

基于正、逆动力学的移动悬架并联机械手动力学建模有效性研究^①

杨玉维^{②***} 钟蜀津^{**} 李 彬^{***} 赵新华^{***}

(* 天津市先进机电系统设计与智能控制重点实验室 天津 300384)

** 天津理工大学机械工程学院 天津 300384)

摘 要 以多体动力学理论为指导,在笛卡尔坐标系下分别构建了移动悬架并联机械手系统的正、逆运动学模型和动力学模型,并以此为基础,采用数值仿真法对系统逆动力学模型进行求解,然后将部分解作为系统正运动学和正动力学模型的输入和边界条件,并进行数值仿真。最后通过正、逆动力学数值仿真比较,验证了系统动力学模型构建和求解方法的正确性和有效性。

关键词 多体动力学, 正逆动力学建模, 数值仿真比较, 移动悬架并联机械手

0 引 言

轻质、高速、大负载移动机械手提高了生产效率和作业精度,因而得以迅速发展,并吸引了大量学者进行研究。实现机械手的快速、准确作业,需要对其动力学性能和控制算法进行深入研究。系统动力学建模是控制器设计的基础,因此准确构建系统正、逆动力学模型具有重要意义。机械手正动力学主要研究系统在给定驱动力(矩)工况下,获取其末端执行器轨迹的相关问题,而机械手逆动力学主要研究获取实现其给定末端执行器轨迹而系统所需驱动力(矩)的相关问题。由此可知,系统的动力学正、逆问题具有互逆性。本文旨在提出一种建立在上述互逆性基础上的用于检验动力学建模正确性及其数值求解有效性的方法。

文献[1,2]构建了柔性机械手的逆动力学模型,在频域内求解了关节前馈驱动力矩,并以此为已知条件,对系统正动力学模型进行通常意义(时域内)上的微分方程求解,以获取弹性构件的弹性变形。但系统正动力学模型求解过程中,没有考虑到

驱动力矩与构建末端运动的时间不同步问题(非因果性^[1,2])。之后研究人员进行了一系列研究:文献[3-6]研究了机械手建模与控制问题;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]分别基于线弹性动力学与结构动力学,相应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;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]以一四自由度并联机构为研究对象,利用虚功原理,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七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 方法建立了坐标变换矩阵,推导了该机器人的运动学方程,基于 ADAMS 虚拟样机技术,对其爬杆过程进行了仿真。

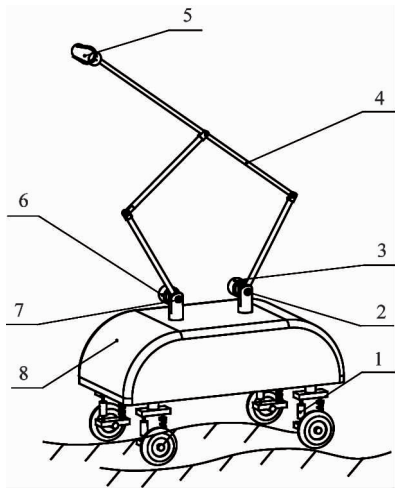
研究试图通过单纯正动力学或逆动力学数值仿真说明系统模型构建的正确性,缺乏从动力学正、逆

① 天津市科技重大专项(16ZXZNGX00070,15ZXZNGX00040,16ZXZNGX00010)资助项目。
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:2017-03-05)

问题互逆性角度出发,进行相互佐证模型构建的正确性。本文同时构建了系统正、逆动力学模型,通过逆动力学模型的数值仿真获取系统所需驱动力(矩),而后作为系统正动力学模型的输入,并进行相应数值仿真,最后通过系统正、逆动力学模型的数值仿真比较。

1 正、逆动力学模型建立

鉴于建模方法的通用性,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



1、弹性阻尼悬架 2、驱动电机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 8、移动载体

图1 移动并联机械手

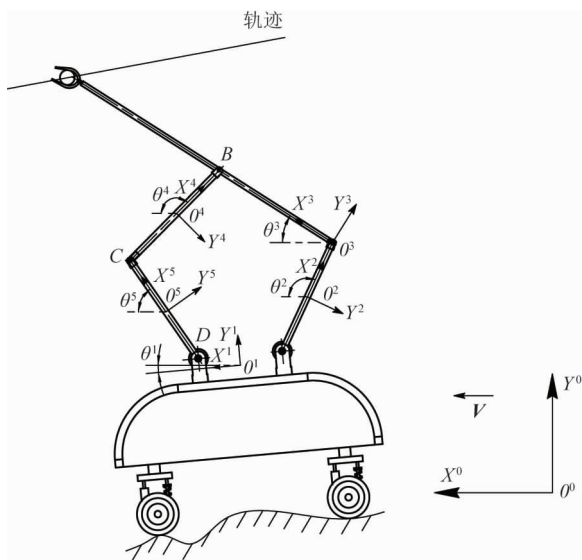


图2 移动并联机械手工况

械手简图,其中 $O-X^0 Y^0$ 、 $O^i-X^i Y^i$ 分别为轮式悬架移动机械手的全局坐标系、构件 i ($i=1,2,\dots,5$) 体坐标系^[16]。构件 i 上任一点位置矢量 r^i 可以描述为:

$$r^i = R^i + A^i \bar{u} \tag{1}$$

其中 $R^i, \bar{u}^i$ 分别是构件 i 坐标系原点和其上任意点在全局坐标系下和其体坐标系下的度量^[11]。

1.1 正、逆运动学建模

轮式移动机械手约束包括完整约束和非完整约束^[16],其中包含来自机械手构件间转动副约束、末端执行器轨迹约束,轮胎与地面的非完整约束等。系统正运动学约束方程^[17]为 $C^1 = 0_{11 \times 1}$,逆运动学方程^[18]为 $C^2 = 0_{13 \times 1}$,采用独立坐标法^[11],可分别得到系统正运动学独立变量^[11] q_i^1 与系统逆运动学独立变量^[18] $q_i^2: q_i^1 = [r_2^1 \ \theta^1 \ \theta^2 \ \theta^5]^T_{1 \times 4}$, $q_i^2 = [\theta^2 \ \theta^5]^T_{1 \times 2}$,并将之分别用于描述正、逆运动学系统构型^[17]: $q = f^1(q_i^1, t)$, $q = f^2(q_i^2, t)$,其中 $q = [q^{1T} \dots q^{5T}]^T$ 。

1.2 正、逆动力学建模

为了便于构件平动与转动之间动力学解耦,特将系统各构件体坐标系原点与构件质心固结。综合利用牛顿-欧拉法和拉格朗日法建立系统正、逆动力学模型,并采用独立坐标描述^[11,18]:

$$M_i^1 \ddot{q}_i^1 = Q_i^1 \tag{2}$$

$$M_i^2 \ddot{q}_i^2 = Q_i^2 \tag{3}$$

上述动力学模型的构建具有通用性:适用于移动载体和机械手构件;完备性:系统运动副约束以拉格朗日乘子的方式加入到系统动力学模型中。

2 数值仿真

首先采用状态空间法分别描述上述正、逆动力学模型(式(2)、(3)),定义状态向量^[17,18]为

$$Y^1 = [(\dot{q}_i^1)^T \ (\ddot{q}_i^1)^T]^T, \dot{Y}^1 = [(\ddot{q}_i^1)^T \ (\dddot{q}_i^1)^T]^T, \\ Y^2 = [(\dot{q}_i^2)^T \ (\ddot{q}_i^2)^T]^T, \dot{Y}^2 = [(\ddot{q}_i^2)^T \ (\dddot{q}_i^2)^T]^T, \\ \text{将之代入系统动力学方程(式(2)、(3)),经过适当变换,可以得到}$$

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

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

式(4)、(5)为一阶微分方程组(ordinary differ-

ence equations, ODE), 则对轮式悬架移动并联机械手动力学正、逆方程(式(2)、(3))的求解, 转换为带初值的一阶常微分方程组求解问题。基于 Gear's 法(高阶线性多步法^[11]), 并采用软件 Matlab2015 对之进行数值法求解:

(1)构建系统正、逆运动学和动力学模型, 并进行动力学逆模型数值仿真求解, 得到系统输出 $\mathbf{Y}^1$, $\dot{\mathbf{Y}}^1$, $\mathbf{T}^1$, t_m 其中 $\mathbf{T}^1$ 为系统驱动力矩向量, 上角标代表来自正动力学模型, t_m 代表系统仿真时间;

(2)将(1)中所得 $\mathbf{Y}^1$, $\dot{\mathbf{Y}}^1$, $\mathbf{T}^1$, t_m 作为系统正运动学、动力学模型 $\dot{\mathbf{Y}}^2 = \mathbf{f}^2(\mathbf{Y}^2, t)$ 输入和边界条件, 并进行数值仿真, 并结合将(1)中的仿真结果进行比较, 从而验证动力学建模的正确性与数值仿真的有效性。

具体求解流程如图 3 所示。

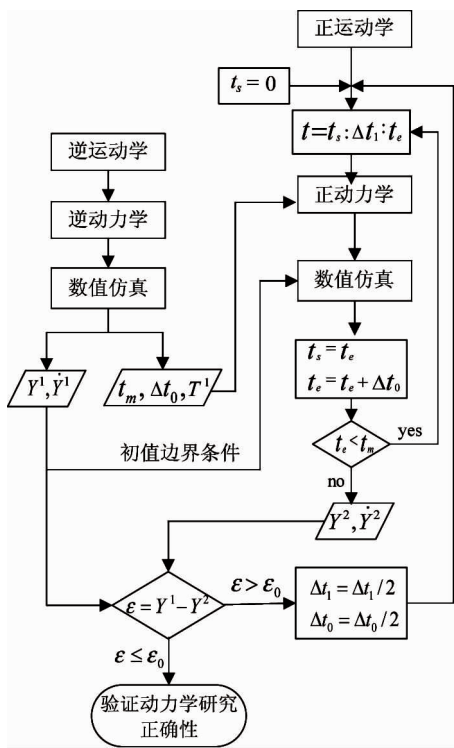


图 3 正、逆动力学研究有效性分析流程图

轮式移动并联机械手数值仿真所用参数^[11,18]如表 1 ~ 表 3 所示。

表 1 工况参数

$t_m = 10\text{s}$	$v = 0.3\text{m/s}$	$\lambda = 0.4\text{m}$	$H_0 = 0.03\text{m}$	$m_{3p} = 5\text{kg}$
--------------------	---------------------	-------------------------	----------------------	-----------------------

表 2 移动载体参数

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

表 3 并联机械手参数

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

部分变量数值仿真结果对比如图 4 ~ 图 9 所示。图 4 ~ 图 9 为移动并联机械手 θ^2 、 θ^5 和末端执行器轨迹动力学正、逆模型的数值仿真对比。图 4、图 6、图 8 分别为在步长 $\Delta t_0 = 0.01\text{s}$ 和 $\Delta t_1 = 0.01\text{s}$ 工况下对于同一变量的正、逆动力学模型数值仿真的对比图, 通过比较可得知, 针对同一变量, 来自系统正动力学模型的数值仿真数值与来自系统逆动力

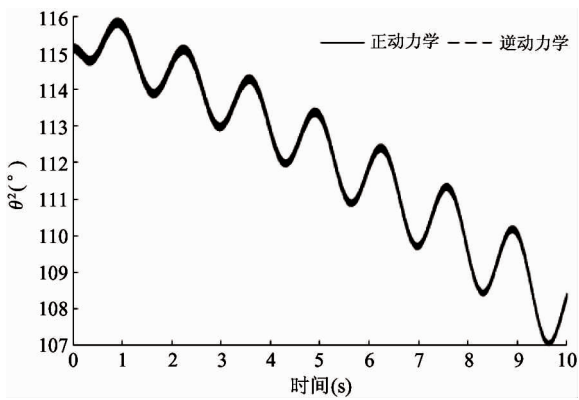


图 4 移动并联机械手 θ^2 数值仿真(步长 0.01s)

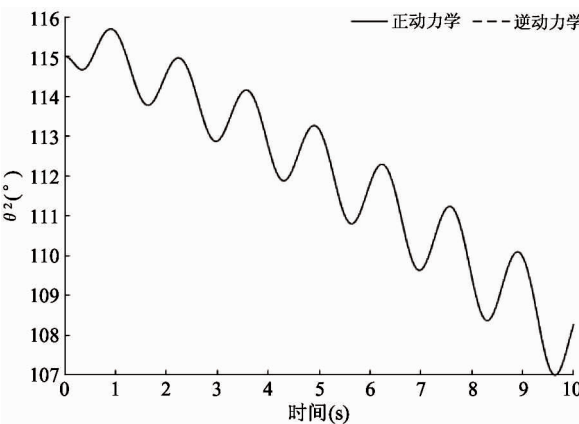


图 5 移动并联机械手 θ^2 数值仿真(步长 0.001s)

学模型的数值仿真结果差异明显(误差 ε 较大),随着步长的减小,令 $\Delta t_1 = 0.001\text{s}$,通过比较图 5、图 7 和图 9,不难发现,针对同一变量,来自正、逆动力学模型数值仿真的结果高度统一(误差 ε 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解法的有效性。

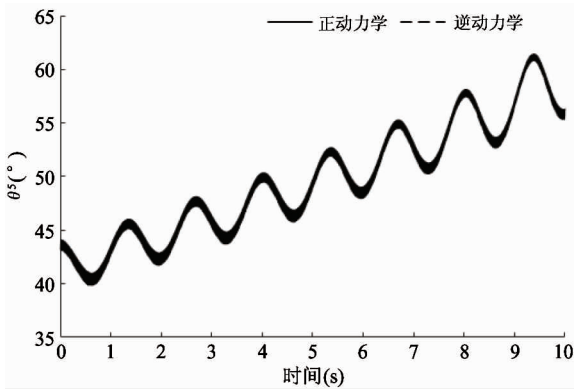


图 6 移动并联机械手 θ^5 数值仿真(步长 0.01s)

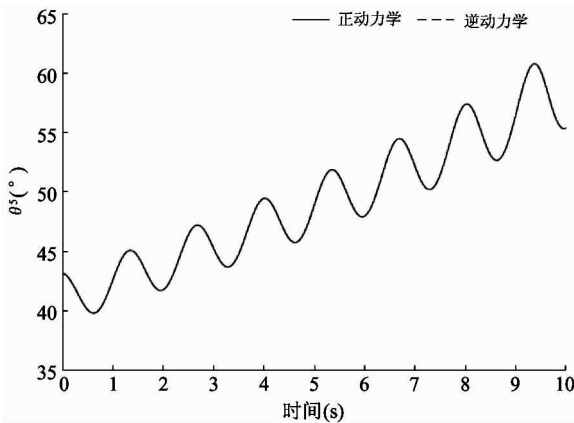


图 7 移动并联机械手 θ^5 数值仿真(步长 0.001s)

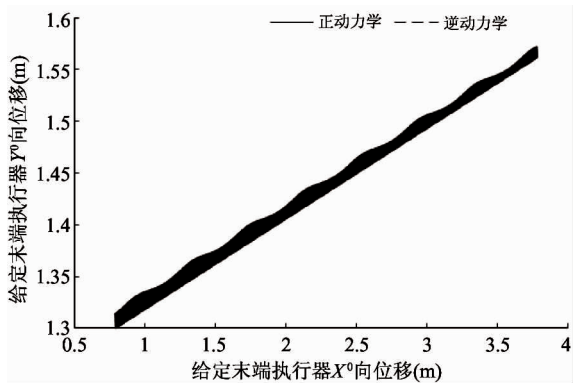


图 8 移动并联机械手末端轨迹数值仿真(步长 0.01s)

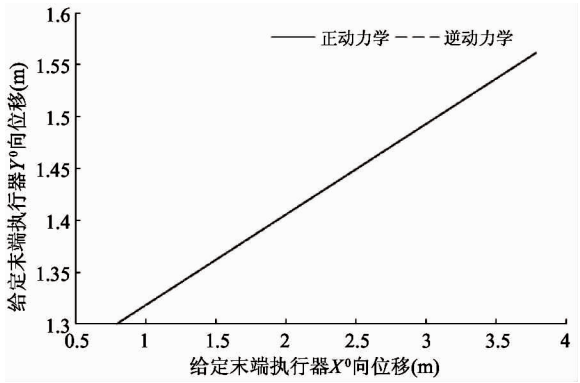


图 9 移动并联机械手末端轨迹数值仿真(步长 0.001s)

3 结 论

本文旨在提出一种可证实移动机械手动力学模型构建的正确性和其数值解法有效性的有力方法:针对给定轨迹,通过系统逆动力学模型获取系统驱动力(矩),作为系统正动力学模型的输入力(矩),通过比较验证,来自正动力学模型的数值仿真-机械手末端执行器的输出轨迹(包括其他系统变量),与系统逆动力学模型给定轨迹(包括其他系统变量)高度一致,有力地验证了正、逆动力学模型构建的正确性与其数值仿真的有效性。从而为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] Bayo E. A finite-element approach to control the end point motion of a single link flexible robot. *Journal of Robotic Systems*, 1987, 4 (1):63-75

[2] Bayo E, Movaghar R, Medus M. Inverse dynamics of a single-link flexible robot: analytical and experimental results. *International Journal of Robotics Automation*, 1987, 3 (3):150-157

[3] Moallem M, Patel R V, Khorasani K. An observer based inverse dynamics control strategy for tip position tracking of flexible multi-link manipulators. 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. *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. In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Guimaraes, Portugal, 1997. 906-909
- [6] Trautt T A, Bayo E. Inverse dynamics of flexible manipulators with Coulomb friction and backlash and non-zero initial conditions. *Dynamics and Control*, 1999, 9(2): 173-195
- [7] Kanaoka K, Yoshikawa T. Dynamic singular configurations of flexible manipulators. 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-element analysis of a planar high-speed high-precision parallel manipulator with flexible links. *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. *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. *Mechanism and Machine Theory*, 2006, 41: 671-687
- [11] 杨玉维, 张明路, 张新华等. 轮式悬架移动 2 连杆柔性机械手动力学研究与仿真. 高技术通讯, 2009, 19(10): 1067-1072
- [12] 杨玉维, 张明路, 张新华等. 轮式移动单杆柔性机械手逆动力学研究与仿真. 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. 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. 系统仿真学报, 2017, 29(1): 99-106
- [15] 黄晋英, 杜为民, 李辉等. 三臂机器人在轨动力学仿真. 中国机械工程, 2016, 27(3): 328-333
- [16] Shabana Ahmed A. Dynamics of Multi-body Systems. Third Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 189-247
- [17] Korayem M H, Rahimi H N, Nikoobin A. Mathematical modeling and trajectory planning of mobile manipulators with flexible links and joints. *Applied Mathematical Modeling*, 2012, 36: 229-3244
- [18] 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. 高技术通讯, 2013, 23(11): 161-165

Study on the validity of dynamics modeling of a mobile suspension parallel manipulator based on positive and inverse kinetics

Yang Yuwei^{* **}, Zhong Shujin^{**}, Li Bin^{* **}, Zhao Xinhua^{* **}

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

(** School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384)

Abstract

Guided by the theory of multi-body dynamics, the positive and inverse kinematics models of a mobile suspension parallel manipulator system as well as its positive and inverse dynamics models are established in the Cartesian coordinate system, and based on the models, the numerical simulation method is used to solve the system's inverse dynamics model, and then, by taking the partial solutions as the inputs and the boundary conditions of the positive kinematics (model) and the positive dynamics model, the numerical simulations are performed. At last, the correctness and effectiveness of the methods for establishing the system's and solving it are verified by the comparison of the positive dynamics numerical simulation and the inverse dynamics numerical simulation.

Key words: multi-body dynamics, positive and inverse dynamic modeling, numeric simulation comparing, mobile suspension parallel manipulator