

一种卫星有效载荷自动化测试系统的设计

何铭俊, 赵川, 姬云龙

(航天东方红卫星有限公司, 北京 100194)

摘要: 提出了一种卫星有效载荷自动化测试系统的设计方法, 详细论述了其实现原理和系统中的各个功能模块, 重点介绍了载荷自动化测试系统的 OCOE 内部结构设计、数传 SCOE 内部结构设计、载荷 SCOE 内部结构设计和系统工作流程等部件的设计思路 and 实现方法; 文章所介绍的卫星有效载荷自动化测试系统, 有着高内聚、低耦合的特点, 同时支持多个载荷处理终端进行载荷数据并行分析; 试验结果表明, 该系统能至少提高一倍以上的工作效率, 避免了人力耗费过大和人工参与对测试结果的不良影响, 使有限的测试人员有更多精力集中在载荷测试数据本身, 提高了测试结果的准确性和可靠性。

关键词: 卫星有效载荷; 自动化测试; 专用测试设备

Design of an Automatic Testing System for Satellite Payload

He Mingjun, Zhao Chuan, Ji Yunlong

(DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100194, China)

Abstract: This paper presents a design method of an automatic test system for satellite payload, and discusses in detail the realization of each functional module in the original tracking system, with emphasis on the OCOE internal structure design, data transmission SCOE internal structure design, payload SCOE internal structure design and system workflow of the payload automatic testing system. The automatic testing system of satellite payload introduced in this paper has the characteristics of high cohesion and low coupling, and supports the co-line analysis of payload data with multiple unload processing. The test results show that the system can improve the working efficiency by more than one time, avoid the adverse effects of too much manpower consumption and manual participation on the test results, and make the limited testers focus more on the load test data itself, so as to improve the accuracy and reliability of the test results.

Keywords: satellite payload; automatic testing system; SCOE (specific checkout equipment)

0 引言

随着对航天产品需求的增加, 我国航天事业飞速发展, 小卫星已经成为我国军用航天装备体系和民用航天服务体系的重要力量, 目前在小卫星综合测试方面, 已经形成了独具小卫星特色的自动化测试系统, 有力地支撑了目前各类卫星的研制测试任务。然而, 随着未来小卫星领域新型号的规划、新技术的应用、型号数量的急剧增加、任务复杂度的不断增长等, 给未来小卫星测试带来了任务数量和技术难度的双重挑战, 对综合电性能测试环节提出了更高的要求^[1-3]。如何提高有效载荷的测试质量及效率, 是目前国内外测试专家一致探讨的话题。一方面, 航天项目对星上载荷的质量和可靠性有着极高的要求, 测试过程中需要对星上载荷进行严格的测试; 另一方面, 航天项目面临着载荷仪器功能复杂、项目周期短、预算低等挑战, 传统的不同载荷仪器 EGSE (electrical ground support equipment) 由仪器的研制单位独立提供, 不能融入目前的测试自动化。自 20 世纪 80 年代起, ESA 等国内外航天机构相继开展了 EGSE 平台的研究, 国内也有多家厂所及科研机构着手研制

有效载荷的测试自动化, 但是尚不具备将独立的载荷仪器 EGSE 融入测试自动化, 提高有效载荷的测试质量及效率的完整解决方案^[4-6]。

目前小卫星在现有综合测试系统的基础上, 借鉴国内外其它先进卫星自动化测试经验, 综合考虑小卫星产业化发展要求, 特别是未来空间军事体系下的小卫星编队飞行、卫星星座发展情况, 以及新型星上综合电子、快速测试等未来测试技术发展规划, 构建了通用集成化、自动化航天器综合测试系统, 重点突破了新型综合测试系统架构、通用测试设备接口、规范测试系统接口、自动化测试智能监视判读、测试数据实时管理等关键技术, 解决了快速测试、设备远程管理等问题, 实现小卫星测试的集成化、规范化、自动化, 解放了测试人力资源, 提高了测试效率^[7-10]。本文正是依靠某遥感卫星有效载荷测试需求, 在研制专用的有效载荷 EGSE 基础上进行平台自动化测试扩展, 并以此为平台采用全面有效的测试和评估方法, 完成对遥感卫星有效载荷的准确、全面地测试。

1 系统方案

1.1 总体结构

小卫星本地自动化测试平台系统的主体架构如图 1 所示, 系统主要包括总控设备 (OCOE, overall check out equipment) 和分系统专用测试设备 (SCOE, special check

收稿日期: 2019-12-24; 修回日期: 2020-02-21。

作者简介: 何铭俊(1979-), 男, 河南许昌人, 硕士, 工程师, 主要从事小卫星综合测试系统研发和测试技术方向的研究。

out equipment) 组成, 其中 SCOE 又主要包括测控测试设备、供配电测试设备、星务测试设备、姿轨控测试设备、数传测试设备、载荷测试设备等。整个 OCOE 与 SCOE 通过局域网 (LAN) 互相连接成为一个分布式的网络系统。

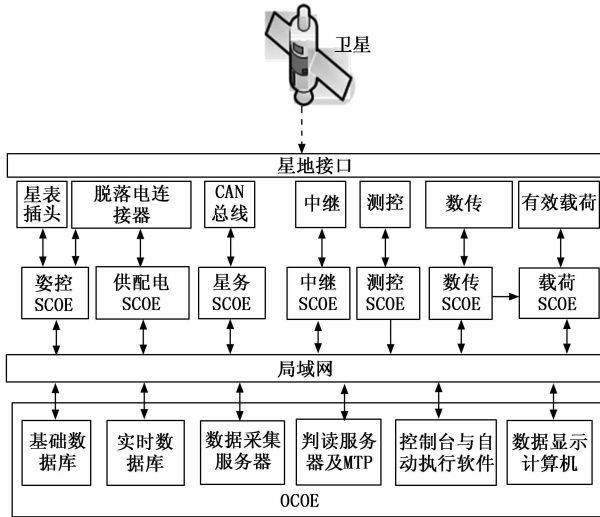


图 1 小卫星本地自动化测试平台网络结构示意图

OCOE 构成了小卫星本地自动化测试平台的核心, 基础数据库是小卫星自动化测试平台的配置库, 存放所有小卫星型号的配置信息。实时数据库是小卫星自动化测试平台中存放小卫星测试数据的实时库。数据采集服务器负责采集星上及各个 SCOE 发出的实时数据信息。判读服务器及 MTP 负责小卫星下行遥测及上行遥控信息的判读和核验。控制台与自动执行软件负责小卫星上行遥控指令的自动发送及判读。数据显示计算机配置小卫星自动化测试软件, 可人工进行核实及查询。

SCOE 作为小卫星本地自动化测试平台的扩展, 各个专用测试设备通过星地接口与卫星进行直接或间接连接, 完成专业性更强的小卫星测试。

1.2 有效载荷自动化测试设计

有效载荷自动化测试平台采用模块化设计方式, 平台建立在小卫星自动化测试平台之上, 是对小卫星自动化测试平台的拓展。有效载荷自动化测试平台主要由 OCOE、数传 SCOE 和载荷 SCOE 共 3 个部分组成, 其内部结构如图 2 所示。

1) OCOE 设计: OCOE 中, 涉及到有效载荷自动化测试平台的接口主要有两部分:

(1) 实时库参数订阅模块: 有效载荷自动化测试平台不仅主要是针对有效载荷的测试, 同时, 也是星地联合测试。要星地联合测试, 就需要星地时统的统一, 此部分正是解决星地时统的一致性。实时库参数订阅模块可以为载荷 SCOE 获取星上时间的广播。

实时库参数订阅模块需要定义实时数据库连接信息和订阅参数信息。实时库参数信息主要包括实时数据库连接 IP、实时数据库连接用户名和密码、实时数据库 ID 和实时

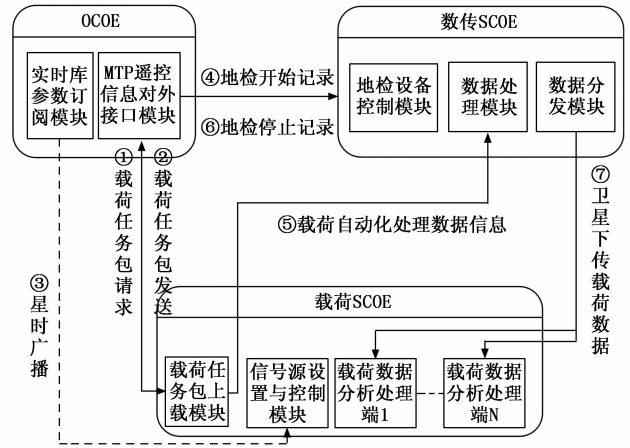


图 2 有效载荷自动化测试平台系统结构示意图

数据库所处阶段信息。订阅参数信息包括参数 ID、参数类型、参数上限、参数下限、参数单位及参数显示格式等信息。

(2) MTP 遥控信息对外接口模块: MTP (master test processor) 是 OCOE 的系统中枢, 是数据管理和控制中心。MTP 通过对总控设备的控制, 与测试网中的其它测试设备 (软件) 相互配合, 共同完成卫星测试任务。目前卫星大部分固定指令都集中在小卫星自动化测试平台的基础数据库中, 另外, 由于测试需要, 常常需要上注临时指令, 此部分指令数量不固定, 往往是一次性操作指令, 需要在卫星测试过程中临时上注。如果按照常规指令制作和上注流程, 往往步骤繁琐, 并且在时间紧, 数据量大的情况下容易出错, 此接口正是为了应对此部分需求而设定。在 MTP 需要发送此部分指令时, MTP 向载荷 SCOE 发送载荷任务包请求, 载荷 SCOE 接收到请求, 经过内部处理后, 向 MTP 遥控信息对外接口模块发送载荷任务包, 之后, MTP 接收到载荷任务包, 经过内部处理, 处理成星上可用指令, 批量传送给小卫星自动化测试平台, 直至通过星地接口, 发送到卫星。另外, 通过 MTP 遥控信息对外接口模块, OCOE 可以向数传 SCOE 发送操作指令, 比如开始地检记录指令和停止地检记录指令等, 从而达到通过 OCOE 控制数传 SCOE, 进而可以控制数传专用地检设备, 达到有效载荷自动化测试平台的自动化操作。

MTP 遥控信息对外接口模块采用 TCP/IP 协议, 数据传输帧格式如表 1 所示。

表 1 工况试验设置及结果

帧头	标志	数据	校验	帧尾
1Byte	1Byte	249Byte	1Byte	1Byte

其中标志 01 表示请求, 02 表示应答, 03 表示 error。校验采用累加和校验, 各字节累加和与 100 的模。

2) 数传 SCOE 设计: 在有效载荷自动化测试平台中, 数传 SCOE 主要负责数传地检设备的控制, 数据简单处理和分发功能, 各部分功能如下:

(1) 地检设备控制模块: 此模块为地检设备与外界交互接口模块, 通过此模块, 可以实现第三方模块控制地检设备的操作。在本系统中, OCOE 主要通过地检设备模块对地检设备进行开始记录和记录停止操作的控制。开始记录前, 地检设备要确保处于待机状态。开始记录后, 地检设备处于正常工作状态, 此时, 地检设备接收通过数传通道下传的数据。记录停止操作后, 地检设备停止当前工作状态, 重新处于待机状态。

(2) 数据处理模块: 此模块为地检设备与第三方交互模块, 主要完成有关地检设备需要处理的数据信息。在本系统中, 载荷 SCOE 与数传 SCOE 需要进行数据信息交换, 就通过本模块实现。

(3) 数据分发模块: 数传地检设备收到星上数传到达地面的数据后, 经过数传地检设备的数据分析处理, 会将数据信息存在本地。然后, 在载荷自动化测试平台中, 数传下传的数据需要发送给载荷 SCOE 进行进一步的数据分析处理, 此部分数据比较庞大, 而且数据信息重要, 需要快速安全的传送给载荷 SCOE。数据分发模块是数传 SCOE 与载荷 SCOE 进行数据交换的中枢, 主要负责把地检设备接收并处理的数据快速传给载荷 SCOE。

3) 载荷 SCOE 设计: 载荷 SCOE 是载荷自动化测试系统中最后一个处理环节, 也是最重要的环节。根据某型号的特点, 设计了载荷任务包上载模块、信号源设置与控制模块、载荷数据分析处理端等模块。同时为了通用型, 此模块采用接口化设计, 以后可以针对不同型号进行模块化设计。此部分具体功能模块如下:

(1) 载荷任务包上载模块: 在载荷分系统测试过程中, 需要经常根据当前载荷的工况进行载荷任务的上注, 从而完成载荷任务。在传统的载荷测试中, 此部分一般在测试前, 由载荷主管设计师将载荷测试过程中需要用到的载荷任务包提前提交给测试总控人员, 总控人员再提前将此部分录入到自动化测试系统。如果一旦载荷任务包更改, 则需要重新提交。如果载荷任务包数量比较小, 此周期较短, 如果载荷任务包数量较大, 则人工复核成本较大。而通过载荷任务包上载模块, 完全系统自动化处理, 省时高效。载荷任务包上载模块是可选模块, 根据型号特点和任务特点, 可以选择使用。

(2) 信号源设置与控制模块: 在载荷分系统测试过程中, 一般需要进行信号源、载荷模拟源等设置。在传统的载荷测试过程中, 在每次载荷任务开始之前, 需要载荷测试人员将信号源或模拟源预先设置好, 然后才能开始星上载荷测试。对于负责任务的载荷测试, 可能每次载荷任务过程中, 需要多次设施载荷信号源或模拟源, 尤其是时间紧的情况下, 更容易出错, 导致载荷任务测试失败。通过信号源设置与控制模块, 系统将预先加载设计好的信号源设置与控制序列, 时间到达时, 自动进行信号源的切换设置, 省时高效。

体的载荷数据分析处理软件, 型号任务不同, 就有不同的载荷分析处理端。此部分采用接口设计, 具体的模块执行由具体模块实现来解决。

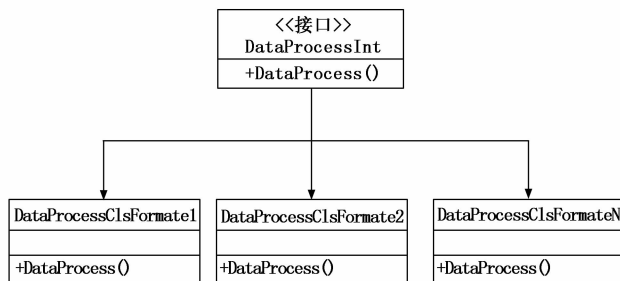


图 3 接口方法

如图 3 所示, DataProcessInt 接口定义 DataProcess, 通过实现此接口方法, 实现各种载荷数据的具体分析处理, 即使以后有新的载荷数据格式, 也可以方便进行拓展。

2 系统运行流程

载荷自动化测试系统的整体运行流程如图 4 所示。

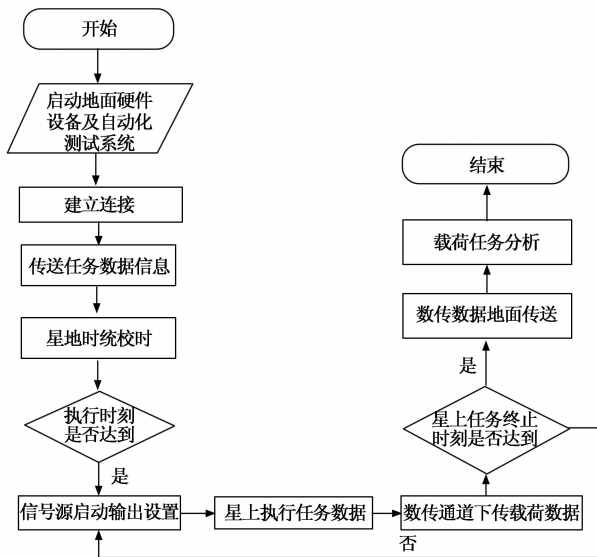


图 4 系统运行流程图

1) 测试人员启动地面硬件设备及自动化测试系统, 这些设备包括 OCOE、数传 SCOE 设备和载荷 SCOE 设备, 同时把自动化测试软件启动到位, 保持网络通畅状态。

2) 建立连接。有效载荷自动化测试过程中, 需要对 OCOE、载荷 SCOE、数传 SCOE 平台进行各自的自动化处理, 在此基础上, 需要对三者进行信息和数据的交换。根据载荷自动化测试系统的特点, 系统采用 TCP/IP 协议作为传输控制协议。此时, OCOE 作为服务端, 数传 SCOE 和载荷 SCOE 作为客户端进行连接。连接一旦成功, 表示地面设备及软件处于可工作状态, 系统可以开始进行载荷自动化测试。如果卫星处于加电状态, 此时实时库将提供星上时间广播。

3) 传送任务数据信息。对于特定任务卫星, 执行任务之前, 需要地面上注任务信息, 这些任务信息作为载荷数据块进行上传, 其特点是任务块是一次性, 同时对于时间要求比较严格。需要上注载荷任务块时, OCOE 向载荷 SCOE 发出载荷任务包请求, 载荷 SCOE 向 OCOE 进行回应, 同时发送载荷任务包数据。OCOE 对载荷任务包进行封装, 作为载荷任务数据块, 通过测控系统, 发送到卫星, 完成星上任务数据的上注。

4) 星地时统校时。任务数据信息上注完毕, 卫星可以等待任务执行时刻的到来, 此时, 星上时间通过地面测控系统, 下发到 OCOE 设备, OCOE 通过 TCP/IP 广播, 将星上时间广播到数传 SCOE 和载荷 SCOE, 达到星地时统一致。

5) 等待执行时刻到达。对于每次星上任务, 任务数据包中均包含任务的起始时间和结束时间。

6) 信号源启动输出。任务起始时间一旦达到, 载荷 SCOE 将首先启动输出设置, 将信号源状态自动设置到位, 及时输出信号。

7) 星上执行任务数据。任务起始时间一旦达到, 星上将自动开启载荷任务, 此时载荷设备开始工作, 同时将载荷数据封装发送给星上数传设备。此时地面 OCOE 将自动启动数传地检设备开始记录, 准备接收星上数据。

8) 数传通道下载荷数据。星上数传设备接收载荷分系统传送的数据, 根据数传工作状态, 采用实时传输或者记录模式(记录载荷数据通过固存回放, 最终将传输给地面数传 SCOE), 将载荷数据通过数传通道, 下传到数传 SCOE。数传 SCOE 进行相应的解码, 最终形成数传通道文件格式数据。

9) 星上任务终止时刻是否达到。对于一般卫星来说, 一次可能包含多个任务, 多个任务有不同的任务执行时间, 一旦一个任务结束, 地面信号源将重新自动设置, 下一个任务开始执行, 重复步骤 6) ~ 8) 的动作。

10) 数传数据地面传送。当所有星上任务执行完毕后, 数传 SCOE 将启动地面分发系统, 将不同任务特点的数传数据, 根据预先制定的位置, 发送到不同的载荷 FTP 目录, 最终完成数传数据的分发操作。此种操作支持多个载荷 SCOE 进行载荷任务分析。同时, 支持针对不同载荷数据, 将数传数据文件进行重命名, 以便形成载荷 SCOE 特定处理要求的数传数据。

11) 载荷任务分析。载荷 SCOE 将对分发的数传数据进行自动分析操作, 操作完成后, 形成报表文件, 供设计师进行下一步的数据分析。

3 实验结果与分析

载荷自动化测试系统开发完成后, 在小卫星综合电测间对其开展了功能和性能试验。试验分别模拟了某型号卫星测试中的两个典型联合工况模式, 其中两个工况模式星上任务执行时间相同, 两个工况模式之间互不关联。具体工

况设置如表 2 所示。

表 2 工况试验设置及结果

工况设置	工况 1	工况 2
上注卫星任务条数	50	100
地面信号源设置总数目	10	20
工况期间地面信号源设置次数	3	3
卫星任务执行时长/min	15	15
卫星工况设置用时/min	5	5
上注星上任务总用时/min	10~20	20~30
传统测试时长/min	65~95	90~120
自动化载荷测试时长/min	30	34

试验结果表明, 在卫星工况期间地面信号源设置次数、卫星任务执行时长、卫星工况设置用时都相同的两个工况模式下测试时, 通过有效载荷自动化测试系统进行自动化测试, 效率比传统测试效率提高一倍以上。随着工况人工参与度的不断增加, 传统载荷测试效率不断下降, 而通过载荷自动化测试, 效率则不断得到提高。

然而在实际测试过程中, 一方面随着人工参与度的提高, 人工差错的概率大幅提高, 一旦出现差错, 就需要重新进行工况试验, 另一方面, 人员之间信息交流用时更加不确定, 同时容易出现信息交流错误, 这时有效载荷自动化测试的优势就更加明显。

4 系统的应用与特点

载荷自动化测试系统目前已经成功应用到某型号的全周期测试, 实现了载荷的自动化测试, 减少了人工操作引起的失误, 提高了测试效率, 突破了载荷测试难以自动化处理的限制。该系统具有如下特点:

1) 实现了载荷测试的自动化。由于载荷测试自身的特点, 传统的载荷测试人工操作设备比较多, 由于时效性和复杂性, 人工操作往往出现失误, 就造成了一种测试模式, 反复进行测试的困局。通过载荷自动化测试, 一旦前期准备工作完成, 可以进行自动化测试, 设计师可以有更多的精力关注载荷测试数据。

2) 可以实现多载荷数据处理终端。传统的载荷测试, 大部分的精力需要放在测试过程以及载荷数据的处理上。前一种通过载荷自动化测试很好完成, 后一种也将耗费较多的人力及时间。此种载荷自动化测试系统支持多个载荷数据处理终端同时处理不同类型数据, 更加高效。

3) 数据可溯性高。载荷自动化测试系统, 将不同终端的设置文件及生成数据分别保存, 一旦载荷测试数据异常, 可以逐个进行追溯查看, 更好地定位异常原因。

4) 可重复性好。载荷测试过程中, 可能会针对某个或多个测试任务进行反复测试, 以便获取更多原始数据信息, 此时, 只需要将载荷任务数据包进行分类修改, 就可以重复进行, 避免了重新设计任务的繁琐。