

CPS 系统体系结构顶层设计研究

何 明¹ 梁文辉^{1,2} 陈希亮¹ 陈秋丽¹

(解放军理工大学指挥信息系统学院 南京 210007)¹ (解放军 61345 部队 西安 710004)²

摘 要 美国国家基金委员会首次提出信息物理融合系统(CPS),该系统已被列于美国未来八大关键信息技术的首位。在归纳分析国内外 CPS 研究现状的基础上,为了实现 CPS 协调物理进程的目标,满足 CPS 的信息处理与物理控制功能性需求和实时性、可靠性、安全性、可适应性等非功能性需求,提出了 3 种视图的 CPS 体系结构。对 CPS 体系结构设计理论及方法进行了研究,最后展望了 CPS 未来的研究方向和技术挑战。

关键词 信息物理融合系统,体系结构,顶层设计

中图法分类号 TP302.1 **文献标识码** A

Research on Top-level Design of Architecture for Cyber-physical Systems

HE Ming¹ LIANG Wen-hui^{1,2} CHEN Xi-liang¹ CHEN Qiu-li¹

(College of Command Information Systems, PLA Science and Technology University, Nanjing 210007, China)¹

(61345 Armies, PLA, Xi'an 710004, China)²

Abstract After Cyber-Physical System(CPS)was proposed by National Science Foundation,it occupied the first place among eight important information technology fields in America. By analyzing current research situation of CPS at home and abroad,three kinds of views for CPS structure were proposed to realize the CPS coordinate physical process and meet the functional requirements just as information processing and physical control of CPS and real-time, reliability, security, adaptability and other non-functional requirements. The design theory and method of CPS architecture were studied. Moreover, the direction for future study of CPS was put forward.

Keywords CPS, Architecture, Top-level design

1 引言

2006 年,美国国家基金委员会首次提出信息物理融合系统(cyber physical systems, CPS),并将其列于美国未来八大关键信息技术的首位^[1-3]。CPS 系统的本质是物理世界与计算机世界的融合,融合计算、通信与控制的新型复杂嵌入式系统,计算与物理过程持续交互、融合,实现嵌入式计算、网络化通信与远程精确控制。CPS 系统具有连续过程与离散事件交织、规模大小、时空跨度各异,以及系统通信和交互方式多变等特点。Baheti 认为 CPS 是系统中各种计算单元和物理单元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^[4]。何积丰院士指出:“从广义上理解,CPS 是一个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,它通过计算进程与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”^[5]。李国杰院士指出人机物三元世界是一个由多人、多机、多物组成的动态开放的网络社会,其中 CPS

系统的角色十分重要,如图 1 所示。

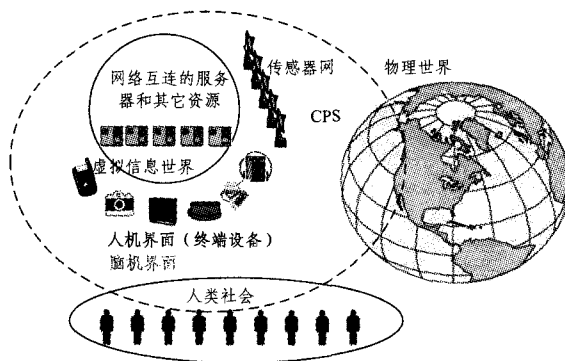


图 1 基于 CPS 的新信息世界观示意图

CPS 符合国家重大战略需求,在社会管理、交通控制、能源利用、环境监测、公共安全、公众健康等方面有广阔应用前景。因此,体系结构作为 CPS 的研究基础,至关重要,如何进行 CPS 系统体系结构的设计摆在了面前。但是,目前 CPS 体系结构研究尚不成熟,仍没有一个统一标准化的 CPS 结构框架能够普遍适用于所有 CPS 应用。本文从视图角度出发,重

到稿日期:2013-01-15 返修日期:2013-05-15 本文受国家自然科学基金面上项目(61174198),江苏省自然科学基金(2012059, BK2011130)资助。

何 明(1978—),男,博士后,副教授,硕士生导师,主要研究方向为建模与仿真、信息物理融合系统;梁文辉(1986—),男,硕士生,主要研究方向为信息物理融合系统、网络安全、传感器网络;陈希亮(1985—),男,硕士,助教,主要研究方向为建模与仿真、人工智能;陈秋丽(1990—),女,硕士生,主要研究方向为信息物理融合系统、网络安全, E-mail: review_paper@126.com。

点对 CPS 体系结构顶层设计进行了研究,同时对 CPS 未来的研究方向进行了展望。

2 国内外研究现状

2.1 国外研究现状

在国外,有关 CPS 的研究主要集中在美国、欧盟、日韩等国家。2006 年,美国开始把 CPS 列为重要的研究项目。2007 年,CPS 被美国总统的科学技术咨询委员会列为网络与信息技术领域八大关键信息技术的首位提案。2008 年成立的美国家 CPS 领导小组在《CPS 执行概要》中,把 CPS 应用放在交通、国防、能源、医疗、农业和大型建筑设施等方面,2008 年年底 IBM 提出的“智慧地球”则是对 CPS 系统未来实践的战略构想。2010 年 3 月,美国科学基金会针对 CPS 基础、方法和工具,软硬件组件、平台与系统 3 个方面征求关于 CPS 系统项目的建议案。欧盟投入约 50 亿欧元(2007—2013)进行研究。

文献[6]中,Hyun Jung La 和 Soo Dong Kim 提出了一种 CPS 的 3 层体系结构,分别为环境层、服务层、控制层。环境层由物理设备和目标环境组成,目标环境包含了使用物理设备的末端用户以及与其相关的物理环境;服务层则是一个典型的计算环境,提供 SOA 和云计算等服务;控制层接收传感器监测到的数据,通过对数据的分析做出控制决策,控制物理设备调用相应的服务。文献[7]提出了一种类似于 OSI 的层次结构模型,形成了一个自底向上的框架,建立了一个从物理层到监督层的模型,阐述了每层的安全要点,并提出了跨层的安全策略,但是层层之间功能划分不够明确,网络层和通信层业务存在重叠。

2.2 国内研究现状

我国从 2008 年开始投入研究,2009 年关注在工业领域的发展,2010 年 863 项目组织专题论坛。与物联网、传感网、嵌入式系统相互关联,但范围更宽泛,是多层面的系统科学。国家自然科学基金在重点支持物联网基础性研究的同时,针对 CPS 系统进行了前瞻性的支持。目前,国内学者已经创建了从感知设备物理层到社会网络模型等的多层次架构,研发了具有自主知识产权的通信协议系统,建立了有效的管理、查询和计算感知数据的机制,形成了全网络的反馈控制理论体系,奠定了坚实的研究基础。

文献[8]采用面向服务的体系结构(service oriented architecture, SOA)的思想,提出了一种面向服务的 CPS 体系框架,将 CPS 中各种软、硬件资源相互组合封装成服务,针对任务分配不同的服务。该框架将 CPS 按照实体到抽象划分为节点层、网络层、资源层和服务层,体现了 CPS 结构特性和以服务作为资源存在方式的思想。文献[9]从物理世界与信息世界实时交互的角度出发,提出了一种交互的 CPS 体系结构,主要包含传感器网络、信息中心、控制中心、执行器网络、用户终端和 CPS 实时网络几个部分。文献[10]也是从安全角度出发,提出了一种可信的 CPS 体系框架,引入了一套信任机制,用于系统实体间建立信任关系,为用户提供了高可信度保证,但是,忽略了对 CPS 控制机制的研究,控制机制是 CPS 的核心,也是建立其他机制的基础。文献[11]提出了一种与物联网[12]架构类似的三层体系框架,该框架按照实体到

抽象、物理到信息的思想将 CPS 划分为物理层、网络层和应用层三层结构,但是,这种划分并未突出 CPS 与物联网的关键不同,即 CPS 的控制特性,未能全面地阐述 CPS 体系结构。

以上研究大多是从物理世界与信息世界交互的过程出发,对 CPS 相关部件按其在交互过程中承担的职能进行划分,得到 CPS 层次化的体系结构,但这种从整个 CPS 运行机理角度分析所得的体系结构过于复杂,交错感太强,且容易顾此失彼,不利于对 CPS 的深入研究。

3 CPS 体系结构设计

3.1 CPS 体系结构设计理论及方法

为了清楚阐述 CPS 体系结构,可以从多个角度进行描述,每个角度称为体系结构的一个“视图”。下面分别从 3 个不同视图对 CPS 进行剖析,提出了基于 3 种不同视图的 CPS 体系结构,每个视图描述了一个关注点,分别从系统架构、功能架构、技术架构 3 个方面对 CPS 进行介绍,这为进一步研究与设计 CPS 奠定了基础。目前,CPS 体系结构设计理论与工具如表 1 所列,设计方法主要有两种:一则是基于 SOA 的体系结构设计方法。SOA 是模仿人类社会的一种分布式计算模式,在人类社会中每个人都享受别人带来的服务,同时也为别人提供服务。CPS 中可以将各种硬件和软件资源相互组合封装成服务,针对任务来分配不同的服务。二则是面向方面(aspect oriented)的体系结构设计方法[13],如图 2 所示。

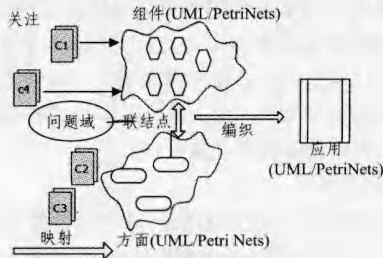


图2 面向方面的设计方法

表1 常用的设计理论和工具

	控制系统设计:连续状态	控制系统实现:离散状态
模型	差分方程、传递函数等	自动机、Petri 网、Statecharts 等
分析理论	Lyapunov 函数、特征空间分析等	布尔代数、形式逻辑、递归论等
软件工具	MATLAB、MatrixX、VisSim 等	SCADE、Statestate、SMV、SAT 等

3.2 基于系统视图的 CPS 体系结构

通过文献[2]可知,CPS 的核心是计算、通信、控制 3 者的有效协同。从系统视图的角度对 CPS 体系结构进行分析,如图 3 所示。

(1) 计算系统

计算系统是 CPS 的处理核心,为物理世界与信息世界的交互提供了有力支撑。CPS 中的计算系统是一个高性能的新型计算系统,它的计算对象由数字的、离散的、静态的变为了模拟的、连续的、动态的。CPS 的计算系统包括信息中心及各个物理部件中嵌入的计算部件,通过计算进程与物理进程的交互,对感知到的物理信息做出恰当的处理和分析,从而便于控制系统做出相应的控制执行策略。同时,CPS 中海量的源数据难以全部保存,且数据存在大量冗余,这就需要计算系统

对海量数据进行聚合计算和融合处理,以形成有意义的逻辑数据,并对高层的逻辑数据进行数据集成,以满足各项应用需求。

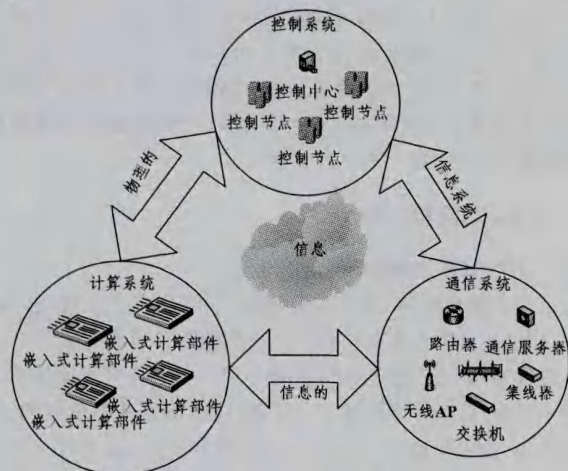


图3 基于系统视图的CPS体系结构

(2)通信系统

通信系统是CPS的传输部分,为物理世界与信息世界的交互提供了基础平台,它以现有网络为依托进行数据交换和传输,并逐步向下一代网络转变。CPS中感知末端节点多采用无线通信方式,而核心网则采用有线通信方式。通信系统担负业务系统和网络设备层面信息的转换、业务设备信息的呈现以及网络设备的管理等功能,负责CPS中传感器、执行器、控制节点、信息中心等物与物之间的互联互通,为CPS数据传输提供路由及QoS服务,有效地屏蔽了不同感知设备间物理差异及网络的多样性和复杂性。

(3)控制系统

控制系统是CPS的中枢神经,是物理世界与信息世界交互的主体^[14]。对于CPS的控制系统来说,控制主体由控制中心和各个控制节点组成,控制客体由各种执行器单元组成,控制媒体由通信网络和控制指令组成^[15]。通过控制系统,可以按所希望的方式对运行的物理进程进行维持或更改,使被控的物理实体达到预定的理想状态;同时,对于物理世界产生的反馈,控制系统会做出相应的事件调整和变更,控制执行器以新的执行模型对物理实体进行操作,维持物理世界的平衡。

3.3 基于功能视图的CPS体系结构

文献[9]提出了一种CPS层次结构模型,该模型中物理层作为最低层,其功能是对物理过程进行监控;控制层则包含一些控制设备,这些设备配有健壮、可靠、安全、容错的控制算法;通信层负责设备与不同层之间的数据传递;网络层包含数据包路由和控制系统拓扑特征;监督层提供人机交互和集中决策能力;管理层做经济、高级的操作决定。

文献[9]所提模型对CPS体系结构做了较为详细的划分,并将安全因素考虑其中。但是,这种划分对于各层设备及功能区分不够明确,层级之间界限较为模糊,且存在功能重叠的现象。因此,结合对CPS工作原理及各项功能的理解,在文献[9]所提层次结构的基础上,进一步分析研究,提出了一种基于功能视图的CPS体系结构模型,如图4所示,该模型各层分工明确,层级之间界限清晰,能够对CPS的分析与设计提供很好的导向。

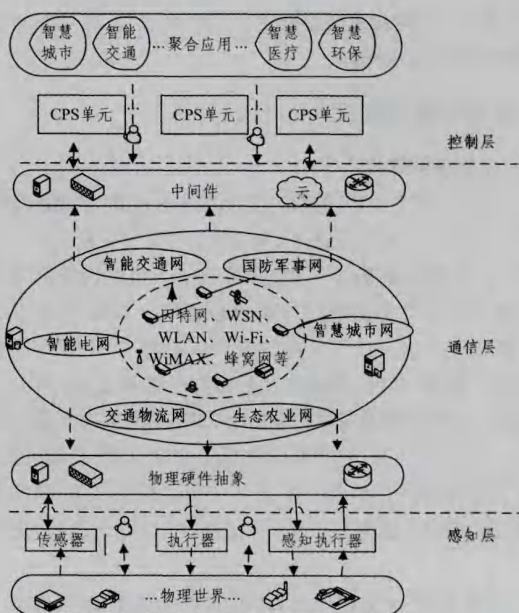


图4 基于功能视图的CPS体系结构

(1)感知层

感知层是将物理世界中的物理属性接入信息世界。它包含各类传感器、探测器等物理设备,它们构成传感网络,对物理环境进行感知,获取物理世界相关信息,并通过感知层设备中嵌入的计算部件对感知到的数据进行恰当的分析处理,然后将得到的可用数据通过网络层传送到控制层和监管层,为控制层和监管层的决策和行动提供支撑。探测器具有感知能力,从物理世界和当前CPS可能处于的物理状态中收集数据。传感器需要有冗余,以确保对状态的正确读取,其感知的数据能够被局部融合,也能够被传送给监管层进行全局融合^[16]。同时,此层也包含各类执行器单元,构成了执行器网络,通过接收控制层的控制节点发来的控制信息,按照指令对物理属性采用相应的动作,从而达到与物理世界的交互。

(2)通信层

网络层是CPS正常运作的基础,实现了CPS的通信功能。它包含网络拓扑和路由选择,为各层设备间的通信提供了通信信道,可采用多种形式,例如无线、电缆、光缆、蓝牙等。而且,采取了一系列的安全措施,保证信息在传输过程中的安全性、保密性以及最小化传输时延。

(3)控制层

控制层是CPS的核心,由多个控制部件构成,通过控制指令对执行器单元进行控制,使其产生恰当的动作,按照预期目标对物理世界进行维护或改善,通过不断的调整促使CPS平稳运行。控制层接收监管层制定的策略,并将其转换为相应指令,用于控制各执行部件的具体动作。

3.4 基于技术视图的CPS体系结构

(1)CPS系统技术需求

需要从以下方面进行技术创新:从物理系统、控制系统、软件系统独立设计向集成的、优化的设计方面创新;从缺乏工程和物理定律的信息知识向CPS-认知和谙熟方面创新;从循环执行与人机交互相结合向高度自动、自治、协调的规模可变框架方面创新;从集中式处理、时间与空间分离向联邦式、分布式、开放型、可重构性方面创新。

(2) CPS 系统的技术视图

针对 CPS 系统的实时、安全、可靠的技术需求,通过对 CPS 基于系统视图的体系结构和基于功能视图的体系结构的深入分析研究,对 CPS 技术框架进行解读,提出了如图 5 所示的基于技术视图的 CPS 体系结构。将支持 CPS 的技术分为 4 个层次,即微电子技术^[17]、高级计算技术^[18]、网络通信技术^[19]和信息应用技术^[20]。

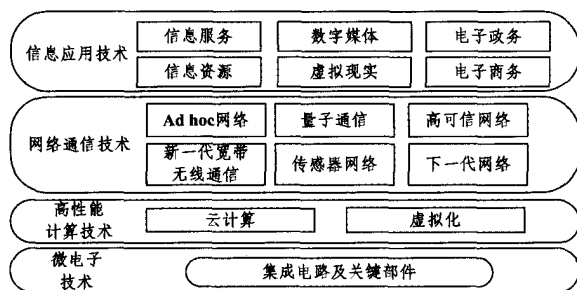


图 5 基于技术视图的 CPS 体系结构

同时,安全管理技术也用于维护 CPS 信息安全和系统管理^[21]。为维护 CPS 安全,防止恶意攻击,通过建立入侵检测系统,分别基于异常和签名进行入侵检测,为 CPS 的物理部件和通信系统提供保护。基于异常的入侵检测在感知层和执行层的应用较普遍,而基于签名的入侵检测对于网络层中的报文交换应用较普遍^[22]。对于系统管理软件及安全防护软件来说,可信计算也是一项重要技术^[23]。

4 研究展望

4.1 CPS 研究方向

CPS 作为一个新的研究领域,得到了国内外越来越多研究者的关注,但目前得到的研究成果较少,且尚不成熟。该领域存在着很多研究点值得关注,可以考虑的研究点包括:研究和集成 3C 技术,实现计算、通信与物理系统的一体化设计,为大型工程系统提供实时感知、动态控制和信息服务,如图 6 所示。

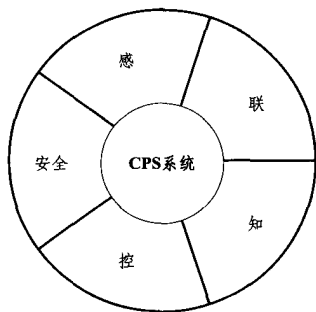


图 6 CPS 系统五大研究方向

(1)研究方向 1 “感”——获得物理世界数据,是信息世界处理和控制的基础。

(2)研究方向 2 “联”——异构网络资源以有线或无线的方式实现准确、高效、低能耗的通信,传递信息。

(3)研究方向 3 “知”——全面观察,准确理解,深刻推理,能处理海量感知数据,对数据进行整理、查询与计算。

(4)研究方向 4 “控”——融合设计、融合控制通过决策反馈到物理世界的控制模型与系统。

(5)研究方向 5 “安全”——维护信息与系统的稳定性,不受外部和内部的攻击。

4.2 CPS 挑战

CPS 挑战主要包括:具有时间、空间、物理和逻辑特性的 CPS 系统抽象;针对环境的不确定性、安全攻击、物理设备的错误,确立 CPS 的健壮性衡量标准,设置健壮性和安全性;可信的 CPS 应具有很高的可靠性、安全性、隐私和可用性;开发 CPS 组合理论,实现 CPS 异构系统之间的无缝整合;需要新的分布式实时计算和实时组通信方法,用于具有无线动态拓扑控制的移动组件的 CPS 系统的动态拓扑控制;需要处理分布在时间和空间中的事件,编程模型需要描述具备空间和时间特性的能力;编程抽象应该具备捕获物理特性和逻辑特性的能力;实时并行编程抽象应该在同时性模型基础上构建。

结束语 CPS 系统最终目标是协调物理进程。为了满足 CPS 的信息处理与物理控制功能性需求和实时性、可靠性、安全性、可适应性等非功能性需求,CPS 体系结构顶层设计是研究基础。从不同的角度出发,提出了 3 种基于不同视图的 CPS 体系结构,分别对 CPS 的系统架构、功能架构、技术架构进行了详细的阐述。理解和最终控制有关实时性能、安全和健壮性的可重构拓扑结构,将会对分布式 CPS 架构设计和控制产生极重要的影响。

参考文献

- [1] Broy M. Cyber-Physical Systems: Technological & scientific challenges[R]. Presentation Report, 2010
- [2] 林峰,舒少龙. 赛博物理系统发展综述[J]. 同济大学学报:自然科学版,2010,8(2):17-23
- [3] Rajkumar R, Lee I, Lui Sha, et al. Cyber-physical systems: The next computing revolution[C]// ACM/IEEE Design Automation Conf (DAC). Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 2010:731-736
- [4] Baheti R, Gill H. Cyber-physical systems [M]// The Impact of Control Technology. Washington D C, USA: IEEE, 2011:161-166
- [5] 何积丰. Cyber-physical Systems[J]. 中国计算机学会通讯,2010,6(1):25-29
- [6] La H J, Kim S D. A Service-based Approach to Designing Cyber Physical Systems[C]//2010 IEEE/ACIS 9th International Conference on Computer and Information Science. Yamagata, 2010: 895-900
- [7] Zhu Quan-yan, Rieger C, Basar T. A Hierarchical Security Architecture for Cyber-Physical Systems[C]// Resilient Control System (ISRC), 2011, 4th International Symposium on Topic (s): Communication Networking & Broadcasting. 2011:13-14
- [8] Dillon T S, Zhuge H, Wu C, et al. Web-of-things framework for cyber-physical systems[J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2011, 23(9):905-923
- [9] 王小乐,陈丽娜,黄宏斌,等. 一种面向服务的 CPS 体系框架[J]. 计算机研究与发展,2010,47(Suppl.):299-303
- [10] 谭明柳,舒坚,吴振华. 一种信息-物理融合系统体系结构[J]. 计算机研究与发展,2010,47(Suppl.):312-316
- [11] 张侃,张广泉,张茗泰. 一种可信的信息物理融合系统设计框架初探[J]. 计算机研究与发展,2011,48(Suppl.):242-246
- [12] 陈丽娜,王小乐,邓苏. CPS 体系结构设计[J]. 计算机科学,2011,38(5):31-34
- [13] Zhang Li-chen. Aspect-Oriented Formal Techniques of Cyber Physical Systems[J]. Journal of Software, 2012, 7(4):823-834
- [14] Lee E A, Seshia S A. Introduction to Embedded Systems, A Cy-

- ber-Physical Systems Approach[M]. Lee & Seshia, 2011
- [15] Mark-Oliver S, Minyoung K, Carolyn T. Toward distributed declarative control of networked cyber-physical systems[C]//7th International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing, Xi'an, 2010; 397-413
- [16] Jorge R B G, Sergio T K. Architecture for sensor networks in cyber-physical system [C] // Proc. IEEE Latin-American Conference on Communications, Bogota, 2010; 1-6
- [17] Vicaire P A, Hoque E, Xie Zhi-heng, et al. Bundle: A Group Based Programming Abstraction for Cyber Physical Systems[C]//Proceedings of the 1st ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems. 2010; 32-41
- [18] Lee E A, Seshia S A. Introduction to Embedded Systems, A Cyber-Physical Systems Approach[M]. Lee & Seshia, 2011
- [19] 胡雅菲, 李方敏, 刘新华. CPS 网络体系结构及关键技术[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(Suppl.), 304-311
- [20] Baheti R, Gill H. Cyber-physical systems[M]//The Impact of Control Technology Washington D C, USA; IEEE, 2011; 161-166
- [21] Bestavros A, Kfoury A, Lapets A, et al. Safe compositional network sketches; formal framework[C]//Proceedings of the 13th ACM International Conference on Hybrid Systems; Computation and Control. New York, USA; ACM, 2010; 231-241
- [22] Kim K H. Desirable advances in cyber-physical system software engineering[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing. California, USA; IEEE, 2010; 2-4
- [23] Dillon T, Potdar V, Singh J, et al. Cyber-physical systems; Providing Quality of Service(QoS) in a heterogeneous systems-of-systems environment[C]//Proceedings of 5th IEEE International Digital Ecosystems and Technologies Conference(DEST). Daejeon, USA; IEEE, 2011; 330-335
- [24] Wan Kai-yu, Hughes D, Man L L, et al. Composition Challenges and Approaches for Cyber Physical Systems[C]//2010 IEEE International Conference on Networked Embedded Systems for Enterprise Applications. Suzhou, 2010; 1-7
- [25] Ma Long-hua, Yuan Teng-kai, Xia Feng, et al. A high-confidence cyber-physical alarm system; Design and implementation[C]//2010 IEEE/ACM International Conference on Cyber, Physical and Social Computing. Stockholm, 2010; 516-520
- [26] Kim K H. Challenges and future directions of cyber-physical system software[C]//34th Annual IEEE International Computer Software and Applications Conference. Seoul, 2010; 10-13
- [27] Dragomirescu D. Cyber-Physical Systems for aeronautic applications[R]. Presentation Report, 2010. University of Toulouse, France 2010
- [28] Singh J, Hussain O, Chang E, et al. Event Handling for Distributed Real-Time Cyber-Physical Systems[C]//IEEE 15th International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing. China, 2012; 23-30
- [29] Huang Jian, Zhang Yan-sheng, Ling Yen I, et al. Real-time service-oriented distributed governance[C]//Proc. 2010 6th World Congress on Services. Miami, 2010; 479-484
- [30] Huang Huang-ming, Tidwell T, Gill C, et al. Cyber-Physical Systems for Real-Time Hybrid Structural Testing; A Case Study [C]//Proceedings of the 1st ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems. Stockholm, 2010; 69-78
- [31] Derler P, Lee E A, Sangiovanni-Vincentelli A. Modeling Cyber-Physical Systems[C]//Proceedings of the IEEE special issue on CPS. December 2011
- [32] Lakshmanan K, Niz D, Rajkumar R, et al. Resource allocation in distributed mixed-criticality Cyber-Physical Systems[C]//Proc. of International Conference on Distributed Computing Systems. 2010

(上接第 7 页)

- [47] Dong Xing-ye, Chen Ping, Huang Hou-kuan, et al. A multi-restart iterated local search algorithm for the permutation flow shop problem minimizing total flow time[J]. Computers & Operations research, 2013, 40; 627-632
- [48] Rajendran C, Ziegler G. Two ant-colony algorithms for minimizing Total Flowtime in permutation flowshops[J]. Computers & Industrial Engineering, 2005, 48; 789-797
- [49] Tasgetiren M, Pan Q-K, Suganthan P, et al. A discrete artificial bee colony algorithm for the Total Flowtime minimization in permutation flow shops[J]. Information Sciences, 2011, 181; 3459-3475
- [50] Pinedo M. Scheduling: theory, algorithms and systems (2ed) [M]. Englewood Cliffs, NJ; Prentice-Hall, 2002
- [51] Gelders L F, Sambandam N. Four simple heuristics for scheduling a flowshop[J]. International Journal of Production Research, 1978, 16; 221-231
- [52] Kim Y D. Heuristics for flow shop scheduling problems minimizing meantardiness[J]. Journal of the Operational Research Society, 1993, 44; 19-28
- [53] Armentano V A, Ronconi D. Tabu search for total tardiness minimization in flowshop scheduling problems[J]. Computers & Operations Research, 1999, 26; 219-235
- [54] Hasija S, Rajendran C. Scheduling in flowshops to minimize total tardiness of jobs[J]. International Journal of Production Research, 2004, 42; 2289-2301
- [55] Vallada E, et al. Minimising total tardiness in the m-machine flowshop problem; A review and evaluation of heuristics and metaheuristics[J]. Computers & Operations Research, 2008, 35; 1350-1373
- [56] Hasija S, Rajendran C. Scheduling in flowshops to minimize total tardiness of jobs[J]. International Journal of Production Research, 2004, 42(2); 289-301
- [57] Parthasarathy S, Rajendran C. Scheduling to minimize mean tardiness and weighted mean tardiness in flowshop and flowline-based manufacturing cell[J]. Computers and Industrial Engineering, 1998, 34; 531-46
- [58] Onwubolu G, Davendra D. Scheduling flow shops using differential evolution algorithm[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 171; 674-92
- [59] Onwubolu G C, Mutingi M. Genetic algorithm for minimizing tardiness in flow-shop scheduling[J]. Production Planning and Control, 1999, 10; 462-71
- [60] Framinan J M, Leisten R. Total tardiness minimization in permutation flow shops; a simple approach based on a variable greedy algorithm[J]. International journal of production Research, 2008, 22; 6479-6498
- [61] Vallada E, Ruiz R. Genetic algorithms with path relinking for the minimum tardiness permutation flowshop problem[J]. Omega, 2010, 38; 57-67