

信息物理系统技术综述

李洪阳¹ 魏慕恒² 黄洁¹ 邱伯华² 赵晔¹ 骆文城³ 何晓² 何潇^{1,4}

摘要 信息物理系统 (Cyber-physical system, CPS) 将计算、通信与控制技术紧密结合, 实现了计算资源与物理资源的结合与协调。CPS 是当前自动化领域的前沿研究方向, 已经引起了学术界和工业界的广泛关注。本文对 CPS 进行了简要介绍, 根据技术的应用特点对 CPS 的现有研究成果进行了分类, 综述了各个研究方向的意义和研究进展, 给出了 CPS 的两个典型实际案例, 探讨了 CPS 研究中亟待解决的问题以及未来可能的研究方向。

关键词 信息物理系统, 技术综述, 网络化三容水箱系统, 智能船舶运行与维护系统

引用格式 李洪阳, 魏慕恒, 黄洁, 邱伯华, 赵晔, 骆文城, 何晓, 何潇. 信息物理系统技术综述. 自动化学报, 2019, 45(1): 37–50

DOI 10.16383/j.aas.2018.c180362

Survey on Cyber-physical Systems

LI Hong-Yang¹ WEI Mu-Heng² HUANG Jie¹ QIU Bo-Hua²
ZHAO Ye¹ LUO Wen-Cheng³ HE Xiao² HE Xiao^{1,4}

Abstract Cyber-physical systems (CPSs) closely combine computing, communication and control technologies, realizing the integration and coordination of computing resources and physical resources. The research on CPSs is a hotspot in the field of automation, which has attracted wide attention from academia and industry. We briefly introduce CPSs in the beginning of this paper. Then we categorize CPS' existing research achievements according to their technological application characteristics and review their significance as well as recent progress. Two practical systems are described to better demonstrate the characteristics of CPSs. Finally, we conclude this paper and point out several future research directions.

Key words Cyber-physical systems (CPSs), technical review, internet-based three-tank system, smart-vessel operation and maintenance system

Citation Li Hong-Yang, Wei Mu-Heng, Huang Jie, Qiu Bo-Hua, Zhao Ye, Luo Wen-Cheng, He Xiao, He Xiao. Survey on cyber-physical systems. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(1): 37–50

计算技术、通信技术和控制技术的快速发展, 引起了人类社会生活的巨大变革。随着信息化和工业化的深度融合发展, 传统的单点技术已不能适应新一代生产装备信息化和网络化的需求^[1]。在这一背景下, 信息物理系统 (Cyber-physical system, CPS)

顺势而出, 其作为当前自动化领域的前沿研究方向, 相关研究工作已经取得了初步进展。

CPS 支撑信息化和工业化的深度融合, 通过集成先进的感知、计算、通信、控制等信息技术和自动控制技术, 构建了物理空间与信息空间中人、机、物、环境、信息等要素相互映射、适时交互、高效协同的复杂系统, 实现系统内资源配置和运行的按需响应、快速迭代、动态优化^[1]。CPS 的实现具有层次性^[2], 可分为单元级、系统级、系统之系统级三个层次, 由感知和自动控制、工业软件、工业网络以及工业云和智能服务平台四大核心技术要素构成。加强 CPS 技术的研究, 推动 CPS 技术的应用对“中国制造 2025”战略的顺利实施和提升我国科技实力具有重大的现实意义。

目前国内外对 CPS 的研究中, 由于领域和着眼点的不同, 研究人员对 CPS 有着不同的理解, 由此出现了几种 CPS 的外延。德国“工业 4.0”旨在促使制造产业迈向高值化, 以 CPPS (Cyber-physical production system) 打造的智能工厂即为

收稿日期 2018-05-30 录用日期 2018-09-07
Manuscript received May 30, 2018; accepted September 7, 2018
国家自然科学基金 (61733009, 61522309, 61473163), 工业和信息化部智能船舶 1.0 研发专项 (联装涵 [2016] 544 号) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61733009, 61522309, 61473163) and the Research and Development Project of Intelligent Ship 1.0 from China's Ministry of Industry and Information Technology ([2016] 544)
本文责任编辑 程龙
Recommended by Associate Editor CHENG Long
1. 清华大学自动化系 北京 100084 2. 中国船舶工业系统工程研究院 北京 100036 3. 北方工业大学自动化系 北京 100144 4. 北京信息科学与技术国家研究中心 北京 100084
1. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084 2. China State Shipbuilding Corporation (CSSC) Systems Engineering Research Institute, Beijing 100036 3. Department of Automation, North China University of Technology, Beijing 100144 4. Beijing National Research Center for Information Science and Technology (BNRist), Beijing 100084

“工业 4.0”的精髓. 中国工程院院长周济在《关于中国智能制造发展战略的思考》的报告中提及 HCPS (Human-centered cyber-physical system) 这一概念, 强调了传统的制造过程在智能制造战略下将从“人-物理系统”的二元体系关系向“人-信息-物理系统”三元体系关系进行转变. CPS 在工业领域的创新应用, 形成了工业信息物理系统 (Industrial CPS, ICPS)^[3]. 除了工业界的广泛研究, CPS 也得到了学术界的高度重视. 本文的出发点是结合现有文献, 根据技术的应用特点对 CPS 的现有研究成果进行综述, 力争达成学术界与工业界对 CPS 认知上的共识.

本文首先对 CPS 进行简要介绍, 之后根据技术的应用特点对 CPS 当前的研究进展进行综述, 并给出系统级和系统之系统级两个层面的 CPS 的实际案例, 最后进行总结, 并探讨 CPS 研究中亟待解决的问题以及未来可能的研究方向.

1 CPS 概述

1.1 CPS 体系结构概述

CPS 通过计算、通信与控制技术的有机与深度融合, 实现了计算资源与物理资源的紧密结合与协调^[4]. CPS 的基本组成包括传感器、控制执行单元和计算处理单元, 如图 1 所示. 传感器对物理系统信号进行采集, 计算处理单元对采集到的数据进行计算分析, 控制执行单元根据计算结果对物理系统施加控制作用. 图 1 中通信网络起到数据传输的作用.

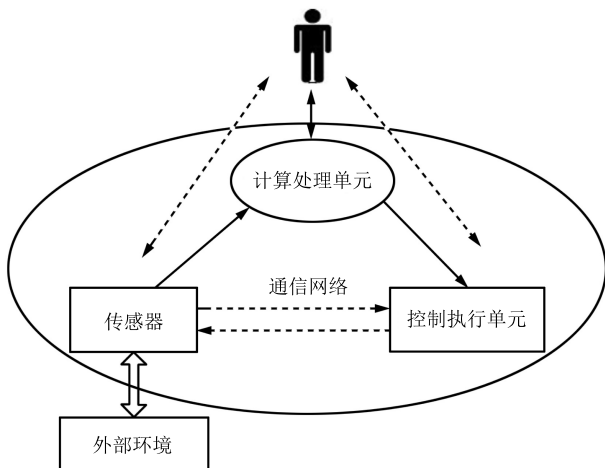


图 1 CPS 基本组成单元^[4]
Fig. 1 Basic units of CPS^[4]

文献 [5] 提出了 CPS 体系结构的一般性描述, 它由决策层、网络层和物理层构成. 决策层对采集到的数据进行处理判断, 得出控制决策, 并向网络层传递监测与控制命令; 网络层对数据进行实时传输;

物理层对物理系统数据进行采集, 并接收网络层传来的监测与控制命令, 借以对物理系统进行反馈控制.

1.2 CPS 研究方向概述

CPS 的智能化实现大致分为四个阶段, 第一阶段是 CPS 对系统环境信息的自主感知; 第二阶段是在通过传感器网络获得感知信息后, CPS 对获取到的信息进行适当的处理, 例如剔除无用的信息, 对信息进行分类等; 第三阶段是在建立数据库的基础上, 对 CPS 进行整体系统的建模, 完成认知任务; 第四阶段是通过整体模型与数据库, 实现最终决策与系统控制. 根据以上四个阶段的递进任务, 将 CPS 技术研究分为 CPS 感知设计技术、CPS 信息处理技术、CPS 建模与认知技术、CPS 决策与控制技术.

另外, 因为 CPS 集成了大量多样的子系统, 而且涉及网络通信技术. 上述四项技术之外, CPS 从整体设计到控制决策的每一步还需要对 CPS 集成设计技术、数字孪生技术和 CPS 安全性技术等进行研究. 综上所述, 给出 CPS 研究方向关系图, 如图 2 所示. 其中中间的四个阶段是 CPS 的分步骤设计, 环形的三个技术是系统整体设计时需要考虑的技术, 在图 2 中以环形包围四个分步图的形式表示.

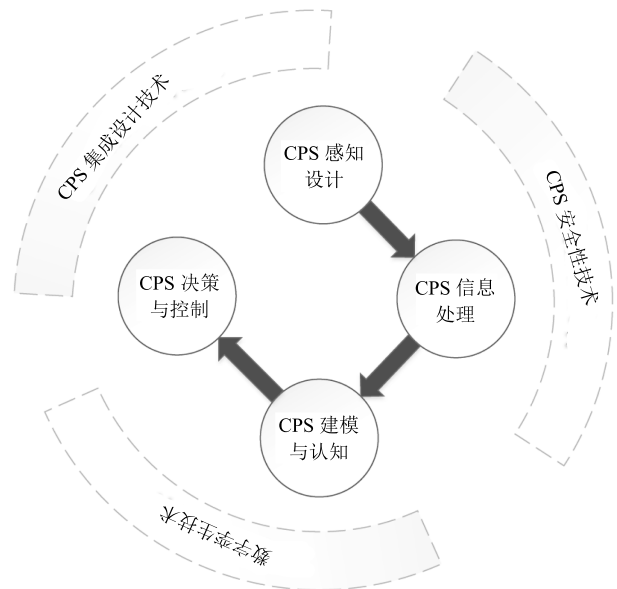


图 2 CPS 研究方向关系图
Fig. 2 Diagram of CPS research interests

2 CPS 技术综述

根据第 1 节提出的 CPS 研究方向关系图, 将从 CPS 感知设计、CPS 信息处理、CPS 建模与认知、CPS 决策与控制、CPS 集成设计技术、数字孪生技术和 CPS 安全性技术等 7 个方向对当前 CPS 的研

究进展进行综述.

2.1 CPS 感知设计

结合现有文献, 将 CPS 感知设计分为数据获取与传感器布置两部分.

CPS 中的数据获取是一项重要技术, 主要对物理层中现场设备数据进行实时准确的采集获取, 并对有用的信息加以提取. 当前数据获取技术研究的核心是保证数据采集系统可以实时精确地对物理层设备进行数据采集. 传统的传感器网络由于缺乏实时性、同时性与容错性, 无法满足 CPS 的需求, 因此文献 [6] 提出了一套数据采集原型系统, 可以在一定程度上满足上述要求. 在无线传感器网络进行数据采集的过程中, 网络阻塞等不稳定的网络条件给数据精确度带来巨大的影响, 增加了对物理层设备的状态估计误差. 针对此现象, 文献 [7] 提出了一种阻塞自适应数据采集方案, 此方案有效地解决了网络阻塞问题, 同时保证了数据估计的精度. IEC 61499 标准用于工业 CPS 范围的分布式自动化系统建模, 然而此标准不支持实时的数据获取, 因此文献 [8] 对该标准进行了延伸, 使其支持数据的实时获取. 文献 [9] 对工业数据采集系统的设计与实现进行了介绍, 对该系统的功能模块、网络设计及软硬件平台的耦合性和扩展性进行了详细说明.

无线传感器网络广泛应用于 CPS 之中, 其中传感器布置问题得到了大量的研究. 目前对 CPS 传感器布置问题的研究大致可以分为两类, 一类是确定传感器布局, 使用最少数量的传感器来达成某种指标; 另一类是对传感器进行布置以满足某种指标. 在 CPS 中, 布置问题是一个重要且基本的问题, 文献 [10] 提出了 QTSwE (Quantum-inspired tabu search algorithm with entanglement) 算法, 并应用于布置问题, 使得在满足监控需求和拓扑连通性条件下, 使用的传感器数目最少. 文献 [11] 研究了 CPS 的网关布置问题, 提出了启发式的网关布置算法和基于网格的启发式算法, 使用最小数目的网关满足每个节点带宽的需求. 文献 [12] 研究了传感器布置问题, 提出了非一致传感器布置策略, 基于此策略提出了传感器的布置模式, 满足了传感器覆盖率和连接性的要求, 并延长了网络寿命. 文献 [13] 对智能建筑 CPS 中基站布置和能源控制问题进行了研究.

2.2 CPS 信息处理

CPS 信息处理的研究方向主要包括数据传输、实时性和不确定性处理三个方面.

当传感器完成数据采集后, 需要将获取的数据发送到终端, 在这个过程中数据传输技术尤为重要. 当前, 数据传输技术的研究重点有数据传输实时性

和数据传输协议. 文献 [14] 提出了一种实时控制 CPS 数据传输模式, 满足了 CPS 跨平台、跨网络、实时性的要求. 实时有效的数据传输是 CPS 的一项基本要求, 通过研究汽车 CPS 时态数据传输的特点, 文献 [15] 描述了对时态数据传输的动静态快照一致性需求, 并提出了两个在线算法, 增强了系统在不同需求下的性能. 医疗 CPS 要求数据传输协议具有可靠性和实时性, IEEE 802.15.4 协议由于低功耗和低成本的特点, 成为该领域的一个权威协议, 但是在可靠性和实时性方面略有不足, 针对此问题, 文献 [16] 提出了 Ada-MAC 协议, 在可靠性和实时性上显示了优势.

CPS 需要具有实时性, 例如实时控制, 实时监测等, 这样才能实时掌握物理设备的运行情况, 进行合理的决策与控制. 文献 [17] 提出了一个新的通信策略, 提高了智能电网 CPS 的吞吐量并保证了系统的实时性. 文献 [18] 研究了实时数据传输的最大数量问题, 即在保证实时性通信的前提下, 调度最大数量的机器在数据传输窗口中传输数据, 提出了两个相应的方案. 文献 [19] 介绍了一种新型人工胰腺装置的分布式传感器平台, 为远程设备上的人工胰腺控制算法提供了实时数据访问.

在实际中, CPS 处于复杂的环境下, 使得收集到的传感器数据往往具有一定的不确定性, 例如数据传输过程中的数据丢失现象、外界噪声对数据的影响、某个传感器故障带来的影响等, 因此对 CPS 数据不确定性问题的研究具有重要意义. 在车辆 CPS 中, 收集到的数据总是不确定和不一致的, 传统的 DS 证据理论可以有效处理不确定信息, 然而在数据冲突时会产生反直觉的结果, 因此文献 [20] 提出了一个改进的方法, 有效解决了汽车 CPS 中传感器数据融合问题. 文献 [21] 对网络化体系结构中数据不确定性进行了分析, 提出了不确定性数据挖掘研究工作的重点研究内容.

2.3 CPS 建模与认知

CPS 使分布的物理系统通过无线通信与计算实现跨空间的结合. CPS 在生产效率和成本能耗等方面具有优势, 但是也带来了一些问题与挑战. 由于 CPS 包括多样的子系统, 传统的建模方法可能无法精确地对整个 CPS 进行建模. 同时, 对于整体的 CPS 大系统而言, 鲁棒性和可靠性也需要重新考虑. 与传统系统相比, CPS 对周围环境有更敏感和更全面的感知能力, 可以对状态做出更准确的估计. 但是, 通信与网络技术的引入也带来了诱导现象, 会影响系统状态估计, 甚至会进一步影响检测与预测推演的结果. 本节将从 CPS 建模、状态估计、检测、预测推演和鲁棒性等方面进行介绍.

CPS 中, 嵌入式计算设备和物理过程与人类用户交互十分紧密. 要实现系统级的设计, 需要兼顾虚拟空间、物理实体和其他设计问题. 例如, 连续变化的物理系统利用连续时间模型来描述, 而计算过程则由离散事件模型来描述, 这样就带来语义鸿沟问题, 联合建模成为解决该问题的一项有力的方法. 文献 [22] 提出了一个集成工具链, 实现了 CPS 的联合建模和联合模拟, 提出的方法不仅提供了语义链, 而且确保了可追溯性. 因为 CPS 的组成模型具有多样性, 文献 [22] 提出的二元联合模型依然有所局限. 借用 UTP (Unifying theories of programming), 使该语义框架在文献 [23] 中被拓展到多元联合模型. 文献 [24] 将 HybridSim 工具链用于实现从多域到现有系统模块的输入. 在汽车 CPS 中, 现有的 CPS 系统设计工具仍然处于特定领域级别^[25], 即只有在确定物理架构后, 才能执行软件集成. 文献 [26] 提出了一种用于汽车 CPS 的功能级网络物理联合设计方法.

CPS 结合并发展了现有的通信技术、无线网络技术、分布式技术、人工智能等技术, 成为集计算、通信与控制于一体的新一代智能系统, 因此 CPS 对环境具有良好的认知能力. 文献 [27] 展示了一种环境感知的 NARX (Nonlinear autoregressive model with exogenous inputs) 模型, 用于估计驾驶行为, 并同时应用在电动汽车的能量管理中, 提高了电池寿命.

通过与网络的交互, 传统的物理传感器、控制单元和设备的安装可以更为灵活地实现, 并具有广阔的延展性和较低的维护成本. 尽管无线控制系统具有多种优势, 但是其中存在的问题也必须得到重视, 以确保系统的鲁棒性和高性能. 文献 [28] 提出了一种无线结构控制系统的估计器切换方法, 将潜在的数据丢失或传感器失效带来的影响最小化. 文献 [29] 提出了基于一致性的分布式线性滤波算法, 减轻了通信噪声的影响. 文献 [30] 采用可满足性模理论方法, 解决了安全状态估计复杂性问题. 文献 [31] 研究了传感器攻击下的线性动态系统状态估计问题. 文献 [32] 对传感器测量损坏下的状态重构问题进行了研究.

CPS 实现了从传统系统到智能系统的转变, 这意味着它必须对自我与外界环境有所感知, 以诊断并推演预测它的行动. 文献 [33] 将一种多层损伤检测策略应用于检测公路标志支持桁架结构中的损伤, 该检测策略使用的振动响应数据收集于分布式无线传感器网络. 文献 [34] 提出了一个分布式方法用于检测和分离互联 CPS 的多传感器故障, 并对所提方法的性能进行了分析. 文献 [35] 建立了故障检测协议, 用于识别异常的传感器并且定位故障源, 该协议

符合低计算复杂度和低实现难度的设计要求.

鲁棒性反映了系统在干扰下仍能保持正常运行的能力. 由于系统模型和环境无法完全已知, 受到干扰不可避免, 因此在系统设计中需要考虑鲁棒性的要求. CPS 可以视为多个独立系统的集成, 因而可靠性和鲁棒性在各个系统的互操作性上和整个系统之系统级的层面上是至关重要的. 文献 [36] 说明了 LOSA (Land open system architecture) 中一系列基于模型的系统之系统级工程和 CPS 工程技术的可行性. 文献 [37] 将输入-输出动态稳定性的概念引入 CPS 作为鲁棒性的概念, 这个概念涵括了现有的连续系统和离散系统鲁棒性的概念. 文献 [38] 研究了系统弹性中系统恢复行为这一特征, 并根据该描述设计了一个可靠的弹性 CPS. 文献 [39] 开发了针对网络-物理环境下非线性网络系统的分布式控制器, 同时对提出的异步传输策略进行了鲁棒性分析.

2.4 CPS 决策与控制

CPS 将信息技术与通信技术融入制造业, 促进了新一代智能工业的发展, 同时对相关领域的传统研究方法提出了挑战. 系统的大规模化要求更高效的任务调度与管理, 智能化要求系统在具有认知能力的条件下做到更准确地预测与决策, 复杂化的系统需要综合的控制器设计与更先进的控制方法研究. 本节从 CPS 的调度、决策与控制等方面进行介绍.

CPS 通过通信与计算, 包含跨空间的多种系统, 使其更加需要对多并行任务的调度问题进行研究. 近年的研究开始关注并行任务的实时调度设计, 即任务可以在同时刻由多核并行处理. 现实应用中, 任务在接入共享资源时需要同步化. 然而, 同步化给任务调度带来难点, 例如加锁. 文献 [40] 针对并行任务设计了实时联合调度程序, 并对任务集的调度性分析方法进行了研究, 区别于现有方法针对的任务模型, 该研究考虑了任务访问的共享资源受到两类自旋锁保护. 随着应用需求的综合化、复杂化, CPS 中对于嵌入式计算系统的计算能力要求也随之提高. GPU 因可编程性、优秀的性能、低耗能等优势在嵌入式系统的应用中获得重要的地位. 针对基于 GPU 的嵌入式系统, 文献 [41] 提出了一种运行时调度框架, 可以用更为灵活的方式处理事件驱动应用程序的动态行为, 即同时考虑时间与空间的抢占.

信息与通信技术的结合, 使物理系统智能化, 造就了 CPS, 推进了制造行业与人类生活的智能化. 智能化的体现之一就是对于环境的感知和状态的评估, 进而能够预测运行性能, 做出准确的决策与安排. 文献 [42] 提出了一种基于环境感知的适应方法来改

进人机交互过程的决策系统, 通过选择最适当的操作来适应操作环境中的变化, 使系统能够以类似的性能级别继续运行. 为了充分利用工厂较低层次的智能实体, 同时控制整个系统, 文献 [43] 提出了一种基于状态的决策方法来平衡自组织控制和整体系统管理, 使用功能和能力来描述机器和模块状态. 文献 [44] 提出了一种基于分区 (Compartmentalization based) 的设计方法, 平行处理电网设计和维护中的多种问题. 不同于传统方法只能单独解决各自特定领域的问题, 该算法将一系列的解决方案按照最优的顺序安排, 可以显著降低总成本.

CPS 将控制、计算和通信紧密地联系在一起, 意味着无线传感器执行器网络和计算机网络都需要面临大量且多样的控制对象, 因此单一的、独立的控制器不再适用于 CPS. 文献 [45] 提出了一个整体的网络物理管理框架, 采用整体式控制器为物理对象产生执行信号, 并重构无线传感器执行器网络来维持期望的控制性能, 增强了无线控制系统在网络和物理扰动下的可靠性. 文献 [46] 提出了基于二次规划的控制框架, 统合了安全状况与控制目标, 安全状况利用倒数与归零这两类控制屏障函数来描述, 控制目标利用相应的控制李雅普诺夫函数来描述. 在此之下, 设计了一类应对 CPS 多种安全目标的综合控制器.

控制方法在过去的几十年中受到了广泛的重视与研究, 例如 PID 控制、自适应控制、模糊控制等. 然而, CPS 将网络技术与通信技术引入到传统物理系统的控制中, 给已有的控制方法在应用时的鲁棒性、可靠性等方面带来了挑战. 文献 [47] 提出了一种 CPS 自适应嵌入式控制方法, 演示了强化学习适应 ECS 软件属性的适用性, 此自适应在线方法的好处是降低了 ECS 和整体 CPS 的平均功耗. 针对受到外源干扰的 CPS, 文献 [48] 提出了一种自适应控制系统, 针对时不变、状态依赖的对抗性的传感器和执行器攻击, 开发了一种自适应控制器. 针对一类受到间歇 DoS 攻击的非线性互联 CPS, 文献 [49] 研究了分散自适应输出反馈控制问题, 构建一类开关型状态估计器, 通过对输出量的测量来获得系统状态. 针对具有非参数不确定性和执行器故障的 MIMO 非线性系统, 文献 [50] 提出了一种 PID 控制方法, 可以自适应调节 PID 增益, 结构简单, 计算成本低廉, 具有鲁棒性和容错能力. 文献 [51] 提出了一种基于模糊逻辑的 CPS 调度与控制方法. 文献 [52] 提出了一种基于模糊逻辑的分布式控制系统来控制模拟过程所需功能块的开发.

2.5 CPS 集成设计技术

CPS 集成设计技术主要包括软件和硬件的研究.

2.5.1 软件

软件的研究主要分为软件架构、软件中间件、软件服务和软件调度四个方面.

软件架构联系着物理世界与信息世界, 对新产品开发、产品线开发、软件维护以及软件升级起着重要作用. 文献 [53] 提出了一种设计分布式测量系统 (Distributed measurement system, DMS) 和 CPS 的基于代理的软件架构, 此架构使用代理范式编程, 可以动态地配置、更新和扩展 DMS, 无需重新启动应用程序或重新启动系统. 文献 [54] 提出了一种灵活应用软件服务的信息物理控制系统软件架构, 此架构结合了基于云计算的信息物理控制系统开发的有效设计模式.

中间件是指位于操作系统和应用软件之间的一层系统软件. 通常, CPS 应用包括低层次的计算组件, 例如传感器和执行器, 它们必须进行通信以执行复杂的任务. 而这些计算组件可能存在于不同应用领域, 中间件技术可以实现处于不同应用领域组件之间的通信. 文献 [55] 阐述了中间件应该具有的体系结构, 提出了一种以数据为中心的中间件. 文献 [56] 提出了一种系统化通用中间件的方法, 此方法基于面向特征的软件开发原则, 并要求更高层次的对现代中间件代数结构进行特征提取. 文献 [57] 对基于无线传感器网络的大型 CPS 智能中间件的构建进行了研究, 弥补了低层次算法与应用程序开发过程之间的差距.

CPS 是受软件系统控制的物理实体的集成, 有效地组合网络和物理实体提供的服务以实现特定的任务仍然是一个挑战, 而传统的基于服务的模型和结合技术不适用于 CPS, 因此文献 [58] 提出了一种创新的物理实体面向服务模型来解决这个问题, 并提出一种两级的组合推理方法. 文献 [59] 提出了一种大规模 CPS 中规划和执行的面向服务的体系结构, 该结构提供了领域建模、规划、执行、监视和执行服务之间的清晰分离, 通过将系统目标分解为更小的子目标有助于实现系统的系统范式, 从而提高所提解决方案的可伸缩性. 文献 [60] 提出了物理服务规范新模型, 以促进 CPS 的实时服务组合. 文献 [61] 提出了一种上下文敏感的服务组合框架, 大大提高了服务发现的精度和效率、 workflow 执行的成功率以及服务组合优化算法的性能.

在 CPS 网络带宽受限的情况下, 为了提高网络利用率, 需要对调度问题进行研究. 为了提高事件的时间戳在实际应用程序中的精确度, 文献 [62] 提出了一种用于 CPS 不确定时间戳的事件调度算法. 为了将任务调度机制整合在一起, 并同时兼顾交通突发事件和数据包丢失, 文献 [63] 提出了一种在云辅助 CPS 中变量负荷的调度算法. 文献 [64] 提出了

一种 CPS 节点操作系统的混合参数调度算法, 实验结果表明, 该算法有效提高了 CPS 节点操作系统的可预测性和可靠性. 文献 [65] 提出了一种 CPS 最佳 ELSF 实时调度算法, 提高了系统的实时性. 文献 [66] 提出了一种高效的混合临界系统调度算法, 保证了严格的实时约束, 同时将所有控制应用程序的控制质量最大化. 为了提高 CPS 资源的利用率, 文献 [67] 提出了一种改进的实时任务抢占式调度算法. 文献 [68] 提出了一种基于消息反馈的 CPS 上层资源动态分配与优化调度策略. 文献 [69] 提出了基于蚁群算法的分布式 CPS 任务调度设计, 提高了系统资源管理和任务调度的快速性、准确性和有效性. 为了解决船舶监控视频数据上传的最优调度问题, 文献 [70] 提出了一种基于遗传优化的船舶 CPS 调度方法. 文献 [71] 提出了一种 CPS 的多控制器半休眠调度算法, 在一定程度上降低了实现成本, 提高了系统控制性能.

2.5.2 硬件

硬件的主要研究方向为网络设计、执行器设计和传感器网络三个方面.

通信网络实现了信息的可靠传输, 为 CPS 终端设备和网关提供数据承载功能. 为了提高物理系统的稳定性, 文献 [72] 提出了一种新型的无线传感器-执行器网络建模框架, 可以利用性能模型推导出传感器和控制器的最优交通生成率, 以保证控制系统稳定性约束的最大中断概率, 同时满足可调度性约束. 文献 [73] 提出了一种具有弹性网络和控制协同设计的体系结构, 为 CPS 提供了抗无线信道不确定性的能力. 为了提高资源利用率, 并减轻网络拥塞, 文献 [74] 提出了一种用于物联网的鲁棒边缘动态网络的设计方案. 文献 [75] 提出了一种 CPS 通信网络的设计方案, 建立了基于事件触发的软件模型, 并通过移动机器人 CPS 对整个通信网络进行了验证. 文献 [76] 采用一种 CPS 的方法对车辆安全网络进行了设计.

在 CPS 中, 为了解决控制资源合理配置问题, 需要对执行器进行设计. 文献 [77] 提出了分支定界法和贪婪算法, 解决了执行器选取的广度和最优控制问题, 并通过数值仿真验证了所提出算法的有效性.

传感器网络由许多在空间上分布的自动装置组成, 通过传感器的协作实现对不同位置的物理或环境状况进行监控. 文献 [78] 提出了一种利用无线传感器网络监测室内温度的网络物理设计方法, 实验证实该方法在 CPS 中可实现更高的能源效率. 文献 [79] 提出了一种基于智能无线传感器网络的 CPS 模型. 在该模型中, 物理系统的传感器给网络系统

提供反馈, 在此反馈的基础上, 控制系统由网络系统激活, 并在物理系统中操作执行器. 文献 [80] 提出了一种 CPS 传感器网络集成框架, 简化了 CPS 中传感器网络软件和硬件的集成和管理. 文献 [81] 针对无线传感器网络提出了一种安全多路径路由算法. 文献 [82] 介绍了一种用于监测大型多用途建筑物内环境条件的传感器网络. 文献 [83] 提出了一种基于传感器网络的智能电网 CPS, 满足了智能电网在线监测的需求.

2.6 数字孪生技术

数字孪生 (Digital twin) 的概念可追溯到 NASA 的阿波罗计划, 其中提及“至少建造两个相同的空间飞行器用以镜像反映空间飞行器在执行任务时的状况^[84]”. 数字孪生一词 2003 年由美国密歇根大学的 Grieves 教授在产品生命周期管理课程中提出, 并在 2015 年撰写的白皮书^[85] 中给出了详尽说明. 数字孪生是物理产品的虚拟数字形式的相等物, 主要包括三个部分: 1) 实体空间中的物理产品; 2) 虚拟空间中的虚拟产品; 3) 用以连接实体产品与虚拟产品的数据与信息的关系. 物理层面需要采集更多种且大量的关于物理产品特征的信息, 虚拟层面则需要改善采集的、可用的信息, 即添加大量的行为特征, 用以物理产品的虚拟化及其性能测试. 数字孪生的实现可以让许多使用者在不同的地域同时获得更为直观的产品信息, 更直接地进行比较, 从而提高了效率. 文献 [84] 指出现有的数字孪生应用方法缺乏概念基础, 提出了一个基于 Skin model shapes 概念的复杂参考模型, 作为设计与制造中的物理产品的数字孪生. 该模型解决了模型性能问题 (例如可扩展性、互操作性、可伸缩性、保真度) 与产品寿命周期内的不同操作 (例如组合、分解、转换、评价). 文献 [86] 展示了基于云计算的 CPS 数字孪生的参考模型架构, 该模型有助于识别系统中基础混杂的计算互动模式的不同程度.

在现有的 CPS 中, 数据通过制造设备采集后积极地影响生产输出. 在这些采集的数据中, 代表性描述设备运行状态的数据是通过标准协议 (例如 MTConnect) 提供的, 而其他有用的数据则可以由生产人员使用制造执行系统 (Manufacturing execution system, MES) 采集. 然而 MTConnect 的数据与 MES 的数据通常存在于各自独立且昂贵的系统中. 文献 [87] 给出了一个安卓设备与云计算工具支持下的新 MES 系统, 该系统结合了 MTConnect 数据与生产人员采集的产品数据, 具有低成本、易实现的优点并十分适用于小型制造企业.

文献 [88] 针对复杂的产品装配车间提出了一个基于数字孪生的智能产品管理与控制的框架, 该框

架实时采集、组织并管理装配车间的数据,而后构建了装配车间的数字孪生,基于数字孪生与大数据驱动下对装配车间预测,提供了装配车间的产品管理与控制服务.文献[89]将数字孪生方法应用于射流偏转器.

2.7 CPS 安全性技术

CPS 与传统 IT 系统最大的区别在于 CPS 是信息系统与物理系统紧密联系的系统,这在传统安全问题的基础上引入了更多物理系统的因素^[90],导致了 CPS 的安全性一旦被破坏,对应的物理系统会受到严重影响,因此对 CPS 安全性的研究意义重大.结合现有文献,将 CPS 安全性技术分为攻击技术与防御技术两个方面.

对 CPS 攻击技术的研究主要是从外界的角度出发,对攻击行为进行设计,例如 DoS 攻击^[91]、数据注入攻击和重放攻击等.针对集中式传感器网络中系统的状态估计,文献[92]研究了 DoS 攻击的调度问题,即入侵者通过优化攻击方案,使系统状态估计性能最差.文献[93]研究了电网系统中最优数据注入攻击问题,通过伪造部分仪表的数据对系统性能进行最大程度的破坏.文献[94]对重放攻击问题进行了研究,指出可以通过重放传感器历史数据来修改实时数据的方法,对系统进行攻击.

防御技术主要可以分为三个方面,即系统受到攻击前的防护措施、系统受到攻击时的攻击检测以及系统受到攻击后的响应机制.文献[95]研究了电力市场中数据注入攻击和攻击防御问题,将此问题描述为二人零和博弈,防御者通过保护合适的测量节点使攻击影响最小.文献[96]研究了数据注入攻击的检测问题,通过 Hynger 工具产生候选不变量,将其与实际不变量比较来检测攻击的出现.文献[97]提出了用于交流状态估计的数据注入攻击检测机制.文献[98]研究了重放攻击下网络化系统的弹性控制问题,提出了滚动时域控制法来解决此问题.文献[99]对车辆无线通信网络遭受 DoS 攻击下的弹性控制问题进行了研究.

3 CPS 系统案例

CPS 是典型的开放智能系统,其发展的较高层次应具有开放智能系统的五个基本特征:状态感知、实时分析、自主决策、精准执行和学习提升,即“20 字箴言^[100]”.目前对 CPS 的研究有如下特点:新概念较多、技术细节研究较多、整体技术研究较少、核心科学问题研究较少以及具备明显 CPS 系统特征的实际系统(例如分布式网络化控制的插电式电动汽车充电桩^[101]和中继系统^[102])较少.本节从系统级和系统之系统级两个方面分别给出 CPS 的系统

案例.

3.1 基于 Internet 的网络化三容水箱系统

基于 Internet 的网络化三容水箱系统构建于 2009 年,是清华大学自动化系过程控制教研室在三容水箱这一经典硬件平台基础上进行 CPS 的初步尝试,其核心改动是网络化.基于 Internet 的网络化三容水箱系统由一个 DTS200 三容水箱系统、两个网络化控制系统 (NetCon)、一个网络摄像机、一台上位机及 Internet 网络组成^[103].DTS200 三容水箱系统外观如图 3 所示.其中 $T1$, $T2$, $T3$ 是三个圆柱形水箱,各个水箱之间装有连接管,连接管中间装有球阀以控制水流量, $T2$ 水箱的水通过管道流向蓄水池,水泵将蓄水池里的水打入水箱 $T1$ 和 $T2$.NetCon 系统主要由网络化控制器、网络化可视控制组态软件和网络可视化监控组态软件组成.它作为网络接口,可以用来对水箱水位进行控制.网络摄像机用于水箱系统的监控.上位机的作用是进行实验操作,并观测系统的运行.网络用来进行数据传输.



图 3 DTS200 三容水箱系统实物图^[104]

Fig. 3 DTS200 three-tank system^[104]

在实验中,两个 NetCon 系统 (NetCon1 和 NetCon2) 分别位于不同地点.三容水箱系统放置于清华大学,通过 NetCon1 与网络相连,进行数据交互.网络摄像头放置在三容水箱附近,实验人员可以在任意位置对三容水箱进行监控.NetCon2 系统放置在格拉摩根大学(现为南威尔士大学),此系统可以通过网络对三容水箱系统进行准确地液位控制,并对系统发生的泄漏、堵塞、传感器、执行器等故障进行及时的检测、分离、估计及容错处理.这种控制形式符合 CPS 的特征,可以说基于 Internet 的网络化三容水箱系统是 CPS 的一个系统级应用案例^[104-106].



图 4 SOMS 系统架构应用部署图

Fig. 4 Application deployment diagram for SOMS system architecture

3.2 智能船舶运行与维护系统

中国船舶工业系统工程研究院基于系统之系统级 CPS 体系架构, 结合我国海洋装备技术和应用特点, 在国内首次研制以装备全寿命周期视情使用、视情管理和视情维护为核心, 面向船舶与航运智能化的智能船舶运行与维护系统 (Smart-vessel operation and maintenance system, SOMS^[107-108]), 为用户提供定制化服务, 利用智能化运维手段, 降低运行与维护成本, 并进一步面向船队、船东和船舶产业链, 分别设计了船舶 (个体)、船队 (群体) 和产业链 (社区) 的 CPS 应用解决方案, 为整个船舶产业链提供面向环境、状态、集群、任务的智能能力支撑。

SOMS 系统的架构可以概括为“两端 + 一网 + 两云”^[109], 即自主控制端、智能管理端、工业传输网络和“本地云 + 远程云”的混合云平台四部分, 涵盖了 CPS 状态感知、实时分析、科学决策、精准执行四个过程。在 2017 年中国船舶工业集团公司发布的全球首艘经船级社认证的智能船舶“大智号”中, SOMS 系统的架构应用部署图如图 4 所示, SOMS 系统通过了英国劳氏船级社和中国船级社的双认证, 成为全球首套同时满足中国船级社智能船舶规范智能能效 E、智能机舱 M、智能集成平台 I 符号以及英国劳氏船级社 Cyber-enabled ship 智能船舶规范中 Cyber SAFE, Cyber MAINTAIN, Cyber

PERFORM 符号要求系统的民用智能船舶系统产品。

自主控制端借助感知与自动控制技术实现个体、群体、环境、活动等多目标数据的感知与获取以及对设备、系统、单船与船队的自动控制。云平台借助工业云技术, 采用“本地云 + 远程云”的混合云架构既保证了本地计算的实时性、隐私性与安全性, 又保证了远程计算的共享性、协同性与高效性。智能管理端面向设备、系统、单船和船队故障预测、健康管理、能效优化和辅助决策等需求, 搭建了智能服务平台。自主控制端、智能管理端和混合云平台通过工业网络和工业软件技术形成数据驱动的 CPS 闭环赋能体系。

4 结束语

CPS 是支撑信息化和工业化深度融合的综合技术体系, 加强 CPS 技术的研究、推动 CPS 技术的应用对“中国制造 2025”战略的顺利实施、提升我国科技实力具有重大的现实意义。本文根据技术的应用特点对 CPS 当前的研究进展进行了详细分析, 并给出了系统级和系统之系统级的 CPS 案例。作为工业智能发展的一种支撑技术体系, CPS 正朝着体系化^[110]、复杂化方向发展, 尤其是对赛博 (Cyber) 空间中自主的认知与学习能力、控制与决策能力需求以及对实体空间中实时反馈能力、精准执行能力

需求日益提升. 因此, 对于 CPS 的技术发展与与应用实践提出了更高的要求, 同时也存在挑战.

1) 层次化 CPS 平台体系的挑战. 对于 CPS 应用而言, 如何构建层次化的平台体系是实践的关键环节之一. 目前 CPS 的应用平台尚缺乏明确定义, 面向产品级、系统级等不同层次的 CPS 应用平台构建仍处于探索阶段, 尚未形成统一标准体系.

2) CPS 架构设计的挑战. 尽管 CPS 技术在工程领域已有一些应用成果, 但从主流企业实际采用的解决方案来看, 架构设计仍处于探索阶段, 尚不成熟, 也缺少一些面向 CPS 复杂层级应用的新型架构设计, 例如引入微服务、数字孪生建模、混合事件驱动设计等.

3) 数字孪生建模的挑战. 作为实现 CPS 的关键基础之一, 数字孪生建模的准确性、实时性、同步性等特性从一定程度上决定了 CPS 技术的应用效果. 目前多采用传统仿真方法构建应用对象的数字孪生模型, 高效性与有效性有待进一步提升.

4) 开放空间下赛博安全的挑战. 网络架构、链路质量、传输安全、外界干扰、人为入侵等安全风险无处不在, 尤其在开放空间下, 系统缺陷和不足给 CPS 服务的持续性、正确性、安全性带来巨大危险, 赛博安全风险管控任重道远.

5) CPS 测试验证技术的挑战. 对 CPS 的测试验证方法与手段是 CPS 技术发展的重要保障和支撑. 目前, CPS 测试验证技术相关的理论知识基础比较薄弱, 导致受重视程度和发展速度远远低于其他研究方向, CPS 的测试验证技术也是 CPS 未来的重要发展方向之一.

References

- White Paper: Cyber-Physical System. China Electronics Standardization Institute, [Online], available: <http://www.cesi.cn/201703/2251.html>, September 21, 2018 (信息物理系统白皮书. 中国电子技术标准化研究院, [Online], available: <http://www.cesi.cn/201703/2251.html>, 2018 年 9 月 21 日)
- Lee J, Qiu Bo-Hua, Liu Zong-Chang, Wei Mu-Heng. *Cyber-Physical System: The New Generation of Industrial Intelligence*. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2017. (李杰, 邱伯华, 刘宗长, 魏慕恒. CPS: 新一代工业智能. 上海: 上海交通大学出版社, 2017.)
- Xing Li-Wen. A report from academician You-Xian Sun on industrial cyber physics fusion systems. *Informatization Construction*, 2018, (1): 10–11 (邢黎闻. 孙优贤院士论工业信息物理融合系统. 信息化建设, 2018, (1): 10–11)
- Wen Jing-Rong, Wu Mu-Qing, Su Jing-Fang. Cyber-physical system. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(4): 507–517 (温景容, 武穆清, 宿景芳. 信息物理融合系统. 自动化学报, 2012, **38**(4): 507–517)
- Li Zuo-Peng, Zhang Tian-Chi, Zhang Jing. Survey on the research of cyber-physical systems (CPS). *Computer Science*, 2011, **38**(9): 25–31 (黎作鹏, 张天驰, 张菁. 信息物理融合系统 (CPS) 研究综述. 计算机科学, 2011, **38**(9): 25–31)
- Guo A, Yu D, Hu Y, Wang S, An T, Zhang T F. Design and implementation of data collection system based on CPS model. In: *Proceedings of the 2015 International Conference on Computer Science and Mechanical Automation (CSMA)*. Hangzhou, China: IEEE, 2015. 139–143
- Iri N, Yu L, Shen H Y, Caulfield G. Congestion-adaptive data collection with accuracy guarantee in cyber-physical systems. In: *Proceedings of the 12th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON)*. Seattle, WA, USA: IEEE, 2015. 82–90
- Huang W Q, Dai W B, Wang P, Vyatkin V. Real-time data acquisition support for IEC 61499 based industrial cyber-physical systems. In: *Proceedings of the 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*. Beijing, China: IEEE, 2017. 6689–6694
- Qi Chao, He Yong. Design of data collection system based on CPS. *Computer Systems and Applications*, 2010, **19**(6): 5–8 (齐超, 何勇. 基于 CPS 的数据采集系统设计. 计算机系统应用, 2010, **19**(6): 5–8)
- Kuo S Y, Chou Y H, Chen C Y. Quantum-inspired algorithm for cyber-physical visual surveillance deployment systems. *Computer Networks*, 2017, **117**: 5–18
- Wang H, Li J Z, Gao H. Minimized cost gateway deployment in cyber-physical systems. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2015, **2015**(9): Article No. 28
- Kim Y H, Kim C M, Han Y H, Jeong Y S, Park D S. An efficient strategy of nonuniform sensor deployment in cyber physical systems. *The Journal of Supercomputing*, 2013, **66**(1): 70–80
- Liu J, Kou T Y, Chen Q, Sherali H D. On wireless network infrastructure optimisation for cyber-physical systems in future smart buildings. *International Journal of Sensor Networks*, 2015, **18**(3–4): 148–160
- Jiang Jun, Huang Chuan-He, Hua Chao, Hu Hai-Qiao, Peng Hui. Data transmission scheme of real-time control CPS based on software defined resources. *Computer Engineering and Science*, 2015, **37**(12): 2250–2255 (蒋俊, 黄传河, 华超, 胡海桥, 彭晖. 基于软件定义资源的实时控制 CPS 数据传输机制. 计算机工程与科学, 2015, **37**(12): 2250–2255)
- Liu K, Lee V C S, Ng J K Y, Son S H, Sha E H M. Scheduling temporal data with dynamic snapshot consistency requirement in vehicular cyber-physical systems. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, 2014, **13**(5S): Article No. 163

- 16 Xia F, Wang L Q, Zhang D Q, He D J, Kong X J. An adaptive MAC protocol for real-time and reliable communications in medical cyber-physical systems. *Telecommunication Systems*, 2015, **58**(2): 125–138
- 17 You M L, Liu Q T, Sun H J. New communication strategy for spectrum sharing enabled smart grid cyber-physical system. *IET Cyber-Physical Systems: Theory and Applications*, 2017, **2**(3): 136–142
- 18 Nguyen N T, Leu M C, Liu X Q F. Real-time communication for manufacturing cyber-physical systems. In: Proceedings of the 16th IEEE International Symposium on Network Computing and Applications (NCA). Cambridge, MA, USA: IEEE, 2017. 241–244
- 19 Lazaro C, Oruklu E, Cinar A. Cyber-physical platform development for multivariable artificial pancreas systems. *International Journal of Handheld Computing Research*, 2015, **6**(3): 1–16
- 20 Ma M M, An J Y, Huang Z, Cao Z B. Sensor data fusion based on an improved Dempster-Shafer evidence theory in vehicular cyber-physical systems. In: Proceedings of the 2015 IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC). Sydney, Australia: IEEE, 2015. 683–687
- 21 Peng Yu, Luo Qing-Hua, Peng Xi-Yuan. Analysis of uncertain data processing methods in networking test framework. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, **31**(1): 229–240
(彭宇, 罗清华, 彭喜元. 网络化测试体系中不确定性数据处理方法浅析. *仪器仪表学报*, 2010, **31**(1): 229–240)
- 22 Fitzgerald J, Gamble C, Payne R, Larsen P G, Basagianis S, Mady A E D. Collaborative model-based systems engineering for cyber-physical systems, with a building automation case study. *INCOSE International Symposium*, 2016, **26**(1): 817–832
- 23 Larsen P G, Fitzgerald J, Woodcock J, Nilsson R, Gamble C, Foster S. Towards semantically integrated models and tools for cyber-physical systems design. In: Proceedings of the 7th International Symposium on Leveraging Applications of Formal Methods, Verification and Validation. Corfu, Greece: Springer, 2016. 171–186
- 24 Wang B B, Baras J S. HybridSim: a modeling and co-simulation toolchain for cyber-physical systems. In: Proceedings of the 17th IEEE/ACM International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications. Delft, Netherlands: IEEE, 2013. 33–40
- 25 Derler P, Lee E A, Vincentelli A S. Modeling cyber-physical systems. *Proceedings of the IEEE*, 2012, **100**(1): 13–28
- 26 Wan J, Canedo A, Faruque M A A. Cyber-physical code-sign at the functional level for multidomain automotive systems. *IEEE Systems Journal*, 2017, **11**(4): 2949–2959
- 27 Vatanparvar K, Faezi S, Burago I, Levorato M, Faruque M A A. Extended range electric vehicle with driving behavior estimation in energy management. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, DOI: 10.1109/TSG.2018.2815689
- 28 Sun Z, Ou G, Dyke S J, Lu C. A state estimation method for wireless structural control systems. *Structural Control and Health Monitoring*, 2017, **24**(6): Article No. e1929
- 29 Savas A J, Srivastava V, Leonard N E. On distributed linear filtering with noisy communication. In: Proceedings of the 2017 American Control Conference (ACC). Seattle, WA, USA: IEEE, 2017. 2699–2704
- 30 Shoukry Y, Nuzzo P, Puggelli A, Sangiovanni-Vincentelli A L, Seshia S A, Tabuada P. Secure state estimation for cyber-physical systems under sensor attacks: a satisfiability modulo theory approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, **62**(10): 4917–4932
- 31 Mishra S, Shoukry Y, Karamchandani N, Diggavi S N, Tabuada P. Secure state estimation against sensor attacks in the presence of noise. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2017, **4**(1): 49–59
- 32 Shoukry Y, Tabuada P. Event-triggered state observers for sparse sensor noise/attacks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, **61**(8): 2079–2091
- 33 Sun Z X, Krishnan S, Hackmann G, Yan G R, Dyke S J, Lu C Y, et al. Damage detection on a full-scale highway sign structure with a distributed wireless sensor network. *Smart Structures and Systems*, 2015, **16**(1): 223–242
- 34 Reppa V, Polycarpou M M, Panayiotou C G. Distributed sensor fault diagnosis for a network of interconnected cyberphysical systems. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2015, **2**(1): 11–23
- 35 Likhov A Y, Lemons N, McAndrew T C, Hagberg A, Backhaus S. Detection of cyber-physical faults and intrusions from physical correlations. In: Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Data Mining (ICDM). Barcelona, Spain: IEEE, 2016. 303–310
- 36 Payne R, Fitzgerald J, Bryans J, Winthorpe E. Applying model-based SE techniques for dependable land systems. *INCOSE International Symposium*, 2016, **26**(1): 1783–1798
- 37 Rungger M, Tabuada P. A notion of robustness for cyber-physical systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, **61**(8): 2108–2123
- 38 Jackson M, Fitzgerald J S. Resilience profiling in the model-based design of cyber-physical systems. In: Proceedings of the 14th Overture Workshop on Towards Analytical Tool Chains. Limassol, Cyprus: Aarhus University Department of Engineering, 2016. 1–16
- 39 De Persis C, Postoyan R. A Lyapunov redesign of coordination algorithms for cyber-physical systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, **62**(2): 808–823
- 40 Dinh S, Li J, Agrawal K, Gill C, Lu C Y. Blocking analysis for spin locks in real-time parallel tasks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2018, **29**(4): 789–802

- 41 Lee H, Faruque M A A. Run-time scheduling framework for event-driven applications on a GPU-based embedded system. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2016, **35**(12): 1956–1967
- 42 Quintas J, Menezes P, Dias J. Information model and architecture specification for context awareness interaction decision support in cyber-physical human-machine systems. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2017, **47**(3): 323–331
- 43 Wang F F, Ju F, Lu Y. A study on performance evaluation and status-based decision for cyber-physical production systems. In: Proceedings of the 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Xi'an, China: IEEE, 2017. 1000–1005
- 44 Vatanparvar K, Fakhouri S, Siddika M A, Faruque M A A. Compartmentalisation-based design automation method for power grid. *IET Cyber-Physical Systems: Theory and Applications*, 2017, **2**(1): 20–27
- 45 Ma Y H, Gunatilaka D, Li B, Gonzalez H, Lu C Y. Holistic cyber-physical management for dependable wireless control systems. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*, 2018, **3**(1): Article No. 3
- 46 Ames A D, Xu X R, Grizzle J W, Tabuada P. Control barrier function based quadratic programs for safety critical systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, **62**(8): 3861–3876
- 47 Buini H M, Peter S, Givargis T. Adaptive embedded control of cyber-physical systems using reinforcement learning. *IET Cyber-Physical Systems: Theory and Applications*, 2017, **2**(3): 127–135
- 48 Xu J, Haddad W M, Hayakawa T. An adaptive control architecture for cyber-physical system security in the face of sensor and actuator attacks and exogenous stochastic disturbances. In: Proceedings of the 56th Annual Conference on Decision and Control (CDC). Melbourne, Australia: IEEE, 2017. 1380–1385
- 49 An L W, Yang G H. Decentralized adaptive fuzzy secure control for nonlinear uncertain interconnected systems against intermittent DoS attacks. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018, DOI: 10.1109/TCYB.2017.2787740
- 50 Song Y D, Huang X C, Wen C Y. Robust adaptive fault-tolerant PID control of MIMO nonlinear systems with unknown control direction. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, **64**(6): 4876–4884
- 51 Cheng S T, Chou J H. Fuzzy-based actuators controlling for minimizing power consumption in cyber-physical system. In: Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications. Fukuoka City, Japan: IEEE, 2012. 160–166
- 52 Garcia C A, Castellanos E X, Buele J, Espinoza J, Beltr'an C, Pilatasig M, et al. Fuzzy control implementation in low cost CPPS devices. In: Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI). Daegu, South Korea: IEEE, 2017. 162–167
- 53 Carni D, Grimaldi D, Nigro L, Sciammarella P F, Cicirelli F. Agent-based software architecture for distributed measurement systems and cyber-physical systems design. In: Proceedings of the 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). Torino, Italy: IEEE, 2017. 1898–1903
- 54 Engelsberger M, Greiner T. Software architecture for cyber-physical control systems with flexible application of the software-as-a-service and on-premises model. In: Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Seville, Spain: IEEE, 2015. 1544–1549
- 55 Kim J H, Lee S H, Kim W T, Park S M. Data transport block structure design in CPS middleware subsystem. In: Proceedings of the 2010 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). Jeju, South Korea: IEEE, 2010. 427–428
- 56 Dabholkar A, Gokhale A. An approach to middleware specialization for cyber physical systems. In: Proceedings of the 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Montreal, Canada: IEEE, 2009. 73–79
- 57 Reijers N, Wang Y C, Shih C S, Hsu J Y, Lin K J. Building intelligent middleware for large scale CPS systems. In: Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Service-Oriented Computing and Applications (SOCA). Irvine, CA, USA: IEEE, 2011. 1–4
- 58 Huang J, Bastani F, Yen I L, Dong J, Zhang W, Wang F J, et al. Extending service model to build an effective service composition framework for cyber-physical systems. In: Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Service-Oriented Computing and Applications (SOCA). Taipei, China: IEEE, 2009. 1–8
- 59 Feljan A V, Mohalik S K, Jayaraman M B, Badrinath R. SOA-PE: a service-oriented architecture for planning and execution in cyber-physical systems. In: Proceedings of the 2015 International Conference on Smart Sensors and Systems (IC-SSS). Bangalore, India: IEEE, 2015. 1–6
- 60 Yen I L, Zhu W, Bastani F, Huang Y T, Zhou G. Rapid service composition reasoning for agile cyber physical systems. In: Proceedings of the 10th IEEE International Symposium on Service-Oriented System Engineering (SOSE). Oxford, England: IEEE, 2016. 442–449
- 61 Wang T, Niu C L, Cheng L L. A two-phase context-sensitive service composition method with the workflow model in cyber-physical systems. In: Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Computational Science and Engineering. Chengdu, China: IEEE, 2014. 1475–1482
- 62 Li F F, Liu C, Yu G, Chen Z. A scheduling algorithm of events with uncertain timestamps for CPS. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Big Data Computing and Communications (BIGCOM). Chengdu, China: IEEE, 2017. 313–319

- 63 Chejerla B K, Madria S. Information fusion architecture for variable-load scheduling in a cloud-assisted CPS. In: Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Collaboration and Internet Computing (CIC). Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 2016. 178–187
- 64 Zhou B H, Yu M, Liu T. A mixed parameter scheduling algorithm of node operating system in CPS. In: Proceedings of the 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). Guilin, China: IEEE, 2016. 2980–2985
- 65 Zhou B H, Yao Y, Mao H Y, Yao D P, Xu L B. Research on optimal ELSF real-time scheduling algorithm for CPS. In: Proceedings of the 28th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Yinchuan, China: IEEE, 2016. 6867–6871
- 66 Schneider R, Goswami D, Masrur A, Chakraborty S. QoC-oriented efficient schedule synthesis for mixed-criticality cyber-physical systems. In: Proceedings of the 2012 Forum on Specification and Design Languages. Vienna, Austria: IEEE, 2012. 60–67
- 67 Zhang J, Yang X D, Fan H B. An improved real-time task preemptive scheduling in cyber-physical systems. In: Proceedings of the 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Chongqing, China: IEEE, 2017. 5843–5848
- 68 Lun Yong-Liang, Cheng Liang-Lun. A kind of the upper resources based on feedback CPS dynamic allocation and optimization scheduling strategy. *Bulletin of Science and Technology*, 2012, **28**(12): 128–130
(伦永亮, 程良伦. 一种基于反馈的 CPS 上层资源动态分配与优化调度策略. *科技通报*, 2012, **28**(12): 128–130)
- 69 Han Jie, Ma Bin, Huang Kuan, Wang Chang-Tao, Wei Wei. Design of distributed CPS system task scheduling based on ant colony algorithm. *Measurement and Control Technology*, 2015, **34**(2): 121–124
(韩杰, 马斌, 黄宽, 王长涛, 魏威. 基于蚁群算法的分布式 CPS 系统任务调度设计. *测控技术*, 2015, **34**(2): 121–124)
- 70 Yang T T, Feng H L, Zhao J, Deng R L, Wang Y, Su Z. Genetic optimization-based scheduling in maritime cyber physical systems. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2017, **13**(7): 1–10
- 71 Gong H F, Li R F, An J Y, Chen W W, Li K Q. Scheduling algorithms of flat semi-dormant multicontrollers for a cyber-physical system. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, **13**(4): 1665–1680
- 72 Park P. Traffic generation rate control of wireless sensor and actuator networks. *IEEE Communications Letters*, 2015, **19**(5): 827–830
- 73 Kim D, Won Y, Eun Y, Park K J. W-Simplex: resilient network and control co-design under wireless channel uncertainty in cyber-physical systems. In: Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA). Mauna Lani, HI, USA: IEEE, 2017. 49–54
- 74 Lorenzo B, Garcia-Rois J, Li X H, Gonzalez-Castano J, Fang Y G. A robust dynamic edge network architecture for the internet of things. *IEEE Network*, 2018, **32**(1): 8–15
- 75 Samant R, Agrawal A, Behera L. Design of communication network for cyber physical system. In: Proceedings of the 39th National Systems Conference (NSC). Noida, India: IEEE, 2015. 1–6
- 76 Fallah Y P, Sengupta R. A cyber-physical systems approach to the design of vehicle safety networks. In: Proceedings of the 32nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Macau, China: IEEE, 2012. 324–329
- 77 Taha A F, Gatsis N, Summers T, Nugroho S. Actuator selection for cyber-physical systems. In: Proceedings of the 2017 American Control Conference (ACC). Seattle, WA, USA: IEEE, 2017. 5300–5305
- 78 Shen C, Chen S B. A cyber-physical design for indoor temperature monitoring using wireless sensor networks. In: Proceedings of the 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2017. 1–6
- 79 Mariappan R, Reddy P V N, Wu C. Cyber physical system using intelligent wireless sensor actuator networks for disaster recovery. In: Proceedings of the 2015 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN). Jabalpur, India: IEEE, 2015. 95–99
- 80 Garay J R B, Kofuji S T. Architecture for sensor networks in cyber-physical system. In: Proceedings of the 2010 IEEE Latin-American Conference on Communications. Bogota, Colombia: IEEE, 2010. 1–6
- 81 Triki B, Rekhis S, Boudriga N. A novel secure and multipath routing algorithm in wireless sensor networks. In: Proceedings of the 2010 International Conference on Data Communication Networking (DCNET). Athens, Greece: IEEE, 2010. 25–34
- 82 Pitt L, Green P R, Lennox B. A sensor network for predicting and maintaining occupant comfort. In: Proceedings of the 2013 IEEE Workshop on Environmental Energy and Structural Monitoring Systems. Trento, Italy: IEEE, 2013. 19–24
- 83 Zhang R R. Research on advanced sensor network based cyber-physical system for the smart grid. In: Proceedings of the 2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Shenzhen, China: IEEE, 2014. 423–426
- 84 Schleich B, Anwer N, Mathieu L, Wartzack S. Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals*, 2017, **66**(1): 141–144
- 85 Grieves M. *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*. White paper, Florida Institute of Technology. 2015.
- 86 Alam K M, El Saddik A. C2PS: a digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems. *IEEE Access*, 2017, **5**: 2050–2062

- 87 Coronado P D U, Lynn R, Louhichi W, Parto M, Wescoat E, Kurfess T. Part data integration in the shop floor digital twin: mobile and cloud technologies to enable a manufacturing execution system. *Journal of Manufacturing Systems*, 2018, **48**: 25–33
- 88 Zhuang C B, Liu J H, Xiong H. Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, **96**(1–4): 1149–1163
- 89 Iglesias D, Bunting P, Esquembri S, Hollocombe J, Silburn S, Vitton-Mea L, et al. Digital twin applications for the JET divertor. *Fusion Engineering and Design*, 2017, **125**: 71–76
- 90 Peng Kun-Lun, Peng Wei, Wang Dong-Xia, Xing Qian-Qian. Research survey on security issues in cyber-physical systems. *Netinfo Security*, 2016, (7): 20–28
(彭昆仑, 彭伟, 王东霞, 邢倩倩. 信息物理融合系统安全问题研究综述. *信息安全*, 2016, (7): 20–28)
- 91 Zhao Y H, He X, Zhou D H. Optimal joint control and triggering strategies against denial of service attacks: a zero-sum game. *IET Control Theory and Applications*, 2017, **11**(14): 2352–2360
- 92 Yang C, Yang W, Shi H B. DoS attack in centralised sensor network against state estimation. *IET Control Theory and Applications*, 2018, **12**(9): 1244–1253
- 93 Yang Q Y, Yang J, Yu W, An D, Zhang N, Zhao W. On false data-injection attacks against power system state estimation: modeling and countermeasures. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2014, **25**(3): 717–729
- 94 Zhao J F, Wang J, Yin L. Detection and control against replay attacks in smart grid. In: Proceedings of the 12th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS). Wuxi, China: IEEE, 2016. 624–627
- 95 Esmalifalak M, Shi G, Han Z, Song L Y. Bad data injection attack and defense in electricity market using game theory study. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, **4**(1): 160–169
- 96 Beg O A, Johnson T T, Davoudi A. Detection of false-data injection attacks in cyber-physical DC microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, **13**(5): 2693–2703
- 97 Yu J J Q, Hou Y H, Li V O K. Online false data injection attack detection with wavelet transform and deep neural networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, **14**(7): 3271–3280
- 98 Zhu M H, Martínez S. On the performance analysis of resilient networked control systems under replay attacks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2014, **59**(3): 804–808
- 99 Biron Z A, Dey S, Pisu P. Resilient control strategy under denial of service in connected vehicles. In: Proceedings of the 2017 American Control Conference (ACC). Seattle, WA, USA: IEEE, 2017. 4971–4976
- 100 Hu Hu, Zhao Min, Ning Zhen-Bo, Guo Zhao-Hui, Chen Zhi-Cheng, Zhu Duo-Xian, et al. *Three-body Intelligence Revolution*. Beijing: China Machine Press, 2016.
(胡虎, 赵敏, 宁振波, 郭朝晖, 陈志成, 朱铎先, 等. 三体智能革命. 北京: 机械工业出版社, 2016.)
- 101 Yang B, Li J W, Han Q N, He T, Chen C L, Guan X P. Distributed control for charging multiple electric vehicles with overload limitation. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2016, **27**(12): 3441–3454
- 102 Yang B, Shen Y Y, Han Q N, Chen C L, Guan X P, Zhang W D. Energy-efficient resource allocation for time-varying OFDMA relay systems with hybrid energy supplies. *IEEE Systems Journal*, 2018, **12**(1): 702–713
- 103 He Xiao, Wang Zi-Dong, Liu Yang, Ji Yin-Dong, Zhou Dong-Hua. Internet-based three-tank experimental platform. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2011, **43**(S1): 190–193
(何潇, 王子栋, 刘洋, 吉吟东, 周东华. 基于 Internet 的网络化三容水箱实验平台. *南京航空航天大学学报*, 2011, **43**(S1): 190–193)
- 104 Zhou D H, He X, Wang Z D, Liu G P, Ji Y D. Leakage fault diagnosis for an internet-based three-tank system: an experimental study. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, **20**(4): 857–870
- 105 He X, Wang Z D, Ji Y D, Zhou D H. Robust fault detection for networked systems with distributed sensors. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, **47**(1): 166–177
- 106 He X, Wang Z D, Wang X F, Zhou D H. Networked strong tracking filtering with multiple packet dropouts: algorithms and applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, **61**(3): 1454–1463
- 107 Qiu Bo-Hua, Zhang Yu-Feng, Wei Mu-Heng, He Xiao, Zhang Yu, Zhu Hui-Min. Great intelligence: cyber-enable ship. *IEEE Spectrum*, 2018, (2): 66–69
(邱伯华, 张玉峰, 魏慕恒, 何晓, 张羽, 朱慧敏. “大智号”: 智慧领航. *科技纵览*, 2018, (2): 66–69)
- 108 Qiu Bo-Hua, Jiang Yun-Peng, Wei Mu-Heng, He Xiao, Zhu Wu. Knowledge economy and the application of CPS in shipbuilding industry. *Information Technology and Standardization*, 2016, (11): 17–21
(邱伯华, 蒋云鹏, 魏慕恒, 何晓, 朱武. 知识与 CPS 在船舶工业中的应用实践. *信息技术与标准化*, 2016, (11): 17–21)
- 109 Qiu B H, Zhang Y, Wei M H, Li Y J, Wang Y. Hybrid cloud based cyber-enabled ship control and management system. In: Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM). Seattle, WA, USA: IEEE, 2018. 1–6
- 110 Lee J [Author], Qiu Bo-Hua, Liu Zong-Chang, Wei Mu-Heng, Dong Zhi-Sheng [Translator]. *Industrial Big Data: The Revolutionary Transformation and Value Creation in Industry 4.0 Era*. Beijing: China Machine Press, 2015.
(李杰 [著], 邱伯华, 刘宗长, 魏慕恒, 董智升 [译]. 工业大数据: 工业 4.0 时代的工业转型与价值创造. 北京: 机械工业出版社, 2015.)



李洪阳 清华大学自动化系硕士研究生. 主要研究方向为信息物理系统, 网络化系统的故障检测与估计. E-mail: lihongya16@mails.tsinghua.edu.cn
(**LI Hong-Yang** Master student in the Department of Automation, Tsinghua University. His research interest covers cyber-physical systems, fault detection and estimation for networked systems.)



赵 晔 清华大学自动化系硕士研究生. 主要研究方向为信息物理系统, 网络化系统的最优滤波与故障诊断. E-mail: zhaoye15@mails.tsinghua.edu.cn
(**ZHAO Ye** Master student in the Department of Automation, Tsinghua University. His research interest covers cyber-physical systems, optimal filtering and fault diagnosis for networked systems.)



魏慕恒 中国船舶工业系统工程研究院海洋智能技术创新中心高级工程师. 2013 年获得清华大学博士学位. 主要研究方向为信息物理系统, 工业智能, 工业大数据, 预测与健康管理. E-mail: weimuheng@163.com
(**WEI Mu-Heng** Senior engineer at the Oceanic Intelligent Technology Innovation Center, CSSC Systems Engineering Research Institute. She received her Ph. D. degree from Tsinghua University in 2013. Her research interest covers cyber-physical systems, industrial AI, industrial big data, and prognostic and health management.)



骆文城 北方工业大学自动化系硕士研究生. 主要研究方向为信息物理系统, 网络化系统的安全性. E-mail: lwc199406@sina.com
(**LUO Wen-Cheng** Master student in the Department of Automation, North China University of Technology. His research interest covers cyber-physical systems, security for networked systems.)



黄 洁 清华大学自动化系博士研究生. 主要研究方向为信息物理系统, 网络化系统的状态估计和故障诊断. E-mail: huangjie18@mails.tsinghua.edu.cn
(**HUANG Jie** Ph. D. candidate in the Department of Automation, Tsinghua University. Her research interest covers cyber-physical systems, state estimation and fault diagnosis for networked systems.)



何 晓 中国船舶工业系统工程研究院海洋智能技术创新中心工程师. 2012 年获得中国矿业大学硕士学位. 主要研究方向为信息物理系统, 预测与健康管理, 故障诊断, 船舶系统设计. E-mail: hxcumtb@126.com
(**HE Xiao** Engineer at the Oceanic Intelligent Technology Innovation Center, CSSC Systems Engineering Research Institute. He received his master degree from China University of Mining and Technology in 2012. His research interest covers cyber-physical systems, prognostic and health management, fault diagnosis, and ship system design.)



邱伯华 中国船舶工业系统工程研究院海洋智能技术创新中心研究员. 2004 年获得哈尔滨工程大学硕士学位. 主要研究方向为信息物理系统, 工业智能, 工业大数据, 预测与健康管理. E-mail: qiubh99@vip.sina.com
(**QIU Bo-Hua** Research professor at the Oceanic Intelligent Technology Innovation Center, CSSC Systems Engineering Research Institute. He received his master degree from Harbin Engineering University in 2004. His research interest covers cyber-physical systems, industrial AI, industrial big data, and prognostic and health management.)



何 潇 清华大学自动化系长聘副教授. 2010 年在清华大学获得博士学位. 主要研究方向为动态系统的故障诊断与容错控制, 网络化系统及其应用. 本文通信作者. E-mail: hexiao@tsinghua.edu.cn
(**HE Xiao** Tenure associate professor in the Department of Automation, Tsinghua University. He received his Ph. D. degree from Tsinghua University in 2010. His research interest covers fault diagnosis and fault tolerant control for dynamic systems, networked systems and their applications. Corresponding author of this paper.)