

DOI: 10.3901/JME.2019.15.208

# 计及非完美运动副的移动并联机械手动力学分析\*

杨玉维<sup>1,2</sup> 李彬<sup>1,2</sup> 周海波<sup>1,2</sup> 赵新华<sup>1,2</sup> 宋阳<sup>1,2</sup>  
刘凉<sup>1,2</sup> 赵磊<sup>1,2</sup>

(1. 天津理工大学天津市先进机电系统设计与智能控制重点实验室 天津 300384;  
2. 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:** 由于配合公差、设计及制造偏差等因素影响,导致机械手运动副间隙客观存在。而运动副间隙又可诱发系统冲击、振动,导致系统动力学性能下降(机械手动力学性能直接影响系统末端执行器轨迹跟踪精度)。针对具有间隙、摩擦运动副的移动并联机械手动力学性能进行相关研究。基于弹性 Hertz 理论、LuGre 摩擦模型与关节支反力,系统构建运动副间隙约束与力学模型。为了便于采用多体动力学分析系统力学性能,首次提出、采用碰撞冲击方向矩阵,将间隙运动副力学模型转化为外力,进而依次系统构建移动并联、双串联机械手动力学模型。针对不同运动副间隙量、跟踪轨迹、负载等参数,进行动力学性能数值仿真,并对结果进行比较与分析,探讨了计及计及非完美运动副的移动并联机械手动力学分析的工程意义。

**关键词:** 运动副间隙; 冲击与摩擦; 动力学性能; 数值仿真

**中图分类号:** TH12

## Dynamic Analysis of a Mobile Parallel Manipulator with Imperfect Kinematic Joints

YANG Yuwei<sup>1,2</sup> LI Bin<sup>1,2</sup> ZHOU Haibo<sup>1,2</sup> ZHAO Xinhua<sup>1,2</sup> SONG Yang<sup>1,2</sup>  
LIU Liang<sup>1,2</sup> ZHAO Lei<sup>1,2</sup>

(1. Tianjin Key Laboratory of the Design and Intelligent Control of the Advanced Mechatronical System, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384;  
2. National Demonstration Center for Experimental Mechanical and Electrical Engineering Education (Tianjin University of Technology), Tianjin 300384)

**Abstract:** It is the tolerances, design and manufacturing variations and other factors that lead to the objective existence of clearance kinematic joints of manipulators. Nevertheless, the clearances of kinematic joints usually induce the system shock, vibration, fatigue failure and other phenomena, which leads to the decrease of system dynamic performance. Manipulator dynamics directly affects the trajectory tracking accuracy of the end effector of system. Thus, the clearances and friction kinematic joints are considered to study the dynamic properties of a mobile parallel manipulator. Based on the elastic Hertz theory, the LuGre friction model and the joint reactions, the kinematic clearance constraints and the kinetic models are systematically modeled. In order to facilitate the application of multi-body dynamics to analyze the kinetic properties of system, the collision impact direction matrices are firstly proposed and adopted to transform kinetic model of clearance motion into external forces to apply, and then the mobile parallel and double serial dynamic models are constructed. According to the different parameters of kinematic joint clearances, working tracking trajectories and loaders, the numerical simulations of dynamic performance are carried out, and then the results are compared and analyzed. And then, the engineering significances of the dynamic analysis of the mobile parallel manipulator with imperfect kinematic joints are discussed.

**Key words:** kinematic joint clearances; shock and friction; dynamic performance; numerical simulation

\* 天津市科技重大专项(16ZXZNGX00070, 15ZXZNGX00040, 16ZXZNGX00010)、天津市自然科学基金重点项目(17JCZDJC30400)、天津市自然科学基金(17JCYBJC18300, 18JCYBJC87900)、国家自然科学基金青年基金(11702190)和国家重点研发计划“智能机器人”重点专项(2017YFB1303502)资助项目。20180916 收到初稿, 20190505 收到修改稿

## 0 前言

机械手本体构件通过运动副相互连接, 机械工程中运动副间隙客观存在(由设计形位公差与制造装配误差等因素造成), 同时由于机械手在工作过程中的磨损, 导致原运动副间隙增大。而运动副间隙对系统动力学特性又具有较大的负面影响: 增大系统末端执行器轨迹跟踪误差, 恶化构件间的冲击与磨损, 导致系统工作精度下降(如在机械手用于维修、装配等应用中, 将严重影响工作质量与效率。), 构件过早疲劳失效。故此, 依据客观物理工况(包含运动副间隙、摩擦等因素), 对机械手进行完备性准确系统运动学、动力学建模与仿真研究具有重要的理论与工程意义。

文献[1]研究了具有间隙运动副机构反馈控制相关问题; 文献[2]研究了运动副间隙量与工作速度对 3RRR 平面机械手动力学性能的影响; 文献[3]考虑库仑摩擦的条件下, 利用非线性等效弹簧阻尼的概念建立了含间隙运动副的接触动力学模型, 并利用动力学分析软件 ADAMS, 研究了不同运动副材料对间隙机构动力学特性的影响; 文献[4]研究了含间隙运动副机构的动力学特性的影响, 综合考虑转动副轴向尺寸、材料非线性系数以及碰撞过程能量损耗等因素, 建立了接触碰撞力模型与库伦摩擦力模型; 文献[5]根据 Hertz 接触定律和 Coulomb 摩擦定律, 建立了含间隙平面转动副的力学模型; 文献[6]含间隙转动副的曲柄滑块机构运动稳定性问题进行了相关研究; 文献[7]采用了综合数值法研究了具有间隙转动副的齿轮传动多体系统动力学耦合问题; 文献[8]对描述固体接触界面接触碰撞事件的本构关系进行了相关研究, 并进行最相关的现有粘弹性接触力模型的研究比较; 文献[9]针对含有间隙运动副的 RAF 平移并联机械手定向误差进行了建模与分析; 文献[10]采用优化算法优化曲柄连杆机构系统杆件质量分布, 以期削弱运动副间隙对系统的冲击碰撞、恶化定位精度等负面影响; 文献[11]根据 Hertz 接触定律和 Coulomb 摩擦定律, 对包含间隙运动副的 2 自由度并联机械手动力学性能进行相关研究; 文献[12]针对提高系统定位精度, 对含有间隙运动副 3-RRR 并联机械手两点轨迹规划进行了相关研究。上述研究, 没有涉及间隙运动副内关节支反力对系统的影响, 动力学模型缺乏完备性; 相对研究对象而言, 研究方法针对性强, 对机械手动力学性能相关研究而言, 缺乏通用性与系统性。

本文以多体动力学理论<sup>[16]</sup>为依据, 着眼于系统

动力学建模的完备性、准确性与通用、系统性, 以具有间隙、摩擦运动副的移动并联机械手(图 1)作为研究对象, 将并联系统具有间隙的运动副打开(图 2), 用关节支反力、碰撞冲击力与摩擦力替代运动副约束施加到系统上, 从而形成移动双串联机械手系统。针对机械手末端轨迹构型不同参数、负载等因素对间隙运动副冲击、摩擦的影响, 进行系统动力学性能进行相关研究, 并结合仿真结果, 针对间隙运动副完备动力学建模的工程意义展开探讨。本文主要包括三个部分: 系统运动学、动力学建模和数值仿真。

## 1 计及运动副间隙、摩擦的系统运动学建模

机械手在执行既定任务如轨迹跟踪时, 具有间隙的运动副组件轴径与轴承间将产生冲击碰撞和摩擦现象, 从而产生碰撞冲击力与摩擦力, 对系统动力学性能将产生严重的影响。机械手执行任务时运动副轴径在轴承内将出现三种运动工况: ① 无接触运动, 如图 3 所示; ② 与运动副轴承持续接触运动, 如图 3 所示; ③ 与运动副轴承冲击碰撞运动, 如图 4 所示。实际工况下, 此三种运动交替往复出现。如何准确确定运动副轴径、轴承间的冲击碰撞时间, 在数值分析中, 是比较困难的<sup>[17-18]</sup>。针对具体碰撞, 需要相应的物理实验提供大量相关参考数据, 以确定碰撞时间。考虑运动学、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、动力学模型。图 1、2 所示为移动机械手简图, 图 1 所示移动并联机械手在含间隙运动副处打开, 并施加相应关节支反力、碰撞冲击力及摩擦力, 系统演变为图 2 所示移动双串联机械手。图 2 中  $O^0-X^0Y^0$  为移动双串联机械手的全局坐标系、 $O^i-X^iY^i$  为构件  $i(i=1,2,\dots,5)$  体坐标系<sup>[13-15]</sup>, 构件  $i$  上任一点位置矢量  $r^i$  可以描为<sup>[13-14]</sup>

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

限于篇幅, 仅考虑构件 3、4 间通过具有间隙的转动副连接。 $r_p^3$  为构件 3 转动副轴承中心  $p^3$  位置矢量(全局坐标系下度量),  $r_p^4$  为构件 4 转动副轴颈中心  $p^4$  位置矢

$$r_p^3 = R^3 + A^3 \bar{u}_p^3 \quad (2)$$

$$r_p^4 = R^4 + A^4 \bar{u}_p^4 \quad (3)$$

其中  $\bar{u}_p^3$ 、 $\bar{u}_p^4$  分别为  $p^3$ 、 $p^4$  位置矢量, 上横线( $\bar{\quad}$ )表示度量于体坐标系  $O^i-X^iY^i$ , 如图 2、4 所示。



$k_{v1}$ 、 $k_{v2}$  为轨迹速度参数(通过参数调整, 确定运动副间隙对系统动力学性能的影响。),  $v$  为移动载体水平速度,  $T_{v1}$  为轨迹周期参数,  $a_0$ 、 $b_0$  为轨迹常数。移动并联机械手逆运动学约束方程<sup>[13-14]</sup>为  $C^1 = \mathbf{0}_{13 \times 1}$  (包含公式(17)), 移动双联机械手正运动学约束方程为  $C^2 = \mathbf{0}_{9 \times 1}$

$$\begin{bmatrix} C^{51}(q^1, q^5) \\ C^{45}(q^4, q^5) \\ C^{32}(q^2, q^3) \\ C^{21}(q^1, q^2) \\ C^1(q^1, t) \end{bmatrix} = \mathbf{0}_{9 \times 1} \quad (18)$$

式中  $q^i = [R^T \ \theta^T]^T$  ( $i=1,2,\dots,5$ ) 用于描述构件  $i$  构型的变量。采用独立坐标法<sup>[15]</sup>, 可分别得到移动并联系统逆运动学独立变量  $q_i^1$  与移动双串联系统正运动学独立变量  $q_i^2$ :  $q_i^1 = [\theta^2 \ \theta^5]^T$ ,  $q_i^2 = [r_2^1 \ \theta^1 \ \theta^2 \ \theta^3 \ \theta^4 \ \theta^5]^T$ , 并将之分别用于描述相同物理构型的移动机械手(图 1 所示)运动学系统构型

$$q = f^1(q_i^1, t) \quad (19)$$

$$q = f^2(q_i^2, t) \quad (20)$$

式中,  $q = [q^{1T} \dots q^{5T}]^T$ 。

## 2 计及运动副间隙、摩擦的系统动力学建模

考虑到碰撞过程的能量损失, 碰撞冲击力可描述为<sup>[12, 18]</sup>

$$F_n = K\delta^n + Dv_n \quad (21)$$

$$D = \left[ \frac{3K(1-(c_e)^2)}{4v_{ni}} \right] \delta^n \quad (22)$$

$$K = \frac{4}{3(\sigma_1 + \sigma_2)} \left[ \frac{R_j^4 R_b^3}{R_j^4 + R_b^3} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_i = \frac{1-(v_i)^2}{E_i} \quad i=3, 4$$

式中,  $D$  为迟滞系数;  $K$  为运动副构件广义刚度系数;  $\sigma_i$  为复合物理参数;  $v_i$  为运动副构件  $i$  的泊松比;  $E_i$  为弹性模量;  $v_{ni}$  为运动副轴承、轴径碰撞相对初始速度;  $c_e$  为运动副材料恢复系数。

将式(22)代入到式(21)可得

$$F_n = K\delta^n \left[ 1 + \frac{3(1-(c_e)^2)v_n}{4v_{ni}} \right] \quad (23)$$

以 LuGre 摩擦模型构建关节运动副摩擦力<sup>[17-18]</sup>

$$F_t = \mu F_n \quad (24)$$

式中,  $\mu$  为瞬时摩擦因数;  $\mu = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 v_t$ ;  $Z$  为“刷毛”平均偏转量。

$$z = \frac{v_t}{|v_t|} \times \frac{\mu_k + (\mu_s - \mu_k) \exp(-\left| \frac{v_t}{v_s} \right| \gamma)}{\sigma_0}$$

$$\dot{z} = v_t - \frac{\sigma_0 |v_t|}{\mu_k + (\mu_s - \mu_k) \exp(-\left| \frac{v_t}{v_s} \right| \gamma)} z$$

式中,  $z$ 、 $\sigma_0$ 、 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  为 LuGre 摩擦模型的动参数,  $\gamma$ 、 $v_s$ 、 $\mu_s$ 、 $\mu_k$  为 LuGre 摩擦模型的静参数<sup>[17-18]</sup>。具有间隙、摩擦的运动副轴承碰撞冲击力与摩擦力(度量于图 4 中坐标系  $O^C-X^C Y^C$ )可表述为矢量形式

$$\bar{F}_m^3 = [F_n \ F_t]^T \quad (25)$$

其在全局坐标系可描述为

$$F_m^3 = A_C^3 \bar{F}_m^3 \quad (26)$$

同理可得到具有间隙、摩擦的运动副轴颈碰撞冲击力与摩擦力矢量形式

$$F_m^4 = -F_m^3 \quad (27)$$

建立在后续移动并联机械手逆动力学基础上(不考虑运动副间隙), 可以得到运动副关节支反力和摩擦力<sup>[15]</sup>, 作为移动双串联机械手外力施加

$$F_R^3 = A_C^3 \bar{F}_R^3 \quad (28)$$

$$F_R^4 = -F_R^3 \quad (29)$$

最终可得到间隙运动副打开处所施加外力为

$$F_{RC}^3 = F_R^3 + F_m^3 \quad (30)$$

$$F_{RC}^4 = F_R^4 + F_m^4 \quad (31)$$

依据多体动力学<sup>[16]</sup>, 并综合利用牛顿-欧拉法和拉格朗日法, 采用独立坐标法<sup>[13-14]</sup>构建移动机械手系统动力学模型

$$M_i^j \ddot{q}_i^j = Q_i^j \quad (32)$$

式中,  $j=1,2$ , 分别代表移动并联系统、移动双串联系统(下述表示方法相同),  $M_i^j$  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。

### 3 数值仿真

由上文可知,由式(19)、(20),定义状态向量为  $Y^j = \begin{bmatrix} (q_i^j)^T & (\dot{q}_i^j)^T \end{bmatrix}^T$ ,  $\dot{Y}^j = \begin{bmatrix} (\dot{q}_i^j)^T & (\ddot{q}_i^j)^T \end{bmatrix}^T$ , 将之代入系统动力学方程(式(32)), 经过适当变换, 可以得到

$$\dot{Y}^j = f^j(Y^j, t) \quad (33)$$

式(33)为一阶微分方程组(Ordinary difference equations, ODE), 基于高阶线性多步法<sup>[15]</sup>, 并采用软件 Matlab2015 对之进行数值法求解。具体求解流程如图 5 所示。

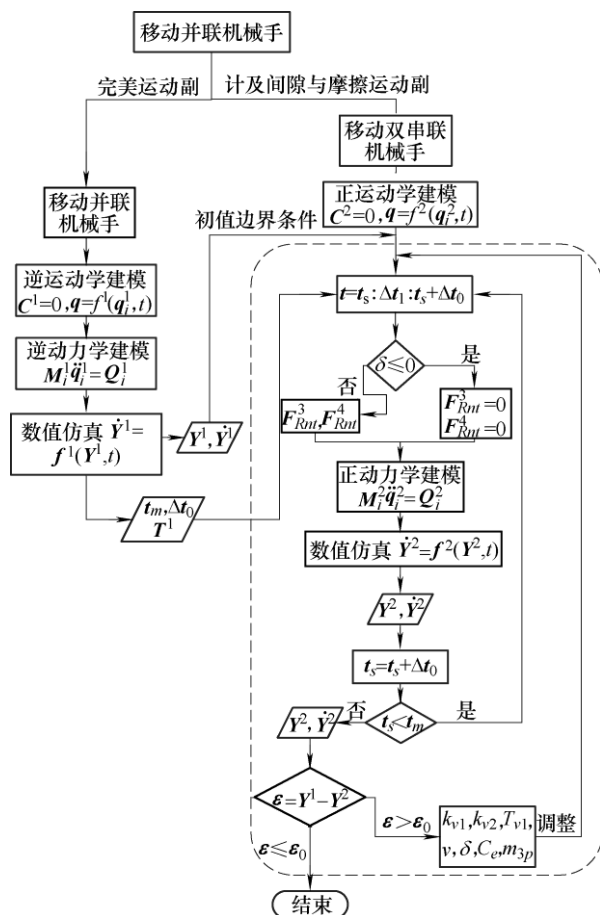


图 5 数值仿真流程图

仿真流程如下。

(1) 不计及运动副间隙、摩擦工况下, 移动并联机械手动力学建模, 通过数值仿真获取  $Y^1, \dot{Y}^1, T^1$ , 作为后续移动双串联机械手动力学仿真初值边界条件与已知条件,  $t_m, \Delta t_0$  作为后续移动双串联机械手仿真时段与时间间隔。

(2) 计及运动副间隙、摩擦工况下, 将移动并联机械手某处运动副打开, 并以关节支反力、摩擦力作为反力施加, 形成等效成移动双串联机械手(图

2), 并构建运动学模型  $C^2 = 0$ , 并进行坐标分离, 采用独立坐标描述系统构型  $q = f^2(q_i^2, t)$ , 并以步骤(1)中所得  $Y^1, \dot{Y}^1$  作为已知为边界条件。

(3) 建立在步骤(2)基础上, 定义仿真时间参数  $t_s, t_m, \Delta t_0$ , 并以  $T^1$  为已知输入驱动力矩, 判断碰撞冲击是否存在: 当  $\delta \leq 0$  时, 有  $F_{Rnt}^3 = 0, F_{Rnt}^4 = 0$ ; 当  $\delta > 0$  时, 则  $F_{Rnt}^3, F_{Rnt}^4$  见式(30)、(31)。

(4) 构建移动双串联机械手动力学模型并进行数值仿真, 得到  $Y^2, \dot{Y}^2$ , 并判别仿真时间  $t_s < t_m$ , 如成立, 回到步骤(3), 进行循环数值仿真, 直至  $t_s < t_m$ ;

(5) 进行  $\varepsilon = Y^1 - Y^2$  比较计算, 如有  $\varepsilon > \varepsilon_0$ , 则进行参数  $(k_{v1}, k_{v2}, T_{v1}, v, \delta, C_e, m_{3p})$  调整, 直至  $\varepsilon \leq \varepsilon_0$  成立, 数值仿真结束。

移动并联、双串联机械手<sup>[13-15, 17-18]</sup>数值仿真所用参数如表 1~3 所示。

表 1 工况参数

仿真时间	车速	负载	轨迹周期参数	速度参数	轨迹参数
$t_m/s$	$v/(m/s)$	$m_{3p}/kg$	$T_{v1}/s$	$k_{v1}, k_{v2}$	$a_0/m, b_0/m$
0.5	0.3	5	0.4	0.6, 0.1	0.795, 1.3

表 2 并联机械手参数

弹性模型	恢复系数	摩擦动参数	运动副间隙
$E_1/MPa, E_2/MPa$	$C_e$	$\sigma_s/(N \cdot m \cdot s^{-1})$	$\sigma_s/(N \cdot m \cdot s^{-1})\delta/mm$
201, 201		0.9, $1 \times 10^5$ , 400	0.0001

表 3 调整参数

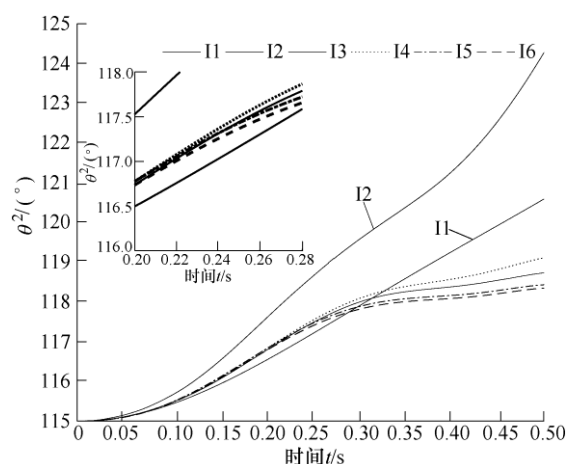
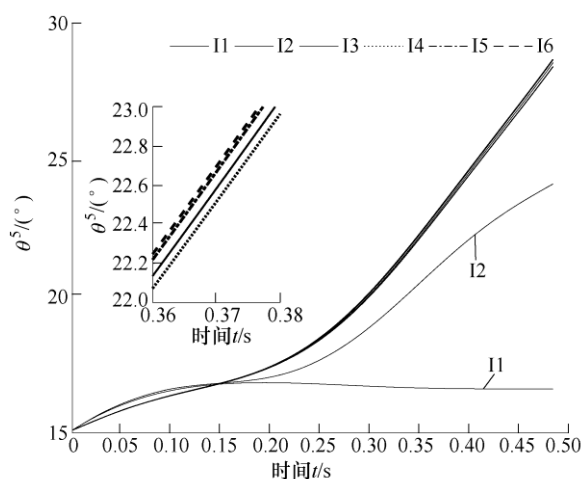
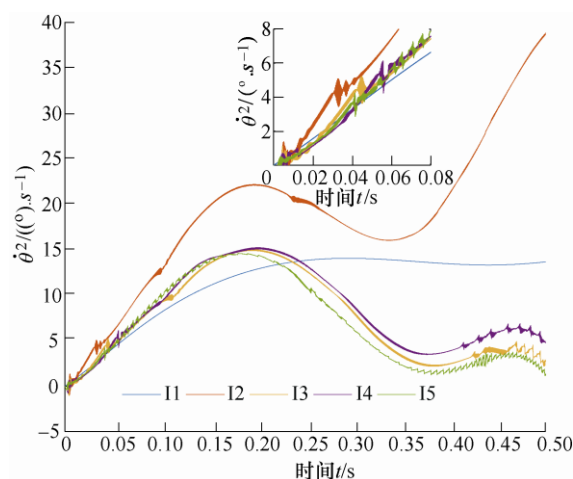
速度	负载	运动副间隙	轨迹周期参数
$v/(m \cdot s^{-1})$	$m_{3p}/kg$	$\delta/mm$	$T_{v1}/s$
11	1.5	0	0.4
12	1.5	0.000 5	0.4
13	1	0.000 3	0.4
14	1	0.000 2	0.4
15	1	0.000 1	0.4
16	1	0.000 2	0.4
161	1	0.000 1	0.4
17	1	0	1

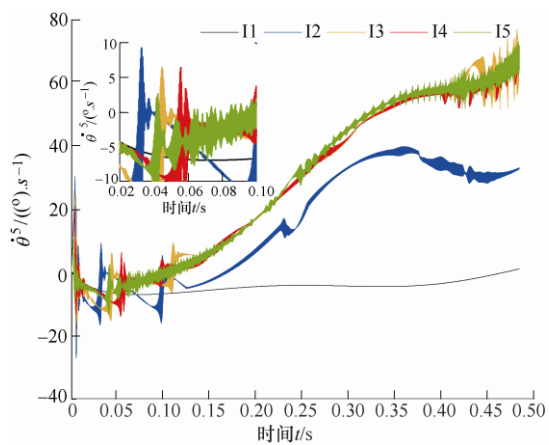
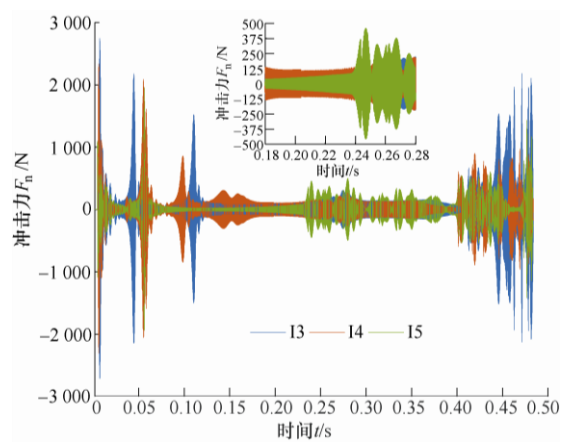
注: 16 对应关节支反力为零。

部分数值仿真结果如图 6~15 所示, 其中图 6、图 7 为移动并联机械手与移动双串联机械手不同参数工况下  $\theta^2, \theta^5$  数值仿真图。通过比较不难发现, 在同样驱动力矩  $T^1$  函数作用下, 通过调整碰撞压入深度  $\delta$ 、负载  $m_{3p}$ <sup>[13-14]</sup>等参变量, 导致运动副间隙冲击力对系统动力学性能产生不同的影响: 由于仿真起点时刻, 边界条件相同, 所以此时系统输出角度相同。而随着时间推移, 不同参数下, 系统输出呈现出不同的特色。曲线 I1 与曲线 I2 对应负载皆是  $m_{3p}=1.5 kg$ , 但曲线 I2 相对曲线 I1 而言, 考虑了不同量的运动副间隙对系统的影响, 从而导致在相

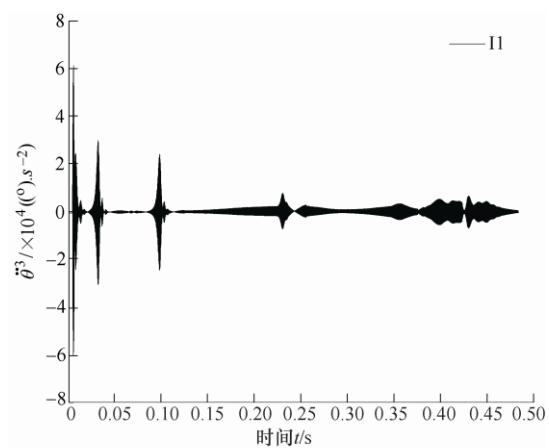
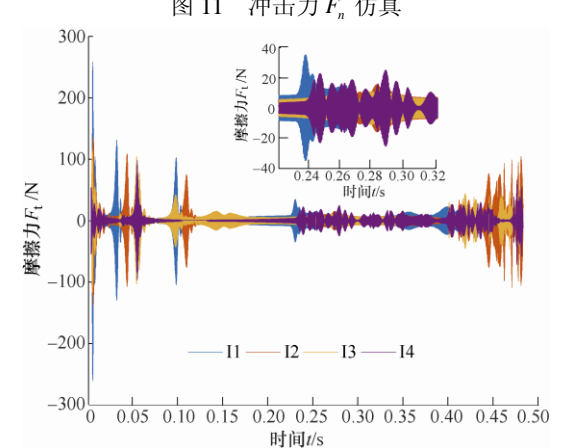
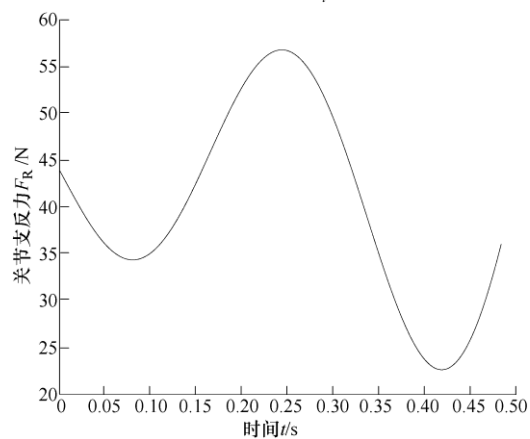
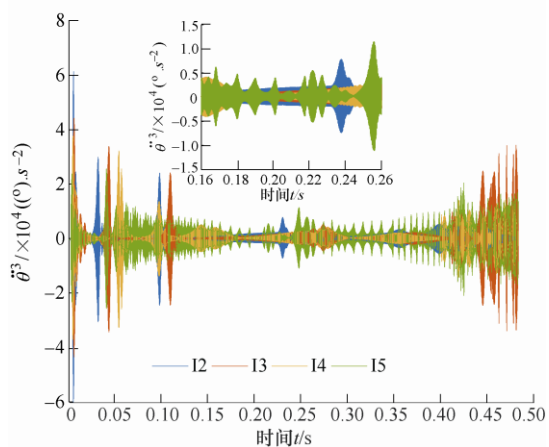
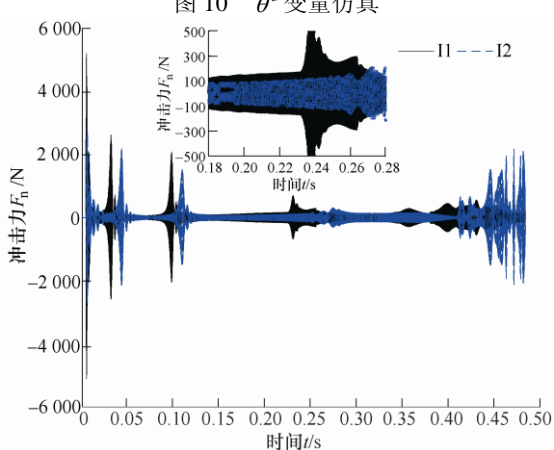
同的驱动力矩  $T^1$  (如图 5 所示) 和相同的边界条件下, 系统的输出随着时间的推移, 出现较大差异。曲线 I3~I6 对应系统负载为  $m_{3p}=1.0$  kg, 对应跟踪轨迹较曲线 I1、I2 对应跟踪轨迹参数有所调整, 导致曲线 I2、I3 随着时间推移变化较大。当负载与跟踪轨迹相同时, 曲线 I3~I6 较其他曲线而言, 变化趋势具有一定相似性, 但由于对应系统的运动副间隙有所调整, 导致曲线 I3~I5 有所差异。曲线 I6 较曲线 I5 而言, 仅是没有考虑关节支反力的作用, 即  $F_R^4 = F_R^3 = 0$ , 由于曲线 I5、I6 差值  $\varepsilon$  较小, 说明相对运动副间隙碰撞冲击力  $F_{nt}^3$ 、 $F_{nt}^4$  而言, 关节  $F_R^3$ 、 $F_R^4$  较小(图 13)对系统动力学性能的影响较小, 限于篇幅, 后续相应工况下相应速度、加速度仿真结果, 文中不做探讨。图 8、9 为移动双串联机械手不同参数工况下  $\dot{\theta}^2$ 、 $\dot{\theta}^5$  数值仿真图, 通过比较不难发现, 由于曲线 I1 对应工况未考虑间隙运动副碰撞冲击, 致使速度变化较为平缓, 曲线 I2~I5 在相应时刻出现振动变化, 说明机械手在实现既定轨迹跟踪时, 于不同时间段, 速度变化冲击程度变化较大。曲线 I3~I5 随着运动副间隙减小, 角速度变化幅度总体上在减小, 符合工程特点, 图 10  $\ddot{\theta}^3$  数据仿真亦具有上述特点。图 11~13 依次为间隙运动副关节冲击力、摩擦力与关节支反力仿真图。如图 11 所示: ① 针对机械手系统同一跟踪轨迹, 接触力幅值(如曲线 I2、I3 所示)整体上随着负载减小而减小。但针对具体某一时间段而言(如 0.26~0.28 s), 尽管负载由 1.5 kg 减少到 1 kg, 但 I3 曲线幅值高于 I2 幅值, 而其他阶段(如 0.15~0.22 s)又出现相反的结果; ② 系统末端跟踪轨迹与负载相同工况下, 不同间隙所对应间隙关节冲击力如曲线 I3~I5 所示: 整体上随着间隙减小而减小, 但针对具体某一时间段而言(如 0.25~0.26 s), 尽管运动副间隙由 0.5 mm 减少到 0.1 mm, 但 I5 曲线幅值高于其他曲线幅值, 而其他阶段(如 0.05~0.06 s)又出现相反的结果。由此说明关节冲击力与负载、关节间隙量之间的具有复杂的非线性关系, 很多程度上还要受到系统末端轨迹构型的影响, 非简单线性可比拟。图 14 为机械手末端 Y0 方向轨迹, 该轨迹对应参数如表 4 所示。I1 为完美运动副双串联移动机械手末端轨迹, 与移动并联机械手(不计及运动副间隙)轨迹一致。在相同驱动力矩下, 计及运动副间隙冲击与摩擦工况下, 机械手系统末端轨迹产生较大变化。该仿真结果表明, 如不计及运动副间隙与摩擦而进行机械手轨迹规划, 将产生较大跟踪误差, 同时增加了系统控制器设计的难度, 不利于机械手系统准确工程作业。图 15 中 I6、I7 曲线对应参数图表 4 所示, 通过对系统

跟踪轨迹参数  $T_{v1}$  的调整, 间隙运动副冲击力产生较大变化。针对 2 点间给定负载工况下, 以上述机械手完备动力学模型为基础, 通过对轨迹优化, 实现间隙运动副冲击最小, 从而降低间隙运动副磨损、增加工作寿命、提高系统作业精度与降低控制器设计成本等。因此, 运动副间隙冲击对系统动力学性能影响研究具有重要工程意义。

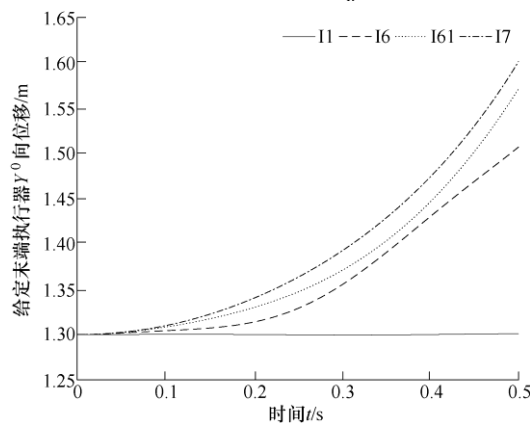
图 6  $\theta^2$  变量仿真图 7  $\theta^5$  变量仿真图 8  $\dot{\theta}^2$  变量仿真

图 9  $\dot{\theta}^5$  变量仿真

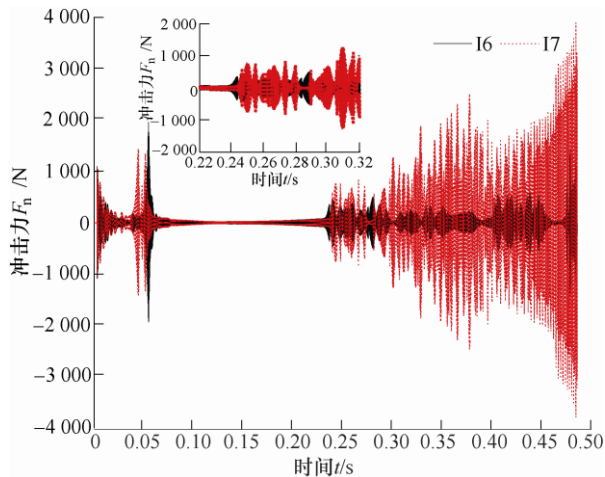
(b)

图 11 冲击力  $F_n$  仿真图 10  $\ddot{\theta}^3$  变量仿真图 12 摩擦力  $F_f$  仿真图 13 关节支反力  $F_R$  仿真

(a)

图 14 机械末端  $Y^0$  方向轨迹仿真



图 15 冲击力  $F_n$  仿真

## 4 结论

(1) 本文首次提出、采用碰撞冲击方向矩阵, 便于采用多体动力学相关理论将间隙运动副力学模型转化为系统外力施加, 有利于实现系统动力学建模方法的完备性、准确性与通用、系统性。

(2) 负载、运动副间隙量、跟踪轨迹构型、移动载体速度、负载重量等参数因素, 对间隙运动副间隙冲击力分布皆有影响。为了减小间隙冲击对系统动力学性能的负面影响, 实现移动机械手准确工程作业, 应以完备系统动力学模型为基础, 进行综合优化调整上述参数。

(3) 相对间隙运动副碰撞冲击力而言, 如关节支反力较小, 其系统动力学性能有一定影响; 但当间隙运动副冲击力与关节支反力接近时, 此两者对系统动力学皆会产生重要影响。鉴于系统准确作业的工程需求的加强, 完备动力学模型构建应将冲击力与关节支反力一并纳入。

(4) 针对 2 点间给定负载工况下, 可以上述机械手完备动力学模型为基础, 通过对轨迹优化, 实现间隙运动副冲击最小, 从而降低间隙运动副磨损、增加工作寿命、提高系统作业精度与降低控制器设计成本等, 以此, 研究方法具有重要工程意义。

## 参 考 文 献

- [1] BROGLIATO B. Feedback control of multibody systems with joint clearance and dynamic backlash: a tutorial[J]. Multibody System Dynamics, 2017(1): 1-33.
- [2] VAREDI S M, DANIALI H M, FARAJTABAR M. The effects of joint clearance on the dynamics of the 3RRR planar parallel manipulator[J]. Robotica, 2016, 35(6): 1223-1242.
- [3] 郝雪清, 陈江义. 不同运动副材料对间隙机构动力学特性的影响[J]. 振动与冲击, 2012, 31(12): 19-21.  
HAO Xueqing, CHEN Jiangyi. Effects of different materials in joints on dynamic characteristics of a mechanism with clearance[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(12): 19-21.
- [4] 王旭鹏, 刘更, 马尚君. 含间隙运动副机构的动力学特性研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(7): 110-115.  
WANG Xupeng, LIU Geng, MA Shangjun. Dynamic characteristics of mechanisms with revolute clearance joints [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(7): 110-115.
- [5] 何柏岩, 王树新, 张颖. 含铰链间隙的刚-柔机械臂动力学模型[J]. 动力学与控制学报, 2004, 2(2): 70-73.  
HE Baiyan, WANG Shuxin, ZHANG Ying. A dynamic model of the mechanical arm with joint clearance [J]. Journal of Dynamics and Control, 2004, 2(2): 70-73.
- [6] OLYAEI A A, GHAZAVI M R. Stabilizing slider-crank mechanism with clearance joints[J]. Mechanism & Machine Theory, 2012, 53(7): 17-29.
- [7] TIAN Q, XIAO Q, SUN Y, et al. Coupling dynamics of a geared multibody system supported by ElastoHydroDynamic lubricated cylindrical joints[J]. Multibody System Dynamics, 2015, 33(3): 259-284.
- [8] ALVES J, PEIXINHO N, SILVA M T D, et al. A comparative study of the viscoelastic constitutive models for frictionless contact interfaces in solids[J]. Mechanism & Machine Theory, 2015, 85: 172-188.
- [9] CHOUAIBI Y, CHEBBI A H, ROMDHANE Z A L. Analytical modeling and analysis of the clearance induced orientation error of the RAF translational parallel manipulator[J]. Robotica, 2016, 34(8): 1898-1921.
- [10] VAREDI S M, DANIALI H M, DARDEL M, et al. Optimal dynamic design of a planar slider-crank mechanism with a joint clearance[J]. Mechanism & Machine Theory, 2015, 86(6): 191-200.
- [11] XU L X, LI Y G. Investigation of joint clearance effects on the dynamic performance of a planar 2-DOF pick-and-place parallel manipulator[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2014, 30(1): 62-73.
- [12] FARAJTABAR M, DANIALI H M, VAREDI S M. Pick and place trajectory planning of planar 3-RRR parallel manipulator in the presence of joint clearance[J]. Robotica, 2015, 35(2): 241-253.
- [13] 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.  
YANG Y W, ZHANG M L, ZHAO X H, et al. Research and simulation of inverse dynamics of a wheeled mobile



- single link flexible manipulator[J]. *Journal Of Mechanical Engineering*, 2010, 46(21): 76-81.
- [14] 杨玉维, 赵新华, 孙启媛, 等. 基于多体动力学特性的机械手时间最优轨迹规划[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(7): 8-14.
- YANG Yuwei, ZHAO Xinhua, SUN qiyuan, et al. Trajectory optimization of manipulator for minimum working time based on multi-body dynamic characters[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(7): 8-14.
- [15] 杨玉维, 钟蜀津, 李彬, 等. 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[J]. *高技术通讯*, 2017, 27(7): 633-637.
- YANG Yuwei, ZHONG Shujin, LI Bin, et al. Study on the validity of dynamics modeling of a mobile suspension parallel manipulator based on positive and inverse kinetics [J]. *Chinese High Technology Letters*, 2017, 27(7): 633-637.
- [16] SHABANA A A. *Dynamics of multi-body systems*[M]. 3rd ed. New York: Cambridge University Press, 2005.
- [17] MUVENGEI O, KIHU J, IKUA B. Dynamic analysis of planar multi-body systems with LuGre friction at differently located revolute clearance joints[J]. *Multibody System Dynamics*, 2012, 28(4): 369-393.
- [18] MUVENGEI O, KIHU J, IKUA B. Dynamic analysis of planar rigid-body mechanical systems with two-clearance revolute joints[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2013, 73(12): 259-273.
- 
- 作者简介: 杨玉维, 男, 1975 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为移动机器人、多体动力学、可穿戴机器人。  
E-mail: buddhawei@126.com  
李彬(通信作者), 男, 1981 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为机器人技术。  
E-mail: cnrobot@163.com