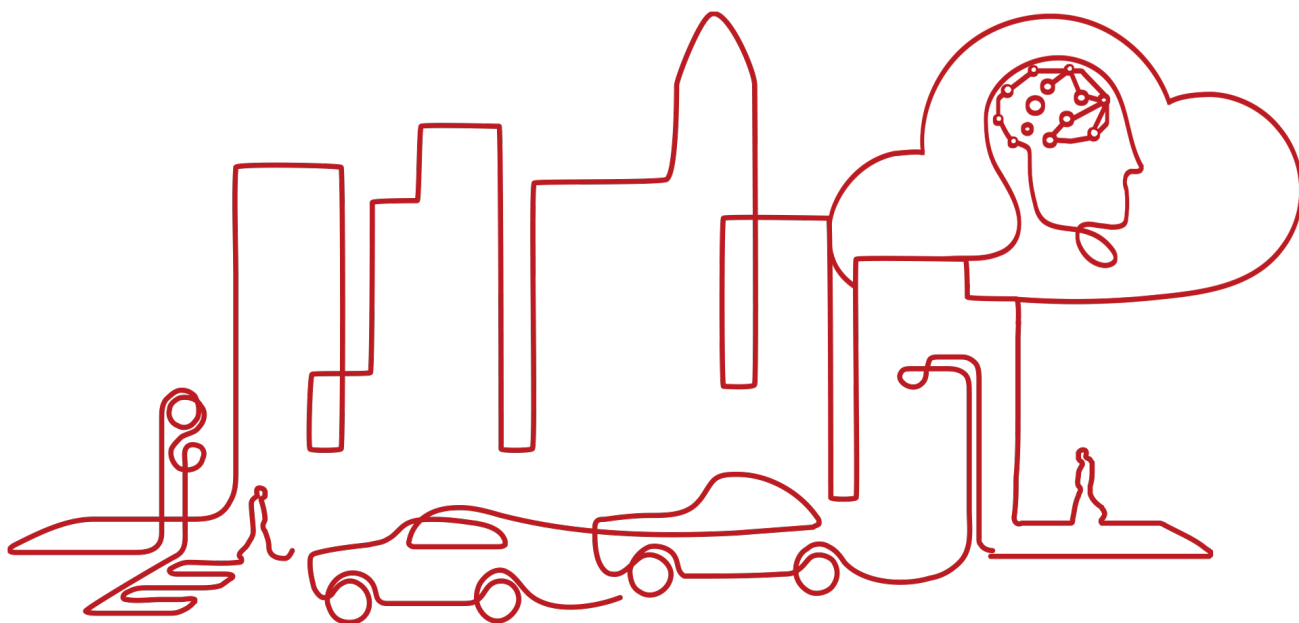


5G工业互联网赋能5G全连接工厂技术白皮书



5GDNA确定性网络产业联盟
2022年11月

目 录

01 什么是5G工业互联	04
1.1 5G与工业融合发展进入新阶段	04
1.2 5G工业互联的主要发展方向	05
02 5G工业互联发展阶段	09
2.1 5G工业互联阶段一：5G车间生产网	10
2.2 5G工业互联阶段二：5G产线工控网	11
2.3 5G工业互联发展阶段分析小结	13
03 5G工业互联关键技术能力	14
3.1 5G工业确定性连接	14
3.2 5G工业极简组网	14
3.3 5G MEC高稳计算	15
3.4 工业协议感知和协同	15
3.5 确定性安全	16
04 5G工业互联相关标准	17
05 总结和展望	18
引文和缩略语	19

本白皮书主要参编单位及人员（以下排名不分先后）

中国科学院沈阳自动化研究所	李栋
中国移动通信研究院	黄震宁、王菁、张翀、徐要强、马万明
中国联合网络通信集团有限公司	陈丹，肖羽
中国联合网络通信有限公司研究院	黄蓉，裴郁杉
中国电信集团有限公司	安志国、孙海、任勇强、李小刚、曾祥宇、杨雷
中国电信股份有限公司研究院	杨峰义
华为技术有限公司	乔雷、伍勇、周凯、陈晓光
海尔集团公司IT平台	韦韬、徐文博
卡奥斯工业智能研究院	赵士超、杜召娟、胡明臣
浙江中控技术股份有限公司	石莹 蒙博宇
珠海格力电器股份有限公司	李斌、柯栋、张俊杰、李润静
三一重工股份有限公司	王辉，杨阳
TCL 王牌电器（惠州）有限公司	赵大力，潘德灼，李竞帆，赵才军
中国电力科学研究院有限公司	朱思成，孟萨出拉，王智慧，韩金侠、杨德龙
国网山东省电力公司青岛供电公司	徐群、刘明峰、李坤、孟建、辛雨航、曲增彬
北京智芯微电子科技有限公司	王于波、赵旭
中科云谷科技有限公司	石恒、汤胜
联通（山西）产业互联网有限公司	杨卫东、许春、高雪峰
东方有线网络有限公司	王明敏、茹伟光、葛虎峰
重庆邮电大学	魏旻、王浩、黄庆卿
重庆邮电大学工业互联网研究院	王平、蒲成亘、孙雄
北京紫光展锐通信技术有限公司	张欲、夏彦龙、朱勇旭、张伟强
上海移远通信技术股份有限公司	应义星、胡勇华、马进永
深圳市广和通无线股份有限公司	张建国、李许安、张佩、李升根
深圳市宏电技术股份有限公司	郭泽辰、凌海宏、龚潇、邹新星
厦门四信通信科技有限公司	唐仕斌、张绍炜、叶顺林
北京中微普业科技有限公司	袁为化、李勉、艾治均
厦门星创易联科技有限公司	严永金
浙江利尔达物联网技术有限公司	沈伟峰、沈晓伟、田志禹
苏州振畅智能科技有限公司	杨文浩、杨文静
北京经纬恒润科技股份有限公司	吴临政，白海明、薛俊亮
广东辛顿科技有限公司	马健
江苏未来网络集团有限公司	叶迎春、陈刚、张强
浪潮通信技术有限公司	梁亮、姜永、高娴
深圳艾灵网络有限公司	俞一帆

第1章 什么是5G工业互联网



1.1 5G与工业融合发展进入新阶段

1.1.1 工业智能化和工业网络发展趋势

工业智能化是基于新一代信息技术与先进制造技术深度融合，贯穿于设计、生产、管理、服务等制造活动的各个环节，具有自感知、自学习、自决策、自执行、自适应等功能新型生产方式。智能制造通过引入大数据、云计算、AI等技术，在生产操作自动化和管理决策信息化等方面已经取得了很大进步，后续需要基于更加广泛和高性能的联网、实时的数据采集、高效的控制，通过AI的深度使用，实现智能化的工业形态，从而实现产品全生命周期制造流程自动优化和人机互动与协同的智能化。通过结合5G的联网和5G MEC边缘计算的计算能力，智能制造系统将进一步实现生产力的提升。5G作为先进的技术，具备移动、无线、高带宽、低时延、广连接的特点，通过5G确定性能力提升，5G确定性网络成为工业网络体系中的重要技术手段之一。5G MEC边缘计算所提供的近端算力平台，也成为工业互联网平台和应用重要的承载基础。5G正在与工业智能化和工业网络体系产生更多的融合价值，赋能产业数字化转型的进程。

1.1.2 5G工业互联网主要关注领域

5G经过两到三年的发展，已经在各个垂直行业落地了大量创新应用，包括5G机器视觉、5G AGV、5G智能视频监控等。随着5GtoB的进一步深入、5G能力的进一步提升，产业也对5G提出了“承载核心生产环节”、“进内网”等要求。在十部委联合发布的《5G应用“扬帆”行动计划（2021-2023年）》中，明确提出了加快利用5G改造工业内网，打造5G全连接工厂标杆，以及，推动“5G+工业互联网”服务于生产核心环节。在工信部《工业互联网创新发展行动计划（2021-2023）》中，明确提出了推动5G应用从外围辅助环节向核心生产环节渗透。2022年9月，工业和信息化部印发《5G全连接工厂建设指南》，支持企业建设产线级、车间级、工厂级等不同类型5G全连接工厂，并提出“十四五”时期，推动万家企业开展5G全连接工厂建设，建成1000个分类分级、特色鲜明的工厂，打造100个标杆工厂，推动5G融合应用纵深发展。

结合上述5G服务核心生产环节、进内网等产业需求，本白皮书提出5G工业互联网。指的是，利用工业级的5G能力，通过5G来支撑工业生产网络的建设，并通过5G MEC作为工业算力底座承载工业软件和平台系统，实现5G使能的工业数字化转型升级。5G工业互联网是一个工业级5G能力的技术集合，通过这些技术实现5G承载核心生产网络和应用，实现对5G全连接工厂的赋能。

1.2 5G工业互联的主要发展方向

整体来看，5G工业互联的主要发展方向包括如下三个方面：

- ◆ 方向一，5G承载工业生产网络：5G从承载辅助性生产业务向核心生产环节渗透，深入车间和现场，部分或全部代替传统生产网络，所谓“更深”
- ◆ 方向二，5G MEC承载工业平台和应用：通过5G网内算力，基于5G网络边缘计算承载工业软件和工业互联网应用等，实现工厂算力底座和工厂普遍赋能，所谓“更强”
- ◆ 方向三，集团+分支机构多园区统一算网：5G MEC连点成网，实现多园区统一算网和统一管理运营，所谓“更广”

1.2.1 方向一，5G承载工业生产网络

5G承载工业生产网络的核心驱动力来自柔性制造和网络简化的需求。按照业界一般理解，柔性生产可以表述为两个方面。

第一方面是系统适应外部环境变化的能力。

例如，离散制造领域中，许多行业存在产品更新周期缩短、产品种类激增、批次缩小的需求。车间不仅需要根据新产品，快速组件新的产线，还需要随着不同产品产量的变化，调整产线的规模与部署位置。由此，工厂对生产网络也提出频繁调整的需求。这些调整既包括产线内部设备间的自动化通信部分，也包括生产管控系统的相关网络部分，如MES客户端与MES服务器间的通信。当前，上述网络基本都采用有线组网，调整会涉及重新布线、网络配置等工作，工作量大且复杂。对于绝大多数工厂车间，由于IT人员数量限制，往往需要集成多个外部服务商来协同完成，所需的协调沟通周期就需要数天。此外，制造领域的物流系统也需要随之调整。

第二方面是生产系统适应内部变化的能力。

产线中，大量的IO模块本身随着执行部件一起移动。此时，IO模块与PLC之间的连接会存在扭曲、频繁插接等，导致工业以太网接口易于损坏，例如拖链机构、转台转鼓、机械臂抓手上的阀岛等。一旦发生一个接口或者线缆损坏，将会导致PLC控制的整条产线停产。很多情况下，由于布线较为密集，部件连接复杂，需要花费大量时间定位具体问题，并拆装线缆。如果是闪断的场景，问题定位难度更高，该过程需要花费2-4个小时。

当前，离散制造行业的设备间工控网络越来越多采用工业以太网通信。且绝大部分通信采用标准以太网帧承载（除少量高精度运动控制需要<1ms的通信需求之外）。5G网络天然具备无线化组网免布线优势，可集中实现设备拓扑关系可视，并可集中配置界面完成网络调整。这为设备间的工业控制通信5G无线化奠定了良好的基础。

从5G化对于柔性生产带来的价值，包括如下几个方面：

- ◆ 在需要快速转产的领域，5G化的工业网络可提升网络调整效率数倍。有效缩短投产时间、提升设备整体效率与产能。
- ◆ 在网络新建/设备规模升级等场景下，基于5G的网络也节约了大量设计时间。在完成逻辑拓扑组网设计之后，无需花费数天去输出详细组网拓扑接线图。
- ◆ 在降低网络线损导致停机的领域，5G工业互联通过免布线，避免了上述扭曲、插接等导致的损耗。能大大降低停产时间。对于高节拍自动化产线价值明显。

为实现上述柔性生产的价值，涉及到车间生产网（主要是例如MES和SCADA等系统的连接需求）和产线工控网（主要是PLC之间以及PLC和IO之间的连接需求）的5G化。所需的5G能力主要包含简化的组网能力、可靠的通信时延、并发密度容量、设备可用性、安全等。

简化组网能力是基础。首先要能满足工业以太网使用最多的2层连接需求，并同时支持3层通信需求。此时，5G网络和终端模组支持5G LAN，才能实现简化组网，避免部署和设置隧道类设备。

稳定可靠的通信时延是支持此类业务的技术门槛。从工业控制业务需求来看（以常见的工业以太网Profinet需求为例），需要综合考虑两个方面的需求。一是应考虑时延的稳定可靠性。即，以周期（CT，Cycle Time）发送的工业以太网数据包到达目标节点的时机应该是稳定的。在接收端，期望在每个Cycle Time周期，都能收到数据包。如果因为丢包/超时，导致接收端连续多个Cycle Time周期内未收到数据包，一旦触发接收端超时看门狗（WDT，watch dog timer）门限，将导致PLC通信错误，连接中断。二，应考虑通信的最大时延。最好不超出PLC设置的扫描周期，避免出现业务逻辑错误，以及显著增加生产节拍，从而降低对于工业设备和逻辑的修改。综合这两个诉求，采用确定性时延指标来满足需求。该指标中的时延指的是最大时延。建议最大时延应小于扫描周期（此时，对于最小时延指标无要求）；该指标中，同时定义了最大时延的可靠性应满足一定要求，确保时延稳定，而不触发看门狗门限。

并发密度/容量：在满足产线所需确定性时延要求的前提下，并发连接的密度/容量是影响5G技术可行性与成本的关键指标。

5G设备可用性，需要能满足车间、产线可用性要求。作为车间、产线整体的一部分，5G设备的可用性不能成为短板。不仅降低设备宕机概率，还体现在能否快速从故障中恢复。

安全是底线。首先，5G自身不应引入新的安全风险。其次，5G在将现有多个有线网络“剪辫子”后，物理上成为一张网。此时，需要能继续保持现有车间的安全隔离。例如不同产线，原本分属于不同的子网，5G后，也需要能保持隔离，避免相互影响。

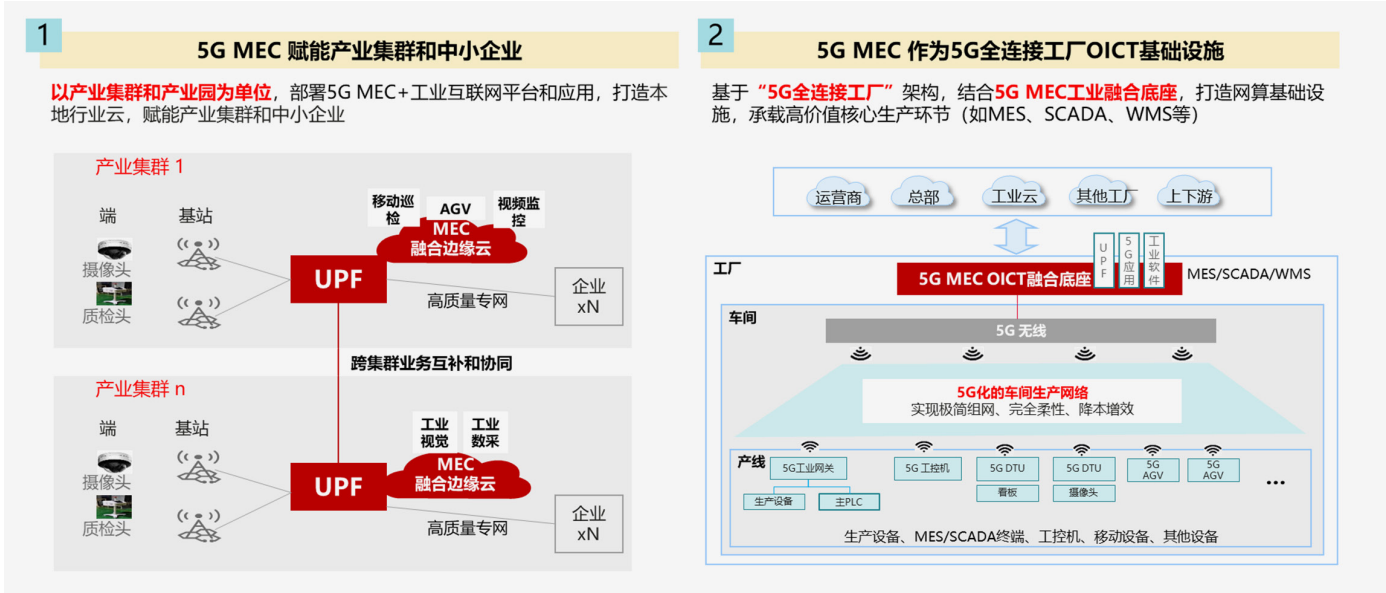
此外，5G网络还应能提供自助服务能力，如本地指标监控、自助完成网络重组等。



1.2.2 方向二，5G MEC承载工业平台和应用

5G MEC或5G网络边缘计算是5G算网体系的重要组成部分。5G MEC提供了下沉的算力节点，并且与5G网络能力紧密融合。同时，工业互联网平台和应用，也呈现出两方面的发展趋势：一方面，云端的工业互联网平台和应用需要通过下沉来满足工业企业对于时延、带宽等性能的更高要求；另外一方面，工业场所内部分散的工业互联网平台和应用节点，例如位于产线上的工控机所承载的应用等，也需要通过算力上移到边缘侧，通过集中化降低部署和使用成本，并实现算力的统筹复用，提升整个系统能力和灵活性。这两个趋势的落脚点，都在边缘计算这个位置，也就是说位于部署于地市或产业园的共享式5G边缘计算节点，或部署于工厂机房的入驻专享式边缘计算节点。不论是云端工业互联网平台和应用的下沉，还是现场工业互联网平台和应用集中化，5G MEC节点都是非常适合的承载底座。尤其是在使用5G作为工业互联网的主要连接手段时，5G MEC或5G网络边缘计算更是成为离工业终端最近，整体架构最合理的边缘算力节点，成为工业互联网平台和应用爆发出新的数字化能量的助推器。

1. 对于广大的中小企业，可以通过地市或产业园区区级部署的5G MEC节点，叠加工业互联网平台和应用，结合统一的5G连接组网能力，一站式获得网联化数字化所需的各项能力，实现企业竞争力提升。这就是共享式的5G MEC或网络边缘计算对产业和中小企业的普遍赋能。
2. 对于大型企业，可以采用入驻专属的5G MEC节点，承载专属的工业互联网平台和工业互联网应用，实现自身生产网络+计算+业务体系的整体柔性 and 架构最优。这就是专属式的5G MEC或网络边缘计算向大型企业提供的算网一体的工业融合底座。



1.2.3 方向三，集团+分支机构多园区统一算网

考虑供应链的成本合理性、异地产业布局等多方面的因素，工业企业往往涉及到全国甚至全球范围内的多园区架构。5GtoB市场发展初期，企业往往会选择某个园区或者某个工厂甚至某个厂房来进行5G的建设，随着5G的应用逐步深入和广泛，不可避免的是，企业将需要在分布在不同地理位置的工厂或园区开展5G建设。那么如何进行集团+分支机构的园区5G算网建设，成为了新的热点和课题。

通常来讲，企业希望5G网络和5G算力在多个园区落地的时候，可以满足如下的诉求：

统一技术架构。采用统一的5G技术架构，有利于企业对5G进行不同园区的快速复制建设，提升实施效率，有利于后期的管理和系统演进。对于入驻式的专网系统，甚至可以考虑采用来自同一个厂家的5G系统，以便于在各个厂区快速进行5G建设的复制。

统一管理。企业对5G具有强烈的自管理要求，在多个园区开展5G建设的时候，肯定不希望每个园区的5G系统管理方式有太多差异，最好是能够通过统一的平台和统一的技术手段，对同一企业的多个园区的5G系统实现统一的管理。

统一组网。5G统一组网涉及到5G网络与企业原有网络之间的统一对接方式和架构，也包括了不同园区之间、集团和分支机构之间，不同5G节点之间的组网方式。通过各个园区的5G MEC节点的相互组网，可以实现5G专网与企业原有网络在不触动企业原有安全架构的前提下实现对接，还可以实现跨园区的5G应用业务协同以及算力调度。

集团+分支机构多园区组网的形态，已经在市场中出现，并且探索出了创新的实践路径。随着5GtoB的进一步深入，将会有更多跨地域集团型企业，考虑多园区的统一5G建设方式，以打造跨地域的5G融合底座体系，在实现支撑自身业务发展的同时，实现对外赋能，对产业赋能。

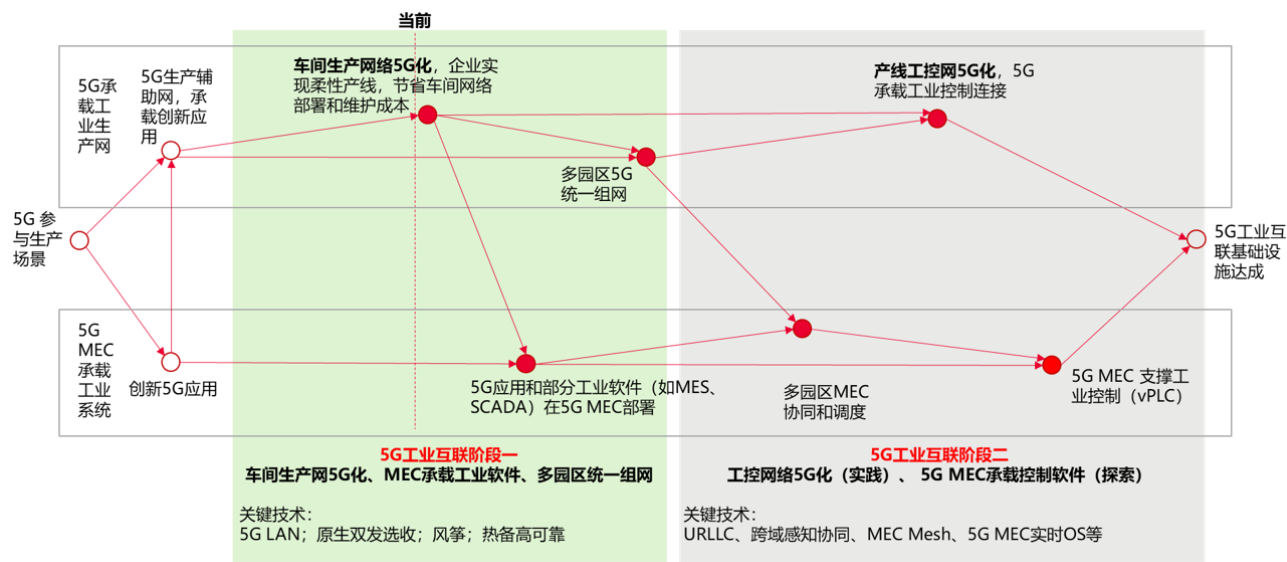
	集团统一规范	集团集中管理平台	集团统一建设	5G与内网统一对接	5G与内网融合	效果
方式一	Y	N	N	N	N	- 初期各工厂技术可基本保持一致，便于经验复制 - 不同运营商及设备商，也没有统一管理，后续演进难度大
方式二	Y	Y	N	N	N	各工厂按照规范分别招标建设，集团建立管理平台对各工厂5G系统进行统一管理，需对接多个运营商，管理平台开发和演进难度大
方式三（推荐）	Y	Y	Y	N	N	- 可选择统一的运营商和设备提供商，各个工厂技术和架构一致，便于统一管理的实现和后续长期演进 5G网络与企业内网在每个工厂通过两侧防火墙进行对接，业务互通最高效，但是增加了安全管理难度，需根据企业自身情况评估
方式四（推荐）	Y	Y	Y	Y	N	各工厂5G系统连点成网自成体系，对应应用部署于5G MEC，实现5G业务数据的最高效处理的同时，可以支持5G与企业内网通过原有内外网互通节点进行互通，保持企业既有安全管理架构
方式五（推荐）	Y	Y	Y	Y	Y	在公网专用前提下，部分5G网元在企业内网进行部署，5G网络成为企业生产内网的一部分。

第2章 5G工业互联发展阶段



当前5G在工业制造中的应用，多集中在“辅助生产”环节，作为辅助生产网出现，部分项目开始使用5G承载核心生产系统，例如MES等的连接需求，但是仍然不普遍。随着5G的能力不断发展，以及客观的工业无线化诉求驱动，5G将逐步深入到核心生产环节，成为主要的生产网络技术之一。由于5G网络的能力是逐步迭代增强，并且行业有其自然发展规律，5G工业互联作为5G进入工业生产网络 and 核心生产环节的技术集合，我们认为其发展过程将分阶段展开，大体上可以分为两个主要阶段：5G车间生产网和5G产线工控网。

	5G+创新应用	5G全连接工厂，深入生产核心环节	
	当前5G+创新应用	5G工业互联阶段一 5G车间生产网	5G工业互联阶段二 5G产线工控网
特点	5G作为外网承载创新应用	使用5G取代有线生产网，进生产	使用5G取代有线工业控制连接，进工控
场景	机器视觉质检、AGV、智能视频监控，AR辅助生产等	MES及SCADA终端、PLC北向、控制柜等产线设备的北向联网	PLC南向、C2C，C2IO、产线内工业控制连接
关键技术	eMBB，上行大带宽等	5G LAN，高可靠	5G LAN，高可靠，可保障低时延
企业收益	基于5G的工业互联网创新应用	有线生产网替代，降低CAPEX，实现柔性产线，便于使用和维护	工业控制连接无线化实现减少产线停机；实现PLC集中化，减少PLC数量并提升工业控制系统能力
规模	每工厂几十到几百连接	每工厂几百到几千连接	每工厂几千到几万连接



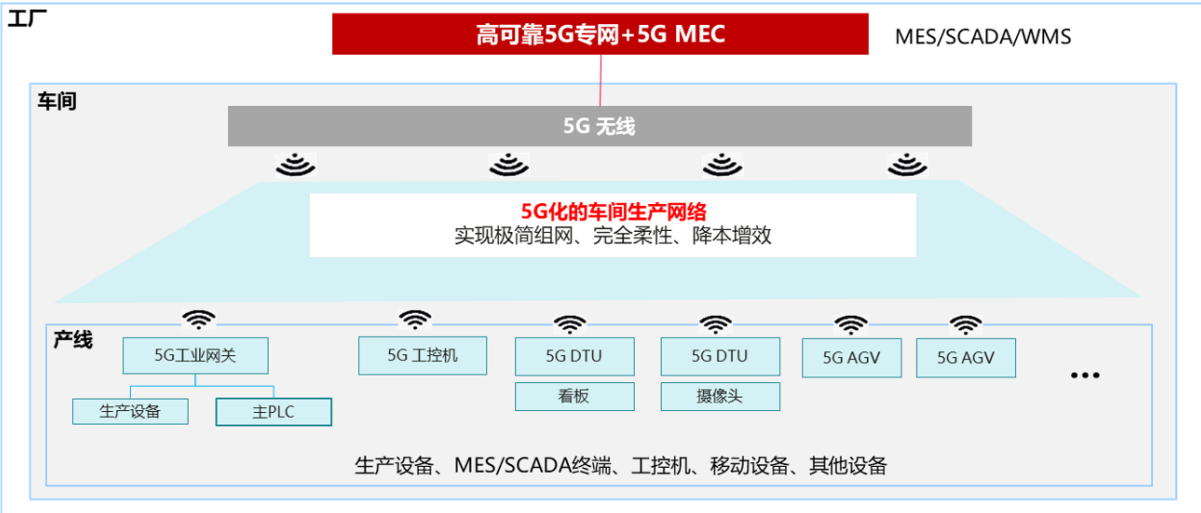
2.1 5G工业互联阶段一：5G车间生产网

5G深入核心生产环节的第一个阶段将聚焦在车间生产网实现“5G全连接”、5G MEC承载工业软件打造工厂融合底座，以及多园区统一组网。随着5G能力的增强，包括风筝方案、5G LAN、高可靠热备等新技术的出现，5G已经具备承担工厂生产网络的能力。

基于5G LAN的二层通信能力，5G可以实现与工厂传统有线车间生产网络同样的网络拓扑架构，实现工业级的组网，从而实现与传统有线车间生产网络无缝对接和平滑替代。在实际项目中，基于5G LAN的环境，我们发现，可以任意的把生产设备连接到5G或有线生产网，而不需要做任何额外的网络配置，不需要重新建立隧道也不需要地址转换。基于5G LAN的组网能力，可以实现完全的5G无线化工厂，打造更具灵活性和扩展性的“设备一跳到平台”的无线的和简化的生产网络，从而实现“5G全连接工厂”。

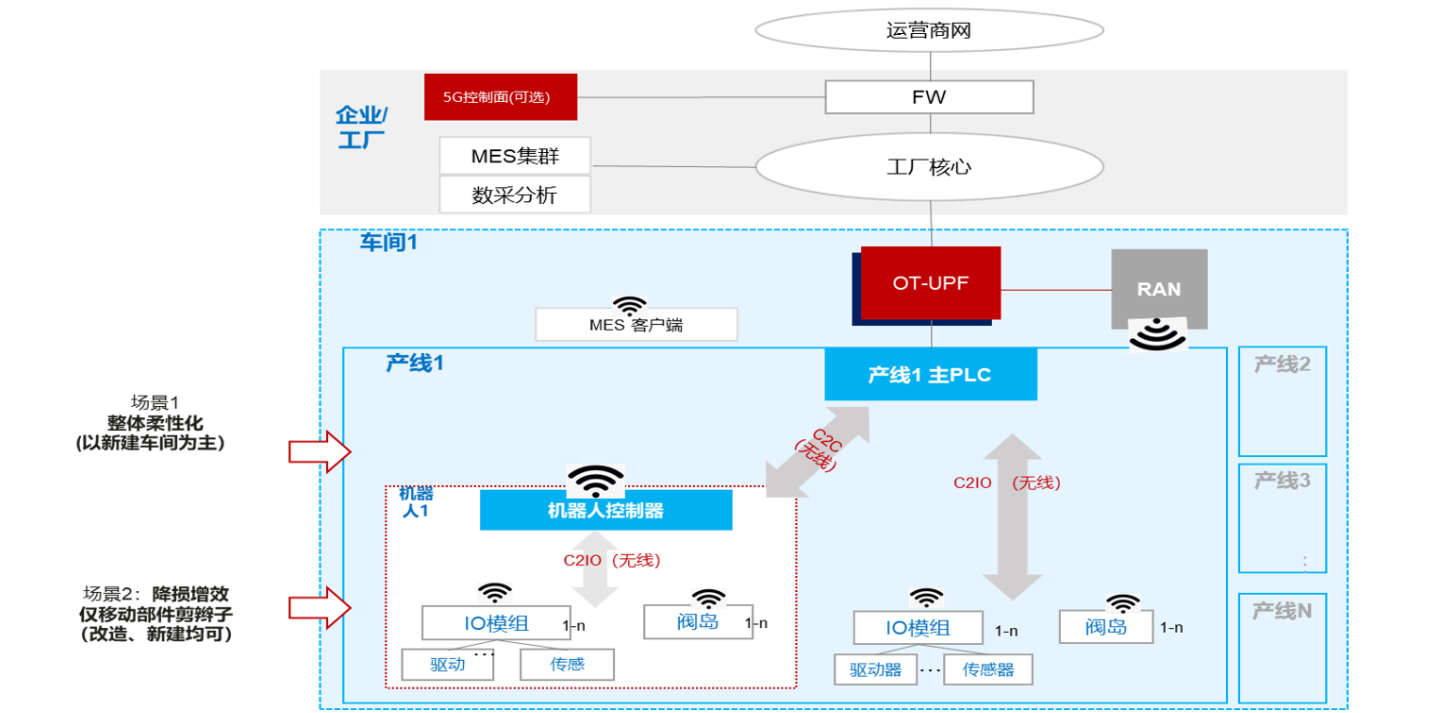
在车间生产网5G化后，车间各生产线的北向通信将5G作为主要联网手段，则5G MEC成为了工厂内非常适合进行工厂生产系统部署的计算平台。MES/SCADA等系统主要都是需要与产线进行通信，当这个通信通过5G网络进行时，MES/SCADA等系统在5G MEC进行部署，将实现设备到平台路径最短架构最优。5G MEC可部署于工厂机房，MES/SCADA等系统部署于5G MEC，可通过5G网络直接实现与生产设备之间的业务闭环。

5G成为车间生产网意味着5G网络将直接影响到工厂的正常生产作业，这对5G系统的可靠性提出了工业级的需求，要求5G网络高可靠高可用。相应的，5G系统也提供了“风筝”、“高可靠热备”等能力，从而提供工业级的高可靠网络能力，保障工厂生产的正常进行。



2.2 5G工业互联网阶段二：5G产线工控网

5G深入核心生产环节的第二个阶段，主要是实现产线内部通信5G化。以工控5G化为主，并综合考虑数采、安全通信等。大致示意如下：



工艺部件工控通信5G化：

如上图所述，以产线主PLC为中心，大致分为主PLC到产线内机器人控制器之间的C2C通信、主PLC到产线设备IO的C2IO通信、机器人控制器到机器人所属设备IO的C2IO通信三大类。此外，不同产线PLC之间，也往往存在C2C的通信（图中未画出）。

上述各种通信关系的5G化改造，主要集中在工业以太通信的端点上。分为受控设备和控制器侧两大类。绝大部分端点在受控设备侧。主要形态为独立的IO模块、以及内置IO模块的设备（主要为阀岛）。由于独立IO模块、阀岛的周边空间有限、存在震动、往往需要随同设备移动等外部影响，一般应采用内置5G 模组方式进行改造（除放置在机柜内的设备外）。对于控制器侧，则是数量相对较少的PLC、机器人控制器。该类设备一般都置于控制机柜内，无内置5G模组强烈诉求。因此，采用外接独立5G网关设备即可满足要求。

产线内多种工业以太通信连接5G化改造的范围，需要根据前述柔性化生产的诉求决定，可大致区分为两大场景：

- 全柔性改造，快速产线重组：产线内部设备间工控通信全部5G化，满足产线快速重组的需求。
- 无线改造，降低线损。产线内部，仅将具备移动的设备连接5G化。

对于第二类场景，实际部署改造时，可能会因为组网相关性，演变为全部连接无线化，以获得简化组网的效益。例如，在分析产线内部有线组网关系后，如果发现需要5G化的设备比例较高，则可以考虑将该产线全部5G化，去除产线内部的有线组网设备。

数采通信5G化

当前，不同的生产线在数采上发展程度与复杂度不同。有的产线，仅仅由产线PLC、机器人提供向上数据采集，数据内容有限。越来越多的工厂，开始关注从设备采集更多的数据，以做到预测性维护、甚至是实时工艺优化。此时，则需要考虑如何在产线内部的众多设备上构筑数据连接，以采集到更多数据源。目前，也有一些企业已经考虑借助5G完成，降低组网施工复杂度。

结合本阶段的工业控制5G化，在同一个生产设备上，未来可利用同一个5G终端，既实现工控通信，也可以扩展数据采集。大大简化网络部署。

安全通信5G化：

首先需要从安全性的影响来决定安全通信部件的连接是否可以5G化。功能安全部件是否5G化，需要考虑两个影响。首先，要避免“安全保护遗漏”导致的安全事故。目前的安全通信协议，为了应对通信层的不稳定，在协议机制层可避免由于网络不稳定而导致安全保护遗漏。

其次，要减少“安全保护过敏”导致的假保护动作，从而降低生产效率。当网络确定性不足时，可能因为安全协议的自保护设计，导致误动作，从而导致生产停机等。

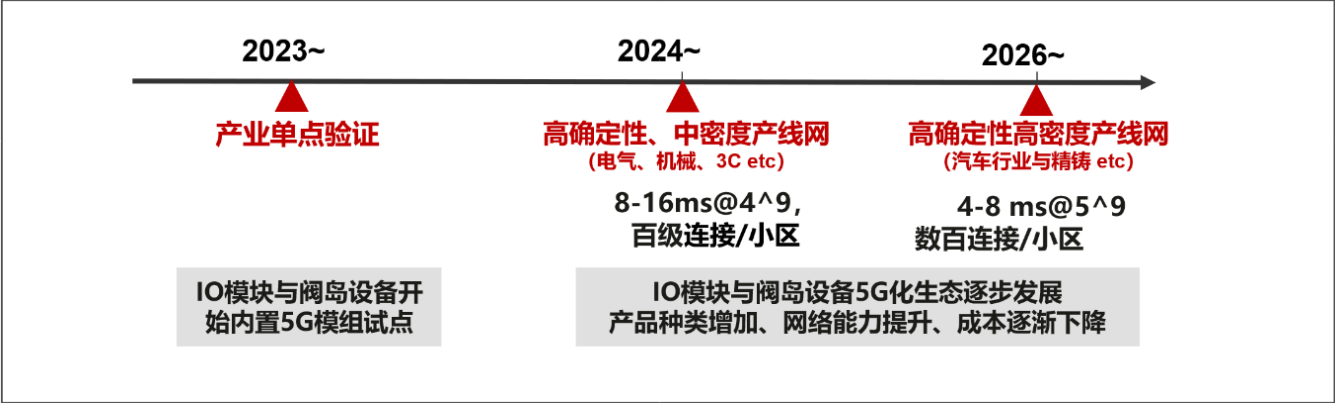
此外，需要通过功能安全部件的组网与普通工艺生产设备（驱动器、传感器）的组网关系，进一步决定是否以及如何5G化。

优化匹配产线的需求与5G网络能力的建议：

工艺工控通信5G化、安全通信5G化、以及数采与工控UE合一，都存在对于5G网络确定性能力的要求。在设计5G化产线时，不应过度追求最高的确定性时延性能指标，导致难以部署。产线的需求与5G网络需求的最佳匹配，应考虑如下几个关键因素：

- 1、合理配置工控通信的PLC的更新周期(CT,Cycle Time)与IO扫描看门狗（WDT，watch dog timer）。在有线网络中，该类参数设计一般设置较为严苛。但是实际在多数场景中，CT周期增加几ms,对于整体产线的节拍影响较为微小。可考虑合理的CT和WDT配置，以更好适配5G网络。
- 2、合理设置确定性并发容量。结合5G网络能力发展节奏，根据上述的产线工艺通信、数采、安全通信是否5G化以及如何5G化的原则，合理设置5G化的范围。
- 3、终端设备5G化产业具备与成本。主要的改造点在于受控设备侧大量的独立模块与内置IO模块的阀岛，需要内置适配5G确定性能力所需的5G网络模组。

以整个车间产线网全5G化为前提，参考典型行业的在确定性时延和并发密度（容量）方面需求（见All《5G/5G-A超可靠低时延通信工业场景需求白皮书（征求意见稿）》，基于当前的技术和产业发展进度预测，大致节奏划分如下。具体项目，应结合上述产线5G化因素具体分析而确定。



5G网络能力展望与典型行业产线全5G化节奏示意

2.3 5G工业互联发展阶段分析小结

上述两个阶段，是根据5G技术能力本身的发展规律，以及工业领域对5G逐步接受的过程，大体进行区分，但是具体到某个企业某个项目，并不意味着严格的时间上的前后关系。就某个企业某个项目而言，最重要的因素，是柔性化制造体系和简化网络的客观需求。具体是先进行车间网络5G化还是产线内部工业控制网络5G化，取决于企业对5G的使用场景。但是通常来讲，如果使用5G大规模的进行产线内部工业控制网络的承载，则实际上完全可以基于同样一张5G网络，实现车间生产网络的5G化，从而实现“一网到底”的极简网络。

在生产网络5G化的基础之上，5G MEC作为来自工业终端的工业数据所能触达的第一个算力节点，将成为承载工厂工业软件系统的理想底座。通过5G MEC进行工业软件（例如MES\SCADA）的承载，有利于实现网络架构和性能的最优化。5G网络和5G MEC边缘计算结合，将成为服务工厂数字化的“算网融合底座”。

第3章 5G工业互联关键技术能力



5G工业互联是一系列关键技术能力的集合，从而基于这些能力构建出工业级的MEC/UPF系统，这些关键技术能力主要包含：

3.1 5G工业确定性连接

无线URLLC技术与增强提供了工业连接所需的低时延等能力，包括：精准时钟同步授时、超级上行、上行免调度传输、Non-Slot 特性等。

对于某些二层网络业务流，往往要求较高的时延可靠性，并能具备一定的可用性提升，防止5G模组甚至RAN设备的损坏导致的业务中断。此时可以采用终端侧和5G核心网配合，实现双发选收技术。在5G终端或者设备内，包含两个5G模组。UE与UPF之间同时发送和接收两份相同的冗余数据，优选保留时延较短的业务包。采用此技术，可大大缓解网络覆盖、干扰、时延不确定等问题。且，终端和服务侧的应用无需修改，完全无感知。在工业互联场景，可针对重要的业务连接，按需选择此技术。

3.2 5G工业极简组网

5G LAN：

5G进入工业互联，如何与现有的工业网络做好兼容、对接集成是关键问题。工业网络大量使用了二层网络组网。为了便于二层工业网络的设备实现5G接入和互联，3GPP R16定义了5G LAN。基于5G LAN，避免5G化过程中额外采购设备进行L3到L2协议的转换，避免了由此带来的时延，以及组网复杂和故障点。

网络切片：

切片是一个基础性的确定性的保障技术。通过切片，对于业务所需的网络资源进行隔离，既实现各独立业务之间资源争抢导致的SLA干扰，也可以提供对于业务的安全保障。

无线接入网切片隔离技术分为QoS优先级调度、RB（Radio Block无线块）资源预留、载波隔离和物理设备资源隔离等几个等级。应用到工业互联，可以考虑在车间网和产线网的不同类型业务之间采取不同的技术。如工控业务所需的URLLC，可考虑等级较高的资源保障手段，与其他业务隔离。

核心网5GC包含若干网络功能，大致分为5G控制面的若干网元和用户面（UPF、MEC）。可按需选择不同隔离策略。包括：全共享，即所有业务共享所有网络功能，仅通过切片进行隔离；部分共享，即部分网络功能基于共享隔离，部分网络功能独立专属等。应用到工业互联，5G作为工厂生产网承载应用，基于时延稳定性、传输安全的考虑，一般应采用部分高可靠核心网网元专属部署的方式。对于不同的生产业务，可考虑使用切片隔离。

核心网分流：

5G核心网内部，通过控制面和用户面（MEC/UPF）配合，可实现灵活的分流能力，减少移动用户访问业务的数据流的迂回。从而显著缩小时延，并实现数据流的安全保护。在大带宽的业务场景，可缩短传输路径，既能降低传输成本，还能减少抖动和拥塞的发生概率，提升带宽确定性能力。MEC/UPF的灵活分流能力，可以根据用户当前的位置信息、用户的属性、用户使用的业务、目标DNN等多种方式分流。对于工业互联场景，建议采用独立专属的MEC/UPF,实现本地车间/产线业务流本地闭环分流。

3.3 5G MEC高稳计算

MEC是在UPF基础上增加边缘计算能力后的。基于MEC，应用的部署位置可以紧靠UPF，既能简化设备和网络的部署安装，也能减少分流点到应用的路径迂回，减少网络抖动和不稳定因素。MEC和调度控制中心协同实现对于MEC上行业应用的感知，并进行调度与控制优化。在工业互联中，可利用5G MEC的“网内算力”和“电信级高稳”能力，将MES、SCADA、AGV调度、数据采集与分析等系统部署在MEC，实现从设备与I/O到服务之间的传输、计算，全程在5G系统内完成。随着连接无线化，设备智能化，架构扁平化的演进，越来越多的应用可以从现场迁移到边缘上，由边缘计算平台提供实时/非实时的混合计算能力，满足行业应用需求。

随着实时虚拟化技术的成熟和面向未来扁平化控制架构的发展，对于PLC（可编程逻辑控制器）逐渐从原来的软硬件一体化PLC向虚拟化形态演进。未来MEC可以通过一系列能力的增强，对虚拟化PLC进行支持，包括：

- 1.确定性调度：与通用操作系统不同，在实时操作系统中，如果一个任务需要被执行，实时操作系统每次都要在确定性的时间内响应和调度该任务。
- 2.高精度定时器：由于目前PLC的内部逻辑大部分都采用周期性扫描方式，工业以太网也是采用周期性通信模式，以及内部周期性的读入读出，任务定时切换，延时执行都依赖高精度的定时器做为系统参考的基准
- 3.绝对优先级抢占和内核级的优先级翻转处理方式，满足高优先级任务对低优先级任务的抢占，以及提供优先级翻转的机制，避免系统死锁

在工厂基于5G建立其生产网络的场景下，5G MEC的独特价值将得到充分发挥，成为工厂的工业算力一体化底座。

3.4 工业协议感知和跨域协同

从3GPP R15开始，技术不断发展，以提升5G确定性联接与组网能力。针对工业互联，特别是满足产线网络所需的低时延、高可靠与大并发的高确定性要求，5GS必须建立对工业以太的感知能力，并基于此实现网络内部各域以及与应用之间的深入跨域协同，以支撑5G整体的确定性能力提升。

3GPP 从R17开始规划5GS直接与应用之间建立周期性业务的感知接口。并定义5G核心网的协同调度能力。行业应用通过该接口将业务周期、突发数据量、业务流预期发送时间等通知5GS。基于此，5G核心网可协同RAN，提升调度效率，降低调度等待时延。3GPP R18正在研究相关技术，为减少多业务流带来的网络拥塞等瓶颈，可以增强实现网络对于应用的反向调度与同步机制。该方法不仅可以提升多业务流并存下时延的稳定性，还可以通过反向调度实现错峰，改进大上行并发瓶颈。

如果工业网络采用TSN技术组网。可以采用3GPP R16开始定义的TSN网络与5G协同组网方案。在该方案中，利用TSN自身的确定性调度能力，无缝与5G集成对接。实现TSN设备间通信在5G上的传送。

3.5 确定性安全

安全是5G工业网络承载相关生产应用的关键保障。安全问题不仅事关生产，在某些情况下甚至事关生命。提供确定性的安全能力是5G工业网络需要着重解决的问题，在5G不引入新的安全风险和保持工业网络现有安全体系架构的前提下需要整体考虑终端接入、网络传输与隔离、MEC应用和运维管理等各个不同节点上的确定性安全能力。

终端接入安全：当前工厂环境中，会有大量存量工控设备通过CPE/工业网关等网络终端接入5G网络，对于这类网络终端本身和工控设备的接入认证需要额外的安全措施，避免恶意设备、仿冒设备接入5G网络和工业网络中。

网络传输安全与隔离：5G工业网络通道进行必要的加密，保证数据的安全性，防止数据被中间人窃听或篡改，同时要考虑相关加解密技术的性能开销不影响客户的时延和性能要求；在网络隔离维度，一方面需要考虑对网络传输时的不同业务数据进行隔离，以防止未经授权的操作人员访问超出其权限的业务数据，另一方面兼容现有的工业网络安全体系结构，不同安全域，子网间彼此隔离，互不影响。

MEC应用安全：MEC部署安全增强能力部件，这些部件通过MEC节点进行调度来确保MEC应用的安全。。MEC安全增强除了数据保护和接口管理外，重点在于对于部署其上的各类APP进行完善的访问控制,包括但不限于对下面一系列的APP操作的安全管控：APP越权访问、APP对MEC接口的DDoS攻击、APP对UPF的恶意攻击、APP与APP之间的恶意攻击等。

运维安全：关键在于业务安全态势可视化。构筑统一的安全运营中心，实现全网安全态势感知，可视化漏洞感知，并且实时进行预警推送。全网态势感知，包括无线安全态势、5GC安全态势、MEC安全态势、承载网安全态势、信令/业务面安全态势；可视化漏洞感知，包括现网资源漏洞自动匹配、现网漏洞可视化，补丁信息通知至网管、漏洞预警实时推送，现网漏洞分钟级感知。

第4章 5G工业互联相关标准

标准化工作是实现5G与工业互联网融合的重要技术基础，国家层面高度重视5G工业互联的标准化工作。2019年11月19日，工信部印发《“5G+工业互联网”512工程推进方案》，明确提出统筹中国通信标准化协会(CCSA)及相关行业标准化组织，研究制定“5G+工业互联网”融合标准体系，完善融合技术、应用标准。2020年12月22日，工信部印发《工业互联网创新发展行动计划(2021-2023年)》，提出加快制定“5G+工业互联网”等关键技术标准，到2023年，建立较为完善的工业互联网标准化工作机制，基本形成统一、融合、开放的工业互联网标准体系，完成60项以上关键标准研制。

在上述政策的指引下，工业互联网产业联盟（All）于2021年底制定并发布了《工业互联网标准体系》（版本3.0），加快建立统一、开放的5G+工业互联融合标准体系，其中最大的变化在于单独成立“5G+工业互联网”标准子类分支，包含网络技术与组网、适配增强技术、终端、边缘计算、应用和网络管理六个维度。全国工业过程测量控制和自动化标准化技术委员会（SAC/TC124）也针对性地制定了《工业无线蜂窝网络》等系列国标。CCSA TC13（工业互联网技术工作委员会）分别针对煤矿、钢铁、港口、水泥、电网以及石油化工等行业启动立项编制相关5G+工业互联网标准。

序号	来源组织	标准名称
1	All&CCSA	《面向矿山领域的“5G+工业互联网”应用场景及技术要求》
2	All&CCSA	《面向港口领域的“5G+工业互联网”应用场景及技术要求》
3	All&CCSA	《面向电网领域的“5G+工业互联网”应用场景及技术要求》
4	All&CCSA	《面向钢铁领域的“5G+工业互联网”应用场景及技术要求》
5	All&CCSA	《面向高端装备制造领域的“5G+工业互联网”应用场景及技术要求》
6	All&CCSA	《面向工业园区的“5G+工业互联网”应用场景及技术要求》
7	All&CCSA	《面向航空领域的“5G+工业互联网”应用场景及技术要求》
8	All&CCSA	《面向水泥领域的“5G+工业互联网”应用场景及技术要求》
9	All&CCSA	《面向石油化工领域的5G+工业互联网应用场景及技术要求》
10	All	《工业现场网5G关键场景及需求》
11	CCSA	《面向印刷电路板行业的5G+工业互联网应用场景及技术要求》
12	TC124	《工业无线蜂窝网络 第1部分：通用技术要求》
13	TC124	《工业无线蜂窝网络 第5部分：应用规范》
14	All	《面向工业现场网的UPF设备技术要求》
15	TC124	《OPC UA与5G集成技术规范 第1部分：通用要求》

此外，3GPP也在加紧对5G工业相关的标准研制。自从3GPP R15开始定义5G标准，5G工业相关特性在3GPP已经迭代了3个版本，R16引入5G LAN能力，支持层二工业协议的直接传输，并支持TSN的Bridge功能；R17进一步增强确定性网络传输架构，引入新的网元TSCTSF（Time Sensitive Communication and Time Synchronization Function，时间敏感通信和时间同步功能），从而可以独立支持工业确定性网络机制，而不依赖于外部TSN网络；R18新立项5TRS_URLLC和GMEC，更加灵活开放5G系统的同步能力、动态组管理、支持跨数据中心/SMF的局域LAN通信。

第5章 总结和展望



工业制造是5GtoB领域最受关注的行业方向，从当前5GtoB的市场发展来看，工业制造类项目占据了数量上的大多数，明显多于其他行业。另外，5G和5G MEC如果能满足工业制造的需求，其能力也可自然外溢至其他行业，通过工业级的5G连接和计算能力，跨行业进行使能。本文所讨论的5G工业互联关键技术，也同样适用于各个典型垂直行业，包括电网、钢铁、港口、化工，等等。

随着5G工业互联各项关键技术的逐步成熟，5G将从当前的主要服务于外围辅助生产环节和创新应用，发展到支撑核心生产环节，包括车间生产网和产线工业控制网，从而给行业带来更强的柔性生产网络形态。同时，结合5G MEC或5G网络边缘计算，5G网络的自带算力也可高效对工业互联网平台和应用进行承载，一方面实现对中小企业的普遍赋能，另外一方面也可实现大型企业的5G连接+计算的融合底座。随着行业对5G使用的愈加深入和普遍，多园区多厂区统一建网，5G网络与企业内网和企业外网的结合也将成为重要课题，最终将形成“5G网络+5G MEC”、“互联网+公有云”、“企业网+私有云”，三个算网体系所共同组成的行业整体算网系统。在这个三位一体的算网系统之上，将真正实现行业的跨世代转型提升，最终推动整个社会生产力的跨越式增长。

5G工业互联赋能5G全连接工厂，步履扎实，前景广阔，必将为工业互联网和工业数字化的发展带来更强助力。

引文和缩略语

引文

[1]《5G/5G-A超可靠低时延通信工业场景需求白皮书（征求意见稿）》，中国信通院、华为等在2022年6月发布

缩略语

缩略语	全 称
5GDN	5G Deterministic Networking: 5G确定性网络
AR	Augmented Reality: 增强现实
CAG	Closed Access Group: 封闭接入组
CN	Core Network: 核心网
CSA	Communication Service Availability: 通信服务可用性
CSMF	Communication Service Management Function: 通信服务管理功能
DIY	Do It Yourself: 自助
DNN	Data Network Name: 数据网络名称
DTU	Distribution Terminal Unit: 配电终端
FlexE	Flexible Ethernet: 灵活以太网
IIoT	Industrial Internet of Things: 工业物联网
KPI	Key Performance Index: 关键性能指标
LAN	Local Access Network: 局域网
MEC	Multi-access Edge Computing: 多接入边缘计算
MTN	Metro Transport Network: 城域传送网
NFV	Network Function Virtualisation: 网络功能虚拟化
NSMF	Network Slice Management Function: 网络切片管理功能
NSSMF	Network Slice Subnet Management Function: 网络切片子网管理功能
PDCP	Packet Data Convergence Protocol: 分组数据汇聚层协议
PLC	Programmable Logic Controller: 可编程逻辑控制
QoS	Quality of Service: 业务质量
RAN	Radio Access Network: 无线接入网
RB	Radio Block: 无线块
SLA	Service Level Agreement: 业务等级协议
TDM	Time Division Multiplexing: 时分复用
TN	Transport Network: 传输网
TSN	Time Sensitive Network: 时间敏感网络
UPF	User Plane Function: 用户面功能
uRLLC	Ultra Reliable Low Latency Communication: 高可靠低时延通信
VNF	Virtualised Network Function: 虚拟网络功能
VR	Virtual Reality: 虚拟现实
OT	Operational Technology : 操作运营技术
V2X	Vehicle-to-everything: 汽车和其他相关设备的通讯
AGV	Automated Guided Vehicle:自动导引运输车