

CPS: 可以持续传承的智能系统

CPS

Cyber-Physical System

新一代工业智能

The New Generation of Industrial Intelligence

[美] 李 杰 (Jay Lee)

邱伯华 刘宗长 魏慕恒

著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

CPS

Cyber-Physical System

新一代工业智能

The New Generation of Industrial Intelligence

[美] 李 杰 (Jay Lee)

邱伯华 刘宗长 魏慕恒

著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

赛博-实体系统(Cyber-Physical System, CPS),相较于传统工业系统,它更关注于机器自主认知、预测和决策能力的实现,并在此基础上,实现工业和信息系统在感知、分析、决策、控制和管理等方面的深度融合。本书立足于工业领域的现状和发展需求,共有6个篇章,分别是现代工业的挑战与机遇、CPS的技术本质与内涵、CPS的技术体系与工业智能实现、CPS的应用体系与智能体(agent)实现、CPS的应用实践案例、CPS为中国产业升级带来的机会空间。

本书是中国首本系统介绍CPS理论和应用的图书,为中国工业迈向智能时代带来新思维和新路径,可作为产学研各个领域学习及发展CPS技术的参考资料。同时,本书也适合对制造领域感兴趣的大众读者阅读,并能为广大读者带来创造性的启发。

图书在版编目(CIP)数据

CPS: 新一代工业智能/[美]李杰(Jay Lee),邱伯华,刘宗长,魏慕恒著;—上海:上海交通大学出版社,2017
ISBN 978-7-313-16769-9

I. ①C… II. ①李…②邱…③刘…④魏… III. ①智能制造系统—制造业—研究 IV. ①F407.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第041189号

CPS: 新一代工业智能

著 者:	[美]李 杰(Jay Lee),邱伯华,刘宗长,魏慕恒	地 址:	上海市番禺路951号
出版发行:	上海交通大学出版社	电 话:	021-64071208
邮政编码:	200030		
出 版 人:	郑益慧		
印 制:	山东临沂新华印刷物流集团有限责任公司	经 销:	全国新华书店
开 本:	880mm×1230mm 1/32	印 张:	6.875
字 数:	113千字		
版 次:	2017年4月第1版	印 次:	2017年4月第1次印刷
书 号:	ISBN 978-7-313-16769-9/F		
定 价:	49.8元		

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系
联系电话:0539-2925628

序 一

Cyber-Physical System(CPS),目前在中国被译为信息-物理系统或赛博-物理系统,但是这些译名在国内许多产学研专家中引起了一些争议,认为它们并不能表达 CPS 的真正内涵。美国国家科学基金会(NSF)在 2006 年首次提出 CPS,并将其作为重点资助的前沿技术方向。在过去几年中,CPS 的概念已经开始广泛影响许多国家的先进制造业和工业转型的战略,如美国总统科学技术顾问委员会将 CPS 列为未来竞争力技术的首位,德国也以 CPS 为核心制定了“工业 4.0”国家战略。德国所推动的是以制造为导向的赛博-物理制造系统(Cyber-Physical Production System, CPPS),而美国 CPS 的研究是以更广泛的产业应用及国家安全为导向。中国也在探索自己的工业转型之路,相继提出了“两化融合”“互联网+”和“中国制造 2025”等国家战略,并将 CPS 列为主要技术方向。然而,在国内的学者、企业和政府对 CPS 的探索过程中,由于对它的定义和解释不能达

成共识,所以在科研和产业化投入方面始终没有找到非常准确的方向。CPS 对中国企业的重要性不言而喻,在过去三十年快速成长的历程中,中国工业引进了许多国外先进产业和装备,也在一些产业领域逐渐形成了自己的核心竞争力,如高铁、风电、光伏、航空航天等;但是在一些核心零部件及装备上依然存在缺口,对中国工业的可持续发展造成了瓶颈,这背后的深层原因是制造知识的缺失。如果 CPS 能够利用大量的制造和运维数据促进知识的产生和传承,就可以帮助中国制造加快缩短核心技术的步伐。

我与李杰教授相识二十多年,一直关注李杰教授及他建立的智能维护系统(IMS)研究中心所从事的科研活动。李杰教授从 2000 年开始致力于工业智能维护系统和工业大数据的研究及产业化应用,并最早提出了孪生模型(Twin Model)的概念。2014 年,美国 NSF 给 IMS 中心颁发“国家科技创新奖”,以表彰 IMS 中心对全球工业界所产生的影响,其中包括对工业互联网、赛博-物理系统和工业大数据等新兴产业方向和技术概念的催化作用。李杰教授认为,CPS 是可以实现知识挖掘和创新的手段,他在这本书中,从 CPS 的来源、定义、系统技术、应用体系和案例等方面做了系统性的阐述,并首次提出将 CPS 译为“赛博-实体系统”更加合适,书中涉及的案例涵盖了智能控制、智能管

理、智能运维、智能服务和智能体系等多个方面。这些案例具有广泛的代表性和体系性，能够为中国探索自己的智能化升级道路提供很好的借鉴。同时，这本书也解释了美国和德国等国家，在推动工业智能化升级的过程中的优势及缺口，强调了中国如何根据自己的国情来利用 CPS 建立自己的核心竞争力并实现产业转型，对中国的企业和政府都有很好的借鉴意义。这是中国第一本系统介绍 CPS 理论和应用的书，可作为产学研各个领域了解和发展 CPS 技术的参考资料。

同时，李杰教授及其科研团队提出了“以数据为基础，挖掘不可见世界的价值”和“以 CPS 体系为核心，实现知识的自主产生与延续”等理念，为突破我国自主工业知识的瓶颈提供了非常有价值的参考。

因此，我们理应欢迎更多像李杰教授这样，既通晓国际工业及制造领域学术和产业发展，又熟悉中国现状的学者对 CPS 的定义、技术构成和应用方向提出自己的见解和论述。

愿这本书与 CPS 一起深深扎根于中国制造的土壤！

李培根

中国工程院院士

2017 年 2 月 9 日于武汉

序 二

让梦想开启未来,是人类进步的永恒动力。缩短从梦想到现实的距离,是人类永恒的追求。

随着我们的生活不断向互联化、移动化和智能化的时代迈进,地球正在迅速地变平、变小和变快,信息与创新、知识与价值、“互联网+”与“区块链+”等新思维成为引领社会发展的新常态。在这样的背景下,工业价值也正在快速转变,从“产品交付”到“价值交付”,从“平台功能”到“体系效能”,形成更加注重通畅、高效、快速反应的“一站式”和满足“个性化”需求的新服务模式,适应构建扁平化、柔性化和网络化的业态融合体、利益共同体、命运共同体以及责任共同体的基础,加强资源、效率、质量、效益的信息主导、体系建设和能力提升,开启全球治理现代化的新局面。

对产品的定义、定位和定价,对功能的坐标、目标和指标,对需求的智理(想到)、智导(说到)和智造(做到),企业在这三个方

面的制造思维和品牌定位将面临全新的机遇和挑战。

世界各国正与时俱进。为了加大信息及互联网技术与工业的深度融合,美国定义了 Cyber-Physical System(CPS),译为信息-物理系统,又译为赛博-实体系统,并将其列为新的国家竞争力战略中最重要的关键技术;德国将信息-物理制造系统(Cyber-Physical Production System, CPPS)作为第四代制造系统的核心技术;中国提出“中国制造 2025”,持续推进工业与信息两化深度融合。

总之,工业的实体与虚拟相融合已势在必行。传统的装备和产品所代表的实体空间是工业基础能力的体现,而以数据和建模为基础的赛博空间是知识和价值创造的新大陆,两者的深度融合将会使价值与产品、知识与实践之间形成一个相互迭代的闭环系统,使知识产生和价值交付的效率获得本质上的提升。未来企业之间的竞争将从实体空间向赛博空间转移,赛博空间的技术和价值布局将决定一个企业,乃至一个国家是否真正具有质量和效益可持续发展的竞争力。

企业 and 国家治理现代化的目标在于实现体系效能数字化,途径在于“网络化+目标态势”,关键在于定位、设计、评价三位一体,着力实现“虚”与“实”的深度融合、赛博空间与实体空间的深度融合、工业化及信息化与体系的深度融合,坚持用标准衡

量,实践检验,数据说话,实现精准发力,协同发力和持续发力。

一些老牌企业也已看到工业智能创新的市场机遇,并期望以核心智能技术为突破,促使传统制造向信息服务转型,产生新的工业价值。中国船舶工业系统工程研究院早在 2010 年就开始组建海洋智能技术中心团队,率先在中国海洋装备领域以工业大数据和 CPS 等工业智能技术为核心开展研究与应用实践,以服务于中国“智能船舶”的实现与发展,并联合美国 IMS 中心李杰教授团队,结合中国的 CPS 应用实践成果,进一步完善与深化 CPS 智能技术体系。

由此,在中国推动“两化深度融合”“中国制造 2025”“深化制造业价值转型”和“供给侧结构性改革”的实践背景下,李杰教授及其团队与中船系统研究院邱伯华及其团队合作完成的《CPS: 新一代工业智能》一书,不仅系统阐述了 CPS 的技术概念,而且涵盖大量实践案例,为中国的企业和学者深度了解和应用 CPS 技术的本质内涵、技术框架和应用体系提供重要的参考。

刘顺达

国务院国有重点大型企业监事会主席

2017 年 3 月 1 日

序 三

回顾人类工业革命近三百年的历史,当每一次工业革命中的科技进步突破了生产力要素的发展瓶颈后,人类的生产力就迈上一层新的台阶,这背后的根本驱动力是对效率和价值的永恒追求。2011年,德国在汉诺威工业展上正式对外宣布“工业4.0”国家战略,拉开了第四次工业革命的序幕。随后,世界各国也相继推出符合自己国情的工业转型战略。在各个国家的战略规划中,我们能看到一个共同的趋势,那就是信息及互联网技术与工业的深度融合。在美国,这个新的方向被定义为“Cyber-Physical System”(CPS,信息-物理系统,又译为赛博-实体系统),成为美国新的国家竞争力战略中最重要的关键技术。德国也将CPS作为第四代制造系统的核心技术。对于制造企业而言,工业大数据、人工智慧、智慧网络系统等新兴技术正在对制造业产生革命性的影响,如何运用这些科技帮助人类,让人类变得更能胜任复杂性工作,并把制造的知识传承下去,是我们需要

深刻思考的课题。

无论是一个国家还是一个企业,其制造的核心竞争力归根结底在于“知识”和“价值”两个方面。一方面,随着制造系统不断复杂化,人们发现依靠人类的经验和学习来实践和积累新知识的速度已经无法满足发展需求。另一方面,制造系统的价值也从过去的提供标准化产品转向提供满足用户定制化需求的产品与服务,这对当前的制造系统从“产品交付”转向“价值交付”过程中的效率也提出新的挑战。于是,人们开始从一个新的空间,即赛博空间中寻找答案。未来企业之间的竞争将从实体空间向赛博空间转移,在赛博空间的科技和价值布局将决定一个企业是否具有永续的竞争力。

上银科技从2010年开始与李杰教授及其所在的IMS中心进行合作,开发新一代的精密丝杆智慧预诊系统,管理产品在使用中“不可见”的健康衰退和精度缺失问题,这对我们上银的客户具有巨大的价值,是在赛博空间中对实体系统进行对称管理和价值创造的重要探索和实践。2016年,我们的精密丝杆CPS产品在芝加哥国际机床展(IMTS)上首次推出,在业界取得了很大的反响,也受到许多客户的青睐。李杰教授的思维在全球工业产业和学术界带来很多的影响,他本人也长期担任中、美、德、日等国家政府和企业的顾问,是一位难得的、兼具国际视野与对

制造业深刻了解的学者。在全球工业智能化革命正在快步向我们走近的时期,李杰教授及其团队所著的《CPS: 新一代工业智能》一书,有助于中国的企业和学者深度了解 CPS 这个中国应对新经济条件下两化融合和产业转型的使能技术。

卓永财

HIWIN 上银科技集团董事长

2017 年 3 月 5 日

前 言

2011年,中国经济总量首次超过日本,成为世界第二经济大国,200多种工业品的产量位居世界首位,这标志着经过数代人的艰苦努力,中国由农业大国向工业大国转变的目标初步达成,中国也成为对世界经济有着举足轻重影响的重要国家。

在看到中国经济取得世界瞩目成就的同时,也需要意识到以投资、劳动力、资源和环境等低成本要素来驱动经济增长的模式开始出现瓶颈,已难以支持中国经济的稳定和持续发展。同时,以美国为代表的传统发达国家开始了“再工业化”战略,正在给工业竞争力赋予新的定义,一系列新技术和新模式的出现正在为价值创造打开新的空间。在这样的背景下,原有需求空间中的增量不足和新型需求空间中的竞争力不足,给中国的经济和工业转型带来了巨大的压力。2012年3月~2014年10月,中国的工业生产者出厂价格指数(PPI)出现连续23个月负增长,许多产业增量需求已经达到饱和,试图继续通过刺激需求增

长来消化原有产能已难以实现。面对传统的要素驱动战略无法支持中国经济持续发展的现状,中国政府提出了“创新驱动战略”,即通过技术创新和制度创新来实现经济的可持续发展,以实现中国由工业大国向工业强国的转变。

1996年,世界经合组织发表了题为《以知识为基础的经济》的报告,总结了生产要素、科技创新与经济发展之间的关系。报告指出,正是新生产要素的不断出现,并通过科技创新的支持,使新生产要素能力形成,并与已有生产要素相互融合,这才不断诞生新的经济增长和价值空间,推动经济可持续增长。随着人类社会从自然经济、农业经济、工业经济、信息经济到知识经济的发展,在创新驱动下,一些使能技术的出现使得新生产要素的杠杆效应不断显现,价值从能源、资本和劳动力等传统要素端向更高的知识型要素转移。将知识作为经济增长的核心要素,是知识经济的核心特征,而自主知识的缺失恰恰是目前我国大量产业处于“微笑曲线”底端和西方发达国家处于顶端的根源。目前,世界经济正处于从信息经济向知识经济转型的关键时期,信息经济所形成的“从数据中获得知识”的能力改变了工业经济“从人的经验中获得知识”的制约。数据正在成为经济发展的战略性资源,而中国作为世界最大的数据生产大国和数据使用大国,有着最大的潜力去获取和使用好这个资源,因此,在世界经济从信

息经济向知识经济转变过程中,中国拥有自身得天独厚的优势。

数百年的工业经济和数十年的信息经济,使得工业化水平和信息化水平都得以长足的发展。知识经济的核心就是以数据为驱动,实现知识的自主形成和规模化利用,将工业化和信息化相互融合,以实现相互促进的正向反馈。因此,把知识作为新的生产要素,以知识自主形成以及与已有生产要素的融合作为科技创新的重点,以价值驱动作为产业模式创新的核心,实现经济的可持续发展,应该是未来创新驱动的重点。

赛博-实体系统(Cyber-Physical System, CPS),在美国应对智能化时代到来提出的八大使能技术中居于首位,它并不是信息系统和工业系统的简单集成,相比传统工业系统基于经验规则的控制,和传统信息系统关注数据随着活动流转的模式不同,CPS更关注系统基于机器自主的认知能力和基于预测的决策能力,并在此基础上,实现工业系统和信息系统在感知、分析、决策、控制和管理等方面的深度融合。在这个体系中,知识的形成和使用的主体在逐步由人向赛博空间转移,实现知识作为生产要素在整个工业体系中的自成长能力和对现有生产要素的高效驱动能力。所以,在研究知识经济的过程中,不能忽视 CPS在这次转型中的巨大作用。

同时,CPS从思想的提出到现实的应用,经过了数十年的发

展,它是将可见的世界和不可见的世界融合在一起的桥梁,涉及了许多技术要素,具有应用的广泛化、多元化、体系化和层次化的特征。本书的目的并不是给 CPS 一个精确的定义,也并不局限于解释 CPS 全面的技术内涵,在我们看来,CPS 作为一个具有很强体系性的技术概念,与现在蓬勃发展的多种新兴技术是融合的关系,任何对 CPS 的技术或模式的定义都很难适用于其全部的应用场景,因此,开放和兼容的研究与应用环境更有助于这个体系的发展。

CPS 最重要的关键词是“融合”,不仅包括“实体系统”与“赛博系统”之间的融合,还包括在技术层面的多种既有和新兴技术的融合,以及在分析层面中的传统专家知识与人工智能之间的融合。CPS 的技术体系既包括了已发展多年的技术,如实时控制系统、物联网、传感与数采、传统机器学习算法、网络通讯等,也包括许多新兴的前沿技术,如非接触式传感技术、分布式计算、以 GPU 和 FPGA 为代表的新型处理器、微机电芯片及传感器、认知计算和深度学习神经网络等。我们从这些技术的融合中看到了巨大的能力增益,使人类科技的进步速度开始超越以往的线性积累过程,我们正在向“奇点”快速地接近。例如在 2017 年的计算机体系结构领域的顶级会议 ISCA 上,谷歌 (Google) 正式向外界发布了面向深度机器学习的新一代芯片技

术 TPU(Tensor Processing Unit)。TPU 是将硬件的处理能力与智能算法相结合的一次伟大尝试,这一融合将硬件的性能提升了约 7 倍,完成新一代 TPU 的迭代时间仅为 22 天,突破了摩尔定律所定义的速度。可以预见在不远的将来,边缘计算、高性能处理芯片、高级智能算法之间的结合会使智能从庞大的数据中心向机器的本地迁移,机器依靠自身的运算与分析能力就能够实现惊人的智能化程度,智能机器之间的相互连接与分享又能够使学习速度以几何倍数增长,实体系统与赛博系统之间的深度融合所带来的改变将超乎我们的想象。

这本书在多年 CPS 基础理论研究与实践的基础上,立足于工业领域的现状和发展需求,通过对现代工业的挑战与机遇的分析,CPS 的技术本质与内涵的探讨,CPS 的技术体系与工业智能实现的理解,CPS 的应用体系与智能体(agent)实现方式的分析,CPS 的应用实践案例的解读和 CPS 为中国经济带来的机会空间这 6 个方面,来解读 CPS 为工业迈向智能时代所带来的新思维和新路径。

总而言之,任何一次工业革命都是在生产力创新驱动下,新生产要素的出现改变已有的生产模式,形成新的价值创造空间和舞台。而 CPS 的出现,为下一代工业变革的方向提供了新的思维模式,或许将成为我们打开工业智能时代大门的钥匙。