第21卷 第3期 空 间 科 学 学 报 Vol.21, No.3
2001 年 7月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE July, 2001

考虑缓冲装置惯性及接触变形的对接动力学仿真研究

关英姿[1] 崔乃刚[1] 康为民[2] 张崇峰[3]

[1](哈尔滨工业大学航天工程与力学系 150001)

[2](哈尔滨工业大学自动化测试与控制系)

[3](航天工业总公司八院第 805 研究所)

摘 要

为了使对接动力学数值仿真更准确、全面地反映对接过程的动力学特性，针对具有异体同构周边式对接机构的两飞船组成的对接系统，建立了考虑缓冲装置惯性及接触变形的对接动力学数学模型. 概述了接触点类型及确定接触点的几何学模型，描述了缓冲装置模型、接触力模型及运动方程，并进行了数值仿真. 最后将仿真结果与未考虑上述两因素的仿真结果进行了对比分析.

关键词 对接动力学－数值仿真－缓冲装置的惯性－接触变形

1 引 言

对接动力学仿真是研究对接过程动力学特性、验证缓冲系统参数设计和机构设计正确性的重要手段 [1−3]. 在对接动力学仿真中最关键的是建立准确的、能够比较全面地反映对接过程的数学模型，这样才能保证仿真结果更接近实际的对接过程. 从已发表的文献看 [1−4], 对接动力学仿真研究中采用的刚体模型有两体模型和三体模型. 前者是只将主、被动飞行器分别简化成刚体，认为主动捕获环仅有形状而没有质量；后者是将主、被动飞行器以及主动捕获环都简化为刚体. 上述两种模型都没有考虑缓冲装置的惯性. 然而，由于异体同构周边式对接机构中捕获环的质量以及与其相连的缓冲器运动元件的质量都很大，在对接中将不可避免地产生很大的附加动力，因此，采用不考虑缓冲装置的惯性及接触变形的数学模型进行仿真对于深入地研究对接动力学过程来说是不够完善的. 基于此，本文研究了考虑缓冲装置惯性以及接触变形影响的对接动力学数值仿真.

本文研究作如下假设：(1) 主、被动飞行器以及主动捕获环均为刚体，不考虑飞行器上的挠性附件及液体晃动的影响. (2) 仅考虑相接触元件的变形，但不考虑变形波的传播. (3) 接触点处无摩擦.

对接系统如图 1 所示，图中坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 、 $O_2x_2y_2z_2$ 和 $O_3x_3y_3z_3$ 分别为主、被动飞行器和主动捕获环连体坐标系.

2000-01-30 收到原稿， 2001-05-08 收到修定稿

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

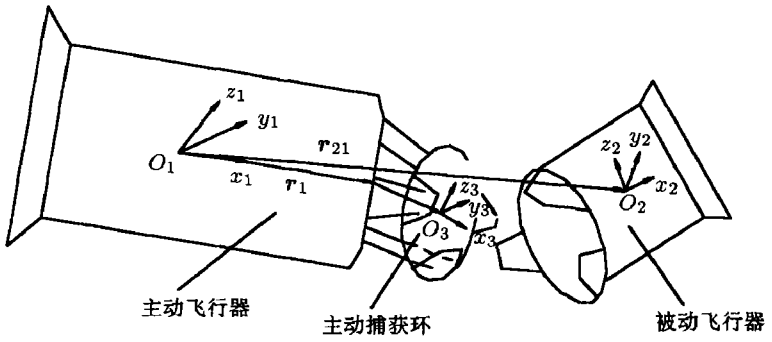


图 1　对接过程建模所采用的坐标系
Fig.1　Coordinate system for docking process modeling

整个对接过程可分为五个阶段：从首次接触到捕获阶段；缓冲校正阶段；拉紧阶段；处于对接状态及对接后分离阶段．其中前两个阶段的动力学过程最复杂，且对接碰撞只发生在第一阶段，因此本文只建立前两阶段的数学模型．

2　从首次接触到捕获阶段的数学模型

2.1　确定接触点的数学模型

异体同构周边式对接机构在对接中共可能出现三大类 20 个接触点，包括导向瓣与导向瓣相接触，有 6 个接触点 ($k = 1, 2, \cdots, 6$)；导向瓣与捕获环的圆周相接触，有 12 个接触点 ($k = 7, 8, ..., 18$)；捕获环边缘与捕获环环面相接触，有 2 个可能的接触点 ($k = 19, 20$)．

为了确定接触点，引入由参数 w 决定的辅助向量 $\boldsymbol{P}(w)$．该向量随接触点类型的不同而分别定义．限于篇幅，关于确定各种接触点的数学模型这里不再赘述，参见文献 [5]．

2.2　接触力模型

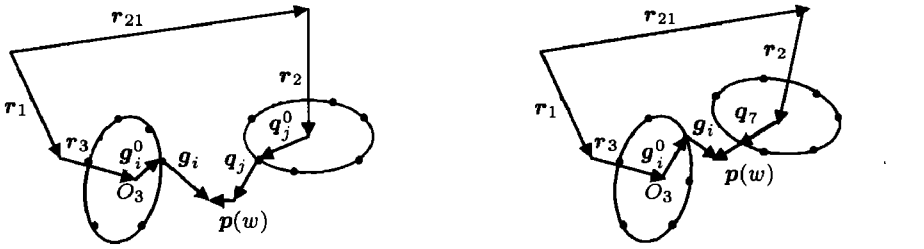
当两捕获环 (含导向瓣) 接触时，由于接触力的作用，在接触处会发生变形．变形量 δ_v 定义为相接触元件在沿接触点的公法线方向的相互 “侵入” 量．由图 2 知，对于各种可能的接触情况，存在如下的矢量方程：

$$\begin{cases} \boldsymbol{r}_1 + \boldsymbol{r}_3 + \boldsymbol{g}_i^0 + \boldsymbol{g}_i(u) - \boldsymbol{P}(w) - \boldsymbol{q}_j(v) - \boldsymbol{q}_j^0 - \boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_{21} = 0, \\ \qquad k = 1, 2, \cdots, 6, \quad i, j = 1, 2, \cdots, 6; \\ \boldsymbol{r}_1 + \boldsymbol{r}_3 + \boldsymbol{g}_i^0 + \boldsymbol{g}_i(u) - \boldsymbol{P}(w) - \boldsymbol{q}_7(v) - \boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_{21} = 0, \\ \qquad k = 7, 8, \cdots, 12, \quad i = 1, 2, \cdots, 6; \\ \boldsymbol{r}_1 + \boldsymbol{r}_3 + \boldsymbol{g}_7(u) + \boldsymbol{P}(w) - \boldsymbol{q}_j(v) - \boldsymbol{q}_j^0 - \boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_{21} = 0, \\ \qquad k = 13, 14, \cdots, 18, \quad j = 1, 2, \cdots, 6; \\ \boldsymbol{r}_1 + \boldsymbol{r}_3 + \boldsymbol{g}_{19}(u, v) + \boldsymbol{P}(w) - \boldsymbol{q}_{19} - \boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_{21} = 0, \quad k = 19; \\ \boldsymbol{r}_1 + \boldsymbol{r}_3 + \boldsymbol{g}_{20} - \boldsymbol{P}(w) - \boldsymbol{q}_{20}(u, v) - \boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_{21} = 0, \quad k = 20. \end{cases} \tag{1}$$

式中 $\boldsymbol{r}_1$ 为主动捕获环处于收缩状态时环心的位置矢量；$\boldsymbol{r}_3$ 为主动捕获环处于收缩位置和伸出后处于任意位置时环心间的矢量；$\boldsymbol{r}_2$ 为从被动飞行器质心到被动捕获环环心间的

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

矢量； $\boldsymbol{r}_{21}$ 为主、被动飞行器质心间的矢量； $\boldsymbol{g}_i^0$ 、 $\boldsymbol{q}_j^0$ 为从主、被动捕获环的环心到其上每个导向瓣根部的矢量； $\boldsymbol{g}_i(u)$ 、 $\boldsymbol{q}_j(v)$ 为主、被动捕获环各导向瓣边缘线段矢量， $0<u, v<1$; $\boldsymbol{g}_7(u)$, $\boldsymbol{q}_7(v)$ 分别为确定接触点在主、被动捕获环周边上的位置的矢量， $0 \leqslant u, v \leqslant 2\pi$; $\boldsymbol{g}_{19}, \boldsymbol{q}_{19}, \boldsymbol{g}_{20}, \boldsymbol{q}_{20}$ 分别为确定 19,20 种接触点在环的周边及环面上的位置的矢量.



(a) 导向瓣与导向瓣接触, $k=1,2,\cdots,6$ (b) 导向瓣与捕获环的周边接触, $k=7,8,\cdots,12$

图 2 两类接触情况示意图

Fig.2 The schematic diagram of two kinds of contacting points

δ_v 的大小可借助于式 (1) 来确定. 当两捕获环的某个接触点处发生 "互侵" 时，相当于对应的向量 $\boldsymbol{P}(w)$ 的长度参数 w 变成了负值，此时有 $\delta_v=\boldsymbol{P}(w)\cdot\boldsymbol{n}_v$, $\boldsymbol{n}_v$ 为接触点公法线方向的单位矢量.

对于两各向同性材料物体的接触力模型可采用 Hertz 接触力模型，其建立在弹性理论基础上. 考虑到碰撞中存在能量的消耗，并认为能量的损失是由于材料的阻尼引起的，为此采用如下的接触力模型:

$$\boldsymbol{F}_v=K_v\delta_v\boldsymbol{n}_v+C_v\dot{\delta}_v\boldsymbol{n}_v, \tag{2}$$

其中， K_v 为相互接触元件的刚度，其随接触点的类型及接触点的位置的不同而不同， C_v 为阻尼系数.

2.3 缓冲装置的模型

当考虑缓冲装置的惯性时，假定缓冲装置产生的力和力矩取决于缓冲器的运动量以及运动量的一阶导数和二阶导数，缓冲力 $\boldsymbol{F}_a$ 和力矩 $\boldsymbol{M}_a$ 的分量形式为

$$\begin{cases} F_{ax}=-F_{0x}-K_x(r_{3x}-r_{3x}^0)-C_y\cdot\dot{r}_{3x}-m_x\cdot\ddot{r}_{3x}; \\ F_{ay}=-F_{0y}-K_y(r_{3y}-r_{3y}^0)-C_y\cdot\dot{r}_{3y}-m_y\cdot\ddot{r}_{3y}; \\ F_{az}=-F_{0z}-K_z(r_{3z}-r_{3z}^0)-C_z\cdot\dot{r}_{3z}-m_z\cdot\ddot{r}_{3z}; \\ M_{a\varphi}=-M_{0\varphi}-K_\varphi\cdot\varphi_3-C_\varphi\cdot\dot{\varphi}_3-I_\varphi\ddot{\varphi}_3; \\ M_{a\psi}=-M_{0\psi}-K_\psi\cdot\psi_3-C_\psi\cdot\dot{\psi}_3-I_\psi\ddot{\psi}_3; \\ M_{a\theta}=-M_{0\theta}-K_\theta\cdot\theta_3-C_\theta\cdot\dot{\theta}_3-I_\theta\ddot{\theta}_3. \end{cases} \tag{3}$$

其中 F_{0x} 、 F_{0y} 、 F_{0z} 、 $M_{0\varphi}$ 、 $M_{0\psi}$ 、 $M_{0\theta}$ 为缓冲系统的等效预紧力和预紧力矩分量; K 为等效刚度； C 为等效阻尼； m 、 I 为等效质量和转动惯量. 下标 $x,y,z,\varphi,\psi,\theta$ 代表三个平动方向和三个转动方向. $\varphi_3,\psi_3,\theta_3$ 为坐标系 $O_3x_3y_3z_3$ 相对于坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 的位置欧拉角.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

式 (3) 中的二阶导数项表明考虑了缓冲装置惯性的影响. 由于对接机构中缓冲装置布局和传动链的非对称性, 各个方向上的等效质量和等效惯量是不相同的, $m_x, m_y, m_z, I_\varphi, I_\psi, I_\theta$ 的具体表达式见张崇峰博士论文 *.

2.4　运动方程

运动方程具有如下形式:

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{V}_{21}}{\mathrm{d}t} = \frac{\boldsymbol{F}_a - \boldsymbol{F}_y}{m_1} - \frac{\boldsymbol{F}_v}{m_2} - \boldsymbol{\omega}_1 \times \boldsymbol{V}_{21}, \tag{4}$$

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}_{21}}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{V}_{21} - \boldsymbol{\omega}_1 \times \boldsymbol{r}_{21}, \tag{5}$$

$$\boldsymbol{I}_1 \cdot \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\omega}_1}{\mathrm{d}t} + \boldsymbol{\omega}_1 \times (\boldsymbol{I}_1 \cdot \boldsymbol{\omega}_1) = -(\boldsymbol{M}_a + \boldsymbol{r}_{31} \times \boldsymbol{F}_a), \tag{6}$$

$$\boldsymbol{I}_2 \cdot \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\omega}_2}{\mathrm{d}t} + \boldsymbol{\omega}_2 \times (\boldsymbol{I}_2 \cdot \boldsymbol{\omega}_2) = -\boldsymbol{r}_{k2} \times \boldsymbol{F}_v, \tag{7}$$

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{V}_{31}}{\mathrm{d}t} = \frac{\boldsymbol{F}_a - \boldsymbol{F}_y}{m_1} + \frac{\boldsymbol{F}_v + \boldsymbol{F}_a}{m_3} - \boldsymbol{\omega}_1 \times \boldsymbol{V}_{31}, \tag{8}$$

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}_{31}}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{V}_{31} - \boldsymbol{\omega}_1 \times \boldsymbol{r}_{31}, \tag{9}$$

$$\boldsymbol{I}_3 \cdot \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\omega}_3}{\mathrm{d}t} + \boldsymbol{\omega}_3 \times (\boldsymbol{I}_3 \cdot \boldsymbol{\omega}_3) = \boldsymbol{r}_{k3} \times \boldsymbol{F}_v + \boldsymbol{M}_a. \tag{10}$$

其中, $\boldsymbol{V}_{21}$ 为两飞行器质心间的相对速度, $\boldsymbol{V}_{31}$ 为主动捕获环相对于主动飞行器的速度, $\boldsymbol{r}_{31} = \boldsymbol{r}_1 + \boldsymbol{r}_3$, m 为质量, $\boldsymbol{I}$ 为惯量张量, $\boldsymbol{\omega}$ 为角速度, 下标 1 、 2 、 3 分别代表主、被动飞行器和主动捕获环. $\boldsymbol{F}_y$ 为反作用发动机的推力, $\boldsymbol{F}_a$ 、 $\boldsymbol{M}_a$ 和 $\boldsymbol{F}_v$ 分别表示作用于主动捕获环上的缓冲力、力矩和接触力; $\boldsymbol{r}_{k2}$ 为接触点至被动飞行器质心的矢径, $\boldsymbol{r}_{k3}$ 为接触点至主动捕获环环心的矢径.

欧拉角速度与相对角速度间具有如下关系:

$$[\dot{\varphi}_3, \dot{\psi}_3, \dot{\theta}_3]^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{B}_{31} \cdot (\underline{\boldsymbol{\omega}}_3 - \boldsymbol{A}_{31} \cdot \underline{\boldsymbol{\omega}}_1), \tag{11}$$

$$[\dot{\varphi}, \dot{\psi}, \dot{\theta}]^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{B}_{21} \cdot (\underline{\boldsymbol{\omega}}_2 - \boldsymbol{A}_{21} \cdot \underline{\boldsymbol{\omega}}_1); \tag{12}$$

$$\boldsymbol{B}_{31} = \begin{bmatrix} 1 & -\cos\varphi_3 \tan\theta_3 & \sin\varphi_3 \tan\theta_3 \\ 0 & \cos\varphi_3 \sec\theta_3 & -\sin\varphi_3 \sec\theta_3 \\ 0 & \sin\varphi_3 & \cos\varphi_3 \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{B}_{21} = \begin{bmatrix} 1 & -\cos\varphi \tan\theta & \sin\varphi \tan\theta \\ 0 & \cos\varphi \sec\theta & -\sin\varphi \sec\theta \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix}. \tag{13}$$

其中 φ, ψ, θ 为坐标系 $O_2x_2y_2z_2$ 相对于坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 的位置欧拉角; $\boldsymbol{A}_{31}, \boldsymbol{A}_{21}$ 分别为由坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 到坐标系 $O_3x_3y_3z_3$ 和坐标系 $O_2x_2y_2z_2$ 的变换矩阵; $\underline{\boldsymbol{\omega}}_1$ 为 $\boldsymbol{\omega}_1$ 在坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 上的分量阵; $\underline{\boldsymbol{\omega}}_3$ 为 $\boldsymbol{\omega}_3$ 在坐标系 $O_3x_3y_3z_3$ 的分量阵.

* 张崇峰. 空间对接机构缓冲系统设计原理及优化设计方法的研究. 哈尔滨工业大学博士论文. 1998:72—73

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

3 捕获后的校正阶段

当主、被动环质心间的位置偏差及其角偏差小到满足啮合条件时，则由捕获锁系统实现捕获. 捕获后，反作用发动机关闭，即 $F_y = 0$. 主动环、被动环及被动飞行器成为一个整体. 此时有 $\varphi_3 = \varphi$, $\theta_3 = \theta$, $\psi_3 = \psi$, $A_{31} = A_{21}$. 于是运动方程为

$$\frac{\mathrm{d}V_{21}}{\mathrm{d}t} = \frac{F_a}{m_1} + \frac{F_a}{m_2} - \omega_1 \times V_{21}, \tag{14}$$

$$\frac{\mathrm{d}r_{21}}{\mathrm{d}t} = V_{21} - \omega_1 \times r_{21}, \tag{15}$$

$$I_1 \cdot \frac{\mathrm{d}\omega_1}{\mathrm{d}t} + \omega_1 \times (I_1 \cdot \omega_1) = -(M_a + r_{31} \times F_a), \tag{16}$$

$$I_2 \cdot \frac{\mathrm{d}\omega_2}{\mathrm{d}t} + \omega_2 \times (I_2 \cdot \omega_2) = M_a + r_2 \times F_a. \tag{17}$$

主动捕获环的位置矢量 r_3 由下式确定：

$$r_1 + r_3 - r_2 - r_{21} = 0. \tag{18}$$

4 仿真结果

利用上述数学模型及自编的 FORTRAN 程序对多组不同的对接初始条件作了数值仿真，限于篇幅，仅以一组对接初始条件的仿真结果为例加以说明.

对接初始条件：两飞行器轴向接近速度为 0.3 m/s, y 方向位置偏差为 −0.1 m, 反作用发动机的推力为 280 N, 其它对接初始条件均为 0.

仿真结果如图 3— 图 6 所示. 图中 1 代表不考虑缓冲装置惯性和接触变形的两体模型的仿真结果， 2 代表本文中的模型的仿真结果. 图 3 和图 4 仅给出了对接捕获阶段的仿真结果，图 5 和图 6 包括捕获后校正阶段的仿真结果，为清晰起见，仅给出了前 4.9 s

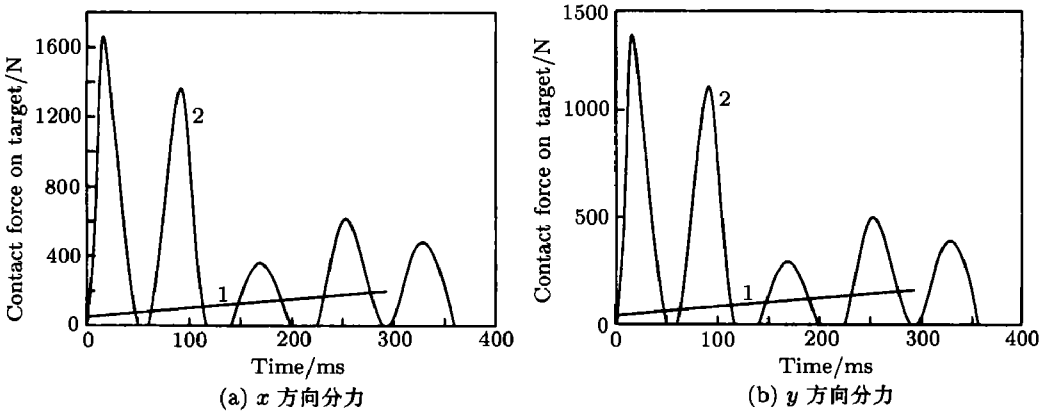


图 3 作用于目标飞行器上的接触力随时间的变化曲线
Fig.3 Contacting force on the target vs. time

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

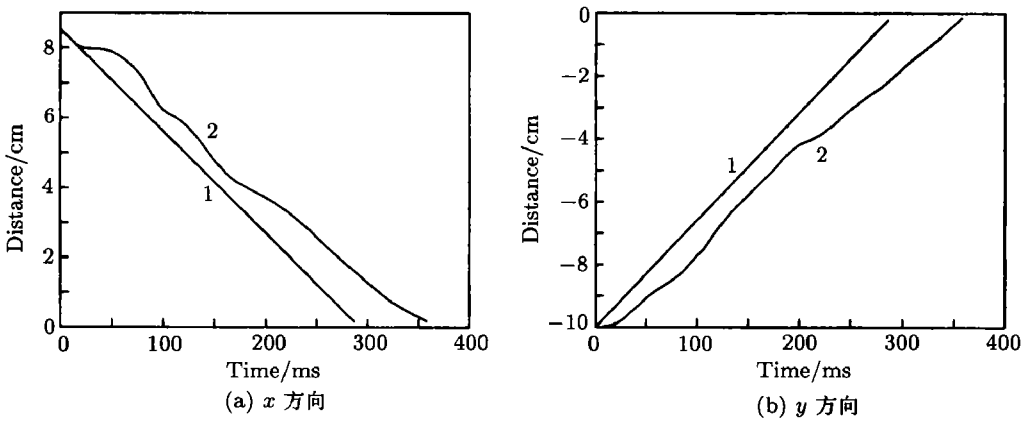


图 4　两捕获环环心间的距离随时间的变化曲线
Fig.4　Distance between centers of two capturing rings vs. time

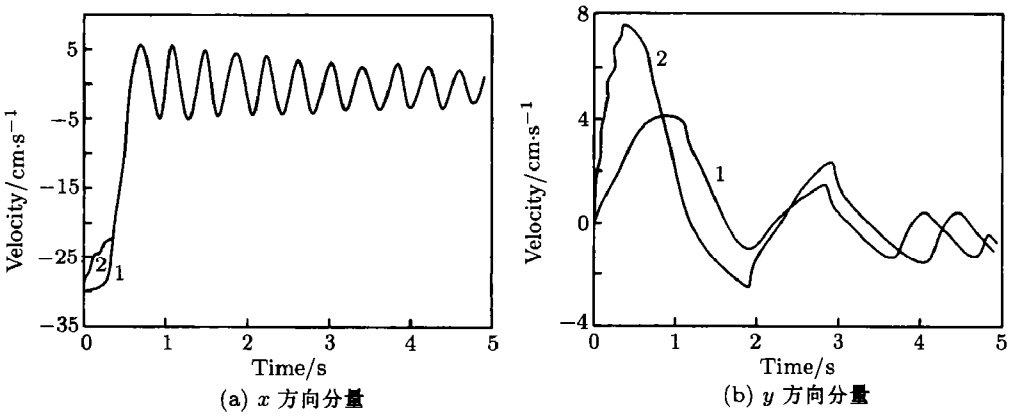


图 5　两飞行器质心间相对速度随时间的变化曲线
Fig.5　Relative velocity between centric of two spacecraft vs. time

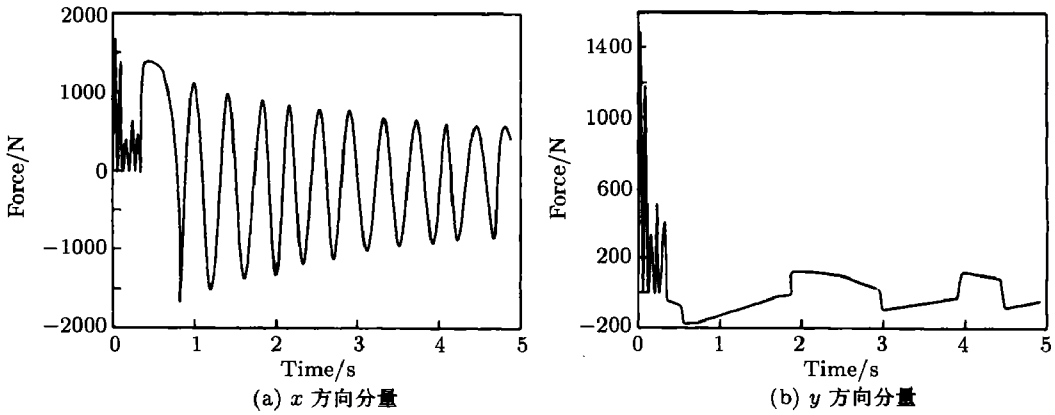


图 6　被动飞行器上的力随时间的变化曲线
Fig.6　Force on passive spacecraft vs. time

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

的仿真结果. 从图中可看出, 两种模型的仿真结果均表明两对接机构能够成功捕获, 只是从接触到捕获的时间不同, 两体模型的计算结果为 0.289 s, 本文的模型为 0.355 s. 从图 3 可看出, 两种模型仿真得到的作用于被动飞行器上的力的大小差别很大. 两体模型得到的 x 方向的最大分力为 198 N, y 方向最大分力为 169 N, 而本文的模型得到的 x 方向的最大分力为 1 640 N, y 方向的最大分力为 1 411 N. 存在差别的原因是两体模型得到的作用于被动飞行器的力为缓冲器产生的力, 因此数值较小. 可见, 用两体模型得到的结果预示在对接过程中作用于被动飞行器上的载荷来指导对接机构的设计是不安全的.

4 结束语

基于系统、完整模型的数值仿真是分析研究对接过程的有力手段. 本文针对异体同构周边式对接机构, 建立了两航天器及其捕获环构成的三体系统在对接捕获阶段及捕获后缓冲校正阶段的完整的对接动力学模型, 尤其是模型中考虑了缓冲装置的惯性及接触变形的影响, 并基于此模型进行了数值仿真. 与两体模型的仿真结果对比表明, 由于两体模型在描述对接过程时所作的简化, 导致仿真结果具有一定的局限性, 特别在预示作用于被动飞行器上的载荷方面表现尤为突出. 而本文的模型较为完善, 得到的仿真结果更为可靠和有说服力.

参 考 文 献

[1] Сыромятников В С. Стыковочные устройства космических аппаратов, [M] Москва: Машиностроние, 1984

[2] 曲广吉, 于登云, 曾新. 航天器空间对接动力学分析仿真软件 DODASS 及其工程应用. 航天器工程, 1995, **4**(4):1—10

[3] 赵阳等. 空间对接机构差动式缓冲阻尼及传动系统力学特性研究. 空间科学学报, 1999,**19**(2):173—180

[4] 于登云等. 航天器对接接触过程撞击动力学分析. 空间科学学报, 1998,**18**(1):62—68

[5] 关英姿, 崔乃刚. 航天器对接过程中接近至首次接触阶段的数值仿真. 上海航天, 1999,(1):21—26

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

RESEARCH ON NUMERIC SIMULATION OF DOCKING DYNAMICS CONSIDERING INERTIA OF SHOCK ABSORBERS AND CONTACT DEFORMATION

GUAN Yingzi[1] CUI Naigang[1] KANG Weimin[2] ZHANG Chongfeng[3]

[1](*Department of Astronautics and Mechanics, Harbin Institute of Technology,* 150001)

[2](*Department of Instrumentation, Measurement and Control Engineering, Harbin Institute of Technology*)

[3](*The 805th Inst. of 8rd Academy, CASC*)

Abstract

Considering inertia of shock absorbers and contact deformation, a more precise and comprehensive docking dynamics model is built to make numeric simulation of the docking system which consists of two spacecrafts with androgynous peripheral docking mechanisms to reflect the dynamic characters of docking process. Types of contact points, geometrical model that determinates contact points, model of contact force and motion equations are studied. Simulation is done and the results are analyzed and compared with those which inertia and deformation are omitted.

Key words Docking dynamic, Numeric simulation, Inertia of shock absorbers, Contact deformation

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com