

文章编号:1001-2486(2007)05-0100-04

基于十字靶标的人控交会对接仿真*

蒋自成,周建平,王跃锋,李九人

(国防科技大学 航天与材料工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要:为了减轻航天员的负担,提高人控对接成功率,建立人控交会对接仿真系统是很有必要的。通过对追踪飞行器和目标飞行器的动力学模型分析,建立了人控交会对接仿真系统的基本框架,并基于十字靶标进行了相应的仿真实验。实验结果表明航天员经过一定的训练后,可以通过操作手柄控制追踪飞行器的位置和姿态,实现航天器的交会对接。为降低操作的复杂程度,航天员可以只进行位置控制,而把姿态控制交给自控系统,这样手控对接的成功率会更高。

关键词:十字靶标;人控;交会对接;仿真

中图分类号:TP391.9 **文献标识码:**A

Manual Control Rendezvous and Docking Simulation Based on Cross Drone

JIANG Zi-cheng, ZHOU Jian-ping, WANG Yue-feng, LI Jiu-ren

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to release astronaut's pressure and guarantee the success of rendezvous and docking (RVD), a manual control RVD simulation system is highly necessary. By analyzing the dynamic models of chase spacecraft and target spacecraft, the basic frame of manual control RVD simulation system was constructed, on which corresponding experiments were made. The results of experiments show that the astronaut can control position and attitude of chase spacecraft by manipulating the hand-stick and ensure the success of RVD. For reducing the complexity of manipulation, astronauts usually control the position of chase spacecraft, and insure that attitude control task is completed by automation. In this way, the success rate of manual-control RVD is larger.

Key words: cross drone; manual control; rendezvous and docking; simulation

空间交会对接是实现空间装配、回收、补给和维修等任务的前提,它包括相互衔接的两部分空间操作:空间交会和空间对接。所谓交会是使两个或两个以上的飞行器按预定时间抵达一定的轨道和空间位置,对接是指两个飞行器连接在一起,包括管道、电路等的接通,在结构上形成一个整体^[1]。进行交会对接的两个飞行器,主动的一方称为“追踪飞行器”,被动的一方称为“目标飞行器”。

在交会对接过程中,可以采用两种交会对接控制方式:自动控制和人工控制。在远距离情况下一般采用自动控制进行交会,这时航天员只起监视作用,参与程度不高。只有到最后平移和靠拢段航天员才介入控制,该阶段是指从相距约 150m 到两飞行器的对接机构相互接触的阶段。这时,航天员可以通过一定的成像设备或目视观察系统观察目标飞行器,根据对接标志判断追踪飞行器与目标飞行器的相对位置、姿态等运动情况,并操纵控制手柄进行人工控制,控制飞行器的相对位移和姿态直至对接成功。俄罗斯的人控交会对接一般由两个航天员实现,一个航天员通过光学瞄准镜或舷窗观察两飞行器的相对位置和姿态进行交会对接控制,另一航天员则通过电子仪表盘监测交会对接过程,显示的数据和图像来自 CCD 光学成像敏感器和电视摄像机的测量,航天员通过平移控制手柄和姿态控制手柄稳定飞船的姿态并减少相对位移和相对速度^[2]。如果 CCD 光学成像敏感器出现故障,航天员还能利用电视摄像和控制手柄实现对接后的撤离控制以及故障情况下的主动逃逸机动控制。我国人控交会对接的测量信息

* 收稿日期:2007-03-11

基金项目:国家 863 计划资助项目(2006AA809207B)

作者简介:蒋自成(1979—),男,博士生。

主要来自电视摄像系统,即通过电视摄像机将目标飞行器接口下方的十字形靶标的图案显示在屏幕上,航天员据此信息确定追踪飞行器与目标飞行器的相对位置和相对姿态,通过操纵手柄等手控装置对追踪飞行器进行姿态控制和平移控制,完成追踪飞行器与目标飞行器对接。

目前国内外公开出版的研究人控交会对接的相关资料还不是很多,文献[2-4]简单介绍了人控交会对接的概念。本文通过分析交会对接飞行器的相对动力学模型,建立了相应的手控回路模型,实现了最后平移靠拢段的人控交会对接仿真。

1 动力学模型

1.1 坐标系定义

(1)主动飞行器本体坐标系 $O_1 X_1 Y_1 Z_1$

原点选在追踪飞行器质心上, x 轴平行追踪飞行器的纵向对称轴指向对接环, y 轴和 z 轴在对接初始时分别和主动捕获环的连体坐标系的 y 轴和 z 轴平行,构成右手坐标系^[5]。

(2)被动飞行器本体坐标系 $O_2 X_2 Y_2 Z_2$

原点选在目标飞行器质心上, x 轴平行于目标飞行器的纵向对称轴并指向目标飞行器飞行方向, y 轴和 z 轴分别和被动捕获环的连体坐标系的 y 轴和 z 轴平行,构成右手坐标系。

(3)坐标系 $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ 到坐标系 $O_2 X_2 Y_2 Z_2$ 的转换矩阵

相对姿态角用欧拉角定义,从坐标系 $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ 到坐标系 $O_2 X_2 Y_2 Z_2$ 的向量变换按 231 旋转顺序进行,三个欧拉角分别为:偏航角 ψ 、俯仰角 φ 、滚转角 γ 。因此,从坐标系 $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ 到坐标系 $O_2 X_2 Y_2 Z_2$ 的转换矩阵为

$$T_{21} = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\varphi & \sin\varphi & -\sin\psi\cos\varphi \\ \sin\gamma\sin\psi - \cos\gamma\cos\psi\sin\varphi & \cos\gamma\cos\varphi & \sin\gamma\cos\psi + \cos\gamma\sin\psi\sin\varphi \\ \cos\gamma\sin\psi + \sin\gamma\cos\psi\sin\varphi & -\sin\gamma\cos\varphi & \cos\gamma\cos\psi - \sin\gamma\sin\psi\sin\varphi \end{bmatrix}$$

1.2 质心相对运动方程

以追踪飞行器连体坐标系为参考坐标系和计算坐标系,目标飞行器质心的相对运动微分方程的矢量形式为

$$\dot{r}_{21} = V_{21} \quad (1)$$

$$\dot{V}_{21} = \frac{F_2}{m_2} - \frac{F_1}{m_1} - 2\omega_1 \times V_{21} - \varepsilon_1 \times r_{21} - \omega_1 \times (\omega_1 \times r_{21}) \quad (2)$$

其中 $\dot{V}_{21} = dV_{21}/dt$, $\dot{r}_{21} = dr_{21}/dt$,表示在坐标系 $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ 下的矢量的相对导数; F_1 和 F_2 分别表示作用在主、被动飞行器上的总作用力; m_1 和 m_2 分别表示主、被动飞行器的质量; ω_1 表示追踪飞行器的转动角速度; ε_1 表示追踪飞行器的转动角加速度。

1.3 相对姿态动力学方程

以 J2000.0 为参考坐标系,目标飞行器的质心坐标系为计算坐标系,目标飞行器绕质心运动微分方程的矢量形式为

$$I_2 \cdot \dot{\omega}_2 + \omega_2 \times (I_2 \cdot \omega_2) = M_2 \quad (3)$$

其中, ω_2 为目标飞行器的转动角速度; I_2 为目标飞行器的惯量张量; M_2 为作用在目标飞行器上的合力矩。

目标飞行器相对追踪飞行器的姿态角 γ 、 ψ 和 φ 可由两飞行器的相对角速度 ω_{21} 在坐标系 $O_2 X_2 Y_2 Z_2$ 的分量表示的运动方程给出:

$$\omega_{21} = \omega_2 - T_{21} \omega_1 \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\gamma} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\cos\gamma\tan\varphi & \sin\gamma\tan\varphi \\ 0 & \cos\gamma\sec\varphi & -\sin\gamma\sec\varphi \\ 0 & \sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{21x} \\ \omega_{21y} \\ \omega_{21z} \end{bmatrix} \quad (5)$$

2 手控回路模型与手控系统组成

2.1 手动控制回路模型

手动控制回路用于自动控制回路出现故障或者逼近段需要启动手动控制的情况,利用手动机构进行交会和对接。当姿态控制手柄偏移时从手柄上发出来的控制信号以及角速度传感器装置发出的信号传送给船上数字计算机,计算机按以下规律对角速度传感器装置信号、姿态控制手柄信号求和并形成 x, y, z 三个通道的累计控制信号:

$$\sigma_x = \omega_x + U_x \quad \sigma_y = \omega_y + U_y \quad \sigma_z = \omega_z + U_z$$

其中, σ_i 为累计控制信号, ω_i 角速度传感器信号, U_i 为手柄发出的信号 ($i = x, y, z$)。

计算机控制模块将每个通道的累计控制信号转变为接通停靠-定向发动机的开关命令。当姿态控制手柄沿任一控制通道偏移时飞船会以一定角速度转动,该角速度与姿态控制手柄的偏移量成正比。

当平移控制手柄偏移时沿 x, y, z 三个通道使飞船产生线加速度,通道是与手柄移动方向一一对应的,飞船上计算机根据角速度传感器信号和手柄信号形成相应的控制信号,然后驱动交会-校正发动机产生线加速度。由于在追踪航天器上,控制机构的执行部件均为喷气发动机,当平移控制需要推力时,发动机会产生某些通道上的扰动力矩,因此平移控制时会产生姿态扰动,所以平移控制手柄发出信号后,停靠-定向发动机会连续工作以控制飞船姿态,直到平移手柄返回初始位置。

2.2 手动控制系统组成

人控交会对接仿真系统的测量部件有电视摄像机、靶标、显示仪表、人控专用惯性测量单元、与自动控制系统共用的惯性测量单元、与自动控制系统共用的模拟太阳敏感器和红外地球敏感器、与自动控制系统共用的激光雷达;控制部件有控制面板、人控线路(MCE)和控制手柄;执行部件是与自动控制系统共用的推进分系统;另外,在地影区的照明主要是靠照明灯。

航天员根据载人运输飞船上综合电子显示屏上的图形和数字、电视摄像机的图像信息、舷窗观察到的景物信息,直接操控手柄,经人控线路处理发出控制命令到推进分系统控制姿控发动机或平移发动机,控制飞船的位置或姿态,来完成人控交会对接、撤离控制和故障情况下的主动逃逸机动控制。图1为人控交会对接系统的结构图。

3 仿真实验

人控交会对接的仿真实验设备主要包括仿真计算机和控制手柄。仿真计算机在进行目标器和追踪器轨道和姿态计算的同时,生成通过电视摄像机看到的靶标的三维图像,操控人员根据电视摄像机的图像信息,确定控制策略,转动手柄,手柄的控制信号通过 A/D 转换器进入计算机。

在仿真过程中,除了考虑发动机的偏心安装和推力不对称之外,还考虑了燃料消耗引起的追踪器的质心漂移、质量变化等引起的扰动力矩。假设目标器对地定向,追踪器位于目标后方 80m,控制目标是使得追踪飞行器 and 目标飞行器保持姿态一致。平移偏差采用手柄控制,姿态偏差采用 PID 控制,追踪器的控制仿真结果如图 2 所示。

4 结论

(1)在最后平移靠拢段,操作员可以通过本仿真系统实现飞船的平移与姿态控制,通过观察十字靶标的图像偏移来实现飞船的人控交会对接;

(2)在仿真实验的过程中发现,同时进行姿态和位置的控制对操作员的要求相当高,控制难度很大,通常的方式是姿态控制采用自动控制方式,平移控制采用人控;

(3)控制过程中的燃料消耗和控制稳定时间取决于人的控制策略,通常先进行 y, z 通道的控制,然后控制 x 通道进行靠拢对接,这种方式的对接成功率很高。

(4)操作员观察十字靶标的偏移时可能会产生错误判断,如上下位置偏差和相对俯仰角偏差给人的图像基本上一样,操作员施加控制时很难判断,必须不断施加小的控制量进行跟踪观察,确定偏移量。

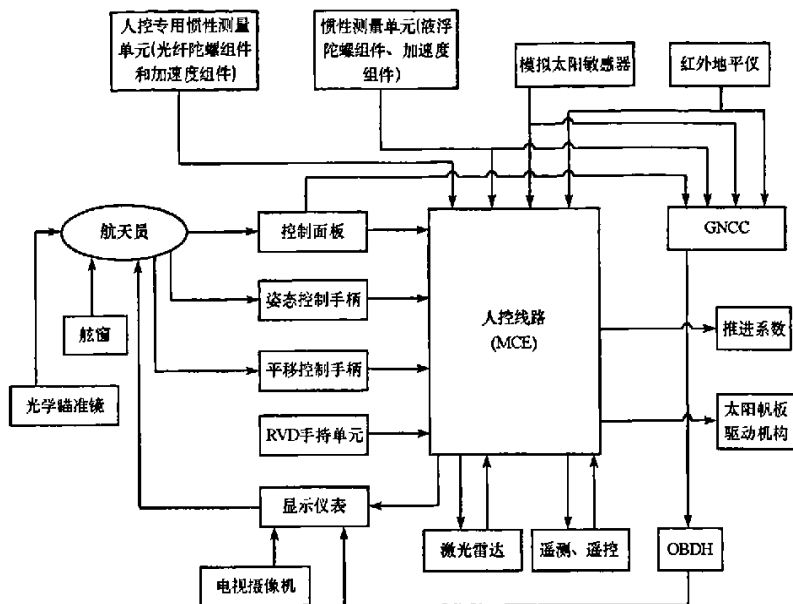


图1 人控交会对接系统结构图

Fig.1 Manual control RVD system architecture

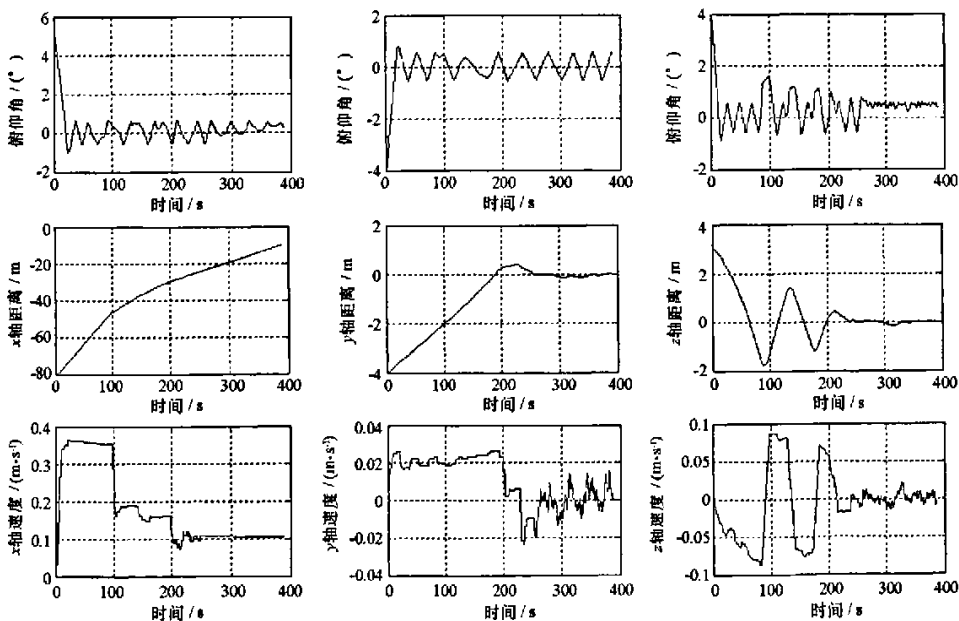


图2 追踪器相对状态仿真

Fig.2 Relative state simulation of chase spacecraft

参考文献:

[1] 林来兴. 空间交会对接技术[M]. 北京:国防工业出版社,1996.
 [2] 刘忆宁,等. 前苏联/俄罗斯航天器交会对接故障分析[J]. 载人航天器,2001.
 [3] Feuse W, Tobias A. The Role of Pilot and Automatic Onboard System In Future Rendezvous and Docking Operations[C]//39th Congress of the International Astronautical Federation,1988.
 [4] Brondina G, Narechal P. Hermets Rendezvous and Docking PROXOPS Concepts[C]//LAF-91-216,1991.
 [5] 杨家琛. 航天器轨道动力学与控制(下册)[M]. 北京:宇航出版社,2002.

