信息物理融合系统

温景容 [1] 武穆清 [1] 宿景芳 [2]

摘 要 信息物理融合系统 (Cyber-physical system, CPS) 是计算、通信和物理过程高度集成的系统, 通过在物理设备中嵌入感知、通信和计算能力, 实现对外部环境的分布式感知、可靠数据传输、智能信息处理, 并通过反馈机制实现对物理过程的实时控制. 分析了 CPS 的基本概念和特征, 对 CPS 的体系架构、中间件系统、实时性、安全和隐私等关键技术的现有研究成果进行综述, 并提出了相应的研究思路; 然后介绍了一些现有的 CPS 原型系统和实例, 体现出 CPS 的优越性; 最后对 CPS 和传感器网络 (Wireless sensor network, WSN)、物联网 (The internet of things, IOT)、网络控制系统 (Networked control systems, NCSs) 进行了对比分析, 总结了 CPS 现有研究中存在的问题, 并展望了 CPS 的发展方向.

关键词 信息物理融合系统, 体系架构, 中间件, 实时性, 安全和隐私

引用格式 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

DOI 10.3724/SP.J.1004.2012.00507

Cyber-physical System

WEN Jing-Rong[1] WU Mu-Qing[1] SU Jing-Fang[2]

Abstract Cyber-physical system (CPS) represents a system which tightly integrates computation, communication and physical processes. Perception, communication, and computing capabilities are embedded into the physical device, in order to realize distributed sensing, reliable data transfer, intelligent information processing, real-time feedback and control. This paper summarizes the basic concepts and characteristics of CPS firstly, and then gives a systemic review of recent progress on some key technologies, such as architecture, middleware system, real-time feature, security and privacy, and also puts forward some related research ideas. Some prototype systems and practical examples are also described to show the advantages of CPS. Finally, CPS is compared with wireless sensor network (WSN), the internet of things (IOT), networked control systems (NCSs), and some existing deficiencies are summarized, and the future research directions of CPS are proposed.

Key words Cyber-physical system (CPS), architecture, middleware, real-time, security and privacy

Citation Wen Jing-Rong, Wu Mu-Qing, Su Jing-Fang. Cyber-physical system. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(4): 507−517

嵌入式计算、传感器监控、无线通信, 以及大规模数据处理等技术的发展使得物理过程、计算过程和通信过程可以高度集成. 通过将感控能力、计算能力和通信能力深度嵌入物理过程, 可实现物理设备的信息化和网络化, 从而产生集计算、通信和控制为一体的信息物理融合系统 (Cyber-physical system, CPS). 在 CPS 中, 通过对物理环境和资源的动态感知、信息的实时可靠传输、数据的综合计算处理, 并利用反馈循环实现对物理过程的有效控制, 整个过程可自动完成, 人处于辅助地位.

CPS 涉及计算科学、网络通信、控制理论等多个学科[1], 广泛应用于多种实际系统, 包括道路交通、航空航天、远程医疗、能源工业自动化、国家电网等大型基础设施系统[1−3], 以及精细农业、药丸式电子内窥镜等局部或微型系统. CPS 技术的深入研究和成果应用将改变信息世界和物理世界的信息交互方式[2], 影响未来物理系统的构建方式, 并有助于实现新一代的智能系统.

目前, CPS 已经引起了国内外学者和研究机构的广泛关注, 及至国家层面的重视. 2006 年 2 月, 美国发布《美国竞争力计划》, 将 CPS 列为重要研究项目; 2007 年, 美国总统直属科技顾问委员会将 CPS 列为优先发展的八大关键信息技术之首; 2008 年, 美国 CPS 指导小组将 CPS 应用于能源、交通、国防、医疗、农业等方面; 截止 2010 年 3 月, 美国国家科学基金会已批准 130 多项 CPS 研究项目. 欧盟

收稿日期 2011-06-24 录用日期 2011-11-09
Manuscript received June 24, 2011; accepted November 9, 2011
国家自然科学基金 (60772109, 61001105) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (60772109, 61001105)
本文责任编委 文成林
Recommended by Associate Editor WEN Cheng-Lin

1. 北京邮电大学信息与通信工程学院网络体系构建与融合北京市重点实验室 北京 100876 2. 河北科技大学信息科学与工程学院 石家庄 050018
1. Laboratory of Network System Architecture and Convergence, School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876 2. Institute of Information Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018

计划在 2007 年到 2013 年投入超过 70 亿美元进行智能电子系统和 CPS 方面的研究, 以确保其领先地位; 日本、韩国也在进行类似的研究[4]; 在学术界, IEEE 和 ACM 等组织从 2008 年开始, 每年都举办 CPS Week[5] 等学术活动和会议, 对 CPS 的关键技术、应用以及未来的发展进行讨论; 另外也有一些研究组织和机构, 例如 CPS 虚拟组织 CPS-VO[6]、MIT 的 CSAIL 实验室[7]、卡内基梅隆大学的 SLD 小组[8] 等, 在 CPS 的相关技术和应用平台方面都进行着较深入的研究; 在国内, CPS 也逐渐引起专家学者的重视, 何积丰等多位院士在学术报告会议中多次提出 CPS 相关研究, 大连理工大学的夏峰博士于 2009 年成立了 CPS 研究小组[9], 我国政府也开始对 CPS 研究进行重点项目资助[10].

但从现阶段国内外研究成果上看, 关于 CPS 的研究仍处于初级阶段, 存在诸多需要解决的理论和技术难题, 部分概念仍比较模糊. 同济大学的王中杰教授等最近发表了信息物理融合系统的研究综述[11], 介绍了 CPS 的概念和系统构成, 分析了 CPS 的应用和发展, 同时将 CPS 和多个相关系统进行对比分析, 具有较高的研究价值, 但其并没有对 CPS 具体涉及的实时性、安全和隐私等技术现有的研究状况进行深入分析. 本文针对 CPS 的系统架构、实时性、安全和隐私等多项关键技术的前期研究成果进行综述和总结, 并对其未来的发展进行展望, 具有较重要的参考价值和意义.

1 CPS 基本概念和特征

CPS 的具体概念目前还没有统一的明确定义, 但其主要是指物理世界和信息世界高度融合的系统. 其中融合主要是指在 CPS 中, 物理环境和信息处理有更深层的交互, 物理设备将嵌入计算、通信能力, 而通过处理后的信息又将反作用于物理环境, 最终形成一个网络化的物理设备系统.

Lee 定义 CPS 是计算过程和物理过程的集成系统, 利用嵌入式计算机和网络对物理过程进行监测和控制, 并通过反馈环实现计算和物理过程的相互影响[12].

Poovendran 定义 CPS 是即将出现的一类新系统, 通过将网络通信能力嵌入物理世界, 如基础设施、工作平台, 甚至人类自身, 实现和物理世界的信息交互. 其主要特点是物理环境和网络世界间紧密的信息交互[13].

Tabuada 认为 CPS 是由一些具有通信和计算功能的传感器和执行器组成的分布式网络, 节点可以对物理环境进行监测和管控, 并依靠互相协调完成更为强大的功能[14].

何积丰院士则提出更为广义的概念: CPS 就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、高效和实时的方式监测或控制一个物理实体, 最终实现信息世界和物理世界的完全融合, 从根本上改变人类构建工程物理系统的方式[15].

对比上述不同的 CPS 定义, 如图 1 所示, 本文认为: 在 CPS 中, 通过将感知能力、通信能力和计算能力嵌入到物理设备中, 对外部环境或资源进行分布式感知、可靠数据传输、综合信息处理, 并通过反馈循环实现对物理过程的实时控制. 在环境变化时, 系统可以动态地自我调整以满足用户需求, 而人处于辅助地位. 整个系统可以是宏观上跨地域的大型复杂系统, 如国家电网等; 也可以是微观上的小型嵌入式系统, 如药丸式电子内窥镜等.

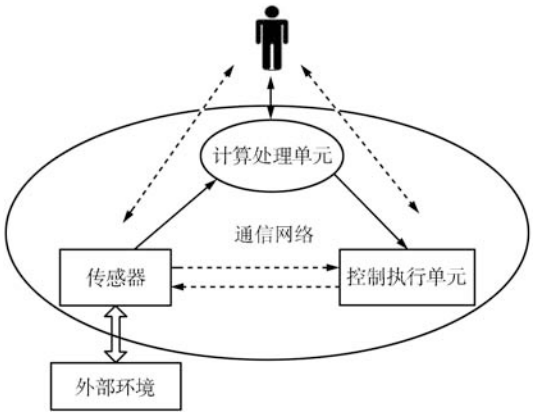


图 1 CPS 系统模型

Fig. 1 Model of CPS

总而言之, 整个 CPS 系统是一个建立在物理环境基础上, 综合利用计算、通信和控制手段的有机融合和深度协作, 实现对大型多维复杂系统的实时感知和动态控制. 其基本特征有[1, 12, 16]:

1) 实时性. 在 CPS 中, 由于引入感知、传输、控制的反馈循环, 信息的传输和处理带来时延, 而精确控制需要根据当时的采样数据进行, 这就对系统的实时性提出了较高要求; 并且由于 CPS 中存在多个系统单元, 它们之间的时间同步也十分重要, 特别是 CPS 多用于航空航天、工业控制等关键领域, 实时性显得尤为重要.

2) 分布式. CPS 中往往存在多个单元, 并通过相互协作完成复杂任务, 每个单元采集和处理部分信息, 并通过发布/订阅模式, 将分布式的信息进行汇总分析, 协调各个单元的任务分配, 实现复杂的计算处理功能.

3) 高可靠性. 不同于传统的控制系统, 由于

CPS 中引入了通信过程, 会带来数据失真, 并且物理过程的不确定性也会引入某些异常因素, 而在 CPS 系统应用中, 必须要具有一定的容错性, 才能保证采集信息和反馈信息的真实可靠, 实现系统的正常稳定工作.

4) 强安全性. 由于 CPS 系统的应用涉及多种重要场合, 其控制过程将对物理环境产生直接作用, 对 CPS 系统的破坏将产生不可估量的后果, 故 CPS 系统的安全性必须得到保证.

5) 多样性. CPS 系统所连接的设备多种多样, 规模可大可小, 并可能使用不同的标准和协议, 网络构成具有多样性. 同时从宏观上, CPS 可以是一个专有的系统, 也可以是全球互联的庞大系统, 具有多类型、多尺度的特点.

6) 自治性. 在 CPS 系统中, 人处于辅助地位, 整个系统可以自动进行对物理环境的感知、信息传递、计算处理和反馈控制过程. 各种资源能够根据任务需要自动重组和重配置. 自治性是 CPS 系统有别于其他系统的一大特点.

2 CPS 的体系架构

体系架构是系统设计中的首要问题, 由于 CPS 系统复杂、应用场景广泛, 因此建立一个具有通用性、起支撑作用的体系架构具有十分重要的意义. 关于 CPS 的系统架构, 国内外已有部分研究成果.

大部分学者认为可以采用分层结构, 将 CPS 分为底层的感知模块和执行模块、中间的通信网络和上层的计算决策模块. Tan 等认为 CPS 是依靠下一代网络松散连接的分布式信息系统和物理系统, 其受用户定义的语义规则限制. 作者在此基础上, 提出了一个原型架构: 传感单元和执行单元直接作用于物理世界, 中间依靠下一代网络进行信息传输, 使用安全数据库服务器进行过期数据的管理, 实时信息通过发布/订阅的方式, 直接交由 CPS 单元进行处理, 用户预定义 CPS 单元的计算规则[16].

Wang 等提出了一种面向服务的 CPS 体系架构[17]. 通过将系统分为节点层、网络层、资源层和服务层, 每层的软硬件资源封装为服务, 针对不同任务分配不同的服务. 节点层负责物理过程和计算过程的交互, 包含传感器技术、嵌入式系统技术、无线连接、控制技术等; 网络层是 CPS 实现分布式计算和资源共享的基础, 完成信息传输和共享, 包含网络接入、路由、数据传输、发布/订阅等技术; 资源层是抽象层, 将硬件提供的信息处理能力描述成资源, 然后对数据资源、模型资源、存储资源等进行组合、定位和维护, 实现有效的资源管理. 服务层对资源的能力进行抽象, 并将其包装成服务提供给用户. 该文也定义了 CPS 的工作流程: 其节点层和物理环境进行实时交互, 通过传感器感知环境变化, 将感知信息传给计算单元, 计算单元调用通信单元和其他节点进行数据交换, 然后将获取的信息进行融合, 从而产生正确判决, 并将决策反馈给控制单元, 实现对物理过程的影响.

谭朋柳等提出了由传感器网络、信息中心、控制中心、执行器网络、用户终端和 CPS 实时网络组成的 CPS 体系结构[18]. 传感器网络感知物理信息, 并经汇聚节点融合后传送; 信息中心负责数据存储和用户鉴权; 控制中心负责数据处理分析, 产生决策, 并将合法用户的控制命令转发给执行器网络中的控制节点; 执行器网络由若干执行单元和控制节点组成, 根据控制命令改变物理过程. 用户终端实现人和信息世界的交互; CPS 实时网络连接各部分组件, 并提供实时基准.

此外, 在具体的 CPS 应用场景中, 需要结合该应用的特点, 对 CPS 的架构进行适当改进.

文献 [19−20] 分别从理论和实践的角度对 CPS 在电力系统中的应用架构进行了分析. Ilic 等针对下一代智能电网资源分布式和动态变化的特点, 提出数学模型架构来分析分布式发电机组和动态负载变化情况, 并对传输网络的性能进行了实例分析[19]. 赵俊华等试图构造实际电力 CPS 的体系结构, 介绍了控制中心、分布式计算设备、通信网络、输电/配电网络、电源和负荷等组件, 并对其中的信息流动和电能流动进行了分析, 对 CPS 通信协议、分布式计算等电力 CPS 关键技术和挑战进行总结, 为电力 CPS 系统的建立提供了参考[20].

Koubaa 等结合 Internet 跨地域互联和嵌入式控制的特点, 提出信息物理互联网 (Cyber-physical internet, CPI) 的概念, 以实现任何时间和地点的泛在控制[21]. CPI 包含多种不同的网络, 如无线传感器网络 WSNs、RFID 系统、移动手机等. 如图 2 所示, CPI 的协议栈将在原有计算机网络五层体系结构的基础上增加 CY-PHY 层 (Cyber-physical layer), 以统一的结构化方式表示数据, 并且支持有效的跨层设计, 其他层将根据 CY-PHY 层信息调整自己的行为. 例如物理层根据 CY-PHY 层信息改变信道和调制方式; MAC 层为适应 CY-PHY 层数据调整同步/异步模式、占空比等参数; 网络层确定适当的路由策略和数据融合机制等.

2011 年的 ICCPS 会议上, 卡耐基梅隆大学的 Bogdan 等提出采用统计物理学中分型主方程来分析物理环境, 侧重利用真实世界中的自相似性和非平稳性进行信息提取, 并将这些信息经过融合后, 利用通信协议传给数据中心进行处理[22−23]. 在系统要求的约束条件下, 将节点的队列长度、通信带宽等作为主方程的优化参数, 得到最优的控制策略, 包括拓

扑的控制、资源的分配、调度和路由策略等, 最后作用于物理环境. 系统包括对物理环境的感知, 其可以利用环境的特点和历史数据的相似性得出更精确的信息; 然后将这些信息经过通信网络进行传输汇聚, 这个过程会引入时延和丢包现象; 信息汇聚后, 按照不同应用业务的限制条件和信息的时频统计特性, 选择线性或非线性的主方程模型进行优化决策; 最后将决策结果反馈给用户, 并对网络的时延、队列长度进行优化.

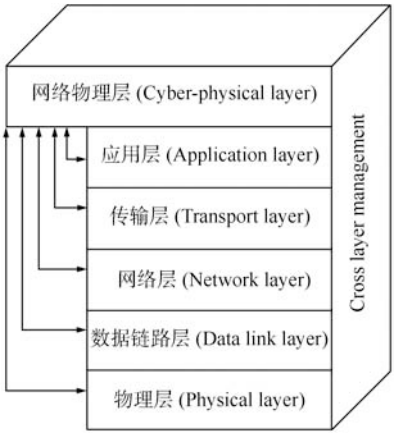


图 2 CPI 协议栈

Fig. 2 Protocol stack architecture for CPI

王中杰等从 CPS 的抽象结构、运行方式、物理构成和实现架构四个方面对 CPS 的架构组成进行了总结分析, 将系统抽象为网络层和物理层, 两层之间进行信息传递, 相互作用[11]. 其中一个重要特征是 “人” 作为系统的组成部分参与交互过程.

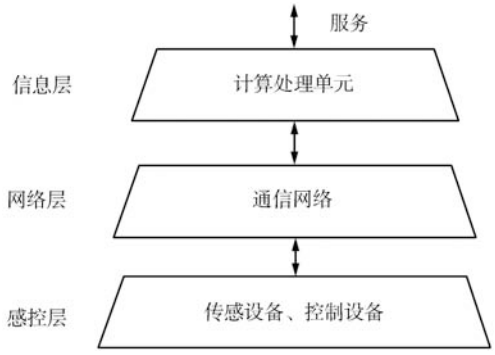


图 3 CPS 层次结构模型

Fig. 3 Layering model of CPS

综合以上对 CPS 体系结构的研究成果, 结合 CPS 的闭环特征, 本文认为: 从信息的传递过程看, 可以将 CPS 分为负责信息感知的传感网络、负责信息传输的通信网络、负责信息处理的计算模块, 以及负责反馈控制的执行网络. 从层次结构上, 如图 3 所示, 可以将 CPS 分为感控层、网络层、信息层, 感控层主要包括传感设备和控制设备, 负责采集物理环境信息, 以及利用控制信息对物理环境进行反馈控制; 网络层主要包括通信传输网络, 进行信息的实时可靠传递; 信息层主要包括计算处理单元, 对采集的数据进行处理和智能判决, 得出控制决策, 并将下层资源抽象为服务向上层用户提供. 相对文献 [11], 本文提出的架构模型层次更加清晰和灵活, 人在该模型中属于可选组件, 可参与系统交互, 也可由系统自己进行智能控制.

3 CPS 中间件

CPS 的中间件是指将 CPS 各组件有机结合在一起的软件系统. 通过对各部分进行抽象, 构建软件模型, 实现各部分自有功能和信息交互, 最后联合成为整个 CPS 闭环系统.

关于 CPS 中间件的研究, 早在 2004 年, 美国伊利诺伊大学的 Hill 等就构建了一个异构可信的信息保障体系中间件 HESTIA[24], 可以为智能大厦和其他类似 CPS 系统提供安全服务, 包括接入控制、入侵检测、匿名保护、负载均衡等. Hill 等在伊利诺伊大学厄巴纳香槟分校的塞贝尔中心布置了实际系统, 包括电子锁、加热制冷光亮控制、视频监控和其他传感器和执行器, 并利用 HESTIA 管理整个系统. 整个系统可以智能工作, 并给予用户有效反馈, 其使用 Prolog 构建智能推理库.

近几年, 关于 CPS 中间件的研究主要基于面向服务模型 (Service-oriented architecture, SOA), 通过将系统分层和模块化后, 不同层间以提供服务的方式进行交互, 这样可以屏蔽各组件系统间的差异, 是一种较好的中间件设计思路.

Lin 等针对 CPS 提出了一个基于实时 SOA 架构的中间件系统 Llama[25], 对任务的执行时间和所需资源进行预测, 并根据用户要求, 利用全局资源管理器 GRM 对实时任务流进行调度, 而利用局部资源管理器对任务进行托管并确保被 GRM 及时调度. 该中间件利用资源预留等方法, 可以增强 CPS 的可扩展性和可预测性, 对 CPS 系统中的任务进行更好的管理. Huang 等则提出了基于 PE (Physical-entity) 的面向服务模型 PE-SOA[26−27], 采用两层组合推理的方法, 将过程分为抽象层面和物理层面, 综合考虑物理实体可提供的服务资源, 并将物理实体间的功能关系映射为类的继承关系. 通过扩展 OWL (Ontology web language) 模型, 建立以 Physical entity 为中心的 PE-SOA 模型, 物理实体提供服务的不确定性和环境限制, 通过抽象层面进行屏蔽, 这样在抽象推理判决时不需要考虑物理

层细节, 而由物理层进行实例化, 分层方式可以提高处理判决速度.

此外, 还有一些学者针对 CPS 中容错特性, 提出采用反馈控制的软件设计方法, 利用合理反馈, 提高系统的稳定性和资源利用效率[28]. 同样为满足 CPS 稳健性和可靠性, 文献 [29] 提出采用自治计算循环 ACCC (Autonomic computing cycle of CPS) 和自治计算监控 ACS (Autonomic computing supervisor) 来实现无人值守情况下的可靠服务, 包括检测、分析、治疗、评价、交换和学习等环节, 采用遗传算法、神经网络等构建知识库.

从整体上看, CPS 的中间件设计中要考虑到物理资源和计算资源的紧密联系, 考虑到物理实体可提供的能力和局限, 通过采用面向服务的中间件设计方法, 可以屏蔽底层细节, 提供较好的信息采集、处理和交互手段, 同时中间件的研究中, 要提供一定容错机制, 保证 CPS 的可靠性.

4　CPS 实时性

CPS 对时间要求严格, 传感模块需要实时感知环境变化, 决策控制模块要根据实时数据进行判决, 实现对物理过程的实时控制. 考虑到 CPS 整个反馈循环处理过程, 实时性主要体现在实时网络传输和实时任务调度处理两个方面. 由于 CPS 引入了通信过程, 信息的传输可能带来不确定的网络时延; 另外系统复杂性的增加也使任务模型变得更加复杂, 实时操作系统和实时任务调度也是 CPS 需要研究的重点.

伯克利大学的 Lee 定义了 CtP (Cyberize the physical) 和 PtC (Physical the cyber) 的概念[12], 提出一个适用于 CPS 的分布式定时软件 PTIDES (Programming temporally-integrated distributed embedded systems), 其规定了分布式软件组件间的交互、互联网络、传感器和执行器与物理环境的交互等, 指出要在正确的时间做正确的事情, 而不是尽可能地提前, 这为 CPS 实时性的研究提供了新的方向. 该分布式软件的前提假设是网络中时钟同步或存在固定误差, 且网络传输时延有限, 文中利用通用电气的 Vie control platform 为例, 解释如何利用 IEEE 1588 标准构建时钟同步的以太网络, 以限定网络的传输时延.

CPS 系统除了处理时延外, 最主要的是引入了双向的传输时延, 并伴随着时延抖动. Al-Omari 等考虑了 CPS 中数据由传感器到控制器, 再由控制器到执行器的过程中产生的时延抖动现象[30], 提出通过采用 Play-back 缓存的方式将抖动转化为固定时延, 利用控制器可知前向路径时延的特点, 精确预测 Play-back 时延, 减少异常峰值的出现. 如图 4 和式 (1) 所示, $RTT_{pcp}(i-1)$ 表示第 $i-1$ 个包的往返传输时间, $\widehat{f}_{pc}(i)$ 表示从传感器到控制器前向传输时延的变化量, $\widetilde{r}_{cp}(i)$ 表示对控制器到传感器反向传输时延变化量的估计值, 由于在 k_i 时刻, 控制器知道 $RTT_{pcp}(i-1)$ 和 $\widehat{f}_{pc}(i)$ 的值, 而 $\widetilde{r}_{cp}(i)$ 的值可以通过以前的历史数据推测得到, 故可推测出第 i 个包的时延, 便于控制器做出决策.

$$\tau_i = RTT_{pcp}(i-1) + \widehat{f}_{pc}(i) + \widetilde{r}_{cp}(i) \qquad (1)$$

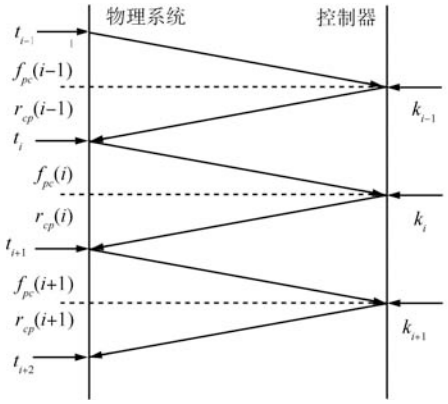


图 4　NCS 包交换流程

Fig. 4　Packets exchange in NCS

相对于时延抖动的小尺度优化, 还可以对消息的传输流程进行优化, 减少数据传输过程, 以减少时延. Kang 等主要对 CPS 中的实时数据服务进行研究, 提出以信息为中心的方式, 其不同于传统实时数据管理和无线传感器网络, 而是利用基于网络的实时嵌入式数据库 nRTEDBs (Network-enabled real-time embedded databases) 提取事件相关的有用信息, 实现传感节点间安全、及时的通信[31]. nRTEDBs 节点具有较一般传感节点更强大的功能, 传感节点将原始数据传给 nRTEDBs 节点进行分析, nRTEDBs 节点间对提取的信息进行交换, 得到全网状态. 通过采用 nRTEDBs 节点代理的方式, 避免了对传感器节点洪泛的数据搜集, 减少了时延. 同时, nRTEDBs 节点可以根据提取到的信息重要程度, 采用不同的转发周期, 实现关键事件的优先发布. 在实时数据处理方面, nRTEDBs 采用自适应的反馈控制数据服务, 通过时延控制器平滑不确定时延, 减小时延抖动.

除了信息处理和传输的实时性研究, 哥伦比亚大学的 Leonardi 等针对实际场景中的物理环境限制, 研究如何实现分布式执行器间的同步问题[32]. 首先考虑对节点在欧氏空间里的放置进行优化, 将需要交互大量数据的节点尽可能靠近, 以减小网络互联成本和端到端时延开销; 在此基础上, 按照整

个系统对时延、丢包等需求和实际物理环境的约束, 将通信系统的优化问题转化为整数线性规划问题, 产生最优的节点间互联网络, 实现通信系统的同步; 最后在一定的计算需求限制下 (如最大执行时间必须小于某一门限), 再利用整数线性规划, 实现执行器间的局部计算同步和全局同步. 整个过程从节点放置、通信系统同步、计算系统同步三个方面保证 CPS 系统实时性要求.

除了以上几个方面, CPS 实时性研究还涉及: 实时操作系统[33−34]、实时网络传输协议[18, 21]、确定性时延保证算法[30] 以及实时数据采集机制[35] 等几个方面, 此外也有学者从片上系统更低的层面探讨影响 CPS 实时性的因素[36].

从整体来说, CPS 的实时性研究具有较大的挑战性, 涉及数据采集的实时性、数据处理的实时性、数据传输的实时性、决策控制的实时性等多个方面, 并且要求严格, 信息采集和控制不仅要正确, 还需要在一定的时间限定内, 过期的信息不应该对系统产生影响.

5 CPS 的安全和隐私

由于 CPS 往往应用于各种关键的大型系统, 存在多种分布式异质组件, 组件间存在着复杂的信息交互过程, 一方面可能造成信息的暴露, 使得关键信息被窃取; 另一方面会造成病毒入侵而对 CPS 进行攻击, 产生难以估量的灾难性后果[37], 这些因素使得 CPS 的安全设计面临更大的挑战[38].

Pham 等研究了以人为中心的 CPS 中隐私保护问题[39]. 未来人周围将存在各种泛在的 CPS 设备, 人的隐私数据将不可避免地遭到泄露, 而一种有效的保护方法就是在数据中添加噪声. 文中提出了一种基于互信息的隐私保护措施, 利用扰动算法, 产生一个隐私信息的最小上界, 并通过打乱数据时序, 有效地隐藏用户信息, 实现隐私和精确数据重构的均衡. 例如 GPS 轨迹将暴露一个人的家庭住址, 但可以通过添加噪声, 使用户可以控制信息的分享量, 在达到一定条件后又可以准确恢复信息. 这种方法也可用于其他 CPS 应用, 以保护关键信息不被窃取.

哈佛大学的 Chong 等认为在 CPS 系统中, 用户产生的数据信息可以被重新利用, 并且可以通过 Self-identifying data 的方式, 对数据信息进行标记, 类似于传统的水印技术, 以实现数据的真实性. 该标记信息可以实现很强的鲁棒性, 可以实现多种转换处理后的准确性. 虽然这种技术不能提供对信息的安全加密, 但却可以对信息的来源进行准确追溯, 从而保证信息的可靠性[40].

相对于 CPS 中的用户隐私, CPS 的安全问题更为重要. Cardenas 等总结了 CPS 中的安全控制问题, 指出 CPS 中的安全涉及消息的完整性、有效性和保密性等几个方面[41]. 通过将 CPS 抽象为物理系统和控制者两部分, 研究两者间信息传递时的欺骗性攻击和 DoS 攻击. 文中分析了现有主动防御、被动响应等机制在处理 CPS 信息安全中的局限, 以及相关的自动控制理论在 CPS 安全控制中的问题, 例如传统的 Kalman 滤波器在对不确定丢包网络状态估计时的问题, 并对 CPS 安全控制研究中的挑战和方向进行了阐述, 例如利用博弈论研究入侵模型、设计新的主动/被动算法和体系对抗入侵等.

具体到 CPS 的应用实例方面, Xu 等将 MANETs 作为 CPS 的一种特殊应用, 提出一种无证书签名方案 McCLS, 可以有效对抗 Black hole 攻击和 Rushing 攻击, 其可作为 CPS 分布式节点间通信加密的一种方式[42]; 文献 [43] 主要针对 CPS 感知部分, 即无线传感器网络部分的安全问题, 通过缩小范围可以借鉴很多现有的无线传感网安全机制研究成果; Thomas 等介绍了 CPS 在车辆交通中的应用[44], 主要研究车域网中如何自动维持车辆间的安全距离, 并通过一个简单的密匙管理机制实现车辆间的安全通信; Hill 等为智能大厦构建了一个安全的中间件, 包括安全的接入控制、匿名保护、入侵检测等[24]; 文献 [45] 则通过微软 SensorMap[46] 的实例讲解了未来以人为中心的 CPS 中如何实现个人隐私的保护.

综上所述, 现有对 CPS 安全和隐私方面的研究仍处于初级阶段, 对数据感知部分采用无线传感网或自组网原有方法, 对信息传输部分主要采用现有网络传输中的安全机制, 而安全控制部分则借助于原有的控制理论加入容错机制等手段, 缺乏从整体对 CPS 安全性的研究. 在未来的研究中, 需要综合这几个部分的现有安全机制, 并结合 CPS 不同应用场景中的特点, 对其安全和隐私性能进行研究和设计.

6 CPS 原型系统和实例

虽然目前国内外关于 CPS 各方面关键技术的理论研究尚处于初级阶段, 但部分研究机构和学者已经开始从实验仿真和应用验证平台的角度对 CPS 进行研究.

由于 CPS 是异质集成系统, 由多个具有不同属性的物理子系统、计算子系统和通信子系统组成, 构建一个整合的仿真系统和实际应用系统具有较大的难度. Lin 等以分布式供水网络 (Water distribution networks, WDN) 为例, 研究了物理过程和计算过程的联合仿真[47−48]. 其采用开源的 EPANET 软件[49] 对分布式供水网络的物理设施进行模拟, 包括

WDN 拓扑、管道水流量、水压、水塔的水深、水质等; 利用 Matlab 对获取的数据进行分析和判决, 然后将信息反馈给 EPANET, 模拟对物理实体的控制, 两个软件间的通信表示物理过程和计算过程的信息交互. 这个仿真过程的缺点是两个仿真器间的交互并不是实时进行的, 而是通过文件的生成和读取完成, 而现实中大多 CPS 应用对实时性要求较高, 故整合的实时仿真系统仍需要进一步研究.

除仿真系统外, 部分学者对 CPS 技术在实际大型系统中的应用也进行了较深入的研究.

文献 [50−52] 对 CPS 在智能电网中的应用进行了研究. Xie 等利用基于模块的方法, 将系统分为发电和配电模块、网络传输模块, 并基于此模型, 提出一个迭代的网络协议, 用于模块和传输网络间的信息交互, 并以一个风力发电系统为例解释了此概念[50]. 文献 [51] 主要讨论了 CPS 电力系统中, 由于物理过程和计算过程的复杂交互而带来的漏洞, 指出电力系统的安全性必须在建网之初就进行充分考虑. Sun 等则分析了智能电网中各组件工作正常, 但由于频率干扰、不同步等问题使得整个系统工作异常[52] 的情况. 文中提出可以采用异步交互和模型验证的方法来解决此类问题, 主要是通过进行模型分解, 将大模型分解成小模型以解决模型验证中可能出现的状态爆炸问题.

同时, 部分学者研究了 CPS 在医疗中的应用. 随着医疗设备新功能的增加和设备间互联通信需求的增加, CPS 在医疗中的应用成为实现下一代智慧医疗的突破点. Lee 等总结了当前医疗技术发展的趋势和挑战[53], 日益更新的软件功能、增加的医疗设备互联性、智能的闭环系统、不间断的监测护理等都为医疗 CPS 提出了挑战, 但这些医疗领域挑战的解决也能为 CPS 在其他领域的应用提供借鉴. 文献 [54] 设计了一种医疗中帮助病人呼吸的辅助呼吸器模型, 可以根据病人历史数据和当前状况自动控制辅助强度, 实现安全、实时的医疗反馈, 并可远程监控.

此外, CPS 还可以在智能交通设计中得到应用. 下一代交通系统将包含无线通信、计算机控制等信息技术, 以及运动模型、传感驱动等物理过程, 通过 CPS 技术对物理过程和计算过程的联合处理提高交通系统的安全性[55].

除了以上介绍的行业应用, CPS 还可以应用于一些小的方面. 文献 [56] 中模拟 CPS 技术设计了一个基于 CPS 模拟器的竞赛游戏 CiberRato, 采用离散时间驱动模型, 在每一时间片内, 模拟器将机器人传感器数据发送给代理, 并接收代理命令, 将其反馈给机器人, 并计算更新得分; 机器人根据命令运动, 并将传感器数据实时传给模拟器; 代理则根据得到的传感器数据进行计算判决处理. 通过 CPS 技术的引入, 可以使游戏具有更好的扩展性.

CPS 相对于传统无线传感器网络, 可以引入更复杂的分布式算法, 算法在每个节点处完成, 而不需要中心控制节点, 这样可以减少消息的传递和节点能耗, 延长整个系统的生存时间, 并减少了无线传感网中 Sink 节点汇聚信息、离线处理和反馈控制的时延. Bocca 等利用 ISMO-2 节点搭建了结构健康监测试验平台, 在每个节点配备三向加速度器实时采集数据, 并直接利用 Goertzel 算法进行频域分析, 然后再对分析的结果进行传输, 和集中式结构相比可以减少 80 % 的时延, 并延长 52 % 的系统寿命[57]. Wu 等提出基于逻辑的 SAN-Logic 模型, 实现全分布式操作, 并搭建家庭自动化应用系统, 包括 9 个墙插电源传感器、3 个运动探测器、5 个环境 (温湿度、光照、语音等) 传感器和一个 802.11 网关. 每个传感器采用 Nano-RK 实时操作系统, 并运行分布式的 SAN-Logic 算法. 实验显示, 整个系统可以减少 15 % 的冗余信息传输, 从而延长节点寿命并降低网络业务量[58].

综上可见, 从应用角度, CPS 将打破现有的传感网系统、通信网系统、控制系统, 建立一个多系统互联互操作的动态可控复杂系统. 通过物理过程、通信过程、计算过程和控制过程等紧密合作, 可以满足多种应用场景需求, 小到药丸式电子内窥镜、智能家庭, 大到远程医疗、航空航天、智能交通、国家电网. 虽然现阶段对 CPS 应用的研究尚处于探索阶段, 但随着 CPS 研究工作的深入, 将催生大量具有计算、通信、控制能力的智能设备和自治系统, 及至推动整个下一代工业的发展.

7 CPS 与其他网络的区别

CPS 是计算、通信、控制和物理过程紧密结合的复杂系统, 不同于现有的传感器网络和物联网, 具有更加复杂的系统结构.

现有的无线传感器网络一般仅限于对局部地区信息的收集, 需要布置大量的传感器节点, 感测的数据通过无线多跳的形式传输到汇聚节点, 汇聚节点对数据进行显示和处理, 供专门的用户使用, 形成一个封闭的专有网络, 主要目的是将物理环境的信息传递给人.

物联网试图打破传感器网络的封闭, 通过将所有物体连接到互联网, 从而形成一个全球物体互联的网络, 实现跨地域的信息感知、传递和共享. 从整体来说, 物联网是一个庞大的系统, 通过采用标准化的体系和技术, 将底层的各个专有传感器网络感知的信息进行远距离传输和共享. 例如, 一些路段的交通情况可以通过摄像头进行拍摄, 并实时传递到互

联网, 出租司机和远端用户都可以通过接入互联网得到实时的路况信息. 另外, 物联网还可以通过使用 RFID 等技术存储和标识物体的相关信息, 实现 “会说话” 的物体.

网络控制系统是指某区域传感器、控制器、执行器和通信网络的集合, 各设备间进行数据传输和协调操作, 实现分布式、网络化的实时反馈系统. 其主要研究是在传统控制系统基础上, 考虑设备间联网后数据传输时产生的时延、丢包、乱序等现象对控制系统设计所产生的影响. 一方面, 可以通过减少时延、丢包等可能, 提高网络控制系统性能; 另一方面, 将网络通信作为已知条件, 改变系统的控制策略设计.

CPS 则通过将通信能力、计算能力深度嵌入物理设备, 利用反馈和控制过程, 实现对物理设备和过程的实时、动态的信息控制和服务. CPS 与物联网的区别在于, 其并不需要实现全球性的互联, 而是更侧重某个系统内的实时反馈控制; 物体不仅具有感知信息和传输信息的能力, 同时具有根据信息进行某种响应的能力; 而整个系统具有智能处理能力, 可以形成闭环, 并减少人为参与. CPS 与传感器网络的区别在于, 不仅仅实现从物理环境到人的感知, 还加入了对信息的智能判决和对环境的反馈控制过程; 系统变得更加复杂, 并具有一定的智能性, 可以减少人的参与. CPS 与网络控制系统具有一定的相似性, 但在 CPS 中, 节点的功能更加强大, 节点本身具有部分自治能力, 感知信息在传输到计算处理单元前可进行预处理, 并可以对反馈的信息进行简单判决.

8 CPS 研究面临的问题

从总体上来看, CPS 通过将计算、通信能力嵌入物理设备, 实现物理世界和信息处理的交互融合, 可以较大地提高对环境的感知和控制能力. 由于 CPS 研究涉及计算、通信和控制科学等多个学科知识, 目前国内外的研究虽然取得了较大的进展, 但仍存在着较多的问题, 一些 CPS 的概念和研究方向并不统一, 存在较多方面需要深入研究的内容, 可以总结为以下几个方面:

1) 从研究的学者群体和切入点来看, 目前主要有两个趋势, 一个是从现有的无线传感器网络出发, 加入执行器的反馈控制部分, 研究此种情况下带来的新问题, 例如网络的 QoS 管理[59]; 另一个趋势是从控制理论出发, 在其中加入网络部分, 将网络信息传递过程抽象为一定的时延和丢包率, 研究由此带来的实时控制中出现的问题. 但这两个趋势的研究方向都是构建一个计算、通信、控制高度集成的系统, 在未来的研究中, 需要对这两方面进行更深入的沟通学习.

2) 从 CPS 的几项关键技术来看, 在中间件方面, CPS 的中间件系统通过采用面向服务的设计方法, 各组件或层次间以服务的方式进行交互, 可以屏蔽底层细节, 但如何在中间件中提供一定的容错机制保证 CPS 的可靠性, 并考虑不同系统物理设备的能力和局限, 是中间件设计中需要解决的主要问题.

对于 CPS 的实时性, 从系统的角度, 由于闭环过程的引入, 相对于传感网中单向数据传输必然增大了时延, 这就需要将时延限定在一定的范围内, 以保证系统的正常工作. 这会涉及实时的数据采集、低时延的通信传输、实时的数据处理和决策反馈等过程, 通过对各个部分的优化, 降低整个系统的时延. 另外, 从更底层的角度, 实时性的操作系统、实时性的任务调度和网络传输协议能给 CPS 的实时性提供更好的保证. 这些方面都是 CPS 的实时性研究中需要考虑的方向.

对于 CPS 的安全和隐私问题, 是现阶段研究较为薄弱的环节, 具有较大的挑战性. 一方面, CPS 的应用场景, 特别是在一些大型的工业系统中, 要求 CPS 必须具备很强的安全性; 另一方面, CPS 中各组件复杂的信息数据交互又容易造成信息泄露和非法侵入, 特别是在需要进行组件或用户间数据共享的情况. 对于整个系统来说, 数据感知部分可以借鉴无线传感器网络原有的安全机制, 信息传输部分主要采用现有网络的安全协议, 安全控制部分则通过对控制信息进行鉴权和加密等手段来实现, 数据的共享可以采用添加噪声或水印的方式实现隐私. 未来 CPS 安全隐私方面的研究需要将各个过程的方法结合起来, 进行综合优化, 以实现更高效的安全防护.

3) 从现有 CPS 的应用角度来看, CPS 的主要优势是可以采用更加智能和复杂的分布式算法, 建立多系统互联互操作的动态复杂系统. 通过将通信、计算和控制能力深度嵌入物理设备, 满足多种应用场景需求, 从小的药丸内窥镜、电子游戏, 到大的航空航天、智能电网系统. 虽然现阶段 CPS 的应用还处于探索阶段, 尚没有大型的实例系统, 但随着对 CPS 中各项关键技术的深入研究, 将产生大量具有计算、通信和控制能力的智能设备和自治系统, 推动整个社会, 特别是下一代工业的发展.

9 总结和展望

现阶段国内外对于 CPS 的研究情况整体来说还处于发展的初期. 关于 CPS 的组成和架构模型, 普遍可以认为分为对外部环境的感知模块、可靠的

数据传输通信模块、综合的信息处理计算模块、实时的反馈控制模块. 物体设备可以同时具备感知能力、通信能力、计算能力和执行能力, 便于实现较复杂的分布式算法和闭环控制. 而可靠的 CPS 中间件、实时的 CPS 反馈循环、安全的 CPS 应用系统等都是下一步 CPS 研究中需要关注的问题.

综合以上可以看到, CPS 的研究和应用仍处于起步阶段, 计算、通信和控制多个学科的交叉给 CPS 带来了广阔的应用前景和较多益处, 但同时也带来了很多新的研究问题. 通过对 CPS 现阶段相关研究成果的总结, 可以更好地理解 CPS 的概念和内涵, 明确 CPS 的研究内容和发展方向, 为更多研究人员进入 CPS 研究领域提供指导. 虽然现阶段 CPS 的研究成果较为匮乏, 但随着传感、通信技术和控制理论进一步综合发展, 以及物联网研究和开发的成熟化, CPS 将成为各国未来科技发展的一个研究热点.

References

1 Baheti R, Gill H. Cyber-physical systems. *The Impact of Control Technology*. Washington D. C.: IEEE, 2011. 161−166

2 Rajkumar R, Lee I, Sha L, Stankovic J. Cyber-physical systems: the next computing revolution. In: Proceedings of the 47th ACM/IEEE Design Automation Conference. Anaheim, USA: IEEE, 2010. 731−736

3 Sha L, Gopalakrishnan S, Liu X, Wang Q X. Cyber-physical systems: a new frontier. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing. Taichung, China: IEEE, 2008. 1−9

4 CPS Steering Group. Cyber-physical systems executive summary [Online], available: http://precise.seas.upenn. edu/events/iccps11/_doc/CPS-Executive-Summary.pdf, November 13, 2011

5 CPS Week [Online], available: http://www.cpsweek.org, November 13, 2011

6 Cyber Physical Systems Virtual Organization (CPS-VO) [Online], available: http://cps-vo.org, November 13, 2011

7 MIT Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory [Online], available: http://www.csail.mit.edu/, November 13, 2011

8 System Level Design Group [Online], available: http://www.ece.cmu.edu/∼sld/wiki/doku.php?id=shared:research_cps, November 13, 2011

9 Cyber-Physical Systems Group [Online], available: http://www.cpschina.org, November 13, 2011

10 The Ministry of Science and Technology of the People′s Republic of China. Cyber-physical integration platform [Online], available: http://www.863.gov.cn/news/1010/20/1010203745. htm, November 13, 2011

11 Wang Zhong-Jie, Xie Lu-Lu. Cyber-physical systems: a survey. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(10): 1157−1166
(王中杰, 谢璐璐. 信息物理融合系统研究综述自动化学报, 2011, **37**(10): 1157−1166)

12 Lee E. CPS foundations. In: Proceedings of the 47th ACM/IEEE Design Automation Conference. Anaheim, USA: IEEE, 2010. 737−742

13 Poovendran R. Cyber-physical systems: close encounters between two parallel worlds. *Proceedings of the IEEE*, 2010, **98**(8): 1363−1366

14 Tabuada P. Cyber-physical systems: position paper. In: Proceedings of the NSF Workshop on Cyber-Physical Systems. Austin, USA: NSF, 2006. 1−3

15 He Ji-Feng. Cyber-physical systems. *Communications of the China Computer Federation*, 2010, **6**(1): 25−29
(何积丰. 信息物理融合系统. 中国计算机学会通讯, 2010, **6**(1): 25−29)

16 Tan Y, Goddard S, Perez L. A prototype architecture for cyber-physical systems. *ACM SIGBED Review*, 2008, **5**(1): Article No. 26 1−2

17 Wang Xiao-Le, Chen Li-Na, Huang Hong-Bin, Deng Su. A service-oriented architecture framework of cyber-physical systems. *Journal of Computer Research and Development*, 2010, **47**(S2): 299−303
(王小乐, 陈丽娜, 黄宏斌, 邓苏. 一种面向服务的 CPS 体系框架计算机研究与发展, 2010, **47**(S2): 299−303)

18 Tan Peng-Liu, Shu Jian, Wu Zhen-Hua. An architecture for cyber-physical systems. *Journal of Computer Research and Development*, 2010, **47**(S2): 312−316
(谭朋柳, 舒坚, 吴振华. 一种信息物理融合系统体系结构. 计算机研究与发展, 2010, **47**(S2): 312−316)

19 Ilic M, Xie L, Khan U, Moura J. Modeling of future cyber-physical energy systems for distributed sensing and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2010, **40**(4): 825−838

20 Zhao Jun-Hua, Wen Fu-Shuan, Xue Yu-Sheng, Li Xue, Dong Zhao-Yang. Cyber physical power systems: architecture, implementation techniques and challenges. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, **34**(16): 1−7
(赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 李雪, 董朝阳. 电力 CPS 的架构及其实现技术与挑战. 电力系统自动化, 2010, **34**(16): 1−7)

21 Koubaa A, Andersson B. A vision of cyber-physical internet. In: Proceedings of the 8th International Workshop on Real-Time Networks. Dublin, Ireland: IEEE, 2009. 1−6

22 Bogdan P, Marculescu R. Towards a science of cyber-physical systems design. In: Proceedings of the IEEE/ACM International Conference on Cyber-Physical Systems. Chicago, USA: IEEE, 2011. 99−108

23 Marculescu R, Bogdan P. Cyberphysical systems: workload modeling and design optimization. *IEEE Design and Test of Computers*, 2010, **28**(4): 78−87

24 Hill R, Al-Muhtadi J, Campbell R, Kapadia A, Naldurg P Ranganathan A. A middleware architecture for securing ubiquitous computing cyber infrastructures. *IEEE Distributed Systems Online*, 2004, **5**(9): 1−14

25 Lin K J, Panahi M. A real-time service-oriented framework to support sustainable cyber-physical systems. In: Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Industrial Informatics. Osaka, Japan: IEEE, 2010. 15−21

26 Huang J, Bastani F, Yen I L, Dong J, Zhang W, Wang F J, Hsu H J. Extending service model to build an effective service composition framework for cyber-physical systems. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Service-Oriented Computing and Application. Taipei, China: IEEE, 2009. 1−8

27 Huang J, Bastani F, Yen I, ZhangW K. A framework for efficient service composition in cyber-physical systems. In: Proceedings of the 5th IEEE International Symposium on Service Oriented Systems Engineering. Nanjing, China: IEEE, 2010. 291−298

28 Woo H, Yi J L, Browne J C, Mok A K, Atkins E, Xie F. Design and development methodology for resilient cyber-physical systems. In: Proceedings of the 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Beijing, China: IEEE, 2008. 525−528

29 Chun I, Park J, Kim W, Kang W, Lee H, Park S. Autonomic computing technologies for cyber-physical systems. In: Proceedings of the 12th International Conference on Advanced Communication Technology. Phoenix Park, Korea: IEEE, 2010. 1009−1014

30 Al-Omari H, Wolff F, Papachristou C, McIntyre D. An improved algorithm to smooth delay jitter in cyber-physical systems. In: Proceedings of the 8th International Conference on Embedded Computing and International Conference on Scalable Computing and Communications. Dalian, China: IEEE, 2009. 81−86

31 Kang K D, Son S H. Real-time data services for cyber physical systems. In: Proceedings of the 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Beijing China: IEEE, 2008. 483−488

32 Leonardi F, Pinto A, Carloni L P. Synthesis of distributed execution platforms for cyber-physical systems with applications to high-performance buildings. In: Proceedings of the IEEE/ACM International Conference on Cyber-Physical Systems. Chicago, USA: IEEE, 2011. 215−224

33 Pagano P, Chitnis M, Romano A, Lipari G, Severino R, Alves M, Sousa P G, Tovar E. ERIKA and open-ZB: an implementation for real-time wireless networking. In: Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing. Honolulu, USA: ACM, 2009. 1687−1688

34 Andrei S, Cheng A M K. Optimizing automotive cyber-physical system specifications with multi-event dependencies. In: Proceedings of the 10th International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing. Timisoara, Romania: IEEE, 2008. 475−479

35 Li F F, Yue D J, Li C W. A query processing approach based on queuing model for cyber-physical systems. In: Proceedings of the 12th International Asia-Pacific Web Conference. Busan, Korea: IEEE, 2010. 291−297

36 Madalin G, Gabriela M, Dan P, Alex D. A simulation framework for PSoC based cyber physical systems. In: Proceedings of the International Joint Conference on Computational Cybernetics and Technical Informatics. Timisoara, Romania: IEEE, 2010. 137−142

37 Wikipedia. Stuxnet [Online], available: http://en.wikipedia.org/wiki/Stuxnet, November 13, 2011

38 Neuman C. Challenges in security for cyber-physical systems [Online], available: http://cimic.rutgers.edu/positionPapers/CPS-Neuman.pdf, November 13, 2011

39 Pham N, Abdelzaher T, Nath S. On bounding data stream privacy in distributed cyber-physical systems. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing. Newport Beach, USA: IEEE, 2010. 211−218

40 Chong S, Skalka C, Vaughan J A. Self-identifying sensor data. In: Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks. Stockholm, Sweden: ACM, 2010. 82−93

41 Cardenas A A, Amin S, Sastry S. Secure control: towards survivable cyber-physical systems. In: Proceedings of the 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Beijing, China: IEEE, 2008. 495−500

42 Xu Z, Liu X, Zhang G Q, He W B, Dai G Z, Shu W H. A certificateless signature scheme for mobile wireless cyber-physical systems. In: Proceedings of the 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Beijing, China: IEEE, 2008. 489−494

43 Skelton G W. Cyber-physical security for wireless sensor networks [Online], available: http://cimic.rutgers.edu/positionPapers/PositionPaper-GordonSkelton.pdf, November 13, 2011

44 Thomas J P, Abburi V, Thomas M, Abraham A. Secure protocol for ad hoc transportation system. In: Proceedings of the 6th International Conference on Information Assurance and Security. Atlanta, USA: IEEE, 2010. 288−293

45 Ganti R K, Tsai Y E, Abdelzaher T F. Sense world: towards cyber-physical social networks. In: Proceedings of the International Conference on Information Processing in Sensor Networks. St. Louis, USA: IEEE, 2008. 563−564

46 Microsoft Research. SensorMap [Online], available: http://atom.research.microsoft.com/sensewebv3/sensormap/, December 9, 2011

47 Lin J, Sedigh S, Miller A. Towards integrated simulation of cyber-physical systems: a case study on intelligent water distribution. In: Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Dependable, Automatic and Secure Computing. Chengdu, China: IEEE, 2009. 690−695

48 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

49 United States Environmental Protection Agency's Water Supply and Water Resources Division. EPANET [Online], available: http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/dw/epanet.html, December 9, 2011

50 Xie L, Ilic M D. Module-based modeling of cyber-physical power systems. In: Proceedings of the 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Beijing, China: IEEE, 2008. 513−518

51 McMillin B. Complexities of information security in cyber-physical power systems. In: Proceedings of the IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. Seattle, USA: IEEE, 2009. 1−2

52 Sun Y, McMillin B, Liu X Q, Cape D. Verifying noninterference in a cyber-physical system the advanced electric power grid. In: Proceedings of the 7th International Conference on Quality Software. Portland, USA: IEEE, 2007. 363−369

53 Lee I, Sokolsky O. Medical cyber physical systems. In: Proceedings of the 47th ACM/IEEE Design Automation Conference. Anaheim, USA: IEEE, 2010. 743−748

54 Cheng A M K. Cyber-physical medical and medication systems. In: Proceedings of the 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Beijing, China: IEEE, 2008. 529−532

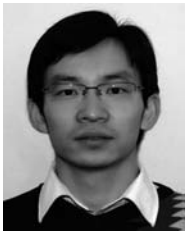
55 Platzer A. Verification of cyberphysical transportation systems. *IEEE Intelligent Systems*, 2009, **24**(4): 10−13

56 Pereira A, Lau N, Tullio Cyber-physical systems simulator [Online], available: http://cpss.sourceforge.net/, December 9, 2011

57 Bocca M, Toivola J, Eriksson L M, Hollmen J, KoivoH. Structural health monitoring in wireless sensor networks by the embedded Goertzel algorithm. In: Proceedings of the IEEE/ACM International Conference on Cyber-Physical Systems. Chicago, USA: IEEE, 2011. 206−214

58 Wu Y Z, Rowe A. Logic-based programming for wireless sensor-activator networks. In: Proceedings of the IEEE/ACM International Conference on Cyber-Physical Systems. Chicago, USA: IEEE, 2011. 163−173

59 Xia F, Ma L H, Dong J X, Sun Y X. Network QoS management in cyber-physical systems. In: Proceedings of the International Conference on Embedded Software and Systems Symposia. Sichuan, China: IEEE, 2008. 302−307



温景容 北京邮电大学信息与通信工程学院网络体系构建与融合北京市重点实验室博士研究生. 2004 年获吉林大学通信工程学院工学学士学位. 主要研究方向为无线自组织网络, 信息物理融合系统, 车载网. 本文通信作者.
E-mail: jrwen@bupt.edu.cn
(**WEN Jing-Rong** Ph. D. candidate at the Laboratory of Network System Architecture and Convergence, School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications. He received his bachelor degree from Jilin University in 2004. His research interest covers wireless ad hoc networks, cyber-physical system, and vehiculared ad hoc networks (VANETs). Corresponding author of this paper.)

武穆清 北京邮电大学信息与通信工程学院网络体系架构与融合北京市重点实验室教授. 主要研究方向为宽带无线接入, 无线自组织网络.
E-mail: wumuqing@bupt.edu.cn
(**WU Mu-Qing** Professor at the Laboratory of Network System Architecture and Convergence, School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications. His research interest covers broadband wireless access technology, and wireless ad hoc networks.)

宿景芳 河北科技大学信息科学与工程学院讲师. 2011 年获得北京邮电大学通信与信息系统专业博士学位. 主要研究方向为宽带无线接入技术, 无线自组织网络. E-mail: sjf.zj2006@yahoo.com.cn
(**SU Jing-Fang** Lecturer at the Institute of Information Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology. She received her Ph. D. degree in communication and information system from Beijing University of Posts and Telecommunications in 2011. Her research interest covers wireless broadband access technology and wireless ad hoc networks.)