

基于关节支反力的移动并联机械手动力学性能验证研究^①

杨玉维^{②***} 周海波^{***} 李 彬^{***} 赵新华^{***} 刘 凉^{***} 赵 磊^{***}

(* 天津市先进机电系统设计与智能控制重点实验室 天津 300384)

(** 机电工程国家级实验教学示范中心(天津理工大学) 天津 300384)

摘 要 提出一种用于验证移动并联机械手动力学建模及数值仿真正确性与有效性的方法。该方法先将移动并联系统某处运动副打开,用关节支反力替代运动副约束,从而形成移动双串联机械手,并以多体动力学理论为指导,在笛卡尔坐标系下分别进行移动并联、双串联机械手动力学建模,采用加权初值法对移动双串联机械手系统进行数值仿真。最后通过对移动并联、双串联机械手动力学数值仿真比较,验证系统动力学模型构建和数值仿真的正确性和有效性。

关键词 移动并联机械手,移动双串联机械手,多体动力学建模,加权初值法,数值仿真

0 引 言

并联机械手以其轻质、高速、大负载等特性迎合了高生产效率和高作业精度的市场需求,从而得以迅速发展,并吸引了大量学者对其进行深入研究。并联机械手系统的动力学性能和控制算法是实现机械手快速准确作业的关键,同时系统动力学模型又是控制器设计的基础,因而有必要对其动力学进行深入研究,包括正动力学研究和逆动力学研究。机械手正动力学主要研究系统在给定驱动力(矩)情况下末端执行器、相关构件等轨迹的相关问题,而机械手逆动力学主要研究如何获取驱动力、驱动力矩,以及末端执行器实现跟踪给定轨迹等的相关问题。由此可知,针对同一系统而言,其动力学正、逆问题具有互逆性。文献[1]对 3 自由度 U 形平面机械手逆动力学进行了研究。文献[2]在柔性 3-PRR 并联机械手动力学研究的基础上,进行了轨迹跟踪与抑振研究。文献[3-6]对机械手建模与控制相关问

题进行了研究。文献[7]综合考虑机构的奇异构型,并进行了平面结构逆动力学问题的研究。文献[8,9]基于线弹性动力学与结构动力学,分别采用有限元法和模态法构建了一平面并联机械手动力学模型,并进行了数值仿真。文献[10]基于拉格朗日原理和有限元法及子结构法构建了一平面并联机械手动力学模型。文献[11,12]针对轮式平面柔性移动机械手逆动力学进行了系统研究,并在频域下求解了系统驱动力(矩)和弹性构型变量等。文献[13]利用虚功原理,以一 4 自由度并联机构为研究对象,建立了系统动力学模型,并利用 ADAMS 校验该模型的正确性。文献[14]采用拉格朗日法构建了 7 自由度机械手动力学模型,并采用 ADAMS/MATLA 联合仿真验证了系统动态性能。文献[15]应用 D-H 方法推导了机器人的运动学方程,利用 ADAMS 虚拟样机技术,对其爬杆过程进行了仿真。文献[16]对 3-RRR 平面机械手(包含运动副间隙)进行了动力学建模与仿真研究。

上述相关文献对机械手系统的动力学的正问题

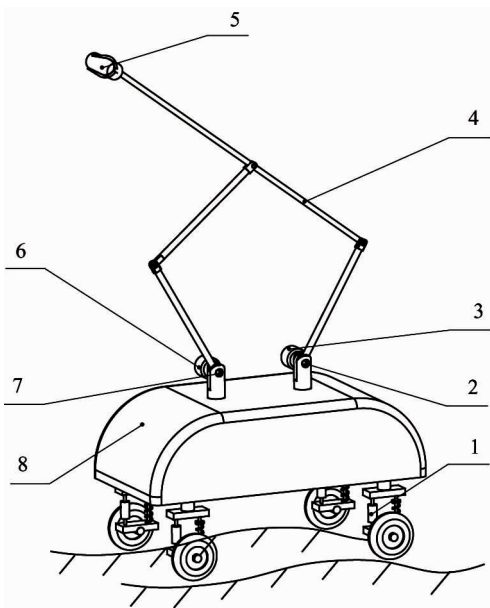
① 天津市科技重大专项(16ZXZNGX00070,15ZXZNGX00040,16ZXZNGX00010),天津市自然科学基金(17JCZDJC30400)和天津市自然科学基金基金面上项目(17JCYBJC18300)资助。
② 男,1975 年生,博士,副教授;研究方向:移动机器人;联系人,E-mail: buddhawei@126.com
(收稿日期:2017-08-18)

或逆问题进行了相关研究。考虑到拓展工作空间等问题,本文选用移动并联机械手作为研究对象,将移动并联系统某处运动副打开,用关节支反力替代运动副约束,从而形成移动双串联机械手系统,旨在提出一种建立在上述动力学互逆性基础上的移动并联系统与移动双串联系统动力学仿真比对的验证方法,检验移动并联机械手建模的正确性与数值仿真方法的有效性。

1 动力学模型建立

考虑动力学建模方法的通用性,本文采用笛卡尔坐标法描述系统运动学模型。图 1、图 2 所示为移动机械手简图;图 3 为移动双串联机械手简图,该系统来自将图 1、图 2 移动并联机械手 B 处运动副打开后形成的移动双串联机械手,并施加相应关节支反力。图 2(或图 3)中 $O^0 - X^0 Y^0$ 为移动并联/双串联机械手的全局坐标系、 $O^i - X^i Y^i$ 为构件 ($i = 1, 2, \dots, 5$) 体坐标系^[17]。构件 i 上任一点位置矢量 r^i 可以描为^[18]:

$$r^i = R^i + A^i \bar{u}^i \quad (1)$$



1、弹性阻尼悬架 2、驱动关节 1 3、驱动电机 1 4、并联机械手
5、荷载 6、驱动电机 2 7、驱动关节 3 14、移动载体

图 1 移动并联机械手

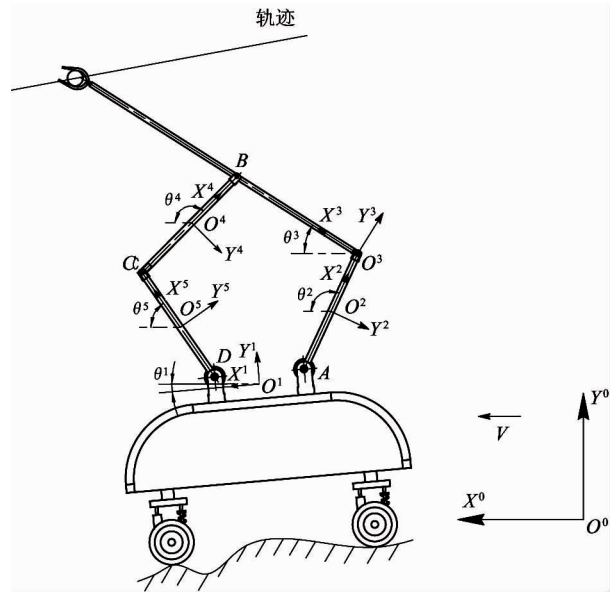


图 2 移动并联机械手工况

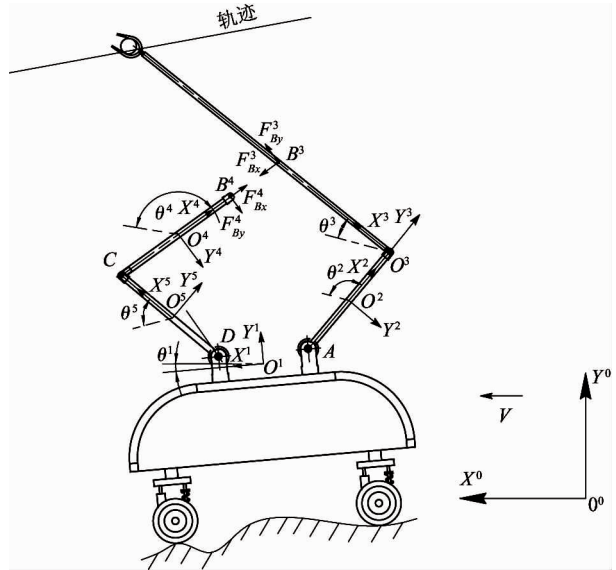


图 3 移动双串联机械手工况

1.1 运动学建模

如图 2、图 3 所示,移动机械手约束包括完整约束和非完整约束^[17]。其中移动并联机械手逆运动学约束方程^[19]为 $C^1 = \mathbf{0}_{13 \times 1}$,移动双串联机械手正运动学约束方程为 $C^2 = \mathbf{0}_{9 \times 1}$:

$$\begin{bmatrix} C^{51}(q^1, q^5) \\ C^{45}(q^4, q^5) \\ C^{32}(q^2, q^3) \\ C^{21}(q^1, q^2) \\ C^1(q^1, t) \end{bmatrix} = \mathbf{0}_{9 \times 1} \quad (2)$$

其中 $q^i = [R^{iT} \ \theta^i]^T$ ($i = 1, 2, \dots, 5$) 为用于描述构件 i 的构型变量。采用独立坐标法^[18], 可分别得到移动并联系统逆运动学独立变量^[18] q_i^1 与移动双串联系统正运动学独立变量^[19] $q_i^2: q_i^1 = [\theta^2 \ \theta^5]^T_{1 \times 2}$, $q_i^2 = [r_2^1 \ \theta^1 \ \theta^2 \ \theta^3 \ \theta^4 \ \theta^5]^T_{1 \times 5}$, 并将之分别用于描述相应移动机械手运动学系统构型^[19]: $q = f^1(q_i^1, t), q = f^2(q_i^2, t)$ 其中 $q = [q^{1T} \dots q^{5T}]^T$ 。

1.2 移动并联、双串联机械手系统逆动力学建模

依据多体动力学^[17], 并综合利用牛顿-欧拉法和拉格朗日法, 采用独立坐标法^[18,19] 构建并联系统逆动力学模型:

$$M_i^j \ddot{q}_i^j = Q_i^j \tag{3}$$

其中 $j = 1, 2$, 分别代表移动并联系统、移动双串联系统, M_i^j 为与系统独立变量 q_i^j 相关的质量矩阵, Q_i^j 由系统外力 (矩) 与 $q_i^j, \dot{q}_i^j$ 相关的二次速度惯性力 (矩) 所组成。

2 数值仿真

应用状态空间法^[19] 描述上述移动并联、双串联系统动力学模型 (式 (2)、(3)), 定义状态向量为: $Y^1 = [(q^1)^T \ (\dot{q}^1)^T]^T, \dot{Y}^1 = [(\dot{q}^1)^T \ (\ddot{q}^1)^T]^T$, $Y^2 = [(q^2)^T \ (\dot{q}^2)^T]^T, \dot{Y}^2 = [(\dot{q}^2)^T \ (\ddot{q}^2)^T]^T$, 将之代入系统动力学方程 (式 3), 经过适当变换, 可以得到

$$\dot{Y}^1 = f^1(Y^1, t) \tag{4}$$

$$\dot{Y}^2 = f^2(Y^2, t) \tag{5}$$

式 (4)、(5) 为一阶微分方程组 (ordinary differential equations, ODE), 基于高阶线性多步法^[18], 并采用软件 Matlab2015 对之进行数值法求解。具体求解流程如图 4 所示。

(1) 移动并联机械手运动学、逆动力学建模, 并进行数值仿真, 由此可得: $Y^1, \dot{Y}^1, T^1, \Delta t_0, t_m, F_{Bx}^i, F_{By}^i$ ($i = 3, 4$, 代表构件号) 等参变量, 其中 T^1 为系统驱动力矩向量, 上角标“1”代表来自移动并联系统模型, Δt_0 代表系统仿真时间间隔, t_m 代表系统仿真时间, F_{Bx}^i, F_{By}^i 为构件 3、4 间关节支反力 (如图 3 所示), 并构建移动双串联机械手运动学模型。

(2) 将 (1) 中所得 $T^1, F_{Bx}^i, F_{By}^i, \Delta t_0, t_m$ 作为移

动双串联机械手系统的已知驱动力矩、外力和仿真时间所参数, Y^1 作为初始动力学模型 $\dot{Y}^2 = f^2(Y^2, t)$ 边界条件, 并在 $0 \sim t_s$ 时间段内进行首次数值仿真, 得到 $Y^2, \dot{Y}^2$ 。

(3) 建立在 (1)、(2) 的基础上, 得到下一时间段 $t_s \sim t_s + \Delta t_0$ 仿真所需系统变量初值 $Y_0^2 = \alpha \times Y^1 + \beta \times Y^2$, 其中 α, β 为权数, 依次循环, 直至两系统输出误差满足 $\varepsilon \leq \varepsilon_0$ 。

(4) 并将 (1)、(3) 中的仿真结果进行比较, 验证移动并联与双串联机械手动力学建模的正确性与数值仿真方法的有效性。

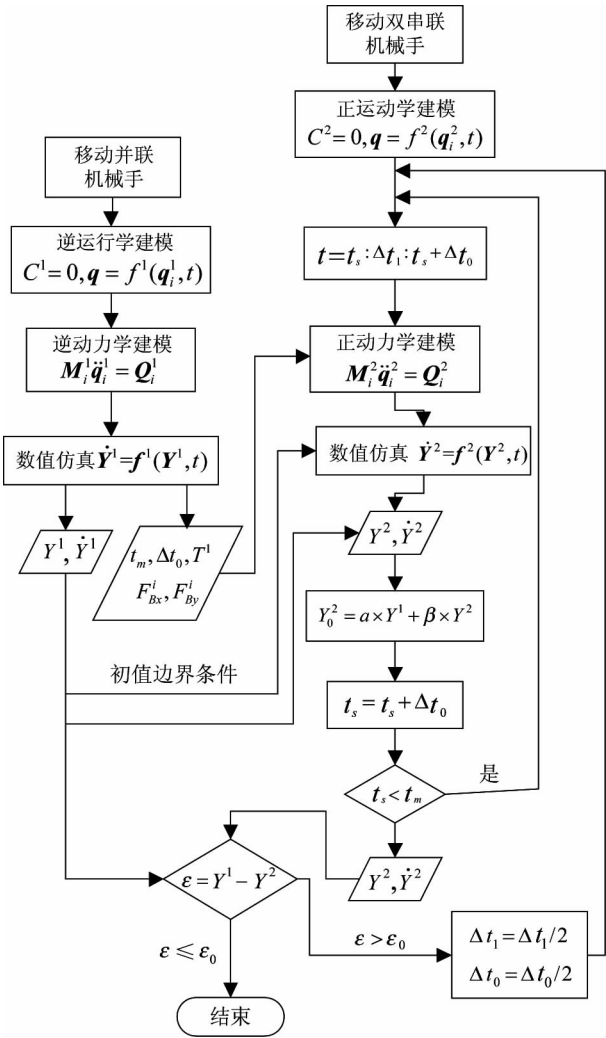


图 4 移动并联、双串联机械手动力学数值仿真流程图

轮式移动并联、双并联机械手数值仿真所用参数^[18,19] 如表 1~3 所示。

表 1 工况参数

$t_m = 2s$	$v = 0.3m/s$	$\lambda = 0.4m$	$H_0 = 0.03m$	$m_{sp} = 5kg$
$\Delta t_0 = 0.01s$	$\Delta t_1 = 0.005s$	$\varepsilon_0 = 1e-4$		

表 2 移动载体参数

$K_1 = 2000N/m$	$C_1 = 200N \cdot s/m$	$K_2 = 5000N/m$	$C_2 = 500N \cdot s/m$
$l_{k1} = 0.2075m$	$l_{k2} = 0.2175m$	$l^{11} = 0.22m$	$m^1 = 40kg$
$l^1 = 0.5m$	$m_{or1} = 1kg$	$m_{or2} = 1kg$	

表 3 并联机械手参数

$m^2 = 1kg$	$m^3 = 1.3kg$	$m^4 = 0.5kg$	$m^5 = 0.5kg$
$l^2 = 0.6m$	$l^3 = 1.2m$	$l^4 = 0.45m$	$l^5 = 0.45m$

部分变量数值仿真结果对比如图 5 ~ 图 10 所示。图 5 ~ 图 10 为移动并联、双串联机械手 θ^5 、 θ^2 数值仿真对比。图 5 为 θ^5 在相同工况下移动并、串系统的数值比对,其中移动双串联机械手动力学仿真加权初值 $Y_0^2 = a \times Y^1 + \beta \times Y^2, \alpha = 10、\beta = 0$, 仿真时间步长 $\Delta t_0 = 0.01s$, 通过比对不难发现,在相同的工况下,两个系统的同一变量输出随着时间的

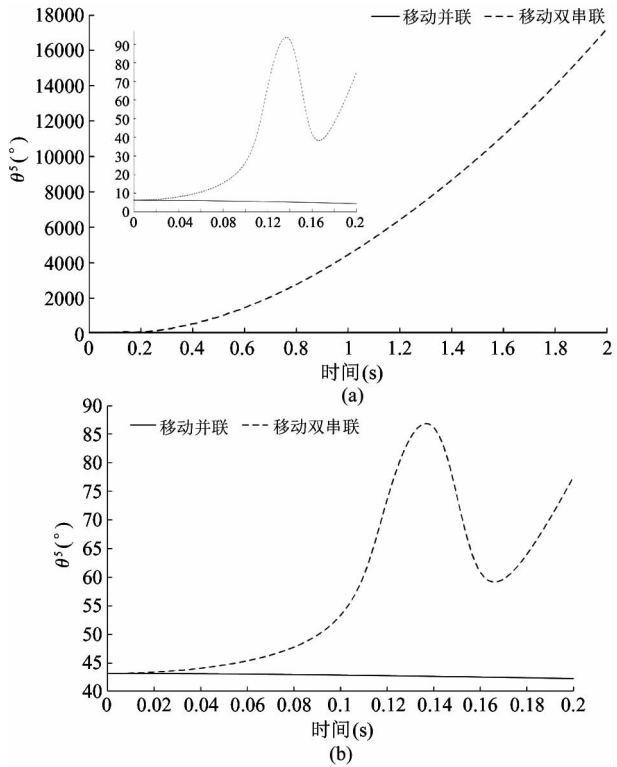


图 5 移动并联机械手 θ^5 数值仿真 ($\Delta t_0, \alpha = 10、\beta = 0$)

推移,产生很大差异,原因在于时间段 $t_s \sim t_s + \Delta t_0$ 内系统的驱动力(矩) $T^2(t_s)$, $F_{Bx}^i(t_s)$, $F_{By}^i(t_s)$ 为常数, $Y^2(t_s + \Delta t_0)$, $\dot{Y}^2(t_s + \Delta t_0)$ 作为下一时间段数值仿真的初值,与 $t_s + \Delta t_0$ 时刻对应的 $Y^1, \dot{Y}^1$ 对比,将有所出入,随着数值仿真循环进行,累计误差加大,如图 5 所示。图 6 相对图 5 对应工况,仅有初值权数 $\alpha = 7、\beta = 3$ 的改变,对比此两幅图,不难发现,由于权数的调整,使移动双串联系统仿真得到相应改善,图 7、图 8,在图 6 的基础上,进一步调整初值权数,通过比对发现移动双串联机械手系统与其对应的并联系统的输出误差 ε 在逐步减小。图 9、图 10 是在图 8 的基础上,将仿真时间步长由 Δt_0 调整为 $\Delta t_1 = 0.005s$, 两系统的输出 $\theta^5、\theta^2$ 的误差进一步减小: $\varepsilon \leq \varepsilon_0$ 。通过上述参数调整,针对相同变量,移动并联、双串联系统动力学模型数值仿真的结果高度统一(误差 ε_0 接近零),从而证明了系统运动学、动力学建模的正确性与数值仿真方法的有效性。

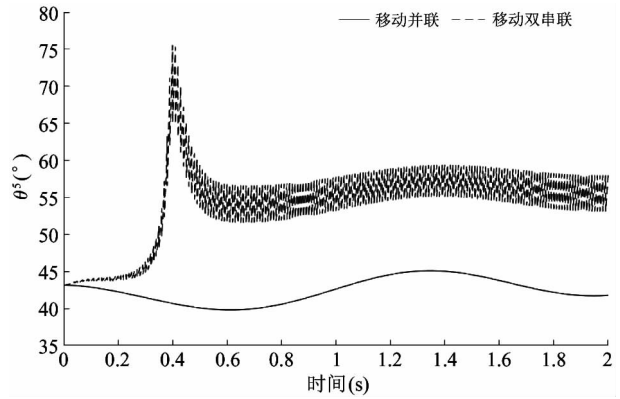


图 6 移动并联机械手 θ^5 数值仿真 ($\Delta t_0, \alpha = 7、\beta = 3$)

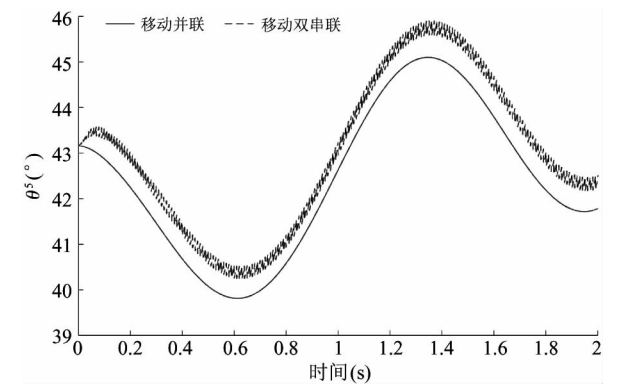


图 7 移动并联机械手 θ^5 数值仿真 ($\Delta t_0, \alpha = 6、\beta = 4$)

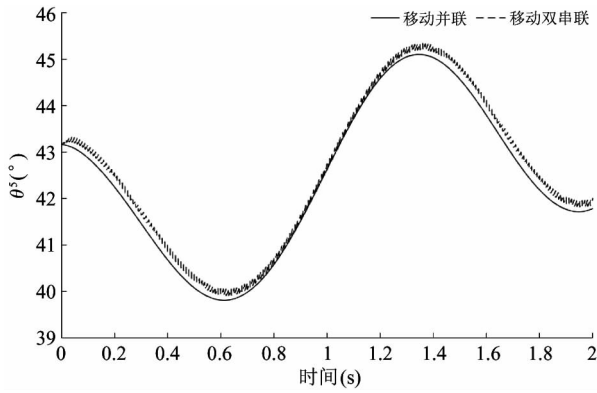


图 8 移动并联机械手 θ^5 数值仿真 ($\Delta t_0, \alpha = 4, \beta = 6$)

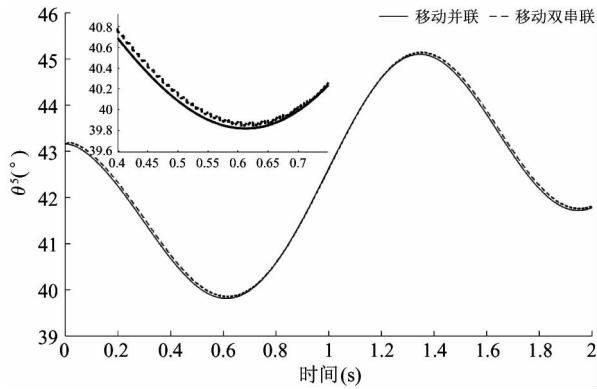


图 9 移动并联机械手 θ^5 数值仿真 ($\Delta t_1, \alpha = 4, \beta = 6$)

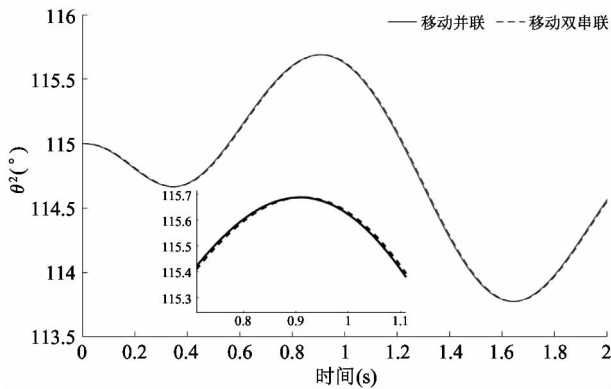


图 10 移动并联机械手 θ^2 数值仿真 ($\Delta t_1, \alpha = 4, \beta = 6$)

3 结 论

本文旨在提出一种用于证实移动并联机械手动力学建模正确性和其数值解法有效性的一种方法。将移动并联系统某处运动副打开,用关节支反力替代运动副约束,从而形成移动双串联机械手系统,并在相同工况下,对此两系统进行运动学、动力学建

模,并在动力学仿真过程中通过调整移动并联、双串联系统变量用于初值的权数和仿真时间间隔,通过对比,不难发现两系统相同变量的仿真结果高度统一。从而有力地验证了移动并联、双串联系统动力学模型构建的正确性与其数值仿真方法的有效性。从而为移动并联机械手动力学性能研究提供了一种正确、有效的验证方法。同时为后续控制算法的构建提供理论基础。

参考文献

- [1] Varedi-Koulaei S M, Daniali H M, Farajtabar M. Inverse dynamics and control of a 3-DOF planar parallel (U-shaped 3-PPR) manipulator[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2015, 34:164-179
- [2] Zhang Q, James K. Trajectory tracking and vibration suppression of a 3-PRR parallel manipulator with flexible links[J]. *Multibody System Dynamics*, 2015, 33 (1): 27-60
- [3] Moallem M, Patel R V, Khorasani K. An observer based inverse dynamics control strategy for tip position tracking of flexible multi-link manipulators[C]. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, Kobe, Japan, 1996. 4112-4117
- [4] Moulin H C, Bayo E. Accuracy of discrete models for the solution of the inverse dynamics problem for flexible arms, feasible trajectories[J]. *ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 1997, 119 (9): 396-404
- [5] Zou J Q, Zhang J J, Lu Y F. An explicit recursive formulation and parallel computation for inverse dynamics of planar flexible manipulators[C]. In: *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Guimaraes, Portugal, 1997. 3:906-909
- [6] Trautt T A, Bayo E. Inverse dynamics of flexible manipulators with Coulomb friction and backlash and non-zero initial conditions[J]. *Dynamics and Control*, 1999, 9 (2): 173-195
- [7] Kanaoka K, Yoshikawa T. Dynamic singular configurations of flexible manipulators[C]. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Takamatsu, Japan, 2000. 46-51
- [8] Piras G, Cleghorn W L, Mills J K. Dynamic finite-ele-

- ment analysis of a planar high-speed high-precision parallel manipulator with flexible links[J]. *Mechanism and machine theory*, 2005, 40:849-862
- [9] Zhang X P, James K, William L C. Dynamic modeling and experimental validation of a 3-PRR parallel manipulator with flexible intermediate links[J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2007, 50:323-340
- [10] Wang X Y, James K M. Dynamic modeling of a flexible-link planar parallel platform using a substructuring approach[J]. *Mechanism and machine theory*, 2006, 41: 671-687
- [11] 杨玉维,张明路,赵新华,等. 轮式悬架移动 2 连杆柔性机械手动力学研究与仿真[J]. 高技术通讯,2009, 19(10):1067-1072
- [12] 杨玉维,张明路,赵新华,等. 轮式移动单杆柔性机械手逆动力学研究与仿真[J]. 机械工程学报,2010,46 (21):76-81
- [13] 贾凯凯,梅江平,刘松涛,等. 4 自由度并联机构刚体动力学模型[J]. 机械工程学报,2016,52(13):10-19
- [14] 陈罡,周奇才,吴菁,等. 七自由度机械臂的 ADAMS/MATLAB 联合仿真研究[J]. 系统仿真学报,2017,1 (29):99-106
- [15] 黄晋英,杜为民,李辉,等. 三臂机器人在轨动力学仿真[J]. 中国机械工程,2016,3(27):328-333
- [16] Varedi-Koulai S M, Daniali M. The effects of joint clearance on the dynamics of the 3RRR planar parallel manipulator[J]. *Robotica*, 2017, 35(6):1223-1244
- [17] Shabana Ahmed A. Dynamics of Multi-body[M]. Third Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 189-247
- [18] Korayem M H, Rahimi H N, Nikoobin A. Mathematical modeling and trajectory planning of mobile manipulators with flexible links and joints[J]. *Applied mathematical modeling*, 2012, 36:229-3244
- [19] 杨玉维,赵新华,王收军,等. 基于多体动力学的轮式悬架移动并联机械手动力学性能研究[J]. 高技术通讯,2013,23(11):161-165

verification Research on dynamics performance of mobile parallel manipulators based on joint reacting force

Yang Yuwei^{***}, Zhou Haibo^{***}, Li Bin^{***}, Zhao Xinhua^{***}, Liu Liang^{***}, Zhao Lei^{***}

(* Tianjin Key Laboratory of the Design and Intelligent Control of the Advanced Mechatronical System, Tianjin 300384)

(** National Demonstration Center for Experimental Mechanical and

Electrical Engineering Education (Tianjin University of Technology), Tianjin 300384)

Abstract

A method is proposed to verify the correctness and effectiveness of a mobile parallel manipulator's dynamics modeling and numerical simulation. The method opens the kinematic pair somewhere in the mobile parallel manipulator system first, then uses the joint reacting force to replace the restraint of kinematic pair to form the mobile dual series manipulator, and under the guidance of the multi-body dynamics theory, models mobile parallel and double series manipulators in the Cartesian coordinate system, and uses the initial value method to perform the numerical simulations for the mobile double series manipulator system. At last, the correctness and effectiveness of the system dynamics modeling and numerical simulation are verified by the comparison of the dynamics simulations of the mobile parallel and double series manipulators.

Key words: mobile parallel manipulator, mobile dual series manipulators, multi-body dynamics modeling, weighted initial value, numerical simulation