

空间交会对接过程的动力学模型与仿真

尤超蓝 洪嘉振

(上海交通大学工程力学系, 上海 200030)

摘要 在空间交会对接过程中,从首次接触碰撞到完成捕获与捕获后的缓冲校正这两个阶段是对接动力学研究的重点,建立动力学模型进行仿真是研究的一个有效途径. 以有内导向瓣异体同构周边式对接机构为研究对象,从机构的物理模型出发建立了对接捕获阶段与缓冲校正阶段的动力学模型. 在动力学仿真软件 DADS 的接口上开发相应的用户模块,完成交会对接过程的动力学仿真.

关键词 动力学模型,动力学仿真,周边式对接机构,航天器对接

引言

空间交会对接是发展载人航天必须解决的一项关键技术,是实现空间站、载人飞船等大型飞行器在轨组装和维修、轮换和营救宇航员、设备更换、物资补给、燃料加注等各项空间作业的基础,也是我国进一步发展载人航天技术及参与国际空间站计划所面临的亟待解决的基本技术之一. 空间交会对接涉及到主动(追踪)、被动(目标)两个飞行器相对于惯性空间来说同时要最多具有 12 个自由度的轨道和姿态控制问题. 为了得到一个高度可靠并且有容错和诊断功能的系统,仿真试验是进行空间交会对接技术研究的一个有效途径. 它是借助于计算机仿真平台通过建立对接机构的动力学模型来对整个对接系统动态过程进行仿真.

根据缓冲阻尼系统在对接过程中的工作特性,对接过程可以划分为 5 个不同的阶段来分别加以模拟. 这 5 个阶段依次为:1)从首次接触到完成捕获;2)从捕获到停止相对运动;3)拉紧;4)对接后组合体状态;5)分离. 一般来说,前两个阶段是对接动力学研究的重点,因为期间对接系统间存在很多接触碰撞,会产生较大的撞击载荷,要求缓冲阻尼系统吸收的能量很大. 对接系统十分复杂,由主动(追踪)飞行器、被动(目标)飞行器、主动对接环、被动对接环以及缓冲机构组成,整个系统包括上百个刚体和上百个铰,如果建立全刚体模型,那么系统动力学方程将是由几百个

微分方程和几百个约束方程所组成的规模庞大的微分-代数方程组,从计算精度与效率角度,以这样的数学模型进行动力学分析在数值上是很困难的. 因此,对接过程的动力学研究常采用简化模型,在建模过程中将对系统简化为 3 个刚体,并假设缓冲系统由 6 个互不相关的缓冲器组成^[1~3]. 这些模型中没有建立弹簧阻尼等缓冲部件物理参数和整体缓冲性能的关系,但这些关系对后续的优化设计是必需的.

本文以有内导向瓣异体同构周边式对接机构为研究对象,对交会对接过程中对接捕获阶段和捕获后的缓冲校正两个阶段进行研究,利用多刚体系统动力学理论^[4],把整个系统简化为若干刚体,把弹簧阻尼等缓冲元件对主动飞行器和主动对接环的缓冲力用缓冲系统力元来表示,建立了缓冲元件物理参数与缓冲系统整体缓冲性能的关系. 另外,文中考虑了缓冲系统中小转动部件惯量对系统动力学方程的贡献. 根据所建动力学模型,在动力学仿真软件 DADS 平台上开发了相应的用户模块,编写了 Fortran 用户接口程序,完成了交会对接过程的动力学仿真.

1 动力学模型

在建模过程中,采用如下假设条件:1)主、被动飞行器及主动对接环均为刚体;2)接触点处无摩擦,且不考虑接触点处的弹性变形.

航天器空间对接过程如图 1 所示,建立连体坐标系: $e(O-XYZ)$ 为惯性坐标系,选在飞行轨道上; e^1

$(O_1-X_1Y_1Z_1)$ 为主动飞行器的连体坐标系,基点选在主动飞行器的质心 O_1 上, X_1 轴与主动飞行器的中心轴重合; $e^2(O_2-X_2Y_2Z_2)$ 为被动飞行器的连体坐标

系,基点选在被动飞行器的质心 O_2 上, X_2 轴与被动飞行器的中心轴重合; $e^3(O_3-X_3Y_3Z_3)$ 为主动对接环的连体坐标系,基点选在主动对接环的质心 O_3 上.

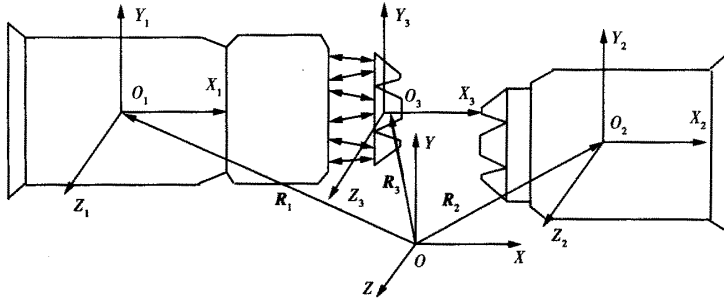


图1 对接系统模型及坐标系

Fig.1 Model of docking system and coordinates

1.1 对接捕获阶段动力学模型

对接捕获阶段是一个复杂的动力学问题,其中存在着大量的接触碰撞以及缓冲系统作用. 此阶段的动力学模型是三体力元模型(图1),三体即主动飞行器、被动飞行器和主动对接环,力元包括缓冲系统力元、接触碰撞力元和捕获锁作用力元. 另外,在建模中还考虑了缓冲系统中齿轮等小转动部件惯量的影响. 下面对以上3种力元和齿轮等转动部件惯量的影响分别进行说明.

1.1.1 缓冲系统力元

差动式缓冲机构是现今常用的缓冲机构. 该机构主要由4类功能单元组成^[5]:捕获环、丝杆自差组合、丝杆组差组合和驱动装置(包括前置自动调整摩擦制动器).

主动飞行器与主动对接环相对位形的改变会导致6根丝杆长度的变化,通过丝杆与丝母相对转动以及差动式缓冲阻尼机构的传动链,机构中的弹簧与阻尼元器件会变形然后产生反作用力. 通过丝杆作用于主动对接环和主动飞行器以阻碍相对位形的改变. 缓冲系统力元模型就是建立丝杆作用于主动对接环与主动飞行器六对力与主动对接环相对主动飞行器位形之间的关系. 本文从差动式缓冲系统的物理结构出发,在运动学关系的基础上,利用虚功原理建立缓冲系统力元模型,为沿丝杆方向的6个力元(图1中6根双箭头线段).

通过运动学分析,可得各弹簧、阻尼元件、摩擦制动器的转角与6根丝杆的长度之间的关系为^[5]:

$$\varphi = \varphi(l_i, d_i, n_k),$$

$$i = 1, \dots, 9; j = 1, \dots, 6; k = 1, \dots, 5 \quad (1)$$

其中 $l_i (i=1\sim6)$ 为6根丝杆的长度, d_i 为丝杆的螺距, $n_k (k=1\sim5)$ 为转速比, $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 为3个杆自差弹簧的圈数; φ_4, φ_5 分别为杆组差弹簧1和杆组差弹簧2的圈数; φ_6 为摩擦制动器和前端弹簧共同转过的圈数; $\varphi_7, \varphi_8, \varphi_9$ 为3个阻尼元件的转角.

将 $\varphi_1, \varphi_8, \varphi_9$ 对时间求导,可得电磁阻尼器的角速度与丝杆的伸长速率 $\dot{l}_i (i=1\sim6)$ 之间的关系. 由弹簧、摩擦制动器的转角和电磁阻尼器的角速度,可求得它们所产生的扭矩,表示为: $M_i = M_i(k_i, \varphi_i, \dot{\varphi}_i)$, 其中 k_i 为弹簧刚度或阻尼系数. 根据虚功原理,得到6个丝杆上的力元值与缓冲阻尼元件扭矩之间的关系为

$$\sum_{i=1}^6 f_i \delta l_i = \sum_{i=1}^9 \sum_{j=1}^6 M_i \frac{\partial \varphi_j}{\partial l_i} \delta l_j \quad (2)$$

其中 $f_i (i=1, 2, \dots, 6)$ 为6根丝杆上的力元值; $M_1(\varphi_1), M_2(\varphi_2), M_3(\varphi_3)$ 为3个杆自差弹簧扭矩; $M_4(\varphi_4), M_5(\varphi_5)$ 为两组杆组差弹簧中的扭矩; $M_6(\varphi_6)$ 为摩擦制动器前端弹簧中的扭矩; $M_7(\varphi_7), M_8(\varphi_8), M_9(\varphi_9)$ 为3个杆自差弹簧对应的电磁阻尼器中扭矩. 从式(2)中可以解得丝杆的力元值 f_i . 6个丝杆力元对接环作用力的合力就是缓冲系统对接环6个方向上的缓冲力(矩).

1.1.2 接触碰撞力元

由于结构关系,内向导瓣异体同构周边式对接机构在对接捕获过程中共可能出现5类接触情况: 1)主、被动导向板的6条边缘相对应接触; 2)主动导向板的6条边缘与被动对接环相接触; 3)被动导向

板的 6 条边缘与主动对接环相接触;4)被动对接环的圆周与主动对接环面接触;5)主动对接环的圆周与被动对接环面接触。关于接触碰撞点的寻找和判定,详见文献[3,5]。在某一时刻,如果存在接触碰撞点 i ,则在接触碰撞点上加入一个接触碰撞力元,力元采用小弹簧模型,具体值为

$$F_{pi} = K \cdot \delta_i + C_1 \cdot \Delta v_i + C_2 \cdot \delta_i \cdot \Delta v_i \quad (3)$$

其中 F_{pi} 为接触碰撞点 i 处法向力大小; K, e, C_1, C_2 为与材料有关的系数; δ_i 为嵌入量; Δv_i 为相对速度。

1.1.3 捕获锁作用力元

在首次接触碰撞后,在缓冲系统作用下,主、被动对接环的偏差逐渐减小,当偏差减小到一定程度时,捕获锁开始起作用。如图 2 所示,分别在锁舌与卡板器上建立连体坐标系 e^1 与 e^2 ,两连体基基点连线得到的矢量 l 在连体坐标系 e^1 投影, x 方向的投影 l_x , y 方向的投影为 l_y ; h 为锁舌的高度。当 $l_y > h$ 时,捕获锁不工作,无相互作用。当 $l_y < h$, 并且 $l_x > 0$ 时,卡板器压上锁舌,在 y 方向上有相互作用 (F_1 和 F'_1),其大小为 f_0 (常值)。当 $l_y < h$, 并且 $l_x < 0$ 时,

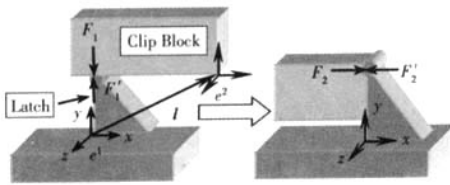


图 2 捕获锁在捕获过程的数学模型图

Fig. 2 The model of docking lock during the docking process

捕获锁锁上,卡板器和锁舌间存在接触碰撞。当存在嵌入量时,在 x 方向上有相互作用 (F_2 和 F'_2),其大小为 $k \cdot \delta$,其中, k 为刚度系数, δ 为嵌入量;详见文献[5]。当 3 个捕获锁都锁上时,认为对接捕获成功,转入缓冲校正阶段。

1.1.4 缓冲系统中转动部件惯量的影响

整个对接机构除了 3 体(主、被动飞行器和主动对接环)外,还有大量的转动部件(如丝杠、齿轮等),部件转动的惯量特征对系统动力学方程有贡献,在此利用动能等效的办法,将转动部件惯量的贡献转化为广义力来处理。

现将系统的动能分为两部分。令主、被动飞行器和主动对接环三刚体模型的动能记为 T_1 ;系统中因

有旋转部件而附加的动能(包括齿轮和 6 根丝杠的动能)记为 T_2 ;系统总的动能为 $T = T_1 + T_2$ 。

对于三体力元模型,缓冲阻尼系统部件的运动可由主动飞行器和主动对接环的相对位形描述。利用笛卡儿方法,以三个刚体的笛卡儿坐标为系统的广义坐标 q 。三刚体的拉格朗日函数为 $L_1 = T_1 - V$, V 为系统的势能,系统的拉格朗日函数可表为

$$L = T - V = T_1 + T_2 - V = (T_1 - V) + T_2 = L_1 + T_2 \quad (4)$$

系统的拉格朗日方程可以写为

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L_1}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L_1}{\partial q_i} = - \frac{d}{dt} \frac{\partial T_2}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial T_2}{\partial q_i} \quad (5)$$

可见缓冲系统运动部件对动力学仿真的影响表现为式(5)的右项。考虑到 DADS 仿真软件的工作模式,式(5)的右项可以作为一种广义力 F_2 处理。

对于三体力元模型,传动链对系统影响的动能是 3 部分,即主动飞行器内齿轮运动的附加动能(记为 T_{21}),主动对接环内齿轮运动的附加动能(记为 T_{23}),丝杠的动能 T_{2L} ,故有 $T_2 = T_{21} + T_{23} + T_{2L}$ 。

有了上述的力元,利用牛顿力学对三个刚体分别列出动力学方程,联立后写为矩阵形式为

$$M \ddot{q} = F_t + F_s + F_p + F_2 \quad (6)$$

其中 M 为系统质量阵; F_t 为推力; F_s 为丝杆力; F_p 为碰撞力; F_2 为小传动部件的广义力。

1.2 缓冲校正阶段动力学模型

在捕获成功后,主动对接环和被动飞行器合为一体。系统的拓扑结构发生改变,此时的动力学模型为二体力元模型(图 3),二体即主动飞行器和等效被动飞行器(包括主动对接环和被动飞行器),力元为缓冲系统力元(如前节所述)。同对接捕获阶段一样, $e(O-XYZ)$ 和 $e^1(O_1-X_1Y_1Z_1)$ 分别为惯性坐标系和主动飞行器的连体坐标系;而 $e^2(O_2-X_2Y_2Z_2)$ 为等效被动飞行器的连体坐标系。等效被动飞行器的质量为主、被动飞行器的质量和。等效被动飞行器的初始条件确定如下:1)等效的被动飞行器的位置初始条件用捕获时刻被动飞行器的位置信息加上相应的质心位置的偏移,姿态初始条件用被动飞行器的姿态参数。2)利用动量和角动量守恒,将捕获时刻主动对接环和被动飞行器的动量、角动量转化到等效被动飞行器上,具体如下

$$m_2^* v_2^* = m_2 v_2 + m_3 v_3 \quad (7)$$

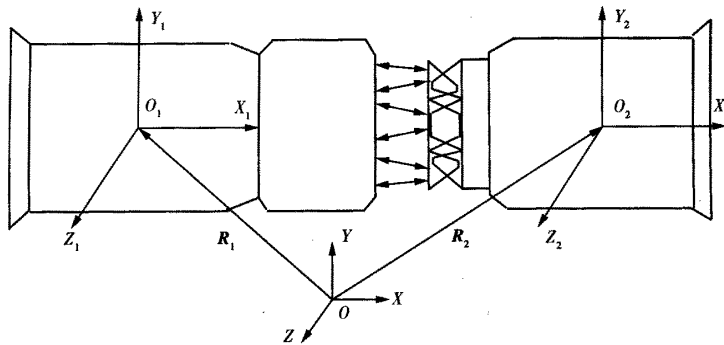


图3 缓冲校正阶段动力学模型及坐标系

Fig.3 Dynamical model in buffering process and coordinates

$$J_2^* \cdot \omega_2^* = J_2 \cdot \omega_2 + J_3 \cdot \omega_3 \quad (8)$$

其中 m_2^*, J_2^*, ω_2^* 分别为等效被动飞行器的质量、惯量张量、速度矢量和角速度矢量; m_2, J_2, v_2, ω_2 分别为被动飞行器的质量、惯量张量、速度矢量和角速度矢量; m_3, J_3, v_3, ω_3 分别为主动对接环的质量、惯量张量、速度矢量和角速度矢量。

2 算例

整个动力学仿真流程如图4所示。利用仿真软件 DADS, 前处理中载入物体的质量、惯量等参数, 在 User-Program 中用 Fortran 程序语言编写所需的6个自定义模块的程序。利用 DADS 进行求解,

在后处理中, 可输出曲线和动画演示等。

对一个典型工况的对接过程进行动力学仿真, 初始条件为: 相对纵向接近速度为 $v_x = 0.35 \text{ m/s}$, 相对滚转(绕 x 轴), $\Delta\phi = 4^\circ$ 推力 560 N , 结果如图5, 图6所示。从图5可以看出能够很好的完成对接, 图6是缓冲力和力矩。另外, 还对其他不同的初始条件(包括中心对接、滚转、偏航、俯仰、Y 偏移、Z 偏移等)30 来种工况进行动力学数值仿真, 同样可以对接成功。

3 结论

本文给出了关于周边式对接机构对接捕获与缓

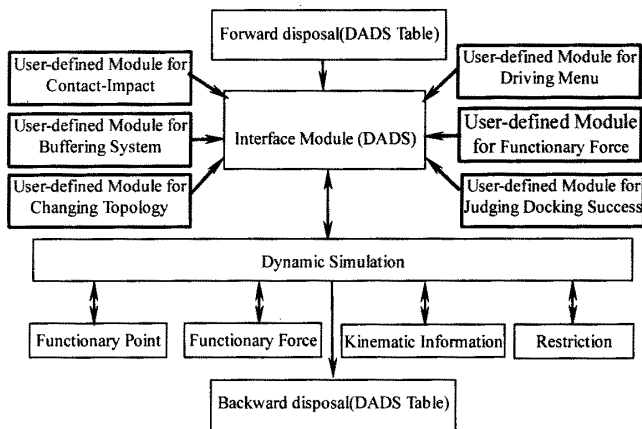


图4 仿真流程图

Fig.4 Flow chart of simulation

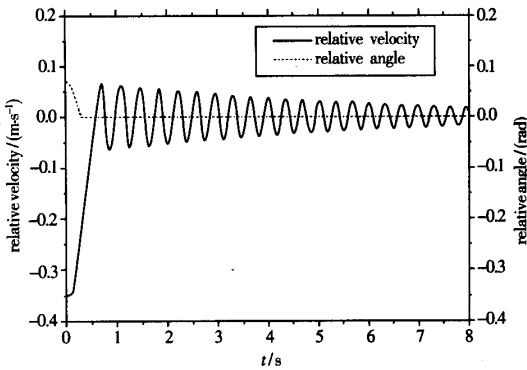


图5 飞行器X方向相对速度和对接环滚转角度差变化曲线

Fig. 5 Variation curves of relative velocity in X direction between spacecrafts and relative roll angle between docking rings

冲校正两个阶段的动力学模型,通过对大量工况的对接捕获过程的动力学仿真,表明本文建立的数学模型可行.同时,由于把缓冲元器件的参数直接在建模中表现出来,故利用该模型只要稍加修改就可以对缓冲系统进行后续的优化设计.再者,由于模型中考虑了缓冲系统6个方向间的耦合并计及了缓冲系统中的小转动部件惯量在对接过程中对系统动力学方程的贡献,因此本文所建模型是比以往的简化模型更接近全刚体模型的一种简化模型.

参 考 文 献

- 1 关英姿,杨大明. 航天器对接过程的动力学建模. 南京理工大学学报, 2001, 25(1): 6~9 (Guan Yingzi, Yang Daming. Dynamic modeling of spacecraft socking process. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2001, 25(1): 6~9(in Chinese))
- 2 王兴贵,韩松臣,荣丽,赵阳. 周边式对接机构的航天器首次接触碰撞击点的确定. 宇航学报, 1999, 20(1): 49~56 (Wang Xinggui, Han Songchen, Rong Li, Zhao Yang.

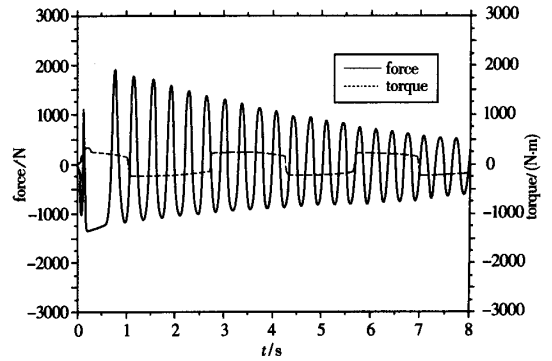


图6 X方向缓冲力和绕X轴缓冲力矩变化曲线

Fig. 6 Variation curves of buffering force in X direction and buffering torque round X axis

Determining the Position of the first contact points for the spacevehicles with androgynous peripheral docking mechanism. *Journal of Astronautics*, 1999, 20(1): 49~56(in Chinese))

- 3 杨芳,曲广吉. 空间对接机构差动式机电缓冲阻尼系统机构传动原理分析. 力学与实践, 1999, 21(3): 44~47 (Yang Fang, Qu Guangji. Operation Analysis of the differential electro-mechanical attenuation mechanism in space docking. *Mechanics in Engineering*, 1999, 21(3): 44~47 (in Chinese))
- 4 洪嘉振. 计算多体系统动力学. 北京: 高等教育出版社, 1999, 2002 (Hong Jiazhen. Computational Dynamics of Multibody System. Beijing: High Education Press, 1999, 2002(in Chinese))
- 5 洪嘉振,尤超蓝,章杰,等. 周边式对接机构对接过程动力学仿真分析报告. 上海交通大学工程力学系, 2003 (Hong Jiazhen, You Chaolan, Zhang Jie, et al. Dynamical Simulation Analysis of Docking Process for Androgynous Peripheral Docking Mechanism. [Report]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2003(in Chinese))

DYNAMICAL MODEL AND SIMULATION OF RENDEZVOUS AND DOCKING PROCEDURE*

You Chaolan Hong Jiazhen

(Department of Engineering Mechanics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract In the course of space docking, the process from the first contact to finishing the capture and buffering after the capture are the research focus of docking dynamics, and establishing the dynamical model and simulation is an effective way for the research. In this paper, in accordance with the docking mechanism of androgynous and peripheral type with inner guide petals, and based on the mechanism physical model, the dynamical models in docking capture process and buffering process were built, and some user-defined modules were developed using the interface of the famous software named DADS, which can accomplish the simulation of docking procedure.

Key word dynamical model, dynamical simulation, androgynous peripheral docking mechanism, space vehicles docking