

文章编号:1671-6833(2012)01-0098-04

含间隙铰链并联机构的动力学分析

陈江义¹, 郝雪清¹, 虞启辉²

(1. 郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘要:以3-RRRT并联机构为对象,基于ADAMS仿真软件平台,在考虑库仑摩擦力条件下,利用非线性等效弹簧阻尼的概念建立含间隙铰链的接触动力学模型,在此基础上构建了机构的动力学分析模型。对该模型进行仿真,分析铰链在理想接触和含间隙时并联机构的动力学性能,同时还比较研究了机构一条支链存在铰链间隙和三条支链均存在铰链间隙时的动力学性能。结果表明铰链间隙对并联机构动平台的加速度及机构接触力都有较大影响,在机构设计时需要加以考虑。

关键词:并联机构; 铰链; 间隙; 动力学特性

中图分类号: TH113 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2012.01.0024

0 引言

以Stewart平台为代表的六自由度并联机构已得到了广泛的研究,但是在许多场合应用的并联机构只需有部分自由度,如2、3、4或5自由度就可以满足使用要求,这一类机构称为少自由度并联机构。少自由度并联机构由于驱动元件少、解耦方便、控制简单、结构紧凑而有较高的实用价值,逐渐成为研究的热点。目前,国内外关于少自由度并联机构的研究和应用正日益深入,许多研究成果已经用于生产和科研中,笔者讨论的3-RRRT机构就是其中的一种^[1]。另外,机构由于安装、制造误差及运行过程中的正常磨损,会使运动副间产生间隙,导致运动副元素之间可能会发生猛烈冲击和碰撞,增加构件的动应力,造成杆件弹性变形增大、磨损加剧,产生噪声和振动,效率降低。针对机构的间隙问题,Bauchau等给出了一种柔性多体系统中典型间隙铰链的运动学描述方法^[2];王华杰运用ADAMS软件分析了含间隙平面曲柄摇杆机构的动力学^[3];Zhao等人讨论了铰链间隙的大小对空间串联机器人动力学性能的影响^[4]。上述工作虽然很有意义,然而目前关于铰链间隙对并联机构动力学性能的讨论还不多,笔者基于ADAMS软件,分析3-RRRT并联机构中铰链在含间隙情况下的动力学性能。

1 含间隙铰链的动力学模型

1.1 非线性弹簧阻尼接触力模型

如图1所示, r_1 、 r_2 分别表示套筒和销轴的半径,其差为间隙 c ,即 $c = r_1 - r_2$; r_1^0 、 r_2^0 分别为套筒和销轴的位置向量,则偏心向量为 $e_{xy} = r_2^0 - r_1^0$,撞入深度为 $\delta = |e_{xy}| - c$,销轴和套筒的运动接触条件为 $\delta \geq 0$ 。

在做间隙机构动力学特性分析时,需要计算接触力。为了计算销轴与套筒的接触力,需要建立一个能表示碰撞速度、两碰撞体的材料特性、接触时表面特征的分析模型。这里运用赫兹接触模型,考虑阻尼产生的能量损失来建立接触力模型^[5],

$$F_n = F_k + F_d = K\delta^n + D\dot{\delta}, \quad (1)$$

式中: F_k 为弹性力; F_d 为能量损耗; K 为刚度因子; D 为阻尼系数。由于是金属接触,力指数 n 通常取值为1.5^[6]。

半径为 r_1 、 r_2 的两个圆内接触,刚度系数定义为

$$K = \frac{4}{3(\sigma_1 + \sigma_2)} \left[\frac{r_1 r_2}{r_1 - r_2} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

材料参数 σ_1 、 σ_2 定义为 $\sigma_i = (1 - \nu_i^2)/E_i$ ($i = 1, 2$),式中 ν_i 为材料的泊松系数; E_i 为材料的弹性模量。阻尼系数 D 表示为 $D = \eta\delta^n$,其中阻尼因子

收稿日期:2011-09-08;修订日期:2011-10-13

基金项目:河南省基础与前沿技术研究资助项目(112300410038)

作者简介:陈江义(1974-),男,湖北仙桃人,郑州大学副教授,博士,研究领域:机械CAD技术、结构动力学、超声无损检测技术等,E-mail: cjj1974@zzu.edu.cn

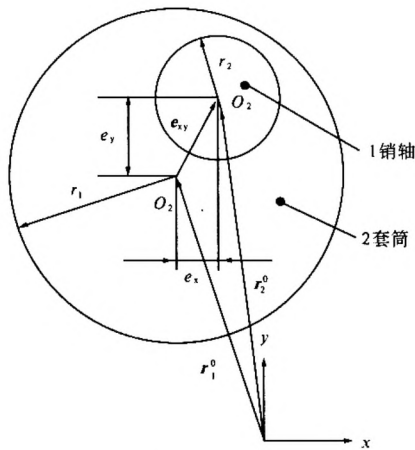


图 1 含间隙的铰链示意图

Fig.1 Revolute joints with clearance

$\eta^{[7]}$ 可由能量损失求得,为

$$\eta = \frac{3K(1 - e^2)}{4 \delta^{(-)}}. \tag{3}$$

将式(3)代入式(1)中得到考虑阻尼的法向接触力为

$$F_n = K\delta^n \left[1 + \frac{3(1 - e^2)}{4} \frac{\delta}{\delta^{(-)}} \right]. \tag{4}$$

1.2 修正的库仑摩擦力模型

通常描述的摩擦力大小是两物体的正压力与摩擦系数的乘积,方向是相对运动趋势反方向的库仑摩擦力,它在描述动摩擦时比较准确.在两物体由静摩擦到动摩擦转变的过程中,只是用简单的一个阶跃函数来表示滑动速度和摩擦系数的关系,因此它对静摩擦的描述是不准确的. ADAMS 中描述摩擦力采用了修正的摩擦力模型,如图 2 所示. 它考虑了静摩擦、库仑摩擦和黏滞摩擦,弥补了库仑摩擦不能准确描述静摩擦到动摩擦过程中摩擦力的情况.

模型中的参数:

$$\begin{aligned} \mu(-V_s) &= \mu_s, \mu(V_s) = -\mu_s, \mu(0) = 0, \\ \mu(-V_d) &= \mu_d, \mu(V_d) = -\mu_d, \\ \mu(V) &= -\text{sign}(V) \cdot \mu_d \quad \text{for}(|V| > V_d); \\ \mu(V) &= -\text{step}(|V|, V_d, \mu_d, V_s, \mu_s) \cdot \text{sign}(V) \\ &\text{for}(V_s \leq |V| \leq V_d); \\ \mu(V) &= \text{step}(V, -V_s, \mu_s, V_s, -\mu_s) \\ &\text{for}(-V_s < V < V_s). \end{aligned}$$

式中: V 表示两物体在接触点的相对滑动速度; μ_s 为静摩擦系数; μ_d 为滑动摩擦系数; V_s 为最大静摩擦系数时的相对滑动速度; V_d 为最大动摩擦系

数时的相对滑动速度.

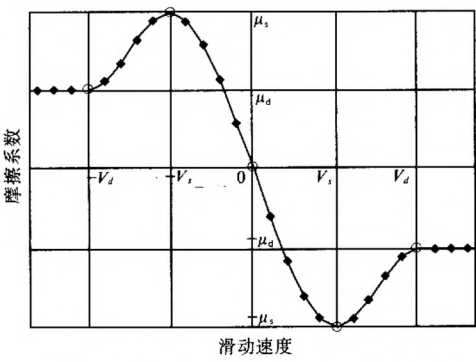


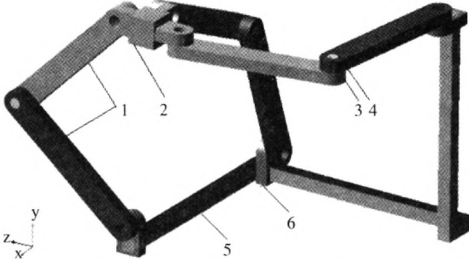
图 2 相对滑动速度与摩擦系数的关系图

Fig.2 Relations of slip velocity and friction coefficient

3. 含铰链间隙 3-RRRT 并联机构的动力学分析

3.1 3-RRRT 并联机构

图 3 所示为 ADAMS 环境下 3-RRRT 并联机构模型^[1],材料为钢,表 1 为钢的材料属性. 这一机构由固定平台、3 条支链和动平台组成. 3 条支链两两正交,每一条支链由一个移动副、3 个铰链和 2 个杆件组成,且铰链轴线和移动副轴线平行. 现在考虑支链中两手臂间铰链的间隙对机构系统性能的影响. 为方便分析,在两手臂的连接部位用销轴和套筒联接,并将一个手臂与销轴固定,另一个手臂与套筒固定. 在此机构中 3 个移动副为驱动副,匀速运动且速度为 1 m/s.



1. 手臂 2. 动平台 3. 销轴 4. 套筒 5. 固定平台 6. 支座

图 3 3-RRRT 并联机构模型

Fig.3 Model of 3-RRRT parallel mechanism

表 1 钢的材料参数

Tab.1 Material properties of steel	
材料参数	数值
弹性模量/GPa	207
泊松比	0.29
密度/(kg · m ⁻³)	7 801

3.2 机构的动力学分析

根据含间隙铰链的动力学模型计算得到的参数并参考常用的参数,可以得到 ADAMS 中接触力模型所需要的参数,如表 2 所示.设仿真时间为 0.2 s,步数为 300 步.

表 2 ADAMS 中接触力模型所需参数

Tab.2 Parameters of contact model in ADAMS

参数	值
刚度因子/(N/mm ^{-3/2})	2.676×10^6
阻尼系数/(N·s·mm ⁻¹)	12 000
恢复系数	0.9
撞入深度/mm	0.1
动摩擦系数	0.16
静摩擦系数	0.23

3-RRRT 并联机构在运动初始时销轴和套筒的形心距离为零,随着运动的进行和间隙的影响,销轴和套筒的形心就会作圆周运动并产生相应的碰撞.由图 4 可以看出,铰链间隙为 0.2 mm 和 0.4 mm 时移动平台形心加速度的变化规律几乎一致;但机构的接触力却大不相同,随着间隙的增大,接触频率增大,振幅也增大.但是无论间隙有多大,接触情况都是由剧烈振动向平稳状态过渡;并且间隙的存在对动平台的速度没有任何影响.

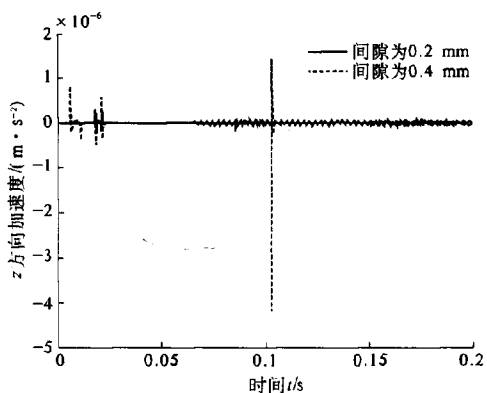
图 4 是考虑 3-RRRT 并联机构的任意一条支链上存在铰链间隙的情况.图 5 是考虑 3-RRRT 并联机构的 3 条支链上都存在铰链间隙的情况,且间隙均为 0.2 mm.从图 5 中可以看到,当并联机构的 3 条支链上都存在铰链间隙时,动平台的加速度会在初始阶段有一个很大的冲击,然后就恢复为零;但机构的接触力不会很快恢复到零,而是经过往复接触才逐渐回复到平稳状态.

3 结论

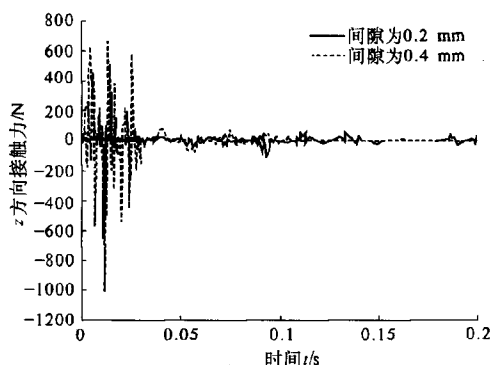
从两方面对 3-RRRT 并联机构进行分析,一方面比较了机构任意一条支链存在不同间隙时动平台的系统性能,另一方面分析了机构 3 条支链都存在间隙时的性能.

(1)若机构中只有一条支链中存在铰链间隙,则间隙越大,接触频率越大,振幅也越大,但是无论间隙有多大,接触情况都是由剧烈振动到平稳状态过渡;并且间隙的存在对动平台的速度没有任何影响.

(2)通过对比机构中只有一条支链上存在铰链间隙和 3 条支链上都存在铰链间隙的情况,可以得出有间隙的铰链越多机构受到的接触力越大,



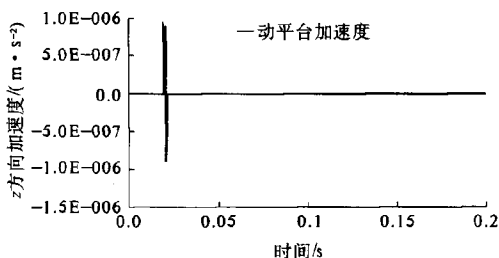
(a) 动平台形心的加速度



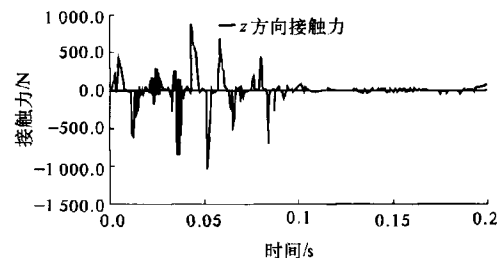
(b) 机构的接触力

图 4 y 轴方向上支链存在不同铰链间隙时机构的性能

Fig.4 Mechanism's performance with different clearances in the chain along y axis



(a) 动平台形心的加速度



(b) 机构的接触力

图 5 3 条支链均存在铰链间隙时机构的性能

Fig.5 Mechanism's performance with three chains' clearance being 0.2mm

冲击越大,机构的运动越容易受到影响.因此,在设计和分析并联机构时一定要考虑间隙的影响,并且在分析机构的动力学性能时一定要全面考虑,从整体出发.

参考文献:

- [1] LANG Yen-ping, CHANG Lai-chi. Dynamic modeling and control of a 3k-DOF Cartesian parallel manipulator [J]. *Mechatronics*, 2009, 19(3): 390 - 398.
- [2] BAUCHAU O A, RODRIGUEZ J. Modeling of joints with clearance in flexible multibody systems[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2002, 39(1): 41 - 63.
- [3] 王华杰. 基于虚拟样机技术的含间隙转动铰建模与动力学仿真[J]. *机械设计与制造*, 2010, 30(11): 64 - 67.
- [4] ZHAO Yang, BAI Zheng-feng. Dynamics analysis of space robot manipulator with joint clearance[J]. *Acta Astronautica*, 2010(68): 1147 - 1155.
- [5] SHIVASWAMY S. Modeling contact forces and energy dissipation during impact in multibody mechanical systems[D]. Wichita: Wichita State University, 1997.
- [6] SCHWAB A L, MEIJJAARD J P, Meijers P. A comparison of revolute joint clearance models in the dynamic analysis of rigid and elastic mechanical systems [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2002, 37(9): 895 - 913.
- [7] FLORES P, AMBROSIO J A. Study on dynamics of mechanical systems including joints with clearance and lubrication[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2006(41): 247 - 261.

Dynamic Analysis of Parallel Mechanism with Clearance Revolute Joint

CHEN Jiang-yi¹, HAO Xue-qing¹, YU Qi-hui²

(1. School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on the ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) simulation software platform, with the 3-RRRT parallel mechanism as the research object and the Coulomb's friction into consideration, the contact force model of joint with clearance is established by using the nonlinear equivalent spring-damp model. After simulating the model, comparing the dynamic characteristic of parallel mechanism which uses ideal joint use clearance joint, simultaneously comparing the dynamic characteristics of parallel mechanism with clearance in one chain with that in three chains, we have the result that shows that the clearance affects the acceleration of moving platform and mechanism' contact force, so clearance should be considered when designing the mechanism.

Key words: parallel mechanism; joint; clearance; dynamic characteristics