



中国移动 5G 确定性工业生产网测试床

引言/导读

以中国移动为代表的运营商积极推进 5G 等新一代信息通信技术的创新发展，为行业数智化转型构建数字基础设施底座。特别在 5G+工业互联网领域，中国移动提出从辅助生产到融入生产再到改变生产的发展路径，全面推进 5G 赋能数智工厂高质量发展，已在工业制造、能源、港口、矿山等行业，围绕工业领域 30 多个典型应用场景，实现 5G 专网项目的批量落地。随着 5G 与工业生产的融合融通，也将进一步影响并带动工业生产模式的改变。

为了向工业客户提供一流的确定性 5G 专网服务，中国移动推动确定性能力从外挂式叠加向内生式供给演进，通过 5G 架构与确定性能力的深度耦合，实现内生确定性服务的一体化供给，即“确定能力内生供给、确定性能极致服务、确定可靠全局保障”。

- 确定能力内生供给：通过对 5G 网络架构的优化调整以及网络能力的增强，内生提供组网融通、极致通信、运营保障等端到端确定性服务能力，极小化甚至无需对外部工业网络提出适配性的改造要求，实现轻量化、插件化部署；
- 确定性能极致服务：全方位推动 5G 通信性能的极致化演进，补齐极致低时延、有界低抖动的性能短板，拉长通信大带宽、空间广覆盖的长板，锻造设备低功耗、网络高安全的新板，提供满足工业制造核心生产环节的极致性能服务；
- 确定可靠全局保障：用全局视角构建 5G 适配工业网络的确定可靠安全能力，系统性提供多维度、多层级的可靠性保障手段和安全防护措施，确保工业生产的稳定运行，保障通信网络以及工业数据的安全。

一、关键词

5G 确定性、工业生产网、高精度时间同步、运动控制、智能分拣

二、测试床项目承接主体

2.1. 发起公司和主要联系人联系方式

中国移动通信有限公司研究院

徐要强：13581714550

彭伟杰：18813015878

2.2. 合作公司

中兴通讯股份有限公司

罗克韦尔自动化（中国）有限公司

三菱电机自动化（中国）有限公司

施耐德电气(中国)有限公司

宏电技术股份有限公司

摩莎科技(上海)有限公司

新华三技术有限公司

航天新通科技有限公司

思博伦通信公司

三、测试床项目目标

在推动 5G 从辅助生产走向融入生产的过程中，出现了许多新的行业痛点需求。例如，在当前工业生产中的旋转场景，通常使用滑环实现旋转设备与周边固定设备之间的通讯，但滑环通信依赖机械接触，易老化破损，需定期替换，增加生产成本；传统工业制造常采用有线方式，产线不易调整，且调整时布线成本高，无法满足柔性生产需求。面向 5G 融入生产的这些新需求，亟待攻关解决 5G 服务于 OT 工业控制的“组网融通”、“5G 确定性”能力提升以及工业控制“算网一体化”等关键问题。

确定性通信是指以高精度时间同步为基础，提供低时延、高可靠、时延抖动有界的通信服务能力，本测试床旨在探索 5G+工业确定性网络的解决方案，锚定工业界最先进、智

能的输送和分拣场景，针对实时 I/O 通信、机器安全控制、运动控制、虚拟化 PLC 等工业全场景提供满足行业需求的确定性服务能力，避免因网络不稳定，导致产品质量下降、产线停机等问题，助力 5G 融入工业生产。

实时 I/O 通信是离散制造、流程工业中最为普遍也最为基础的通信方式。在测试床规划中，需验证 5G 服务于单/双无线实时 I/O 通信、冗余 PLC 与实时 I/O 通信、双发选收冗余传输 I/O 实时通信等通信场景。

运动控制特指 PLC 控制伺服电机实现精准运动的自动化控制方式，对通信要求最为苛刻。测试床需验证 PLC 控制单伺服电机、单 PLC 控制多伺服电机轴同步运动、多业务流混合组网等场景。

虚拟化 PLC 是将传统的硬件 PLC 以软件化的方式部署在 5G 边缘算力平台上，进一步降低 PLC 南向 5G 控制的时延。需验证基于 5G UPF 基座的虚拟化 PLC 满足通过 5G 进行实时 IO 控制、变频运动控制、伺服运动控制、触摸屏交互、调试站交互等工业场景。

5G 确定性工业生产网测试床将构建端到端技术验证平台、产品测试认证平台、商用解决方案孵化平台，贯彻国家 5G+工业互联网发展战略，满足工业发展需求，推动 5G 应用需要向工业生产核心环节渗透。

四、测试床方案架构

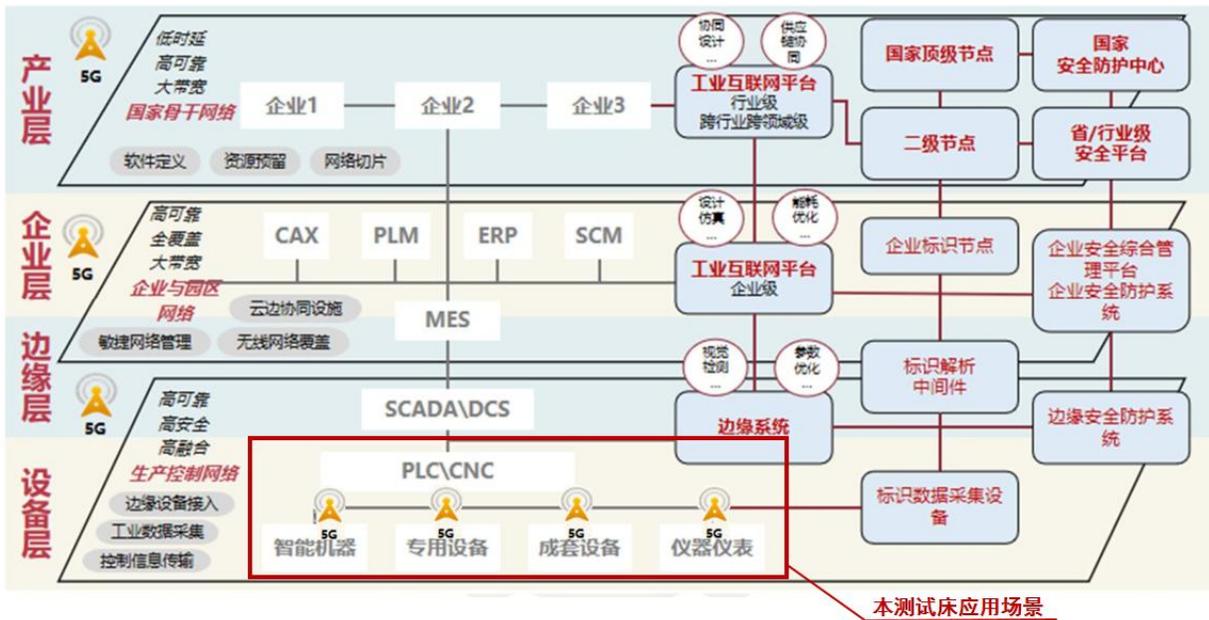
4.1. 测试床应用场景

本测试床测试验证 5G 应用于数据采集、普通 IO 控制、机器安全控制、运动控制等工业通信的效果和能力；本测试床测试验证虚拟化 PLC 部署于 5G 边缘算力平台实现基于 5G 通信的南向控制效果和能力。测试床还测试验证 5G 用于控制当前较先进工业设备融入工业生产输送、分拣等核心环节的能力。具体的场景包括：

- (1) 通过 5G 控制多伺服电机协同运动
- (2) 通过 5G 实现机器视觉信息的上传
- (3) 通过 5G 控制 Delta 分拣机器人
- (4) 通过 5G 控制磁驱轨道输送系统

4.2. 测试床架构

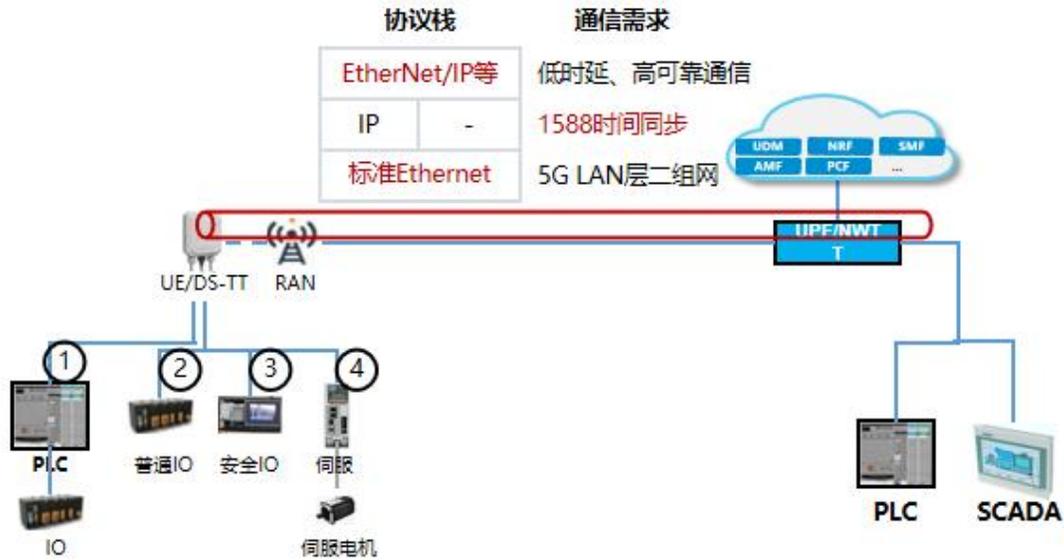
本测试床属于 AII 总体架构中网络互联部分，其应用场景在 AII 《工业互联网体系架构（版本 2.0）》中的位置如下图所示。在关键技术验证上，本测试床重点测试验证 5G 端到端确定性技术在高精度时间同步精度、可靠性、时延和抖动等维度可提供的通信服务能力；在应用场景验证上，本测试床重点测试验证 5G 确定性通信技术应用于 PLC 南向控制现场设备的能力和效果。



AII 工业互联网实施框架总体视图（2.0）

4.3. 测试床方案

测试床构建了“工业以太网 over 5G”、“工业以太网 over 5G TSN”，以及“5G UPF 基座虚拟化 PLC”三大技术测试路径：



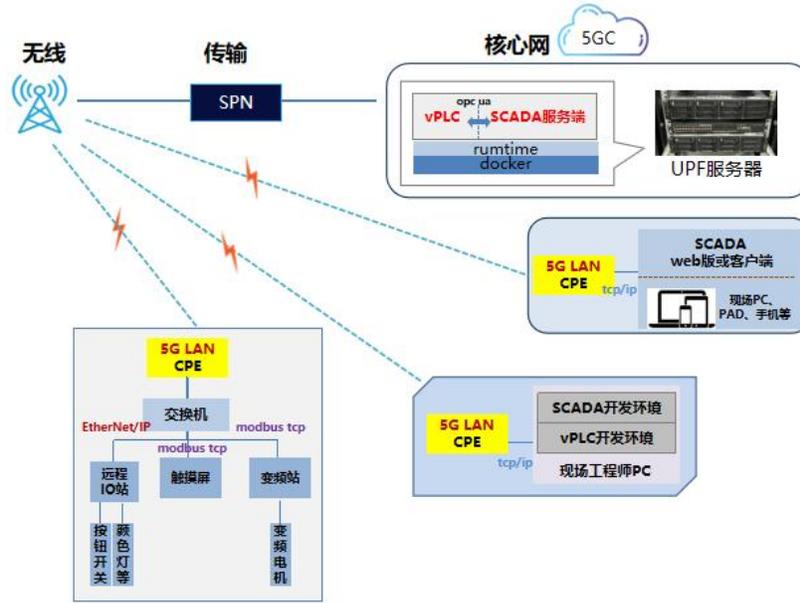
工业以太网 Over 5G

工业以太网 Over 5G: 5G 满足以 EtherNet/IP 为代表的工业协议对标准以太网络的通信和组网需求。



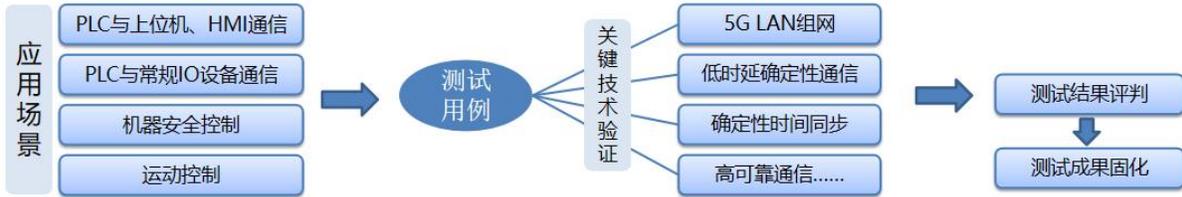
工业控制协议 Over 5G + TSN

工业控制协议 Over 5G + TSN: 5G 满足以 CC-Link IE TSN 为代表的工业协议对 TSN 网络的通信和组网需求。



UPF 服务器虚拟化 PLC 控制

UPF 服务器虚拟化 PLC 控制：5GUPF 服务器满足施耐德 EAE 虚拟化 PLC 的运行要求，同时满足与南向设备的通信需求。



测试床测试方法

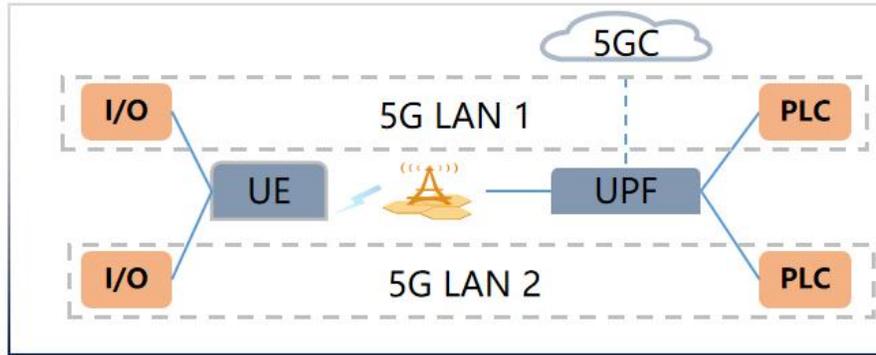
在测试方法上，测试床按工业生产网络的实际应用场景设计用例，按 OT 设备的最终工况来评判测试结果，关注 5G 关键技术指标，固化测试成果。

4.4. 方案重点技术

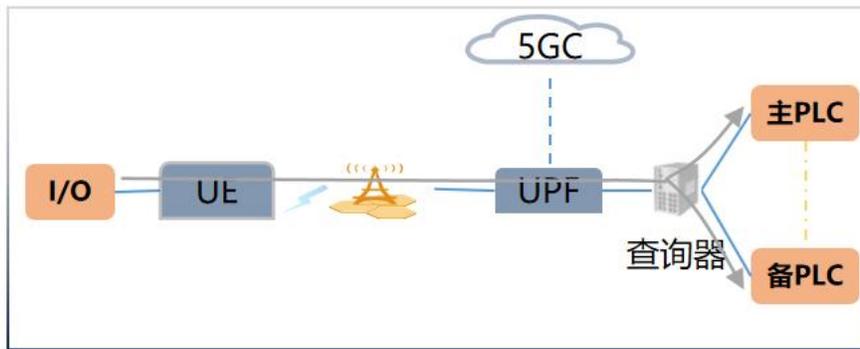
5G 确定性工业生产网需要 5G 端到端确定性技术来保障。5G 确定性技术是一个技术体系，以 5G LAN 组网、高精度时间同步为基础，以低时延、抖动有界，高可靠通信为关键目标。通过多种原子技术组合可以分档分级满足不同业务的通信需求。

1. 5G LAN 工业组网

基于 Ethernet PDU 会话的 5G LAN 技术是实现工业设备通过 5G 实现层二组网的关键技术。5G LAN 可独立组网，也可以与现存控制网络融合组网。不同的 LAN 网络可以通过不同的 5G VN 组进行业务隔离，在同一个 5G VN 组内可以实现设备之间单播、组播、广播等通信方式。



5G LAN 二层组网



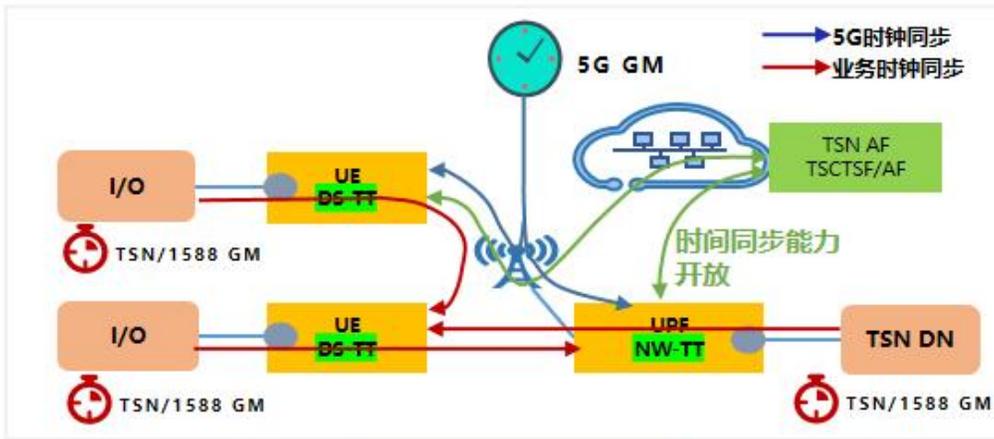
5G LAN 组播通信

通过 5G LAN 组网，5G LAN 内部的组播通信，实现主备 PLC 的冗余部署。

2. 5G 高精度时间同步

高精度时间同步是实现工业自动化领域运动控制的基础技术。PLC 与伺服驱动器之间需要完成时间同步，并基于相同的时间基准通过闭环控制实现运动控制。通过 5G 网络实现运动控制，需要 5G 参与时间同步，并保证时间同步精度满足业务需求。

3GPP 标准定义了较为完善的时间同步方案，包括 IEEE 1588，TSN 802.1AS 等多种时间同步协议，5G 对外授时或业务透传 5G 进行授时等多种部署方案，以及时间同步能力开放等功能。

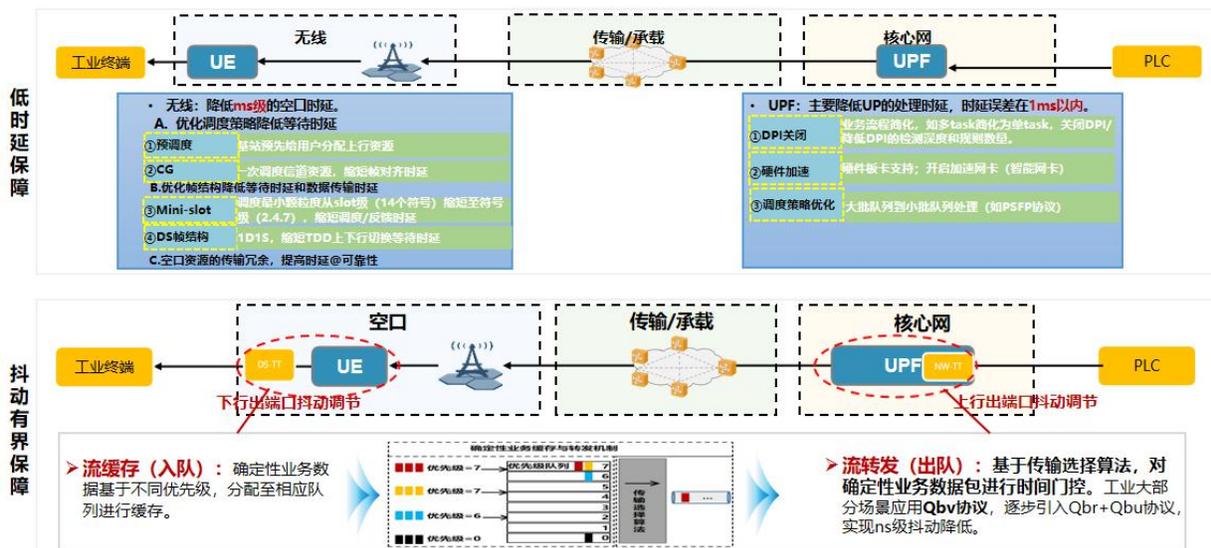


3GPP 标准高精度时间同步方案

3. 5G 低时延，抖动有界

5G 低时延保障，以优化无线空口时延为主，优化传输网络时延，核心网设备处理时延为辅。优化无线空口时延主要通过调度策略的优化、帧结构优化、空口资源的冗余传输等技术来实现。

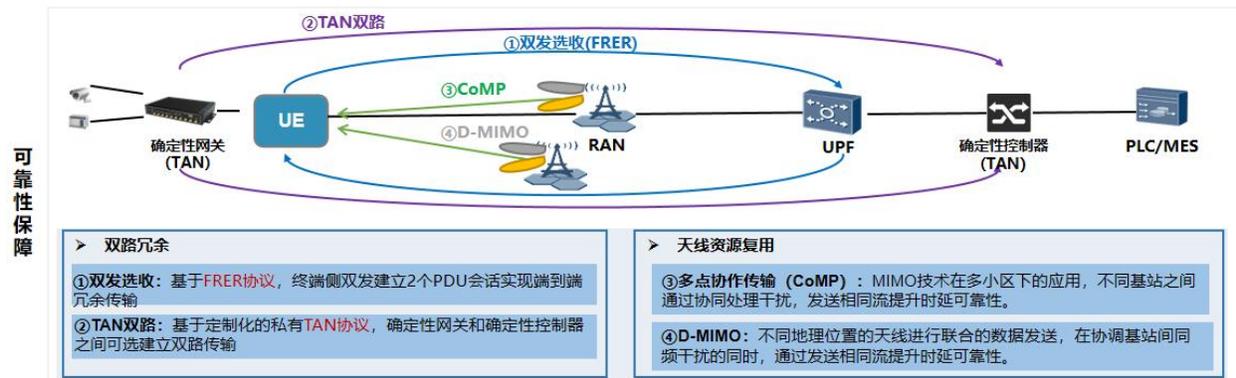
5G 时延抖动有界保障，当前主要通过 TSN 802.1Qbv 的时间窗口机制来实现，即通过分别位于 UE 和 UPF 的 DS-TT 和 NW-TT 来实现时延的调节。



5G 低时延、抖动有界保障方案

4. 5G 可靠性保障

5G 网络的可靠性保障，主要通过冗余传输来实现，包括无线空口的冗余传输、5G 内部的冗余传输（TSN 802.1CB）、业务级的冗余传输（比如基于 TSN 协议）等。



5G 可靠性保障方案

4.5. 方案自主研发性、创新性及先进性

1. 自主研发性

本测试床的测试需求、测试方案、测试用例由中国移动研究院主导，联合合作伙伴共同完成。

2. 创新性

(1) 创新性地设计了 IEEE 1588 和 TSN 802.1AS 等多种时间同步协议多模态的融合部署技术和组网方案。

(2) 创新性地解决了 5G LAN 组播通信实现工业自动化中主备 PLC 冗余部署的堵点问题。

3. 先进性

(1) 业界领先的探索 5G 在 PLC 南向进行数据采集、普通 IO、机器安全控制、运动控制全场景覆盖验证的测试床；

(2) 业界领先的探索 5G 与 EtherNet/IP, CC-LINK IE TSN 等多种工业协议融合的测试床；

(3) 测试床成果在 2022 年《中国移动 5G 确定性工业生产网白皮书》中发布；

(4) 测试床成果《5G 确定性工业生产网在绿色电网和工业控制中的创新实践》在 2022 年第五届“绽放杯”5G 应用征集大赛 5G 增强技术专题赛获得三等奖。

(5) 测试床关键技术、组网方案等测试成果通过构建的“5G 确定性工业生产网旋转台电子齿轮系统”在 2023 年北京展、上海展进行展示，获得业界关注和好评。

- (6) 测试床最新成果《5G UPF 基座虚拟化 PLC 部署方案》在 2024 年世界物联网博览会“面向工业生产控制的 5G-A 确定性关键技术研究与应用示范联合创新”论坛进行发布。

4.6. 方案安全风险控制

本测试床从 5G 网络安全、机器安全控制两个方面提供安全风险控制。

- (1) 5G 网络安全：采用 5G 专网尊享模式，独享 5G 无线、核心网设备，满足生产网络安全需求，在用 5G LAN 技术满足企业业务隔离的业务需求。
- (2) 机器控制安全：采用安全 PLC 组网，实现 SIL3 的机器安全控制级别。

五、测试床实施部署

5.1. 测试床实施规划

1. 2022 年 04 月-2022 年 08 月：需求调研，架构设计，测试方案设计；
2. 2022 年 08 月-2022 年 12 月：5G 确定性工业生产网测试床两轮组队测试，验证 5G 网络架构、关键技术应用于 PLC 南向设备控制的可行性；
3. 2023 年 01 月-2023 年 06 月：构建 5G 确定性生产网旋转台电子齿轮系统，验证 5G 确定性技术用于 PLC 南向多伺服电机协同运动控制的效果和能力；
4. 2023 年 07 月-2023 年 12 月：构建 5G 确定性生产网智能输送分拣系统，验证 5G 确定性技术用于 PLC 南向控制先前输送、分拣设备融入工业生产核心环节的能力；
5. 2023 年 12 月-2024 年 8 月：构建 5G UPF 基座虚拟化 PLC 部署测试系统，验证 5G UPF 服务器是否满足施耐德 EAE 虚拟化 PLC 的运行要求，验证 5G 通信是否满足与南向设备的通信需求；
6. 2023 年 12 月-未来：基于测试床，继续验证 5G 新方案、新能力；同时对合作伙伴开放测试床在 5G 高精度授时、5G LAN 工业组网、5G 确定性通信的测试验证能力。

5.2. 测试床实施的技术支撑及保障措施

测试床由中国移动研究院主建，由罗克韦尔自动化（中国）、三菱电机（中国）、施耐德电气（中国）、中兴通讯、宏电科技、MOXA、H3C、航天新通等合作伙伴提供工业自动化、5G、TSN 等领域技术支撑。

5.3. 测试床实施的自主可控性

本测试床采用的 5G 网络、5G 终端、TSN 交换机等设备由国产合作伙伴研发完成，具有自主可控性。PLC、伺服驱动器、私服电机、机器视觉等关键设备和关键部件，为国际主流自动化厂商生产，工业通信协议遵循国际标准。

六、测试床预期成果

6.1. 测试床的预期可量化实施结果

本测试床预期将获得如下成果：

- (1) 5G 组网架构实现 5G 确定性工业生产网的可行性，以及 5G 关键技术的实施效果；
- (2) 验证 5G 设备以及 TSN 通信设备等关键产业能力和短板；
- (3) 构建可以固化测试床成果的集成系统，并提供可对外开放的测试验证能力。

6.2. 测试床的商业价值、经济效益

本测试床充分验证 5G 确定性方案在工业控制核心环节全场景的应用，

- (1) 5G 提供高速、低时延的数据传输能力，使得工控系统能够实时、准确的获取控制数据，从而优化生产流程，提高生产效率；
- (2) 5G 对核心控制环节改造可以与人工智能、大数据等技术相结合，推动工控系统智能化转型，实现自动化、智能化的生产和管理；
- (3) 5G 实现企业“一网到底”，大大降低企业生产和运营网络的建设和成本。

6.3. 测试床的社会价值

本测试床可广泛应用在工业各行业数智化改造的 5G+核心控制环节，尤其是多品种小批量的离散制造业。5G 确定性工业生产网创新解决方案，旨在打造 5G 满足 PLC 南向与现场设备之间通信，特别是支持工业中对通信要求最为严苛的运动控制场景的解决方案。

现场展示中，以工业元素、工业形式，非常直观的呈现了 5G 在系列确定性技术加持下，服务于 PLC 无线化控制多轴伺服电机高速啮合的运动控制效果。该方案的成功实施，充分展示了 5G 确定性通信能力，对提振产业信心，促进 5G 全连接工厂的场景、连接上量，促进 5G 真正融入生产核心环节有着重要意义。

6.4. 测试床初步推广应用案例

中国移动 5G 确定性工业生产网测试床，深度契合 5G 融入生产核心控制环节的需求，一阶段成果已在 2023 北京 PT 展、上海 MWC 展、中移合大等展会展出，二阶段成果已在 2024 年世界物联网博览会上发布，获得行业伙伴的广泛关注，未来在工业企业的核心控制环节 5G 化改造具有指导和借鉴意义。

七、测试床成果验证

7.1. 测试床成果验证计划

按照计划，5G 确定性工业生产网测试床的构建氛围三个阶段：

阶段一：基础探索，2022-04~2022-12，已完成

验证 5G 确定性技术的能力，验证产业的支持度，验证 5G 与工业协议的融合度，验证 5G 通信能力对工业自动化应用场景（数据采集、普通 IO、机器安全控制、运动控制）的覆盖能力，发现并解决存在的问题。

阶段二：综合构建，2023-01~2024-04，已完成

将测试床成果应用到综合测试平台上，验证 5G 用于真实工业设备（电子齿轮、磁驱轨道、Delta 分拣机器人等）的控制效果。构建 5G UPF 基座虚拟化 PLC 部署测试系统，验证 5G UPF 服务器上部署施耐德 EAE 虚拟化 PLC，通过 5G 与南向设备的通信的效果。

阶段三：能力开放，2025~未来，实施中

测试床测试能力对外开放，吸纳更多的合作伙伴，孵化面向商用的解决方案，丰富产业配套设备。

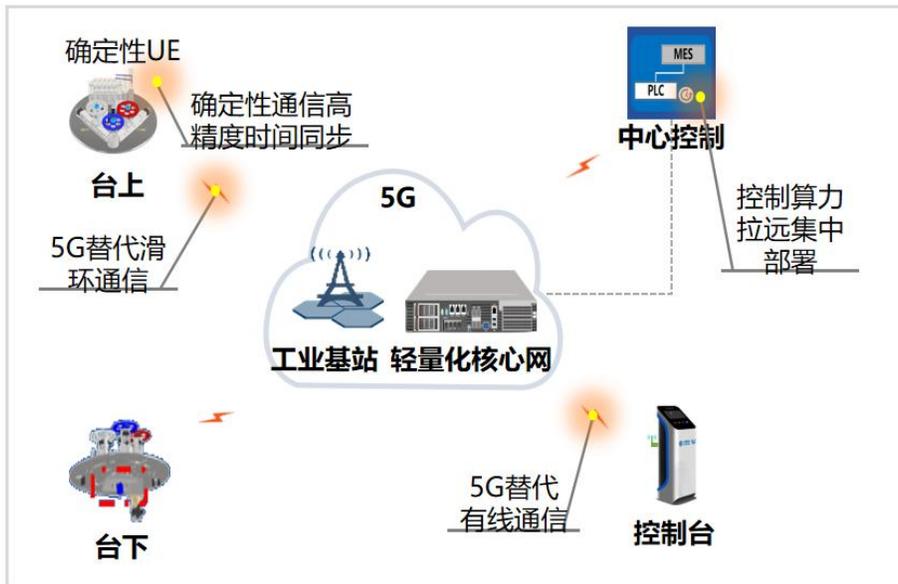
7.2. 测试床成果验证方案

阶段一：关键测试用例（部分）

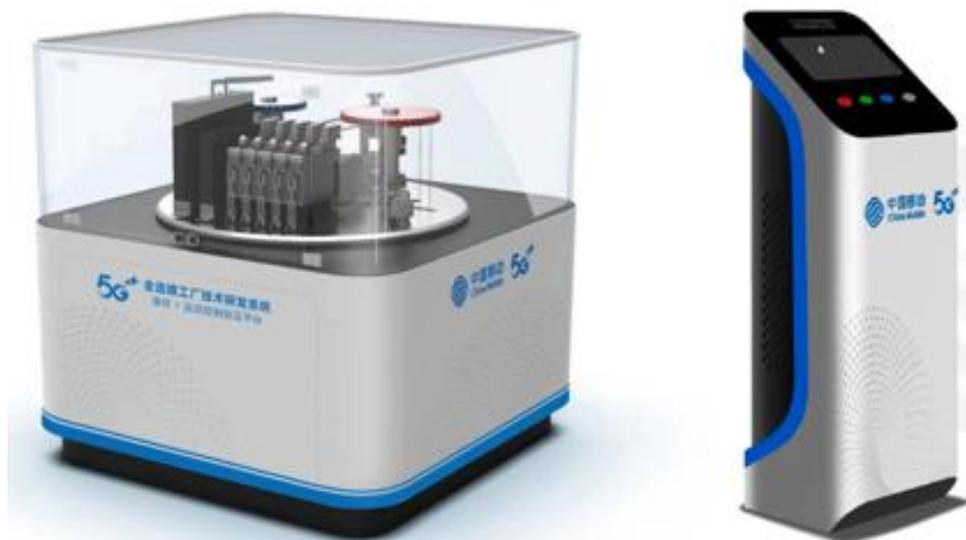
用例编号	用例描述	应用场景	关键技术
1	单PLC控制单伺服驱动器，测试10ms One Cycle（双向10ms）发包，观察运动位置和运动速率的拟合曲线	运动控制	基础组网、低时延、时间同步
2	单PLC控制双伺服驱动器，测试10ms One Cycle（双向10ms）发包，观察运动位置和运动速率的拟合曲线，单UE下挂两个伺服。	运动控制	基础组网、低时延、时间同步
2a	单PLC控制双伺服驱动器，测试10ms One Cycle（双向10ms）发包，观察运动位置和运动速率的拟合曲线，两个UE下各自下挂一个伺服。	运动控制	基础组网、低时延、时间同步
2b	单PLC控制双伺服驱动器，测试10ms One Cycle（双向10ms）发包，观察运动位置和运动速率的拟合曲线，DS-TT/NW-TT设置传输时延门控，观察数据传输时延。	运动控制	基础组网、确定性时延、时间同步
3	单PLC控制双伺服驱动器，电子齿轮差速比2:1，测试10ms One Cycle（双向10ms）发包，观察运动位置和运动速率的拟合曲线	运动控制	基础组网、低时延、时间同步
4	单PLC控制单伺服驱动器，测试10ms One Cycle（双向10ms）发包，同时相同VN组内存在大上行视频监控流量，观察运动位置和运动速率的拟合曲线，以及高清视频的回传效果	运动控制	基础组网、低时延、时间同步、流调度
5	相同5G LAN内，两组单PLC控制单伺服驱动器，分别以10ms One Cycle（双向10ms）发包，两组间共享相同的主时钟，两组PLC之间有协作，观察运动位置和运动速率的拟合曲线，预期多组间能正常协同	运动控制	基础组网、低时延、时间同步、跨PLC组网通信
6	不同5G LAN内，两组单PLC控制单伺服驱动器，分别以10ms One Cycle（双向10ms）发包，单独进行时钟同步，观察运动位置和运动速率的拟合曲线，预期相互不干扰	运动控制	组网隔离、低时延、时间同步
7	单PLC控制单伺服驱动器工作，以10ms One Cycle（双向10ms）发包，采用802.1cb双发选收机制保证通信可靠性，业务进行过程中，构造故障，业务无影响。	运动控制	基础组网、低时延、时间同步、高可靠
8	安全PLC连接远程安全IO，设置IO的RPI时间20ms，构造安全故障，观察系统运行情况。	机器安全控制	基础组网
8a	安全PLC连接远程安全IO，设置IO的RPI时间20ms，采用PRR冗余组网，构造安全故障，观察系统运行情况。	机器安全控制	基础组网、高可靠
9	主备冗余PLC通过5G与普通IO进行通信，构造主PLC故障，业务不受影响。主备PLC构成一个IGMP组播组。	冗余PLC与常规IO控制	基础组网、层二组播
9a	主备冗余PLC通过5G与IO模块进行通信，构造主PLC故障，业务不受影响。主备冗余PLC和IO模块都位于UE侧。	冗余PLC与常规IO控制	基础组网、层二组播
10	主备冗余PLC通过5G与支持PRR协议的普通IO之间通过双5G CPE进行通信，构造其中一个5G CPE PDU会话通信异常，业务不受影响。	冗余PLC与常规IO控制	基础组网、层二组播、高可靠
10a	主备冗余PLC通过5G与普通IO之间通过双5G CPE进行通信，普通IO通过PRP交换机与5G CPE进行通信，构造其中一个5G CPE PDU会话通信异常，业务不受影响。	冗余PLC与常规IO控制	基础组网、层二组播、高可靠

基于 EtherNet/IP 的 5G 确定性技术测试方案

阶段二：综合测试平台（5G 确定性工业生产网旋转台电子齿轮系统）组网和实物图



5G 确定性工业生产网旋转台电子齿轮系统组网图



5G 确定性工业生产网旋转台电子齿轮系统实物图（工业部分）

阶段二：验证 5G UPF 服务器上部署施耐德 EAE 虚拟化 PLC，通过 5G 与南向设备的通信的效果，测试用例和测试结果

编号	描述	结果
1	实时虚拟机 VPLC 业务对接 5G I/O 站场景	Pass
2	实时虚拟机 VPLC 业务对接 5G 控制变频电机按预设频率旋转和停止场景	Pass
3	实时虚拟机 VPLC 业务通过 5G 控制 I/O 站和变频电机协同动作	Pass
4	从 5G UE 下挂的 SCADA 客户端访问 UPF 服务器内置的非实时应用 SCADA 服务和实时 vPLC 业务	Pass
5	单 PLC 控制单伺服驱动器工作，以 5ms 作为发包间隔，采用 URLLC 技术保证通信可靠性，业务进行过程中，构造故障，业务无影响	Pass
6	验证实时虚拟机的最大时延	Pass
7	验证实时虚拟机的平均时延	Pass
8	验证实时虚拟机空载 16 线程任务切换性能	Pass

5G UPF 服务器上部署虚拟化 PLC 测试用例和测试结果

八、与已存在 AII 测试床的关系

5G 确定性端到端测试床是对现有 All 测试床体系的补充，丰富了 5G 确定性技术在实时 IO 控制、机器安全控制、伺服运动控制、磁驱控制以及机器人控制等场景的测试验证方法。

九、测试床成果交付

9.1. 测试床成果交付件

测试床的交付件包括：

- (1) 测试方案和测试报告；
- (2) 测试平台两套，“5G 确定性工业生产网旋转台电子齿轮系统”、“5G 确定性工业生产网智能输送分拣系统”；
- (3) 专利若干。

9.2. 测试床可复制性

测试床成果可在工业制造领域，特别是基于 EtherNet/IP、CC-LINK IE TSN、Modbus TCP 等工业协议的数据采集、普通 IO 控制、安全控制等场景进行推广复制，在运动控制等对通信严苛的应用场景做商用探索。

9.3. 测试床开放性

本测试床从构建之初就凝聚了包括 5G 厂商，自动化头部企业，以及 IT 通信等合作伙伴的广泛共识。在中国移动研究院的主导下，大家共同发掘行业关键痛点问题，识别 5G 关键、讨论测试方案制、构建落地测试床，共同推荐 5G 的向工业生产核心环节渗透。

十、其他信息

10.1. 测试床使用者

测试床初期仅限现有合作伙伴使用，待成熟后面向行业伙伴征集技术合作测试项目。

10.2. 测试床知识产权说明

中国移动通信有限公司研究院对本测试床的建设、运营以及使用拥有产权，本测试床相关的技术、专利、软件著作权等在测试建设合作单位中根据情况协商确定。

10.3. 测试床运营及访问使用

测试床部署在中国移动国际信息港（北京昌平）。初期仅限项目参与单位开展技术验证，待成熟后将征集更多合作伙伴共同规划新技术验证。

10.4. 测试床资金

三年总投入预计约 200 万人民币，中国移动研究院自主投入。部分设备合作伙伴提供。

10.5. 测试床时间轴

本测试床通过两年的运行，目前已取得多项阶段性进展，并进行了发布。2024 年的工作重点包括，继续按原计划进行 5G 确定性关键技术的验证和商用方案的孵化，推动测试床验证能力的对外开发，吸纳更多的合作伙伴参与进来，为 5G 在行业的发展做更多的贡献。



中国移动 5G 确定性工业生产网测试床工作计划时间轴