



5G 确定性网络的应用和传送技术

Applications and Transmission Technology of 5G Deterministic Network

赵福川/ZHAO Fuchuan
刘爱华/LIU Aihua
周华东/ZHOU Huadong

(中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518057)
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.201905010
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20190916.1427.002.html>

网络出版日期: 2019-09-16
收稿日期: 2019-07-20

摘要: 高可靠低时延通信(URLLC)是垂直行业数字化转型的关键需求,重点分析了智能电网、工业互联网垂直行业应用对5G确定性网络的需求。研究了灵活以太网技术(FlexE)、时间敏感网络(TSN)、确定性网络(Detnet)等确定性网络关键技术。认为TSN/Detnet技术是后续确定性业务承载技术的发展方向。

关键词: 5G承载;确定性网络;网络切片;URLLC;TSN;Detnet

Abstract: Ultra Reliable Low Latency Communications (URLLC) is the key demand of digital transformation of vertical industry, and the requirements of 5G deterministic network for Smart Grid and industrial Internet vertical industry applications are emphatically analyzed. In this paper, the key deterministic network technologies of Flex Ethernet (FlexE), Time Sensitive Networking (TSN) and Deterministic Networking (Detnet) are also studied. It is considered that TSN/Detnet is the development direction of following deterministic bearing technology.

Key words: 5G bearing; deterministic network; network slice; URLLC; TSN; Detnet

1 垂直行业对5G确定性网络的需求

5G网络面向万物互联,除了传统增强移动宽带(eMBB)互联网业务外,也引入了高可靠低时延通信(URLLC)业务。URLLC业务覆盖了智能电网、智能工厂、车联网等应用场景,是垂直行业数字化转型的关键需求^[1]。

URLLC业务对承载网络的时延、抖动、丢包有严格要求,我们把承载这种严格要求业务的网络称为确定性网络。确定性网络的性能要

求在传统的互联网协议(IP)/多协议标记交换网络(MPLS)上难以真正满足,传统IP网络采用尽力而为的统计复用服务模型,通过传输控制协议(TCP)提供可靠应用的连接;但TCP协议会影响时延,其滑动窗口拥塞控制机制会引起业务突发,导致网络拥塞和时延抖动,难以提供确定性时延和时延抖动保证。

智能电网和工业以太网是5G垂直行业数字化转型的2个重要领域。本文中,我们将重点研究这2个领域对5G确定性网络的需求。

1.1 智能电网

智能电网对安全性要求极高,特别是对继电保护要求严格。继电

保护有距离线路保护、方向比较保护、电流差动保护等,其中电流差动保护应用最广泛。简单来说,差动保护就是当输电线路正常运行时,输电线路两端的电流值相同;而当这条输电线路发生故障时,两端的电流就会不一致。当差动电流大于差动保护装置的预定值时,保护启动进而将被保护设备的各侧断路器跳开,使故障设备断开电源。

广域电流差动保护则是将该保护原理拓展应用到广域电力系统中,通过采集广域网中多测量点的电流信息进行差动保护的计算和故障定位。通信内容主要包含帧性质及保护起动元件逻辑状态等信息。国际电工委员会(IEC)61850-90-

基金项目:国家科技重大专项
(2017ZX03001016)

12 标准^[9]6.2 节中规范了远程保护的通信性能要求,如表 1 所示。

不同的电力场景和应用,对通信的时延、抖动和丢包率都有确定性的要求,并对不同的时延要求定义了生存时间值 1(TTL1)至生存时间值 6(TTL6)的 6 个细分等级。在表 1 电流差异模拟比较中,要求时延 3~10 ms,抖动小于 100 μ s,2 个方向的不对称性时延小于 200 μ s,这 3 个功能场景对误码率(BER)也有很高的确定性要求。

在电网中根据传送电压等级不同,往往各种指标需求也不同。

IEC 61850-90-12 标准中 6.11 节把广域下对远程保护的通信要求按照电压等级进行了指标需求的细分,如表 2 所示。

同一个电流差异模拟比较功能场景,超高压(EHV)、高压(HV)、中压(MV)对通信的时延、抖动、不对称性时延、误码率以及时间同步精度等都有不同的确定性要求。

为了满足通信的可靠性、报文时延特性、数据完整性等要求,通信管道上目前主要采用同步数字体系(SDH)E1 方式,常用通道主要包括以 2 Mbit/s 速率复接 2 M(E1)接口

和以 2 Mbit/s 速率采用专用光纤通道。协议上一般采用基于面向对象的通用变电事件通信(GOOSE)这种特殊的通信机制^[9]。GOOSE 通信采用一种特殊的映射方式:应用层定义协议数据单元,在经过表示层进行编码之后,直接映射到数据链路层和物理层,而不通过传输控制协议(TCP/IP)。传输模型简化为 4 层:应用层、表示层、数据链路层和物理层。为了避免类似 TCP 滑动窗口拥塞机制导致的突发,同时因为通信信息少,GOOSE 协议通过报文重发送机制解决丢包问题,同一个报文一般会发送几次。

▼表 1 远程保护的通信要求

	模拟比较(差动电流)	命令	远程跳闸系统
方向	双向	双向	单向
报文大小	50 ~ 100 bits	少量 bits(开/关)	少量 bits(开/关)
报文周期性	3 ~ 12 次/周期	零星	零星
带宽	9.6 ~ 64 kbit/s	< 10 kbit/s	< 10 kbit/s
时延	< 3 ~ 10 ms	< 10 ms	< 10 ms
抖动	< 100 μ s	不要求	不要求
非对称时延	< 200 μ s	非关键	非关键
时间同步精度	< 100 μ s	非关键	非关键
误码率	< 10 ⁻⁶ ~ 10 ⁻⁸	< 10 ⁻⁶	< 10 ⁻⁶
恢复时间	< 50 ms	< 50 ms	< 50 ms
不可用	< 10 ⁻⁴ 单一系统(HV); < 10 ⁻⁷ S 双冗余系统(EHV)	< 10 ⁻² ~ 10 ⁻³	< 10 ⁻⁴
	HV: 高压	EHV: 超高压	

▼表 2 不同电压等级的远程保护通信要求

	A 等级	B 等级	C 等级	D 等级
应用场景	EHV	HV	MV	通用
时延	3 ms	10 ms	100 ms	1000 ms
抖动	10 μ s	100 μ s	1 ms	10 ms
非对称时延	100 μ s	1 ms	10 ms	100 ms
时间同步精度	1 μ s	10 μ s	100 μ s	10 ~ 100 ms
误码率	10 ⁻⁷ ~ 10 ⁻⁶	10 ⁻⁵ ~ 10 ⁻⁴	10 ⁻³	/
不可用	10 ⁻⁷ ~ 10 ⁻⁶	10 ⁻⁵ ~ 10 ⁻⁴	10 ⁻³	/
恢复时间	0	50 ms	5 s	50 s
	HV: 高压	EHV: 超高压	MV: 中压	

1.2 工业互联网

工业互联网网络是通过 5G、大数据、云计算、物联网、增强现实(AR)、工业机器人、人工智能等基础技术,构建起来的工业环境下人、机、物全面互联的关键基础设施^[4-5]。

在工业互联网,自动化控制是最基础的应用,其核心是闭环控制系统。典型的闭环控制过程周期低至毫秒级别,所以系统通信的时延需要达到毫秒级别甚至更低才能保证控制系统实现精准控制,同时要确保可靠性。工业互联网对实时性的需求根据应用场合可大致分为 3 个等级:工厂级的控制需求要求响应时间在 1 s 左右即可,而过程级控制一般需要响应时间在 10 ~ 100 ms 以内,实时性要求最高的是运动控制,要求响应时间在 1 ms 以下,甚至达到几十微秒的量级^[6]。

工业互联网企业内网相对成熟,主要通信技术包括以太网控制

自动化技术(EtherCAT)、时间敏感网络(TSN)等。EtherCAT保留了开放式系统互联(OSI)系统7层结构中的3层,即应用层(AL)、数据链路层(DL)和物理层(PL)。同时修改数据链路层协议,在实时通道内由实时介质访问控制(MAC)接管通信控制,避免报文冲突,简化数据处理,主要用于要求高同步高可靠性的运动控制领域。TSN采用标准以太网协议,可无缝集成现有以太网应用和标准的IT网络来提高易用性,同时带来了确定性时延和高可靠性,实现了工业互联网所需的远程诊断、可视化和修复功能。

工业互联网企业外网,当前主要利用既有的互联网或承载网搭建的企业专线,但在安全性、可靠性以及低时延低抖动等性能方面不能满足工业级的要求。工业互联网是连接人、机、物全面互连的基础设施,工业互联网的性能要求对网络技术提出了新的挑战。

1.3 行业需求小结

类似上述的智能电网和工业互联网,URLLC的垂直行业应用对网

络有严格的低时延、低抖动、低丢包率和高可靠性的承载需求。如表3所示,第三代合作伙伴技术规范(3GPP TS) 22.261标准^[7]定义了URLLC类业务各种场景下端到端时延、抖动、可靠性、带宽、流量密度等多个网络性能。

为了满足上述网络性能需求,URLLC协议层面通常采用类用户数据报协议(UDP)的机制,并且将OSI系统中的7层架构精简为4层或3层。对网络性能提出了更高、更确定的指标要求,包括毫秒级别的时延、微秒级别的抖动以及6个9的可靠性等。如何实现低时延高可靠的确定性网络,是5G承载网络技术面临的新挑战。

2 确定性网络的传送技术研究

当前实现确定性网络的传送技术有2类,一种是L1层时分复用(TDM)模式的管道技术,另一种是L2/L3层时延敏感分组管道技术。

2.1 L1层管道技术难以满足L2/L3灵活颗粒确定性业务需求

传统的L1层管道技术类似同

步数字体系(SDH)/光传送网(OTN),采用TDM复用机制来实现的。为了适应IP业务的低成本扁平化建网需求,近期在国际电信联盟电信标准分局(ITU-T)立项的G.mtn标准引入了以太网物理编码子层(PCS层)的L1层管道技术,PCS层的L1层管道采用FlexE Shim层的时隙作为业务映射的容器,最小时隙为5 Gbit/s。这些技术都基于固定容器来承载业务,只能满足容器本身点到点的确定性性能,受限于容器大小,管道无法满足分组业务灵活颗粒要求,尤其是小颗粒要求。

对于L1管道技术,业界也提出了更小颗粒管道的思路,比如支持比切片通道层(SCL)标准5G颗粒更小的1G颗粒管道,支持小于1G颗粒的Sub 1G OTN管道等。该技术虽然能增加L1管道技术对灵活颗粒L2/L3层业务的灵活性,但仍然无法解决L2/L3层业务确定性性能的根本问题。该技术方向存在固有的缺陷包括:

(1)L1 TDM技术的限制。L1管道采用TDM复用技术,无法实现带宽的统计复用,如果是每业务每L1管道,必然导致网络带宽碎片化和巨大带宽浪费,另外大量TDM电路导致的实现成本、功耗和运维成本代价较大。L1管道存在固定大小TDM容器,该容器技术上的限制无法满足灵活确定性业务的动态带宽调整需求,而调整带宽容易导致业务受损。

(2)层网络架构的限制。L1管道并不感知L2/L3业务转发性能,L2/L3业务的转发性能由L2/L3分

▼表3 5G的URLLC业务性能指标要求

场景	端到端时延/ms	抖动	可靠性	带宽/(Mbit/s)	流量密度
离散自动运动控制	1	1 μs	99.9999%	1~10	1 Tbit/(s·km ²)
离散自动化	10	100 μs	99.99%	10	1 Tbit/(s·km ²)
自动远程控制	50	20 ms	99.9999%	1~100	100 Gbit/(s·km ²)
自动监控	50	20 ms	99.9%	1	10 Gbit/(s·km ²)
配电-中压	25	25 ms	99.9%	10	10 Gbit/(s·km ²)
配电-高压	5	1 ms	99.9999%	10	100 Gbit/(s·km ²)
智能运输系统基础设施回程	10	20 ms	99.9999%	10	10 Gbit/(s·km ²)
触觉交互	0.5	/	99.999%	低	低
远程控制	5	/	99.999%	低~10	低

组层转发机制决定;因此,L1管道颗粒即使再小,仍然只能保证管道本身的性能,无法保证管道内业务的确定性,尤其是当管道内承载不同类型的分组业务或者并发的分组业务时L1管道并不能精确感知。

(3)L1管道颗粒与管道速率的限制。L1管道的颗粒就是管道的转发速率,L1管道的颗粒度越小,转发速率也越小,转发时延会增大,比如1G颗粒的SCL管道转发时延比标准5G颗粒要大5倍。

(4)TDM技术兼容性的限制。L1管道采用TDM复用,有固定大小容器结构。这会带来不同颗粒管道互通的兼容性问题,比如1G颗粒以太网切片管道和标准5G颗粒的以太网切片管道是无法对接互通的。

L1层管道技术是为L2/L3层业务提供灵活连接的L1管道,为基础物理网络重构提供灵活拓扑连接。L1层管道技术聚焦于基础网络拓扑路径的连接和管道本身性能,而并不感知和保证它所承载的L2/L3层分组业务的性能。

2.2 TSN/Detnet是L2/L3灵活颗粒业务确定性承载技术发展方向

电气和电子工程师协会(IEEE)802.1制定的一系列TSN^[8]标准,是以L2层以太网为基础,满足L2层时间敏感业务的新一代以太网标准。它除了满足传统音频和视频业务的确定性质量外,重点满足面向工业互联网等垂直行业应用的需求。Detnet^[9]是国际互联网任务组(IETF)成立的支持L3层确定性网络工作组,支持在L3层满足大范

围和大规模确定性业务的组网需求。Detnet网络的转发面技术当前以TSN技术为基础,因此,本文转发面以TSN技术为研究对象。

与L1层管道技术不同,L2层TSN技术基于以太网分组转发架构,为了满足L2/L3业务的确定性,针对每条L2/L3业务流维护每流的转发状态,从流量特征、流量监管、队列管理到业务调度等分组业务转发的各流程保证每业务转发性能,满足每业务灵活颗粒的要求。与L1层管道技术相比,TSN/Detnet技术具备如下优势:

(1)解决业务确定性的根本问题。TSN/Detnet技术基于分组转发技术,在L2/L3分组层保证业务性能,从根本上解决了每业务性能保证的问题。

(2)适应业务灵活带宽颗粒的要求。TSN/Detnet技术基于分组业务特征维护每业务转发状态,能适应业务灵活带宽颗粒的要求,提升了转发效率。

(3)满足不同类型业务和并发业务的转发要求。TSN/Detnet技术通过业务识别、队列和调度等技术支持不同类型的业务和并发业务的转发性能,满足多业务承载的性能要求。

3 城域网TSN确定性转发技术研究

3.1 TSN每业务流量监管(IEEE 802.1Qci/Qcr)

TSN技术为了保证每业务的转发性能,对每节点业务流量的输入

和输出都有监管的要求。首先业务的输入需要满足每业务流量监管(IEEE 802.1Qci)的要求,包括校验业务流的速率和包长,而出口为了不引入业务突发,也可以对每业务进行流量整形(IEEE 802.1Qcr)。

对于城域网,该要求与业务服务质量(QoS)(入口Policing和出口Shaping)要求类似;但是业务跳数和并发业务流数会大于TSN传统的局域网应用,同时也存在不同速率接口转换的影响问题。因此,TSN技术在城域网结合类似SCL的L1管道技术可以解决城域网L1拓扑和不同接口速率的问题,而且SCL标准5G颗粒度提供了较好的管道颗粒与转发速率的平衡。

3.2 TSN业务确定性调度技术(IEEE 802.1Qbv/Qch)

TSN核心技术在于业务的确定性调度,该技术借鉴了TDM技术的思路增强以太网分组调度技术支持业务确定性转发性能,目前已标准化的主要包括基于时间门调度(IEEE 802.1Qbv)和循环队列调度技术(IEEE 802.1Qch,即循环队列转换(CQF))。

时间门调度将传统分组调度机制增强为基于时间的调度,调度单位为时间,每个调度队列根据设定的时间控制该队列门选择开关来确定是否允许被调度,从而实现业务队列基于时间的调度。如图1所示,时间门调度表T0时间内队列0,2,3,5,6,7门选择开关打开,允许发送业务,而队列1和4则关闭,不允许发送业务。

循环队列调度通过收发循环队列来支持确定性转发时延,最简单的循环队列由1个发送队列和1个接收队列组成。在设定的循环时间(Cycle)内,接收队列只接收将要被调度的业务报文,而发送队列只负责发送该队列的报文;下一个Cycle周期2个队列循环轮换,即原接收队列转换为发送队列,将前一个周期接收的业务报文发送出去,而前一个周期的发送队列用于接收本周期的业务报文。该机制通过保证了每个周期接收的业务报文必须在下一个周期内发送出去,因此,每个节点转发业务的时延是确定的,即正常为1个Cycle。CQF转发示意图如图2所示。

为了保证业务端到端的转发时

延,时间门调度机制和CQF调度机制,需要部署时间同步用于同步每跳转发的调度时间。因此,该技术对于城域网应用有较大的限制。一是业务经过路径的所有节点均需要部署高精度时间同步;二是在设置业务调度时间时,需要精确计算链路时延并逐跳设置精确的调度时间,带来了管理和控制工作的复杂性;三是城域同步精度和多跳处理,需要相对局域网较大的调度时间片来容忍调度误差,这将会稍增大该机制在城域网应用的转发抖动。

(1)确定性业务集中管控。

TSN/Detnet业务为了保证每业务确定性服务质量,需要依赖集中管控技术,包括集中配置业务端到端资源预留避免拥塞丢包、配置业

务监管参数和调度参数等。

集中管控技术(SDN Controller/NMS)可以实现TSN/Detnet业务的管控要求。首先通过每业务资源预留实现端到端转发资源保证,避免业务拥塞出现丢包和影响转发时延;通过合理的资源预留配合每业务流量监管,可以避免业务的拥塞和丢包。其次,TSN增强确定性调度技术针对每业务配置相关的参数也需要集中计算和配置,比如CQF每业务关联的Cycle,如图3所示。

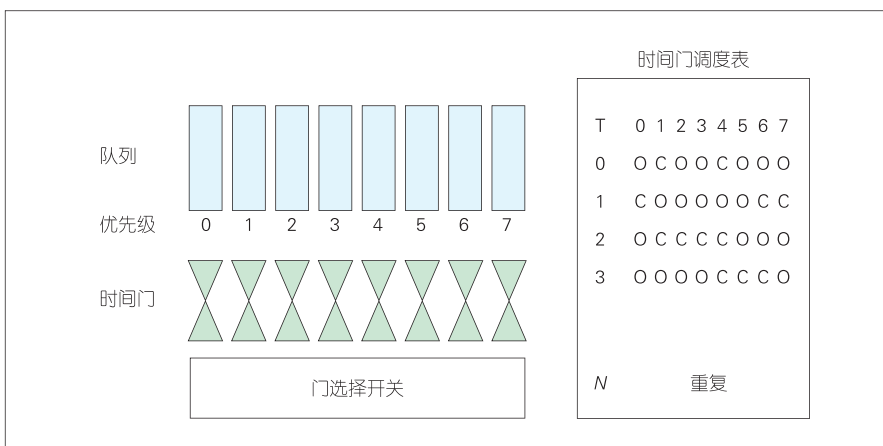
集中管控技术在城域网已经普遍应用,对于支持TSN/Detnet确定性业务,现有的集中管控技术只需增加对确定性业务的管控功能即可满足要求。

(2)TSN/Detnet技术在城域网的应用和局限性探讨。

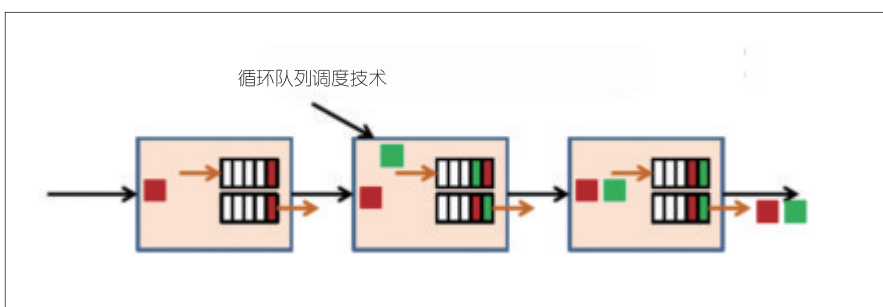
TSN技术标准IEEE在2018年底基本标准化,在局域网中逐步得到应用;Detnet技术IETF针对IP/MPLS封装和操作维护管理(OAM)部分正在进行标准化。但TSN/Detnet技术目前应用到城域网仍有局限性:

- TSN确定性调度目前基于时间进行,其端到端性能保证均要求部署时间同步;对网络也有要求,该要求在局域网中容易得到满足,但是对于城域网则受到一些因素的限制。不要求部署时间同步的确定性调度技术仍在研究中。

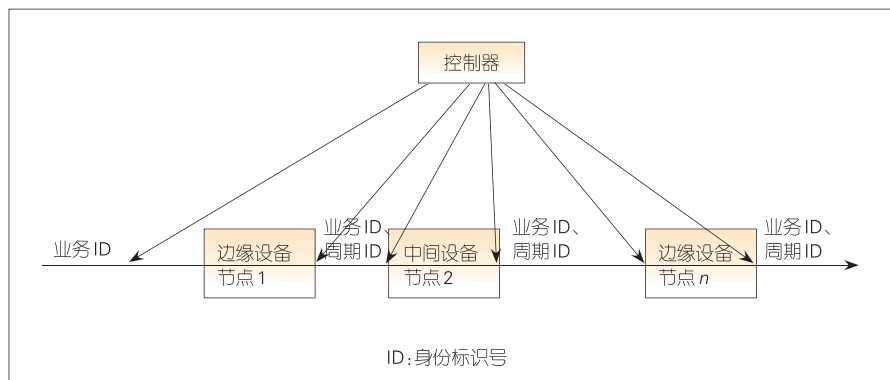
- TSN基于时间的调度在局域网中应用忽略链路时延,但是在城域网中链路时延基本不能忽略,这样给基于时间的调度机制增加了复杂性和额外的因素。



▲图1 时间敏感网络时间门选择调度示意图



▲图2 时间敏感网络2循环队列转换调度示意图



▲图3 时间敏感网络/确定性网络集中管控示意图

● TSN/Detnet 技术需要维护每业务的转发状态,存在业务支持的规模和扩展性问题,当前有确定性转发的业务数量比较少,这个问题尚不突出。

● TSN 基于时间的调度机制受到一些分组特性的影响,比如包长大小对调度时间的影响,多流汇聚对业务突发和调度的影响等,复杂场景的 TSN 业务性能有待检验。

4 确定性网络传送技术研究趋势

L1 层技术是传统采用 TDM 复用的硬隔离管道技术,以 SDN/OTN TDM 管道为典型代表;FlexE 技术^[10]则在以太网接口架构下引入了类 TDM 硬隔离通道,中国移动切片分组网 (SPN) SCL^[11]进一步在以太网分组转发架构下引入了类 TDM 硬隔离管道。但是传统 TDM 管道只能保证管道本身性能的确切性,无法满足管道内业务,尤其是分组业务性能的确切性。而 L2 层以太网和 L3 层 IP 技术已经成为当前主流的业务承载技术,L2/L3 层确定性承载技术逐步成为目前研究的热点。

TSN/Detnet 作为 L2/L3 层灵活

颗粒确定性业务承载技术,当前适合作为小规模确定性业务层承载技术应用到城域网中。该技术与管道层技术可以有机结合,满足面向 5G 灵活颗粒确定性业务承载需求和灵活切片的需求。在 SPN 网络中,管道层技术提供基于 5G 颗粒的网络灵活确定性连接,而 TSN/Detnet 技术提供灵活小颗粒确定性业务承载,是后续确定性业务承载技术的发展方向。

5 结束语

目前,如何实现低时延高可靠的确定性网络,仍然是 5G 承载网络技术面临的新挑战。而在确定性网络的关键技术中,TSN/Detnet 技术已经可以应用到城域网,满足业务对低时延和确定性服务质量的要求。尽管如此,TSN/Detnet 技术仍有进一步提升的空间,包括降低确定性转发对时间同步的要求、解决业务包长变化对确定性转发和业务性能的影响等,这些技术的突破可以降低 TSN/Detnet 技术应用的限制并进一步提升转发性能。

参考文献

[1] 师严,王光全,王海军. 面向 5G 的承载网需求及

关键技术[J]. 中兴通讯技术, 2018,24(1):17-20. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2018.01.004

- [2] IEC. Communication Networks and Systems for Power Utility Automation Part 90-12: Wide Area Network Engineering Guidelines: IEC TR 61850-90-12[S]. IEC, 2015
- [3] 唐瑜,王倩. 基于 IEC 61850-90-1 的广域电流差动保护信息模型与信息流分析[J]. 电气开关, 2013, 51(2): 56-59. DOI: 10.3969/j.issn.1004-289X.2013.02.017
- [4] 张恒升. 工业互联网——重构网络架构的起点[J]. 中兴通讯技术, 2018,23(2):45-46. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2017.02.010
- [5] LI G, XU R, LI Z B, et al. Design of Wireless Energy-Harvested UHF WSN Tag for Cellular IoT [J]. ZTE Communications, 2018, 16(1): 11-17. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5188.2018.01.003
- [6] 中华人民共和国工业和信息化部. 工业互联网发展行动计划(2018—2020)年[EB/OL]. (2018-06-07) [2019-09-09]. <http://www.mit.gov.cn/n1146295/n1652858/n1652930/n3757016/c6212005/content.html>
- [7] 3GPP. Service Requirements for the 5G System: 3GPP TS 22.261[S]. 2018
- [8] IEEE. IEEE 802.1 Time-Sensitive Networking Task Group [EB/OL]. [2019-09-09]. <http://www.ieee802.org/1/pages/tsn.html>
- [9] IETF. IETF Deterministic Networking (detnet) Working Group [EB/OL]. [2019-09-09]. <https://datatracker.ietf.org/wg/detnet/>
- [10] OIF FlexE. OIF-FLEXE-02.0-Flex Ethernet 2.0 Implementation Agreement. 2018
- [11] CCSA. 切片分组网 (SPN) 总体技术要: H-2018007963[S]. CCSA, 2019

作者简介



赵福川,中兴通讯股份有限公司承载网产品线规划总工;主要研究方向为 5G 承载、PTN 和 IPRAN 产品规划;承担国家重大专项 1 项;获得国家科技进步二等奖 2 项、省部级奖励 2 项等;申请专利 10 余项。



刘爱华,中兴通讯股份有限公司资深系统架构师;主要研究移动回传网系统架构和关键技术,包括 2G/3G/4G 和面向 5G 移动回传网传输体系和关键技术,并参加全球传送网相关标准讨论和制定工作;获得多项省市科技进步奖;提出 10 余项发明专利。



周华东,中兴通讯股份有限公司承载网方案总工;长期从事承载网研发以及产品规划等工作,主要研究方向为承载网建网方案以及 PTN 和 IPRAN 产品规划;申请发明专利 2 项。