

基于多体动力学的轮式悬架移动刚-柔并联机械手动力学性能研究^①

杨玉维^{②*} 刘振忠^{**} 董黎敏^{**} 李扬民^{**} 袁旭^{**}

(* 天津理工大学天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室 天津 300384)

(** 天津理工大学机械工程学院 天津 300384)

摘 要 考虑到移动串联机械手不能很好地满足高速、大负载工况下准确作业的要求,提出了轮式悬架柔性移动并联机械手这一新的构型,并对其进行了动力学性能研究。基于多柔性体动力学,在笛卡尔坐标下构建了系统动力学模型,建模方法具有通用性与完备性。在此基础上,分别针对串联、并联、刚性、柔性四类移动机械手的动力学模型进行了数值仿真,并对仿真结果进行了比较、分析,验证了建模方法的正确性并佐证了新构型移动机械手的动力学性能特点,提出了提高柔性并联机械手的工作速度、刚度和工作精度的技术方法,为后续控制算法的构建提供了理论基础。

关键词 多体动力学, 动力学建模, 数值仿真, 轮式悬架, 刚-柔并联机械手

0 引 言

由于拓展了机械手的工作空间,移动串联机械手在工业、医疗、反恐等领域有着广阔的应用前景,同时面临着高速、重载等严峻的挑战。由于高速构件具有较大惯性力,不利于系统控制,为此通常采用低质构件来降低惯性力(矩)。但系统高速运行时,易产生弹性变形、振动等负面影响,从而降低了作业精度。为了提高机械手末端轨迹跟踪精度,大量学者致力于柔性系统动力学研究,例如,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了通常意义(时域内)上的微分方程的求解,以获取弹性构件的弹性变形,但在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]),所以该方法存在一定的不足;文献[3-6]研究了柔性机械手的建模与控制问题;文献[7]综合考虑了机构的奇异构型,并进行了平面结构逆动力学问题的研究;文献[8]和文献[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,在有限元法基础上,综合利用虚功原理和牛顿-欧拉方程构建了移动柔性机械手系统的完整逆动力学模型,并在频域下求解了系统驱动力(矩)和弹性构型变量等。上述研究对移动柔性机械手控制有着重要指导意义。

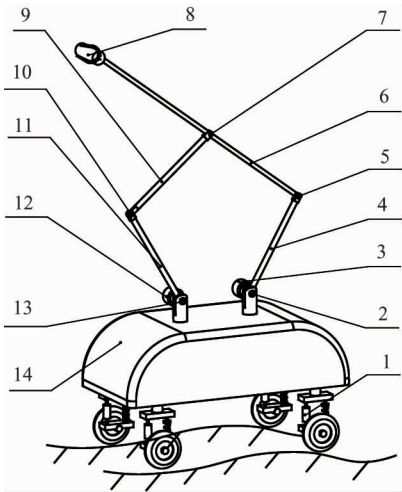
本文借鉴并联机械手的高速、大刚度、准确作业等优点,在新构型轮式悬架移动并联机械手(专利号:ZL 201120108956.5)的基础上,提出了轮式悬架柔性移动并联机械手。本研究针对这一新构型,以多柔性体动力学理论基础,借助有限元法,综合考虑移动载体悬架、杆件、运动副关节等柔性及它们与系统刚体运动间的非线性动力学耦合效应,在笛卡尔坐标下,综合采用牛顿-欧拉法和拉格朗日法构建了系统动力学模型,并以此为基础分别针对移动“串/并”联“刚/柔”机械手逆动力学进行仿真,并通过对仿真结果比较分析,佐证了轮式悬架移动柔性并联机械手所具有的优点及复杂的非线性动力学耦合问题,为后续控制算法的构建提供了理论基础。

① 国家自然科学基金(51275353,51205289),天津市应用基础及前沿技术研究计划(自然科学基金一般项目)(12JCYBJC12200)和天津市高等学校科技发展基金(20120402)资助项目。
② 男,1975年生,博士,讲师;研究方向:移动机器人;联系人,E-mail: buddhawei@126.com
(收稿日期:2014-05-16)

1 动力学模型建立

多柔性体系统动力学建模通常采用两种坐标系:全局坐标系和体坐标系^[13]。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 所示为移动机械手简图,其中 $O-X^0 Y^0$ 和 $O^i-X^i Y^i$ 分别为轮式悬架移动机械手的全局坐标系和构件 i ($=1,2,\cdots,5$) 体坐标系。并作假设如下:

(1) 只考虑图 1 中序号 6 所对应构件的弹性变形,并采用欧拉-伯努力梁理论构建弹性构件的形函数^[12]描述其弹性变形;



1:弹性阻尼悬架; 2:驱动柔性关节 1; 3:驱动电机 1; 4:杆 2; 5:转动关节 2; 6:柔性杆 3; 7:转动关节 3; 8:荷载; 9:杆 4; 10:转动关节 4; 11:杆 5; 12:驱动电机 2; 13:驱动柔性关节 5; 14:移动载体

图 1 移动柔性并联机械手

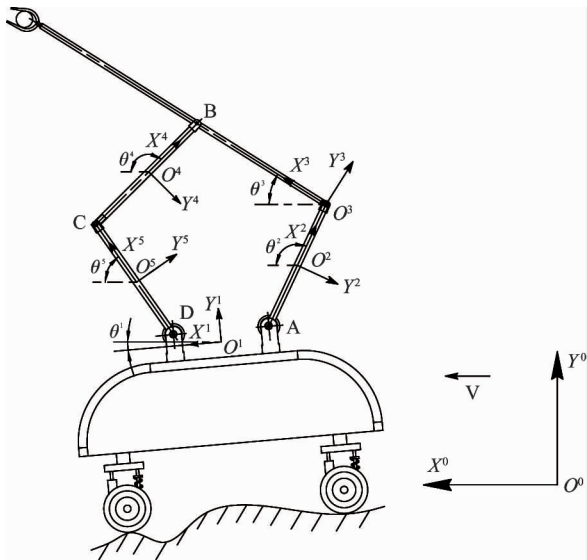


图 2 移动并联柔性机械手工况

(2) 移动小车在正弦函数描述的路面以水平向匀速 v 运行。

由于构件弹性振动变形与构件体坐标系刚体运动间存在严重非线性动力学耦合,同时考虑到建模的便利性,将并联机械手柔性构件体坐标系 $O^3-X^3 Y^3$ 设置为浮动坐标系^[13],安置如图 2、图 3 所示。其余构件体坐标系固结在相应的构件质心上,这将使得后续构件动力学模型得到简化,即刚体构件的平动与转动之间的动力学耦合得到解耦。依据 Chales 定理,弹性构件 i ($=3$) 上任一点位置矢量 $\mathbf{r}^i$ 可以描述为^[13]

$$\begin{aligned}\mathbf{r}^i &= \mathbf{R}^i + \mathbf{A}^i \bar{\mathbf{u}}^i = \mathbf{R}^i + \mathbf{A}^i (\bar{\mathbf{u}}_0^i + \bar{\mathbf{u}}_f^i) \\ &= \mathbf{R}^i + \mathbf{A}^i \mathbf{S}^{ij} (\bar{\mathbf{q}}_0^j + \bar{\mathbf{q}}_f^j) = \mathbf{R}^i + \mathbf{A}^i \mathbf{S}^{ij} \mathbf{B}_1^{ij} (\bar{\mathbf{q}}_0^j + \bar{\mathbf{q}}_f^j) \\ &= \mathbf{R}^i + \mathbf{A}^i \mathbf{S}^{ij} \mathbf{B}_1^{ij} (\bar{\mathbf{q}}_0^j + \mathbf{B}_2^i \bar{\mathbf{q}}_{fi}^i)\end{aligned}\tag{1}$$

其中 $\mathbf{R}^i, \bar{\mathbf{u}}^i$ 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,针对刚性构件 m 而言, $\bar{\mathbf{q}}_f^{mj} = 0$, 式中 j 为离散单元序号^[13]。构件 i 任一点速度矢量 $\dot{\mathbf{r}}^i$ 可以描述为

$$\dot{\mathbf{r}}^i = \mathbf{B}^i \dot{\mathbf{q}}^i\tag{2}$$

其中当 $i=3$ 时,有 $\mathbf{B}^i = [\mathbf{I} \quad \mathbf{A}_\theta^i \bar{\mathbf{u}}^i \quad \mathbf{A}^i \mathbf{S}^{ij} \mathbf{B}_1^{ij} \mathbf{B}_2^i]$, $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; $i \neq 3$ 时,有 $\mathbf{B}^i = [\mathbf{I} \quad \mathbf{A}_\theta^i \bar{\mathbf{u}}^i]$ 。

基于欧拉-伯努力梁理论,对柔性构件 3 选用 5 个节点进行有限元离散,如图 3 所示。每个节点坐标为 $[q_{f(3i-2)}^3 \quad q_{f(3i-1)}^3 \quad q_{f(3i)}^3]^T$, 其中 $i = 1, 2, \cdots, 5$ 为节点序号,故用于描述柔性杆坐标向量 $\mathbf{q}_f^3$ 的维数为 15×1 。基于悬臂梁边界条件,第 1 节点的自由度为 0,即 $[q_{f1}^3 \quad q_{f2}^3 \quad q_{f3}^3]^T = \mathbf{0}_{3 \times 1}$, 同时考虑杆 4 通过转动副对柔性杆约束的作用,有 $q_{f8}^3 = 0$ 。

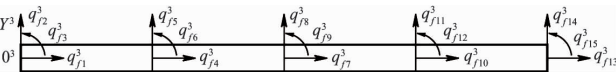


图 3 柔性臂有限元离散

相对体坐标系 Y^3 向刚度而言,柔性杆件轴向 (X^3 向) 刚度很大,轴向弹性变形远远小于 Y^3 向的,这将导致描述系统动态特性的微分方程刚性化,从而降低系统动力学模型求解的精度,于是给出假设: $q_{f(3i-2)}^3 = 0$, 其中 $i = 1, 2, \cdots, 5$ 为节点数。综上所述,用于描述机械手杆 3 独立弹性坐标向量 $\mathbf{q}_{fi}^3$ 为

$$\mathbf{q}_{fi}^3 = [q_{f5}^3 \quad q_{f6}^3 \quad q_{f9}^3 \quad q_{f11}^3 \quad q_{f12}^3 \quad q_{f14}^3 \quad q_{f15}^3]^T_{1 \times 7}\tag{3}$$

1.1 运动学分析

轮式移动柔性机械手约束包括完整约束及非完

整约束。其中来自机械手构件间转动副的完整约束方程 $C_1 = \mathbf{0}_{10 \times 1}$:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}^2 + \mathbf{A}^2 \bar{\mathbf{u}}_{O^3}^2 - \mathbf{R}^3 - \mathbf{A}^3 \bar{\mathbf{u}}_{O^3}^3 \\ \mathbf{R}^3 + \mathbf{A}^3 \bar{\mathbf{u}}_B^3 - \mathbf{R}^4 - \mathbf{A}^4 \bar{\mathbf{u}}_B^4 \\ \mathbf{R}^4 + \mathbf{A}^4 \bar{\mathbf{u}}_C^4 - \mathbf{R}^5 - \mathbf{A}^5 \bar{\mathbf{u}}_C^5 \\ \mathbf{R}^1 + \mathbf{A}^1 \bar{\mathbf{u}}_A^1 - \mathbf{R}^2 - \mathbf{A}^2 \bar{\mathbf{u}}_A^2 \\ \mathbf{R}^1 + \mathbf{A}^1 \bar{\mathbf{u}}_D^1 - \mathbf{R}^5 - \mathbf{A}^5 \bar{\mathbf{u}}_D^5 \end{bmatrix} = \mathbf{0}_{10 \times 1} \quad (4)$$

其中 A, O^3, B, C, D 分别为构件间转动副铰点; 车轮与路面间约束方程 $C_2 = \mathbf{0}$:

$$r_1^1 - vt - c_0 = 0 \quad (5)$$

其中 r_1^1, c_0 分别为移动载体水平坐标和初始位置, 用扭转弹簧简化驱动关节的柔性^[14], 并分别用 θ_k^2, θ_k^5 对其柔性进行量化度量。综合考虑系统非完整约束和完整约束(运动副束及末端轨迹), 采用独立坐标法^[14], 可以得到系统独立变量为

$$\mathbf{q}_i = [r_1^1 \quad \theta^1 \quad \theta^2 \quad \theta_k^2 \quad (\bar{\mathbf{q}}_j^3)^T \quad \theta^5 \quad \theta_k^5]^T_{1 \times 13} \quad (6)$$

并将之用于描述系统构型 $\mathbf{q} = \mathbf{f}_1(\mathbf{q}_{id}, t)$, 其中 $\mathbf{q} = [\mathbf{q}^{1T} \dots \mathbf{q}^{5T}]$ 。

1.2 动力学分析

由于系统各刚性构件体坐标系原点与构件质心相固结, 致使构件平动与转动之间动力学解耦, 从而使系统动力学模型得到部分简化; 柔性构件 3 采用浮动坐标法, 综合利用牛顿-欧拉法和拉格朗日法建立系统动力学模型, 并采用独立坐标描述^[13]:

$$\mathbf{M}_{id} \ddot{\mathbf{q}}_{id} = \mathbf{Q}_{id} \quad (7)$$

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; 并具有完备性: 可以将系统约束方便的以拉格朗日乘子的方式引入到系统动力学模型中, 致使动力学模型中包含运动副约束反力。

2 数值仿真

为了说明移动并联柔性机械手所具有的动力学性能特点, 本文针对相同的工况和边界条件等, 分别对移动串联刚体机械手和移动串联柔性机械手(图 4 所示)、移动并联刚体机械手和移动并联柔性

机械手进行建模和数值仿真(平面工况), 并对结果进行比较。

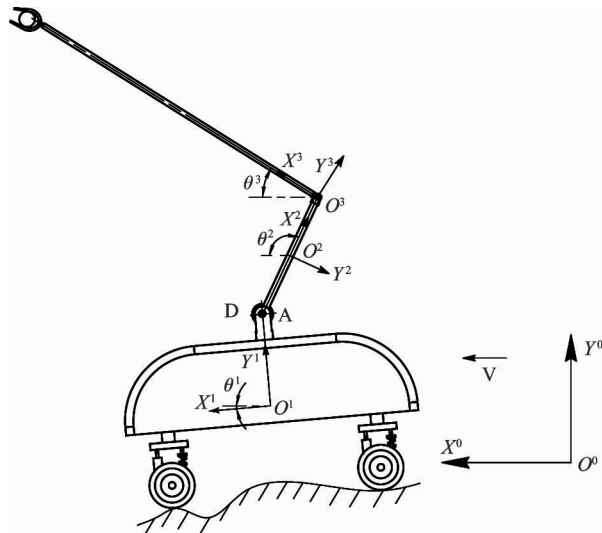


图 4 移动串联柔性机械手工况

首先采用状态空间法描述上述动力学模型(公式(7))。定义状态向量为 $\mathbf{Y} = [\mathbf{q}_{id}^T \quad \dot{\mathbf{q}}_{id}^T]^T$, $\dot{\mathbf{Y}} = [\dot{\mathbf{q}}_{id}^T \quad \ddot{\mathbf{q}}_{id}^T]^T$, 将之代入动力学方程(公式(7)), 经过适当变换, 可以得到

$$\dot{\mathbf{Y}} = \mathbf{f}(\mathbf{Y}, t) \quad (8)$$

公式(8)为一阶微分方程组, 则对轮式悬架移动柔性并联机械手动力学方程(公式(7))的求解, 转换为带初值的一阶常微分方程组求解问题。由于该动力学方程组的高度非线性体现在构件平动与转动间、体坐标刚体运动与柔性体弹性变形振动间和移动载体与机械手间的高度动力学耦合效应, 因此获取其解析解在多数情况下是不可行的。本文基于 Gear's 法(高阶线性多步法^[13]), 并采用软件 Matlab2012 对之进行数值法求解。

轮式移动串/并联刚/柔机械手数值仿真所用参数^[11]如表 1 ~ 表 4 所示。

表 1 路况参数和仿真时间和负载

$t = 0.145\text{s}$	$v = 0.3\text{m/s}$	$\lambda = 0.4\text{m}$	$H_0 = 0.03\text{m}$
$m_{3p} = 5\text{kg}$			

表 2 移动载体参数(移动并联机械手)

$K_1 = 2000\text{N/m}$	$C_1 = 200\text{N} \cdot \text{s/m}$	$K_2 = 5000\text{N/m}$	$C_2 = 500\text{N} \cdot \text{s/m}$
$l_{k1} = 0.2075\text{m}$	$l_{k2} = 0.2175\text{m}$	$l^{11} = 0.22\text{m}$	$m^1 = 20\text{kg}$
$l^1 = 0.5\text{m}$	$m_{or1} = 1\text{kg}$	$m_{or2} = 1\text{kg}$	

表 3 移动载体参数(移动串联机械手)

$K_1 = 2000\text{N/m}$	$C_1 = 200\text{N} \cdot \text{s/m}$	$K_2 = 5000\text{N/m}$	$C_2 = 500\text{N} \cdot \text{s/m}$
$K_{r2} = 37014\text{N/m}$	$K_{r3} = 37014\text{N/m}$		
$l_{k1} = 0.2075\text{m}$	$l_{k2} = 0.2175\text{m}$	$m_{or1} = 1\text{kg}$	$m^1 = 20\text{kg}$
$l^1 = 0.5\text{m}$	$I_{h2} = 0.6\text{kg} \cdot \text{m}^2$	$I_{h3} = 0.6\text{kg} \cdot \text{m}^2$	
$E = 0.7\text{e}11\text{Pa}$	$r^3 = 0.014\text{m}$		

表 4 移动殛殛机械手参数

$m^2 = 1\text{kg}$	$m^3 = 1\text{kg}$	$m^4 = 1.3\text{kg}$	$m^5 = 1.3\text{kg}$
$K_{r2} = 37014\text{N/m}$	$K_{r5} = 37191\text{N/m}$		
$l^2 = 0.6\text{m}$	$l^3 = 1.2\text{m}$	$l_i^4 = 0.45\text{m}$	$l_e^4 = 0.55\text{m}$
$l_i^5 = 0.45\text{m}$	$l_e^5 = 0.55\text{m}$	$I_{h2} = 0.6\text{kg} \cdot \text{m}^2$	$I_{h5} = 0.6\text{kg} \cdot \text{m}^2$
$E = 0.7\text{e}11\text{Pa}$	$r^3 = 0.014\text{m}$		

部分变量数值仿真结果如图 5 ~ 图 14 所示。图 5 ~ 图 9 为 $\theta^1 \sim \theta^5$ 移动刚体/柔体串联/并联机械手构件 i 相对惯性坐标系下的角度数值仿真结果,通过比较可以发现来自杆件、关节、弹性阻尼悬架等的柔性对机械手与移动载体间的动力学性能有着重要的影响;并联机械手刚度高于串联机械手,刚体机械手刚度高于柔性机械手;图 10 为系统末端执行器轨迹数据仿真结果,图 11 为柔性构件弹性变形数据仿真结果,通过比较弹性构件几何尺寸,构件弹性变形属于小变形范畴,佐证了所用描述构件弹性行为的线弹性有限元法的合理性和正确性;图 12 为移动载体水平驱动力数据仿真结果,由于移动载体水平速度恒定,导致系统动力学模型具有逆动力学的成

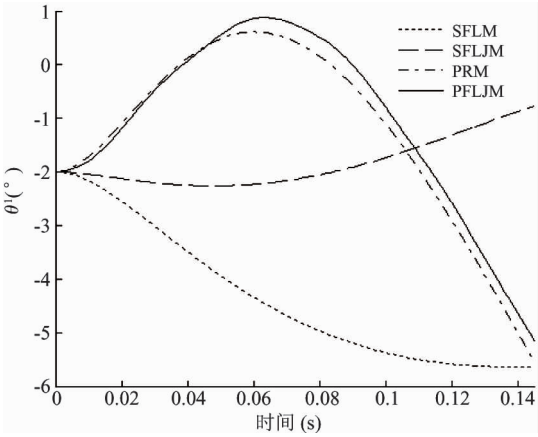


图 5 移动并联机械手 θ^1 数据仿真

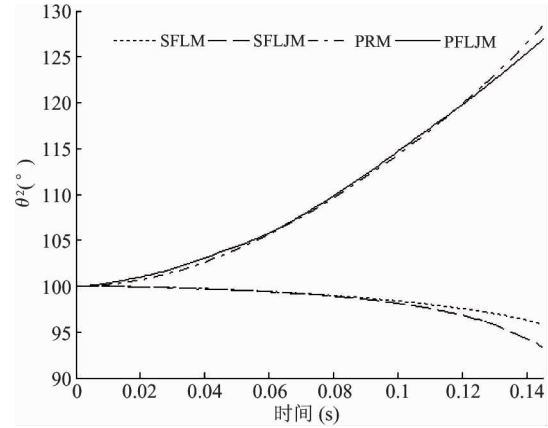


图 6 移动并联机械手 θ^2 数据仿真

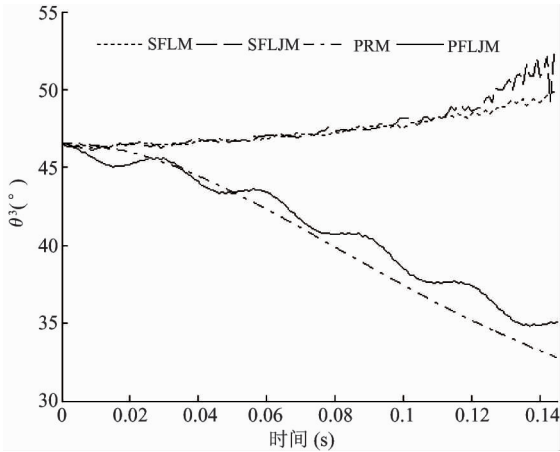


图 7 移动并联机械手 θ^3 数据仿真

SFLM:serial flexible link manipulator, 串联柔杆机械手; SFLJM:serial flexible link and joint manipulator, 串联柔性杆和关节机械手; PRM: parallel rigid manipulator, 并联刚体机械手; PFLJM:parallel flexible link and joint manipulator, 并联柔性杆及关节机械手

分,由此可以发现移动并联柔性机械手动力学耦合更为严重;图 13 和图 14 依次为构件 2 与构件 3 角速度数据仿真结果,通过比较可以发现,针对相同驱动力矩,移动并联柔性机械手构件与移动柔性串联

相应构件相比,角速度变化幅度更小,从而佐证了并联柔性机械手的系统刚度高于相应的串联柔性机械手的系统刚度。

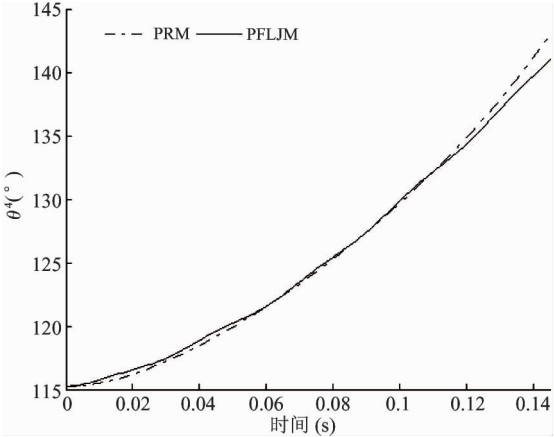


图 8 移动并联机械手 θ^4 数据仿真

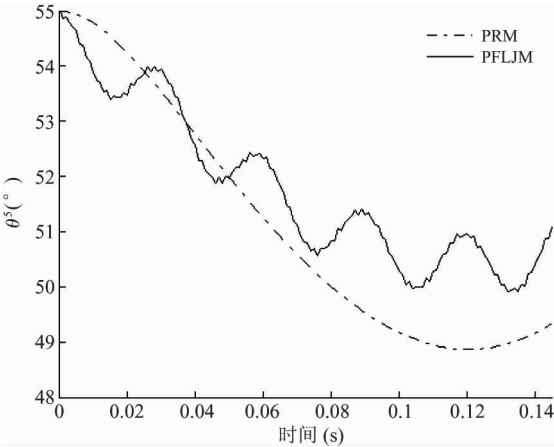


图 9 移动并联机械手 θ^5 数据仿真

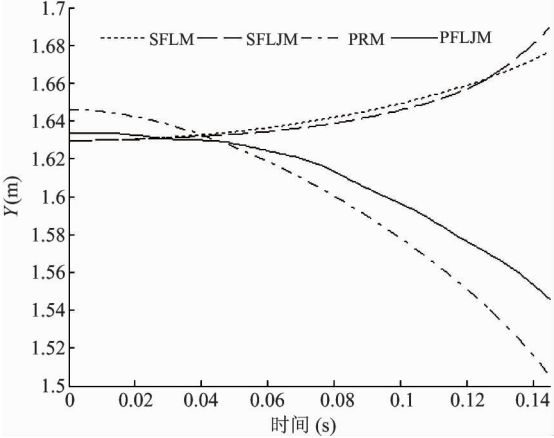


图 10 移动并联机械手末端轨迹数据仿真

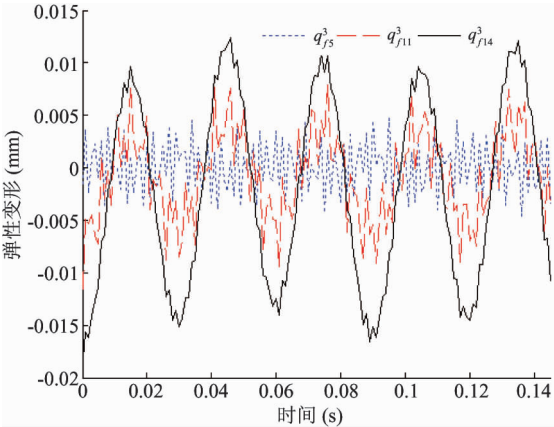


图 11 移动并联机械手柔性杆弹性变形数据仿真

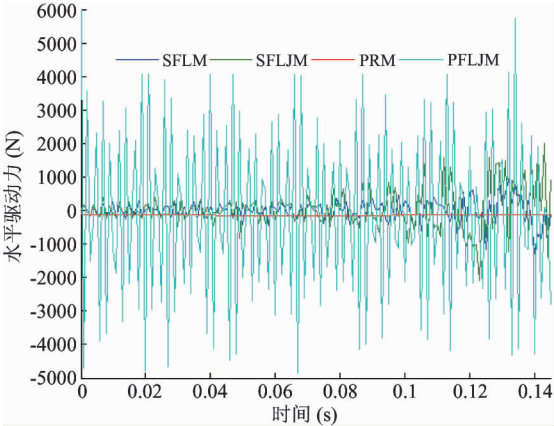


图 12 移动载体水平驱动力

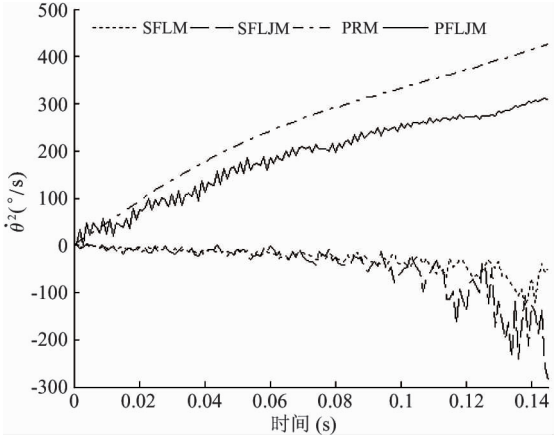


图 13 移动并联机械手 θ^2 数据仿真

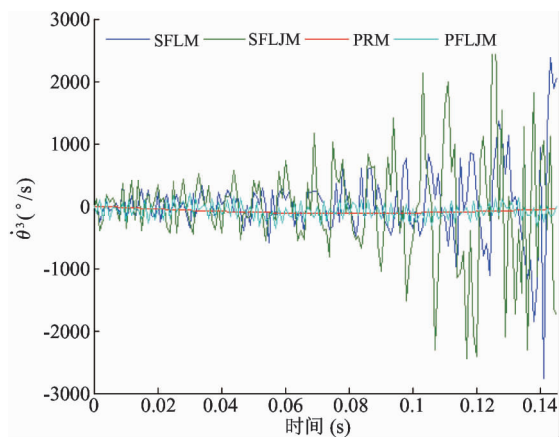


图 14 移动并联机械手 θ^3 数据仿真

3 结 论

本研究考虑了悬架、柔性杆、柔性关节等柔性,系统地构建了轮式悬架移动并联柔性机械手动力学模型,并与其他三种构型的移动机械手相关仿真结果比较得出:相对串联机械手而言,采用抗弯模量低的轻质杆件所组成的柔性并联机械手可以提高工作速度,同时可以增大系统构型刚度,从而提高系统的工作精度。随着低碳环保概念的普及,期望极大地提高系统的工作效率,为此有必要进一步将杆件轻质化,同时针对相同的负载,轻质化后的移动并联柔性机械手在高速运行工况下,构件的弹性变形和振动将对系统动力学性能产生重要的影响,如系统刚体运动与弹性构件间出现比较严重的非线性动力学耦合现象。准确构建描述系统动态特性的动力学模型是建立高作业精度控制算法的基础,为此有必要对移动柔性动力学性能进行系统的研究。

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*, 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, et al. An explicit recursive formulation and parallel computation for inverse dynamics of planar flexible manipulators. In: *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 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, 19 (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*, 2000. 46-51

[8] Piras G, Cleghorn W L, Mills J K, et al. 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, Mills J K, William L C. Dynamic modeling and experimental validation of a 3-PRR parallel manipulator with flexible intermediate links. *J Intell Robot Syst*, 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,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. *高技术通讯*, 2009, 19: 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. *机械工程学报*, 2010, 46 (21):6-81

[13] Shabana A A. *Dynamics of Multi-body Systems*. Third Edition. New York: Cambridge University Press, 2005. 189-247

[14] Korayem M H, Rahimi H N, Nikoobin A. Mathematical modeling and trajectory planning of mobile manipulators with flexible links and joints. *Applied Mathematical Modelling*, 2012, 36:3229-3244

Study of the kinetic characteristics of a wheeled-suspension mobile rigid-flexible parallel manipulator based on multi-body dynamics

Yang Yuwei^{* **}, Liu Zhenzhong^{**}, Dong Limin^{**}, Li Yangmin^{**}, Yuan Xu^{**}

(^{*} Tianjin Key Laboratory for Control Theory & Applications in Complicated Systems,

Tianjin University of Technology, Tianjin 300384)

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

Abstract

In view of the fact that mobile flexible serial manipulators lack the incapability of precise positioning under the case of high speed and heavy payload, a new configuration of a wheeled suspension flexible mobile parallel manipulator was presented, and its dynamic characteristics was studied. Based on multi-body dynamics, its dynamic model was constructed in the Cartesian coordinate system by using a general and perfect modelling method. On the basis of this, four kinds of mobile manipulators, i. e. serial, parallel, rigid and flexible, were studied by numerical simulation, and the results verified the effectiveness of the presented modelling method and the dynamic characteristics of the novel mobile manipulator. Furthermore, some techniques for improving a mobile parallel manipulator's working speed, figidity and working precision were proposed.

Key words: multi-body dynamics, dynamic modeling, numeric simulation, wheeled suspension, rigid-flexible parallel manipulator