

可重复使用飞行器地面系统 超融合设计及应用

麻雨欣¹, 曾发², 张耀磊², 代京², 张翔², 梁君²

(1. 航天材料及工艺研究所, 北京 100076; 2. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘要: 针对可重复使用飞行器地面系统应用要求和现行方案存在的问题, 改变各分系统独立设计思路, 将地面系统作为一个整体, 将其广义的各类计算机抽取出来, 进行超融合设计, 通过软件定义硬件和服务器虚拟化、存储虚拟化、网络虚拟化、显控桌面化, 可实现根据各分系统任务需要, 进行计算机资源的灵活分配和动态调度, 以虚拟机、云桌面的形式供各分系统使用, 简化了地面系统的配置和部署, 实现了地面系统的通用化、简易化、便捷化、可配置化、高可用性; 与各分系统独立设计方案应用对比和性能测试表明, 地面系统超融合设计减少了IT设施32%, 缩短了部署时间52%, 降低了运维复杂度60%, 可用性达到了99.9%以上, 服务延迟率低于44%, 并可实现灵活配置, 能适应不同型号的可重复使用飞行器应用。

关键词: 可重复使用飞行器; 地面系统; 超融合; 软件定义; 虚拟化

Design and Application of Hyper-Converged Ground System for Reusable Spacecraft

MA Yuxin¹, ZENG Fa², ZHANG Yaolei², DAI Jing², ZHANG Xiang², LIANG Jun²

(1. Aerospace Research Institute of Materials and processing Technology, Beijing 100076, China;

2. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: In response to the requirements of reusable spacecraft ground systems and existing problems in actual schemes, by replacing the independent design concept of each subsystem and taking the ground system as a whole, a hyper-converged scheme is designed to extract the generalized various computers. The requirements of each subsystem task are achieved through the steps of the software definition hardware and server virtualization, storage virtualization, network virtualization, display and operation desktop, computer resources, which can be distributed flexibly and adjusted dynamically. The virtual machines and cloud desktops are used for each subsystem to simply the ground system configuration and deployment, and realize the generalization, simplification, convenient, configurability, and high availability. Compared with the independent design scheme, the experimental results show that the ground system hyper-converged scheme reduces the IT facilities by 32%, shortening the deployment time by 52%, reducing the complexity of operation and maintenance by 60%, with the availability over 99.9% and the service delay rate lower than 44%, and enabling the flexible configuration, which meets the application of different reusable spacecraft.

Keywords: reusable spacecraft; ground system; hyper-converged; software definition; virtualization

0 引言

我国运载火箭、导弹传统上各分系统各自独立, 由有关分系统的地面设备组成广义的地面系统, 主要由供配电设备、供配气设备、电气测控设备、动力测控设备、发射控制设备、信息采集设备、信息传输设备、计算机、应用软件等组成, 完成其测试、发射过程中的供配电、供配气、信号激励、状态控制、参数测量等测试、发射控制功能^[1-2], 因其核心功能为测试、发射控制, 狭义的地面系统常常被称为测发控系统, 两个概念常常互用。由于地面系统直接由各分系统的地面设备组成, 因此并不存在独立完整的地面系统设计环节, 又由于各分系统独立设计, 各自为政, 因此地面系统的各分系统测发控功能重复、系统复

杂, 很多设备被设计为专用设备、非标设备, 存在资源浪费、兼容性差、数据分散、信息传递困难、测试效率低下、自动化程度低、设备重复配套等问题, 且每个飞行器型号都有各自专用的地面系统, 不能通用, 使得其一直冠有“专家系统”的名声, 只有专家才能操作^[1,3-4], 目前我国航天飞行器地面系统体积庞大、环节复杂, 测发控周期长达20~30天^[5], 并缺乏快速入场、搭建、撤场和便携机动能力。地面系统的上述不足, 使得航天飞行器的发射准备工作多、现场保障人员多、测试效率极低^[4]、发射周期极漫长, 难以满足高密度、高适应、低成本发射, 已成为我国航天事业发展的一大制约因素。因此, 航天飞行器地面系统需要转向通用化、标准化、简易化、便捷化、集成化、

收稿日期: 2022-11-07; 修回日期: 2023-05-26。

作者简介: 麻雨欣(1990-), 女, 硕士, 工程师。

引用格式: 麻雨欣, 曾发, 张耀磊, 等. 可重复使用飞行器地面系统超融合设计及应用[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(3): 225-231.

一体化、可配置化^[1,3-4,6-13]，成为业内众多专家的共识，特别是新一代航天飞行器在这方面提出了更高要求^[1]。由于地面系统绝大多数设备是各种类型的广义计算机设备或以计算机为核心，因此航天飞行器地面系统设计及应用的核心趋势是实现其计算机的通用化、简易化、便捷化、一体化、可配置化。近年来，随着计算机技术发展，相关的虚拟化技术、云计算技术在灵活配置硬件、提升资源利用、优化数据存算能力、实现数据持续保护等方面取得良好应用效果，有航天业内人员将相关技术应用到航天飞行器地面系统进行研究，以期实现地面系统的一体化、易恢复、易扩容、可配置化^[14-17]。由于地面系统通用化、标准化、集成化、一体化设计会触动航天飞行器研制体系中总体和各分系统主体的传统分工、责任和利益格局，因此其实施和应用相对缓慢，需要先以单个飞行器型号为试点，再逐步推进发展。

在航天领域，可重复使用飞行器特指一类既能像火箭一样将有效载荷送入空间轨道，又能在任务完成后自行安全返回地面，并能重复使用的飞行器。相比传统航天飞行器，可重复使用飞行器分系统众多、在轨飞行时间长、任务随时变更、多次重复使用，地面系统更为庞大复杂，包括测发控、总控网、电源及配电、测控通信、动力测控、加泄及供气、发射支持、自主保障、运动机构等分系统的地面设备，测试、发射、控制流程多，且需多次转场、长

时间测控，随时变更程序，数据计算、存储任务重，计算机集群规模越来越大，后期系统升级需求强烈，并由此带来高安全性、高可用性^[18]、易扩容性的要求，并随飞行器短隔间、高频次重复使用，地面测试、发射控制周期要求 1 周内，部署、使用便捷化机动性要求极高。

1 各分系统独立设计方案

某型可重复使用飞行器地面系统现行设计沿用运载火箭地面系统的设计思路，采用各分系统独立设计方案，各分系统各自采用专用设备、接口设备、独立物理计算机、交换机一起构建其地面系统，用到众多服务器、工作站、工控机、普通台式机、交换机等，使得在地面试验、测试、发射、飞行遥测遥控时，地面系统部署极其复杂、成本高昂、更改麻烦，每次入场、搭建、撤场、转场占用大量时间，拖累研制进度，低水平重复劳动使设计人员疲惫不堪，试验数据管理、测试结果分析自动化程度低，安全性、扩容性要求更无法满足，后期运维非常复杂，不同重复使用飞行器型号间地面系统通用化程度低，造成研制成本居高不下，其现行设计的总体架构如图 1 所示。

从图 1 可知，可重复使用飞行器地面系统总体架构为分前、后端的多网络、多子系统协同工作的分布式系统，前端设备主要是仪器设备、交换机、显控终端，后端设备则主要是服务器、工作站、工控机、交换机、显控终端，承担各自分系统数据计算、存储、交换、显示、操控功能，

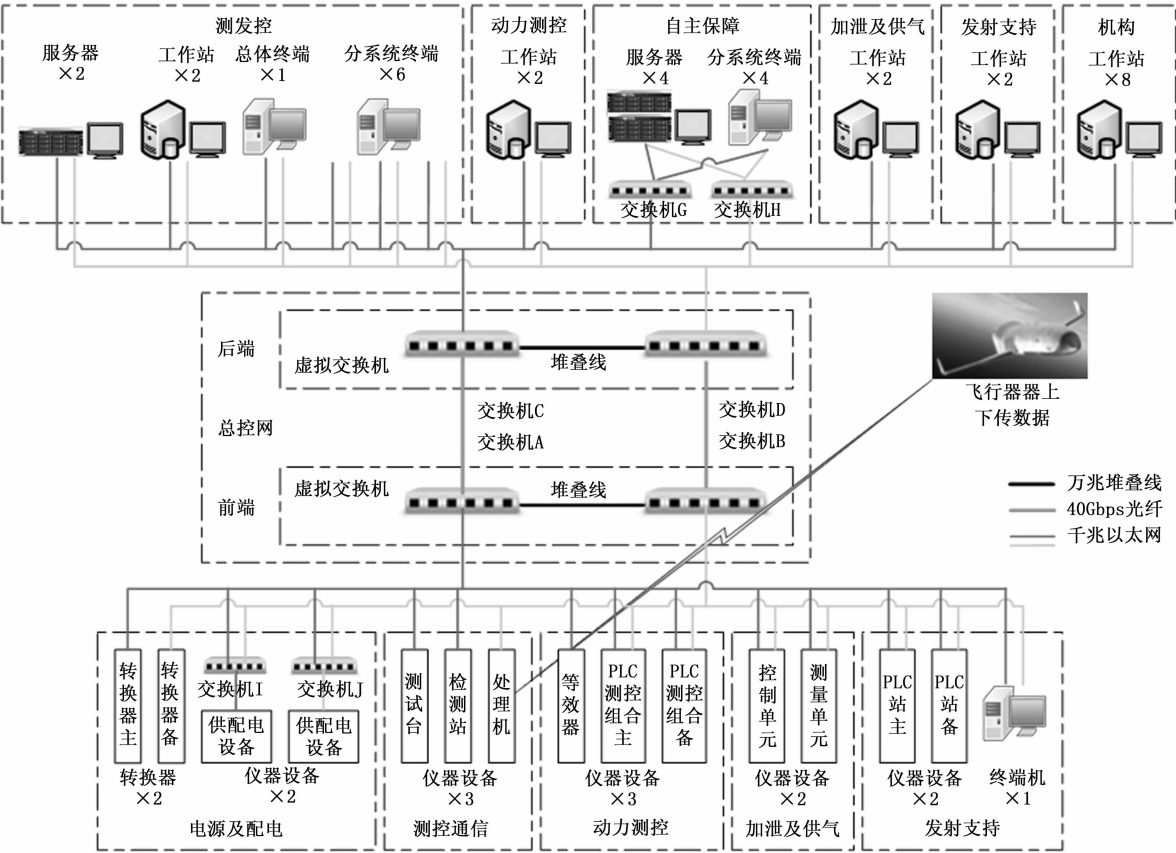


图 1 地面系统各分系统独立设计总体架构

前、后端设备通过总控网光纤交换机互联,网络采用冗余环网架构,各分系统各自设计,各分系统各自部署多种形式的计算机,重要计算机采用双机冗余工作,地面系统服务器、工作站、工控机、普通台式机、交换机、显示器众多,网络连接复杂,系统更改困难,难以满足可重复使用飞行器要求。

2 超融合设计

2.1 需求分析

根据上文分析,可重复使用飞行器地面系统庞大复杂,终端用户众多、应用复杂多变、多地切换部署、长时运行维护,体现到其计算机系统需求,就是要具备强大的数据计算、存储、吞吐、传输能力,支持高并发读写访问,能够快速、便捷、便宜地部署、变更和运维,采用通用化、标准化的硬件实现资源灵活配置,并具备高安全性、高可用性、易扩容性。

2.2 总体方案

针对可重复使用飞行器地面系统要求和传统方案痛点,跳出各分系统各自设计的传统思维,将其地面系统作为一个整体进行超融合设计,采用超融合架构^[18-19],将各分系统所有服务器、工作站、工控机、显控台式机、交换机等物理机提取出来抽象化,用云技术、虚拟化技术融合成一个整体,用软件定义计算、存储、网络,形成服务器虚拟化、存储虚拟化、网络虚拟化,根据各自任务需要,实现计算机计算、存储、网络资源的灵活分配和动态调整,以承担数据计算、存储、交换工作,以虚拟服务器、工作站、

工控机、云桌面的形式供各分系统使用,对各分系统而言,使用体验跟采用物理机一样,可继续沿用传统思路设计各自方案,但对整个地面系统而言,硬件上只有2台超融合一体机和各分系统显示、操作作用的云桌面瘦终端,其他IT设施全部取消,且超融合一体机内部采用多个多核CPU、多内存、多缓存、多网卡、多电源,物理上具备冗余功能,可大大减少用户终端和网线等,其总体架构见图2,各分系统依旧采用前、后端设备,前端设备包括各分系统仪器设备和前端超融合一体机,后端设备包括后端超融合一体机和总体、各分系统用户终端,前端仪器设备通过网线与前端超融合一体机相连,后端总体、各分系统用户终端通过网线与后端超融合一体机相连,前、后端超融合一体机通过光纤相连,网络采用冗余架构,在超融合一体机上可灵活更改网络拓扑,前、后端超融合一体机用光纤连接,数据高速传输,可构成一个统一的虚拟云平台,跨越前、后端,给整个地面系统提供数据的计算、存储和交换服务。

2.3 超融合一体机

超融合一体机以软件定义计算机系统架构,通过服务器虚拟化、存储虚拟化、网络虚拟化,实现一套物理硬件上,灵活创建、配置、删除不同分系统及其用户所需的服务器、数据存储、网络,在管理平台软件平面上即可灵活构建不同的总控网拓扑结构,实现所画即所得,后台自动备份和即时挂载,各分系统用户仍感觉跟传统方案一样,拥有相同的服务器、工作站、工控机、显控终端、交换机,相同的操作系统和应用程序,无需更改自己现有设计方案。

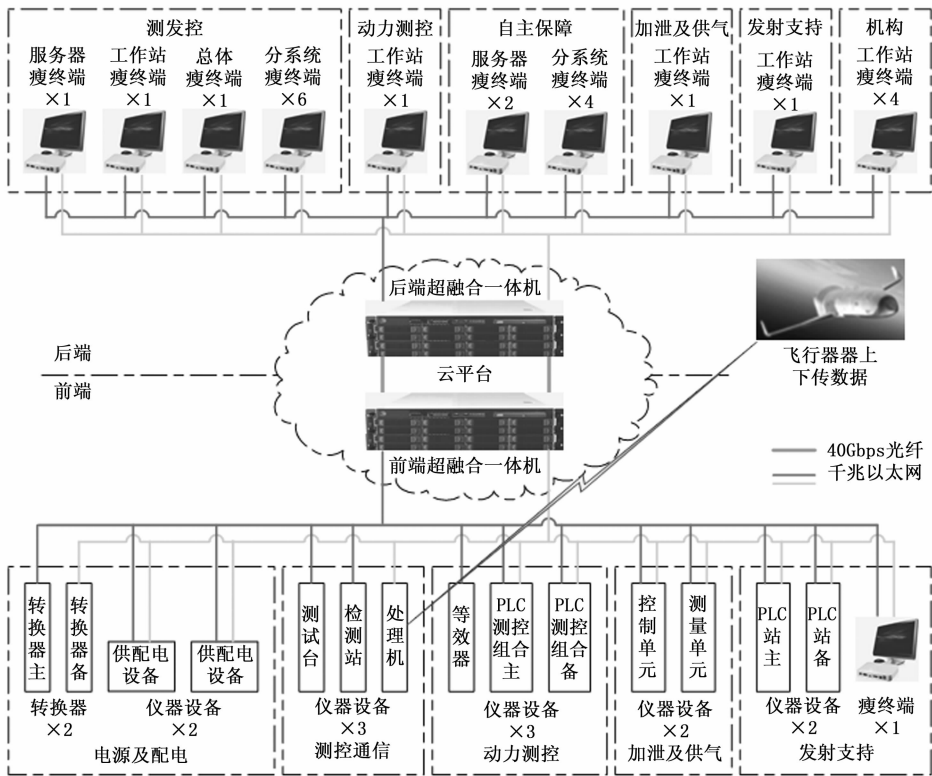


图2 地面系统超融合总体架构

超融合一体机由通用 x86 服务器、磁盘、网卡组成，采用服务器虚拟化、存储虚拟化、网络虚拟化技术，分别称为 vSV、vSAN、vNET，内部总体架构见图 3。

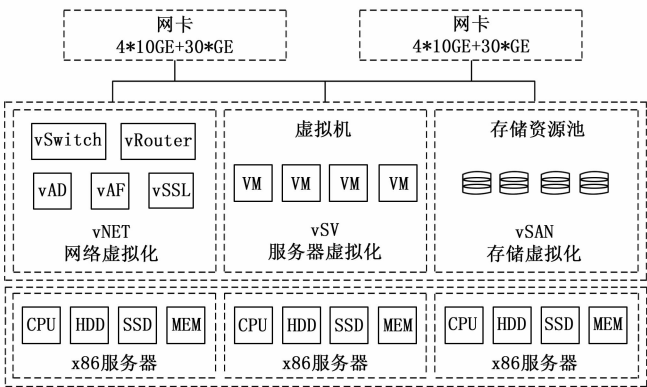


图 3 超融合一体机内部架构

服务器虚拟化，采用服务器虚拟化组件，将通用 x86 服务器硬件资源虚拟化，对最终用户呈现标准的虚拟服务器，每台 VM（虚拟机）由虚拟化层提供高效、独立的计算机系统，具有处理器、内存、网络设备、存储设备和 BIOS，操作系统和应用程序在虚拟机上的运行与在物理机上的运行没有区别，各分系统用户感觉跟物理机一样，实现一机多用，快速灵活创建、配置、删除服务器，减少物理服务器数量。服务器虚拟化架构见图 4。VMM（虚拟机监视器）是一种运行在物理服务器和操作系统之间的中间软件层，允许多个操作系统和应用程序共享一套硬件资源，可看作虚拟环境中的“元”操作系统，协调访问服务器上的所有硬件资源和 VM。物理服务器启动并执行 VMM 时，会给每台虚拟机分配适量的 CPU、内存、网络和磁盘，并加载所有 VM 的 Guest OS（虚拟机操作系统）。VMM 直接运行在裸机上，使用和管理底层的硬件资源，Guest OS 对硬件资源的访问都通过 VMM 完成，作为底层硬件的直接操作者，VMM 拥有硬件的驱动程序。VMM 基于 Linux 内核虚拟化，直接管理、调用硬件资源，无需底层操作系统，其相当于一个很薄的操作系统。VMM 对物理资源的虚拟包括 CPU 虚拟化、内存虚拟化和 I/O 设备虚拟化，各自基本工作机理如下：Guest OS 与 VMM 构成 VM 的两级 CPU 调度框架，Guest OS 负责线程或进程在 vCPU（虚拟机 CPU）上的调度，VMM 负责 vCPU 在 pCPU（物理 CPU）上的调度，把各个 VM 中的 vCPU 按照一定的策略和机制分配物理资源；Guest OS 与 VMM 构成 VM 的两级内存映射，Guest OS 负责 VA（虚拟地址）到 PA（物理地址）的映射，VMM 负责 PA 到 MA（总线上的机器地址）的映射，实现虚拟地址到机器地址的转换；VMM 通过截获 Guest OS 对 I/O 设备的访问请求，再通过软件模拟真实的硬件来复用有限的外设资源。为确保地面系统的高可用性，VM 采用热迁移技术，当 VM 所在的物理服务器出现故障或硬件资源紧张时，可将整个 VM 运行状态完整保存下来，

快速恢复到运行良好的其他物理服务器上，并同步改变 VM 数据文件的存储位置，整个过程平滑切换。

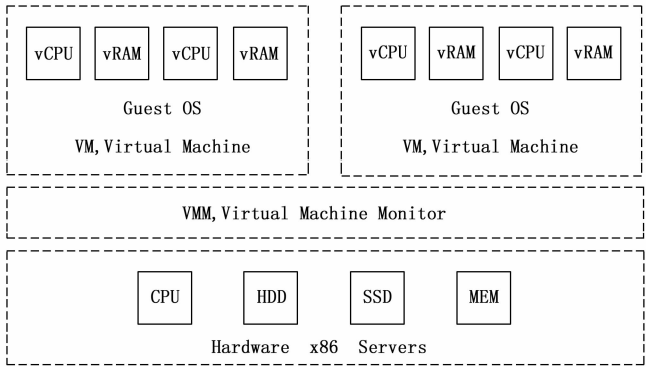


图 4 服务器虚拟化架构

存储虚拟化，基于分布式文件系统 GlusterFS，进行深度优化改进，通过软件定义存储，利用磁盘阵列构建物理存储资源，基于底层 VMM 之上，通过主机管理、磁盘管理、缓存、存储网络、冗余副本等技术，统一管理前、后端超融合一体机上的所有硬盘，将其虚拟化为存储资源池，划分为一个个粒度可设置的数据块，通过向 vSV 提供访问接口，使 VM 可进行数据的读写，并利用 SSD（固态硬盘）缓存文件数据块，加速读写，虚拟化存储可灵活增减存储资源给各分系统用户，并利用数据迁移、影子副本、快照技术实现数据自动备份和即时挂载，提高可重复使用飞行器地面系统的可用性，并可实现在线扩容。vSAN 基于 vSV 集群获取集群内主机信息，构建 vSAN 时，首先建立 vSV 集群，并至少需要 2 台物理主机。vSAN 默认将 SSD 当缓存使用，以加快读写速度。各分系统用户在各自的 VM 上设置系统盘、数据盘等，实际数据以数据块形式存储到资源池中，并分散在不同的物理磁盘上，同一份数据在不同的物理磁盘上存储 3 个副本，确保数据持久安全性，满足高可用性。存储虚拟化工作原理见图 5。

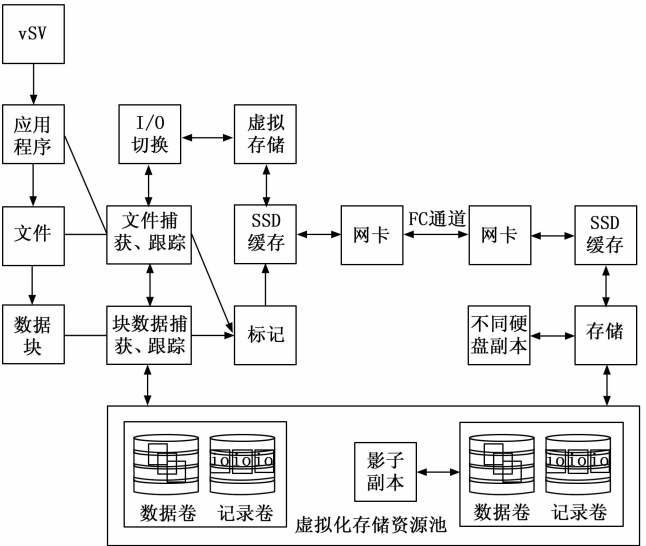


图 5 存储虚拟化工作原理

网络虚拟化, 通过软件定义网络 (SDN), 采用 Overlay (物理网络之上的逻辑网络) 实现地面系统网络设备的控制层和数据层分离、以及不同分系统用户间隔离, 实现对网络流量的灵活化、集中化、细粒度控制, 获得对网络的可编程性、自动化和控制能力, 建立可高度灵活配置的弹性网络, 再通过网络功能虚拟化 (NFV), 将传统网元设备的网络功能提取出来虚拟化, 运行在 x86 服务器上, 按需分配和灵活调度各类网络功能资源, 实现分布式虚拟交换机 vSwitch、虚拟路由器 vRouter、虚拟负载均衡 vAD, 在管理平台上直接用拖拉连线, 即可灵活构建不同的总控网拓扑结构, 实现所画即所得。vSwitch 将分布于多台物理主机的网卡替换掉交换机, 并在逻辑上组成一个大的集中式交换机, 减少传统设计中每台交换机需单独分别配置过程, 并为地面系统网络连接提供集中控制点, 使虚拟环境中的网络配置不再以主机为单位, 简化虚拟机网络连接的部署、管理和监控。vRouter 提供虚拟路由功能, 并提供 VLAN 子网口、ACL 策略、DHCP 地址池、DNS 代理, 并自带 HA 功能, 出现故障可自动迁移到正常主机上, 实现故障恢复。vAD 提供负载均衡功能。vAF 是一道虚拟防火墙。vSSL 是融合 IPsec/SSL 的 VPN, 提供数据网络传输安全。相比现行设计, 采用网络虚拟化后, 地面系统的总控网, 其特征已不再明显, 只集中于超融合一体机, 且主要为软件, 不再作为一个单独的分系统。网络虚拟化工作原理见图 6。

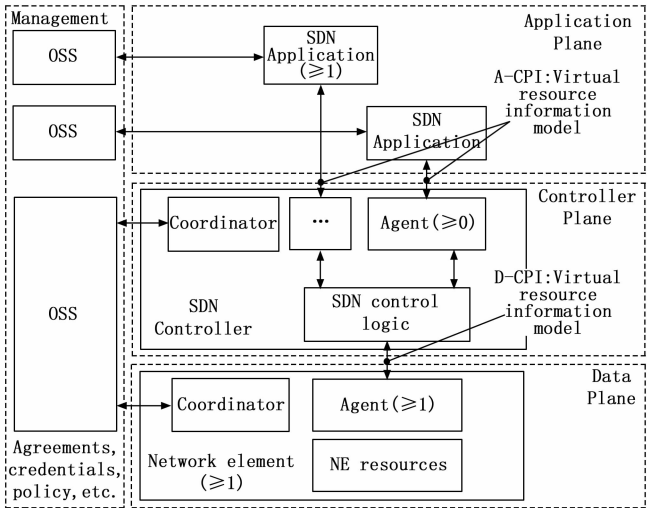


图 6 网络虚拟化工作原理

可重复使用飞行器地面系统可在超融合一体机上, 通过设置 VM 灵活按需配置多台不同计算、存储资源的计算机, 采用画图方式灵活构建不同的总控网拓扑结构, 使得地面系统使用非常便捷、简易、可软件配置, 而且一套 IT 硬件可用于不同型号的可重复使用飞行器应用, 只需重新在软件上快速、简易配置, 使得地面系统实现通用化、标准化。超融合一体机组成单元为通用 x86 服务器, 每套组成单元可通过网络聚合, 实现模块化横向扩展, 只需增加

x86 服务器, 就可实现地面系统扩容。在超融合一体机上部署超融合云平台软件, 配置、管理 vSV、vSAN、vNET, 并集中部署各分系统应用软件, 通过账户设置和授权, 供各分系统用户使用。

2.4 云桌面瘦终端

依赖于超融合一体机的服务器虚拟化、存储虚拟化, 再利用桌面虚拟化技术和 ARM 架构的云终端, 形成地面系统桌面云, 各分系统用户端显控采用云桌面瘦终端, 实现用户端硬件瘦身。各分系统应用软件集中部署到超融合一体机上, 桌面云通过账户设置和授权, 各分系统用户在瘦终端上经总控网随意访问, 各应用软件无论是 C/S 或 B/S 架构、Java 或 Net 开发环境, 均可在桌面云上运行。超融合一体机自适应接入瘦终端的数量和显示需求, 采用 RAP 远程虚拟交付协议, 通过高效流压缩、动态图过滤、多媒体重定向、智能缓存优化等优化算法, 提高数据传输效率, 将各分系统应用软件显控位图发送到各自瘦终端, 实现对各自业务的显示和操控。云桌面的显控方式, 硬件上只要采用瘦终端、显示器和鼠标, 瘦终端通过网线连接到超融合一体机上, 其中瘦终端采用 ARM 架构, 运行效率高、功率小, 使用稳定, 尺寸规格小, 提高各分系统显控的简易性、轻便性、快速性、灵活性。对各分系统用户而言, 其应用软件开发和用户操作没有任何变化, 可实现用户层面上的无缝转移, 没有改变现行分工、责任, 不存在抵制情绪。

3 超融合应用与测试

3.1 设备配置

前端超融合一体机承担的数据计算、存储较少, 采用低配置, 主要利用其虚拟化网络实现数据交换, 后端超融合一体机承担大量的数据计算、存储、交换, 采用高配置, CPU、内存、缓存、网口都较多, 硬件配置分别见表 1、表 2。云桌面瘦终端选用深信服公司 aDesk-AIR-200H 型货架产品, 硬件配置见表 3。

3.2 应用对比

可重复使用飞行器地面系统采用各分系统独立设计和超融合设计的硬件配套见表 4, 其中超融合设计配套 2 台超融合一体机, 相当于 2 * 2 台 x86 服务器 + 2 * 2 块网卡, 相比各分系统独立设计减少硬件 24 台套, 对比表 4 数据可算得, 采用超融合设计后, 相比各分系统独立设计, 其 IT 设

表 1 前端超融合一体机配置

名称	规格/性能
机箱高度	4U
CPU	Inter CPU 4 * E5-2660 v4@2.1 GHz
内存	ECC DDR4 128 GB
硬盘	Inter S4510 SSD 1.2 TB+ Seagate SAS 6 Gb/s 7200r/min 4 * 1.8 TB
GE 口	4 * 10GE+30GE
扩展插槽	24 * SATA/SAS

表 2 后端超融合一体机配置

名称	规格/性能
机箱高度	4U
CPU	Inter CPU 10 * E5-2660 v4@2.1 GHz
内存	ECC DDR4 4 * 256 GB
缓存	Inter S4510 SSD 2 * 1.2 TB(当内存用)
硬盘	Inter S4510 SSD 4 * 1.2 TB+Seagate SAS 6 Gb/s 7200 r/min 30 * 1.8 TB
GE 口	6 * 10GE+40GE
扩展插槽	24 * SATA/SAS

表 3 云桌面瘦终端硬件配置

名称	规格/性能
CPU	ARM Cortex A9(四核)
内存	1 GB
硬盘	4 GB
网络	双以太网卡
USB 口	6
VGA 口	1
音频口	1
规格	127 mm * 127 mm * 25 mm

表 4 地面系统各分系统独立设计与超融合设计硬件配套对比

设备名称	传统设计	超融合设计
服务器/台	6	0
超融合一体机/台	0	2
工作站/台	16	0
台式机/台	12	0
以太网交换机/台	4	0
光纤交换机/台	4	0
网卡/块	0	4
瘦终端/台	0	23
KVM 组件/套	34	23

施减少 32%，整体成本节省 40%，搭建、拆卸、搬运时间缩短 52%，运维、扩容复杂度降低 60%，明显提升设计、部署、运维简易度，降低成本。

3.3 性能测试

针对可重复使用飞行器地面系统数据服务、长时间使用要求其高可用性这两个重要指标作为考核测试项。

数据服务主要测试在不同虚拟主机数时的服务响应时间、吞吐量。将虚拟主机数分别设置为 10 台、15 台、20 台、25 台、30 台，每台虚拟主机平均并发线程数为 40，处理文件大小为 5~200 kB 不等，写数据、读数据、删数据操作比例分别为 10%、85%、5%，持续运行 10 min。表 5 为服务响应时间和吞吐量。测试结果表明，持续增加并发数量时，服务响应时间逐渐增强，但都在 300 ms 以下，吞吐量随并发数增加有所增加，但不明显，基本维持在 4 800 op/s。

高可用性主要测试在不同数据量和不同虚拟主机数的数据恢复时间、服务延迟率。将数据保护块设备大小设为

表 5 不同虚拟主机数服务性能

虚拟机数	并发数	响应时间/ms	吞吐量/op/s
10	400	80	4 500
15	600	110	4 700
20	800	150	4 800
25	1 000	200	4 820
30	1 200	270	4 830

32 kB，虚拟机恢复数据量分别设为 10 MB、20 MB、50 MB，恢复模式分别采用增量恢复、全量恢复^[20]，增量恢复模式基本思路：设数据保护初始时刻为 t_c ，指定目标恢复时间点为 t_h ，当前时刻 t ，先查找出 t_h 时刻到 t 时刻发生改变的扇区，再查找这些扇区从 t_c 到 t_h 分支上所有写操作记录，最后在相同扇区号的多个写操作记录中，取时间最接近 t_h 的那个记录；全量恢复模式基本思路：设数据保护初始时刻为 t_c ，指定目标恢复时间点为 t_h ，找出从 t_c 到 t_h 分支上所有写操作记录，最后在相同源地址的多个写操作记录中，取时间最接近 t_h 的那个记录。表 6 为单台虚拟机 2 种恢复模式的数据恢复时间；表 7 为多台虚拟机并发恢复性能；表 8 为多台虚拟机平均恢复时间和恢复延迟率。测试结果表明地面系统数据可用性达到 99.9% 以上，服务延迟率低于 44%。

表 6 单台虚拟主机不同恢复模式性能对比

数据量/MB	增量恢复时间/s	全量恢复时间/s
10	1.1	1.2
20	1.5	1.7
50	1.9	3.5

表 7 多台虚拟主机不同恢复模式性能对比

数据量/MB	增量恢复时间/s			全量恢复时间/s		
	10	20	50	10	20	50
虚拟机 1	2.8	3.0	3.4	3	3.8	4.8
虚拟机 2	3.2	3.6	4.2	3.4	4.0	4.6
虚拟机 3	3.1	3.4	3.7	3.6	4.1	4.7
虚拟机 4	2.9	3.1	3.3	3	4.3	5.2

表 8 多台虚拟主机平均恢复性能及服务延迟率

数据量/MB	平均恢复时间/s			服务延迟率/%		
	10	20	50	10	20	50
增量恢复	2.9	3.3	3.7	44	41	32
全量恢复	3.3	4.1	4.8	32	28	25

4 结束语

针对可重复使用飞行器地面系统通用化、简易化、便捷化、可配置化、高可用性的要求，进行超融合设计 and 应用，通过服务器虚拟化、存储虚拟化、网络虚拟化、显控桌面化，设计集成化、一体化超融合一体机，简化地面系统配置，实现其可软件配置，具有如下特点：

1) 相比传统设计, IT 设施减少 32%, 整体成本节省 40%, 整体部署时间缩短 52%, 运维复杂度降低 60%, 明显提升部署、使用简易度, 降低成本;

2) 实现软件定义硬件、地面系统灵活配置、硬件标准化, 应用通用化, 适用不同型号的可重复使用飞行器地面测试、发射控制应用;

3) 可用性高达 99.9% 以上, 服务延迟率低于 44%, 且无需停机就可在线扩容, 适应需长期在轨型可重复使用飞行器长期测控应用。

参考文献:

- [1] 韩亮, 张宏德, 彭越. 运载火箭地面一体化测发控系统 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (6): 5-8.
- [2] 肖士利, 郭振, 谢志丰, 等. 中国运载火箭地面系统发展方向研究 [J]. 宇航总体技术, 2020, 4 (2): 25, 28-29.
- [3] 张学英, 易航, 汪洋, 等. 运载火箭测发控系统通用化设计 [J]. 导弹与航天运载技术, 2012, 320 (4): 15-19.
- [4] 宋征宇. 新一代航天运输系统测发控技术发展的方向 [J]. 航天控制, 2013, 31 (4): 3-9.
- [5] 徐昕, 高飞, 韩秀利, 等. 快速机动发射运载火箭测发控系统的设计分析与展望 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (10): 120.
- [6] 任月慧, 张宏德, 彭越, 等. 运载火箭测发控技术未来发展与展望 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (6): 3.
- [7] 程鹏. 某测发控系统设计与实现 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [8] 孙鹏, 李海孟, 梅洪, 等. 通用可重构测发控体制技术研究 [C] // 第三届国防科技工业试验与测试技术发展战略高层论坛论文集, 2010.
- [9] 解维奇, 李朝凤, 姚静波. 先进上面级火箭地面测发控系统——
(上接第 224 页)
- [12] 王一凡, 汤建华, 徐修祝. 谷物流量传感器敏感梁结构对测量精度的影响 [J]. 传感器与微系统, 2021, 40 (10): 67-70.
- [13] 申伯纯, 周进. 一种高增益级联微波放大器设计与实现 [J]. 电子测量技术, 2019, 42 (8): 28-31.
- [14] MULLETTI S, REZNITSKIY E, SAVARIEGO S, et al. A hardware prototype of wideband high-dynamic range analog-to-digital converter [J]. IET Circuits, Devices & Systems, 2023, 17 (4): 181-192.
- [15] 刘敬坤, 李继森, 孙凯. 矢量网络分析仪大动态范围接收机设计 [J]. 国外电子测量技术, 2021, 40 (12): 131-134.
- [16] 原庆, 刘希森, 梁雪明. 大动态高速响应数字 AGC 功能电路的实现 [J]. 固体电子学研究进展, 2022, 42 (6): 467-472.
- [17] 黄潇, 唐求, 周朝霞, 等. 用于生物电阻抗谱测量的程控宽频恒流源设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35 (4): 145-153.
- [18] 邵亚璐, 王鉴, 庞存锁, 等. 大动态信号的高分辨采集电路化设计与实现 [J]. 装备学院学报, 2017, 28 (2): 58-64.
- [10] 朱亚文. 运载航天器地面测发控系统概述 [C] // 湖南省第二届研究生创新论坛——航空宇航与控制科学分论坛论文集, 2011.
- [11] 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.
- [12] 高飞, 徐玮, 汪灏, 等. 快速发射运载火箭测发控方舱列装化设计研究 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (5): 62-68.
- [13] 徐明钊, 袁乾臣, 徐亚平. 重型运载火箭测发控系统一体化设计研究 [C] // 中国宇航学会深空探测技术专业委员会第九届学术年会论文集 (中册), 2012.
- [14] 王元, 崔卫华, 徐小泉. 虚拟化技术在航天测控中心系统设计中的应用研究 [C] // 第八届中国卫星导航学术年会论文集——S08 测试评估技术, 2017.
- [15] 张晨光, 吕明, 刘苑伊, 等. 云计算技术在运载火箭测试发控系统应用研究 [C] // 第十九届中国科协年会, 2017.
- [16] 吕跃鹏, 刘俊阳, 杨喆. 基于虚拟化的火箭测发控软件冗余技术 [J]. 航天控制, 2020, 38 (3): 61-68.
- [17] 张晨光, 吕明, 刘巧珍. 基于云计算一体化测试发控系统设计与分析 [J]. 导弹与航天运载技术, 2018, 361 (3): 114-118.
- [18] 艾如鹏. 基于 Openstack 的超融合平台的研究与实现 [D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [19] 郝佳林. 基于超融合架构的 HCOS 对象存储系统研究与实现 [D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [20] LI X, XIE C S, YANG Q. Optimal Implementation of Continuous Data Protection in Linux Kernel [C] // In NAS 08th International Conference on Networking, Architecture, and Storage, 2008: 28-35.
- [19] 梁娟. 基于 CMOS 工艺的自动增益控制电路研究 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (7): 264-268.
- [20] MINGYANG Z, ZHUGANG W, WEIMING X. Convergence and stability analysis of a digital automatic gain control [J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2013, 27 (12): 1118-1128.
- [21] JANZEN R, MANN S. Extreme-dynamic-range sensing: real-time adaptation to extreme signals [J]. IEEE multimedia, 2017, 24 (2): 30-42.
- [22] 王琦, 蒋川东, 杜海龙. 低噪声高增益锁相放大的微弱信号检测系统 [J]. 实验技术与管理, 2018, 35 (3): 84-86, 100.
- [23] 杨坤, 王志斌. 基于 FPGA 的数字程控中频放大电路设计 [J]. 国外电子测量技术, 2020, 39 (2): 111-117.
- [24] 周锦荣, 周嘉伟. 基于 AD9288 的信号采集系统设计与实验 [J]. 实验技术与管理, 2020, 37 (11): 88-92.
- [25] 李良杰, 吕志刚, 冯晓岗, 等. 基于四级级联放大的程控微弱信号放大装置 [J]. 探测与控制学报, 2022, 44 (2): 85-91.