

## 基于 OXC 技术的数据中心网络优化研究

陈 隽<sup>1</sup>  
CHEN Jun

## 摘 要

随着数字经济快速发展,数据中心规模持续扩张,其互联互通场景下的传输需求呈现出高带宽、低延时、易运维的核心诉求,现有网络架构已难以匹配这一发展趋势。为解决上述问题,文章提出将全光交叉技术应用于数据中心网络优化。首先,系统分析了数据中心现网的架构缺陷与传输需求痛点;其次,深入探讨了全光交叉技术的核心特性及在提升网络性能方面的独特优势;最后,结合实际网络优化项目的实践数据,验证了该技术在提升数据中心间传输带宽、降低延时及简化运维流程等方面的显著效能。研究表明,全光交叉技术为大规模数据中心网络升级提供了可行的技术路径,具有重要的工程应用价值与推广前景。

## 关键词

数据中心网络;全光交叉技术;大带宽;低时延;可重构光分插复用器技术

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.01.032

## 0 引言

随着信息化建设的不断发展,大数据成为生活和生产中的重要因素,网上购物、智能制造、物联网、线上医疗、网上金融、人工智能等应用,产生了海量数据,推进了云计算、数据中心等的建设落地,同时也对大数据的传输和存取提出了更高要求,需要响应快速,实时在线,网络健壮,运维便捷,促使数据中心网络间的互联效率成为提升数据中心性能的重要一环。

1. 上海市信息网络有限公司 上海 200081

## 1 数据中心网络的基本架构

这些年大量的数据中心建设、升级和改造,新的应用,提出新的需求,结合网络通信技术的发展,促使数据中心网络也不断更新。

## 1.1 数据中心网络的定义与功能

数据中心网络是指连接数据中心之间的服务器、存储设备和连接网络设备的基础设施,用于支持计算、存储资源及应用开发服务的运行。其主要功能包括数据传输、应用程序响应、资源共享、负载均衡以及提供高可用性和容错能力。

## 参考文献:

- [1] 周思明,段金长,李颖杰,等.一种改进的 SVM 短期电力系统负荷预测方法[J].沈阳工业大学学报,2023,45(6): 661-665.
- [2] 唐利涛,张智勇,陈俊,等.基于 Autoformer 的电力负荷预测与分析研究[J].华东师范大学学报(自然科学版),2023(5): 135-146.
- [3] 李文升,孙东磊,郑志杰,等.基于 QWDAE 和 HWMHG-RU 融合的电力系统短期负荷预测模型[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(9):62-67.
- [4] 王健,易妹慧,刘浩,等.基于注意力机制优化长短期记忆网络的短期电力负荷预测[J].中南民族大学学报(自然科学版),2023,42(1):73-81.
- [5] 陈晓红,王辉,李喜华.基于 KPCA-CNN-DBiGRU 模型的短期负荷预测方法[J].管理工程学报,2024,38(2): 221-231.
- [6] 樊江川,于昊正,王冬生,等.基于 PLESN 和 LESQRN 概率预测模型的短期电力负荷预测[J].燕山大学学报,2024,48(1): 54-61.
- [7] 秦烁,赵健,徐剑,等.基于多任务学习和单任务学习组合模型的综合能源系统多元负荷预测[J].电网技术,2024,48(4): 1510-1522.

## 【作者简介】

尹璐(1990—),女,山西灵石人,本科,工程师,研究方向:负荷管理。

(收稿日期:2025-07-07 修回日期:2026-01-04)

## 1.2 数据中心网络的组成

传统数据中心网络采用三层结构,包括接入层、汇聚层和核心层。接入层用于物理连接存储设备和应用服务器,汇聚层连接接入交换机,聚合接入层的数据流,进行转发,并提供策略控制,诸如防火墙、网络检测等服务,核心层交换机与汇聚层连接,处理跨区域数据,承担数据中心内部与外部网络间的高速数据包转发,并提供对外互联网连接,为整个网络提供 L3 层路由网络。网络架构如图 1 所示。

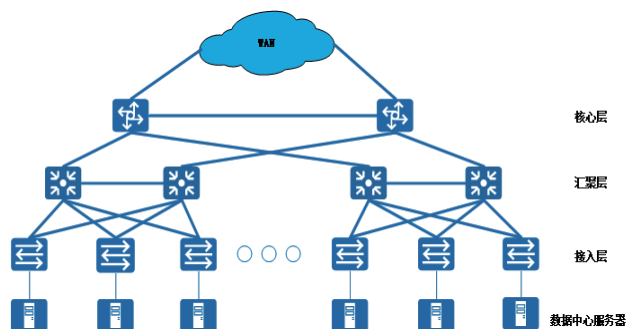


图 1 传统数据中心网络结构图

## 1.3 数据中心网络的发展需求

随着大数据应用的不断发展,出现不同的应用需求,对数据中心网络的性能也提出了不同的要求。

云计算和人工智能技术的快速发展,数据量呈现指数级增长,大数据爆发式增长直接推动了通信网络带宽需求的快速增长,从百兆、千兆到万兆,核心部分网络间的流量已经向 100 Gbit/s 快速演进。访问模式也发生了变化,模块化、分布式对服务器的访问需求,如 Hadoop,将数据分布于不同服务器中进行并行计算,频繁访问,产生大量的东西向流量,造成服务器间网络的频繁大流量通信。

对于高频或实时在线的应用,诸如金融交易、在线医疗、视频会议等,则对通信网络中的延迟抖动比较敏感,达到毫秒甚至微秒级别。

数据中心承载着海量的全面数据,网络中断可能引发重大损失,通信网络的可靠性与安全性是保证数据连续性、有效性的核心要素,因此构建冗余和安全的网络是保障数据传输的有效手段。

同时,数据中心需要应对各种变化的应用需求,对相互间的通信网络的开通和运维提出了更高的要求。

## 2 全光交叉技术的基本原理

针对不断变化的数据中心网络通信需求,全光交叉技术的发展,为大数据传输提供了一种良好的技术基础,实现了光层的一跳直达,成为解决高要求数据中心互联的重要技术手段。

### 2.1 全光交叉的定义与特点

全光交叉连接(optical cross connect, OXC)是一种灵活

的光交换调度方式,相比传统的基于分离机架+跳纤的光交互方式,OXC 采用了全光背板集成式光纤互连方式,无需跳纤,单板即插即用,实现了高效的全光通信,网络线路快速连通,便捷维护<sup>[1]</sup>。

该技术的关键优势体现在 3 个方面:光信号的并行传输能力使其单通道带宽可达到 100 Gbit/s 级别,满足数据中心爆炸式流量增长的需求<sup>[2]</sup>;端到端的光传输技术将网络延迟降低至微秒级,这对实时性要求高的数据中心应用具有重要价值;波长资源的可调节和灵活复用,提升了光纤利用效率<sup>[3]</sup>。

### 2.2 全光交叉的关键技术

OXC 技术主要有基于可重构光分插复用器(reconfigurable optical add/drop multiplexer, ROADM)技术的光路调节,以及用于光纤互连的光交叉连接矩阵。

#### 2.2.1 光路调节技术

基于波长选择开关(wavelength selected switch, WSS)的出现,ROADM 技术具有了可重构、动态配置、灵活调整的性能,可实现更多维度的扩展,目前已实现 CDCF-ROADM 调节技术,其中 CDCF 分别代表:

(1) 波长无关(Colorless):任何波长通道都可以从任何端口进行上下路。

(2) 方向无关(Directionless):任何本地业务可以配置为发往任何方向,或者任何方向的业务都可以配置到本地下路。

(3) 竞争无关(Contentionless):支持同样波长的多个业务在同一个本地节点上下路。

(4) 波道间隔可调(Flexible Grid):在可变带宽光网络中,系统根据各信号需要的频谱分配不同的带宽。

CDCF-ROADM 技术,指将任意输入端口中的任意波长进行组合,发送到任意输出端口,可以包括相同波长的信号,实现波长无阻塞,并支持波道间隔可调的技术。

而 CD-ROADM,是指端口可以上下任意波长的信号,且任意波长的信号也可以往返于任意方向,不受方向限制,但相同波长的信号由不同的 WSS 进行管控,以避免部分波长阻塞。

ROADM 技术的完善同时也方便了运维管理,可以通过网管软件远程进行波长和通道操作,提高了网络管理效率。

#### 2.2.2 光交叉连接矩阵技术

OXC 的连接,主要依靠光交叉连接矩阵来实现,包含光背板、光连接器、WSS 等关键技术。以国内某厂商为例,有光背板、光上下路单板、光线路单板等。

光线路单板是通过高密度连接器与光背板相连,可以将一组波长调度到任意光方向或调度到任意光上下路单板进行业务上下,一块光线路单板实现一个光方向的相应功能。

光背板主要有柔性光背板及高密度光连接器。光背板技术是将单板内部连纤分成多组高密度互连光纤，形成无阻的柔性光路连接，实现架内“0”跳纤，集成度高，提高了系统可靠性，并提供了超大交换容量支持，以及纳秒级的时延通信。

光上下路单板可以支持 CDF-ROADM 和 CDCF-ROADM，前一种采用 TWIN  $1 \times N$  WSS，不支持竞争无关，通过单板的高密度连接器及光背板的光纤连接，调度到任意光方向。后一种采用  $M \times N$  WSS，可以实现 8/16 维竞争无关。

WSS 采用非线性光学效应或交叉增益调制将信号转移，实现多个维度的动态光波长调度，是光线路单板和光上下路单板的核心元件，能有效解决波长资源竞争问题。

### 2.3 全光交叉技术的优势

全光交叉技术在通信网络应用中已经展现出多方面优势。

能够提供更高的带宽支持。随着光技术的发展，从 80 波道 C 波段、CE 波段、C++ 波段，现在扩展到 192 波道 C+L 波段，传输容量提升了近 2 倍。全光网络通过波长复用技术可实现单波速率 400 Gbit/s 的传输容量，远超传统光电交换网络的物理限制，可满足大数据传输容量的需求<sup>[2]</sup>。

网络扩展性方面，基于 ROADM 技术的波长交叉调度<sup>[3]</sup>，使数据中心能够通过增加和动态调节波长通道实现平滑调速，满足数据业务的动态需求。OXC 技术可增加光交叉调度的灵活性，提高光纤网络资源的利用率；支持传输管道带宽的动态调整，实现 100 Gbit/s、超 100 Gbit/s 等波长智能化调度；支持光域均衡和光功率自动优化，提升系统传输性能，增加可用路由，提高了网络的健壮性。

在运维方面，单板功能进行了高度集成，站点内部的光纤连接都通过光背板，完成插板即连纤，提高了开通效率。具有更为灵活的配置能力，网管可通过远程进行数据配置（波长配置），就能实现业务的快速开通（分钟级）和维护，增加了网络的弹性。高度的集成化，统一的网络管理平台，支持光功率的自动管理和端到端的波长管理，降低了维护成本，同时为智能化管理提供了便捷。

这些特性有效解决了数据中心面临的带宽增长压力与效能瓶颈，分布式的光交叉互连方案通过软硬件协同优化，进一步提升了资源调度的灵活性。

## 3 基于全光交叉的数据中心网络优化设计

### 3.1 网络结构优化

传统网络结构在数据中心网络中面临扩展性差和资源利用率低等问题，容易形成带宽拥塞，当业务流量激增时会导致网络拥塞。因此在现有网络的基础上进行设备更新、网络扩容，以提高整体性能。设计采用脊叶（Spine/Leaf）的扁平二层架构<sup>[4]</sup>，Spine 核心交换机负责将所有的 Leaf 交换机连接起来，形成一个 Full-Mesh 拓扑，提供一个弹性 L3 路由网

络。Leaf 交换机物理连接数据中心服务器，同一区域直接互通，不同区域通过 Spine 交换机转发，采用虚拟扩展局域网（virtual extensible local area network, VXLAN）技术<sup>[5]</sup>，实现服务器间的东西向数据流量的通信。整体网络结构易于扩展，能很好地适应数据中心的发展，当 Spine 交换机的带宽不足，只需要增加 Spine 节点数，并提供路径上的负载均衡；如果接入连接不足，则只需增加 Leaf 节点数，这种特性特别适用于数据中心的应用扩展。

在 Spine 层间设计采用 100 Gbit/s，保留核心层间可扩容的能力，以满足不断增加的数据传输需求。Leaf 层与 Spine 交换机间根据目前流量采用 10 Gbit/s 接入，Leaf 层与服务器间采用 1 Gbit/s 或 10 Gbit/s 接入，同区域的数据中心间通过 Leaf 层转发数据，不同区域数据中心间通过 Spine 交换机转发，实现多个数据中心之间的数据共享、负载均衡和数据备份。这种结构提供了更好的扩展性，并通过冗余路径在节点间通信，增加网络的健壮性。网络结构如图 2 所示。

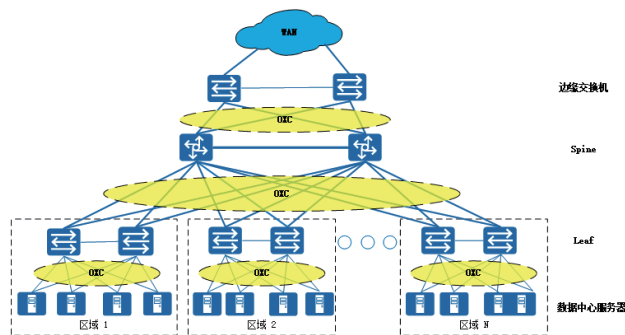


图 2 网络优化结构图

数据中心网络之间的互联互通，在条件允许的情况下，采用全光交叉技术进行，在整个数据中心网络中实现全光纤互连，将为数据中心应用提供更好的性能优化。

根据数据中心网络业务量的需求及今后发展，规划相应的维度，搭建网络。设计以接入带宽 10 Gbit/s，每个区域 4 台服务器为例，选择可扩展 CE 波段，波道可提升到 96 波，采用  $1 \times N$  WSS 规划支持 16 维，可实现 CDF 功能，测试 OXC 设备组建的数据中心网络的性能。

整个网络中，光线路板的每个槽位对应一个光方向，当光路信号进入之后，线路板内部集成的 WSS 模块，可以将一组波长“拆成”16 路波长信号，通过高密度连接器与光背板相连，光背板支持超大交换容量的全连接，不同波长光信号从光背板出来之后，光上下路单板内置两组 TWIN 20 WSS，负责管理波长的添加和下路，支持灵活栅格，调度到任意光方向或调度到任意光上下路，可实现 CD 或 CDF 功能，完成光纤线路的上下路传输。

### 3.2 网络运维优化

OXC 的高集成度，网管可以远程进行光路和波道的调节，增加了网络的弹性，极大提高了网络运维和开通的效率，降



低了维护成本，并统一网络管理平台，支持光功率的自动管理和端到端的波长管理，同时这种结构设计便于软件定义网络（software defined network, SDN）等集中式网络管理平台的实施，SDN 使整个网络成为一个易于操作的管理模式，并在网络发生堵塞或链路故障时能及时发现问题，管理和重新配置，为智能化管理运维提供了方便<sup>[6]</sup>。

### 3.3 可靠性优化

在可靠性方面，OXC 的线路板可以内置光监控信道（optical supervisory channel, OSC）进行光纤的质量监测，支持对波长进行阻断、衰减量调节（实现功率均衡功能），搭配光时域反射仪（optical time domain reflectometer, OTDR）模块，在收发端进行光功率性能检测，实时监测链路质量，同时误码监测机制通过实时监测误码率变化发现器件异常，定位故障时间从小时级缩短至分钟级。

多路径冗余设计能够有效提升网络应对故障的能力。Spine/Leaf 的二层网络架构，形成负载均衡和冗余的网络结构保护。同时在线路侧光纤的 1+1 保护，光层配置波长交换重路由，形成多重物理保护，避免单一光路故障导致数据中心业务中断。

## 4 网络优化结果分析

通过 OXC 技术在数据中心网络的应用，提升了光纤的利用效率，从支持 C 波段到 C+L 波段，容量得到极大提升，网络带宽可以按需扩容，目前可支持单条线路带宽 100 Gbit/s 到 400 Gbit/s，解决了数据中心核心交换机间的数据传输瓶颈，为人工智能训练等新业务提供必要支撑。二层扁平架构的 OXC 全光网络，为数据中心东西向之间的数据传输提供了即插即用、动态调节、便捷可控的配置管理。

对于带宽与延时的测试，采用仪表测试仪，测试两台服务器之间的数据传输。测试通过 OXC 连接的区域 1 和区域 2 之间服务器相互通信，流量通过 Spine 交换机进行转发，测试整条网络线路传输的延时和抖动，端口速率设为 10 Gbit/s，流量发送速率为 8 Gbit/s。测试结果显示，业务平均吞吐量为 7.895 bit/s，平均延时在 1 ms 左右，平均抖动 0  $\mu$ s，最大 179  $\mu$ s 的抖动，丢包率为 0，具体如图 3 所示。根据测试结果，OXC 光纤互联网络的延时主要在光纤的距离传输消耗时间（约 5  $\mu$ s/km）与光器件处理时间（ns 级）之和，较传统的 ROADM 组网方式降低 30%<sup>[7]</sup>。抖动和丢包率显示网络性

能稳定，满足数据中心的实时业务需求。

OXC 的 1+1 线路保护和冗余保护，光纤的性能监测，波长可调等技术，有效保障了光网络的健壮性。

OXC 的高度集成，根据业务需要插板即用，网管远程进行配置、监控及管理，结合 SDN 的实施，极大提高了运维效率，构建了良好基础。

测试结果显示，OXC 网络在带宽扩展性、资源利用率、延时、可靠性方面性能优于传统数据中心网络，在性能指标上突破了传统技术瓶颈，适合数据中心的各种应用对网络性能的需求。

## 5 结语

经过优化的数据中心网络，采用 OXC 全光交叉网络技术，使得网络建设、扩展和维护更便捷，带宽利用率更高，网络健壮性更好，网络性能得到有效提升，为日益增长的云服务、云计算以及人工智能和大数据模型等海量数据应用打下基础，为日后的业务扩展构建弹性可扩展的数据中心网络提供了一个良好的技术方向。

### 参考文献：

- [1] 王甫涵, 郝祥勇, 蔡轶, 等. 全光数据中心互联的混合放大技术研究 [J]. 光通信研究, 2023(3):6-9.
- [2] 唐雄燕, 魏步征, 沈世奎, 等. 智算数据中心光电交换技术综述 (特邀) [J]. 光通信研究, 2024(5):5-17.
- [3] 吕凯, 齐斌, 钟胜前, 等. ROADM 全光交换网络关键技术的发展与应用展望 [J]. 电信科学, 2022, 38(7):37-42.
- [4] 杨可歆, 黄婷婷, 周鹏, 等. 有限波长转换全光脊叶数据中心网络设计 [J/OL]. 光通信研究, 1-10[2025-12-12]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1266.TN.20241217.1432.008>.
- [5] 李济伟, 王洋, 柳瑞春. VxLAN 技术在数据中心网络中的应用 [J]. 电子元器件与信息技术, 2024, 8(12):166-168.
- [6] 关妹萌. SDN 在数据中心网络中的应用 [J]. 软件, 2025, 46(3):73-75.
- [7] 郭安. F5G 全光网络在智慧建筑中的应用探讨 [J]. 建筑电气, 2022, 41(7):69-72.

### 【作者简介】

陈隽 (1973—), 男, 上海人, 本科, 工程师, 研究方向: 数据网络通信。

Service Performance Test Summary Results

| Service | Verdict | L1 Avg Throughput | L2 Avg Throughput | Frame Loss Percent | Avg Delay     | Max Delay Variation | Avg Delay Variation | Out Of Sequence Percent | Missing Frames Percent |
|---------|---------|-------------------|-------------------|--------------------|---------------|---------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|
| 1       | PASS    | 8 Gbit/s          | 7.895 Gbit/s      | 0%                 | 1 014 $\mu$ s | 179 $\mu$ s         | 0 $\mu$ s           | 0%                      | 0%                     |

图 3 测试结果

(收稿日期: 2025-06-26 修回日期: 2026-01-04)