

# ZTE中兴



## IP 网络未来演进技术白皮书 3.0 —— 增强确定性网络（EDN）

## IP 网络未来演进技术白皮书 3.0 —— 增强确定性网络(EDN)

版本	日期	作者	备注
V1.0	2021/05/22	ZTE	新建
V2.0	2022/08/28	ZTE	更新一提出开放服务互连网络解决方案和三大关键技术: 服务感知网络 (SAN)、增强确定性网络 (EDN)、网络内生安全
V3.0	2023/08/22	ZTE	更新一提出增强确定性网络 (EDN) 架构及其关键技术

### 重要贡献单位:

中国信息通信研究院  
中国移动研究院  
中国电信研究院  
中国联通研究院  
紫金山实验室  
北京交通大学  
华中科技大学

©2023 ZTE Corporation. All rights reserved.

2023 版权所有 中兴通讯股份有限公司 保留所有权利

#### 版权声明:

本文档著作权由中兴通讯股份有限公司享有。文中涉及中兴通讯股份有限公司的专有信息, 未经中兴通讯股份有限公司书面许可, 任何单位和个人不得使用 and 泄漏该文档以及该文档包含的任何图片、表格、数据及其他信息。

## 目 录

<b>1 前言</b> .....	<b>6</b>
<b>2 EDN 的术语及定义</b> .....	<b>7</b>
<b>3 EDN 的应用场景及需求</b> .....	<b>9</b>
3.1 EDN 的差异化确定性需求及 QoS 等级 .....	9
3.2 EDN 的典型应用场景及特征 .....	11
3.3 EDN 的技术挑战和实现目标 .....	12
<b>4 EDN 的架构</b> .....	<b>13</b>
4.1 EDN 的总体架构 .....	13
4.1.1 EDN 的三层总体架构 .....	13
4.1.2 EDN 的总体架构功能视图 .....	15
4.2 EDN 的转发面架构 .....	16
4.2.1 EDN 的转发面架构及功能 .....	16
4.2.2 EDN 的转发面数据封装 .....	17
4.3 EDN 的控制面架构 .....	18
4.3.1 EDN 的控制面架构及功能 .....	18
4.3.2 EDN 的控制面层次化模型 .....	20
4.4 EDN 的 OAM 架构 .....	21

<b>5 EDN 的关键技术</b> .....	<b>23</b>
5.1 EDN 的业务层关键技术.....	23
5.1.1 基于 DD-QoS 的流量调度技术.....	23
5.2 EDN 的路由层关键技术.....	24
5.2.1 分布式确定性路由技术.....	25
5.2.2 跨域确定性路由技术.....	25
5.2.3 时隙化路径编排技术.....	26
5.2.4 时隙化路由调度技术.....	26
5.3 EDN 的资源层关键技术.....	27
5.3.1 多种队列机制.....	27
5.3.2 确定性资源预留技术.....	32
<b>6 EDN 的标准化</b> .....	<b>33</b>
6.1 EDN 的 CCSA 标准化地图.....	33
6.2 EDN 的 IETF 标准化地图.....	34
<b>7 EDN 的样机系统及验证测试</b> .....	<b>35</b>
7.1 EDN 样机系统的总体架构.....	35
7.2 EDN 样机系统的转发面实现.....	36
7.3 EDN 样机系统的控制面实现.....	37

---

7.4 EDN 样机系统的测试实践.....	38
<b>8 面向 EDN 的网络演算实践.....</b>	<b>39</b>
8.1 网络演算基础.....	39
8.2 网络演算模型.....	40
8.3 网络演算仿真与验证.....	42
<b>9 EDN 的未来发展.....</b>	<b>43</b>
<b>10 总结.....</b>	<b>43</b>
<b>11 缩略语.....</b>	<b>44</b>
<b>12 参考文献.....</b>	<b>45</b>

## 图

图 1	开放服务互连网络的整体设计 .....	6
图 2	EDN 典型应用场景 .....	11
图 3	EDN 三层架构图 .....	14
图 4	EDN 总体架构功能视图 .....	16
图 5	EDN 转发面组网架构图 .....	17
图 6	层次化管理与调度模型 .....	21
图 7	EDN 确定性路由与传统路由的差异 .....	25
图 8	CSQF 转发机制示意图 .....	29
图 9	ADN 机制调度流程示意图 .....	29
图 10	TQF 队列机制、编排时隙和调度时隙示意图 .....	30
图 11	Deadline 队列机制示意图 .....	31
图 12	EDN CCSA 标准化地图 .....	34
图 13	EDN IETF 标准化地图 .....	35
图 14	EDN 样机组网图 .....	36
图 15	EDN 样机转发处理 .....	37
图 16	EDN 样机控制面 .....	38

图 17 网络演算建模..... 41

图 18 网络演算测试组网图..... 42

# 1 前言

2021 年 6 月，中兴通讯联合中国信息通信研究院及移动、电信、联通三大运营商（以下简称三大运营商）联合发布《IP 网络未来演进技术白皮书》<sup>[01]</sup>（以下简称白皮书 2021），提出了 IP 网络技术未来仍将平滑演进的预判。2022 年 9 月，中兴通讯再次联合中国信息通信研究院及移动、电信、联通等发布《IP 网络未来演进技术白皮书 2.0——开放服务互连网络》<sup>[02]</sup>（以下简称白皮书 2022），提出从主机互连到服务互连，提出未来 IP 演进方案——开放服务互连网络解决方案和三大关键技术：服务感知网络（SAN）、增强确定性网络（EDN）、网络内生安全等技术。

白皮书 2022 提出的开放服务互连网络需要满足业务多样化的连接需求，包括确定性的连接需求，同时开放服务互连架构需要支持从局域、城域到广域大规模增强确定性网络 EDN 技术。开放服务互连基于泛在的算网共性服务构建新的能力平台，其增强的 L3 层网络是关键使能组件，而 EDN 则是增强的 L3 层网络连接能力的关键技术，两者的关系如下图 1 所示。开放服务互连网络提供的服务将会使用不同的异构确定性技术，将会跨不同的特定确定性网络域，需要一种大规模确定性网络技术支持异构跨域互连，满足多样化业务的确定性 QoS 需求。

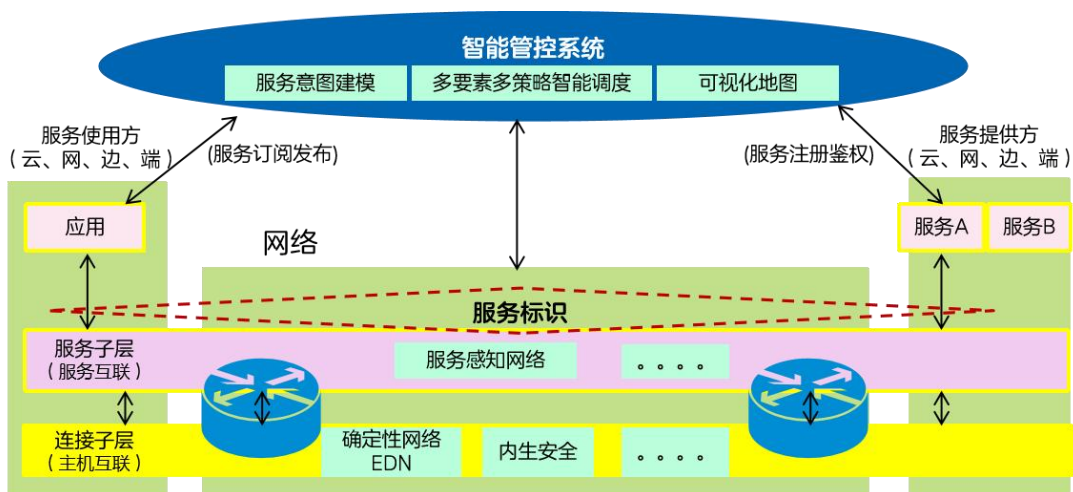


图 1 开放服务互连网络的整体设计



近年来，确定性网络成为行业发展的重要方向。随着 5G 承载网络的业务与网络需求的增强，大规模确定性网络技术需求迫切。因此，中兴通讯在未来 IP 网络的研究中，将白皮书 2022 所提的开放服务互连网络解决方案中的关键技术之一——增强确定性网络（EDN）作为未来 IP 业务提供高质量保障的重要支撑。

本白皮书在白皮书 2022 提出的开放服务互连网络及其关键技术的基础上，详细阐述增强确定性网络（EDN）关键技术的场景需求、架构、关键技术、测试验证等内容。

本白皮书第二章首先定义了增强确定性网络（EDN）的相关术语。

第三章描述了开放服务互连网络中的 EDN 需求和典型应用场景。

第四章提出了 EDN 的三层架构及其功能视图，包括业务层、路由层和资源层，同时提出了控制面、转发面及 OAM 相关架构及功能需求。

第五章介绍了 EDN 关键技术及解决方案。

第六章介绍了 EDN 的标准化进展，包括 IETF、ITU-T、CCSA 等国际国内标准组织的推进情况。

第七章介绍了 EDN 的测试验证情况。

第八章介绍了确定性网络演算实践的情况。

第九章和第十章介绍了 EDN 的未来发展情况和总结。

## 2 EDN 的术语及定义

EDN 相关的术语及定义如下：

- **差异化确定性服务等级 DD-QoS ( Differentiated Deterministic QoS )**

差异化确定性 QoS ( DD-QoS )，基于多样化的业务需求，提出确定性的分类分级及其

SLA 指标，完善了确定性 QoS 目标，基于类的确定性资源管理思想，可以根据确定性业务的类型和级别，建立分级的确定性路径，提供差异化确定性 QoS 保障。

- **增强确定性网络技术 EDN ( Enhanced Deterministic Networking )**

增强确定性网络 EDN，是一种基于大规模网络需求增强的确定性网络技术，可满足多样化的分类分级业务需求及差异化的 SLA 指标，达到 DD-QoS 目标，提供跨管理域异构互联，融合多种转发技术及能力的协同的端到端的确定性保障服务。

- **增强确定性网络转发面技术 EDP ( EDN Data Plane )**

增强确定性网络的转发面 EDP，是指 EDN 的转发面或数据面技术，涉及跨管理域异构互联的网络组网，可以提供多种确定性转发技术及能力，包括多种队列调度技术等。数据面的封装需要考虑多种网络传输格式，包括 IP/MPLS/SR-MPLS/SRv6 等。

- **增强确定性网络控制面技术 ECP ( EDN Control Plane )**

增强确定性网络的控制面 ECP，是指 EDN 的控制面技术，涉及集中式、分布式、混合式等多种架构模型，同时包括南北向接口协议扩展等。

- **增强确定性网络管理面技术 EMP ( EDN Management Plane )**

增强确定性网络的管理面 EMP，是指 EDN 的管理面技术，涉及 EDN 的 OAM 需求，封装格式及处理机制，故障检测方案和性能测量方法等。

- **增强确定性网络资源层 ( EDN Resource Sub-layer )**

增强确定性网络的资源层，处于 EDN 架构的最底层，规划携带确定性能力的网络资源。

- **增强确定性网络路由层 ( EDN Route Sub-layer )**

增强确定性网络的路由层，处于 EDN 架构的中间层，构建具有确定性能力保障的确定性路径。

- **增强确定性网络业务层 ( EDN Service Sub-layer )**

增强确定性网络的业务层,处于 EDN 架构的最上层,提供满足业务多样化需求的端到端差异化确定性 QoS 服务的流量调度。

- **增强确定性网络确定性链路 ( EDN Deterministic Links )**

增强确定性网络的确定性链路,是基于节点、链路、带宽、buffer、队列、sub-net 等资源构建的确定性虚链路,可以基于时间的确定性资源预留提供不同级别的确定性转发能力。

- **增强确定性网络确定性路径 ( EDN Deterministic Paths )**

增强确定性网络的确定性路径,是基于确定性链路和资源,计算满足确定性时延等约束条件的路径,建立具有确定性保障的路径。

- **增强确定性网络确定性业务 ( EDN Deterministic Services )**

增强确定性网络的确定性业务,是基于确定性路径和资源,将业务按照准入策略引流到相应的路径上转发。

- **增强确定性网络时间资源容器 ( EDN Time-based Resources Container )**

增强确定性网络的时间资源容器,用于为确定性链路提供基于时间的资源保障,时间资源容器指示每调度时隙内的传输比特量。

## 3 EDN 的应用场景及需求

### 3.1 EDN 的差异化确定性需求及 QoS 等级

由于 EDN 应用场景的确定性业务承载需求非常广泛,不同的确定性场景和业务对确定性 SLA 指标的需求存在差异性,参考 CCSA TC3 及 TC614 (网络 5.0) 等标准对确定性业务需

求及 SLA 指标的分析，业务需要进行分类分级，例如：

网络下载业务等，对时延抖动不敏感，是非实时业务，确定性需求主要关注带宽保障；

广播类或同步音视频业务等是实时业务，只要在平滑时间内，确定性需求主要关注有界时延的需求；

实时通讯类业务如生产监控、算力通信等，对时延是敏感的，确定性需求主要关注低时延需求；

交互类音视频业务，如云视频会议、云游戏等，对抖动是敏感的，确定性需求主要关注时延上界、低抖动需求；

生产控制类业务，如电力保护、远程控制等，对时延抖动要求高，确定性需求主要关注低时延、低抖动的需求。

由于业务需求的多样化，EDN 需要提供分类分级的差异化确定性 QoS 服务，满足差异化的确定性业务 SLA 需求。

为满足确定性网络多样化应用场景和业务对时延、抖动的要求，需要对网络中确定性业务的 QoS 进行分级，明确确定性服务等级中每个等级对应的 SLA 指标。EDN DD-QoS 基于多样化的业务需求，提出确定性的分类分级及其 SLA 指标，完善了确定性 QoS 目标。EDN 基于类的确定性资源管理思想，可以根据确定性业务的类型和级别，建立分级的确定性路径，提供差异化确定性 QoS 保障。从确定性业务需求的角度，可将网络中确定性业务特征分成 5 种类型，分别为：带宽保障类、有界时延上限保障类、低时延保障类、低抖动保障类、低时延和低抖动保障类，每种业务类型对应的 SLA 指标及典型业务如表 1 所示：

表 1 : 差异化确定性 QoS 等级

EDN QoS 等级	Level-0	Level-1	Level-2	Level-3	Level-4
业务类型	带宽保障类	有界时延上限保障类	低时延保障类	低抖动保障类	低时延低抖动保障类
SLA 指标	基本带宽保障	时延上界 <300ms	时延<100ms, 抖动<50ms	时延<20ms, 抖动<5ms	时延<10ms, 抖动<100us
典型业务	下载类, 如 FTP 等	同步语音类, 如语音电话, 广播业务等	实时通讯类, 如多媒体通讯、生产监控、算力等	视频交互类, 如 AR/VR, 全息通信, 云视频, 云游戏等	生产控制类, 如电力保护、远程控制等

### 3.2 EDN 的典型应用场景及特征

EDN 作为开放服务互连网络的确定性连接基础, 可以满足面向未来网络多样化业务的服务需求场景, 包括局域确定性网络的开放互联场景、行业数字化虚拟专网的确定性服务场景、移动互联网确定性 QoS 保障场景和沉浸式增强音视频服务场景。EDN 典型应用场景如下图 2 所示:

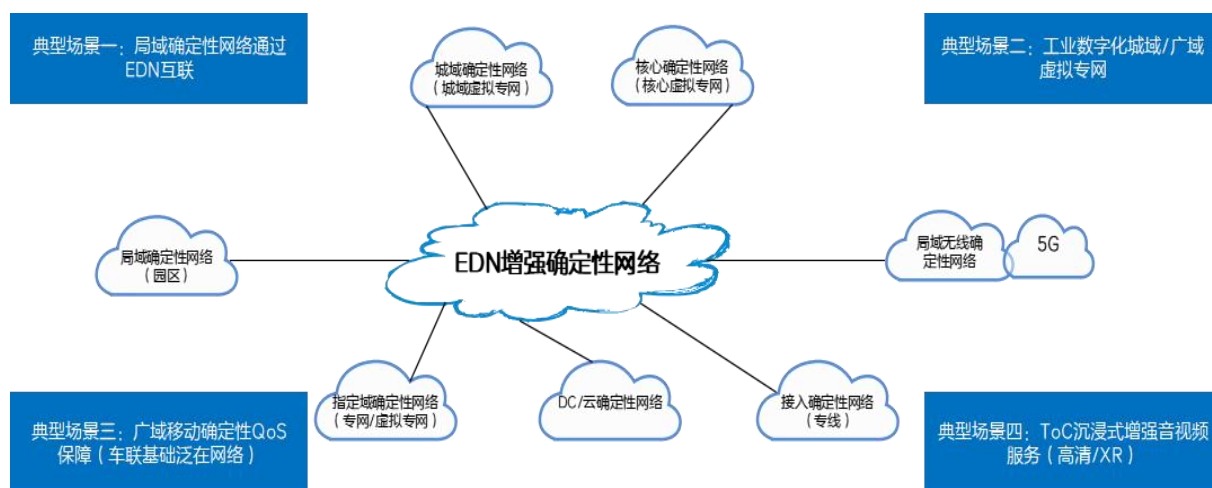


图 2 EDN 典型应用场景

通过 EDN 典型应用场景的分析, 其网络及业务有以下特征和需求:

- (1) **确定性业务需求多样化。**确定性连接的数量将持续增加，同时业务确定性需求多样化，随着确定性业务的逐步部署，确定性业务需求呈现出不同类型和不同等级的特性，包括低时延低抖动类型、低抖动类型、边界时延类型等，其中同一类型中也有不同等级的指标要求，比如低抖动类型的抖动级别包括 100 微秒级和毫秒级等。
- (2) **确定性业务规模化。**随着确定性业务的持续发展，确定性连接的数量将持续增加到大的规模，典型对于骨干网从 K 级别增加到 M 级别的规模甚至更大规模。
- (3) **确定性网络跨域及异构互联。**局域园区确定性网络逐步应用将会跨管理域，增加确定性网络异构及跨域互联的需求，将出现用于互联局域确定性网络的大规模确定性骨干网，其组成可能是多样化的，包括接入确定性专线、城域/核心确定性虚拟专网、指定域专网/虚拟专网以及 DC/云确定性网络。
- (4) **确定性资源及转发机制多样化。**不同确定性网络域内的技术体制是多样化的，同一网络内也可以提供多种转发机制，如基于周期转发、基于截止时间转发等，也可能是跨层技术，包括 L1/L2/L3 层确定性技术等。

### 3.3 EDN 的技术挑战和实现目标

根据 EDN 的典型应用场景和特征可以看出，EDN 需要提供面向承载网的端到端确定性服务，主要面临以下挑战：

从业务需求看，确定性技术需要考虑多样化的确定性业务需求及差异化的 SLA 指标，需要提供分类分级的差异化确定性 QoS 服务，但目前单一转发机制无法满足差异化的确定性业务承载需求，当前典型采用专有网络或多种技术体制组合，包括：有界抖动业务，需要引入类 TDM/TSN 调度机制等；有界时延业务，需要引入异步加权机制；高可用性业务，需要引入硬

隔离技术等。目前缺乏一种确定性技术及统一架构，提供统一的管理调度和转发能力协同机制，融合多样化的资源和技术体制，满足差异化的确定性业务 SLA 需求。

从网络需求看，局域园区确定性网络的逐步应用将带来跨园区互联的需求，将出现用于互联局域确定性网络的大规模确定性骨干网，其组成可能是多样化的，包括接入确定性专线、城域/核心确定性虚拟专网、指定域专网/虚拟专网以及 DC/云确定性网络等，确定性承载技术不仅需要考虑到业务流量规模大且动态并发、网络拓扑规模大等网络特征，还需要考虑多种网络转发技术的协同及端到端的跨网络跨管理域的互联等。目前缺乏一种确定性网络技术及统一架构，降低网络的流量状态维护，提供基于类的流量调度能力，建立端到端确定性路由，满足跨网络技术跨管理域等大规模组网范围内的确定性保障。

因此，EDN 将提供一种确定性网络技术及统一架构，可满足多样化的分类分级业务需求及差异化的 SLA 指标，实现 DD-QoS 目标，提供跨管理域异构互联，融合多种转发技术及能力的协同的端到端的确定性保障服务。

## 4 EDN 的架构

### 4.1 EDN 的总体架构

#### 4.1.1 EDN 的三层总体架构

从 EDN 的关键需求可以看出，目前大规模确定性网络面临着巨大挑战，首先确定性资源及转发机制多样化导致多种转发机制及异构资源需要协同，需要融合多样化的资源和技术体制，统一调度确定性资源，其次大规模网络跨管理域及异构互联增加了构建确定性路由的难度，最

后，确定性业务需求多样化且动态并发，需要提供分类分级的调度及差异化 QoS 服务。因此，EDN 定义了业务层、路由层、资源层的三层总体架构，如图 3 所示。

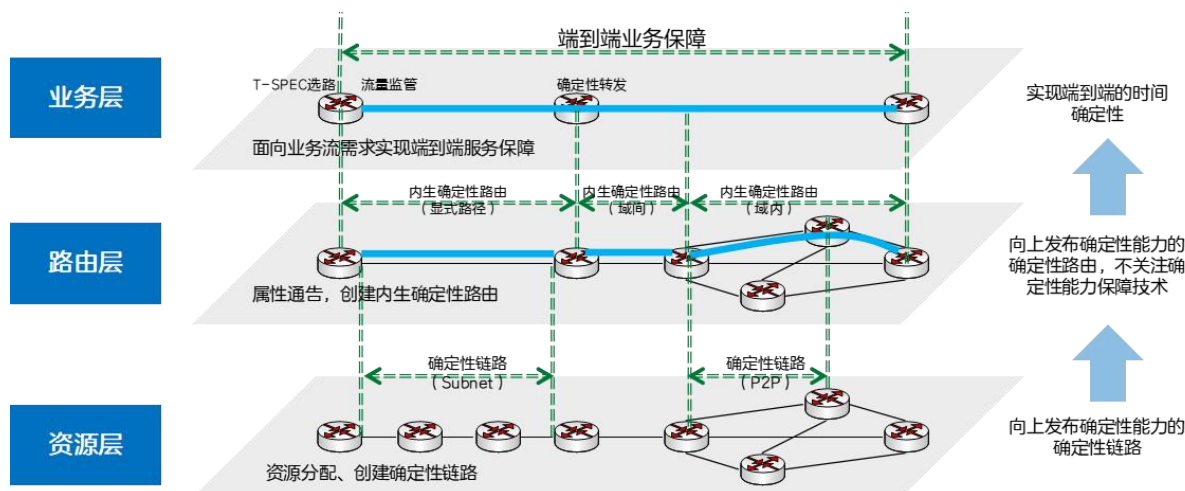


图 3 EDN 三层架构图

确定性架构包括三个层次：资源按规划预留，各个节点与链路具备确定性的能力；确定性路由建立，根据网络整体规划，形成了端到端的确定性能力；面向业务流的服务，根据业务分类分级调度，关联到一条合适的确定性路由。

### (1) 资源层 (Resource Sub-layer)

资源层统一维护确定性转发资源（包括链路、带宽、队列、时隙等），统一建模异构确定性资源以形成确定性链路资源集合，基于时间资源的容器提供资源分配，为不同级别的确定性转发能力提供保障。确定性链路可以是提供确定性传输能力的 Sub-net，也可以是 P2P 链路。相比传统的链路，确定性链路除了具有确定的带宽以外，还具有确定的节点内时延与抖动。

### (2) 路由层 (Route Sub-layer)

路由层使用资源层提供的确定性资源集合，创建的具有不同 SLA 等级的内生路由，提供确定性承载能力。确定性路由可以基于严格显式路径或松散路由，前者适用于有控制器的集中式场景，后者适用于没有控制器的分布式场景。路由层利用流量工程机制提供拥塞保护，它可以



通过使用队列技术或其底层连接的帮助做到这一点。

### (3) 业务层 ( Service Sub-layer )

业务层通过规划业务流的流量特性，在网络入口节点对每条业务流实施准入控制和流量监管，并映射至确定性的路由以满足不同类型不同级别业务的 QoS 目标。业务需求应和网络能力适配，不同的业务等级由于对时延/抖动的界限需求不同，则映射至的确定性路由所使用的资源与路由机制也不同。业务层也可以提供服务保护、服务可靠性等。

## 4.1.2 EDN 的总体架构功能视图

EDN 的总体功能视图如图 4 所示，根据 EDN 的架构分层，按照业务层、路由层和资源层对 EDN 的功能进行分类。

首先，EDN 的资源层需要提供保障确定性 SLA 指标的资源，包括多种队列机制，也可以包括其他转发机制等跨层资源，规划携带确定性能力的网络资源，需要对资源进行建模，构建确定性链路，并对资源进行层次化预留等。

其次，EDN 的路由层需要在确定性链路基础上，按照时隙化路由调度算法计算具有确定性能力的保障路径，并进行时隙化路径编排，下发路径结果建立集中式、分布式的确定性路由，同时包括域内或跨域路由。

最后，EDN 的业务层在确定性路径的基础上，提供基于 DD-QoS 的流量调度技术，包括分类分级流识别、准入控制及引流策略、流过滤及映射等。



图 4 EDN 总体架构功能视图

## 4.2 EDN 的转发面架构

EDN 转发面技术（EDN Data Plane，EDP）涉及跨管理域异构互联的网络组网，可以提供多种确定性转发技术及能力，包括多种队列调度技术等。数据面的封装需要考虑多种网络传输格式，包括 IP/MPLS/SR-MPLS/SRv6 等。

### 4.2.1 EDN 的转发面架构及功能

如图 5 所示，EDN 是一个嵌套的网络，任何 EDN 业务类型均可由另一 EDN 服务传输。EDN 节点可以通过不同的 Sub-net 技术互连，Sub-net 包括 P2P 链路及多种队列机制增强，也可以包括 MPLS-TE 隧道、TSN L2 链路、FlexE/OTN 硬管道，以及更底层的 EDN 路由等跨层资源。这些 Sub-net 可以构建确定性链路，并通过基于时间的确定性资源的预留保障确定性转发能力，根据数据面封装报文，完成业务分类分级转发，保障端到端差异化确定性 QoS 服务。

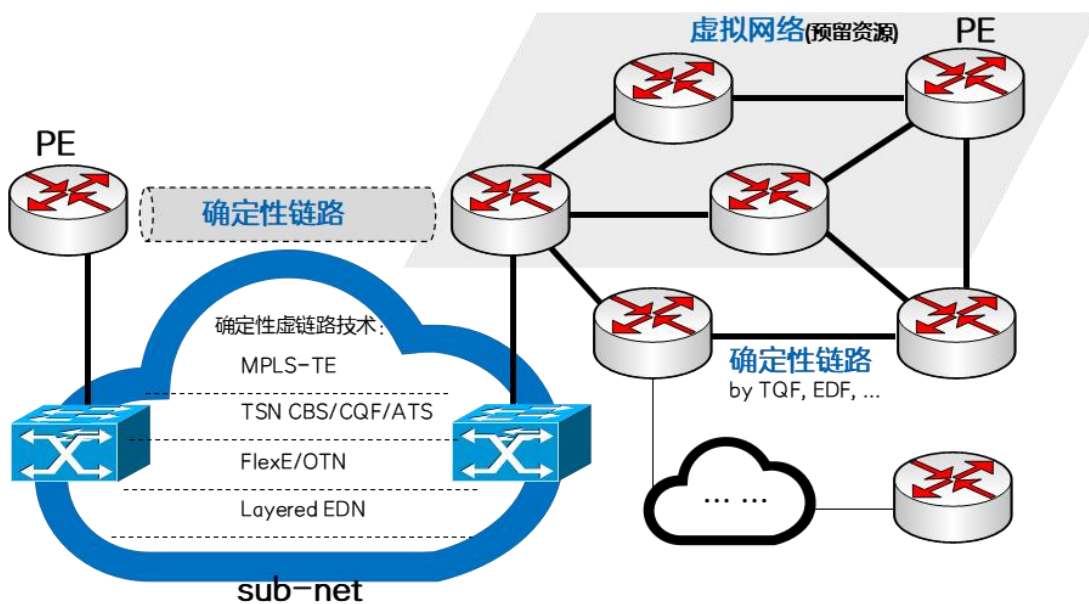


图 5 EDN 转发面组网架构图

EDN 转发面功能包括主要网元角色入口节点、出口节点以及中间节点等，这些节点完成数据面的确定性转发功能，节点需要提供架构中的分层功能，如下：

- (1) **网络入口节点上**，转发面在业务层执行准入控制策略，根据流分类将业务流映射至对应的确定性路径，根据需要封装流标识、确定性等级、确定性资源标识、序列号、队列信息等信息，并根据路由层路由包含的转发信息将报文转发至指定的下一跳。
- (2) **网络中间节点上**，转发面在业务层执行流识别并在路由层匹配确定性路由和策略，访问资源层确定性资源（如与确定性等级对应的队列、时隙），并根据路由包含的转发信息将报文继续转发至下一跳。
- (3) **网络出口节点上**，转发面在业务层执行流识别并在路由层匹配确定性路由和策略，剥除确定性报文封装，基于内层载荷继续向终端系统转发。

#### 4.2.2 EDN 的转发面数据封装

EDN 的数据报文不需要携带业务需求信息，需要携带数据面转发相关信息及用于指导报文

转发的资源信息，包括队列信息、分类分级信息等，报文格式可以采取通用封装方式。增强确定性网络数据面的封装需要考虑多种网络传输格式，包括 IP/MPLS/SR-MPLS/SRv6 等，传统 IPv4 和 MPLS 可以考虑使用已有字段，例如 TC 或 DSCP 映射的方式携带相关信息。IPv6/SRv6 可以考虑使用 IP 选项、IP 扩展标头或现有 IP 头等携带相关信息。

### 4.3 EDN 的控制面架构

EDN 控制面技术（EDN Control Plane，ECP），涉及集中式、分布式、混合式等多种架构模型及其相关功能，同时包括南北向接口协议扩展等。

#### 4.3.1 EDN 的控制面架构及功能

##### 4.3.1.1 EDN 控制面架构

为支持 EDN 的转发面功能，需要构建 EDN 的控制面来执行网络管理、流量编排、状态监测等控制功能。EDN 的控制面可以使用三种不同的组网架构，即集中式架构、分布式架构与混合式架构，其功能对比如表 2 所示。

除了下述控制功能实现的差异，不同控制架构在性能上也存在差异，如控制实体处理性能差异会影响业务编排效率，而不同的控制信令交互模式也会影响网络开销等。集中式架构和分布式架构并不是对立的而是互为补充，二者能够在不同的场景和需求下可以发挥各自的优势。因此，网络管理人员在确定 EDN 控制架构时应当综合考虑网络规模、拓扑结构、应用场景、性能要求等因素，进行合理地选择。

表 2 三种架构的控制功能对比

	集中式架构	分布式架构	混合式架构
控制实体	集中控制器	EDN 节点	集中控制器或 EDN 节点
控制通道	集中控制器—EDN 节点	EDN 节点—EDN 节点	集中控制器—EDN 节点、EDN 节点—EDN 节点
控制协议	OpenFlow\NETCONF 等	IGP\BGP\RSVP-TE 等	兼容集中式和分布式的控制协议
状态收集	集中控制器通过控制协议收集或探测所有 EDN 节点及链路的状态	EDN 节点通过控制协议探测相邻链路的状态并与邻居同步状态数据库	既可通过集中控制器收集,也可通过分布式控制协议进行收集与同步
需求上报	终端通过北向接口向集中控制器上报业务需求	终端通过网络/用户接口向 EDN 节点的控制代理上报业务需求	终端可选择地向集中控制器或 EDN 节点控制代理上报业务需求
业务编排	集中控制器为业务编排转发路径及相应传输时隙	接入 EDN 节点为业务编排转发路径及相应传输时隙	选择性地使用集中控制器或接入 EDN 节点为业务编排转发路径及相应传输时隙
结果下发	集中控制器通过控制协议向涉及的 EDN 节点发送调度结果以完成部署	接入 EDN 节点通过分布式控制协议向涉及的 EDN 节点发送调度结果以完成部署	根据控制实体选择相应控制协议向涉及的 EDN 节点发送调度结果以完成部署
总结	集中式架构具有全局优化、统一决策、简化管理等特征。	分布式架构具有区域自治、快速响应、可扩展性强等特征。	混合式架构具有高灵活性、分域隔离、高可靠性等特征。

#### 4.3.1.2 EDN 控制面功能

EDN 控制面功能按照业务层、路由层和资源层分别提供。

- (1) **资源层**提供 EDN 的确定性资源管理及调度,包括资源建模、确定性链路、层次化资源预留

等;

- (2) **路由层**提供 EDN 的确定性路由规划及建立,包括路径计算及时隙化编排、路由建立及分配、跨域路由、分布式路由等;
- (3) **业务层**提供 EDN 的确定性业务调度及准入,包括业务 DD-QoS 调度、业务标识及识别,业务协商与准入、引流和流映射配置等。

### 4.3.2 EDN 的控制面层次化模型

由于在 EDN 网络中,多种业务共存且确定性分类分级需求导致 SLA 指标的差异化,EDN 需要提供多种级别的差异化确定性 QoS,针对 EDN 三层架构,EDN 控制面可通过链路级、路径级到业务级的层次化管理与调度模型,保障确定性 QoS 服务的达成。如图 6 所示,模型可分为三层如下:

- (1) **链路级**: 构建确定性链路,提出时间资源容器,提供基于时间的确定性资源预留,解决不同业务等级之间的资源冲突,保障确定性转发能力。
- (2) **路径级**: 构建确定性路径,基于时间资源容器和确定性资源规划,计算端到端时延、抖动、丢包及类型和级别等约束条件的路径,解决相同业务等级、不同确定性路径之间的资源冲突,保障确定性转发路径。
- (3) **业务级**: 构建确定性业务,提供基于确定性资源分配的业务,解决相同确定性路径上不同业务间的资源冲突,保障确定性业务转发。

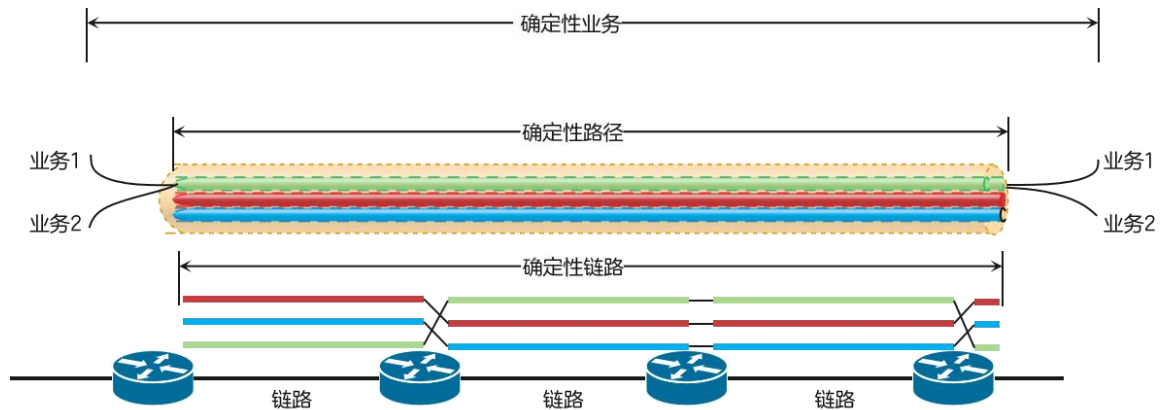


图 6 层次化管理与调度模型

基于层次化管理和调度模型的流程如下：

- (1) 将 EDN 网络资源建模成确定性链路，在出端口上为每一类确定性业务等级分配规划带宽资源，其中包括结合 EDN 多种队列调度机制，将此带宽换算成对应容器内的最大可预留资源量，用以表示报文在此容器对应的时间区间内能够发送的最大资源量（单位可以是 bit、字节、一定字节长度的报文个数等）。
- (2) 针对每一类确定性业务等级需求，建立一条或多条从入口 PE 节点到出口 PE 节点的确定性路径，其中包括按照对应业务等级的 SLA 指标需求计算路径，并沿路为上述路径预留一定数量的容器资源。
- (3) 在入口 PE 节点上对确定性业务进行规划和编排，根据业务等级和需求，在对应等级的确定性路径上为该业务选择合适的准入容器并分配相应资源。

#### 4.4 EDN 的 OAM 架构

EDN 的管理面技术（EDN Management Plane, EMP），涉及 EDN 的 OAM 技术，包括 EDN 故障检测和性能测量方法等。相较于传统网络层 OAM，EDN OAM 技术需满足更多的功能性需求，这些需求分别匹配到 EDN 三层确定性逻辑架构。因此，EDN OAM 的架构也自上而

下分为业务层 OAM、路由层 OAM、资源层 OAM 三层，如下：

- (1) **业务层 OAM**：用于对确定性时延上界、确定性抖动上界、高可靠性等 QoS 目标的达成进行跟踪、管理和维护。可以对确定性业务流以随流方式进行时延、抖动、丢包性能测量。可以逐流或逐类对确定性业务进行 QoS 指标数据收集，基于 SLA 达成情况对业务可用性进行精确评估，对可能出现的某类业务可用性劣化进行诊断，触发策略更新或配置优化。
- (2) **路由层 OAM**：用于对确定性路由进行性能测量和故障管理。支持端到端路由或指定子网的连续性检测和连通性验证，并为其提供远程缺陷指示。支持按业务流或业务类型，对确定性报文进行路由验证。对于跨域场景，需要跟踪各指定域的时延，及时优化域内时延预算，必要的变更域间路由编排。
- (3) **资源层 OAM**：用于对确定性链路及其资源进行检测、管理和维护。支持对确定性链路的带宽（总带宽、可用带宽、已用带宽）、单向时延（最大时延、最小时延、统计平均时延）、丢包率进行性能测量。支持对参与 EDN 转发的出接口按容器进行确定性资源数量和状态的采集和监测，结合队列机制，按时隙（超周期、物理周期、子周期）或队列（时隙队列、deadline 队列）进行缓存资源使用情况的监测，以保持转发面与控制面资源信息的同步。支持为确定性业务，按其端到端路径对沿途节点进行带宽资源预留和实际占用情况的监测、分析，按需进行资源预留调整及资源规划的优化；按业务流或业务类型进行时隙资源分配和实际占用情况的监测、分析，按需进行时隙调度的优化。

需要指出的是，确定性业务在 SLA 里承诺了较非确定性业务更为严格的时延、抖动、丢包等性能指标，这对 EDN OAM 提出了较传统网络层 OAM 更高的性能要求。例如工业远程控制应用提出小于 5ms 的时延和低于 100us 的抖动，这不仅需要精细的时延测量方法设计，还需要硬件提供更精准的时间戳标记能力（误差控制到微秒级）。



## 5 EDN 的关键技术

基于 EDN 技术架构, EDN 通过业务层 DD-QoS 流量调度, 路由层内生确定性路由、路径编排和调度转发, 资源层多样化队列和资源预留等关键技术构建了 EDN 技术体系并研制了 EDN 原型样机。

### 5.1 EDN 的业务层关键技术

#### 5.1.1 基于 DD-QoS 的流量调度技术

EDN 业务层提供基于分类分级的差异化业务特征的流量调度技术, 其中, 转发面包括分类分级特征携带, 业务识别及分类分级的引流及转发等; 控制面包括业务准入、引流策略配置、资源预留等。

##### 5.1.1.1 DD-QoS 流识别

EDN 根据业务报文的一个或者多个字段进行业务流识别, 例如, 当确定性业务类型和级别较多时, 可以通过报文中新增确定性业务分类分级标识识别业务, 当业务分类数量较少的情况下可以使用扩展已有 DSCP 的方式。对应已识别的业务流按照报文中指示的分类分级标识及转发信息进行转发。对于未识别的业务流, 可以通过流限速、流量监管等方式处理。控制面也可以配置更精细的感知流量周期特性的过滤器等方式过滤业务流, 对于不符合过滤条件的流量可以直接丢弃或者通过重整形等其他手段进行处理, 对于匹配成功的业务流, 可以通过流量映射等方式映射到相应的网络或资源进行转发。

### 5.1.1.2 DD-QoS 业务准入控制

EDN 接收到某条确定性业务的请求消息时，获取请求消息中携带的流量特征、数据报文特征、业务对网络的需求等参数，根据业务的 SLA 需求，协商确定性业务等级，根据选路策略选择相应服务能力确定性路径，结合当前网络的剩余带宽资源状况及流量特征，判断是否有足够剩余带宽资源及合适的时隙允许业务接入，如果有足够的资源，则指定该业务能使用的一个或多个时间资源容器（例如周期、时隙、队列等）并预留业务所需资源量，并形成业务准入控制配置信息。

### 5.1.1.3 DD-QoS 引流策略

EDN 接受确定性业务准入后，需要将业务引流到相应的路径上转发，可以通过控制面配置 SR Policy 进行引流，进一步地配合策略模板，设置确定性业务类型与颜色的映射关系，可实现基于业务类型将流量引导到对应 SR Policy 隧道，其中 SR Policy 中需要携带确定性路径，该确定性路径信息中除了指示确定性业务需要经过的节点和出端口外，还需要指示业务被规划的周期或者时隙以及时间容器分配的资源，转发面根据上述信息对确定性流进行转发。

## 5.2 EDN 的路由层关键技术

EDN 基于确定性链路进行算路，得到具有确定性 SLA 能力的确定性路由。如图 7 所示，和传统路由方法相比，EDN 在路由层新增了确定性链路（包含了节点内部时延）的 QoS 属性参数通告、基于累计确定性时延度量最优且同时满足时间和带宽资源约束的确定性路径计算等核心思想，并体现在分布式路由、跨域路由、集中式时隙化路径编排等关键技术。



图 7 EDN 确定性路由与传统路由的差异

### 5.2.1 分布式确定性路由技术

分布式路由技术需要兼容现有 IP 路由体系, 在 IGP 路由协议中增加确定性链路信息的扩展, 并通过 IGP 洪泛, 使得域内节点获知由确定性链路信息构建的 IGP 域内拓扑。基于此, 入口边缘节点为业务流进行确定性路由计算, 例如以确定性时延 (节点队列时延上界与确定性链路时延之和) 为度量, 采用时延最小的灵活算法 (Flex-Algo), 计算出一条端到端时延上界满足 QoS 等级的优选路由。

### 5.2.2 跨域确定性路由技术

由控制器规划出一条跨域时延最小的显式域间路由, 并将业务流的端到端时延保证要求分解到沿途各域, 形成各域的时延预算。上述信息下发给沿途各域, 各域分别计算出从显式域间路由指定的本域入口到本域出口、时延上界不超过预算值的域内确定性路由。显式域间路由和域内确定性路由共同构成一条确定性的端到端跨域路由。

在跨域场景中，除了可创建跨域流量工程路径，也可以建立 BGP 意图路由，迭代至底层的集中式确定性路径或分布式确定性路由。如果采用 BGP 意图路由，需要设法在路由通告中携带每个域的度量（如时延）分配信息，以灵活的控制每个域的度量分配。

### 5.2.3 时隙化路径编排技术

根据业务特征和网络特征，将确定性的时间资源和带宽资源编排到所计算的确定性路径中。根据报文在上游节点传输到下游节点的时间偏差，进行时隙映射关系的编排，确定性链路模型中包括了基于时隙映射的队列时延。

控制器为确定性业务流进行路由计算时，是在一个具有确定性带宽保证的虚拓扑中进行的，即虚拓扑中每条链路的可用带宽都可以满足业务流的需求。对计算得到的确定性路由，需要正式对沿途节点接口及时隙下的带宽资源进行预留。对于无集中控制器的场景，可采取 RSVP 方式进行资源预留。因此，业务流的确定性路径生效，也伴随着沿路节点上时间资源和带宽资源编排的确认。

### 5.2.4 时隙化路由调度技术

为实现基于 EDN 控制面架构与 DD-QoS 模型对转发层面的功能控制，控制平面融合确定性路由的流量调度技术成为了确定性路由性能保障的关键，为此 EDN 控制面采用了时隙化业务调度算法实现时隙化路由调度技术。算法针对 DD-QoS 典型包含两类算法方案，即基本的可扩展调度算法和增强流序列算法。

计算 EDN 时隙化路由调度最基本的方法是输入流参数并定制多个约束条件，如时隙约束、映射约束和截止时间约束等。然而，这种方法是内存密集型的，为大规模问题找到高质量的解

决方案可能要花费大量时间。一种典型的方案是考虑到该调度问题本质上等同于 0-1 多维背包 (01MK) 的 NP 完全问题, 即在可行执行时间内难以找到最优解, 因此, EDN 时隙化路由调度算法为了降低计算复杂度可选择计算密集型的启发式算法。基本的可扩展调度算法先找到一个可行的解, 而增强的流序列算法通过迭代以逼近最优解。

## 5.3 EDN 的资源层关键技术

### 5.3.1 多种队列机制

EDN 的资源层需要支持多种队列机制, TSN 队列机制如 CBS、TAS、CQF、ATS 等适合局域网应用, 面对当前网络需求存在一定的局限性, 在大规模确定性网络场景中, 已有多种基于 TSN 队列增强或适用于大规模网络的队列机制, 如 Stop-Go、CSQF、ADN、TQF、Deadline 等。

#### 5.3.1.1 TSN 队列机制的局限性

队列调度技术是保证确定性传输的重要能力, 在大规模确定性网络场景中, 传统的 TSN 队列调度技术面对当前的网络需求仍存在一定的局限性, 我们针对几种传统的 TSN 队列机制的适用情况进行了评估, 如表 3 所示。因此, 在传统的 TSN 队列机制基础之上, 需要进一步扩展来满足 EDN 网络中多样化的业务需求。

表 3 TSN 队列机制面对大规模确定性网络需求评估结果

大规模确定性网络需求	TSN 队列机制的评估结果			
	CBS	TAS	CQF	ATS
容忍时间异步	是	否	否	是
支持单跳长距离传输时延	是	是	否	是
适应更好的链路速率	部分满足	部分满足	部分满足	部分满足
支持大规模流量调度	是	是	部分满足	部分满足
支持高利用率	是	部分满足	部分满足	是
防止流量波动对业务影响	部分满足	部分满足	部分满足	部分满足
适用于复杂拓扑结构下的大规模节点数量	否	部分满足	部分满足	部分满足

### 5.3.1.2 Stop-Go 队列机制

Stop-Go 将输入和输出链路的时间轴划分为固定长度的时隙“帧”。在两帧之间到达的数据包只能在下一帧中被传输，在同一帧中的报文可以以任何次序传输，因此每个报文都被引入一个固定的时延。如果报文的最大到达速率小于帧中保留的时间片，那么这种算法能确保有限的时延和时延抖动。

### 5.3.1.3 CSQF 队列机制

CSQF 队列调度技术是在 CQF 队列机制的基础之上进行的拓展，如图 8 所示，在接收转发双队列循环调度的基础上增加容忍队列，吸收报文处理过程中产生的时延变化或者一定程度

的带宽的突发, 消除了 CQF 机制中上游节点发送时间和下游节点接收时间严格在同一周期的限制。通过段路由 (SR) 中的 SID 字段携带报文的发送周期, 在中间节点对业务流进行调度时可以满足中间节点流无状态特性, 在广域网上具备可扩展性。

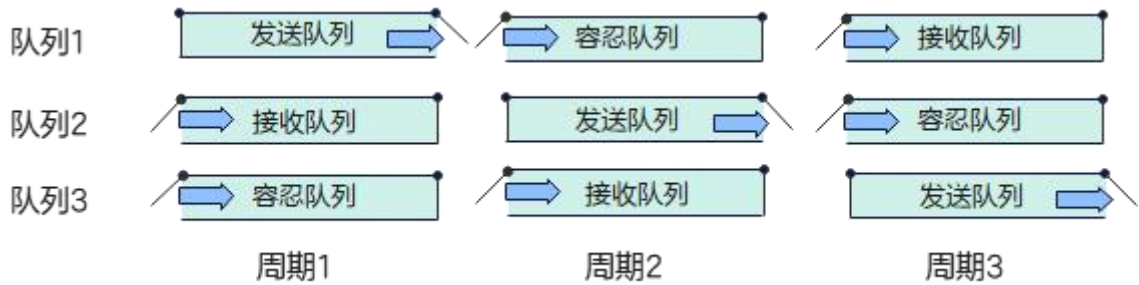


图 8 CSQF 转发机制示意图

### 5.3.1.4 ADN 队列机制

ADN 队列机制是一种基于聚合流调度的异步技术, 无需时间同步或者频率同步的限制。

图 9 所示是 ADN 调度机制的处理流程, 从源地址出来的报文在时间标签模块为其增加时间信息, 然后报文会进入时延保障模块, 在模块的入口增加调节器对流量进行基于端口整形, 降低业务突发对时延带来的影响, 还要结合核心节点无状态的公平队列机制进行转发, 可以采用严格优先级调度策略或者其他合适的调度机制, 保证域内时延有界。此外, 为了保证业务抖动有界的特性, ADN 队列机制需要在时延有界保证域的出口和目的地之间构造抖动保证网络模块, 达到抖动有界的目的。

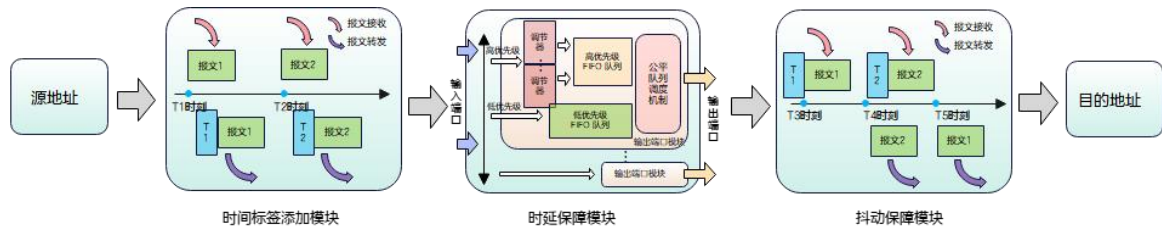


图 9 ADN 机制调度流程示意图

### 5.3.1.5 TQF 队列机制

TQF 队列机制是在 TAS 基础之上进行的拓展，采用时分复用的思想在全局构建时隙分配表，如图 10 所示，可以在较长时间范围对不同的业务进行全局的精确编排。在边缘节点，通过报文携带的时隙编号以及不同时隙内的资源预留情况实现准入控制。中间节点结合调度时隙和门控对业务报文进行转发，实现业务抖动性能的保证，在此基础之上，根据时隙编排的全局性质，还可以结合编排为业务报文选择时延最小的路径进行转发，同时中间节点可以维持业务流的无状态特性，相邻节点间的调度时隙仅需频率同步，具备大规模确定性网络上的可拓展性。TQF 机制还支持转发时隙与编排时隙相同/不同两种模式，包容不同节点转发能力的差异。

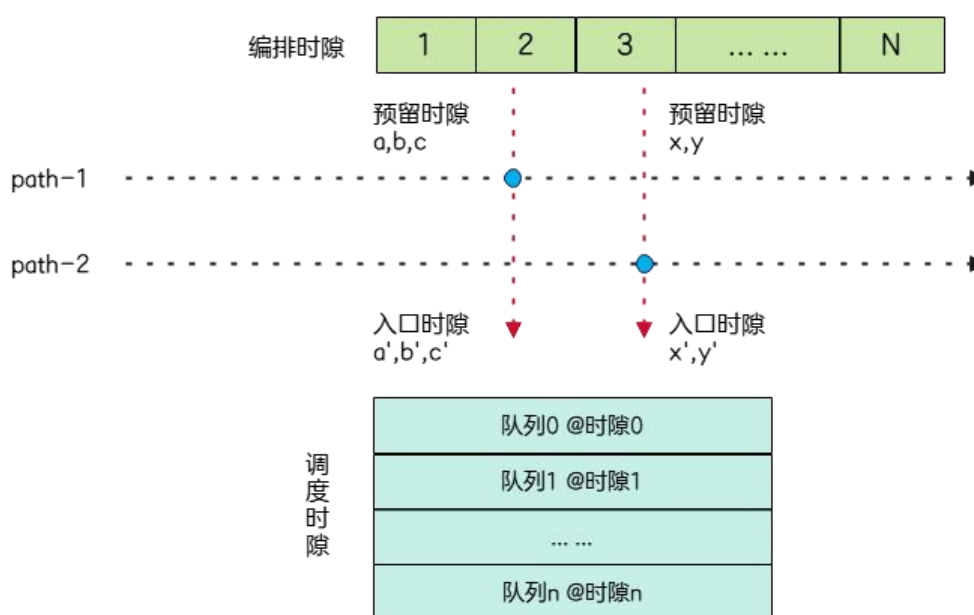


图 10 TQF 队列机制、编排时隙和调度时隙示意图

### 5.3.1.6 Deadline 队列机制

Deadline 队列机制是基于队列的授权时间和倒计时时间完成转发的异步调度技术。如图 11 所示，在边缘节点基于业务的特性对报文进行准入控制，在中间节点完成流识别，并根据本地



系统时钟以及业务的优先级决定在截止时间前是否对报文进行发送。并且设计了 in-time 和 on-time 两种队列模式，in-time 模式可以对到达的业务报文提前发送来满足低时延的需求，on-time 模式严格按照截止时间的设置对报文进行发送，可以满足业务低抖动的需求。

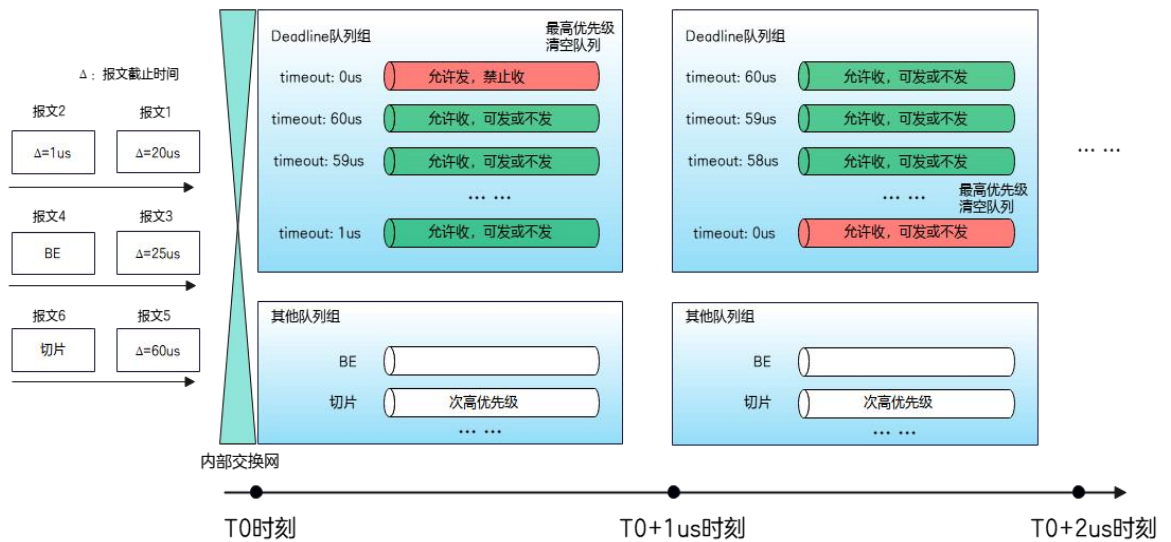


图 11 Deadline 队列机制示意图

### 5.3.1.7 多队列机制共存

TSN 队列机制面临广域和时间同步的局限，而 DD-QoS 多样化的需求以及 EDN 资源层异构的要求导致自然产生多队列机制共存的事实，而 EDN 架构资源层设计已经支持多队列机制共存。Stop-Go 队列机制进一步发展为 CQF/CSQF，CSQF 队列机制通过增加容忍队列减轻广域复杂组网时间同步的要求，TQF 进一步采用了时分复用的思想满足异步复杂网络多样化时间敏感业务的时延和抖动保障。而 ADN 和 Deadline 队列机制则同样在广域组网异步模式下提供有界时延和抖动。

## 5.3.2 确定性资源预留技术

### 5.3.2.1 确定性资源建模

确定性需求的多样化、网络确定性资源的多样化以及底层转发机制的多样化使得网络的能力具有一定的差异性，而增强型确定性网络需要屏蔽这些差异。确定性资源是提供确定性网络服务的基础，通过对网络整体资源进行规划，统一建模异构确定性资源形成统一的确定性链路，为不同级别的确定性转发能力提供保障。

为了满足不同的确定性需求指标，可以为不同级别确定性业务配置不同的转发能力，EDN 将确定性链路类型可以分为低抖动保证类、低时延低抖动保证类、低时延保证类、有界时延上限类等。为了保障确定性链路的转发能力，EDN 提出时间资源容器，用于为确定性链路提供基于时间的资源保障，时间资源容器指示每调度时隙内的传输比特量，根据对不同的时间资源的预留，确定性链路将提供不同类型的确定性能力。

确定性链路是基于节点、链路、带宽、buffer、队列、sub-net 等资源构建的，其中多种队列及转发机制将导致确定性链路具有不同的确定性能力和级别，因此，确定性链路需要针对不同的转发机制进行资源度量和量化。例如，当使用 TSN ATS/CBS/ADN 调度机制的确定性链路，不同的 traffic class (如 CDT、class A、class B) 可分配初始的突发量份额和带宽份额，然后根据“速率-延迟”服务曲线得到每个 traffic class 的每跳延迟上界；使用 CQF/CSQF 调度机制的确定性链路，不同的 cycle 级别可分配初始的带宽资源份额，每个 cycle 级别的每跳延迟上界与 cycle 长度相关；使用 EDF/Deadline 调度机制的确定性链路，不同的时延等级可分配初始的突发量资源与带宽资源份额，满足可调度性条件，每个时延等级确定了每跳延迟上界；使用 TQF 调度机制的确定性链路，编排周期内的每个时隙编号均有初始的突发量资源，其

大小不超过时隙长度乘以链路带宽，每跳延迟上界取决于入向时隙与预留的出向时隙之间的偏移。

### 5.3.2.2 层次化资源预留

传统的资源预留方法保证预留带宽在宏观层面上满足业务流的峰值信息速率，但是面对因确定性需求产生的多种的调度转发机制，即使宏观层面满足传输需求，在某个特定的传输时间片（周期、时隙、授权时间区间等）也可能缺乏足够的资源进行传输，无法保证有界时延和抖动，因此需要根据不同的队列调度技术对其关联的容器资源进行细粒度的规划和预留。层次化资源预留技术基于层次化模型，基于链路级、路径级和业务级进行不同级别的资源预留，分别为不同的业务等级规划并预留对应的时间资源，分层解决资源冲突，为不同等级的确定性业务提供准入和传输的需求。

## 6 EDN 的标准化

中兴通讯联合信通院、中国移动、中国电信、中国联通、北京交通大学、紫金山实验室等已在国际国内多个标准化组织提出了 EDN 标准化地图和标准体系，包括 IETF，CCSA TC3 和 TC614 等，未来计划继续在 ITU-T SG13 实现课题突破。

### 6.1 EDN 的 CCSA 标准化地图

由于大规模确定性业务的承载需求是多维的，CCSA 开展了确定性承载网络体系的研究，如图 12 所示，2022 年初，中兴通讯联合信通院、中国移动等在 CCSA TC3 和 TC614（网络 5.0）等多个标准组牵头了确定性承载网络业务分类分级需求等相关标准，制定了相应的确定性

SLA 指标分类和分级。

与此同时，在大规模场景下，还需要考虑多种网络转发技术的协同及端到端的跨网络跨管理域的互联等，但目前缺乏确定性技术及统一架构提供确定性承载端到端服务，实现多种转发技术及能力的协同，满足分类分级的确定性业务承载需求以及跨网络技术跨管理域等大规模组网范围内的确定性保障。因此，2022 年 11 月，中兴通讯联合中国移动、信通院、中国电信、中国联通等首次提出 EDN 的架构体系，在大规模确定性网络方向获得共识，并完成了架构行标立项，并于 2023 年上半年完成在 CCSA TC3 的 EDN 系列行标立项。



图 12 EDN CCSA 标准化地图

## 6.2 EDN 的 IETF 标准化地图

针对大规模组网需求，中兴通讯于 2022 年 2 月首次提出确定性网络的增强架构，IETF DetNet 工作组于 2022 年 7 月正式修改工作组简章，将 Enhanced DetNet 正式列入 Milestone 工作计划，预计未来 2 年内发布，其中中兴通讯与中国移动等联合牵头的需求草案已于 2022 年 12 月采纳为工作组草案。Enhanced DetNet 技术包括增强确定性网络架构及其关键技术相关标准已成为确定性网络的研究热点及标准化方向。

中兴通讯联合中国移动、信通院、北京交通大学等已在 IETF DetNet、PCE、LSR、IDR、6MAN 等多个工作组同步推进 EDN 的系列草案，包括需求、架构、队列机制、转发面及控制

面扩展等系列标准草案 20 篇，如图 13 所示，部分草案已获得工作组认可。



图 13 EDN IETF 标准化地图

## 7 EDN 的样机系统及验证测试

### 7.1 EDN 样机系统的总体架构

EDN 样机系统的总体架构，如图 14 所示。

TSN 节点负责发送和接收客户业务，TSN 业务到达 EDN 网络域（黄色部分）后，被作为 L2VPN 客户业务进行承载，EDN 域采用时隙队列转发（TQF）技术承载 TSN 客户业务，从而满足业务的端到端时延和抖动需求。EDN 域对外呈现出虚拟 TSN 网桥的特征，对 TSN 业务终结、传输和再生。

**TSN 管控平台**负责端到端 TSN 业务的管理和控制，完成对 TSN 节点的管理和配置，将对 EDN 域（虚拟 TSN 网桥）的时延、抖动、带宽等需求传递至确定性网络管控平台。

**确定性网络管控平台**负责根据业务的时延和抖动进行选路，并对 EDN 域内节点进行业务参数配置和管理，EDN 网络节点根据配置完成业务的确定性转发。

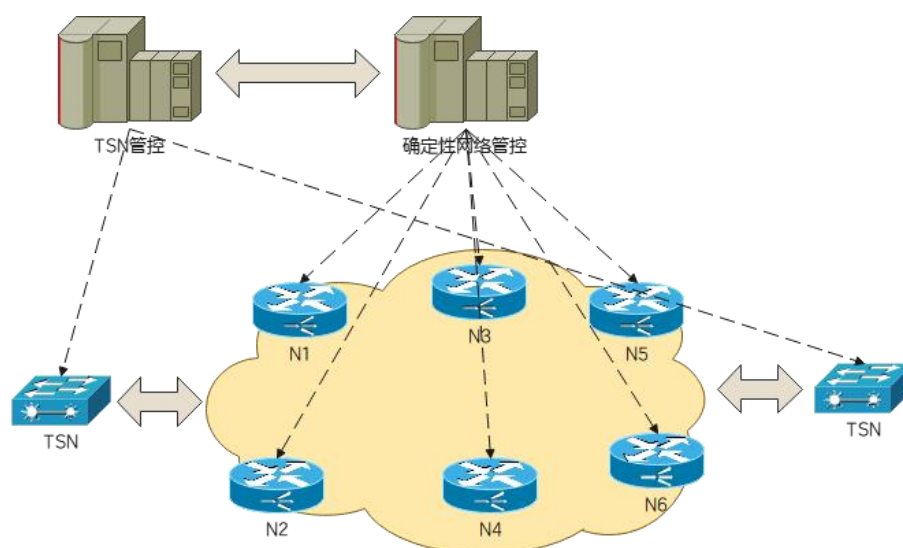


图 14 EDN 样机组网图

## 7.2 EDN 样机系统的转发面实现

样机转发面实现了 EDN 时隙化队列调度机制（TQF），如图 15 所示，UNI 口根据报文头字段对普通业务和确定性业务进行区分，对确定性业务打上 EDN 时隙标签，转发设备在时隙标签指导下按队列时隙进行转发。样机支持汇聚功能，支持重载汇聚下的确定性流量监管和整形。样机同时支持多业务流混合承载，通过在 MAC 层实现 802.3BR 抢占机制，减少 BE 流量巨帧对 EDN 业务的干扰，提高业务承载效率。在汇聚拥塞发生时，时隙化软管道支持 EDN 流量的无阻塞和无丢包调度，满足确定性业务可靠性要求。

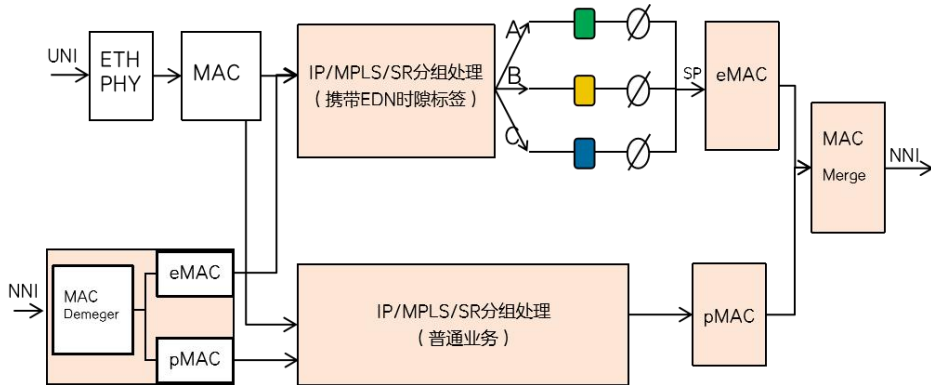


图 15 EDN 样机转发处理

为验证 EDN 业务分类分级和差异化接入承载机制，EDN 样机实现了多级时隙调度模板。

时隙模板的调度时隙长度间存在 2 次幂关系，能够提供不同的确定性服务等级，包括不同的端到端时延、抖动、带宽以及不同的突发报文吸收能力，客户可根据需求自由选择需要的服务。在每个时隙内，各时隙模板队列根据时隙门控的开/闭状态确定是否有待传输报文，各级模板的队列间遵循严格优先级调度，时隙队列间基于保护带实现软隔离。

### 7.3 EDN 样机系统的控制面实现

EDN 样机系统采用集中式控制面方案，包含两个功能模块，即 CUC 和 CNC。CUC 为用户提供配置接口，CNC 负责节点管理和确定性业务配置下发。CNC 通过 NetConf/BGP-LS 等南向接口与转发面设备进行交互，通过 RestConf 协议与 CUC 交互，如图 16 所示。CNC 的功能逻辑上分为三个部分，即资源层、路由层和业务层，CNC 北向接收 CUC 的配置和确定性业务部署请求，在 CNC 内部进行业务编排和资源分配，然后通过南向接口将网元配置和业务部署信息下发至转发设备。CNC 主要功能包括转发面拓扑收集、虚拟拓扑管理、EDN 业务部署、路径编排、资源管理及南向配置参数下发等。

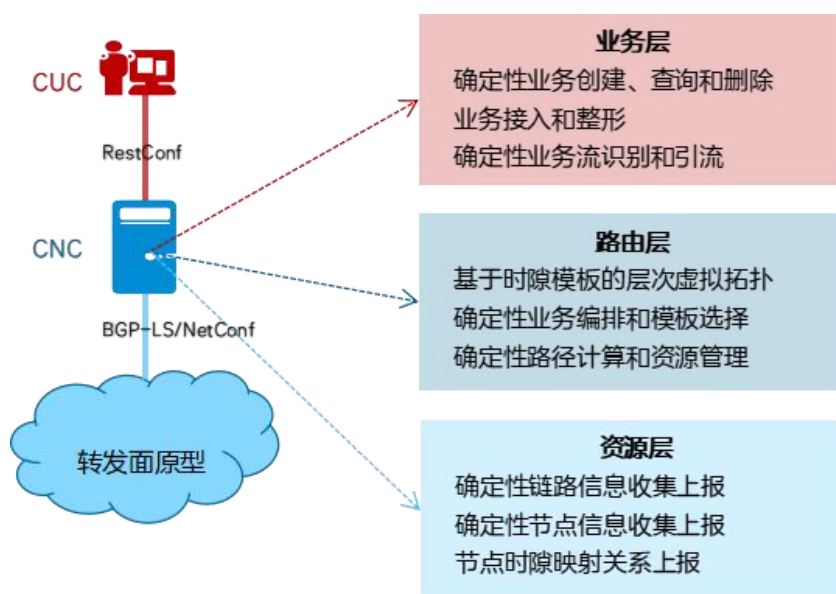


图 16 EDN 样机控制面

## 7.4 EDN 样机系统的测试实践

EDN 样机系统测试用例设计主要考虑如下场景：

- 单个时隙调度模板叠加背景流，验证 EDN 基础端到端抖动保障能力；
- 多个时隙调度模板混发，验证 EDN 同时接入承载不同等级确定性业务的抖动保障能力；
- 随机的巨帧、大规模流量，验证 EDN 不同时隙模板对巨帧、大规模流量处理能力的差异；
- 多打一场景，验证 EDN 样机系统的汇聚控制能力，确定性业务优先保障，EDN 不同时隙模板间遵循严格优先级拥塞调度；
- 不同的 EDN 业务周期配置，验证 EDN 样机系统的端侧对客户业务进行接入、整形和再生的控制能力。

EDN 样机系统在 CENI 平台上进行了完备的用例测试，覆盖上述所有的测试场景。CENI 平台是国家重大科技基础设施，用于广域网的新技术和新业务验证测试。本次测试中，通过环



回方式发/收发送重载（网络侧>80%）确定性测试流量和干扰背景流，业务端到端距离超过3000公里（南京->北京->南京的环回总距离），跨越 CENI 现网 8 跳非确定性路由器设备和若干跳 OTN 光网络设备。由于 CENI 网络存在其它业务流量，实测基础网络环境存在约 100us 的抖动。

在 CENI 现网的测试结果表明，EDN 样机系统不同的时隙调度模板实现了差异化的分级确定性业务接入控制和承载能力，体现优秀的端到端转发抖动控制性能（<20us），能够在混合流、大规模、汇聚和重载等条件下保持稳定性。同时，EDN 样机系统能够吸收基础网络环境的抖动，体现出良好的平滑演进能力。

## 8 面向 EDN 的网络演算实践

确定性网络的理论基础之一是网络演算，同时，EDN 也利用网络演算提供确定性网络路径选择、性能调整和优化工具。

### 8.1 网络演算基础

网络演算是一种基于到达曲线和服务曲线的端到端时延计算技术。到达曲线是对业务流量的建模，服务曲线是对网络服务能力的建模。并通过数学计算方式推导出业务流在网络中的端到端时延上界。相较于传统排队论，网络演算侧重于端到端性能描述，天然适用于确定性的时延需求；相较于机器学习方法，模型可解释性强、扩展性更好。网络演算理论分为确定网络演算( Deterministic Network Calculus, DNC )与随机网络演算( Stochastic Network Calculus, SNC )两个分支。其中 DNC 计算的是系统的性能边界，对应系统极限情况下（比如网络最拥塞时）的系统性能，一般用于输入模型的确定性较高的分析，如周期性业务与均匀服务模型中，

其资源利用率低，轻载情况时延上界估计过高，重载情况时延上界无穷大。确定网络演算技术端到端的时延估计过于保守，时延的上界：

$$D \leq \frac{(e + \tau) * h}{1 - (h - 1) * v}, \quad \text{当 } v < \frac{1}{h - 1}$$

其中  $e$  是节点处理时延， $\tau$  是初始突发时延， $v$  是最大链路利用率， $h$  为路径跳数，公式中只有带宽利用率很低时才能计算出时延上界，带宽利用率变高后没有时延上界。即使轻载情况下，现网的流量时延很小，各种网络演算算法的误差很大。另外网络中普遍存在汇聚微突发现象，导致时延分布的长尾效应。这些会导致确定网络演算应用于 IP 网络有一些困难。

SNC 是 DNC 的扩展，定义了统计性能边界，允许实际情况以一定概率超过统计边界，从而提高了资源利用率，代价是 SLA 保障不是 100% 覆盖。另外随机概率分布未知，时延上限不够紧致也是随机网络演算的弊端。

## 8.2 网络演算模型

网络演算采用随机网络演算算法，提出基于网络质量概率演算的算法。基于概率的网络演算设计思想由以下三部分构成：

- (1) 引入概率演算，业务流的微突发导致排队等待时延累积概率服从负  $e$  指数分布，通过设置概率阈值，得到突发量，来优化达到曲线中的突发量。对于轻载情形，极大地优化微突发引起的时延抖动估计；
- (2) 采用上游最大服务能力，修正下游到达曲线。上游节点的突发会进入到下游节点，根据上游节点的突发量，优化下游节点的到达曲线，进一步收紧时延上界；
- (3) 将笼统的时延上界计算替代为逐跳时延上界考察。为了便于路径的搜索和计算，需要逐跳

的计算节点的时延上界，保障端到端时延的确定性。

通过以上解决方案，可以大大优化时延上界估计，明显减弱长尾效应，同时适用于轻载和重载情形，支持转发面多种调度方式。网络演算算法模型如图 17 所示，到达曲线  $a$  由多段组成，其中多端口汇聚导致的报文碰撞演算出突发量  $M$ ，峰值速率  $p$  根据上游实际等效速率进行优化，上游的突发量累积到下游演算出实际突发  $b$ ，再根据不同的转发面调度方式，构建出不同的服务曲线  $\beta$ 。

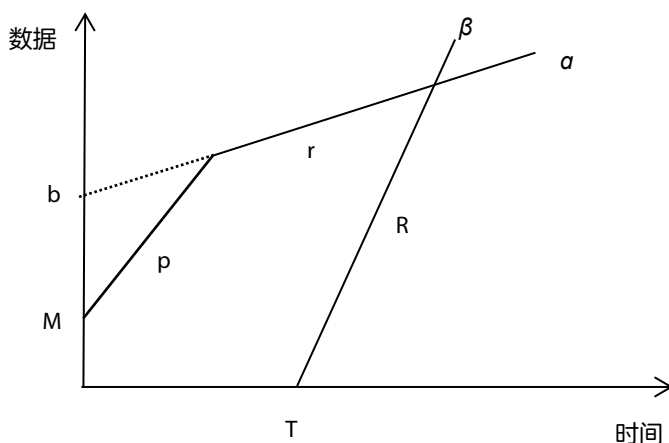


图 17 网络演算建模

需求参数包括从设备侧获取的调度方式及整形器参数、端口数据的周期内流速、端口服务能力，业务流获取的参数包括  $T$ -spec 参数和端到端时延需求，以及配置的概率阈值和获取的拓扑数据。根据最大业务包长、链路带宽、调度算法及整形参数和周期内流速，可以精确刻画业务的到达曲线，达到数据轻量级需求。算法可以对微突发定量化描述，通过概率的演算极大地优化微突发引起的时延抖动估计，能够识别大流速汇聚到小带宽的情形，从而避免局部拥塞。在轻载的情形下可以有效收紧时延上界。

通过网络演算规划工具具有以下功能：

1. 对业务进行路径选择，并预留相应的资源；
2. 对网络进行性能仿真；
3. 对网络流量进行调优。

### 8.3 网络演算仿真与验证

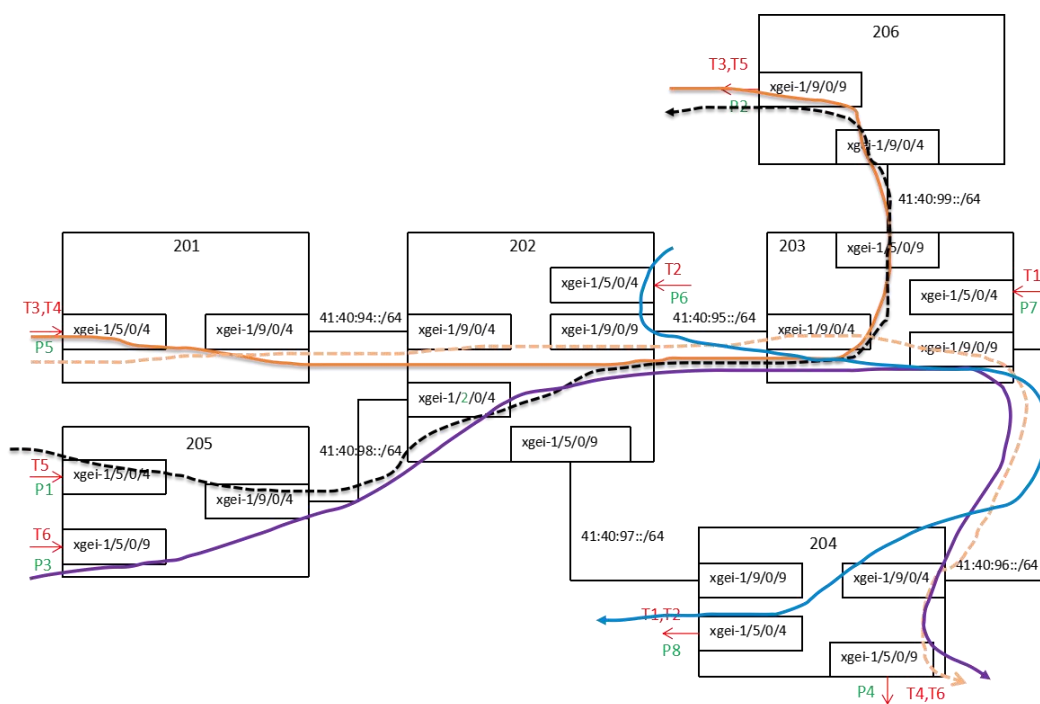


图 18 网络演算测试组网图

通过算法的仿真和实际设备的测试验证，业务流端到端的时延上界准确度达到 90%以上。

如图 18 所示，为实际设备的组网图，共 6 个节点，配置 5 组共 25 条确定性业务流，背景流 15 条，多组流之间有多次汇聚。通过测试仪发送业务流并测量不同业务流的端到端时延，并与网络演算部署和计算的端到端时延上界值对比，端到端时延准确度达到 90%以上。随着业务流带宽的增加，轻载和重载情形下的准确度都能达到 90%，极大的优化了传统网络演算端到端时延估计过高的弊端。

网络演算可以优化全网的平均路径边界时延，降低带宽利用率，达到流量负载均衡。在大

规模拓扑的仿真下，对比传统的路由算法，可以将平均路径边界时延降低 10%–24%；平均带宽利用率降低 12%–38%；高带宽利用率的链路占比降低，例如超过 80%利用率的占比降低 30%–75%，使得网络更不容易出现拥塞，负载更均衡。

## 9 EDN 的未来发展

IP 未来网络技术发展历来存在“演进”和“革命”技术路线之争，其实两种技术路线最关键的焦点在于未来网络技术的兼容性问题。EDN 从设计上就考虑了与现有 IP 网络的兼容性考虑，EDN 可以基于现有的 IP 网络 QoS 架构增强，因此，支持和现有 IP 网络互联互通。随着 EDN 技术架构、核心理念和关键技术方案的推广，预计 EDN 代表的增强确定性服务能力将逐步成为 IP 未来网络的基础能力之一。

## 10 总结

IP 网络自诞生之日起，在过去的数十年中已经取得了巨大的成功，IP 网络作为 IP 化业务开放服务的基础，随着 5G/B5G、云网融合、算力网络、工业自动化、行业数字化等多样化 IP 业务的发展，呈现出泛在、开放、服务化的持续发展趋势，但是传统 IP 网络只能提供尽力而为的 BE ( Best-Effort ) 服务能力越来越限制 IP 基础网络对多样化业务的服务质量。EDN 在 DetNet 的基础上构建了面向 IP 未来网络的增强确定性 QoS 服务能力，通过凝聚行业共识目前已经形成了完整的技术体系并将逐步完成标准化。开放服务互联有了 EDN 内生确定性的支持，将推动 IP 网络朝着未来持续演进！

## 11 缩略语

- ADN: Asynchronous Deterministic Networking 异步确定性网络
- BE: Best-Effort 尽力而为服务
- BGP: Border Gateway Protocol 边界网关协议
- CCSA: China Communications Standards Association 中国通信标准化协会
- CNC: Centralized Network Configuration 集中网络配置
- CQF: Cycle Queuing and Forwarding 周期队列及转发机制
- CSQF: Cycle Specified Queuing and Forwarding 特殊周期队列及转发机制
- CUC: Centralized User Configuration 集中用户配置
- DC: Data Center 数据中心
- DetNet: Deterministic Networking 确定性网络
- DNC: Deterministic Network Calculus 确定网络演算
- DSCP: Differentiated Services Code Point 差分服务代码点
- EDF: Earliest Deadline First 最早截止时间优先算法
- IETF: Internet Engineering Task Force 国际互联网工程任务组
- IGP: Interior Gateway Protocol 内部网关协议
- IP: Internet Protocol 互联网协议
- IPv4: Internet Protocol Version 4 互联网协议第 4 版
- IPv6: Internet Protocol Version 6 互联网协议第 6 版
- ITU-T: International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector 国际电信联盟电信标准化部
- L1: Layer 1 物理层 1 层
- L2: Layer 2 数据链路层 2 层
- L2VPN: Layer 2 Virtual Private Network 二层虚拟专用网
- L3: Layer 3 网络层 3 层
- MPLS: Multi-Protocol Label Switching 多协议标记交换
- OAM: Operations, Administration and Maintenance 操作管理维护

- PE: Provider Edge 边缘设备
- QoS: Quality of Service 服务质量
- RSVP: Resource Reservation Protocol 资源预留协议
- Restconf: Restful Configuration RESTFUL 风格的配置协议
- SAN: Service Aware Network 服务感知网络
- SLA: Service Level Agreement 服务保障协议
- SNC: Stochastic Network Calculus 随机网络演算
- SR: Segment Routing 分段路由
- SRv6: Segment Routing IPv6 基于 IPv6 转发平面的段路由
- TC: Traffic Class 流量等级
- TDM: Time Division Multiplexing 时分复用技术
- TE: Traffic Engineering 流量工程
- TQF: Timslot Queuing and Forwarding 时隙队列转发机制
- TSN: Time-Sensitive Network 时间敏感网络
- T-Spec: Traffic Specification 流量特征
- UNI: User Network Interface 用户/网络接口

## 12 参考文献

- [01]中兴通讯股份有限公司: IP网络未来演进技术白皮书, 2021年6月
- [02]中兴通讯股份有限公司: IP网络未来演进技术白皮书2.0——开放服务互联网络, 2022年9月
- [03]中国信息通信研究院: 确定性承载技术和评测体系研究报告, 2023年5月
- [04]中国移动: 5G 确定性工业生产网白皮书, 2022年8月
- [05]紫金山实验室等: 未来网络白皮书—确定性网络技术与产业发展应用白皮书, 2022年9月
- [06]IMT-2020(5G)推进组: 5G 确定性承载网络 SLA 指标体系白皮书, 2021年12月
- [07]网络 5.0 产业和技术创新联盟: 网络 5.0 技术白皮书 2.0, 2021年9月
- [08]网络 5.0 产业和技术创新联盟: 网络 5.0 总体技术需求, 2023年3月
- [09]网络 5.0 产业和技术创新联盟: 网络 5.0 体系架构, 2023年3月

- [10] 网络 5.0 产业和技术创新联盟：网络 5.0 确定性业务分类分级需求（征求意见稿），2023 年 6 月
- [11] IETF: RFC8655, “Deterministic Networking Architecture” ,October 2019
- [12] IETF: draft-xiong-detnet-large-scale-enhancements, “ Enhanced DetNet Data Plane (EDP) Framework for Scaling Deterministic” ,July 2023
- [13] IETF:draft-ietf-detnet-scaling-requirements, “ Requirements for Scaling Deterministic Networks” ,July 2023
- [14] IETF:draft-xiong-detnet-enhanced-detnet-gap-analysis,” Gap Analysis for Enhanced DetNet Data Plane” ,July 2023
- [15] IETF:draft-xiong-detnet-teas-te-extensions, “ Traffic Engineering Extensions for Enhanced DetNet” ,July 2023
- [16] IETF:draft-xiong-detnet-data-fields-edp, “Data Fields for DetNet Enhanced Data Plane” ,July 2023
- [17] IETF:draft-peng-detnet-packet-timeslot-mechanism,” Timeslot Queueing and Forwarding Mechanism” ,July 2023
- [18] IETF:draft-peng-detnet-packet-timeslot-mechanism,” Timeslot Queueing and Forwarding Mechanism” ,July 2023
- [19] CCSA: 确定性承载网络的业务质量指标与评估方法面(送审稿), 2023 年 7 月
- [20] CCSA: 面向承载网的增强确定性网络架构及技术要求(征求意见稿), 2023 年 8 月
- [21] CCSA: 面向承载网的增强确定性网络数据面转发技术要求(征求意见稿), 2023 年 8 月
- [22] CCSA: 面向承载网的增强确定性网络控制面技术要求(征求意见稿), 2023 年 8 月
- [23] CCSA: 确定性承载网络的操作管理维护技术要求(征求意见稿), 2023 年 8 月
- [24] Boudec J Y L , Thiran P .NETWORK CALCULUS: A Theory of Deterministic Queueing Systems for the Internet[J].lecture notes in computer science Incs, 2004.DOI:10.1007/3-540-45318-0.