

1 5G 超低延时在工业网络 PLC 控制应用测试床

1.1 引言/导读

江苏亨通光电股份有限公司成立于 1993 年，于2003年8月在上海证券交易所挂牌上市（SH.600487），总部位于中国苏州，全国布局13个省市，拥有海外10大产业研发基地，在俄罗斯、中东、南非、南美、东南亚等30多个国家和地区设立营销和技术服务机构，业务范围覆盖150个国家和地区。亨通光电拥有完整的光电线缆产业群：自主产权的“光棒-光纤-光缆”光通信产业链及全系列“FTTX”的ODN研发与制造，引领光网城市的全系列产品产业群；海底光电复合缆及海底光缆、海底超高压电力缆、全系列的电力电缆产业群；机车、轨道交通、海洋工程、新能源等领域用电气装备电缆产业群等。此外，在2019年中国企业500强中，亨通排名第187位，在中国民营企业500强排名更是达到了54位。

对于传统的工业园区进行智能化改造，网络部署是基础，无线网络的部署相对于有线光纤光缆的部署是最经济有效的手段，5G技术较好的契合了工业应用对于无线网络的需求，工业企业引入5G网络部署是未来发展的必然方向。亨通光电“5G+工业互联网”智慧园区通过铺设5G网络基础设施，并有效结合工业互联网平台的建设，开展“5G+工业互联网”融合创新应用，为国内5G网络在工业制造业企业的建设及应用的普及，树立示范、试点的标杆。

此次项目的业务创新性：

（1）率先在通信线缆行业建设“5G+工业互联网”智慧园区

亨通光电率先建立通信线缆行业基于“5G+工业互联网”智慧园区。通过5G技术与工业互联网平台的融合应用，利用5G的高速率、低延时等特点，实现通信产业链的上下游整合，积累大量的APP、机理模型、微服务等。通过5G网络与边缘计算及人工智能等技术的融合应用，能够整合亨通光纤园区内各个生产车间、运行模块的资源，提升企业安防级别及其他园区内公共服务，打造数字化、网络

化、智能化以及可复制的智慧园区。

（2）自研3款5G工业终端

自主研发了三款工业级5G智能网关：5G低速智能网关、5G高速智能网关以及5G智慧型智能网关。

5G低速工业互联智能网关是专为取代LTE智能网关而研发。主要用于平时数据量不大，实时性要求也不高。但是在出现紧急情况时能够满足一段时间内大数据量的传输要求。

5G高速工业互联智能网关主要为传输数据量大，延时要求高场景而开发。5G高速工业互联智能网关具有Wi-Fi6接口、以太网接口、语音接口并具有5G上联和10GPON上联功能的综合性网关。为智能工厂提供高达10G以上的高速数据接入互联网。同时Wi-Fi6为企业局域网高速互通提供技术保障。Wi-Fi Mesh功能为智能工厂采用灵活的无线组网提供了可能。另外5G和10GPON主备份链路设计为智能工厂上行链路保持通畅提供了保障。

5G智慧型工业互联智能网关是专为人工智能机器人设计的专业性网关。5G物联网型网关具有双CPU，拥有丰富的物联网接口。不仅具有网关AP的功能，而且能给智能设备提供相应的语音输入、测距、定位等辅助性功能。另外强大的FPGA处理能力还能给智能设备提供前端决策能力。

（3）5G超低时延PLC控制应用实现5G工业典型应用场景的落地实施

在5G+工业安防、5G+移动生产管理、5G+智慧协同、5G+工厂数据集成、5G+物资、车辆定位、调度、5G+能耗管理、5G+智慧仓储物流、智能桁架、机器人等方面打造典型应用场景，覆盖核心生产环节，相关典型应用具备可复制可推广条件。

1.2 关键词

5G+工业互联网，5G超低延时，PLC控制

1.3 测试床项目承接主体

1.3.1 发起公司和主要联系人联系方式

江苏亨通光电股份有限公司 轩传吴 15722617890

中国移动通信集团江苏有限公司苏州分公司 盛忠 13912720901

1.3.2 合作公司

中国移动通信集团江苏有限公司苏州分公司

1.4 测试床项目目标

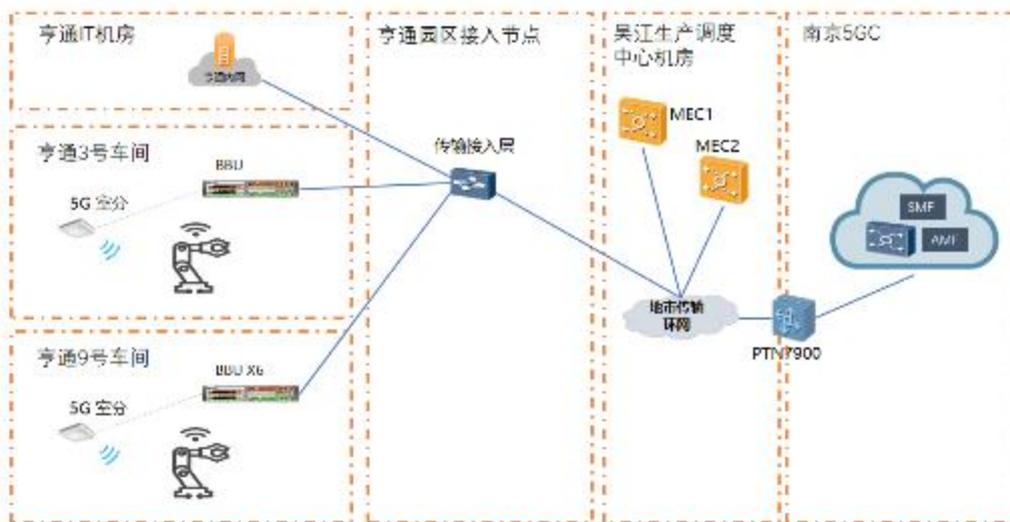
重点验证5G网络中低时延低抖动在工厂生产实际PLC控制应用。为满足工厂柔性化生产需求，往往需根据生产订单量、订单产品结构，自由调整产线设备数量、产线设备位置及整线产线内部各部件，各部件作为独立终端接入工业互联网，进行设备集中传控，对网络时延提出了很高的要求。其他移动类设备，如智能仓储传输、工业机器人、机械臂等根据不同的应用场景和移动速度，也同样需要网络满足超低时延传输。传统PLC控制系统扫描时间约10ms左右，因此整体网络时延如果能达到10ms，就能大规模应用在工业控制网络中，使5G工业互联网更广泛应用于工业制造。

本测试床项目目标是在实际工厂生产环境下，实现目标生产设备5G控制、智能桁架5G控制等实际5G工业应用中PLC通过5G无线网络传输控制网络时延达到10ms级，波动小于3ms的确定性网络。

1.5 测试床方案架构

1.5.1 测试床应用场景

1. 灵活组网

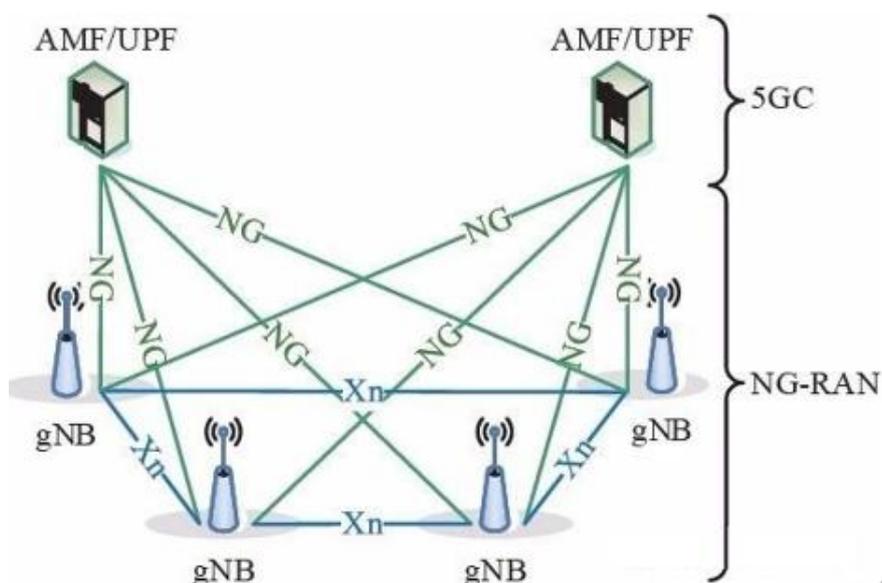


图：网络部署方案

1. 无线部署方案：

网络架构：为了支持增强型移动宽带（eMBB）、超高可靠与低延迟（uRLLC）、大规模机器类通信（mMTC）等多种业务应用，5G网络引入NR新空口和新的网络架构，以提升峰速率、延时、容量等网络性能指标，并具备更大的组网灵活性和可扩展性，以满足多样化的业务需求。如下图所示。

5G无线接入网（NG-RAN）由多个5G基站（gNB）组成。gNB箱UE提供NR空口协议的终结，并通过NG接口连接到AMF/UPF等5G核心网（5GC）网元，gNB之间通过Xn接口实现相互连接。



图：无线部署方案

5G基站通过OTN/PTN本地网接入地市PTN,通过省干专线接入南京数据中心PTN,各个厂家核心网统一建设在南京数据中心,包含SA和NSA。如下图4所示。

网络架构: 采用SA组网: 支持网络切片, 接入时延低, 支持更多的终端接入;

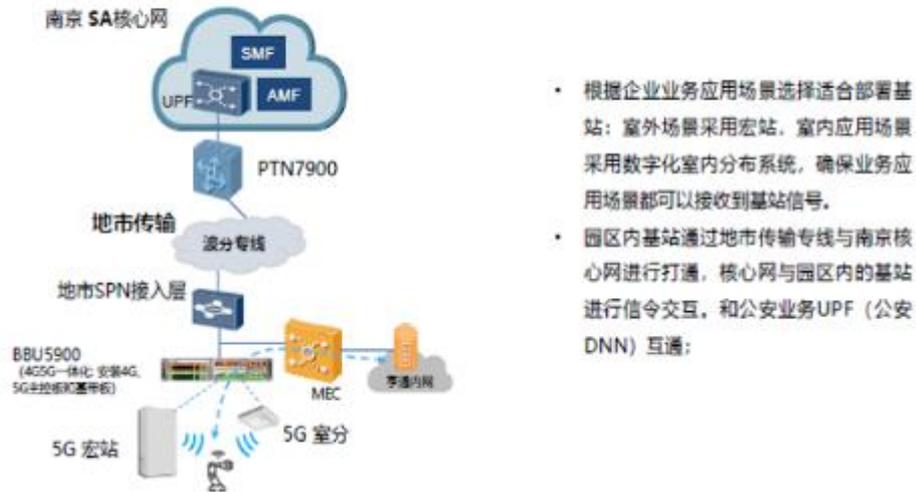


图: 5G网络架构

2. 传输部署方案: 基于SPN的传输方案

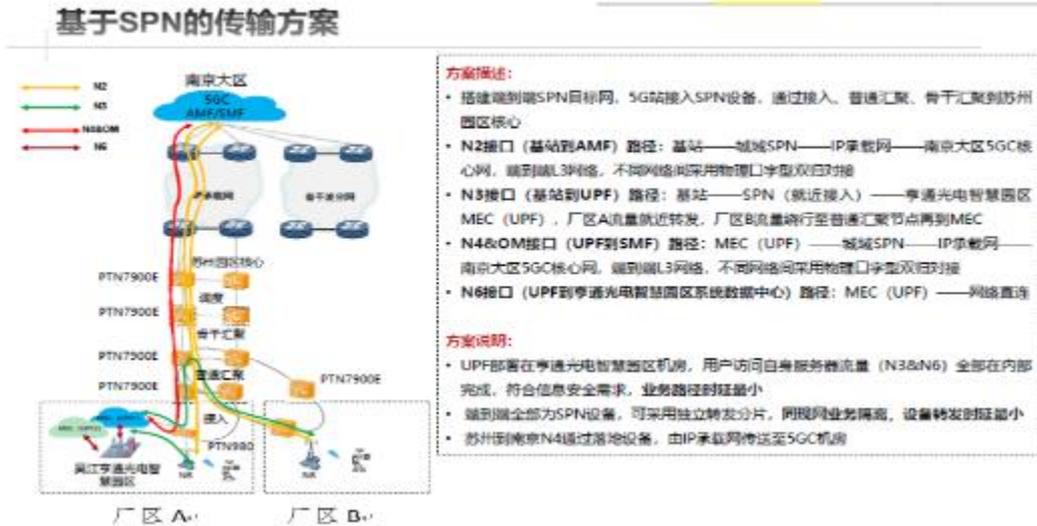
搭建端到端SPN目标网, 5G站接入SPN设备, 通过接入、普通汇聚、骨干汇聚到苏州园区核心;

N2接口(基站到AMF)路径: 基站——城域SPN——IP承载网——南京大区5GC核心网, 端到端L3网络, 不同网络间采用物理口字型双归对接;

N3接口(基站到UPF)路径: 基站——SPN(就近接入)——智慧园区 MEC (UPF), 厂区A流量就近转发, 厂区B流量绕行至普通汇聚节点再到MEC;

N4&OM接口(UPF到SMF)路径: MEC (UPF)——城域SPN——IP承载网——南京大区5GC核心网, 端到端L3网络, 不同网络间采用物理口字型双归对接;

N6接口(UPF到智慧园区系统数据中心)路径: MEC (UPF)——网络直连; UPF部署在智慧园区机房, 用户访问自身服务器流量(N3&N6)全部在内部完成, 符合信息安全需求, 业务路径时延最小; 端到端全部为SPN设备, 可采用独立转发分片, 同现网业务隔离, 设备转发时延最小; 苏州到南京N4通过落地设备, 由IP承载网传送至5GC机房。如下图所示。

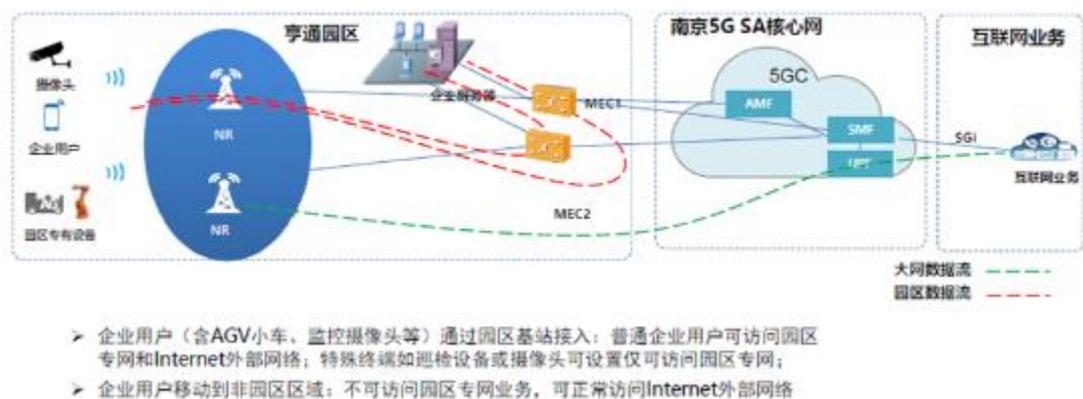


图：基于SPN的传输方案

3. 核心网部署方案

企业用户通过园区基站接入：普通企业用户可访问园区专网和Internet外部网络；特殊终端如巡检设备或摄像头可设置仅可访问园区专网；企业用户移动到非园区区域：不可访问园区专网业务，可正常访问Internet外部网络。如下图所示：

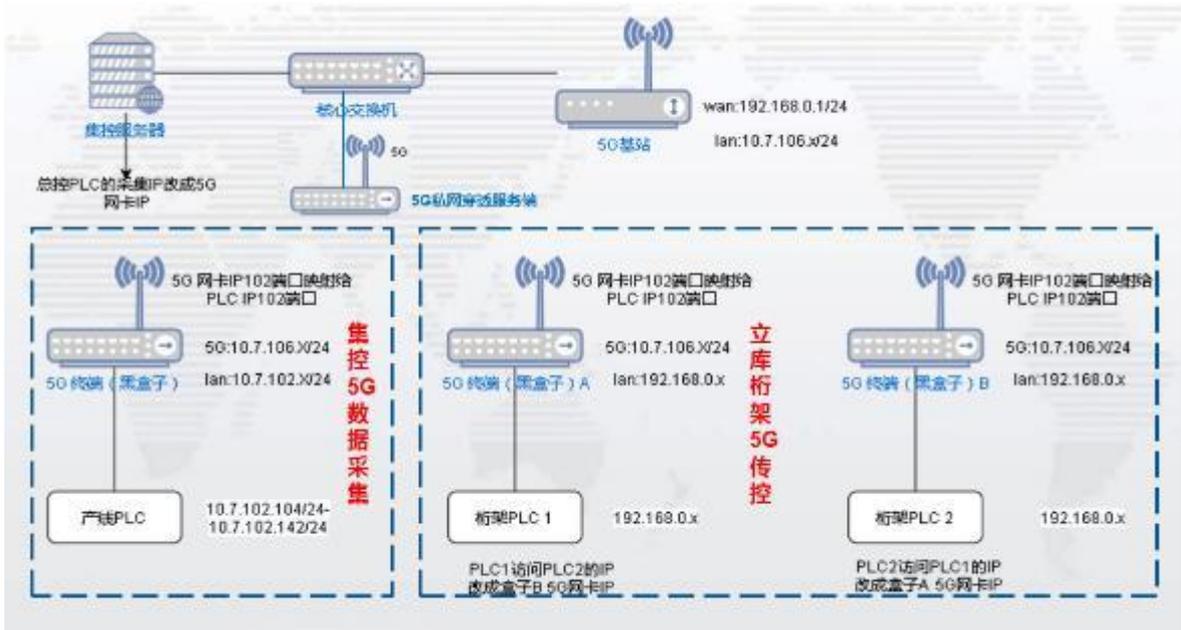
核心网CP在南京,UP下沉园区



图：核心网部署方案

4. 工业互联网5G车间覆盖

基于亨通承建接入的宏站5G网络信号，采用中国移动ipSite组网，进行私有化部署。采用MEC共享部署模式，应用数据不落地原则，优先在工业控制系统中落地实施，室内采用pRRU、RHUB、BBU进行5G组网。采用工业级5G 网关，部署于车间工业互联网汇聚交换机后端，对5G信号进行转换，使车间工业互联



图：工厂网络融合部署方案

基于以上5G网络构建及技术可行性验证基础上实现以下具体功能：

1. 5G移动生产

建立5G及毫米波通信传输为基础的工业互联网，将生产车间所有可移动生产设备接入5G网络，利用5G网络低时延的特性，实现移动生产设备的生产传控。满足公司柔性化生产需求，根据生产订单量、订单产品结构，自由调整产线设备数量、产线设备位置及产线设备功能，同时保证生产实时、可靠正常运行，提升了企业设备利用率及生产效率。

2. 基于5G网络的工厂集中控制分析系统

基于5G构建工业边缘侧网络，工业智能网关连接生产产线整线主控PLC，利用5G 低时延、高可靠等特性保障工厂生产过程所有生产线开完工、升降速等传控指令下达，实现生产整线的集中化智能管理。

3. 基于5G网络的设备部件柔性化调度

光缆生产整线通常由多个设备部件构成，设备部件按功能划分通常具有独立PLC，如成缆工序的绞台、扎纱机，护套工序的收线装置、放线装置、储线装置。实际生产过程中，由于产能、产品技术要求、厂区空间调整的需要，工厂产线内部控制部件也需要灵活部署和移动调整。通过将产线内部控制设备部件连入5G

工业互联网，实现产线内部设备部件的灵活部署和可靠性控制，进一步实现智能工厂的柔性化生产。

4. 5G+智慧仓储物流、智能桁架

5G通信网络作为智慧仓储机械臂、智能桁架传控数据通道，是智慧仓储、传输系统实时、快速运输的关键。通过工厂实际智能仓储传输系统应用需求与5G网络深度融合，5G网络低时延低抖动确定性网络的研究和技术突破，实现低时延的高速仓储物流传输与传控。

1.5.4 方案重点技术

1. 采用MEC共享部署模式，应用数据不落地原则，优先在工业控制系统中落地实施。MEC部署至吴江本地中心机房并进行冗余备份，与工厂工业互联网三层核心相连，通过5G网络优化及智能网关相互配合，降低时延，提升网络确定性

2. 采用自研5G工业网关，支持IPsec、OpenVPN、L2tp等常规VPN组网方式，实现数据安全传输，采用自主开发的私网穿透协议，在不改变原有的网络拓扑和结构情况下，对5G网关下挂的设备网络进行透明转发，即插即用，并且转发的数据均走硬件加速通道，保证极低的转发时延。

3. 应用的5G网关采用OFDMA技术，允许路由器仅用一次传输就可以为多个终端设备发送数据（可支持8台终端设备），而传统路由器则需要先后轮流多次传输才可完成多终端设备的数据发送。OFDMA使得多设备同时工作的传输效率显著提高，延迟明显降低。

1.5.5 方案自主研发性、创新性及先进性

该项目采用合作自研5G工业网关，支持IPsec、OpenVPN、L2tp等常规VPN组网方式，实现数据安全传输，采用自主开发的私网穿透协议，实现5G网络与工厂工业控制网络无缝融合，避免企业应用5G网络大规模改造本地工业控制网络的痛点。

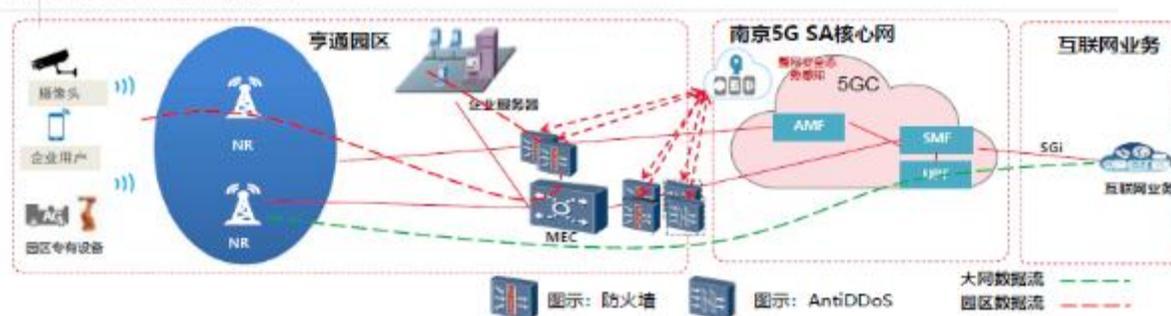
该项目采用边缘计算MEC下沉方案，5G核心网络通过专线接入园区中心机房，MEC下沉部署至本地中心机房并进行冗余备份，通过自研5G网关进行测试

验证及协议优化，并应用于工厂实际移动集中数采控制、智能桁架传控等实际场景，实现5G无线网络在实际工业应用中的低时延高确定性，真正解决工业控制网络移动设备传控无线网络传输问题。

1.5.6 方案安全风险控制

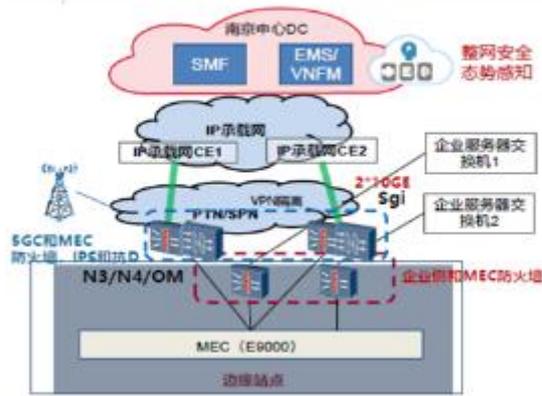
- 防火墙框式转发时延低于80us，盒式低于15us，不影响业务时延；
- MEC所有安全设备均被省中心云HiSec平台管理，HiSec提供统一安全策略管理配置；
- MEC防火墙上送安全事件和关键流量到HiSec平台进行主动的威胁检测；
- MEC和5GC部署双机热备的防火墙，提供信令流量和OAM流量白名单访问控制，确保5GC和MEC之间只有合法流量通过；
- MEC和企业私网之间部署防防火墙，提供NAT和基于应用和用户的精细化访问控制侧，保护MEC和企业业务安全；
- MEC部署AntiDDoS和IPS 提供本地应用和数据保护能力；
- 双机热备提供会话级别实施备份，提升整个系统可靠性和带宽利用率。如下图所示

网络安全部署方案



- MEC所有安全设备均被省中心云HiSec平台管理，HiSec提供统一的安全策略管理配置
- MEC防火墙上送安全事件和关键流量到HiSec平台进行主动的威胁检测
- MEC和5GC部署双机热备的防火墙，提供信令流量和OAM流量白名单访问控制，确保5GC和MEC之间只有合法流量通过
- MEC和企业私网之间部署防防火墙，提供NAT和基于应用和用户的精细化访问控制侧，保护MEC和企业业务安全
- MEC部署AntiDDoS和IPS 提供本地应用和数据保护能力
- 双机热备提供会话级别实施备份，提升整个系统可靠性和带宽利用率

网络安全部署方案



防火墙框式转发时延低于80us, 盒式低于15us, 不影响业务时延

1. 在 E9000H和 SPN设备之间, 部署双机热备的防火墙, 保护N3、N4和OAM的流量, 蓝色所示, 信令、控制流量有限, 建议采用盒式交换机
2. E9000H和SPN设备之间部署IPS, 抗D保护保护核心网
3. 南京中心DC部署HiSec平台, 提供所有MEC安全设备统一管理, 简化运维
4. MEC安全设备上送安全事件和特定流量到HiSec平台, 进行异常行为分析, 建立主动防御的安全体系, 提升整个方案防御能力
5. 在E9000H和企业服务器交换机之间, 部署双机热备防火墙, 保护MEC到企业业务服务器之间的用户面N6流量, 红色所示, 业务流量考虑到扩展性, 建议采用框式防火墙

图：网络安全部署方案

1.6 测试床实施部署

1.6.1 测试床实施规划

2021.1-2021.3 5G基础网络建设, 5G网络宏站建设

2021.3-2021.6 5G室分部署, 完成5G与工厂工业网络设备连接性测试

2021.6-2021.10 5G网关自研私网穿透协议可行性验证, 5G网关兼容PLC终端配合, 验证技术可行性。

2021.11-2021.12 工厂5G智能应用实施, 进行第二阶段测试及验证。

1.6.2 测试床实施的技术支撑及保障措施

5G 核心网基于网络功能虚拟化NFV (Network Function Virtualisation) 技术, 使其天然具备了灵活多样的隔离能力。

首先, 核心网5GC 包含若干网络功能, 整体上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 (如网关) 独立建设; 以及全部网元独立建设, 不共享任何资源。

针对单个网元内不同业务的隔离, 可以采取不同的主机组隔离, 也可以共享主机组而采用虚拟资源以及服务隔离。前者隔离度高, 但是硬件相对专用, 成本高。后者采用在VNF (Virtualised Network Function 虚拟网络功能) 内部逻辑隔

离，资源使用效率提升。

移动传输网络虚拟隔离技术，采用VPN（Virtual Private Network 虚拟专用网）+QoS 实现多个业务在一个物理基础网络上的相互隔离。硬隔离一般采用 FlexE（Flexible Ethernet）/MTN（Metro Transport Network 城域传送网）接口隔离或MTN 交叉隔离两种技术。FlexE/MTN 接口隔离通过时隙调度技术，将物理端口划分为多个隔离的刚性管道。即使在重载硬塞下的调度，也会有更稳定的时延。

OFDMA技术是相对于传统路由器较为明显的区别之一，它允许路由器仅用一次传输就可以为多个终端设备发送数据（多达8台终端设备），而传统路由器则需要先后轮流多次传输才可完成多终端设备的数据发送。OFDMA使得多设备同时工作的传输效率显著提高，延迟明显降低。

1.6.3 测试床实施的自主可控性

本测试床基于江苏亨通光电股份有限公司良好的工控网络基础，联合中国移动共同承建5G网络。该测试床由江苏亨通光电股份有限公司和中国移动通信集团江苏有限公司苏州分公司设计、建设、运营，自主可控。

1.7 测试床预期成果

1.7.1 测试床的预期可量化实施结果

1. 在实际工厂生产环境下，PLC控制系统扫描时间约10ms左右，因此预期目标生产设备5G控制、智能桁架5G控制等实际5G工业应用中PLC通过5G无线网络传输控制网络时延达到10ms，波动小于3ms的确定性网络。

2. 探索NSA模式下5G网络确定性指标，降低应用部署成本，实现区别部署。

1.7.2 测试床的商业价值、经济效益

实现5G智能传控、自我优化，打破有线传输的限制，持续改进的高质量智

能制造新生态。有利于打造质量领先的5G专网承载的“互联网+”协同制造体系与面向出口产品的业内领先的示范智慧园区。以亨通线缆产业园区为例预计实现生产周期缩短30%，作业文件消除60%，产品质量提升25%，数据录入时间减少70%。单位面积产能增加 100%，人均产值提升 50%。

1.7.3 测试床的社会价值

围绕高质量发展目标，进一步推动工业互联网应用，加快由智能工厂向智慧园区升级，建立5G及毫米波通信传输为基础的工业互联网、物联网系统。①建立园区统一的基础设施（IaaS、PaaS）、统一的服务管理（人员、环境、安全）；②建立园区级工业互联网平台（上下游企业）；③园区统一的安全态势感知平台（工控、办公网、信息）。

结合线缆制造特点，以亨通光电工业互联网平台为基础，通过导入5G及毫米波技术，将园区的产品数据、运营数据、价值链数据和外部数据进行互通串联，形成一个完善的园区数据闭环，实现智能分析、自我优化，持续改进的高质量智能制造新生态。打造质量领先的线缆出口智慧园区。

面对工业经济发展的新形势新任务，通过建设刻蚀设备协同设计、生产制造以及运维服务的工业平台，实现运用信息技术带动工业化生产，促进管理方式的转变，提高工业化效率和管理水平，谋求新型工业化的经济增长方式，缩小与发达地区的信息化差距，实现跨越式发展，变挑战为机遇，走出一条绿色节能、科技智能的新型工业化之路，是推进信息化与工业化融合、建设工业企业信息化监管平台的意义所在。

1.7.4 测试床初步推广应用案例

案例1：借助5G新型基础设施，联合成立5G工程应用研究中心，在亨通光电打造5G智能制造示范车间，共同推动5G+先进制造业的发展。在亨通线缆产业园、亨通光通信产业园等实现5G+设备数采，利用5G工业级数采网关实时获取生产设备、辅助设备的状态数据，在设备发生故障时可以及时报警，并对生产效率进行分析，助力实现透明化生产。

案例2：通过5G智能工厂建设实验方案，利用5G、边缘计算等新一代通信技术，

为亨通光（七都）3号车间、8号车间进行5G布局，实现车间物联网数据采集、设备监测、仪器联网等5G应用。搭建产业链质量管控平台，实现产业质量数据采集与分析管理。

案例3：在3号车间5G项目中，依托于5G工业网关对装备相关数据采集，打造数字化制造模型系统。通过对生产设备的三维建模，可以对设备参数、状态进行实时监控和预警，评估设备健康状况及产品质量状况，保证生产质量稳定，比如对机器设备相关动作前后温度、压力、转速等进行AI分析，动态实现设备的预防性维护和质量隐患预测。

1.8 测试床成果验证

1.8.1 测试床成果验证计划

2022.1 5G组网设备验证

2022.2 基于工厂应用场景的5G网络低时延低抖动性能验证

1.8.2 测试床成果验证方案

对pRRU、RHUB、BBU、5G网关等5G组网设备进行网络测试与验证。

实现5G智能仓储传输、智能智能桁架、5G+移动生产管理、5G+智慧协同、5G+工厂数据集成、5G设备部件柔性化生产传控等应用场景，并在各大应用场景进行5G低时延低抖动确定性网络检测与验证，要求达到10ms，波动3ms。

1.9 与已存在 AII 测试床的关系

该测试床项目与之前已审批的测试床无任何关联

1.10 测试床成果交付

1.10.1 测试床成果交付件

测试床的交付件包括：

- 1) 测试床项目计划书
- 2) 测试床部署实施方案
- 3) 测试床结题报告

1.10.2 测试床可复制性

本测试床可直接复制用于通信线缆工业制造。结合线缆制造特点，以亨通光电工业互联网平台为基础，通过导入5G及毫米波技术，将园区的产品数据、运营数据、价值链数据和外部数据进行互通串联，形成一个完善的园区数据闭环，实现智能分析、自我优化，持续改进的高质量智能制造新生态。打造质量领先的线缆出口智慧园区。

本测试床也可复用于大部分PLC控制系统无线应用场景。面对工业经济发展的新形势新任务，实现运用信息技术带动工业化生产，促进管理方式的转变，提高工业化效率和管理水平，谋求新型工业化的经济增长方式，实现跨越式发展，变挑战为机遇，走出一条绿色节能、科技智能的新型工业化之路，是推进信息化与工业化融合、建设工业企业信息化监管平台的意义所在。

1.10.3 测试床开放性

本测试床低时延低抖动的确定性5G工业控制技术具有广泛开放性，除用于亨通光电股份有限公司外，可用于需要PLC无线控制的大部分企业。

开放应用1：借助5G新型基础设施，在东方电气集团打造5G智能制造示范车间，共同推动5G+先进制造业的发展。在东方汽轮机厂、东方风机、东方研究院等实现5G+设备数采，利用5G工业级数采网关实时获取数控机床、焊接设备的状态数据，在设备发生故障时可以及时报警，并对生产效率进行分析，助力实现透明化生产。

开放应用2：通过5G智能工厂建设实验方案，利用5G、边缘计算等新一代通信技术，为中国一重集团核电车间进行5G布局，实现车间物联网数据采集、设备监测、车床联网等5G应用。搭建盾构施工信息化管控平台，实现盾构机数据采集与设备管理，生产环境参数7*24h实时监测。

开放应用3：在上海中烟机械5G智慧工厂项目中，依托于5G工业网关对烟机进行数据采集，打造数字孪生系统。通过对生产设备的三维建模，可以将设备通过虚拟化的手段展示，对设备的实时生产动作通过映射，仿真实时展示在数字孪生界面，管理人员可以远程对设备动作、状态进行实时监控和预警，评估设备健康状况，保证生产质量稳定，比如对机器设备相关动作前后温度、压力、能量、转速等进行AI分析，动态实现设备的预防性维护。

1.11 其他信息

1.11.1 测试床使用者

该测试床是亨通光电与中国移动联合建设的基于5G确定性网络的工业互联网融合应用。第三方的企业与用户如需参观访问该测试床，可向亨通光电提出书面申请，亨通光电将在保障工厂安全生产与不影响自身业务的前提下，酌情接洽，开展访问、交流事宜。

1.11.2 测试床知识产权说明

该测试床由亨通光电、中国移动联合设计、建设、运营，其过程中产生的开发成果及其知识产权，包括但不限于专利申请权、专利权、版权、商业秘密，均归亨通光电和中国移动所有。

1.11.3 测试床运营及访问使用

工业网络通过5G专网专线接入5G核心网，根据5G业务应用场景，室外部署宏站，室内部署数字化室内分布系统，支持多种的终端访问接入，满足接入终端包括工

业控制逻辑单元、摄像头、AGV、机械臂、工业机器人等场景终端接入及未来的接入扩展需求。

1.11.4 测试床资金

资金预估1200万元，其中亨通光电自投700万元，移动投入500万元。

1.11.5 测试床时间轴

2021.1-2021.3 5G基础网络建设，5G网络宏站建设

2021.3-2021.6 5G室分部署，完成5G与工厂工业网络设备连接性测试

2021.6-2021.10 5G网关自研私网穿透协议可行性验证，5G网关兼容PLC终端配合，验证技术可行性。

2021.11-2021.12 工厂5G智能应用实施，进行第二阶段测试及验证。