

# 面向批量化小卫星的便携式快速巡检系统研究

刘杰强, 李田甜, 王 鹏, 宋海龙, 徐圣法

(北京东方计量测试研究所, 北京 100094)

**摘要:**为解决批量化小卫星在贮存阶段测试周期长、自动化程度低、测试设备多等问题,提出了一种面向批量化小卫星的快速巡检方法,设计并开发了针对小卫星多种测试模式下的便携式快速巡检系统;该系统具有适用性广、稳定性好、效率高、成本低、便于携带和操作简便等优点,已在某小卫星的批量巡检中得到应用验证;通过参数配置、巡检序列设置、程序上注更新和巡检模式重组,可满足不同小卫星快速批量巡检,特别是用于小卫星外场巡检时优势明显;经实验结果表明,单颗小卫星的巡检时间从2天缩小到2小时,明显提高了巡检效率,大幅降低了时间成本和人力成本,对小卫星的批量巡检效果更加显著。

**关键词:**批量化;小卫星;便携式;快速巡检

## Research on Portable and Quick Inspection System for Batch Small Satellites

Liu Jieqiang, Li Tiantian, Wang Peng, Song Hailong, Xu Shengfa

(Beijing Orient Institute of Measurement & Test, Beijing 100094, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of long test cycle, poor automation and too many test equipment in the storage stage of batch small satellites, a quick inspection method for batch small satellites is proposed, and a portable and quick inspection system for small satellites under various test modes is designed and developed. The system has many advantages, such as wide applicability, good stability, high efficiency, low cost, easy to carry and operate. It has been applied in batch inspection of a small satellite. Parameter configuration, inspection sequence setting, program annotation updating and inspection mode reorganization can meet the requirement of quick batch inspection for different small satellites, especially for those in field patrol. The experimental results show that the inspection time of a single small satellite is reduced from 2 days to 2 hours, the inspection efficiency is obviously improved, the time cost and labor cost are greatly reduced, and the batch inspection effect of small satellites is more significant.

**Keywords:** batch production; small satellite; portable; quick inspection

## 0 引言

作为现代科学技术中发展迅速的尖端技术之一,航天技术标志着一个国家的科学技术水平,也彰显出一个国家的综合国力。航天技术的发展对促进人类的文明和社会的进步有着十分重要和积极的作用<sup>[1-2]</sup>。在卫星技术与应用不断发展的推动下,国内外的卫星产业得到了快速发展,商业航天迎来了重要的发展机遇期。而在发展商业航天的大环境下,迫切需要缩短卫星开发研制周期,特别对于单一任务的专用卫星以及组网卫星,更需要成本低、研发周期短、应用效果显著的卫星技术,因此小卫星技术应运而生。与传统的大卫星相比,小卫星具有功能密度高、重量轻、研制成本低、有效载荷种类多、飞行任务灵活多样、性能指标千差万别的特点<sup>[3-7]</sup>。近年来,小卫星在技术上快速发展,应用效益日益增长<sup>[8-9]</sup>,发展态势强劲,各类小卫星进入高密度发射期,近年来全球成功入轨微小卫星统计数据如图1所示。

随着航天事业的快速发展,小卫星的研制周期不断缩短、数量不断增多,“一箭多星”的发射模式已成为常态。为了统筹规划航天器发射任务,大量小卫星在通过AIT

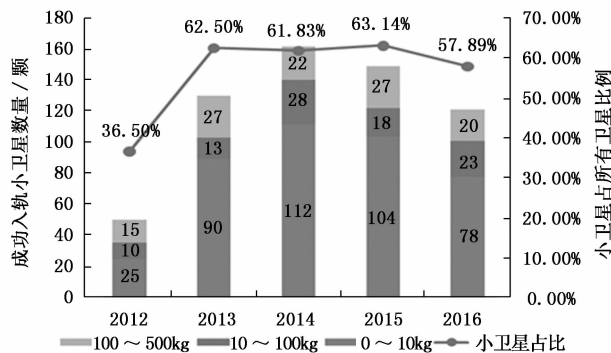


图1 2012—2016年全球成功入轨微小卫星数量

(总装、测试与试验)测试后,在发射前可能需要长时间贮存。而小卫星贮存期间需要定期进行功能及性能巡检,以确保小卫星随时具备发射状态。国内小卫星的传统AIT流程,由于体系架构、软件落焊等原因导致AIT流程过于繁琐<sup>[10-11]</sup>,测试时间长且投入人员多,无法满足批量化小卫星在发射前贮存阶段的快速巡检需求。

本文针对小型化、集成化、轻质化,并可支持多种巡检模式、多种类型小卫星快速巡检需求,设计并开发了一套便携式的小卫星快速巡检系统,具有适用性广、稳定性好、效率高、成本低、便于携带等特点,推广应用前景良好;并通过搭建系统验证环境,对该系统的正确性和有效

收稿日期:2019-01-29; 修回日期:2019-02-16。

**作者简介:**刘杰强(1985-),男,江西高安人,硕士,工程师,主要从事航天器自动化测试技术与设计工作方向的研究。

性进行了验证，可为批量化小卫星快速巡检提供参考。

## 1 系统总体设计

小卫星平台舱及载荷舱内置星载测试单元，星载测试单元可完成小卫星自动测试功能。便携式快速巡检系统用于与星载测试单元配合完成小卫星巡检任务。本系统总体设计架构分为三层，即数据采集层、数据管理层和应用层，其架构设计如图 2 所示。

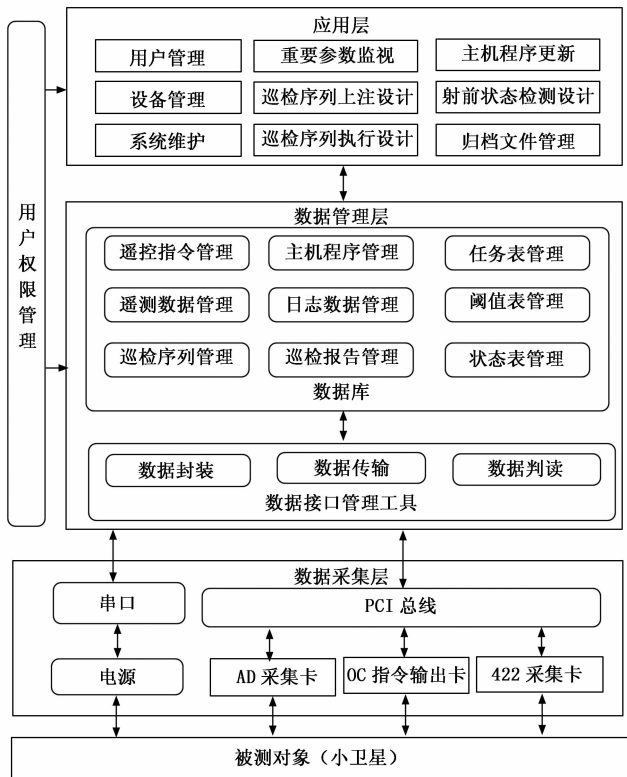


图 2 系统总体架构设计图

数据采集层：通过数据采集卡采集小卫星的各类状态参数、发送控制指令或巡检序列，并为小卫星提供稳定的电源输出。

数据管理层：包括数据库和数据接口管理工具。数据库用于完成数据处理（数据存储、分析、管理等），并为应用层提供数据订阅服务；数据接口管理工具为数据采集层与数据库之间的枢纽，将采集的卫星数据入库。

应用层：面向巡检人员的信息交互层，以“一键式”操作方式为巡检人员提供巡检序列执行、数据自动判读、巡检报告自动生成和用户管理等服务。

此外，针对数据层和应用层的运行安全，设计了用户权限管理模块，对不同的操作者设置不同的权限，避免非法操作和跨权限操作。

## 2 系统硬件设计

系统硬件主要由便携式加固计算机、稳压电源、AD 采集卡、OC 指令输出卡、422 采集卡和相应的配套线缆组成。其中，AD 采集卡、OC 指令输出卡和 422 采集卡插入便携式

加固计算机中的 PCI 总线插槽中，通过 PCI 总线接口与便携式计算机进行数据通信，总线接口完全符合 PCI V2.2 规范。

### 2.1 便携式加固计算机

便携式加固计算机选用全加固军规计算机，自带 PCI 总线接口、串口、网口、USB 等接口，具有加固抗震及便于携带的特点，强固特性通过 IP65 认证，适用于各种恶劣的户外环境或需要经常移动使用的场合。此外，便携式加固计算机配置高性能背光液晶屏和防震硬盘、可充电电池及高效的电源管理软件，其中可充电电池单独供电时间超过 4 小时。

### 2.2 稳压电源

稳压电源用于为小卫星供电，具备过流保护、过压保护、过载保护和短路保护等功能，集成于便携式加固计算机中。系统选用 TDK lambda Z+ 系统电源作为稳压电源，该系列电源具有可编程、体积小、高可靠、输入输出隔离等特点，支持远端采样，输出电压范围 0~36 V，输出电流范围 0~10 A。便携式加固计算机通过 RS232 接口或 USB 接口控制稳压电源，两种接口互为备份，默认采用 RS232 接口控制稳压电源。

### 2.3 PCI 板卡

系统主要使用三类 PCI 板卡，即 AD 采集卡、OC 指令输出卡和 422 采集卡。AD 采集卡用于采集各种模拟量、电阻量、状态量，通过电阻分压可实现  $\pm 50\text{V}$  的输入量程，采集精度 16bit，支持 72 路单端采集，具备高速串行/并行接口。OC 指令输出卡输出部分采用磁隔离方式设计，指令脉宽精度 0.1 ms，指令脉宽范围 1~6000 ms，支持 16 路 OC 指令和 16 路射随指令输出。422 采集卡具有 4 路独立的 RS422 接口，用于采集小卫星的所有状态参数，并发送控制指令或巡检序列。

选用 PLX 公司的 PLX PCI9054 作为 PCI 板卡的 PCI 总线控制器。PLX PCI9054 具有以下特点：

- 1) 符合 PCI V2.2 规范的 32 位 33 MHz 目标接口芯片，PCI 突发传输速度高达 132 MB/s；
- 2) PCI9054 的 LOCAL 总线与 PCI 总线之间数据传输模式包括主模式、从模式和 DMA 模式；而 LOCAL 总线的控制包括 M、C、J 三种模式，其中常用 C 模式，即地址数据总线非复用模式；
- 3) 提供了两个独立的可编程 DMA 控制器。

在板卡设计中采用 LOCAL 总线 C 模式的 DMA 方式，LOCAL 总线的时钟可达 33 MHz。在此方式下 PCI9054 作为 PCI 总线主设备，同时也是 LOCAL 总线的控制者，使用 DMA0 通道作为数据传送通道，通过设置 DMA0 控制器内部的寄存器即可实现 PCI 总线和 LOCAL 总线两者之间的数据交换，其总线连接如图 3 所示。

### 2.4 系统结构设计

巡检系统采用一体化设计，将稳压电源集成于加固计算机中，便于巡检人员携带。系统结构为一个整体，内部分为上下两层，上层为便携式加固计算机，下层为稳压电

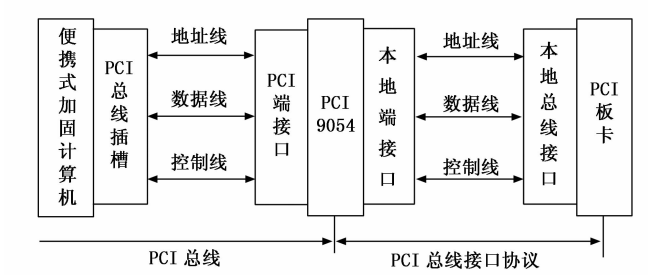


图 3 本地总线与 PCI 总线连接示意图

源。由于大功率稳压电源运行时会产生大量的热量, 散热问题是系统集成设计重点考虑的问题。因此, 在稳压电源前后面板设置电源通风口, 后面板设置风扇; 而在整机结构设计时, 设计通风口, 保障前后面板通风正常, 利于设备散热, 并且在主机内部增加一个散热风扇, 有助于稳压电源散热。整个巡检系统尺寸为 400 mm (长) × 280 mm (宽) × 130 mm (高), 重量 8.5 kg, 特别适合于小卫星外场批量巡检。

3 系统软件设计

快速巡检软件是系统的核心软件, 运行于便携式加固计算机上, 通过 RS422 总线、PCI 总线与小卫星各设备进行通信, 通过 RS232 接口或者 USB 接口程控稳压电源。软件运行于 WINDOWS 平台上, 开发环境选用 Microsoft Visual Studio 2010 进行软件开发, 选用 MySQL 作为系统数据库。系统软件采用自顶向下的设计策略, 先设计总体框架后设计各模块及具体类, 设计遵循模块化、通用化、可配置、界面友好等原则。

软件采用分层和模块化设计, 分层设计如图 4 所示。按照层次划分为用户接口层、测试需求及策略层、适配层、驱动层、硬件层和对外接口层。其中, 用户接口层负责与用户交互, 测试需求及策略层为用户接口层提供支撑, 适配层用于为驱动层和测试需求及策略层提供转换接口, 驱动层用于实现操作系统与底层硬件的通信, 硬件层为具体的板卡, 对外接口层用于实现与小卫星上设备的接口。以上各层中, 快速巡检软件直接相关层为驱动层以上各层。

快速巡检软件内部接口主要涉及到上层界面和中间各层的数据交互。具体包括两类: 一是将操作界面中的输入参数转化为标准的参数结构, 并将结构中的参数传输至中间相关层; 二是将中间各层获得的遥测数据和状态信息在界面上进行显示。软件参数设置采用同步方式实现, 而数据和参数采用异步操作方式获取, 在设计上采用 windows 系统的消息机制。

3.1 用户管理设计

用户管理模块主要负责用户的认证和管理, 对于不同用户角色提供不同权限, 避免非法操作。该模块实现的具体功能包括用户添加、用户删除、权限管理和登录管理, 只有经过认证登录的用户才有权限执行特定操作。其中, 用户角色主要分为管理员和操作员两类, 管理员有权限对

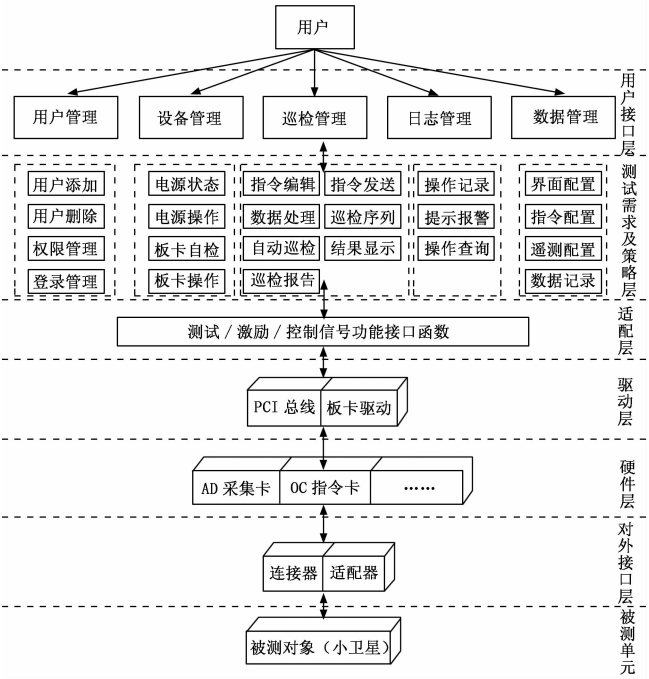


图 4 快速巡检软件模块设计图

设置密码的数据库进行维护, 可添加、修改、删除操作员, 并可对不同的操作员设置相应的操作权限; 操作员的权限主要是面向巡检人员日常的巡检。

3.2 设备管理设计

设备管理模块主要负责硬件设备的管理, 包括板卡的识别、板卡自检、板卡操作、电源管理等。用户对硬件设备的指令也在本模块转化为对应板卡或者电源的操作, 接收小卫星上的遥测状态数据也是由本模块上传至相应的处理模块。设备管理模块在软件启动时自动检索各板卡的状态, 若不在设备列表中, 则打开板卡, 同时配置板卡初始化参数, 进行板卡自检, 并将板卡状态更新至设备列表中。

3.3 巡检管理设计

巡检管理模块主要负责小卫星巡检时相关操作, 包括对模拟量采集的数据处理和显示, 指令发送, 对遥测数据的解析, 巡检序列的添加、修改、删除、保存和执行, 巡检结果显示以及巡检报告自动生成等。在本模块中, 用户编辑好巡检序列和判定条件后, 即可启动“一键化”巡检。在巡检过程中, 每一条巡检指令的运行状态和巡检结果都可直观显示, 所有巡检指令执行完毕后自动生成巡检报告或者报表。

为了应用于不同的巡检场合, 设计了不同的巡检模式, 共划分为 5 种巡检模式, 即重要参数监视模式、巡检序列上注模式、巡检序列执行模式、主机程序更新模式、射前状态检测模式, 不同的巡检模式对应不同的巡检界面。

3.3.1 重要参数监视模式设计

该模式为普通模式, 即通过发送指令数据同时实时更新显示相应遥测数据。用户通过界面编辑或从配置文件中载入指令数据, 在用户选择确认发送后, 指令数据通过

RS422 接口发送至小卫星上设备,同时小卫星上设备通过 422 接口将遥测数据发送至便携式加固计算机,便携式加固计算机接收到遥测数据后立即交由快速巡检软件进行处理,快速巡检软件按照约定协议对遥测数据进行解析,并对重要参数进行监视,在超出正常范围时进行高亮显示或报警,所有操作和提示信息在界面中进行显示的同时会保存至日志文件中。卫星遥测参数存储于数据库中,每个遥测参数对应唯一的标识号,巡检人员可以根据重点关注的卫星遥测参数显示需求将相应的标识号填入配置文件中,重新加载配置文件后即可实现重要参数的实时监视。

### 3.3.2 巡检序列上注模式设计

该模式以巡检序列为单位进行数据上注,即将多条指令数据整合在一起进行数据发送,巡检序列由用户自定义并以配置文件的形式进行存储。在该模式中,用户通过选择编辑或从配置文件中读取已经创建好的巡检序列,在用户确认发送后,巡检序列通过 RS422 接口发送至小卫星上设备,同时遥测数据通过 RS422 接口由小卫星上设备下传至加固计算机,再交由快速巡检软件处理,快速巡检软件在保存遥测数据的同时,按照约定协议提取上注巡检序列相关遥测参数,并按照协议格式进行解析,解析后的数据可实时反映当前上注巡检序列的过程状态,并以直观显示的方式反馈给用户。

### 3.3.3 巡检序列执行模式设计

该模式主要控制小卫星上设备执行相应的巡检序列,并对巡检序列的当前执行情况根据相关遥测进行解析并直观显示。巡检序列来源于上一模式,两者工作流程类似。

### 3.3.4 主机程序更新模式设计

该模式主要由 RS422 接口完成对星务主机软件代码的升级替换。星务主机的程序存储区划分为星务计算机软件存储区和星务 BootLoader 软件存储区,而星务 BootLoader 软件的主要功能是通过星地 RS422 接口接收地面命令及程序代码,完成星务计算机软件的代码升级。在本模式中,快速巡检软件按照协议格式,将新程序代码作为指令数据进行组包,通过 RS422 接口发送至星务主机,再由星务主机的 BootLoader 软件完成对星务主机软件的代码替换。快速巡检软件根据星务主机更新程序后下发的遥测参数判读程序是否更新成功。

### 3.3.5 射前状态检测模式设计

在小卫星发射前需要执行一些特定指令集,例如需要擦除星务主机 BootLoader 的程序以防止星务计算机软件在轨被更改的风险。在本模式中,用户事先通过配置文件或者界面配置好的射前指令,通过选择射前指令,在用户经过发送确认后,射前指令通过 RS422 接口发送至小卫星上设备,由小卫星上设备完成射前指令的执行,最终完成小卫星发射前状态的配置工作。

### 3.4 日志管理模块设计

日志管理模块主要对软件所有的操作时间、操作内容、操作结果和操作人员记录,并对操作结果进行提示,

如有错误则进行报警提示,所有日志信息存储于日志文件中,便于后续日志查询。进行报警提示时高亮显示警告日志信息或错误日志信息。

### 3.5 数据管理模块设计

数据管理模块主要负责数据管理相关操作,包括界面配置、指令配置、遥测配置、数据记录和配置文件管理等。

界面配置用于调用用户界面,并对用户定制化的界面信息进行保存,以保证下次软件启动时符合用户使用习惯。指令配置用于编辑配置发送指令数据,这些指令也可用于巡检序列中。遥测配置用于对接收的 422 数据和模拟量数据进行解析配置。数据记录用于记录所有接收的遥测数据和发送的指令数据,并存入实时数据库中,便于日后查询。配置文件管理用于维护阈值表、增量表、任务指令表、串口配置参数和重要参数监视配置等信息,以 xml 文件的形式存储。

## 4 系统验证

为了验证便携式快速巡检系统功能的正确性和有效性,针对某型小卫星搭建了相应的测试验证系统,该验证系统主要由便携式快速巡检系统、某型小卫星(被测对象)和连接线缆组成,验证系统各部分接口关系如图 5 所示。经验证测试结果表明,便携式快速巡检系统能够满足小卫星日常巡检的功能性能需求。

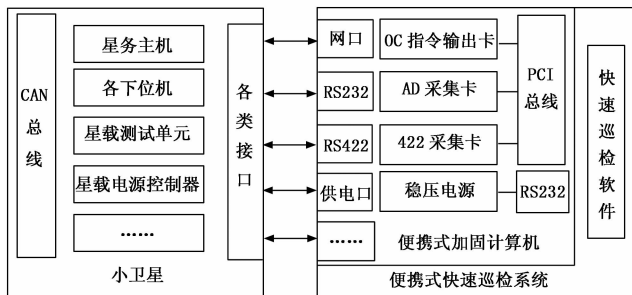


图 5 验证系统组成图

此外,为了体现便携式快速巡检系统的优势,分别采用便携式快速巡检系统和传统测试方法对同一小卫星进行巡检,并从巡检时间和投入人员两个维度进行比较,图 6 给出了两种巡检方法的对比结果。由验证测试对比结果可知,在同等巡检质量要求下,对于单颗小卫星巡检,快速巡检系统约需 1 人巡检 2 小时,而传统测试方法约需 2 人 2 天。对于批量化小卫星巡检,快速巡检系统优势将更加明显,具有广阔的应用前景。

## 5 结束语

在充分研究批量化小卫星快速巡检需求的基础上,提出了一种面向批量化小卫星快速巡检的多模式巡检方法,设计并开发了针对小卫星多种巡检模式下的便携式快速巡检系统。重点介绍了系统的总体设计、硬件以及软件的设计与实现,最后通过搭建验证系统,验证了面向批量化小卫

(下转第 178 页)