

# 适用于多星并行测试的应答机设计与验证\*

王 淦, 窦 骄, 纪文章, 何 钊, 谢英泽  
(航天东方红卫星有限公司 北京 100094)

**摘要:** 为了提高星座的测试效率、降低测试成本, 提出一种适合多星并行测试的应答机设计方法, 通过地面测试设备和星上测控应答机复用星上的遥控 RS422 接口、遥测 RS422 接口的方式, 突破了多星并行测试的瓶颈。新方法已经成功应用于某卫星星座的并行测试, 降低了测试成本、提高了测试效率、缩短了星座的测试周期。

**关键词:** 星座; 并行测试; 应答机; RS422

中图分类号: V44 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2020)03-0042-06

## The transponder design method and validation applicable to multi-satellites parallel testing

WANG Gan, DOU Jiao, JI Wenzhang, HE Shan, XIE Yingze  
(DFH Satellite Co., Ltd, Beijing 100094, China)

**Abstract:** In this paper, a new transponder design method suitable for multi-satellites parallel testing is proposed to improve the test efficiency and to reduce the test cost. The bottleneck problem of multi-satellites parallel test is solved by the ground testing equipment and transponder using the same interface of tele-command RS422 and the interface of telemetry RS422. It has been successfully applied to the parallel testing of a constellation, which reduces the testing cost, improves the testing efficiency and shortens the testing cycle of the constellation.

**Key words:** Multi-satellites; Parallel testing; Transponder; RS422

## 引 言

自 20 世纪 80 年代末以来, 小卫星从最初的起步阶段, 经过发展阶段, 发展到现在的應用阶段。随着小卫星技术的不断成熟, 以及小卫星单星功能和性能的大幅提升, 使小卫星具备装备化、实用化的特点<sup>[1]</sup>。同时, 由于小卫星体积小、质量轻、可提供的能源有限, 且单星载荷需要高度集成化<sup>[2]</sup>, 故此效能发挥受限, 使得小卫星已经从单颗卫星任务发展成为集群、编队和巨型星座<sup>[3]</sup>任务, 如鸿雁星座、九天卫星物联网、OneWeb 星座、StarLink 计划等。

随着低成本、研制周期短的小卫星星座以及编队卫星的发展, 依托于传统的卫星测试方式已经无法满足“一箭多星”、卫星组网等批量被测卫星的测试需求, 为了有效降低成本、减少测试时间、提升测试效率, 卫星批产化、并行化测试技术逐渐受到青睐<sup>[4,5]</sup>。本文从应答机的功能和应答机在整星测试中起到的作用出发, 总结了传统卫星测试中应答机的测试方法以及局限性, 提出一种通过地面测试设备和星上应答机复用星上的遥控 RS422 接口、遥测 RS422 接口的方式实现多星并行测试的方法, 突破了多星并行测试的瓶颈, 并成功应用于某星座卫星的并行测试, 提升了测试效率。

## 1 应答机的设计

### 1.1 功能

测控应答机与地面测控系统、星务系统、天线系统一起配合完成星地测控任务, 主要具有如下功能<sup>[6,7]</sup>:

\*基金项目: 装备预先研究合同(30508020501)

收稿日期: 2020-05-14

- ① 向地面测控站发射下行载波多普勒跟踪信标，引导地面站捕获卫星，同时将卫星遥测信息下传地面；
- ② 接收地面测控站发送的上行遥控信号，完成解调，并对解调后的遥控信号进行处理，产生上行遥控数据并发送给星务系统；
- ③ 与地面测控系统配合完成卫星的测距、测速功能；
- ④ 完成应答机自身遥测信息的采集，并发送给星务系统处理；同时，接收来自星务系统的指令信息，对自身工作状态进行控制。

### 1.2 方案介绍

测控应答机方案如图 1 所示<sup>[8,9]</sup>。

测控应答机由双工器、接收通道、发射通道和基带模块组成。其中，双工器使接收信号和发射信号隔离，保证接收通道、发射通道同时正常工作。

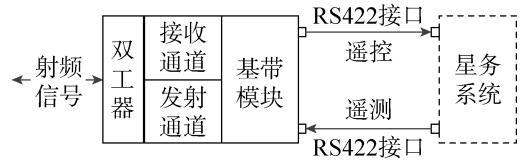


图 1 测控应答机方案

Fig. 1 Diagram of transponder scheme

测控应答机在接收、解析上行遥控数据时，首先，通过双工器，接收通道对射频信号进行变频、放大、滤波等处理后输出中频信号给基带模块；然后，基带模块进行同步，并解析产生遥控数据；最后，基带模块通过 RS422 接口输出给星务系统。其中，应答机是遥控数据的发送端，RS422 接口采用 DS26LV31ATM 芯片，采用三线（时钟、数据和门控）制进行传输。

测控应答机在接收、发射下行遥测数据时，首先，通过 RS422 接口从星务系统接收遥测数据；然后，对遥测数据进行调制、变频、放大等处理形成射频信号；最后，测控应答机将射频信号发送到地面测控系统。其中，应答机是遥测数据的接收端，RS422 接口采用 DS26LV32ATM 芯片，采用二线（时钟和数据）制进行传输。

测控应答机在接收、发射下行遥测数据时，首先，通过 RS422 接口从星务系统接收遥测数据；然后，对遥测数据进行调制、变频、放大等处理形成射频信号；最后，测控应答机将射频信号发送到地面测控系统。其中，应答机是遥测数据的接收端，RS422 接口采用 DS26LV32ATM 芯片，采用二线（时钟和数据）制进行传输。

### 1.3 整星测试中的作用

根据测控应答机的功能可知，测控应答机在整星测试阶段主要完成两个方面的任务：

- ① 功能和性能测试：测控应答机作为整星的重要单机之一，其功能和性能指标测试是整星测试的一部分；
- ② 保通道功能：测控应答机是星地通信的唯一通道，在其它系统测试过程中，测控应答机要保证通道正常，辅助整星其它系统遥测的确认和指令的控制。

### 1.4 传统应答机的局限性

在基于传统测控应答机设计的整星测试中，测控应答机是进行功能、性能测试或者整星保通道功能测试(即配合整星其它系统进行测试)过程中始终占用地面测试系统的一体化测控设备，如图 2 所示。多星并行测试时只能依靠单台多通道一体化测控设备或者多台单通道一体化测控设备实现，无法做到测试效率和测试成本的最优化。

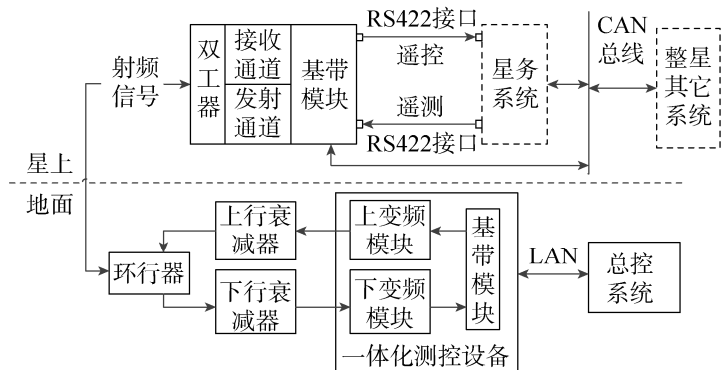


图 2 整星测试

Fig. 2 Diagram of satellite testing

## 2 并行测试系统设计

### 2.1 设计思路

并行测试系统是为了解决星座中多颗卫星同时进行测试的问题，因此系统需要同时具备多颗卫星的通信信道。相对于单颗卫星的测试系统而言，并行测试系统需要解决如下问题：

- ① 具备应答机功能和性能测试条件；

- ② 具备同时提供多星的上行遥控通道;
- ③ 具备同时提供多星的下行遥测通道;
- ④ 避免多颗卫星同时测试时互相干扰。

在星座设计中多颗卫星的测控应答机具有功能一致、性能统一、设计状态一致性良好等特点, 所以, 对任意一台测控应答机的测试结果可以在整个星座的所有测控应答机中进行举一反三, 测试数据共用。

充分利用测控应答机在整星中的功能、性能测试和保通道测试这两个功能的特点, 并结合传统测控应答机的设计方案, 地面测控系统可以使用一套传统的一体化测控设备对多颗卫星的测控应答机的功能、性能进行轮流测试; 通过对星上测控应答机与星务系统间的 RS422 接口进行复用的方式, 实现多条遥测和遥控通道, 保证多星并行测试过程中保通道的功能。同时, 复用 RS422 接口的方式需要地面测控系统配置具有 RS422 收发功能和网口传输功能的 PXI 板卡, PXI 板卡通过网口与总控系统连接, 因此地面测控系统的后端总控系统可以完全继承, 不需做任何改动。

### 2.2 应答机的设计更改

RS422 发送芯片 DS26LV31ATM 的工作模式受到 EN 和 EN\*管脚的控制, 其真值表如表 1 所示。

由真值表可知, 当 EN 管脚为低电平、EN\*管脚为高电平时, 输出引脚为三态模式, 且输出模式不受输入引脚影响。

在传统测控应答机设计中, 测控应答机与星务系统之间 RS422 接口的 EN 和 EN\*通过上拉方式, 使两个管脚一直为高电平, 因此 RS422 芯片为一直有效状态。

测控应答机与星务系统的遥控 RS422 接口, 当门控信号有效时, 时钟信号输出; 当门控信号无效时, 时钟信号不输出。时钟信号的上升沿与数据变化对齐, 下降沿与数据位中间对齐, 要求在时钟下降沿时取数。数据有效时门控有效, 门控为低电平有效。波形图如图 3 所示, 其中, 符号 “” 代表省略的传输比特。

测控应答机与星务系统的遥测 RS422 接口, 无门控信号, 时钟信号一直发送。其上升沿与数据变化对齐, 下降沿与数据位中间对齐, 下降沿取数。波形图如图 4 所示。

通过对星上测控应答机与星务系统间的 RS422 接口进行复用, 可以提供另外一条星地测控通道, 保证整星的保通道测试, 如图 5 所示。其中, 星地测控通道 1 可以完成测控应答机的功能、性能测试和整星保通道测试; 星地测控通道 2 仅可以完成整星保通道测试。

测控应答机和地面测控系统 (PXI 板卡 RS422 端口) 作为遥控数据的发送端, 都可以发送遥控数据给星务系统。地面测控系统与星上测控应答机通

表 1 RS422 真值表

Table 1 RS422 true table

使能		输入		输出
EN 管脚	EN*管脚	DI 管脚	DO+管脚	DO-管脚
低	高	不影响	三态	三态
其他情况		低	低	高
		高	高	低

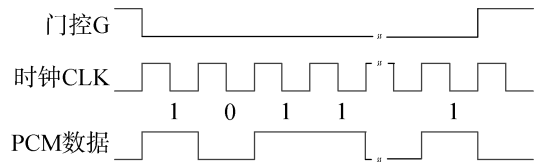


图 3 遥控数据传输时序图

Fig. 3 Time sequence diagram of tele-command transmission

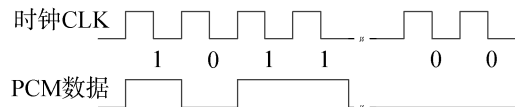


图 4 遥测数据传输时序图

Fig. 4 Time sequence diagram of telemetry transmission

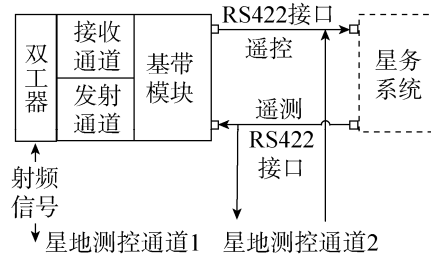


图 5 测控应答机并行测试方案  
Fig. 5 Design diagram of parallel testing scheme for transponder

过“线与”的方式复用 RS422 接口，两个星地测控通道无法同时使用 RS422 接口进行上行遥控数据发送；当两个星地测控通道分时使用星地测控通道时，无效的测控通道的 RS422 接口门控信号为高电平，有效的测控通道的 RS422 接口门控信号需要拉低才能进行正常遥控数据传输，在传统测控应答机中由于“线与”的方式，一个高电平与一个低电平进行线与始终为高电平，因此无法进行数据传输。

根据真值表可知，当设置 EN 管脚为低电平，EN\*管脚为高电平时，无论输入高电平还是低电平，输出都是三态模式。在三态模式下，高电平与三态进行线与为高电平，低电平与三态进行线与为低电平，则其它测控通道便可以通过 RS422 接口进行数据传输。通过将星上测控应答机和地面 PXI 遥控数据的发送 RS422 的 EN 管脚和 EN\*管脚改为可配置，来实现星上测控应答机和地面 PXI 遥控数据发送在三态状态和正常状态下的切换。遥控数据传输波形图如图 6 所示。

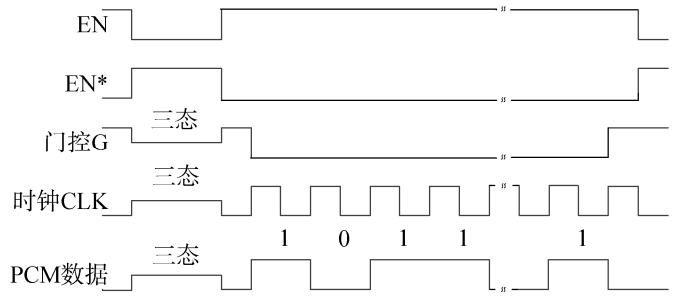


图 6 并行测试中遥控数据传输时序图

Fig. 6 Time sequence diagram of tele-command transmission in parallel testing

测控应答机和地面测控系统作为遥测数据的接收端，均等待星务系统发送遥测数据。遥测数据通过二线 RS422 进行传输，时钟线和数据线在整星测试过程中一直有效。地面测试系统和测控应答机通过采用合理的匹配设计，可以同时接收星务系统通过 RS422 发送来的遥测数据，时序图如图 4 所示。

### 2.3 应答机设计更改后特点

通过更改星上测控应答机的遥控 RS422 接口设计实现整星并行测试的设计方法具备如下特点和优势：

#### ① 功能完善

对测控应答机在整星测试中的两个作用进行分离考虑，地面测控系统可以通过一套一体化测控设备实现测控应答机功能、性能的测试；同时，通过复用 RS422 接口的方式，实现测控应答机的保通道功能，达到测控应答机在整星测试中的作用全覆盖的目的，实现星座的并行测试。

#### ② 低成本

文献[4]和文献[5]中提出通过地面测试系统进行通用化、平台化等方式实现整星并行测试，均需要多套一体化测控设备作为通道接收整星遥测数据或者发送遥控数据，设计中除了需要地面额外的软、硬件开发外还需要多台一体化测控设备，而单台一体化测控设备造价非常高。

相比于文献[4]和文献[5]等以前的并行化设计，通过更改星上测控应答机的方式实现并行化仅需要实现 RS422 接收和网口发送数据的 PXI 板卡的开发以及测控应答机的适应性改造，成本更低。

#### ③ 通用性强

通过更改星上测控应答机的遥控 RS422 接口设计实现整星并行测试的设计方法对传统卫星采用的测控应答机具有良好的通用性，不用区分测控应答机的工作频段、体制等。

#### ④ 可扩展性强

在整星测控应答机的设计保持一致的情况下，星座中每增加一颗卫星仅需要地面测控系统增加一块 PXI 板卡即可实现多星的并行测试。

## 3 并行测试系统的应用

适用于多星并行测试的应答机设计方法已经成功应用于某星座（5 颗卫星）的整星并行测试，完整的星座测试系统如图 7 所示。

星座系统中 5 颗卫星状态完全一样，测控应答机的功能、性能在整星中的作用和设计也完全一样。在星座测试过程中，总控系统可以将开关矩阵切换至 5 颗卫星中的任意一颗卫星(下述以卫星 1 为例)，

使卫星 1 的射频通道与一体化测控设备进行连接,同时总控系统需要设置卫星 1 的 PXI 板卡遥控 RS422 接口为三态模式,此时总控系统可以通过一体化测控设备对应答机的射频性能指标等进行完整测试,也可以通过一体化测控设备给卫星 1 发送遥控数据。一体化测控设备可以将接收并解析的遥测数据,通过千兆以太网发送至数据库和每个遥测显示终端。

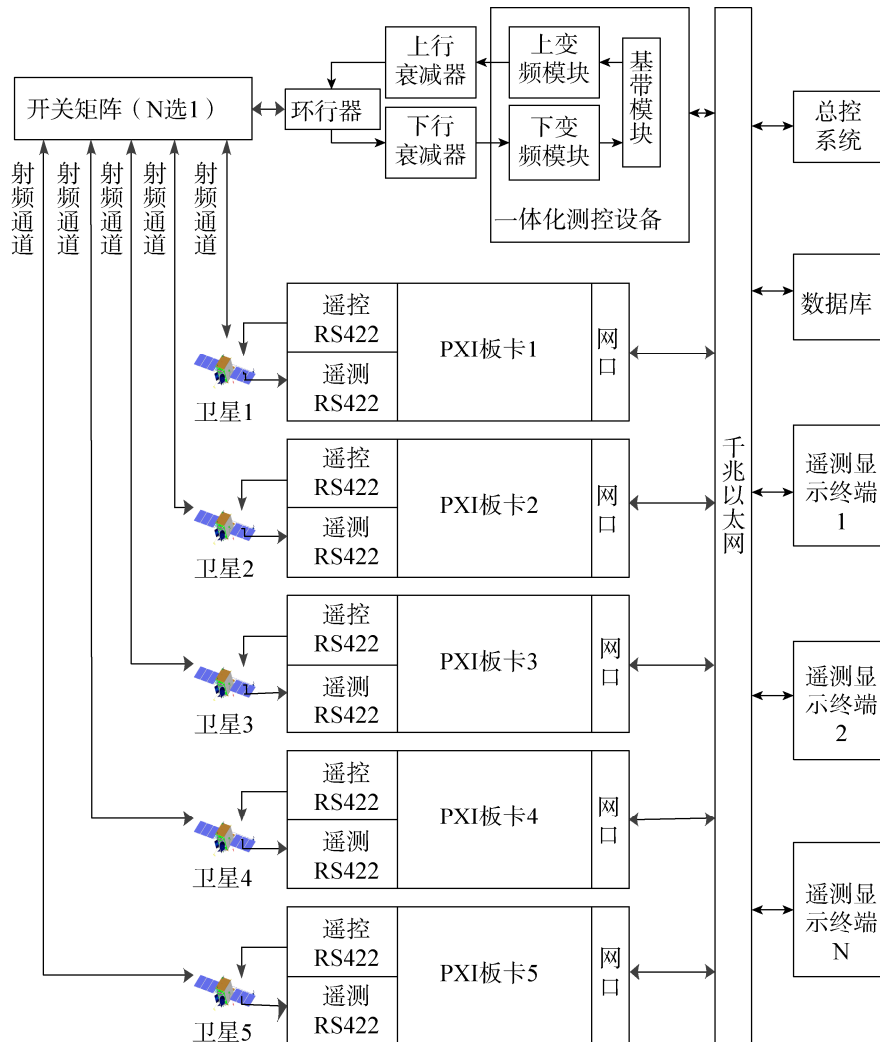


图 7 星座并行测试系统

Fig. 7 Multi-satellites parallel testing

在卫星 1 占用一体化测控设备时,其它四颗卫星可以通过 PXI 板卡的 RS422 接口接收整星遥测数据,发送遥控数据。

目前,通过本文的并行测试方法已经成功完成某卫星星座的初样、正样、环境试验等所有研制阶段测试项目,卫星星座完成发射,在轨运行稳定。

### 4 结束语

针对星座系统设计中卫星数量多、研制周期短、测试任务重等特点,设计并实现了适用于多星并行测试的应答机设计方法。同时,介绍了该应答和设计方法在某星座系统测试中的成功应用,为小规模星座组网测试提供了切实可行的解决方法,为后续大型或巨型星座的自动化测试与并行测试相结合的测试方法奠定了基础。

## 参考文献

- [1] 马定坤, 匡银, 杨新权. 微纳卫星发展现状与趋势[J]. 空间电子技术, 2017, 3: 42–45.  
MA Dingkun, KUANG Yin, YANG Xinquan. Development actual state and trends of nano-satellite[J]. Space Electronic Technology, 2017, 3: 42–45.
- [2] 张明广, 董房, 杨同智. 商业卫星的智能化研制方法研究[J]. 军民两用技术与产品, 2019, 427: 48–52.  
ZHANG Mingguang, DONG Fang, YANG Tongzhi. Research on intelligent development method of commercial satellite[J]. Dual Use Technologies & Products, 2019, 427: 48–52.
- [3] 夏开心. 微纳卫星自主健康状态评估方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
XIA Kaixin. Research on autonomous health state assessment method of micro-satellite[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [4] 李文霁, 曾鸿, 任光杰, 等. 卫星并行测试中测控前端通用化设计[J]. 航天器工程, 2015, 24(6): 129–133.  
LI Wenji, ZENG Hong, REN Guangjie, et al. TT&C front-end universal design for satellite parallel test[J]. Spacecraft Engineering, 2015, 24(6): 129–133.
- [5] 高括, 刘磊, 杨杰锋, 等. 适用于多星并行测试的通用测控地面测试平台设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(1): 1–4.  
GAO Kuo, LIU Lei, YANG Jiefeng, et al. Design and implementation of universal TT&C ground test platform for multi-Satellite concurrent testing[J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(1): 1–4.
- [6] 王松. 测控应答机及皮卫星工程化的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.  
WANG Song. Research on the engineering of TT&C transponder and Pico-satellite[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [7] 朱超逸. 高可靠小型测控应答机的研究与改进[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.  
ZHU Chaoyi. Research and improvement of high reliability micro TT&C transponder[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [8] 于为健. 数字化扩频应答机基带设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.  
YU Weijian. Design and implementation of baseband for digital spread-spectrum transponder[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.
- [9] 石雷, 熊亮, 宁金枝, 等. 应用于深空探测的小卫星测控系统方案研究[J]. 航天器工程, 2016, 25(6): 81–85.  
SHI Lei, XIONG Liang, NING Jinzhi, et al. Research on TT&C scheme of small satellite applied to deep space exploration[J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(6): 81–85.

## [作者简介]

- 王 淦 1988年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航天器通信系统设计。  
窦 骄 1978年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为航天器通信系统设计。  
纪文章 1975年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向 GPS 导航。  
何 钊 1985年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为航天器通信系统设计。  
谢英泽 1993年生, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为航天器通信系统设计。