



# 5G 时代工业互联网 边缘计算网络

白皮书

# PREFACE

## 前言

工业互联网是新一代网络信息技术与制造业深度融合的产物，是实现产业数字化、网络化、智能化发展的重要基础设施，通过人、机、物的全面互联，全要素、全产业链、全价值链的全面连接，推动形成全新的生产制造和服务体系，是经济转型升级的关键依托、重要途径、全新生态。

5G+边缘计算是支持工业互联网的关键技术，“5G+边缘计算”应用场景贯穿工业制造的全过程，覆盖AGV、生产过程控制、机器协作等各个环节。“5G+边缘计算”融合应用将显著降低企业运营成本，提高生产效率，优化制造资源配置，提升产品高端化、装备高端化和生产智能化水平，推动制造业实现质量效益提高、产业结构优化、发展方式转变、增长动力转换，为工业互联网提供有力保障。

《5G时代工业互联网边缘计算网络白皮书》详细介绍了工业互联网发展面临的挑战及边缘计算的优势，分析了工业

互联网场景对5G+边缘计算的需求，并给出工业互联网的5G+边缘计算网络架构及解决方案实践案例。为行业客户、设备商、集成商和运营商在部署和应用时提供参考。

本白皮书由中国科学院沈阳自动化研究所、中国信息通信研究院、中国移动通信集团有限公司、中国联合网络通信集团有限公司、中国电信集团有限公司、华为技术有限公司、重庆大学、北京易华录信息技术股份有限公司、贝加莱工业自动化（中国）有限公司、三菱电机自动化（中国）有限公司、徐州重型机械有限公司、联通（江苏）产业互联网有限公司、中讯邮电咨询设计院、青岛海尔工业智能研究院有限公司、大连金勺科技有限公司等单位共同完成。主要编写人包括：

中国科学院沈阳自动化研究所  
曾鹏、李栋、俞雪婷、刘金娣

中国联合网络通信集团有限公司  
曹畅、贾雪琴、何涛、肖羽、王跃

重庆大学  
蔡岳平

贝加莱工业自动化（中国）有限公司  
宋华振

联通（江苏）产业互联网有限公司  
于谦

中国信息通信研究院  
张恒升、王哲

中国电信集团有限公司  
雷波、解云鹏、赵倩颖、吕航

北京易华录信息技术股份有限公司  
王凌、钟将

三菱电机自动化（中国）有限公司  
高山青、朱超

中讯邮电咨询设计院  
王帅

中国移动通信集团有限公司  
刘鹏、王帅

华为技术有限公司  
宋军、黄还青、孙建平、翁志强、高偲

大连金勺科技有限公司  
曹欣

徐州重型机械有限公司  
李忠福、张翔、杜兆龙

青岛海尔工业智能研究院有限公司  
黄玉宝、胡明臣

# CONTENTS

## 目录

<b>01</b>	<b>工业互联网发展面临的挑战及边缘计算的优势</b>	<b>01</b>
1.1	工业互联网发展现状及挑战	01
1.2	工业边缘计算发展现状及优势	03
1.3	工业互联网边缘计算网络内涵及利益共同体	04
<b>02</b>	<b>工业互联网场景对5G+边缘计算的网络需求分析</b>	<b>05</b>
2.1	工业互联网的典型5G+边缘计算场景	05
2.2	5G+边缘计算给工业互联网带来的价值	08
2.3	工业互联网场景对5G+边缘计算的网络需求	09
<b>03</b>	<b>工业互联网的5G边缘计算网络架构</b>	<b>10</b>
3.1	工业互联网边缘计算网络架构	10
3.2	5G行业专网	11
3.3	5G边缘计算在OT网络的应用模式	14
3.4	工业互联网的5G边缘计算网络架构及网络规划	17
<b>04</b>	<b>工业互联网边缘计算网络解决方案实践</b>	<b>22</b>
4.1	大型装备制造行业解决方案实践	22
4.2	3C行业解决方案实践	26
4.3	智慧工厂解决方案实践	29
<b>05</b>	<b>工业互联网边缘计算网络发展趋势及建议</b>	<b>31</b>
5.1	工业互联网边缘计算网络未来展望	31
5.2	工业互联网边缘计算网络发展建议	32



# 01

## 工业互联网发展面临的挑战及边缘计算的优势



### 1.1

#### 工业互联网发展现状及挑战

工业互联网是互联网和新一代信息技术与工业系统全方位深度融合所形成的产业和应用生态，是工业智能化发展的关键综合信息基础设施，其本质是以机器、原材料、控制系统、信息系统、产品以及人之间的网络互联为基础，通过对工业数据的全面深度感知、实时传输交换、快速计算处理和高级建模分析，实现智能控制、运营优化和生产组织方式变革。

全球主要国家在工业互联网方面进行战略布局，由前期市场自发探索走向了政府市场的双轮驱动。

国际方面，为了使工业重新焕发强大的竞争力，如美国、德国、日本等工业强国纷纷布局工业互联网，通过新一代信息技术促进生产关系和生产关系革新，抢占产业竞争制高点。政府加强工业互联网顶层设计，纷纷发布国家发展战略，政府通过投资项目、科研补贴、税收优惠等方式，支持科技基金、创新中心、研究机构等引领工业互联网发展，推动工业互联网从概念探讨迈入产业实践。

国内方面，工业互联网已经得到了国家的高度认可与重视，“十三五”规划、中国制造 2025、“互联网+”、“深化制造业与互联网融合发展”等等重大战略都明确提出发展工业互联网。2018 年及 2019 年，我国又密集出台了《工业互联网发展行动计划（2018—2020 年）》《工业互联网网络建设及推广指南》等一批政策文件，大力支持工业互联网的发展。2019 年底，工信部印发《“5G+ 工业互联网”512 工程推进方案》提出要推进 5 大类 12 项 5G+ 工业互联网重大工程建设，以加速推进 5G 技术与工业互联网的融合应用落地，以加强 5G、工业互联网、人工智能等新型基础设施建设。

国际相关产业组织由各自推进走向了对接联合，企业间跨界融合平台化、生态化创新的发展模式。

行业组织围绕工业互联网通力合作。产业联盟汇聚成员单位的优势资源，推进产学研用协同创新，使成员之间的成果转化和对接更加高效。德国工业 4.0 平台由德国机械设备制造业联合会、德国电气和电子制造商协会等发起，协会负责技术和理念推广，研究机构负责技术开发、标准制定和人才培养，大众、西门子等大型制造企业提供技术与解决方案，中小企业则以联合方式参与创新研发并分享创新成果。美国工业互联网联盟由 AT&T、思科、GE、IBM 和英特尔 5 家企业联合发起，目前有 210 家成员单位，支持了边缘网关、工业互联网平台等 26 个测试床。我国在 2016 年 2 月成立了工业互联网产业联盟，2020 年联盟成员单位数量超过 1600 家，先后从工业互联网顶层设计、技术研发、标准研制、测试床、产业实践、国际合作等多方面开展工作，发布了工业互联网白皮书、工业互联网平台、测试床、优秀应用案例等系列成果。

企业积极投入研发与应用。企业是工业互联网发展的主力军，制造企业、自动化企业、IT 企业都积极参与工业互联网建设与推广。老牌工业企业 GE 和西门子在巨大的数字化转型压力下，率先推动工业互联网发展，施耐德、ABB 等紧随其后。微软、美国参数技术公司（PTC）等 IT 企业

凭借在软件服务、平台建设等方面的优势也占据一席之地。同时，工业互联网领域也涌现出 Ayla、Flutura、Maana、QiO 等一批初创企业，他们借助在物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术上的优势，通过投资并购、战略合作、成立联盟等方式增强竞争优势，推动工业互联网创新发展。国内也涌现一批工业互联网企业，包括新型工业互联网科技企业如树根互联，传统的电信运行商、设备商，如移动、联通、电信和华为、中兴等企业也纷纷投入主要力量，提出各自的工业互联网解决方案。国内企业在国际政策的推动下也在积极开展工业互联网的改造升级，进行工业互联网技术的应用落地。

通过几年来的理论和实践探索，工业互联网网络已从概念形成普及进入到应用实践推广的新阶段，业界对工业互联网的发展方向已有高度的共识。在这一过程中，国内外均形成了大量的探索实践，工业互联网改造已经涵盖了工业的多个行业、大中小各类企业乃至实体经济的各个领域，为进一步创造新的生产力和发展动能奠定了基础。

虽然工业互联网网络发展迅猛，但是仍然面临诸多挑战。



工业设备基础比较薄弱。当前数据采集因为传感器实际数量设置偏少，各个装备的智能化水平较低，现场设备联网率偏低，故而因此产生了在现场数据的采集数量、类型、精度等各方面的低标准结果。

IT 网络与 OT 网络跨网互联困难，工业传统网络历史遗留下的分层隔离、多总线协议共存的局面导致工业互联网的网络化改造阻力较大，各自独立的系统导致数据孤岛，难以形成信息的有效流动和互通，因此难以对实时分析、智能优化和科学决策提供充足的条件。

由于产业链条的变长，需要产品全生命周期的数据的集成，涉及多链条多角色的协作和整合，因此工业互联网对数据的理解、流动和全生命周期的管理提出更高要求。

## 1.2

## 工业边缘计算发展现状及优势

边缘计算技术是计算技术发展的焦点，通过在靠近工业现场的网络边缘侧运行处理、分析等操作，就近提供边缘计算服务，能够更好满足制造业敏捷连接、实时优化、安全可靠等方面的关键需求，改变传统制造控制系统和数据分析系统的部署运行方式。目前，国内外产业界对边缘计算架构及模型已经能开展多方面的探索，2014年，欧洲ETSI成立移动边缘计算标准化工作组（MEC），将密集型移动计算任务迁移到附近的网络边缘服务器中，提出移动边缘计算模型；2015年，开放雾计算联盟（OFC）开展OpenFog架构及安全性、可扩展性、开放性等8个支柱模型研究；国内边缘计算产业联盟及工业互联网产业联盟联合发布《边缘计算参考架构3.0》白皮书和20多个边缘计算测试床。在标准制定方面，2020年，中国联通等单位在ITU-T SG20推动的“边缘计算需求和能力要求”（ITU-T Y.4208）的国际标准正式发布、“边缘计算网关”等国际标准正在稳步推进；CCSA在边缘云、云边协同、边缘网关、

边缘计算在工业互联网、车联网等领域的应用也有相当数量的标准报批。2016年10月，由IEEE和ACM正式成立了IEEE/ACM Symposium on Edge Computing，组成了由学术界、产业界、政府（美国国家基金会）共同认可的学术论坛，对边缘计算的应用价值，研究方向开展了研究与讨论。2017年中国科学院沈阳自动化研究所牵头成立了中国自动化学会边缘计算专业委员会。2018年是边缘计算蓬勃发展的一年，在微软2018年度开发者大会上，微软公司发布“Azure IoT Edge”等边缘侧产品，将业务重心从哪Windows操作系统转移到智能边缘计算方面。几乎在同一时间，亚马逊公司发布“AWS Greengrass”边缘侧软件，将AWS云服务无缝扩展至设备。阿里云宣布2018年将战略投入边缘计算技术领域并推出边缘计算产品Link Edge。

边缘计算的优势体现在三个方面：



提供IT与OT跨网互通的能力，边缘侧网关向现场设备提供多种接口、协议，可以解决现场设备信息联网和工业设备多协议之间与IT网络设备互通的问题，强化平台数据输入的能力，实现传感器控制系统、管理软件等不同来源的海量数据的集成与汇聚。

边缘计算与云计算协同的能力，通过边缘侧在设备端就能够对业务数据进行实时处理，数据不必上传到云端，大大节省数据传输的时延和网络的带宽消耗，提高实时业务的确定性保障和数据的安全性。

边缘计算在网络边缘侧的智能分布式架构与平台上，通过知识模型驱动智能化能力，建立统一的服务框架，面向系统运维人员、决策者、开发者等多角色多链条人员，实现协作。

### 1.3

## 工业互联网边缘计算网络内涵及利益共同体

工业互联网边缘计算网络是工业互联网与边缘计算结合的新型网络。采用工业互联网网络基础架构，在此基础上加入边缘计算网关、边缘计算控制器和边缘云，通过边缘计算技术，降低工业现场的复杂性，提高工业数据计算的实时性和可靠性，形成更为先进和优化的工业互联网网络解决方案。

通过边缘计算技术，可以对工业互联网形成有力的技术支持，解决工业互联网发展中遇到的问题。《工业互联网体系架构 2.0》中指出“边缘计算技术的赋能作用主要体现在两个方面：一是降低工业现场的复杂性。目前在工业现场存在超过 40 种工业总线技术，工业设备之间的连接需要边缘计算提供“现场级”的计算能力，实现各种制式的网络通信协议相互转换、互联互通，同时又能够应对异构网络部署与配置、网络管理与维护等方面的艰巨挑战。二是提高工业数据计算的实时性和可靠性。在工业控制的部分场景，计算处理的时延要求在 10ms 以内。如果数据分析和控制逻辑全部在云端实现，难以满足业务的实时性要求。同时，在工业生产中要求计算能力具备不受网络传输带宽和负载影响的“本地存活”能力，避免断网、时延过大等意外因素对实时性生产造成影响。边缘计算在服务实

时性和可靠性方面能够满足工业互联网的发展要求。”同时，工业互联网也为边缘计算提供了基础的数据、网络支撑和业务承载平台。通过边缘计算和工业互联网两种技术的结合，能够形成更为先进和优化的解决方案，助理工业企业转型升级。

工业互联网边缘计算网络产业将是由通信运营商、通信设备商、工业设备商、系统集成商、工业用户等多个利益共同体组成的生态系统。其中通信设备商为工业互联网边缘计算网络提供基本的网络传输设备、边缘计算设备及其配套的解决方案；工业设备商提供工业设备并接入工业互联网边缘计算网络，作为系统数据的基础来源；通信运营商在通信设备商和工业设备商搭建网络和设备设施基础上，提供网络服务和管控云平台，并负责网络和系统的运行维护；系统集成商在通信运营商搭建的服务和平台基础上开发上层应用，将整个工业互联网边缘计算网络系统设备数据进行集成与应用，面向用户需求提供服务；工业用户通过系统集成商提供的服务接口使用工业互联网边缘计算网络系统。通过通信运营商、通信设备商、工业设备商、系统集成商、工业用户的多方共建共享，实现利益共同体各方利益的最大化。



# 02

## 工业互联网场景对 5G+ 边缘计算的网络需求分析



### 2.1

### 工业互联网的典型 5G+ 边缘计算场景

5G+ 边缘计算在工业互联网中有着广泛的应用，例如工业视觉、AR 远程协助、智能巡检等。这些典型应用场景对与 5G 和边缘计算带来的大带宽、低时延、高可靠性有着很高的要求。下面选取几个工业互联网的典型 5G+ 边缘计算场景来进行介绍。

#### ► 工业视觉

工业视觉用于自动检验、工件加工和装配自动化以及生产过程的控制和监视的图像识别。通过 4K、8K 等高清摄像头、工业相机采集生产线上产品的图像信息，将图像进行处理、分析和理解，以识别各种场景下的目标和对象，实时检测生产线上产品的质量，包括外观缺陷检测、尺寸检测、图案检测等，以达到对产品质量检测的高精度、实时性、高效率的目的，可以最大程度替代人工质检，降低企业成本，提升质检的效率和效果。工业视觉需要采集分析大量的图像信息，并做出实时的反馈控制，要求大带宽：5~150Mbps/300Mbps 回传成像数据；低时延：20-50ms，PLC 控制反馈。因此工业视觉场景中需要结合 5G+ 边缘计算。通过 5G 的高上行带宽进行图像信息的传送，满足工业视觉大带宽的需求；结合边缘计算平台部署的机器视觉 AI 算法完成对产品的快速检测，此外还需与云端进行协同进行大数据存储、AI 算法训练。

## ► AR 远程协助

AR 远程协助可以支持员工学习、培训、交流，提供操作示范、导引，提醒生产过程注意事项及操作细节；将工人看到的场景直接传递给工艺人员，工艺人员通过视频、语音、标记等交互手段对工人进行直观指导。AR 类应用希望要用户有身临其境的真实感，如果当用户改变动作到画面绘制在新的位置上花了太长的时间，画面就会产生偏移，造成拖影。因此，没有足够低的时延，就不能给用户一个很好的服务体验，远程协助也不能达到最佳效果。因此此类场景对网络的时延和带宽有着很高的要求。因此可以通过边缘计算平台提供转码、渲染、三维重建、物体识别、AR 内容管理等能力为 AR 远程协助提供业务的近端实时处理和低时延保障；通过 5G 保证 AR 远程协助大的大带宽需求。

## ► 远程驾驶

越来越多的工业场景会用到远程驾驶，如钢铁厂的天车远程驾驶、地下矿井的采掘车远程驾驶等。通常企业在中央控制室设置远程驾驶装备（监控屏和控制设备），通过远程驾驶装备远程操控前端设备。该场景需要精准控制生产作业设备，对业务时延有较高要求（通常小于 20ms），通过 5G 接入和 MEC 的本地分流可以实现远程驾驶的业务保障。

## ► AI 视频监控

主要有 2 大类 7 个细分场景，包含园区办公室监控、仓库监控、园区出入监控、生产线设备异常、操作人员行为、是否戴安全帽、车间人员是否按规定路线行走等；除了安防监控，生产过程中还需要对生产线设备及操作人员行为异常进行识别，增强产线安全和可靠性，为产线工序定义操作红线，关键操作不能有遗漏；AI 视频监控场景会记录园区中的大量信息，因此对数据的隐私性有要求，同时需要对大量的视频数据进行实时分析，因此对带宽和时延有很高的要求。利用 5G+ 边缘计算 +AI，在现场部署视频监控，对工人的操作进行记录并且实时的送到后台。系统分析软件依赖 MEC 的边缘计算能力对视频进行分析，对比，识别园区内的异常事件。

## ► 多机器人协作

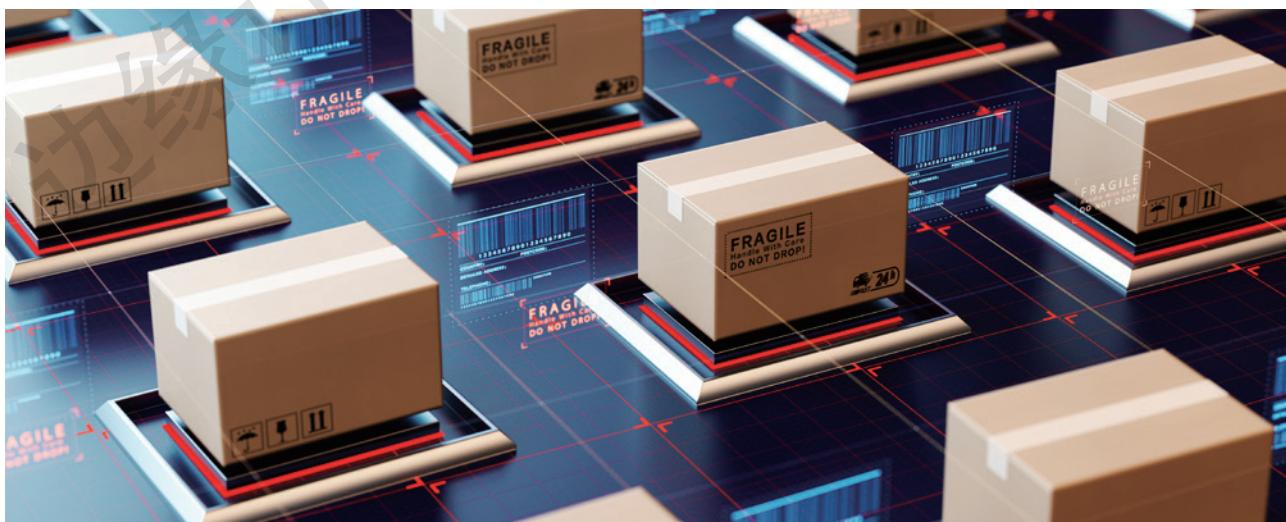
多机器人协作顾名思义就是多个机器人相互协作。用于作业的工业机器人、物料配送的移动机器人等都具有内部传感器和感知周围环境的外部传感器，通过融合 C2C 技术进行信息交互与自主决策，完成复杂的作业，实现人机、机机之间的有效配合，保证安全、可靠的工作。多机器人协作系统由远程控制端、智能中心、智能机器人以及边缘侧组成。多机器人协作中，需要传输两类信息，一类是状态类信息，包括机器人的状态及环境信息，如关节的位置、速度，这类信息是从底层机器人端到控制端的反馈或机器人之间的信息传递，信息量较大，实时性要求高。另一类是控制类信息，从控制端到机器人的控制命令信息，这类信息对数据的安全性和可靠性有较高要求。因此多机器人协作系统可以与 5G、机器视觉、边缘计算、云计算技术的融合，改善机器人的刚性自动化，提高产线的柔性能。多机器人协作的需求主要是低时延、高可靠性需求，通过 5G NR 空口的低时延、高可靠性改善了 Wifi 的时延大、可靠性低的缺点控制要求；实时计算和控制需求，可通过 MEC 的部署满足了机器人 PLC 控制信息的安全可靠，进一步降低时延。

## ► 无人机巡检

无人机巡检被广泛的应用在智慧物流、智慧园区、设备巡检等领域。巡视包括人员、财产、治安、消防安全。无人机利用摄像头视频（可见光高清、红外等）实时传送到厂区综合控制中心。通过对视频图像进行基于人工智能的物体识别、模式识别分析，判断所巡检的地点是否存在安保异常或火警异常并实现智能提示，最大限度降低安保人员日常劳动强度。可以实现厂区范围内规范化、常态化的空中安保巡视和设备点检。但实际上，大部分前端设备都只具备单纯的感知和摄像功能，不具备前置的计算功能，需要将数据传输至数据中心进行处理。将视频分析与处理服务被部署在距感知设备较近的 MEC 平台中。通过无人机摄像头采集到的数据和图像信息通过 5G 基站传输到 MEC 平台中进本地分析预处理，降低对核心网及骨干网带宽资源的占用，同时也将时延缩短到端到端。AI 训练服务则被部署在云数据中心，依靠云计算强大的计算能力来对数据进行训练，得到更准确地训练模型。5G 的上行速率可达 200Mbps，可以支持 4K、8K 甚至全景的视频回传；二是 5G 毫秒级的低时延高可靠特性可以有效地保障无人机的精确控制和精准定位。

## ► AGV 仓储物流

AGV 是自动引导运输车（Automated Guided Vehicle）的英文缩写。通常也称为 AGV 小车，它是一种装备有电磁或光学等自动引导装置，能够沿规定的导引路径行驶，具有安全保护以及各种移载功能的运输车。AGV 系统是智慧工厂的重要构成之一，实现物料的自动流转和生产制造的全程可追溯生产数据采集。在 AGV 仓储物流场景中，AGV 小车接收到指令后自动前往相应的位置进行工作。在 AGV 小车工作流程中，需要对自己目前所在的位置进行定位，通过传感器检测前方路障，实时规划路径，与其他小车进行协同等，因此对时延和并发有着很高的要求。在群车密集式作业，密集存储的场景中：WiFi 并发 200 台（1600 平方米仓库），移动切换 Wifi AP 每天 10+ 次停机，重传恢复 2 分钟；网络需求：支持 100-200AGV 并发、时延要求在 50-100ms 之间。通过 5G+ 边缘计算，可以支持数百台 AGV 小车同时接入，在边缘处实时处理 AGV 传感器所采集的数据，对其指令和路径进行规划。



## 2.2

## 5G+ 边缘计算给工业互联网带来的价值

“5G+ 边缘计算”应用场景贯穿工业制造的全过程，覆盖 AGV、生产过程控制、机器协作等各个环节。“5G+ 边缘计算”融合应用将显著降低企业运营成本，提高生产效率，优化制造资源配置，提升产品高端化、装备高端化和生产智能化水平，推动制造业实现质量效益提高、产业结构优化、发展方式转变、增长动力转换，为工业互联网提供有力保障。

综合来讲 “5G+ 边缘计算” 给工业互联网带来以下五大价值：



- 1. 免布线。**5G+ 边缘计算解决园区内原有 WiFi 网络抗干扰能力差的问题，同时避免架设有线网络成本高、难度大、工期长的难题，保证终端网络连接的方便稳定性。如在 AGV 仓储物流场景中在园区面积比较大时，WiFi 覆盖面积较小，解决位置移动时导致的 WiFi 频繁重连问题。
- 2. 兼容多协议，降低改造成本。**由于相关设备间都采用 L2 网络接口，工业设备商和企业都不希望改造相关设备的网络通信接口和协议，5G MEC 对多协议和通信接口的兼容，降低了改造成本。
- 3. 提供低时延。**很多工业互联网场景中如多机器人协作，对时延有很高要求，由于 5G 边缘计算更靠近终端的特性提供的低时延可以满足低时延场景中对精度、协同等高要求。
- 4. 提供大带宽，降低对外网带宽需求。**AR/VR，监控，巡检等场景，由于需要传送大量视频图像信息，往往需要超大带宽，5G 的超级上行能力可以为该类场景提供超大带宽，同时利用边缘计算进行本地处理，减少传送到云中心的数据，降低对外网的带宽需求。
- 5. 提高安全性。**由于园区内的信息涉及到企业的内部数据，具有很高的隐私性，数据本地处理，降低了数据泄露的风险，提升了工业互联网的安全性。

5G+ 边缘计算与工业互联网的融合创新发展，将推动制造业从单点、局部的信息技术应用向数字化、网络化和智能化转变，也为 5G+ 边缘计算开辟更为广阔的市场空间，从而有力支撑制造强国、网络强国建设。当前，我国产业界推进 5G+ 边缘计算与工业互联网融合创新的积极性不断提升，“5G+ 边缘计算 + 工业互联网” 内网建设改造覆盖的行业领域日趋广泛，应用范围向生产制造核心环节持续延伸，叠加倍增效应和巨大应用潜力不断释放。

## 2.3

## 工业互联网场景对 5G+ 边缘计算的网络需求



- 1. 支持业务通过固网或移动网的多接入需求** 工业互联网场景中，需要接入多种终端设备进行数据的采集、控制等，由于业务的固定或移动特定，决定了设备接入网络的方式必然是多样的，需要网络支持业务通过固网或移动网的多接入需求。



- 3. 支持云边协同 / 跨域边云协同** 在智能巡检、AGV 应用、园区设施管理以及 C2C 控制等场景中都对边缘节点以及云中心的协同有要求，如通过云平台接收来自边缘计算节点聚合的数据信息进行模型训练，并将更新模型推送到边缘端，完成数据分析和处理等，需要网络支持云边协同 / 跨域边云协同。



- 5. 需要网络满足工业互联网确定性时延 / 低时延、高带宽、高并发网络需求** 在时延方面，工业自动化控制通常分为运动控制和过程控制，运动控制通常要求时延在 1ms 级别，过程控制要求时延在 10ms~100ms 级别；同时，确定性时延不仅要求低时延，还要求时延的抖动控制在一定范围内，通常为纳秒级；带宽方面，对于传统结构化数据的采集，要求在 100kbps，对于非结构化数据的采集，例如视频等，要求在 100mpbs 以上；同时需要支持大量终端设备的高并发。因此，需要网络满足工业互联网的确定性时延 / 低时延、高带宽、高并发网络需求。



- 6. 支持现场异构接入网络** 工业互联网需要面对多种多样的设备，5G+ 边缘计算的网络需要向下支持多种类的设备接入。



- 2. 支持工业互联网的可靠连接性需求** 网络能够在边缘计算节点业务发生故障时，不再往异常边缘计算节点做业务分发，能够快速切换至其他节点，降低故障影响面。



- 4. 满足运营商网络和园区网融合的互联互通互操作、以及安全互信需求** 园区网和运营商网络融合是工业互联网中常见的场景之一。园区网为行业客户在园区范围内提供网络连接，运营商网络为行业客户提供互联网接入和分流管道。同时，运营商网络或园区网可部署边缘计算节点，为用户提供数据服务等业务。



- 7. 支持 OT 网的协议和低延迟** 在 5G 网络应用到 OT 网络中，需要 5G 网络支持 TSN 等 L2 工业互联网协议，满足设备间通信协议的匹配需求。同时，要简化端到端网络来降低网络延迟来满足工业互联网的通信性能要求。

# 03

## 工业互联网的 5G 边缘计算 网络架构



### 3.1

#### 工业互联网边缘计算网络架构

企业园区网按功能一般分为三个部分，办公网、生产 IT 网和生产 OT 网络，有不同的网络要求和技术体系。

- a 办公网**：由企业的 IT 团队负责建设和运维，标准的 eMMB 场景，主要网络建设目标是解决网络覆盖和高性价比带宽问题，有线网络技术采用以太网交换和路由，无线技术以 WiFi 为主。
- b 生产 IT 网**：也是由企业的 IT 团队负责建设和运维，支持 AGV 物流、预测维护和移动监控等生产辅助应用，对网络的延迟和工业级可靠通信有一定要求，是 5G 和 WiFi 积极进入的场景。
- c OT 网**：由企业的生产 OT 团队负责，以现场总线和工业以太网等专业网络为主，有非常高的低延迟和工业级可靠通信要求。5G LAN 和 5G TSN 在寻找价值应用来突破。OT 网络有很高的安全要求，通过防火墙和园区网互连。

5G MEC 可以部署在 OT 网络中，支持智能制造，满足低延迟和高工业级通信可靠性要求；也可以部署在园区网骨干上，支持智能园区应用，移动应用（机器人）。在园区里可以部署，多个 5G MEC 来支持不同的业务；每个 5G MEC 里面的 UPF 都由一个 5G 核心网控制面来进行统一管理和提供漫游服务。5G MEC 可以和企业的边缘云部署在一起。

企业有一个工业互联网云平台负责企业的所有生产和管理活动，同时部署边缘云和 5G MEC 来完成特定的应用。工业互联网平台可以是部署在园区里的私有云，也可以是部署在专有云中。工业互联网平台通过园区网和园区间专网来连接所有的边缘云和 5G MEC。企业的不同园区间，通过专线或切片（支持低延迟业务）互连，支持远程控制或远程 VR 等应用。

工业互联网边缘计算网络架构，如图 3.1 所示。

工业互联网边缘计算网络架构，如图 3.1 所示。

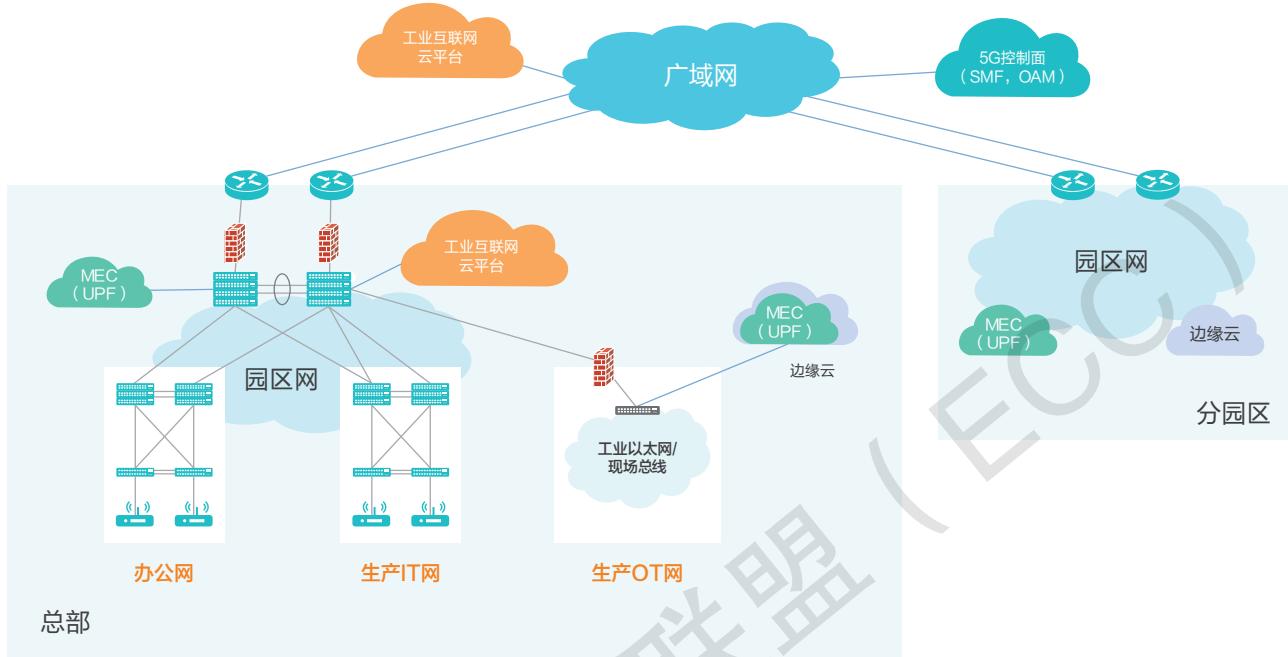


图 3.1 工业互联网边缘计算网络架构

### 3.2

## 5G 行业专网

5G 专网具有大带宽、广连接、低时延、安全性高等诸多优势。同时，5G 专网具备部署区域化、网络需求个性化、行业应用场景化等特点。

所谓部署区域化，是指 5G 专网服务的部署范围可根据区域设计，可面向封闭式的使用场景，如制造业园区、港口、矿山等；网络需求个性化，是指对时延要求严苛、可靠性要求高、上行速率需求高、数据安全和隔离要求严格等，5G 专网中的网络切片、边缘计算、NFV/SDN 实现园区网络灵活部署；行业应用场景化，是指 5G 网络将为不同的

行业场景就近部署算力并提供能力开放。5G 专网可与现有 IT 网络实现兼容互通，网络能力、网络技术也将不断演进升级。最后，对于多数企业重要的一点是，5G 公网与专网的融合部署可缩短建设周期，进而大大降低成本。

5G 专网服务不仅仅是一张通信网络，更是一种融合网络、云计算、边缘计算、应用平台全面定制的综合解决方案。5G 专网包括以下三种类型：5G 虚拟专网、5G 混合专网以及 5G 独立专网。

### 3.2.1 5G 虚拟专网

在 5G 虚拟专网模式中，企业专网用户和企业内公众用户，共享 5G 基站、5G 核心网（控制面和 UPF）和 5G 承载网。

企业专网用户数据流，从企业专网用户终端，经过运营商在园区里共享基站，5G 承载网，到公网 UPF，再通过专线传回企业云。企业用户数据一般都会出园区。

园区里面普通用户数据流，通过运营商在园区里共享基站，经 5G 移动承载网传到公网 UPF。流程和园区外普通用户的业务流一样。

运营商可以通过提供 5G 切片来保证基站到 UPF 的通信性能和数据安全，5G 切片包括 5G 基站切片、5G 移动承载网切片和 5G 核心网（UPF）切片。从运营商 5G UPF 到企业云间的专线也可以采用切片网络来保证高性能。

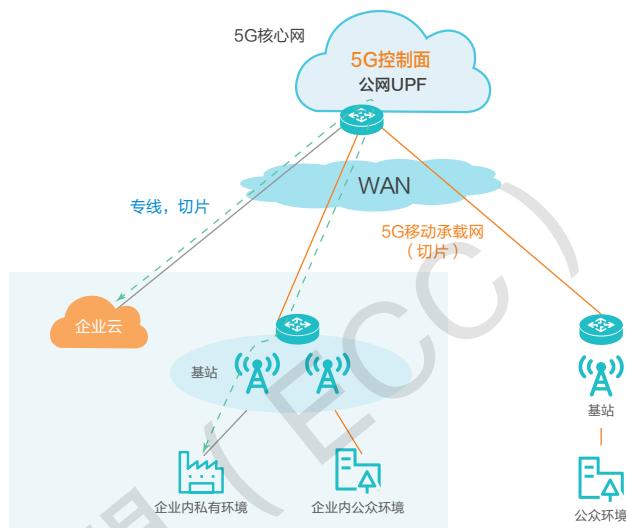


图 3.2 5G 虚拟专网

### 3.2.2 5G 混合专网

在 5G 混合专网模式中，企业专网用户和企业内公众用户，共享 5G 基站和 5G 核心网控制面。企业用户有专用的、部署在企业园区里的 5G MEC（包括专用的 UPF）。5G MEC 在园区里面和企业云互连。

企业专网用户数据流，从企业专网用户终端，经过运营商在园区里的共享基站，直接到园区 5G MEC 的 UPF，最后通过园区内网络连接企业云。企业用户数据不出园区，但 5G 用户的控制信息会出园区，被发送到运营商的 5G 核心网控制面。

园区里面普通用户数据流，通过运营商在园区里共享基站，经 5G 移动承载网传到公网 UPF。其流程和园区外普通用户的业务流一样。

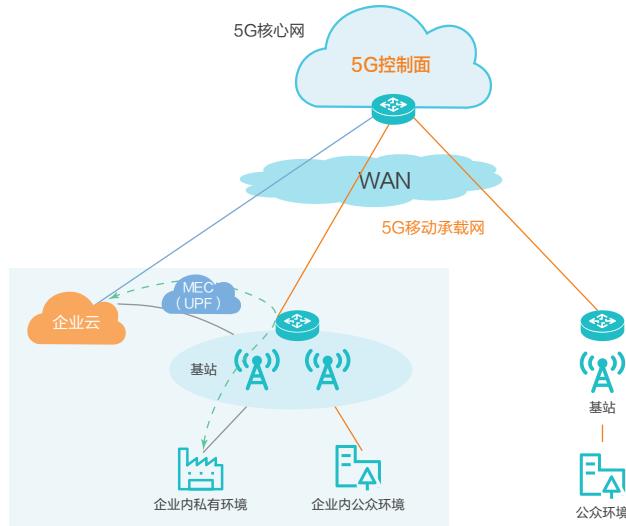


图 3.3 5G 混合专网

### 3.2.3 5G 独立专网

在 5G 独立专网模式中，为企业专网用户和企业内公众用户分别建设独立的 5G 网络。5G 企业专网，有独立的无线频段、独立的基站和独立的无线核心（5G 控制面和 UPF），所有网络设备都在园区里，通过园区网络互连。5G 企业独立专网可以由运营商来建设，也可以是企业自建。

运营商同时在企业园区里部署公共 5G 网络，和园区外部部署方案一致，提供普通用户的 5G 业务。

企业专网用户数据流，从企业专网用户终端，经过运营商在园区里的独立基站，直接到园区 5G MEC 的 UPF，最后通过园区内网络连接企业云。企业用户数据不出园区。

园区里面普通用户数据流，通过运营商在园区里共享基站，经 5G 移动承载网传到公网 UPF。其流程和园区外普通用户的业务流一样。

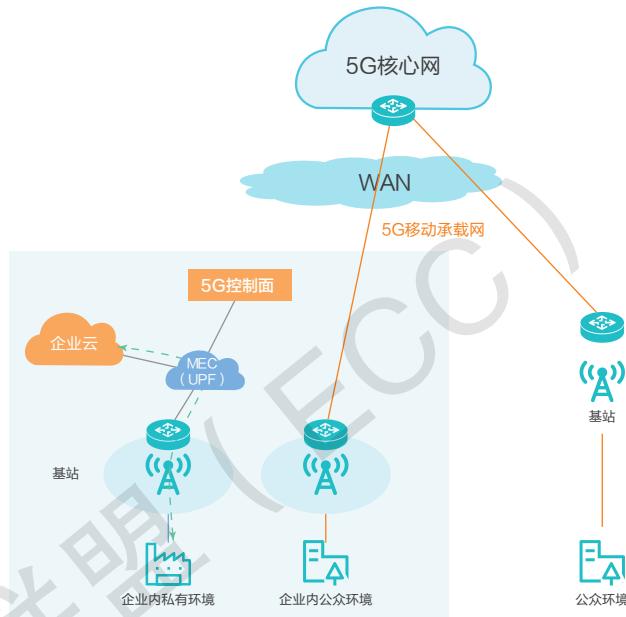


图 3.4 5G 独立专网

### 3.2.4 5G 专网特性分析

三种 5G 专网具有不同特性和客户对象，分析小结见表 3.1。

	5G 虚拟专网	5G 混合专网	5G 独立专网
网络共享	共享基站、5G 核心网和 5G 移动承载网	共享基站和 5G 核心网的控制面系统	无共享
数据是否出园区	出园区	不出园区	不出园区
MEC 位置	比较高，在运营商机房	下移到园区	下移到园区
低延迟	中	高	高
数据传输安全	比较高（可以用切片）	很高	最高
灵活自服务	低	中	高

成本	低	中	高
客户对象	对网络性能和边缘计算要求不高，对成本比较敏感的中小企业	对网络性能尤其是时延要求高，同时对本企业数据管控有较高要求的客户，如工业视觉检测、工业数据采集、云化 PLC、设备远程控制、移动诊疗车、AGV 调度与导航、机器人巡检等。	对安全、性能、自管理要求苛刻的行业客户，如矿山（矿山井下采矿、矿车无人驾驶）、港口（吊机远控、自动集卡）大型工厂、电网等

采用运营商 5G 网络来建设专网，有成本低、迅速开通和专业建维的优点。当前，在工业互联网领域，大企业基本上都采用 5G 混合专网模式

### 3.3

## 5G 边缘计算在 OT 网络的应用模式

### 3.3.1 5G 边缘计算在 OT 网络的应用模式架构

5G MEC 在企业网，特别是 OT 网络中的应用，给工业互联网带来了新的通信应用能力和应用模式。

OT 网络中的设备和应用一般分为 5 层：设备层、边缘控制器层、边缘网关层、边缘云层和工业互联网云平台层。

传统的工业互联网 OT 网络是有线网络。设备和边缘控制器间一般采用简单、实时的现场总线来构建网络。边缘控制器和边缘网关，边缘网关间，采用各种工业以太网来构建车间级网络。

5G MEC 在 OT 网络中的部署应用当前主要是 5G 混合专网模式，为工业互联网应用提供了移动和低延迟通信能力，如图 3.5 所示，提供了“低延迟无线通信”和“无线通信 + 边缘计算”两种通信应用新模式。

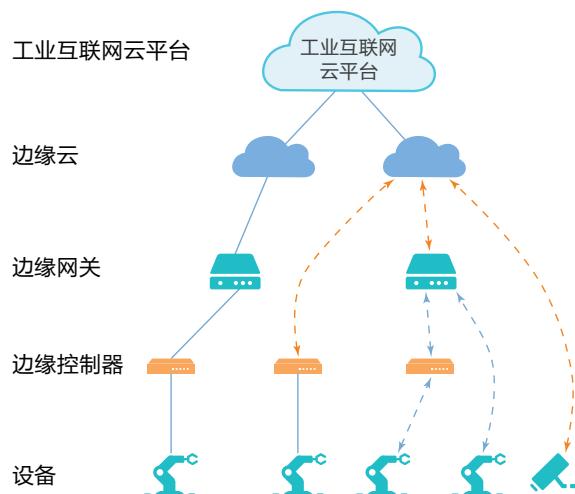


图 3.5 5G MEC 在 OT 网络中应用模式

- a “低延迟无线通信”（蓝线）模式：为设备层、边缘控制层和边缘网关层间提供 5G 通信连接，对应原来的现场总线和工业以太网通信连接。大部分情况只需要 UPF 来提供 5G 通信连接，不需要 MEP 来提供边缘计算应用。
- b “无线通信 + 边缘计算”（红色）模式：为设备侧、边缘控制器层和边缘网关层提供到边缘云的通信连接，一

般是提供三层（IP）通信连接，延迟要求一般会比“低延迟无线通信”模式略低。MEP 平台及应用可能部署在 5G MEC 中，提供前端实时智能应用，并且能调用 5G 的开放通信能力，来编写有 5G 特色的智能应用。

在工业互联网中，5G MEC 系统一般要同时满足两种通信应用模式。

### 3.3.2 “低延迟无线通信”模式

5G “低延迟无线通信”模式提供低延迟无线通信连接，原先这些通信连接主要是通过现场总线和工业以太网来提供的，也就是一个二层（L2）网络。

由于相关设备间都采用 L2 网络接口，工业设备商和企业都不希望改造相关设备的网络通信接口和协议，因此 5G LAN 和 5G TSN 被用来提供二层通信连接，组建一个端到端的 L2 业务网络。

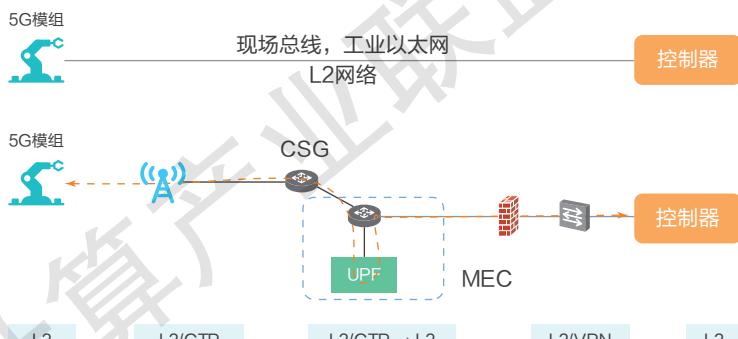


图 3.6 OT 有线网络和 5G “低延迟无线通信”模式网络

如图 3.6 所示，在传统的 OT 有线网络中，设备通过 L2 有线网络（现场总线和工业以太网）连接到控制器。5G “低延迟无线通信”模式组网是由 5G 基站，运营商 IP RAN 路由器，5G MEC 系统组成，通过防火墙和企业 OT 网络连接；5G MEC 中的 UPF 和无线基站一起提供 5G 通信连接；设备可以通过 5G 模组或 5G CPE 来上 5G 网络。

5G 网络从基站到 UPF 间，通过 GTP 封装来传输 L2 数据帧（如以太网帧），这个传输过程要经过运营商的 IP

RAN 网络和 MEC 网关路由器。L2 帧在 UPF 被从 GTP 解封装出，再通过数通网络的 L2 VPN（VxLAN, L2TP）传输到控制器，中间要穿越 MEC 防火墙和企业防火墙，以及 MEC 网关路由器和企业园区网。

随着工业以太网向 TSN 标准演进，5G TSN 技术将被用来组建 5G L2 网络。

5G “低延迟无线通信”模式网络的主要挑战是提供 OT 有线网络级的低延迟和高可靠性通信能力，这也是 OT 网络可以使用 5G 网络的一个必要前提。5G uRLLC 超高可靠低时延场景及相关协议就是面向这个网络模式和应用，当前无线侧仍然是网络的主要挑战点。

另外，数通网络的简化和端到端网络的简化也是需要研究的一个问题。

### 3.3.3 “无线通信 + 边缘计算”模式

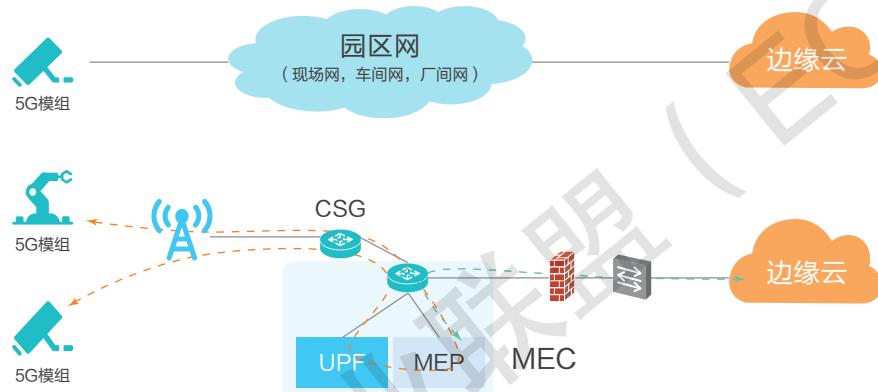


图 3.7 OT 有线网络和 5G “无线通信 + 边缘计算”模式网络

如图 3.7 所示，在传统的 OT 有线网络中，设备通过工厂有线网络（现场总线和工业以太网），可能还有厂间网，连接到边缘云，一些远程控制应用也可能是跨厂区的。5G “无线通信 + 边缘计算”模式组网是由 5G 基站，运营商 IP RAN 路由器，5G MEC 系统组成，通过防火墙和企业 OT 网络连接；5G MEC 中的 UPF 和无线基站一起提供 5G 通信连接，MEP 支持边缘计算应用；设备可以通过 5G 模组或 5G CPE 来上 5G 网络。

5G “无线通信 + 边缘计算”模式，不仅提供 5G 实时连接，而且提供实时工业计算应用，比如工业视觉检测。

5G MEC 中的边缘计算，可以看为园区边缘云应用的下移。5G 通信能力开放包括无线网络位置服务（提供基于无线基站定位的用户位置信息），和无线网络带宽及

QoS 管理等。用户应用如需要对无线网络上下行带宽进行差异化控制，由 MEP 和无线网络联动实现。实时工业应用直接部署在 5G MEC 的 MEP 平台中，完成实时边缘计算，直接把计算结果反馈给相关设备。比如，工业摄像机把产品检测信息发到 5G MEC，部署在 MEP 中的工业视觉应用进行边缘计算，挑出不合格的产品，并将计算结果反馈给生产线上的控制设备，把不合格的产品挑出来。如此，生产信息传输路径短并且被实时处理，不需要传输回园区的边缘云；同时实时工业应用还可以利用 MEP 平台提供的 5G 开放通信能力来优化应用。

5G MEC 和园区边缘云间，需要保持通信连接，5G MEC 需要将相关信息反馈给园区边缘云；有些边缘计算应用，有可能需要后端云计算的支持。

## 3.4

## 工业互联网的 5G 边缘计算网络架构及网络规划

## 3.4.1 ECNI 的边缘计算网络架构

为了推动边缘计算网络以及边缘计算产业发展，边缘计算产业联盟 ECC 在 2019 年和网络 5.0 联合成立了边缘计算网络基础设施联合工作组（ECNI），是业界第一个聚焦边缘计算网络的产业组织。2019 年 11 月，ECNI

发布了“运营商边缘计算网络技术白皮书”，是业界首个有关运营商边缘计算网络的白皮书。

此白皮书提出了一个新的边缘计算网络抽象模型（图 3.8），将边缘计算网络分为三个逻辑网段来描述：

**ECA ( Edge Computing Access, 边缘计算接入网络 )**

从用户系统到 MEC 所经过的网络基础设施；

**ECN ( Edge Computing Network, 边缘计算内部网络 )**

MEC 内部网络基础设施；

**ECI ( Edge Computing Interconnect, 边缘计算互连网络 )**

从 MEC 到云计算系统（如公有云、私有云、通信云、用户自建云等）、其它 MEC、各类数据中心所经过的网络基础设施。

MEC 在物理网络中的部署位置不同，ECA 和 ECI 在物理网络中的映射也不一样；ECI 可能跨多个网络域。因此，ECA/ECN/ECI 网络模式能更好地描述复杂的 MEC 网络

和多样性物理网络间的关系，本文后续也会用这套网络模式来描述工业互联网边缘计算的网络架构。

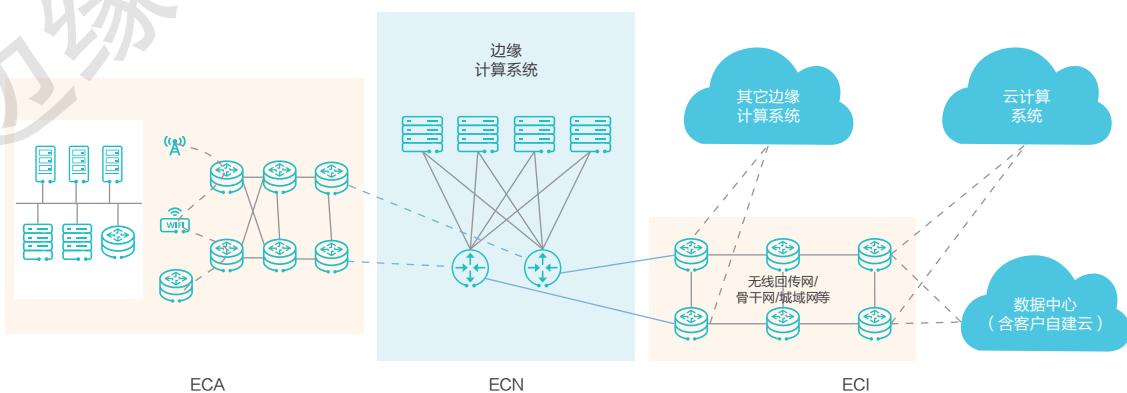


图 3.8 ECNI 的边缘计算网络抽象模型

### 3.4.2 工业互联网边缘计算网络架构

参照 ECNI 边缘计算网络模型，工业互联网边缘计算网络架构如图 3.9 所示，以边缘计算系统为中心，将相关网络划分为 ECA、ECN 和 ECI 三部分。

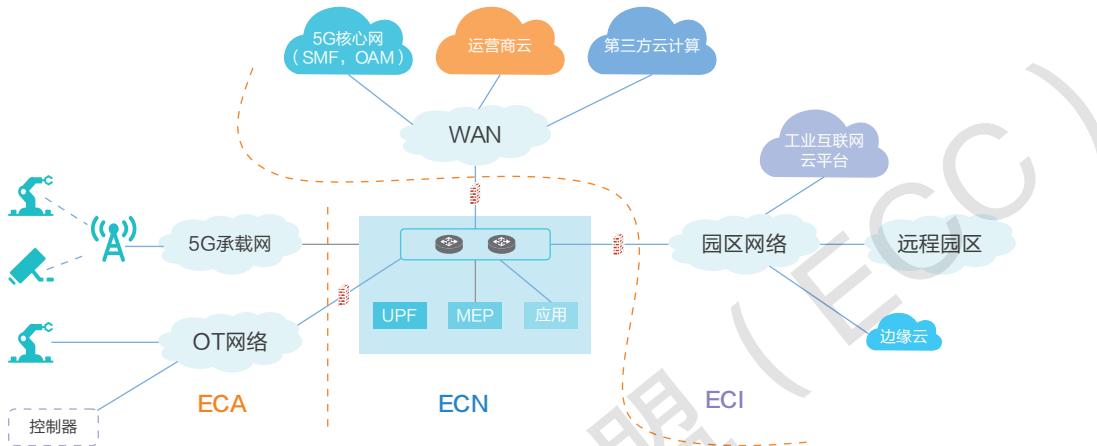


图 3.9 工业互联网边缘计算网络架构

#### ► 边缘计算接入网（ECA）

工业互联网中的设备可以通过有线和无线方式，接入边缘计算系统。如果采用运营商 5G 接入，ECA 包括运营商的移动承载网 IP RAN。

#### ► 边缘计算内部网络（ECN）

5G MEC 是一个小型边缘云，通过一对 ECN 网关路由器和外网互连，内部连接 UPF 一体机和边缘计算服务器。

#### ► 边缘计算互联网（ECI）

ECI 网络分为两个部分，运营商网络互连部分和企业网互连部分。

ECI 的运营商网络部分，提供以下通信连接服务：5G MEC 的 UPF 和 5G 核心网控制面及相关 5G 业务运维系统互通；运营商可以从自己的云计算平台推送应用到 MEC 的 MEP 上；第三方为 MEC 提供应用业务。

ECI 的企业网部分，提供以下通信连接服务：MEC 通过 OT 网络和工厂的边缘云互通；MEC 通过园区网和工业互联网云平台互通；远程控制等应用可以跨园区和 MEC 互通。

### 3.4.3 工业互联网 5G 边缘计算网络规划

工业互联网边缘计算网络是以园区网络（OT 网络）为核心，结合运营商 5G 网络和承载网络组成的，网络复杂。

工业互联网 5G 边缘计算网络规划需要重点关注以下规划要点。

#### ▶ 5G ECA 对 OT 网的协议和低延迟支持

如图 3.2 所示，在 5G 网络应用到 OT 网络中，需要 5G 网络支持 TSN 等 L2 工业互联网协议，满足设备间通信协议的匹配需求。同时，要简化端到端网络来降低网络延迟来满足工业互联网的通信性能要求。

#### ▶ 5G ECA 最短路径

5G 混合专网模式是当前最多被工业互联网应用的通信模式，从基站到 MEC 的 UPF 的 N3，应该采用最短路径连接，在园区里应该通过在园区里的路由器直接连接到 MEC，而不应该在运营商的网络中绕行。业务流无绕行的需求，一方面是为了低延迟和节约网络带宽，另一方面是为了保证企业关键业务数据不出园区，如图 3.10 和图 3.11 所示。这要求 MEC 接入点路由器能就近转发数据报文，因此边缘接入网设备具有路由能力（L3 到边缘）是支持业务流无绕行传输的一个基本要求。

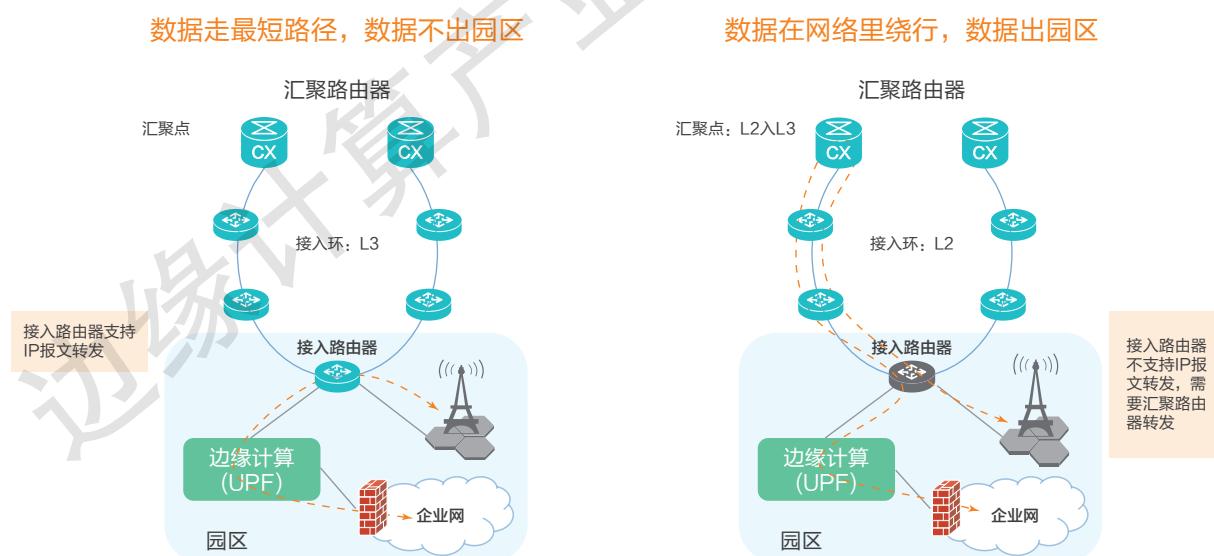


图 3.10 L3 到边缘，5G ECA 最短

图 3.11 L2 到边缘，5G ECA 绕行

## ► ECN 集成通信

小微型 MEC 是当前 5G MEC 的主流模式，因为成本和通信需求，ECN 一般采用一层集成网络模型，如图 3.12。这就要求 ECN 的路由器提供 MEC 中各物理设备间以及 VM 间的 L2 和 L3 可靠连接，完成 MEC 和外部 IP 网络（IP RAN）的路由互通和可靠通信，以及边云协调通信。一个 UPF 可以运行多个 VM 来提高性能和可靠性，ECN 要提供多路 ECMP 负载均衡。

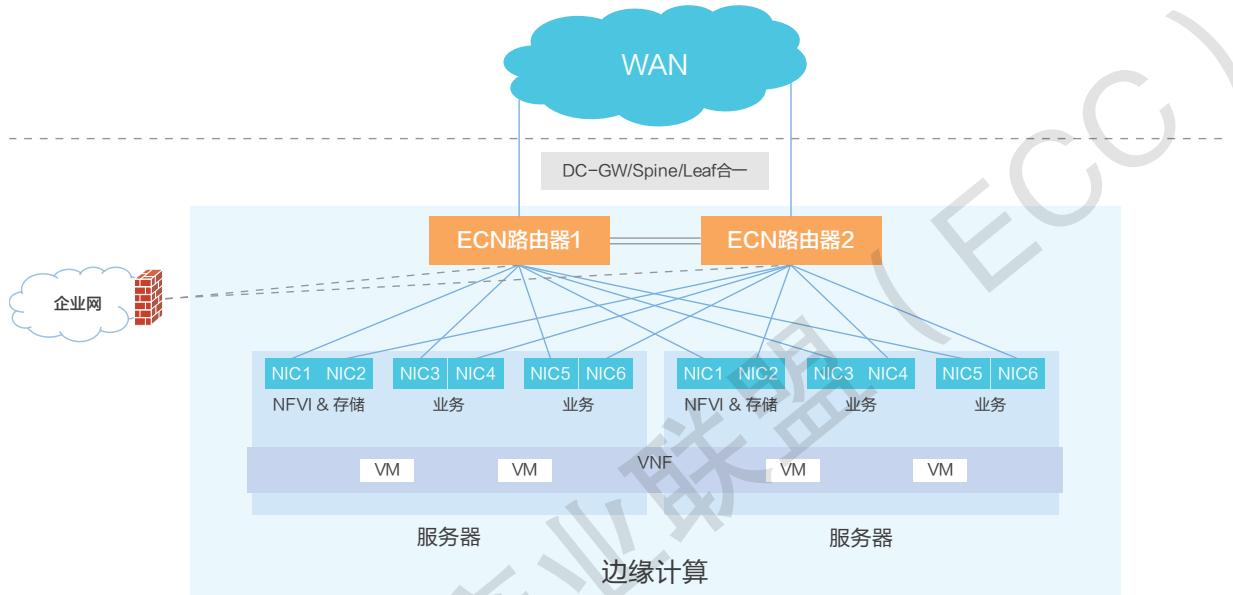


图 3.12 ECN 参考模型

## ► 安全

5G 边缘计算系统对运营商和企业来讲都不是安全域，带来了新的网络安全隐患，如图 3.13 所示。运营商角度，5G 边缘计算里面有非运营商的应用和网络连接，如边缘计算系统直接和企业网互通，不是电信安全域；同时边缘计算改变了原来移动承载网 IP RAN 的业务承载封闭性。企业角度，业务数据和业务应用经过外网和外部 IT 系统，即经过了企业非安全区，并且企业网增加了和运营商网络的互联点，如 5G MEC 经常是接在企业网内部，而不是企业网出口处。

现在边缘计算项目中都采用以防火墙为主的网络安全方案，运营商和企业分别部署防火墙在两网互通的通道上，来保证网络安全。

### 边缘计算系统对运营商和企业都不是安全域

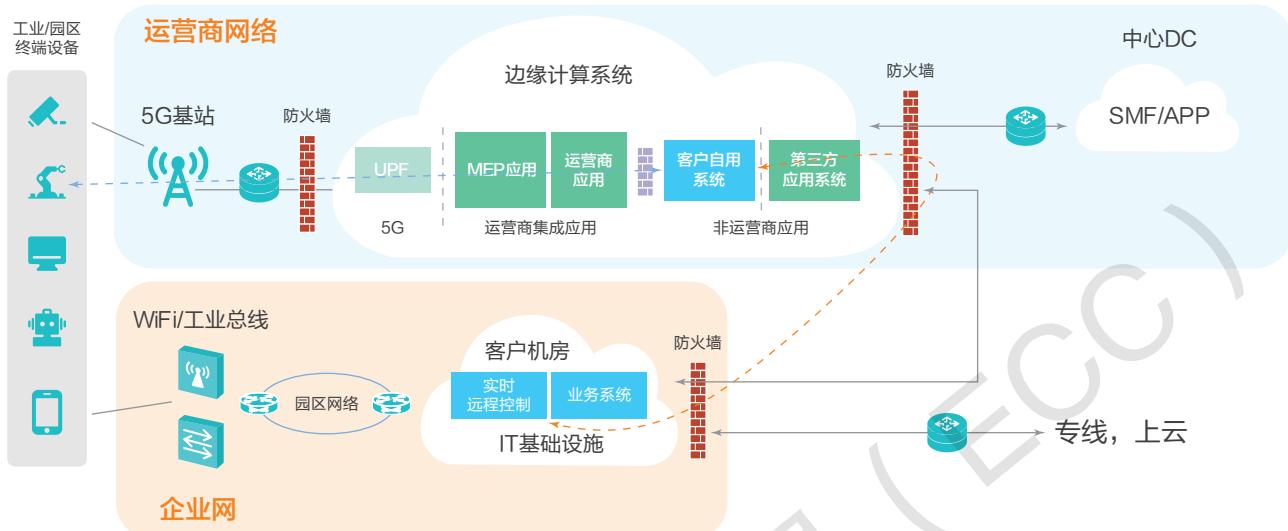


图 3.13 运营商边缘计算系统和企业网安全互通

## ▶ ECI 灵活和低延迟网络

ECI 网络是一个复杂的逻辑网络，如图 3.9。一方面是通过运营商 WAN 网络连接 5G 核心网，运营商云应用和第三方云应用。ECI 映射到运营商的物理网络上，可能会跨越城域网和骨干网等多个网段。为了支持应用在边缘计算里面的动态部署，网络需要能尽快地提供 ECI 网络连接，比如按需实时建立到某个第三方云的 VPN 通道；为了保证延迟，提供切片网络；为了自动化部署和管理，提供网络 SDN 管控和 API 接口。

ECI 还包括跨园区网络，可以采用运营商切片专网来保持工业互联网的通信要求，满足远程控制和 VR 的需求。



# 04

## 工业互联网边缘计算网络 解决方案实践



### 4.1

#### 大型装备制造行业解决方案实践

##### 4.1.1 典型应用场景

5G MEC 在大型装备制造行业应用的典型场景包括：工业视觉检测、整机质量检测系统、企业能耗数据采集、

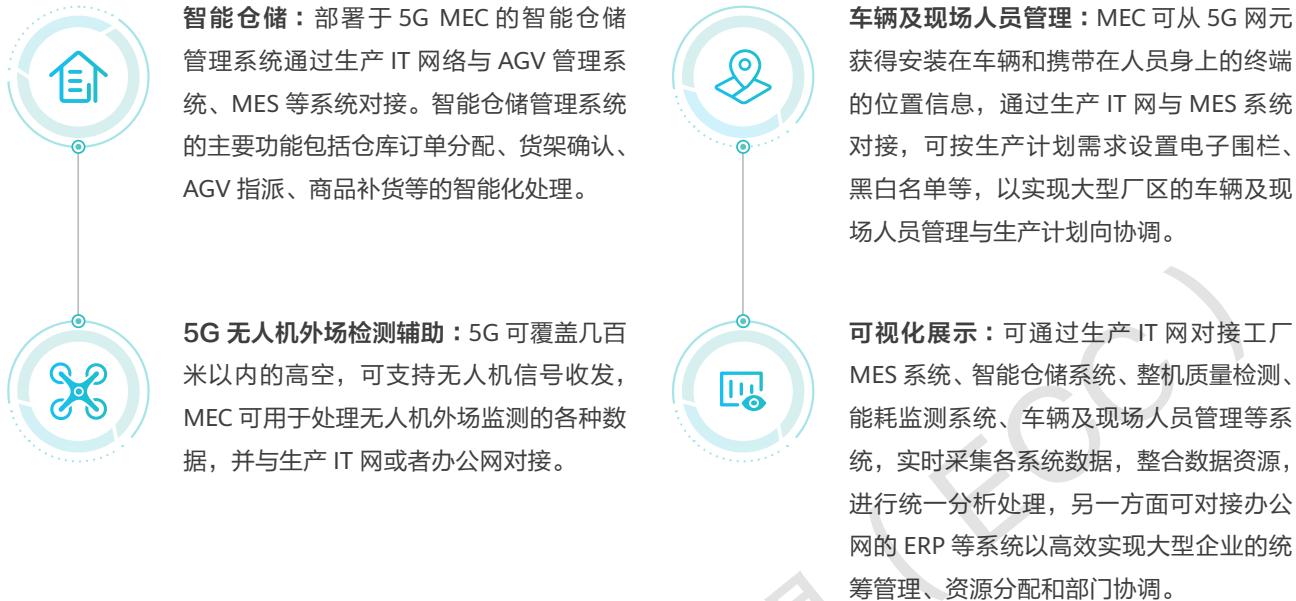
智能仓储、车辆及现场人员管理、5G 无人机外场检测辅助、可视化展示系统等。



**工业视觉检测：**部署于 5G MEC 的工业视觉检测可应用在大型装备制造企业的生产线上，一般由视觉检测系统和机械臂等机器人匹配应用，并与 OT 网内的生产线上的 PLC 控制管理系统对接，以实现数据测量、检测、定位、识别和控制功能。

**整机质量检测：**作为整机，大型装备产品在出厂前需要进行严格的质量检测。部署于 5G MEC 的整机质量检测系统通过 OT 网关连接到整机的多个待检测部件。整机质量检测系统将实时控制指令下达到各检测部件并实时获取各部件输出状态数据，通过对控制指令以及输出状态数据的分析，可精确完成各部件的单项功能 / 性能检测以及多项组合功能 / 性能检测。

**企业能耗在线监测：**部署于 5G MEC 的工业能耗在线监测系统可通过大型装备企业的生产 IT 网实时采集各厂区的水、电、气、稀有气体等各种能耗数据，同时可以采集展示配电房、空压机站、锅炉房、水泵房、污水处理站等各大站房设备运行状态和用能情况，为核算管理提供数据支撑和多维度分析。



## 4.1.2 组网技术方案

### 1. 组网需求分析

对以上应用场景进行梳理后，通用的网络传输要求、室外 / 室内网络覆盖总体技术要求如下：

- (1) 时延要求：低于 40ms；
- (2) 上行带宽：大于 100Mbps；
- (3) 室外覆盖技术需求：演示道路沿线 5G 覆盖连续；

(4) 室外覆盖技术需求：安全和美观，确保安全生产和整体美观；

(5) 室内覆盖技术需求：5G 点状覆盖。

典型场景下的组网技术需求如下表所示：

典型场景	网络类型	网络特性	组网需求
工业视觉检测	生产 OT 网、生产 IT 网	大带宽、高可靠、低时延	5G MEC 接入生产 IT 网、MEC 支持视觉检测算法、5G MEC 与控制器组网。PLC 控制器之间通过 OT 网组网。
整机质量检测	生产 OT 网、生产 IT 网	大带宽、高可靠、低时延	5G MEC 接入生产 IT 网、MEC 支持质量检测配置和测试用例，5G MEC 与待测设备组网、与质量检测操控台组网；待测设备之间通过 OT 网络组网。

企业能耗在线监测	生产 IT 网	满足带宽和时延即可	5G MEC 接入生产 IT 网、MEC 支持数据分析 / 统计 / 报警等业务，5G MEC 与数据采集设备组网；数据采集设备管理系统通过生产 IT 网组网。
智能仓储	生产 IT 网	大带宽、高可靠、低时延	5G MEC 接入生产 IT 网、MEC 支持 AGV 管理系统，5G MEC 与 AGV 设备组网；AGV 设备与其他相关设备通过生产 OT 网组网。
车辆及现场人员管理	生产 IT 网	大带宽	5G MEC 接入生产 IT 网、MEC 支持车辆及现场人员管理系统，或者 MEC 与 IT 网中的车辆及现场人员管理系统组网。
5G 无人机外场检测辅助	生产 IT 网	大带宽	5G MEC 接入生产 IT 网、MEC 支持 5G 无人机外场检测辅助系统，或者 MEC 与 IT 网中的 5G 无人机外场检测辅助系统组网。
可视化展示	办公网、生产 IT 网	满足带宽和时延即可	5G MEC 接入生产 IT 网或者办公网、MEC 支持可视化展示系统或者 MEC 与办公网中的可视化展示系统组网。

## ► 2. 典型组网方案

参考下图，大型装备制造企业级 5G MEC 典型组网方案如下。

- ECA：企业中的工业系统和设备可以通过有线和无线方式，接入边缘计算系统。
  - » 5G 蜂窝接入：公网业务数据由 5G 基站通过 IP-RAN 送到核心网处理；本地数据直接由 5G 基站送至本地 UPF。
  - » 有线连接：可由采用光纤或者以太网通过路由器、防火墙将企业办公网、企业 IT 生产网、企业 OT 生产网接入 ECN。
- » 5G 室外覆盖方案：
  - › AAU 组网：利用 AAU 大功率优势实现道路覆盖；
  - › 部署规模：根据厂区面积大小，确定基站数量。举例：1100 亩的厂区部署 3 个基站，每个基站 2 个 AAU，共 6 个 AAU。
- » 5G 室内覆盖方案：
  - › 车间级：考虑到上行带宽需求及该车间 5G 手机用户接入需求，可部署 NSA 和 SA 两套系统，共需部署 2 个 BBU，2 个 rHUB 和 12 个 pRRU。

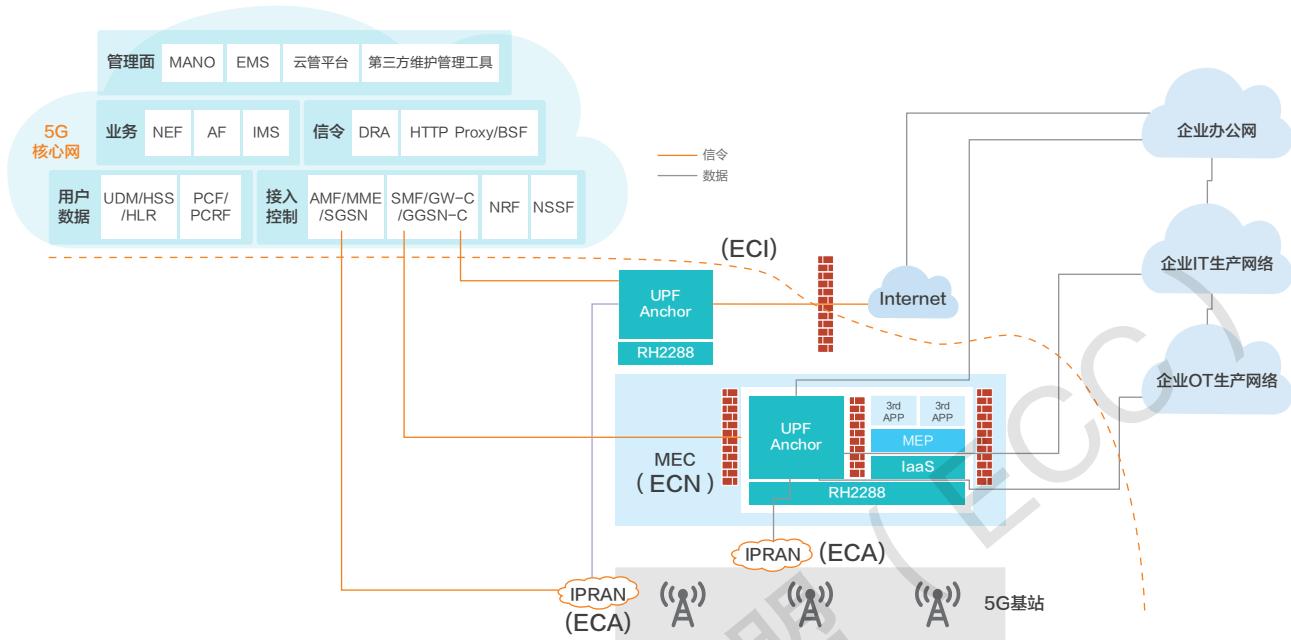


图 4.1 5G MEC 与企业网组网

- ECN : 边缘计算内部网络。
  - » 5G MEC 是一个小型边缘云，通过一对 ECN 网关路由器和外网互连，内部连接 UPF 一体机和边缘计算服务器。
  - » 典型配置包括：
    - › UPF 服务器 : 3 台；
    - › 交换机 : 3 台 (TOR 2 台, 硬件管理 1 台)；
    - › 防火墙 : 2 台。
- ECI : 包括运营商网络互连部分和企业网互连部分。
  - » 运营商网络互连部分 :
    - › 5G 核心网 : 主要负责控制面任务。MEC 通过 IP-RAN 连接核心网。5G 核心网的实际部署可由大区核心网和本地核心网组成。本地核心网是大区核心网的部分能力下沉至网络边缘组成。
    - › UPF 的部署及运维管理 : 使用核心网管理面进行 MEC UPF 的拉远部署及后期运维管理。UPF 可使用 MEC 标准轻量化方式进行部署；如无公网接口需求，UPF 可规划为 UPF Anchor，不提供出公网接口；如有出公网诉求 UPF 需要规划为 UPF ULCL 并打通 N9 接口与 UPF Anchor 互通，由 UPF Anchor 出公网。
  - » 企业网互连部分 :
    - › 为本地网络用户规划数据网络名称 (DNN)，并通过 AMF, SMF 配置实现本地用户的 UPF 选择；
    - › 安全防护由边缘机房防火墙负责。

## 4.2

# 3C 行业解决方案实践

### 4.2.1 典型应用场景

以 3C（电脑 Computer、通讯 Communication 和消费性电子 Consumer Electronic）为代表的制造产业是典



**视频监控应用：**包含园区办公室监控、仓库监控、园区出入监控、生产线设备异常、操作人员行为、是否戴安全帽、车间人员是否按规定路线行走等；除了安防监控，生产过程中还需要对生产线设备及操作人员行为异常进行识别，增强产线安全和可靠性，为产线工序定义操作红线，关键操作不能有遗漏。

**C2C 控制：**随着机器人技术的发展，多机器人协作系统是当前工业机器人应用的一个重要发展方向，通过多机器人的协作可以完成复杂的制造过程。多机器人协作系统与 5G、机器视觉、边缘计算、云计算技术的融合，可以改善机器人的刚性自动化，提高产线的柔性能力。

**AR 辅助运维 / 装配：**随着 AR/VR 技术发展，工业企业引入 AR 辅助生产，典型应用场景包括：远程安装指南、远程维护培训、仓储拣料辅助、复杂环境导航。

**机器人园区巡逻：**日常巡检工作包括检查是否存在可疑热源、关键设施是否被损坏、园区各点位是否存在有害气体，提供全天候 24 小时巡逻。

型的离散生产模式，柔性化、自动化、智能化、网络化成为主要发展诉求，典型应用场景包括：



**AGV 应用：**主要场景有 5G 视觉 SLAM 导航 AGV、5G 替换 Wifi 的 AGV 调度。AGV 系统是智慧工厂的重要构成之一，实现物料的自动流转和生产制造的全程可追溯生产数据采集。

**工厂数据采集应用：**传统数据采集面临挑战包括：有线部署周期长，故障难检测；定制化加载测试，灵活部署快速交付；数据传输稳定性和确定性需要保证等。5G 可使能生产数据采集剪掉辫子，构建数字孪生生产线。

**AR 设备智能巡检：**当设备出现故障时，现场技术人员还可通过终端设备查询云端专家知识库的相关意见，同时可利用 AR 技术请求专家进行远程故障诊断。

## 4.2.2 组网技术方案

3C 制造行业未来工厂应包括：智能加工中心与自动化生产线、智能化生产执行过程管控系统、智能化立体仓库和物流运输系统、智能化生产控制中心、生产质量智能管理系统、智能决策与分析系统、仿真与设计系统和协同制造系统。

面向大规模产品的流水线制造模式，指的是采用工业机器人、自动化专机、特定生产装备等，组建自动化生产线，

实现各工序的自动化、无人或少人化生产作业。采用自动化流水线制造方式，可以大幅提高劳动生产率，缩短生产周期，减少在制品占用量和运输工作量，降低生产成本。

因此，需要搭建基于 5G MEC 的企业虚拟专网。传统方式主要是通过终端设置专用 VPN，在园区通过 Internet 访问企业内网，如同下图：

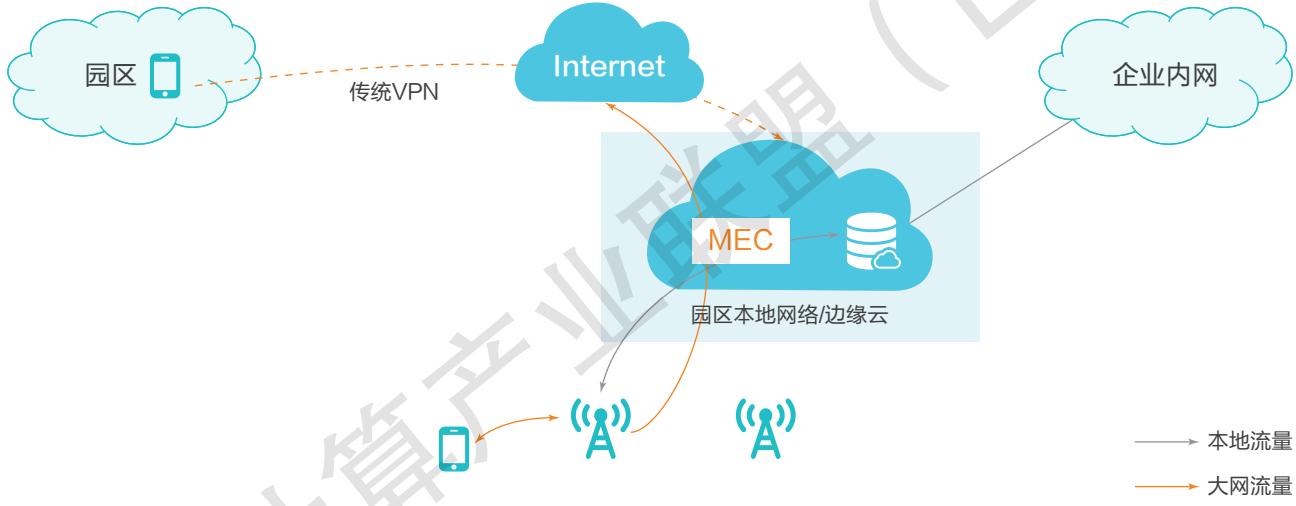


图 4.2 传统 VPN 组网方式

基于 5G MEC 的虚拟企业专网主要是通过聚焦需求，采取云网结合的技术方案。

### (1) 部署 5G 基站，覆盖 5G 信号

通过 5G 室分进行覆盖，提供移动化、低时延、大带宽的“5G 管道”，企业内终端访问园区业务时，进行该特定业务分流；分流规则可基于 IP 地址、用户签约等方式，也支持由园区策略设置访问权限（应用层、白名单等）。

### (2) 搭建 MEC 平台（边缘计算）

边缘计算（MEC）可以看作是一个运行在移动网络边缘的、运行特定任务的云服务器。MEC 技术支持在无线基站与核心网之间运行应用程序，向移动用户提供业务，其基本思想是把云计算平台从移动核心网络后端迁移到移动接入网边缘，实现计算及存储资源的前置利用，旨在减少移动业务交付的端到端时延，从而提升用户体验。

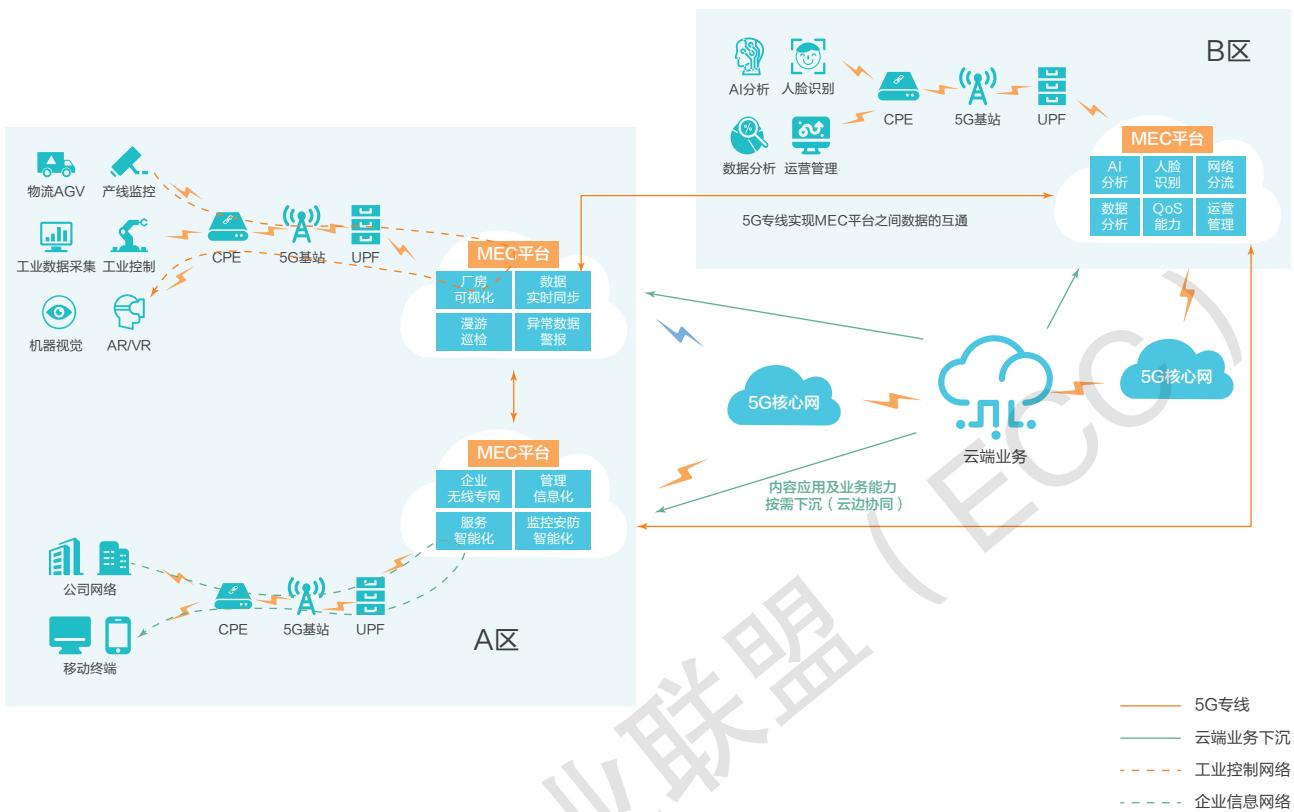


图 4.3 MEC 组网方式

### (3) 基于 5G+MEC 的虚拟企业专网

5G 的核心网采用云化部署方式，将云基础设施、边缘机房、丰富的光纤传输、AI 等能力资源优势同 5G 深度融合，

5G+MEC 的虚拟企业专网中将运用 5G 边缘计算、5G 专线、5G 网络切片、5G 超级上行，在工业控制、质量、管理、可视化、以及安全应用领域，促使产业不断更新升级。

## 4.3

# 智慧工厂解决方案实践

### 4.3.1 行业需求分析

随着中国经济转型发展，传统工业园区正面临重重挑战，如网络资源配置不合理、产业模式不完整、未形成共享机制、投入产出严重失衡等。主要体现如下：

(1) 从园区网络来说，工厂生产网络扩展性差、灵活性差。

当前园区工厂的生产线联网大多依赖有线传输，虽然园区已覆盖 WIFI、LORA 等无线网络，但仍存在信号干扰、容量有限、稳定性较差等问题，导致部分生产辅助设备如扫描枪、办公 Pad、AGV 等在使用过程中时常出现掉线、卡顿等问题，严重影响了工作效率和用户体验。

(2) 从系统平台来说，各家工厂应用和系统烟囱式独立部署，缺乏相应的集成与互联机制。

传统的 MES 系统是相对封闭的制造执行管理系统，只是适用于工厂的车间生产线，与其他的系统间是一个个信息孤岛，造成工厂整体效率很低、信息共享和业务系统非常有限。

(3) 多样化的工业业务场景需求需要，对于园区业务呈现出需求的多样化，不同场景对网络安全业务隔离和网络具体指标的要求是不一样的。

生产线的设备管理与机器视觉是严格的生产域数据，对安全隔离性要求高，但目前网络无法实现生产域数据与其他业务数据的隔离保障。另外，产品质检环节中拍摄图片回传至平台，需要上百兆 / 秒的速率，时延要求

20ms；设备管理要求精准控制，时延要求 10ms 以内；这些都对网络定制化提出更高要求，通过 5G 切片与边缘计算特性可满足工厂定制化需求。

(4) 当前 5G 行业应用场景规模推广难度大，无法快速满足工厂需求。

目前 5G 行业应用中做的比较多的是工业机器视觉、AR 远程维修、AGV 控制、PLC 控制等，这些应用场景的解决方案还是以普通的终端加 5G CPE 为主。该方案受限 CPE 的上行带宽小，组网复杂等原因，规模复制难度很大。导致无法快速的在工厂内实现部署。



图 4.4 原有 CPE 联接方式

针对以上问题，采用 5G+ 边缘计算的方式进行网络部署。边缘计算可以满足敏捷连接、实时业务、数据优化、应用智能、安全与隐私保护等方面的需求，是实现分布式自治、工业控制自动化的重要支撑。5G 技术发展切合了

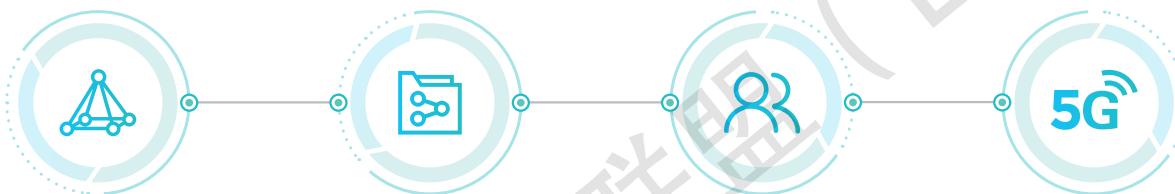
传统制造企业在数字化转型中对无线网络的应用需求，其大带宽、低延时、广连接的特性，能更好满足工业环境下设备互联和远程交互等需求，并且为边缘计算的发展提供有力支撑。

### 4.3.2 组网技术方案

本项目方案以打造新一代工业智慧园区为目标，运用 5G+ 边缘计算构建可视化运维的 5G 虚拟专网，依托 COSMOPlat 和边缘计算平台优势和最新 5G 终端最终完成整个项目方案的落地。解决当前传统园区对于网络、

平台、应用和终端的诸多痛点，为海尔园区工厂提供定制化、交互、柔性的产品 + 服务。

整体方案框架共分为四个方面：



网络

结合边缘计算和网络切片技术建设一张覆盖园区的 5G 专网网络，满足生产设备的大连接、广覆盖，实现设备随时随地的移动接入；

平台

提供 MEP 开放平台，加强与 COSMOPlat 平台运营数据共享，为车间内各种生产应用提供需要的计算能力；

应用

结合工厂的特点设计满足工厂需求的典型应用场景；

终端

针对行业终端缺少导致场景规模推广难的情况，联合行业厂商开发 5G 行业终端。

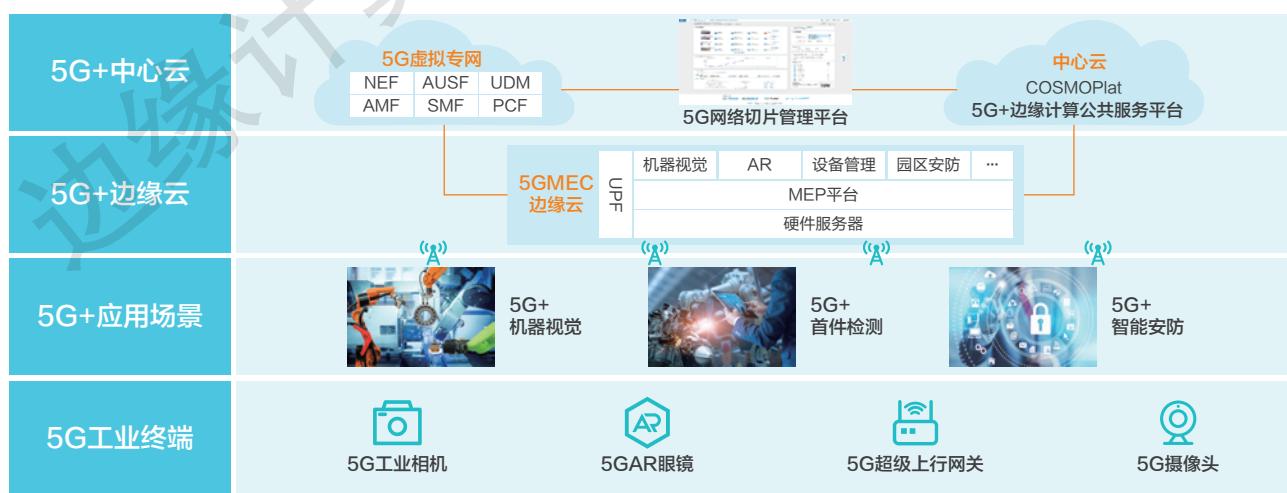


图 4.5 解决方案架构图

# 05

## 工业互联网边缘计算 网络发展趋势及建议



### 5.1

### 工业互联网边缘计算网络未来展望

工业互联网时代已经逐步开启，无论是在技术还是产业应用方面，都有巨大的发展空间，研究和应用工业互联网的企业或机构可以在现有的网络、计算、通信、制造信息化等方面发挥创造力，丰富其中的技术内涵和应用模式，为新的互联网时代的工业进步探索更有效率的发展途径。当然，工业互联网不仅仅是简单的对互联网的应用，工业技术与产业在互联网的环境中还可以建立更加具有革命性的体系，借助为发展互联网、移动通信、云计算而建立的全社会的基础设施资源，把工业体系与相关联的渠道和系统联系起来，构建一个可以相互融合、互为作用、相互服务的高效网络，为工业产品制造、应用运行、全生命周期状态等过程提供更加丰富的数据，为全方位的系统优化提供依据，并为在线服务创造技术条件。

工业互联网是传统制造业转型和升级为智能制造的重要保障，智能制造是制造体系的全面升级，涉及产业链的各个环节，贯穿于产品生命周期的每个阶段（设计→生产→物流→销售→服务）。我国智能制造将工业互联网作为重要

基础设施，此次疫情背景下，工业互联网和 5G、MEC、人工智能、大数据中心一起，成为国内“新基建”投入的重点，为工业智能化提供共性的基础设施和能力支撑。工业互联网中的边缘计算网络作为“新基建”的网络基础设施建设重要一环，其建设需要在此过渡过程中逐步升级，在边缘连接传统制造与智能制造，实现“云网边”协同，为工业互联网的发展与未来智能制造的成功转型奠定坚实的基础。

从工业智能制造发展的角度来看，如何保证原有生产的情况下，通过工业互联网突破传统方式的壁垒，提高生产效率，扩大生产规模，是未来工业互联网发展的一个方向。边缘计算网络在工业互联网中的作用，包括将边缘设备进行汇聚，将园区网与 MEC 进行互联，将多点 MEC 进行协同，从而满足未来工业生产的需求，其发展方向是提供高效、灵活、稳定的连接。当前，新冠肺炎疫情在中国逐步得到控制，但在欧美等其它国家的形势不容乐观。在国内的整体疫情防控形势要求下，很多企业，尤其是制造业企

业已经逐步将生产方式由过去大量人工劳动方式转变为机器代替人的自动化生产方式。通过这次疫情，中国传统制造业充分认识到数字化、网络化、智能化生产方式的重要性和大数据平台、工业互联网平台建设的真正价值。而如

何将传统方式中的生产设备、生产数据通过边缘网络以最高效的方式汇聚到工业互联网中来，实现“云网边”协同，是边缘计算网络未来的发展方向。



## 5.2

## 工业互联网边缘计算网络发展建议

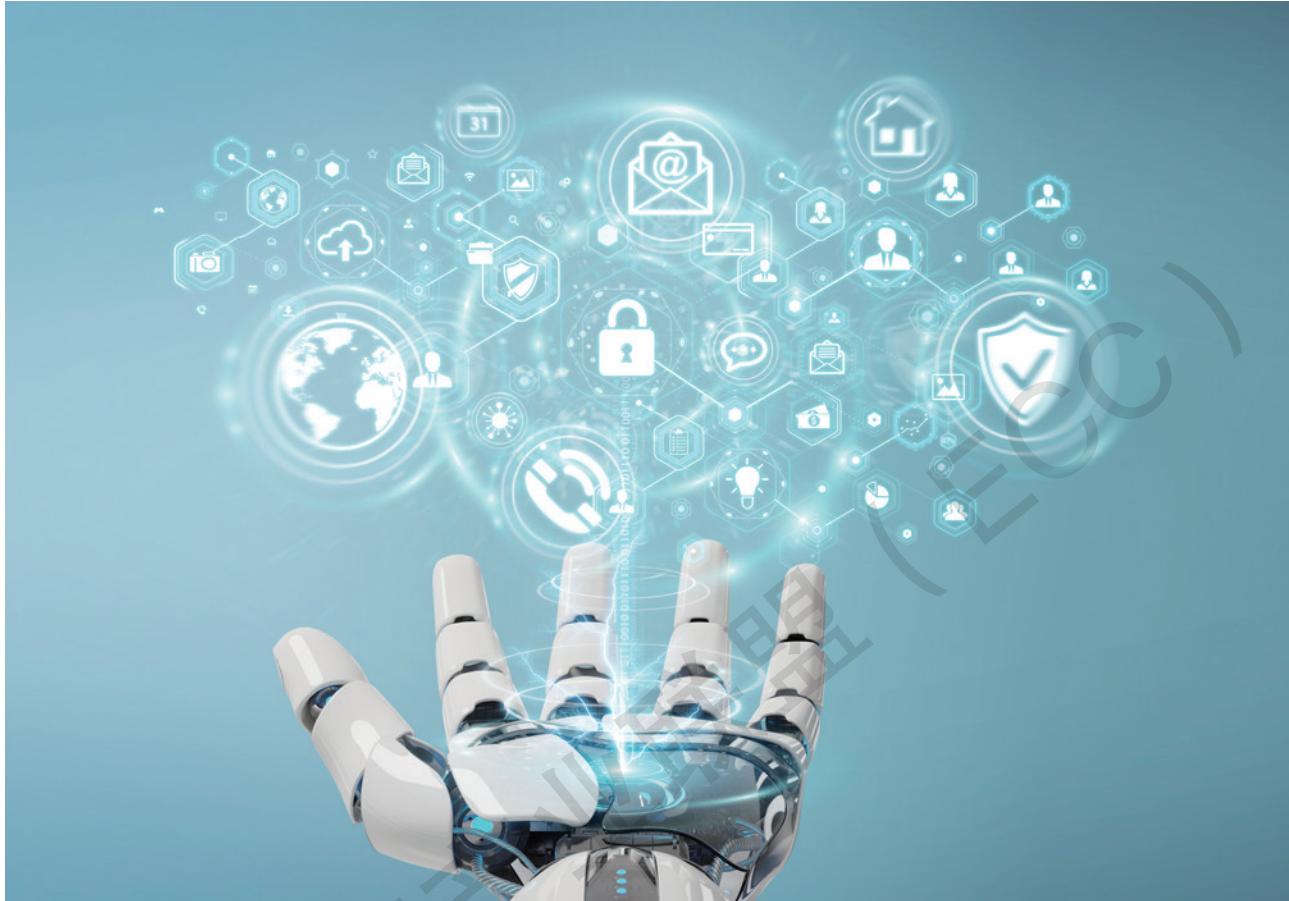
工业互联网用三句话概括：数据采集是基础，工业 PaaS（平台即服务）是核心，工业 APP 是关键，即通过大范围和深层次的数据采集，构建工业大数据管理和服务平台，形成满足不同行业、不同场景的应用服务。在“数字基建”推动下，只有通过构建“端、网、云、业”的网络集聚生态，才能实现工业互联网的整体发展。

其中，“端”和“网”是边缘计算网络研究的范畴：

“端”是智能感知，数据采集是工业互联网的基础，而如何将采集的数据更有效的传送到网络上，就需要将“端”接入到边缘计算网络中。车间是制造企业使用与产生数据的重要场所，传感器无处不在，如何将传感器更灵活高效的接入边缘计算网络，实现实时的数据传送，是工业互联网边缘计算网络中需要进一步解决的问题。工业互联网一方面给传感器企业带来了机会与挑战，另一方面，也对边

缘网络的兼容性与灵活性带来了更高的要求，以达到网络化、通用化、智能化的更高目标。

“网”是互联互通，连接即服务，工业互联网与 5G+MEC 的融合是未来的看点。5G+MEC 带来的高带宽、低时延、支持海量接入等方面的优势，具备与工业互联网深度融合的潜力。IT 与 OT 的融合，在通讯机制和数据结构层面，实现了真正意义上的互联互通。工厂内部网络呈现出扁平化、IP 化、无线化及灵活组网的发展趋势，并逐步融合为同一张全互联网络，工厂外部网络则呈现出工业生产信息系统与互联网的深度协同与融合，结合边缘计算接入网络、边缘计算内部网络以及边缘计算互联网的技术扩展，以真正实现 IT 系统与互联网的融合、OT 系统与互联网的协同、企业专网与互联网的融合、产品服务与工业互联网的融合等目标。



工业互联网通过构建网络、平台、安全三大功能体系，打造人、机、物全面互联的新型网络基础设施。在此网络体系中，网络是互联的基础，涉及人、机、法、料、环全要素和产品生命周期各环节，将工业全系统、全产业链、全价值链深度互联；平台体系是核心，在传统工业云平台的基础上，通过物联网、大数据、人工智能等技术的应用，实现制造能力开放、知识经验复用和开发者集聚；安全体系是保障，可以识别和抵御安全威胁、化解各种安全风险。边缘计算网络只有结合传输与承载网络、平台体系、安全保障功能共同发展，才能够更好的满足工业互联网对于未来智能制造的整体需求。

此外，我国作为世界第一制造大国和网络大国，为了将我国建设成为制造强国和网络强国，应该高度重视工业互联网在工业制造领域的推动作用，将其与 5G、MEC 协同发展，

聚焦各工业领域，积极推进 5G、MEC 与工业互联网的融合应用和创新发展，推动生产制造服务体系升级、产业链延伸和价值链拓展，从而产生叠加倍增效应，助力企业实现远程协同管理、产品服务化、供需对接实时化、智能化生产和管控精细化、无人化等。

工业互联网对工业领域自身的革命性影响也必将是深远的，以制造业为例，正在酝酿和发展的基于网络和数据的智能制造正在深刻的影响着制造技术和制造过程的组织模式，正在从解放生产力中获得更加高效和低成本的制造能力。边缘计算网络作为基础设施中的互联基石，在汇聚与协同中起着至关重要的作用，因此，对于工业互联网中的边缘计算网络开展持续的深入研究是十分必要的，需要企业界、科研机构和相关领域的有识之士积极参与。

## 参考文献

1 ) 5G MEC IP 承载网白皮书, 数通产品线, 华为技术有限公司, 2020 年

<https://carrier.huawei.com/~/media/CNBGV2/download/program/5G-MEC-IP-Network-White-Paper-cn-v2.pdf>





关注边缘计算产业联盟  
请扫二维码

#### 版权所有 ©

本白皮书版权属于边缘计算产业联盟( ECC )、工业互联网产业联盟( AII )、  
网络 5.0 产业和技术创新联盟( N5A )共同所有，本文档包含受版权保护的内容，  
未经本联盟书面许可，任何单位和个人不得擅自摘抄、复制本文档内容的部分或全部，并不得以任何形式传播。

#### 商标声明

 边缘计算为边缘计算产业联盟( ECC )的商标。

 工业互联网产业联盟( AII )的商标。

 网络 5.0 产业和技术创新联盟( N5A )的商标。

本文档提及的其他所有商标或注册商标，由各自的所有人拥有。

#### 边缘计算产业联盟( ECC )

地址：北京市海淀区上地十街辉煌国际 5 号楼 1416

邮编：100085

网址：[www.ecconsortium.net](http://www.ecconsortium.net)

邮箱：[info@ecconsortium.net](mailto:info@ecconsortium.net)

电话：010-62669087

#### 工业互联网产业联盟( AII )

地址：北京市海淀区花园北路 52 号

邮编：100191

网址：<http://www.aii-alliance.org/>

邮箱：[aii@caict.ac.cn](mailto:aii@caict.ac.cn)

电话：010-62305887

#### 网络 5.0 产业和技术创新联盟( N5A )

地址：北京市海淀区花园北路 52 号

邮编：100191

网址：<http://network5.cn/>

邮箱：[network5@caict.ac.cn](mailto:network5@caict.ac.cn)

电话：010-62300067