

含旋转副间隙的空间可展开机械手动态特性研究

雷远航 何亚银 陈礼军 赵永强 任志贵 王军利

(陕西理工大学 机械工程学院, 汉中 723000)

摘要:【目的】为研究旋转副间隙对空间可展机构动态特性的影响,设计了一种空间剪叉式可展开机械手。【方法】建立旋转副间隙数学模型,基于IMPACT函数的接触力模型对含旋转副间隙的空间机械手进行动力学仿真,分析间隙大小、恢复系数、间隙位置和间隙数量等因素对其展开过程动态特性的影响。【结果】结果表明,间隙大小在0.02~0.04 mm、所选择材料的恢复系数在0.4~0.8时,展开过程相对稳定;越远离执行件的位置,旋转副间隙对执行件的动态特性越大;间隙数量增加会使机械手展开过程中振动频率增大,影响其展开过程的稳定性。因此,选择合适的参数和材料至关重要。研究结果可为空间可展开机械手的研究与机构优化提供参考。

关键词: 旋转副间隙; 动力学仿真; 动态特性; 空间可展开机构

中图分类号: TH122 **DOI:** 10.16578/j.issn.1004.2539.XXXX.XX.001

0 引言

随着航空航天事业的发展,空间捕获的任务越来越多,各国对于空间机械手的需求非常大,不管是空间站的维护搭建、对接,还是对太空垃圾、陨石的回收,都需要用到具有不同功能的空间机械手。空间机械手作为空间站组装、卫星捕获与维修等任务的核心执行机构,使其具备高精度、高可靠性的运动性能至关重要。然而,在高低温交替、真空辐照、微重力等长期极端空间环境作用下,机械手关节的旋转副因磨损、热变形或制造误差产生的运动副间隙会被显著放大,导致末端执行器定位精度下降、关节振动加剧甚至系统失稳,严重影响空间机械手的服役寿命与任务可靠性。

在机械手结构设计方面,王汝贵等^[1]基于象鼻卷起和伸展两种姿态,设计了一种螺旋形空间折展机构,并且进行了尺寸优化。韩博等^[2]提出了一种单驱动空间可展开桁架式捕获机械手,使用剪叉变胞单元和同步铰链连接,可以在展开至特定位置时从线性伸展转变为平台翻转,从而完成目标捕获动作。曹启迪^[3]设计了一种新型三棱柱桁架式可展开机械手,并采用螺旋理论对展开过程、抓取动作及随动机构自由度进行了理论分析;系统由3组对称布置的

相同手指模块组成,通过协同工作,可实现高效可靠的抓取功能。

在间隙对机构特性影响方面,金国光等^[4]基于平面六杆机构,使用冲击函数模型,对含有多个间隙与柔性连杆的六杆机构进行动力学模拟仿真,研究了间隙数量、间隙位置等因素对系统动力学性能的影响。白争锋等^[5]建立含间隙和不确定参数的柔性机械臂动力学模型,提出了一种非概率可靠性计算方法,并且验证了其有效性。邱雪松等^[6]以可展太阳帆板为研究对象,通过建立多间隙柔性动力学模型,探究了多间隙和柔性对帆板质心加速度、铰链间隙碰撞力等参数的影响。李金玉^[7]针对实际机构中存在的旋转副间隙和移动副间隙,分析两种间隙混合作用下机构的动态特性,用理论分析与试验研究相结合的方法,研究了混合间隙对机构动力学特性的影响。王铁成等^[8]以曲柄滑块机构为研究对象,建立旋转副间隙和移动副间隙的动力学模型,分析了混合间隙对该系统动力学特性的影响。时兵等^[9]提出一种考虑误差的旋转副间隙建模方法,建立了包含构件误差的变间隙动力学模型,描述了铰接副的相对运动学关系和非线性碰撞特性。Miao等^[10]针对空间机械臂展开过程,建立了含间隙关节的多体系统数学

收稿日期: 2025-06-17 修回日期: 2025-07-21

基金项目: 陕西省自然科学未来新兴产业领域重点研发计划(2025CY-YBXM-019); 陕西省科技厅基金项目(2024NC-YBXM-203)

作者简介: 雷远航,男,2001年生,陕西宝鸡人,硕士研究生; 主要研究方向为空间可展开机构; 1795528174@qq.com。

何亚银(通信作者),女,1975年生,陕西蒲城人,教授,工学硕士; 主要研究方向是机械设计及理论、机械动力学; heyayin@21cn.com。

引用格式: 雷远航,何亚银,陈礼军,等.含旋转副间隙的空间可展开机械手动态特性研究[J].机械传动,XXXX,XX(X):1-10.

LEI Yuanhang, HE Yayin, CHEN Lijun, et al. Dynamic characterization of spatially deployable manipulator with rotating pair clearance[J]. Journal of Mechanical Transmission, XXXX, XX(X):1-10.



免费获取

模型, 以此为基础, 系统研究了间隙特性对2自由度空间机械臂系统动态性能和运动稳定性的影响。Marques等^[11]提出一种考虑摩擦效应的球铰间隙机构动力学建模与分析方法, 以含间隙球铰副的空间四连杆机构为研究对象, 系统探究了不同摩擦模型、间隙尺寸及摩擦因数对机构动力学的影响规律。

综上所述, 现有研究多集中于平面机构, 如平面六杆机构、曲柄滑块机构或单一类型空间结构的间隙影响分析, 针对空间剪叉式可展开机械手这一特定机构的研究较少。本文将剪叉机构的紧凑折叠展开特性与空间机械手的需求相结合, 设计了含多旋转副的剪叉式展开单元, 并创新性地引入凸轮分离机构, 以期解决空间抓取中的接触干涉问题。该结构设计既保留了剪叉机构轻量化的优势, 又针对性适配了空间环境下的抓取任务, 填补了含间隙剪叉式结构在空间机械手动态特性研究中的空白; 同时, 研究了不同间隙半径、不同恢复系数、不同间隙位置和不同间隙数量对该空间机构动态特性的影响。

1 旋转副间隙理论

在机械原理中, 理想运动副通常被假设为没有任何摩擦、间隙或弹性变形的, 完全按照理论运动的连接方式。但是在实际机械系统中, 为了满足特定的运动需求, 设计时通常会在轴与轴承之间预留一定的预设间隙, 这类通过工程计算主动设置的间隙被称为规则间隙; 在长期运行过程中, 由于磨损等原因则会逐渐产生非规则间隙, 其会随运行时间动态累积, 可能引发振动、噪声甚至运动精度失效。

1.1 旋转副间隙数学模型

旋转副间隙的数学描述^[12-16]如图1所示。

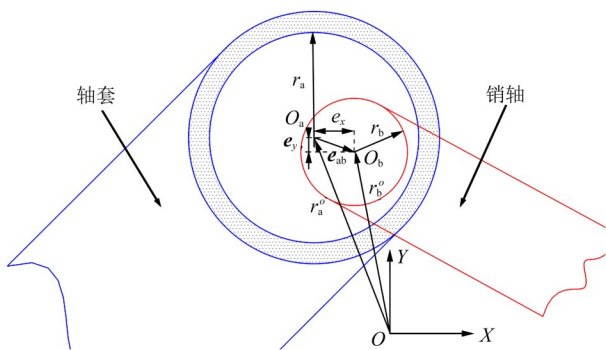


图1 旋转副间隙模型

Fig. 1 Model of the rotary sub gap

图1中, r_a 和 r_b 分别为轴套和销轴的半径; r_a^o 和 r_b^o 分别为 O_a 和 O_b 在坐标系 XOY 中的位置向量。因此, 可以将间隙用向量表示为

$$\mathbf{e}_{ab} = \mathbf{r}_b^o - \mathbf{r}_a^o \quad (1)$$

其大小可以表示为

$$e_{ab} = \sqrt{e_x^2 + e_y^2} \quad (2)$$

式中, e_x 和 e_y 分别为 \mathbf{e}_{ab} 在 X 方向和 Y 方向的分量。

容易得出, \mathbf{e}_{ab} 的单位向量为

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{e}_{ab}}{e_{ab}} \quad (3)$$

如图2所示, 当轴套和销轴发生碰撞时, 碰撞点为点 q_i 和点 q_j , 则接触变形 δ 可表示为

$$\delta = e_{ab} - c \quad (4)$$

式中, c 为间隙半径, 即轴套和销轴的半径差。

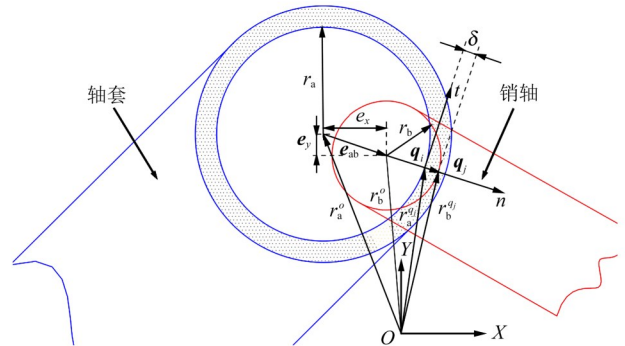


图2 旋转副间隙碰撞示意图

Fig. 2 Schematic diagram of rotating sub gap collision

当 $\delta \geq 0$ 时, 发生碰撞的碰撞点 q_i 和 q_j 的位置可分别表示为

$$\mathbf{r}_a^{q_i} = \mathbf{r}_a^o + r_a \cdot \mathbf{n} \quad (5)$$

$$\mathbf{r}_b^{q_j} = \mathbf{r}_b^o + r_b \cdot \mathbf{n} \quad (6)$$

对式(5)、式(6)进行1阶求导, 可得碰撞点 q_i 和 q_j 的速度分别为

$$\dot{\mathbf{r}}_a^{q_i} = \dot{\mathbf{r}}_a^o + r_a \cdot \dot{\mathbf{n}} \quad (7)$$

$$\dot{\mathbf{r}}_b^{q_j} = \dot{\mathbf{r}}_b^o + r_b \cdot \dot{\mathbf{n}} \quad (8)$$

将碰撞速度投影到平面上, 得到碰撞点的相对切向速度和相对法向速度, 如图3所示。

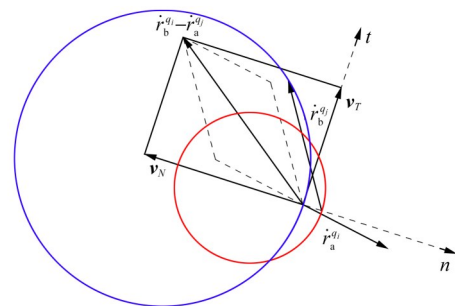


图3 碰撞点速度矢量

Fig. 3 Velocity vector at the collision point

将式(7)、式(8)所得碰撞速度分解到法向和切向, 得法向相对速度 \mathbf{V}_N 、切向相对速度 \mathbf{V}_T 分别为

$$\mathbf{V}_N = (\dot{\mathbf{r}}_b^{q_j} - \dot{\mathbf{r}}_a^{q_i})^T \cdot \mathbf{n} \quad (9)$$

$$\mathbf{V}_T = (\dot{\mathbf{r}}_b^{q_j} - \dot{\mathbf{r}}_a^{q_i})^T \cdot \mathbf{t} \quad (10)$$

式中, 切向单位向量 \mathbf{t} 可由法向单位向量 \mathbf{n} 逆时针旋转 90° 得到。

碰撞点处的接触碰撞力 $\mathbf{F}^{[17-18]}$ 由法向力 \mathbf{F}_n 和切向力 \mathbf{F}_t 组成, 将 \mathbf{F} 向 X 方向和 Y 方向投影, 其受力如图 4 所示。

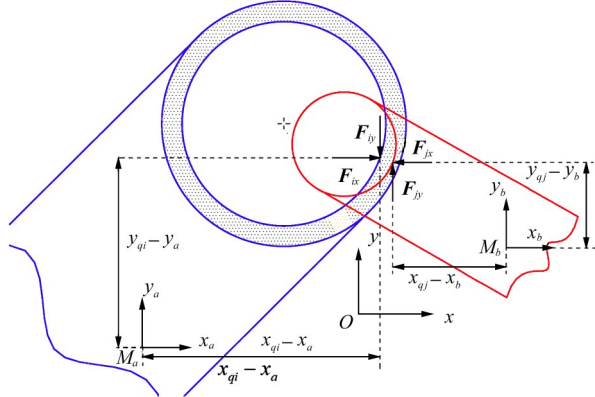


图 4 碰撞点受力矢量图解

Fig. 4 Vector diagram of the force on collision points

图 4 中, M_a 和 M_b 分别为构件 a 和构件 b 的质心。作用在构件 a 质心上的碰撞力和力矩分别为

$$\mathbf{F}_a = \mathbf{F}_n + \mathbf{F}_t \quad (11)$$

$$\alpha_a = -(y_{qi} - y_a)\mathbf{F}_{ix} - (x_{qi} - x_a)\mathbf{F}_{iy} \quad (12)$$

同理, 作用在构件 b 质心上的碰撞力和力矩分别为

$$\mathbf{F}_b = -\mathbf{F}_a \quad (13)$$

$$\alpha_b = (y_{qi} - y_b)\mathbf{F}_{jx} - (x_{qi} - x_b)\mathbf{F}_{jy} \quad (14)$$

1.2 接触力模型

动力学仿真采用基于 IMPACT 函数的接触力模型^[19-20], 用于模拟物体间的瞬态碰撞行为。IMPACT 函数是一种非线性的弹簧和阻尼力函数, 基于两个部件之间的距离来决定是否存在作用力; 该模型通过非线性弹簧-阻尼机制描述接触力的动态响应, 结合几何参数与材料特性, 适用于多体系统中的弹性碰撞仿真。

当两物体接触时, 定义穿透深度 δ 为几何干涉量 ($\delta \leq 0$ 表示无接触, $\delta > 0$ 表示发生穿透)。接触力 T 的表达式为

$$T = \begin{cases} 0, & \delta \leq 0 \\ F_t + C\dot{\delta} \cdot \text{STEP}(\delta, 0, 0, d, 1), & \delta > 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中, F_t 为材料的弹性恢复力, $F_t = k\delta^n$, 其中 k 为刚度系数, n 为力指数; $C\dot{\delta} \cdot \text{STEP}(\delta, 0, 0, d, 1)$ 用于描述碰撞能量耗散, 其中 C 为阻尼系数, $\dot{\delta}$ 为穿透速度。

STEP 函数可以实现阻尼系数在穿透深度 $\delta \in [0, d]$ 内的平滑过渡, 避免数值突变, 其表达式为

$$\text{STEP}(\delta, 0, 0, d, 1) = \begin{cases} 0, & \delta \leq 0 \\ 3(\delta/d)^2 - 2(\delta/d)^3, & 0 < \delta < d \\ 1, & \delta \geq d \end{cases} \quad (16)$$

式中, 刚度系数 k 由 Hertz 接触理论确定, $k = \frac{4}{3}E^*\sqrt{R^*}$, 其中, $E^* = (\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2})^{-1}$ 为等效弹性模量; $R^* = (\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2})^{-1}$ 为等效曲率半径, R_1 、 R_2 分别为两接触体的曲率半径, 凸面为正, 凹面为负; E_i 、 v_i 、 R_i 分别为接触体材料弹性模量、泊松比及曲率半径。

Hertz 接触理论为弹性体间的静态接触力学行为提供了经典解析方法, 是 Adams 等动力学软件中非线性接触力模型的理论基础。Hertz 理论的基本假设: ①材料特性。接触体为均匀、各向同性的线弹性材料。②几何条件。接触区域远小于物体尺寸, 表面光滑无摩擦。③接触类型。静态或准静态接触, 忽略动态效应。

接触半径 β 为

$$\beta = \sqrt[3]{\frac{3T_n R^*}{4E^*}} \quad (17)$$

式中, T_n 为法向接触力。

最大接触压力 p_0 为

$$p_0 = \frac{3T}{2\pi\beta^2} \quad (18)$$

穿透深度 δ 为

$$\delta = \frac{\beta^2}{R^*} = \sqrt[3]{\frac{9T^2}{16R^*(E^*)^2}} \quad (19)$$

力与位移的关系为

$$T = \frac{4}{3}E^*\sqrt{R^*} \cdot \delta^{1.5} \quad (20)$$

式(20)表明, 接触力与位移的 1.5 次方成正比, 从而奠定了动力学仿真中 IMPACT 函数弹性项 kx^e ($e = 1.5$) 的理论基础。

由 Hertz 接触理论可知, 当构件 a 和构件 b 碰撞时, 刚度系数为

$$k = \frac{4}{3(\xi_a + \xi_b)} \sqrt{\frac{R_a R_b}{R_a - R_b}} \quad (21)$$

式中, ξ_a 和 ξ_b 为碰撞体材料参数, 与各自的弹性模量和泊松比有关, 可分别表示为

$$\xi_a = \frac{1-v_a^2}{E_a} \quad (22)$$

$$\xi_b = \frac{1-v_b^2}{E_b} \quad (23)$$

2 空间可展开机械手模型建立

剪刀机构 (Scissor Lift Mechanism) 是一种常见的机械结构, 主要用于实现垂直升降运动。其在空间机械手的设计中展现出独特潜力, 其紧凑的交叉连杆结构通过展开与折叠实现伸缩运动, 适用于对轻

量化、高刚性和可收纳性要求苛刻的太空环境。

2.1 可展开机械手结构设计

本文所设计的空间可展开机械手由多个剪叉机构展开单元组成。优势在于结构简单、可靠性好、稳定性高。该机械手具有折叠和展开两种状态。如图5所示,在其运输过程或存放时主要为折叠状态;机械手工作时则为展开状态。

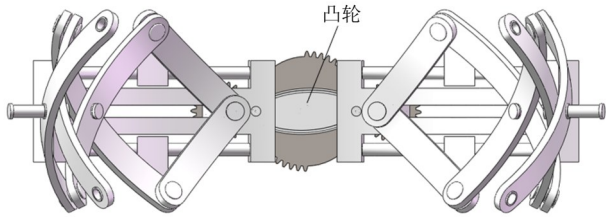


图5 机械手总体设计

Fig. 5 Overall design of the robotic arm

为确保机械手在伸展作业时避免与抓取物发生接触干涉,本设计在两机架间增设了凸轮分离机构,如图6所示。该机构通过凸轮轮廓的精确控制,在机械手伸展过程中使两机架产生40 mm的径向分离位移,从而可有效消除摩擦风险,保护抓取物和机械手本体免受接触损伤。在机械手基本展开单元伸展的同时,机架会在凸轮的传动下分开,其分开的尺寸范围为0~40 mm,则机械手夹持圆柱物体的尺寸范围为260~300 mm。

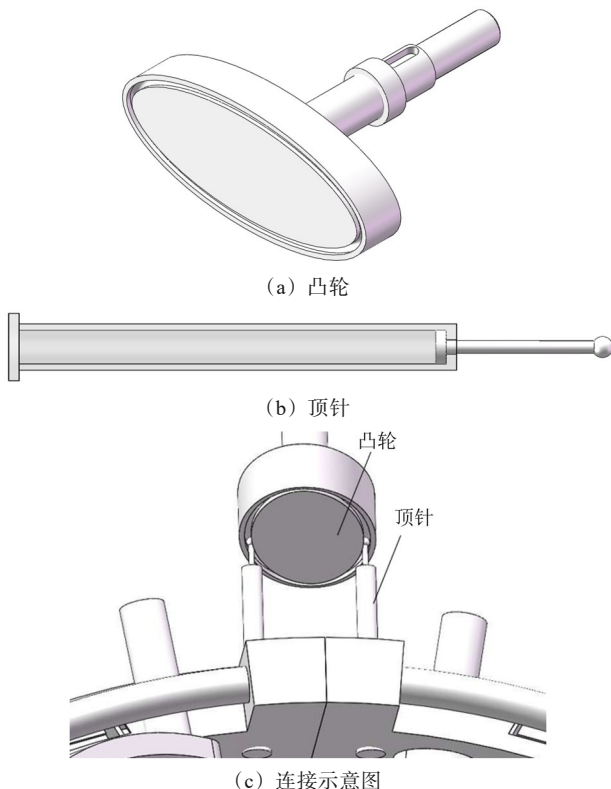


图6 凸轮及顶针结构设计图

Fig. 6 Structural design diagram of cam and thimble

凸轮顶针具有伸缩变化的特性。由图6可知,顶针前端设计为一个圆球,可以直接卡在凸轮槽中,保证顶针在随凸轮运动过程中配合紧密不脱落;后端固定于机械手机架上,起定位作用。

2.2 基本展开单元设计

如图7所示,基本展开单元由1个主动件和3个从动件的弯曲板件组成。1个基本展开单元构成了1个剪叉机构,机械手的手爪部分由多个同样的剪叉机构组成。根据该设计,主动件在电动机的带动下做一定角度的旋转运动,各个从动件在主动件的传动下依次运动,从而实现机械手爪的折叠和伸展运动。

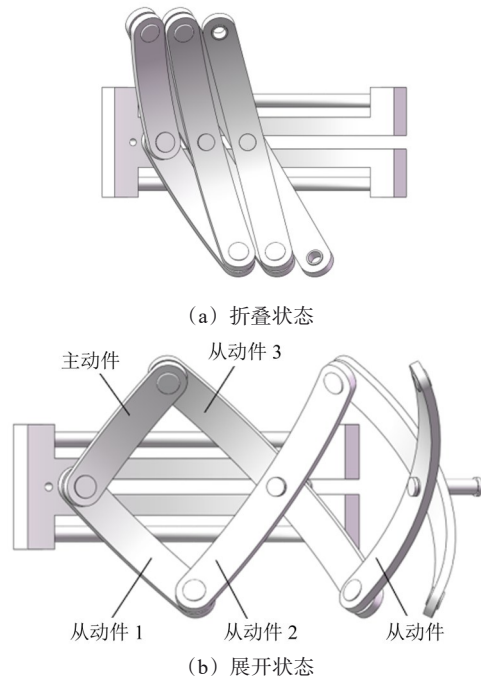


图7 机械手基本展开单元折叠和展开状态

Fig. 7 Folding and unfolding state of the basic unfolding unit of the manipulator

根据图8进行基本展开单元零件的设计计算。

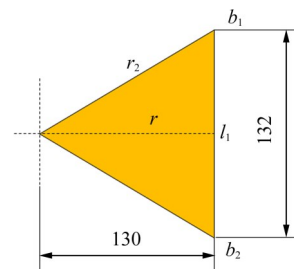


图8 展开单元设计草图

Fig. 8 Design sketch of the unfolded unit

图8中, b_1 、 b_2 两点表示在机械手在抓取过程中,一个基本展开单元与抓取物的接触点; r 为抓取物半径; l_1 为机械手抓取单元的竖直距离; r_2 为展开单元中主动件的半径。可得

$$r_2 = \sqrt{r^2 + \left(\frac{l_1}{2}\right)^2} \quad (24)$$

主动件是一个弯曲的板状零件, 一端有轴, 用于连接联轴器和电动机, 另一端的孔用于连接其他零件。达到抓取位置时旋转角度为 $\theta_1=50^\circ$, 其初始位置与竖直方向夹角为 $\theta_2=15^\circ$, 弯折角度为 $\theta_3=17^\circ$ 。根据投影关系可得其弦长为

$$l_3 = \frac{l_1/2}{\cos(\theta_1 - \theta_2)\cos\theta_3} \quad (25)$$

弦心距 d 为

$$d = \sqrt{r_2^2 - \left(\frac{l_3}{2}\right)^2} \quad (26)$$

图9为展开零件参数示意图, 其具体数值如表1所示。

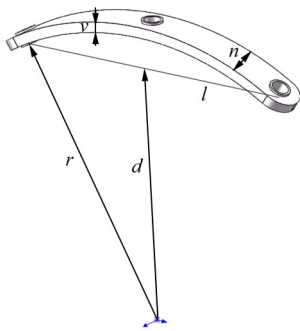


图9 展开单元参数示意图

Fig. 9 Schematic diagram of unfolded units' parameters

表1 展开单元主要参数

Tab. 1 Main parameters of the unfolded unit

零件名称	半径 r/mm	弦心距 d/mm	宽度 n/mm	厚度 v/mm
主动件	147	140	20	5
从动件1	151	140	20	5
从动件2	147	120	20	5
从动件3	151	120	20	5

上述4个零件共同组成了第一个展开单元, 后续展开单元均由从动件2和从动件3连接构成。

2.3 含间隙的空间机械手虚拟样机模型

针对上述模型, 主动件和从动件1之间的 D 点为圆柱副, 并且在此处添加旋转驱动使其匀速展开; A 、 B 、 C 处都为旋转副, 通过改变连接件轴和孔的直径

来保证旋转副处的间隙。虚拟样机模型如图10所示。

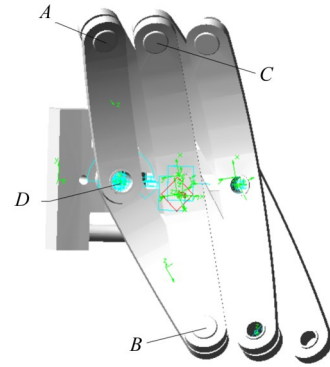


图10 空间机械手虚拟样机模型

Fig. 10 Space manipulator virtual prototype model

为了使所研究的间隙对机构的影响更符合实际, 利用碰撞接触模型, 并考虑了摩擦因数, 采用库仑摩擦模型。碰撞接触参数为: 刚度系数 $K = 1.0 \times 10^8 \text{ N/mm}$; 力指数 $n = 2.2$; 阻尼系数 $D = 1.0 \times 10^4 \text{ N}\cdot\text{s/mm}$; 切入深度 $\delta = 1.0 \times 10^{-4} \text{ mm}$; 摩擦模型中的参数为: 静摩擦因数 $\mu_s = 0.3$; 动摩擦因数 $\mu_d = 0.1$; 静滑移速度 $v_s = 0.1 \text{ mm/s}$; 动滑移速度 $v_d = 1.0 \text{ mm/s}$ 。

3 含旋转副间隙的空间机械手动态特性分析

本文在对不同间隙半径、恢复系数、间隙位置和间隙数量进行分析时, 采用动力学分析软件对含间隙空间机械手进行仿真, 分析机构从动杆的速度、加速度等动态特性。

3.1 间隙半径对机构运动学特性的影响

在实际的机械设计中, 由于制造误差、装配公差或者磨损等原因, 旋转副的两个构件之间不可能完全紧密配合, 会有一定的间隙。这个间隙会导致磨损加剧, 产生额外的振动或噪声, 甚至影响机构的寿命。考虑精度与合理范围后, 取旋转副 A 处的间隙半径分别为 0.007 mm 、 0.01 mm 、 0.02 mm 、 0.04 mm 、 0.05 mm , 其他参数保持不变。旋转副 A 处在不同间隙半径下的动态特性曲线如图11所示。

图11可知, 旋转副 A 处间隙半径分别为 0.007 mm 和 0.05 mm 时, 因为旋转副内碰撞次数和频率增大, 从动杆速度和加速度波动频率都比较大; 间隙半径为 $0.02 \sim 0.04 \text{ mm}$ 时, 从动杆速度曲线与理想状态下大部分重合, 加速度相对趋于稳定。

由旋转副间隙数学模型中穿透深度计算式(4)可知, 间隙半径 c 增大时, 轴套与销轴的最大可能穿透深度 δ 增大; 由接触力计算式(15)可知, δ 增大导致弹性恢复力 F 和阻尼力 F_z ($F_z = C\dot{\delta}$) 的幅值及变化率显著提升; 由Hertz理论[式(20)]可知, 接触力随 δ 非线性增长, 导致仿真中速度、加速度波动加剧。当 $c =$

0.02~0.04 mm时, δ 处于合理范围, 接触力与能量耗散平衡, 故动态特性稳定。

综上, 旋转副间隙半径越大, 机构展开过程中从动杆的速度和加速度波动的幅值与频率就越大, 波动的持续时间也随之增大, 导致对机构的冲击加剧。所以, 间隙半径大小是影响机构运动学特性的重要因素。因此, 需要在满足精度和可动性的条件下调整间隙半径, 减少旋转副间隙引起的不良动态行为。

3.2 恢复系数对机构运动学特性的影响

恢复系数(Coefficient of Restitution, COR)是描述物体碰撞后动能恢复程度的物理量, 取值范围在0~1之间。它反映了碰撞过程中能量的损失情况, 等于碰撞后两物体分离的相对速度与碰撞前接近的相对速度的绝对值之比, 即

$$e = \frac{|v'_2 - v'_1|}{|v_1 - v_2|} \quad (27)$$

式中, v_1 、 v_2 分别为碰撞前的速度; v'_1 、 v'_2 分别为碰撞后的速度。

保持旋转副A处间隙半径 $c=0.02$ mm不变, 分别取恢复系数 e 为0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、0.98, 得到的不同恢复系数下的从动杆加速度曲线如图12所示。

由图12可知, 恢复系数 e 在接近0和1两种极端情况时, 旋转副间的碰撞频率愈加激烈, 接近1时加速度也明显增大。基于恢复系数定义[式(27)]和接触力模型中的能量耗散机制, 当 $e \approx 1$ 时, 碰撞接近完全弹性; 由式(15)可知, 阻尼力 F 能量耗散不足, 接触力高频次冲击, 导致加速度幅值剧增; 当 $e \approx 0$ 时, 完全非弹性碰撞使动能损失过大, 碰撞后速度突变引发低频振动; 当 $e=0.4 \sim 0.8$ 时, 阻尼项与弹性项匹配, 能量耗散稳定, STEP(δ)实现平滑过渡, 故动态特性平稳。

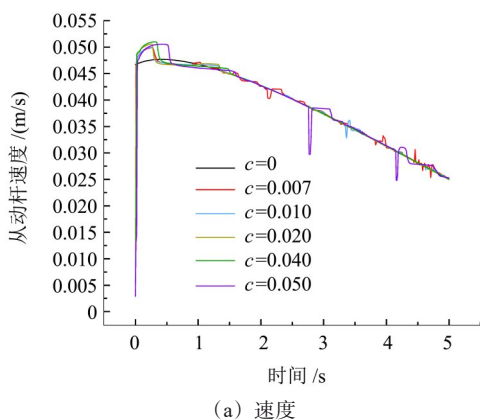
为了避免完全非弹性碰撞和完全弹性碰撞这两种工况对机构造成的影响, 需要选择合适的材料。

由图13所示不同恢复系数下从动杆加速度幅值

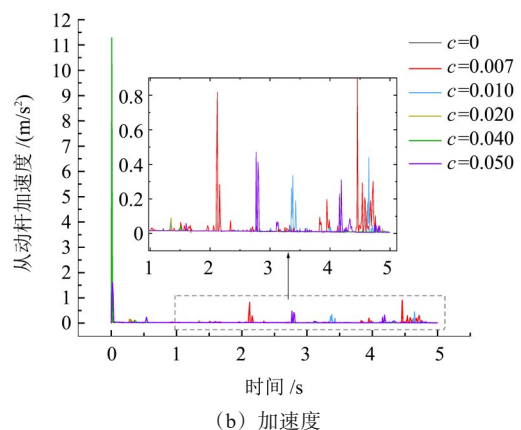
可以看出, 恢复系数在0.4~0.8时, 从动杆加速度相对较小且机构的运动学特性呈现有规律的变化; 恢复系数在0.98附近时, 从动杆的加速度幅值急剧增大。因此, 在对含旋转副间隙的空间机械手进行材料选择时, 应选择恢复系数在0.4~0.8范围内的材料。本文选择7075-T6铝合金。

3.3 间隙位置对机构运动学特性的影响

在实际工程应用中, 每个旋转副可能都会存在间隙, 所以, 间隙位置是影响机构动态特性的一个重要因素。本文选取间隙分别位于旋转副A、B、C处, 间隙半径取0.02 mm保持不变, 其余旋转副均为理想铰。研究不同间隙位置对机构的速度、加速度的动态变化, 结果如图14所示。



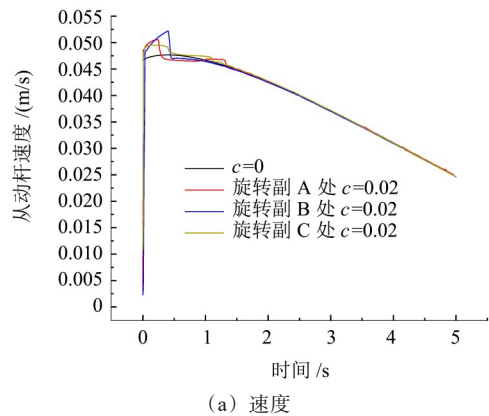
(a) 速度



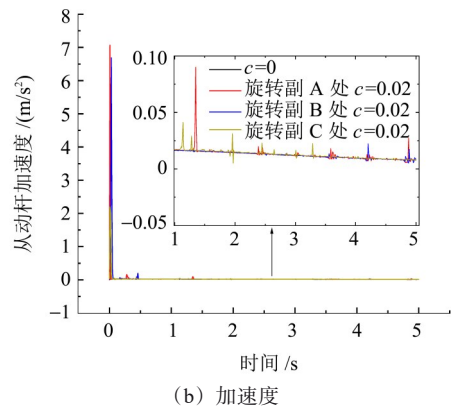
(b) 加速度

图11 旋转副A处存在间隙时的动态特性曲线

Fig. 11 Dynamic characteristic curve when there is a gap at rotating pair A



(a) 速度



(b) 加速度

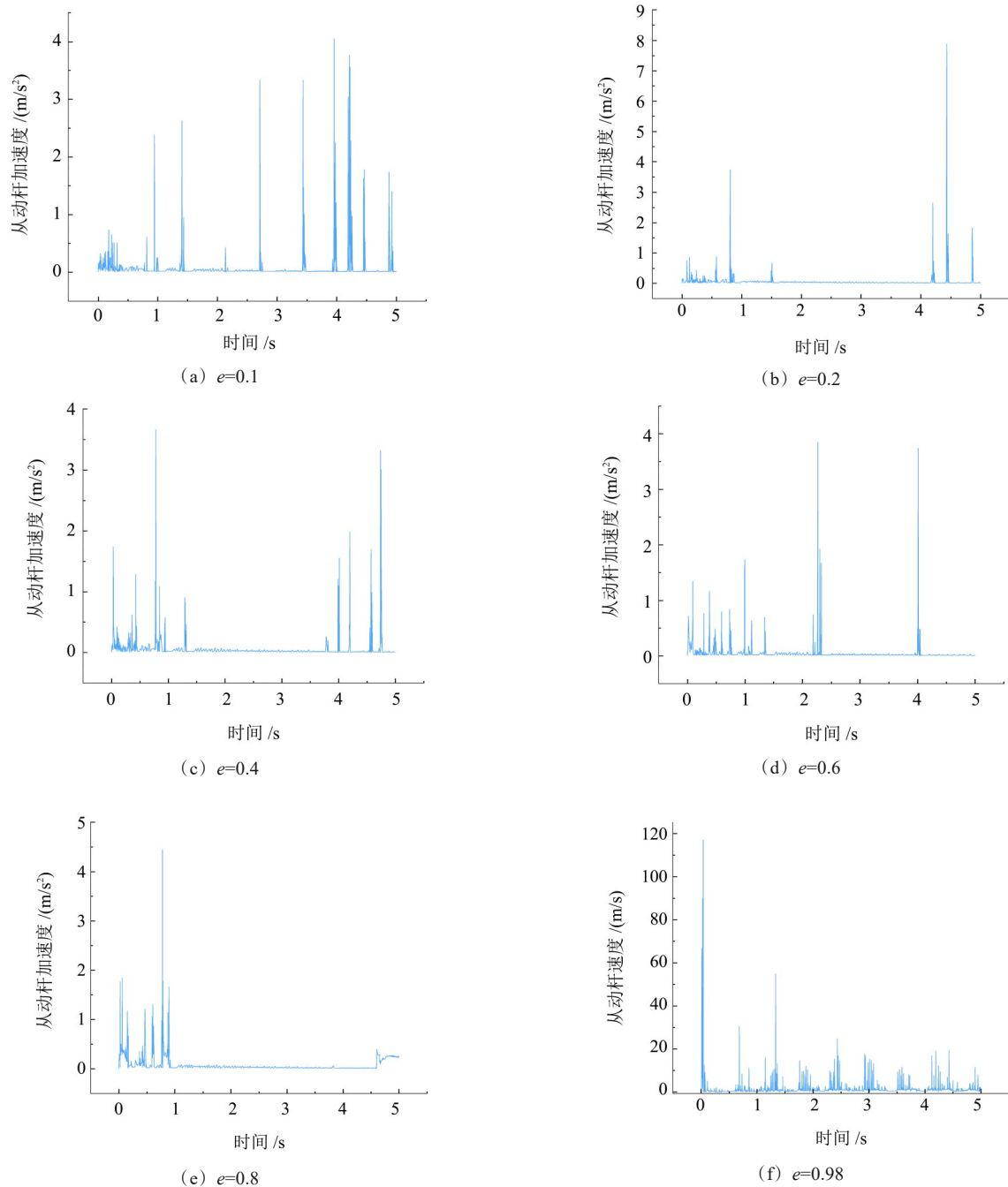


图 12 不同恢复系数下从动杆加速度曲线

Fig. 12 Acceleration curves of the follower rod with different recovery coefficients

图 14 不同间隙位置时从动杆动态特性曲线

Fig. 14 Follower rod dynamic characteristic curves at different clearance positions

由图 14 可知, 当间隙处于不同旋转副时, 从动杆的速度曲线与理想状态曲线(无间隙)大致重合; 当间隙存在于旋转副 C 处时, 速度曲线比间隙位于旋转副 A 和旋转副 B 处时速度波动最大值和波动幅度要小。

当旋转副间隙位于不同位置时, 与速度曲线相比, 从动杆的加速度曲线波动较大。间隙位于旋转副 A 处时加速度曲线波动最大值在 $7.07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, 间隙

位于旋转副 B 处时加速度曲线最大波动值为 $6.69 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, 而间隙位于旋转副 C 处时加速度曲线最大波动值为 $2.19 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$; 并且可以看出, 当间隙位于旋转副 C 时, 加速度曲线比间隙位于旋转副 A 和旋转副 B 处时波动幅度小。根据碰撞力投影计算式(11)~(14), 旋转副处的碰撞力会通过连杆传递至执行件, 传递过程中力的幅值随距离增大而放大。远离执行件的间隙(如 A 处)产生的碰撞力, 经从动件传递至末端时, 力矩更大, 导致执行件加速度波动更显著。而靠近执行件的间隙(C 处)力臂较

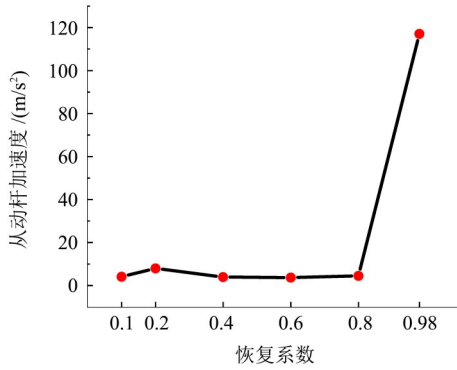


图 13 不同恢复系数下从动杆加速度幅值

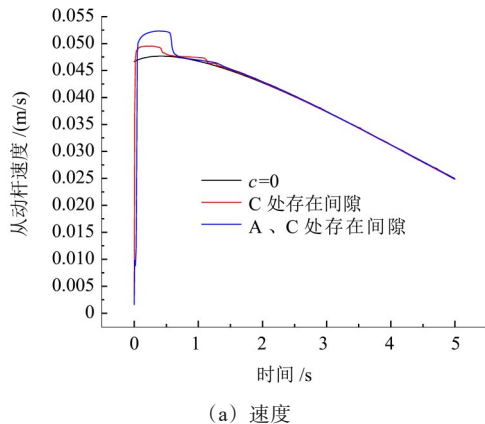
Fig. 13 Acceleration amplitude of the follower rod with different recovery coefficients

短, 影响被削弱, 与仿真结果一致。

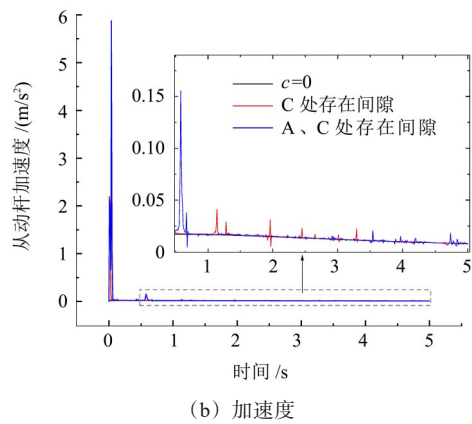
综上, 当整个机构只考虑单个间隙时, 旋转副间隙的位置离机构执行件越远, 旋转副间隙内的接触碰撞就越激烈, 对机构的动态特性影响就越大, 旋转副内的磨损程度也会增大。因此, 在空间机械手机构设计时, 应该更加关注远离机构执行件处的旋转副间隙的动态特性。

3.4 间隙数量对机构运动学特性的影响

实际机构由于加工装配问题以及机构运行期间



(a) 速度



(b) 加速度

图 15 旋转副 A、C 处存在间隙时从动杆动态特性

Fig. 15 Dynamic characteristics of the follower rod in the presence of a gap at rotating pair A and C

旋转副 C 有 1 处存在间隙时, 加速度波动峰值为 $2.19 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$; 旋转副 A、C 有 2 处存在间隙时, 加速度波动峰值为 $5.87 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$; 旋转副 B、C 有 2 处存在间隙时, 加速度波动峰值为 $3.28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$; 旋转副 A、B、C 有 3 处存在间隙时, 加速度波动峰值为 $15.72 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, 从动杆的加速度波动峰值和频率逐渐增大。由式 (11)~式 (14) 可知, 叠加碰撞力的矢量合成使总接触力非线性叠加, 间隙数量增加导致振动频率升高。

4 结论

以一种含旋转副间隙的空间机械手为研究对象,

产生的磨损使得机构存在多个旋转副间隙。因此, 为了更加贴近实际应用, 需要对多个转动副间隙进行仿真研究, 探究旋转副间隙个数对机构动态特性的影响。

使旋转副 A、B、C 处存在间隙, 其余运动副均为无间隙理想状态。对以下 4 种情况进行分析: ①考虑旋转副 C 有 1 处间隙; ②考虑旋转副 A、C 有 2 处间隙; ③考虑旋转副 B、C 有 2 处间隙; ④考虑旋转副 A、B、C 有 3 处间隙。间隙半径大小均为 0.02 mm , 其他参数保持不变。

如图 15~图 17 所示, 由仿真结果可知, 保持间隙半径为 0.02 mm 不变, 考虑不同间隙个数, 存在 1 处或 2 处旋转副间隙时, 从动杆速度曲线与理想曲线在大部分区域内基本重合, 但在局部会产生偏离。存在 3 处旋转副间隙时, 对比其他两种情况, 从动杆速度曲线与理想曲线在大部分区域会产生偏离。当间隙个数不同时, 速度的波动频率和波动的峰值大小和时间也不相同。随着机构间隙个数的增多, 其对机构速度影响增大。

结合 Hertz 理论可知, 多间隙的穿透深度相互耦合, 导致接触力的波动频率叠加, 故仿真中间隙数量越多, 振动频率越高。

综上所述, 间隙个数对机构动态特性影响较为明显。随着间隙个数的增多, 机构的速度和加速度呈现出高幅值高频率特征; 因为当机构存在多个间隙时, 间隙之间会互相影响, 产生了更加剧烈的冲击。

建立含间隙的旋转副数学模型, 分别研究了不同间隙半径、不同恢复系数、不同间隙位置和不同间隙数量对空间机械手的动态特性的影响。可以看出,

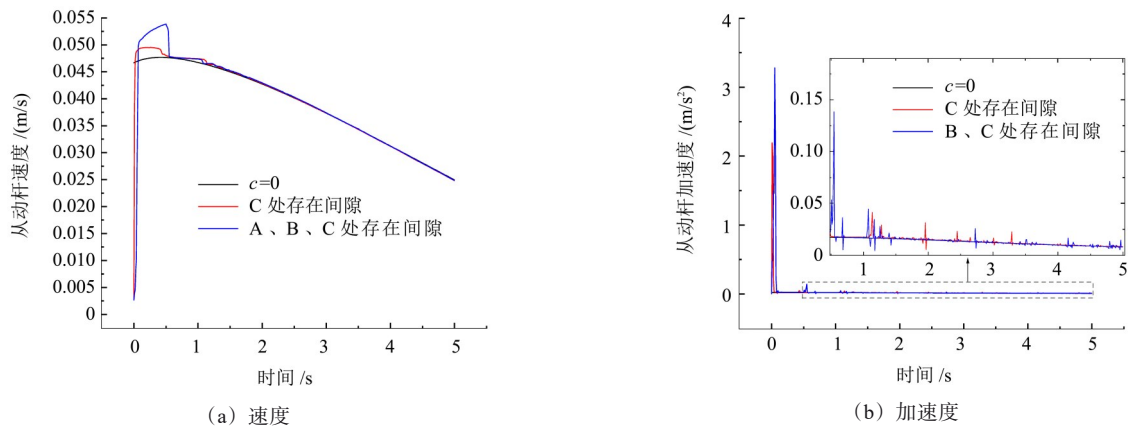


图16 旋转副B、C处存在间隙时从动杆动态特性

Fig. 16 Dynamic characteristics of the follower rod in the presence of a gap at rotating pair B and C

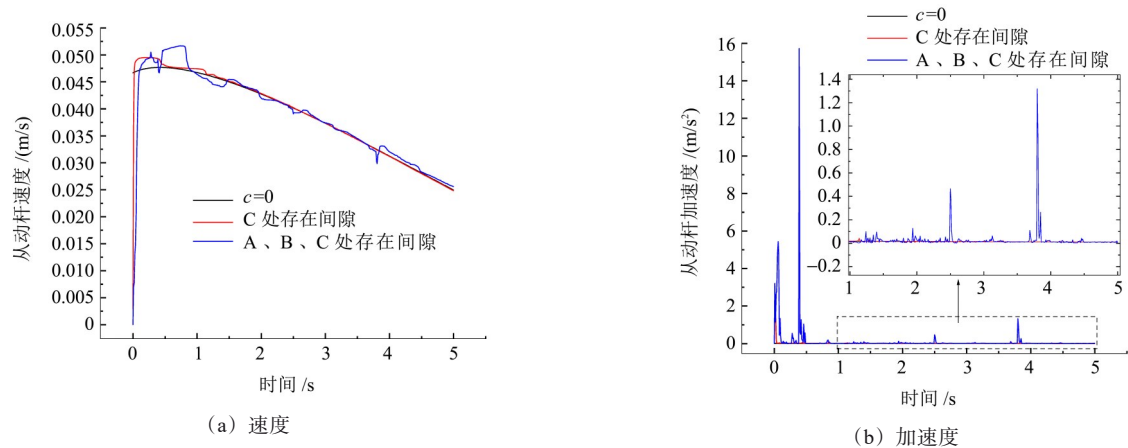


图17 旋转副A、B、C存在间隙时从动杆动态特性

Fig. 17 Dynamic characteristics of the follower rod in the presence of a gap at rotating pair A, B and C

旋转副间隙会对空间机械手的动态特性产生显著的影响。具体结论如下:

1) 间隙半径太大会降低机构展开的稳定性和精确度, 而间隙半径太小又不利于旋转副内形成油膜, 润滑作用减弱。间隙半径小于 0.02 mm 或大于 0.04 mm 时, 从动杆速度和加速度波动频率都比较大。因此, 间隙半径为 0.02~0.04 mm 时, 从动杆速度和加速度都趋于稳定。

2) 恢复系数 e 在接近 0 和 1 两种极端情况时, 旋转副间的碰撞频率愈加激烈, 接近 1 时加速度也明显增大。因此, 在进行材料选择时, 应选择恢复系数在 0.4~0.8 范围内的材料。本文选择 7075-T6 铝合金。

3) 只存在单个间隙时, 旋转副间隙的位置离机构执行件越远, 旋转副间隙内的接触碰撞就越激烈, 对机构的动态特性影响就越大, 旋转副内的磨损程度也会增大。

4) 间隙个数对机构动态特性影响较为明显, 随着间隙个数的增多, 间隙之间会产生复杂的耦合影响, 会产生更加强烈的冲击。

因此, 在实际应用中, 在满足设计加工要求的前提下, 需要合理设置间隙值的大小、间隙位置以及材料的选择。

参 考 文 献

- [1] 王汝贵, 金聪, 杨泽慧. 仿象鼻螺旋形折展机构设计与应用研究[J]. 机械传动, 2023, 47(9): 74-80.
Wang Rugui, Jin Cong, Yang Zehui. Design and application of an elephant trunk-like spiral deployable mechanism [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2023, 47(9): 74-80.
- [2] 韩博, 杨名, 骆明炎, 等. 单驱动空间可展开变胞捕获机械手设计与分析[J]. 机械工程学报, 2025, 61(1): 30-43.
Han Bo, Yang Ming, Luo Mingyan, et al. Design and analysis of single-drive space deployable metamorphic capture manipulator [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(1): 30-43.
- [3] 曹启迪. 面向大型目标抓取的三棱柱桁架式可展开机械手设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 2019002713.
Cao Qidi. Design of triangular prism truss deployable manipulator for large-scale target grasping [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019: 2019002713.
- [4] 金国光, 何升, 魏展, 等. 含多关节间隙平面柔性六杆机构的动力学分析[J]. 天津工业大学学报, 2024, 43(4): 75-81.

- Jin Guoguang, He Sheng, Wei Zhan, et al. Dynamic analysis of planar flexible six-bar mechanism with multi-joint clearances [J]. *Journal of Tiangong University*, 2024, 43(4): 75-81.
- [5] 白争锋, 牛余新, 崔乐文, 等. 考虑不确定参数的含间隙柔性机械臂非概率可靠性分析[J]. *力学学报*, 2025, 57(1): 224-236.
- Bai Zhengfeng, Niu Yuxin, Cui Lewen, et al. Non-probabilistic reliability analysis of flexible manipulator with joint clearance and uncertain parameters [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2025, 57(1): 224-236.
- [6] 邱雪松, 任志博, 桂朋, 等. 含多间隙柔性可展帆板动力学建模及仿真[J]. *宇航学报*, 2018, 39(7): 724-731.
- Qiu Xuesong, Ren Zhibo, Gui Peng, et al. Dynamic modeling and simulation of a flexible deployable solar array with multiple clearances [J]. *Journal of Astronautics*, 2018, 39(7): 724-731.
- [7] 李金玉. 考虑混合间隙的机构动力学研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- Li Jinyu. Research on dynamic characteristics of mechanism with mixed joint clearances [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [8] 王铁成, 陈国平, 马方, 等. 含混合间隙多体系统动力学分析[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(9): 178-183.
- Wang Tiecheng, Chen Guoping, Ma Fang, et al. Dynamic analysis of multibody systems with mixed clearance [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(9): 178-183.
- [9] 时兵, 金焯. 面向虚拟样机的机构间隙旋转铰建模与动力学仿真[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(4): 299-303.
- Shi Bing, Jin Ye. Dynamic simulation and modeling of revolute clearance joint for virtual prototyping [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(4): 299-303.
- [10] Miao H H, Li B, Liu J, et al. Effects of revolute clearance joint on the dynamic behavior of a planar space arm system [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2019, 233(5): 1629-1644.
- [11] Marques F, Isaac F, Dourado N, et al. A study on the dynamics of spatial mechanisms with frictional spherical clearance joints [C]// Volume 6: 12th International Conference on Multibody Systems, Nonlinear Dynamics, and Control. American Society of Mechanical Engineers, 2016: V006T09A012.
- [12] 王旭鹏. 含间隙铰链机构非线性接触力和碰撞动力学研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
- Wang Xupeng. Research on nonlinear contact forces and impact dynamics of mechanism with clearance joints [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016.
- [13] 金国光, 侯旭睿, 魏展, 等. 考虑运动副间隙的平面连杆机构动力学分析[J]. *机械传动*, 2022, 46(9): 59-66.
- Jin Guoguang, Hou Xurui, Wei Zhan, et al. Dynamic analysis of planar linkage mechanism considering the clearance of kinematic pair [J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2022, 46(9): 59-66.
- [14] 姚廷强, 陈锐搏, 王立华, 等. 考虑三维圆柱铰间隙碰撞的空间机构柔性多体动力学分析方法[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(1): 297-307.
- Yao Tingqiang, Chen Ruibo, Wang Lihua, et al. Flexible multi-body dynamic analysis method of spatial mechanisms considering 3-D cylindrical hinge clearance collision [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(1): 297-307.
- [15] 李园园. 考虑多间隙的多体系统动力学分析及可靠性优化设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017: 12-38.
- Li Yuanyuan. Dynamics analysis and reliability optimization design of multibody systems with multiple clearances [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017: 12-38.
- [16] 阎绍泽, 陈鹿民, 季林红, 等. 含间隙铰的机械多体系统动力学模型[J]. *振动工程学报*, 2003, 16(3): 290-294.
- Yan Shaoze, Chen Lumin, Ji Linhong, et al. Dynamic modeling of multibody system with clearance joints [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2003, 16(3): 290-294.
- [17] 梁豪. 含间隙曲柄滑块机构的动力学特性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2022: 10-13.
- Liang Hao. Dynamic characteristics analysis of crank-slider mechanism with clearance [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022: 10-13.
- [18] 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: 011002.
- [19] Khemili I, Romdhane L. Dynamic analysis of a flexible slider-crank mechanism with clearance [J]. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2008, 27(5): 882-898.
- [20] Chen Y, Wu K, Wu X Z, et al. Kinematic accuracy and nonlinear dynamics of a flexible slider-crank mechanism with multiple clearance joints [J]. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2021, 88: 104277.

Dynamic characterization of spatially deployable manipulator with rotating pair clearance

LEI Yuanhang HE Yayin CHEN Lijun ZHAO Yonqiang REN Zhigui WANG Junli
(Mechanical Engineering College, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China)

Abstract: [Objective] In order to study the influence of the rotating pair clearance on the dynamic characteristics of the space deployable mechanism, a space shear-fork deployable manipulator was designed. [Methods] A mathematical model of the rotating pair clearance was established, and a dynamic simulation analysis of the space manipulator containing a rotating pair clearance was carried out based on the contact force model of the IMPACT function to analyze the effects of the gap size, the recovery coefficient, the position of the gap and the number of gaps on the dynamic characteristics of its unfolding process.