

空间对接机构动力学仿真分析

于伟 杨雷 曲广吉

(中国空间技术研究院总体部,北京 100086)

摘要 以俄罗斯“异体同构”周边内翻式对接机构(APAS89)为研究对象,利用 ADAMS 建立对接机构的差动式机电缓冲阻尼系统的动力学模型,对差动式机构的动态特性进行仿真,得到系统的等效刚度和阻尼特性.对差动式机电缓冲阻尼系统及其主要部件的动态特性进行仿真研究,可以为对接机构设计提供仿真工具和设计依据,其仿真结果对空间对接机构的设计研究以及空间对接过程动力学建模具有参考作用.

关键词 航天器,空间对接,对接机构,对接动力学,动力学仿真

引言

根据我国载人航天发展分3步走的战略部署,随着神州五号载人飞船将航天员顺利送入太空,我国下一步将进行载人航天的第3步——空间试验室工程,其中最重要的就是要突破空间交会对接技术.

空间交会对接是现代复杂航天器,尤其是载人空间站长期在轨运行期间不可缺少的操作活动.它是完成空间组装、人员更换、补给、维修和回收等作业的先决条件.20世纪60年代初,苏联和美国相继开展了各自的空间对接技术研究,至今已成功进行了200多次空间交会对接活动.其中美国的航天飞机和俄罗斯的“和平号”空间站在空间交会对接中采用周边式对接机构 APAS89(图1),“和平号”对接机构使用的是差动式机电缓冲阻尼系统,该系统的设计十分巧妙,能控制捕获环6个自由度方向的运动并具有缓冲阻尼的功能.在对接过程中差动式机构的缓冲阻尼部件不是独立工作,而是通过传动机构彼此相连,每个缓冲阻尼器的工作状态都与其他缓冲阻尼器的工作状态有关.差动式机构的捕获环具有较大的运动范围,捕获过程中捕获环的纵向移动量较小,而在其他5个自由度上具有较大的灵活性,且可靠性较高.但是差动式机构较重,系统组成复杂,运动部件多达上百个,是一个典型的空间多环机构,其机构动力学特性及其复杂.

在对接机构的设计中,对接机构的缓冲阻尼系统性能直接关系到空间对接的成败,必须通过建模和仿真对其缓冲和阻尼特性进行深入的分析,以便

为对接机构设计优化和空间对接过程动力学特性仿真提供有效的依据.本文就以俄罗斯“异体同构”周边内翻式对接机构(APAS89)为研究对象,利用 ADAMS 建立对接机构的差动式机电缓冲阻尼系统的动力学模型,其仿真结果对空间对接机构的设计研究以及空间对接过程动力学建模具有参考作用.

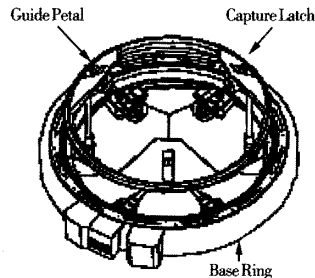


图1 APAS89 构型图

Fig. 1 APAS89 mechanism

1 差动式缓冲阻尼系统的结构组成

作为缓冲、阻尼和传动的直接控制机构,差动式缓冲阻尼系统主要有4个功能单元,即捕获环、丝杠联系组合、副杆联系组合和驱动装置(图2).丝杠联系组合由一对滚珠丝杠转换器和联系齿轮组成,形成一个差动组合;弹簧机构和电磁阻尼器各自分别与一根丝杠联系.副杆联系组合主要由3个差速器和一些中间传动轴组成,形成另一个差动组合,双轴弹簧机构装在其中一个差速器中;在驱动装置前安

装有一个自动调整摩擦制动器 and 始端弹簧机构. 通过中间齿轮和传动轴将所有 4 个功能单元连成一个差动式缓冲阻尼系统. 这些部件通过恰当的运动组合, 可以完成对接开始前捕获环的伸出、对接过程的缓冲阻尼和对接结束后捕获环的拉紧, 并且在对接撞击过程中保证捕获环有 6 个自由度方向上的灵活运动, 以利于捕获连接, 并提供有效的缓冲和阻尼, 吸收撞击过程的动能.

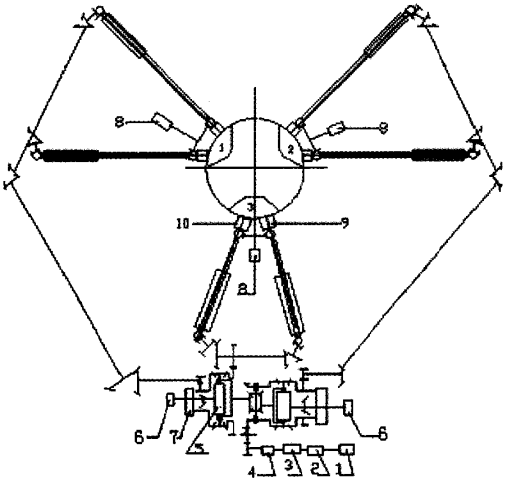


图 2 系统的基本组成和各部件的分布示意图

- 1 —— 驱动装置; 2 —— 齿轮盒; 3 —— 摩擦制动器; 4 —— 轴中心弹簧; 5 —— 差动中心弹簧; 6 —— 失调定位器;
- 7 —— 失调传感器; 8 —— 电磁定位器; 9 —— 中心弹簧;
- 10 —— 电磁阻尼器

Fig. 2 APAS docking mechanism

- 1 —— Driven mechanism; 2 —— Gears;
- 3 —— Friction clutch; 4 —— Axial centering spring;
- 5 —— Differential centering spring;
- 6 —— Fixer; 7 —— Misalignment sensor;
- 8 —— Fixer; 9 —— Interface centering spring;
- 10 —— Magnetic damping spring.

2 差动式机构的运动方程

2.1 坐标系定义

按图 3 所示, 为机构运动学分析定义的坐标系. 主要有对接框上的固定坐标系 $O-x_0y_0z_0$ 和捕获环上的体坐标系 $O-x_cy_cz_c$. $O-x_0y_0z_0$ 是以在对接框上的丝杠下铰点所在圆的圆心为坐标原点, x_0 轴沿对接机构的纵向指向捕获环, y_0 轴与 z_0 轴位于丝杠下铰点所在的圆面内, 与 x_0 轴构成右手系. $O-x_cy_cz_c$ 是以捕获环质心为坐标原点, x_c 轴沿捕获环纵轴始终指向捕获环外端, 初始时捕获环完全伸出, 此时坐标系

$O-x_cy_cz_c$ 的 y_c 轴与 z_c 轴分别与坐标系的 $O-x_0y_0z_0$ 的 y_0 轴与 z_0 轴平行.

2.2 弹簧机构

差动式机电缓冲阻尼系统共配置了 6 个弹簧机构, 它们都采用平面蜗卷弹簧, 其刚度为 k . 差动式机构共有两种工作形式的弹簧. 一种是单轴双向旋转弹簧, 分别装在 3 对丝杠组合处 (K_1); 另一种是双轴双向旋转弹簧, 包括与两个差速器两端相连的弹簧 (K_2) 以及安装在自动调整摩擦制动器前的弹簧 (K_3). 单轴双向旋转弹簧的变形能可写成

$$V = \frac{1}{2} M \varphi = \frac{1}{2} k \varphi^2$$

而双轴双向旋转弹簧的变形能可写为

$$V = \frac{1}{2} k (\varphi_1 - \varphi_2)^2$$

式中 φ_1, φ_2 分别为其两根旋转轴的转角.

2.3 电磁制动器

电磁制动器是丝杠联系组合中的阻尼元件. 当转速不高时, 制动力矩实质上与转子转速 ω 成正比. 在建立动力学方程时, 考虑其阻尼力可近似为速度的线性函数, 则其耗散函数可以写成速度的二次型齐次函数, 其表达式为

$$R = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \omega_i \omega_j$$

式中 R 为瑞利耗散函数, C_{ij} 为耗散系数. 实际应用中需通过试验进行测量和修正.

2.4 自动调整摩擦制动器

在差动机构中, 摩擦制动器是一个能量吸收元件, 由旋转轴、钢球压力调整器和一组摩擦片组成, 在钢球压力调整器的作用下, 这组摩擦片有额定的扭矩 M_n . 在撞击力作用下, 与差速器 CS_2 外壳相连的齿轮将其转动传到调整摩擦制动器前面的弹簧 K_2 的壳体上, 弹簧扭转变形产生的力矩通过旋转轴传到摩擦片上, 当力矩小于 M_n 时, 摩擦片不转动; 当力矩超过 M_n 时, 旋转轴将带动摩擦片开始旋转, 靠滑动摩擦的作用来消耗撞击能量. 设差速器 CS_2 外壳上的齿轮工作转角为 θ , 弹簧 K_4 的刚度系数为 k , 则从 CS_2 传递过来的力矩为

$$M_{k_3} = k \cdot \theta$$

当 $M_{k_3} < M_n$ 时, 自动调整摩擦制动器不工作, 弹簧 K_4 的弹性势能为

$$V_3 = \frac{1}{2} k \theta^2$$

当 $M_{k_3} \geq M_n$ 时, 自动调整摩擦制动器工作, 记摩擦制动器旋转轴的转角为 θ_{2m} , 则有

$$k(\theta - \theta_{2m}) = M_n$$

于是弹簧 K_4 的弹性势能为

$$V_3 = \frac{1}{2}k(\theta - \theta_{2m})^2 = \frac{M_n^2}{2k}$$

3 系统动力学建模

在差动式机电缓冲阻尼系统结构原理和运动关系分析的基础上,应用 ADAMS 建立了差动式机电缓冲阻尼系统的动力学模型(图 4)。模型中共有 42 个运动部件(Moving Part)、6 个圆柱副(Cylindrical Joint)、28 个旋转副(Revolute Joint)、6 个螺旋副(Screw Joint)、12 个恒速副(Convex Joint)、22 个关联副(Coupler)等。其中在捕获环齿轮处设置了具有单轴双向弹簧机构以及机电阻尼器;在差速器两中心轮之间设置具有类似结构的弹簧机构;在差速器外壳上连接有自动调整摩擦器。

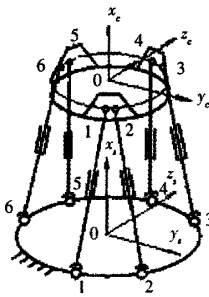


图 3 简化机构示意图

Fig. 3 Simplified mechanism

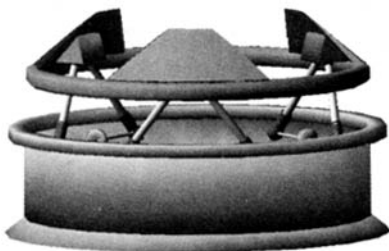


图 4 ADAMS 模型

Fig. 4 ADAMS model

4 系统缓冲阻尼特性分析

利用建立的模型进行了仿真计算,部分仿真结果曲线见图 5~图 10:

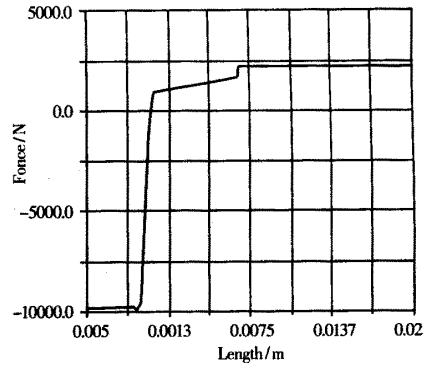


图 5 纵向缓冲器特性

Fig. 5 Buffering characteristics(τ)

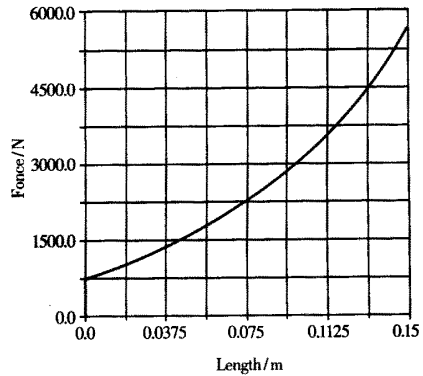


图 6 横向缓冲器特性

Fig. 6 Transverse displacement characteristics

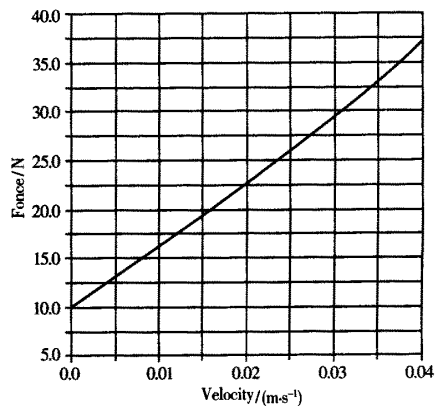


图 7 横向阻尼特性

Fig. 7 Transverse damping characteristics

根据上述仿真分析结果可以得出如下结论:

- 1) 对于捕获环的纵向移动,起缓冲阻尼作用的

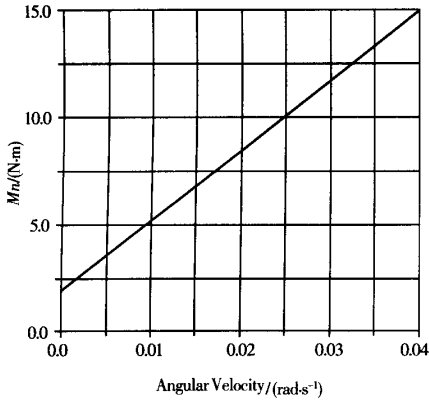


图 8 绕 Y 轴旋转阻尼特性

Fig. 8 Damping characteristic in Y rotation

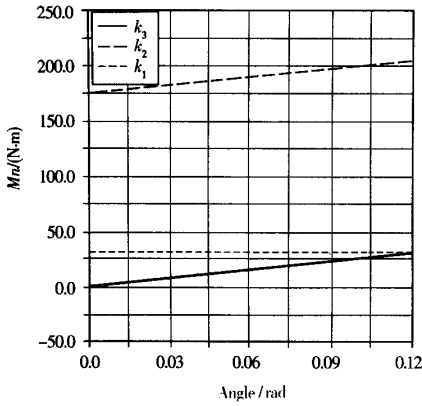


图 9 绕 Z 轴转动各弹簧特性

Fig. 9 Buffering characteristics in Z rotation

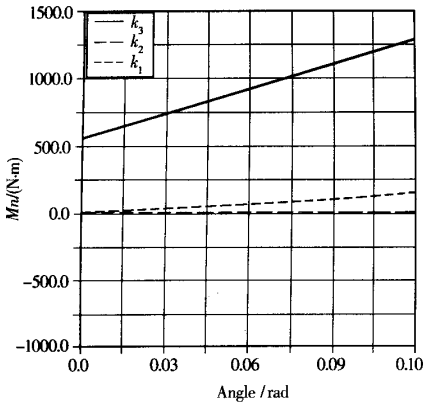


图 10 滚转方向各弹簧特性

Fig. 10 Buffering characteristics in X rotation

2) 对于捕获环的侧向移动,起缓冲阻尼作用的丝杠联系组合中的弹簧(刚度为 k_1)、电磁制动器(阻尼系数 c_1),它们很好地控制了捕获环的横向位移.副杆联系组合中的弹簧(刚度为 k_2)和摩擦制动器前的始端弹簧(刚度为 k_3)所起的作用不占主要地位(图 6 和图 7).

3) 对于捕获环的偏航角位移和俯仰角位移,主要是由两个差速器弹簧(刚度为 k_2)的作用,此时虽然阻尼的作用很小,但同样使位移变化趋于缓和(图 8 和图 9).

4) 对于捕获环滚动角位移,起缓冲阻尼作用的是丝杠联系组合中的弹簧 K_1 和电磁制动器 c_1 (图 10).

5 结束语

本文通过建立缓冲阻尼系统的动力学模型,应用 ADAMS 仿真分析软件对系统的缓冲阻尼特性进行了数学仿真分析,定性分析了差动式机构中分布的所有缓冲器和阻尼器的分工和作用,把复杂缓冲阻尼系统的性能等效到捕获环的 6 个自由度上,分析系统在各个自由度方向的刚度特性和阻尼特性.因此,通过 6 个缓冲阻尼器的差动联系,根据仿真结果可以合理地对接缓冲阻尼器的刚度系数和阻尼系数进行设计和调节,这不仅可以保证对接捕获环的自由运动,而且能分别对 6 个自由度方向的偏差进行有效的缓冲和阻尼,从而为差动式机构的设计与优化提供依据和支持,并为对接过程动力学仿真提供系统等效刚度系数和阻尼系数.

参 考 文 献

- 1 娄汉文,曲广吉,刘济生.空间对接机构.北京:航天工业出版社,1992 (Lou Hanwen, Qu Guangji, Liu Jisheng. Space Docking Mechanism. Beijing: Aerospace Industry Press, 1992(in Chinese))
- 2 曲广吉,杨雷.航天器动力学工程.北京:中国科学技术出版社,2000,372~426 (Qu Guangji, Yang Lei. Spacecraft Dynamics Engineering. Beijing: Chinese Technology Press, 2000. 372~426(in Chinese))
- 3 杨芳.空间飞行器对接机构和对接过程动力学分析与仿真研究. [博士论文]北京:中国空间技术研究院,1999 (Yang Fang. Dynamics Analysis and Simulation of Spacecraft Docking Mechanism and Docking Process. [Ph D Thesis]. Beijing: Chinese Academy of Space Technology, 1999 (in Chinese))

是摩擦制动器以及与其同轴驱动的单轴双向弹簧机构(图 5).

DYNAMICS ANALYSIS AND SIMULATION OF SPACECRAFT DOCKING MECHANISM

Yu Wei Yang Lei Qu Guangji

(Chinese Academy of Space Technology, Beijing 100086, China)

Abstract This paper studied the internal-petal androgynous peripheral attachment system (APAS), its differential electro-mechanical attenuation mechanism, and the dynamics properties of the docking mechanism. The docking mechanism virtual prototyping model was established by using Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems (ADAMS). According to the simulation, the characteristics of the mechanism's equivalent stiffness and damping were obtained. These findings have been essential in ensuring a successful mission.

Key words spacecraft, space docking, docking mechanism, docking dynamics, dynamics analysis