



CPS
Cyber-Physical Systems

信息物理系统白皮书

(2017)

指导单位：工业和信息化部信息化和软件服务业司
国家标准化管理委员会工业标准二部

编写单位：中国电子技术标准化研究院
中国信息物理系统发展论坛

2017年3月1日发布

信息物理系统白皮书

(2017)

指导单位：工业和信息化部信息化和软件服务业司
国家标准化管理委员会工业标准二部

编写单位：中国电子技术标准化研究院
中国信息物理系统发展论坛

2017年3月1日发布

关于CPS的几点思考 ——CPS是什么？怎么看？怎么干？

安筱鹏

2006年美国国家科学基金会（NSF）组织召开了国际上第一个关于信息物理系统的研讨会，并对Cyber-Physical Systems（即CPS）这一概念做出详细描述。此后美国政府、学术界和产业界高度重视CPS的研究和应用推广，并将CPS作为美国抢占全球新一轮产业竞争制高点的优先议题。2013年德国《工业4.0实施建议》将CPS作为工业4.0的核心技术，并在标准制定、技术研发、验证测试平台建设等方面做出了一系列战略部署。CPS因控制技术而起、信息技术而兴，随着制造业与互联网融合迅速发展壮大，正成为支撑和引领全球新一轮产业变革的核心技术体系。

《中国制造2025》提出，“基于信息物理系统¹的智能装备、智能工厂等智能制造正在引领制造方式变革”，要围绕控制系统、工业软件、工业网络、工业云服务和工业大数据平台等，加强信息物理系统的研发与应用。《国务院关于深化制造业与互联网融合发展的指导意见》明确提出，“构建信息物理系统参考模型和综合技术标准体系，建设测试验证平台和综合验证试验床，支持开展兼容适配、互联互通和互操作测试验证。”

当前，《中国制造2025》正处于全面部署、加快实施、深入推进的新阶段，面对信息化和工业化深度融合进程中不断涌现的新技术、新理念、新模式，迫切需要研究信息物理系统的背景起源、概念内涵、技术要素、

¹ 当前，国内业界针对CPS有“信息物理融合系统”、“赛博物理系统”、“信息物理系统”、“赛博实体融合系统”等多种译法。为了便于统一认识，本文采用《中国制造2025》中关于CPS“信息物理系统”这一提法。

应用场景、发展趋势，以凝聚共识、统一认识更好的服务于制造强国建设。现结合两化深度融合工作，就信息物理系统谈几点认识和体会：

一、一个总体定位：CPS是支撑两化深度融合的一套综合技术体系

信息化和工业化融合是人类社会两个重要发展历史进程的交汇。从社会形态演进角度看，其所引发的生产方式变革与生活方式调整正在构建信息社会发展新蓝图；从经济发展角度看，其所推动的资源配置方式优化与发展方式转变正在构建现代产业体系新格局；从工业发展角度看，其所催生的智能化技术装备、协同化创新体系、柔性化生产方式、集约化资源利用、精准化管理模式正在重塑新时期国家竞争新优势。

我国正处于信息化大背景下工业化加速发展的历史时期。党的十七大做出了大力推进信息化与工业化融合的战略部署，十八大又进一步提出信息化和工业化深度融合。去年4月19日，习近平总书记在网络安全和信息化工作座谈会上强调要“做好信息化和工业化深度融合这篇大文章”。推动信息化和工业化融合是历史赋予工业和信息化部的重要使命，是立部之本，更是全国工业和信息化系统的共同责任。

推动信息化和工业化深度融合，就是要深刻把握全球信息化深入发展与中国工业化进程加速交汇的时代特征，在全面提高信息化水平的基础上，促进信息技术向工业体系全面渗透，加快实现信息化基础上的新型工业化。推动信息化和工业化深度融合，就是要实现信息技术从单项业务应用向多业务综合集成转变，从单一企业应用向产业链协同应用转变，从局部优化向全业务流程再造转变，从提供单一产品向提供一体化的“产品+服务”转变，从传统的生产方式向柔性智能的生产方式转变，从实体制造向实体制造与虚拟制造融合的制造范式转变。

从实践来看，两化深度融合具有四个基本特征：**一是内生性**，两化深度融合是企业提升劳动生产率、获取竞争新优势的重要手段和途径，具有

内生的自增强机制。**二是创新性**，两化深度融合是一个伴随技术、商业模式和组织体系创新的过程，需要构建相适应的制度和管理新模式。**三是层次性**，两化深度融合体现在技术、产品、装备、工艺、管理等方面，也体现在发展理念、产业体系、生产方式、业务模式等方面。**四是长期性**，两化深度融合是一个从局部到整体的拓展、从点线到面的延伸、从技术变革到组织制度变迁的演进，这一转变是不断持续演进的过程。

当前，面对抢占新一轮科技革命和产业变革竞争制高点的新形势，面对“以加快新一代信息技术与制造业深度融合为主线，以推进智能制造为主攻方向”的战略方针，面对从制造大国向制造强国转变的战略任务，迫切需要构建支撑两化深度融合的技术体系。**信息物理系统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。**可以看出，信息物理系统是工业和信息技术范畴内跨学科、跨领域、跨平台的综合技术体系所构成的系统，覆盖广泛、集成度高、渗透性强、创新活跃，是两化融合支撑技术体系的集大成。信息物理系统能够将感知、计算、通信、控制等信息技术与设计、工艺、生产、装备等工业技术融合，能够将物理实体、生产环境和制造过程精准映射到虚拟空间并进行实时反馈，能够作用于生产制造全过程、全产业链、产品全生命周期，能够从单元级、系统级到系统之系统（SoS）级不断深化，实现制造业生产范式的重构。从新一轮产业变革的全局出发，结合多年来推动两化融合的实践，我们认为，信息物理系统是**支撑信息化和工业化深度融合的综合技术体系**。

二、四大技术要素：“一硬、一软、一网、一平台”是CPS的四大核心技术要素

美国国家科学基金会、美国国家标准与技术研究院、德国国家科学与工程院、欧盟第七框架计划等研究机构或科研项目对信息物理系统的概念、定义不尽相同，但总体来看，其本质就是构建一套赛博（Cyber）空间与物理（Physical）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。状态感知就是通过各种各样的传感器感知物质世界的运行状态，实时分析就是通过工业软件实现数据、信息、知识的转化，科学决策就是通过大数据平台实现异构系统数据的流动与知识的分享，精准执行就是通过控制器、执行器等机械硬件实现对决策的反馈响应，这一切都依赖于一个实时、可靠、安全的网络。我们可以把这一闭环赋能体系概括为“一硬”（感知和自动控制）、“一软”（工业软件）、“一网”（工业网络）、“一平台”（工业云和智能服务平台），即“新四基”。“新四基”与中国制造2025提出的“四基”（核心基础零部件、先进基础工艺、关键基础材料和产业技术基础）共同构筑了制造强国建设之基。

感知和自动控制是数据闭环流动的起点和终点。感知的本质是物理世界的数字化，通过各种芯片、传感器等智能硬件实现生产制造全流程中 人、设备、物料、环境等隐性信息的显性化，是信息物理系统实现实时分析、科学决策的基础，是数据闭环流动的起点。与人体类比，可以把感知看作是 人类接收外部信息的感觉器官，提供视觉、听觉、嗅觉、触觉和味觉这“五觉”。自动控制是在数据采集、传输、存储、分析和挖掘的基础上做出的精准执行，体现为一系列动作或行为，作用于人、设备、物料和环境上，如分布式控制系统（DCS）、可编程逻辑控制器（PLC）及数据采集与监视控制系统（SCADA）等，是数据闭环流动的终点。与人体类

比，根据指令信息完成特定动作和行为的骨骼和肌肉可以看作是控制的执行机构。

工业软件是对工业研发设计、生产制造、经营管理、服务等全生命周期环节规律的模型化、代码化、工具化，是工业知识、技术积累和经验体系的载体，是实现工业数字化、网络化、智能化的核心。简而言之，工业软件是算法的代码化，算法是对现实问题解决方案的抽象描述，仿真工具的核心是一套算法，排产计划的核心是一套算法，企业资源计划也是一套算法。**工业软件定义了信息物理系统，其本质是要打造“状态感知-实时分析-科学决策-精准执行”的数据闭环，构筑数据自动流动的规则体系，应对制造系统的不确定性，实现制造资源的高效配置。**与人体类比，工业软件代表了信息物理系统的思维认识，是感知控制、信息传输、分析决策背后的世界观、价值观和方法论，是通过长时间工作学习而形成的。

工业网络是连接工业生产系统和工业产品各要素的信息网络，通过工业现场总线、工业以太网、工业无线网络和异构网络集成等技术，能够实现工厂内各类装备、控制系统和信息系统的互联互通，以及物料、产品与人的无缝集成，并呈现扁平化、无线化、灵活组网的发展趋势。工业网络主要用于支撑工业数据的采集交换、集成处理、建模分析和反馈执行，是实现从单个机器、产线、车间到工厂的工业全系统互联互通的重要基础工具，是支撑数据流动的通道。物质（机械、如导线）连接、能量（物理场、如传感器）连接、信息（数字、如比特）连接、乃至意识（生物场，如思维）连接，为打造万物互联的世界提供了基础和前提。与人体类比，工业网络构成了经路脉络，可以像神经系统一样传递信息。

工业云和智能服务平台是高度集成、开放和共享的数据服务平台，是跨系统、跨平台、跨领域的数据集散中心、数据存储中心、数据分析中心和数据共享中心，**基于工业云服务平台推动专业软件库、应用模型库、产品知识库、测试评估库、案例专家库等基础数据和工具的开发集成和开**

放共享，实现生产全要素、全流程、全产业链、全生命周期管理的资源配置优化，以提升生产效率、创新模式业态，构建全新产业生态。这将带来产品、机器、人、业务从封闭走向开放，从独立走向系统，将重组客户、供应商、销售商以及企业内部组织的关系，重构生产体系中信息流、产品流、资金流的运行模式，重建新的产业价值链和竞争格局。国际巨头正加快构建工业云和智能服务平台，向下整合硬件资源、向上承载软件应用，加快全球战略资源的整合步伐，抢占规则制定权、标准话语权、生态主导权和竞争制高点。与人体类比，工业云和智能服务平台构成了决策器官，可以像大脑一样接收、存储、分析数据信息，并分析形成决策。

三、三个层次体系：单元级、系统级、系统之系统级是CPS的三个层次

理解和认识信息物理系统要树立系统观和层次观，要深刻把握信息物理系统演进和发展的规律。具体来说，信息物理系统具有明显的层级特征，小到一个智能部件、一个智能产品，大到整个智能工厂都能构成信息物理系统。信息物理系统建设的过程就是从单一部件、单机设备、单一环节、单一场景的局部小系统不断向大系统、巨系统演进的过程，是从部门级到企业级、再到产业链级、乃至产业生态级演进的过程，是数据流闭环体系不断延伸和扩展的过程，并逐步形成相互作用的复杂系统网络，突破地域、组织、机制的界限，实现对人才、技术、资金等资源和要素的高效整合，从而带动产品、模式和业态创新。

单元级是具有不可分割性的信息物理系统最小单元。可以是一个部件或一个产品，通过“一硬”（如具备传感、控制功能的机械臂和传动轴承等）和“一软”（如嵌入式软件）就可构成“感知-分析-决策-执行”的数据闭环，具备了可感知、可计算、可交互、可延展、自决策的功能，典型如智能轴承、智能机器人、智能数控机床等。每个最小单元都是一个可被识别、定位、访问、联网的信息载体，通过在信息空间中对物理实体的身

份信息、几何形状、功能信息、运行状态等进行描述和建模，在虚拟空间也可以映射形成一个最小的数字化单元，并伴随着物理实体单元的加工、组装、集成不断叠加、扩展、升级，这一过程也是最小单元在虚拟和实体两个空间不断向系统级和系统之系统级同步演进的过程。

系统级是“一硬、一软、一网”的有机组合。信息物理系统的多个最小单元（单元级）通过工业网络（如工业现场总线、工业以太网等，简称“一网”），实现更大范围、更宽领域的自动流动，就可构成智能生产线、智能车间、智能工厂，实现了多个单元级CPS的互联、互通和互操作，进一步提高制造资源优化配置的广度、深度和精度。系统级CPS基于多个单元级最小单元的状态感知、信息交互、实时分析，实现了局部制造资源的自组织、自配置、自决策、自优化。由传感器、控制终端、组态软件、工业网络等构成的分布式控制系统（DCS）和数据采集与监控系统（SCADA）是系统级CPS，由数控机床、机器人、AGV小车、传送带等构成的智能生产线是系统级CPS，通过制造执行系统（MES）对人、机、物、料、环等生产要素进行生产调度、设备管理、物料配送、计划排产和质量监控而构成的智能车间也是系统级CPS。

系统之系统级（即SoS级）是多个系统级CPS的有机组合，涵盖了“一硬、一软、一网、一平台”四大要素。SoS级CPS通过大数据平台，实现了跨系统、跨平台的互联、互通和互操作，促成了多源异构数据的集成、交换和共享的闭环自动流动，在全球范围内实现信息全面感知、深度分析、科学决策和精准执行。**基于大数据平台，通过丰富开发工具、开放应用接口、共享数据资源、建设开发社区，加快各类工业APP和平台软件的快速发展，形成一个赢者通吃的多边市场，构建一个新的产业生态。**西门子Mindsphere、GE Predix以及海尔COSMO、PTC的ThingWorx等软件和大数据平台，通过实现横向、纵向和端到端集成，形成了开放、协同、共赢的产业新生态，体现了SoS级CPS的发展方向。

四、五点统一认识：继承性与创新性统一、理论性与指导性统一、阶段性 with 演进性统一、层次性与系统性统一、实体制造与虚拟制造统一

一部工业革命的断代史，就是一部具有划时代意义的颠覆性产品的创新史，从蒸汽机到电动机，从手摇机床到数控机床，从阿帕网到互联网，从功能手机到智能手机，都预示一个新时代的开始。信息物理系统作为一项颠覆性创新技术，正在带来制造体系的重构与制造范式的迁移，昭示着人类正进入新工业革命时代。认识信息物理系统，需要坚持五个统一。

继承性与创新性的统一。信息技术产业的发展史，就是一部传承与颠覆、追赶与超越、竞合与重生相互交织的发展史。信息物理系统是新一轮产业革命的奥林匹克，它永恒的主题是更高更快更强，是如何超越和不被超越。信息物理系统由美德等发达国家提出，我们看到的是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，其背后是一个国家对产业生态的驾驭能力，是一个国家实力的消涨。面对产业生态系统构建的重大窗口期，面对构建技术先进、产业领先、安全可控的历史任务，我们需要继承国外优秀的研究成果，需要系统总结中国两化融合的多年实践，更需要有领跑者思维和持续创新的勇气，提出具有中国特色的信息物理系统的技术架构，增强产品和服务的定义能力、产业生态的驾驭能力。

理论性与指导性的统一。信息物理系统不仅仅是一套技术体系，也是一套人类认识和改造世界的新方法，是一套制造业价值观、方法论、发展模式和运行规律的认识框架。信息物理系统在中国的应用和发展必须与中国的实践相结合，从中国的工业实践出发，体现对实践规律的理论认识。从本质上来说，开展信息物理系统的研究就是要构建一套符合我国国情的信息化和工业化深度融合的技术体系，通过这套技术体系形成指导我国工业实践的方法论、技术谱系、标准体系。因此，我们提出信息物理系统包含“一硬、一软、一网、一平台”四大技术要素，让信息物理系统这一概

念在我国真正落地。

阶段性与演进性的统一。当前，我们正处在一个技术变革的时代，信息技术发展日新月异，颠覆、跨界、融合、生态、创新将是信息技术产业的主题。对信息物理系统而言，技术在发展，产品在创新，体系在重建，能够实现感知、分析、决策、执行等环节的新技术将会不断涌现，当前的技术体系可能被未来的技术体系所颠覆，因此对信息物理系统的认识不是静态的，而是动态的、演进的、优化的过程。同时，信息物理系统的建设，只有起点，没有终点，是一个认识和应用不断深化的过程。白皮书体现了当前阶段对信息物理系统的认识，随着对信息物理系统认识的加深，理解的深入，需要对白皮书不断更新，对技术体系建设不断完善。

层次性与系统性的统一。信息技术扩散、融合、应用的内在逻辑是在比特的汪洋中重构原子的运行轨道，信息物理系统建设就是在比特的世界中构建物质世界的运行框架和体系，是以数据自动流动实现资源优化，这将是一个从局部到全局、从初级到高级、从单机到系统逐步演进的过程。信息物理系统层次性体现为最小单元叠加成为小系统，小系统叠加成为大系统，大系统叠加构建成巨系统，这带来资源优化配置从单点到多点、从静态到动态、从低级到高级的跃升。感知、通信、计算、控制相互作用构成了信息物理系统的基本形态，其不断叠加形成的复杂巨系统是信息物理系统演进的最终形态，“一硬、一软、一网、一平台”既是信息物理系统相对独立的四大技术要素，也是相互融合、互相促进的集成系统，这是CPS系统性的集中体现。从工业领域的实施路径和落地方案来看，智能制造不只是“黑灯工厂”，不只是“机器换人”，不单纯是设备改造，也不是简单地软件堆叠，而是制造系统的集成、制造体系的重建、制造模式的再造。对于信息物理系统而言，其不是传统制造思维的线性延伸，不是传统制造要素的全面展开，也不完全是制造阶段的整体跨越，而应该是适用性和先进性、局部实现和整体实现的相对统一。

实体制造和虚拟制造的统一。ICT对人类社会带来的重大变革是创造一个新世界：信息空间。制造业数字化、网络化、智能化的过程，是在信息空间重建制造流程，并基于此不断提升制造效率的过程。未来制造，将是基于信息物理系统的制造，将是数据驱动、软件定义、平台支撑的制造，将是实体制造与虚拟制造实时交互的制造，无论是产品、设备、工艺流程都将以数字双胞胎的形态出现。虚拟制造的应用，将会经历从碎片化到一体化、从局部到全局、从静态到动态的过程，逐渐涵盖研发设计、制造过程、服务运营的全流程。

五、五条建设思路：资源优化是目标、数据自动流动是关键、工业软件是核心、新型能力培育是主线、系统解决方案是重点

信息物理系统通过数据、软件、网络、平台等信息技术与人员、机器、物料、环境、供应链等制造要素的深度融合，构建一个信息空间与物理空间数据自动流动的闭环赋能体系，实现生产制造的自主协调、智能优化和持续创新，推动制造业与互联网融合发展。总的来看，要围绕以下五个方面建设信息物理系统。

资源优化是目标。工业革命300年来，技术变革是永恒的主题，而不变的主题是对制造效率、成本、质量永恒的追求。企业是社会资源配置的一种组织，是通过对社会资本、人才、设备、土地、技术、市场等各种资源进行组合配置来塑造企业能力，满足客户需求的一种社会组织。企业的竞争就是资源配置效率的竞争，是能力不断跃升的竞争。如何缩短一个产品研发周期、提高一部机床使用精度、提高一个班组的产量、提高一组设备的使用效率、提升仓储周转次数、减少一类部件库存数量、缩短客户服务的响应时间、降低资金使用成本等，所有这些本质上都是如何优化资源使用效率。信息物理系统通过创建一个与实物制造相对应的虚拟制造空间，实现了研发设计、试验、制造、服务在虚拟空间的仿真测试和生产，

形成人类认识和改造世界新方法，实现资源优化的新模式。**一是在资源优化的频率上，从静态优化走向动态优化**，摒弃传统的以不变应万变的思维模式，根据需求和环境的变化实时调整资源配置方式，企业面对个性需求带来生产批次越来越多、批量越来越少的新形势，面对制造环节柔性生产的要求，面对不断追求零库存的过程就是资源优化频率加快的过程，对资源优化频率的追求将是无止境的。**二是在资源优化的范围，从单点局部走向全局优化**，参与优化的资源沿着点、线、面、体、大系统、巨系统方向不断拓展，局部优化不能替代全局优化，全局优化也不是局部优化的总和。**三是在资源优化方法论上，从实体优化走向虚实结合优化，从传统的“试错法”到基于数字仿真的“模拟择优法”的演变，这一新方法推动了制造范式的迁移**，通过构建制造业快速迭代、持续优化、数据驱动的新方式，重建制造效率、成本和质量管控新体系，实现更短的研发周期、更低的制造成本、更高的产品质量和更好的客户体验。

数据自动流动是关键。当感知无所不在，连接无所不在，数据一定无所不在。**信息物理系统的本质就是构建一套数据自动流动的运行体系，即将正确的数据（所承载知识）、在正确的时间、传递给正确的人和机器，以信息流带动技术流、资金流、人才流、物资流，进而不断优化制造资源的配置效率。**新一代信息技术的发展带来最本质的变化是实现了生产全流程、全产业链、全生命周期管理数据的可获取、可分析、可执行。**这带来了数据驱动的服务**，智能互联产品正演变为一个客户需求数据实时感知的平台，演变为基于时实数据的客户服务平台。**带来了数据驱动的创新**，企业对客户现实需求和潜在需求的深度挖掘、实时感知、快速响应、及时满足，越来越依赖于需求—功能—创意—产品链条数据联动的速度、节奏和效率。**带来了数据驱动的新模式**，数字化模型普遍存在于生产体系各个环节，构建了面向设计、生产、运营、服务和管理的**产品库、知识库、专家库**，衍生出个性化定制、极少量生产、服务型制造和云制造等新的生产模

式。**带来了数据驱动的决策**，企业内部的横向集成和企业间的纵向集成实现了数据的及时性、完整性、准确性和可执行性，推动数据—信息—知识—决策持续转化，构建企业运营新机制。

工业软件是核心。工业软件是一种以数据与指令集合对知识、经验、控制逻辑等进行固化封装的数字化（代码化）技术，构建了工业领域中数据自动流动的规则体系，是业务、流程、组织的赋能工具和载体，解决了复杂制造系统的不确定性、多样性等问题。工业软件作为一种工具、要素和载体，为制造业建立了一套信息空间与物理空间的闭环赋能体系，实现了物质生产运行规律的模型化、代码化、软件化，使制造过程在虚拟世界实现快速迭代和持续优化，并不断优化物质世界的运行。产品设计和全生命周期管理软件（如CAX、PLM等）建立了高度集成的数字化模型以及研发工艺仿真体系，生产制造执行系统（MES）是企业实现纵向整合的核心，联通了设备、原料、订单、排产、配送等各主要生产环节和生产资源，企业管理系统（如ERP、WMS、CRM）为企业的业务活动进行科学管理，改变了企业管理模式和管理理念。在网络化协同生产、个性化定制、服务型制造等生产新模式的驱动下，工业软件定制化、平台化、网络化和智能化已成为工业软件巨头推动产品变革的重要方向。

新型能力培育是主线。信息物理系统作为支撑两化深度融合的一套综合技术体系，落到企业具体实践上，其最终目的是打造企业互联网时代背景下的新型能力。历次技术进步引发的工业革命，不仅推动了制造范式的变革，也伴随着企业核心能力体系的变迁。当前，**伴随着制造业新产品、新需求、新模式的快速发展，伴随着制造系统越来越复杂及生产全流程不确定性增加，迫切需要CPS系统更广泛地应用和普及。**CPS的出现和应用，它不仅仅是CPS部件、单元、数控机床、智能机器人、自动化生产线的引入，也不仅仅是企业内部的流程再造、组织优化，最终都要落实到企业核心能力提升上来，并不断推动从传统能力拓展到新型能力。因此，企

业推进信息物理系统建设，不能只单纯强调信息技术的先进性，而要围绕企业新型能力打造不断推进数据、技术、业务流程、组织结构的互动创新和持续优化，将技术的进步、组织结构的变革、业务流程的优化转化为企业的新型能力，诸如个性化定制、精益管理、风险管控、供应链协同、市场快速响应等新型能力，进而重构企业生产方式、服务模式和组织形态，不断获取差异化的可持续竞争优势。

系统解决方案是重点。推动信息物理系统的应用与发展既需要核心关键技术的突破，也需要一批具有广泛应用前景的行业系统解决方案。美德日等发达国家从各自发展特点出发，围绕信息物理系统的建设、使用和推广，组建产业联盟、研制参考架构、研发共性技术、建设试验环境，逐步摸索出一套方法、路径和模式，形成了多种解决方案。**率先打造基于信息物理系统的成熟、完整、可复制的解决方案，正成为国际巨头竞争的制高点和引领行业转型发展的风向标。**在实践中，迫切需要抓住制造资源碎片化、在线化、再重组、再优化的机遇，在打造信息物理系统共性平台的基础上，要围绕产品、装备、工具、客户、供应链、第三方应用等要素的数字化、网络化、智能化，逐步构建跨设备、跨产线、跨车间、跨工厂、跨企业的信息物理系统解决方案。

六、六项重点任务：加强顶层设计、夯实技术基础、推动测试验证、组织试点示范、强化信息安全、深化国际合作

当前，信息物理系统相关技术和产业仍处在起步期，应抢抓机遇、提早布局、整合资源、重点突破，抢占发展主动权。当前，要将基于CPS的产业生态系统培育和构建作为新一轮产业变革的制高点，将技术产业发展、测试平台建设、解决方案推广作为生态建设的三大环节。具体地，要以加强顶层设计为基础，以突破技术和产业瓶颈为关键，以强化工业信息安全为保障，加强国际合作，通过搭建测试验证公共服务平台推进相关技

术应用的测试验证，以面向特定行业的应用示范带动相关技术和系统解决方案的产业化。

加强顶层设计。信息物理系统是工业和信息技术跨界交织、深度融合的新型技术体系，涉及多技术、多标准、多领域，需要加大统筹协调力度，加强顶层设计。**一是**持续跟踪信息物理系统技术、产业、应用发展趋势，凝聚行业发展共识，发布并不断更新《信息物理系统白皮书》，在《中国制造2025》、《国务院关于深化制造业与互联网融合发展的指导意见》的战略部署中，强化相关任务的落实。**二是**加快制定信息物理系统参考架构，形成信息物理系统发展的路线图，牵引和指导技术标准、技术研发、实验验证、应用推广等工作全面展开。**三是**完善标准体系，编制信息物理系统综合标准化建设指南，开展基础共性标准、关键技术标准和行业应用标准的研制，加快构建信息物理系统术语、数据和信息模型等基础标准，工业大数据、工业云、工业软件等平台 and 软件标准，以及传感控制、生产设施、工业网络等领域的标准体系。

夯实技术基础。信息物理系统技术演进正处于新旧融合、快速迭代、多方博弈的新阶段，当前要以“一硬、一软、一网、一平台”为重点，加大支持力度，推进关键技术研发和产业化。**一是**提升感知与自动控制产业支撑能力，突破核心芯片、驱动器、现场总线、工业以太网等关键器件和技术的发展瓶颈，加快推动智能传感器、可编程逻辑控制器、分布式控制系统、数据采集与监控系统等研发和产业化。**二是**实施工业技术软件化工程，促进软件技术与工业技术深度融合，重点突破工业嵌入式软件、制造执行系统等传统工业软件，虚拟仿真、工业数据分析等新型工业软件，提升工业软件的集成应用能力。**三是**建设工业云和智能服务平台，围绕智能装备接入工业云的数据采集、网络连接和调度管理等重点环节，突破通信协议、数据接口、数据分析等关键技术，提升工业云平台系统解决方案供给能力，推动工业设计模型、数字化模具、产品和装备维护知识库等制造

资源向全社会的开放共享，鼓励培育基于平台的新型生产组织模式。**四是**推动工业网络发展，制定工业互联网总体体系架构方案，明确关键技术路径，加快IPv6、泛在无线等技术在工厂内部网络的部署，推动软件定义网络、5G等技术在网络基础设施中的应用。

开展测试验证。测试验证平台是实现信息物理系统高效适配、安全可靠的关键载体，是整合产业链创新资源的重要手段，是当前阶段推广普及信息物理系统的重要抓手。美工业互联网、德工业4.0平台组织几百家企业参与近百个各类测试床建设。当前要以信息物理系统核心组件为对象，建立通用性和专业性相结合的应用测试验证平台，加速信息物理系统关键软硬件技术应用和产业化，依托平台汇聚产业和打造生态系统。**一是**建设信息物理系统通用性技术测试验证平台，以“一硬、一软、一网、一平台”为重点，开展通用性技术的可靠性、开放性、互通性测试验证，促进相关通用性标准的建立和行业应用的推广。**二是**建设面向特定行业应用的专业性测试验证平台，围绕钢铁、石化、航空等不同重点行业，建设通用性网络和生产试验床，开展设备和系统互通性、系统解决方案及技术测试验证，验证实现通用性技术在特定生产环境、生产工艺下的适用性和可用性稳定性和鲁棒性。**三是**支持研究院所、运营商、设备商及制造企业建设面向信息物理系统的工业网络测试验证平台建设，推动SDN、5G等新型工业网络技术在工业中的应用。**四是**建设信息物理系统体验中心，聚焦具体行业领域，模拟客户现场真实环境，开展解决方案、最佳实践等示范、演示和推广示范。

组织试点示范。行业应用试点示范是牵引技术应用测试和标准体系建立的有效手段，应从特定行业选择、特定应用场景两个角度来考虑试点示范工作的推进思路。**一是**开展信息物理系统技术平台试点示范，在基础数据采集、设备互联互通、异构数据集成、生产资源优化等领域，形成一批行业应用示范项目。**二是**开展CPS行业系统解决方案试点示范，面向生产

设备及生产线改造、数据共享、工艺流程改造、能耗智能管控等重点，通过匹配客户需求和信息物理系统最佳实践，可复制、可推广的行业系统解决方案，建设应用案例库，形成边研究、边试点、边推广的联动模式。**三是**开展部省共建，以信息物理系统在区域落地为重点，通过强化省部资源统筹，建设国家创新中心、测试验证平台、试点示范项目、紧缺人才培养等，建设一批信息物理系统示范区。

强化信息安全。信息物理系统应用越深化，工业信息系统安全形势将越严峻，要将工业控制系统安全作为当前信息物系统推进和部署的重要内容，同规划、同部署、同推进，打造安全可靠产业发展环境。**一是**完善工业信息安全政策标准体系，研究制定《工业控制系统信息安全行动计划》、《工业控制系统信息安全防护能力评估方法》等政策文件，以及工业信息安全评估、测试等相关标准。**二是**建设“国家工业信息安全发展研究中心”，培育工业信息安全国家队，建设工业信息安全态势感知、风险预警、应急处置、安全防护、产业推进能力。**三是**增强工业信息安全技术产业支撑能力，建设工业信息安全态势感知、信息共享等技术平台，开展工业控制系统信息安全年度检查，组织工控安全防护能力试点示范。

深化国际合作。当前，美德日等不断加强信息物理系统国际合作，强化全球发展主导权。我国应抓住信息物理系统刚刚起步、国际格局正在形成、创新空间大的历史契机，将国际合作作为战略举措系统推进，积极主动、取长补短，在全球发展中把握主动权。**一是**推动政府、协会、联盟及企业等不同层面，开展与德国工业4.0、美国工业互联网以及国际标准化组织、国际产业组织之间在技术研究、测试验证、试点示范、应用推广、标准化等方面的交流与合作，探索国际合作新领域、新机制。**二是**积极利用中德智能制造合作机制，将信息物理系统作为中德企业合作、园区合作、标准合作、人才培养的重点内容。**三是**引导企业积极参与国际竞合发展，鼓励企业积极参与全球信息物理系统技术架构、标准化、测试验证平

台、解决方案等研究和成果输出，提升国际话语权和全球影响力。

推进两化深度融合是一项富有创新性的伟大实践，信息物理系统作为支撑两化深度融合的综合技术体系，是推动制造业与互联网融合发展的重要抓手，需要在技术研发、标准研制和产业应用等方面尽早部署。为此，我司指导中国电子技术标准化研究院，联合国内相关单位，编撰形成了《信息物理系统白皮书（2017）》。本白皮书在编写过程中集众人之智、采众家之长，体现了当下我国对信息物理系统的认识水平。下一步，要围绕信息物理系统共性关键技术研发、测试验证平台建设、综合标准化体系建设及试点示范推进等方面，统筹开展工作。希望能够通过白皮书为相关人员提供参考，通过社会各界共同努力，为我国信息物理系统的发展贡献一份力量。

是为序。

信息物理系统白皮书（2017）

指导单位

工业和信息化部信息化和软件服务业司
国家标准化管理委员会工业标准二部

编写单位（排名不分先后）

中国电子技术标准化研究院
中国船舶工业系统工程研究院
中国航空综合技术研究所
华为技术有限公司
北京元工国际科技股份有限公司
同济大学
广东工业大学
石化盈科信息技术有限责任公司
沈机（上海）智能系统研发设计有限公司
中国电子信息产业发展研究院（软件测评中心）
中国信息通信研究院
中控科技集团有限公司
海尔集团
参数技术公司（PTC）
中国石油化工股份有限公司九江分公司
江苏极熵物联科技有限公司

信息物理系统白皮书（2017）

指导委员会

谢少锋	工业和信息化部信息化和软件服务业司	司 长
安筱鹏	工业和信息化部信息化和软件服务业司	副 司 长
戴 红	国家标准化管理委员会工业标准二部	主 任
赵 波	中国电子技术标准化研究院	院 长
林 宁	中国电子技术标准化研究院	书 记

专家咨询委员会

李伯虎	中国工程院	院 士
钱 锋	中国工程院	院 士
宁振波	中航工业信息技术中心	首 席 顾 问
赵 敏	中国发明协会发明方法研究分会	会 长
苗建军	中国航空综合技术研究所	副总工程师
邱伯华	中国船舶工业系统工程研究院 海洋智能技术中心	主 任
王建伟	工业和信息化部信软司两化融合推进处	处 长
冯 伟	工业和信息化部信软司两化融合推进处	副 处 长

编写人员（排名不分先后）

周 平	郭 楠	于秀明	贾 超	刘献礼	苏 伟	陈 强
杨梦培	王程安	张 羽	蒋云鹏	吴灿辉	彭 炎	钟优平
丁德宇	樊留群	陈德基	袁 波	程良伦	肖 红	王 涛
索寒生	贾贵金	朱志浩	刘广杰	洪月蓉	周 峰	张松鹏
袁晓庆	王晓玲	张泉灵	吴坤林	宋治元	刘 平	钟海龙
张星星	孙东来					

内容摘要

自信息物理系统提出以来，美国、德国及欧盟等多个国家和组织先后发布了有关信息物理系统的研究报告，探索信息物理系统技术及其应用。尤其在制造业领域，发展信息物理系统已经成为美国、德国等发达国家实施“再工业化”战略，抢占制造业新一轮竞争制高点的重要举措。在国内，信息物理系统作为支撑两化深度融合的一套综合技术体系，受到广泛的关注，技术研发和应用推广发展迅速。为了积极引导我国信息物理系统发展，中国电子技术标准化研究院组织业内相关专家编写了本白皮书。重点围绕“为什么”、“是什么”、“怎么干”、“怎么建”、“怎么用”、“怎么发展”等方面面向制造业的信息物理系统展开论述。

通过对信息物理系统内涵和外延的深入挖掘，白皮书确定了“**一个总体定位**”，即信息物理系统是支撑两化深度融合的一套综合技术体系，其目标是通过打通**两大空间**（信息空间和物理空间）在数据闭环自动流动的**四个过程**（状态感知、实时分析、科学决策、精准执行）中实现“资源的优化配置”。**“一硬”**（感知和自动控制）、**“一软”**（工业软件）、**“一网”**（工业网络）、**“一平台”**（工业云和智能服务平台）即**“新四基”**是信息物理系统的四大核心技术要素。在数据闭环自动流动的过程中，表现出**六大典型特征**（数据驱动、软件定义、泛在连接、虚实映射、异构集成、系统自治），作用于**三个层次**（单元级、系统级、SoS级）信息物理系统。白皮书依据上述**“一二三四五六”**的总体思路，围绕信息物理系统的内涵、实现、建设与应用、演进进行论述。

第一章简要介绍了信息物理系统的发展背景及面临的问题。从宏观层面回答了“为什么”发展信息物理系统的问题。同时给出本白皮书的编写方法以及对相关问题的说明。

第二章给出了本白皮书对信息物理系统的定性描述，回答了信息物理系统“是什么”的问题，是本白皮书的核心。首先阐述了信息物理系统的发展起源，同时结合国内外专家学者对信息物理系统的认识及我国当前工业发展现状，从信息物理系统的定位、定义和本质三个层面给出了本白皮书的认识；随后考虑信息物理系统的层次性及系统性，对信息物理系统的认识进行了外延，给出了信息物理系统的最小单元，并在此基础上扩展成三种不同的层次；最后总结归纳不同层次信息物理系统所呈现出来的特性，形成六大典型特征并详细描述。

第三章提出了信息物理系统的技术实现，回答了信息物理系统“怎么干”的问题。通过对第二章提出的三个层次信息物理系统的技术架构和技术需求进行分析总结，给出了信息物理系统的技术体系，并对技术体系中相关技术归纳汇总出信息物理系统四大核心技术要素为：“一硬”（感知和自动控制）、“一软”（工业软件）、“一网”（工业网络）和“一平台”（工业云和智能服务平台）即“新四基”。围绕嵌入式软件、MBD、智能感知、虚实融合控制、现场总线、工业以太网、大数据分析等方面对“新四基”中关键技术具体展开。

第四章给出了信息物理系统的建设和应用蓝图，回答了信息物理系统“怎么建”、“怎么用”的问题。从设计、生产、服务和应用四个方面，分析现有工业生产过程的现状和问题，给出了依据信息物理系统的解决思路，并在具体的场景下，对通过信息物理系统实现环节的改造提升进行了描述。最后，根据企业的不同阶段，提出了信息物理系统建设路径。

第五章给出了发展信息物理系统的演进路径，回答了信息物理系统“怎么发展”的问题。以问题导向为原则，从技术攻关和人才培养、标准体系建设、解决方案研究和新生态建立四个方面提出了建议。

最后，附录从国内外研究情况、企业的典型应用、术语和缩略语三个方面对正文进行了补充。

目 录

一、概述	1
1.1 编写背景	1
1.2 编写方法	2
1.3 特别说明	3
二、信息物理系统的内涵	5
2.1 CPS的来源	5
2.2 CPS的认识	7
2.3 CPS的层次	12
2.4 CPS的特征	16
2.4.1 数据驱动	16
2.4.2 软件定义	17
2.4.3 泛在连接	17
2.4.4 虚实映射	18
2.4.5 异构集成	18
2.4.6 系统自治	19
三、信息物理系统的实现	21
3.1 CPS的体系架构	21
3.1.1 单元级	21
3.1.2 系统级	22
3.1.3 SoS级	23
3.2 CPS的技术需求	24
3.2.1 单元级	24
3.2.2 系统级	25
3.2.3 SoS级	25

目 录

3.3 CPS的技术体系	25
3.4 CPS的核心技术要素	27
3.4.1 感知和自动控制	27
3.4.2 工业软件	29
3.4.3 工业网络	32
3.4.4 工业云和智能服务平台	35
3.5 CPS的标准化	37
3.5.1 国内外已开展的标准化工作	37
3.5.2 有待解决的CPS标准化问题	38
3.5.3 CPS标准化重点方向	38
四、信息物理系统的建设和应用	41
4.1 CPS应用场景概览	41
4.2 CPS典型应用场景	42
4.2.1 智能设计	42
4.2.2 智能生产	45
4.2.3 智能服务	48
4.2.4 智能应用	53
4.3 CPS建设路径	58
五、信息物理系统的演进路径	61
附件A：信息物理系统国内外研究和应用综述	63
附件B：信息物理系统典型应用	68
附件C：术语和缩略语	77
参考文献	79
致谢	82

一、概述

1.1 编写背景

随着计算技术、通信技术和智能控制技术的迅速发展，信息物理系统（Cyber-Physical Systems, CPS）一经提出便引起学术界及产业界的广泛重视并保持快速发展。CPS与人类社会生产生活息息相关，具有广泛的应用前景，典型应用场景包括生产制造、交通运输、医疗健康、城市建设等，各国政府及组织纷纷开展CPS相关领域探索。尤其在制造业领域，发展CPS已经成为美国、德国等发达国家实施“再工业化”战略、抢占制造业新一轮科技革命和产业变革制高点的重要举措。

面对复杂的全球产业竞争格局，国务院先后出台了《中国制造2025》（国发〔2015〕28号）和《国务院关于深化制造业与互联网融合发展的指导意见》（国发〔2016〕28号，以下简称《指导意见》），全面部署推进制造强国战略实施，加快推进我国从制造大国向制造强国转变。《指导意见》把发展CPS作为强化融合发展基础支撑的重要组成部分，明确了现阶段CPS发展的主要任务和方向，对推动我国CPS发展具有重要意义^{[1]-[3]}。

与此同时，我们深刻地认识到，CPS发展和应用仍然面临诸多挑战。一是认识不统一。现阶段不同国家或组织对CPS的理解各不相同，对CPS典型特征的认识还不一致。二是技术体系亟待完善和提升。CPS发展的完备技术体系亟需梳理，发展CPS的部分核心关键技术亟待解决。三是典型应用亟需总结。目前CPS在航空航天、船舶、汽车、石化等部分典型制造行业已有一些探索应用，亟需归纳总结典型应用场景特征，建立能体现CPS典型特征的典型应用参考案例，可以为更深更广的应用推广提供参考依据。



为进一步贯彻落实《指导意见》的要求，推动我国CPS发展，支撑制造业与互联网融合，在工信部信息化和软件服务业司的指导下，信息物理系统发展论坛将近期关于CPS的主要研究成果进行整编归纳，同时汇集了学术界、产业界专家学者对CPS发展的真知灼见，编写了本白皮书。

1.2 编写方法

一是研究分析国外相关政策与理论。综合分析美国、德国、欧盟等国家和地区的CPS政策措施，研究学习美国国家标准与技术研究院（NIST）、德国国家科学与工程院（acatech）、IEEE等机构的最新研究成果。例如：美国总统科学技术顾问委员会（PCAST）发布的《挑战下的领先——全球竞争世界中的信息技术研发》^[4]、美国CPS研究指导小组（CPS Steering Group）发布的《信息物理系统概要》^[5]、NIST发布的《信息物理系统框架》^[6]、德国发布的《国家嵌入式系统技术路线图》^[7]、acatech发布的《德国工业4.0实施建议》^[8]、《网络世界的生活》^[9]、欧盟发布的《CyPhERS CPS欧洲路线图和战略》^[10]等。通过开展上述政策和相关理论的研究分析，系统掌握了CPS技术和应用发展最新动向。

二是归纳总结CPS的内涵。在工信部信息化和软件服务业司指导下，我们组织了业内相关领域的专家，经过多轮讨论和论证，从CPS的来源、认识等方面深入研究了CPS的内涵，给出了CPS的定义及其典型特征，同时按照系统和单元复杂度对CPS进行分类，形成CPS认识体系。

三是研究分析国内外典型应用案例。先后研究了NIST工程实验室智能电网项目组发布的CPS测试平台（Testbed）和德国人工智能研究中心（DFKI）建成的世界第一个已投产的CPPS（Cyber-Physical Production Systems, CPPS）实验室等典型应用案例，系统掌握了CPS应用的典型场景、建设路径、价值和面临的挑战。研究了同济大学、浙江大学、广东工业大学、中航信息技术中心、中船系统工程院等高校、科研机构及专

家学者关于信息物理系统研发和应用的最新成果及相关文献著作^{[11]-[16]}，重点分析了中船集团与美国NSF-IMS中心联合成立的海洋智能技术中心（OITC），探讨CPS技术在工业领域的应用研究。

1.3 特别说明

1）本白皮书将“Cyber-Physical Systems”翻译为“信息物理系统”。CPS在引入国内时，业界对其内涵和外延并无统一认识，甚至其译名都存在较大的争议。就中文名称就有“信息物理系统”、“赛博物理系统”、“网络实体系统”、“赛博实体融合系统”等。为表述清晰，本白皮书采用国务院相关文件中用法，统一使用“信息物理系统”。

2）制造业是CPS的主要应用领域之一。CPS涉及制造、医疗、船舶、交通、军事、基础设施建设等多个领域，为使研究范围更加聚焦，本白皮书重点针对制造业领域进行研究并阐述观点。

3）当前社会各界对CPS认识仁者见仁智者见智，本白皮书主要观点内容仅代表参编单位当下对CPS意见看法。对于文中主要观点，欢迎社会各界专家学者提出建议，今后我们将积极吸纳各方专家意见，不断丰富完善白皮书的内容。

二、信息物理系统的内涵

2.1 CPS的来源

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”最早于1982年美国作家威廉·吉布森（William Gibson）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）》中普及，为公众所熟知。

但事实上，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¹的启发，创造了“Cybernetics”这个单词²。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（如图2-1）。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

¹ 1834年著名的法国物理学家和数学家安培（A.M. Ampère）根据希腊语“Kybernetes”（原意指的是希腊轮船上掌舵人）将关于国务管理（Civil Government）的科学命名为“Cybernétique”。在此意义下，“Cybernétique”一词被编入19世纪许多著名词典中。^[16]

² 1948年诺伯特·维纳出版了《Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine》一书，创造了Cybernetics一词。

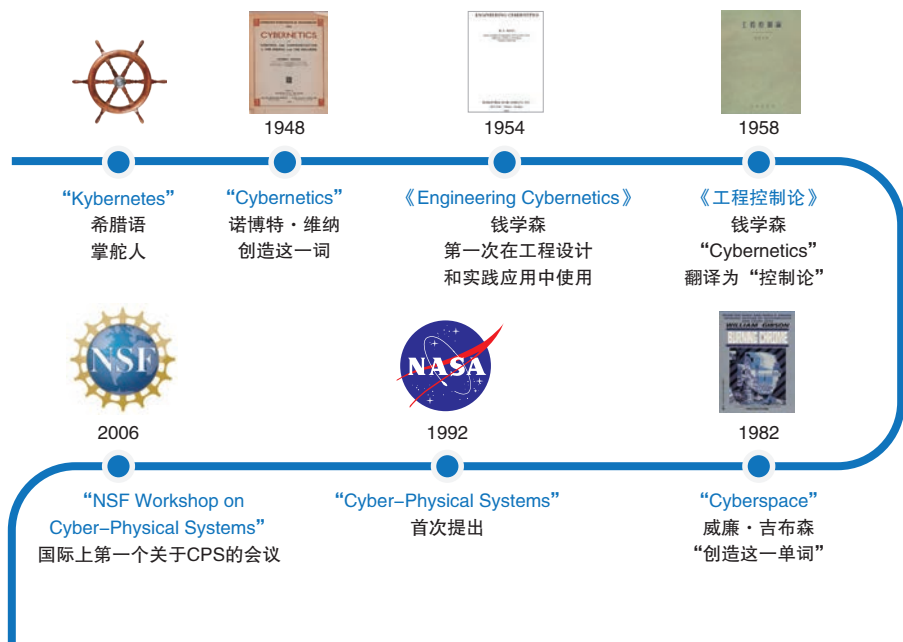


图2- 1 CPS 术语来源历程

统”、“赛博物理系统”、“网络实体系统”、“赛博实体融合系统”等，本白皮书将其翻译为“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，急需对计算、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推动下，信息物理系统顺势出现。

需求来源。当前我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。制造业企业亟需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。

2.2 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2-1汇集了业内主要机构和专家对CPS的认识。

表2-1 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) ^[17]	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。
美国国家标准与技术 研究院CPS公共工作组 (NIST CPS PWG) ^[6]	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 (acatech) ^[9]	CPS是指使用传感器直接获取物理数据和执行器作用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，使整个主机的新功能，服务远远超出了当前嵌入式系统具有控制行为的能力。
Smart America ^[18]	CPS是物联网与系统控制相结合的名称。因此，CPS不仅仅是能够“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。



机构或学者	观点认识
欧盟第七框架计划 ^[10]	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 ^[19]	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 ^[20]	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 ^[21]	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需与我国当前工业发展的现状相结合，并能够指导我国工业的转型升级，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，在我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，本白皮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进行系统全面研究，本白皮书尝试给出对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。**

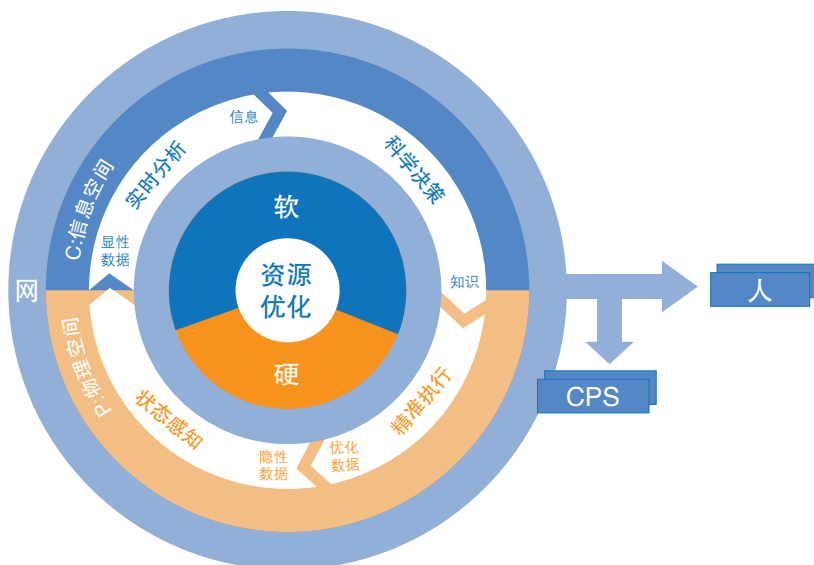


图2- 2 CPS的本质

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如图2-2。具体来说：

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，这些数据暗含在实际过程中方方面面，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的传递到信息空间，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。是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关系的过程。大量的显性数据并不一定能够直观的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，所做的最优决定。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，使得信息真正的转变成知识，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的更加可靠，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。因此对于CPS的本质,可从另一个角度辅助来看如图2-3。

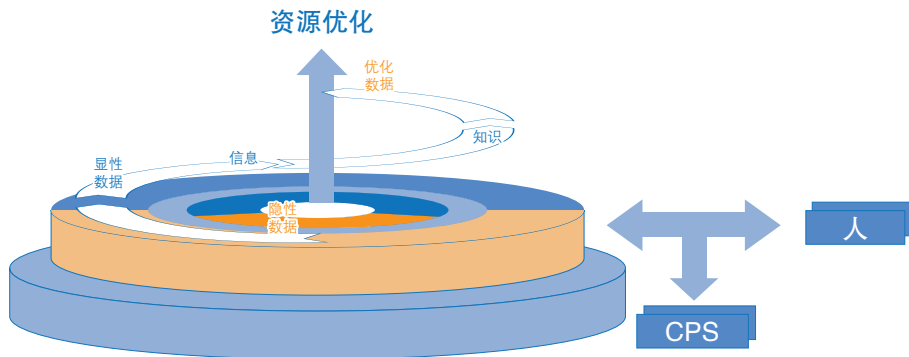


图2-3 另一角度对CPS的认识

2.3 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应逐渐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(System of Systems, 系统之系统级)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

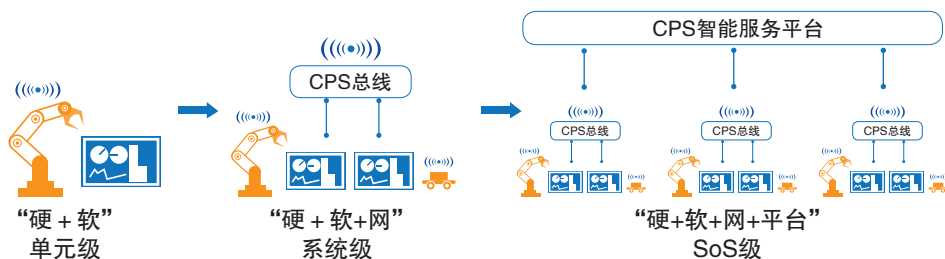


图2-4 CPS的层次演进

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2-4。

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CPS单元如图2-5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通信模块，构成含有“感知-分析-决策-执行”数据自动流动基本的闭环，实现在设备工作能力范围内的资源优化配置（如优化机械臂、AGV小车的行驶路径等）。在这一层级上，感知和自动控制硬件、工业软件及基础通信模块主要支撑和定义产品的功能。



图2-5 单元级CPS示意图



图2-6 系统级CPS示意图

系统级CPS: 在单元级CPS的基础上，通过网络的引入，可以实现系统级CPS的协同调配。在这一层级上，多个单元级CPS及非CPS单元设备的集成构成系统级CPS，如一条含机械臂和AGV小车的智能装配线。多个单元级CPS汇聚到统一的网络（如CPS总线），对系统内部的多个单元级CPS进行统一指挥，实体管理（如根据机械臂运行效率，优化调度多个AGV的运行轨迹），进而提高各设备间协作效率，实现产线范围内的资源优化配置。在这一层级上，网络联通（CPS总线）至关重要，确保多个单元级CPS能够交互协作。

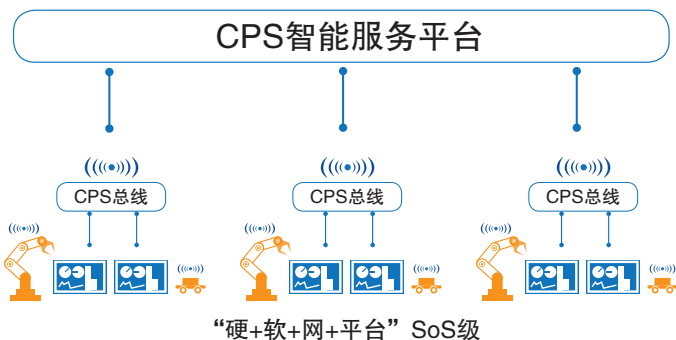


图2-7 SoS级CPS示意图

SoS级CPS:在系统级CPS的基础上，可以通过构建CPS智能服务平台，实现系统级CPS之间的协同优化。在这一层级上，多个系统级CPS构成了SoS级CPS，如多条产线或多个工厂之间的协作，以实现产品生命周期全流程及企业全系统的整合。CPS智能服务平台能够将多个系统级CPS工作状态统一监测，实时分析，集中管控。利用数据融合、分布式计算、大数据分析技术对多个系统级CPS的生产计划、运行状态、寿命估计统一监管，实现企业级远程监测诊、供应链协同、预防性维护。实现更大范围内的资源优化配置，避免资源浪费。

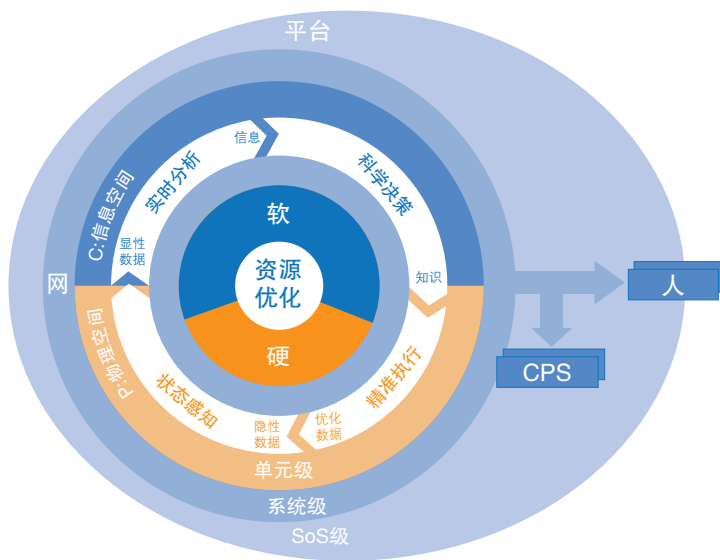


图2- 8 对CPS的再认识

对CPS层次的划分使得我们对CPS的认识又有了更加深刻的理解。因此，为了更为全面的认识CPS的本质，我们给出了CPS的更为系统的示意图如图2-8。同时，从另外一个角度重新理解CPS的本质与三类CPS之间的关系如图2-9。

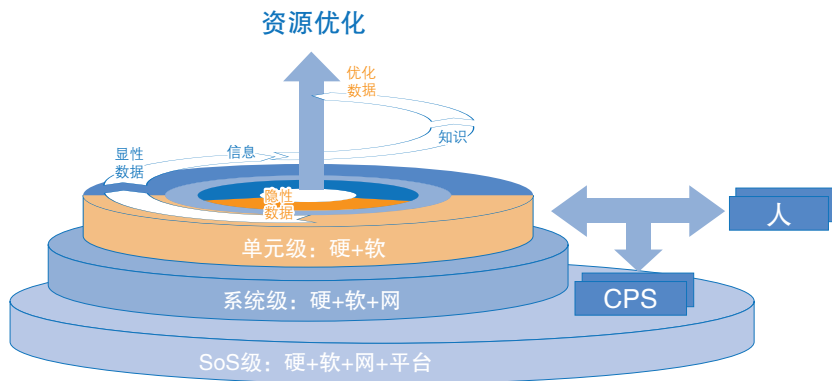


图2- 9 从另外一个角度对CPS的再认识

2.4 CPS的特征

CPS作为支撑两化深度融合的一套综合技术体系，构建了一个能够联通物理空间与信息空间，驱动数据在其中自动流动，实现对资源优化配置的智能系统。这套系统的灵魂是数据，在系统的有机运行过程中，通过数据自动流动对物理空间中的物理实体逐渐“赋能”，实现对特定目标资源优化的同时，表现出六大典型特征，总结为：数据驱动、软件定义、泛在连接、虚实映射、异构集成、系统自治。理解CPS的特征不能从单一个方面、单一层次来看，要结合CPS的层次分析，在不同的层次上呈现出不同的特征。

2.4.1 数据驱动

数据普遍的存在于工业生产的方方面面，其中大量的数据是隐性存在的，没有被充分的利用并挖掘出其背后潜在的价值。CPS通过构建“状态感知、实时分析、科学决策、精准执行”数据的自动流动的闭环赋能体系，能够将数据源源不断的从物理空间中的隐性形态转化为信息空间的显性形态，并不断迭代优化形成知识库。在这一过程中，状态感知的结果是

数据；实时分析的对象是数据；科学决策的基础是数据；精准执行的输出还是数据。因此，数据是CPS的灵魂所在，数据在自动生成、自动传输、自动分析、自动执行以及不断的迭代优化中不断累积，螺旋上升，不断产生更为优化的数据，能够通过质变引起聚变，实现对外部环境的资源优化配置。

2.4.2 软件定义

软件正和芯片、传感与控制设备等一起对传统的网络、存储、设备等进行定义，并正在从IT领域向工业领域延伸。工业软件是对工业各类工业生产环节规律的代码化，支撑了绝大多数的生产制造过程。作为面向制造业的CPS，软件就成为了实现CPS功能的核心载体之一。从生产流程的角度看，CPS会全面应用到研发设计、生产制造、管理服务等方方面面，通过对人、机、物、法、环全面的感知和控制，实现各类资源的优化配置。这一过程需要依靠对工业技术模块化、代码化、数字化并不断软件化被广泛利用。从产品装备的角度看，一些产品和装备本身就是CPS。软件不但可以控制产品和装备运行，而且可以把产品和装备运行的状态实时展现出来，通过分析、优化，作用到产品、装备的运行，甚至是设计环节，实现迭代优化。

2.4.3 泛在连接

网络通信是CPS的基础保障，能够实现CPS内部单元之间以及与其它CPS之间的互联互通。应用到工业生产场景时，CPS对网络连接的时延、可靠性等网络性能和组网灵活性、功耗都有特殊要求，还必须解决异构网络融合、业务支撑的高效性和智能性等挑战。随着无线宽带、射频识别、信息传感及网络业务等信息通信技术的发展,网络通信将会更加全面深入地融合信息空间与物理空间,表现出明显的泛在连接特征，实现在任何时



间、任何地点、任何人、任何物都能顺畅的通信。构成CPS的各器件、模块、单元、企业等实体都要具备泛在连接能力，并实现跨网络、跨行业、异构多技术的融合与协同，以保障数据在系统内的自由流动。泛在连接通过对物理世界状态的实时采集、传输，以及信息世界控制指令的实时反馈下达，提供无处不在的优化决策和智能服务。

2.4.4 虚实映射

CPS构筑信息空间与物理空间数据交互的闭环通道，能够实现信息虚体与物理实体之间的交互动联。以物理实体建模产生的静态模型为基础，通过实时数据采集、数据集成和监控，动态跟踪物理实体的工作状态和工作进展（如采集测量结果、追溯信息等），将物理空间中的物理实体在信息空间进行全要素重建，形成具有感知、分析、决策、执行能力的数字孪生（亦叫作数字化映射、数字镜像、数字双胞胎）。同时借助信息空间对数据综合分析处理的能力，形成对外部复杂环境变化的有效决策，并通过以虚控实的方式作用到物理实体。在这一过程中，物理实体与信息虚体之间交互动联，虚实映射，共同作用提升资源优化配置效率。

2.4.5 异构集成

软件、硬件、网络、工业云等一系列技术的有机组合构建了一个信息空间与物理空间之间数据自动流动的闭环“赋能”体系。尤其在高层次的CPS，如SoS级CPS中，往往会存在大量不同类型的硬件、软件、数据、网络。CPS能够将这些异构硬件（如CISC CPU、RISC CPU、FPGA等）、异构软件（如PLM软件、MES软件、PDM软件、SCM软件等）、异构数据（如模拟量、数字量、开关量、音频、视频、特定格式文件等）及异构网络（如现场总线、工业以太网等）集成起来，实现数据在信息空间与物理空间不同环节的自动流动，实现信息技术与工业技术的深度融合，因此，

CPS必定是一个对多方异构环节集成的综合体。异构集成能够为各个环节的深度融合打通交互的通道，为实现融合提供重要保障。

2.4.6 系统自治

CPS能够根据感知到的环境变化信息，在信息空间进行处理分析，自适应的对外部变化做出有效响应。同时在更高层级的CPS中（即系统级、SoS级）多个CPS之间通过网络平台互联（如CPS总线、智能服务平台）实现CPS之间的自组织。多个单元级CPS统一调度，编组协作，在生产与设备运行、原材料配送、订单变化之间的自组织、自配置、自优化，实现生产运行效率的提升，订单需求的快速响应等；多个系统级CPS通过统一的智能服务平台连接在一起，在企业级层面实现生产运营能力调配，企业经营高效管理、供应链变化响应等更大范围的系统自治。在自优化自配置的过程中，大量现场运行数据及控制参数被固化在系统中，形成知识库、模型库、资源库，使得系统能够不断自我演进与学习提升，提高应对复杂环境变化的能力。

三、信息物理系统的实现

3.1 CPS的体系架构

基于本白皮书对CPS的认识及其主要特征，本部分尝试给出一个CPS最小单元体系架构，即单元级CPS体系架构，然后逐级扩展依次给出系统级和SoS级两个层级的体系架构，供研究和应用参考。

3.1.1 单元级

单元级CPS是具有不可分割性的CPS最小单元，其本质是通过软件对物理实体及环境进行状态感知、计算分析，并最终控制到物理实体，构建最基本的数据自动流动的闭环，形成物理世界和信息世界的融合交互。同时，为了与外界进行交互，单元级CPS应具有通信功能。单元级CPS是具备可感知、可计算、可交互、可延展、自决策功能的CPS最小单元，一个智能部件、一个工业机器人或一个智能机床都可能是一个CPS最小单元，其体系架构如下图3-1所示。

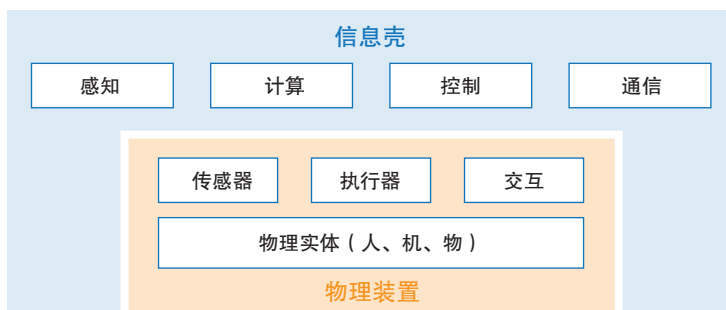


图3- 1单元级CPS体系架构

1. 物理装置

物理装置主要包括人、机、物等物理实体和传感器、执行器、与外



界进行交互的装置等，是物理过程的实际操作部分。物理装置通过传感器能够监测、感知外界的信号、物理条件（如光、热）或化学组成（如烟雾）等，同时经过执行器能够接收控制指令并对物理实体施加控制作用。

2. 信息壳

信息壳主要包括感知、计算、控制和通信等功能，是物理世界中物理装置与信息世界之间交互的接口。物理装置通过信息壳实现物理实体的“数字化”，信息世界可以通过信息壳对物理实体“以虚控实”。信息壳是物理装置对外进行信息交互的桥梁，通过信息壳从而使得物理装置与信息世界联系在一起，物理空间和信息空间走向融合。

3.1.2 系统级

在实际运行中，任何活动都是多个人、机、物共同参与完成的，例如在制造业中，实际生产过程中冲压可能是有传送带进行传送，工业机器人进行调整，然后由冲压机床进行冲压，是多个智能产品共同活动的结果，这些智能产品一起形成了一个系统。通过CPS总线形成的系统级CPS体系架构如下图3-2所示。

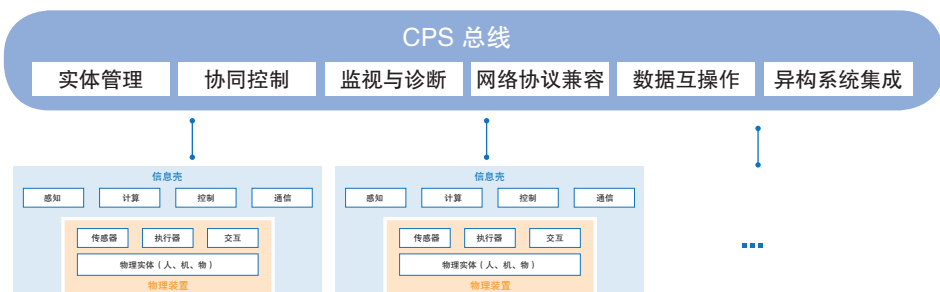


图3- 2 系统级CPS体系架构

多个最小单元（单元级）通过工业网络（如工业现场总线、工业以太网等），实现更大范围、更宽领域的自动数据流动，实现了多个单元级CPS的互

联、互通和互操作，进一步提高制造资源优化配置的广度、深度和精度。系统级CPS基于多个单元级CPS的状态感知、信息交互、实时分析，实现了局部制造资源的自组织、自配置、自决策、自优化。在单元级CPS功能的基础上，系统级CPS还主要包含互联互通、即插即用、边缘网关、数据互操作、协同控制、监视与诊断等功能。其中互连互通、边缘网关和数据互操作主要实现单元级CPS的异构集成；即插即用主要在系统级CPS实现组件管理，包括组件（单元级CPS）的识别，配置，更新和删除等功能；协同控制是指对多个单元级CPS的联动和协同控制等；监视与诊断主要是对单元级CPS的状态实时监控和诊断其是否具备应有的能力。

3.1.3 SoS级

多个系统级CPS的有机组合构成SoS级CPS。例如多个工序（系统的CPS）形成一个车间级的CPS，或者形成整个工厂的CPS。通过单元级CPS和系统级CPS混合形成的SoS级CPS体系架构如图3-3所示。

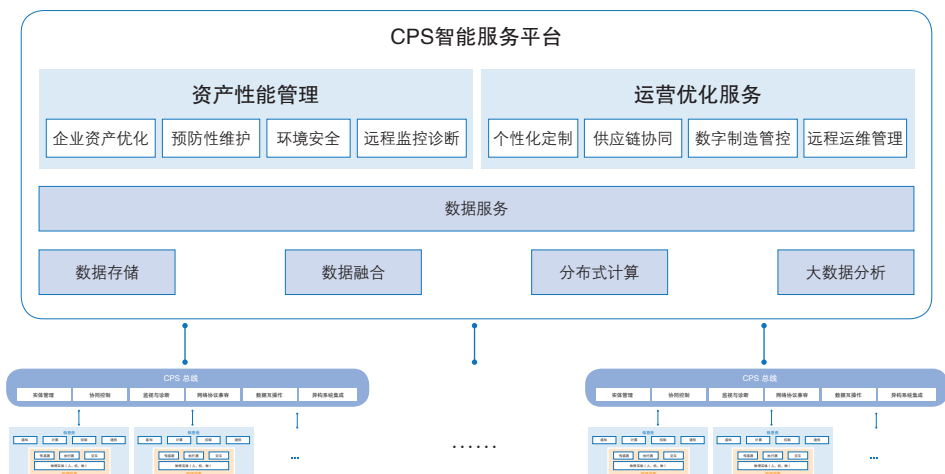


图3-3 SoS级CPS体系架构



SoS级CPS主要实现数据的汇聚，从而对内进行资产的优化和对外形成运营优化服务。其主要功能包括：数据存储，数据融合，分布式计算、大数据分析，数据服务，并在数据服务的基础上形成了资产性能管理和运营优化服务。

SoS级CPS可以通过大数据平台，实现跨系统、跨平台的互联、互通和互操作，促成了多源异构数据的集成、交换和共享的闭环自动流动，在全局范围内实现信息全面感知、深度分析、科学决策和精准执行。这些数据部分存储在CPS智能服务平台，部分分散在各组成的组件内。对于这些数据进行统一管理和融合，并具有对这些数据的分布式计算和大数据分析能力，是这些数据能够提供数据服务，有效支撑高级应用的基础。

资产性能管理主要包括企业资产优化、预防性维护、工厂资产管理、环境安全和远程监控诊断等方面。运营优化服务主要包括个性化定制、供应链协同、数字制造管控和远程运维管理。通过智能服务平台的数据服务，能够对CPS内的每一个组成部分进行操控，对各组成部分状态数据进行获取，对多个组成部分协同进行优化，达到资产和资源的优化配置和运行。

3.2 CPS的技术需求

由于复杂性和跨学科的特点，CPS的技术需求极其广泛，其成功实现不仅需要借助已有的成熟技术，比如总体技术进行架构设计，信息安全技术保障系统的安全可靠，同时还对技术提出了新要求。本部分基于CPS的特征，按照CPS三个层次的体系架构，重点梳理汇总CPS特征下引发的新的技术需求。

3.2.1 单元级

单元级CPS技术需求是构建一个最基本的CPS单元时需要满足的技术

需求，从单元级CPS的体系架构看，传感器是CPS获取相关数据信息的来源，是实现自动检测和自动控制的首要环节，CPS进一步需要对获取的数据进行计算分析并在信息虚体中流通，执行器则根据计算结果实现对物理实体的控制与优化，所以可梳理出其技术需求主要包括：一是状态感知能力；二是对物理实体的控制执行能力；三是对数据的计算处理能力；四是对外交互和通信能力。

3.2.2 系统级

在单元级CPS的技术需求基础上，参考系统级CPS的体系架构，主要强调其组件之间的互联互通，并在此基础上着眼于对不同组件的实时、动态信息控制，实现信息空间与物理空间的协同和统一，同时需要对集成的计算系统、感知系统、控制系统与网络系统进行统一管理，所以归纳可得出系统级CPS除包含单元级CPS技术需求外，还需关注有：一是CPS之间的互联互通能力；二是系统内各组成CPS的管理和检测能力；三是系统内各组成CPS的协同控制能力。

3.2.3 SoS级

在系统级CPS技术需求基础上，参考SoS级CPS的体系架构，SoS级CPS所感知的数据更为真实、丰富多样、种类繁多，因此需要新的处理模式对数据进行融合分析提取其中潜在价值，从而提供更强的决策力、洞察力和流程优化能力。通过数据服务可进行CPS的资源控制和CPS能力的获取。综合归纳其相对系统级CPS增加的技术需求主要是：一是数据存储和分布式处理能力；二是对外可提供数据和智能服务能力。

3.3 CPS的技术体系

通过研究分析CPS的体系架构和技术需求，综合单元级、系统级、

SoS级CPS所需的自动控制技术、智能感知技术、计算（软件）技术、通信技术、互联技术、协同控制技术、分布式终端管理技术、数据存储和处理技术、云服务技术等，并结合CPS所需当前已较为成熟的嵌入式软件、通信、大数据等技术，提出了CPS技术体系如图3-4所示，供研究应用CPS参考。



图3- 4 CPS的技术体系

CPS技术体系主要分为CPS总体技术、CPS支撑技术、CPS核心技术。CPS总体技术主要包括系统架构、异构系统集成、安全技术、试验验证技术等，是CPS的顶层设计技术；CPS支撑技术主要包括智能感知、嵌入式软件、数据库、人机交互、中间件、SDN（软件定义网络）、物联网、大数据等，是基于CPS应用的支撑；CPS核心技术主要包括虚实融合控制、智能装备、MBD、数字孪生技术、现场总线、工业以太网、CAX\MES\ERP\PLM\CRM\SCM等，是CPS的基础技术。

对CPS技术体系中各种技术归纳总结，本白皮书认为上述技术体系可以分为四大核心技术要素即“一硬”（感知和自动控制）、“一软”（工业软件）、“一网”（工业网络）、“一平台”（工业云和智能服务

平台）”。其中感知和自动控制是CPS实现的硬件支撑；工业软件固化了CPS计算和数据流程的规则，是CPS的核心；工业网络是互联互通和数据传输的网络载体；工业云和智能服务平台是CPS数据汇聚和支撑上层解决方案的基础，对外提供资源管控和能力服务。

3.4 CPS的核心技术要素

基于CPS的“一硬”（感知和自动控制）、“一软”（工业软件）、“一网”（工业网络）、“一平台”（工业云和智能服务平台）的四大核心技术要素，本部分只对其中包含的部分关键技术进行论述，其它技术例如总体技术、信息安全等也是CPS可靠高效运行的保障，只是限于篇幅此处不过多论述。

3.4.1 感知和自动控制

CPS使用到的感知和自动控制技术主要包括智能感知技术和虚实融合控制技术，如图3-5。

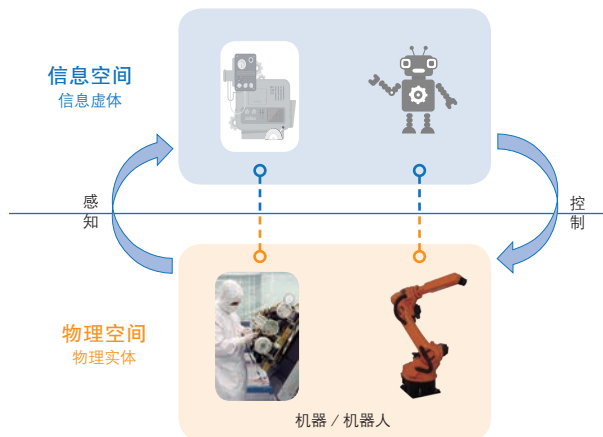


图3- 5 信息空间和物理空间的交互

1. 智能感知技术

CPS系统主要使用的智能感知技术是传感器技术。传感器是一种检测装置，能感受到被测量的信息，并能将检测感受到的信息，按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出，以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。RFID是最常用的一种传感器，即射频识别传感器。主要包括感应式电子晶片或近接卡、感应卡、非接触卡、电子标签、电子条码等。RFID系统一般由电子标签（Tag）、读写器（Reader）和计算机网络及数据处理系统（也称“RFID中间件”或“应用软件”）三大部分组成。

2. 虚实融合控制技术

CPS虚实融合控制是多层“感知-分析-决策-执行”循环，建立在状态感知的基础上，感知往往是实时进行的，向更高层次同步或即时反馈。如图3-6所示，包括嵌入控制、虚体控制、集控控制和目标控制四个层次。

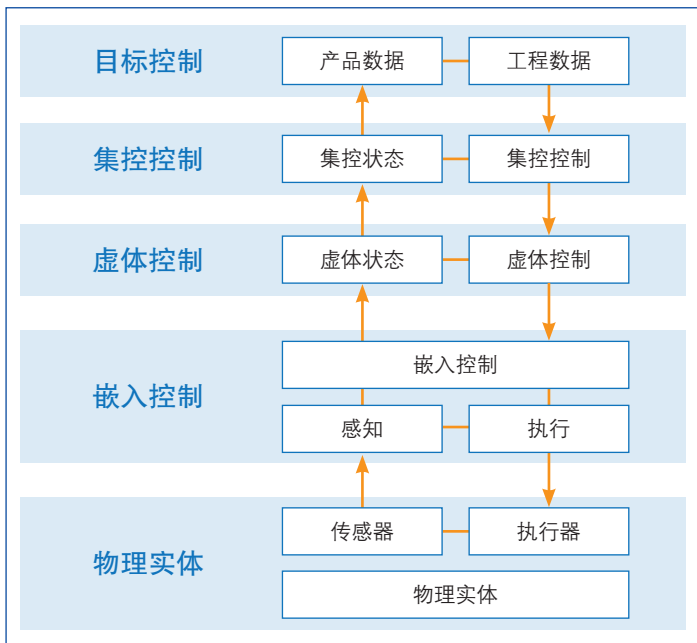


图3- 6 多层循环控制

(1) 嵌入控制。嵌入控制主要针对物理实体进行控制。通过嵌入式软件，从传感器、仪器、仪表或在线测量设备采集被控对象和环境的参数信息而实现“感知”，通过数据处理而“分析”被控对象和环境的状况，通过控制目标、控制规则或模型计算而“决策”，向执行器发出控制指令而“执行”。不停地进行“感知-分析-决策-执行”的循环，直至达成控制目标。

(2) 虚体控制。虚体控制是指在信息空间进行的控制计算，主要针对信息虚体进行控制。虚体控制不是必须的，但往往是非常重要的，一是在嵌入式软硬件实现复杂计算不如在“大”计算环境（如云计算）成本低、效率高，二是需要同步跟踪物理实体的状态（感知信息），通过控制目标、控制逻辑或模型计算而向嵌入控制层发出控制指令。

(3) 集控控制。在物理空间，一个生产系统，往往由多个物理实体构成，比如一条生产线会有多个物理实体，并通过物流或能流连接在一起。在信息空间内，主要通过CPS总线的方式进行信息虚体的集成和控制。

(4) 目标控制。对于生产而言，产品数字孪生的工程数据提供实体的控制参数、控制文件或控制指示，是“目标”级的控制，实际生产的测量结果或追溯信息收集到产品数据，通过即时比对判断生产是否达成目标。

3.4.2 工业软件

工业软件是指专用于工业领域，为提高工业企业研发、制造、生产、服务与管理水平以及工业产品使用价值的软件。工业软件通过应用集成能够使机械化、电气化、自动化的生产系统具备数字化、网络化、智能化特征，从而为工业领域提供一个面向产品生命周期的网络化、协同化、开放式的产品设计、制造和服务环境。CPS应用的工业软件技术主要包括嵌入

式软件技术和MBD技术等。

1. 嵌入式软件技术

嵌入式软件技术主要通过把软件嵌入在工业装备或工业产品之中, 这些软件可细分为操作系统、嵌入式数据库和开发工具、应用软件等, 他们被植入硬件产品或生产设备的嵌入式系统之中, 达到自动化、智能化的控制、监测、管理各种设备和系统运行的目的, 应用于生产设备, 体现采集、控制、通信、显示等功能。嵌入式软件技术是实现CPS功能的载体, 其紧密结合在CPS的控制、通信、计算、感知等各个环节, 如图3-7所示。

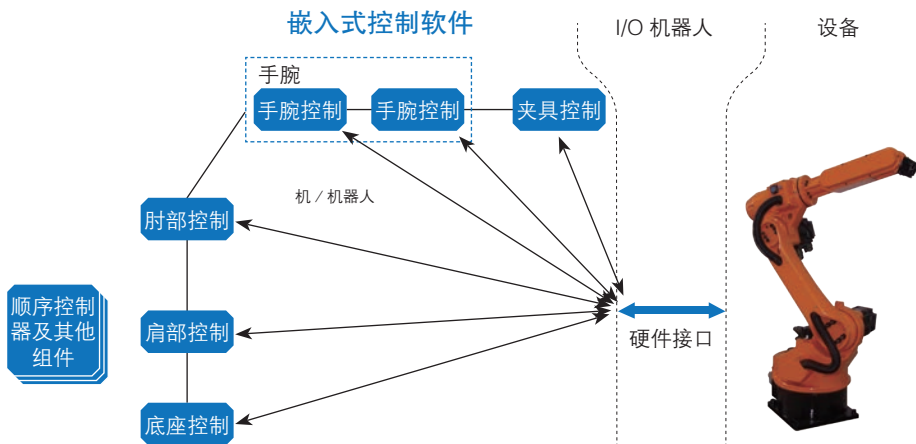


图3-7 嵌入式软件在单元级CPS的作用

2. MBD技术

MBD (Model Based Definition) 技术采用一个集成的全三维数字化产品描述方法来完整地表达产品的结构信息、几何形状信息、三维尺寸标注和制造工艺信息等, 将三维实体模型作为生产制造过程中的唯一依据, 改变了传统以工程图纸为主, 而以三维实体模型为辅的制造方法。通过MBD技术, 支撑了CPS系统的产品数据在制造各环节的流动。

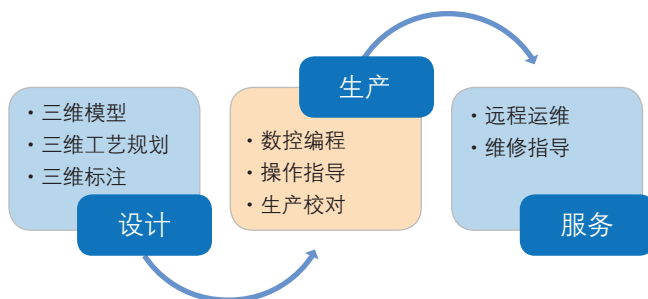


图3- 8 MBD技术在制造业的应用

MBD制造模式下，产品工艺数据、检验检测数据的形式与类型，发生了很大变化。通过MBD技术，产品模型串联起了工业软件。工艺部门通过三维数字化工艺设计与仿真，依据基于MBD的三维产品设计数模建立三维工艺模型，生成零件加工、部件装配动画等多媒体工艺数据。检验部门通过三维数字化检验，依据基于MBD的三维产品设计数模、三维工艺模型，建立三维检验模型和检验计划，如图3-8所示。

3. CAX/MES/ERP软件技术

CAX是CAD、CAM、CAE、CAPP、CAS、CAT、CAI等各项技术之综合叫法。CAX实际上是把多元化的计算机辅助技术集成起来复合和协调地进行工作，从产品研发、产品设计、产品生产、流通等各个环节对产品全生命周期进行管理，实现生产和管理过程的智能化、网络化管理和控制。

CAX软件是CPS信息虚体的载体。信息虚体的原始要素定义，以及信息虚体之间接口的定义，都是通过CAX软件实现。通过CAX软件，CPS的信息虚体充斥到制造流程之中，从供应链管理、产品设计、生产管理、企业管理等多个维度，提升“物理世界”中的工厂/车间的生产效率，优化生产工程。

MES是满足大规模定制的需求实现柔性排程和调度的关键，其主要



操作对象是CPS信息虚体。通过信息虚体的操控，以网络化和扁平化的形式对企业的生产计划进行“再计划”，“指令”生产设备“协同”或“同步”动作，对产品生产过程进行及时的响应，使用当前确的数据对生产过程进行及时调整、更改或干预等处理。同时信息虚体的相关数据通过MES收集整合，形成工厂的业务数据，通过工业大数据分析整合，使其全产业链可视化，达到CPS使能后的企业生产最优化、流程最简化、效率最大化、成本最低化和质量最优化的目的。

ERP是以市场和客户需求为导向，以实行企业内外资源优化配置，消除生产经营过程中一切无效的劳动和资源，实现信息流、物流、资金流、价值流和业务流的有机集成和提高客户满意度为目标，以计划与控制为主线，以网络和信息技术为平台，集客户、市场、销售、采购、计划、生产、财务、质量、服务、信息集成和业务流程重组等功能为一体，面向供应链管理的现代企业管理思想和方法。

3.4.3 工业网络

经典的工业控制网络金字塔模式展示了定义明晰的层级结构，信息从现场设备层，向上经由多个层级流入企业层。尽管这一模式得到广泛认可，但其中的数据流动并不顺畅。由于金字塔每层的功能性要求不尽相同，这就导致了各层往往采用不同的网络技术，使得不同层级之间的兼容性较差。此外，由于CPS对开放互联和灵活性的要求更高，自动化金字塔模式的这种结构越来越受到诟病。

CPS中的工业网络技术将颠覆传统的基于金字塔分层模型的自动化控制层级，取而代之的是基于分布式的全新范式，如图3-9所示。由于各种智能设备的引入，设备可以相互连接从而形成一个网络服务。每一个层面，都拥有更多的嵌入式智能和响应式控制的预测分析；每一个层面，都可以使用虚拟化控制和工程功能的云计算技术。与传统工业控制系统严格

的基于分层的结构不同，高层次的CPS是由低层次CPS互连集成，灵活组合而成。

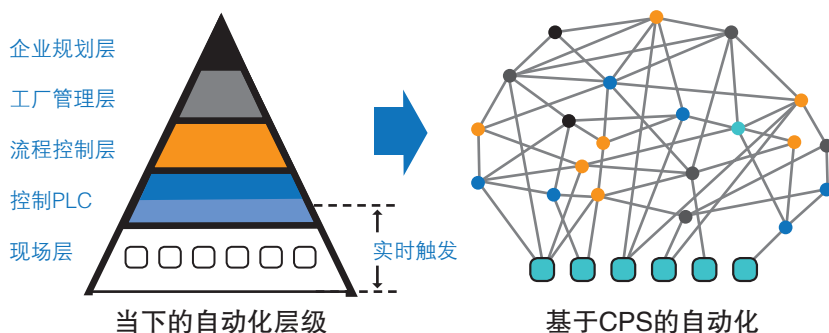


图3- 9 CPS的网状互联网络^[22]

CPS网络从技术角度来看，主要涉及到工业异构异质网络的互联互通和即插即用。由于不同的网络在传输速率、通信协议、数据格式等方面的差异，异构异质网络的融合具有高度的复杂性。一些设备将作为边缘网关，发挥连接异构网络的作用，将数据融合在IP网络中传输和控制。同时还需要一个统一的通信机制与数据互操作机制，使数据在不同网络间传输和交换，实现设备间的互联互通。此外，为了适应柔性制造，小批量定制化的需求，CPS必须是灵活组合的，相应的，工业网络也必须是柔性的，即插即用的，从而使能资源的合理配置以及生产效率的极大提高。

CPS网络的实现，在接入技术上，主要通过有线网络，例如现场总线技术和工业以太网技术，以及无线网络和基于有线无线网络形成的柔性灵活的工厂网络；从网络类型来分，既有各种智能设备组成的专用协议局域网，也有基于通用TCP/IP协议的公共互联网。

1. 现场总线技术

现场总线技术是计算机，网络通讯、超大规模集成电路、仪表和测



试、过程控制和生产管理等现代高科技迅猛发展的综合产物，主要解决工业现场的智能化仪器仪表、控制器、执行机构等现场设备间的数字通信以及这些现场控制设备和高级控制系统之间的信息传递问题。现场总线作为工厂数字通信网络的基础，沟通了生产过程现场及控制设备之间及其与更高控制管理层次之间的联系，因此现场总线的内涵现在已远远不是指这一根通讯线或一种通讯标准。总线在运动控制中的应用使得工业自动化控制技术正在向智能化、网络化和集成化方向发展，为自控设备与系统开拓了更为广阔的领域。现场总线的控制系统主要有如下特点，全数字化通信、开放型的互联网络、互可操作性与互用性、现场设备的智能化、系统结构的高度分散性、对现场环境的适应性。

2. 工业以太网技术

当前广泛使用的工业以太网技术有十余种，如EtherCAT、Ethernet Powerlink等。这些工业以太网技术，基本上都是各家厂商基于IEEE 802.3（Ethernet）百兆网的基础上，增加实时特性获得的。工业以太网，提供了一个无缝集成到新的多媒体世界的途径。此外，当前IEEE 802正在对实时以太网TSN进行标准化，以满足工业环境中时间敏感的需求。TSN实现了一个标准的开放式网络基础设施，可支持不同厂商仪器之间的相互操作和集成。同时，TSN可支持制造应用中的其他网络传输，进而驱动企业内部信息系统网络与生产控制系统网络的无缝融合。工业生产商和终端用户将通过更多的供应商获得更低成本的网络部件，有助于工业以太网更广泛被采用。

3. 无线技术

无线技术，由于其节省线路布放与维护成本，组网简单（常支持自组织组网，而且不需要考虑线长、节点数等制约），已应用于工业生产的一些场景，如基于IEEE 802.15.4的WirelessHART与ISA100.11a技术，当前已有一些在资产管理、过程测量与控制、HMI等方面的应用，尤其是在某些

环境不适宜有线布放，如高温、腐蚀环境下，无线几乎是唯一选择。WiFi和Zigbee也是工厂内非生产环境中会使用的无线局域网技术，前者侧重于高速率、后者侧重于低功耗。此外，移动宽带技术LTE、eLTE，低功率广域无线技术NB-IoT、LTE-M、LoRa等也在工业企业中有相应的应用。

4. SDN

为了适应柔性生产的需求，单元级CPS可能根据需求进行灵活重构，例如智能机器可在不同的系统级CPS（如生产线）间迁移和转换，并实现即插即用，这需要工厂网络的柔性灵活组网。基于软件定义网络（SDN）的敏捷网络，实现了管理平面与业务平面的分离，可以实现网络资源可编排能力。基于业务系统（如制造执行系统MES）的需求，在SDN控制器的配置下，各网络设备进行网络资源调度和业务分发，实现快速的网络重组，支撑柔性制造和生产自组织。

3.4.4 工业云和智能服务平台

工业云和智能服务平台通过边缘计算技术、雾计算技术、大数据分析技术等技术进行数据的加工处理，形成对外提供数据服务的能力，并在数据服务基础上提供个性化和专业化智能服务，如图3-10。

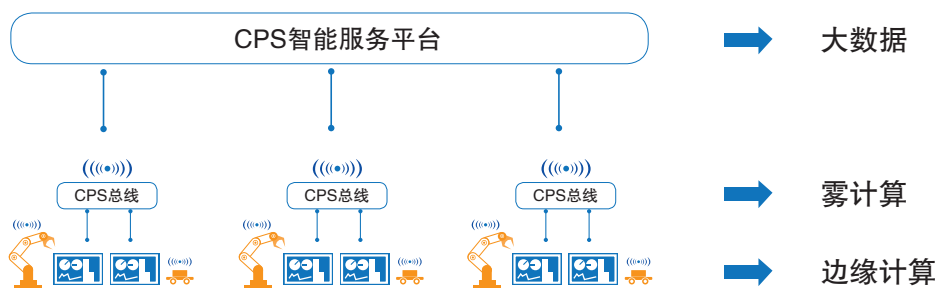


图3- 10 CPS平台构建需要的计算技术



1. 边缘计算

边缘计算指在靠近物或数据源头的网络边缘侧，融合网络、计算、存储、应用核心能力的开放平台，就近提供边缘智能服务，满足行业数字化在敏捷连接、实时业务、数据优化、应用智能、安全与隐私保护等方面的关键需求。

对于SoS级CPS，其每一个CPS组成均具有计算和通信功能，通过每一个CPS的边缘计算，数据在边缘侧就能解决，更适合实时的数据分析和智能化处理。边缘计算聚焦实时、短周期数据的分析，具有安全、快捷、易于管理等优势，能更好地支撑CPS单元的实时智能化处理与执行，满足网络的实时需求，从而使计算资源更加有效地得到利用。此外，边缘计算虽靠近执行单元，但同时也是云端所需高价值数据的采集单元，可以更好地支撑云端的智能服务。

2. 雾计算

CPS是复杂控制系统，局域型的CPS对于每个CPS组成也需要进行协同计算，从而对组成CPS单元协同控制。雾计算将数据、数据处理和应用程序集中在网络边缘的设备中，数据的存储及处理更依赖本地设备，而非服务器。雾计算是新一代的分布式计算，在CPS中应用分布式的雾计算，通过智能路由器等设备和技术手段，在不同设备之间组成数据传输带，可以有效减少网络流量，数据中心的计算负荷也相应减轻。雾计算可以作为产品CPS或系统CPS之间的计算处理，以应对网络产生的大量数据——运用处理程序对这些数据进行预处理，以提升其使用价值。雾计算不仅可以解决联网设备自动化的问题，更关键的是，它对数据传输量的要求更小。

3. 大数据分析

大数据分析技术将给全球工业带来深刻的变革，创新企业的研发、生产、运营、营销和管理方式，给企业带来了更快的速度、更高的效率和更深远的洞察力。工业大数据的典型应用包括产品创新、产品故障诊断与预

测、工业企业供应链优化和产品精准营销等诸多方面。工业云和智能服务平台所支持的CPS技术，可以通过大数据分析来实现上述创新。例如，有效地分析产品大数据，通过系统地收集研发数据和分析建模，以新的算法来优化、控制和稳定产品研发质量，以此来实现产品创新；有效地分析高频、海量的运维大数据，可以确定产品的工作状态，发现零部件更换与维护的规律，由事后发现问题、解决问题而做到事先避免问题，以此来实现产品故障诊断与预测式运维服务。对来自社交网络的商业大数据的分析，可以从数据中观察到人们复杂的社会行为模式，通过数据挖掘，找到用户的产品使用习惯、喜好和实际需求，以调整优化产品，为客户提供更高满意度的产品与服务，以此来实现产品精准营销。

3.5 CPS的标准化

标准与技术创新同步已成为推动产业发展的有效模式。信息物理系统是一个具有显著创新潜力和社会影响的领域，其技术体系和应用方案有待完善，用标准助推创新发展是必要的手段。因此，借鉴国内外已开展的CPS标准化工作经验，针对CPS标准化存在的现实需求，我们认为现阶段开展标准化工作应聚焦在几个重点方向。

3.5.1 国内外已开展的标准化工作

目前美国NIST、IEEE以及我国CPS发展论坛已先行开展了CPS标准研究工作。

美国国家标准与技术研究院（NIST）于2014年6月成立CPS公共工作组（CPS PWG），联合相关高校和企业专家共同开展CPS标准研究，并于2016年5月发布了《信息物理系统框架》。该框架分析了CPS的起源、应用、特点和相关标准，并从概念、实现和运维三个视角给出了CPS在功能、商业、安全、数据、实时、生命周期等方面的特征。



美国电子电气工程师协会（IEEE）于2008年成立CPS技术委员会（TC-CPS），致力于CPS领域的交叉学科研究和教育。TC-CPS每年都举办CPSWeek等学术活动以及涉及CPS各方面研究的研讨会。

中国电子技术标准化研究院于2016年9月联合国内百余家企事业单位发起成立信息物理系统发展论坛，共同研究CPS发展战略、技术和标准等。现已形成《信息物理系统（CPS）体系结构》、《术语和概念》标准草案，正在申请国标立项。

3.5.2 有待解决的CPS标准化问题

CPS体现了工业技术和信息技术的跨界融合，涉及到硬件、软件、网络以及平台等多方面的集成，以及不同环节、不同模式下的复杂应用。目前国内外对CPS标准的研究还处于起步阶段，这些现实情况以及CPS本身具有的创新性、复杂性给标准化工作带来了诸多挑战：

- 统筹CPS设计、实现、应用等多方面的标准化任务，整体布局分段实施。
- 统一CPS标准化语言，减少理解和认识的差异化。
- 解决互联互通、异构集成、互操作等复杂技术问题。
- 规范CPS应用模式，营造良好的应用氛围。
- 构建CPS安全环境，预防控制安全问题。

3.5.3 CPS标准化重点方向

针对上述问题，从顶层设计、基础共性、关键技术、应用和安全等5个方面提出标准化的重点方向。

1. 顶层设计

顶层设计是开展标准化工作的总体纲领与参考，界定了CPS标准研究的范围，明确待研制的标准明细以及各项标准之间的关系。对顶层架构的

设计应至少包括标准体系框架、实施综合标准化体系建设指南等。

2. 基础共性类标准

用于统一CPS的术语、相关概念以及框架模型，是认识、理解以及实现CPS的基础，为开展其他方面的标准研究提供支撑。包括术语和概念、体系结构以及相关的评估规范等。

3. 关键技术类标准

用于规范CPS的设计、开发和实现中的关键技术要素及其测试规范，指导技术研发、测试验证等。包括MBD建模、异构集成、数据互操作、数据分析等技术要求及其测试规范、技术实现的过程与方法等。

4. 应用类标准

用于指导不同场景、不同行业CPS的部署、集成与测试。包括用例、系统解决方案以及行业实施指南等。

5. 安全类标准

用于规范CPS中工业控制以及信息安全管理，提升工控安全防控能力。包括工业控制系统信息安全管理、风险评估、防护能力评估等。

四、信息物理系统的建设和应用

4.1 CPS应用场景概览

目前，CPS受到工业领域的广泛关注，并已在多个环节得到应用和体现。通过对目前CPS在工业领域中的应用程度、重要性、代表性进行筛选和考量，本白皮书最后选择从智能设计、智能生产、智能服务、智能应用这四个方面，结合CPS的关键特征和关键技术实现对CPS的应用场景进行阐述和说明。应用场景概览如图4-1，随着CPS技术和应用的快速发展，我们也将对本部分内容进行不断丰富和完善。

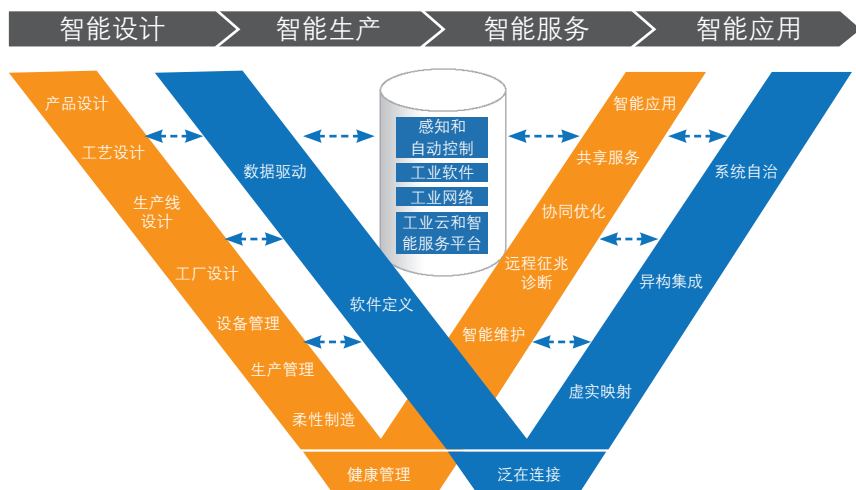


图4- 1 CPS在制造业应用概览

本白皮书选择从应用需求、解决思路、应用场景这三个角度分别对CPS在智能设计、智能生产、智能服务、智能应用中的应用进行描述。根据CPS在这四个方面中的应用需求提出解决思路，围绕解决思路选择适合



的应用场景进行解释说明，使读者可以更深刻地理解本内容。

4.2 CPS典型应用场景

4.2.1 智能设计

1. 应用需求

目前，在产品及工艺设计、生产线或工厂设计过程中，借助于仿真分析手段使设计的精度得到大幅度提高，但由于缺少足够的实际数据为设计人员提供支撑，使得在设计、分析、仿真过程中不能有效模拟真实环境，从而影响了设计精度。所以需要建立实际应用与设计之间的信息交互平台，使得在设计过程中可以直接提取真实数据，通过对数据进行分析处理来直接指导设计与仿真，最后形成更优化的设计方案，提高设计精度，降低研制成本。

2. 解决思路

随着CPS不断发展，在产品及工艺设计、生产线或工厂设计过程中，企业流程正在发生深刻变化，研发设计过程中的试验、制造、装配都可以在虚拟空间中进行仿真，并实现迭代、优化和改进。通过基于仿真模型的“预演”，可以及早发现设计中的问题，减少实际生产、建造过程中设计方案的更改，从而缩短产品设计到生产转化的时间，并提高产品的可靠性与成功率。

3. 应用场景

■ 产品及工艺设计

通常为了更好地满足设计目标，需要通过基于产品应用环境进行产品使用性能的仿真，例如机械产品包括结构强度仿真、机械动力学仿真、热力学仿真等。传统的仿真系统各自独立，在仿真过程中不能完全描述产品的综合应用环境，而CPS很好地解决了这个问题。在进行产品研发设计

过程中，通过将已有的相关经验设计数据或者试验数据等不同种类的数据进行采集，建立结构、动力、热力等异构仿真系统组成的集成综合仿真平台，将数据及仿真模型以软件的形式进行集成，从而实现更全面、真实的产品使用工况仿真，同时结合产品设计规范、设计知识库等信息，形成以某一目标的优化设计算法，通过数据驱动形成产品优化设计方案，实现产品设计与产品使用的高度协同。在产品工艺设计方面，为了使产品的制造工艺设计更加精准、高效，需要对实际制造工艺的具体参数进行采集，例如机加工中刀具的切削参数、电机功率参数等，在软件系统或平台中将工艺参数、工艺设计方案、工艺模型进行信息的组织和融合，考虑不同的工艺参数对产品制造质量、产品制造效率、产品制造设备可承受力等方面的影响，建立关联性模型，依据工艺设计目标和制造现场实际条件，以实时采集的工艺数据进行仿真，并以已有的工艺方案、工艺规范作为支撑，形成制造工艺优化方案，场景如图4-2所示。

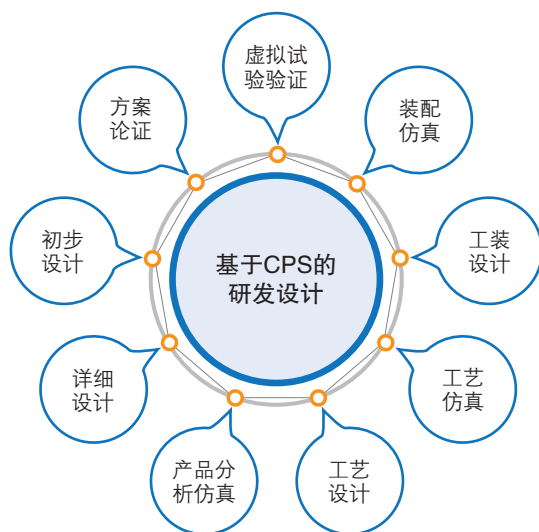


图4- 2 CPS在研发设计的场景

■ 生产线/工厂设计

在生产线/工厂设计方面，首先建立产品生产线/工厂的初步方案，初步形成产品的制造工艺路线，通过采集实际和试验所生成的工时数据、物流运输数据、工装和工具配送数据等，在软件系统中基于工艺路线建立生产线/工厂中的人、机械、物料等生产要素与生产线产能之间的信息模型。在此过程中，综合考虑生产线/工厂中不同设备、不同软件系统、不同网络通信协议之间的集成，根据生产线/工厂建设环境、能源等现有条件，结合系统采集的工时、运输等数据来分析计算出合理的设备布局、人员布局、工装工具物料布局、车间运输布局，建立生产线/工厂生产模型，进行生产线/工厂生产仿真，依据仿真结果优化生产线/工厂的设计方案。同时，生产线/工厂的管理系统设计要通过数据传递接口与企业管理系统、行业云平台及服务平台进行集成，从而实现生产线/工厂设计与企业、行业的协同。如图4-3所示。



图4-3 CPS在生产线设计的场景

4.2.2 智能生产

1. 应用需求

生产制造是制造业的核心环节，也是制造企业将用户需求变成实际产品、实现产品价值的重要过程。但是，传统生产制造模式中的生产设备分散，而且特殊设备处于高危区域中，所以造成生产设备的操作、监测、管理等极为不便。此外，因设备与设备之间的不能通信而造成生产制造过程缺乏协同性，从而出现设备闲置或设备不足的现象，造成生产资源及生产能力分配不合理和浪费。

另一方面，由于缺乏数据传导渠道和工具，对生产制造过程中的状态、数据、信息很难进行传输和分析。因此，生产过程的管理和控制缺乏数据信息等决策依据的支撑，管理者的意志难以准确传递和执行。这样会造成资源调度和生产规划的不合理，并阻碍生产制造效率和质量的提高。

为解决以上生产过程存在的问题，亟需利用CPS打破生产过程的信息孤岛现象，实现设备的互联互通，实现生产过程监控，合理管理和调度各种生产资源，优化生产计划，达到资源和制造协同，实现“制造”到“智造”的升级。

2. 解决思路

生产制造是制造企业运营过程中非常重要的活动，CPS将针对生产制造环节的应用需求对生产制造环节进行优化，以实现资源优化配置的目标。

CPS通过软硬件配合，可以完成物理实体与环境、物理实体之间（包括设备、人等）的感知、分析、决策和执行。设备将在统一的接口协议或者接口转化标准下连接，形成具有通信、精确控制、远程协调能力的网络。通过实时感知分析数据信息，并将分析结果固化为知识、规则保存到知识库、规则库中。知识库和规则库中的内容，一方面帮助企业建立精准、全面的生产图景，企业根据所呈现的信息可以在最短时间内掌握生产

现场的变化，从而作出准确判断和快速应对，在出现问题时得到快速合理的解决；另一方面也可以在一定的规则约束下，将知识库和规则库中的内容分析转化为信息，通过设备网络进行自主控制，实现资源的合理优化配置与协同制造。

3. 应用场景

■ 设备管理应用场景

CPS将无处不在的传感器、智能硬件、控制系统、计算设施、信息终端、生产装置通过不同的设备接入方式（例如串口通讯、以太网通讯、总线模式等）连接成一个智能网络，构建形成设备网络平台或云平台，在不同的布局和组织方式下，企业、人、设备、服务之间能够互联互通，具备了广泛的自组织能力、状态采集和感知能力，数据和信息能够通畅流转，同时也具备了对设备实时监控和模拟仿真能力，通过数据的集成、共享和协同，实现对工序设备的实时优化控制和配置，使各种组成单元能够根据工作任务需要自行集结成一种超柔性组织结构，并最优和最大限度地开发、整合和利用各类信息资源。如图4-4所示。

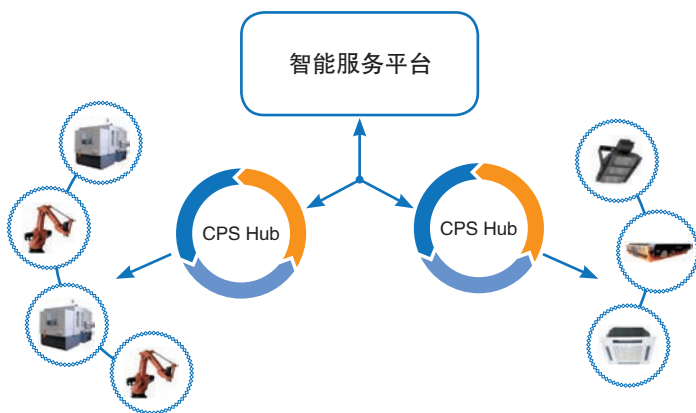


图4- 4 车间设备联网

■ 生产管理应用场景

CPS是实现制造业企业中物理空间与信息空间联通的重要手段和有效途径。在生产管理过程中通过集成工业软件、构建工业云平台对生产过程的数据进行管理，实现生产管理人员、设备之间无缝信息通讯，将车间人员、设备等运行移动、现场管理等行为转换为实时数据信息，对这些信息进行实时处理分析，实现对生产制造环节的智能决策，并根据决策信息和领导层意志及时调整制造过程，进一步打通从上游到下游的整个供应链，从资源管理、生产计划与调度来对整个生产制造进行管理、控制以及科学决策，使整个生产环节的资源处于有序可控的状态。如图4-5所示。



图4-5 生产管理

■ 柔性制造应用场景

CPS的数据驱动和异构集成特点为应对生产现场的快速变化提供了可能，而柔性制造的要求就是能够根据快速变化的需求变更生产，因此，CPS契合了柔性制造的要求，为企业柔性制造提供了很好的实施方案。

CPS对整个制造过程进行数据采集并存储，对各种加工程序和参数配置进行监控，为相关的生产人员和管理人员提供可视化的管理指导，方便设备、人员的快速调整，提高了整个制造过程的柔性。同时，CPS结合CAX、MES、自动控制、云计算、数控机床、工业机器人、RFID射频识别等先进技术或设备，实现整个智能工厂信息的整合和业务协同，为企业的柔性制造提供了技术支撑。如图4-6所示。

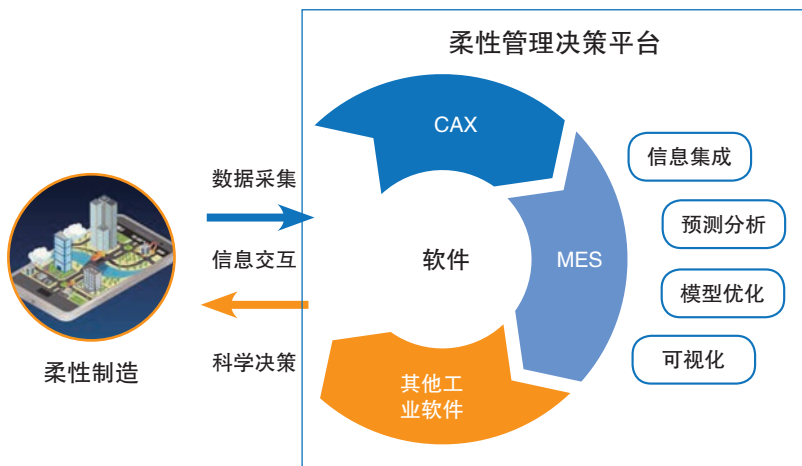


图4-6 柔性制造应用场景

4.2.3 智能服务

1. 应用需求

伴随着新工业革命的到来，先进制造模式和技术不断深化，用户在高精度和制造高效率方面的需求越来越突出，带来的是装备越来越智能化、产品模块越来越集成化，从而生产过程的精密性、自动化、数字化、智能

化程度越来越高。企业大幅度提高生产效率的同时也面临着装备运行复杂、使用难度日益增大的困扰，这些无疑会对企业的管理和服务带来巨大挑战。

对装备应用企业来讲，需要将传统的集中式控制向分布式控制转变。装备进入制造企业成为了企业经营要素，企业的目标是通过较低成本投入能够高效生产出高品质的产品。将智能装备与关联的其他装备、相关软件等要素有机的融合，配合基于大数据的先进管理才可能实现，但是大量、多样的智能装备和产品融入，必然会产生各类海量的多样化、碎片化信息，并且会贯穿到各个环节，这必然会给传统制造模式在运营管理、维护等方面带来严峻挑战。对装备制造企业来说，装备的复杂性、故障原因的多样性，增加了自身和使用者故障解决的周期和成本，特别是大型复杂的协同运行环境中，各装备的维护活动不能独立进行，更是加大了系统管理、维护、故障处理的难度和复杂度，加重企业负担。

智能化的普及带来传统企业管理复杂的问题，管理的各个环节都是碎片化管理，装备间、系统间、使用者等攸关方不能互联互通，协同优化。企业需要能够保证装备在协同优化、健康管理、远程诊断、智能维护、共享服务等方面进行高效应用。利用CPS数据驱动、虚实映射、系统自治等应用特征，为解决上述需求提供了有效的手段。

2. 解决思路

通过在自身或是相关要素搭载具有感知、分析、控制能力的智能系统，采用恰当的频率对人、机、料、法、环数据进行感知、分析和控制，运用工业大数据、机器学习、PHM、人工智能等技术手段，帮助企业解决装备健康监测、预防维护等问题，实现“隐形数据-显性数据-信息-知识”的循环优化。同时通过将不同的“小”智能系统按需求进行集成，构建一个面向群体或是SoS的装备的工业数据分析与信息服务平台，对群体装备间的相关多源信息进行大数据分析、挖掘，实现群体、SoS之间数据和知

识的共享优化，解决远程诊断、协同优化、共享服务等问题，同时通过云端的知识挖掘、积累、组织和应用，构建具有自成长能力的信息空间，实现“数据-知识-应用-数据”。

通过CPS按照需要形成本地与远程云服务相互协作、个体与群体（个体）、群体与系统的相互协同一体化工业云服务体系，能够更好地服务于生产，实现智能装备的协同优化，支持企业用户经济性、安全性和高效性经营目标落地。

3. 应用场景

■ 健康管理

将CPS与装备管理相结合，通过应用建模、仿真测试、验证等技术建立装备健康评估模型，在数据融合的基础上搭建具备感知网络的智能应用平台，实现装备虚拟健康管理。通过智能分析平台对装备运行状态进行实时的感知与监测，并实时应用健康评估模型进行分析预演及评估，将运行决策和维护建议反馈到控制系统，为装备最优使用和及时维护提供自主认

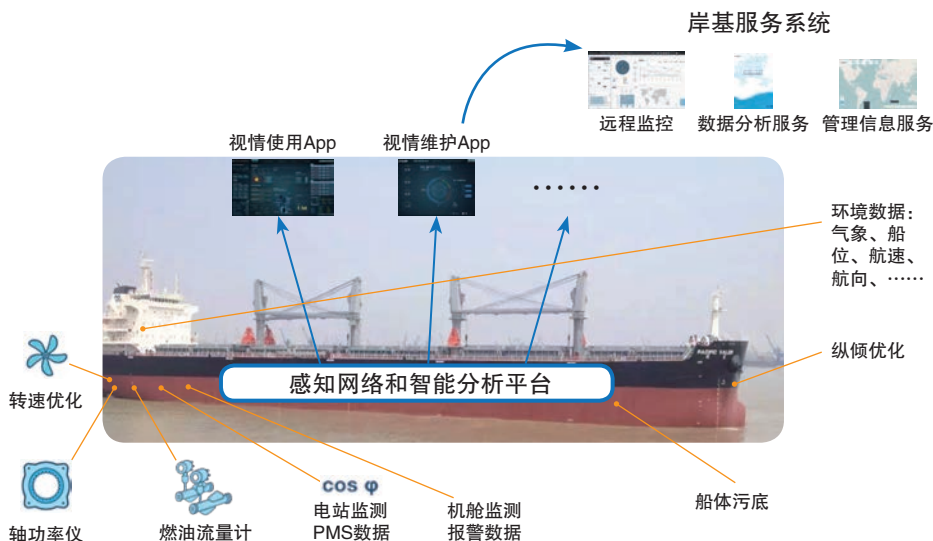


图4-7 某型船舶精细管理CPS系统示意图

知、学习、记忆、重构的能力，实现装备健康管理。如图4-7为某型船舶健康监测管理CPS系统示意图。

■ 智能维护

应用建模、仿真测试及验证等技术，基于装备虚拟健康的预测性智能维护模型，构建装备智能维护CPS系统。通过采集装备的实时运行数据，将相关的多源信息融合，进行装备性能、安全、状态等特性分析，预测装备可能出现的异常状态，并提前对异常状态采取恰当的预测性维护。装备智能维护CPS系统突破传统的阈值报警和穷举式专家知识库模式，依据各装备实际活动产生的数据进行独立化的数据分析与利用，提前发现问题并处理，延长资产的正常运行时间，如图4-8。



图4- 8 CPS在预防维护中的应用

■ 远程征兆性诊断

传统的装备售后服务模式下，装备发生故障时需要等待服务人员到现场进行维修，将极大程度影响生产进度，特别是大型复杂制造系统的组件装备发生故障时，维修周期长，更是增加了维修成本。在CPS应用场景

下，当装备发生故障时，远程专家可以调取装备的报警信息、日志文件等数据，在虚拟的设备健康诊断模型中进行预演推测，实现远程的故障诊断并及时、快速地解决故障，从而减少停机时间并降低维修成本。图4-9为CPS在预防维护中的应用图。

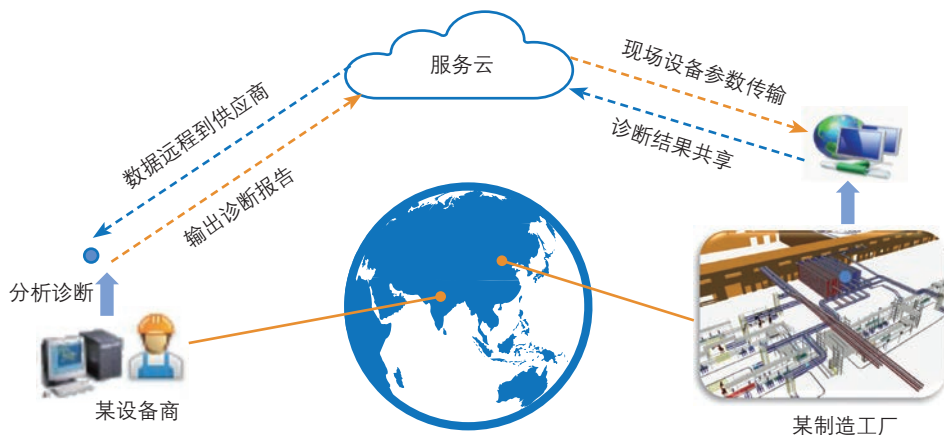


图4-9 CPS在远程诊断中的应用

■ 协同优化

CPS通过搭建感知网络 and 智能云分析平台，构建装备的全生命周期核心信息模型，并按照能效、安全、效率、健康度等目标，通过对核心部件和过程特征等在虚拟空间进行预测推演，结合不同策略下的预期标尺线，从而筛选出最佳决策建议，为装备使用提供辅助决策，从而实现装备的最佳应用。以飞机运营为例，运营中对乘客人数、飞行时间、飞行过程环境数据、降落数据、机场数据等数据的采集，同步共享给相关方：飞机设计与制造部门通过飞机虚拟模拟模型推演出最优方案指导飞机操作人员、航空运营商提供最优路线方案给地勤运营等。图4-10为CPS在运营调度的场景图。



图4- 10 CPS在运营调度的场景

■ 共享服务

通过在云端构建一个面向群体装备的工业数据分析与信息服务平台，将单一智能装备的信息与知识进行共享，正在运行的智能装备可以利用自身的感知和运算能力帮助其他智能装备进行分析运算，智能装备可依据云端群体知识进行活动优化。以船舶为例，将要开始某个具体航线活动的船舶可以向该区域内的船舶提出信息请求，正在进行该活动的船舶可以利用自身的感知与运算能力帮助前者进行分析运算，将结果告知，这样，前者可以依据这个结果选择航线、设定航速、躲避气象灾害。

4.2.4 智能应用

1. 应用需求

工业产品不同于大众消费品，企业用户在购买工业产品之后，将其作为生产工具纳入再生产体系当中，创造新的产品、服务，获取利润。工业体系产业链上，设计者、生产者和使用者相互之间密不可分，生产者为使



用者提供符合设计者要求的产品，三者之间既是合作者又是互相争利的竞争者。

随着经济增速放缓，在市场压力和资金压力下，制造企业势必会采取生产线升级、管理系统信息化等措施提高生产效率，降低成产成本，同时减少在产品设计上的投入。无论设备制造企业如何提升制造端的智能化，其成本最终依然会转移给用户企业，对于现金流同样紧张的用户企业来说，任何生产要素的投入都是大额的资金占用，势必会提高用户企业的经营风险。在零和博弈的传统产业链上，设计者、生产者和使用者之间的矛盾不可调和。

2. 解决思路

通过“新四基”的体系性建设，实现CPS在制造业全产业链的创新应用，给制造业带来了新的思路：不只是生产产品，而是创造真正的用户价值，解决用户再生产过程中的焦虑（worry-free），令设计者和制造者通过提供服务的方式参与到使用者企业的再生产过程中，共创产业融合的分享型价值链。

运用感知和自动控制硬件以及工业软件，将传统产业链中设计者、生产者和使用者的装备、人和环境行为连入工业网络。通过软件定义的工业网络实现装备设计数据、装备生产数据、装备运行数据、设计活动数据、生产活动数据、使用活动数据、内环境和外环境数据的异构融合，并将工业大数据按安全性和隐私性要求存储在私有工业云或公有工业云中。

通过数据服务平台的映射层，实现装备的设计个体空间、生产个体空间和运行个体空间的映射，设计、生产、使用过程中人类管理活动行为的映射，以及环境空间的映射，并通过智能组网、集群协同、活动协同和环境协同等不同目标，构建可供认知利用的群体空间、活动空间和环境空间。在数据服务平台的认知层，分别用以数据驱动和机器学习为主要手段的行为认知方式，以机理模型和数据增强为主要手段的启发认知方式，以

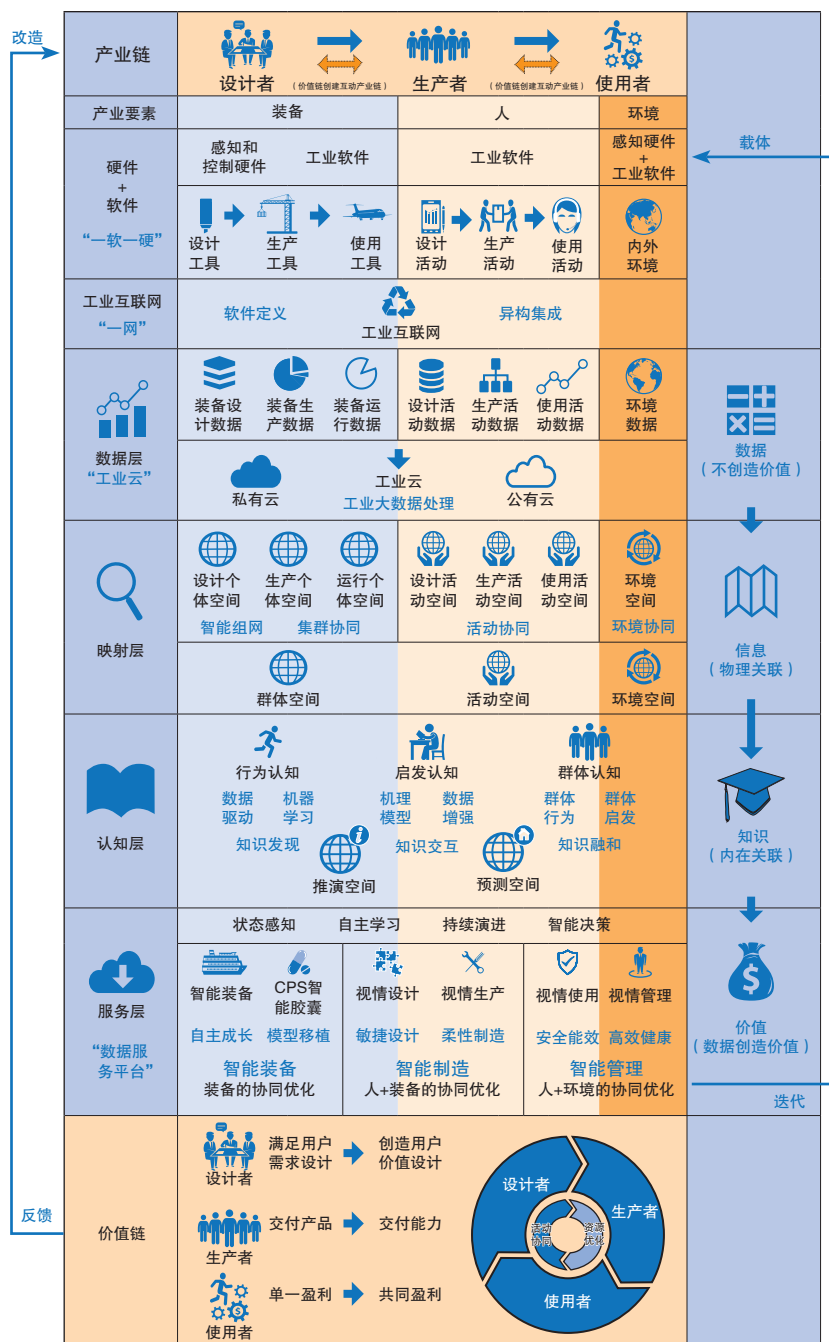


图4- 11 智能应用解决思路图



群体行为认知和群体启发认知为主要手段的群体认知方式，构建知识发现、知识交互和知识融和的平台，并通过知识的推演、预测，建立推演空间和预测空间。最终，在数据服务平台的服务层对环境提供状态感知、自主学习、持续演进和智能决策的支撑服务，并以工业软件和感知控制硬件为载体运用在设计端、生产端和使用端。在装备端的协同优化通过知识成长的核心智能装备建设以及模型移植的CPS智能胶囊实现，共同完成“智能装备”。在人与装备之间的协同优化，通过机器自主学习的事情设计和视情生产实现，满足敏捷设计、柔性制造等供给侧的优化需求，完成“智能制造”。在人与环境之间的协同优化，通过工业智能技术，突破人类工程师的局限性，实现安全、健康、高效、环保的视情使用和视情管理，完成“智能管理”。

通过上述“新四基”的建设，实现制造业全产业链的信息物理融合和价值共同创造，将设计者、生产者和使用者的单调角色转变为新价值创造的参与者，并通过新型价值链的创建反馈到产业链的转型，从根本上调动生产流程中各个参与者的积极性和创造力，最终实现业态融合的制造业转型。如图4-11所示。

3. 应用场景

■ 无人装备

船舶、飞机等重资产装备，普遍操作难度大，安全性要求高，一旦发生意外就会造成严重后果，这就对操作人员的能力和经验的提出了很高的要求。随着老龄化加剧，人力资源短缺的情况日益严重，以船舶为例，传统模式下，培养一个优秀的船员需要5到10年，市场上迫切需要一种智能化船舶解决方案，一方面快速提高船员的技能水平，同时降低操船对于船员经验的依赖程度。

建立在“新四基”之上的CPS很好的解决了装备智能化的问题，通过装备状态感知和实时计算，学习认知装备操控过程知识，并通过行为认知

和启发认知不断的迭代增强决策正确率，逐渐实现物的智慧代替人的智慧，建立无人智能设备，同时构建CPS智能胶囊，在同类型的装备上进行模型移植，实现设备智能化能力的低成本快速推进。如图4-12。

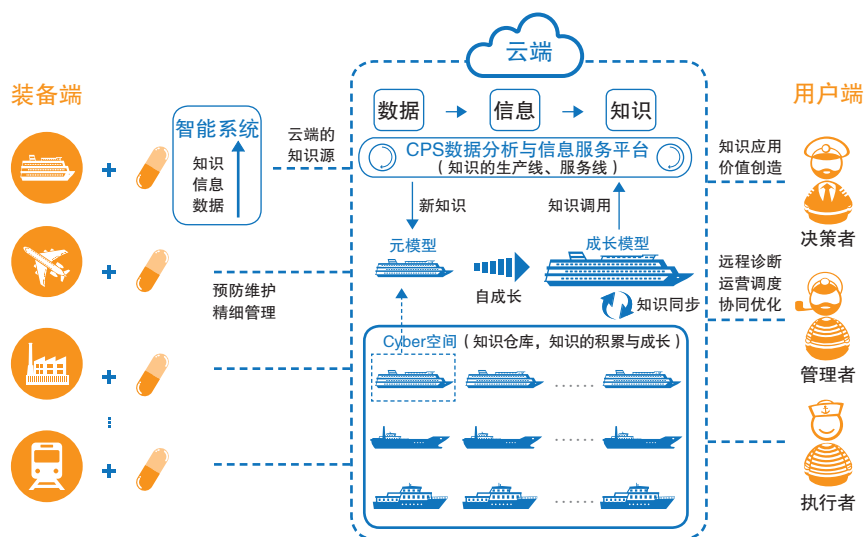


图4- 12 无人装备应用场景图

■ 产业链互动

当市场需求饱和时，需要设计者、生产者共同参与到使用者的活动之中，利用工业网络，构建融合设计、生产和使用的信息空间，并通过机器学习和群体认知等手段，快速分析产品的使用状况，预测用户的需求变化和市场趋势，提供设计修改建议和生产维修计划辅助决策知识，智能优化配置资源，及时处理用户需求。

同时，通过CPS，可以让用户参与到产品的设计生产过程中，激发用户的需求，增加购买欲望，共同实现敏捷设计和柔性生产。

■ 价值链共赢

制造企业要实现向服务商的转型，由单一的依靠销售产品收入变为通



过交付后的产品服务实现长期稳定的收入。依靠传统的售后维护手段，显然已无法满足用户企业的服务需求。传统的定期保养、远程维护、专家诊断等方式，均是“与用户争利”的手段，高额的养护成本更加激化了二者之间的矛盾，许多大型企业用户不惜花重金建立自有的服务体系。但是，定期保养、专家诊断等服务模式提升保养保障能力的边际成本很高，只有大型企业才有实力构建自己专家系统，而占据更大是市场份额的中小企业则无力承担高额的保养费用和庞大的专家系统。

因此，制造企业面向最广大的用户，尤其是中小企业用户，以较低成本向其提供与大型企业相同的定制化服务，这就需要通过CPS，建立人、装备和环境在信息空间中的映射，更重要的是，建立机器自主学习的认知决策系统，通过智能决策支持，突破传统专家系统等模式受人员素质限制的桎梏，向用户提供更加便利、高效的人与环境协同优化服务，即视情使用和视情管理服务。通过服务，进一步参与到产品交付后的持续盈利过程中，在分担用户管理使用风险的同时实现共同盈利。

4.3 CPS建设路径

信息物理系统在状态感知、实时分析、科学决策、精准执行的数据闭环下，可以实现生产制造的自主协调、智能优化和持续创新，对于企业制造的各个环节都可以得到很大的提升。但是企业在建设CPS的过程中要充分考虑信息物理系统的层级特征，不同企业处在不同的阶段，应根据实际情况采取不同的应对措施。CPS的建设不可能一蹴而就，一定是循序渐进、逐渐深入的，其建设路径可以分为如下几个阶段：

1. CPS体系设计

不论处在任何阶段的企业，在建设CPS的初期，都应该从行业背景出发，结合自身特点，针对应用模式、层次架构、安全体系、标准规范体系

等方面开展CPS建设相关的整体体系设计。对企业在CPS建设上的具体需求、资源配给、建设周期、建设平台、人员支持、目标考核进行合理规划。另外，通过对企业目前CPS所属阶段进行评估与诊断，对未来CPS建设的条件与投入进行预判，从而制定适合企业实际发展的CPS解决方案，最终形成完整的CPS建设体系设计，帮助企业开展下一步的具体建设。

2. 单元级CPS建设

当企业处于单元级CPS建设阶段，首先应明确单元级CPS的建设目标，即通过物理硬件、嵌入式软件及通信模块构成含有“感知-分析-决策-执行”数据自由流动的闭环，实现资源的优化配置。在具体建设上我们应将感控设备安装、制造工艺与流程数字化作为重点。

感控设备的安装是CPS建设的基础，通过改造或者更新企业的感控设备，提升感知外部环境信息、实现智能控制的关键能力，对CPS的应用起着技术牵引和场景指导的作用。通过提升装备的状态感知和智能控制能力，为制造工艺与流程数字化提供数据基础与控制基础。

制造工艺与流程的数字化是实现资源优化配置的重要环节，通过工业软件对工艺、流程等工业技术实现数字化、软件化，为信息处理和汇聚提供载体。通过对生产过程中复杂信息流进行分析处理，实现高效的资源优化。

3. 系统级CPS建设

当企业处于系统级CPS建设阶段，需要实现更大范围、更宽领域的数字自由流动，更多关注多个单元级CPS之间的互联互通、协同控制。在具体建设上应将工业网络的建设作为重点。

工业网络是CPS实现多个单元级CPS互联的保障，建立在网络和系统集成基础上。通过工业网络将状态感知、传输、计算与制造过程融合起来，实现对多个单元级CPS之间数据的互联互通，进一步对物的实时、动态信息进行分析和控制，以实现制造信息可靠感知、数据实时传输、海量



数据处理，从而最终实现各组成CPS之前的协同控制能力。

4. SoS级CPS建设

当企业处于SoS级CPS建设阶段，要实现多个系统级CPS的有机组合，更多关注于数据存储和分布式处理能力、智能服务能力，在具体建设上应将大数据平台、智能服务平台的建设作为重点。

大数据平台、智能服务平台是实现全面感知、深度分析、科学决策和精准执行的有力保障。通过感知设备实时感知获取可靠信息，通过工业网络以实时高效传输手段传输数据，通过大数据平台以智能快速的方式将这些有效数据进行处理，通过智能服务平台以高精度快响应的方式提供精准反馈控制，从而最终实现SoS级的CPS建设。

五、信息物理系统的演进路径

CPS为支撑两化深度融合提供了一套综合的技术体系，同时也是实现两化深度融合的必经之路。目前，随着我国各界对CPS的重视程度越来越高，各级政府、企业、高校、科研院所都在积极推动对CPS的相关研究与应用推广。然而，当前CPS的研究和应用还并不完善，其发展仍面临着诸多亟待解决的问题，总结归纳主要包括：一是CPS核心关键技术仍需研究；二是CPS综合标准体系有待研制；三是CPS成熟的解决方案还未成熟；四是CPS生态亟需构建。针对上述问题，我们可以通过加强以下几方面工作来帮助解决，从而推动CPS技术与应用在我国快速发展：

一是加快核心关键技术攻关和人才培养。将CPS的四大核心技术要素“新四基”（感知和自动控制、工业软件、工业网络、工业云和智能服务平台）作为重点关注对象，通过联合产业界、高校、科研院所和服务商形成产学研用的合作创新体系，以团结协作方式共同加快开展CPS核心关键技术攻关工作。同时，针对应用需求，充分利用和整合现有资源，加快开展CPS研发平台、测试验证平台和综合验证试验床的建设与应用推广，为CPS解决方案的开发提供技术保障。另外，在高校设立与CPS紧密相关的专业课程，在企业、科研院所成立关于CPS的专业研究部门，针对CPS构造复杂、涉及知识广泛的实际情况，形成多学科、多领域的交叉人才培养新模式。并且建立关于CPS的国际交流与合作机制，围绕核心技术研发开展多层次、多渠道、多方式的人才交流与合作。

二是构建信息物理系统综合标准化体系。依托科研院所、咨询机构、行业协会、代表企业等开展广泛调研，全面掌握我国CPS技术和应用发展的现状与需求，通过专业标准化制定机构组织相关产业代表，共同研究建立适合CPS发展的综合标准化体系。同时，组织力量加快编制CPS体系架



构等具有指导意义的关键标准，引导我国CPS技术和应用的提升与进步。另外，充分做好标准的宣传与贯彻，大力推动标准的落实与推广，引导CPS相关产业的快速发展。

三是推动信息物理系统行业解决方案研究。面向CPS建设，加快培育一批优秀系统解决方案提供商，通过利用中央财政现有资金渠道，鼓励地方设立专项资金，加大对CPS发展关键环节和重点领域的投入力度，为符合条件的解决方案提供商实施CPS方案验证、方案推广提供支持，并在各领域组织开展行业系统解决方案应用试点示范工程，促进CPS解决方案由点到面进行推广，从而调动解决方案提供商对CPS研究的积极性，推进CPS解决方案的快速发展。

四是打造健康良好发展新生态。通过建立跨行业、跨学科的新型发展联盟，大力培育发展感知和自动控制、工业软件、工业网络、工业云和智能服务平台的载体，促进CPS的多领域和跨行业应用。通过政府引导各界积极布局相关技术和应用，把握发展机遇，稳步推进CPS在各领域的推广，最终形成协同创新、产用结合、以市场促发展的CPS发展新生态。

附件A

信息物理系统国内外研究和应用综述

自2006年至今，CPS的发展得到了许多国家政府的大力支持和资助，已成为学术界、科技界、企业界争相研究的重要方向，获得了国内外计算机、通信、控制、生物、船舶、交通、军事、基础设施建设等多个领域研究机构与学者的关注和重视。同时，CPS也是各行业优先发展的产业领域，具有广阔的应用前景和商业价值。

1. 国外研究现状

国际上，有关CPS的研究大多集中在美国、德国、日本、韩国、欧盟等国家和地区。

表A-1 各国研究机构对CPS的研究及成果

国家和组织	研究方向	研究成果
	理论和标准研究： 参考架构、应用案例、时间同步、CPS安全、数据交换。	- 成立CPS公共工作组（CPS PWG） - 发布了CPS框架1.0（2016年5月） - CPS测试验证平台（Testbed）
	标准研究： 开展CPS相关标准研制工作。	- 成立IEEE TC-CPS - 定期举办学术会议CPS Weeks
	战略分析和理论研究： 智能设备、嵌入式系统、感知控制、复杂系统（SoS）。	- 设立CPS研究小组 - 启动了ARTEMIS项目 - 发布《CyPhERS CPS欧洲路线图和战略》
	国家战略和理论研究： CPS特征、CPS应用、智能设备、信息物理制造系统CPPS。	- 德国工业4.0确定以CPS为核心 - 发布《生活在网络世界—CPS集成研究计划》 - 成立了世界第一个已投产CPPS实验室
	标准、技术、应用研究： 聚焦参考结构、核心技术、标准需求以及应用案例等的研究。	- 信息物理系统发展论坛 - CPS共性关键技术测试验证平台建设与应用推广等项目



■ 美国

2006年2月,美国科学院发布《美国竞争力计划》^[23],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》^[4]的报告中列出了8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》^[5]把CPS应用于交通、农业、医疗、能源、国防等方面。

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,已收集全球范围内的CPS测试平台清单,正在建立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》^[6],提出了CPS的两层域架构模型,在业界引起极大关注。

截至2016年,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^[24]。

美国利用国际产业链优势,在CPS标准、学术研究和工业应用方面处于领先地位,我国亟需在标准研究和应用领域深入研究,追赶世界先进水平。

■ 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》^[25]提出了发展本地嵌入式系统网络的建议，明确提出CPS将是德国继续领先未来制造业的技术基础。2013年4月，在汉诺威工业博览会上德国正式推出工业4.0。《德国工业4.0实施建议》^[8]中提出：建设一个平台，即“全新的基于服务和实时保障的CPS平台”。2015年3月，德国国家科学与工程院（acatech）发布了《网络世界的生活》^[9]，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，建成了世界第一个已投产的CPPS（Cyber-Physical Production Systems，CPPS）实验室。

德国借助其制造强国优势，突出CPS在制造业和嵌入式领域的应用，我国在实施制造强国战略过程中，需要重点关注CPS对制造业发展的促进作用。

■ 欧盟

欧盟在CPS方面也做了很多工作。CPS研究做为欧盟公布的“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)^[26]等项目，计划投入超过70亿美元到CPS相关方面研究，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》^[10]，强调了CPS的战略意义和主要应用的关键领域。

欧盟发挥国家间组织优势，重点关注CPS的战略分析和理论研究，我国也要加强同世界其它国家和组织的沟通交流，促进CPS理论和应用的发展。

■ 日韩

在日韩等国，CPS从2008年左右开始备受关注。韩国科技院等高等教育机构和科研院尝试开展了CPS的课程，从自动化研究与发展角度，关



注计算设备、通讯网络与嵌入式对象的集成跨平台研究。在日本，以东京大学和东京科技大学为首，对CPS技术在智能医疗器件以及机器人开发等方面的应用投入了极大的科研力量。

日韩作为后发的发达国家，紧跟CPS的技术研发和应用，对我国的CPS发展既是动力，也是挑战，我国需要加大CPS领域的研究投入。

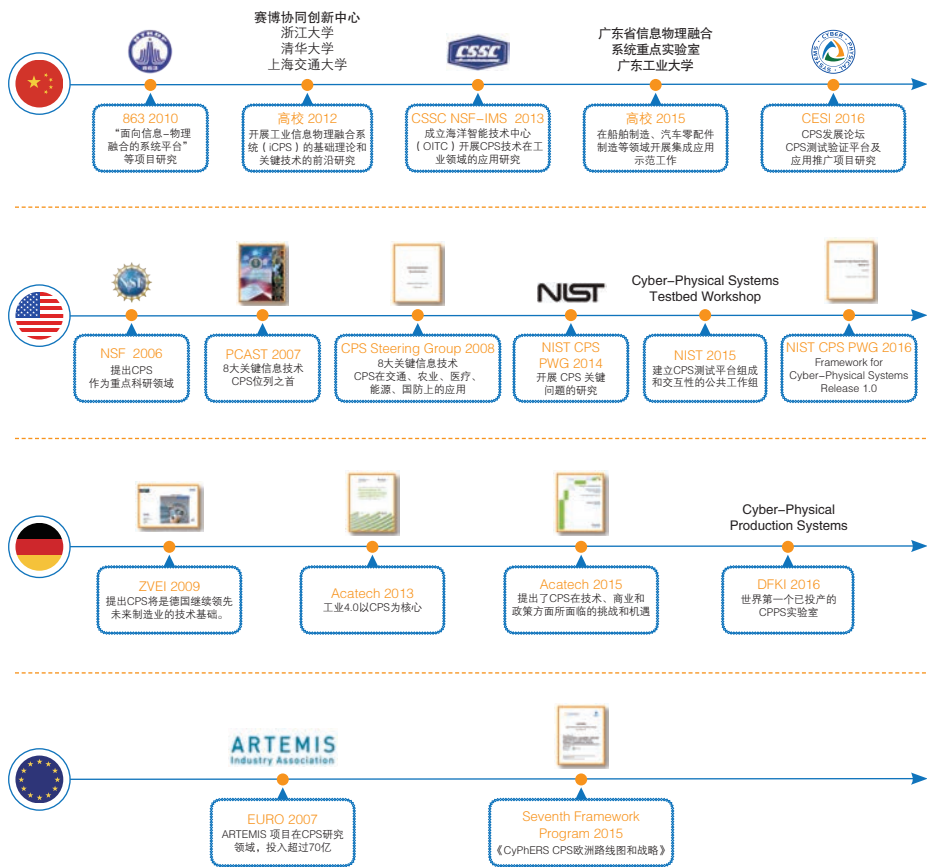


图 A-1 各国CPS发展历程

2. 国内研究现状

在CPS明确提出之前，我国已经开展了类似的研究，这些研究与政府在工业领域的政策紧密联系在一起。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我国CPS发展驶入快车道。

高校和科研单位也纷纷进行CPS技术研究和应用。2010年科技部启动了863计划“面向信息-物理融合的系统平台”等项目。2012年浙江大学、清华大学、上海交通大学联合成立了赛博（Cyber）协同创新中心，开展工业信息物理融合系统（iCPS）的基础理论和关键技术的前沿研究。2016年3月中山大学成立信息物理系统研究所，致力于CPS核心技术和特色应用研究。2016年9月，中国电子技术标准化研究院（工业和信息化部电子标准化研究院）联合国内百余家企事业单位发起成立信息物理系统发展论坛，共同研究CPS发展战略、技术和标准，开展试点示范，推广优秀的技术、产品和系统解决方案等活动。此外，在工业和信息化部的支持下，中国电子技术标准化研究院开展了CPS共性关键技术测试验证平台建设与应用推广等项目的研究。

在CPS应用实践方面，国内也开展了较多有益探索。2013年，中船集团与美国NSF-IMS中心联合成立海洋智能技术中心（OITC），开展CPS技术在工业领域的应用研究。该中心研制的CPS智能信息平台 and 智能船舶运行与维护系统（SOMS）作为国产智能船舶的两大核心系统在散货船、集装箱船和VLCC船上开展广泛应用。广东工业大学2015年5月建立广东省信息物理融合系统重点实验室，2016年6月进一步建立智能制造信息物理融合系统集成技术国家地方联合工程研究中心，初步构建了智能制造信息物理融合系统集成应用体系架构，并在船舶制造、汽车零配件制造等领域开展集成应用示范工作。



附件B

信息物理系统典型应用

单元级CPS: 中控科技集团有限公司CPS应用研究

■ 建设背景

尽管DCS和PLC的应用已经相对成熟，在某些方面仍表现出了一定局限性，其较高的价格和复杂的系统结构、较高的技术门槛以及较高的制造和维护成本使得其更适用于中大型的控制场合。而单元级CPS包含“感知-分析-决策-执行”的数据自由流动闭环，具有传感执行、自动控制、实时通信等基本要素，也正是自动化控制系统的进一步完善与提升。

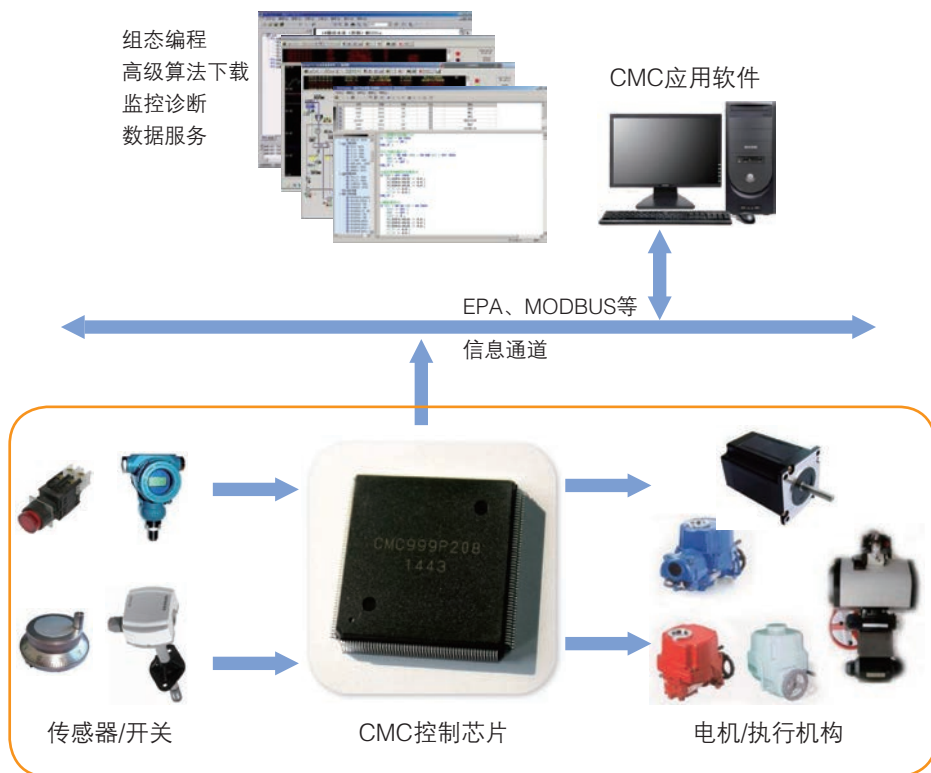
■ 实施情况

中控科技集团有限公司联合国内多家单位共同研制了基于CMC芯片的多种控制系统。CMC芯片即片上控制模块，是一种成本更低廉、设计更简单、可靠性更高的CPS核心模块，将传感信号的检测输入、控制运算、执行输出以及各种工业通信协议全部集成在单一的SoC芯片中，将现有结构复杂、成本高昂的控制系统简化为单一芯片，从而大幅度降低控制系统和单元级CPS的结构成本和实现难度。

基于CMC芯片，集成了多家单位开发产品。例如由武汉华中数控股份有限公司研制出新一代数控系统和相应的车床、铣床，以及小功率和中功率的多种伺服驱动装置；由上海自动化仪表有限公司研制出各类工业变送器仪表、电动执行机构；由沈阳中科博微自动化技术有限公司研制了智能电表的终端和采集器、集中器设备；由浙江中控研制了点位控制器、无线智能插座、无线灯光控制器等智能建筑设备。

各设备除了在内部实现了状态感知、实时分析、精准执行外，也通过实时以太网接口与管理监控软件进行信息交互，提供科学决策。所有这

些设备产品都基于CMC芯片+传感+执行+管理服务软件的CPS结构进行设计（如图B-1所示），并完成了良好的应用。



图B-1 基于CMC的单元级CPS结构示意图

CMC芯片的创新点主要包括：片上控制关键技术、片上数模混合高精采集和输出实现技术、片上高可靠实时互连技术等。CMC芯片将控制功能普及到现场端，将传感信号和执行信号以数据映射的方式存储在芯片内部，通过组态程序和内置的控制算法完成实时控制，系统完全自治。并且，CMC芯片通过实时通信网络将现场和平台间的信息和数据通道直接打通，由CMC应用软件配合完成数据监测和更大型分布式系统的实施。CMC芯片使得设备开发商直接搭载CMC芯片并通过简单的控制组态便可



实现传感监测、控制决策、精准执行和通信监测的功能，并完成单元级的CPS研制和应用。

■ 实施效果

使用CMC芯片进行CPS设备的研制和实施，与常规嵌入式系统方案相比，在设备硬件方面，由于集成度较高，研制周期更短，芯片的可靠性更高，硬件成本也更低。由于CMC方案已内嵌了控制算法和控制程序处理功能，因此其底层软件开发成本为零，开发时间为零，可靠性高。在PC端软件方面，由于CMC方案也直接集成了协议通信并提供了对应的软件应用平台（包括组态、监控、调试诊断、数据库等），使得CPS设备在向上建设系统级CPS以及SoS级CPS时将没有技术障碍。

系统级CPS: 石化盈科CPS应用研究

■ 建设背景

近年来，世界石化产业规模不断扩大，产业格局发生显著变化，北美、中东和亚太作用日益凸显。世界石化工业加快了结构调整步伐，开始由以规模带动效益阶段转向以质量和效益提升竞争力阶段，产品结构向精品、高端方向转变，并高度重视节能环保、绿色低碳和循环经济发展。在新技术革命的推动下，世界石化工业科技创新发展迅猛，技术创新向集成创新转变。石化盈科从系统级CPS入手，构建基于CPS的中国石化智能工厂来开展相关研究，以CPS为核心融合新一代信息技术、运营技术和制造技术等，给石化工业生产方式带来了革命性的变化。

■ 实施情况

石化盈科于2012年起承担基于CPS的中国石化智能工厂建设。中国石化智能工厂是面向石化生产的全产业链环节，将CPS深入应用到现有石化生产过程中，实现工艺和设备运行技术、人的深度集成融合，提升全面感知、预测预警、协同优化、科学决策的四项关键能力，以更加精细和动态

的方式提升工厂运营管理水平，并推动形成新的制造和商业模式创新。

石化智能工厂是构建一个以泛在感知和泛在智能服务为特征的新一代石化生产环境，将由无处不在的传感器、智能硬件、控制系统、计算设施、通信设备、信息终端构成的单元级CPS连接成一个智能网络，构成系统级CPS，实现了企业、人、设备、服务之间的互联互通，最大限度地开发、整合和利用各类信息资源、知识、智慧。

基于CPS的中国石化智能工厂建设围绕三条主线：

1. 全过程一体化生产管控

即通过企业资源计划管理层、生产执行管理层和过程控制层互联，实现各层次的信息汇通和数据共享，实现物流、资金流和信息流的统一，实现全厂管控一体化。通过产品质量、安全管控和能源产耗等约束条件下的计划调整，实现全厂范围计划调度一体化。通过建立工厂和车间数据模型支撑生产过程的自动化处理，通过知识前置实现实时的事前预测，获取与当前工艺状况相适应的最佳操作模式用于指导生产、优化工艺过程。

2. 全流程一体化优化

即通过资源共享，最终实现从原油资源优化、原油配送、生产加工至成品油配送及销售的供应链全过程整体效益最大化。建立横跨石化各业务单元的一体化供应链管理平台，以物料、能源和环保为主要约束，实现全局动态调控，建立上中下游协同的计划与调度优化模型，实现全价值链的供应链优化。在此基础上，围绕客户价值和产业链的整合，构建技术服务、商业服务为一体的商业生态圈，形成新的商业模式。

3. 生命周期一体化资产管理

即实现石化工厂资产设备从计划应用、投入使用、检维修到设备寿命终止的整个生命周期的管理。通过连接最小单元CPS，构建系统级CPS，对设备运行状态进行评定，预测振动趋势，实时对监测数据进行故障诊断和案例匹配，提前预测发现潜在的问题，判别问题风险，安排预防性维



护，对停产检修做出计划，对意外停车做出快速反应，为工厂的升级和改造提供支撑。

■ 实施效果

从下属企业的装备基础、管理基础、员工素质基础和信息化基础等方面考虑，中国石化选择了燕山石化、茂名石化、镇海炼化、九江石化等4家企业作为试点进行以CPS为核心的智能工厂建设，取得了优异的成效，并给同行业的智能工厂建设提供了参考和指导。截止2016年，4家试点企业的先进控制投用率、生产数据自动数采率分别提升了10%、20%，均达到了90%以上，外排污染源自动监控率达到100%，建立了数字化、自动化、智能化的生产运营管理新模式，从局部优化、离线优化逐步提升为一体化优化、在线优化，劳动生产率提高10%以上，提质增效作用明显，促进了集约型内涵式发展。

SoS级CPS：中国船舶工业系统工程研究院CPS应用探索

■ 建设背景

船舶工业是为航运业、海洋开发及国防建设提供技术装备的综合性产业，对钢铁、石化、轻工、纺织、装备制造、电子信息等重点产业发展和扩大出口具有较强的带动作用。但在全球经济增长乏力的大背景下，航运业市场持续低迷，过度在船舶设计制造端追求产品性能的提升已经无法打动船东，需创造新的行业合作形态，令产业链上下游企业共同参与到船舶价值创造之中，创造新的用户价值。

中国船舶工业系统工程研究院利用自身系统工程理论的优势和海军体系工程理论基础，于2010年成立海洋智能技术中心（OITC），是我国船舶领域最早的信息物理系统专门研究机构。海洋智能技术中心（OITC）为了探索适应中国船舶制造业和远洋航运业的转型发展方案，以工业智能为核心突破点，从根本上解决船厂、船东和船员之间的矛盾，率先开展基

于CPS船舶产业SoS解决方案，并积极开展实船实践验证工作，共创“无忧船舶”和“无忧运营”。

■ 实施情况

海洋智能技术中心（OITC）针对SoS级CPS的体系架构，结合我国海洋装备技术和应用特点，在国内首次研制以装备全寿命周期视情使用、视情管理和视情维护为核心，面向船舶与航运智能化的智能船舶运行与维护系统（Smart-vessel Operation and Maintenance System，简称SOMS），并进一步面向船队、船东和船舶产业链，分别设计了船舶（个体）、船队（群体）和产业链（社区）的CPS应用解决方案，为整个船舶产业链提供面向环境、状态、集群、任务的智能能力支撑。

海洋智能技术中心（OITC）在北京设置了工业大数据认知中心与智能信息服务平台，通过具有自主知识产权的CPS认知与决策系统（CPS Cognition and Decision System，简称CCDS），将船舶工业数据异构融合，在信息空间进行映射，在机器自主学习的认知计算环境中，完成了船舶设计、制造、运营流程的知识发现与行为预测。并通过智能信息服务平台以数据驱动模型训练技术对外提供面向船舶设计、制造、管理、运营的视情决策支持。

同时，海洋智能技术中心（OITC）研发了船舶智能Agent。一方面，作为模型和算法的载体，通过模型移植技术实现船舶的自主成长能力，在实时接入上千种传感器数据的基础上，独立为船端用户的活动提供实时快速的决策支持；另一方面，以模型化方式与北京认知中心进行知识交互，并在北京工业大数据认知中心与智能信息服务平台的支持下，基于群体认知学习能力提供更深度的智能决策支持和智能Agent持续升级。

通过工业大数据认知中心与智能信息服务平台，以及CCDS和智能Agent的技术布局，海洋智能技术中心（OITC）根据船舶产业应用对象的不同提出了三个层次的SOMS解决方案：



(1) 船舶-SOMS个体CPS体系解决方案：船舶作为船舶行业的核心装备，既是整个产业链技术水平的集中体现，也是产业链智能化升级最重要的载体。SOMS个体解决方案设计了由感知-分析-决策和控制4个模块构成的智能控制单元，首先对典型的主力船型加装感知系统和分析系统，分析全船数据，通过北京认知中心的强大运算能力和数据科学家队伍，训练认知模型，优化认知算法，以重点船舶的智能化带动船舶整体智能化发展。在为重点船舶提供视情决策、资源优化支持的基础上，利用模型移植将核心模型和关键算法制作成为CPS胶囊，此后只需要在同型姊妹船舶上安装CPS胶囊，并接入简单的关键数据就可以实现大部分自主视情优化功能，无须进行感知网络的重复建设，有利于CPS技术和成果的高效率、低成本推广。

(2) 船队-SOMS群体CPS体系解决方案：船队作为工业领域内最典型的装备集群，几乎具备了装备集群的所有特点和特征，同时由于船舶使用场景和任务的多样性，也出现了很多集群协同优化方面的智能化需求。SOMS群体解决方案为船队的直接关系用户，也就是船东，设计了由感知-分析-决策-管理4个模块构成的智能管理单元，在船舶智能化的基础上，结合我国船舶工业的实际情况，运用模型化传输手段实现了岸海一体分析决策流程，为船东提供了基于CPS的群体认知学习化境，并通过智能信息服务平台，为船东提供视情使用和视情管理服务，在安全、经济和环保三个方面为船东提供自主成长的智能化服务支撑。

(3) 产业链-SOMS社区CPS体系解决方案：在SOMS个体和群体解决方案的基础上，为了进一步在船舶产业进行CPS的应用推广，本着“数据驱动，融合创新”的理念，SOMS社区解决方案提供面向全产业链的全维数据感知、综合数据分析、定制信息服务，以商船、渔船、执法船和关键设备等海洋领域核心装备为装备对象，向海洋领域核心活动的用户提供装备全寿命周期信息服务、智慧航运、货物产业链服务、智慧渔业管理等

智慧化服务，以智能Agent和部署在船端、船东总部的分布式数据中心为数据来源，以北京认知中心为数据认知、优化决策、信息服务的载体，以CCDS为核心，将不同领域用户以知识相连接，构建信息物理融和的船舶工业社区，实现CPS在船舶产业链的深度融合与广泛应用。

SOMS船舶、船队和产业链三种解决方案是依次递进、相互影响的，由于面临的装备、船舶、船队和企业等对象众多，船舶的工作环境、任务场景复杂，SOMS解决方案既是装备建设解决方案，又是系统工程解决方案，更是体系工程解决方案，因此，SOMS解决方案在实现过程中需要相互依托，需要相互促进，循序渐进，整个SOMS体系工程分为三个建设阶段：

(1) 第一阶段：CPS体系框架建设，海洋智能技术中心（OITC）建设由工业软件、感知控制硬件、船舶互联网、认知决策中心和信息服务中心组成的CPS框架体系，并在CPS认知决策系统进行重点攻关，同步开展主力船型和重点企业实践验证工作，为CPS体系应用和推广提供技术基础和实践案例。

(2) 第二阶段：通过典型船舶和重点企业的示范带动左右，将SOMS解决方案在船舶产业链上下游进一步推广，由船舶使用端向船舶的设计、制造端辐射，最终实现SOMS技术体系在船舶产业的整体布局，为船舶产业的信息物理深度融和打下基础；

(3) 第三阶段：通过船舶、船队和产业链的对象全面覆盖，实现SOMS解决方案在船舶设计、制造、使用流程全面融入，真正实现船舶全产业链的信息物理深度融合与广泛融合，构建完整CPS工业体系化应用，从而提升整个产业的工业智能化水平。

■ 实施效果

(1) SOMS与智能船舶

海洋智能技术中心（OITC）的“SOMS个体解决方案”提出了基



于信息物理系统的船舶智能化解决方案，并在军民领域同步开展了实船应用实践，目前该解决方案已在三大主力船型实践应用，其中作为全球首个搭载定制版SOMS系统的远洋大型船舶“明勇轮”自2015年起已累计运行10080小时，18个不同航段，航行数据5.79GB，其中健康管理和能效管理两大模块，实现了显著的油耗节省和“近零故障” (Near-Zero Breakdown)，受到了市场用户和领域专家的高度认可。

(2) SOMS与智能管理

作为中国最早开展CPS研究的船东之一，招商轮船在劳氏船级社的支持下，率先与中船集团签署战略合作协议，共同推进船舶智能化、航运管理智能化、岸海一体智能信息体系等方向的全面合作，并创造条件，推进“SOMS群体解决方案”的实船试装与实践应用，目前“SOMS群体解决方案”已在招商轮船VLOC、VLCC等主力船型开展了实船试装与测试工作，并取得了阶段性成果。

(3) SOMS与智慧海洋

结合国家“智慧海洋”工程，通过CPS在船舶产业的体系性应用，构建了“装备端-CPS云端-用户端”三位一体的船舶领域赛CPS知识体系，实现知识的挖掘、积累、组织、成长和应用，完成了CPS的全产业链深度融和与广泛融合，推动了船舶产业的智能化进程。

附件C

术语和缩略语

表C- 1 术语

术语	定义/解释
信息物理系统 (Cyber- Physical Systems)	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。
物理实体 (Physical Entities)	本文特指人、机、物等在物理世界中真实存在、可见的形体。
物理空间 (Physical Space)	物理空间指物理实体和物理实体之间的关系形成的多维空间。
信息虚体 (Cyber Entities)	本文特指人通过工具对物理实体建模形成的数字化模型（映射）。
信息空间 (Cyberspace)	信息空间是主要由信息虚体组成，由相互关联的信息基础设施、信息系统、控制系统和信息构成的空间，具有控制、通信、协同、虚拟和控制等特点。亦称“赛博空间”
数字孪生 (Digital Twin)	本文特指在制造业中，人机物等物理实体映射形成的信息虚体，它依赖数据理解其对应的物理实体的变化并对变化做出响应。
CPS总线 (CPS Hub)	本文特指是利用标准化接口和软件实现各异构CPS间的信息交换和传递。



表C- 2 缩略语

缩略语	原始用语
CPS	信息物理系统 (Cyber-Physical Systems)
SoS	系统之系统 (Systems of Systems)
CPPS	信息物理生产系统 (Cyber Physical Production Systems)
IoT	物联网 (Internet of Thing)
ICT	信息通信技术 (Information Communications Technology)
WMS	仓库管理系统 (Warehouse Management System)
CRM	客户关系管理 (Customer Relationship Management)
PCS	过程控制系统 (Process Control System)
ERP	企业资源计划 (Enterprise Resource Planning)
MES	制造执行系统 (Manufacturing Execution System)
AGV	自动导引运输车 (Automated Guided Vehicle)
RFID	射频识别 (Radio Frequency Identification)
PHM	故障预测与健康管理 (Prognostic and Health Management)
PMS	设备管理系统 (Plant Management System)
CISC	复杂指令计算机 (Complex Instruction Set Computing)
RISC	精简指令集计算机 (Reduced Instruction Set Computing)
FPGA	现场可编程门阵列 (Field – Programmable Gate Array)
PLM	产品生命周期管理 (product lifecycle management)
PDM	产品数据管理 (Product Data Management)
SCM	供应链管理 (Supply Chain Management)
MBD	基于模型的定义 (Model Based Definition)
CAD	计算机辅助设计 (Computer Aided Design)
CAM	计算机辅助制造 (Computer Aided Manufacturing)
CAE	计算机辅助工程 (Computer Aided Engineering)
CAPP	计算机辅助工艺过程设计 (Computer Aided Process Planning)
CAT	计算机辅助测试 (Computer Aided Test)
CAI	计算机辅助教学 (Computer Aided Instruction)
TSN	时间敏感网络 (Time Sensitive Networking)
SDN	软件定义网络 (Software Defined Network)

参考文献

- [1] 《中国制造2025》（国发〔2015〕28号），2015.05.
- [2] 《国务院关于深化制造业与互联网融合发展的指导意见》（国发〔2016〕28号），2016.05.
- [3] 《“十三五”国家信息化规划》（国发〔2016〕73号），2016.12.
- [4] Leadership under challenge: Information technology R&D in a competitive, 2007.
<https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/pcast-07-nitrd-review.pdf>
- [5] CPS Steering Group, Cyber-Physical Systems Executive Summary, March, in Science and Technology, 2008.
- [6] Framework for Cyber-Physical Systems, Cyber Physical Systems PWG, Sep. 2015.
- [7] The German Nationale Roadmap Embedded Systems, Dec. 2009.
http://netzwerk-zukunft-industrie.de/wp-content/uploads/2016/01/Anlage-3_Nationale-Roadmap-Embedded-Systems.pdf
- [8] Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0, 2013.
http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Material_fuer_Sonderseiten/Industrie_4.0/Final_report__Industrie_4.0_accessible.pdf
- [9] Living in a networked world, 2015.
http://www.cyphers.eu/sites/default/files/acatech_STUDIE_agendaCPS_eng_ANSICHT.pdf



- [10] The European Union' s Seventh Framework Programme, CyPhERS
Cyber-Physical European Roadmap & Strategy, 2013.
<http://www.cyphers.eu/sites/default/files/D2.1.pdf>
- [11] 胡虎、赵敏、宁振波等.三体智能革命[M]. 机械工业出版社, 2016.
- [12] 李必信,周颖. 信息物理融合系统导论[M]. 科学出版社, 2014.
- [13] EdwardAshfordLee, SanjitArunkumarSeshia, Lee,等. 嵌入式系统导论:CPS方法[M]. 机械工业出版社, 2012.
- [14] 王飞跃. 从工程控制到社会管理:控制论Cybernetics本源的个人认识与展望[J]. 控制理论与应用, 2014(12):1621-1625.
- [15] 温景容,武穆清,宿景芳. 信息物理融合系统[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(4):507-517.
- [16] 钱学森. 工程控制论:英文版[M]. 上海交通大学出版社, 2015.
- [17] Helen Gill, From Vision to Reality: Cyber-Physical Systems, National Science Foundation, November 18-20, 2008.
http://www2.ee.washington.edu/research/nsf/aar-cps/Gill_HCSSL_Transportation_Cyber-Physical_Systems_2008.pdf
- [18] Smart America. <http://smartamerica.org/about/>
- [19] Lee J, Bagheri B, Kao H A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems[J]. Manufacturing Letters, 2015, 3:18-23.
- [20] Edward A. Lee. CPS foundations[C]. Design Automation Conference. ACM, 2010:737-742.
- [21] 何积丰. Cyber- physical System [J]. 中国计算机学会通讯, 2010, 6 (1): 25-29.
- [22] VDI/VDE-GMA, Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation, Thesen und Hand- lungsfelder, April 2013.

- [23] American Competitiveness Initiative, 2006.
<http://georgewbush-whitehouse.archives.gov/stateoftheunion/2006/aci/>
- [24] CPSWeeks. <https://cpsweek2017.ece.cmu.edu/index.php/events/>
- [25] The German Nationale Roadmap Embedded Systems, Dec. 2009.
http://netzwerk-zukunft-industrie.de/wp-content/uploads/2016/01/Anlage-3_Nationale-Roadmap-Embedded-Systems.pdf
- [26] Advanced research and technology for embedded intelligence and systems, 2007.
<https://artemis-ia.eu/>



致 谢

本白皮书的编写受到社会各界专家、企业及科研单位的关注和大力支持，在此特别感谢李杰、林诗万、郭朝晖等专家对白皮书编写提供的宝贵修改意见。同时，感谢中国科学院自动化研究所、北京科技大学、重庆邮电大学、中国电子学会、北京和利时系统工程有限公司、新华三技术有限公司、上海明匠智能系统有限公司、易往信息技术有限公司、南瑞集团、上汽通用汽车有限公司、东风汽车公司、三一重工股份有限公司等企业及科研单位为白皮书编写做出的宝贵贡献。

中国电子技术标准化研究院

通信地址：北京市东城区安定门东大街1号
中国电子技术标准化研究院（100007）
白皮书联络人：苏伟
联系方式：010-64102805
邮 箱：suwei@cesi.cn

