

基于信息物理融合系统的智能制造架构研究

张彩霞^{1,2} 程良伦¹ 王向东²

(广东工业大学自动化学院 广州 510006)¹ (佛山科学技术学院自动化系 佛山 528000)²

摘要 信息物理融合系统(Cyber Physical System, CPS)的特征和功能为离散制造的智能化生产和竞争力的提高提供了有效的思路和途径。本文在现有物联网的基础上,基于CPS概念并结合现有离散制造业的特点,构造离散型制造信息物理融合系统的基本架构,并对该架构和相应功能模块进行了分析。最后,从离散型制造CPS基础理论和系统模型、系统优化调度与自治机制、安全性、可靠性、系统的可验证性等几个方面阐述了离散型制造CPS所面临的挑战。

关键词 信息物理融合系统,离散型制造,物联网,智能制造

中图分类号 TP393 文献标识码 A

Research on Architecture of Intelligent Manufacturing Based on Cyber-physical System

ZHANG Cai-xia^{1,2} CHENG Liang-lun¹ WANG Xiang-dong²

(Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)¹

(Department of Automation, Foshan University, Foshan 528000, China)²

Abstract The characteristics and functions of cyber-physical system provide effective thinking and approach for discrete manufacturing intelligent production and competitiveness. Based on the existing networking and the concept of CPS and combining the existing discrete manufacturing industry structure characteristics, we constructed a discrete manufacturing physical system basic framework based on the CPS, at the same time, the framework and the corresponding function module were analyzed. Finally, several important research problems associated with the existing discrete manufacturing of CPS, including the discrete manufacturing CPS basic theory and system model, system optimization scheduling and autonomous mechanism, safety, reliability, system verification and so on, were elaborated.

Keywords Cyber physical system(CPS), Discrete manufacturing industry, Internet of things, Intelligent manufacturing

1 前言

离散型制造存在着产品品种多、个性化需求多、定制变化多,中小批量、单件生产混合,产品规格繁多、结构复杂、技术难度大,产品物料需求量大,外购件、外协件和标准件多,物流管理复杂等特点。同时,离散型制造业分布在诸如机械加工、电子元器件制造、汽车、家用电器、医疗设备等行业,范围较广。离散制造竞争力的提高必须与信息技术紧密结合,走智能化生产的道路。

近年来,制造技术正经历着由自动化、数字化、网络化向智能化方向发展的过程。智能制造逐步受到了工业界和学术界的广泛关注。智能制造除了制造过程本身要实现智能化外,还要逐步实现智能设计、智能管理、信息集成、全局优化,逐步提高制造系统的智能化水平,最终建立高效、灵活、可持续发展的智能制造系统。为实现制造系统的智能化,必须深入分析现有的制造架构,对离散制造系统现有的操作体系、通信方式、管理模式等系统模型进行高度的整合,分析其存在的问题与不足,全面引入先进的传感技术、控制技术、信息技术等,实现智能的离散型制造系统。信息物理融合系统(Cyber-Physical System, CPS)的出现为实现智能离散型制造系统提供了

一种全新的思路和有效的实现途径。

信息物理融合系统(CPS)的概念一经提出便受到国内外的广泛关注。CPS继承并发展了多个学科的不同技术,因此具有高复杂性,至今还没有一个全面而精确的定义。根据美国的国家基金委的定义^[1],CPS系统是一个将计算系统、感知系统、通信网络、控制系统及物理系统等高度集成的复杂的新型系统,它将计算与物理资源紧密结合。何积丰院士^[2]将CPS系统定义为: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,其能通过计算、物理的相互影响、反馈,实现对物理实体的安全可靠及高效、协同、实时的感知、监测与控制,最终实现信息和物理两个世界的完全融合,构建一个可信、可控、安全、高效的信息物理融合网络,从根本上改变人类构建物理系统的模式。

信息物理融合系统(CPS)强调物理世界与感知世界的交互,能自主感知物理世界状态、自主连接信息与物理世界对象、确定感知模型,自主判断,形成控制策略,自主调节,实现虚拟信息世界和实际物理世界的互联、互感、高度协同。CPS系统是现代物联网的提升和发展,虽然二者均强调物理世界的互联,但是物联网主要强调人对物理实体的控制作用,通信多数在物理实体、人之间进行,物理实体由于不能通信而无法

本文受国家自然科学基金(60673132),佛山市科技发展专项资金项目(FZ2010030),广东省自然科学基金(9152800001000026)资助。

张彩霞(1976-),女,博士生,主要研究方向为无线传感器网络安全、智能控制, E-mail: zh_caixia@163.com;程良伦(1965-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为智能与网络化系统等;王向东(1962-),男,教授,主要研究方向为数学应用。

实现 CPS 系统实体所能实现的自治能力;物联网中物理实体要有被识别的唯一编号^[4],要有数据发送器、传输通路和相应的接收器,而 CPS 中所有的网络节点、计算、通信模块和人自身都被视为系统中的一分子;CPS 比物联网具有更好的自主调节和适应性与协同性,是物联网的进一步延伸,能够实现人、物体、通信之间的最优控制。

CPS 具有非常广阔的应用前景,世界各国都相继对其展开了广泛、全面的研究并将其初步应用到生物、能源、交通、军事等多个领域。美国国家自然科学基金会连续多年对信息物理融合系统(CPS)相关技术的研究和相关领域的应用给予高度的重视和支持;在日韩等国,从 2008 年起 CPS 已备受关注;在我国,国家自然科学基金委员会公布的《未来 10 年中国科学发展战略·信息科学》^[5](2011—2020)将 CPS 列为优先发展领域之一。

基于以上 CPS 的发展、特点与应用背景,本文提出在现有的物联网的基础上,结合环境智能和普适计算等未来网络技术,根据离散制造业的特点,构造离散型制造信息物理融合系统的基本架构。该架构在以 RFID、全球定位系统、红外感应等物联网技术实现物品监测跟踪的同时,也能实现对离散制造业的生产、调度、销售、售后等各环节相关资源的实时控制和自主调节。

2 CPS 的综述

2.1 CPS 的基本概念

CPS 系统通过将先进的控制技术、通信技术、计算技术进行深度的融合与有机的协作,实现物理世界与虚拟世界的互联,它是具有自主感知、自主判断和自主调节治理能力的下一代智能系统。

CPS 通过通信网络对局部物理世界发生的感知和操纵进行可靠、实时、高效的观察与控制,能够实现大规模实体控制和全局优化控制,实现资源的协调分配与动态组织,实现信息世界与物理世界的高度集成以及多对多动态链接,实现并行计算和信息处理。

2.2 CPS 的基本功能逻辑单元

CPS 包括传感器、执行器和决策控制单元等基本组件。传感器和执行器通过嵌入到物理组件上实现对外界物理状态的感知与监测,同时接收决策控制单元的控制指令对物理对象进行控制,传感器与执行器是物理和计算世界的接口;决策控制单元接收传感器感知信息,根据实际用户定义的语义规则和控制规则生成控制逻辑,并将指令发送给执行器对物理对象进行操控,如图 1 所示^[8]。

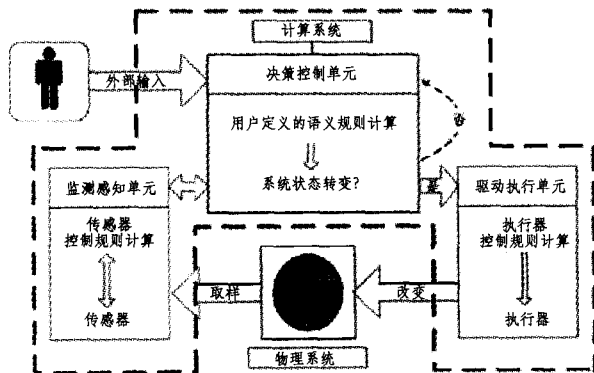


图 1 CPS 的基本功能逻辑单元

2.3 CPS 的特征和功能

CPS 与现有的物理世界和通信世界相比,在结构和性能方面具有以下几大特征^[3,6,7,8,9]:

- 1) 全局虚拟、局部物理性,信息与物理组件高度集成。
- 2) 深度嵌入性,嵌入式传感器与执行器嵌入每一物理组件,各物理组件都应具有信息处理和通信能力,具备计算、通信、精确控制、远程协调和自治 5 大功能。
- 3) 事件驱动性,通过对物理对象状态的感知形成控制决策作用于物理对象,从而形成基于事件驱动控制的闭环过程;
- 4) 自下而上的数据传输模式,CPS 系统数据从物理对象接口采集,而后不断提升、抽象,最终达到用户端口。该过程通过数据的不断融合为用户提供准确、全面的事件信息。实现资源的高效动态组织与协调分配,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) 系统具有自学习、自适应、自主协同功能,高度自治,满足实时鲁棒控制;
- 6) 系统安全、可靠、抗毁、可验证,CPS 系统必须在保证自身的安全性、隐秘性的基础上,抵御各类外部攻击,实现功能、结构各异的子系统之间的协调运行^[10]。

3 离散型制造 CPS 的系统架构

通过对文献^[11,12]的深入研究,结合离散制造业现有体系结构的特点,构造了离散型制造 CPS 的系统架构,如图 2 所示。

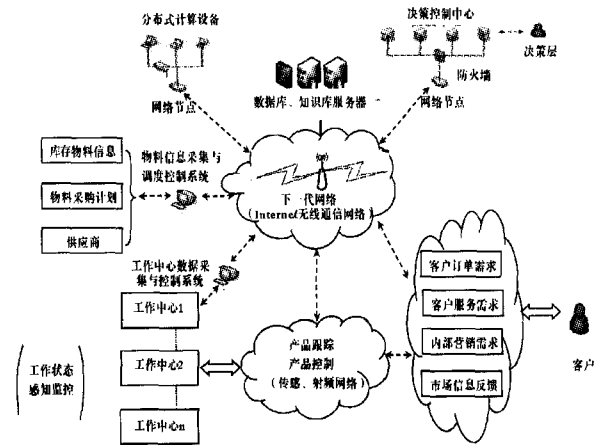


图 2 离散型制造 CPS 的系统架构

由图可知,离散型制造 CPS 主要由大量物理设备(各类产品及其零件的加工中心)、分布式数据处理设备(计算机、知识库服务器、执行器等)、信息采集设备(传感器、RFID 等)构成。这些设备的计算、传感、控制等信息通过通信网络连接起来,而物料、产品零件、产品销售等的流通过各级、各类控制中心采用现代物流流连接起来。离散型制造 CPS 不同于现有的离散制造系统,其主要特点是:离散型制造 CPS 系统中存在大量的分布式计算设备;具有比现存系统完善的信息采集系统;将有线网络与无线网络相结合;通过全局优化,能实现对物流、资金流、信息流的实时、集成、同步控制;能有效协调和优化处理供应链范围内的所有业务活动,实现全球采购、生产、销售和服务的业务处理。

具体主要由以下几部分构成:

- 1) 决策控制中心

决策控制中心是整个离散型制造 CPS 的核心,主要完成以下工作:通过网络收集所有采集设备所采集的系统,诸如:物料信息、采购信息、生产加工信息、销售信息、客户服务信息等;根据所采集的信息及时调整修正系统模型并进行各种分析;根据分析结果修正设计方案、调整物料采集、优化生产结构、调整营销策略等;同时,决策控制中心通过下一代互联网、无线传感器网络、RFID 系统、运输调度系统等各个子系统的协作实现整个离散型制造 CPS 系统的有序、高效运行;并且通过无线或传感网络即时接收产品的使用、运输等相关信息并实施相关的控制策略。

2) 分布式计算设备

离散型制造 CPS 需要实时处理海量多源动态制造业数据流,实现生产过程精确、最优控制,强大的计算和信息处理能力是实现这一目标的关键。已有的 EDI(Electronic Data Interchange)技术等无法满足离散型制造 CPS 的计算需求,可以考虑计算机系统网格技术、云计算、并行计算等技术构建新的离散型制造 CPS 的计算平台,通过整合系统中各种异构计算设备来满足离散型制造 CPS 的高效、准确、实时的计算特征。

3) 数据传输网络

离散型制造 CPS 的数据传输网络主要包括有线数据传输网络和无线数据通信网络。其中以现代计算机网络和实时无线传感网络为基础的传输网络构成了离散型制造 CPS 的数据传输网络基础。下一代互联网(NGI)和下一代网络(NGN)为离散型制造 CPS 的数据通信网络提供重要的支撑,其中的核心技术 Ipv6 可以提供丰富的地址资源^[11],为离散型制造 CPS 网络的产品、物料、生产设备等众多物理对象实现网络互联提供了丰富的网络地址资源,为实现物理对象的识别创造了基础。

无线网络通信用于连接生产设备的无线传感设备、物料和产品的射频传感设备及部分活动设备,为决策控制中心提供即时有效的检测数据。离散型制造 CPS 系统的无线传感应具有传感器与执行器并存的功能^[12],不仅能够检测状态,而且能够执行一些控制设备运行的指令。

4) 物料信息网络

离散型制造 CPS 物料信息网络包括:库存物料信息、物料采购计划、供应商等信息,这些信息通过网络即时、动态地传送给决策控制中心,决策控制中心根据 CPS 物料信息,在生产需求、市场需求、订单需求的基础上动态地定制采购计划,并通过物料信息采集与调度控制系统进行相关的分配,实现物料、采购、生产的优化组合,节约人力、物理,通过优化组合实现物料的智能调度,在一定程度上实现零库存。

5) 产品及配件加工网络

决策控制中心根据实时信息制定生产计划并将其分解成若干加工子任务信息传送给 CPS 网络系统的数据库。加工网络数据采集与控制系统从数据库中即时提取信息并将子任务分配给相应的生产者,生产者结点一旦接受该子任务,相应生产设备 Agent 将被允许从 CPS 网络系统的数据库读取必要的信息,并将其传送给加工中心,加工中心根据相应命令和数据完成需要加工的子任务,并将运行状态的相关信息发送给相应生产设备 Agent,向任务负责结点返回结果,提交该子任务。由于产品加工要经过不同的工序,各个工序的生产能力通常并不平衡,现存的离散制造业在生产上容易出现木桶

效应,生产被关键的瓶颈资源所制约,而离散型制造 CPS 网络通过实时的信息传输与有效地协调控制决策,有效地克服了这一点,使生产过程达到全局最优化。

6) 产品跟踪、控制网络

通过下一代无线通信网络实现产品跟踪及有效控制,对遍布全球的相应产品,即时采集使用信息、使用状态,为决策控制中心的生产计划调整提供依据,同时提高产品的有效服务水平,优化售后服务网络,对部分功能可通过内嵌的具有传感与执行功能的传感器进行控制修复,实现离散型制造 CPS 的产品的自我协调和自主控制。

4 离散型制造 CPS 的研究挑战

CPS 是一门新兴的技术,而离散型制造 CPS 更是一个崭新的研究领域,有很多难题需要解决。本文在分析现有 CPS 研究技术的基础上,结合离散型制造 CPS 的特点,指出离散型制造 CPS 面临的理论与技术挑战。

4.1 离散型制造 CPS 的模型基础

现有的离散制造物理系统建立在微分方程与代数方程的基础上,只关注系统功能的实现及细节的影响,其用户端是物品与物品之间进行信息交换和通信,不关注物理实体与信息在时间、空间上的连续性。克服离散型制造 CPS 系统的信息组件与物理组件的差异,实现物理空间和信息空间的感知互动,这涉及环境、感知、网络、处理、服务等各个环节和作用域的协同处理和反馈,其内在耦合关联的表征是上述协作机制的基础;同时,离散型制造 CPS 系统存在着普遍的高度混杂性和非确定性,如产品环境、传感器属性、计算终端类型、网络形态、信息处理方式、产品应用服务需求等,各因素紧密耦合且关联复杂,这对离散型制造 CPS 系统的共性建模、统一描述和系统设计等带来极大的挑战。

4.2 离散型制造 CPS 的优化调度与自治机制

离散型制造 CPS 的优化调度与自治管理是其运行的基础,为离散型制造 CPS 的信息感知、交互、处理和决策提供重要支撑。针对新的系统模型,必须研究与之相适应的优化调度和自治机制,基于竞争或分布式协作调度的思想,分别采用时空相关性分析、机会传输、组合优化等理论与技术,在 CPS 系统信息处理各个层次实施优化;实现一整套面向实时可靠服务需求的系统优化机制,最后,针对物联网的复杂性,分析物联网各层各类资源的耦合内容、形式以及相应的耦合强度,通过解耦变换、博弈、约束优化等理论和技术,研究设计系统跨层优化机制和算法。到目前为止,CPS 优化方面已经取得了一些研究成果,例如:利用先进的计算技术^[13]和中间件技术,通过构建虚拟的资源池,实现对系统硬件和计算资源的综合、高效的调度;通过 CPS 行为的调节^[14,15],设计任务调度控制算法,从而初步实现系统性能的预测并降低资源开销。但这些研究成果如何与离散型制造 CPS 结合,针对离散型制造 CPS 构建相应的优化调度与自治机制仍是未来研究的重点。

4.3 安全性

离散型制造 CPS 系统的安全不仅涉及到信息空间中信息传送、信息处理和数据的安全,更为重要的是 CPS 系统中大量的物理实体的决策操作的安全和物理实体所携带的数据的安全,因此,对系统的安全性提出了更高的要求。离散型制造 CPS 系统的物理、信息组件间的信息交互比物联网系统更

为频繁,且组件间具有更多的自由空间,使实现不确定复杂环境下对整个离散型制造 CPS 系统的各个环节进行不间断监控与管理成为极富挑战的关键问题。如何抵御系统外的恶意攻击,构建信息安全保障体系,必须从综合考虑 CPS 系统各个方面的特性入手,需构建预警、保护、检测、响应、恢复、反击、预警的循环安全保障体系,充分认识 CPS 系统在安全性防护中与传统信息系统的不同之处^[16],指导离散型制造 CPS 系统安全方案设计和建设,并结合网络科学、社会科学和动力学等知识进行行为发现、偏好分析等,实现对可能存在的威胁的感知和及时预警,实现系统的安全生产。

4.4 物理、信息可靠性

物理和信息的可靠性是离散型制造 CPS 系统安全运行的基础,可靠性分析是离散型制造 CPS 系统进行产品策划、系统设计、生产调度的基础。其可靠性分析应该同时考虑信息系统和物理系统间的相互影响,借助信息可靠性相对成熟的理论^[17-18],研究突发异常事件的预警及网络抗毁与级联事故预防技术,在提高物理可靠性和信息可靠性的同时,进一步研究两者的融合,以实现离散型制造 CPS 整个系统的可靠性。

4.5 离散型制造 CPS 的可验证性

制造业的工业环境验证理论与方法,是实现数据感知、传输、计算、海量数据处理与实际生产过程控制无缝融合的重要基础。以实现生产过程精确控制为目标,从系统能耗、处理速度、整体调度能力、内存消耗情况、死锁、隐私性等方面^[3]出发,全面评估离散型制造 CPS 系统中各个物理组件、信息组件的性能,并进行验证,结合先进的人机交互技术和系统仿真平台,对物理设备能量损耗、计算模块时耗、计算时延等开展研究,综合构建离散型制造 CPS 系统的验证和评估体系,这是离散型制造 CPS 系统设计的一大难题。

结束语 CPS 是全球信息技术和信息产业发展的新趋势,它将信息世界与物理世界紧密地结合在一起,深度融合并高度发展了计算系统、通信网络、控制系统、物理系统(传感系统、执行系统等)等系统功能,渗透在经济、生活、生产的各个领域,对现有的传统工业格局产生了深远的影响。

离散型制造业是现代制造业的一个分支,生产结构复杂、分布领域广泛。基于 CPS,本文提出在现代物联网的基础上构建离散型制造 CPS 系统,并对系统的架构和功能模块进行了分析。作为未来离散型制造业的基本架构,它实现了对现有离散型制造系统的全方位的提升,将先进的控制技术、计算理论、通信网络、制造技术等融入到离散型制造 CPS 系统中,代表了先进的离散制造发展趋势,高度融合了各类 CPS 的各种特性。

离散型制造 CPS 作为未来大规模 CPS 的一个子系统,仍是一个崭新的研究领域,面临着重大的挑战。本文从离散型制造 CPS 基础理论和系统模型、系统优化调度与自治机制、安全性、可靠性、系统的可验证性等几个方面阐述了离散型制造 CPS 需要解决的重要问题。

参 考 文 献

[1] National Science Foundation of the United States. Cyber physical system(CPS) program solicitation [EB/OL]. <http://www.nsf.gov/pubs/2010/nsf10515/nsf10515.htm>, 2010-07-01

[2] 何积丰. Cyber-physical Systems[J]. 中国计算机学会通讯, 2010, 6(1): 25-29

[3] 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): 1157-1165

[4] Oleshchuk V. Internet of things and privacy preserving technologies[C]//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

[5] Evans-Pughe C. Europe researches embedded systems with ARTEMIS [EB/OL]. http://www.Electronicsweekly.com/Articles/2006/05/15/38622/Europe_researches_embedded_systems_with_A_RTEMIS.html, 2010-03-21

[6] 中国国家自然科学基金委员会, 2010 项目指南: 重点项目[EB/OL]. http://www.nsf.gov.cn/nsfc/cen/xmzn/2010_xmzn/02/06.html, 2010-03-21

[7] 中华人民共和国科学技术部国家科技计划项目申报中心. 国家重点基础研究发展计划、国家重大科学研究计划 2010 年度重要支持方向 [EB/OL]. <http://program.most.gov.cn/htmledit/E9ED307C-D6A1-81D7-EE32-8C09D9FDEDA.html>, 2010-03-22

[8] 黎作鹏, 张天驰, 张菁. 信息物理融合系统(CPS)研究综述[J]. 计算机科学, 2011, 9(38): 25-31

[9] Rajkumar R, Insup L, Lui S, et al. Cyber-physical systems: the next computing revolution[C]//Proceedings of the 47th ACM/IEEE Design Automation Conference. California, USA; IEEE, 2010: 731-736

[10] Woo H, Yi Jian-Liang. A Simulation Framework for PSoC Based Cyber Physical Systems[C]//Proceedings of International Conference on Distributed Computing Systems. 2008: 525-528

[11] 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. 2009: 44-45

[12] Tan Y, Goddard S, Prez L C. A prototype architecture for cyber-physical systems[J]. ACM SIGBED Review, 2008, 5(1): 26

[13] Kang K, Son S H. Real-time data services for cyber physical systems[C]//Proceedings of the 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Washington D. C., USA; IEEE, 2008: 483-488

[14] Easwaran A, Insup L. Compositional schedule ability analysis for cyber physical systems[J]. ACM SIGBED Review, 2008, 5(1): 6

[15] Zhang F M, Wolf S K, Task W. scheduling for control oriented requirements for cyber-physical systems[C]//Proceedings of the Real Time Systems Symposium. Barcelona, Spain; IEEE, 2008: 47-56

[16] Dillon T, Potdar V, Singh J, et al. Cyber-physical systems: Providing Quality of Service(QoS) in a hetero-generous systems-of-systems environment[C]// Proceedings of 5th IEEE International Digital Ecosystems and Technologies Conference (DEST). Daejeon, USA; IEEE, 2011: 330-335

[17] Sieteng S, RAI S. An efficient cutset approach for evaluating communication-network reliability with heterogeneous link capacities[J]. IEEE Trans on Reliability, 2005, 54(1): 133-144

[18] Zhang R R, Zhao Z Y, Chen X, et al. Design and implementation of a RBD-based algorithm for reliability analysis of electric power communication network[C]//Proceedings of Asia and Pacific Transmission & Distribution Conference & Exposition. Seoul, Korea, October 2009: 26-30