

引领信息物理系统（CPS）落地与深耕

# 信息物理系统（CPS） 典型应用案例集

中国电子技术标准化研究院 编 著◎



中国工信出版集团



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

引领信息物理系统（CPS）落地与深耕

# 信息物理系统（CPS） 典型应用案例集

中国电子技术标准化研究院 编 著◎

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书在系统阐述信息物理系统来源、发展与内涵的理论基础上,对中国制造业的信息物理系统优秀实践案例进行总结和提炼,通过 28 个典型案例展现了制造企业与解决方案供应商 2 个主体的实现方式,以及钢铁、轨道交通、石化、电子、汽车、航空、船舶等 15 个行业的应用成效,实现了理论与实践的融合,对进一步推动信息物理系统的落地推广和创新发展具有借鉴意义。

本书可为致力于制造业转型升级的主管部门、制造企业、解决方案提供商、科研院所及有意了解信息物理系统的社会各界人士提供参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

## 图书在版编目(CIP)数据

信息物理系统(CPS)典型应用案例集 / 中国电子技术标准化研究院编著. —北京:电子工业出版社, 2019.5

ISBN 978-7-121-36266-8

I. ①信… II. ①中… III. ①控制系统 IV. ①TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 064327 号

策划编辑:刘志红

责任编辑:刘志红

印 刷:天津嘉恒印务有限公司

装 订:天津嘉恒印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:16.5 字数:422.4 千字

版 次:2019 年 5 月第 1 版

印 次:2019 年 5 月第 1 次印刷

定 价:128.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 [zlt@phei.com.cn](mailto:zlt@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式:(010) 88254479, [lzhmails@phei.com.cn](mailto:lzhmails@phei.com.cn)。

# 编委会

## 指导委员会

主任 谢少锋

副主任 李颖 王建伟 赵波

委员 孙文龙 冯伟 周平

## 工作委员会

执笔人（排名不分前后）

于秀明	苏伟	杨梦培	朱铎先	刘宗长	邱伯华
陈俊	胡梦君	索寒生	李天辉	刘广杰	张雪健
张星星	杨晨	李兴林	胡正林	张凤德	陈宁
杨帆	吕瑞强	王海斌	吴庚	黄琳	李艳宇
董智升	薄曰薄	张建华	隋晓飞	靳春蓉	李竞
方明强	王建宇	宁琨	张志强	刘波	张龙
杨海燕	冯清川				

## 前言

自信息物理系统（以下简称“CPS”）概念提出以来，各国政府、学术界和产业界高度重视，并积极探索。德国《工业 4.0 实施建议》将 CPS 作为工业 4.0 的核心技术，中国提出“基于信息物理系统的智能装备、智能工厂等智能制造正在引领制造方式变革”。在全球大力发展实体经济的背景下，CPS 作为信息化和工业化深度融合的综合技术体系，正成为抢占新一轮工业革命制高点的重要支撑。

CPS 通过集成先进的感知、计算、通信、控制等信息技术和自动控制技术，构建了物理空间与信息空间中人、机、物、环境、信息等要素相互映射、适时交互、高效协同的复杂系统，实现系统内资源配置和运行的按需响应、快速迭代、动态优化。面向制造环境变化、制造资源多样、制造过程复杂等问题，基于 CPS 的解决方案广泛应用于设计、生产、服务等关键环节，有效提高效率，降低成本，提升产品质量。

随着对 CPS 认识的逐步深入，国内已出现不少优秀的 CPS 实践。为积极推动 CPS 落地应用，本书编委会用了一年时间开展 CPS 典型应用案例的征集与编写工作，将 CPS 最典型的应用场景分享给读者，将 CPS 建设中最核心的经验传达给读者，将 CPS 凸显的成效展示给读者。本书分为三篇，第一篇理论篇，系统阐述了 CPS 的来源、发展与内涵；第二篇解决方案篇，总结归纳了石化、烟草、船舶、电子、轨道交通等行业共性的 CPS 实现路径和技术体系；第三篇制造升级篇，提出了设备管理、柔性生产、质量管控、运行维护等典型制造场景的 CPS 应用实践。

本书的编写离不开社会各界朋友的大力支持。在此，特别感谢工业和信息化部信息化和软件服务业司领导对本书的悉心指导，感谢宁振波、赵敏、马国钧、王湘念、张文彬、刘军、何潇、陈继忠等专家的宝贵意见，感谢提供案例的各企事业单位的无私奉献，感谢信息物理系统（CPS）发展论坛的组织者为案例征集工作所付出的辛苦。希望《信息物理系统（CPS）典型应用案例集》可以为支持 CPS 事业的朋友们带来一份欣喜，可以为中国的制造业转型升级贡献一份力量。

《信息物理系统（CPS）典型应用案例集》编委会

2019 年 3 月

## 理论篇 / 001

1.1 CPS 来源与发展 / 003

1.2 CPS 的内涵 / 006

## 解决方案篇 / 015

案例 1 和利时基于模型的数字孪生运行平台的 CPS 应用 / 017

案例 2 ANSYS 在泵系统领域基于数字孪生的 CPS 应用 / 027

案例 3 兰光创新在离散制造领域的 CPS 应用 / 037

案例 4 石化盈科在石化行业的 CPS 应用 / 046

案例 5 华龙迅达在烟草行业数字工厂建设的 CPS 应用 / 052

案例 6 中船系统院在智能船舶领域的 CPS 应用 / 062

案例 7 沈机智能在机加工行业的 CPS 应用 / 071

案例 8 极熵物联在动力车间智能服务模式下的 CPS 应用 / 078

案例 9 明匠智能基于加工单元的 CPS 应用 / 088

案例 10 重庆斯欧在互连协同领域的 CPS 应用 / 095

案例 11 航空工业制造院在航空产品研制领域的 CPS 测试应用 / 107

案例 12 电子标准院在共性关键技术领域的 CPS 测试应用 / 119

- 案例 13 海尔模具在设备管理领域的 CPS 应用 / 129
- 案例 14 剑桥科技在电子产品生产领域的 CPS 应用 / 136
- 案例 15 东风装备在高效装备制造领域的 CPS 应用 / 145
- 案例 16 中建钢构广东在无人工厂领域的 CPS 应用 / 156
- 案例 17 西奥电梯在电梯制造领域的 CPS 应用 / 164
- 案例 18 上海宝钢在智能钢板品质自动分析领域的 CPS 应用 / 174
- 案例 19 东方电气在智慧风电领域的 CPS 应用 / 183
- 案例 20 中车青岛四方在智能轨道交通服务领域的 CPS 应用 / 192
- 案例 21 北汽新能源在汽车精益生产领域的 CPS 应用 / 199
- 案例 22 博深工具在轨道交通制动装置质量检测领域的 CPS 应用 / 209
- 案例 23 山东育达医疗设备在系统自治技术领域的 CPS 应用 / 216
- 案例 24 华晶金刚石在异构系统集成领域的 CPS 应用 / 224
- 案例 25 新北洋在柔性制造领域的 CPS 应用 / 229
- 案例 26 玲珑轮胎在高性能子午线轮胎智能工厂领域的 CPS 应用 / 235
- 案例 27 浙江万向在汽车零部件大规模生产领域的 CPS 应用 / 240
- 案例 28 海航科技在无人货物运输船领域的 CPS 应用 / 249

# 理论篇

CPS 自提出以来，引起了各国政府、学术界和产业界的广泛关注。美国、德国及中国等纷纷开展 CPS 理论研究、项目支持、标准研制、试验平台建设等，推动 CPS 在制造领域的应用发展。2017 年 3 月 1 日，中国电子技术标准化研究院（以下简称“电子标准院”）在工业和信息化部信息和软件服务业司、国家标准化管理委员会工业标准二部的指导下，联合 CPS 发展论坛的成员单位共同研究、编撰了《信息物理系统白皮书》，对 CPS 做出全方位的解读。本篇为“理论篇”，引用了白皮书中的核心内容，以帮助读者快速了解 CPS 的发展现状及内涵。

本篇分为 CPS 来源与发展、内涵两部分。CPS 来源与发展主要介绍了 CPS 的起源及发展现状，回答了“为什么”发展 CPS 的问题；CPS 内涵给出了 CPS 的定义、层次和特征，回答了 CPS “是什么”的问题。本篇为读者提供 CPS 的理论知识参考，是本书各个案例的理论基础，为更好地阅读与理解案例提供支撑。





# 1.1 CPS 来源与发展

## 1.1.1 来源

**术语来源。**信息物理系统 (Cyber-Physical Systems, CPS) 这一术语, 最早由美国国家航空航天局 (NASA) 于 1992 年提出, 其后这个概念因为一次危机事件而被美国政府高度重视。2006 年, 美国国家科学基金会 (NSF) 科学家海伦·吉尔 (Helen Gill) 在国际上第一个关于信息物理系统的研讨会 (NSF Workshop on Cyber-Physical Systems) 上将这一概念进行详细描述。“Cyber”一词容易使人们联想到“Cyberspace”、“赛博空间”的概念。“Cyberspace”是 1982 年美国作家威廉·吉布森 (William Gibson) 在发表的短篇小说《燃烧的铬合金 (Burning Chrome)》中首次创造出来, 并在后来的小说《神经漫游者 (Neuromancer)》中被普及, 为公众所熟知。

Cyber-Physical Systems 的术语来源可以追溯到更早时期, 1948 年, 诺伯特·维纳受到安培的启发, 创造了“Cybernetics”这个单词。1954 年, 钱学森所著《Engineering Cybernetics》一书问世, 第一次在工程设计和实验应用中使用这一名词。1958 年, 其中文版《工程控制论》发布, “Cybernetics”翻译为“控制论”。此后, “Cyber”常作为前缀, 应用于与自动控制、计算机、信息技术及互联网等相关的事物描述 (CPS 术语来源历程参见图 1-1)。针对 Cyber-Physical Systems, 国内部分专家学者将其翻译成“信息物理融合系统”、“赛博物理系统”、“网络实体系统”、“赛博实体融合系统”等, 本书将其翻译为“信息物理系统”。

**技术来源。**信息物理系统是控制系统、嵌入式系统的扩展与延伸, 其涉及到的相关底层理论技术源于对嵌入式技术的应用与提升。然而, 随着信息化和工业化的深度融合发展, 传统嵌入式系统中解决物理系统相关问题所采用的单点解决方案已不能适应新一代生产装备信息化和网络化的需求, 需要对计算、感知、通信、控制等技术进行更为深度的融合。因此, 在云计算、新型传感、通信、智能控制等新一代信息技术的迅速发展与推动下, 信息物理系统顺势出现。

**需求来源。**当前, 中国工业生产正面临产能过剩、供需矛盾、成本上升等诸多问题, 传统的研发设计、生产制造、应用服务、经营管理等方式已经不能满足广大用户新的消费需求、使用需求, 迫使制造业转型升级, 提高对资源配置利用的效率。制造业企业需要新的技术应用使得自身生产系统向柔性化、个性化、定制化方向发展。而 CPS 正是实现个性化定制、极少量生产、服务型制造和云制造等新的生产模式的关键技术, 在大量实际应用需求的拉动下, 信息物理系统顺势出现, 为实现制造业转型升级提供了一种有效的实

现途径。

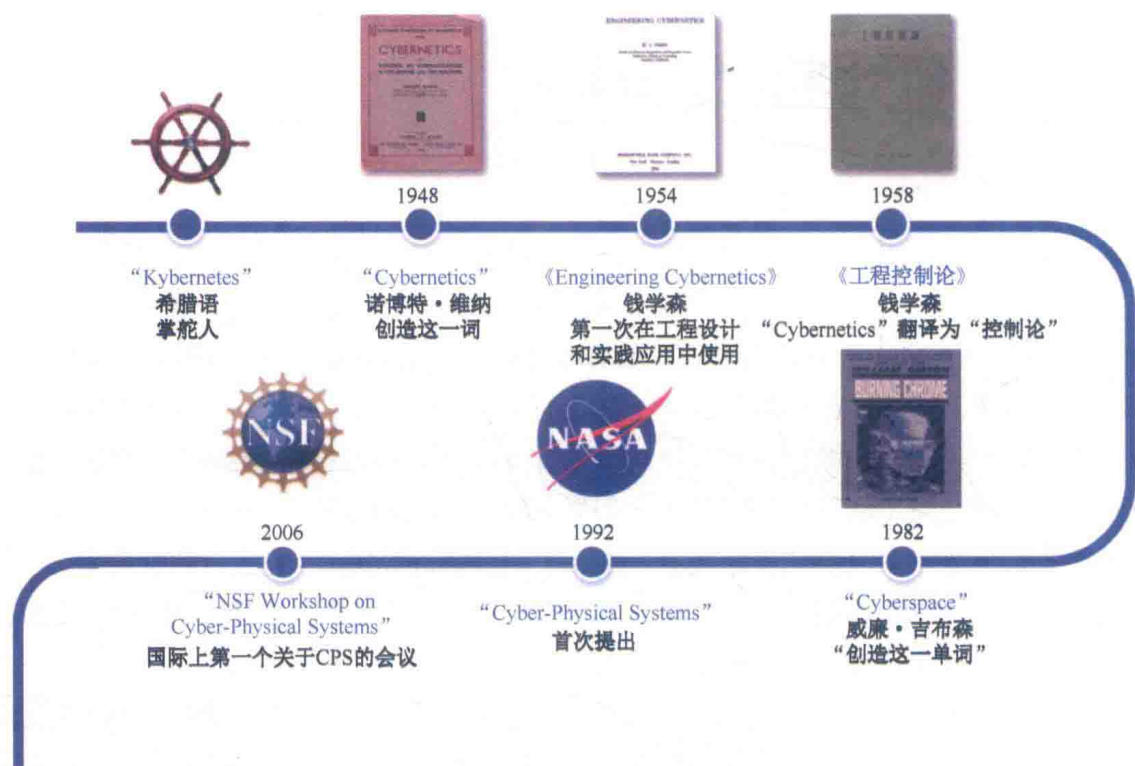


图 1-1 CPS 术语来源历程

## 1.1.2 发展

### ■ 美国

2006年2月,美国科学院发布《美国竞争力计划》,明确将CPS列为重要的研究项目;2006年末开始,美国国家科学基金会召开了世界上第一个关于CPS的研讨会,并将CPS列入重点科研领域,开始进行资金资助。2007年7月,美国总统科学技术顾问委员会(PCAST)在题为《挑战下的领先——全球竞争世界中的信息技术研发》的报告中列出了八大关键的信息技术,其中,CPS位列首位,其余分别是软件,数据、数据存储与数据流,网络,高端计算,网络与信息安全,人机界面与社会科学。2008年3月,美国CPS研究指导小组(CPS Steering Group)发布了《信息物理系统概要》,把CPS应用于交通、农业、医疗、能源、国防等方面。2009年5月,来自加州伯克利分校、卡内基·梅隆大学等高校和波音、博世、丰田等企业联合发布《产业与学术界在CPS研究中协作》白皮书。

2014年6月,美国国家标准与技术研究院(NIST)汇集相关领域专家,组建成立了CPS公共工作组(CPS PWG),联合企业共同开展CPS关键问题的研究,推动CPS在跨多个“智能”应用领域的应用。2015年,NIST工程实验室智能电网项目组发布CPS测试平

台 (Testbed) 设计概念, 并建立 CPS 测试平台组成和交互性的公共工作组。2016 年 5 月, NIST 正式发表了《信息物理系统框架》, 提出了 CPS 的两层域架构模型, 在业界引起极大的关注。2017 年, NIST 发布的《2017-2019 三年计划》指出, CPS 应用将在更多的商业应用中涌现出来, 到 2025 年, CPS 预计会产生每年 11.1 万亿美元的经济影响。

截至目前, 美国国家科学基金会投入了超过 3 亿美元来支持 CPS 基础性研究。在学术界, IEEE 及 ACM 等组织从 2008 年开始, 每年都举办 CPSWeek 等学术活动。CPSWeek 汇集了国际上关于 CPS 的五个主要会议: HSCC、ICCPS、IoTDI、IPSN 和 RTAS, 以及涉及 CPS 各方面研究的研讨会和专题报告。

## ■ 德国

德国作为传统的制造强国, 也一直关注 CPS 的发展。2009 年, 德国《国家嵌入式系统技术路线图》提出了发展本地嵌入式系统网络的建议, 明确提出 CPS 是德国继续领先未来制造业的技术基础。2010 年 3 月 1 日, 德国工程院启动了 agendaCPS 项目, 历时 2 年, 发布了《信息物理系统综合研究报告》(Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems)。2013 年, 德国成立“工业 4.0”工作组, 并在同年 4 月发布《保障德国制造业未来: “工业 4.0”未来项目实施建议》, 明确提出基于嵌入式系统的演进技术 CPS 将是德国继续领先未来制造业的技术基础。2015 年 3 月, 德国国家科学与工程院发布了《网络世界的生活》, 对 CPS 的能力、潜力和挑战进行了分析, 提出了 CPS 在技术、商业和政策方面所面临的挑战和机遇。依托德国人工智能研究中心 (DFKI), 德国开展了 CPS 试验工作, 建成了世界上第一个已投产的 CPPS (Cyber-Physical Production Systems) 实验室。

## ■ 欧盟

欧盟在 CPS 方面也做了很多工作。CPS 研究作为欧盟公布的“单一数字市场”战略的一部分, 得到欧盟的大力支持。欧盟通信网络、内容和技术理事会单独设立 CPS 研究小组; 欧盟在 2007 年启动了 ARTEMIS (Advanced Research and Technology for Embedded Intelligence and Systems) 等项目, 计划在 CPS 相关研究方面投入超过 70 亿美元, 并将 CPS 作为智能系统的一个重要发展方向。2015 年 7 月, 欧盟发布《CyPhERS CPS 欧洲路线图和战略》, 强调了 CPS 的战略意义和主要应用的关键领域。另外, 欧盟成立了信息物理系统工程实验室 (CPSE), 由 6 个设计中心组成, 包括法国设计中心、英国设计中心、德国南部设计中心、德国北部设计中心、西班牙设计中心和瑞典设计中心, 每个设计中心分别由不同研究机构主持, 定位是为 CPS 工程和技术企业提供资金和世界级的技术支持。

## ■ 中国

从 2009 年开始, CPS 在工业领域的应用逐渐引起中国国内科研机构、高校、企业的关注。2010 年, 国家“863”计划信息技术领域办公室举办了“信息-物理融合系统发展论

坛”专题研讨会，对 CPS 科学基础、关键技术、战略布局等进行研讨，会后清华大学、同济大学等高校相继成立了多个 CPS 工作组。2016 年，中国政府提出了深化制造业与互联网融合发展的要求，其中，在强化融合发展基础支撑中对 CPS 未来发展做出进一步要求。政策的延续和支持使得中国 CPS 发展驶入快车道。2017 年 3 月 1 日，中国电子技术标准化研究院在工业和信息化部（以下简称工信部）信息和软件服务业司、国家标准化管理委员会工业标准二部的指导下，联合 CPS 发展论坛的成员单位共同研究、编撰了《信息物理系统白皮书》，对 CPS 做出全方位的解读。

在项目支持方面，工信部 2016、2017 年设立了工业转型升级项目《信息物理系统测试验证解决方案应用推广》，重点支持信息物理系统关键技术测试验证平台，支持超过 8 个相关重点项目。2018 年，工信部开展了制造业与互联网融合发展试点示范工作，其中包含信息物理系统相关方向。科技部在 2017、2018 年的国家重点研发计划项目中分别支持了“电网信息物理系统分析与控制的基础理论与方法”及“智能生产线信息物理系统理论与技术”等研究课题。目前，CPS 在军方中也受到了高度重视，军委装备发展部在 2017、2018 年陆续支持了“信息物理系统计算支撑技术”、“信息物理系统融合建模仿真方法”等项目。

此外，以中国电子技术标准化研究院（简称电子标准院）为代表已开展了 CPS 测试能力建设，2018 年 9 月，电子标准院围绕 CPS 标准协议兼容、异构系统集成、物理单元建模等关键共性技术构建了测试能力，通过了中国合格评定国家认可委员会（CNAS）“信息物理系统检测能力”扩项评审，成为国内第一家具有 CPS 检测能力的机构，将有效推动中国 CPS 共性技术的研发与试验验证。

## 1.2 CPS 的内涵

### 1.2.1 CPS 的认识

CPS 是多领域、跨学科不同技术融合发展的结果。尽管 CPS 已经引起了国内外的广泛关注，但 CPS 发展时间相对较短，不同国家或机构的专家学者对 CPS 理解侧重点也各不相同。表 1-1 汇集了业内主要机构和专家对 CPS 的认识。

表 1-1 各国机构及专家对 CPS 的认识

机构或学者	观点认识
美国国家科学基金会（NSF）	CPS 是通过计算核心（嵌入式系统）实现感知、控制、集成的物理、生物和工程系统。在系统中，计算被“深深嵌入”到每一个相互连通的物理组件中，甚至可能嵌入到物料中。CPS 的功能由计算和物理过程交互实现

机构或学者	观点认识
美国国家标准与技术研究院 CPS 公共工作组 (NIST CPS PWG)	CPS 将计算、通信、感知和驱动与物理系统结合, 并通过与环境(含人)进行不同程度的交互, 以实现有时间要求的功能
德国国家科学与工程院	CPS 是指使用传感器直接捕捉物理数据和执行器影响物理过程的嵌入式系统、物流、协调与管理过程及在线服务。他们通过数字网络连接, 使用来自世界各地的数据和服务, 并配备了多模态人机界面。CPS 开放的社会技术系统, 使整个主机的服务和功能远远超出了当前嵌入式系统具有控制行为的能力
Smart America	CPS 是物联网与系统控制结合的名称。因此, CPS 不仅仅能够“感知”某物在哪里, 还增加了“控制”某物并与其周围物理世界互动的能力
欧盟第七框架计划	CPS 包含计算、通信和控制, 它们紧密地与不同物理过程, 如机械、电子和化学, 融合在一起
美国辛辛那提大学 Jay Lee 教授	CPS 以多源数据的建模为基础, 以智能连接 (Connection)、智能分析 (Conversion)、智能网络 (Cyber)、智能认知 (Cognition) 和智能配置与执行 (Configuration) 的 5C 体系为构架, 建立虚拟与实体系统关系性、因果性和风险性的对称管理, 持续优化决策系统的可追踪性、预测性、准确性和强韧性 (Resilience), 实现对实体系统活动的全局协同优化
加利福尼亚大学 伯克利分校 Edward A. Lee	CPS 是计算过程和物理过程的集成系统, 利用嵌入式计算机和网络对物理过程进行监测和控制, 并通过反馈环实现计算和物理过程的相互影响
中国科学院 何积丰院士	CPS 从广义上理解, 就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, 它通过计算进程和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

对一个新事物、新概念的理解和认识, 应在不同范围、不同层次充分把握其内涵, 应遵循认识的方法论, 对相关概念的理解与认识也应在不断迭代和演进中完善。把握这一原则, 我们认为认识和发展中国信息物理系统必须与中国当前工业发展的现状结合, 并能够指导中国工业的转型升级, 促进信息化和工业化的深度融合。因此, 在继承相关国内外研究成果的基础上, 本部分从定位、定义及本质三个层面, 给出了对信息物理系统的认识。

**定位。**党的十五大提出“大力推进国民经济和社会信息化”, 首次将“信息化”写入国家战略; 十六大提出“以信息化带动工业化、以工业化促进信息化, 走新型工业化的道路”; 十七大提出了“发展现代产业体系, 大力推进信息化与工业化融合”的新科学发展的观念; 十八大又进一步提出“坚持走中国特色新型工业化、信息化、城镇化、农业现代化道路, 推动信息化和工业化深度融合、工业化和城镇化良性互动、城镇化和农业现代化相互协调, 促进工业化、信息化、城镇化、农业现代化同步发展。”从中国工业近 20 年的发展历程来看, 工业化演进的同时, 迎来了信息技术的发展浪潮。因此, 中国不能按照其他强国那样, 先走工业化, 再走信息化, 要在这个时间节点上同步发展, 互相促进。这与信息物理系统的发展要求如出一辙, 一脉相承。因此, 本书对信息物理系统的定位是: **信息物理系统是**

支撑信息化和工业化深度融合的一套综合技术体系。

**定义。**通过对现有各国科研机构及学者的观点等进行系统全面研究,本书尝试给出 CPS 的定义,即: **CPS 通过集成先进的感知、计算、通信、控制等信息技术和自动控制技术,构建了物理空间与信息空间中人、机、物、环境、信息等要素相互映射、适时交互、高效协同的复杂系统,实现系统内资源配置和运行的按需响应、快速迭代、动态优化。**我们把信息物理系统定位为支撑两化深度融合的一套综合技术体系,这套综合技术体系包含硬件、软件、网络、工业云等一系列信息通信和自动控制技术,这些技术的有机组合与应用,构建起一个能够将物实体和环境精准映射到信息空间,并进行实时反馈的智能系统,作用于生产制造全过程、全产业链、产品全生命周期,重构制造业范式。

**本质。**基于硬件、软件、网络、工业云等一系列工业和信息技术构建起的智能系统,其最终目的是实现资源优化配置。实现这一目标的关键要靠数据的自动流动,在流动过程中数据经过不同的环节,在不同的环节以不同的形态(隐性数据、显性数据、信息、知识)展示出来,在形态不断变化的过程中逐渐向外部环境释放蕴藏在其背后的价值,为物理空间实体“赋予”实现一定范围内资源优化的“能力”。因此,信息物理系统的本质就是**构建一套信息空间与物理空间之间基于数据自动流动的状态感知、实时分析、科学决策、精准执行的闭环赋能体系,解决生产制造、应用服务过程中的复杂性和不确定性问题,提高资源配置效率,实现资源优化。**CPS 的本质如图 1-2 所示。

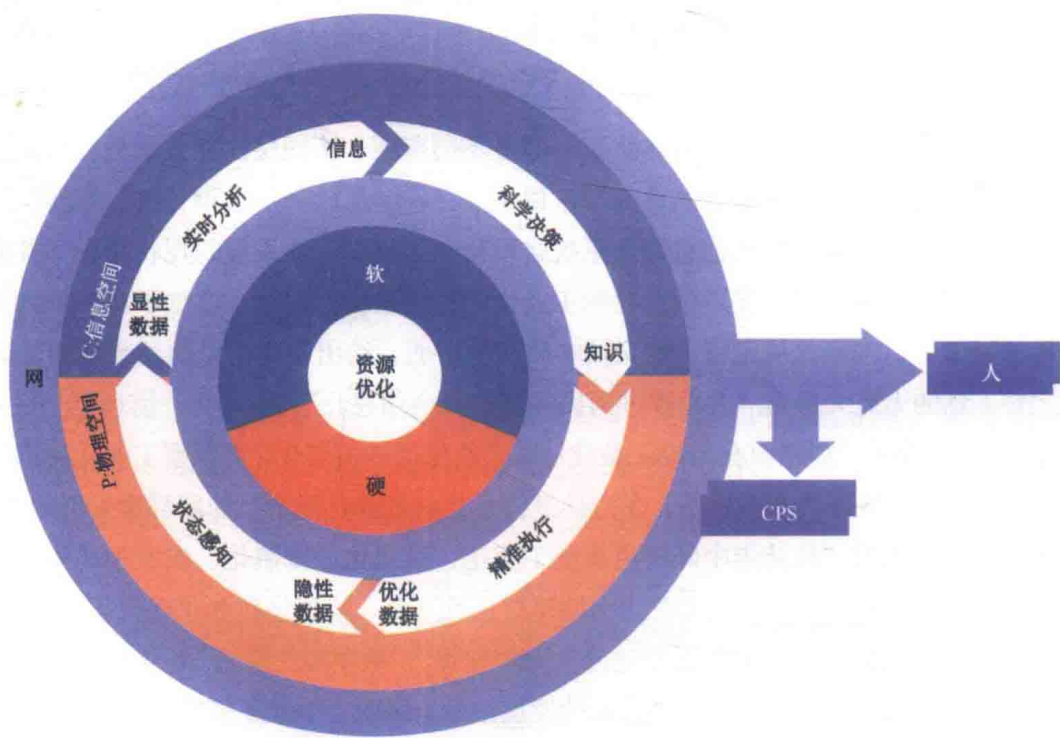


图 1-2 CPS 的本质

实现数据的自动流动具体来说需要经过四个环节，分别是：状态感知、实时分析、科学决策、精准执行。大量蕴含在物理空间中的隐性数据经过状态感知被转化为显性数据，进而能够在信息空间进行计算分析，将显性数据转化为有价值的信息。不同系统的信息经过集中处理形成对外部变化的科学决策，将信息进一步转化为知识。最后以更为优化的数据作用到物理空间，构成一次数据的闭环流动。

**状态感知**，是对外界状态的数据获取。生产制造过程中蕴含着大量的隐性数据，如物理实体的尺寸、运行机理、外部环境的温度、液体流速、压差等。状态感知通过传感器、物联网等一些数据采集技术，将这些蕴含在物理实体背后的数据不断地传递到信息空间，使得数据不断“可见”，变为显性数据。状态感知是对数据的初级采集加工，是一次数据自动流动闭环的起点，也是数据自动流动的源动力。

**实时分析**，是对显性数据的进一步理解，将感知的数据转化成认知的信息的过程，是对原始数据赋予意义的过程，也是发现物理实体状态在时空域和逻辑域的内在因果性或关联性的过程。大量的显性数据并不一定能够直观地体现出物理实体的内在联系。这就需要经过实时分析环节，利用数据挖掘、机器学习、聚类分析等数据处理分析技术对数据进一步分析估计，使得数据不断“透明”，将显性化的数据进一步转化为直观、可理解的信息。此外，在这一过程中，人的介入也能够为分析提供有效的输入。

**科学决策**，是对信息的综合处理。决策是根据积累的经验、对现实的评估和对未来的预测，为了达到明确的目的，在一定的条件约束下的最优决定。在这一环节，CPS 能够权衡判断当前时刻获取的所有来自不同系统或不同环境下的信息，形成最优决策来对物理空间实体进行控制。分析决策并最终形成最优策略是 CPS 的核心关键环节。这个环节不一定在系统最初投入运行时就能产生效果，往往在系统运行一段时间之后逐渐形成一定范围内的知识。对信息的进一步分析与判断，使得信息真正转变成知识，并且不断地迭代优化，形成系统运行、产品状态、企业发展所需的知识库。

**精准执行**，是对决策的精准物理实现。在信息空间分析并形成的决策最终将会作用到物理空间，而物理空间的实体设备只能以数据的形式接受信息空间的决策。因此，执行的本质是将信息空间产生的决策转换成物理实体可以执行的命令，进行物理层面的实现。输出更为优化的数据，使得物理空间设备运行更加可靠，资源调度更加合理，实现企业高效运营，各环节智能协同效果逐步优化。

**螺旋上升**，数据在自动流动的过程中逐步由隐性数据转化为显性数据，显性数据分析处理成为信息，信息最终通过综合决策判断转化为有效的知识，并固化在 CPS 中，同时产生的决策通过控制系统转化为优化的数据作用到物理空间，使得物理空间的物理实体朝向资源配置更为优化的方向发展。从这一层面来看，数据自动流动应是以资源优化为最终目标“螺旋式”上升的过程。另一角度对 CPS 的认识如图 1-3 所示。



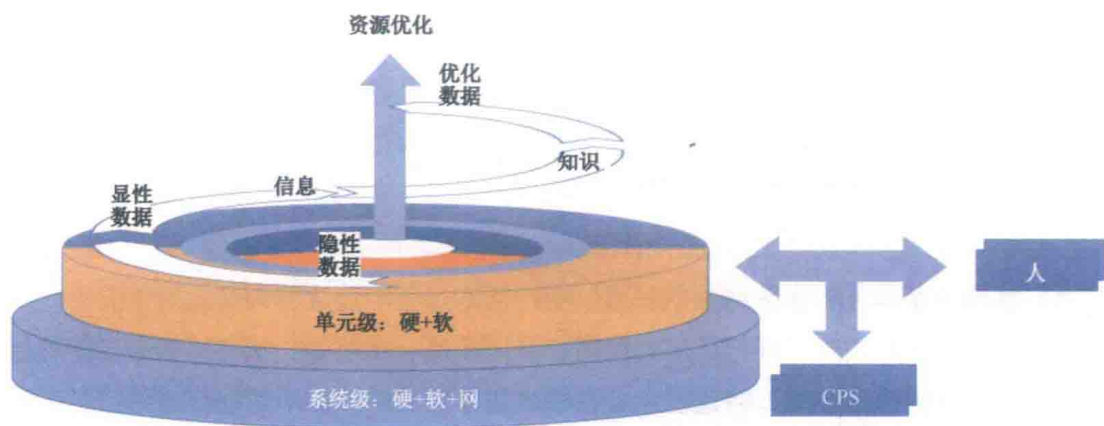


图 1-3 另一角度对 CPS 的认识

## 1.2.2 CPS 的层次

CPS 具有层次性，一个智能部件、一台智能设备、一条智能产线、一个智能工厂都可能成为一个 CPS。同时 CPS 还具有系统性，一个工厂可能涵盖多条产线，一条产线也会由多台设备组成。因此，对 CPS 的研究要明确其层次，定义一个 CPS 最小单元结构。

本部分尝试给出了 CPS 最小单元结构，从最简单的 CPS 入手，对其基础特征进行分析，逐渐扩展过渡到 CPS 的高级形态。在这一逐渐递增的过程中，CPS 需要相关技术实现相关功能，同时表现出更高级的特征。

按照本文对 CPS 外延的理解，本部分将 CPS 划分为**单元级**、**系统级**、**SoS 级**三个层次。单元级 CPS 可以通过组合与集成（如 CPS 总线）构成更高层次的 CPS，即系统级 CPS；系统级 CPS 可以通过工业云、工业大数据等平台构成 SoS 级的 CPS，实现企业级层面的数字化运营。CPS 的层次演进如图 1-4 所示。

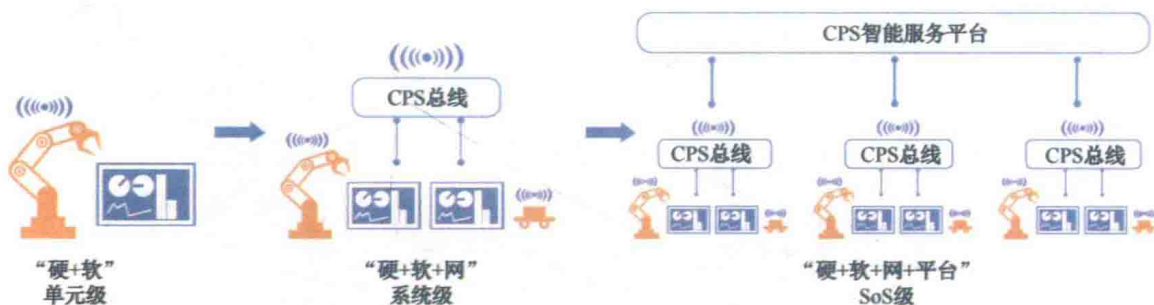


图 1-4 CPS 的层次演进

**单元级 CPS**：一个部件如智能轴承，一台设备如关节机器人等都可以构成一个 CPS 最小单元，单元级 CPS 具有不可分割性，其内部不能分割出更小的 CPS 单元，如图 1-5 所示。单元级 CPS 能够通过物理硬件（如传动轴承、机械臂、电机等）、自身嵌入式软件系统及