DOI: 10.3901/JME.2020.19.160

面向空间软捕获的双模传动关节设计与仿真^{*}

徐升¹ 褚明¹ 张晓东² 孙汉旭¹

(1. 北京邮电大学自动化学院 北京 100876;

2. 北京空间飞行器总体设计部空间智能机器人系统技术与应用北京市重点实验室 北京 100094)

摘要: 星载抓捕机构在空间目标捕获任务中发挥着重要作用,然而空间捕获时的对接碰撞很容易导致抓捕机构失稳。针对空间捕获软对接问题,设计了一种双模传动软接触关节,既能实现双自由度刚性传动,同时可通过阻尼吸振实现空间六维碰撞的缓冲和卸载。在ADAMS仿真软件中建立单关节星载抓捕机构模型,通过空间单维和六维碰撞下的仿真研究,验证了软接触关节缓冲和卸载空间六维碰撞的原理及其对基座与关节稳定的有效性。进一步建立三关节星载抓捕机构模型,通过空间六维碰撞下的仿真试验,说明了双模传动软接触关节在多关节抓捕机构中应用的有效性。

关键词: 软捕获; 双模传动; 阻尼吸振

中图分类号: V423; TP242

Design and Simulation of Dual-mode Transmission Joint for Spatial Soft Capture

XU Sheng¹ CHU Ming¹ ZHANG Xiaodong² SUN Hanxu¹

(1. School of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876;

2. Beijing Key laboratory of Intelligent Space Robotic Systems Technology and Application, Beijing Institute of Spacecraft System Engineering CAST, Beijing 100094)

Abstract: The space-borne manipulator has been playing an important part in the acquisition task of spatial targets, but the docking collision during space capture can easily lead to the instability of both the manipulator and floating base. Aiming at the problem of soft capture, a kind of dual-mode transmission soft-contact joint is developed, which can not only realize the rigid transmission of double degrees of freedom, but also realize the buffering and unloading of space six dimensional collision through damping vibration absorption. The single joint space-based capture mechanism model is established in ADAMS software. The principle of buffering and unloading spatially six-dimensional collision, and the effectiveness for the stability of base and joint, are verified through the comparative simulation of spatially single-dimensional and six-dimensional collision. Furthermore, the model of three joint on-board catching mechanism is established, and the effectiveness of the application of dual-mode transmission soft contact joint in multi joint catching mechanism is illustrated by the simulation experiment in six-dimensional space collision.

Key words: soft capture; dual-mode transmission; damping vibration absorption

0 前言

目标捕获是空间在轨服务的重要组成部分,然而捕获时的对接碰撞极易引起抓捕机构基座失稳。实现空间在轨目标捕获时的对接软接触,对于实现空间在轨捕获任务具有重要意义。

目前,国际上基于对接机构的空间软捕获技术的研究已经有大量的实践,如锥-杆对接系统、空间飞网技术、电磁对接等^[1]。近年来,通过设计新型空间对接机构以实现软对接仍然是众多学者研究的热点^[2-4],与此同时,许多学者通过讨论对接机构参数对微小卫星软接触的影响,在当前现有对接机构的基础上提出了新型对接机制,并通过仿真试验验证了新型对接机制的有效性^[5-7]。

机械臂是星载捕获机构的典型部件,利用多关节机械臂开展在轨对接已成为空间目标捕获研究的

^{*} 国家自然科学基金(51875046, 61733001)、科技部重大专项(2017YFB1300204)、国家留学基金(CSC201906475018)和北京市自然科学基金(3202021)资助项目。20200603 收到初稿,20200713 收到修改稿

热点。YOSHIDA 等^[8-13]基于星载抓捕机构动量和角动量主动控制, 最小化了轨迹跟踪和轨迹规划时对接碰撞的影响, 实现关节镇定, 避免基座姿态失稳; GUO 等^[14-16]基于双臂机器人, 通过最优化碰撞前的双臂配置, 实现轨迹跟踪和轨迹规划时对接碰撞的最小化; YU 等^[17-21]基于捕获机构轨迹规划, 通过对捕获机构的主动控制调整机械臂姿态以最小化基座姿态扰动。

以上研究的出发点是基于传统电驱动关节的机械臂模型, 而通过研制机械臂新型关节实现空间对接的软接触也逐渐受到许多学者的关注。CHU^[22]在机械臂关节内部引入变刚度驱动器, 然后通过自学习软抓捕控制算法, 最小化空间对接对漂浮基座的影响。NGUYEN^[23]将可控磁流变阻尼器^[24]应用于平面二自由度机械臂关节空间, 但并没有解决空间多维对接软接触的问题。BIAN^[25]根据内共振原理, 在关节空间内引入减振器, 卸载机械臂的非线性振动, 进而实现漂浮基座的稳定。

本文面向空间目标捕获的软对接任务, 设计了一种兼具刚性驱动能力和柔性接触能力的双模传动软接触关节。首先在 ADAMS 软件中建立单关节星载抓捕机构模型, 分别在单维碰撞和空间六维碰撞下仿真, 结果表明所提出的软接触关节能够实现空间六维空间碰撞的缓冲与卸载; 进而以三关节星载抓捕机构模型为对象研究了多关节串联模型的空间软对接能力, 通过空间六维碰撞下的仿真, 说明了提出的软接触关节在多关节星载抓捕机构中具有良好的适应性。

1 双模软接触关节的功能定义

一种用于星载抓捕机构的软接触关节, 其三维模型如图 1 所示。该关节具有双模切换功能, 一方面, 通过电动机和齿轮驱动, 以十字轴结构为旋转轴, 实现关节两端臂杆的刚性传动; 另一方面, 通过可控阻尼组件, 单关节即可实现空间六维碰撞的缓冲与卸载。其功能定义如下。

(1) 运动传输功能, 具备为星载抓捕机构提供操作负载的驱动与传动能力。

(2) 测量功能, 即通过传感器实现运动、力等可控变量的测量。

(3) 闭环控制功能, 实现星载抓捕机构路径规划等操作的运动和阻尼控制的闭环控制。

(4) 阻尼吸振功能, 单关节可实现空间六维碰撞的卸载和缓冲。

(5) 双模切换功能, 根据在轨任务的不同执行阶段, 离合器件可实现刚性驱动结构和柔性软接触传动结构的双模切换。

图 1 软接触关节三维模型

2 双模软接触关节设计

2.1 软接触关节结构组成

根据第 1 节中的功能定义, 分别设计了软接触关节的刚性驱动机构和柔性传动机构及两种传动机构间的切换机构, 具体结构组成框图如图 2 所示。

图 2 软接触关节的结构组成框图

软接触关节结构包含伺服控制器与机械本体两部分。伺服控制器分为中央控制器和嵌入式控制器; 机械本体由可控阻尼组件和驱动机构组成, 可控阻尼组件分为旋转阻尼组件和直线阻尼组件; 在伺服控制器与机械本体间建立通信协议, 可实现星载抓捕机构捕获前刚性驱动与捕获时冲击卸载缓冲间的切换控制和捕获时的关节阻尼控制。

如图 3 所示, 旋转阻尼单元由旋转式磁流变阻尼器、传动系、扭转弹簧、转换机构和离合装置组成; 如图 4 所示, 直线阻尼单元由直线式磁流变阻尼器、传动系、扭转弹簧、转换机构和离合装置组成。转换机构与离合装置用于实现刚性驱动与阻尼缓冲卸载间的切换; 传动系用于机械传动; 通过对关节内部磁流变阻尼器的控制, 实现对星载抓捕机构捕获时碰撞的缓冲卸载。

图3 旋转阻尼单元

图4 直线阻尼单元

2.2 软接触关节结构方案

软接触关节具备双模切换功能,设计十字轴作为连接件。一方面,十字轴的正交旋转驱动轴可实现单关节双自由度刚性传动,若将多关节和臂杆耦合成星载抓捕机构则能实现空间六维路径规划;另一方面,在十字轴传动回路中引入阻尼吸振器,并通过离合装置和转换机构的切换,则可实现对空间六维动量的缓冲和卸载。软接触关节的总体外围尺寸为直径0.23 m、长度0.75 m,其内部结构分解图分别如图5~8所示。

图5 软接触关节的结构分解图一

1. 旋转内壳 2. 旋转外壳 3. 支架一 4. 连接板一 5. 支架三
7. 十字轴 8. 支架二 9. 连接板二

刚性传动原理分析:电动机驱动单元一(12)是主动力矩输入端;离合器一(11)和控制器(28)固定于电动机基座(29);电动机基座(29)固定于支架二(8);电动机驱动单元二(12)和离合器二(43)固定于支架四(48)上;支架一(3)与旋转

外壳(2)通过连接板一(4)固接;滑轨一(16)、滑轨二(21)、滑轨三(22)和滑轨四(41)呈对称式分布,并固定于滑动内壳(15);对应的电磁制动滑块一(17)、滑块二(20)、滑块三(19)和滑块四(40)固定于滑动外壳(6)。滑动内壳(15)和滑动外壳(6)之间的相对滑动通过滑轨一(16)、滑轨二(21)、滑轨三(22)、滑轨四(41)、电磁制动滑块一(17)、滑块二(20)、滑块三(19)和滑块四(40)实现,并通过电磁控制实现自由滑动模式和锁定模式的切换。

阻尼吸振原理分析:直线式磁流变阻尼器(36)、线位移传感器(37)和弹簧机构(38)的基体固定于滑动外壳(6);阻尼器的导向杆通过连接板三(35)固定于滑动内壳(15);旋转式磁流变阻尼器X(47)和编码器X(49)的基体安装于支架四(48);旋转式磁流变阻尼器Y(23)和编码器Y(24)的基体安装于支架二(8),其旋转轴是由十字轴(7)充当;旋转式磁流变阻尼器Z(51)、编码器Z(52)、扭簧机构Z(53)、制动器(55)的基体固定于旋转旋转内壳(1);连接板四(54)固定于支架三(5),其轴是旋转轴Z(50);旋转阻尼组件中的离合器X(45)和离合器Y(27)的固定支座X(44)和支座Y(25)分别固定于支架四(48)和支架二(8),主动轴分别由所述齿轮一(13)、齿轮三(30)的轴充当;扭簧机构X(46)和扭簧机构Y(26)是一端分别固定于支架一(3)和支架四(48),一端分别固定于离合器X(45)和离合器Y(27)的从动盘;旋转外壳(2)通过连接板一(4)和连接板二(9)分别与支架一(3)和支架二(5)固定;旋转内壳(1)和旋转外壳(2)之间通过轴承连接,实现相对转动。

图6 软接触关节的结构分解图二

10. 电动机齿轮 11. 离合器一 12. 电动机驱动单元一 13. 齿轮一
14. 齿轮二 15. 滑动内壳 16. 滑轨一 17. 滑块一 18. 支座
19. 滑块三 20. 滑块二 21. 滑轨二 22. 滑轨三
23. 旋转式磁流变阻尼器Y 24. 编码器Y 25. 支座Y
26. 扭簧机构Y 27. 离合器Y 28. 控制器 29. 电动机基座

图 7 软接触关节的结构分解图三

30. 齿轮三 31. 力矩传感器 32. 支架三 33. 齿轮四
31. 力矩传感器 Y 32. 支架三 33. 齿轮四 34. 电动机齿轮二
35. 连接板三 36. 直线式磁流变阻尼器 37. 线位移传感器
38. 弹簧机构 39. 支座 40. 滑块四 41. 滑轨四
42. 电动机驱动单元二 43. 离合器二 44. 支座 X 45. 离合器 X
46. 扭簧机构 X 47. 旋转式磁流变阻尼器 48. 支架四 49. 编码器 X

图 8 软接触关节的结构分解图四

50. 旋转轴 Z 51. 旋转式磁流变阻尼器 Z 52. 编码器 Z
53. 扭簧机构 Z 54. 连接板四 55. 制动器 56. 力矩传感器 X

2.3 软接触关节原理分析

目前刚性驱动的理论成果已经相对成熟, 因此本文对软接触关节的原理分析侧重于探究如何通过阻尼吸振来实现空间六维碰撞的缓冲和卸载。在空间捕获任务中, 要求星载抓捕机构具有空间六维路径规划能力, 故图 9 以三关节星载抓捕机构为例, 显示了三个连续关节的受力(力矩)图。在笛卡尔坐标系下, 在软接触关节的 X 和 Y 方向分别加入旋转式阻尼器, 在 Z 方向分别加入旋转式和直线式阻尼器, 此时共有四个自由度来实现空间六维对接碰撞力的缓冲和卸载, 即 X 、 Y 和 Z 方向的旋转冲量分别由 X 、 Y 和 Z 方向的旋转阻尼单元缓冲和卸载; Z 线方向的线动量由 Z 方向的直线阻尼单元缓冲卸载; X 和 Y 方向的线动量分别由 Y 和 X 方向的旋转阻尼单元缓冲卸载。

由图 9 可以看出沿 X 方向的力 $F_{x(k+1)}$ 可以转换为围绕 $O_k y_k$ 轴的旋转力矩 M_{y_k} 和围绕 $O_{k-1} y_{k-1}$ 轴的旋转力矩 $M_{y(k-1)}$ 。同样, 沿 Y 向的力 $F_{y(k+1)}$ 可以转换为围绕 $O_k x_k$ 轴的力矩 M_{x_k} 和围绕 $O_{k-1} x_{k-1}$ 轴的转动力矩 $M_{x(k-1)}$ 。由此可知, 关节 X 和 Y 方向的旋转阻尼单元, 能间接稳定沿 Y 方向和 X 方向的线动量, 从而实现空间六维动量的缓冲和卸载。

图 9 软接触机制示意图

3 单关节仿真实例

如图 10 所示, 在 ADAMS 软件中建立单关节星载抓捕机构模型。而后针对单关节星载抓捕机构, 分别设计了两种典型的目标碰撞, 即单维碰撞和空间六维碰撞, 以验证软接触关节缓冲和卸载空间六维动量的有效性。

图 10 单关节抓捕机构模型

3.1 单维碰撞

软接触关节在空间任意方向上都具有缓冲和卸载碰撞动量的能力。如图 11 所示, 六个单向碰撞力, F_x 即 X 方向碰撞力, M_x 即 X 方向碰撞力矩, F_y 即 Y 方向碰撞力, M_y 即 Y 方向碰撞力矩, F_z 即 Z 方向碰撞力, M_z 即 Z 方向碰撞力矩, 分别施加在星载抓捕机构末端, 通过测量关节各自由度的位移, 判断软接触关节卸载和缓冲六维空间碰撞的原理。

图 11 单关节抓捕机构单维碰撞示意图

仿真参数如下：作用于抓捕机构末端的单维碰撞力或力矩为 50 N 或 $50\text{ N}\cdot\text{m}$ ，持续时间为 0.1 s 。漂浮基座质量为 200 kg ，惯性矩为 $I_x=I_y=70\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ， $I_z=60\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ；臂杆质量为 40 kg ，惯性矩为 $I_x=I_y=10\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ， $I_z=5\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。阻尼器的弹性系数分别为 $f_{wy}=f_{wz}=40\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ 和 $f_z=40\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ ，阻尼系数为 $10.0\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}/\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ 。仿真步长为 0.1 s 。

如图 12 所示，当星载抓捕机构末端仅受到沿 X 方向碰撞力时，关节只产生绕 Y 轴的旋转运动；如图 13 所示，当末端仅受到 Y 方向碰撞力时，关节只产生 X 向旋转运动；如图 14 所示，当末端仅受到 Z 方向碰撞力时，关节只产生 Z 向直线运动；如图 15 所示，当末端仅受绕 X 轴的碰撞时，关节只产生绕 X 方向旋转运动；如图 16 所示，当末端仅受绕 Y 轴的碰撞时，关节只产生绕 Y 方向旋转运动；如图 17 所示，当末端仅受绕 Z 轴的碰撞时，关节只产生绕 Z 方向旋转运动。此外，所有的关节位移均在阻尼作用下幅值收敛，由此可验证第 2.3 中提出的软接触原理。

图 12 单 X 轴直线碰撞下关节位移曲线

图 13 单 Y 轴直线碰撞下关节位移曲线

图 14 单 Z 轴直线碰撞下关节位移曲线

图 15 单 X 轴旋转碰撞下关节位移曲线

图 16 单 Y 轴旋转碰撞下关节位移曲线

图 17 单 Z 轴旋转碰撞下关节位移曲线

3.2 空间六维碰撞

如图 18 所示, 在空间六维碰撞下对单关节星载捕获机构分别在弹性无阻尼、弹性有阻尼和刚性等三个不同的条件设置下进行仿真, 得到基座的位姿曲线和关节各自由度的位移曲线, 进而验证软接触关节缓冲和卸载空间六维动量的有效性。

图 18 单关节抓捕机构空间六维碰撞示意图

具体仿真参数如下: 末端的瞬时冲击力/力矩 $\mathbf{F}=(F_x, F_y, F_z)=(50 \text{ N}, 50 \text{ N}, 50 \text{ N})$, $\mathbf{M}=(M_x, M_y, M_z)=(50 \text{ N}\cdot\text{m}, 50 \text{ N}\cdot\text{m}, 50 \text{ N}\cdot\text{m})$, 持续时间 0.1 s ; 基座质量 200 kg , 惯性矩为 $I_x=I_y=70 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $I_z=60 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$; 臂杆质量为 40 kg , 惯性矩为 $I_x=I_y=10 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $I_z=5 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$; 关节各自由度弹性系数为 $f_{wx}=f_{wy}=f_{wz}=40 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ 和 $f_z=40 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$; 弹性无阻尼条件下关节阻尼系数为 $10.0 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$, 弹性有阻尼条件下关节阻尼系数为 $0 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}/\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

如图 19~24 所示, 在空间六维碰撞下, 刚性模式下漂浮基座的线速度和角速度都会发生突变; 弹性无阻尼模式下漂浮基座的线速度和角速度不再突变, 但存在长期的振荡; 弹性有阻尼模式下, 漂浮基座的线速度和角速度不仅避免了突变, 并且可以在 10 s 内收敛。仿真结果表明, 软接触关节加载的磁流变阻尼器可以吸收空间碰撞动量, 并将捕获目标的一部分动能转化为阻尼器的内能, 即具备缓冲与卸载空间六维碰撞的能力, 进而避免基座失稳。

图 19 空间六维碰撞下基座 X 向速度曲线

图 20 空间六维碰撞下基座 Y 向速度曲线

图 21 空间六维碰撞下基座 Z 向速度曲线

图 22 空间六维碰撞下基座 X 向角速度曲线

图 23 空间六维碰撞下基座 Y 向角速度曲线

图 24 空间六维碰撞下基座 Z 向角速度曲线

在刚性条件下，由于关节处于锁定状态，故关节各自由度位移为零。图 25 和图 26 分别给出了空间六维碰撞下无阻尼关节的位移曲线和带阻尼关节的位移曲线。如图 25 所示，无阻尼模式下关节各自由度的位移曲线存在长期的振荡；而如图 26 所示，有阻尼模式下关节各自由度的位移不仅在 10 s 内收敛至稳定，避免了震荡，并且曲线峰值降为无阻尼位移曲线的一半。仿真结果表明，在空间六维碰撞下，在软接触关节中引入磁流变阻尼器可以实现单关节星载抓捕机构关节的稳定。

图 25 空间六维碰撞下无阻尼关节位移曲线

图 26 空间六维碰撞下带阻尼关节位移曲线

通过空间六维碰撞下单关节抓捕机构的基座速度和关节位移曲线分析，验证了软接触关节软接触关节具备缓冲与卸载多关节星载捕获机构空间六维

碰撞的能力，避免漂浮基座与关节失稳。

4 多关节应用仿真

如图 27 所示，在 ADAMS 软件中建立三关节星载抓捕机构模型，将第 3 节中单关节星载抓捕机构拓展到三关节星载抓捕机构，进而研究软接触关节在多关节星载抓捕机构中应用的有效性。

图 27 三关节抓捕机构模型

由于在空间捕获任务中，要求星载抓捕机构具备空间六维路径规划能力，而单个软接触关节具备两个自由度的刚性驱动自由度，因此，在空间捕获任务中，星载抓捕机构至少拥有三个软接触关节。三关节星载抓捕机构仿真示意图如图 28 所示，通过空间六维碰撞下仿真得到三关节星载抓捕机构在弹性有阻尼、弹性无阻尼和刚性条件下的基座速度与角速度变化曲线，以及各关节在有阻尼和无阻尼模式下的位移曲线，验证软接触关节在多关节星载抓捕机构中应用的有效性。

图 28 三关节抓捕机构空间六维碰撞示意图

具体仿真参数如下：抓捕机构末端的瞬时冲击力/力矩 $\mathbf{F}=(F_x, F_y, F_z)=(50 \text{ N}, 50 \text{ N}, 50 \text{ N})$ ， $\mathbf{M}=(M_x, M_y, M_z)=(50 \text{ N}\cdot\text{m}, 50 \text{ N}\cdot\text{m}, 50 \text{ N}\cdot\text{m})$ ，持续时间 0.1 s；基座质量 200 kg，惯性矩为 $I_x=I_y=70 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ， $I_z=60 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ；臂杆质量为 40 kg，惯性矩为 $I_x=I_y=10 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ， $I_z=5 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ；关节各自由度弹性系数为 $f_{wx}=f_{wy}=f_{wz}=40 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ $f_z=40 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ ；弹性有阻尼条件下关节阻尼系数为 $10.0 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ ，弹性有阻尼条件下关节阻尼系数为 $0 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}/\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

如图 29~34 所示，在空间六维碰撞下，刚性模式下漂浮基座的线速度和角速度都会发生突变；弹

性无阻尼模式下漂浮基座的线速度和角速度不再突变, 但存在长期的振荡; 弹性有阻尼模式下, 漂浮基座的线速度和角速度不仅避免了突变, 而且曲线幅值发生了收敛。仿真结果表明, 与图 26~29 相比, 有阻尼和无阻尼模式下运动趋势大致相同, 并且在有阻尼和无阻尼曲线对比情况下, 图 29~34 曲线峰值相比图 26~29 曲线有所下降, 基座更稳定, 这是由多关节阻尼组件串联所导致, 突出了多软接触关节星载抓捕机构在空间捕获任务中实现基座稳定的优越性。

图 29 三关节抓捕机构基座 X 向速度曲线

图 30 三关节抓捕机构基座 Y 向速度曲线

图 31 三关节抓捕机构基座 Z 向速度曲线

图 32 三关节抓捕机构基座 X 向角速度曲线

图 33 三关节抓捕机构基座 Y 向角速度曲线

图 34 三关节抓捕机构基座 Z 向角速度曲线

在刚性条件下, 由于关节处于锁定状态, 故关节各自由度位移为零。图 35~40 分别给出了空间六维碰撞下无阻尼软接触关节的位移曲线和带阻尼关节的位移曲线。如图 35、图 37 和图 39 所示, 无阻尼模式下各关节自由度的位移曲线存在长期的振荡; 而如图 36、图 38 和图 40 所示, 有阻尼模式下各关节自由度的位移曲线避免了震荡, 并且曲线峰值下降为无阻尼位移曲线的一半。与图 25 和图 26 相比, 有阻尼和无阻尼模式下关节运动变化大致相同, 并且图 35~40 曲线峰值相比图 25 和图 26 曲线有所下降, 这是由多关节阻尼组件串联所导致, 进一步突出了多软接触关节星载抓捕机构在空间捕获任务中实现关节的优越性。

图35 空间六维碰撞下无阻尼关节一位移曲线

图36 空间六维碰撞下有阻尼关节一位移曲线

图37 空间六维碰撞下无阻尼关节二位移曲线

图38 空间六维碰撞下有阻尼关节二位移曲线

图39 空间六维碰撞下无阻尼关节三位移曲线

图40 空间六维碰撞下有阻尼关节三位移曲线

通过空间六维碰撞下三关节抓捕机构和单关节抓捕机构的基座速度和关节位移曲线对比,说明了软接触关节在多关节抓捕机构中应用的有效性,即软接触关节具备缓冲与卸载多关节星载捕获机构空间六维碰撞的能力。

5 结论

(1) 提出了一种双模传动的软接触关节结构,兼具刚性传动功能和对空间六维碰撞力的缓冲和卸载功能。

(2) 通过单维碰撞和空间六维碰撞下单关节星载抓捕机构的仿真试验,验证了软接触关节缓冲和卸载空间六维碰撞的有效性。

(3) 在空间六维碰撞下对三关节星载抓捕机构进行仿真,对比单关节星载抓捕机构空间六维碰撞下的仿真结果,说明了软接触关节在多关节抓捕机构中应用的优越性。研究结果对今后通过对软接触关节的可控阻尼寻优实现多关节星载抓捕机构捕获时的镇定控制具有参考价值。

参考文献

- [1] PAIROT J M, FREZET M, TAILHADES J. European rendezvous and docking system[J]. Acta Astronautica,

- 1992, 28(28): 31-42.
- [2] FENG Fei, LIU Yiwei, LIU Hong, et al. Development of space end-effector with capabilities of misalignment tolerance and soft capture based on tendon-sheath transmission system[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(11): 3015-3030.
- [3] OLIVIERI L, FRANCESCONI A. Design and test of a semiandrogynous docking mechanism for small satellites[J]. Acta Astronautica, 2016, 122: 219-230.
- [4] LIU Xiaoguang, LU Yong, ZHOU Yu, et al. Prospects of using a permanent magnetic end effector to despin and detumble an uncooperative target[J]. Advances in space research, 2018, 61(8): 2147-2158.
- [5] 李隆球, 邵广斌, 周德开, 等. 一种长行程小型化对接机构设计与分析[J]. 载人航天, 2016, 22(6): 758-765. LI Longqiu, SHAO Guangbin, ZHOU Dekai, et al. Design and analysis of a long-stroke and miniaturized docking mechanism[J]. Manned Spaceflight, 2016, 22(6): 758-765.
- [6] 刘洋, 姚燕安, 何妍颖. 变拓扑 3-RSR 多面体对接机构的设计与研究[J]. 载人航天, 2018, 24(1): 61-66. LIU Yang, YAO Yanan, HE Yanying. Design and research of topological 3-RSR polyhedron docking mechanism[J]. Manned Spaceflight, 2018, 24(01): 61-66.
- [7] ZHANG Xiang, HUANG Yiyong, CHEN Xiaoqian. Analysis and design of parameters in soft docking of micro/small satellites[J]. Science China (Information Sciences), 2017, 60(5): 51-64.
- [8] YOSHIDA K, SASHIDA N, KURAZUME R, et al. Modeling of collision dynamics for space free-floating links with extended generalized inertia tensor[C]// Proceedings of the 1992 IEEE International Conference. Nice: IEEE, 1992, 899-904.
- [9] YOSHIDA K, SASHIDA N. Modeling of impact dynamics and impulse minimization for space robots[C]// Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference. Yokohama: IEEE, 1993: 2064-2069.
- [10] WEE L B, WALKER M W. On the dynamics of contact between space robots and configuration control for impact minimization[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1993, 9(5): 581-591.
- [11] NENCHEV D N, YOSHIDA K, VICHITKULSAWAT P, et al. Reaction null-space control of flexible structure mounted manipulator systems[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15(6): 1011-1023.
- [12] NENCHEV D N, YOSHIDA K. Impact analysis and post-impact motion control issues of a free-floating space robot subject to a force impulse[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15(3): 548-557.
- [13] CONG Peichao, ZHANG Xin. Preimpact configuration analysis of a dual-arm space manipulator with a prismatic joint for capturing an object[J]. Robotica, 2013, 31(6): 853-860.
- [14] 郭闻昊, 王天舒. 空间机器人抓捕目标星碰撞前构型优化[J]. 宇航学报, 2015, 36(4): 390-396. GUO Wenhao, WANG Tianshu. Pre-impact configuration optimization for a space robot capturing target satellite[J]. Journal of Astronautics, 2015, 36(4): 390-396.
- [15] CHEN Xuazhen, QIN Shiyin. Motion planning for dual-arm space robot towards capturing target satellite and keeping the base inertially fixed[J]. IEEE Access, 2018, 6(6): 26292-26306.
- [16] XU Wenfu, YAN Lei, HU Zhonghua, et al. Area-oriented coordinated trajectory planning of dual-arm space robot for capturing a tumbling target[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(9): 2151-2163.
- [17] YU Zhangwei, LIU Xiaofeng, CAI Guoping. Dynamics modeling and control of a 6-DOF space robot with flexible panels for capturing a free floating target[J]. Acta Astronautica, 2016, 128: 560-572.
- [18] PETER X, YUE Shiguang. Pre-posed configuration of flexible redundant robot manipulators for impact vibration alleviating[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(1): 195-200.
- [19] LAROUCHE B P, ZHU Z H. Autonomous robotic capture of non-cooperative target using visual servoing and motion predictive control[J]. Autonomous Robots, 2014, 37(2): 157-167.
- [20] MCCOURT R A, SILVA C W D. Autonomous robotic capture of a satellite using constrained predictive control[J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 2006, 11(6): 699-708.
- [21] ZHANG Long, JIA Qingxuan, CHEN Gang. Pre-impact trajectory planning for minimizing base attitude disturbance in space manipulator systems for a capture task[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(4): 1199-1208.
- [22] CHU Ming, WU Xingyu. Modeling and self-learning soft-grasp control for free-floating space manipulator during target capturing using variable stiffness method[J].

- IEEE Access, 2018, 6(6): 7044-7054.
- [23] NGUYEN H, THAI C, SHARF I. Capture of spinning target with space manipulator using magneto rheological damper[C]// Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Toronto: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2010, 1-12.
- [24] BALAMURUGAN L, JANCIRANI J, ELTANTAWIE M A. Generalized magnetorheological (MR) damper model and its application in semi-active control of vehicle suspension system[J]. International Journal of Automotive Technology, 2014, 15(3): 419-427.
- [25] BIAN Yushu, GAO Zhihui, LÜ Xin, et al. Theoretical and

experimental study on vibration control of flexible manipulator based on internal resonance[J]. Journal of Vibration and Control, 2018, 24(15): 3321-3337.

作者简介: 徐升, 男, 1994 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机器人动力学与控制。

E-mail: 2013211784@bupt.edu.cn

褚明(通信作者), 男, 1983 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机器人动力学与控制。

E-mail: chuming_bupt@bupt.edu.cn

张晓东, 男, 1980 年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为空间机器人技术。

E-mail: 15810002976@139.com

孙汉旭, 男, 1960 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为空间机器人技术。

E-mail: hxsun@bupt.edu.cn