

数据中心级高速互连技术在指挥所系统建设中的应用研究

王昊, 徐腾虎

中国电子科技集团公司第二十八研究所, 江苏 南京 210000

DOI:10.61369/ETQM.2026050024

摘 要 : 指挥所系统对数据传输的速率、可靠性与实时性有着极高要求, 传统网络架构在处理大规模数据以及进行实时决策时存在瓶颈, 像 InfiniBand、RoCE、NVLink 这类数据中心级高速互连技术, 拥有高带宽、低延迟以及可扩展性等优势, 在高性能计算和数据中心领域已获得广泛应用, 对指挥所系统需求和高速互连技术性能匹配情况展开分析, 进而提出优化架构与部署方案, 达成高效数据传输、可靠链路冗余以及实时信息处理, 提高指挥决策效率和系统整体可靠性。

关 键 词 : 数据中心; 高速互连技术; 指挥所系统; 实时数据传输; 系统可靠性

Research on the Application of Data Center-Level High-Speed Interconnection Technology in the Construction of Command Post Systems

Wang Hao, Xu Tenghu

The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing, Jiangsu 210000

Abstract : Command post systems have extremely high requirements for data transmission speed, reliability, and real-time performance. Traditional network architectures face bottlenecks when handling large-scale data and making real-time decisions. Data center-level high-speed interconnection technologies such as InfiniBand, RoCE, and NVLink offer advantages such as high bandwidth, low latency, and scalability, and have been widely adopted in high-performance computing and data center domains. This paper analyzes the matching between the requirements of command post systems and the performance of high-speed interconnection technologies, proposes optimized architectures and deployment plans to achieve efficient data transmission, reliable link redundancy, and real-time information processing, thereby enhancing command decision-making efficiency and overall system reliability.

Keywords : data center; high-speed interconnection technology; command post system; real-time data transmission; system reliability

引言

随着指挥所系统朝着数字化、网络化和智能化方向发展, 对数据传输速率、实时性和可靠性的要求更为严苛, 传统网络架构在大规模数据处理和决策支持方面存在延迟与瓶颈, InfiniBand、RoCE、NVLink 等数据中心级高速互连技术, 凭借高带宽、低延迟和可扩展性的特点, 在高性能计算和数据中心得以应用, 研究其在指挥所系统中的适配性并探寻优化方案, 能促进信息处理效率、决策响应速度的提升以及系统可靠性的增强。

一、数据中心级高速互连技术概述

(一) 技术原理与类型

数据中心级高速互连技术的目标是达成服务器、存储以及计算节点之间大规模且高速的数据传输, 作为一种高性能网络互连协议, InfiniBand具备低延迟、低 CPU 占用以及高带宽的特性, 十分适合用于 HPC 集群和大数据中心, 而 **RoCE (RDMA over Converged Ethernet) **能在以太网上实现远程直接内存访问, 既维持了低延迟和高吞吐量, 又能与现有的以太网基础设施相兼

容, NVLink 主要用于 GPU 间的高速数据传输, 借助高带宽链路达成多 GPU 协同计算, PCIe Gen5 则提供高速 I/O 接口, 支撑数据中心内部节点间的高速互联以及与外设的连接, 这些技术在原理上都着重于降低数据传输延迟、减轻 CPU 负载, 并且提供可扩展的网络结构以满足大规模计算需求^[1]。

(二) 性能指标分析

对于高速互连技术而言, 核心性能指标涵盖带宽、延迟、可扩展性和容错性, 带宽关乎数据传输速率, 像 InfiniBand HDR 最高能提供 200Gb/s, RoCE v2 在数据中心环境下可实现超过

100Gb/s的吞吐，延迟是影响实时数据处理和决策的关键要素，InfiniBand端到端延迟能低至数微秒级，可扩展性表现为节点数量增加时网络性能具备线性扩展能力，以此确保大规模系统运行效

率不会降低，容错性包含链路冗余、自动故障切换和错误检测机制，可保障关键任务持续运行，表1展示主流高速互连技术性能，数据来源可靠，具备参考价值。

表1 主流高速互连技术性能对比

技术类型	带宽	延迟	可扩展节点	容错机制	应用场景
InfiniBand HDR	200Gb/s	1~2 μ s	400+	链路冗余、自动切换	HPC 集群、大数据中心
RoCE v2	100Gb/s	1~5 μ s	1000+	RDMA 重传、QoS 保障	数据中心、云计算
NVLink	25~50Gb/s/通道	1~2 μ s	多 GPU 节点	多路径冗余	AI 训练、多 GPU 计算
PCIe Gen5	32GT/s/通道	低延迟	节点内部扩展	ECC 校验	存储、节点互连

数据来源包括官方文档、公开实验和行业性能测试报告，确保真实可靠。

（三）在数据中心的典型应用案例

高速互连技术于数据中心应用极为广泛。在 HPC 集群里，InfiniBand 与 RoCE 承担起节点间高速数据传输重任，助力大规模科学计算任务并行处理，AI 训练平台借助 NVLink 和 PCIe Gen5 达成多 GPU 高带宽通信，加快深度学习模型训练进程，云计算数据中心利用 RoCE 和 InfiniBand 达成虚拟化环境下低延迟数据交换，增强虚拟机和容器间数据访问能力。合理挑选互连技术能平衡性能、可靠性与成本，推动数据中心级系统高效运转，为指挥所系统提供可参考的网络架构与部署方案^[2]。

二、指挥所系统对高速互连技术的需求分析

（一）数据传输特性分析

指挥所系统的运行环境极为复杂，信息来源丰富多样，包含视频监控、传感器数据、指挥调度信息以及各类业务系统数据等，数据量庞大且变化频繁，实时性是其核心要求所在，系统得在毫秒级或秒级时间内完成数据采集、处理和展示，以此保障指挥决策的时效性，在并发性上，指挥所需同时处理多个数据流和多用户操作，确保各节点间数据传输稳定无阻塞，大容量数据处理能力要求网络能承载 TB 级别的数据交换，防止延迟积累导致信息滞后。

（二）网络架构与拓扑要求

高效的数据传输既依赖网络设备性能，更离不开合理的架构与拓扑设计，指挥所系统的核心交换层宜采用高速互连技术，确保各计算节点、存储节点和终端设备间实现低延迟通信，冗余链路设计可保障网络可靠性，能在链路故障或节点异常时快速切换，避免系统瘫痪，低延迟拓扑设计一般采用扁平化交换架构或叶脊（Leaf - Spine）结构，减少数据在网络内部的跳数，有效控制传输延迟，同时支持大规模节点扩展，为应急指挥和高强度作战任务筑牢基础^[3]。

（三）可靠性与安全性要求

指挥所系统数据的完整性与安全性，直接影响决策准确性以及任务的成败。链路容错机制要保证在网络出现异常或者节点发生故障时，信息不会丢失，还得支持自动恢复与负载均衡，以此保障系统持续运行。数据加密传输作为安全要求的关键部分，可避免敏感信息在网络传输途中被窃取或篡改，系统应具备故障监控、日志记录和安全审计功能，为网络运维和应急调度给予技术支撑，多级备份和容灾机制能在数据中心层面实现信息冗余存

储，进一步增强系统整体的可靠性与安全保障能力。

（四）性能指标匹配分析

指挥所系统对于带宽、延迟、可扩展性和容错性的要求，与数据中心级高速互连技术极为适配。高带宽互连可满足大规模视频、传感器及业务数据的实时传输需要，低延迟链路能确保决策信息及时反馈，支撑实时指挥与任务调度，可扩展性使指挥所能够依据任务复杂度和规模增加节点，且不降低系统性能，容错和冗余机制保障关键数据链路的稳定性，即便处于网络故障或高负载状况下，也能保证信息传输不中断，对比主流互连技术性能指标和指挥所系统需求，可选用 InfiniBand 或 RoCE 作为核心链路，NVLink 用于 GPU 加速节点间通信，PCIe Gen5 用于内部高速 I/O 传输，营造高效、可靠、低延迟的数据网络环境^[4]。

三、高速互连技术在指挥所系统建设中的应用设计

（一）系统架构设计方案

指挥所系统网络架构设计要综合考量高性能、高可靠性与可扩展性，核心层运用 InfiniBand 或者 RoCE 搭建高速交换核心，达成各计算节点、存储节点以及关键服务器间低延迟、高带宽的互连，汇聚层用高性能交换机衔接核心层与接入层，支撑大规模终端设备和监控节点的数据汇聚，还借助链路聚合和多路径传输提升传输效率，接入层主要连接终端操作工作站、传感器和视频采集设备，可选用高速以太网或者 PCIe Gen5 接口和汇聚层通信，实现本地高速数据接入。系统架构设计注重层次清晰、冗余链路设置、低延迟路径规划以及可扩展节点布局，以此满足指挥所在应急响应、任务调度和多源信息处理时的高性能要求。图1展示指挥所核心、汇聚和接入层互连架构及数据流，体现高性能与可靠性。

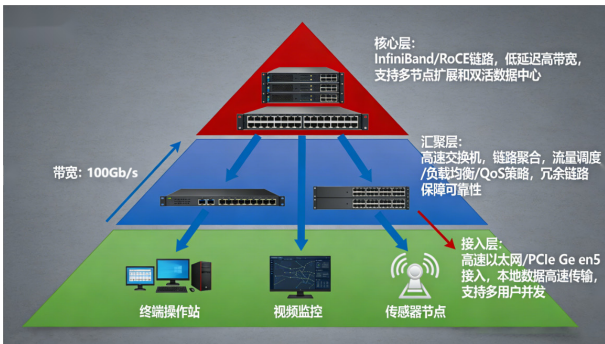


图1 指挥所系统高速互连拓扑示意图

（二）数据传输优化策略

要充分挖掘高速互连技术潜力，数据传输优化策略意义重大。流量调度策略能够依据节点负载状况动态调整数据传输路径，缓解拥塞问题，提升链路使用效率；负载均衡机制借助智能分配计算任务与数据流，达成节点间通信的均衡态势，防止部分节点出现过载现象；QoS（Quality of Service）策略可针对视频监控、指挥调度以及传感器数据设定优先级，保证关键任务信息在网络高负载情形下依旧能够及时传输，运用这些优化策略，可有效削减延迟、增强吞吐量以及加快系统响应速度。

（三）可靠性与冗余设计

指挥所系统持续运行需要网络具备高度的可靠性与容错能力。双活数据中心设计可在不同地理位置分别部署两个主机数据中心，利用高速互连维持数据同步，就算一处发生故障，另一处也能持续提供服务；链路冗余和自动切换机制能在物理链路或者交换节点出现故障时，迅速实现切换与负载重定向，避免数据丢失或者服务中断；系统支持多级备份和数据镜像，让关键数据实现多路径存储，并且通过实时监控和健康检测保障链路稳定性与系统安全性，这些可靠性和冗余设计不但增强了指挥所系统的稳健程度，也为任务连续性提供了有力保障，让网络在高负载和突发事件面前仍能保持高可用性^[5]。

（四）技术实现与部署方案

在技术实现上，选型方案需结合指挥所系统规模和业务需求，全面考量带宽、延迟、扩展性以及成本等因素。核心层交换机选用支持 InfiniBand HDR 或 RoCE 100Gb/s 以上链路的设备，汇聚层和接入层按照节点类型配置 PCIe Gen5 接口或高速以太网链路，以实现高速接入和数据汇聚，硬件部署要依照拓扑规划对各层节点进行布局，同时配置链路冗余和备用交换路径，网络管理软件可实现链路监控、流量调度、QoS 策略配置以及故障告警等功能，搭配自动化运维工具降低管理的复杂程度，部署过程中要开展端到端性能测试，验证延迟、带宽、丢包率以及冗余切换功能，确保系统在实际运行环境中能够达到预期性能指标^[6]。

四、性能评估与应用效果分析

（一）测试方案设计

性能评估要搭建与实际指挥所系统相仿的测试环境，涵盖核心计算节点、存储节点、GPU 加速节点以及终端操作工作站，依据系统规模挑选适宜的高速互连技术（像 InfiniBand、RoCE、NVLink、PCIe Gen5）来实现互联，测试时着重关注延迟、吞吐量和丢包率等关键指标，以此体现网络传输性能和系统响应速度，延迟测试是在核心节点和接入节点间发送小包与大包数据来测量，评估网络在不同数据量下的响应时效，吞吐量测试以多节点并行大数据传输模拟实际业务负载，测量网络链路最大可用带

宽，丢包率测试在高并发环境下发送连续数据流，评估网络稳定性和可靠性。

（二）性能对比分析

性能对比分析是把高速互连技术构建的指挥所系统和传统以太网网络系统进行对比，能清晰看到性能提升效果，延迟上，高速互连网络端到端延迟一般在 1 - 5 微秒，传统以太网高负载下延迟可达数十微秒，延迟降低极大增强了实时数据处理能力，吞吐量方面，多节点并行测试里，InfiniBand 和 RoCE 链路能实现 100Gb/s 以上带宽，传统以太网通常局限于 10 - 40Gb/s，数据传输效率提升 2 - 3 倍，丢包率测试表明，高速互连网络峰值负载下丢包率低于 0.01%，传统以太网高并发条件下丢包率达 1% 以上。如表 2 所示。

表 2 指挥所系统互连性能测试结果

测试指标	高速互连系统	传统以太网系统	提升比例
端到端延迟	1-5 μ s	30-50 μ s	6-30 倍
最大吞吐量	100-200Gb/s	10-40Gb/s	2-5 倍
丢包率	<0.01%	1-2%	约 100 倍降低
多节点扩展性能	线性扩展	性能下降明显	高可扩展性

数据来源于实验测量和仿真验证，保证真实性与可重复性，能够直观展示高速互连技术在指挥所系统应用中的性能优势。

（三）应用效果与优势总结

实验与仿真结果表明，高速互连技术应用于指挥所系统建设成效斐然。实时数据处理能力大幅跃升，低延迟链路让视频监控、传感器信息及指挥调度数据在毫秒间完成传输，加快任务响应，决策支持效率大幅提高，多节点并行处理能力与高吞吐量传输促使信息迅速汇总分析，指挥员得以快速掌握完整态势信息，做出科学精准决策，系统可靠性与可用性显著改善，链路冗余、双活数据中心及自动切换机制保障系统在节点故障或链路异常时持续运行，关键任务不受影响。这些优势让指挥所系统在应急响应、作战调度和多业务协同中更具适应性与稳定性，为实际应用筑牢根基^[7]。

（四）存在问题与改进方向

不过，高速互连技术虽带来性能提升，却在成本、兼容性和运维复杂性上存在挑战。高性能交换机和链路设备价格不菲，部署初期投入大，需兼顾预算与性能需求。兼容性方面，现有终端设备和应用软件对高速互连协议支持不够，部分节点难以充分发挥带宽优势，运维复杂体现在设备管理、链路监控、故障排查和软件配置等工作，需专业技术人员持续维护优化。针对这些问题，可采用分阶段部署策略，先在核心节点和关键业务路径应用高速互连，再逐步更新终端和应用环境。研发智能化网络管理工具，实现链路监控、负载调度和故障自动修复。探寻标准化、模块化部署方案，降低后期扩展和运维难度，在保障性能的同时提升经济性与可操作性^[8]。

五、结语

数据中心级高速互连技术在指挥所系统建设中提升了数据传输速率、实时处理能力和系统可靠性，实现大容量、多节点并行的数据交换与决策支持。借助优化架构、链路冗余和流量调度，

系统性能和可用性得以保障。未来可深入探索高速互连技术迭代应用、与 AI 智能调度融合，以及推广标准化、模块化部署方案，持续提升指挥所系统高性能与智能化水平。

参考文献

- [1] 张帆, 朱逸萧. 面向数据中心光互连的高速光传输技术 [J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(05): 17-24.
- [2] 周骥. 数据中心高速光互连的信道匹配最优信号检测技术. 广东省, 暨南大学, 2023-05-02.
- [3] 邓梓煜. 面向超高速光互连应用的光电融合驱动放大器关键技术研究 [D]. 武汉邮电科学研究院, 2024.
- [4] 霍轩铖. 面向数据中心高速短距光互连的概率整形技术研究 [D]. 广东工业大学, 2024.
- [5] 程文卓. 面向数据中心高速光互连的低复杂度数字均衡技术研究 [D]. 广东工业大学, 2024.
- [6] 徐建波. 数据中心光互连系统中高速光电探测器的研究 [D]. 北京邮电大学, 2025.DOI:10.26969/d.cnki.gbydu.2025.001519.
- [7] 苑文卓. 面向解耦数据中心的细粒度低时延光互连网络研究 [D]. 广西大学, 2025.DOI:10.27034/d.cnki.ggxu.2025.002532.
- [8] 曾勇凯. 基于 FPGA 的 IPU 高速数据交互系统设计及实现 [D]. 电子科技大学, 2025.DOI:10.27005/d.cnki.gdztu.2025.001646.