



## 基于光电混合交叉技术的电力光传送网络优化

赵阳<sup>1</sup>, 宋伟<sup>1</sup>, 段程煜<sup>1</sup>, 申昉<sup>1</sup>, 张晓宏<sup>2</sup>, 赵继华<sup>2</sup>

(1. 国网冀北电力有限公司信息通信分公司, 北京 100053;

2. 上海诺基亚贝尔股份有限公司, 上海 201206)

**摘要:** 对电力光传送网络的现状进行了初步分析, 电力光传送网络面临着传送容量的不断提升、拓扑的日渐复杂、业务的灵活调度以及网络智能演进等巨大的挑战。采用光电分层交叉处理的思路, 电层专注于小颗粒业务的汇聚收敛和超长距的电再生, 光层则提供波长级别的灵活调度, 基于无色、无向、无冲突、灵活栅格可配置光业务上下架构的 CDC-FROADM 技术优化网络架构, 提升网络的传送效能, 降低能耗和空间占用, 赋能网络智能化的演进, 同时极大节省网络建设和运维成本。

**关键词:** 电层交叉; 波长路由; 混合交叉; 灵活栅格

**中图分类号:** TN919.6+4

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2021264

## Optimization of power optical transmission network based on photo-electronic hybrid cross-connection technology

ZHAO Yang<sup>1</sup>, SONG Wei<sup>1</sup>, DUAN Chengyu<sup>1</sup>, SHEN Fang<sup>1</sup>, ZHANG Xiaohong<sup>2</sup>, ZHAO Jihua<sup>2</sup>

1. Information and Communication Branch of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100053, China

2. Nokia Shanghai Bell Co., Ltd., Shanghai 201206, China

**Abstract:** A preliminary analysis to the current situation of the power grid optical transmission network was made. The power grid optical transmission network is facing huge challenges such as the increasing transmission capacity, the increasingly complex topology, the flexible scheduling of services and the evolution of network intelligence. By adopting photoelectric layered cross processing, electric layer cross focus on small particles business convergence and long distance electric regeneration, optical layer routing provides the flexible wavelength routing, based on colorless, directionless, and contention less flexible grid configurable add/drop architecture CDC-F ROADM technology to optimize network structure, improve the network transmission efficiency, reducing energy consumption and space, which also benefits the evolution of network intelligence, and greatly save the construction and operational costs.

**Key words:** ODUk switching, photonics switching, hybrid switching, flex grid



## 1 引言

随着视频业务、大数据、泛在物联网（智能电网）等业务的蓬勃发展，引发了数据流量的爆炸性增长，给光传送网的传送处理能力带来了巨大挑战，干线光传送网络单纤传输容量持续快速增长并已步入数十 Tbit/s 时代，需要 Pbit/s 甚至更高容量的交叉调度能力。为了实现传送节点任意维度数据之间的无阻塞交叉调度，光传送网络的交叉调度目前一般采用大容量的电交叉设备来实现，其中，单节点交叉容量设备支持能力已超过 60 Tbit/s，采用集群技术可达到数百 Tbit/s。但随着波长通道速率的快速增长，尤其是当传输速率达到 100 Gbit/s 以及更高时，超大容量电交叉设备正逐渐逼近电互连背板带宽、设备功耗以及机房供电散热等处理能力的上限，不同交换机制的能耗比较如图 1 所示，电层交叉的发展已经遇到了技术和能耗的瓶颈。

电力的光传送网正面临着云业务、智能电网、实时视频、数据中心互联等新型业务的传送要求，线路的速率和容量在不断提升。目前电力已经开始应用 100 Gbit/s 线路速率，并将很快迈向 200 Gbit/s 等更高的速率，这对光传送网络提出了

灵活配置、低时延、网络平滑升级、智能管控等更高的要求。考虑到电力光传送网络拓扑日趋复杂，光纤的拓扑依赖于输变电线路的走向，站点比较分散，站间距离不均衡，业务流量不均衡，还存在很多传统低速接入业务等复杂的场景，相应的光传送网络应该具备业务的有效汇聚和快速疏导、宽带的灵活调度、超低功耗、超长传送距离、线路速率灵活可调等特性。

据 IHS Markit（埃信华迈）市场调查，光传送网络（特别是核心骨干网）演进需求是通过先进的 SD-FEC 软件决策前向纠错技术等来改善传输距离，支持可变栅格（flex grid），更高的线路调制格式 8QAM、16QAM、64QAM 以及概率星座整形技术等支持更高的线路速率，同时需要具备 CDC-F 无色、无向、无冲突灵活栅格（colorless, directionless, contention-less, flex-grid, CDC-F）的可重构光分插复用器（reconfigurable optical add-drop multiplexer, ROADM）架构以及可编程的网络端口满足网络演进的需要。

## 2 电力光传送网基于电交叉组网所遇到的挑战

目前电力的光传送网主要基于光通路数据单

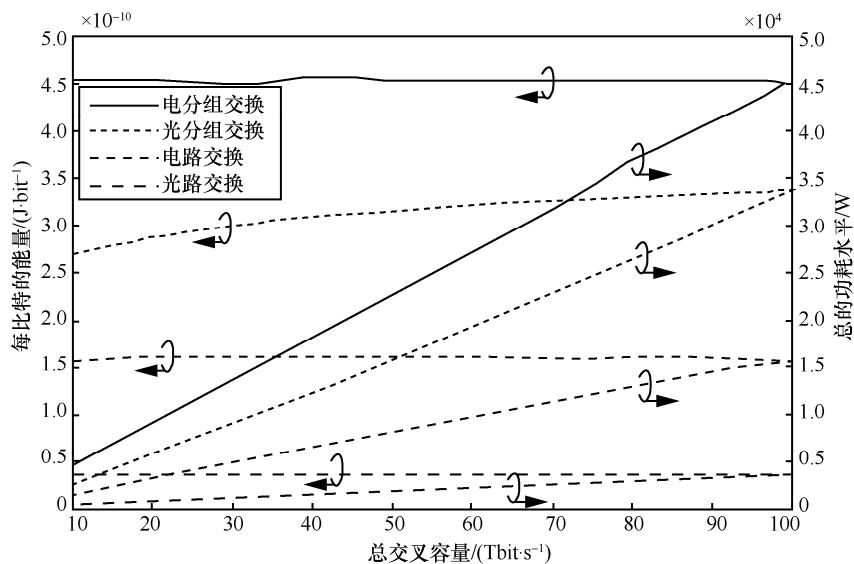


图 1 不同交换机制的能耗比较

元  $k$  (optical channel data unit- $k$ , ODU $k$ ) 电交叉技术, ODU $k$  电交叉技术与以前的同步数字体系 (synchronous digital hierarchy, SDH) 和同步光纤网络 (synchronous optical network, SONET) 技术思路一脉相承, 采用中央交叉矩阵和支、线路分离的架构, 在网络的建设和运维方面有着相近的思路, ODU $k$  电交叉能方便进行低速业务的汇聚和长途传送时的信号电域再生, 给网络的规划和运维带来一定的便利, 网络的规划设计显得较为简单, 网络维护人员可以方便地使用 SDH 运维的经验。

但电层交叉本身的技术缺陷也是明显的, 电层交叉调度的成本 (尤其是网络的扩容成本) 远远高于光层交叉, 电层交叉面对每个线路方向都需要提供昂贵的线路板卡, 并且电层的交叉矩阵无法进行平滑的升级, 随着线路速率的提升, 电层交叉矩阵也需要更新换代, 导致设备的投资得不到有效的保护。但对于光层的线路系统的不同速率, 10 Gbit/s 时代的线路设备原理上也可以用于 100 Gbit/s、200 Gbit/s 甚至 400 Gbit/s 信号的传送, 这就极大地降低了网络的投资成本。从交叉的容量来看, 电层交叉到几十 Tbit 时, 会带来极大的空间占用, 噪声、散热和供电都会成为很难克服的问题, 但光层交叉可以轻松支持上百 Tbit 甚至 Pbit 的交叉容量, 却有着较小的空间占用, 较小的噪声和散热。在电力行业的供电方面, 有些地方不可能满足电交叉日益增长的耗电需求, 本文根据业务处理功能的差别将 OTN 站点分为

省调 (主要作用是业务上下)、核心节点 (业务电中继需求大的节点)、非核心节点和接入层节点 (接入层节点主要是网络边缘节点、地市公司、220 kV 站点等), 针对不同位置节点的供电需求对照分析结果见表 1 (为了简单起见, 本文只比较了 10 波和 20 波两种容量的情况, 符合大多数电力需求场景条件)。

在实际的应用场景中, 除了省、备调以外, 一般的站点当电源需求在 4 路 63 A (-48 V) 电源以上的时候, 大部分电力机房都难以满足电源的需要 (通过现场了解, 除了省调以外, 其他站点大多数没有太多的 50 A 以上大电流空开富裕, 尤其是 500 kV 站点比较突出), 一般也很难大面积的改造既有电源系统, 从表 1 的需求分析来看, 大容量纯电交叉方案是很难推行的, 尤其是电力用户大多数不接受电源端子并联使用的时候, 可能还会占用更多的电源端子资源, 这无疑给纯电交叉方案的使用带来更大的障碍。

从网络应用的角度而言, 电交叉技术适合于在接入、汇聚层面进行小颗粒的业务疏导和汇聚, 形成大颗粒的光层信号, 也可以应用在超长距传送时附带提供电再生的能力。光层交叉的优势在于为波长级别的业务提供了灵活的光路由功能, 适合在骨干核心层对大容量的业务进行调度。但如果把骨干和核心层的业务调度也放在电层处理, 这就使得电层矩阵处理了从接入到核心的所有业务, 混淆了不同层次网络的功能, 导致网络层次划分不清晰, 无法进行有针对性的网

表 1 不同节点位置的电源需求对照

| 波道数      | 省调         | 核心节点 (电中继需求较大的节点) | 非核心节点      | 接入层节点      |
|----------|------------|-------------------|------------|------------|
| 10 波/OXC | 63 A (2+2) | 40 A (2+2)        | 40 A (1+1) | 32 A (1+1) |
| 10 波/ODU | 50 A (3+3) | 50 A (2+2)        | 40 A (2+2) | 50 A (1+1) |
| 20 波/OXC | 63 A (3+3) | 50 A (3+3)        | 63 A (1+1) | 50 A (1+1) |
| 20 波/ODU | 70 A (3+3) | 63 A (3+3)        | 63 A (2+2) | 63 A (1+1) |

注: 在光、电混合交叉的应用中, 没有业务疏导需求的业务是不建议进矩阵的, 因此, 接入层站点一般不上电交叉设备, 用支、线路合一板卡按照实际需求扩展接入业务; 另外, 在非核心节点一般也建议用容量相对较小的电交叉设备以降低功耗和空间占用



络扩展升级,网络的灵活性和智能化也受到很大的限制。

从国外客户的广泛实践来看,电层交叉的应用被限制在特定的场景,但光层交叉则更多地被接受和应用,从固定光分插复用器(fixed optical add-drop multiplexer, FOADM)到 ROADM(reconfigurable optical add-drop multiplexer),从固定业务上下端口的传统 ROADM 到波长无关方向无关型 ROADM(CDROADM),再到波长无关方向无关竞争无关型 ROADM(CDCROADM),ROADM 成为光传送网络演进的主流技术,符合低功耗的环保要求,同时其扩展性和灵活性也契合了光网络的软件定义网络(software defined network, SDN)演进方向,为网络的软件编程能力提供了可能。

随着相关技术的快速发展,100 Gbit/s 以及更高速率的信号拥有了越来越好的传输性能,超长距的传送不再是梦想,结合放大技术的进步和超低损耗的光纤,100 Gbit/s 正交相移键控(quadrature phase shift keying, QPSK)信号可以无电中继传送 4 000 km 甚至 5 000 km 以上,无须频繁地进行电再生,推动光层交叉可能更多地应用于电力传送网络,极大地降低电力光网络建设和运行维护的成本。波长速率为 10 Gbit/s、100 Gbit/s 的光电交叉优劣对比见表 2,波长速率为 100 Gbit/s 和波长

速率超 100 Gbit/s 时代,ROADM 是合理的选择。

随着未来数据中心互联需求的日益增多,大带宽低时延的应用会倾向于站点之间的直连,而非通过迂回路由互联,这样网络中各节点的维度会整体提高,这会进一步凸显光交叉的调度便利性,同时加大光交叉与电交叉在网络建设和运行成本等诸多方面的差异。

在单跨长距节点多的时候,光、电交叉之间的成本差异会有一定的缩小,同时光层交叉的业务设计和运行维护比电层的交叉设计要复杂,光层交叉的设计需要考虑各种各样光参数的实时监测,对光层损伤的实时补偿,但基于光网络的智能化发展可以有效消除这些挑战。

对于业务分层方面来说,可以借助电交叉在小颗粒业务疏导方面的良好表现将其布置于地调或地调以下的一些节点,将业务疏导成大颗粒业务进入光层或干线网络。当然,由于实际应用场景中小颗粒业务的分布不均,而且在网络边缘节点的机房、供电等都比较紧张的场景下,可以考虑用集中电交叉和分布式电交叉相结合的方式疏导小颗粒业务,然后送入光层进行交叉处理。

### 3 光电分层交叉处理基本架构

电力光传送网在很长时间内可能仍然面临低

表 2 10 Gbit/s、100 Gbit/s 的光电交叉优劣对比分析

|               | ROADM                         | OTN                                          |
|---------------|-------------------------------|----------------------------------------------|
| 10 Gbit/s 系统  | 节省了再生环节                       | 再生的花费并不大                                     |
|               | CDC-F 是很大的投资                  | 灵活的架构,投资较少                                   |
|               | 受到通道数和交叉维度的限制,96 个通道,8~12 维度  | 96×10 Gbit 4 个维度的调度需要 3.84 Tbit 的矩阵          |
|               | 高建网成本,低运维成本                   | 低建网成本,高运维成本                                  |
| 100 Gbit/s 系统 | ROADM                         | OTN                                          |
|               | 与 10 Gbit/s 系统同样的线路投资         | 再生需要巨大的成本                                    |
|               | 可以灵活升级到 200 Gbit/s/400 Gbit/s | 无法构建灵活架构,96×100 Gbit 4 个维度需要 38.4 Tbit 的交叉矩阵 |
|               | 很低的建网和运维成本                    | 非常高的建网和运维成本                                  |

速业务传送的需要, 目前现网仍有大量的电交叉设备, 建议在接入和汇聚层利用电交叉设备进行低速业务的疏导和汇聚处理, 然后将大颗粒的业务交给光层交叉设备 ROADM 处理, 将光层和电层的优势分别发挥出来, 构建层次清晰的网络体系, 网络可以在光层和电层按照自身的规律分别演进和优化, 提升网络的可扩展性和灵活性。光电混合交叉的网络节点架构如图 2 所示, 运用光电混合交叉的思路, 网络层次清晰, 业务的管理和调度基于不同的传送平面, 可以有效应对低速业务和高速业务的调度任务, 高速业务和低速业务的调度和走向有着很大的不同, 需要采用不同的策略。光电混合交叉则能有针对性地提高资源利用率, 优化业务开通质量, 实现智能化调度。

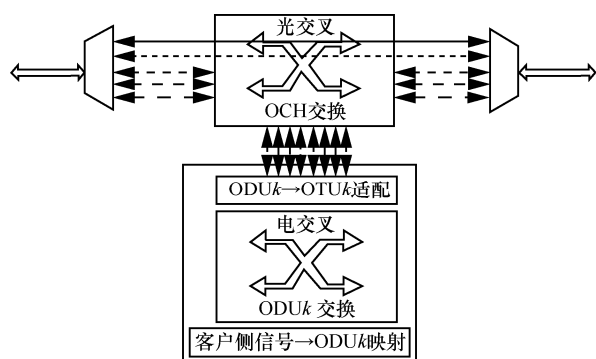


图2 光电混合交叉的网络节点架构

光层位于网络的底层, 相对于 IP 层和 OTN 电层的业务调度, 光层业务调度成本最低、功耗最低的技术方式, 如图 3 所示。越往上层的技术方式, 带来越多的成本和功耗的上升, 业务向光层的下沉带来的收益是明显的。

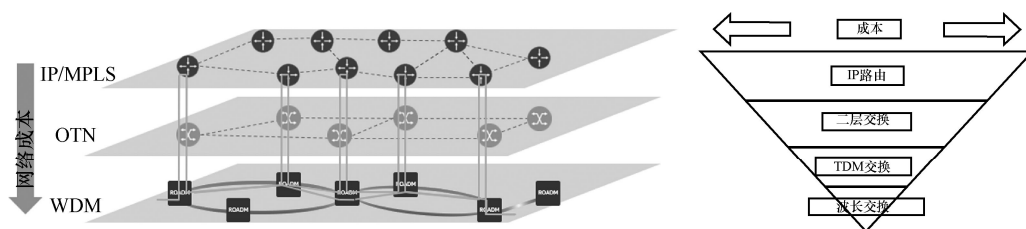


图3 业务分层网络优化

#### 4 CDC-FROADM 优势

光层的处理主要通过 FOADM 和 ROADM 的方式实现。光网络架构的演进经历了从固定连接的 FOADM 到可配置连接的 ROADM, 从点到点拓扑到网状拓扑, 从人工参与的方式到网络的智能管控, 光层和电层结合的控制平面提供业务的动态保护恢复功能, 将波长交叉的优势逐渐地彰显, 光网络演进的关键步骤如图 4 所示。目前光网络已经发展到了动态可调整的阶段。

CDC-FROADM 作为成熟的 ROADM 解决方案, 是目前 ROADM 发展的最高产品形态, 目前已经在全球获得了广泛的商用, 其典型的功能架构如图 5 所示。

波长无关方向无关竞争无关型波道间隔可调型 (colorless, directionless, contention-less, flex-grid, reconfigurable optical add/drop multiplexing, CDC-F ROADM) 能够提供多维度线路的无阻塞波长路由, 也能在业务上下路时提供无色、无向、无冲突 (colorless, directionless, contention-less, CDC) 的接入能力。无色的端口, 即一个端口可以承载任意波长的业务, FOADM 和不支持无色特性的 ROADM 端口只能上下固定的波长; 无向的属性意味着上下的业务可以连接任意方向的线路维度; 无冲突即相同的波长可以在同一个站点的上下路模块进行业务的上下。灵活栅格对于多种线路速率的支持是必须的, 不同的线路速率其通道间隔可能是不一样的, 需要基于具体的线路速率定义所需要的栅格。

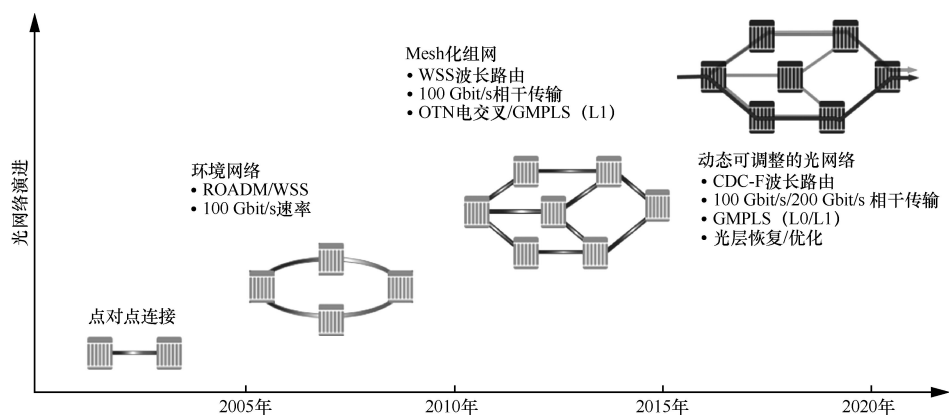


图4 光网络演进关键步骤

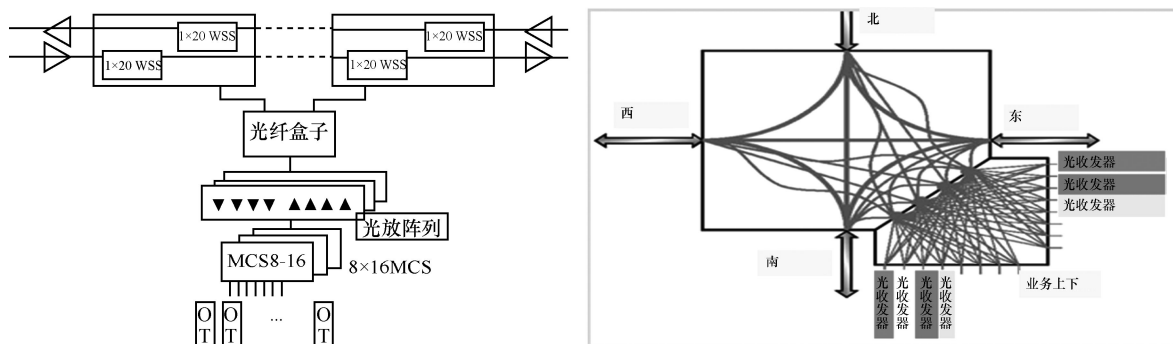


图5 CDC-FROADM 典型架构

CDC-FROADM 给光网络架构带来革命性的改变,极大地提升了光层的灵活性,增强了业务在多层、多域网络的保护和恢复功能,优化了网络业务的汇聚和疏导,灵活栅格的支持使得频谱资源利用率得到很大的提升,可以支持更大的传送容量。可编程的硬件加上超级通道的处理能力,正好契合了 CDC-FROADM 对网络架构的更新,让网络资源能够基于真实的需要被优化配置,而不是过配置或者欠配置。通过对某省级 OTN 的业务路由分析,平均每条业务需要经过 3.5 个节点,即相对 FOADM 或纯电交叉而言,如果采用 CDC-FROADM,开通一条新的业务可以减少 3.5 次下站,这会大大节约工程建设和维护过程中的成本,同时大幅缩业务开通周期。

针对电力的光传送网络, CDC-FROADM 的大颗粒光层调度和 OTN 电层小颗粒的汇聚疏导

结合起来,将构建层次清晰的网络架构,优化网络的运维,为网络的升级扩展提供灵活性。

## 5 光网络智能化的演进

在云化的时代,随着光网络拓扑的复杂化,业务速率的多样化和高速化,要求光传送网络具备更高的效率,如果仅仅依靠人工维护和网管配置,已经无法满足业务网的需求,需要能够支持自我学习的 SDN 和灵活调节的光网络,这就是智能光网络的基础,可以实现业务在不同层次的灵活调度和配置,网络运行的绿色环保,网络资源的高效利用以及支持光网络向未来演进的架构和接口。

智能光网络需要网络设备具备灵活可编程的能力以及 SDN 的演进能力,提供开放和可扩展的接口。网络设备应具备可编程能力,主要基于数

字信号处理 DSP 芯片实现, 可以针对具体的网络应用场景, 通过软件编程来定义相应的硬件能力。例如, 基于同样的硬件, 既可以支持 100 Gbit/s 超长距的干线应用, 也能支持 200 Gbit/s、400 Gbit/s 的大容量城域应用, 而这种灵活的切换通过简单的网管操作就能实现。

网络向 SDN 演进是必然的趋势, 目前的网络建设应该有这方面的考虑和布局。例如, 网元设备的北向接口可对接各种上层应用, 支持开源软件的开发。控制器提供软件可编程的功能, 利用开放的接口满足上层客户定制化需求, 光网络 SDN 的基本架构如图 6 所示。

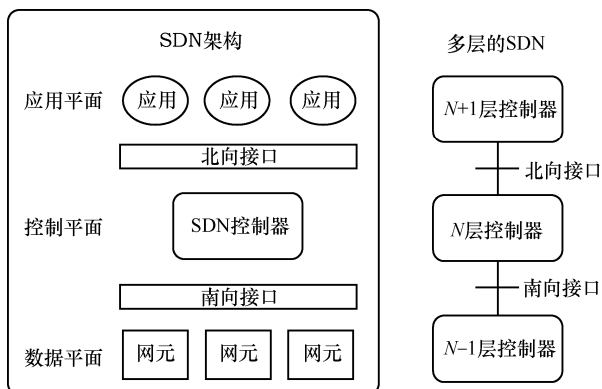


图6 SDN 的基本架构

除了 SDN 的网络演进, 多层多域的控制平面也让光传送网络具有智能管控的能力, 基于控制平面可以轻松地进行网络业务和参数的配置, 实时知晓网络资源的状况, 构建优化的端到端的连接, 根据拓扑或者业务的变化实时调整资源的配置, 优化业务路由, 在网络层面共享保护的资源(没有控制平面前的保护资源都是独占式的), 并基于优先级灵活提供多种保护和恢复机制, 如有保证的恢复(guaranteed restoration, GR)、保护和恢复结合(protection and restoration combination, PRC)、1+1 子网连接保护(sub-network connection protection, SNCP)等保护恢复方式。光层和电层协调的控制平面, 充分利用了光层和电层的优势, 在多个层次进行资源的发现、协调

和优化使用, 提升资源的使用效率, 有效保证业务的正常运行。多层、多域控制平面示意图如图 7 所示, 光层和电层的资源被协调使用, 提供保护和快速恢复。

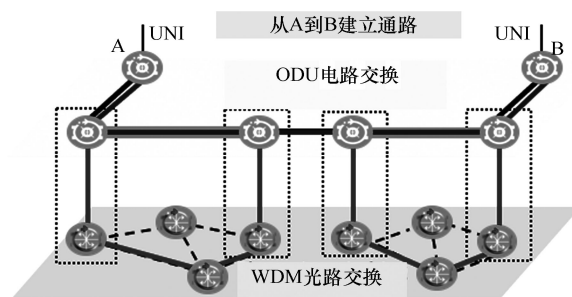


图7 多层、多域的控制平面示意图

中心化的 SDN 与分布式的控制平面结合起来, 既可以保证网络的实时反应, 又能促进网络的长期演进, 既能确保各个网络区域的智能管控, 又能协调全网资源构建优化的端到端连接。针对电力的光传送网, 可以根据现有业务的特点, 结合长期的演进趋势, 探讨 SDN 和控制平面结合的网络优化方案。

## 6 电力光传送网光电混合交叉的应用场景分析和展望

针对国内某客户省内干线的光传送网, 本文用真实的网络设备比较了不同解决方案的建设成本和运维成本。某省电力干线网络如图 8 所示(网络相似度 90%以上), 跨度达到 800 km, 18 个 ROADM 站点, 传送容量有 4 Tbit, 客户业务目前包括 GE、STM-16 和 10GE 业务; 网络扩容升级以后将变为以 10GE/STM-64 业务为主, sub-10G 业务为辅, 并计划近期增加 100 Gbit/s 业务需求。

电力行业中的业务大多数为汇聚型业务, 其中调度数据网可根据其规模分为核心层、汇聚层和接入层, 接入层主要是将用户数据接入网络, 汇聚层完成与核心层之间业务汇聚和分发, 其业务呈现典型的汇聚型特征, 传输网络实际上是完成从地调骨干节点到省级调度中心、备用调度中



心之间的业务汇聚和分发,数据通信网是用于传输电力生产调度及管理、管理与营销信息、应急通信、用户信息等综合性 IP 数据网络,由省公司核心节点、核心汇聚节点及各地市公司汇聚节点组成,业务同样是从汇聚节点向核心汇聚节点再向省公司核心节点汇聚的数据流向,对应到传输网络来说,由于核心汇聚节点呈网状结构,因此会存在部分分散型的业务需求;对于综合数据网而言,由检修公司核心节点、少量汇聚节点及各 500 kV 接入节点组成,业务也以汇聚型为特征,加上部分核心、汇聚节点之间的互联带宽需求。

以上几种数据网的业务带宽有不断增加的趋势,同时电力通信网络中还有一些带宽需求低、可靠性要求高的保护、安控类业务,这些业务因为数量大、路由组织和管理复杂、安全性要求高而备受重视,目前在国内电力系统中无一例外都是承载在 SDH 平面上,但是 SDH 平面随着整个产业链的演进也必然最终退出历史舞台,届时这类业务的处理方式可能会出现多种可能,可以通过 OSUflex 单元映射方式解决、可以通过内嵌 VC 交叉的板卡和盒子解决(类似于 MSTP 解决以太网业务接入的思路)、如果认定 SPN 切片为物理隔离则还有可能通过 SPN 实现小颗粒业务的提供等。不管采用那种方式,本文都建议将这类业务

统一规划在其中一个波道或 ODUk 里面,以便和其他业务隔离,通过特殊性能保障方式确保这类保护和安控信号的承载方式实现顺利切换。

从前面的分析可以看出,电力 OTN 中承载的业务是以汇聚型为主、辅之以少量分散型业务(如 SDH 光路承载、检修波道、数据网核心汇聚节点之间的互联电路等),总的来说呈现出的是负载不均衡的情况,一般来说省级调度中心、备用调度中心的链路容量相对大。因此,本文以容量瓶颈节点周围的波道数为基础进行分析。考虑到目前国内用户的使用习惯,采用光、电混合代替纯光交叉,以光、电混合方式和纯电交叉方案进行比较,切合实际应用场景。

#### (1) OTU 数量对比

纯电交叉应用时,信号进出电矩阵都需要光传送单元(optical transport unit, OTU)的配置,而光交叉矩阵则没有对 OTU 的要求,它是在光域进行业务的调度,没有光电转换的需要。所以电交叉会比光交叉使用更多的 OTU,而且随着业务需求的增加,OTU 数量的差异会越来越大。当 80 波配置时,纯电交叉比光、电混合方案的 OTU 使用量高出接近 90%,如图 9 所示。OTU 的成本占到网络建设成本的大部分,从这个角度而言,纯电交叉的建网成本远远高于光电混合交叉。

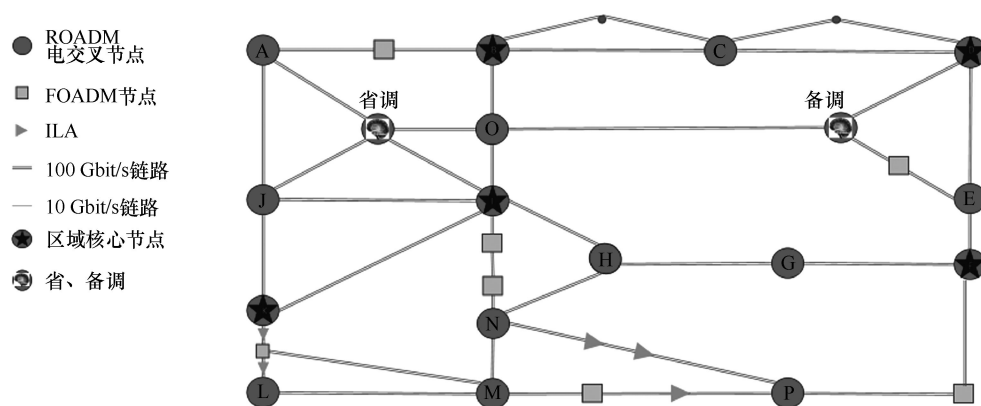


图 8 某省电力干线网络

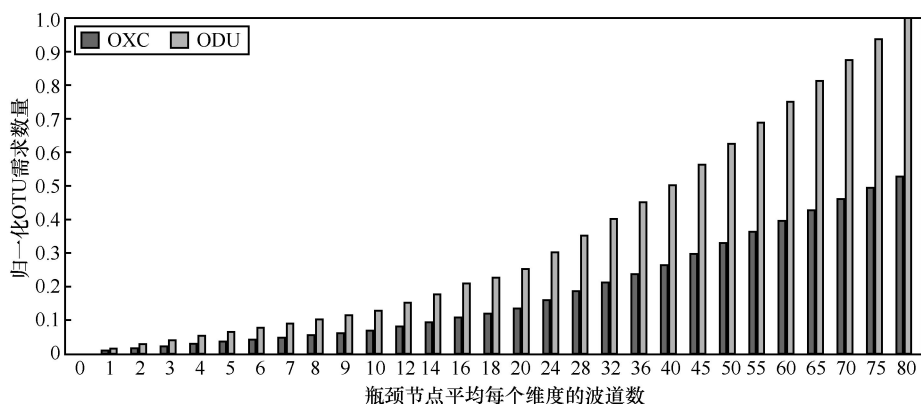


图9 两种方案的 OTU 需求对比

### (2) 机房空间占用

由于机房空间占用和子架有关,一般来说,在业务需求较少的时候,光、电交叉区别不明显,波道数越来越多的时候,光交叉的优势就越来越明显。实际上,在电力行业应用中,不同的节点位置情况差异也会比较大,依据节点业务处理功能的不同将其分为3类——省调(业务接入及传送为主)、核心位置节点(业务电中继比较多)和非核心位置(业务电中继少)节点,两种方案在不同场景下的机房占用空间对比如图10所示。就平均情况而言,在波道数量较少时二者的差异相对较小,80波配置时,纯电交叉比光、电混合交叉高出将近30%;其中省调和核心位置节点的情况差不多,由于大量的电中继板卡和业务上下板卡的存在,使得两种方案的差别非常小;差别最大来自于数量占比较大的非核心位置节点,差异甚至超过了50%。因此,需要将网络中占比较大的非核心节点的机房空间消耗降下来就有必要采用光、电混合的方案,这也是和实际项目应用需求是吻合的。

### (3) 网络扩展成本差异

由于光交叉初期有波长路由器,投入较大,对于平台建设初期而言,光交叉成本略高于电交叉,但是当业务需求增长到3个波长以上时,二者的成本趋于一致,随着波长的继续增加,纯电交叉的成本越来越高于光电混合交叉。当80波配

置,纯电交叉的网络扩展成本相对于光、电混合方案高出60%左右,两种方案的网络扩展成本对比如图11所示。

### (4) 能耗对比

两种平台在开通业务的初期,能耗没有太大差异,但随着业务的增加,电交叉的能耗就会明显高于光交叉,二者的差别也会越来越大。作为能耗对比,本文以网络稳定工作时的功耗为基础比较,但是在实际网络设计过程中,设备供电常常要以最大的功耗为基础进行设计,否则便会在掉电重启不正常的情况。

通过实际的数据分析发现,就平均水平而言,在纯电交叉方案中,当业务需求达到10波的时候,单站的平均最大功耗需求会达到6 000 W以上,考虑主、备供电,需要提供四路63 A的-48 V电源,这对电力行业的机房提出了巨大的挑战,使得全电交叉的应用受到很大的限制。同样的电源条件下,如果采用光交叉,可以满足两倍以上波长的业务需求。

总体能耗方面,业务波长数越多,纯电交叉的功耗优势越明显,到80波配置时,纯电交叉的功耗比光、电混合交叉高40%左右,和机房空间占用情况类似,对于省调和核心节点而言,两种方案的功耗差别不大,但是对于非核心节点来说,功耗差别非常大,两种方案在不同情况下的能耗对比如图12所示。

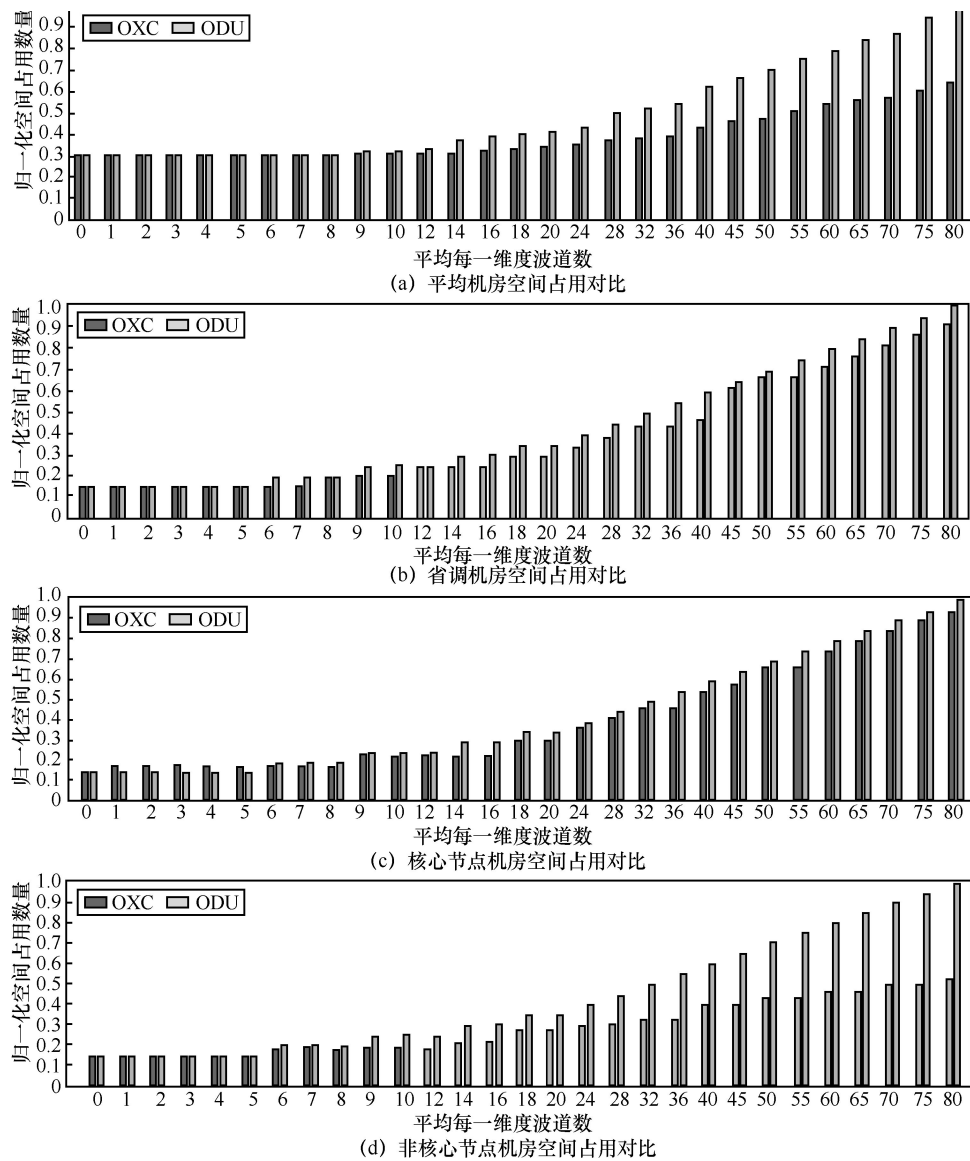


图 10 两种方案在不同场景下的机房占用空间对比

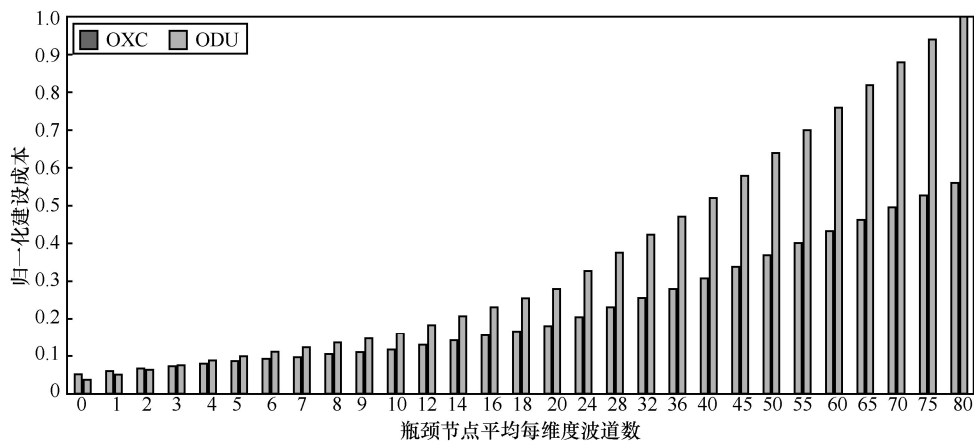


图 11 两种方案的网络扩展成本对比

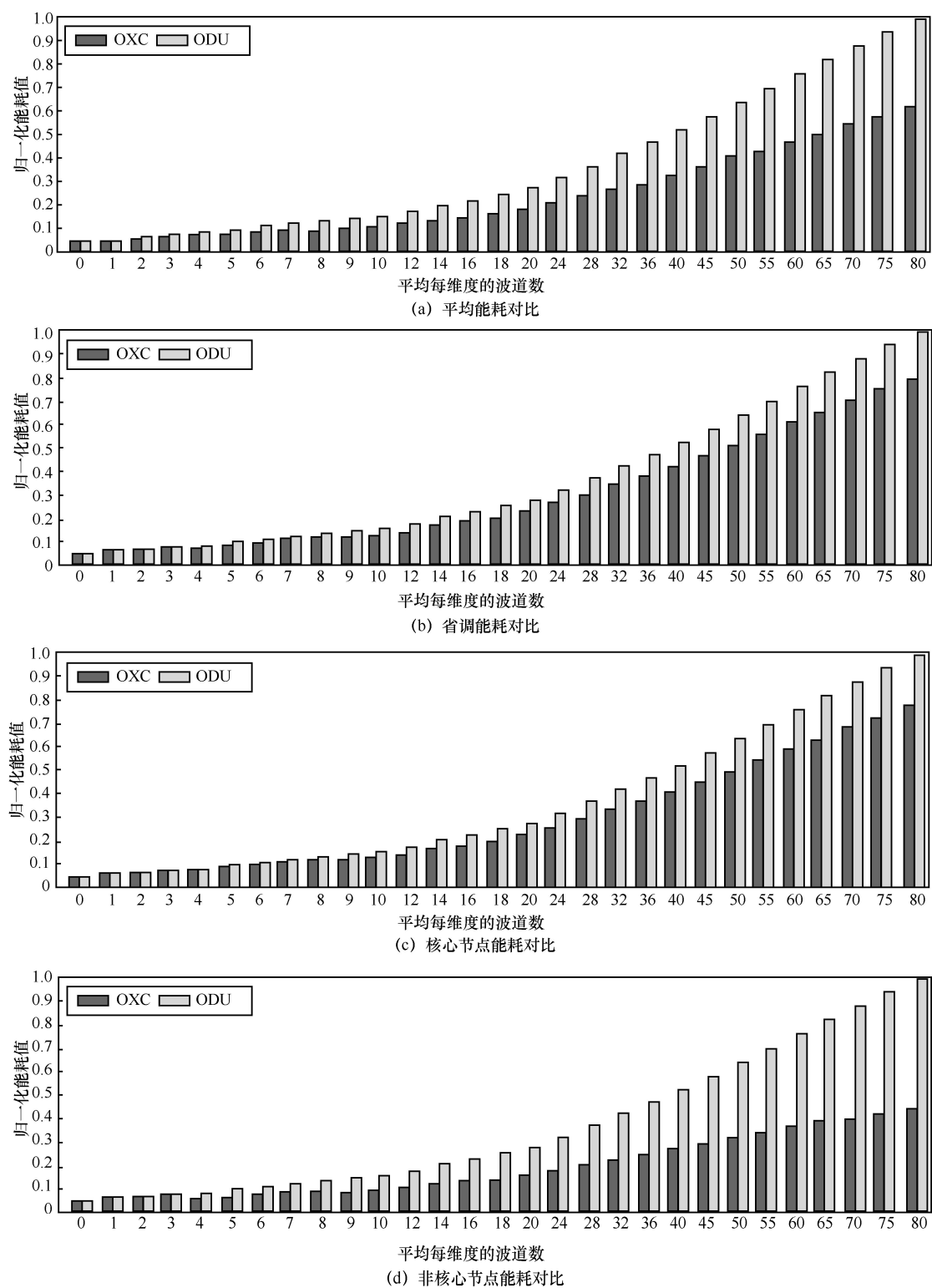


图 12 两种方案在不同情况下的能耗对比

数据分析表明, 针对这个具体的网络建设, 光电混合交叉与纯电交叉在各方面有着巨大的差

别, 特别是随着波长数的增加, 两个方案的差别更加凸显出来, 光电混合交叉有效地降低了 OTN



交叉矩阵的容量和 OTU 的数目, 80 波配置时纯电交叉要多使用 90% 的 OTU。光电混合交叉网络扩容成本明显降低, 80 波配置时纯电交叉比光、电混合交叉高出 55% 左右。运维成本也存在显著差异, 80 波配置时纯电交叉比光、电混合交叉多用 40% 的功耗。占用空间而言, 80 波配置时纯电交叉也相较于光、电混合交叉高出将近 30%。当然, 这个分析结果和具体的网络模型有一定关系, 对于网络中超长距较多, 业务电中继需求多的应用场景二者差别稍微小一点, 反之则差别更大。

从这个真实网络的分析对比, 可以看出, 纯电交叉方案在面对大容量交叉连接、高速率的信号传送等存在技术上的先天不足, 应将其定位于低速业务的汇聚和长途业务的再生。光电混合交叉可以有效降低网络投资成本, 缩减网络设备所占空间, 降低网络运维成本, 并且使传送网络变得简洁灵活, 易于升级扩展, 契合网络智能化的发展, 有助于网络向 SDN 的平滑演进。

## 7 结束语

ROADM 技术作为成熟的光交叉技术在全球范围内得到广泛的应用, 随着相关技术的不断创新, 100 Gbit/s 的传送距离已经足以支持支持 ROADM 的应用, 先进的 CDC-FROADM 技术已经被广泛地测试和应用, 为网络的演进带来了方向, 同时 OTN 电交叉已经从交叉功能转换为低速业务的汇聚和疏导。光电混合交叉有效发挥了光交叉和电交叉各自的优势, 分层处理消除了网络业务的瓶颈, 带来了智能管控的演进可能。通过对电力真实光网络的对比分析, 光电混合交叉组网将带来网络建设和运维巨大的成本节省以及网

络智能的平滑演进, 本质上这两个技术并非竞争关系, 而是互相配合、优势互补, 为电力光网络提供了优化的应用之道和升级之道。

## 参考文献:

- [1] Nokia white paper. Benefits of CDC-F ROADMs[R]. 2016.
- [2] FUJITSU white paper. CDC ROADM Applications and Cost Comparison[R]. 2016.
- [3] NOKIA 1830 Photonic Service Switching Release 10.1, product info and planning guide[S]. 2017.
- [4] ZHAO Z Q, DENG N, LI F, et al. the technical requirements on the re-configurable Optical Add/Drop Multiplexing (ROADM) system[EB]. CCSA standardization, 2017.

## [作者简介]



赵阳 (1987- ), 男, 国网冀北电力有限公司信息通信分公司工程师, 主要研究方向为电力通信系统。

宋伟 (1983- ), 男, 国网冀北电力有限公司信息通信分公司工程师, 主要研究方向为电力通信系统。

段程煜 (1989- ), 男, 国网冀北电力有限公司信息通信分公司工程师, 主要研究方向为电力通信传输。

申昉 (1990- ), 男, 国网冀北电力有限公司信息通信分公司工程师, 主要研究方向为电力通信系统。

张晓宏 (1971- ), 男, 上海诺基亚贝尔股份有限公司高级工程师, 主要研究方向为光网络系统架构。

赵继华 (1972- ), 男, 上海诺基亚贝尔股份有限公司高级工程师, 主要研究方向为光网络系统方案设计。