

# 面向工业应用的5G增强技术

## 5G Enhancement Technology for Industrial Application

王立文,唐雄燕,黄蓉,张雪贝,杨文聪,王友祥(中国联通研究院,北京 100048)

Wang Liwen, Tang Xiongyan, Huang Rong, Zhang Xuebei, Yang Wencong, Wang Youxiang (China Unicom Research Institute, Beijing 100048, China)

### 摘要:

5G作为新一代的移动通信技术,具有超高带宽、超低时延、超大规模连接等特征,契合了工业数字化转型对无线网络的应用需求,但5G在工业领域的应用研究还在探索阶段。首先论述了典型工业应用和网络需求,然后深入分析了工业协议感知和网络控制、5G LAN、高可用技术等5G增强技术,并提出了当前存在的问题和后续研究方向。

### 关键词:

工业应用;5G LAN;高可用

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2022.03.001

文章编号:1007-3043(2022)03-0001-07

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Abstract:

As the new generation of mobile communication technology, 5G has the characteristics of ultra-high bandwidth, ultra-low delay and ultra-large scale connection, which meets the application requirements of wireless network in the industrial digital transformation. However, the application research of 5G in the industrial field is still in the exploratory stage. Firstly, it discusses the typical industrial applications and network requirements, and then analyzes 5G enhancement technologies such as industrial protocol perception and network control, 5G LAN, high availability technology, and puts forward the current problems and the future research directions.

### Keywords:

Industrial applications; 5G LAN; High availability

**引用格式:**王立文,唐雄燕,黄蓉,等.面向工业应用的5G增强技术[J].邮电设计技术,2022(3):1-7.

## 0 引言

工业作为经济持续发展的基础,利用信息和网络技术的进步使其向精密化、柔性化、网络化、智能化方向转变和发展尤为重要。5G作为新一代的移动通信技术,具有超高带宽、超低时延、超大规模连接等特征,契合了工业数字化转型对无线网络的应用需求。5G与工业互联网的广泛融合将推动工业自动化技术的进一步发展。

虽然这2年面向垂直行业场景的5G网络方案和应用案例层出不穷,但在工业领域的应用研究还在探

索阶段。工业场景对网络的需求具有其独特性,如工业终端设备通常按照LAN方式组网、关键数据对实时性要求高。为此,3GPP针对工业场景启动了5G LAN、工业协议感知和增强、高可用方案等5G增强技术的研究。

## 1 典型工业应用

随着工业自动化技术的发展,工业互联网在工业生产中逐渐普及。大带宽、低时延、高确定性的工业互联网可以降低数据和指令传输难度,提高端、边、云算力的协同能力,使工业应用的设计和部署更灵活。

如图1所示,工业互联网分为工厂外网络和工厂

收稿日期:2022-02-16

内网络2部分。工厂外网络通过广域网络连接工厂、公有云平台、上下游企业和用户、出厂产品,实现企业协同、用户服务、产品售后等。工厂内网络用于实现厂内办公、生产过程管理、机械设备控制等,又可分为工厂级、车间级和现场级。

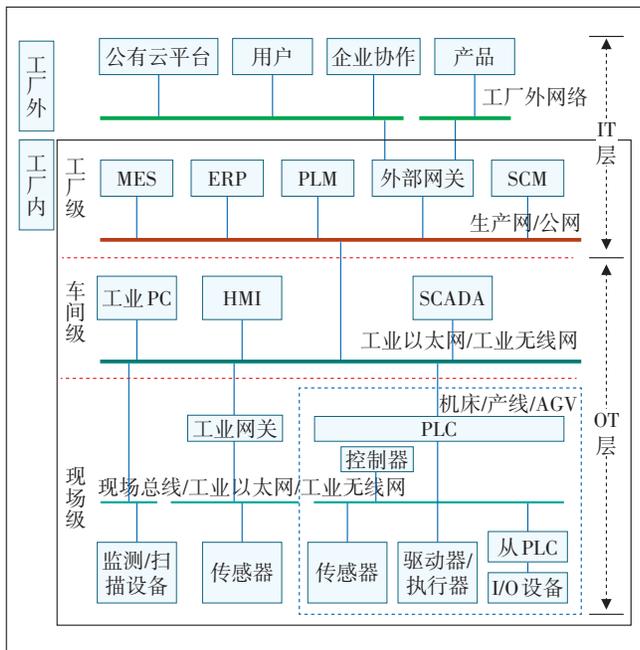


图1 工业互联网网络体系

a) 工厂级网络是IT网络,主要采用以太网和TCP/IP协议栈,用于办公和生产管理。

b) 车间级网络通常采用工业以太网和工业无线网络为状态监控、人机界面接口等系统提供通信网络。

c) 现场级网络处于工厂网络系统的最边缘,用于连接I/O设备、传感器、仪表和驱动装置等各类工业现场设备。在同一个车间内往往会存在多个独立的现场级网络系统,如1个工岛、产线、机床甚至1台AGV小车内可能都有1套独立的现场级网络系统。现场级网络多采用工业总线、工业以太网等,其规模大小不等,与工业现场场景相关。

用于各种工业现场场景的工业应用层出不穷,但其基础都离不开对现场设备的控制与对现场状态的采集。

### 1.1 PLC与工业控制

可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)早期只有逻辑控制的功能用来代替继电器,后来增加了时序控制、模拟控制、定时、计数、通信等

各类功能,已广泛应用于钢铁、化工、电力、制造等各个行业实现对各类设备和过程的自动化控制,其组成和组网如图2所示。

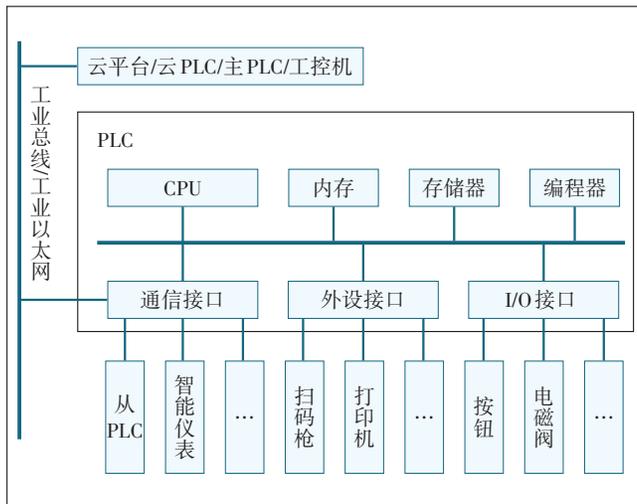


图2 PLC组网结构示意图

PLC的I/O接口是PLC与生产现场相联系的桥梁。PLC通过丰富的I/O接口与按钮、传感器、控制阀、指示灯等各种工业现场的器件相连,实现对工业现场各种信号的采集和控制。典型的有开关量控制和过程控制。

a) 开关量和逻辑控制:开关量和逻辑控制是工业中最普遍的场景之一,PLC按照逻辑条件通过I/O接口控制大量的开关量进行顺序动作实现对生产过程的控制。PLC具有编程能力,可通过软件实现不同方式的逻辑控制,既可用于单台设备的开关量控制,也可用于多机群控、自动化流水线等多设备多开关量的控制场景。

b) 过程控制:在工业生产过程中,除了只有通断2种状态的开关量之外,还有温度、压力、流量、液位、速度等许多连续变化的模拟量也需要被控制。PLC通过A/D、D/A转换I/O接口实现对模拟量变化过程的采集和控制。过程控制通常需要比例—积分—微分(proportion-integral-differential, PID)闭环控制功能,可以在PLC内编程实现,也可以在云平台/云化PLC中实现或者采用专用PID模块。PID控制功能的执行位置需综合工厂算力、现场级PLC设备的运算能力、业务控制系统的时间精度要求和通信能力等多种因素,选择合适的方案。

PLC通信接口主要用于通过各类通信方式与其他设备/系统实现互联互通,如通过工业以太网与云平台

进行北向通信接收操作指令;或者通过工业总线与驱动器/执行器、智能传感器进行南向通信实现动作控制、状态采集等。不同的工业应用设计方案对通信接口和网络传输要求也不同,如过程控制中PID功能可部署在云PLC,也可部署在现场从PLC,前者需要周期性传递采样和控制数据,对通信的带宽、实时性等要求远高于后者。对通信网络要求较高的典型应用是运动控制。

运动控制是工业控制领域的另一个重要分支,通过对电机的控制调节机械部件的位移、速度、加速度、转矩等物理量使其按照预期的轨迹和参数运动,广泛应用在包装、印刷、纺织、数控机床、机器人等工业场景,已成为现代先进制造技术的基础。典型的运动控制系统由上位机、PLC/运动控制器、驱动装置、电动机和传感器反馈检测装置和被控对象等组成,重点在于协调多个电机,完成指定的运动,如数控机床里面要协调XYZ轴电机、多关节机械臂的运动驱动。运动控制与常规自动控制的显著区别之一是高动态特性。如高速加工的运行速度为90 m/min时,伺服驱动电机之间1 ms的时间同步误差,将造成1.5 mm的运动同步误差。因此运动控制器与驱动器、反馈装置之间的数据交换接口需要有极高的精确性和实时性。

早期运动控制接口采用脉冲模拟量方式,虽然硬件成本低、标准开放,但是编程繁琐、布线要求高、距离受限,随着工厂自动化和信息化的发展,逐渐被工业总线、工业以太网等网络总线方式取代。运动控制系统网络化具有简化布线、信号双向传输、降低编程复杂度、易于实现设备诊断和系统集成等优点,但是也因为信号延迟、抖动等因素提高了采样周期等时、同步控制的实现难度。

### 1.2 工业数据采集

数据是工业互联网的基础,只有采集到当前物理世界的真实数据<sup>[7]</sup>,才能对这些数据进行分析处理,进而完成对生产过程的监控和闭环控制。如图3所示,数据采集系统通常包含数据采集、数据传输和数据分析处理3个阶段。

数据采集是通过传感器、智能仪表等收集生产过程中的真实物理状态信息,如电流、电压、温度、压力、开关状态、声音、图像等。

数据传输是将采集到的状态数据通过工业总线、工业以太网、TCP/IP等方式回传。当数据采集设备的通信接口与回传网络不匹配时(如工业现场回传网络

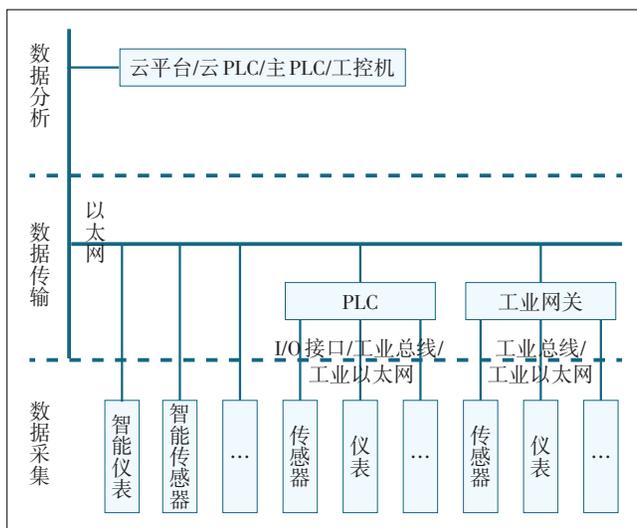


图3 数据采集系统组网示意图

采用工业以太网,但采集设备为RS232总线接口),还需通过PLC、工业网关等设备对数据进行转换和封装后才可回传到数据分析系统。

数据分析是对采集到的各种数据(如实时状态、加工工艺数据等)进行加工处理后,再以各种方式输出和展现,用以监控生产过程、指导技术人员优化工艺流程、与控制系统协同完成生产过程的闭环控制等。

### 1.3 AGV小车

自动导引车(Automated Guided Vehicle, AGV)小车是一种集导航、通信、外部感知和数据处理等智能技术于一体的可移动机器人,拥有快速、高效装卸和搬运物料的能力,具有高智能化、无人驾驶、行驶路径灵活等优点,是柔性智能物流设备的典型代表。

每辆AGV是一个独立个体,对于自身的运动控制,有着独立的运行装置和控制系统。在实际使用中,还需要使这些独立的AGV间相互配合有序完成生产任务,当多台AGV共同完成同一任务时可以编为一组。通过通信系统,调度控制器可与每台AGV小车点对点通信实现对AGV小车的状态数据采集和任务调度、编组管理,编组内AGV小车间可点对多点通信实现位置和状态信息广播,编组间可进行逻辑隔离避免干扰。因此通信系统除了满足QoS指标外,还需要具备灵活的逻辑隔离能力和隔离域内多播能力。

## 2 工业应用的网络需求

在工业场景中,不同工业应用的工业终端规模、业务功能、部署方案不同,对工业通信网络的网络指

标、组网方式、隔离要求等需求也不同。

## 2.1 网络指标需求

工业互联网中存在着控制数据、过程数据、告警数据、系统诊断数据、配置数据等多种业务数据,表1为一种工业通信数据分类模型,主要分为等时同步、周期/循环、事件告警、网络控制、诊断组态、Best Effort、音视频等。

表1 工业互联网系统中的通信数据模型

类型	数据帧特征			网络指标需求		
	周期性	报文大小	关键程度	数据传输保障	抖动容忍	丢包容忍
等时同步	100 μs~2 ms	固定,30~100 B	高	Deadline	0	0
周期/循环	2~20 ms	固定,50~100 B	高	Latency	≤Latency	1~4 帧
事件告警	-	变长,100~1 500 B	高	Latency	-	取决于应用
网络控制	50 ms~1 s	变长,50~500 B	高	Bandwidth	Yes	Yes
诊断组态	-	变长,500~1 500 B	中	Bandwidth	-	Yes
Best Effort	-	变长,30~1 500 B	低	None	-	Yes
音视频	采样/帧率	变长,1000~1 500 B	低	Latency	-	丢包降低质量

等时同步、周期/循环、网络控制为周期性数据,即连续周期性下发的控制数据和上传的状态数据,如运动控制场景中控制器发送给驱动器的位移数据、过程控制场景中周期性采样的压力数据等。通常周期性数据关键程度较高,具有相对严格的实时性要求,其报文长度通常固定且较短,带宽需求也比较固定。其中等时同步数据流常用于运动控制,如前文所述高速高精度场景对运动控制网络的传输时延要求非常高,控制数据需在截止时间之前送达,对时延抖动和丢包的容忍度为零。

事件告警、诊断组态、Best Effort为非周期性数据,产生非周期性数据的业务应用更复杂,报文特征和网络指标要求也不同,如影响生产安全的告警数据具有较严格的实时性要求,诊断组态数据关键程度为中,数据备份等其他关键程度较低但带宽需求较大的数据采用尽力而为的传输。

音视频数据的发送周期与其采样帧率相关,报文长度较大且可变,丢包主要影响传输质量,对丢包容忍度也相对较高。

表1总结了不同数据类型对网络传输指标的要

求,但实际应用中,网络指标要求与工业应用相关,可根据实际需求设计和优化网络。如运动控制场景中不同执行器和机械部件动力反应时间不同(注塑机械的液压轴所需的反应时间为250 μs~1 ms,印刷机械轴的反应时间约3 ms,封装加工机械反应时间为2~6 ms),实际需要的网络传输指标也不同。而当网络性能成为提升系统效率的瓶颈时,可以通过优化网络,降低工业应用的反应时间,提高产线的生产效率,减少材料浪费,达到降本增效的目的。

## 2.2 组网需求

工业通信网络除了满足业务数据传输的网络指标要求外,还需要具备易用、支持逻辑隔离、高可用等特性。

### 2.2.1 易用

易用指符合现有网络架构和工业终端设备的组网习惯。目前工业以太网一般基于层二的单播、组播、广播通信方式实现层三或者应用层通信。如某些工业终端设备需要通过层二广播报文完成设备发现。

### 2.2.2 隔离

工业现场的业务应用繁多,且随着产线的升级改造还有新业务不断加入,为了避免不同业务间的干扰,需要在网络上进行隔离;同一业务的不同子系统间也可能会需要灵活的网络隔离功能,如AGV小车编组间隔离。因此工业通信网络还需要具有灵活的逻辑隔离能力。

### 2.2.3 高可用

工业通信网络作为现代控制系统的核心组成部分,业务报文传输的可靠性直接影响控制系统的可靠性。在实际的生产使用中,业务应用正常运行的基础是网络服务的高可靠性。网络高可靠性一方面是通过优化QoS调度保障高优先级数据在通信链路资源发生竞争时可靠传输实现;另一方面是提高通信链路的可靠性,如提高通信设备本身的可靠性或者采用设备、端口、传输介质冗余的高可用方案。

环网拓扑是最简单、成本最低的链路冗余方案,为了避免环网状态下的以太网广播风暴,需要冗余管理协议通过阻塞网络端口的方式将物理上的环状拓扑配置为逻辑上所有设备节点之间仅存在唯一通信路径的树状拓扑,当设备节点或者传输介质发生故障时,冗余管理协议会计算新的逻辑拓扑,重新配置网络,恢复网络通信。从链路故障通信中断到冗余管理协议感知到故障状态后重新配置网络恢复通信的时

间为冗余恢复时间(也被称为故障倒换时间)。标准以太网中使用的STP、RSTP等冗余管理算法的秒级冗余恢复时间无法满足工业应用,工业以太网又推出了DLR、MRP、DRP等更快速冗余恢复技术。

链路冗余恢复方案在链路故障时会造成短暂的通信中断。IEC62439标准中定义了PRP、HSR等数据包粒度的多发选收协议,其原理是发送端发送数据时将数据帧复制并添加相关控制信息后经过冗余的多条通信链路分别发送,接收端经不同的通信链路接收到数据帧后根据控制信息只保留第1个接收到的数据帧,从而达到某一链路故障时不丢包的目的。

### 3 面向工业应用的5G增强技术

针对工业应用对网络的需求,3GPP启动了相关的5G增强技术的研究。

#### 3.1 工业协议感知和网络控制

目前工业网络中主要是工业现场总线和工业以太网,虽然同一种现场总线是具有互换性和互操作性,但不同的现场总线之间的兼容性较差,需要专用

设备转换,设备复杂、成本高。工业以太网是建立在IEEE802.3系列标准和TCP/IP标准之上,通过Ethernet/IP、Profinet、EtherCAT、Modbus TCP、PowerLink等应用层协议实现的分布式实时控制通信网络,适用于数据传输量大、传输速度要求较高的场合,已经逐渐超过现场总线的市场占比,成为工业自动化网络的主流。

现在主流的工业以太网协议主要是基于有线传输介质进行部署,而5G作为一种无线传输技术,虽然在高带宽、高可靠、低时延方面进行了优化和改进,但相较于有线介质依然存在易受干扰、时延高、抖动大等劣势。支持感知工业协议并针对关键数据优化QoS保障重要业务传输质量的5G增强技术是继5G+TSN之后又一提高5G网络质量的解决思路。

如图4所示,工业应用的控制端和工业终端之间通过5G网络互通,5G系统中增加感知协同功能模块,在UPF中增加探针感知工业协议,再针对工业数据的类型和重要程度,修改5G网络的QoS参数,实现针对工业应用的传输质量增强。

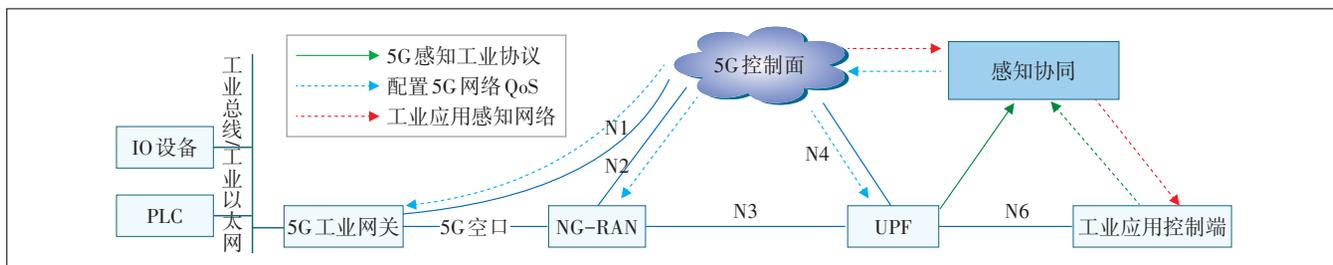


图4 5G网络工业协议感知增强系统示意图

该方案的优点是实现过程对工业应用透明,可以使5G网络在物理层替换原来的有线传输介质,不影响业务应用。未来还可以从工业应用中获取业务对网络的要求,向工业应用开放5G网络状态等,实现工业应用与5G网络的双向感知,有助于进一步优化业务体验。

#### 3.2 5G LAN

3GPP R15中,5G网络主要实现了基于IP类型会话的层三通信。为了适应工业场景中设备间层二通信的需求,需要在CPE和UPF两端架设隧道设备将工业层二协议报文封装在IP隧道报文中传输,额外引入隧道设备增加了组网复杂度和成本。

5G网络还支持ethernet类型的会话,可以支持用户面层二通信。图5为5G端到端系统中ethernet和IP类型会话的用户面协议栈对比,IP类型会话的用户面

数据只携带IP协议报文头,在UPF中基于IP地址进行路由转发;而ethernet类型会话的用户面数据则携带具有源MAC和目的MAC的以太帧报文头,在UPF中会基于MAC地址进行交换转发,从而实现用户面的端到端层二通信。

3GPP R16中启动了5G LAN项目,通过ethernet类型的5G LAN技术,可以提供直接支持层二通信的5G虚拟本地网,如图6所示,3GPP定义了3种转发方式:Local Switch转发、基于N19接口转发和基于N6接口转发,分别适用于同厂区内UE(共用同一锚点UPF)间转发、跨厂区UE(跨锚点UPF)间转发、UE与DN侧设备间转发等场景。

5G LAN将有互访功能的用户组划分到相同的逻辑域内,即VN组。通过VN组可以实现同组内的UE间互通和不同组UE间的逻辑隔离,以满足工业网络

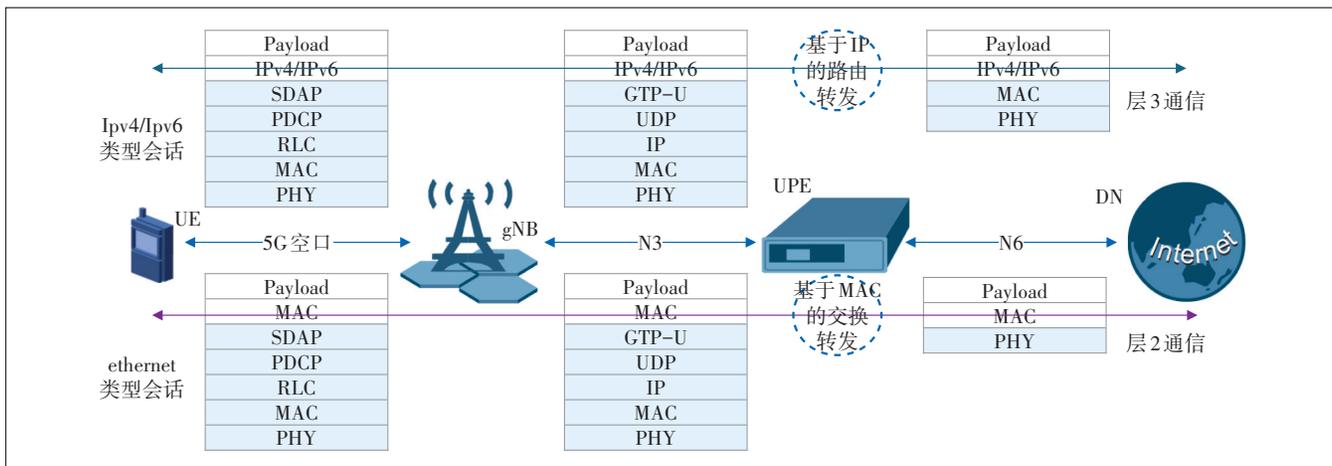


图5 5G端到端系统用户面协议栈

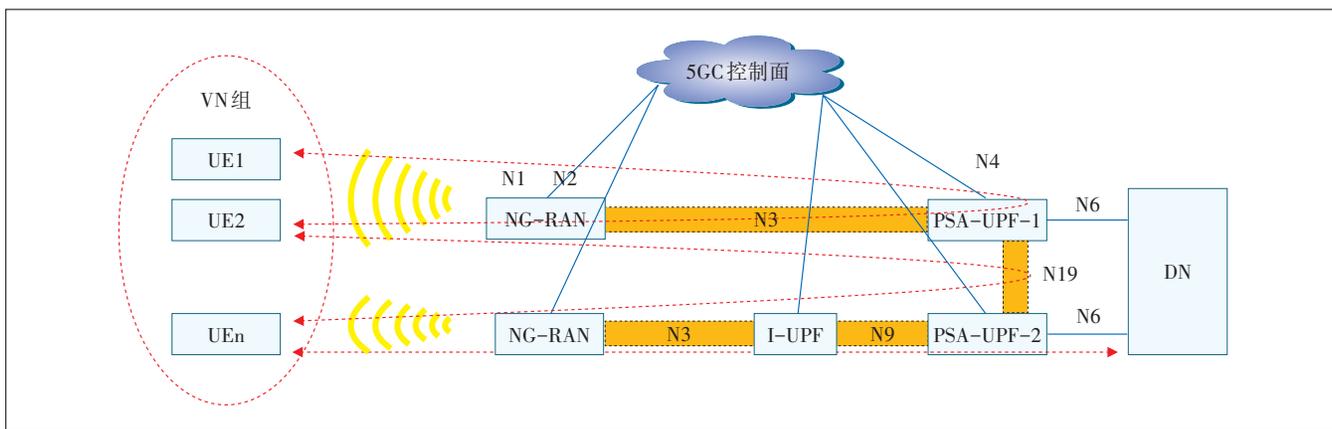


图6 5G LAN的3种转发方式

组网中对业务隔离的需求。在3GPP R16中, VN组仅支持与DNN+S-NSSAI (Single Network Slice Selection Assistance Information)的1:1映射关联, 用户本地网络内的细粒度隔离需求都要通过DNN和切片来配合实现VNG的隔离, 在实际使用中可以将VNG结合VLAN使用, 使网络的逻辑隔离功能更精细灵活。

5G LAN技术可以使5G网络支持层二的单播、多播通信和广播域隔离, 满足工业场景组网所需的易用性和业务隔离特性。

### 3.3 高可用技术

基于5G LAN的5G网络可以参考工业以太网, 采

用链路冗余和数据包多发选收等高可用方案。

图7为一种链路冗余方案的组网拓扑, 该方案中2组CPE、基站、UPF构成了2条5G通信链路, 在CPE和UPF两侧连接交换机。当CPE建立ethernet类型会话实现5G用户面端到端层二互通后, 2台工业交换机与2条5G链路组成环网拓扑, 需要使能冗余管理协议“破坏”以避免广播风暴。但现有的冗余管理协议应用在5G场景中时存在以下问题。

a) 5G设备的5G空口/GTP-U隧道等链路与传统有线介质不同, 系统对链路状态的感知机制不同, 参与计算的节点规模不同, 导致现有的冗余管理协议无

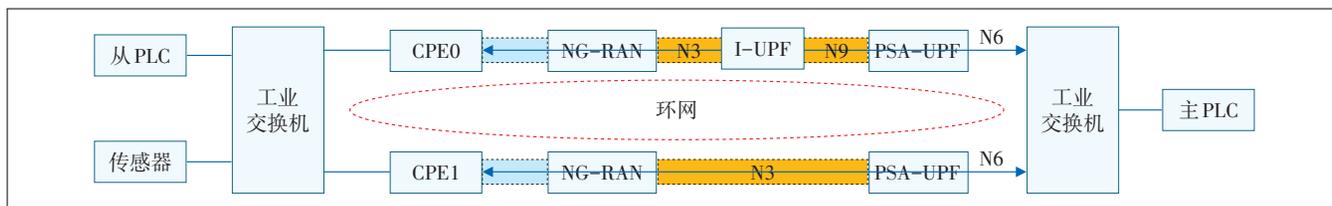


图7 一种5G链路冗余方案的组网拓扑

法直接应用在5G网络设备中。

b) 5G网络直接透传冗余管理协议的协议报文,当网络拓扑切换发生网络风暴时,5G网络会大量丢包,同时也会无差别地丢掉协议报文导致协议工作异常。目前如何有效“破坏”是5G LAN技术的研究热点之一。

链路冗余方案在实际运行中只有单链路工作,当5G空口受到突发干扰或者链路故障发生链路切换时,会发生数据包的丢包、重传、时延抖动等问题,导致PLC和I/O连接异常,影响工业应用的稳定。图8为一种

种基于5G LAN的双发选收方案,与图7类似,5G建立2条独立的用户面层二链路,然后CPE和UPF两侧的交换机使能PRP或者HSR协议,实现主PLC与从PLC等设备之间的数据包冗余传输,该机制也可以起到平滑时延抖动的效果。该方案虽然可以复用现有的PRP/HSR交换机设备,但需要2套5G网络设备,成本较高,可作为现阶段的过渡方案,将来可以将PRP、HSR等多发选收协议集成到UPF和CPE等5G设备,并与5G QoS等功能协同优化,形成多发选收能力内生的5G网络方案,如图9所示。

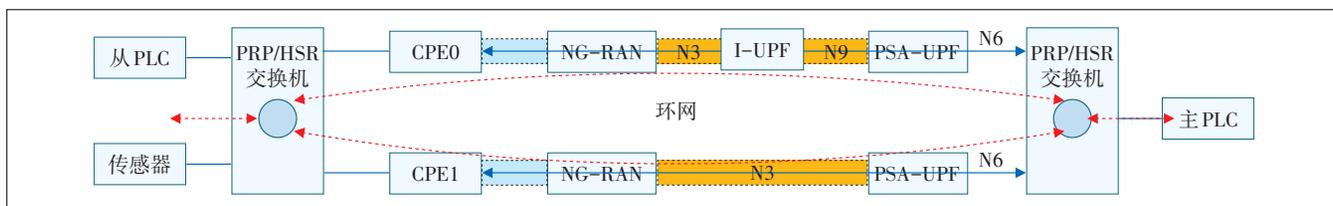


图8 一种5G双发选收方案的组网拓扑

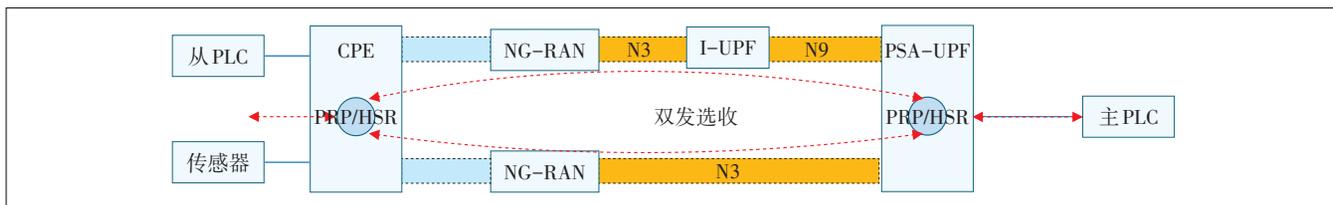


图9 内生双发选收能力的5G网络方案

## 4 结束语

5G具备无线连接、边缘计算、网络切片等技术优势,在工业无线通信、云化机器人、柔性生产等工业自动化领域具有很大的应用潜力。为了满足工业应用的网络需求,5G技术也在LAN组网、高可用和优化网络服务质量等方面不断地优化与改进,助力5G在工业领域普及应用。但是5G网络与工业应用双方供需主体之间的认知还在初级阶段,依然存在着面向工业应用的5G网络需求的输入不足,针对工业应用的5G网络解决方案研发不够等问题,还需要进一步加强面向工业应用的5G网络需求和解决方案研究,以推动5G在现代工业领域的应用和推广。

## 参考文献:

[1] 刘玉书,王文. 中国智能制造发展现状和未来挑战[J]. 人民论坛·学术前沿, 2021(23):64-77.  
[2] 王丹,孙滔,段晓东,等. 面向垂直行业的5G核心网关键技术演进分析[J]. 移动通信, 2020, 44(1):8-13.

[3] 张力方,程奥林,赵雪聪,等. 5G专网关键技术及设计部署方案研究[J]. 邮电设计技术, 2021(10):1-8.  
[4] 傅成龙,管立军,程远. 5G在边缘增强型工业控制网络的应用探索[J]. 邮电设计技术, 2021(7):36-39.  
[5] 黄倩,黄蓉,王友祥,等. 开源边缘计算平台研究分析[J]. 邮电设计技术, 2021(10):88-92.  
[6] 周侗. 运动控制网络确定性调度方法研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2012.  
[7] 李艳君,张小锋. 大数据时代的智能数据采集设备的设想[J]. 邮电设计技术, 2016(2):84-87.  
[8] 吴国荣. AGV群控技术研究[D]. 济南:济南大学, 2020.  
[9] 吴越,黄蓉,王友祥. TSN与移动网络前传架构融合研究[J]. 邮电设计技术, 2021(3):26-31.

## 作者简介:

王立文,博士,主要从事开源5G、用户面硬件加速、核心网相关技术研究工作;唐雄燕,中国联通研究院副院长、首席科学家,教授级高级工程师,主要研究方向为宽带通信、互联网/物联网、新一代网络等;黄蓉,毕业于北京邮电大学,高级工程师,博士,主要从事无线移动通信相关技术研究及标准化工作;张雪贝,毕业于北京邮电大学,主要从事5G/6G网络架构、面向行业的5G专网及边缘UPF关键技术和解决方案等研究工作;杨文聪,高级工程师,主要从事移动通信新技术研究工作;王友祥,高级工程师,博士,主要从事未来网络、通信云、开放网络新技术研究及试验工作。