

CPPS及在航空领域的应用*

王 勃, 杜宝瑞, 王金海

(中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司, 沈阳 110034)

[摘要] 赛博物理生产系统(Cyber-Physical Production Systems, CPPS)目前已成为工业界与学术界的研究热点,各制造强国也纷纷将其作为提升本国制造业全球竞争力的核心技术之一。首先详细阐述了赛博物理系统(Cyber-Physical Systems, CPS)以及CPPS的概念,并提出了CPPS的5个关键特征;其次,指出了CPPS研究中所重点关注的技术领域;最后,介绍了CPPS在航空领域的应用以及对我国制造企业的启示。

关键词: CPPS; CPS; 航空; 制造; 赛博安全

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.13.067



王 勃

工学博士,毕业于北京航空航天大学航空宇航制造工程专业,中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司特殊引进高技术人才,长期以来专注于飞机数字化制造及智能制造技术的研究与应用。

新世纪以来,尤其是2008年金融危机之后,欧美等西方发达国家的经济情况受到不同程度的冲击,各国政府意识到将经济核心置于金融以及房地产等领域的不确定性。为了振兴经济,各工业强国推出了一系列先进制造业的发展规划,如美国先进制造业国家战略计划、德国工业4.0、英国“制造的未来”等。与此同时,新兴技术与产业的发展成为全球经济增长的一个亮点,大数据、物联网、移动互联网等新概念、新技术、新产品层出不穷,制造业正在经历第4次具有颠覆性意义的变革。促成前3次工业革命的关键技术要素分别为动力技术、电气技术以及信息技术,而本次变革的关键推动要素之一就是赛博物理系统(Cyber-Physical Systems, CPS)。

CPS最早由美国提出^[1-3]。近年来,其理论与技术的研究不断深入和进步,目前已成为先进制造业发展的关键技术之一。2006年,美国自然科学基金会宣布将该系统作为国家科研核心课题。自2012年起,欧盟开始启动与嵌入式系统以及CPS技术相

关的战略研究与开发计划,并计划在10年内投入70亿美元,以期在此领域占据世界领导地位。2013年,德国正式发布“工业4.0”实施建议,将CPS作为其3大核心技术要素之一,并明确提出要为CPS技术和产品建立和培育新的主导市场。如今,我国制造业也将受益于CPS技术的发展,先进机器人、智能生产线、智能工厂等技术的推广与应用正在带动我国制造业的转型升级^[4-8]。

CPS与CPPS

1 CPS

CPS是指由计算机、网络等信息介质以及具备物理输入输出且可相互作用的物质实体组成的网络。CPS不同于互联网的独立设备,也不同于没有物理输入输出的单纯网络。从嵌入式系统到CPS的演化过程如图1所示。

由图1可知,CPS的提出是在最初嵌入式系统的基础上,融入了感知、网络、智能计算等技术逐步演进而来的。在CPS集成化的网络、信息处理、传感以及驱动技术使得赛博

* 基金项目: 2015年工信部智能制造系统层级模型及水平评价体系专项。

空间与物理设备深度融合,进而使系统达到足够的智能并能在多变的环境中应对多变的需求。未来,CPS将越来越依赖于计算单元。因此,计算单元必须具有足够高的可依赖性、物理安全性以及信息安全性^[9-11]。

从这个角度上来看,智能机器人、智能物流系统、智能数控机床等都可称作CPS。随着技术的发展,这种智能化系统在工业界所发挥的作用越来越明显。与此同时,这些系统的应用并不意味着削弱了人在系统中的重要性,而是改变了人的角色,同时也改变了系统对人类技能的需求。

2 CPPS

赛博物理生产系统(Cyber-Physical Production Systems, CPPS)

是CPS在制造领域的一种具体形式,它的出现一方面依赖于计算机技术、信息技术、数据分析技术等的发展;另一方面也依赖于制造领域中制造装备、先进工艺等技术的突破。对企业而言,CPPS能够使其中的设备、设施、人等各种生产要素实现互联互通,并能够进行信息交换和实时控制,这有利于从根本上改善包括制造、工程、材料使用、供应链和全生命周期管理的工业过程。对于整个制造业而言,CPS能够使不同地域、不同行业的企业、科研院所、政府等组织实现高效合作,并在全球领域内形成良性的、优化的制造业生态环境。

CPPS的基本结构与原理如图2所示。在赛博空间中,包含了产品全生命周期中所有对象及其活动的模

型与知识,通过这些模型与知识,制造过程中的所有环节将能够在赛博空间中得到基于全资源的仿真与优化,进而发现并避免生产过程中存在的问题及风险。这有赖于对物理系统及其行为的建模与仿真技术,以及基于这些模型对物理系统可能发生的紧急情况的预测与处理等技术。物理系统中包含了大量能够自主运行并相互合作的元器件或子系统,如智能制造设备、智能物流系统、智能产品等。赛博空间与物理系统之间的组织模式、过程控制、信息传递等方式将更加多样化,并可能根据需求实时发生动态变化,这与传统的自动化生产中的“金字塔模型”之间存在显著不同,如图3所示。

此外,作为系统中最重要决策者,人与具有部分智能的机器共同构成决策主体,并在CPPS中也将发挥重要的作用。在CPPS中,人工智能将广泛应用于制造过程的各阶段、各环节,并构成具有不同程度智能行为的智能执行单元。每一智能执行单元均包含人与“机器”,两者之间实现交互,共同构成决策主体。人进行基于知识与经验的思维,形成正向和主导的决策与指令;具有智能行为的机器通过自检、自分析,形成自适应的决策调整,反馈到系统的前端,构成新一轮的决策指令,并丰富知识与经验积累。多个智能执行单元共同组成特定的智能制造系统,其中,赛博系统与物理系统互为支撑、深度融合。

CPPS 的特征

CPPS具有如下特征:高度自主化、赛博物理深度融合、人机交叉融合、生产灵活高效、定制化生产。

(1) 高度自主化。

赛博空间中具有整个制造系统与制造过程的完整模型,能够对物理系统中的实际制造过程进行全过程的仿真。同时,赛博空间中具有支持

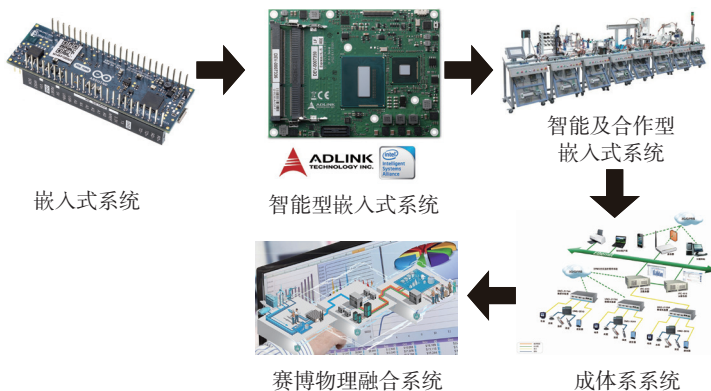


图1 从嵌入式系统到赛博物理系统的演进

Fig.1 Development from the embedded system to the CPS

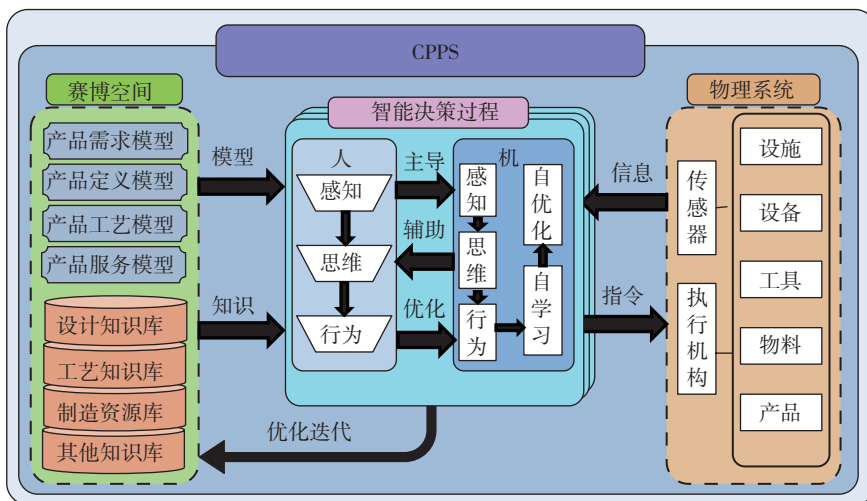


图2 CPPS的基本结构与原理

Fig.2 Basic structure and principle of the CPPS

生产过程决策的设计、工艺、制造等相关知识,这些知识能够用于支持系统对制造过程的决策。在生产过程中,物理系统中的元器件能够采集相关制造数据并将这些数据传递到赛博空间,赛博空间将基于历史数据及实时数据进行系统优化。通过这一闭环过程的不断迭代,CPSS拥有了自学习、自决策、自主控制等能力,并且随着系统的运行,系统中的知识不断积累,系统的智能化程度不断提升,自主性也随之逐步完善。

(2) 赛博物理深度融合。

在传统的自动化生产系统中重点关注生产过程的实时控制。而在CPSS中,赛博空间与物理系统进行深入交互与融合,并实现对制造活动的先验预判、实时控制以及后置优化,如图4所示。在制造过程开始之前,赛博空间首先对制造过程进行全资源的仿真,验证制造方案的正确性;在制造过程中,赛博空间与物理系统之间进行实时控制与数据传递,并实时优化制造过程;在制造过程完毕之后,赛博空间将通过对本次制造过程的分析,进一步抽取其中的数据,通过分析形成制造知识,并服务于后续的制造过程。

(3) 人机交叉融合。

如前所述,与自动化制造中所强调的“无人制造”不同,人在CPS中占有非常重要的地位,人与“机器”共同组成决策主体且人机分工的方式发生了显著变化。如图5所示,从劳动量的角度来看,基于CPSS人类大量的体力劳动将被机器取代,且人类的少部分脑力劳动也将被机器取代。从劳动的复杂度来看,繁琐复杂的人类体力劳动将逐渐减少,人类将更加专注于复杂度较高的脑力劳动,而机器能够从事的辅助性智能劳动将明显增多。

随着CPS的灵活性与可依赖性程度不断提升,人类与机器之间的信息交互内容与交互方式也正在逐渐

丰富,协作过程更加安全顺畅。目前,大量的先进技术手段也将改变人类的劳动方式,例如增强现实技术目前已在制造领域中得到广泛的应用。如图6所示,工人在安装飞机上的电

缆管路时,通过佩戴专业化的眼镜,能够直接观测管路的接头位置,进而避免了错装、漏装等错误。基于人机工程学研发的可穿戴设备正在制造业中推广应用,这些设备的应用显著

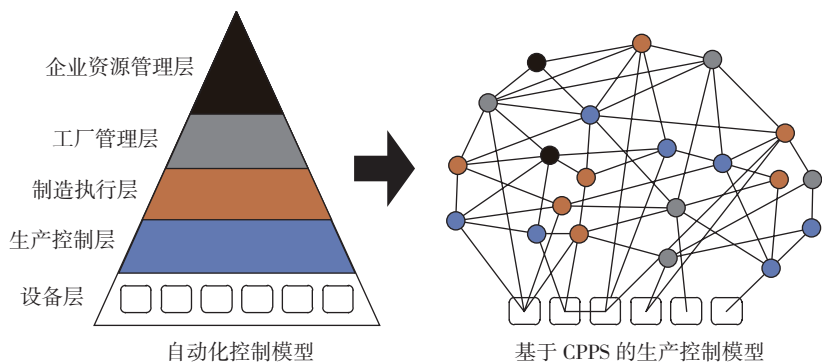


图3 生产控制模型的转变

Fig.3 Change of the production control model

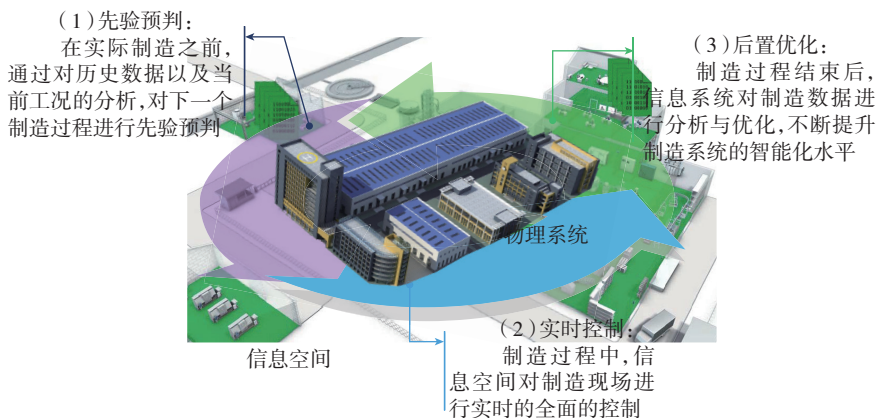


图4 赛博空间与物理系统的深度融合

Fig.4 Combination of the cyber space and the physical system

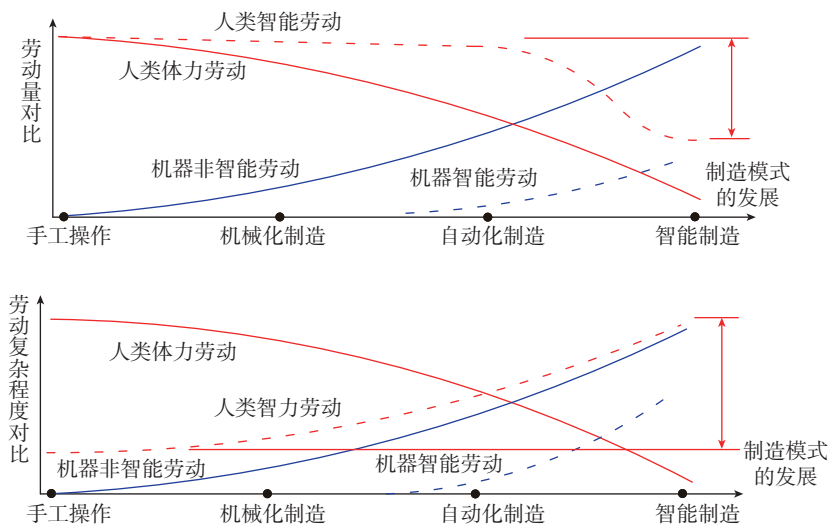


图5 赛博物理生产系统中人类与机器劳动的变化

Fig.5 Changes of the human and machine labor in the CPSS

降低了人类劳动的劳动强度。

(4) 制造系统灵活可控。

计算机技术、通信技术突飞猛进的发展,近年来正在逐渐与制造业发生融合,并推动着制造业的不断进步。在CPS中,具有自主性、可自我调节的生产资源形成一个循环网络,通过大量智能技术的运用,制造系统的自动化、柔性化水平逐步提高,系统单元之间能够根据需求实现灵活的组织重构,与传统自动化制造相比,企业可以根据形势与环境来控制、调节智能制造资源网络与生产过程,制造系统的灵活性更为显著。

(5) 定制化、众包众创生产。

由于制造系统具有非常高的灵活性,企业面对客户定制化需求,可以高效、快速且成本低廉地实现制造系统的重组,即便是生产很小批量的产品也能够获利。同时,通过全价值链的集成,具有特殊需求的用户可以直接或间接地参与生产过程,可以更好地支持产品的定制化生产。随着CPPS的不断延拓,制造企业将在全社会领域内形成全新的制造生态环境,制造过程中的各个环节将会交由更加专业化的人员或单位专门负责,专业分工将更加细致和灵活。这些制造技术与模式的变革将使制造业形成定制化、众创化的生态环境,极大满足了未来社会对制造的复杂需求。



图6 可穿戴设备在制造中的应用

Fig.6 Application of the wearable devices in manufacturing

CPPS 所涉及关键技术领域

CPPS 涉及到信息技术、制造技术、计算机技术以及智能分析技术等各个领域,国内外针对 CPPS 的研究也较为广泛。但从总体来看, CPPS 的研究与实施重点关注于如下几个领域。

1 CPPS的建模

对于 CPPS 而言,如何在赛博空间中建立生产系统的模型,进而支持对生产系统的仿真、控制和优化是一项首要工作。在过去数十年中,已有大量针对生产系统建模的研究,且已经形成了若干建模标准,这些标准能够根据需求从不同的维度描述不同的制造系统^[12-14]。为了使这些标准能够适用于 CPPS 各环节的建模过程,目前业界正在研究的方向包括:

(1) 建模标准的专业化与拓展。为了保障在建模过程中覆盖尽可能多的需求,建模语言需要面向制造过程中的细节进行专业化的定制,并针对制造业的特殊需求进行拓展。为此,建模标准应具有内部拓展能力,在不改变建模标准基本架构的条件下引入专业化的概念。

(2) 建模语言的语义与语法完善。建模语言标准定义了抽象或具体的语法,但是仍需要研究如何能够将制造系统中的制造过程通过建模语言中的具体语法描述出来。

(3) 建模语言对制造系统实时性或突发性行为的描述。目前,建模语言标准通常用于系统的设计,然而,系统执行过程中的某些实时性行为、突发行为也需要在建模语言中进行描述。建模语言标准必须能够支持在此方面的定义。

2 赛博空间与物理系统的集成

如前所述,CPS 中的网络不同于没有物理输入输出的计算机网络,也不同于没有网络的单机设备。CPS 中的网络要求具有高度的实时性。此外,网络终端多连接的设备可能具有不同的系统、数据接口、通信标准等。因此,从本质上讲,CPS 通常是一个复杂的异构系统。复杂的 CPPS 中将会集成大量的异构、分布式组件或系统,这些组件或系统必须能够高效地协同工作。实现这一目标首要解决的就是一种标准化的术语体系、一种统一的建模语言,以及用于描述赛博空间与物理系统之间信息交互的软硬件规范体系。

3 赛博物理安全问题

对于 CPPS 而言,网络的大规模应用将使信息安全威胁进一步扩大,而深度的人机交互则需要确保人与设施在物理系统中的安全性^[15-16]。

赛博安全将涉及到国防信息安全、私人信息安全、系统完整性以及知识产权等方面。从目前来看,赛博安全所关注的问题包括赛博安全的评价体系,对赛博威胁的主动防御,以及应对瞬时赛博攻击而采取的容灾或备份机制等^[17-18]。CPPS 中的网络通信是整个系统中赛博安全要求最高的环节。赛博攻击通常会在通信过程中监控、干涉赛博空间,进而对物理系统中的设施进行破坏,或导致关键流程的失灵。因此, CPPS 通信中适当且可承受的信息安全是 CPPS 中首先需要考虑的因素。目前,工业界已经能够为基于 IP 的通信提供主动防御,并有效地拦截已知或可预测的攻击事件。但是,由于 CPS

可能存在未知的安全脆弱环节,目前的主动防御措施并不足以应对专门针对这类环节的新形式攻击或是未预测到的攻击。针对这一类的攻击,在 CPPS 中引入态势感知技术将是一种有效手段。态势感知^[19]就是在大规模系统环境中,对能够引起系统状态发生变化的安全要素进行获取、理解、显示并预测未来的发展趋势。通过态势感知,当系统遭受威胁时能够自动激发反馈并实现自我保护功能。

物理安全也是 CPPS 需要重点考虑的问题。制造过程中存在大量的人机混合作业以及机器与机器互操作的场景。在此方面,首先需要保障人类在操作过程中的人身安全,这主要涉及到机械损伤、辐射等方面的保护;其次,需要重点关注因系统出现故障而产生安全隐患时的处理模式。

CPPS 在航空领域中的作用

对于航空制造领域而言, CPPS 是确保质量、提高效率、控制成本的新手段,是增强产品快速研制能力的新途径,是企业组织与流程变革的新动力,也是推进先进制造技术的新引擎。

国外在 CPPS 领域的研究较早,目前,西门子、GE 等工业巨头已经开始基于 CPPS 的理念着力打造智能化工厂以及智能化的应用平台。如 GE 公司开发并推出了 Predix 平台,该平台是一款集成了大数据分析、物联网、智能设备等技术的开放性软件平台,制造企业可以在此平台上开发新的应用,从而实现对企业数据的分析、预测等功能,进而提升设备的综合效能。Predix 平台中包含了数十种面向智能制造的产品或软件系统,涉及到的功能包括以下几方面:

(1) 设备通信。提供与设备连接的基本功能,从设备及过程中提取数据,并通过数据管理提取有效信

息。

(2) 现场监控及数据可视化。帮助企业管理者了解设备等资产的运行情况,并将正在发生的事件可视化显示。

(3) 数据分析。提供基于历史数据以及实时数据的分析功能,进而使用户理解数据间的关系,并能高效地解决问题。

(4) 基于分析的预测。通过先进的预测性分析与故障预判,保障关键设备自动连续运行。

(5) 基于分析的优化。优化生产流程,并使设备的性能最优化,达到企业所定制的目标。

经过数十年的发展,我国航空企业在数字化、信息化等领域获得了长足的进展,但是在自动化、智能化等方面与国外先进水平仍存在较大差距。具体而言,主要表现在两个方面。首先,制造效率较低。目前,单机设备的应用尚未发挥其最大效能,加工参数选取较为保守,主轴利用率较低。同时,设备组线的程度较低,多数设备处于单机运行状态,装夹等生产准备周期较长,并未发挥设备的规模效益。其次,制造过程受人为因素的影响较大。在工艺设计、车间排产、零件加工与装配、质量检测等生产的各个环节,大多会受到人为因素的影响。

为此,我国航空企业应遵循 CPPS 的思路,着力对制造流程进行梳理和优化,并重点从以下方面考虑:

(1) 制造知识库的构建。

知识是智能的基础,基于知识的制造过程决策则是飞机制造智能化的灵魂所在。在赛博空间中,基于现有知识通过人工智能手段实现制造过程的自动决策及优化,同时不断更新与完善制造知识,使物理系统能够更快地响应新型产品的研制需求。航空制造企业在多年的飞机研制过程中积累了丰富的工艺知识。然而,现阶段大量的知识尚无法以独

立的形式存在,而是依存于富有经验的工程师,或是被固化在特定的智能制造系统中。这使得企业无法对这些知识进行有效的维护、应用、拓展及共享。此外,由于工艺设计与制造人员的水平及工作习惯不尽相同,且在工作过程中又缺乏优化的作业规范,致使产品加工效率低及加工质量差等问题频发。因此,在赛博物理生产系统的框架下建立制造知识库,并在此基础上构建制造过程智能决策体系是赛博物理生产系统的基础工作。

(2) 制造大数据的应用。

制造数据是一个企业中的宝贵财富,通过对制造数据的分析能够发现制造过程中的问题,并能够对制造过程进行优化。目前,我国企业大多实现了数字化,并实现了制造数据的采集和存储,但是目前针对这些数据的分析还较少。我国企业应着眼于从海量的制造数据中寻找隐藏其间的关系和联系,进而揭示智能工厂制造过程的运行规律。

(3) 改变工人在制造过程中的角色。

综上所述,人为因素对制造过程的影响较大,往往成为导致产品质量不稳定的主要原因。同时,这种问题主要发生在工人的体力劳动方面。为此,改变工人在劳动中的角色以及劳动方式尤为重要,这将涉及到对工人的培训、新型工具、设施的研发等一系列工作。

结束语

CPPS 给制造业所带来的变化将是颠覆性的,将远远大于过去几十年以来计算机技术与信息技术所带来的变化。未来,具有高度可靠性、安全性、可依赖性的 CPPS 将能够实现如今难以想象的功能。目前,国外先进企业正在开展 CPPS 的实践,我国企业也应当从中得到启发,消化其中的核心理念,并积极在生产中实践,

进而助推企业的发展。

参考文献

- [1] 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, 38(8):1243-1248.
- LIN Feng, SHU Shaolong. Review of the development of cyber physical systems[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2010, 38(8):1243-1248.
- [2] RHO S, VASILAKOS A V, CHEN W. Cyber-physical systems technologies and applications[J]. Future Generation Computer Systems, 2016,56: 436-437.
- [3] SEUNGMIN R, ATHANASIOS V, VASILAKOS, et al. Cyber physical systems technologies and application-Part II[J]. Future Generation Computer Systems, 2016,61: 83-84.
- [4] 张伦彦. 面向工业 4.0 的精益生产线设计和实施方法[J]. 航空制造技术, 2014(18):44-47.
- ZHANG Lunyan. Lean production line design and implementation method for industry 4.0[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(18):44-47.
- [5] 刘丹鹤. 赛博空间与网际互动——从网络技术到人的生活世界[D]. 上海: 复旦大学, 2004.
- LIU Danhe. Cyberspace and network interaction—from network technology to life world[D]. Shanghai: Fudan University, 2004.
- [6] 沈苏彬, 杨震. 工业互联网概念和模型分析[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2015, 35(5):1-10.
- SHEN Subin, YANG Zhen. Analysis on the concepts and models of the industrial internet[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science), 2015, 35(5):1-10.
- [7] 张曙. 工业 4.0 和智能制造[J]. 机械设计与制造工程, 2014(8):1-5.
- ZHANG Shu. The industry 4.0 and intelligent manufacturing[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2014(8):1-5.
- [8] 周济. 智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015(17): 2273-2284.
- ZHOU Ji. Intelligent manufacturing—main direction of “made in China 2025” [J]. China Mechanical Engineering, 2015(17):2273-2284.
- [9] 杜宝瑞, 王勃, 赵璐, 等. 航空智能工厂的基本特征与框架体系[J]. 航空制造技术, 2015(8):26-31.
- DU Baorui, WANG Bo, ZHAO Lu, et al. The basic characteristics and framework of the smart factories in aviation industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(8):26-31.
- [10] ZUEHLKE D. Smart factory: towards a factory of things[J]. Annual Reviews in Control, 2010,34(1):129-138.
- [11] 吴巍. 赛博空间与通信网络安全问题研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2011,6(5):473-476.
- WU Wei. The research of cyberspace security and communication network problems[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2011,6(5):473-476.
- [12] MORDINYI R, BIFFL S. Versioning in cyber-physical production system engineering—best-practice and research agenda[J]. IEEE/ACM International Workshop on Software Engineering for Smart Cyber-physical Systems, 2015, 27(6):44-47.
- [13] CRENSHAW T L, GUNTER E, ROBINSON C L, et al. The simplex reference model: limiting fault-propagation due to unreliable components in cyber-physical systems architectures[C]//The 28th of IEEE International Real-Time Systems Symposium. New York: IEEE, 2007:400-412.
- [14] 刘厦, 王宇英, 周兴社, 等. 面向 CPS 系统仿真的建模方法研究与设计[J]. 计算机科学, 2012, 39(7):32-35.
- LIU Sha, WANG Yuying, ZHOU Xingshe, et al. Research and design for the modeling of simulation of CPS[J]. Computer Science, 2012, 39(7):32-35.
- [15] 谢宗晓. 信息安全、网络安全及赛博安全相关词汇辨析[J]. 中国标准导报, 2015(12):30-32.
- XIE Zongxiao. Discrimination of information security, network security, cyber security and so on[J]. China Standards Review, 2015(12):30-32.
- [16] SOLMS R V, NIEKERK J V. From information security to cyber security[J]. Computer & Security, 2013,38(4):97-102.
- [17] GAHAM M, BOUZOUIA B, ACHOUR N. Cyber-physical production systems combined with logistic models—A learning factory concept for an improved production planning and control[J]. Procordia Crip, 2015, 32:92-97.
- [18] MONOSTORI L. Cyber-physical production systems: roots, expectations and R & D challenges[J]. Procordia Crip, 2014, 17:9-13.
- [19] CANEDO A, JIANG W, FARUQUE M A A. Functional modeling compiler for system-level design of automotive cyber-physical systems[C]//Proceedings of IEEE/ACM International Conference on Computer-aided Design, 2015:39-46.

CPPS and Its Applications in Aviation Industry

WANG Bo, DU Baorui, WANG Jinhai

(AVIC Shenyang Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Shenyang 110034, China)

[ABSTRACT] Cyber-physical production systems (CPPS) has become the research hotspot both in the industry and academia, and the manufacturing powerhouses have also regard CPPS as one of the key techniques to enhance the global competitiveness of its manufacturing industry. The concepts of cyber-physical systems (CPS) and CPPS are detailed firstly, and five key features of CPPS are pointed out. Then, some important technical fields in the research of CPPS are given. Finally, the application of CPPS in the aviation field is introduced and its enlightenment for China manufacturing enterprises is elaborated.

Keywords: CPPS; CPS; Aviation; Manufacturing; Cyber security

(责编 古京)