



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业互联网面向应用的确定性技术 总体框架蓝皮书

工业互联网产业联盟（AII）
2025年5月





工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业互联网面向应用的确定性技术 总体框架蓝皮书

工业互联网产业联盟（AII）

2025 年 05 月



工业互联网产业联盟

Alliance of Industrial Internet

编写说明

随着我国不断深入推进新型工业化，工业企业的数字化、网络化、智能化升级需求越来越高，工厂中涌现了机器视觉质检、AR 等大量新型的工业应用，这些工业应用除了对网络通信提出了低时延、低抖动等要求，也对计算能力提出更高的低处理时延、周期同步等要求。未来在工业场景下，生产线需要确保多个生产环节在一个约定的时间内完成，这迫切需要工业企业对网络资源和算力资源进行统一调度。因此，如何协同网络通信与计算处理过程，保障工业应用的确定性，已成为行业热点。确定性技术研究正逐渐从网络层向应用层延伸，成为新型工业网络的关键技术方向。

2023 年，工业互联网产业联盟网络组组织产学研用相关单位，共同开展了面向应用的确定性技术研究，提出面向应用的确定性系统架构，旨在建立工业算力和工业网络之上的资源综合调度机制和系统，以保障工业生产流程中工业应用协同的确定性。通过梳理典型应用场景并分析重点技术方向，本蓝皮书为相关产业的技术研究与发展以及新型工业应用的部署提供了方向指引。

组织单位：工业互联网产业联盟

编写单位（排名不分先后）：中国信息通信研究院、中国科学院沈阳自动化研究所、北京邮电大学、紫金山实验室、清华大学、北京交通大学、首钢集团有限公司、重庆大学、普天信息工程设计服务

有限公司、中国电信集团有限公司、北京首钢自动化信息技术有限公司、中国联合网络通信有限公司、中电福富信息科技有限公司、中国电子科技集团有限公司电子科学研究院、北京理工大学、中电科普天科技股份有限公司、中国电信研究院、中国移动通信有限公司研究院、中兴通讯股份有限公司、山东浪潮科学研究院有限公司、华为技术有限公司、中国铁塔通信技术研究院、中国信息通信研究院西部分院

编写组成员（排名不分先后）：张恒升、付韬、李栋、俞雪婷、朱海龙、黄韬、张华宇、彭开来、贾庆民、杨峥、贺骁武、王泽宇、杨冬、张维庭、张丙龙、宋扬、李明妍、郭松涛、陈昕、郭惠军、李果、张东、贾雪琴、韩政鑫、李凯、税洪静月、张腾飞、李丹、程栋、张岱、马锐、张振、曾军、蒋铭、刘鹏、黄震宁、马万明、彭伟杰、王晶、李斌、楚俊生、赵孝武、张昊彦、陈李昊、郭宇辉、马鸿泰、李然、唐华苹、吕玲

目 录

一、 背景	1
二、 面向应用的确定性内涵与架构	3
(一) 面向应用的确定性技术内涵	3
(二) 确定性服务内涵	4
(三) 面向应用的确定性系统架构	5
(四) 面向应用的确定性技术特征	10
三、 重点技术方向	14
(一) 基础共性技术	14
(二) 监测分析技术	15
(三) 跨系统协同技术	15
(四) 资源调度技术	16
(五) 跨系统控制技术	17
四、 面向应用的确定性应用场景	18
(一) 服装整理的生产线机器人	18
(二) 控制即服务的实时生产线	20
(三) 跨园区确定性的云化 X 服务	22
(四) 确定性数字孪生的智能车间	24
(五) “用户到产线”的定制生产线	26
(六) 确定性巡检的地下综合管廊	28
(七) 精准自动化的光学元件装配	31
(八) 确定性边端协同的冶金产线	32
(九) 冶金行业确定性机器视觉检测	34
五、 展望	37
六、 附录	39
(一) 术语表	39
(二) 参考文献列表	39

一、背景

随着工厂的数字化、网络化、智能化水平不断提升，工业网络、工业算力与工业控制呈现出新的架构与特征。一方面，工业算力从生产线分离出来，物理上分成现场级、边缘级和中心级。另一方面，逻辑上工厂全流程管控逐步向一体化、无人化发展。随着工厂中涌现了机器视觉质检、AR 等大量新型的工业应用，这些工业应用除了对网络通信提出了低时延、低抖动等要求，也对计算能力提出更高的低处理时延、周期同步等要求，需要建立网络与算力的更紧密联系。未来在工业场景下，生产线需要确保多个生产环节在一个约定的时间内完成，这迫切需要工业企业对网络资源和算力资源进行统一调度。因此，工业企业管理网络和算力的复杂度和难度持续增大，不得不付出更多的人力、资金、设备来管理工厂网络。

目前国内外企业积极开展算力与网络一体化研究并研制相关产品，相关产品依据工业应用的需求对计算能力与网络通信能力进行协同优化。例如，对于需要大量数据传输的机器学习模型训练任务，在网络带宽有限的情况下，可先对数据进行压缩或预处理，减少数据传输量，同时优化网络传输协议，提高数据传输效率。

与互联网中应用的服务质量不同，工业应用需求普遍具有较强的时间敏感要求。由于缺乏工业算力的确定性参数协调机制及接口，如何准时、精确地协同工业应用成为了未来工业网络中的挑战。

一是大范围确定性协作难度大。PLC、数字化机床等生产设备往往要求操作时延达到不高于毫秒级误差，但 OT 设备引入智能算法后，分离的生产系统、算力系统和云服务增加了生产流程的总时延。目前各类设备仅实现了业务编排和数据互通，但在无法将确定性参数分配给工业算力的情况下，缺乏有效的计算任务动态调度机制，难以完成整个生产流程确定性的弹性控制。

二是算力与网络资源控制不灵活、效率低。工业算力和工业网络各自独立配置，在生产任务变化后，难以动态、高效地调整跨设备的网络资源和计算资源，只能通过预留过量资源来平衡多种生产任务对共享资源的需求。例如，机器视觉装配任务在识别复杂图像中的线缆弯曲时，边缘计算运行的分类算法需要实时处理大量图像信息，一旦网络转发时延超出预期时，边缘计算无法动态地缩减时延。因此，机器视觉应用需要预留额外的带宽和独立的边缘计算容器，为类似工业应用部署独占的服务器极大提升了生产线成本。算力网络相关工作也无法解决该类问题，算力网络主要关注“大网海量资源”的调度，聚焦算力池化、费用计量等移动通信业务关心的问题，无法直接用于资源紧张的工厂。

三是工业算力、工业网络的综合管理运维更复杂。在现有工厂建设模式中，传统生产线解决方案的部署门槛高、灵活性低、运维难度大，工业算力和工业网络各自有独立的管理模块。当生产任务变更时，算、网、控设备都需要重新配置，生产线重新配置需要暂停生产活动，业务变更的时间成本和经济成本

较高。为了解决上述问题，新型工业网络将支持控网算集成的新特征，如何兼顾网络通信过程确定性与计算处理过程确定性成为关键问题。

本报告提出面向应用的确定性（Application-oriented Determinacy, AoD）技术，该技术是实现工业算网的关键技术之一，在算网资源统一调度的基础上统筹生产流程的确定性保障。该技术依据生产流程将多应用协同过程组成一个确定性服务，面向工厂中的确定性服务将计算过程和通信过程统筹规划，依据生产全流程的确定性需求自顶向下地完成资源协同分配，实时、动态优化工厂基础设施及其资源，在智能生产中保障多样化工业应用高效率、高可靠、高确定性地执行。

二、面向应用的确定性内涵与架构

（一）面向应用的确定性技术内涵

面向应用的确定性技术是一种管理工业应用协同过程确定性的技术，该技术协调工业应用的通信过程与计算过程，使得应用执行过程的时延、抖动、带宽等指标具有确定的极限值。

面向应用的确定性技术通过协同调度生产设备、边缘设备和网络设备的多种资源，并匹配工业应用的执行顺序，从而确保整个生产流程的确定性。因此，面向应用的确定性由以下四个方面共同构成：

一是网络传输的通信确定性，面向应用的确定性技术需要确保数据在传输过程中具有低时延、低抖动和高可靠性，满足工业应用对实时性通信的要求。

二是工业算力的计算确定性，面向应用的确定性技术需要保证计算任务能够在算力设备上按照预定的时间和顺序执行，确保处理结果的及时性和准确性。

三是应用流程的时序确定性，面向应用的确定性技术需要确保各个工业应用按照既定的关系协同工作，避免因时序混乱导致的生产问题。

四是程序执行的逻辑确定性，面向应用的确定性技术需要确保程序在执行过程中逻辑清晰、操作准确，避免因程序错误、无法收敛或逻辑混乱导致的不确定性。

（二）确定性服务内涵

确定性服务是指一个或多个应用参与的通信环节和计算环节构成的闭环，是面向应用的确定性技术管理各种资源的“桥梁”。面向应用的确定性技术针对确定性服务定义性能参数，可以更加直观地表达生产流程的需求。因此，面向应用的确定性技术可以针对确定性服务的各环节进行动态调整和优化。

以图 1 所示的确定性服务为例，确定性产线由 AGV 小车、传送带、机械臂、工业模型等组成。确定性服务是贯穿 IT 系统和 OT 系统的业务流，代表 AGV 小车将原料运送到传送带，传送带将原料传递给机械臂，机械臂依据工业模型加工的过程。其中，计算过程包括小车控制应用、传送带应用、机械臂应用，通信过程包括通知传送带原料就绪信号、工业设备应用发送图像数据、云平台应用识别决策结果等。从图中可以看出，由于计算资源和网络资源会复用给多个工业应用，生产线会同时运行多个确定性服务，面向应用的确定性技术需要同时保障所有

确定性服务的时延、抖动、顺序、可靠性等指标。

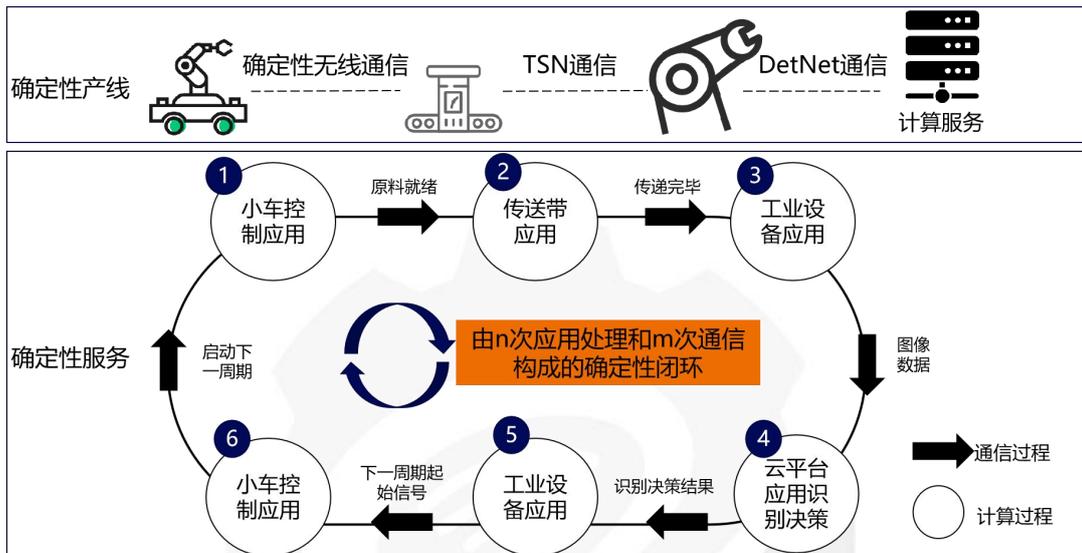


图 1 确定性服务示意图

（三）面向应用的确定性系统架构

面向应用的确定性系统是一种实现面向应用的确定性能力的分布式系统，其系统架构如图 2 所示。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

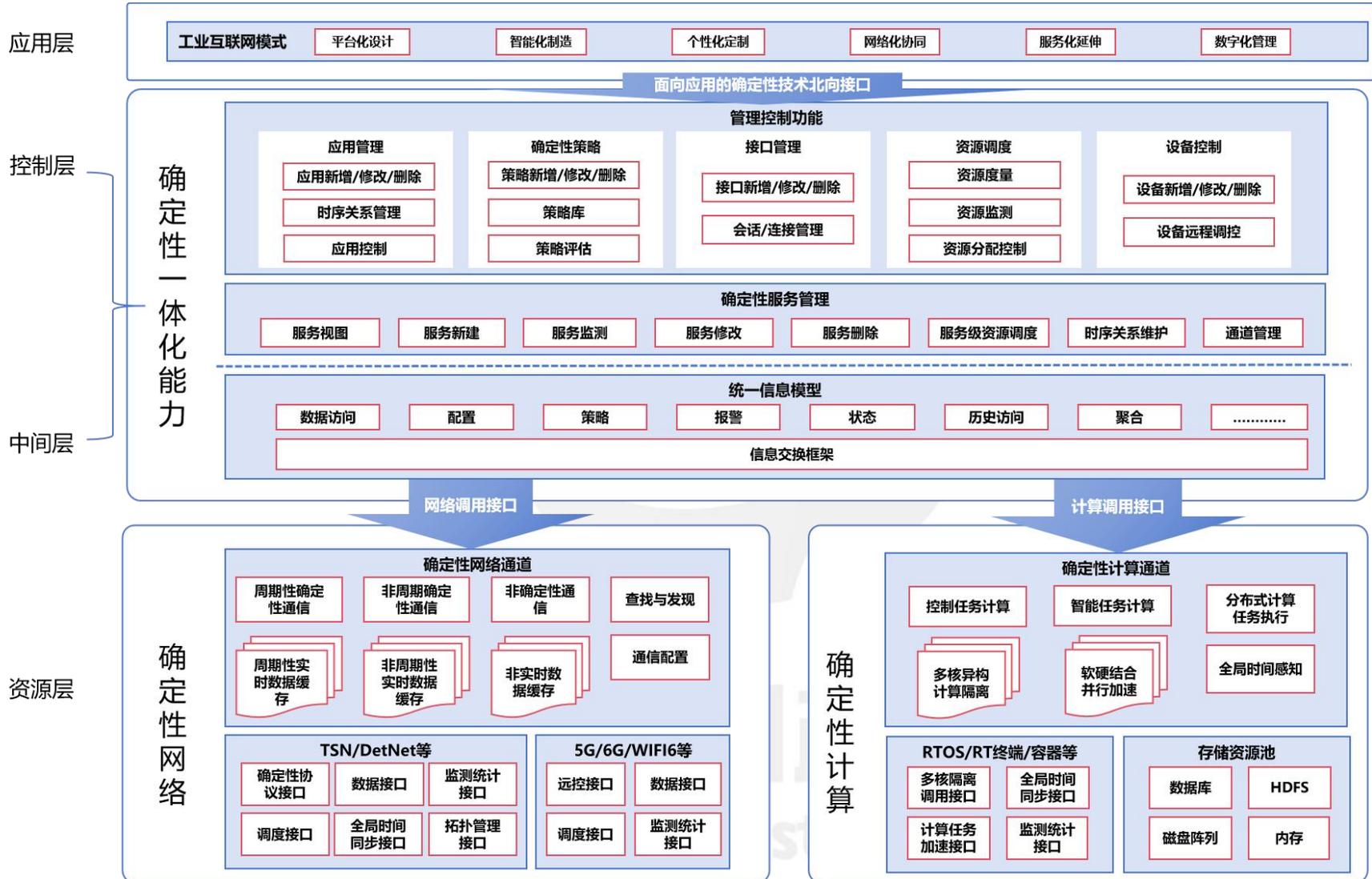


图 2 面向应用的确定性系统架构图

1. 应用层

应用层由工业互联网模式及其中应用组成。面向应用的确定性系统中的应用包含通用应用和行业专用应用，用户可以根据每个应用的需求分别进行确定性参数配置。

1) 通用应用是各种场景下都会用到的基础应用，提供数据采集、通用模型、数据预处理、协议转换等基本功能。

2) 行业专用应用是特定行业领域的专业性较强的应用，提供定制化、差异化功能。

2. 控制层

控制层是管理服务与资源的控制部分，分为管理控制功能、确定性服务管理和面向应用的确定性北向接口三个部分，用于监测、调度和管理整个系统中的工业设备、工业应用、各种资源和确定性服务。

管理控制功能是整体确定性管理服务的功能集合，分为应用管理、确定性策略、接口管理、资源调度和设备控制五个部分。其中，应用管理可以新增/修改/删除工业应用，时序关系管理用于编辑工业应用之间的执行顺序，应用控制用于主动更改工业应用配置。确定性策略用于管理整个系统的策略，该功能支持新增/修改/删除策略。策略库用于管理系统中可以使用的各种策略。策略评估用于监测面向应用的确定性系统的实时性能，该功能利用历史数据和监测数据评估确定性策略的执行结果。接口管理用于控制系统中的北向接口和资源调用接口，可以新增/修改/删除接

口和管理会话/连接。资源调度主要用于资源度量、资源检测和资源分配控制。设备控制功能支持新增/修改/删除设备，实现已纳管各类设备的远程调控。

1) **确定性服务管理是实现确定性服务创建、监测、资源调度等功能的模块。**该模块根据应用需求和时序，构建确定性服务并维护其更新，依据控制策略调整确定性服务采用的工业算力和网络资源。该模块提供确定性服务的服务视图，支持新建、监测、修改、删除服务。资源调度决定计算任务分配与数据流量调度。时序关系维护是确定性服务中通信环节和计算环节顺序的功能。通道管理是新建、配置、删除确定性通道的功能。

3) **面向应用的确定性北向接口是用于应用注册、监测和管理的接口，**实现工业互联网模式和面向应用的确定性控制层之间的数据交换和控制信息传递。

3. 中间层

中间层是整个面向应用的确定性系统的**互联、互通和互操作部分**，由统一信息模型、网络调用接口、计算调用接口三部分组成，实现确定性一体化能力与确定性网络和确定性计算的互操作。它接收确定性服务管理的资源决策结果，再通过统一信息模型将资源决策结果转化为设备配置参数，统一信息模型将设备配置参数传递给确定性网络通道和确定性计算通道。

1) **统一信息模型是定义面向应用的确定性信息通用表示方式的方法，**实现各厂商设备间数据互通，将面向应用的确定性指标和配置传递给工业终端、边缘计算、网络控制器、云服务等。该

模型对面向应用的确定性系统中的数据访问接口、业务模型、策略模板、报警类型、状态表、历史信息等进行了定义和规范。

2) 网络调用接口是确定性服务管理对网络确定性通道的调用接口，该接口支持配置网络控制器、交换机、路由器、工业网关等设备。

3) 计算调用接口是确定性服务管理对确定性计算通道的调用接口，该接口支持配置边缘计算设备和云服务。

4. 资源层

资源层是系统中网络设备、边缘计算设备、生产设备、工业终端、云服务构成的资源底座，该层由确定性网络和确定性计算组成，确定性网络可以分解为网络确定性通道、TSN、DetNet、5G、WIFI6 等，确定性计算可以分解为确定性计算通道、RTOS、RT 终端、容器、存储资源池等。资源具体包括计算资源、网络资源、存储资源等。面向应用的确定性资源层依据面向应用的确定性中间层传递的配置，调整确定性网络通道和确定性计算通道。

1) 确定性网络通道是整合确定性服务通信资源的功能。确定性服务由多个工业应用组成，该通道可以细分为多个端到端传输路径，在通道参数中描述这些端到端传输路径的详细配置。确定性网络通道会建立周期性确定性通信、非周期性确定性通信和非确定性通信的对象，保存每个通信资源的状态信息。查找与发现功能向确定性服务管理提供感知信息。通信配置是向网络控制器、交换机、路由器等设备发送配置参数的功能。

2) 确定性计算通道是整合确定性服务算力的功能。该通道区

分多个计算能力类型，具体包括控制任务计算、智能任务计算、分布式任务计算。该通道提供任务队列、进程/线程、计算单元数量、共享存储等配置模板。多核异构计算隔离是将 GPU 等多核芯片划分为多个计算实例的功能，可以将不同的计算任务分配到适合的计算实例上，减少工业应用的资源争抢。软硬结合并行加速是结合多实例技术和虚拟化技术，向确定性服务提供合适粒度的算力。

3) TSN/DetNet 等是具有确定性传输能力的网络，支持确定性协议接口、数据接口、监测统计接口等接口。

4) 确定性无线网络（5G、WIFI6、6G 等）是具有确定性传输能力的无线网络，具有远控接口、数据接口、调度接口等接口。

5) 实时操作系统/实时终端/容器等具有提供确定性计算的能力，支持多核隔离调用接口、全局时间同步接口、计算任务加速接口等接口。

6) 存储资源池是提供大存储容量的设备或软件，具体包括数据库、HDFS、磁盘阵列等。

（四）面向应用的确定性技术特征

1. 算网一体化确定性

算网一体化确定性是指围绕确定性服务调控生产流程涉及到的各类资源。面向应用的确定性技术主动感知工业应用需求，以全局优化策略调控 IT-OT 系统，配置网络、计算等资源，实现涵盖计算过程和通信过程的全流程确定性闭环控制。面向应用的确定性技术在满足确定性指标的约束条件下可以弹性协调计算环节

和通信环节，使得计算和网络整体性能最优化^[1]。

系统性代表多维度指标体系应具有网边端云指标和整体确定性指标，多维度指标体系能够覆盖工业互联网所有业务的需求。

动态性代表每种设备及其资源的使用情况动态变化，负载、确定性、调控参数也不断变化。

精确性代表指标的监测与控制能够满足工业生产的要求，实现“测得准、控得精”的目标。面向应用的确定性包括了逻辑、计算和网络等多个环节，形成的应用关系之间的整体确定性。

2. 异构资源实时调度

异构资源实时调度是指面向应用的确定性技术调度整个系统中的异构资源，实现全局优化目标。异构资源主要指多种网络混合组网、多种算力按需分配和多种存储方式。面向应用的确定性技术需要对分布式的企业离散资源和集中式的工业云池化资源采用全局的管理模式，向用户提供灵活、弹性的基础设施能力。

3. 全域业务敏锐感知

全域业务敏锐感知是指面向应用的确定性技术主动感知各类设备及其运行的工业应用，在全域范围内利用主动或被动的方式获取应用基本信息，动态构建应用关联和时序。

4. 控制即服务能力

控制即服务能力^[2]将工业系统中的控制功能开放到面向应用的确定性控制层或网络中，实现更加灵活的应用部署。随着硬件 PLC 向虚拟 PLC 转化，将部分工业控制功能部署到云服务器或网络中^[3]。

5. 包容性基础设施

包容性基础设施是将资源与设备基础设施化，在工厂内具备灵活地扩容、调整能力，促进上层工业应用对生产线的垂直管控。

(1) 网算资源基础设施化是指将工业互联网中分布的各类资源统一管理和策略一致，实现按需使用、弹性释放、精准调度计算资源和网络资源。

(2) OT 设备基础设施化是指将 OT 设备的监测、控制、分析、管理等功能以标准形式开放。面向应用的确定性技术利用统一信息模型实现各类设备互操作，依据不同行业工业设备特点规范确定性工业终端接口，形成与设备制造商和通信协议无关的规范化 OT 设备基础设施。

6. 灵活柔性业务流程

灵活柔性业务流程是配置全局管理策略，支持快速调整确定性服务、确定性环节和确定性设备。该特征降低人工参与程度，提高网边端云协同管理水平，缩短生产线重新配置的重启时间。

7. 智能化需求映射

智能化需求映射是指将确定性服务指标动态分解为通信指标和计算指标，远程更新各设备的应用参数，降低了生产线的配置复杂度，实现确定性服务各环节性能的灵活调整。面向应用的确定性技术依托该特征，从应用业务侧设计符合用户需求的逻辑，自顶向下设计服务质量可以更直观地向各行业扩展，提高用户管理效率和整个工厂性能。面向应用的确定性技术指标体系如图 3 所示，确定性服务指标规定了针对某一生产活动的总体指标，整

体指标由其中所有环节的指标构成。在工业应用注册时，工业应用给确定性服务指标赋初值，随后面向应用的确定性控制器会依据调度策略将确定性服务的指标拆分为通信环节指标和计算环节指标，再通过远程控制接口配置网络设备、计算设备。面向应用的确定性技术的目标是严格保障确定性服务的指标，所以可以动态调整服务中各环节指标。

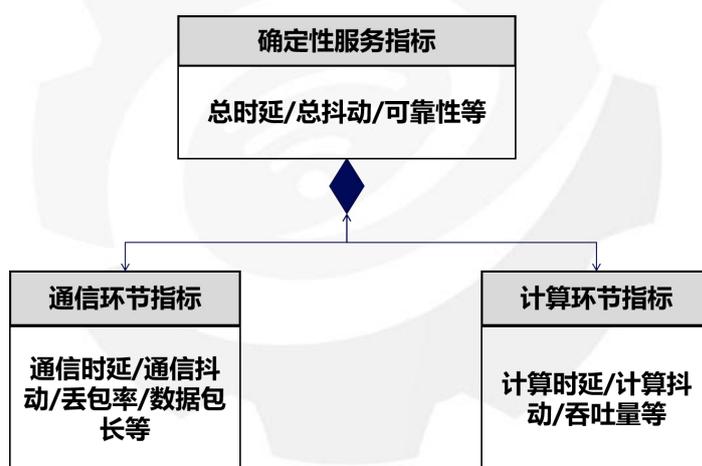


图 3 确定性服务指标体系

8. 确定性服务预测模型

确定性服务预测模型从系统和**服务**两个层面实现性能统计分析。在**服务层面**，面向应用的确定性系统周期性地监测计算环节与网络环节，依据确定性服务预测模型将所有环节监测结果汇聚成确定性服务的性能预测值，进而分析确定性服务性能指标发展趋势。在**系统层面**，确定性服务预测模型可以分析整个系统中所有确定性服务的资源关系并评估面向应用的确定性系统现状。确定性服务预测模型是实现精确调控的基础，如果没有确定性服务预测模型，系统只能判断各环节的性能变化趋势，确定性服务预测模型可以全面评估各类资源的使用情况及变化趋势。

三、重点技术方向

(一) 基础共性技术

基础共性技术是解决确定性保障的指标、需求、能力抽象等基本问题的技术。基础共性技术由面向应用的确定性架构设计技术、指标体系及映射技术、确定性需求模型技术、确定性能力抽象技术、确定性度量技术、确定性评价体系技术构成。

一是面向应用的确定性架构设计技术，该类技术设计面向应用的确定性系统的通用架构和专用架构，专用架构需要根据各行业需求进行优化。面向应用的确定性架构设计重点在于硬件设备、工业软件和设备间接口，解决面向应用的确定性互操作、确定性服务管理等问题。二是指标体系及映射技术，该技术针对面向应用的确定性系统建立更加全面的指标体系，指标体系涵盖时延、抖动、带宽、包长、周期等指标。指标映射技术将全局指标映射到算网资源持有设备。三是确定性需求模型技术，该技术针对行业应用需求严格且多样化特点，以数据流为单位，对服务层确定性相关需求要素进行统一抽象，形成面向确定性服务闭环的确定性需求模型。四是确定性能力抽象技术，该技术针对底层物理网络异构化趋势，统一抽象出独立于异构物理网络的路由、频率、时隙、计算、存储等确定性能力。通过将服务层确定性需求和确定性网络能力协同适配，实现面向应用的确定性保障。五是确定性度量技术，该技术构建科学、准确的确定性度量方法，实时衡量面向应用的确定性系统确定性水平。六是确定性评价体系，该技术研究确定性服务的多维度关

键指标，能够计算面向应用的确定性系统的确定性测量值。

（二） 监测分析技术

监测分析技术是针对面向应用的确定性系统中计算设备、网络设备、确定性服务等进行监测与分析的技术。监测分析技术由应用监测技术、确定性服务监测技术、应用关系监测技术和应用审计技术构成。面向应用的确定性检测技术不同于二、三层确定性网络监测技术和计算监测技术，需要衡量应用关系及确定性服务指标体系。一是**应用监测技术**，该技术对工业应用进行监测，分析工业应用占用本地资源情况和通信状态等实时信息。二是**确定性服务监测技术**，该技术监测确定性服务的总时延、总抖动、复杂度、规律模式等实时信息。三是**应用关系监测技术**，该技术监测确定性服务中多个工业应用的执行顺序，监测每对工业应用间链路的状态。四是**应用审计技术**，该技术审计工业应用的操作和通信，分析工业应用的类型和复杂程度，为更精确的调度策略提供信息依据。

（三） 跨系统协同技术

跨系统协同技术是确保各个网络和应用遵循一致的时间顺序和互通规则的技术。跨系统协同技术由时间同步技术、逻辑时钟同步技术、频率同步技术和异步通信技术构成。一是**时间同步技术**，该技术是一种用于在分布式系统中对事件进行排序和时间戳记注释的技术。二是**逻辑时钟同步技术**，该技术确保所有设备和应用能够具有全局统一的逻辑时钟。三是**频率同步技术**，该技术涉及到网络之间、设备之间选择适合的频率，确保异构网络和算网设备的频率一致性^[4]。四是**异步通信技术**，

该技术在不要时钟精确同步的条件下，保证节点之间的事件顺序和时间戳的一致性。

（四） 资源调度技术

资源调度技术是全局管控工业网络和工业算力的技术。面向应用的确定性控制器根据资源分配算法调整面向确定性服务的资源分配方案。资源调度技术由业务流量整形技术、链式流保障技术、资源保障技术和算网一体化保障技术构成。一是**业务流量整形技术**，该技术需要结合传统网络层流量整形、传输层滑动窗口和计算队列调度等方法，实现面向算网协同的各环业务流量整形。二是**链式流保障技术**^[5]，确定性服务中的工业应用不需要大量算力时，确定性服务简化为多个连续的数据流，本报告称之为链式流。该技术面向链式流统一划分路由路径和设备门控，通过链式流整体调度优化提升网络资源利用率。

三是**单一资源保障技术**，该技术实现对某一种资源的弹性管控，满足确定性服务对该资源的需求。算力保障方式可以分为算力分配、算力预留、算力隔离等。算力粒度可以划分为虚机、容器、CPU、GPU、DPU等粒度。目前GPU厂商可以通过vGPU、MIG技术将具有大量计算单元的模组划分为多个独立算力实例，可以有效减少工业场景中计算任务冲突。网络保障方式可以是调用网络控制器或垂直管控网络设备。四是**算网一体化保障技术**，该技术是指同时调整工业网络和工业算力的情况下保障确定性服务性能，在网络通信性能和计算任务性能之间取得折衷。该技术需要确保面向应用的确定性系统中所有确定性服务的指标正常。

（五）跨系统控制技术

跨系统控制技术是集中控制各类设备的技术。跨系统控制技术由策略分解技术、配置更新技术、传输控制技术构成。一是**策略分解技术**，该技术将全局策略分解为各类设备的局部策略。在策略分解的过程中，需要考虑各设备的状态和资源，确保所有局部策略的一致性。二是**配置更新技术**，该技术通过统一信息模型将各局部策略转化为各环节配置参数，再将配置参数下发至各环节。统一信息模型的信息需要包括确定性服务基本信息、确定性参数、各环节参数等。三是**传输控制技术**，该技术是调控确定性服务内部传输协议的技术。新型传输协议可以采用窗口调节、连接迁移、多路传输等手段，适配计算设备的吞吐量与网络设备的门控。

四、面向应用的确定性应用场景

新型生产线在自动化装配、质量检测、故障诊断等场景中普遍采用了多应用协同控制，面向应用的确定性技术直接从应用的角度描述性能指标。全局指标能够更直观地反映用户的确定性需求，可以“自顶向下”自动分解和动态优化，因此面向应用的确定性可以实现“需求直接落地到生产线”的新模式。

（一）服装整理的生产线机器人

1. 场景描述

柔性材料的自动化加工一直是工业生产的难点问题，材料不可预测的形变会给加工设备带来困难。在面向应用的确定性技术控制下，机械臂能够实时识别形变后的状态，精准地执行操作并修正形变带来的负面影响。复杂装配任务需要多台机器人协作执行，因此生产线采集大量的图像、传感数据，这些实时数据对网络带宽和计算时延有较高要求。

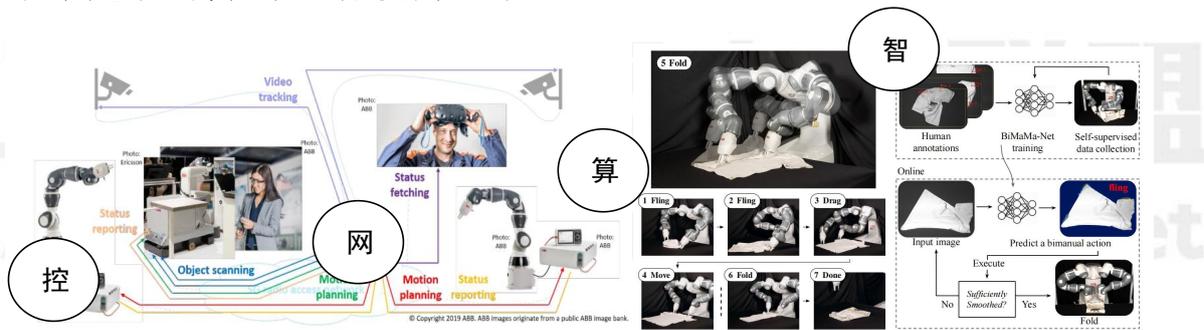


图 4 计算密集型产线 [6]

随着机械臂智能化程度的提高，机械臂可以替代人工处理柔软的衣物，该案例的两个机械手臂同时规划操作和实时判断柔性材料状态。机械臂能够在 120 秒内以 93% 准确度完成叠衣过程。

在整个折叠操作过程中，机器学习算法离线部分周期性地更

新神经网络，优化模型的各项参数。机器学习算法在线部分则对图像进行识别，机械臂会不停地将折叠效果反馈至神经网络，在预测操作结果和判断折叠效果的基础上，机器学习算法判断是否进入下一个周期。总时长主要受限于识别的准确率和识别时延，如果通过工业算力赋能机械臂，该案例需要通过面向应用的确定性技术确保通信双向过程、自学习过程和图像识别过程的确定性，机械臂可以提升柔性物体加工复杂度、折叠速度和准确度。

2. 场景需求

为了实现图像识别与机械臂的无缝联动，各设备需要确保执行设备与外部测量、传感器、机器学习和控制系统的确定性连接，单一确定性环节的时延通常在 50ms 内，涉及高速或高精度的总时延通常在 20ms 内，可靠性通常为 99.99%。

表 1 确定性服务各环节指标需求

序号	确定性环节名称	环节可靠性	环节时延	环节带宽	环节抖动
1	固定机器人运动规划	≥99.99%	(5-40) ms	DL<1Mbits/s UL<1Mbits/s	<10ms
2	机器人间通信	≥99.99%	(10-40) ms	DL<0.1Mbits/s UL<0.1Mbits/s	<5ms
3	移动机器人运动规划	≥99.99%	(10-50) ms	DL<0.5Mbits/s UL<0.5Mbits/s	<20ms
4	物体扫描	--	<10ms	DL<2Mbits/s UL<2Mbits/s	<5ms
5	固定机器人状态监测	≥99.0%	(5-10) ms	DL<1Mbits/s UL<1Mbits/s	<5ms
6	移动机器人状态检测	≥99.0%	(5-10) ms	DL<1Mbits/s UL<1Mbits/s	<5ms
7	状态捕捉	≥99.0%	(50-100) ms	DL<5Mbits/s UL<1Mbits/s	<35ms
整体确定性总指标		≥99.99%	115-290ms	DL<5Mbits/s UL<2Mbits/s	<35ms

3. 生产效能

面向应用的确定性技术可以提升柔性材料加工新型产线的资源利用率和整体性能，随着智能算法的不断优化，面向应用的确定性

定性技术可以进一步推广到线缆装配等领域。

(二) 控制即服务的实时生产线

1. 场景描述

在传统工业控制网络中，控制任务的管理设备和执行任务的控制器互相深度绑定，在业务切换过程中生产企业面临配置过程繁琐、规模扩展受限、升级成本高昂等问题。控制即服务模式以确定性为基础，将整个网络虚拟化为一个通用的逻辑控制器，将工业算法下沉到网络交换设备。机械臂除了能够执行预先设置的抓取、放下等简单指令，还应对周围环境的变化做出正确、快速的响应，实现工业应用的端到端确定性执行。

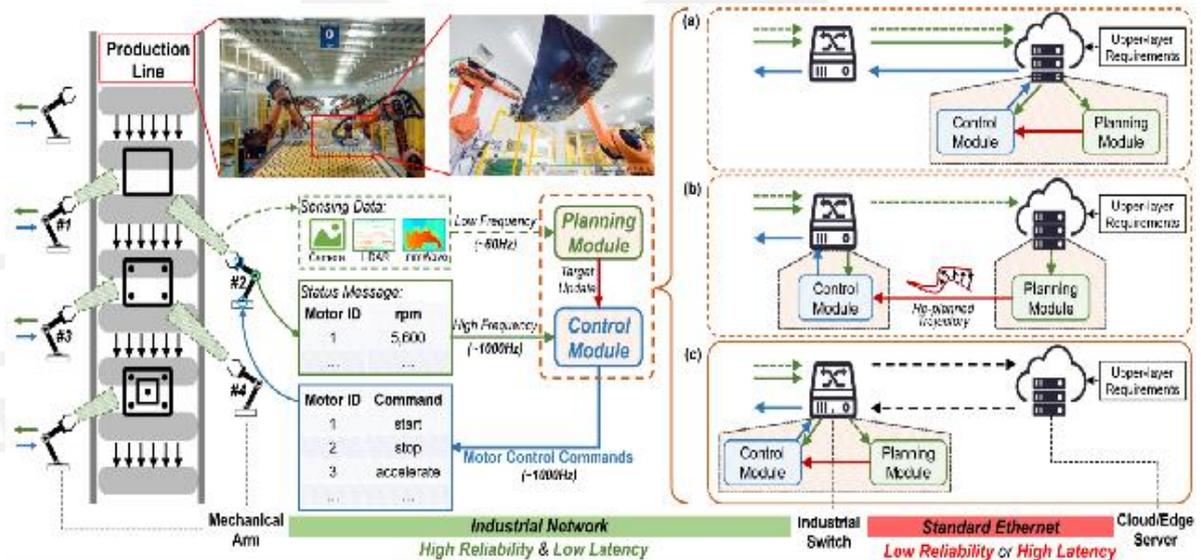


图 5 CaaS 工作模式

1) 该模式采用云边辅助的机械臂控制流程，机械臂将姿态信息和环境传感器数据发送到服务器，服务器根据任务目标计算出合理的运动轨迹，控制模块将其转化为机械臂的控制指令。将控制计算任务卸载可以有效降低管理成本，但网络传输与服务器计算的不稳定性会增大控制误差。

2) 该模式将控制模块从服务器迁移到网络交换机，离生产线

更近的控制模块获得更低控制时延和较高控制精度。但是，部署在网络交换机的轻量级控制模块无法满足智能化控制任务对环境变化快速及时响应的需求。

3) “控制即服务”的架构将规划模块和控制模块组合作为一种服务，将该服务下沉到网络交换机，进一步降低机械臂的端到端控制时延，满足高精尖的工业生产任务需求。

2. 场景需求

工业机械臂控制频率不低于 1000Hz，机械臂的控制模块响应延迟至多为 1ms。丢失控制指令会触发工业机械臂一般有运动保护机制，终端电机会重复上一个控制指令或直接停机。1080P/60Hz 的相机要求规划模块的响应延迟至多为 16.6ms，为保证顺利获取到图片数据，那么连接机械臂与计算核心的网络带宽至少要预留 10Mbps。

过高的控制时延和过小的网络带宽，会降低工业机械臂的控制精度，影响工业产品的质量，损害工厂生产效率。

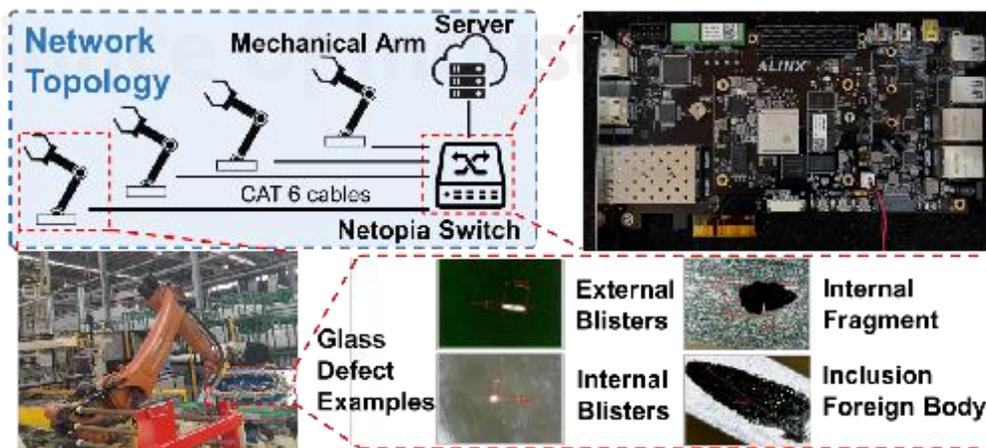


图 6 CaaS 工厂案例

3. 生产效能

“控制即服务”能力可以确保控制指令被准确、及时地收发，从而使机械臂的行动更加精确，减少误操作和延迟。该模式通过

对底层控制和智能规划任务进行统一的计算、网络资源调配，可以满足不同控制终端的时延、带宽需求，面向应用的确定性网络可以提高企业工厂的整体资源利用率和降本增效。

(三) 跨园区确定性的云化 X 服务

1. 场景描述

云化 X 服务将控制功能从物理设备迁移到云服务或边缘计算设备，能够极大降低生产线成本。云化 X 服务通常直接由工程师预估处理和计算的时间，工程师用控制周期减去预估的时间并最终确定网络确定性要求。为了确保算力不被抢占，现有方案中计算部分被过度预留资源。

- 1) 云化 X 服务需要算网协同的确定性，需要面向应用的确定性系统实现控制与执行之间的确定性远程闭环控制。
- 2) 云化 X 服务需要保障应用层面端到端的精确控制，满足应用程序对通信时延、带宽、云端算力等较高的性能要求。
- 3) 云化 X 服务具有多网融一、拓宽采集通道、工业设备复用性、生产流程可靠的特征。云化 X 服务的典型场景包括确定性云化 DCS、确定性 5G 云化 PLC、确定性 5G 云化机器人等。

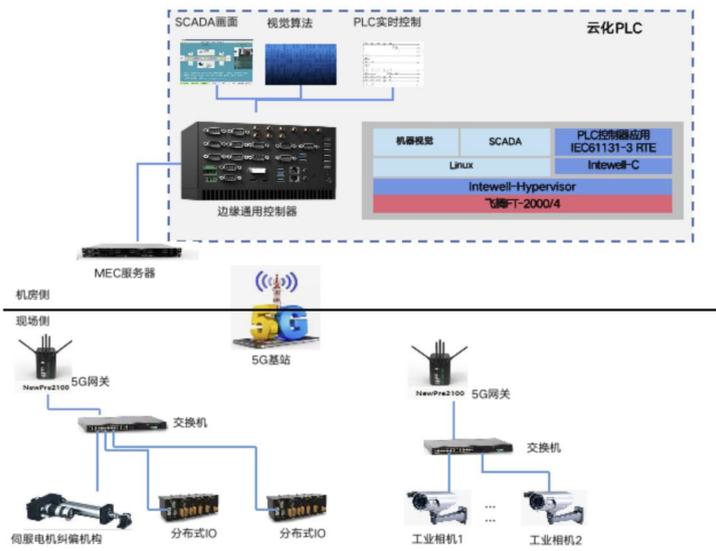


图 7 云化 X 服务案例

2. 场景需求

PLC 逻辑控制具有固定的控制周期，应用需要在 0-10ms 周期内完成一次 IO 数据读取、处理和写出的操作。

运动控制是涉及到机器人、伺服电机等设备的精密控制业务，对于时延和抖动的确定性能力要求很高，端到端时延要控制在 10ms 以内，抖动小于 100us。

机器视觉质检是涉及到图像处理和分析的智能质检业务，对于上行大带宽能力要求较高，网络要提供大于 80Mbps 的上行带宽。

电力差动保护是涉及到电网安全和稳定运行的关键业务，对于时延和可靠性要求极高，业务时延要求小于 15ms，可靠性达 99.999%。

云化 X 服务与受控设备需要动态变更映射关系。

3. 生产效能

面向应用的确定性可以实现跨域网络与计算的深度融合，数据流能够在额外开销最小的条件下实现高质量通信。面向应用的

确定性可以为云化 X 服务提供带宽大、时延低的高质量外网。工业生产设备可通过与不同云化服务互联形成灵活的确定性服务，这一模式提升了工业设备复用性。面向应用的确定性技术将云化 X 服务的远程协同流程“透明化”，促进云化服务落地。

(四) 确定性数字孪生的智能车间

1. 场景描述

数字化车间运用精益生产、精益物流、可视化管理等先进的生产管控理论设计和建造，数字孪生建模范围由单个产品向整个车间转变。数字孪生通过各级传感器和数据采集设备，以多种形式、海量规模不断收集业务时间敏感数据，再实时得到预测性分析结果和决策结果。数字化车间的数字孪生实现了对真实车间物理对象的虚拟实验、测量、分析的媒介和手段，全面感知整个生产环境中的态势细节。在此过程中，上层控制管理系统、数字孪生仿真验证、真实物理工厂的应用之间的协同包括了计算、网络传输等多个环节，难以靠单一的网络层保障支撑应用间确定性需求。数字孪生的确定性服务可确保全工厂在信息空间上的精确、可靠投影。



图 8 确定性数字孪生逻辑结构

2. 场景需求

数字孪生呈现分布式管理、组成关系复杂、物理过程多样的特征，实现复杂生产流程的实时互动仿真：

1) 数字孪生需要具有统一数据模型，数字工厂的物理数据利用专网采集，再向上层数据中心汇聚和处理，处理结果会被上层应用使用。整个数据转换过程跨多个系统，需要在真实物理工厂、数字孪生仿真验证和上层控制管理应用间使用统一信息模型完成数据传递、语义交互和互操作。

2) 数字孪生需要实时同步处理控制信号，工业系统检测、控制、执行的实时性高，很多应用的实时性要求整个流程时延在 10ms 以内，智能规划控制需要确定的控制数据和反馈数据，避免从真实物理工厂收集失效信息、重复信息和其他错误信息；

3) 数字孪生需要计算能力的动态调配，数字孪生应用采用 AI 智能规划控制，需要大量算力执行仿真、模型训练、模型运行等任务。面向应用的确定性技术在大规模云计算算力、边缘计算

算力之间进行确定性动态调配，综合调整网络时延和计算时间，确保网算整体时间开销满足应用实时性要求。

3. 生产效能

面向应用的确定性技术支持从数字孪生应用到生产设备应用的视角，在应用数据采集、传输和处理计算过程中，对网络和工业算力进行统一编排管控，为真实物理工厂的工业应用提供实时性、可靠性和有序性的整体保障能力，避免单一采用确定性网络技术带来算力浪费。在该案例中面向应用的确定性技术实现数字孪生应用数据可靠、实时的传输和处理，帮助工厂简化流程并提升运作效率。

（五）“用户到产线”的定制生产线

1. 场景描述

用户到产线（Customers to Production Lines, C2PL）新模式将人工智能新技术应用到工厂生产活动编排中，以智能大模型为核心拉通定制化订单和柔性生产。该模式支持用户以多种输入形式定制心仪的产品，用户可以在外观、材料、尺寸等方面进行自由定制方案。用户在互联网完成高端产品的定制、下单和支付，由工业管理软件完成 IT 系统和 OT 系统的联合业务编排。交互式大模型订单编排自动生成一个确定性订单，再由工业生产控制系统拆解为多个加工环节。面向应用的确定性控制器会依据加工环节构建确定性服务，实现生产过程中的算网资源动态调整。



图 9 C2PL 新模式逻辑结构

C2PL 实现无人化生产线调度，可广泛适用于各行业柔性制造生产线，提升用户的参与度和需求采集效率。现有 ChatGPT 可以支持语音、链接、图片等方式的数据，用户在系统给出效果图后，可以交互式改进产品形态和配置。在这个场景中，人工智能衔接了 IT 工作流和 OT 工作流，面向应用的确定性则需要进行全局服务质量定义、控制与监测评估。

2. 场景需求

工业大模型需要支持多种产品需求的多模态输入，语音、图片、链接等需求能够被系统理解并呈现样品效果，将面向应用的确定性参数拆解为 IT 设计环节和 OT 生产环节加工步骤的确定性参数。

面向应用的确定性系统需要实现确定性服务创建、资源调度、确定性评估等。

在保障产品多样化条件下，生产线任务变更过程需要面向应用的确定性技术保障确定性。

面向应用的确定性系统需要向工业生产控制系统提供统一定义信息模型；

面向应用的确定性系统需要划分出能够完成生产任务的工业算力和网络资源，确保能够实时完成加工工序。

3. 生产效能

面向应用的确定性生产流程可以贯穿 IT 设计流程和 OT 生产流程，面向应用的确定性技术可以简化算网调控方法，极大缩短柔性制造时间。面向应用的确定性系统可在多个定制任务间共享算力和网络，提升设备利用率。该案例可以降低人工成本，提升企业竞争力。用户则可以缩短需求分析时间，全天候获得高品质产品或服务。

（六） 确定性巡检的地下综合管廊

1. 场景描述

城市地下综合管廊是地下空间建立的一体化隧道，埋入城市电力、通信、燃气、供热、给排水、有线电视、道路照明等至少 7 种管线，是城市管理的地下生命线。我国地下综合管廊建设从

2015 年开始试点，到 2022 年 6 月底，279 个城市、104 个县累计开工建设管廊项目 1647 个、长度 5902 公里，形成廊体 3997 公里。

- 1) 巡检是需要白天昼夜不断持续开展的重要基础性工作，主要工作由管廊设施运行状态监控、数据采集分析、设备联动控制、突发事件处置、抢险救灾等组成。
- 2) 综合管廊巡检工作并不轻松，巡检人员不仅要懂专业技术，还需要有良好的体能，克服长时间连续工作的疲惫感。

2. 场景需求

该案例需要管控异构算力，近端算力需要提供 ≥ 7 个领域的专业数据库，用于比对、分析机器人上传的传感器数据、高清视频数据，完成异常、事故情况判断和报警。云化应用可生成维修建议、专家远程连线，配合巡检人员高效完成巡检任务。面向应用的确定性系统需按巡检不同业务类型、流程要求，抽取不同算力，保证数据分析精准性。

该案例需要无人化控制，综合管廊巡检工作量大，且 24 小时持续进行，全部用人成本投入高。10 公里以上的综合管廊一般只能采用无人化方式的机器人巡检。

该案例需要网络自适应多种应用，巡检机器人作为综合管廊内的移动智能终端，搭载多种传感器设备，需要具备数据采集传输、远程控制、高清视频回传、AR/VR 远程连线和双向对讲功能，涉及网络和应用协同、IT 和 OT 网络协同。需要根据不同应用自适应选择管廊内网络带宽和转发策略，对网络实时性、可靠性要求较高。

该案例需要多种应用顺序执行，远程人员获取报警和机器人

位置后，通过平台向机器人发送控制指令，完成故障、异常、事故跟踪和处置。

该案例中各地综合管廊较为分散，随着使用规模不断扩大，存在互联互通和可靠性需求，未来需要面向应用的确定性技术对工业算力、网络资源、能耗的综合调度。



图10 确定性巡检逻辑结构

3. 生产效能

综合管廊巡检机器人可以24小时昼夜不间断开展巡检任务，目前可替代人工完成70%以上的日常巡检项目，相较于人工巡检提升4倍巡检效率。机器人可以忍受火灾等事故发生时的较高温度，还可以避免人工巡检时出现的漏检、误检等情况。

综合管廊巡检机器人可通过高清视频和采集综合数据，精准分析事故、实时控制设备，提前到达事故地点协助救援、为救灾人员提供处置建议、远程维修，不但减轻了人力巡检的危险及负担，而且提高了事故处置的实时性和可靠性。该案例还可明显降低现场管线维修难度和人工费用。

(七) 精准自动化的光学元件装配

1. 场景描述

高端光学元件是决定高端装备性能水平的核心零件。随着激光装置通量提升和规模增大，“精准”、“柔性”与“洁净”是提升重大装置负载能力的关键因素。针对重大装置光学元件的精准自动化装配场景，光学元件装配生产线包含物料接驳与存储、物料转运组件、光学元件装配、模块光路调试、控制系统五大组件。该案例是满足精度、效率、洁净要求的光学元件装校与光路调试设备与方案，实现空间滤波器单口径模块的全程自动化、洁净化、柔性化、无人化装配。

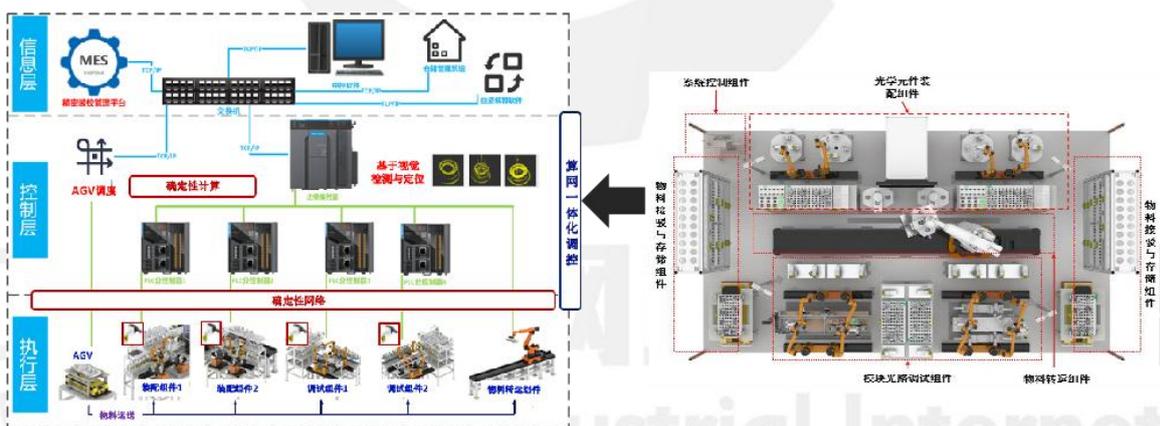


图 11 自动化装配逻辑结构与部署图

2. 场景需求

该案例需要基于边缘计算的 3D 视觉检测与精准定位，通过本地实时采集视觉数据与分布式模型计算训练，完成边缘大数据视觉模型抽取与聚合，结合机械臂精密力控技术，实现光学元件精准装配。

该案例需要实现多 AGV 协同的光机模块柔性装配，采集装配五大模块组件状态并实时上传，依据光学元件在装配业务类型、

流程要求、按需调度等方面的区别分别调度计算与网络资源，实现面向多装配任务逻辑的柔性指令确定性传输与 AGV 协同调度。

3. 生产效能

该案例支持确定性算网资源调度技术，面向装配流程逻辑实现边缘服务器、PLC 控制器等计算与网络资源的一体化设计，提高自动化装配控制精度并延长光学元件使用寿命。光学元件装配生产线通过全局优化装调工艺及装调姿态等措施，实现五大模块组件生产及调试全流程协同化与洁净化，实现多业务灵活柔性化生产并提高装配效率。该精准自动化装配方案为飞机、轮船、汽车等领域重大装置的高质量运行提供有效保障。

(八) 确定性边端协同的冶金产线

1. 场景描述

“连续性生产流程、生产工艺相对固定”是冶金流程行业的一个核心特性。冶金产线执行的生产工序会根据产品类型、品牌和型号等多项参数而变化，该案例生产线的配置参数会配合指定工艺模型和机理模型而下发和更改。鉴于目前模型的计算结果相对固化，模型与生产线实际存在差异，该案例引入大量智能检测设备投入产线，智能分析服务器辅助并指导生产工序间和工序内的资源动态调整，最终达到提质增效的效果。该案例将智能检测设备融入产线，将智能检测管控融入算网系统，解决钢铁生产控制过程中边-端协同对计算和带宽的需求。

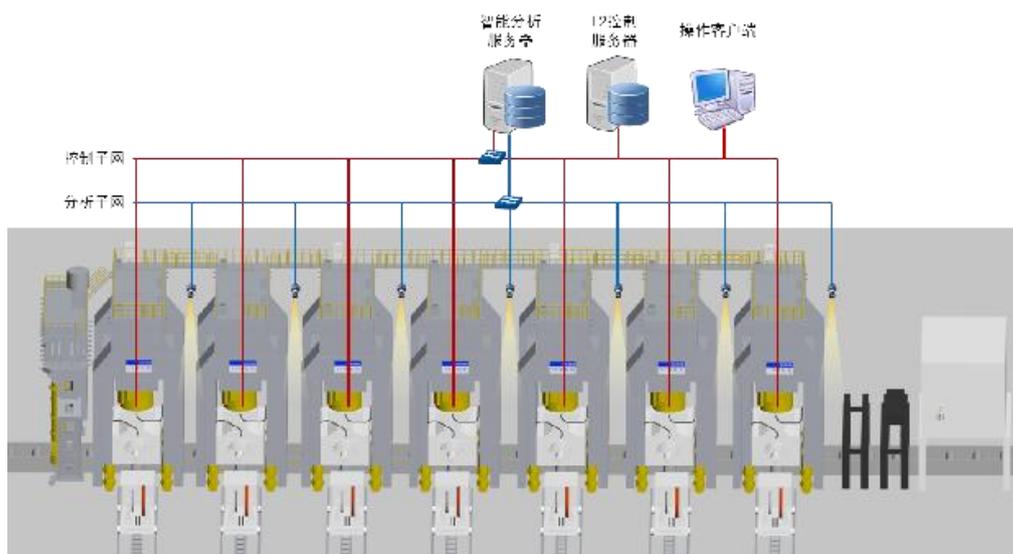


图 12 工厂边端协同网络结构

1) 该案例通过工艺模型指导工序执行，当钢坯经过加热炉加热后，钢坯经过粗轧、精轧过程形成带钢产品。工艺模型基于钢坯测量参数以及每个阶段的测量参数进行工序设计，并将计算出的控制参数下发到生产设备的控制器执行。

2) 该案例引入智能检修的控制优化，通过引入视觉、传感器等采集设备加强对生产过程的精细感知，对实时情况做出分析进行反馈，并结合工艺专家系统进行生产工序的定制化调整。

3) 该案例引入智能检测设备将控制逻辑下放到端侧，通过边端协同聚合分离的工业算力。L2 控制服务器缩短确定性服务反馈路径时延。面向应用的确定性控制器带来可控的计算延时和传输延时，确保生产系统高效稳定的运行，最终达到确定性服务闭环控制的要求。

2. 场景需求

工业模型设备和传感器设备安装在产线的不同位置，冶金生产线根据不同应用场景，控制闭环流程需要在 20ms-100ms 内完成。

冶金生产线一旦产生额外时延和抖动，调整滞后的生产设备会影响产品质量甚至导致生产事故。

冶金生产线分布约 150 个监控摄像机，另有约 20 个用于智能分析的专项工业相机。同时，二级过程控制系统接收由生产设备和检测传感器组成 2 万个采集点的数据，采集点采集频率为 20Hz。冶金生产线总体带宽需求可达约 830Mbps。其中，摄像机、工业相机占据主要的带宽资源，传感器特点是采集频率较高。

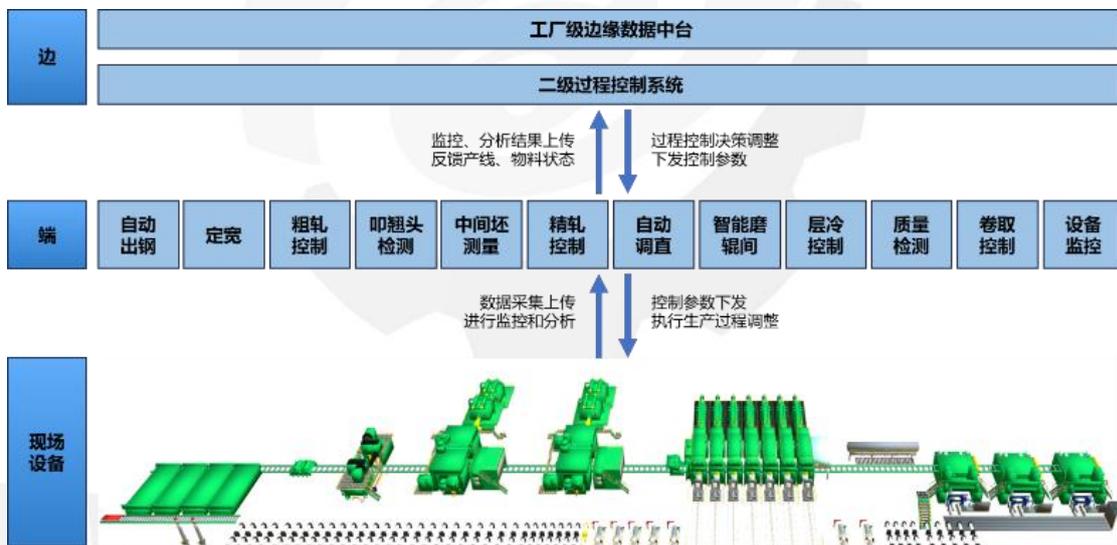


图 13 工厂网边端协同

3. 生产效能

利用面向应用的确定性技术的调度能力，冶金生产线可以有效地调节复杂控制系统、不同生产工序的网络和算力分配。面向应用的确定性控制器确保计算按需进行且控制按时下发的条件，确保产线多个生产设备的信息同步。该案例可以保障冶金生产线多工序并行生产的协同，通过对工业生产资源利用的整体优化调整，兼顾生产质量、生产效率、资源消耗。

(九) 冶金行业确定性机器视觉检测

1. 场景描述

在冶金流程行业中的热轧生产过程中，生产线因来料坯、设备的不确定性会发生轧件两侧不对称的情况，该情况导致带钢板型问题。由于生产线上存在生产节奏快、参数控制精度高和多元异构数据处理难度大等现实问题，带钢板型问题无法依靠传统手动调控来解决。因此，首钢通过引入高分辨率、高频和高时效的智能分析系统来实时自动解决带钢板型问题。智能分析服务器实时监测带钢板型情况，分析产生镰刀弯和翘曲等缺陷的偏移方向和趋势，并协同 L2 控制服务器精准调控生产设备参数。该案例提升产品质量与模型自学习能力，并可以对有质量问题的产品重新加工。

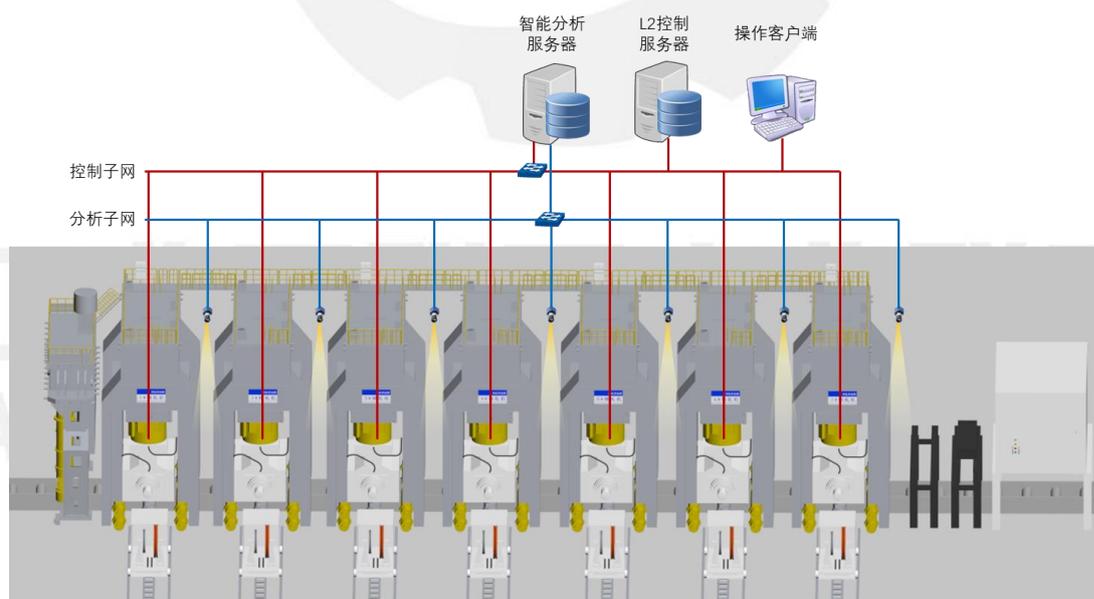


图 14 自动调直智能分析系统网络结构

2. 场景需求

该案例需要采用“控制即服务”的框架，通过合理调度相机分析的资源用量，实现最大化的系统算力使用率。冶金产线需要在 7 个机架出口各安装一台 1080P/60Hz 的高清摄像机，高清摄像机拍摄距离远且分析精度要求高。该案例为确保总体延时满足生

产需求，对相机数据传输的带宽有严格要求，网络带宽总量要求不低于 70Mbps。

在轧制过程中，各机架间带钢速度逐步提升，相机图像分析频率根据速度响应调整，7 个点的分析帧率在 4fps 到 40fps 不等，这一过程造成了极大的计算负载变化。

该案例因带钢产品差异，生产工艺随之改变，7 架轧机可能分别处于轧制或空载状态，空载状态轧机对调直作业没有影响，其相关相机分析功能可暂停，智能分析服务器可以按需调整算力分配。

3. 生产效能

该场景利用面向应用的确定性技术有效地调节不同生产工序下的网络和算力分配，在确保计算按需进行、控制信息按时下发的条件下，可以有效优化能源消耗，提升生产质量、生产效率和资源利用率。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

五、展望

工业生产线天然需要确保加工流程的确定性，所以在“控网算”融合的系统必须保障多种资源的全局调度。面向应用的确定性技术未来将加速“控网算”融合过程的推进，整体保障工厂中多应用协同过程的确定性。

面向应用的确定性技术未来能够显著简化工业算力和工业网络的确定性管理。未来工业互联网以确定性服务为管理对象，这种模式既符合排产计划，又实现了复杂的资源管控，从而打通企业生产计划和生产线之间的管理运维边界。目前，生产业务调整耗费的时间从几十分钟到几个小时不等，而通过针对生产流程的确定性一体化管控，可以快速实现业务变更、升级等操作。因此，未来面向应用的确定性技术可以推动传统生产线向“快速反应产线”转变。

面向应用的确定性技术未来将有力支撑工业大模型的部署与应用。当前，联邦学习、场景大模型、代理型 AI 等技术在工业领域正不断应用推广，这使得算力资源和网络资源需要与工业大模型的开销实现双向适配。在这些前沿场景中，面向应用的确定性技术通过保障人工智能服务的计算和互联能力，在“云边端”可确保模型训练、参数同步以及推理任务的高效执行，有效减少因资源竞争或网络波动导致的延迟和错误。此外，该技术还能进一步提高模型训练的效率和可扩展性。

本蓝皮书为该类技术的技术研究、产业落地奠定了基础。工业互联网涉及的产业范围极为广泛，因此需要结合详细生产

需求，对通用架构、确定性接口、资源计量/描述等方面进行深入研究。后续工作将推进相关技术的标准化与产业化进程，并围绕垂直行业需求开展试点与推广。我们愿与全球相关组织、企业、科研机构 and 高校加强合作，共同定义面向应用的确定性技术路线和产品体系，携手推动全球产业的持续发展。



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

六、附录

(一) 术语表

序号	术语	英文	解释
1.	应用	Application	应用是指确定性需求较高且与外部应用通信的程序
2.	确定性网络	Deterministic Networking, DetNet	IETF提出的网络层确定性技术
3.	时间敏感网络	Time Sensitive Networking, TSN	IEEE提出的数据链路层确定性技术
4.	确定性IP网	Deterministic IP, DIP	华为提出的网络层确定性技术
5.	面向应用的确定性	Application-oriented Determinacy, AoD	跨传输层到应用层的确定性, 详细介绍见第二章
6.	面向应用的确定性系统	Application Oriented Deterministic System	具备面向应用的确定性能力的系统
7.	整体确定性	Overall Determinacy	涵盖网络、计算、能耗等资源的确定性
8.	边缘计算	Edge Computing	在靠近物或数据源头的一侧, 采用网络、计算、存储、应用核心能力为一体的开放平台, 就近提供最近端服务
9.	可编程逻辑控制器	Programmable Logic Controller, PLC	一种数字运算操作的电子系统, 专门在工业环境下应用而设计
10.	云化PLC	Cloud PLC	在云平台中划分资源并部署的PLC程序
11.	控制即服务	Control as a Service, CaaS	将工业系统中的控制功能下沉到网络中
12.	用户到产线	Customer to Production Line, C2PL	一种用户直接定制产线产品的个性化生产模式

(二) 参考文献列表

[1]Fu T, Zhang H. The System Architecture and Decision Mechanism of the Deterministic Application Layer in the Industrial Internet[C], 2023.

[2]Yang Z, Zhao Y, Dang F, et al. CaaS: Enabling Control-as-a-Service for Time-Sensitive Networking[C], 2023.

[3]Wang Z Z Y E. Industrial Knee-jerk: In-Network Simultaneous Planning and Control on a TSN Switch: In Proceedings of the 21st Annual International Conference on Mobile Systems, Applications and Services[C], 2023.

[4]Tan W, Wu B, Wang S, et al. Large-scale Deterministic Transmission among IEEE 802.1Qbv Time-Sensitive Networks[J]. 2022.

[5]Yang D, Gong K, Ren J, et al. TC-Flow: Chain Flow Scheduling for Advanced Industrial Applications in Time-Sensitive Networks[J]. IEEE Network, 2022,36(2):16-24.

[6]Avigal, Yahav, et al. "Speedfolding: Learning efficient bimanual folding of garments." 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2022.



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet