

面向工业制造的确定性网络技术发展研究

汪硕^{1,2}, 王佳森², 蔡磊³, 黄韬^{1,2}, 卢华³, 刘韵洁^{1,2}

(1. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876; 2. 紫金山实验室, 南京 211111;
3. 广东省新一代通信与网络创新研究院, 广州 510070)

摘要: 面向工业制造的确定性网络技术作为兼具理论创新性与技术实用性的前沿领域, 对推动新一代工业互联网技术创新、促进工业制造和高质量网络融合发展具有价值, 也为抢占确定性网络技术制高点、抓住新的经济增长点提供机遇。本文从制造企业、通信厂商两方面研判了面向工业制造的确定性网络技术发展需求, 详细梳理了国内外面向工业制造的确定性网络技术发展现状和趋势; 进一步凝练我国面向工业制造的确定性网络技术发展面临的挑战, 完成了面向工业制造的确定性网络技术发展阶段划分: 试点示范阶段、规模化复制阶段、自发创新驱动阶段。研究表明, 我国“确定性网络+工业制造”发展需要重点关注: 成立产业联盟促进生态发展, 加快形成公网专用的先发优势, 重视行业发展路径选取, 加大应用创新发展的资源保障, 加强基础理论和关键技术研究, 注重“产学研”一体化人才培养。

关键词: 工业制造; 工业互联网; 确定性网络; 时间敏感网络; 第五代移动通信; 服务质量

中图分类号: T-1 **文献标识码:** A

Development of Deterministic Networking Techniques for Industrial Manufacturing

Wang Shuo^{1,2}, Wang Jiasen², Cai Lei³, Huang Tao^{1,2}, Lu Hua³, Liu Yunjie^{1,2}

(1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China; 2. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China; 3. Guangdong Communications and Networks Institute, Guangzhou 510070, China)

Abstract: Deterministic networking for industrial manufacturing is a frontier technology with both theoretical innovativeness and technical practicability; it is significant for promoting technological innovations of the new-generation industrial Internet and for promoting the integrated development of industrial manufacturing and high-quality network, thereby providing opportunities for occupying the commanding height of network technology and seizing new economic growth points. This study investigates the development requirements for deterministic networking for industrial manufacturing from the aspects of manufacturing and communication enterprises, summarizes the development status and trends of the technology in detail, and further addresses development challenges. We classify the development stages of the technology into pilot demonstration, large-scale replication, and spontaneous innovation. Research reveals that the “deterministic network + industrial manufacturing” development in China needs to focus on the following aspects: establishing industry alliances to improve the industrial ecology, maximizing the existing public networks, carefully selecting industry development paths, increasing resource guarantee for application innovation, strengthening research on basic theories and key technologies, and training personnel through collaboration among industry, universities, and research institutes.

Keywords: industrial manufacturing; industrial Internet; deterministic network; time-sensitive network; the fifth-generation (5G) mobile communication; quality of service

收稿日期: 2021-01-18; **修回日期:** 2021-03-01

通讯作者: 蔡磊, 广东省新一代通信与网络创新研究院研究员, 研究方向为工业互联网; E-mail: cailei@gdnci.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“网络强国”(2020-ZD-14); 国家自然科学基金项目(61902033); 北京市自然科学基金项目(4204105)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

创新型国家建设提出了对网络强国的要求，工业互联网应与工业制造协同推进 [1]。工业制造的发展依赖于通信网络的升级 [2]，新一代网络技术赋能工业制造成为重要发展趋势 [3]。目前，以太网已大规模应用于工业网络（如工厂内网、工厂外网等），互联网协议网络接入的工业设备达到 1.2×10^{10} 台（截至 2020 年）[4]。

高效地使用、管理、维护、控制工业设备，需要以提供确定性服务质量的网络通信平台与技术作为支撑；工业制造网络化与智能化升级，也对网络提供确定性服务质量提出了要求。确定性服务质量具体包括：低时延（上限确定）、低抖动（上限确定）、低丢包率（上限确定）、高可靠（下限确定）、高带宽（下限确定）等。工业制造系统分为实时监控、机器视觉、远程控制、物资管理等多个子系统，均对确定性服务质量提出要求（见表 1）。典型的确定性网络有：灵活以太网（FlexE）、时间敏感网（TSN）、确定网（DetNet）、第五代移动通信（5G）确定性网络（5GDN）等 [5,6]。文献 [3] 分析了 5G 部署及其商用情况，认为 5G 将对工业互联网发展产生极大的促进作用。文献 [5] 总结了 TSN、DetNet、5G 等确定性网络技术的发展现状和趋势，着重研判相关技术在超低时延方面的特性。文献 [6] 阐述了 FlexE、TSN、DetNet、5G 的技术要点及发展趋势。

已有研究侧重于对确定性网络技术及其发展趋势的研判，本文则重点开展面向工业制造的确定性网络技术发展分析与体系论证，提出三阶段发展路径，以期为我国确定性网络的工业制造应用研究提供参考。

二、面向工业制造的确定性网络技术需求分析

发展面向工业制造的确定性网络技术有助于推动我国网络强国和制造强国建设。确定性网络技术与工业制造深度融合，赋能实体产业，推动工业制造系统和管理升级，同时能够引导服务商提供高质量、多样化的服务能力。因此，在需求、供给两方面都需要面向工业制造的高质量确定性网络 [7]。

（一）工业制造的升级需求

当前，工业制造的升级发展趋势已明确（见图 1），驱动了对确定性网络的新需求。20 世纪 80 年代以来，全球制造业布局发生了根本性变化，我国成为全球规模最大的制造业国家。随着通信、计算机、机械、电子、电气、自动化等领域的技术发展，全球制造业也呈现出新的发展动向。

为了更好地满足消费市场需求，工业制造由规模化生产向着定制化生产转变。居民生活水平的不断提升、消费需求的升级换代，促使制造业向着小众化、多元化、定制化发展。

为了进一步增强用户体验，工业制造从提供产品向着产品服务化、生态化转变。制造企业不再单一提供产品，而是转变为综合性服务供应商；工业领域不可避免地由单一产品提供向着一体化的产品生态与产品服务转型。

为了适应产品定制化及供应链的变化，工业制造从专业分工向着一体化生产转变。企业供应链呈现新的发展动向，制造业企业趋向于整合上下游的产业信息、发展为一体化生产企业。

为了提升生产能力和效率，工业制造由传统生产制造向着智能化、数字化生产模式转型。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，工厂内外开始布局新技术、新

表 1 部分工业制造自动化过程对确定网络服务质量的要求 [5]

| 应用 | 时延要求/ms | 抖动要求/ μm | 可靠性/% | 传输速率/Mbps |
|-----------|---------|---------------------|----------|-----------|
| 远程控制 | 5 | — | 99.999 | 10 |
| 离散自动运动控制 | 1 | 1 | 99.999 9 | 1~10 |
| 离散自动化 | 10 | 1000 | 99.99 | 10 |
| 过程自动化远程控制 | 50 | 20 000 | 99.999 9 | 1~100 |

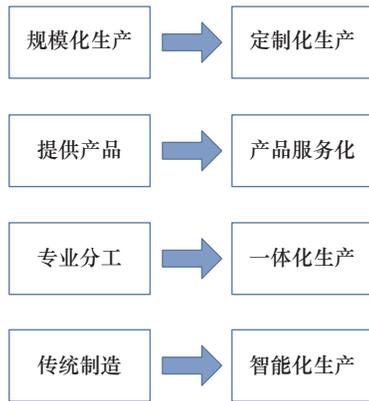


图1 工业制造升级发展趋势

平台。相应制造企业的工厂内网、工厂外网、数据互通等通信模块均对确定性网络提出了具体而多样化的要求 [6]。

（二）通信厂商的升级需求

通信厂商希望提高技术水平、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 [7]。

确定性网络是通信厂商技术更新迭代的方向。以太网缺乏实时传输质量保证机制、全局时钟与同步机制、带宽保留机制、数据包过滤机制，无法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，在聚合以太网层面实现面向工业制造的确定性网络服务，成为通信厂商重要的技术升级需求。

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，培育新的业务增长点。工业制造企业产值高、升级空间大，成为通信厂商积极争取的服务对象。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制造经营一线，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。确定性网络可以使得工业数据传输速率比传统以太网快数十倍到数百倍，严格控制端到端抖动、时延等关键指标，满足企业对实时自动化（如机器人操控、无人车调度等）的需求。网络切片等技术支持通信厂商提供差异化的服务，而高质量、差异化的服务也为通信厂商带来新的收益空间。

三、面向工业制造的确定性网络技术发展现状与趋势分析

（一）技术研究现状

工业领域现有的几个以太网扩展版，如过程现场网络（PROFINET）、以太网控制自动化技术（EthernetCAT）、时间触发以太网（TTEthernet）、严格实时路由架构（HaRTES）等，可以部分满足工业制造的需求，但因缺乏带宽预留、时钟同步、数据包优先级过滤等机制，不能完全满足工业制造过程的严格实时、确定性服务质量要求 [6]。确定性网络技术使得互联网协议网络在控制端到端工业平台和设备方面从“尽力而为”转向“准时准确”，促使 TNS、5GDN 等确定性网络技术成为工业制造升级的热门选择。

为了支持工业制造过程中的确定性通信，电子电气工程师学会（IEEE）制定了 TSN 技术标准，互联网工程任务组（IETF）提出了 DetNet 技术标准，光联网论坛（OIF）定义了 FlexE 技术 [6]。5GDN 指利用 5G 资源构建可预期、可规划、可验证、具有确定性能力的移动专网，提供差异化的业务体验 [7,8]，由此打造更加灵活、更为高效、部署简便的工业制造确定性网络。整体来看，TSN、5GDN 已经开始工业制造方面的商业应用，而 DetNet、FlexE 还需要继续发展以适应工业制造的需求。

FlexE 技术主要用于 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。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 [6]。

TSN 为局域网的确定性服务质量提供保障，可在同一局域网中发送周期、非周期数据流；包含了一系列技术标准，如时钟同步、流预留、循环排队等，确保物理层、链路层的确定时延与抖动 [5]。

5G 用于提供无线接入服务，涉及的主要技术或功能有：增强移动宽带、超可靠低延迟通信、大规模机器通信。例如，超可靠低延迟通信技术依赖于 5G 的低延迟、时间同步、资源管理、可靠性等特性，5GDN 据此保证确定性低时延低抖动网络服务质量。

DetNet 用于在广域网中提供确定性网络服务，

目前仅有部分技术标准，如可扩展确定性传输以及循环排队转发等，确保网络层的确定时延和抖动[5]。其他相关技术标准仍在制定过程中。

确定性网络在制造企业中的应用场景可细分为机器视觉、实时监控、远程控制、物资管理、辅助作业、海量连接、生命周期管理等（见图2），国内已有大型制造企业的应用案例[7]。

除了企业应用外，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第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 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）电动机同步控制实验，验证了基于确定性网络的超远距离实时工业制造控制的可能性[9]。

（二）技术发展趋势

TSN 在链路层通过时分复用调度技术为高优先级流量提供了确定性传输服务，保证低时延低抖动；但可能加大低优先级流量的延迟，可考虑利用统计复用为时延界限提供统计保证[6]。TSN 的集中式部署或分布式部署、连接多个封闭时间敏感网等技术，是需要进一步研究的课题。新的标准定义、技术实现、实验测试是 TSN 与 5G 应用结合的研究内容。

相较于 TSN 的流量控制操作，DetNet 的流量控制操作将面临规模更大、传输距离更远、调度复杂性更高等挑战。TSN 与 5G 均已商用，但 DetNet 的技术标准仍在制定阶段，因而广域确定性网络的服务需要更多研究，如数据流的控制转发技术、服务质量保证技术等。

基于 FlexE 的网络切片技术，运营商在 1 个硬

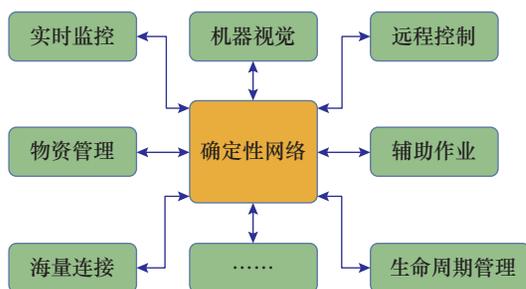


图2 确定性网络技术在工业制造中的应用场景

件基础设施中可切分出多个保证服务质量、业务物理隔离的虚拟网络，相应 OAM 功能可满足网络维护需求[6]。借助 FlexE 技术提供灵活的带宽和定制化的服务质量，提高网络利用率，实现不同工业制造过程的多样化服务体系成为重要发展趋势。

5G 已经商用，与局域网 TSN、广域网 DetNet 融合，将进一步增强面向工业制造的服务能力与质量。5G 与 FlexE 结合，为 5GDN 提供差异化服务能力。降低网络建设成本、拓宽工业制造方面的应用规模，这对 5G 资费体系设计提出了新增研究需求。

此外，确定性网络技术的重要发展趋势有[6]：稳妥处理网络架构创新与逐步部署的关系，设计故障处理、容错机制等安全保护机制，促进各层技术间的融合等。大型“确定性网络+工业制造”实验平台的建造与开放也是一个重要发展趋势，CENI 与工业制造企业的制造过程集成也可以进一步深化。

四、面向工业制造的确定性网络面临的挑战

（一）制造企业信息化、数字化水平存在短板

确定性网络在工业制造领域实现全面部署，前提之一是需要制造企业或工厂的数字化、信息化水平达到一定程度，然而我国不少制造企业（包括规模以上企业）依然存在明显不足。根据两化融合服务联盟针对参评的 15 万家工业企业的统计数据[7]，截至 2019 年第二季度，生产设备数字化率、关键工序数控化率分别为 47%、49.2%，而智能制造就绪率仅为 7.6%；这其中的参评企业绝大多数为规模以上企业。工业互联网产业联盟针对我国工业企业调查数据显示[7]，企业面临着数据存量不大、管理手段落后的突出问题，如 66% 的企业存储数据总量不到 20 TB（不及一个省级电信运营商日增数据量的 1/10），51% 的企业仍在用文档等相对初级的方式进行数据管理。

工业企业信息化、数字化达到一定程度后，才能顺利实施“确定性网络+工业制造”。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工业制造应用，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制造企业建设与发展需求的同时，应努

力实现确定性网络在工业企业中的落地部署以及与其他信息化、数字化建设的同步。

（二）确定性网络与工业制造融合面临壁垒

确定性网络与工业制造的融合发展尚处初级阶段，仍需深化应用探索。与消费互联网不同，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，存在一定程度的跨界鸿沟；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、精准支持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。运营商通常选择典型行业与场景，结合自身确定性网络的建设节奏，以试点的方式实施逐步部署。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；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。

（三）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，制约了工业制造赋能作用的体现。例如对于 5GDN，技术成熟度方面的问题剖析如下 [7]。①在可靠性方面，由于无线网络特有的突发环境变化引起的干扰和衰落，5G 可靠性还不能稳定地维持在 99.999 9% 以上的目标；工业生产对时延、可靠性的敏感度很高，需通过无线网络切片来灵活自主地控制帧结构、编码策略，进而达到提高稳定性的要求；还可考虑无线网络底层编码方式面向应用进行个性化定制等策略。②在网络通信容量和效率方面还处于试点阶段，5G 作为未来工厂的“工业总线”，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。③在终端支持方面，5G 工业模组的技术成熟度、成本等因素将直接影响 5GDN 在工业制造企业中的应用，预计随着相关

厂商数量的增加，产品成熟度提升、成本下降。

尽管已经发布了很多确定性网络方面的标准和技术规范，但仍然缺乏规模化工业制造的测试场景，需要更多的应用落地以增强产业和消费者市场的信心 [5]；还应重视和增加确定性网络用于工业制造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。

（四）确定性网络服务成本与人才培育问题

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，即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论证。

“确定性网络+工业制造”作为典型的跨行业重大应用，成熟人才紧缺；具有潜力的人员分布在高校、科研机构、企业中，涉及专业有通信、计算机、自动化、机械、电子、电气等；专业人才缺失制约了行业发展水平。高校与企业应积极对接相关培养策略，高校或研究机构可组建新的专业或院系，深化“产学研”合作，加强面向“确定性网络+工业制造”产业的人才培养与使用，尽快形成一批复合型、实用型专业技术人才队伍。

五、面向工业制造的确定性网络技术发展阶段划分

面向工业制造的确定性网络以建设大规模、可提供确定性服务质量的信息基础设施为目标，为工业制造升级提供实时、高质量、高可靠的网络服务，全面赋能工业制造。面向工业制造的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+工业制造”融合发展可划分为 3 个阶段。

（一）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工业制造企业需求方合作，针对工业制造的重点场景开展示范试点。工业制造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。通过确定性网络在工业制造场景的成功试点，使“确定性网络+工业制造”从技术论证转化为现实应用，凸显价值创造并形成示范效应。

在技术可行性方面，TSN、独立组网 5G 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可有效支撑工业制造业务需求。

在商业可行性方面，因工业制造企业对新型信息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，大部分工业制造企业采取观望态度。为此，可针对性选取那些具有制造效率提升潜力大、改造便利的工业制造场景，优先实施试点应用。

（二）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+工业制造”应用规模化落地，确定性网络赋能工业制造的效果显现。工业制造企业生产制造效率明显提升，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基本具备。

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。确定性网络体系基本建成，形成以 FlexE 为承载网、以 TSN 和 5G 为接入网的工业互联网服务架构，能够根据智能制造场景切换服务质量，具备全天候、多场景、多维度的园区类制造企业服务能力，同时保证企业私有数据的安全性、确定性网络服务质量的稳定性。

在商业可行性方面，基于第一阶段试点示范，供给方、需求方经过多场景、多阶段的应用磨合，形成完善的合作模式，涵盖行业标准、方案落地、商业模式等。定制化网络切片服务模式成熟，制造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，兼顾生产效率提升和生产成本控制；工业模组技术成熟、成本降低，规模化复制的边际成本稳步降低，得到大部分工业制造企业的积极使用，如升级生产过程、提升产品良率、提供定制化工业产品等。

（三）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，成为驱动制造业数字化转型的核心基础设施之一。工业制造行业发展也进入了新的阶段，行业自发创新驱动的积极性很高。确定性网络在工业制造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+工业制造”全面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场景的标配，典型特征是各类工业制造企业需求方群体成为主要推动力量，自发地进行工业互联网各细分环节创新；在创新过程中对确定性网络产生需求，驱动确定性网络在工业场景更大范围中的应用。

在技术可行性方面，确定性网络体系趋于完善，形成以 DetNet 为核心网、以 FlexE 为承载网、以 TSN 和 5G 为接入网的体系架构；局域、广域、有线、无线等形式的确 定性网络深度集成、有机融合，服务范围拓展至大规模、超大规模的工业制造园区；支持各类场景下的确定性网络功能直接应用，同时为工业制造企业提供接口，便于制造企业参与定制化确定性网络的各细分环节，更好满足企业的差异化使用需求。

在商业可行性方面，大部分工业制造企业的成本进一步得到控制、产品良率大幅提升，能够获取更高的产品附加值；快速响应用户定制产品的需求，借助确定性网络完成设计和生产；具有主动参与确定性网络细分环节改进的意愿、能力、渠道，进一步寻求多样化的业务增长点。

六、对策建议

（一）成立产业联盟促进生态发展

面向工业制造的确定性网络，其深度发展、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，推动产品应用的落地。

各产业联盟应加强合作、协同发展，打造行业内信息一体化平台，实施一系列创新发展示范案例。相关发展重点有：①资源共享，产业联盟的首要任务是消除信息不对称、资源不平均，构建一体化的资源共享平台，对联盟成员的敏感资源可以采用授权使用的方式加以管理；②联合研发，当资源具备共享条件的时候，进一步推进产业链上下游各方的研发过程联合化，提升研发能力和效率；③项目落地，产业联盟的最重要任务是推进“确定性网络+工业制造”的应用项目落地，帮助工业制造企业获得高附加价值，同时提升通信服务商的服务能力；④融合发展，产业联盟最终将促进产业链上下游高度融合、互惠互通、互利共赢，同时产业联盟尊重成员的差异性和多样性。

（二）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，尤其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，在5G公网上实现针对工业制造企业的确定性网络服务，加快形成更多“确定性网络+工业制造”的示范应用。例如，基于5G打造工业级TSN并应用于智能制造场景，基于CENI公网打造供企业和研究机构测试验证远程工业制造技术的专用网络。

在以公网专用提供确定性网络服务方面，建议关注以下方面：①定制服务，提供的确定性网络服务需要考虑到工业制造企业的实际需求，多阶段、多维度、多场景地提供定制化专网服务；②示范项目，形成公网专用的典型成功案例，为众多工业企业升级提供可参考的样板；③应用落地，公网专用以落地实际应用、产生工业价值为根本目标；④综合集成，实现公网专用的过程中不拘泥于单一的确定性网络技术，考虑综合集成多种技术（如网络切片、边缘计算等）来升级工业制造系统。

（三）重视行业发展路径选取

“确定性网络+工业制造”尚处于初期发展阶段，宜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：①行业合适性，工业制造涉及众多细分行业，部分对确定性服务质量要求较高的细分行业（如生

产过程自动化）可优先进行部署；②场景合适性，确定性网络宜选择技术、标准相对成熟，与运营商的联接管道能力强相关的场景，如工业制造中的机器视觉场景；③区域合适性，鉴于目前提供确定性网络服务的基础网络覆盖尚不全面，可结合移动边缘计算对确定性网络进行区域化的独立部署，电气设备工业制造园区、港口码头船舶制造基地等独立性较强的区域可优先部署。

（四）加大应用创新发展的资源保障

加速商业模式创新，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，引导社会资本加大对“确定性网络+工业制造”行业的投入。鼓励各类银行信贷、投资基金向“确定性网络+工业制造”方向的倾斜力度，支持工业制造企业开展“确定性网络+工业制造”产品研发和应用落地，提升制造企业生产效率、产品质量，降低生产成本。

（五）加强基础理论和关键技术研究

基础理论研究、关键技术突破是“确定性网络+工业制造”发展的重要基础。建议加强以下理论和技术方向的研究：智能制造原理、自动控制原理、网络设计原理、确定性传输原理、人工智能原理、大规模转发机制、确定性调度机制、灵活切片技术、确定性传输设备及器件研制等。在国家级科技投入层面，建议合理加大对“确定性网络+工业制造”相关研究的支持力度，增设必要的专项研究课题，促进跨行业技术与应用融合的科技成果发展，筑牢行业发展亟需的科技支撑体系。

（六）注重“产学研”一体化人才培养

建议主管部门牵头，联合高校、科研机构、企事业单位，论证和构建体现行业需求特色的“产学研”一体化人才培养机制。优化教育资源配置，精准培养复合型人才，为“确定性网络+工业制造”的扎实发展提供智力支撑。针对“确定性网络+工业制造”成熟人才紧缺、潜在人才分散的实际情况，建议设立“确定性网络+工业制造”交叉学科研究中心，同步开展人才培养、研究攻关，兼顾研究成果顺畅转化。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院. 国务院关于深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见 [EB/OL]. (2017-11-27) [2020-12-15]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-11/27/content_5242582.htm.
State Council of the People's Republic of China. State Council guidance on deepening the development of industrial Internet in the “Internet + advanced manufacturing industry” [R]. [EB/OL]. (2017-11-27)[2020-12-15]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-11/27/content_5242582.htm.
- [2] “新一代人工智能引领下的智能制造研究”课题组. 中国智能制造发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2018, 20(4): 1–8.
The Research Group for *Research on Intelligent Manufacturing Development Strategy*. Research on intelligent manufacturing development strategy in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2018, 20(4): 1–8.
- [3] 张云勇. 5G将全面使能工业互联网 [J]. 电信科学, 2019, 35(1): 7–14.
Zhang Y Y. 5G will fully enable the industrial Internet [J]. *Telecommunications Science*, 2019, 35(1): 7–14.
- [4] Cisco Systems. Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2015—2020 [EB/OL]. (2016-02-03) [2020-12-15]. https://www.cisco.com/c/dam/m/en_in/innovation/enterprise/assets/mobile-white-paper-c11-520862.pdf.
- [5] Nasrallah A, Thyagaturu A S, Alharbi Z, et al. Ultra-low latency (ULL) networks: The IEEE TSN and IETF DetNet standards and related 5G ULL research [J]. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 2019, 21(1): 88–145.
- [6] 黄韬, 汪硕, 黄玉栋, 等. 确定性网络研究综述 [J]. 通信学报, 2019, 40(6): 160–176.
Huang T, Wang S, Huang Y D, et al. Survey of the deterministic network [J]. *Journal on Communications*, 2019, 40(6): 160–176.
- [7] 5G确定性网络联盟. 5G确定性网络+工业互联网融合白皮书 [R]. 北京: 5G确定性网络联盟, 2020.
5G Deterministic Network Alliance. White paper on 5G deterministic network + industrial Internet [R]. Beijing: 5G Deterministic Network Alliance, 2020.
- [8] 5G确定性网络联盟. 5G确定性网络产业白皮书 [R]. 北京: 5G确定性网络联盟, 2020.
5G Deterministic Network Alliance. White paper on industry of 5G deterministic network [R]. Beijing: 5G Deterministic Network Alliance, 2020.
- [9] 强鹏, 刘冰洋, 于德雷, 等. 大规模确定性网络转发技术 [J]. 电信科学, 2019, 35(9): 12–19.
Qiang L, Liu B Y, Yu D L, et al. Large-scale deterministic network forwarding technology [J]. *Telecommunications Science*, 2019, 35(9): 12–19.