

不同重力环境下间隙对机械臂末端轨迹的影响^①

刘福才^② 侯甜甜 秦 利 高静方

(燕山大学工业计算机控制工程河北省重点实验室 秦皇岛 066004)

摘 要 以在轨服务高精度操控任务为背景,根据不同重力环境中机构的间隙界面运动特性,研究了地面装调及空间服役两种不同工况下的近似间隙等效模型。分析了不同重力环境下影响间隙形成的主要因素,并以二自由度空间机械臂为例,使用无质量轻杆法获取考虑铰间间隙的空间机械臂在重力及重力释放条件下的动力学解析解,进行了铰间间隙与重力对末端轨迹跟踪控制精度耦合影响的仿真研究。在此基础上,针对间隙等效模型造成的模型不确定性及干扰设计了间隙补偿控制器,并通过仿真验证了间隙补偿控制器的有效性。

关键词 空间机械臂, 关节间隙, 无质量杆方法, 微重力

0 引 言

随着航天事业的不断发展,对空间机构精度的要求越来越高,人们开始关注铰间间隙引起的空间机构动力学非线性特性。在实际机构中,运动副间隙主要由三部分组成,一部分是由于设计动配合需要而加工形成的规则装配间隙,一部分是运动副设计、制造过程中必然会存在的一定误差,另一部分是由于摩擦磨损引起的非规则的运动副附加间隙,因此,运动副间隙是不可避免的。铰间间隙的存在破坏了机构的理想约束模型,与摩擦、磨损、构件与关节柔性、地面预应力、重力等因素产生耦合影响,极大地改变了机构的动力学特性,使机构响应在一定程度上不可预计,也给机构建模和控制器设计带来极大的困难,因此,研究含铰间间隙机构的运动学控制与分析具有重要的意义。基于这方面的考虑,本研究专门探讨了在不同重力环境下,间隙对空间机械臂末端轨迹的影响。

1 相关研究

长期以来,国内外的学者针对含间隙机构进行了大量的研究。主要研究成果体现在以下几方面:

(1) 间隙模型描述

1971 年, Dubowsky 等美国学者针对运动副间隙提出了一维冲击副模型^[1,2], 随后又提出了一维冲击杆模型^[3]和二维冲击环模型^[4], 并基于所提出的模型对含间隙机构进行了大量的研究。张劲夫等对考虑运动副间隙的机构动力学研究状况进行了评述, 指出了现有研究方法的特点^[5]。阎绍泽等分析了含间隙多体系统的边拓扑结构特性, 引入了基本约束和变结构约束概念^[6]。朱巨才等提出了一种新的无质量-弹簧阻尼组合模型非线性动力学运动微分方程的近似解法, 从而得到相应的含间隙机构的动力学响应^[7]。何柏岩等根据 Hert 接触定律和 Coulomb 摩擦定律, 使用 Kane 方法建立了含间隙平面旋转铰的力学模型^[8]。

(2) 间隙对机构运动学的影响

Tsai 将铰间间隙表示为一个无质量轻杆, 基于螺旋理论对含间隙机构进行了运动灵敏度分析与定位误差分析^[9]。Ting 将含间隙运动副用间隙连杆表示, 研究了由于运动副间隙造成的含间隙平面单环机构的最大定位误差^[10]。黄宇中研究了间隙引起的关节坐标参数变化^[11]。崔道碧推导了关节间隙对机器人末端运动学影响的精确解析式^[12]。宋月娥等分析了机器人关节间隙对末端位置重复定位精度的影响^[13]。

(3) 间隙对机构动力学的影响

^① 863 计划资助项目。

^② 男, 1966 年生, 博士, 教授; 研究方向: 计算机控制及空间机器人控制; 联系人, E-mail: lfc@ysu.edu.cn
(收稿日期: 2014-06-21)

Moon 等在实验中观测到了铰间隙空间可展机构的混沌振动现象^[14]。Folkman 等针对铰接空间机构,考虑了重力和间隙影响,详细地分析了铰接空间结构的阻尼特性^[15]。Flores 建立了考虑运动副间隙和润滑的动力分析方法,分别建立了无润滑和有润滑时具有间隙的铰模型,研究了运动副含间隙及润滑作用的机构动力学行为^[16]。吴焕芹等利用连续接触模型把含间隙机构转化为多构件多自由度的无间隙机构进行了分析^[17]。阎绍泽等对航天器中含间隙机构非线性动力学问题及其研究进展情况进行了总结^[18]。吴德隆、黄铁球等通过理论计算了含间隙大型伸展机构的动力学响应,并与实验结果进行了比较^[19]。王巍等分析了航天器中间隙引起的各种动力学问题,并研究了含间隙太阳帆板展开动力学特性^[20]。白争锋研究了考虑运动副磨损间隙的航天机构的动力学特性与控制^[21]。游斌弟研究了刚柔耦合星载天线动态指向机构的动力学特性及其挤压油膜润滑被动控制技术^[22]。

从上面看出,现有研究主要分析了间隙对机构运动性能的影响,整体呈现了从运动学误差到动力学性能再到与机构柔性、磨损、润滑耦合的发展趋势,而针对不同重力环境下含间隙机构的控制器设计研究较少。文献[23,24]分别考虑了重力和摩擦,对地面和空间的机械臂进行了动力学特性和轨迹跟踪仿真研究,但是没有考虑间隙的影响。对于精密空间操作机构,间隙的影响不可忽略。众所周知,所有空间机构都是在地面装调,空间与地面的区别在于重力不同。因此,在不同重力环境下,间隙对空间机械臂末端轨迹有哪些影响,如何通过控制方法消除这些影响,是本文所要解决的关键问题。

本文采用无质量杆模型将含间隙的二自由度机械臂转化成为三自由度(将间隙等效成一个间隙杆,即增加一个构件和一个自由度)的无间隙机械臂进行分析。利用拉格朗日方法分别推导出重力和微重力环境下的含间隙二自由度机械臂的动力学模型。另外,结合连杆转速对间隙形成的影响,分别对不同重力环境中二自由度机械臂进行控制,使得机构输出末端轨迹能够跟随期望轨迹。并通过仿真结果验证间隙补偿控制器在提高空间机械臂的轨迹跟踪精度方面的有效性。

2 不同重力环境下间隙等效模型分析

无质量杆方法的主要思想就是将间隙看作是一

根无质量的轻杆,即认为两个运动副(旋转铰轴和轴承)始终处于连续接触状态,完全忽略了运动副之间的变形。连杆法的使用使机构在原有的基础上增加了自由度,但是仍处于完整约束状态。该方法建模简单,便于计算。其模型如图1所示。为了求解方便,文中考虑了轴颈和轴套的接触属于内圆柱和外圆柱母线同时接触的情况。

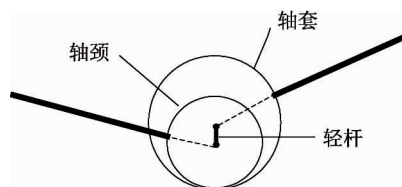


图1 间隙杆模型

图2是利用ADAMS软件仿真得到的考虑间隙时关节轴颈中心点在不同重力环境下,速度同为1500rad/min的持续运动轨迹图。从图2中可见:在轴颈的周期性转动过程中,1g重力条件下,稳定运行阶段时由于重力指向作用轨迹集中于轴套下端,且具有一定的周期性,振动相对较小;空间微重力条件下,轨迹分布于轴套圆周上,但振动现象相对明显。这些特点也符合现有的研究结论。

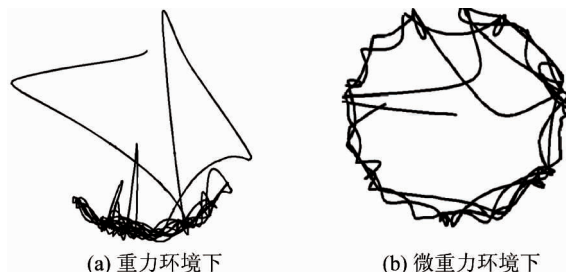


图2 不同重力环境关节轴颈中心轨迹图

空间机械臂具有低速运行的特点,因此重力环境下重力项比重大,重力指向作用更加明显,接触力产生点会集中于轴套底端,同时由于静态径向间隙与弹性变形值较小,因此可假设接触力产生位置在轴套正下端。微重力环境下,由于重力释放指向作用消失,轴颈基本沿着轴套圆周运动,因此可假设接触力产生位置在轴套圆周,受力方向沿运动传递输出杆件。以二自由度机械臂为例,考虑铰间间隙,模拟重力指向作用下机构的运动学变化与受力情况,其等效模型如图3所示;模拟微重力环境下机构的运动学变化与受力情况,等效模型如图4所示。

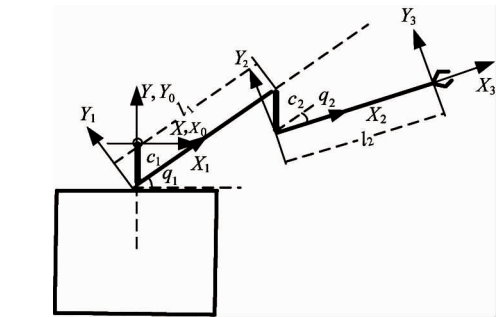


图 3 1g 重力环境含间隙空间机械臂等效结构示意图

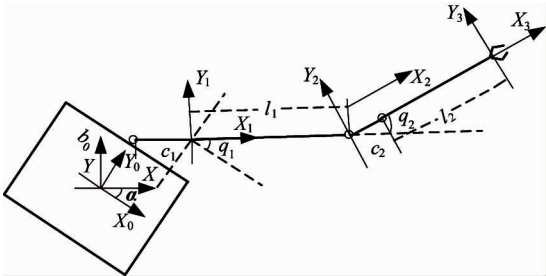


图 4 微重力环境空间机械臂等效结构示意图

3 不同重力环境下间隙对末端轨迹的影响

3.1 低转速情况下的影响

机械臂在重力环境下低速运行时,间隙的形成受转动的离心力的影响作用比受重力的影响作用小,因此轴颈与轴套之间的接触力主要集中在轴孔的正下方。在这种情况下,本文假设轴颈始终处于轴孔下部,无质量轻杆连接轴颈与轴孔中心竖直向下。在已建立含间隙二自由度机械臂动力学模型的基础上进行仿真,得出低转速时,间隙的存在对运动轨迹的影响如图 5 所示。由于间隙的取值较小,图 5 中显示的间隙对机械臂运动轨迹的影响不明显,为了详细说明,给出了低速时间隙末端轨迹的局

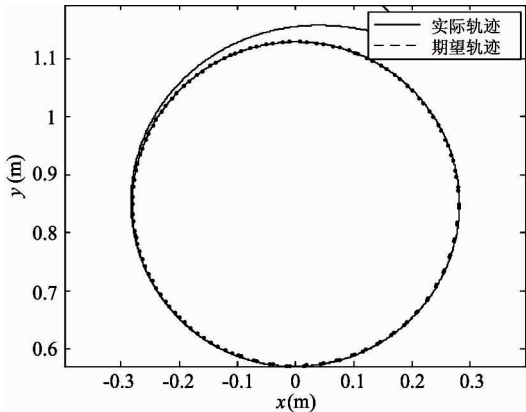


图 5 低速时间隙对末端轨迹的影响

部放大图(见图 6),图 6 为图 5 中点(0, 1.13)附近的局部放大图。

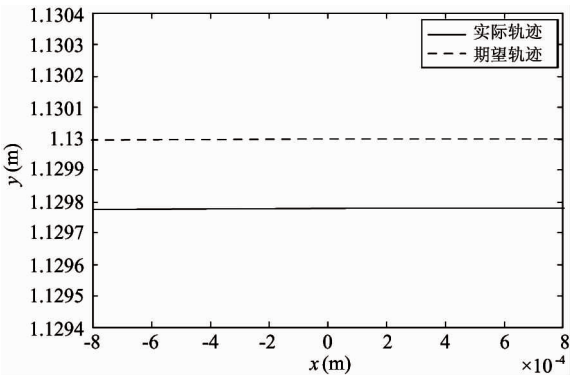


图 6 低速时间隙对末端轨迹局部放大图

由图 6 可以观察到,由于主要受重力的影响,间隙对末端轨迹的影响主要体现在纵坐标的变化,使得输出的末端轨迹相对期望轨迹竖直向下移动了间隙的尺寸 c 。

3.2 高转速情况下的影响

重力环境下,机械臂高速转动时,离心力的影响逐渐明显,进而超过重力。这种情况下轴颈受离心力的作用沿着轴孔内表面旋转,无质量轻杆一端连接轴孔中心作为圆心,另一端连接轴颈中心做旋转运动。同样,在已建立二自由度机械臂动力学模型的基础上进行仿真,得出高转速时,间隙的存在对运动轨迹的影响如图 7 所示,同理,图 8 为图 7 点中(0, 1.13)的局部放大图。

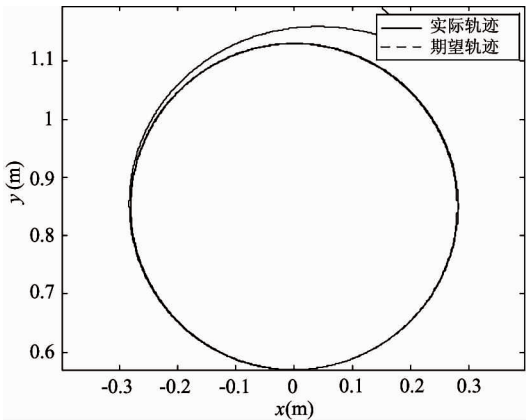


图 7 高速时间隙对末端轨迹的影响

由图 8 可以观察到,由于受离心力的影响,将间隙等效成间隙杆后,间隙对末端轨迹的影响等效于将原来的杆长 l 延长到了 $l + c$,使得实际轨迹偏离期望轨迹。

在微重力环境下,由于重力释放指向作用消失,轴颈基本沿着轴套圆周运动,间隙的形成主要受离心力的影响。因此在低、高速两种情况下,间隙对机械臂末端轨迹的影响与重力环境下高转速时情况相同。

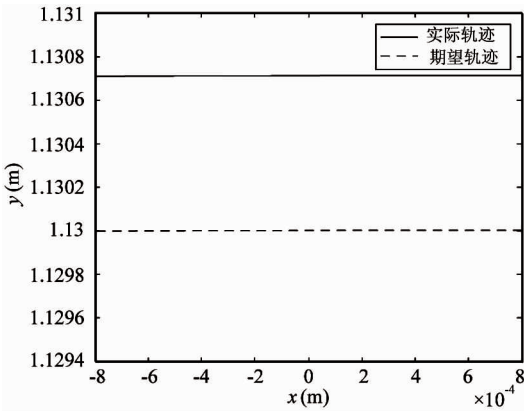


图8 高速时间隙对末端轨迹局部放大图

4 间隙补偿控制方法

4.1 不同重力环境下二自由度机械臂模型的建立

4.1.1 运动学方程的建立

重力环境下等效模型如图3所示。机械臂基座固定,关节角度 q_1, q_2 已知时,通过几何关系可以得到低转速时地面机械臂正运动学方程

$$\begin{cases} x = l_1 \sin(q_1) + l_2 \sin(q_1 + q_2) \\ y = l_1 \cos(q_1) + l_2 \cos(q_1 + q_2) - c_1 - c_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中, c_1, c_2 为关节1和关节2的径向静态间隙。

高转速时地面机械臂正运动方程为

$$\begin{cases} x = l'_1 \sin(q_1) + l'_2 \sin(q_1 + q_2) \\ y = l'_1 \cos(q_1) + l'_2 \cos(q_1 + q_2) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $l'_1 = l_1 + c_1, l'_2 = l_2 + c_2$, 表示杆1、杆2长度在考虑间隙情况下的变化量。

微重力环境下,等效模型如图4所示。机械臂基座漂浮,关节角度 q_1, q_2 已知时,通过几何关系,可以得到空间机械臂正运动学方程

$$\begin{cases} x = x_0 - b_0 \sin(\alpha) - l'_1 \sin(\alpha + q_1) \\ \quad - l'_2 \sin(\alpha + q_1 + q_2) \\ y = y_0 + b_0 \cos(\alpha) + l'_1 \cos(\alpha + q_1) \\ \quad + l'_2 \cos(\alpha + q_1 + q_2) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $l'_1 = l_1 + c_1, l'_2 = l_2 + c_2$, 表示杆件1和杆件2长度在考虑间隙情况下的变化量, c_1, c_2 为关节径向静态间隙, $\chi = [x_0; y_0; \alpha]$ 表示基座的运动参数。

4.1.2 动力学方程的建立

本文中的机械臂动力模型是采用拉格朗日方法推导的朗格朗日方程。对于任何机械系统,拉格朗日函数 L 定义为系统的动能和势能之差。

$$L = E_k - E_p \quad (4)$$

系统的动力学方程(称第二类拉格朗日方程)为

$$F_i = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中, q_i 是表示动能和势能的广义坐标, $\dot{q}_i$ 为相应的广义速度, F_i 称广义力, q_i 是角度坐标,相应的 F_i 是力矩。

最终,地面机械臂动力学方程一般写成如下形式:

$$\tau = H(q)\ddot{q} + B(q, \dot{q}) + G(q) \quad (6)$$

空间机械臂动力学方程一般写成如下形式:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + B(q, \dot{q})\dot{q} \quad (7)$$

4.2 不同重力环境下间隙补偿控制器的设计与仿真比较

在控制系统设计时,所要达到的控制目的是在考虑较间隙的情况下,通过对关节角度进行控制,使机械臂的末端轨迹能够跟上期望轨迹。这就需要通过运动学逆解方程将期望轨迹变换为空间角度作为系统的给定,通过与反馈的实际角度比较后,经过控制器进行控制,输出控制量即力矩信号 τ_1 和 τ_2 对机械臂进行跟踪控制。

由于间隙轻杆模型添加在含间隙的运动学正解上,因此本文采用把间隙作为系统的干扰加入到控制环内部从而对间隙进行补偿,通过控制器抑制干扰。系统中机械臂输出的是关节角度,通过含间隙的运动学正解后,得出的实际轨迹与给定轨迹进行比较。同时经过雅克比矩阵运算后的关节角则作为系统的反馈量,本文假设机械臂末端坐标可测。控制框图如图9和图10所示。

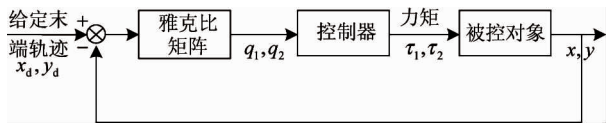


图9 地面间隙补偿控制器的控制框图

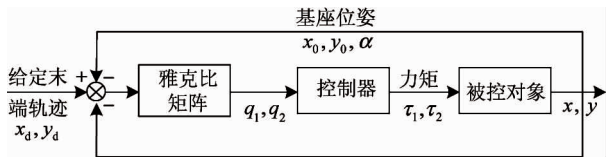


图10 空间间隙补偿控制器的控制框图

采用的控制器为 PD 控制器,具体形式为

$$\tau = k_p e + k_d \dot{e} + K \cdot G \tag{8}$$

其中, G 为重力补偿项。根据重力环境的不同, K 取值如下式所示:

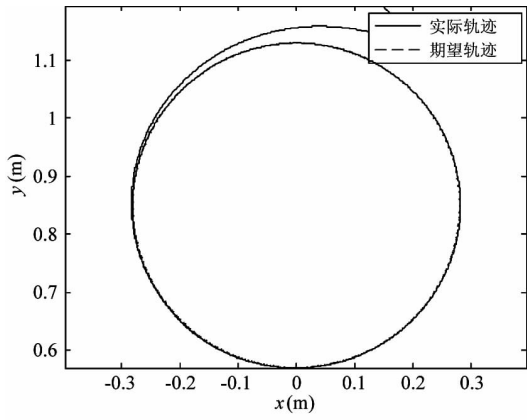
$$K = \begin{cases} [0 \ 0]^T, & 0g \text{ 时} \\ [1 \ 1]^T, & 1g \text{ 时} \end{cases} \tag{9}$$

在建立的含间隙二自由度机械臂的模型以及控制器的基础上,运用Matlab软件进行仿真,在给定

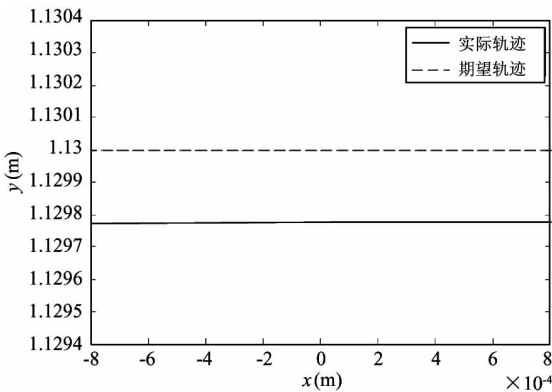
运动轨迹之后,观察间隙控制器对机械臂末端输出轨迹跟踪精度的控制效果。

重力环境下,含间隙二自由度机械臂模型参数为: $m_1 = 4\text{kg}$, $m_2 = 3\text{kg}$, $c_1 = c_2 = 3\text{mm}$, $l_1 = 1\text{m}$, $l_2 = 1\text{m}$,其中 m_1 、 m_2 分别为杆 1、杆 2 质量。

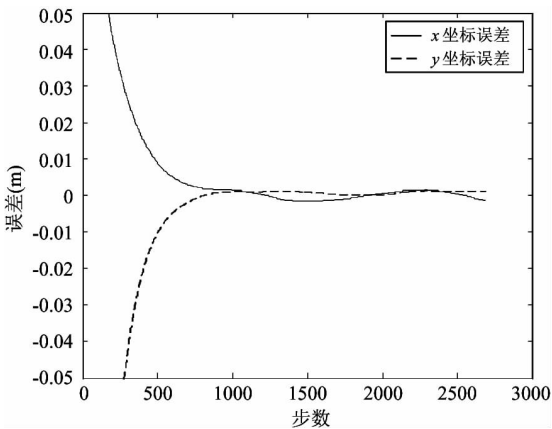
机械臂的末端抓手期望末端轨迹为



(a) 重力环境下低速时无间隙补偿空间轨迹曲线

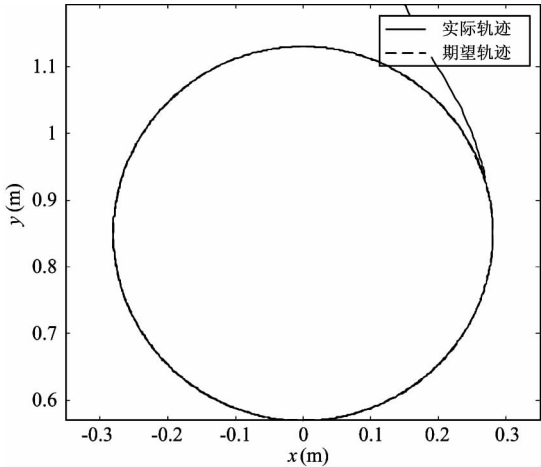


(b) 重力环境下低速时无间隙补偿空间轨迹局部放大图

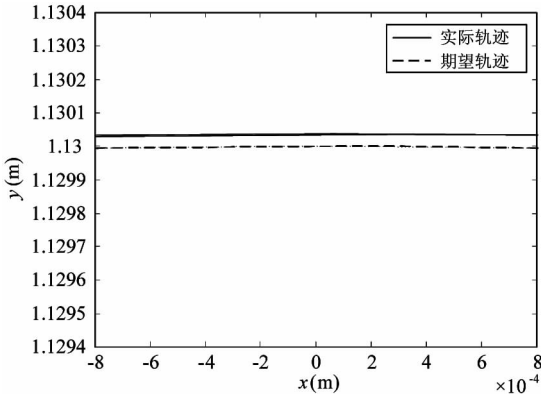


(c) 重力环境下低速时无间隙补偿空间轨迹误差曲线

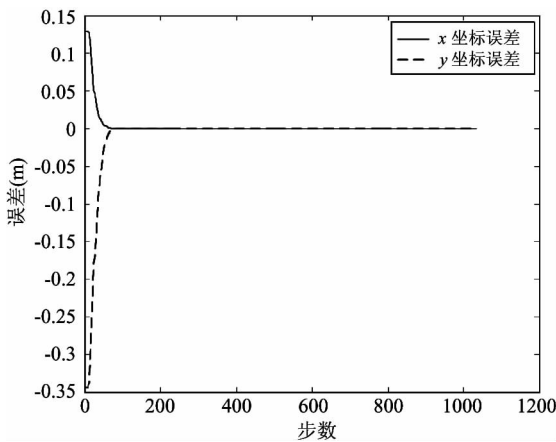
图 11 重力环境下低速时无间隙补偿仿真曲线



(a) 重力环境下低速时有间隙补偿空间轨迹曲线



(b) 重力环境下低速时有间隙补偿空间轨迹局部放大图



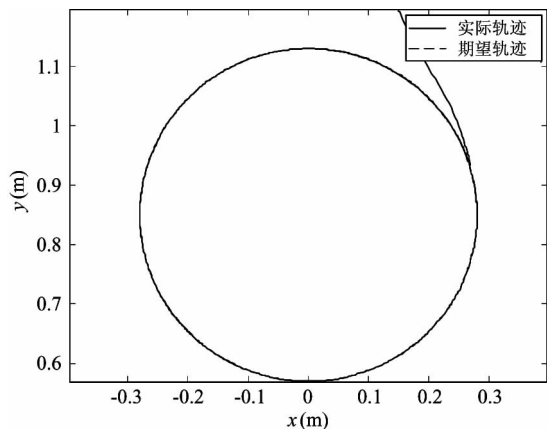
(c) 重力环境下低速时有间隙补偿空间轨迹误差曲线

图 12 重力环境下低速时有间隙补偿仿真曲线

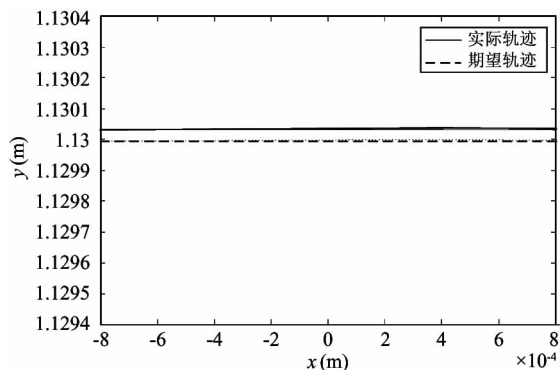
$$\begin{cases} x_d = 0.28\cos(\frac{\pi t}{5}) \\ y_d = 0.28\sin(\frac{\pi t}{5}) + 0.85 \end{cases} \quad (10)$$

重力环境下的仿真结果如图 11 ~ 图 14 所示,其中轨迹局部放大图均为点(0, 1.13)附近局部放大图。

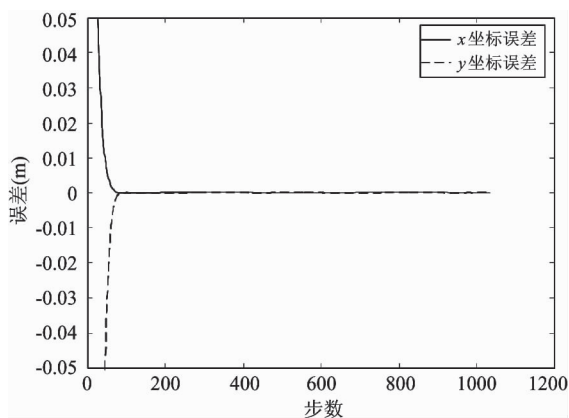
由仿真结果计算得出:重力环境下,当对间隙进行补偿控制时,关节低速转动时间隙引起的末端轨迹的偏差降低了 80%,关节高速转动时间隙引起的末端轨迹的偏差降低了 94.28%,跟踪精度有明显的提高。



(a) 重力环境下高速时有间隙补偿空间轨迹曲线



(b) 重力环境下高速时有间隙补偿空间轨迹局部放大图

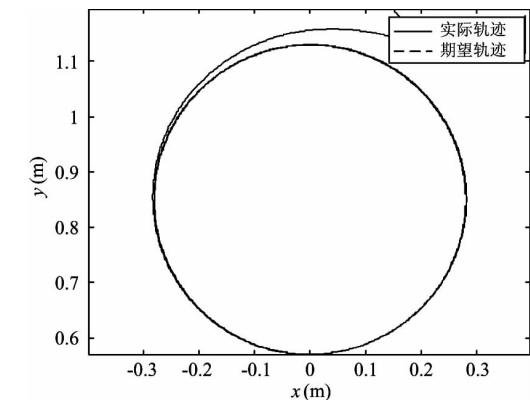


(c) 重力环境下高速时有间隙补偿空间轨迹误差曲线

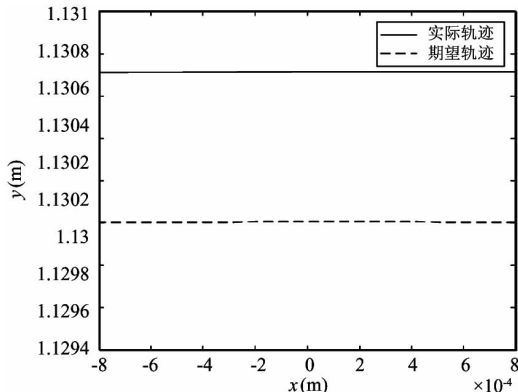
图 14 重力环境下高速时有间隙补偿仿真曲线

微重力环境下,含间隙二自由度机械臂模型参数为: $m_0 = 40\text{kg}$, $m_1 = 4\text{kg}$, $m_2 = 3\text{kg}$, $l_1 = 1\text{m}$, $l_2 = 1\text{m}$, $c_1 = c_2 = 3\text{mm}$,其中 m_0 为基座质量。

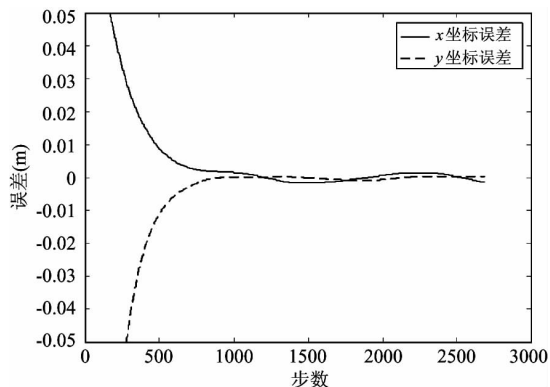
由仿真结果计算得出:微重力环境下,当对间隙进行控制时,关节转动时间隙引起的末端轨迹的偏差降低了 57.14%,跟踪精度有明显的提高。



(a) 重力环境下高速时无间隙补偿空间轨迹曲线



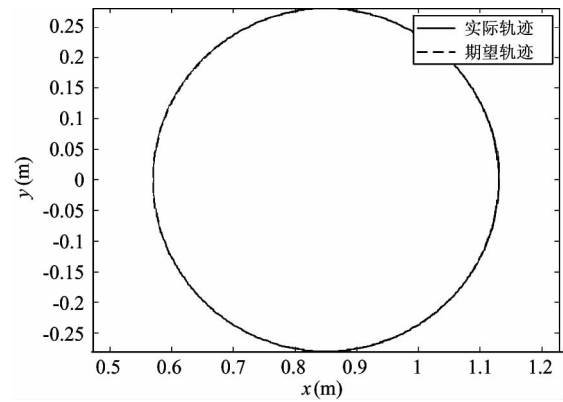
(b) 重力环境下高速时无间隙补偿空间轨迹局部放大图



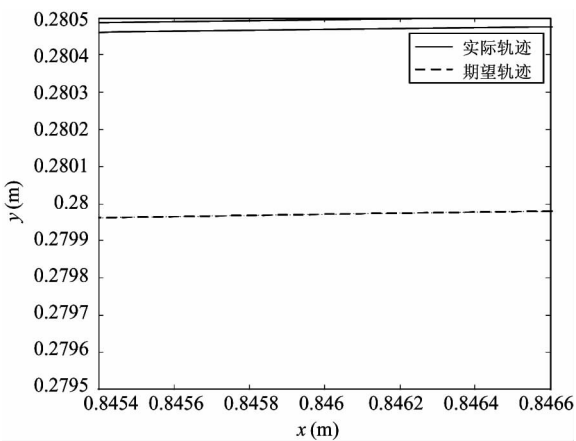
(c) 重力环境下高速时无间隙补偿空间轨迹误差曲线

图 13 重力环境下高速时无间隙补偿仿真曲线

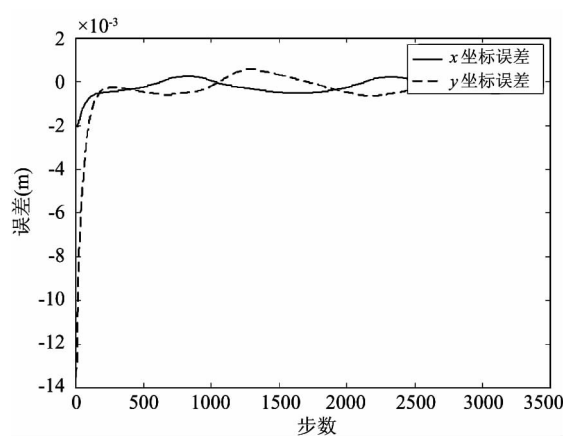
微重力环境下仿真结果如图 15 和图 16 所示,其中轨迹局部放大图均为点(0.84, 0.28)附近的局部放大图。



(a) 微重力环境下无间隙补偿空间轨迹曲线

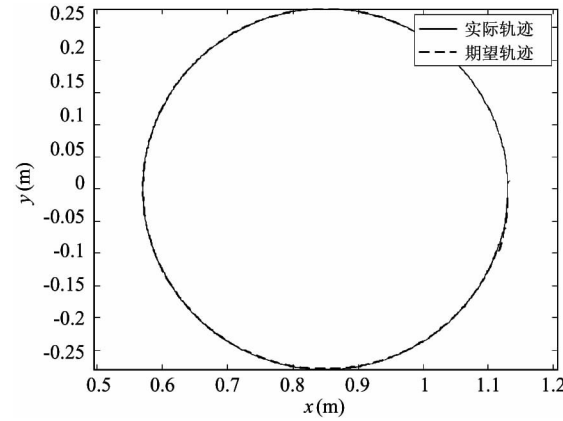


(b) 微重力环境下无间隙补偿空间轨迹局部放大图

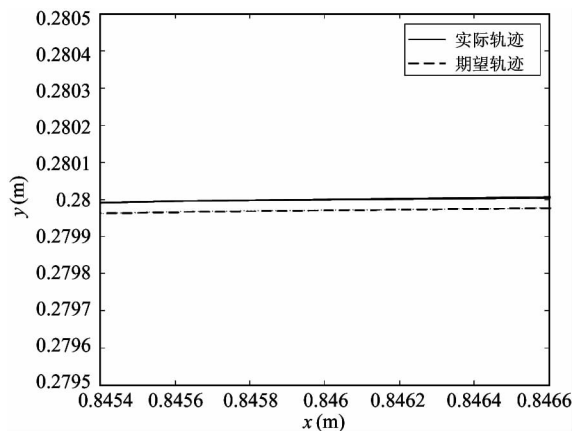


(c) 微重力环境下无间隙补偿空间轨迹误差曲线

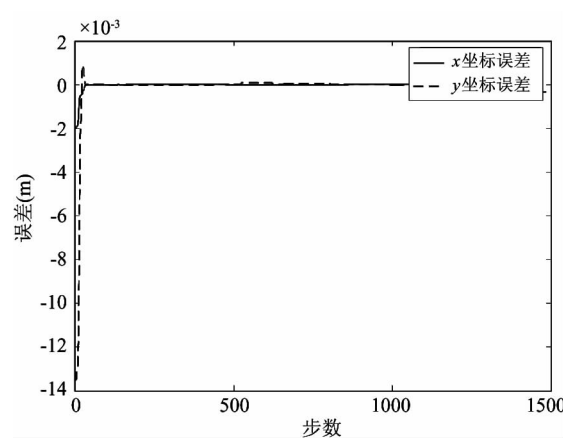
图 15 微重力环境下无间隙补偿仿真曲线



(a) 微重力环境下有间隙补偿空间轨迹曲线



(b) 重力环境下有间隙补偿空间轨迹局部放大图



(c) 微重力环境下有间隙补偿空间轨迹误差曲线

图 16 微重力环境下有间隙补偿仿真曲线

5 结 论

本研究针对空间精密操作系统,以含间隙二自由度机械臂为例,运用无质量轻杆模型代替间隙,通过仿真研究得出在两种重力环境下,间隙的存在都会导致机械臂末端轨迹偏离期望轨迹,影响机械臂

的轨迹跟踪精度。在此基础上还进行了无间隙补偿和有间隙补偿控制的比较分析。仿真结果表明,在重力和微重力环境下,考虑带有间隙补偿控制时,通过将间隙作为系统的干扰,利用控制器的抗干扰性对间隙进行补偿控制后,机械臂的末端轨迹跟踪精度均得到明显的提高,从而验证了本研究所提控制方法的有效性。需要说明的是,本文间隙等效模型采用的是无质量轻杆,进行建模时忽略了轴颈和轴套接触表面的弹性形变以及摩擦等因素,主要体现间隙对机械臂在运动学方面带来的影响,难以描述运动副元素间的动力学特性,下一步的研究工作是针对模型的建立进行完善和改进。

参考文献

- [1] Dubowsky S, Freudenstein F. Dynamic analysis of mechanical systems with clearance, Part 1: formation of dynamic model, *Trans ASME J Eng Ind*, 1971, 93B(1): 305-309
- [2] Dubowsky S, Freudenstein F. Dynamic analysis of mechanical systems with clearances, Part 2: Dynamic response. *Trans ASME J Eng Ind*, 1971, 93(1): 310-316
- [3] Dubowsky S, Gardner T N. Dynamic interactions of link elasticity and clearance connections in planar mechanical systems. *Trans ASME J Eng Ind*, 1975, 97B: 652-661
- [4] Dubowsky S, Gardner T N. Design and analysis of multilink flexible mechanisms with multiple clearance connections. *Trans ASME J Eng Ind*, 1977, 99B: 88-96
- [5] 张劲夫, 许庆余, 尹铸华等. 考虑运动副间隙的机构动力学研究方法. *机械科学与技术*, 2000, 19(S1): 22-23 + 27
- [6] 阎绍泽, 贾书惠, 吴德隆等. 含间隙的变拓扑多体系动力学建模分析. *中国机械工程*, 2000, 11(6): 624-626
- [7] 朱巨才, 符炜. 含间隙机构无质量杆-弹簧阻尼组合模型的近似解法. *机械设计*, 2004, 21(2): 43-46
- [8] 何柏岩, 高峰, 王树新. 计及铰链间隙的机械臂动力学建模与仿真. *天津大学学报*, 2005, 38(9): 795-799
- [9] Tsai M J, Lai T H. Kinematic sensitivity analysis of linkage with joint clearance based on transmission quality. *Mechanism and Machine Theory*, 2004, 39(11): 1189-1206
- [10] Ting K L, Zhu J M, Watkins D. The effects of joint clearance on position and orientation deviation of linkages and manipulators. *Mechanism and machine theory*, 2000, 35(3): 391-401
- [11] 黄宇中, 刘文燊, 谢莉. 机器人机构关节间隙对手部位姿误差的影响. *上海交通大学学报*, 1990, 24(1): 48-56
- [12] 崔道碧. 关节间隙对机器人末端位姿误差的影响. *湖南大学学报*, 1999, 26(2): 32-36
- [13] 宋月娥, 吴林, 戴明. 机器人关节间隙误差分析. *机械工程学报*, 2003, 39(4): 11-14
- [14] Moon F C, Li G X. Experimental study of chaotic vibrations in pin-jointed space truss structure. *AIAA Journal*, 1990, 28(5): 95-921
- [15] Folkman S L, Rowsell E A, Ferney G D. Influence of pinned joints on damping and dynamic behavior of a truss. *Guidance, Control, and Dynamics*, 1995, 8(6): 1398-1403
- [16] Flores P, Ambrósio J, Claro HCP, et al. A study on dynamics of mechanical systems including joints with clearance and lubrication. *Mechanism and Machine Theory*, 2006, 41: 247-261
- [17] 吴焕芹, 程强, 钟诗清. 含间隙的平面四杆机构运动特性分析. *武汉理工大学学报(信息与管理工程版)*, 2010, 32(3): 419-422
- [18] 阎绍泽, 陈鹿民, 季林红等. 含间隙铰的机械多体系动力学模型. *振动工程学报*, 2003, 16(3): 290-294
- [19] 吴德隆, 李海阳, 彭伟斌. 空间站大型伸展机构的运动稳定性分析. *宇航学报*, 2002, 23(6): 98-102
- [20] 王巍, 于登云, 马兴瑞. 航天器铰接结构非线性动力学特性研究进展. *力学进展*, 2006, 36(2): 233-238
- [21] 赵阳, 潘冬, 白争锋等. 含间隙卫星天线双轴机构动态磨损特性研究. *机械设计与制造*, 2011, (05): 107-109
- [22] 游斌弟, 星载天线动态指向精度动力学分析与控制 [博士学位论文], 哈尔滨: 哈尔滨工业大学. 2011
- [23] 刘福才, 高娟娟, 王跃灵等. 重力对空间机械臂运动控制的影响. *高技术通讯*, 2012, 22(9): 944-950
- [24] 刘福才, 刘彩凤, 秦利, 等. 重力作用下的摩擦对空间机械臂运动控制的影响. *高技术通讯*, 2014 (1): 65-71

Effect of clearance on the manipulator end trajectory under different gravity environments

Liu Fucai, Hou Tiantian, Qin Li, Gao Jingfang
(Industrial Computer Control Engineering of Yanshan University,
Key Laboratory of Hebei Province, Qinhuangdao 066004)

Abstract

Taking the on orbit servicing and high precision manipulation as the background, a clearance equivalent model of the mechanisms with clearance was studied for both ground alignment and spatial service according to the movement characteristics of mechanisms clearance interface under different gravity environments. The main factors affecting the formation of clearance under different gravity environments were analyzed, and then taking a 2-DOF manipulator as an example, the dynamics analytical solution of the manipulator with clearance in both the gravity and the gravity release environments was obtained by using the Massless link method. What is more, the simulation research on the coupling effect of clearance and gravity on the precision of end trajectory tracking control was conducted. Based on this, to compensate the uncertainty and the disturbance caused by the clearance equivalent model, a clearance compensation controller was designed and the simulation results showed the effectiveness of it.

Key words: space manipulator, joint clearance, massless link method, microgravity