



未来网络发展大会

FUTURE NETWORK  
DEVELOPMENT CONFERENCE

NANJING · CHINA / 中国 · 南京

# 未来网络白皮书

## ——确定性网络技术体系白皮书 (2021 版)

第五届未来网络发展大会组委会

2021 年 6 月



## 版权声明

本白皮书版权属于网络通信与安全紫金山实验室所有并受法律保护，任何个人或是组织在转载、摘编或以其他方式引用本白皮书中的文字、数据、图片或者观点时，应注明“**来源：网络通信与安全紫金山实验室**”。否则将违反中国有关知识产权的相关法律和法规，对此网络通信与安全紫金山实验室有权追究侵权者的相关法律责任。

## 编写说明

### 编写单位：

网络通信与安全紫金山实验室、华为技术有限公司、北京邮电大学、5G 确定性网络产业联盟、江苏亨通光电股份有限公司、江苏省未来网络创新研究院

### 参与单位：（排序不分先后）

东南大学、广东省新一代通信与网络创新研究院、华中科技大学、清华大学、天津大学、香港公开大学、西南大学、中国信息通信研究院、中国移动通信研究院、中国联通研究院、中兴通讯股份有限公司

### 主要编写人员：（排序不分先后）

汪硕、王佳森、吴斌伟、张晨、王严严、陈平平、贾庆民、白钰、高新平、王闯、蒋胜、闫岫、刘冰洋、黄玉栋、郑尧、彭国宇、尹淑文、黄蔚蓝、阮韬、伍勇、轩传吴、魏亮、车杭骏、梁文辉、刘爱华、莫益军、肖卿俊、张杰、刘鹏、王丹、王泽林、刘畅

## 前 言

互联网技术已经提供种类繁多的应用服务如电子商务、视频会议、语音通话等，取得了极大的成功。但现有“尽力而为”互联网不能很好满足工业、农业和服务业中新兴系统如智能制造系统、无人运载系统、超远程控制系统、智能决策系统、远程医疗系统、智慧农业系统、视频竞技系统等的超低时延、超低抖动、超高可靠的确定性通信要求。

确定性网络用于提供实时数据传输，保证确定的通信服务质量如超低上界的时延、抖动、丢包率，上下界可控的带宽，以及超高下界的可靠性。确定性网络能够满足三大产业中新兴系统的高质量通信需求。

本白皮书介绍确定性网络技术特征和需求，阐述确定性网络包括时间敏感网络（TSN）、灵活以太网（FlexE）、确定网（DetNet）、确定性 IP（DIP）网络、确定性 WiFi（DetWiFi）、第五代移动通信确定性网络（5GDN）的技术现状、发展趋势和标准，介绍确定性网络应用场景和案例，并给出确定性网络和产业融合发展的建议。

本白皮书旨在吸引更多研究、工程和产业人员参与确定性网络的理论研究、技术攻关和应用落地；通过确定性网络技术实现未来网络变革，抓住“确定性网络+”的技术和经济发展机遇，推动各行业朝着信息化、数字化、网络化和智能化的方向升级。

# 第五届未来网络发展大会白皮书

## 目 录

前 言 .....	I
目 录 .....	III
一、确定性网络背景 .....	1
1.1 确定性网络概念和特征 .....	1
1.2 确定性网络需求和意义 .....	2
1.3 确定性网络发展目标 .....	5
二、确定性网络技术 .....	7
2.1 灵活以太网（FlexE） .....	8
2.2 时间敏感网（TSN） .....	18
2.3 确定网（DetNet） .....	24
2.4 确定性 IP（DIP）网络 .....	36
2.5 确定性 WiFi（DetWiFi） .....	44
2.6 5G 确定性网络（5GDN） .....	50
三、确定性网络技术发展趋势 .....	57
3.1 FlexE 技术趋势 .....	57
3.2 TSN 技术趋势 .....	58
3.3 DetNet 技术趋势 .....	59
3.4 DIP 技术趋势 .....	60
3.5 DetWiFi 技术趋势 .....	62

3.6 5GDN 技术趋势 .....	63
四、确定性网络技术标准 .....	65
4.1 FlexE 标准 .....	65
4.2 TSN 标准 .....	66
4.3 DetNet 标准 .....	67
4.4 DIP 技术标准 .....	71
4.5 DetWiFi 标准 .....	72
4.6 5GDN 标准 .....	74
五、确定性网络应用场景与案例 .....	76
5.1 应用场景 .....	76
5.2 应用案例 .....	79
六、确定性网络行业发展建议 .....	85
6.1 发展面临的挑战 .....	85
6.2 发展阶段划分 .....	87
6.3 发展对策建议 .....	90
七、确定性网络未来展望 .....	92
附录 A：术语与缩略语 .....	93
参考文献 .....	95



## 一、确定性网络背景

### 1.1 确定性网络概念和特征

以太网自 20 世纪 70 年代诞生以来，由于其简单的网络连接机制、不断提高的带宽以及可扩展性和兼容性而被广泛使用。目前，以太网已能支撑各行各业多样的应用。

根据全球移动数据流量评估报告显示，到 2020 年全球 IP 网络接入设备达 263 亿，其中工业和机器连接达 122 亿，相当于总连接设备的一半，同时高清和超高清互联网视频约全球互联网流量的 60%。激增的数据业务，如视频传输、机器通信，带来了大量的拥塞崩溃、数据分组延迟、远程传输抖动，传统以太网用“尽力而为”的方式传输数据，只能将端到端的时延减少到几十毫秒。但许多的新兴业务，例如智能驾驶、车联网、智慧交通、工业控制、智慧农业、远程手术、无人驾驶、VR 游戏、智能服务等，需要将端到端时延控制在微秒到几毫秒级，将时延抖动控制在微秒级，将可靠性控制在 99.9999% 以上。因此，迫切需要建立一种可提供“准时、准确”数据传输服务质量的新一代网络[1][20][25]。

确定性服务质量（Quality of Service, QoS）可以提供“准时、准确”数据传输服务质量。五种典型的确定性 QoS 包括：低时延（上限确定）、低抖动（上限确定）、低丢包率（上限确定）、高带宽（上下限

确定)、高可靠(下限确定)。图 1-1 表示五种典型的确定性 QoS。确定性网络(Deterministic Networking)是提供确定性服务质量的网络技术,是在以太网的基础上为多种业务提供端到端确定性服务质量保障的一种新技术[1][20][25]。

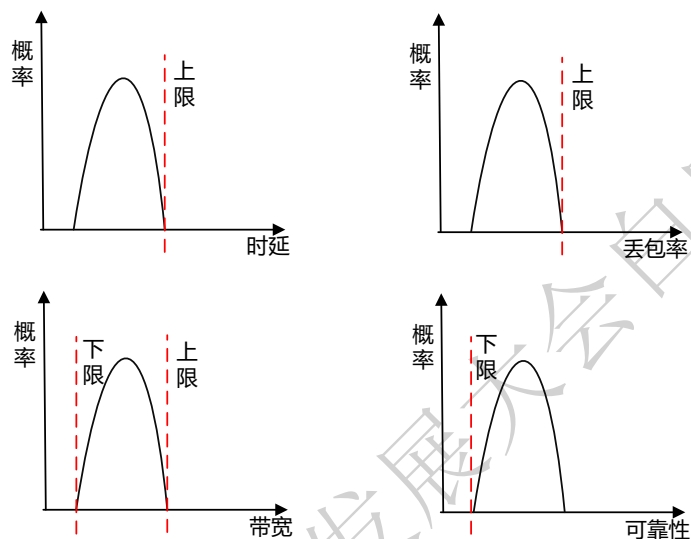


图 1-1 五种典型的确定服务质量：确定性时延、抖动、丢包率、带宽、可靠性

确定性网络特征[1][2][10][11][20][25]: 能够提供确定性服务质量, 灵活切换确定性服务和非确定性服务, 自主控制提供确定性服务质量的等级, 全面赋能产业升级, 支撑大规模机器通信、机器视觉、远程操控、人工智能、工业互联网、农业互联网、智能服务业的需求, 通信服务商深入产业一线定制化弹性供给确定性网络服务, 确定性网络服务能力一体化与多样化跨域全局协同。

## 1.2 确定性网络需求和意义

(1) 从战略角度: 确定性网络技术是新一代网络通信体系发展方向, 是网络、工业、农业和服务业强国的重要推动力。形成“确定

性网络+”的技术和产业格局对千行百业朝着数字化、网络化、智能化的高质量发展方向进一步迈进具有重要意义。

(2) 从技术层面：确定性网络是先进技术的代表，提供确定性网络服务、构建重大网络基础设施，为占领信息技术发展的制高点提供新的机遇。

确定性网络是通信厂商技术更新迭代的方向。现有以太网缺乏实时传输质量保证机制、全局时钟和同步机制、带宽保留机制、数据包过滤机制等，难以保证确定性服务质量。通过时钟同步、频率同步、流量整形、资源预留、时敏流调度、灵活切片等技术，在融合以太网实现确定性网络服务，成为通信厂商重要的技术升级需求。

(3) 从场景、产业角度：确定性网络技术的大规模落地，可以推动制造业（智能工厂，设备检修），物流业（智慧仓库，无人包裹投递），运输业（智能港口、机场、交通），影视行业（AR/VR），医疗行业（远程诊疗/手术），农牧业（智慧农场、智能产销、智能养猪），服务业（智能餐厅、服务定制、数字营销）等网络化、智能化升级。例如，对于工业控制场景，表 1-1 展示了其对确定性服务质量的要求。

表 1-1 部分工业制造场景对确定网络服务质量的要求[2]

应用	时延要求	抖动要求	可靠性及传输速率
远程控制	5 毫秒	-	99.999%可靠性, 达 10 Mbps 数据传输率
离散自动运动控制	1 毫秒	1 微秒	99.9999%可靠性, 1 Mbps 到 10 Mbps 数据传输率
离散自动化	10 毫秒	1 毫秒	99.99%可靠性, 10 Mbps 数据传输率
过程自动化远程控制	50 毫秒	20 毫秒	99.9999%可靠性, 1 Mbps 到 100 Mbps 数据传输率
过程自动化监控	50 毫秒	20 毫秒	99.999999%可靠性, 1 Mbps 数据传输率

随着通信、计算机、机械、电子、电气、自动化等领域的技术发

展，全球农业、工业、服务业也呈现出新的发展动向。为了更好地满足消费市场需求，各个产业由规模化生产或提供服务向着定制化生产或提供服务转变。居民生活水平的不断提升、消费需求的升级换代，促使各个产业向着小众化、多元化、定制化的方向发展。此外，为了提升生产、服务能力和效率，三大产业向着数字化、智能化方向转型。新兴技术如人工智能、大数据、物联网、车联网、云计算、机器人等蓬勃发展；相应地，农业、工业、服务企业的内网、外网、数据互通等通信模块均随着新技术的布局而更新迭代。总之，产品服务定制化与产业升级对确定性网络提出具体而多样的要求。

（4）从产品、服务附加值角度：各产业厂商和通信厂商希望提高技术水平、提升生产制造能力、扩大服务范围、提升服务能力和价值，因而对确定性网络提出需求。

确定性网络为各个产业厂商、公司、机构寻找新的产品和服务附加值提供契机。各产业厂商、公司在经过“确定性网络+”升级后，生产能力、制造能力、服务能力、产品服务定制化能力均有大幅提升，进而提升产品服务附加值，推动各个行业发掘新的增长点。

确定性网络是通信厂商扩大服务范围的重要选项。随着通信厂商管道化发展，通信产业链上下游各厂商希望能够为客户提供差异化、多样化、个性化的产品和服务，培育新的收入增长点。工业、农业、服务业产值高、升级空间大，通过提供高质量的确 定性网络服务，通信厂商得以深入生产经营一线，扩展服务范围和服务多样性。

确定性网络是提升通信厂商服务价值的重要依托。确定性网络严

格控制端到端抖动、时延等关键指标，满足企业对高质量通信的需求。网络切片等技术使得通信厂商可以提供差异化的服务，而高质量、差异化的服务也为通信商带来新的收益空间。

### 1.3 确定性网络发展目标

确定性网络技术以建设大规模的，可提供确定性服务质量的网络为目标，为各行各业升级提供实时、高质量、高可靠的数据传输服务，全面赋能农业、工业、服务业升级，向高质量发展转型。具体地，确定性网络发展有如下目标：

（1）占领新一代网络技术发展制高点，在融合网络中提供确定性服务，构建 LAN/WAN 确定性网络体系，实现局域、广域、有线、无线确定性网络深度集成、有机融合的布局。赋能通信服务商为大规模和超大规模农业、工业、服务园区提供定制化、确定性网络服务。

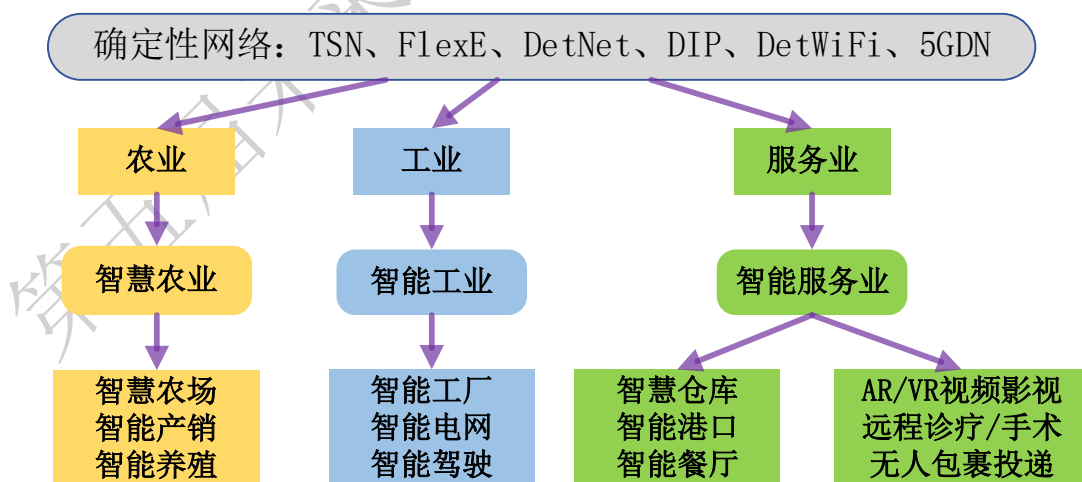


图 1-2 “确定性网络+三大产业”升级例图

（2）促进产业升级、提升消费者体验。通过确定性网络技术，实现农业、工业、服务业朝着网络化和智能化方向升级，形成“确定

性网络+”的产业格局，推动各行业产品质量、产品良率、服务质量大幅提升，实现产品和服务定制化转型。

第五届未来网络发展大会白皮书



## 二、确定性网络技术

目前，确定性网络的技术关键在于实现确定性时延、抖动、丢包率、带宽和可靠性等[1]-[5][13][20][23][25]。确定性时延主要通过时钟同步、频率同步、调度整形、资源预留等机制实现；确定性抖动和丢包率通过优先级划分、抖动消减、缓冲吸收等机制实现；确定性带宽通过网络切片和边缘计算等技术实现；确定性可靠性通过多路复用、包复制与消除、冗余备份等技术实现。

确定性网络技术目前主要包括：灵活以太网（Flexible Ethernet, FlexE）[1][3]，时间敏感网（Time-sensitive Networking, TSN）[4][5]，确定网（Deterministic Networking, DetNet）[6]-[9]，DIP（Deterministic IP）技术[20][25][27]，确定性 WiFi（Deterministic WiFi, DetWiFi）[16]-[19]，以及 5G 确定性网络（5G Deterministic Networking, 5GDN）[10]-[14][23][24]。

在确定性带宽保障方面，FlexE 通过接口技术在物理层和链路层之间插入中间层，实现业务速率和物理通道速率的解耦，提供比传统以太网更加灵活的带宽颗粒度，支撑高速大端口 400GE、1TE 等演进。通过灵活的物理接口捆绑和逻辑接口划分，提供子速率承载、硬管道及隔离等机制，构建智能端到端链路，实现网络切片，支撑带宽资源弹性灵活的分配和保障。

为保证确定性时延，IEEE TSN 工作组和 IETF DetNet 工作组分别聚焦于链路层和网络层的确定性技术，提出了全网时钟/频率同步

机制和基于时隙的门控优先级队列调度机制，即先通过门控优先级队列将时延敏感流和尽力而为流隔开，再从时间上或空间上将时延敏感流隔开，从而使网络出端口不发生排队或具有有界的排队时延。

表 2-1 典型确定性网络技术

技术名称	网络层级	支持软件定义网络	技术成熟度
灵活以太网（FlexE）	L1.5	支持	实验与商用阶段
时间敏感网（TSN）	L2	支持	实验与商用阶段
确定网（DetNet）	L3	支持	标准制定阶段
确定性 IP（DIP）网络	L2-L3	支持	实验与商用阶段
确定性 WiFi（DetWiFi）	L1-L2	支持	实验阶段
5G 确定性网络（5GDN）	L1-L3	支持	实验与商用阶段

在无线确定性方面，5G 通过高可靠通信技术，有望实现 99.9999% 的确定性连接可靠性，通过网络切片实现确定性带宽保证，借助低延迟技术和边缘计算等实现端到端确定性控制。

## 2.1 灵活以太网（FlexE）

灵活以太网（FlexE）是由 OIF（Optical Internetworking Forum）发布的通信协议，其基本思想是通过增加时分复用的 Shim 层实现 MAC 层与 PHY 层的解耦，得到更加灵活的物理通道速率，从而实现链路捆绑、子速率和通道化三种应用模式，承载各类速率需求业务 [1][3]。

基于灵活以太网的网络切片方案能够实现带宽按需灵活分配，并且专用硬管道能够实现安全、低时延的服务质量。灵活以太网技术能够通过 PHY/MAC 层协同调度实现时隙交换以保证时延、提高带宽利



用率，也能够与 SDN 技术结合实现对 L1 层的传输控制，实现网络动态调整。目前灵活以太网技术主要用于 5G 承载网场景，作为未来网络体系的基础性技术，还将进一步扩展至其他网络场景。

FlexE 技术旨在实现业务速率与物理通道速率的解耦，多个客户端可以共享 FlexE 组中物理通道的总速率，这一核心功能通过在传统以太网架构的 PHY PCS 子层和 MAC 中间插入一个额外逻辑层 FlexE Shim 层并通过基于 calendar 的时隙分发机制来实现。Shim 层将业务逻辑层和物理层隔开，在 FlexE1.0 标准中可以把 FlexE 组中的每个 100GE PHY 划分成 20 个时隙的数据承载通道，每个 PHY 所对应的这一组时隙被称为一个 sub-calendar，其中每个时隙对应的带宽为 5Gbps。根据客户端和 FlexE 组的映射关系，FlexE 可提供链路捆绑、子速率和通道化三种应用模式。

(1) 链路捆绑：将多个物理通道捆绑起来，形成一个总速率的逻辑通道，利用多个低速率物理管道来支持更高的速率的客户端，实现大流量的业务传输，可以替代 LAG (Link Aggregation Group, 链路聚合组) 或 ECMP 并且能够避免哈希算法带来的低效率。如图 2-1 所示，4 路 100GE 的物理通道可以实现 400G MAC 速率传输。

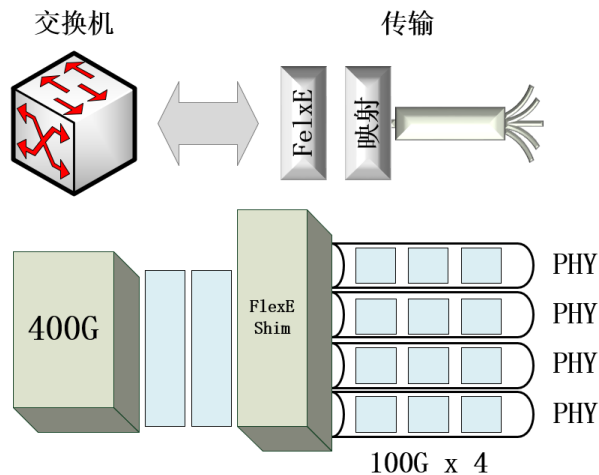


图 2-1 链路捆绑示意图

(2) 子速率：当单条客户业务速率小于一条物理通道速率，多条客户流共享一条物理通道时，能够在一条物理通道的不同时隙上分别传递多个客户业务，多条客户业务流采用不同时隙，实现等效于物理隔离的业务隔离，提供了一种不需要流量控制的物理通道填充方法。提高物理通道的带宽利用率与物理通道的传递效率，实现网络切片功能。如图 2-2 所示，当客户端业务速率为 150G，一路物理通道为 100GE 时，这 150G 业务采用时分复用的思想分到两路物理通道的多个时隙来实现传输。

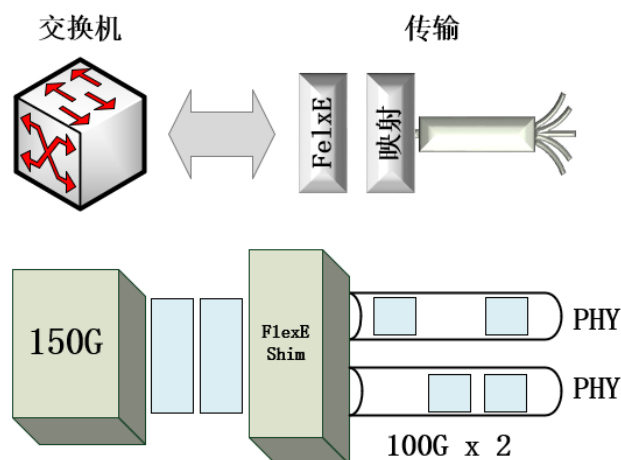


图 2-2 子速率示意图

(3) 通道化：客户业务在多条物理通道上的多个时隙传递，分布在多条不同物理通道的多个时隙上，多个客户共享多个物理通道。客户业务在 FlexE 上传递时，根据实际情况选择不同的时隙组合，合理利用物理通道带宽。如图 2-3 所示，用户业务具有不同的速率需求，而物理通道只有 100GE 这一种，类似于复杂化的子速率模式，所有这 400GE 的客户业务共享这 4 路 100GE 的物理通道，客户业务通过时分复用的思想分到不同物理通道的不同时隙中。

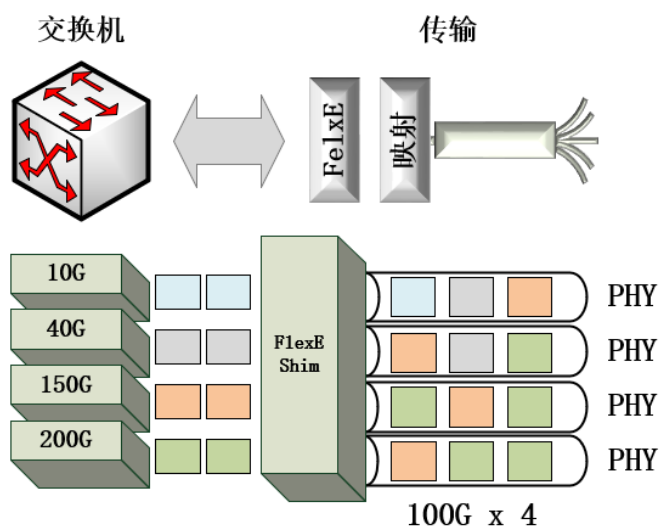


图 2-3 通道化示意图

### 2.1.1 FlexE 架构

FlexE 技术在 IEEE802.3 基础上引入了 FlexE Shim 层，可以看作将 Shim 层置于 PHY 层 PCS（Physical Coding Sublayer，物理编码子层）上与以太网的 MAC 层进行对接，FlexE 的架构如图 2-4 所示。其中物理层的 PCS 功能模块能够实现对业务流进行 64/66 编码并进行扰码，实现 Lane 分配和 AM（Alignment Marker，定位标志）信息

块的插入。

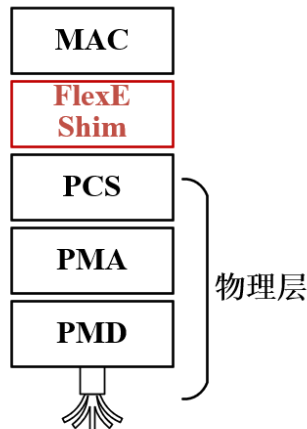


图 2-4 FlexE Shim 结构

在 FlexE 中，主要包含 Client，Shim 和 Group 三种组件。FlexE Client 指的是对应于网络的各种用户接口，与现有 IP/Ethernet 网络中的传统业务接口一致，FlexE Client 可根据带宽需求灵活配置，支持各种速率的以太网 MAC 数据流（如 10G 40G n\*25G 数据流，甚至非标准速率数据流），并通过 64B/66B 的编码的方式将数据流传递至 FlexE Shim 层。FlexE Group 本质上就是 IEEE 802.3 标准定义的各种以太网 PHY 层，由于重用了现有 IEEE 802.3 定义的以太网技术，使得 FlexE 架构得以在现有以太网 MAC/PHY 基础上进一步增强。Shim 作为核心部件，是映射或反映射 client 和 group，实现 client 对 group 的多路复用以及 group 到 client 的解复用。

### 2.1.2 FlexE 技术

#### (1) FlexE Shim 层

FlexE Shim 层通过对 64/66 编码后的客户端业务流进行时隙排

列、成员分发和开销插入三个步骤实现 FlexE 速率与物理通道解耦的核心功能，其实现客户业务承载的工作流程就是 Shim 层实现多路复用的过程，如图 2-5 所示。

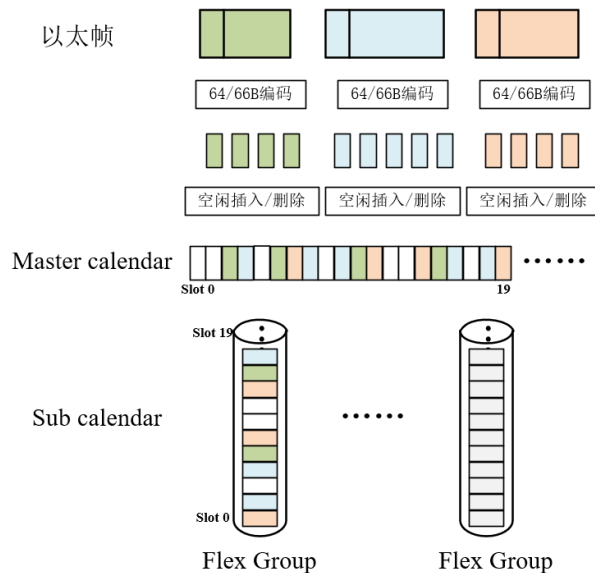


图 2-5 FlexE Shim 业务承载流程

首先，经过了 64/66 编码，所有的 FlexE 客户端必须进行速率调整，以匹配 FlexE 组的时钟。所适应信号的标称速率略小于 FlexE 客户端的标称速率，以允许为 FlexE 组的 PHYs 上的对齐标记和 FlexE 开销的插入留出空间，还会生成错误控制块用于插入未使用或不可用的日历插槽。然后，每个 FlexE 客户端的 66 比特块按照一定顺序进入到 calendar 中，calendar 中的 66B 比特块再按照一定的顺序分配到 FlexE 组的每个 PHY 物理通道中，并且由控制功能管理每个 FlexE 客户端被插入到哪个日历槽中，并在传输方向的每个 FlexE PHY 上插入 FlexE 开销。最后每个 PHY 的 66B 比特块流通过插入对齐标记分配到该 PHY 的 PCS 通道，在 100GBASE-R 栈的 PMA 服务接口上出现。

在业务流的接收端 FlexE 再使用解复用功能恢复信号，其过程是复用功能的逆过程，经过解扰码，恢复出 66 比特块，寻找 FlexE 开销块，确定 sub calendar，所有 sub calendar 拼装出 master calendar，从中找出每条客户业务流，然后通过 idle 块的插入和删除进行速度调整，进行 64/66 反编码，恢复出原始客户业务。

### 1) FlexE 帧

由于 FlexE 的灵活多变，相同的物理链路上所承载的逻辑端口可能是不同的，这就要求在传输数据的过程中有额外的信息能够标志物理链路具体所承载的逻辑端口情况。FlexE Shim 层通过 Overhead 提供带内管理通道，支持在对接的两个 FlexE 接口之间传递配置管理信息，实现链路的自动协商建立。具体而言，以 100GE PHY 为例，一个开销复帧(Overhead MultiFrame)由 32 个开销帧(Overhead Frame)组成，一个开销帧则由 8 个开销时隙(Overhead Slot)组成。Overhead Slot 如图 2-6 中黑色数据块所示，实际上是一个 64/66B 的原子数据块。Overhead Slot 每隔 1023 个“20 Blocks”出现一次，但每个 Overhead Slot 中所包含字段是不同的。开销帧中，第一个 Overhead Slot 中包含“0x4B”的控制字符与“0x5”的“O Code”字符等信息。在信息传送过程，对接的两个 FlexE 接口之间通过控制字符与“O Code”字符的匹配确定第一个开销帧，从而在二者之间建立了一个独立于图 2-6 绿色 Slot 的数据通道之外的管理信息通道，实现对接的两个接口之间配置信息的预先协商等。例如，某个 FlexE Client 数据流在发送端的 FlexE Shim/Group 中的数据通道 Slot 映射信息位置等内容传送到

接收端后，接收端可以从数据通道中根据发送端的 Slot 映射等信息恢复该 FlexE Client 的数据流。FlexE 的带内管理还可以交互两个接口之间的链路状态信息，传递 RPF（Remote PHY Fault）等 OAM 信息。

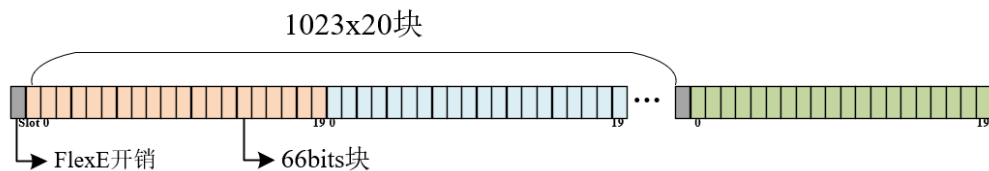


图 2-6 FlexE 帧结构示意图（以 100GE 为例）[30]

## 2) calendar 结构

FlexE Shim 使用 calendar 将 FlexE 组的每个 PHY 的 sub calendar 上的 66 比特块位置分配给每个 FlexE 客户端。calendar 的粒度为 5G，每 100G 的 FlexE 组可以分为 20 个时隙，每个时隙都能够容纳一个 66 比特块。支持两种 calendar 配置：“A”和“B”calendar 配置。提供这两个 calendar 配置是为了方便重新配置。

对于 n 个绑定 100GBASE-R 的 PHY 组成的 FlexE 组，calendar 的逻辑长度为 20n。按 calendar 分配的比特块被分配到长度为 20 的 n 个 sub calendar。并进入到 FlexE 组的 PHY 中传输。

FlexE 通过为每一个 Client 提供 Slot/Calendar 配置可更改机制，实现所需带宽的动态调整。FlexE 中，对接的两个接口之间通过开销管理通道实时传递体现 Client 在 Group 中映射关系的两种不同 Calendar 配置信息：A 和 B（分别由“0”或“1”bit 表示）。两组 Calendar A/B 可以动态切换，从而实现对应 Client 的带宽可调整。任意一个



Client 的带宽在两组 Calendar A/B 之间可能是不同的，通过切换，并进一步结合系统应用控制可以实现无损带宽调整。Calendar A/B 的切换通过开销管理通道内嵌的 Request/Acknowledge 机制实现。

## (2) 交叉传输

FlexE 一层交叉是 FlexE 的一个重要应用，用于数据中继过程中减少数据的传输时延。FlexE 一层交叉是指一个 FlexE 组接收端收到的数据不通过 FlexE 客户端 (Client) 进入到 MAC 层，而是直接从 FlexE 客户端转发到另一个 FlexE 组的客户端，如图 2-7 所示，数据从 PE (源) 向 PE (宿) 发送，途径的交换机为 P，数据到达 P 时不会将数据传向 MAC 层，而是通过交叉传输的方式直接从 Shim 层传向下一个节点，并在到达目的接收端再解码上传数据。这种交叉传输的方式是实现端到端 FlexE tunnel 的核心，是构成了 L1 层承载网的基础。

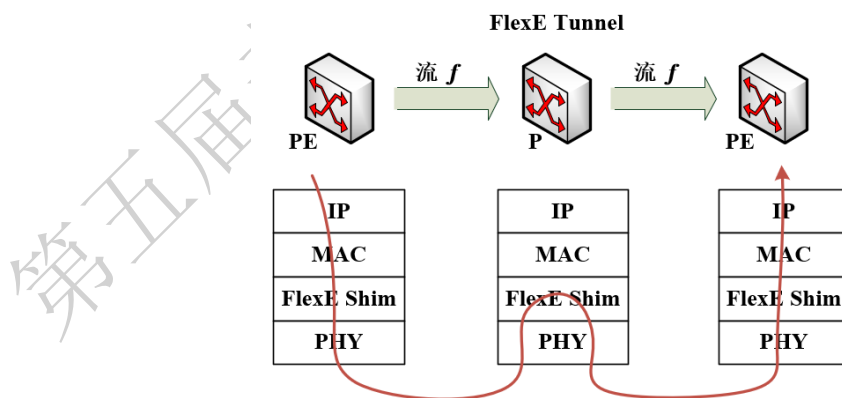


图 2-7 FlexE tunnel 传输示意图

## (3) FlexE tunnel 运行管理和维护

由于在 FlexE 中，数据通过一个端到端的“隧道”直接进行传输，不再通过 MAC 层所获取的信息决定下一跳的转发，所以 FlexE tunnel



技术的实现需要额外的信息来进行传输管道的端到端监控和数据的传输控制,因此在 FlexE 中加入了携带 OAM(Operation, Administration and Maintenance, 运行管理和维护)的信息块。OAM 是一个特殊的信息块,是基于 IEEE802.3 码块的扩展,符合 64/66 编码规范,并且具备特殊的标志,可以在接收端被识别和提取。

为了保证数据在网络中传输的可靠性,需要在 FlexE tunnel 中传输时对数据进行保护。FlexE tunnel 技术中保护策略在业务数据正在传输的 tunnel 出现故障时快速将客户业务切换到另外一条 tunnel 进行传输,其保护模式分为“1+1”保护和“1:1”保护两种。

如图 2-8 所示,“1+1”保护模式允许数据同时在两条 tunnel 中传输,并在传输目的点同时检测两条 tunnel 的数据传输的质量,从传输质量高的 tunnel 中接收客户业务数据。

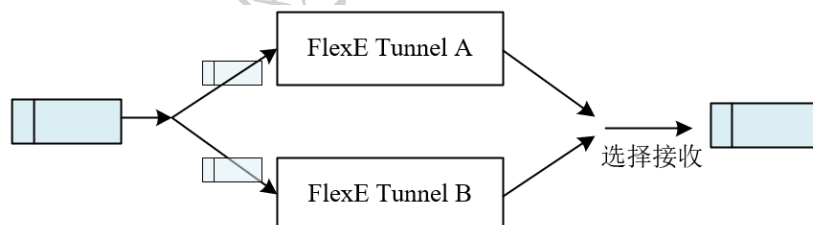


图 2-8 FlexE tunnel “1+1” 保护模式

如图 2-9 所示,“1:1”保护模式存在两条承载通道 tunnel: 主通道 tunnel 和备通道 tunnel。在正常工作时,客户业务在主通道 tunnel 传输,备通道 tunnel 可以传输低优先级客户业务。当主通道 tunnel 出现故障时,发送到和接收端协商并决策,同时将客户从主通道 tunnel 切换到备通道 tunnel 中传输。

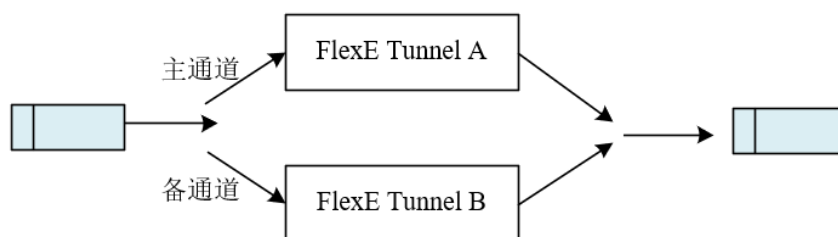


图 2-9 FlexE tunnel “1: 1” 保护模式

## 2.2 时间敏感网（TSN）

时间敏感网（Time-sensitive Networking, TSN）用于解决二层网络确定性保证问题[1][2]，目前主要应用于汽车控制领域、工厂内网、智能电网、5G 等场景。TSN 通过一系列协议标准实现零拥塞丢包的传输，提供有上界保证的低时延和抖动，为时延敏感流量提供确定性传输保证。

### 2.2.1 TSN 架构

TSN 形成场景和网络架构如图 2-10 到图 2-13 所示[5][26]。根据网元在网络中的位置，TSN 架构中的核心元素可以分为网关、桥设备、端设备三个角色。网关设备主要部署于 TSN 域边缘，实现跨层及跨异构域之间的互通。网桥设备主要部署于 TSN 域内部，实现域内的互联互通。端设备则指具备时间敏感网络功能的工业设备，包括车、工业自动化设备等。

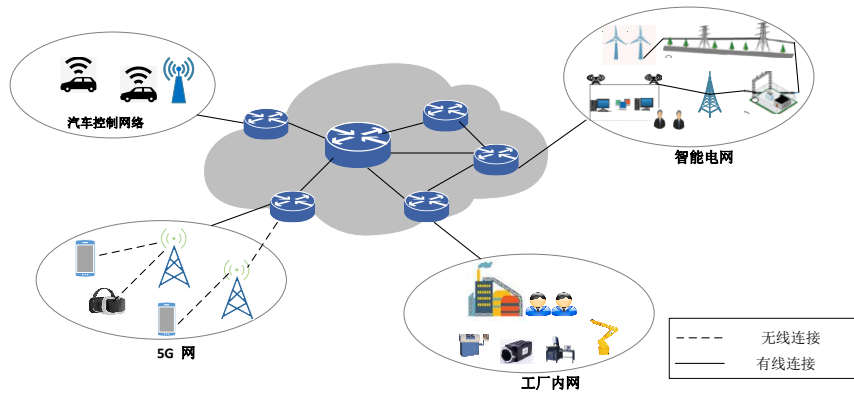


图 2-10 TSN 形成场景

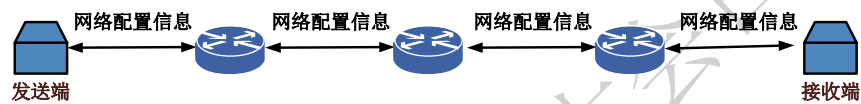


图 2-11 全分布式用户和网络

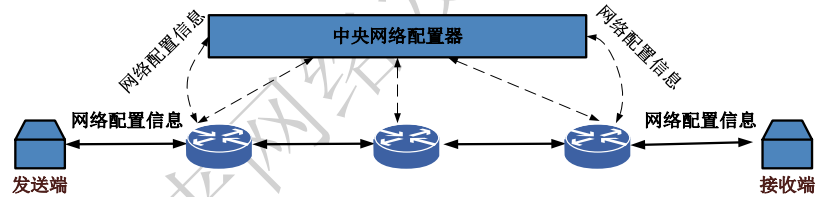


图 2-12 集中式网络、分布式用户

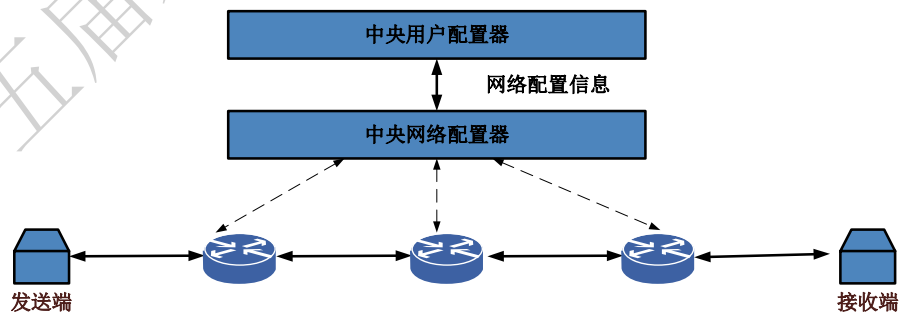


图 2-13 全集中式网络 and 用户

TSN 桥将控制面和数据面分开。控制协议作为高层的实体，如 SDN 控制器可以代替分布式协议提供控制能力。数据面包括了一个

MAC 中继节点和至少两个端口，如图 2-14 所示[26]。

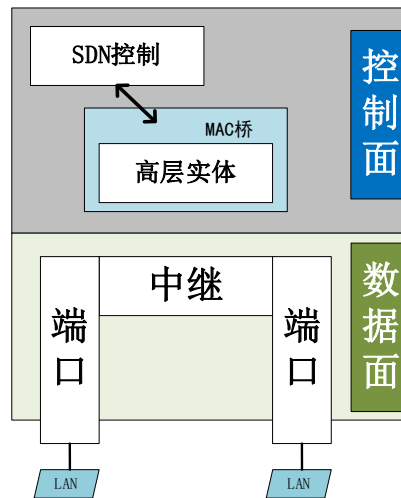


图 2-14 IEEE 802.1 TSN 桥

## 2.2.2 TSN 技术

为了实现局域网的确定性传输，时间敏感网络实现了精确的网络时间同步机制，调度不同优先级流量的流量整形机制、资源预留机制和时间敏感流量配置机制。

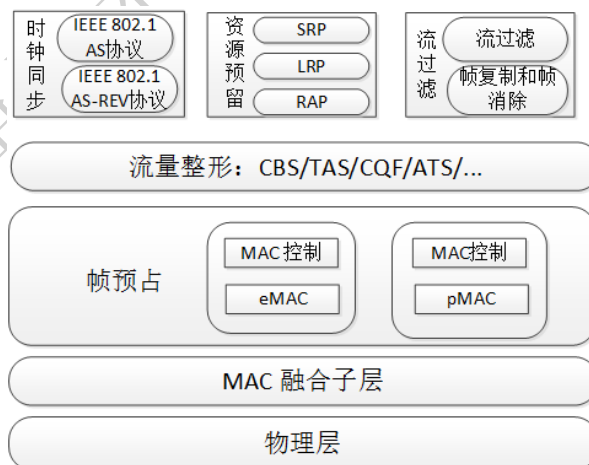


图 2-15 TSN 技术体系

### （1）时间同步机制

精准的网络时间同步是实现确定性网络的基础，在 TSN 协议中，

IEEE 802.1 AS 和更新的修订版本 IEEE 802.1AS-REV 可以实现亚微秒级的时间同步。IEEE 802.1AS 采用 IEEE 1588-2008 中的通用精确时间配置协议，简称 gPTP 协议。gPTP 协议通过 BMCA 算法建立主从结构形成 gPTP 域，然后选出最精确的时钟源作为 GrandMaster(GM) 时钟。在 gPTP 域内，主时钟和从时钟之间不断传递时间信息，并将时间与 GM 时钟进行同步。IEEE802.1 AS-REV 增加了在多个时域进行时间同步的功能和冗余的能力，既能在某域内 GM 时钟发生故障时实现快速切换到其他域的功能，还能提高时间测量精度。目前还存在时间精度与硬件成本之间的权衡问题。

## (2) 网络流量整形机制

为了实现确定延迟，TSN 利用帧抢占和流量整形机制在以太网链路中实现确定的传输路径，流量整形机制通过为高优先级流量提供确定的传输时隙来提供确定的传输时延，避免突发流量造成的重传和丢包的影响。目前已经发布了几种流控制标准，比如 IEEE 802.1Qav (Credit-based Shaper, CBS)，IEEE 802.1Qbv (Time-aware Shaper, TAS)，802.1Qch (Cyclic Queuing and Forwarding, CQF) 和 IEEE 802.1Qcr (Asynchronous Traffic Shaping, ATS)。

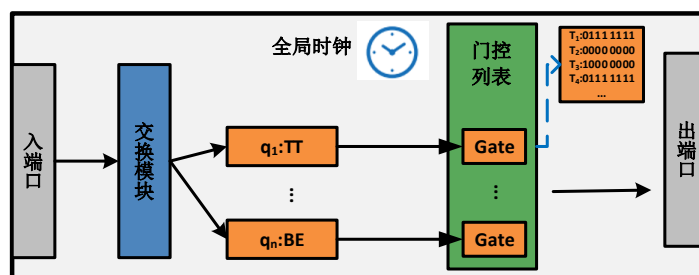


图 2-16 TSN 门控调度

**CBS 整形器：**CBS 主要应用于音视频流量，它利用信用指标将传输时间分为允许高优先级流量和普通优先级流量传输的两个时隙。CBS 可以将单跳延迟限制在 250 微秒，但是增加了网络平均延迟。

**TAS 整形器：**TAS 可以提供更精确的确定性时延保障。TAS 机制要求所有网络节点的时间同步，然后利用门控列表控制不同优先级队列的传输。TAS 虽然有效减小了传输时延，但是配置复杂，对网络节点的时间同步精度要求很高。

**CQF 整形器：**CQF 可以通过同步入口和出口的队列操作以降低 TAS 配置的复杂性，实现与网络拓扑无关的零拥塞丢失和有界延迟，但对时间同步的要求也很高。

**ATS 整形器：**为了有效利用网络带宽，ATS 基于 UBS (Urgency-based Scheduler)，通过在每一跳重塑 TSN 流，提供无需严格时间同步的确定性时延。

为了减少低优先级流量对高优先级流量的干扰，IEEE 802.1 Qbu 帧抢占机制允许高优先级的流量打断低优先级流量的传输，帧抢占造成的低优先级帧中断只发生在链路层，在下一个网桥的接口处，被中断的帧会被重新整合成完整的帧。Qbu 显著减小保护频带的字节数。

### (3) 资源预留机制

为了实现对时间敏感流量的优先调度，需要有针对性 TSN 流的资源预留和准入控制机制。资源预留机制负责路径预留和带宽限制。

资源预留机制有分布式和集中式两种。IEEE 802.1 Qat 流预留协议 (Stream Reservation Protocol, SRP) 基于 TSN 流的资源要求和当

前网络可用资源规定了准入控制架构，通过多址注册协议，使用 48 位扩展唯一标识符来识别和注册业务流，为 AVB 流提供足够的资源预留。由于 Qat 采用分布式的注册和预留方式，注册请求的变更有可能使网络过载从而导致关键流量类的延迟。IEEE 802.1Qcc 通过减小预留消息的大小和频率来改善 SRP，使更新仅由链路状态或预留改变触发。Qcc 提供了一套集中式的全局管理和控制网络的工具，可通过远程管理协议（如 NETCONF 或 RESTCONF）执行资源预留，调度和其他配置。

MRP (Multiple Registration Protocol) 提供了有效的注册流方法，但它保存流状态信息的数据库限制在大约 1500 字节。随着更多业务流共存以及网络规模的增加，数据库成比例地增加，SRP 和 MRP 由于注册流状态信息的数据库有限而无法扩展到具有实时性 IACS 应用的大型网络。本地链路预留协议 (Link-local Registration Protocol, LRP) 在点对点链路的两端之间有效地复制 MRP 数据库，并在网桥报告新的网络状态时逐步复制更改。LRP 还提供清除过程，当此类数据库的源无响应时，删除复制的数据库。

#### (4) 配置 TSN 流量

TSN 流会根据应用需求在以太网报头中的 802.1Q VLAN 标记中的 PCP (Priority Code Point) 和 VID (VLAN ID) 中定义流的不同优先级。TSN 中有多个流管理标准，包括 IEEE 802.1CB (FRER, Frame Replication and Elimination for Reliability)，802.1Qca (Path Control and Reservation)，802.1Qci (Per-Stream Filtering and Policing)，负责提供



路径冗余，多路径选择以及队列过滤。

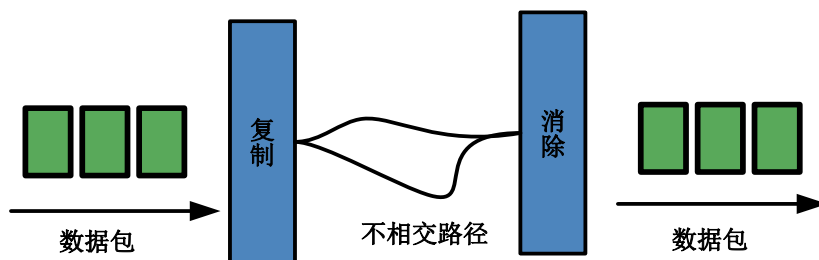


图 2-17 TSN 802.1CB FRER

尽管标准以太网可以通过生成树协议提供冗余能力，但是对于实时 IACS 应用而言，在发生故障时的收敛时间太慢。因此，FRER 在不相交的路径上发送关键流量的重复副本，用于主动实现无缝数据冗余，代价是额外的带宽消耗。

PCR 提供显式转发路径控制所需要的协议，如预定义的保护路径、带宽预留、数据流冗余、流同步和流控制信息的控制参数的分配，PCR 与 FRER、802.1Qcc 结合使用时达到快速恢复，高效路径冗余和动态流量管理。

## 2.3 确定网（DetNet）

IETF 在 2015 年 10 月成立 DetNet 工作小组，专注于在第二层桥接和第三层路由段的确定性数据路径，这些路径可以为三层数据提供确定性的延迟、抖动、丢包以及高可靠性保障。DetNet 工作组与负责二层操作的 IEEE802.1 TSN 工作组合作，定义了二层和三层的通用架构，即 DetNet 网络架构 [2]。DetNet 的应用示例包括专业和家庭音频/视频、车载多媒体、工业控制系统，以及 IEEE 802.1 TSN 任务组考虑的应用。



DetNet 工作组主要研究在单一管理控制下或在一个封闭的管控组内的网络实现确定性保障，如园区网络、专用广域网。DetNet 目的是实现沿多跳路径转发，具有确定性延迟、可控的低丢包率与高可靠性，侧重于 IP 层调度保障，目标在于将确定性网络通过 IP/MPLS 等技术扩展到广域网上，IETF 相关标准体系正在不断演进中。

DetNet 主要思想借鉴 TSN 的机制和架构，提供三层端到端的确定性方案。DetNet 允许单播或多播流的确定性转发以及 DetNet 流与其他业务流共网传输。实现方法主要包括资源预留、释放/重用闲置网络资源、集中控制、显性路由、抖动消减、拥塞保护、多径路由等。通过网卡完成 DetNet 相关的数据封装，如流 ID、Sequence 封装。DetNet 编制的标准文件将兼容在 IEEE802.1 TSN 工作组和其他 IETF 工作组的相关确定性网络的底层协议。

### 2.3.1 DetNet 架构

确定网（DetNet）的总体架构为网络提供了一种低丢包率、有界端到端延迟的数据流传输能力，用于承载实时的单播或多播数据流。图 2-18 展示 DetNet 的总体架构，终端应用业务流通过网络用户接口与 DetNet 的边缘路由相接，DetNet 域内通过骨干路由与边缘路由组成，DetNet 域间由不同的边缘路由连接。DetNet 通过边缘路由的时延抖动测量、骨干路由的确定路径与资源预留以及端到端显式路由与无缝冗余实现终端业务流的三层确定性传输。

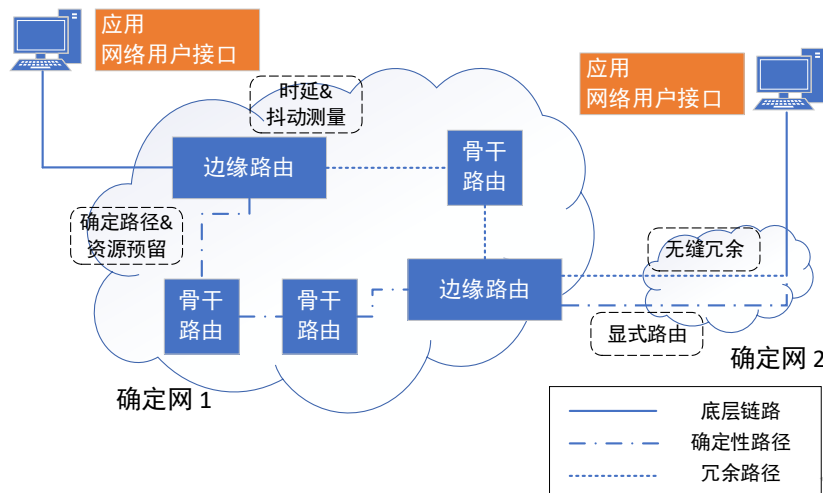


图 2-18 DetNet 架构

DetNet 网络架构通过资源（如链路带宽和缓存空间）预留、冗余保障，为 DetNet 提供了可靠的确定性服务。未使用的预留资源可以用于非 DetNet 数据流的传输，实现不同优先级业务流共网传输。

图 2-19 所示为 DetNet 数据平面的概念模型，其包含应用源/目的子层(Source/Destination)、DetNet 服务子层(Service Sub-layer)、DetNet 转发子层 (Forwarding Sub-layer) 和低层级网络 (Lower Layers)。DetNet 服务子层是负责特定 DetNet 服务的层，例如分组排序，流复制/重复消除和分组编码，而 DetNet 传输子层负责可选地通过底层网络提供的路径为 DetNet 流提供拥塞保护。DetNet 可以有多个分层拓扑，其中每个下层拓扑为更高层拓扑服务。DetNet 节点之间相互连接形成子网络，这些低层级网络，例如二层 TSN 网络或者点对点光传输网络 (Optical Transport Network, OTN)，可以通过兼容服务支持 DetNet 流量。DetNet 服务子层包含数据包排序 (Packet Sequencing)、冗余消除 (Duplicate Elimination)、流复制 (Flow Replication)、流合并 (Flow Merging)、数据包编码 (Packet Encoding) 与数据包解码

（Packet Decoding）；DetNet 转发子层包含资源分配（Resource Allocation）与显式路由（Explicit Routes）。DetNet 的各子层功能如下：

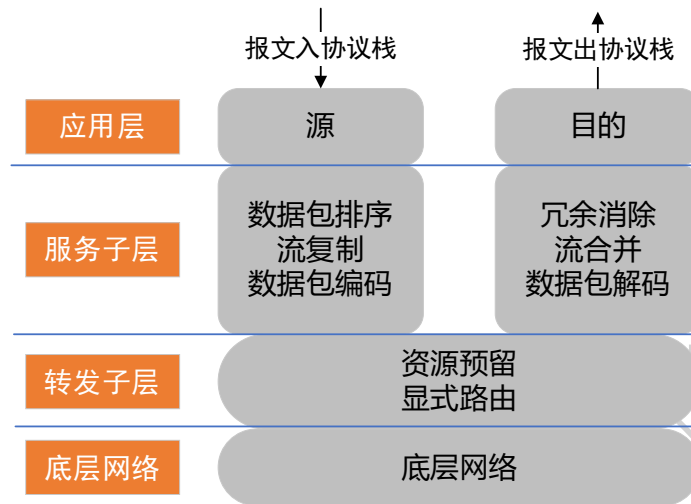


图 2-19 DetNet 数据平面协议堆栈

（1）应用程序。应用程序即业务应用的“源”和“目的”地址。

（2）数据包排序与冗余消除。数据包排序用于 DetNet 服务保护的数据包复制和消除。冗余消除作为 DetNet 服务子层的一部分，基于对等体（数据包排序）提供的序列号，将重复数据包丢弃。其可以对 DetNet 成员流、复合流进行操作。

（3）流复制与流合并。流复制为了实现 DetNet 业务保护功能，能够将属于一个 DetNet 复合流的数据包复制到多个 DetNet 成员流中。流复制可以对数据包进行显式复制和标记。流合并可以将 DetNet 成员流组合在一起，使数据包到达属于特定的 DetNet 复合流的堆栈。DetNet 流复制、流合并，数据包排序、冗余消除用于执行数据包的复制和消除（Packet Replication and Elimination）。

（4）数据包编码与解码。数据包编码将多个 DetNet 数据包中的

信息组合在一起，并在不同的 DetNet 成员流中以数据包的形式传输信息。数据包解码从不同的 DetNet 成员流中获取数据包，并根据这些数据包计算来自复合流输入的原始 DetNet 数据包。

(5) 资源分配。资源分配在 DetNet 转发子层提供路径和带宽资源分配功能。

(6) 显式路由。显式路由是指预先确定的固定路径，在 DetNet 转发子层运行，以避免网络融合对高优先级流的影响。

操作、管理和维护 (Operations, Administration, and Maintenance, OAM) 可以利用带内和带外信令，验证应用业务流服务是否在 QoS 约束保障内有效实现。OAM 可以通过在数据包中添加特定的标记，以跟踪网络配置错误。主动和混合 OAM 需要额外的带宽来执行 DetNet 域的故障管理和性能监视。

DetNet 包括终端系统、边缘节点、传输节点、中继节点等，如图 2-20 所示。

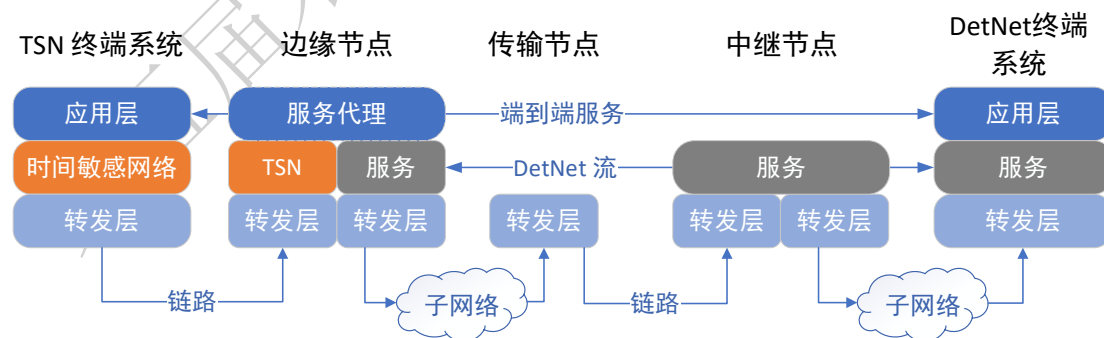


图 2-20 DetNet 网络示意图

DetNet 控制器平面中 CPF (Controller Plane Function) 是控制器的核心部件，负责计算用于网络平面的确定性路径。如图 2-21 所示，

CPFs 将业务流分布在不同确定的 DetNet 节点上进行部署，使之满足流约束条件，如安全性和延迟，并优化总体调度成本。

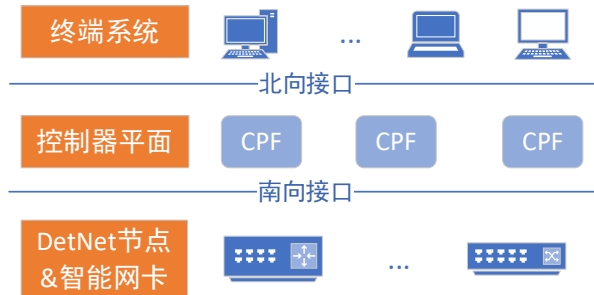


图 2-21 北向与南向接口

DetNet 节点（或者终端系统的网卡 NIC）向 CPF 公开它们的能力和物理资源，CPF 则可以借助这些信息通过南向接口拓扑的动态感知进行自动更新。DetNet 节点之间与终端系统可以交换关于路径状态的信息。

### 2.3.2 DetNet 技术

DetNet 具有时钟同步、零拥塞损失可靠性与安全性特点。同时，DetNet 致力于将超低延迟（Ultra-Low Latency, ULL）和高可靠性的服务扩展到三层网络，以及正常业务流量与 DetNet 流共网传输的实现。因此，基于 DetNet 的技术实现目标，其需要满足以下三点技术要求：

#### （1）时钟同步和频率同步（Time/Frequency Synchronization）

DetNet 的时钟同步可以利用 IEEE 802.1 AS 实现，也可以参考 IEEE 1588v2 PTP 实现频率同步。但是，目前 IETF 还没有针对 DetNet

网络设备的时钟同步的选择具体规范。

## (2) 零拥塞损失与可靠性 (Zero Congestion Loss and Reliability)

DetNet 中的 ULL 特性和零拥塞损失通过排队算法、缓冲区预留和包抢占实现。DetNet 为了得到更低的抖动，其不仅需要端到端时延的上界限制，还需要对时延下界进行控制以实现抖动的限制要求。抖动减小的技术实现方式可以通过全局亚微秒级时钟同步或计算应用程序包的执行时间字段来实现。为了保证 DetNet 的可靠性，通过采用过滤器与相应策略来检测报文的故障和错误。当检测到故障时，将中断传输并进行调整。此外，在 DetNet 中还应用分组复制和消除技术来实现可靠性。

## (3) 安全性 (Security)

安全性能的考虑是 DetNet 的一个重要基本特性。为了实现 DetNet 资源的请求与控制安全性，应该对连接到 DetNet 域的设备使用认证和授权，以确保参数的管理配置被限制在授权的设备上。DetNet 的控制分为集中式控制和分布式控制。对于集中控制 DetNet，流量工程网络的抽象和控制 (ACTN) 被用于安全保障的实现。对于分布式控制的 DetNet，其安全性是通过部署的 DetNet 协议的安全属性来实现。

结合上述技术指标需求，根据目前输出 DetNet 工作组草案、DetNet 数据平面方案以及数据流信息模型等相关标准文件，DetNet 标准技术分为四类：DetNet 流概念 (Flow Concept)、DetNet 流管理 (Flow Management)、DetNet 流控制 (Flow Control) 和 DetNet 流完整性 (Flow



Integrity)，如图 2-22 所示。

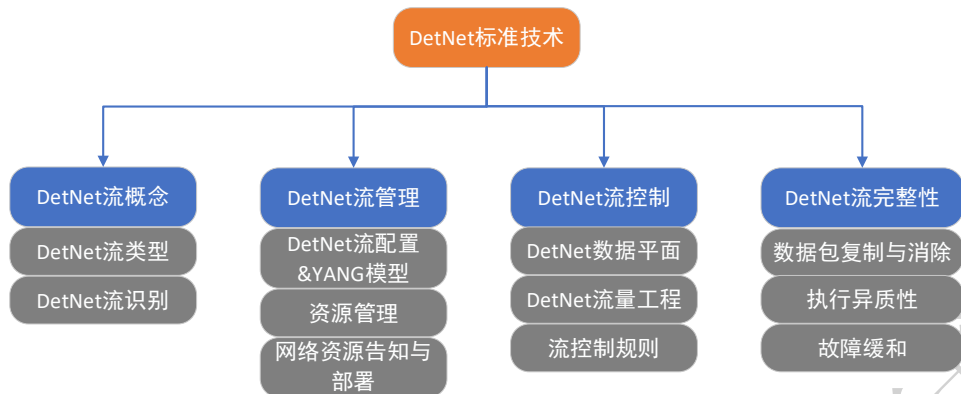


图 2-22 DetNet 标准技术分类

### (1) DetNet 流概念 (Flow Concept)

应用流(App-flow)。应用流是通过 DetNet 流所承载的在非 DetNet 感知终端系统之间传送的有效负载（数据）。应用流不包含任何与 DetNet 相关的属性，也对 DetNet 节点没有特定的要求。

DetNet 转发流 (DetNet-f-flow)。DetNet-f-flow 具有 DetNet 流的具体格式，它只需要 DetNet 转发子层提供的资源分配特性。

DetNet 服务流(DetNet-s-flow)。作为一种 DetNet 流的特定格式。DetNet-s-flow 只需要 DetNet 服务子层提供的业务保护特性即可。

DetNet 服务转发流 (DetNet-sf-flow)。DetNet-sf-flow 在转发过程中需要同时具备 DetNet 业务子层和转发子层的功能。

在 DetNet 流识别方面，与传统的严格分层的网络架构相比，DetNet 节点打破“分层规范”的约束，以便低层级可以感知到较高的层流类型。这种对更高层流类型的感知方式有助于在流跨多个域传输时提供特定的排队、整形和转发服务。

为了实现准确的流检测和识别，必须对各种流属性映射进行标准

化。对于 DetNet 流在不同域之间的转发，中继节点都需要获取与流类型和相应属性相关的上层信息。DetNet 模糊了网络层和链路层的界限，二层网络可以通过流 ID 和 DetNet 控制字识别 DetNet 流类型和对应属性相关的上层信息。为此，DetNet 流需要标准化跨层或异构网络的流属性映射。DetNet 考虑了 3 种主要的转发方法：IP 路由、MPLS 标签交换、以太网桥接。对于在异构网络的转发，每个 DetNet 数据分组都附加或封装有多个流 ID（IP、MPLS 或以太网）。这使 DetNet 能够在 IP 和非 IP 网络之间进行路由和转发，从而实现网络互操作性。

## （2）DetNet 流管理（Flow Management）

### 1）DetNet 配置和 YANG 模型

DetNet 能够在各种支持 DetNet 的网络实体之间实现无缝配置和重配置，草案定义了 DetNet 分布式、集中式和混合式的配置模型及其相关属性，还介绍了在集中配置模型中传递网络配置参数的 YANG 模型。

DetNet 配置的模型包含分布式、集中和混合式配置模型。在分布式配置模型中，UNI 信息通过 DetNet UNI 协议发送，分布式的 DetNet 控制平面将 UNI 和配置信息传播到每个数据平面实体，控制信息通过 IGP 和 RSVP-TE 等协议来执行。在集中式配置模型中，CUC（Centralized User Configuration）向 CNC（Central Network Controller）发送 UNI 信息，类似于 TSN 中的 IEEE 802.1Qcc 集中式配置模型。对于混合配置方法，在控制平面内采用分布式协议和集中式协议相结



合的方式来协调配置信息。DetNet YANG 模型与 TSN 中 IEEE 802.1Qcp 类似，为集中式配置模型定义了一个 DetNet YANG 模型，用于传递网络配置参数。

## 2) 资源管理

在资源管理方面，DetNet 有集中式和分布式这 2 种路径设置方式。集中路径设置类似于 IEEE TSN 的集中管理模型，利用 PCE (Path Computation Element) 和基于分组的 IP 或非 IP 网络的信息传播来实现全局网络的优化。分布式路径设置利用内部网关协议流量工程 (IGP-TE) 提出了类似于 802.1Qat、802.1Qca 和 MRP 信令协议的初始设计规范。

## 3) 网络资源告知与部署

为了补充 DetNet 流量控制机制 (包括整形、调度和抢占)，每个节点 (或集中设置的中央控制器) 需要有和附近网络共享网络状态的能力。例如共享当前节点的资源使用状态、邻居节点及其关系的属性等。目前还没有规定如何实现这种能力，但是这对于全局规划流量、实现确定性网络至关重要。

### (3) DetNet 流控制 (Flow Control)

DetNet 流的大多数控制功能遵循与 IEEE TSN TG 确定性流相同的原则，但关键的集成机制存在一些区别，分别体现在 DetNet 数据平面、DetNet 流量工程以及流控制规则。

#### 1) DetNet 数据平面：

DetNet 数据平面主要分为服务层和传输层。服务层可以应用分组

排序、流复制/重复消除、分组编码等，而传输层可以应用拥塞保护机制和显式路由。DetNet 可以有几个分层的 DetNet 拓扑结构，其中每个较低的层为较高层提供服务。此外，DetNet 节点（终端系统和中间节点）相互连接，形成子网络。这些低层级网，如二层网络，可以通过兼容的业务支持 DetNet 业务，如 5G 系统中的 IEEE 802.1 TSN 或点对点 OTN 业务。目前，对于 DetNet 服务和传输层协议，有各种各样的协议和技术选项正在考虑之中。

## 2) DetNet 流量工程：

IETF 流量工程架构和信令工作组考虑将流量工程（Traffic Engineering, TE）架构用于分组和非分组网络，定义控制和管理 DetNet 流的关键概念、功能以及不同层面之间的关系，使用户和操作人员可以动态地轻松控制、测量和管理流，还引入了 QoS 参数的快速恢复和确定性边界。DetNet WG 采用类似于软件定义网络范例的方法，为 DetNet 起草了一套 TE 架构，与 IEEE TSN 的 802.1Qcc 管理方案和集中式 SDN 方法具有相似之处。整个架构分为应用层面、控制层面和网络平面，并且在控制层面对 DetNet 流进行全局规划。一般来说，这种 DetNet 流量工程架构设想了一种高度可扩展、可编程和通用即插即用的方案，其网络功能和配置便于进行实现和扩展。

## 3) 流控制规则：

流控制规则主要包含流量排队、整形、调度和抢占（Queuing, Shaping, Scheduling, and Preemption）。通过定义流控制规则（如排队、整形、调度和抢占），以实现确定性的有边界延迟和包丢失。流量控

制通常包括准入控制和网络资源预留，即带宽和缓冲区空间的分配。

DetNet 流量控制将利用 IEEE802.1 TSN 队列传输和流量整形技术。

这些 TSN 机制包括基于信用整形 CBS (802.1Qav)、时间感知整形 TAS (802.1Qbv)、循环排队和转发整形 CQF (802.1Qch)、异步流量整形 ATS (802.1Qcr) 和帧抢占 (802.1Qbu 和 802.3br) 等技术。

#### (4) DetNet 流完整性 (Flow Integrity)

DetNet 流完整性包含数据包的复制与消除、执行异质性、故障缓和等技术。

##### 1) 数据包复制与消除:

数据包分制和消除功能 PREF 与 TSN TG 802.1CB 标准有一些相似之处，它源于 IETF HSR 和 PRP 机制。PREF 在 DetNet 服务层中有数据包信息排序、复制、消除三大功能。其中，数据包排序功能是给属于一个 DetNet 流的每个数据包加上一序列号或时间戳，这些序列号用于检测数据包丢失以及进行重新排序。复制功能让流在源进行复制，采用显式的源路由使一个 DetNet 流通过两条不相交的路径转发到同一个目的地。消除功能主要是在路径上的任何节点执行冗余消除，目的是为下游的其他流量节省网络资源，通常在网络边缘或接收端执行。在接收到数据流后，端口有选择地将复制的流组合在一起，根据数据包的序列号对数据包进行逐包选择并丢弃。PREF 是一种主动减少甚至消除丢包的措施。

##### 2) 执行异质性:

与 TSN 类似，DetNet 在 DetNet 和非 DetNet 流之间强制区分带

宽。DetNet 网络将 75% 的可用带宽用于 DetNet 流。但是，为了保持较高的带宽利用率，任何为 DetNet 流保留但未被利用的带宽都可以分配给非 DetNet 流。因此，DetNet 的架构模型确保了不同的服务和应用程序之间的适当共存。

### 3) 故障缓和:

为了减少各种可能故障，除了数据包流复制和带宽识别，DetNet 网络的设计需要具有一定强度的鲁棒性。减少 DetNet 流中断的关键机制之一是应用类似于 IEEE 802.1Qci (PSFP) 的过滤器和策略，它可以检测行为不当的流，并可以标记超过规定流量的流。此外，DetNet 故障缓解机制可以根据预定义的规则采取行动，例如丢弃数据包、关闭接口或完全丢弃 DetNet 流。

## 2.4 确定性 IP (DIP) 网络

工业互联网是面向未来网络技术深度服务于全行业的演进方向之一，特别是面向机器互联的高精度应用。在未来，会有大量的智能机器接入网络，“面向机器的通信”将产生许多新型网络功能需求。网络服务对象和服务模式的转变使得“大带宽等于高质量”的假设不再普遍适用，信息在网络中传输的准时性和网络层的确定性成为了未来网络关键需求之一。DIP 技术是华为和紫金山实验室共同提出的一种新颖的三层确定性网络技术架构，在数据面上引入周期调度机制进行转发技术的创新突破，在控制面提出免编排的高效路径规划与资源分配算法，真正实现大规模可扩展的端到端确定性低时延网络系统。

DIP 在传统 IP 的基础之上引入周期转发的思想，通过控制每个数据包在每跳的转发时机来减少微突发，消除长尾效应，最终实现端到端时延确定性。DIP 技术可以保证在最差情况下的端到端时延依然有界，且最差时延与最好时延之间的差距仅为  $2T$ 。在核心节点上进行标签交换和周期转发聚合调度，解决了传统 IP 网络的突发累积问题，实现了 IP 网络的端到端确定性低时延和微秒级抖动。此外 DIP 技术中核心节点无逐流状态，设备之间不需要精准时间同步，因此具有良好的大网可扩展性。

相比于业界的 TSN、DetNet 等工作，DIP 技术无需网络节点之间的严格时间同步，核心节点无状态，并且支持任意长距离链路，因此可扩展性更强，技术代价更低。DIP 在业界首次同时实现了网络的确定性和大规模可扩展性，不仅适用于工业制造、园区网等小规模组网场景下，也可以满足运营商网络等大规模 IP 网络对确定性和可扩展性的双重要求，极大地提升了 IP 技术服务能力，同时也将引领未来技术和行业趋势，在未来工业互联网、工业控制、柔性制造等领域发挥重要的作用。

图 2-23 以一个简单的例子来进行说明。假设节点 A 有 10 个入接口，1 个出接口，所有接口的速率都是一样的。假设每个入接口上都有一条流，并为此流预留了 5% 的接口带宽资源。假设 10 个接口的 10 条数据流都是同一优先级，10 条流在节点 A 的出接口汇聚时总共占用出接口最多 50% 的带宽资源，因此不存在拥塞的情况。然而由于对每个数据包的到达时间没有控制，因此最差的情况是 10 条流的数据



同时到达，在出接口排队等待调度。排队的产生会挤压原本流内报文的间隙，形成微突发。假设下游节点 B 有 10 个像 A 一样的上游节点，则微突发的情况会进一步累积，形成微突发迭代。多跳之后，确定性时延将无从保证。该图示同时也说明，传统 IP 转发即使配合了资源预留及优先级调度，也无法实现确定性时延。其主要原因是由于对每个数据包的行为缺乏控制，导致了排队形成了微突发。为此我们需要控制每个数据包的行为，不能容许数据包随意发送（接收），而且为每个数据包分配一个特定的发送（接收）时间周期。通过控制每个包的行为来避免冲突，从而控制节点内部排队时延，最终消除长尾效应实现确定性时延。

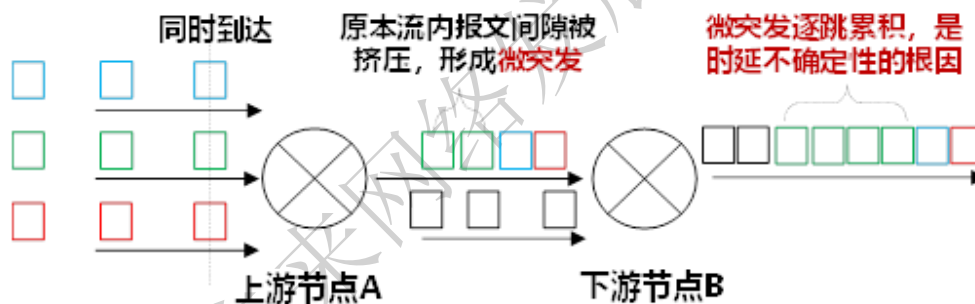


图 2-23 微突发及突发累积

### 2.4.1 DIP 理论分析与网络架构

网络演算理论提供了一种计算网络端到端延时上限的方法，在给定网络拓扑、每个节点的服务曲线（对节点处理时延特征、接口的容量、整形调度算法等的综合抽象描述）、所有流的流量到达曲线和端到端路径的条件下，即可计算得到端到端的最坏排队时延。叠加链路时延，即可得到端到端时延上限。

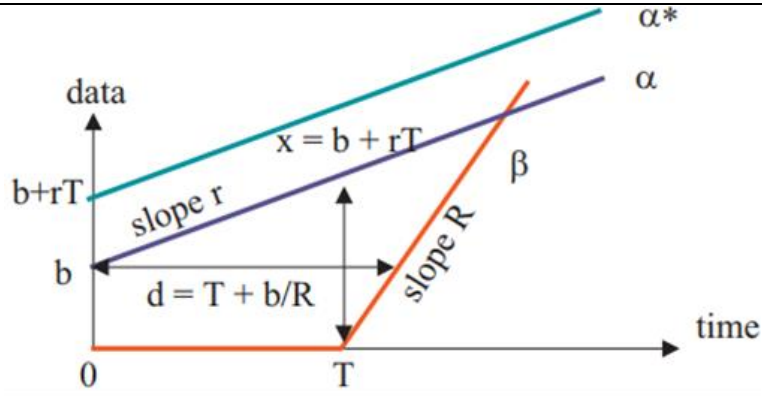


图 2-24 网络演算基础模型

基于网络演算理论，学术界已经证明[28][29]：对于通用场景（拓扑和流量可能是任意的），传统的 IP 统计复用转发方式能够给出的端到端时延上限极差，甚至没有上限。具体而言，当网络直径（流经过的最大跳数）为  $h$  时，仅当网络带宽最大利用率  $v < 1/(h-1)$  时，可以得到时延上限，且时延上限随跳数增长很快；当  $v \geq 1/(h-1)$  时，没有时延上限。

传统 IP DiffServ 端到端时延上限为：

$$\begin{aligned} \text{if } v < \frac{1}{h-1}, \quad d &\leq \frac{(e + \tau)h}{1 - (h-1)v} \\ \text{else,} \quad d &\rightarrow \infty \end{aligned}$$

其中， $v$  为最大链路利用率， $e$  为最大节点处理时延， $\tau$  为最大初始突发度串行化时延（流初始突发总和除以链路带宽）， $h$  为端到端跳数。

此结论并不限于尽力而为（Best-effort）转发，还包括采用了区分优先级（DiffServ）的转发模式，对于最高优先级仍然有效。

确定性 IP 技术在统计复用的基础上，采用周期性的整形和调度

机制，在微观上形成了周期性的隔离，避免了微突发及其逐跳累积，打破了网络演算中：“流量到达曲线的突发增大→初始服务延时增大，初始服务延时增大→流量离开曲线的突发增大”的恶性循环，使得时延随跳数线性缓慢增长，且端到端抖动上限恒定。DIP 的端到端时延上限为：

$$d = \sum_{i \leq h} (\zeta + \ell_i) \pm \zeta$$

其中， $\zeta$  是 DIP 周期长度， $\ell_i$  为第  $i$  跳的周期相对时间差， $h$  为端到端跳数。DIP 通过周期精确整形和调度，避免微突发，每跳时延确定，端到端时延是跳数的线性关系，可实现端到端微秒级确定性。

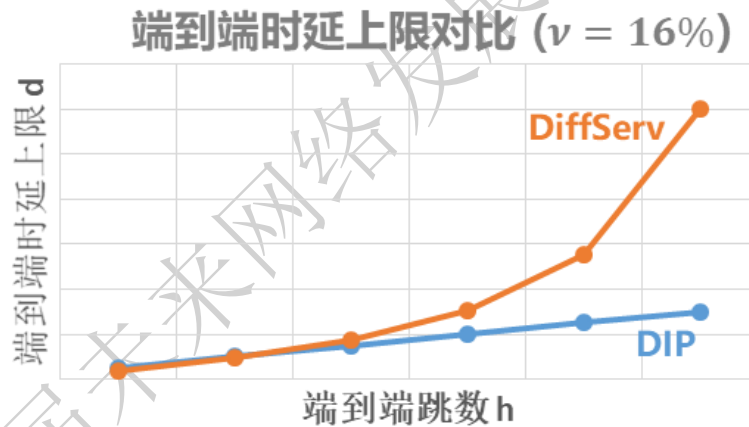


图 2-25 端到端时延（排队时延）上限对比

图 2-25 以链路最大带宽利用率  $v=16\%$ （非常轻载）为例对比 DIP 与 DiffServ 的端到端延时的趋势，如图 2-25 所示[27]。即使在极度轻载的情况下，DiffServ 的端到端延时在 3 跳之后就开始急剧增长，以至于在 7 跳之后就再无延时上限。而 DIP 的时延会线性增长，即使在利用率远大于 16% 甚至满负载的情况下依然如此（仍如图中的蓝色曲



线)。

DIP 端到端网络架构包括入口边缘节点、核心节点、出口边缘节点等，如图 2-26 所示。

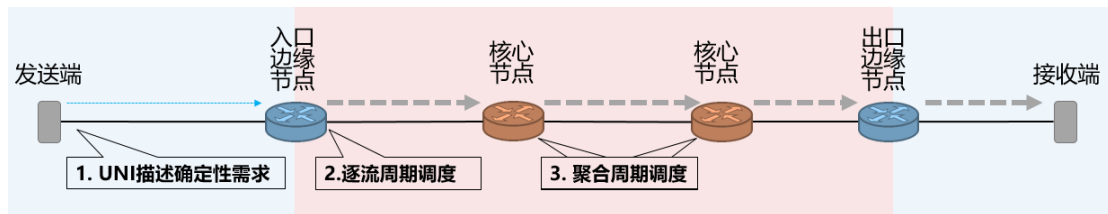


图 2-26 DIP 端到端网络架构

## 2.4.2 DIP 网络技术

### (1) DIP 网络控制面技术

1) 准入控制。确定性 IP 网络入口边缘节点的控制面应记录每条流的资源预留状态，状态信息包括流标识（如 flow\_ID）、预留带宽（如 reserved\_bandwidth）、开始时间（如 start\_time）和结束时间（如 end\_time），如图 2-26 所示。入口边缘节点通过资源预留结果，可以决定确定性流是否被允许进入网络进行确定性转发。数据流的资源预留状态可以被动态的刷新，实现资源预留续期。

当数据流超出了准入条件时，入口边缘节点必须能够阻止该数据流的报文进入确定性传输流程。可以直接丢弃相关报文或者将报文按照尽力而为的优先级进行传输。

2) 路径规划和资源预留。数据流传输确定性路径规划实现，可基于分布式路由算法或者集中式路径计算，为数据流进行传输路径规划，并支持预先沿途进行必要的确定性资源预留。

资源预留包括静态资源预留和动态资源预留。在特定部署中，资源预留信令可以分为初始资源预留和资源预留续期。静态资源预留实现方式有两种：①通过集中控制单元，为沿途转发节点下发资源需求，由各节点根据下发的信息，为对应的业务流进行资源预留或者相应的映射建立；②通过信令，由入口边缘节点发送携带了数据流信息的资源预留/映射建立信令，信令中可包含流标识、数据流需求带宽、预留资源的起始周期号和需要预留的周期数量、周期映射及周期窗口等。

动态资源预留/映射建立流程的信令与静态资源预留的第二种信令类似，只是这个流程是动态触发的，触发条件包括：人工触发、控制单元、流触发等。

## (2) DIP 网络数据面技术

基于数据分组和存储转发的 IP 网络具有资源统计复用的特点，在提升吞吐和降低成本的同时，给数据报文的传输时延带来高度的不确定性。循环排队转发（Cyclic Queueing and Forwarding）技术是当前解决在分组转发网络中确定性时延保障问题的重要技术。TSN 的 Qch 方案是该技术的典型应用之一。然而该方案须要所有网络节点之间进行时间同步，并且其工作机制限制了单跳最大链路时延，其方案并不具备可扩展性。

DIP 技术使用一种可扩展的、易实现的、小缓存的稳定低排队时延的转发面架构[20]。其技术要求为：①网络设备需将时间划分为等长的周期，数据包按照周期进行排队和转发。即被指定在同一周期从发送节点发送出去的报文，在接收节点被调度到指定的同一周期进行

下一跳转发。②对某周期的报文，首节点和尾节点上的发送周期的时间差应保持稳定，即周期编号差值保持固定。但具体报文在周期内被发送的确切时间可以不固定。

为确定性流预留资源后，需要在数据面完成路径绑定和确定性周期转发功能。

**1) 路径绑定功能。**确定性 IP 传输的资源预留体现在数据转发路径的节点上。因此，后续的数据报文传输需要绑定该路径。路径绑定技术可以与标签携带技术耦合。

**2) 确定性周期转发功能。**入口边缘节点根据数据报文被发出的时间，将时间周期编号嵌入到报文中。中间节点收到报文后，依据周期映射进行确定性周期转发，使得数据报文发出时携带本地时间周期编号，直到数据报文被送达出口边缘节点。

从时延角度看，该框架功能拥有控制时延抖动上限的效果。首节点在某周期末尾发送的报文可能在尾节点中所对应周期的开始被发送出去；反之，首节点某周期开始发送的报文可能在尾节点中所对应周期的末尾才被发送出去。上述最好情况和最差情况的时延差值为 2 个调度周期长度，即  $2T$ （ $T$  为调度周期长度）。如图 2-27 所示。

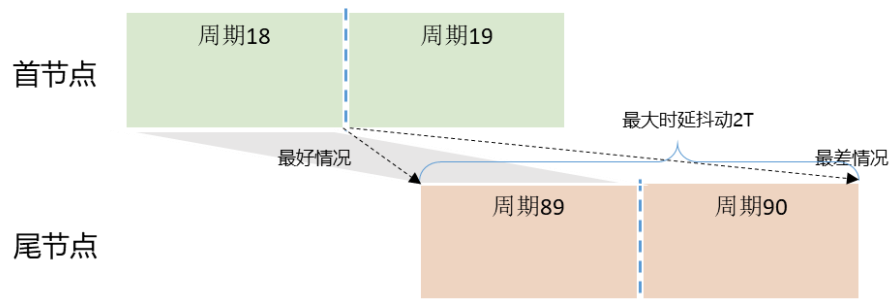


图 2-27 周期排队转发时延抖动分析

在 IP 网络中报文的处理和链路传输时延相对固定，上下游相邻节点可以维持稳定的周期映射关系。确定性 IP 网络节点可以为每个周期进行编号，上游节点从本周期发送出去的报文中携带该编号标签，下游节点解析该标签值用于确定数据报文被发送的周期。

## 2.5 确定性 WiFi (DetWiFi)

### 2.5.1 DetWiFi 架构

DetWiFi (Deterministic WiFi) 的网络架构由管理器，AP (Access Points)，站点以及连接的传感器和执行器组成。管理器用于存储来自站点的信息，并在站点加入后将固定的时隙表分配给站点。AP 和站点采用相同的硬件和网络堆栈，它们只是在不同的工作模式下运行。

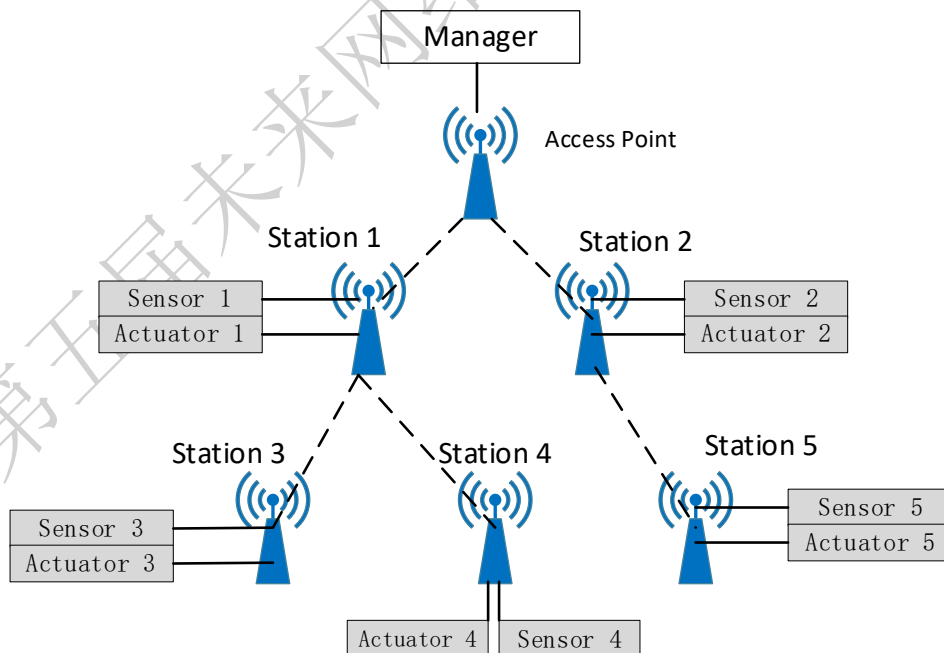


图 2-28 DetWiFi 网络结构[16]

如图 2-29 所示，DetWiFi 由三个组件组成：数据包队列，任务调

度程序和系统状态容器（SSC）。DetWiFi 中有两个数据包队列：发送队列（Tx 队列）和接收队列（Rx 队列）。数据包准备发送后，将它们放入发送队列中，等待适当的时隙，然后将其发送给驱动程序进行发送。类似地，当从较低层接收到数据包时，它们将被存储在接收队列中。任务计划程序用于计划任务并控制 DetWiFi 的行为，包括发送信标，时隙循环和网络加入。这些任务根据任务的紧急程度按优先级进行区分，任务调度程序将首先执行高优先级任务，而不是低优先级任务。SSC 由时隙表，邻居表和计时器组成：时隙表记录了时隙循环序列，该序列是在管理者加入网络时从其获取的；邻居表用于存储邻居信息，该信息在邻居信标中公告；计时器负责维护 DetWiFi 的时间信息；并且大多数任务是由几个计时器触发的。

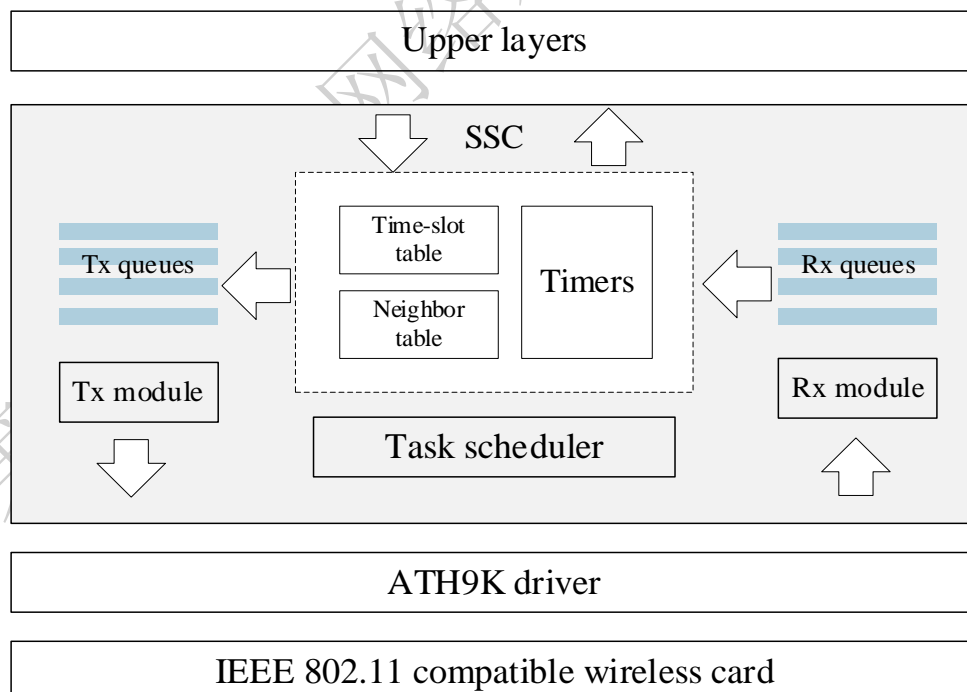


图 2-29 一类 DetWiFi 系统架构[16]

由于兼容的 MAC 设计，原始网络的上层得到了很好的支持。许

多基于标准 UDP/TCP 的应用程序都可以正常工作。此外，由于确定性的网络功能，某些以前无法部署的实时多跳应用程序现在可以部署。为了实现多跳确定性，应修改驱动程序的某些默认功能，而 ath9k 是一个开源驱动程序，并且网络接口卡的许多 MAC 功能都可以被改变。实现时主要关注两个部分：帧格式修改和禁用 CSMA 机制。由于 DetWiFi 和 802.11 之间的拓扑和结构差异，很难直接重用 802.11 帧格式。因此，IEEE 802.11 的大多数默认控制和管理帧都被放弃，仅保留数据帧。控制和管理信息包含在默认 802.11 数据帧的有效负载（DetWiFi 字段）中。但是，为了正确，成功地发送修改后的帧，需要更改 IEEE 802.11 标头的多个位置：应声明该帧为广播帧，使得默认的 MAC 地址不会干扰发送过程。片段比特被设置为零以通知接收者它不是一个片段帧；每个源地址字段都填充有自定义地址，而不是 NIC 的 MAC 地址。帧格式的这些修改为多跳通信带来极大便利，并确保驱动仍然可以识别帧。

### 2.5.2 DetWiFi 技术

工业无线网络应用广泛的标准技术如 WirelessHART、WIA-PA 和 ISA100.11a，都不能同时提供工业控制所需的极低时延和高可靠性通信。为使无线网络满足时间敏感业务的传输要求，目前主流的方法是设计无线网络中的实时传输调度方法，将端到端的实时传输时延问题建立成具有时延限制的数学模型，再进行分析求解；此外，在多跳网状网络中采用灵活高效的实时路由算法，将冲突时延、数据传输成



功率等纳入路由决策也能在一定程度上实现数据的实时可靠传输。在工业安全监测等实时性要求严苛的场景中，对 MAC (Medium Access Control) 协议的改进设计来满足非周期关键性数据的及时接入信道与立即传输，能大幅缩短关键数据的端到端时延；设备间的相互协作通信是提高通信可靠性的有效方法，协作通信结合改进的 MAC 协议能有效实现时间敏感数据的低时延和高可靠传输。另外，对现有的 IEEE 802.11 协议进行改进，使其具有可靠性和实时性能以适用于时间敏感的高速工业应用；由 IEEE 802.11ax 定义的下一代 WiFi 更是引入了一些确定性关键数据传输增强功能，以提高对时间敏感的工业自动化应用的支持。

IEEE 802.11be 任务组 (TGbe) 成立于 2019 年 5 月，旨在解决新的 PHY 和 MAC 修正案的设计问题。被视为 IEEE 802.11ax 的继任者和下一个 WiFi 7 的核心部分，IEEE 802.11be 希望实现 30 Gbps 的峰值吞吐量，并将破坏性解决方案整合到 WiFi 生态系统中，例如多链路操作、多路访问、多 AP 协调。同时，IEEE 802.11be 的目标还在于减少无线局域网 (WLAN) 中的最坏情况下的延迟和抖动。要用作潜在的 IEEE 802.11be 低延迟模式的一部分，必须重新设计原始的 TSN 机制，同时考虑无线介质的固有限制（即，链路的不可靠性，不对称的路径延迟，信道干扰，信号失真，缺乏准确的时钟同步，以及网络接口卡不兼容），同时确保与旧版 WiFi 设备的向后兼容性。

考虑到 TSN 原理的 WiFi 7 技术的精心设计肯定会有助于减少 WiFi 延迟问题，但是目前，潜在的集成既不能直接实现，也不能免除

不确定性和不兼容性。TGbe 可以采用的方法既包括对 TSN 子标准的改编，也包括对新解决方案的提议。下面介绍 TSN 的时间同步以及流量整形和调度组件，并讨论支持它们的最合适的 IEEE 802.11be 增强功能。

(1) 时钟同步：TSN 子标准 IEEE 802.1AS 包含精确时间协议 (PTP)，该协议可以在主/从基础上跨网络设备分配单个参考时钟。公共时钟的可用性同样是 WiFi 7 的关键要求，因为它将允许成功地调度上行链路和下行链路中的 MU 传输，以及在 AP 之间建立协调机制。

实际上，已经通过考虑无线链路非对称延迟的 IEEE 802.11v 中定义的时序测量(TM)程序，可以在 IEEE 802.11 上运行 IEEE 802.1AS。时间在主机（即 AP）和从机（即 STA）之间的私有动作帧中传播，后者可以计算时钟偏移并相应地调整自己的时间。

此外，IEEE 802.1AS 标准的下一个修订版 (IEEE 802.1AS-Rev，仍处于草案版本)将包含通过使用 IEEE 802.11mc 精细定时测量(FTM)过程的新颖同步方法。FTM 提供了 0.1 ns 的时间戳分辨率，远比 TM 的精度高，TM 的时间戳分辨率为 10ns。

(2) 流量调度：EDCA 使用的四个访问类别 (AC) 不足以对实时应用程序进行精细控制，因为它们无法提供对延迟/抖动的严格限制，尤其是在拥塞情况下。出于这个原因，TGbe 正在考虑对 EDCA 进行可能的增强，例如合并一个对时间敏感流量具有最高优先级的新 AC，以及修正传输机会 (TXOP) 使用机制。



另外，在 IEEE 802.11 MAC 模式上对 IEEE 802.1Qbv 时间感知整形器的调整将允许设备根据尚待定义的新规则来控制流量如何到达不同的 EDCA AC。通过对到达 MAC 层的流量进行整形，设备将能够减少 AC 间竞争，并更好地控制它们满足信道的方式和时间。

(3) 帧抢占：在一个节点正在传输多个流量的情况下，将对时间敏感的流量放在最高优先级队列中可能不足以减轻由于大量正在进行的低优先级传输而造成的延迟，该传输可能包括许多聚合的数据包，并持续到最大物理协议数据单元 (PPDU) 持续时间 (即 5 毫秒)。

针对该问题的可能解决方案是基于 IEEE 802.1Qbu 帧抢占机制的改编，即在对时间敏感的流量存在的情况下进行帧抢占从而提高整体吞吐量。将抢占帧整合到 WiFi 中将需要操作物理层和链路层，例如可抢占帧的格式以及在保留可抢占流量完整性的同时对帧进行分段操作。

尽管帧抢占可能会应用于来自同一节点的传出传输，但需要扩展信道访问机制以合并来自其他 AP/STA 的传输。基于这种实现，在存在时间敏感的业务流的情况下，建议简单地避免在 OBSS 中使用分组聚合，但这也意味着吞吐量损失。

(4) 接入控制：保护时间敏感流量的传统方法是在给定的频段和时间段内避免信道过载 (即限制流量负载，流量数量和/或允许传输数据的 STA 数量)，尽管 IEEE 802.11e 准入控制机制限制了 BSS 中每个服务类的业务流数量，但 IEEE 802.11aa 将此功能扩展到了整个 OBSS。两者均可单独由 WiFi 7 使用，或与流量整形解决方案结合

使用，以控制流量如何到达传输缓冲区。通过多链路操作以及将 6 GHz 频段纳入 IEEE 802.11be，可能设计出流量感知型多频段准入控制系统。例如，根据网络和负载条件，6 GHz 频段可以专用于时间敏感流量。将来可能还需要更多的准入控制机制来支持调度操作。

(5) 介质访问：时间表规划可以定期执行对时间敏感和对时间不敏感的业务传输，以将彼此隔离。从这个意义上说，IEEE 802.11ax 中已有两种促进无冲突操作的介质访问方法：触发器机制和目标唤醒时间机制。基于触发器的访问允许 AP 调度上行链路 MU 传输。未来的改进可能包括速率自适应机制，以增加对时间敏感帧的传输比率，以及持久分配方案，以减少由触发信令引起的控制开销。通过使用目标唤醒时间（TWT）机制，STA 采用唤醒时间表，使它们定期唤醒以发送/接收数据。

前面提到的两种方法只是确定访问信道的那一刻，而 TGbe 培育的新 MAC 功能可以支持调度操作。就减少延迟而言，调度操作是关键。但是，阻碍其在无线域中进行精确操作的主要障碍仍然是在多个 OBSS 的争夺中，可以结合适当的多 AP 资源协调策略来解决这一争端。

## 2.6 5G 确定性网络（5GDN）

确定性技术的发展与业务的实际部署与演进相辅相成。随着近年 5G 的快速商用部署并逐步深入行业数字化，5G 确定性网络也在商业项目中得到验证，并反向推动技术的进一步升级。而且由于 5G 网络

涉及到无线接入网、传输承载网、核心网等不同部分，因此前文中阐述的 TSN、DetNet 等技术也会通过 3GPP 标准版本逐步迭代并深入的集成到 5G 确定性网络中。

5G 确定性网络是指利用 5G 网络资源打造可预期、可规划、可验证，有确定性传输能力的移动专网，提供差异化的业务体验[10]。因 5G 在国民经济中战略作用，整体业界以及政府对 5G 及 5GDN 十分重视和支持。此外，5GDN 有助于强化 5G 网络从服务消费者到服务公司和组织。

5GDN 包括三种能力：差异化（Differentiated）网络、专属（Dedicated）网络、自助（Do It Yourself）网络[23]。差异化网络包括带宽、时延、抖动、丢包率、可用性、高精度定位、广域/局域组网等的差异性。专属网络包括网络安全、资源隔离、数据/信令保护等特性。自助网络包括线上/线下购买、网络自定义、快速开通、自管理/自维护、网络自运营等特性。

### 2.6.1 5GDN 架构

如图 2-30 所示，5G 系统整体分为 5G 终端设备、5G 无线接入网（RAN）与 5G 核心网（CN，Core Network）。无线接入网与核心网之间通过传输承载网络进行联接[1]。



图 2-30 5G 网络系统示意图

基于 5GDN，5G 可以为垂直行业提供确定性和差异化的体验。这将使无线网络不仅可以向公众普遍提供服务，而且还可以为垂直行业提供虚拟专用网络以驱动其数字化转型，并具有灵活的业务编排和调度功能。

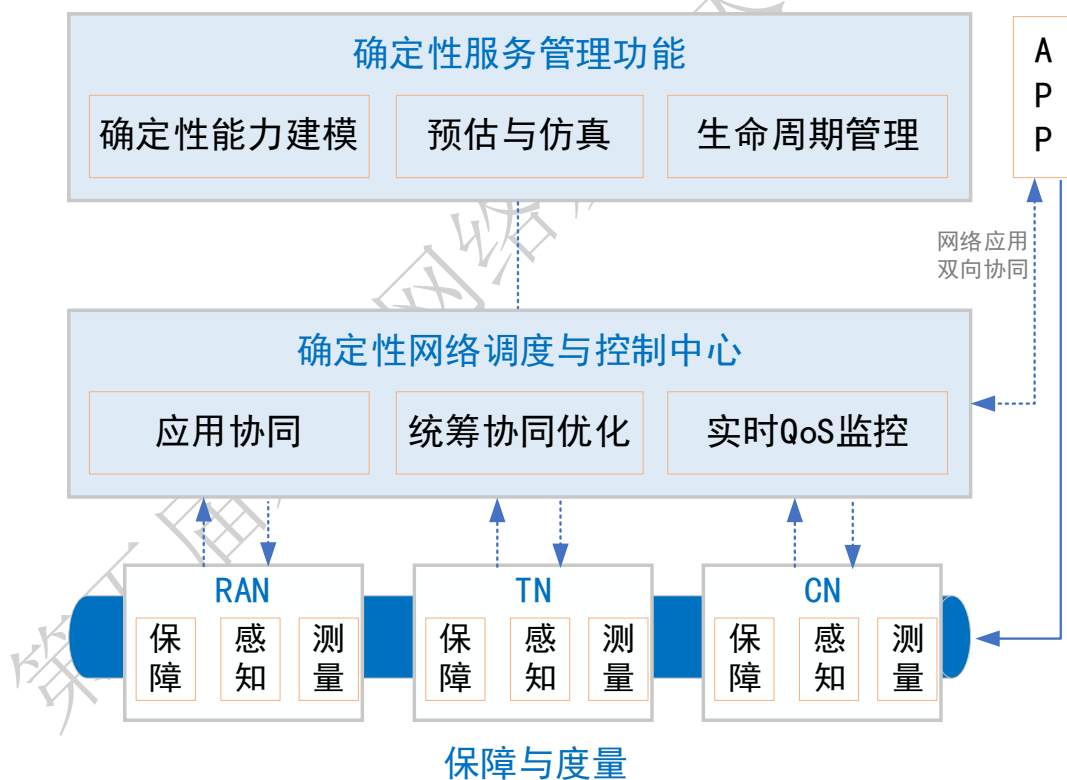


图 2-31 5G 确定性网络架构

为保障确定性服务的提供，5GDN 架构可以分为确定性服务管理、确定性网络调度与控制中心、保障与度量三个层面，如图 2-31 所示

[23]。当前 5GDN 的网络架构已经通过 3GPP R16/17 版本进行了定义，并在目前正在讨论的 R18 版本中会有进一步的增强。

确定性服务管理用于客户或运营商输入业务需求，管理网络切片、5G 局域网、边缘计算等系统与能力，并提供网络状态监测、显示和告警；此外，确定性服务管理用于提供顶层确定性的设计部署、确定性能力建模、确定性生命周期管理、支撑实时 SLA/QoS 仿真和预测。

确定性网络调度与控制中心担当确定性网络控制器的角色，通过网络各域（RAN/CN/TN/APPs）统筹协同调度，实现多技术（URLLC、切片、多接入边缘计算、TSN）综合集成、网络应用双向协同、SLA/QoS 实时评估，最大化网络整体确定性能力。

保障与度量层建构于数据面，用于包级数据采集，实现时延、抖动、带宽等指标的精确度量，接受控制中心深度协同调度，提升确定性保障能力。

## 2.6.2 5GDN 技术

5GDN 的核心模块包括 5G 核心网，高性能异构 MEC 和动态智能网络切片：

（1）5G 核心网是 5GDN 的关键。5G 确定性网络是一个端到端的概念，涵盖了基站，传输和核心网的综合能力。其中，确定性能力的大脑是 5G 核心网。5G 核心网负责网络质量保证期间的全局资源调度和管理，实现 5GDN 架构中确定性网络调度与控制中心的功能。核心网管理所有网络拓扑，访问信息，用户数据和行业需求。它确保

了每个行业的用户都可以在公共网络上享受自己的私有渠道，并保证获得确定性的体验。

(2) 高性能异构 MEC 是 5GDN 中确定性保障与度量的基础性系统。MEC 可以通过就近部署的 UPF (User Plane Function 用户面功能) 提供本地增强的联接能力，降低时延，并提供计算平台承载行业应用。具体来说，这些包括：1) 灵活的分流能力，比如，根据用户当前的位置信息、用户的属性、用户使用的业务、目标 DNN 等多种方式分流，可以减少移动用户访问业务的数据流的迂回，从而显著缩小时延，并实现数据流的安全保护。在大带宽的业务场景，MEC 可缩短传输路径，既能降低传输成本，还能减少抖动和拥塞的发生概率，提升带宽确定性能力。2) 本地计算增强确定性，应用的部署位置最靠近分流的位置，既能简化设备和网络的部署安装，也能减少分流点到应用的路径迂回。MEC 和调度与控制中心协同实现对于 MEC 上行业应用的感知，并进行调度与控制优化。3) 按需部署 MEC，行业客户可灵活选择 MEC 的部署位置，比如，园区级别部署的 MEC，兼顾数据不出园区和业务时延、大数据量传输节省的诉求；煤矿等井下工作场景，需要增强 MEC 应对大网的控制面连接中断的突发情况，保持继续工作的弹性。

(3) 动态网络切片构成 5G 确定性网络的基础支撑能力。与普通用户要求不同，行业要求可能会有很大差异。以远程计量为例。远程计量涉及大量连接。它不耗费带宽或对延迟不敏感，但是需要更高的安全性和可靠性。远程手术和自动驾驶等应用程序的要求更加严格：



确定性延迟，高安全性和“六个九”（99.9999%）甚至更高的可靠性，每年的停机时间仅为几秒钟。为了满足这些要求，引入了动态智能切片技术。它通过在公共网络、公共资源池和公共物理硬件平台上进行灵活的软件编排和调度，构建了多个基于软件的虚拟专用网络。它还在这些专用网络上提供了不同的网络功能，包括但不限于带宽、延迟、数据包丢失、抖动甚至安全管理机制。将来，将需要提供动态智能切片功能，以供垂直行业进行定制和订阅。它们不仅必须适应需要差异化，确定性经验的新应用程序，而且还必须保证易于访问和敏捷。这样，5G 网络将成为垂直行业数字化转型的真正推动者。

具体来讲，端到端网络切片由 UE、RAN、CN、TN 共同组成，5GDN 通过 RAN 资源隔离技术、核心网资源隔离技术、传输网资源隔离技术、业务安全保护技术等实现动态网络切片。RAN 资源隔离分为 QoS 优先级调度、无线块资源预留、载波隔离和物理设备资源隔离四个逐步升高的等级。核心网资源隔离使用网络功能虚拟化（NFV）实现。传输网资源隔离技术使用虚拟隔离（VPN+QoS 虚拟隔离）和硬隔离（如 FlexE）实现。业务安全保护通过资源隔离、数据网络名称（Data Network Name, DNN）认证功能、封闭接入组（Closed Access Group, CAG）功能、切片二次认证等加以实现。

（4）5GDN 集成现有确定性网络技术。5GDN 通过利用多种确定性网络技术如 FlexE、TSN、DetNet 可以强化其端到端确定性传输能力和网络切片能力。以 FlexE 作为 5G 承载网可以提升 5G 网络切片能力。以 TSN、DetNet 与 5G 结合，可以进一步保证确定性端到端



传输质量。例如，图 2-32 是一类 5G 和 TSN 结合提供确定性端到端传输的体系架构[12]。

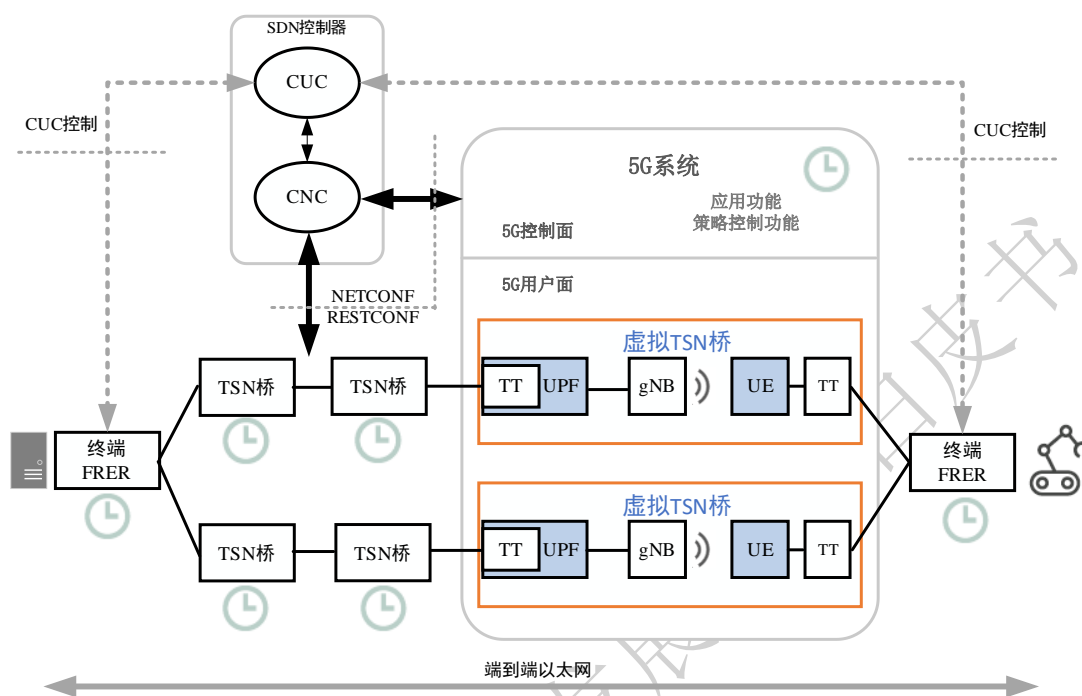


图 2-32 5G 与 TSN 集成的端到端确定性控制架构

### 三、确定性网络技术发展趋势

#### 3.1 FlexE 技术趋势

网络切片技术可以让运营商在一个硬件基础设施中切分出多个虚拟的端到端网络，每个网络切片在设备、接入网、承载网及核心网方面实现逻辑隔离，适配各种类型服务并满足用户的不同需求。对每一个网络切片而言，网络带宽、服务质量、安全性等专属资源都可以得到充分保证。采用 FlexE 技术的网络具有弹性带宽、灵活分配的硬管道，可以实现业务的物理隔离和可靠的服务质量，天然地实现了网络切片功能。FlexE 技术的物理管道捆绑、子速率、通道化的应用模式可以承载各类速率需求的客户业务，提高了网络承载带宽的利用率，降低了网络设备的成本，逐步完善的 OAM 功能满足网络维护管理需要，这些优势很好地满足了 5G 承载网络的技术需求。

随着 5G uRLLC 承载、时间敏感应用等新兴业务的出现，在 IP/Ethernet 中保障最恶劣情况下时延目标的确定性网络技术开始出现。其中，二层技术 IEEE 802.1TSN 和三层技术 IETF DetNet 定义了 IP/Ethernet 网络中的拥塞管理机制、基于时延信息的调度算法、显式路径建立以及提供高可靠性的冗余链路技术等，进一步结合 FlexE 技术，以提供有保障的时延（Bounded Latency）、零丢包的确定性业务承载也成为了研究热点。

包括 OIF、TU-T、IETF、BBF 在内的标准组织都在积极筹备 FlexE

下一步更加精细灵活、易于管理维护的方案，利用其他网络技术对 FlexE 进行扩展。中兴、华为、移动、思科等国内外厂商运营商都在积极产出技术方案与应用产品，推动 FlexE 的发展。随着 OIF FlexE 2.0 标准的正式发布，以及 FlexE 技术在数据通讯领域相关标准组织的系统应用、架构级扩展，FlexE 技术引起了业界广泛关注，芯片/设备制造商积极投入芯片/设备研发、产品测试及演示等环节，网络运营商/大型 OTT 业务提供商也在积极通过标准推动、技术合作、方案验证等方式参与其中，相关产业链正在形成。

### 3.2 TSN 技术趋势

TSN 在二层网络通过时分复用的思想为高优先级流量提供了确定性网络需要的传输路径和传输时延，但是会导致低优先级流量的时延增加，需要考虑与低优先级流量共存的问题。可以为“尽力而为”流中的关键数据包赋予更高的优先级，例如路由控制协议的关键数据包。

在容错冗余方面，TSN 技术的应用场景，如工业控制，要求高可用和高可靠性。可以结合 HSR 或者 PRP 等协议考虑具体的实现机制，但是它们受到拓扑类型的限制。Qca 可以创建必要的路径，也可以由中央控制器来创建。

在具有频繁业务变更的应用场景下，需要考虑复杂配置与实时性的权衡。现有的流量整形算法要求网络在配置时就确定初始参数。如每个物理链路上的确定性流分配的带宽的最大比例，分配给确定性队

列整形器的优先级级别数，CQF 算法会提前配置门控列表。在有新增或删除业务流量的场景下，TSN 技术不够灵活。应用程序可以指定可以承受的最大端到端延迟，然后采用更灵活的分配资源策略满足时延要求。

如何与 5G 网络集成也是未来要考虑的关键问题，借助对 TSN 的标准化支持，将 5G 系统部署在工厂中时，它被视为一组符合 IEEE 标准的虚拟 Ethernet-TSN 桥。TSN 转换器功能可实现 5G 与有线 TSN 网络之间的互通。在控制平面上，5G 桥提供了与 TSN 网络控制器交互的管理功能。

TSN 为了满足确定性的时延需求，会牺牲掉部分带宽资源，需要考虑提高资源利用率。除此之外，如何部署 TSN 网络，是采用分布式部署还是结合 SDN 等技术进行集中式部署，如何互联多个封闭的 TSN 网络，如何协调传输时延的最大时延和平均时延，是加速 TSN 应用部署的关键问题。

### 3.3 DetNet 技术趋势

DetNet 与给定 L2 网段中包含的 TSN 流控制操作和服务相比，预计 DetNet 流控制操作将具有更大的规模和更高的复杂性。DetNet 流量控制将在互操作性、控制数据开销以及保证各种 L2 网段的 QoS 指标方面带来若干挑战。此外，不同网段的所有者之间可能会出现 QoS 服务水平协议的不同要求。以下几个大规模确定性转发技术发展趋势值得关注。

在时钟同步方面，由于 DetNet 应用领域包含部分专用广域网的确定性保障，这面临网络空间距离过大等问题，进行全局网络设备精准的时间同步难以实现。为了实现时钟同步作为当前网络层确定性传输的基础技术保障，1588V2 协议频率同步可应用于 DetNet 以此实现广域的时钟同步。但不同设备在 DetNet 域间基于频率同步的协同运作、固定时间偏移选择等问题依旧是时钟同步机制在确定性网络领域研究的重点。

在调度模型方面，由于广域网存在长距链路，且链路时延较大，导致难以根据流的逐跳到达时间建立调度模型。这与现有的 TSN 相关调度模型存在一定的区别，如何将现有 L2 网段的调度模型结合 DetNet 特性进行修改也成为了目前研究的热点。同时由于在网络层面各方面业务流数据量激增，存在着上千条海量流量，时延抖动需求各异，调度合成计算的时间复杂度高，在调度合成方面也对控制平面提出了一定的挑战。

在设备配置方面，在某些应用流业务场景下，若流量存在动态变化，则在线重配置难度大，或存在资源浪费等问题，对控制平面的在线计算调度与实时配置下发能力提出了更高的要求。同时由于底层网络设备异构，无法统一调度，因此在底层设备（如 TSN 交换机）间的互联互通方面尚待验证。

### 3.4 DIP 技术趋势

在 DIP 的基本原理和基础能力之上，相关技术扩展还可以进行

相应增量设计，实现更强的能力，适配更广泛的业务场景。例如，针对有超低时延要求的工业现场网络场景，可以在不同设备上采用不同的周期大小，并通过相关的门控队列调度机制实现不同大小周期之间的对接，进一步压缩 DIP 时延，满足未来工业场景的需求。同时，可以进一步结合流量模型学习和业务场景极值估算，在流量接入前提前规划流量路径，实现流量极值范围内的业务免编排实时接入。又如，针对有更低抖动要求的场景，可以通过出口网关上的进一步的流间隔离机制，实现网络的端到端 $\pm 1\mu\text{s}$ 抖动。再如，针对 TSN 孤岛之间相互连接的场景，DIP 的周期可以与 Qch 的调度周期无缝对接，实现 TSN 网络的跨 IP 连接。此外，针对 5G URLLC 等场景，还可以通过 DIP 周期与 5G 空口时隙之间的联合调度使能端到端的确定性，提升 5G 空口的接入能力等等。对于以上场景，都可以在 DIP 基本机制基础之上进行相应的增量设计以适配不同业务场景。

低平均时延的研究方向上的主要思路是基于 EDF（Earliest Deadline First）方法进行相关调度机制的设计。EDF 的基本思想是以报文携带的绝对 deadline 作为调度优先级标准，deadline 更紧迫的报文调度优先级更高。业界关于 EDF 的研究由来已久，但历史工作都是基于单点的研究，主要用于 CPU 调度，在 EDF 的网络级性能上缺乏关键进展。这一理论可以扩展用于城域、园区、IPRAN 等场景，提供绝对的 E2E 最低时延上界和最大可调度域。针对普适网络，华为也提出了基于 Damper+EDF 的工作持续方案，以 Damper 机制作为最低可调度时延上界的计算指导，在保证绝对时延上界的前提下，通过



EDF 的方式尽可能的降低平均时延。

从完整的网络架构角度，实现真正意义上的端到端确定性还需要实现二层确定性网络与三层确定性网络的对接与拉通，需要无线网络与有线网络的对接与拉通，以及终端协议栈内部的确定性机制。此外，面向众多场景对于端到端概率性时延上限的需求，可以基于随机网络演算、鞅论等基础理论和方法，通过对流量到达曲线和网络服务曲线等的概率化建模和推演，付出更少的网络资源来概率性的满足端到端的时延需求。华为在以上方向均开展了系统、深入的研究。

### 3.5 DetWiFi 技术趋势

TSN 在为诸如工业控制、自动驾驶等领域带来福音的同时，自身也面临着一些挑战。TSN 是基于有线以太网提供的低时延、高可靠和低抖动等性能，始终不能摆脱线缆的束缚，如何在无线网络上部署和拓展 TSN 协议的功能就成为一大技术难点。TSN 是公开的协议标准，如何在为不同的应用场景提供低成本、互操作便利的同时提供优于传统专用协议的高性能和效率也有待解决。

无线 TSN 在无线网络上提供高可靠和低时延服务，但大多数技术只关注某一个方面（如时延或可靠性等）的性能，而同时实现低时延、高可靠性、高可用性、低成本和节能等性能，使其在无线链路上提供可媲美于有线链路特性的技术却极其少见。传统的基于 IEEE 802.11 和基于 IEEE 802.15 物理层的无线 TSN 大都只能提供软实时性能，在时延和可靠性要求极其苛刻的运动控制等场景的部署增益并



不大，基于 5G 物理层的无线 TSN 技术的研发是一个不错解决方案，但面临着棘手的兼容问题。关于无线 TSN 中的数据隐私、用户信息篡改、非授权用户假冒等安全问题也是一个很大的挑战。

TSN 和成熟的 IEEE 802.11 技术的集成，将可能带来无线确定性网络。这种趋势中最可靠，最有前途的是 IEEE 802.11be，它是未来 WiFi 7 的真正前身，它应带有定义明确且向后兼容的时间敏感操作模式，以支持低延迟通信。尽管 WiFi 在免许可频段内运行将很难保证完全确定性的通信，但仍然存在减少所有内部和外部可控原因影响的空间。一方面，可以通过考虑动态频谱访问（例如非连续信道绑定和多链路操作以及协作 AP 策略）来最大程度地减少与外部网络的竞争。另一方面，在存在来自“尽力而为”流的大数据包时，同一 WLAN 内部的优先级划分和调度机制可以提供一种有效的解决方案，以减少时间敏感流量的传输时间。

### 3.6 5GDN 技术趋势

5GDN 发展方向包括高性能核心网络和承载网、高效异构 MEC、智能网络切片，以及创新型应用：

（1）5G 核心网络朝着高性能多连接、智能感知和保障、智能资源管理方向发展，通过智能资源管理进一步降低 5GDN 的时延。5G 承载网发展趋势是构建以 FlexE、TSN、DetNet 为承载网的架构体系，通过 TSN 和 DetNet 增加 5GDN 的确定性低时延、低抖动传输能力，以 FlexE 等技术强化 5GDN 的高性能网络切片和差异化服务能力。

(2) 5GDN 的一个发展趋势是进一步加强异构边缘计算平台的效率，完成各种设备接入时间和传输时间的大幅缩减。此外，实现应用、边缘网、传输网、核心网的跨网络域的协同保障是一个重要发展趋势。

(3) 实现网络精确度量与探测，促成网络切片智能化是 5GDN 发展的重要趋势。利用 QoS Monitoring 技术，改进切片质量，形成闭环优化，智能配置需求方的网络服务质量，实现差异化、定制化服务，有助于技术应用快速落地。

(4) 实现5GDN与行业网络对接，落地创新型应用是5GDN发展的重中之重。通过5GDN大幅改进现有垂直系统如自动驾驶、工业制造、智慧农业、智能服务等效率或效能，实现5GDN与行业应用的紧密结合，推动5GDN项目落地，是重要发展趋势。

为实现确定性网络的差异化，5G 无线侧也在不断进行技术改进。如精准时钟同步授时、提升上行带宽的SUL（Supplementary Uplink，辅助补充上行链路）与超级上行技术、降低时延的上行免调度传输（UL Grant-free）与Non-Slot 特性等。本白皮书主要关注在网络侧的确定性能力，以及如何与无线、传统承载的协同，对于无线侧的技术改进不进一步展开。

## 四、确定性网络技术标准

### 4.1 FlexE 标准

2016 年 3 月灵活以太网研究小组发布 FlexE1.0 标准,实现 100GE PHY 的支持,单个时隙对应带宽,即时隙粒度为 5Gbps,确定了管理信息传递通道。OIF 于 2018 年 6 月推出了 FlexE 2.0 版本标准,增加了管理细节,确定了 200GE、400GE PHY 的承载方案,并通过合并 5 个 5Gbps 的时隙,实现了 25Gbps 的时隙粒度。随着 5G 移动回程网络未来接入层/城域边缘的信道化,为最小 10G 客户端提供 5Gb/s 粒度,50GE PHY 是细粒度的市场需求和可能的大批量应用,灵活的实现逻辑将是至关重要的,由此 2018 年 11 月 OIF 又启动了 FlexE 2.1 标准制定项目,旨在对 FlexE 2.0 进行扩展,增加 50GE PHY 和 50Gbps 时隙粒度的支持,指定一个 50G 的 Flex 帧和多路复用格式,并将解决具有较低带宽 FlexE 应用的需求,为包括未来 5G 移动网络接入层在内的应用提供实现基础。

此外,BBF (BroadBand Forum) 在 2017 年 5 月启动“Network Services in IP/MPLS Network using Flex Ethernet”标准项目,以实现通过 FlexE 接口在 IP/MPLS 网络中实现增强 QoS 功能框架并基于现有网络兼容支持 FlexE 接口隧道技术。多个基于 FlexE 的技术方案在并在 BBF Q3 会议中被接纳,这些提案包括 FlexE 在 IP/MPLS 网络中部署的技术方案和架构、基于 FlexE 的网络分片以及结合 Segment

Routing 实现更灵活路径提供/管理等。同时 IETF 也启动了 FlexE 控制平面标准制定工作，以实现接口隔离、网络分片等技术，其工作聚焦在 FlexE 框架上，主要讨论端到端 FlexE 技术的架构、场景以及为实现端到端 FlexE 路径需要完善/扩展的信令及路由协议。

## 4.2 TSN 标准

IEEE 802.1AS/ASReV 定时和同步是实现确定性通信的重要机制。802.1AS 是 IEEE 1588 PTP 同步协议的简化版，该协议支持不同 TSN 设备之间的同步兼容性。802.1ASReV 增加对容错和多个主动同步主机的支持。

IEEE 802.1Qbv 定义了 TSN 交换机出口业务流的排队转发机制。在每个时间窗口，只有规定的队列的消息可以传输。其他队列在这些时间窗禁止传输，通过提前规定的门控列表，数据包通过每个交换机的延迟是确定性的，使信息延迟通过网络 TSN 组件可以保证。

IEEE 802.1Qbu 定义了帧抢占机制。允许中断标准以太网或巨型帧的传输，以便允许高优先级帧的传输，然后在不丢弃先前发送的中断消息片段的情况下恢复传输。

IEEE 802.1CB 冗余管理协议，遵循高可用性无缝冗余（HSR）-IEC 62439-3 条款 5 和并行冗余协议（PRP）-IEC 62439-3 条款 4 已知的类似方法。为了提高可用性，相同的消息的冗余副本通过网络通过不相交的路径并行通信。

IEEE 802.1Qcc 管理接口和协议的定义，新增集中配置模式，支

持 TSN 网络调度的离线和/或在线配置。

IEEE 802.1Qci 工作在交换机（转发引擎）的入口，通过 StreamID 识别流，然后执行相关策略，负责管理控制并防止恶意流程恶化网络性能。

IEEE 802.1Qca 路径控制和预留机制。为数据流提供显式路径控制，带宽和流预留以及冗余。

IEEE 802.1Qch 定义循环排队和转发机制的流量整形机制，配置简单，灵活性低。

IEEE 802.1Qcr 异步整形机制，提供有界的延迟和抖动（低性能级别），而不需要时间同步。

IEEE 802.1 Qcp 标准化了 TSN 的 YANG 模型，为周期性监控和报告以及配置 802.1 网桥和组件提供框架，比如配置媒体访问控制（MAC）网桥、双端口 MAC 中继（TPMR）、虚拟局域网（VLAN）网桥等。

### 4.3 DetNet 标准

DetNet 正在努力集成与扩展 L2 技术和机制，以实现跨网桥与路由器的端到端确定性流，即超越局域网边界的 DetNet L3 节点。迄今为止，DetNet 规范提供了正确的端到端传输和封装，包括 DetNet 数据平面和整个 DetNet 架构，采用了相关兼容性强且稳定标准，即 IETF RFC 和 IEEE 标准。

由于 DetNet 工作组成立时间较短，目前仅形成部分 IETF RFC

文件，以及相关的现有 IETF 草案，如 DetNet 架构、用例、安全等；DetNet 数据平面方案，包括 IP 和 MPLS、SRv6 三种；数据流信息模型、Yang 模型、控制平面架构等。本节将全面概述正在进行的 IETF DetNet 标准化。

### (1) IETF RFC 文档

- RFC 8557 (Deterministic Networking Problem Statement): 该文件主要阐述了各行业领域对具有确定性保障的业务流建立多跳路由路径需求的建议。
- RFC 8578 (Deterministic Networking Use Cases): 该文件对“确定性业务流”有共同需求的不同行业的用例进行了概述说明，这些用例在网络拓扑和特定应用领域方面有明显的不同，为 DetNet 提供了一个广泛的行业环境。对于每个用例，文件都标识当前代表性的解决方案，并描述 DetNet 可以实现的潜在改进。
- RFC 8655 (Deterministic Networking Architecture): 该文件提供了 DetNet 的总体架构，它提供了一低丢包率、有限端到端延迟的数据传输能力，用于承载实时应用的单播或多播数据流。DetNet 在 IP 层运行，并通过 IEEE 802.1 定义的较低层技术（如 MPLS 和 TSN）提供服务。
- RFC 8938 (DetNet Data Plane Framework): 该文件提供了 DetNet 数据平面的总体框架，其涵盖 DetNet 数据平面规范、通用概念和注意事项。同时还描述了与控制器平面的相关考虑



事项。

- RFC 8939 (DetNet Data Plane: IP): 该文件建立在 DetNet 体系结构 (RFC 8655) 和数据平面框架 (RFC 8938) 上, 指定了对 IP 封装数据提供 DetNet 服务的 IP 主机和路由器的数据平面操作方式。同时文件采用现有的 IP 层和更高层协议用于支持流识别和 DetNet 服务交付。
- RFC 8964 (DetNet Data Plane: MPLS): 该文件指定在 MPLS 报文交换网络上运行时的 DetNet 数据平面, 主要利用伪线路 (Pseudowire, PW) 封装、MPLS 流量工程 (MPLS-TE) 封装以及相关机制。

## (2) IETF 草案

- draft-ietf-detnet-bounded-latency-02 (DetNet Bounded Latency): 本草案提出了一个定时模型, 使得现有或将来的相关协议标准能够实现有限延迟和零拥塞丢失的确定性服务质量。草案定义了资源预留协议与服务器的需求, 通过使用其他文档中定义的队列机制, 提供确定性服务质量。
- draft-ietf-detnet-controller-plane-framework-00 (DetNet Controller Plane Framework): 本草案提供了控制平面的框架概述。
- draft-ietf-detnet-flow-information-model-14 (DetNet Flow and Service Information Model): 本草案描述了 DetNet 的流程和服务信息模型, 这些模型主要服务于 IP 和 MPLS 的 DetNet 数据



平面。

- draft-ietf-detnet-ip-oam-01 (OAM for DetNet with IP Data Plane): 本草案介绍了基于 IP 数据平面的确定性网络操作、管理、维护协议 (OAM) 的使用规范。
- draft-ietf-detnet-mpls-oam-02 (OAM for DetNet with MPLS Data Plane): 本草案定义了基于 MPLS 数据平面的 DetNet 网络上的确定性服务关联通道 (ACH) 的格式和使用规范。
- draft-ietf-detnet-ip-over-mpls-09 (DetNet Data Plane: IP over MPLS): 本草案介绍了基于 MPLS 报文交换网络对 IP 进行封装的确定性网络数据平面。
- draft-ietf-detnet-ip-over-tsn-07 (DetNet Data Plane: IP over IEEE 802.1 TSN): 本草案指定了在 TSN 子网上运行时的确定性网络 IP 数据平面, 但草案未定义新的工作流程。
- draft-ietf-detnet-mpls-over-tsn-07 (DetNet Data Plane: MPLS over IEEE 802.1 TSN): 本文档指定了在 TSN 子网上运行时的 MPLS 确定性网络数据平面。
- draft-ietf-detnet-mpls-over-udp-ip-08 (DetNet Data Plane: MPLS over UDP/IP): 本草案指定了 MPLS 确定性网络数据平面在 IP 网络上的操作和封装, 其中采用的方法基于 MPLS-in-UDP 技术。
- draft-ietf-detnet-security-16 (DetNet Security Consideration): 本草案从 DetNet 系统和组件的角度讨论特定于 DetNet 的安全注

意事项。在系统方面考虑事项包括相关威胁和攻击的分类，以及用例和服务属性的关联。在组件方面主要考虑数据包过滤策略与超时包检测等操作。草案还讨论了特定于 IP 和 MPLS 数据平面技术的安全注意事项。

- draft-ietf-detnet-tsn-vpn-over-mpls-07 (DetNet Data Plane: IEEE 802.1 Time Sensitive Networking over MPLS): 本草案指定了当 TSN 网络通过 DetNet MPLS 网络互联时的 DetNet 数据平面。
- draft-ietf-detnet-yang-11 (DetNet YANG Model): 本草案介绍了用于 DetNet 流配置和操作数据的确定性网络 YANG 模型的规范。YANG 模型可以不依赖任何信令协议，提供沿确定路径的端到端 DetNet 服务，该模型还能够指定流的操作状态。

#### 4.4 DIP 技术标准

DIP 相关技术标准在 CCSA 中进行最先推动。目前，相关行业标准 and 研究报告内容如表 4-1 所示：

表 4-1 DIP 相关标准和报告（含暂定）

序号	标准名称（含暂定）	目标工作组
1	面向工业互联网的端到端确定性网络技术	ST8/WG2
2	确定性 IP 网络协议规范	TC3/WG2
3	确定性 IP 网络设备技术要求	TC3/WG2
4	确定性 IP 网络的技术测试要求	TC3/WG2

序号	标准名称（含暂定）	目标工作组
5	电信网络的确定性 IP 网络控制面技术要求	TC3/WG1
6	电信网络的确定性 IP 网络面向汇聚层边缘云的技术要求	TC3/WG1
7	电信网络的确定性 IP 网络总体架构和技术要求	TC3/WG1
8	工业互联网 企业确定性网络关键技术及自运营系统研究	ST8/WG2
9	面向物联网应用的确定性网络技术需求分析研究	TC10/WG3

相关参与单位包括中国移动、中国联通、中国电信、华为、南邮等。目前，《确定性 IP 网络总体技术要求标准》已在 CCSA 进入报批阶段。与此同时，DIP 技术相关的周期缓存队列机制、网络架构等内容，也在 IETF 相关工作组（如：DetNet WG）中同步进行推动，与业界共同讨论数据面国际技术标准。

#### 4.5 DetWiFi 标准

IEEE 在 2018 年 5 月与 7 月，及 2019 年 5 月相继成立了研究组、学习组以及工作组，目的是为了制定新的高性能的 WiFi 标准，即 IEEE 802.11be Extreme High Throughput（EHT）。

802.11be 的初始目标是支持最大 30 Gb/s 的吞吐量，比 802.11ax 的速率还要高 4 倍，频率范围从 1 GHz 到 7.250 GHz，包括 2.4 GHz、5 GHz 及新的 6 GHz 未授权频段，但仍将与已有的支持各标准的 802.11 设备兼容。关于 802.11be 的关键技术的讨论内容参考表 4-2，它们是目前活跃的重要技术话题，预计在 2021 年将发布 802.11be 的

版本草稿。

表 4-2 802.11ax 与 802.11be 的新技术演进[18]

关键技术特征	802.11ax 目前规范	802.11be 的新技术演进
频率	2.4GHz, 5GHz, 6GHz (产品尚未支持)	2.4GHz, 5GHz, 6GHz (必选)
调制方式	1024 QAM	支持可能达到 4096 QAM 的调制等级
信道带宽	20MHz, 40MHz, 80MHz, 160MHz	在 802.11ax 上增加 320MHz
频带或信道聚合	无	多个方案待选
多接收和多发送 (MU-MIMO)	8 条流 (基于 OFDMA 的 MU-MIMO 上行和下行)	16 条流 (基于 OFDMA 的 MU-MIMO 上行和下行)
多 AP 接入协作	无	OFDMA 协作, 或空口协作, 或分布式 MIMO
链路适配和重传机制	自动重传请求 ARQ	支持混合的自动重传请求
与 6GHz 共存机制	在 802.11ax 中已有部分功能定义	对于已有的移动设备或新的设备, 802.11be 将可能通过支持动态频率选择、基于地域数据库或频谱接入系统等方式实现共存

提高无线传输性能首先是从物理层的工作频率、频段或信道的宽度及工作方式、发送及接收的天线空口方式等方面进行讨论。以 WiFi 技术为例, 影响数据传输吞吐量的因素主要包含了 OFDMA 的子载波数量、子载波传输的比特数、编码速率、空间流个数、帧间隔及每次传输物理帧所需时间。

支持新的 6 GHz 工作频率可以扩大频段带宽, 能有效增加 OFDMA 的子载波数量; 对信道或频段进行聚合绑定, 支持频段或信道的全双工收发, 能提高数据传输的效率和吞吐量; 扩展多输入多输出的空间流数量, 可以支持更多的同时进行传输的通道。这些物理层的扩展在标准定义过程中可以较早形成共识, 因为它们能够直接提高有效的数据传输速率, 是否能进入最后的标准规范在于芯片厂家需要

评估硬件的成本和可行性。

对于涉及数据链路层改变的多 AP 接入协作以及混合自动重传请求，因为技术方案较复杂，对性能的提升程度需要详细评估，目前无法确定在标准讨论过程中将会如何做技术方案选择或权衡。全双工收发可行性研究在 IEEE 的兴趣组（TIG）已有初步的报告。

#### 4.6 5GDN 标准

目前 3GPP 已经冻结 5G Release-15、Release-16 标准，正在演进中的标准包括 Release-17 和 Release-18。图 4-1 是 5GDN 相关的标准演进[23]。

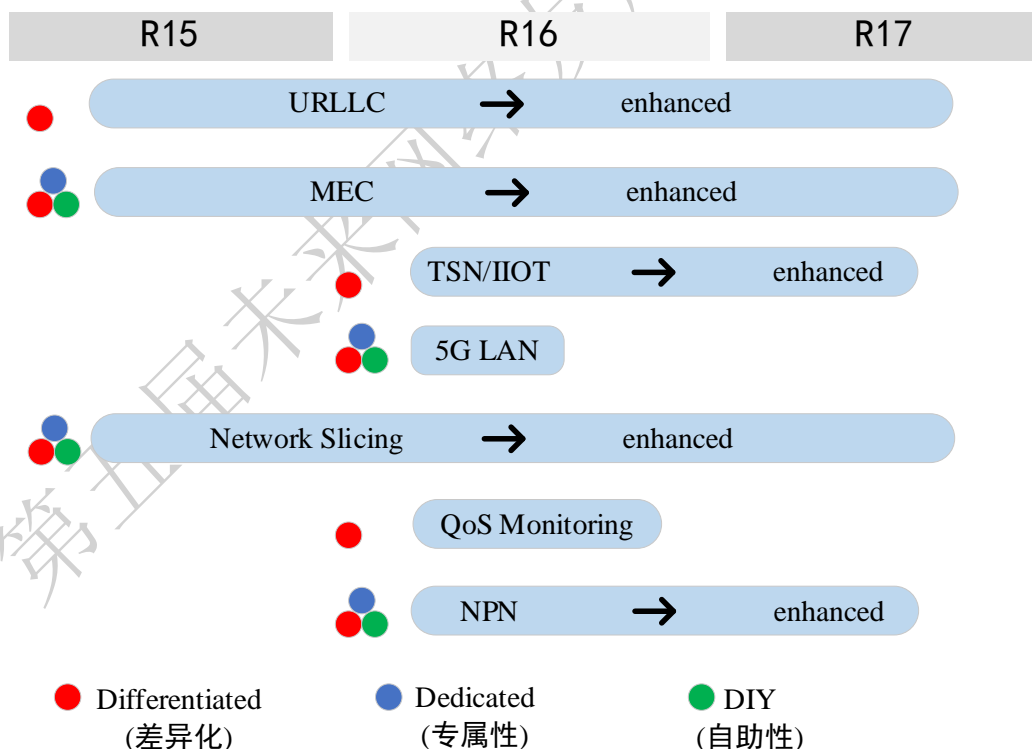


图 4-1 3GPP 5GDN 相关标准演进

从 R15 向 R17 演进过程中，URLLC、MEC 和网络切片能力均得到了加强。URLLC 的改进可以降低无线接入及核心网业务时延、提

升可靠性；网络切片通过资源隔离，提供差异化的确定性服务质量；同时，网络切片与 MEC 的结合有助于快速建网、降低成本、降低时延以及提升安全性[23]。

3GPP 在 R16 中研究 5G 与工业物联网 (Industrial Internet of Things, IIoT) 的结合，定义了 5G 与 TSN 集成的能力；同时，R16 中定义了 5G LAN 功能，用于 5G 直接支持现有的以太二层组网[23]。此外，R16 中的 QoS Monitoring 可用于确定性服务质量的监控。最后，从 R16 到 R17，5G 专网能力也将得到加强。

除 3GPP 确定性相关标准外，使用 FlexE 和 DetNet 等构建的 5GDN 系统也依赖于 FlexE 和 DetNet 等技术标准，可参考相关标准章节。

## 五、确定性网络应用场景与案例

确定性网络在各行各业都有应用潜力。但目前，“确定性网络+工业系统”应用最为成功。通过为工业设备提供确定性通信服务，促进工业生产的精细化、定制化能力，扩大工业制造的服务范围，提升工业产品的质量和良率。另外，通过强化和扩大工业制造能力，间接推动农业和服务业的多种应用的蓬勃发展。

### 5.1 应用场景

#### 5.1.1 FlexE 应用场景

FlexE 包含了一些子技术，如垫片结构用于网络切片，交叉传输实现端到端传输，操作管理维护（OAM）支持端到端传输监控，通道保护提供可靠性。借助垫片结构，通过捆绑，子速率和通道化，FlexE 适用于多客户多专线、速率调节、灵活组网等多种应用场景。FlexE 技术最核心的应用是基于垫片结构的网络切片。用于 5G 承载网，为 5G 网络切片的确定性路径提供支撑，可以提升服务商定制化、差异化的服务能力[1]。

FlexE 的三种典型应用场景为 Unaware 场景，Aware 场景和 Termination 场景[3]。



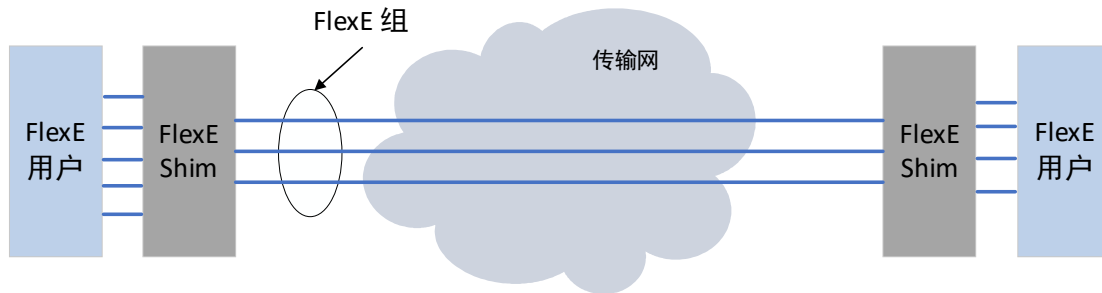


图 5-1 FlexE Unaware 应用场景：使用已有光纤，无需硬件升级，支持绑定和通道化功能

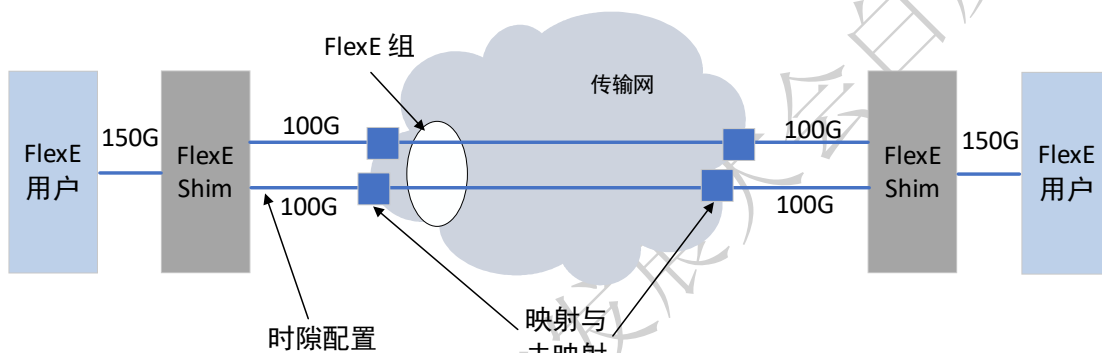


图 5-2 FlexE Aware 应用场景：支持绑定、子速率和通道化，主要使用子速率功能

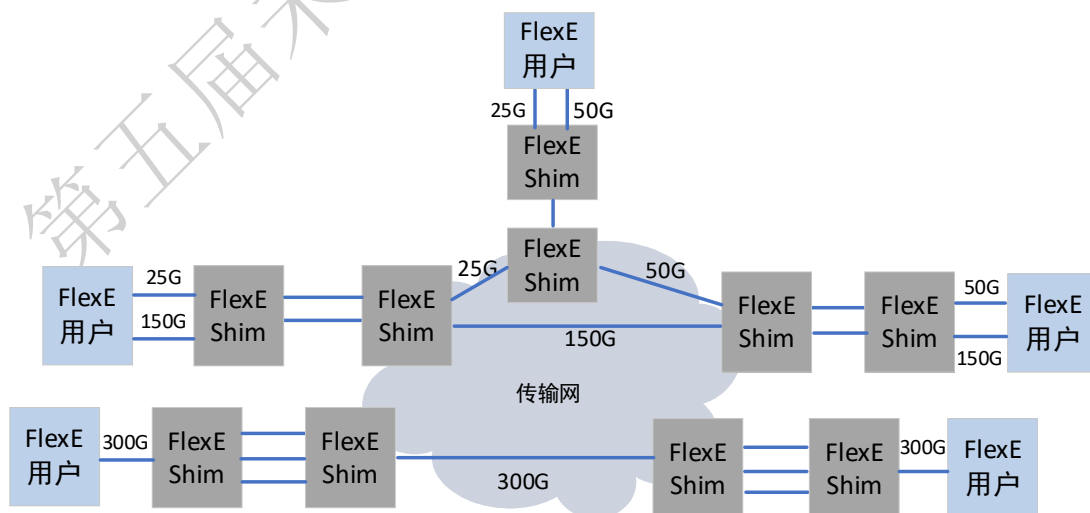


图 5-3 FlexE Termination 应用场景：灵活支持绑定、子速率和通道化

### 5.1.2 TSN/DetNet 应用场景

TSN 为局域网的确定性服务质量提供保障,可在融合局域网络中发送周期、非周期数据流;包含了一系列技术标准,如时钟同步、资源预留、循环排队等,确保端到端的确定时延与抖动。TSN 可以用于车联网、车内网、智能电网、工厂内网等众多场景。此外,用 TSN 作为 5G 的承载网也是一个潜在的重要应用场景。

DetNet 作为 TSN 的广域版本,TSN 的应用场景也是 DetNet 的应用场景。DetNet 允许在超远距离完成确定性通信,因而允许广域应用场景,如远海船舶控制、海岸线实时监测、超远距工业控制、超远程手术系统、大范围目标检测等。此外,基于 DetNet 构建确定性服务的骨干网和核心网是重要的应用场景。

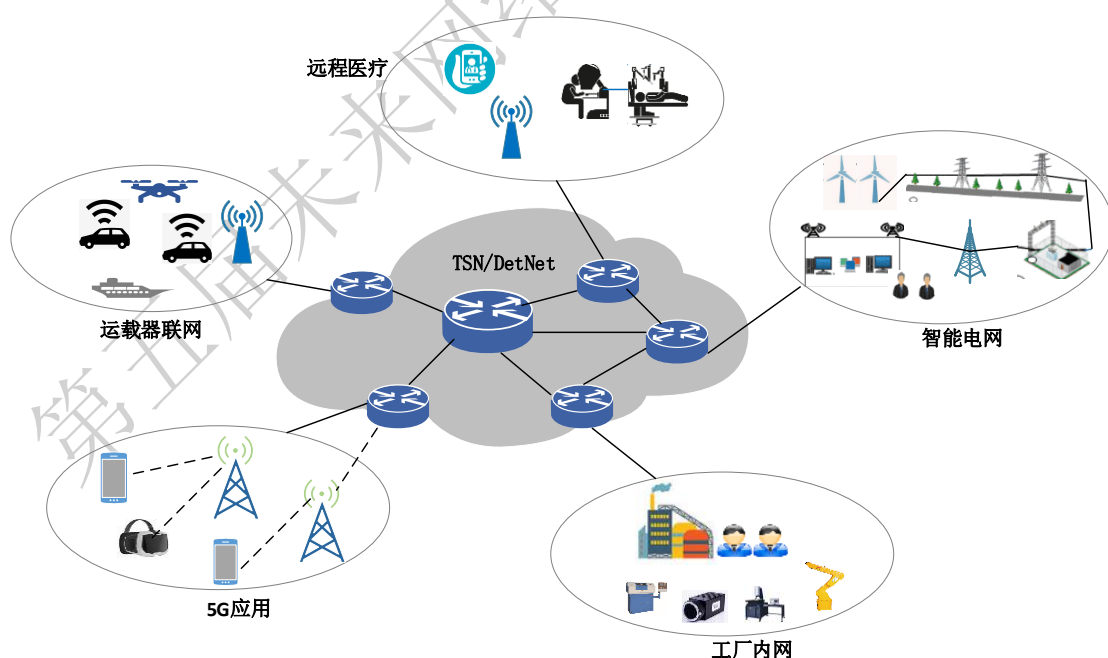


图 5-4 TSN/DetNet 应用场景

### 5.1.3 5GDN 应用场景

5GDN 商业应用场景演进包括三个阶段[23]:

(1) 阶段 1 部署局域 5G 确定性网络, 典型场景包括 IT 与通信服务、智能电网输变电应用、工业生产辅助和外围非生产类应用。该阶段典型的网络能力包括米级定位精度、50Mbps 上行带宽、20ms 时延以及 99.9%可靠性。

(2) 阶段 2 部署局域 5G 确定性网络, 典型场景包括差动保护等分布式智能电网输变电应用、更加严苛的生产辅助类应用、少量工业自动化控制。该阶段典型的网络能力包括厘米级定位精度、500M~1Gbps 上行带宽、5ms 时延以及 99.999%可靠性。

(3) 阶段 3 部署广域确定性网络, 典型场景包括深入工业自动化核心控制流程、与 OT 深度集成、V2X 应用等。该阶段典型的网络能力包括周期确定性通信、小于 5ms 确定性超低时延、99.9999%超高可靠性以及 us 级时钟同步精度。

## 5.2 应用案例

### 5.2.1 DIP 超远距离工业控制

#### (1) 背景和痛点

超远距离工业设备控制一直是高端通信和工业自动化技术的典型应用案例。在超远距情况, 时延和抖动非常难以控制, 容易造成工业自动化设备无法完成作业甚至导致危险。例如, 在超远程手术系统

中则不允许出现时延和抖动失控的情况。

## (2) 解决方案

针对超远程控制，我国开展了网络确定性实验平台研究，代表性的是未来网络试验设施（CENI）。CENI 作为我国在通信与信息领域的一项国家重大科技基础设施，可为未来网络体系架构与关键技术的部署、测试、验证提供大规模且开放的试验环境。CENI 的广域端到端确定性传输架构基于华为的 DIP 路由器构建[20][21]。CENI 的端到端确定性网络架构如图 5-5 所示；确定性时延和抖动如图 5-6 所示[21][27]。

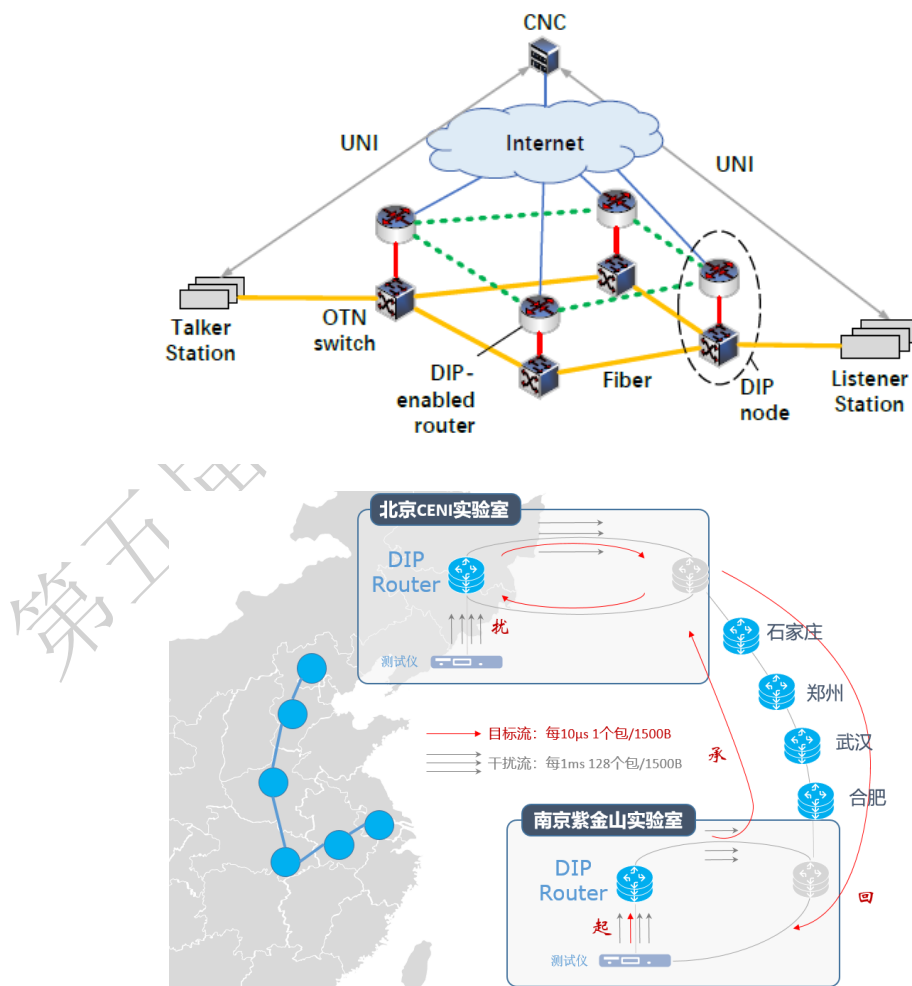


图 5-5 北京-南京环回网络架构和部署图

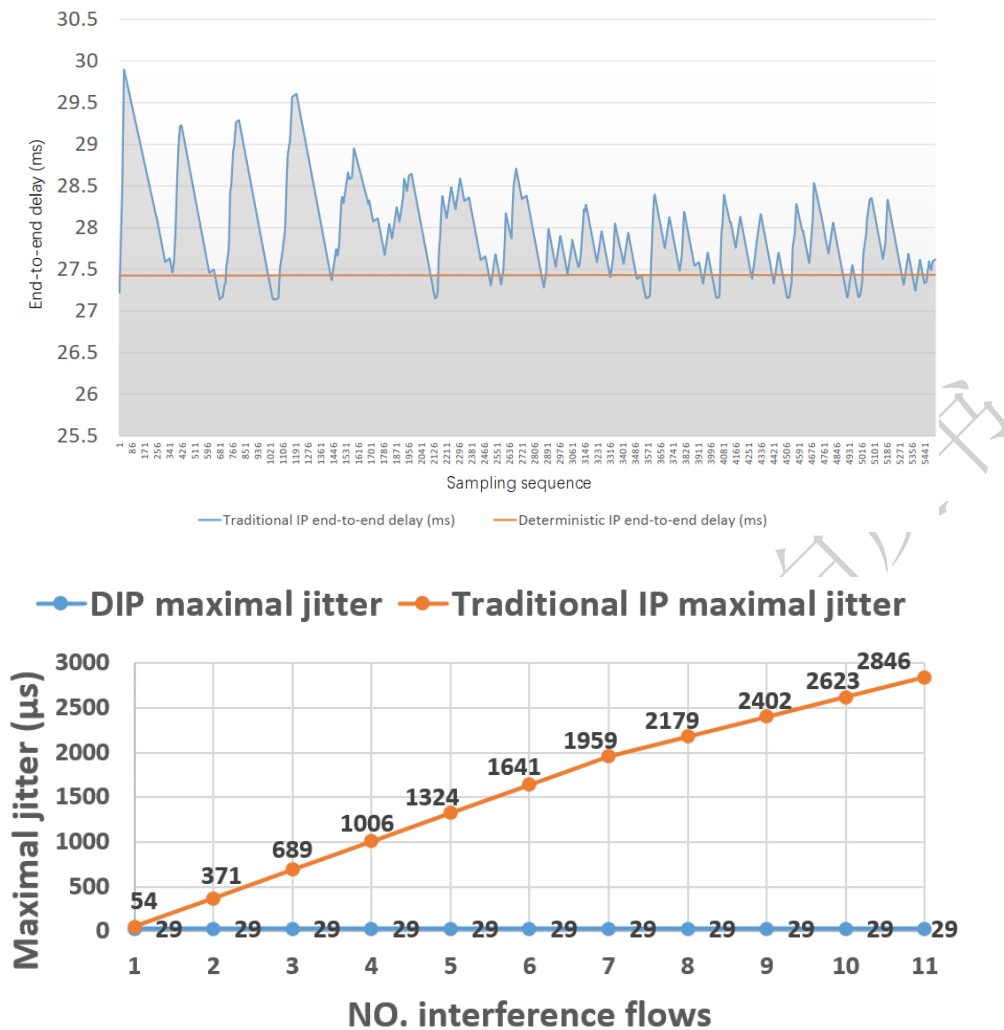
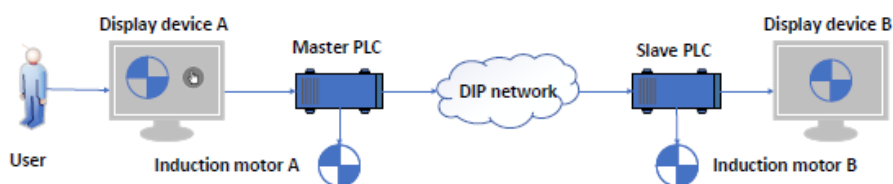


图 5-6 CENI 北京-南京千公里环回网络端到端测试结果：时延和抖动[21]

目前已经基于 CENI 实现了超远距离的确定性低时延低抖动数据传输实验，完成超远距离（2000 km）电机同步控制典型案例（常速变负载）实验，验证了基于 DIP 的超远距离实时电机控制的可能性，实验系统如下图所示。



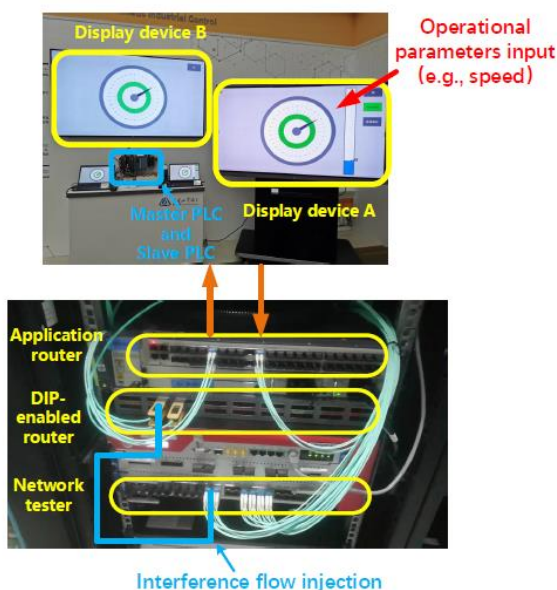


图 5-7 北京-南京千公里环回网络 DIP 测试电机常速变负载同步控制[21]

### (3) 效果总结

基于 DIP 的传输案例表明 2000 公里的远程端到端时延有望控制在 28 毫秒以下，抖动有望控制在 29 微秒以下；也表明 2000 公里的超远距电机同步控制的可能性，在此基础上有望构建超远距手术系统。

## 5.2.2 亨通光电 5GDN 智慧园区案例

### (1) 背景和痛点

亨通光电数字化、智能化转型升级工作围绕“一核、两链、三支撑”展开。由于行业特点，光电缆行业普遍是接单生产，特别是光缆行业，对个性化要求非常高，几乎 100%接单生产，对柔性生产能力要求较高，智能化改造的一个重要方向是提升按客户要求做出快速响应的能力。目前，所有工厂都进行了网络化、数字化升级，但多以 4G、工厂内工业级 WiFi 和工业级专网为主，并不能满足智能工厂的全部



无线连接需求。

例如，PLC 控制网络需求为时延 10-15ms，时延抖动 3ms。因此对于基于 PLC 控制系统，传统 4G 网络已经无法承载。而工业级 WiFi 存在跨区域延时，可靠性差，经常出现丢包断网现象，导致工作现场整体停顿的问题。

## (2) 解决方案

根据亨通光电数字化建设及工业互联网业务需求，亨通光电联合苏州移动在亨通光电线缆产业园完成 5G 基础网络及室内分布式网络建设，实现室外 5G 网络覆盖与室内 5G 网络覆盖，实行 MEC 部署。同时基于 5G 确定性网络和工业 5G 网关，实现 PLC 控制系统 5G 无线联网，实现生产线 5G 无线网络控制，在近万平米车间内进行设备柔性布置，提升了装备调整的速度与时效，车间柔性化能力得到提升。

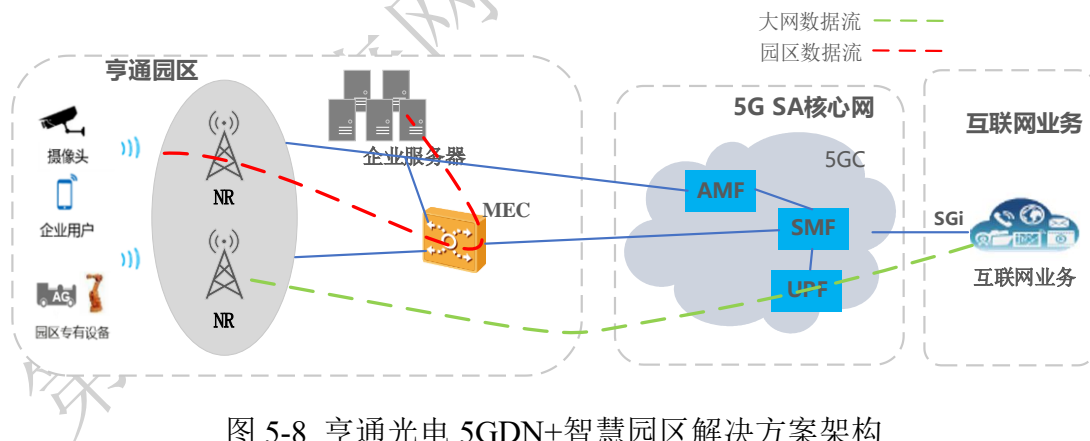


图 5-8 亨通光电 5GDN+智慧园区解决方案架构

亨通光电 5G 确定性网络在工厂、园区应用主要围绕 5GDN+智慧园区开展，具体包括数据采集、计算机视觉、PLC 控制、定位、产业链协同、仓储物流、移动式管理以及能耗管理等八类应用。其中 PLC 控制对确定性 QoS 要求最高。

5G 确定性网络用于 PLC 控制：通过优化 5G 网络，应用固定 IP 地址模式，构建 MEC；采用 SPN 设备，独立转发分片，根据业务场景调整上行预调度参数，优化基于 5G 技术的分布式 PLC 控制系统，得到 10ms 级传输时延，时延抖动小于 3ms；从而实现了快速调整产线设备配置、产线设备位置及整线内部各部件通过 5G 网络控制，在车间运输机器人等移动设备中也得到应用。

### （3）效果总结

亨通光电 5G+智慧园区提升了企业柔性化能力，将改变原有生产组织方式和管理模式，有效提高企业柔性制造能力，提升企业生产效率，降低生产成本，提升产业链协作效率。通过 5G 确定性网络促进亨通光电“一核、两链、三支撑”能力建设，亨通光电可实现全生产要素、全流程互联互通，为客户提供实时监造系统，客户、供应商可以实时获得工厂的相关生产信息、订单信息等，实现柔性生产和产业链、价值链协同的目标。

## 六、确定性网络行业发展建议

### 6.1 发展面临的挑战

#### （1）企业信息化、数字化水平存在短板

确定性网络在各领域实现全面部署，前提之一是需要企业或工厂的数字化、信息化水平达到一定程度，然而我国不少企业（包括规模以上企业）依然存在明显不足。工业互联网产业联盟针对我国工业企业调查数据显示，企业面临着数据存量不大、管理手段落后的突出问题：66%的企业存储数据总量不到 20 TB，51%的企业仍在使用文档等原始的方式进行数据管理[10]。

企业信息化、数字化达到一定程度后，才能顺利实施“确定性网络+”融合发展。缺乏坚实的数字化、信息化条件，即使能够完成基于确定性网络的应用，最终也难以形成规模化应用与价值创造的预期格局。在保证信息化、数字化程度能够满足企业建设与发展需求的同时，应努力实现确定性网络在企业落地部署过程中与其他信息化、数字化技术的同步。

#### （2）确定性网络与企业融合面临壁垒

确定性网络的应用发展尚处初级阶段，仍需深化探索。与消费互联网不同，确定性网络目前主要用于工业企业，通信运营企业与工业制造企业等之间的技术、架构、商业模式等融合发展壁垒较高。运营商和设备商对工业制造行业的技术、特性、业务流程、工艺流程等把

握不够到位，存在一定的壁垒；网络运营商缺乏为高端制造业提供大规模、高质量确定性网络服务的经验，难以全面、精准满足工业制造企业的生产经营实际需求。另外，全球运营商的确定性网络部署规模尚无法支持大范围、广覆盖的确定性网络服务需求。运营商多选择典型行业与场景，结合自身确定性网络的发展节奏，以试点的方式开展逐步部署。例如，结合移动边缘计算对确定性网络进行区域化部署，工业园区等独立性较强的工业制造区域可作为优先试点。

在确定性网络与工业制造融合发展的过程中，确定性网络与工业制造企业的跨界合作与供需对接需要加强，应在工业制造密集的重点区域开展确定性网络商业应用试点示范，同时积极探索开放式、可盈利、可持续的新型商业模式。

### （3）确定性网络技术成熟度仍需提高

从已有的应用结果来看，确定性网络因其技术成熟度仍然有限，制约了赋能各行各业的能力。1）确定性网络作为未来企业的“数据总线”，需要满足机器视觉、实时监控等有着大量数据上行应用的需求，且不同设备、不同应用需要多样化的接入方式。2）确定性网络设备的技术成熟度、成本等因素将直接影响其在企业的应用，预计随着相关厂商数量的增加，成熟度提升、成本下降。3）尽管已经发布了很多确定性网络方面的标准和技术，但仍然缺乏规模化的测试场景，需要更多的应用落地以增强产业和消费者市场的信心；还应重视和增加确定性网络用于工业、农业、服务业各个场景的闭环稳定性测试，形成多场景、多维度的可复用成功案例。

#### （4）确定性网络服务成本问题

目前已有商用的确定性网络（如 5GDN），但部分企业，尤其是中小企业对确定性网络将来的资费问题仍有顾虑：确定性网络资费过高可能拉高企业生产成本。这些问题的解决，需要确定性网络运营商充分提升服务能力和技术成熟度，生产商显著降低设备生产、制造、维护的费用，政府主管机构适度参与市场初期定价制定。

## 6.2 发展阶段划分

确定性网络技术以建设大规模的、可提供确定性服务质量的网络为目标，为工业、农业、服务业提供实时、高质量、高可靠的网络服务，全面赋能三大产业高质量升级转型。确定性网络发展体系建设是一个渐进的过程，在论证技术可行性、商业可行性的基础上，“确定性网络+”融合发展可划分为三阶段。

### （1）试点示范阶段

该阶段的特征是，运营商、设备厂商、方案商等供给方积极与各类企业需求方合作，针对重点场景开展示范试点。需求企业提出自身业务场景中对确定性网络性能的明确要求，供给方通过集成各类技术手段来保障这些确定性要求。确保确定性网络在各场景的成功试点，使“确定性网络+”从技术论证转化为现实应用，通过价值创造形成示范效应。

在技术可行性方面，TSN、独立组网 5G、DIP 网络是目前提供确定性网络服务的主流技术，可以满足低时延、高可靠、高带宽、海量

连接的确定性要求；网络切片等技术也在逐步成熟，具备确定性网络定制化服务的支持能力。相比非独立组网，独立组网架构是部署网络切片、超级上行、边缘计算等技术的基础，所具备的双向低时延、上行大带宽等技术特征，有效支撑需求企业业务需求。

在商业可行性方面，因潜在需求企业对新型信息通信技术应用持谨慎态度，开展试点示范项目应采取先低投入启动、后稳步加大投入的发展路径。在确定性网络商用初期，各垂直领域应用中的直接收益可能并不明显，大部分企业采取观望态度。为此，可针对性选取那些具有效率提升潜力大、改造便利的制造、生产和服务场景，优先实施试点应用。

## （2）规模化复制阶段

该阶段的特征是，供给方、需求方均积极探索“确定性网络+”应用规模化落地，确定性网络赋能企业的效果显现：企业制造、生产、服务效率明显提升，上下游产业链信息整合效果良好。工业制造领域大范围应用的可行性条件已经具备。

在技术可行性方面，基于组网的确定性网络进入大规模商用，接入网、核心网功能趋于完善，支持各类场景的确定性网络功能都可以直接使用，满足各类制造企业的大规模应用需求。确定性网络体系已经建成，形成以 DIP 网络、FlexE 为承载网，以 DIP 网络、TSN、5G、DetWiFi 为接入网的工业、农业、服务业互联网服务架构，能够很好的根据服务场景智能切换服务质量，能够全天候、多场景、多维度的服务园区类制造企业、农业企业、服务企业，同时保证企业私有数据



的安全性和确定性网络服务质量的稳定性。

在商业可行性方面，在第一阶段试点示范的基础上，供给方、需求方经过多场景、多阶段的应用磨合，在行业标准、方案落地、商业模式等方面都将形成完善的合作模式。定制化网络切片服务模式成熟，企业可以根据不同制造场景的实际需求灵活切换网络服务质量，做到制造、生产、服务效率提升和成本控制两不误；确定性网络模组技术成熟、成本降低，规模化复制的边际成本越来越低，大部分企业有很强意愿使用确定性网络，用于升级生产过程、提升产品良率、提供定制化产品和服务、提升服务质量和效率等。

### （3）自发创新驱动阶段

经过长时间的商用之后，确定性网络各方面趋于成熟，成为驱动企业数字化转型的核心基础设施之一。工业、农业、服务业发展也进入了新的阶段，行业自发创新驱动的积极性极高。确定性网络在诸多场景下应用的各类标准、技术方案、商业模式均较成熟，“确定性网络+”将进入自发创新驱动阶段。在该阶段，确定性网络可能成为工业、农业、服务业高质量网络的标配，典型特征是各类企业需求方群体成为主要推动力量，自发地进行确定性网络各细分环节创新；在创新过程中对确定性网络产生需求，驱动确定性网络在多种场景更大范围应用。

在技术可行性方面，确定性网络体系已经完善，形成以 DIP 网络、DetNet 为骨干网和核心网，以 DIP 网络、FlexE、DetNet、TSN 为承载网，以 DIP 网络、TSN、5G、DetWiFi 为接入网的确定性网络

体系架构，局域、广域、有线、无线确定性网络深度集成、有机融合，并且服务范围提升为大规模和超大规模工业、农业、服务业园区。支持各类场景的确定性网络功能不仅可以直接使用，还为需求企业提供接口允许非运营商企业参与定制化确定性网络各细分环节，更好满足当事企业的使用需求。

在商业可行性方面，大部分企业已经取得了更高的产品附加值、成本进一步得到控制、产品良率大幅提升，可以根据用户定制产品和服务快速做出响应，借助确定性网络完成设计、生产、服务，同时保证产品和服务质量。各用户企业有主动参与确定性网络细分环节改进的意愿、能力和渠道，通过主动改进网络服务环节，梳理和补齐自身业务的短板，进一步寻求多样化的增长点。

### 6.3 发展对策建议

#### （1）成立产业联盟促进生态发展

“确定性网络+”深度发展、生态繁荣依赖产业链上下游的多个环节，也离不开管理部门、企事业单位、社会团体的共同努力。建议采取产业联盟的形式，凝聚各方共识和力量，消除信息不对称现象，推动产品、应用、服务落地。

#### （2）加快形成公网专用的先发优势

我国网络基础设施建设发展迅速，在移动网络快速发展的背景下，建议加快推进公网专用的先发优势。

#### （3）重视行业发展路径选取

“确定性网络+”尚处于初期发展阶段，应稳妥实施渐进式推进策略，为大规模融合发展打牢基础。行业发展路径需要优选，建议重点关注行业合适性、场景合适性、区域合适性。

#### （4）加大应用创新发展的资源保障

加速商业模式的创新，完善运营商资费体系，规范产业标准，结合行业实践，探索全新的产业生态模式。发挥公共专项资金的撬动作用，引导社会资金加大对“确定性网络+”行业的投入。鼓励各类银行信贷、投资基金向“确定性网络+”领域倾斜力度，支持各类企业开展“确定性网络+”产品研发和应用落地，提升企业生产效率、产品质量、产品良率、服务质量、降低生产和服务成本。

## 七、确定性网络未来展望

确定性网络无论从技术或是与产业融合发展来说都处于新兴阶段，需要一定的时间和资源投入，促成技术与产业渐进式发展与融合。当确定性网络在技术上得以突破、在设备制造成本上得以控制，构建多层次的多维度的确定性网络架构体系，以满足多场景的确定性网络需求。依托 DIP 网络、DetNet、TSN、DetWiFi、5GDN 构建人/物/应用/应用的确定性连接；依托 DIP 网络、FlexE、DetNet、TSN 构建确定性的承载网；依托 DIP 网络、DetNet 构建确定性的骨干网与城域核心网络，实现局域、广域、有线、无线确定性网络深度集成，将带来产业变革式发展，助力农业、工业、服务业网络化和智能化升级，大幅提升产品质量、产品良率和服务质量，实现产品和服务定制化，形成“确定性网络+”的发展新篇章。

## 附录 A：术语与缩略语

中文名称	英文缩写	英文全拼
灵活以太网	FlexE	Flexible Ethernet
时间敏感网	TSN	Time-sensitive Networking
确定网	DetNet	Deterministic Networking
确定性 IP	DIP	Deterministic Internet Protocol
5G 确定性网络	5GDN	5G Deterministic Networking
确定性 WiFi	DetWiFi	Deterministic WiFi
服务质量	QoS	Quality of Service
增强现实	AR	Augmented Reality
虚拟现实	VR	Virtual Reality
增强型移动宽带	eMBB	Enhanced Mobile Broadband
超可靠和低时延通信	URLLC	Ultra-reliable Low Latency Communications
大型机器通信	mMTC	Massive Machine Type Communication
软件定义网络	SDN	Software-defined Networking
400G 以太网	400GE	400 Gigabit Ethernet
1T 以太网	1TE	1 Terabit Ethernet
局域网	LAN	Local Area Network
广域网	WAN	Wide Area Network
尽力而为	BE	Best-Effort
媒体访问控制	MAC	Medium Access Control
物理编码子层	PCS	Physical Coding Sublayer
物理媒介接入层	PMA	Physical Medium Attachment
物理媒介相关层	PMD	Physical Medium Dependent
端口物理层	PHY	Physical Layer
链路聚合组	LAG	Link Aggregation Group
等价多路径	ECMP	Equal Cost Multi-Path
定位标志	AM	Alignment Marker
运行管理和维护	OAM	Operation, Administration and Maintenance
光传输网络	OTN	Optical Transport Network
流管理实体	FME	Flow Management Entity
控制器功能	CPF	Controller Plane Function
网卡	NIC	Network Interface Card
控制字	CW	Control Word
中心用户配置	CUC	Centralized User Configuration
中心网络控制	CNC	Central Network Controller
数据分组复制和消除功能	PREF	Packet Replication and Elimination Function
路径计算单元	PCE	Path Computation Element

分层状态路由	HSR	Hierarchical State Routing
路径恢复协议	PRP	Path Restoration Protocol
多协议标签交换	MPLS	Multi-Protocol Label Switching

第五届未来网络发展大会白皮书



## 参考文献

- [1] 黄韬, 汪硕, 黄玉栋, 郑尧, 刘江, 刘韵洁. 确定性网络研究综述[J]. 通信学报, 40(6): 164-180, 2019.
- [2] A. Nasrallah, A. S. Thyagaturu, Z. Alharbi, *et al.* Ultra-low latency (ULL) networks: The IEEE TSN and IETF DetNet standards and related 5G ULL research[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 21(1): 88-145, 2019.
- [3] 华为百科 FlexE.  
[https://info.support.huawei.com/network/ptmngsys/Web/WDMkg/zh/69\\_FlexE.html](https://info.support.huawei.com/network/ptmngsys/Web/WDMkg/zh/69_FlexE.html).
- [4] 工业互联网产业联盟. 时间敏感网络(TSN)产业发展报告: 网络设备互通测试报告[R]. 2019.
- [5] IEEE 802.1 Time Sensitive Networking (TSN) Task Group:  
<https://1.ieee802.org/tsn/>.
- [6] X. Geng, M. Chen, *et al.* DetNet configuration YANG model [R]. Internet Eng. Task Force, Internet-Draft draft-geng-detnet-conf-yang-11, 2021.
- [7] X. Yang, D. Scholz, M. Helm. Deterministic networking (DetNet) vs time sensitive networking (TSN)[R]. Seminar IITM SS 19: Network Architectures and Services, 79-84, 2019.
- [8] Finn N, Thubert P. Deterministic networking problem statement[R]. draft-finn-detnet-problem-statement, 2019.
- [9] Grossman E, Gunther C, Thubert P, *et al.* Deterministic networking use cases[R]. IETF draft, 2019.
- [10] 5G 确定性网络产业联盟. 5G 确定性网络+工业互联网融合白皮书[R]. 2020.
- [11] 5G 确定性网络产业联盟. 5G 确定性网络产业白皮书[R]. 2020.
- [12] J. Farkas, B. Varga, G. Miklós, J. Sachs. 5G-TSN integration for industrial automation[R]. Ericsson Technology Review, no. 7, 2019.
- [13] 5G 确定性网络的应用和传送技术. 中兴通讯技术, 25(5), 2019.
- [14] 朱瑾瑜, 张恒升, 陈洁. TSN 与 5G 融合部署需求及网络架构演进. 中兴通讯技术, 2020.
- [15] M. Shafi, *et al.* 5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 35 (6): 1201-1221, 2017.

- [16] Y. Cheng, D. Yang, and H. Zhou. Det-WiFi: A multihop TDMA MAC implementation for industrial deterministic applications based on commodity 802.11 hardware. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 1-10, 2017.
- [17] T. Adame, M. Carrascosa, and B. Bellalta. Time-sensitive networking in IEEE 802.11be: On the way to low-latency WiFi 7. *arXiv:1912.06086v2*, 2020.
- [18] 成刚, 杨志杰. Wi-Fi6 之后的 Wi-Fi 技术趋势. *电子技术应用*, 46(4): 19-23, 2020.
- [19] A. Aijaz. High-performance industrial wireless: achieving reliable and deterministic connectivity over IEEE 802.11 WLANs. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, 1: 28-37, 2020.
- [20] 强鹏, 刘冰洋, 于德雷, 王闯. 大规模确定性网络转发技术[J]. *电信科学*, 35(9): 12-19, 2019.
- [21] S. Wang, B. Wu, C. Zhang, Y. Huang, T. Huang, Y. Liu. Large-scale deterministic IP networks on CENI[C]. *INFOCOM Workshop*, 2021.
- [22] 汪硕, 王佳森, 蔡磊, 黄韬, 卢华, 刘韵洁. 面向工业制造的确定性网络技术发展研究[J]. *中国工程科学*, 23(2): 1-8, 2021.
- [23] 5G 确定性网络产业联盟. 5G 确定性网络架构产业白皮书[R]. 2021.
- [24] 3GPP. TS 23.501[R]. 2019.
- [25] 郑秀丽, 蒋胜, 王闯. NewIP: 开拓未来数据网络的新连接和新能力[J]. *电信科学*, 2019, 35(9): 2-11.
- [26] J. Farkas. IEEE 802.1 TSN – An introduction[R]. *IEEE 802 Plenary*, 2019.
- [27] 紫金山实验室, 华为网络技术实验室等. CENI New IP 组网测试报告[R]. 2020.
- [28] Z. L. Zhang, Z. Duan, and Y. T. Hou. Fundamental trade-offs in aggregate packet scheduling[C]. *Proceedings Ninth International Conference on Network Protocols (ICNP 2001)*, 129-137, 2001, IEEE.
- [29] A. Charny, J. Y. Le Boudec. Delay bounds in a network with aggregate scheduling[C]. *International Workshop on Quality of Future Internet Services*, 1-13, 2000, Springer, Berlin, Heidelberg.
- [30] 中国电信, 华为. 灵活以太网技术白皮书[R]. 2018.