

# 空间对接仿真试验台对接机构测控系统设计

李双全, 杜亚娟, 刘凌锋

(中国电子科技集团公司第三十二研究所, 上海 201808)

**摘要:**为实现空间两飞行器的交会对接,需要对空间交会对接过程进行仿真调试。为此,构建空间对接半实物仿真试验台,克服无实物仿真环境的局限性,再现 2 个空间飞行器的交会对接过程。提出对接机构测控系统设计方案,描述其软件结构和控制流程,建立对接机构测控模型,通过 RT-LAB 实时仿真平台将模型下载到测控计算机上运行,实现对接机构传感器信号的采集和运动控制。试验结果表明,该系统模型能够模拟飞行器的交会对接过程,具有较好的实时性,系统运行稳定、可靠。

**关键词:**空间交会对接;仿真测控系统;控制流程;对接机构;仿真试验台

**中文引用格式:**李双全,杜亚娟,刘凌锋.空间对接仿真试验台对接机构测控系统设计[J].计算机工程,2017,43(6):24-29.

**英文引用格式:**Li Shuangquan, Du Yajuan, Liu Lingfeng. Design of Docking Mechanism Measurement and Control System for Space Docking Simulation Test-bed[J]. Computer Engineering, 2017, 43(6): 24-29.

## Design of Docking Mechanism Measurement and Control System for Space Docking Simulation Test-bed

LI Shuangquan, DU Yajuan, LIU Lingfeng

(The 32nd Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shanghai 201808, China)

**[Abstract]** In order to implement the rendezvous and docking of two space aircrafts, the simulation debugging of the rendezvous and docking process must be done. So this paper builds a space docking hardware-in-the-loop simulation test-bed which overcomes the limit of no physical simulation environment. It can reproduce the rendezvous and docking process of two space aircrafts. The design scheme of measurement and control system for docking mechanism is put forward. Its software structure and control flow process are described, and the measurement and control model of docking mechanism is built. The model is downloaded to run through the RT-LAB real time simulation platform, and implements sensor signal sampling and motion control of docking mechanism. Experimental results show that the system model can simulate rendezvous and docking process of aircrafts. It has good real-time performance, and the system runs stably and reliably.

**[Key words]** space rendezvous and docking; simulation measurement and control system; control flow; docking mechanism; simulation test-bed

**DOI:**10.3969/j.issn.1000-3428.2017.06.004

### 0 概述

随着载人航天技术的发展,空间交会对接技术也得到了快速发展<sup>[1-4]</sup>。美国和俄罗斯较早突破了空间交会技术,我国在 2011 年神舟八号与天宫一号实现了完美的对接,也标志着中国掌握了自主交会技术,并得到了应用。

要实现空间飞行器的交会对接,必须建立空间对接仿真试验台。目前为止,研究较多地集中在无实物仿真调试上<sup>[5-8]</sup>,即无对接机构、力/力矩传感器

等试验设备。通过建立轨迹规划模型、对接动力学模型、对接机构和运动模拟器位姿计算模型、对接机构测控模型等数学模型,对模型进行调试和验证。为了真实再现飞行器的空间对接过程,无实物调试远远不能满足要求。

针对空间对接无实物仿真的局限性,本文构建空间对接动力学半实物仿真试验台。通过运动模拟器、对接机构模拟再现空间两飞行器的对接过程,运用温场环境模拟分系统提供空间高低温的试验环境,以验证模型的正确性、系统控制回路的实时性,以及对接

**基金项目:**国家“921 工程”项目。

**作者简介:**李双全(1975—),男,高级工程师、硕士,主研方向为系统仿真、软件工程;杜亚娟,研究员、博士;刘凌锋,工程师、硕士。

**收稿日期:**2016-12-15 **修回日期:**2017-03-06 **E-mail:** duyajuan@tom.com

过程的故障分析与应对策略、系统的运行可靠性,并完成空间对接机构的验收和鉴定试验。

### 1 背景介绍

美国登月活动和俄罗斯和平空间站的建造与补给都曾依赖仿真试验台,国际空间站也要求通用对接机构必须在工作温度和真空条件下通过地面对接动力学试验台仿真测试。

本文构建的空间对接仿真试验台为神舟八号与天宫一号的成功对接提供了强有力支撑,在此仿真平台上进行了研制验收。

在构建空间对接半实物仿真试验台并对其原理进行描述的基础上,提出对接机构测控系统设计方案,建立测控模型,描述其控制流程,完成对对接机构传感器信号的采集以及运动控制,如对接、捕获、缓冲、回复等控制,实现对接机构和运动模拟器的自动对接和手动对接过程。

### 2 空间对接仿真试验台构建和原理

空间对接仿真试验台,也称为半实物仿真试验台,由测量元件(力传感器)、控制器(包含了数学模型的控制)以及执行元件(运动模拟器分系统)3个部分构成。试验台能够实时模拟2个飞行器(主、被动飞行器)的对接动力学过程。

试验原理如图1所示<sup>[9]</sup>。力传感器将对接机构间的作用力输出到控制分系统,控制分系统按照模型运算输出对运动模拟器的运动控制指令,由运动模拟器分系统实现主被动对接机构之间的相对运动。

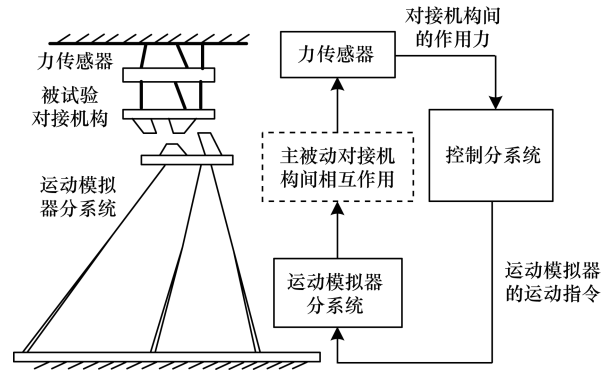


图 1 对接仿真试验原理图

在图1中,对接机构为真实产品,用数学方程表征两飞行器的质量、惯量特性和动力学特征,用Matlab/Simulink建立其数学模型,采用六自由度运动模拟器实现两飞行器对接过程的相对运动。真实空间交会对接测量技术多采用雷达、光学成像、激光测距仪对两飞行器进行相对位置和相对姿态测量<sup>[10-11]</sup>,而本试验台采用六维力传感器测量对接机构的相对位置,进而由下载到目标机的动力学数学模型控制运动模拟器和对接机构的运动。

### 3 仿真试验台系统结构

空间对接仿真试验台系统结构如图2所示,包括五大分系统,其中各分系统用虚线框标识。任务管理计算机、视景仿真计算机、模型计算机之间采用反射内存网络连接,相比以太网,其硬件采用分布式RAM实现数据的传输、共享,不需要复杂的网络协议控制,具有完善的错误管理和防止数据丢失的保护措施,保证了传输延迟时间短和数据传输的可靠性<sup>[12-14]</sup>。

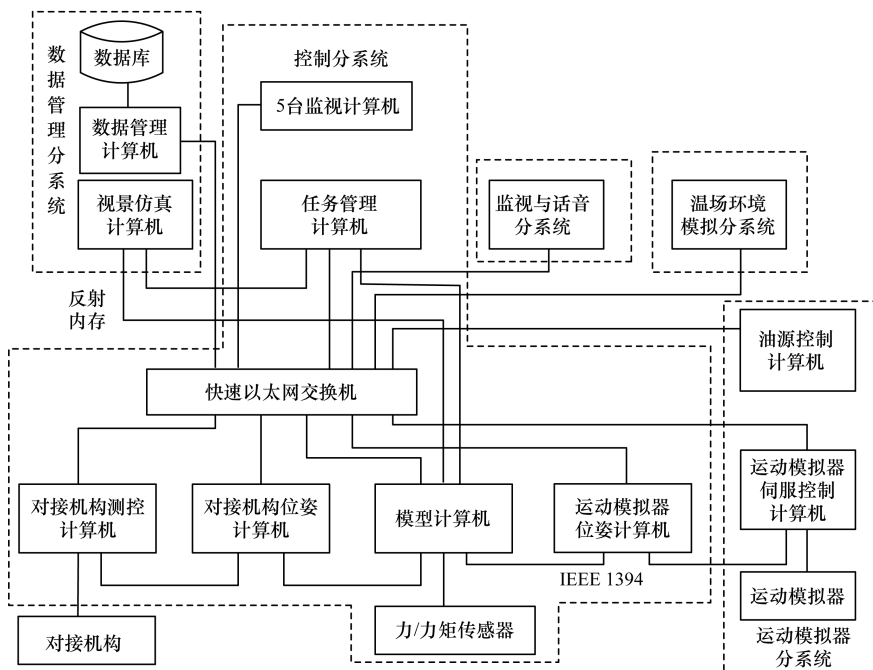


图 2 空间对接仿真试验台系统结构

本文构建的空间对接仿真试验台,主要有四大创新突破:

1) 数学模型的建立和实现,包括轨迹规划模型、对接动力学模型、对接机构和运动模拟器位姿计算模型、运动模拟器从任意位置回到零位的模型以及对接机构测控模型。利用 Matlab/Simulink 建立数学模型,要考虑到对接飞行器的受力情况、空间对接的真实环境等。然后对模型不断调试和验证。为保证模型软件的实时运行采用快速原型开发技术,即建立出正确的模型,直接生成目标机需要的执行代码。

2) 系统控制实时性。系统控制回路周期必须满足 1 ms 的时间指标,一个控制周期包括数据的采集、计算以及输出。因此,选择高采集速率的 A/D 采集卡、性能高的模型计算机以及高速数据传输网络,并优化计算模型,在实际的硬件环境中进行验证。

3) 多目标控制。仿真试验台控制分系统是一个多目标控制系统,其中,任务管理计算机作为上位机;模型计算机、对接机构位姿计算机、运动模拟器位姿计算机、对接机构测控计算机以及运动模拟器分系统的运动模拟器伺服控制计算机作为下位机。由上位机向下位机发出控制指令,下位机运行模型软件接受控制指令并输出控制信号,进而控制对接机构和运动模拟器。多目标控制要满足不同下位机模型运算起始同步、控制实时性、下位机之间的高速通信等要求。

4) 故障检测与决策。为了应对空间对接可能出现的各种问题,必须尽量周全地考虑各种故障信息。将故障类型进行分类,故障类型划分得越细,越能更加真实地模拟实际情况。将试验台故障类型划分为一、二级别,一级为严重故障,报警并停止试验,二级为一般故障,只报警不停止试验。对于一些重要的单元,如运动模拟器分系统或对接机构测控计算机应该能够实时在线检测一些严重的故障,并给出停机控制指令,在极短的时间内控制系统停机。在紧急状态下,任务管理机也可以通过手动紧急停止按钮终止试验。在整个试验过程中,控制分系统任务管理机能够完成系统故障的检测,并根据故障的类型进行故障决策。

#### 4 对接机构测控系统设计

对接机构测控系统采集传感器信号,根据测控模型软件输出对接机构的运动控制。被试验对接机构有机械组件和控温仪参与试验,对接机构测控系统由测控计算机、驱动装置组成,其组成框图如图 3 所示。

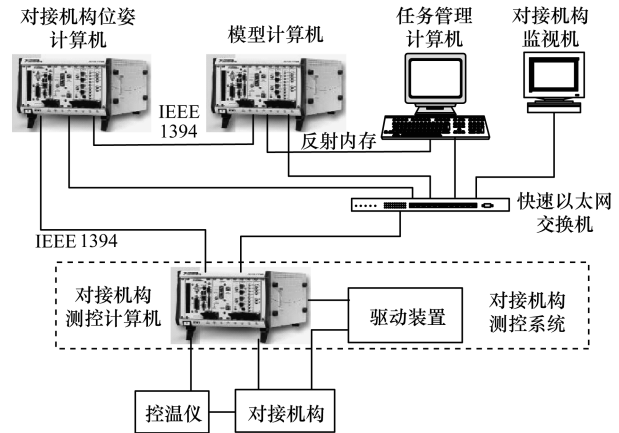


图 3 对接机构测控系统组成

其功能如下:

- 1) 采集开关式传感器、电位器式传感器和执行元件电流信号。
- 2) 输出 3 种执行元件(驱动组合电机、捕获锁电机和电磁定位器)的控制信号。
- 3) 与模型计算机、对接机构位姿计算机以及任务管理计算机之间进行数据传输。
- 4) 模拟对接过程机构故障信号输出。

对接机构测控计算机通过对对接机构各种传感器信号的采集和处理,将 3 路信号(接触、捕获、准备好)输入到模型计算机,模型计算机根据对接机构的状态进行相应数学模型的运算,输出控制指令完成对运动模拟器分系统的控制;6 路处理的信号(杆位移、杆自差)输入到对接机构位姿计算机进行对接机构位姿的计算,通过任务管理计算机的任务管理和控制进行监视,同时,任务管理计算机也对对接机构测控计算机采集和处理的多路信号进行监视。

对接机构测控系统要完成 131 个触点开关信号(共 69 个开关式传感器,每个传感器触点数量不同)、8 个电位器信号(杆位移、杆自差、对接锁)和 19 个电机执行元件的电流采集,在 1 ms 内完成采集保存,并在 1 ms 内完成电机、电磁定位器控制信号的输出。

### 5 软件功能实现与试验结果分析

#### 5.1 软件系统环境

对接机构测控计算机软件系统环境如图 4 所示。任务管理计算机向测控计算机下达控制指令,测控计算机向任务管理计算机传输对接机构传感器信号、电压/电流信号、对接机构的状态信息以及故障信息;测控计算机向模型计算机发送准备好、接触、捕获等信号,模型计算机按照对应的模型进行计算;测控计算机向对接机构位姿计算机传输杆位移/杆自差传感器信号,对接机构位姿计算机按照相应的模型进行计算;驱动装置将对对接机构的传感器信号传输给测控计算机,测控计算机根据测控模型计算向机械组件输出

控制信号,控制对接机构的动作;当其他下位机出现故障时,向测控计算机发送原位停机指令,控制对接

机构停止在原位上,再由任务管理计算机通过手动控制指令控制对接机构恢复到原始位置。

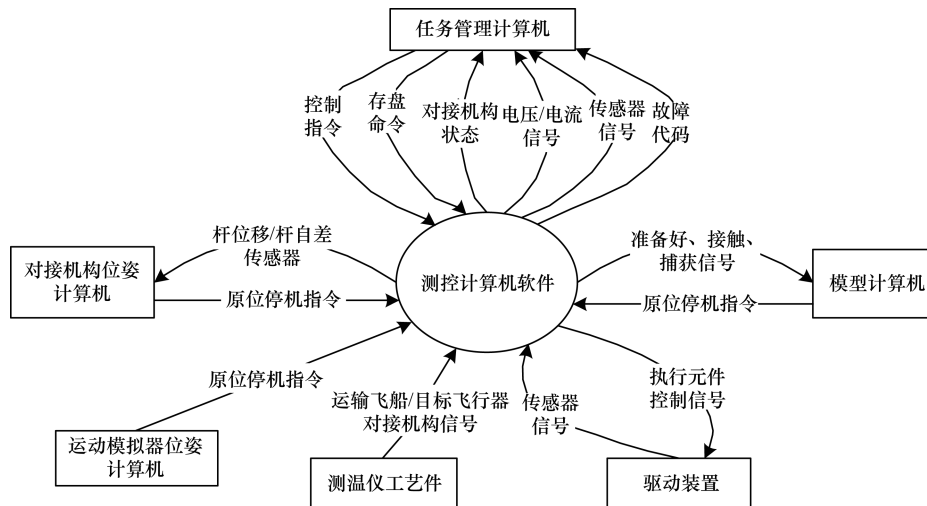


图 4 对接机构测控计算机软件系统环境

### 5.2 软件结构

对接机构测控计算机软件结构如图 5 所示,包括自检模块、信号采集模块(模拟量采集/开关量采集)、试验流程控制模块(自动控制/手动控制)、通信模块(以太网、1394 通信、RS232 串口通信)、机械组件控制模块(主驱动组合电机、捕获锁、电磁拖动机构)、数据存储模块等。

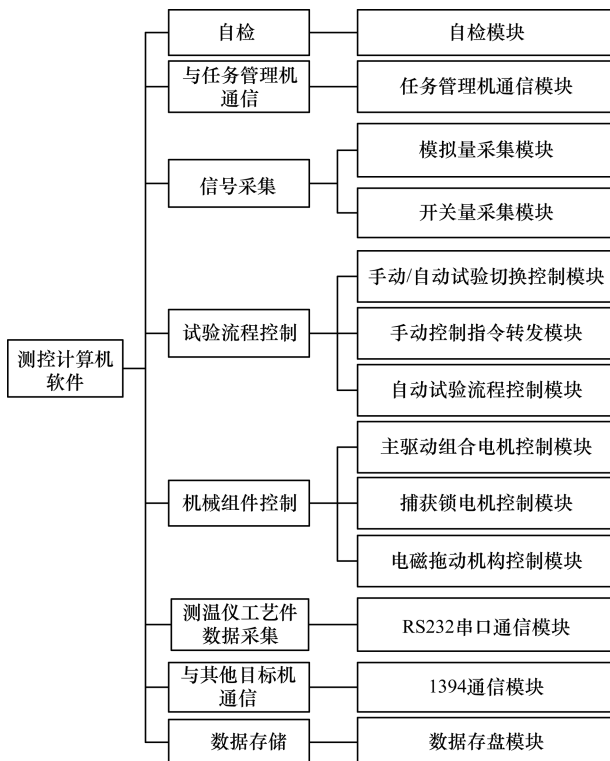


图 5 对接机构测控计算机软件结构

### 5.3 控制流程

对接机构测控系统软件是运行在测控计算机上的数学模型。由于 RT-LAB 仿真编译工具能够方便

地实现复杂的分布式实时仿真<sup>[15-16]</sup>,因此在试验台系统中选用 RT-LAB 仿真环境。任务管理计算机通过 RT-LAB 提供的接口将编译好的模型下载到测控计算机上,并控制模型执行运算或者停止运算。

为了完成对接机构和运动模拟器的对接,测控系统需要将对接机构驱动到等待对接的位置,模型计算机按照轨迹规划模型输出位姿、角速度信息到运动伺服控制计算机,进而控制运动模拟器的运动,实现对接。对接后根据力传感器信息,模型计算机按照动力学模型输出计算信息,进而控制飞行器之间的捕获缓冲和拉近过程。测控系统自动试验流程包括对接准备、接触捕获判断、强制推出、拉近过程。如图 6 所示。

控制流程步骤如下:

- 步骤 1 开始。
- 步骤 2 等待中央控制单元发对接准备指令。
- 步骤 3 判断是否收到对接准备指令,是,进入步骤 4;否则,返回步骤 2。
- 步骤 4 启动驱动组合电机,拉回对接环到初始位置。
- 步骤 5 启动捕获锁电机锁合。
- 步骤 6 锁合电磁定位器。
- 步骤 7 启动驱动组合电机推出对接环到等待对接位置。
- 步骤 8 电磁定位器解锁。
- 步骤 9 判断对接环是否平衡,是,进入步骤 10;否则,进入步骤 17。
- 步骤 10 向中央控制单元发对接准备好信号。
- 步骤 11 判断是否接触,是,进入步骤 12;否则,进入步骤 13。
- 步骤 12 向中央控制单元发接触信号。
- 步骤 13 判断是否捕获,是,进入步骤 14;否则,进入步骤 16。

步骤 14 向中央控制单元发捕获信号。

步骤 15 缓冲校正时间。

步骤 16 判断捕获是否超时,是,进入步骤 17; 否则,返回步骤 13。

步骤 17 向中央控制单元发送故障信号,停止所有机构停止动作。

步骤 18 结束。

对接机构测控系统的整体流程如图 6 所示。

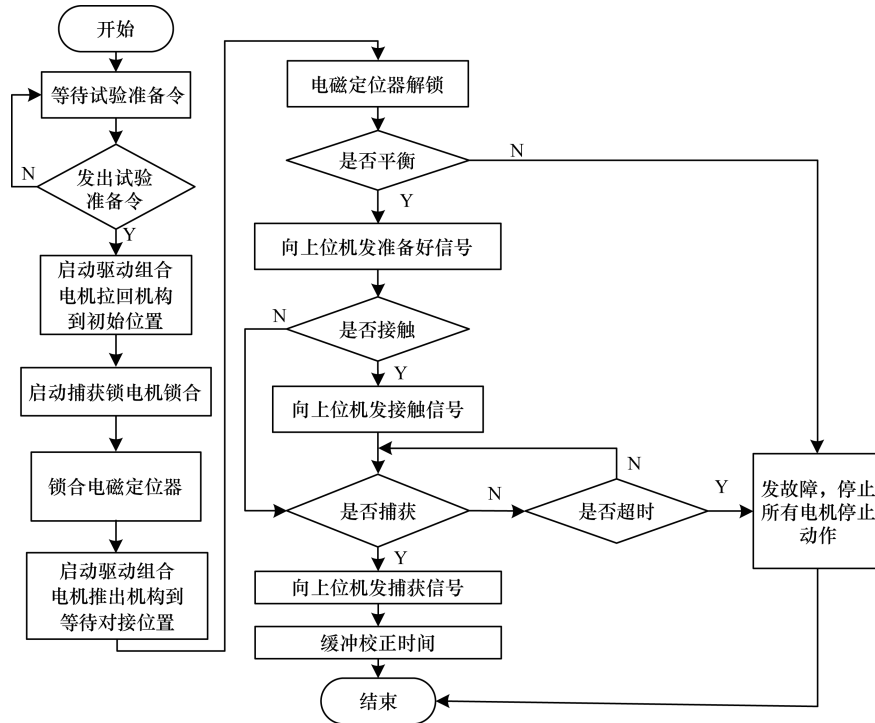


图 6 对接机构测控系统控制流程

### 5.4 试验结果分析

空间对接仿真试验台控制分系统的任务管理计算机和监视计算机选用 LabVIEW 开发环境,其编程方便,人机交互界面友好,具有强大的数据可视化分析和仪器控制能力等特点。任务管理计算机与 5 台下位机通过以太网通信。硬件平台均采

用 NI PXI-8187 嵌入式控制器,RT-LAB 作为仿真编译工具,操作系统采用 QNX 实时操作系统。任务管理计算机通过 Matlab/Simulink 开发系统建立的模型编译下载到目标机,控制目标机开始模型计算。图 7 给出了一个试验工况下自动对接试验控制界面。



图 7 自动对接试验控制界面

整个试验过程包括 4 个阶段: 系统自检阶段完成各分系统以及目标机的自检, 确认自检状态正常后进入试验准备阶段; 在试验准备阶段, 用户进行试验的配置, 包括试验环境温度值( 高低温、常温)、不同试验工况( 不同的初始对接条件)、工作模式( 自动控制试验、手动控制试验) 等, 并设置模型参数; 进行试验时, 如果是自动控制试验, 任务管理计算机将编译好的整合模型下载到各个目标机, 控制目标机开始模型运算, 实现轨迹规划、捕获缓冲和拉近过程。如果是手动控制试验, 则通过模型计算输出对运动模拟器的运动控制, 通过对接机构测控计算机输出对对接机构的运动控制; 试验结束阶段, 不论运动模拟器和对接机构处于任何位置, 控制对接机构和运动模拟器恢复到初始位置。经过不同试验工况以及模拟空间试验环境的多次试验, 验证了系统模型的正确性, 两飞行器都能完成准确的对接并恢复到初始零位状态, 验证了系统运行的稳定和可靠。

## 6 结束语

本文构建的空间对接仿真试验台, 能够模拟 2 个空间飞行器的交会对接过程, 在试验过程中, 对接机构测控系统发挥了较大的作用。本文通过对测控系统的软硬件设计, 实现对接机构传感器信号的采集和对对接机构的运动控制, 完成整个试验对接过程。试验结果验证了模型的正确性和系统运行的可靠性。由于后续载人航天要建立空间站, 实现多个飞行器的空间对接, 因此下一步将研究分析多飞行器对接动力学特性, 对对接动力学模型以及对接机构测控模型进行修改优化, 并更改对接初始条件, 以适应空间对接的要求。

## 参考文献

- [ 1 ] 周建平. 载人航天交会对接技术[ J ]. 载人航天, 2011, 17( 2 ): 1-8.
- [ 2 ] 郑永煌. 空间交会对接技术[ J ]. 自然杂志, 2011, 10( 6 ): 311-314.
- [ 3 ] Machula M, Sandhoo G S. Rendezvous and Docking for Space Exploration [ C ] // Proceedings of the 1st Space Exploration Conference. [ S. l. ]: AIAA Press, 2005.
- [ 4 ] 张柏楠, 马晓兵, 郑伟, 等. 中国载人交会对接技术的设计与实现[ J ]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44( 1 ): 1-11.
- [ 5 ] 关英姿, 康为民, 崔乃刚. 空间交会对接预捕获阶段的建模与仿真[ J ]. 系统仿真学报, 2000, 12( 6 ): 664-667.
- [ 6 ] Evans J, Pinon III E. The History and Future of Space Simulations[ C ] // Proceedings of Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit. Providence, USA: AIAA Press, 2004.
- [ 7 ] 王华. 交会对接仿真系统[ D ]. 长沙: 国防科学技术大学, 2002.
- [ 8 ] 肖余之, 邹怀武, 徐峰. 对接动力学试验台的建模与仿真研究[ J ]. 宇航学报, 2010, 31( 3 ): 674-680.
- [ 9 ] 杜亚娟. 半实物仿真综合试验台控制系统方案[ J ]. 计算机工程, 2010, 36( 22 ): 233-235.
- [ 10 ] 马婷婷, 魏晨曦. 空间交会对接测量技术的发展[ J ]. 中国航天, 2004, 16( 7 ): 30-34.
- [ 11 ] 魏祥泉, 李金宗, 李冬冬. 空间交会对接测量系统及其发展趋势[ J ]. 载人航天, 2004, 12( 1 ): 23-25.
- [ 12 ] 徐振国, 许彩. 反射内存网技术在舰载导航系统中的应用[ J ]. 舰船电子工程, 2016, 36( 6 ): 50-53.
- [ 13 ] 冯炳灿, 孔德仁, 商飞. 反射内存网络在实时测控系统中的应用[ J ]. 计算机测量与控制, 2011, 19( 1 ): 60-62.
- [ 14 ] 冯旭哲, 罗飞路, 陈建云, 等. 基于反射内存网络的实时测试系统设计与实现[ J ]. 计算机测量与控制, 2007, 15( 11 ): 1447-1448, 1457.
- [ 15 ] 常晓飞, 符文星, 闫杰. 基于 RT-LAB 的某型导弹半实物仿真系统设计[ J ]. 系统仿真学报, 2009, 21( 18 ): 5720-5723.
- [ 16 ] 姜东红, 吴根水, 屠宁. RT-LAB 软件在半实物仿真系统中的应用[ J ]. 测控技术, 2008, 27( 4 ): 71-73.

编辑 顾逸斐

( 上接第 23 页 )

- [ 15 ] Cok D R. SMTLIB: Tutorial, Validation and Adapter Tools for SMT-LIBv2[ M ]. Berlin, Germany: Springer, 2011: 480-486.
- [ 16 ] Barrett C, Deters M, Moura L D, et al. 6 Years of SMT-COMP [ J ]. Journal of Automated Reasoning, 2013, 50( 3 ): 243-277.
- [ 17 ] Clarke E, Biere A, Raimi R, et al. Bounded Model Checking Using Satisfiability Solving [ J ]. Formal Methods in System Design, 2001, 19( 1 ): 7-34.
- [ 18 ] Deters M, Reynolds A, King T, et al. A Tour of CVC4: How It Works, and How to Use It[ C ] // Proceedings of the 14th Conference on Formal Methods in Computer-Aided Design. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 7.
- [ 19 ] de Moura L, Nikolaj B. Z3: An Efficient SMT Solver [ C ] // Proceedings of TACAS' 08. Berlin, Germany: Springer, 2008: 337-340.
- [ 20 ] Zaharia M, Chowdhury M, Franklin M J, et al. Spark: Cluster Computing with Working Sets[ C ] // Proceedings of HotCloud' 10. Berkeley, USA: USENIX Association, 2010: 10.
- [ 21 ] Grech N, Georgiou K, Pallister J, et al. Static Energy Consumption Analysis of LLVM IR Programs [ EB/OL ]. [ 2016-03-15 ]. <https://arxiv.org/abs/1405.4565v2>.
- [ 22 ] Vujosevic-Janovic M, Kuncak V. Development and Evaluation of LAV: An SMT-based Error Finding Platform [ C ] // Proceedings of the International Conference on Verified Software: Tools, Theories, Experiments. Berlin, Germany: Springer, 2012: 98-113.
- [ 23 ] Cadar C, Dunbar D, Engler D. KLEE: Unassisted and Automatic Generation of High-coverage Tests for Complex Systems Programs [ C ] // Proceedings of the 8th USENIX Conference on Operating Systems Design and Implementation. Berkeley, USA: USENIX Association, 2008: 209-224.
- [ 24 ] SATABS. SNU Real-time Benchmarks [ EB/OL ]. [ 2016-03-15 ]. <http://www.cprover.org/goto-cc/examples/snu.html>.

编辑 陆燕菲