

智能工厂的感知、通信与控制

Co-Design of Sensing, Communication and Control for the Smart Factory

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 05-0061-006

摘要: 认为信息化和工业化的深度融合是未来工业化的必然趋势, 基于感知、通信、控制相融合的工业网络系统有利于推动全局统筹调度、过程运行优化和系统反馈控制等的实现, 为建立高品质、低能耗、个性化、小批量生产的智能工厂奠定基础。同时, 还提出了一种基于工业网络系统的智能工厂架构, 指出了传统工厂面临的挑战, 以及实现智能工厂亟需解决的关键问题。

关键词: 智能工厂; 工业网络系统; 感知通信控制一体化设计

Abstract: Deeply integration of informatization and industrialization is an inevitable trend of future industrialization. The industrial network based on combining sensing, communications and control is beneficial for global scheduling, process optimization and feedback control. In this way, the high-product-quality, low-energy-consumption and small-batch-production smart factories foundation can be built. Moreover, an architecture of smart factory is proposed, the challenges of traditional factories and the key issues in realizing the smart factory are analyzed.

Keywords: smart factory; industrial network systems; co-design of sensing, communication and control

关新平 / GUAN Xinping
吕玲 / LYU Ling
杨博 / YANG Bo

(上海交通大学, 上海 200240)
(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai
200240, China)

广泛利用工业自动化、智能设备、大数据等, 形成具有自感知、自调节、自执行等“知识自动化”功能的新一代智能系统: 通过工业网络系统实现生产的跨层协同与跨域集成, 通过面向服务制造的工业软件实现柔性生产, 通过工业大数据分析实现产业链的上下互动, 通过工业系统安全标准保证可管、可控与可信。

制造业是国民经济的主体, 是立国之本、兴国之器、强国之基。改革开放以来, 中国制造业持续快速发展, 建成了门类齐全、独立完整的产业体系, 有力推动工业化和现代化进程, 显著增强综合国力, 支撑世界大国地位。然而, 与世界先进水平相比, 中国制造业仍然大而不强, 在自主创新能力、资源利用效率、产业结构水平、信息化程度、质量效益等方面差距明显, 转型升级和跨越发展的任务紧迫而艰巨。在新环境下, 中国政府立足于国际产业变革大势, 全面提升中国制造业发展质量和水平。国务院发布《中国制造 2025》, 明确提出通过政府引导、资源整合, 实施国

家制造业创新中心建设、智能制造、工业强基、绿色制造、高端装备创新 5 项重大工程, 实现长期制约制造业发展的关键共性技术突破, 提升中国工业企业的整体竞争力。

近年来, 日趋激烈的市场竞争迫使工业企业由过去的单纯追求大型化、高速化、连续化, 转向注重提高产品质量, 降低生产成本, 减少资源消耗和环境污染, 可持续发展的道路上来。面对制造模式的逐步转型升级, 智能工厂本质上是利用计算机技术、通信技术、网络技术、自动控制技术、人机交互和虚拟现实等先进技术, 融合智能装备/设备, 形成高度协同的生产系统(含实时监测控制系统、自动化流程管理、环境监测与管理等系统), 达到生产的最优化、流程的最简化和效率的最大化。其主要特征为

1 智能工厂发展面临的机遇和挑战

以信息技术和自动化技术为核心的智能工厂发展战略是提高中国工业竞争力的必然选择。信息技术作为智能工厂的关键, 已经成为信息化推动工业化发展的代表性技术, 是国际技术竞争的焦点和科技的制高点。随着信息通信技术的不断发展, 成本低、易部署、可移动的无线设备已被广泛应用于工业现场监测控制, 如基于传感器、控制器、执行器等构成的智能生产系统。在智能化工厂车间中, 感知设备可布置在一些不易人为监测和管理的环境中, 实现监测控制与预警操作, 并能在紧急情况下实现无人监测控制的应急处理, 避免工业设备的大规模级联失效等故

收稿日期: 2016-07-25
网络出版日期: 2017-07-05

障。此外,智能设备的感知信息通过有线/无线异构通信网络传输到远端控制中心,控制中心将网络空间的高级计算能力有效运用于现实世界中,从而可对与生产、设计、开发有关的所有数据进行统一分析,实现生产资源、人力资源和经济资源的合理分配,并对工厂中各物理实体进行实时高效地调整和控制,提高工程监管的效率。

然而,目前企业的工厂仍处在批量化、低收益、高能耗的传统工业模式,因此要在现有基础上实现智能工厂面临着巨大挑战,其中较为显著且至关重要的三大挑战如下。

挑战1:数据采集器功能单一、数目稀少、采集参数少,难以满足个性化、小批量生产对多维丰富数据的要求。随着人们消费理念与偏好的升级,追求消费的个性化已经成为现实与趋势,消费者不再满足现有制造业所能够提供的标准化产品,这些传统标准化产品的用户满意度越来越低,个性化、小批量定制生产已成为未来制造业发展趋势。由于全流程中影响产品质量的参数众多且动态变化,需要部署更多数目、更多种类以获取更多参数信息数据的采集,实现对物理世界的泛在感知。因此,智能工厂必须具备多类大量的智能感知设备,以快速获取生产全流程的全面数据,并基于数据分析实现生产目标的自我调整,自动驱动生产加工,保持产品品质,最后生产出个性化产品。

挑战2:现有有线网络覆盖范围有限、可扩展性较差、可承载业务量与种类有限,难以为智能工厂中大量不同应用提供满意的服务质量。随着无线通信技术的快速发展,无线通信和网络技术被引入了工业控制领域;但在许多工业领域,由于安全性、效率、费用等,无线网络不太可能取代目前已经得到广泛应用的各种有线网络。因此,有线/无线异构工业网络已成为工业监测控制领域的一个新兴热点,推动了传统工厂向智能

工厂发展,降低了智能工厂全面监测的建设和维护成本。在有线、无线异构,多种网络并存的工业网络系统中,通过利用软件定义网络技术对并存的多个网络进行统一管理,同时设计建立工业网络多协议转换体系,实现有线/无线异构网络与系统的融合,既保留了有线通信的高安全性与可靠性,也充分利用工业无线技术为多类工业应用提供满意的服务,以实现按需高效地获取众多在线监测的重要工业过程参数,并以此为基础实施优化控制定制生产,达到提高产品质量,提高能源效率,完成个性化柔性生产的目标。

挑战3:企业管理与生产排程、工序分配相分离,难以满足智能工厂对柔性生产智能按需控制的需求。智能工厂自动化系统已由集散控制系统演进到计算、通信与控制融合的时代,探索智能工厂从控制域到管理域的垂直集成实现技术新模式,研发智能工厂制造执行系统与运营管理平台,实现工厂的智能生产与智能管理。由于智能工厂的子系统众多,智能工厂中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,传统工厂的控制管理系统已不能够提供满意的控制性。通过设计可重构软件架构来提高系统的可扩展性,以促进制造过程系统设计、控制与优化工业软件。通过开发可编程智能控制器实现可编程分布式自主逻辑控制,以实现智能控制器与系统的开发。与此同时,工业网络系统的性能好坏既取决于控制器执行控制算法,也与系统参数、控制命令等数据的感知精度与传输质量有关,因此控制算法设计与感知策略、通信协议是相互依赖、相互影响的,单纯优化任意一个并不能满足工业网络系统的整体性能要求。因此,感知通信控制一体化设计对于提高智能工厂性能至关重要。

虽然实现智能工厂面临着巨大挑战,但是智能工厂的发展却是势在必行、亟需推进的。

与此同时,各国针对如何实现智能工厂也采取众多举措。德国的工业4.0充分利用信息通信技术和网络空间虚拟系统、信息物理系统相结合的手段,推动制造业向智能化转型,将实体物理世界与虚拟网络世界融合、产品全生命周期、全制造流程数字化以及基于信息通信技术的模块集成,形成一种高度灵活、个性化、数字化的产品与服务新生产模式。美国的互联网以及信息通信技术巨头与传统制造业领导厂商携手推出工业互联网概念,GE、思科、IBM、AT&T、英特尔等80多家企业成立了工业互联网联盟。通过制定通用标准,利用网络和数据的力量,打破技术壁垒,提升整个工业的价值创造能力,更好地促进物理世界和数字世界的融合。2016年3月,德国工业4.0平台和美国工业互联网联盟双方达成共识,形成了初始映射图,以显示两种架构之间的直接关系;制定了未来确保互操作性的一个清晰路线图,以及工业互联网中标准化、架构和业务成果方面的合作。

中国将智能制造定位于国家战略高度。2015年国务院出台了《中国制造2025》,明确提出通过政府引导、整合资源,实施国家制造业创新中心建设、智能制造、工业强基、绿色制造、高端装备创新5项重大工程,实现长期制约制造业发展的关键共性技术突破,提升中国工业企业的整体竞争力。中国共产党第十六次代表大会(以下简称16大)报告明确指出:“实现工业化仍然是中国现代化进程中艰巨的历史性任务。信息化是中国加快实现工业化和现代化的必然选择。坚持以信息化带动工业化,以工业化促进信息化,走出一条科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源优势得到充分发挥的新型工业化路子”。中国共产党第十七次代表大会(以下简称17大)报告也明确指出:“加强能源资源节约和生态环境,增强可持续发

展能力”，“发展现代化产业体系，大力推进信息化与工业化融合，促进工业由大变强，振兴装备制造业，淘汰落后生产能力”。

2 面向智能工厂的感知传输控制一体化设计

目前工厂的管理与运行大多以工程师为主体，当市场需求和生产工况发生频繁变化时，以人工操作为主体的生产计划、调度和工艺技术等部门不能及时、准确地调整相应的指标，导致产品质量下降，生产效率降低和能耗增加，从而无法实现企业综合生产指标的优化控制。因此，面向未来智能工厂，研究基于感知传输控制一体化的工业网络系统，以实现智能工厂从控制域到管理域的垂直集成，实现工厂的智能生产与智能管理，对提高工业产值、个性化生产至关重要。智能工厂的工业网络系统架构主要分为3层：现场设备层，网关层，传感器云层^[1]。

现场设备层主要是实现对工况的泛在感知。其主要目的是通过利用异构大量的智能感知设备以快速全面地获取生产加工过程中的数据，并对获取到的数据进行分析，实现对产品全生命周期信息的全面掌控。

网关层面主要是建立现场设备与网关之间的双向连接并完成数据通信。其主要目的是通过软件定义网络技术对有线无线并存的多个网络进行统一管理，为多类工业应用提供满意的服务，实现按需高效获取众多在线监测的重要工业过程参数。

传感器云层面主要是将各类应用需求与网关层面的服务质量需求相匹配，并生成控制指令。其主要目的是根据用户个性化需求，智能地做出生产决策，并将其转化为底层系统相应的控制指令，促进实现个性化、小批量、低能耗、高收益的生产目标。

2.1 感知

数据是所有智能的源头，因此数

据获取是实现工业网络系统的第1步。在工业网络系统中，传感设备收集物理单元运行状态信息，并且将其通过实时通信网络传送到计算单元，实现智能控制。在此过程中，数据获取性能受到传感设备硬件、通信资源、时变传输环境影响，最终导致某个或某些获取不到数据或者获取到的数据收到严重污染。因此，需要对获取到的数据进行分析，可使用基于信息稀疏性的重构技术与基于部分可观测信息的状态估计技术，尽可能地提取原始数据携带的信息，完成最终的物理单元感知过程。

针对状态问题，我们前期工作着眼于如何提高工业网络系统状态感知的准确性与一致性^[2-6]。在复杂恶劣的工业环境中，机器马达和设备运转时产生的噪声会干扰传感器节点的正确感知，使得其感知性能和感知数据存在较大误差，且分布在不同位置的节点获取的数据往往存在较大差异，单一节点感知数据不准确、节点间信息不一致等现象明显。针对工业过程监测控制的需求，将大量、多类传感器根据不同工艺过程进行密集部署，以获取更丰富、更准确的生产运行状态信息。同时，将底层现场子网、中间层 Mesh 骨干网和顶层工业以太网的无线/有线异构网络相互融合，形成新一代的混合网络架构，实现对现有工业有线网络的补充与改进。此分布式/集中式混合架构可以保证感知信息的准确性、一致性、完备性，因此基于有线/无线异构网络的混合式信息感知是实现泛在感知的关键。

考虑感知设备涉及两类传感器节点，其中第1类节点为主节点，其全体记为 I_S ；第2类节点为中继节点，其全体记为 I_R 。每个主节点获得测量值 $y_{i,w}(k)$ ，每个中继节点只负责为主节点转发数据，并无感知能力。一般将网络抽象为图，从图论的角度来刻画网络拓扑，然后根据节点间的距离来确定邻居集合，邻居节点

间相互交换信息，实现分布式协同估计，最终达到一致。将节点的通信网络建模为一个无向图 $G=(V,E)$ ，其中 $V=I_S \cup I_R$ 为所有节点的全体， $E \subset V \times V$ 为节点间所有通信链接的集合。在节点 i 的通信半径 κ 范围之内的所有节点为节点 i 的邻居，记为 N_i ， $N_i = \{j \in V: d_{ij} \leq \kappa\}, \forall i \in V$ 。在滤波器的演化过程中，主节点首先感知环境，获得状态的观测值以及邻居节点的估计值，并根据这些信息去更新自己的估计值，如公式(1)所示。

$$x_{i,w}(k) = \phi_{i,w} [y_{i,w}(k) - x_{i,w}(k)] + \varphi_{i,w} x_{i,w}(k) + \sum_{j \in N_i} \sigma_{ij}^w [X_{j,w} \{s_{ij}(k)\} - x_{i,w}(k)], i \in I_S \quad (1)$$

然后，主节点将更新后的估计值发送给其邻居节点。中继节点在接收到信息后，根据公式(2)将信息加权处理后广播出去。

$$x_{i,w}(k) = \sum_{j \in N_i} \vartheta_{ij}^w x_{j,w}(k) + \vartheta_{ij}^w x_{i,w}(k), i \in I_R \quad (2)$$

其中， $\phi_{i,w}$ 和 $\varphi_{i,w}$ 为常数， σ_{ij}^w 与传感器发射功率与邻居间具有有关， $\vartheta_{ij}^w \geq 0, \sum_{j \in N_i} \vartheta_{ij}^w = 1, \forall i \in I_R$ 。在上述过程中，节点间的通信仅限于邻居节点之间，故公式(1)和公式(2)是分布式的，且能够很好地消除单一节点感知不准确对物理单元状态感知性能的影响。

2.2 通信

针对工业网络系统大规模、异构、高实时、高可靠及可重构需求，研究工业网络系统一体化网络架构，以解决工业网络泛在互联、可靠传输和即插即用的问题。为了攻克工业以太网与低速现场总线、工业无线网络的互联共存技术，研究制造装备垂直集成和水平集成的互操作标准技术体系与架构。并在此架构下，研究基于软件定义的可重构工业控制网络，以攻克基于软件定义的流程交换技术，管理和控制业务混合传输模式下的

实时调度技术、网络自动重构技术。基于上述研究的架构,设计多网间跨域跨层合作通信协议,保证数据传输的实时性、可靠性、可扩展性。

针对可靠传输问题,我们前期部分工作着眼于如何提高工业无线网络信息传输可靠性^[7-9]。工业无线传输过程涉及电磁频谱异常拥挤,频谱资源受限,通信设备能量受限,多信道接入、传输冲突、传输时延大等问题,为了实现在恶劣工业环境下可靠的通信,有必要构建一个保障服务质量的、实时的、可靠的和自适应的通信协议,特别是无线通信协议,以保障信息物理系统中数据的高可靠性传输^[9]。现有的 WirelessHART、ISA100.11a 和 WIA-PA 工业无线标准协议都基于时分多址(TDMA)技术,进行确定性的、可控的数据传输调度以保证数据的时效性与可靠性。越来越多的无线设备和网络,已经对有限的频谱资源形成巨大压力,然而当非授权无线频谱资源越来越拥挤和不足时,部分已被分配的固定用户使用频段却没有得到充分的利用,降低频谱资源利用率。为减少频谱资源浪费,认知无线电技术被提出并逐渐兴起,它使无线设备具有认知功能,能主动感知周围环境的可用频谱,并在其空闲时加以利用,实现频谱动态分配,极大地提高频谱利用率,解决

频谱资源紧张的问题,受到学术界和工业界的极大关注,被认为是通信领域未来发展的关键技术之一^[10-11]。因此可以借助认知无线电技术扩展网络的可用频谱,通过设计高效可靠的信息传输协议实现感知信息的可靠传输,这对工业网络系统的控制性能至关重要。

另外,在智能工厂中部署多类传感器节点,感知不同参数,各类节点根据信息重要性的不同,具有不同的传输优先等级。过程数据的传输时效一般为毫秒级到秒级,需要很高的传输实时性和可靠性;而设备环境监测数据的时效性相对要长很多,一般在秒级以上。因此,自动化过程数据就要求比设备环境监测数据具有更高的优先等级,如何设计满足智能工厂多优先级异构数据收集和传输对于整个工控系统安全高效的运行至关重要。针对此问题,我们前期工作将异构多优先级数据抽象建模成不同的传输优先等级,然后设计一个优先级协调器,指定当高优先级的节点在指定的时隙没有数据传输的时候,低优先级节点才能进行数据传输。如图1所示,以一个3类优先级节点和2个信道的场景为例,说明此多信道多优先级传输机制。此机制首先为3类优先级节点分别设计了多信道超帧,由3个不同颜色深度的超帧表示。

通过这种 TDMA 多信道传输规划,在相同的优先等级的节点之间不会发生冲突,冲突只可能发生在不同传输优先级的节点之间。由于3个超帧是分离设计的,都完全利用了超帧中的所有信道和时隙资源,因而每个时隙都同时分配给了不同优先等级的节点。为了解决这种可能的冲突,进而设计了优先级传输控制机制,通过引入一个优先级指示标识来协调各节点按照预设的优先级进行数据传输。通过这种方式,低优先级的节点只能机会式地传输。因此,需要引入一个优先级指示标识,以便对节点的优先级进行声明和辨识,进而利用此指示标识完成多优先级数据传输控制,协调不同优先级的节点在来各个时隙和信道上进行数据传输。

2.3 控制

智能工厂自动化系统已由集散控制系统演进到计算、通信与控制融合的时代,其智能化体现在:具有高效、灵活、可扩展与可重构功能的控制管理系统;具有自主、安全、稳定与分布式控制功能的现场控制器;具有实时、可靠、鲁棒与自适应性能的控制算法等各个层面。

工业控制管理系统需要具有高效、灵活、可扩展与可重构功能。面向未来智能工厂,探索智能工厂从控

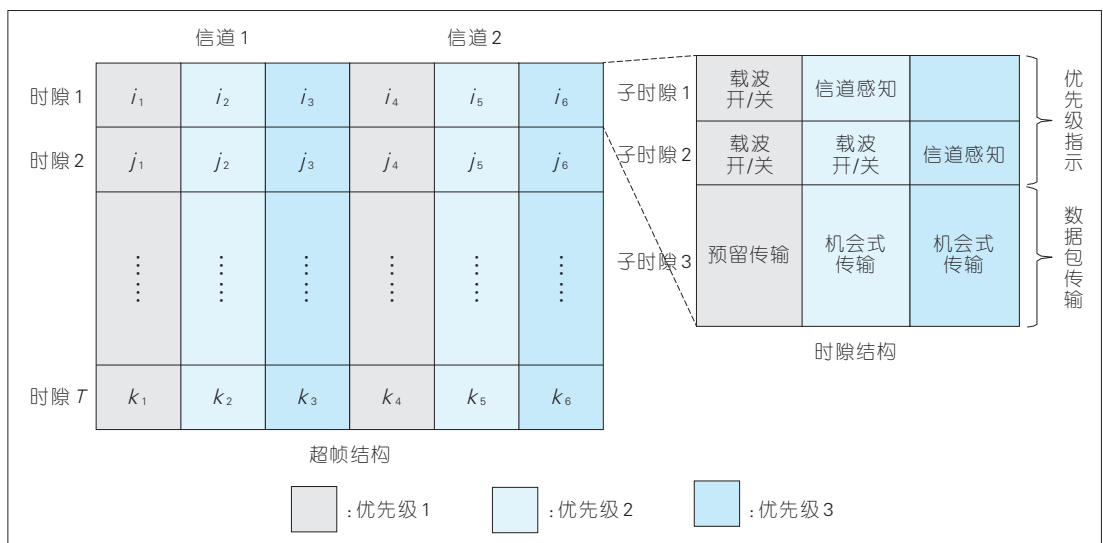


图1 多信道多优先级调度机制

制域到管理域的垂直集成,实现技术新模式,研发制造过程系统设计、控制与优化工业软件,研发智能工厂制造执行系统与运营管理平台,实现工厂的智能生产与智能管理。由于智能工厂的子系统众多,智能工厂中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,传统工厂的控制管理系统已不能够提供满意控制性,需要设计可重构软件架构来提高系统的可扩展性,建立工业网络多协议转换体系以实现有线/无线异构网络与系统的融合。分布式结构为自动化系统提供了高度的灵活性与高效协作的可能性,基于IEC61499标准的分布式工业自动化软件设计范式采用面向服务的软件架构,建立基于时间与事件混合驱动的计算模式,实现高效、灵活、可扩充与可重构的工业分布式软件架构。完整分布式自动化系统的软件模型中应包含控制软件、工业系统物理信息模型以及通信模型。因此建模语言可以表示为 $M(t)=(S,P,C)$,其中 S 代表控制软件模型, P 代表系统物理仿真模型, C 代表通信协议模型。考虑到分布式自动化系统的复杂性、多样性等特点,以及用户体验,可在IEC61499标准的基础上,根据分布式自动化系统特点,实现对控制、仿真与通信进行抽象化建模,使得各类不同设备可以根据自身的性能从协议中选择支持的指令,实现可扩充、可重构的分布式自动控制软件系统。

现场控制器需要具有实时、自主、分布式以及模块化控制能力。面向智能工厂大规模分布式控制需求进行理念创新,研发智能控制器与系统,实现分布式逻辑控制和运动控制的功能整合,开发先进可编程智能控制器,实现可编程分布式自主逻辑控制,以及分布式实时可靠控制。从嵌入式硬件层面,进行面向分布式集群控制的工业控制器模块化架构设计,采用PC104总线架构,基于复杂可编程逻辑器件(CPLD)的软件可编程逻辑

辑控制器(PLC)输入/输出模块、模块化控制扩展模块以及Can、Ethernet、EtherCat等通信模块,实现面向运动控制、过程控制、时序控制的混合控制架构;从嵌入式软件层面,通过研究软件PLC模块的关键技术,提升大规模多任务分布式控制模式下实时操作系统的响应能力;从上位机软件层面,基于组态编码的数字量和条件解析技术,实现分布式信息交互的逻辑控制。

控制算法需要具有实时、可靠、鲁棒的控制性能。智能工厂中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、相互影响的关系,单纯优化任意一个并不能满足工业网络系统的整体性设计要求,因此控制与通信一体化设计对于工业网络系统性能优化至关重要。在有线/无线多网共存且异构的通信环境中,有线网络带宽相对较低,无线网络存在信道时变、衰落严重、噪音干扰等多种不利因素,导致工业网络系统的网络环境具有极大的动态性、不确定性。加之可用通信网络资源有限,携带控制命令的数据包在通信网络中可能遭受较大的传输时延,即使此控制命令在决策时十分准确,但是因为其时延过大,到达物理单元时已经过时,因此物理单元将认为此控制命令是无效的。另外,如果动态的网络环境导致此控制命令丢失,那么物理单元将无控制命令可执行,因此需要考虑丢包、时延等网络诱导因素对控制性能影响。在这样的网络环境下,实时、可靠、鲁棒控制的技术难点在于有限的网络资源导致部分感知信息丢失,无线资源调度直接控制器的稳定性,使得基于传统控制系统以及状态估计理论的设计与分析方法难以直接应用到基于无线技术的工业网络系统控制器的设计。因此,在网络资源受限的情况下,实时、可靠、鲁棒的控制面临新的挑战,直接决定智能工厂中的工业系统是否能够安全、稳

定、高效地运行。然而,目前基于控制与通信联合设计的网络系统性能优化在国际上仍处于探索阶段,尚不具备一套完整的理论与设计方法,有必要深入地研究。关于感知、传输、控制一体化设计研究刚刚起步^[12-16],可将分布式状态估计、基于估计的控制以及无线网络资源进行优化联合设计,构建能够表征工业信息系统的总代价函数,包括估计代价、控制代价以及通信代价。与此同时,还需要满足无冲突可靠传输、最大发射功率限制、可用无线资源约束等要求。

3 结束语

在未来的智能工厂中,智能现场设备的感知信息通过多网并存的有线/无线异构通信网络传输到远端控制中心,控制中心运用高级计算能力对与生产、设计、开发有关的所有数据进行统一分析与决策。基于工业网络系统的智能工厂架构主要分为三大层面:现场设备层面主要是实现对工况的泛在感知;网关层面主要是建立现场设备与网关之间的双向连接并完成数据通信;传感器云层面主要是将各类应用需求与网关层面的服务质量需求相匹配,并生成控制指令。面向未来智能工厂,研究基于感知通信控制一体化的工业网络系统有利于推动全局统筹调度、过程运行优化和系统反馈控制等;有利于促进实现智能工厂从控制域到管理域的垂直集成;有利于提高产品质量,降低生产能耗,实现个性化小批量生产;有利于推进智能工厂的建成。

参考文献

- [1] HU P. A System Architecture for Software-Defined Industrial Internet of Things[C]//IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband. IEEE, 2016:1-5. DOI: 10.1109/ICUWB.2015.7324414
- [2] CHEN C, ZHU S, GUAN X, et al. Wireless Sensor Networks: Distributed Consensus Estimation[M]. New York:Springer, 2014.
- [3] CHEN C, YAN J, LU N, et al. Ubiquitous Monitoring for Industrial Cyber-Physical Systems Over Relay-Assisted Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing, 2015, 3(3): 352-362. DOI: 10.1109/TETC.2014.2386615

- [4] ZHU S, XIE L, CHEN C, et al. Collective Behavior of Mobile Agents with State-Dependent Interactions [J]. Automatica, 2015, 51:394-401. DOI: 10.1016/j.automatica.2014.10.064
- [5] ZHU S, CHEN C, MA X, et al. Consensus Based Estimation Over Relay Assisted Sensor Networks for Situation Monitoring[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2015, 9(2):278-291. DOI: 10.1109/JSTSP.2014.2375851
- [6] ZHU S, CHEN C, LI W, et al. Distributed Optimal Consensus Filter For Target Tracking in Heterogeneous Sensor Networks[J]. IEEE Trans Cybern, 2013, 43(6):1963-1976. DOI: 10.1109/TSMCB.2012.2236647
- [7] LIN F, CHEN C, ZHANG N, et al. Autonomous Channel Switching: Towards Efficient Spectrum Sharing for Industrial Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(2):231-243. DOI: 10.1109/JIOT.2015.2490544
- [8] LIN F, CHEN C, XU Q, et al. A Separate Design Principle for Priority-Aware Packet Collection in Industrial Cyber-Physical Systems[J]. Eurasip Journal on Wireless Communications & Networking, 2016, 2016(1):1-14. DOI: 10.1186/s13638-016-0572-x
- [9] LIU Y, ZHU Y, NI L, et al. A Reliability-Oriented Transmission Service in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2011, 22(12): 2100-2107. DOI: 10.1109/TPDS.2011.113
- [10] LYU L, CHEN C, YAN J, et al. State Estimation Oriented Wireless Transmission for Ubiquitous Monitoring in Industrial Cyber-Physical Systems[J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing, 2016, (99):1-1. DOI: 10.1109/TETC.2016.2573719
- [11] AZARFAR A, FRIGON J F, SANJO B. Improving the Reliability of Wireless Networks Using Cognitive Radios[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2011, 14(2):338-354. DOI: 10.1109/SURV.2011.021111.00064
- [12] GATSIS K, RIBEIRO A, PAPPAS G J. Optimal Power Management in Wireless Control Systems[C]//American Control Conference. USA:IEEE, 2013:1562-1569. DOI: 10.1109/ACC.2013.6580058
- [13] GASIS K, PAJIC M, RIBEIRO A, et al. Opportunistic Control Over Shared Wireless Channels[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60(12):3140-3155. DOI: 10.1109/TAC.2015.2416922
- [14] LI H, WU C, SHI P, et al. Control of Nonlinear Networked Systems With Packet Dropouts: Interval Type-2 Fuzzy Model-Based Approach.[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2015, 45(11):2378. DOI: 10.1109/TCYB.2014.2371814
- [15] ZHANG L, GAO H, KAYNAK O. Network-Induced Constraints in Networked Control Systems—A Survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 9(1):403-416. DOI: 10.1109/TII.2012.2219540
- [16] YANG R, LIU G P, SHI P, et al. Predictive Output Feedback Control for Networked Control Systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(1):512-520. DOI: 10.1109/TIE.2013.2248339

作者简介



关新平, 上海交通大学讲席教授、博士生导师;研究方向为工业网络系统设计、控制与优化等;国家杰出青年基金获得者, 教育部长江学者特聘教授, 已主持“973”课题、国家自然科学基金重点项目、上海市科委重大项目等30余项, 曾获“国家自然科学基金一等奖”2项, 2008年获“IEEE模糊系统汇刊杰出论文奖”;已出版专著4部, 发表SCI论文130余篇。



吕玲, 上海交通大学自动化系在读博士研究生;研究方向为工业网络系统中控制和通信联合设计、网络环境下的控制与估计、可靠的无线通信协议设计、多域通信资源的优化分配等;已发表论文6篇。



杨博, 上海交通大学自动化系教授、博士生导师;研究方向为无线网络资源分配、网络安全、智能电网等;已发表论文100余篇。