



ICT

基于工业 5G 的柔性智造孪生控制平台

刘垚圻^{1,2,3}, 李红光^{1,2,3}, 周一青^{1,2,3}, 石晶林^{1,2,3}, 马英娇⁴, 钱蔓黎⁴

(1. 中科南京移动通信与计算创新研究院, 江苏 南京 211135;

2. 中国科学院计算技术研究所无线通信技术研究中心, 北京 100190;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 北京中科晶上科技股份有限公司, 北京 100190)

摘要: 作为实现智能制造的关键, 工业互联网将先进制造技术与工业 5G 深度融合, 贯穿于物料准备、生产制造、试验测试和服务等全生命周期的各个环节。面对日益增长的定制化、小批量的产线需求, 以及确定性高可靠的通信要求, 提出并设计了基于工业 5G 的柔性智造孪生控制平台, 包括灵活编排、按需生产的柔性智造产线, 以低时延、高可靠的工业级 5G 为核心的智联网, 以及实现数据采集、实时反馈的孪生控制平台, 结合智能决策机制实现“感知—分析—决策—执行”的闭环演进。

关键词: 工业 5G; 柔性智造; 孪生控制; 工业互联网

中图分类号: TN929

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022121

Industrial 5G based digital twin control platform for flexible intelligent manufacturing

LIU Yaoqi^{1,2,3}, LI Hongguang^{1,2,3}, ZHOU Yiqing^{1,2,3}, SHI Jinglin^{1,2,3}, MA Yingjiao⁴, QIAN Manli⁴

1. Zhongke Nanjing Mobile Communication & Computing Innovation Institute, Nanjing 211135, China

2. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4. Beijing Sylincom Technology Co., Ltd., Beijing 100190, China

Abstract: As the key of intelligent manufacturing, industrial Internet deeply integrates advanced manufacturing technology with industrial 5G. It runs through all links of the whole life cycle, such as material preparation, production and manufacturing, test and service. Facing the increasing demand for customization, small batch production line and deterministic and reliable communication requirements, a industrial 5G based flexible intelligent manufacturing twin control platform was proposed and designed. Specifically, it included flexible manufacturing line with flexible arrangement and on-demand production, intelligent network with industrial 5G with low delay and high reliability as

收稿日期: 2021-10-31; 修回日期: 2022-04-10

通信作者: 周一青, zhouyiqing@ict.ac.cn

基金项目: 江苏省重点研发计划项目 (No.BE2021013-2); 浙江省重点研发计划项目 (No.2021C01040)

Foundation Items: Jiangsu Key Research and Development Program (No.BE2021013-2), Zhejiang Key Research and Development Program (No. 2021C01040)

the core, the digital twin control platform of data acquisition and real-time feedback. The platform combined intelligent decision mechanism to realize the closed-loop evolution of perception analysis decision execution.

Key words: industrial 5G, flexible intelligent manufacturing, digital twinning control, industrial Internet

0 引言

信息通信技术的近三十年主要围绕技术发明和自身应用不断发展,以人为核心,逐渐深入并改变人类生活。5G 作为新一代信息通信技术的突出典型^[1-5],是使能经济社会数字化转型的关键之一。在人工智能、大数据、云计算、边缘计算等技术的加持下,促进 5G 技术向经济社会各领域扩散渗透,重塑传统产业发展模式,孕育新兴信息产品和服务。5G 技术开启以“机器人”为核心的万物互联 IT 3.0 新时代,其所支持的海量机器通信,将实现移动通信与以智慧城市、智能家居等为代表的典型应用场景的深度融合。5G 还将以其超高可靠性、超低时延的卓越性能,引爆如智能网联汽车、移动医疗、工业互联网等垂直行业应用。随着 5G 越来越大范围、越来越深层次地应用在工业、医疗、港口、电力等领域,其作为平台技术给各个行业的数字化转型带来了广阔的市场空间,将重塑数字化未来。信息技术的不断革新,为传统制造带来新的动能。5G 以全新的网络架构,支持增强型移动带宽、超可靠低时延通信和大连接物联网三大应用场景^[6],提供 Gbit/s 级的峰值速率、毫秒级的传输时延和千亿级的连接能力,开启万物泛在智联的新时代,使其在以物为主连接的工业领域发挥巨大的能动性,推动各个方向的产业发展。

以 5G 技术与工业技术有机融合的智能制造正引领第 4 次工业革命高速发展,支撑产业的高智能生产、协调作业。数字化、智能改造的核心是数据连接和以工业大数据为支撑的智能决策与实时控制,但工业现场的复杂度高、干扰性强以及协议种类繁多,导致设备连接变得具有极强的挑战性。根据赛迪研究院统计,当前我国大规模工业企业里,

有 80% 的机器设备因为没有联网,是不会沟通的“哑”设备;另外 20% 的联网设备因遵循的通信协议不同,存在严重的“语言”障碍。由此可见,“信息孤岛”阻碍了制造资源、数据的集成共享和创新应用,支持丰富工业协议的可信通信网络是工厂数字化转型、智能改造的主要瓶颈。广大中小规模的离散制造企业,在面向未来应用需求,与机械、装备、工业用品等相关的产品制造更呈现为多品种、小批量的定制生产模式。随着工业生产模式逐渐走向以最终客户需求为导向,离散制造正从备货型生产 (make-to-stock, MTS),走向接单生产 (make-to-order, MTO) 以及按订单设计 (engineer-to-order, ETO) 的模式。对于智能制造生产线而言,多品种小批量的柔性化的需求将变得越来越刚性,需要将柔性工岛按生产任务的工艺需求来实现灵活编组,将工艺装备按需智能组合,柔性机器人按编排进入工作区域,并能实现携带多种夹具、按需作业。传统人工控制的方式已经难以满足生产过程中的实时处理,对于复杂生产计划,难以及时高效地规划,此外机电设备的故障诊断、失效预测对于整个柔性生产而言过于复杂。

本文针对 MTO 和 ETO 的工业生产需求,结合数字孪生技术,设计了基于工业 5G 的柔性智造孪生控制平台。通过柔性智造生产线按需小量生产来完成订单,以满足用户的个性化需求;通过 5G 智联网络为柔性智造提供低时延、高可靠和多并发的需求;通过孪生控制平台实现对整个柔性智造过程的监测和优化,以提升生产作业的效率。最后对柔性智造产线、工业 5G 智联网络和孪生控制平台中涉及的关键技术进行了研究探讨。

1 整体架构

基于工业 5G 的柔性智造孪生控制平台包括



以低时延、高可靠的工业级 5G 为核心的智联网网络，灵活编排、按需生产的柔性智造生产线，以及数据采集实时反馈的孪生控制平台，结合智能分析与决策机制实现“感知—分析—决策—执行”的闭环演进平台。

该平台针对任务需求和生产线能力进行拆解分析，统一编排调度物料、设备和仪器，对当前工业 5G 网络部署进行网络规划和网络优化等调整。从而实现资源的有效利用，最大化提升差异化需求的生产与测试效率。从物理实体

到虚拟孪生，从服务需求到排工排产¹，基于工业 5G 柔性智造孪生控制平台总体架构如图 2 所示，本文将基于工业 5G 柔性智造孪生控制平台功能层次分为设备层、网络层、孪生层、应用层和服务层。

(1) 设备层

设备层由数据感知器和执行器构成。数据感知器主要由各类传感器、摄像头组成，实现对不同工业生产线作业环境、生产设备的数据采集；执行器主要由机器人、数控机床、工控机、AGV

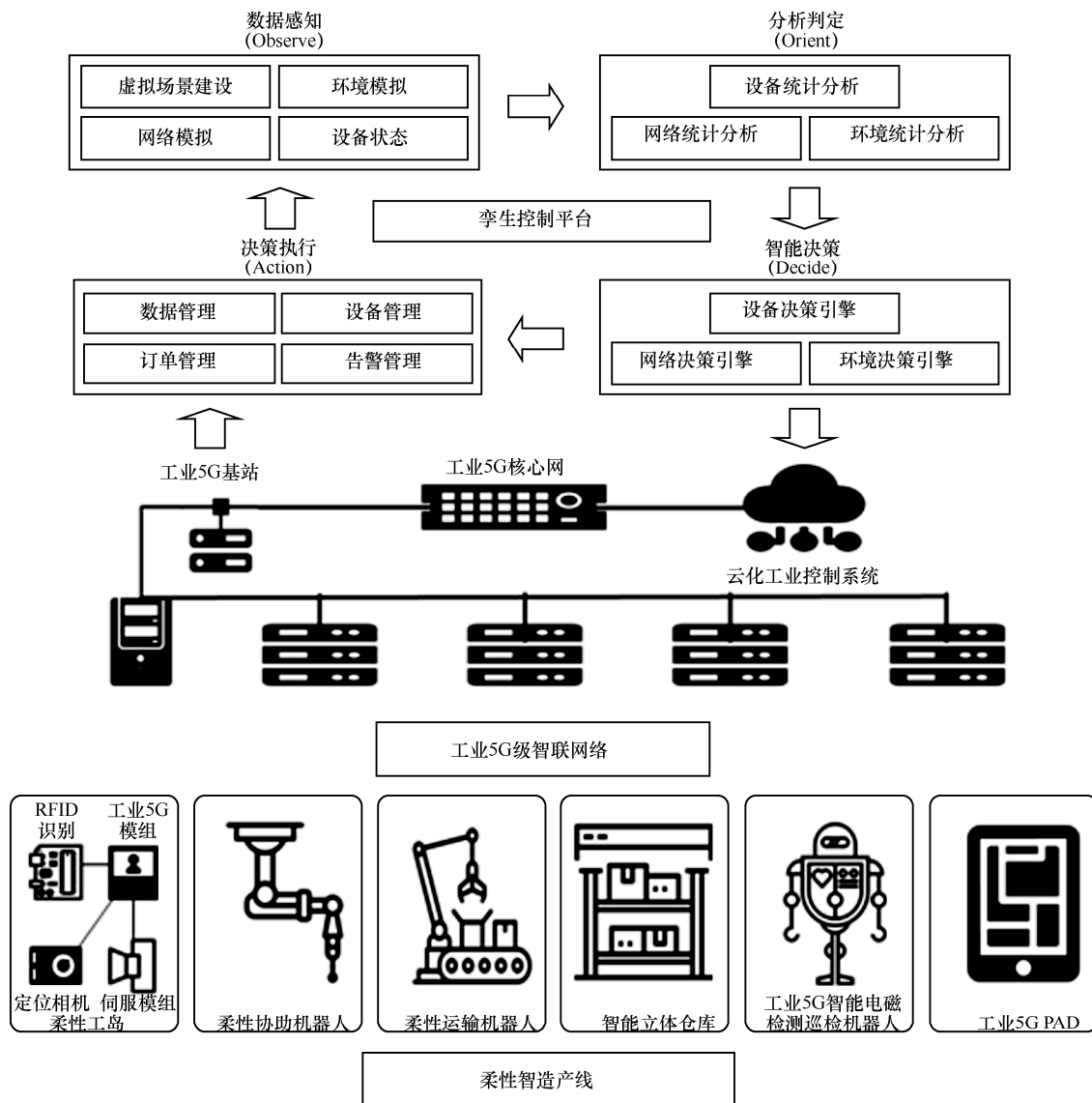


图 1 基于工业 5G 柔性智造孪生控制平台总体架构

¹ 对生产任务及生产资料进行优化编排，以提高效率

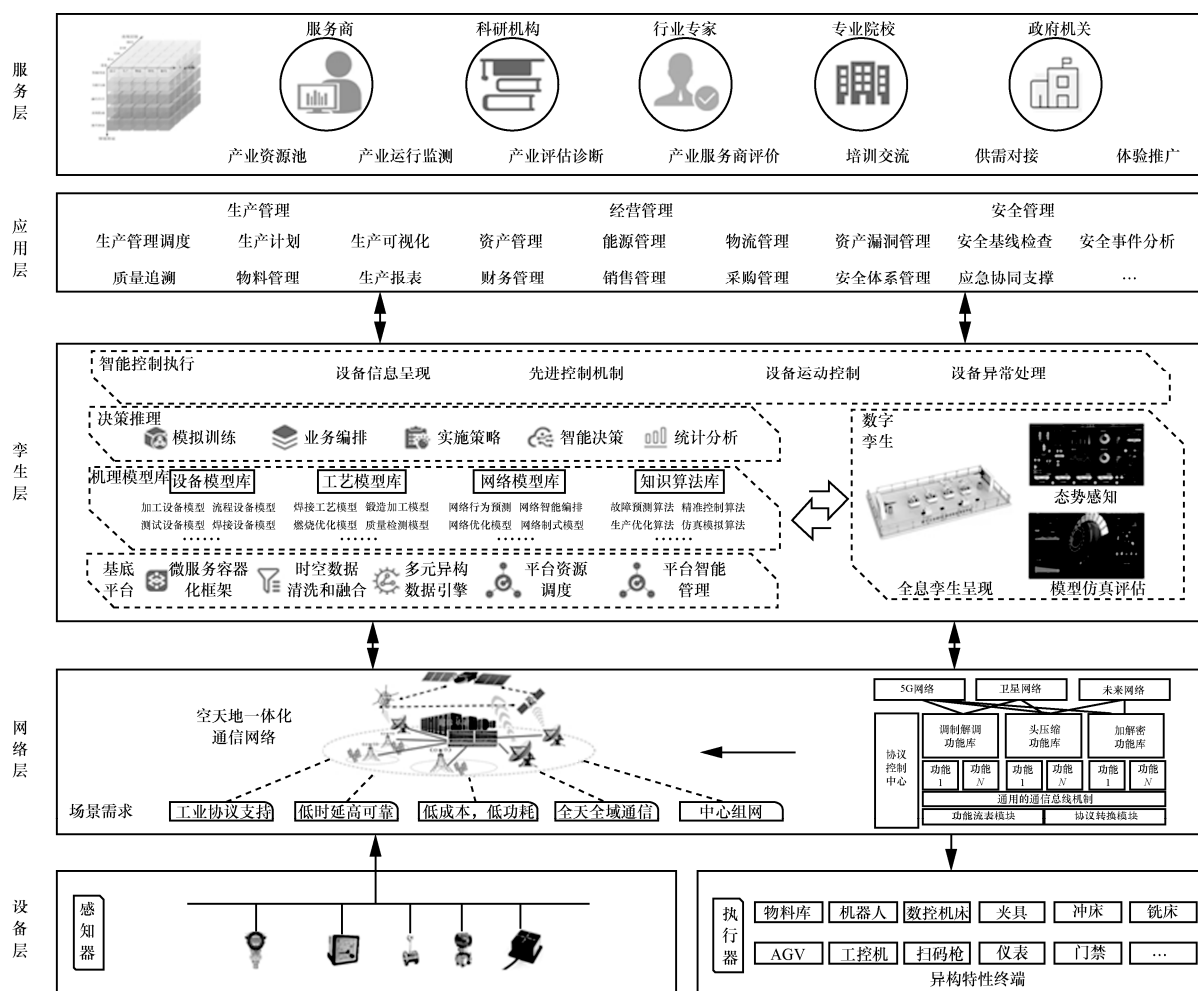


图2 基于工业 5G 柔性智造孪生控制平台层次架构

等组成，完成对控制执行层命令的执行。

(2) 网络层

网络层主要由工业 5G 无线传输解决方案和协议来满足不同作业环境对特性异构终端的时延、功耗等通信指标和通信业务成本的约束；采用软件、硬件虚拟化技术实现对网络通信资源的高效复用，提升网络层的整体性能。同时可以支持地面 5G 网络和卫星网络及其他各类制式，通过地面网络和卫星网络来综合保障特性异构终端数据能全天候全时域传输，保障极端条件和特殊情况的有效连接。

(3) 孪生层

孪生层是工业 5G 柔性智造孪生控制平台的核心，其主要有基底平台、机理模型库、决策推

理、智能控制执行和数字孪生 5 个部分。基底平台基于微服务和容器化框架实现，主要完成对网络层传输数据的清洗融合、多元异构数据的搜索引擎、平台资源和服务的编排调度以及整个平台的各项管理；根据先验知识或者通过已获得的数据进行设备模型、工艺模型、网络模型和知识算法的建模，形成机理模型库；决策推理通过对应用层需求的解析，调用机理模型库和数据库数据完成模型的更新、业务的编排、实施策略的选择，并将统计分析的接口反馈给应用层；智能控制执行通过给执行器下发先进控制机制的执行命令来精准地完成智能控制；采用数字孪生技术将实体作业场景进行全息孪生呈现，对各个模型进行仿真评估。



(4) 应用层

应用层需求驱动着工业 5G 柔性智造孪生控制平台运转。应用层由生产管理、经营管理和安全管理构成，生产管理对生产过程的可视化，能使管理人员更好地把握生产计划；通过对经营过程进行管理能完善公司的管理体系，提升办公效率；安全管理通过对安全基线的核查、安全事件的分析以及应急系统的支撑等，让可靠生产更有保障。

(5) 服务层

服务层主要是针对商业推广、工厂运行、生产线诊断、供需对接以及教育培训等典型场景的拓展和服务，由不同类别用户对服务商、政府、企业、科研机构等提供不同内容的服务能力。

2 系统组成与关键技术

2.1 柔性智造产线

随着消费者对各类商品品质提升、个性化和差异化消费需求的增长，生产制造企业不断地应用创新技术，朝着差异化、智能化生产模式发展，以提高自身竞争力，在保证产品质量的前提下，

缩短产品生产周期，降低产品成本，最终使中小批量的生产可以与大批量的生产抗衡，柔性智造系统便应运而生。柔性智造生产线增强了生产线的适应性，使生产线的布局更能适应消费需求的变化。

本文以智能化柔性装配测试生产线为例，基于工业级 5G 智联网络的低时延高可靠通信以及柔性机器人控制技术，实现试验设备的物料获取、组装、检测和入库的定制化自动化运行。基于工业 5G 的柔性智造生产线布局如图 3 所示。

整条自动化装配线主要由原材料立体库、输送 AGV (automated guided vehicle)、多功能组装工岛、质量检测、产品测试工岛以及成品立体库组成。

原材料/成品立体库是材料与成品存储的位置，负责物品的出库和入库。每个托盘带有 RFID 电子标签，以实现身份追踪和定位。采用三轴模组实现从立体库抓取托盘放入中转平台。运输 AGV 由底盘和 xMate7 Pro 机器人复合而成，配合视觉实现对产品托盘的上下料²及运输，并具备 5G 和常规精准定位功能。多功能组装工岛与输送

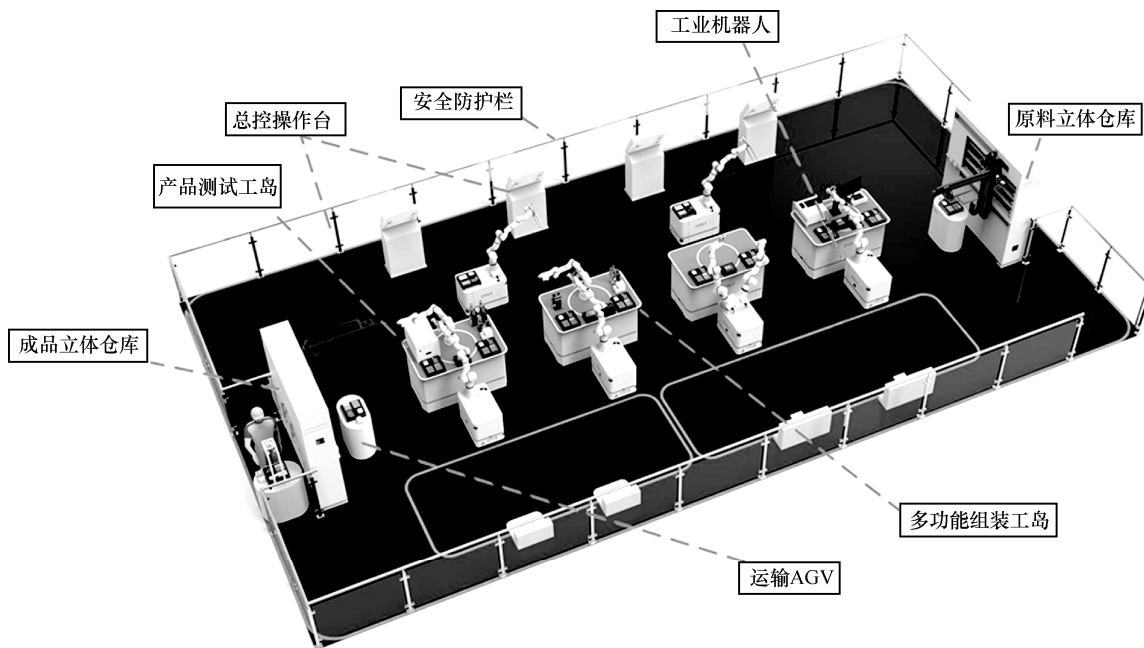


图 3 基于工业 5G 的柔性智造生产线布局

2 将原料装入加工设备，并获得所需材料的两个过程简称

AGV 类似, 根据排单任务只能调整工位, 也可以根据不同的任务更换机械臂上的工具, 从而实现不同的定制化需求。产品测试/质量检测工岛主要针对质量和产品性能进行测试。具体流程是根据工艺需求, 柔性工岛按任务需求进行工艺装备配置、智能编组, 柔性工岛编组就位后, 实现电气接口智能切换, 并进行快速自检, 完成生产前准备工作。柔性机器人按工艺任务要求, 就位于对应操作位, 进行电气接口智能切换, 并完成快速自检后, 按生产任务要求进行智能的夹具快换作业。运输 AGV 完成原材料从立体库出库到中转平台上, 以及工岛间的设备转运工作。

该柔性制造试验生产线, 在工厂与工业 5G 网络和实时孪生决策的保障下, 完成自动编组、基于视觉系统实现快速分拣、机器人视觉引导取料、机器人力控装配、电气动力切换、自动化生产线的组装与调试等各项工艺内容, 整体实现了柔性智能作业, 连接用户智能工厂系统, 实现从任务订单、生产排程、数据调配全程监管与控制, 达到数字化、智能化生产工艺的管理目标。

2.2 工业级 5G 智联网络

智能化柔性装配测试产线中, 主要涉及工业视觉和 AGV 的应用。工业视觉采用 4K、8K 等高清摄像头采集数据, 需要大带宽回传成像数据, 需要低时延完成 PLC 控制反馈; AGV 系统实现物

料的自动流转和生产制造的全程可追溯生产数据采集, 需要实时规划路径, 并与其他小车进行协同等, 对时延和并发有很高的要求。

5G 网络切片能满足工业领域的不同业务场景要求, 并能支持端到端的编排管理, 可根据业务要求进行弹性扩张和收缩; 超可靠低时延通信标准在原有的增强型移动带宽的基础上, 进一步降低了时延。中国科学院计算所提出的“超级基站”, 通过虚拟化技术对射频单元、基带、协议和基站资源进行了池化, 并通过集中式全局资源管控, 实现全域无线资源的动态共享和按需分配, 解决传统基站利用率低, 负载不平衡的问题。本文提出分布式部署、集中式管控的工业 5G 智联网络, 来满足智能化柔性装配测试生产线对网络时延带宽的并发需求。

其中, 工业 5G 智联网络以超级基站为核心, 主要由虚拟资源池和智能管控系统组成。虚拟资源池通过对基站资源进行抽象、封装虚拟池化操作, 使得基站资源能集中管理, 动态分配、解耦依赖和资源复用, 且不用改变传统基站对外的管理接口, 易于拓展。超级基站将系统基站池资源分为基带处理、协议处理、管理控制 3 个部分。不同逻辑层次的实体虚拟池化资源, 需要管控系统进行统一管控协作, 工业 5G 智联网络的智能管控软件架构如图 4 所示。

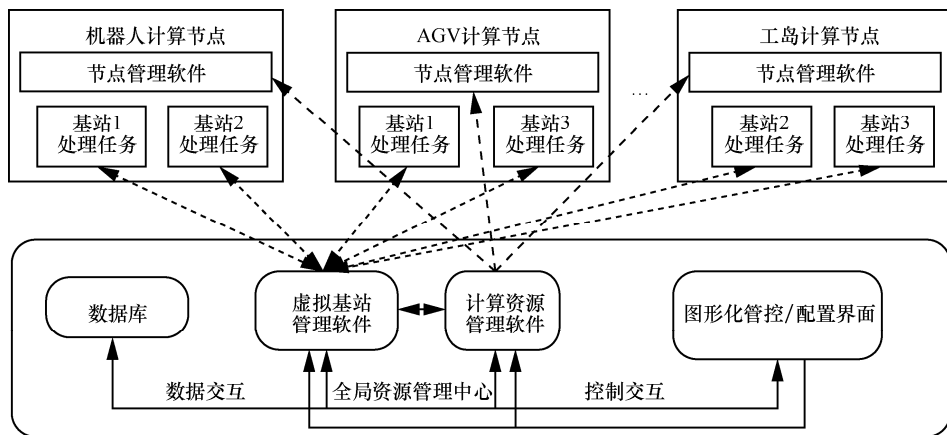


图 4 智能管控软件架构



全局资源管理软件负责对各个计算节点上的资源进行统一的管理和调度,具体地,节点管理软件负责最底层物理资源管理,计算资源管理软件负责虚拟资源的管理,虚拟基站管理软件负责虚拟基站的管理。

2.3 孪生控制平台

孪生控制平台是工业 5G 柔性智造的核心,主要由基底平台、虚实映射中间件、标准化机理模型库等组成。依托工业 5G 低时延、高可靠的特点,完成对网络、生产线设备、环境等的大数据分析,不断学习成长,形成感知—分析—决策—执行的闭环控制,最终实现积木块化搭建的柔性产线,基因组式智能衍生的柔性智造。

(1) 基底平台

基底平台主要完成对柔性生产线数据的清洗融合、多元异构数据的搜索引擎、平台资源和生产服务的编排调度以及整个平台的各项管理等服务。传统的服务是单体架构,所有功能在一个工程中开发,服务部署在一台物理机上,业务迭代及代码开发会相互干扰,效率低下,且一般情况下无法充分利用物理机资源。因此本文提出基于微服务与容器化的基底平台,如图 5 所示。

基底平台一方面实现模型的快速适配,一方面实现硬件资源的自动化动态管理,可以实时根据局部资源使用情况和全局资源使用情况进行动态伸缩。基底平台围绕业务能力组织,将单体服务拆分为多个服务,通过服务实现组件化,包括生产调度服务、生产设备接入服务、测试分析服务、模型算法服务和消息推送服务等业务服务,支持模块业务单独开发部署以提高效率,且单个服务能够动态扩展,并通过熔断机制将错误隔离到单个服务内,不会扩散到整个平台,整体容错

性更好。平台采用容器化方式进行部署,支持跨平台,利于环境标准化和版本控制,以提高硬件资源的利用率,节省开支。多云管理通过对公有云和工厂搭建的私有云的管理,实现工厂或者任意联网的地方能够对柔性生产线进行管理。

(2) 虚实映射中间件

在孪生控制平台中,高保真地呈现生产环境及设备,有利于监测柔性制造试验生产线的真实性,添加生产设备和减少生产设备时,对生产过程及生产策略的影响都需要通过真实生产设备和虚拟生产设备来联动仿真模拟评估。因此需要对场景中的柔性机器人、AVG 小车、立体仓库及其他生产设备进行映射。本文提出虚实协同的映射中间件,主要由客户端、设备端和服务端服务构成,可通过虚拟设备与实物设备的动态映射绑定,虚拟设备的操作实际映射到实物设备上,完成虚实结合的联动测试,以更好地完成生产任务。虚实协同映射中间件架构如图 6 所示。

客户端指用户浏览配置的前端界面,通过与服务端和基底平台配合实现各类型的消息推送服务,包括实施生产数据推送和生产设备的状态、指令发送等功能。设备端由原材料立体库、输送 AGV、多功能组装工岛、质量检测、产品测试工岛以及成品立体库组成,形成远程实时控制、检测、测量评估的虚实协同映射系统。

(3) 标准化模型

柔性生产线中的机电设备、AGV 小车避障和柔性机器人装配涉及众多机理模型,复杂的生产环境使得机理模型理论结果与实际结果存在偏差。因此,本文提出使用大规模数据与机理的融合驱动,一方面对感知数据进行去冗纠偏,一方面对已有的机理模型进行迭代演进,形成标准化

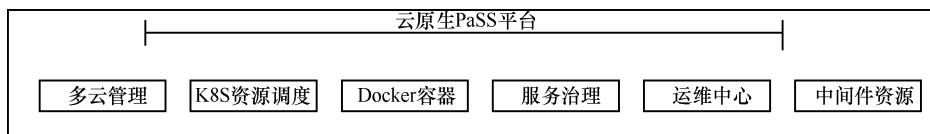


图 5 基于微服务与容器化的基底平台

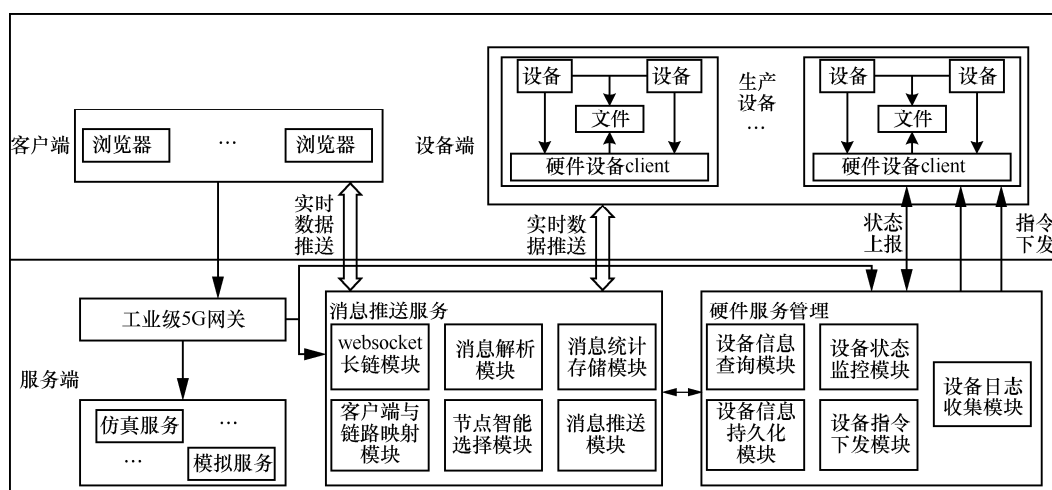


图6 虚实协同映射中间件架构

模型。基于标准模型的柔性智造孪生系统不仅可以高保真地还原生产线状态，还能对未来生产线行为进行预测推演。标准化模型生成过程如图7所示。

3 结束语

随着工业5G与柔性生产线的深度融合，智能制造也将迈上新的台阶。面向定制化小批量的生产需求，打造智能编排的柔性生产线，依托确定性高可靠的工业5G网络保证通信的实时性和准确性。通过孪生控制平台对生产任务、产线状态、

环境以及网络情况进行实时监控，结合大数据分析的人工智能的决策优化，从而实现排工排产、网规网优的不断迭代和演进。感知、通信、计算、控制技术的不断突破，都将成为工业生产智能化、数字化、网络化、柔性化的重要基础保障。

参考文献：

- [1] ZHOU Y Q, LIU L, WANG L, et al. Service-aware 6G: an intelligent and open network based on the convergence of communication, computing and caching[J]. Digital Communications and Networks, 2020, 6(3): 253-260.
- [2] LIU L, ZHOU Y Q, GARCIA V, et al. Load aware joint CoMP

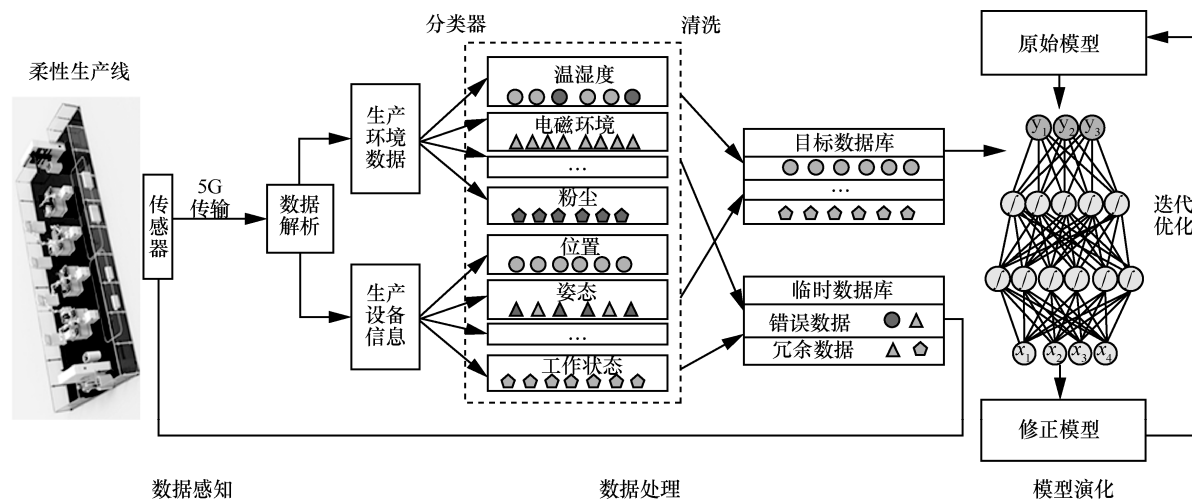


图7 标准化模型生成过程



- clustering and inter-cell resource scheduling in heterogeneous ultra dense cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(3): 2741-2755.
- [3] XING C W, MA S D, ZHOU Y Q. Matrix-monotonic optimization for MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, 63(2): 334-348.
- [4] ZHOU Y Q, LIU H, PAN Z G, et al. Two-stage cooperative multicast transmission with optimized power consumption and guaranteed coverage[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(2): 274-284.
- [5] GARCIA V, ZHOU Y Q, SHI J L. Coordinated multipoint transmission in dense cellular networks with user-centric adaptive clustering[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(8): 4297-4308.
- [6] 王俊文. 未来工业互联网发展的技术需求[J]. *电信科学*, 2019, 35(8): 26-38.
WANG J W. Technical requirement of future industrial Internet[J]. *Telecommunications Science*, 2019, 35(8): 26-38.
- [7] 刘彬, 张云勇. 基于数字孪生模型的工业互联网应用[J]. *电信科学*, 2019, 35(5): 120-128.
LIU B, ZHANG Y Y. Application of digital twin model based industrial internet[J]. *Telecommunications Science*, 2019, 35(5): 120-128.
- [8] 邹春明. 基于 5G 技术的物联网的发展及应用[J]. *数字通信世界*, 2021(8): 147-148.
ZOU C M. Development and application of the internet of things based on 5G technology [J]. *Digital Communication World*, 2021(8): 147-148.
- [9] ZHOU Y Q, TIAN L, LIU L, et al. Fog computing enabled future mobile communication networks: a convergence of communication and computing[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2019, 57(5): 20-27.
- [10] 周一青, 李国杰. 未来移动通信系统中的通信与计算融合[J]. *电信科学*, 2018, 34(3): 1-7.
ZHOU Y Q, LI G J. Convergence of communication and computing in future mobile communication systems[J]. *Telecommunications Science*, 2018, 34(3): 1-7.
- [11] 颜玮. 基于 Robotstudio 的柔性智造生产线的仿真教学平台的构建[J]. *现代制造技术与装备*, 2019(9): 215-217.
YAN W. Construction of simulation teaching platform for flexible intelligent manufacturing production line based on robotstudio[J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2019(9): 215-217.
- [12] CISCO. Intent based networking [Z]. 2021.
- [13] ETSI. Zero touch network and service management [R]. 2021.
- [14] HAN S S, WANG F Y, CHENG X, et al. Parallel networks and network softwarization: a novel network architecture[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2017, 47(7): 811.
- [15] 孙滔, 周钺, 段晓东, 等. 数字孪生网络(DTN): 概念、架构及关键技术[J]. *自动化学报*, 2021, 47(3): 569-582.
SUN T, ZHOU C, DUAN X D, et al. Digital twin network(DTN): concepts, architecture, and key technologies[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(3): 569-582.
- [16] QIAN M L, WANG Y Y, ZHOU Y Q, et al. A super base station based centralized network architecture for 5G mobile communication systems[J]. *Digital Communications and Networks*, 2015, 1(2): 152-159.[LinkOut]
- [17] LIU Y, ZHOU Y Q, YUAN J H, et al. Delay aware flow scheduling for time sensitive fronthaul networks in centralized radio access network[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(5): 2992-3009.
- [18] SU Y T, LIU Y Q, ZHOU Y Q, et al. Broadband LEO satellite communications: architectures and key technologies[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(2): 55-61.
- [19] LIU Y Q, SU Y T, ZHOU Y Q, et al. Frequency offset estimation for high dynamic LEO satellite communication systems[C]//*Proceedings of 2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [20] 刘垚圻, 周一青, 苏晓旭. 低轨卫星互联网发展与挑战[J]. *中国电信建设*, 2021(1): 32-40.
LIU Y Q, ZHOU Y Q, SU X X. Development and challenges of low orbit satellite internet[J]. *China Telecommunications Construction*, 2021(1): 32-40.
- [21] 马世骏. 智能时代 柔性先行[J]. *今日制造与升级*, 2020(S2): 20-21.
MA S J. In the smart age, flexibility takes the lead [J]. *Manufacture & Upgrading Today*, 2020(S2): 20-21.
- [22] 韩健睿, 张瑞祺, 郭瑞莲, 等. 一种基于工业视觉的汽车密封件涂胶工作站研究[J]. *科技创新与应用*, 2021, 11(27): 62-64.
HAN J R, ZHANG R Q, GUO R L, et al. Research on automotive sealing gumming workstation based on industrial vision [J]. *Technology Innovation and Application*, 2021, 11(27): 62-64.
- [23] MA Y J, SHI J L, ZHOU Y Q, et al. Design and implementation of dynamic high-speed switches in super base station architectures[J]. *China Communications*, 2020, 17(3): 78-89.
- [24] LIU L, ZHOU Y Q, YUAN J H, et al. Economically optimal MS association for multimedia content delivery in cache-enabled heterogeneous cloud radio access networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(7): 1584-1593.
- [25] LIU L, ZHOU Y Q, ZHUANG W H, et al. Tractable coverage analysis for hexagonal macrocell-based heterogeneous UDNs with adaptive interference-aware CoMP[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(1): 503-517.

[作者简介]



刘垚圻（1995- ），男，中科南京移动通信与计算创新研究院空天地一体化研究室主任，主要研究方向为天地一体化网络架构、先进信息网络试验平台以及孪生平台。



石晶林（1972- ），男，中国科学院计算技术研究所无线中心主任、研究员，主要研究方向为天地一体化网络、计算与通信融合和工业级 5G 基带芯片。



李红光（1997- ），男，中国科学院计算技术研究所硕士生，主要研究方向为天地一体化网络标准化与移动性管理、孪生技术。



马英娇（1987- ），女，博士，北京中科晶上科技股份有限公司核高基事业群副总经理、高级工程师，主要研究方向为工业级 5G 通信网络及超级基站异构资源池互联技术。



周一青（1975- ），女，中国科学院计算技术研究所无线中心副主任、研究员，主要研究方向为计算与通信融合、异构网络和干扰管理。



钱蔓藜（1986- ），女，北京中科晶上科技股份有限公司盘古研究院执行副院长、副研究员，主要研究方向为计算与通信融合、资源管理。