

# 无线化工业控制系统: 架构、关键技术及应用

于海斌<sup>1,2,3,4</sup> 曾鹏<sup>1,2,3</sup> 梁炜<sup>1,2,3</sup> 王忠锋<sup>1,2,3</sup> 刘阳<sup>1,2,3</sup> 许驰<sup>1,2,3</sup>

**摘要** 大型生产设施的安全与能效监控, 迫切需要低功耗、高精度的泛在感知, 高实时、高可靠的无线传输以及动态灵活的生产管控. 为此, 本文首先提出一种扁平架构的无线化工业控制系统. 然后, 围绕感知、传输和控制等核心功能需求, 系统阐述了高实时高可靠的工业无线网络设计及其时-空-频三元联合调控方法, 感知终端的变周期精益采样和高能效精准时间同步方法, 以及管控平台的语义化互操作和赋时 workflow 模型等核心关键技术. 最后, 研发了面向石油高效采收和电网全域安全监测的无线化工业控制系统, 介绍了应用效果和成效.

**关键词** 工业控制系统, 工业无线网络, 管控平台, 现场测控仪表, 安全, 能效

**引用格式** 于海斌, 曾鹏, 梁炜, 王忠锋, 刘阳, 许驰. 无线化工业控制系统: 架构、关键技术及应用. 自动化学报, 2023, 49(3): 540-549

**DOI** 10.16383/j.aas.c220571

## Wireless Industrial Control System: Architecture, Key Technologies and Applications

YU Hai-Bin<sup>1,2,3,4</sup> ZENG Peng<sup>1,2,3</sup> LIANG Wei<sup>1,2,3</sup> WANG Zhong-Feng<sup>1,2,3</sup> LIU Yang<sup>1,2,3</sup> XU Chi<sup>1,2,3</sup>

**Abstract** Low-power and high-precision ubiquitous sensing, high real-time and high-reliable wireless transmission, and dynamic and flexible control are the urgent requirements for the effective monitoring on the safety and energy efficiency of large-scale production infrastructures. Thus, a flat architecture of wireless industrial control system is first proposed in this paper. Then, focusing on the key functional requirements with respect to sensing, transmission and control, the key technologies are proposed, including the network design and the time-space-frequency joint scheduling method for high real-time and high-reliable wireless transmission, the dynamic-cycle high-efficiency sampling and high-energy-efficiency high-accuracy time synchronization methods of sensing devices, as well as the semantic interoperability and timed workflow model of management and control platform. Finally, the wireless industrial control systems for high-efficiency recovery of oil and full-domain safety monitoring of power grid are developed, whose implementation results are introduced.

**Key words** Industrial control system, industrial wireless networks, management and control platform, field measurement and control instrument, safety, energy efficiency

**Citation** Yu Hai-Bin, Zeng Peng, Liang Wei, Wang Zhong-Feng, Liu Yang, Xu Chi. Wireless industrial control system: Architecture, key technologies and applications. *Acta Automatica Sinica*, 2023, 49(3): 540-549

制造业和能源工业是实体经济的核心, 创造了我国约 1/3 的 GDP<sup>[1]</sup>, 实现其安全、低碳和高效运行意义重大. 据国家有关部门统计, 2021 年我国由

安全问题导致的生产事故 3.46 万起, 事故频发势头难以有效遏制<sup>[2]</sup>; 与此同时, 我国单位 GDP 能耗是世界平均水平的 1.5 倍, 工业节能提效对于实现“碳达峰、碳中和”意义重大<sup>[3]</sup>.

工业控制系统, 为制造业和能源工业的安全稳定运行提供了重要支撑. 伴随信息通信技术与工业制造技术<sup>[4]</sup>的深化融合, 工业控制系统经历了数字化、网络化阶段, 并朝着智能化的方向发展. 其中, 集散式控制系统、现场总线控制系统是数字化和网络化阶段最典型的代表, 催生了 Modbus、Profinet、EtherCat 等近百种现场总线及工业以太网协议<sup>[5]</sup>, 形成了异构协议多级层叠互联的经典工业控制系统架构<sup>[6]</sup>.

然而, 随着现代工业生产不断地向着大型化和连续化发展, 特别是对于电力输送、石油生产等大型工业基础设施, 基于有线线缆的工业控制系统,

收稿日期 2022-07-13 录用日期 2023-02-23

Manuscript received July 13, 2022; accepted February 23, 2023  
国家自然科学基金 (62173322, 92267108), 辽宁省科学技术计划 (2022JH25/10100005) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (62173322, 92267108), Science and Technology Program of Liaoning Province (2022JH25/10100005)

本文责任编辑 杨涛

Recommended by Associate Editor YANG Tao

1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室 沈阳 110016 2. 中国科学院网络化控制系统重点实验室 沈阳 110016 3. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院 沈阳 110169 4. 中国科学院大学 北京 100049

1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016 2. Key Laboratory of Networked Control Systems, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016 3. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

逐渐呈现出广域互联成本高而能力弱、感知深度与精度不够等突出问题。美国总统科技顾问委员会在本世纪初指出: 工业无线控制的应用, 将使美国工业生产能耗降低 10%、污染排放降低 25%<sup>[7]</sup>。为此, 学术界和工业界开始探索满足工业需求的无线网络技术, 推动工业控制系统的无线化进程。主要代表性工作有: 艾默生、西门子等国际自动化公司组织制定了 WirelessHART、ISA100.11a 标准<sup>[8]</sup>, 开展了从芯片、设备、仪表到平台软件的体系化研发, 力图率先突破无线化工业控制系统技术。同一时期, 我国成立了工业无线技术联盟, 开展了无线化工业控制系统的技术攻关和全系列产品研发<sup>[9]</sup>, 并制定了 WIA-PA 国际标准, 于 2011 年成为国际电工委员会 (International Electro Technical Commission, IEC) 国际标准。

面向采油井、电力网等大型工业基础设施的安全与能效监测, 由于检测参量多、设备规模大、系统空间分散, 构建无线化工业控制系统日益迫切, 但在感知、传输、控制等方面面临着诸多难题。首先, 现有的 WiFi、Bluetooth、Zigbee、NB-IoT、LoRa 等无线网络技术不能满足工业控制的高实时高可靠通信要求<sup>[10-11]</sup>; 其次, 长期无人值守条件下, 实现 3~5 年不更换电池的低功耗无线传感, 仍存在技术缺失; 最后, 为实现系统跨域协同及扁平化管控, 系统的在线决策和服务化编程<sup>[12]</sup>等核心技术亟待突破。

针对上述难题, 本文围绕无线化工业控制系统扁平架构的构建, 系统性介绍了从无线网络、感知终端到管控平台的理论创新、技术突破及工程应用。具体包括:

- 1) 构建了一种扁平架构的无线化工业控制系统;
- 2) 设计了“星-网”层叠拓扑的工业无线网络, 提出了“时-空-频”三元联合调控与优化方法;
- 3) 提出了变周期精益采样、高能效精准时间同步等无线感知终端低功耗关键技术;
- 4) 提出了支持决策与控制一体化的语义化互操作技术和赋时 workflow 模型。

在此基础上, 研发了包含现场测控仪表、网络传输设备、管控平台等全系列单元的无线化工业控制系统, 并针对石油开采和电力传输等典型行业开展工程应用与验证。

## 1 无线化工业控制系统的扁平架构

面向采油井、电力网等重大工业基础设施, 以现场总线、以太网多级层叠互联为基础的工业控制系统架构, 难以满足海量异构测控仪表的实时可靠接入、低功耗泛在感知和异构业务协同的要求。为

此, 本文提出无线化工业控制系统的扁平架构, 如图 1 所示。该架构以工业无线网络为核心, 在感知终端和管控平台之间建立高实时、高可靠的交互通道, 支持海量测控仪表的泛在感知和异构业务的跨域协同, 进而实现采油井、电力网等工业设施的安全高效运行。

系统分层及功能如下:

- 1) 感知层。主要面向工业生产制造的物理或化学过程, 通过海量异构测控仪表, 实现对物理空间内生产制造全过程的多变量协同感知或测量, 支持工业控制系统的自感知。
- 2) 网络层。主要面向海量测控仪表的互联互通, 以工业无线网络为核心, 为物理空间和空间建立交互通道, 实现海量感知数据的按期上报和实时控制命令的确定性下达, 支持工业控制系统的自运行。
- 3) 控制层。主要面向复杂生产任务的决策、控制与优化, 通过在信息空间对网络层上报的海量异构感知数据进行计算和建模, 完成跨系统的语义化互操作, 实现对控制系统的决策和控制一体化, 支持工业控制系统的自优化。

## 2 工业无线网络设计与优化

为实现控制系统的扁平架构, 支撑复杂生产过程的泛在感知和协同控制, 工业无线网络需要支持海量异构测控仪表的高并发接入, 为底层感知终端和上层管控平台建立透明通道, 通信指标要求极为苛刻。为此, 本文首先设计了“星-网”层叠的网络拓扑结构; 然后提出了时-空-频资源联合调控与优化的方法体系, 支持工业无线网络的高实时高可靠传输。

### 2.1 “星-网”层叠网络拓扑设计

工业环境温湿度变化大、振动强, 加之工业非授权频段信道拥挤、随机干扰严重, 因此, 工业无线网络始终面临着复杂工业环境下有限网络资源与严苛通信指标之间的矛盾。

为此, 本文从时域、频域、空域全维度拓展网络资源, 构建如图 2 所示的“星-网”层叠拓扑网络, 支持现场测控仪表、手持设备等系统设备的高并发实时接入。具体来说, 第一层采用网状拓扑结构, 由网关设备和路由设备组成, 路由设备间可以进行自组织、自适应通信; 第二层采用星状拓扑结构, 以各路由设备为簇首组成多个星状网络。相比于单纯的网状网络拓扑, “星-网”层叠拓扑网络可以大幅降低系统开销。对于节点数为  $N$  的网络, 进行单播通信时, 网状组网的开销为  $O(h^2N)$ , 而“星-网”状组

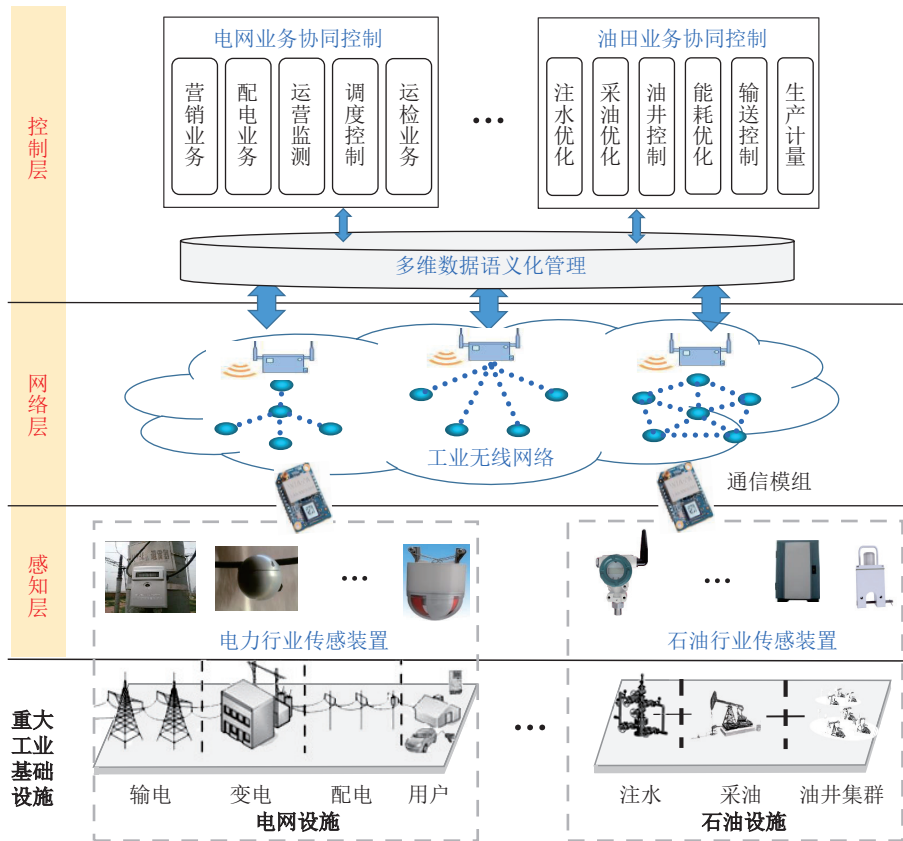


图 1 系统架构

Fig.1 System architecture

网的开销仅为  $O(N)$ , 其中  $h$  为跳数<sup>[13]</sup>.

为实现对“星-网”层叠拓扑网络的高效管理, 本文定义如图 3 所示的“集中-分布”相结合的网络管理架构, 由网络管理者、安全管理者和簇首协作完成网络管理和安全管理. 其中, 执行网络管理者和安全管理者功能的是网关设备, 执行簇首功能的是路由设备; 网络管理者和安全管理者直接管理路由设备, 同时把对现场设备的管理权限下放给路由设备.

### 2.2 时-空-频资源联合调控与优化

工业无线网络的时-空-频资源有限且跨层耦合, 加之工业环境恶劣, 单一资源变量的频繁抖动都将造成整个资源体系的大幅波动. 因此, 基于传统网络分层协议体系开展资源调度, 面临着最优性差、灵活性弱等方面的挑战.

为此, 综合考虑流量守恒约束、网络带宽约束和网络时空频资源约束等因素, 构建如下资源调控问题<sup>[14]</sup>.

$$\max F(x, t, p, w, f) \tag{1a}$$

$$\text{s.t. } S_v = \sum_{l \in L_{\text{out}}(v)} f_l - \sum_{l \in L_{\text{in}}(v)} f_l \tag{1b}$$

$$f_l \leq c_l(x_l, t_l, p_l, w_l), \forall l \in L \tag{1c}$$

$$x \in X, t \in T, p \in P, w \in W \tag{1d}$$

其中, 目标函数  $F(x, t, p, w, f)$  表示实时性或可靠性指标, 是关于时-空-频资源变量的函数.  $x, t, p, w, f$  分别代表调度变量、时间比例、发射功率、信道带宽、路径流量; 流量守恒约束 (1b) 要求节点  $v \in V$  的源速率  $S_v$  等于该节点全部流出数据流  $L_{\text{out}}(v)$  的和与其全部流入数据流  $L_{\text{in}}(v)$  的和之差; 带宽约束 (1c) 要求链路上的数据传输速率不超过其容量, 由单个数据流  $l$  的调度变量、时间比例、发射功率、信道带宽决定; 物理约束 (1d) 指定时域  $t$ 、空域  $p$  和频域  $w$  的物理资源可行域.

基于跨层协议设计和联合优化的思想, 提出一种基于松耦合分解的时空频资源调度方法, 如图 4 所示. 考虑到冲突域划分和流量控制相互独立, 但均与资源调度紧密耦合, 将上述问题分解为两个松耦合子问题: 1) 划定冲突域 (给定  $\bar{x}$ ) 情况下, 资源调度与流量控制的联合优化问题; 2) 流量确定 (给定  $\bar{f}$ ) 情况下, 冲突域划分与资源调度的联合优化问题.

不同于传统的逐级求解优化方式, 将跨层优化

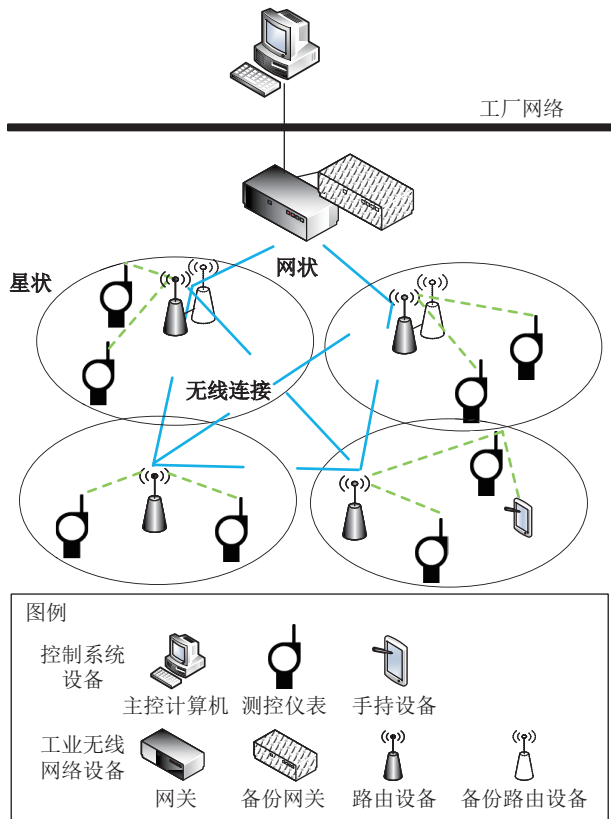


图 2 星-网层叠拓扑

Fig. 2 Star-mesh hierarchical topology

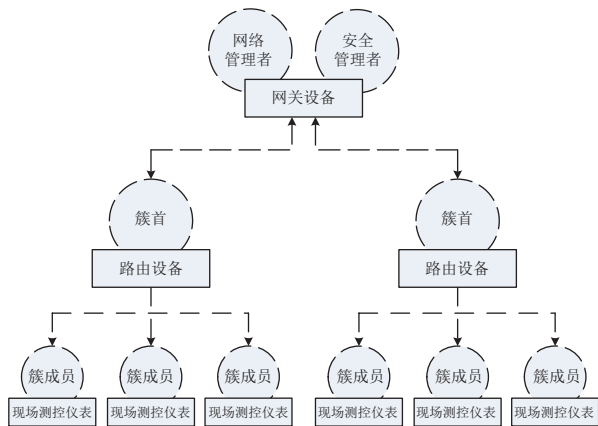


图 3 集中-分布的复合管理模式

Fig. 3 Hybrid centralized-distributed management

问题分解为冲突域划分、资源调度、流量控制等多个松耦合子问题, 通过对不同环节的迭代优化, 寻求整个问题的最优解. 因此, 不同于传统静态资源配置优化方法, 该方法在网络性能无法满足工业通信指标要求时, 可以动态调节时空频资源, 不断改善解的质量, 是一种满足工业控制要求的新方法.

在资源联合调控的框架下, 根据异构工业任务

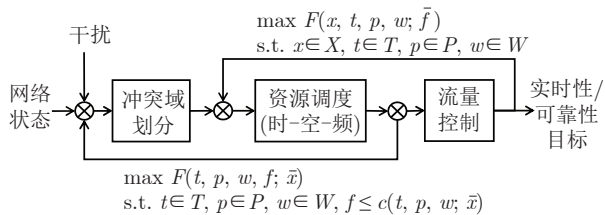


图 4 时-空-频资源联合调控

Fig. 4 Time-spatial-frequency joint resource scheduling

的通信需求, 我们建立了紧急动作、闭环调控、开环控制等不同任务的控制关键性分级体系, 并首次面向工业无线控制领域提出了混合关键性调度方法<sup>[15]</sup>, 支持对异构工业任务的按需资源调度. 进一步, 提出了资源需求和供给的容限函数, 支持关键任务的最早截止期优先调度<sup>[16]</sup>. 通过对可调度性、端到端时延等指标的仿真分析和实验测试, 证明了混合关键性调度的有效性<sup>[17-18]</sup>.

与此同时, 为确保非授权频段通信的可靠性、抑制窄带突发干扰, 固定周期的信道切换 (即: 盲跳频) 已经不能满足工业通信的确定性要求. 为此, 本文提出自适应跳频方法. 通过在不同传输周期的不同时段, 实时感知信道特性, 并根据丢包率、重传次数等关键指标动态切换信道, 解决该频段自由竞争接入导致的随机干扰问题, 同时满足非授权频段的使用法规<sup>[19]</sup>. 仿真分析和实验测试均表明, 自适应跳频相比于盲跳频可以有效减少冲突, 提高传输可靠性<sup>[20]</sup>. 上述方法应用于 5G 的无线空口协议, 支持了 5G 在非授权频段的高实时高可靠通信<sup>[21]</sup>.

基于本节的创新工作, 制定了 WIA-PA 工业无线网络国际标准 (IEC 62601)<sup>[22]</sup>. 应用测试表明, WIA-PA 性能优于其他同类技术和产品.

### 3 现场测控仪表的低功耗同步感知

传统工业现场测控仪表采用固定周期采样和频繁时间同步来提升感知精度, 造成了感知终端能耗高的问题. 考虑到复杂工业生产过程中, 绝大部分与安全能效相关的参量, 具有“低频稀疏变化”、“链式或局部密集分布”等特征, 本文提出“变周期网络精益采样”与“高效精准时间同步”的创新思路, 创建了“采样传输一体化”的网络化低功耗同步感知新体系, 支持现场测控仪表 3~5 年的稳定运行.

#### 3.1 变周期网络精益采样

1) 采样周期动态调节. 提出一种对工业无线网络应用层数据进行动态周期按需采样的穿级采样方法, 基本原理如图 5 所示. 首先, 建立基于被测参量关键性、敏感度、误差容限和变化范围的采样分级

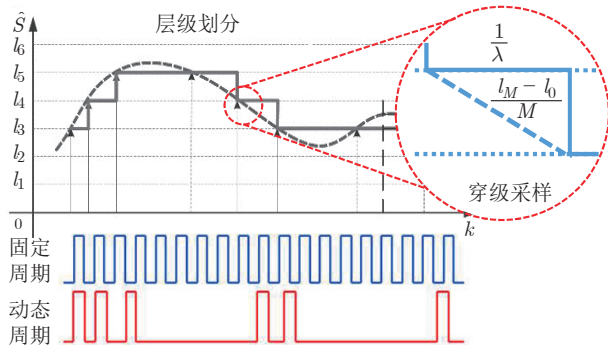


图5 采样方法对比

Fig.5 Comparison of sampling methods

模型, 确定层级  $M$  划分; 然后, 运用 Markov 链权衡数据率和丢包率, 并根据下式确定对信号区间进行层级划分的上限  $M_u$  和下限  $M_d$ .

$$\begin{cases} M_u = \mu \frac{(l_M - l_0) \lambda}{\max\{|s_{\min}|, |s_{\max}|\}} \\ M_d = \frac{l_M - l_0}{2p_r e_{\max}} \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $l_0$  和  $l_M$  分别是最小和最大层级,  $\lambda$  是节点发送数据率,  $\mu$  是可调权重,  $s_{\min}$  和  $s_{\max}$  分别是原始信号的最小和最大变化率,  $p_r$  是数据包发送成功率,  $e_{\max}$  是信号采样的最大误差。

显然, 通过均匀、非均匀等不同分布进行层级分配  $l_k$  ( $k = 1, \dots, M$ ), 可以实现动态周期的按需采样. 这样, 由于非周期性地在信号穿越层级时进行采样, 可以有效降低数据的射频发送次数, 达到降低能耗的目的。

在穿级采样的基础上, 考虑网络丢包的影响, 我们进一步提出了穿级采样中丢失数据的恢复方法. 工程实践表明, 在感知层进行穿级采样, 可以对底层感知数据量进行压缩, 有效降低采样数据的传输比率, 节约 40%~90% 的终端能耗, 实现了终端百微瓦级低能耗运行<sup>[23]</sup>.

2) 并发数据聚合压缩. 为降低网络的数据传输量, 避免拥塞及降低功耗, 提出网络并发数据的聚合/解聚方法. 聚合和解聚功能由图 3 中网络管理者统一配置, 通过网关、路由设备、现场设备等设备具体执行. 其中, 聚合是将多个用户应用对象的数据或簇成员包合并为一个数据包, 可以划分为数据聚合和包聚合两个层次. 具体来说, 数据聚合是对现场设备中一个以上用户应用对象所采用的聚合形式; 而包聚合是对路由设备接收一个以上现场设备的数据包所采用的聚合形式. 与之相对, 解聚就是聚合的逆过程, 将聚合包分解为用户应用对象数据或簇成员包. 解聚在网关设备实现, 由网关设备的解聚对象完成。

仿真和实验验证表明: 通过聚合/解聚, 可减少 35% 的数据传输量, 降低网络能耗, 避免拥塞<sup>[24]</sup>.

### 3.2 高效精准时间同步

现场测控仪表受成本和功耗的限制, 时钟晶振温漂明显, 需高频次同步, 造成电能消耗过快. 为此, 本节给出了时钟模型的建立和时间同步方法。

为了克服时钟漂移问题, 必须建立多源时钟模型, 并进行时延抖动控制, 以进一步提高时间同步精度. 针对传统时钟模型无法描述多同步干扰源的问题, 综合考虑多跳网络的链路非对称传播时延、中间节点转发时延以及从节点时钟源计时误差因素, 建立了一体化的时钟模型<sup>[25]</sup>; 进一步, 建立了主从时钟之间的时钟偏移以及时钟偏移率的状态空间模型, 并利用卡尔曼滤波对从节点的时间进行估计<sup>[26]</sup>. 如图 6 所示, 根据相邻同步报文到达时刻  $t_1$  和  $t_2$ , 可计算节点 B 相对于基准节点 A 的时间误差及其预测值  $\tau$ . 据此, 通过所提出的非对称链路的时延自适应预测补偿方法, 大幅降低同步频次。

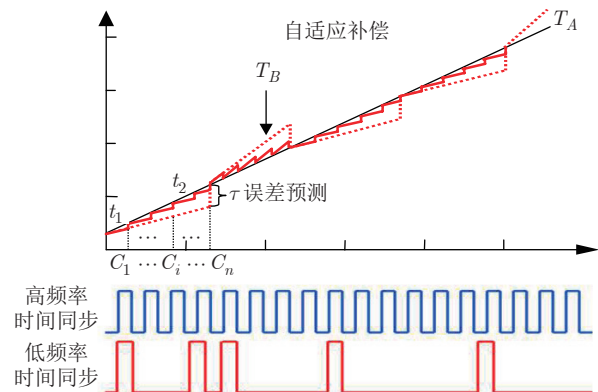


图6 时间同步方法对比

Fig.6 Comparison of time synchronization methods

实验结果表明, 在同步频次降低一个数量级的前提下, 仍实现了微秒级的同步精度<sup>[27]</sup>, 为降低网络终端功耗奠定了基础。

## 4 决策-控制一体化管控平台

工业无线网络提供的泛在感知和传输能力, 使得基于数据驱动的智能决策与控制成为可能<sup>[28-30]</sup>. 然而, 管理决策域的逻辑数据与现场控制域的时序数据异构, 管理决策采用的事件驱动“离散”计算模型与控制采用的时间驱动“连续”计算模型异构, 形成了“数据墙”和“计算墙”, 致使无线化工业控制系统难以实现决策与控制一体化. 为此, 本文提出了语义化互操作技术和赋时 workflow 模型, 实现管控平台的在线决策和服务化编程, 实现系统的扁平化。

#### 4.1 决策-控制数据的语义化互操作

针对决策数据和控制数据异构的问题, 提出了“语义化标注-双向关联检索”的基本策略, 如图 7 所示. 首先, 根据异构数据的业务和时空属性, 进行对象映射, 并对大量的异构数据进行清洗和挖掘. 然后, 对异构数据进行语义化标注<sup>[31]</sup>, 构建统一的语义化数据流.

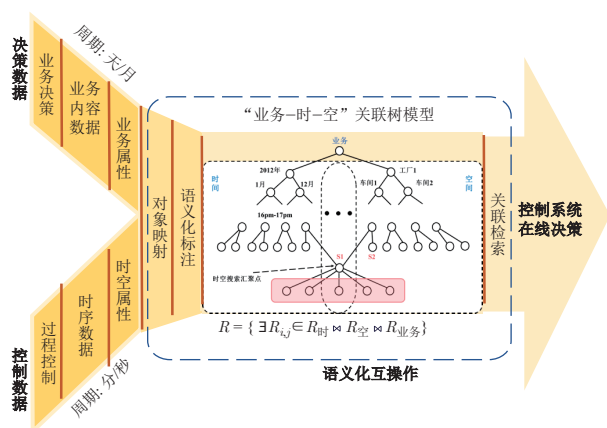


图 7 语义化互操作的基本思路

Fig. 7 Basic idea of semantic interoperability

在此基础上, 建立以现场测控仪表为核心的“业务-时-空”语义关联树模型, 提出业务语义与时空语义的双向关联方法. 考虑到时序感知数据的业务语义标注开销大, 难以支持在线关联分析的问题, 对检索请求进行细粒度解析, 创建了时空数据流的检索方法, 实现了 OWL、WordNet 和 WSMO 等解析. 进一步, 建立时序感知数据流的关联搜索引擎, 率先实现千万条实时感知数据秒级关联查询, 准确率超过 98%.

通过语义化标注和双向关联检索, 支持决策数据与控制数据的语义化互操作, 改变了传统控制系统平台基于历史数据的离线分析模式, 实现控制系统的安全、能效在线分析和实时决策, 支持系统的扁平化.

#### 4.2 时间-事件混合驱动的赋时 workflow

针对决策与控制的计算模型异构问题, 提出基于 Web Service 服务化封装和动态组合方法, 支持决策与控制的协同计算. 具体来说, 提出了 Web Service 协议裁剪和语法压缩编码方法, 实现了内容压缩率 45%、句柄压缩率 90%, 解决了控制功能服务化封装中的 Web Service 机制开销大、实时性差的关键问题.

在此基础上, 建立了赋时 workflow 模型, 提出了

基于事件驱动的控制逻辑自动生成机制及满足时序约束的工作流编程方法, 创建并实现了服务化可组合的控制逻辑开发新模式.

基于此, 研制了国内首个通过 OPC 基金会认证的嵌入式控制器, 实现了感知、反馈、执行、PID 调节、参数辨识等典型功能的服务化封装.

## 5 应用系统开发及成效

### 5.1 石油高效采收

石油开采作为能源工业的前期关键环节, 其效率和用能水平直接影响我国的能源安全和工业生产效率. 石油开采过程中, 抽油机作为最主要采油设备, 具有设备数量多、分布地域广的特点, 迫切需要无线化工业控制系统, 支持对石油开采过程的在线监测、精准计量和协同控制.

为此, 研发了面向石油高效采收的无线化工业控制系统, 如图 8 所示. 其中, 以工业无线网络 WIA-PA 技术和低功耗感知技术为核心, 开发了压力变送器、示功仪、远程终端、流量自控仪等现场测控仪表, 支持对不同采油过程的变周期采样和无线自组网. 这样, 以采油井、水井、阀组间为单位, 根据实际测控需要, 组建不同拓扑的网络, 并汇聚至网关. 网关间通过高速骨干网进一步汇聚至应用服务器、数据服务器, 进而接入协同生产管控平台.

在此基础上, 通过对海量异构感知数据进行统计和分析, 构建了基于 Bitmap 的油水井采注优化实时推理引擎<sup>[32]</sup>, 提出了广域大规模油水井采注协同优化控制方法, 实现了采油井和注水井井间连通性分析与协同优化控制, 以及抽油机泵效和能耗的实时分析与动态优化.

基于海量无线感知数据的融合感知, 在感知终端高精度时间同步的支持下, 实现了抽油机的功图反演, 构建了完整的功图诊断体系, 支持对气体影响、供液不足、漏失等不少于 24 种工况特征的识别, 工况诊断正确率在 92% 以上<sup>[33]</sup>. 同时, 实现了动液面融合感知和产量精准计量. 初期的工程应用表明, 可以实现动液面计量平均误差在 10% 以内, 单井计量平均误差在 7.7% 以内<sup>[34]</sup>. 长期的系统运行表明, 在电池供电的情况下, 感知终端低功耗运行, 可以 5 年不更换电池, 实现了对采油井远程监控和站场无人值守, 提高了油井计量和管理水平, 降低了人工劳动强度.

### 5.2 电网全域安全监测

电力输送作为能源工业的中间环节, 其运行质量将直接影响工业生产效率及安全. 电网的“输-变-

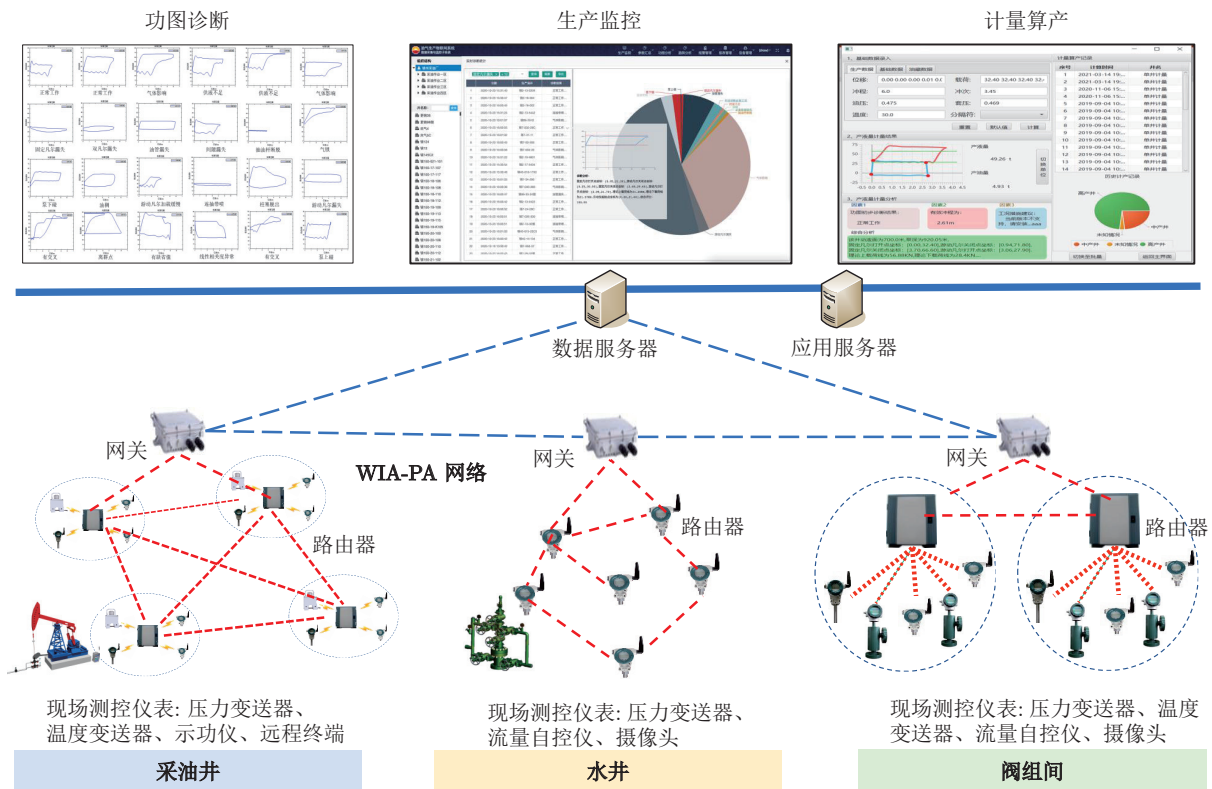


图8 面向石油高效采收的无线化工业控制系统

Fig.8 Wireless industrial control system for high-efficiency oil collection

配”各环节部署海量异构传感器,具有广域分散部署、工作电磁环境复杂等特征,对无线化工业控制系统的实时性和可靠性提出了严峻挑战。

为实现对电网运行状态的监测,研发了面向电网全域安全监测的无线化工业控制系统,如图9所示。其中,针对电网“输-变-配”各环节,以低功耗感知技术为核心,研发并部署了风偏传感器、振动传感器、SF6监测器、漏电流传感器、故障指示器等23种电网用现场测控仪表。然后,基于WIA-PA的无线自组网能力,构建线状、网状、树状等不同拓扑网络,满足“输-变-配”不同要求。以输电环节为例,单个杆塔上部署有多类型的传感器节点,与杆塔上的路由设备构成星型网络;输电线路杆塔之间的路由设备进一步构成线型网络,且相隔节点之间可以互通,避免相邻节点的丢失,造成整个线路的瘫痪<sup>[35]</sup>。通过构建灵活的网络,实现了电力输送各环节上监测装置的互联互通,支持电网输电线路舞动、覆冰监测,大型变压器健康状态监测,配网线路接地故障监测等。

进一步,首次将全域状态监测系统融入电网调度,构建了覆盖“输-变-配”的电网全域安全预测运维系统,实现了运营监测、配网调度和异常告警的一体化集成,提高了设备运行状态的可控和在控能力。

在电磁干扰最严重的变电站中应用表明,现场测控仪表的室外通信距离可以达到100~200 m,数据周期最快为1 s,周期性数据时延小于1 s,报警数据时延小于100 ms<sup>[27]</sup>。在广域输电线路上的应用表明,单跳范围内,可保证任意速率的可靠传输,即丢包率为0;随着跳数和距离的增加,仍可保证低速率的可靠传输。具体结果如图10所示。

在电网的规模化应用表明,系统对输电环节中的杆塔变形和倾斜、线路覆冰及不均匀脱冰等严重隐患的准确预报,可降低人工巡查劳动量30%以上;对变电环节中变压器油色谱异常、变压器油中溶解气含量异常(增长率)和铁芯接地流数据异常等进行了预警,可降低设备故障率75%;对配电环节中的接地短路故障进行快速区段定位,提高了故障查找效率,故障排除时间由2 h降为1 h<sup>[36]</sup>。

## 6 总结与展望

本文聚焦于无线化工业控制系统这一自动化领域的变革性技术,以我国自主研发的工业无线网络WIA-PA为背景,从基础的系统架构开始,到感知、传输和控制等关键技术,详细介绍了我国近20年工业无线控制技术体系建立及系统构建的进展,并以采油和电网生产监测为代表,介绍了典型无线化

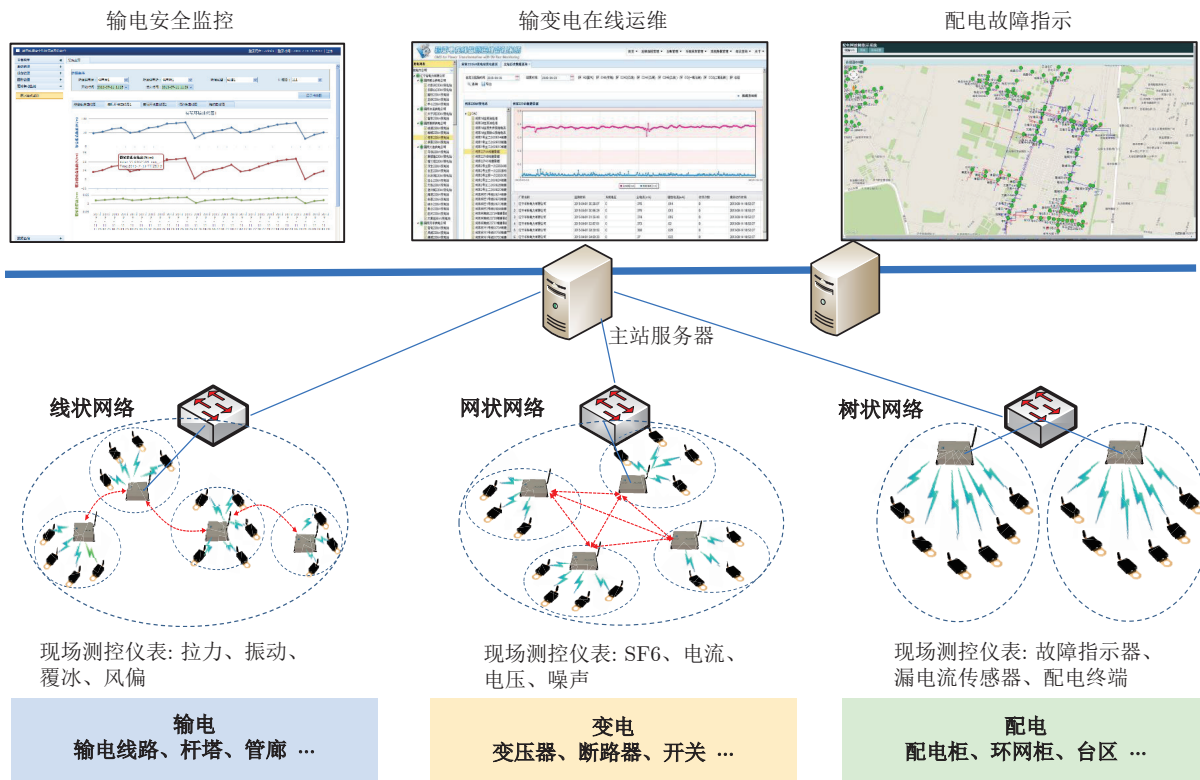


图 9 面向电网安全监测的无线化工业控制系统

Fig.9 Wireless industrial control system for safety monitoring in power grid

| 丢包率 / %              | 速率 / kbps | 传输间隔 / min |     |      |      |       |       |
|----------------------|-----------|------------|-----|------|------|-------|-------|
|                      |           | 2.4        | 9.6 | 20.0 | 40.0 | 100.0 | 128.0 |
| 节点 1<br>(距网关 50 m)   | 0.5       | 0          | 0   | 0    | 0    | 0     | 0     |
|                      | 1.0       | 0          | 0   | 0    | 0    | 0     | 0     |
|                      | 5.0       | 0          | 0   | 0    | 0    | 0     | 0     |
| 节点 2<br>(距网关 200 m)  | 0.5       | 0          | 0   | 0    | 0    | 0     | 0.1   |
|                      | 1.0       | 0          | 0   | 0    | 0    | 0     | 0.1   |
|                      | 5.0       | 0          | 0   | 0    | 0    | 0     | 0.1   |
| 节点 3<br>(距网关 500 m)  | 0.5       | 0          | 0   | 0    | 0    | 0.1   | 0.2   |
|                      | 1.0       | 0          | 0   | 0    | 0    | 0.1   | 0.1   |
|                      | 5.0       | 0          | 0   | 0    | 0    | 0.1   | 0.1   |
| 节点 4<br>(距网关 800 m)  | 0.5       | 0          | 0   | 0    | 0.1  | 0.2   | 0.3   |
|                      | 1.0       | 0          | 0   | 0    | 0.1  | 0.1   | 0.3   |
|                      | 5.0       | 0          | 0   | 0    | 0.1  | 0.1   | 0.3   |
| 节点 5<br>(距网关 1000 m) | 0.5       | 0          | 0   | 0.1  | 0.2  | 0.2   | 0.4   |
|                      | 1.0       | 0          | 0   | 0    | 0.1  | 0.2   | 0.4   |
|                      | 5.0       | 0          | 0   | 0    | 0.1  | 0.2   | 0.4   |

图 10 输电线路网络测试结果

Fig.10 Testing results for power line network

工业控制系统的应用模式和成效。

未来, 随着海量异构工业设备的动态接入, 对网络的吞吐量、实时性、可靠性等方面的要求将进一步提升, 加强 WIA-PA 与 5G 等技术的融合具有极大应用前景. 进一步, 基于泛在感知获得的海量工业数据, 通过与云计算、边缘计算等信息技术结合, 将进一步推动数据驱动的工业控制与优化. 因

此, 构建感知、传输、计算、控制一体化的新一代工业控制系统将是未来研究重点。

References

- 1 State Statistics Bureau. The economy got off to a steady start [Online], available: [http://www.stats.gov.cn/xxgk/jd/sjjd2020/202204/t20220419\\_1829876.html](http://www.stats.gov.cn/xxgk/jd/sjjd2020/202204/t20220419_1829876.html), February 28, 2023 (国家统计局. 经济运行实现平稳开局 [Online], available: [http://www.stats.gov.cn/xxgk/jd/sjjd2020/202204/t20220419\\_1829876.html](http://www.stats.gov.cn/xxgk/jd/sjjd2020/202204/t20220419_1829876.html), 2023-02-28)
- 2 People's Daily. During the "14th Five-Year Plan", my country's energy consumption per unit of GDP will be reduced by 13.5% — Accelerating the formation of an energy-saving society [Online], available: [http://www.gov.cn/xinwen/2021-08/10/content\\_5630408.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-08/10/content_5630408.htm), February 28, 2023 (人民日报. "十四五"我国单位 GDP 能耗降低 13.5% —— 加快形成能源节约型社会 [Online], available: [http://www.gov.cn/xinwen/2021-08/10/content\\_5630408.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-08/10/content_5630408.htm), 2023-02-28)
- 3 Ministry of Industry and Information Technology, General Administration for Market Regulation. Motor energy efficiency improvement plan (2021–2023) [Online], available: [https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2021/art\\_76228b2294a14e168c94a9a3db77fc40.html](https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2021/art_76228b2294a14e168c94a9a3db77fc40.html), February 28, 2023 (工业和信息化部, 市场监管总局. 电机能效提升计划 (2021–2023年) [Online], available: [https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2021/art\\_76228b2294a14e168c94a9a3db77fc40.html](https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2021/art_76228b2294a14e168c94a9a3db77fc40.html), 2023-02-28)
- 4 Felser M, Kleineberg O. Coexistence standardization of operation technology and information technology. *Proceedings of the IEEE*, 2019, 107(6): 962–976
- 5 Xu C, Du X Y, Li X C, Tu Y C, Li L, Jin X, et al. 5G-based industrial wireless controller: Protocol adaptation, prototype de-



- velopment, and experimental evaluation. *Actuators*, 2023, **12**(2): 1–19
- 6 Enterprise-control system integration Part1: Models and terminology. IEC/ISO 62264.1-2003, 2003
- 7 President's Committee of Advisors on Science and Technology. Report to the President on Federal Energy Research and Development for the Challenges of the Twenty-first Century, 1997
- 8 Petersen S, Carlsen S. WirelessHART vs. ISA100.11a: The format war hits the factory floor. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2011, **5**(4): 23–34
- 9 Yu H B, Zeng P, Xu C. Industrial wireless control networks: From WIA to the future. *Engineering*, 2022, **8**: 18–34
- 10 Xu C, Yu H B, Zeng P, Li Y H. Towards critical industrial wireless control: Prototype implementation and experimental evaluation on URLLC. *IEEE Communications Magazine*, DOI: 10.1109/MCOM.009.2200648
- 11 Raza M, Aslam N, Le-Minh H, Hussain S, Cao Y, Khan N M. A critical analysis of research potential, challenges, and future directives in industrial wireless sensor networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, **20**(1): 39–95
- 12 Dai W, Vyatkin V, Christensen J H, Dubinin V N. Bridging service-oriented architecture and IEC 61499 for flexibility and interoperability. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2015, **11**(3): 771–781
- 13 Zheng M, Liang W, Yu H B, Xiao Y. Performance analysis of the industrial wireless networks standard: WIA-PA. *Mobile Network Application*, 2017, **22**: 139–150
- 14 Yu H B, Zeng P, Zheng M, Xu C, Jin X, Liang W. *Performance Controllable Industrial Wireless Networks*. Singapore: Springer Nature, 2023.
- 15 Jin X, Xia C Q, Xu H T, Wang J T, Zeng P. Mixed criticality scheduling for industrial wireless sensor networks. *Sensors*, 2016, **16**(9): Article No. 1376
- 16 Xia C Q, Jin X, Kong L H, Zeng P. Bounding the demand of mixed-criticality industrial wireless sensor networks. *IEEE Access*, 2017, **5**: 7505–7516
- 17 Jin X, Wang J T, Zeng P. End-to-end delay analysis for mixed-criticality WirelessHART networks. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2015, **2**(3): 282–289
- 18 Jin X, Tian Y, Xu C, Xia C Q, Li D, Zeng P. Mixed-criticality industrial data scheduling on 5G NR. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, **9**(12): 10306–10318
- 19 ETSI EN 301 893 V2.1.1. 5 GHz RLAN; Harmonised standard covering the essential requirements of article 3.2 of directive 2014/53/EU [Online], available: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/301800\\_301899/301893/02.01.01\\_60/en\\_301893v020101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301800_301899/301893/02.01.01_60/en_301893v020101p.pdf), February 28, 2023
- 20 Liang W, Zhang X L, Yang M, Xu W J, Wang J, Zeng P, et al. Demonstration abstract: A complete WIA-PA network and its adaptive anti-interference mechanisms. In: Proceedings of the 15th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom). New York, USA: IEEE, 2009. 1–3
- 21 Xu C, Zeng P, Yu H B, Jin X, Xia C Q. WIA-NR: Ultra-reliable low-latency communication for industrial wireless control networks over unlicensed bands. *IEEE Network*, 2021, **35**(1): 258–265
- 22 Industrial networks-wireless communication network and communication profile-WIA-PA. IEC 62601, 2011
- 23 Wang Yang, Zeng Peng, Zhang Qiong, Wang Qiu-Shi, Yu Hai-Bin. Level crossing sampling algorithm for energy conservation in WSNs. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, **33**(5): 1070–1077  
(汪扬, 曾鹏, 张琼, 王秋石, 于海斌. 无线传感器网络低功耗穿越级采样算法. 仪器仪表学报, 2012, **33**(5): 1070–1077)
- 24 Jin X, Guan N, Xia C Q, Jin X, Zeng P. Packet aggregation real-time scheduling for large-scale WIA-PA industrial wireless sensor networks. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, 2017, **17**(5): 1–19
- 25 Wang Z W, Zeng P, Kong L H, Li D, Jin X. Node-identification-based secure time synchronization in industrial WSNs. *Sensors*, 2018, **18**(8): 1–18
- 26 Wang Zhao-Wei, Zheng Meng, Zeng Peng, Li Dong. IEEE 1588 protocol-based time synchronization method for multihop wireless networks. *SCIENTIA SINICA Informationis*, 2016, **46**(6): 777–788  
(王照伟, 郑萌, 曾鹏, 李栋. 基于 IEEE 1588 协议的多跳无线网络时间同步方法. 中国科学: 信息科学, 2016, **46**(6): 777–788)
- 27 Zeng P, Wang Z W, Jia Z, Kong L H, Li D, Jin X. Time-slotted software-defined industrial ethernet for real-time quality of service in Industry 4.0. *Future Generation Computer Systems*, 2019, **99**: 1–10
- 28 Liu X Y, Xu C, Yu H B, Zeng P. Deep reinforcement learning-based multi-channel access for industrial wireless networks with dynamic multi-user priority. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, **18**(10): 7048–7058
- 29 Liu Xiao-Yu, Xu Chi, Zeng Peng, Yu Hai-Bin. Deep reinforcement learning-based high concurrent computing offloading for heterogeneous industrial tasks. *Chinese Journal of Computers*, 2021, **44**(12): 2367–2381  
(刘晓宇, 许驰, 曾鹏, 于海斌. 面向异构工业任务高并发计算卸载的深度强化学习算法. 计算机学报, 2021, **44**(12): 2367–2381)
- 30 Liu X Y, Xu C, Yu H B, Zeng P. Multi-agent deep reinforcement learning for end-edge orchestrated resource allocation in industrial wireless networks. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2022, **23**(1): 47–60
- 31 Shi Zhao, Liu Yang, Zeng Peng, Yu Hai-Bin. Semantic annotating method of sensing data attributes for data processing in IoT. *SCIENTIA SINICA Informationis*, 2015, **45**(6): 739–751  
(施昭, 刘阳, 曾鹏, 于海斌. 面向物联网的传感数据属性语义化标注方法. 中国科学: 信息科学, 2015, **45**(6): 739–751)
- 32 Liu Yang, Zhang Tian-Shi, Li Shi-Chao, Tong Xing, Zeng Peng, Yu Hai-Bin. A real-time reasoning engine for injection-production optimization of water and oil wells on account of bitmap. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(6): 1007–1016  
(刘阳, 张天石, 李世超, 佟星, 曾鹏, 于海斌. 基于 Bitmap 的油水井采注优化实时推理引擎. 自动化学报, 2017, **43**(6): 1007–1016)
- 33 Song C H, Liu S, Han G J, Zeng P, Yu H B, Zheng Q Y. Edge intelligence based condition monitoring of beam pumping units under heavy noise in the industrial internet of things for Industry 4.0. *IEEE Internet of Things Journal*, DOI: 10.1109/JIOT.2022.3141382
- 34 Zhang Li-Ting, Li Shi-Chao, Zheng Dong-Liang, Shi Shuo, Zeng Peng. Oil well situational awareness system based on multi-source information fusion. *Process Automation Instrumentation*, 2019, **40**(9): 51–54  
(张立婷, 李世超, 郑东梁, 石硕, 曾鹏. 基于多源信息融合的油井态势感知系统. 自动化仪表, 2019, **40**(9): 51–54)
- 35 Lin J R, Zhu B H, Zeng P, Liang W, Yu H B, Xiao Y. Monitoring power transmission lines using a wireless sensor network. *Wireless Communications & Mobile Computing*, 2015, **15**(14): 1799–1821
- 36 Wang Zhong-Feng. IoT-based global status monitoring system for smart grid. *Automation Expo*, 2020, (5): 38–39  
(王忠锋. 基于物联网的智能电网全域状态监测系统. 自动化博览, 2020, (5): 38–39)



**于海斌** 中国科学院沈阳自动化研究所研究员. 主要研究方向为工业控制网络与系统, 智能制造. 本文通信作者. E-mail: yhb@sia.cn

**(YU Hai-Bin** Professor at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research

interest covers industrial control network and system, smart manufacturing. Corresponding author of this paper.)



**曾鹏** 中国科学院沈阳自动化研究所研究员. 主要研究方向为工业无线传感器网络, 智能电网.

E-mail: zp@sia.cn

**(ZENG Peng** Professor at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research

interest covers industrial wireless sensor networks and smart grids.)



**梁炜** 中国科学院沈阳自动化研究所研究员. 主要研究方向为工业无线网络及安全.

E-mail: weiliang@sia.cn

**(LIANG Wei** Professor at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. Her research

interest covers industrial wireless networks and security.)



**王忠锋** 中国科学院沈阳自动化研究所研究员. 主要研究方向为智能电网, 工业无线网络.

E-mail: wzf@sia.cn

**(WANG Zhong-Feng** Professor at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His

research interest covers smart grids and industrial wireless networks.)

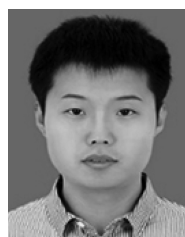


**刘阳** 中国科学院沈阳自动化研究所研究员. 主要研究方向为语义数据处理, 标识解析.

E-mail: liuy@sia.cn

**(LIU Yang** Professor at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. Her research

interest covers semantic data processing and identification resolution.)



**许驰** 中国科学院沈阳自动化研究所研究员. 主要研究方向为工业控制网络, 工业互联网.

E-mail: xuchi@sia.cn

**(XU Chi** Professor at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research

interest covers industrial control networks and industrial Internet.)