

# 5G+工业互联网通信冗余 可靠性研究

## Research on Redundancy Reliability of 5G+ Industrial Communication Network

辛荣寰,程 远,傅成龙(中讯邮电咨询设计院有限公司,北京 100048)

Xin Ronghuan, Cheng Yuan, Fu Chenglong (China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd., Beijing 100048, China)

### 摘要:

5G是一种针对工业通信场景进行了专门优化设计的新兴移动通信技术,应用了一系列创新性技术,提升移动通信的低时延高可靠性能,以适应工业通信场景更高的网络要求。但在5G技术发展的不同阶段以及不同工业通信应用场景,网络冗余仍然是提高网络连接可靠性的普遍解决方案。为了满足5G在工业互联网中的应用,提出双路5G冗余主从网络、双路5G冗余并行网络、5G+工业以太网冗余主从网络和5G+工业以太网冗余并行网络4种网络冗余方案,并对其性能和可靠性进行分析,为5G在工业通信环境实际部署提供参考。根据生产实际,充分考虑5G和现有工业以太网的相对优势,选择最优的5G+工业以太网融合高可靠网络部署方案。

### Abstract:

5G communication is an emerging mobile communication technology specially optimized and designed for industrial communication scenarios. A series of innovative technologies are applied to improve the low-latency and high-reliability performance of wireless communication to meet the higher network requirements of industrial communication scenarios. Meanwhile, network redundancy is still a common solution to improve the reliability of networks in different stages of 5G technology development and different industrial communication application scenarios. In order to properly apply 5G in industrial communication networks, it proposes four redundant solutions, such as the dual 5G redundant master-slave network, the dual 5G redundant parallel network, the 5G + industrial Ethernet redundant master-slave networks and the 5G + industrial Ethernet redundant parallel networks. The performance and reliability of various technologies are compared to provide a reference for the practical deployment of 5G in the industrial communication scenarios. The relative advantages of 5G and existing industrial Ethernet should be fully considered according to the actual production requirement, and the optimal 5G + industrial Ethernet integrated high-reliability network deployment plan should be chosen.

### Keywords:

5G; Network redundancy; Industrial ethernet; Industrial automation; Low-latency and high-reliability

引用格式:辛荣寰,程远,傅成龙. 5G+工业互联网通信冗余可靠性研究[J]. 邮电设计技术,2021(7):1-5.

## 1 导论

工业通信网络已经历了三代变革,从现场总线,发展到工业有线以太网,再到现在的工业无线网络<sup>[1]</sup>。中国制造2025和工业4.0也明确规划了工业生产系统向数字化转型的方向。数字化转型要求人、产

### 关键词:

5G;网络冗余;工业以太网;工业自动化;低时延高可靠

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2021.07.001

文章编号:1007-3043(2021)07-0001-05

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):



品和机器更加紧密的连接在一起,以实现整个垂直产业链的互联互通,这个概念被称为工业互联网<sup>[2]</sup>。移动通信技术具备高移动性和广覆盖范围的优势,具有极大潜力应用到工业生产系统中。由3GPP主导的第5代移动通信技术(5G)<sup>[2]</sup>不仅能够提供更大的传输带宽,将理论峰值数据速率提升到3 Gbit/s(下行)和1.5 Gbit/s(上行),甚至更高<sup>[3]</sup>,同时针对工业通信场景和物联网场景进行了优化设计,提升通信系统时延、可

收稿日期:2021-06-16

靠性等性能,以支持更为先进的工业自动化转型升级,包括制造自动化和流程自动化。

然而,鉴于工业通信网络直接服务于工业生产,其对覆盖范围、连接能力、可靠性、能耗均有更高性能要求。同时,随着工业自动化程度的提升,更多的工业通信场景是时间敏感型网络(Time Sensitive Network, TSN)<sup>[4]</sup>,在传输关键性工业控制信号时,要求能做到实时传输,实时响应。虽然3GPP及5G设备制造商提出了一系列新技术来提升5G通信的低时延高可靠传输。但针对不同的工业应用场景及5G技术发展阶段,厂商应充分利用已有工业有线和无线的相对优势,将多种技术相结合,来满足工业通信网络更高的低时延高可靠传输要求。融合多种技术在4G时代已有所应用,未来更会成为一种趋势<sup>[5]</sup>。本文旨在提出几种基于5G技术的工业通信网络冗余方案设计,并进行相应的可靠性分析。

## 2 工业通信网及5G发展现状

### 2.1 工业互联网网络

AI1发布的《工业互联网网络连接白皮书》<sup>[2]</sup>指出,当前的工厂工业网络往往分为生产运营技术(OT)和经济信息技术(IT)网络,二者通过网关实现互联和安全隔离。工业互联网要求打破信息孤岛,将原来分散部署在各服务器的业务系统,如工业控制系统,集中部署到工厂内的数据中心。从而形成新的核心网络+分布式网络的架构(如图1所示)。其中,原有的嵌入式工业控制系统应与经济流程垂直互连,并与其他分布式业务网络平行并结合。这要求网络架构具有灵活性和可靠性。同时,工业物联网设备将在原有的工业控制系统的基础上大量增加,从100到1 000甚至到10 000。因此,这对网络连接的连接能力提出了更高的要求。

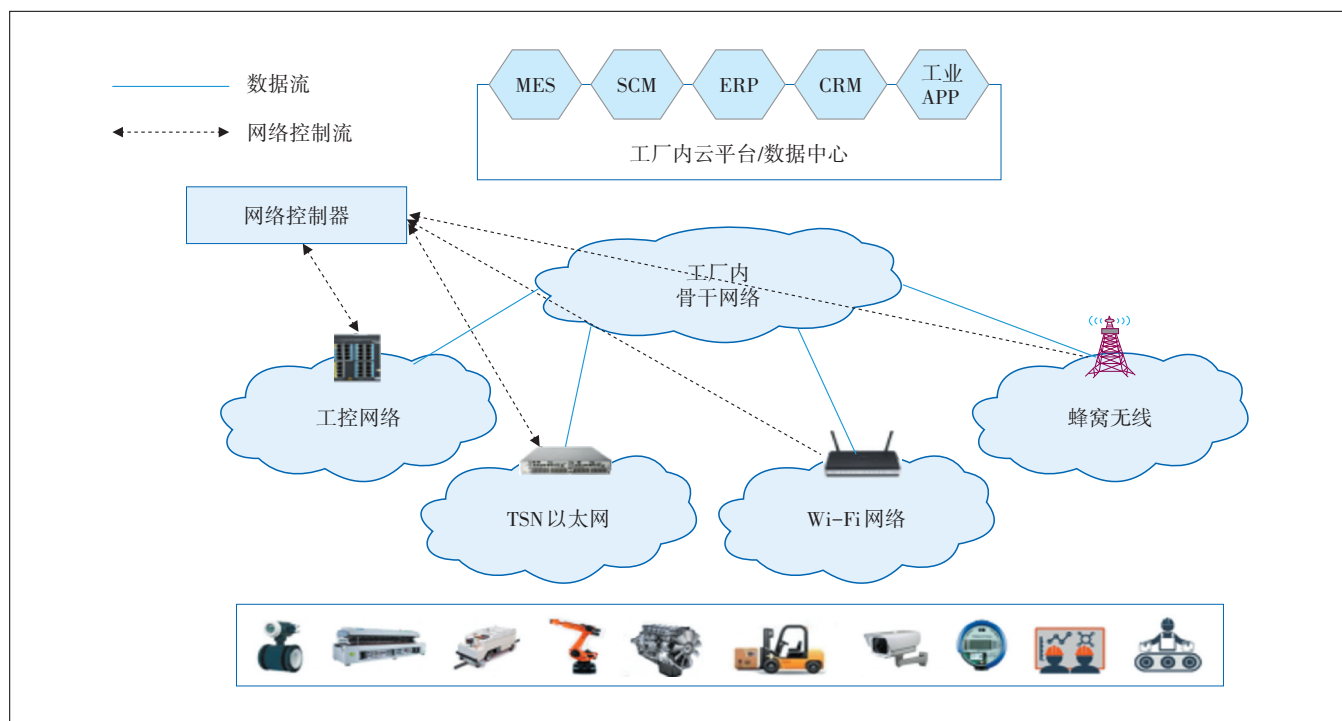


图1 工业互联网工厂内网络实施参考<sup>[2]</sup>

### 2.2 工业有线以太网与TSN

工业有线以太网是基于IEEE802.1以太网标准发展而来。工业有线以太网的应用层是成熟的现场总线协议,而以下的物理层、数据链路层等则遵循IEEE802.1以太网标准,支持基于IP的TCP协议或UDP协议进行数据传输<sup>[6]</sup>。为了满足工业通信网络对

实时性的要求,IEEE从2006年起陆续发布了时间敏感型网络(TSN)标准(IEEE802.1AS)<sup>[7]</sup>。TSN工作组制定了关于时序、同步、服务质量(QoS)、转发和排队机制以及可靠性的标准,以实现工业作业现场的实时通信。

### 2.3 5G移动通信

5G移动通信在延续上一代移动通信网络的增强移动宽带(eMBB)特性的基础上,新增两大全新特性:大规模机器类型通信(mMTC)和超可靠的低延迟通信(URLLC)<sup>[3]</sup>。国际电信联盟指出,5G的目标性能指标包括高达几Gbit/s的数据速率,每平方公里一百万个节点的广域覆盖和深度的室内穿透,端到端时延接近1 ms以及99.999%的数据包传输可靠性<sup>[8]</sup>。随着5G技术和产品的不断成熟,能够满足上述目标性能,为工业和制造业的广泛应用提供低时延高可靠连接。

3GPP在已发布的5G Release 15和Release 16版本中,提出了一系列的创新技术,来实现5G与TSN网络的融合,服务垂直行业,让工业生产更柔性化。首先,专门为特定工厂设计的5G专网正在逐步应用于工业企业。5G基站、接入网甚至将5G核心网下沉到用户本地,为工业企业提供更为专注的传输网络,在时延和可靠性上均有所保障。其次,多点协作传输(CoMP)技术在5G RAN中进一步深化<sup>[9]</sup>,可协调多个5G传输点为一个终端传输数据或联合接收一个终端的数据。CoMP的技术实质是空间分集,充分利用相邻小区的传输点为同一终端提供通信服务。CoMP可以有效提高5G的传输能力和提升5G传输的可靠性。为了发挥5G专网的最大效益,业内正在研究将2.4 GHz、5 GHz和6 GHz的未授权频谱也纳入到5G网络中来,即5G NR-U<sup>[10]</sup>。5G NR-U将运营商的NR授权频谱作为锚点来“聚合”非授权频段,以利用未授权频谱资源增强5G专网网络容量和性能。

### 3 5G与工业以太网融合及网络冗余

应用5G专网技术、CoMP空间分集技术和5G NR-U等先进技术,可以适应不同工业通信应用场景,有效地提高5G传输能力以及5G通信的可靠性,实现5G与工业以太网的融合。CoMP空间分集技术的应用使得终端设备与核心网络建立起双路或多路5G连接。同时,基于IEEE802.1标准发展而来的工业有线以太网已经过多年演化,其TSN网络标准已经能较好地支持工业实时通信。因此,当技术提供方引入以5G为基础的工业通信网络时,应充分利用5G无线网络和有线网络的相对优势,形成优势互补,打造一张先进的工业通信网络。

本文提出几种以5G通信为基础的冗余网络连接方案,并进行可靠性分析。网络冗余技术指的是对网络通信链路进行备份以确保网络的可靠性<sup>[11]</sup>,当通信

链路出现故障而不能正常工作时,备用链路代替主用链路继续完成相同的功能,从而减少损失<sup>[12]</sup>。网络连接的冗余技术是提高工业通信网络可靠性的普遍解决方案之一。

#### 3.1 双路5G冗余主从网络连接

5G网络中的CoMP空间分集技术和网络功能虚拟化功能使得终端设备能够与核心网络建立起双路甚至多路5G网络连接<sup>[13]</sup>。双路5G网络连接可以分别接入不同小区或者不同频率的5G无线网络,双路5G链路相互隔离,各自进行数据传输。整体网络连接场景如图2所示。同一个5G终端设备接入不同的5G RAN基站,传输信号最终在核心网汇聚。安装于边缘控制侧的无线网关设备可以根据算法定义主连接网络和从连接网络<sup>[14]</sup>。主连接网络在2个节点之间传输数据帧的同时,可以自发地传输诊断帧。接收节点按照诊断算法对诊断帧的接收情况进行解析。当主连接网络发生网络阻塞或数据信号丢失等情况时,诊断算法判定Fault,无线网关设备可以动态切换到从连接网络。但是,网络切换常常需要一定的处理时间。

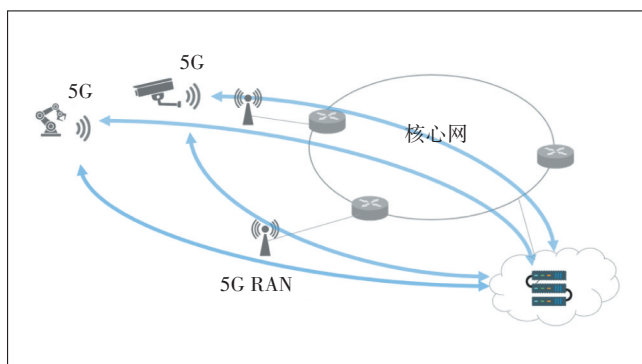


图2 双路5G冗余网络连接

这种方案充分利用了5G的新技术特性。双路5G网络连接仅需通过软件实现,无需额外的物理硬件成本,在经济性上有一定优势。然而,因为双路5G网络连接仅通过软件隔离,无线信号发射和接收等物理设备的故障仍可能造成工业通信网络的失效。

#### 3.2 双路5G冗余并行网络连接

与3.1中描述的相同,5G网络中的网络虚拟化功能建立起双路相互隔离的5G网络连接。采用双路5G冗余并行网络连接方案时,2路5G链路同时同步在2个节点间传输数据帧。为了能够区分2路5G链路,数据帧在发送前可以添加相同的序列号和不同的标识<sup>[14]</sup>。接收节点根据忽略算法对接收到的数据帧的

序列号和标识进行分析,优先接收到的具有相同序列号的数据帧会被转发到上一层,而后接收到的数据帧会被忽略。该方案无需增加物理接入设备,仅通过软件实现双路连接,节省了硬件成本。尽管双路5G冗余网络连接仍受制于物理设备的故障,双路5G冗余并行网络连接能够在一路5G网络连接发生故障后实现无时延切换。但是,并行网络连接使每1组数据报文需经过2次传输,这意味着双倍的网络流量在5G RAN中传输。双倍的流量对带宽的需求有所提升,在传输成本上有所增加。因此,并行冗余方案并不适合视频等大带宽业务传输的可靠性保障,更适合传输工业控制信号等工业通信场景。

### 3.3 5G+工业以太网冗余主从网络连接

5G+工业以太网方案将5G网络连接与现有的工业以太网连接有机结合,充分利用2种技术的比较优势,提高了网络连接的可靠性。5G的低时延高可靠特性能够完全满足工业控制的时间关键数据的传输需要,并且具有高移动性和灵活性。工业以太网的有线连接受到生产现场复杂环境影响相对较小,但生产设备必须固定或部署长线缆,缺乏灵活性。工厂可以根据实际需要选择5G无线网络或者工业有线以太网作为主连接网络,另一路网络作为备用连接网络。对原有具备工业以太网通信能力的设备进行改造时,通常选用5G网络作为备用连接网络,以最大程度避免对实际生产产生干扰。在部署新的大型工业设备时,5G网络通常被推荐作为主连接网络。目前,一些厂商生产的大型工业设备已经直接集成了5G接入能力,可以利用5G无线通信优势,进行应用扩展部署。

工业控制终端通过交换机与无线网关设备和工业以太网网关设备相连接。5G网络发生网络阻塞或数据丢失等情况时,交换机可以动态切换到工业以太网进行数据传输,从而保证可靠性。其冗余连接的场景如图3所示,终端设备同时具备接入5G RAN和工业以太网通信的能力,工业以太网和5G核心网互通,并通过核心网与工业企业服务器交互。

### 3.4 5G+工业以太网冗余并行网络连接

同样,5G+工业以太网冗余并行网络连接实现了2个节点间采用5G通信和工业以太网并行传输数据帧的高可靠网络连接场景。此类冗余连接方式可以降低单一网络连接对工业控制数据传输效率影响,并在故障发生后实现无时延切换。然而,不可忽略的是2种完全不同的网络连接技术在时延和传输速率上存

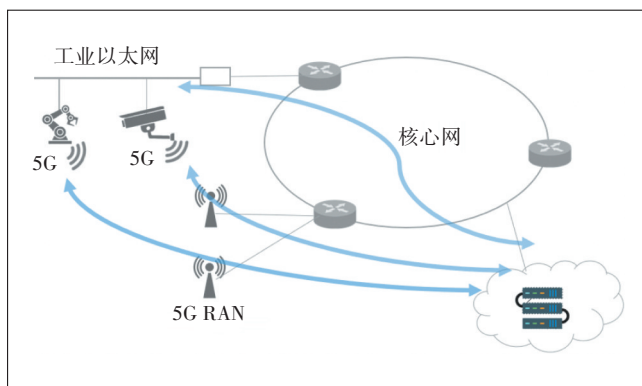


图3 5G+工业以太网冗余网络连接

在差异,这可能会导致接收节点接收到的数据帧产生混淆。IEC SC65委员会制定的IEC 62439标准提出了并行冗余协议(PRP),设计了并行冗余网络的机制和算法<sup>[15]</sup>。根据PRP协议的设计,接收节点侧常常需要配置汇聚网关对数据帧进行筛选和忽略,该汇聚网关需要具备较强算力和处理速率,以保证数据的高效分发。另外,与双路5G冗余并行网络连接场景相似,并行场景意味着双倍的流量,传输成本将有所增加,同时汇聚网关处理压力将会加大<sup>[16]</sup>。因此,数据量较小的传输信号(譬如工业控制信号)适用于冗余并行网络连接,其对网络带宽造成的影响较小。

## 4 可靠性分析比较

对第3章中描述的几种方法在各种基于5G的工业通信网络的冗余连接场景表现进行了定性比较。各种网络连接和冗余技术的性能和可靠性比较如表1所示。各种冗余技术在性能表现上各有差异,但是故障恢复时间是衡量冗余技术的关键指标<sup>[7]</sup>。

表1 各种网络连接和冗余技术的性能和可靠性比较

网络连接场景	传输流量	单路故障丢帧情况	单路故障业务恢复时间
工业以太网	数据帧	有	不确定
单路5G网络连接	数据帧	有	不确定
双路5G冗余主从网络	数据帧+诊断帧	有	几十毫秒至百毫秒
双路5G冗余并行网络	双倍数据帧	无	无时延
5G+工业以太网冗余主从网络	数据帧+诊断帧	有	几十毫秒至百毫秒
5G+工业以太网冗余并行网络	双倍数据帧	无	无时延

表1的比较内容可以为实际生产中的网络部署提供参考,不同的网络冗余组网方案各有优缺点,需要结合工业应用场景的现状与实际建设需求,进行合理选择。冗余网络连接的部署成本高于单路网络连接,但在大部分时延敏感及高可靠性要求的工业通信网络应用场景下是必要的<sup>[7]</sup>。随着双路5G网络连接的成熟,其虚拟化网络连接的形式能够显著降低部署的物理硬件成本,仅通过软件来实现网络冗余功能,在成本、部署、运维等方面的优势,有助于推动5G技术在工业通信网络中全面应用推广。网络服务提供商和工业企业需要根据生产的实际需求,选择合适的网络实施形式,在最大程度保障可靠性的基础上,避免网络资源的浪费。

## 5 结语

工业通信网络是一类专业性强、实时传输要求高的时间敏感型网络,对时延和可靠性的要求较高。5G通信以其移动性强、技术先进的优势,正在被广泛应用于建设工业通信网络。建设以5G为主的工业通信网络时,应充分考虑网络的可靠性要求,建立起双路甚至多路的5G+5G或5G+工业以太网的网络冗余方案。

不论是5G还是工业以太网,冗余网络连接场景的可靠性优于单一网络连接场景。5G+工业以太网的冗余网络方案适用于已有大型工业设备的改造场景,但是其网络部署成本较高。双路5G通信的冗余网络方案可以基于同一套物理硬件设备利用软件方式建立并隔离双路5G通信,具备经济性优势。冗余主从网络方案能够在主连接网络故障时实现快速切换,其故障恢复速度明显优于单一网络连接,同时对业务带宽不敏感,因此,比较适合视频传输等大带宽业务传输场景。相比之下,不论是双路5G冗余并行网络和5G+工业以太网冗余并行网络,冗余并行网络流量相比于实际业务数据量成倍增加,在传输成本上有所增加。因此,建议数据量不大但是可靠性要求较高的业务(譬如工业控制信号)使用冗余并行网络连接方案。

不同的网络冗余方案在性能、可靠性、建设成本和传输成本上存在差异,需要根据不同应用场景的实际需求,选择合适的方案,以实现效益最大化。

## 参考文献:

[1] 工业互联网产业联盟. 工业互联网网络连接白皮书(版本1.0)

- [EB/OL]. [2021-04-15]. <https://www.miit.gov.cn/n973401/n5993937/n5993968/c6488070/part6488075.pdf>.
- [2] GHOSH A, MAEDER A, BAKER M, et al. 5G evolution: a view on 5G cellular technology beyond 3GPP release 15 [J]. IEEE Access, 2019, 7: 127639-127651.
- [3] 杨彬祺. 5G毫米波大规模MIMO收发系统及其关键技术研究[D]. 南京:东南大学, 2019.
- [4] 宋华振. 时间敏感型网络技术综述[J]. 自动化仪表, 2020, 41(2): 1-9.
- [5] SAUTER T. The three generations of Field-Level networks—evolution and compatibility issues [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(11): 3585-3595.
- [6] 陈积明, 王智, 孙优贤. 工业以太网的研究现状及展望[J]. 化工自动化及仪表, 2001, 28(6): 1-4, 9.
- [7] 张亮. 时间敏感性网络中可靠性技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2018.
- [8] ITU. Minimum requirements related to technical performance for IMT2020 radio interface(s) [R]. [EB/OL]. [2021-04-15]. <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2410-2017>.
- [9] CUI Q M, WANG H, HU P X, et al. Evolution of limited feedback comp systems from 4g to 5g: comp features and limited feedback approaches [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2014, 9(3): 94-103.
- [10] NAIK G, PARK J M, ASHDOWN J, et al. Next generation Wi-Fi and 5g nru in the 6 ghz bands: opportunities and challenges [J]. IEEE Access, 2020(8): 153027-153056.
- [11] 章涵, 冯冬芹, 褚健. 网络冗余系统中精确时钟同步方法[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(8): 1643-1649.
- [12] KAMEN E W, TORAB P, COOPER K, et al. Design and analysis of packet switched networks for control systems [C]//Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control. IEEE, 1999.
- [13] TRIVISONNO R, GUERZONI R, VAISHNAVI I, et al. SDN-based 5g mobile networks: architecture, functions, procedures and backward compatibility [J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2015, 26(1): 82-92.
- [14] 姜立群, 徐皓冬, 宋岩, 等. 基于以太网的现场总线冗余技术研究 [C]//第6届全国信息获取与处理学术会议论文集.《仪器仪表学报》杂志社, 2008: 712-715.
- [15] 资瑶, 宋亚男, 徐荣华, 等. 基于并行冗余协议的工业以太网冗余实现方法[J]. 电脑编程技巧与维护, 2015(9): 30-31, 36.
- [16] 李俊刚, 张爱民, 宋小会, 等. 并行冗余协议在智能变电站网络的应用[J]. 南方电网技术, 2013, 7(4): 92-96.

### 作者简介:

辛荣寰, 中讯邮电咨询设计院创新业务部总经理, 教授级高级工程师, 中国联通5G创新应用联盟行业终端专家委员会委员, 中国通信学会高级会员, 长期从事通信网络咨询规划、设计工作, 目前主要从事5G行业创新发展工作; 程远, 毕业于浙江大学, 工程师, 主要从事智能制造解决方案咨询与设计工作; 傅成龙, 毕业于瑞典皇家理工大学, 助理工程师, 主要从事5G+工业产品研究与设计工作。