

赛博物理系统发展综述

林峰, 舒少龙

(同济大学 电信学院, 上海 200092)

摘要: 赛博物理系统描述了一类由计算单元与物理对象通过通讯网络高度集成的复杂系统. 这类系统伴随着计算机及其网络技术的高速发展而出现, 代表了新一代工业技术的发展方向, 目前得到了各国政府、学术界和工业界的高度重视. 赛博物理系统的高效运行需要计算机科学、控制科学和通信科学等多学科的协同努力, 目前面临系统理论, 系统设计方法, 设计工具等诸多方面的挑战.

关键词: 赛博物理系统; 分布式计算; 网络化控制; 嵌入式系统

中图分类号: TP 273; TP 301; TP 393 **文献标识码:** A

A Review on Cyber-Physical Systems

LIN Feng, SHU Shaolong

(College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A cyber-physical system (CPS) is a system featuring a tight combination of and coordination between the system's computational and physical aspects by communication networks. It is the development product of computer and network technologies and gains much attention from governments, academia and industry. In order to design and operate CPS effectively, scientists and engineers in computer science, control science and communication science should work together to overcome the challenges such as theories, design methodologies and tools.

Key words: cyber-physical system; distributed computing; networked control; embedded systems

1 赛博物理系统产生背景

自从计算机的出现, 在物理系统中嵌入计算设备和相应的软件以使得集成的系统具有更为灵活和

复杂的功能成了系统发展的必然趋势. 随着计算机和通讯技术的迅速发展, 计算机和物理对象的系统化集成的速度变得越来越快, 系统化集成的程度也越来越高. 网络技术的快速发展则进一步加剧了这一趋势. 欧盟委员会最新研究报告表明^[1], 几十年来, 电子设备在工业产品中所占的比重增长迅速. 该研究报告预测到本年代末, 在汽车、航空、工业自动化、消费电子、智能家居和健康医疗器械等领域, 电子设备在产品中所占的比重将达到 53%. 以汽车为例, 1990 年, 电子设备在一辆汽车中所占的价值比重约为 16%, 而到 2003 年, 这一比重已经达到 52%, 预计本年代末将到达 56%.

随着各种电子设备在各应用领域中的比重迅速增加, 计算机和物理对象集成系统的结构相应地也在发生着变化. 这种结构上的改变如图 1 所示^[2-3].

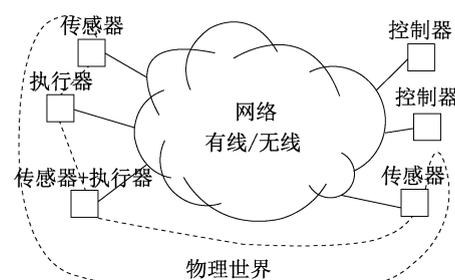


图 1 赛博物理系统结构

Fig.1 Architecture of Cyber-Physical System

从图中可以看到, 计算机技术, 网络通讯技术的发展, 使得计算单元与物理对象通过通讯网络高度耦合的大型复杂系统出现并得到发展, 与传统的计算机控制系统具有明显区别的是, 这类系统具有设备分布式布置, 高度网络化集成等特征. 将这类代表新技术的集成系统称之为赛博物理系统 (Cyber-Physical Systems, CPS). CPS 系统可简洁地定义为

收稿日期: 2009-09-16

基金项目: 美国国家科学基金会和美国国家卫生研究院项目资助 (ECS-0624828, ECS-0823865, 1R01DA022730-01A2); 国家自然科学基金项目资助 (60904019); 同济大学青年优秀人才行动计划资助

作者简介: 林峰 (1960—), 男, 教授, 工学博士, 长江学者, IEEE 院士, 主要研究领域为离散事件动态系统, 混合系统, 赛博物理系统和鲁棒控制. E-mail: flin@ece.eng.wayne.edu

一类计算单元与物理对象通过通讯网络高度集成的复杂系统^[4].

早期计算机与物理对象的系统集成实现了工业自动化,能够用计算机来代替人的操控等诸多工作.而网络和通讯技术的发展,计算单元和物理对象通过通讯网络的系统集成将带来更多技术上的优势和潜在利益^[5]:可以使得许多大型复杂系统如国家电网等运行更安全,效率更高;可以减少这些系统构建及其操作这些系统的费用;这些系统允许不同的子系统通过网络进行组合和集成,形成更为复杂的系统,产生新的功能,拥有更灵活和强大的能力.鉴于此,2007年8月美国总统直属科技顾问委员会(The President's Council of Advisors on Science and Technology, PCAST)在关于网络信息技术的报告中^[6]提出,要将网络信息技术重新放到优先研究和发展的位置,特别指出网络信息技术研究的重中之重是研究赛博物理系统理论,开发赛博物理系统技术.

2 赛博物理系统技术应用

到目前为止,尽管赛博物理系统存在诸多需要解决的理论和技術难题,但是它已经在国家电网,智能交通和环境监控等诸多领域得到了应用,并且产生了积极的经济价值,体现了其技术上的优势.

2008年美国国家自然科学基金会召开的赛博物理系统峰会^[7]特别提出了赛博物理系统在三个领域广阔的应用前景:

分布式能源系统.传统电网采用垂直、中心控制物理架构,为了克服传统电网中电力生产及其电力传输等过程中的诸多不足,分布式能源系统对传统电网采取诸多改进措施:加入大量分布式电力生产源,电力储存设备及其可控制负载(诸如可充电混合电动汽车).对于分布式能源系统,无线网络传感和控制可以更有效、更可靠、更灵活地改善网络性能,提高电网的效率.当然,分布式能源系统的巨大潜力如果希望得到完全开发,需要重新考虑能源系统的物理架构,控制方法及其通讯方式,突破现有电网架构、控制和无线网络通讯等方面存在的理论上和技术上的局限.

新一代交通系统.目前的交通网络存在严重的拥挤,结果是降低了运行的效率,增加了燃油的消耗量.并且严重的拥挤需要政府增加更多的道路资源,需要巨大的经济投资.然而,对于现存的交通基础设施,

如果可以提高其运行效率则是改善交通拥挤的一个非常有效的途径.因此结合计算技术和网络技术的新一代交通系统已受到广泛的研究并正得到应用,与现有交通系统相比新一代交通系统具有明显的进步:具有更大的运输能力,更少的交通拥挤、油料消耗和废气排放,系统更安全,更可靠.考虑到新一代交通系统具有典型的赛博物理系统特征,它的效率的完全发挥将需要充分运用赛博物理系统理论和设计方法等方面的研究成果.

健康医疗系统.健康医疗系统的改善可使全民受益,因此是一项非常有意义的事情.为了更好地改善健康医疗系统,需要考虑在线安全医疗设备系统建设,远程医疗诊断和治疗,及其随之需要的医疗设施的改革.赛博物理系统理论可为健康医疗系统实现上述功能,在改善现有医疗系统方面发挥重要作用.通过赛博物理系统技术能够更有效地利用稀缺医疗资源.

在其他一些文献或者会议^[3,8-9]中也提到赛博物理系统在上述方面的应用.此外,文献^[3]还提出赛博物理系统可在分布式机器人,军事系统等领域发挥作用;文献^[8]还提出赛博物理系统可在智能建筑、智能桥梁建设,汽车,移动通讯设备等领域发挥作用.赛博物理系统指导小组在执行报告^[5]中较为全面地总结了赛博物理系统的应用领域及其所可能带来的潜在利益.总结见表1.

表1 赛博物理系统应用领域

Tab.1 Applications of Cyber-Physical System

应用领域	潜在机会
交通运输	①飞行器飞得更快,更远,耗能更少;②飞行控制系统的设计,更有效地利用空间航线资源;③汽车功能更强,更安全,耗能更少.
国防	①功能更强的防御系统;②自治车辆的网络化编队.
能源和工业自动化	①新的可再生能源的开发;②家庭、办公室、办公大楼和车辆等运行效率更高,操作更方便.
健康和生物医疗	①家庭保健服务;②功能更强的生物医疗设备;③新一代人造器官;④拥有更高自动化水平和扩展功能的网络化生物医疗系统.
农业	①节能技术的开发;②设备自动化程度更高;③生物工程闭环加工;④资源与环境的最优化利用;⑤食品更安全;
国家基础设施	①高速公路容量更大,运行更安全;②国家电网更可靠,效率更高.

总之,赛博物理系统技术作为21世纪工业的技术基础,可被应用于诸多领域,为这些领域的产品开

发,技术上的改进提供诸多机会.

3 赛博物理系统研究进展

计算机的出现促使人们开始了将计算机集成到物理系统中的研究历程.最初的研究是将计算机作为控制器,提高物理对象控制的灵活性,改善物理对象的性能.其中控制学科领域集中研究计算机控制系统,而计算机学科则致力于开发计算速度更快,存储容量更大的计算设备.不管是计算机科学研究计算设备的设计和开发,还是控制科学研究各种物理动态系统的计算机控制,其前提是将系统抽象为某个模型,然后进行分析.由于这两个学科的研究对象和研究方法不一致,导致研究结果不兼容.比如,计算机学科研究计算的时候往往忽略时间这个因素,这样导致计算单元在与物理系统集成的过程中由于实时性的缺乏而产生许多难以解决的问题.这种困难促使了计算机学科对嵌入式系统^[10]研究的重视,研究计算单元如何满足物理系统的实时性要求.另一方面,网络应用的普及,控制科学也日益意识到通过网络传输的数据信息存在各种各样的通讯特征:如存在信息包丢失,不确定网路延时等,如果希望一个复杂的物理系统满足控制性能要求,这些对控制系统性能的影响因素则无法置之不管,因此本世纪以来网络控制系统^[11]的研究风生水起.

上述研究对计算机科学,控制科学和通信科学之间的融合做出了一定的贡献,然而,随着各种计算设备及其网络的进一步发展,许多系统具有计算单元和物理对象分布式布置,通过网络进行通讯和控制等赛博物理系统特征.采用上述研究成果对这类系统进行分析和设计时存在不可逾越的困难^[9,12-14].通讯网络的带宽,延时,丢包率的大小,计算单元的能力,计算单元的调度方式,物理系统的架构及其动态特性等各种因素都可能影响系统的动态性能,并且这些因素对系统性能的影响是相互联系的.赛博物理系统的研究已经引起了许多国家的重视,并得到这些国家政府的大力支持和资助.

美国:美国国家自然科学基金会在赛博物理系统的研究中充当了世界领导者的角色.早在2005年,美国国家自然科学基金会就资助了当年高可信医疗设备软件与系统(High Confidence Medical Device Software and Systems, HCMDSS)研讨会,会上提到高可信的医疗设备具有赛博物理系统的典型特征.2006年,美国国家自然科学基金会主持召开了

第一届赛博物理系统研讨会(NSF workshop on Cyber-Physical Systems),指出赛博物理系统研究的目的是为出现的计算机,通讯网络和物理单元高度集成的系统的开发寻找新的理论基础和实现技术.使得信息、计算、通讯和控制融于一体的新一代集成系统能够高可靠、高效率地工作,具有高性能.与此同时,召开了其他一些有关赛博物理系统的研讨会.赛博物理系统的研究开始受到美国国家政府的重视.2007年8月,美国总统直属科技顾问委员会PCAST在关于网络信息技术的报告中^[6]提出,需要重新重视网络信息技术的研究和发展,并且第一次官方地提出研究赛博物理系统理论、开发赛博物理系统设计技术是保持美国信息技术(IT)行业世界领先地位的重要措施,官方的支持很大程度上刺激了对赛博物理系统的进一步研究工作.在此之后,赛博物理系统指导小组组织专家总结了赛博物理系统的当前研究情况及其给出了研究的指导方向^[5].2008年,美国国家自然科学基金会召开了赛博物理系统峰会^[7],并且为赛博物理系统的研究提供研究资金进行重点资助(NSF program solicitation on Cyber-Physical Systems),鼓励相关领域研究者为赛博物理系统理论研究和技术开发作出贡献.

欧洲:在欧洲,启动了嵌入式智能与系统先进研究与技术(Advanced Research and Technology for Embedded Intelligence and Systems, ARTEMIS)项目,该项目预计在2007年到2013年期间投入70亿欧元展开智能电子系统方面的研究工作,该项目期望到2016年欧盟在智能电子系统研究和技术开发方面能够成为世界的领导者.赛博物理系统作为智能电子系统的一个重要发展方向,自然受到了ARTEMIS项目的支持和重视.另外欧盟成立了欧洲智能系统集成技术平台(European technology platform on smart systems integration, EPoSS).目的在于增进科技研发和促进经济发展,使欧洲产业在全球市场上取得优势.欧洲智能系统集成平台每年举行的年会为学术界和工业界对智能系统集成的发展提供了交流的平台.2010年的年会(European conference & exhibition on integration issues of miniaturized systems - MEMS, MOEMS, ICs and electronic components)将于当年3月在意大利举行.并且明确提出:智能系统集成是一个多元件集成而得到的系统,系统可以从外界物理对象中得到信息,电子地操控该物理对象,跟物理对象进行通讯得到信息和数据,然后对物理对象施加反馈信息.可以

发现此类系统明显具有赛博物理系统特征.

此外,诸如日本、韩国和中国等国家也展开了赛博物理系统的相关研究工作.在韩国,韩国软件振兴院(korea IT industry promotion agency)为韩国情报通信部下属的非赢利事业单位,其宗旨为促进韩国IT产业的发展.她一直以来密切关注新一代嵌入式系统的发展.她资助了2008年在大邱举行的大邱国际嵌入式系统会议(Daegu international embedded conference, KAIST),该会议的目的是研讨下一代具有网络化特性的嵌入式系统,提出了需要开展赛博物理系统的研究.韩国科学技术院(korea advanced institute of science and technology, KAIST)已于2008年在大学里尝试开展赛博物理系统的课程教学工作^[15].在日本,虽然还没有官方正式地推动赛博物理系统项目,但是其每年举行的嵌入式技术会议(embedded technology)密切关注赛博物理系统的发展,并且该年会受到了日本全国广泛的关注.其中2008年的年会有26646个注册者,最终有10 000个人参加了该会议.2009年的会议将在日本横滨举行,将继续关注计算设备,通讯网络方面的新进展及其这些新技术与物理对象集成的研究工作.中国也较早关注赛博物理系统的研究工作,在2007年发布的控制科学与工程学科发展研究报告^[16]中提到,系统运作的网络化、功能的多样化、系统的复杂化是国内外自动化研究和发展的主要趋势,特别指出赛博物理系统的控制越来越引起控制界的关注.2008年7月在北京举办了首届国际赛博物理系统研讨会(the first international workshop on Cyber-Physical Systems),与此同时联合召开的国际分布式计算系统会议(28th IEEE international conference on distributed computing systems, ICDCS 2008)也非常关注赛博物理系统的研究进展.2009年网络化集成控制技术论坛专题讨论网络化集成控制技术的研究进展及其工业应用.此外,笔者所在的课题组正与韦恩州立大学的教授合作开展智能电网CPS系统的研究工作^[17-18],天津大学和其他研究机构也正在赛博物理系统研究方向上展开研究^[19].

作为21世纪工业的技术基础,赛博物理系统的研究和开发也得到了工业界的充分关注.诸如National Instruments, Microsoft, NEC, Honeywell等大型国际IT公司正积极参与赛博物理系统的研究和开发工作,希望在新一代的工业化技术革新的浪潮中能够保持其技术的先进性,以期未来仍然可以维持其市场领先者的角色.如National Instruments,

Microsoft, NEC, Honeywell 等公司参与了美国国家自然科学基金会主持的赛博物理系统峰会, Omron, Siemens, HMS 等公司参加了2009年网络化集成控制技术论坛并展示了最新开发的相关工业技术.

4 赛博物理系统面临挑战

赛博物理系统涉及计算机科学,通信科学和控制科学等多个学科知识,其研究开发的成功需要计算机科学,通信科学和控制科学等多学科间的相互协作.赛博物理系统的设计必须在统一的设计框架下考虑测量噪声,执行精度,环境扰动,计算过程中的错误和通讯过程中存在的延时和丢包等多方面的因素.然而,目前还没有一个能够处理计算机系统,通讯网络系统和物理动态系统的统一理论框架.简单来讲,计算机工程师和科学家们并不知道如何将稳定性等物理系统指标,转化为计算机设计中的功耗等指标.控制理论和信号处理理论将计算机抽象为不会出错的计算设备,这种简单的抽象忽略了计算的许多重要的方面:由于缓冲和能量管理而导致的大时变,由于计算的复杂性导致更高的软件错误率等.控制理论和信号处理理论对通讯的抽象也过于简单,控制理论假定信息在不同环节中的传递是零丢失、零时延的,这在无线、低功耗网络中无法实现.虽然最近数据丢包、时滞系统等系统的控制问题到了控制界的重视并且得到了诸多结果,但是这些研究结果是从控制模型的角度分析得到,其能否与计算机和通讯有效集成,进而设计有效的CPS系统还没有得到肯定.

发展赛博物理系统的首要壁垒是指导理论的缺乏,建立赛博物理系统理论已经成了相关学科领域的重要而急切的研究课题.另外赛博物理系统的设计方法和设计工具的开发等问题也需要努力解决.在赛博物理系统的研究上面临着巨大的挑战^[3,5,7,9,12-14],具体可总结为以下几个方面:

系统合成:计算机系统,网络系统和物理系统本质上是不同的,赛博物理系统的开发需要重新考虑异质子系统的合成问题,需要考虑赛博物理系统中物理和计算的特性对系统设计的影响.对异质系统采用新的视角进行研究和分析才能够允许创造大规模网络化集成系统.对此种异质系统合成存在许多理论上需要研究的问题,首要问题是研究过程中的模型提取.计算模型提取需要包含物理概念,如时间和能量.而对物理动态的模型提取需要包含实现

平台的不确定性,诸如网络延时,有限字节长度,舍入误差等.这些提取的改变可以使得拥有物理特性的计算与能够处理实现不确定性的物理的综合不再是一个难题;其次,需要为描述物理过程和计算逻辑的异质模型及其模型语言的合成发展新的设计方法.需要发展新的数学框架,以使得方法论不仅仅在数学上是精确地可描述的,并且对于系统开发者和相应设计工具的开发者是清楚的,易理解的和实用的;需要开发新的赛博物理系统开放架构,这些架构允许建立国家级或者全球级的赛博物理系统能力,这些架构应该是动态的以便更好地适应操作条件的改变;需要依据不可靠的子系统建立可靠的赛博物理系统的理论和方法.

分布式传感、计算和控制:对于传统的控制系统而言,传感,计算,控制决策的制定及其执行都是即时完成的,但在网络化的赛博物理系统中,反应时间却可能对系统的控制性能产生影响,比如控制决策的执行延时太长,将可能使系统产生严重的问题.并且赛博物理系统本质上具有分布式特征,不能依赖于以往的单闭环反馈控制理论来解决如此系统的分布式控制、传感、计算等问题.如何从一个分布式的环境中收集到充足的信息?如何对分布式控制对象施加有效的控制?如何合理利用分布式计算单元,合理地给这些分布式计算单元分配任务?分布式传感,分布式计算和控制的过程中,信息的传递通过网络通讯来实现,为了更好地利用这些网络资源,如何采取必要的通讯控制算法以便能够使得通讯的效率最高?这些都是需要解决的关键问题.比如,为了完成某个控制任务,什么信息需要采集?什么时候需要采集信息?何处计算单元应该负责计算的任务?信息传递的路径选择?何处执行器完成执行功能?在一个分布式环境中,还要考虑系统的鲁棒性,自适应性,和自组织性等重要特性.比如,某个传感器单元,某个计算单元,某个通讯线路的故障会不会对系统的性能产生严重的影响.在一个分布式环境中,局部的系统演化要能够最小程度上影响全局系统的演化,确保局部对全部的资源需求,及其局部系统对整个系统运行性能的影响达到最小.

网络通讯可预测性、可靠性及其安全性:网络通讯拥有有限的通讯带宽,存在传输过程中的数据包丢失及其时变时延,这些缺点使得传统控制策略难以应用于赛博物理系统.为了有效地对赛博物理系统施加控制以期得到最优的系统性能,需要对系统控制策略和无线网络设计进行联合研究,在设计无

线通讯网络时需要考虑其满足分布式传感、计算和控制对信息的要求.为了支持实时、闭环传感和控制,赛博物理系统中的通讯网络设计将明显不同于传统无线传感器网络(其一般采用开环传感),确保信息通讯质量的可控及其可预测是极其重要的.为了达到该目的,存在许多有待解决的问题,如无线网络需要支持赛博物理系统控制策略的设计;动态、不可预测的控制决策会实时改变对信息通讯需求,因而需要信息通讯结构和信息调度的实时调整;不同的控制策略要求不同的信息通讯质量;赛博物理系统的不确定环境特征对可预测信息通讯网络服务质量(QoS)设计也是一个很大的挑战.赛博物理系统中的许多异质单元的存在也给网络通讯中的信息安全设计和控制带来了更多的困难.比如计算单元与物理对象的交互可能暴露通讯的信息,从而使通过物理对象对赛博物理系统的通讯网络进行攻击成为可能.

设计开发工具:当新的赛博物理系统应用领域出现时,必须能够快速利用已经存在的工具基础去帮助设计那些系统.然而,原有的计算机辅助设计工具并不适合采用赛博物理系统技术构建大规模异质系统,因此必需研究赛博物理系统的设计开发工具.赛博物理系统设计开发工具的研发面临许多挑战.赛博物理系统是异质集成系统,由多个不同属性的物理子系统、计算子系统和通讯网络子系统组成.这种异质性导致设计的复杂性增加,给自动化设计工具的开发带来了困难.由于赛博物理系统中存在诸多异质性的子系统,设计工具需要兼顾这些系统的各自的特性,因此导致设计工具的专业化程度会降低,降低设计工具的效率,增加设计的成本,也给设计工具的市场化开发带来了困难.

5 结论

赛博物理系统的研究将给21世纪的工业带来革命性的发展,但是也可以看到,由于计算机学科、控制学科和通信学科研究理论和方法上的异质性而导致了赛博物理系统各个组成部分之间的无缝集成成为了需要解决的难题,带来了挑战.另一方面,赛博物理系统广阔的应用前景及能够给生活和工业带来的诸多好处使得许多国家、企业、科研单位纷纷加入到赛博物理系统研究的队伍中来.社会经济发展的需要,国家之间对科技的竞争都将使得赛博物理系统成为当前及未来数年的研究热点.

参考文献:

- [1] FAST GmbH for the European Commission. Study of worldwide trends and R&D programmes in embedded systems in view of maximising the impact of a technology platform in the area[R]. [s. l.]: European Commission, 2005.
- [2] Liberatore V. Networked Cyber-Physical Systems: an introduction[R/OL]. [2007-12-30]. <http://vorlon.case.edu/~vx11/NetBots/nsf07.pdf>.
- [3] HUANG Benxiong, WANG Furong. Cyber-Physical System: a survey[C]// Smart Home Workshop. Stavanger: University of Stavanger & Lyse Tele, 2008: 26-27. <http://www.ux.uis.no/atc08/smarthome>.
- [4] Wikipedia. Cyber-Physical Systems[G/OL]. [2010-06-02]. <http://en.wikipedia.org/wiki/Cyber-physical-system>.
- [5] CPS Steering Group. Cyber-Physical Systems: executive summary[R/OL]. [2008-10-25]. <http://varma.ece.cmu.edu/summit/index.html>.
- [6] President's Council of Advisors on Science and Technology. Leadership under challenge: information technology R&D in a competitive world[R/OL]. [2007-08-06]. <http://www.cps-vo.org/node/207>.
- [7] CPS Summit. CPS summit report[R/OL]. [2008-10-30]. <http://varma.ece.cmu.edu/Summit/index.html>.
- [8] Wing J M. Cyber-Physical Systems research charge[C]// CPS Summit, Saint Louis: National Science Foundation 2008. <http://www.cra.org/ccc/docs/cps-summit.pdf>.
- [9] Sha L, Gopalakrishnan S, Liu X, et al. Cyber-Physical Systems: a new frontier[C]// IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing. [s. l.]: IEEE, 2008.
- [10] 维基百科. 嵌入式系统[G/OL]. [2009-06-02]. <http://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%B5%8C%E5%85%A5%E5%BC%8F%E7%B3%BB%E7%BB%9F>.
Wikipedia Embedded systems[G/OL]. [2009-06-02]. <http://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%B5%8C%E5%85%A5%E5%BC%8F%E7%B3%BB%E7%BB%9F>.
- [11] 岳东, 彭晨, Han Qinglong. 网络控制系统的分析与综合[M]: 北京: 科学出版社, 2007.
YUE Dong, PENG Chen, HAN Qinglong. Analysis and synthesis of networked control systems [M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [12] Lee E A. Cyber-Physical Systems: design challenges [C] // International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC), Orlando. [s. n.], 2008. <http://www.ourglocal.com/ieee/?c=13730>.
- [13] Lee E A. Cyber-Physical Systems—are computing foundations adequate? [C] // NSF Workshop on Cyber-Physical Systems: Research Motivation, Techniques and Roadmap, Austin. [s. n.], 2006. http://ptolemy.eecs.berkeley.edu/publications/papers/06/CPSPositionPaper/Lee_CPS_PositionPaper.pdf.
- [14] Lee E A. Computing foundations and practice for Cyber-Physical Systems: a preliminary report [R/OL]. [2007-10-31]. <http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2007/>.
- [15] Cyber-Physical Systems[R/OL]. [2008-10-30]. <http://locust.kaist.ac.kr/cs744-cps/CS744.html>.
- [16] 中国自动化学会. 控制科学与工程学科发展研究[R/OL]. [2007-12-26]. <http://www.cast.org.cn/n435777/n435799/n1105056/n1108887/n1396384/52458.html>.
Chinese Association of Automation. Research report of control science and engineering[R/OL]. [2007-12-26]. <http://www.cast.org.cn/n435777/n435799/n1105056/n1108887/n1396384/52458.html>.
- [17] Associated Press. Wayne State study seeks more efficient power grid[R/OL]. [2009-06-02]. <http://archives.chicagotribune.com/2009/jun/02/science/chi-ap-mi-powergridstudy>.
- [18] Wang C, Nehrir M H, Lin F. Modeling and control of fuel cells for distributed generation applications; continuous, discrete, and hybrid approaches[C]// IECON 09, 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Porto; IEEE, 2009. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=5405664>.
- [19] FENG Xia. Cyber-Physical Systems bridging the virtual and real worlds[R/OL]. [2009-10-31]. http://www.cpschina.org/CPS_DUT_Apr_2009_Feng.pdf.