

# 遥操作交会对接系统研究\*

周剑勇, 张波, 蒋自成, 李海阳  
(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 遥操作交会对接是指操作人员在远端通过遥操作方式控制追踪航天器进行交会对接, 主要用于无人航天器自动交会对接系统故障条件下平移靠拢段的交会对接控制。简要介绍了遥操作交会对接的基本概念及其国内外研究现状; 结合我国载人航天工程的基本特点, 设计了适用于我国未来空间站任务的遥操作交会对接系统; 根据设计的系统方案, 设计和开发了相应的遥操作交会对接仿真系统, 并进行了部分仿真分析和遥操作交会对接试验, 初步验证了设计方案的可行性。

**关键词:** 遥操作交会对接; 系统设计; 仿真分析; 时延

**中图分类号:** V526 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2012)03-0024-05

## Researches on teleoperation rendezvous and docking system

ZHOU Jianyong, ZHANG Bo, JIANG Zicheng, LI Haiyang

(College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Teleoperation rendezvous and docking is referred to as the concept that the chase spacecraft is flown distantly through teleoperation approach. It can be used as a backup for autonomous rendezvous and docking for the unmanned chases during the finally approach stage. The concept of teleoperation rendezvous and docking (RVD) and the previous studies in this field were introduced firstly. Then, a design of the teleoperation RVD system was addressed, which is based on the primary assumed conditions of our future space station project. Finally, a simulation system was developed and corresponding experiments were carried out for verifying the design, especially the design with teleoperation time delay. The results show that the design is feasible, even though there are jobs to be done in the future.

**Key words:** teleoperation rendezvous and docking; system design; simulation analysis; time delay

随着我国载人航天事业的不断发展以及空间站工程的论证、立项等工作的开展, 我国将开展载人空间站的建造。在空间站的建造、后续运营及功能拓展中, 需要进行无人航天器与空间站的大量交会对接活动, 如货运飞船、实验舱等与空间站的交会对接。由于无人航天器不载人的特性, 无法采用载人飞船的手动交会对接方式作为自动交会对接的备份, 一旦自动交会对接系统出现故障, 将不得不放弃整个交会对接任务, 由此将造成巨大的经济损失和社会影响, 甚至个别情况下还将威胁到空间站的安全。

因此, 研究一种无人航天器自动交会对接系统的备份手段, 用于进行自动系统异常情况下的交会对接控制, 具有重要的工程实践价值、经济效益和社会意义。

## 1 遥操作交会对接概述

### 1.1 遥操作交会对接概念

遥操作交会对接是指操作人员在远端(或在控制飞行器环境内)通过遥操作方式操作追踪航天器, 实现交会对接, 国外有学者称之为交会对接的遥操作控制(teleoperation control)<sup>[1]</sup>, 也有学者称之为远程控制(remote control)<sup>[2]</sup>、遥操作飞行(remote pilot、teleoperation pilot)<sup>[3-4]</sup>等。就概念本身而言, 遥操作交会对接借鉴了空间机器人遥操作的概念, 是传统遥操作概念的一个延伸, 是遥科学的一个子领域。

国内外有相关学者和研究人员曾提出过“遥操作航天器”(teleoperator spacecraft)的概念, 并提出了遥操作航天器的总体设计思路等<sup>[5-7]</sup>。遥操作航天器是指可以通过地面操作人员或空间站上航天员进行遥操作控制的一类航天器, 用于进

\* 收稿日期: 2011-09-06

基金项目: 国家部委资助项目

作者简介: 周剑勇(1983—), 男, 江西宜春人, 博士研究生, E-mail: zhoujianyong@nudt.edu.cn;

蒋自成(通信作者), 男, 湖南常德人, 讲师, 博士, E-mail: jiangzicheng@nudt.edu.cn

行交会对接、在轨服务、目标捕获等空间活动。

遥操作航天器任务实施过程中采用的空间交会对接技术就是遥操作交会对接技术,相关研究文献简要阐述了遥操作航天器的概念和基本设计思想。

遥操作交会对接主要有两种工作模式,一是空间站上航天员对追踪航天器进行遥操作交会对接控制的工作模式;一是地面操作人员对追踪航天器进行遥操作交会对接控制的工作模式,可分别简称为站-船遥操作交会对接模式和地-船遥操作交会对接模式。遥操作交会对接操作过程中,操作员主要利用反馈的 TV 摄像机图像及相对运动位置、速度等测量信息,通过遥操作平台在线实时地控制远端追踪航天器完成交会对接。

## 1.2 遥操作交会对接研究现状

美国曾于 20 世纪 80 年代在 OMV (Orbital Maneuvering Vehicle) 项目中开展过遥操作交会对接技术的基础研究<sup>[8]</sup>。项目计划研制一种通用的遥操作航天器,用于进行在轨服务、回收废弃卫星等空间活动,后来由于研制经费等因素,项目于 1991 年下马。

俄罗斯(前苏联)则于 20 世纪 90 年代初,研制成功了站-船模式的 TORU (Teleoperatormiy Rezhim Upravleniya) 遥操作交会对接系统,并应用于和平号(Mir)空间站和国际空间站 (ISS) 的交会对接任务,作为无人货运飞船自动交会对接系统的备份。近年来,TORU 系统已成功实施多次进步号无人货运飞船自动交会对接系统故障下与 ISS 的交会对接<sup>[9]</sup>,取得了巨大的经济效益。

日本 NASDA (National Space Development Agency of Japan) 在 ETS (Engineering Test Satellite) 计划中也开展了相关研究,并计划在 ETS 7 任务

期间进行基于地面的地-船模式遥操作交会对接空间实验,最终由于种种原因,实验没有如期进行<sup>[3-4,10-11]</sup>。

相对于其他航天大国或主要的空间技术研究组织,从国内学者公开发表的研究文献来看,国内航天领域的各研究机构、科研院所等对遥操作交会对接的研究还未正式开展。

## 2 遥操作交会对接系统设计

综合 TORU 系统和 ETS 7 的遥操作交会对接系统等,得知国外研究的遥操作交会对接系统往往只支持站-船模式或地-船模式单一的遥操作模式。这与各国的航天发展基本国情有一定的关联,俄罗斯由于基本解决了空间站航天员长期驻守的相关技术,且其参与建设与维护的空间站(包括 ISS 和 Mir)有航天员长期驻守,因此只需要研究和实现站-船模式的遥操作交会对接即可满足其空间站的应用需求。相对而言,日本一直希望独立地开展自己的航天活动,并且 ISS 上已有 TORU 系统可实现站-船模式的遥操作交会对接,故 NASDA 重点转向地-船模式的遥操作交会对接研究。结合我国的载人航天现状,我国未来空间站将面临无航天员值守的情况。因此,我们的遥操作交会对接系统需要同时支持站-船模式和地-船模式两类遥操作交会对接的工作模式。当自动交会对接系统出现故障时,根据实际情况启动遥操作交会对接系统,由航天员进行站-船模式的遥操作交会对接控制或由地面操作人员进行地-船模式的遥操作交会对接控制。

根据以上的总体任务需求,初步设计我国未来空间站的遥操作交会对接系统,如图 1 所示。

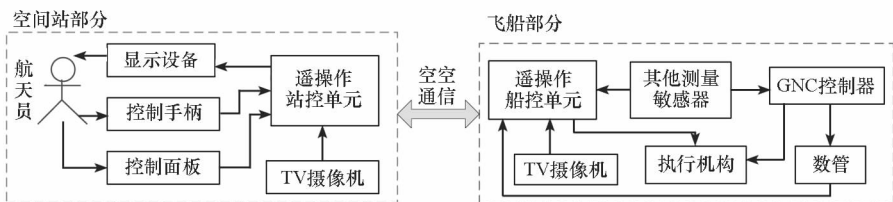


图 1 站-船遥操作交会对接系统原理

Fig. 1 Space station based teleoperation RVD

图 1 中,遥操作站控单元和遥操作船控单元为遥操作交会对接的运动控制单元。航天员根据安装在飞船上交会对接摄像机、安装在空间站上的舱外监视摄像机等的电视图像,结合其他敏感器的测量信息(在显示设备上显示),遥操作货运飞船等无人追踪器进行交会对接或撤离,测量信息和遥操作指令通过空空通信或天地通信系

统进行传输。控制手柄主要进行飞船平移运动和姿态运动的遥操作控制,控制面板主要用于施加部分其他控制指令,如施加避撞机动(CAM)等。

地-船遥操作交会对接的控制流程与站-船模式部分类似,遥操作环境由地面遥操作系统组成,如图 2 所示。相对于站-船模式空间站的操作环境,地面环境可利用的资源显著增多,如更强

的计算能力、更先进的人机交互设备等,设计的地-船遥操作交会对接系统充分利用地面丰富的资源,引入各种先进的遥操作技术,如预测控制技术、预显示技术、虚拟现实技术等,以克服和解决天地大时延条件下的遥操作交会对接问题。此外,地-船遥操作模式下,个别极端情况下,地面操作员可能需要遥操作空间站进行紧急避撞机动,以确保空间站的安全。

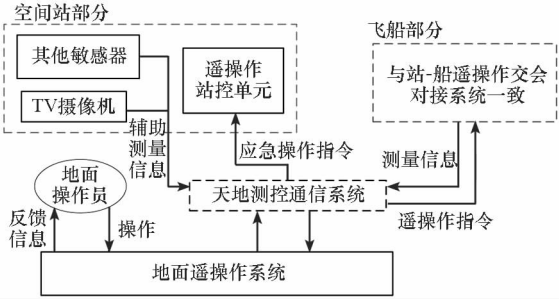


图 2 地-船遥操作交会对接系统原理图  
Fig. 2 Ground based teleoperation RVD

分析以上设计方案,遥操作交会对接与载人飞船的手动交会对接部分类似,操作者的主要信息来源和操作依据为 TV 图像及其他测量设备的辅助测量信息,而 TV 图像的传输可能需要较大的通信带宽,这是遥操作交会对接系统的一个重要约束。

此外,进行地-船遥操作交会对接时,遥操作时延可达  $5 \sim 7s^{[12-13]}$ ,大时延对遥操作交会对接的操作效率、成功率、安全性等均有影响,需要深入分析和研究时延对遥操作交会对接控制、安全性等的影响特性。

### 3 仿真系统设计与仿真分析

针对本文设计的遥操作交会对接系统,设计并研制相应的遥操作交会对接仿真系统,进行设计方案的初步分析和仿真验证。尤其对设计方案中两个重要的约束进行分析和仿真试验,即分析 TV 图像的传输带宽是否可满足工程约束、操作时延的影响情况或时延影响是否可克服。

#### 3.1 仿真系统设计

##### (1) 基本仿真模型

飞船和空间站的动力学模型采用高精度的轨道积分模型,包括 J2 项摄动、大气阻力摄动、第三体引力摄动等摄动模型<sup>[14]</sup>。空间站处于姿态稳定的被动飞行模式,不配合飞船进行交会对接机动;飞船的姿态由 GNC 系统进行自动控制,遥操作只进行飞船的平移运动控制。

##### (2) 仿真系统总体框架

仿真系统主要进行飞船/空间站的动力学与控制的仿真、TV 图像的模拟、图像的编码与图像显示等。仿真系统的组成和总体信息流关系如图 3 所示。

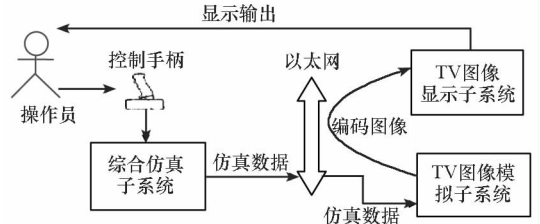


图 3 仿真系统总体结构  
Fig. 3 The teleoperation RVD simulation system

综合仿真子系统主要实现对仿真系统的综合管理;进行激光雷达等测量敏感器的功能仿真;进行空间站 GNC 系统功能的仿真,包括轨道运动的自主控制和对地定向姿态运动的自主控制;进行飞船 GNC 系统部分功能的仿真,主要为姿态运动的自动控制和飞船平移运动的动力学仿真。

TV 图像模拟子系统通过三维可视化的方式模拟 TV 摄像机的场景图像,并对 TV 图像的压缩编码过程进行模拟,将编码压缩后的图像信息通过网络发送至 TV 图像显示子系统,进行图像显示。

TV 图像显示子系统通过网络接收 TV 摄像机图像模拟子系统的图像数据,并对图像数据进行解码得到图像信息,将解码后的图像信息显示在显示终端设备,模拟显示终端的 TV 图像显示。

TV 图像的模拟中引入了类工程的图像编码压缩、数据传输和解压显示的过程,既提高了图像模拟的真实性,又可用于进行图像传输带宽的测试以及分析不同图像质量对遥操作交会对接的影响等。

#### 3.2 仿真试验及结果分析

仿真试验主要对前面提到的两个系统设计约束进行操作试验和分析,试验结果分析如下。

##### (1) 图像通信带宽分析

本仿真系统中 TV 图像的压缩格式采用 JPEG 格式,逐帧对图像进行压缩和传输,图像为 24 位真彩色模式,综合试验结果分析如表 1 所示。

分析上图,25f/s 的连续图像,保证图像较好的清晰度条件下,通信带宽的需求约  $3.8 \sim 4.8 Mb/s$ 。

表 1 图像通信带宽测试

Tab. 1 Communication bandwidth experimental results

分辨率	帧率(f/s)	图像质量	平均带宽 (Mb/s)
1024 × 768	25	一般	3.9
		较清晰	4.8
		很清晰	6.1
720 × 576	25	一般	2.7
		较清晰	3.8
		很清晰	5.9

参考 ATV<sup>[15]</sup>、ETS 7<sup>[16]</sup> 等遥操作系统的设计,其通信带宽约 1.5Mb/s。实际工程中,图像为 8 位灰度图像,且压缩算法为经过优化的 MPEG 流压缩算法时,通信带宽将进一步显著减小,可降至 1.5Mb/s 左右。因此,TV 图像的传输带宽可满足工程约束,以 TV 图像为遥操作的主要参考信息是可行的。

(2) 遥操作时延影响分析

由于地 - 船遥操作交会对接模式的操作时延为 5 ~ 7s,参考国内外对空间遥操作机器人仿真时延的设定<sup>[17-19]</sup>,仿真系统的闭环操作时延设为 6s,单向时延 3s,时延的模拟通过软件算法实现。

试验初始条件设为飞船在空间站正后方 150m,采用 - V Bar 方式进行交会对接。实验操作人员直接面向延迟后的图像和测量模拟数据进行操作,暂未采用预显示技术等辅助操作。试验任务时间要求不大于 720s,以确保任务操作均在地面可监视弧段内。遥操作交会对接试验成功与否通过比较终端状态是否满足对接要求<sup>[20]</sup>,对接终端要求定义如表 2 所示。

表 2 对接精度要求

Tab. 2 Expected final docking states

项目	要求
接近速度	$0.05\text{m/s} \leq V_x \leq 0.4\text{m/s}$
横向速度	$\sqrt{V_y^2 + V_z^2} \leq 0.3\text{m/s}$
横向位移	$\sqrt{y^2 + z^2} \leq 0.3\text{m}$

表 3 中,0s 时延与载人飞船的手动交会对接类似,认为闭环控制回路无显著时延。2s 时延接近于站 - 船遥操作交会对接的闭环时延,其结果可作为站 - 船模式的参考试验结果。6s 时延与地 - 船模式的时延接近,反映地 - 船模式大时延的操作试验情况。

表 3 时延影响试验

Tab. 3 Results of time delay experiment

时延条件	燃料消耗均值(kg)	任务时间均值(s)	失败次数	成功次数
0s	9.05	578.52	0	20
2s	9.31	591.36	0	20
6s	9.71	619.35	4	16

分析以上试验结果,遥操作大时延对遥操作交会对接的成功率影响显著,随着操作时延的增大,遥操作交会对接任务的燃料消耗逐渐增加,任务操作时间也逐渐增长。

4 结 论

根据以上的系统设计和试验分析,可知:

(1) 提出的遥操作交会对接系统设计结合了我国载人航天的实际情况,系统资源需求可满足工程约束,设计方案具有一定的合理性和可行性。

(2) 地 - 船模式的遥操作大时延对遥操作交会对接影响显著,需要进一步研究克服遥操作时延的相关技术。

(3) 遥操作交会对接不仅可用于我国未来空间站任务中,还可拓展应用于非合作目标的空间交会与捕获等,具有重要的工程应用价值和潜在的军事价值,应就此技术展开广泛而深入的研究。

参考文献 (References)

- [1] Jones S. Orbital maneuvering vehicle teleoperation and video data compression [J]. AIAA Journal, 1989, 28(9): 99 - 117.
- [2] Cislighi M. The ATV rendezvous pre-development program (ARP)[C]// Proceedings of the 22nd AAS Guidance Control Conference. Breckenridge; ESA 1999.
- [3] Mitsushige O. Experiences and lessons learned from the ETS-VII robot satellite [C]// Proceedings of IEEE Internal Conference on Robotics and Autonomous. San Francisco; IEEE, 2000: 914 - 919.
- [4] Masaaki M, Isao K. Development of ETS-VIII RVD system-preliminary design and EM development phase engineering test satellite and rendezvous docking [C]// Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Washington DC; AIAA, 1995. 1656 - 1664.
- [5] Tewell J R, Richard A S. Advanced teleoperator spacecraft [C]// Proceedings of the AIAA Conference on Large Space Platforms: Future Needs and Capabilities. Los Angeles; AIAA, 1978.
- [6] Tuner J R, Spencer R A. Teleoperator Maneuvering System [C]// Proceedings of the AIAA Conference on Space Systems. Washington DC; AIAA, 1982.
- [7] Zhou J Y, Jiang Z C, Tang G J. Conceive of the conception

- and investigation of teleoperator spacecraft [ C ]// 61<sup>st</sup> International Astronautical Congress, Prague; International Astronautical Federation 2010.
- [ 8 ] Keith E C. OMV mission simulator [ C ]// Proceedings of the IEEE Conference on Space Technology. Anaheim; AIAA, 1990.
- [ 9 ] Zhou J Y, Jiang Z C, Tang G J. A new approach for teleoperation rendezvous and docking with time delay [ J ]. Sci China-Phys Mech Astron, 2012, 55: 1 - 6.
- [ 10 ] Mitsushige O, Isao K. ETS - 7, a rendezvous docking and space robot technology experiment satellite result of the engineering model development work [ C ]// Proceedings of the 34<sup>th</sup> SICE Annual Conference. Hokkaido; IEEE, 1995.
- [ 11 ] Isao K, Masaaki M, et al. In-orbit demonstration of an unmanned automatic rendezvous and docking system by the Japanese engineering test satellite ETS-VII [ C ]// Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Washington; AIAA, 1994; 950 - 960.
- [ 12 ] Sheridan T B. Space teleoperation through time delay: review and prognosis [ J ]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1993, 9(6): 592 - 606.
- [ 13 ] Noriaki A, Lee J H, et al. A study on influence of time delay in teleoperation [ C ]// Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Atlanta; IEEE, 1999; 317 - 322.
- [ 14 ] 王华, 唐国金, 李海阳. 航天系统分析与仿真基础程序库 AstroLib [ J ]. 系统仿真学报, 2007, 19 ( 13 ): 2917 - 2920.
- WANG Hua, TANG Guojin, LI Haiyang. AstroLib: a foundational library for aerospace system analysis and simulation [ J ]. Journal of System Simulation, 2007, 19 ( 13 ): 2917 - 2920. ( in Chinese )
- [ 15 ] Gianni C, Giovanni B P. Visual techniques applied to the ATV-ISS rendezvous monitoring [ C ]// Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. Atlanta; IEEE, 2004; 613 - 625.
- [ 16 ] Mitsushige O. System engineering approach in designing the teleoperation system of the ETS-VII robot experiment satellite [ C ] // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. New Mexico; IEEE, 1997; 3050 - 3061.
- [ 17 ] Yoon W K, Toshihiko G, Hiroshi K. Model based space robot teleoperation of ETS-VII manipulator [ J ]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20(3): 602 - 612.
- [ 18 ] 李成, 梁斌. 空间机器人的遥操作 [ J ]. 宇航学报, 2001, 22(1): 95 - 98.
- LI Cheng, LIANG Bin. Teleoperation of space robotics [ J ]. Journal of Astronautics, 2001, 22 ( 1 ): 95 - 98. ( in Chinese )
- [ 19 ] 曾庆军, 宋爱国, 黄惟一. 时延下空间遥操作机器人系统工作模式研究 [ J ]. 宇航学报, 2003, 24(2): 180 - 184.
- ZENG Qingjun, SONG Aiguo, HUANG Weiyi. Research on operation mode of space teleoperation robot with time delay [ J ]. Journal of Astronautics, 2003, 24 ( 2 ): 180 - 184. ( in Chinese )
- [ 20 ] 张波, 蒋自成, 周剑勇, 等. 交会对接平移靠拢段手控策略设计 [ J ]. 载人航天, 2010, 16(2): 21 - 25.
- ZHANG Bo, JIANG Zicheng, ZHOU Jianyong, et al. The hand control strategy of rendezvous and docking in the approach phase [ J ]. Manned Spaceflight. 2010, 16(2): 21 - 25. ( in Chinese )