

航天器有效载荷高可靠集成仿真测试系统设计

马萍, 唐卫华, 李峰

(中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094)

摘要: 随着航天器有效载荷的种类、功能及结构日趋复杂, 对集成仿真测试系统的功能和性能要求也越来越高; 有效载荷集成仿真测试系统是进行有效载荷系统级电性能联试、整器综合测试和发射场测试的重要工具; 为满足不同领域、不同类型有效载荷的仿真测试需求, 提高系统集成测试与验证的工作效率和适应性, 在分布式高性能计算机网络体系结构基础上, 提出一种航天器有效载荷集成仿真测试系统的设计架构; 该系统遵从“强内聚、松耦合”的先进设计思想, 各组成模块可以根据测试需要进行灵活重组, 用于有效载荷研发的各个阶段, 具有可靠性高、灵活性强、快速重构和扩展升级的优势; 对有效载荷集成仿真测试系统中各测试设备的功能、组成及具体方案进行了详细介绍。

关键词: 航天器; 集成仿真测试系统; 有效载荷; 高可靠; 可扩展

Design of Spacecraft Payload Integrated Simulating and Testing System with High Reliability and Scalability

Ma Ping, Tang Weihua, Li Feng

(Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: With the types, functions and structures of spacecraft payloads increasingly complex, the requirements for the performance of integrated simulating and testing system are getting higher and higher. The payload integrated simulating and testing system is an important tool to carry out the payload system-level electrical performance test, the overall integrated test and the launch field test. To meet the simulating and testing requirements from different areas and different types of payload and to improve efficiency and adaptability of the system integrated test and verification, a design architecture of spacecraft payloads integrated simulating and testing system with higher reliability, adaptability and scalability is proposed based on distributed high-performance computer network architecture. The system complies with the design concept of strong cohesion and loose coupling, whose modules can be flexibly reorganized according to the testing requirements, and can be used in all stages of payload research and development with the advantages of high reliability, flexibility, fast reconstruction and extended upgrade. The functions, compositions and specific programs of all testing equipments in the payload integrated simulating and testing system are introduced in detail.

Keywords: spacecraft; integrated simulating and testing system; payloads; high reliability; scalability

0 引言

综合电测是保证航天器有效载荷可靠性, 检验有效载荷电性能与功能完备性、接口匹配性以及载荷间工作协调性的必要手段^[1-3]。近年来, 随着我国航天技术的飞速发展, 深空探测卫星、载人飞船、空间实验室、空间站等采用新技术、具有新功能、赋予新使命的航天器不断出现, 开展空间科学实验研究的有效载荷规模空前庞大, 探索性强、复杂程度高的科学实验项目也日益倍增。面对各领域有效载荷接口复杂、数据类型多、码速率高、数据量大、运营管理模式复杂等特点, 和集成测试任务持续性、滚动性、迭代性、多任务并行实施等需求, 以往专用性强、自动化智能化程度不高、通用性开放性较弱、扩展空间有限的测试系统将难以胜任。需要采用新思路、新方法, 建设功能全面、通用性和可靠性强、自动化和智能化^[4-5]

程度高的集成仿真测试系统, 以满足不同领域、不同类型有效载荷的仿真测试需求, 提高系统集成测试与验证的工作效率和适应性。

综合分析航天器有效载荷综合测试的特性需求和集成仿真测试系统的发展趋势, 在分布式高性能计算机网络体系结构基础上提出一种航天器有效载荷集成仿真测试系统的设计架构, 融合“强内聚、松耦合”的设计理念和模块化^[6-7]的设计思想, 具有较强的可靠性、适应性、开发性和可扩展能力, 支持按任务需求进行快速重构和扩展升级, 以适应有效载荷不同研制阶段、不同试验场地、不同规模的测试任务需求。

1 系统设计需求

有效载荷集成仿真测试系统是进行有效载荷电性能联试、整器综合测试和发射场测试的重要工具, 主要用于测试有效载荷电性能与功能的完备性、检验各载荷间接口的匹配性、验证系统软硬件工作的协调性和可靠性^[1]。测试系统应具备:

1) 接口仿真功能: 仿真航天器平台对有效载荷的供电、测控和信息接口; 仿真航天器平台总控设备对载荷专用测试设备的数据和信息转发接口; 仿真发射场测发指挥监控系统(以下简称 C3I 系统)对测试系统的信息传输接口。

2) 集成测试功能: 实时监控对载荷的供电输出, 并支持

收稿日期: 2017-08-28; 修回日期: 2017-09-26。

基金项目: 国家载人航天专项工程。

作者简介: 马萍(1983-), 女, 山东济宁人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事载人航天有效载荷综合测试技术方向的研究。

唐卫华(1962-), 男, 北京人, 高级工程师, 主要从事载人航天有效载荷综合测试试验方向的研究。

过压和限流保护；生成、编辑和发送指令和数据注入，支持手动或自动执行测试指令序列；实时采集、显示载荷遥测参数，自动接收、处理通过中高速通道下行的载荷科学数据。

3) 专用测试功能：配置载荷数据格式、传输协议和解包规则，自动解析载荷科学数据和工程数据，实现载荷图像或视频快视、遥测参数自动判读、用户可订制的可视化数据监显，实现与航天器平台地面综测系统和发射场 C3I 系统的信息交互。

4) 测试管理功能：支持用户权限管理、系统软硬件资源管理，具有测试数据、测试日志等信息记录、归档、查询、输出等管理功能。

5) 故障分析功能：支持数据总线在线监视、测试数据回放、测试过程回溯和测试数据分类统计，通过对测试状态的监视和对测试数据的分析，及时发现被测产品的故障隐患，快速定位故障根源。

6) 自动化：根据被测产品的模型数据、设计信息及测试需求，自动形成被测产品的测试用例；结合产品的接口及功能设计信息（如 IDS 表）自动生成测试指令序列和数据注入码值；自动执行测试序列完成注入指令发送和结果确认。

7) 智能化：将载荷专家的数据判读规则和模型形成数据判读知识库，在测试过程中根据数据判读知识库和注入指令对载荷的相关参数进行自动监视判读，减少人为操作和判读处理，提高测试和判读的准确性和及时性。

8) 可靠性、安全性：系统具有自身故障检测、故障隔离和紧急处置的设计，在各阶段测试中测试系统不能影响被测设备的安全。

9) 扩展性：系统具有良好的模块化、标准化设计，具有标准扩展接口，能够根据不同的测试环境和测试要求对系统进行快速重组，根据后续任务的变化可以灵活快速完成系统的二次开发、系统扩展和升级。

2 系统设计方案

2.1 系统框架设计

本设计采用分布式网络结构和客户机/服务器的结构框架。系统内所有设备和软件保持相对独立性，通过局域网和数据库相连接，实现数据共享和快速处理。服务器作为系统核心，负责整个系统网络的维护和仿真测试信息的调度管理。客户端根据功能分为两种角色：1) 作为前端设备，直接与被测设备相连接，负责与被测设备件的信息交互；2) 作为仿真/测试终端，负责测试过程操作、测试数据和信息的处理、显示和判读等。系统基础框架如图 1 所示。

整个集成仿真测试系统仅通过测试前端机与被测载荷或其他外界系统相联通，完成接口数据转换。该系统构架一方面有利于提高系统可靠性，保护系统安全，避免受外界其它系统干扰或者入侵破坏；另一方面也提高了系统可维护性和可扩展性，便于增添改变系统中软硬件配置，可实现系统无缝升级而不改变基础体系框架结构。扩展后的系统构架如图 2 所示。

2.2 系统组成及工作原理

在分布式网络结构和客户机/服务器结构框架的基础上，结合具体任务需求，设计并实现的测试系统。如图 3 所示。

整个测试系统由集成测试设备（简称 ICOE）和专用测试

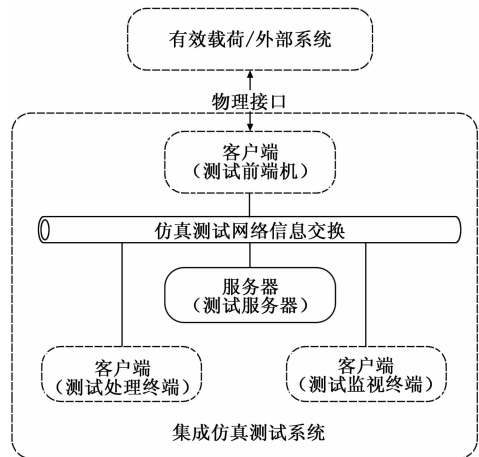


图 1 集成仿真测试系统基础构架

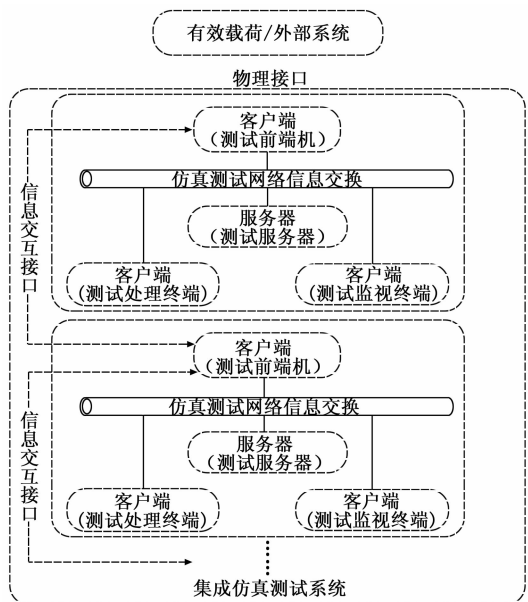


图 2 可扩展的测试系统构架

设备（简称 SCOE）两部分组成，每个部分又分为前端接口交互层、中间资源管理层、后端应用处理层 3 个层次，层次与层次之间紧密互联，两个部分之间又相对独立，充分体现“强内聚、松耦合”的设计理念^[4]。两个部分共同支持了载荷级系统联试，其中 SCOE 可单独用于支持整器综合测试和发射场测发等任务。SCOE 接收并处理 ICOE 或航天器综合测试总控设备（简称 OCOE）转发的有效载荷遥测参数（包括模拟量遥测、数字量遥测、航天器重要参数等）；接收并处理通过中继通道下行的载荷应用数据（包括工程数据和图像/视频数据）。

2.2.1 集成测试设备

集成测试设备主要负责完成测试系统中的硬件接口配置管理、指令控制管理、自动化测试实施和测试过程监控管理。主要功能包括：

1) 平台接口仿真功能：仿真平台对载荷系统的供电接口、程控接口、模拟量遥测接口、数字量遥测和注入接口（1553B 总线）、应用数据接口（以太网总线）、航天器综合测试总控设备对载荷系统 SCOE 接口（以太网总线），实现各接口的数据

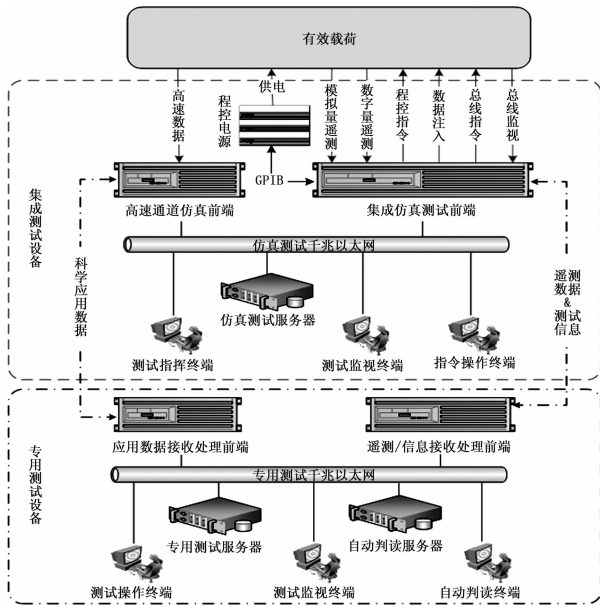


图 3 某型号任务有效载荷测试系统组成

通信。

2) 集成测试功能: 支持对供电电源实时监控; 提供对指令、数据注入和指令序列的生成编辑平台, 实现自动化测试; 支持对采集到的载荷模拟量遥测显示、异常报警与回放; 具有对平台 1553B、以太网等总线接口的通信、监视和仿真功能; 将采集的模拟量、数字量和应用数据按照地面测试协议组包后, 与 SCOE 进行信息交互。

3) 测试管理功能: 用户权限管理、测试/操作日志管理、测试统计和系统自检等功能。

如图 3 所示, 集成测试设备中前端接口交互层包括集成测试仿真前端、高速通道仿真前端; 中间资源管理层包括仿真测试服务器; 后端应用处理层包括指令操作终端、测试监视终端、测试指挥终端。

2.2.2 专用测试设备

专用测试设备负责系统数据处理、数据分析、数据管理和数据自动判读等关键性工作, 主要功能包括:

1) 接收集成测试设备转发的有效载荷模拟量和数字量遥测数据、指令信息、载荷应用数据及约定信息, 实现与航天器平台综测系统、C3I 系统的信息交互;

2) 以表格、曲线等多种可视化形式显示接收到的载荷数据, 支持多种格式的载荷图像和视频快视;

3) 根据事先建立的判读知识库, 对接收到的遥测数据、应用数据进行实时判读, 针对异常情况根据预先设置的故障处置流程进行自动干预;

4) 支持实时模式下的载荷状态监视和回放模式下的详细数据分析和判读;

5) 支持遥测数据、工程数据、图像数据、视频数据和日志信息的分类存储, 以及数据和日志信息的在线检索、分析或导出。

如图 3 所示, 专用测试设备中前端接口交互层包括应用数据接收处理前端、遥测/信息接收处理前端; 中间资源管理层包括专用测试服务器、自动判读服务器; 后端应用处理层包括

测试监视终端、自动判读终端。

3 系统实现思路

3.1 硬件设计

集成测试仿真前端负责仿真航天器平台对有效载荷的供电、测控和信息接口等, 通常建立在 VXI、PXI、LXI 等虚拟仪器测试平台上, 通过 GPIB、A/D 采集、数字 I/O、1553B 总线、1394 总线、以太网通信等接口模块, 实现相应的数据接口通信功能。

有效载荷供电由程控电源提供, 集成仿真测试前端通过 GPIB 或 LAN 接口对程控电源的输出电压、电流和功率等进行监视, 控制、调节电源输出的电压和电流, 提供过压和限流保护功能。

程控指令发送由集成测试仿真前端中的 Digital I/O 功能模块完成, 仿真航天器平台向有效载荷设备发送程控指令; 模拟量遥测采集由集成测试仿真前端中的 Analog I/O 功能模块完成, 仿真航天器平台采集有效载荷设备的模拟量遥测。

信息接口通信一般包括 1553B 总线通信、RS422 接口通信、LVDS 接口通信、1394 总线通信等, 通过集成测试仿真前端中的各个通信模块来完成, 仿真航天器平台采集有效载荷设备的数字量遥测、工程数据、科学数据, 向有效载荷发送注入指令, 并对总线通信状态进行在线监视。

3.2 软件设计

有效载荷集成测试系统的软件总体结构如图 4 所示, 包括实时和非实时两部分。实时部分主要负责实时数据接收、发送、存储、解析、处理和判读, 保证对实时数据的无间断流畅监控。非实时部分主要负责对历史数据、日志、知识库、模型库以及配置信息库等数据和知识进行存储、增添、删除、更改、查询、统计等常规管理工作。

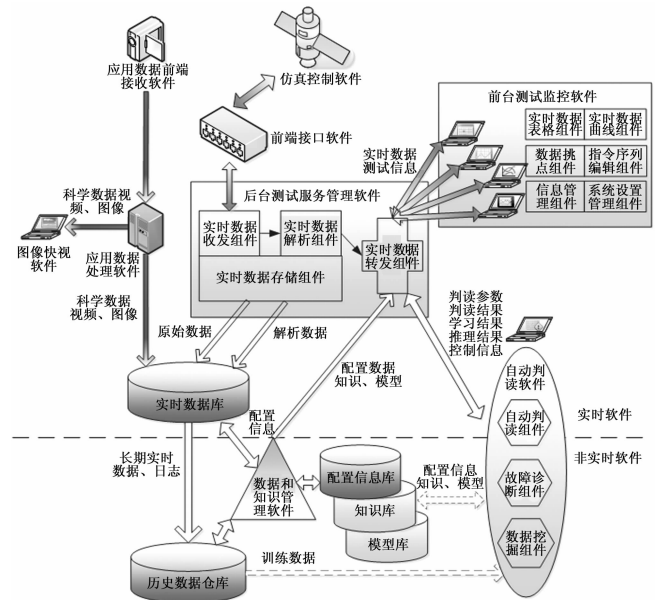


图 4 系统软件总体结构

实时软件包括: 仿真控制软件、前端接口软件、应用数据前端接收软件、前台测试监控软件、前台数据管理软件、图像快视软件、后台测试服务管理软件、应用数据处理软件和自动判读软件, 系统采用多线程、分布式处理、高性能计算体系等

多种手段来充分保障对数据处理的实时性要求。

非实时软件包括：数据和知识管理软件以及历史数据仓库、配置信息库、知识库等。系统使用 Oracle 11g 数据库管理系统完成对实时数据、历史数据、日志、配置信息和知识的存储管理。

3.2.1 前端接口交互层

集成仿真测试前端运行仿真控制软件和前端接口软件。仿真控制软件采集被测载荷的模拟量、数字量遥测参数和其他总线接口数据；前端接口软件根据任务约定的数管遥测和信息格式封装成遥测数据源包和指令包后，转发至 SCOE 遥测/信息接收前端。

高速通道仿真前端运行应用数据前端接收软件，仿真航天器平台对有效载荷的高速数据接口，包括光纤网络通信、万兆网通信等，负责对有效载荷高速应用数据的上/下行传输和处理，并根据任务需求将接收到的应用数据按照约定的信息格式和通信协议打包后发送至后端 SCOE 系统。

遥测/信息接收处理前端运行前端接口软件，接收、处理、存储集成测试仿真前端转发的有效载荷遥测参数和测试信息，并将解析处理后的遥测数据和测试信息发送到专用测试服务器（数据库）归档。

应用数据处理前端运行应用数据处理软件，接收高速通道仿真前端转发的有效载荷高速应用数据，并根据有效载荷数据处理与传输协议对载荷应用数据进行解包处理，将解包后数据发送到专用测试服务器（数据库）归档。

3.2.2 中间资源管理层

测试服务器上部署数据库管理系统、测试服务管理软件、数据和知识管理软件，是整个测试系统运行的核心。测试服务管理软件实现对实时数据（含指令及执行结果）的收发、解析、处理、存储和越界判读；数据和知识管理软件实现对测试数据和测试过程的管理，包括对实时测试数据、实时测试信息、参数配置信息、监显界面配置信息、数据字典、用户权限和测试日志的数据库管理工作，对数据、指令和判读结果的归档、查阅、输出和统计分析。

测试服务器支持各个测试监视终端的数据订阅请求，将订阅内容保存为用户的配置信息，并根据用户的订阅内容，通过网络自动向订阅终端发布数据和信息。对于数据量不大、实时性较强的载荷遥测参数和工程数据，测试服务器通过广播机制发送至各监视终端；对于数据量较大、非实时性的科学数据、图像和视频数据，系统通过组播或者点播方式发送给有数据订阅或者有播放请求的终端。

自动判读系统由自动判读服务器和自动判读客户端组成。判读服务器端负责接收指令信息和测试数据，根据系统内置判读规则、用户自定义规则和判读模型执行判读处理，推理得出判读结论，通过网络发送给各判读客户端并将关键信息存储进判读数据库；判读客户端负责判读规则的书写、校验、存入数据库以及判读结论的显示、查询、导出及判读报告生成。

3.2.3 后端应用处理层

测试指挥终端运行测试监控软件，负责指令发起和校核、测试状态监控、测试进程维护和关键参数判读；实现对系统设备的在线管理和状态监视，包括测试设备的性能状态、软件的运行状态、设备故障监视及隔离等监控功能。指令操作终端负责指令码和数据注入码值的编辑，指令经测试指挥终端校核确

认后，由集成仿真测试前端发出。

测试监视终端运行测试监控软件，为用户提供直接的数据显示。以表格、曲线、图像、视频等多种可视化形式向数据监视人员显示各类测试数据和报警信息，并接受操作人员的浏览、查询、设置、打印、回放等操作。支持监显页面和显示参数的私人订制，用户可以通过数据订阅的方式在监视页面上显示订制的挑点参数，也可以根据个人喜好配置个性化的监视页面。图像快视终端运行图像快视软件，为用户提供可视化界面浏览、查询、回放科学数据、图像和视频。

自动判读终端运行自动判读软件，用于用户对自动判读知识的录入和知识库的维护，用户根据判读服务器中内置的丰富判读规则，通过调用关系图的方式创建判读模型；通过网络实时接收判读服务器得出的所有判读结论并呈现给用户，提供判读结论的查询、注释等功能。用户还可以对判读过程进行临时的人工干预，便于在测试过程中及时调整判读策略以达到最理想的自动判读结果。

4 实际应用与分析

系统所有的软硬件设计经过了航天型号任务的实际应用，在多个型号任务的有效载荷集成测试中得到了充分的试验验证，也取得了较好的应用效果。系统在 C/S 的网络框架下遵循了模块化的设计思想，全功能的硬件配套总计 5 大类，包括仿真前端、处理前端、测试/判读服务器、监视终端、控制终端；全功能的软件组件总计 97 件，包括集成仿真测试、前端数据接收解析、前台数据显示、后台数据处理、综合测试管理、数据库管理和数据判读等组件类，其中，系统运行的基础组件总计 52 项，系统选择性扩展组件总计 45 项。软件系统开发基于 C++ 完成，可运行在 Windows 系列操作系统上（包括 Windows 7/8 专业版和 Windows Server 2008 R2 X64）。系统软件界面如图 5 所示。

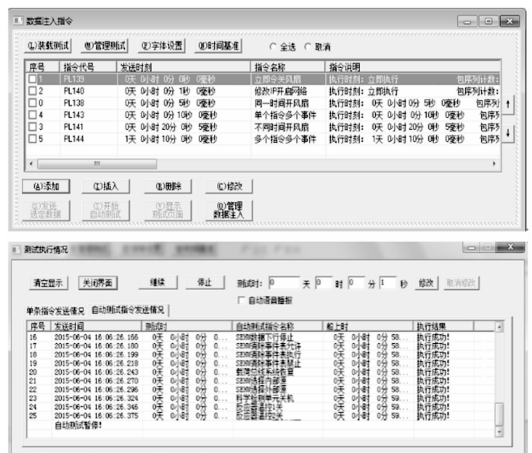


图 5 数据监视及控制软件界面示意图

经过多个型号任务的实际应用，系统模块化的设计组件重复利用率高达 90%。根据任务需求提取相应的硬件和软件模块，经过继承和适应性修改后，能够实现测试系统的快速重构，用于支持单载荷调试、载荷级系统联试、整舱综合测试和发射场测试等不同规模、不同场景的测试任务，大大缩短了系统开发周期，缩减了系统开发成本，提高了系统开发效率。通

(下转第 8 页)