

# 基于 VSS 及 SSM 的运载火箭地面测发控网络系统设计

赵心欣, 张宏德, 静广宇, 白冰, 刘苑伊

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

**摘要:** 运载火箭地面测发控网络是传输地面信息的中枢, 对此网络的要求是高效和可靠; 但是, 随着新一代火箭的研制及应用, 对实时性的要求越来越高, 系统内数据量的激增, 现有火箭网络指标满足不了新一代火箭对地面网络的需求; 提出基于 VSS 及 SSM 新技术的地面测发控网络, 通过应用 VSS 技术, 虚拟切换, 简化环路架构及路由协议, 提高网络自愈时间, 通过采用 SSM 技术及组播地址设计, 避免组播无用叠加, 极大地降低对交换机 CPU 资源消耗, 保证交换网络传输正常。

**关键词:** 高可靠; 运载火箭; 地面测发控网络

## VSS and SSM based Ground Test and Control Network System for Launch Vehicle

Zhao Xinxin, Zhang Hongde, Jing Guangyu, Bai Bing, Liu Yuanyi

(Beijing Institute of Aerospace Systems Engineering, Beijing 100076, China)

**Abstract:** The launch vehicle ground test and control network is the backbone for transmitting ground information. The requirements of this network are efficient and reliable. However, with the development and application of a new generation of rockets, the requirements for real-time performance are getting higher and higher, and the amount of data in the system is soaring. The existing rocket network indicators cannot meet the demand of the new generation of rockets for the ground network. Therefore, this paper proposes a ground-based measurement and control network based on VSS and SSM new technology. This network improves the network self-healing time by applying VSS technology, virtual switching, simplifying loop architecture and routing protocol, and adopting SSM technology and multicast address. Designed to avoid multicast useless superposition, greatly reducing the CPU resource consumption of the switch and ensuring normal transmission network transmission.

**Keywords:** high reliability; launch vehicle; ground test and control network system

## 0 引言

火箭地面测发控网络系统是运载火箭的重要组成部分, 承担火箭地面测发控设备网络互连、测试信息共享、状态监视、测试进程控制, 并为测试和发射提供故障诊断。随着网络测控模式的大规模使用, 点火、紧急关机等关键信号均通过网络进行下达, 因此信息传输的可靠性及快速重构能力是系统架构设计的重点。同时, 随着上网设备增多, 一对多的数据发送模式增加, 组播数据越来越大, 对组播数据流的控制也成为网络数据的管理关键。采用必要的技术手段以避免网络故障造成发射中止或推迟, 同时主动减少网络故障自愈过程中的代价, 对于运载火箭测发控网络这样的关键应用具有非常重要的意义<sup>[1-2]</sup>。

本文采用的一种基于 VSS 及 SSM 新技术的高可靠运载火箭地面测发控网络系统设计, 通过高可靠的网络架构设计、高稳定性的数据传输路由设计、高效率的组播通信技术设计及轻量化的网络监控等技术可有效提高运载火箭地

面测试发射控制的可靠性、安全性。

## 1 系统设计

火箭地面测发控网络系统设计旨在研究运载火箭测发控系统在测试发射过程中的高可靠网络测控设计技术, 在本项目研究过程中遵循如下思路:

火箭地面测发控网络系统负责搭建数据传输平台, 火箭的测试、发射信息需要通过火箭地面测发控网络系统系统完成前后端以及各系统间的信息交互, 一旦火箭地面测发控网络系统发生故障, 将会对整个火箭系统的测发流程造成重大影响, 因此系统在设计之初, 将可靠性、安全性作为系统设计的首要原则: 采用冗余设计, 消除系统设计中的单点失效模式; 进行安全性分析, 对关键功能实施人工干预。

火箭地面测发控网络系统为地面测试发控系统搭建数据传输平台, 在火箭地面测发控网络系统搭建的局域网上, 连接了各系统的测试设备以及火箭地面测发控网络系统的测控计算机, 由此构成一个完整的网络测试发控系统。系统组成及拓扑结构如图 1 所示。

按照功能划分, 火箭地面测发控网络系统系统主要由

收稿日期: 2018-09-20; 修回日期: 2018-10-11。

作者简介: 赵心欣(1986-), 女, 北京市人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事计算机网络应用技术方向的研究。

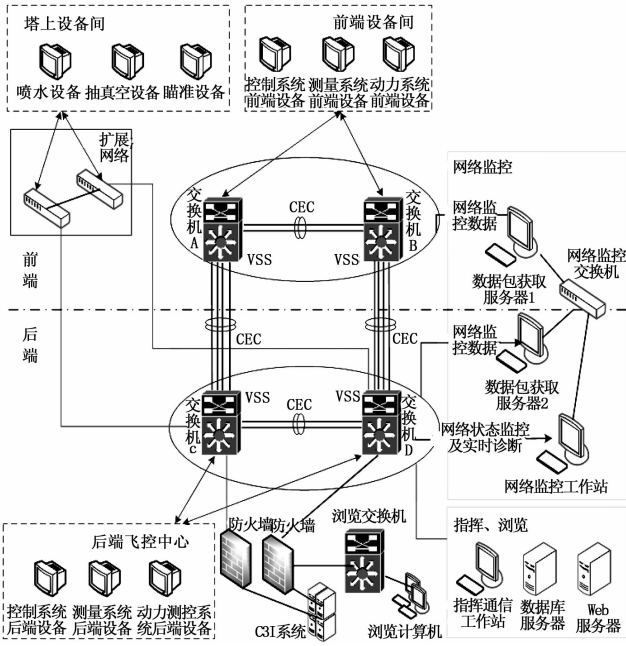


图 1 系统组成示意图

主干网、数据浏览、网络监控三部分功能组成，具体如下：

1) 主干网负责火箭地面测发控网络系统的测发功能，包括物理链路的搭建，测试流程管理、数据的接收、转发等。由四台主干网交换机、数据库服务器、WEB 服务器、指挥管理工作站等组成。其中交换机负责物理链路的搭建，交换机 A、交换机 B 在前端，并互为冗余；交换机 C、交换机 D 在后端，并互为冗余。四台交换机通过千兆双光缆联成环路。四台交换机通过环形连接起到冗余作用，并且成为前后端网络的主干，前端、后端参与测控的设备均通过双冗余方式连在主干网上。数据库服务器、WEB 服务器、指挥管理工作站等安装在后端，负责完成测试流程及测试数据的管理；

2) 数据浏览主要完成火箭地面测发控网络系统的实时数据、历史数据的发布、显示、判读，同时提供与 C3I 等火箭外系统的通信接口，保证与外系统通信安全。由一台浏览交换机、一台防火墙及浏览计算机组成。浏览交换机负责浏览网端的数据交互，通过防火墙与主干网、C3I 系统隔离，起到数据安全作用；后端不直接参与测试的浏览计算机，均连接到浏览交换机，通过防火墙联入主干网络，形成一个统一的整体；

3) 网络监控通过对网络上各节点、链路间的状态信息进行收集、监控、故障分析和排查，实现对主干网状态的监控和管理。火箭地面测发控网络采用 1+2 模式，即一台网络监控工作站+两台网络抓包服务器，两台网络抓包服务器分别设置在前、后端，获取前后端的网络数据；网络监控工作站设置在后端，接收抓包服务器的数据进行对比、分析，同时对前、后端各系统的关键节点进行监测，达到网络状态的实时监控和诊断的目的。

## 2 关键技术分析

### 2.1 虚拟化网络交换系统设计

火箭地面测发控网络系统分为前端和后端，构建测发控信息高速公路，为火箭电气各子系统的分布式远距离测发控信息提供传输和交换平台，一旦火箭地面测发控网络系统发生故障，将会对整个火箭系统的测发流程造成重大影响，高可靠的网络架构是确保火箭射前测试及发射的基本条件。

在传统火箭地面测发控网络平台的设计中，前端、后端的数据通信设备均采用热备份冗余协议（HSRP）实现双机冗余工作方式。HSRP 的基本工作原理是主/备双机系统通过高频率的发送/侦听专用组播报文（每帧预设间隔 15 毫秒）以监测对方设备的工作情况，任何形式的网络故障导致双机系统在一定时间内（预设间隔 50 毫秒）无法侦听到对方的组播报文就会触发主/备双机系统的故障切换，从而实现主/备双机系统的高可靠性运行。HSRP 的工作原理简单、有效，并可实现主/备双机系统的负载均衡，具有很好的适应性，但是 HSRP 的固有特性也容易造成以下问题：

- 1) 高频率的发送/侦听专用组播报文，容易造成数据通信设备 CPU 负载过大；
- 2) 主/备双机对开机顺序和间隔较为敏感，容易造成数据通信设备初始工作状态的混乱；
- 3) 主/备双机间的组播信息会泄漏至二层网络中，容易造成交换网络中组播信息的混乱。

通过采用全新的“虚拟交换系统”（VSS, Virtual Switching System）协议，可消除原有 HSRP 冗余协议可能造成的组播数据泛洪和初始状态混乱的问题，实现前、后端数据通信设备的冗余双机功能<sup>[3-4]</sup>。系统设计见图 2。

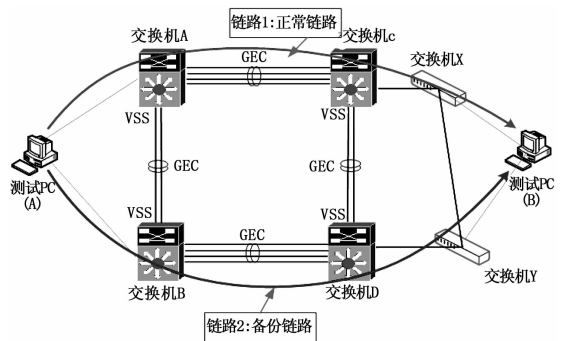


图 2 高可靠网络架构示意图

VSS 协议通过 2×10 GE 带宽将两台数据通信设备组合为单一的虚拟交换机。VSS 双机之间控制信息和数据信息的同步、故障检测和自愈恢复的功能都是通过“虚拟交换链路”（VSL, Virtual Switch Link）所承载的“保持状态切换”（SSO, Stateful Switchover）机制和“不间断转发”（NSF, Nonstop Forwarding）机制实现的，与 HSRP 协议的冗余备份机制完全不同。VSS 双机冗余架构中的一台作为主用虚拟交换机，另一台作为备用虚拟交换机，当主用虚拟交换机发生故障时，VSS 双机将自动实现控制层面、

数据层面的快速切换, 备用虚拟交换机能瞬时承担全部路由、交换任务, 从而构成高效的双机冗余系统。基于 VSS 技术构建的前端虚拟交换系统与后端虚拟交换系统之间采用路由方式转发数据, 能够提供 8 GB 带宽的稳定数据通信容量 (各分系统均单独使用 1 GB 带宽), 后端各分系统之间的稳定数据通信容量为 40 GB 带宽, 比较现有网络平台的性能都有较大的增长。

## 2.2 基于 PIM-SSM 的组播管理及路径规划技术

组播是一种允许一台主机一次同时发送单一数据分组到多台主机的技术, 是节省网络带宽, 减轻数据源及交换机负担的有效措施。由于新一代运载火箭地面设备均采用冗余设计, 导致地面设备数量大, 设备间信息交互多, 信息流复杂, 组播一发多收的优势导致组播在新一代运载火箭得到大规模的应用, 但是大量使用组播也会导致测发控网络上数据量的大幅增长, 因此对地面测发控网络上组播进行有效的规划与管理是保证地面测发控网络正常运行的重要方面。

在传统火箭地面测发控网络组播设计中一般采用 PIM-DM (Dense-Mode, 密集模式) 作为组播协议, 此协议采用了“扩散/剪枝”机制, 由反向路径转发 RPF 动态建立最短路径树 SPT, 用“推”模式, 所有组播流量在整个网络周期性泛洪, 在不需要的地方进行修剪。由于此模式在全网络进行泛洪, 不论各个终端设备是否接收此组播, 因此在组播数据量大的情况下可能造成网络系统中流量过大, 进而造成的交换机 CPU 资源耗尽。

通过采用 PIM-SM 协议的 SSM (Source Specific Multicast, 指定源组播) 技术替换现有 PIM-DM 协议实现总控网内的组播数据通信。PIM-SSM 有别于 PIM-DM, 数据以拉 (主动接收) (DM 是推, 即被动接收) 的方式接收, 每一个组播都有确定的源和组播地址, 组播从源到组播地址都是单一路径, 不存在“泛洪-裁剪”模式, 所以从机制上杜绝了持续大量泛洪数据被 CPU 处理从而导致 CPU 利用率过高, 进一步导致通信异常的可能<sup>[5-7]</sup>。

PIM-SSM 协议在 PIM-SM 协议 (Spare-Mode Multicast, 稀疏模式) 的基础上发展而来, 去掉了 PIM-SM 协议中规定的汇集点 RP (Rendezvous Point) 路由器, 也省去了首先构建共享树然后切换到最短路径树的过程, 而是直接由接收者所在子网的 DR 路由器向上游路由器发送 (S, G) 加入/剪枝报文, 从而建立从发送者到接收者的组播通道 (channel), 转发组播数据, 能够使组播数据始终沿最短路径树转发, 提高通信效率。

同时在组播地址的设计中, 各系统组播地址进行统一规划, 按照分系统及业务功能进行划分。组播规划不仅能够防止同一地址重复使用导致的 IP 地址冲突, 误使用预留组播地址导致的网络不通, 并且能够避免组播 IP 地址复用导致的组播数据叠加等问题, 进一步节省网络带宽, 减轻交换机负担, 对地面测发控网络的数据量进行了有效的控制。

## 2.3 网络监控设计

运载火箭地面测发控网络实现火箭各测发控设备的信

息交互, 为实现网络通信故障的快速分析和定位, 研制网络监控系统。网络监控系统的组成结构示意图见图 3<sup>[8-10]</sup>。

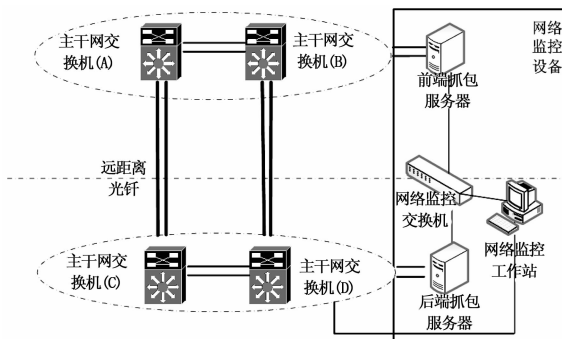


图 3 网络监控系统结构示意图

网络监控系统通过 SNMP 协议对火箭网络交换机的状态, 包括 CPU 利用率、内存、网络流量等信息进行获取和分析, 实现对网络及终端工作状态的监控。通过建立网络拓扑编辑平台, 实现对网络系统状态的实时高效人性化呈现, 包括设备的在线状态、通知事件和告警, 并可按条件进行查询, 极大地方便了用户试验后对整个网络运行情况的分析, 通过采用路径分析技术, 结合对网络拓扑的架构对数据包特征进行识别, 可以获取每个信息的传输路径和传输时延, 实现对网络数据的监控。

通过网络监控技术, 实现对全网络的智能监控, 实时呈现和镜像数据抓包分析, 在解决问题的能力 and 效率上具有显著的优势, 从而保证了火箭地面测发控网络的可靠性。

## 3 测试结果分析

### 3.1 故障切换时间测试

传统火箭地面测发控网络交换机一般采用 HSRP 冗余。本文就采用 HSRP 冗余和 VSS 冗余在不同故障情况下的故障切换时间进行了试验测试。故障状态包括: 网络交换设备故障和主干链路故障。试验结果见表 1。

表 1 算法运行时间比较

故障模式	故障切换时间		换时间 提高率
	HSRP 模式	VSS 模式	
前端交换设备故障平均切换时间	2062	717	65.2%
后端交换设备故障平均切换时间	2256	825	63.4%
传输链路故障平均切换时间	175	125	基本持平

由表 1 分析可知:

1) 在交换设备故障情况下, VSS 冗余模式比 HSRP 冗余模式平均约提高 65.2%、63.4%;

2) HSRP 冗余方案和 VSS 冗余方案, 在传输链路故障情况下, 切换时间基本持平。

### 3.2 组播对 CPU 资源消耗测试

传统火箭地面测发控网络组播一般采用 DM 组播模式。通过采用 DM 组播和 SSM 组播方案在不同的组播数据工况

下,测试了对交换机 CPU 资源的消耗。试验结果见表 2。

表 2 DM 模式及 SSM 模式下 CPU 资源消耗对比 %

组播注入总流量		DM 模式		SSM 模式	
		40Mbps	100Mbps	40Mbps	100Mbps
前端交换机	峰值	26	99	15	24
	CPU 利用率	33	95	17	7
后端交换机	峰值	40	99	37	34
	CPU 利用率	21	94	17	17

由表 2 分析可知:

- 1) 在系统组播量小时 (40 Mbps), DM 模式和 SSM 模式下 CPU 资源消耗皆在 40% 以下, 对交换网络无影响;
- 2) 在系统组播量大时 (100 Mbps), DM 模式下 CPU 利用率达到 94% 以上, CPU 资源消耗严重, 交换网络传输可能产生拥堵或中断; 而 SSM 模式下对 CPU 资源消耗仍维持在 40% 以下, 保证交换网络传输正常。

### 4 总结

通过对火箭地面测发控网络系统系统设计, 采用了新一代火箭高可靠冗余网络架构设计、高稳定性数据传输路由设计、高效率组播设计, 有力提高了火箭地面测发控网络的可靠性、安全性, 为优化火箭测试发射流程起到关键作用。

(上接第 9 页)  
控制电路。

图 14 中, CH1 为差分式 B 探针原始感应电压波形, CH2 为输出触发波形。经过放大, 可以看出 B 探针原始波形的过零点到输出触发波形的上升沿之间时间差, 即延迟时间差为 1.14  $\mu\text{s}$ , 与计算值相一致。

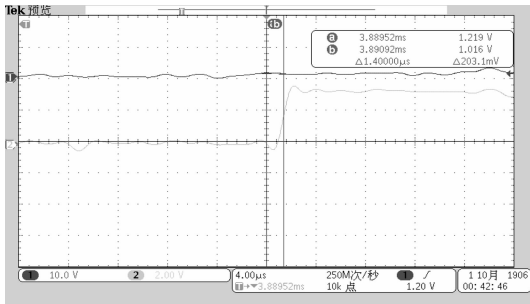


图 14 延迟时间波形图

### 4 结论

- 1) 分析了序列差分式 B 探针工作原理并给出了初步设计。这种差分探针的方法可以有效排除电磁干扰等对输出波形的影响, 得到良好的波形, 从而达到良好的测速效果, 可用于单轨或多轨增强型电磁轨道发射装置。
- 2) 采用运算放大器、电压比较器、门电路构成的实时检测模块和脉宽比较模块来检测电枢的运动速度并判断是否达到所设定的阈值, 延迟时间不超过 2  $\mu\text{s}$ 。
- 3) 本文采用的过零点实时检测模块的输出脉冲为窄脉冲, 且脉宽可调, 即使多个 B 探针密集布置, 也不会发生

### 参考文献:

- [1] 龙乐豪, 李平歧, 等. 我国航天运输系统 60 年发展回顾 [J]. 宇航总体技术, 2018, 2 (2): 1-6.
- [2] 陆浩然, 吕明. 一种高可靠可重构远距离测控网络系统 [J]. 导弹与航天运载技术, 2010 (1): 7-9, 51.
- [3] 孔焱然. 虚拟交换系统在供电公司网络架构中的应用 [J]. 上海电力学院, 2011, 27 (2): 169-167.
- [4] 邱逸昌, 等. 真空热试验网络架构的改进 [J]. 航天器系统工程, 2014, 31 (1): 47-51.
- [5] 刘莹, 徐格. Internet 组播体系结构 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [6] 张杨. 源确定组播路由协议的研究与实现 [D]. 东北大学, 2008.
- [7] 李东旭, 王彬, 张成文. PIM-SSM 应用于警用专网组播的研究 [J]. 移动通信, 2017 (16): 43-49.
- [8] 白冰, 王丹. 基于简单网络管理协议的运载火箭网络监控系统研究 [J]. 导弹与航天运载技术, 2013 (3): 69-72.
- [9] 杜世逊, 段广民. 基于 SNMP 的网络流量监控系统及应用 [J]. 电脑编程技巧与维护, 2011 (18): 143-144.
- [10] 耿庆田, 赵宏伟, 于繁华. 基于 SNMP 的网络流量数据采集研究与实现 [J]. 长春师范学院学报 (自然科学版), 2007 (6): 84-86.

输出脉冲重叠的情况, 有利于对弹丸在膛内的运动过程进行多点连续监控。

- 4) 本文采取较多的模拟电路实现了电枢运动速度的实时检测。为了提高整体电路的扩展性, 后续考虑在保证延迟时间的基础上, 采用以 FPGA 为核心的可编程硬件电路来实现电磁轨道发射系统电枢膛内运动速度的实时检测。

### 参考文献:

- [1] 王莹, 马富学. 新概念武器 (第一版) [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1997.
- [2] 周媛, 李敏堂, 等. 美国电磁轨道发射技术现状及特点分析 [J]. 火力与指挥控制, 2010, 35 (9): 1-4.
- [3] 翟利鹏, 冯俊文, 等. 电磁轨道发射系统总体情景规划研究 [J]. 中国工程科学, 2008, 10 (8): 45-50.
- [4] 孙小超, 曹斌, 等. 基于 SOPC 的分段轨道炮发射控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (8): 134-136.
- [5] 钟和清, 邹云屏, 等. DSP 数字控制系统的电磁兼容设计 [J]. 通信电源技术, 2004, 21 (4): 13-15.
- [6] 刘福才, 李欢, 等. 基于 B 探针的膛内电枢速度测量系统研究 [J]. 兵工学报, 2014, 35 (6): 762-768.
- [7] 牛颖蓓. 基于 DSP 电磁轨道炮控制系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (4): 1014-1016.
- [8] 李菊香, 苏子舟, 等. 基于 B 探针的轨道炮电枢位置测量及研究 [J]. 火炮发射与控制学报, 2014, 35 (2): 40-44.
- [9] 唐福俊, 张天平. 离子推力器羽流测量 E×B 探针设计及误差分析 [J]. 真空与低温, 2007, 13 (2): 77-80.
- [10] 周媛, 严萍, 等. 电磁轨道发射装置中导轨几何参数对电感梯度的影响 [J]. 电工电能新技术, 2009, 28 (3): 23-27.