

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.08.004

# 运载火箭控制系统信号综合测试方法

程龙<sup>1</sup>, 姚静波<sup>1</sup>, 解维奇<sup>1</sup>, 田建宇<sup>2</sup>

(1. 中国人民解放军装备学院航天装备系, 北京 101416; 2. 北京航天自动控制研究所, 北京 100854)

**摘要:** 针对传统测试设备的不足, 为满足新型运载火箭控制系统测试的需求, 对控制系统信号的综合测试方法进行的研究。以标准化、模块化为目标对软件进行总体设计, 对综合测试系统的功能结构和运行方式进行描述, 采用软件工程方法对系统运行的信息流进行归纳与分析, 确定各类信号的采集方案, 提出多路信号的协同采集与处理方法。应用结果表明: 系统性能稳定, 功能集成度高, 能有效提高测试的效率和信息化水平。

**关键词:** 运载火箭; 控制系统; 地面测试; 数据采集

**中图分类号:** TJ86 **文献标志码:** A

## A Integrated Test Method for Control System of Launch Vehicle

Cheng Long<sup>1</sup>, Yao Jingbo<sup>1</sup>, Xie Weiqi<sup>1</sup>, Tian Jianyu<sup>2</sup>

(1. Dept. of Spaceflight Equipment, Equipment Academy of PLA, Beijing 101416, China;

2. Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China)

**Abstract:** Aiming at the shortcoming of traditional test equipment, and in order to meet the new launch vehicle's demands for control system test, a new method of integrated test for control system signals is studied. Aiming at the standardization and modularization of software, an overall design of software is put forward. The function structure and run mode of the new test system is described. The information flow of system is concluded and analyzed through software engineering method. Acquisition plans of different kinds of signals are determined, and the flow of multiplex signals acquisition is brought forward. The practical application proves that the system has stable performance and high integration level, and the efficiency and informationization level of ground test are enhanced effectively.

**Key words:** launch vehicle; control system; ground test; data acquisition

## 0 引言

由于航天试验任务的特殊性, 其安全性、可靠性一直备受关注。而运载火箭是实施航天试验任务的基础, 也是航天工程中最为复杂的系统之一<sup>[1]</sup>。为保证航天发射任务的成功, 运载火箭在研制过程中和发射前, 必须进行全面而严密的测试工作。

目前, 火箭地面测试系统庞大、重复, 设备及接口种类繁多, 给使用、维护和升级带来了极大不便<sup>[2]</sup>。相比国外先进的运载火箭地面测试系统, 测试效率低和适应能力差<sup>[3]</sup>。而且随着航天事业的发展, 为有效增强测试水平并提高运载火箭可靠性, 人们对测试过程中获取信息的容量要求越来越大, 对信息的综合处理能力要求也越来越高。为解决以上问题, 我国某新型运载火箭在其控制系统的测试过程中将采用标准化设计的信号综合测试系统。运载火箭的控制系统, 承担了从重要功能检查测试到火箭点火发射、从火箭导航测量到制导与姿态控制、从火箭基本飞行控制到保证入轨精度控制等一系列控制功能或任务, 具有指挥控制中枢的主导地位和作用<sup>[4]</sup>。控制系统的测试工作在整个运载火箭测试

过程中显得尤其重要; 因此, 笔者从软件实现的角度对运载火箭控制系统被测信号的综合测试方法进行阐述。

## 1 总体功能模块化

运载火箭的发射控制模式按距离可分为 2 类: 近距离测试发射控制方式和远距离测试发射控制方式<sup>[5]</sup>。目前, 我国发射场均完成了前者向后者的改造; 因此, 信号综合测试系统按照远距离控制方式进行设计, 由前端设备和后端设备组成。前端设备位于发射工位附近, 任务时无人操作, 主要用于各被测信号的接入、隔离调理、采集和发送等; 后端设备则距离前端数公里, 有人员操作, 主要用于控制前端设备, 并接收、处理和分析前端发送来的测试数据。前后端均包括各自的软件系统。航天科技工业系统的应用软件主要包括 4 类: 系统仿真及设计软件、计算机辅助制造软件、地面测试与控制软件以及飞行运行软件<sup>[6]</sup>。本系统软件属于第 3 类。

### 1.1 模块化设计

测试软件标准化和模块化能缩短测试系统开发

收稿日期: 2012-03-26; 修回日期: 2012-04-23

作者简介: 程龙(1981—), 男, 甘肃人, 博士, 讲师, 从事飞行器测试发控、自动控制、系统仿真研究。

周期, 增加系统内部硬件的互换性, 提高扩展和升级能力<sup>[7]</sup>。为满足标准化与模块化要求, 便于软件的移植与重用, 软件采用自顶向下与模块化设计相结合的设计方法, 主要包括文件操作、参数设置、采集显示、数据处理、远控与数据传输 5 个功能模块, 如图 1 所示。

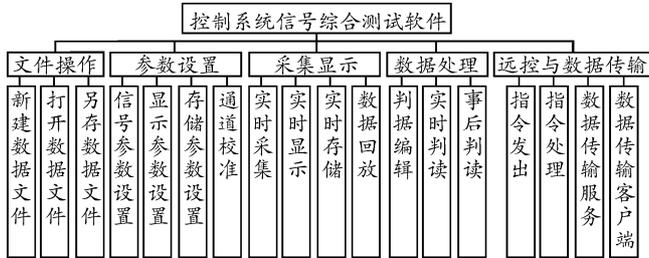


图 1 软件功能的模块化

文件操作：信号采集开始时新建数据文件，为数据存储提供存储路径和文件名；打开历史数据文件进行分析或另存当前打开的数据文件。

参数设置：设置整个数据采集系统的信号参数（包括采样频率、实时判读条件等）、图形显示参数和存储参数（包括数据文件、测试信息文件、系统日志的存储路径等）。另外还提供采集通道的软件校准功能。

采集显示：根据各项参数设置，对所采集的信号进行实时采集、显示、存储与回放。

数据处理：主要完成对信号幅值大小或时序时串的实时判读，并对采集数据进行事后判读，判读所用到的判据可通过判据编辑模块进行修改和新建等操作。

远控与数据传输：完成远控模式运行时前后端设备之间的数据传输和指令控制。

### 1.2 运行模式

软件系统采用模块化设计后，通过不同的功能模块组合可以形成前端采集机和后端控制机的软件，如表 1 所示。

位于后端的控制机是正式任务时操作手的直接操作对象，其软件需包含上面提到的各功能模块所含有子模块的绝大部分。

位于前端的采集机软件在远程工作时必需的子模块有：新建数据文件、信号参数设置、存储参数设置、实时采集、实时存储、指令处理和数据传输服务。但考虑到前端调试工作的需要，采集机软件可能还需要其他诸如显示、判读等功能，因此将采集机的工作方式设计为 3 种模式：远程静默模式、

远程正常模式和本地调试模式。远程静默模式占用资源小，适用于正式任务过程，它包含上面提到的前端所必需的几个子模块；远程正常模式则包含几乎所有功能模块，但需要后端控制，适用于前后端设备的配合调试工作；本地调试模式包含除了网络传输外的所有功能模块，不需后端控制，适用于本地单机调试以及系统的采集通道校准。

表 1 软件功能模块组合

功能模块	控制机	采集机		
		远程静默	远程正常	本地调试
文件操作	新建数据文件	√	√	√
	打开数据文件	√	√	√
	另存数据文件	√	√	√
参数设置	信号参数设置	√	√	√
	显示参数设置	√	√	√
	存储参数设置	√	√	√
	通道校准	√	√	√
采集显示	实时采集	√	√	√
	实时显示	√	√	√
	实时存储	√	√	√
	数据回放	√	√	√
远控与数据传输	指令发出	√	√	√
	指令处理	√	√	√
数据传输	数据传输服务	√	√	√
	数据传输客户端	√	√	√

在软件开发过程中，各版本的软件通过预编译参数，控制不同功能组合，由一个工程编译生成。这样就复用了公用功能，使软件的升级和维护变得简单。另外，还为今后的多型号软件项目的重用奠定了基础。

## 2 信息流

软件功能结构确定后，需对系统运行时的指令、数据等信息流向进行梳理与规划。

图 2 显示了系统总体的信息流程。后端用户通过远程控制操作，控制前端系统对箭上信号进行采集、传输，并通过后端的各项指令完成数据的显示、回放和判读等操作。在日常的设备调试过程中，前端也可以存在前端用户，直接对前端系统进行操作。在正常的测试过程中，操作人员只在后端进行远程的控制。

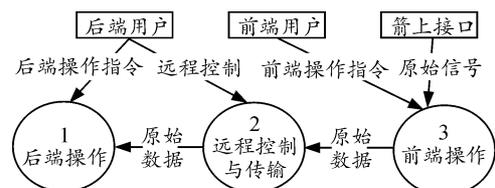


图 2 系统总体数据流程图

后端操作的数据流程图如图 3 所示，其中包含了

后端多种操作过程的信息流程(对应图 2 中的子系统 1), 为清晰起见, 将它们分别列出:

1) 正常测试过程的数据流。远程客户端将接收到的前端原始数据同时向 3 个方向传输。第一是将原始数据进行转换后, 按照用户的显示设置和信号通道特点, 进行数据的显示; 第二是将原始数据送至数据的实时判读模块, 进行超差监测; 第三是按照用户指定的存储参数, 进行数据存盘。

2) 数据回放过程的数据流。后端用户通过文件操作将数据文件还原为原始数据, 然后原始数据进行转换后, 按照用户的显示设置和信号通道特点, 进行数据的显示。

3) 事后数据判读过程的数据流。后端用户通过文件操作将数据文件还原为原始数据, 结合相应的判据文件进行事后判读, 判读完成后输出判读结果。

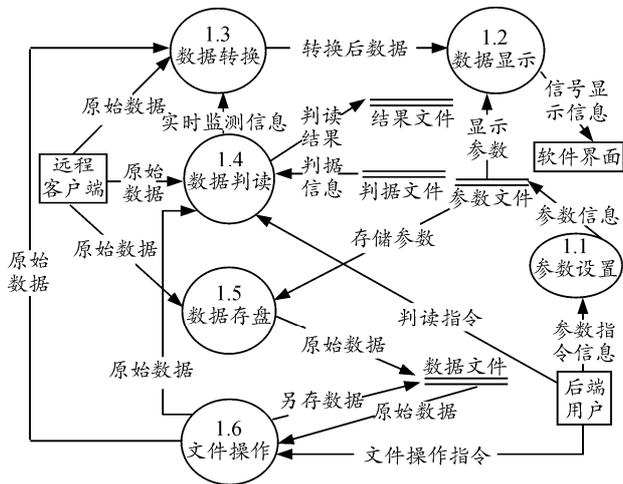


图 3 后端操作数据流图

### 3 信号的采集方案与处理流程

#### 3.1 采集方案

运载火箭被测信号是由箭上测试点通过电缆引出的, 具有信号路数多, 类别庞杂等特点<sup>[8]</sup>。系统需采集的信号可分为 4 类: 模拟电压信号、脉冲计数信号、不带电触点信号和时序开关信号, 共计 700 余路。目前, 运载火箭测试主要采用 VXI 测试设备<sup>[9-10]</sup>。但考虑总线传输速率、高集成度、小型化和自主知识产权等要求, 系统前端采集机采用 cPCI 总线结构, 对各类信号进行采集。

##### 1) 模拟电压信号。

模拟电压信号的采集比较简单, 信号进行隔离调理后再采用 A/D 采集卡对信号进行采集, 将数据传送到计算机中。模拟信号路数较多, 需要 2 块采

集卡同时工作。采集时采用缓冲区半满中断方式, 半满时间设定为 1 s, 用于系统计时。

##### 2) 脉冲计数信号。

系统需要对多路不定时发生的脉冲信号进行计数。这一工作主要由 FPGA 为核心的脉冲计数卡和数字 I/O 卡完成, 脉冲计数卡主要用于对脉冲信号的计数, 并将计数器所累计的脉冲数每 40 ms 锁存一次, 上传至 cPCI 总线, 供数字 I/O 卡读取至计算机。两块卡之间采用握手方式进行数据的传输。

##### 3) 不带电触点信号。

不带电触点信号的采集主要是检测多路触点是否闭合, 采集结果为数字量, 与脉冲计数信号的采集共用脉冲计数卡和数字 I/O 卡。脉冲计数卡对各触点接通/断开状态进行间隔 1 ms 的采样, 每 40 ms 连同脉冲计数结果组帧后发给数字 I/O 卡。

##### 4) 时序开关信号。

为了考核运载火箭飞行软件的可靠性, 在进行正式飞行之前, 要进行大量的模拟飞行试验, 每一次的模拟飞行, 都会产生大量的时序信息<sup>[11]</sup>。飞行时序的测试是控制系统测试工作中的重要组成部分, 目前我国大多采用 VXI 设备实现对飞行时序的采集。但该型火箭需测量的时序开关信号路数多达 500 余路, 采用 VXI 设备会带来体积大、价格昂贵和集成度低等问题, 且订货周期长、无自主知识产权。为此, 笔者以 FPGA 芯片为核心研制了时序综合处理卡, 对时序信号进行状态比对、锁存和组帧, 再发送至数字 I/O 卡, 实现了对时序信号的采集。

### 3.2 采集与处理流程设计

软件在测试过程中要采集大量的多类数据, 在确保数据正确有效的前提下, 还要进行实时加工处理, 进行相应的传输、存储与图形化显示。要求软件设计时充分考虑软件的运行效率, 既要保证数据可靠, 又要及时。这就需要对各任务线程的结构、顺序、优先级、之间的通信关系等进行合理设计。为达到这一目的, 采集处理流程如图 4 所示。

采集处理流程中共需管理 4 块 cPCI 采集卡的工作, 分别分为 4 个线程进行, 总体过程如下:

1) 采集开始后, 首先启动时序中断接收线程, 由于时序信号的到来是非周期不定时的, 因此采用数字 I/O 卡的中断方式进行接收, 在收到数据后立即进行处理、显示等工作, 且该线程在采集开始后一直工作至用户停止采集, 与主线程并列;

2) 随后主线程内依次开启脉冲/触点采集线程

和模拟卡 1 采集线程, 这 2 个线程采用缓冲区半满方式对各自的信号进行采集, 之后返回主线程等待;

3) 主线程内采用缓冲区半满方式对模拟卡 2 进行采集, 之后等待第 2)步中的 2 个线程返回;

4) 脉冲/触点、模拟卡 1、模拟卡 2 均完成一次缓冲区半满采集后, 集中进行存储和显示。

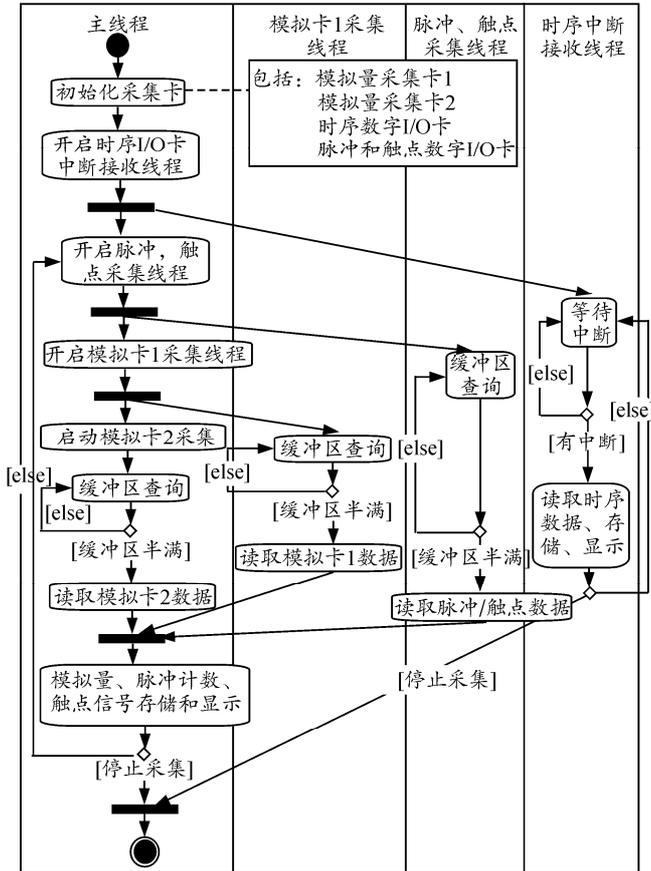


图 4 信息的采集处理流程

可以看出, 脉冲/触点、模拟卡 1、模拟卡 2 的采集是周期性的, 此周期长短取决于它们的缓冲区半满长度。此笔者将缓冲区半满长度均设置为 1 s。系统工作时间, 即采集周期的推进由三者同时控制, 只有脉冲/触点采集卡、模拟卡 1、模拟卡 2 均完成了 1 s 内的采集工作, 才能进行下一周期的采集。

以上采集流程具有如下优点:

1) 仅将模拟卡 2 的采集置于主线程内, 将其他采集卡的采集工作分配于各自的分线程, 有效地避免了各卡采集时的相互干扰和占时冲突。

2) 时序信号采用中断方式接收, 所占软件资源小; 其他信号均以 DMA 传输的缓冲区半满方式进行采集, 将大部分工作分配于采集卡硬件本身, 有效提高了软件运行效率。

3) 由于软件存储、显示等工作与采集卡的缓冲

区填充工作是同时进行的, 因此可保证所有的采集、处理均可在 1 s 内完成, 不会造成数据读取的丢失。

经过测试, 采集模拟信号 128 路(采样频率均为 1 kHz), 脉冲计数/触点信号 50 余路, 时序时申信号 500 余路, 并进行存储、显示等各种处理, 软件对 CPU 占用率不高于 10%(CPU 主板控制器型号为凌华 cPCI-6910)。

### 4 结束语

笔者介绍了运载火箭控制系统信号综合测试软件的总体功能设计与多路信号的协同采集处理方法, 它们是软件开发的核心工作。此外, 为适应新型运载火箭测试工作的需求, 软件还添加了数据实时/事后判读、信息的融合处理和模拟通道的软件校准等功能。除了对功能的要求, 航天试验任务对相关软件的安全性要求也很高, 因此还考虑了各类故障情况的处置, 如网络中连续断传、硬盘空间不足、使用人员的误操作等。

总之, 新的综合测试系统具有自动化、智能化、信息化和标准化等特点, 性能稳定, 功能集成度高, 它的使用将有效提高测试的效率和信息化水平, 增强测试数据的分析利用能力, 推进我国航天发射技术的发展。

### 参考文献:

- [1] 李福昌. 运载火箭工程[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2002: 6.
- [2] 杜诚谦, 潘洁伦. 新一代运载火箭地面测试发控系统一体化设计概述[J]. 航天控制, 2004, 22(2): 50-52.
- [3] 张晨光, 杨华, 杨军. 运载火箭新型地面测试发控系统构想[J]. 宇航学报, 2005, 26(3): 249-252.
- [4] 穆山, 毛万标. 运载火箭控制系统(上)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 2.
- [5] 崔吉俊. 载人航天发射技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 26.
- [6] 黄春平, 侯光明. 载人航天运载火箭系统研制管理[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 197.
- [7] 马永青, 谢平, 陈宜成. 采用统一测试策略的运载火箭测试系统[J]. 航天控制, 2004, 22(4): 87-90.
- [8] 同江, 蔡远文. LXI 总线在运载火箭测试中的应用[J]. 导弹与航天运载技术, 2009(2): 45-47.
- [9] 刘晓燕, 彭勤素. 箭上火工品自动测试方案及实现方法[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(5): 232-234.
- [10] 张磊. 载人航天运载火箭地面测试发射控制系统[J]. 导弹与航天运载技术, 2004(1): 34-37.
- [11] 孙海峰. 基于数据库和三维哈希表的运载火箭飞行时序自动判读技术[J]. 航天控制, 2010(4): 63-65.