

文章编号 1004-924X(2011)09-2177-09

空间相机地面实时动态集成测试技术

胡君*, 王栋

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:为了确保空间相机在轨长期、可靠工作,依据空间相机的系统结构和原理,提出了一种空间相机地面实时动态集成测试方法。采用自开发的星上载荷控制系统仿真设备、动态成像目标生成及模拟系统、主控系统仿真测试设备、CCD成像系统仿真测试设备、编码器仿真测试设备、热控仿真测试设备、电源监控系统和图像快视及数据记录系统等作为单元测试设备,应用卫星同步时钟和时钟同步采集卡,实现分布式仿真测试设备的精确时钟同步。以仿真调度控制服务器作为集成测试的控制核心,建立了集成运算模型、集成测试方法和网络实时动态集成测试工作平台。通过 $0.06(^{\circ})/s$ 恒速运动调偏流角试验,验证了集成测试技术的有效性,连续拍摄到的动态目标调整图像倾斜小于 0.01° 。

关键词:空间相机;实时动态系统集成;仿真测试;测试设备

中图分类号:V447.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111909.2177

Real-time dynamic integration detection technology of space camera on the ground

HU Jun*, WANG Dong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: huj@ciomp.ac.cn

Abstract: Based on system structures and principles of some space cameras, an integration dynamic detection method is proposed to operate space cameras in long-term and reliability on the orbit. A space camera testing unit is proposed, which is composed of own multi-simulated testing apparatus, such as SATL load control, dynamic image generator, space camera controller, CCD imaging system, encoder system, thermal control system, power control system and image data displaying and recording system. These apparatus are synchronized accurately using a SATL synchronous clock and a clock sampling device. Using a simulated integration detection control server as the core, a integration operation model, integration testing method and a working platform based on web dynamic integration are built. The integration detection technology is verified by an example of camera drift angle dynamic adjustment experiment in a movement speed of $0.06(^{\circ})/s$ and obtained imaging max lean is less than 0.01° .

Key words: space camera; real-time and dynamic system integration; simulation test; test equipment

1 引言

空间相机在军事侦察、陆地资源勘测、海洋监视和气象预报等各个领域都有极为广泛的应用^[1],已成为国防和国家经济建设必不可少的重要工具。空间相机在轨执行任务期间,通常不能人工直接干预或维修,只能根据地面的指令进行参数调整或进行简单的更改或切换,要求相机自身的光学系统、控制系统和成像系统的主要性能、功能和可靠性不能有任何的纰漏。空间相机在设计初期、中期、后期和发射之前需要进行各种试验联合调试,对相机各子系统、各种关键部件、各个重要工作单元和电性接口等完成严格的检验及测试。通过在地面上长期反复进行各种单元级、子系统级、关键部件和整机的桌面调试、仿真测试、集成测试及综合联试,检验相机的总体性能、系统功能、可靠性、稳定性和接口等指标是否达到设计的要求。尤其在相机设计的中后期还要进行各个分系统间、各系统之间的协调性、合理性测试和验证。

传统上,对空间相机的地面检测主要是利用常用的检测设备,如常见的利用示波器对单端电压信号、差分信号和时钟信号的匹配检测^[2];利用万用表对控制电路端电流及端阻值的检测;利用一些独立的仿真专用测试设备对相机的单元和部件进行仿真测试等。这些方法均为最常用的检测和仿真测试方法,其简便、灵活,也比较实用。但这些独立的仿真专用测试设备对相机整机的某些功能和性能进行测试效果还不理想,如仿真相机在轨长时间(几十天)连续工作或动态连续测试过程中,这些设备受数据存储容量的限制,单一功能无法进行网络连接与协调工作,难以实现一些重要的综合分析和试验测试。

空间相机在轨摄像一次工作任务有时可能花费较长时间,特别是相机主控系统,一直处于“值班”待命状态,随时准备接收地面发来的命令和注入参数,这种长时间“值班”工作状态,可能几个月、甚至几年连续工作。因此,急需一套针对相机整体结构(通过单元仿真)的,连续、长时间和实时动态的地面测试设备及监测系统。本文针对上述需求,设计了空间相机地面实时动态集成测试系统,给出了测试方法。通过对某相机进行实时调

偏流集成测试试验,验证了被测相机获取的最大倾斜误差,调整效果满足设计要求。

2 空间相机系统组成及工作原理

通常的空间相机组成^[2]包括主控系统、热控系统、光学镜头组件、调焦系统、编码器系统、偏流系统、TDICCD 组件、CCD 成像控制系统和信号及数据通讯电路等,如图 1 所示。在相机主控制系统的统一调度下,完成热控、调焦、调偏流、内外通讯、像移补偿、调级数、摄像、图像数据传输和数据处理等功能。

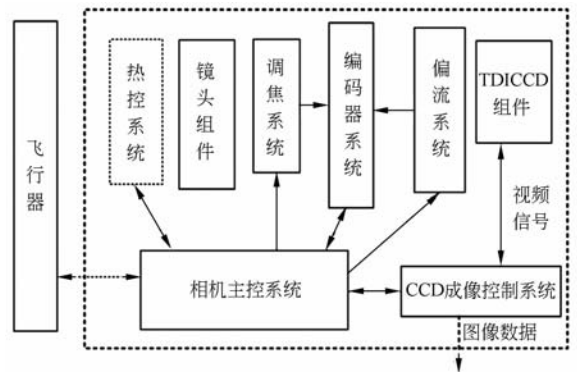


图 1 相机组成及工作原理

Fig. 1 Principle and composing of space camera

空间相机根据地面指控中心的具体指令和任务要求,执行对地面目标的观测、跟踪、拍摄和目标识别等重要任务。

空间相机及相关载荷搭载在飞行器上,在预定轨道高度上绕地球工作。根据地面指令和注入参数,对感兴趣的区域进行拍摄,然后通过中继卫星传输方式实时把拍摄的图像传输到地面接收站;也可以将所拍摄的图像数据暂时存储在相机及载荷中的大容量存储单元中,在过境本土时通过无线传输等手段传送给地面接收站,传输完成后,图像存储单元又允许被擦除,重新利用,从而实现多次、长时间的持续拍摄。

3 集成测试与仿真

3.1 集成测试原理及组成

空间相机网络系统集成仿真测试系统^[3]包括

集成测试管理系统、相机仿真测试子系统和卫星同步时钟系统等。集成测试管理系统按照实现的功能,由仿真调度控制服务器、数据库服务器、综合分析服务器、一系列监显、输出设备和软件系统等组成(简称集成测试平台);相机仿真测试子系统由相机各种单元仿真测试设备、相机工作状态监测设备和相机信号检测仪器等组成(简称单元测试设备);卫星同步时钟系统由 K805 卫星同步时钟设备和同步时钟采集组成,如图 2 所示。其中图中虚线是系统差分对时的 RS-485 总线;点划线是网络对时以太网总线;实线是传输信号和图像数据的以太网总线。

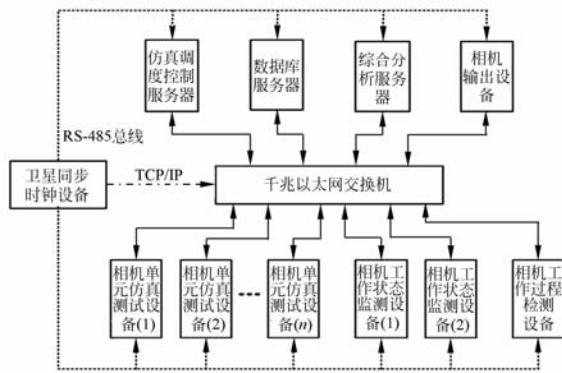


图2 相机实时集成仿真测试系统结构

Fig.2 System structure of real-time integrated simulation and detection for space camera

集成仿真测试平台各个节点的主要功能如下:

仿真调度控制服务器,控制单元测试设备的运行,提供作业任务调度,并监控测试设备的工作状态等功能。将仿真测试过程中产生的数据存储到数据库服务器节点的数据库中,为其它用户访问数据库提供接口。

仿真数据库服务器,存储相机集成仿真测试过程中产生的所有测试数据,为空间相机的工作状态、性能的分析及处理提供数据源。

仿真综合分析服务器,根据相机仿真测试子系统或仿真测试单元返回仿真测试数据,对被测的空间相机实物单元的工作状态、性能及功能进行解析、逻辑判断和综合分析,检测空间相机设计和性能上的缺陷等。

相机输出设备主要指网络打印机、图像绘图仪、和实时显示设备等。

相机单元测试设备:相机内部的专项仿真测试设备和工作状态监控设备;相机外部的星上载荷控制系统仿真设备和图像快视及数据记录系统。

相机工作状态监测设备,主要是针对相机母线电源、各种模拟遥测量和数字遥测量以及工程参数的监视设备。

相机工作过程检测设备,相机在工作不同阶段(如上电、准备、调焦和摄像等)的时序关系、工作状态转换等的状态检测设备。

相机系统集成仿真测试工作原理及过程:将被测相机接入集成测试平台,启动仿真测试设备、检测设备、监控设备、网络设备和同步时钟设备;并进入待机状态,在仿真调度控制服务器的统一控制和管理下,各测试设备按照预定的工作时序开始对相机的各功能、性能进行测试或检测^[4],产生的所有检测数据存入数据库服务器中,同时通过监显设备实时显示^[5]。实时检测完毕后,综合分析服务器通过提取、分析本次试验产生的应用数据,给出相机工作的综合分析及对性能满足的综合评价。

3.2 仿真测试设备简述

空间相机的实时、动态、网络系统集成仿真测试系统建在同一局域网内,按照某种机制,通过网络连接组成仿真测试系统。各专项单元测试设备能够独立对空间相机实物仿真测试,有效地利用测试设备的计算能力和系统的通信协调能力。

由于C/S结构^[6]简单、运用普遍、易于使用。因此,该集成仿真测试平台采用C/S结构作为空间相机网络集成仿真测试系统的体系结构。

单元测试设备包括星上载荷控制系统仿真设备、动态成像目标模拟生成系统、成像系统仿真测试设备、编码器仿真测试设备、热控仿真测试设备、电源监控系统、图像快视及数据记录系统和程控遥测仿真监测设备等。

星上载荷控制系统仿真设备对相机的控制功能,主要由同步时钟采集系统、1553B总线控制卡和仿真测试软件等组成,通过1553B总线与相机通讯;动态成像目标模拟生成系统用于产生匀速或变速运动成像目标,模拟飞行器相对地面的不同像移速度、偏航角和姿态的变化,由动态目标发

生器和计算机控制系统组成,通过网络将模拟目标位置、速度等信息周期地传给星上载荷控制系统仿真设备,再经星上载荷控制系统仿真设备发送给相机;成像单元仿真测试系统,模拟相机成像单元与相机内部主控器的通讯规范、系统状态和工作时序等,主要由通讯控制系统、同步时钟采集系统及仿真测试软件等组成,通过 RS-422 通讯总线接口与相机相接;编码器仿真测试设备,测试相机与电机及编码器相关的功能和性能,模拟电机的感性和阻性负载以及编码处理系统与相机主控通讯规则、系统状态和工作时序等,主要由电机模拟负载设备,电机驱动脉冲采集设备,串行通讯控制卡、同步时钟采集系统及其仿真测试软件等组成,通过 RS-422 总线接口与相机相接;相机主控系统仿真测试设备可以在主控系统设计完成之前,替代主控角色测试与相机内部其他子系统(如成像子系统、编码器子系统等)之间的通讯规范、工作时序等正确性,主要由 RS-422 通讯总线电路板、同步时钟采集系统和仿真测试软件等组成;热控仿真测试设备是测试相机控温策略、加热控制电路的性能和功能,由热敏电阻仿真输出卡、加热信号采集卡、加热负载卡及其仿真控制软件组成;电源监控系统是监控相机的母线电源电压、电流、功率等,由可编程电源、计算机及监控软件组成;图像快视及数据记录系统是实时记录和显示相机输出的图像数据,由光纤信号转换卡、高性能图像采集卡及其控制软件 stream 5 和实时像质评价软件等组成;程控及遥测仿真监测设备:程控

功能由模拟发布程控指令和数据注入参数的相关电路和软件完成;遥测功能由采集相机下行遥测参数的电路和软件完成。这些单元测试设备与相机关系如图 3 所示。其中虚线为相机与部分仿真或监测设备的连接线路,根据每次测试的需要,相机有选择地连接相应仿真或检测设备。

3.3 集成测试时间同步

在对空间相机实物仿真测试过程中,各单元测试设备之间、与集成测试平台内各个设备之间数据记录的时间基准必须一致,这也是分布式^[7]测试系统普遍的基本要求。如果时间基准不一致,各设备按照本身系统的时间进行记录,则在进行自动综合判读和分析时,会由于时间上差异,造成判断错误和分析失败。

在分布式系统时钟同步^[8]应用中,最常见的时钟同步模式有硬件同步模式、软件同步模式和混合同步模式等。本系统设计了一种属于硬件改进型的时间同步模式。采用卫星同步时钟设备与独立开发的基于 PCI 总线的 FPGA 的时钟同步采集卡进行周期性校时,实现时间同步。在卫星同步时钟^[9]对时时,与各类仿真测试设备无关,只有当测试设备或系统设备需要时间时,直接通过 PCI 总线到时钟同步卡的存储器中读取。系统结构如图 4 所示。

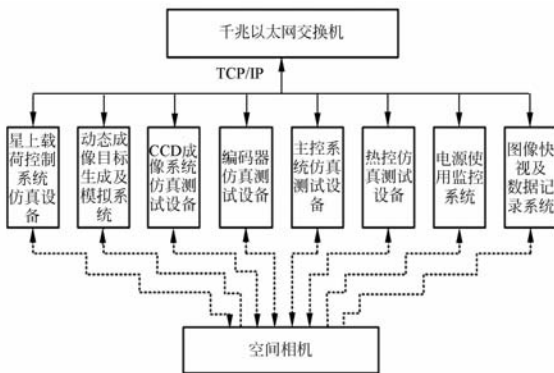


图 3 仿真测试设备与相机关系

Fig. 3 Connection relation between detection units and space camera

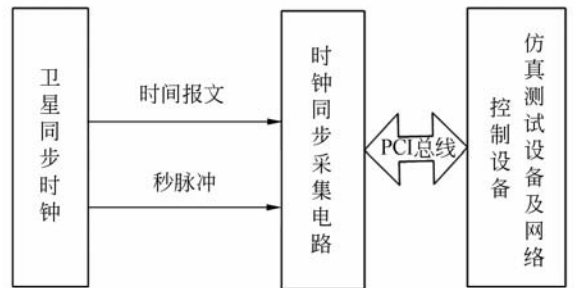


图 4 时钟同步模式示意

Fig. 4 Working mode of synchronization clock

卫星同步时钟系统工作原理:首先由 FPGA 接收卫星同步时钟设备输出的串行时间报文(年月日时分秒),初始化 FPGA 的时钟同步卡的时间计数器以获得基准时间,并以秒脉冲信号周期性校对秒计数器,秒以内的时间利用 FPGA 内部计数器电路完成。将时间信息存储到 FPGA 内

部的 RAM 中,每 0.1 ms 更新一次时间数据,实现时、分、秒、毫秒及 0.1 ms 单位的计数。当各单元测试设备和集成测试平台中的设备需要时间数据时,通过 PCI 总线直接获取时钟同步卡计时系统生成的时间,从而实现各单元测试设备和集成测试平台的设备获取时间的一致性。

经采用示波器检测,卫星同步时钟系统本身的精度高于 0.01 ms,满足该系统的时间同步设计精度要求。另外,时间的同步是通过时钟同步采集卡内的计时系统实现的,避免了使用计算机系统时钟带来的争夺系统资源的问题。

3.4 集成仿真测试调度

仿真调度控制服务器是整个集成仿真测试系统的控制核心,负责单元仿真测试设备的控制和作业任务调度,协调整个系统各部分的工作。

仿真调度控制服务器维护整个系统的配置信息、节点队列和作业队列。节点队列存放各个仿真测试设备的资源信息;作业队列存放用户已提交的各个作业信息。仿真调度控制服务器根据用户的节点作业调度策略选取参与仿真测试的节点设备及作业命令,将执行作业的命令发送给仿真测试设备,仿真测试设备根据作业命令标识接收发送给自己的作业命令,并将作业投入运行。同时仿真调度控制服务器监控各仿真测试设备的作业运行状态和资源使用情况。设备节点及作业的调度控制处理流程如图 5、图 6 所示。

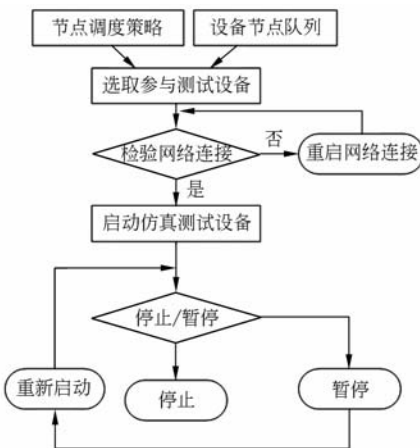


图 5 单元仿真测试设备调度流程

Fig. 5 Dispatching flow of detection and simulation unit

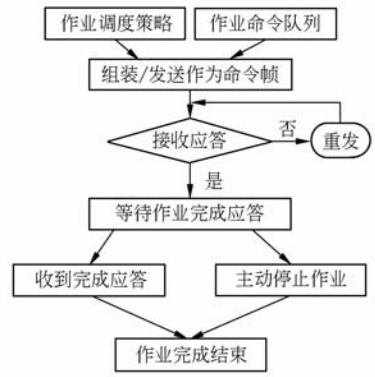


图 6 作业命令处理调度流程

Fig. 6 Dispatching flow of task command process

3.5 集成测试方法

3.5.1 网络系统^[10]集成及仿真测试

计算机间网络通信是仿真测试系统中数据传输、命令交互的桥梁。在网络集成仿真测试系统中,仿真测试设备需要把测试数据发送到仿真调度控制服务器中进行分析处理,并把数据转存到数据库服务器中,同时也需要仿真调度控制服务器向仿真测试设备发送控制命令和作业分配参数等等,具有数据传输量大,可靠性高的特点。

为保证数据的高可靠性,系统采用了面向连接的 TCP/IP 协议,同时利用千兆以太网交换机来保证仿真调度控制服务器对测试数据的实时解析。

仿真调度控制服务器和单元仿真测试设备的通信接口程序都采用了 WinSocket 套接字的编程规范,在 VC++ 的开发环境下,利用 MFC 提供的同步阻塞 Socket 的通讯机制封装类 CSocket 来实现仿真测试数据、命令和作业参数的接收和发送。通信流程与时序如图 7 所示。

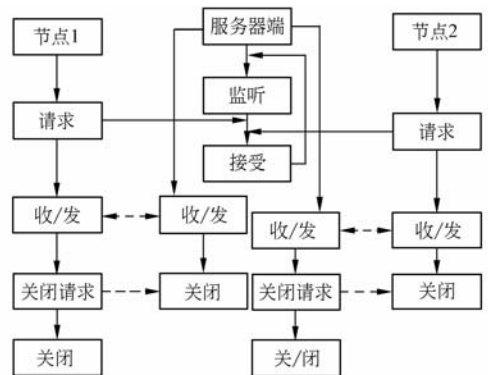


图 7 通信流程与时序

Fig. 7 Communication flow and scheduling

3.5.2 网络动态测试及步骤

各种仿真测试设备均是独立开发的,测试数据的格式也各不相同,定义统一的数据传输帧结构是保证仿真调度控制服务器与仿真测试设备进行数据传输的前提。自定义数据帧结构见表 1。

表 1 数据传输帧结构格式

Tab.1 Structure and format of data transmitting frame(Byte)

仿真节点地址	帧类型	命令/数据类型	数据	时间码
1	1	1	128	12

自定义数据帧的长度共占 143 个字节,加上帧头和帧尾,整个 TCP/IP 传输帧的长度不超过 200 个字节。在 1 000M 传输率的以太网环境下,数据帧的网络传输延迟在 10 ms 之内,满足常规的空间相机测试应用。

3.5.3 实时解析及集成测试运算模型

一般空间相机在轨运行期间地面输入有两种参数,程控指令和内部数据注入参数。其中程控指令 $\bar{E} = e_1, e_2, e_3, e_4, e_5$, 其中 e_i 为一个分量,即一条指令;数据注入参数 $\bar{I} = i_1, i_2, i_3, \dots, i_{34}$ 其中 i_i 为分量,即一个控制参数;相机返回参数(含状态)共 252 个,其中遥测参数 $\bar{R} = r_1, r_2, r_3, \dots, r_{47}$;主控箱工程参数 $\bar{M} = m_1, m_2, m_3, \dots, m_{19}$;平台参数 $\bar{F} = f_1, f_2, f_3, \dots, f_{20}$;数据注入参数 $\bar{Z} = z_1, z_2, z_3, \dots, z_{37}$;热控参数 $\bar{H} = h_1, h_2, h_3, \dots, h_{26}$;调焦调偏流参数 $\bar{P} = p_1, p_2, p_3, \dots, p_{32}$;图像辅助数据 $\bar{D} = d_1, d_2, d_3, \dots, d_{71}$, 其中 $r_i, m_i, f_i, z_i, h_i, p_i, d_i$ 为每种参数类型的分量,每个分量为一个返回参数。对于不同规模和型号的空间相机,其输入和返回的参数是不同的,但基本类别差别不大。

(a) 实时解析及运算模型

实时解析及参数相关运算模型包含三部分:空间相机输入参数和空间相机返回参数,作为网络实时动态集成测试平台的输入参数,用多种向量 $\bar{R}', \bar{M}', \bar{F}', \bar{Z}', \bar{H}', \bar{P}', \bar{D}'$ 表示;网络实时动态集成测试平台的实时解析系统和相关参数(逻辑)运算及评价系统。如图 8 所示,其中 \bar{S}' 作为实时解析及自动判读的结果; \bar{Y}' 作为系统集成相关参数(逻辑)运算及评价结果。

(b) 实时解析及自动判读

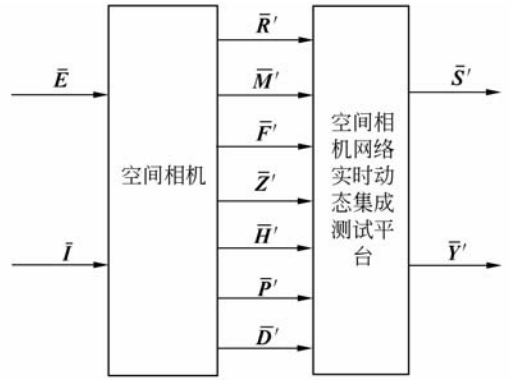


图 8 实时解析及参数相关运算模型图

Fig. 8 Model of real-time data parsed and parameter relation operation

系统集成仿真测试系统依据 \bar{E} 和 \bar{I} 中的元素约定,按顺序从相机输出端实时读出所需的工程参数($\bar{R}', \bar{M}', \bar{F}', \bar{Z}', \bar{H}', \bar{P}', \bar{D}'$)的每个向量中的每个元素的字位信息码,进行译码并进行逻辑判定,实时显示和存储这些判定结果 \bar{S}' , 并给出正确与否的结果状态信息。其有限自动机物理模型如图 9 所示。从左至右依次读取每个元素的字位信息。

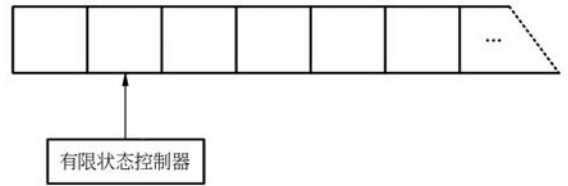


图 9 相机工程参数有限物理自动机

Fig. 9 Physical model of finite state automata on space camera parameter

(c) 系统集成逻辑运算

依据 \bar{E}, \bar{I} 和 $\bar{R}', \bar{M}', \bar{F}', \bar{Z}', \bar{H}', \bar{P}', \bar{D}'$, 对不同工程类型参数进行逻辑关系或工程运算,给出运算参考结果。建立的相机返回参数参加(逻辑)关系或工程运算的数学模型,应用数据库中的关系数据库模型原理,定义了特殊系统集成运算模型如下:

$$\bar{Y}' = R(\bar{R}', \bar{M}', \bar{F}', \bar{Z}', \bar{H}', \bar{P}', \bar{D}'), \quad (1)$$

式中 $\bar{Y}' = y_1', y_2', y_3', \dots$, 通过式(1)关系函数 R , 实现对 $\bar{R}', \bar{M}', \bar{F}', \bar{Z}', \bar{H}', \bar{P}', \bar{D}'$ 之间的选择的不同元素的逻辑运算或工程计算,给出相机集成综合动态测试和评价结果 \bar{Y}' 。

4 集成测试实例

采用某空间相机实时调偏流试验作为一个实例,说明实时动态系统集成测试技术和集成仿真测试系统的在测试中的应用。

空间相机实时调偏流集成测试试验^[11]需要程控遥测仿真监控设备、动态目标生成及模拟系统、星上载荷控制系统仿真设备、平行光管、图像快视及数据记录系统和集成测试平台,如图10所示。

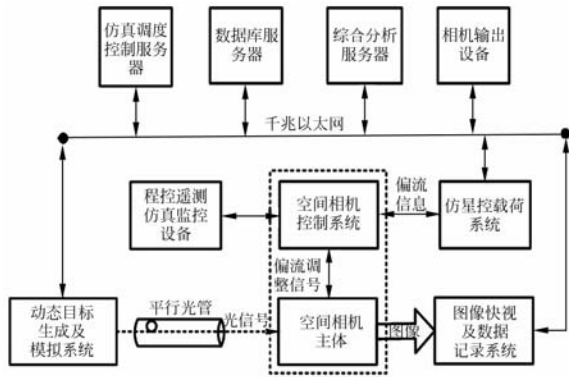


图10 相机实时调偏流角集成测试系统示意图

Fig. 10 Integration detection system for real-time drift angle adjustment of space camera

动态目标生成及模拟系统通过平行光管的光信号与相机TDICCD焦面组件对准,确定控制动态目标生成及模拟系统的目标圆鼓旋转速度(模拟相对空间飞行器的地面像移)和目标圆鼓的偏转(模拟飞行器偏航角的变化)范围。设定目标生成及模拟系统的偏航角初始定位值(被测相机偏流角的编码器设定为中间值),并使动态目标生成及模拟系统偏航角运动到所赋初始指定的位置。被测某型号空间相机、集成测试平台和单元测试设备全部加电准备工作,包括程控遥测仿真监控设备、动态目标生成及模拟系统、星上载荷控制系统仿真设备、图像快视及数据记录系统、集成测试平台、相机控制系统和相机主体的偏流调整机构及CCD驱动控制系统等。

设目标生成及模拟系统模拟飞行器相对地面像移速度为292.9 mm/s,偏流角范围 $\pm 4.3^\circ$ 。集成仿真测试过程:

(a)启动相机集成测试平台,根据调偏流试验的目的选择相关的测试设备以及安排作业任务流

程。收到任务指令的各单元测试设备和被测空间相机开始进入准备状态。

(b)程控仿真监控设备根据作业流程向相机发送相关程控开、关机指令 e_i 以及数据注入参数 i_i 。

(c)集成测试平台中的仿真调度服务器控制及管理系统通过以太网实时获取动态目标生成及模拟系统送出的偏航角值 p_i' ,结合测试系统当时广播的飞行器平台参数完成偏航角与偏流角的变换计算,获得相机的偏流参数 y_i' ,通过以太网传输给星上载荷控制系统仿真设备。

(d)星上载荷控制系统仿真设备按作业任务中的预定参数和实时接收到的偏流参数 y_i' ,通过1553B总线发送给相机控制系统,控制相机偏流调整机构,完成一次实时调整偏流角。同时星上载荷控制系统仿真设备在仿真调度服务器的控制下,把每次循环接收到的动态测试结果 Y' ,包括偏流角修正参数、相机当前状态和工作时间码等均进行实时存储和显示。

(e)图像快视及数据记录系统实时采集空间相机工作过程中产生的图像数据信息,同时结合像质评价软件,实现对图像传递函数等关键信息的计算;同时综合分析系统根据数据库中存储的实时数据对相机各状态参数进行译码和解析然后送给输出设备显示,对异常状态报警提示。

(f)反复重复以上(c)~(e)步骤,构成对相机偏流调整机构和相关的控制系统进行动态闭环连续测试过程。每次循环获得的集成仿真测试结果 Y' ,均通过集成测试平台和单元测试设备,实时显示和记录下来,达到实时动态监控和测试的目的。

(g)测试结束后,通过综合分析系统按照作业流程,根据时间相关性,提取出各单元测试设备在本次试验中产生的相关数据,通过系统集成逻辑运算,完成最后的综合评价。

应用相机集成测试平台和单元测试设备等进行动态闭环测试^[8]试验,获取的某型号空间相机未调偏流时所拍摄到的动态目标部分图像,如图11所示;显然,由于偏流角对相机成像质量的影响,导致图像倾斜严重,像质较差,经计算得到动态传递函数小于0.02。图12为相机进行实时调偏流后所拍摄到的动态目标图像。模拟飞行器偏流角速度恒速 $0.06^\circ/\text{s}$,相机进行连续拍摄到的动态目标图像,经计算,获取图像的最大倾斜误差不

超过 0.01° 、静态传递函数约为 0.15, 动态的传递函数不低于 0.1。通过实时调偏流集成测试试验验证, 验证了相机的偏流调整机构和算法能够实时跟踪偏航角变化的能力, 并能够在实时调偏流的过程中获得高质量的图像。

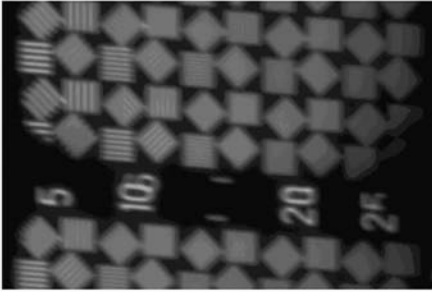


图 11 无调偏流角时的图像

Fig. 11 Image without drift angle adjustment

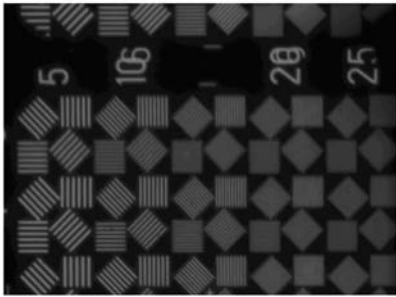


图 12 调偏流角时的图像

Fig. 12 Image with drift angle adjustment

5 结 论

应用网络技术、仿真测试技术和计算机自控及自动机理论等, 提出了一种空间相机地面实时动态系统集成连续测试技术和方法。设计了以仿真测试调度系统作为对相机集成测试的控制核心; 采用专项单元测试设备和一系列监控设备作为系统分布式仿真测试设备; 应用卫星同步时钟和基于 PCI 总线的 FPGA 的时钟同步采集卡, 实现了集成测试过程中分布式仿真测试设备的时间精确同步; 建立集成逻辑运算模型、集成测试方法和网络实时动态集成测试平台。通过对某型号空间相机实时调偏流集成测试试验, 验证了被测相机获取图像的最大倾斜误差 $< 0.01^\circ$, 调整效果达到动态传递函数不低于 0.1, 满足设计要求。

地面实时动态集成测试系统是在局域网与分布式系统^[3]相机结合的环境下开发的, 经过多次实验验证及在多种条件下进行集成仿真测试应用, 系统能满足对空间相机论证阶段、初样阶段和正样阶段的连续、实时和综合集成测试要求, 达到预测、判断和评价空间相机功能、性能和可靠性的目标。突破了传统上地面常规检测的局限性, 同时也避免了因采用单个专用仿真测试设备测试结果单一性、片面性的问题。

参考文献:

- [1] 胡君, 王栋, 孙天宇. 现代航天光学成像遥感器的应用与发展[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(6): 519-533.
HU J, WAN D, SUN T Y. The application and development of recent space optical image remote sensors[J]. *Chinese Optics and Applied Optics*, 2010, 3(6): 519-533. (in Chinese)
- [2] 马岩. 空间 CCD 相机控制系统的仿真测试技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2006.
MA Y. *Research on simulate test technology of the space CCD camera control system*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, 2006. (in

Chinese)

- [3] 徐鹏, 黄长宁, 王涌天, 等. 空间相机仿真系统原理方案初步设计[J]. 中国空间科学技术, 2002, 5: 38-42.
XU P, HUANG CH N, WANG Y T, *et al.*. The projected design of the space camera on simulating system principium[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2002, 5: 38-42. (in Chinese)
- [4] 马岩, 胡君, 吴伟平, 等. 航天光学遥感器多单元并行实时通信仿真测试[J]. 计算机仿真, 2008, 25(9): 58-61.
MA Y, HU J, WU W, *et al.*. Test and simulation of concurrent and real-time communication of multi-cells of space optical remote sensor[J]. *Computer Simulation*, 2008, 25(9): 58-61. (in Chinese)
- [5] 马岩, 胡君. CCD 成像单元仿真系统的实时显示方

- 法研究[J]. 液晶与显示, 2008, 23(3):334-339.
- MA Y, HU J. Real-time display method CCD imaging unit simulation of system[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2008, 23(3): 334-339. (in Chinese)
- [6] 刘天胜,袁斌,李铭. 一种分布式电磁计算仿真平台的设计与实现[J]. 计算机仿真, 2008, 25(9):280-283.
- LIU T SH, YUAN B, LI M. Design and implementation of a distributed simulation platform for electromagnetic computing [J]. *Computer Simulation*, 2008, 25(9):280-283. (in Chinese)
- [7] 肖育劲,唐胜利,何祖威. 基于网络的分布式机群并行仿真平台开发[J]. 计算机仿真, 2004, 23(3):48-50.
- XIAO Y J, TANG SH L, HE Z W. Development of network-based distributed simulation platform[J]. *Computer Simulation*, 2004, 23(3):48-50. (in Chinese)
- [8] 薛芳侠,姚益平,谢虹,等. 分布交互式仿真中的高性能时钟设计问题研究[J]. 计算机仿真, 2006, 23(5):115-118.
- XUE F X, YAO Y P, XIE H, *et al.*. Design of high performance clock used in distributed interactive simulation system[J]. *Computer Simulation*, 2006, 23(5):115-118. (in Chinese)
- [9] 穆欣,胡君,宋启昌,等. 空间相机集成测试系统的时钟同步[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6):1436-1443.
- MU X, HU J, SONG Q CH, *et al.*. Tim synchronization of integrated testing system of space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6): 1436-1443. (in Chinese)
- [10] 刘志国,刘太阳,王仕成,等. 基于实时网络的半实物仿真集成平台研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(15):3425-3427.
- LIU ZH G, LIU T Y, WANG SH CH, *et al.*. Research on hardware-in-the-loop simulation integrated platform based on real-time network [J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(15): 3425-3427. (in Chinese)
- [11] HU J, CAO X T, WANG D, *et al.*. Dynamic closed-loop test for real-time drift angle adjustment of space camera on the earth[J]. *SPIE*, 2010, 7656:76560Z-1-76560Z-7.

作者简介:



胡君(1952—),男,吉林蛟河人. 研究员,硕士生导师,主要研究方向为智能控制与信息处理、空间光学遥感器地面测试技术. E-mail: huj@ciomp. ac cn



王栋(1979—),男,山西阳泉人,博士,副研究员,主要研究方向为空间相机的地面测试技术和数字图像处理技术 E-mail: wangdong983232 @ yahoo. com. cn