

信息物理融合系统研究综述

王中杰¹ 谢璐璐¹

摘 要 信息物理融合系统 (Cyber-physical systems, CPS) 是多维异构的计算单元和物理对象在网络环境中高度集成交互的新型智能复杂系统, 具有实时、鲁棒、自治、高效和高性能等特点. 本文首先介绍了 CPS 的概念和特征, 综述了 CPS 的当前发展状况与应用前景; 其次, 对 CPS 的系统构成进行了简要分析, 讨论了 CPS 与相关技术的区别与联系; 最后, 对 CPS 技术发展所面临的主要挑战及可能的研究方向进行了总结与展望.

关键词 信息物理融合系统, 实时, 高性能, 嵌入式系统, 网络控制

DOI 10.3724/SP.J.1004.2011.01157

Cyber-physical Systems: A Survey

WANG Zhong-Jie¹ XIE Lu-Lu¹

Abstract Being a real-time and robust autonomous system with high performances, cyber-physical systems (CPS) are a kind of novel intelligent complex systems with different scales of computation and physical components tightly integrated and interacted under the future networks. The notion and the characteristics of CPS as well as the development of this technology are first presented. Then, the technology framework of CPS and its relationship with other related systems and technologies are discussed. Finally, challenges to be dealt with for CPS are pointed out, and the future research directions are discussed.

Key words Cyber-physical systems (CPS), real-time, high performance, embedded system, networked control

嵌入式技术、计算机技术和网络技术的发展, 为人类的生活带来了极大便利. 但随着硬件产品性能和数据处理能力的不断提升, 网络通信技术的飞速发展, 计算机系统的信息化与智能化, 人们对于各种工程系统和计算设备的需求已不仅仅局限于系统功能的扩充, 而是更关注系统资源的合理有效分配和系统性能效能的优化, 以及服务个性化与用户满意度的提升. 在这种需求的引导下, 信息物理融合系统 (Cyber-physical systems, CPS) 作为一种新型智能系统应运而生, 并引起了各国政府、学术界和商业界的高度重视.

CPS 可以理解为基于嵌入式设备的高效能网络化智能信息系统, 它通过一系列计算单元和物理对象在网络环境下的高度集成与交互来提高系统在信息处理、实时通信、远程精准控制以及组件自主协调等方面的能力, 是时空多维异构的混杂自治

系统^[1-2]. CPS 在功能上主要考虑性能优化, 是计算、通信与控制 3C (Computation, communication, control) 技术^[3] 于一体的智能技术, 具有实时、安全、可靠、高性能等特点. 相较于现有的实时嵌入式系统和网络控制系统, CPS 关注资源的合理整合利用与调度优化, 能实现对大规模复杂系统和广域环境的实时感知与动态监控, 并提供相应的网络信息服务, 且更为灵活、智能、高效.

CPS 与人类的生活和社会的发展息息相关, 是涵盖了小到纳米级生物机器人, 大到全球能源协调与管理系统等涉及人类基础设施建设的复杂大系统. CPS 的典型应用包括智能交通领域的自主导航汽车、无人飞行器; 生物医疗领域的远程精准手术系统、自主计算与感控的植入式生命设备; 以及智能电网、家庭机器人、智能建筑等, 是构建人类未来智慧城市的基础.

本文对信息物理融合系统这一新兴技术进行了概述. 首先, 介绍了 CPS 的概念和特点, 综述了 CPS 的发展现状和应用前景; 其次, 对 CPS 的系统构成和理论基础进行了说明, 分析了现有的 CPS 架构, 讨论了 CPS 与计算机系统、嵌入式系统、网络控制系统和物联网等技术的区别与联系; 最后, 分析了 CPS 研究所面临的挑战, 并对 CPS 的技术发展和应用实现进行了展望.

收稿日期 2010-04-14 录用日期 2011-05-17

Manuscript received April 14, 2010; accepted May 17, 2011
国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2011AA040502), 国家自然科学基金 (71071116), 上海市基础研究重点项目 (10JC1415300) 资助
Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2011AA040502), National Natural Science Foundation of China (71071116), and Shanghai Key Project of Basic Research (10JC1415300)

1. 同济大学电子与信息工程学院 上海 201804
1. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804

1 信息物理融合系统 (CPS)

1.1 CPS 的基本定义

CPS 的理念最早由美国自然基金委提出, 该概念一经提出便获得了国内外的广泛关注. 各国科研学者从 CPS 的理论方法、相关组件、运行环境、系统设计和实现等不同层面对 CPS 进行了深入研究. 但由于 CPS 具有较高的复杂性, 继承并融合发展了多个学科的不同技术, 很难给出一个精确而全面的定义; 加上不同领域的研究者对 CPS 的理解各异, 短期内还未能完全达成共识.

本文给出了几个较具代表性的定义:

Lee^[1] 提出, CPS 是一系列计算进程和物理进程组件的紧密集成, 通过计算核心来监控物理实体的运行, 而物理实体又借助于网络和计算组件实现对环境的感知和控制.

Baheti 等认为 CPS 是系统中各种计算元素和物理元素之间紧密结合并在动态不确定事件作用下相互协调的高可靠系统^[2-4].

Sastry^[5] 从计算科学与信息存储处理的层面出发, 认为 CPS 集成了计算、通信和存储能力, 能实时、可靠、安全、稳定和高效地运行, 是能监控物理世界中各实体的网络化计算机系统.

Branicky 和 Krogh 等^[6-7] 则从嵌入式系统和设备开发的角度, 指出 “Cyber” 是涉及物理过程与生物特性的计算、通信和控制技术的集成, CPS 的本质正是集成了可靠的计算、通信和控制能力的智能机器人系统.

马文方指出, CPS 是在环境感知的基础上, 深度融合计算、通信和控制能力的可控可信可扩展的网络化物理设备系统, 通过计算进程和物理进程相互影响的反馈循环实现深度融合和实时交互来增加或扩展新的功能, 以安全、可靠、高效和实时的方式检测或者控制一个物理实体^[8].

结合以上各种概念, 本文认为, CPS 强调 “Cyber-physical” 的交互, 涉及未来网络环境下海量异构数据的融合、不确定信息信号的实时可靠处理与通讯、动态资源与能力的有机协调和自适应控制, 是具有高度自主感知、自主判断、自主调节和自治能力, 能够实现虚拟世界和实际物理世界互联与协同的下一代智能系统.

1.2 CPS 的主要特征

在实际应用中, CPS 旨在提高人类生活质量, 促进人和环境的和谐发展. 在系统实现上, CPS 以同时保证 “实时性” 和系统的 “高性能” 为主要目标, 具有自治、交互、精准、抗毁、协同、高效的特性, 能够实现对 Cyber 与 Physical 大规模动态异构资源

的监控管理. 相较于现有的各种智能技术, CPS 在结构和性能等方面主要有以下几大特征^[9]:

- 1) 信息与物理组件高度集成;
- 2) 各物理组件都应具有信息处理和通信能力;
- 3) 是网络化的大规模复杂系统;
- 4) 在时间和空间等维度上具有多重复杂性;
- 5) 能实现资源的高效动态组织与协调分配;
- 6) 系统高度自治自动化, 满足实时鲁棒控制;
- 7) 系统安全、可靠、抗毁、可验证;
- 8) 自学习、自适应、动态自治、自主协同.

2 CPS 的发展

自 2005 年提出至今^[3], CPS 的发展得到了许多国家政府的大力支持和资助, 已成为学术界、科技界争相研究的重要方向, 获得了国内外计算机、通信、控制, 以及生物、交通、军事、基础设施建设等多个领域研究单位与学者的关注和重视, 具有很高的科研意义. 同时, 它也成为了各行业优先发展的产业领域, 具有广阔的应用前景和商业价值.

2.1 CPS 的国内外研究现状

1) 美国

在美国, 近年举办了多次 CPS 相关的国际性会议和研讨活动, 就 CPS 的基础理论、CPS 的应用、CPS 的性能以及 CPS 的安全性等问题展开了较为深入的讨论, 引发了人们对 CPS 的研究. 同时, CPS 连续多年均被美国国家自然科学基金会 (National Science Foundation, NSF) 列为科研热点和重点, 进一步促进了 CPS 及其相关技术的开发和应用.

基于对近年来获得 NSF 资助的 CPS 相关科研项目的分析, 其研究热点集中在嵌入式与自动化开发、网络化与信息安全和信息基础设施建设三大方面, 主要涉及: 节能、廉价、灵活、通用的 CPS 智能自治嵌入式设备以及相关软硬件组件及环境的设计开发; 安全可靠的 CPS 有线与无线异构网络通信协议、网络服务和通讯环境的构建与优化; 复杂工业工程系统和智能电网等大规模基础设施的网络化精准协同控制, 以及对相关资源的高效管理和智能调度决策等问题. 目前已取得了较好的初步成果.

麻省理工学院 (Massachusetts Institute of Technology, MIT) 设计了基于移动机器人的分布式智能机器人花园, 研究了面向动态环境感知、多节点协调通讯和任务自主获取与执行的 CPS 自治建模和控制, 为进一步提高 CPS 的节点间的自主交互与高效实时通讯构建了基础. 宾夕法尼亚工程学院研究的汽车导航软件 GrooveNet, 在系统的协调性、稳定性和可信度上做了很多创新, 能够同时支持

对真实车辆与虚拟车辆的运行监控, 为车辆 CPS 的构建和自治导航的协调优化提供了一个良好的建模与仿真测试平台. Carnegie Mellon 大学的 Marija Ilic 课题组将支持向量机预测模型和马尔科夫状态控制等方法运用于智能电网 CPS 的建模优化, 实现了风力发电中能量的优化协调和配置, 相关方法有望适用于未来分布式新能源 CPS 的调度管理^[10-11]. Indiana 大学在城市下水道网络的管理和监控上引入了 CPS 的思想和技术, 正在开发完善的 CSOnet 监控系统^[12] 旨在实现人类需求和气候环境动态变化下的城市管道排放水网络的自治调度管理. 此外, CPS 相关技术也正被广泛应用于新型智能生物医疗设备的设计与开发; 在抗灾预警、金融调控、军事演练、社会行为分析、物流和供应链优化等领域需求层面上, 也均有一定应用.

2) 欧洲

在欧洲, CPS 研究还处在理论创新的尝试阶段. 许多学者对于 CPS 的构架与建模新方法展开了讨论和研究. Rammig 提出了将生物系统理论和智能计算方法与 CPS 技术相结合的思想, 实现了系统计算性能的优化^[13]. 此外, 欧盟在智能电子系统以及多元件的复杂系统集成上做了很多工作, 于 2008 年启动了 ARTEMIS (Advanced research and technology for embedded intelligence and systems) 等项目, 将 CPS 作为智能系统的一个重要发展方向, 并创办了 CPS 专刊 “*International Journal of Cyber-Physical Systems*”.

3) 日韩

在日韩等国, CPS 从 2008 年左右开始备受关注. 韩国科技院等高等教育机构和科研院尝试开展了 CPS 的课程, 从自动化研究与发展的角度, 关注计算设备、通讯网络与嵌入式对象的集成跨平台研究. 在日本, 以东京大学和东京科技大学为首, 对 CPS 技术在智能医疗器件以及机器人开发等方面的应用投入了极大的科研力量.

4) 中国

中国于 2008 年在北京召开的 IEEE 嵌入式研讨会上, 将信息物理融合系统的研究列为今后技术发展的一大重点. 2009 年举办的一系列网络控制技术和网络信息技术论坛以及计算机大会中, 也高度关注了 CPS 技术在工业等领域的发展状况. 2010 年, 国家 863 计划信息技术领域办公室和专家组在上海举办了 “信息-物理融合系统 (CPS) 发展战略论坛”, 对这项技术给予了高度关注.

国内学者也已经进行了一些相当有意义的 CPS 前沿技术研究, 并取得了一些研究基础. 计算机领域的学者结合物联网和云计算等技术, 针对 CPS 的普

适化网络环境开展了一些探索性研究, 武汉大学信息资源研究中心提出了结合云计算和下一代互联网的理念, 进行 CPS 语义中间件的设计, 研究 CPS 网络互联和自主交互等技术. Xia 等^[14] 则从系统自动化控制的角度出发, 提出了 “面向复杂信息物理融合系统的实用型高可信无线通信协议”, 基于结点间反馈控制技术开展了医疗应用中传感器任务调度和控制的研究. 此外, 清华大学、华东师范大学、天津大学、同济大学等多所研究机构也开展了 CPS 技术的相关研究. 香港和台湾各大学也于近年举办了多次有关 CPS 的研讨会, 并成立了名为 UCCPS (User-centric cyber-physical systems workshop) 的 CPS 亚洲论坛.

2.2 CPS 的应用前景

依据 CPS 的发展现状, 可以看出, 虽然该技术还处在发展初期, 但已被运用于医疗、能源、交通等多个重要发展领域, 具有广阔的应用前景.

1) 在社会生活方面, 各种 CPS 智能感控设备和相关应用程序的开发, 将便于人们更准确地感知周围的环境, 及时获得所感兴趣的信息与服务的动态更新, 促进信息和知识的及时有效共享, 增进人与人之间的沟通和联系.

2) 在分布式能源开发和建设上, CPS 的自主协调与大范围实时通信能力, 能在太阳能、风能、生物能等不稳定新能源加入的情形下, 实现分布式电能的合理生产与调度, 提高电网的负载能力和稳定性, 改善电力系统的性能. 同时, 通过对无线信号的传感与控制, 能提高对智能家电和电动汽车等各种智能可控负载的管理和协调能力.

3) 在交通运输上, 目前主要存在交通网络拥堵、交通事故频发、燃油消耗与碳排放高、道路运输能力与利用效率不均衡等问题. 基于 CPS 技术的未来交通系统, 能通过散布于道路、交通工具以及人之间的各种智能感控设备进行实时信号的传递和处理, 宏观上这将有助于交通流和交通行为的分析与预测, 微观上则能进一步实现 “人-车” 以及 “车-车” 之间的自治协调与协同.

4) 在生物医疗方面, CPS 旨在提高相应医疗与手术器材的灵活性和使用寿命, 通过远程诊断与手术治疗, 实现医疗资源的合理高效利用. 基于 CPS 的廉价居民便携式医疗设备的使用和普及, 将实现对人体各项生理参数和生活环境的实时远程精准监测与记录, 便于医务人员更全面地了解记录病患的病历和生活习惯, 更早发现并预防潜在病因, 避免病情延误, 对症下药, 保证医治效果, 提高居民整体健康水平.

5) 在工业自动化领域, CPS 能依据环境中各节

点信息的交互,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的调整和控制,提高工程监管的效率.此外,CPS设备能被布置在一些不易人为监测和管理的环境中,实现监控与预警操作,并能在紧急情况下实现无人监控的应急处理,避免工业设备的大规模级联失效等故障.

6) 在城市基础设施建设上,CPS能提高资源的利用效率,并能有效收集和分析民众的愿望和建议,使得开发建设更加节能、环保、高效,相应的服务能切实满足人民需求.同时,该技术可被用于提高设备的可维修和可利用性、公共设施 and 智能建筑的安全性和智能性、以及城市整体建设和规划的灵活性和通透性等.

目前,CPS技术已经得到了国际工商业界和许多大型国际公司的高度关注,发展速度极为迅速.主要有汽车制造领域的戴姆勒、通用、福特等公司;医疗卫生领域的美国数字卫生中心、飞利浦;制造与过程控制领域的United Technologies、爱默生Emerson Process Control等;防御与航空领域的Rockwell Collins, Lockheed Martin Corporate Headquarters, BAE, Boeing Phantom Works以及重要设施构建领域的IBM Global Energy and Utility Solutions, SAIC和风险投资公司New Venture Partners等^[9].此外,CPS在农业生产等领域,也将有巨大的发展潜力.

由此可见,CPS是一种面向资源实时优化配置和高效能可持续利用的智能技术,并具有较高的兼容性和普适能力,将被应用于人类社会生活的各个领域.CPS相关产品和技术的研发与应用,将大大促进这些领域的科技与经济发展,为人类提供更优质的生活体验和服务,创造新的社会发展机遇.然而,CPS作为一个崭新的研究领域,概念新颖、学科跨度大,和现有的系统理论与研究基础存在较大不同.在CPS技术的未来研究中,将主要面临CPS架构设计、系统抽象与建模、系统设计方法、系统验证体系、仿真工具和实现平台等方面的挑战.为了更好地实现CPS在未来各个行业领域中的融合和应用,把握技术发展和革新的机会,需要突破现有的计算模式、物理架构、控制方法和通讯环境,从CPS技术理论层面,对该技术进行切实深入的研究.

3 CPS的系统构成

系统结构的优劣将从根本上影响系统的最终性能和所能满足的功能需求,更不用说系统的平台兼容性和灵活性等问题,因此,CPS组件抽象与架构建立是实现整体研究的基础,具有非常重要的地位.本文将依据国内外现有研究,从CPS的抽象结

构、运行方式、物理构成和实现架构这4个方面,对CPS的架构进行分析和讨论.

3.1 CPS的抽象结构

简单地说,CPS中的“Cyber”和“Physical”可以视为两个具有节点交互的网络:“Physical”层包含了多个相互联系的物理实体,“Cyber”层由众多的智能监控节点(包含了人、服务器、信息站点或者各种移动设备等)和它们之间的通讯联系构成^[3].在“Physical”层和“Cyber”层相互作用下,系统通过计算、通信和控制3C技术实现信息的交互和决策,如图1所示.

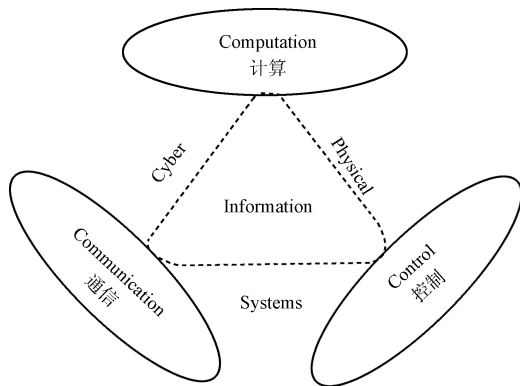


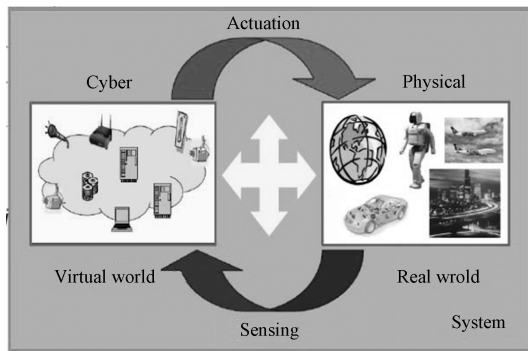
图1 CPS的抽象结构^[3]

Fig.1 Abstraction of CPS

然而,具体Cyber-Physical的3C对应关系是如何实现的,各组件和资源间是如何协调的,还是一个亟待解决的问题.因此,又有许多学者从CPS的运行方式、物理构成和系统实现等角度,对CPS的结构进行了不同的描述.本文选取其中比较有代表性的几种结构进行了分析.

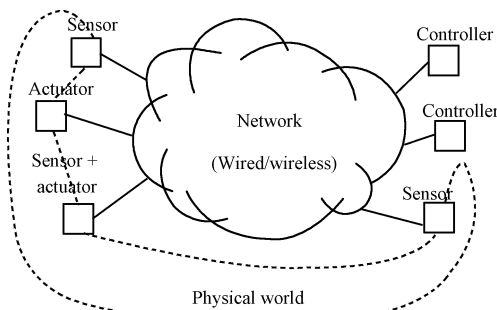
3.2 CPS的运行方式

Bestavros等提出了CPS系统运行方式的抽象结构^[15],如图2所示.物理层的实体通过对环境的感知,对相应的信息进行处理,并在进行处理的同时将信息经网络发送到信息层,信息层组件在获取感知信息后,针对物理环境和网络中用户需求的改变,自动调整内部关联与模型,将指令通过人机界面或者执行器和驱动设备传送给物理层各组件.物理实体接受指令,并通过实体间的自主协调,执行系统所要求的相应操作.这种系统运行方式较为直观地体现了通过Cyber-Physical交互,将物理世界和虚拟世界互联的思想,不足之处在于没有突出物理组件所具有的自主协调、自主验证和自主决策能力,也没有充分考虑人在系统中的地位和作用.

图 2 CPS 的运行方式^[15]Fig. 2 Operation of CPS^[15]

3.3 CPS 的物理构成

在 CPS 的物理构成上, Al-Hammouri 等^[16] 提出了 CPS 结构的一般性描述 (图 3), 并说明了基于此结构的 CPS 的特点。

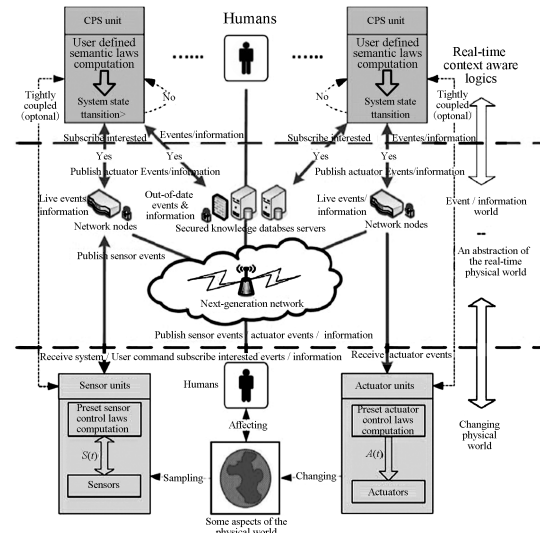
图 3 CPS 的物理构成^[16]Fig. 3 Structure of CPS^[16]

CPS 与传统的计算机控制系统和无线传感网络在物理构成上存在较大的不同。首先, CPS 的网络环境是异构的, 能同时涵盖不同属性的网络, 并且信息通信范围不受限制; 其次, CPS 传感网络中不单包含传感器节点 (Sensors), 还包含了执行器/驱动器节点 (Actuators), 以及一部分同时具有传感与执行能力的节点 (Sensor + Actuator)。在 CPS 环境中, 控制者可以代表具有自主协调和计算能力的控制器设备, 也可以指人和其他生命体。此外, 控制者、传感器和执行器位于同一层面与物理世界交互, 指出 CPS 是包含了人和生物等生命体在内的与物理环境直接交互的反馈系统。

3.4 CPS 的实现架构

基于 CPS 的物理实现, Tan 等^[17] 在 *ACMSIGBED Review* 上提出了一种基于可信的 CPS 原型架构, 研究了基于下一代网络技术和 Web service 的全局标识时间、事件/信息驱动、发布/订购机制、语义控制规则和量化机制等技术, 如图 4 所

示。

图 4 CPS 的实现架构^[17]Fig. 4 An architecture of CPS^[17]

该结构的特点在于从系统构建和实现的角度, 较为全面地说明了 CPS 在设计 and 具体运行实现时, 所可能涉及的关键技术。主要包括: 1) CPS 中的传感器和执行器节点是在现有传感器节点中融入了控制和计算能力的新型节点; 2) “下一代网络”是实现 CPS 实时通信和信息交互的重要节点和环境; 3) CPS 中的信息流包含语义事件信息和普通数据信息, 因此, 信息层对应的系统 CPU 内核应具有语义识别和控制能力, 以便提高系统的实时感知能力; 4) “人”是 CPS 系统反馈结构中的一个组件; 5) 信息安全和可靠数据服务是 CPS 的关键问题。基于该架构的 CPS 系统在原型设计中若能添加对系统性能的量化和验证模块, 比如哪些模块能够保证系统的实时性和高性能, 或者会影响这些性能, 则这个框架会更加完善。

此外, 也有学者从节省系统能耗、增强系统的自适应感知能力和提高系统在多平台协作下的实时性和可靠性等角度, 对 CPS 的架构进行了很多有意义的研究。

4 CPS 的相关技术

依据 CPS 的概念及特性描述, 可以认为 CPS 技术结合了计算机系统、嵌入式系统、工业控制系统、无线传感网络、物联网、网络控制系统和混杂系统等技术的特点 (如图 5), 但又和这些系统有着本质不同。为了更好地实现 CPS 的抽象与建模、研究系统设计与仿真实现的方法、构建 CPS 的验证体系, 需要充分认识、利用并改进现有的相关技

术.

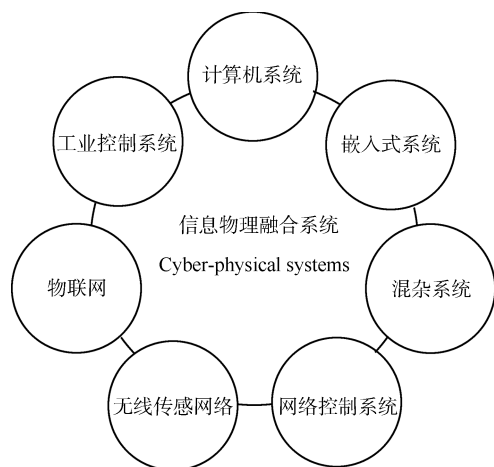


图 5 CPS 的相关技术

Fig. 5 CPS-related technologies

4.1 CPS 与计算机系统

CPS 也必须具备计算机系统软硬件组件与功能, 比如具有中央处理机、存储器和外部设备, 以及操作系统、语言处理系统、数据处理系统和人机交互系统等. 但在各个组件的具体设计与实现上, 将会有很大的不同. 这主要在于现有计算机系统的主要目的是为了高效存储、转换和处理数据. 而 CPS 的最终目的是实现计算过程和物理过程的实时有效交互. 因此, 在传统计算机系统中不非常重要的实时性、安全性、可靠性、防御性、保密性以及自适应等特性, 却是 CPS 关注的重点. 此外, 计算机系统网格技术、云计算、并行计算等技术, 在一定程度上也满足 CPS 分布式分散控制和高效计算的特性. 可以考虑将这些技术与 CPS 相结合, 并针对不同的系统需求与问题, 进行自适应的改进和优化.

4.2 CPS 与嵌入式系统

在技术构成上, 虽然嵌入式系统是依照软硬件协同理念进行开发和设计的, 但 CPS 中计算单元和物理对象的结合与传统的软硬件协同技术不同. CPS 要求硬件中一定要包含 Cyber 组件. 软硬件协同的目的是为了提供一个稳定的集成环境, 以便通过在物理设备中嵌入一定的计算设备和相应的软件来增强嵌入式系统的功能. 而 CPS 中的 Cyber-Physical 集成是为了使系统更好地适应周围不确定的、动态发展和变化的环境, 更注重计算资源与物理资源的深层耦合、协调同步, 以及资源的有效利用等问题.

在控制实现上, 嵌入式系统的控制大多是基于连续动态反馈实现的, 往往忽略实现过程中的细节问题, 比如模式转换、错误检测、时间约束等问题.

在系统实时监控上也常采用基于事件的设计方法, 但该方法对于稳定性、短暂恢复和参数变化等随时间动态变化的问题无法实现有效监控. CPS 需要面对的是更为复杂的应用程序, 比如大型安全系统、自治系统和多智能体系统, 这些系统往往具有分布式混杂系统的特性, 需要精密的数字化控制算法. 因此, 单纯从工程化的角度, 利用现有基于测试的嵌入式平台是不够的^[18], 可考虑在 CPS 系统中采用基于多模型的设计结构来替代传统基于事件的结构.

在产品开发应用上, 首先, 嵌入式软件主要面向小型计算机的设计, 对应的问题也是在有限资源环境下的优化. 而 CPS 要解决如何在时间和空间多维异构环境下的大范围复杂巨系统的系统一致和高效等问题^[19]. 其次, 嵌入式系统是封装式的, 一旦和具体应用结合在一起, 它的升级换代也必须和具体产品同步进行, 导致了系统不够灵活, 平台兼容性和适用性较差, 系统更新换代的代价较大. 这些问题正是 CPS 旨在避免和解决的.

然而, 虽然存在以上几大不同, CPS 的核心却离不开嵌入式. 可以将 CPS 技术视为对现有嵌入式技术的完善与优化.

4.3 CPS 与工业控制系统

CPS 是一个具有控制属性的网络, 但它又有别于现有的工业控制系统. 现有控制系统基本是封闭的系统, 即便其中一些工控应用网络也具有联网和通信的功能, 但其工控网络内部总线大都使用的是工业控制总线, 网络内部各个独立的子系统或者设备难以通过开放总线或者互联网进行互联, 通信的功能也比较弱. 而 CPS 则把通信放在与计算和控制同等地位上, 这是因为 CPS 是涉及人和生物等感知因素的智能控制系统, 它强调的分布式应用系统中物理设备之间的协调是离不开通信的. CPS 具有对网络中设备远程协控的能力, 并且 CPS 在被控对象的种类和数量、特别是在网络规模上都将远远超过现有的工控网络. 文献 [20] 对 CPS 技术和工业控制系统的异同, 以及 CPS 技术在现有工业系统中的发展趋势进行了较为详细的探讨.

4.4 CPS 与无线传感网络

无线传感器网络 (Wireless sensor network, WSN) 主要由部署在监测区域内大量的微型传感器节点 (Sensors) 构成, 是通过无线通信方式形成的一个多跳自组织网络. 无线传感器网络技术的发展将有助于 CPS 的实现, 现有无线网络环境的构建将为 CPS 的发展提供很好的平台. 但 WSN 技术有一定的局限性. 主要在于这些节点在被投放到监测地点后, 在空间上基本是静态配置的, 技术专有化程度高, 适用性不广, 而且其中的具体连接方式不明朗,

属于一种开环的监控模式。此外, 大多数传感器网络面临节点数量受限等问题^[21]: 1) 由于过多的节点和通讯线路会使网络变得十分复杂而无法正常工作; 2) 因为传感器节点的价格目前并不低廉, 但电池寿命在最好的情况下也只能维持几个月。

而且 CPS 不仅由传感器节点构成, 还包含执行器^[22]。CPS 在监控时需要保证闭环交互控制, 但其网络结构是分布式开放的。由于节点 (特别是具有执行功能的节点) 具有自主性, 因此, 其拓扑结构是呈时空动态配置的, 节点间应有明确的协调和通信协议, 以及在不同环境下可通用的解决方案。文献 [23] 就提出了一种以消息为中心的 CPS 实时数据服务, 能够实现对无线传感网络中信息的实时抽取, 并保证了通信的安全性及效率。同时, CPS 也将通过网络控制策略和电池设备的改进来延长传感器节点的使用寿命。

4.5 CPS 与物联网

物联网 (The internet of things) 的概念近年来在我国得到了高度重视和快速发展。然而物联网并不是信息物理融合系统, 物联网是通过射频识别 (Radio frequency identification, RFID)、红外感应器、全球定位系统、激光扫描器等信息传感设备, 按约定的协议, 把物品与互联网连接起来, 进行信息交换和通讯, 以实现智能化识别、定位、跟踪、监控和管理的一种“物物相连的”网络^[24]。它和 CPS 的主要差别在于:

1) “物联网”中的“物”要满足以下条件: 要有相应信息的接收器; 要有数据传输通路; 要有一定的存储功能; 要有 CPU; 要有操作系统; 要有专门的应用程序; 要有数据发送器; 遵循物联网的通信协议; 在世界网络中有可被识别的唯一编号^[24]。而 CPS 中, 所有的计算模块、通信模块、网络节点、物理实体, 包括人自身, 都可以被视为系统中的物理组件。

2) CPS 实现的是对各物理组件 (涉及“人”等生命体) 的远程通讯和控制, 是一种“感控”的过程; 而物联网所实现的仅仅是人对物体状态的感知功能, 并不能实现远程实时控制。而且物联网的通信大都发生在物品与服务器或物品和人之间, 物品之间并无通信, 不具备 CPS 组件的自主交互和自治能力。

3) CPS 涉及的是不确定环境下的海量异构数据, 而物联网主要依赖传统的小型嵌入式芯片, 并不能应对海量信息的提取和计算。

4) 从系统性能的角度出发, CPS 具有更好的容错性、计算管理能力、协同性和适应性。

由此可见, 物联网、普适计算与环境智能等未来网络技术的发展为 CPS 的实现提供了一个物物相联的网络通信环境。随着 CPS 技术在大规模实时服

务系统中的应用和普及, RFID 等物联技术在完成货品跟踪与监测等基本服务的同时, 也将能实现对实际货品与相关资源的实时精确调度和控制。

4.6 CPS 与网络控制系统

网络控制系统 (Networked control system, NCS) 是通过串行通信网络形成的闭环反馈控制系统, 它与 CPS 的问题领域具有一定的相似性, 但在技术实现上的要求更高, 主要体现在系统的实时自治控制上。网络控制系统在远程控制中主要面临网络诱导时延、单包/多包传输、数据包丢失、节点的驱动方式、静态/动态的网络调度、通讯约束、空采样、抖动和时序错乱等多个问题。为了更好地避免这些问题, 提高系统的实时性, CPS 设备主要采用分散式布控, 在各节点自主感知控制的基础上, 结合中枢连锁可调节反馈控制的控制模式来实现系统的调度与决策^[25], 通过赋予节点自治性, 优化控制模型的精准度, 实现系统的自主自适应调节, 提高系统的整体响应速度和任务执行效率, 实现在信息反馈到决策者的同时, 利用执行器在当地实时处理和解决问题。这使得 CPS 具有更高的性能优势。

4.7 CPS 与混杂系统

混杂系统 (Hybrid systems) 是指连续变量和离散事件同时存在并且相互影响和相互作用的一类动态系统。CPS 属于混杂系统的研究范畴, 混杂系统中的许多模型和技术都可以作为 CPS 研究时的借鉴, 比如离散事件模型、计算智能模型、博弈法等。但 CPS 也具有混杂系统所不包含的新特征, 比如信息层的软件组件将与所涉及的实际物理设备直接交互, 而每个物理设备也都必须包含通讯与计算的能力; 而且 CPS 中的反馈是包含了人和生物在内的“Cyber-Physical”反馈过程。人将不仅作为系统的设计者、监控者和使用者, 而是变成系统的一部分。人的语言、思想、行为甚至人的生物特征等因素都将参与 CPS 的运行与决策。

5 CPS 研究面临的挑战和研究方向

CPS 作为一门新兴的技术, 有很多难题需要解决, 其研究议程将是庞大的、跨领域的, 将涉及计算科学、生命科学和许多工程相关科学中的知识, 比如生物学、力学、机械学和电学等。本文在对现有研究进行分析阐述的基础上, 指出在当前的 CPS 研究中, 主要面临着如何在异构环境下实现“Cyber-Physical”集成、如何实现组件动态抽象、如何实现系统的自治协调、如何提高系统的实时性、如何确保系统安全可靠, 以及如何如何进行系统性能和系统相关模型方法验证这 6 大主要挑战。并针对各项挑战,

对可能的解决方法 and 研究方向进行了展望。

5.1 Cyber-Physical 在异构环境下的集成

传统的物理系统是通过微分方程和连续的边界条件来控制 and 处理问题, 关注影响系统实现的细节因子; 传统的信息系统则是建立在认知和离散数学等非结构化知识的基础上的, 对时间和空间的连续性不敏感, 通常只关心系统功能的实现。而信息物理融合系统同时涉及物理组件和信息组件, 因此, 如何克服这种差异, 实现信息层和物理层的深度耦合, 是 CPS 研究中的首要问题。

在研究中可以从操作系统和编程语言的角度出发, 重新考虑硬件与软件的划分, 采用软硬件综合建模, 促进 Cyber-Physical 的融合。比如 TINYOS 和 NESC 通过结合, 混淆了操作系统和编程语言的界限, 提供了一套更为合适的嵌入式软件抽象模型。而电子设计自动化 (Electronic design automation, EDA) 社区和 PROLEMY Project 在基于多模型混合的软硬件共同设计上也开展了探索^[19]。也可以从理论研究角度入手, 结合可计算的动态系统理论。传统的系统理论或者是纯物理的 (比如控制系统、信号处理等) 或者是纯计算的 (比如计算性、复杂性等), 新型的混杂系统以及随机进程代数等理论则应当对物理和计算两部分的内容进行柔性融合。此外, 还可以考虑结合云计算和网络中间件技术^[23], 以下一代互联网为平台, 构建虚拟化资源池, 实现系统中计算资源和硬件资源的管理和调度。文献 [26–27] 研究了 CPS 中的任务调度优化问题, 通过设计控制规则来实现对 CPS 行为的调节, 初步实现了能够预测系统性能并降低资源开销的任务调度算法。

5.2 组件抽象

CPS 的组件抽象是 CPS 研究中的一大难点。主要面临如何才能“忽略”不同应用领域和不同平台种类的知识和技术特点, 将混杂的交互过程解耦, 从动态的、相异的、时空多维的混合领域中完成对不同信息与物理设备的抽象和量化等问题^[28–29]。除了进一步优化现有软件工程的相关理论, 还可以考虑结合 GIS 和多维数据挖掘技术, 通过对现有数据的分析, 提取对于组件识别和抽象有用的信息。也可以结合图论和复杂网络技术, 通过将信息抽象为网络中的“节点”和“边”, 进而分析信息的构成特点, 并通过复杂网络中的集群效益和社区划分等方法, 实现对混杂信息与组件的提取。

5.3 自治性和自主协调性

大规模 CPS 的出现, 将会提供给决策者和普通用户以海量的信息和远远高于需求水平的大量可被控制的电子设备。这就可能会超出人的操控能力。

因此, CPS 应该具有能够自行消化信息和知识、并自主动态地操控每个设备的能力。只有满足了自主性, 才能实现 CPS 系统的全局性能优化。因此, 需解决系统中组件的自主交互和资源的协调调度问题^[26–27, 30]。

可以考虑结合网络技术、Multi-agent 智能技术和移动机器人技术, 实现 CPS 组件的智能感知和协调交互能力。也可从语言上入手, 设计和开发更具可预测性、可靠性, 更易理解的代码, 比如 Signal 等同步语言^[31], 已被证实航空电子设备中非常有效。此外, 自主性的实现主要是依靠对系统的有效控制实现的, 因此, 在控制算法的设计上需要尽量避免冲突和冗余现象, 以便实现系统的同步, 可以尝试结合基于扩展马尔科夫链的控制以及一些动力学和生物同步相关的控制方法。

5.4 实时性

在现有嵌入式系统和网络控制技术中, 实时性也是一个研究重点。在 CPS 环境下对实时操作的要求更高, 不仅要提高系统实时性的精度, 也要提高系统的兼容性, 以便具有在不同平台和不同空间范围中实现系统实时响应的能力。如何在广域时空范围下实现对系统的实时控制, 以及如何在牺牲系统性能和资源的前提下提高系统实时性及可预测性, 是实现 CPS 技术的难点。以下是几种提高系统实时性的方案^[32–33]:

1) 设计可预测的分层存储技术。在传统分层存储技术上增强可预测性, 以便在提高系统计算性能的同时保证时间的可预测性。

2) 设计可预测的内存管理技术。现有的自动存储管理技术虽然能显著提高编程人员的生产效率和软件可靠性, 但也面临着耗费过多时间和系统资源的问题。对此, 可考虑采用一些资源优化调度算法。

3) 设计可预测的并发机制。CPS 具有并发特性, 但现有的并行系统往往是以牺牲系统资源和性能为代价的。可从能耗和资源优化的角度, 开发适用于 CPS 的并发机制。

4) 开发具有实时语义性的编程语言。考虑编程语言的计时能力、执行效果和时耗代价等。现有的一些编程语言在发展中已经考虑了时间语义等问题, 比如 Mathworks 的 Simulink 建模语言等。

5) 设计具有时间测定能力的网络分布式软件。考虑在传统协议和网络交互模式中增加时间测定能力, 并与网络化的时间同步技术相结合, 提高 CPS 的实时性和整体效能。

5.5 系统的安全可靠性

安全可靠是大型复杂系统的首要指标。在 CPS 环境下, 信息与物理组件间的交互相较原有网络通

讯结构更为便捷频繁, 而网络中用户甚至智能组件的地位也享有更多的平等自由. 此外, 物理组件与面向对象的软件组件对于安全性的标准也有本质不同, 传统的单一基于线程和方法调用的模式将不再适用^[31].

在这样的环境下, 如何保证用户的通讯信息和隐私, 并提高 CPS 相应组件的抗毁性和可靠性, 以及如何实现在不确定复杂环境下对系统的时间不间断监控与管理, 是极富挑战性的关键问题^[34]. 在保证系统安全性的角度, 考虑进行以下操作^[35]: 1) 及时发现网络威胁, 并预计攻击可能导致的结果; 2) 认识到 CPS 在安全性防护中和传统信息系统的不同之处; 3) 考虑建立从预防、检测、防御性修复、系统复原和制止相似攻击等几个层面来抵制攻击的 CPS 安全机制. 其中, 在预测阶段可以结合网络科学、社会科学和动力学等知识, 比如偏好分析、行为发现、渗流预测等技术实现对可能存在的威胁的感知, 并及时发布预警.

在可靠性的提高上, 一方面可以通过增强系统的实时性来实现, 另一方面也可以借助现有的一些网络抗毁与级联事故预防技术, 研究预防突发异常事件, 并能实现系统实时恢复的预警预报和修复技术. 同时, 也要保证系统能量的恒久维持, 比如通过各组件之间的协调和调度来实现生产系统的不断电, 或是研发使用寿命更长的新型储能设备等.

5.6 可验证性

采用什么技术和指标对 CPS 中的各个组件以及方法的性能进行衡量、验证与优化是系统设计中的一大难题. 比如如何对计算模块中代码的时耗进行统计和评估、如何计量物理设备在网络环境下的能量损耗等.

CPS 的验证目前还缺乏通用的被认可的标准. 可以考虑从系统调度能力、系统能耗、系统速度、系统内存使用情况、死锁以及隐私性等方面开展研究. 结合现有的建模仿真与验证技术, 对 CPS 中的模型和方法进行验证和评估. 同时, 也可以充分利用并改进已有的各种人机交互系统和复杂系统仿真平台, 比如弗吉尼亚大学和伯克利大学等研究机构采用了 MacroLab 做为 CPS 的基础编程和验证环境, 已取得了较好的实验效果^[36].

6 结束语

CPS 是一个崭新的、非常有前途的研究领域, 国内外对它的研究均刚刚起步. 如何在现有研究基础上, 结合计算机科学、网络科学、控制科学、通信科学和生命科学、物理学、社会学等相关领域的知识和技术, 完善 CPS 的理论, 开展 CPS 实时性、自

治性、安全性和高效能的研究, 并进一步实现 CPS 应用的推广, 是科研工作中的一大难题, 更是一大机遇. 本文对 CPS 的概念和发展进行了概述, 并分析了可能的研究方向, 希望引起广大科研工作者对 CPS 更多的关注和兴趣.

References

- 1 Lee E. Computing Foundations and Practice for Cyber-Physical Systems: a Preliminary Report, Technical Report UCB/EECS-2007-72, University of California, USA, 2007
- 2 Baheti R, Gill H. Cyber-physical systems. *The Impact of Control Technology*. Washington D.C., USA: IEEE, 2011. 161–166
- 3 CPS Steering Group. Cyber-physical systems executive summary [Online], available: http://precise.seas.upenn.edu/events/iccps11/_doc/CPS-Executive-Summary.pdf, June 4, 2011
- 4 Lin J, Sedigh S, Miller A. A general framework for quantitative modeling of dependability in cyber-physical systems: a proposal for doctoral research. In: *Proceedings of the 33rd Annual IEEE International Computer Software and Applications Conference*. Seattle, USA: IEEE, 2009. 668–671
- 5 Sastry S S. Networked embedded systems: from sensor webs to cyber-physical systems. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Hybrid Systems: Computation and Control*. Berlin, Germany: Springer, 2007. 1–1
- 6 Branicky M. CPS initiative overview. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Cyber-Physical Systems*. Washington D.C., USA: IEEE, 2008
- 7 Krogh B, Ilic M D, Sastry S S. Networked Embedded Control for Cyber-Physical Systems: Research Strategies and Roadmap, Technical Report, Team for Research in Ubiquitous Secure Technology, USA, 2007
- 8 Ma Wen-Fang. CPS: sensor-net to sensor-actuator-net. *China Information World*, 2010, **25**
(马文方. CPS: 从感知网到感控网. 中国计算机报, 2010, **25**)
- 9 Rajkumar R, Insup L, Lui S, Stankovic J. Cyber-physical systems: the next computing revolution. In: *Proceedings of the 47th ACM/IEEE Design Automation Conference*. California, USA: IEEE, 2010. 731–736
- 10 Ilic M D, Xie L, Khan U A, Moura J M F. Modeling future cyber-physical energy systems. In: *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting*. Pittsburgh, USA: IEEE, 2008. 1–9
- 11 Zhang Y, Ilic M D, Tonguz O F. Application of support vector machine classification to enhanced protection relay logic in electric power grids. In: *Proceedings of the Large Engineering Systems Conference on Power Engineering*. Montreal, Canada: IEEE, 2007. 31–38
- 12 Pu W, Lemmon M D. Distributed flow control using embedded sensor-actuator networks for the reduction of combined sewer overflow (CSO) events. In: *Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control*. New Orleans, USA: IEEE, 2007. 1529–1534
- 13 Rammig F J. Cyber biosphere for future embedded systems. In: *Proceedings of the 6th International Workshop on Software Technologies for Embedded and Ubiquitous Systems*. New York, USA: Springer, 2008. 245–255
- 14 Xia F, Ma L H, Dong J X. Network QoS management in cyber-physical systems. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Embedded Software and Systems*. Chengdu, China: IEEE, 2008. 302–307

- 15 Bestavros A, Kfoury A, Lapets A, Ocean M. Safe compositional network sketches: formal framework. In: Proceedings of the 13th ACM International Conference on Hybrid Systems: Computation and Control. New York, USA: ACM, 2010, 231–241
- 16 Al-Hammouri A, Liberatore V, Al-Omari H, Al-Qudah Z, Branicky M S, Agrawal D. A co-simulation platform for actuator networks. In: Proceedings of the 5th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York, USA: ACM, 2007, 383–384
- 17 Tan Y, Goddard S, Prez L C. A prototype architecture for cyber-physical systems. *ACM SIGBED Review*, 2008, 5(1): Article No. 26
- 18 Kim K H. Desirable advances in cyber-physical system software engineering. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing. California, USA: IEEE, 2010, 2–4
- 19 Lee E. Cyber physical systems: design challenges. In: Proceedings of the 11th IEEE International Symposium on Object Component Oriented Real Time Distributed Computing. Orlando, USA: IEEE, 2008, 363–369
- 20 Corman D, Paunicka J. Industrial challenges in the composition of embedded systems. In: Proceedings of the 13th Monterey Conference on Composition of Embedded Systems: Scientific and Industrial Issues. Berlin, Germany: Springer, 2007, 97–110
- 21 Amorim M D, Ziviani A, Viniotis Y, Tassiulas L. Practical aspects of mobility in wireless self-organizing networks. *IEEE Wireless Communications*, 2008, 15(6): 6–7
- 22 Tricaud C, Chen Y Q. Optimal mobile actuator/sensor network motion strategy for parameter estimation in a class of cyber physical systems. In: Proceedings of the American Control Conference. St. Louis, USA: IEEE, 2009, 367–372
- 23 Kang K, Son S H. Real-time data services for cyber physical systems. In: Proceedings of the 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Washington D. C., USA: IEEE, 2008, 483–488
- 24 Oleshchuk V. Internet of things and privacy preserving technologies. In: Proceedings of the 1st International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace Electronic Systems Technology. Washington D. C., USA: IEEE, 2009, 336–340
- 25 Abdelzaher T. Research challenges in distributed cyber-physical systems. In: Proceedings of the IEEE/IFIP International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing. Shanghai, China: IEEE, 2008, 5–5
- 26 Easwaran A, Insup L. Compositional schedulability analysis for cyber-physical systems. *ACM SIGBED Review*, 2008, 5(1): Article No. 6
- 27 Zhang F M, Szwajkowska K, Wolf W. Task scheduling for control oriented requirements for cyber-physical systems. In: Proceedings of the Real Time Systems Symposium. Barcelona, Spain: IEEE, 2008, 47–56
- 28 Lin J, Sedigh S, Miller A. A general framework for quantitative modeling of dependability in cyber-physical systems: a proposal for doctoral research. In: Proceedings of the 33rd IEEE International Computer Software and Applications Conference. Seattle, USA: IEEE, 2009, 668–671
- 29 Tan Y, Vuran M C, Goddard S. Spatio-temporal event model for cyber-physical systems. In: Proceedings of the 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Washington D. C., USA: IEEE, 2009, 44–50
- 30 Ten C W, Liu C C, Govindarasu M. Anomaly extraction and correlations for power infrastructure cyber systems. In: Proceedings of the IEEE International Conference on System, Man and Cybernetic. Washington D. C., USA: IEEE, 2008, 7–12
- 31 Lee E. Cyber-Physical Systems — Are Computing Foundations Adequate? [Online], available: <http://chess.eecs.berkeley.edu/pubs/329.html>, June 12, 2011
- 32 Bonakdarpour B. Challenges in transformation of existing real-time embedded systems to cyber-physical systems. *ACM SIGBED Review*, 2008, 5(1): Article No. 11
- 33 Lee E A. Time-critical networking - invited presentation. In: Proceedings of the IEEE/LEOS Summer Topical Meeting. Washington D. C., USA: IEEE, 2009, 149–150
- 34 Crenshaw T L, Gunter E, Robinson C L, Sha L, Kumar P R. The simplex reference model: limiting fault-propagation due to unreliable components in cyber-physical system architectures. In: Proceedings of 28th IEEE International Real-Time Systems Symposium. Washington D. C., USA: IEEE, 2007, 400–412
- 35 Dillon T, Potdar V, Singh J, Talevski A. Cyber-physical systems: Providing Quality of Service (QoS) in a heterogeneous systems-of-systems environment. In: Proceedings of 5th IEEE International Digital Ecosystems and Technologies Conference (DEST). Daejeon, USA: IEEE, 2011, 330–335
- 36 Hnat T, Sookoor T, Hooimeijer P, Weimer W. Macrolab: a vector-based macro programming framework for cyber-physical systems. In: Proceedings of the 6th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York, USA: ACM, 2008, 225–238



王中杰 同济大学电子与信息工程学院控制科学与工程系教授。主要研究方向为复杂系统的建模控制与调度优化, 信息物理融合系统, 复杂网络, 以及网络控制。本文通信作者。

E-mail: wang_zhongjie@tongji.edu.cn
(**WANG Zhong-Jie** Professor in the Department of Control Science and Engineering, College of Electronics and Information Engineering, Tongji University. Her research interest covers modeling, control, scheduling and optimization of complex systems, cyber-physical systems, complex networks, and networked control. Corresponding author of this paper.)



谢璐璐 同济大学电子与信息工程学院控制科学与工程系博士研究生。主要研究方向为信息物理融合系统的建模控制与优化。

E-mail: lilymaomao@gmail.com
(**XIE Lu-Lu** Ph. D. candidate in the Department of Control Science and Engineering, College of Electronics and Information Engineering, Tongji University. Her research interest covers modeling, control and optimization techniques of cyber-physical systems.)