

工业网络系统的感知—传输—控制一体化: 挑战和进展

关新平^{1,2} 陈彩莲^{1,2} 杨博^{1,2} 华长春³ 吕玲^{1,2} 朱善迎^{1,2}

摘要 工业网络系统是融合工业控制和信息通信的多维动态系统, 具有维度高、动态性强、工业通信协议和网络配置嵌入等特性; 如何在网络环境下实现信息感知分布性、控制适应性、整体协调性, 已成为工业网络系统研究的新挑战. 本文简述了工业网络系统的内涵和主要特征, 分析了感知—传输—控制一体化面临的挑战和关键问题; 综述了分布式状态感知、适变传输、协同控制等关键技术的研究进展; 对工业网络系统的未来研究方向和潜在应用前景进行了总结和展望.

关键词 工业网络系统, 分布式估计, 适变传输, 协同控制, 联合设计

引用格式 关新平, 陈彩莲, 杨博, 华长春, 吕玲, 朱善迎. 工业网络系统的感知—传输—控制一体化: 挑战和进展. 自动化学报, 2019, 45(1): 25–36

DOI 10.16383/j.aas.c180484

Towards the Integration of Sensing, Transmission and Control for Industrial Network Systems: Challenges and Recent Developments

GUAN Xin-Ping^{1,2} CHEN Cai-Lian^{1,2} YANG Bo^{1,2} HUA Chang-Chun³ LYU Ling^{1,2} ZHU Shan-Ying^{1,2}

Abstract Industrial network system represents a kind of multi-dimensional dynamic systems with the integration of control, information and communication. They have the following three characteristics: high dimension, strong dynamics, and deep embeddedness of communication protocols and network configuration. How to realize distributed sensing, control adaptability and system coordination has become a new challenge in the network environment for industrial systems. This paper is concerned with the connotation and characteristics of industrial network systems, and the challenges and key issues aiming at the integration of sensing, transmission and control. We then give a brief overview of recent developments of distributed sensing, adaptive transmission and cooperative control in industrial control systems. The future research directions and potential applications of industrial network systems are also discussed at the end of this paper.

Key words Industrial network systems, distributed estimation, adaptive transmission, cooperative control, co-design

Citation Guan Xin-Ping, Chen Cai-Lian, Yang Bo, Hua Chang-Chun, Lyu Ling, Zhu Shan-Ying. Towards the integration of sensing, transmission and control for industrial network systems: challenges and recent developments. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(1): 25–36

随着信息技术的发展, 大量具备感知与执行能力的设备和终端融入工业系统, 通过信息获取、传输、处理和控制等相互作用, 构成了融合控制和信息通信的多维动态系统, 即工业网络系统. 这类系统将自动控制技术、计算机技术、通信网络技术等先进

技术进行高度融合, 通过网络实现了信息系统与工业物理过程的协同, 形成了自治的工业系统, 达到了生产的最优化、流程的最简化、效率的最大化, 对促进工业制造的数字化、网络化和智能化融合发展至关重要.

收稿日期 2018-07-12 录用日期 2018-10-21
Manuscript received July 12, 2018; accepted October 21, 2018
国家自然科学基金 (61521063, 61622307, 61731012, 61633017, 61573245, 61603251), 上海市自然科学基金 (18ZR1419900) 资助
Support by National Natural Science Foundation of China (61521063, 61622307, 61731012, 61633017, 61573245, 61603251) and Natural Science Foundation of Shanghai Municipality of China (18ZR1419900)
本文责任编辑 刘允刚
Recommended by Associate Editor LIU Yun-Gang
1. 上海交通大学自动化系 上海 200240 2. 系统控制与信息处理教育部重点实验室 上海 200240 3. 燕山大学电气工程学院 秦皇岛 066004
1. Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240 2. Key Laboratory of System Control and Information Processing, Ministry of Education of China, Shanghai 200240 3. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004

1 工业网络系统

工业网络系统集成泛在感知、适变传输、协同控制等功能为一体, 具有结构网络化、控制现场化和功能分散化等突出优点, 是实现工业信息物理系统智能化和互联化的核心.

1.1 感知—传输—控制的一体化设计

要想实现“感知—传输—控制一体化”设计, 首先应综合考虑感知、传输、控制的协同设计架构. 传统控制理论通常假设通信与信息传输是完美的, 主要考虑如何利用反馈信息达到特定的控制目标, 而通信理论则不关注传输信息的内容和用途, 主要考

虑如何将信息从源端可靠地传输到终端. 控制与通信机制的分离设计, 严重制约了网络系统整体性能的提升. 此外, 恶劣的工业环境导致了系统状态的不可观测和部分控制指令信息的丢失. 由于不完整信息将严重影响控制性能, 因此亟需研究面向工业网络系统的感知、传输、控制联合优化设计^[1-2].

网络系统的分析与设计必须满足工业系统对敏捷精确协同控制和实时可靠泛在通信的需求, 综合利用控制、通信和感知计算理论, 将控制优化理论与通信网络设计方法相结合, 形成具有自适应于系统动态和网络能力的新一代工业网络系统. 因此, 构建感知-传输-控制一体化框架, 有助于清晰地表示三者之间相辅相成、相互制约的耦合关系, 为揭示三者间的相互作用和提升工业网络系统整体性能奠定基础.

1.2 感知-传输-控制一体化面临的挑战

1) 资源受限条件下的异构终端难以融合

一方面, 复杂工业环境导致终端感知数据出现不可避免的时空偏差; 另一方面, 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监测对象的局部信息, 这些局部信息之间不仅存在差异, 甚至是矛盾的. 多终端的协作感知有利于扩展时间和空间的覆盖范围, 提高状态/参数的感知准确性. 需要指出的是, 工业环境通常需要监测大量参数, 以热轧产线为例, 监测的参数涉及环境温度、设备温度、电机状态、钢板厚度和宽度、轧制压力等, 多达百级. 部署的监测终端具有不同的测量及功能属性, 呈现出明显的异构特性. 如何刻画并统一表达异构终端下的感知模型成为关键. 另外, 监测终端一般采用电池供电, 且难以对电量进行有效补充, 能量耗尽将导致终端无法获得状态信息. 因此, 不仅需要考虑终端自身的感知、滤波、去噪等功能, 还需要考虑终端间的协作. 适应不同的终端功能、系统动态和能量有效性, 这是异构终端分布式感知的关键和难点.

2) 复杂多变的通信环境

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大量的异构通信设备共享有限的无线资源也会造成严重的同频干扰. 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^[3]. 如此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. 在实际工业应用中, 由于信息容量的限制, 网络系统的组成单元之间在单位时间内只能交换有限的信息. 频谱等通信资源的限制, 使得端到端的数据传输时延较大, 导致数据在传输过程中存在过时甚至丢失等现象. 信息论表明, 通

过增加编码长度可渐近达到香农容量, 从而提高通信可靠性, 但会增加通信时延. 不确定、不完整、过时的反馈信息给系统的稳定性及估计、控制性能造成极大影响, 进而给工业网络系统中控制指令和反馈信息的实时可靠的按需传输带来了新的挑战.

3) 网络环境下信息和控制交互耦合

随着工业生产系统向大型化和复杂化方向发展, 生产过程呈现出多子系统紧密耦合的特征, 耦合关系复杂, 非线性特征明显. 通信网络的快速发展, 使得子系统间的物质、能量以及信息流愈发频繁. 局部摄动、交互时延、链路动态等不确定性均会通过物理的耦合及网络的连接由此及彼地传播, 严重影响了系统性能. 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. 传统的控制结构和模式已经受到极大的挑战^[2]. 设计子系统间的协同机制是满足网络系统整体控制性能要求的关键. 然而, 受限于感知手段以及系统建模技术, 许多关键状态和参数不可测, 系统内和系统间的耦合信息无法精确获得, 直接影响到各子系统之间的协同策略以及各控制器的具体实现. 如何克服不确定性, 实现网络环境下协同控制成为一大难题.

2 感知-传输-控制一体化的研究

工业网络系统感知-传输-控制一体化研究的主要内容及各内容间的内在联系, 体现了感知、传输、控制三者之间相互依赖和相互制约的关系, 如图 1 所示. 本文围绕此一体化框架从以下 3 个方面展开综述: 非理想通信下异构网络分布式融合估计、面向感知和控制的自适应传输和网络环境下的复杂系统协同控制. 其中, 感知过程为控制提供信息支撑, 传输过程负责实现感知信息实时可靠的交互, 控制过程为保证系统稳定高效运行提供控制决策.

2.1 非理想通信下异构网络分布式融合估计

在感知层面, 面向控制的无线网络感知, 目的是对存在大量冗余且被噪声污染的观测量进行预处理, 以降低网络负载并提高感知的准确性与控制的稳定性. 功能有限的单个传感终端利用信息与通信技术可形成功能强大的多终端协同感知, 核心是解决信息融合估计问题. 关于一般的无线传感器网络融合估计问题, 已有的研究成果主要分为分布式的融合估计^[1]和中心式的融合估计^[4-5]两类. 分布式方法依赖终端间的协同合作, 首先要确定终端之间的信息传递的方式, 即协同策略. 现有的协同策略主要有增量式策略、扩散式策略和一致式策略, 大多假设较为理想的通信环境^[6-10].

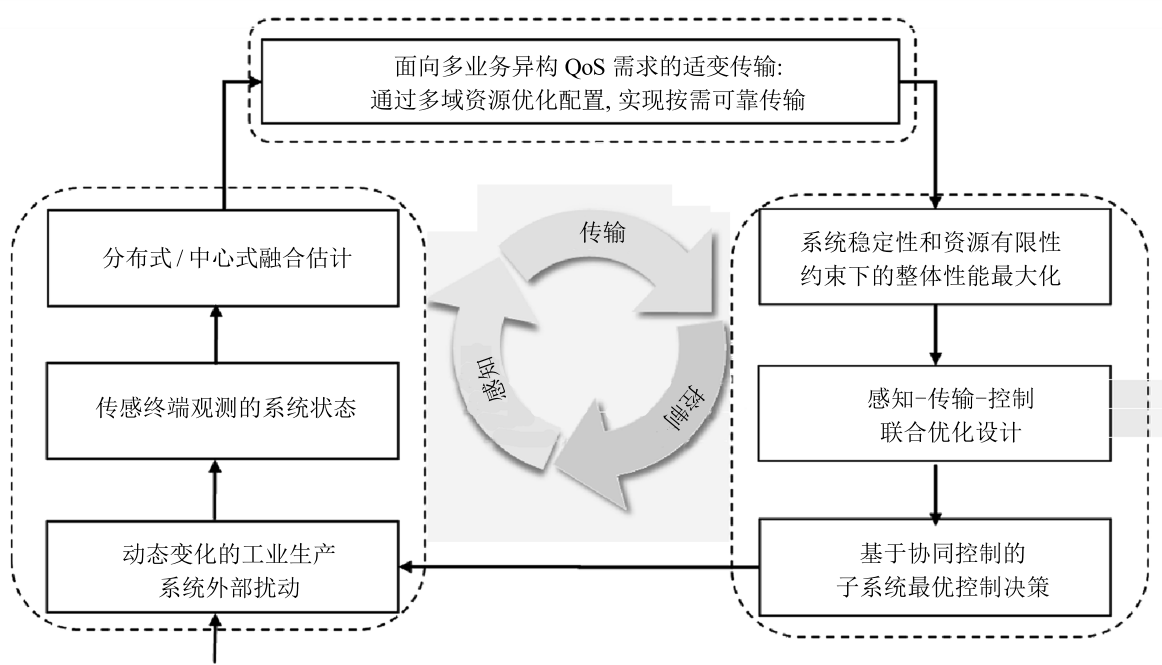


图 1 工业网络系统感知-传输-控制一体化框架

Fig. 1 Integration framework of sensing, transmission and control for industrial network systems

对于非理想通信环境下的分布式融合估计问题, 研究尚处于起步阶段. Zhao 等^[11] 研究了加性噪声信道下的自适应估计问题, 提出了扩散式的分布式估计算法, 并刻画了估计误差的稳态界. 在此文献的研究基础上, Zhang 等进一步考虑了终端间的通信存在 Markovian 随机丢包的情况, 提出了一致式的分布式估计算法, 分析了其随机收敛性及收敛速度^[12-13]. 除了无线信道的动态变化和噪声影响, 有限的通信带宽是影响网络环境下状态估计的另一个主要因素. 有效的方法是在终端处进行必要的量化和压缩. 文献中常见的量化方法有均匀量化、对数量化和随机量化^[14-15]. Xie 等^[16] 提出了基于动态量化器的扩散式融合估计算法, 并建立了算法的均方有界性和估计误差的稳态界; 文献 [17-18] 分别研究了均匀量化器和对数量化器对一致式估计算法性能的影响, 分析了算法的均方收敛性. 需要指出的是, 上述研究工作无论是均匀量化器、对数量化器还是随机量化器皆会存在稳态的量化误差, 该误差依赖于初值的选取和量化步长的选择, 无法消除. 为解决此问题, Li 等^[19] 提出了动态量化的概念, 能保证一致性估计算法的渐近收敛, 然而量化器的设计需要精细的多参数调参, 依赖全局信息, 且每个终端需配备多个解码器, 其个数依赖于网络拓扑结构, 扩展性较差. 基于上述考虑, Zhu 等^[20] 提出了基于滑动平均的一致式分布式估计算法, 该算法采用常规的随机量化器, 易于设计, 并能够有效克服量化误差的影响, 估计性能在有限步内达到并超过了中心式的

估计算法性能, 并将该结果推广到一般的加性量化模型, 建立了算法收敛的重对数律^[21]. 针对同一问题, Kar 等在文献 [22] 中将一致性策略引入到最小二乘估计算法中, 讨论了噪声、随机链路失效、量化误差等对一致式估计算法的影响, 并利用随机逼近理论研究了估计的渐近无偏性和相容性. 然而这些研究仅适用于同构网络, 即所有终端具有相同的功能属性, 无法适用于存在多类终端的工业应用场景, 且对通信环境的刻画仍过于理想, 离真实的工业应用场景尚有距离.

在异构终端建模方面, Zhu 等提出了一种终端的异构性模型^[23-24]. 一方面, 依据终端的功能差异, 建立异构感知模型. 对于未知状态 $\theta \in \mathbf{R}^J$, 感知终端 i 的量测如下:

$$\mathbf{y}_i(t) = H_i \theta + \mathbf{n}_i(t), \quad i \in \mathcal{I}_S$$

其中, $H_i \in \mathbf{R}^{J_i \times J}$ 为终端 i 的观测矩阵, $\mathbf{n}_i(t)$ 为测量噪声. 注意到测量矩阵 H_i 依终端而变化, 即感知终端具有不同的测量属性. 另外, 对任意 i , 维数 $J_i \ll J$, 即对于单个感知终端, θ 不可观. 为保证终端间协同能够实现有效估计, Zhu 等引入协同可观的概念, 即 $\sum_{i \in \mathcal{I}_S} H_i^T H_i$ 可逆.

另一方面, 引入了通信终端以增强网络连通性, 减少感知终端间的通信距离, 建立了终端的角色异构模型, 其中感知终端 $i \in \mathcal{I}_S$ 观测未知状态并进行融合估计, 通信终端 $i \in \mathcal{I}_R$ 负责数据聚合和转发.

感知终端的融合估计为

$$\mathbf{x}_i(t+1) = f(\mathbf{x}_i(t), \{\mathbf{z}_{ij}(t)\}_{j \in N(i)}, \mathbf{y}_i(t)), \quad i \in \mathcal{I}_S$$

通信终端的数据聚合为

$$\mathbf{x}_i(t) = g(\{\mathbf{z}_{ij}(t)\}_{j \in N(i)}), \quad i \in \mathcal{I}_R$$

其中, $f(\cdot)$ 表示感知终端的融合估计策略, 依赖于终端 i 当前的状态 $\mathbf{x}_i(t)$, 自身测量值 $\mathbf{y}_i(t)$ 以及邻居信息 $\{\mathbf{z}_{ij}(t)\}_{j \in N(i)}$; 注意到受通信约束的限制, 终端 i 接收到的邻居 j 的信息 $\mathbf{z}_{ij}(t)$ 并不是其状态 $\mathbf{x}_j(t)$; $g(\cdot)$ 为通信终端的聚合策略, 仅依赖于接收到的邻居信息. $f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 的具体形式依实际需求设计. 例如 $f(\cdot)$ 可取为融合“新息”更新和一致性策略的结构^[1].

$$\mathbf{x}_i(t+1) = \mathbf{x}_i(t) + \rho(t)H_i^T(\mathbf{y}_i(t) - H_i\mathbf{x}_i(t)) + \rho(t) \left(\sum_{j \in N(i)} \mathbf{z}_{ij}(t) - b_i(t)\mathbf{x}_i(t) \right), \quad i \in \mathcal{I}_S \quad (1)$$

其中, $\rho(t) > 0$ 为抑制观测及通信噪声的影响而引入, $b_i(t)$ 为补偿因子, 对通信约束进行补偿. 终端 i 接收到的邻居 j 的信息为 $\mathbf{z}_{ij}(t) = \alpha_j(t)h_{ij}(t)\mathbf{x}_j(t) + \mathbf{v}_{ij}(t)$, 这里 $\alpha_j(t)$ 为邻居 j 的放大转发系数, $h_{ij}(t)$ 为信道增益, $\mathbf{v}_{ij}(t)$ 为通信噪声. $g(\cdot)$ 取加权平均的形式.

$$\mathbf{x}_i(t) = \sum_{j \in N(i)} \mathbf{z}_{ij}(t), \quad i \in \mathcal{I}_R \quad (2)$$

综上, 终端的异构性如图 2 所示, 每个终端仅依赖邻居信息进行更新和迭代. 感知终端首先感知环境, 获得状态的观测值以及邻居终端的估计值, 进行更新, 并将更新后的估计值发送给邻居终端; 通信终端在接收到信息后, 进行聚合并广播.

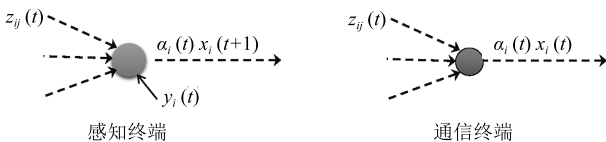


图 2 终端异构性模型示意图^[25]

Fig. 2 A schematic view of node heterogeneity^[25]

由于通信终端无进一步信息处理的能力, 导致信息的转发在多跳网络上易形成回路, 从而导致式 (2) 难以分布式求解. 为此, Zhu 等在文献 [23] 提出了代数图变换的方法, 通过“删边-赋权-分割”将通信终端的模型分析转化为具有吸收态的 Markov 链的稳态解问题, 依据网络拓扑易于实现. 进而利

用随机逼近理论分析了估计的渐近无偏性和一致性. 另外, 还设计了连续时间形式的融合估计算法, 给出了确保无偏最优估计的参数设计准则, 将误差方程统一到 Itô 随机分析的框架, 建立了随机稳定的充分条件^[24]. 在此基础上, 文献 [25] 进一步考虑了信道衰落和通信噪声等工业通信环境的影响, 提出了通信约束的补偿机制, 设计了异构网络的分布式融合估计算法, 利用随机逼近理论分析了其无偏性及一致性.

2.2 面向感知和控制的适变传输

单纯从数据传输的角度来说, 已有大量相关工作研究如何提高端到端的无线传输的可靠性, 例如 TDMA 正交传输机制和多路径传输等. 文献 [26] 提出了一种基于重传的可靠性机制, 可以实现无汇聚节点的端到端数据包可靠传输. 考虑到单跳网络的长传输距离会导致传输信号的严重路径损耗, Marina 等^[27] 基于寻找多跳无环链路分离的多路径, 提出按需要的路由选择算法. 文献 [28–29] 进一步考虑多路径选择中的节点能量、占空比及节点缓存等因素, 分别提出了基于多目标和全局位置信息的路由选择算法. 文献 [30] 考虑到冗余路由在提高端到端信息传输可靠性方面的优势, 提出了最小化系统代价并提高可靠性的多目标冗余分配问题, 并将此问题转化成模糊非线性规划问题进行求解. 从工业应用角度考虑, 现有多路径方案大多要求实时收集网络信息或依赖于全局位置信息的获取. 另外, 缺乏对数据转发过程引发的传输时延增大等问题的考虑, 具有较大的局限性.

面向感知和控制的可靠传输机制设计应聚焦通过无线网络资源优化与调度来提高信息传输的可靠性、降低节点通信能耗、提高网络资源利用率, 为保证资源动态情况下的感知和控制性能奠定基础.

现有的网络系统的控制/估计主要关注网络信道不确定诱导的数据丢包和通信时延等的影响. 文献 [31–35] 将信道的不确定性建模成随机丢包过程. 为刻画随机丢包对估计性能的影响, 通常采用误差协方差矩阵的平均有界性作为系统稳定性的衡量指标. 对于单个感知终端将量测经不可靠信道传输到远端融合中心的估计问题, Sinopoli 等^[36] 证明了 Kalman 滤波器是最小均方误差估计, 并理论证明了存在临界丢包概率 λ_c , 只要丢包概率小于 λ_c , 即可保证估计误差协方差阵平均有界. 随后, 大量的研究工作都集中于如何精确刻画 λ_c 的值^[37]. 文献 [38] 对这方面的研究进行了综述.

对于工业网络系统的传输来说, 更关心的是如何降低 λ_c , 提高传输的可靠性, 保证感知和控制性能. 由于频谱资源和终端能力是制约控制性能提升

的两大主要因素, 在这方面, 已经有一些相关的研究. 针对带宽受限、频谱稀缺导致的信息丢失问题, 文献 [39] 借助认知无线电技术获取更多的频谱资源, 通过增加带宽, 提高感知数据的传输可靠性, 进而提升网络环境下的估计准确性. 文献 [40] 考虑到发射设备能量受限的问题, 提出采用能量获取技术补充终端的能量, 同时结合剩余能量和估计性能进行动态的功率调节, 在保证估计算法收敛的条件下, 最小化整个网络的能耗. Leong 等^[41] 针对长传输距离和大路径损耗导致的信息丢失问题, 引入通信终端, 利用通信终端的聚合和转发功能, 减少感知终端与远端融合中心的通信距离, 进而降低无线信道衰落对估计性能的影响, 同时提高感知终端的寿命. 在此基础上, Cheng 等^[42] 进一步将其拓展到多跳的情形, 研究了面向状态估计的多跳数据包转发机制, 通过合理的路由设计, 使得端到端的传输时延满足状态估计的稳定性需求.

然而, 现有文献主要是聚焦于如何通过设计控制器来保证控制性能. 仅有少量工作在控制器设计的同时考虑通信网络调度和设计等. 为了降低对通信资源的需求, 通常采用增大控制间隔、采样间隔或采取机会式传输调度方法. 具体地, Cao 等^[43] 提出了一种基于模拟退火算法的在线优化策略, 通过优化控制间隔来提高通信网络约束下的控制性能; 文献 [44] 模块化地设计了控制回路的采样时间, 针对该采样时间触发的控制系统, 设计了 deadline 约束的多跳数据包传输协议, 进一步提升了控制系统性能. 文献 [45] 通过机会式调度控制指令数据包的传输, 在保证控制性能的基础上, 减少了数据包的传输数量, 从根本上减少了对通信网络的资源需求. Knorn 等^[46] 考虑到工业复杂环境下终端通常难以更换电池, 借助能量获取技术来降低有限的电池能量对控制性能的约束, 并通过自适应地功率分配, 降低可用能量的动态性对数据传输的可靠性影响, 以提高控制性能.

对于网络控制系统, Schenato 等^[47] 指出, 控制系统的性能不仅依赖于控制器设计, 同时还严重受制于通信网络及外部的通信环境. 对于工业网络系统, 这一论断同样成立, 而且更为严峻, 有以下三方面原因. 1) 工业现场中的感知数据具有多优先级、频谱资源有限、节点能量有限等特殊特性. 2) 面对复杂多变的工业现场环境, 无线传输技术需要引入适应性和智能化, 以解决有限频谱、能量与动态异构需求之间的矛盾. 3) 工业网络系统具有显著的多业务异构 QoS (Quality of service) 需求特征, 例如, 过程自动化过程数据的传输时效性一般为毫秒级到秒级, 需要很高的传输实时性和可靠性, 为其分配较高的优先级; 而设备环境监测数据的时效性相对要长,

一般在秒级或分钟级以上, 具有较低的优先级. 面向此类系统的传输机制尚未形成清晰的研究思路及解决方案, 更遑论面向感知和控制的传输机制. 这需要对控制器和通信机制进行联合设计.

Lyu 等^[48] 通过主动调度有限网络资源以从传输上解决影响控制/估计性能的外部网络环境, 提出了基于改进 Kalman 滤波的收敛性分析方法, 构建了无偏估计收敛性与传感器观测数据的映射关系.

$$\min_{i \in S} \Pr(r_i(k) = 1) > \frac{\xi_1(k-1) - \varepsilon}{\xi_2(k-1)} \quad (3)$$

其中, $\Pr(r_i(k) = 1)$ 表示感知终端 i 的成功传输概率, $\xi_1(k-1)$ 和 $\xi_2(k-1)$ 与 $k-1$ 时刻的估计误差相关. 式 (3) 给出了存在观测信息丢失情况下状态估计收敛的必要条件. 基于此, 文献 [48] 利用认知无线电技术, 研究了面向工业系统状态感知的传输机制. 对于多优先级数据共存的问题, 为监测系统状态的感知终端分配冗余的无线资源, 设计了多信道多优先级传输策略, 以保证状态估计的收敛性. 与此同时, 对设备健康监测终端, 进行时隙、频谱、功率多域资源联合优化和按需传输调度, 实现了降低数据包冲突概率, 达到减少传输时延、提高数据传输率和资源利用率的目的.

2.3 网络环境下的复杂系统协同控制

从控制层面来讲, 基于无线网络感知与适变传输的工业网络系统协同控制, 其目的是利用系统终端设备获取的测量信息, 综合感知设备运行的复杂环境、受限硬件资源、信息传输时滞、系统交互耦合等因素, 针对具有大规模、高复杂、多耦合特性的工业网络系统, 设计具有整体优化特性的多子系统协同控制器, 实现不同空间多子系统的稳定运行, 使得系统整体性能得以高效提升.

图 3 是一个典型的工业网络系统耦合模型, 具有子系统内级联连接, 子系统间关联耦合的特点. 对于此类系统的控制研究, 已有的研究成果主要分为集中控制^[49] 和分散控制^[50-51] 两大类.

集中控制对所有子系统进行统一的控制和管理, 主要有调用返回模型 (Call-return model) 和管理者模型 (Manager model) 两类. Tan 等^[49] 采用模型预测控制方法, 提出一种在输电网中协调不同的分布式电源逆变器并行操作的集中控制方案, 进而实现输电网整体的能源管理. 对于单个级联子系统的集中控制, 采用感知信息, 实现系统的镇定, 其关键问题是克服时滞和不确定性对控制器设计造成的影响. 上世纪 80 年代末提出的反演递推 (Backstepping) 方法被认为是级联系统反馈控制最有效的方法之一. 然而直接将反演递推方法用于非线性时滞系统, 设

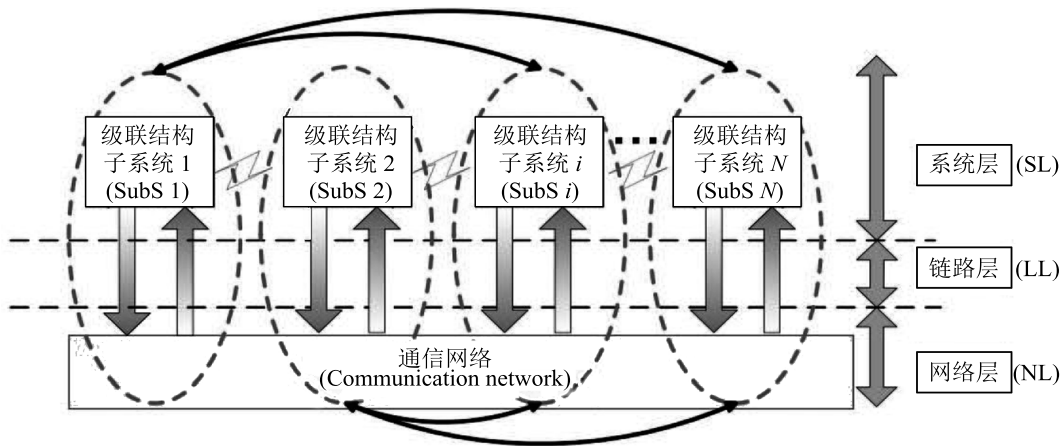


图 3 网络环境下复杂系统协同控制

Fig. 3 A schematic view of cooperative control of complex systems in network environments

计控制器, 容易陷入循环迭代错误. 有鉴于此, 文献 [52] 基于可测信息重构不可感知信息, 进而基于重构的系统状态信息, 提出了补偿反演递推策略, 为虚拟控制输入变量引入补偿因子, 避免了循环迭代问题. 文献 [53] 利用 Razumikhin 引理, 实现对非线性和多状态时滞的整体处理, 具有更强的泛化能力和鲁棒性.

相比于集中控制, 分散控制只需要自身子系统的状态信息, 不需要全局子系统信息^[54]. 对于大规模系统来说, 这极大地降低了对通信的需求. 但另一方面, 由于只能利用自身子系统信息, 采用分散控制方法设计控制器时, 必须考虑网络耦合关系和结构特征. 如何设计与结构特性相匹配的控制策略至关重要. 这方面已经有很多研究成果^[50]. 文献 [55–56] 将系统的不确定性界融入到控制器设计中, 实现了时滞关联系统的指数镇定. 上述研究成果大多假设系统的耦合呈现线性或部分线性的形式, 而且系统的状态完全可知.

非线性特征明显、信息与控制的交互耦合等特征使得网络系统的分散控制极为困难. 仅有较少的研究成果. 文献 [57] 针对关联系统中存在的非线性耦合和不匹配非线性扰动, 通过引入虚拟耦合将可用信息分离出来, 设计分散输出反馈控制器, 实现对非线性关联系统的渐近镇定. Hua 等^[58] 基于级联—关联的分解思想, 提出了级联递推和关联分散的协同设计方法. 1) 为每个子系统设计分散级联观测器来重构不可感知的状态. 针对观测器和误差系统构成的复合系统, 设计冗余的虚拟控制, 从而有效克服了网络耦合时滞和非线性关联的影响. 2) 针对子系统间关联项未知的情形, 利用自适应方法在线辨识, 学习网络关联特征, 进而给出了网络系统分散控制器设计策略, 实现多关联节点的分散协同控制. 该方法将计算复杂度由 $O(Nn_i)$ 降为 $O(n_i)$, 其中 N 为

网络系统中所有子系统的个数, n_i 为第 i 个子系统的维数, 大大简化了控制器设计. 近年来, 关联系统的未建模、执行器控制方向未知、随机扰动、状态不可测、强耦合等问题均得到了较好解决^[51, 59].

主从遥操作系统是一类控制与信息紧密交互耦合的典型网络系统, 如图 4 所示. 主端子系统将控制信息经通信网络传输给从端, 从端子系统操作被控对象并将力反馈等信息通过网络回传给主端. 主从系统最主要的性能是稳定性和透明性, 即从端对主端的位置轨迹精确跟踪, 主端通过从端得到工作环境中力的精确反馈. 对传输同步要求高的主从网络系统, 不对称时延和时延抖动是影响其性能的核心因素.

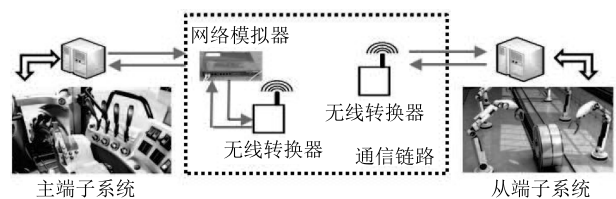


图 4 主从遥操作系统

Fig. 4 A master-slave teleoperation system

波变换方法是研究主从遥操作系统的一类重要方法, 基本思想是将主从端的速度信息与力信息适当叠加后进行传输, 基于散射原理来克服网络时滞的影响^[60]. 但是波变换理论严格要求网络时延为对称且定常, 这对于实际网络系统很难实现. 文献 [61–62] 跳出波变换的框架, 对于时变时滞情形, 设计了比例—微分 (PD) 型控制器, 并建立了系统稳定性的条件、时滞上界与控制器参数的关系. 但文献 [61] 仅适用于控制器参数为标量的情形. Hua 和 Liu 设计了 PD 控制和直接力反馈控制两种模式, 确定了保证位置跟踪精度的前向和反向传输时滞的上界,

同时提升了同步性能和透明性能^[62]. 为了消除位置跟踪偏差, Tian 等^[63] 提出了一种基于能量监测器的切换信道主从控制. 该方法采用能量监测器来判定主从端是由人操作还是与环境接触, 进而决定是否关闭力通道. 通过信道的切换, 有效提高了位置跟踪精度与力觉临场感. 除了上述单主-单从的结构, 亦有许多工作研究了单主-多从和多主-多从结构的遥操作协同控制. 特别地, 文献 [64] 研究了单主-多从且从端有网络连接的网络遥操作控制问题, 针对网络时滞和执行器饱和的限制, 设计了分布式控制器, 实现了多从端子系统的编队控制, 并建立了系统的吸引域. 上述研究作为网络环境下复杂系统的协同控制奠定了良好的基础.

2.4 感知-通信-控制联合设计

关于联合设计方面的研究尚处于襁褓之中. 对于感知-通信-控制一体化设计, 本文做了初步探索, 所提出的工业网络系统的分层架构如图 5 所示. 工业网络系统中感知终端的计算和通信能力有限, 直接将感知数据传送到融合中心将消耗大量的能量和频谱资源, 大量的数据同时传输会导致严重的冲突和碰撞, 进一步恶化信息交互的可靠性和实时性. 针对此问题, 提出在工业网络系统中部署边缘估计终端, 负责对原始感知数据的预处理和信息转发. 基于边缘计算的中心式的融合估计, 一方面可以减少感知终端的通信开销, 另一方面可以去除冗余信息, 提高资源有效性, 有利于进一步提升异构传感网的协同感知能力.

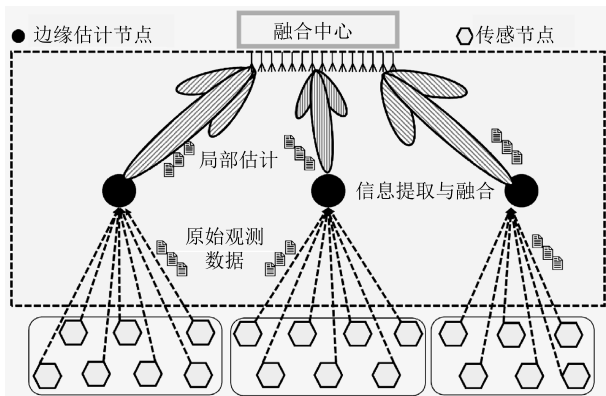


图 5 工业网路系统的分层架构
Fig. 5 A hierarchical architecture for industrial network systems

由于感知终端的感知范围有限且相邻终端的感知信息的相关性较高, 根据地理位置将所有终端进行分簇, 并且为每个簇部署一个边缘估计终端. 所有边缘估计终端构成中间层, 利用边缘计算技术对接收到的原始感知数据进行信息提取与融合, 以去除

冗余信息, 提高感知精度. 随后, 边缘估计终端将局部估计值传递到融合中心.

文献 [65] 提出了工业无线环境下信息传输与状态估计的联合设计架构, 设计了能够自适应于网络资源调度方案的高效估计算法, 降低了网络诱导因素对估计收敛性与准确性的影响. 同时, 综合考虑多传感器间通信资源的相互竞争以及信息传输可靠性与估计性能的内在联系, 提出了一种能够折衷估计准确性和资源有效性的多目标协同优化方法. 不仅保证了无线控制系统中估计的收敛性和资源分配的公平性, 同时可提高状态估计的准确性和频谱-能量的有效性, 提升了系统整体性能和资源利用率.

文献 [66-67] 针对通信-控制联合设计问题, 深入分析工业无线网络中带宽受限、传输速率、时延等网络诱导限制因素对控制性能的影响, 以最小化工业网络系统的感知-传输-控制总代价为目标, 开展资源受限的自适应网络资源调度与 LQR (Linear quadratic regulator) 控制律联合设计的研究.

考虑到传输调度策略和有限的无线资源对估计和控制性能的影响, 本文定义了函数 $\mathcal{F}_{w,k}(p_{w,m}(k), a_{w,m}(k), h_{w,m}(k))$ 来表示信息传输的可靠性. 由此可见, 信息传输的可靠性由终端发射功率、传输信道增益以及信道数目决定. 信息传输可靠性直接影响控制律的设计, 进而影响控制的稳定性, 最终将影响整体系统的运行代价. 考虑到控制律的设计不会对传输调度的制定产生影响, 以及估计性能只依赖于传输调度策略, 因此, 将控制律与传输调度分离设计, 估计算法与控制律分离设计. 对于初始状态误差有限且估计误差协方差收敛的系统, 有限时域的最优控制律是标准的 LQR 控制器, 即每个子系统的最优的控制律为 $u_w(k) = K(k)\tilde{x}_w(k|k)$, 其中增益可根据 LQR 控制计算.

基于 LQR 的控制代价函数为

$$J = \sum_{k=1}^{N-1} J_w(k)$$

其中,

$$J_w(k) = \tilde{x}_w^T(k|k)\tilde{x}_w(k|k) + u_w^T(k|k)u_w(k|k)$$

且 $\tilde{x}_w(k|k)$ 为远端收到的子系统 w 的状态估计值. 由于各个子系统的状态估计值通过不可靠的无线信道传输到远端控制中心, 为此定义传输可靠性的指示变量 $\gamma_{w,m}(k) \in \{0, 1\}$, 其概率记为 $\Pr\{\gamma_{w,m}(k) = 1\} = \eta_{w,m}(k)$. 因此, 基于上文设计的可靠传输调度, 远端控制中心收到的估计值为 $\tilde{x}_w(k|k)$, 其估计误差方差矩阵为 $P_w(k|k)$. 由于随机丢包的存在, 导致估计误差协方差阵中包含随机变量, 用期望误差进行代替, 得到最优控制律为 $u_w(k)$. 进而, 将无冲

突通信约束下的估计、控制以及传输的总代价最小化问题描述如下:

$$\min \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{w=1}^W E \{ J_w(k) \} + \text{tr} (E \{ P_w(k|k) \}) + \Delta T \sum_{m=1}^M p_{w,m}(k)$$

s.t. C1: $\sum_{w=1}^W a_{w,m}(k) \leq 1$

C2: $\sum_{m=1}^M a_{w,m}(k) p_{w,m}(k) \leq p_0$

C3: $\prod_{m \in I_M^1} [\eta_{m,w}(k)]^{a_{w,m}(k)} \times \prod_{m \in I_M^0} [\zeta_m \eta_{m,w}(k)]^{a_{w,m}(k)} \geq 1 - \frac{1}{\lambda_{\max}^2(A)}$

C4: $a_{w,m}(k) \in \{0, 1\}$

C5: $p_{w,m}(k) \geq 0$

式中, C1: 为保证无冲突传输, 在每个时隙一信道只能分配给一个簇头用于传输; C2: 在所有被信道

上的发射功率总和不能超过其最大功率; C3: 在估计信息存在连续丢包的情况下, 保证系统稳定的条件. 如果系统不存在连续丢包, 那么此条件可以移除; C4: 信道分配指示变量为 0-1 整数; C5: 终端的发射功率为正数.

由于此优化问题的目标函数为非线性函数在有限时域内的时间累积代价总和, 限制为非凸的, 且优化变量存在整数, 因此该问题为混合整数非线性规划问题. 对于时间累积问题来说, 需要利用非因果的未来信息来求全局最优解, 计算复杂度很大, 因此可以利用动态规划技术将多时隙优化问题转化为一列单时隙优化问题, 利用各时隙之间的关系, 逐个进行求解. 对于某个时隙的子问题来说, 采用子问题分解迭代求解法和半定规划的分块坐标下降法近似求解算法获取次优解^[66].

2.5 工业网络系统一体化设计在热轧流程中的应用

本节以热轧工艺过程为例, 分析热轧工艺发展对工业网络系统一体化设计的需求, 并简述已有的部分成果.

热轧流程由多道工艺过程组成, 按工序一般可划分为五个部分: 加热区、粗轧区、精轧区、冷却区和卷取区, 如图 6 所示, 将坯料依次经过不同工艺设

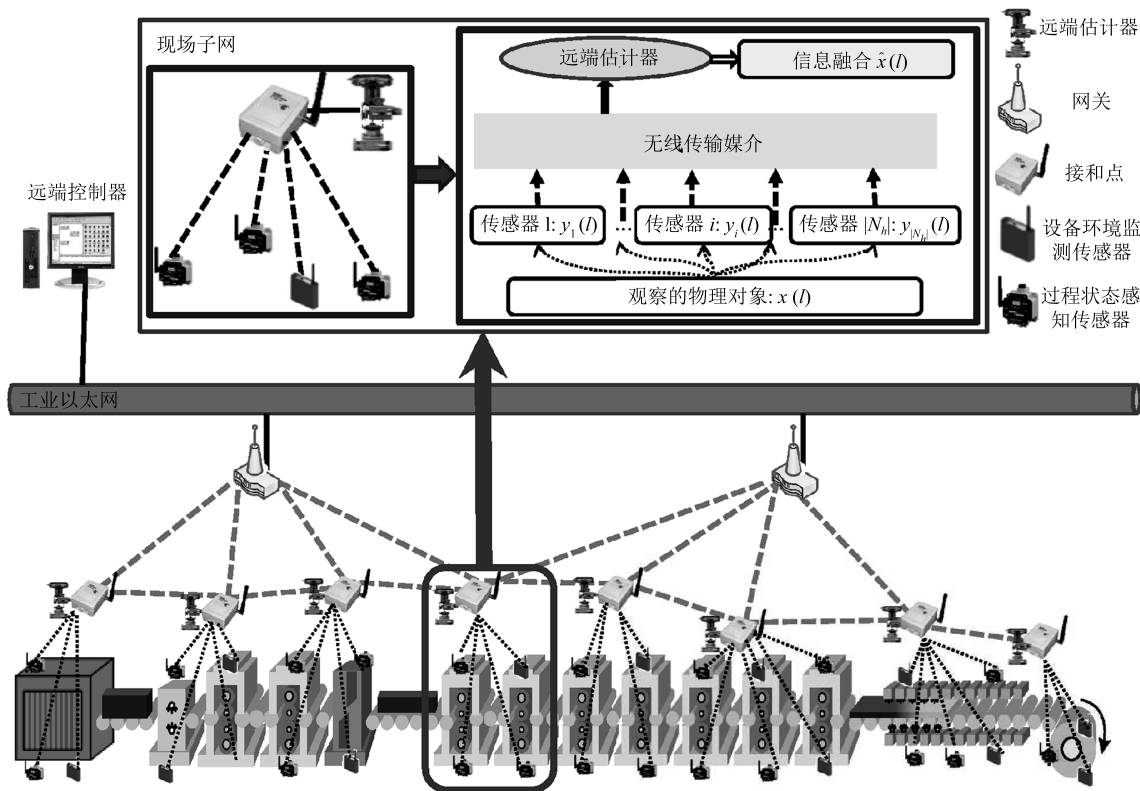


图 6 工业网络系统在热轧流程中的应用

Fig. 6 Application of industrial network systems to hot rolling process

备的加工处理,最后形成符合规格要求的成品. 热轧流程有严格的工序要求,而且工艺过程复杂度高且工业生产线的布置、工艺设备的空间物理位置设置和工序的衔接等都是精心设计的. 由此可见,热轧生产过程是一个典型的级联-关联耦合的复杂物理系统. 通过部署大量的传感器来获取更多过程数据,实现对轧制过程轧件温度等参数的全生命周期管理,提高产品力学性能和组织性能的预报水平,以适应钢铁生产中小批量、高质量的轧制需求,提高轧制工业信息化水平,改善热轧生产控制,保障生产安全. 为提高轧制水平,需要实现从感知、传输到控制的一体化设计,以感知支撑控制,以传输保证数据的可靠实时到达,以控制实现对系统的优化决策.

在感知层面, Zhu 等^[68] 从网络层面探究了分布式融合估计对网络拓扑的要求,基于网络覆盖度、网络连通性以及估计性能要求,提出了网络部署及拓扑优化的新方法,为热轧流程监控的网络部署提供了必要的理论指导. 对于中间的路由层, Xue 等^[69] 针对工业现场存在电磁干扰等恶劣通信环境,提出了实时路由策略 TREE,保证了热轧生产线的感知信息实时可靠地传输,进而有效地解决了无线网络在工业应用中的挑战,使得无线技术适合工业领域并为实际应用做好了准备^[70]. 在此基础上, Chen 等^[71] 首次将基于树的广播策略与分布式信息融合分散式一致性估计相结合,并将融合估计算法应用于热轧产线的钢板温度的估计及跟踪问题,提升了异构网络的估计有效性和准确性,进而实现了对钢板温度的精确估计和连续跟踪.

3 结论与展望

随着控制科学、通信科学、计算科学的快速发展,交叉学科不断取得新的进展,工业网络系统也将得到长足发展. 新的感知-传输-控制一体化范式会不断涌现,协同优化控制的方法和实现方式也会越来越丰富,应用范围将不断扩大. 可以预见,通过网络控制系统各个环节的优化与协调来实现工业系统的优化控制将成为一个重要的研究方向,而且工业网络系统在生产过程智能化和信息化中将发挥越来越重要的作用.

本文最后提出一些重要但尚待解决的问题及未来值得深入探索的研究方向.

1) 在感知层面,已有部分研究成果提出了网络感知模型,为分布式估计过程和信息交互过程建立了统一架构. 但是,随着信息技术的不断发展,网络系统中控制与信息的交互耦合特征变得格外显著,而且信息的获取与传输往往会在多种网络中跨网交互和传输,导致其与控制层面的耦合将变得更加复杂. 因此,估计算法中“新息”更新与信息交互的依

赖关系尚未得到广泛的研究.

2) 在传输层面,感知信息与控制指令的传输性能随着无线环境的动态变化而变化,给时延约束下的可靠传输带来巨大的考验. 面对工业复杂环境下,如何利用有限的资源为网络控制系统提供实时可靠的信息交互尚未得到充分解决.

3) 在控制层面,控制对象的性质与结构随网络规模的扩展而发生变化,对反馈控制提出新的挑战. 面对新的耦合特征,横向级联、纵向关联的结构分解模式需要协同考虑控制器设计复杂度与结构分解方式的关系. 将对象的控制需求与面向控制的信息感知和传输相结合,进行联合设计和优化是非常具有挑战性的研究方向,目前部分研究工作仅仅做了初步的研究,尚需进一步深化.

References

- 1 Chen C L, Zhu S Y, Guan X P, Shen X M. *Wireless Sensor Networks: Distributed Consensus Estimation*. Berlin, Germany: Springer, 2014.
- 2 Murray R M. *Control in an Information Rich World: Report of the Panel on Future Directions in Control, Dynamics, and Systems*. Philadelphia, PA, USA: SIAM, 2003.
- 3 Stenumgaard P, Chilo J, Ferrer-Coll J, Angskog P. Challenges and conditions for wireless machine-to-machine communications in industrial environments. *IEEE Communications Magazine*, 2013, **51**(6): 187-192
- 4 Kay S M. *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 1993.
- 5 Ribeiro A, Schizas I D, Roulmeliotis S I, Giannakis G B. Kalman filtering in wireless sensor networks. *IEEE Control Systems Magazine*, 2010, **30**(2): 66-86
- 6 Xiao L, Boyd S, Lall S. A scheme for robust distributed sensor fusion based on average consensus. In: *Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*. Boise, ID, USA: IEEE, 2005. 63-70
- 7 Schizas I D, Ribeiro A, Giannakis G B. Consensus in Ad Hoc WSNs with noisy links, Part I: distributed estimation of deterministic signals. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, **56**(1): 350-364
- 8 Speranzon A, Fischione C, Johansson K H, Sangiovanni-Vincentelli A. A distributed minimum variance estimator for sensor networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, **26**(4): 609-621
- 9 Barbarossa S, Sardellitti S, Di Lorenzo P. Distributed detection and estimation in wireless sensor networks. *Academic Press Library in Signal Processing: Communications and Radar Signal Processing*. New York, USA: Elsevier, 2014. 329-408
- 10 Cattivelli F S, Sayed A H. Diffusion LMS strategies for distributed estimation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, **58**(3): 1035-1048

- 11 Zhao X C, Tu S Y, Sayed A H. Diffusion adaptation over networks under imperfect information exchange and non-stationary data. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, **60**(7): 3460–3475
- 12 Zhang Q, Zhang J F. Distributed parameter estimation over unreliable networks with Markovian switching topologies. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, **57**(10): 2545–2560
- 13 Zhang Qiang. Distributed estimation and control of multi-agent systems in uncertain environment. *Scientia Sinica Mathematica*, 2013, **43**(6): 529–540
(张强. 不确定环境下多自主体系统的分布式估计与控制. 中国科学: 数学, 2013, **43**(6): 529–540)
- 14 Fu M Y, Xie L H. The sector bound approach to quantized feedback control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, **50**(11): 1698–1711
- 15 Xiao J J, Cui S G, Luo Z Q, Goldsmith A J. Power scheduling of universal decentralized estimation in sensor networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, **54**(2): 413–422
- 16 Xie S L, Li H R. Distributed LMS estimation over networks with quantised communications. *International Journal of Control*, 2013, **86**(3): 478–492
- 17 El Chamie M, Liu J, Başar T. Design and analysis of distributed averaging with quantized communication. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, **61**(12): 3870–3884
- 18 Liu S, Li T, Xie L H, Fu M Y, Zhang J F. Continuous-time and sampled-data-based average consensus with logarithmic quantizers. *Automatica*, 2013, **49**(11): 3329–3336
- 19 Li T, Fu M Y, Xie L H, Zhang J F. Distributed consensus with limited communication data rate. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, **56**(2): 279–292
- 20 Zhu S Y, Soh Y C, Xie L H. Distributed parameter estimation with quantized communication via running average. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, **63**(17): 4634–4646
- 21 Zhu S Y, Liu S, Soh Y C, Xie L H. Performance analysis of averaging based distributed estimation algorithm with additive quantization model. *Automatica*, 2017, **80**: 95–101
- 22 Kar S, Moura J M F, Ramanan K. Distributed parameter estimation in sensor networks: nonlinear observation models and imperfect communication. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2012, **58**(6): 3575–3605
- 23 Zhu S Y, Chen C L, Ma X L, Yang B, Guan X P. Consensus based estimation over relay assisted sensor networks for situation monitoring. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2015, **9**(2): 278–291
- 24 Zhu S Y, Chen C L, Li W S, Yang B, Guan X P. Distributed optimal consensus filter for target tracking in heterogeneous sensor networks. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2013, **43**(6): 1963–1976
- 25 Zhu S Y, Soh Y C, Xie L H. Distributed inference for relay-assisted sensor networks with intermittent measurements over fading channels. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, **64**(3): 742–756
- 26 Ali S, Fakoorian A, Taheri H. Optimum Reed-Solomon erasure coding in fault tolerant sensor networks. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Wireless Communication Systems. Trondheim, Norway: IEEE, 2007. 6–10
- 27 Marina M K, Das S R. Ad hoc on-demand multipath distance vector routing. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2006, **6**(7): 969–988
- 28 Villaverde B C, Rea S, Pesch D. InRoute: a QoS aware route selection algorithm for industrial wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 2012, **10**(3): 458–478
- 29 Heo J, Hong J M, Cho Y. EARQ: energy aware routing for real-time and reliable communication in wireless industrial sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2009, **5**(1): 3–11
- 30 Liu Y H, Zhu Y M, Ni L, Xue G T. A reliability-oriented transmission service in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2011, **22**(12): 2100–2107
- 31 Shi L, Epstein M, Nurray R M. Kalman filtering over a packet-dropping network: a probabilistic perspective. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2010, **55**(3): 594–604
- 32 You K Y, Fu M Y, Xie L H. Mean square stability for Kalman filtering with Markovian packet losses. *Automatica*, 2011, **47**(12): 2647–2657
- 33 Quevedo D E, Ahlen A, Johansson K H. State estimation over sensor networks with correlated wireless fading channels. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, **58**(3): 581–593
- 34 Xia M, Gupta V, Antsaklis P J. Networked state estimation over a shared communication medium. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, **62**(4): 1729–1741
- 35 Mamduhi M H, Molin A, Tolić D, Hirche S. Error-dependent data scheduling in resource-aware multi-loop networked control systems. *Automatica*, 2017, **81**: 209–216
- 36 Sinopoli B, Schenato L, Franceschetti M, Poolla K, Jordan M I, Sastry S S. Kalman filtering with intermittent observations. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, **49**(9): 1453–1464
- 37 Kluge S, Reif K, Brokate M. Stochastic stability of the extended Kalman filter with intermittent observations. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2010, **55**(2): 514–518
- 38 You Ke-You, Xie Li-Hua. Survey of recent progress in networked control systems. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(2): 101–118
(游科友, 谢立华. 网络控制系统的最新研究综述. 自动化学报, 2013, **39**(2): 101–118)

- 39 Cao X H, Cheng P, Chen J M, Ge S S, Cheng Y, Sun Y X. Cognitive radio based state estimation in cyber-physical systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, **32**(3): 489–502
- 40 Calvo-Fullana M, Antón-Haro C, Matamoros J, Ribeiro A. Random access communication for wireless control systems with energy harvesting sensors. arXiv: 1801.10141, 2018.
- 41 Leong A, Quevedo D E. Kalman filtering with relays over wireless fading channels. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, **61**(6): 1643–1648
- 42 Cheng P, Qi Y F, Xin K F, Chen J M, Xie L H. Energy-efficient data forwarding for state estimation in multi-hop wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, **61**(5): 1322–1327
- 43 Cao X H, Cheng P, Chen J M, Sun Y X. An online optimization approach for control and communication codesign in networked cyber-physical systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, **9**(1): 439–450
- 44 Demirel B, Zou Z H, Soldati P, Johansson M. Modular design of jointly optimal controllers and forwarding policies for wireless control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2014, **59**(12): 3252–3265
- 45 Gatsis K, Pajic M, Ribeiro A, Pappas G J. Opportunistic control over shared wireless channels. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015, **60**(12): 3140–3155
- 46 Knorn S, Dey S. Optimal energy allocation for linear control with packet loss under energy harvesting constraints. *Automatica*, 2017, **77**: 259–267
- 47 Schenato L, Sinopoli B, Franceschetti M, Poolla K, Sastri S S. Foundations of control and estimation over lossy networks. *Proceedings of the IEEE*, 2007, **95**(1): 163–187
- 48 Lyu L, Chen C L, Hua C Q, Guan X P. State estimation oriented reliability enhancement with cooperative transmission in industrial CPSs. In: Proceedings of the 2016 IEEE Global Communications Conference. Washington, DC, USA: IEEE, 2016. 1–6
- 49 Tan K T, Peng X Y, So P L, Chu Y C, Chen M Z Q. Centralized control for parallel operation of distributed generation inverters in microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, **3**(4): 1977–1987
- 50 Bakule L. Decentralized control: an overview. *Annual Reviews in Control*, 2008, **32**(1): 87–98
- 51 Hua C C, Zhang L L, Guan X P. *Robust Control for Nonlinear Time-Delay Systems*. Singapore, Singapore: Springer, 2018.
- 52 Hua C C, Guan X P, Shi P. Robust backstepping control for a class of time delayed systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, **50**(6): 894–899
- 53 Hua C C, Feng G, Guan X P. Robust controller design of a class of nonlinear time delay systems via backstepping method. *Automatica*, 2008, **44**: 567–573
- 54 Šiljak D D. *Decentralized Control of Complex Systems*. Boston, USA: Academic Press, 1991.
- 55 Mahmoud M S, Bingulac S. Robust design of stabilizing controllers for interconnected time-delay systems. *Automatica*, 1998, **34**(6): 795–800
- 56 Xie S L, Xie L H. Stabilization of a class of uncertain large-scale stochastic systems with time delays. *Automatica*, 2000, **36**(1): 161–167
- 57 Yan X G, Spurgeon S K, Edwards C. Decentralised stabilisation for nonlinear time delay interconnected systems using static output feedback. *Automatica*, 2013, **49**(2): 633–641
- 58 Hua C C, Guan X P. Output feedback stabilization for time-delay nonlinear interconnected systems using neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2008, **19**(4): 673–688
- 59 Zhou J. Decentralized adaptive control for large-scale time-delay systems with dead-zone input. *Automatica*, 2008, **44**(7): 1790–1799
- 60 Niemeyer G, Slotine J J E. Stable adaptive teleoperation. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1991, **16**(1): 152–162
- 61 Nuño E, Ortega R, Barabanov N, Basañez L. A globally stable PD controller for bilateral teleoperators. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, **24**(3): 753–758
- 62 Hua C C, Liu X P. Delay-dependent stability criteria of teleoperation systems with asymmetric time-varying delays. *IEEE Transactions on Robotics*, 2010, **26**(5): 925–932
- 63 Tian D P, Yashiro D, Ohnishi K. Wireless haptic communication under varying delay by switching-channel bilateral control with energy monitor. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, **17**(3): 488–498
- 64 Yan J, Wan Y, Luo X Y, Chen C L, Hua C C, Guan X P. Formation control of teleoperating cyber-physical system with time delay and actuator saturation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2018, **26**(4): 1458–1467
- 65 Lyu L, Chen C L, Yan J, Lin F L, Hua C Q, Guan X P. State estimation oriented wireless transmission for ubiquitous monitoring in industrial cyber-physical systems. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 2016, DOI: 10.1109/tetc.2016.2573719
- 66 Lyu L, Chen C L, Zhu S Y, Guan X P. 5G enabled codesign of energy-efficient transmission and estimation for industrial IoT systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, **14**(6): 2690–2704
- 67 Lyu L, Chen C L, Hua C Q, Zhu S Y, Guan X P. Co-design of stabilisation and transmission scheduling for wireless control systems. *IET Control Theory and Applications*, 2017, **11**(11): 1767–1778

- 68 Zhu S Y, Chen C L, Guan X P. Sensor deployment for distributed estimation in heterogeneous wireless sensor networks. *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, 2012, **16**(4): 297–322
- 69 Xue L, Guan X P, Liu Z X, Yang B. TREE: routing strategy with guarantee of QoS for industrial wireless sensor networks. *International Journal of Communication Systems*, 2014, **27**(3): 459–481
- 70 Barnwal R P, Bharti S, Misra S, Obaidat M S. UCGNet: wireless sensor network-based active aquifer contamination monitoring and control system for underground coal gasification. *International Journal of Communication Systems*, 2017, **30**(1): e2852
- 71 Chen C L, Yan J, Lu N, Wang Y Y, Yang X, Guan X P. Ubiquitous monitoring for industrial cyber-physical systems over relay-assisted wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 2015, **3**(3): 352–362



关新平 IEEE/CAA Fellow. 上海交通大学讲席教授, 系统控制与信息处理教育部重点实验室主任. 国家杰出青年基金获得者, 教育部长江学者特聘教授. 1999 年获哈尔滨工业大学博士学位. 主要研究方向为工业网络系统设计, 控制与优化, 智能工厂中无线网络及应用.
E-mail: xpguan@sjtu.edu.cn

(**GUAN Xin-Ping** IEEE/CAA Fellow, Chair Professor of Shanghai Jiao Tong University, Director of the Key Laboratory of System Control and Information Processing, Ministry of Education of China, Shanghai Jiao Tong University, China. He is a winner of the National Science Fund for Distinguished Young Scholars, “Changjiang Scholar” by the Ministry of Education of China. He received the Ph. D. degree in electrical engineering from the Harbin Institute of Technology, in 1999. His current research interest covers the design, control and optimization in industrial network systems, wireless networking and applications in smart factory.)



陈彩莲 上海交通大学自动化系教授, 国家优秀青年科学基金获得者, 教育部青年长江学者. 主要研究方向为无线传感器网络和工业应用, 计算智能, 分布式状态感知. 本文通信作者.
E-mail: cailianchen@sjtu.edu.cn

(**CHEN Cai-Lian** Professor in the Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University. She is a winner of the National Outstanding Youth Science Foundation, and Changjiang Young Scholar of Ministry of Education. Her research interest covers wireless sensor networks and industrial appli-

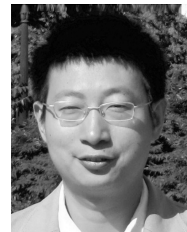
cations, computational intelligence, and distributed situation awareness. Corresponding author of this paper.)



杨博 上海交通大学自动化系教授. 主要研究方向为能源网络和无线网络的博弈论分析和优化.

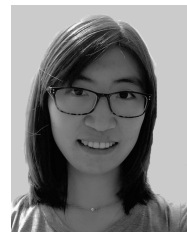
E-mail: bo.yang@sjtu.edu.cn

(**YANG Bo** Professor in the Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University. His research interest covers game theoretical analysis and optimization of energy networks and wireless networks.)



华长春 燕山大学电气工程学院教授, 长江学者特聘教授. 主要研究方向网络化控制系统的分析与综合, 基于数据驱动的故障诊断和容错控制, 网络化遥操作系统的控制. E-mail: cch@ysu.edu.cn

(**HUA Chang-Chun** Professor at the School of Electrical Engineering, Yanshan University. He is a “Changjiang Scholar” by the Ministry of Education of China. His research interest covers analysis and synthesis of networked control systems, data-driven fault diagnosis and fault-tolerant control, and networked teleoperation control.)



吕玲 上海交通大学自动化系博士研究生. 主要研究方向为无线传感器-执行器网络中可靠传输, 融合估计, 协调控制及在工业网络的应用.

E-mail: sjtulvling@sjtu.edu.cn

(**LYU Ling** Ph. D. candidate in the Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University. Her research interest covers reliable transmission, fusion estimation, coordination control in wireless sensor and actuator networks, and their applications in industrial networks.)



朱善迎 上海交通大学自动化系副教授. 主要研究方向为多机器人系统协调控制, 无线网络的分布式估计和优化及在工业网络的应用.

E-mail: shyzhu@sjtu.edu.cn

(**ZHU Shan-Ying** Associate professor in the Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University. His research interest covers coordination control of mobile robots and distributed estimation and optimization in wireless networks, and their applications in industrial network.)