

工业互联网感知通信控制协同融合技术研究综述

田辉¹, 贺硕², 林尚静³, 范绍帅¹, 聂高峰¹, 蒋秀蓉¹

(1. 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876; 2. 郑州大学信息工程学院, 河南 郑州 450001;
3. 北京邮电大学安全生产智能监控北京市重点实验室, 北京 100876)

摘 要: 感知通信控制的协同融合是工业互联网发展的必然趋势, 梳理工业互联网感知通信控制协同融合技术的研究现状与挑战对推动工业互联网发展具有重要意义。首先, 介绍了工业互联网中感知-通信-控制三要素间的复杂耦合关系。然后, 综述了国内外关于工业互联网感知通信控制协同融合技术的研究现状和面临的问题。最后, 围绕工业互联网中感知通信控制协同融合问题对未来的研究方向进行了总结和展望。

关键词: 工业互联网; 信息流; 感知通信控制解耦; 协同融合

中图分类号: TN92

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2021177

Survey on cooperative fusion technologies with perception, communication and control coupled in industrial Internet

TIAN Hui¹, HE Shuo², LIN Shangjing³, FAN Shaoshuai¹, NIE Gaofeng¹, JIANG Xiurong¹

1. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876

2. School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001

3. Beijing Key Laboratory of Work Safety Intelligent Monitoring, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876

Abstract: The cooperative fusion with perception, communication and control is the inevitable trend of industrial Internet. Sorting out the research development and challenges of the cooperative fusion technologies with perception, communication and control in industrial Internet is of great significance to promote the development of industrial Internet. Firstly, the complicated coupling relationship among perception, communication and control in industrial Internet was introduced. Then, the related works and open problems of the cooperative fusion technologies with perception, communication and control were summarized. Finally, the future research directions were summarized and prospected for the problems of the cooperative fusion technologies with perception, communication and control in industrial Internet.

Keywords: industrial Internet, information flow, decoupling of perception, communication and control, cooperative fusion

1 引言

制造业是国民经济的主体, 是立国之本、兴国之器、强国之基。工业互联网是全球工业体系智能化变革的重要推手, 将具有感知、监控能力的各类采集或控制器以及泛在技术、移动通信、智能分析

等技术不断融入工业生产的各个环节, 最终将传统工业推动到智能化的新阶段。早在 1948 年, “控制论之父” 诺伯特·维纳在他的经典著作《控制论: 或关于在动物和机器中控制和通信的科学》中指出: “控制系统应该作为一个复杂的、连锁的反馈闭环。” 从系统科学的角度重新审视工业互联网, 可

收稿日期: 2021-05-25; 修回日期: 2021-08-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62071068); 网络与交换技术国家重点实验室 (北京邮电大学) 开放课题资助项目 (SKLNST-2021-1-11)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62071068), Open Foundation of State key Laboratory of Networking and Switching Technology (Beijing University of Posts and Telecommunications) (SKLNST-2021-1-11)

以发现,工业互联网是一个多尺度、多相流耦合的复杂系统,如图 1 所示。

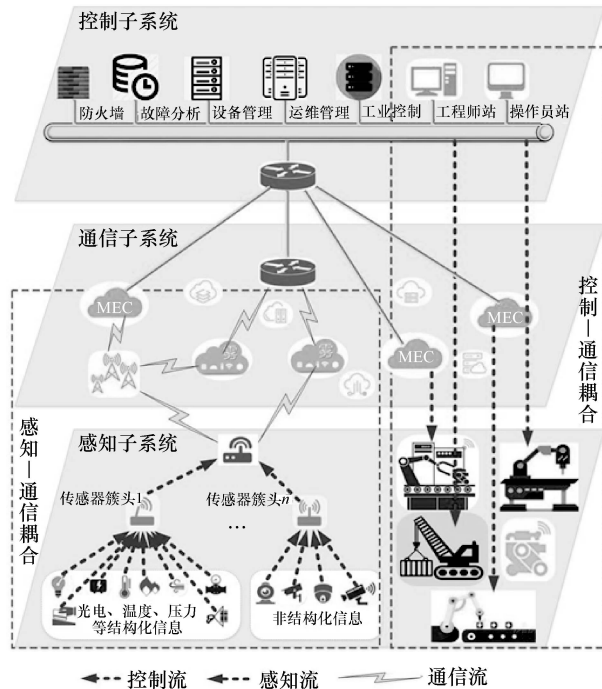


图 1 “感知-通信-控制”融合多尺度、多相流耦合复杂系统

然而,现有工业互联网通常将传感系统、通信系统和控制系统作为独立的子系统分别优化设计。其面临如下 3 方面的问题。

首先,工业互联网在底层通信链路存在“不可靠性”。工业现场环境存在严重的电磁干扰。工业电网、高频振动、电弧等对无线通信干扰严重,工业生产与监控系统中存在大量的异构通信设备,如采用局域网技术的传感器设备、采用广域网 4G、5G 技术的 CPE (customer premises equipment) 中继或者基站设备等,这些设备共享有限的无线信道也会造成同频干扰。此外,厂房中遍布的金属器械等会对无线信号造成衰落和阴影等影响。复杂动态变化的工业环境将不可避免地影响无线传输的实时性和可靠性。通信传输过程中的时延或者丢包将直接影响工业控制系统决策的准确性,以及对现场设备控制的稳定性。因此,工业互联网中通信系统的设计,不能仅考虑优化本地的通信网络参数,同时应该考虑控制系统的稳定性约束。

其次,工业互联网在前向感知-通信链路存在“不准确性”。一方面,传感器设备硬件资源的限制导致分布在不同物理空间的终端仅能获得工业设备状态或者工业生产过程的局部信息,这些局

部信息之间不仅存在偏差,甚至是自相矛盾的。通过扩展传感器节点在时间和空间的覆盖范围,可以提高感知准确性。然而,仅仅通过增加工业现场中传感器数量的方式解决信息感知的“不准确性”会导致通信网络传输负荷的增加,影响控制决策的时效性。另一方面,现代工业生产流程的复杂性导致工业现场环境中不仅存在以温度、转速、压力等模拟量和开关量为代表的结构化信息,同时存在以大量高清视频、图像声音为代表的非结构化信息。传感器终端将大量的未经分析融合的非结构化信息直接传到工业控制系统进行决策处理,会进一步增加通信网络的传输负荷,并且影响后续控制决策的准确性。因此,工业互联网中感知系统的设计,不能仅考虑感知系统本身的优化,同时应该考虑通信系统的通信能力约束。

最后,工业互联网在反向控制-通信链路存在“不确定性”。随着工业生产系统向大型化和复杂化方向发展,生产过程呈现多子系统紧密耦合的特征,耦合关系复杂,非线性特征明显。一个子系统内部的单点扰动、感知误差、交互时延等不确定性均会通过物理网络的耦合及通信网络的连接由此及彼地传播扩散,产生级联震荡,严重影响整个工业系统的稳定性。因此,对生产过程的控制和优化,除了需要考虑单个生产装置或局部子系统性能外,更需兼顾整个系统的全局优化。因此,工业互联网中控制系统的设计,同样不能仅考虑对系统物理量的控制优化,必须将感知系统和通信系统作为自身系统的一部分进行联合优化设计。

目前,国内外学者和研究机构提出了控制通信一体化^[1]、物理信息系统^[2]和分布式人工智能^[3]等未来工业技术。但是,现有的研究弱化了通信技术在闭环系统中所发挥的级联桥接效应,没有对通信系统在工业复杂耦合系统中的作用给予足够的重视。工业互联网感知通信控制协同融合技术的研究仍处于起步阶段。

为了进一步推动工业互联网感知通信控制协同融合技术的发展,本文主要综述了工业互联网感知通信控制协同融合技术方面的相关研究。首先,以信息的流转为引线介绍了工业互联网感知-通信-控制三要素之间的复杂耦合关系;然后,围绕工业互联网中感知通信控制协同融合问题,对国内外研究现状进行了综述分析,并总结了现有研究面临的问题;最后,对工业互联网感知通信控制融合系统中

的解耦机制、高可靠通信、感知通信融合和稳定性控制等开放性研究问题进行了细致的讨论和分析。

2 感知-通信-控制三要素间的复杂耦合关系

工业互联网中，一个任务的完成需要通过信息在感知流、通信流和控制流之间的高效有序传递才能实现。图 2 给出了典型工业互联网复杂系统中感知流、通信流和控制流之间的复杂耦合关系。

从本质上讲，感知流、通信流和控制流是通过信息流在感知执行层、通信传输层和处理决策层上耦合在一起的。一条信息流从生成到失效会经历 4 个阶段，即信息的收集、信息的传递、信息的处理决策和信息的执行。完整的工业互联网产品的生产过程需要源源不断的信息流的驱动。感知执行层包括多种不同功能的传感器和具备执行功能的执行器。传感器主要负责信息的收集，而执行器则根据控制指令完成信息的执行。得益于感知器的多样性，感知信息的承载业务形式包括图像、视频、音频及零星小数据（如表征温度、湿度、电压、电流等）等。通信传输层由若干无线基站组成，负责将收集到的信息交付给处理决策层，并将处理决策层的决策执行指令下达至感知执行层。信息在通过通信传输层时会被抽象为信息传输的约束条件（如时延、可靠性、数据速率等），屏蔽不同信息感知的承载业务差异。处理决策层则根据收集到的信息进行信息处理，并根据处理结果下达控制指令。由于信息收集的规模和处理规则的不同，处理决策层包括多个处理环节。

由于信息流的时序因果特性，工业互联网中的感知执行层、通信传输层和处理决策层的耦合呈现序贯特性，即通信传输层作为中间层将感知执行层与处理决策层耦合在一起。在感知执行层，信息的收集由多种时空分布不均匀的感知节点组成。快速进行感知数据的收集和处理是保证信息流准确性的基础。然而，从感知数据产生的原始数据需要经过通信传输层到达处理决策层进行处理。在处理决策层，信息经过处理后生成时序控制决策。这些时序控制决策通过通信传输层的有序控制指令传递，下达至感知执行层的执行节点。

3 国内外研究现状与面临的问题

由第 2 节的介绍可以看出，工业互联网中感知系统、通信系统和控制系统三者之间紧密耦合、序贯相通。本节将从感知计算、高可靠通信和通信控制 3 个方面介绍工业互联网中感知通信控制协同融合技术的研究现状，并进一步分析现有研究面临的问题。

3.1 面向工业互联网的感知计算研究

传统工业互联网架构通常使用集中式服务器作为计算中心，以光电、温度、压力等各种传感器（如二维条形码读取设备、RFID 标签读写器、工业相机、高清摄像头等）和变送器作为工业自动化生产控制过程的末端感知单元，并对采集的数据进行多维、异构数据融合处理，以支持服务器进行智能决策。

为了实现在工业互联网应用场景中处理异构设备、快速配置与实现、在线服务生成等方面的智

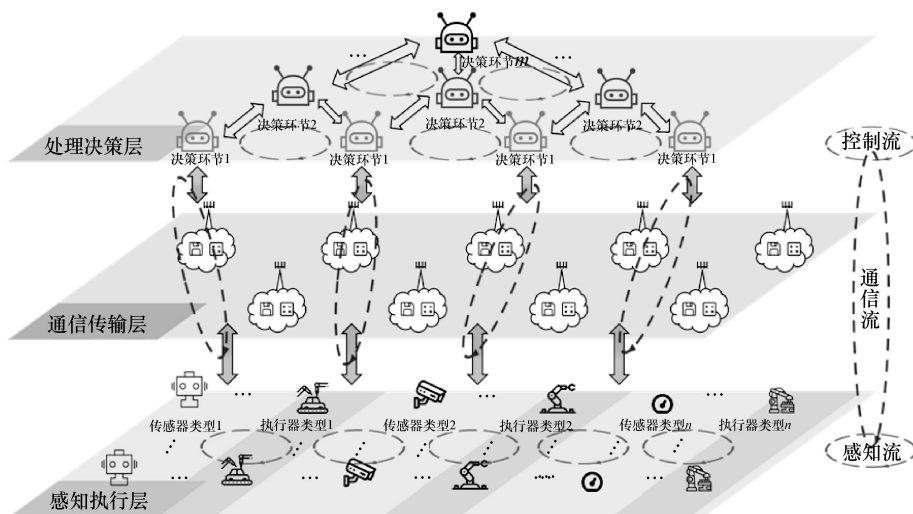


图 2 感知流、通信流和控制流耦合关系

能互联,文献[4]通过灵活配置编程接入模块连接异构的物理制造资源,提出了由定制的接入模块、访问中心和本地服务器组成的工业物联网中心处理架构。文献[5]提出了一种新的中间件体系结构——面向信息物理系统的实时数据分发服务,使传感器数据能够在高度不可预测的环境下及时、可靠地传播。总的来说,传统的工业互联网更多地以集中式处理架构为基础对数据进行融合处理。

然而,随着制造工业智能化进程的推进,工业制造领域呈现海量异构智能终端设备连接的特性,这些工业设备将产生无法估计的数据量,同时智能终端的感知、计算、存储能力相较以往均有很大提升,能够实现对物理世界的大范围、长时间、多维度的信息采集以及数据空时相关性的深度挖掘,相应的传统工业采用的数据集中式处理模式在工业互联网时代并不是最优的处理方案^[6]。

边缘计算等技术的出现,为感知任务的快速部署和感知数据的传输与处理提供了新的契机^[7]。工业互联网中的许多控制功能将通过本地设备完成而无须依赖于云端,计算卸载技术将感知数据的处理工作交给靠近感知数据源的边缘计算设备;将分布式部署的单一功能传感器采集到的多维、异质、非结构化信息进行融合汇聚、智能处理,增强感知系统容错性,同时最大程度地发挥实时数据的价值,决策通过在边缘设备之间共享数据和计算来完成,更有利于工业制造过程的管控。工业互联网架构逐渐演进为“云-管-边-端”模式,其中,“云”是指物联网平台云,“管”是指有线/无线通信方式,“边”是指边缘计算,“端”则涵盖了智能传感、智能终端和智能设备。基于上述模式,文献[8]提出了一种基于软件定义网络(SDN, software defined network)的云-边交互架构来处理工业互联网环境下的大数据流,云-边协同降低了传统集中式云计算带来的时延,中间件 SDN 用于克服边缘设备和云服务器之间的大量数据迁移导致的底层网络拥塞,采用切比雪夫分解的多目标进化算法进行流量调度。文献[9]基于 SDN 架构,结合分层云和边缘计算技术,提出了一种新的工业应用集中式计算卸载策略——软件定义工业网络体系结构,解决了工业互联网中资源利用、数据处理和系统兼容性等缺陷。

为了获得云-边协同模式最优的卸载策略,已有许多研究考虑不同用户场景下的任务划分和任

务分配问题。文献[10]在功率受限的网络下,通过马尔可夫决策过程(MDP, Markov decision process),利用一维搜索算法实现移动设备的任务卸载决策。类似地,文献[11]基于 MDP 问题建模,在异构网络下将任务状态分为 9 种类型,提出时空计算卸载决策算法,实现了给设备任务分配相应的传输时隙和卸载到最合适的边缘服务器的策略。文献[12]在多用户场景中,采用启发式算法解决卸载决策和资源分配问题,根据设备的计算频率和产生数据量大小来定义任务的优先级,以此来部署信道资源和边缘服务器的频率资源。

目前,关于工业互联网环境中涉及的节点能源资源、计算资源、缓存资源、频谱资源等不同资源间的联合优化已有大量研究。文献[13-15]对计算资源和无线资源进行联合优化,文献[16-20]对计算资源和能源进行联合优化,文献[21-23]研究了无线资源和能源的联合优化,文献[24-26]研究了无线资源和存储资源的联合优化方案等。不同服务器间的资源迁移相关研究较少,文献[27]主要研究了基于贝尔曼-福特方法的低复杂度分布式迁移技术,文献[28-29]研究了基于激进奖励机制的资源迁移技术等。

工业互联网场景中全面的感知计算阶段、泛在的互联互通阶段、深度的智能控制阶段是密不可分的,现阶段基于边缘计算的传感器信息处理卸载技术未能很好地考虑工业现场环境中的时延约束,无法满足计算密集型和时延敏感型感知任务的需求,基于边缘计算的工业互联网时延约束下的传感器感知任务卸载,以及雾计算节点之间任务卸载均有待进一步研究。

3.2 面向工业互联网的高可靠通信研究

面向工业互联网场景的通信技术的关键指标是低时延和高可靠。在 5G 技术出现之前,针对工业互联网的研究主要集中在无线传感器网络(WSN, wireless sensor network)和工业监控网络。文献[30]对 WSN 中时隙媒体接入控制(MAC, media access control)的超帧结构进行了研究,以在满足各种不同条件下最小化 MAC 访问时延,但忽略了工业环境中的能量消耗问题,无法在实际的工业互联网场景中实现。文献[31]研究了 WSN 中的聚合调度问题,提出了一种高效的分布式调度算法,降低了时延。文献[32]研究了工业监控网络中的汇聚传输调度问题,提出了一种时延最优的调度策略,但不能在给定的时延约束下最大化其可靠性。针对引入视

觉能力的 WSN, 文献[33]提出了一种基于事件公平的调度方案, 以减少事件报告时延。该方案能实现一定程度的性能提升, 但仍然不支持在传感器上传输实时视频。文献[34]针对事件监控的 M2M 应用, 引入了一种预测资源分配算法, 该算法利用组内 M2M 设备流量模式的相关性, 显著降低了平均上行时延。以上传统研究成果都在一定程度上提升了通信网络的低时延性能, 但仍未能满足工业互联网中的毫秒级时延需求。

伴随着 5G 技术的兴起, 超可靠低时延通信 (uRLLC, ultra-reliable and low latency communications) 被引进, 以实现包括工业互联网场景在内的关键机器通信。目前, 面向工业互联网的 5G 技术主要从非正交多址接入 (NOMA, non-orthogonal multiple access)、免调度传输、大规模多输入多输出 (massive MIMO)、多连接以及短子帧结构等方面研究 uRLLC。

在 NOMA 技术研究方面, 业界提出了一些基本的方案, 包括稀疏编码多址接入 (SCMA, sparse code multiple access) 方案和多用户共享接入方案等^[35-36]。针对工业自动化场景, 文献[37]研究了 NOMA 和协作 NOMA 在可靠性要求、总能量和时延约束下, 联合优化块长度和功率分配, 最小化译码错误概率的问题; 文献[38]提出了一种基于 SCMA 增强的全双工方案, 并分析了该方案在时延约束下的可靠性。NOMA 的引入为免调度传输提供了天然的空间, 基于 NOMA 实现免调度传输可以降低信令开销和传输时延。

在免调度技术研究方面, 文献[39]对免调度传输系统的性能进行瞬态分析, 推导出时延约束下的可靠性。文献[40]针对 5G 标准化中讨论的基于停止-等待协议的机制和盲重传机制, 研究了这 2 种上行免调度方案的性能, 分析其在时延约束下的可靠性。

在 massive MIMO 技术研究方面, 文献[41]针对基于毫米波的 massive MIMO 系统提出了一种时延控制方法, 在时延和可靠性约束下最大化网络性能, 以支持 uRLLC。文献[42]基于最小二乘信道估计研究了可以实现 uRLLC 的多用户 massive MIMO 技术, 可以在时延有限和信道状态信息不准确的条件下提高传输的可靠性。

在多连接技术研究方面, 文献[43]针对多连接提出了一个基于短码块的 D2D 扩展系统的框架, 用以实现 uRLLC。文献[44]研究了用户在多连接条

件下的联合译码性能。

在短子帧技术研究方面, 文献[45]设计了一种通过减少符号时间实现的短子帧结构, 减少了数据包的传输时延。这些针对 uRLLC 的研究为实现工业互联网中的超高可靠性和超低时延需求奠定了基础。总而言之, 在目前 5G 技术标准体系之下, uRLLC 技术还未有统一的系统性方案, 仍然有很多工作预计留至后续 5G 标准体系研究^[46]。

现有研究都只是从纯通信技术的方向来实现工业互联网中的低时延和高可靠需求。但是, 在实际的工业现场流程中, 通信和控制是紧密耦合在一起的, 要真正达到工业互联网中的通信技术指标, 需要将通信问题放在控制环节一起解决。

3.3 面向工业互联网的通信控制研究

自动控制理论的发展主要经历了 3 个阶段: 适用于单输入单输出线性对象的经典控制理论^[47-50], 适用于大型、复杂、高维、非线性和不确定性严重对象的现代控制理论^[51-52], 适用于未知或不确定性严重对象且不依赖对象模型的智能控制理论^[53-55]。实际工业过程难以建立精确的数学模型, 但可以方便地使用输入、输出与跟踪误差等数据, 从而使基于数据的控制方法得到了极大的发展。目前工业界应用的控制系统大部分采用以跟踪误差为基础的 PID 控制技术, 此外, 工业界中也出现了如无模型控制、学习控制、模糊控制、专家控制、神经网络控制、仿人行为的智能控制等基于数据的控制方法^[56-59]。然而, PID 控制器适用于具有线性动态特性的被控对象, 难以适用于具有综合复杂性的工业过程。因此, 适合复杂工业过程的基于数据和数学模型相结合的先进控制技术的研究受到工业界的广泛关注。针对一类具有非线性和不确定性, 并且输出被控变量不能在线直接连续测量的复杂对象, 文献[60]提出了一种基于智能特征模型的智能控制新方法。针对具有多变量、强耦合、强非线性和不确定性且特性随工况频繁变化的复杂工业过程, 文献[61]提出了基于多模型切换的智能解耦控制方法。针对互联系统的协同控制问题, 文献[62]设计了适用于无时滞系统的分布式控制器。

工业互联网由于包含众多的子系统, 其感知信息与控制决策传输的具体实现过程与传统工厂存在很大的差异。控制器执行的控制算法性能由工业网络系统的通信性能和控制策略共同决定, 且二者相互依赖、相互影响, 单纯优化二者之一不能满足

工业网络系统的整体性设计要求, 需要将控制和通信视为完全融合的系统进行整体设计^[63]。例如, 控制系统的采样速率对控制系统和通信系统都会造成影响, 进而决定整体的控制性能^[64]。提高合理范围内的采样速率、降低信息传输时延以及丢包率可以有效地改善控制系统性能, 但是会导致通信系统的能耗增加^[64]。因此, 最优的采样速率需要联合考量控制和无线通信系统。此外, 工业过程运行控制涉及回路控制和回路设定控制上下 2 层反馈控制, 二者对应的控制周期不同, 对通信与控制提出了不同的权衡设计要求^[50]。因此, 控制与通信协同设计对于工业互联网的性能优化至关重要^[65]。

4 种场景下控制和通信系统协同设计的研究工作如下。

1) 无线控制系统场景下, 文献[66]对控制和通信进行协同设计, 通过研究由多子系统、本地传感器以及远端控制-调度器组成的无线控制系统中无线传输稳定性对于控制性能的影响, 协同设计稳定性和传输调度机制减轻不可靠传输对于闭环控制的影响, 并且提出了一种分解方案, 采用标准线性二次调节器和无线资源分配实现最优化控制性能的目的。

2) 工业物联网场景下, 文献[67]通过主动方式提高工业互联网系统的估计性能, 首先提出一种雾-云分层网络架构和分簇模型, 然后设计分层的传输-估计方法, 最后采用基于分解方法的块坐标下降法最小化估计误差和能量消耗的加权和, 从而实现节能和稳定的传输-估计协同设计。

3) 自动驾驶场景下, 文献[68]针对无线连接自动驾驶车辆排的通信与控制集成系统问题, 提出了一种新颖的用于优化自动驾驶车辆排操作的框架, 综合考虑无线 V2V 网络的时延和车辆控制系统的稳定性, 通过分析控制系统稳定性得出无线系统可靠性的下限和近似表达式, 并采用最大化无线系统可靠性的方法优化控制系统的参数。

4) 信息物理系统场景下, 文献[69]在进行短包无线通信的实时信息物理系统场景下考虑了控制和通信系统间的紧密交互, 研究了封包化预测控制与无线资源消耗之间的关系, 提出一种控制和通信协同设计方法以优化封包化预测控制的预测长度, 实现了消耗最少无线资源产生非最少无线流量的效果。

综上所述, 目前工业互联网下的控制与通信的

协同已经引起了学术界的广泛关注, 但在国际上仍处于探索阶段, 是一个具有深入研究价值的领域。

3.4 现有研究面临的问题

在现有工业互联网引入感知通信计算协同技术的初衷, 是通过打破 3 个环节的边界为工业互联网业务提供端到端的服务保障。尤其是, 需要为时延敏感工业控制类业务提供端到端的确定性、可靠服务保障。然而, 现有研究在协同场景以及协同模式上, 仍然有以下不足之处。

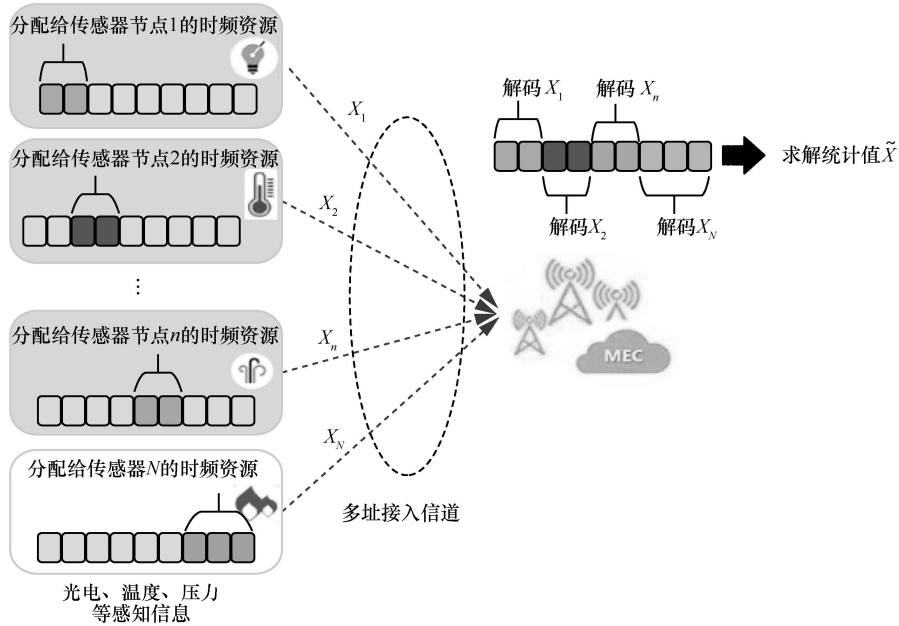
首先, 在协同场景方面, 现有的研究普遍侧重单一传输场景的协同。例如, 研究在无线局域网 (Wi-Fi) 或者 5G uRLLC 网络下通信与控制的协同。然而, 在复杂传输环境下, 信息的获取与传输往往会在有线传输与无线传输中跨网交互和传输。

在有线传输场景下, 通常采用时延敏感网络 (TSN, time sensitive network) 来提供确定性时延和可靠性保障。在无线传输场景下, 通常采用 5G uRLLC 技术来提供低时延、高可靠保障。因此, 还需要研究如何在跨 TSN 以及 5G uRLLC 混合传输场景下为工业互联网时延敏感类业务提供实时可靠的传输保障。

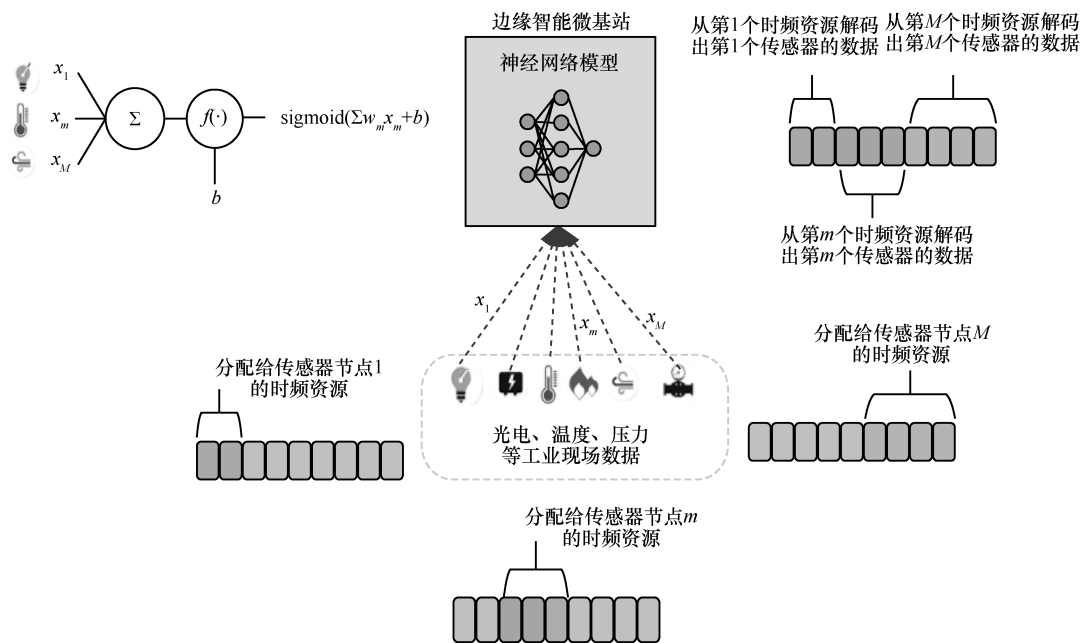
目前, 3GPP R16 率先提出了 5G 桥接 TSN 的架构, 通过在 TSN 中引入新的 TSN 应用实体 (TSN-AF) 和设备侧 TSN 转换器 (DS-TT), 在 5G 网络 UPF 中引入网络侧 TSN 转换器 (NW-TT), 在工业互联网中构建了跨有线链路和无线链路的混合传输链路。然而, 考虑到 5G uRLLC 网络与 TSN 在通信机理、协议机制、承载资源各个方面均有较大差异, 5G-TSN 混合传输场景下感知通信控制协同仍然是一个研究难点^[70]。

其次, 在协同模式方面, 现有的研究普遍采用松耦合的模式, 即将感知通信计算视为一个贯序单向传递过程。感知-通信协同的基础是“先感知再传输”, 如图 3(a)所示; 通信-计算协同的基础也仍然是“先传输再计算”, 如图 3(b)所示。这样以通信环节作为桥接“感知与计算”的中间环节将导致通信传输链路的性能成为整体协同性能提升的瓶颈。迫切需要开展“边感知边传输”以及“边传输边计算”的感知通信计算一体化的紧耦合模式。

近几年, 空中计算技术被提出并应用到大规模传感器数据感知领域^[71]。空中计算利用无线信号在传输过程中的波形叠加属性, 在进行信息传输的同时完成了数据汇聚, 这为感知通信计算一体化设计



(a) 感知通信协同中“先感知再传输”



(b) 通信计算协同中“先传输再计算”

图 3 基于松耦合的感知通信计算协同

提供了一种解决思路。例如，从深度学习模型中神经元的运算过程中，神经元并非对原始的输入数据感兴趣，而是对原始输入数据的统计值通过激活函数后的结果感兴趣。此外，在联邦智能推理过程中，边缘智能服务器设备并非对某一个边缘智能节点的原始的模型参数感兴趣，而是对多个边缘智能节点本地模型参数的统计值（如加权算术平均等）感兴趣。因此，利用空中计算技术，可以在通信传输

的同时，实现边缘计算节点上神经元的运算以及深度模型参数的融合。

4 未来研究展望

结合第 3 节所介绍的国内外研究现状以及现有研究面临的问题可以看出，如何打破现有工业互联网中对传感系统、通信系统和控制系统采用孤立设计的桎梏，已经成为未来工业互联网进一步发展亟

待解决的问题。本节结合前文所述工业互联网感知通信控制融合技术发展趋势及最新研究进展,进一步提出了工业互联网感知通信控制融合系统的一些开放性问题,具体总结如下。

4.1 系统约束下的感知通信控制解耦机制

为了对工业互联网中感知、通信和控制进行解耦,需要解决 2 方面的问题。第一,对感知、通信和控制耦合因素进行系统构建。构成工业互联网系统的实体设备数量多、能力差异大。如何屏蔽工业互联网设备实体的差异性,选取有效的状态变量,是全面刻画并构建工业互联网系统的基础。第二,基于构建的模型获取感知、通信和控制需要遵循的基本准则。感知流和控制流通过传输流耦合在一起。信息在通信传输层传输时容易受无线信道波动和复杂通信协议解析的影响,导致信息传递的不可靠性,并进一步引发感知的不准确性和控制的不确定性。因此需要研究信息流中感知、通信和控制各部分的解耦机理,获取感知、通信和控制的基本约束准则。

4.2 5G 与 TSN 的跨域协同传输理论

5G 与 TSN 资源形态、协议机制不同。TSN 在设备间严格时间同步的基础上,基于不同优先级队列的门控列表及流预留协议对数据发送时间、时长等进行控制,实现时延敏感类高优先级业务的确定性传输;然而,无线网络内在的链路共享特性,导致用户以及用户的业务采用调度的方式动态共享无线空口资源,无法执行严格的 QoS 保障。由此可见,TSN 是采用预留的方式分配队列发送机会资源的,而 5G uRLLC 是采用共享的方式调度无线时频资源的。因此,5G uRLLC 与 TSN 的融合需要从 2 个方面进行探索研究。一方面,在有线 TSN 与无线 5G uRLLC 网络融合边界,强化 5G 与 TSN 的双向柔性适配,将时延敏感网络门控传输与队列管控思想引入 5G 网络调度,实现 5G 与 TSN 跨域联合实时调度;另一方面,在 5G uRLLC 网络内部,无线链路所固有的随机特性给确定性保障带来了挑战。针对如何克服无线信道时变带来的 5G 链路非确定影响因素这一难题,需要从 5G 资源预留、保障与动态共享机制,支持确定性时延的 uRLLC 帧结构,基于微时隙的可变粒度资源调度颗粒等关键技术方面,强化 5G 网络针对时延敏感类业务的保障能力,实现面向工业控制业务的无线时延敏感网络技术体系。

4.3 基于空中计算的通信计算一体化技术

工业互联网数据的爆炸式增长以及工业终端设备存储容量和计算能力的快速提升,使工业终端更倾向于在本地处理数据,从而促进了以联邦学习为代表的一系列分布式机器学习技术的繁荣。然而联邦学习的高维模型参数聚合问题给无线分布式边缘智能系统带来了巨大的挑战。空中计算通过利用无线信号在传输过程中的波形叠加属性以及多用户的并发传输,可以实现数据在空中的高速聚合。然而传统的空中计算方案主要针对窄带非频选信道,而由于联邦学习模型参数的高维度特性,需要利用宽带信道对其进行传输,由此导致传统的面向窄带非频选信道的空中计算方案精确度下降,难以适用。因此,需要针对联邦学习的模型参数聚合特点,设计新型空中计算方案,以满足联邦学习的通信计算一体化传输需求。

4.4 基于非完美信息的系统稳定控制机制

工业互联网中的“非完美信息”,如不确定的通信时延以及不完全可测的系统状态信息,是导致稳定控制的不确定性的直接原因。信息时延的波动主要是由通信过程中的传输负载、通信资源等的随机变化导致。如果能够完美知晓通信时延,就可以在控制算法中实现精确补偿,从而实现系统的稳定。然而,在实际工业互联网环境下,受硬件能力和无线环境快速变化的影响,通信时延常伴有不确定性。非确定性时延的存在会使系统控制滞后或错乱,大大降低了控制系统的控制性能,严重时会影响控制系统的稳定性。同时,由于工业环境的限制,在设计控制算法时,由于部分系统状态信息不可测取或不易测取,导致系统状态信息不完全,给控制系统的稳定精确设计带来了巨大的挑战。因此,开展基于非完美信息的系统稳定控制机制研究,通过通信和控制的协同融合,使工业互联网具有较强的环境适应能力和健壮性是未来研究的重要方向。

5 结束语

立足于未来工业互联网的感知-通信-控制三大环节是从“独立自治”向“协同融合”发展的必然趋势,本文首先以信息的流转为引线介绍了工业互联网中感知-通信-控制三要素间的复杂耦合关系,随后综述分析了国内外相关研究现状并总结了现有研究面临的问题。最后对工业互联网感知通信控制协同融合技术的发展进行了总结和展望,为该

领域的未来研究打下了基础。

参考文献:

- [1] 关新平, 陈彩莲, 杨博, 等. 工业网络系统的感知-传输-控制一体化: 挑战和进展[J]. 自动化学报, 2019, 45(1): 25-36.
GUAN X P, CHEN C L, YANG B, et al. Towards the integration of sensing, transmission and control for industrial network systems: challenges and recent developments[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(1): 25-36.
- [2] DEEP S K, SOOD S K. 5G ready optical fog-assisted cyber-physical system for IoT applications[J]. *IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications*, 2020, 5(2): 137-144.
- [3] IOANNOU I, VASSILIOU V, CHRISTOPHOROU C, et al. Distributed artificial intelligence solution for D2D communication in 5G networks[J]. *IEEE Systems Journal*, 2020, 14(3): 4232-4241.
- [4] TAO F, CHENG J F, QI Q L. IIHub: an industrial Internet-of-things hub toward smart manufacturing based on cyber-physical system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(5): 2271-2280.
- [5] SENGAN S, V S, NAIR S K, et al. Enhancing cyber-physical systems with hybrid smart city cyber security architecture for secure public data-smart network[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2020, 112: 724-737.
- [6] 王智明. 移动工业边缘云技术研究[J]. 通信世界, 2018(23): 43-44.
WANG Z M. Research on mobile industry edge cloud technology[J]. *Communications World*, 2018(23): 43-44.
- [7] TALEB T, SAMDANIS K, MADA B, et al. On multi-access edge computing: a survey of the emerging 5G network edge cloud architecture and orchestration[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(3): 1657-1681.
- [8] KAUR K, GARG S, AUJLA G S, et al. Edge computing in the industrial Internet of things environment: software-defined-networks-based edge-cloud interplay[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(2): 44-51.
- [9] XU F M, YE H Y, YANG F, et al. Software defined mission-critical wireless sensor network: architecture and edge offloading strategy[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 10383-10391.
- [10] XU F M, YE H Y, CUI S H, et al. Software defined industrial network: architecture and edge offloading strategy[C]//*Communications and Networking*. Cham: Springer International Publishing, 2019: 46-56.
- [11] LIU J, MAO Y Y, ZHANG J, et al. Delay-optimal computation task scheduling for mobile-edge computing systems[C]//*Proceedings of 2016 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1451-1455.
- [12] KO H, LEE J, PACK S. Spatial and temporal computation offloading decision algorithm in edge cloud-enabled heterogeneous networks[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 18920-18932.
- [13] QIAN L P, SHI B H, WU Y, et al. NOMA-enabled mobile edge computing for Internet of things via joint communication and computation resource allocations[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(1): 718-733.
- [14] REN C S, LYU X C, NI W, et al. Distributed online optimization of fog computing for Internet of things under finite device buffers[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(6): 5434-5448.
- [15] CHENY H, ZHAO D M, CHENY Q, et al. Joint computation offloading and radio resource allocations in wireless cellular networks[C]//*Proceedings of the 10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [16] ZHAO P T, TIAN H, QIN C, et al. Energy-saving offloading by jointly allocating radio and computational resources for mobile edge computing[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 11255-11268.
- [17] LYU X C, NI W, TIAN H, et al. Optimal schedule of mobile edge computing for Internet of things using partial information[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(11): 2606-2615.
- [18] LYU X C, TIAN H, NI W, et al. Adaptive centralized clustering framework for software-defined ultra-dense wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(9): 8553-8557.
- [19] CHEN S G, ZHENG Y M, LU W F, et al. Energy-optimal dynamic computation offloading for industrial IoT in fog computing[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2020, 4(2): 566-576.
- [20] WU H, TIAN H, FAN S S, et al. Data age aware scheduling for wireless powered mobile-edge computing in industrial Internet of things[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(1): 398-408.
- [21] LYU X C, TIAN H, JIANG L, et al. Selective offloading in mobile edge computing for the green Internet of things[J]. *IEEE Network*, 2018, 32(1): 54-60.
- [22] LYU X C, NI W, TIAN H, et al. Distributed online optimization of fog computing for selfish devices with out-of-date information[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(11): 7704-7717.
- [23] LYU X C, REN C S, NI W, et al. Multi-timescale decentralized online orchestration of software-defined networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(12): 2716-2730.
- [24] HE S, TIAN H, LYU X C. Edge popularity prediction based on social-driven propagation dynamics[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(5): 1027-1030.
- [25] HE S, TIAN H, LYU X C, et al. Distributed cache placement and user association in multicast-aided heterogeneous networks[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 25365-25376.
- [26] HE S, LYU X C, NI W, et al. Virtual service placement for edge computing under finite memory and bandwidth[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(12): 7702-7718.
- [27] LYU X C, TIAN H, NI W, et al. Energy-efficient admission of delay-sensitive tasks for mobile edge computing[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(6): 2603-2616.
- [28] LYU X C, REN C S, NI W, et al. Distributed optimization of collaborative regions in large-scale inhomogeneous fog computing[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(3): 574-586.
- [29] PU L J, CHEN X, XU J D, et al. D2D fogging: an energy-efficient and incentive-aware task offloading framework via network-assisted D2D collaboration[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(12): 3887-3901.
- [30] YAN H R, ZHANG Y, PANG Z B, et al. Superframe planning and access latency of slotted MAC for industrial WSN in IoT environment[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, 10(2): 1242-1251.
- [31] YOUSEFI H, MALEKIMAJD M, ASHOURI M, et al. Fast aggregation scheduling in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(6): 3402-3414.

- [32] ZHANG H B, SOLDATI P, JOHANSSON M. Performance bounds and latency-optimal scheduling for convergecast in WirelessHART networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(6): 2688-2696.
- [33] DURMUS Y, OZGOVDE A, ERSOY C. Distributed and online fair resource management in video surveillance sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2012, 11(5): 835-848.
- [34] BROWN J, KHAN J Y. A predictive resource allocation algorithm in the LTE uplink for event based M2M applications[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2015, 14(12): 2433-2446.
- [35] ZHANG C, YANG C, PANG X, et al. Efficient sparse code multiple access decoder based on deterministic message passing algorithm[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(4): 3562-3574.
- [36] HAYAT O, NGAH R, HASHIM S Z M. Multi-user shared access (MUSA) procedure for device discovery in D2D communication[J]. *Telecommunication Systems*, 2021, 76(2): 291-297.
- [37] REN H, PAN C H, DENG Y S, et al. Joint power and blocklength optimization for uRLLC in a factory automation scenario[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 19(3): 1786-1801.
- [38] ZENG J, LYU T J, LIN Z P, et al. Achieving ultrareliable and low-latency communications in IoT by FD-SCMA[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(1): 363-378.
- [39] ZHAO L L, CHI X F, QIAN L, et al. Analysis on latency-bounded reliability for adaptive grant-free access with multipackets reception (MPR) in uRLLCs[J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(5): 892-895.
- [40] BERARDINELLI G, HUDA M N, ABREU R, et al. Reliability analysis of uplink grant-free transmission over shared resources[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 23602-23611.
- [41] VU T K, LIU C F, BENNIS M, et al. Ultra-reliable and low latency communication in mmWave-enabled massive MIMO networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(9): 2041-2044.
- [42] ZENG J, LYU T J, LIU R P, et al. Linear minimum error probability detection for massive MU-MIMO with imperfect CSI in uRLLC[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(11): 11384-11388.
- [43] SHE C Y, CHEN Z C, YANG C Y, et al. Improving network availability of ultra-reliable and low-latency communications with multi-connectivity[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(11): 5482-5496.
- [44] WOLF A, SCHULZ P, DÖRPINGHAUS M, et al. How reliable and capable is multi-connectivity?[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(2): 1506-1520.
- [45] JI H, PARK S, YEO J, et al. Ultra-reliable and low-latency communications in 5G downlink: physical layer aspects[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2018, 25(3): 124-130.
- [46] 张轶, 夏亮, 徐晓东, 等. 3GPP 中 uRLLC 标准研究进展[J]. *移动通信*, 2020, 44(2): 2-7.
- ZHANG Y, XIA L, XU X D, et al. The uRLLC standardization progresses in 3GPP[J]. *Mobile Communications*, 2020, 44(2): 2-7.
- [47] PIPPARD A B, DICKE R H. Response and stability, an introduction to the physical theory[J]. *American Journal of Physics*, 1986, 54(11): 1052.
- [48] NULL. Analog design essentials[J]. *Choice Reviews Online*, 2006, 44(04): 44-2131.
- [49] EVANS G W. Bringing root locus to the classroom[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2004, 24(6): 74-81.
- [50] 柴天佑. 生产制造全流程优化控制对控制与优化理论方法的挑战[J]. *自动化学报*, 2009, 35(6): 641-649.
- CHAI T Y. Challenges of optimal control for plant-wide production processes in terms of control and optimization theories[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(6): 641-649.
- [51] KALMAN R E. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. *Journal of Basic Engineering*, 1960, 82(1): 35-45.
- [52] BELLMAN R. *Dynamic programming*[M]. Princeton: Princeton University Press, 1957.
- [53] SWAROOP D, HEDRICK J K. String stability of interconnected systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1996, 41(3): 349-357.
- [54] ÅSTRÖM K J, ANTON J J, ÅRZÉN K E. Expert control[J]. *Automatica*, 1986, 22(3): 277-286.
- [55] PSALTIS D, SIDERIS A, YAMAMURA A A. A multilayered neural network controller[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 1988, 8(2): 17-21.
- [56] O'DWYER A. *Handbook of PI and PID controller tuning rules*, 2nd Edition[R]. 2006
- [57] 韩志刚, 汪国强. 无模型控制律串级形式及其应用[J]. *自动化学报*, 2006, 32(3): 345-352.
- HAN Z G, WANG G Q. Cascade scheme of model free control law and its application[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2006, 32(3): 345-352.
- [58] SUGIE T, ONO T. An iterative learning control law for dynamical systems[J]. *Automatica*, 1991, 27(4): 729-732.
- [59] WANG L X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1993, 1(2): 146-155.
- [60] 吴宏鑫. 智能特征模型和智能控制[J]. *自动化学报*, 2002, 28(S1): 30-37.
- WU H X. Intelligent characteristic model and intelligent control[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(S1): 30-37.
- [61] FU Y, CHAI T Y. Nonlinear multivariable adaptive control using multiple models and neural networks[J]. *Automatica*, 2007, 43(6): 1101-1110.
- [62] MASSIONI P, VERHAEGEN M. Distributed control for identical dynamically coupled systems: a decomposition approach[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(1): 124-135.
- [63] ZHAO G D, IMRAN M A, PANG Z B, et al. Toward real-time control in future wireless networks: communication-control co-design[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2019, 57(2): 138-144.
- [64] PARK P, COLERI E S, FISCHIONE C, et al. Wireless network design for control systems: a survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(2): 978-1013.
- [65] 关新平, 吕玲, 杨博. 智能工厂的感知、通信与控制[J]. *中兴通讯技术*, 2017, 23(5): 61-66.
- GUAN X P, LYU L, YANG B. Co-design of sensing, communication and control for the smart factory[J]. *ZTE Technology Journal*, 2017, 23(5): 61-66.
- [66] LYU L, CHEN C L, HUA C Q, et al. Co-design of stabilisation and transmission scheduling for wireless control systems[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2017, 11(11): 1767-1778.
- [67] LYU L, CHEN C L, ZHU S Y, et al. 5G enabled codesign of energy-efficient transmission and estimation for industrial IoT systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(6): 2690-2704.
- [68] ZENG T C, SEMIARI O, SAAD W, et al. Joint communication and control for wireless autonomous vehicular platoon systems[J]. *IEEE*

Transactions on Communications, 2019, 67(11): 7907-7922.

[69] TONG X, ZHAO G D, IMRAN M A, et al. Minimizing wireless resource consumption for packetized predictive control in real-time cyber physical systems[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.

[70] 蔡岳平, 李栋, 许驰, 等. 面向工业互联网的 5G-U 与时间敏感网络融合架构与技术[J]. 通信学报, (2021-08-11).

CAI Y P, LI D, XU C, et al. Integrating 5G-U with time-sensitive networking for industrial Internet: architectures and technologies[J]. Journal on Communications, (2021-08-11).

[71] 陈力, 卫国. 未来无线网络下的空中计算技术[J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(1): 29-34.

CHEN L, WEI G. Over-the-air computation for future networks[J]. ZTE Technology Journal, 2019, 25(1): 29-34.



林尚静 (1986-), 女, 湖北武汉人, 博士, 北京邮电大学讲师、硕士生导师, 主要研究方向为边云协同智能和 AI 驱动 5G 网络优化。



范绍帅 (1987-), 男, 山东烟台人, 博士, 北京邮电大学讲师、硕士生导师, 主要研究方向为 5G 及 B5G 组网关键技术、智能边缘网络技术、室内定位技术等。

[作者简介]



田辉 (1963-), 女, 河南郑州人, 博士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线资源管理、智能边缘计算、移动社交网络。



聂高峰 (1988-), 男, 河南周口人, 博士, 北京邮电大学讲师、硕士生导师, 主要研究方向为空地一体化网络、移动自组织网络、移动通信传输组网技术等。



贺硕 (1992-), 女, 河南南阳人, 博士, 郑州大学讲师, 主要研究方向为边缘智能、无线资源管理、强化学习等。



蒋秀蓉 (1993-), 女, 甘肃天水人, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为计算机视觉、机器学习等。