

5G 工业现场网白皮书

算网融合 | 内生确定性 | 一站式服务

2023年06月

中兴通讯股份有限公司

目录

1	产业发展和演进展望	02	3	生产域的专网部署	15
2	生产域需求和挑战	03	3.1	5G 现场网	15
2.1	行业场景需求	03	3.2	5G 现场网部署模式	16
2.1.1	物流 - 自动分拣	03	3.2.1	5G 现场网独立部署模式	16
2.1.2	3C 制造 - 柔性生产	04	3.2.2	5G 现场网预集成模式	19
2.1.3	汽车制造 - 柔性工岛生产	05	3.2.3	5G 园区网 & 现场网协同部署模式	21
2.1.4	装备制造 - 产线服务	06	3.2.4	5G 园区网 & 5G 现场网合一部署模式	22
2.1.5	钢铁 - 无人行车	07	4	5G 现场网关键技术	23
2.1.6	煤矿 - 综采面	08	4.1	网络关键技术	23
2.1.7	露天矿 - 无人矿卡	09	4.1.1	现场网络互联	23
2.1.8	港口 - 龙门吊	10	4.1.2	现场网的可靠性	25
2.1.9	化工 - 装置区	12	4.1.3	功能安全保障	31
2.2	生产现场专网对 5G 能力要求	13	4.1.4	ToB/ToC 网络隔离技术	32

4.2 算力关键技术 34

- 4.2.1 现场网算力载体 34
- 4.2.2 算力服务化架构 35

4.3 业务支撑能力 37

- 4.3.1 云化 PLC 37
- 4.3.2 视频优化 38
- 4.3.3 融合定位平台 40
- 4.3.4 前置机数采 40
- 4.3.5 云化 AGV 调度台 41

4.4 企业自服务 41

- 4.4.1 免规划，精准建模与网络规划 41
- 4.4.2 免调测，快速建站 42
- 4.4.3 免运维，业务视角自动化运维 43

7

附录: 缩略语 54

5

实践案例 45

- 5.1 新北洋物流自动分拣线应用 46
- 5.2 中兴南京滨江工厂数字化自动产线应用 46
- 5.3 广州明珞 5 G 原生装备制造生产线 48
- 5.4 上汽通用五菱汽车制造智能岛 49
- 5.5 武钢无人天车改造 50
- 5.6 黄陵矿综采面 50
- 5.7 西湾露天矿 52
- 5.8 博世工业园区 54

6

总结和展望 53

8

参考文献 56

产业发展和演进展望

工业不仅仅是国民经济的主导，更是社会经济发展的基础。近年来，我国陆续推出《5G应用“扬帆”行动计划》（以下简称扬帆行动）和《“5G+工业互联网”512工程推进方案》等政策，促进产业各界进行5G与工业互联网融合创新。5G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，从而有力支撑制造强国、网络强国建设。“5G+工业互联网”已经逐渐成为加速中国新型工业化进程的重要支撑。

在近年来数字经济大潮推动下，“5G+工业互联网”创新发展，已经取得阶段性成效，部分领域已经从示范走向复制，根据历年绽放杯的参赛项目数据看来，2022年参赛项目超2.8万个，其中商业落地&可复制的占比已超56%。在规模发展的同时，也凸显出一些问题：当前工业互联网的典型应用以单一环节的数字化改造为主，没有形成统一的建设方案，“单点”业务还可能会进一步为企业数字化转型带来更多信息孤岛；此外，传统企业的IT、OT网络往往由不同厂家建设，并由独立的部门分别管理，在企业内部也形成了一道道“墙”，企业生产数字化转型仍处在初级阶段。2022年9月，工业和信息化部印发《5G全连接工厂建设指南》（以下简称全连接工厂），旨在进一步推动“5G+工业互联网”融合应用从典型场景向生产现场系统性建设，此举也标志着“5G+工业互联网”由起步探索阶段迈向深耕细作阶段。5G全连接工厂是充分利用以5G为代表的新一代信息通信技术集成，打造新型工业互联网基础设施，新建或改造产线级、车间级、工厂级等生产现场，形成生产单元广泛连接、信息（IT）运营（OT）深度融合、数据要素充分利用、创新应用高效赋能的先进工厂。

本白皮书，旨在“扬帆行动”和“全连接工厂”的指导方针下，结合中兴通讯和运营商以及各行业伙伴一起进行的广泛实践和优化迭代的经验，输出覆盖端/网/云/业的一站式的产品方案及服务，通过算网融合的底座，内生确定性的保障，一站式的服务，面向各行业伙伴呈现一套详细的工厂级、产线级、车间级的现场网的建设思路和细化流程，将“全连接工厂”的理念落到实处，从而助力不同类型的企业按需实现生产域的转型升级，加快“5G+工业互联网”新技术新场景新模式向工业生产各领域各环节深度拓展，推进传统产业提质、降本、增效、绿色、安全发展。

2

生产域需求和挑战

2.1

行业场景需求

生产现场是指以完成生产任务为核心的一系列活动场所，它包括各基本生产车间的作业场所，其核心部门是生产部门。全连接工厂定义了产线级、车间级、工厂级的生产现场。在不同的行业，生产现场对应不同生产现场以及不同的生产域作业。接下来，我们以下列不同行业典型的生产域作业先做个场景化分析：

2.1.1

物流
自动分拣

随着电子商务、快递等行业的蓬勃快速发展，物流分拣行业也得到了迅猛发展，物流分拣中心作为中枢纽节点，对提升物流效率越来越重要。传统的分拣中心，依靠人工分拣，效率低，错误率高，成本高，导致快递积压，时效性差，无法应对日益增长的快递业务量需求。自动化分拣正在成为物流行业自动化转型的典型应用。

一般自动化分拣系统的核心是直线或环形交叉带分拣机和矩阵分拣机，直线分拣机系统由上包台，六面扫读码机，分拣小车等设备组成，分拣机中的小车队列沿着轨道高速运动，每辆小车载有由独立动力驱动的输送带，与小车运行方向垂直运动，贴有条码单的货件经半自动化或全自动导入台快速导入分拣机小车，经自动识别系统定位目的地后，小车皮带快速转动卸载货物实现货物分拣。

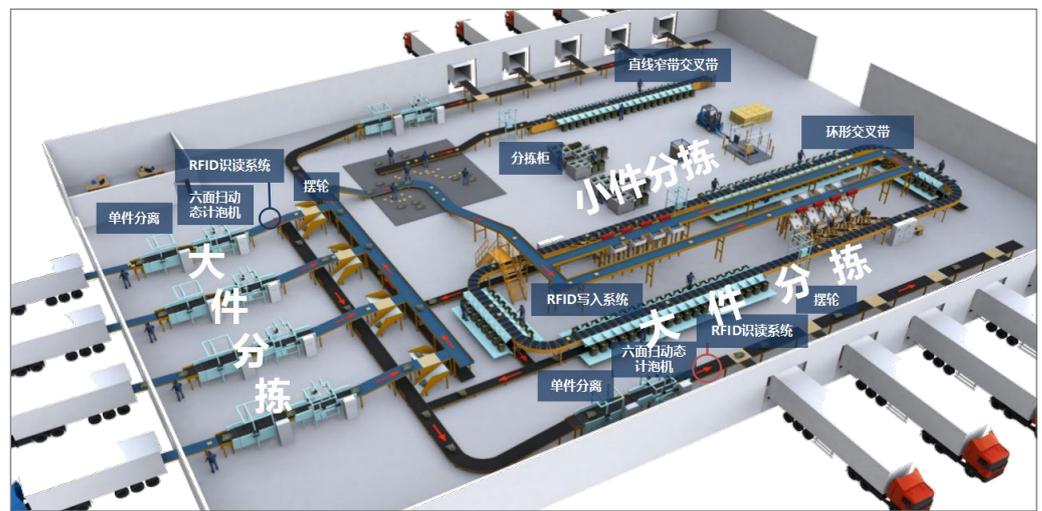


图 2-1 自动化分拣设备

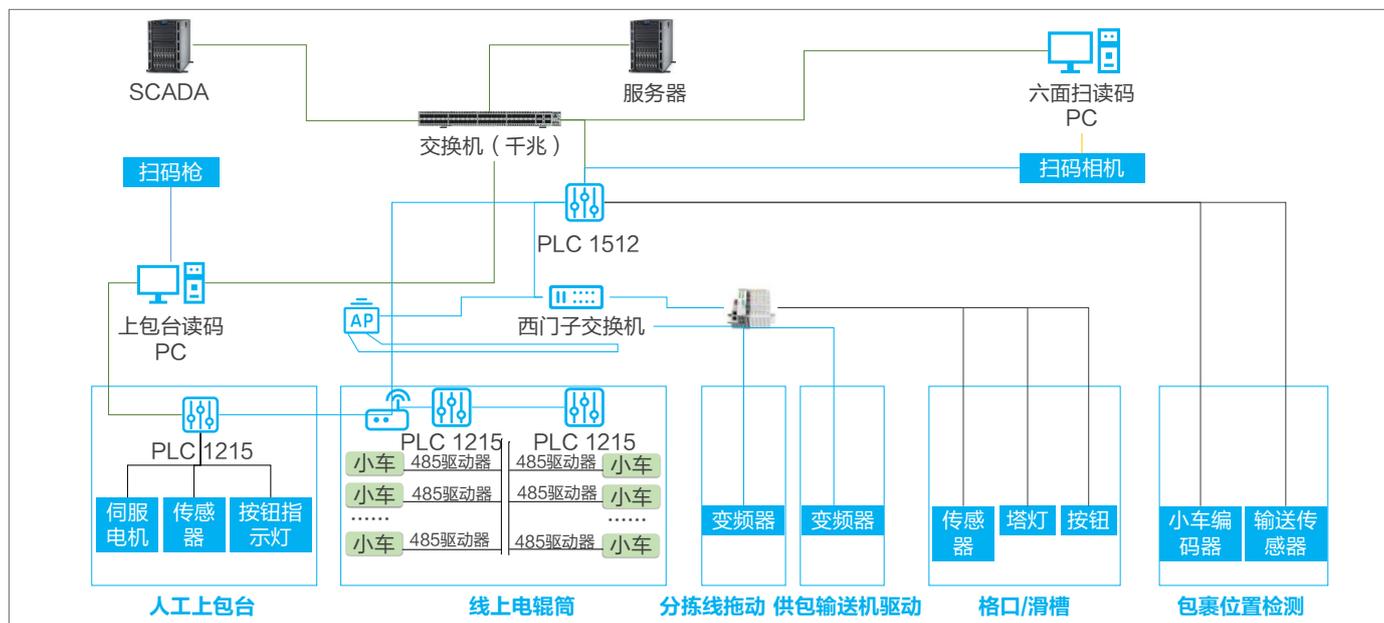


图 2-2 自动化分拣系统

现有分拣机系统大部分采用有线连接，布线复杂，仅移动的分拣小车采用 WLAN 无线方式，配合漏波电缆完成无线信号的部署，而借助高性能的 5G 无线网络替代传统的有线和 WLAN 来构建自动分拣中心，将极大地简化网络部署，是自动化分拣系统升级的最佳方式。5G 应用于自动化分拣系统，整体有如下核心需求：

确定性网络性能：自动分拣系统通过 PLC 对各环节进行控制，比如分拣小车以 2 ~ 3 米 / 秒速度滚动，编码器实时上报小车坐标，PLC 计算并准确发出指令到小车，需要有低时延可靠稳定的无线网络保障。

应用的云化部署：现有多台 PLC 单独部署，控制孤立，希望 PLC 云化部署来实现集中远程的控制；同时上包台、六面扫读码机、WCS 应用服务器也希望云化部署；希望通过集中、云化的统一部署，降低部署成本，助力信息化升级，提升分拣效率。

2.1.2

3C 制造 柔性生产

3C 制造车间一般是在一个大型厂房内设置多个功能区，每个功能区部署不同的产线，每条产线按产品工艺流程完成零部件生产、模块封装（SMT/LCM）、整机装配、产品测试、成品包装等生产环节。工厂在已实现产线自动化基础上，期望借助 5G 实现机械臂、PLC 的联网及云化，结合区域内多个产线的数采、AGV 协同上下料、机器视觉应用，进一步向数字化、智能化演进。

典型应用场景如整机自动化装配测试产线，包括多个测试环岛，通过机械臂取放被测件到多套测试夹具做并行装配 / 测试。其中涉及 PLC 控制机柜、本地运行 MAT（制造自动化测试系统）、MDS（制造数据应用系统）和位于数据中心的 MES（制造执行系统）。

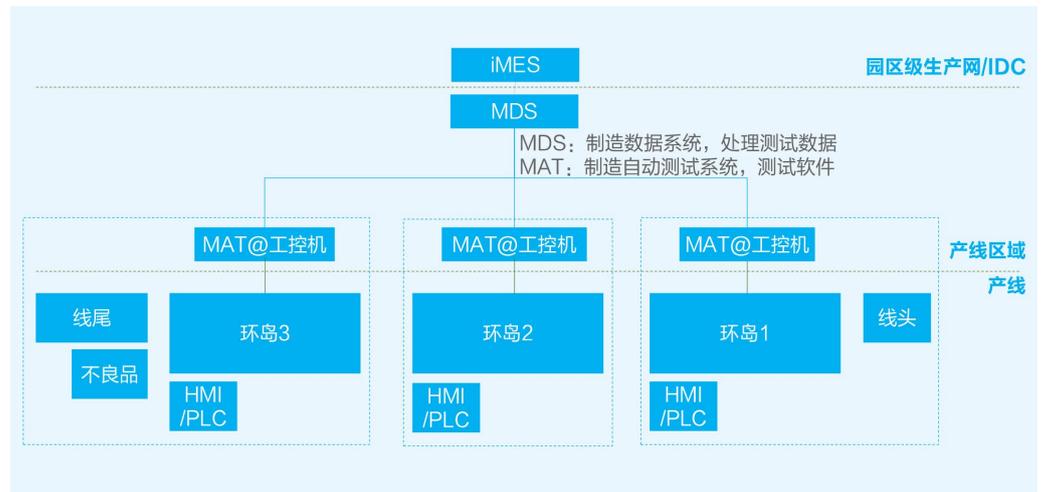


图 2-3 自动化装配测试产线现场网示例

自动化产线对网络需求：

01. 联网 / 云化 / 无线化：当前产线如环岛集成度高，线缆繁杂，不利于柔性化生产，迫切无线化；AGV、PLC、机械臂等需要联网和数采，实现生产过程可视和产线预测性维护；PLC、机器视觉需要云化集中处理提升效率；
02. 网络确定性：承载工业 PLC 协议、AGV 上下料业务，需支持 <20ms@99.99% 低时延；机器视觉应用需要 >80Mbps 每路的大带宽；
03. 网络可用性：云化对网络可用性提出高要求，要求 7*24 小时运行，月故障时间 <10 小时，单次 <8 小时，设备更换时间 <60 分钟，人工干预间隔 >30 分钟；
04. 网络部署 / 改造周期：期望网络快速部署 / 改造以及快速稳定运行，减少对实际生产的影响；
05. 自运维及安全：工厂有自己的工业互联网平台，提出了自运维及对接融合的要求；工厂有专业的信息安全团队，对 5G 技术应用引入的新的安全场景，期望有全面分析及判断。

2.1.3

汽车制造 柔性工岛生产

新能源汽车时代，用户的用车需求呈现出多元化、个性化、千车千样的升级趋势，竞争也愈加激烈。汽车制造要满足对柔性的极致需求，引入了工岛的形式，当前存在两大问题：

01. 在工岛之间采用 AGV 做产线物流，运送半成品配件，AGV 密度高。如果采用传统 WIFI 覆盖，容易出现切换断网、网络拥塞卡顿的问题，影响生产物流效率，严重甚至导致产线停线。
02. 工岛间 PLC 的控制协同为东西向 C2C 通讯，以及 PLC 与远程 IO 的 C2IO 通讯，采用有线连接，工岛布局变更时需要重新布线，带来额外的部署周期及成本。



图 2-4 汽车装配产线现场网示例

采用 5G 无线连接，可以很好的解决上述两个问题，该场景对 5G 的需求包括：

01. 长连接：减少切换时延甚至消除切换，网络良好覆盖需保障 AGV 业务不断链；
02. 时延确定性：保障汽车产线的 PLC 通讯确定性需求，即支撑相应工业以太网协议承载，并满足现场 PLC 应用参数下长期不断链；
03. 综合大容量：满足产线区域内大上行、时延敏感等各类业务的用户数、业务容量需求，包括生产控制、生产管理类业务；
04. 缩短部署 / 改造周期：期望网络快速部署、改造以及快速稳定，减少对实际生产的影响；
05. 自运维及安全：生产停线带来直接生产损失，要求尽可能避免，发生后也尽快恢复，要求 5G 网络应该具备自运维、自恢复能力。

2.1.4

装备制造 产线服务

装备制造车间和 3C 制造类似，一般是在一个大型厂房内设置多个功能区，每个功能区部署不同的产线，每条产线按产品工艺流程完成铸造、锻造、冲压、焊接、机械加工、热处理、涂装、装配等生产环节。装备制造的不同产线一般由不同产线集成商提供，自动化产线的数字化通过产线设备全连接、数据采集、数字孪生等手段，为产线提供全生命周期服务，包括产线规划设计、集成调试、持续工艺监测优化、预测性维护和远程诊断等。

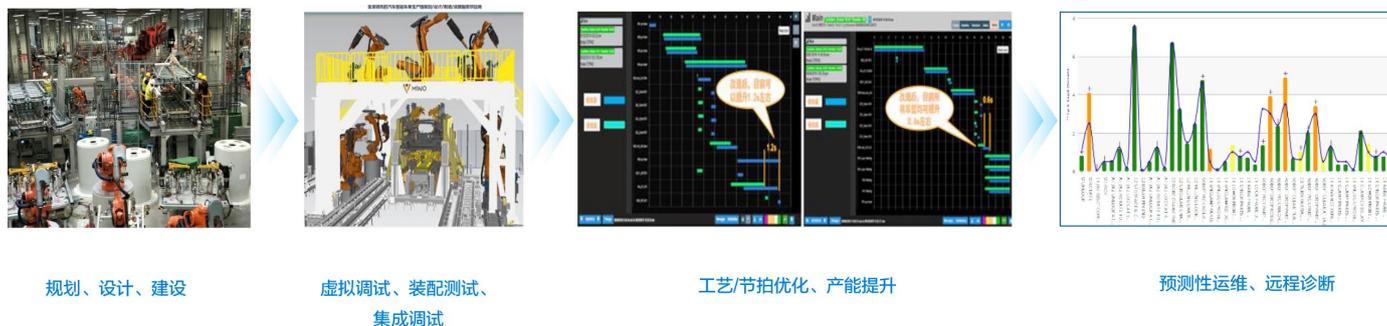


图 2-5 自动化产线全生命周期服务

自动化产线全生命周期 服务对 5G 专网需求：

01. 产线 / 现场数据本地实时闭环：由于工艺流程不同和产线集成商不同，每条产线形成相对独立的功能体，产线设备数据采集、设备 PLC 控制和生产过程监控大都在产线内部形成闭环，对数据安全、时延抖动要求较高，需要产线 / 现场数据本地卸载和实时处理；

02. 云网业协同：当前产线应用如 SCADA、PLC、MES、智能制造服务平台等与网络相互独立，IT/OT/CT 难以融合，数据价值难利用，希望借助云网业超融合平台实现云网业一体化，从而将网络与产线工艺和流程深度融合；

03. 柔性化 / 无线化：装备制造为典型的离散制造行业，产品定制化高，现场总线和工业以太网以有线为主，多层级、多汇聚、布线难、运维难、灵活性差，不能满足柔性生产的需求，需要扁平化、无线化、柔性化网络；

04. 标准化、易部署、自运维：需要标准化、轻量化、免规划、免调测、免运维、快速开通的网络。

2.1.5

钢铁 无人行车

钢铁行业智能制造转型升级，从云网协同向云网融合发展，通过 OT、IT、CT 技术的融合，将工业互联网、5G、大数据、云计算及人机交互技术等技术带入生产现场，再辅之以创新应用和制造控制系统的深度融合，推动钢铁行业突破传统模式下的技术瓶颈并向智能化智慧化方向转型。这里以无人行车为例进行分析。

行车是钢铁行业作业的关键设备，存量巨大，普遍用于钢铁厂热轧、冷轧生产线和成品库吊运钢卷。传统行车的作业需要司机长期低头弯腰作业，容易患上颈椎、腰椎等职业病，同时行车作业属于高空作业，存在安全风险，工作环境恶劣，招人困难。此外，传统行车依靠司机驾驶，还需要地面指挥工配合，整体效率低下。当前，行车已经走在无人化改造的前列，通过为行车加装夹钳传感器、测距 / 防撞激光、车载角度测量仪、防摇摆控制器、称重测量仪表、限位开关及传感器等控制装置和地面反光板，通过打通车载 PLC 以及 WMS 库管系统后台，实现智能行车与各生产工序、仓库物料、工厂管理系统进行数据交换，贯通进料、上料、生产、下线、存储、发货等多环节信息流，全面优化物流工艺流程，大幅提升行车运行的安全系数和整体效率。



图 2-6 钢铁行业远控

以无人行车为例的钢铁行业 对 5G 专网需求：

01. 网络可靠性要求高：钢铁行业的生产普遍是全年不间断进行，用于支撑业务运行的网络设备也要满足 365 天 × 24 小时、全天候生产需求。钢铁厂内部作业环境普遍不佳，有高温、多尘等因素的不利影响，对设备工作环境提出较高要求。

02. 无线环境的精细化规划及设计需求：钢铁厂房内部的大量钢结构和大型设备也对电磁波的正常传播产生较大的干扰，存在网络干扰大、反射多等不利因素。部分企业还存在一些其它无线网络，如 WiFi 等，还需要同步考虑对其它无线系统的共存和替代。

03. 大带宽业务对无线网络要求高：如行车改造后会加装高清摄像头，多部行车同时工作，高清视频监控将对网络带宽产生数百 Mbps 的大带宽需求，对空口回传网络造成巨大传输压力。

2.1.6

煤矿 综采面

综采面是煤炭的第一生产现场，根据矿区大小的不同，综采面大小不一，一般宽度 300m，长度 2km，安全起见，煤矿综采面一般不超过 2 个。综采面关键设备包括采煤机、输送机和液压支架。采煤机用于割煤，液压支架用于支护工作面煤壁，刮板输送机则用于输送采煤机割下的煤。综采面的主要工艺流程，先由采煤机上边的炮头不停的旋转切割煤层，然后煤层在重力作用下落在刮板上，刮板面上有旋转的三向拨轮将落下的煤屑刮到输送机上，输送机是靠圆环链传动，最后输送到运输机，运出煤矿。



图 2-7 煤矿综采面

综采面目前存在以下业务痛点，智能化改造需求迫切：

01. 高风险：综采面具有作业空间狭小、机械设备多、视觉环境差、温度高的特点，其安全事故频发，严重影响了整个煤矿的安全管理工作，是煤矿安全管理工作中的重点区域。

02. 高成本：由于井下特殊的工作环境，井下工作人员难以招募，且人工效率较低，生产规模难以有效提升。回采工作面工作环境和状态对人体伤害较大，因此人力成本逐渐增高。

03. 难运维：对于井下业务系统，部署方式基本上为有线部署，在井下狭小的空间内，大规模的线缆部署给综采面的日常维护工作带来了极大的麻烦，运维较困难，效率低下。

04. 无线化：工作环境复杂，设备不断移动，线缆易折断，存在无线替代有线的需求。

综采面的智能化改造，是指在不需要人工直接干预的情况下，采掘装备通过智能感知、智能调控、自主导航独立完成采掘作业的过程。在这个过程中，5G 网络以其低时延大宽带大连接的能力，可以为综采面提供一个可靠高效的基础网络，支撑视频监控、远程控制、信息采集、人员通讯等业务的应用，推进综采面“减人”、“少线”等迫切需求的解决。智能综采面对 5G 网络的主要诉求包括：

数据井下闭环，网断业不断：在井下综采面的顺槽，设有综采面顺槽集控中心，由视频监视、远程控制、语音通话、安全监控等功能组成，是整个工作面协调控制的大脑。所有综采面的传感器信息、视频监控信息，都需要先送到集控中心；对煤机、支架等的控制指令，也是从集控中心发出。因此需要通过 5G 技术，部署一张覆盖整个综采面的专网，提供综采面内点对点的通信服务，而且该服务不受外界影响，即使与井上通信链接中断，该服务仍然可以继续保持。

确定性保障：主要包括上行的大宽带和远控的低时延高可靠。综采面有大量的视频业务，需要网络提供稳定可保障的大带宽；远程控制类业务如采煤机、掘进机等远程操控，需要网络提供低时延承载能力。

减少专网部署运维的工作量：井下工作环境恶劣，而且对下井的调测设备有严格的准入要求，给无线站点规划、设备调测、网络运维带来很大的困扰。因此如何降低现场的工作量，尽量做到免规划、免调测，易运维，以降低 5G 专网引入门槛。

2.1.7

露天矿 无人矿卡

露天矿常见的有露天煤矿和露天采石矿：露天煤矿，煤层在地下几十到百米不等，通过挖掘形成深坑进行采煤作业；露天采石矿，一般在山顶开采出一个工作平台，往山脚方向逐层进行采掘。露天矿的开采流程有穿孔、爆破、挖掘、铲装和运输等环节。矿区内有大量的挖掘机、运土车、电铲、指挥车、大型矿卡等专用设备，当前以人工驾驶操作为主，指挥中心难以及时掌握作业进度和安全风险。



图 2-8 露天矿生产流程

露天矿场地处偏远艰苦区域，工作环境恶劣，而且存在瓦斯、粉尘、塌方、滑坡等安全隐患，导致企业招工难、人力成本高、司机矿工老龄化流动性高等问题，因此矿山智能化转型过程中少人化无人化是一个重要趋势。无人矿卡是当前露天矿智能化改造的首选业务，通过将智能调度和管控系统部署到所有车辆，完成车辆状态和安防监控的实时采集，大数据智能分析系统辅助指挥中心做出精准决策和调度，同时，运用先进的无人驾驶技术和远程操控技术改造挖掘机、矿卡、电铲等核心生产设备，使得矿区作业现场少人，最终达到无人化。矿区内敷设光缆困难，内外传输光缆容易被挖断，5G 技术是露天矿智能化的最佳选择。

无人矿卡的智能化改造，对5G网络的覆盖提出了特有的挑战：

移动接入容量要求高：矿区作业面积大，同时有数百台车辆工作，5G网络需要满足数百台车辆移动性要求。

重叠覆盖严重：矿区面积从几平方公里到数十平方公里不等，地形空旷，重叠覆盖严重，无线信号复杂；

无线覆盖需跟随变化：矿区道路不规则，整体地形随着挖掘进度不断变化或移动，导致无线网络覆盖也跟随变化，影响网络质量。

2.1.8

港口 龙门吊

港口龙门吊主要工作于堆场，对集装箱进行装卸作业，实现将集装箱在堆场指定贝位与AGV、集卡等运输工具之间进行搬运。龙门吊主要有两种：轨道吊与轮胎吊，轨道吊只能在堆场内固定的轨道上移动，不能转场，而轮胎吊装有轮胎，机动灵活，能够转场作业。目前存量码头多使用轮胎吊，新建码头多使用轨道吊。



图 2-9 港口龙门吊

传统的龙门吊是工作人员现场全天候作业，需要多名作业人员且采用三班轮换，对作业人员数量需求大。龙门吊司机属于特殊工种，技能要求高、培训时间长，司机通常在20-30米高的操作室连续作业几小时，夏天热冬天冷、禁食禁水、长期低头作业易得颈椎病、极易疲劳。这种工作方式一方面招工难成本高，另一方面也容易出现安全事故。

龙门吊远程控制改造是港口实现自动化、无人化的关键一步。龙门吊远程控制首先需要在每台龙门吊上安装PLC控制系统与多个高清摄像头，在中央控制室安装PLC控制中心、多个ROS远控操作台以及相应的多路显示屏，驾驶员在中央控制室通过回传的视频进行分析和判断，从而下达指令，完成对龙门吊及其吊具的精准移动、抓取与释放集装箱等操作。

早期龙门吊远控的传输网络有两种，一种是基于轮胎吊的波导管，一种是基于轨道吊的光纤。光纤能够满足操控需要的大带宽、低时延、高可靠的性能要求，但是光纤的工程实施需要挖沟埋缆，工期通常会长达数月，对于非新建码头，会影响正常的生产业务。同时，光纤通过绞线盘的方式工作，随着岸桥和

轨道吊的移动，光纤容易出现折损，维修与更换需要 3-5 天不等，以及高达数十万的成本。而波导管内传输的是 WIFI 信号，由于 WIFI 的冲突机制，无法针对不同性能要求的业务进行差异化保障，对外表现就是视频回传出现卡顿、黑屏以及马赛克等，PLC 控制会产生告警甚至急停。同时，波导管传输距离有限，超过 100 米，需要增加 AP 或中继设备。此外，对于轮胎吊转场作业，波导管无法提供连续信号，转场作业无法通过远程控制实施，需要人工现场驾驶，带来不便。



针对龙门吊远程控制的传输部分，即从龙门吊港机侧到控制中心的连接链路，5G 网络可以提供更优的解决方案。龙门吊远程控制对 5G 网络提出如下要求：

01. 视频回传的带宽要求：对于每台龙门吊，通常有 20-30 个高清摄像头，同一时刻按驾驶员的操作有 6-8 路视频回传显示，每路视频需要 4Mbps 上行带宽，即单台龙门吊需要 30Mbps 左右的上行带宽；

02. 视频回传的时延要求：视频回传的时延直接影响驾驶员远控的操作体验，过大的时延带来操控的迟滞感。根据人体的感受，通常要求端到端时延控制在 250ms 以内，去掉视频编解码及显示时延，传输链路上的时延大约 50-100ms；

03. 控制指令的低时延与高可靠要求：由于龙门吊自身体积大、惯性大，从安全角度考虑，PLC 控制的时延与可靠性要求非常严格，通常通过心跳机制进行检测。以某港口龙门吊为例，如果连续出现 8 个心跳包同时大于 16ms 则后台告警，如果连续 25 个心跳包同时大于 16ms 则机器急停。5G 网络的时延、可靠性需要满足 PLC 控制的要求；

04. 业务差异化保障：针对视频流与控制报文的差异化特性，需要有针对性的进行 QoS 保障，既要保障视频流大报文的带宽需求，又要保障 PLC 控制小报文的低时延高可靠需求，网络需兼顾业务的体验以及最大化网络资源利用率；

05. 移动过程中的业务性能保障：龙门吊的工作过程也伴随着移动过程，通常情况下，一台龙门吊会沿着 400m 长的直线轨道上运动，同时，对于轮胎吊，还有转场的需求。在龙门吊的移动过程中，要求业务性能不能降低，移动性需求对于无线的可靠性是巨大的挑战，同样对于无线的覆盖性也是巨大挑战；

06. 多用户多业务并发保障：在实际过程中，很少有单一用户单一业务的场景，通常都是多种业务多个用户同时运行，以某港口堆场为例，在一个 1000m*200m 范围内有 32 台龙门吊同时工作，无论是有线的汇聚层还是无线接入层，均应保障区域内多业务并发的性能，即每一台龙门吊的业务均要求得到保障。

2.1.9

化工 装置区

化工园区根据功能不同划分为生产装置区、罐区、运输卸载区、公共工程辅助设施区、管理区等，其中生产装置区反应塔基于原料进行化学或者物理反应，通过合成或者分解等反应手段生产化工产品。生产装置区是化工园区的生产核心。大型反应装置周围建设金属钢架，用于管理维护大型设备。装置区中，生产涉及的物料复杂危险，多以气体和液体状态存在，绝大多数属于易燃、易爆、易挥发、有毒性物质；生产工艺比较复杂，反应塔运行条件一般需要高低温（高温达 1100℃，低温达 -100℃）、高压（达 350MPa），一旦操作失误或设备失修，极易发生火灾爆炸事故。

基于化工园区的特点，当前化工园区的管理的问题主要聚焦在：

- 重大危险源人工报备数据滞后，出险处置难；
- 移动危险源设卡监管导致效率低下；人员登记、出险无法统计、有效疏散；
- 能耗环境事后管理，事中缺失管理手段等问题，造成厂区安全保障难、管理效率低下等问题；
- 末端连接率待提高，受制于环境，有线通信无法实现终端全覆盖，而 4G 无线方式，传输带宽受限，可靠性低；
- 智能运维手段少：受限于通讯，自动化运维手段缺少，人工巡检周期长、成本高、效率低。



图 2-10 化工装置区

化工园区数字化转型是企业发展方向，最终目标是，通过一张网络采集末端各类数据，在数字孪生平台可视呈现，最终可以有效获取园区的进出货、收益情况、人员分布情况、各个装置区运行情况等，即直观地数字化呈现整个园区的情况，提升安全管理水平和生产效率。化工园区基于 5G 无线网进行数字化改造过程中，对网络有如下特有诉求：

设备要求高：大部分装置区属于危险区域，对设备安全要求高，有防爆要求；

性能要求高：园区数字化转型主要聚焦视频监控类、数据采集类业务，需要建设一张覆盖完善性能高的无线网络，满足网络大带宽、高可靠、无损切换要求，例如动设备状态监控，通过 5G 低时延、高可靠的网络，实时采集设备运行数据，对设备健康状况实时评估、分析预警，实现预测性运维；

无线规划难：针对装置区金属结构多，导致无线信号大量反射衍射，网络规划难度大；

数据安全要求高：数据不出园区，同时需考虑网络隔离，生产网需和其他网络进行隔离，保障生产域网络的安全。



生产现场专网对 5G 能力要求

综合以上不同行业典型生产域场景，我们可以总结生产域的 5G 现场网需具备如下核心能力：

- 01) **面向工业控制的高业务确定性** 工业控制应用需要网络提供高确定性，不论网络负荷、干扰等波动，都需保障业务所需的时延、带宽的确定性。例如，10ms@99.99% 的确定性时延是基础，还应包括抖动等。
- 02) **面向工业控制的高网络鲁棒性** 5G 走入生产域，为保障生产的连续性和安全性，对网络的鲁棒性提出更高要求，包括 99.99% 的网络可靠性，更为关键的是如何确保网络出现异常时不影响生产的连续性，例如及时的链路倒换、快速的网络自愈以及客户自维护等，这都需要在网络设计之初就匹配工业生产的功能安全进行合理规划。



- 03)
- 匹配工业生产的现场总线连接** 区别于传统的 ToC 用户和一般的 ToB 非生产业务，生产域核心业务不只是联网，而是需要和其周边很多设施进行互动，这就要求 5G 网络和现场有线或无线既有设施互联互通，包括兼容传统的工业总线，以及支持相关的工业协议等，常见的组网包括 5G LAN、L2TP、VxLAN 等，需兼容的工业协议包括 Profinet RT、OPC UA 等。
- 04)
- 为数字化转型应用提供算力及平台组件** 业主进行生产域数字化转型，通常不仅关注 5G 网络本身，还希望为数字化转型应用提供算力及平台组件，也就是业主/集成商需要完整的覆盖连接+算力+应用的整体方案，甚至是应用所需的通用加速组件，即包括 5G 网络、边缘算力载体、视频优化、云化 PLC、远控平台、融合定位等一站式方案。如果业主、集成商、网络供应商三者中间缺少整体拉通，将阻碍新型现场网在实际工业生产域的规模应用。
- 05)
- 进入生产域的安全隔离保障** 大多数行业都有明确的安全隔离保障要求，一般要求生产网络独立于管理信息网、外部 Internet 等，且仅在安全区做数据互通。现场网方案的规划设计，首先需要满足企业安全需求，实现业务的现场闭环。例如核心网组件 UPF 甚至 5GC 的本地化，网络管理组件的本地化，以及现场部署的高集成化。其次，如果 ToB&ToC 共享无线频谱或无线基站时，还需额外考虑 ToB/ToC 的网络隔离。
- 06)
- 企业的自助监测运维服务** 针对生产域网络，现场业主有自服务诉求，包括网络/业务运行状态的监测、低门槛的业务运维，例如业务上线、业务能力编排、网络灵活调整等。
- 07)
- 数字化下现场网和工业互联网平台的运营管理协同** 企业数字化转型是一个端到端的系统和数据融通：在生产现场，生产应用需要本地闭环并实现本地数字化可视可管可控；向上，现场网还需要具备与企业 MES、SCADA、HMI、业务运行大屏等互通的能力，从而实现企业的统筹规划、调整和运营；再向上，系统还需具备和外部云端的工业互联网平台互通，及时获取外部云端的业务运营数据，服务于生产域的现场网，这一能力正在成为企业数字化的刚需。端到端的数据贯通要求现场网对外能力开放，即将网络参数、业务数据等通过 Open API 开放，从而实现柔性生产的网络参数可调、不同部门差异化数据采集分析等能力。

3 生产域的专网部署

从第二章典型生产域场景需求和能力要求分析可以看出，相比于共享 5G 公网主要承载的 ToB 管理信息 / 辅助生产业务，生产域现场网的要求更高，需充分考虑企业生产域业务发生位置、业务时效性、可靠性等服务质量需求，结合生产数据流转和企业管理流程、企业内网架构及网络安全需求特征，实现 ICT 与 OT 的架构融合及联合部署，建立全局业务驱动和资源管理调配模型，满足企业数字化、智能化的发展诉求。

3.1

5G 现场网

现有企业利用运营商共享专网往往是网业分离模式，业务应用自行或者委托第三方部署在云上，通过购买运营商 ToB 卡号套餐、委托运营商扩展网络的方式实现。企业业主基本看不到网络，由运营商黑盒运营和运维，典型行业场景例如电力配电网调控监测业务、园区安防视频监控、教育 / 医院双域网等等，这种我们可以称之为 5G 园区专网。5G 园区专网服务的业务应用比较简单，企业自身或委托集成商直接向运营商购买连接即可支撑园区应用的开通。

但深入现场生产域的数字化、智能化，企业业主往往只能描述诉求，并不清楚如何实现。而不同行业场景也千差万别，单纯标准化连接能力对于业主并不解决问题。尤其是产业数字化浪潮当下方兴未艾，尚难以通过标准化实现最优方案。通过大量实践，我们提出了 5G 现场专网方案，即以开放的 5G 系统为基础，通过产业链合作，融合多种能力，满足生产现场特定业务的端到端的完整解决方案。

相比 5G 园区专网通过共享运营商专网满足企业上云的业务连接需求，5G 现场专网需更贴近客户生产现场，合理设计网络连接和算力供给方式，集成业务应用，满足生产现场需求。5G 现场专网是算网融合一体的整体交付，总体包括两方面：

1) 通过定制网方案满足连接，包括端到端硬件设施产品、确定性保障、企业自服务运维等。

2) 通过算力服务化架构提供应用集成, IOCT 融合分布式算力, 可内生或外部开放合作产业链生态, 按需集成交付行业应用。典型行业应用如: 多 AGV 协同、PLC 工业控制、AI 机器视觉、钢铁无人天车、港口龙门吊、叉车物料管理、产线数字孪生等。

从企业的传统工业网络平面看(如下图), 5G 园区网模式更适合 IT 网(包括 IT 办公网和 IT 生产网)、生产辅助网, 5G 现场网模式更适合 OT 生产网络, 尤其是工控专网等。

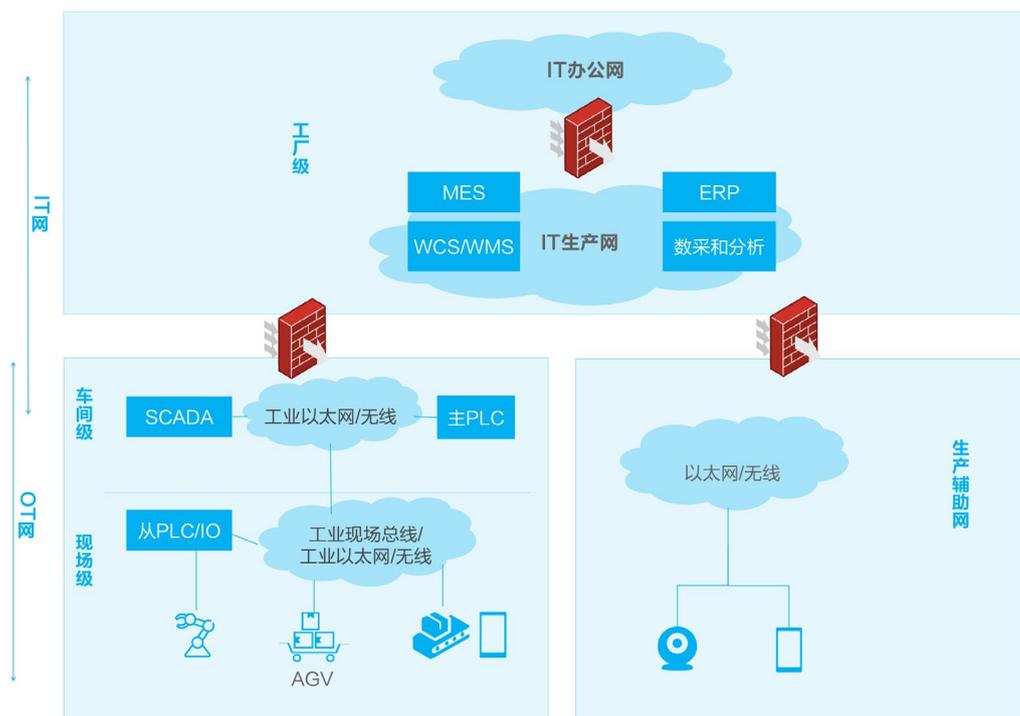


图 3-1 传统工业现场网组网架构

3.2

5G 现场网部署模式

下面我们结合典型行业, 针对现场专网需求, 实例化阐述 5G 现场网的几种部署模式:

3.2.1

5G 现场网 独立部署模式

独立部署模式是 5G 现场专网最基本的部署模式。当行业客户的业务因低时延、高可用等性能要求超出了公网的能力上限, 无法采用 5G 园区专网方案时, 就需要为行业应用独立部署 5G 现场专网。采用匹配行业应用需求的专用网关、专用基站 / 专用 UPF, 以实现对业务流在传输时延、处理能力、系统可用性等维度的端到端保障。

典型场景: 3C 电子制造车间如下:

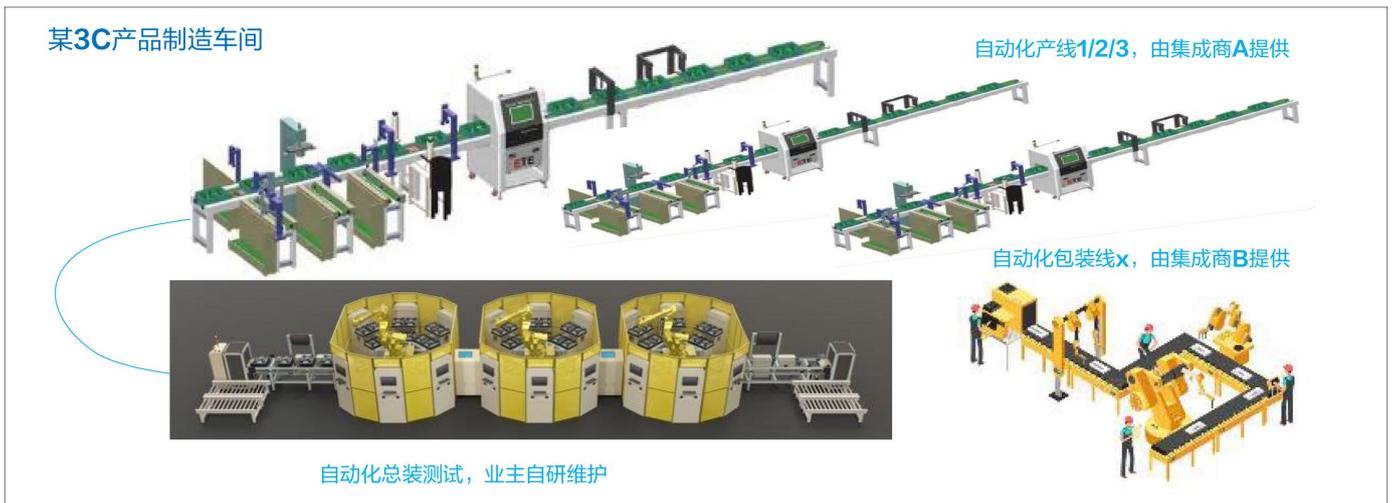


图 3-2 典型 3C 电子制造自动化产线图

基本特征

01. 范围有限：以离散制造为典型，多条产线所处区域有限，基本都集中在一个车间之内；
02. 业务集中：车间内的数据采集、数据处理、操作执行都在一起，仅 IT 域数据会出车间，OT 域数据大部分需要在车间本地分流和处理；
03. 调整灵活：为实现柔性生产，产线设备需要在车间范围内移动和调整，不希望网络连接完全固化不动；
04. 易部署、自运维：车间内的生产管理信息网的互通可用 IT 人员完成，车间内的生产控制网络由产线制造部门部署维护。

产业数字化的新型业务也催生了网络和算力新模式的应用机会，例如：

01. 产线 / 工位间抛接的 AGV 运行：可通过车间现场算力的调度台总控优化，同时结合高可靠连接保障网络的优化；
02. 智慧仓储物流的叉车调度：可通过 5G 扩展的融合定位能力结合标签识别来完成；
03. 生产设备的数采联网和预测性维护：可通过现场算力的融合应用完成前置处理，并专属配置兼顾时延、大连接、大带宽的 5G 网络连接；
04. 质检工位的机器视觉应用：可通过定制的低时延大带宽 5G 专网，结合云边协同的现场算力承载应用，省去工位的工控机等额外设施；
05. 无人化、自动化线体和机械臂控制的应用：可通过定制的低时延高可靠的 5G 确定性专网，保障主从 PLC/PLC C2IO 的剪辫子，并进一步对主 PLC 进行云化改造。

3C 电子车间现场网的总体架构需要考虑两方面：网络架构上，需要融合企业多层异构网络，包括实现现场应用本地闭环和物理隔离的 OT 生产专网，以及承载工业互联网平台、MES/ERP、WCS 等应用的 IT 管理信息网络、生产辅助网；云架构上，需支持分布式边缘云架构，包括置入 OT 生产专网控制节点的现场云算力和工厂级的边缘云 / 园区数据中心，其中，通过现场网设备扩展算力，可以避免大量零散工位工控机的部署，实现现场业务的云化灵活部署。

5G 现场网和上层系统的数据融通关系：

首先 OT 生产域数据在本地即可闭环，同时数采数据和生产运营调度数据经防火墙进入上层 IT 生产管理网络，进一步经防火墙可打通企业集团的私有云及运营商公网和 Internet 互联网。整体组网架构如下：

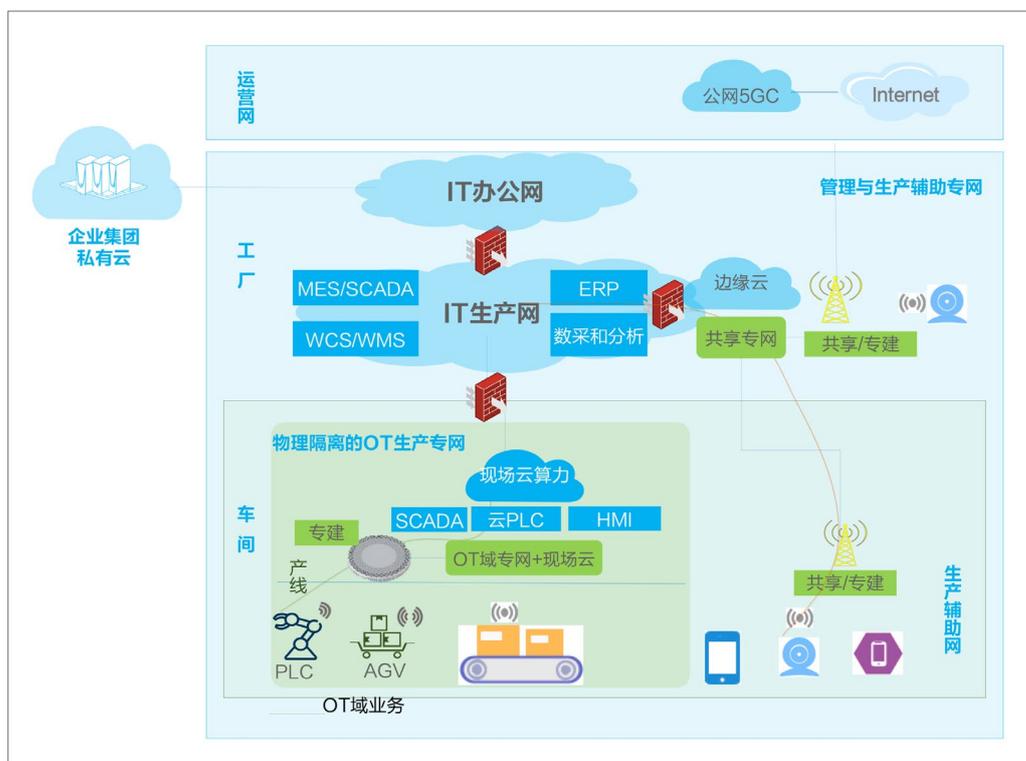


图 3-3 5G 现场网独立部署模式的组网架构示意图

此外，车间内多条产线的协作，需要产线间 OT 专网的互联互通和统一管理，如下图所示：

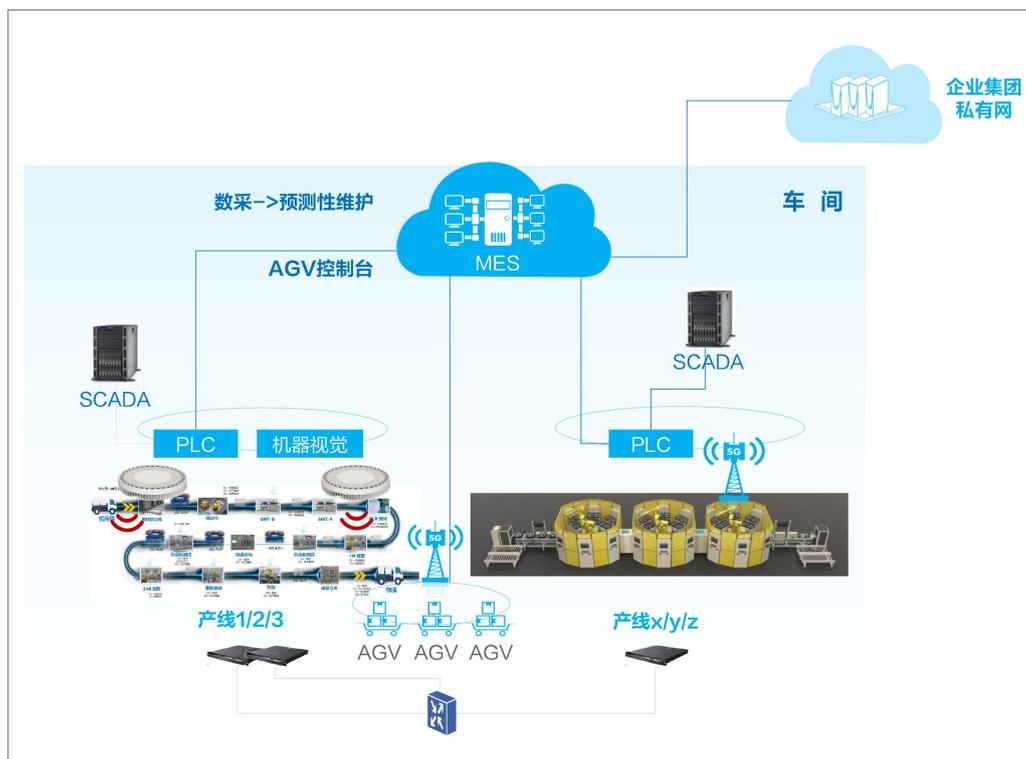


图 3-4 车间内多产线互联互通组网示意图

现场多业务的应用，算力的分布式协同，高要求业务的保障以及网络的安全隔离，需要提前进行统一的规划和精准的设计。5G精准网络规划涵盖室内3D数字地图建设、业务QoS需求映射分析、网络资源估算、数字孪生仿真等，最终设计网络最优拓扑结构，设备工程规划参数和无线网络参数。主要包括：

- 基于室内3D数字地图对业务分布进行地理化，明确在不同位置ToB业务数量和业务总量需求；
- 基于射线追踪模型进行精准覆盖预测，获取准确的信道估计，达成业务保障接入电平门限值；
- 基于SLA演算满足业务QoS要求网络资源；
- 基于数字孪生进行网络最优拓扑结构设计、设备工程参数和无线参数设计，输出给一线工程人员进行安装和参数配置。



3.2.2

5G 现场网 预集成模式

5G 预集成模式可以认为是独立部署模式在网业融合形式上的一种极端形态，即由行业集成商，将匹配行业应用需求的专用网关、专用基站、专用UPF等专用设备，与行业设备集成在一起，形成5G原生式行业应用系统，一站式交付给行业客户。

典型场景：产线集成商在产线解决方案中预集成5G现场专网，例如：汽车装配线的集成商，将专用5G网关、专用5G基站等设备集成到汽车装配生产线的设备中，使该装配线原生内嵌5G数据传输能力，再交付给整车工厂。

大型制造基地一般拥有多条产线，其建设和运营由不同的集成商负责，产线级现场网首先支撑产线自身业务，然后再和其他产线进一步协同，构成更大的有机整体。产线建设有产线新建和产线改造两种模式：

- 产线新建，一般由业主方提出需求，产线集成商提供交钥匙工程，对产线整体性能负责，并提供全生命周期服务。业主会全程参与方案选择、方案实施和测试验收。
- 产线改造，尤其是更换生产物的柔性生产调整，通常由业主方自行设计、实施方案，自行对改造效果负责。如果改造量大，可能引入第三方产线集成商，则类同产线新建。

为满足跟随产线部署，支撑产线各种控制、数采、图像、视频的数字化连接，产线现场网的架构需要充分内聚，需要一个更强的融合设备节点，实现云网业一体化，预装、改配、一键开通、自优化、自服务，推荐的组网架构如下图所示：

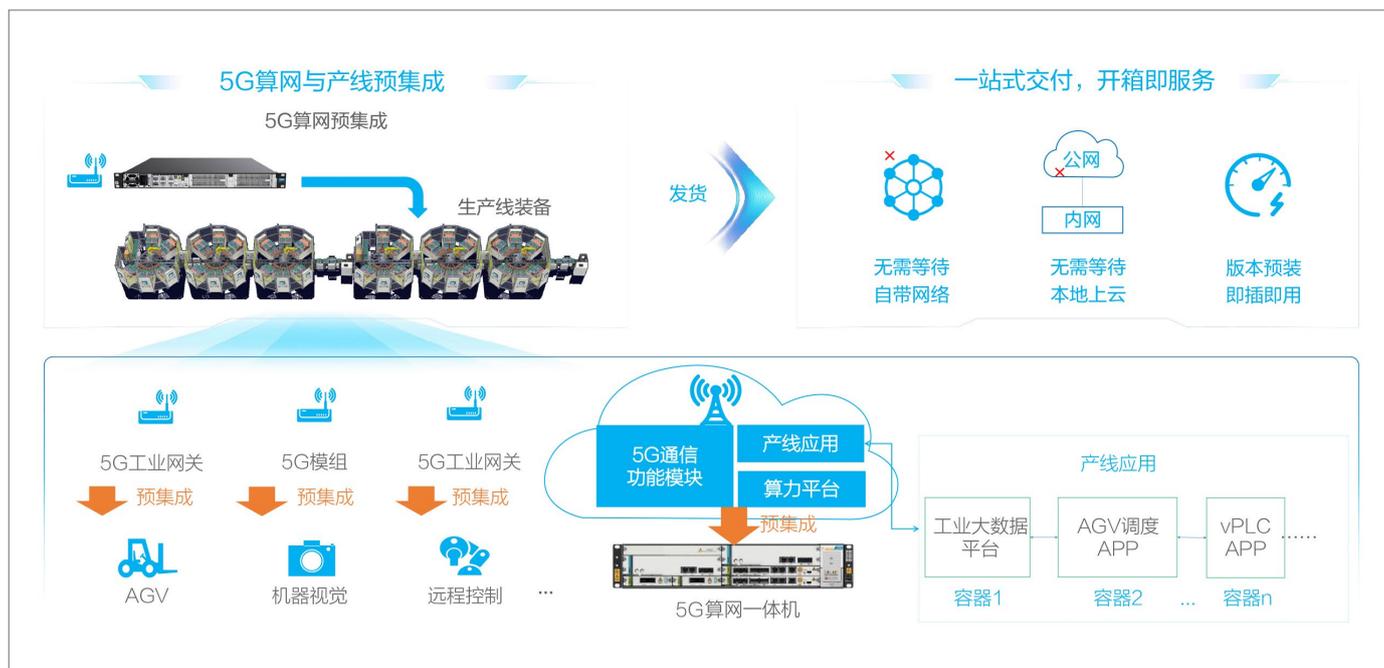


图 3-5 产线级 5G 现场专网组网架构示意图

该场景推荐使用多网元合一、算网合一的 5G 算网一体机，具备如下亮点：

- **多网元合一，端到端 5G 方案**
内生 5G 端到端产品方案，包含基站的 BBU 功能、核心网的 AMF、SMF、UPF 功能，以及基于 IDOS 的业务 SLA 和运维服务保障。
- **算网合一，内嵌算力载体：**
除了 5G 专网功能以外，同时提供基于分布式云原生的算力资源，满足产线现场数据分析平台、机器视觉、云化 PLC 控制等应用部署。
- **资源独享，OT 域专网**
该 5G 算网一体机在空口宜使用专用频率，仅承载 OT 域业务的终端设备可接入，与外部 CT、IT 网络隔离，资源独占。
- **低时延，确定性保障**
下沉产线的 5G 算网一体机设备，不仅可以减少 5G 专网内不同网元之间的传输时延，也可以减少 5G 专网和产线内工控机、服务器之间的传输时延，还可以减少产线内通过 5G 专网接入的不同设备之间的端到端时延，同时该独立专网可不受大网限制，便捷叠加各项无线低时延技术，保障生产域应用的确定性。

- 易部署，易运维

跟随产线快速部署插电即用，或者非专业的企业人员将融合节点连接交换机，接入 OT 域网络即可，从而大大简化了 5G 专网部署的复杂度。同时，通过内置的 IDOS 业务运维系统，企业业主可轻松掌握通讯设备的运行状态和无线网络业务质量，便于企业客户集中查看、操作和数据能力开放等能力。

- 可扩展，可开放

若业主要将产线现场网接入其内网或者新建网络，则可以调整该算网一体机的设备配置参数，注册认证即可接入运营商或者业主系统进行管理，实现灵活的扩展。此外，通过 Open API 接口，该系统可向上提供网络接入的运行状态和配置能力的开放，支撑上层系统实现统一监控、产线业务流程优化配置同步等，从而实现完整的数字化产线。

3.2.3

5G 园区网 & 现场网协同部署模式

5G 园区网 & 现场网协同部署模式是在独立部署模式基础上的扩展，针对有一定规模的行业场景，不同的生产环节，不同的生产区域之间通常需要协同运作，依托于 5G 园区网，叠加独立部署的现场网后，共同协作服务生产域应用。

在类似 3C 电子和装备的离散制造产线车间基础上，例如钢铁的冷轧、热轧等往往不同工序又组成更大的生产园区。车间往往代表某类经营产品的完整生产，管理上归属独立经营的业主单位或子单位，它可能由多条功能完全相同的重复产线组成，也可能由工艺流程前后衔接的多个产线组成，具备车间和跨车间的集控中心。网络设计需要体现经营主体所有产线后整体产出最优，又具有部分产线灵活调整的能力。业务衔接也需要具备在生产域内部闭环的基础上互联互通和对外开放复用的能力。

典型的应用，以钢铁为例，除了车间的无人行车，在跨车间范围还有园区无人铁水运输、人员定位安全管理等。此时，比较适宜的方案是整个工厂生产基地，结合运营商大网共享能力，以及 5G 定制专网优势，将园区和多个车间构成 1+N 算网底座方式。

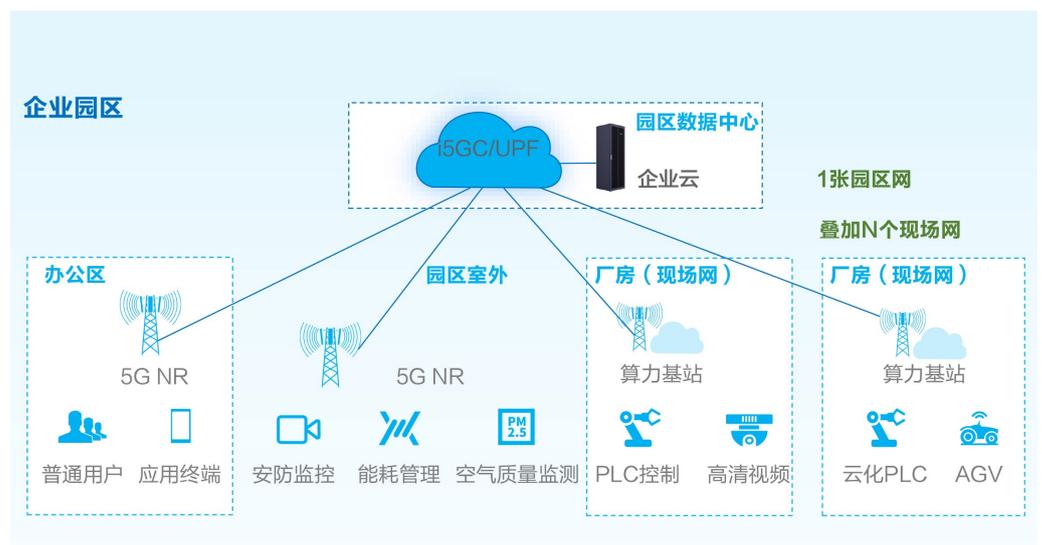


图 3-6 1+N 算网底座组网架构示意图

3.2.4

5G 园区网 & 5G 现场网合一部署模式

室外作业区的 5G 专网是现场网独立部署模式一种特殊情况，通常应用于生产现场以室外为主的行业场景，为满足行业应用而部署的 5G 现场专网，这类场景往往采用园区网和现场网合一部署模式。同时这类场景大多地处偏远，在 5G 现场专网建设之后，为了更高性价比地补充所在区域缺失的 5G 公网覆盖，可以允许公网业务接入 5G 现场专网，通过 ToB 和 ToC 双域隔离技术，保障两者之间不会相互影响。

典型场景：大型化工、港口、露天矿等企业的生产现场，除了产线、车间、工厂，还有广大的室外作业区。当下产业数字化改造，这些区域往往结合无人车辆、远程控制、人员管理、智能物流等大量业务改造要求，构建室外作业区作业现场专网。例如港口需要考虑岸桥堆场密集区域的无人集卡、远控龙门吊、智能理货等；化工装置区动设备预测性检测、人员安全管理；露天矿的无人矿卡等。

相比产线、车间，室外作业区的专网建设还需要额外考虑公网隔离、企业混合云、多应用系统协作等因素，例如港口集装箱堆场，专网建设时需要同时考虑地面的无人集卡路线和移动的上层龙门吊业务；例如露天矿，在复杂变化的无人矿卡作业区，需要避免远处公网信号的干扰和网络接入的隔离等。

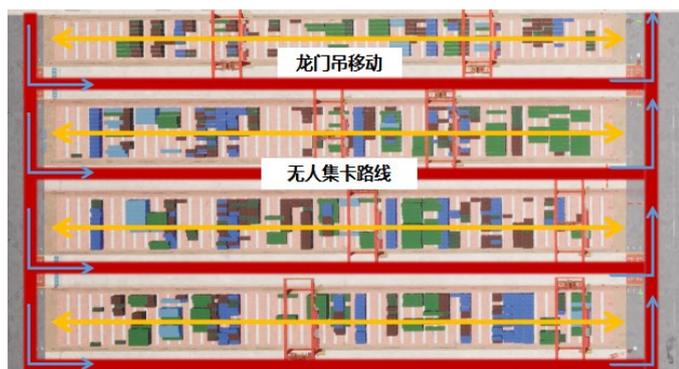


图 3-7 某港口集装箱堆场



图 3-8 某露天矿现场

室外作业区 5G 专网方案特有的需求：

- 立体覆盖：地面、深坑、山坡、低空等混合场景，需要考虑全面覆盖。
- 多频协同：覆盖、容量、可靠性都有刚性要求，需要多频网络满足。
- 移动性保障：远程控制类生产业务在室外移动，都有视频不卡顿，业务平滑的要求，需要解决频繁切换、同频干扰等常见问题。



图 3-9 室外作业区 5G 现场网部署模式示意图

为满足室外作业需求，5G 现场网需同时兼顾网络和算力的部署，建议采用 iCube 云网柜方式一体化独立部署，一站式满足园区数据、专网语音、边缘算力、应用集成等多种网络需求，也可以分网元下沉部署，如边缘 UPF、基站（含 BBU）等，不论是集约一体化还是分网元部署，其组网架构应该包括基站（含 BBU）、下沉的 UPF 或轻量化核心网 i5GC、边缘云 MEC、企业自服务管理平台 IDOS 甚至专业网管，并经防火墙北向连接运营商大网 5GC 以及网管管理面。

4

5G 现场网关键技术

5G 现场专网部署架构下，我们从企业现场网络互联、网络确定性保障、网络隔离、网络运维、应用平台支撑等几个方面，分别阐述如何更好的支撑工业现场网的落地。

4.1

网络关键技术

4.1.1

现场网络互联

工业生产域网络互联互通本质上就是将物理上分布在不同层次、不同类型的系统和设备通过网络连接在一起，实现信息 / 数据的传输与应用。

原有工业网络设备大部分工作在局域网环境，往往采用二层组网技术和典型的 Ethernet 报文进行指令和信息的传送，单纯使用 5G 网络无法快速寻址，可考虑 5G LAN 技术，同时支持单播，组播和广播数据传输，支持不同的区域、分布在不同的地方的业务通过 5G 网络互联互通，具有良好的空间扩展性。在此基础上，一方面，5G 网络有完备的用户鉴权机制，可以避免非许可设备的接入，在安全上的优势非常明显；另一方面，不同的 5G LAN 之间可以实现隔离，数据通信的安全性也得到保障。5G LAN 技术，在实际项目方案落地的时候，对终端能力有要求。当终端不支持 5G LAN 功能时，我们同时提供使用隧道技术实现二层以太网通信，例如 VxLAN、L2TP 技术，在不改变原有现场网的端 - 业之间通讯方式下，无需增加额外路由设备，快速使用 5G 无线网络。

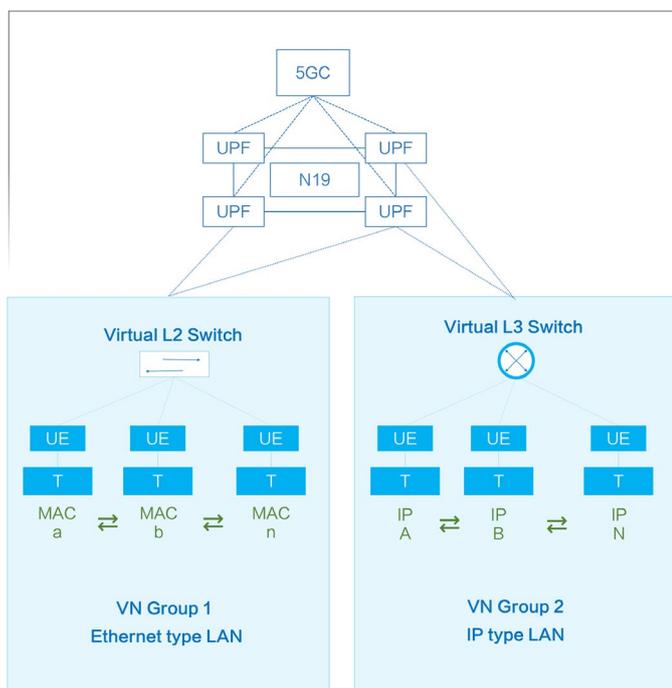


图 4-1 5G LAN 互联互通

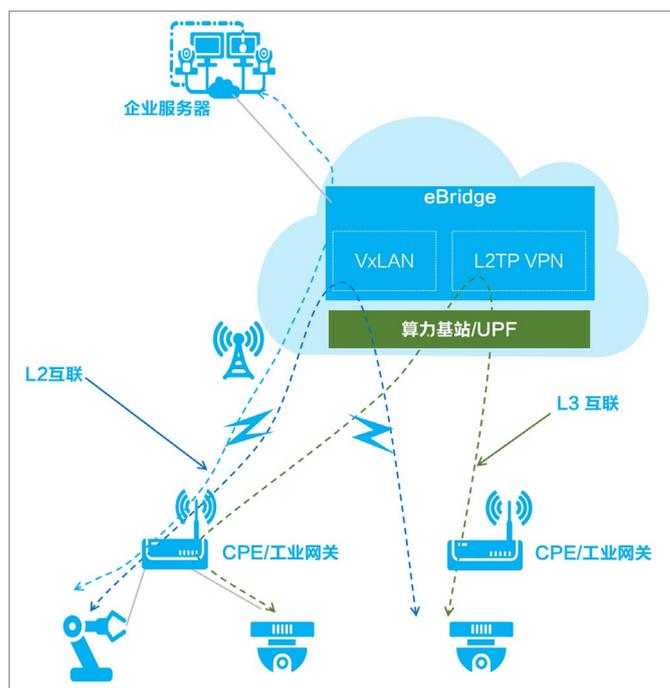


图 4-2 L2/L3 互通

同时，工业现场有大量不同型号的 PLC、工业机器人、AGV 小车、数控机床等设备，物理接口和工业协议也五花八门，这些多样化的端侧可通过 5G 工业网关实现柔性化接入，实现无线替代有线的扁平化结构改造。5G 工业网关可支持不同物理接口 / 工业协议设备的融合互通和适配：

- 支持包括 RS232/RS485、LAN 以太网、WIFI 接口和无线通信接口；
- 内置各种通讯协议，支持 ModbusRTU、CAN、OPC UA 等协议；
- 通过 HTTPS、MQTT 等协议与工业系统服务进行通信。

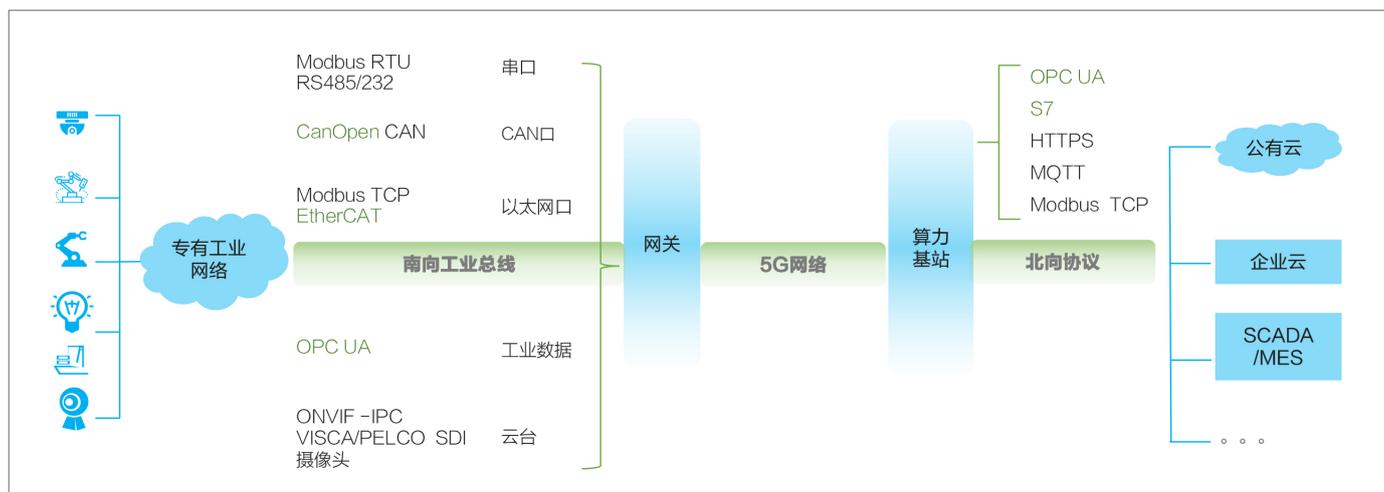


图 4-3 5G 网关支持多种工业协议

4.1.2

现场网的可靠性

在工业生产场景中，钢铁生产金属加工、3C 制造复杂设备装配、物流自动分拣等工序中，需及时可靠的获取工业装备的控制、感知等信息，对网络的可靠性提出高可靠诉求；同时工业现场网络的稳定运行是生产企业稳定生产重要因素，这就需要保证现场网络和现场业务长时间连续的高可靠性。大部分无人化设计的智能制造工厂要求现场网络至少保障 7*24 小时不间断稳态运行，否则一旦中断，会严重影响企业的正常生产和运行。我们基于行业的实践，总结矿山、轨交、钢铁、港口、化工等行业的可靠性需求如下图所示：



图 4-4 各行业可靠性需求

为了保障工业生产系统的安全稳定运行，我们针对工业现场网提供业务连接可用性保障、网络可用性保障、业务功能安全保障方案。

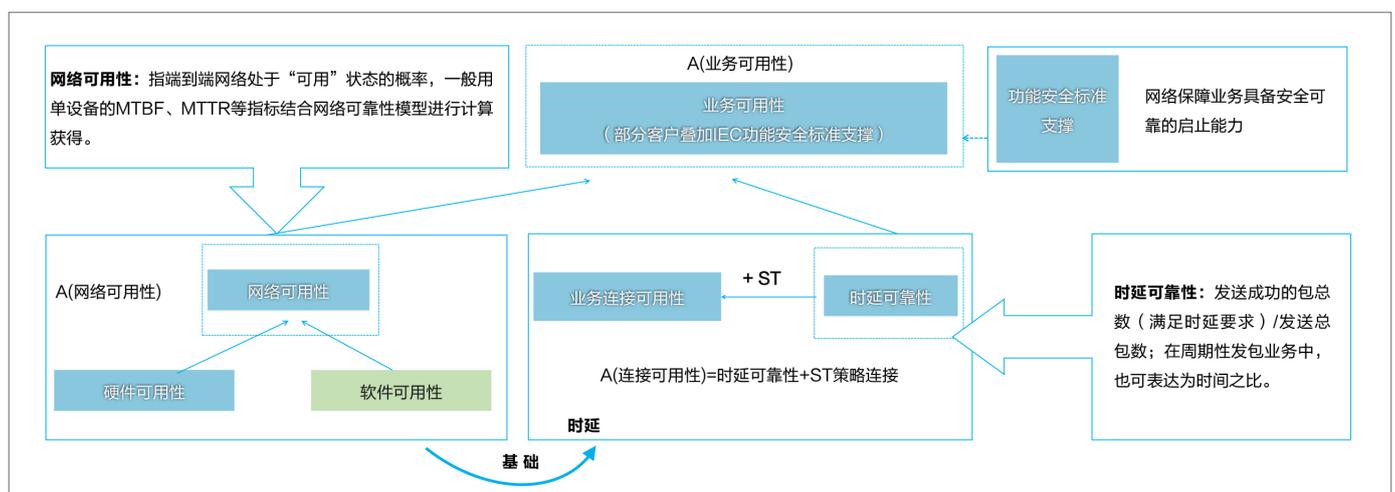


图 4-5 网络、连接、业务可用性关系示意图

4.1.2.1 业务连接可用性

随着工业现场柔性生产和数字化转型，各垂直行业对时延确定性的诉求日益剧增。例如港口煤矿等远控场景要求 20ms~50ms 传输时延，并且满足 99.99% 以上的时延可靠性。工业自动化控制要求 4ms~10ms 传输时延，并且满足 99.999% 以上的时延可靠性。与此同时，工业生产域的机器视觉质检、无人矿卡等应用的视频回传，对上行实时并发也提出带宽和移动性的要求。

虽然 5G 技术可区分业务场景进行差异化 QoS 配置，进行 NR 的调度和无线资源管理保障，但实际业务运行的带宽需求和配置 QoS 是否匹配，没有进行闭环保障，亟需灵活的 QoS 配置和可闭环的 QoS 保障策略。业务连接可用性保障方案，深入感知终端具体业务数据流的业务特征，针对特定的终端甚至业务数据流协同基站和应用，进行网业协同的调度，实现网络时延、可靠性以及业务带宽的保障。

对于不同业务的时延和可靠性要求，有不同的无线技术来满足相应的性能要求。

4.1.2.1.1

基础低时延高可靠技术保障

对于 20ms@99.99% SLA 级别：采用如本地分流、PDCP 乱序递交、智能预调度等减少链路及空口的传输时延；采用保守 MCS、调整目标 BLER、HARQ 重传增强等技术来保障空口的可靠性。

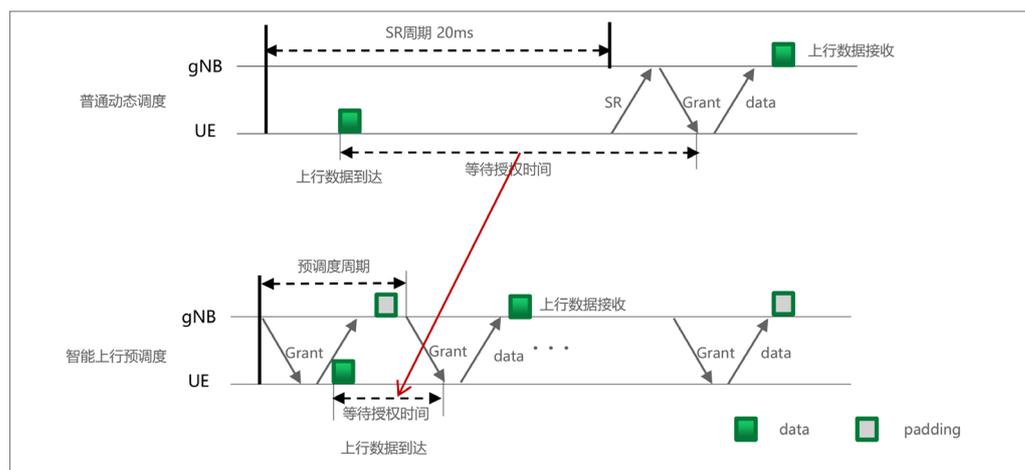


图 4-6 智能上行预调度带来的时延增益

对于 10ms@99.999% SLA 级别：可采用 DS 帧结构、保守 MCS、调整目标 BLER、HARQ 重传等技术降低空口时延；进一步可增加双载波互补帧结构 CA 的方式来降低空口传输时延，也可以采用 URLLC mini-Slot 调度来节省系统处理时延和空口传输时延；可靠性增强方面，可以使能基于 CA 的 PDCP Duplication 功能（若终端支持），或者 5G+5G/5G+WIFI 的 FRER 双发优收功能，以及半静态预留 RB 资源等技术来进一步提高空口可靠性。

对于 5ms（及以下）@99.999% SLA 级别：利用超短帧结构 DS 的多 MO URLLC 功能来达到极致时延保障，利用 mini-Slot 重复来进一步增强空口可靠性，或者 5G+5G/5G+WIFI 的 FRER 双发优收功能提升业务端到端的可靠性。

进一步，在上述不同时延可靠性技术上，可以叠加使用 TSN 技术降低时延抖动，增强业务确定性。

4.1.2.1.2

基础大带宽技术保障

生产域中除了控制时延类需求，同时存在大带宽类业务保障需求，主要的对上行带宽有较大需求，比如港口、露天矿、矿井综采面、钢铁无人天车、制造产线等业务场景普遍存在的图像 / 视频回传、机器视觉业务等大带宽的视频类业务应用，我们采用叠加频段以及调整 1D3U 帧结构、载波聚合 CA、MU-MIMO、SuperMIMO 等技术，提升网络带宽，满足生产域的业务需求。

4.1.2.1.3

业务 SLA 闭环保障

相较于 ToC 的无差异化参数设置以及尽力而为的服务，初期的 ToB 专网通过“切片 +5QI”实现业务的差异化调度，从而保障不同应用的 SLA。但“切片 +5QI”基于静态配置的方式，无反馈机制，无法感知业务保障效果，同时为了保障业务体验，往往配置多的资源进行保障，存在极大的资源浪费。

我们基于 SLA 保障平台，自动识别业务数据流特征、根据业务特征进行无线资源的闭环精准网业协同调度，实现时延可靠性及业务带宽的保障。确定性保障架构见下图：

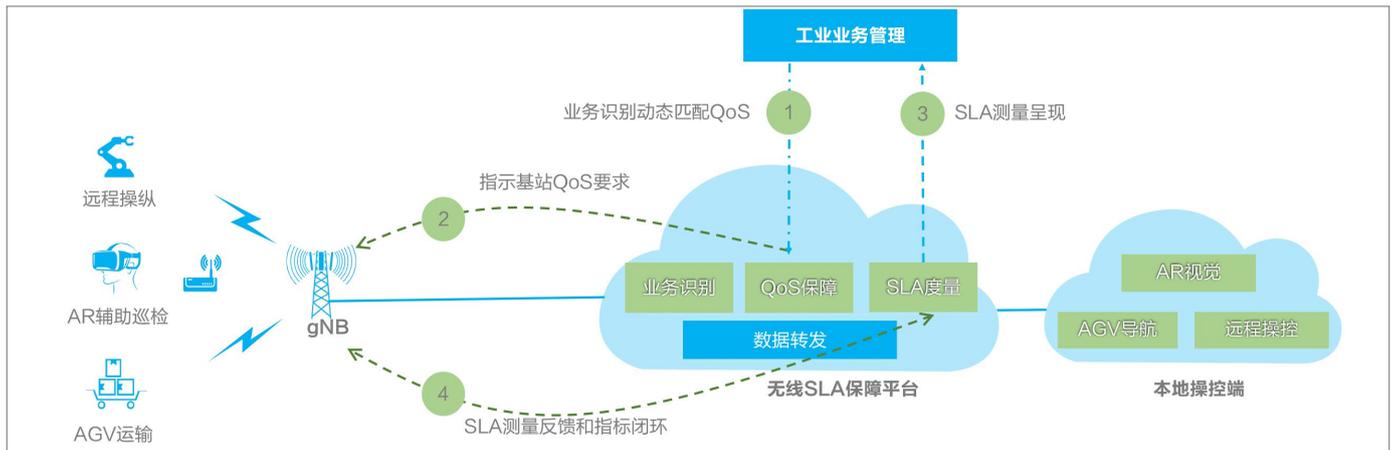


图 4-7 SLA 闭环保障

SLA 闭环保障功能引入对数据转发面的 AI 业务特征识别技术，深度洞察感知业务特征与基站调度协同，进行精准协同调度，同时进行 SLA 测量反馈，根据测量结果进一步进行调整。这种与业务匹配的调度机制最终可达成业务网络需求保障目标，同时可以有效利用频谱资源，对多终端并发和降低干扰也有增益。



4.1.2.1.4

TSN 超低抖动保障

工业现场网络，如 PLC 运动控制场景，对报文的时延和抖动要求非常高，需要网络具备低时延和超低抖动的确定性，TSN 技术和 5G 技术相结合，能够很好地解决这个问题。

中兴通讯通过 TSN 的技术，结合 5G 网络自身低时延能力，通过业务的确定性编排等技术，打造端到端的内生确定性解决方案，保障 $\pm 1\text{ms}$ 级抖动。

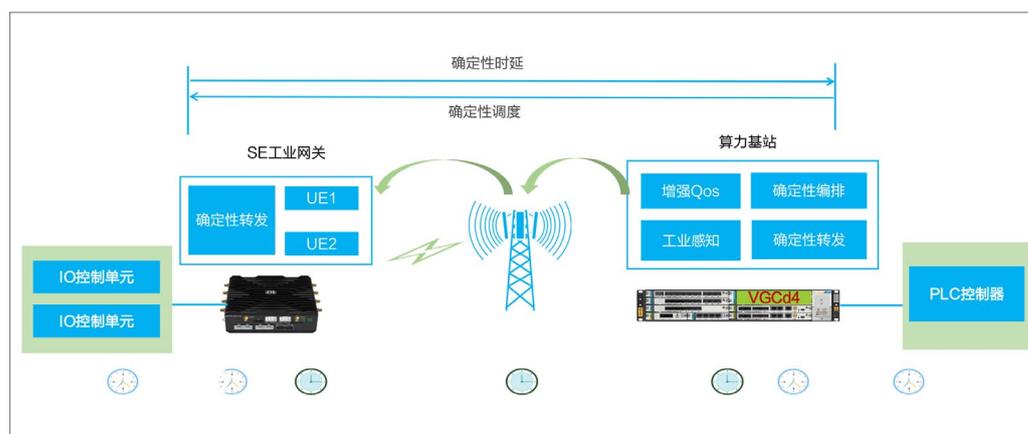


图 4-8 TSN 方案示意

5G TSN 解决方案包括：

硬件：支持 TSN 的 SE 工业网关和算力基站 /UPF

软件：支持 802.1as/1588 时钟同步；支持确定性转发 802.1Qbv 技术；支持 802.1Qbu 帧抢占技术；进一步，支持内生确定性编排和调度，保障 5G 网络传输的确定性。



4.1.2.2

网络可用性

网络可用性：产品在任意随机时刻需要和开始执行任务时，处于可工作或可使用状态的概率。在 5G 系统中，网络可用性用于描述网元组成的网络正常运行的时间比例。5G 现场网保障工业现场网的网络可用性，主要有三个方面的方案：

网络冗余备份高可靠、数据分流锚点高可靠、端到端链路高可靠。

通过上面三个层级的网络可用性保障机制，一方面提升整个通信网络系统的可用性 ($\text{Availability} = \text{uptime} / (\text{uptime} + \text{downtime})$)，(uptime 为满足 Qos 性能的端的到端通讯服务时间，downtime 为宕机时间)，另一方面通过端到端的冗余传输保障机制，提升端到端数据包传输成功率，保证业务的可靠性。

4.1.2.2.1

网络冗余备份高可靠

针对工业现场业务场景，5G 现场网可以通过双 BBU 备份、双 pBridge 上连、RRU 重叠覆盖技术，以及 5G 核心网组池、承载 SPN 双平面等端到端网元节点硬件设备备份的方式，在单设备故障时，快速通过备份网元恢复网络，从而增加网络的高可靠性，减少对工业现场网业务的影响。

满足行业生产业务的连续性，是通过网元节点备份的实时倒换，基于单板级的备份、传输链路备份、节点级备份、无线双平面备份、业务的惯性运行等技术点，实现端到端网络链路的 0 单点故障，实现网断业不断，真正使能可承诺 5G 用于工业生产的超高可靠网络。

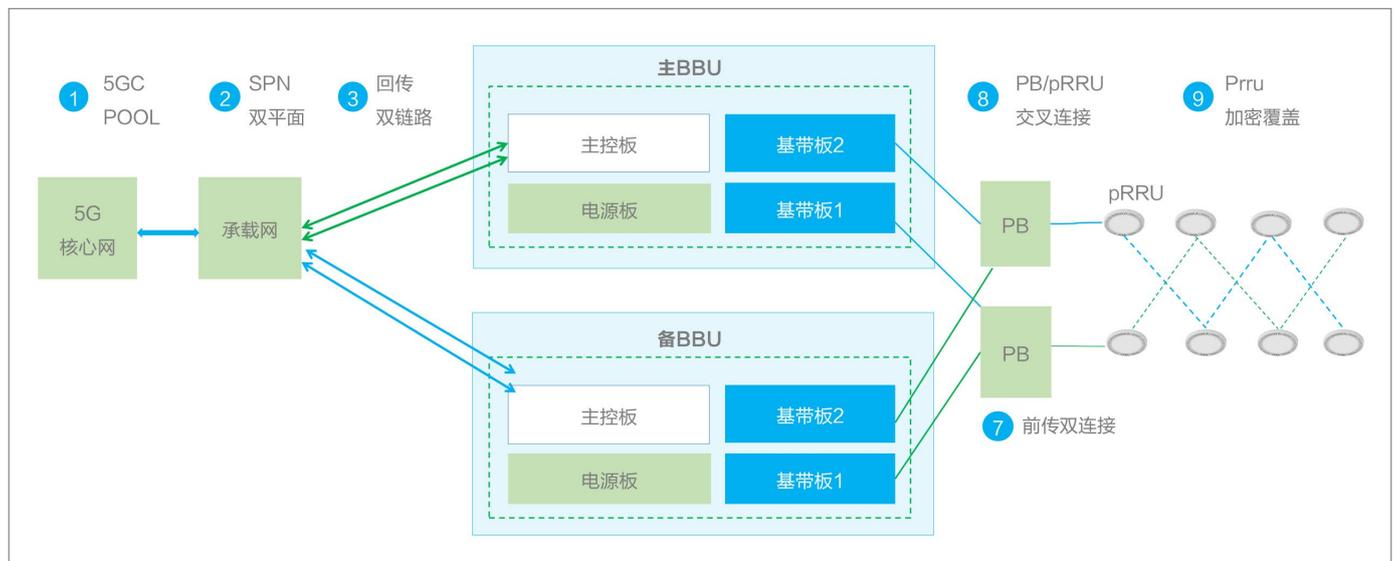


图 4-9 多级网络备份提升网络高可靠

4.1.2.2.2

数据分流锚点高可靠

5G 现场网，针对用户业务数据分流锚点进行备份，保障业务的可靠性，方案如下：

01. UPF 资源池

对于工厂级的 UPF，一般部署在园区或电信的机房，为了提升可靠性，可以部署多套 UPF，组成资源池，当其中一个 UPF 故障时，可自动选择其他 UPF，从而保障数据的可靠性。

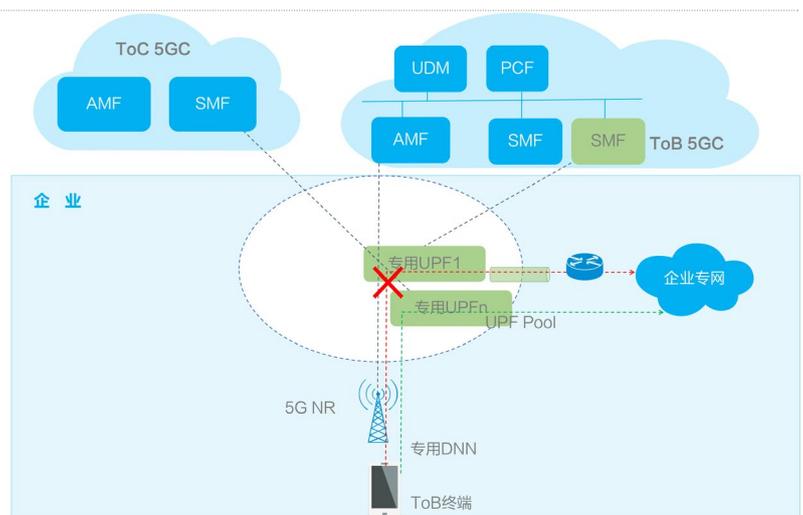


图 4-10 UPF 池化可靠性保障

02. 工厂级 UPF 和车间级算力基站互备方案

针对 5G 园区和现场网协同部署模式下，可采用工厂级 UPF 和车间级算力基站互备部署，满足可靠性的要求。如下图现场级业务正常接入到算力基站，当算力基站故障，可以接入到工厂级的 UPF，网络快速切换，保障业务的可靠性。

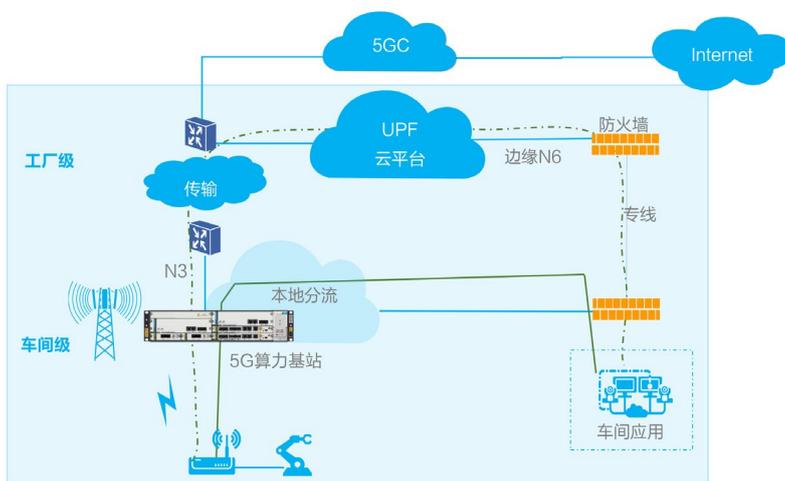


图 4-11 工厂级 UPF 和车间级算力基站互备方案

03. 算力基站互备方案

当采用算力基站作为工业现场数据分流锚点时，采用算力基站 1+1 备份方案，实现业务的可靠性。同时结合 FRER 的双链路保护方案，在设备故障情况下，实现毫秒级的设备倒换。

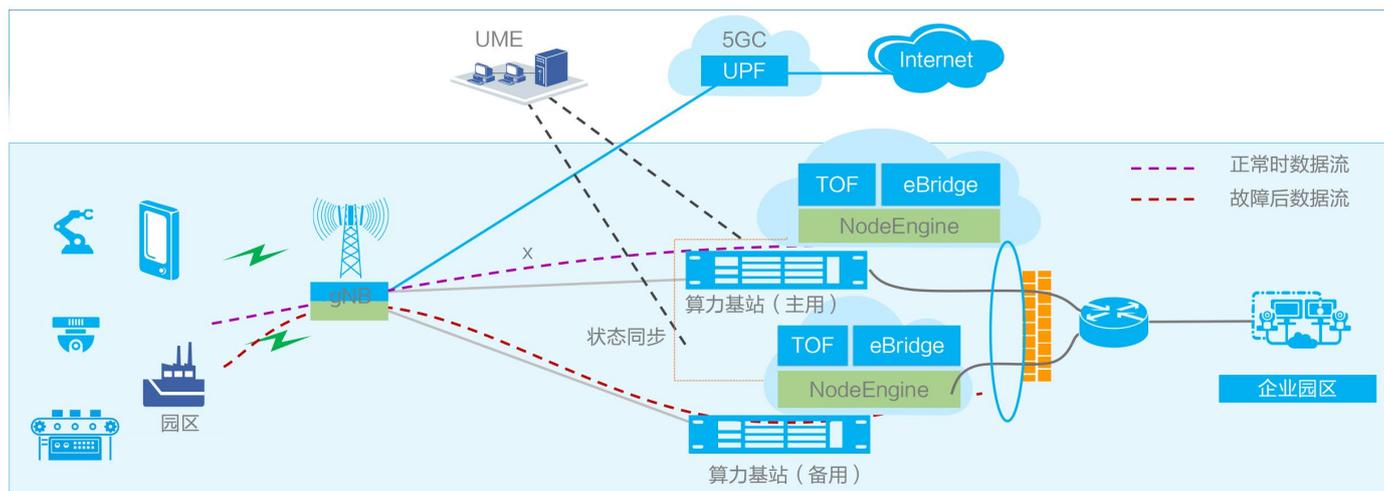


图 4-12 车间级算力基站互备方案

4.1.2.2.3

端到端链路高可靠

端到端链路可靠性，支持 IEEE802.1CB 的 FRER 帧复制和消除功能，能够保障单链路故障下的“0”时延倒换、“0”丢包。该技术不仅仅可以使用 5G 双链路，也可以做异构网络双链路备份，如 5G+WIFI，5G+ 有线，5G+4G 等双链路的 FRER 功能。针对工业生产核心业务，为满足车间整体的 OT 专网高安全可用，一般可采用 5G 双网双链路的方式。

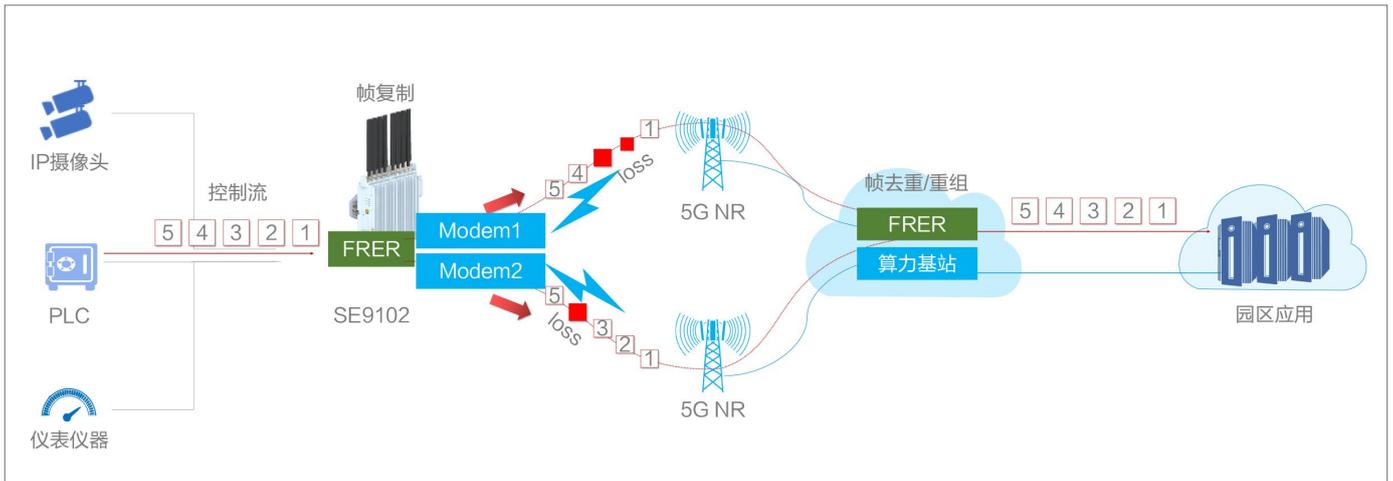


图 4-13 FRER 高可靠方案

4.1.3

功能安全保障

相当多的 OT 行业属于“安全攸关行业”，保证安全的重要性不亚于保证业务的连续性，在国家和行业层面也受到了立法约束，来建议相关 OT 行业认真考虑功能失效的风险，并设计相应的安全控制措施。生产控制功能与安全控制功能之间的关系可以下面的化工行业图例。如果采用 5G 提供安全组件之间的通信，则 5G 系统必须要能支撑整个安全控制功能，使其达到预期的安全级别。

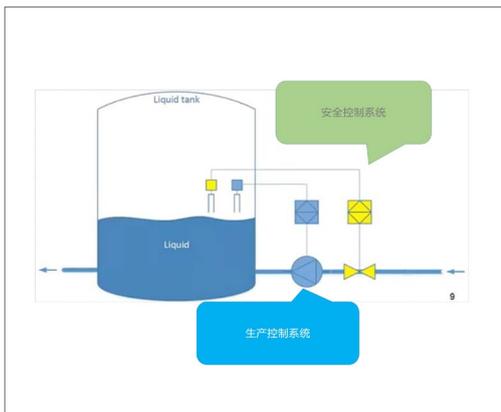


图 4-14 安全控制系统与生产控制系统

当 5G 无线网络赋能的新型业务方案，例如 AGV、机器视觉、工业控制等运用于企业 OT 生产时，相关核心生产环节也属于“安全攸关”领域，应当由业务提供者在生产控制系统之外，额外考虑并部署安全控制系统，以防止、检测、控制和缓解故障（功能失效）导致的风险。例如通过 5G 无线网络将原先在危险现场进行的作业（如港口的岸桥远控）迁移到远端集控室进行远控，此时需设计万一远端通信链路故障的近端机械保护措施，例如停止操作或者回原位等。

安全控制系统是由业务单位进行设计和部署，而若安全控制系统也是基于 5G 通信，那么，按照 IEC 61784-3 标准（由国际电工委员会制定的针对现场总线中通信过程的功能安全标准）的原则，5G 也需要配合功能安全设计提供支撑。此时，往往由于上层安全通信协议（例如 PROFIsafe）的保护，安全控制系统并不需要比正常业务通信更高的链路质量性能，但网络连通的可靠性是其关键基础要求。

此外，随着技术的发展，5G 在工业现场网中的作用已不仅限于提供纯粹的“通信管道”，也会提供诸如边缘计算、云化 PLC、定位优化等与核心业务紧密结合的方案。这些功能组件作为工控系统中的基础设施或关键组成部分，可能需要遵循 IEC 61508 系列功能安全标准，满足行业客户对功能安全准入资质的要求。这不但对 5G 供应商所交付的安全与可靠性解决方案有要求，还要求产品在包括研发流程的整个生命周期内，贯彻以“功能失效风险分析”为中心的质量管控和缺陷治理方法，系统性地消除产品中潜在的软硬件缺陷，以达到工业级的安全置信度。

4.1.4

ToB/ToC 网络隔离技术

工业园区中存在多类 ToB/ToC 接入终端,除了 ToB 生产终端之外,还存在多种不同的 ToC 终端,包括:工业园区内移动的企业终端,可同时访问公网和企业办公网的员工终端,以及进入园区的外部访客手机终端等。各类终端访问的网络需与生产网络安全隔离,保障生产任务不受影响,生产数据不泄露。

可以基于用户 DNN/ 切片分流技术,网络侧控制面和用户面网元设备可对用户进行分权分域控制,实现不同用户访问不同网络 / 子网络,实现生产网络隔离。

1. 大部分生产终端无移动性,通过签约单独 DNN 及其生产子网分流套餐,生产终端仅接入到边缘 UPF,无法访问其他网络 / 子网络,避免数据泄露。

2. 园区内企业员工终端需要访问互联网和企业办公网络。终端签约专用 DNN1,并签约办公子网分流套餐。用户接入网络后访问互联网数据分流至 Internet,访问专网数据被分流至办公子网,无法访问生产网络,避免数据泄露园区外。

3. 企业移动终端需要访问数据子网。终端签约专用 DNN2,并签约数据子网分流套餐。用户接入网络后仅可通过边缘 UPF 访问数据子网,无法访问生产网络,避免挤占生产网络带宽资源。

4 进入园区的 ToC 访客用户,终端仅签约 ToC DNN 和切片,不会签约企业专用套餐,终端接入网络后通过中心 ToC UPF 访问公网,不会接入到园区的边缘 UPF,从而保证专网数据隔离。

同时,还支持叠加企业独立认证,向 DN-AAA 发起二次认证,实现企业对接入终端的身份识别,避免非可信终端接入到企业专网,进一步保障专网访问安全性。

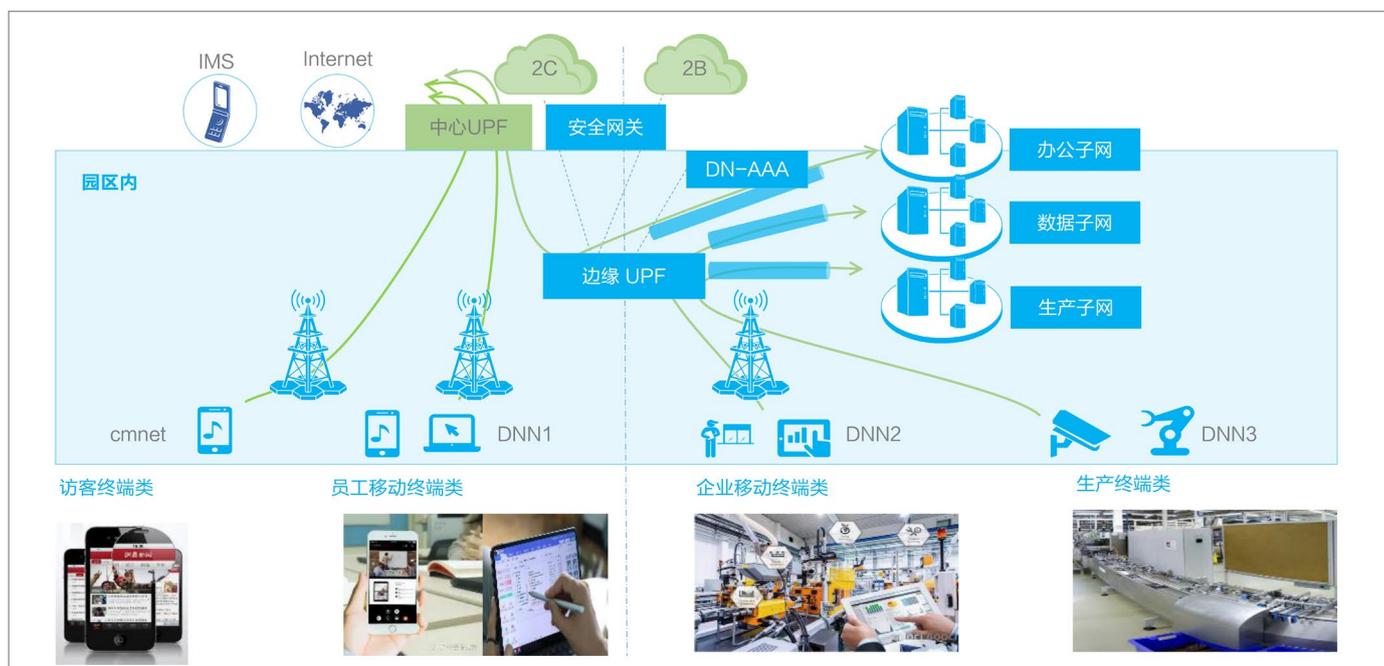


图 4-15 基于用户 DNN/ 切片和签约隔离方案

对于算力基站场景，ToB 终端签约切片，采用基于切片分流，保障 ToB 用户数据本地分流到园区，保障数据安全性；

而针对企业员工 ToC 用户，使用基于 RFSP 的基站分流隔离方案，在企业用户提供的终端专用套餐中签约特定的 RFSP，企业员工不换卡、不换号使用自有 ToC 终端，根据 RFSP 进行控制，可同时访问公网和专网（如办公网）；

而非企业员工的公网用户，由于没有签约 RFSP，不能访问园区专网。

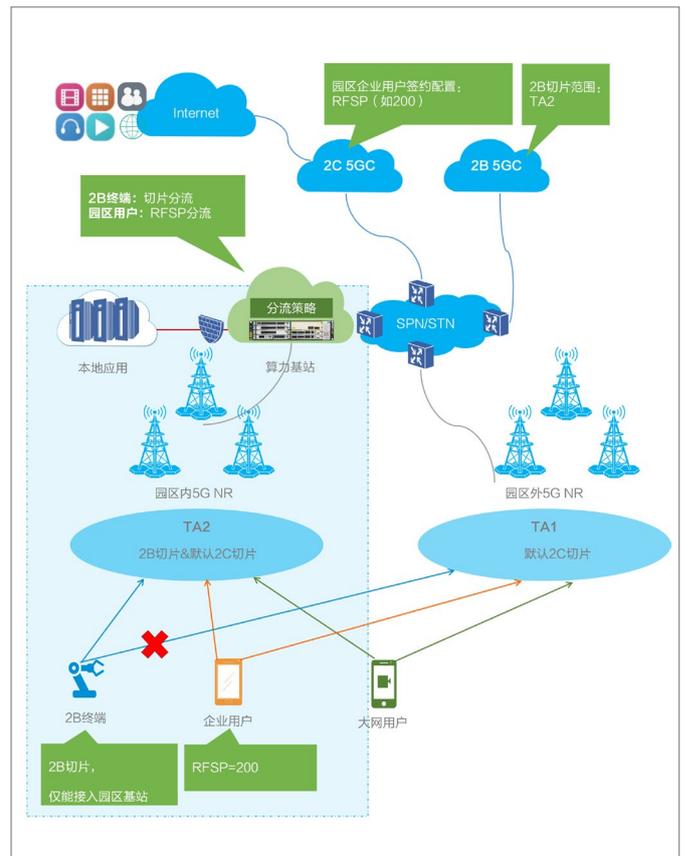
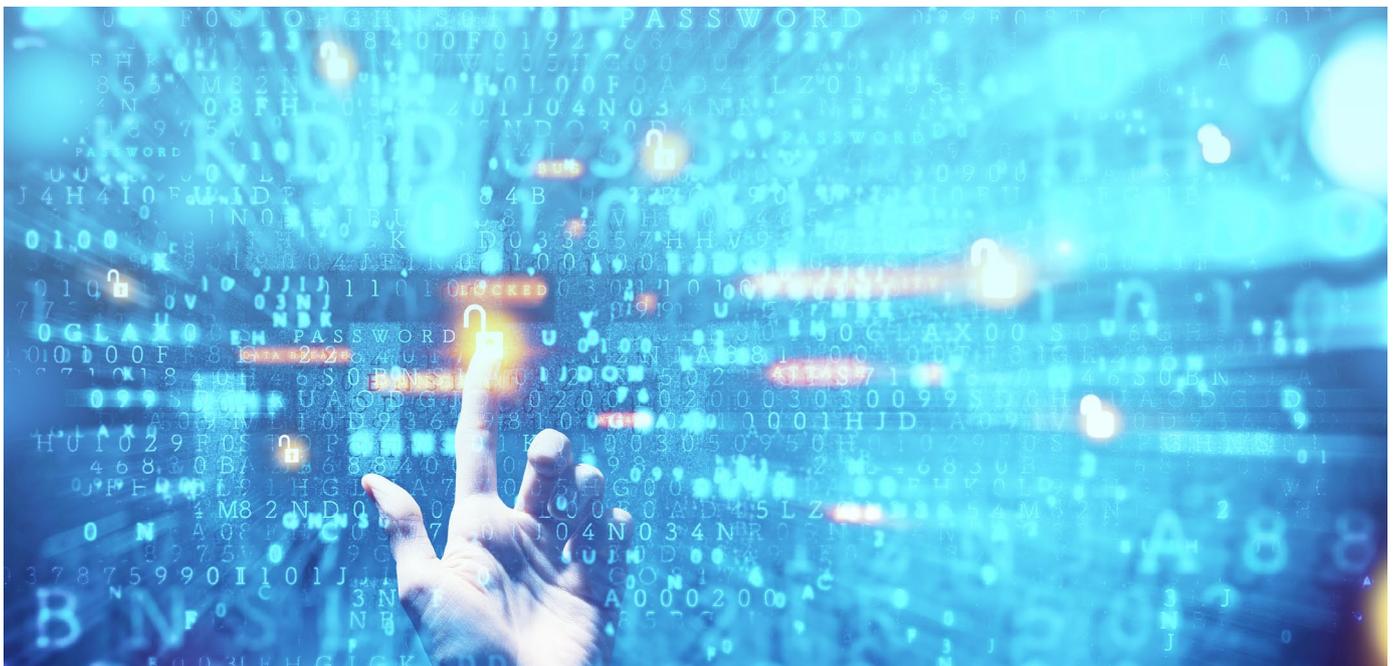


图 4-16 基于 RFSP 算力基站隔离方案



4.2

算力关键技术

4.2.1

现场网算力载体

为了更好地服务生产业务，现场网不仅仅提供网络能力，还需要提供算力资源来达成网业协同能力，以工业网关（端）、算力基站/算网一体机（边）、MEC（云）等三级形态为载体，以容器形式开放算力，灵活部署企业业务。

现场网对算力资源的诉求需要考虑业务需求和资源状况。通常，越靠近云，算力资源越充足，但时效性一般；越靠近端，算力资源有限，但时效性高。几种算力载体的对比详见下表：

算力位置	资源状况	适合的业务特性	典型业务示例
端侧 工业网关	算力严格受限，如CPU通常少于10核	配合生产节奏的极致时效性	电子围栏、安全IO、vPLC
边侧 算力基站/算网一体机	算力受限，如CPU通常少于100核	配合生产节奏的高时效性	vPLC，AI 视觉质检，低时延视频
云侧 MEC边缘云	算力充足，如CPU通常在1000核以上	配合生产节奏的时效性要求不高	视频监控

MEC 边缘云平台：通过与 5G 网络结合（UPF 是结合点），提供一种新的网络架构，通过将移动接入网与互联网业务深度融合，一方面通过本地分流来降低时延，满足用户极致体验需求，并节省带宽资源；另一方面通过将计算能力下沉到网络边缘位置，提供第三方应用集成，为移动边缘入口的服务创新提供了有效的助力。

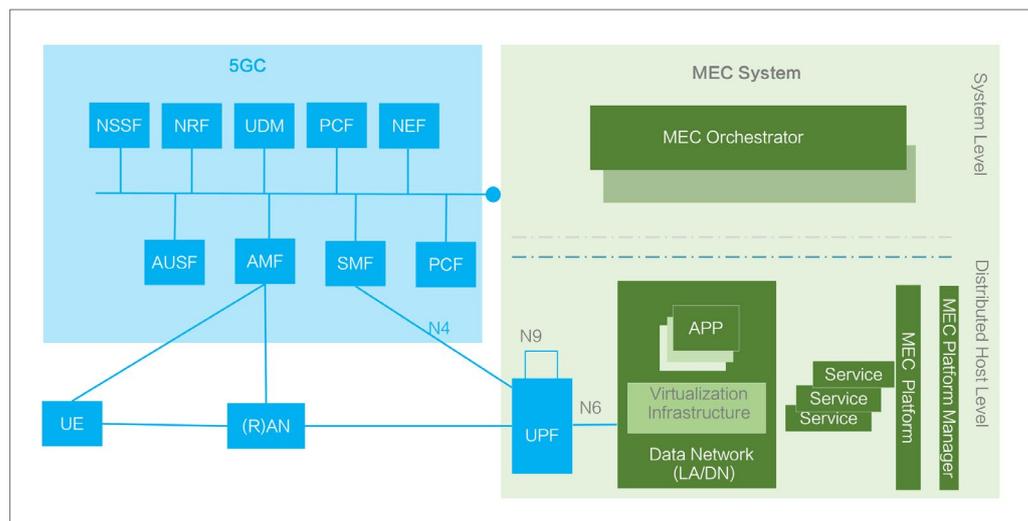


图 4-17 MEC 在网络边缘实现 CT 和 IT 的融合

算力基站、5G 算网一体机、工业网关提供的本地算力：数字化改造过程中，在工业现场网络，很多业务终结在产线和车间级，这些应用可以部署在本地的现场边 / 端算力平台上，本地终结业务使得业务更加高效，组网更加简单。但是本地算力资源能力有限，不是所有的应用都适合部署在本地，可对计算资源需求较少的业务可以进行本地部署，如普通的工控机软件，测试软件等。



图 4-18 本地算力开放

4.2.2

算力服务化架构

现场网算力可通过例如中兴数字星云服务化架构，实现业务拉通和数据融通，包括 ZTE 自有业务端到端服务，以及开放的第三方严选业务拉通集成。

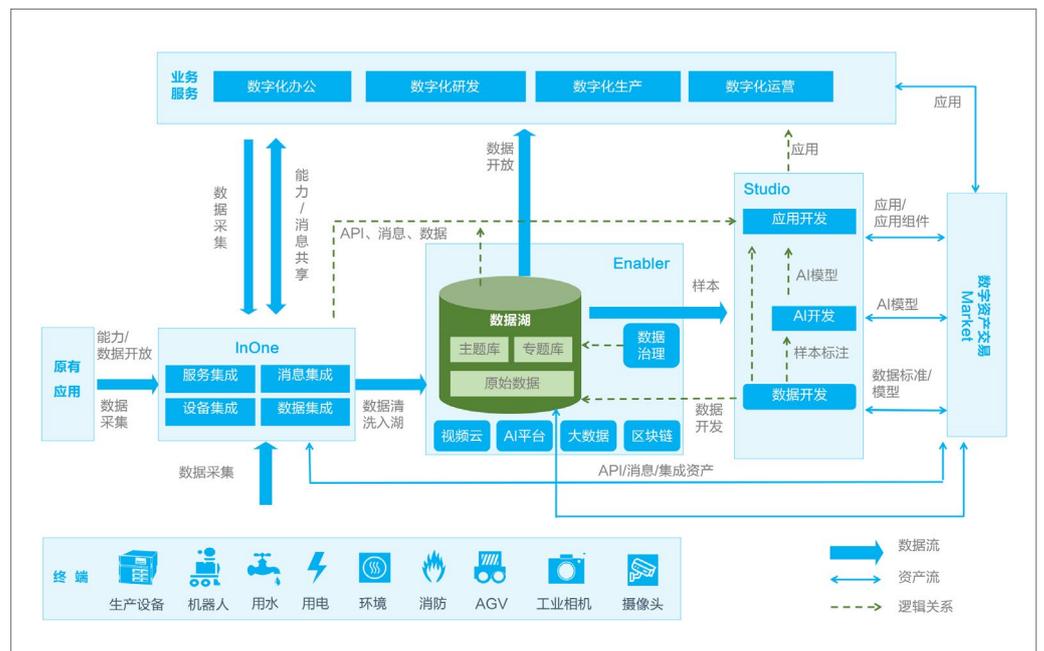


图 4-19 中兴数字星云服务化架构

中兴数字星云包含提供全栈技术能力组件调用的 Enabler、融合 IT 和 OT 系统汇聚各类数字资产的 InOne、助力敏捷创新的一站式开发平台 Studio、激活企业内外部各种数据共享交易的 Market。四大模块能够让企业原有的系统、应用、数据，以及数字化转型所需的新的技术和能力，都以数字资产形式纳入交易架构，并帮助企业进行数字资产的一本账管理和一平台调度。因此行业客户利用“数字星云”建设自己的数字平台，可以实现数字资产最大范围、最安全高效的交易与复用，从而破解多样应用、统一治理和降本增效之间的矛盾，达到业务有韧性、系统可生长、成本能降低的目标。

行业应用在边 / 端算力平台的上线方式，取决于应用开发方与现场算力平台的对接方式。例如可以通过交易进入中兴数字星云，根据生产安排，按需部署到车间 / 产线的算力平台。

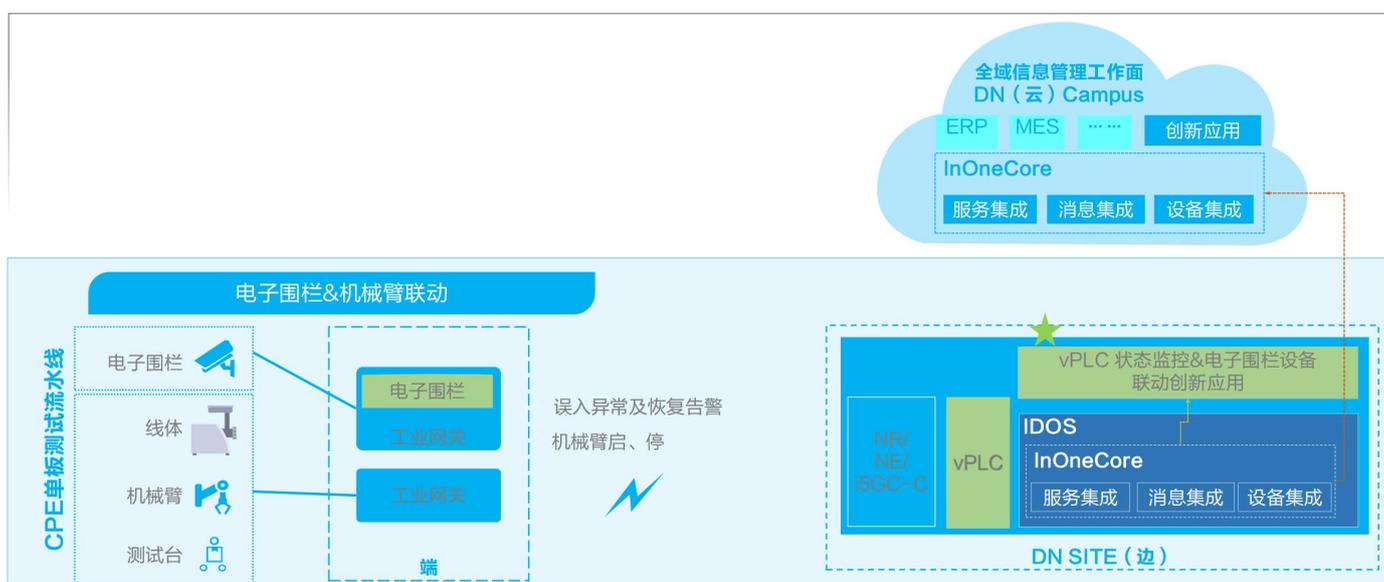


图 4-20 管理融通能力

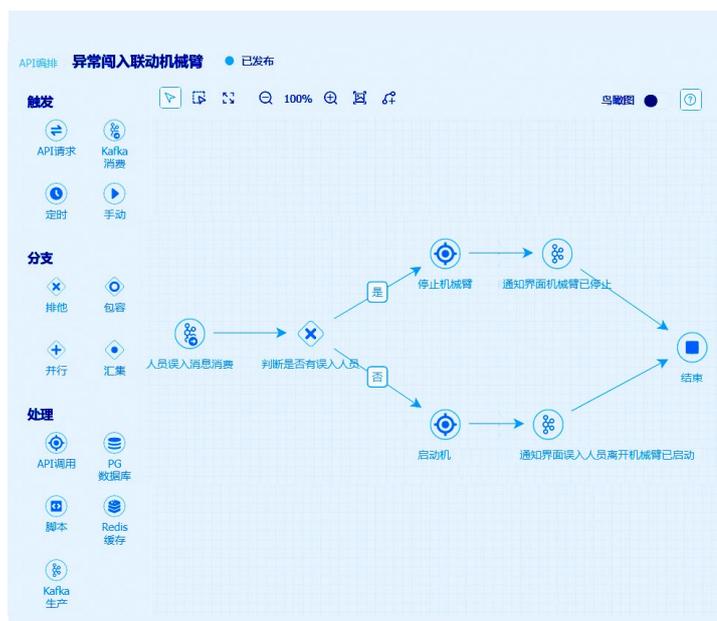


图 4-21 数字星云低代码开发示意图

5G 网络进入工业生产，不仅提供数据管道，5G 算力基站 / 算网一体机作为数字星云 Digital Nebula (DN) Site 节点，打通 IT/OT/CT 各类数据，还可以快捷进行 5G 融合创新，通过应用低代码开发，使得应用系统间更快速拉通，生产管理更加高效。

以中兴滨江智能制造工厂为例，基于数字星云的平台，先独立部署了云化 PLC 自动化测试线和电子围栏两个应用，如下图所示，云化 PLC 应用部署在边侧的 5G 算网一体机上，电子围栏应用部署在端侧的 5G 网关上。通过数字星云平台的“低代码开发”，在边侧使用拖拽方式创建了一个新的应用“PLC 和电子围栏联动”。应用发布生效后，当有人闯入电子围栏告警区时，电子围栏产生告警，同时云化 PLC 自动化测试产线停止运行，两个独立应用实现了联动。

4.3

业务支撑能力

现场网算力，可按需内置云化 PLC、视频优化、定位平台、前置机数采、云化 AGV 调度台等业务应用，也可开放给三方应用，方便应用的集成，从而基于 5G 算网能力给行业提供一站式的场景化方案。

4.3.1

云化 PLC

传统 PLC 有多种协议形态，彼此不互通，在工业数字化转型过程中，可以通过云化 PLC 优化现场网络，使得组网更加简单。云化 PLC 有利于统一工业现场网络，应用基于云的 IT/OT/CT 融合新方式。基于 5G 网络的云化 PLC 如下图所示，将 PLC 的“大脑”上移到具备算力基站或者算网一体机，对于常规复杂度低的传感器等 I/O 控制，可简化直接将 5G 网关作为协议转换工业 CPE 使用；对于复杂控制的 PLC 应用，可在边侧部署主 PLC，在端侧 5G 边缘网关上部署从 PLC，从而实现主从 PLC 控制。PLC 基于边端云化的部署，易于跨厂家互通以及易于客户技改升级、柔性制造的工艺调整等。端侧支持 PLC 的 5G 边缘网关，还可直接实现远程 I/O 的扩展，进一步降低大量 I/O 下挂的级联成本。

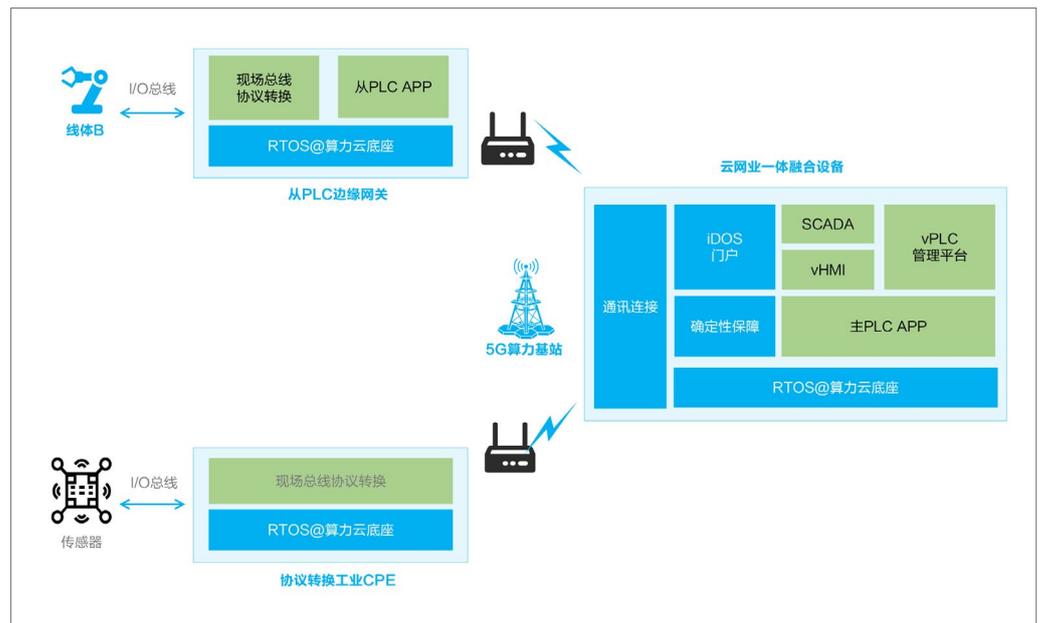


图 4-22 基于 5G 网络的云化 PLC 架构

4.3.2

视频优化

工业现场网存在多种视频类业务，对带宽要求高，针对不同的业务场景，基于有限 5G 网络的资源，如何保障视频业务，我们考虑如下：

4.3.2.1 边端协同机器视觉

机器视觉应用是指采集对象图像信息，并通过对图像信息的智能分析完成一些工业控制类功能的应用场景，一般的是由视觉系统 + 高性能工控机组成。在一些特定的场景，比如控制的设备需要具备移动性、空间不足等问题需要将工控机的功能后置，采用边端协同的解决方案。

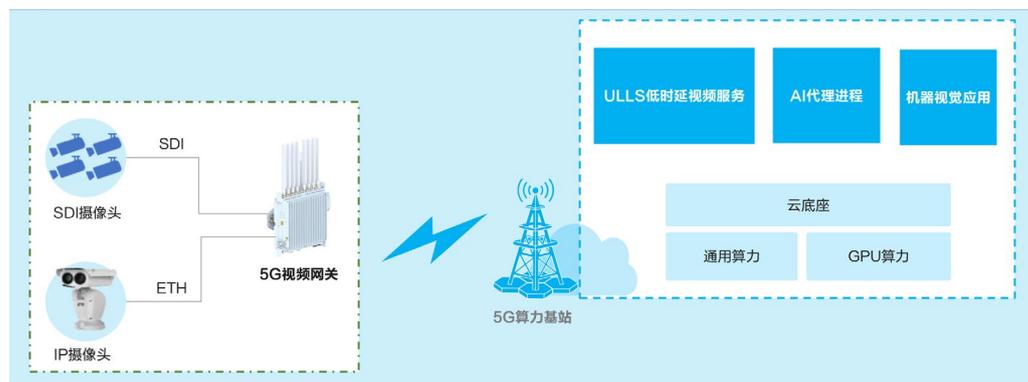


图 4-23 边端协同方案示意

典型的边端协同机器视觉应用架构如下图所示：

端侧：通过视频网关对接各种摄像头接口，完成图像的采集、压缩和协议转换等一系列工作，并通过5G网络上传；

边侧：算力平台部署了相应的图像支撑服务，并将客户开发或指定的第三方应用部署在边缘算力平台上，通过应用和分流服务的对接配置，通过 RTP 协议完成实时视频流从设备到应用的链路搭建。

4.3.2.2 摄像头业务优化

在 IP 摄像头密集场景下，多流视频并发时，多 I 帧在同一时刻传输（称之为 I 帧碰撞），会带来数倍于视频流典型码率的传输带宽需求，超出网络传输能力，导致网络传输链路拥塞，引起突然的时延加大、视频卡顿。为了保障视频传输的质量，保障视频业务稳定传输不卡顿，通常有几种解决方案：

01. 视频 I 帧碰撞检测，调整 I 帧发包周期，达到流量整形的目的。

该方案需提供视频 I 帧碰撞检测算法和控制算法，如下图可选在算力基站 / 算网一体机上部署 I 帧检测 AI 算法服务，对摄像头的视频流的 I 帧碰撞概率进行检测，对于碰撞概率高的摄像头进行调整，调整指令可以通过 onvif 等摄像头管理协议发送给摄像头，从而达到避开 I 帧碰撞，降低网络带宽需求。

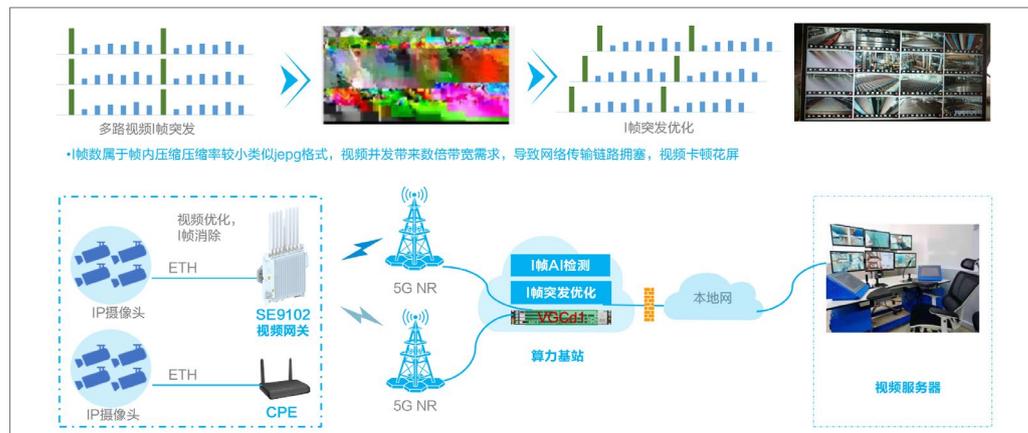


图 4-24 视频 I 帧碰撞优化

02. 通过对视频编码处理，消除 I 帧，并进一步引入抗丢包低时延传输技术，降低网络带宽需求；

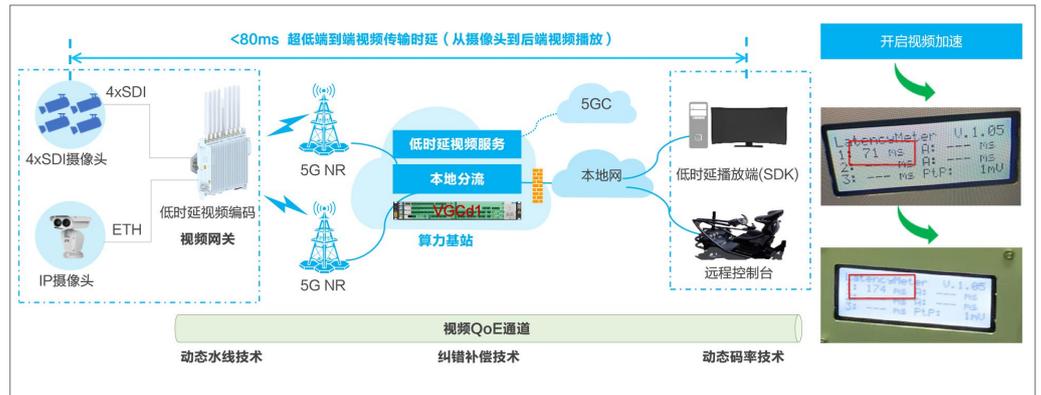


图 4-25 抗丢包低时延传输技术

03. 通过视频拼接合成，将多路摄像头业务拼接成一路视频传输，降低整体网络带宽流量，达到流畅视频传输。

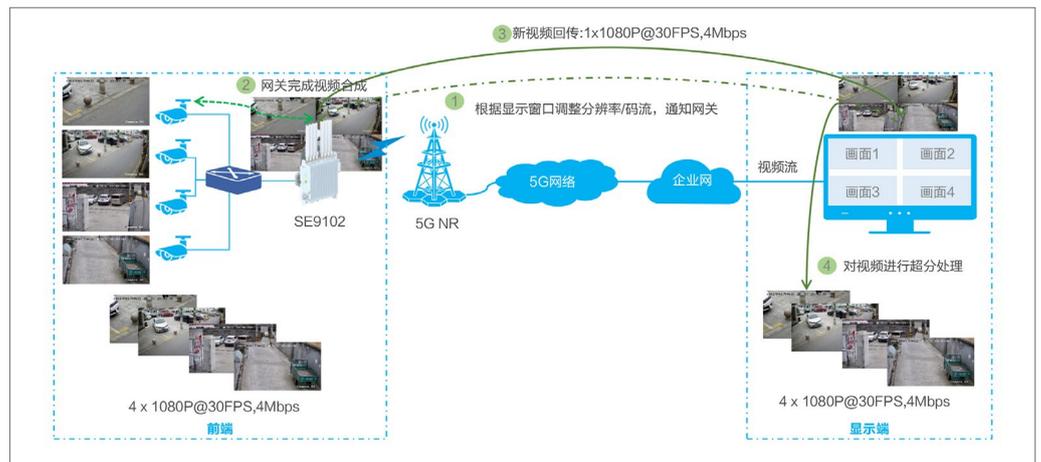


图 4-26 视频拼接方案

4.3.2.3 工业相机无损压缩

工业相机图像由于对画质和时延要求都很高，对无线带宽需求大。针对这种场景增加额外实时的先压缩后解压的图像 / 视频处理技术，在端侧进行视频压缩编码，在空口进行低时延的传输，解码端接收进行解压缩以及 AI 分析，大大降低网络需求，从而更好的保障业务。

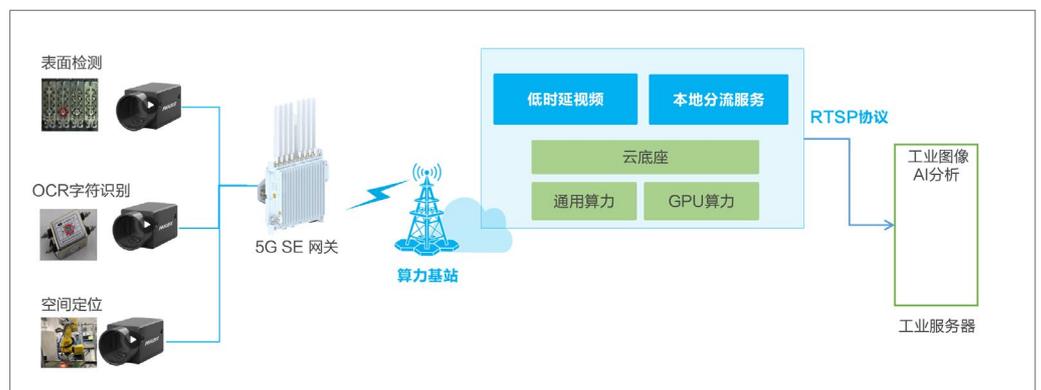


图 4-27 工业相机无损压缩

4.3.3

融合定位平台

工业现场往往环境复杂，单一的定位技术无法满足企业差异化需求，引入多种不同类型的定位技术的融合解算。针对工业现场的实际网络部署和应用需求，定位融合从两个方面考虑：

01.5G 定位解算：如 5G 蜂窝网络 UTDDoA、AoA、ECID 等定位算法融合；

02.5G 定位与非 5G 定位的不同定位技术融合解算：如 5G UTDDoA、UWB、蓝牙、卫星等不同定位技术的融合定位。

边侧算力，一方面可部署定位解算、融合平台等定位基础服务，另一方面，算力也可以对外能力开放，部署定位应用，面向企业提供位置管理、轨迹管理、电子围栏、电子考勤、视频联动、调度优化等业务。

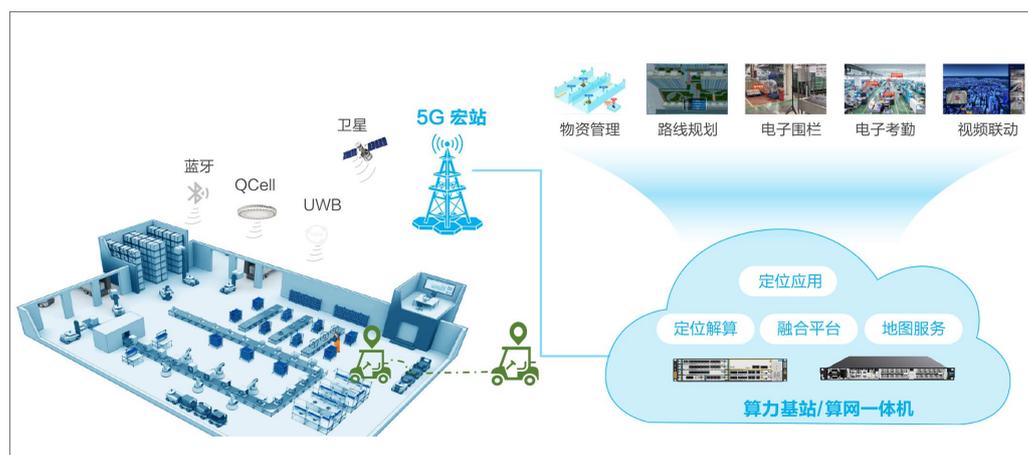


图 4-28 5G 融合定位

4.3.4

前置机数采

数字化信息采集主要是各种设备通过指定接口（如 RS232、485 或以太网）采集产线设备的运行信息，并汇总到指定的软件系统进行分析，通常来说，采用前置工控机完成：1）与设备物理对接，2）部署相应的数据采集和分析系统。我们可以通过端侧网关实现与设备对接，通过端侧算力与边侧算力配合，完成数据采集和分析系统的部署，从而替代工控机方案。该方案在环境简化和成本方面更有优势。



图 4-29 前置数采示意图

4.3.5

云化 AGV 调度台

现场算力也可支持云化 AGV，满足 AGV 的实时调度协同。如下图 AGV 典型软件架构所示，云化 AGV，当前典型的是调度模块的云化，未来可进一步实现视频处理模块的云化。云化 AGV 可按需部署在车间 / 产线的算力载体上，提升系统集成度，实现统一运维，降低整体成本。

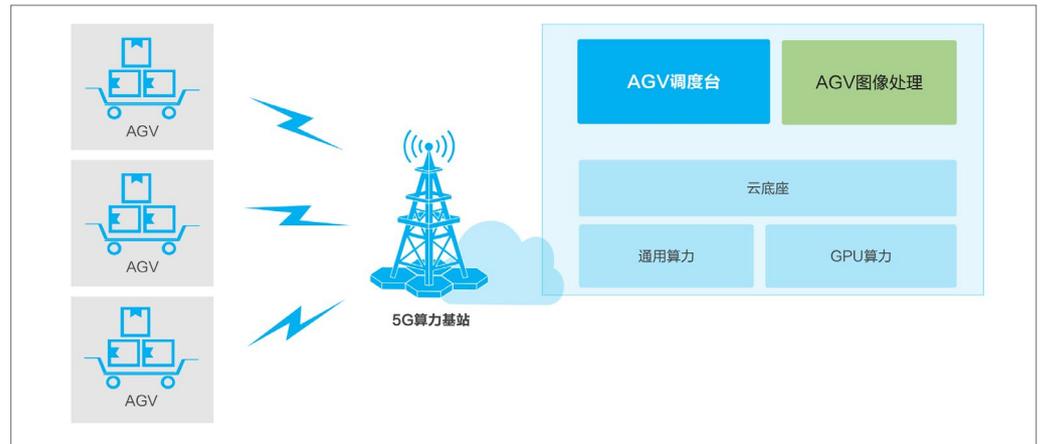


图 4-30 AGV 云化调度台示意

4.4

企业自服务

为了降低 5G 专网的行业导入门槛，中兴通讯创新地提出了三免自服务方案，包括客户免规划，现场免调测，业务免运维，实现极简的网络端到端部署运维。在网络规划方面，对现场人员无技能要求，采用 3D 激光雷达扫描、建模、生成地图，基于数字孪生实现站点仿真规划，规划效率可提升 6 倍以上。在现场调测方面，传统网络开通需要下载版本、参数对接、业务对接等，快速建站免调测方案使用版本 / 参数预装，行业综测仪调测，小时级开通，可以实现 10 倍的效率提升。另外，通过 ToBeEasy 运维方案，可以为行业客户提供端到端网络和业务可视化呈现，故障自动定界，从而实现无人值守的业务自运行和免运维。

4.4.1

免规划，精准建模与网络规划

对于车间有限空间的网络覆盖往往采取更精准的固定部署方案。针对 5G 无线生产专网，我们可以引入 3D 地图建模，从信号强度覆盖扩展到地理化业务点位，依据实际的差异化业务 SLA 需求，进行场景化精准建模，形成整体用户为中心的网络设计。

对站点位置，天线初始工参和预置无线参数，需要满足业务接入的网络覆盖质量和容量要求。

对业务保障，需要以业务 QoS 要求、业务数量、业务位置或轨迹等需求为输入，从以下几个维度进行网络设计，进行空口能力保障：

01. 从端到端的 QoS 需求映射到无线侧空口能力：把用户的需求转化成无线网络规划语言（即覆盖电平和网络负荷要求），进行网络覆盖和容量设计；

02. 基于数字孪生平台进行链路级 QoS 仿真：对无线环境、实际业务的发包特征，网络端到端协议进行孪生，进行链路级的 QoS 预测，根据预测进行站点位置自动寻优，输出网络拓扑。

03. 基于场景特征进行参数规划：对于不同场景的工业现场网，适配了不同的系列化产品和针对性的无线参数，包括波束策略、切片策略、CA 策略、超级小区、质切参数等。

通过以上步骤，针对各种复杂场景针对业务需求进行精准网规建模，设计无线网络达成业务 QoS 保障的基础条件。

4.4.2

免调测，快速建站

ToB 网络建设中多种网络形态并存、不同服务等级并存，实际面临挑战如下：开通时间长，技能要求高，业务验收不精准等问题。

针对工业现场的 5G 设备，采用产线预装 + 现场改配的方案，缩短现场开通耗时，做到开箱即用，达到小时级开通，同时完成切片业务一键式开通，降低开通难度和专业性要求，满足工业 ToB 行业客户的需求。

同时网络开通后，应用创新仪表“5G 行业综测仪”，实现 ToB 模拟业务验收，解决 ToB 验收环节痛点，实现行业 SLA 业务匹配验收，业务 KQI 感知可视化，实现 SLA 业务精准验收。业务验收支持多种行业业务模型模拟（PLC 控制 / 电力 DTU / 视频等），支持业务 SLA 可视、可度量及报告输出，支持精准 SLA 业务验收。其典型特征及验收流程图示如下：



图 4-31 5G 行业综测仪典型特征



图 4-32 行业综测仪使用过程示意图

4.4.3

免运维，业务视角 自动化运维

在工业现场网，面向企业的极简运维诉求，既要考虑提供丰富的专业化通讯网络运维手段，又要兼顾企业多样化的生产经营需求，进而帮助企业快速打破领域技术壁垒，提供简化且有效的运维能力，兼顾专业网络维护、业务视角管理，满足上层应用多变性需求。面向工业现场网，提供支持网业协同的极简运维产品，具备以下主要能力：

设备管理

支持工业现场网的无线和有线接入，并对网络设备进行管理和运维，提供统一的拓扑、告警、性能、资源配置、巡检以及安全等功能，并结合智能的故障预测和根因分析，实现快速的问题定界定位，提升运维效率。

支持算力资源的状态监控，包括资源分布位置以及资源总量和使用情况的呈现。

终端管理

支持 CPE、工业网关、视频网关、AGV 设备、综测仪以及 IoT 设备（生产设备等）等设备接入和管理，包括第三方终端。

业务运维

工业现场网的极简运维系统以业务链路视角出发，辅以网络设备视角、终端设备视角、行业 APP 视角，对工业现场网络进行管理和控制，实时观测业务链路的保障状态、网络设备、终端设备的告警、网络性能指标等数据，快速进行问题定界处置，保障工业现场网络稳定、业务链路可靠。一个典型的端到端连接业务包括端到端网元如下图所示：

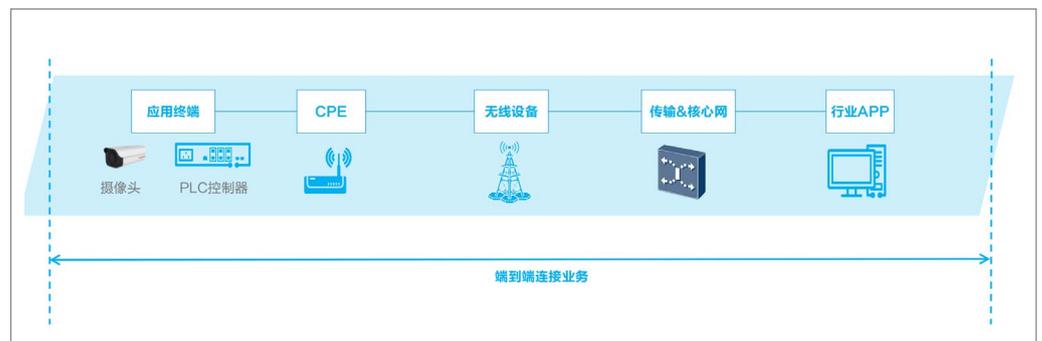


图 4-33 业务运维视

01. 以业务链路视角为核心的运维

5G 通讯网络在工业现场网应用中提供了基础信息通道的核心能力，企业更为关注的是如何依托 5G 网络开展各类业务生产活动。工业现场网极简运维系统，采用从业务链路视角出发的管理维护手段，可以将复杂的通讯设备管理工作转化为易于快速掌握的、直观的、类似 IT 设备管理维护方法，使网络能更好服务于各类业务生产活动。

02. 快速定界定位和快速恢复能力

工业现场网场景，出于安全生产和连接稳定性的考虑，网络运维的首要目标是快速发现问题，快速定界

问题，快速恢复问题。运维需要精细体现从终端到应用或终端到终端的业务链路的质量监控和保障服务。工业现场网极简运维系统需要从业务链路保障要求设定、质量监控、问题识别、问题定界定位、问题处置构建一个完整的闭环体系。

为了达成快速定界，快速恢复的目标，闭环系统应是递进的网络服务质量保障体系，包括：

- a) 设备层面的自动闭环自愈能力；
- b) 系统层面的端到端自动闭环自愈能力；
- c) 现场企业用户人工干预，基于极简运维系统提供的处理建议进行向导式人工闭环处置能力；
- d) 疑难问题转交专业运维的闭环处置能力。

业务运营

01. 行业 APP 管理

工业现场网 OT 域存在多种多样的行业 APP，面向企业的运维系统需要对其进行部署与纳管。

根据业务和资源的需求，选择合适的算力平台进行部署，快速完成行业 APP 的上线开通，同时可实时监测 APP 的网络资源使用情况及业务运行状态，并根据实时运行情况及时做出资源优化调整处理。

02. 号卡管理

企业用户对于终端号卡需要具备一定的自主管控能力。在极简运维系统中，需包含对于终端号卡的放号、签约、销户等操作，能够在满足运营商总体网络部署方案基础上，方便企业用户自行进行终端号卡的接入管理。同时提供面向终端号卡维度的流量监控、质量监测、异常中断识别、非法终端隔离等能力。

直观可视化

在可视化呈现上，工业现场网极简运维系统可直观体现业务链路的构成，可视化各种网络连接关系，包括终端到网络到行业 APP，或终端到网络到终端等。同时在连接关系上直观显示质量状态、各类指标数据等。也可以从设备视角，直观展示设备的位置及连接关系，设备状态等信息。

能力开放

面对工业现场网场景和需求的多样性，以及在不同场景下各行业已构建的业务运营体系，企业的运维平台需要提供更为开放的管理维护能力和数据来满足这些定制化诉求，并支撑各行业的上层综合应用。通过能力开放，将通用的核心技术能力形成组件库，通过平台赋能给行业客户和生态伙伴，显著降低业务技术门槛，助力上层应用的创新孵化和生态构建。诸如提供可视化 API 控制台作为 API 管理门户，提供 API 创建、订阅、消费者管理、管控等功能；还可以支持开发者订阅 API 和快速低代码开发，提供可视化 API 编排能力，实现按需组合、能力创新。

5 实践案例

随着行业实践的深入，目前已经积累了一些典型行业的现场网场景方案。

可复制的典型生产现场应用				
研发设计类	生产运行类	检测监测类	仓储物流类	运营管理类
煤矿井下智慧综采面 非煤井下无人采掘面 露天矿无人矿卡	非危化品仓储物流 预测性维护 装置区人员定位	无人行车 机器视觉质检 智慧铁水运输 检修高危作业	岸桥远控 无人集卡 龙门吊	PLC工业控制 多AGV协同 机器视觉质检 电子围栏 产线数字孪生
煤矿 	化工 	钢铁 	港口 	工业制造 

图 5-1 行业现场网典型场景

5.1

新北洋物流自动分拣线应用

山东新北洋信息技术股份有限公司，是专业的物流自动化分拣装备供应商，公司重视技术创新和科技成果转化。中国电信，中兴通讯与新北洋一起，联合研究基于 5G 云网 + 云化 PLC 的方案。通过引入产线级部署的 5G 超融合设备“5G 算网一体机”，一站式提供 5G 接入网、核心网、云化算力、企业运维等功能，为分拣系统提供了极简的产线级本地 5G 专网，为分拣带小车提供了 20ms@99.99% 的确定性保障。实体主从 PLC 及工业交换机被云化 PLC 和 5G 网络所替代，简化了现场网络部署和 PLC 运维工作。物流系统、六面扫系统、分包系统等应用，都集中部署在 5G 算网一体机的云化算力上，节省了工控机投入成本，实现了 5G 网、云、业一体化运营。

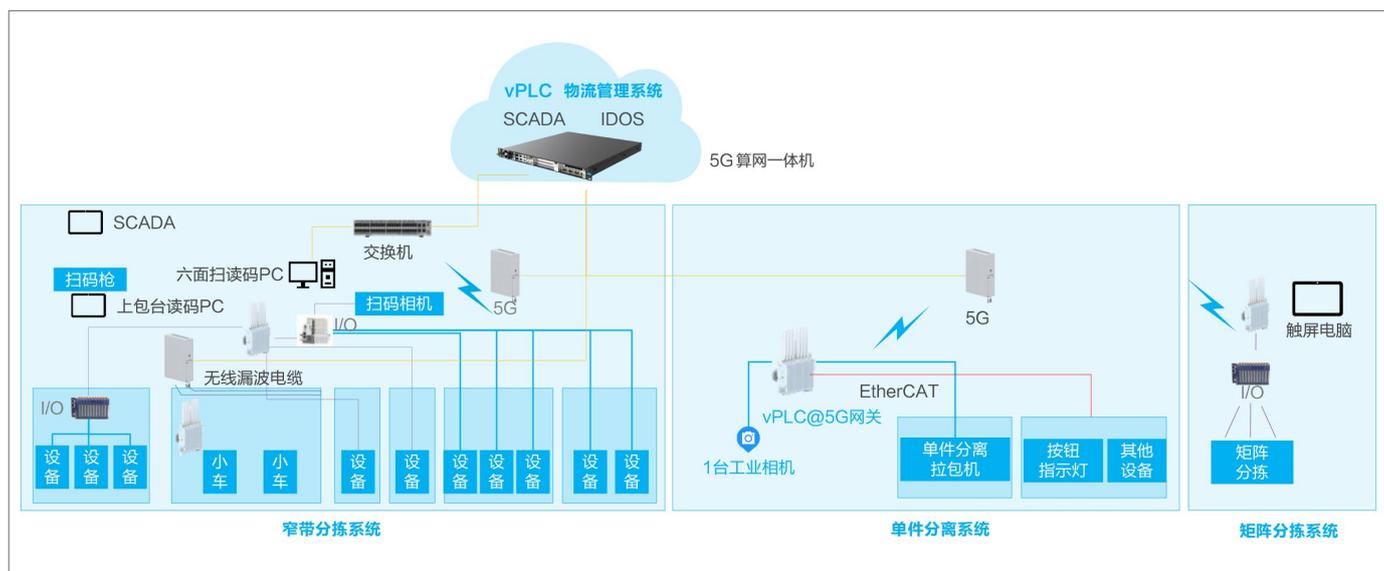


图 5-2 新北洋基于 5G 云网云化 PLC 的分拣系统

5.2

中兴南京滨江工厂数字化自动产线应用

南京滨江工厂基站制造车间的数智化改造，是典型的电子制造行业车间级现场网案例。当前工艺流程及改造需求可参考 2.1.2 章节。车间内运营商 5G 专网选用数字化室分小基站机型结合超级小区技术实现 5G 覆盖，承载 AGV、数采、机器视觉、中兴云化 PLC 等业务，实现企业主要设备剪辫子和车间数据全部无线上云，提升了产线柔性，推动数智化应用；其中测试产线的 PLC 及工控机 MAT/MDS 业务进行联网 & 云化，实现了 PLC 集中云化部署及维护，推进了工业国产化进程，并带来 50% 的成本降低。

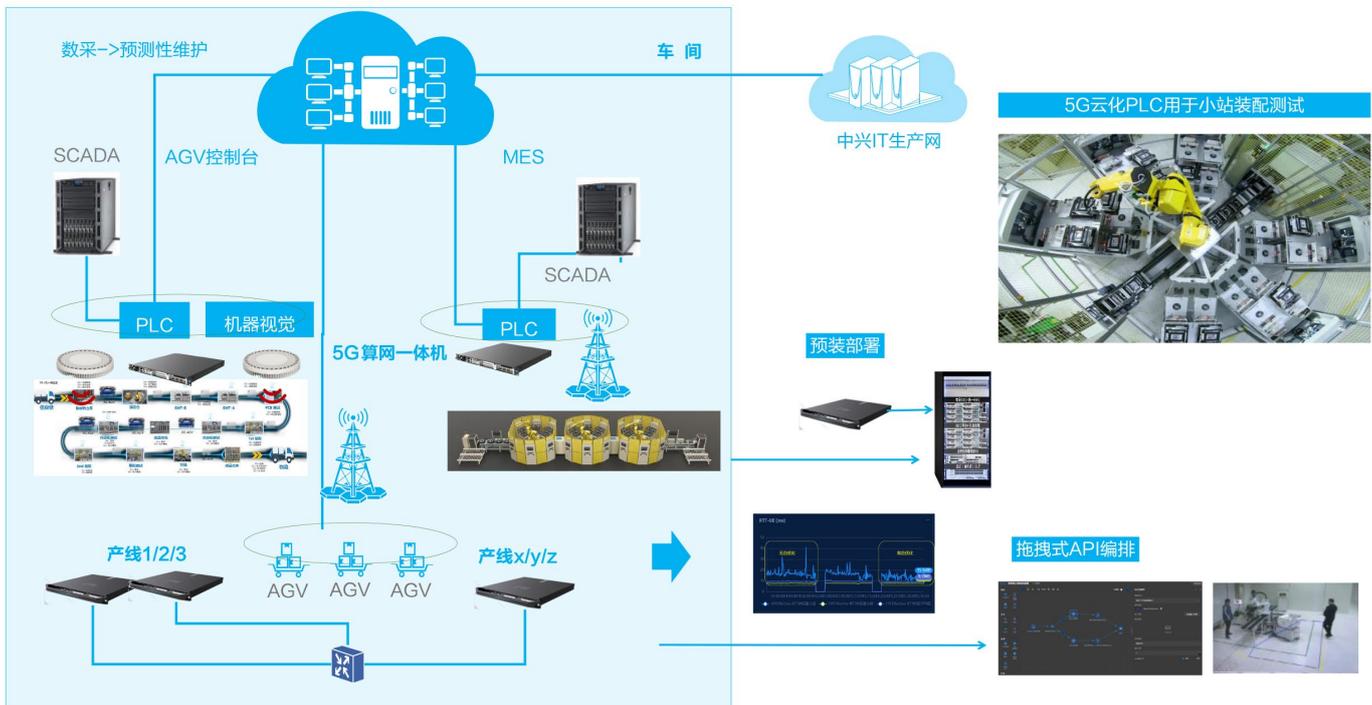


图 5-3 滨江工厂车间网络部署方案



改造过程采用 5G 算网一体机，网络应用 20ms@99.99% 确定性时延增强功能，实现实时可靠的产线控制，实现实时控制产线，同时基于专频专网采用三免方式部署。基于这种改造带来了以下的几个优势：

01. 单个产线一天内完成改造，快速投入生产；
02. SLA 闭环控制减少了现场优化需求；
03. 产线用户使用 IDOS 自行维护网络，启用基于数字星云的 DN site，同时拉通并采用中兴工业互联网平台架构，完成现场低代码开发，实现 PLC 控制与电子围栏的联动。
04. 目前系统持续稳定运行，未来还支持热备份的高可靠部署方式。

5.3

广州明珞 5G 原生装备制造生产线

广州明珞为汽车制造业、新能源及一般工业领域企业，提供智能制造生产线、虚拟制造、工业大数据服务。5G 现场网被预集成到为业主提供的装备制造生产线中，并与其自研的 MISP 工业物联网智能制造服务平台深度融合，为智能制造生产线提供从规划设计、装配调试、产能优化、日常运维、优化改造到回收再造的“全生命周期”服务。5G 现场网除了为产线各设备提供低时延高可靠的确定性连接外，还提供边缘算力平台，为 MISP 工业物联网智能制造服务平台和数采应用 APP 等工业应用提供部署环境，真正实现云网业一体化部署，OICT 深度融合。

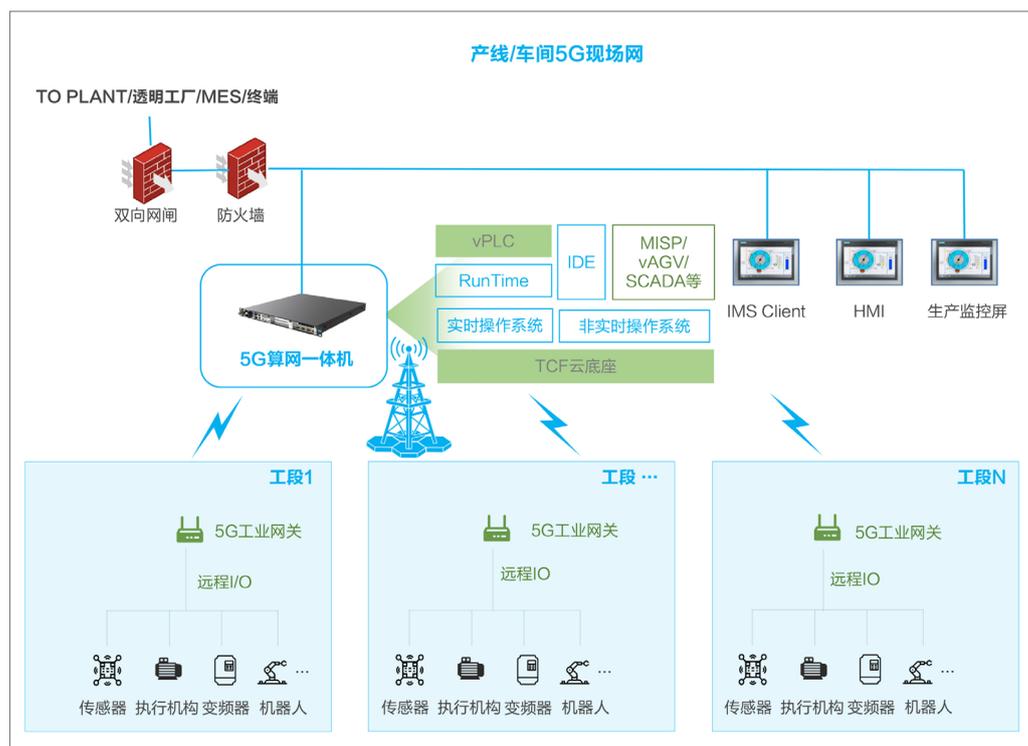


图 5-4 广州明珞 5G 现场网方案

5G 原生式装备制造生产线具有以下优势：

01. 无线替代有线，实现产线剪辫子、扁平组网、产线设备快速联网、产线灵活调整和柔性生产；
02. 分布式边缘算力平台，可按需部署工业互联网平台、云化 PLC、云化 AGV、数采 APP 等工业应用，实现云网业一体化部署，OICT 深度融合，减少现场设备数量、节省成本；
03. 内生确定性网络能力，支持 URLLC 增强、5G LAN、TSN(时间敏感网络)、FRER 双发优收等，满足生产节拍和业务连续性需求；
04. 服务产线交付，原生式 5G 现场网解决项目现场网络问题，实现现场设备快速接入和实时数据采集，支撑基于 MISP 平台的数字孪生和虚拟调试，极大地缩短产线装配调试周期、提升效率；
05. 服务产线健康，5G 现场网实时采集产线数据，支撑基于 MISP 平台的把脉产线/设备脉搏、诊断线体健康状态，提供智能监控、产能提升、故障预警等持续增值服务。

5.4

上汽通用五菱汽车制造智能岛

作为业内柔性化程度最高的汽车总装工厂，上汽通用五菱纯电精益智造工厂采用“装配岛”模式，以“高柔性”“高效率”“更精益”“更稳定”为标签，实力赋能五菱品牌，打造满足用户个性化和高品质需求的新能源座驾。为满足岛式生产对无线网络的需求，在上汽通用五菱宝骏基地试制车间内，搭建了 5G 专网环境，AGV/PLC 等业务承载在 5G 网络上并进行测试验证，整个网络需满足应用要求才进入生产环境，其中挑战最大的是安全 PLC 所需的 5G 承载。

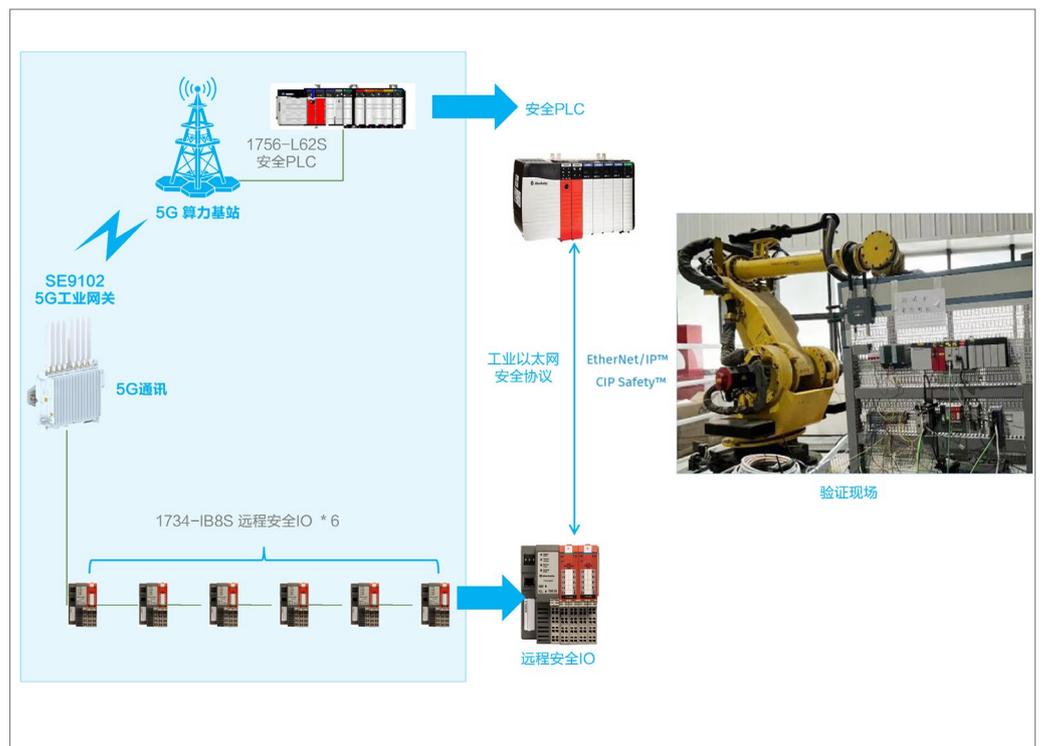


图 5-5 上汽通用五菱 5G 安全 IO 方案

在汽车制造场景中，普遍的使用安全 PLC 来保持协作机械间的安全区间，以及保障人身及财产安全。安全 PLC 采用 EtherNet/IP Safety 工业以太网安全协议，发包间隔为 20ms，安全通讯断链将导致整个产线停线，且需要人工介入恢复。业主方提出，生产环境至少 1 个月不断链，实验室准入测试要做到 7*24 小时不断链。从需求角度看，安全 PLC 业务的时延确定性要求在当前车间 PLC 应用中是最高的，满足它意味着其他 PLC 连接也都可以用 5G 承载。

项目现场根据实际应用场景，由 6 个安全 IO 级联，通过 EtherNet/IP safety 协议与上级安全 PLC 通讯，要求在 7*24 小时内 6 个 IO 都不能断链，连接响应时限不能超过 80ms。验证中兴通讯基于 NodeEngine 工业基站 + SE9102 5G 工业网关，加载内置的 20ms@99.99% 时延确定性分级保障、FRER(双发优收)、VxLAN 层二组网等功能，实现了 7*24 小时不断链，同时有足够的时延保障余量有望在未来进一步支持双端无线组网，实现更大的灵活性。

5.5

武钢无人天车改造

宝武集团从 2019 年起逐步推广工业智造，目前武汉钢铁园区已完成 5G 无人行车应用部署，利用 5G 边缘计算等技术助力宝武集团践行“四个一律”的宗旨。武钢 5G 无人行车项目，主要场景为钢卷库 - 板坯库 - 主轧线应急场三个区域。项目现场通过对行车进行现代化改造，增加摄像头、传感器、PLC 等装置，采集行车作业现场更多的信息，并通过 5G 网络实现前端业务控制系统与后端库房管理系统的互联互通，从而实现现场行车的无人化控制。

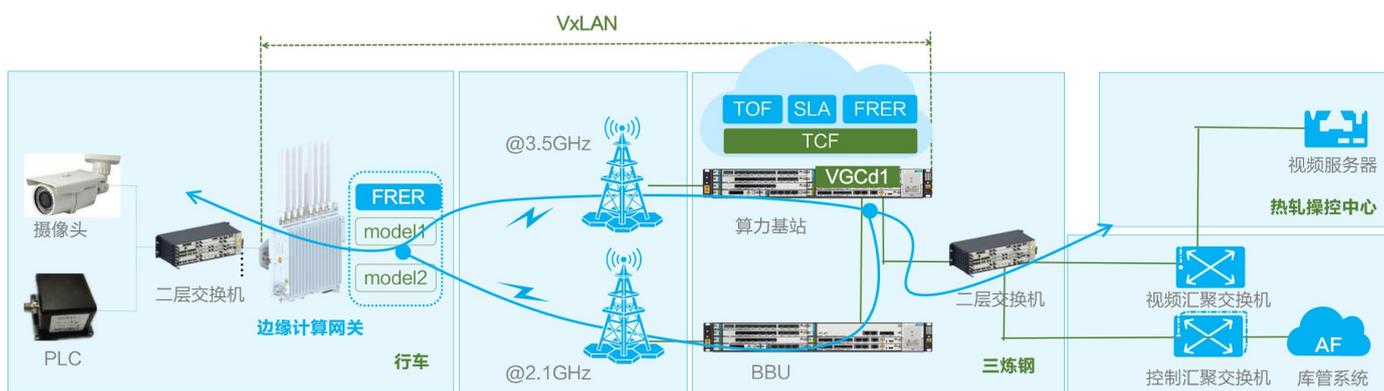


图 5-6 行车无人化控制方案

考虑到厂房内钢结构较多，5G 信号反射严重，易造成信号干扰而引起终端在小区间的频繁切换。针对这一问题，厂房采用小站专建并开通超级小区功能，避免终端在厂房内的切换问题。武汉联通联合中兴通讯采用 3.5GHz+2.1GHz 的 5G 双频组网，打造双链路通道，并充分利用中兴 5G 边缘网关单终端双模组的结构特点，构建 FRER 双发优收通道，确保网络平均时延稳定在 10ms 的级别。

此外，中兴利用 NodeEngine 算力基站本地分流技术和算力扩展能力，对接无人天车的 WMS 管理系统，增设 IDOS 企业业务运维服务，实现企业业务直通调度的高效应用和实施监测运维的最优化。

5.6

黄陵矿综采面

黄陵矿业集团有限责任公司（简称：黄陵矿业）是陕西煤业化工集团有限责任公司所属的核心骨干企业。为改善井下作业环境、降低劳动强度、减少入井人员、促进矿井向本质安全转型，黄陵矿业持续推进“机械化、智能化、自动化、信息化”建设步伐，全面实施智能开采、智能掘进、生产辅助系统集中控制和智能安全监测监控等建设重点工程。在这个过程中，综采工作面的 5G 应用成为了黄陵矿业重中之重研究课题。同时，针对工作面空间狭小、传感器众多、作业工序复杂等情况，黄陵矿业期望解决掘、支、锚、运协同作业困难、工作面布线困难、线缆易断等一系列问题。以黄陵一号矿 627 工作面为契机，黄陵矿业联合智引科技、中兴通讯等合作伙伴，通力协作，共同研究 5G 通信技术在综采工作面的应用。

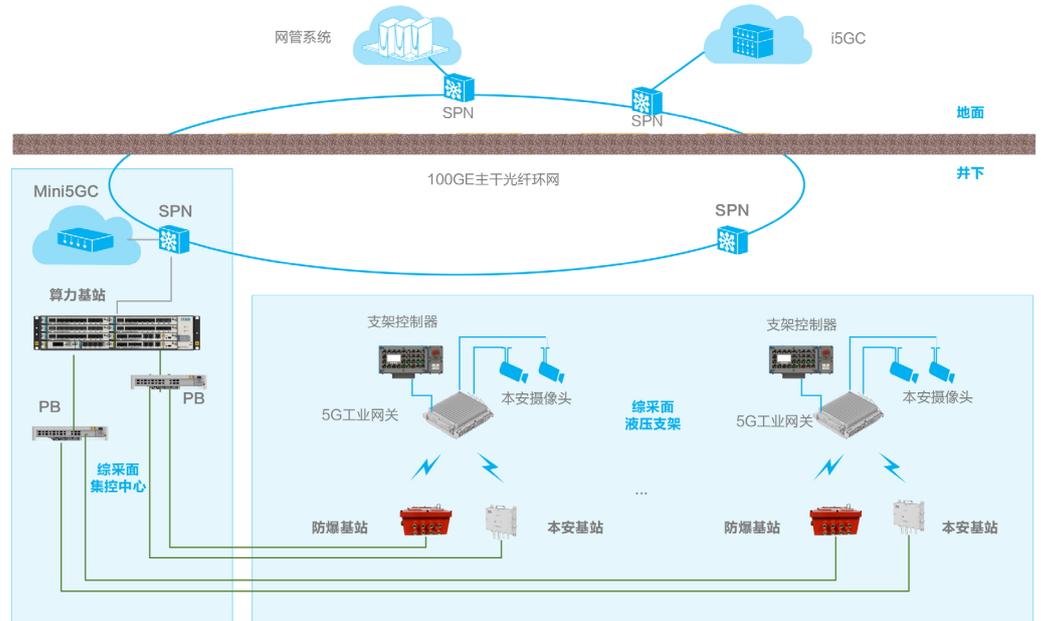


图 5-7 综采面工作面网络方案

综采面 5G 专网的要点包括：

- TDD 3.5GHz + FDD 2.1GHz 双频组网构建 FRER 双发优收通道；
- 井下算力基站内嵌 NodeEngine 模块，实现业务井下本地分流，并为业务提供智能 QoS 保障；
- 井上部署云网融合平台，包括小型化 i5GC、小型化 iIMS，提供语音业务、调度对接业务；
- 同时在井下设备列车上部署轻量级应急 mini5GC，与井上 i5GC 形成容灾备份，保证在与井上断链后，井下工作面 5G 网络可以正常工作。

通过这一系列举措，最终将实现综采面视频无线回传、基于回传视频的全景工作面拼接、液压支架无线控制以及煤机远程控制等智能化改造。

5.7

西湾露天矿

西湾露天煤矿属于国家首批智能化建设煤矿，也是国家能源集团 5 个智能化示范矿山之一。陕西移动联合中兴通讯创新应用 5G 700M+2.6G+4.9G 三频组网，引入轮式升压塔（可移动拖车）5G 基站和精准网络规划技术，应对露天矿信号覆盖重叠及地形变化带来的性能下降问题，从而改善无人矿卡等设备的业务体验。同时通过 5G 视频网关辅助矿区远程操控，通过多层网多链路冗余保障、NG-C 断链业务保活等技术保障网络高可用。目前已实现了 31 台无人矿卡的常态化商用运营。

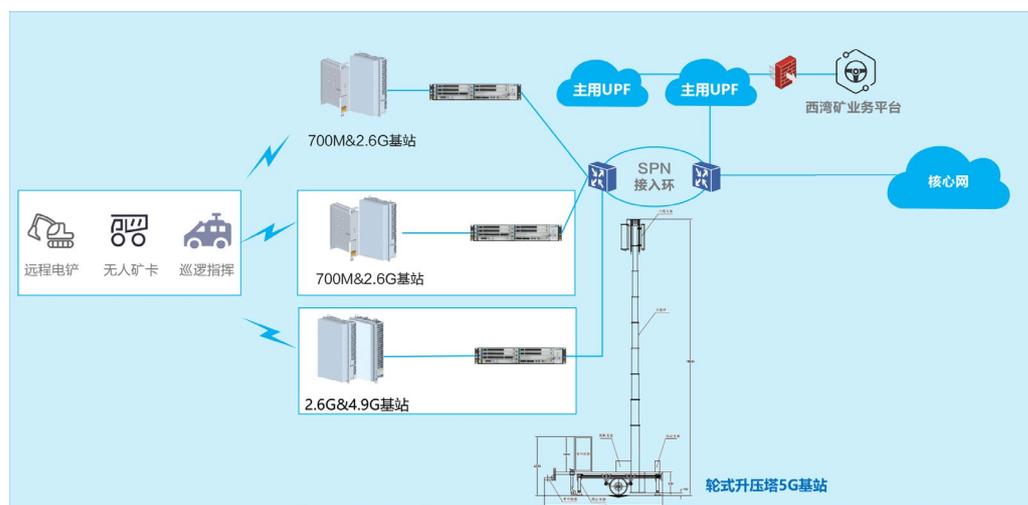


图 5-8 西湾露天矿 5G 组网

5.8

博世工业园区

博世汽车是世界 500 强企业，是智能制造标杆企业和灯塔工厂，该企业对生产数据安全性和保密性要求非常高。本项目为满足博世常州园区内低时延、大带宽、移动性、安全性等网络需求，在博世常州园区建设具有独立 RAN 硬件、频谱专用、5GC 独立部署的行业专网。在保证数据不出园区的前提下，充分发挥网络专用化、设备轻量化、部署灵活化、运维简单化、功能定制化等优势，为 BOSCH 生产系统提供网络基础。

博世苏州园区 5G 专网架构图如图所示。

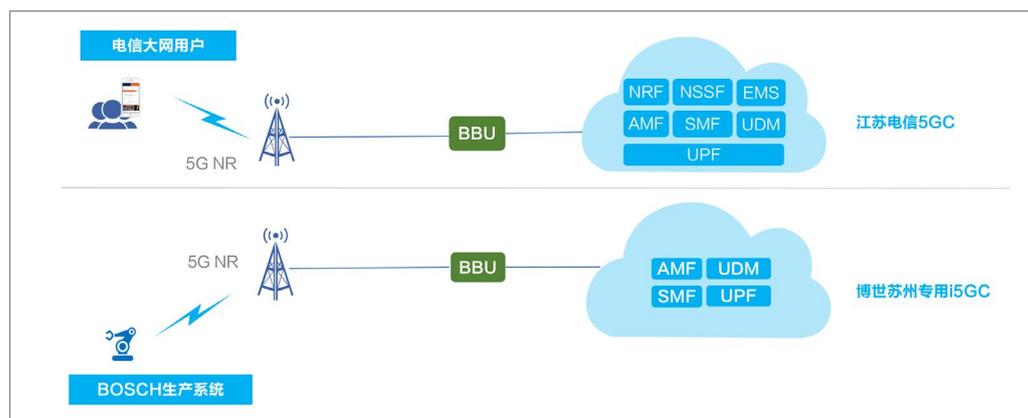


图 5-9 BOSCH 园区专网架构图

BOSCH 工厂采用定制 5G 核心网 i5GC 下沉、无线基站独立部署方式，建设纯私有 5G 专网，i5GC 及 RAN UME 服务器在本地部署，电信提供远程运维服务，BOSCH 专网基站不提供电信大网用户接入服务，专网基站与大网完全分开。依托该 5G 专网，可满足以下业务场景：

- (1) 数据的全面采集和传输；
- (2) 5G+AI+ 云技术，为数据孪生储备；
- (3) 仓库自动仓储系统；
- (4) AGV 厂内自动化无人运输；
- (5) 实时工艺过程监控。



6 总结和展望

工业是实体经济的核心力量，当前，我国“5G+工业互联网”创新发展进入快车道，ICT产业、行业 and 生态伙伴正在持续创新并携手探索如何利用数字化、网络化和智能化，进一步实现效率和效益的跃迁，提升全要素生产力，并已经取得了瞩目的成绩。接下来，5G全连接工厂在工业领域应用的重点将从生产外围辅助环节向生产中心控制环节加速迈进，该白皮书正是5G进入生产控制现场网方案的实践总结，适用于各个垂直行业，典型的包括制造、港口、钢铁、化工、煤矿、露天矿等。

后续，5G+工业互联网的持续深入，现场网方案还需要全产业携手在以下三方面持续推进，最终助力各个行业构建真正的全连接工厂：

- **推进技术创新和标准化：**结合工业各应用场景的演进需求，持续推动工业互联网的基础技术创新研究及标准化，在工业业务组网、业务性能保障、产品形态、覆盖增强、定位感知方面进行重点加强，并结合各个行业的业务特性，进行专项技术研究，对行业接口及能力开放等进行定义和适配，不断增强工业互联网端到端的技术优势；
- **推进产品方案端到端落地：**加速推进工业互联网的实际商用和产品落地，推动芯片、模组、仪表、应用测试、解决方案、平台各个环节，协同产业链优势资源推动主要行业高价值场景的规模商用；
- **推动创新应用场景：**积极探索工业互联网创新应用场景，积极推进技术融合，持续打造高性能、高可靠、安全高效的工业网络。



附录：缩略语

缩略语	全称	释义
5G	5th Generation	第五代移动通信
5GC	5G Core Network	5G核心网
5QI	5G QoS Identifier	5G QoS标识
BLER	Block Error Rate	误块率
FRER	Frame Replication and Elimination for Reliability	保障可靠性的帧复制与消除
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request	混合自动重传请求
HMI	Human and Machine Interface	人机界面
MCS	Modulation and Coding Scheme	调制与编码策略
MES	Manufacturing Execution System	工厂制造执行系统
MISP	MINO Intelligence Service data Platform	明珞智能数据服务平台
miniUPF	mini User Plane Function	轻量化用户面功能
MIMO	Multiple Input, Multiple Output	多输入、多输出
MU-MIMO	Multi-user, Multiple Input, Multiple Output	多用户多路输入/多路输出
MO	Monitoring Opportunity	监测机会
OPC UA	OLE for Process Control Unified Architecture	用于过程控制的OLE统一架构

附录：缩略语

缩略语	全称	释义
PDCCP	Packet Data Convergence Protocol	分组数据汇聚协议
PLC	Programmable Logic Controller	可编程逻辑控制器
QoS	Quality of Service	服务质量
RB	Resource Block	资源块
RFSP	RAT/FrequencySelection Priority	无线/频率选择优先级
ROS	Remote Operation System	远控操作台
SDMA	Space-Division Multiple Access	空分复用
SLA	Service Level Agreement	服务等级协议
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition	即数据采集与监视控制系统
TTI	Transmission Time Interval	传输时间间隔
TSN	Time Sensitive Network	时间敏感网络
WMS	Warehouse Management System	仓库管理系统
URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communication	超高可靠低时延通信



- 1、《5G/5G-A 超可靠低时延通信工业场景需求白皮书》
- 2、《无线云网融合智慧服务白皮书 2.0》
- 3、《赋能 5G 垂直行业：基于端边协同保障时延确定性技术研究“5G 行业应用”》
- 4、IEC 61508 (all parts), Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems
- 5、IEC 61784-3 ,Industrial communication networks – Profiles – Part 3: Functional safety fieldbuses – General rules and profile definitions



作者

中兴通讯股份有限公司

白玉	柏钢	陈东华	董路明	费腾	高飞	高皓媛	郝黎凯
何继青	胡浩	黄梅青	刘嘉	刘领	刘爽	刘西亮	卢学锋
陆志恩	马文光	孟照星	倪燕子	盛枫	束裕	孙干	汤红
童年	汪竞飞	王红欣	王宏伟	王良德	王晓明	王旭辉	王峥
邬圣音	晏虹	叶建阳	张帆	张周峰	赵丁	周建华	周业群

© 2023 ZTE Corporation. All rights reserved.

2023 版权所有 中兴通讯股份有限公司 保留所有权利

版权声明：

本文档著作权由中兴通讯股份有限公司享有。文中涉及中兴通讯股份有限公司的专有信息，未经中兴通讯股份有限公司书面许可，任何单位和个人不得使用 and 泄露该文档以及该文档包含的任何图片、表格、数据及其他信息。

本文档中的信息随着中兴通讯股份有限公司产品和技术的进步将不断更新，中兴通讯股份有限公司不再通知此类信息的更新。