

智能制造：

从数字先行到工业万花筒

王需 清华大学

自强不息
厚德载物

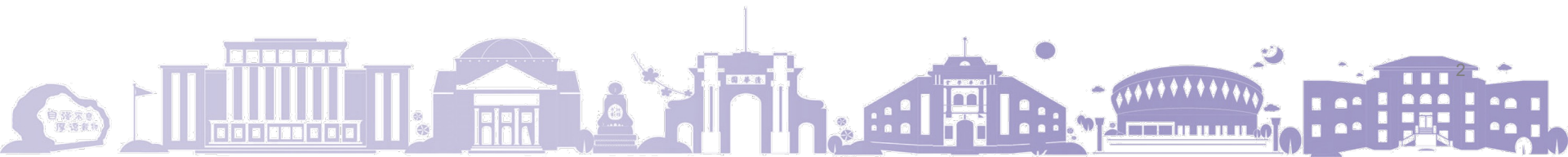


王需

清华大学全球创新学院助理研究员

清华-福耀数字智能制造中心副主任

- 主要研究方向
 - 工业互联网
 - 边缘计算
 - 时延敏感网络
- 联系方式
 - xu_wang@tsinghua.edu.cn
 - 17600181593



工业是国民经济发展的命脉

世界工业史上的历次革命**极大提升了人类的物质文明**
发展**工业互联网**，促进工业**网络化智能化**，成为多国国家战略

1 机械化
蒸汽机动力驱动的机械生产出现



1769: 瓦特制出第一台蒸汽机

1869: 辛辛那提屠宰场第一条生产线

3 自动化
电子和信息技术实现制造流程进一步自动化



1969: 第一个可编程逻辑控制器

21世纪: 互联网, 物联网, 云计算



2 电气化
基于劳动分工, 电力驱动的大规模生产出现



4 网络化
物理信息融合系统出现

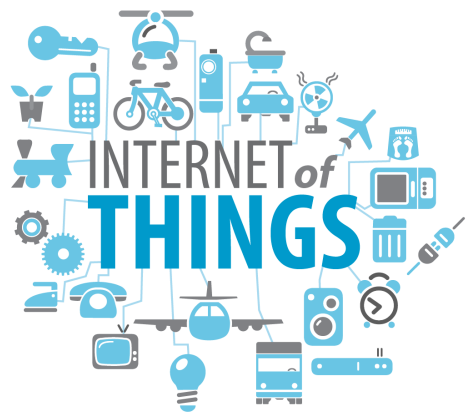
德国工业4.0

美国工业互联网

中国制造2025



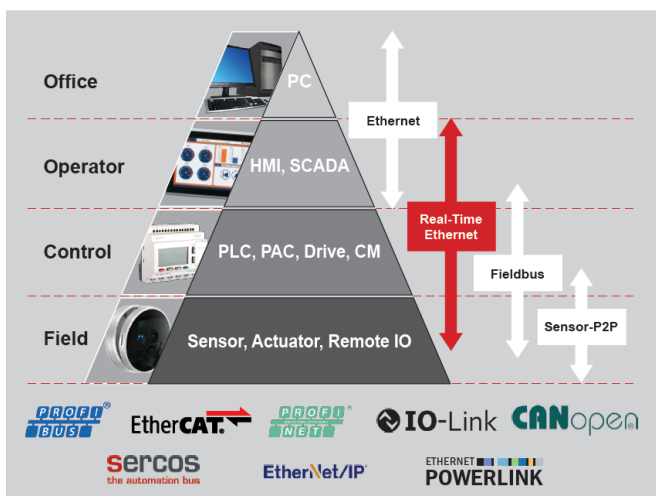
第四次工业革命



从技术角度来看，**第四次工业革命**是一场工业领域从**嵌入式系统**（Embedded System）到**信息物理融合系统**（Cyber Physical System）的**技术变革**，通过**物联网**（Internet of Thing）、**云计算**（Cloud Computing）、**大数据**（Big Data）及**人工智能**（Artificial Intelligence）在工业中的应用，促成**基于网络化的智慧革命**。

工业互联网

- ❑ 工业互联网的**概念**诞生于2012年，但工业互联网本身最早可以追溯到二十世纪六七十年代微电子技术、计算机技术和机器人技术所促进形成的**工业自动化**时期
- ❑ 工业互联网从传感器/执行器通讯，到现场总线，再到实时以太网，以及办公网络，不同的层级与环境采用不同的通讯方式，实现对生产制造环境的全流程追踪与控制



OT技术

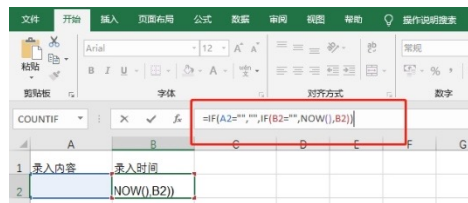
工业网络的自动化金字塔

信息技术很早就被应用到了工业中...

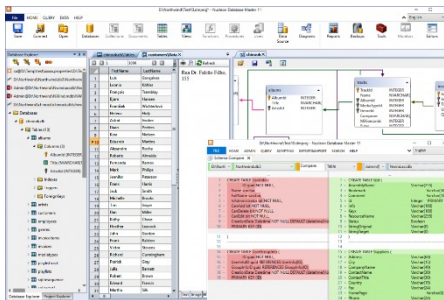
IT技术



人工记录



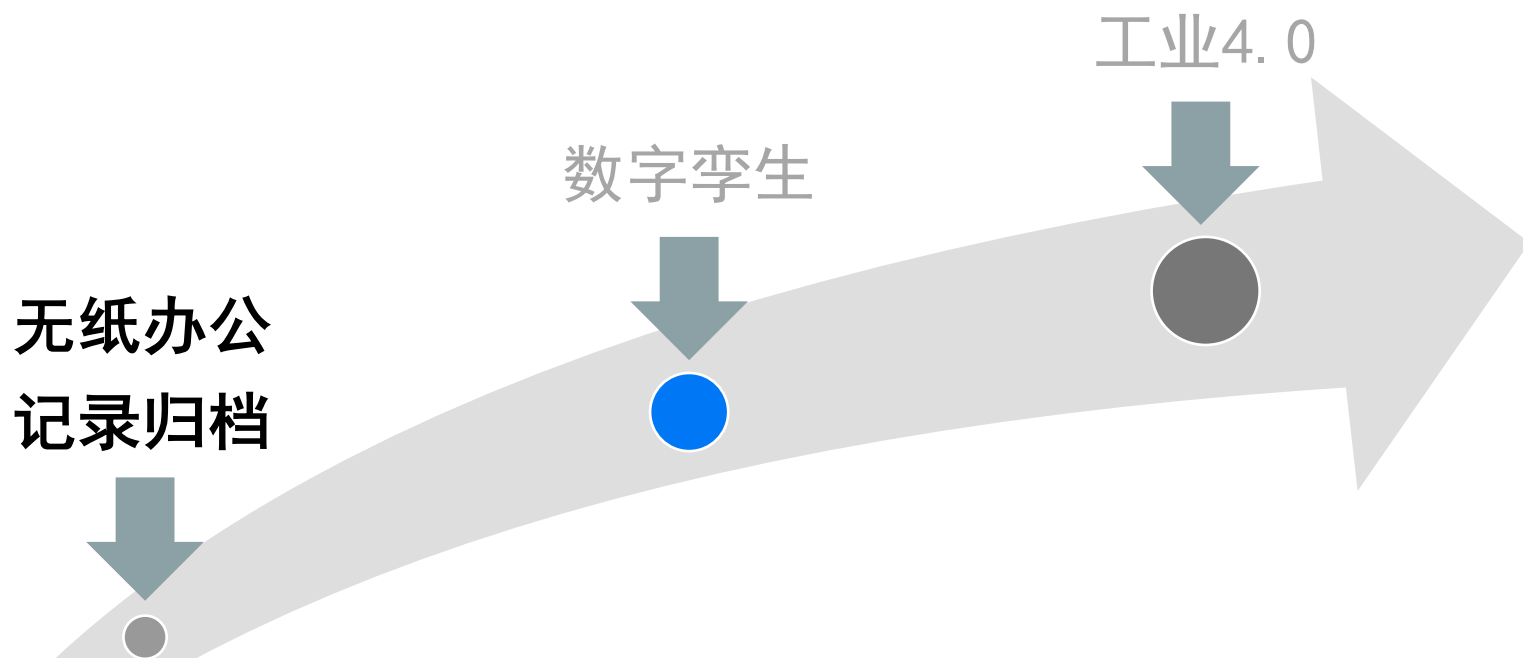
手动归档



离线分析



工业互联网的发展历程



“数字后行” 事情发生了，经过人为抽象总结，用数据来描述。

物联网等技术的出现



传感器感知

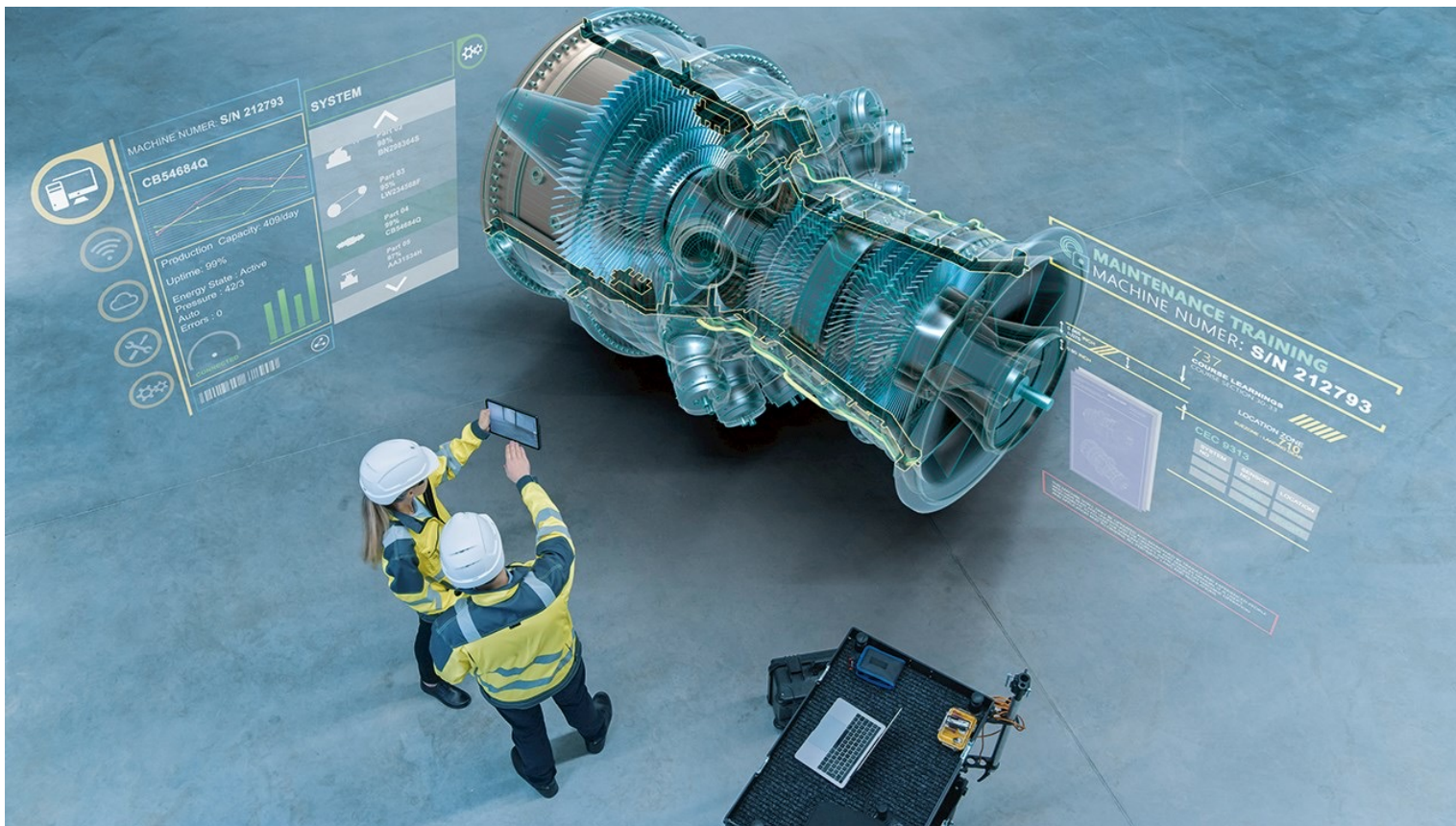


网络传输入库



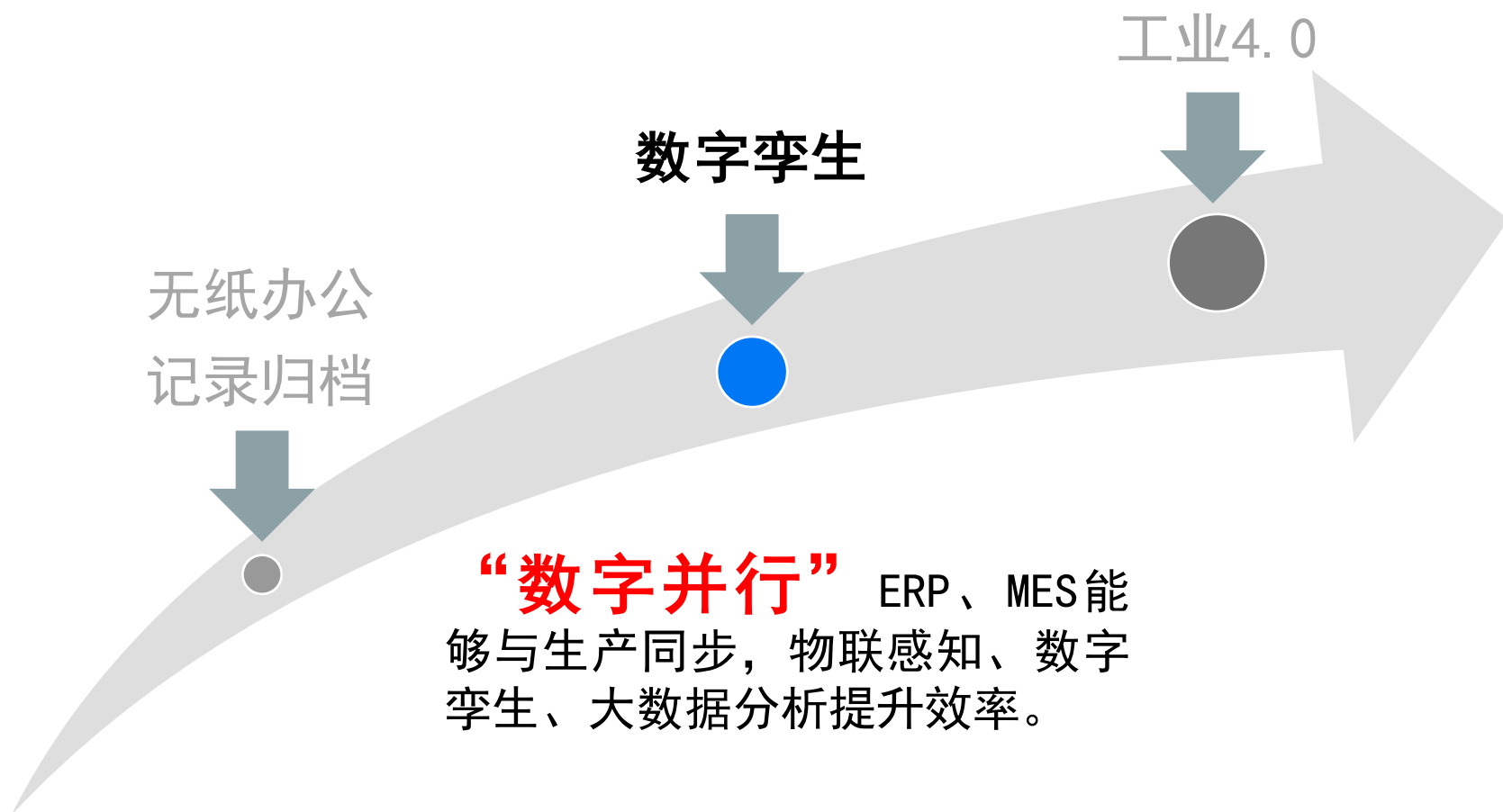
离线/在线分析

物联网等技术出现之后



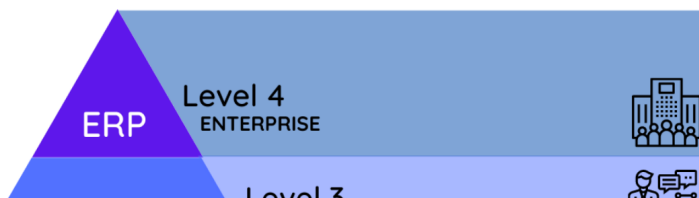
数字孪生

工业互联网的发展历程



工业互联网的现状

工业中的信息系统自下而上服务于生产管理，而无法服务于产品开发流程



管理信息化走在了生产信息化的前面



福清铝合金配件工厂拉弯成型生产线

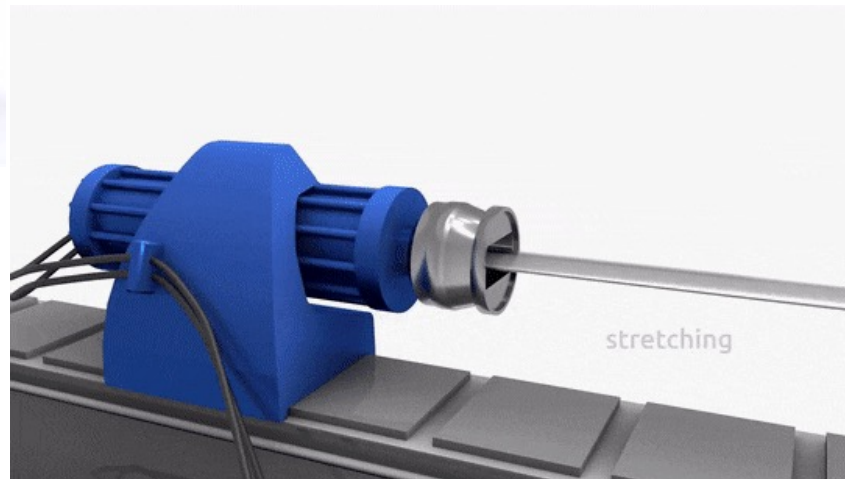


工业互联网与铝合金成型

- 铝合金是十分重要的轻金属材料，在航天、航空、交通运输、建筑、机电、轻化和日用品中有着广泛的应用，铝合金产量在有色金属材料中居**首位**，在金属材料中在钢铁之后居**第二位**
- **铝材拉弯**是较为普遍的铝合金成型工艺，工业互联网通过PLC设置拉弯机机械臂的执行轨迹，实现对铝件成型过程的精准控制



铝合金具有广泛的应用



铝合金拉弯工艺

铝合金拉弯工艺

铝合金拉弯开发过程



模具制造

一次生产



产品生产

多次使用

铝合金拉弯工艺

铝合金拉弯开发过程

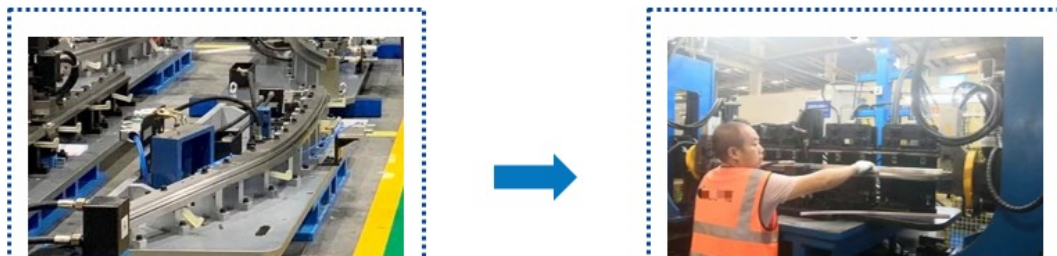


由于模具摆放、不同批次铝材料参数变化等原因，OT驱动的参数调整方法需要工人多次重复劳动，大大降低了生产效率



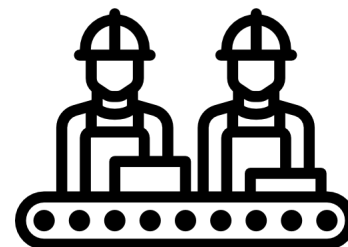
铝合金拉弯工艺

铝合金拉弯开发过程



迫切需要进一步突破工业互联网驱动产品开发设计的方法

参数调整的过程占生
产时间的**80%**



流水线生产

工业互联网的服务场景

智能化生产



石化、钢铁、家电等行业通过部署**工业互联网**，实现对**生产过程**、**计划资源**、**关键设备**等的全方位管控与优化。

网络化协同



航空航天、汽车、船舶等行业借助**工业互联网**平台，将分布于全球的资源**有效整合**，**并行组织**，大幅缩短产品研制周期。

典型模式

服务化延伸



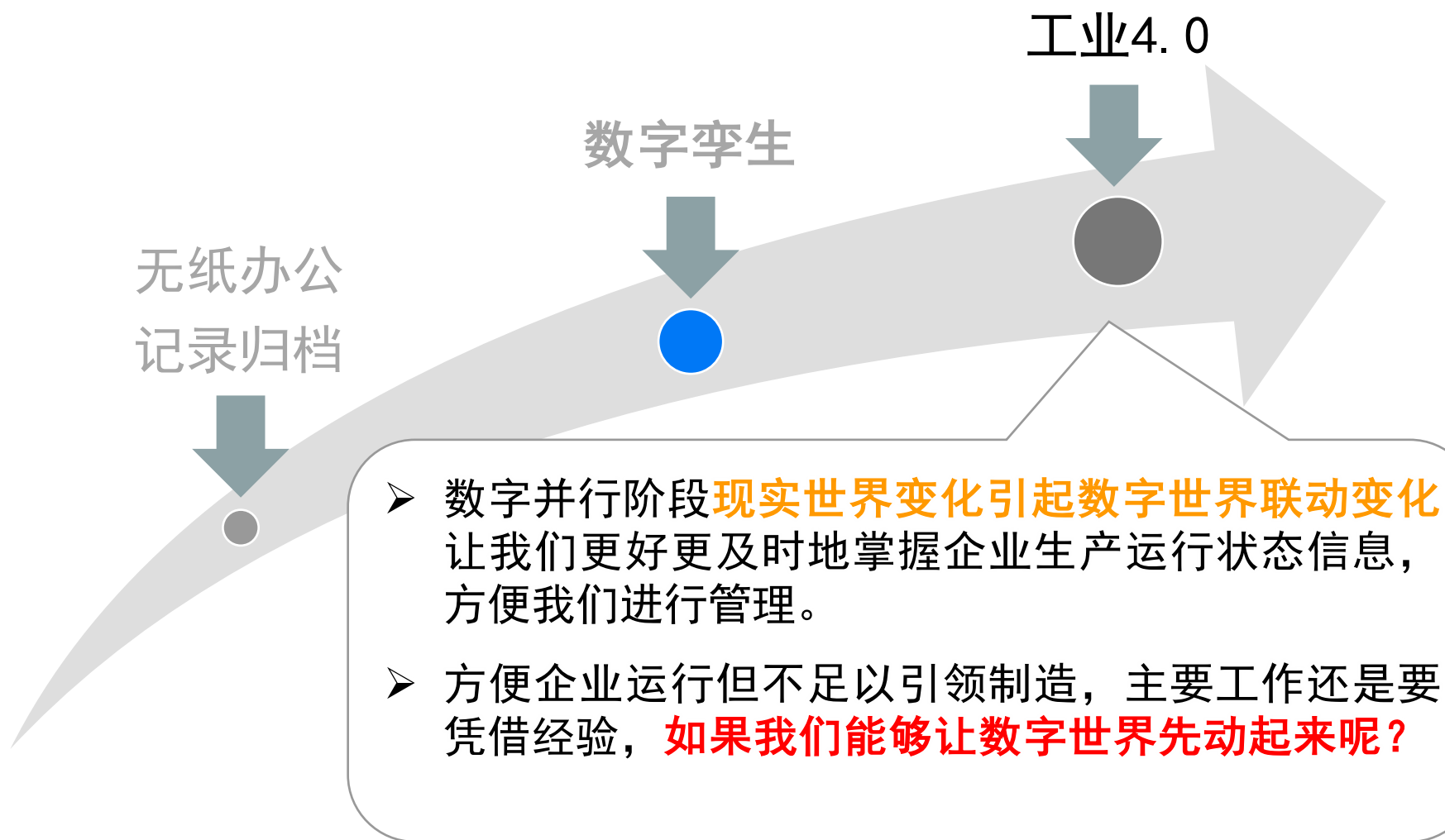
工程机械、电力设备、供水设备等设备制造业通过**工业互联网****实时监控**产品的运行状况，并开展**远程管理**、**预测性维护**等服务。

个性化定制

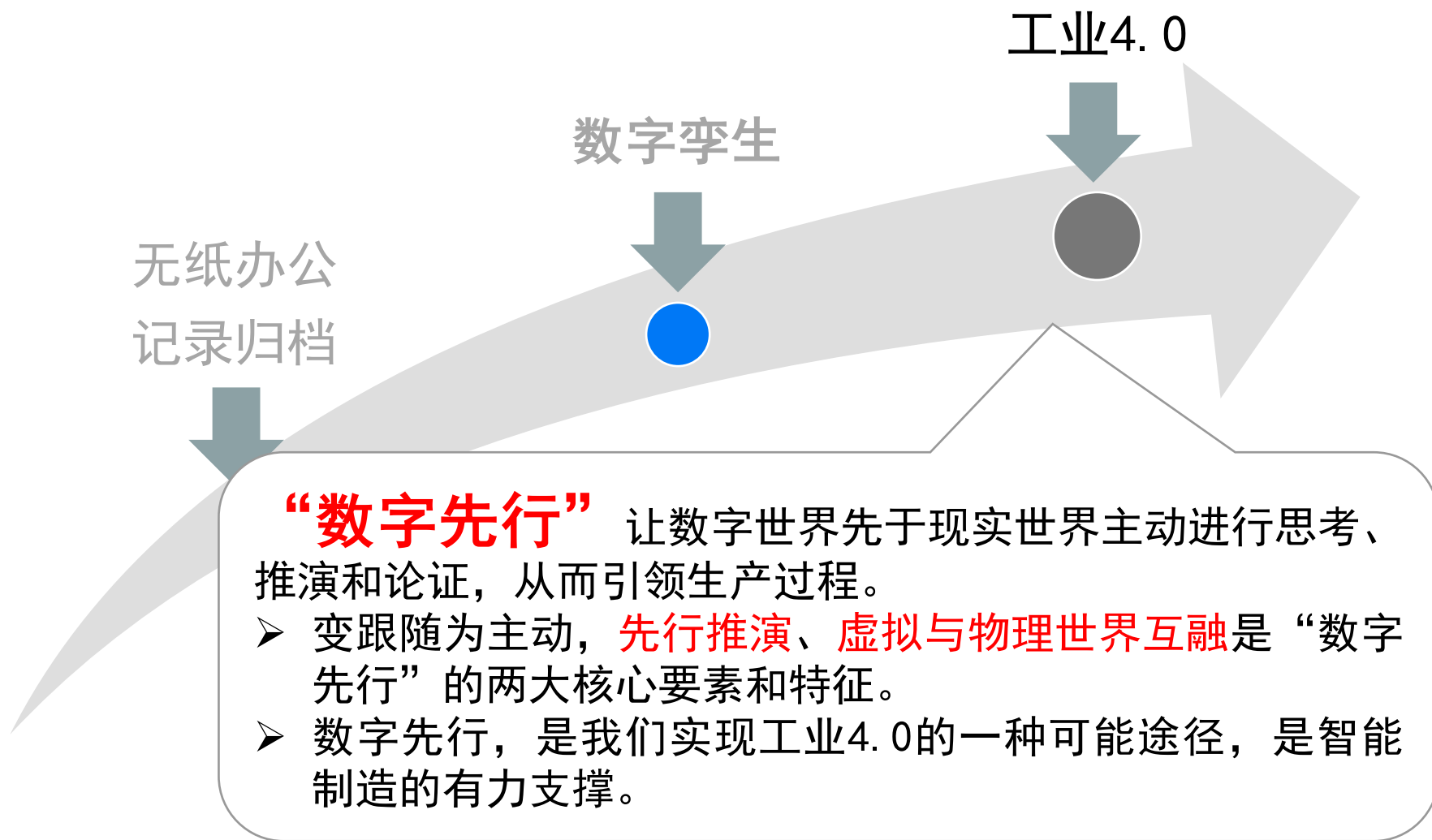


家电、服装、家具等行业通过**工业互联网**实现用户与**企业产品定制服务**平台的有效对接，推动用户与企业的**深度交互**。

工业互联网的发展历程



工业互联网的发展历程



实现数字先行需要什么

深度感知、密集连接

- 感知数据支撑

数据贯通、模态相融

- 消除信息孤岛

模型前瞻、知识演进

- 先行思考、智能推演

网控一体、全线协同

- 生产自动化

科学问题

感知：**末梢失连**，依靠检具测量、人工抄录、效率低。

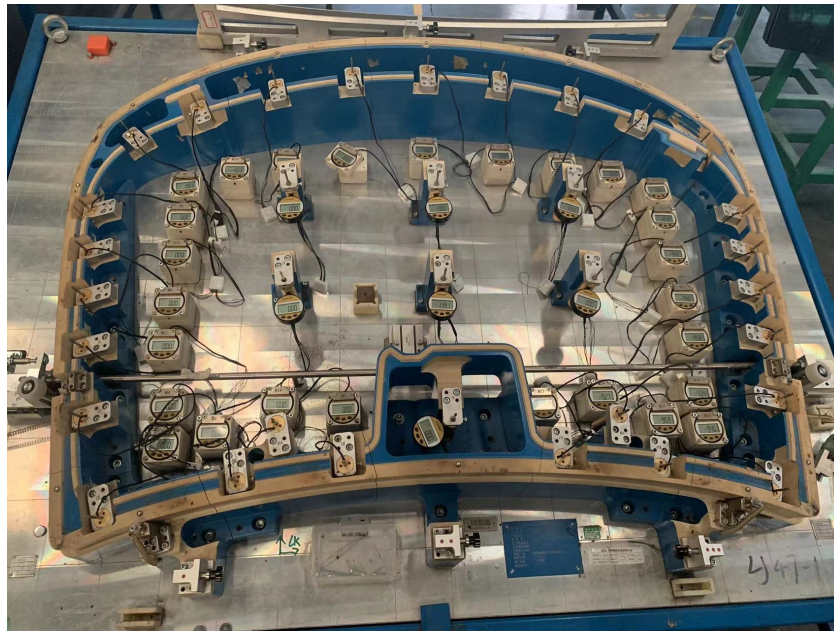
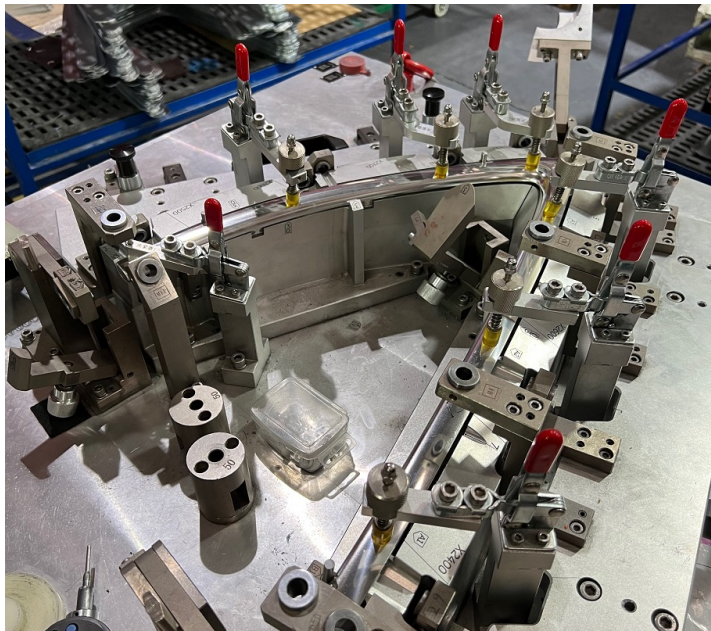
网络：**共存不共网**，IT与OT、不同模态的OT网络流量不互通，形成信息孤岛。

控制：**网控脱节**，网络系统与控制系统脱节，生产难以实现自动化。

设计误差大、修改模具成本高、生产效率低、交付周期长。

感知：密集连接需求

每一个工件上的密集感知连接需求



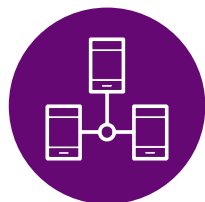
玻璃和铝合金产品检测装置

挑战



无线缆

这些装备、工件需要灵活设置检测点位或控制运动



高密度连接

小范围（设备域内）密集部署大量无线连接，通常超过100点/平方米



归一化延迟

无线随机延迟归一化，感知、传输时间需要跟上生产节拍

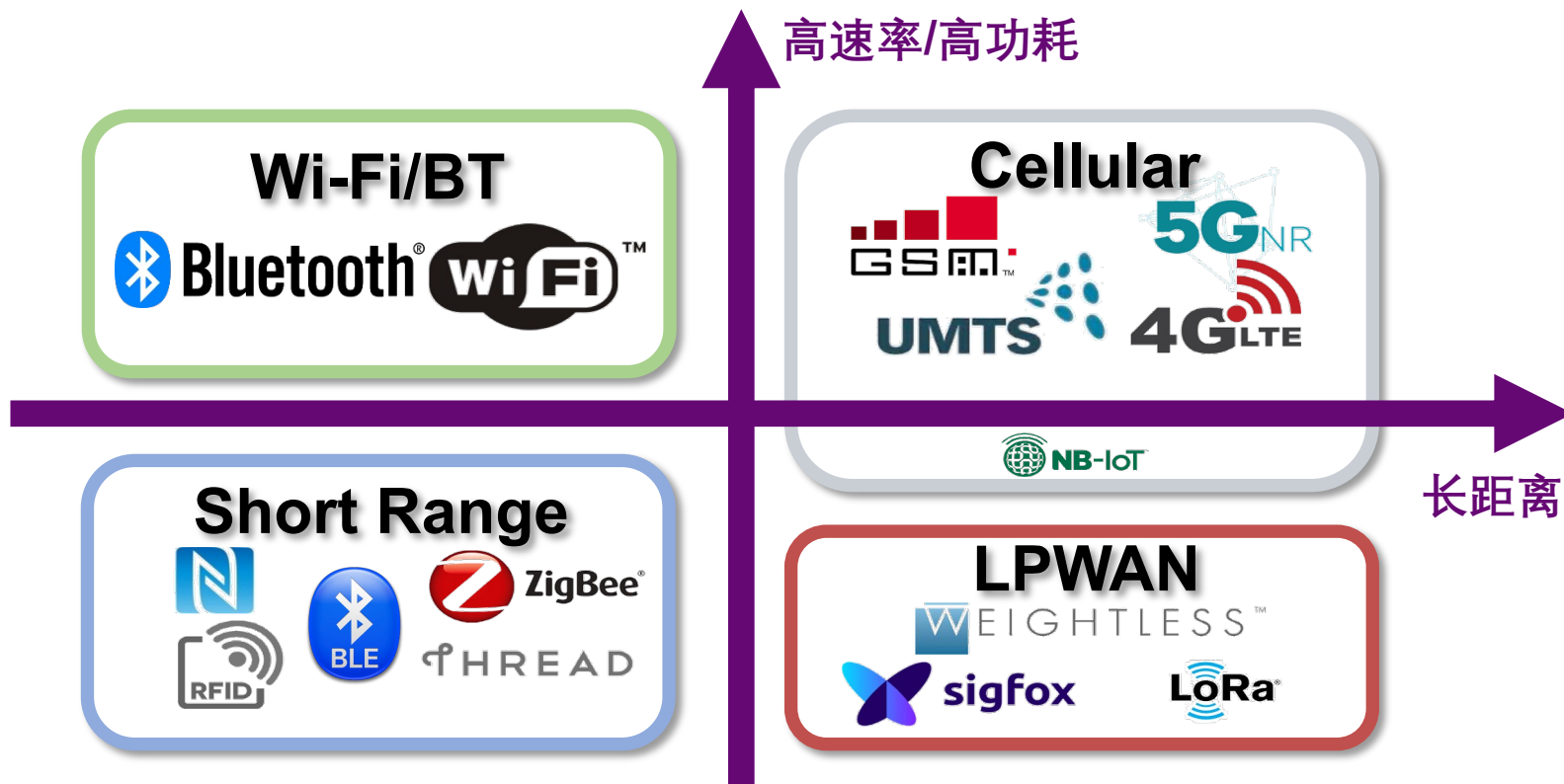


超低功耗

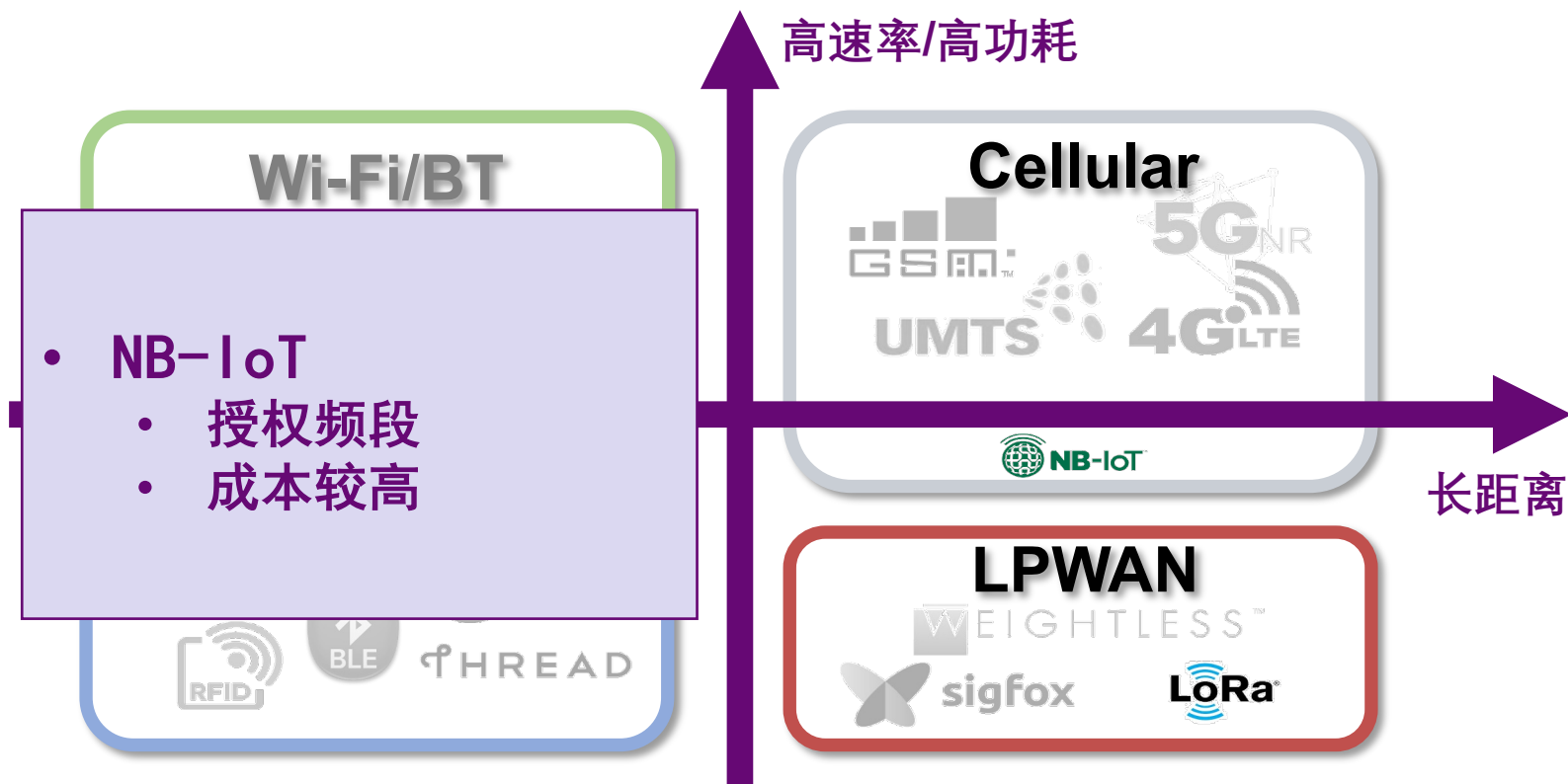
需尽量降低电池替换频率

工件域网络
Equipment Area Network

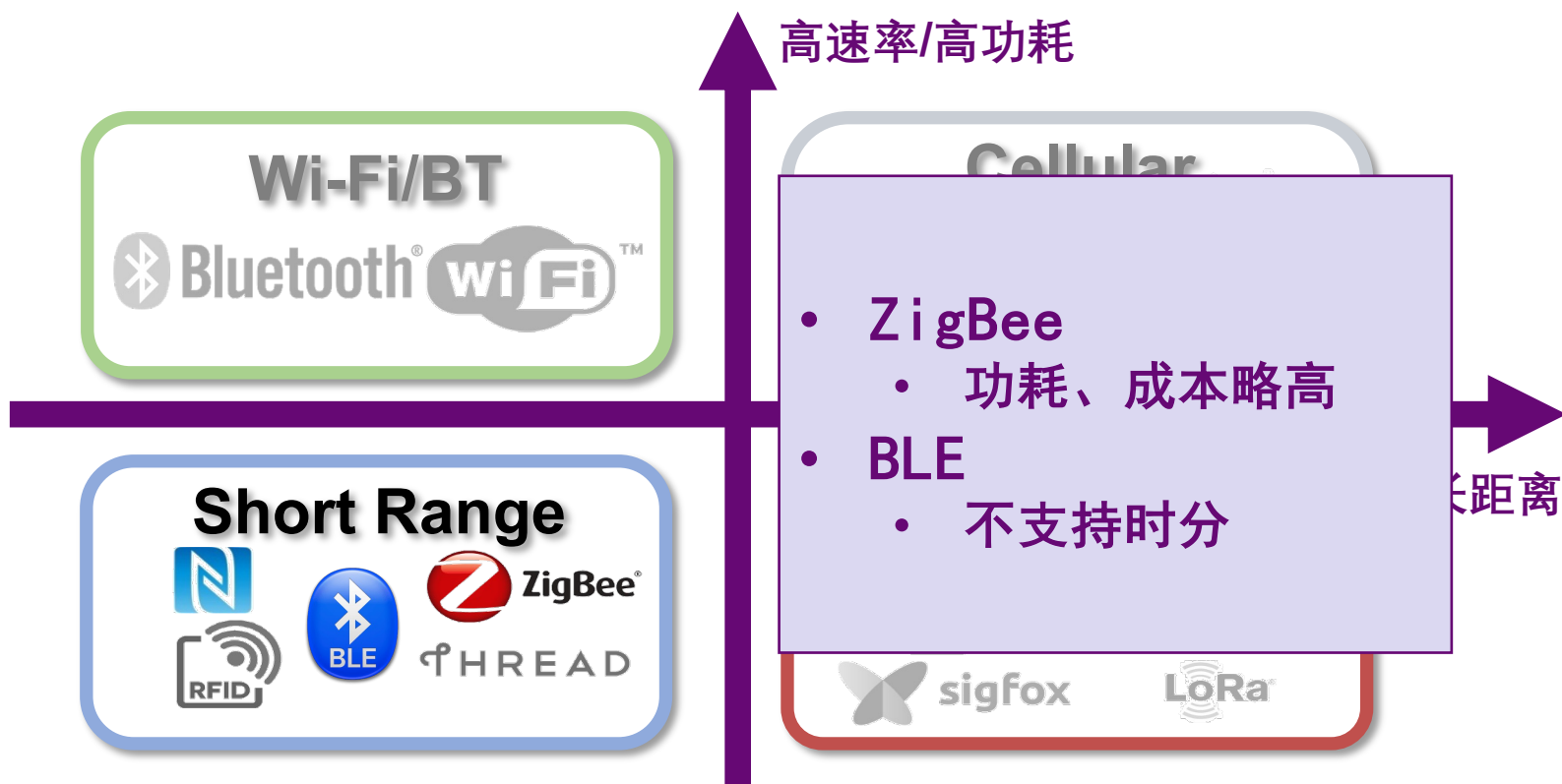
挑战



挑战

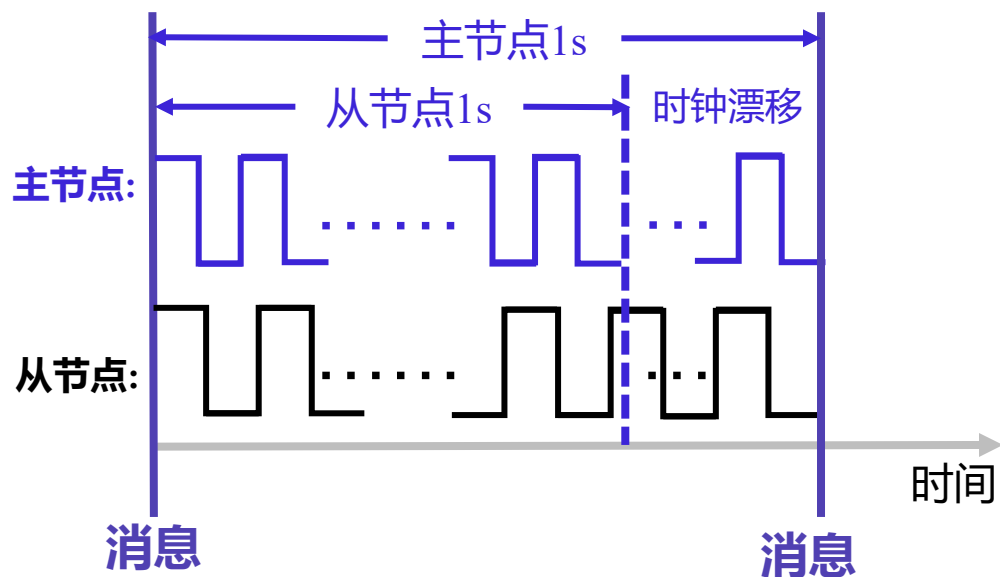


挑战



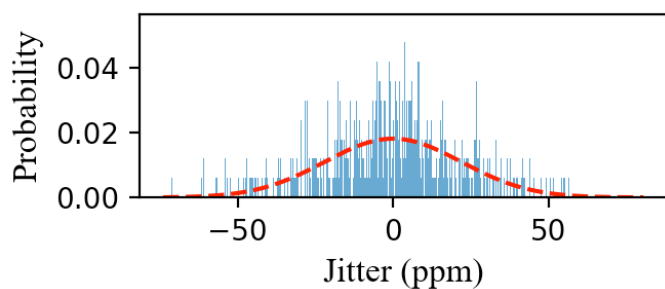
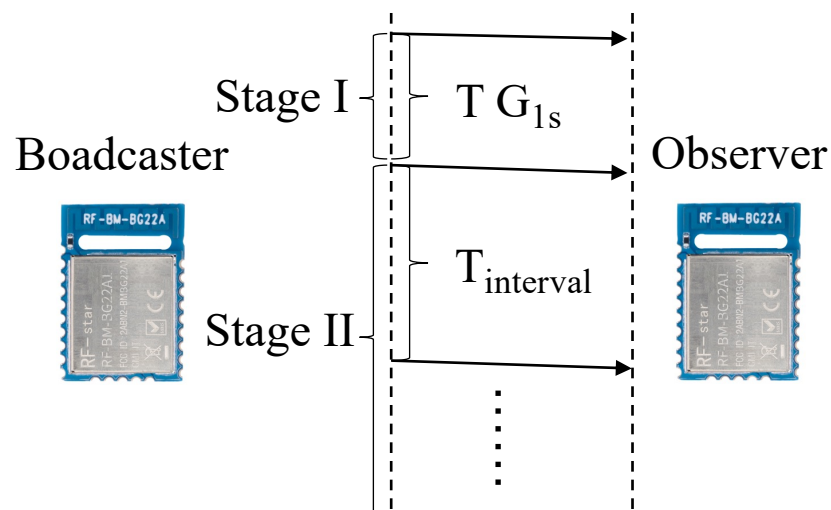
时钟同步方法

- BLE采用多时钟架构
 - 高速时钟（几十MHz）：处理协议栈
 - 低速时钟（几十KHz）：休眠与唤醒
 - 2000ppm（千分之二）
 - 对于2ms的时隙，需要每秒完成一次“授时”



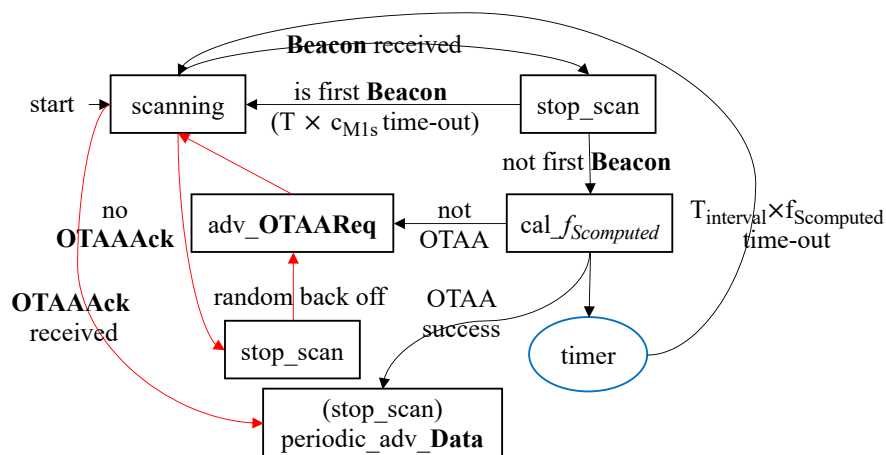
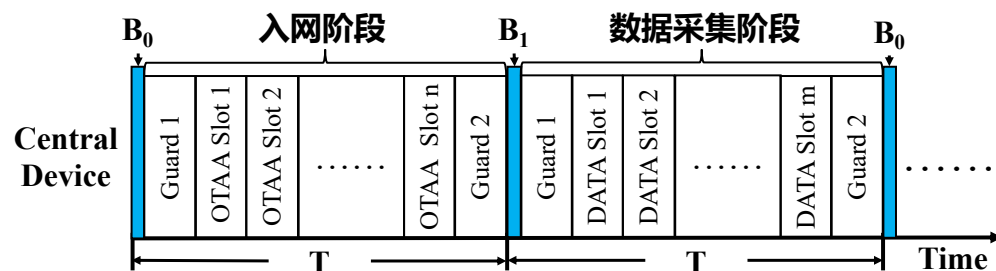
两阶段时钟同步

- 零消息交换
- 第一阶段
 - 短时间牺牲功耗
 - 利用 beacon 信号计算和估计时钟偏差
 - 初步解决同步失准问题
- 第二阶段
 - 超低占空比 ($<0.01\%$) 维持同步

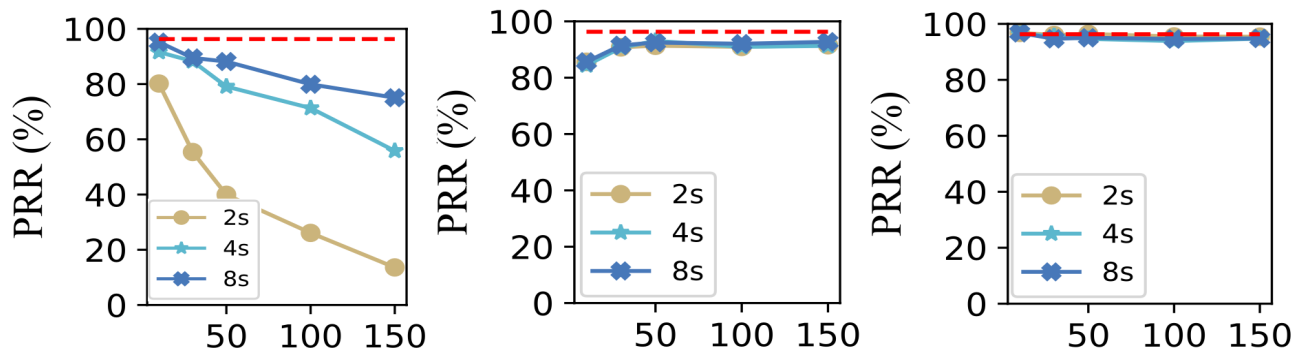


无连接分时调度机制

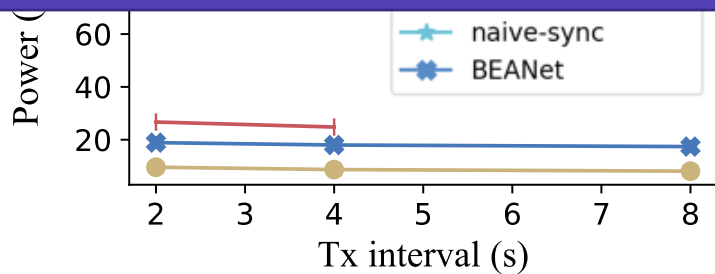
- 无连接机制，以**提升网络容量**和**降低延迟及功耗**
- 合理分配时隙，以**避免冲突**并**保证传输确定性**



BEANet性能评估



实现了20 μ w支持200个节点同时并发连接的蓝牙协议



BEANet性能评估

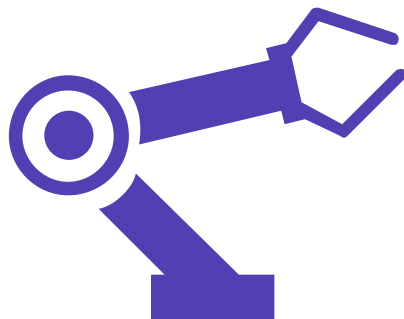
协议	LLDN	TSCH	Glossy	BlueFlood	BEANet
功耗 (以占空比计算)	0.15%	0.18%	0.16%	0.41%	0.077%
低速时钟源	晶振	晶振	晶振	晶振	RC振荡器
低速时钟精度要求	20	20	20	40	10,000
PHY	IEEE 802.15.4			BLE	

**BEANet 将时钟同步的频率将至2.5% (40X) ,
与标准BLE协议相比, 功耗降低29%**

网络模态：共存不共网

实时性要求迥异

- “尽力而为” 网络: Best-Effort Networking
- 时间敏感网络: Time-Sensitive Networking



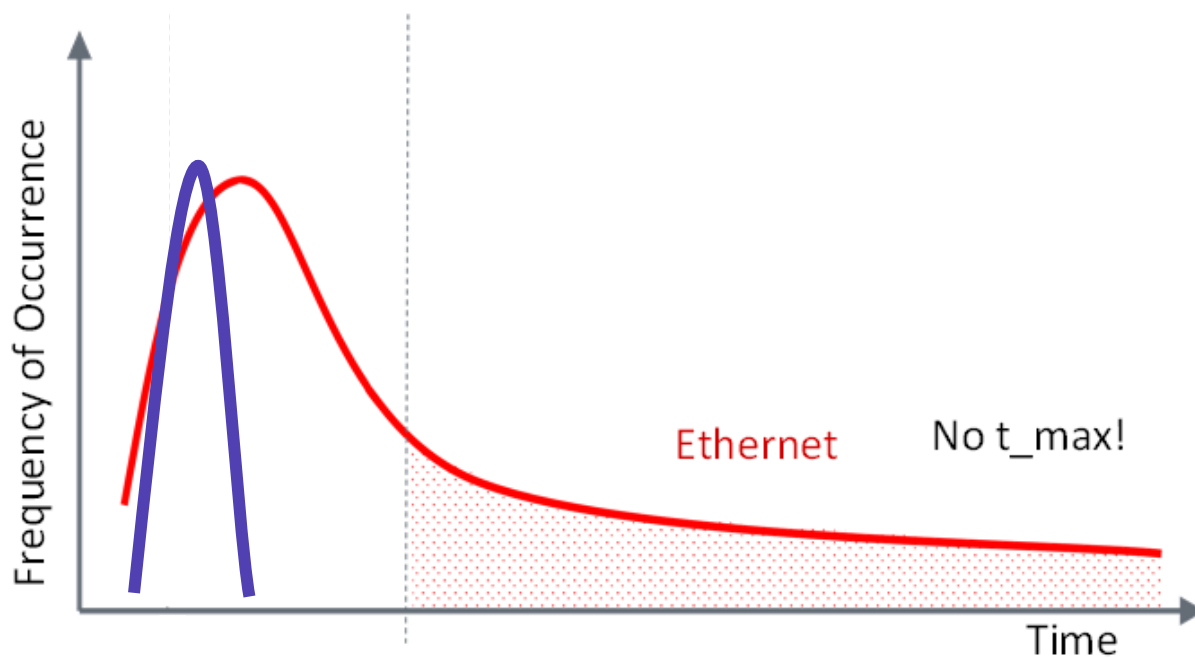
以太网：OT面前水土不服

- 发送端**没有**基于时间的流量调度
- **尽力而为**的转发机制
- **Delay Tolerant**

不确定

不实时

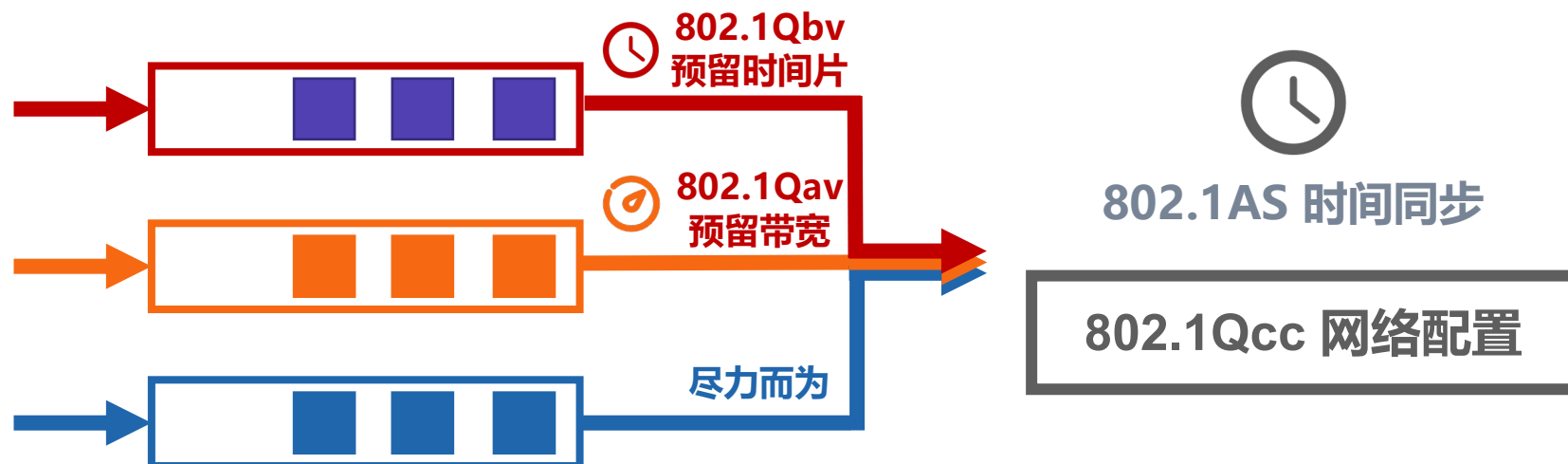
不可靠



低延迟、确定性的可靠转发

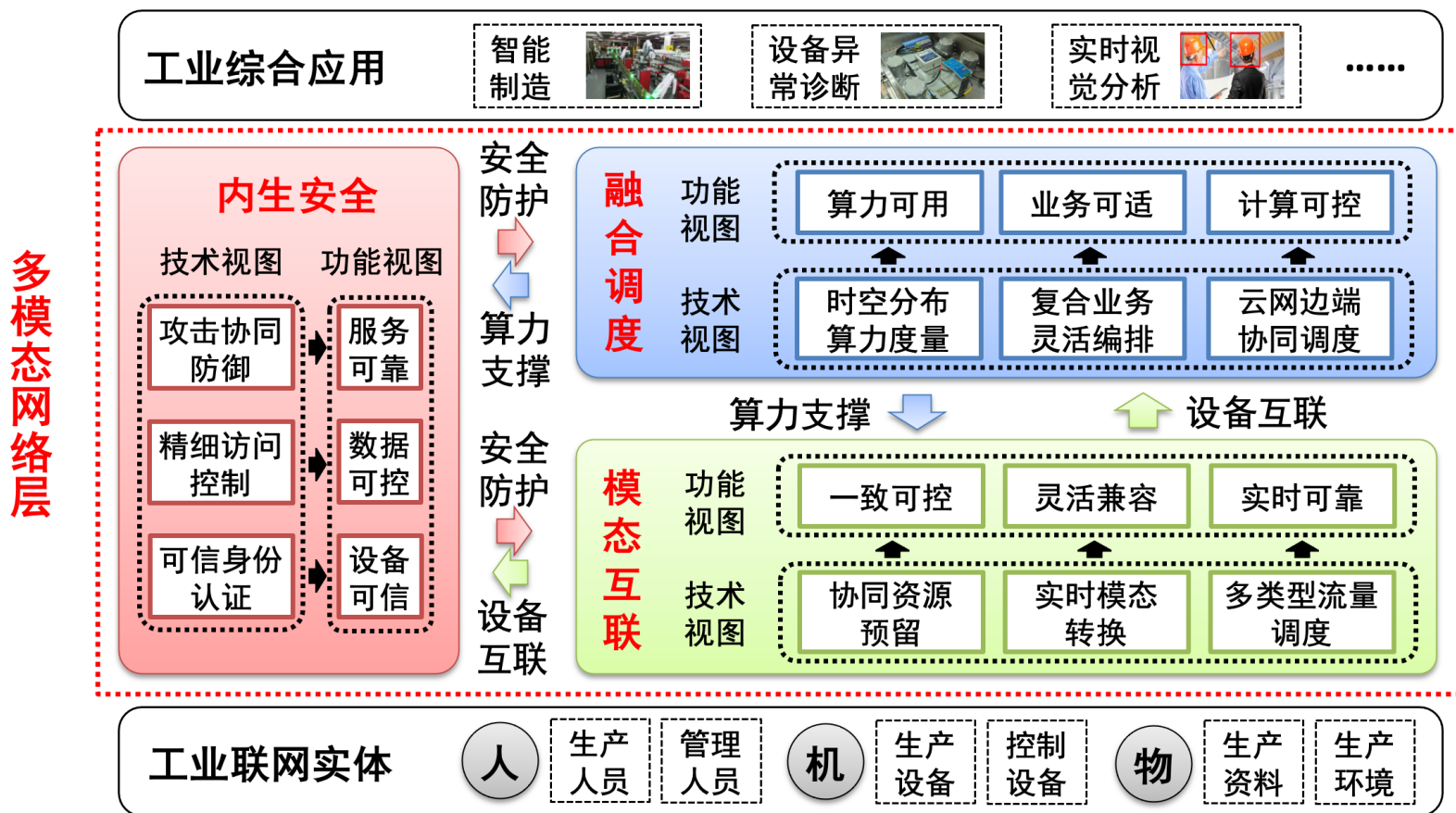
Time Sensitive Networking

- IEEE 802.1AS: 给整个网络提供高精度的时间。
- IEEE 802.1Qav: 在不超过预留带宽的前提下, 优先传输。
- IEEE 802.1Qbv: 为流量预留出周期性的时间片。
- IEEE 802.1Qcc: 对网络进行统一配置。



工业网络架构

设计基于“**模态互联、内生安全、融合调度**”的工业互联网网络模态总体架构



TSN工业网络交换机

- 全面支持802.1AS、Qav、Qbv、Qcc等协议
- 支持IT流量与OT流量的共网传输
- 实现关键数据流量的确定性转发与超低时延传输
- 基于FPGA的软硬件协同设计
- TSN部分100%自主知识产权

纳秒

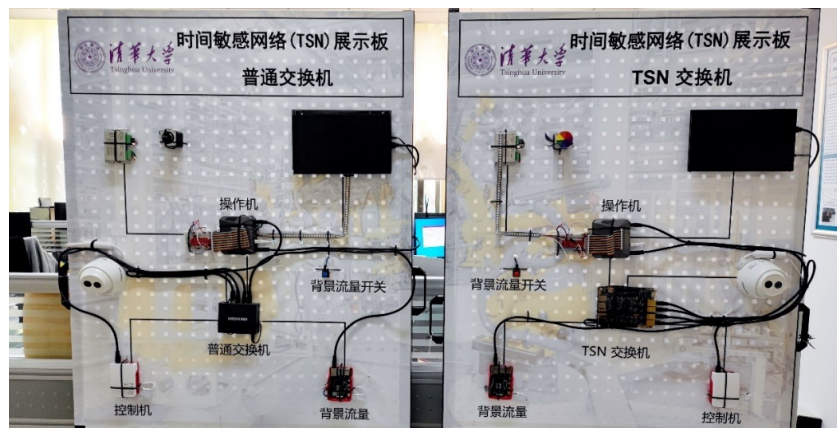
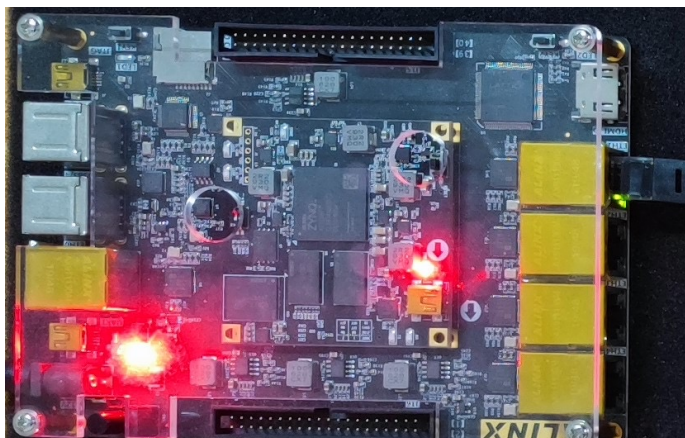
时间同步精度达到纳秒级

微秒

每跳时延抖动小于一微秒

万兆

带宽最大支持万兆以太网



控制：网控脱节

传统工业控制网络的局限性

传统工业控制系统中控制任务与**专用控制器紧密耦合**，而与**网络传输分离**，在实现**柔性制造**时面临三大问题：

- **配置过程繁琐**：生产线切换需要先停机然后重新配置 PLC 和设备间的物理连接，造成生产效率下降。
- **规模扩展受限**：PLC 物理接口数量限制了产线可以增加的设备数量，难以满足厂商的升级需求。
- **升级成本高昂**：随着控制任务复杂性逐渐增加，算力不足的 PLC 需要更新换代，造成额外停机成本。

Switch time (min)		Switch frequency	Production reduction
Change mold	Reconfig. & pilot run		
10	40	6-8/day	24%

生产线切换成本

	Preprocessing	Printing	Quality control
# new devices	3	1	2
New tasks	Surface ins. ¹ Edge ins. Size ins.	Printing ins.	Curvature ins. Appearance ins.
Computation	Arithmetic, CV, PID	CV	Arithmetic, CV

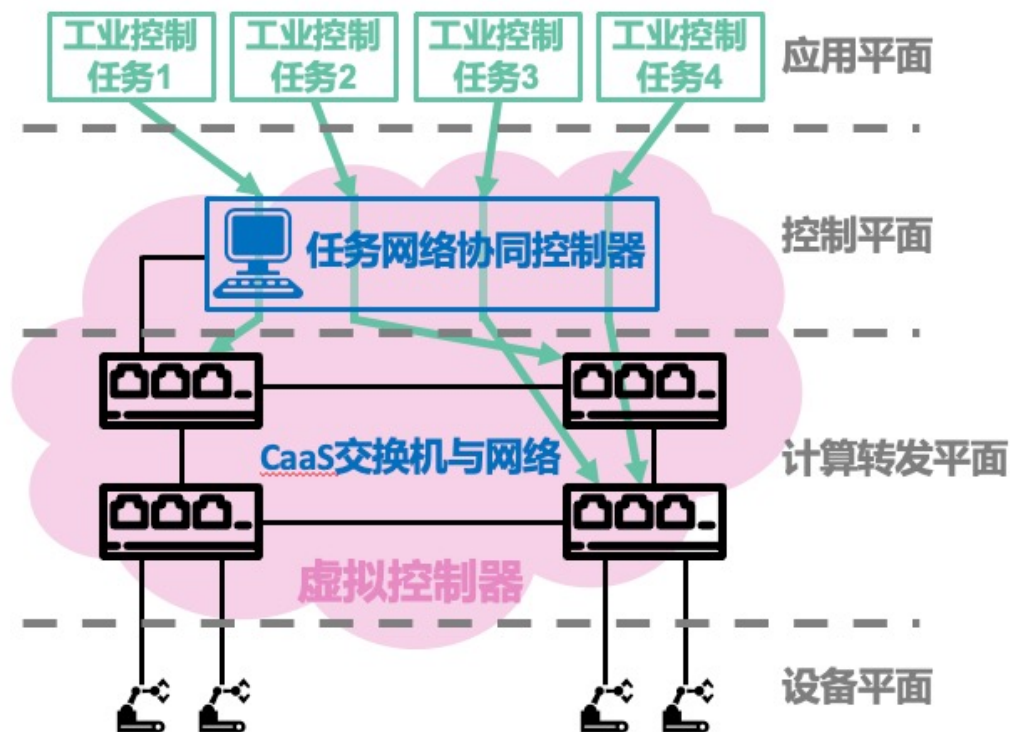
¹ inspection

控制任务升级需求

根本原因在于控制任务与控制器紧密耦合、与网络传输分离

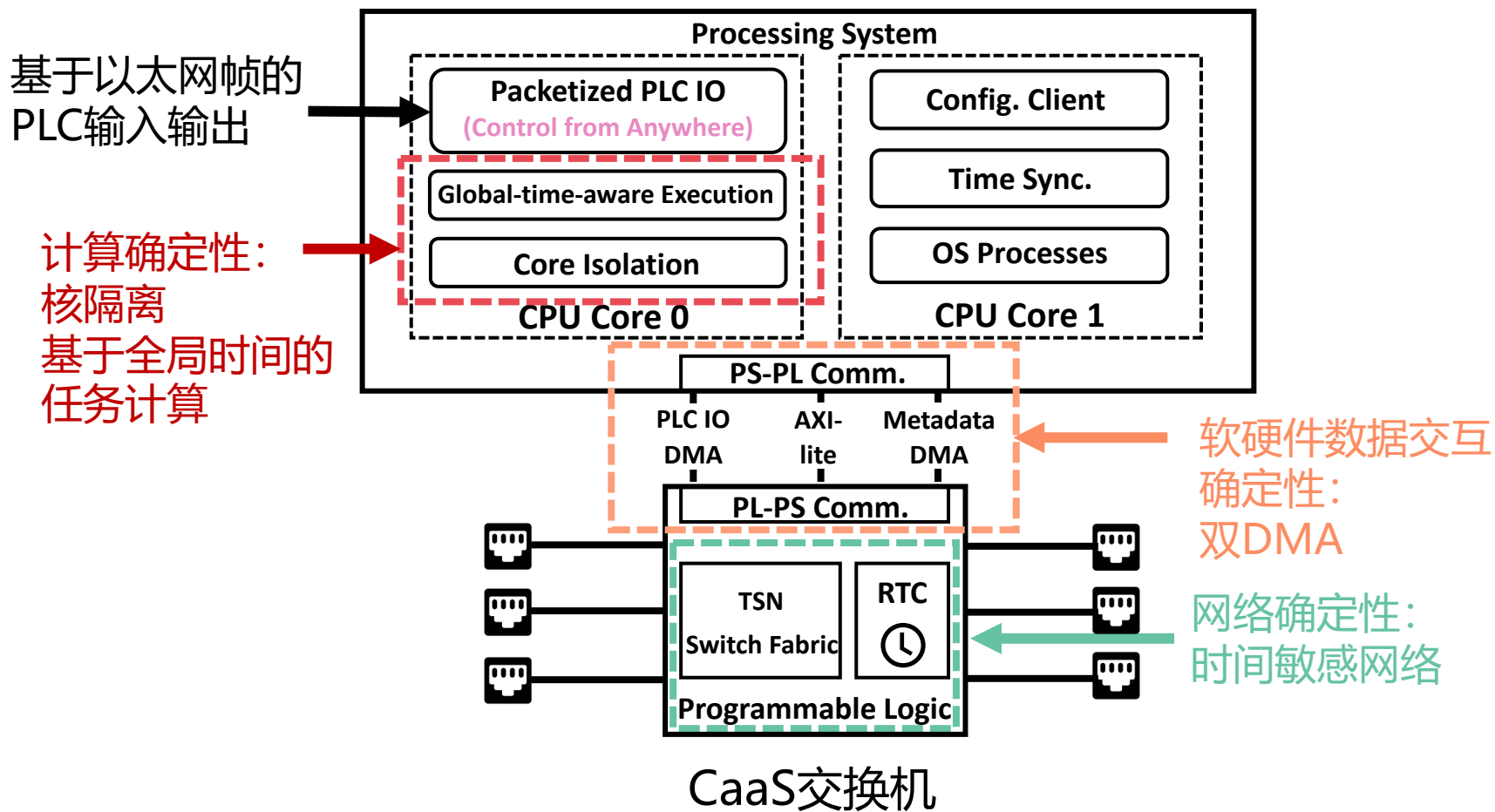
CaaS: 控制即服务工业网络架构

- **控制即服务 (CaaS)** 技术，将控制任务与专用控制器**解耦合**，协同调度控制任务与网络流量，将控制任务**灵活部署**到网络中任意交换机中。
- 将整个工业控制网络虚拟为一个**通用控制器**，实现控制功能虚拟化，支持**生产线灵活切换与升级**。



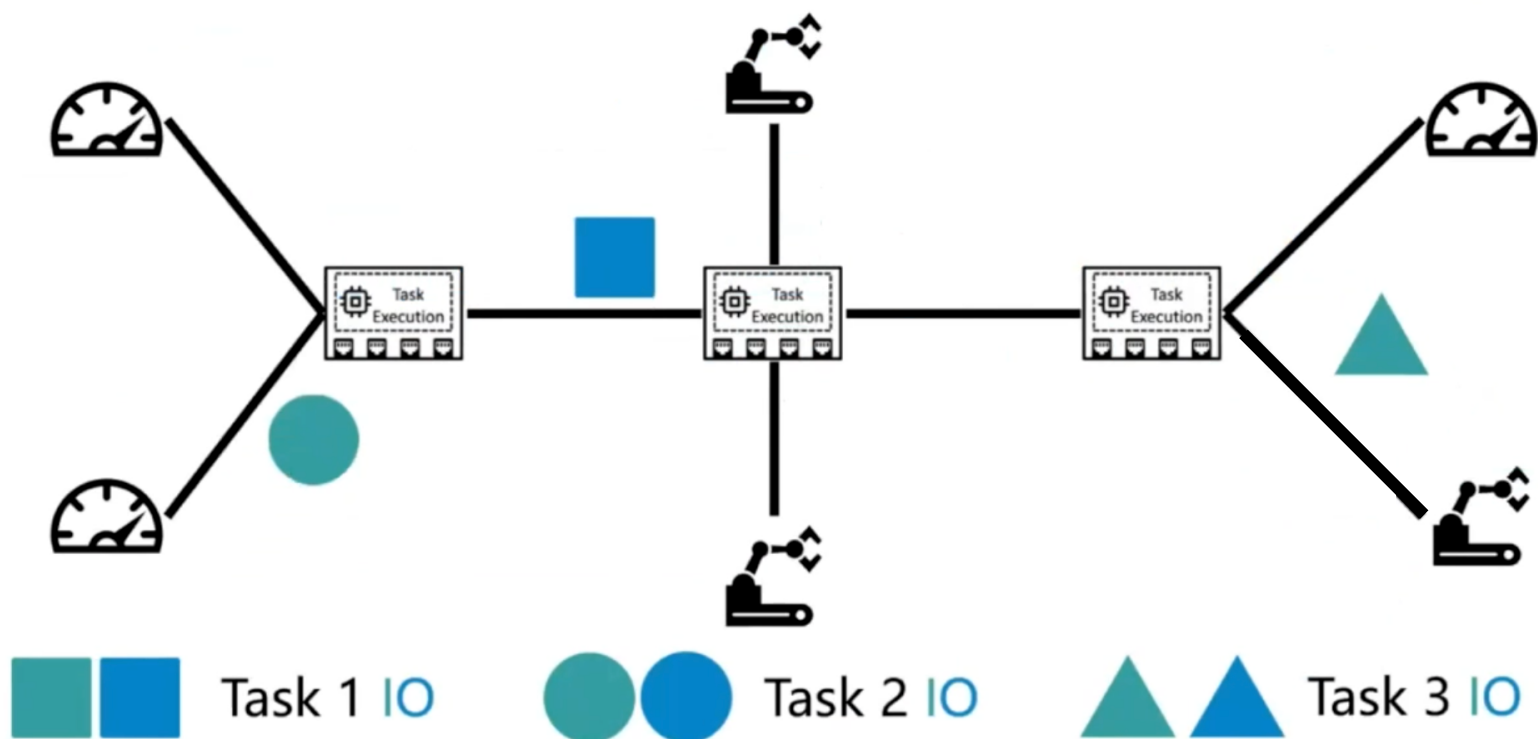
CaaS 交换机设计

- CaaS交换机及协议栈，保障工业控制任务端到端确定性。



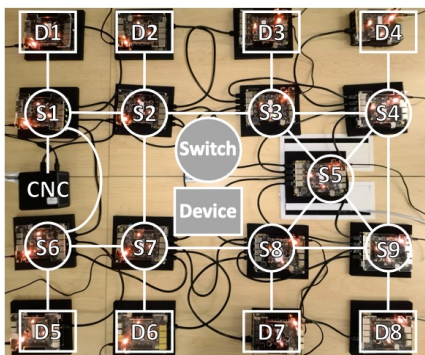
任务和流量协同调度

- 合理规划任务和流量，以**避免冲突并保证传输和计算的确定性**
- 调度目标：何时/何处执行，数据流何时经过哪条链路

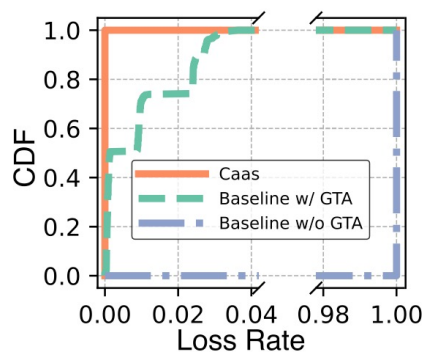


CaaS 系统整体性能表现

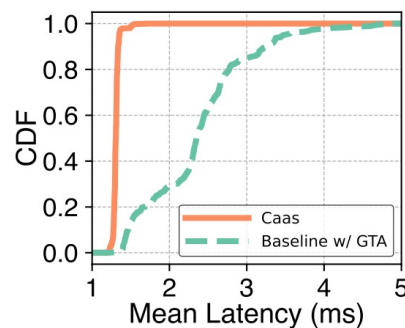
- 相比传统方法，CaaS 通过多种技术**保障确定性控制**，实现了零丢包率，并将延迟降低 42-45%，抖动降低三个数量级。



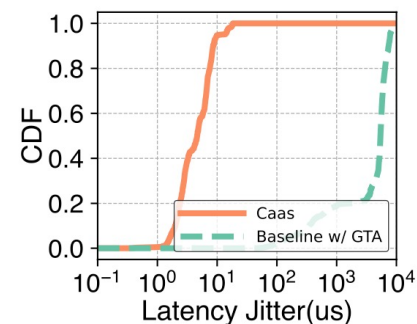
(a) A380 network topology



(b) A380, CDF of loss rate



(c) A380, CDF of mean latency



(d) A380, CDF of jitter

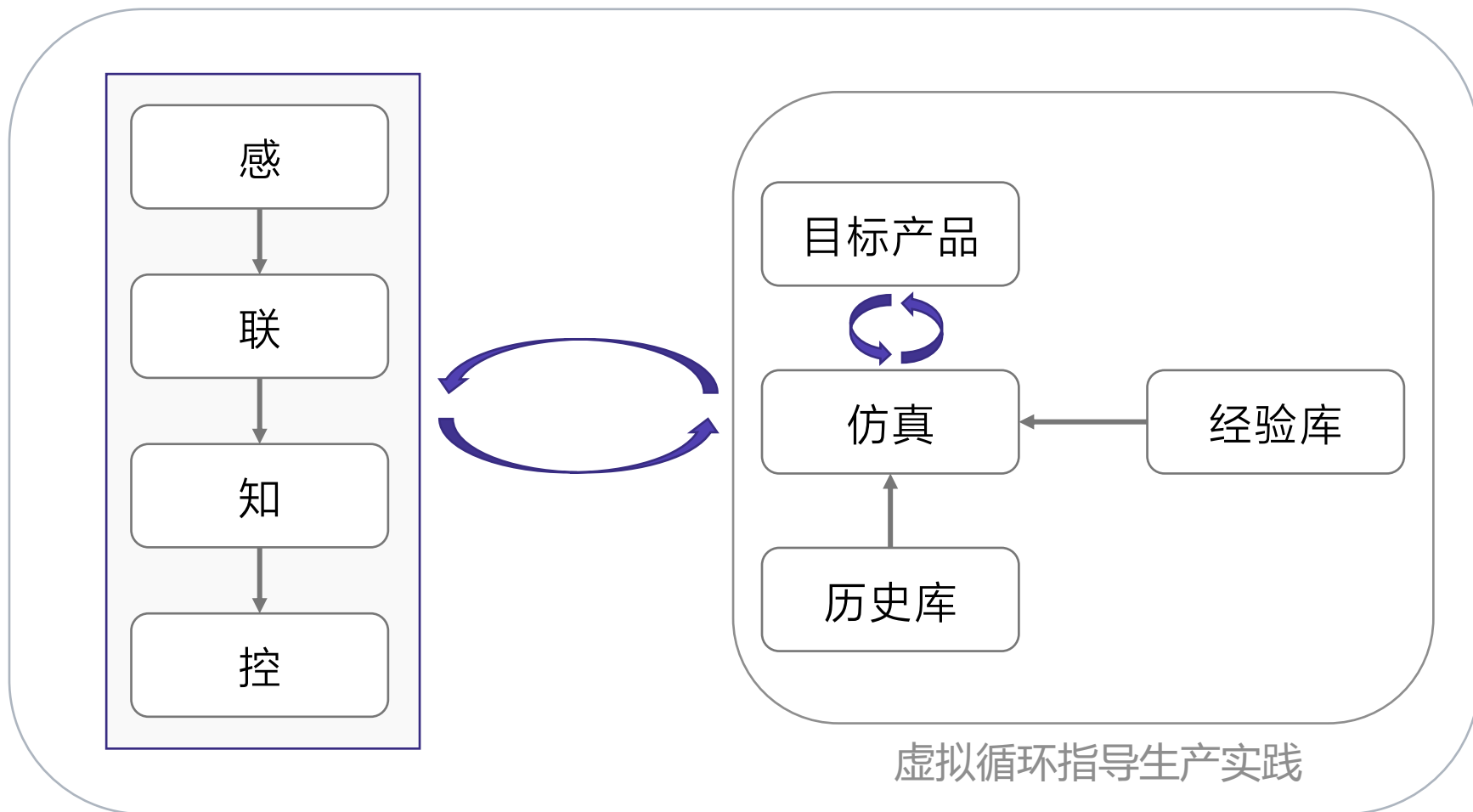
[1] Zheng Yang, Yi Zhao, Fan Dang, Xiaowu He, Jiahang Wu, Hao Cao, Zeyu Wang, Yunhao Liu. CaaS: Enabling Control-as-a-Service for Time-Sensitive Networking. **IEEE INFOCOM 2023**.

铝合金拉弯生产中的应用

整体方案

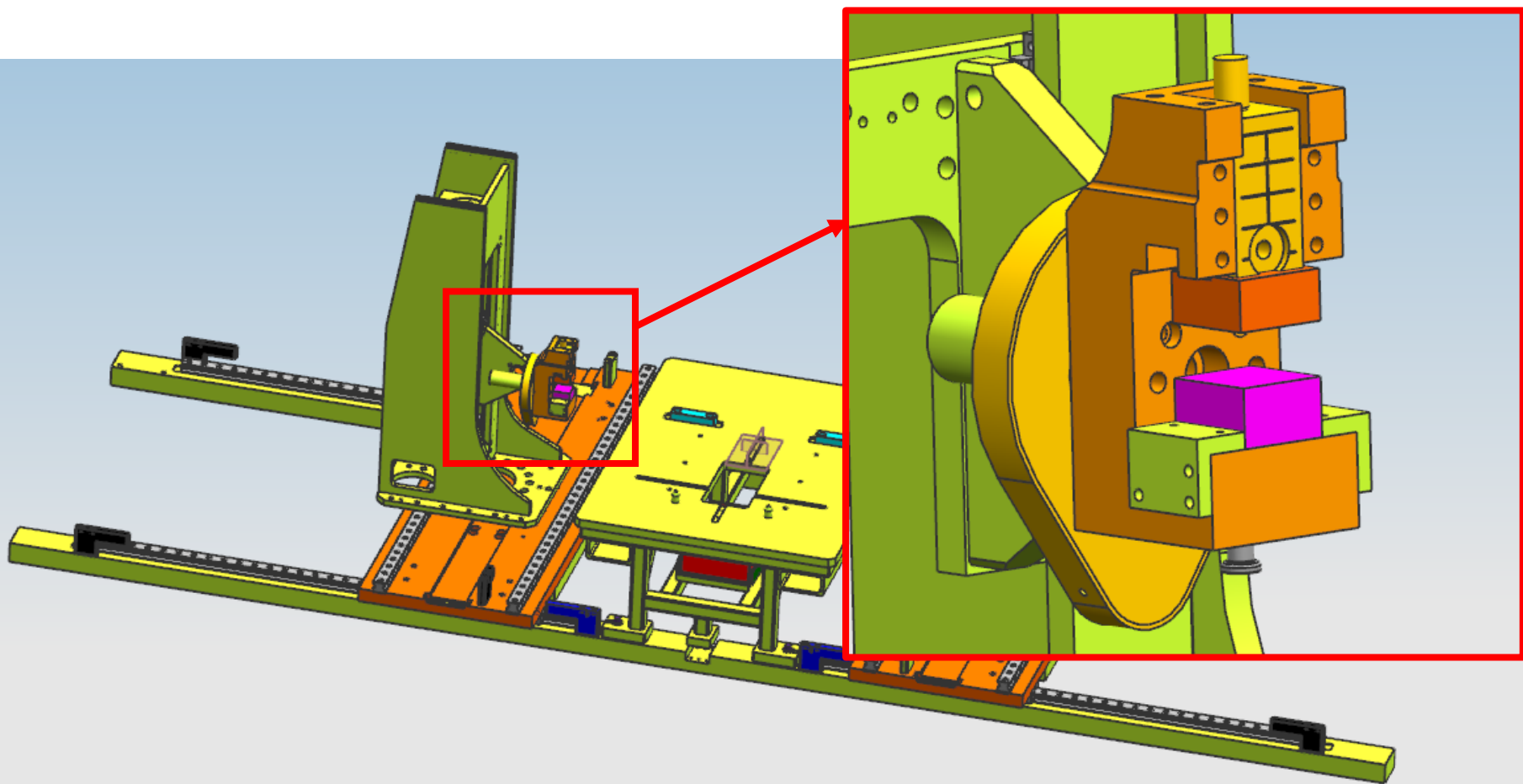
- 改变传统仿真到生产的单循环模式
- 多链路密集感知
- 跨模态数据流互通
- 双循环迭代知识演进
- 网控一体自动化生产

系统架构

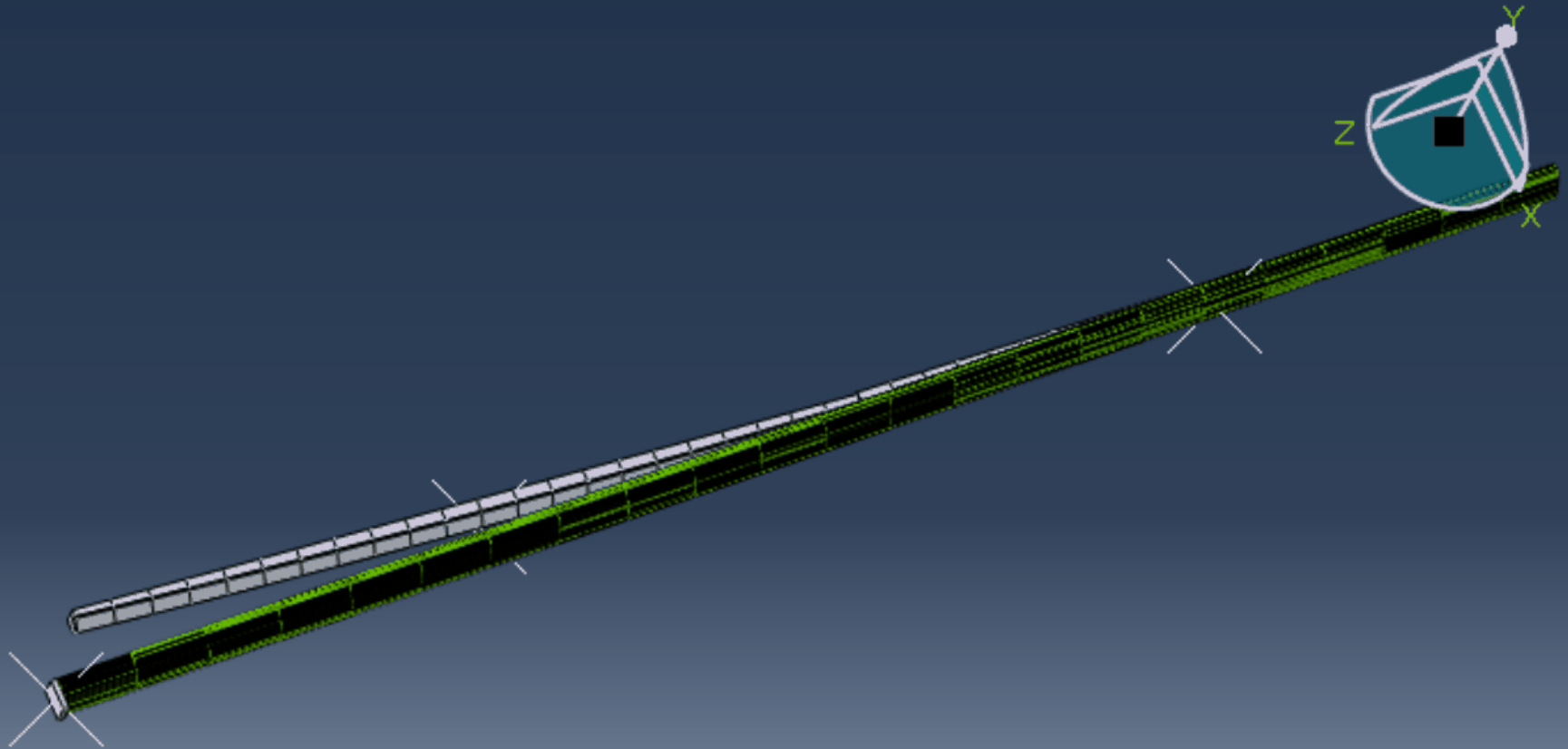


生产循环优化虚拟模型

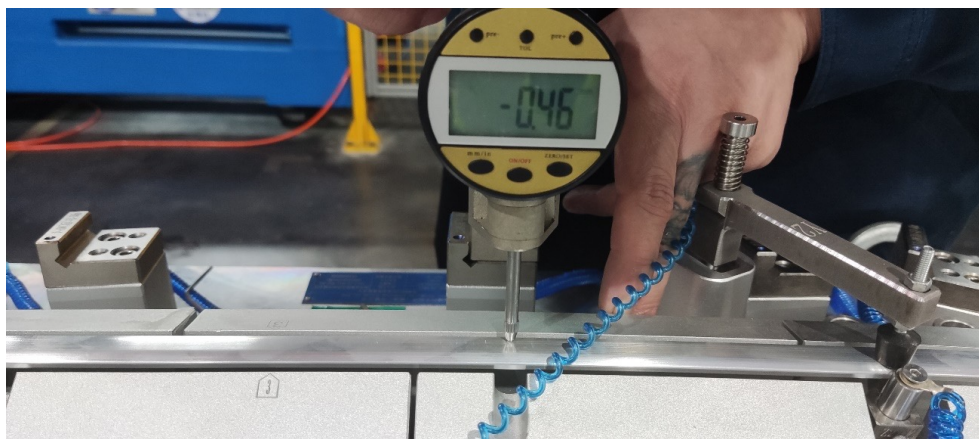
铝合金拉弯机示意图



铝合金拉弯工艺自动优化



正式投入使用



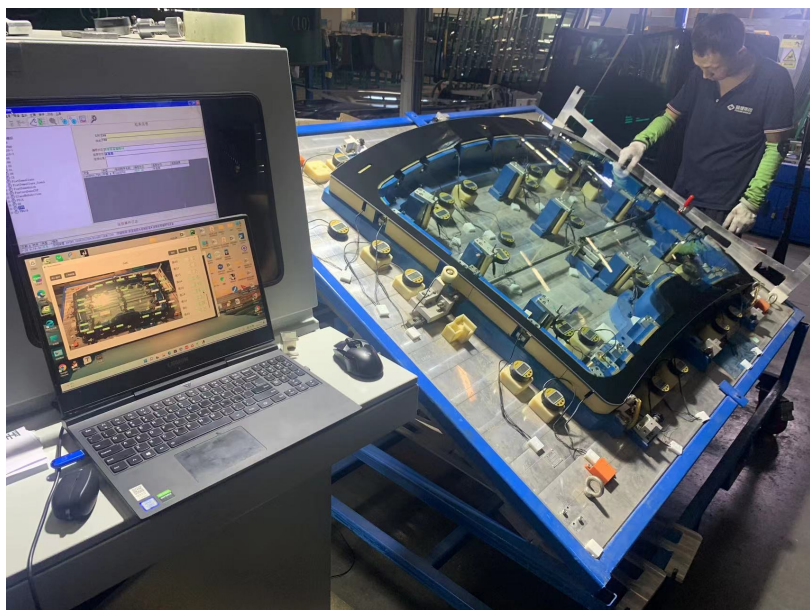
- 2022年11月中旬首个新型号产品投产。
- 12月初系统全面投入使用。

效率提升

产品名称	误差 (<0.5mm)
H53-后水切	0.21mm
H53-前水切	0.25mm
H97-后上饰条	0.42mm
C281	0.31mm
HC-前水切	0.47mm
HC-后水切	0.40mm
UXE-前水切	0.73mm
H97-前门水切	1.39mm

- 对比工厂现有方法平均新产品研发效率提升**3~5倍**，研发成本节约**30%**。

应用推广



系统已在铝合金生产线正式投入使用，预计年内在工厂列装并实现联网规模1万节点以上

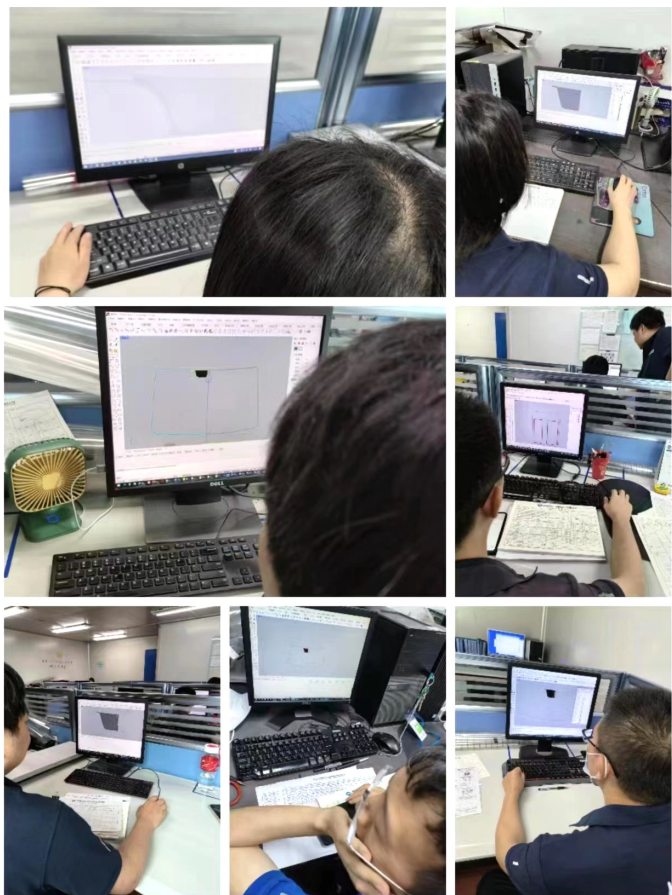
应用推广



应用推广



应用推广



福耀玻璃工业集团股份有限公司
FUYAO GLASS INDUSTRY GROUP CO., LTD.

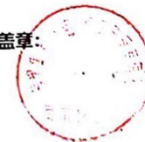
蓝牙百分表应用报告

因汽车玻璃生产自动化数据采集的需要，福耀集团上海事业部于 2023 年正式部署由清华大学研发的蓝牙百分表产品。该产品在汽车玻璃生产线百分表检具上进行了部署应用。经质保部门验证，该产品对本事业部的自动化数据采集起到积极的推动作用。该产品数据传输准确，信号稳定，数据收集效率优于传统人工作业方式，部署安装过程较市场同类型蓝牙产品更加方便快捷，且成本远低于市场上同类型蓝牙产品，适配事业部使用习惯及智能化生产需求。

签字确认 Confirm:

日期 Date: 2023.5.19

盖章:



数字先行的工业互联网

我们已经跨过数字后行，正处于数字并行阶段。未来要突破以感、联、知、控为支撑，先行推演、数字物理融合为要素，数字先行的工业互联网。

订单信息
ERP

BUY

车间制造部



工业万花筒

- IT的第一次繁荣：windows带来桌面APP的繁荣
- IT的第二次繁荣：web带来门户网站的繁荣
- IT的第三次繁荣：移动互联网带来移动APP的繁荣
- IT的第四次繁荣：物联网带来物理信息系统应用APP的繁荣，工业互联网是这一阶段的桥头兵

从数字先行到工业万花筒



钱塘湖春行

白居易

孤山寺北贾亭西，水面初平云脚低。
几处早莺争暖树，谁家新燕啄春泥。
乱花渐欲迷人眼，浅草才能没马蹄。
最爱湖东行不足，绿杨阴里白沙堤。

敬请批评指正

谢谢

王需 清华大学

