中。

3 轨迹规划

机器人轨迹规划是指依据机器人所要执行的任务设计机器人各关节运动规律。轨迹规划主要有两种方式:点到点(PTP)轨迹规划和连续路径(CP)轨迹规划。对于连续的运动,除规定起始点和终止点,还要指明两点之间的若干中间点,即路径点,必须沿特定的路径运动^[10]。

轨迹规划可在关节空间或笛卡尔空间实现。由于关节空间规划方法便于计算,且不会发生机构奇异性问题,这里采用关节空间规划方法。根据多功能采样机械臂作业要求,展开、折叠动作采用PTP规划,入锁、解锁、采样动作采用CP规划。这里采用3次多项式算法^[11]来讨论采样机械臂各种作业的轨迹规划。

对于已知的两个路径点,通常会给定始末位置 $\theta(0) = \theta_0$, $\theta(t_f) = \theta_f$; 始末速度 $\dot{\theta}(0) = \dot{\theta}_0$, $\dot{\theta}(t_f) = \dot{\theta}_f$ 。这4个约束条件能解出4个未知量,因此能够确定一个三次多项式^[12]:

$$\theta(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 \quad (9)$$

对应的关节速度为:

$$\dot{\theta}(t) = a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2 \quad (10)$$

把4个期望的约束代入式(9, 10),得:

$$\begin{aligned} \theta_0 &= a_0 \\ \theta_f &= a_0 + a_1t_f + a_2t_f^2 + a_3t_f^3 \\ \dot{\theta}_0 &= a_1 \\ \dot{\theta}_f &= a_1 + 2a_2t_f + 3a_3t_f^2 \end{aligned} \quad (11)$$

求解方程组中的 a_i , 可以得到方程的解:

$$\begin{aligned} a_0 &= \theta_0 \\ a_1 &= \dot{\theta}_0 \\ a_2 &= \frac{3}{t_f^2}(\theta_f - \theta_0) - \frac{2}{t_f}\dot{\theta}_0 - \frac{1}{t_f}\dot{\theta}_f \\ a_3 &= -\frac{2}{t_f^3}(\theta_f - \theta_0) + \frac{1}{t_f^2}(\dot{\theta}_f + \dot{\theta}_0) \end{aligned} \quad (12)$$

应用式(12), 求出符合任何起始和终止位置及速度的三次多项式。本研究对三次多项式曲线进行采样, 将其分成 n 段, 求得末端执行器所经过 $n-1$ 个路径点的期望位姿, 应用上一节所求逆解公式(5~8), 求出第1段路径各关节转角, 通过循环操作, 依次求出第 $i(i=2, 3, \dots, n)$ 段路径对应关节转角, 得到采样机械臂的连续轨迹。

4 虚拟样机控制系统

4.1 控制系统结构

采样机械臂是一个多输入多输出、强耦合的复杂机电系统,对其进行精确控制比较困难。为此,先不考虑机械臂的动态耦合控制,对每个关节进行独立反馈控制,使其能够跟踪给定轨迹曲线。

该采样机械臂的每个关节处都安装一个用来测量关节角的光电编码器和一个对相邻连杆施加扭矩的电机,每个电机由各自的驱动器进行驱动,各驱动器由运动控制器进行控制,控制器、驱动器、执行电机和反馈编码器组成各自的伺服控制系统。控制器通过串口总线或以太网总线同上位机通信,接收上位机发出的指令并及时将当前状态信息传送给上位机。采样机械臂的总体控制结构如图3所示。

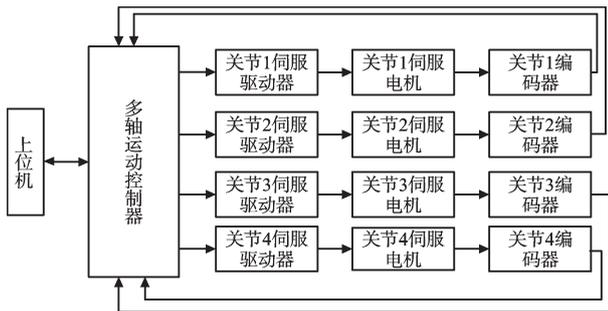


图3 采样机械臂独立关节控制结构

4.2 关节位置伺服控制

采样机械臂是串联机械臂,因此可通过控制各个关节的角度位置来控制末端执行器的位置。当不考虑采样机械臂动态特性时,可以将多输入多输出的采样机械臂系统简化为单输入、单输出的伺服控制系统。直流伺服系统可以简化为一个二阶系统,为提高系统响应速度,加入比例环节,同时为了增大系统的阻尼,抑制系统超调,引入微分环节,从而构成了PD位置控制,其结构如图4所示。

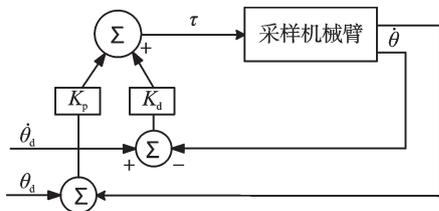


图4 采样机械臂关节位置PD控制

5 联合仿真

5.1 联合仿真机械系统搭建

ADAMS与Matlab的联合仿真通过ADAMS/con-

trol接口模块来完成的,首先在ADAMS中定义输入、输出变量;然后通过Control模块将ADAMS中定义好的机械系统导入到Matlab中,生成Matlab/Simulink中机械子系统,如图5所示。

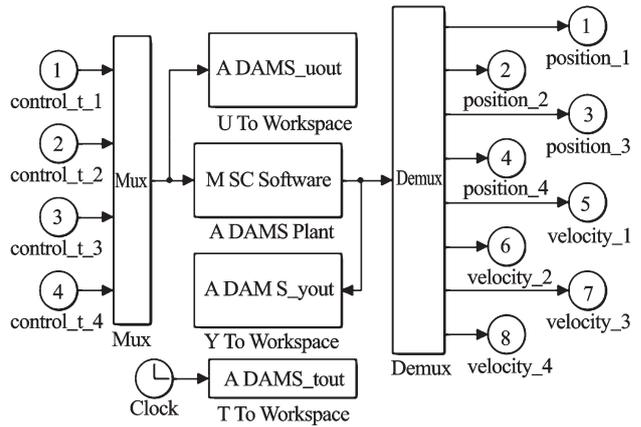


图5 Matlab/Simulink中的adams_sub模块

从图5中可以看出,机械子系统ADAMS Plant有4个转矩变量作为输入,4个位置变量及4个角速度变量作为输出。

5.2 联合仿真控制系统

本研究在Matlab中利用Simulink模块搭建联合仿真系统,采用PD控制策略进行位置控制,通过对各个关节位置的控制,实现对机械臂末端执行机构的位置控制,使机械臂能够实现较高精度的位置跟踪。联合仿真系统如图6所示。

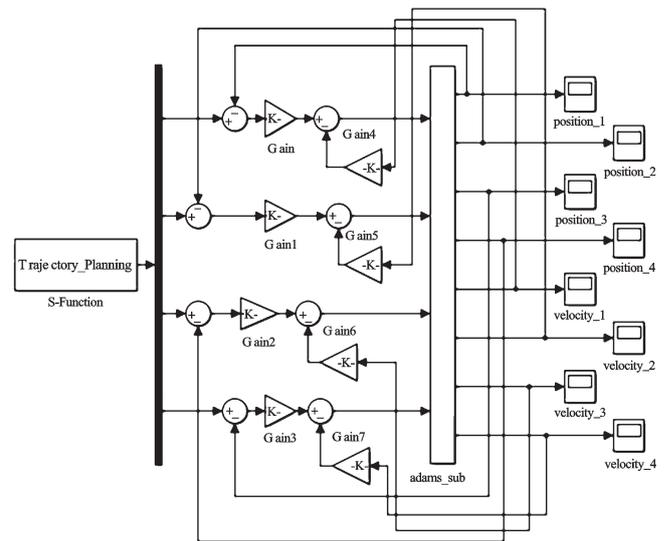


图6 联合仿真PD位置控制系统结构

其中S-Function是Matlab/Simulink的系统函数,可以采用Matlab代码、C、C++等语言编写,它可以用来表述并实现连续系统、离散系统以及复合系统等动态系统^[13]。这里采用S函数编写轨迹规划器,其输出的各关节期望位置通过PD位置控制输入到机械系统中。

本研究设定轨迹初始位置为支起状态,各关节角为 $\theta_0 = [0 \text{ pi}/3 - 2 \times \text{pi}/3 \text{ pi}/6]$,终止状态为折叠状态,各关节角为 $\theta_f = [0 \text{ 0 pi pi}/4]$ 。笔者运行仿真,通过示波器可以实时观察各关节的角位移和角速度曲线,且通过ADAMS后处理模块可查看各关节力矩大小。这里只给出肘关节在地球重力和火星重力加速度两种情况下空载力矩曲线如图7、图8所示。

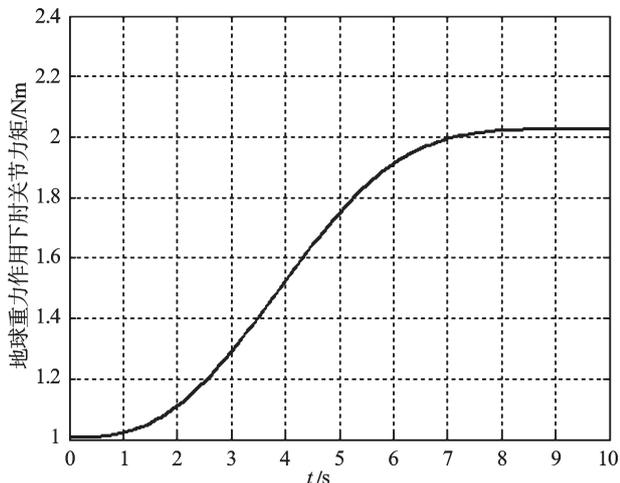


图7 地球重力作用下肘关节力矩曲线

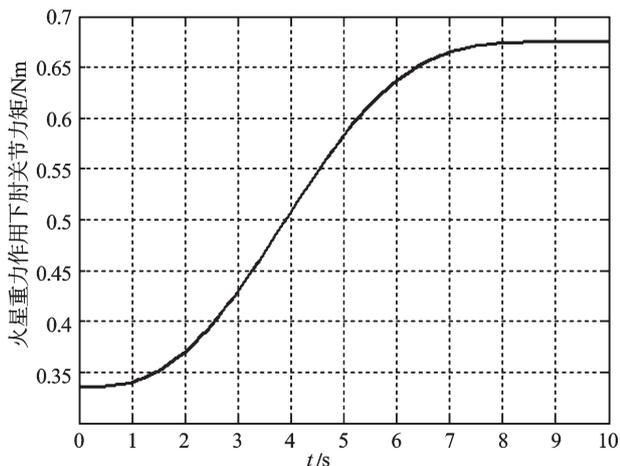


图8 火星重力作用下肘关节力矩曲线

由图7、图8可看出采样机械臂收放过程中关运行平稳,在地球重力作用下的肘关节的力矩 $1 \text{ N} \cdot \text{m} \sim 2 \text{ N} \cdot \text{m}$,在火星重力作用下的肘关节力矩 $0.34 \text{ N} \cdot \text{m} \sim 0.68 \text{ N} \cdot \text{m}$,远小于关节所能提供最大力矩 $19.1 \text{ N} \cdot \text{m}$,说明采样机械臂达到轻量化低功耗目的。

6 结束语

本研究通过SolidWorks、ADAMS、Matlab 3个软件的综合使用,建立行星采样机械臂的虚拟样机系统,求解其运动学公式的正、逆解,将运动学公式通过Matlab系统函数的编程方法输入到轨迹规划中,实现连续轨迹规划。通过Matlab和ADAMS的联合仿真,对比地球、火星不同重力加速度下各关节力矩,两种情况下所需力矩都远小于关节所能提供最大力矩,达到轻质高载目的,为采样机械臂进一步研究提供基础。

参考文献(References):

- [1] 欧阳自远,李春来,邹永廖. 月球探测的进展与我国的月球探测[J]. 中国科学基金. 2003(4):193-197.
- [2] 张冰蔚,LIU Guan-jun,ZHANG Hong-wei. 一种用于行星探测车的多功能机械臂:中国,201110137930. 8[P]. 2011-05-26.
- [3] 李 斌. 月球车车载机械臂的研究进展及关键技术探讨[J]. 机器人技术与应用,2008(3):29-32.
- [4] 张冰蔚,LIU Guan-jun,刘 杰. 一种用于行星探测车的机械臂锁定装置:中国,20111031327. 0[P]. 2011-10-14.
- [5] 李增刚. ADAMS入门详解与实例[M]. 北京:国防工业出版社. 2006.
- [6] 罗家佳,胡国清. 基于Matlab的机器人运动仿真研究[J]. 厦门大学学报:自然科学版,2005,44(5):640-644.
- [7] 龚建球,刘守斌. 基于Adams和Matlab的自平衡机器人仿真[J]. 机电工程,2008,25(2):8-10,73.
- [8] 邢迪雄,张 琦. 基于CATIA V5的工业机器人运动学仿真研究[J]. 机械,2011(1):63-67.
- [9] CORKE P I. ROBOTICS, Vision & Control: Fundamental Algorithms in Matlab[M]. Springer,2011.
- [10] 林立俊,柳和生,饶锡新,等. 基于Matlab的ARB-120型机器人运动学仿真研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2013,(3):67-69.
- [11] CRAIG J J. 机器人学导论[M]:负超译. 北京:机械工业出版社,2006.
- [12] 马如奇,郝双晖,郑伟峰,等. 基于Matlab与ADAMS的机械臂联合仿真研究[J]. 机械设计与制造,2010(4):93-95.
- [13] 刘金琨. 机器人控制系统的设计与Matlab仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2008.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

孙小肖,张冰蔚,刘家举,等. 轻量化行星采样机械臂虚拟样机系统[J]. 机电工程,2014,31(10):1301-1305.

SUN Xiao-xiao, ZHANG Bing-wei, LIU Jia-ju, et al. Virtual prototyping system of planet sampling manipulator with lightweight[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2014,31(10):1301-1305.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>