



中国移动
China Mobile

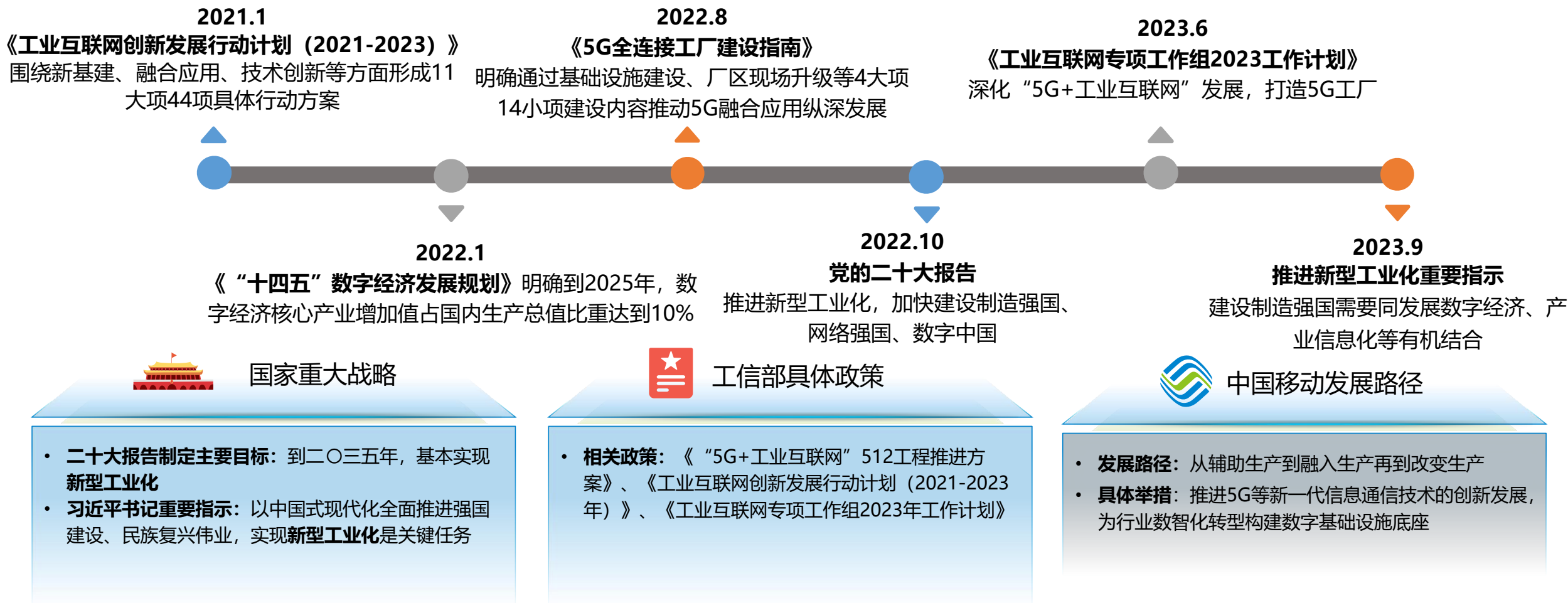
面向新型工业化的5G工业算网技术

中国移动研究院 黄震宁
2023年11月

www.10086.cn

新型工业化政策频出，已成为国家重大战略

2021年以来，国家工业互联网政策密集发布，总体呈**体系化、持续增强**的特点，工业互联网已成为推进新型工业化的**新型基础设施**



中国移动5G+工业互联网取得显著成效

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

30+ 工业领域
典型应用场景

4000+ 工业领域
商用案例

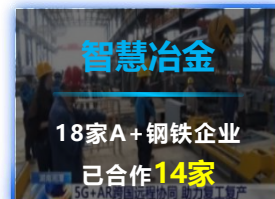
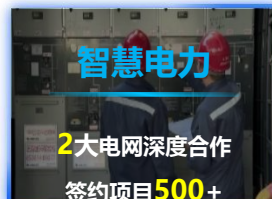
90亿 DICT
签约额

TOP1 绽放杯
连续六年

5G下矿井、进工厂、入海港,与行业深度融合实现多个“行业领跑”



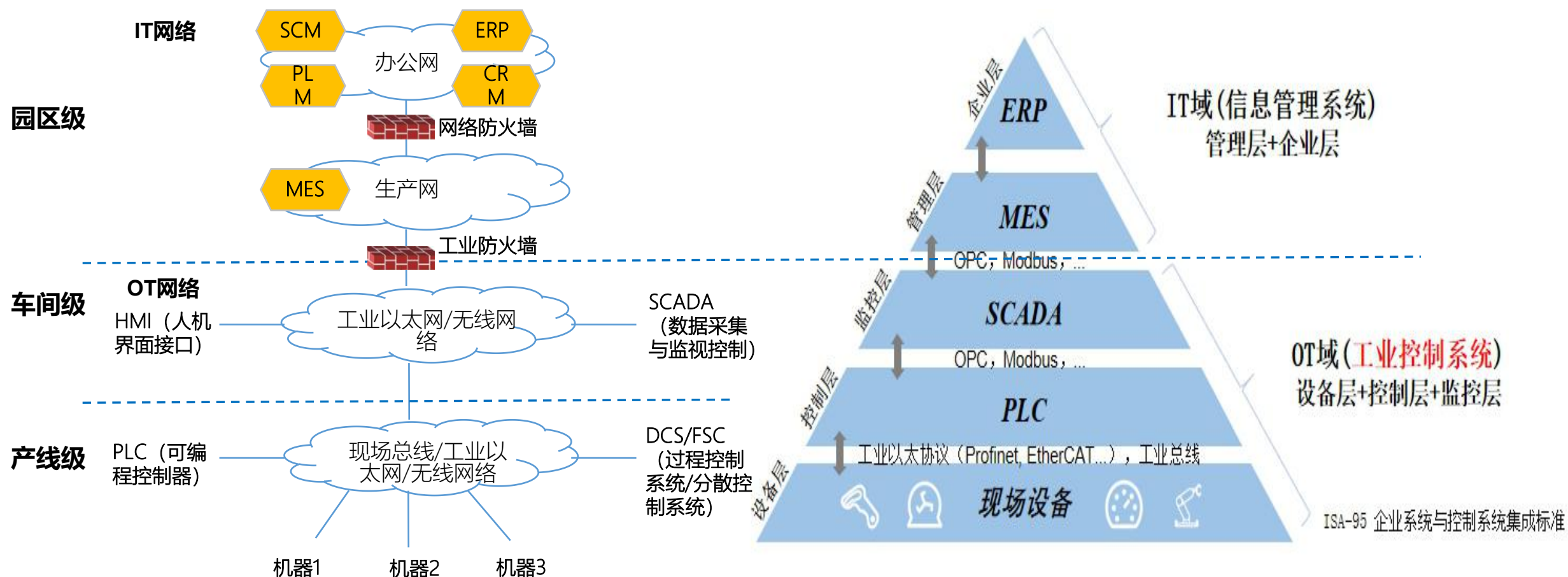
深耕典型场景，行业规模复制呈“燎原之势”



第六届绽放杯全国总决赛中获一等奖10个（工业6个），共有157个（工业67个）项目获奖，获奖项目总数及一等奖数量均为业界第一

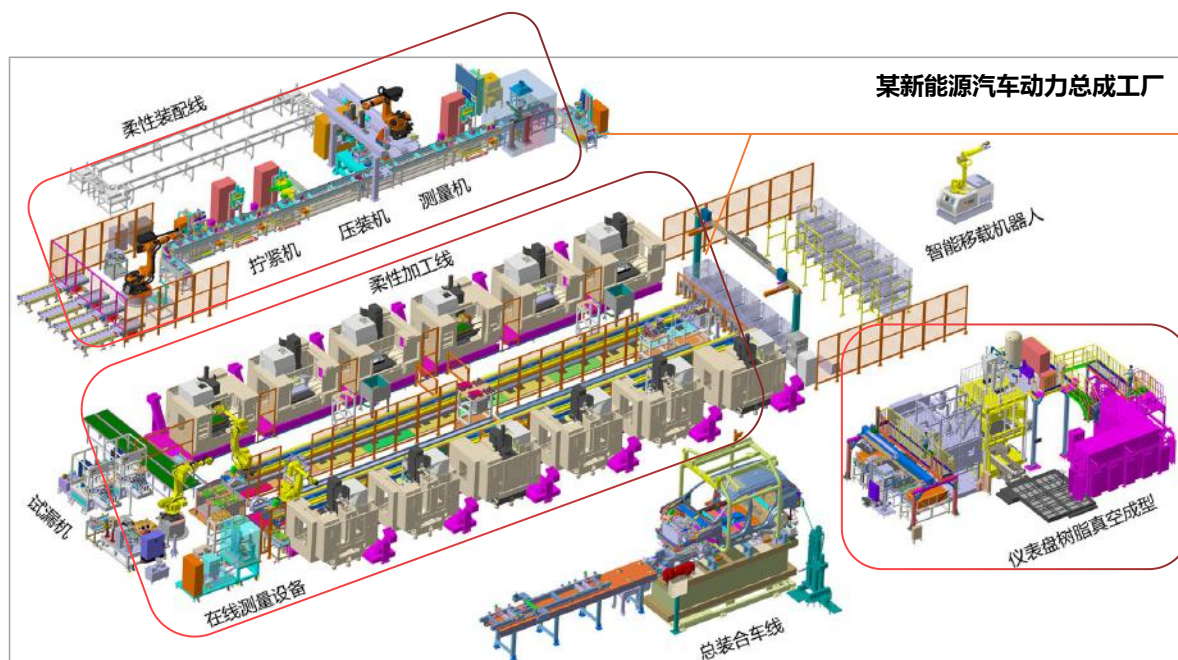
工业控制系统是当前工业控制生态的核心

工业企业的标准分层ISA-95（企业系统与控制系统集成国际标准）架构中，其中下三层被称为工业控制系统（即OT系统），是生产现场和上层企业信息系统数据信息流转的关键节点，同时也是当前工业控制生态的核心。

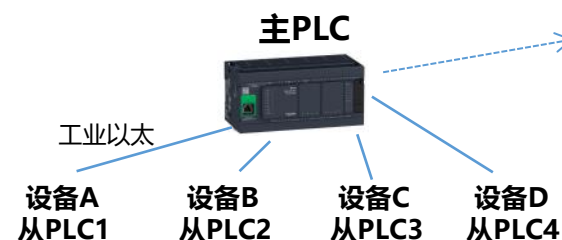


当前工业控制系统的架构组成

在当前的工业控制现场主要有两种部署方式，小集中式和集中+分布式，小集中式指产线上小范围的控制集中化，以边缘控制器为核心，集中+分布式指单产线多工位间的1主多从式控制，主站负责不同从站间的协调和数据传递。



集中+分布部署



以某一台设备的PLC作为主站即主PLC，其他设备的PLC作为从站即从PLC，主站负责协调不同从站设备的协调动作

从站设备一般是产线某个工序的不同设备，工艺上设备间具有强耦合性，如机床和上下料机械手间

集中式部署



集成PLC控制、视觉分析等能力，将产线多设备控制能力集中部署，各大工控厂商西门子、罗克韦尔、倍福、三菱等的主推产品

现场设备上不部署PLC，只部署跟执行机构、传感器互联的IO站、伺服站等

工业业务可划分为**强实时**、**弱实时**、**非实时业务**，通常强实时业务(运动控制、高精协同控制等)一般部署在产线设备控制器上，弱实时性业务(主从PLC控制、远程遥控等)部署在车间/园区侧，非实时性业务(数采、IT)部署在园区侧

业务类型	场景大类	应用场景	场景描述	细分行业	工控能力	通信要求	部署
强实时性业务	高精伺服运动运动、逻辑控制	柔性产线运动控制	工厂柔性生产中根据要求快速重构、配置，实时控制、数据集成和互操作性	高端制造、汽车制造等	工控周期<2ms	通信时延<5ms	端侧 产线设备
		多轴电机协同控制	运动控制的实时控制管理，多个运动部件协同按照预期运动轨迹和参数动作	高端装备、汽车、轨道交通制造、电子行业等	工控周期<1ms	通信时延<1ms	
弱实时性业务	普通IO控制、主从PLC控制	车间巡检机器人控制	定时采集现场图像、声音、温湿度、气体等信息，数字化存储和报警	钢铁、石化、冶金、矿山、食品、汽车、电子等	无	通信时延<50ms	边侧 车间、园区
		远程遥控操作	基于控制信号的远距离传输，机器视觉、AI等实现车间/工厂级无人远控	钢铁、石化、汽车、轨交制造等	无	通信时延<20ms	
		视觉检测控制	利用拍摄图片上传边缘云做视觉质检应用，对比分析检查，设备自动识别	汽车、高端装备、轨道交通制造、电子、钢铁等	无	通信时延<20ms	
		主从PLC控制	车间主控制器负责多个从控制器的协同和调度，如AGV仓储搬运	汽车、电子、家电、轨交制造、钢铁等	工控周期<10ms	通信时延<50ms	
非实时性业务	数据采集	物流系统调度和控制	利用仓库管理系统实现工程的自动控制，进行相应的信息处理	高端装备、汽车、钢铁、电子等	无	通信时延<200ms	边侧 车间、园区
		生产数据采集和协同分析处理	产品多品种共线混流生产，设备上报生产数据到平台侧，平台根据需求下发不同产品参数	汽车、高端装备、轨道交通、电子、石化、钢铁等	无		
	信息处理	MES/ERP等IT应用	制造运行系统、生产调度系统	各行业	无	无	边侧 园区

工业控制系统因软硬件强捆绑现状导致系统维护成本高、系统集成复杂度高、软件生命周期管理难的问题，工业自动化也逐步在向开放性的方向演进，主要是**网络开放性**、**软硬件开放性**、**控制系统架构开放性**三方面。

工业控制系统现状-软硬件强捆绑

DCS/PLC系统，从控制器硬件到编程软件，甚至IO都是绑定的，用户一旦选择某个厂商的系统就几乎固定了可用的软硬件、架构和技术路线，这样的系统可靠性稳定性方面会有优势，但缺点和局限性也很显然。

● 软硬件无法复用，系统维护升级成本高

随着设备的老旧以及生产复杂性的提升，这样的系统在维护和升级时就会面临产品选择上的限制和高昂的成本。如果要向其他PLC/DCS供应商的系统迁移，硬件和软件都不能复用，得重新编程组态，不仅技术上难以实现而且需要高额的投资。

● 异构系统互通复杂，研发更新效率低

涉及多个不同控制系统的相互集成时，需要各种协议转换设备，不但增加了企业成本，还使系统集成变得异常复杂，中心控制程序也因此变得庞大冗杂，使系统研发，维护和更新效率低下。

● 工控代码移植性差，软件全生命周期管理难

专有的工业自动化系统无法利用IT技术的进步，专为一个系统而编写的自动化软件应用程序无法在另一个系统上运行，应用代码可移植性不足导致软件创新受阻和投资受损。

自动化向开放性趋势发展



网络开放性

- 在标准以太网协议上修改的工业以太网给自动化系统带来了更大的开放性。
- 在运动控制领域，实时工业以太网也开始兴起。工业以太网的应用使得更多的设备更多的系统能够接入控制系统，“一网到底”也因此成为了可能。
- 近年来，随着TSN的发展，传统工业网络也在向TSN网络转型，多数工业以太网协议已开始支持。



软硬件开放性

- 90年代，基于PC的控制技术开始兴起，IPC、嵌入式PC开始承担起工业控制器的角色，使得基于Windows或者Linux的工业计算机、甚至商用电脑就可以成为控制器硬件，不依赖硬件厂商；
- 此外它的操作系统Windows和Linux也很开放，很多IT技术可以在这些“控制器”上直接使用，给自动化控制系统带来了更大的开放性。



控制系统架构开放性

- 2016年，埃克森美孚公司就通过开放流程自动化论坛（OPAF）发起了旨在定义“一个开放、安全、基于标准、支持互操作性并适用于多个流程工业的流程控制架构”，即现在由The Open Group组织的O-PAS标准；
- 通过集成实验室验证OPA的四大关键特性（互操作性、互换性、组态和应用程序的移植性）。

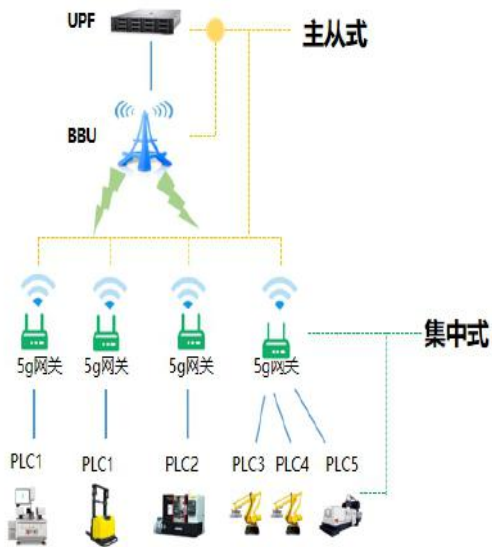
容灾保障

- 链路层**: 链路探测、双路保障
- 虚拟化层**: 单臂BFD检测、跨层联动
- 功能模块层**: 灰度升级、UPF热备份、BBU双核保障、RRU冗余覆盖
- 网元设备层**: 信令风暴抑制、计划性热迁移、双活容灾
- 网络协同层**: 负荷分担、系统byPass

5G组网架构提供了工控系统良好的适配环境

5G在工业中的组网架构、业务性能、标准算力底座、互联互通开放式架构可以天然匹配工业控制系统的部署现状、工业业务需求分布、以及工控系统的演进趋势要求，具备打造基于5G边缘算力一体化底座和5G网关特色产品的可行性。

5G在工业中的组网架构



部署架构

天然的主从架构，满足工业控制系统集中+分布、小集中化的架构

业务性能

5g标准的算力底座和业务性能满足在5g网关上部署工业强实时性业务，在5gUPF上部署弱实时性、非实时性业务的要求

工控系统和5G工业控制网络可以内生融合

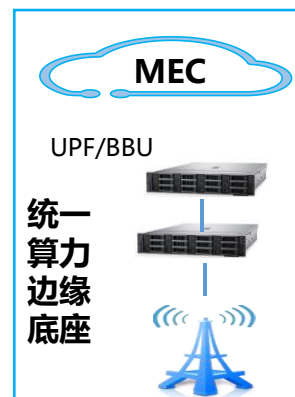
软硬放开放

5g标准的算力底座，5gUPF/MEC/BBU、5g网关为工业控制系统提供统一的X86/ARM硬件底座，满足软硬件解耦的要求

网络和架构开放

5g层级南北向、东西向天然的互联互通能力，满足工业架构网络开放性、控制系统架构开放性的要求

5G基座和工控融合架构



云侧：基于边缘云的企业应用

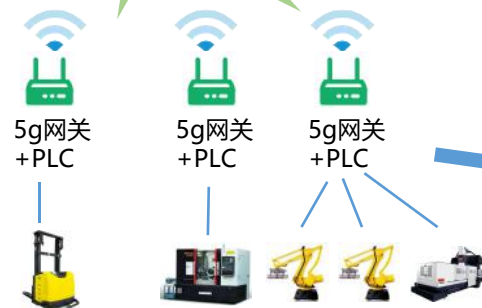
- ◆ 企业IT应用，MES、ERP、CRM等
- ◆ 工控应用编排运维管理平台

边侧：基于5G统一边缘底座的边缘控制器

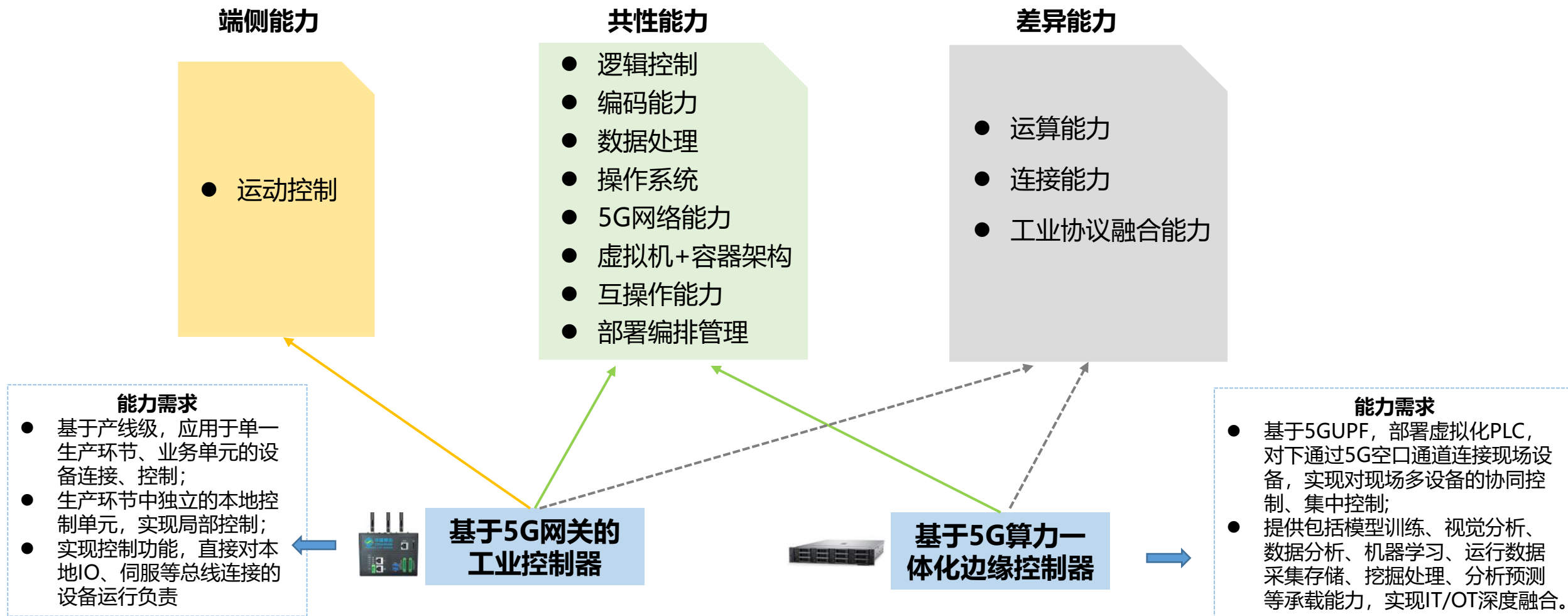
- ◆ 通过边云融合的优势，提供大带宽、低时延的数据传输能力，突破原有PLC的算力能力限制
- ◆ 提供工业控制和智能化应用的能力，面向工业智能化业务提供包括模型训练、视觉分析、数据分析、机器学习、运行数据采集存储、挖掘处理、分析预测等平台承载能力，实现IT/OT深度融合

端侧：基于5G网关的工业控制器

- ◆ 应对现场强实时性业务
- ◆ 直接通过工业总线/以太网控制现场设备
- ◆ 北向5G连接，具备高性能5G网络网络的接入能力



为满足工业控制系统不同业务的部署架构位置、性能要求以及工业开放性的演进趋势，5G基座融合工业控制和边缘应用需具备13种能力，满足端侧/边侧共性和差异化控制能力



端侧5G网关需具备强实时工控业务承载所需的能力，边侧5G算力一体化基座需具备弱实时/非实时工控业务承载能力。

共有能力

● 逻辑控制

- 基本逻辑运算能力、计数器/定时器、状态机、PID等用于完成工控系统中的逻辑功能

● 编码能力

- 具备多语言编程集成能力，支持IEC61131-3，支持高级语言

● 数据处理

- 处理和分析工控系统中的数据技术，如采集处理分析、建模优化

● 实时操作系统

- 采用分时调度方式实现多个高实时操作系统并行调度
- 利用CPU多核、指令虚拟化、接口虚拟化技术满足高实时性

● 5G网络能力

- 通过5G与现场数据及各类工业组态软件交互，低时延、高可靠通信，TSN实现确定性保障
- 利用5G切片技术对业务所需网络资源隔离

● 数据调度

- 实时应用Qos优先级服务保障，QoS服务灵活，功能完善

● 虚拟机+容器架构

- 支持虚拟机和容器架构。两个网络通道，一与PLC开发环境连接，二与现场被控对象连接。

● 互操作能力

- 支持开放自动化IEC61499的接口和部署能力

● 部署编排管理

- 5G网络中支持部署vPLC的节点安装代理，包括指令接收、算力水平检测、通信性能检测、检测结果回传、PLC部署等

5G网关+
工控能力

5G边缘算力基座+
边缘控制能力

● 运动控制

端侧

- 基于PLCopen标准运控控制技术，实现伺服、步进执行器的控制，点位、直线、插补等同步

● 运算能力

端侧

- 支持算力>1T OPS，控制循环周期在500us~20ms之间

边侧

- 支持算力>2T OPS，控制循环周期在10ms~30ms之间

● 连接能力

端侧

- 支持多个I/O设备连接，从站I/O设备和5G网关PLC系统间可通过以太网接口实现

边侧

- 支持通过5G空口连接网关或现场5gIO站的能力

● 工业协议融合能力

端侧

- 支持南向常见工控协议融合
- 通过协议栈进行总线数据的检索、解析、转换、配置，实现协议转换，通过5G网络传输的能力

边侧

- 支持OpcUa/Modbus/MQTT等北向协议，常见南向协议

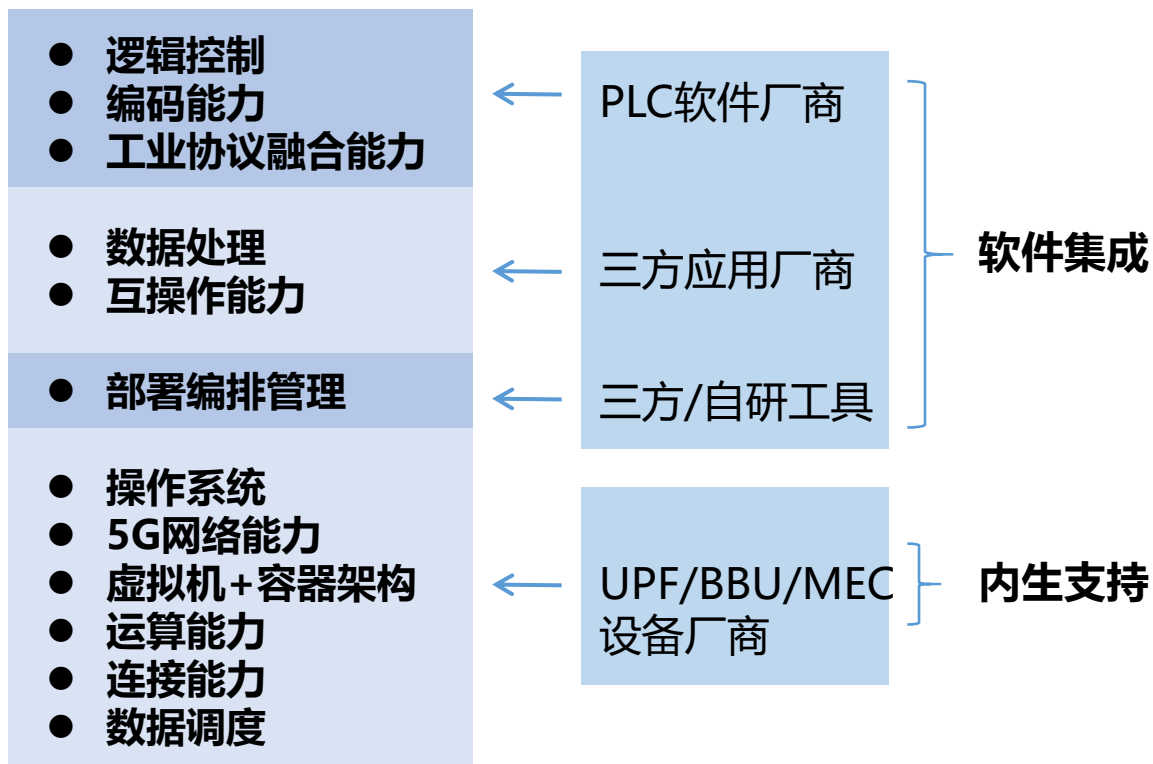
单端能力

差异能力

5G算力一体化基座承载工控应用，能力集成上分为软件集成和内生支持两类，工控应用软件的**集成部署**和如何**保证基座进程和硬件网络端到端的确定性**是最核心的问题。

□ 基座集成工控和工业智能化应用能力汇总

- ✓ 工业应用层通过软件集成方式
- ✓ 操作系统、实时虚拟层、容器层，算力一体基座内生支持

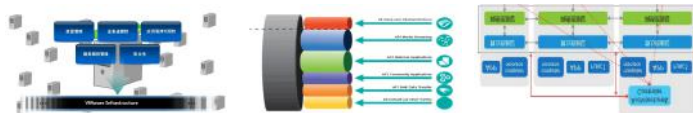


核心问题

1、基座确定性能力

□ 进程和网卡驱动间端到端确定性

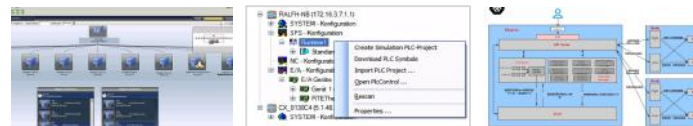
- 虚拟化+容器架构，实时性区分
- 数据调度，实时应用优先级数据保证
- 编排管理，应用算力调度



2、应用软件部署

□ 工控应用能力扩展

- ✓ PLC开发/运行态部署
- ✓ 应用系统接口和跨层通信

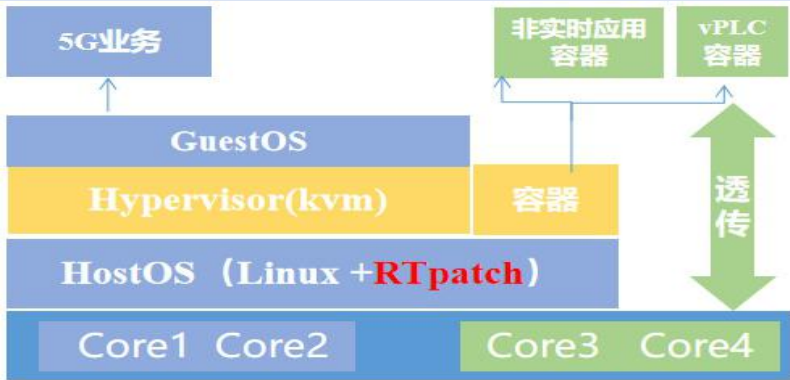


5G 算力一体化基座承载工业应用，应支持按两个阶段方案进行演进

主流
架构
对比

大类	小类	实时性	移植性	适配性	便利性
改造原有操作系统	内核补丁	一般，能实现软实时要求，存在一定抖动	一般，须整体系统移植	较差，工业协议需单独开发适配	部署方便，不改变原有Linux的API
	多核处理器AMP	较好，可实现硬实时要求	一般，需跟随原有操作系统移植	较好，RTOS上可直接适配工业协议	部署繁琐，不同操作系统都需支持
	type1虚拟化	较好，可实现硬实时要求	较好，通过type1 hypervisor统一管理	较好，RTOS上可直接适配工业协议	部署繁琐，设备驱动程序等代码都需加到hypervisor中
	type2虚拟化	较好，可实现硬实时要求，相对type1差些	较好，通过type2 hypervisor统一管理	较好，RTOS上可直接适配协议	部署方便，hypervisor架设在hostOS上

UPF
方案
演进



阶段1：实时化补丁+容器部署

关键能力：

- ✓ 实时化改造不应影响原有网元业务
- ✓ 容器本身的轻量化和实时性提升
- ✓ PLC容器划分单独CPU核管理平台

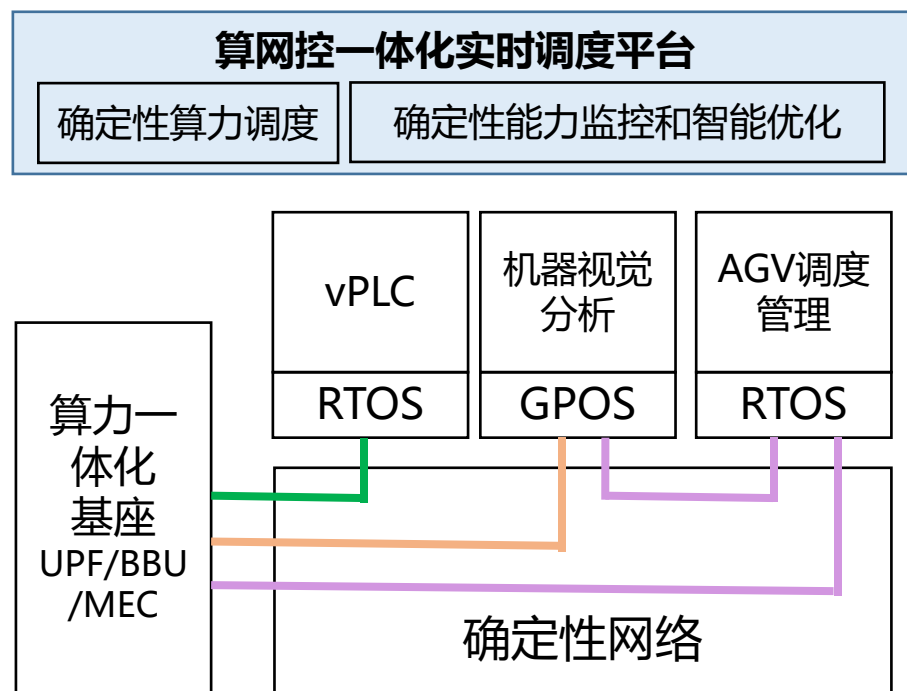


阶段2：混合操作系统

关键能力：

- ✓ 虚拟机和实时操作系统
- ✓ 虚拟机实时操作系统实时性测量和优化
- ✓ RTOS划分单独CPU核管理平台

5G算力一体化基座承载工业应用，除操作系统部署架构外，基座应在**数据调度**、**算力编排**、**网络保障**三方面重点保障基座确定性能力，同时这三方面也是算力一体化基座赋能全场景工业应用集中部署的前提。



UPF关键能力：

● 操作系统数据调度

具备数据调度服务保障能力，PLC工控应用、基于网络的语音通话、视频服务，使用高优先级Qos数据传输，保证网络拥塞时PLC应用的实时性，语音服务、视频服务流畅、无噪音、不失真。

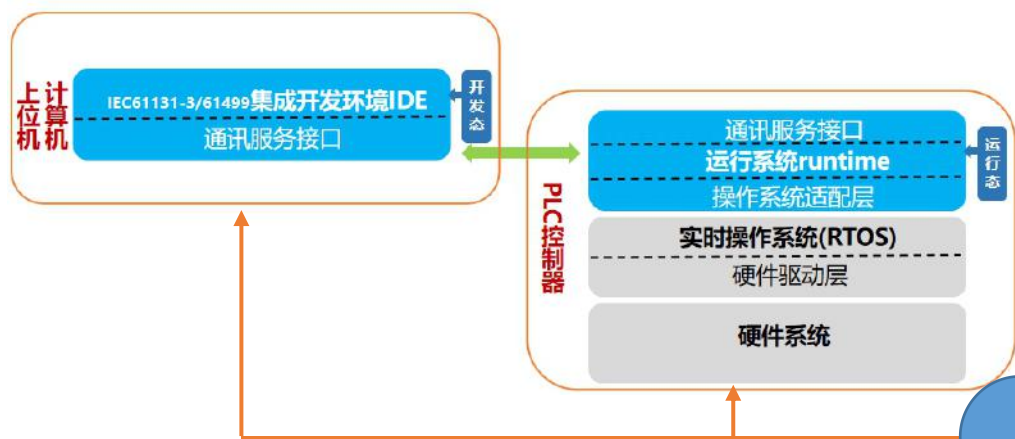
● 多应用算力编排

工厂级部署时，PLC数量级能达到百级别，同时融合运动控制算法等，对算力分配和编排有一定要求。需要基于工业应用对实时操作系统的需求，结合当前基座的资源状态，动态分析出应用所需的实时操作系统的算力，并给出部署建议，或协助应用完成安装、加载、部署；算力编排应当尽量确保应用获得充足的确定性算力，满足应用硬件资源的合理分配和使用。

● 多应用业务网络保障

- 1.需要具备灵活拉通5G基座和工业应用APP，以及任意几个应用APP之间确定性传输通道的能力；
- 2.在同TSN网卡内，应用间可获得时延小于100us的确定性传输通路。在跨TSN网卡转发时，应用可获得时延小于250us的传输通路；
- 3.基座也能够为应用提供高精度时钟同步，确保虚拟化PLC之间，虚拟PLC与IO设备之间建立精准同步关系。

在5G基座上融合PLC应用时，从工程人员开发便捷度和基座融合简洁性考虑，PLC运行态（RTE）和开发态（IDE）需工控厂商进行更多的适配满足新型工控系统下的要求，支持**开放自动化**、**多vPLC隔离**、**组态便捷识别**。



开放自动化

PLC应用软件应支持IEC61499和IEC61131-3相结合的方式

- IEC61131是单设备程序标准，以单个设备为顶层软件模型
- IEC61499基于事件驱动的功能块网络，面向对象编程，控制系统作为单集成系统建模和开发，作为分布式系统部署；
- 实现独立于底层系统的应用模型，程序代码跨越多厂商平台和工程设计工具的可移植性，促使软件和硬件解耦

多vPLC隔离

需保证不同vPLC通道的隔离和带宽资源的合理分配

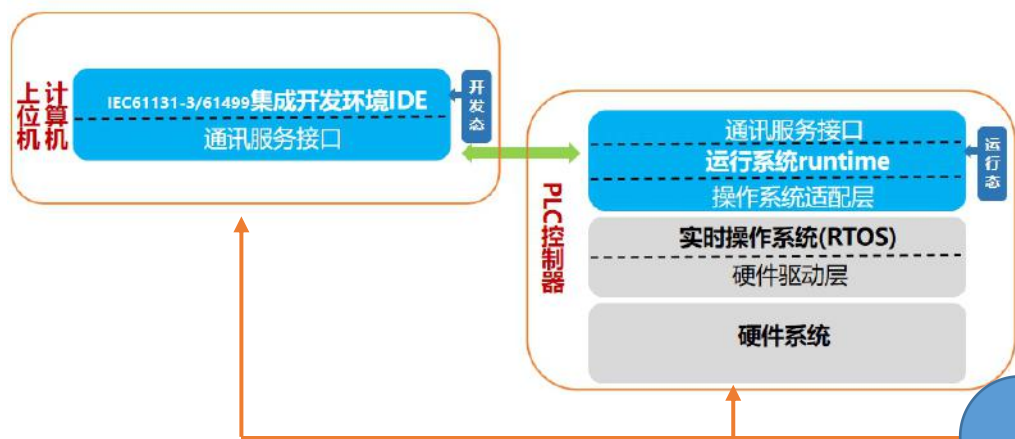
- 对vPLC实例划分不同网络平面和vlan保证实例的通道隔离；
- 虚拟化或容器化部署时，利用底座k8s的资源分配和管理特性，对不同的vPLC实例绑定或共享不同的网络和计算资源；
- vPLC任务支持多优先级调度；对不同优先级的PLC任务设置不同优先级，优先满足高优先级任务的调度。

组态便捷识别

需满足5G+有线混合下组态的易用性和兼容性

- 软件中需支持无线、有线的图形化快速配置，如支持5G网络下站设备（CPE、网关等）描述文件导入和拓扑连接
- 可视化呈现当前组网（有线、无线）的拓扑关系、地址、协议，设备组网间5G或者有线网络故障时图形显示

在5G基座上融合PLC应用时，通过**通信服务接口**的支持满足南北向通过的要求，依赖**操作系统适配层**兼容不同操作系统和应用部署方式，采用集成主流的**应用跨层通信**技术满足异构系统间的高效互通



应用跨层通信

保证实时/非实时应用，异构操作系统间高效互通

- 共享内存，通过发起方系统根据通信申请一段内存用于通信，划分各个通信区域，读取共享内存寄存器配置区内配置信息，开启多系统间的通信；
- 虚拟设备通信，通过虚拟设备建立不同操作系统间的通信接口，完成服务端和客户端的跨系统通信。

通信服务接口支持

需保证应用南北向通信对接的能力

- 支持OPC-UA、MQTT协议对接北向的MES、SCADA系统或其他智能化平台，以及云端工业应用；
- 支持PLC南向主流工控协议，如ModbusTCP、EtherCAT、EtherNet/IP、PROFINET协议；
- 支持标准IEC61499和IEC61131-3开发环境IDE的接口能力，保证PLC代码的在线调试和运行服务

操作系统适配层

需通过适配层兼容适配不同操作系统和部署方式

- 明确所有接口的定义，支持调用操作系统的线程、文件系统等接口，实现应用程序的调度和运行；
- PLC RTE可支持容器化的部署，将PLC运行环境整体打包标准化单元，实现开发、交付、部署环境的一致性，使其免受外在环境差异的影响，减少PLC应用间的冲突

5G 算力一体化基座承载工业应用，生态上分工控厂商和基座厂商，工控应用的部署在应用开发侧由工控厂商完成，对基座本身来说核心是**基座的确定性能力**优化和协调

方式一：半集中化

弱实时性工业控制业务+
工业智能化应用业务

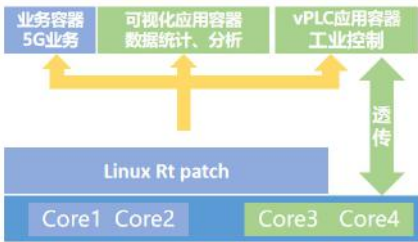
方式二：全集中化

强实时+弱实时性工业控制业务
+非实时工业智能化应用业务

5G性能+硬件生态的演进

操作系统的实时性

- UPF现状：
 - linuxII性虚拟化+容器架构
 - 虚拟化和容器共管理平台
- 实施方案：
linux实时性改造

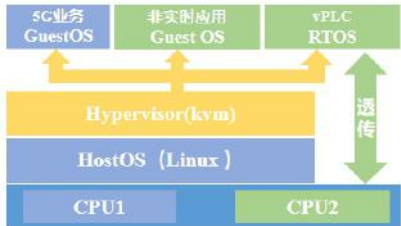


操作系统数据调度

- 需求：
QoS服务灵活，功能完善，可根据不同场景设定
- 技术：
PLC工控应用、基于网络的语音通话、视频服务，使用高优先级Qos数据传输，保证网络拥塞时PLC应用的实时性，语音服务、视频服务流畅、无噪音、不失真。

操作系统的实时性

- 实施方案：
II型虚拟化融合实时操作系统，在实时操作系统上部署工控业务



应用算力编排

- 需求：
全集中化通常部署PLC数量在百级别，同时融合运动控制算法
- 技术：
根据工业应用对RTOS的需求，动态分析应用所需算力，获取部署建议，协助应用安装、加载、部署。

业务网络保障

- 需求：
需灵活拉通多个工业应用APP之间确定性传输通道的能力
- 技术：
UPF上对网元业务和TSN网络传输能力评估，收到应用对网络的确定性需求时，结合应用的收发时延和转发路径时延，确定最优的路径选择，协助建立业务流转发通路

实时化改造->完整实时操作系统



强化技术突破

- 面向数智工厂应用需求，持续稳定推进新标准制定、新技术攻关，OICT融合贯通
- 引导产业新方向，支撑新产业格局演进



自主创新，产业引领



打破跨界障碍

- 打破工业制造和通信网络技术壁垒，形成发展愿景共识，鼓励创新合作
- 推动创新产业双链深度融合，加快产业结构化升级



融合汇通，协同发展



推进应用创新

- 开展多层级应用实践，推动规范约束，促进成果转化，打造标杆示范工程
- 推广解决方案应用，激发产业活力



标杆示范，生态繁荣



携手共进，繁荣5G+工业互联网产业生态 加速中国新型工业化进程

中国移动研究院



中移智库



www.10086.cn