



专题：细颗粒光传送网

电力fgOTN通信技术应用分析

刘建明

(工业和信息化部产业发展促进中心, 北京 100846)

摘要: 随着新型电力系统建设的稳步推进和智能电网的发展, 电力通信网作为电力系统的重要组成部分, 其技术选型和网络架构设计对电力系统的可靠性至关重要。针对细颗粒光传送网 (fine grain optical transport network, fgOTN) 技术在电力通信网中的应用, 深入分析了fgOTN技术演进及其特点, 并与同步数字体系 (synchronous digital hierarchy, SDH) 和光传送网 (optical transport network, OTN) 进行对比, 发现fgOTN具备强大的管控能力、灵活的组网与业务承载能力、可靠的保护机制, 以及良好的兼容性和演进能力, 非常适合电力等行业的通信网络应用。

关键词: fgOTN; 同步数字体系; 光传送网; 电力通信网

中图分类号: TN915

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025023

Application analysis of fgOTN in power communication network

LIU Jianming

Industrial Development Promotion Center, Ministry of Industry and
Information Technology, Beijing 100846, China

Abstract: With the steady advancement of new power system construction and the development of smart grids, the power communication network, as an important part of a power system, its technology selection and network architecture design are crucial to the reliability of the power system. For the application of fine grain optical transport network (fgOTN) technology in power communication network, the evolution of fgOTN technology and its characteristics were deeply analyzed, and compared with synchronous digital hierarchy (SDH) and optical transport network (OTN), it was found that fgOTN had powerful management and control capabilities, flexible networking and service bearing capabilities, reliable protection mechanisms, and good compatibility and evolution capabilities, which were suitable for communication network applications in industries such as electric power.

Key words: fgOTN, SDH, OTN, power communication network

收稿日期: 2024-11-30; 修回日期: 2025-01-01

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2021YFB2401300)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2021YFB2401300)



0 引言

随着新型电力系统的不断推进，以风电、光伏等为代表的新能源在能源结构中的占比稳步提升。新能源在电网结构和运行特征上改变着电网，使其向多种电网主体并存的网状拓扑结构和源网荷储一体化控制模式转变。构建新型电力系统，能源电力技术面临重大发展机遇，传统学科迎来新的机遇和挑战^[1]。从终端到主站系统端到端可视、可管、可维、可控，需要一张通信网来保证。传输网络是整个电力通信的基础底座，保障控制和采集信号安全、准确、可靠传输。在通信网络可靠的前提下，构建一张骨干网更宽、配电网覆盖更广、低压台区更透明的电力通信网就显得尤为重要。

传统电力通信网，按照承载的业务和部署的站点，主要分为输变电通信网和配电通信网。输变电通信网，按照分区原则，生产控制大区业务和管理信息大区业务分开独立建网并承载相应的业务。在通信技术的选择上，当前主要为同步数字体系（synchronous digital hierarchy, SDH）和光传送网（optical transport network, OTN）。随着数字化电网的快速发展，大颗粒IP化业务逐渐增加，SDH技术存在一定的带宽瓶颈。OTN技术一定程度上可以解决带宽瓶颈问题，但存在管道颗粒度过大，无法承载生产控制类业务效率低下的弊端，无法取代SDH在电力通信网中的作用。另外，在设备供应链方面，SDH设备普遍面临退网及备品不足的问题。

本文旨在深入分析SDH、OTN和细颗粒光传送网（fine grain optical transport network, fgOTN）等传输通信技术，并从技术特点、标准演进、产业成熟度、经济性要求和安全性要求等多个角度探讨这些技术在电力通信网中的应用前景，以为电力通信网的技术选型和未来发展提供参考和建议。

1 通信技术标准的演进

1.1 SDH标准体系

根据国际电信联盟电信标准化部门（International Telecommunications Union for Telecommunications Standardization Sector, ITU-T）的定义，SDH是一个为不同速率的数字信号的传输提供相应等级的信息结构，包括复用方法和映射方法，以及相关的同步方法组成的技术体制^[2]。一方面，与通信相关业务需求逐渐发生改变，从早期的单一语音业务逐步发展成语音、数据、图像和视频等综合业务，带宽需求迅速增加；另一方面，原有的准同步数字体系（plesiochronous digital hierarchy, PDH）技术主要面向语音业务承载，且面临各种挑战，例如，缺乏全球统一的技术标准（欧洲、北美、日本各不相同）导致互操作困难、速率较低（最大仅566 Mbit/s），无法支持更大带宽业务和兼容性不足，无法支持异步传输模式（asynchronous transfer mode, ATM）、光纤分布式数据接口（fiber distributed data interface, FDDI）等业务。SDH基于PDH面临的问题进行了改进优化，例如，SDH面向语音、数据、图像和视频等综合业务承载，提供全球统一的技术标准、更大的带宽（10 Gbit/s）、兼容ATM、FDDI等各种业务。基于上述技术优势，SDH被广泛应用于各行各业，并成为行业生产网的事实标准。

SDH采用的信息结构等级称为同步传送模块（synchronous transport mode- N , $N=1, 4, 16, 64$; STM- N ）。STM-1为SDH的基本模块，4个STM-1同步复用构成STM-4，16个STM-1或4个STM-4同步复用构成STM-16，4个STM-16同步复用构成STM-64。SDH采用块状的帧结构来承载信息，每帧由纵向9行和横向 $270 \times N$ 列字节组成，每个字节含8 bit。SDH帧结构分为段开销（section overhead, SOH）区、STM- N 净负荷区和管理单元指针（administrative unit pointer, AU-PTR）

区3个区域,其中SOH区主要用于网络的运行、管理、维护及指配,以保证信息能够正常灵活地传送;STM- N 净负荷区用于存放真正用于信息业务的比特和少量用于通道维护管理的通道开销字节;AU-Ptr区用来指示净负荷区内的信息首字节在STM- N 帧内的准确位置,以便接收时能正确分离净负荷。SDH具备丰富的开销,使得SDH的管理简便。

SDH标准以G.707^[2]为基础构建,历经6次修订,并在各行各业被普遍采纳和使用,包括运营商网络和垂直行业通信网。随着移动通信和家庭宽带的迅速发展,SDH已经无法满足用户日益增长的带宽需求,逐步被大带宽的OTN技术取代,SDH在运营商市场渐渐退出,同时SDH技术标准也在2007年基本停止演进。但是在早期垂直行业,带宽需求并不强烈,SDH以其高可靠、低时延、硬隔离等优势仍然大量部署应用于电力、交通、石化等行业通信网。近年来,随着行业智能化的发展,大量高清视频、数据等新业务的出现大大增加了通信带宽需求,SDH带宽不足的问题也越来越明显,行业亟须演进到SDH下一代技术。

1.2 OTN标准体系

OTN是在波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)基础上发展而来的。WDM利用光的性能,将不同波长的光在同一根光纤中传输,实现在同一根光纤中同时传输多种业务,以提升光纤传送容量(传输容量=波数×每波传送的容量)。OTN将SDH强大的操作、维护管理(operation administration and maintenance, OAM)理念和功能移植到WDM系统中,并弥补了WDM系统在性能监控和维护管理方面的不足。OTN从最初的40波10 Gbit/s波分系统,发展到现在240波400 Gbit/s波分系统,不断突破光纤传输容量极限,甚至有设备厂商联合运营商,实现了超100 Tbit/s的传输系统。OTN技术支持客户信号的透明传送、高带宽的复用交换和配置(最小交叉

颗粒为ODU0,约等于1.25 Gbit/s),具有丰富的开销功能和前向纠错(forward error correction, FEC)能力,提高可维护性和传输性能。

OTN系统引入了电交叉功能,能够更灵活地调度业务;还增加了网络配置的灵活性,能够提供网络保护,提高安全性;改善了WDM设备的可管理性、快速故障定位、业务保护、快速开展业务、网络碎片整理、减少备件种类、投资保护、全业务支持等能力。并且,在网络保护方面,OTN利用光层性能和电交叉能力,提供不同等级的自动交换光网络(automatically switched optical network, ASON)功能,增强了业务保护的能力。

OTN技术标准以G.709^[3]为基础构建,已广泛应用于运营商跨国骨干、国家骨干、城域接入、数据中心互联和行业骨干通信网中。在互联网时代和智能化时代,OTN技术蓬勃发展,带宽逐步升高,以满足日益增长的带宽需求。同时在光层上,发展出了以全光交换^[4]为代表的光层技术,简化了光层设备数量,减少了机房占用空间。总之,业务的发展不断驱动着OTN技术的更新迭代。

1.3 fgOTN标准体系

随着无线3G/4G和宽带业务分组化发展,SDH逐步被骨干OTN及城域分组传输技术取代,但在运营商政企精品专线网、行业生产网中仍被广泛应用至今。后续的增强型OTN^[5-6]虽较好地解决了SDH网络带宽不足和设备老旧替换等诉求,并在运营商市场逐步完成了对SDH网络的替换,确保了业务的平滑迁移,但本质上是通过集成虚容器(virtual container, VC)和光数据单元 k (optical data unit- k , ODU k)平面来实现大小颗粒业务的统一承载,承载效率不高,而用单一平面解决大小颗粒承载才是长远之道。2020年,中国通信标准化协会(China Communications Standards Association, CCSA)在OTN技术标准体系下,扩展出基于信元的光业务单元(optical ser-



vice unit, OSU) 承载技术^[7-8], 提供 1 Gbit/s 以下并兼顾 1 Gbit/s 以上分组业务的综合接入, 解决了小颗粒分组业务的高效承载需求, 该标准在 2023 年 12 月定稿, 2024 年 7 月正式发布。与此同时, ITU-T 在 2020 年 3 月针对 OTN 扩展速率低于 1 Gbit/s (Sub-1G) 小颗粒技术, 立项了 G.OSU 标准^[9], 重新定义了 Sub-1G 的 OTN 技术, 即后来的 fgOTN 技术, 在聚焦小颗粒恒定比特速率 (constant bit rate, CBR) 业务的同时兼顾以太网 (Ethernet, ETH) 小颗粒业务的承载。该标准在 2023 年 2 月达成共识, 2023 年 11 月正式批准发布^[10]。

fgOTN 技术基于 OTN 标准框架定义了 Sub-1G 的细颗粒通道, 更侧重于为 E1、VC-*n*、STM-1/4 等时分复用 (time division multiplexing, TDM) 业务并兼顾 ETH 业务, 提供物理隔离和安全、可靠、高效的传输能力, OTN 技术架构如图 1 所示。由于 fgOTN 是在 OTN 技术框架下的扩展, 因此 fgOTN 与 OTN 技术具有良好的兼容性, 有利于现有 OTN 集成和演进。

国网辽宁电力公司基于 fgOTN 标准的通信设备挂网测试成功; 国网山东省电力公司联合中国电力科学研究院有限公司、国网电力科学研究院有限公司和技术有限公司开展 fgOTN 新一代光纤通信技术应用研究, 搭建 fgOTN 试验环网, 在国内率先开展继电保护业务环网运行测试

证, 测试结果表明 fgOTN 技术满足继电保护光纤通道的技术要求。

2 fgOTN 技术特点

随着 SDH 在通信网络中被逐步淘汰, 在现有的 OTN 上扩展 fgOTN 路径层, 成为用于承载专线业务的替代方案。从历史上看, 基于 TDM 机制的 SDH 网络用于传输低速率信号, 而 G.709 中定义的 OTN 最小容器为 1.25 Gbit/s, 承载低速率 (如 Sub-1G) 业务是低效的。因此, 需要定义一个新的细粒度光通道数据单元 (optical channel data unit, ODU) 层网络, 在 OTN 上提供物理隔离、安全、可靠和基于 TDM 的传输能力^[11]。

2.1 帧结构与映射结构

细粒度灵活光通道数据单元 (fine grain optical data unit flexible, fgODUflex) 提供了 $p \times 10$ Mbit/s 灵活传送容器, 其继承了 OTN 4 行 \times 3 824 列的帧结构, 并进行了优化创新, 在原 16 列开销 (1~16 列) 的基础上, 新增 16 列开销 (1 905~1 920 列), 并对开销进行优化设计, 提供了低速管道同时具备高性能 OAM 的传送能力。fgOTN 延续 OTN 的帧结构, 帧之间采用固定连接, 定帧时, 单帧帧头误码即帧失步 (out-of-frame, OOF) 不影响业务承载。fgOTN 帧结构如图 2 所示。

fgODUflex 映射到 ODU 服务层容器承载, 服务

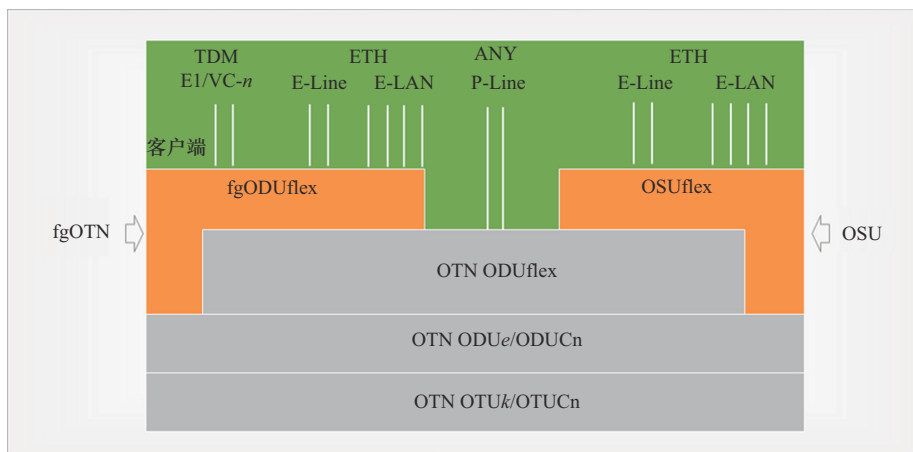


图 1 OTN 技术架构

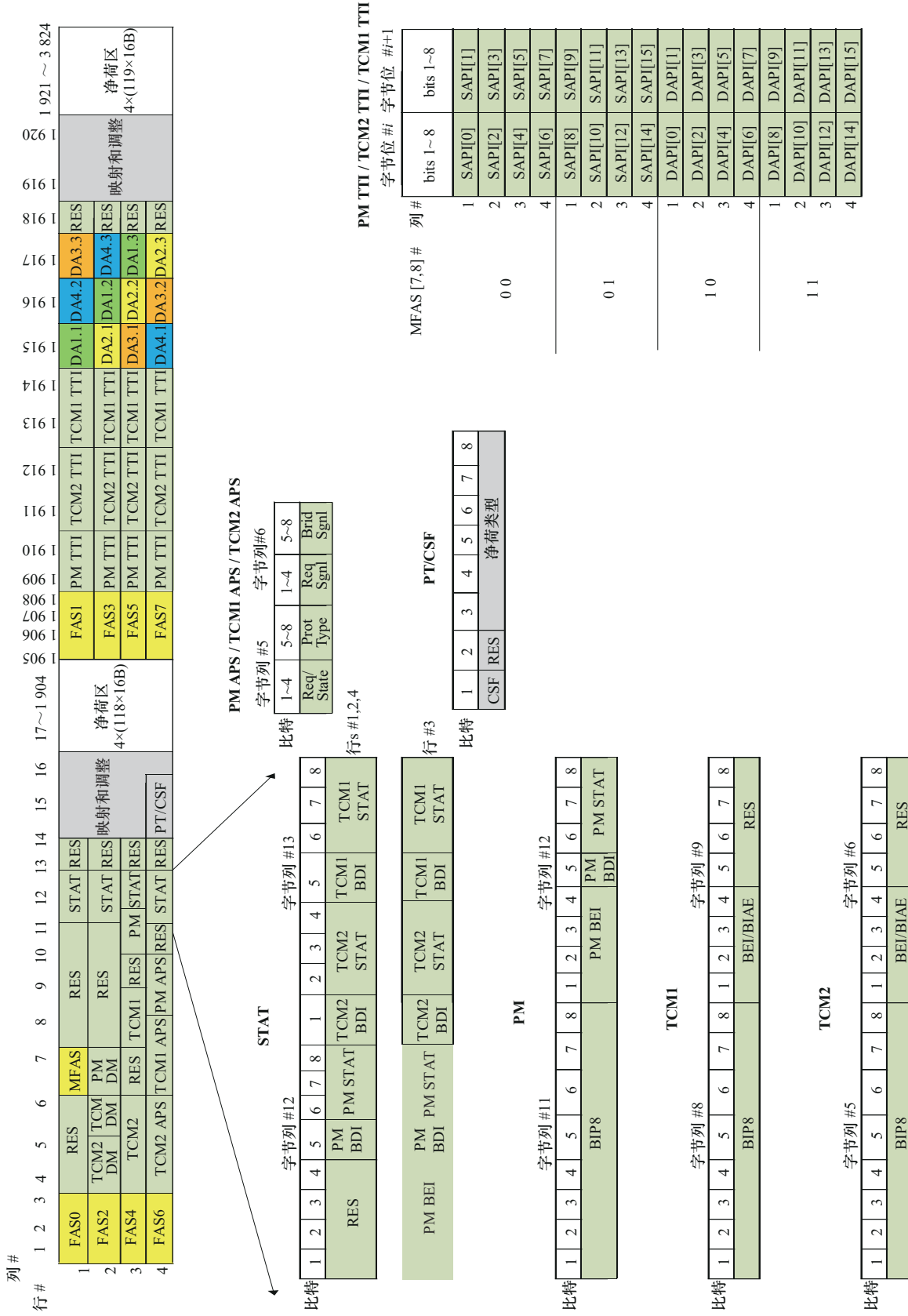


图2 fgOTN帧结构



层容器包括 1.25 Gbit/s ODU0、2.5 Gbit/s ODU1、10 Gbit/s ODU2 以及 $n \times 1.25$ Gbit/s ODUflex。其中， n 为细粒度时隙 (fine grain time-slot, fgTS)，取值 3~7。fgOTN 映射结构如图 3 所示。

CBR 业务采用通用映射规程 (generic mapping procedure, GMP)，基于 16 byte 映射粒度，映射到 fgODUflex 净荷区，为匹配低速 fgODUflex 特征，对该 GMP 映射进行了优化创新，采用了两行净荷子容器结构，一旦故障或保护倒换，可实现业务的快速恢复^[13]。同时，最新标准针对 E1 映射进行了优化，新增支持 4 路 E1 业务 (同源同宿) 映射进 1 个 fgODUflex 10 Mbit/s 容器，进一步提升了带宽利用率^[14]。CBR 业务到 fgODUflex 映射示意图如图 4 所示。

分组传输 (packet transmissions, PKT) 业务基于 66B 码块，采用映射规程 (idle mapping procedure, IMP) 映射到 fgODUflex 净荷区。具体流程：待映射 PKT 业务 (以太网 MAC 帧) 首先按照 IEEE 802.3-2022 图 82-5 的格式编码成 66B 码块，由于以太网 MAC 帧速率非恒定，需要通过增删 66B 空闲码块完成以太网 MAC 帧到

fgODUflex 净荷速率适配^[15]。PKT 业务映射到 fgODUflex 示意图如图 5 所示。

2.2 管控技术

基于 fgOTN 的 OTN 管控系统架构如图 6 所示，包含传送层、管控层和应用层。在传送层，利用独立波长的光监控通道 (optical supervisory channel, OSC) 或 OTN 帧结构的通用通信通道 (general communication channel, GCC) 开销传递管控层的数据通信网 (data communication network, DCN) 信息，其中管理平面、控制平面采用不同的通道承载，彼此物理隔离；在管控层，管控系统通过南向接口采集设备和网络拓扑等资源信息，实现路由计算、连接控制和保护恢复等功能。管控层分为单域管控和跨域管控，单域管控系统与跨域管控系统通过层间接口交互，分别实现域内和域间管控功能；应用层通过调用管控层的应用接口实现网络管控功能。

2.3 组网与业务能力

fgOTN 提供了灵活速率的承载容器，具备多样化业务承载能力，可支持 CBR 和 PKT 两大业务类型。CBR 业务包括但不限于 STM-1、STM-4、

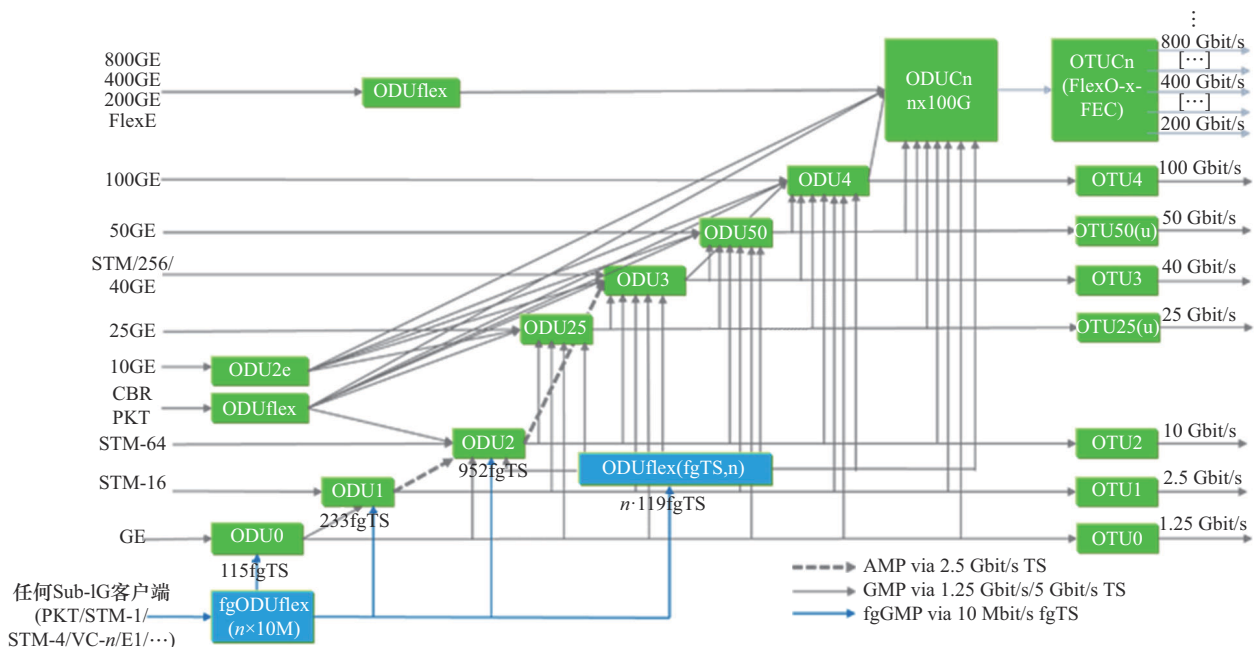


图 3 fgOTN 映射结构

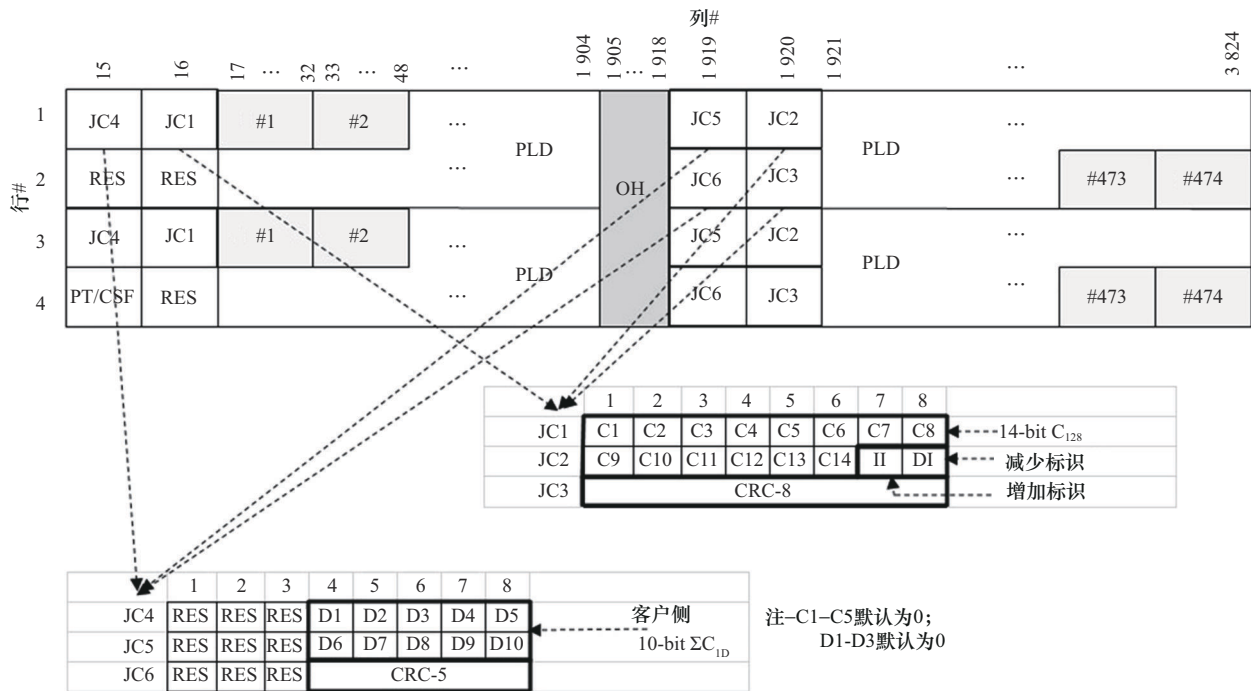


图4 CBR业务到fgODUflex映射示意图

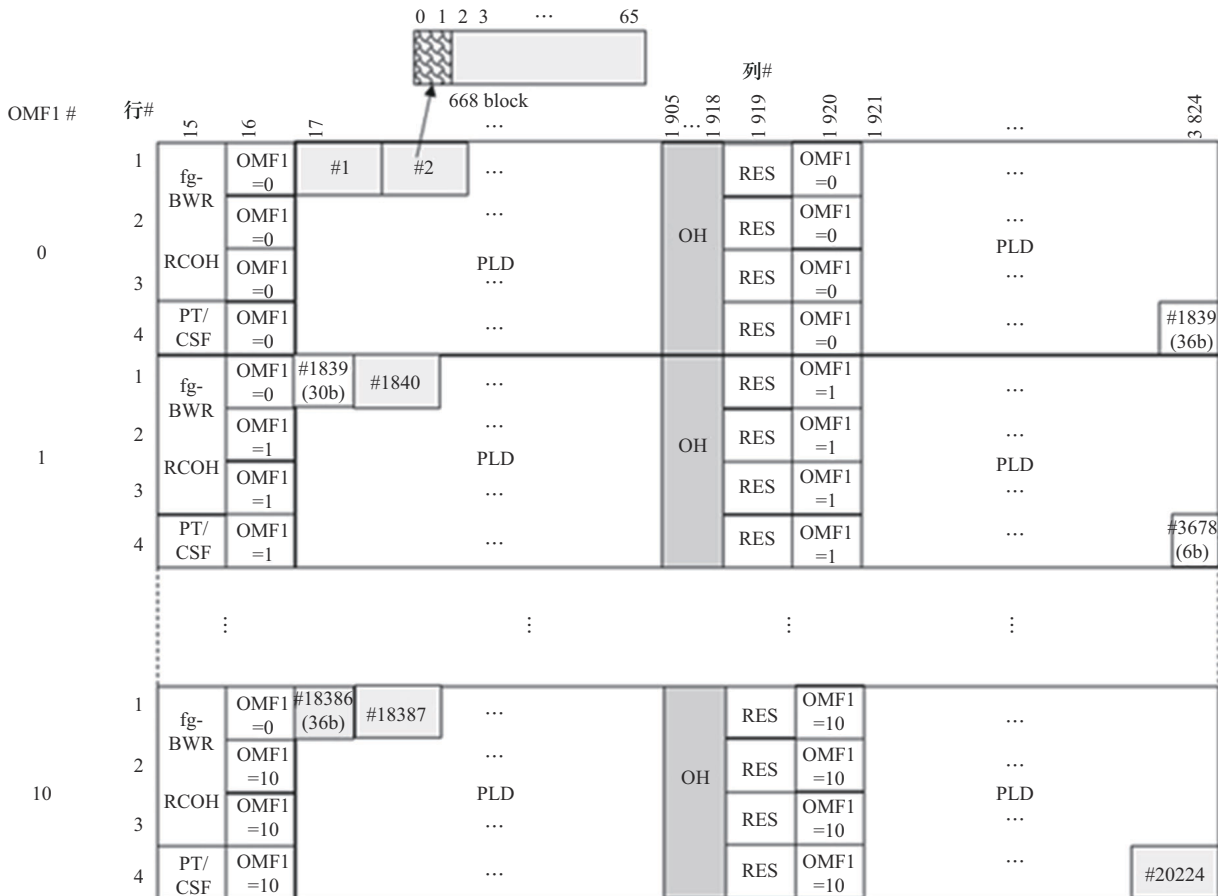


图5 PKT映射分组业务到fgODUflex示意图

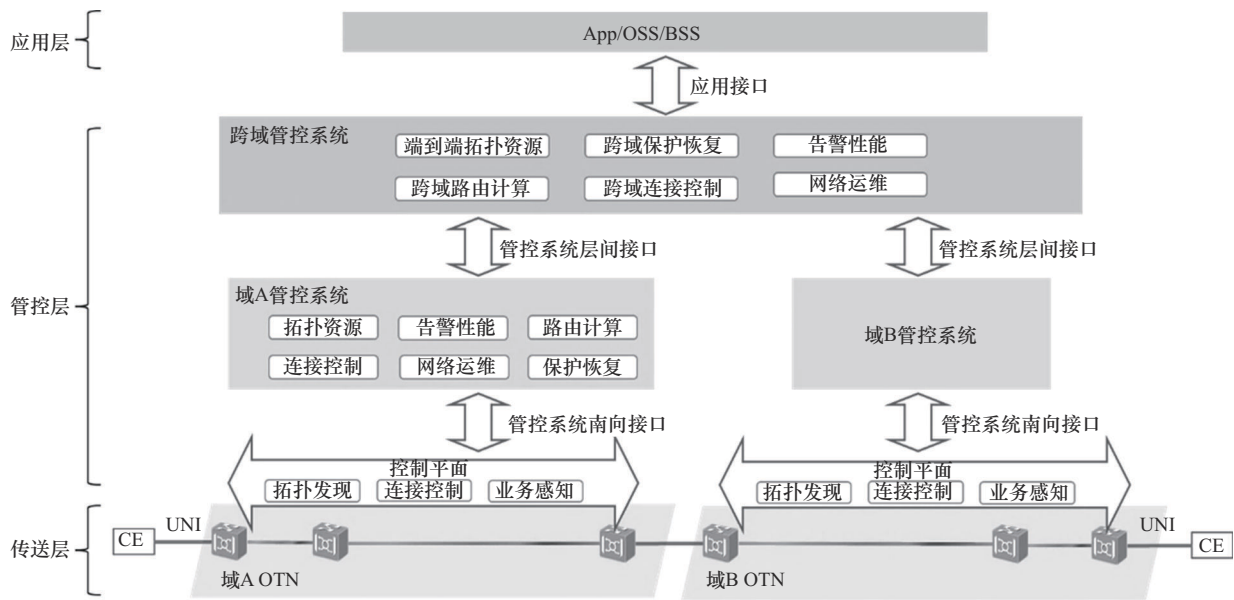


图6 基于fgOTN的OTN管控系统架构

VC-12、VC-3、VC-4、E1等，PKT业务则为任意速率的分组业务。通过映射CBR或PKT业务到ODU/fgODU承载传送，实现CBR业务及其时钟透传，以及任意带宽PKT业务的低时延/低抖动高可靠传送。

(1) fgODUflex提供CBR的业务承载

fgODUflex承载CBR业务示意图如图7所示，主要包括以下3类业务。

一是STM-1/STM-4 ↔ STM-1/STM-4的对等

网络（peer-to-peer, P2P）透传专线：在电力通信网中，承载调度数据网变电站汇聚站到调度中心站的STM-1/STM-4的POS专线业务。

二是E1（VC12） ↔ STM-1/STM-4（VC12）的点到多点（point-to-multipoint, P2MP）汇聚专线：在电力通信网中，承载调度数据网变电站接入站到变电站汇聚站的cPOS专线业务。

三是E1/2 M光（VC12） ↔ E1/2 M光（VC12）的P2P专线：在电力通信网中，承载继电保护、

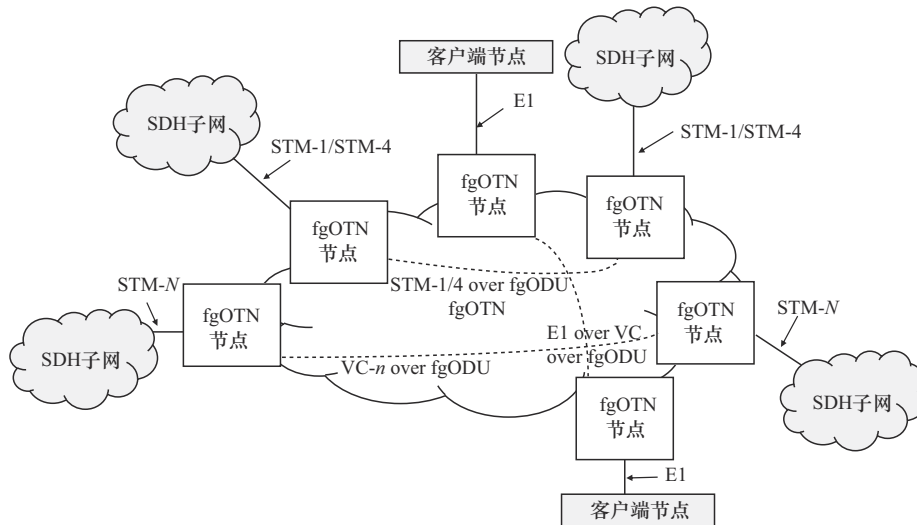


图7 fgODUflex承载CBR业务示意图

安全自动装置及调度自动化等 P2P 的 E1 专线业务。

(2) fgOTN提供ETH的业务专线承载

fgOTN承载ETH业务示意图如图8所示，主要包括以下2类业务。

一是ETH↔ETH的P2P透传专线：在电力通信网中，承载调度数据网、综合数据网、视频物联专网等ETH专线业务。

二是ETH↔ETH的P2MP汇聚型专线/专网：在电力通信网中，承载调度数据网、综合数据网、视频物联专网等，涵盖变电站接入站到变

电站汇聚站、变电站汇聚站到中心站ETH专线/专网业务。在汇聚站或中心站点，通过ETH over fgOTN单板L2交换功能实现ETH业务的汇聚。

2.4 保护技术

fgOTN技术参照SDH技术，可提供丰富的网络侧、客户侧、设备级保护。设备级保护包括主控、交叉、时钟、电源的1+1主备单板保护。为适配电力继电保护业务承载，fgODU可定制差动和无损的网络保护技术。fgOTN网络侧、客户侧保护技术分别见表1和表2。

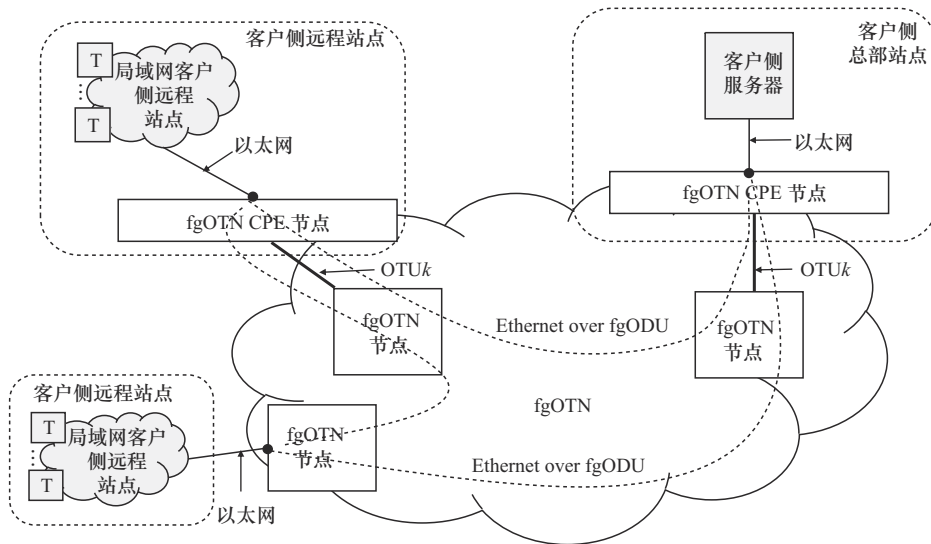


图8 fgOTN承载ETH业务示意图

表1 fgOTN网络侧保护技术

保护类型	倒换模式	业务管道	适配业务
子网连接保护 (subnetwork connection protection P, SNC) [16]	1+1 双端/单端	ODU/fgODU	E1、ETH、STM-1/4 (VC)
差动 SNCP	1+1 先拆后建+延迟+双端倒换	fgODU	继电保护 E1
E1 多路径无损	M+1 无损	fgODU	继电保护 E1
子网连接多重保护 (subnetwork connection multi-protection, SNCMP)	M+1 多路径[17]	fgODU	E1、ETH、STM-1/STM-4 (VC)

表2 fgOTN客户侧保护技术

保护类型	倒换模式	适配业务
支路保护倒换 (tributary protection switching, TPS)	处理模块切换	E1
链路聚合组 (link aggregation group, LAG)	板内端口切换	ETH
分布式板级保护 (distribute link aggregation group, DLAG)	跨板端口切换	ETH



2.5 网络同步技术

fgOTN 与 SDH 网络兼容组网时，需要采用同步技术^[18]。fgOTN 独立组网时，可不依赖系统网络时钟同步，实现业务可靠传输。

fgOTN 提出了创新的时钟透传机制，采用逐点时钟相位偏差累计，在末端节点统一处理。时钟相位差累积透传处理机制示意图如图9所示。fgOTN 时钟透传机制能满足各种 CBR 业务的时钟指标（ITU-T G.813、ITU-T G.823、ITU-T G.8251 标准）^[19]。

2.6 fgOTN 技术总结

fgOTN 技术整体上具备以下特点。

(1) 高可靠：fgODUflex 优化创新的 OAM，新 FAS 定帧字节，连续码流，固定帧连接，定帧效率高与定帧可靠性高。

(2) 物理隔离：固定 10 Mbit/s 的时隙划分，提供严格的物理隔离、硬管道传送能力。

(3) 确定性低时延：固定 16 字节时隙交织，低时延及低时延抖动。

(4) 灵活容器： $p \times 10$ Mbit/s fgODUflex 灵活容器 ($p=1 \sim 119$)，提供 Sub-1G 任意颗粒业务承载。

(5) CBR 业务时钟透传：简化 fgGMP 及时钟相位累积，CBR 业务高性能时钟透传。

(6) 毫秒级无损带宽调整：简化的一步无损带宽调整，百毫秒级别快速无损带宽调整。

(7) 纳秒级时延测量：优化的时延测量机制，纳秒级的高精度时延测量。

fgOTN 基于 OTN 框架扩展了小颗粒业务通道，在保持 TDM 机制的基础上，从定帧、时隙交织、时钟同步、时延测量等方面专门针对小颗粒业务场景进行了适配和优化。以电力行业为例，fgOTN 既可以为电力行业 I 区/II 区控制类 CBR 业务提供物理隔离、高可靠、高安全和确定性低时延的承载，又兼顾了以太网业务，为 III 区/IV 区综合数据提供承载。

3 fgOTN 和 SDH、OTN 对比

3.1 技术定位和业务支持对比

从第 2 节内容可以看出，SDH、OTN 和 fgOTN 都是基于 TDM 的传输体系，技术同源，但在发展中，OTN 和 fgOTN 也融入了一些新的技术特点，与 SDH 在技术架构、业务的封装处理、管控、兼容性等方面存在一定的差异。同时，这 3 类技术依托的产品平台的原始定位有所不同，展现的系统特点和能力也有所差异。SDH、OTN 和 fgOTN 的技术定位和业务支持对比见表 3。

由表 3 可知，SDH、OTN 和 fgOTN 在定位和业务支持上存在差异。

(1) 定位：SDH、OTN 和 fgOTN 均是基于 TDM 的技术，保障接入的业务独享式，业务之间相互隔离，业务的安全性高。

(2) 业务：SDH 是面向小颗粒业务承载的技术，支持 E1/STM-1 CBR 业务；OTN 是面向大颗粒业务的技术；fgOTN 是 OTN 体系的扩展，面向

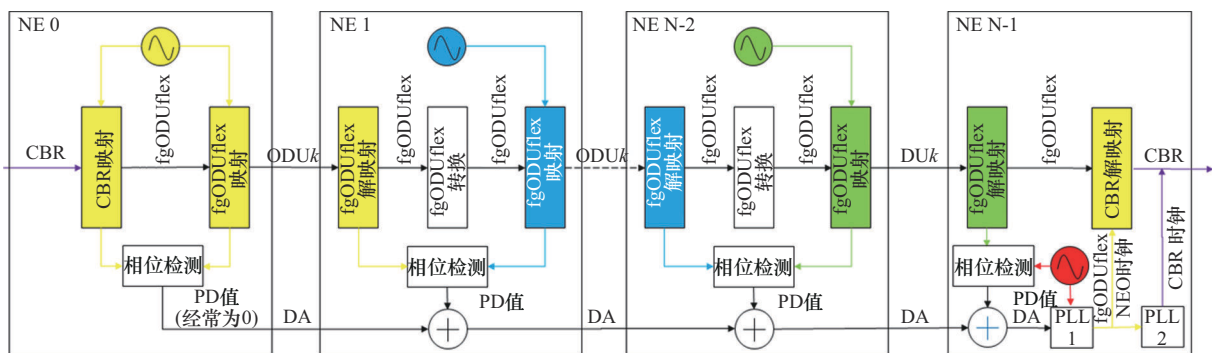


图9 时钟相位差累积透传处理机制示意图

表3 技术定位和业务支持对比

技术体系	ITU-T SDH	ITU-T OTN	ITU-T fgOTN
技术定位	小颗粒业务硬隔离承载	OTN 架构下的大颗粒（GE 及以上）业务硬隔离承载	OTN 架构下的小颗粒 CBR/ETH 硬隔离承载，替代传统 SDH 场景
业务支持	E1/STM-1/STM-4/VC-n、ETH	FE、GE、10GE、40GE、50GE、100GE 等，STM-1/STM-4/STM-16/STM-64，OTU1/OTU2/OTU2e/OTU3/OTU4 等，以及存储、视频类业务	E1/STM-1/STM-4/VC-n、ETH

小颗粒承载，ITU-T 的目标场景是替代 SDH。

3.2 组网能力对比

在工程部署中，常见的网络拓扑结构包括链状、环状、树状、星形和网状。技术的应用需要考虑组网能力，以适配不同行业不同场景的组网架构。在网络部署中，还需要考虑地理条件和光纤走向等因素对网络传输距离的影响。例如，过长的传输距离可能导致传输信号不可达，这就需要考虑引入中继设备来解决信号长距离传输的问题。在部分特殊的应用场景中，还需要关注信号的干扰问题及其对接收端信号恢复能力的影响。

组网能力对比见表4，SDH、OTN 和 fgOTN 3 种技术组网能力的主要差异如下。

(1) 组网架构：3 种技术均支持链状、环状、树状、星形和网状等网络拓扑结构，但这 3 种技术体系支持的线路带宽技术有差异，从而在支持小颗粒业务的场景下组网范围存在不同。

(2) 传输能力：SDH 主要依赖灰光传输能力，在工程上，也可额外借助光路子系统来提升传输能力；OTN 和 fgOTN 系统可以依靠本身的传输能力，在 100 Gbit/s 速率以下线路单跨可灰光可彩光，灰光能力 80 km，彩光能力相同。

4 fgOTN 兼容演进和标准

基于网络存量及技术体系分析各种兼容性演进。SDH 和 OTN 存量网络属于传统光传输网体系，fgOTN 是 OTN 技术延展，具备网络兼容性演进的基础。

(1) SDH 网演进需求

SDH 设备在网时间分布不均，每年均存在按照设备退网年限进行设备退网的情况。退网往往以插花式老旧改造为主，即用一台新的 SDH 设备（设备功能不低于要替换的老设备）进行预配置，在割接窗口期进行新旧设备替换。针对 fgOTN 的兼容演进方案，主要是通过具备 fgOTN 平面和 SDH 平面的设备，先按照 STM-N 网络接口来插花式兼容替代 SDH 网络，后续新设备与 SDH 通过 STM-N 对接，fgOTN 间通过 OTU_k 接口对接，端到端业务通过 VC-n 承载，fgOTN 之间直接开通 fgODU 通道。全部 SDH 设备老旧改造完成（8 年以上）后，fgOTN 成网，所有新开通业务通过 fgODU 承载。新一轮 fgOTN 平台老旧退网，将承载的 VC-n 通道逐步割接到 fgODU 管道，E1/STM-N 只存在于支路端口，演进完成。

表4 组网能力对比

技术体系	ITU-T SDH	ITU-T OTN	ITU-T fgOTN
组网架构（核心/汇聚/接入）	可支持链状、环状、树状、星形和网状等拓扑。 线路技术组合：STM-1/STM-4/STM-16/STM-64 模型	可支持链状、环状、树状、星形和网状等拓扑。 线路技术组合：OTU2/OTU3/OTU4/OTUC2/OTUC4/OTUC8 模型	可支持链状、环状、树状、星形和网状等拓扑。 线路技术组合：OTU2/OTU3/OTU4/OTUC2/OTUC4/OTUC8 模型
物理层单跨长距	灰光：10 km、40 km、80 km	灰光：10 km、40 km、80 km 彩光+光路子系统：80~400 km	灰光：10 km、40 km、80 km 彩光+光路子系统：80~400 km
网络端口可靠性		支持 GFEC/EFEC 多种	支持 GFEC/EFEC 多种



(2) OTN演进需求

线路侧可直接与存量OTN混合组网；存量OTN增配板卡可平滑升级支持fgOTN小颗粒业务，业务端到端可配置。

2023年，fgOTN核心标准在OTN框架下逐步完善并发布，ITU-T发布了多个关键标准，包括：G.709.20 Annex对fgOTN的整体框架和核心理念进行了总结，G.872 Annex则涵盖了fgOTN接口的定义，明确了不同设备和网络之间的互联互通要求；G.709 Amd3则对fgOTN的架构进行了详细描述，明确了小颗粒、灵活性强的光传输网络的设计与实现路径。2024年7月，fgOTN标准进一步拓展，包括G.798 Amd2设备功能标准^[20-26]，针对fgOTN设备的功能需求进行了补充，规范了设备在网络中的角色和职责；G.8251 Amd1时钟同步标准，确保了fgOTN中的时钟精度和同步性；G.808.4保护标准，进一步提高了网络的可靠性和故障恢复能力。G.874 Annex管理信息模型已立项，G.875 Annex信息模型已发布。这些新增的标准进一步丰富了fgOTN的技术框架，推动了小颗粒标准体系的不断完善。ITU-T fgOTN标准化进展见表5。

表5 ITU-T fgOTN标准化进展

fgOTN标准系列	ITU-T标准	当前状态
fgOTN总体	G.709.20 Annex	已发布
fgOTN架构	G.872 Annex	已发布
fgOTN接口	G.709 Amd3	已发布
fgOTN设备功能	G.798 Amd2	已发布
fgOTN时钟	G.8251 Amd1	已发布
fgOTN保护	G.808.4	已发布
fgOTN管控	G.874、G.875 Annex、G.874 G.875	已立项 已发布

与此同时，CCSA也在积极推动fgOTN标准的本地化发展，已于2023年年底正式立项开展《细粒度光传送网（fgOTN）技术要求》标准的制定工作。该标准于2024年8月由CCSA报批送

审通过，预计2025年上半年正式发布。该标准发布后将为国内外通信行业提供参考和遵循的技术规范。

在行业应用方面，国内的主流通信厂商积极响应fgOTN标准，并开始依托这些新标准推出相关的设备和样机。国网山东省电力公司在fgOTN承载继电保护业务方面开展了验证；国网辽宁省电力有限公司在继电保护、安全稳定控制、调度数据承载、综合数据承载等方面开展了示范验证，通过fgOTN承载现网调度数据网E1→cPOS STM-1等业务；国网福建省电力有限公司在国网泉州供电公司开展fgOTN+SDH+OTN组网验证，预计2025年完成测试验证。这些工作验证了fgOTN在实际应用中的性能和稳定性，不仅为ITU-T的fgOTN标准在我国的发展与应用提供了宝贵经验，也进一步推动了fgOTN在不同场景中的应用和推广。

综上所述，fgOTN标准体系的发展，既是OTN技术的自然延伸，也是通信行业对更加灵活、精细化、可扩展光网络需求的回应。随着相关标准的不断发布和完善，fgOTN将在未来的光网络建设中发挥越来越重要的作用。

5 结束语

fgOTN作为ITU-T定义并发布的新一代通信技术和标准，继承了SDH的核心优势，同时在OTN体系的基础上进行了扩展和创新。fgOTN结合了SDH在小颗粒业务承载方面的技术特点，能够高效支持CBR业务的需求，并通过OTN技术的带宽扩展能力，满足现代电力系统对大带宽和高传输效率的需求，适应未来电力智能化时代对通信网络的高带宽和高可靠性要求。fgOTN的技术特点包括强大的管控能力、灵活的组网与业务承载能力、可靠的保护机制，以及良好的兼容性和演进能力，非常适合电力等行业的通信网络应用。fgOTN将SDH和OTN的

优点有机结合, 具备良好的发展前景, 将成为未来电力通信网建设的重要技术方向, 也将成为电力通信网和其他行业通信网络未来发展的关键技术。

参考文献:

- [1] 袁学斌, 马文祥, 李文萍, 等. 新型电力系统建设背景下网络安全建设思考[J]. 网络安全技术与应用, 2024(3): 96-97.
YUAN X B, MA W X, LI W P, et al. Thoughts on network security construction under the background of new power system construction[J]. Network Security Technology and Application, 2024(3): 96-97.
- [2] ITU-T. Network node interface for the synchronous digital hierarchy (SDH): G.707[S]. 2007.
- [3] ITU-T. Interfaces for the optical transport network: G.709[S]. 2020
- [4] 周敏, 张健, 王寅. 全光交换网络的技术发展与演进趋势[J]. 电信科学, 2019, 35(4): 16-23.
ZHOU M, ZHANG J, WANG Y. Technology development and evolution trend of all-optical switching networks[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(4): 16-23.
- [5] 工业和信息化部. 分组增强型光传送网络总体技术要求: YD/T 2939-2015[S]. 2015.
MIIT. Overall technical requirements for packet enhanced optical transport networks: YD/T 2939-2015[S]. 2015.
- [6] 工业和信息化部. 分组增强型光传送网(OTN)设备技术要求: YD/T 2484-2021[S]. 2021.
MIIT. Technical requirements for packet enhanced optical transport network (OTN) equipment: YD/T 2484-2021[S]. 2021.
- [7] 工业和信息化部. 光业务单元(OSU)技术要求: YD/T 4855-2024[S]. 2024.
MIIT. Technical requirements for optical service unit(OSU): YD/T 4855-2024[S]. 2024.
- [8] 工业和信息化部. 基于光业务单元(OSU)的光传送网(OTN)设备技术要求: YD/T 4856-2024[S]. 2024.
MIIT. Technical requirements for optical service unit (OSU) based optical transport network (OTN) equipments: YD/T 4856-2024[S]. 2024.
- [9] GORSHE S, HUBER T. Report of e-meetings on G. osu[R]. ITU-T Rapporteur Q11/15.2020.
- [10] ITU-T. Interfaces for the optical transport network: G. 709/Y.1331 (2020) Err. 3[S]. 2023.
- [11] ITU-T. Overview of fine grain OTN: G.709.20[S].2024.
- [12] ITU-T. Architecture of the optical transport network: G. 872[S].2024.
- [13] ITU-T. Clarification of VCn client ingress adaptation for mapping to fgODUflex in G.709[S]. 2024.
- [14] ITU-T. Mapping of multiple E1 signals into fgOPUflex(1) proposal[R]. 2024.
- [15] IEEE. Standard for ethernet: IEEE 802.3-2022[S].2022.
- [16] ITU-T. Linear protection for fgMTN and fgOTN: G. 808.4[S]. 2024.
- [17] ITU-T. M+1 fgOTN protection application in power grid communication network[S]. 2024.
- [18] ITU-T. The control of jitter and wander within the optical transport network (OTN): G.8251 (2022) Amd. 1[S]. 2024.
- [19] ITU-T. Extensive verification of the fgOTN(CBR) clock solution for preserving the traditional OTN level of jitter/wander with practical DA arrival time variation[S]. 2023.
- [20] ITU-T. Considerations on fgOTN equipment functional model[S]. 2023.
- [21] ITU-T. Comments on fgOTN scope and generic processes: G.798[S]. 2024.
- [22] ITU-T. Add hitless bandwidth adjustment to fgODUflexP/ETH adaptation function: G.798[S]. 2024.
- [23] ITU-T. Add hitless bandwidth adjustment to ODUkP/fgODUflex adaptation function: G.798[S]. 2024.
- [24] ITU-T. Text proposal for fgODUflex to E1 adaptation function-schin: G.798[S]. 2024.
- [25] ITU-T. Text proposal for fgODUflexP to VC-n adaptation functions: G.798[S]. 2024.
- [26] ITU-T. Text proposal for fgODUflex TCM functions: G.798[S]. 2024.

[作者简介]



刘建明 (1955-), 男, 工业和信息化部产业发展促进中心教授级高级工程师、博士生导师, 中国电机工程学会会士, 长期从事智能电网工作。