DOI: 10.3901/JME.2019.03.099

考虑含间隙关节的漂浮基空间机械臂 动力学输出特性研究*

谷勇霞¹ 张玉玲² 赵杰亮² 阎绍泽²

(1. 北京工商大学材料与机械工程学院 北京 100048;

2. 清华大学机械工程系 北京 100084)

摘要: 研究关节间隙对漂浮基空间机械臂动力学特性的影响对设计空间站机械臂具有重要意义。采用 Lankarani-Nikravesh 接触力表达式建立了考虑摩擦的含间隙关节模型;应用 Lagrange 方程和含间隙关节模型建立了含间隙的漂浮基空间机械臂动力学模型。数值模拟分析了间隙关节数量和不同间隙尺寸对漂浮基空间机械臂动力学输出特性的影响,并定量分析了间隙对漂浮基空间机械臂动力学输出的影响程度。结果表明,两个含间隙关节的耦合作用导致关节接触碰撞力剧烈变化,引起漂浮基空间机械臂的动力学输出更加剧烈;关节的间隙尺寸值越大,漂浮基空间机械臂动力学输出的波动幅值越大,但波动频率会随着间隙值的增大而减小,降低了空间机械臂的运动精度。该研究可为解决多个含间隙关节的漂浮基空间机械臂的高精度轨迹控制问题提供重要的理论依据。

关键词: 间隙尺寸; 间隙数量; 漂浮基空间机械臂; 动力学特性

中图分类号: TH113

Dynamic Characteristics of Free-floating Space Manipulator with Joint Clearance

GU Yongxia¹ ZHANG Yuling² ZHAO Jieliang² YAN Shaoze²

(1. School of Material and Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048;

2. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: The influence of joint clearance on the dynamic characteristics of the free-floating space manipulator is of great significance to the design of the space station manipulator. The joint model with clearance and friction is established by the Lankarani-Nikravesh contact force expression and the dynamic model of free-floating space manipulator with clearance is derived by using the Lagrange equation. The dynamic output characteristics is analyzed by numerical simulation in consideration of the number of joints with clearance and different clearance sizes and the influence of the clearance on the dynamic output characteristics of the free-floating manipulator is studied quantitatively. The results show that the coupling effect of the double joints with clearance leads to the dramatic change of the contact forces, which causes the dynamic output of the free-floating space manipulator to be more intense. The dynamic output of the free-floating space manipulator fluctuates more violently with the larger clearance size, but the fluctuation frequency decreases, which seriously reduces the motion accuracy of space manipulator. This study provides the important basis for the high precision trajectory control of free-floating space manipulator with multiple joints with clearance.

Key words: clearance size; number of clearance joints; free-floating space manipulator; dynamic characteristics

0 前言

随着宇航技术的发展,迫切需要空间机械臂能够在释放、回收卫星以及空间站的在轨装配、维修

等方面发挥重要的作用^[1],空间机械臂多样化和精细化的操作任务对其工作精度和可靠性提出了更高的要求。但在太空环境下,空间机械臂系统处于自由漂浮状态,其载体和机械臂之间存在强烈的动力学耦合行为,载体的位姿将随着机械臂的运动发生变化,这严重影响机械臂的定位精度和运动稳定性^[2]。另一方面,由于加工误差和装配误差等因

* 国家自然科学基金(11272171),摩擦学国家重点实验室自主研究课题(SKLT2014B06)资助项目。20180415 收到初稿,20181112 收到修改稿

素的存在,空间机械臂的关节中往往存在间隙,关节间隙会导致机械臂运动过程中出现冲击响应,并诱发结构振动,不仅加速了空间机械臂关节的磨损,还会影响机械臂的正常运行和精确控制^[3-4]。

由于关节间隙会导致机械臂产生大幅度低频振动,增加系统动力学响应的复杂度^[5-6],为此,一些学者研究了间隙对机械臂动力学特性的影响,但早期的研究主要针对含单一间隙关节的机械臂。ZHAO 等^[7]基于非线性弹簧阻尼模型和库伦摩擦模型建立了含单一间隙关节的漂浮基空间机械臂动力学模型,并分析了间隙对空间机械臂动力学特性的影响。CHAKER 等^[8]采用旋量法建立了含间隙和制造误差的球面并联机器人运动方程,指出关节间隙和制造误差会对机器人姿态误差产生线性影响。卢剑伟等^[9]基于集中质量法建立了考虑齿侧间隙的机械臂动力学模型,研究表明间隙引起的运动误差是影响机械臂定位误差的主要因素。上述间隙的研究主要基于单个关节,而实际空间机械臂系统包含多个关节,各关节中均存在间隙,机械臂在运动过程中各关节的间隙相互耦合使系统的振动更为复杂,导致系统不稳定^[10]。因此,同时考虑多个关节间隙对空间机械臂动力学特性的综合影响具有重要意义。MUVENGEI 等^[11]和 ABDALLA 等^[12]分析了含多关节间隙的曲柄滑块机构动力学特性,指出多关节间隙会严重降低系统的性能。FLORES 等^[13]建立了含多关节间隙的平面多体系统动力学模型,并分别分析了单关节间隙和多关节间隙对系统动力学的影响,结果表明多关节间隙系统的振动明显加剧。

虽然有学者对多关节间隙的系统动力学特性进行了研究,但主要针对地面系统,对位于卫星等漂浮基上含多关节间隙的空间机械臂的研究较少,目前针对漂浮基空间机械臂等无根系统的研究主要集中于轨迹规划^[14-15]、轨迹控制^[16-18]及轨迹优化^[19-20]等问题,关节间隙对漂浮基空间机械臂动力学特性影响的研究尚不完善。为此,本文采用 Lankarani-Nikravesh 接触力模型和库伦摩擦定律,建立了间隙关节模型;结合 Lagrange 方程和动量守恒定理建立了含间隙关节的漂浮基空间机械臂动力学模型,分析了关节间隙参数变化对漂浮基空间机械臂动力学性能的影响。

1 理想关节的漂浮基空间机械臂动力学模型

如图 1 所示^[21],漂浮基空间机械臂一般包括漂

浮基载体、主臂和精细臂。将联结漂浮基载体与主臂、主臂与精细臂的关节较视为理想关节较,对整个漂浮基空间机械臂进行运动学分析。 O 为整个系统的质心,以 O 为原点建立全局坐标系 OXY , O_0 为漂浮基载体的质心, x_0 为 O_0 到 O_1 的连线方向, x_1 、 x_2 分别为主臂和精细臂的对称轴; e_i 为沿 x_i 轴正方向的基矢($i=0,1,2$); l_0 为 O_0 和 O_1 之间的距离, l_1 、 l_2 分别为主臂和精细臂的长度; θ_0 为 x_0 轴相对于 X 轴的转角, θ_1 为 x_1 轴相对于 X 轴的转角, θ_2 为 x_2 轴相对于 X 轴的转角;漂浮基载体、主臂和精细臂的质量分别为 m_0 、 m_1 、 m_2 转动惯量分别为 J_0 、 J_1 、 J_2 ; r_0 为漂浮基质心相对于全局坐标系原点的矢径, r_1 、 r_2 分别为主臂和精细臂的质心 O_{C1} 、 O_{C2} 相对于惯性坐标系原点的矢径。

图 1 漂浮基空间机械臂运动分析图

根据系统各部分几何位置关系,主臂和精细臂在质心 O_{C1} 、 O_{C2} 处的矢径可表示为^[21]

$$r_1 = r_0 + l_0 e_0 + \frac{1}{2} l_1 e_1 \quad (1)$$

$$r_2 = r_0 + l_0 e_0 + l_1 e_1 + \frac{1}{2} l_2 e_2 \quad (2)$$

式中, $e_0 = [\cos \theta_0 \quad \sin \theta_0]^T$, $e_1 = [\cos \theta_1 \quad \sin \theta_1]^T$, $e_2 = [\cos \theta_2 \quad \sin \theta_2]^T$ 。

对式(1)和式(2)分别求一阶导数可得

$$\dot{r}_1 = \dot{r}_0 + l_0 \dot{e}_0 + \frac{1}{2} l_1 \dot{e}_1 \quad (3)$$

$$\dot{r}_2 = \dot{r}_0 + l_0 \dot{e}_0 + l_1 \dot{e}_1 + \frac{1}{2} l_2 \dot{e}_2 \quad (4)$$

不考虑重力的影响,在不受外力的条件下,整个系统的动量守恒。结合动量守恒和第二类 lagrange 方程可得载体姿态受控、位置不受控的漂浮基空间机械臂动力学方程为^[21]

$$M(\theta) \ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} = Q \quad (5)$$

式中, $\theta = [\theta_0 \quad \theta_1 \quad \theta_2]^T$ 为系统的广义坐标, $M(\theta)$ 为 3×3 正定对称的质量矩阵, $C(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta}$ 为包含科氏力、离心力的 3 阶列矢量, $Q = (-\tau_1 \quad \tau_1 - \tau_2 \quad \tau_2)^T$ 为

系统的广义力列矢量。其中矩阵 $\mathbf{M}$ 和 $\mathbf{C}$ 的非零元素为

$$\begin{aligned} M_{11} &= \sum_i m_i L_{i0}^2 + J_0 + J_1 + J_2 \\ M_{12} &= M_{21} = \sum_i m_i L_{i0} L_{i1} \cos(\theta_0 - \theta_1) + J_1 + J_2 \\ M_{13} &= M_{31} = \sum_i m_i L_{i0} L_{i2} \cos(\theta_0 - \theta_2) + J_2 \\ M_{22} &= \sum_i m_i L_{i1}^2 + J_1 + J_2 \\ M_{23} &= M_{32} = \sum_i m_i L_{i1} L_{i2} \cos(\theta_1 - \theta_2) + J_2 \\ M_{33} &= \sum_i m_i L_{i2}^2 + J_2 \\ C_{12} &= -\sum_i m_i L_{i0} L_{i1} \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1 - \theta_0) \\ C_{13} &= -\sum_i m_i L_{i0} L_{i2} \dot{\theta}_2 \sin(\theta_2 - \theta_0) \\ C_{21} &= \sum_i m_i L_{i0} L_{i1} \dot{\theta}_0 \sin(\theta_1 - \theta_0) \\ C_{23} &= -\sum_i m_i L_{i1} L_{i2} \dot{\theta}_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) \\ C_{31} &= \sum_i m_i L_{i0} L_{i2} \dot{\theta}_0 \sin(\theta_2 - \theta_0) \\ C_{32} &= \sum_i m_i L_{i1} L_{i2} \dot{\theta}_1 \sin(\theta_2 - \theta_1) \end{aligned}$$

其中, $i=0,1,2$, $L_{00} = -(m_1 + m_2)l_0/m$, $L_{01} = -(\frac{1}{2}m_1 + m_2)l_1/m$, $L_{02} = -\frac{1}{2}m_2l_2/m$, $L_{10} = L_{00} + l_0$, $L_{11} = L_{01} + \frac{1}{2}l_1$, $L_{12} = L_{02}$, $L_{20} = L_{00} + l_0$, $L_{21} = L_{01} + l_1$, $L_{22} = L_{02} + \frac{1}{2}l_2$ 。

2 考虑关节间隙的漂浮基空间机械臂动力学模型

2.1 关节间隙的接触力模型

关节间隙模型见图 2, 其中 OXY 为全局坐标系,

图 2 关节间隙模型

O_b 、 O_j 分别为轴套与轴的几何中心点, r_b^o 、 r_j^o 分别为轴套与轴的几何中心点在全局坐标系中的位置矢量, e 为轴套与轴的偏心距矢量。

根据关节运动过程中轴套与轴的几何位置关系, 参考文献[22]中关节间隙数学模型的建立方法, 可得轴套与轴在整个碰撞过程中的接触力为

$$\mathbf{F}_b = F_n \mathbf{n} + F_t \mathbf{t} \quad (6)$$

式中, $\mathbf{t}$ 为轴套与轴接触时的切向单位矢量, 其方向为法向单位矢量 $\mathbf{n}$ 逆时针旋转 90° , $\mathbf{F}_b$ 为轴套在接触点受到的接触力。根据牛顿第三定律, 轴在接触点受到的接触力为

$$\mathbf{F}_j = -\mathbf{F}_b \quad (7)$$

为便于计算, 将轴套与轴受到的接触力分别移到轴套与轴的几何中心点, 产生的力矩为

$$\mathbf{M}_p = (X_{Qp} - X_{Op})F_{py} - (Y_{Qp} - Y_{Op})F_{px} \quad (p=b, j) \quad (8)$$

式中, X_{Qp} 、 Y_{Qp} 为接触点处的位置坐标在 X 和 Y 方向的投影, X_{Op} 、 Y_{Op} 为几何中心点的位置坐标在 X 和 Y 方向的投影, F_{px} 、 F_{py} 为对应的接触力在 X 和 Y 方向的投影。

为了正确描述轴套与轴的接触碰撞过程, 关节间隙的接触碰撞模型需要考虑轴套和轴的材料性质、几何特征及运动状态等因素^[7]。有学者指出当 Lankarani-Nikravesh 接触力模型中的指数在 $1 \sim 1.5$ 之间时, 该模型可以精确描述转动副构件间的接触碰撞力^[23]。因此本文采用 Lankarani-Nikravesh 接触力模型来描述轴套与轴之间的接触碰撞力, 该模型的显示表达式为^[24]

$$F_n = K\delta^m + D\dot{\delta} \quad (9)$$

式中, K 为刚度系数, 反映了接触体的材料性质和几何特征, 其表达式为

$$K = \frac{4}{3(\sigma_b + \sigma_j)} \left[\frac{R_b R_j}{R_b - R_j} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

式中, R_b 、 R_j 分别为轴套与轴的半径,

$\sigma_p = \frac{1 - \mu_p^2}{\pi E_p}$ ($p=b, j$) 为与材料性质相关的参数, 其中

E 和 μ 分别为材料的弹性模量与泊松比。式(10)中 δ 为轴套与轴的相对刺穿深度, D 为碰撞阻尼系数, 其表达式为

$$D = \frac{3K(1 - c_e^2)\delta^m}{4\dot{\delta}_0} \quad (11)$$

式中, c_e 为碰撞恢复系数, 一般接近于 1, $\dot{\delta}_0$ 为初始碰撞速度, 对于金属材料指数 m 通常取 1.5。

在轴套与轴接触碰撞的过程中,轴套与轴沿接触点切线方向存在相对运动或相对运动的趋势,因此需要对碰撞过程中产生的切向摩擦力进行描述。文中采用式(12)的库伦摩擦力对轴套与轴碰撞过程中产生的摩擦力进行描述。

$$F_t = -\mu_t F_n \frac{v_t}{|v_t|} (|v_t| > 0) \quad (12)$$

式中, μ_t 为滑动摩擦因数, v_t 为轴套与轴的切向相对运动速度。结合式(9)和式(12)可计算出式(6)、式(7)表示的接触力。

2.2 考虑单关节间隙的漂浮基空间机械臂动力学模型

将联结漂浮基载体与主臂、主臂与精细臂的关节分别视为理想关节和含间隙关节,并将第 2.1 节中的接触力模型引入到式(5)理想关节的漂浮基空间机械臂动力学模型中,可建立含一个关节间隙(单关节间隙)的漂浮基空间机械臂动力学模型。含间隙关节的运动过程可分为“自由飞行”和“接触碰撞”两个运动状态,因此含间隙的漂浮基空间机械臂系统为变拓扑结构系统,间隙接触力的变化与系统的拓扑结构变化密切相关。

(1) 当关节间隙的运动状态保持为“自由飞行”时,此时的间隙接触力为零,则含间隙的漂浮基空间机械臂动力学模型为

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{F} \quad (13)$$

式中, $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 为漂浮基空间机械臂的惯量阵, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}$ 为科氏力列阵, $\mathbf{F}(\mathbf{q}) = [-\tau_1 \quad \tau_1 - \tau_2 \quad \tau_2 \quad 0 \quad 0]^T$ 为广义力列阵, $\mathbf{q} = [\theta_0 \quad \theta_1 \quad \theta_2 \quad x_j \quad y_j]^T$ 为包含描述关节间隙运动的广义坐标,其中 x_j 、 y_j 为轴的几何中心 O_j 在全局坐标系 OXY 中的投影。

(2) 当关节间隙的运动状态保持为“接触碰撞”时,此时存在间隙接触力,则含间隙的漂浮基空间机械臂动力学模型为

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{F} + \mathbf{F}_c \quad (14)$$

式中, $\mathbf{F}_c = [F_{c1} \quad F_{c2} \quad F_{c3} \quad F_{c4} \quad F_{c5}]$ 为包含法向碰撞力和径向摩擦力,在广义坐标 $\mathbf{q}$ 下的广义力列阵。其中矩阵 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 和 $\mathbf{F}_c$ 的非零元素为

$$\begin{aligned} M_{11} &= \sum_{i=0}^1 m_i L_{i0}^2 + J_0 \\ M_{12} &= M_{21} = \sum_{i=0}^1 m_i L_{i0} L_{i1} \cos(\theta_0 - \theta_1) \\ M_{13} &= M_{31} = \sum_{i=0}^1 m_i L_{i0} L_{i2} \cos(\theta_0 - \theta_2) \end{aligned}$$

$$M_{14} = M_{14} = -\sum_{i=0}^1 m_i L_{i1} L_{i0} \sin \theta_0$$

$$M_{15} = M_{51} = \sum_{i=0}^1 m_i L_{i1} L_{i0} \cos \theta_0$$

$$M_{22} = \sum_{i=0}^1 m_i L_{i1}^2 + J_1$$

$$M_{23} = M_{32} = \sum_{i=0}^1 m_i L_{i1} L_{i2} \cos(\theta_1 - \theta_2)$$

$$M_{24} = M_{42} = -\sum_{i=0}^1 m_i L_{i1} L_{i1} \sin \theta_1$$

$$M_{25} = M_{52} = \sum_{i=0}^1 m_i L_{i1} L_{i1} \cos \theta_1$$

$$M_{33} = \sum_{i=0}^1 m_i L_{i2}^2 + J_2 + \frac{1}{4} m_2 l_2^2$$

$$M_{34} = M_{43} = -\left(\sum_{i=0}^1 m_i L_{i1} L_{i2} + \frac{1}{2} m_2 l_2\right) \sin \theta_2$$

$$M_{35} = M_{53} = \left(\sum_{i=0}^1 m_i L_{i1} L_{i2} + \frac{1}{2} m_2 l_2\right) \cos \theta_2$$

$$M_{44} = M_{55} = \sum_{i=0}^1 m_i L_{i1}^2 + m_2$$

$$C_{12} = \sum_{i=0}^1 m_i L_{i0} L_{i1} \dot{\theta}_1 \sin(\theta_0 - \theta_1)$$

$$C_{13} = \sum_{i=0}^1 m_i L_{i0} L_{i2} \dot{\theta}_2 \sin(\theta_0 - \theta_2)$$

$$C_{21} = \sum_{i=0}^1 m_i L_{i0} L_{i1} \dot{\theta}_0 \sin(\theta_1 - \theta_0)$$

$$C_{23} = \sum_{i=0}^1 m_i L_{i1} L_{i2} \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2)$$

$$C_{31} = \sum_{i=0}^1 m_i L_{i0} L_{i2} \dot{\theta}_0 \sin(\theta_2 - \theta_0)$$

$$C_{32} = \sum_{i=0}^1 m_i L_{i1} L_{i2} \dot{\theta}_1 \sin(\theta_2 - \theta_1)$$

$$C_{41} = -\sum_{i=0}^1 m_i L_{i1} L_{i0} \dot{\theta}_0 \cos \theta_0$$

$$C_{42} = -\sum_{i=0}^1 m_i L_{i1} L_{i1} \dot{\theta}_1 \cos \theta_1$$

$$C_{43} = -\left(\sum_{i=0}^1 m_i L_{i1} L_{i1} + \frac{1}{2} m_2 l_2\right) \dot{\theta}_2 \cos \theta_2$$

$$C_{51} = -\sum_{i=0}^1 m_i L_{i1} L_{i0} \dot{\theta}_0 \sin \theta_0$$

$$C_{52} = -\sum_{i=0}^1 m_i L_{i1} L_{i1} \dot{\theta}_1 \sin \theta_1$$

$$C_{43} = -\left(\sum_{i=0}^1 m_i L_{i1} L_{i1} + \frac{1}{2} m_2 l_2\right) \dot{\theta}_2 \sin \theta_2$$

$$\begin{aligned}
F_{c1} &= -F_{bx}(L_{00} + l_0)\sin\theta_0 + \\
&F_{by}(L_{00} + l_0)\cos\theta_0 - M_b \\
F_{c2} &= -F_{bx}(L_{01} + l_1)\sin\theta_1 + \\
&F_{by}(L_{01} + l_1)\cos\theta_1 + M_b - M_j \\
F_{c3} &= -F_{bx}L_{02}\sin\theta_2 + F_{by}L_{02}\cos\theta_2 + M_j \\
F_{c4} &= F_{bx}L_0 + F_{jx} \\
F_{c5} &= F_{by}L_0 + F_{jy}
\end{aligned}$$

式中, $L_{00} = -m_1 l_0 / (m_0 + m_1)$, $L_{01} = -\frac{1}{2} m_1 l_1 / (m_0 + m_1)$, $L_{02} = -\frac{1}{2} m_2 l_2 / (m_0 + m_1)$, $L_{10} = L_{00} + l_0$, $L_{11} = L_{01} + \frac{1}{2} l_1$, $L_{12} = L_{02}$, $L_0 = L_1 = -m_2 / (m_0 + m_1)$ 为系统惯性参数的组合。

2.3 考虑双关节间隙的漂浮基空间机械臂动力学模型

研究中将联结漂浮基载体与主臂、主臂与精细臂的关节均视为含间隙关节(图 3), 各关节间隙仍采用第 2.1 节中的接触力模型, 同样应用 2.2 节中的建模方法将各间隙关节的接触力模型引入到式(5)理想关节的漂浮基空间机械臂动力学模型中, 可建立含两个关节间隙(双关节间隙)的漂浮基空间机械臂动力学模型。

图 3 考虑双关节间隙的漂浮基空间机械臂简化模型

在对含间隙的漂浮基空间机械臂动力学模型进行数值仿真时, 为计算不同关节间隙运动状态下的间隙接触力, 需要精确判断“自由飞行”和“接触碰撞”两个运动状态的切换点。根据关节间隙铰的运动学分析可知, 当轴套与轴接触时, 轴套与轴的相对穿刺深度 $\delta(q, t)$ 发生改变, 因此可将 $\delta(q, t)$ 作为关节间隙运动状态切换的判断条件, 即

$$\begin{cases} \delta(q, t) < 0 & \text{轴套与轴未接触} \\ \delta(q, t) = 0 & \text{轴套与轴开始接触} \\ \delta(q, t) > 0 & \text{轴套与轴接触碰撞} \end{cases} \quad (15)$$

由于轴套与轴的碰撞时间极短, 为准确计算出

式(15)描述的运动状态转换时刻, 避免数值仿真求解困难, 仿真过程采用变步长数值积分算法, 即在轴套与轴未接触时, 采用较大的时间步长进行计算; 在轴套与轴接触碰撞时, 采用较小的时间步长进行计算。为保证精度要求, 在仿真过程中还需定义刺穿阈值 $\delta_{\max}$, 使轴套与轴的相对刺穿深度满足 $|\delta(q, t)| \leq \delta_{\max}$ 。

3 数值模拟分析

为分析间隙对漂浮基空间机械臂动力学特性的影响, 表 1、表 2 分别给出了漂浮基空间机械臂的惯性参数和关节间隙的仿真参数。仿真过程中, 设置关节驱动力矩 $\tau_1 = 0.2\sin(2\pi t)$, $\tau_2 = 0.05\sin(2\pi t)$, 仿真时长为 3 s。仿真初始时刻, 漂浮基空间机械臂处于水平位置, 各关节角速度均为 0。

表 1 漂浮基空间机械臂的惯性参数

i	质量 m_i/kg	转动惯量 $J_i/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$
0	1 738	3315
1	2.70	0.15
2	0.80	0.10

表 2 漂浮基空间机械臂关节间隙的仿真参数

弹性模量 E/GPa	68.95
泊松比 μ	0.30
碰撞恢复系数 c_e	0.90
摩擦因数 μ_t	0.10
初始碰撞速度 $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.005

图 4 和图 5 分别给出了间隙为 0.1 mm 时含双关节间隙的漂浮基空间机械臂关节间隙铰 1 和间隙铰 2 产生的碰撞力随时间的变化曲线。由图可知, 碰撞力 1 和碰撞力 2 随时间变化呈现脉冲式波动, 说明间隙的存在使机械臂在运动过程中不断发生高频接触碰撞, 导致关节处产生较大的碰撞力, 这是漂浮基空间机械臂系统产生振动的主要原因, 严重影响系统的稳定性。

图 4 碰撞力 1 随时间的变化曲线

图5 碰撞力2随时间的变化曲线

3.1 含间隙关节数量对动力学输出特性的影响

为保证空间机械臂在执行任务过程中的运动精度,实际工程中需要对机械臂末端的轨迹加以控制,因此有必要研究精细臂的动力学输出特性。仿真结果对精细臂在不同关节间隙数量下的动力学输出特性进行了分析,其中图6~8分别给出了间隙为0.1 mm时精细臂在不同关节间隙数量下转角、角速度及角加速度随时间的变化曲线。

图6 不同间隙数量下精细臂转角的变化曲线

图7 不同间隙数量下精细臂角速度的变化曲线

从图6~8可知,在单关节间隙和双关节间隙条件下,精细臂的转角变化曲线相对比较平稳,角速度曲线出现阶梯状波动,角加速度曲线呈现脉冲特

图8 不同间隙数量下精细臂角加速度的变化曲线

性,原因在于关节中的轴套与转轴接触碰撞时,产生的碰撞力作用于连接构件,使角速度和角加速度发生改变,当轴套与转轴脱离接触时,连接构件只受到驱动力矩的影响,此状态下角加速度很小,由于一次碰撞时间极短,因此整个过程中角速度发生锯齿状的变化,而角加速度呈现出脉冲特性。与理想关节相比,含单关节间隙和双关节间隙的精细臂转角、角速度及角加速度幅值均增大,且双关节间隙条件下的幅值明显大于单关节间隙。双关节间隙下角速度和角加速度响应更加复杂,其波动剧烈程度远大于单关节间隙,原因在于双关节间隙存在自由飞行-自由飞行、自由飞行-接触碰撞、接触碰撞-自由飞行、接触碰撞-接触碰撞四种状态,不同状态下关节接触碰撞力的耦合作用导致关节接触碰撞力剧烈变化,引起精细臂的动力学输出更加剧烈。

3.2 间隙尺寸对动力学输出特性的影响

为了进一步分析间隙对漂浮基空间机械臂动力学输出特性的影响,仿真结果对不同间隙尺寸下精细臂的动力学输出进行了分析。图9~11分别给出

(a) 单关节间隙

图 9 不同间隙尺寸下精细臂转角的变化曲线

了单关节间隙和双关节间隙下间隙尺寸为 0 mm、0.05 mm、0.1 mm、0.5 mm 时精细臂的转角、角速度及角加速度随时间的变化曲线。

图 10 不同间隙尺寸下精细臂角速度的变化曲线

图 11 不同间隙尺寸下精细臂角加速度的变化曲线

由图 9a、图 9b 和图 10a、图 10b 单关节间隙和双关节间隙下精细臂的转角和角速度曲线可知, 间隙的存在导致转角和角速度幅值增大, 但二者的幅值并不随着间隙尺寸的增加而增大, 其中双关节间隙下精细臂的转角和角速度最大值分别为 0.680 7 rad、0.70 rad/s, 大于单关节间隙下的转角 0.187 6 rad 和角速度 0.1489 rad/s。由图 11a 和图 11b 发现, 随着间隙尺寸的增加, 角加速度曲线的波动幅值明显增加, 说明角加速度对间隙尺寸的变化比较敏感。不同间隙尺寸下, 角加速度曲线仍然呈现脉冲特性, 且间隙尺寸越大, 抖动越剧烈, 但抖动频率减小, 这是由于间隙尺寸越大, 接触碰撞力越大, 但接触碰撞次数减少。另外, 双关节间隙下的角加速度幅值是单关节间隙的 7 倍左右, 且相同尺寸下的抖动频率大于单关节间隙, 主要由于双关节间隙存在两个关节间隙接触力的耦合作用, 导致其角加速度响应远比单关节间隙复杂, 这进一步反双关节间隙抖动剧烈程度明显强于单关节间隙, 加剧了系统的

稳定性。

根据文献[7]含单关节间隙的漂浮基空间机械臂动力学特性研究结果,间隙存在与间隙尺寸大小对空间机械臂的角位移影响很小,对角速度和角加速度影响较大,使二者出现明显波动,尤其是角加速度出现脉冲式的振荡,幅值明显增加。这一研究结果与本文中含单关节间隙的漂浮基空间机械臂动力学输出结果相吻合。目前对含多关节间隙的漂浮基空间机械臂动力学特性研究较少,但根据[13,25]等已有文献中含多关节间隙的地面多体系统动力学研究发现,多关节间隙的存在使关节碰撞力增大,从而导致关节角速度和角加速度等动力学输出波动更为剧烈。这些研究不仅为含间隙系统的建模提供理论基础,也在一定程度上反映了文中多关节建模的正确性,未能反映漂浮基模式下的含多关节间隙的空间机械臂动力学特性。由于漂浮基空间机械臂的载体和机械臂之间存在强烈的动力学耦合,含多关节间隙的建模比较复杂,但是含多关节间隙的漂浮基空间机械臂更接近实际工况,因此本文的研究对于设计高精度空间机械臂提供了一定理论依据。

4 间隙对动力学输出影响的定量分析

从前面分析可以发现,含间隙关节数量和尺寸对漂浮基空间机械臂动力学输出影响较大,使系统的动力学输出发生不同程度的抖动,其中角加速度抖动的剧烈程度明显大于角速度和转角。为了定量分析间隙对漂浮基空间机械臂动力学输出的影响,定义反映角加速度抖动程度的指标 R ,其表达式为

$$R(c) = \frac{\Delta\alpha}{\Delta t} \quad (16)$$

式中, $\Delta\alpha$ 为不同间隙条件下角加速度的最大值与最小值之差; Δt 为对应间隙条件下角加速最大值与最小值的时间差。 $R(c)$ 为量纲一指标,反映了漂浮基空间机械臂动力学输出抖动剧烈程度, $R(c)$ 越大,表明动力学输出抖动越剧烈。为定量分析含间隙关节数量和间隙尺寸分别对漂浮基空间机械臂动力学输出的影响,结合前面的仿真结果,表 3 和表 4 分别给出了不同含间隙关节数量和不同间隙尺寸下的 R 大小。

表 3 不同含间隙关节数量下的指标 R

名称	最大值/ ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$)	最小值/ ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$)	时间差/s	指标 R
理想关节	0.026	-0.026	0.500	0.104
单关节间隙	176.700	-91.640	0.516	520.040
双关节间隙	800.000	-800.000	0.001	1 600 000.000

表 4 不同间隙尺寸下的指标 R (单关节)

间隙尺寸/mm	最大值/ ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$)	最小值/ ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$)	时间差/s	指标 R
0	0.026	-0.026	0.500	0.104
0.05	105.400	-195.100	1.230	300.500
0.1	176.700	-91.640	0.516	520.040
0.5	390.800	-286.500	1.600	423.310

由表 3、4 不同含间隙关节数量和不同间隙尺寸下的指标 R 大于 1 可知,含间隙关节的漂浮基空间机械臂动力学输出抖动剧烈程度远大于理想关节系统。表 3 中双关节间隙的指标为 1 600 000.000,几乎是单关节间隙指标的 3 076.686 倍,说明双关节间隙下的抖动剧烈程度是单关节间隙的 3 076.686 倍左右。由表 4 可知,随着间隙尺寸的增大,对应的指标也随之增大,当间隙尺寸由 0.05 mm 增大到 0.1 mm 时,对应 R 值由 300.500 增加到 520.040,增加了 73.058%,说明角加速度的抖动剧烈程度增加了 73.058%;当间隙尺寸由 0.1 mm 增大到 0.5 mm 时,对应的 R 值由 520.040 减小到 423.310,即角加速度的抖动程度有所减小,原因在于当间隙尺寸较大时,虽然角加速度的抖动范围增大,但抖动频率减小,角加速度的抖动程度会出现减弱的现象。说明随着间隙尺寸的增大,漂浮基空间机械臂动力学输出的抖动程度呈现先增强后减弱的趋势。

5 结论

本文采用 Lankarani-Nikravesh 接触力模型和库伦摩擦模型对机械臂关节间隙模型进行描述,结合 lagrange 方程和动量守恒原理分别建立了理想的零间隙关节、一个含间隙关节和两个含间隙关节的漂浮基空间机械臂动力学模型,并对不同动力学模型的仿真结果进行了对比分析,进而定量研究了间隙对漂浮基空间机械臂动力学输出的影响程度,为多个含间隙关节的漂浮基空间机械臂高精度轨迹控制问题提供重要的理论依据。

(1) 不同含间隙关节数量下的漂浮基空间机械臂动力学研究表明,间隙存在时,精细臂的转角变化曲线相对比较平稳,角速度曲线出现阶梯状波动,角加速度曲线呈现脉冲特性。与理想关节相比,含单关节间隙和双关节间隙的精细臂转角、角速度及角加速度幅值均增大,但双关节间隙条件下的幅值明显大于单关节间隙。另外,双关节间隙之间的耦合作用导致关节接触碰撞力剧烈变化,使双关节间隙下的动力学输出响应更加复杂,引起精细臂的动力学输出更加剧烈。

(2) 不同间隙尺寸下的漂浮基空间机械臂动力学研究表明,随着间隙尺寸的增大,精细臂的转角和角速度幅值几乎不变,角加速度的幅值逐渐增加,即角加速度对间隙尺寸的变化比较敏感,且间隙尺寸越大,抖动越剧烈,但抖动频率减小。双关节间隙的耦合作用导致动力学输出更加复杂,使双关节间隙下的角加速度幅值是单关节间隙的7倍左右,且相同尺寸下的抖动频率大于单关节间隙。说明双关节间隙不仅使动力学输出的抖动加剧,而且增加了系统的抖动频率,降低系统的稳定性。

(3) 通过定量分析间隙对漂浮基空间机械臂的动力学输出的影响可得,双关节间隙的动力学输出振动剧烈程度是单关节间隙的3 076.676倍左右;随着关节间隙尺寸的增大,漂浮基空间机械臂的动力学输出抖动程度呈现先增强后减弱的趋势。

参 考 文 献

- [1] YOSHIDA K. Achievements in space robotics[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2009, 16(4): 20-28.
- [2] ZHANG F, FU Y, QU J, et al. Robust adaptive control of a free-floating space robot system in cartesian space[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2015, 12: 1-11.
- [3] XIANG W W K, YAN S Z, WU J N. A comprehensive method for joint wear prediction in planar mechanical systems with clearances considering complex contact conditions[J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(1): 86-96.
- [4] 阎绍泽, 向吴维凯, 黄铁球. 计及间隙的运动副和机械系统动力学研究进展[J]. 北京大学学报, 2016, 52(4): 741-755.
YAN Shaoze, XIANG Wuweikai, HUANG Tieqiu. Advances in modeling of clearance joints and dynamics of mechanical systems with clearances[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2016, 52(4): 741-755.
- [5] XIANG W, YAN S, WU J, et al. Complexity evaluation of nonlinear dynamic behavior of mechanisms with clearance joints by using the fractal method[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2014, 228(18): 3482-3495.
- [6] DONG P, YANG Z, YUE Z, et al. Dynamic modeling and analysis of space manipulator considering the flexible of joint and link[C]//Advanced Materials Research. Trans Tech. Publications, 2013, 823: 270-275.
- [7] ZHAO Y, BAI Z F. Dynamics analysis of space robot manipulator with joint clearance[J]. Acta Astronautica, 2011, 68(7): 1147-1155.
- [8] CHAKER A, MLIKAA, LARIBI M A, et al. Clearance and manufacturing errors' effects on the accuracy of the 3-RCC spherical parallel manipulator[J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2013, 37: 86-95.
- [9] 卢剑伟, 陈昊, 孙晓明, 等. 考虑减速机构间隙的机械臂动力学建模分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(15): 15-21.
LU Jianwei, CHEN Hao, SUN Xiaoming, et al. Dynamic modeling and analysis of robot arm with consideration of clearance in gear reducer[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(15): 15-21.
- [10] MEGAHED S M, HAROUN A F. Analysis of the dynamic behavioral performance of mechanical systems with multi-clearance joints[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2012, 7(1): 1-11.
- [11] MUVENGEI O, KIHU J, IKUA B. Dynamic analysis of planar rigid-body mechanical systems with two-clearance revolute joints[J]. Nonlinear Dynamics, 2013, 73(1-2): 259-273.
- [12] ABDALLAH M A B, KHEMILI I, AIFAOU N. Numerical investigation of a flexible slider-crank mechanism with multijoints with clearance[J]. Multibody System Dynamics, 2016, 38(2): 173-199.
- [13] FLORES P, LANKARANI H M. Dynamic response of multibody systems with multiple clearance joints[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2012, 7(3): 1-13.
- [14] ZHOU C, JIN M H, LIU Y C, et al. Singularity robust path planning for real time base attitude adjustment of free-floating space robot[J]. International Journal of Automation and Computing, 2017, 14(2): 169-178.
- [15] HUANG X H, JIA Y H, XU S J. Path planning of a free-floating space robot based on the degree of controllability[J]. Science China Technological Sciences, 2017, 60(2): 251-263.
- [16] YU X, CHEN L. Modeling and observer-based augmented adaptive control of flexible-joint free-floating space manipulators[J]. Acta Astronautica, 2015, 108: 146-155.
- [17] 于潇雁, 陈力. 漂浮基柔性两杆空间机械臂基于状态观测器的鲁棒控制及振动控制[J]. 机械工程学报, 2016, 52(15): 28-35.
YU Xiaoyan, CHEN Li. Observer based robust control and vibration control for a free-floating flexible space manipulator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(15): 28-35.
- [18] RYBUS T, SEWERYN K, SASIADEK J Z. Control system for free-floating space manipulator based on

- nonlinear model predictive control (NMPC)[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2017, 85(3-4): 491-509.
- [19] ZHANG Q, JI L, ZHOU D, et al. Nonholonomic motion planning for minimizing base disturbances of space manipulators based on multi-swarm PSO[J]. Robotica, 2017, 35(4): 861-875.
- [20] WANG M, LUO J, FANG J, et al. Optimal trajectory planning of free-floating space manipulator using differential evolution algorithm[J]. Advances in Space Research, 2018, 61(6): 1525-1536.
- [21] 梁捷, 陈力. 漂浮基空间机械臂姿态与末端爪手协调运动的模糊变结构滑模控制[J]. 福州大学学报, 2008, 36(5): 698-703.
- LIANG Jie, CHEN Li. Fuzzy variable structure sliding-mode control for coordinated motion of spacecraft attitude and its manipulator[J]. Journal of Fuzhou University, 2008, 36(5): 698-703.
- [22] 游斌弟, 潘冬, 赵阳. 关节铰间隙对漂浮基星载天线扰动研究[J]. 宇航学报, 2010, 31(10): 2251-2258.
- YOU Bindi, PAN Dong, ZHAO Yang. Research on disturbance of joint with clearance on free-floating satellite antenna[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(10): 2251-2258.
- [23] KOSHY C S, FLORES P, LANKARANI H M. Study of the effect of contact force model on the dynamic response of mechanical systems with dry clearance joints: Computational and experimental approaches[J]. Nonlinear Dynamics, 2013, 73(1-2): 325-338.
- [24] LANKARANI H M, NIKRAVESH P E. A contact force model with hysteresis damping for impact analysis of multibody systems[J]. Journal of Mechanical Design, 1990, 112(3): 369-376.
- [25] YANG L, ZHANG X, HUANG Y. Dynamic analysis of open-loop mechanisms with multiple spatial revolute clearance joints[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2018: 0954406218757810.
-
- 作者简介: 谷勇霞(通信作者), 女, 1968 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为机械动力学。
E-mail: guyx@th.btbu.edu.cn