



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

电力行业5G工厂建设实施 参考指南

工业互联网产业联盟（AII）
2025年5月





工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

电力行业 5G 工厂建设实施参考指南



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业互联网产业联盟（AII）
2025 年 5 月

声 明

本报告所载的材料和信息，包括但不限于文本、图片、数据、观点、建议，不构成法律建议，也不应替代律师意见。本报告所有材料或内容的知识产权归工业互联网产业联盟所有（注明是引自其他方的内容除外），并受法律保护。如需转载，需联系本联盟并获得授权许可。未经授权许可，任何人不得将报告的全部或部分内容以发布、转载、汇编、转让、出售等方式使用，不得将报告的全部或部分内容通过网络方式传播，不得在任何公开场合使用报告内相关描述及相关数据图表。违反上述声明者，本联盟将追究其相关法律责任。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业互联网产业联盟

联系电话：010-62305887

邮箱：aia@caict.ac.cn

前 言

电力行业是国民经济的基础命脉，是支撑经济社会发展的核心动能。5G、人工智能、物联网等新一代信息技术的蓬勃兴起，正加速推动电力系统向清洁化、智能化、数字化转型，构建以新能源为主体的新型电力系统已成为全球能源革命的重要方向。5G 技术与电力工业的深度融合，将重塑发电、输电、变电、配电以及用电等全链条运营模式，实现能源生产精准调控、设备状态实时感知、运维管理无人化升级，为构建安全高效、绿色低碳的现代能源体系提供全新范式。

电力行业作为首批“5G+工业互联网”重点行业，以 5G 为代表的新一代 ICT 技术已广泛应用于电力生产与消费各环节，取得了积极成效。自工信部发布《5G 全连接工厂建设指南》以来，电力企业积极响应，正在大力推进 5G 工厂的规划建设，助力电力生产的数字化转型。然而，由于电力生产消费全过程的主体多、链条长、要求高，应用场景复杂多样，如何根据行业特点有针对性的开展 5G 工厂规划建设已成为亟需解决的重要问题。

本指南立足于电力行业特性和发展阶段，围绕新型电力系统建设需求，系统梳理电力业务应用核心环节的数字化转型路径，重点研究电力行业 5G 工厂在基础设施建设、现场适配升级、关键环节应用、网络安全防护等方面的关键问题，

提出具体指导和典型实施路径，为电力行业的数字化转型和高质量发展提供有力支撑。

牵头编写单位：南方电网科学研究院有限责任公司、中国信息通信研究院

参与编写单位：国网山东省电力公司、中国南方电网电力调度控制中心、中国南方电网超高压输电公司、中国电信天翼物联科技有限公司、中国联合网络通信有限公司广东省分公司、广东省技术经济研究发展中心、中兴通讯股份有限公司、广东电网有限责任公司、浙江省能源集团有限公司、山东思极科技有限公司、深圳艾灵网络有限公司、华能澜沧江水电股份有限公司、北京紫光展锐通信技术有限公司、星徽联（上海）数据科技有限公司

编写组成员（排名不分先后）：梁志宏、王涵、索思亮、沈彬、陈梦婷、黄颖、刘晗、张国翊、朱海龙、陈保豪、陆国生、李正浩、张金国、李鉴学、赵孝武、杨祎巍、邹钟璐、陈立明、黄开天、李坤、孟建、辛雨航、段世惠、张恒升、俞一帆、于青民、李宗祥、陈敏、朱璿、管子健、潘桂新、许高生、郭春旭、徐兵荣、何景礼、楚俊生、李燕、范海东、金宏伟、傅俊伟、屠海彪、雪小峰、游梓霖、麦立峰、林俏伶、张世超、苗德雨、马月姣、杨龙保、朱一峰、李任新、刘乘昱、张承亮、张伟强、朱勇旭、卓越、魏鸿斌、汪琪



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

目 录

一、 电力行业 5G 工厂建设的必要性	1
(一) 电力行业 5G 工厂概述	1
(二) 电力行业发展现状	1
(三) 电力行业数字化转型痛点	2
(四) 电力行业 5G 工厂的价值体现	4
二、 电力行业 5G 工厂业务环节及建设需求	5
(一) 发电环节需求	5
(二) 输电环节需求	7
(三) 变电环节需求	8
(四) 配电环节需求	10
(五) 用电环节需求	12
(六) 新型电力系统环节需求	15
三、 电力行业 5G 工厂建设内容	16
(一) 建设总体架构	16
(二) 基础设施建设	17
1、 5G 网络基础设施建设	17
2、 边缘计算部署	23
3、 网络管理服务系统	25
4、 业务系统建设	26
(三) 厂区现场升级	27
1. 现场装备网络改造	27
2. IT-OT 设备融合部署	32
3. 生产服务数智化应用提升	34
(四) 关键环节应用	37
1. 发电领域关键环节应用案例	37
2. 电网侧关键环节应用案例	55
(五) 网络安全防护	60

1. 电力业务安全需求分析	60
2. 电力行业 5G 工厂安全参考架构设计	61
3. 电力行业 5G 工厂安全参考方案	62
四、 电力行业 5G 工厂实施建议	67
(一) 工厂建设参考	67
(二) 技术发展方向	70



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

一、电力行业 5G 工厂建设的必要性

（一）电力行业 5G 工厂概述

电力行业 5G 工厂主要是指利用 5G 技术高带宽、低时延、大连接等特点，对电力行业的发电、输电、变电、配电、用电等主要环节进行数字化和智能化升级改造，包括使用 5G 技术进行现场装备网络改造、IT-OT 设备融合部署以及生产服务数智化应用提升等。区别于传统的 5G 工厂，电力行业 5G 工厂适用范围更广泛，不仅包含智慧电厂等传统工厂应用，还包括输变配电运行监视、配网保护与控制、智慧用电服务以及新型电力系统并网等应用场景，实现更精准的电力调度、更高效的新能源消纳、更可靠的电网安全保障，以及更智能的运维管理，进一步提升电力行业的数智化水平。

（二）电力行业发展现状

“碳达峰、碳中和”目标背景下，电力生产加速清洁化，能源消费日趋电气化，电力系统迎来转型升级的重大机遇。3 月 15 日，习近平总书记中央财经委第九次会议上提出，构建以新能源为主体的新型电力系统。新型电力系统承载着能源转型的历史使命，以坚强智能电网为枢纽，以源网荷储协同为关键，业务发展呈现“终端海量接入、信息交互频繁、控制向末梢延伸”的态势，对电网通信的灵活接入能力、业务承载能力、安全隔离能力提出新的需求。5G 高速率、低时延、高可靠、大连接的技术特性与新型电力系统业务需求高度契合，可有效解决最后一公里可靠通信问题，扩展新型电力系统监测控

制的范围与能力。

（三）电力行业数字化转型痛点

随着新型电力系统建设推进，电力行业正处于一个深刻的转型时期。发电集团和电网企业作为行业的两大支柱，面临着前所未有的挑战。首先，发电集团在传统能源向新能源转型的过程中，面临着设备更新、技术升级和运营模式转变的压力，需要整合分散的新能源资源，提高发电效率和电网接入能力，同时也要确保发电过程的稳定性和可靠性。其次，电网企业在新型电力系统中承担着更加复杂的调度和管理任务，需要应对新能源发电的波动性和不确定性，保障电网的安全稳定运行，同时，随着分布式能源的大规模接入，电网企业需要构建更加灵活和智能化的电网，以适应分布式发电和需求侧响应的需要。因此，电力行业亟需通过数字化转型，构建一个更加智能、高效、安全 and 环境友好的新型电力系统。

理想 1：建立“源网荷储”的深度协调互动以适应电力生产形势由大容量集中式常规发电向大规模分布式新能源转变

随着新能源的高速发展，新型电力系统中配电网将从无源网变为有源网，潮流由单向变为双向、多向，电网运行控制更加复杂。电力生产方式由“源随荷动”向“源网荷储”互动转变，需要建立更加灵活的资源调控能力。电源侧要提高监控和预测能力，电网侧着重强化配电网的运行监控和灵活承载，适应用户侧的能源消费电气化和多元化，从而实现“源网荷储”的深度协调互动，应对新能源大规模发展对电网安全稳定运行的挑战。

理想 2：在电网生产经营中大力推广应用数字化技术，实现电网企业的全面数字化转型

随着电网数字化转型的深入推进，需要加快电网生产、企业经营和客服服务等领域的数字化创新，应用“大云物移智链”等数字技术，强化信息采集、感知、处理、应用等环节建设，实现电网、设备、客户状态的动态采集、实时感知和在线监测，促进生产提质、经营提效、服务提升，推动全业务、全环节数字化转型。

现实 1：光纤对配用电网的覆盖远远不足，无法支撑大规模分布式能源和配用电设备接入

长期以来，电力光纤专网仅实现了对 35kV 及以上电压等级的主网覆盖。10kV 及以下电压等级的配用电网，由于终端分布点多面广，光纤覆盖成本过高，实施和运维难度巨大，未实现“最后一公里”的有效覆盖。

以山东电网精准负荷控制工程为例，全省 436 个大用户通过光纤接入，光缆建设成本平均每公里超过 7.8 万元，平均每用户光缆投资 27.4 万元。光纤通信方式无法支撑大规模分布式能源和海量配用电设备的接入，“最后一公里”通信成为制约“源网荷储”友好互动的瓶颈。

现实 2：4G 网络的性能和安全难以满足电网数字化技术应用与数字化转型发展需求

随着人工智能、云计算、大数据新型数字化技术在电网业务中的广泛应用，数据呈现爆发式增长，对无线通信网络的承载能力提出更

高要求，4G 网络性能无法满足作业现场高清视频监控、无人机智能巡检等数字化创新业务的大带宽、广连接需求。此外，虽然 4G 已广泛应用于用电信息采集、配电自动化“二遥”等电力业务，但 4G 无线通信体制无法保证电力监控业务的安全隔离性、毫秒级时延、99.999% 可靠性等关键指标，在分布式电源、配网监控、负荷控制等关键领域的应用受限。因此迫切需要更加先进的无线通信技术解决新型电力系统“最后一公里”的接入问题，提供差异化的安全隔离能力，以及更低的时延、更高的可靠性和更广泛的终端接入能力。

（四）电力行业 5G 工厂的价值体现

5G 定义的三大场景：增强移动带宽 (eMBB)、超可靠低时延通信 (uRLLC) 和大规模机器通信 (mMTC)，具备超高带宽、超低时延、超大连接的技术特点。在电力系统的发电、输电、变电、配电、用电等业务场景各环节均可发挥重要作用，能够深刻变革电力通信网，全面提升电力信息化水平。

1. 5G 通信与电力通信网络需求高度契合

5G 网络技术的峰值速率最高可达 20Gbps，区域速率、边缘速率都比 4G 大幅提高，可以满足电网业务大量高清视频监测数据的传输需求。5G 的通信时延比 4G 少一个数量级，空口时延在 1ms 左右，为电力差动保护、精准切负荷等超低时延业务应用创造了条件。5G 网络容量更大，每平方公里能够连接 100 万个终端，能够满足电力物联网海量智能终端的接入需求。5G 作为通信新技术典型代表，其技术特点与新型电力系统通信需求高度匹配，可实现对部分光纤通信的替

代、提升无线通信可靠性、高效赋能电网应用，为新型电力系统侧构建提供坚强通信技术支撑。

2. 5G 通信与新型电力系统高度匹配

基于 5G 的新型电力系统将充分支持分布式新能源、分布式储能和电动汽车车联网连接，支持各种智能电器设备进入家庭、商场、工厂和园区，为满足个性化、多样化、市场化的能源供应服务提供连接的桥梁。5G 为电力终端接入网提供了泛在、灵活、低成本、高质量的全新技术选择，为打造更加安全、可靠、绿色、高效的数字电网提供了强大的基础能力，助力电力行业数字化转型，推动以新能源为主体的新型电力系统建设。

总体来看，5G 通信技术与电力行业需求高度契合，未来电力行业将成为 5G 规模化商用的重要用户之一。

二、电力行业 5G 工厂业务环节及建设需求

（一）发电环节需求

随着《中国制造 2025》和《国家能源生产与消费革命战略（2016-2030 年）》等一系列国家政策文件发布，发电企业正积极推进数字化转型，政策鼓励企业采用 5G、物联网、大数据等前沿数字技术，对现有发电生产系统进行信息化和智能化升级，提升生产效率和安全管控，培育新质生产力，推动能源产业高质量发展。目前，发电企业在数字化转型方面存在以下需求：

（1）改善安全生产

管理针对安全隐患多、管理难度大、安全质量监督范围不足等问

题，基于不断增加的各类安全数据信息，提升现场监控能力，更新升级管理手段，创新安全管控模式，实现包括工程建设和生产经营在内的全覆盖风险管控。提高人员安全管理效率，支持对人员违章、环境异常等问题进行主动探测，对危险区域作业人员行为进行事前主动预防。

（2）加强数据采集能力

全面支持自动化采集和分析人员、安全、质量、环境等要素过程数据。针对生产现场存在的厂房环境复杂、巡检区域繁多及设备数量大等特点，突破多测量点实时生产数据采集困难的难题，通过灵活快速增加现场测量点等方式，提高数据采集效率和自动化、智能化程度，实现对发电过程及设备运行状态的精准、高效检测，支撑生产数据的沉淀、管理和应用。

（3）生产管理智能化

持续加强数据共享，打破施工现场和生产区域的相互独立状态，消除信息孤岛。通过对海量数据的智能分析，形成系列化数据模型，提升设备维护效率及全环境巡检能力，实现针对分散复杂区域的少人化或无人化管理。

（4）网络安全及优化

优化提升网络安全防护水平，实现不同网络域的安全隔离，保障数据传输安全性。针对现场设备因控制电缆敷设难度大，难以进行有线远程控制改造，导致设备自动化水平低的问题，引入高性能高可靠 5G 通信技术，克服传统有线及无线网络的局限性（例如，光纤网络

部署不灵活、耗资大，4G 网络和 WIFI 带宽不足、时延高、稳定性差），满足网络部署灵活性、网络带宽及时延稳定性等需求。

（二）输电环节需求

随着输电线路电压等级不断提高，电网的分布越来越广，输电线路遭遇外力破坏、覆冰、山火等事故不断发生，输电线路的巡视维护工作量越来越大，而相应数字化、智能化装置发展时间短、运行条件恶劣，导致输电线路的监测维护工作越发困难。针对以上问题，推动“云大物移智”等关键技术在输电环节取得突破，稳步推进智慧输电建设，以提升对输电线路的监控及管理水平，积极深化落实国家数字化转型战略举措。目前，输电环节对 5G 工厂建设存在以下需求：

（1）输电线路通道智能化巡检

当前输电线路中部分区域仍采用传统的人工定期检修制度来进行线路运行的维护，存在人力物力成本高、工作量大、隐患发现不及时、巡检区域有限、巡检人员人身安全面临威胁等缺点。5G 工厂建设能有效满足无人机巡检、机器人巡检等智能化巡检技术对通信大带宽、低时延的需求，从而提高巡检效率、降低巡检成本、增强巡检人员安全性。

（2）输电线路通道立体化监测

输电线路通道环境错综复杂，存在大量外破隐患。受限于技术、成本等因素，多数线路仅在少数隐患点密集区域部署监控装置，并采用定时拍照等方式回传数据，无法实现实时监控、无法系统性管控外破风险。通过在输电线路上部署可视化、覆冰监测、微气象、导线弧

垂、导线舞动、导线温度、杆塔倾斜、震动等传感器，实现杆塔本体及线路的立体化监控。结合输电环节 5G 工厂建设，满足输电线路监测设备大连接数、大带宽、低延时的通信需求，将海量监测数据实时传输到换流站的监测中心后台，实现感知数据的监测和分析，支撑输电线路立体化多方位智能监测。

（3）输电线路通道信号全覆盖

输电线路走廊多在人烟稀少的野外穿行，沿线运营商提供的无线公网信号差、不稳定。例如南方电网超特高压输电线路通道有超过 50% 的区域是没有公共网络覆盖，数据传输困难，亟需推进输电环节 5G 工厂建设进程，满足无公网覆盖地区的输电线路数据及时、完整回传的需求。

（三）变电环节需求

目前，变电站/换流站在数字化转型的过程中仍存在站内最后一公里无线通信瓶颈、各生产信息系统分散、数据难以融合、变电设备智能化水平不高等问题，生产智能化、业务平台化及数据价值化能力仍有待提高。针对上述问题，5G 主要有三点优势，分别为面向更多的业务场景、更强的网络承载能力以及提供更安全开放的行业专网服务。目前，变电环节对 5G 工厂建设存在以下需求：

（1）移动作业方面

变电站/换流站设备巡视、定检、缺陷记录等日常工作大部分均已实现电子化，但由于站内最后一公里无线通信瓶颈制约，移动作业往往需人工手动通过其他设备和软件来实现数据导入导出，流程复杂、

效率十分低下且对部分表计无法实时监控，数据信息未实现全面管控及应用。通过变电环节 5G 工厂建设，满足大带宽、低延时以及信号全面覆盖的特性，实现运行巡视、缺陷记录、高压预试、继电保护定检等业务作业现场在线实时接收派工，提高变电站/换流站日常巡视、倒闸操作、事故异常处理、应急联动等的运维效率，提升现场作业智能化水平。

（2）智能检测方面

变电站/换流站仪表分布较广，环境各异，目前主要由人工定期勘察并记录数据，存在人工识别易出现偏差、人工统计效率不高、高处表计有跌落风险、室外表计表面脏污难以识别、部分表计位于高危区域等问题。通过在仪表附近安装摄像头、机器人巡检、数字化仪表等方法探索替代人工定期统计的可能，实现设备状态智能监测。摄像头、巡检机器人、数字表计等终端接入变电环节 5G 工厂，实现系统对相关参数的实时监测，及时主动对异常数据发出告警，促进变电站/换流站业务的高效、安全运营。

（3）智能安监方面

变电站/换流站设备繁多，运行状态复杂，施工作业规范性要求极高。不规范作业、误入带电区域、高空作业等带来极大的人身伤亡风险，需要针对站内施工现场的人员、工序、质量等全方位进行监管，而安监人员只能通过抽查方式管控现场，按照“冰山理论”大量违规隐藏水下。通过将前端的摄像头、移动单兵等设备接入 5G 工厂，高清视频数据实时上传至视频分析平台，满足高清视频数据低时延大带

宽传输的需求。结合人脸识别、安全帽识别、工作服识别、安全带识别、危险区域检测、作业区吸烟检测、手扶梯检测、打瞌睡检测、人群态势分析、指针仪表识别等功能算法，实现实时园区车牌识别，人脸识别，人员着装、是否戴口罩等检测，提高人员作业合规性，降低变电站/换流站内事故发生率。

（4）远程协同运维方面

随着变电站/换流站设备智能化程度的不断提高，其复杂性越来越高，电力设备运维难度、安装及巡检作业指导难度越来越大，严重依赖技术支持。基于“前方精兵、后方专家”的管理思路，将总部专家智慧通过 5G 工厂实时传达到变电站/换流站工作现场，实现作业现场远程运维协作，有效提升运维作业效率。

（四）配电环节需求

配电业务作为电力系统的关键组成部分，在数字化转型的过程中面临诸多挑战。随着分布式能源、智能电网以及需求侧管理等新兴业务的快速发展，传统的配电通信网络在带宽、时延、可靠性和灵活性方面已难以满足日益增长的需求。5G 通信技术的引入为解决这些问题提供了新的可能性。5G 技术以其高带宽、低时延、高可靠性和大连接数的特点，能够为配电通信网络带来革命性的改进。因此，5G 通信技术被视为支撑配电通信网络数字化转型的关键技术之一，可实现配电网的全面感知、高效控制和智能决策，推动配电网业务向更加智能化、自动化和绿色化的方向发展。

（1）配电自动化“二遥”

配电自动化“二遥”业务应用于配电网运行的自动化感知、监视。监控范围覆盖站房端、馈线端、台区端 3 个关键环节，主要配电终端包括站所终端（DTU）、馈线终端（FTU）、台区终端（TTU/智能融合终端）3 类，每类终端外围布设相应的电气量、开关量、环境量等各类感知终端设备。远程通信方式以 4G/5G 无线虚拟专网接入为主，光纤专网、无线专网为辅。

（2）配电自动化“三遥”

配电自动化“三遥”业务实现对配电网运行的自动化感知、监视与控制，具备配电 SCADA、馈线自动化、电网分析应用与相关应用系统互联等功能。远程通信方式以 4G/5G 无线虚拟专网接入为主，光纤专网、无线专网为辅，存在少量的中压电力线载波。

（3）配网保护业务

配网保护主要包括配网差动保护和配网拓扑保护。配网差动保护是电流差动保护原理在配网中的应用，通过比较该段线路本侧和对侧的差动电流和制动电流，实现故障精确定位和快速隔离，缩小停电范围，提升用户用电质量。配网拓扑保护类似于主网线路光纤纵差保护，通过配电线路两侧安装的配网保护运行信息交互实现纵联功能，保护终端设备与同一环网内相邻终端设备进行信息交互，通过比对相邻点保护装置启动、故障方向判断结果等信息，构成配网纵联保护，实现区内、区外故障快速定位与隔离。

（4）配网智能巡检

配网智能巡检业务包括配电设备/环境监测和配电网视频巡检两

类业务。配电设备/环境状态监测面向配电状态检修业务，主要包括站房（环网柜、配电室等）测温等。配电网视频巡检包括移动作业终端、对配电站房的视频监控、机器人巡检和对配电线路的无人机巡检。本地通信方式以微功率无线、WAPI 通信网络为主，远程通信方式以 4G/5G 无线虚拟专网接入为主。

（5）配网应急通信

配网应急通信业务综合配网运行监测数据、营销 95598 等需求，由调度部门统一指挥，统筹运检、营销两个部门，作为独立的功能模块集成于 PMS3.0 系统中。配电应急通信业务用于采集和传输配电故障现场的语音、图像、视频信息。本地通信方式主要以 WiFi、无线自组网为主，远程通信方式以无线专网、光纤通信、卫星通信为主。

（五）用电环节需求

用电业务发展以优质用能服务为目标，主要面向居民智慧家庭用能服务、社区多能服务、商业楼宇用能服务、工业企业及园区用能服务、电动汽车及分布式能源服务等方面，重点提升服务质效和管理水平，提高电网设备利用率和全社会用能效率，充分发在能源汇聚传输和能源转化利用方面的作用，提高综合能源普遍服务、惠民利政的水平，提升数据价值共享开放、赋能变现的能力。

（1）居民智慧家庭用能服务方面

开展家庭负荷辨识、柔性负荷优化调节技术、家电数据接入技术研究，为居民用户提供精确到设备的用电信息查询、家电运行管理、家庭能效分析、节能策略建议和家电智能托管服务，为家电厂商提供

营销策略推广、家电运行评估、市场份额统计、潜力市场发掘及统一售后管理等服务，实现对居民负荷灵活、柔性、高效调节，提高配网设备利用率及供电可靠性。

（2）社区多能服务方面

依托先进的通信和信息技术，通过对社区多能感知设备的监控、诊断和控制，积极参与需求响应和市场化交易等电力互动，实现社区范围内冷、热、电、气交互耦合与协同控制，在保证社区用能舒适性的前提下，达到最优经济用能，同时促进社区清洁能源消纳。

（3）商业楼宇用能服务方面

针对商业楼宇重点耗能对象空调系统，通过传感器将空调系统组件及其状态信息实现就地感知与融合。运用采集（控制）终端、多容器技术及优化控制策略，实现低功耗、低延时的就地实时控制。同时，将筛选的设备状态信息及数据上传至商业楼宇用能服务，通过统筹大数据智能分析与就地调控策略，对楼宇用能设备进行实时优化控制，提升系统能效管理和自动化水平，从而实现系统级节能优化控制及电网友好互动。

（4）工业企业及园区用能服务方面

针对工业企业及园区能耗高、节能压力大、用能信息采集不全、各能源子系统相互独立、缺乏与电网互动等问题，研究应用工业企业能源循环梯次利用及园区多能互补协调优化等技术，通过部署企业用能设备采集（控制）终端，应用“大云物移智链”等信息通信技术，实现工业企业及园区内能源系统的设备状态全息感知、风光冷热电储多

能协调控制、多能互补及能源梯次利用，提升工业企业及园区供能系统效率，降低企业用能成本，促进终端负荷与电网供应能力协同平衡。

（5）电动汽车及分布式能源服务方面

随着电动汽车的快速发展和分布式能源的大规模接入，电动汽车接入电网的充电行为具有较大的不确定性，电动汽车充电无序化、高渗透率，给电网运行负荷造成巨大影响；分布式新能源大规模发展和接入带来电网消纳和调控能力不足，亟须解决分布式能源的全额消纳问题。因此，各种客户侧的各类用能负荷、分布式能源和用户储能等源、荷、储、充等业务应用相互交融、关联制约，需要构建电动汽车与分布式能源系统，从整体上统筹台区侧各类能源和负荷的特点，对台区各能源设施、用能设备和电动汽车进行实时状态感知、协同优化控制，实现规模化电动汽车有序充电和分布式能源全额消纳，满足台区侧源网荷储协同服务的需求。

用电业务发展对通信覆盖范围和能活接入能力需求急剧增加，通信接入网面临着接入范围、接入能力急剧增长的趋势，对通信可靠性、实时性、安全性和带宽水平提出了新的要求，单一通信方式难以满足目前急剧增长各类用电业务通信需求，研究需要灵活多样的通信接入方式成为一个重要课题。目前电力光纤专网、4G/5G 无线虚拟专网、中低压电力线载波等多种通信技术共存，互为补充，将是长期面临的现状，其中本地通信以 RS485、电力线载波为主，远程通信以 4G/5G 无线虚拟专网接入为主。

（六）新型电力系统环节需求

（1）分布式光伏电站

分布式光伏电站主要分布于各类工业园区，可按规模分为10kV 分布式光伏和0.4kV 分布式光伏两类。集成了光伏电站的工业企业需依赖能源数据管理系统对生产全流程的能耗数据进行采集和分析，实现产品产值对标，确定高耗能点位，并进行节能降耗改造，实现降本增效。

1) 10kV 分布式光伏

10kV 分布式光伏电站业务主要包括电源监控业务和计量采集业务，其远程通信主要采用4G/5G 无线虚拟专网接入。

2) 0.4kV 分布式光伏

0.4kV 分布式光伏只需满足营销业务需求，主要为计量采集业务。本地通信网采用HPLC，远程通信以4G/5G 无线虚拟专网接入为主。

（2）虚拟电厂

虚拟电厂可看作是在传统电网物理架构上，利用先进的调控技术、计量技术、通信技术把分布式发电、分布式储能设施、可控负荷等不同类型分布式资源进行整合协同开展优化运行控制和市场交易的载体，实现电源侧的多能互补和负荷侧的灵活互动，对电网提供电能或调峰、调频、备用等辅助服务。

虚拟电厂作为新型电力系统的关键业务场景之一，涉及业务部门、业务流程更多更广泛，参与方更多，通信方式更加多样化，从物理上建设专网承载业务存在较大难度。因此，5G 电力通信虚拟专网是承

载虚拟电厂业务的主要通信解决方案。

(3) 新型储能

新型储能主要分为 10kV 分布式储能业务和 0.4kV 分布式储能业务。10kV 分布式储能业务主要包括储能调控业务和计量采集业务，其远程通信主要采用 4G/5G 无线虚拟专网接入方式；0.4kV 分布式储能只需满足营销业务需求，通过 4G/5G 无线虚拟专网接入。

三、电力行业 5G 工厂建设内容

(一) 建设总体架构

电力行业 5G 全链接工厂的实施架构总体分为发电、输电、变电、配电和用电等五个层级，具体实施包括基础设施建设，厂区设施升级，关键环节应用以及网络安全方等四大方面的能力建设。对于电力行业，5G 工厂主要建设内容均涉及发输变配用，本章主要从四大能力建设内容进行介绍。

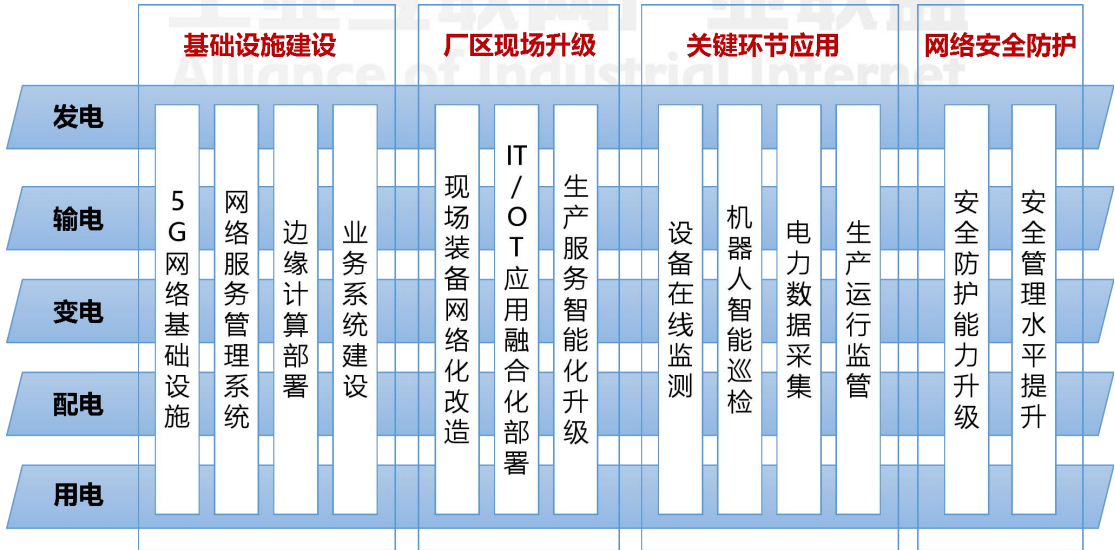


图 1. 电力行业 5G 全链接工厂的实施架构

基础设施建设主要是从电力行业 5G 工厂的网络基础设施、网络

管理服务系统、边缘计算部署、业务系统建设等方面开展阐述。

厂区现场升级主要包含现场装备网络化改造、IT-OT 应用融合化部署、生产服务智能化升级等。

关键环节应用主要从电力行业发输变配用以及新型电力系统等主要环节，主要应用场景包括设备在线监测、机器人智能巡检、电力数据采集、生产运行监管等方面。

网络安全防护主要包含安全防护能力升级、安全管理水平提升等。

(二) 基础设施建设

1、5G 网络基础设施建设

电力行业业务场景复杂，5G 网络需要根据应用场景，用户业务质量需求等选择不同的组网方式。面向电力 5G 工厂“建网”和“联网”需求，提供虚拟专网、混合专网、独享专网三种 5G 专网形态，包含卡、基站、传输、5GC 等基础产品。

表 1. 电力行业 5G 网络建设模式

模式	独立专网	混合专网		虚拟专网
部署特点	电力使用自有频段，独立建设电力核心网，核心网/承载/无线基站均为电力自有产权设备。	共用运营商无线频段资源，运营商无线基站就近接入电力传输网络，对接电力自建 5G 核心网。	共用运营商无线频段资源，5G 控制面共用运营商核心网，电力自建 5G UPF。保证数据不出园区。	运营商端到端提供虚拟专网服务，并向电力提供专网号卡资源。
优势	电力专网全部产权/管理归属电力，独立建设，独立运维；专网号卡资源自行管理。保证数据不出园区。	核心网独立部署，最大程度上与运营商网络隔离，保证数据不出园区。号卡资源自行管理。	UPF 核心网独立部署内网，保证电力业务的业务数据不出园区。	运营商虚拟专网，只提供专网服务+号卡资源为电力使用。充分利用运营商公网资源。

对比	投资：巨大，无线传输资源独立投资。 运维：全部王源自行维护，卡号资源自控 安全性：控制和业务数据不出园区。	投资：大，共享无线传输资源。独立建设核心网。 安全性：控制和业务数据不出园区。 运维：运营商提供服务，卡号资源自控	投资：中，共享无线传输资源。独立建设 UPF 安全性：业务数据不出园区。 运维：运营商提供服务	投资：少，共享无线传输资源。 安全性：业务数据不出园区。 运维：运营商提供服务
----	---	---	---	---

(1) 电力独立专网方案

电力独立专网是企业自建一张物理专用 5G 网络，包括无线、接入网、承载网、核心网等 5G 网络端到端基础设施，与公网隔离，只承载企业业务的专用网络。该网络部署方式可以保障数据完全不出企业、5G 网络安全兼容企业网络安全要求、企业对网络有充分自主管理能力等。

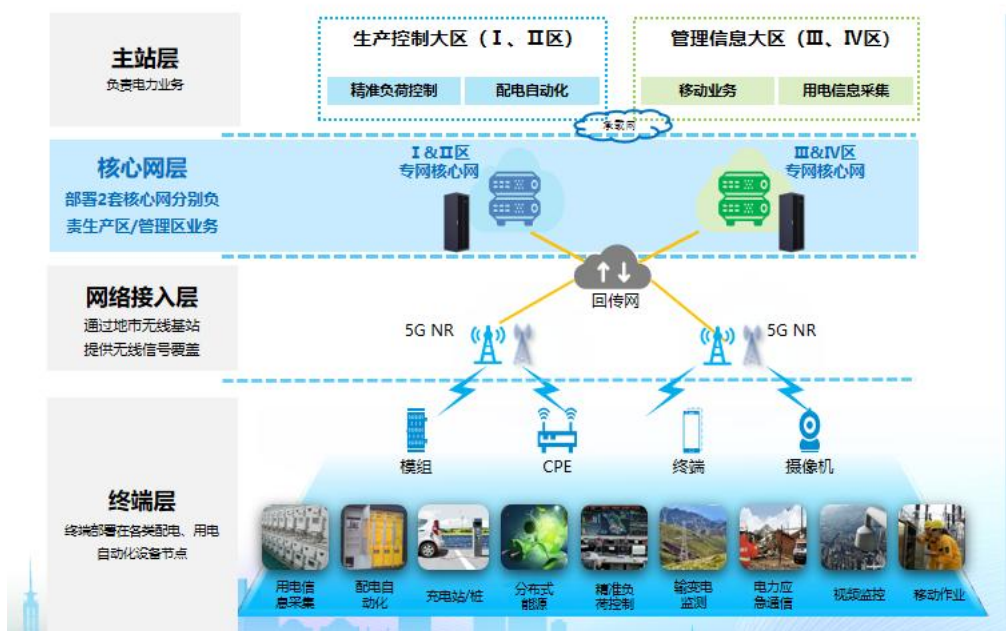


图 2. 电力独立专网方案

核心网：生产控制大区和管理信息大区各建设 2 套新型融合核心网形成一主一备，对接区域基站。

无线侧:基站下的电力终端的 IP 地址段优先是一个独立的网段,方便电力数通设备配置路由指向核心网设备,基站可以是同一个厂家,也可以是不同厂家。

传输网:利旧现有的网络承载设备。

安全可靠业务隔离:生产控制和管理信息大区业务实现物理隔离。

多局址部署:地市分布式部署,不容易同时出现故障,网络波及以及影响范围可控,可靠性更高。

(2) 电力混合专网方案

电力 5G 混合专网混合专网是将原有在运营商 5G 核心网和多接入边缘计算 (MEC 可选) 等功能下沉至企业内,满足局域场景电力行业客户需求,实现业务数据的本地卸载,达到数据不出园区、支持时延敏感业务的目的。

电力 5G 混合专网通过基站共享, RB 资源预留, 网络切片和 UPF 专用等技术和手段实现电力业务与公网业务及其他 toB 业务的隔离和网络资源的专享专用。

无线组网基于公用基站建设规划之外根据特定电力业务对网络覆盖、容量、上行带宽的需求,或覆盖补盲需求建设专门基站,即专建基站(可视电力业务要求设置是否允许公网用户接入),来满足特定电力业务专属需求。5G 无线空口通过 RB 资源预留实现生产控制大区业务与其他业务的硬隔离和资源专用,通过 5QI 调度实现管理信息大区业务与其他业务的逻辑资源隔离及优先级调度。

传输组网使用 SPN/STN/IPRAN 技术体制,通过 FlexE 或 MTN 切片

技术满足电力生产控制大区业务与其他大区业务的硬隔离需求。通过 VPN 实现安全区内不同业务在传输资源共享下的逻辑资源隔离。FlexE 和 MTN 切片技术在应用部署上具备不同的传输特性。

核心网控制面网元采用独立部署方式或者共用运营商核心网，用户面 UPF 根据业务的网络通信需求和安全隔离要求部署于省会城市机房，或按需下沉部署至地市或园区级机房（运营商机房或电力机房）。其中生产控制大区业务使用部署省会城市机房或地市机房的电力专用 UPF，实现与管理信息大区业务、其他 toB 业务及公网业务的物理资源隔离和业务就近转发；管理信息大区业务使用部署在省会城市机房或地市机房的行业共享 UPF，并通过切片 ID 和 DNN 实现与其他 toB 业务及公网业务的逻辑资源隔离，同时，管理信息大区业务也可选配使用电力专用 UPF。

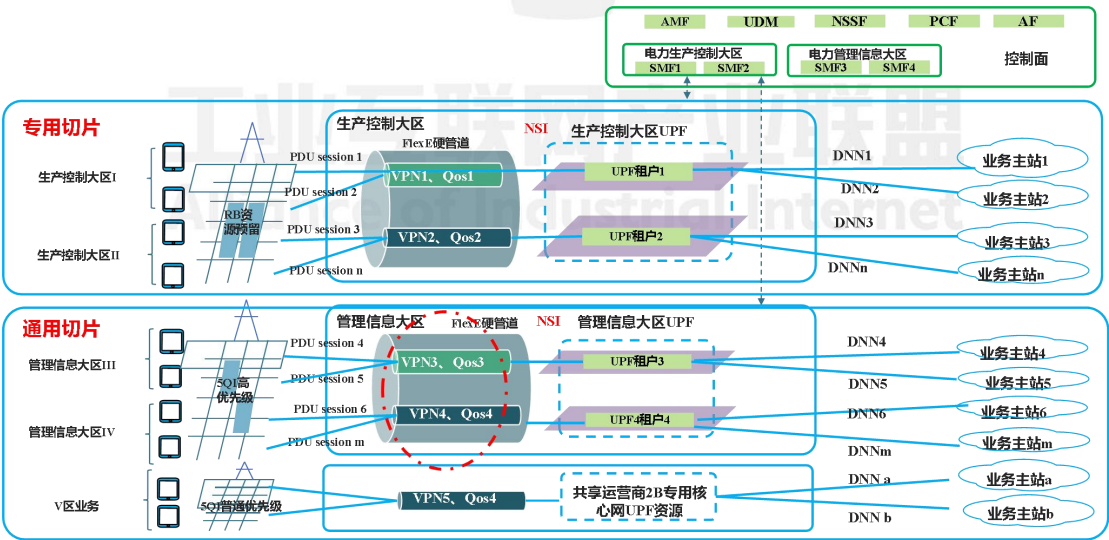


图 3. 电力混合专网网络切片方案

网络切片方面，电力混合专网建设可根据电力行业网络安全要求规划 5 种 5G 电力切片，分为电力专用切片和电力通用切片两种，电力专用切片主要面向生产控制大区（安全 I 区和安全 II 区）业务，

电力通用切片主要面向管理信息大区 and 互联网区（安全 III 区、安全 IV 区和安全 V 区）业务。

1) 核心网控制面网元采用独立部署

公网用户和电力专网用户采用不同的 PLMN 网号。公网终端或者电力终端接入基站时，基站根据不同的 PLMN 区分接入到公网 AMF 或者专网 AMF

全量 5GC 方案（控制面省公司集中/UPF 下沉市公司）建设电力专网 5GC 控制面 (AMF/SMF/UPF/UDM 等)，省集中建设，与运营商大网隔离；用户面 UPF 下沉市公司，I/II 生产区和 III/IV 管理区物理隔离；

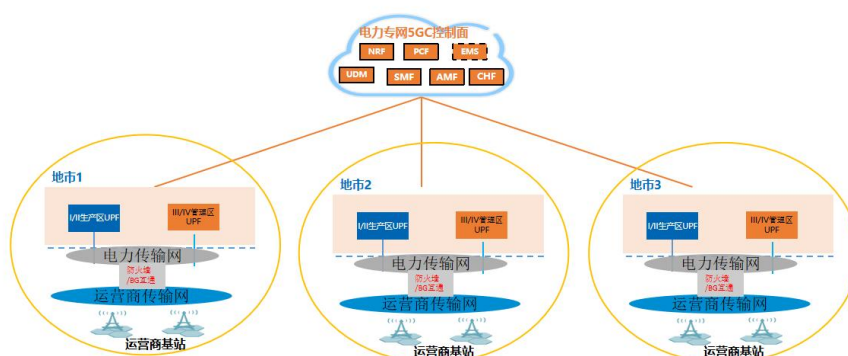


图 4. 核心网控制面网元独立部署方案

2) 核心网用户面 UPF 独立部署

核心网用户面 UPF 独立部署并通过定制 DNN 实现电力内部生产网络与公网的相互隔离。5G 核心网用户面功能设备（UPF）下沉部署到电力园区内，并通过电力内网连接到边缘计算平台。

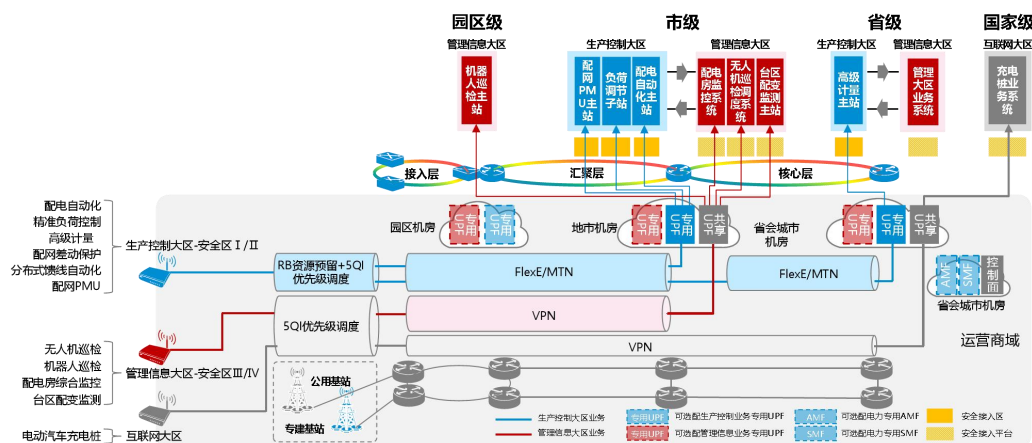


图 5. 核心网用户面 UPF 独立部署方案

针对部分电力业务场景，仅能通过特定切片提供网络能力的情况（性能需求差异性较大），建议以业务为粒度划分专用网络切片。（例如分布式 FA 等具备 5G 局域网需求的业务场景，可采用 5G LAN 网络技术方案，但需要为此类终端业务分配专用的网络切片。）

电力管理信息类业务在无线侧使用 5QI 优先级调度，承载侧使用 VPN 隔离，核心网使用部署在园区侧的专用 UPF，实现与其他 toB 业务及公网业务的隔离。

（3）电力虚拟专网方案

电力虚拟专网是基于运营商的 5G 公网架构，利用 5G 切片、定制 DNN、共享 UPF/MEC 等技术，提供公网专用、资源优先保障的电力 5G 虚拟专网能力。提供网络质量定制化、与其他公众用户业务逻辑隔离的专用通道服务。

该模式与公网用户共享基站和核心网，5G 设备部署在运营商机房，工厂业务数据和 5G 控制面信令均会离开工厂园区，适用于没有物理专用要求、成本较为敏感场景。

利用 5G 公网基站为车间内的生产设备提供无线连接，并通过网络切片实现工厂内部生产网络与公网的相互隔离。

表 2. 电力虚拟专网隔离方案

业务类型	方案			
	无线	传输	核心网	切片及 DNN
管理信息类业务	5QI 优先级调度	VPN 隔离	省级或地市级行业网共享 UPF	为管理信息 III 区和 IV 区分配专属的 S-NSSAI，并按需为业务分配专属的 DNN
互联网大区类业务	5QI 优先级调度	VPN 隔离	省级级行业网共享 UPF	为互联网大区分配专属的 S-NSSAI，并按需为业务分配专属的 DNN

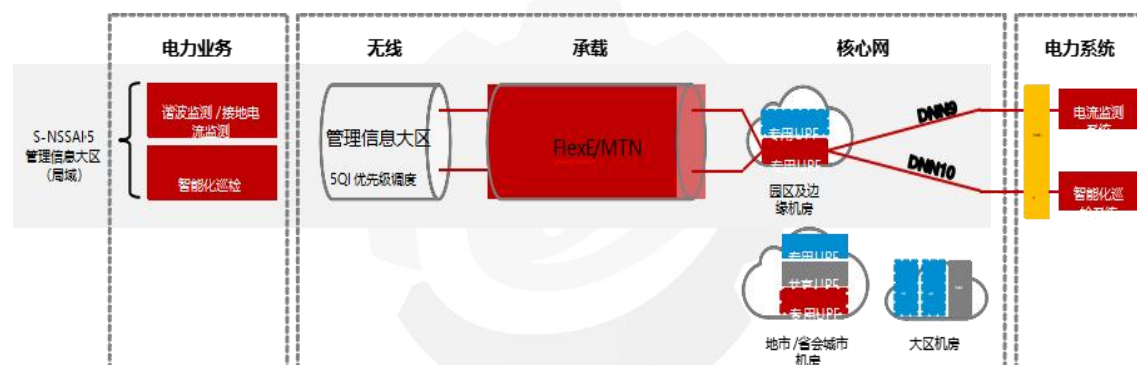


图 6. 电力虚拟专网方案

综上，构建基础设施时，需在企业内部选取适当位置部署企业自主可控的综合管理平台，统一纳管企业各分支机构内部署的 5G 专网网元，实现企业内部全体 5G 专网用户开户信息的及时更新同步。对于时延敏感类业务或高安全隔离类业务，应考虑在各生产分支机构支持全下沉部署全套 5G 核心网系统，保证其独享 5G 网络设施，从而提供较好的业务保障。

2、边缘计算部署

5G 专网模式中包括本地业务保障、数据不出园区、边缘节点等三类重要网络能力需求，可采用 UPF 作为边缘计算的用户面实现边数

据转发处理功能，边缘计算平台系统为边缘应用提供运行环境并实现对边缘应用的管理。在 5G 网络架构中，边缘 UPF 可实现园区内外业务分流，并可作为专网业务锚点 UPF 完成本地流量卸载，厂区内本地分流需要覆盖厂区内所有基站。用户面下沉作为实现 5G 边缘计算的前置条件，为电力行业提供了丰富、高效的网络使能，边缘计算（MEC，Multi-access Edge Computing，边缘增强型一体化 UPF，包含 UPF 和计算服务两部分功能，下同）通过在靠近数据源或用户的地方提供计算、存储等基础设施，基于 IT 架构和云计算的能力为边缘应用提供运行在移动网络边缘的、运行特定任务的云服务。除运营商 MEC 边缘计算外，可选择部署现场级边缘计算节点。

边缘计算将原有云计算中心的部分或全部计算任务“下沉”到靠近用户的网络边缘侧，使物联网设备不再需要将产生的数据都上传至遥远的云计算中心，较之传统的云计算架构，边缘计算具有低延迟、高安全性和低核心网负载的优势。

低延迟：在云计算架构中，物联网设备产生的海量数据都上传至云计算中心进行处理，网络带宽的限制会给核心网络带来巨大的负载压力，造成网络堵塞，导致较长的网络传输时延，该网络模式不能满足物联网应用的高实时性需求。比如，无人驾驶需要每一个动作都在毫秒级时间内之内完成。边缘计算通过将云计算中心的计算和存储能力“下沉”到网络边缘侧，使用户的服务请求可以在网络边缘侧进行处理，保障了处理的实时性。

高安全：物联网设备产生的数据通常包含用户的隐私数据，将这

些数据上传至云计算中心会增加泄露用户隐私的风险。在边缘计算中，用户的数据在本地设备或边缘节点上进行存储和处理，避免了隐私泄露问题。同时，边缘计算在边缘设备和云计算中心之间分配存储处理和应用，黑客攻击只会使单个设备或边缘节点上的本地数据受到破坏，而不会导致整体数据遭到破坏。边缘计算是分布式架构，具有更高的可靠性和容错性。

低核心网负载：随着爆炸式增长的物联网设备及其产生的海量数据，将这些数据都上传至云计算中心会导致核心网负载过重，引起网络堵塞。而在边缘计算中，本地设备收集的数据可以在本地进行计算分析，或者在本地设备上对必须上传至云计算中心的数据进行预处理。较之原始数据，预处理之后的数据要比其小得多。

3、网络管理服务系统

网络管理服务系统是电力内网进行智能化运维和管理的综合平台。在电力企业内部搭建网络服务与管理系统，对工厂内网进行智能化运维和综合管理，实现网络运维管理的可视化、网络与业务协同的智能化、告警处理的及时化、网络升级的联动化，使企业网络管理人员可以根据企业需要对业务及网络进行端到端监控，管理接入网络的用户，动态调配网络资源，及时发现并跟踪网络故障等，做好日常网络运维工作。网络服务提供商可根据使用权限，通过系统进行网络远程维护、升级、故障处理等，降低网络运维管理成本及复杂度。

5G 专网网络管理服务系统以数字化、智能化的方式满足用户自助运维管理需求，在可观、可维、可管三个维度不断深入，提供递进

式服务。

可观方面：网络管理服务系统通过对无线网、核心网、传输网、MEC、专网 CPE 等各类专网设备信息进行聚合，实现 5G 专网端到端网络运行一点可视，针对电力场景提供专属网络监控模板，并提供网元级、用户级、电力业务级的 SLA 实时监控。

可维方面：用户可通过一键检查功能迅速了解网络服务质量与问题点；使用自助拨测与端到端故障定界功能，精准定位业务应用数据传输问题范围，实现快速排障。除此之外，网络管理服务系统还提供网络质差风险预警和网元/用户/业务级自助重保监控能力，为电力用户提供智能化自助运维手段。同时，用户还可通过 5G 网络管理服务系统获取服务支撑，包括满足业务咨询、一键报障等需求。

可管方面：网络管理服务系统可对工业内网、专网终端、无线网、核心网、MEC 等设备节点进行端到端网络管理，支撑电力用户实现数字化集约管理和跨设备联动配置。

4、业务系统建设

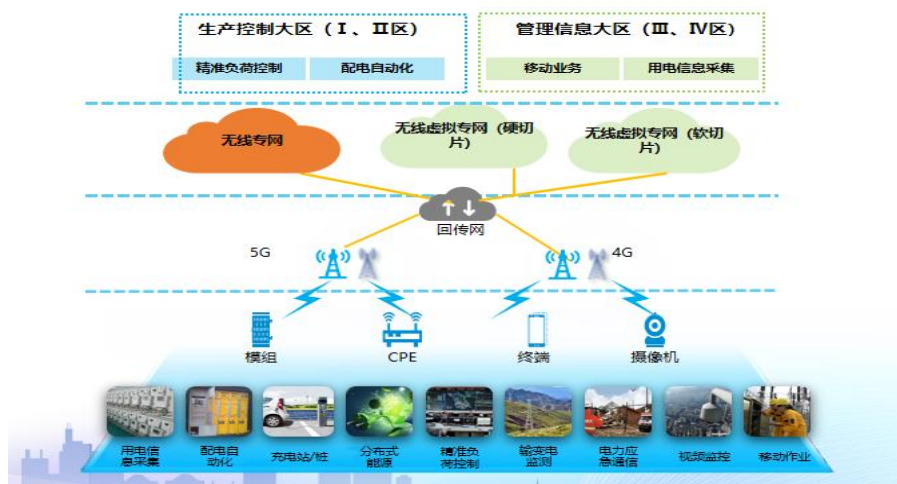


图 7. 5G 承载电力业务系统示意图

5G 技术高速率、低时延高可靠以及海量连接的新型特点可为新型电网的通信系统提供新的技术支撑。整体来看，电力 5G 业务主要分为控制类和采集类两大业务类型，遵循电力安全要求，电力 5G 业务可以安全分区为粒度，分为 5 类：生产控制大区（安全区 I）、生产控制大区（安全区 II）、管理信息大区（安全区 III）、管理信息大区（安全区 IV）、互联网大区。电力业务场景丰富，各大区内可包含多种电力 5G 业务场景，各分区典型业务示例如下：

表 3. 电力行业各安全分区业务示例

电力业务分区	典型业务举例
生产控制大区（安全区 I）	精准负荷控制、分布式电源、配电自动化、分布式馈线自动化、配网差动保护、配网 PMU、高级计量等
生产控制大区（安全区 II）	
管理信息大区（安全区 III）	无人机巡检、机器人巡检、配电房综合监控、台区配变监测等
管理信息大区（安全区 IV）	
互联网大区	电动汽车充电桩等

（三）厂区现场升级

1. 现场装备网络改造

目前，电力工厂内仍有许多关键设备、控制系统等尚未实现联网功能，这导致设备的运行状态、系统的使用情况以及物料信息无法及时获取。这不仅造成了生产资源的浪费，也降低了生产效率，使得运营管理变得粗放。为了解决这一问题，电力工厂可以利用 5G 技术进行现场网络化改造。对于电力工厂内的固定设备，如发电机组、变压器、开关柜等关键设备，由于它们没有移动需求，可以采用有线网络

方式进行连接。这样可以确保数据传输的稳定性和可靠性，便于实时监控设备的运行状态和性能参数。而对于有移动需求的设备，如巡检机器人、无人机、移动式监测设备等，则可以采用 5G 无线网络方式进行连接。5G 网络具有高速、低时延、大连接的特性，可以支持这些设备的实时数据传输和远程控制，提高电力工厂的自动化和智能化水平。

（1）电力 5G 工厂现场网络优化

5G 工厂的建设，为电力行业在发电、输电、变电、配电和用电各环节提供了强大的网络支持，实现了现场网络的优化和智能化升级。现场网络优化的方式有以下几种：

（1）发电环节网络优化

在发电环节，可以充分利用 5G 网络的高速率、低时延特性，对厂区内的发电设备进行网络优化。通过部署 5G 专网，实现发电机组、控制系统等关键设备的实时数据采集和传输，确保发电过程的稳定运行和高效管理。同时，可以利用 5G 网络实现发电设备的远程监控和精准控制，提高发电效率和设备利用率。

（2）输电线路智能巡检

在输电环节，可以借助 5G 网络的实时通信能力，实现输电线路的智能巡检。通过部署无人机、机器人等智能巡检设备，利用 5G 网络进行实时数据传输和分析，及时发现线路故障和隐患，提高输电线路的安全性和可靠性。此外，5G 网络还支持线路监测数据的实时回传和远程监控，为输电线路的运维管理提供有力支持。

(3) 变电站无线接入

在变电环节，可以采用 5G 无线网络接入技术，实现变电站内部设备的智能互联。通过部署 5G 基站和无线终端，实现变电站内各设备之间的实时数据交换和协同工作，提高变电过程的自动化和智能化水平。同时，5G 网络还支持变电站与外部系统的数据共享和通信，提升整个电力系统的协同效率。

(4) 配电网覆盖提升

在配电环节，可以着力提升配电网的覆盖范围和通信能力。通过优化 5G 网络布局和增强网络信号覆盖，实现配电设备的全面接入和实时监控。利用 5G 网络的高速传输特性，实现配电数据的快速回传和处理，为配电网的优化调度和故障处理提供有力支持。

(5) 用电设备互联互通

在用电环节，可以利用 5G 网络的广覆盖和高速率特性，实现用电设备的互联互通。通过部署智能电表、智能终端等设备，利用 5G 网络进行数据采集和传输，实现对用户用电行为的实时监控和分析。



图 8. 电力行业各环节 5G 网络支撑示意图

(2) 电力 5G 终端改造

电力终端设备广泛分布于发、输、变、配、用、储等各生产环节，

用于直接实现数据采集、信号传感、指令控制等业务功能，终端类型包括生产作业终端、采集终端、传感终端、控制终端、智能业务终端等，边端设备节点分散、规模庞大。当前电力行业已实现配电自动化三遥、精准负荷控制、分布式电源、用电信息采集、视频监控与在线监测、安监与应急、输变配无人机巡检等 5G 网络支撑业务覆盖，同时针对新型电力系统建设中涌现的新需求和融合化改造也在持续推进过程中。

电力 5G 终端包括 5G 工业网关、5G DTU 配网终端、5G 摄像机、5G 无人机、5G 电力融合终端等，形态丰富，可广泛应用于发电、输电、变电、配电和用电等电力生产环节，并根据业务需求，提供不同的应用服务和业务质量。

电力 5G 终端可分为独立式 5G 终端和嵌入式 5G 终端。独立式 5G 终端能够将 5G 信号转换成其他无线或有线信号，让更多设备接入网络，如电力 5G 馈线终端、5G CPE、5G 网关等。嵌入式 5G 终端将 5G 芯片模组集成到电力业务终端中，实现电力业务数据的 5G 传输，典型终端有 5G 配电终端、嵌入式 5G 巡检机器人等。

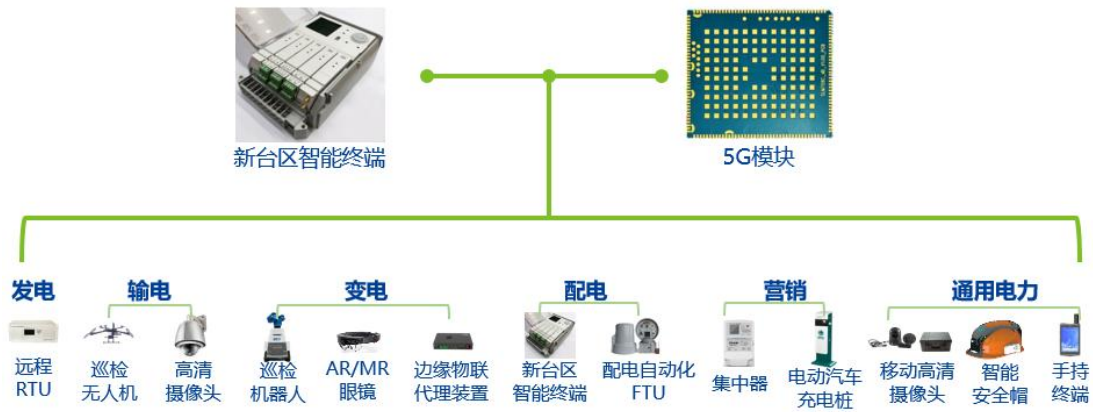


图 9. 电力 5G 终端示意图

在电力行业 5G 工厂建设中，许多设备或系统具备特定的部署、作业和性能需求，设备或系统可进行 5G 化改造的特征有以下三种：

（1）部署需求特征：具有可移动、灵活化等部署需求的设备

这类设备通常需要在不同的工作环境中进行快速部署和移动，以满足电力行业的灵活作业需求。传统的有线网络连接方式在这些场景下显得不够灵活和高效，而 5G 网络的无线连接特性则能够很好地满足这些需求。通过 5G 网络，这些设备可以轻松地实现快速部署和移动，同时保持稳定的网络连接，确保数据的实时传输和处理。

（2）作业需求特征：具有摆动、旋转等作业需求的设备

在电力行业中，一些设备在执行作业时需要进行摆动、旋转等动作，如巡检机器人、无人机等。这些设备的作业特点使得传统的有线连接方式难以适应，而 5G 网络的无线连接则能够提供更大的灵活性和自由度。通过 5G 网络，这些设备可以在执行复杂动作的同时保持稳定的网络连接，确保数据的实时采集和传输，提高作业效率和安全性。

（3）性能需求特征：数据流量大、高可靠、低时延等性能需求的设备或系统

随着电力行业信息化和智能化水平的不断提升，一些设备或系统对数据传输的性能要求也越来越高。它们需要处理大量的数据流量，同时要求数据传输具有高可靠性和低时延的特性。传统的网络连接方式往往难以满足这些高性能需求，而 5G 网络则能够提供强大的性能支持。通过 5G 网络，这些设备或系统可以实现高速、稳定的数据传

输，确保数据的实时性和准确性，为电力行业的决策提供有力支撑。

2. IT-OT 设备融合部署

在电力行业中，5G 工厂 IT 和 OT 应用融合化部署成为推动数字化转型的核心举措。在传统的电力企业中，IT 系统应用与 OT 系统应用分别由不同的团队进行建设和维护。IT 系统应用团队通常由具备计算机、软件等专业知识的人员组成，致力于实现企业的信息化，提升生产管理运营能力。而 OT 系统应用团队则主要由工业控制、自动化等领域的专家构成，专注于实现电力生产制造的自动化和智能化。

为加速电力工厂的数字化转型进程，应积极推进云网融合。通过实现网络资源、计算资源、平台资源等的横向打通，构建起一个高效、协同、智能的工厂生产运营体系。综合运用 5G、工业协议、大数据等新兴技术，建设针对电力行业工业场景下的设备数据采集、设备运维、统计分析等功能模块，实现电力行业生产数据孪生化、业务事件可视化和生产管理科学化，打造高效、智能、创新的智慧工厂应用示范企业。



图 10. 电力行业 IT-OT 设备融合部署示意图

将电表、传感器、DCS、PLC、DNC 等嵌入式系统、通过协议转换等，实现数据采集至设备管理平台。针对不同电力工厂、企业的不同的网络情况，依靠 5G 工厂，对不同企业的网络资源进行切片，实现工业协议的直接打通，改变传统其他企业用互联网作为数据传输的方式，实现工业协议与设备云驱动管理程序的直接连接。

5G 工厂 IT/OT 融合架构为电力行业提供了丰富的应用场景：利用 5G、工业协议、时序数据库等新兴技术，建设设备数据采集，设备运行监控，设备性能监控，设备点巡检管理等完整的设备管理功能，一次性补完企业的设备管理短板。依托 5G 网络，推动对所有设备进行广泛连接，对生产数据、业务数据、管理数据、运营数据进行全面采集，打破信息交互壁垒，从整体上统筹融合，将企业办公流、业务数据流、设备数据流、视频信息流、各类传感设备信息流等“人、机、料、法、环、测”环节连通起来，实现 IT 和 OT 深度融合。向下连接

发电、变电、输电、视频、消防、门禁、环测、定位、机器人、无人机、点检仪、对讲机等海量设备，实现各种设备的数据采集服务，实现设备远程控制；横向对接 DCS、SIS、MIS、HR、ERP、EMS 等业务系统数据，全面实现业务系统的互联互通，构建从设备、终端、网络、生产运行、经营管理的全要素连接全面感知的智慧电厂，支撑经营决策、运行维护、安全应急等深度应用，实现多厂区、多机组、多系统协同优化，支撑构建“集约协同、智能优化、无人干预，少人值守”的生产运营模式，实现管理最佳、效益最优、风险可控，让企业更安全、更高效、更环保、更智能。

3. 生产服务数智化应用提升

在电力业务场景中，随着电力行业向数字化、网络化、智能化方向持续发展，5G 工厂数智化应用提升变得至关重要。电力行业在追求高效、安全、可持续的生产运营过程中，对生产服务提出了更高要求，如生产安全、智能巡检、智能运维平、智能化制造、网络化协同、数字化管理等。

电力行业生产服务数智化应用提升包括以下几个方面：

（1）智能巡检

基于 5G、边缘计算、人工智能、视觉识别、UWB 等技术，以信息化手段辅助电厂日常工作，实现皮带机器人、配电房机器人、升压站机器人、监控摄像头、无人机、点检仪、对讲机、个人佩戴设备等各类智能化设备接入 5G 网络，通过远程操控巡检设备，对生产现场进行巡视和监控，对回传的视频、图片、声音等信息进行识别检测和分

析,有效提升巡检效率和准确率,降低巡检人员安全风险和人力成本。实现电力巡检少人化、无人化和智能化,在巡检过程中对设备状态、环境安全、人员行为、电子围栏进行实时监测和预警,确保电厂发现隐患的及时性,做到“早发现、早治理”,提高巡检效率和灵活性,降低人工误差和事故风险。

（2）智能运维

电力系统的发/输/变/配/用全流程连续性强,设备性能劣化及设备故障将对生产稳定性造成影响。基于 5G、人工智能、物联网、数字孪生等技术,通过在生产设备上部署传感器,实现生产设备数据感知与采集,通过生产设备数据信息分析挖掘,及时发现并修复设备异常及故障,保障设备生产的稳定性,降低维护成本。一是设备运行状态监测,通过对生产设备的实时运行数据感知和采集,实现设备状态智能监测、设备状态智能评价、设备健康状态全方位监测。二是智能故障诊断分析,通过对设备的环境、性能、状态等信息的全方位、多角度的设备故障诊断,及时发现设备运行中的潜在隐患,实现设备的智能预警与诊断,指导用户及时准确的定位问题和故障修复,保证电厂设备运行的安全性、可靠性。

（3）智能安全

基于 5G 网络、人工智能技术、大数据分析能力、智能化终端设备、UWB 技术、边缘计算、数字孪生等技术,集预案、视频、图片、语音、文字、位置等信息为一体,以电厂安全管理为基础,各子系统有机互动为特点的全方位、自动化、高精度的电厂安全状态掌控与高

效的电厂安全管理。将分散的各类安全子系统（如智能门禁、视频监控、智能消防、智能安防、人员定位、人脸识别、电子围栏等系统）进行有机的互连，综合处理各项厂区业务，从而实现智慧厂区的协调联动、安全防护。展示视频摄像头、温湿度探头、烟感等设备的监控告警信息，及时发觉电厂安全隐患（如可以对未戴安全帽和非法闯入的人员进行抓拍、追踪和报警）；同时利用人员定位及车辆定位技术，对外来人员进入重点施工区域进行报警提示并生成行动轨迹，对厂区各类施工车辆进行超速报警等，达到防微杜渐于无形中的效果，实现提供全方位、自动化、高精度的电厂全面安全管控，保障运行、检修、作业的安全性，避免安全事故发生。

（4）数字孪生工厂

基于 5G 网络，广泛连接工厂、厂区的各类传感器，进行各类数据采集和实时传输汇总。采用三维建模技术和数字孪生技术，将厂区的建筑、机组、设备及周边环境等真实环境和虚拟空间映射，搭建厂区级场景、机组级场景、系统级场景和设备级场景的数字孪生工厂，基于 5G 网络低延迟、高速率的特性，实现虚拟空间内设备物联、设备检测、生产运行、现场作业、故障感知、安全监管、经营仿真等智能化应用服务，让用户在办公室可以随时的、沉浸式的查看厂区建筑、机组、设备及周边环境每个空间细节，现场设备运行情况，通过定位设备位置，联动调取周边摄像头进行现场影像实时可视化监测，为用户提供全方位、自动化、高精度的安全状态掌控与高效的安全管理，有效提升管理效能。

在 5G 工厂的背景下，这些智能应用还可以通过与物联网设备的连接和协同，实现电力系统的实时监控和智能控制。不仅提高了电力系统的自动化水平，还能够更加精准地掌握电力系统的运行状态，及时发现和处理问题。

（四）关键环节应用

1. 发电领域关键环节应用案例

（1）融合 5G 物联网应用的智能电厂示范项目

1) 总体技术方案

通过数据桥梁联通虚拟电厂和物理电厂，在数据虚拟电厂环境中实现设备的监测、预警、诊断、试验，优化其运行状态。将最佳方案反馈应用在物理世界的设备操作上，全面提升电厂整体“智慧”能力。



旨在满足发电厂八大领域存在的需求痛点。



图 11. 融合 5G 物联网应用的智能电厂示意图

由于浙江省能源集团旗下有多座发电厂，因此智能电厂项目采用了“云边端协同一体化”框架。集团侧的工业互联网、赋能服务系统作为云端，提供数据统筹管理、模型训练、策略下发等服务。电厂作为边端，负责数据采集上传，并接受集团侧下发的模型、策略，并将模型部署到现场设备；同时也可利用现场实时数据，进行模型的修正和再训练。现场的 DCS、就地 PLC 等系统，作为端部，负责下装各类算法模型，根据模型计算结果，对现场设备进行实时优化及反馈。

“云、边、端协同架构”作为一种分布式架构，在安全防护上做到了：安全分区、网络专用、纵向隔离、横向认证；在系统资源分配上充分发挥了云端的大数据运算能力、边缘计算的数据快速处理能力，做到了资源优化配置，使系统算力得到更有效的应用。

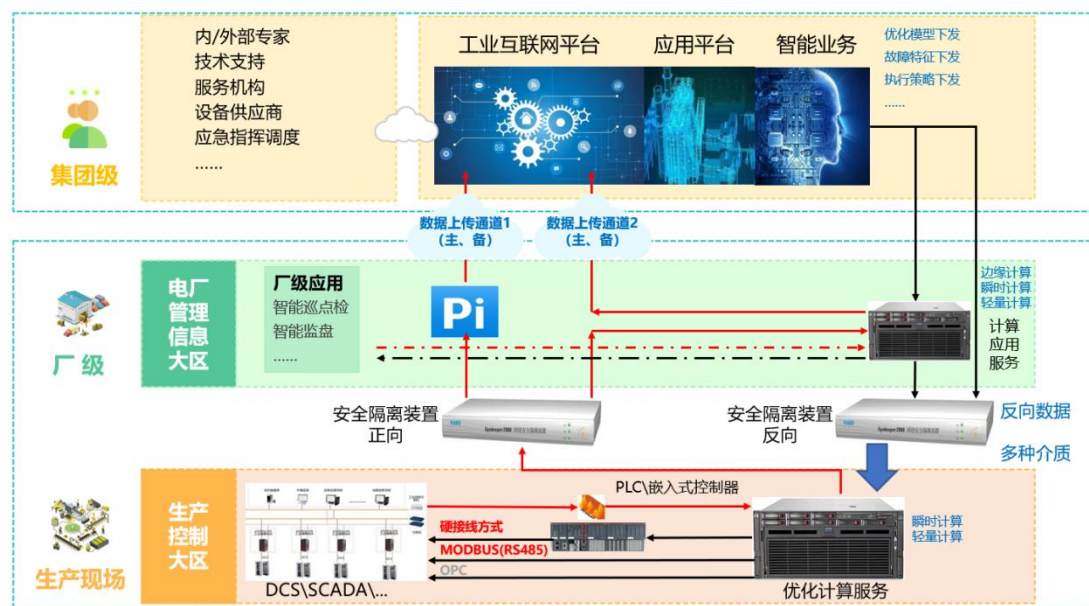


图 12. 智能电厂云、边、端协同架构示意图

而对于电厂来说，智能电厂项目就是充分采集现场的数据，利用云端的赋能服务系统和工业互联网平台，打造八大领域的智能化应用，提高电厂智能化水平。



图 13. 智能电厂技术架构示意图

在底层的数据传输，大多采用有线方式传输。但为了保证数据的多样性，提高大数据分析模型精度，在智能电厂建设过程中，台州第二发电公司采购研发了智能巡检机器人、智能无线感知系统、巡点检

智能终端等设备。这些设备可弥补现场固定安装的传感器的不足，进行灵活部署。为实现这些设备的数据的安全高效传输，台州第二发电公司与中国移动三门公司合作，实现了台州第二发电公司全厂室内外的 5G 信号覆盖。

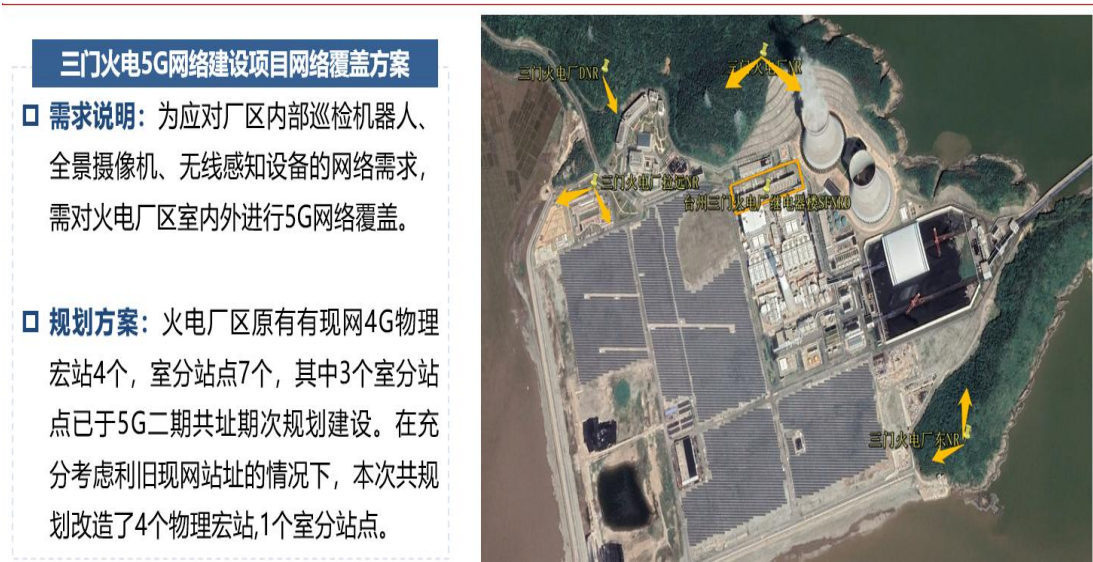


图 14. 三门火电厂 5G 网络建设方案

2) 5G 通信建设方案

本项目由平台出口路由器（防火墙）新增 3 条 100Mbps 线路接入至营运商 IP 专用承载网，并在 IP 专网内通过物联网专用 MPLS VPN（使用物联网公用 VPN：CHINAMOBILE_VIP_IOT）与接入汇聚机房的 MEC 设备打通，接入汇聚机房需要打通 MEC 到核心网 5G、到基站的路由。MEC 侧 UPF 做业务分流，应用通过（UL CL）分流策略将业务分流道凤鸣山园区机房，其他用户的业务走 5GC 出口。接入汇聚机房需要打通 MEC 到 5GC 的 MANO、EMS，负责本地 MEC 下沉的 UPF 的实例化部署及网管，本方案总体组网拓扑示意图如下：

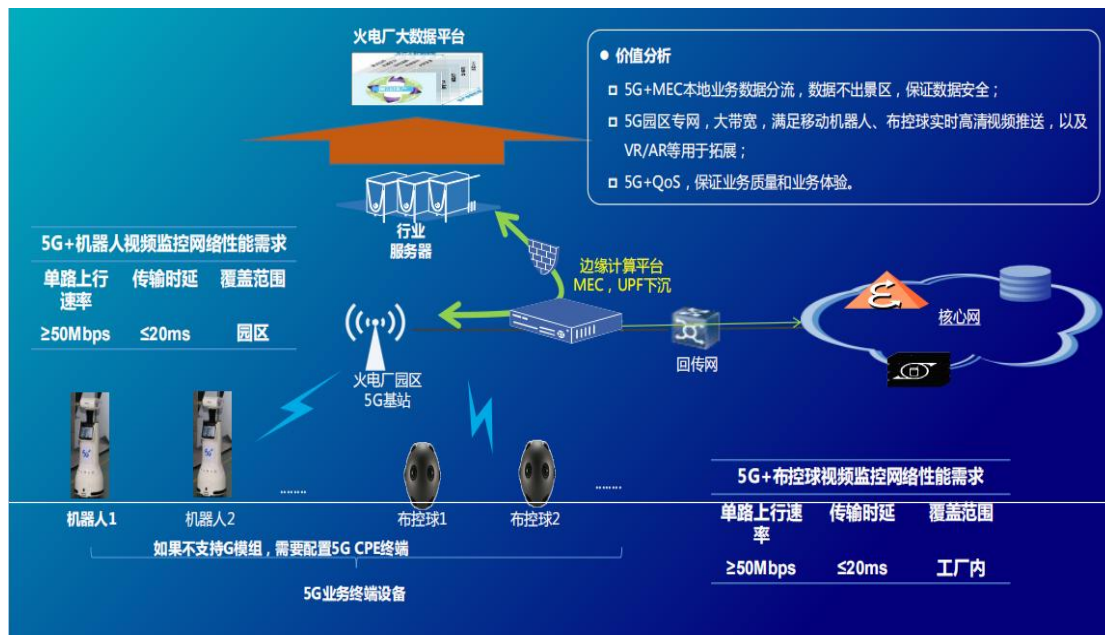


图 15. 智能电厂 5G 通信建设方案

具体 5G 组网方案：本方案涉及 IP 专用承载网接入、5G 专网构建以及 MEC 设备分流策略配置三大部分。5G 基站接收厂区设备数据，并通过物联网专用 VPN 传输至 MEC，再由 MEC 侧 UPF 做业务分流，实现厂区专用设备和其他终端设备的数据隔离，实现网络切片，厂区专用设备数据再通过数字电路传输至火电大数据平台出口路由器（防火墙）。

方案特点：本项目为台州市首个应用了 5G 专网及 MEC 分流技术的项目，采用 5G SA 组网下的专用 DNN 网络保障数据本地分流，在无线边缘网络就近部署计算、存储、分流、大数据分析等用户所需的服务和云端计算功能，实测端到端延迟从 60ms 降低至 10ms。目前台州第二发电公司已成功开通具备 MEC 功能的 5G 专卡，依托大带宽网络，有效回传实时机器人巡检画面、设备信息、环境信息等数据；同时，结合 MEC 能力实现企业生产和管理数据的本地分流，保障了企业数据

的安全性和私密性。

电厂内部应用场景众多，不同业务有着不同移动性，安全、时延、可靠性等要求，难以通过一张网络来满足。针对发电厂多样化应用场景，本方案构建一个敏捷、自动化、智能化的端到端切片编排管理系统。通过切片技术，将一个物理网络切分成提供不同功能的逻辑网络，用于满足不同的应用场景，确保数据流通的安全性和高效性。



图 16. 智能电厂 5G 切片方案示意图

3) 5G 应用场景

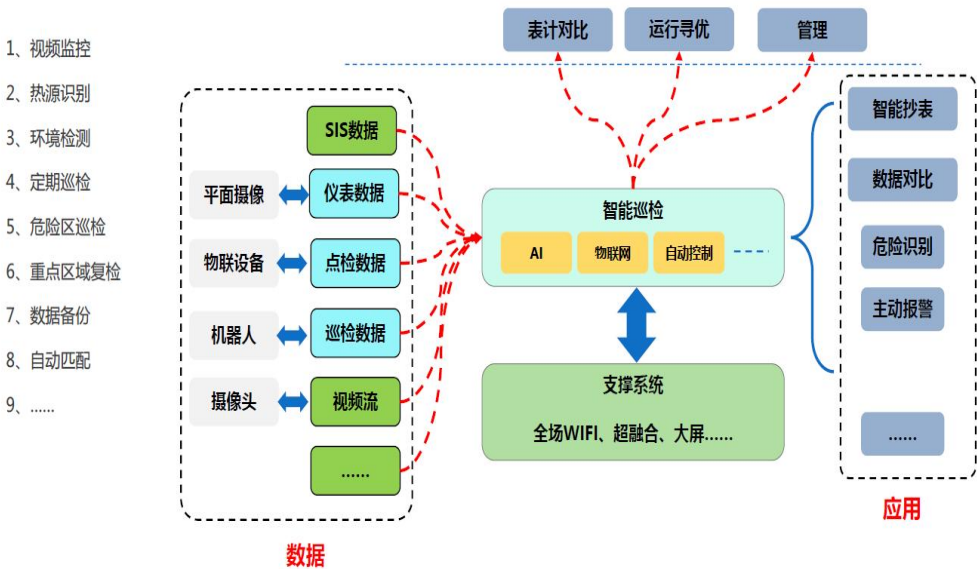


图 17. 智能电厂 5G 应用场景示意图

目前台州第二发电公司智能电厂项目中，共有智能巡检机器人、智能巡点检系统、智能两票系统、智能无线感知设备系统等项目使用 5G 网络进行数据传输。

其中智能巡点检系统、智能两票系统的使用场景为通过智能终端，与管理四区的系统后台、ERP 等系统进行通信，不涉及跨区通信。而机器人、无线感知设备的数据需要进行跨区传输，因此为保证数据安全，并缓解云端压力，采用了分区部署、边缘计算的部署方式。现场设备通过无线连接 LoRa 网关、5G 网关等设备，将传感器信号发送至网关，利用 5G 网关通过厂内 5G 信号进行远程数据传输，传输至 5G 专用机房，再从 5G 专用机房通过有线的形式传输到感知区交换机和接口机，进而传输至计算框架服务器内。具体的网络架构如下：

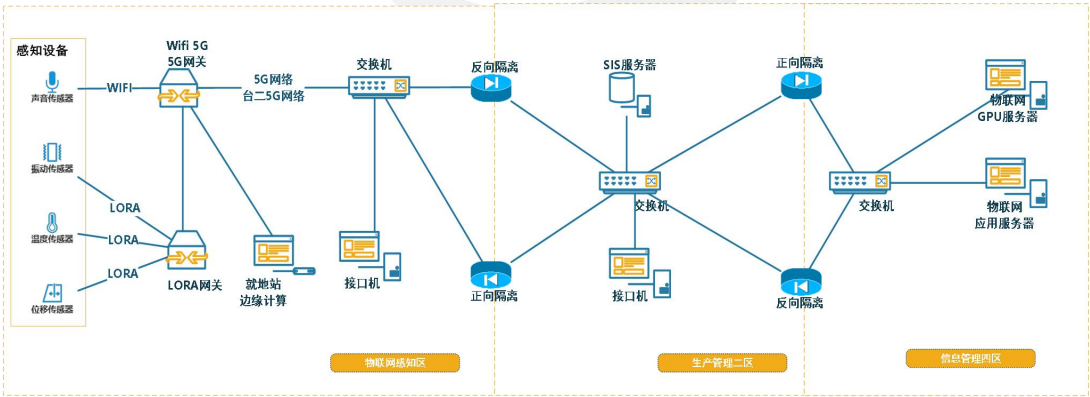


图 18. 智能电厂 5G 网络架构示意图

4) 案例实践效果

在 5G 网络的支撑下，各个智能电厂子系统可以数据实现了互联互通，避免了信息孤岛的产生。全厂数据可以实现同步采集、同步分析，真正做到了全厂大数据的实时挖掘。



图 19. 智能巡检机器人应用示意图



图 20. 智能手持终端应用示意图

巡检机器人、智能感知设备、智能手持终端等收集到的数据、视频流可以做到低延迟、大容量实时传输，大大完善了现场生产管理数据库。同时以 5G 技术、物联网技术、智能传感器技术、信号分析技

术以及深度学习技术为基础，建立起开放式的设备管理和故障诊断专家数据分析平台；运用工业物联网技术实时监测设备运行状态，利用 SIS 数据、物联网数据、巡点检数据等信息，进行设备状态、报警、数据、分析等功能展现，发现异常实时报警，实现设备故障提前预警和智能诊断，实现生产设备的“物联”和“人联”，提升生产管理效率，降低风险，充分体现了发电企业的安全生产理念，必将进一步改善发电行业的整体形象。

(2) 水电站碾压车/平仓车无人化应用案例

在水电站大坝建设过程中，碾压混凝土施工是水库大坝工程中一项非常重要的施工环节。目前人工驾驶的碾压车需依赖人工统计碾压往返次数，以确定作业是否符合技术标准要求。对碾压车进行无人化改造后，可利用 5G 本地专网在现场采集碾压车定位及视频等数据，并实时回传至后台，由系统自动识别处理碾压作业过程是否符合要求，显著降低人员投入。



图 21. 水电站无人化应用示意图

为保障稳定作业，无人驾驶碾压车要求现场无线网络提供大于 200Mbps 的上行传输能力，端到端平均时延小于 20ms，且支持数十台车辆及其他关联设备稳定接入。

1) 露天土石方运输车网联化

在水电站大坝建设过程中，需完成大量露天土石方运输工作。相关运输车辆的网联化改造，可显著提升土石方运输的作业效率。

露天土石方运输现场地形高低起伏，山体遮挡多，且由于采面定期爆破，易使地形频繁变化，从而为作业区域实现低成本有效无线覆盖带来挑战。通过对 5G 本地专网进行优化配置，可以较低成本对作业区域实现无死角覆盖，消除网络通信盲区。



图 22. 土石方运输车网联化示意图

网联化露天土石方运输车通常装备多个高清摄像头，用以支持远程操控。为保证稳定可靠的远程操控，需利用 5G 本地专网提供大于

300Mbps 的上行传输能力，且支持多摄像头并行传输时延稳定性达到 $10\sim 30\text{ms}@99.99\%$ 。

露天土石方运输作业区域面积较大，在运输车辆行驶过程中需进行跨小区切换。为确保运输作业的顺畅进行，5G 本地专网需进行优化，支持基站快速稳定切换。

2) 运营数据采集及控制

在运营期，电站多依赖 SCADA 系统及 DCS 系统进行电站运营控制。其中，SCADA 系统主要负责数据采集和监控，DCS 系统侧重连续控制和复杂算法。利用上述系统，可对电站关键设备进行监测，实现故障诊断和预警，减少设备故障风险，提高电站运行稳定性和可靠性。

5G 本地专网可支持将终端设备联入网络，承载多协议数据采集及控制指令下发功能。利用多借口 5G 终端，可实现现场多种设备接入 5G 网络。

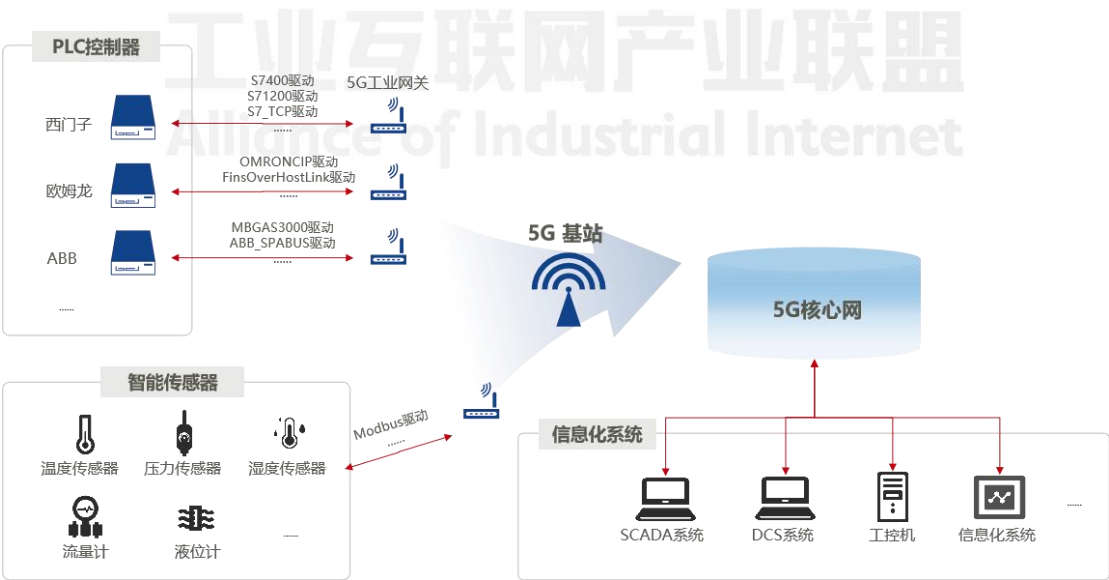


图 23. 运营数据采集及控制示意图

3) 5G 天车远程控制



图 24. 5G 天车远程控制示意图

水电站地下厂通常使用天车完成大型设备（如发电机组、变压器等）的起重运输，高空作业（如设备安装检修）配合及物料转运等作业任务。由于天车作业区域面积大、作业轨迹不固定、吊运品类多，无法利用有线网络或 Wi-Fi 网络实施天车作业远程精准操控。

利用 5G 本地专网，并结合 AI 视觉识别技术，可实现天车系统联动控制，提升天车作业效率及安全性。5G 本地专网可确保天车在长距离移动过程中，始终保持稳定的网络连接，不会出现漫游中断及时延抖动激增问题。

天车作业场景多为平面库区或通道，环境复杂，且吊运货物种类繁多，作业动作存在不确定性，现场单靠人员管控安全难度大，因此易出现安全事故。通过新增天车可视化操作管理，利用 5G 本地专网高速上行及实时数据传输能力，可实现天车远程控制功能，提高天车吊运操作人员安全性。

（3）阳江核电 5G 专网应用案例

1) 频谱规划方案

在核电厂区内实施分区规划，高低频组网、双频冗余、超级上行策略，满足不同区域大容量、高并发、超远覆盖等差异性需求。在核电厂区内采用高中低三个专用频率，与公众网络隔离，规划高频用于室外基础覆盖及室内基础覆盖；中频用于生产区高热点区域双频组网，采用超级上行补充容量，核岛等部分合路 DTW 系统区域的室内覆盖，以及海域超远覆盖；低频用于核岛室内双频冗余组网，以及隧道口以内与进山口以内区域（含水口冷源区域）及海域区 NB 覆盖。

2) 总体设计

总体设计采用基于 SA 架构的 5G 独立专网，无线网及核心网均私有化部署，考虑阳江核电站对 5G 专网可靠性要求，采用中国电信如翼模式，将专用轻量化 5G 核心网下沉，部署于厂区机房，采用专用 5G 基站和专用载波；部署专用 IMS 实现 VoNR 语音通信；部署短消息中心与平台实现短消息收发；部署集群调度平台实现集群调度通信。

核心网主要设备/服务器（5G 核心网、IMS、短信中心、综合网管、网络安全设备）在 AD 楼机房、AW 楼机房部署，实现异机房 1+1 热备。实现用户数据与公网数据完全隔离，提供可靠的业务隔离和业务质量保障，保证数据专用和安全。

在数据中心内部部署核心交换机、核心网、负载均衡，组成整个网络的支撑网，并与现网的行政电话和应用系统打通，在网络升级的过程中，与现有 IT/CT 系统具有良好兼容性以及可扩展性，利于降低

园区内的网络运维成本、提高运营效率。

在各业务节点机房部署传输接入设备、在核心机房部署传输汇聚设备组成网络的承载网，具备容灾安全保障，通过提供硬件备份、链路容灾及网元级容灾等不同程度的网络容灾保障，在网络单点故障情况下保障业务连续性。

在整个网络的关键位置部署日志审计和防火墙，保证专网能在接入安全、数据传输安全、数据防泄露安全、恶意攻击抵御等方面具有全方位防护能力。

基于以上网络建设相应网络管理系统和业务系统，可对 5G 专网有一定的自配置、自管理能力，可对专网内的用户成员进行开通和管理。同时可对网络运行状态进行查询、网络性能进行监控，网络故障能自主告警。

核心网：支持 5G 终端鉴权、安全认证、机卡绑定，移动性管理等功能；包含 AMF/SMF/AUSF/SMSF/NEF/NRF/UDM/PCF/AF/UPF 等遵循 3GPP 5G R16 协议标准的网元设备，并支持相关网元功能要求；核心设备的 UPS 供电后备时间在 6 小时以上，核心服务器对时支持阳江核电时钟系统接入。

IMS 平台：容量不少于 2 万户，支持语音/视频通话每秒并发不少于 2000 路。支持标准 IMS 的终端接入，支持统一的北向协议接口，并支持联动更新/升级；支持黑/白名单设置，对不同号码设置不同呼叫权限；支持特定号码的监听、录音、压缩和存储功能；支持本地或远程设备维护管理能力；支持系统平滑扩容、升级兼容性能力。包含

CSCF/MGCF/IMS-MGW/MRFC/MRFP/BGCF/HSS/PDF/SGW 等功能。提供基于 5G 的 VoNR 接入能力。

短消息中心：包含 IP-SM-GW（短信网关）、SMSC（Short Message Service Center 短消息中心）等，提供短信存储转发能力。短信发送能力不低于 1000 条/秒,短信接收能力不低于 500 条/秒;支持与中广核集团外发短信平台对接。

传输及承载网：采用“汇聚/接入”的架构实现业务综合承载。

无线网：部署 5G 宏站、杆站、数字化室分、无源室分等无线基站对各区域进行 5G 网络覆盖。在隧道口以内与进山口以内区域（含入水口冷源区域）区域覆盖 4G 基站，保证 NB 信号覆盖。

网络安全体系：考虑到本次项目建设中的“核电厂应急安全、厂址安全、运行安全、人员安全的核安全”等建设内容受到损害时可能造成的影响，建设阳江核电厂的安全等级应设为三级。阳江核电 5G 专网研究项目网络安全设计参考《网络安全等级保护基本要求》中三级保护要求为控制要求，并结合《核能行业网络安全等级保护实施指引》第三级要求进行设计，围绕“一个中心、三重防护、三个体系”为核心指导思想，构建集防护、检测、响应、恢复于一体的全面的安全保障体系。

集群对讲调度平台：“集群对讲调度平台”是面向应急处置、作业调度和移动执法场景的可视化指挥调度平台。具有集群调度、集群分组、一键呼叫、调度台组呼、单呼和全呼业务、话权优先级设置、迟后接入、调度台用户状态显示、录音、回放、数据上屏、临时群组

创建、图片、文件、信息传送等功能，可基于用户级别、群组 and 权限进行管理。对前端进行调度和资源整合，实现指挥调度的协同能力，提供低成本、高效率、专业级的指挥调度、协同作业的平台。

综合网管平台：综合网管平台（即 5G 定制网端到端运营平台）是面向全行业、全场景提供数字化、可视化 SLA 以及端到端切片管理、场景化业务监报告警、故障定界定段等功能的全方位运营保障解决方案，提供了融合、智能、敏捷、开放的端到端可视化运营能力。

综合网管平台实行分权分域管理，用户角色分权（即菜单权限）、操作员分域（即分支机构），根据登录账号所属的角色和分支机构展现不同的菜单功能和不同的资源情况，平台采用多因子校验登录，并有操作审计功能，敏感信息脱敏展示、加密存储，满足安全等保要求。

平台支持部署在企业园区内，提供围绕园区业务的网络运营和运维能力，分为采控层、能力层、应用前台三大部分。其中，采集层实现应用和云网端到端的感知、采集、控制指令下发，包含无线、承载、核心网、MEC、终端、业务/网管系统）等 6 大采控插件。能力层通过跨域多维 AI 建模与关联，实现各类企业应用的 SLA 实时监测和异常一键定位，提供多种可视化运营能力。

定位平台：阳江核电园区规划建设通过 5G 定制网实现室内外信号覆盖服务，采用北斗+5G+蓝牙信标技术，对园区 2 万人员进行位置管理：室外通过北斗定位接口，室内通过 5G/蓝牙信标等接口，实现在定位平台展示人员的位置，并提供提供地图服务、定位中心、接口网关、数据服务、设备服务、监控服务、系统管理、日志中心等功能。

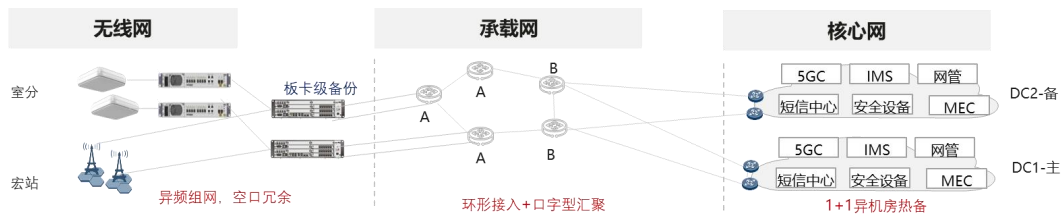


图 25. 阳江核电站 5G 专网应用示意图

3) 方案详细设计

核心网系统架构采用 NFV/SDN（网络功能虚拟化/软件定义网络）等技术实现数据连接和业务，AMF/SMF/AUSF/SMSF/NEF/NRF/UDM/PCF/AF/UPF 等遵循 3GPP 5G R16 协议标准的网元，控制平面（CP）网络功能之间基于服务化的交互。基于 SA 架构部署，支持增强型移动宽带、低时延高可靠和大规模物联网等 5G 典型场景。同时核心网兼容 4G 处理能力，用于支持 NB-IoT 功能。

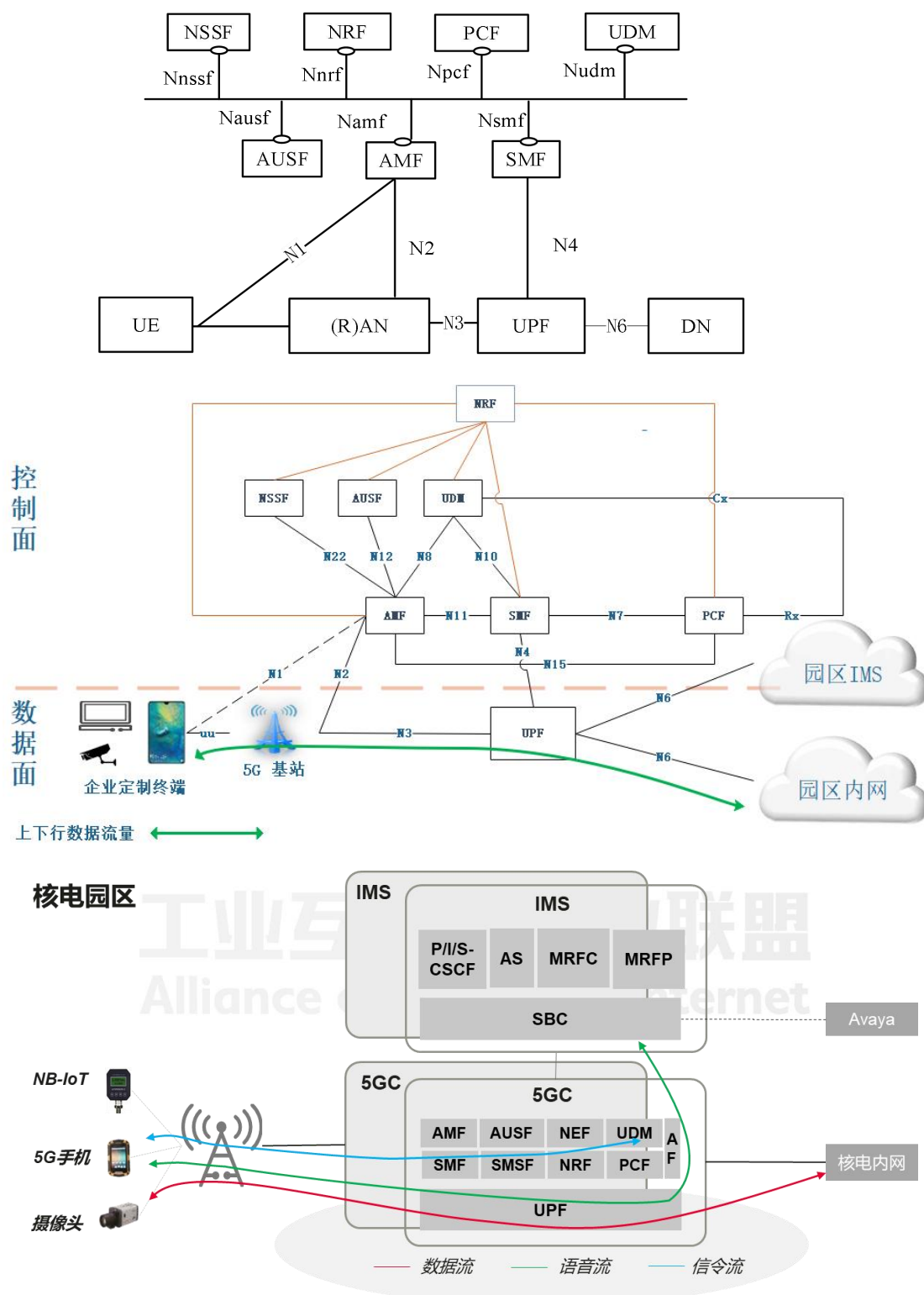


图 26. 阳江核电站 5G 专网建设方案

本项目通过在核电站双机房 1+1 部署 5GC+IMS，实现独立 5G 专网，该基础方案可以实现 5G 专网安全隔离和数据不出厂区，独立部

署不受外网影响实现孤网可运行。

1、独立 5G 专网实现安全隔离

独立 5G 专网核心网采用专用 5GC、IMS 实现核心网隔离，核电站区域内无线接入采用专建专享基站，配置专用频率，实现专网安全隔离。与公众网隔离，不受外部网络影响，实现孤网可运行。

2、数据不出厂区

厂区部署专用基站，核心网整体下沉到核电站厂区机房，实现终端用户数据只在核电站厂区 5G 基站、承载网接入点、专用 UPF 和核电站专网内部网络之间流转，形成一个本地专用网络，达到数据不出厂区的目的。

3、物理安全，支持高可靠高可用

支持系统 1+1 热备部署。多层可靠性机制保障业务 99.999%可靠性。

2. 电网侧关键环节应用案例

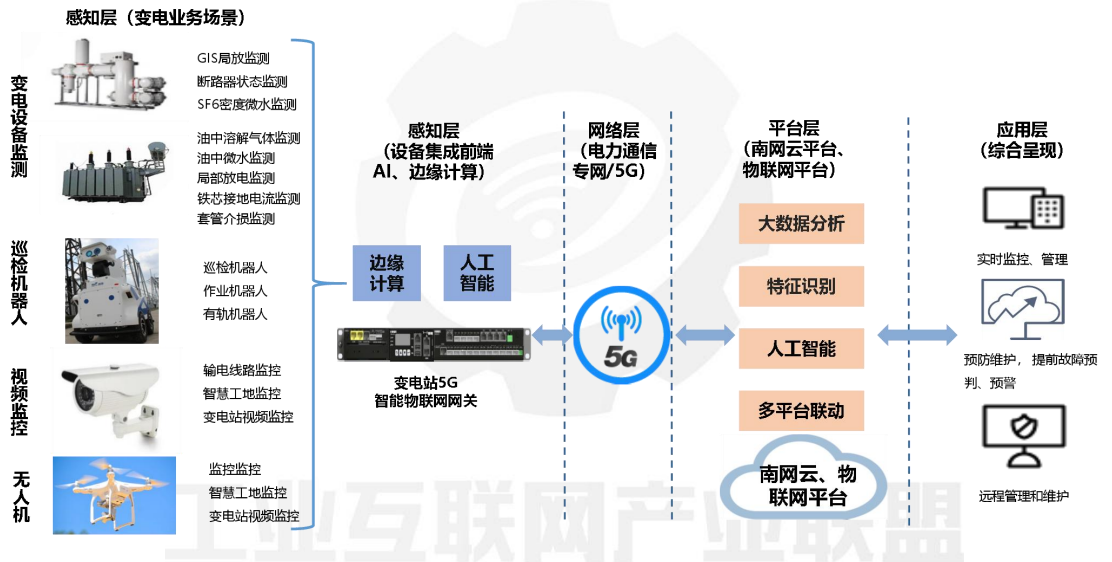
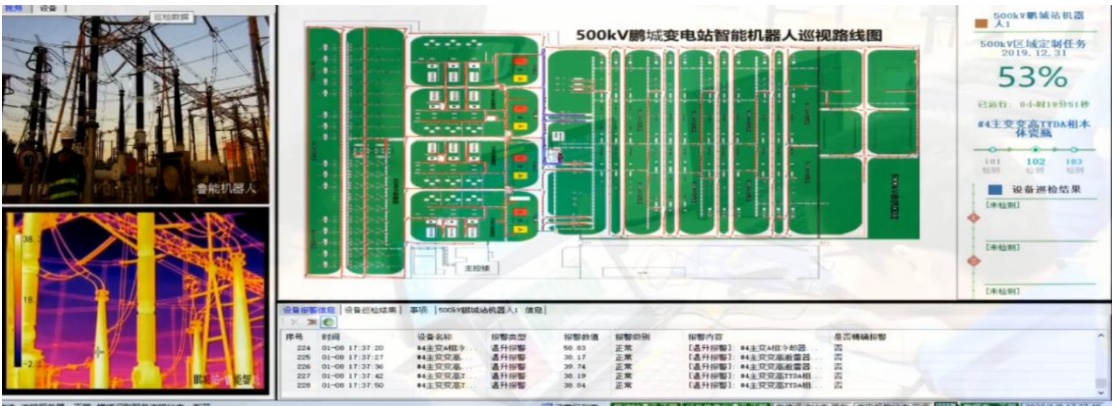
（1）电网侧 5G 广域网应用案例

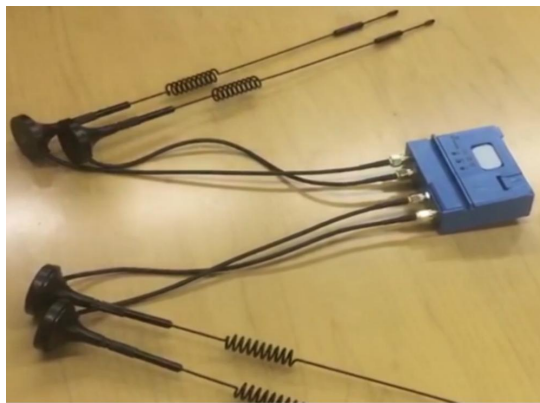
（一）应用模式

南方电网按照电力 5G 广域网顶层架构方案，基于中国移动 5G SA 切片网络，携手中国移动、中兴、华为等合作伙伴在某供电区域建设了涵盖发、输、配、变、用、综合 6 大类、51 个业务场景的 5G+智能电网应用示范区。

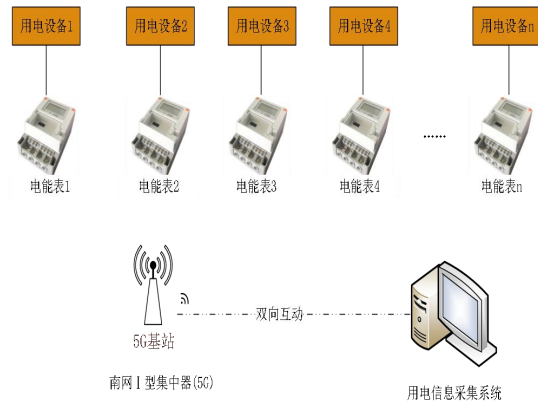
目前示范区内已经完成了输变电设备在线监测、配电自动化、配网差动保护、配网 PMU 等生产控制类业务，以及输电线路状态在线监

测及视频监控、巡检机器人、智能配电房等管理信息大区业务的试点运行。





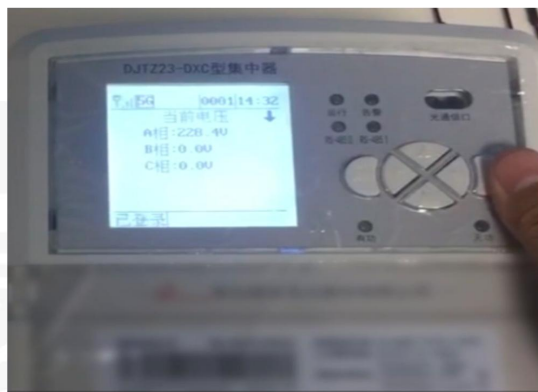
5G通信模组



系统实测环境拓扑图



三相电表



I型集中器

图 27. 电网侧 5G 广域网应用案例示意图

目前各业务试点整体运行情况良好，打造了广域环境下 5G 电力虚拟专网业务安全应用的创新模式。

（二）应用成效

1. 可靠的安全隔离性能

基于 5G 电力虚拟专网顶层架构,通过在无线侧空口 RB 资源预留、传输侧配置 FlexE 硬管道、核心网侧开通电力专用切片、部署电力专用的 UPF+MEC 设备,实现了电力业务与其它公众用户、行业用户业务的隔离,确保承载生产控制类业务的 5G 切片具备端到端隔离性能,改善了 4G 网络下只具备逻辑隔离条件的掣肘,充分满足电力业务承载的安全性要求。

2. 稳定的超低时延和精准授时性能

基于 5G 的超低时延和精准授时性能，满足了配网差动保护及配网同步相量测量业务的承载需求。根据在示范区的测试情况，广域条件下配网差动保护业务平均时延达到毫秒级，延时抖动导致的最大延时大幅降低，差动保护采样幅值误差均大幅减小，PMU 授时精度显著提升，充分满足了业务承载需求。

3. 完善的业务安全监视/态势感知性能

基于运营商网络能力开放，电力搭建了 5G 网络管理平台，实现了对电力 5G 业务、网络切片性能、电力终端的统一管理，解决电力 5G 应用场景丰富多样，网络组网架构复杂多变的背景下，对网络灵活管控的需求、网络通道管理的需求、海量终端监控的需求，降低网络运维复杂度，保障电力 5G 应用安全、高效、可靠运行。

（2）电网侧 5G 局域网应用案例

（一）应用模式

国网河南电力携手河南移动、华为等合作伙伴，针对某换流站提高智能化运维及管理水平的需求，在共建共享的基础上实现了该换流站 5G 网络全覆盖，并于 2020 年在站内部署电力专用 MEC，搭建了特高压 5G 园区专网。

该换流站内需要通过 5G 实现无线接入的业务主要为中安全业务和通用安全业务，例如：现场作业管控终端、设备移动监控、单兵作业终端、智能巡检机器人、灭火机器人、电力无人机等，为满足各类业务的安全接入与应用效果，采用了如下 5G 园区专网安全应用模式：

（二）应用成效

1. 安全的数据隔离保障

换流站 5G 基站与 MEC 均为电力专用，通过搭建 5G 局域虚拟专网，保证电力业务数据不出园区，达到了较高的安全隔离效果。同时业务数据采取身份认证、报文加密等技术，通过安全链路进行传输，保障数据在网络传输过程中难以被窃取和篡改，满足了中安全业务的安全防护要求。

2. 高性能的业务应用体验

5G 园区专网可灵活进行无线侧帧结构配置，保证上下行速率配比，提升网络 QoS 保障性能。换流站连续两年在年度检修工作中，利用 5G 大带宽能力保障现场作业管控、安全布控球等设备的实时传输，实现多个作业面、多位作业人员的实时管控，安全管控效率显著提升。根据站内测试情况，终端数据经 MEC 本地卸载后直接进入服务器的单向平均传输达到了超低时延的通信性能，机器人、无人机等终端的移动视频传输质量及摄像头操控效果显著提升。

3. 灵活的业务可靠接入

MEC 灵活的数据分流转发及卸载功能，解决了各类业务接入不同位置系统主站的传输问题，省级部署业务系统的终端通过 MEC 分流后传输至省电力公司系统主站，其余本地部署的业务均通过 MEC 实现数据的本地卸载与接入，保证电力数据不出园区。5G 园区专网实现了站内无线业务的灵活接入与转发，通过边界安全隔离和数据加密传输，保障电力业务不出园区、数据信息不泄露，增强业务安全可靠。

（五）网络安全防护

1. 电力业务安全需求分析

根据《电力监控系统安全防护规定》（国家发改委 2014 年第 14 号）、国家能源局《关于印发电力监控系统安全防护总体方案等安全防护方案和评估规范的通知》（国能安全[2015] 36 号文）的相关规定及要求，从电力业务安全需求出发分为高安全业务、中安全业务、通用安全业务三种模式。

高安全业务是系统与智能电网的电力调度生产直接相关，涉及到实时控制类及感知采集类业务，如安全自动控制系统、电能量计量系统等业务。高安全业务系统需要大区互联电网安全运行智能控制系统具备故障感知、状态感知、协调控制等功能。该类业务安全防护需求较高，需通过无线虚拟专网和防火墙接入信息内网，并增加安全接入区，主站新增安全接入区（含正反向隔离、前置机、安全接入网关）。

中安全业务是指管理信息安全区的相关业务，其安全等级仅次于高安全区业务。中安全业务系统主要应用于智能电网生产管理和办公自动化，与生产或管理类的个人桌面计算机相关，如电力调度运行管理系统、资产管理系统等业务。中安全业务分布广泛，人机互动频繁，该类业务安全防护需求：需通过无线虚拟专网和防火墙接入信息内网，应防止网管系统被恶意攻击，包括利用网管软件漏洞、弱口令、策略配置不当，导致网管系统被非法获取权限，从而获取配置数据或非法篡改网络配置。

通用安全业务是指互联网大区业务，其安全等级最低。通用安全

业务系统主要面向互联网应用，以移动应用为主，如即时通信软件、培训教育等业务。该类业务安全防护需求不高，通过互联网通道实现接入。

2. 电力行业 5G 工厂安全参考架构设计

电力行业 5G 工厂在支撑智能电网应用发展过程中，首先需要遵循国家能源局关于电网安全防护“安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证”的基本原则，其安全架构包括“云、管、端”三大层级，涉及终端安全、管道安全和平台安全和管理四个方面。

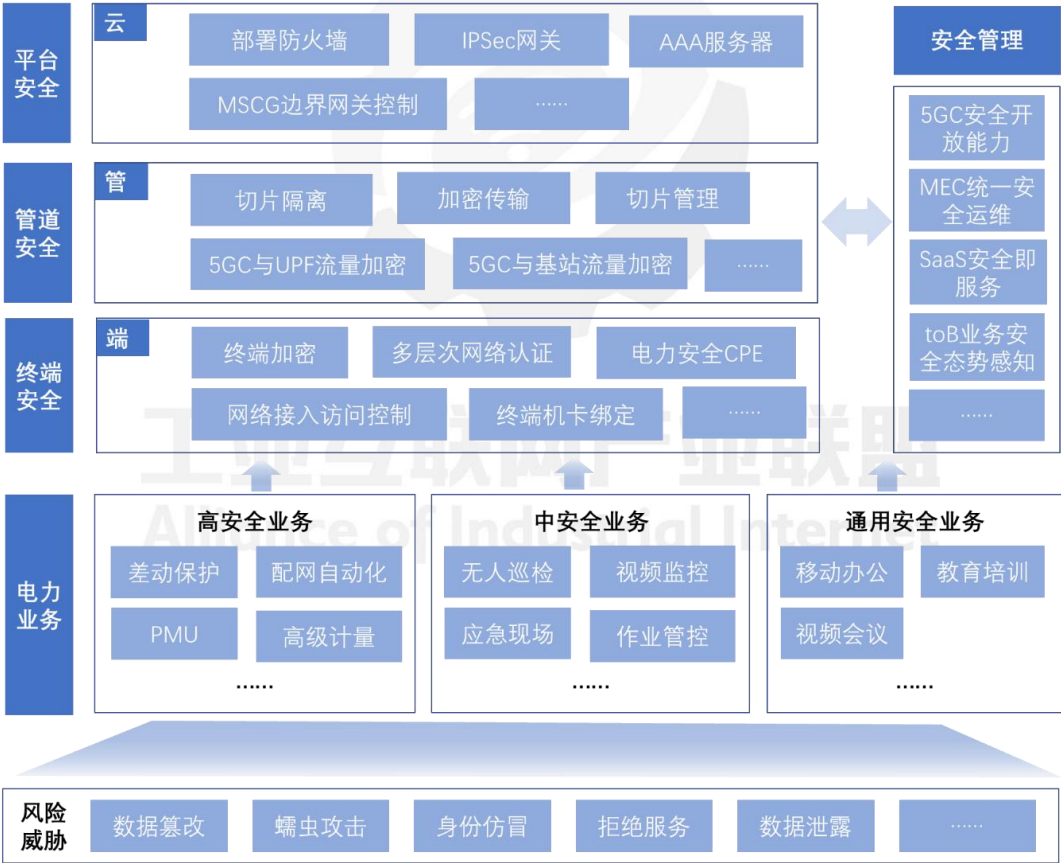


图 28. 电力行业 5G 工厂安全架构图

电力行业 5G 工厂总体安全参考架构的核心在于针对 5G 安全风险威胁构建终端、管道、平台等层面的安全防护能力以及 5G 网络基础设施的安全管理能力，以此来满足不同安全等级的电力业务的需求。

1) 终端安全：可集成电力定制化安全模块，支持非对称加密技术进行终端加密，实现主站对终端的身份鉴别和报文完整性保护。对重要终端，可采用双向认证加密技术。此外，对于特定的重要业务，还可以采用机卡绑定、终端 DNN 与网络切片绑定等安全策略。

2) 管道安全：重点是利用 5G 高强度安全隔离的网络切片技术和可定制切片管理，为不同安全等级电力业务制定不同的切片策略，提供不同的专网安全保障服务。

3) 平台安全：基于不同的电力业务设置不同安全服务区，放置二次认证 AAA 服务器，防止恶意终端或第三方应用对平台的攻击。

4) 安全管理：通过运营商将 5G 网络安全能力共享给电力行业的应用，对终端、切片、MEC、专用 UPF、安全防护设备等进行统一监控，实现全天候全方位网络安全态势感知。

3. 电力行业 5G 工厂安全参考方案

针对电力业务安全性需求，遵循“安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证”基本防护策略要求，在端侧、管侧、云侧等纬度，为不同安全等级的电力业务提供不同的安全能力组合及参考方案，具体如下：

(1) 端到端切片安全隔离，提供按需保障的 5G 安全通道

根据电力业务要求，需在不同安全分区或同一安全分区不同业务之间采用不同强度的隔离手段，例如针对高安全业务采用达到或接近物理隔离的隔离强度，针对中安全业务采用接近物理隔离或逻辑隔离的隔离强度，针对通用安全业务采用逻辑隔离的隔离强度等。由此需

要在 5G 电力虚拟专网的接入网、传输网、核心网等环节采用不同的隔离手段来实现灵活的横向隔离。

1) 接入网隔离

接入网隔离调度方式主要通过 5QI (5G Quality Identifier, 5G QoS 标识符) 优先级和 RB (Resource Block, 资源块) 资源预留, 其中 RB 资源预留是 5G 区别于 4G 的重要特性。根据电网不同业务对隔离性的不同要求, 可以采用以下三类隔离方案:

① **完全共享模式:** 无线资源与其他用户完全共享, 部分由 5QI 根据优先级进行调度, 每个切片不直接参与资源的调度, 由一个公共的调度来负责。

② **部分独占模式:** 无线资源主要由 5QI 根据优先级进行调度, 并由 PRB 资源预留技术, 承载独占切片业务。

③ **完全独占模式:** 无线接入网使用独立的硬件资源和频谱资源, 具备最高的安全性。但是建网成本会大幅增加, 满足于超高的物理隔离需求。

2) 传输网隔离

5G 的无线接入网和核心网之间的传输网络可通过网络切片进行业务隔离。不同切片网络的转发面彼此隔离, 而隔离性取决于采用不同的转发面切片技术。切片技术分为硬隔离切片和软隔离切片。

① **硬隔离切片:** 在 L1 或光层, 基于物理刚性管道的切片技术。如: FlexE 技术、OTN 技术、WDM 技术。

② **软隔离切片:** 在 L2 或以上, 基于统计复用的切片技术, 如:

基于 SR、MPLS-TP 的隧道/伪线技术，基于 VPN、VLAN 等的虚拟化技术。

在实际应用中，也可以采用混合硬隔离切片、软隔离切片的方案，硬隔离切片方式保证业务的隔离安全、低时延等需求，软隔离切片方式支持业务的带宽复用。

3) 核心网隔离

核心网隔离方案有完全共享、部分独占和完全独占三种模式，可依据电网的不同业务类型进行选择：

- ① **完全共享模式：**与 2/3/4G 网络的“一条跑道、尽力而为”一致，适用于对安全无特殊要求的公众网普通消费者业务；
- ② **部分独占模式：**少量网元功能独占与大部分网元功能共享相结合，平衡了安全性与成本，主要适用于高、中两大类安全类型业务。
- ③ **完全独占模式：**等同于建设一张完整的电力行业专用核心网，具有最高的安全性，建设和运营成本也最高，适用于需要超高安全隔离性而对成本不敏感的特殊业务。

(2) 多层次认证体系，满足纵向认证要求

根据电力业务要求，需提供终端接入认证、二次认证等纵向认证措施，以确保终端接入主站的合法性。

1) 多层次鉴权认证体系

基于 3GPP 5G 标准认证体系提出的多层次鉴权认证体系，在标准 3 层认证基础上，可增加电力侧的认证需求，避免非法卡/终端接入电力系统/切片，对电力业务主站发起网络攻击。

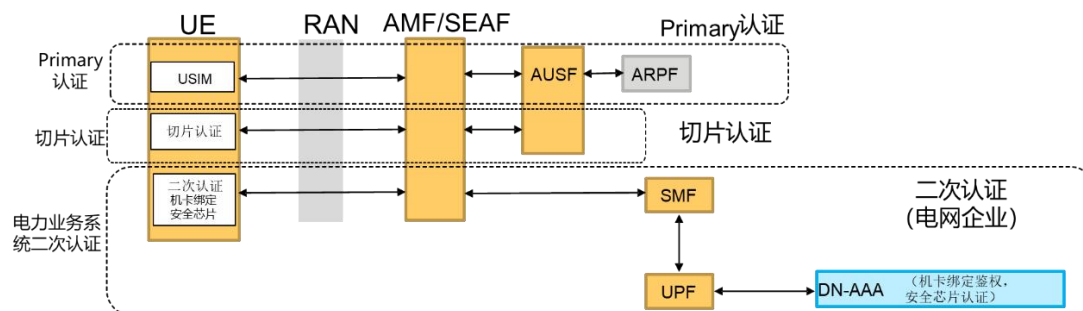


图 29. 多层次鉴权认证体系示意图

具体手段可包括：

机卡绑定：核心网侧将终端 USIM 卡的 IMSI 与设备 IMEI 进行绑定认证，如果两者不匹配则拒绝接入网络；

二次认证：基于 3GPP 二次认证架构及标准协议完成终端到 DN-AAA 服务器之间的终端二次鉴权认证，二次认证失败后则不允许终端访问电力业务；

安全模块认证：终端集成国密型号的安全模块，与中心侧 IPsec VPN 安全网关之间建立 VPN 数据传输通道，实现网络层双向身份认证。

2) 增强认证的 5G 电力通信终端

随着移动通信、集成电路等技术快速发展，通信终端的体积不断变小，其对安全设备的尺寸也提出了更高的要求，为了满足电力应用系统中终端侧安全防护要求，可研发适合内嵌于终端内部的工业级安全模块，为终端和中心之间的通信线路提供安全传输保障，易于与现有通信装置进行一体化整合设计。

(3) 云边协同的安全应用，支撑安全防护及监测

针对云边协同的安全应用，需根据 5G 安全开放能力实现对 5G 电力虚拟专网的 MEC 安全防护、安全态势感知，并可针对部分业务开展

5G+区块链的安全认证模式探索。

1) 基于基础设施和 APP 业务的 MEC 安全防护

电力 MEC 中包含连接（UPF，运营商可信域）与计算（MEP+第三方 APP，运营商不可信域）两部分，可采用如下手段提升电力 MEC 安全性。

① 针对 MEC 平台能力开放的特性，部署 VFW（虚拟防火墙）等虚拟化安全组件对来自边缘 APP 的访问进行过滤。APP 与 MEC 平台之间可按需进行访问控制及数据传输安全机制，如机密性、完整性保护及防重放攻击。通过漏洞及端口扫描手段来关闭 MEC 平台不必要的端口和服务。

② 提供 APP 全生命周期安全防护，保障业务及应用安全。对 APP 使用的资源进行隔离，对 APP 镜像和镜像仓库进行完整性和机密性、访问控制保护。另外，对 APP 提供包括身份安全、镜像安全、入侵检测等的安全防护。

2) 全天候全方位的 5G 网络安全态势感知

电力企业通过部署网络安全态势感知系统，集成用户侧安全设备内置的安全探针，下发安全策略，上报安全设备信息，可以缩短 5G 网络的威胁发现时间，提升安全事件的响应速度，保障网络安全“规划、建设、运营”三同步。

（4）数据加密传输

针对电力行业 5G 工厂的数据加密传输需求，可将 5G CPE 终端与国密型号的安全模组一起实现 IPSec VPN 隧道，支撑终端安全接入认

证及通信加密。对于重点防护的调度中心、发电厂、变电站，由于其数据的高度敏感性，应当设置经过国家指定部门检测认证的电力专用纵向加密认证装置或加密认证网关及相关设施，实现双向身份认证、数据加密和访问控制。加密认证网关除具有加密认证装置的全部功能外，还应实现电力系统数据通信应用层协议及报文的处理。

此外，5G 通信机制要求用户数据必须先经过 UPF 再进行转发，从而实现了从终端至基站至 UPF 的传输隧道，且不暴露在公网上，保障了用户通信数据安全。

四、电力行业 5G 工厂实施建议

（一）工厂建设参考

电力行业工厂建设通常涉及如下典型步骤：

（1）需求分析

对现有生产流程和业务进行全面分析，识别哪些环节可以受益于 5G 技术，例如孤岛数据采集分析、生产现场监测、远程监控、自动化控制、预测性维护、生产能效管控等。

（2）5G 网络规划

与运营商、设备商、第三方集成商等合作，规划好如何利用 5G 公网，确保覆盖整个发电厂区，变配电场所、输电线路、用电区域等。同时考虑频谱使用、网络架构、基站部署、核心网下沉等。

（3）设备智能化升级

更新生产设备，使其具备 5G 通信能力，或者通过部署 5G 工业网关，使生产设备接入 5G 网络。这可能涉及传感器、控制器、机器人

等的升级或替换。

（4）边缘计算部署

在工厂现场部署边缘计算节点，以减少延迟，提高数据处理速度，并优化数据安全。边缘计算节点位置的选取则可结合实际需求灵活部署。

（5）平台建设

构建 5G 工业互联网平台，整合设备数据，实现生产过程的可视化管理、数据分析和智能决策。

（6）应用开发

针对具体业务场景开发相应的 5G 应用，典型应用有智能电网监控，5G 高带宽和低延迟特性使得实时监控输电线路、变电站和配电站成为可能，提高故障检测和响应速度；智能分布式能源管理，支持分布式能源（如太阳能、风能）的并网管理，智能抄表或用电计量，5G 连接大量智能电表、传感器等设备，实现能源使用情况的实时监测和管理实现清洁能源的高效利用和优化；调度远程控制与自动化，5G 支持远程操作和控制，如自动巡检机器人、无人机对电力设施进行检查，以及远程开关断路器等、无线 SCADA 系统，5G 可以替代传统的有线 SCADA 系统，提高数据传输效率和灵活性；基于 AR/VR 的远程培训，利用 5G 的高速传输能力，实现远程的虚拟现实（VR）培训，让员工在安全环境中学习操作技能；基于 AI 的故障预测，通过 5G 网络收集设备的运行数据，利用 AI 算法进行故障预测，减少非计划停机时间和维修成本；应急响应与恢复：在自然灾害或其他紧急情况下，

5G 的快速部署能力可以支持临时通信网络建立，保障电力抢修指挥的顺利进行；车载通信与移动服务：对于电力公司的车辆和服务团队，5G 可以提供高速移动通信，提升现场服务效率。网络安全保护，5G 网络可以支持更高级别的加密和身份认证，增强电力系统的网络安全。

（7）试点验证

在小范围内进行试点项目，验证技术可行性，优化系统性能，并收集反馈。

（8）规模化部署应用

在试点成功后，逐步扩大 5G 技术的应用范围，实现全域覆盖。

（9）安全与合规性检查

确保 5G 网络符合电力行业安全标准和法规要求，如网络安全法、电力设施保护条例等。

（10）持续优化与维护

随着技术和业务的发展，不断更新和优化 5G 网络及应用，确保系统稳定运行并适应未来的需求变化。

值得注意的是，电力 5G 连接工厂的建设模式也引起业界广泛关注并期待尝试。一方面，目前电力企业与运营商深化 5G 网络技术的战略合作是“双碳”目标下构建新型电力系统的可行且重要途径。自建专网将导致电力企业增加大量的资产投资、需要储备相当数量的技术力量、同时国家大力建设的公共基础设施也将被浪费，可以充分利用双方的基础设施如：数据中心机房、杆塔、光缆等，进行共享共建，使得公共基础设施资源得到最大程度的利用，互为支撑。而与运营商

进行网络的合作，比如电力网络切片，电力企业仅需要搭建切片核心网、UPF 等平台，保障数据安全性和网络可靠性，能大幅减少了资产投资。

另一方面，随着业务需求优化和长期运营成本的考量，特别是电力行业事关国民经济发展的方方面面，5G 电力网络的运行安全至关重要。专网频段的 5G 电力专用网络可以提供更高的安全性，防止外部干扰和攻击，确保电力系统的安全运行。专用网络不受 5G 公网的拥塞影响，能够保证关键任务的稳定通信。专网可以针对电力行业需求优化配置，提供更低的延迟，这对于实时控制和故障响应至关重要。

（二）技术发展方向

电力行业可以通过不同类型的通信网络进行互联，但日益多样化的电力需求需要一个更精密、更具时空包容性和创新性的系统。5G 切片技术特点与电力通信网络需求高度契合，与智能电网性能高度匹配。5G 工厂或电力 5G 网络能承载起电力行业多样性的需求。同时，在相对完善的电力 5G 网络以及工厂的基座基础上，还可以纳入新技术，更好地满足并支持新型电力系统的演进。

（1）挖掘并提升电力 5G 工厂的价值

当前 5G 赋能电力系统转型升级的相关研究和应用落地仍在发展阶段，主要体现在传统电力业务优化和数据驱动的价值创造上，未来需要探索 5G 技术进入电力行业核心生产环节，通过 5G 赋能探索电力行业新质生产力的提升，催生新产品、新业务、新服务，为行业带来实质性价值。

（2）夯实 5G 电力基础底座，提升通信保障能力

目前 5G 增强技术 5G-A 正在开发中，这些技术会优化网络架构，提高带宽与吞吐率，特别是上行能力，增强网络切片功能、提升定位精度、挖掘节能效率和降低终端模组成本等，5G 网络向更高性能、更绿色化方向发展演进。

（3）充分融合其他新技术拓展网络确定性、智能化水平

5G 将与 AI、大数据等技术进行深度融合，跨界整合的速度将进一步加快，这种融合将为 5G 产业生态带来更加开放和活跃的发展态势，推动电力行业促进生产和管理系统之间的互联互通，形成协同工作模式，降本提质增效。

（4）探索更高效的电力终端纳管机制

5G 电力通信接入设备分为 5G 电力通信终端和 5G 电力网关。电力 5G 终端设备是指内嵌 5G 通信芯片/模组、具备直接接入 5G 网络能力的设备。随着 5G 通信芯片/模组价格的降低，新型应用的上线，更多电力终端设备会直接接入 5G 网络。目前更多电力终端设备通过 5G 电力网关/CPE 接入 5G 网络，这就涉及对网关或 CPE 及其下挂电力传统终端的统一纳管。对 5G 网关或者 CPE 的纳管借助于终端管理平台等系统可以做到，但进一步纳管下挂传统电力终端则是未来趋势，以便远程监控终端，跟踪设备状态，及时发现和解决问题、规划升级、替换和维护计划，减少现场支持的需求，降低运维成本。

（5）深化 5G 电力网络的共管共维

电力 5G 连接工厂或专网与电力企业的生产管理等任务密切结合

且互相依赖，电力企业客户对 5G 网络有强烈的管理和维护的诉求。但 5G 网络的技术门槛相对较高，5G 电力网络异构复杂，既有与 5G 公网资源或企业私有资源共享协同的考虑，又有专用专管且互相安全隔离的特征，还有 5G 专网和业务系统之间自动化协同的需求，导致了 5G 专网的管理和维护是完全不同于 5G 公网由运营商独立提供面向公众客户的尽力而为的管理和维护模式，有大量的管理和维护服务可能通过人工等进行信息传递。因此由 5G 专网服务提供方（例如运营商）和电力企业一起，通过共管共维平台来共同管理和维护 5G 专网是更加可行的模式，迫切需要通过深化网络运维来探索双边共管共维各种界面的划分，同步制定专网共管共维相关标准。

