

基于开放架构的 工业智能计算机

改变IEC金字塔计算体系的新方法

中国科学院计算技术研究所

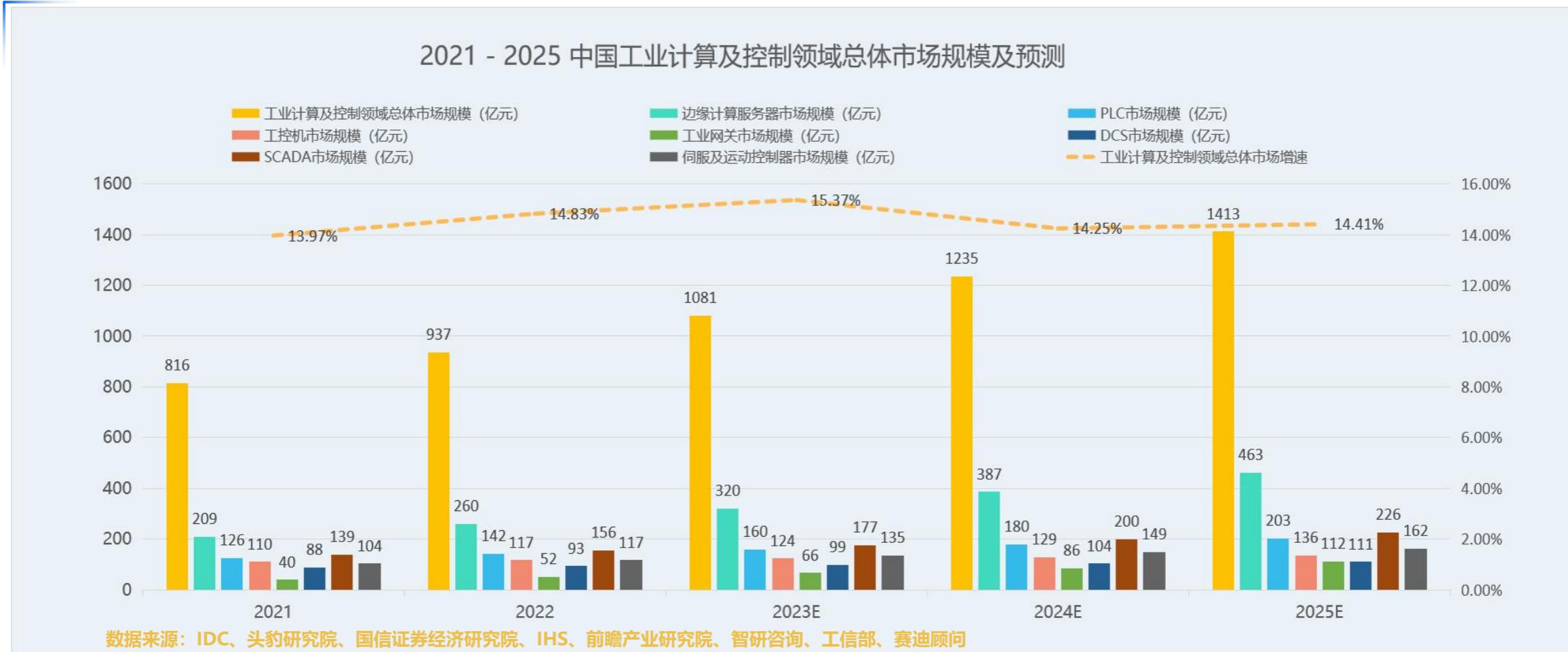
韩银河

2024.11



计算是支撑工业信息化、数字化、智能化的基础

● PLC、工控机、伺服驱动器、DCS、SCADA、工业网关、边缘服务器七类基础设施突破千亿市场



2021年国务院

《“十四五”智能制造发展规划》

2020年国资委

《关于加快推进国有企业数字化转型工作的通知》

2021年工信部

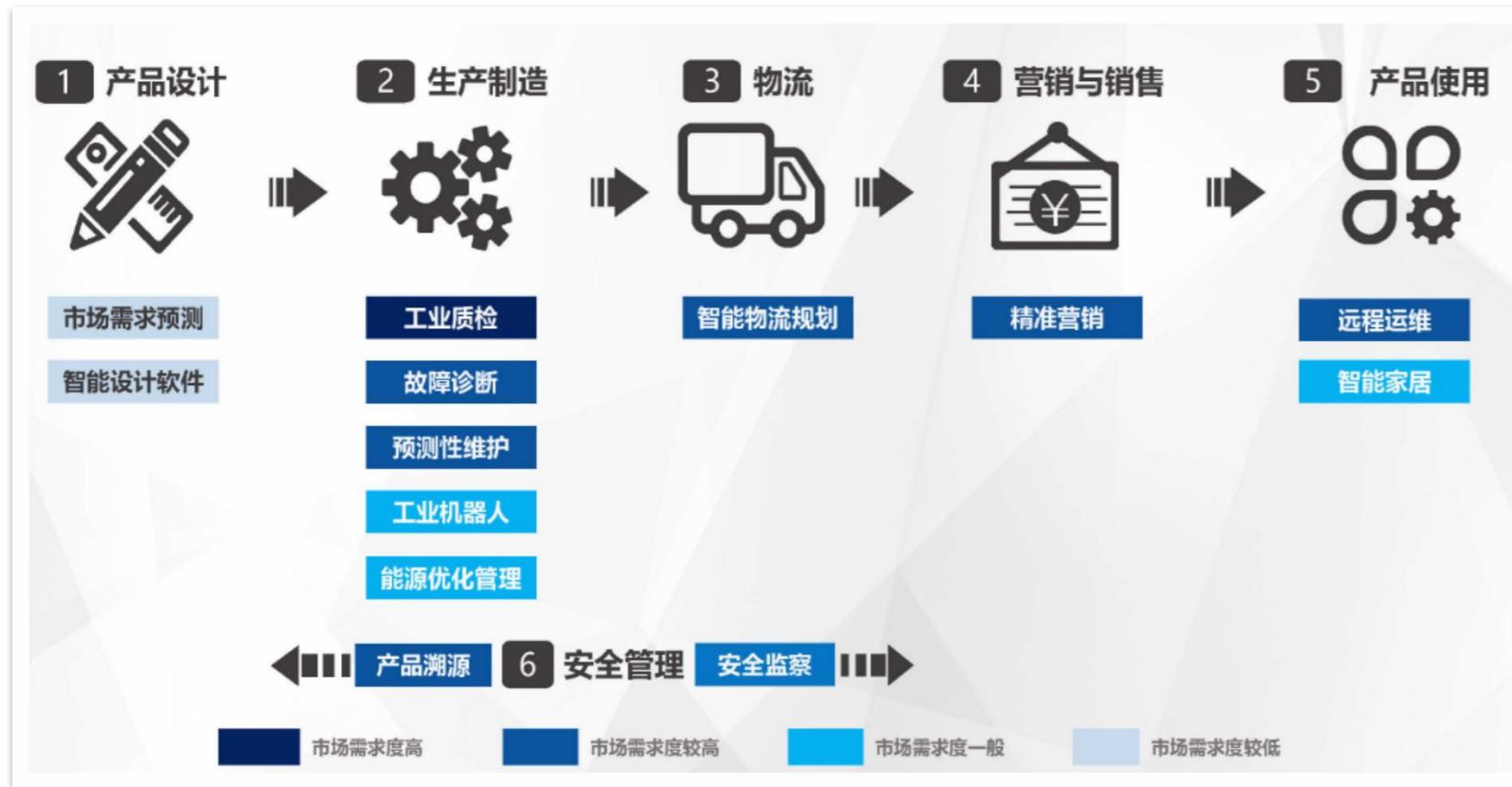
《“十四五”软件和信息技术服务业发展规划》

2020年工业互联网联盟

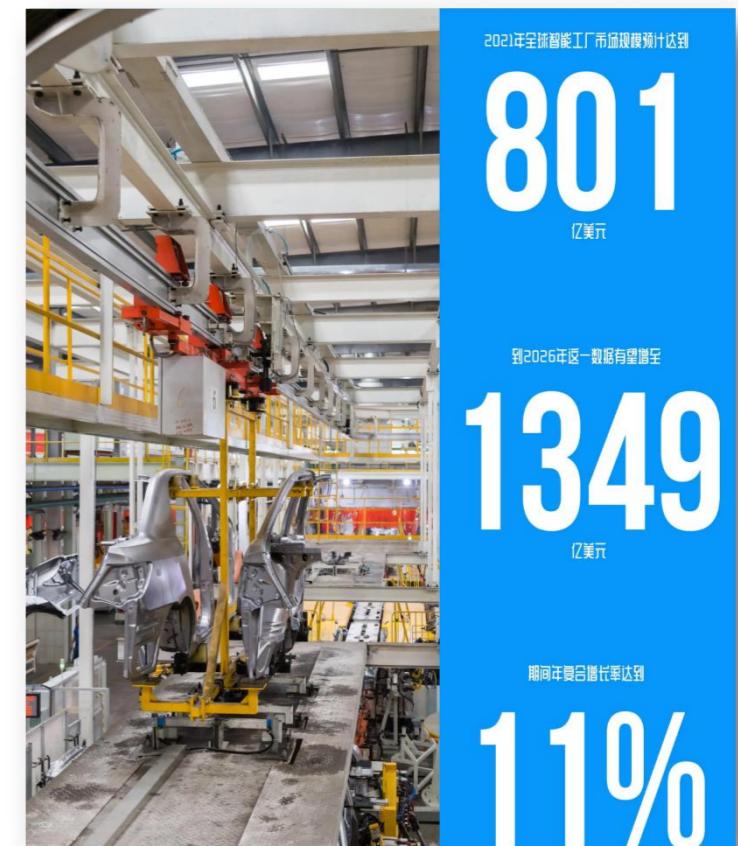
《工业智能白皮书》

智能化浪潮：工业对智能化需求增长明显

● 先进制造、智慧工厂、新能源等方向是智能化需求最突出的领域



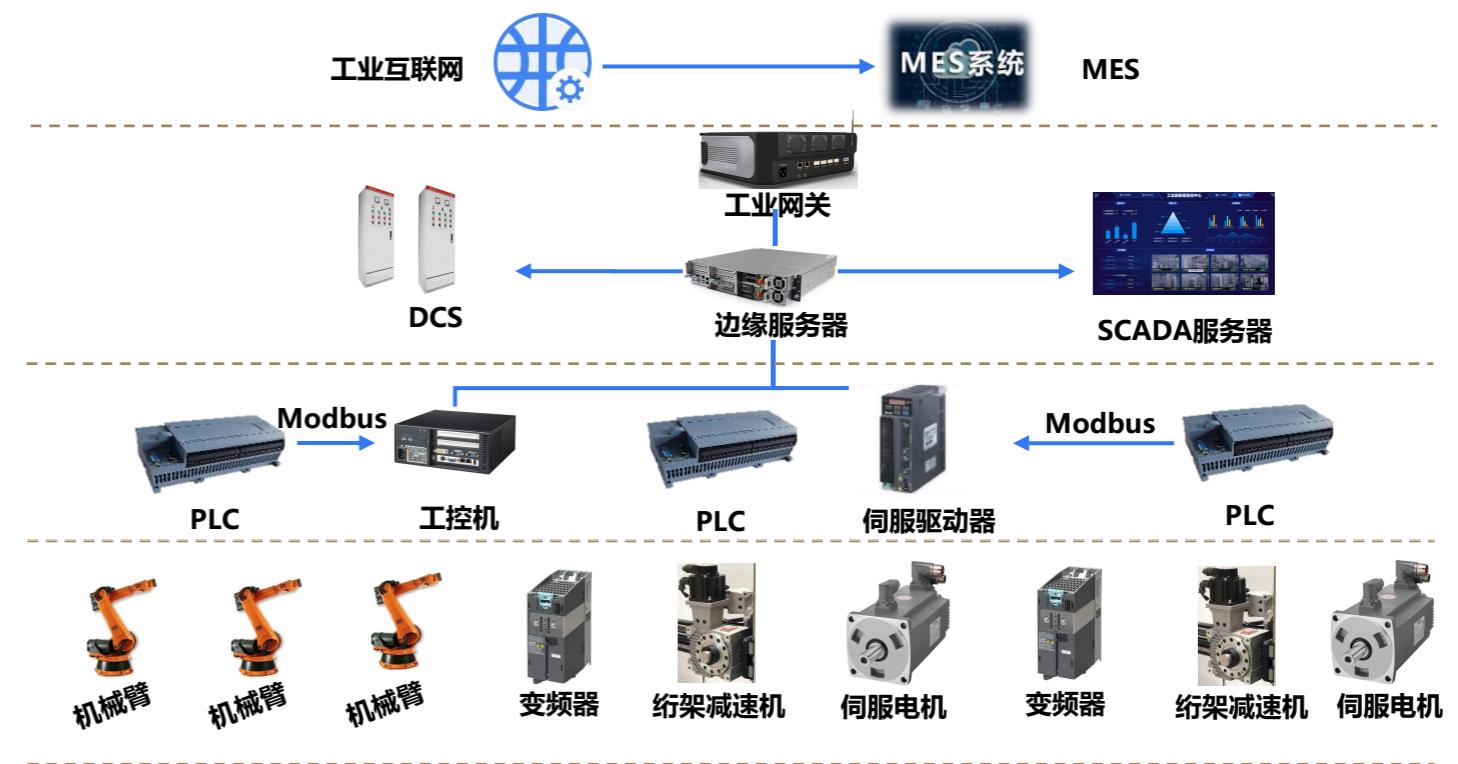
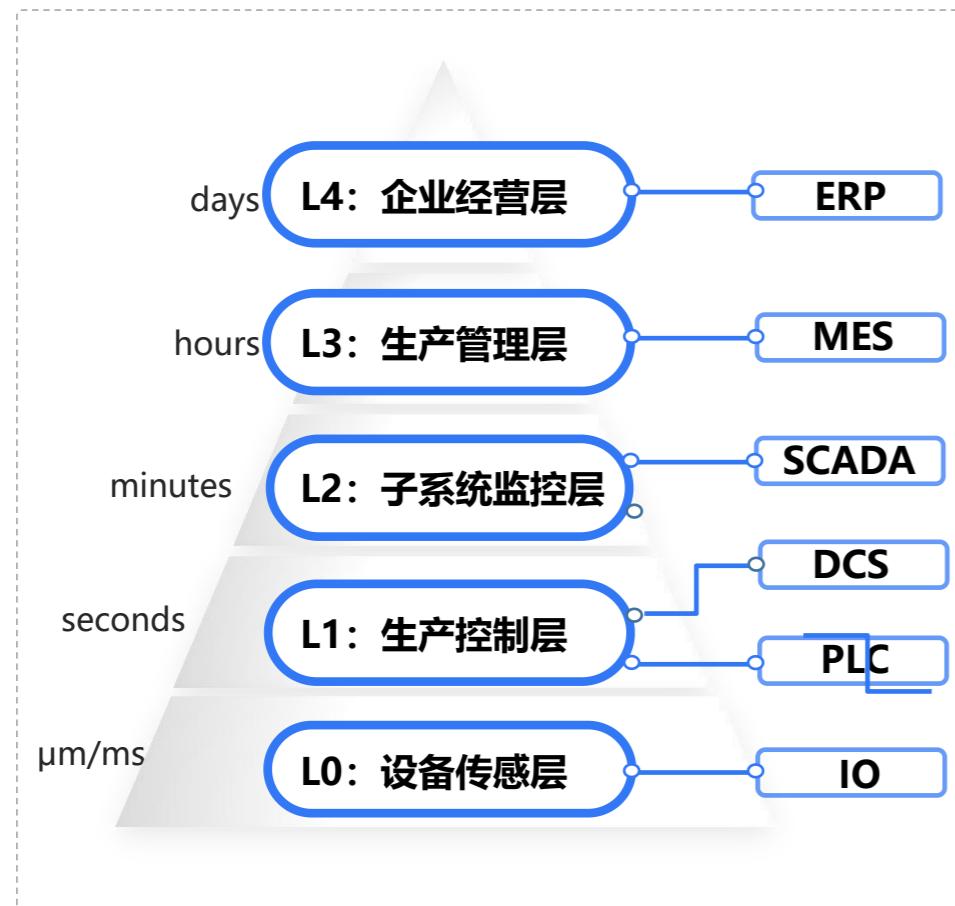
制造全生命周期的智能化需求 (图来自赛迪调研报告)



全球智能工厂市场规模-国际市场研究机构Markets and Markets报告 (2021)

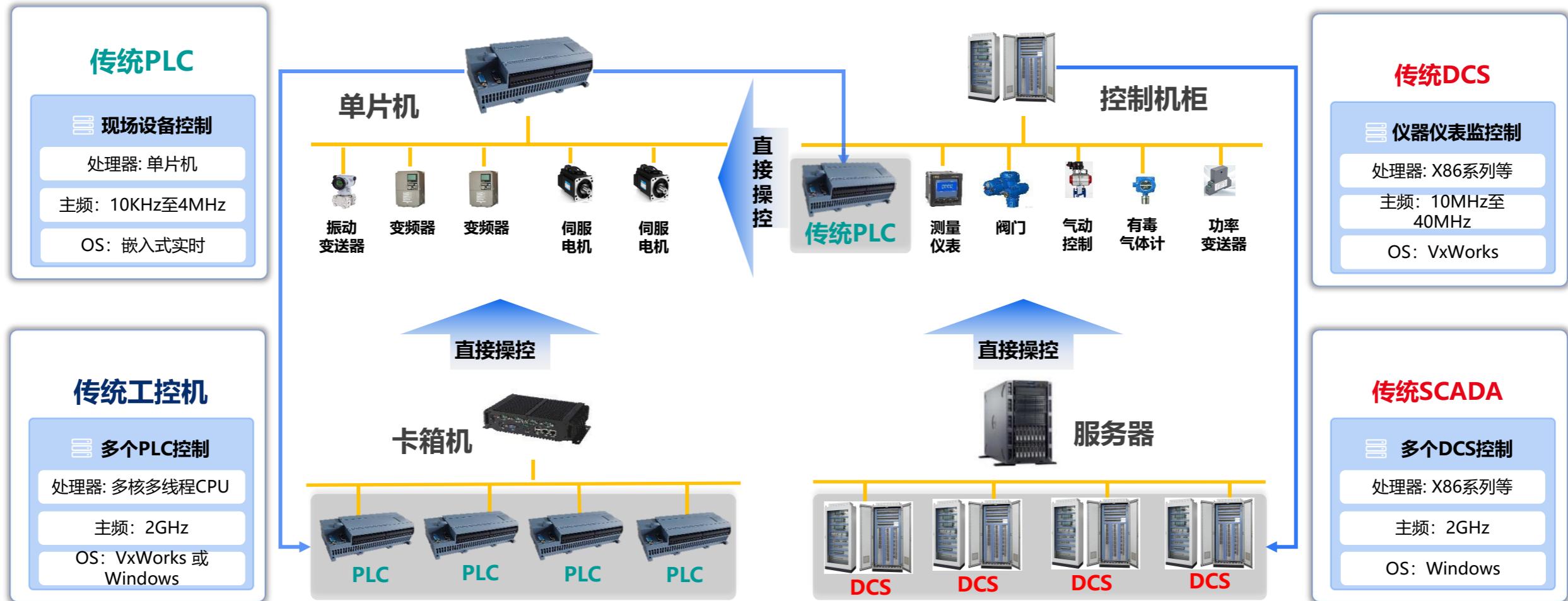
工业计算现状：IEC62264金字塔五层体系架构

- 当前IEC62264金字塔架构是五层结构，边缘端属于生产控制层（L0-L2），云端属于管理经营层（L3-L4）



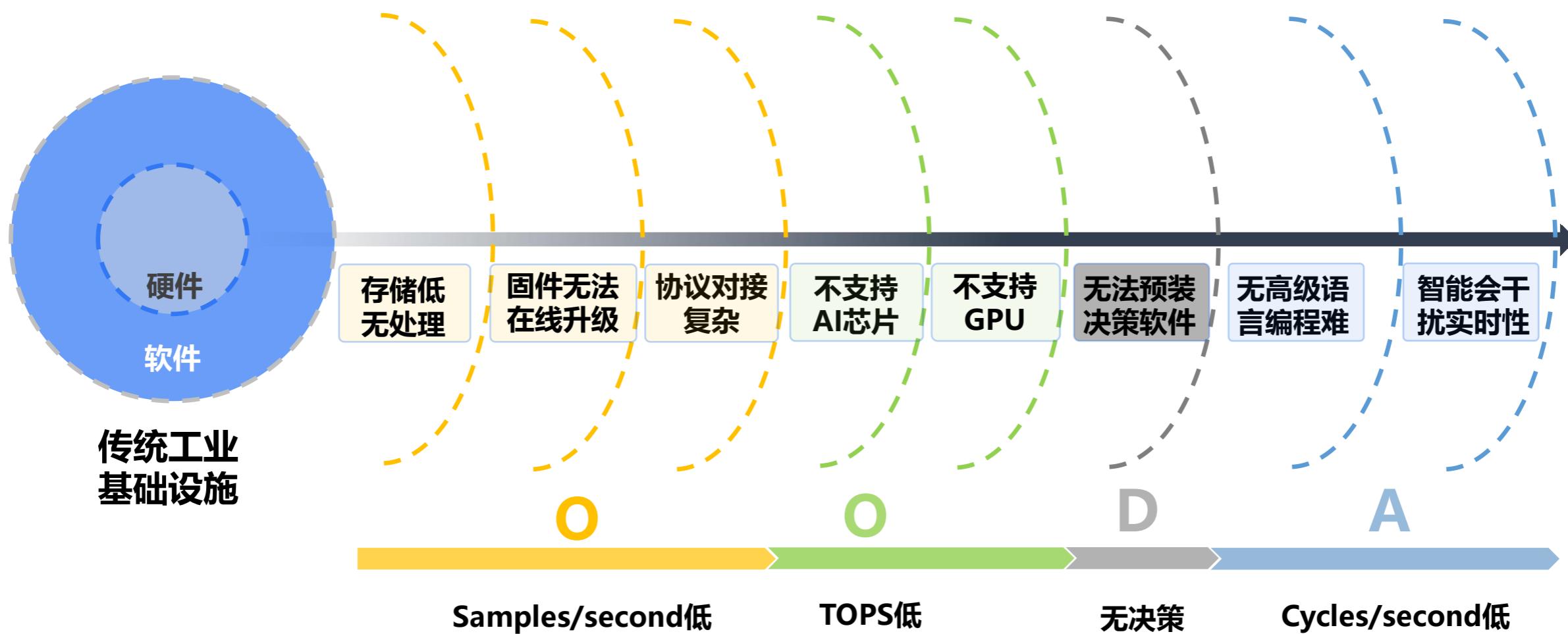
技术挑战1：计算机数量多、种类多、算力低

- 生产控制层的PLC、DCS、工控机等本质是运行单一控制程序的计算机，体系结构十分离散



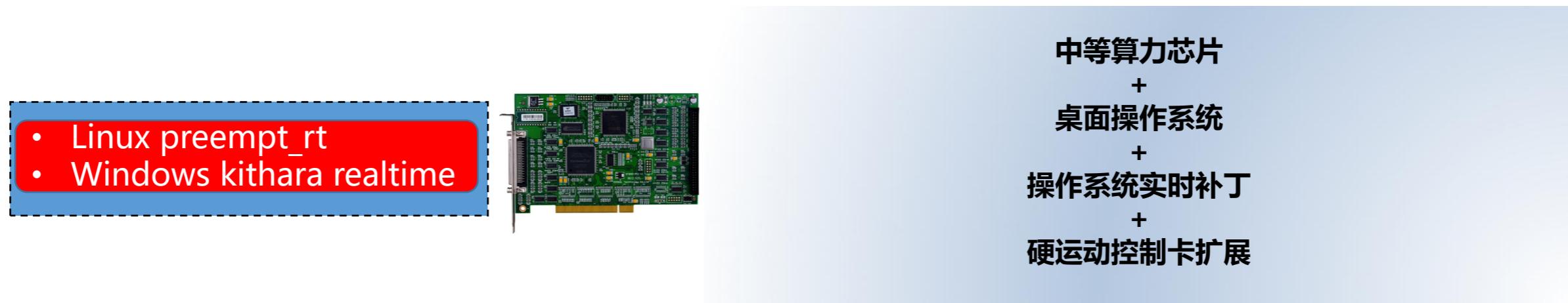
技术挑战2：生产控制层（L1-L2）难智能化

- 目前的PLC体系，硬件上算力不足，软件上不支持当前通用的智能计算框架



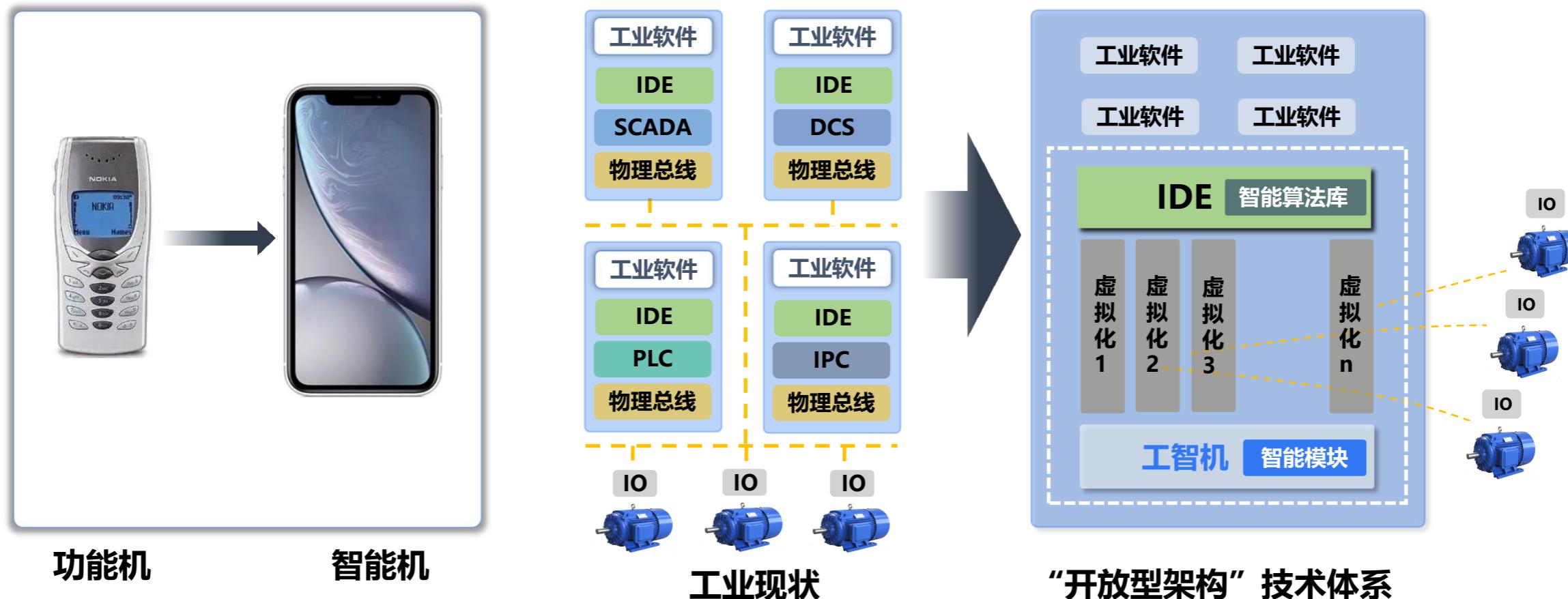
技术挑战3：工业计算欠缺开放性，无法快速形成事实标准

- 相比于个人电脑行业，工业计算架构**开放性不足**，欠缺事实标准，兼容性的不足，使得无法适应快速发展新应用需求，也无法支撑工业软件的快速迭代



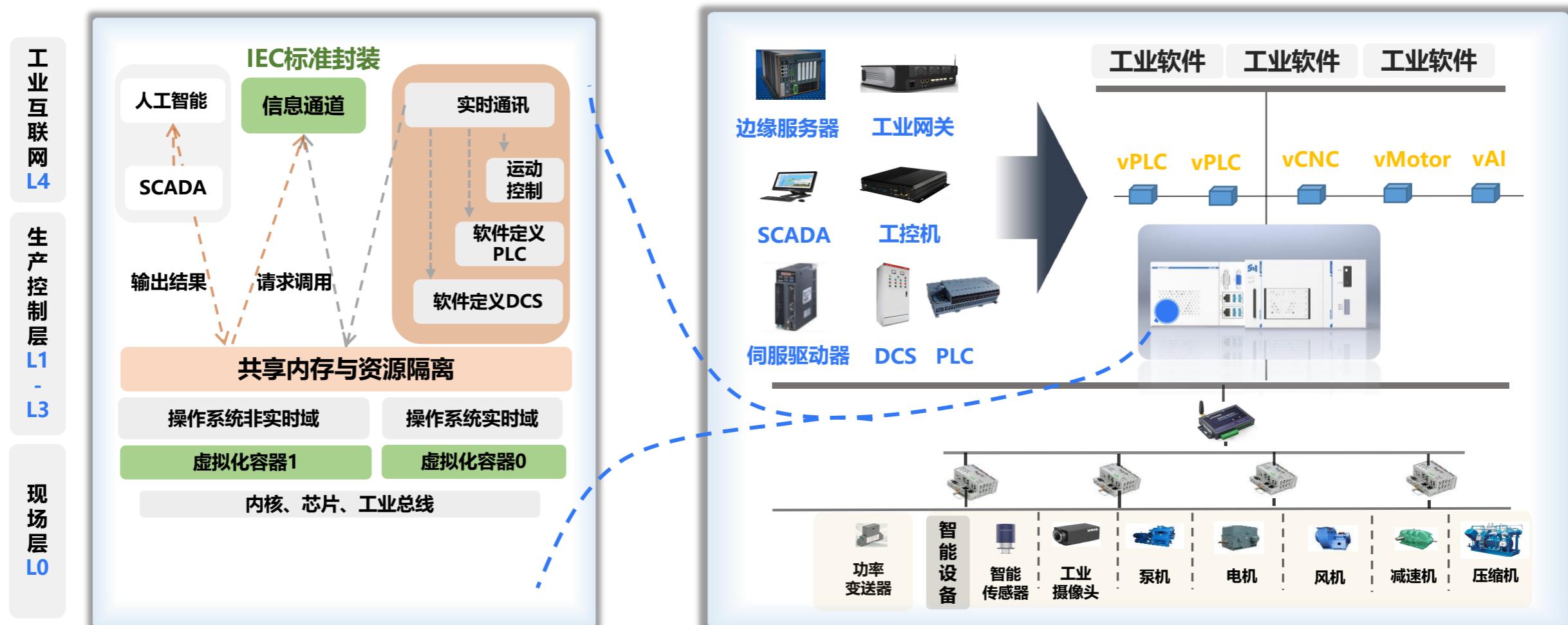
我们的思路：基于通用计算和软件定义的新开放型架构

- **基于开放架构的工业智能计算机：**将控制面与硬件面解耦，把和物理世界交互的模拟控制设备分离出来，通过软件技术实现PLC、DCS、运控、CNC数控，并融合视觉、APP、仿真、数据库、互联网通信等非实时应用



开放架构的工智机是改变当前IEC金字塔计算架构

- 实现控制程序和计算程序，将替代PLC、工控机、DCS、SCADA、工业网关、边缘服务器等“工业电脑”，将多个devices变成一个device, 改变IEC金字塔架构

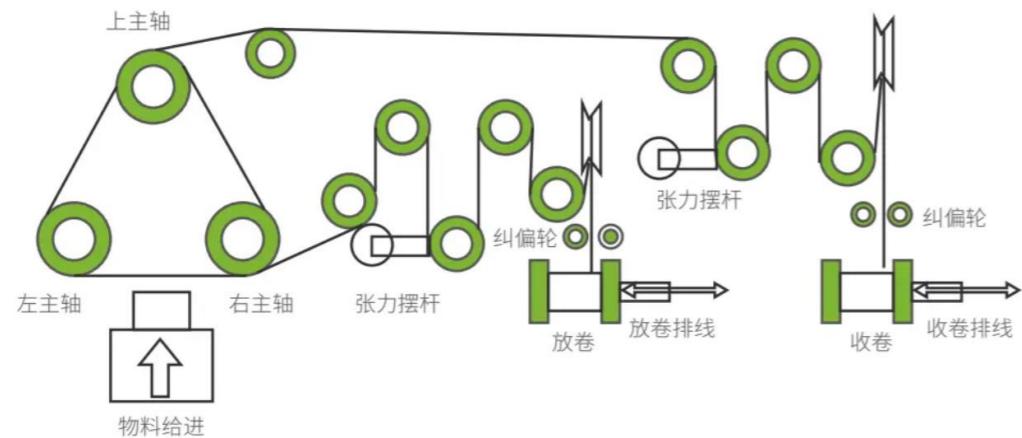


开放架构的工智机核心优势举例

● 高速运动控制

用商业芯片的性能持续增长实现定制类似的功能，单指令速度超1个数量级；latency与jitter基本能实现实时系统类似性能

多轴电机同步控制、机械臂、磁悬浮流水线等场景



● 软件开发成本大幅下降

硬件成本在1/2 ~ 1/5；二次开发代价在1/5 ~ 1/12

3C电子视觉质检、智慧工厂、新能源等场景



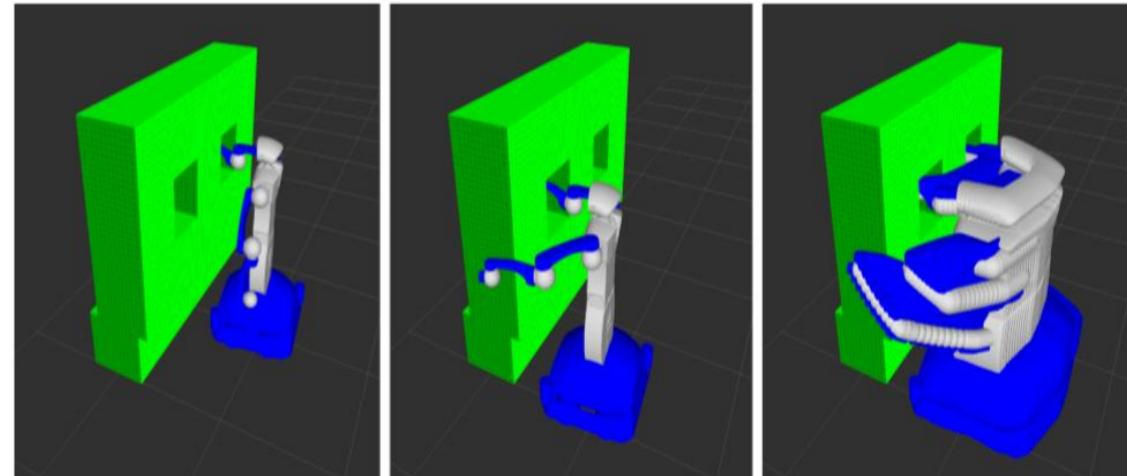
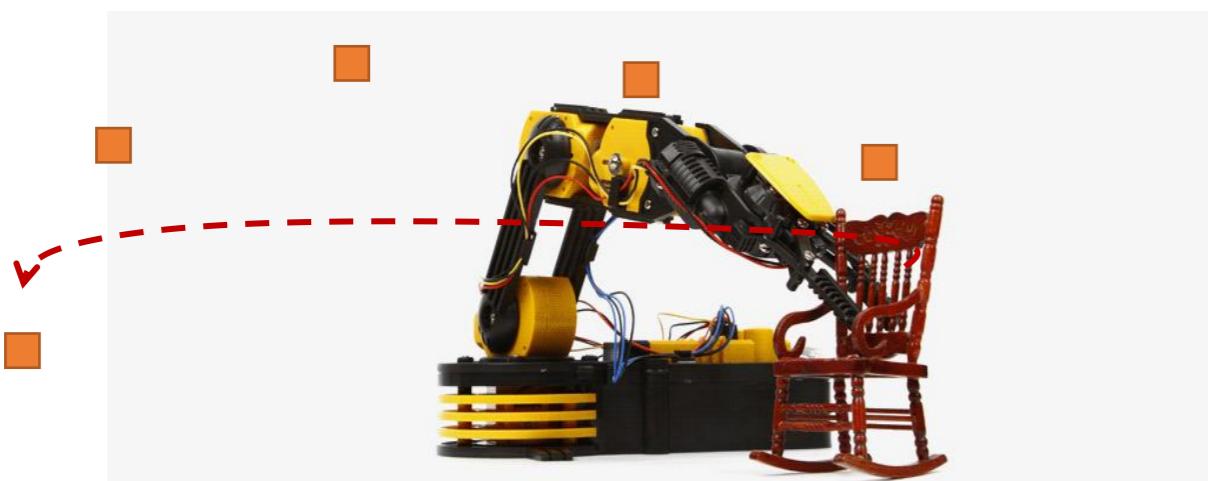
关键技术一：工业智能计算机体系结构

● 异构智能计算体系结构



关键技术二：运动控制芯片

- 两个核心步骤



算力需求

对于15个自由度的机械的臂，采用某型GPU，路径规划
的时间达到了**7.7秒**。

关键技术二：运动控制芯片

01

双目感知加速器 (O)

02

神经网络处理器 (O, D , HPCA20)

03

第一个关节运动控制加速(A , TCAS22,DAC17)

- ◆ 实现了大自由度关节精准控制(100个以上)

04

第一个运动规划控制加速器(A , ICCAD20, DAC19,

DAC18)

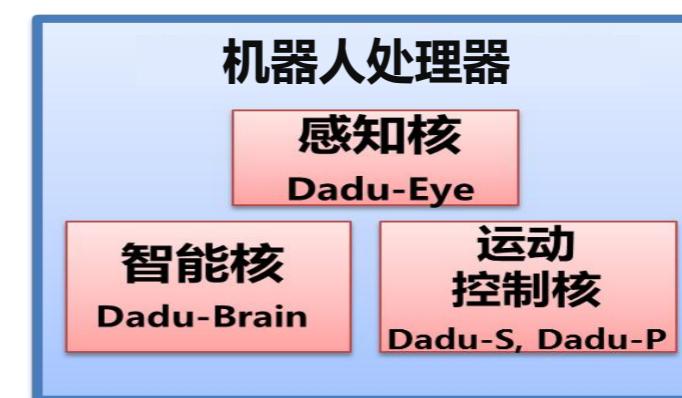
- ◆ 实现了带自身形状的机器人移动操作

创新工作：运动控制算法专用加速



智能无人机 智能机器人

智能无人机 智能机器人



关键技术二：运动控制芯片-关节运动计算加速

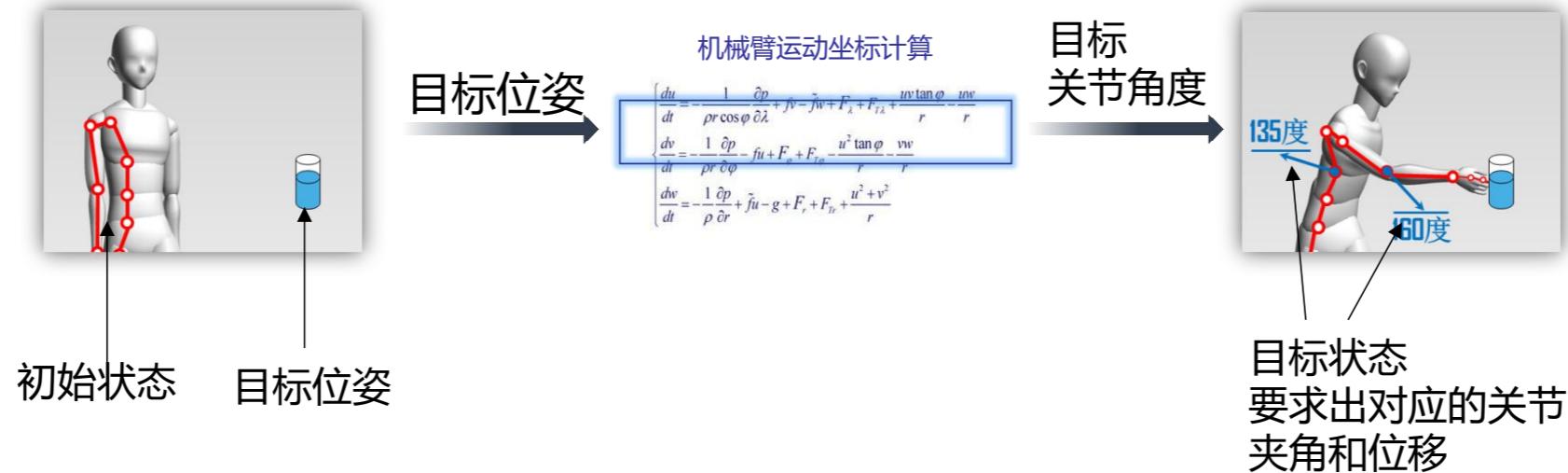
● 坐标运算-逆运动学方程求解

问题定义

已知直角空间的位姿 X_t ,
求出各关节夹角 θ 和位
移 d

数值法

适用于多关节机器人，
但对于100自由度的坐标
运算，算一步需要**1**秒



关键技术二：运动控制芯片-关节运动计算加速

目前方法

逆雅克比求解方法，但矩阵求逆过程**非常复杂，速度慢**

预测并行-雅克比转置法

将求逆过程近似为求转置，并利用硬件大规模并行结构，并行投机猜测转换系数

- 在每次迭代时，采用多个不同的 α 进行计算，得到结果后从中选取最优

雅可比转置法

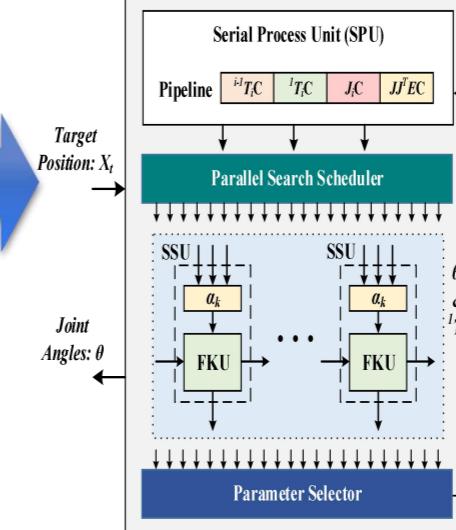
$$\begin{aligned} \mathbf{J}(\theta) &= \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \theta} \\ \Delta \mathbf{X} &\approx \mathbf{J} \Delta \theta \\ \Delta \theta &= \mathbf{J}^{-1} \Delta \mathbf{X} \text{ 难以计算} \\ \Delta \theta &\approx \alpha \\ \mathbf{J}^T \Delta \mathbf{X} \\ \theta &= \theta + \Delta \theta \end{aligned}$$

投机
并行

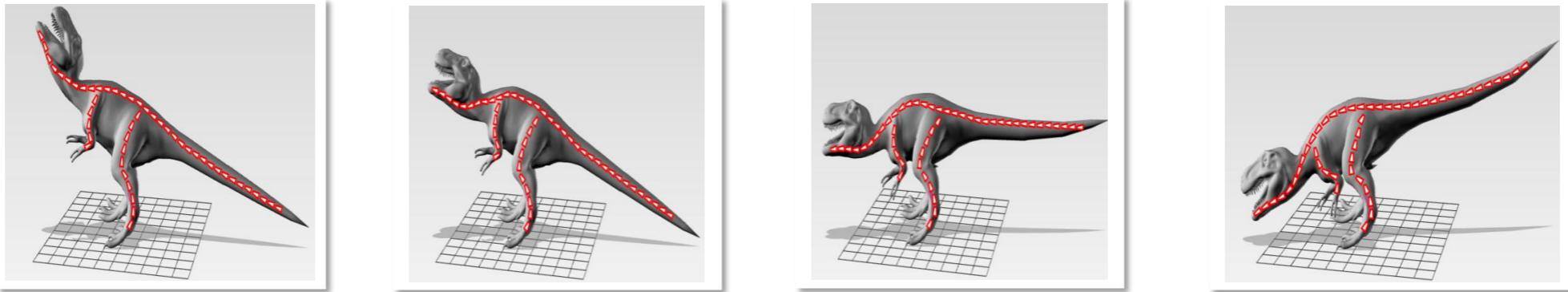
投机-雅可比转置法

$$\begin{aligned} \mathbf{J}(\theta) &= \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \theta} \\ \Delta \mathbf{X} &\approx \mathbf{J} \Delta \theta \\ \Delta \theta_1 &= \alpha_1 \mathbf{J}^T \Delta \mathbf{X} \rightarrow e_1 = \|\mathbf{X} - \mathbf{f}(\theta + \Delta \theta)\| \\ \Delta \theta_2 &= \alpha_2 \mathbf{J}^T \Delta \mathbf{X} \rightarrow e_2 = \|\mathbf{X} - \mathbf{f}(\theta + \Delta \theta)\| \\ &\vdots \\ \Delta \theta_N &= \alpha_N \mathbf{J}^T \Delta \mathbf{X} \rightarrow e_N = \|\mathbf{X} - \mathbf{f}(\theta + \Delta \theta)\| \\ \Delta \theta &= \Delta \theta_k, \text{ when } e_k = \min\{e_1, e_2, \dots, e_N\} \\ \theta &= \theta + \Delta \theta \end{aligned}$$

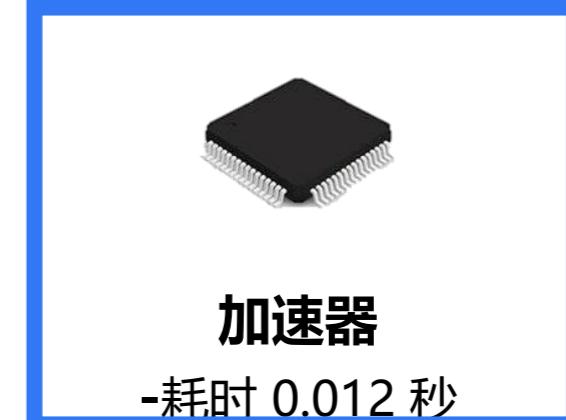
投机并行硬件结构



关键技术二：运动控制芯片-关节运动计算加速



100-自由度 的逆运动



- 100x加速，每秒80次运动计算，实现100个自由度实时控制

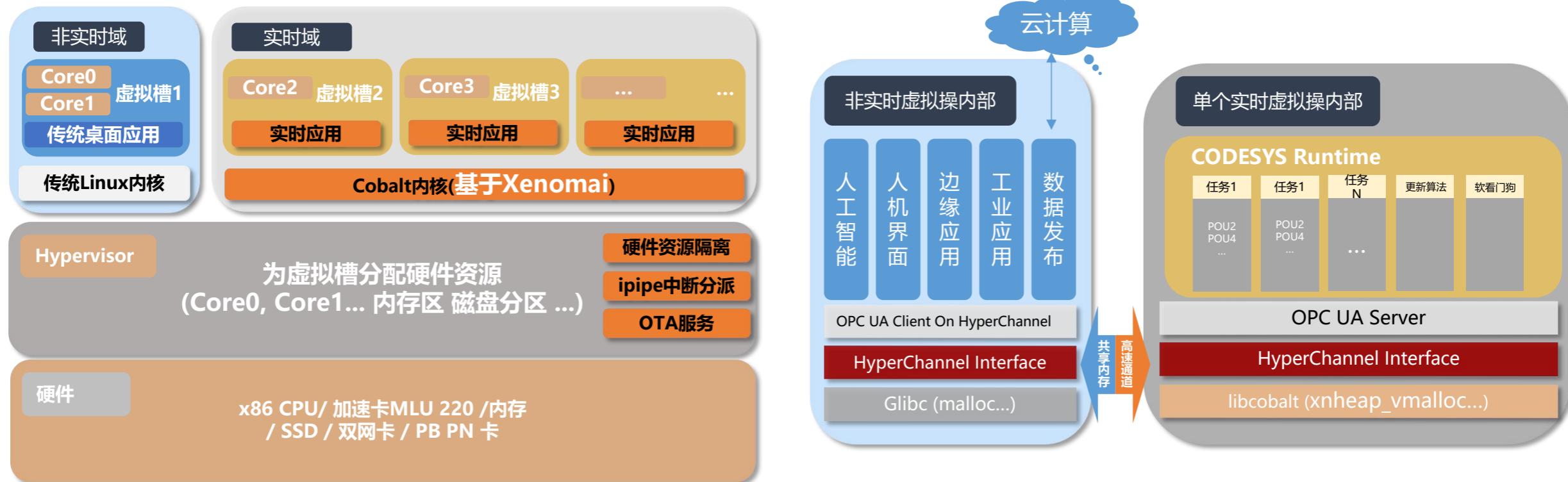
发表于Trans. CAS[2022], ICCAD[2020], DAC[17]

关键技术三：操作系统双域虚拟化-整体架构

- 在商业操作系统基础上，实现虚拟槽容器、工业运行时等于一体的工业虚拟化技术



关键技术三：操作系统双域虚拟化-虚拟槽和Codesys兼容



01 虚拟槽：基于开源Xenomai Hypervisor框架划分

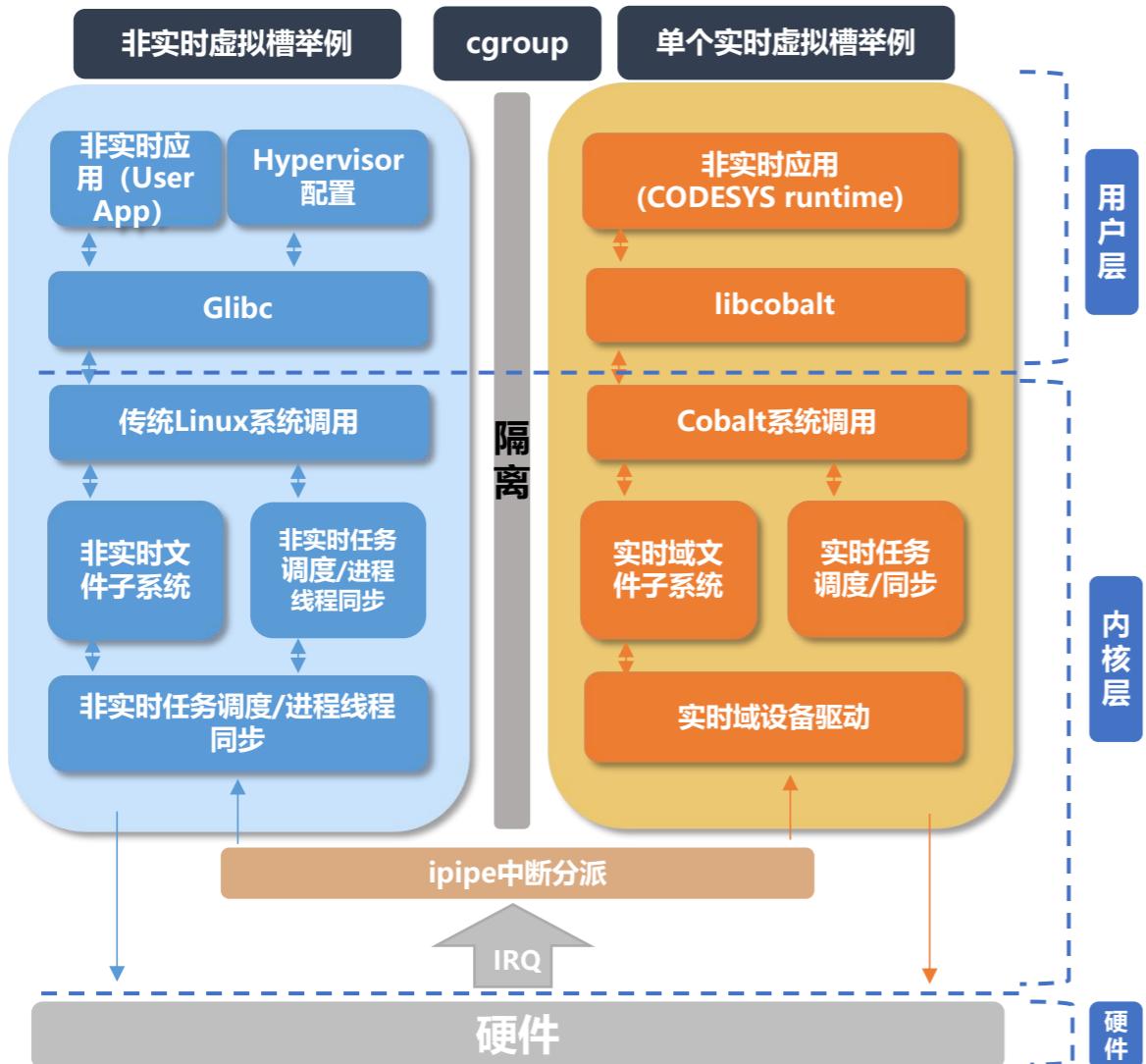
CPU核:

- 为非实时域和实时域分别建立虚拟槽，为每个虚拟槽划分 1~N个CPU物理核
- Linux对实时域无感，无须修改可在非实时域运行

02 对Codesys兼容支持

- 通过Runtime内POSIX任务接口(pthread)，用钩子函数，连接Xenomai的实时库Cobalt

关键技术三：操作系统双域虚拟化-实时保障



03 对中断的处理：在iPIPE层，精细分配实时和非实时中断：

- 中断按实时属性和优先级高低先后处理，实时域中断> 实时域任务> 非实时域中断> 非实时域任务

04 资源隔离：基于cgroups技术划分资源并建立隔离机制，提供Hypervisor级资源配置：

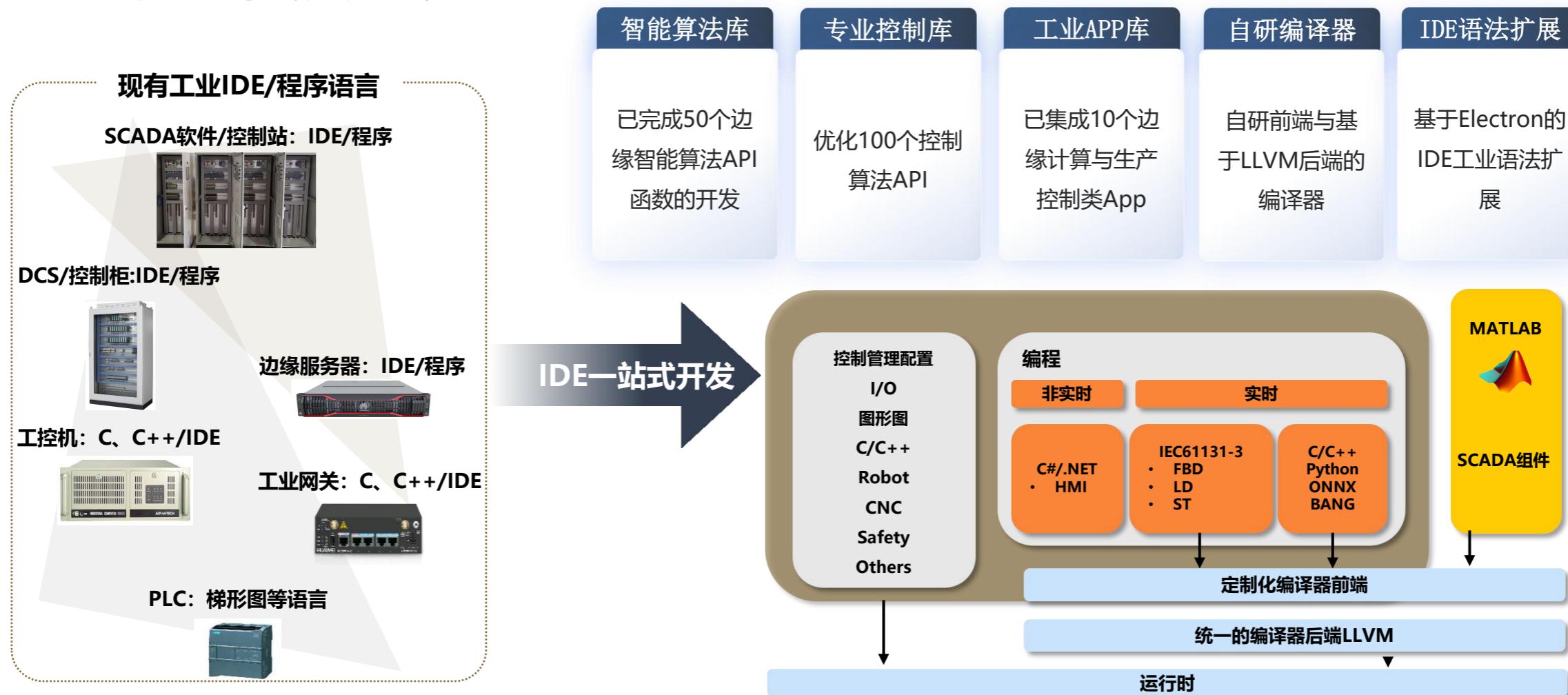
- 精细划分每个虚拟槽的内存、磁盘分区、IO设备（字符设备、块设备等）、资源配置UI界面，方便最终用户按业务需求合理分配资源

05 通信：基于Sorket跨域数据通讯，无损硬实时性：

- 在Xenomai - RTNET-XDDP(Sorket跨域数据交换协议)基础上，实现高速的数据交互

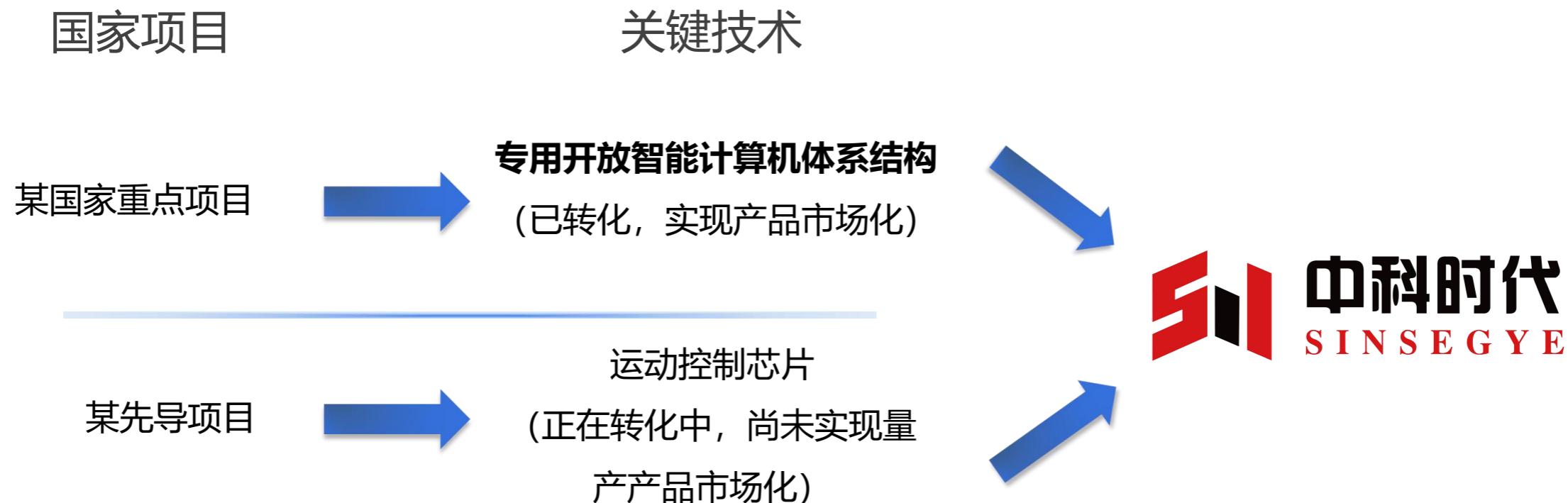
关键技术四：工业混合编程平台IDE

- 通过库化和通用编译，支持新型编程方式，形成集控制、边缘计算、工业仿真和工业App于一体的一站式开发环境



关键技术四：通过合作企业，进行产品化和成果推广

- 将智能计算机设计技术和运动控制芯片技术转移给中科时代公司，进行产品化和成果推广，用产品满足国家战略需求



关键技术四：工业智能计算机产品型态

算控显一体



SX58系列
赛扬J6412
2.0GHz



SX51系列
Atom2.0GHz



SX21系列
HYGON海光
3.0GHz

SP7000S系列
赛扬N97 2.0GHz



SP7000H系列
I5\I7高代
扩展显卡



SP60系列
Atom2.0GHz



SP50系列
I7\I9高代
扩展显卡

标准控制器形态工业智能计算机

IPC形态工业智能计算机

工业智能计算机：控制+设备智能看护系统应用案例

● 某油田无人化场站

背景

某采油厂围绕“无人智能场站”，以关键设备为切入点，通过智能化手段，完成人员巡检远程化，故障维修精准化、提前化。

应用价值

工智机减少设备部署

降低项目成本

软PLC控制系统代替现场多台PLC及一台系统服务器

工智机高算力

实现远程看护以及预测性维护

设备上部署振动温度一体化传感器，采集设备的加速度、速度、位移，结合设备本体的流量、电流、电压的工艺数据，通过故障神经网络模型的自动学习，对设备故障进行精确定位。同时与中石油A11系统融合完成一体化远程看护，降低人员劳动强度



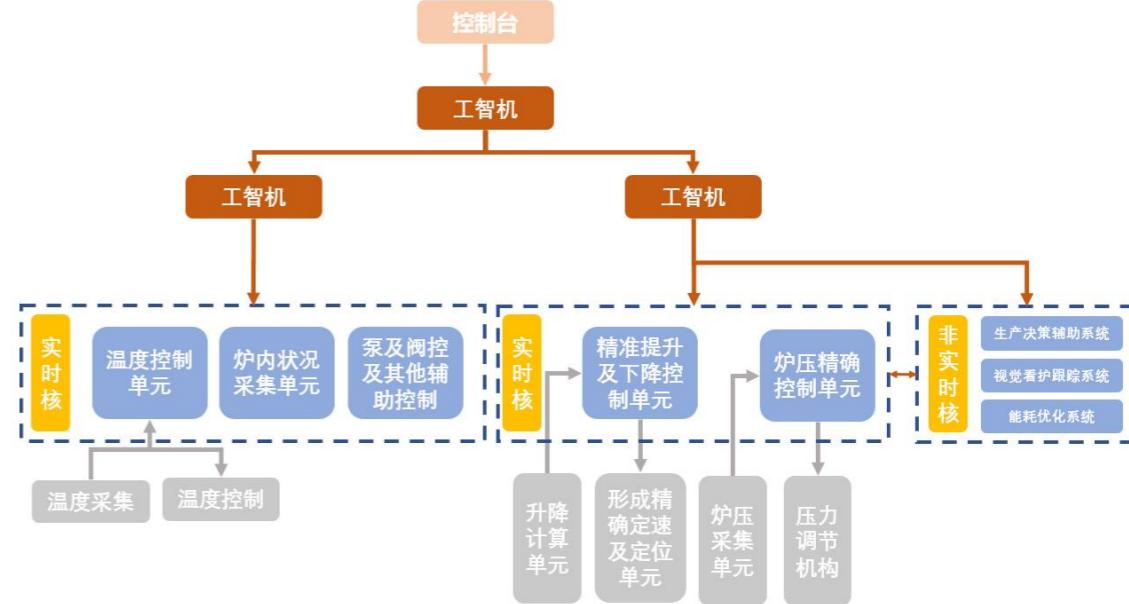
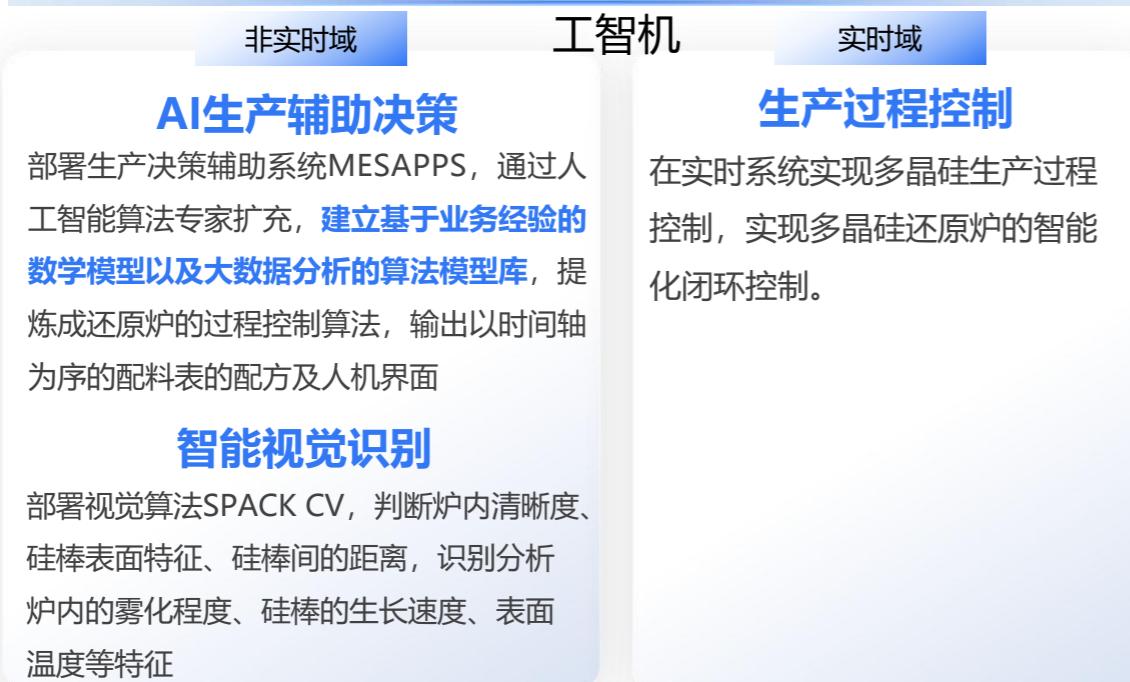
工业智能计算机：控制+生产决策辅助系统应用案例

● 多晶硅还原炉自动控制

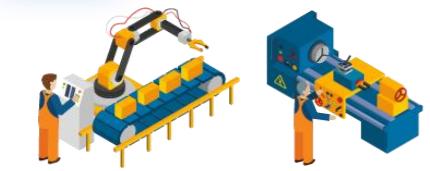
背景

多晶硅还原工艺因过程机理复杂难以有效控制，生产工艺过程及能耗数据建模困难等问题，传统闭环控制受制于某些参量不可测，无法提供理想的控制方案。

应用价值



展望：开放架构的工业智能计算机是支撑OODA可计算制造闭环的计算底座



生产现场



工业模拟器



生产现场

01

O

生产数字感知器

3D可视化与形状建模

5G+工业操作系统

02

O

基于模型的系统工程

开放建模描述语言

AI算法平台

03

D

VR AR工业协作

系统仿真与分析

数字孪生

软件定义制造

机器人软硬一体平台

数控机床

04

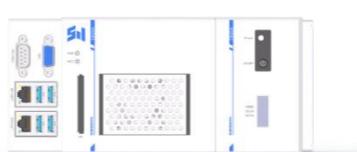
A

企业生产运营网络数据MBD、ERP、PLM、MES...

计算底座

开放架构的工智机

Computability@Computing



在宏观模型上，可把工业过程，融合物理和信息空间，抽象为 OODA的过程

通过工业模拟器，对信息化空间进行推演

开放架构的工智机有望成为支撑可计算制造的计算底座

工智机可能是未来工业数据的第一个汇聚口，具有极高价值

谢谢!
THANKS

