

弱撞击对接机构捕获过程的传力性能分析

陈传志 聂宏 陈金宝 王小涛

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京, 210016)

摘要:弱撞击对接机构(Low impact docking mechanism, LIDM)的力雅可比矩阵包含了驱动臂与负载传感环力和力矩的传递关系信息。然而,力和力矩具有不同的量纲,将雅可比矩阵分解为两个分别与力和力矩传递相关的子矩阵,在两个子矩阵的基础上,分别推导出力和力矩传递关系的数学模型,并通过计算工作空间内力和力矩传递能力的分布规律,研究 LIDM 力和力矩的传递性能。分析结果表明,对接机构的结构构型确定后,力和力矩传递性能呈椭球体分布,并随负载传感环沿不同路径移动,呈现不同的规律。研究结果对以 LIDM 为代表的空间对接机构的结构性能评价及优化具有重要的工程意义。

关键词:空间对接;弱撞击对接机构;雅可比矩阵;力传递性能

中图分类号:V526 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2014)03-0451-06

Analysis of Force Transmissibility Performance of Low Impact Docking Mechanism During Capturing Process

Chen Chuanzhi, Nie Hong, Chen Jinbao, Wang Xiaotao

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The Jacobian matrix of the low impact docking mechanism (LIDM) contains relationship information between the actuators and the load sensing ring's forces and torques. However, forces and torques have different dimensions. The Jacobian matrix is decomposed into two sub-matrixes, that are related to force and torque transmission respectively. Based on the two sub-matrixes, the mathematical models of force and torque transmissibility can be developed. And some mechanical properties about force and torque transmission of LIDM can be analyzed by calculating the distribution of force and torque transmissibility within work space. The analyses show that the distribution of force and torque transmissibility is ellipsoid after the structural configuration of docking mechanism is determined, showing different laws with load sensing ring during moving along different paths. Further, the results of the study are important to the performance estimation and optimization about structural properties of the docking mechanism which is represented by LIDM.

Key words: space docking; low impact docking mechanism; Jacobian matrix; force transmissibility performance

空间交会对接是现代航天器、载人空间技术及长期轨道运行不可或缺的组成部分。空间交会对接技术是载人飞行的关键技术^[1-2],是完成空间组装、补给、维修、救援、人员更换、产品回收等各项空

间作业的先决条件。自空间对接技术发展以来,对接机构出现了很多结构形式,如锥杆式对接机构、外翻异体同构周边式对接机构、内翻异体同构周边式对接机构、弱撞击对接机构等多种不同构型^[3]。

基金项目:国家自然科学基金(51105196)资助项目;江苏省自然科学基金(BK2011733)资助项目;江苏高校优势学科建设工程资助项目;中央高校基本科研业务费专项资金(NS2012130)资助项目。

收稿日期:2013-12-24;**修订日期:**2014-03-19

通信作者:聂宏,男,教授,博士生导师,E-mail:hnie@nuaa.edu.cn。

弱撞击对接机构(Low impact docking mechanism, LIDM)作为一种先进的对接机构具有以往对接机构不具备的特点,如以闭环反馈控制系统代替了以往的机械化缓冲系统、电磁铁代替了机械碰撞捕获锁等。这些特点使得对接机构更灵活,能够减弱甚至消除对接机构对初始碰撞力的需求,降低了因接触时撞击能量大^[4],而导致航天器姿态发生大的变化或结构变形甚至破坏等情况发生的可能。目前 NASA 设计的 LIDM 已经应用于哈勃望远镜,并将应用于国际空间站,另外欧空局也进行了类似对接机构的研制工作。我国现在应用的对接机构与前苏联的异体同构周边式对接机构(APAS)类似,属于硬对接,随着空间任务的逐渐增多,将无法满足不同多样化的空间任务需求,因此 LIDM 的研究也将是我国研制工作的一个趋势。

LIDM 从首次接触到捕获这一阶段的运动最为复杂^[5],这一阶段对对接能否顺利完成起着至关重要的作用。由于控制系统的误差,两飞行器接触时总会产生一定程度的碰撞力,所以通过研究捕获系统的传力性能来分析捕获系统承载能力是很必要的。捕获系统的传力分析不仅能够表明机构的传力特点,还将为研究各部件对 LIDM 捕获系统承载能力的影响提供理论基础,并且对 LIDM 的设计与优化具有一定的工程意义。

本文通过对 LIDM 捕获过程中的力和力矩传递性能分别进行分析,阐释了负载传感环处于不同位置和姿态时力和力矩的承载特点。由于力和力矩具有不同的量纲,文中将雅可比矩阵分解为两个分别与力和力矩传递相关的子矩阵,分别就 LIDM 单独承受力或力矩时的传递性能进行求解计算,并就捕获系统处于不同位置姿态时的承载能力进行了解析。

1 LIDM 的结构组成及其捕获系统的力雅可比矩阵

LIDM 是一种能够为空间对接任务提供一种低冲击或者无冲击环境的新型对接机构,如图 1 所示。LIDM 主要由闭环反馈控制系统、驱动臂、负载传感环、负载传感器、电磁铁和结构锁等结构组成^[6-7]。LIDM 的闭环控制系统通过分析负载传感器的反馈信息,从而控制 6 个驱动臂来达到低冲击或无冲击的效果。

LIDM 通过 6 个驱动臂将负载传感环与基座连接起来,如图 2 所示,为对接机构的捕获系统建立动静坐标系,静坐标系 $o-xyz$ 固定在基座上,其

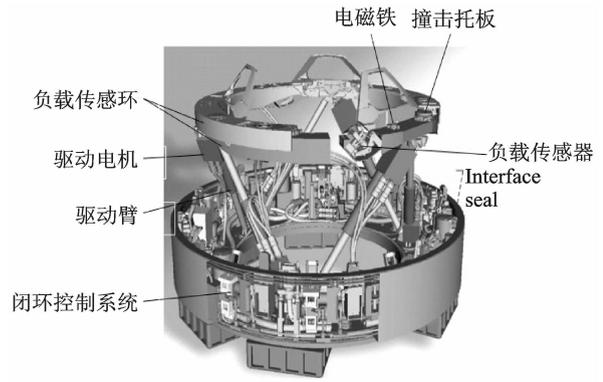


图 1 弱撞击对接机构

Fig. 1 Low impact docking mechanism(LIDM)

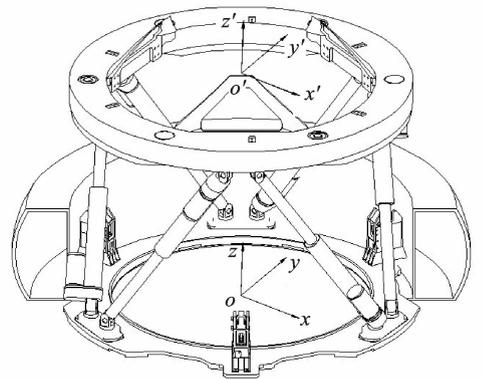


图 2 弱撞击对接机构坐标系

Fig. 2 Coordinate system of the LIDM

中各驱动臂顶点 A_i 的坐标为 $(a_{xi}, a_{yi}, 0)$, 动坐标系 $o'-x'y'z'$ 固定在负载传感环上, 其中各驱动臂顶点 B_i 的坐标为 $(b_{xi}, b_{yi}, 0)$, 坐标系旋转矩阵为 \mathbf{R} , 动坐标系原点 o' 在坐标系 $o-xyz$ 中的坐标为 \mathbf{P} , \mathbf{P} 为关于 x_0, y_0 和 z_0 3 个变量的向量。对接机构中各驱动臂的长度 l_i 满足

$$l_i = [(\mathbf{R}\mathbf{B}_i + \mathbf{P} - \mathbf{A}_i)^\top (\mathbf{R}\mathbf{B}_i + \mathbf{P} - \mathbf{A}_i)]^{1/2} \quad i=1, \dots, 6 \quad (1)$$

其中 \mathbf{R} 为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} c\alpha c\gamma & -s\beta & c\beta s\gamma \\ c\alpha s\beta c\gamma - s\alpha s\gamma & c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma \\ s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma & s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma \end{bmatrix}$$

式中: c, s 分别为余弦函数 $\cos()$ 与正弦函数 $\sin()$ 的缩写; α, β 和 γ 表示负载传感环姿态的欧拉角。

雅可比矩阵是多元形式的导数^[8], 杆长的函数如式(1)所示, 每个函数都包含 $x_0, y_0, z_0, \alpha, \beta$ 和 γ 6 个独立变量, 因此对接机构的雅可比矩阵 \mathbf{J} 为

$$\mathbf{J} = \partial \mathbf{l} / \partial \mathbf{X} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{l} = [l_1 \ l_2 \ \dots \ l_6]^\top$, $\mathbf{X} = [x_0 \ y_0 \ z_0 \ \alpha \ \beta \ \gamma]^\top$ 。因此推导出驱动臂与负载传感环之间的运动关系为

$$\dot{\mathbf{l}} = \mathbf{J}\dot{\mathbf{X}} \quad (3)$$

根据虚功原理推导,力雅可比矩阵与运动学雅可比矩阵的转置相等,即

$$\mathbf{J}_F = \mathbf{J}^T \quad (4)$$

因此

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}^T \mathbf{f} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{F} = [f_x \ f_y \ f_z \ m_x \ m_y \ m_z]^T$ 代表负载传感环中心点处所承载力和力矩矢量; $\mathbf{f} = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4 \ f_5 \ f_6]^T$ 代表6个驱动臂的力矢量且假设 $\|\mathbf{f}\| \leq 1$ 。

式(5)表明了驱动臂与负载传感环之间的传力关系。由于力和力矩具有不同的量纲,同时处理力和力矩的传递关系过程复杂,这里将力雅可比矩阵分解为两个分别与力和力矩传递相关的子矩阵 \mathbf{J}_f 和 \mathbf{J}_m ,如式(6)所示

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_o \\ \mathbf{m}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_f \\ \mathbf{J}_m \end{bmatrix} \mathbf{f} \quad (6)$$

当 \mathbf{J}_F 非奇异时满足

$$\mathbf{J}_F \mathbf{J}_F^{-1} = \mathbf{I} \quad (7)$$

将式(7)展开

$$\begin{bmatrix} \mathbf{J}_f \\ \mathbf{J}_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{F;1,3}^{-1} & \mathbf{J}_{F;4,6}^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{J}_{F;1,3}^{-1}$ 与 $\mathbf{J}_{F;4,6}^{-1}$ 分别表示 \mathbf{J}_F^{-1} 前3列和后3列,令 $\mathbf{Y} = \mathbf{J}_{F;1,3}^{-1}$, $\mathbf{Z} = \mathbf{J}_{F;4,6}^{-1}$,由式(8)得

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{J}_m \mathbf{Y} &= \mathbf{0} \\ \mathbf{J}_f \mathbf{Z} &= \mathbf{0} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

通过式(6~9)对力雅可比矩阵进行了初步的分解与变换,能够简化之后的计算过程。

2 力/力矩传递特性分析

参考空间对接任务的初始对接条件,需要对传递能力进行分析来评估对接机构是否能够完成对接初始条件范围内的对接任务。在这一部分,假设对接机构只进行力或者力矩传递,并分析捕获系统力或者力矩的承载能力。

对接机构只进行力的传递时,力矩为零,即

$$\mathbf{m}_o = \mathbf{J}_m \mathbf{f} = \mathbf{0} \quad (10)$$

由式(9,10),可以得到

$$\mathbf{f} = \mathbf{Y}\mathbf{X} \quad (11)$$

其中 $\mathbf{X} \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 。因此

$$\|\mathbf{f}\|^2 = \mathbf{X}^T \mathbf{Y}^T \mathbf{Y} \mathbf{X} \leq 1 \quad (12)$$

由于 $\mathbf{Y}^T \mathbf{Y}$ 为对称矩阵,所以存在矩阵 \mathbf{P} 满足下式

$$\mathbf{Y}^T \mathbf{Y} = \mathbf{P} \mathbf{D} \mathbf{P}^T \quad (13)$$

其中 \mathbf{P} 为 $\mathbf{Y}^T \mathbf{Y}$ 特征值 $D = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ 对应的单位特征向量矩阵。令

$$\mathbf{X} = \mathbf{P} \mathbf{D}_p \mathbf{X}_z \quad (14)$$

式中: $\mathbf{X}_z = [x_z \ y_z \ z_z]^T$; \mathbf{D}_p 为 $\text{diag}(1/\sqrt{\lambda_1}, 1/\sqrt{\lambda_2}, 1/\sqrt{\lambda_3})$ 。将式(13,14)代入式(12)得

$$\|\mathbf{X}_z\| \leq 1 \quad (15)$$

由式(6,11,14)得

$$\mathbf{f}_o = \mathbf{J}_f \mathbf{Y} \mathbf{P} \mathbf{D}_p \mathbf{X}_z \quad (16)$$

通过式(15,16)可推导出负载传感环不同位置姿态的力承载范围,如式(17)所示

$$\mathbf{f}_o^T \mathbf{K} \mathbf{f}_o \leq 1 \quad (17)$$

式中: $\mathbf{K} = (\mathbf{J}_f \mathbf{Y}^T \mathbf{P} \mathbf{D}_p \mathbf{D}_p^T \mathbf{P}^T \mathbf{Y}^T \mathbf{J}_f^T)^{-1}$,且为3阶实对称矩阵。令 d_1, d_2 和 d_3 为 \mathbf{K} 特征向量 \mathbf{U}_f 对应的特征值,且 $d_1 \geq d_2 \geq d_3$ 。化简式(17)得

$$[f_x \ f_y \ f_z] \mathbf{U}_f \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} \mathbf{U}_f^T [f_x \ f_y \ f_z]^T \leq 1 \quad (18)$$

同理可得到 LIDM 捕获系统承载力矩范围

$$[m_x \ m_y \ m_z] \mathbf{U}_m \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \end{bmatrix} \mathbf{U}_m^T [m_x \ m_y \ m_z]^T \leq 1 \quad (19)$$

椭球的数学表达式如式(20)所示

$$[x \ y \ z] \begin{bmatrix} 1/a^2 \\ 1/b^2 \\ 1/c^2 \end{bmatrix} [x \ y \ z]^T \leq 1 \quad (20)$$

式(18,19)分别与式(20)对比,表明驱动臂受力 $\|\mathbf{f}\| \leq 1$ 时,负载传感环中心点的所能够承载力(力矩)范围构成一个椭球,轴 f_x, f_y 和 f_z (m_x, m_y 和 m_z) 分别对应的半轴长为 $d_1^{-1/2}, d_2^{-1/2}$ 和 $d_3^{-1/2}$ ($\gamma_1^{-1/2}, \gamma_2^{-1/2}$ 和 $\gamma_3^{-1/2}$), \mathbf{U}_f^T (\mathbf{U}_m^T) 为坐标旋转矩阵,椭球各轴线的方向分别与 $\mathbf{J}_f \mathbf{J}_f^T$ ($\mathbf{J}_m \mathbf{J}_m^T$) 的特征向量的方向重合。

随着 LIDM 负载传感环位置姿态的变化,负载传感环能够承载的力和力矩椭球也会随之改变。椭球越接近球,力学性能越好,力或力矩各方向的承载能力差异越小;椭球的体积越大,表示对接机构的综合承载能力越好;椭球最长轴越长,表示最长轴所在方向能够承载的力或力矩越大。为了进一步描述各位置姿态的力学性能,引入力和力矩椭球的圆度 w_f 和 w_m ,表达式如下

$$\left. \begin{aligned} w_f &= (d_1/d_3)^{-1/2} \\ w_m &= (\gamma_1/\gamma_3)^{-1/2} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

当 \mathbf{J}_f (或 \mathbf{J}_m) 的秩小于3,即 \mathbf{J}_f 为奇异矩阵时, LIDM 捕获系统的机构力(或力矩)奇异,驱动臂施加力无法平衡负载传感环所受的外力和外力矩。

3 算例分析

机构节点坐标如表 1 所示,分别对以下两种情况进行计算:(1)保持姿态角 $(\alpha, \beta, \gamma) = (0, 0, 0)$,负载传感环原点沿 x 轴移动,位置由 $(0, 0, 1)$ 移动到 $(1, 0, 1)$; (2)保持姿态角 $(\alpha, \beta, \gamma) = (0, 0, 0)$,负载传感环原点沿 z 轴移,动位置由 $(0, 0, 0.3)$ 移动到 $(0, 0, 1.5)$ 。

计算结果如图 3~10 所示:图 3,4 是沿 x 轴移动时 3 个位置点的力和力矩椭球,能够直观给出不同位置姿态的力和力矩承载范围;图 5,8 分别是沿 x 轴和 z 轴移动时,力和力矩椭球体积变化曲线;

图 6 是沿 x 轴任一点最长轴与位置点 $(0, 0, 1)$ 处最长轴的比值曲线;图 7,10 分别是沿 x 轴和 z 轴移动时,力和力矩的椭球圆度变化曲线;图 9 表示沿 z 轴任一点最长轴与位置点 $(0, 0, 0.3)$ 处最长轴的比值曲线。

表 1 节点坐标

Tab. 1 the coordinates of nodes

i	1	2	3	4	5	6
a_{xi}	0.643	0.342	-0.985	-0.985	0.342	0.643
a_{yi}	0.766	0.940	0.174	-0.174	-0.940	-0.766
b_{xi}	0.985	-0.342	-0.643	-0.643	-0.342	0.985
b_{yi}	0.174	0.940	0.766	-0.766	-0.940	-0.174

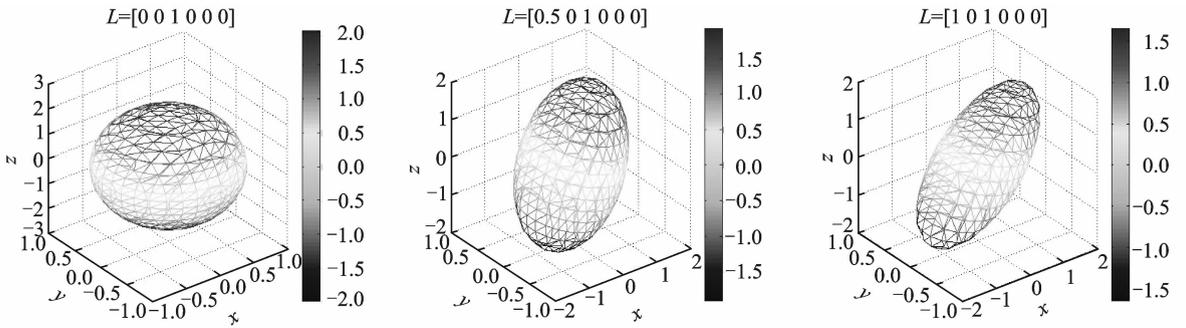


图 3 沿 x 轴不同位置处的力椭球

Fig. 3 Force ellipsoid at different positions along the x -axis

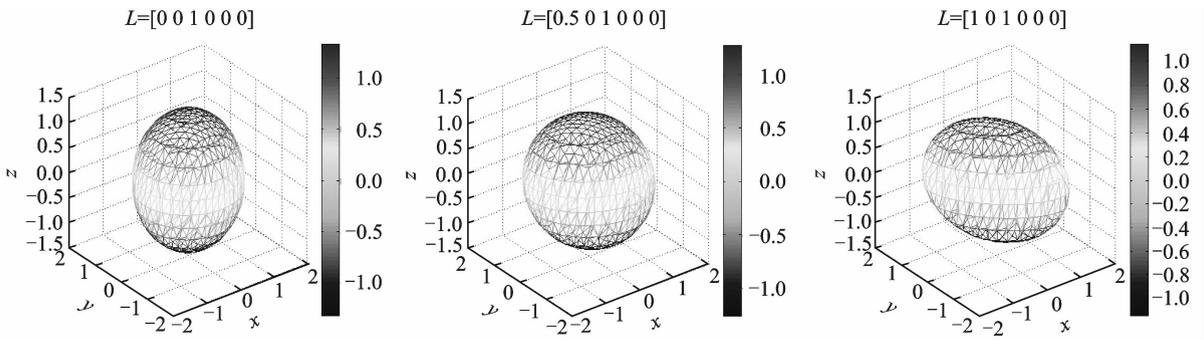


图 4 沿 x 轴不同位置处的力矩椭球

Fig. 4 Torque ellipsoid at different positions along the x -axis

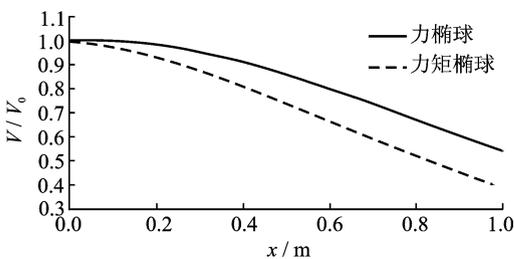


图 5 力和力矩椭球体积沿 x 轴变化曲线

Fig. 5 Ellipsoid volume of force and torque change along the x -axis

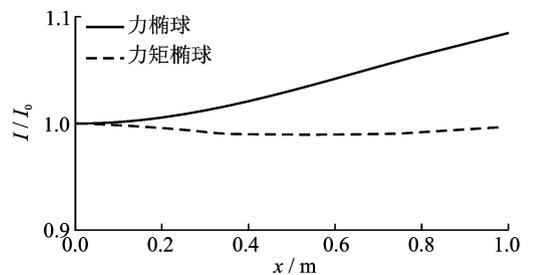


图 6 力和力矩椭球最长轴沿 x 轴变化曲线

Fig. 6 The longest axis of force and torque change along the x -axis

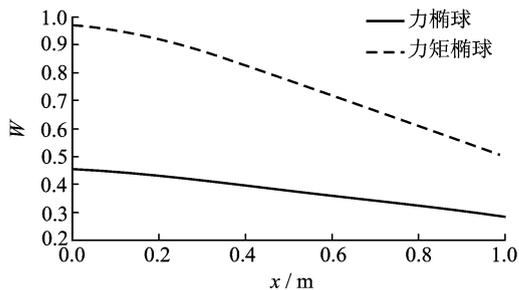


图 7 力和力矩椭球圆度沿 x 轴变化曲线

Fig. 7 Circularity of force and torque change along the x -axis

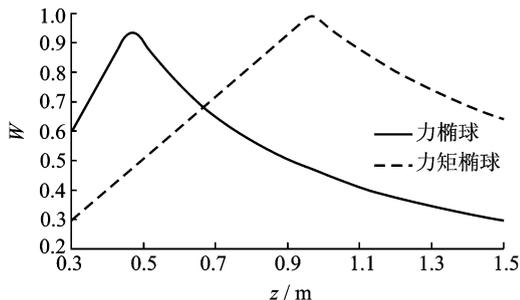


图 10 力和力矩椭球圆度沿 z 轴变化曲线

Fig. 10 Circularity of force and torque change along the z -axis

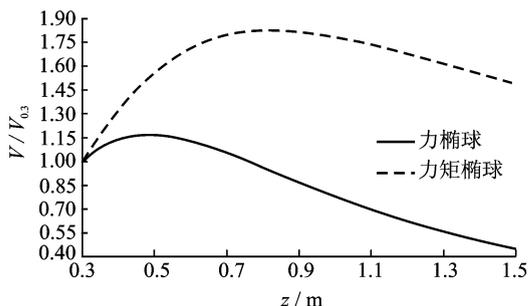


图 8 力和力矩椭球体积沿 z 轴变化曲线

Fig. 8 Ellipsoid volume of force and torque change along the z -axis

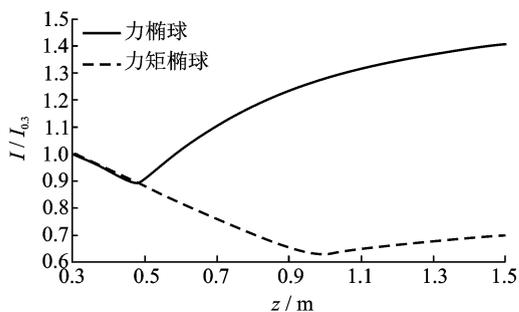


图 9 力和力矩椭球最长轴沿 z 轴变化曲线

Fig. 9 The longest axis of force and torque change along the z -axis

沿 x 轴移动: 据图 3, 4 所示, 负载传感环中心点位于 $(0, 0, 1)$ 处时, 力和力矩椭球最长轴都是垂直于 xy 平面, 对接结构沿 z 轴方向有较大的力和力矩的承载能力, 且 xy 平面内各方向的力和力矩的模分别相等, 即各方向力和力矩的承载能力相同; 据图 5~7 所示, 随着负载传感环的沿 x 轴移动椭球逐渐倾斜, 力和力矩椭球的体积都逐渐减小, 力椭球的最长轴逐渐变长, 力矩椭球最长轴基本不变, 力和力矩椭球的圆度逐渐减小, 表明不同位置处的最大承力和力矩方向不同, 由中心点向四周运

动会导致综合承载能力逐渐降低, 最大力方向的承载能力有所增大, 而最大力矩方向的力矩承载能力基本不变, 另外两短轴的承载能力逐渐降低。

沿 z 轴移动: 据图 8~10 所示, 综合承载能力随着负载传感环沿 z 轴移动, 先增大后减小, 单方向所能够承载的最大力和力矩先减小后逐渐增大, 力和力矩的椭球圆度先增大后减小。当负载传感环位于 $(0, 0, 0.48)$ 附近时, 捕获系统力的综合承载能力最大, 单轴所承载的力最小, 各方向力的承载差异最小; 当负载传感环位于 $(0, 0, 0.74)$ 附近时, 捕获系统的力矩综合承载能力最大, 而位于 $(0, 0, 0.94)$ 时力矩的单轴承载能力才能达到最小, 各方向力矩承载差异最小。

4 结 论

本文对 LIDM 捕获系统的力和力矩传递特性进行了分析, 由于力和力矩具有不同的量纲, 将力雅可比矩阵分解为两个分别与力和力矩传递有关的子矩阵, 分别建立了 LIDM 驱动臂与负载传感环之间力和力矩传递关系的数学模型, 并计算分析了驱动臂输入力范围确定后, 负载传感环的处于不同位置姿态的力和力矩的传递特性, 分析计算结果表明:

- (1) 负载传感环处于某一位置姿态时, 其所能够承受的力和力矩范围均呈椭球体分布。
- (2) LIDM 几何构型确定后, 随着负载传感环由几何中心向周围移动, 力和力矩的综合承载能力降低, 力最大承载能力逐渐增大, 力矩最大承载能力基本不变, 最大承载力的方向随位置姿态的变化而变化。
- (3) 随着负载传感环由收缩状态向伸展状态运动, 力和力矩的综合承载能力先增大后减小, 单方

向所能够承载的最大力和力矩先减小后逐渐增大。

研究结果能够对以 LIDM 为代表的空间对接机构的结构性能作出评价,为机构的优化提供参考,为之后研究各部件对捕获系统承载能力的影响提供理论基础,具有一定的工程意义。

参考文献:

- [1] 陈宝东,唐平.空间对接机构技术及其研制[J].上海航天,2005(5):6-8.
Chen Baodong, Tang Ping. The technology development of docking mechanism system[J]. Aerospace Shanghai, 2005(5):6-8.
- [2] 张崇峰,肖余之,李明福,等.飞行器对接机构缓冲器的设计研究[J].哈尔滨工业大学学报,1998,30(5):111-114.
Zhang Chongfeng, Xiao Yuzhi, Li Mingfu, et al. Design method for buffer of aerocrafts docking mechanism[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1998,30(5):111-114.
- [3] 李金宗.空间交会对接技术[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1997.
Li Jinzong. Space rendezvous and docking techniques [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1997.
- [4] 于登云,曲广吉,曾辛,等.航天器对接过程撞击动力学分析[J].空间科学学报,1998,18(1):62-68.
Yu Dengyun, Qu Guangji, Zeng Xin, et al. Contact-impact dynamic analysis of spacecraft in the course of space docking[J]. Chinese Journal of Space Science, 1998,18(1):62-68.
- [5] 王兴贵,韩松辰,荣丽,等.周边式对接机构的航天器首次接触撞击点的确定[J].宇航学报,1999,20(1):49-56.
Wang Xinggui, Han Songchen, Rong Li, et al. Determining the position of the first contact points for the space vehicles with androgynous peripheral docking mechanism[J]. Journal of Astronautics, 1999, 20(1):49-56.
- [6] Lewis J L, Baumer G C, Sauser B W, et al. International low impact docking system (iLIDS) project technical requirements specification[R]. NASA JSC-63686F, 2011.
- [7] Lewis J L, Sauser B W, Hatfield C A. NASA docking system (NDS) interface definitions document (IDD)[R]. NASA JSC-65795, 2011.
- [8] Craig J J. 机器人学导论[M]. 负超,等译.北京:机械工业出版社,2006.
Craig J J. Introduction to robotics[M]. Fu Chao, Trans. Beijing: China Machine Press, 2006.

