

## 一种便携式微纳卫星姿控测试系统

苏振华<sup>1</sup> 齐晶<sup>2</sup> 张少坡<sup>1</sup>

(1. 航天东方红卫星有限公司 北京 100094; 2. 中国空间技术研究院 北京 100094)

**摘要:**通过分析微纳卫星姿控系统的测试特点,设计了一种便携式微纳卫星姿控测试系统。该系统采用标准的PXI总线,具有标准的内外接口、集成度高、便携性强的特点。依据测试系统工作原理,从硬件结构和软件架构两方面进行了系统设计。根据星地接口特点,系统硬件在满足测试需求的基础上,采用功能密度高的标准、通用货架产品来构建系统。软件按照方便易用、灵活配置的原则,采用模块化的方式实现,使系统具有良好的人机交互界面。系统研发完成后,在型号测试中进行了实验验证,结果表明该系统较以往设备具有更好的集成度和便携性。

**关键词:**微纳卫星;姿控;测试;集成化;通用化;标准化

**中图分类号:** V441 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.5030

## Research on miniaturization test system of MN satellite AOCS

Su Zhenhua<sup>1</sup> Qi Jing<sup>2</sup> Zhang Shaopo<sup>1</sup>

(1. DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100094, China; 2. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** In view of the test requirements of Micro-nano attitude and orbit control subsystem (MN AOCS), this article in accordance with the principle of integration, generalization and standardization of design, puts forward a set of attitude control test system based on PXI bus. The system will integrate a variety of types of different modules scattered function into a set of equipment, realize the integration, extendability, and syntheses of the system. The experiment proved that the test system can meet the test requirements of MN AOCS.

**Keywords:** MN satellite; AOCS; test; integrated; generalized; standardized

### 0 引言

在机械工艺、电子技术、材料科学、数据处理等领域的发展促进下,卫星的微小化技术取得了长足的进步,使其应用范围更加广泛。微纳卫星具有尺寸小、能耗低、研制费用低、搭载灵活的特点,促使其取得了长足的发展。姿控分系统作为星上最重要的分系统之一,主要用于实现卫星姿态和轨道控制功能,其不仅组成部件多、内外部间信息流复杂,而且具有非常复杂的控制模式,相较于卫星其他分系统具有较大的研制难度。因此,在研制过程中,必须对姿控分系统进行充分的地面实验验证和详细的测试等工作,以便保证其实际工作过程中的指标达到设计要求,从而有力地保证整星任务的成功<sup>[1-2]</sup>。

在测试系统的设计研发过程,基本的思想是:1)要保证系统可靠、耐用,需要继承现有的成熟技术;2)为了满足具体测试任务的相应测试需求以及为测试任务提供一种

灵活方便的先进测试手段,在保证测试系统可靠的基础上多采用一些先进的技术。同时,为了保证测试系统具有标准的接口、功能集成度高以及能够方便地进行功能扩展和升级,采用通用化的标准模块来设计测试系统的硬件结构以满足卫星测试过程中的不同需求,同时在软件开发过程中,保证测试系统具有友好的人机界面以及后续功能拓展的二次软件开发能力<sup>[3-15]</sup>。

通过分析微纳卫星姿控系统的测试特点,设计了一种便携式微纳卫星姿控测试系统。该系统采用标准的PXI总线,能够很好地满足姿控系统的测试需求,具有标准的内外接口、集成度高、便携性强的特点。

### 1 测试系统设计

#### 1.1 测试系统的原理

在姿控分系统的地面测试过程中,需要完成内外接口、部件性能和极性、闭环功能等测试,姿控地面测试系统

需要支撑以上姿控分系统的测试。其具体的测试工作原理如下：地面采用半物理仿真的方法模拟卫星的动力学环境（即利用数学模型模拟动力学环境），尽量将姿控分系统的部件产品接入到仿真测试的回路；执行部件的输出信号经过处理后输入到动力学仿真计算机，然后仿真计算机利用动力学模型进行卫星姿态和轨道动力学的实时运算（模型综合考虑各种干扰力矩），并提供卫星运动参数（姿态角

度、姿态角速度、轨道六根数等信息）给敏感器信号源或信号模拟器，模拟器为各个敏感器提供对应的激励信号。

测试系统组成如图 1 所示，包括以下功能模块：综合控制模块负责进行测试过程控制和实施；动力学仿真模块用于进行各类动力学模型的运算以及完成各类接口的通信；星务模拟器模拟测试过程中的指令注入和遥测轮询以及 GPS 数据；数据管理模块进行各类数据的分析处理。

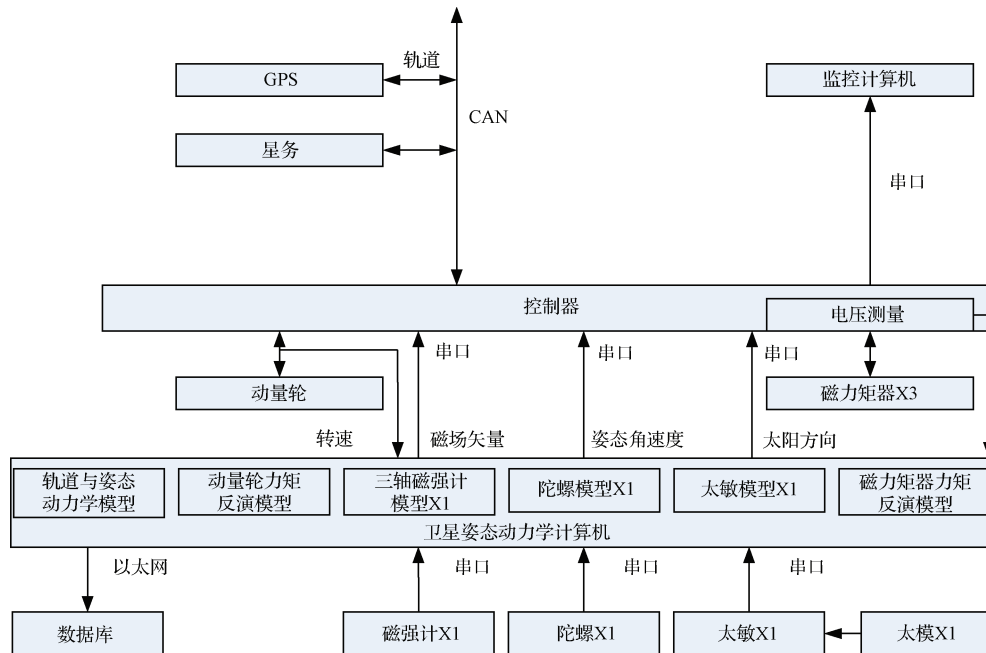


图 1 测试系统组成示意图

### 1.2 硬件设计

为了满足微纳卫星姿控系统的测试需求，测试系统需要与各部件通信从而进行数据交换。本文对其星上各类部件的测试接口进行梳理和归类，利用工业现货产品实现星上要求的标准接口通信。同时，地面测试系统需要完成动力学仿真、数据处理及相应分系统模拟的功能。在各个功能模块的实现过程中，采用基于 PXI 总线标准的高密度功能办卡实现实时仿真计算、功能集中。基于各类功能板卡构建系统的核心功能模块如图 2 所示，由电气连接解决方案、综合控制计算机、动力学仿真计算机等 3 个部分组成。

动力学仿真计算机作为系统的核心功能模块，其对实时性有着较高的要求。因此，系统采用运算速度达 ms 级的控制器作为系统主控计算机，以实现实时计算。同时，主控计算机作为其他功能模块的基础平台，为其提供稳定的系统运行环境。根据星地接口所需的类型和数量，系统采用集中功能板卡分散实现的方式，所有数据交换均依靠 PXI 总线实现。机箱作为硬件功能板卡的支撑结构，要提供结构支撑、标准的 PXI 总线槽、系统能源、热力磁环境保护、标准的接口等；同时，在设计时要保证其便携性，方便设备的转运。在以 PXI 总线为架构的测试系统中，测量设

备、仪器仪表和嵌入式计算机均按照标准的 PXI 总线插卡的形式集中在 PXI 总线上；因而对测试系统进行升级或维护时，只需针对相应的 PXI 总线模块进行维护或更换，而整个系统无需进行改动。

硬件结构在对各类信号进行归一化统计的基础上，测试系统中的各功能模块均采用通用板卡来实现，对外接口模块采用标准的通信协议；相较于以往的设计方案，该系统不仅具备统一、简化的对外测试接口，而且具备很好的可拓展性和可维护性；能够满足系统具有标准的内外接口、集成度高、便携性强的设计目标。

### 1.3 软件设计

在进行系统软件开发的过程中，为了提高软件的可靠性和功能可扩展性，采用模块化的思想，将系统设计以下功能模块进行实现。

1) 第一类模块为实时仿真运算模块。实时仿真运算模块对系统的实时运算性能有较高的要求，其主要功能是完成各种模型的实时计算，包括：姿态动力学模型的计算、轨道运动学模型的计算、以及涉及到的各种坐标系的转换计算等。

为了能够更加真实地模拟卫星实际运行的动力学场景，提高半物理仿真测试系统的真实性和准确性，实时计

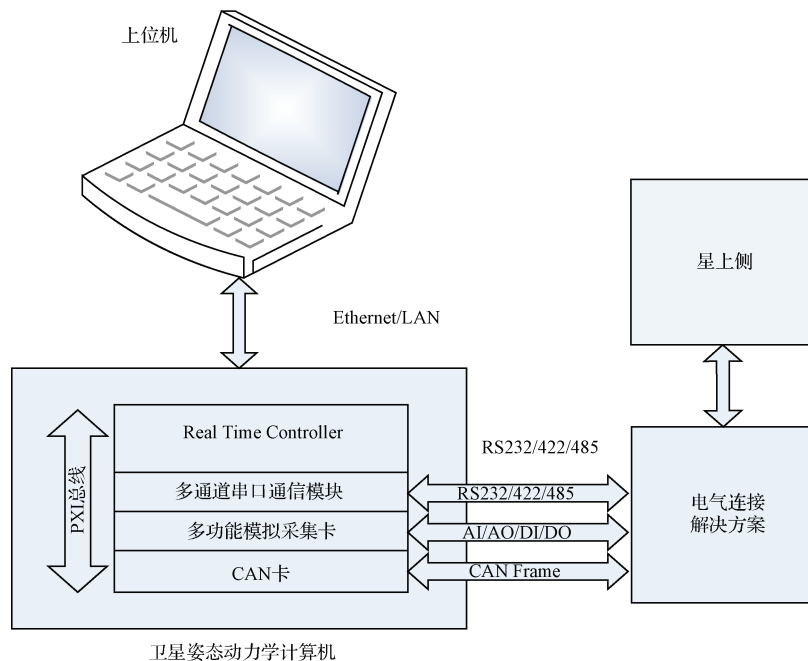


图2 系统硬件平台示意图

算模块要求具有非常严格的实时性。由于动力学仿真运算的周期最小要求 1 ms,因此要求系统所使用的操作系统的运算能力达到  $\mu\text{s}$  级别。本文所设计的测试系统将使用实时性较好的 VxWorks 操作系统来支撑动力学模型的仿真运算,以达到姿控测试系统的实时性设计目标。同时,在动力学模型仿真计算模块的开发过程中,要尽量提高软件的复用性(复用在全数字仿真过程中, Simulink 等工具仿真生成的一些动力学模型),避免二次开发,节省人力物力。

2)第二类模块为接口通信模块,该系统中具有较多种类的硬件接口,接口通信模块不仅需要完成对硬件接口的读写操作,而且需要完成通信数据的滤波,以过滤有效数据中的杂波;该模块功能不需要实时完成,一般要求几百 ms。比如动力学仿真计算机中进行数据通信的功能模块,其需要对各类功能板卡进行读写操作,要求具有几百 ms 的计算周期即可。

3)第3类模块为辅助功能模块。该功能模块主要包括:指令的发送、辅助数据的广播、测试数据的存储以及处理显示等功能,对实时性没有要求。且该类功能模块的开发过程不依赖于星上的测试项目和内容,使其具有良好的通用性;基于标准的 TCP/IP 通信协议,具有较高的扩展能力以及和其他工具软件的兼容性。

在进行硬件模块的开发实现过程中,要尽量使用标准的板卡和设备来实现所设计的功能。测试系统通用化、模块化的设计思想使得该系统通过不同模块的组合能够满足不同姿控系统和不同状态下的测试需求,达到软件的继承性和可重复性利用。

动力学仿真计算模块、综合控制计模块和数据存储显

示模块之间的相互关系如图3所示。其中,综合控制计算机与动力学仿真计算机以上下位机的模式工作。

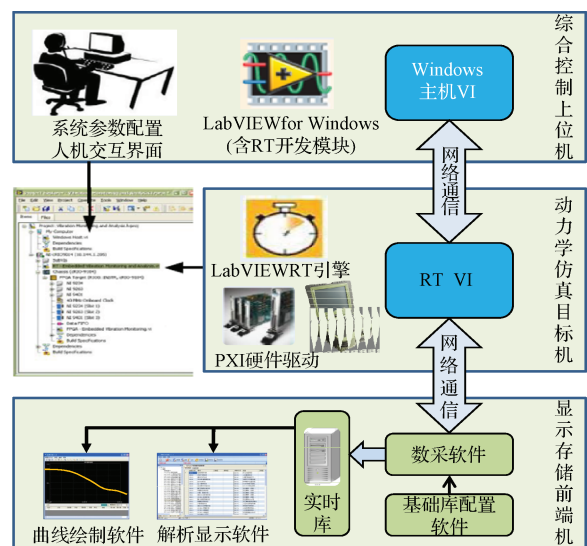


图3 软件架构示意图

综合控制上位机作为测试系统软件的开发界面,装有 LabVIEW 开发环境以及 RT 开发。RT 模块的主要作用:将在 LabVIEW 环境中开发的应用 VI 程序编译并下装到 RT 实时运行环境中。同时,作为上位机,进行动力学仿真系统参数的配置及测试策略调度和控制。

动力学仿真计算机上运行 LabVIEW RT 实时操作系统,其具有极强的实时性,能为动力学模型 VI 程序提供  $\mu\text{m}$  级的运算支撑能力。同时,其还负责各类 PXI 板卡的硬件驱动。

上下位机按照标准的 TCP/IP 通信协议进行数据传输,包括:实时仿真数据、不同的测试控制策略 VI 程序和系统参数配置等。

数据显示存储模块作为测试数据的处理中心,需要完成:测试数据的实时显示、存储、查询以及分析处理。

## 2 实验验证

在完成测试系统原理样机的研制后,将原理样机和微纳卫星姿控分系统通过地面测试电缆按照图 1 进行连接,进行姿控测试系统的实验验证。测试过程中,完全按照姿控系统的测试需求、测试项目和内容进行,同时对测试系统的各个软件模块进行考核。在实验的过程中,为了对该测试系统的性能指标进行比对验证,本文将该测试系统获得的动力学仿真等测试数据和全数字仿真下获得的动力学仿真结果转换到同一坐标系下进行对比分析。结果表明该系统的功能能够满足姿控分系统的测试工程需求。

在验证测试系统满足工程应用需求的基础上,本文将本系统和传统的姿控测试系统进行了比较,比较项目如表 1 所示。

表 1 本系统与传统测试系统的比较

序号	项目	本测试系统	传统测试系统
1	功能	满足工程需求	满足工程需求
2	标准化	较好	较差
3	集中度	集中	分散
4	便携性	较好	较差
5	通用性	较好	较差
6	可扩展性	较好	较差
7	人机界面	友好	不友好

通过比较可以得知,本系统在标准的 PXI 总线基础上,通过选择标准化的板卡硬件,实现了测试设备功能的集中化。测试系统功能模块的集中化改变了以往测试设备分散的状况,使其具有便携性。相较于以往的测试系统,标准化的设计使得本系统的通用性和可扩展性更强。同时在系统软件的开发过程中,注重测试系统的可操作性,为操作人员提供了良好的人机交互界面。

## 3 结论

本文设计了一种便携式微纳卫星姿控测试系统。该系统采用标准的 PXI 总线,具有标准的内外接口、集成度高、便携性强的特点。系统由上下位机组成,其硬件采用标准的通用货架产品,软件以功能模块实现。将以往测试系统中分散功能模块集中化,采用通用的工业板卡实现。

实验结果表明,该系统能够满足微纳卫星姿控系统的测试工程需求,改变了以往测试设备分散的状况,使其具有便携性。

## 参考文献

- [1] 颜灵伟,张善从.可重构的卫星姿控仿真测试系统设计[J].计算机工程,2010,36(8):236-238.
- [2] 董恺琛,赵开春,赵鹏飞,等.微纳卫星姿控软件实时测试系统[J].光学精密工程,2013,21(8):2008-2015.
- [3] 张洪光.航天器供配电测试设备硬件模块化、软件配置化设计思路[J].航天器工程,2010,19(1):72-76.
- [4] 朱小丰.皮卫星姿控系统的敏感器和执行机构电路设计[D].杭州:浙江大学,2011.
- [5] 彭瑞.基于 PXI\_VxWorks 的卫星姿轨控仿真测试系统的设计与实现[D].上海:上海交通大学,2011.
- [6] 余亚敏,刘振刚,徐家国.萤火一号火星探测器姿控分系统测试设备研究[J].上海航天,2013,30(4):236-239.
- [7] 高华宇,董云峰.基于气浮台的小卫星姿态控制全物理仿真实验系统[J].计算机测量与控制,2009,17(6):1153-1156.
- [8] 彭瑞,柏嘉翔.卫星姿轨控分系统通用化半物理仿真测试系统研究[J].数字技术与应用,2011(9):58-59,61.
- [9] 易进.小卫星姿控系统设备模拟器研制[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [10] 刘斌,屈卫东,李英波.卫星姿轨控分系统仿真测试平台的设计与实现[J].自动化博览,2010,27(8):94-96.
- [11] 周俊杰,何攀峰.基于 VxWorks 的实时多任务软件框架设计[J].国外电子测量技术,2012,31(4):80-82.
- [12] 贺庚贤,李俊霖,宁飞.星务仿真系统高精度时标设计[J].电子测量与仪器学报,2014,28(8):827-835.
- [13] 陈志,何玉珠.某导弹半实物仿真测试系统微型化的研究[J].电子测量技术,2014,37(2):13-16.
- [14] 张丽梅,潘海飞,吴清源.基于 LabVIEW 和 PXI 设计通用仪器仪表综合检定系统[J].中国测试,2010,36(2):70-73.
- [15] 李进进,苏理,段静,等.基于 PXI 和 CompactRIO 平台构建列车传动控制单元测试环境[J].仪器仪表学报,2013,34(增刊1):106-112.

## 作者简介

苏振华,1987 年出生,硕士,工程师,主要研究方向为小卫星综合测试工作。

E-mail:suzhenhua1@163.com