

信息物理融合系统理论与应用专刊序言

管晓宏¹ 关新平² 郭戈^{3,4}

信息物理融合系统 (Cyber physical systems, CPS) 是集控制、通信与计算于一体的智能系统。CPS 在智能感知和信息通信的基础上, 通过信息计算和物理过程的相互影响实现计算、通信和控制的深度融合和实时交互, 以安全、可靠、高效和实时的方式检测及控制物理系统, 实现全系统的自治和协作。

近年来, CPS 及其相关技术的快速发展, 推动了汽车、工业自动化、医疗保健、应急响应、工业控制系统、智能建筑、智慧道路、智能交通系统、电力系统等领域关键技术的升级换代和跨越发展。与 CPS 有关的其他概念包括: 物联网、工业互联网、智慧城市、智慧电网以及万物智慧 (如: 汽车、建筑、家庭、制造、医院、家电等)。

目前, CPS 理论体系尚处于构建之中, 相关研究正面临诸多亟待解决的难题。例如, 如何理解信息系统与物理系统的相互作用? 如何面向物理系统需求设计信息系统? 如何保证物理系统在信息缺失或面临不安全因素时正常运行? 与传统控制系统相比, CPS 系统构成要素多, 其通信、控制和计算开销较大, 而资源通常有限。另外, CPS 中的网络及信息技术环境与物理原件广泛关联, 涉及控制、通信、模拟及数字物理学、逻辑学等多个领域, 信息空间与物理世界的相互作用随时间和情况而变化, 利用多领域模型捕捉这种变化对 CPS 设计至关重要。CPS 分析和设计中既应考虑物理系统的基本功能要求和物理限制, 还应评估联系物理系统与信息系统的网络通信层的服务质量及安全性对两者的影响, 更面临着信息处理能力、计算方法及其效率和性能方面的

挑战。尤其是网络信息安全问题日益突出, CPS 的安全性问题也值得重视。上述几方面的问题处理不当, 会导致 CPS 系统性能恶化、效率低下, 甚至不稳定。

自 2006 年美国国家科学基金委员会将 CPS 列为重点研究领域以来, CPS 一直是学术界和企业界的热点研究领域之一, 全球范围内举办了很多专题国际研讨会, 一些知名国际期刊也相继出版 CPS 方面的专刊。归纳起来, CPS 领域的研究工作重点关注的问题主要包括: 系统的基本架构及建模、系统的测试验证、信息获取与处理、通信模式与协议、智能计算方法、先进控制方法、信息安全与综合安全分析等方面的理论和方法, 以及 CPS 在工业控制系统、智能交通系统、能源系统、医疗保健设备等方面的应用研究。

CPS 中的物理系统与信息空间的高度融合, 给信息获取、通信、计算和控制带来诸多挑战, 对相关领域尤其是控制科学与工程学科带来深刻变革。我们出版信息物理融合系统理论与应用专刊, 一方面是为了展示我国学者在有关领域的最新研究成果, 更重要的是为了促进我国信息物理融合系统相关理论研究的深入开展, 并希望由此带动 CPS 在交通、能源、医疗、工业控制等领域的应用技术发展。经推荐和审稿专家几轮评审, 最后录用论文 16 篇, 集中反映了近年来在 CPS 系统理论与应用研究中的最新成果, 以供广大科技工作者了解和研讨。

此专刊收录的论文涉及 CPS 研究综述、CPS 在智能电网、智能交通、输油管网中的应用研究、CPS 信息安全与综合安全分析等方面, 希望这些优秀成果可以使读者受到鼓舞和启发, 也希望能吸引和带动更多的优秀学者投身于 CPS 研究, 从而推动我国在 CPS 相关理论与应用研究中不断取得新成就。

1 CPS 研究综述

信息系统与物理系统的融合在提升系统性能的同时, 信息系统的信息安全威胁与物理系统的工程安全问题相互影响, 导致新的综合安全问题。刘焯、管晓宏等的综述“信息物理融合系统综合安全威胁与防御研究”, 全面介绍了 CPS 的概念与安全现状, 给出了 CPS 的综合安全定义。在对现有安全事件进

收稿日期 2018-12-01
Manuscript received December 1, 2018
DOI: 10.16383/j.aas.2019.y000001
引用格式: 管晓宏, 关新平, 郭戈. 信息物理融合系统理论与应用专刊序言. 自动化学报, 2019, 45(1): 1-4
Citation: Guan Xiao-Hong, Guan Xin-Ping, Guo Ge. Preface of the special issue on theory and applications of cyber-physical systems. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(1): 1-4
1. 西安交通大学 西安 710048 2. 上海交通大学 上海 200030 3. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室 沈阳 110004 4. 大连海事大学 大连 116026
1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710048 2. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030 3. Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110004 4. Dalian Maritime University, Dalian 116026

行分析的基础上,提出了综合安全威胁模型.并从时间关联和空间关联的角度,对现有 CPS 攻击和防御方法进行了分类和总结,最后探讨了 CPS 综合安全领域的研究方向.

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、工业通信协议和配置深入嵌入等特征,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,是工业网络系统的新挑战.关新平、陈彩莲、杨博等的综述“工业网络系统的感知-传输-控制一体化:挑战和进展”,概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,自适应传输、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.

加强 CPS 技术研究对“中国制造 2025”战略的实施具有重大现实意义. CPS 的技术实现可分为单元级、系统级、系统之系统级三个层次,由四大核心技术要素构成,包括: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. CPS 在工业领域的创新应用,形成了工业信息物理系统 iCPS,德国“工业 4.0”即是典型代表,可望使制造过程从“人-物理系统”二元体系向“人-信息-物理系统”三元体系转变.李洪阳、何潇等的综述“信息物理系统技术综述”,根据技术的应用特点对 CPS 当前的研究进展进行了综述,并给出了系统级、系统之系统级两个层面的 CPS 的实际案例,力求使学术界与工业界达成 CPS 认知共识.

电力系统是 CPS 的典型应用之一,本专刊收录了两篇这方面的综述文章,对促进我国电力系统 CPS 研究具有积极促进作用.姜兆宇、贾庆山、管晓宏等的综述“多时空尺度的风力发电预测方法综述”,首先根据风力发电预测范围,梳理了单台风力发电机、单一风电场以及风电场群三个空间尺度上的发电预测方法.其次,针对不同空间尺度,根据风电预测是否使用气象信息将预测方法分类,并根据预测时间尺度将预测方法再次分类.在不同时间尺度上对风电预测的研究进展和挑战进行了分类综述.该论文有助于研究人员对不同的风力发电预测任务采取合适的方法.王琦等的“面向电力信息物理系统的虚假数据注入攻击研究综述”论文,针对面向电力 CPS 的虚假数据注入(False data injection, FDI)的攻击过程和防御手段进行了分析与总结,从攻击者视角分析了 FDI 的攻击目标、策略及后果,从防御者视角总结了保护与检测环节中的各类方法.

2 CPS 在能源电力系统的应用研究

随着电力信息通信技术的发展与应用,电力流

与信息流深度融合,共同实现对系统的全景状态感知与控制决策,开放的通信环境与复杂的信息物理耦合交互,使得电力系统的优化管理与控制、信息安全风险成为影响电力系统安全稳定运行的重要因素.针对能源电力系统的优化管理与控制问题,司方远、汪晋宽等提出一种信息物理融合的智慧能源系统多级对等协同优化方法.在信息物理融合能源系统的基础上,构建了智慧能源系统的局域和广域两级协同优化架构.综合考虑产消者能源实体对等交互过程中的社会福利、供求平衡和需求意愿等因素,基于 Stone-Geary 函数和双向拍卖机制构建了智慧能源系统能量优化模型,给出了通过收敛判定域引导的全局随机寻优与区域定向寻优策略,有效地提高了算法的局部搜索能力.此外,通过双向拍卖机制的理性定价以及智能合约的辅助服务,有效地实现了用户友好的对等交易模式.

李韬等研究了智能电网的系统管理员(防护者)如何确定攻击者类型,从而选择最优防护策略的问题,提出一种贝叶斯序贯博弈模型以确定攻击者的类型,根据序贯博弈树得到博弈双方的均衡策略.首先,对类型不确定的攻击者和防护者构建了静态贝叶斯博弈模型,通过海萨尼转换将不完全信息博弈转换成完全信息博弈,得到贝叶斯纳什均衡解,进而确定攻击者的类型.其次,考虑了攻击者和防护者之间的序贯博弈模型,它能够有效地帮助防护者进行决策分析.通过逆向归纳法分别对两种类型的攻击者和防护者之间的博弈树进行分析,得到了博弈树的均衡路径,进而得到了攻击者的最优攻击策略和防护者的最优防护策略.

针对连续拒绝服务攻击导致量测数据丢失使得动态状态估计失效、进而破坏智能电网安全经济运行问题,杨飞生、潘泉等针对受网络攻击的信息物理融合电力系统的事件触发控制问题,提出一种弹性事件触发机制,使电力系统能够容忍攻击所造成的数据丢失,与此同时,实现 PI 型静态输出反馈控制器的输入按需更新,减少了通信负担.对于建立的闭环时滞系统模型,构造新型李亚普诺夫泛函进行稳定性分析,得到系统所能承受的最大拒绝服务攻击持续时间,并对控制器增益和弹性事件触发矩阵进行协同设计.杜大军、费敏锐等研究了拒绝服务攻击下基于无迹卡尔曼滤波(Unscented Kalman filter, UKF)的智能电网动态状态估计问题,提出一种用于拒绝服务攻击下智能电网动态状态估计的 UKF 方法.首先,分析拒绝服务攻击引起数据丢失特性并设计了数据补偿策略,以重构电力系统动态模型.然后结合 Holt's 双参数指数平滑和无迹卡尔曼滤波方法,构造了融合补偿信息的新状态估计方程,并进一步基于估计误差协方差矩阵得到状态增益更新方法,

从而获得 UKF 动态估计新方法.

3 CPS 在智能交通中的应用研究

交通系统是 CPS 的另一个典型应用领域. 本专刊收录了三篇该领域的研究论文. 云计算和服务框架为交通信息物理系统 (TCPS) 提供了强大的计算及存储能力, 为解决智能交通系统的目标实时控制等问题提供了有效的方案. 夏元清等在“智能交通信息物理融合云控制系统”一文中, 针对现代智能交通信息物理融合路网中的对象繁杂、数据采集、传输及计算需求高以及实时调度控制能力差等问题, 基于云控制系统理论, 给出了智能交通云控制系统设计方案, 包括智能交通边缘控制技术和智能交通网络虚拟化技术. 基于智能交通流大数据, 在云控制中心服务器上利用深度学习和超限学习机等智能学习方法对交通流数据进行训练预测计算, 能够预测城市道路的短时交通流和拥堵状况. 进而在云端利用智能优化调度算法得到实时交通流调控策略, 用于解决拥堵路段交通流分配难题, 提高智能交通控制网络动态运行性能.

TCPS 借助先进的环境感知、实时信息获取和处理技术, 可与第三方工具和服务无缝集成, 实现车辆与车辆、车辆与道路设施的信息共享和运行协调, 从而使车辆的实时调度和协作优化运行成为可能. 郭戈等研究了基于 TCPS 的高速公路运输车辆协同运行优化调度与控制问题, 提出基于车-车、车-路实时信息感知和共享的大规模车辆大范围实时协同调度及合并编组运行思想, 目的是将运输车辆根据任务路线编组成小距离行驶的车队 (称为道路火车), 以降低大部分车辆行驶中克服空气阻力的油耗, 从而最大限度地降低营运者运输成本和总体温室气体排放. 首先采用局部调度策略, 结合领队车辆选择算法及聚类分析, 构建可合并车辆集合, 然后用数学规划方法实现每个车队集合中车辆路径与速度的精细优化, 并通过突发情况的简易处理证明其调度策略的可扩展性.

由于通用计算机设备和通信技术存在的信息安全漏洞, 给基于通信的列车运行控制 CBTC 系统带来日益严峻的信息安全风险, 因此, 研究 CBTC 系统的信息安全风险量化和动态评估具有重要意义. 唐涛等针对城市轨道交通列车运行控制系统的信息安全风险评估问题, 根据设备及通信链路的差异性构建了 CBTC 网络拓扑模型, 结合信息安全风险下线路列车运行性能变化所导致的运能损失, 采用综合表征信息域和物理域特征的二维结构信息熵, 实现对 CBTC 系统信息安全风险的建模、量化分析和评估.

4 CPS 信息安全与综合安全研究

由于信息处理与动态过程的紧密关联, 使得信息物理特别容易受到数据传输中的错误或攻击影响, 进而造成损失或重大的破坏. CPS 面临的安全威胁主要源于感知层、网络层和控制层三个方面. CPS 感知层的传感器大都无法直接使用跳频通信及公钥密码等现有安全机制, 其网络层结构复杂、异构、开放, 基于标准通信协议分布式地传输和处理信息, 易受外部攻击. 而感知层和网络层的不足, 导致控制层易受入侵攻击, 使控制指令延迟或失真, 从而使 CPS 无法及时执行正确的任务, 导致物理系统性能下降甚至失稳. 常见的外部攻击有阻断服务 (Denial-of-Service, DoS)、假数据注入 FDI、重启及哄骗等. 安全性是 CPS 研究的重要内容之一, 本专刊有四篇论文专门研究此问题.

马大中、孙秋野等研究了基于数据特征融合的管网信息物理异常诊断方法, 针对管网系统数据量大、耦合性强的问题, 提出一种基于数据特征融合的信息物理异常诊断方法. 首先, 通过站场信息数据构建信息增维矩阵并且通过矩阵预分析实现信息传输中断异常的判断. 然后, 基于不同站场信息构建的信息增维协方差矩阵, 通过矩阵特征值分布的变化情况对物理异常以及信息传输错误异常进行区分. 在此基础上, 为了对管网物理异常分类实现系统运行状态的有效分析, 将管网信息增维协方差矩阵最大特征向量映射的二维图像作为输入, 采用卷积神经网络进行研究, 进而实现对物理异常的准确判断.

针对含有攻击的相互耦合信息物理系统中的分布式有限时间状态安全估计以及分布式有限时间安全控制器设计问题, 宋永端、温长云等通过探索安全估计问题的可解性与不可分辨攻击的存在性之间的等价特性, 建立安全估计可解的充分条件. 进而提出一种由分布式安全测量预选器和有限时间观测器构成的分布式有限时间状态安全估计策略, 可确保系统状态可在预设的有限时间内得到准确估计. 利用获得的安全状态估计和反步设计方法, 提出一种分布式有限时间安全控制器, 可保证系统在有限时间内实现对给定信号的跟踪.

为了保护 CPS 中物理实体的正常运行不因恶意攻击造成的网络空间入侵而受干扰, 夏浩等研究了基于博弈论的 CPS 安全控制问题, 目的在于从物理系统入手, 将受到数据包时序攻击的 CPS 安全性研究抽象为一个博弈过程, 基于非合作博弈的两人零和博弈模型, 设计了可变延迟情况下的鲁棒输出反馈的极大极小控制器. 并且采用参数化的软约束二次型目标函数, 在控制器设计时引入干扰衰减因子, 通过对干扰衰减因子的取值使得二次型目标函

数取极小值,从而保证了最差情况下的稳定控制,在满足干扰衰减因子的约束条件下,本文通过粒子群搜索算法得出干扰衰减因子的值.

彭勤科等研究了 FDI 攻击下 CPS 的稳定性,尤其是 FDI 攻击对 CPS 稳定性的影响.建立了从前向通道和反馈通道分别注入控制假数据和测量假数据的 FDI 攻击模型,然后提出 FDI 攻击效力模型用来量化 FDI 攻击对 CPS 状态估计值和测量残差的影响.在此基础上,设计了一种攻击向量协同策略,并通过理论分析获得操纵 CPS 稳定性的攻击条件:攻击矩阵稳定性和时间参数的选取时机及系统矩阵稳定性.论文揭示了 FDI 攻击的协同性,对保护 CPS 安全和防御网络攻击提供重要参考.

上述论文都得到了国家自然科学基金委员会、国家重点研发计划等资助,其研究成果丰富了 CPS 系统理论体系.需要指出的是,由于时间和篇幅所限,本期信息物理融合系统理论与应用专刊并不能全面反映该领域的主要研究方向及最新进展,所发表的论文也可能存在一定不足.但我们希望本期专刊能够对该领域的研究人员有所参考和启发,以推动信息物理系统理论及相关应用技术研究.我们也借此机会,对积极提供稿件的作者表示感谢,也感谢专刊论文的编委和审稿人对本专刊所做的贡献,感谢《自动化学报》编辑部对专刊出版给予的大力支持!

客座编委



管晓宏 中国科学院院士. IEEE Fellow. 西安交通大学电子信息工程学院院长. 清华大学智能与网络化系统研究中心讲席教授组成员. 1993 年获美国康涅狄格大学博士学位. 主要研究方向复杂网络化系统的经济性与安全性,电力、能源、制造等系统优化,网络信息安全,信息物理融合系统包括智能电网等.

E-mail: xhguan@tsinghua.edu.cn

(**GUAN Xiao-Hong** Academician of the Chinese Academy of Sciences, IEEE Fellow. Dean of the School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong

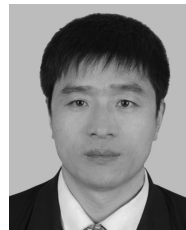
University. Chair Professor of the Center for Intelligent and Networked Systems (CFINS), Tsinghua University. He received the Ph.D. degree in electrical engineering from the University of Connecticut, Storrs, USA, in 1993. His research interest covers economy and security of complex networked systems, optimization of electrical power and energy systems and manufacturing systems, network security and cyber-physical systems including smart grid.)



关新平 IEEE 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 Fellow, Chair Professor at Department of Automation, Deputy Director of University Research Management office, Director of the Key Laboratory of Systems Control and Information Processing, Ministry of Education of China, Shanghai Jiao Tong University, China. He is a "National Outstanding Youth" honored by NSF of China, "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 interests covers the design, control and optimization in industrial network systems, wireless networking and applications in smart factory.)



郭戈 东北大学特聘教授,大连海事大学博导. 1998 年获得东北大学控制理论与控制工程专业博士学位. 主要研究方向为智能交通系统、共享出行系统、信息物理融合系统.

E-mail: geguo@yeah.net

(**GUO Ge** Professor at Northeastern University. He received his Ph.D. degree from Northeastern University in 1998. His research interest covers intelligent transportation systems, mobility-on-demand systems, cyber-physical systems.)