

信息物理融合系统及其应用

景 博，周 伟*，黄以锋，汤 巍，焦晓璇
(空军工程大学航空航天工程学院,陕西西安,710038)

摘要 信息物理融合系统是一类将感控、计算和通信与物理对象在网络环境中高度集成的新型智能复杂系统,可以实现系统的实时性、自治性、鲁棒性和高性能等。介绍了 CPS 的基本概念、发展现状和系统架构,分析了 CPS 与嵌入式系统、无线传感器网络和物联网的联系与区别;重点研究了 CPS 在电力、交通、医疗和航空航天等领域的应用研究现状及面临的突出问题;对 CPS 的研究方向进行了总结与展望。

关键词 信息物理融合系统;嵌入式系统;物联网;无线传感器网络;航空航天

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.02.001

中图分类号 V227 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)02-0001-06

Reserch of Cyber-physical Systems and Its Application

JING Bo,ZHOU Wei*,HUANG Yi-feng,TANG Wei,JIAO Xiao-xuan
(Aeronautics and Astronautics Engineering Institute,Air Force Engineering University,Xi'an,710038,China)

Abstract: Having the performance of real-time, autonomous, robust and high capability, cyber-physical Systems (CPS) are a kind of intelligent complex systems which combined sense and control, computation and communication with physical object tightly in network environment. The notion, development and framework of CPS are presented, and the different between CPS and embedded system, WSN and IoT are discussed at first. Then, the application and research of CPS in the fields of electric power, traffic, medical and aeronautic & astronautic are summarized, and the outstanding challenges about CPS are pointed out. Finally, the future research and development directions of CPS are discussed.

Key words: cyber-physical systems;embedded system;internet of thing; wireless sensor networks;aeronautic and astronautic

随着计算机技术和通讯技术的迅猛发展,计算系统和物理世界系统化集成的速度越来越快,网络技术的快速发展则进一步加剧了这一趋势,传统嵌入式系统中解决物理系统相关问题所采用的单点解决方案不再适应新一代物理设备信息化和网络化的需求,现有各种网络技术不能满足新一代物理设备网络可控、可信和可扩展的新需求。这些原因促使信息物理融合系统(Cyber-physical systems,CPS)这一新理论的提出^[1]。

信息物理融合系统涉及计算科学、网络通信、控

收稿日期:2013-09-26
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51201182)
作者简介:景 博(1965—),女,河北邯郸人,教授,博士生导师,主要从事飞行器故障预测与健康管理、无线传感网络研究。
E-mail:jingbo_sensor@163.com

* 通信作者:周 伟(1984—),男,陕西西安人,博士生,主要从事机载无线传感器网络研究.E-mail:ZWZ-KGY@139.com

引用格式:景博,周伟,黄以锋,等. 信息物理融合系统及其应用[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(2):1-6. JING Bo,ZHOU Wei, HUANG Yifeng,et al.Reserch of cyber-physical systems and its application[J]. Journal of air force engineering university:natural science edition,2014,15(2):1-6.

制理论等多个学科,在未来不但可以广泛应用于航空航天、道路交通、医疗保健、环境监测、国家电网等大型系统,而且可以应用于纳米级生物机器人、精细农业、药丸式电子内窥镜等局部或微型系统^[2-3]。就像 Internet 改变了人与人交互的方式一样,CPS 的出现将改变人与物理世界交互的方式^[4]。

本文在研究信息物理融合系统基本概念、系统架构等内容的基础上,重点对其在电力、交通、医疗和航空航天等领域的应用研究现状及面临的突出问题进行分析与总结。

1 信息物理融合系统概述

1.1 CPS 基本概念

CPS 是涉及信息系统和物理系统交互与融合的一个崭新的研究领域,目前国内外的研究人员尚未对其形成统一定义^[5]。美国国家科学基金会(NSF)最早提出 CPS 的定义^[6]:“计算资源与物理资源间的紧密集成与深度协作”。Tabuada^[7]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,并依靠相互协调完成更强大的功能”。Baheti 等^[2]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”。Lee^[8]认为:“CPS 是计算进程与物理进程的集成和相互影响,即通过嵌入式计算机和网络实现对物理进程的监测和控制,并通过反馈循环实现物理进程对计算进程的影响”。Rajkumar 等^[4]认为:“CPS 是通过计算和通信内核实现了监测、协调、控制和集成的物理和工程系统”。

国内,中国科学院的何积丰院士认为^[1]:“CPS 是在环境感知的基础上,深度融合了计算、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,它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者控制一个物理实体”。同济大学王中杰教授^[9]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”。

虽然上述各种 CPS 定义的侧重点不同,但其核心都是计算、通信和控制在于系统内的融合,都包含物理世界与网络的交互,以及智能控制和调节的能力。因此,可以认为 CPS 是一类将感控能力、计算能力和通信能力与物理对象有机结合的智能系统,它在

感知物理世界的基础上,由计算系统自主决策控制信息,再通过通信系统反馈给控制设备,后者按照控制信息完成相应的操作,从而实现对物理世界的自主实时感控。

1.2 CPS 的发展现状

自 2005 年提出以来,CPS 在短短几年内就获得国内外大量学者的关注,被视为继计算机、互联网之后国际信息技术竞争力新的制高点之一。

在国外,美国国家科学基金委员会将 CPS 列为重点支持的关键性研究领域,2008 年发布项目申请,2010 年进行了更新与补充。美国网络和信息技术研究开发计划针对 CPS 投入数亿美元经费,组织加州大学伯克利分校、麻省理工学院、IBM、波音、通用公司等高校和企业联合开展 CPS 研发。为了能在智能电子系统领域占据全球领导地位,欧盟第七框架计划启动了智能嵌入式系统的先进研究和技术项目,该项目将 CPS 作为智能系统的一个重要发展方向,计划在 2008~2017 年投入 27 亿欧元开展嵌入式计算与 CPS 相关技术的研发。韩国和日本等国近几年也设立了针对 CPS 的研究计划。韩国科学技术院 2008 年开始在大学尝试开展 CPS 相关课程教学工作。以东京大学和东京科技大学为首,日本对 CPS 技术在智能医疗器件以及机器人开发等方面的应用研究正在如火如荼地进行。

我国在 2008 年召开的 IEEE 嵌入式研讨会上将信息物理融合系统的研究列为发展的重点。2012 年我国启动了“面向 CPS 的系统平台”主题项目,列入国家高技术研究发展计划(863 计划)之中。该项目由清华大学、国防科技大学、浙江大学、华东师范大学、西北工业大学、北京控制工程研究所等单位联合承担,主要针对 CPS 的可预测性和高可靠性等关键问题,突破和掌握 CPS 建模、应用以及试验床构造等核心共性技术,研发相应的支撑工具与平台,并将系统化地在城市交通车辆运控系统、轨道交通控制系统和月球车导航与控制系统等典型应用中进行示范性验证。

2 CPS 与相关技术

与现有的嵌入式系统、无线传感网络和物联网技术相比,CPS 的系统结构更复杂,功能也更强大。

2.1 CPS 与嵌入式系统

嵌入式系统是依照软硬件协同的理念进行开发和设计的,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软件来扩展和提升物理设备的能力。嵌入式系统注重在设备环境的约束下如何实现资源利用的最优化^[10],采用基于事件的系统监控,对稳定性和参数变化等随

时间动态变化的问题无法实现有效监控。

CPS 作为物理进程与计算进程的融合体,注重计算系统与物理环境的有机融合,将现有的独立设备进行智能化连接,实现自适应的组网与交互,从而使系统之间实现相互感知、有效协同,并根据任务需求对计算逻辑进行自动调整与配置,可解决当前嵌入式系统和网络技术面临的新问题:“传统嵌入式系统不能满足新一代物理设备信息化和网络化的需求”。当然,CPS 的发展离不开嵌入式:“当嵌入式系统强调实时信息处理子系统与被控制的物理设备和子系统的协同交互时,可称之为 CPS^[11],CPS 是对现有嵌入式技术的优化、增强与扩展。

2.2 CPS 与无线传感器网络

无线传感器网络(WSN)是由部署在监测区域内大量的微型传感器节点通过无线通信方式形成的一个多跳自组织网络。这些节点在局部空间中基本是静态配置的,其感测的数据通过无线多跳的形式传输到汇聚节点,并对数据进行处理之后提供给用户,从而形成一个局部封闭的网络。

CPS 不仅由传感单元、计算单元和通信单元构成,还包含执行单元,这就使得 CPS 不仅可以实现环境感知和决策,而且可以通过执行单元对环境进行反馈控制,使系统具备自治性^[12]。由于 CPS 的感知和执行单元具有一定的自主性,这就决定了其拓扑结构是动态配置的,且节点间应有明确的通信协议。WSN 技术的发展将有助于 CPS 的实现,现有无线传感网络环境的构建将为 CPS 的发展打下很好的基础。

2.3 CPS 与物联网

“物联网”是指将各种信息传感设备,如射频识别装置、全球定位系统等装置,与互联网结合起来而形成的一个网络,可实现跨地域的信息感知和传递。物联网重塑了物-物关系,特别是加快了物体间的信息活化、通信及共享^[13]。

CPS 在继承物联网“物与物相连”、“人与物交互”的基础上,更强调物体间的感知互动,强调物理世界与信息系统间的循环反馈。CPS 在感知物理环境信息之后,能够通过计算、通信和控制系统进行反馈操作,也能够根据感知信息实时调节自身状态,从而使得 CPS 组件具有自主交互以及自治能力,使得整个系统具备更好的容错性、协同性和适应性。CPS 是物联网的理论核心和技术内涵,而物联网是 CPS 初级阶段的外在表现形式,其发展将为 CPS 的实现提供一个良好的物-物相联的网络通信环境。

2.4 CPS 的特性

与现有的信息系统和物理系统相比,CPS 具有以下特性^[14-15]:

计算进程与物理进程有机融合。CPS 通过将

感控能力、计算能力和通信能力深度嵌入物理过程,极大地增强了物理系统的自适应能力、可靠性、安全性和可用性等。

多维度开放式系统。CPS 具有高度的复杂性,能够支持各种类型的物理设备系统,具有开放性。

适时性。适时性是指 CPS 中任务的完成具有最终期限,这一点在航空航天领域尤为关键。

自治性。CPS 最大的特点就是系统的自治性,系统能够在感知环境后做出相应的反应,在没有人的情况下系统同样能够正常运行。

分布性。CPS 系统中存在大量的嵌入式计算单元组成了分布式计算网络,有利于实现针对海量异构数据的复杂计算,是一种典型的分布式计算系统。因此,可以考虑基于大规模分布式计算技术框架如云计算来构建 CPS 计算平台。

3 CPS 系统架构

CPS 的系统架构是其骨架和灵魂,是首先要解决的关键问题。CPS 系统架构的建立必须体现 CPS 的基本原理和特性。

3.1 CPS 的基本物理组成

CPS 的基本物理组件包括感知单元、执行单元和决策控制单元。感知单元是一种能够实时监测外界信号、物理条件或化学组成的嵌入式设备;执行单元是一种能够接收控制指令并对受控对象施加控制作用的嵌入式设备;决策控制单元是一种能够根据用户定义的语义规则生成控制逻辑的逻辑控制设备^[16]。基本物理组件结合反馈循环控制原理,构成了执行 CPS 最基本的监测与控制功能的逻辑单元,见图 1。

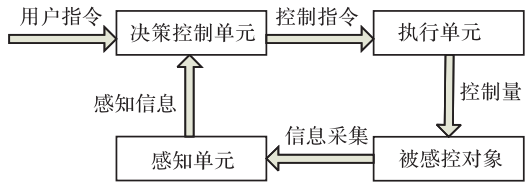


图 1 CPS 基本物理组成
Fig.1 Structure of CPS

3.2 CPS 的体系架构

CPS 系统架构的建立必须体现 CPS 的基本原理和特殊需求,这样才能开发满足需要的 CPS。按照功能,可将 CPS 分为传感网络,通信网络,计算模块,以及执行网络。目前,大部分研究者都认可 CPS 按照层次结构的分层:底层的感知模块和执行模块、中间的通信网络以及上层的计算决策模块。对于 CPS 的实现架构,国内外不同领域的学者分别从系统能耗、实时性和可靠性等角度分别进行了研

究,其中 Tan 等构建的 CPS 原型架构具有较强的通用性^[17-20]。

本文在文献[20]的基础上,考虑实际系统中感知组件与执行组件之间存在数据交换,因此提出如图 2 所示的 CPS 体系架构。其中,感控层是 CPS 中与物理环境紧密结合的感知组件、执行组件,以及在它们之间和它们与上层网络之间进行数据交换的通信单元。对于特定区域中感知组件与执行组件之间存在的实时数据交换,主要是针对执行组件状态必要的实时监控与维护。网络层是跨区域的网络,类似于计算机网络中的国际互联网,是实现超大区域中 CPS 节点协同感知和协同控制的网络,主要实现实时的数据传输和资源共享,本文称该层的网络为未来网络,是国际互联网的发展方向。决策层通过云计算等技术实现对采集的数据的分析和处理,并能自主进行判断和得出控制决策,主要功能是将下 2 层资源抽象为各种 CPS 服务提供给上层用户,使得用户能够在不需要详细了解下面 2 层情况时与系统进行交互。

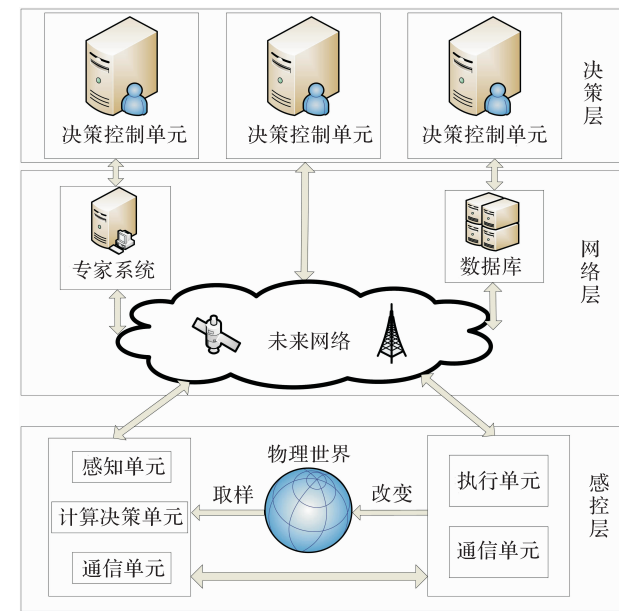


图 2 CPS 的体系架构

Fig.2 An architecture of CPS

4 CPS 应用研究现状及面临的挑战

目前 CPS 技术在航空航天、电力、交通、医疗、环境监测、能源、农业等人类社会发展的各个领域的应用研究已经全面展开。本文在介绍 CPS 在电力、交通、医疗和航空航天 4 个领域的典型应用研究基础上,指出当前的 CPS 研究所面临的挑战。

4.1 在电力领域的应用研究

CPS 为管理者提供了电网监控的有效手段,支持电网运行的在线分析、动态调度与负载均衡^[21]。

在分布式能源管理上,Ilic 等人将支持向量机、马尔科夫状态控制等方法运用于电力 CPS 的建模优化,可在风能等新能源并网的情形下实现分布式电能的最优调度,提高电网运行的稳定性^[22-23]。Susuki 等人利用混成自动机这一 CPS 最为成熟的建模和验证方法,智能验证并网瞬态可靠性,研究了单发电机/无限大系统送电的瞬时可靠性验证问题,为电网安全运行提供了更大的操作灵活性^[24]。此外,CPS 技术在数据中心能源使用效率的评估和优化、电动汽车电池电力持续稳定供应、调度和降低空调能耗等方面都进行了不同程度的研究^[25-27]。

4.2 在交通领域的应用研究

基于 CPS 的交通系统通过散布于道路、人和交通工具中的各种智能感应装置进行行车信息的实时采集、传递和处理决策,可实现“人-车”以及“车-车”之间的自治与协调。Cartwright 等认为现代交通运输系统是一个典型的 CPS 系统^[28]。目前,汽车中应用的 ACC、ESP、自动泊车系统等技术都属于汽车 CPS 技术研究的新进展^[29]。汽车 CPS 技术不但可以提高单辆汽车行驶的安全性、可靠性和节能性,而且还可以实现智能调度,有效减轻城市交通压力^[30-31]。Xu Li 等根据 CPS 交通系统的人机特点,提出考虑驾驶员对调度影响的启发式算法^[32]。Madden J 等提出利用 CPS 技术将交通信息实时通信给车辆,从而实现对车辆进行有效控制,提高行车安全^[33]。

4.3 在医疗领域的应用研究

医疗 CPS 是以保障生命安全为重要前提的网络化、智能化的医疗设备系统,通过各医疗单元之间的实时网络化通信和决策与控制,辅助医务人员实施操作,实现了医疗资源的高效合理利用^[34]。Insup Lee 等人对闭环医学设备系统的安全性提出了一套新的验证方法^[35]。Li Tao 等人研究了关于激光气管切开术中医疗设备即插即用的典型医疗 CPS 案例^[36]。LifeSync、Wellcore 和飞利浦等公司正在进行人体传感器网络相关产品的开发,比如化疗输液控制系统,这也是医疗 CPS 的一个热门发展方向^[37-38]。

4.4 在航空航天领域的应用研究

从宏观上讲,各种飞行器、发射场、卫星等组成了大范围的航空航天 CPS;从微观上看,作为一种复杂系统,单架航空器或航天器的发动机、飞控、电源等系统的感知、控制和信号传输子系统组成了机载 CPS。在飞控系统的研发中,早已经体现了信息物理融合的理念。2001 年,Lui Sha 针对多版本决策系统的可靠性问题,提出了一种更适合自动控制 CPS 的“简约体系结构”^[39],即使高性能控制程序发生任何故障,物理系统的状态向量也不会超出安全

取值范围。在航天器飞行的不同阶段,其控制系统要在太阳捕获、位置保持、异常处理等各种模式之间切换。在每种控制模式下,系统利用传自感知器的反馈信号,通过各种执行器进行轨道、姿态和特定部件的调整。可以看出,整个系统的控制过程将通信、计算与控制紧密地融合在一起,是典型的 CPS^[40]。

通过介绍 CPS 在以上 4 个领域中的应用研究现状,对 CPS 在各领域研究中所面临的重点、共性问题总结如下^[10,22,29,34]:

1)实时性问题。一方面,目前的控制理论基本都是基于事件驱动的,而计算机系统只负责实现功能;另一方面,感知、传输、控制闭环过程的引入必然会增加系统时延,因此,如何在广域时空范围内通过对各个部分的优化实现对系统的实时控制,以及如何在保证系统性能的前提下提高系统实时性及可预测性,是实现 CPS 技术的基础和难点。

2)系统工程问题。由于 CPS 研究所涉及的不同领域人员的知识背景不同,这就为 CPS 的设计、开发、调试、运行和维护造成很多隐患。如何创新利用系统工程理论以避免和减少这些隐患,最大化降低其造成的影响,是需要深入研究的问题。

3)系统建模与验证问题。构建 CPS 模型需要重点解决多异构模型之间的互操作,模型组件演化、转换和正确连接检验等问题;构建 CPS 模型应综合考虑计算单元和物理单元的时空相关性,从而确定事件执行顺序;CPS 中的通信网络可能会导致物理系统不稳定,如何构建相应的网络模型是 CPS 建模的关键。验证是对 CPS 模型和方法的评估,在现有仿真验证技术基础上,如何扩展多异构模型验证方法,实现大规模组合系统验证,是亟需解决的问题。

4)安全可靠性问题。CPS 系统的安全可靠性对于诸如航空航天、医疗、电力等关乎国计民生的重要领域来说是至关重要的。CPS 主要的安全性问题为网络威胁与物理威胁:网络威胁是基于网络攻击与软件漏洞的安全性问题;物理威胁主要是针对通信链路的安全与可靠性问题。CPS 的可靠性是系统性能的关键,是系统在实践中普遍应用的前提。

5 总结与展望

作为一个崭新的研究领域,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,具有很强的兼容性和普适能力,CPS 将实现计算资源与物理资源的紧密结合,大大促进相关领域的科技与经济发展,是能够从根本上改变人与物理世界交互方式的新一代智能系统。为了更好地实现 CPS 在未来各个领域中的融合和应用,需要突破现有的计算模式、物理架构、控制方法和通信环境的束

缚,从技术理论层面对该技术进行深入研究。未来 CPS 技术的研究,将主要面临系统架构设计、建模与验证、通信及网络技术、安全性与可靠性和实现平台等方面的挑战。本文对 CPS 的基本理论和应用研究中面临的突出问题进行了概述。如何进一步完善 CPS 理论,开展相关支撑技术的深入研究,实现 CPS 技术的应用推广,是科学研究工作中的一系列难题,更是一大机遇,本文后续将继续在这一方面进行研究。

参考文献(References):

- [1] 何积丰. Cyber-physical Systems[J]. 中国计算机学会通讯, 2010, 6(1):25-29.
HE Jifeng. Cyber-physical systems[J]. Communications of the china computer federation, 2010, 6(1): 25-29.(in Chinese)
- [2] Baheti R, Gill H. Cyber-physical systems[J]. The impact of control technology, 2011:161-166.
- [3] Sha L, Gopalakrishnan S, Liu X, et al. Cyber-physical systems: a new frontier[C]//Proceedings of the IEEE international conference on sensor networks, ubiquitous, and trustworthy computing. Taichung:IEEE,2008:1-9.
- [4] Rajkumar R, Lee I, Sha L, et al. Cyber-physical systems: the next computing revolution[C]// Proceedings of the 47th ACM/IEEE design automation conference. anaheim: IEEE press, 2010: 731-736.
- [5] CPS Steering Group. Cyber-physical systems executive summary [R/OL]. <http://precise.seas.upenn.edu/events/ic-cps11/doc/CPS-Executive-Summary.pdf>,2011.
- [6] National Science Foundation of the United States. Cyber physical system (CPS) program solicitation [EB/OL]. [2013 - 09 - 26]. <http://www.nsf.gov/pubs/2010/nsf10515>.
- [7] Tabuada P. Cyber-physical systems: position paper[C]// Proceedings of the NSF workshop on cyber-physical systems. Austin:NSF, 2006:1-3.
- [8] Lee E. CPS foundations[C]//Proceedings of the 47th ACM/IEEE design automation conference. Anaheim:IEEE, 2010: 737-742.
- [9] 王中杰, 谢璐璐. 信息物理融合系统研究综述[J]. 自动化学报, 2011, 37(10):1157-1166.
WANG ZhongJie, XIE LuLu. Cyber-physical systems: a survey[J]. Acta automatica sinica, 2011, 37(10):1157-1166.(in Chinese)
- [10] 李仁发, 谢勇, 李蕊, 等. 信息物理融合系统若干关键问题综述[J]. 计算机研究与发展, 2012, 49(6):1149-1161.
LI Renfa, XIE Yong, LI Rui, et al. Survey of cyber-physical systems[J]. Journal of computer research and development, 2012, 49(6):1149-1161.(in Chinese)
- [11] Roman Obermaisser, Hermann Kopetz. Genesys: A candidate for an artemis cross-domain reference architecture for embedded systems [R]. Vienna university of technology, 2009:5-6.
- [12] Tricaud C, Chen Y Q. Optimal mobile actuator/sensor network motion strategy for parameter estimation in a class of

- cyber physical systems[C]//Proceedings of the American Control Conference, St Louis;IEEE,2009;367-372.
- [13] 郭贺铨.物联网的应用与挑战综述[J].重庆邮电大学学报, 2010, 22(5):526-531.
- WU Hequan. Review on internet of things; application and challenges[J]. Journal of chongqing university of posts and telecommunications, 2010, 22(5):526-531.(in Chinese)
- [14] Lee E A. Cyber physical systems; design challenges[C]// Proceedings of 11th IEEE international symposium on object oriented real-time distributed computing. Orlando; IEEE, 2008;363-369.
- [15] Lui S, Meseguer J. Design of complex cyber physical systems with formalized architectural patterns[J]. software-intensive systems and new computing paradigms; challenges and visions, 2008;92-100.
- [16] Al-Hammouri A, Liberatore V, Al-Omari H, et al. A co-simulation platform for actuator networks[C]//Proceedings of the 5th international conference on embedded networked sensor systems. New York;ACM, 2007;383-384.
- [17] Tan Y, Vuran M C, Goddard S, et al. A concept lattice-based event model for cyber-physical systems[C]//Proceedings of ICCPS. New York;ACM, 2010;50-60.
- [18] Tan Y, Vuran M C, Goddard S. Spatio-temporal event model for cyber-physical systems[C]// Proceedings of the 29th IEEE international conference on distributed computing systems workshops. Washington D C;IEEE,2009;44-50.
- [19] Lin J, Sedigh S, Miller A. A general framework for quantitative modeling of dependability in cyber-physical systems; a proposal for doctoral research[C]//Proceedings of the 33rd Annual IEEE international computer software and applications conference. Seattle;IEEE, 2009; 668-671.
- [20] Tan Y, Goddard S, Perez L C. A prototype architecture for cyber-physical systems[R/OL].(2013-09-26). <http://www.cs.virginia.edu/sigbed/archives/2008-01/Tan.pdf>.
- [21] Taneja J, Katz R H, Culler D E. Defining CPS challenges in a sustainable electricity grid [C]//Proceedings of IEEE/ACM third international conference on cyber - physical systems [S. l.];IEEE, 2012; 119-128.
- [22] Ilic M D, Xie L, Khan U A, et al. Modeling future cyber-physical energy systems[C]// Proceedings of the IEEE power engineering society general meeting. Pittsburgh; IEEE, 2008;1-9.
- [23] Zhang Y, Ilic M D, Tonguz O F. Application of support vector machine classification to enhanced protection relay logic in electric power grids[C]//Proceedings of the large engineering systems conference on power engineering. Montreal; IEEE, 2007;31-38.
- [24] Yoshihiko Susuki, T John Koo, Hiroaki Ebina, et al. A hybrid system approach to the analysis and design of power grid dynamic performance[J]. Proceedings of IEEE, 2012, 100 (1); 225-239.
- [25] Parolini L, Sinopoli B, Krogh B H, et al. A Cyber-physical Systems Approach to Data Center Modeling and Control for Energy Efficiency[J]. IEEE, 2012,100(1);254-268.
- [26] Jin F,Shin K G. Pack sizing and reconfiguration for management of large-scale batteries[C]//Proceedings of IEEE/ACM third international conference on cyber - physical systems [S. l.];IEEE, 2012;138-147.
- [27] David A,Du D,Larsen K G, et al. An evaluation framework for energy aware buildings using statistical model checking [J]. Science China information sciences, 2012, 55(12); 2694 -2707.
- [28] Cartwright R, Cheng A,Hudak P, et al. Cyber-physical challenges in transportation system design[C]//Proceedings of national workshop for research on high-confidence transportation cyber-physical systems; Automotive, aviation and rail, washington D C; National Science Foundation,2008;220-224.
- [29] Manfred Broy, María Victoria Cengarle, Eva Geisberger. Cyber-physical systems; imminent challenges[J]. Monterey workshop 2012, LNCS 7539,2012;1-28.
- [30] Fallah Y P,Huang C,Sengupta R, et al. Design of cooperative vehicle safety systems based on tight coupling of communication, computing and physical vehicle dynamics[C]// Proceedings of IEEE/ACM first international conference on cyber-physical systems;IEEE, 2010; 159-167.
- [31] Platzer A. Verification of cyberphysical transportation systems[J]. IEEE intelligent systems, 2009,24(4);10-13.
- [32] LI Xu,YU Xue gang,WAGH A,et al.Human factors-aware service scheduling in vehicular cyber-physical systems[C]// Proceedings of IEEE INFOCOM 2011-IEEE conference on computer communications. New Jersey; IEEE, 2011;2174-2182.
- [33] Madden J, Mcmillin B, Sinha A. Environmental obfuscation of a cyber physical system; vehicle example[C]//Proceedings of IEEE 34th annual computer software and applications conference workshops. New Jersey;IEEE, 2010;176-181.
- [34] Lee I,Sokolsky O,Chen S, et al. Challenges and research directions in medical cyber- physical systems[C]//Proceedings of the IEEE, 2012, 100(1); 75-90.
- [35] Arney D,Pajic M,Goldman J M, et al. Toward patient safety in closed-loop medical device systems [C]//Proceedings of IEEE/ACM first International conference on cyber-physical systems, IEEE, 2010;139-148.
- [36] Tao Li, Feng Tan, Qi-xin Wang, et al. From off-line toward real-time; a hybrid systems model checking and CPS co-design approach for medical device plug-and-play[C]// Proceedings of IEEE/ACM third international conference on cyber-physical systems.[S.l.];IEEE, 2012;13-22.
- [37] Calhoun B H,Lach J,Stankovic J A, et al. Body Sensor Networks; A Holistic Approach From Silicon to Users[J].Proceedings of the IEEE, 2012, 100(1); 91-106.
- [38] Banerjee A ,Gupta S K S.Towards modeling and analysis of cyber-physical medical systems[C]//Proceedings of the 4th international symposium on applied sciences in biomedical and communication technologies. Barcelona;[s.n.], 2011; 1-5.
- [39] Lui Sha. Using simplicity to control complexity[J]. IEEE software , 2001,18(4);20-28.
- [40] 杨孟飞, 王磊, 顾斌, 等. CPS 在航天器控制系统中的应用分析[J]. 空间控制技术与应用, 2012, 38(5);8-13.
- YANG Mengfei, WANG Lei, GU Bin, et al. The application of CPS to spacecraft control systems[J]. Aerospace control and application, 2012, 38(5);8-13.(in Chinese)

(编辑:徐敏)