

# 信息物理系统建设指南(2020)



指导单位:工业和信息化部信息技术发展司

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

2020年8月28日发布

# 信息物理系统建设指南（2020）

指导单位：工业和信息化部信息技术发展司

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

2020年8月28日发布

# 序

信息物理系统（以下简称“CPS”）作为信息化与工业化融合的综合技术体系，驱动着物理世界与信息世界的融合发展与创新应用，为制造业高质量发展带来了全新的发展机遇。与此同时，融合发展的新需求也推动着CPS探索发展的新路径。

2017年3月，中国电子技术标准化研究院联合中国信息物理系统（CPS）发展论坛成员单位，共同研究形成了《信息物理系统白皮书（2017）》，从“为什么”、“是什么”、“怎么干”、“怎么建”、“怎么用”、“怎么发展”等方面对制造业CPS展开论述，引起社会各界的强烈反响，业界基本达成CPS“一个总体定位、连接两大空间、作用三个层次、打通四个环节、四大技术要素、六大典型特征”的理论共识。

三年多以来，我们持续跟踪主要发达国家、学者和团体组织在金融投资、科技研究、产业发展、人才培养等方面推进CPS的最新发展，立足于CPS“有什么价值”，探索CPS“如何分步实施”，着力推动CPS的发展由理论共识转向工程实践，打通CPS建设“最后一公里”。基于此，在工业和信息化部信息技术发展司的指导下，中国电子技术标准化研究院联合制造业相关企业研究形成了《信息物理系统建设指南（2020）》（以下简称《指南》），旨在助力制造企业在“乱花渐欲迷人眼”的“概念丛林”中，坚定CPS的建设决心，在“山穷水复疑无路”的“实施困境”中，提供CPS的建设模式。

本《指南》从概念、路径和保障三个层面出发，给出了CPS国内外最新研究进展和再认识，梳理了CPS为企业带来的典型价值场景，提出了CPS建设的“人、机器、数字孪生体”三要素以及“人智、辅智、混智、机智”四个建设模式，明确了CPS技术体系和安全支撑，并给出了典型行业的CPS建设实践。简单总结即提出：一个核心认识、一个价值体系、四

个建设模式和五大行业实践。

**一个核心认识。**CPS是数据价值提升与业务流程再造的规则体系。CPS构建了物理空间和信息空间各要素相互映射、适时交互、高效协同的复杂系统，将物理空间设备、产线、工厂等物理环境以及“研发设计-生产制造-运营管理-产品服务”等业务环节，在信息空间相对应的构建起数字孪生设计、数字孪生工艺、数字孪生流程、数字孪生产线、数字孪生产产品等，实现生产全生命周期流程在信息空间的数字孪生重构，并通过数字主线，实现各数字孪生体之间的数据贯通，通过“数据+模型”实现数据到信息到知识到策略的转化，构建起了数据价值提升与业务流程再造的规则体系，即实现业务数据化、知识模型化、数据业务化、决策执行化的逻辑闭环。

**一个价值体系。**CPS价值体系为企业决策层及实施层选择“速赢改善点”提供思路，CPS的“状态感知-实时分析-科学决策-精准执行”闭环为制造业不同场景带来巨大价值，但不同行业、不同业务特点、不同环节的CPS应用为企业带来的价值也各有不同，企业可通过资产维（设备无忧运行等）、业务维（生产资源高效调度、极致能耗科学管控等）和服务维（市场需求精准捕捉、客户交互体验增强等）3个维度分析最适宜自身的价值创造点，并根据自身企业规模、行业、企业特点选择当前优先级最高的价值创造点进行实践，实现投入产出最大化。

**四个建设模式。**CPS建设模式与价值体系息息相关，往往是确定价值创造点后选择相对应的建设模式。企业建设CPS要充分考虑成本投入、问题复杂度、处理难易度、业务规模等因素，因此企业可基于企业发展现状选择不同的建设模式。基于“认知决策”的控制机制是CPS的核心，我们按照其核心“认知决策”能力从低到高提出人智、辅智、混智和机智4种模式，循序渐进、层层递进。CPS建设以感知、分析、决策、执行为方法论，以分析和决策为核心，每种模式建设均需人、机器和数字孪生体三要

素的参与，区别仅在于不同模式下占比不同。4种模式从低到高代表机器和数字孪生体在整个CPS体系中占比越来越高，人的占比越来越小，也就是人在CPS中慢慢的由操作者向高级决策者转变，机器和数字孪生体代替人处理重复性、复杂性的问题，最终实现人机协同的过程。

**五大行业实践。**典型行业共性建设方案是推动CPS落地与发展的重要抓手，既可以促进关键共性技术的突破，又可以推动制造企业的个性化应用。基于价值体系、建设模式选择、建设实施的思路可在汽车制造业、航空航天业、石化行业、船舶行业和烟草行业落地应用，形成不同模式的解决方案，为企业带来不同的价值。

本《指南》在编制过程中集思广益，汇聚了目前国内CPS领域的专业研究团队，并组织权威专家召开了数次专题研讨，体现了当下对CPS的最新认识。下一步，在工业和信息化部信息技术发展司的指导下，中国电子技术标准化研究院联合中国信息物理系统（CPS）发展论坛成员，将进一步深耕CPS标准体系、CPS建设指导、共性关键技术测试与应用、典型场景梳理、开源以及人才培养等工作，为企业建设CPS落地及全面推广奉献力量。

同时，CPS建设指南及其标准化工作还需不断的结合企业实践进行完善和改进，我们欢迎任何单位和个人对本指南的内容提出宝贵意见，并共同参与到CPS的研究过程中。希望通过本指南的发布能够使更多的企业、专家了解我们的研究成果，也希望能够通过CPS建设指南为相关人员提供参考，通过社会各界共同努力，为我国CPS的发展贡献一份力量。

## ■ 指导单位

工业和信息化部信息技术发展司

## ■ 编写单位

中国电子技术标准化研究院

震兑工业智能科技有限公司

西安电子科技大学

重庆大学

北京兰光创新科技有限公司

和利时集团

北京元工国际科技股份有限公司

红云红河集团红河卷烟厂

北京天泽智云科技有限公司

浙江大学

江苏赛西科技发展有限公司

中电天奥有限公司

江苏赫玛信息科技有限公司

广州明珞汽车装备有限公司

北京科技大学

石化盈科信息技术有限责任公司

北京机械工业自动化研究所有限公司

紫光云引擎科技（苏州）有限公司

启明星辰信息技术集团股份有限公司

北京天融信网络安全技术有限公司

## ■ 编写单位

参数技术公司 (PTC)

ANSYS中国

陕西法士特齿轮有限责任公司

中国联合网络通信有限公司

西安邮电大学

## ■ 指导委员会

### 主任

谢少锋      工业和信息化部信息技术发展司      司 长

### 副主任

李 颖      工业和信息化部信息技术发展司      巡视员

赵 波      中国电子技术标准化研究院      院 长

### 委员

孙文龙      中国电子技术标准化研究院      副院长

冯 伟      工业和信息化部信发司两化融合推进处      处 长

周 平      中国电子技术标准化研究院      主 任

信息技术研究中心

## ■ 专家咨询委员会

孙优贤	中国工程院	院 士
李伯虎	中国工程院	院 士
桂卫华	中国工程院	院 士
宁振波	中航工业信息技术中心	首席顾问（原）
赵 敏	中国发明协会发明方法研究分会	会 长
郭朝晖	上海优也信息科技有限公司	首席科学家
邱伯华	震兑工业智能科技有限公司	总经理

## ■ 编写人员（排名不分先后）

于秀明	王程安	贾 超	孔宪光	张 羽	夏晓峰	苏 伟
朱铎先	靳春蓉	丁 研	杨春节	何 毅	黄 琳	杜玉琳
吴 庚	张 瑞	杨梦培	张星星	张瀚文	杨卓峰	周训淼
黄明吉	郑舒阳	阎德劲	李 晗	吕立勇	王 莉	逢新利
高 谊	傅金泉	赵铭远	马洪波	李 武	雷慧桃	安高峰
李永杰	董孝虎	陆成长				



# 内 容 摘 要

本指南以“企业如何真正构建CPS”问题为出发点，从CPS的概念、路径和保障3个方面展开，围绕“CPS有什么价值”、企业应构建“什么样的CPS”、“CPS如何落地”等方面展开论述。

## 上篇：概念篇

包括第一、二章，核心是给出CPS的最新态势和认识。

第一章介绍了CPS发展的最新态势，回答了当前工业发展为什么需要CPS的问题。从金融、科技、产业、人才等方面分析全球对CPS研究和实践的进一步深化，提出我国CPS发展进入全面实施期。

第二章给出了对CPS的再认识，分析CPS与数字经济和实体经济融合、CPS与两化深度融合的促进与支撑关系，给出CPS闭环赋能体系与数据增值和流程再造的内涵逻辑，论述数字孪生在当前工业发展的核心支撑作用。

## 中篇：路径篇

包括第三、四、五章，核心是基于CPS价值分析模型，指导企业选择CPS建设模式，给出典型行业建设实践。

第三章分析了CPS对企业的价值，回答了CPS对企业“有什么用”的问题。从企业资产、业务、服务三个维度分析企业当前发展痛点，论述CPS在设备管理、研发设计、生产和全产业链协同方面为企业带来的效益效果，给出了CPS价值分析模型。

第四章给出了企业建设CPS的路径，回答了企业应构建“什么样的CPS”问题。给出了CPS的通用功能架构以及4个典型建设模式的特征和建设重点，提供了企业选择建设模式的思路。

第五章给出了我国典型行业的案例，回答了“CPS如何落地”的问题，选取汽车、航空航天、石化、船舶和烟草行业，从行业特点、解决思路、落地路径和价值体现方面论述CPS四种模式的建设实践。

## 下篇：保障篇

包括第六、七、八章，核心是明确CPS建设的保障体系和当前发展建议。

第六章给出了CPS的技术体系，从产品复杂度、应用复杂度和业务复杂度3个方面论述CPS技术支撑作用的重要性的发展方向。

第七章给出了CPS的安全保障，CPS安全是建设的前提，从CPS面临的威胁与需求、建设思路、建设过程和典型建设案例分析CPS安全的核心作用。

第八章给出了当前发展CPS的建议，从政策协同、标准引领、平台支撑、行业推广和人才培养等方面给出下一步发展建议，以期推动我国CPS更好更快发展。

# 目 录

## 上篇：概念篇

一、信息物理系统发展态势 .....	1
1.1 项目投资 .....	2
1.2 科技研究 .....	2
1.3 产业发展 .....	5
1.4 人才培养 .....	6
1.5 特别说明 .....	7
二、信息物理系统再认识 .....	8
2.1 数据：业务数据化，实现隐性数据显性化 .....	10
2.2 模型：知识模型化，实现隐性知识显性化 .....	10
2.3 服务：数据业务化，实现隐性价值显性化 .....	11
2.4 执行：服务可执行，实现显性价值的落地 .....	12

## 中篇：路径篇

三、信息物理系统价值创造 .....	13
3.1 CPS价值图谱 .....	13
3.2 企业的价值选择 .....	18
四、信息物理系统建设路径 .....	21
4.1 CPS通用功能架构 .....	21
4.2 CPS建设的4个模式 .....	24
4.3 CPS的建设模式选择 .....	34

五、信息物理系统典型应用实践	36
5.1 汽车制造业	36
5.2 航空航天业	41
5.3 石化行业	47
5.4 船舶行业	53
5.5 烟草行业	59

## 下篇：保障篇

六、信息物理系统建设技术体系	67
6.1 概述	67
6.2 面向产品复杂度的CPS关键技术	69
6.3 面向应用复杂度的CPS关键技术	73
6.4 面向业务复杂度的CPS关键技术	76
6.5 共性关键技术——数字孪生	79
七、信息物理系统安全保障	82
7.1 概述	82
7.2 CPS面临的安全威胁与需求	82
7.3 CPS安全保障总体建设思路	84
7.4 CPS安全保障实施过程	85
7.5 CPS安全保障实施案例	87
八、信息物理系统发展建议	92
参考文献	95
致谢	98

## 一、信息物理系统发展态势

信息物理系统（Cyber-Physical Systems, CPS）是支撑信息化和工业化融合的综合技术体系。在世界主要国家纷纷发布制造业转型升级、“再工业化”战略的驱动下，发展CPS已成为支撑和引领全球制造业新一轮技术革命和产业变革的重要举措。为促进我国CPS发展，推动制造业与互联网融合，2017年3月，中国电子技术标准化研究院联合CPS发展论坛成员单位，共同研究、编撰形成了《信息物理系统白皮书（2017）》，从“为什么”、“是什么”、“怎么干”、“怎么建”、“怎么用”和“怎么发展”等六个方面对面向制造业的CPS展开论述。

近年来，英国、德国、俄罗斯等国家陆续发布数字经济战略，以数字化为主题的新经济形态逐步显现，同时，互联网、人工智能、大数据等新一代信息技术日益成熟、应用日趋广泛。在经济形态转变以及新技术发展



图1-1 CPS发展态势



的双重驱动下，科技界、产业界、教育界等对CPS的研究与实践进一步深化，推动CPS进入新阶段，如图1-1所示。

## 1.1 项目投资

资金投入持续扩大，推动CPS工程实践落地。美国瞄准世界技术前沿，强化科研布局，重点资助前瞻性研究领域。美国国家自然科学基金（NSF）2017-2019年在CPS研究的资金投入总计1.13亿美元，2019年投入资金为5150万美元，占三年总投入的45.5%。欧盟充分发挥国家间组织优势，聚焦中小企业行业应用布局，重点资助产业发展领域。“智能无处不在（SAE）”项目下的FED4SAE联盟通过构建一个泛欧洲CPS数字创新中心（DIHS）生态链，为中小企业提供技术与平台，推进欧洲CPS解决方案的市场化进程，加速欧洲工业和服务的数字化转型。该项目始于2015年由欧盟“地平线2020”科研与创新框架计划（H2020）资助，2019年额外拨付1400万欧元用于CPS的研究与应用推广。

我国政府积极培育企业试点示范，推动CPS建设与实施。工信部聚焦产业发展，近三年来开展制造业与互联网融合试点示范（CPS试点示范）和工业转型升级专项，累计支持了10余项面向行业的CPS测试验证平台项目和试点示范。国防、科技等主管部门纷纷在各自领域开展部署工作。国防科工局2017年发布的“民参军”和“军转民”军用技术推广目录和产品信息通知中，CPS出现在征集目录中。军委装备发展部信息系统局2017年发布全军共用信息系统装备预研指南，提出了“面向军事信息系统“云+端”的体系架构”的研究项目。科技部的网络化协同及智能制造重大专项将智能生产线CPS理论与技术（基础前沿类）作为一项研究课题。

## 1.2 科技研究

在科技研究领域，国际上三大学术流派引领CPS学术科研走势，各

研究机构纷纷开展CPS不同领域的研究工作，推动CPS技术多维度发展。我国紧随国际步伐，重点关注CPS理论、标准、应用等方面的研究，探索CPS技术的突破性发展。

美国国家自然科学基金（NSF）侧重于CPS科学技术与工程领域的基础研究，并致力于将CPS理论和方法整合到教育中，开发新课程推动CPS技术的普及。NSF是CPS研究领域最早发展起来的一个流派，2006年组织召开了国际上第一个关于CPS的研讨会，并对Cyber-Physical Systems（即CPS）这一概念做出详细描述。每年都会面向学术界征集CPS研究课题并提供资助，近年来重点关注能够带来新思路的跨学科、跨领域的合作研究，能够加速CPS成熟应用的工程实践研究以及测试床试验环境的研究。2019年美国NSF联合德国科学基金会DFG的信息物理网络优先项目(SPP-1914)对CPS通信网络领域的技术研究提供支持。

伯克利工业CPS研究中心（ICYPHY）侧重于CPS体系结构、设计、建模和分析技术的开源，旨在通过CPS解决机械、环境、电力、生物医学、化学、航空等领域的工程模型与算法模型之间的融合，搭建学术研究与工业应用的桥梁。近年来ICYPHY组织阿瓦斯特（Avast）、卡莫齐工业（Camozi Industries）、电装(Denso)、福特（Ford）、丰田（Toyota）等工业企业与斯坦福大学、华盛顿大学等科研机构共同开展基于CPS的智能工厂、先进机器人技术、先进控制与优化技术方面的研究，2019年ICYPHY与西门子在工业控制系统的建模与仿真、实时虚拟容器方面进行了重点研究。

电气和电子工程师协会（IEEE）下的CPS技术委员会（TC-CPS），侧重于学术活动规划和服务，为世界各地关于CPS的研究和创新成果提供一个可以互相交流的平台。IEEE聚焦CPS跨学科研究和教育，重点关注包括CPS的数据处理、基础架构、嵌入式系统、物联网、下一代操作系统、工业自动化等领域的研究。与NSF、ACM联合组织



CPS WeeK（2019年更名为CPS-IoT Week）是美国CPS学术最重要活动。从2008年开始，每年都定期汇集面向计算与控制、设计与实现、信息处理与传感器、嵌入式与应用等方向的顶级会议，同时包括多个研讨会、培训、竞赛、峰会以及行业和学术界的各种展览会。近年来CPS WeeK对CPS-IoT相关技术进行持续关注，2017年提出物联网作为一项新兴技术为CPS带来的挑战，并有望成为CPS的全球网络基础设施；2018年重点关注基于IoT驱动的陈PS的可靠性问题；2019年正式将CPS WeeK更名为CPS-IoT Week，可见IoT与CPS技术融合发展态势明显。

其他组织也对CPS开展了关键技术研究，跨组织间的合作交流趋势明显。德国电气和电子制造协会（ZEFI）重视CPS核心技术与工业结合，2018年与工业4.0平台（Plattform Industrie 4.0）合作发布《德国工业4.0-资产管理壳》，文中提出了面向资产的功能架构，构建资产管理壳的使用视图，并描述资产管理壳与价值服务应用场景之间的关系；2019年成立5G互联工业和自动化联盟，发布的《5G应用白皮书》介绍了3GPP定义的5G非公用网络的四种工业部署方案，并根据服务属性说明各场景间的差异。美国国家标准与技术研究所（NIST）成立CPS和智能电网工作组，与行业、学术和政府合作开展CPS参考架构方面的研究并建立CPS测试床，对外提供测试服务；近年来还重点关注物联网发展为CPS所带来的机会，2019年发布的特别出版物《Internet of Things / Cyber-physical Systems》对2011年至2018年间不同学术流派对二者的定义与关系的理解进行梳理，认为二者相互融合的趋势明显。欧盟毕加索项目重点探讨欧美双边合作的可能性，2018年发布《欧盟-美国IoT/CPS合作前景分析报告》分别从技术、政治、法律、社会发展等视角下分析未来欧盟和美国在CPS相关领域合作的机遇和挑战。

我国学术领域在理论、标准、应用研究领域均有突破。在基础研究领域，高校和科研单位对CPS的研究和应用进入核心攻坚阶段，重点突破



物理仿真、实时传感、智能控制、人机交互、系统自治等CPS关键核心技术。2018年为了探讨未来自动化科学与技术的发展趋势，明确研究发展方向，《自动化学报》发布“自动化科学与技术未来发展专刊”，探讨了伴随CPS的发展给传统自动化科学与技术所带来的新挑战和新机遇。2019年7月由周济院士领衔，中国工程院、华中科技大学、清华大学、密西根大学多位学者参与研究的论文《面向新一代智能制造的人-信息-物理系统(HCPS)》，从HCPS视角分析了智能制造系统的进化历程与趋势，重点探讨了面向新一代智能制造的HCPS的内涵、特征、技术体系、实现架构以及面临的挑战<sup>[10]</sup>。在标准研究领域，中国电子技术标准化研究院积极推进CPS重点标准的国标立项工作，在国家标准化委员会、工业和信息化部等的指导和支持下，2017年《信息物理系统 参考架构》、《信息物理系统 术语》两项国家标准正式立项，并经过3年的研制临近正式发布。

### 1.3 产业发展

产业应用逐步完善，呈现出大企业平台化协同化发展、中小企业借助优势资源开展自我升级改造的态势。大型制造企业正往软件化、平台化方向开发CPS解决方案，中小型企业基于平台以较低的价格获得与大型企业相同的定制化服务，有效地减少二次开发的成本。西门子通过收购不同类型仿真、分析软件，不断扩展其数字化业务，同时融入人工智能、数字孪生等技术，将其在制造领域多年的知识以模型化、组件化的形式沉淀到平台上，为客户提供基于CPS的工业数字化整体解决方案，2018年收购Mendix公司及其低代码平台帮助中小企业开发自己的应用程序，吸引越来越多的工业企业入局，共同构建服务型制造生态。企业间通过平台集成各自的客户群体、品牌价值、专业领域知识以及技术方案能够实现终端市场和应用等方面的优势互补。2018年6月罗克韦尔自动化与美国参数技术公司（PTC）达成战略合作协议，共同为客户打造全面、灵活的工业领域



产品；同年9月，老牌制造企业ABB凭借其在过程、电力自动化领域的优势与贝加莱、达索联手为客户提供全方位的软件解决方案。制造企业已开始应用CPS来改善生产、管理以及服务等各个业务环节。根据2019年1月中国电子技术标准化研究院出版的《信息物理系统（CPS）典型应用案例集》显示，我国企业开展的CPS应用实践现已涉及设备管理、柔性生产、质量管控、运行维护、供应链协同等多类制造场景，覆盖石化、烟草、船舶、电子、轨道交通等15个行业。其中，制造企业依托平台将行业原理、基础工艺、业务流程、专家经验等共性技术知识代码化、组件化、模型化，以数字化模型的形式沉淀并开放共享；解决方案供应商对接用户需求，为客户提供CPS解决方案、平台产品及实施服务。

## 1.4 人才培养

伴随着CPS在整个工业界的普及，围绕CPS开展工作的工程师逐年增加，对于接受正规的CPS教育或培训的需求急速上升，教育界开始意识到CPS学科发展的重要性。2016年12月美国发布的《21世纪的信息物理系统教育》系统剖析了工程教育如何帮助未来的工程人员获取并构建CPS能力的途径及建议。美国NSF、专业协会和大学行政管理部门在现有工程教育计划以及为CPS工程专业和辅修专业学生开设新的CPS课程提供支持，为CPS工程学士学位课程开设总体课程，并考虑为其分配资源，开展实践学习活动和实验室工作。加利福尼亚大学伯克利分校电气工程和计算机科学系开设《嵌入式系统概论：信息物理系统的方法》课程，相较于传统的嵌入式课程更加注重建模方面的教学转变，重点面向CPS建模。此外，宾夕法尼亚大学、伊利诺伊理工大学、科罗拉多大学博尔德校区、爱荷华州立大学、纽约大学均开设了CPS相关课程。

国内清华大学、浙江大学、同济大学、西北工业大学等重点高校也创建CPS研究组或实验室，中国香港和台湾地区的部分高校成立了UCCPS

（User-centric cyber-physical systems workshop）亚洲论坛从事CPS技术相关研究。重庆邮电大学开设了“信息物理系统（CPS）与智能工厂”课程，在授课内容上主要讲授国内外制造业的现状，信息物理系统及智能工厂的关键使能技术。同济大学工业4.0学习工厂目前已开发8门课程，通过综合性开放式的课程设计，在实际工程环境下全面培养、提高学生的工程素养和工程能力及团队协作、组织协调能力。重庆大学成立信息物理社会可信服务计算教育部重点实验室（CPS-DSC实验室）开展信息物理社会可信服务计算基础科学问题及应用基础问题研究，支撑国家和重庆地区的经济建设和社会进步。华中科技大学成立信息-物理-社会系统实验室（Cyber-Physical-Social Systems Lab, CPSSLab），主要的研究领域包括CPSS、嵌入式系统、物联网、大数据、普适计算与移动计算、高性能计算、云计算、绿色计算等。

## 1.5 特别说明

Cyber一词可追溯到维纳在《控制论》中使用Cybernetics一词，常作为前缀表示与Internet或电脑相关的事物。美国国防部高度重视赛博空间，在2009年4月组织出版《赛博力量和国家安全》中，将赛博空间定义为一个可操作的领域，由电磁频谱、电子系统及网络化基础设施三部分组成，人类通过电子技术和电磁频谱在赛博空间中进行信息的创建、存储、修改、交换和利用。业界对于“Cyber-Physical Systems”名称的翻译存在差异，中文名称有“信息物理系统”、“赛博物理系统”、“网络物理系统”等，但对其本质内涵的理解保持一致。本指南采用国务院相关文件中的用法，统一使用“信息物理系统”。

## 二、信息物理系统再认识

在《信息物理系统白皮书（2017）》中，我们给出了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。基于硬件、软件、网络、工业云等构建的智能复杂系统依托数据的自动流动（隐性数据、显性数据、信息、知识），为物理空间实体“赋予”一定范围内的资源优化“能力”。因此，CPS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，提高资源配置效率，实现资源优化，如图2-1所示。从逻辑内涵角度看，无论是制造业数字化转型、工业互联网、两化融合，其本质都是在信息空间和物理空间之间构建一套闭环赋能体系，而构建这套闭环赋能体系的技术体系就是CPS。

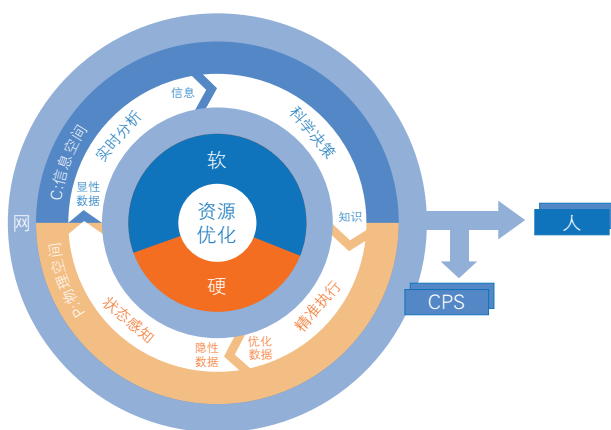


图2-1 《信息物理系统白皮书（2017）》提出CPS的本质

随着CPS应用落地开花，我们对CPS的认识也从理论框架转向应用价值。在2017年“基于数据自动流动的闭环赋能体系”的认识基础上，我们认为CPS更是数据价值提升与业务流程再造的规则体系。CPS将物理空间“研发设计-生产制造-运营管理-产品服务”等各业务环节以及设备、产线、产品和人等物理实体，在信息空间相对应的构建起数字孪生设计、数字孪生工艺、数字孪生流程、数字孪生产线、数字孪生产品等，实现产品全生命周期流程在信息空间的数字孪生重构，并通过数字主线实现各数字孪生体之间的数据贯通；通过“数据+模型”即数据到信息到知识到策略的转化，创造新的服务模式并执行，由此构建起了数据价值提升与业务流程再造的规则体系。这套规则体系具体来说包括：业务数据化、知识模型化、数据业务化、决策执行化。即实现：业务——（数据化）——产生数据——（模型化）——高价值数据——（业务化）——反哺业务的逻辑闭环，如图2-2所示。

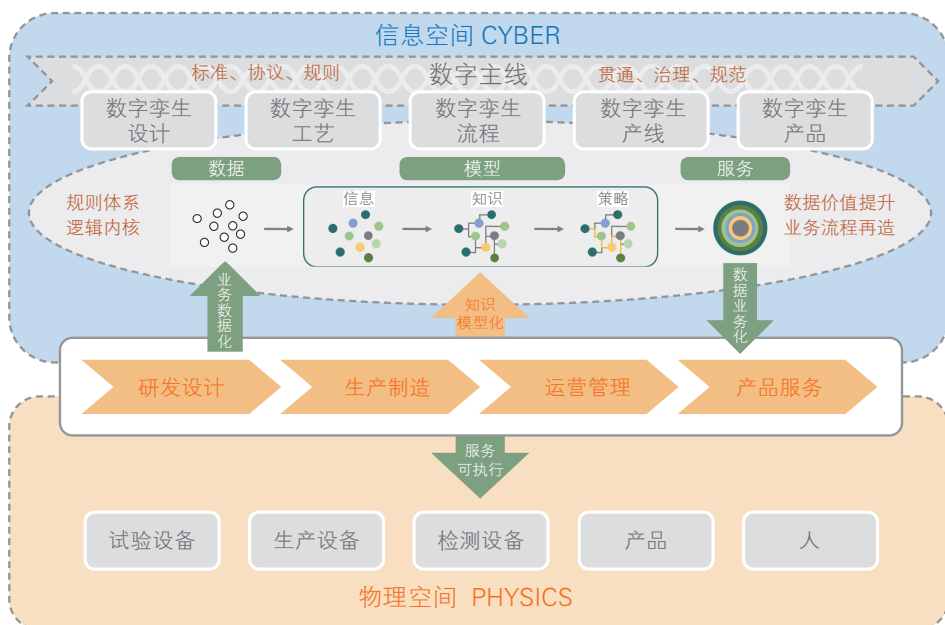


图2-2 CPS的数据价值提升与业务流程再造的规则体系

## 2.1 数据：业务数据化，实现隐性数据显性化

CPS通过集成先进感知、计算、通信等技术，将“研发设计-生产制造-运营管理-产品服务”等各业务环节及制造资产中蕴含在背后的隐性数据在信息空间不断显性化，使得数据能够“可见”，实现业务流程的数据化。业务数据化是构建信息物理系统的基础，将“一切业务数据化”是实现在信息空间对业务全流程重构和优化的前提。业务数据化可分为：资产数字化、流程数字化，即推动工业设备上云和业务系统上云，在信息空间构建与物理空间相对应的全流程业务逻辑及设备资产，如图2-3所示。

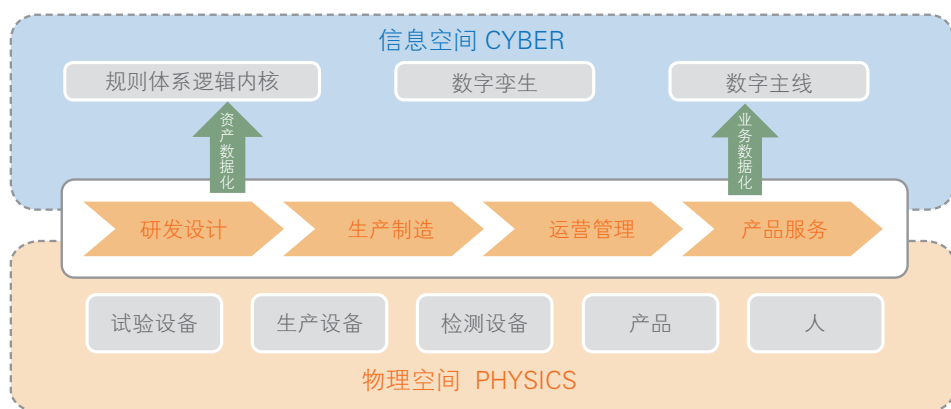


图2-3 资产业务数据显性化

## 2.2 模型：知识模型化，实现隐性知识显性化

认识、规律是人类不断试错物理世界过程中积累的经验的固化，长期以来这些规律、经验、认识以物理形态（竹简、书籍、专利、论文）或意识形态（洞察、经验、智慧）存在。数字化模型是这些规则、逻辑、知识的数字化体现，将各类经验、知识、方法不断模型化、数字化并沉淀在云端，可以实现从杂乱无章的数据中提炼成可理解的信息、转化为相互关联的知识、寻找到实现目标的策略路径。模型可分为机理模型（模型驱动）

和大数据分析模型（数据驱动），是数据价值增值的“培养皿”，也是构建数字孪生的核心。模型嵌入数字孪生体中，提升了物理世界与信息世界的相互映射、高效协同，如图2-4所示。

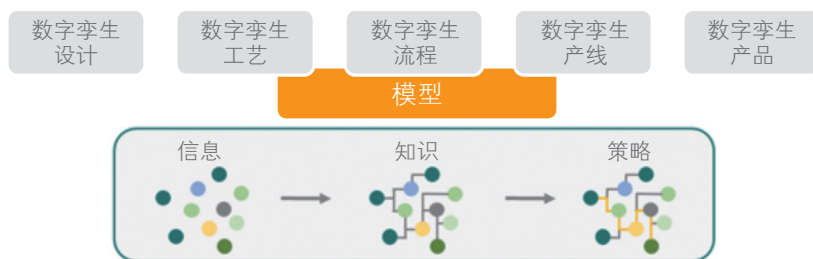


图2-4 模型为数据价值增值

## 2.3 服务：数据业务化，实现隐性价值显性化

CPS是数据价值提升与业务流程再造的规则体系，这套规则体系的逻辑内核为基于模型（机理模型、大数据分析模型）的数据增值服务，简单的说就是“数据+模型=服务”，如图2-5所示。基于“数据+模型”的核心逻辑，一方面实现“数据-信息-知识-策略”的价值提升，另一方面，各类业务环节的数据的统一汇聚、调用，打破传统业务线性化流程的制式枷锁，实现业务流程的重构与再造。当把海量数据加入到数字化模型中，进行反复分析、学习、迭代之后，可以带来“描述物理世界发生了什么、诊断为什么会发生、预测下一步会怎么样、决策该怎么办等”高价值服务，将这种高价值服务以工业APP等新型载体的形式呈现出来并反哺到业务流程中，把蕴含在大量数据背后的隐性价值不断显性化，即实现数据的业务化，一方面能够优化现有业务流程及业务体系，另一方面能够拓展业务空间，带来新的经济增长点。



图2-5 规则体系的逻辑内核

## 2.4 执行：服务可执行，实现显性价值的落地

业务数据化实现了生产全流程环节隐性数据在信息空间的显性化。知识模型化将物理空间各类经验、规律、方法等隐性知识以数字化模型的形式在信息空间不断显性化，并通过“数据+模型”带来的数据增值服务，数据业务化将蕴含在大量数据背后的隐性价值不断显性化。基于“业务数据化-知识模型化-数据业务化”实现了由业务——（数据化）——产生数据——（模型化）——高价值数据——（业务化）——反哺业务的闭环。而服务价值的落地应用必须要与物理空间物理实体相结合，符合物理空间的运行规律和逻辑，确保服务能够可执行。



## 三、信息物理系统价值创造

本章从制造业面临的痛点问题出发，以价值创造为导向，从资产、业务、服务三个维度描绘了CPS的真实应用场景，回答了CPS“有什么用”、“用在哪”的疑问，帮助企业借助CPS寻求收益。本章还尝试给出不同行业 and 不同特点企业选择CPS时的关注点。

### 3.1 CPS价值图谱

不同行业、不同业务特点、不同业务环节的CPS应用为企业带来的价值各不相同。本节参考《信息物理系统（CPS）典型应用案例集》（以下简称案例集），并对不同行业、不同业务企业的CPS应用情况进行调研，梳理出CPS在资产、业务、服务三个维度的价值场景，围绕企业目标建设满足当前阶段价值的CPS，最终实现成本下降、质量提高、效率提升、资源配置间的协同，图3-1为CPS在制造领域的价值图谱。



图3-1 CPS在制造领域的价值图谱



资产维价值场景主要聚焦设备、产线等基础设施，以设备无忧运行、设备快速排故、设备高效运维等为目标导向，最终实现大幅降低运营成本的价值体现。

业务维价值场景主要瞄准企业内部的业务流程，以高精度产品/工艺设计、精益品质提升管理、极致能耗科学管控、生产资源高效调度等为目标导向，最终取得业务流程优化、生产要素高效配置、产品质量大幅提升的价值体现。

服务维价值场景主要着眼于企业对外的联系与增值，以市场需求精准捕获、客户交互增强体验、信息交互强健供应链、制造能力价值最大化/产融合作升级创新等为目标导向，最终实现企业服务化延伸的价值体现。

### 3.1.1 资产维下的CPS价值

资产维度下的CPS应用主要通过对设备以及生产线的状态进行实时跟踪，在取得实时数据的基础上开展相应的分析与决策，从而提升设备资产的使用率。

#### 3.1.1.1 设备无忧运行

企业设备的运行状态不可见、非计划停机、现场排查困难等问题影响着生产稳定。基于此问题，CPS通过感知、分析、计算、控制闭环机制，可实时采集温度、湿度、振动等设备状态数据和工作时间、加工产品数量等过程数据，并以统计图表、起停状况、故障显示等方式将设备运行和生产过程可视化，提高了应对设备异常的快速反应能力、减少因机械故障引起的灾害，保障了设备的有效运行时间，做到真正无忧运行。

#### 3.1.1.2 设备快速排故

设备故障的排查时效直接影响着经济效益。CPS在掌握设备实时运行数据的基础上，通过设备故障知识库与设备管理系统的集成，综合判断故障位置，以图形声音等形式提供告警，快速捕捉故障现象、准确定位故障

原因，合理设计并验证维修策略，实现基于设备运行状态的检修维护闭环管理，提高了设备故障排查效率。

### 3.1.1.3 设备高效运维

CPS在对设备健康状况进行评估的基础上，提供设备缺陷类别和等级；在预测设备故障及剩余寿命的同时，依据参数化预案专家库，智能制定预测性维护解决方案，以此提前应对风险。在此场景下通过CPS将传统的可见故障排除转变为不可见问题预测，并实现同行业经验积累和汇聚，大幅降低设备的风险故障概率。

## 3.1.2 业务维下的CPS价值

业务维度下的CPS应用主要面向产品全生命周期，包括对设计、质量、能耗、生产调度方面的优化，实现研发周期缩短、产品质量提升、能耗降低、生产稳定性提高等。

### 3.1.2.1 高精度产品/工艺设计

随着用户对产品的需求愈加丰富，产品更迭周期越来越快，产品/工艺的快速精准设计显得愈发重要。CPS通过数字孪生技术等手段，集成产品在实际工况下运行的各类数据，构建超高拟实度的虚拟仿真模型，使得产品在实际试验或制造之前进行模拟与检验，从而缩短产品设计周期并降低试验成本。在此场景下，CPS能够解决企业实际生产过程中理想设计信息和真实加工、装配、检测等制造信息脱节的问题。

### 3.1.2.2 精益品质提升管理

产品生产过程中数据处理实时性差、工况状态反馈缓慢、运行决策粗放易变等问题困扰着企业质量提升的步伐。基于此问题，通过CPS可以统一集成从工艺设计到制造生产以及检验过程各环节的数据，对全过程数据进行实时监测、动态预警、过程记录分析，实现产品和制造过程中质量相关数据的统一管理，并对关键工序质量进行在线检测和在线分析，自动



对检验结果判断和报警，实现检测数据共享，并可通过产品质量问题知识库，杜绝生产过程中因为人为干预而造成产品质量的偏差，确保生产系统的高效协同和产品质量的一致稳定。

### 3.1.2.3 极致能耗科学管控

能耗指标是企业控制成本的重要因素，能效优化是企业不得不面对的关键问题。通过CPS能够实现能耗信息、生产要素信息和生产行为状态等信息感知，对能源的输送、存储、转化、使用等进行全面监控，实现对高能耗设备以及制造过程能耗的实时优化调控。基于CPS的能效管理相比于传统的能耗监管方法，数据来源由单一的能耗数据向多类型的装备能耗、生产要素和生产行为等数据转变，使能源监管更加精准高效。

### 3.1.2.4 生产资源有效调度

生产资源的优化配置是基于产品成本、价格、质量等因素的综合分析结果，决定着效益的高低。基于此问题，通过CPS将企业物料采购、生产、仓储配送、运输管理等的多系统信息集成，利用虚实映射技术，通过物理实体与虚拟模型的真实映射、实时交互、闭环控制，实现供应链全过程信息跟踪映射，并以此进行配送运输路线优化、运输过程调度、物料调配。在此场景下，通过CPS的数据采集、虚实映射等机制使得企业生产资源透明化，可以帮助企业实现采购、生产、物流、配送的无缝化和智能化。

## 3.1.3 服务维下的CPS价值

服务维度下关注的重点已不仅仅是基于智能产品的服务，而是通过平台级CPS联通产业链上下游实现服务化的全面延伸，获得更广泛的附加价值。

### 3.1.3.1 客户交互增强体验

随着客户对产品参与度需求的不断提升，如何建立与客户的联系，

提升交互体验是未来新的发展趋势。基于CPS的个性化定制使企业的服务管理模式呈现新的转变，由传统的客户提供需求模式转变为服务商主动寻求服务，产品的管理过程也向着实时化、远程化、集成化的生命周期管理转变。在此场景下，产品就是一个CPS，由此具备感知计算控制的功能，且可与生产CPS连接，一是可以通过CPS反映产品在使用过程中的变化规律，也可用于分析产品性能的影响因素，帮助设计人员对产品进行改进，及时满足用户的个性化需求，二是加强客户与厂商间的交互，形成以客户需求为主导的企业新生产模式，整个过程下用户既是消费者又是设计者、生产者，真正实现了“产消合一”的理念。

### 3.1.3.2 制造能力价值最大化

在各类企业出现制造能力冗余浪费的背景下，通过CPS将既有的资产和能力转变为结构化、信息化的表达并在平台上进行汇聚，可对企业内部资产进行全面数字化改造。依托CPS发布资源信息，实现员工、原材料、能源、工厂以及设备等资源透明化，推动企业间、企业与社会间通过闲置设备租赁、生产能力租用的形式产生额外收益，一方面提高资源使用效率，另一方面控制企业成本，能够解决企业产能过剩与产能不足的问题。该场景是未来发展趋势，通过不断在平台上积累供求双方信息，将建立起生态发展体系。

### 3.1.3.3 信息交互强健供应链

随着全球化的快速发展，为了更好响应市场需求、提高竞争能力，企业需要建立更加透明、柔性、快速反应的供应链管理体系。通过CPS的科学分析与决策，实时提供配套供应商及供应数量方案，实现跨区域、跨企业的订单配置、供应商选择、物料调配、运力资源的优化，实现厂商、客户定制化服务的无缝对接，带动区域生态链上下游的整体发展。在此场景下，通过CPS将原料供应商、各级制造商、方案解决商以及客户等多源异构数据进行整合与分析，能够解决企业随着客户个性化需求增加导致的产



能应变能力不足、资源获取难度加大等问题。

#### 3.1.3.4 产融合作升级创新

在产业链金融不断创新的背景下，通过CPS整合企业全流程数据，挖掘潜在商业价值上，能够解决企业和金融机构的信息不对称问题，实现产业的现实需求和金融有效供给的无缝对接。CPS能够集成生产经营活动中业务流、物流、资金流、数据流，依托平台实现企业融资需求发布，对接金融机构产品。在此场景下，CPS能够增强企业技术研发能力，促进制造业由低端机械加工向高端智能制造的产业升级，推动新商业模式的发展，最大化提升客户价值。

## 3.2 企业的价值选择

企业可根据规模与业务范围，结合自身业务发展规划，选择投入产出比最高的CPS应用领域。通过对多家制造企业以及解决方案供应商所提供的CPS应用案例分析，不同行业、业务特色以及服务模式的企业对于CPS应用的侧重点不同。

### 3.2.1 基于行业分类的价值判断

CPS的价值在资产、业务、服务三个维度均有体现，但制造企业对于CPS的需求因其所处行业的不同而有所不同。通过总结分析，提出了9个CPS应用较多行业的价值导向图，如图3-2所示。

行业类型	CPS价值关注点										
	资产维			业务维				服务维			
	设备无忧运行	设备快速排故	设备高效运维	高精度产品/工艺设计	精益品质提升管理	极致能耗科学管控	生产资源高效益调度	客户交互体验增强	信息交互强健供应链	产融合作升级创新	制造能力价值最大化
汽车/电子零部件	✓	✓		✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
食品/医药	✓	✓		✓		✓	✓				
石油化工	✓	✓	✓	✓		✓	✓			✓	
航空/船舶/轨道交通装备制造	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓
烟草	✓			✓				✓			

图3-2 CPS价值关注点

### 3.2.2 基于企业特点的价值判断

受内外部种种因素的影响，单从行业的角度并不能完全作为企业应用CPS的价值参考。企业会因其规模的大小、业务的不同、自身发展规划的不同，对于CPS价值点的考量而有所侧重，本节从企业特点角度的为企业CPS价值选择提供指导。

**企业规模因素：**建议制造资源充足、存在闲置设备和产线的大型制造企业以及受限于规模、资金因素难以实现业务发展需求的中小型企业、创新型企业，在选择CPS应用领域时重点考虑客户交互体验增强、产融合作升级创新、制造能力价值最大化。

**市场定位因素：**建议产品受市场影响较大、客户需求多样化、需要按照市场与客户需求快速响应（如电子产品类、纺织类、家具制造类等）的企业，在选择CPS应用领域时重点考虑市场需求精准捕捉、客户交互增强体验、精益品质提升管理。

**产业关联性因素：**建议所处产业链复杂，上、下游供应商多样化（如



船舶制造业）的企业，在CPS应用价值选择时重点考虑柔性快反供应链提升、生产资源高效益调度。

企业规划因素：建议有长期发展规划，重视通过高质量的产品与售后打造品牌价值的企业，选择CPS应用价值时重点考虑高精度产品/工艺设计、精益品质提升管理。



## 四、信息物理系统建设路径

为实现CPS的应用价值，本章给出了建设CPS的通用功能架构、3大核心要素，并按照CPS建设的难易程度给出了4条典型建设模式，提倡企业综合考虑问题复杂度和处理问题的难度，选择适宜自身发展的CPS模式，以期为企业“如何建设CPS”提供思路。

### 4.1 CPS通用功能架构

CPS的实现方式是多种多样的，本节仅给出CPS建设的通用功能架构。CPS应围绕感知、分析、决策与执行闭环，面向企业设备运维与健康健康管理、生产过程控制与优化、基于产品或生产过程的服务化延伸需求建设，并基于企业自身的投入选择数据采集与处理、工业网络互连、软硬件集成等技术方案。

总的来说，功能架构由业务域、融合域、支撑域和安全域构成，业务域是CPS建设的出发点，融合域是解决物理空间和信息空间交互的核心，支撑域提供技术方案，安全域为建设CPS的保障，如图4-1所示。

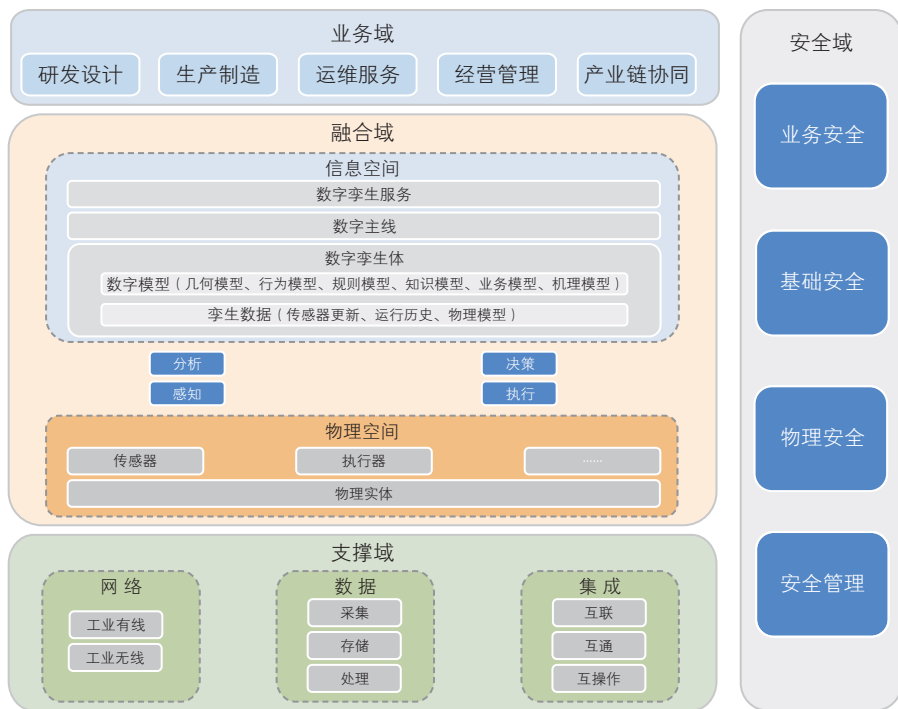


图4-1 CPS功能架构

### 4.1.1 业务域

业务域是驱动企业建设CPS的关键所在。业务域覆盖企业研发设计、生产制造、运维服务、经营管理、产业链协同等全过程，企业可根据面临的挑战，按业务或按场景梳理分析创值点，CPS为企业提供的典型创值点见本指南第三章。

### 4.1.2 融合域

融合域是企业建设CPS的核心，由物理空间、信息空间和两个空间之间的交互对接构成。

物理空间应包括传感器、执行器以及制造全流程中人、设备、物料、工艺过程/方法、环境等物理实体，是完成制造任务的关键组成要素。

信息空间负责将物理实体的身份、几何、功能、机理、运行状态等信息进行数字化描述与建模，形成数字孪生体，基于数字主线对物理实体提供映射、监测、诊断、预测、仿真、优化等功能服务。

两个空间之间的交互对接是由感知、分析、决策、执行闭环构成。感知应实现对外界状态的数据获取，将蕴含在物理空间的隐性数据转化为显性数据。分析应对显性数据进一步处理，将采集到的数据转化为信息。决策应对信息进行综合处理，是在一定条件下，为达成最终目的所做的最优决定。执行是对决策的精准实现，是将决策指令转换成可执行命令的过程，一般由控制系统承载。

#### 4.1.3 支撑域

数据包括数据的采集、存储和处理，企业在建设前应面向价值需求，规划采集数据的范围、类型、格式、频率、采集方式等，避免不同解决方案供应商的“模板式”业务系统采集无用数据，导致存储资源浪费、同一数据多次采集等窘境。

网络为数据在CPS中的传输提供通信基础设施，企业应基于需求，选择主流的现场总线、工业无线等协议。

企业CPS的建设离不开硬件与硬件、硬件与软件、软件与软件之间的集成，集成方式并无优劣之别，企业可根据规模、复杂度、业务实时性需求等方面选择适宜的集成技术。

#### 4.1.4 安全域

企业建设CPS时应考虑数据的保密与安全，可从业务安全、基础安全、物理安全和安全管理等方面出发，分析面临的威胁和挑战，实施安全措施，详见本指南第七章。

## 4.2 CPS建设的4个模式

基于认知决策的控制机制是CPS的核心，即信息空间是CPS建设的核心，认知决策是为了更精准的控制，因此CPS的4个建设模式基于信息空间中分析与决策能力划分，4个模式如图4-3所示。

模式	定义	感知		分析	决策	执行	
人智	人基于经验解决已知问题，机器按人的指令执行；数字孪生体能够实现物理空间在信息空间的映射。	通过传感器、RFID等方式采集数据。		通过上下限、坏值剔除等方式进行数据筛选，并转换成有逻辑的信息展示，人基于经验和机器状态进行决策。		人操作机器、软件等执行。	
		机器	人	数字孪生体	人	机器	人
辅智	机器基于已有知识解决已知问题并避免其再发生，未知问题由人来解决；数字孪生体具备逻辑分析能力。	面向已知问题的数据采集。		建立知识库、专家系统等，机器基于已有的知识进行决策处理，并通过数据分析模型等对未知问题进行识别，提示人进行处理。		已知问题机器自动执行，未知问题人操作机器控制。	
		机器	人	数字孪生体	人	机器	人
混智	机器基于机理、模型等推理识别未知问题，并与人协同未解决未知问题；数字孪生体间能够实现协同运行。	以需求为导向的数据采集，异构数据融合。		建立机理模型、数据分析模型以及模型间的关系，个体模型能在信息空间进行协作；已知问题机器基于知识库决策处理，未知问题由机器基于模型给出建议，达到人机协同。		已知问题机器自动执行，未知问题由机器驱动人共同执行。	
		机器	人	数字孪生体	人	机器	人
机智	机器基于自决策、自执行等解决未知问题，并避免其再次发生；数字孪生体具备与物理空间实时交互的能力。	基于业务需求，自主调整数据采集的数量、频率、内容。		建立高级模型分析，模型间通过特征关联、协同推理等方式进行多对象多目标分析；已知问题机器基于知识库决策处理，未知问题机器可根据物理空间的变化自主处理。		已知问题机器自动执行，未知问题机器自动控制。	
		机器		数字孪生体	人	机器	人

图4-3 CPS建设的4种模式

CPS建设按照其核心“认知决策”能力从低到高分别为人智、辅智、混智和机智4种模式，循序渐进、层层递进，感知、分析、决策、执行是建设的方法论，其中分析和决策是建设的核心。图中可见，人、机器、数字孪生体是CPS建设的三要素，4种模式从低到高代表机器和数字孪生体在整个CPS体系中占比越来越高，人的占比越来越小，也就是人在CPS中慢慢的由操作者向高级决策者转变，机器和数字孪生体代替人处理重复性、复杂性的问题，最终实现人机协同。

## 4.2.1 人智：人智——信息展示能力

人智是具备了感知、控制、执行和反馈闭环，实现了物理空间和信息空间的联通，分析和决策的能力主要依靠人的经验。因此，人智是具有CPS特征的最初级系统，对不确定性问题以及多变的环境和任务主要由人基于经验解决，机器按人的指令执行，信息空间的数字孪生体可映射物理空间的物理实体。

建设人智的目标是实现数据在物理世界和信息世界的自由流动，关注点在于数据采集与数据分析展示等方面。人智具有固定的操作方式，并且不会在整个产品生命周期发生变化。在出现安全问题、故障或外界情况发生变化的情况下，一般都需要人为干预。

人智主要实现设备互联，即通过传感器、数据采集卡、采集软件，形成数据记录并存储到指定位置。通过信息系统，将重要的数据或经过简单计算的信息反馈给操作人员，操作人员以图表、曲线等信息为依据进行决策，如图4-4所示。

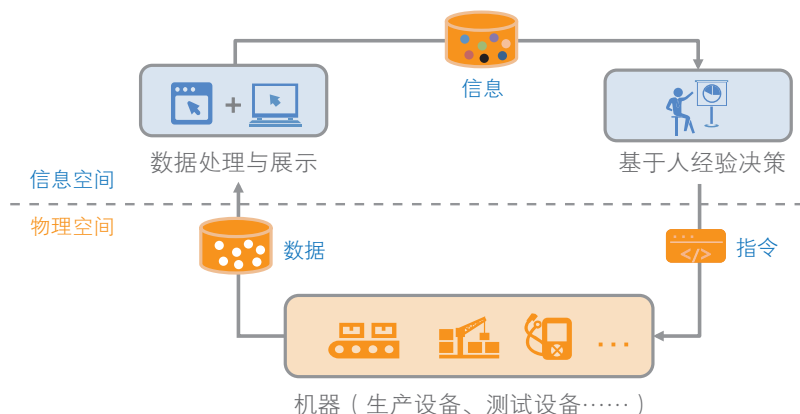


图4-4 人智模式建设总览图

### 4.2.1.1 数据采集系统建设

数据是CPS建设的基石，企业在搭建CPS时需要将涉及产品生命周期



的所有数据进行采集、清洗、存储和处理，这就需要在生产中运用传感技术、嵌入式技术等数据采集技术对生产设备等物理实体和执行过程进行数据化处理。值得注意的是，数据采集的过程应尽量减少人工的参与，在建设过程中人为动作更多侧重于控制数据采集系统的更新和稳定。

#### 4.2.1.2 信息空间的搭建

信息空间的搭建借助数据分析与数据展示技术，实现企业各类机器、仪表、信息系统、用户等数据的简单分析和图形化展示。企业决策人员可根据展示的信息决策，同时可与客户、供应商进行实时的信息共享，达到互利共赢的结果。

### 4.2.2 辅智：辅智——知识应用能力

辅智的核心是对知识库、专家库、解决方案库、经验等知识的封装利用，机器基于已有知识解决已知问题并避免其再发生，未知问题由人来解决，同时数字孪生体能够具备逻辑分析能力。数字孪生体在模型建模阶段预先确定，在全生命周期内只能通过更改模型改变，在辅智阶段，物理实体可以感知外部的数据，决定采取何种操作模式，但不具备认知能力，仅依据已有知识做出相应的决策，解决的是人已知并且已有成熟解决方案的问题。

在人智实现CPS闭环的基础上，辅智增加了机器对已知已解决问题的识别与决策控制能力，该类问题及配套的解决方案由操作人员在日常工作中总结归纳而来，可称为企业的核心竞争力，本建设指南称之为知识中心。信息空间实时采集运行数据和状态数据，当机器出现故障时，知识中心在知识库或专家库中进行匹配与比对，若在知识库中有相应或相似描述，专家系统配置的模型将择优选择最佳方案，及时处理故障，若在知识库中未发现，则提醒工作人员处理。工作人员处理的知识可丰富知识中心，如图4-5所示。

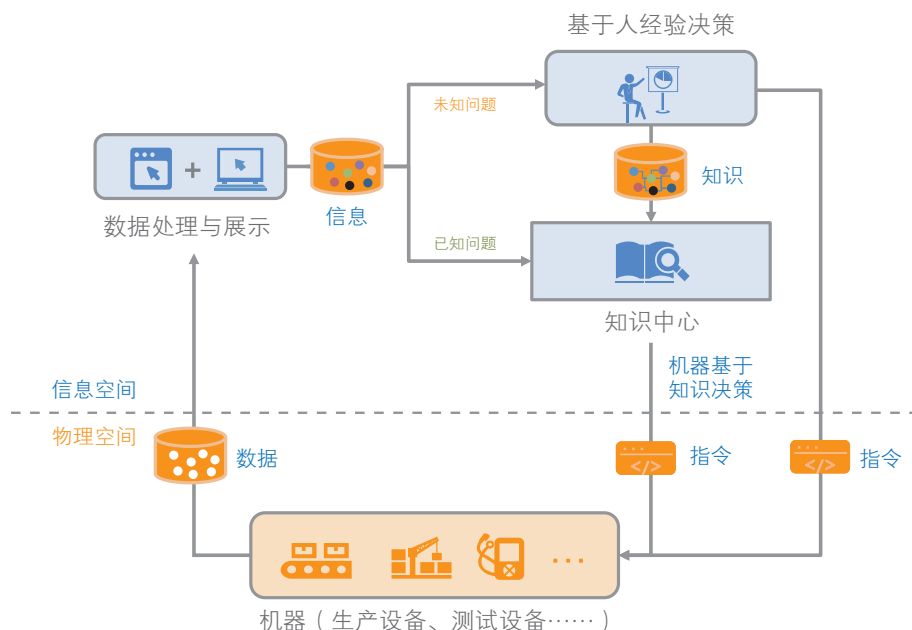


图4-5 辅智模式建设总览图

#### 4.2.2.1 面向已知问题的数据采集

面向特定的价值和业务需求，即已知已解决的问题，通过条码、RFID、设备协议等方式采集具有特定数据分析需求的状态数据、过程数据、物料数据、环境数据、产品数据等，使隐形数据显性化。

#### 4.2.2.2 分层分级的实时分析

根据不同的业务场景，企业应在边缘端或上层系统对有特定需求的数据进行分层分级处理，降低数据传输和系统分析压力，基于基本的理论模型、部件模型等机理模型和基本的数据分析模型，对数据进行分析 and 融合。

#### 4.2.2.3 知识中心的搭建

知识中心的功能包括知识收集、知识整理和知识验证与应用。

##### a) 知识收集



知识收集是最重要的环节，知识收集的内容包含模型方法、工业流程、业务经验等方面。模型方法是指解决某一类问题的步骤，也就是该类问题的算法。如果研究的问题具有一般性，就可以通过抽象、简化的方式，形成模型。在制造型企业的工作实践中，存在着很多隐形或显性的模型算法。它们是以约定俗成、常态化的工作方式周而复始。换句话说，就是面对这一类问题，具体岗位日常采用的行之有效的学习方式。

工业流程和业务经验中包含人、机、料、技术图纸、数控程序、设计规范、加工参数、工具消耗、质量分析、生产异常等各领域信息，这些均可以作为有价值的知识进行管理，但在知识收集过程中不能仅仅停留在表面层面，应关注知识的关联分析与深度挖掘。如质量管理中，常常仅做到了废品率的统计，对于废品产生背后可能涉及的人员工作效率、工作技能、设备参数设置、刀具加工、甚至薪酬政策等综合原因并未整体分析。

#### b) 知识整理

收集的知识在应用之前要做整理，整理包括对知识的抽取、存储分类、管理等。可以利用市场上已有的知识管理软件对知识进行标准化的管理。例如，Confluence是一个专业的企业知识管理与协同软件，具有不同权限，支持不同格式，且能够远程协同。Confluence的知识空间具备相对统一的格式，知识可以被保存、调用和修改。

#### c) 知识验证与应用

知识的应用主要涉及推理规则、人机交互界面和知识解释系统的开发，将知识转化成机器可以调用的编码。值得注意的是，知识在应用前必须要经过验证。知识的验证就是在人为参与的前提下，通过比对机器做出的决策准确性来对知识中心进行一段时间的试运行和调整，直到系统稳定的做出判断。

### 4.2.2.4 机器的防差错执行

虽然信息空间中知识中心和人决策后的指令经过验证，但在实际生产



中，机器本身也应具备防错机制，接收指令后应在设备系统中二次验证方可执行。

#### 4.2.3 混智：混智——认知决策能力

混智是在辅智的基础上，通过互联网、大数据、人工智能等技术，提升整个系统的智能化水平，变成具有认知和学习能力的CPS。智能CPS建立在已知的复杂算法模型基础上，通过前期训练，具备了对一定未知问题的处理能力。该系统已经可以对已知问题进行分析 and 决策，并针对具体问题给出推荐的解决方案，能解决部分人类尚未解决的问题。该系统的认知能力是系统开发阶段的训练模型赋予的，因此系统对未知世界所做的认知是有限的。简单来说，混智模式下，机器基于机理、模型等推理可识别未知问题，并与人协同来解决未知问题，同时数字孪生体间能够实现协同运行。

混智的目标是建立一个认知中心，满足处理当前工业场景中不确定性问题和大规模复杂问题的需求，其关注点在于知识发现并高效利用知识，即在信息空间中形成认知与决策能力。认知与决策作为混智的标志，是闭环赋能体系中两个密不可分的环节，从纷繁复杂的信息中提炼出有用的知识，是认知的过程，综合运用多种知识给不确定性问题提供正确合理的建议，是决策的过程。物理空间的感知结果以数据形式输入到信息空间的认知中心，信息空间的决策结果以控制指令和管理策略的形式输出到物理空间的控制执行机构，并通过解决生产制造、应用服务过程中的不确定性问题和复杂问题，优化资源配置而创造出价值，这是一条建立在物理空间和信息空间之间的完整的双向的闭环赋能回路。而从认知到决策之间发生了从数据到知识，从知识到价值的转化，可见混智通过认知与决策完成了一项重要任务：发现知识并高效利用知识，如图4-6所示。

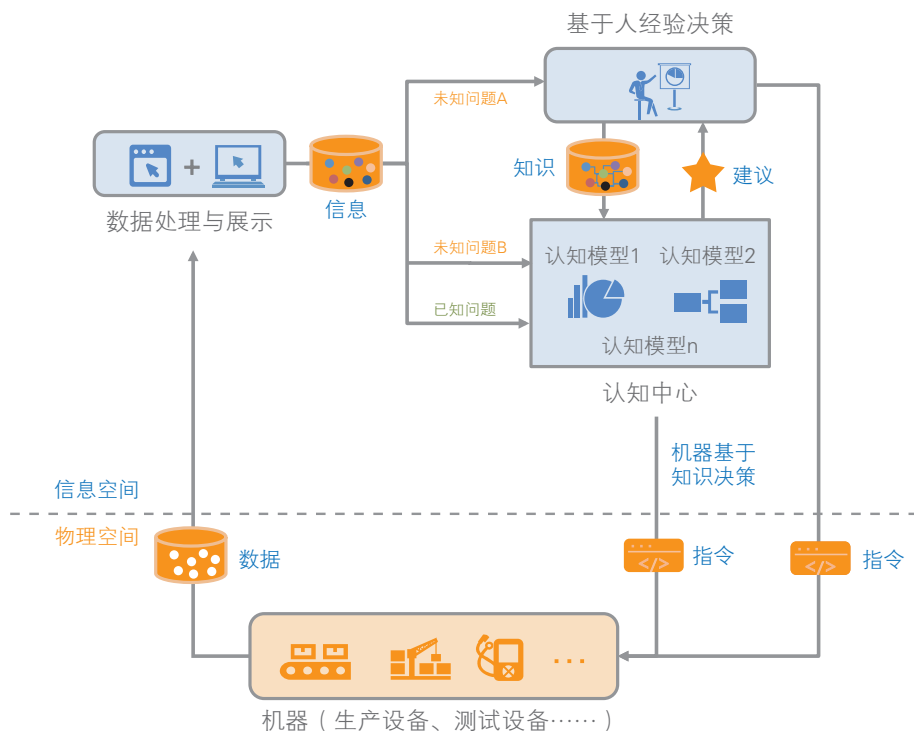


图4-6 混智模式建设总览图

混智模式首先通过按需柔性的数据采集以及选择性、归纳性的存储实现数据积累，在此基础上，通过模型抽象、空间映射与知识挖掘，构成信息空间发现知识并高效利用的机制。积累丰富的数据资源，数据种类越多、规模越庞大越有利于消除不确定性；将数据抽象为模型，模型类别越细分结构越完整越有利于信息空间的学习；将模型映射到空间，映射规则越清晰越有利于推理；在空间中挖掘知识，挖掘知识越全面越深入越有利于基于知识做决策。

#### 4.2.3.1 以需求为导向的数据采集

混智按照活动目标和认知需求进行选择性和有侧重的数据采集，并实现多维异构数据源的整合，从信息来源和采集方式上保证数据质量，主要体现在一是面向事件的数据采集，当工况、外部环境和目标情况发生变化

时，采取不同的采集策略；二是面向分析目的进行有针对性的数据采集；三是面向设备健康的数据采集，根据设备健康状态监测评估和故障识别所需的数据类别和采样频率的差别进行差异化的数据采集。

#### 4.2.3.2 支持数据到信息转换的数据存储

混智的数据存储要通过智能分析实现数据到信息的转换，根据事件、目标、个体、群体等不同事件变化、不同数据特性进行选择性和归纳性存储。混智的数据存储模式具有更高的价值和信息密度，提升后续认知的效率和准确性。

#### 4.2.3.3 混智信息空间认知中心的建设

信息空间认知中心一是基于机理、群体、活动模型构成的单系统智能化模型，构建综合考虑时间、成本、环境协调的多目标模型的集成，完成从个体智能化到集群的智能化。二是充分考虑构建个体知识库、群体知识库、活动知识库、环境知识库的实际需求，明确各个知识库的对象、数据种类和范围，在信息空间建立涵盖设备状态、活动事件和环境变化的知识体系，形成完整的可自主学习的知识结构。三是建立个体空间、群体空间、环境空间、活动空间与推演空间，以实时数据驱动模拟个体之间、群体之间以及与环境之间的关系，记录物理空间随时间的变化，对物理空间的活动进行模拟、评估、推演与预测，形成决策知识，得到知识库和模型库，构成完整的知识发现体系。四是信息空间通过物理空间活动产生的数据，对个体与群体对象在环境中的当前客观状态进行精确定量评估，分析环境对个体与群体对象效能与任务目标的影响，推演与预测个体与群体对象在环境中的未来发展趋势，根据推演结果指导个体与群体活动，从而完成信息空间与物理空间的融合过程。

#### 4.2.3.4 机器的安全响应执行

混智模式人操作机器的行为概率更低，一方面降低人员的工作强度并减少人为干扰，另一方面也对机器的控制系统提出了更高的要求，应确保



机器指令正确、安全，并应具有差错处理和安全识别与响应能力。

#### 4.2.4 机智：机智——适应创造能力

机智使系统变成了“智能体”，具备了自认知、自执行、自决策的能力，并且可以随着其认知水平的提升，系统整体能力可以得到不断提升优化。简单来说，机智模式下机器基于自决策、自执行等活动解决未知问题，并避免其再次发生，同时数字孪生体具备与物理空间实时交互的能力。

机智的目标是建设一个可以自我成长的智能体系，满足未来工业场景下的处理未知问题的需求，其关注点在于推演空间的构建和协同优化能力的形成。

未来的工业系统将面对更多未知与多变的环境与系统，因此机智阶段的工业智能需要具备面向环境的智能、面向状态的智能、向集群的智能和面向任务的智能4个能力，该能力主要通过推演模型的构建实现，推演模型在信息空间中推演决策行为在实体经济中的活动结果与目标差异，产生新的认知反馈，实现CPS知识体系的循环迭代和创新，从“知识的积累”变成“新知识的创造”，构成自我重构和自我成长的工业智能生态，具备处理未知环境、集群和任务的能力。

在混智认知与决策系统的基础上，机智利用数据驱动的方式，增加了决策与认知之间的反馈环节，建立推演模型，不断优化原有控制系统中的模型和逻辑策略，相较于原有的控制系统具备更好的自我成长性和自适应能力，构成自感知、自记忆、自认知、自决策的可以自我成长的智能体系，如图4-7所示。

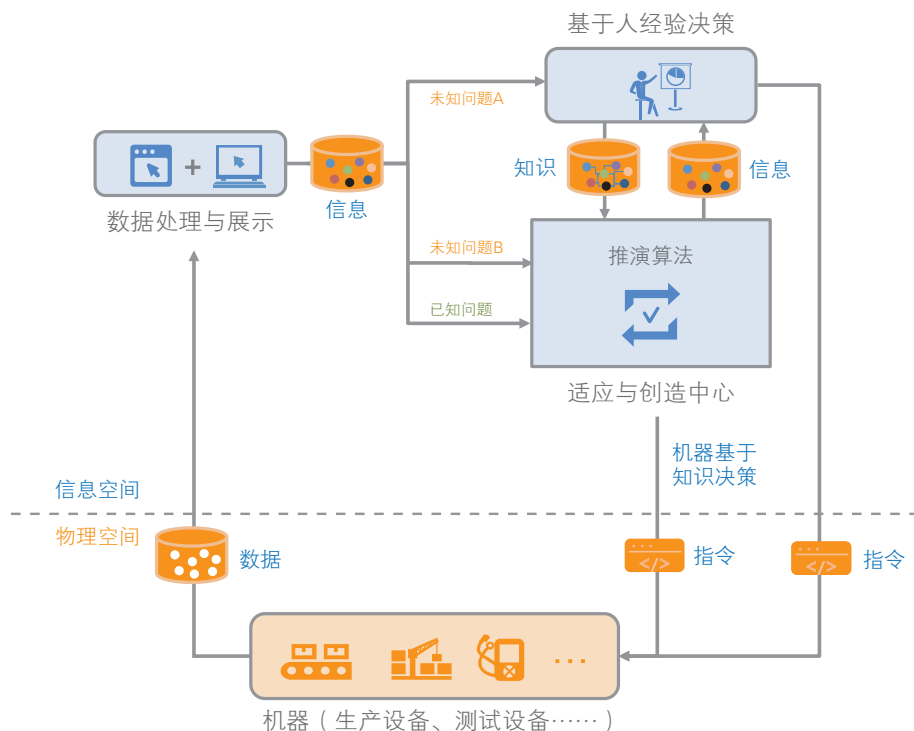


图4-7 机智模式建设总览图

#### 4.2.4.1 机智的自感知

数据采集环节，机智的自感知主体自主调整数据采集的数量、频率、内容，实现按照自身状态、外部环境、活动目标进行自适应管理与控制。

#### 4.2.4.2 机智的自记忆

数据存储环节，机智的自记忆主体能够按照信息分析的需求和方向进行自适应的、动态的数据到信息的转换，保证数据的可解读性，实现智能化的筛选、存储、融合、关联记忆，实现自主的关联性、时序性存储。

#### 4.2.4.3 机智的自我成长

机智需要在机理、群体、活动等模型的基础上，针对对象在环境中的活动状态，提取对象及对象群体中的活动特征并进行关联分析，进而以推



演、评估与预测为重点，形成多模型的协同知识推演规则，以多目标（如安全、成本、时间等指标最优）、多层次（如船舶领域的船、船队、船东等多决策层）、多环节（如设备使用、维护、保障、调度等）活动的优化协同为目标，构建自优化决策模型，达成在复杂环境下的多对象活动协同。

#### 4.2.4.4 机器的自修复执行

信息空间的智能水平越高，越对机器的精准、平稳、实时执行提出越高的要求。机智阶段的机器应具有预测性维护、自识别意外事项、自动处理修复、自动防护的能力，从而保障指令的安全、实时、无缝执行。

### 4.3 CPS的建设模式选择

CPS本质上是为了解决生产制造、应用服务过程中的复杂性和不确定性问题，对于复杂问题的处理程度的需求决定了CPS的模式。其核心就是人、机器和数字孪生体在其中的参与程度。企业CPS的建设是一项涉及设备、技术、网络、IT、生产、研发等各部门的系统工程，理应在特定的业务场景下，综合考虑企业拟解决问题的复杂度以及问题的处理程度，确定当前最适宜的建设模式，如图4-8所示。

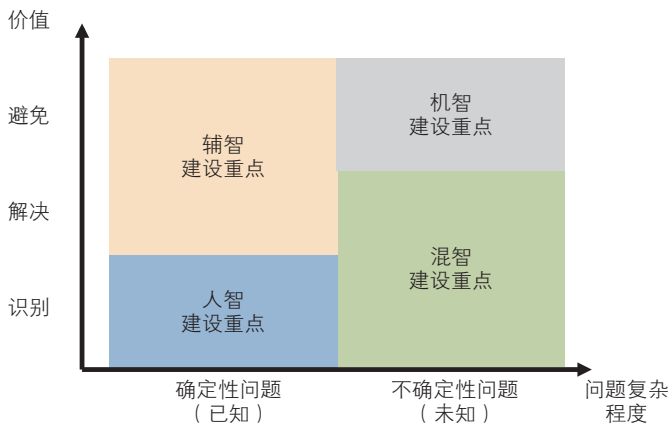


图4-8 CPS建设模式选择

在特定的业务场景和价值需求下，企业选择建设模式应以问题和预期效果作为标准，切不可本末倒置，落入为了智能、为了追赶新概念的圈套。本建设指南从企业建设CPS关注的问题处理程度和问题复杂程度两个维度分析，给出企业建设CPS方案设计阶段的模式选择参考。

企业以生产现场可视、设备状态可视等为主要目标，可选择人智模式建设CPS，实现核心业务的数据采集和信息展示，如离散制造业的安灯系统、产线看板系统、SPC系统，流程行业的DCS等系统。

企业以“解决或避免已知问题”为主要目标，即降低工人的重复性劳动、减少人参与降低错误发生等问题，可选择辅智模式建设CPS，实现人智积累的知识库、解决方案库、专家库等的协同应用，典型场景包括离散制造车间基于APS的实时调度、产线的自动叫料、机床刀具的自动补偿、焊接的自动优化，流程行业基于APC的卡边操作等。

以“识别或解决不确定性问题”为主要目标，即降低人的定性认知与决策对整体的影响，增加设备或系统在复杂环境的认知能力，可选择混智模式建设CPS，通过多模型之间的协作，系统为工人提供决策建议，帮助识别并解决复杂性和不确定性问题。如复杂系统的生产调度问题、关键设备的健康管理和能效管理问题、产线的工艺仿真问题等。

以“避免不确定性问题的发生”为主要目标，即实现设备的无忧使用、产线的自适应，可选择机智模型建设CPS，实现信息空间与物理空间的虚拟生产与执行、自感知与自决策。



## 五、信息物理系统典型应用实践

本章围绕提出的四种模式，与不同行业、不同阶段结合，形成典型案例。

### 5.1 汽车制造业

案例摘要：本案例分析了生产计划执行与调度对汽车制造行业的重要性，提出了CPS理念的解决思路，并给出CPS四种模式在汽车企业中的落地应用路径。

关键词：汽车行业；计划的执行与调度场景；四模式实现路径；工业互联网；基于物联网通讯协议MQTT的数字总线；高级排产排程技术。

#### 5.1.1 汽车行业特点

汽车制造行业具有大规模、多品种、批量生产等特点，同时面临着产业链长、工艺面广、成本控制要求高等诸多挑战。

汽车生产线布局采取流水线生产方式，生产过程按照既定路线运行，并依据生产线节拍同步领料送料，既响应生产需求，又能减少线边物料数量。一旦计划执行遇到问题，例如设备故障、挂起等，都会影响后续的生产 and 领料送料，因此汽车生产对计划、执行与调度等过程管控与优化过程具有较高的要求。

#### 5.1.2 基于CPS理念的解决思路

针对汽车企业的发展态势，结合企业自身的自动化、数字化和信息化水平，建设CPS可帮助解决汽车行业生产过程中计划执行遇到问题影响后



续生产的情况，实现对生产的实时指挥和自主闭环管理。

#### 5.1.2.1 建设数据总线，打好CPS基础

基于三大物联网协议之一的MQTT，建设数据总线，将采集的数据以订阅分发的方式，在不同设备、系统间共享传递，打造CPS的数据基础。

汽车生产企业包括PLC设备、DNC机床、机器人、AGV等各类生产相关设备，设备也来自不同厂家、采用不同控制系统，以数据总线的方式，一方面实现车间实时数据的感知、采集与识别，结合不同设备以及接口模式，进行数据采集集成；另一方面也可以实现软件系统间的数据集成。数据总线的建设，为汽车生产企业各类设备提供了统一的数据共享交换通道，确保了数据的完整性和准确性，从而为CPS打造了数据基础。

#### 5.1.2.2 排产排程算法，优化生产计划

高级排产排程算法APS，基于生产能力和生产过程中的约束，结合整数规划方法，实现生产计划的优化排产、高级排程等功能。

汽车生产企业从生产制造环节划分为冲压、焊装、涂装、总装，各环节间存在较强的上下游衔接关系，在实际生产中，需要将相同车种、相同型号、相同颜色的汽车安排在一起生产，同时又要兼顾到生产节拍、工序、生产设备、工装模具、库存等限制约束条件，结合计划执行情况的实时反馈，实现瓶颈设备的最大化利用。排产排程算法的引入，为汽车生产企业的生产计划制定提供了更科学可靠的最优化方案，从而提升设备利用率，提高计划执行率。

### 5.1.3 CPS模式落地路径

汽车行业在生产计划与排产领域的CPS模式落地路径如图5-1所示。

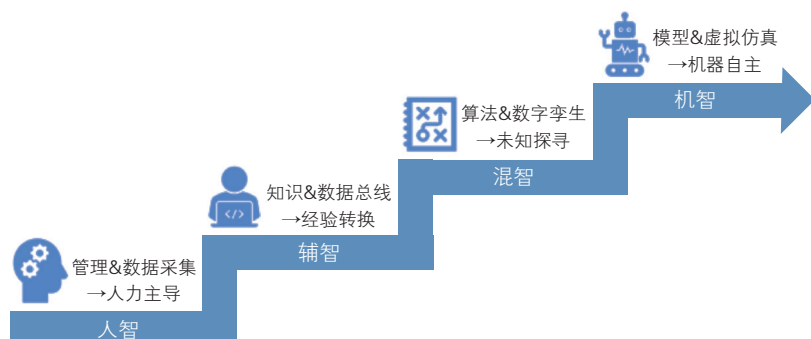


图5-1 汽车行业CPS模式落地路径

### 5.1.3.1 人智模式：管理&数据采集→人力主导

在CPS的人智模式中，企业应结合生产设备和产线情况，建立生产控制系统或者数据采集系统，通过不同的数据接口协议，实现生产过程中数据的采集和信息空间的构建，感知生产过程的数据。同时建立适用于企业情况的问题管理机制，感知到问题后，由人实时分析感知的数据，结合人的经验做出决策，再根据决策执行生产。

企业生产计划由生产计划管理员，结合生产相关的数据及个人经验，使用Excel等软件编制下发。在生产执行过程中，通过生产控制系统或者数据采集系统感知生产执行状态，例如设备故障、生产线停机等，由人根据系统采集的信息分析问题，结合自己的经验做出计划调整方案，重新下发给车间执行。

### 5.1.3.2 辅智模式：知识&数据总线→经验转换

在CPS的辅智模式中，企业应建立ERP、MES系统，实现生产计划在软件中编制查阅。可基于物联网通讯协议MQTT建设数据总线，将采集的数据以订阅分发的方式，在不同设备、系统间实时共享。依据生产业务模式建立知识库，构建因素分析模型，实现基于知识的数据分析决策功能。

企业的生产计划通过数据总线下发，在生产执行过程中感知到生产执行状态，实时对采集的数据进行分析，通过模型匹配预先定义的业务规则

解决方案，由机器形成问题应对决策，再通过数据总线下发给执行设备，从而实现生产计划执行过程的闭环管理。

以流水线的同步生产为例，当主线发生故障或意外停线时，通过CPS的状态感知功能，采集到停线信息，触发CPS启动模型分析，做出延后投料的决策，并将决策信息下发给AGV系统乃至仓库备料人员，将之前计算的投料计划延后，也就是将相对应的投料时间也相应延后，如图5-2所示。

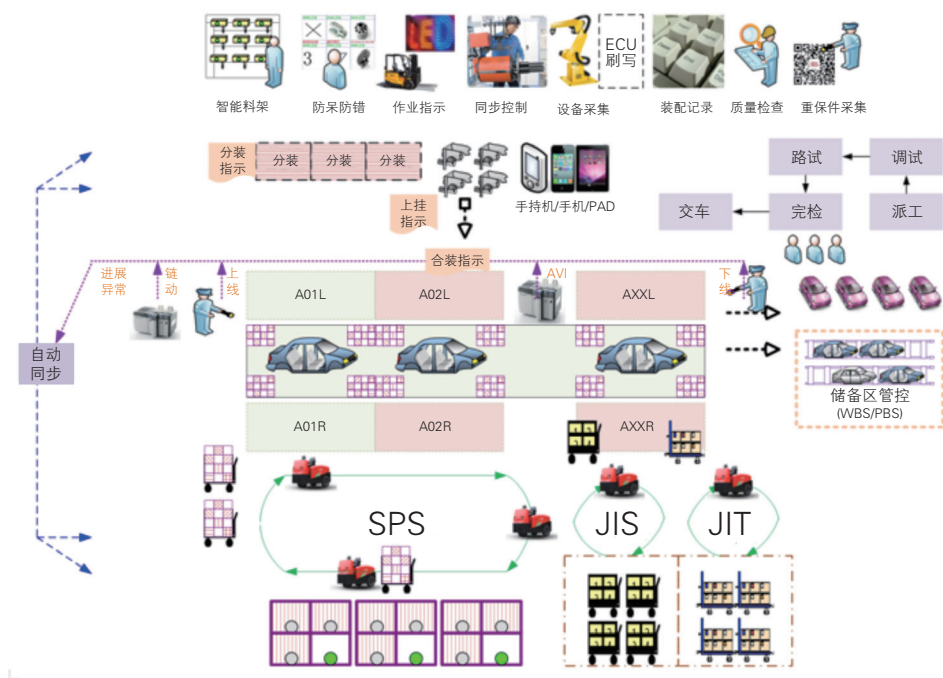


图5-2 产线的同步生产

在辅智模式中，对于没有预先定义解决方案的问题，系统无法给出建议决策，仍然需要人来处理。

### 5.1.3.3 混智模式：算法&数字孪生→未知探寻

在混智模式，企业基于能力和平衡约束条件，建立高级排产排程算法

APS，实现优化排产、高级排程等功能，结合计划执行情况的实时反馈，形成计划的动态同步滚动计算，为汽车设计、生产、售后物理空间建立数字孪生的信息空间，如图5-3所示。当计划执行产生偏差时，在信息空间中设备、生产线的状态和待完成的计划任务进行分析，利用高级排产排程算法和业务模型评估计算，获得最优的解决方案，传递给物理空间的设备和生产线，形成物理空间和信息空间之间的相互融合和完整闭环。

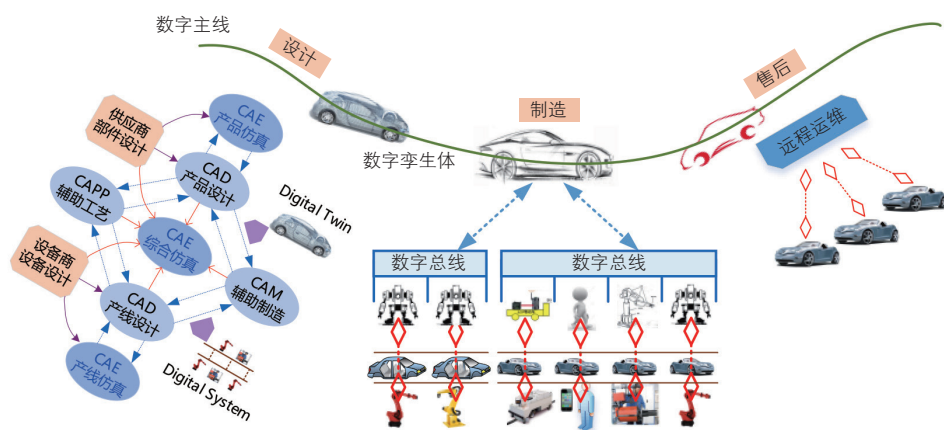


图5-3 数字孪生空间示意图

在混智模式中，机器除了可以解决已知问题，还可以通过算法和业务模型解决部分未知问题。

#### 5.1.3.4 机智模式：模型&虚拟仿真→机器自主

随着虚拟仿真技术的发展与推广，可以在汽车生产中采用虚拟仿真技术，建立与物理空间完全对应的虚拟信息空间，通过业务模型、算法模型、数学模型做出的决策，可以预先在仿真系统中执行，再迁移到物理空间中执行，这样就实现了依靠机器指挥物理空间的生产计划，尤其适用于多车型柔性化自识别生产。物理空间中遇到问题，在仿真系统中同样出现，机器可以在仿真系统中不断尝试，自主识别、分析、解决，这就是未

来CPS机智模式的应用场景。

#### 5.1.4 价值体现

CPS的实施，实现了自下而上的执行状态采集、数字化管控系统的智能决策、自上而下的作业指令下发的闭环控制，支持从物料到产品的全过程管控、以动态调度、精益自动物流配送的协同，将汽车计划、生产执行和调度信息整合在一起，提高生产效率，提升企业生产过程中的应变能力。以某汽车集团企业为例，CPS由辅智模式提升到混智模式，计划编制效率提升50%以上，计划实际可执行率达到98%以上，作业任务及时下达率100%。

## 5.2 航空航天业

案例摘要：本案例分析了航空航天类复杂离散制造企业的基本特点，提出了CPS在该类企业落地的解决思路，并给了CPS四模式的应用实践。

关键词：航空航天；复杂离散制造行业；研发与生产场景；CPS四模式实践；数字主线；数字孪生；设备物联；工业大数据分析。

### 5.2.1 航空航天业复杂离散制造行业特点

航空航天属于复杂离散制造行业，具有多品种、小批量、产品复杂、协作人员多、研制周期长、产品价值高等特点。生产设备多为通用，不同产品按照相应规格利用对应的生产设备进行生产。该类型企业对质量要求非常高，且具有很强的保密性等特点。

对于航空航天企业而言，提升研发与生产效率，降低研发与生产成本，保障产品质量，一直是重中之重。在以上几个方面中，质量问题尤为重要。在生产过程中，该类企业对产品技术状态的控制、生产过程的控制、生产计划的制订、调度生产的能力以及信息化管理水平有着较高的要求。



## 5.2.2 基于CPS理念的解决思路

由于产品复杂，研制过程需要反复仿真验证，航空航天企业非常适合打造以CPS为理念的智能化研制与生产管控系统。以产品研发与生产为目标对象，通过管理、业务和技术的融合和创新，在信息空间打通产品设计、产品制造、试验验证各阶段的研制过程，可大幅度缩短产品研制周期、降低研制成本和提高产品质量，为产品的顺利研制与高效生产提供有力保障。

### 5.2.2.1 数字主线：一条主线贯始终

数字主线是指利用先进建模和仿真工具，实现产品全生命周期，从产品研发、工艺规划、生产制造、运营管理直至报废（退役）等各环节，集成并驱动以统一模型为核心的数据流。

由于航空航天产品复杂、涉及人员多，通过数字主线可有效地消除与产品相关的信息孤岛，将正确的信息在正确的时间，以正确的方式传递给正确的人，避免了信息的丢失、失真、不正确、不及时等情况发生，从而有效提高协作效率、降低管理成本，并对产品质量提高、研发周期缩短都具有明显的促进作用。

### 5.2.2.2 数字孪生：虚实两体深度融合

航空航天企业具有产品复杂，研发生产过程复杂、周期长、成本高等特点，一旦出现设计或生产问题，经济损失大，因此航空航天产品研发与生产过程特别适合采用数字孪生技术，在研发设计、生产制造、产品服务等方面，在信息空间中实现对物理实体的映射、仿真与优化，减少物理世界的生产与调试等环节，对产品研发效率、质量、成本具有显著效果。

在生产环节，航空航天企业采用了较多的数字化设备，如数控机床、机器人、热处理设备、立体仓库、测量测试设备，还有各类仪器仪表等数字化设备，由于控制系统厂家不同、设备厂家、系统版本、接口形式、通讯协议千差万别，这些设备基本都处于孤立的单机生产模式，不能很好地

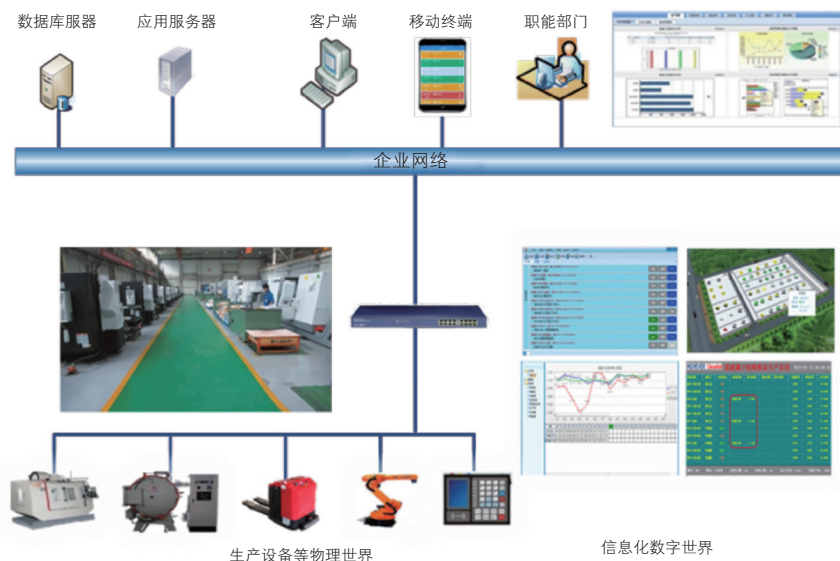


图5-4 车间级CPS系统

发挥这些先进设备的价值，并造成了上游的ERP、MES等系统与生产设备脱节，设备运行状态与生产进度都不能及时获知，不能有效地对生产进度进行科学计划与精细管理。企业需要在参考工业互联网、智能制造等先进理念基础上对这些数字化设备进行互联互通，通过底层各类设备、生产线与上端管理系统的深度融合，打造具有CPS典型特征、虚实一体的数字化、网络化、智能化生产管控模式，提升生产效率与产品质量，如图5-4所示。

#### 5.2.2.3 新一代智能：三元交汇更智能

基于互联网、大数据、人工智能等新技术，通过机器学习与深度洞察，实现3个IT技术的深度融合交汇，即信息技术（Information Technology）、工业技术（Industry Technology）、智能技术（Intelligent Technology），增加机器认知、主动学习、产生知识的能力，构建更为强大的动态感知、实时分析、科学决策、精准执行的智能化生产模式，从弱人工智能迈向强人工智能，开启真正意义上的智能制造新模式。

### 5.2.3 CPS四模式落地实践

航空航天企业涵盖的专业众多，在CPS具体应用方面也各不相同，不同的模式都可以在相应的应用场景中得到很好地应用。

#### 5.2.3.1 人智：信息透明利决策

人智模式尽管属于CPS的初级应用，但基于状态感知、数据处理后，相关人员可从这些量化、可视化以及各种报警等信息中，及时发现系统运行中的异常并快速处理，形成感知、控制、执行和反馈的闭环。对系统有效运行、对生产效率、产品质量都有很好的保证与提升价值。

在生产制造环节，人智这种CPS模式在工厂中大量存在，对生产有序进行非常有价值。比如车间中的安灯系统，车间调度、维修、管理等人员可以从系统中的声音、信息画面中及时获得相关异常，并进行快速响应处理。如各种自动化生产线以及各种电子化看板，尽管系统自身不能进行自主决策和精准执行，但可以显示各种故障等异常情况，工作人员借助于这些信息，对各种异常情况进行快速响应，如图5-5所示。



图5-5 电子看板

由于人智模式的智能决策主要是靠人，系统功能重点在于状态感知与数据处理等部分。这类系统具有投资较少、见效较快等特点，强调以实用为主。



### 5.2.3.2 辅智：知识管理提质效

辅智主要特点就是基于知识的专家系统。

企业各种研发、生产、管理、运营等环节充满了各种经验与知识，这些经验与知识是企业高效、高质运转的保证，是企业的核心竞争力。在信息化系统中构建各种专家知识库，将这些经验与知识进行有效存储、挖掘、再利用，可针对不同的外界变化和各種客观状况快速地给出基于知识的解决方案。

在企业研发生产环节，辅智模式可以充分利用已有经验和知识，帮助企业构建更为高效高质的生产管理模式。比如在CAM或刀具管理系统中的切削参数专家库、CAPP中的工艺专家库、MES系统中的设备维修知识专家库、APS高级排产算法、在工业互联网中各种工业APP等等，都是基于行业知识构建的专家库，可有效提升研发、生产、管理、维修等方面的效率与质量，并可明显缩短新员工的学习曲线。

辅智模式主要是基于专家库解决已知问题，其基础是丰富的行业经验与知识，航空航天类企业在研发、生产、管理、服务等都方面都可以进行应用此种模式。这类模式很多情况是基于商用的信息化系统进行知识的积累与管理，企业也可以根据自身需要自行开发与与供应商合作构建相关知识库。

### 5.2.3.3 混智：认知协同数据流

混智模式采用互联网、大数据、人工智能等新一代的信息技术，系统/设备具有一定的认知和学习能力，能解决研发、生产、管理、服务中的不确定性问题和复杂问题。

在航空航天制造类企业有较多的此类应用场景。比如，机器视觉可通过对产品形态等进行学习和认知，对产品质量进行自动检测。数控机床的自适应切削功能，能够依据当前设备负荷、零件变形、零件余量等变化，通过机器学习、认知与自主决策进行动态调整进给速度等切削参数，确保

整体加工效率更高，产品质量更好。

混智还体现在对数字化、网络化、智能化技术的综合应用。比如在ERP、MES与PLM等信息化系统中，如图5-6所示，以数据流驱动业务流，实现研发与生产过程的信息共享、过程协同，实现数据的自由流动，可有效避免信息的失真和错误，对提升工作效率、减少质量问题发生具有明显的效果。

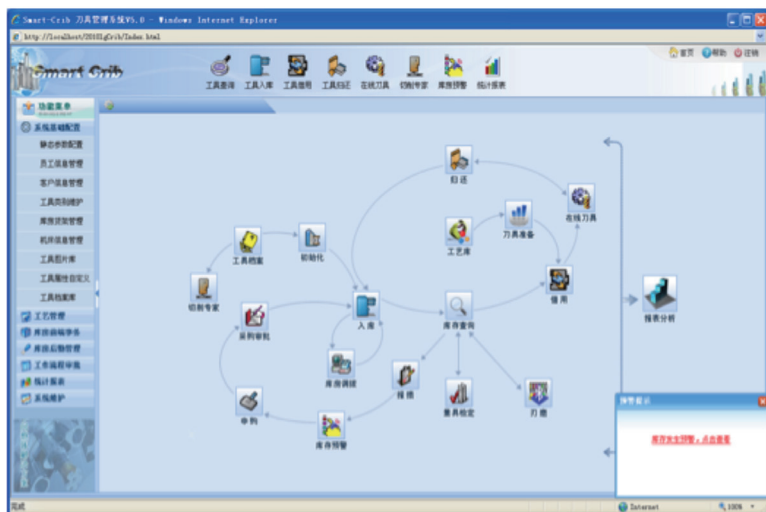


图5-6 制造过程协同

混智是航空航天类企业走向智能制造的重要形态和当前主要努力方向。

#### 5.2.3.4 机智：智能助无忧生产

机智模式通过感知和预测环境的变化，能够对自身状态变化进行风险评估和预测，并通过知识的学习与群体的协同，实现自我成长能力。

设备预测性维护是航空航天企业的机智模式典型应用场景。设备预测性维护系统通过采集单机设备信号和同类设备之间的差异性，实现设备间的信息互联和经验借鉴，并进行机器学习，可完成早期故障预诊和诊断，

将设备健康状态与生产计划和维修计划相匹配，提供生产最佳化排程建议，降低生产中的浪费和停机时间造成的成本损失，实现无忧生产。

机智强调了机器或系统的自认知、自执行、自决策的能力，是CPS在制造企业的高级应用形态，是将来重要的发展方向。

尽管智能的程度不同，但由于场景不同、经济性不同，四种模式的CPS在航空航天制造企业中都有很多不同的应用。只有智能程度的不同，没有孰好孰劣之分，一切以满足实际需要为原则。

#### 5.2.4 价值体现

航空航天类制造企业通过实施CPS理念的解决方案，在信息虚拟空间中对产品研发、生产制造、运营管理、产品服务等活动进行仿真、优化，并实现各种信息的共享与协同，做到精准研发、精益生产和精细管理，可明显提升研发生产效率和产品质量，明显缩短研制与生产周期，并大大降低产品成本。

### 5.3 石化行业

案例摘要：本案例从业务维出发，基于系统级CPS的体系架构，结合石化生产行业的技术与应用特点，构建面向石化行业的智能控制与生产管控系统。通过先进控制算法及管控一体化的应用，为石化企业提供高效率、高质量、低能耗的生产环境，并结合工艺仿真技术提高控制算法的准确性与开发效率，进一步提高生产效率。

关键词：石化行业；先进过程控制生产场景；“人智”+“辅智”+“混智”模式。

#### 5.3.1 石化行业特点

石化行业是高危性行业，其生产过程既不同于离散行业，也与一般的



流程型企业存在着较大的区别，一旦发生火灾、爆炸事故，往往造成较大的伤亡或财产损失，造成重大环保事故，石化行业特点主要表现在物料物性的复杂性（绝大多数属于易燃、易爆、易挥发、有毒性物质）、工艺复杂度高且运行条件苛刻（一旦操作失误或设备失修，极易发生火灾爆炸事故）、装备复杂（涉及塔类、罐区、换热设备、机泵、管线等多品种设备设施、且多数需要运行在高温高压高腐蚀环境）以及安全环保约束条件严格（如有毒有害气体、噪声、高温、粉尘、射线）等特点。

### 5.3.2 基于CPS理念的解决思路

在石化行业CPS中，通过对工程设计、工艺、设备、安全、环保、质量的各种静、动态泛在感知的海量数据进行计算、分析、优化和反馈，可为规划、设计、施工、生产运行、经营管理等部门提供准确数据支持的管理环境，为计划排产、质量控制、过程监控的智能化协同优化提供必要条件。

石化行业CPS是一个在环境感知的基础上，深度融合了计算、通信、控制的可控可信可拓展的网络化物理设备系统，涉及以下关键技术及基于CPS的生产和管理解决思路。

#### 5.3.2.1 基于数字孪生的DCS系统设计方式

具有一定灵活性的过程自动化系统能够有效提升制造过程的盈利能力。但由于开发生产控制系统的门槛较高，且具有一定的不确定性，因此将控制程序直接在实际生产过程中进行测试验证，不仅成本高昂，且十分危险。采用基于仿真模型的自动化系统设计方式，能够对生产现场的装备、电气、控制、热力学等因素进行建模仿真，从而确保新的生产工艺与控制程序能够在虚拟环境中进行测试与验证，并最终降低实际生产运营的风险。

#### 5.3.2.2 生产过程数字化

通过应用面向石化行业的低功耗传感器技术，以及适合复杂工业环境

应用的无线通信网络技术，提升设备、生产过程的泛在感知能力，在此基础上进一步建立物与物、人与物、人与人互联互通的集成统一工业物联网平台，提升生产过程各关键要素的实时感知和高效协同能力。

### 5.3.3 CPS模式落地路径

#### 5.3.3.1 人智（管控一体化平台-DCS+SCADA）

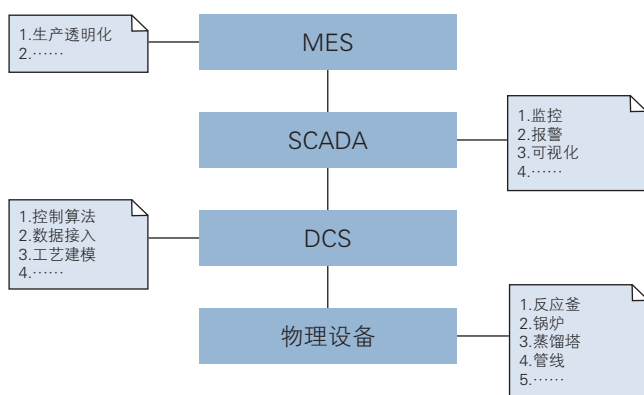


图5-7 石化行业人智建设图

石化行业的人智模式主要用于解决CPS的初级生产问题，即通过自动化系统(DCS/SCADA)实现机器人完成某些固定且重复性的生产过程，并通过信息化系统实现生产资源(人机料法环)集中管控，如图5-7所示。在石化生产过程中，DCS系统负责对生产流程中蒸馏塔、灌、换热设备、机泵等各类设备进行闭环控制，并使其物理运行参数（温度、压力、流量等）满足实际生产工艺的基本要求；SCADA系统负责对生产设备进行监控、报警与可视化，并帮助操作员按照生产规程对生产设备进行操作；MES系统负责对生产资源信息进行集中管理，从而提高生产过程的透明度，并通过排产功能完成资源的优化调度，实现生产效率的提升。

### 5.3.3.2 辅智（先进过程控制-APC+DCS）

石化行业的辅智模式是在人智的基础上，赋予机器处理复杂、动态问题的能力，如图5-8所示。在石化行业，可在现有自动化系统(DCS)的基础上，增加先进过程系统(APC)，从而实现更加高效的生产；为了达到上述目标，需要APC系统针对石化生产中塔、罐、釜、锅炉等设备的物理特性及工艺参数进行模型分析，并通过工艺优化算法给出最优控制参数。

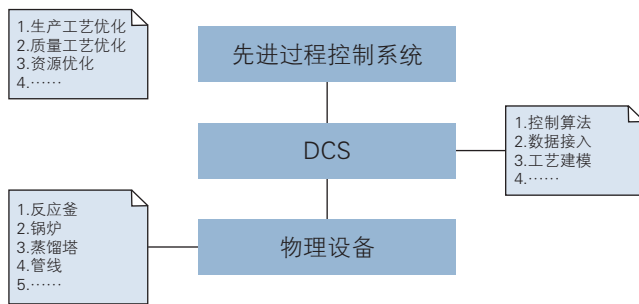


图5-8 石化行业辅智建设图

APC控制算法将行业知识进行封装，并以行业库的形式提供给工程人员，工程人员可通过建模工具根据实际现场需求，使用行业库对生产优化工艺进行建模，并针对生产/质量/资源三个维度进行优化。生产类优化算法主要负责对生产参数进行动态调节，从而确保生产率/生产过程的稳定性；质量控制算法负责动态的调节设备物理参数(如温度、压力、湿度和溶度)，从而提高产品的合格率；资源算法用于确保原料与燃料等资源能够按需投入到生产系统，并根据实际的生产指标进行动态调节，避免不必要的浪费。

### 5.3.3.3 混智（先进过程控制/仿真系统-DCS+APC+仿真建模）

石化行业的混智模式是在辅智的基础上，借助仿真建模技术开发复杂工业算法的能力。以石化行业为例，随着客户对生产工艺优化(生产/质量/资源)需求的增长，APC系统所需提供的工艺优化点分布变得更加广泛，

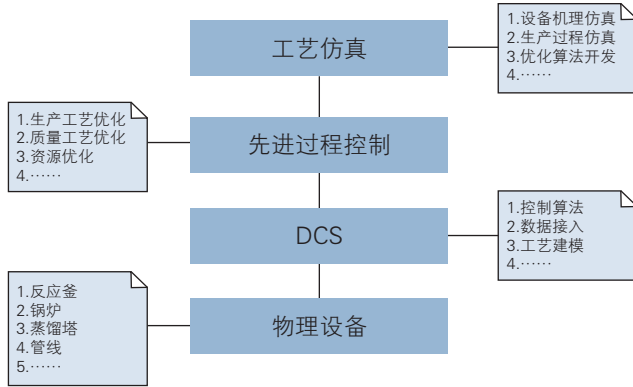


图5-9 石化行业混智建设图

且所需优化的范围由单一设备优化转为多设备所构成的系统单元级优化。

石化生产工艺复杂度的不断提升会将导致工艺算法开发难度的上升，采用单一的自动化功能设计手段将难以确保算法的正确性与可验证性。借助模型仿真的设计软件，设备及生产工艺的动态特性(如温度、压力、湿度、浓度、流量)可在虚拟的环境中进行推演，极大增强系统演化的可预见性。同时，业务专家可在虚拟环境中，通过建模方式开发对应的机理模型与工艺算法，并控制虚拟的设备对虚拟的生产环境进行调节。

在离线仿真完成后，用户可通过DCS或APC将实际现场的数据与仿真软件对接，从而验证优化算法的正确性；在验证结束后，仿真软件的算法可导入到APC系统中，并由APC系统控制实际的工业现场。

#### 5.3.3.4 机智模式（先进过程控制/仿真系统/人工智能- DCS+APC+仿真建模+机器学习）

石化行业的机智模式是在混智的基础上，借助机器学习技术实现生产工艺的自调整与自优化，如图5-10所示。在石化生产过程中，存在一些未发觉、却又影响生产效率(生产/质量/资源)的关联因素，当这些因素分布于跨生产单元的区域时，便形成一系列非线性问题，且难以通过单纯的仿真建模解决。

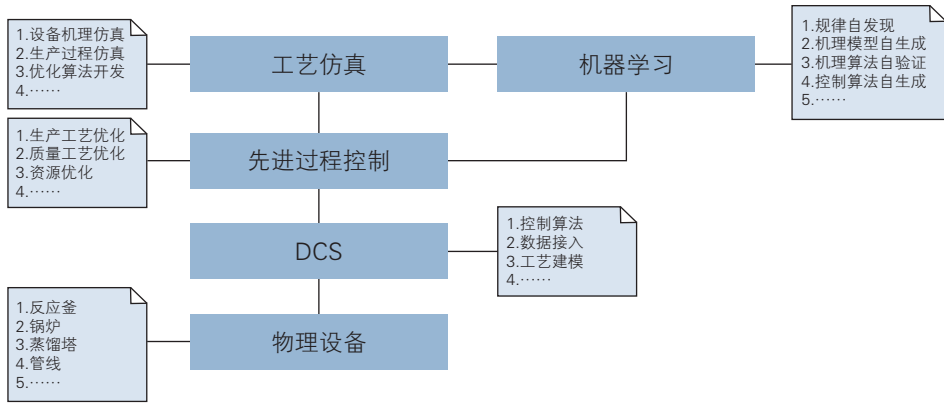


图5-10 石化行业机智建设图

使用机器学习技术能够将系统发展中的隐性规律显性化，从而全面的提升系统的自我认知能力(自感知)；在发现规律后，机器学习可提出相应的优化算法假设，并在仿真软件中自动建模、自我验证(自决策)；经过验证的算法会被机器学习筛选出来，并自动下装到APC系统中进行执行(自执行)。

### 5.3.4 价值体现

以某石化企业的甲醇及转化烯烃项目为例，该企业建设从人智提升到辅智，取得了以下效益：

- 生产率保障：实现170万吨/年甲醇及35万吨/年线性低密度聚乙烯、35万吨/年聚丙烯的生产目标；
- 计划调度操作一体化：产品验收率可提高至85%；
- 设备可靠性管理：设备修理费用降低5%，提高设备的可用性5%，减少30%的设备紧急抢修事件；
- 能源管理体系:实现节能10000吨标煤/年。



## 5.4 船舶行业

案例摘要：本案例从服务维出发，基于SoS级CPS的体系架构，结合海洋装备技术和应用特点，构建面向船舶与航运智能化服务的智能船舶运行与维护系统。通过面向装备“视情使用、视情维护和视情管理”的定制化应用，为船东提供高安全性、低成本的航行、维护、运营管理等决策支持，将服务为核心的价值创造贯穿于船舶产品的全寿命周期。

关键词：船舶行业；智能船舶无忧使用服务场景；“辅智”；“混智”模式。

### 5.4.1 船舶行业特点

现代船舶的大型化和技术的复杂程度使得人为控制和管理变得日益困难。与此同时，航运业市场低迷，存在运力过剩，运营成本增幅过高等问题。这使得传统的以船东“买好船”为途径的价值创造模式达到瓶颈。降低船舶控制和管理难度、减少人为操作带来的不确定性、提高船舶营运的经济性和安全性是航运企业首要考虑的问题。通过实现船上设备“近零故障”、航线与航速动态优化、“无忧”管理等“用好船”的方式则打开了一个全新的智能船舶创值视角，能够更好地提供面向营运的解决途径，即面向船东用户的定制化需求，将智能化服务带来的价值提升贯穿于船舶产品的全寿命周期。

### 5.4.2 基于CPS理念的解决思路

船舶运营阶段的整体效能往往受限于不同船员个体和管理者的个人认知及经验差异，而实现船东“无忧”运营的目标正是以缩小人员个体差异对于整个系统效能的影响为前提。借助CPS技术手段，通过数字化、网络化的数字主线以及智能化的认知能力建设，提升信息空间在决策中的参与程度是解决问题的有效途径。



#### 5.4.2.1 数字主线

以数字化和网络化的环境建立为基础，进行全船信息的集成，通过信息标准化处理与清洗技术，构建数据共享分析平台，提供统一的、适应多船型的信息服务，实现全船信息的融合。全船要建设数字主线，一是应具备数据获取的能力，包括船舶设备、船队、活动、环境数据等的采集，支持面向异构系统多源数据的完整性和一致性的存储、转换、分析；二是要实现船内相互关联系统的互联互通能力，以及搭建网络化环境支持船岸之间稳定可靠的数据传递。

#### 5.4.2.2 认知能力

面向智能化应用需求，解决数据到知识的转化问题，构建全船映射模型，实现船舶设备、系统、活动以及海洋环境到信息空间的映射，形成智能数据分析与认知能力，针对船舶全生命周期的预测与推演拓展，构建具备智能分析与决策思考能力的船基感知控制与岸基运营管理的大脑。

### 5.4.3 CPS模式落地实践

以CPS技术体系为支撑的服务能力建设，数字主线是基础，认知能力建设是核心。首先要通过数字化、网络化实现数据的获取和互联互通，其后以船基和岸基的计算能力为支撑，通过数据+算法+模型分析手段，构建船舶运营阶段的知识体系，进而为用户提供定制化的智能服务。

船舶行业服务维CPS落地建设流程如图5-11所示。

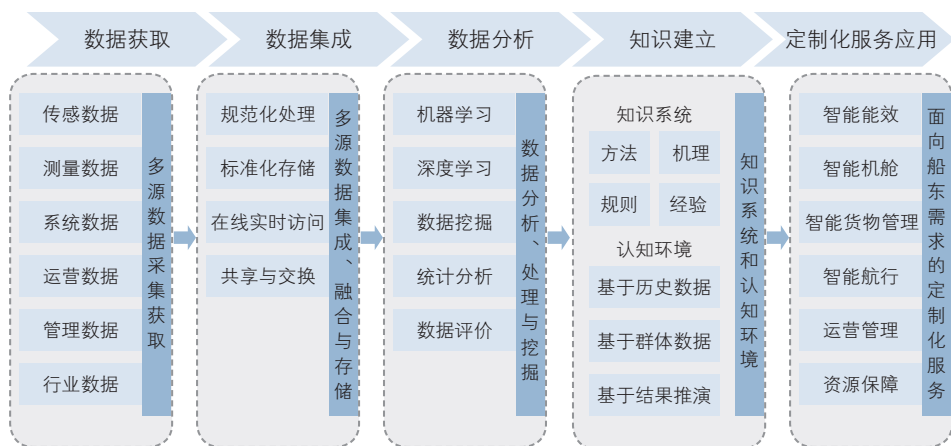


图5-11 船舶行业服务维CPS建设流程

首先，数据采集获取和集成融合阶段，解决不同船舶、各类系统的感知处理与存储的规范统一问题，减少数据采集的模式、频率、准确度和可靠性的差异，同时对不同时效和目标的数据的存储模式和机制差异进行适配，满足不同智能应用对数据的要求。

其次，数据分析和知识建立的过程构成CPS系统认知与决策的核心。其中，知识建立环节的“知识系统”适用于“辅智”模式的CPS建设，将大量船舶工业技术原理、行业知识、设备机理、最佳实践等的规则化、模型化、软件化沉淀，形成已知已解决问题的知识库。而“认知环境”建设强调已知未解决问题的知识发现，适用于“混智”模式的CPS建设，主要包括基于历史数据资源的认知、基于船队群体数据资源的认知以及基于结果推演寻优的认知。（1）基于历史数据资源的认知是以数据为驱动的船舶视情使用和视情维护的基本手段，在时间维度上，对不同时间窗口内的数据进行建模，实现各活动特征和状态特征参数之间的关系性建模；（2）基于船队群体数据的认知，针对船舶个体运行的数据样本、工况信息不完善的情况，通过对船队群体的聚类 and 模式识别，建立群体基线模型，将设备型号、运行环境相似的姊妹船群体运行数据资源作为知识发现



的基础，去除不确定因素的影响；（3）基于结果推演的认知主要针对船东的运营决策支持，建立维修计划、航次计划等运营环节的决策优化知识，综合考虑设备健康状态、维护资源的可用性、航路信息、船期要求等多个维度的复杂因素，对运营安排进行推演寻优，获得安全性、经济性的最优决策建议。

最后，以知识库为基础，面向船东需求提供定制化的智能化应用服务，通过智能能效、智能机舱、智能货物管理、智能航行支持以及运营和资源保障决策支持服务，实现面向船舶产品全生命周期的价值创造。

面向船舶行业服务维的CPS建设主要以“辅智”和“混智”两种方式落地。“辅智”模式的智能应用主要针对船东岸基智能管理端的部署，实现日常事务管理的智能化决策；“混智”模式的智能应用主要针对船舶的运行，包括智能健康管理、智能能效管理、智能航行等。

#### 5.4.3.1 辅智模式

辅智模式的CPS建设，基于企业一线实践和管理经验，其核心是将分布于各个业务流程、环节的技术、经验、方法、规则进行模型化、软件化的沉淀，形成基于已有知识的辅助决策系统。

船舶行业基于辅智模式CPS的服务维实践，可面向船东所属各型船队需求，提供机务管理、运营管理、维修保障、资源保障等服务。其中，机务管理服务支持机舱管理、油料管理、备件消耗管理等；运营管理包括租户质量评估、运输计划、航次预估、航次优化、燃油补给计划等；维修保障包括航修厂能力评估、维修任务排程、维修效果与经济性评估等；资源保障包括港区资源、人力资源、物料管理等。

#### 5.4.3.2 混智模式阶段

基于混智模式建设的CPS，信息空间在整个系统运行中的参与程度进一步提升，以船舶运行环境和自身状态的感知能力为基础，同时具备基于方法、规则和经验的计算能力，以及产生知识的“思考和学习”能力，能

够部分取代认知与学习性质的船员脑力活动，改变以往凭借船员经验的定性化决策，提供精确的定量化信息服务决策。以此降低船员个体差异因素对整个系统运行效能的影响，提升所有船员处理航行、维护等复杂性和不确定性问题的能力，实现为船东减轻人员管理负担，同时降低运营成本、提升运行安全性和可靠性，混智模式认知能力建设如图5-12所示。

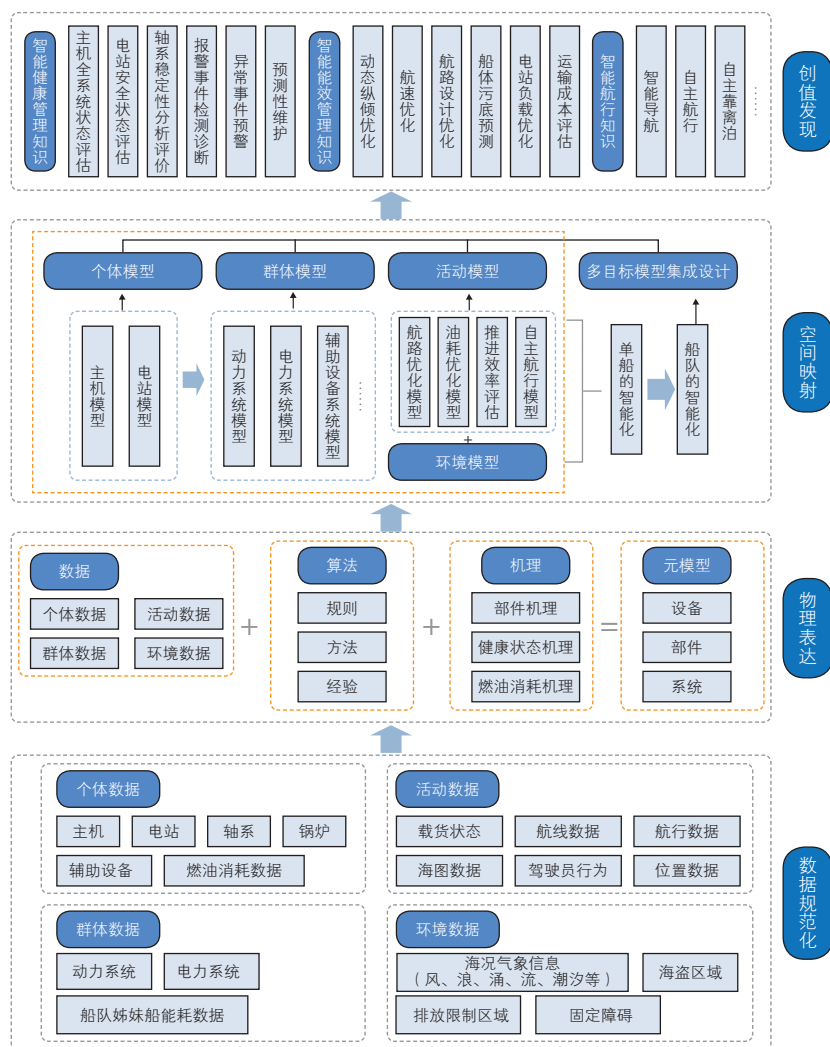


图5-12 智能船舶信息物理系统认知能力建设



#### a) 数据规范化

数据层的数据采集面向船舶各类智能化应用对于数据获取的需求。个体数据的采集针对数据驱动的分析手段，重点在于获取设备的性能特征；群体数据体现设备单元基础上的系统运行特征；活动数据和环境数据结合船舶自身活动状态和环境因素，是面向船舶不同航行状态和工况模式的特征提取过程。

#### b) 物理表达

对数据层产生的大量数据进行抽取、转换、分析，结合规则、方法、经验等在信息空间数字化沉淀的算法，以及船舶设备、系统本身的机理，等综合手段驱动，形成按需、按类的供映射空间建设可重复使用的模型化组件。

#### c) 空间映射

针对信息空间的个体、群体、活动、环境进行有效的模型建立，面向智能化任务需求，以元模型的集成优化协同为基础，综合考虑时间、成本与环境协调的多目标模型的集成设计方法，并针对船队的多层次性、关联复杂性以及动态时变性,建立起可供知识发现按需调用的模型库。

#### d) 创值发现

结合多空间的模型体系，以运行过程中产生的数据为驱动，构建面向智能化应用的知识发现体系，实现状态认知评估类、趋势预测类、决策类知识的发现。其中，认知评估类知识关注部件、设备当前运行状态，数据与模型结合，解决对于复杂设备多使用工况条件下的健康状态评估问题；趋势预测类知识实现状态变化规律的预测，以映射空间模型库为基础，结合历史和当前数据，实现对设备、系统、全船未来活动及表现的预测；决策类知识发现结合多空间知识体系，构建CPS推演决策能力，同时结合智能应用的决策行为知识反馈，识别、判断决策行为，积累决策知识，丰富和完善决策知识库体系。

## 5.4.4 价值体现

### 5.4.4.1 实现船舶智能化

隐性问题显性化：使维护具有可预测性，为采取措施预留足够时间，为用户提供明确的维护建议，将这些建议包含在他们的预防性维护计划中，从而优化维护成本，同时避免计划外故障停机以及主机重大故障。

装备使用精确化：最大限度挖掘燃油节省方向，针对智能能效系统的实船数据验证，最高达到4%的油耗节省。

### 5.4.4.2 实现岸基管理智能化

必要的监控和分析手段：实现船位监控、海洋气象台风监控、航迹与航速监控、船舶机舱设备状态与能效监控等，同时具备实现船队智能管理的航线数据分析、船舶航行大数据分析报告、航速优化等功能系统。

面向船队绩效的调度与资源配置策略：利用现有的营运信息，快速洞察船队的绩效和竞争力，提供明确、综合的船队概况，指导经营管理者为提高船队绩效采取正确的举措。

## 5.5 烟草行业

案例摘要：本案例根据烟草加工制造业的特点，结合烟草制造业相关典型应用场景，分别介绍了“人智、辅智、混智、机智”四种CPS模式在这几类业务场景中的落地应用方式与效果。

关键词：烟草制造业；CPS烟草行业应用案例；烟支重量控制；设备综合健康评估与维保策略优化；中央空调系统能耗优化控制；烘丝机出口水分优化控制；专家经验模型；机理与数据驱动混合模型；自学习自适应。

### 5.5.1 烟草行业特点

中国卷烟工厂已普遍采用了国内外成熟先进的工艺技术装备，总体



工艺技术装备水平处于国际先进水平，具备较高程度的生产自动化、数字化、网络化水平，为烟草制造业升级转型提供了较充分的技术和物质基础。随着行业制造业转型升级及高质量发展的需要，烟草行业正面临现代化烟草经济体系改革、现代化卷烟制造平台升级等要求。

在生产模式上，烟草加工属于具有流程型及离散型特征的混合型生产模式，烟叶复烤、烟丝加工属于流程型加工，嘴棒成型、卷接包装、装封箱属于离散型生产。烟叶复烤及制丝加工需要支持全配方及分组加工的工艺要求，不同的原料、配方及加工工艺对产品的内在品质及均衡性有着重大的影响。且由于烟草加工工序多，对加工工序之间的协同性、工序间来料的工艺质量稳定性具有较高的要求。在烟草制造中探索构建行业CPS，整合行业内外部数据及生产过程数据，充分深入挖掘大数据的价值，促进产品的研发、工艺改进、协同制造及营销服务，推动“卷烟产品数字化、卷烟生产智能化、卷烟服务全网化”转型升级势在必行。

### 5.5.2 基于CPS理念的解决思路

烟草行业通过构建智能烟厂CPS系统，针对生产计划排产与执行、设备管理、质量管理、能源管理、物料与物流管理等五大主要业务线，实现所有数据的全面集成。通过智能算法及仿真优化生产排程，通过信息的高度共享及分发实现协同作业，通过大数据分析实现设备故障诊断与维护、产品质量监测预测、工艺参数优化控制、产品质量追溯等应用，通过“事前、事中、事后”的建模仿真，实现业务的优化与改进。目标追求是“优质、高效、低耗、绿色、安全、智能”的生产。未来的智慧工厂改变了传统工作模式，所有人、生产设备置身于信息与物理一体化的运行中，由数据及模型驱动业务执行，整个工厂无时无刻不在体现信息流动，是一个“人、虚拟、现实”高度交互融合的智能工厂。大量重复性的劳动力被解放出来，重点关注优化及高附加值的研究分析工作，如表5-1所示。



表 5-1 CPS理念定义与示范落地案例分析

模式	定义	示范落地案例分析
人智	人基于经验解决已知问题，机器按人的指令执行；数字孪生体能够实现物理空间在信息空间的映射。	烟支单支克重重量偏差控制
辅智	机器基于已有知识解决已知问题并避免其再发生，未知问题由人解决；数字孪生体能够具备逻辑分析能力。	卷接包设备综合健康评估与维保策略优化
混智	机器基于机理、模型等推理识别未知问题，并与人协同来解决未知问题；数字孪生体间能够实现协同运行。	中央空调系统能耗优化控制
机智	机器基于自决策、自执行等解决未知问题，并避免其再次发生；数字孪生体具备与物理空间实时交互的能力。	基于自学习自适应的烘丝机工艺优化控制

### 5.5.3 CPS模式落地路径

#### 5.5.3.1 人智模式：基于自动控制与人工经验的烟支重量控制

卷接包设备是自动化程度较高的设备，针对烟支重量的控制，目前主要以系统自动调节为主，人工干预为辅。操作人员在机台上设定好重量参数，在实际生产过程中设备自动对支烟重量进行检测实现自动反馈控制。然而在生产实际中，“人、机、料、法、环”各环节都可能造成影响，设备自身控制波动较大时，需要通过相关实时数据的采集和分析辅助，再依赖于操作工对问题的经验判断进行处置。主要方式为：

通过进行与烟支重量控制相关的实时数据采集，包括烟丝工艺数据、嘴棒工艺数据、风力平衡系统数据等外围数据、综合测试台检测数据、烟支重量标准差、烟支重量超标剔除数、空头率、压实端位置、平准盘位置等设备状态数据、重量控制系统状态数据等，通过数据的综合展示及异常分析，再结合操作工对问题判断的经验进行相应的处置，包括对风量平衡系统的调节、烟支压实端位置、平准盘位置的调节、重量控制系统的维护等方式。

随着各烟草企业对烟支单支克重问题的越来越重视，以及大家应用CPS相关技术的越来越成熟，期望在不远的将来能够建立相关的分析模型，以辅智或者混智模式来实现烟支单支克重控制的问题。

### 5.5.3.2 辅智模式: 基于专家经验模型的卷接包设备综合健康评估与维保策略优化

设备的可靠性是影响产品产量、质量、物料消耗、维修费用的重要因素，设备维护是生产保障中最重要的活动。由于烟草卷接包设备价值高、结构复杂、运行速度快、精度要求高，非计划性的停机维修将造成重大的经济损失。按既定规程或标准的设备轮保是传统的维护模式，但此模式会造成过度维护或欠维护，造成经济损失或较多的突发性故障停机，“预测性维护、精准维护、状态维修”是行业卷烟设备运维管理积极探索的新模式。结合维修工长期积累的知识库、经验库，通过数据采集、建模分析等技术的应用，为设备的健康状态评价、制定科学的维保策略，实现精准精益的设备维护管理带来了很好的解决方案，如图5-13所示。

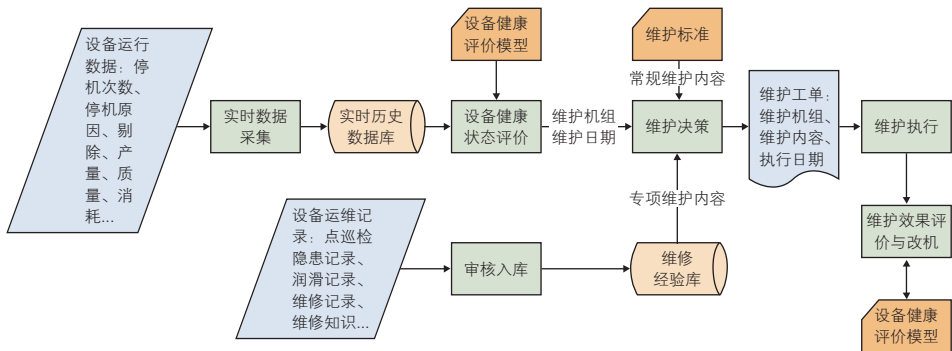


图5-13 设备健康状态评价与维护决策实现路径

通过卷包设备相关的产量、质量、消耗、效率、停机等等运行状态数据的采集，构建设备健康状态评价模型，实现对设备健康状态的评价，通过大数据分析技术，预测设备的最佳轮保时机，维修工结合维修经验库给

出针对性的维保专项内容，结合维护标准产生常规性的维护内容，从而能够科学合理的制定设备轮保的顺序、时间、内容项，产生维护的工单并执行，执行后再通过设备健康评价模型及实际生产数据进行维保效果的评价与评价模型的完善，如图5-14所示。



图5-14 设备健康状态评价与维护决策实践

### 5.5.3.3 混智模式：基于机理与数据驱动混合模型的中央空调系统能耗优化控制

随着烟草生产工艺设备自动化程度的提升，生产效率的提高，柔性生产的普及，与之相适应的按需精准供能已成为动力车间的当务之急。现有的能管集控系统能够实时监测能源供应的全过程数据，并对接MES系统、制丝集控/卷包数采系统、仓储物流信息、气象数据等，解决动能业务相对分散的问题，实现动能相关的控制流、信息流、管理流的统一。动力部门基本上都是根据经验通过能管集控系统进行供能调度。然而，由于动能设施普遍存在较大的热容性，动能设备的能耗输入与能源参数的输出之间存在较大的时间滞后，人为控制不免造成不必要的浪费和不稳定性。因此，如何做到根据各部门车间能耗预测，提前预知能管部门有计划及时供能，将能够极大的提高供能效率与降低能耗，是目前烟草制造业的一个难

点。解决思路之一是基于CPS建设中央空调系统能耗优化控制系统，如图5-15所示。

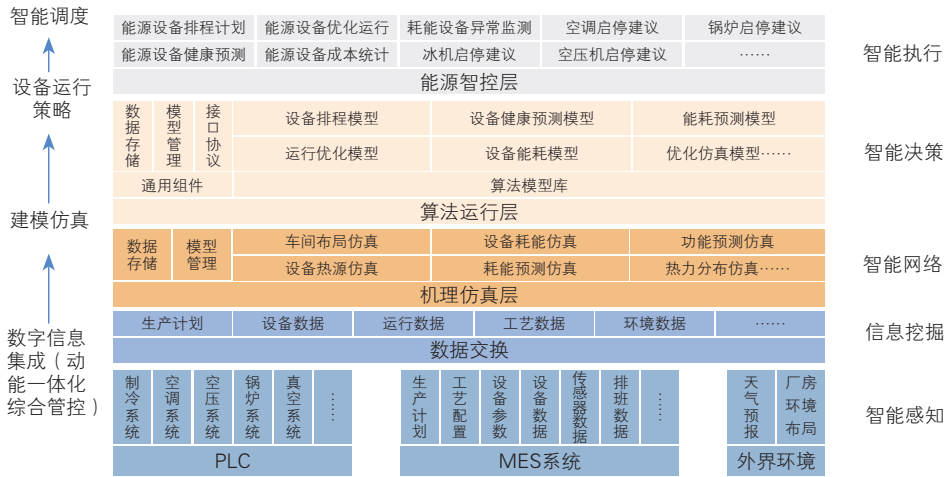


图5-15 中央空调系统能耗优化控制系统

中央空调系统能耗优化控制系统主要实现方法是：通过生产关联的能源仿真模型的研究，动能管控与工艺指标历史数据的分析，运用大数据技术和人工智能理论，优化能源调度策略，完成设备的智能联控，最终实现能源需求侧驱动的智能供能系统。首先基于云平台构造大数据分析能力，收集获取并储存设备和系统的运行数据，然后基于历史数据和预测模型构建空压系统和制冷系统与空调系统联动的优化策略，就地优化控制系统，并将决策结果输出到用户界面上。在该过程中，控制系统和云平台实施实时交互，实时的将设备运行数据上传到云平台，并在获取云平台的决策结果后，将决策结果的控制指令下达到设备层，联动控制冷水机组、水泵、空压机、真空泵和冷却塔等设备，从而优化设备的开启逻辑和运行曲线，同时允许用户通过更高的权限来修改控制逻辑以应对和避免控制系统故障。最终，将智能建议直接导入设备控制器，实现各供能系统群控，全系统无人化自动化运行。

### 5.5.3.4 机智模式：基于自学习自适应的烘丝机工艺优化控制

制丝加工过程中烘丝是比较重要的工序，烘丝后的烟丝水分是关键的控制指标，烘丝机有一套自带的PLC逻辑控制，能够根据出口水分值及入口水分值、物料流量等参数进行闭环控制，但由于来料差异、料头料尾、环境温度湿度变化等因素没法参与PLC控制，所以需要人工进行相关参数的调节已保证出口水分的稳定性。什么时候调节、调节什么参数、调节多少值往往受到个人经验及习惯的影响，所以每个班组烟丝出口水分的波动比较大。

基于工业大数据分析、物联网、工业智能等智能制造新技术为过程质量控制和质量管理的智能化带来了新的变革。基于在线检测系统，能够全面采集设备的加工参数、工艺质量数据，关联环境、上下游工序数据。基于大数据做相关性分析，构建分析、控制模型，与集控系统紧密集成，通过对核心关键参数的自动调节，实现质量控制的智能化应用。



图5-16 基于CPS的烘丝机出口水分预测与控制系统

如图5-16所示，采用“模型预测控制技术、多元时间序列分析预测”等大数据分析技术，可对烘丝机出口水分进行预测，并根据预测情况自动计算最佳的控制参数及调整值，通过运行过程中采用基于人工神经网络的MFA控制方法不断自学习和模型优化，使控制能够持续精准有效，某厂实践如图5-17所示。



图5-17 烘丝机出口水分预测及调整建议

### 5.5.4 价值体现

CPS的理念与实施，贯穿于烟草制造业的各个业务线及具体的业务环节，根据不同的业务特点与需求，各业务场景分别适合人智、辅智、混智、机智等不同模式的CPS建设。各场景CPS建设模式不同，但各具价值。譬如通过智能化的生产排程及仿真验证，可以综合考虑交货时间、生产时长、换牌次数、设备利用率及能源消耗等等综合因素，从而提高生产效率、降低消耗；通过智能化的调度策略能够确保人员、设备、物料、环境、技术标准、生产活动等的协同执行，提高生产作业的精准性，提高生产效率，减少空耗；通过智能化的工艺质量控制，能够减少人为经验的依赖，提高控制的精准性，提升产品的质量；通过智能化的设备运维管理，实现精准、精益的预测性维护，减少突发性故障停机带来的经济损失；通过智能化的能源管控，能够实现能源需求侧与供给侧的协同，实现精准供应，减少能源浪费；通过智能化的物料管理，能够精准快速的追踪和分析原辅料、成品、半成品的关键参数，从而杜绝不合格品流入市场等等，切实的支撑“优质、高效、低耗、绿色、安全”的生产，智能制造模式的实施应用将为烟草行业制造力的升级、行业的高质量发展带来新的机遇。

# 六、信息物理系统建设技术体系

本指南第三章从资产维、业务维和服务维三方面切入，对CPS在不同应用场景中的价值创造模式进行了详细阐述；第四章给出CPS的建设模式，企业需要根据自身情况选择合适的具体建设模式。可见，无论是CPS价值的实现还是CPS建设模式的选择，最终的落地应用都必须依靠具体的技术实现。

本章从CPS面临的产品、应用与业务中的问题出发，阐述需要解决的问题、解决问题的难点、需要的支撑技术和达到的效果，给出CPS建设技术体系。

## 6.1 概述

对于制造业来说，无论是数据、知识的产生和应用，只有作用于产品的设计、制造和服务提升上，才可以真正发挥数据和知识的价值。本章一是从产品的设计建模出发，围绕产品全生命周期中机理产生过程展开，对应的关键技术解决CPS产品复杂度难题。二是从制造过程出发，围绕数据的产生和应用展开，实现数据在各业务环节中的自动流动，对应的关键技术解决CPS应用复杂性的问题。三是从服务提升过程出发，围绕知识的产生和应用这一维度展开，实现数据到工业知识的转化，对应的关键技术解决CPS业务复杂性的问题。因此，我们通过产品复杂度、应用复杂度以及业务复杂度三个维度来阐述信息物理系统建设的技术支撑体系。

一是产品复杂度维度。产品复杂度既包括产品本身的复杂性，也包括对产品运营维护的复杂性。产品本身的复杂性体现在设计和生产流程复杂，此过程往往涉及机械、电子、电磁、力学、软件等多个学科的协同



应用，具有产品机理产生难、设计和建模过程复杂、产品功能性能指标要求高等特点。产品运营维护的复杂性体现在产品的运行环境具有多样性，特别是在高压、高温、高腐蚀等情形下，对产品功能性能的监测有很大的挑战。针对产品复杂性的问题主要依靠CPS综合技术体系中仿真技术来解决。

二是应用复杂度维度。在制造企业中CPS的应用有多种情境和方式，总体来说可以分为单元级应用、系统级应用和SoS级应用。CPS在不同情境下应用的核心是保证数据的自由流动，但是制造业现场却具有系统异构性、协议多样性、网络复杂性和数据海量性等特点，在这种情况下保证数据采集、传输、计算与应用的通畅和有效是一个挑战，这就需要CPS综合技术体系中数据产生与应用技术来解决。

三是业务复杂度维度。制造业发展的新模式为个性化定制、智能化生产、网络化协同和服务化延伸，其核心就是知识的产生、积累、应用与实践。知识的产生可能聚焦于某一个业务场景，但更多的是在跨业务场景和全周期场景中产生。对现阶段来说，工业知识产生与演进规律不明、分析挖掘困难、决策优化机制欠缺、知识管理和认知能力弱是制造业中普遍存在的问题，这就需要CPS综合技术体系中认知和决策领域的技术来解决。

因此，对于CPS关键技术的描述不能从单一方面、单一维度来考虑。必须具有全局思维，从数字孪生这一核心，结合产品复杂度、应用复杂度和业务复杂度三个维度展开思考，才能较全面的阐述CPS建设过程中涉及的关键支撑技术，如图6-1所示。



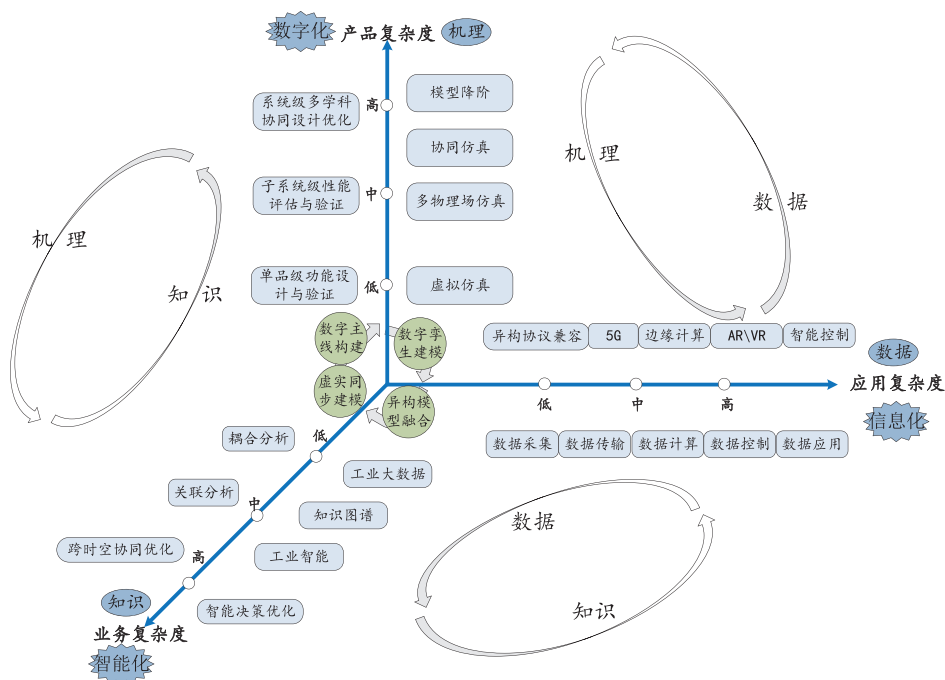


图6-1 CPS建设的技術总覽图

通过以数字孪生技术为核心的三个复杂度维度分解，可以看到CPS是综合了虚拟仿真、数据分析、认知决策等多个领域关键技术的技术体系，可以很好地实现“机理-数据-知识”的多模态耦合分析，通过机理、知识与数据模型的指导、修正、完善、迭代、反馈调控、验证等耦合作用，形成全面多模态融合方法与机制。下面从产品复杂度、应用复杂度和业务复杂度这三个维度来详细阐述支撑CPS建设的各种技术。

## 6.2 面向产品复杂度的CPS关键技术

产品复杂性的问题主要依靠CPS综合技术体系中仿真技术来解决。产品机理建模是构建数字模型的过程，结果是在信息空间中形成物理等价物，仿真技术伴随着建模的整个过程，利用多种仿真技术包括单学科物理

场的仿真、多物理场仿真及系统仿真等构建数字孪生模型，针对产品复杂度的不同，产品机理建模和仿真可从部件级、子系统级和系统级逐层进行，最后形成以数字孪生为特征的虚拟数字模型，然后将数字孪生模型和仿真求解器部署到CPS中。如图6-2所示。

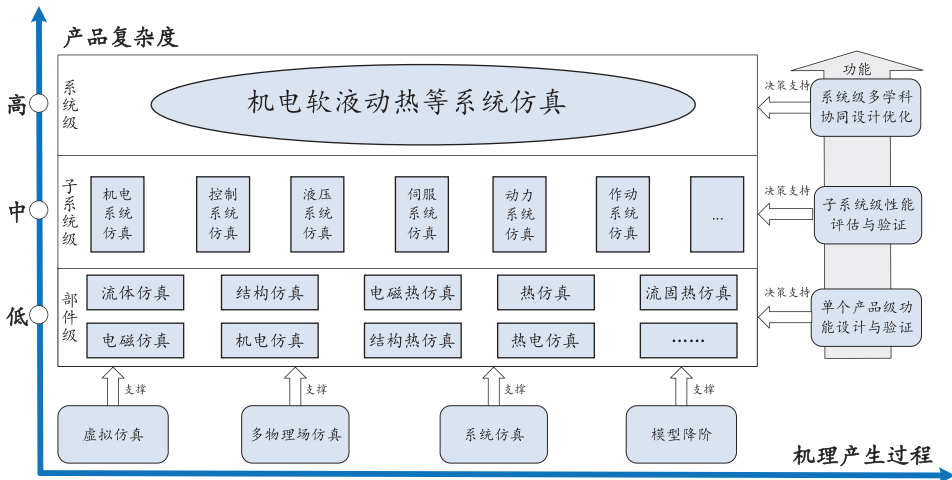


图6-2产品复杂度维关键技术

针对产品复杂度的不同，产品机理建模和仿真可从部件级、子系统级和系统级逐层进行，最后形成以数字孪生为特征的虚拟数字模型。

部件级的建模和仿真主要是为了对单个部件具体的功能和性能进行设计和验证。针对部件具体的功能，需要对部件的某些物理场进行仿真，包括流体仿真、结构仿真、电磁热仿真、热仿真、流固仿真、电磁仿真、机电仿真、结构热仿真、热电仿真等。

子系统级的建模和仿真主要是为了对某一子系统的功能和性能进行设计和验证。针对某一子系统要实现的功能，可能涉及到几个学科之间的模型联合仿真。典型的子系统仿真的机电系统仿真、控制系统仿真、液压系统仿真、伺服系统仿真、动力系统仿真、作动系统仿真等。

系统级的建模和仿真主要是为了对整个系统的功能和性能进行协同设

计和整体验证，并对整个系统性能进行优化。根据系统功能的不同，构建包括机械、电子电气、软件、液压、动力、热等不同学科的集成模型，并进行协同仿真和参数优化。此外，在系统级的仿真过程中，如果所采用的单学科仿真模型呈现三维状态，分析时则需要在保证高保真度的基础上采用降阶技术对模型进行简化处理，然后再使用降阶后的模型来构建系统模型，将完全的三维模型转换为零维、一维、二维、三维混合结构的系统模型，这样可以降低仿真时间和复杂度，同时又能保持原系统的输入输出关系特性。

通过上述关键技术，面对产品复杂且机理产生难，建模过程复杂且计算困难等情况，更好地实现机理与数据、知识的融合，支撑产品功能性能指标，验证模型设计的准确性，并对参数进行优化，为产品的虚实融合提供有力支撑，满足环境适应性要求。此外通过网络和真实物理产品连接，使得数字模型与物理设备能形成双向的互通，达到数字模型和物理模型的同步运行，从而实现利用数字孪生模型监测和控制物理设备，或者进一步拓展出更多高级的具体应用。

### 6.2.1 虚拟仿真技术

虚拟仿真依靠电子计算机，结合有限元或有限体积的概念，通过数值计算和图像显示的方法进行结构、流体、电磁、热等单物理场的数值模拟，达到对工程问题、物理问题乃至自然界各类问题数值分析和机理研究的目的。

虚拟仿真技术一直被用于设计或改进物理产品或流程，借助虚拟仿真可以直观的展示产品结构中不易观测到的现象，使人容易理解和分析；还可以展示发生在结构内部的一些物理现象，便于在构建物理原型之前就对各种备选设计方案进行评估。此外，虚拟仿真还可以对工作场景进行建模，支持研发出各种控制算法，改善操作的控制策略。



### 6.2.2 多物理场仿真技术

多物理场仿真解决的是流、固、电、磁、热等单物理场的相互叠加，相互影响的多物理场耦合问题。

在现实世界中，产品往往同时受到多个物理领域的影响，为了应对复杂产品在复杂环境中应用的挑战，需要研究多物理场的交互影响，以及多物理场交互影响产生的机理。同时，小型化、高功率密度、高可靠性以及采用先进材料等趋势增大了对于多物理场仿真的需求。在单物理场虚拟仿真技术基础上进行多物理场耦合仿真可更准确的评估这些复杂的物理现象和相关机理，常见的多物理场耦合包括流-固耦合、电-热耦合、热-结构耦合、流-固-热耦合、电-热-结构耦合等。

### 6.2.3 系统仿真技术

系统仿真就是根据系统分析的目的，在分析系统各要素性质及其相互关系的基础上，建立能描述系统结构或行为过程的、且具有一定逻辑关系或数量关系的仿真模型，进行仿真分析或定量分析，以获得正确决策所需的各种信息的过程。

CPS是在环境感知的基础上，深度融合了计算、通信和控制能力，具有信息空间和物理空间深度融合和实时交互功能的复杂系统，同时具备系统的可控、可信和可拓展能力。具有更高仿真精度的3D物理系统建模和仿真在智能化、电气化产品的开发和使用中尤为重要，利用虚拟系统技术，高保真模型内的权威系统定义能帮助用户完整理解各种子系统之间的依赖性、数据和接口，而不是一系列传统静态的基于文本的设计文档。

### 6.2.4 模型降阶技术

系统仿真对于仿真速度要求较高，系统仿真的时间量级一般为微秒和毫秒级，但三维虚拟仿真的时间量级一般为小时级或天级。将系统仿真

与三维仿真直接连接进行耦合计算时，整体计算速度的瓶颈在于三维仿真上，两者耦合计算将导致系统仿真的整体计算时间很长，难以匹配工程上的需求。因此需要采用模型降阶技术对三维仿真模型进行处理，在保证一定精度的情况下，减少仿真时间来满足工程上的要求。

降阶技术主要分为静态降阶和动态降阶两种。目前较为成熟的降阶技术为基于响应面的静态降阶技术。但其只能对无时间相关性的物理现象进行降阶处理，无法对具有时间相关性的现象进行降阶。动态降阶技术则是利用机器学习的方法对三维仿真模型在指定工况参数空间内的全部工作特性进行拟合，生成降阶模型。其过程首先是在三维仿真软件中对所关心的问题三维瞬态仿真，然后将仿真后获得的仿真结果作为学习资料，降阶器对此进行学习，生成对应的降阶模型，降阶模型可作为一个普通的系统仿真元件，直接连入系统中使用。

### 6.3 面向应用复杂度的CPS关键技术

CPS应用的本质是实现数据在设计、采购、仓储、生产、管理、配送和服务等环节自动流动，以数据流带动资金流、物流和人才流，进而不断的优化流程，提高制造资源配置效率。以数据的采集、传输和计算分析技术驱动，打通每一个业务环节，有效支撑CPS在各类应用场景下实现价值。

在制造企业中CPS的应用有多种情境和方式，总体来说可以分为单元级应用、系统级应用和SoS级应用。为了应对更加复杂的应用场景和应用环境，保证数据的采集、传输、计算和使用更加智能，需要异构协议兼容、大规模实时数据传输、边缘计算、AR/VR、智能控制等多种技术协同,如图6-3所示。

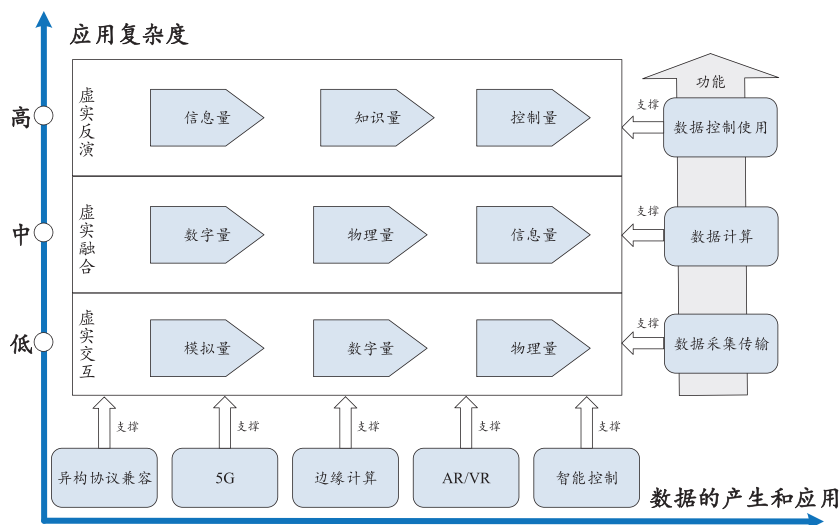


图6-3 应用复杂度维关键技术

通过上述关键技术，在高端装备或复杂的工厂环境下，CPS可实现异构数据实时感知、数据高效稳定传输，实现信息挖掘、有效控制，支撑人与系统的完美交互，构建SoS级CPS系统，从而实现多个系统级CPS工作状态的统一监测、实时分析、集中管控。

### 6.3.1 异构协议兼容技术

数据是支撑CPS进行建模、仿真、优化、控制的基础，CPS的价值创造在很大程度上取决于采集数据的数量和质量。但是由于CPS具有泛在连接、异质同构的属性，系统采集的数据来源很多，可以是物料、生产设备、产品、装备等物理实体，也可以是各类信息化系统。即便同一种类设备也存在设备厂商不同、开放程度不一样、接口形式不统一、协议繁杂等问题，设备之间在协议适配、协议解析和数据互联互通方面困难重重。因此，为了实现互联互通，需要采用异构协议兼容技术实现多种硬件接口、通讯协议数据包的安全转换和转发功能，保证CPS的根基稳固。

### 6.3.2 5G技术

5G与云计算、大数据、虚拟/增强现实、人工智能等技术深度融合，成为CPS应用的关键基础设施。

5G三大应用场景是增强移动宽带（eMBB）、海量机器类通信（mMTC）和超可靠低时延通信（uRLLC）。其中，eMBB可以解决对带宽有极高需求的数据传输工作，如图像和高清视频数据的回传、自动控制或自动驾驶中的VR（虚拟现实）和AR（增强现实）等，满足CPS中数据传输的需求；mMTC聚焦对连接密度要求较高的业务，可以解决多类型、大批量的传感器布置问题，满足CPS末端节点互联、全面感知的需求；uRLLC聚焦对时延极其敏感的业务，满足CPS中的数字孪生和实时控制的需求。

5G将CPS应用场景与高速移动通信深度融合，提供了一个更灵活、更可靠、更安全、更智能、可编程、可拓展的网络，满足CPS中对于网络低时延、大流量、高可靠、高安全性等的需求，对CPS在产品、应用和业务中的应用提供支撑。

### 6.3.3 边缘计算技术

边缘计算是在靠近物或数据源头的网络边缘侧，融合网络、计算、存储、应用核心能力的分布式开放平台，就近提供边缘智能服务，满足行业数字化在敏捷联接、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。因此，边缘计算技术是实现物理空间与信息空间连接的桥梁，将大规模节点运算处理放到CPS节点端进行，减轻中央处理运算负荷，使工业过程响应更为实时。作为连接物理世界和数字世界的桥梁，企业通过边缘计算设备将物理空间工业现场PLC设备和数控系统连入信息空间。现阶段，边缘计算技术的实现应用难点主要为边缘操作系统、OPC UA、算法模型和协议适配等方面。



### 6.3.4 智能控制技术

智能控制技术是控制论的技术实现应用，是通过具有一定控制功能的自动控制系统，来完成某种控制任务，保证某个过程按照预想进行，或者实现某个预设的目标。智能控制是实现CPS虚实融合的主要技术手段。智能控制的主要关键技术包括：无线控制技术、模糊控制技术、神经网络控制技术、学习控制技术、可编程控制技术、液压传动控制技术等。

### 6.3.5 AR\VR技术

物理世界的实体是可见可触的，可以简单直观的与人进行交互。而虚拟世界的传递给人的多为屏幕上的几行数字或一些图表，这大大增加了相关人员对CPS操作的难度，使用增强式交互技术表达数字孪生体可以大大降低人员的使用成本。虚拟现实（VR）技术主要包含计算机图形技术、立体显示技术、视觉跟踪和视点感应技术、语音输入输出技术、听觉、力觉和触觉感知技术5个关键技术。增强现实（AR）技术主要包含跟踪注册技术、显示技术和智能交互技术等。

## 6.4 面向业务复杂度的CPS关键技术

CPS在研发设计、工艺管理、生产制造、测试试验以及运维服务等业务环节的应用存在耦合性、关联性和跨时空系统性等特点，根据涉及业务场景和复杂度的不同可以将其化分为单场景、跨场景和全场景应用，不同场景、跨场景、全周期场景等对知识体系要求不一，存在着演进规律不明等困难。

CPS针对上述不同场景分别提供耦合分析、关联分析以及跨时空协同分析等功能，以实现“原始数据—数据处理—知识加工—知识管理—认知服务”的知识产生与应用过程。为支撑不同场景下的数据分析需求以及知



识的产生与应用，需要工业大数据、知识图谱、工业智能和智能决策优化等关键技术的支撑，如图6-4所示。

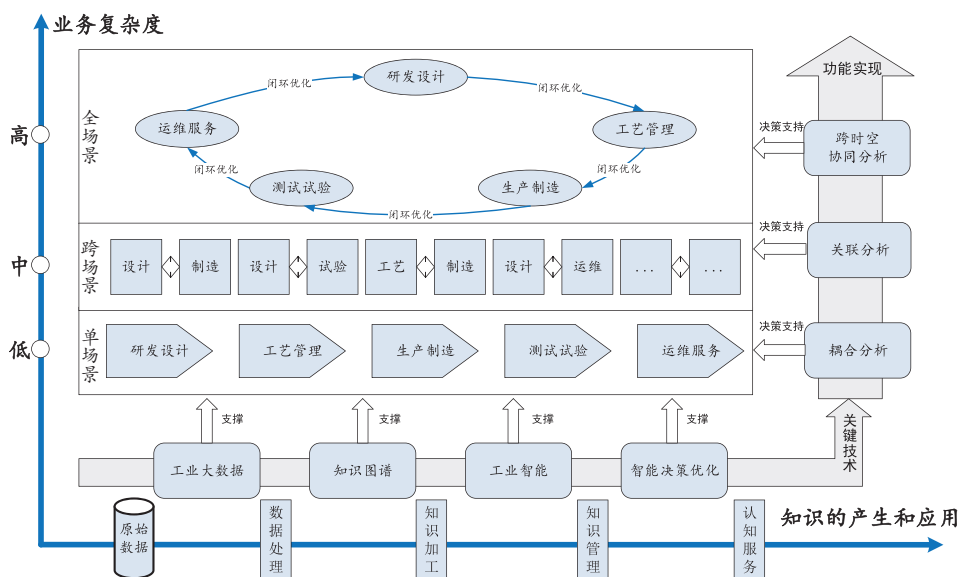


图6-4 业务复杂度维关键技术

通过上述关键技术，CPS从对数据的洞察挖掘到支持决策的知识的萃取，实现了“数据—信息—知识”的高效转化，加速了信息空间与物理空间之间的交互动。可以实现数据与机理融入知识产生与分析挖掘，更好地实现决策优化机制，支撑CPS应用服务转化。既能提升知识的产生、利用和传承过程的效率和规模，又能重新优化生产组织要素的价值链关系，以最优的方式支撑CPS实现服务最终用户实现各项业务的发展和价值。

### 6.4.1 工业大数据技术

工业大数据是工业企业自身及生态系统产生或使用的数据的总和。从产品的整个生命周期来看，工业大数据贯穿于产品研发设计、工艺管理、生产制造、测试试验和运维服务等各个环节，其价值属性实质上是基于工



业大数据分析对产品的全生命周期数据深入挖掘内在知识价值，并融合工业机理模型，以数据驱动+机理驱动的双驱动模式来进行工业大数据的分析，为工业生产、运维、服务等单一场景、跨业务场景以及全业务场景提供科学的认知决策。

### 6.4.2 知识图谱技术

随着大数据时代的到来，工业生产过程中积累了海量数据，知识图谱技术为工业领域提供了一种便捷的知识表达、积累和沉淀方式，为行业大数据的理解和洞察提供了丰富的背景知识。将CPS作为实现企业智能化升级的系统支撑，知识图谱技术的应用是支撑其进一步满足智能化诉求的手段之一。行业智能化升级的实现过程中，迫切需要行业知识赋能，将知识赋予机器并让机器具备一定程度的认知能力。

### 6.4.3 工业智能技术

工业智能技术是人工智能技术在工业领域融合应用的系统技术与方法，包括机器学习、深度学习、自然语言处理、计算机视觉、认知与推理等技术，将传统依靠人类经验的传承方式，转向通过数据分析、智能建模等手段挖掘数据的隐形线索，将知识转为模型，使得行业知识能够高效和自发的产生、利用和传承。工业智能为处理海量工业图像、工业视频、工业声音、工业日志等非结构化数据以及工业时序数据提供了技术支持，支撑了CPS的挖掘、分析、诊断与预测能力，解决了工业领域碎片化知识处理与挖掘难题。工业智能既能提升知识的产生、利用和传承过程的效率和规模，又能重新优化生产组织要素的价值链关系，以最优的方式支撑CPS实现服务最终用户实现各项业务的发展和价值。

#### 6.4.4 智能决策优化技术

智能决策优化技术是CPS的核心关键技术，从工业数据中发现可供迭代利用的知识，并能够基于推理与优化算法生成指导管理与控制活动的策略，是实现基于数据自动流动的闭环赋能体系、资源优化、价值提升的重要抓手。工业场景下通过建立工业大数据和知识驱动的流程工业智能优化决策机制和系统体系结构，以及工业大数据驱动的行业知识挖掘、推理与重组、多源异构多尺度生产指标构建，形成基于大数据和知识驱动的生产指标决策、优化运行与控制一体化的工业智能决策优化新模式，实现基于CPS工业生产的绿色化、智能化和高效化。

综上所述，工业大数据技术、知识图谱技术、工业智能技术、智能决策与优化技术支撑CPS从对数据的洞察挖掘到支持决策的知识的萃取，实现了“数据—信息—知识”的高效转化，加速了信息空间与物理空间之间的交互动。

### 6.5 共性关键技术——数字孪生

数字孪生（Digital Twin）是基于传感器更新、运行历史、物理模型等孪生数据，完成从物理实体到信息虚体的模型映射，以及从信息虚体反馈至物理实体的过程。数字孪生能够实现仿真、监测、诊断、预测、迭代优化等数字孪生服务。数字孪生包括（1）物理实体、（2）信息虚体（数字孪生体：数字模型、孪生数据；孪生主线；数字孪生服务）以及上述任意二者之间的（3）交互对接，如图6-5所示。数字主线（Digital Thread）负责以统一的模型为核心，构建包含产品全生命周期与全价值链的数据流，疏通信息孤岛，驱动知识生成，建立统一的数据、信息、知识的传递和访问规则。

数字孪生体（Digital Twins）能够将物理实体的各项参数进行映射，

具备与物理实体交互、决策的能力，由孪生数据、数字模型组成。孪生数据能够通过传感器更新、运行历史、物理模型等将物理空间显性、隐性数据在信息空间集中汇聚、呈现，是构建数字孪生体的核心要素。数字模型能够在信息空间再现物理实体的物理属性、功能、行为和性能等，支撑数字孪生体完成相关服务。

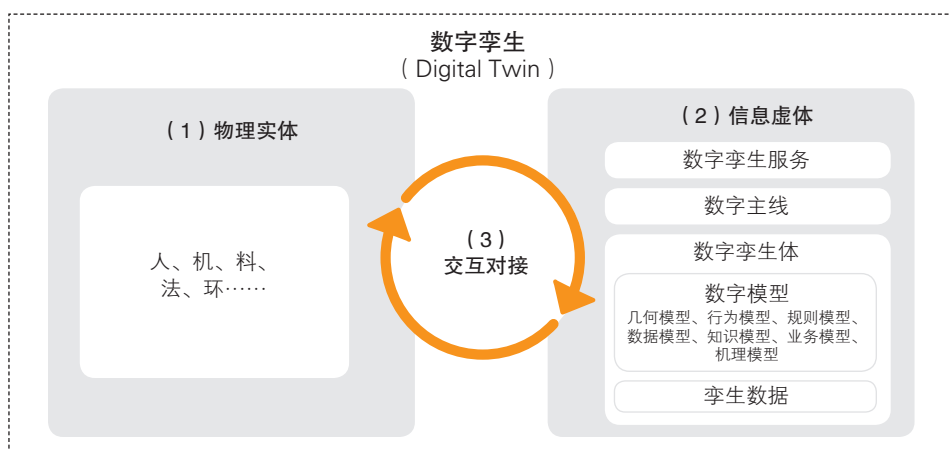


图6-5 数字孪生与数字孪生体的关系

依据信息空间与物理空间融合应用层次要求，数字主线实现了数字孪生各制造环节模型之间的联通、耦合、叠加，以形成更大的孪生系统；数字孪生体通过管理壳接入数字主线，多个数字孪生体互联协同，形成更复杂的孪生体。

一是数字主线构建。产品全生命周期过程涉及人、机、料、法、环境等异构全要素数据资源，这些数据资源主要由产品生命周期管理(PLM)等业务系统进行采集，具有数据形式多样、数据流动过程复杂等特点。数字主线可以通过本体技术、语义映射等技术，以主题仓库为服务载体，实现产品全生命周期跨时空、多尺度数据资源的关联融合。

二是数字孪生框架搭建。数字孪生框架设计主要基于产品全生命周期数字链，采用语义、映射、本体、形式化描述、多图谱关联等技术，定义

数字孪生架构，规范数字孪生接口与互操作规范，实现对多类型数字孪生的识别、配置与管理。

三是数字孪生体构建。多时空多尺度数字孪生体的构建是数字孪生的核心。根据已定义的数字孪生框架，通过虚实交互反馈、数据融合分析、决策迭代优化等手段，基于语义技术、本体技术等技术，在长度、时间尺度以及耦合范围等多个方面进行统一建模，构建高精度的数字孪生体。

四是虚实同步建模。数字孪生体通过信息空间与物理空间的数据交互、信息传递，对产品在不同业务场景和不同运行环境下的功能和性能进行预测，将预测结果通过数字孪生体为物理实体增加或扩展新的能力，完成产品数字孪生体与实体之间的相互指导、修正、完善、迭代、反馈调控和验证。

通过数字孪生技术，设计数字孪生接口与互操作规范，定义数字孪生间的相互逻辑关系，从数字孪生图谱中选择数字孪生体，确定数字孪生体内部的数据传递关系、模型融合机制和同步建模等级，实现多数字孪生体协同与处理。通过定义多个数字孪生体的交互关系，多个数字孪生体互联互通，形成更复杂更高级别的数字孪生体。数字孪生可在物理空间和信息空间之间建立准实时联系，实现互联互通互操作，在信息空间中对物理空间实体进行描述、诊断、预测，从而优化资源配置效率。



## 七、信息物理系统安全保障

### 7.1 概述

CPS的发展关系到一个国家工业生产规模化与智能化、经济可持续发展、关键信息基础设施保护等重大领域，其重要性及其所面临的安全挑战已经引起各国政府及其研究机构的高度重视。然而，目前我国CPS涉及领域所采用的信息安全保障技术大量源于国外技术体系，且技术本身存在“来源不明、规范不清、体系不全”的问题，安全保障技术的使用尚未形成全系统、全覆盖的应用框架。因此，对CPS安全的研究及建设，关系到我国关键基础设施系统、智能制造、工业互联网等国民经济发展重要目标的安全。本章将着重对CPS面临的安全威胁、CPS安全需求、安全建设的内容以及CPS安全如何实施进行论述。

### 7.2 CPS面临的安全威胁与需求

#### 7.2.1 CPS面临的安全威胁

CPS面临的各类威胁总体如表7-1所示。

表7-1 CPS面临的安全威胁分类

信息-物理融合	硬件 软件 网络 平台	物理攻击、设备故障、线路故障、电磁泄漏、电磁干扰、拒绝服务攻击、信道阻塞、控制命令伪装攻击、控制协议攻击、控制网络攻击、女巫攻击、重放攻击、感知数据破坏、假冒伪装、信息窃听、数据篡改、节点捕获等
基础安全		拒绝服务攻击、路由攻击、汇聚节点攻击、方向误导攻击、黑洞攻击、泛洪攻击、陷阱门、恶意代码、应答哄骗、错误路径选择、隧道攻击、用户隐私泄漏等
业务安全		数据注入攻击、机器学习算法攻击、跨域身份伪造、非授权域操作、恶意代码、数据库渗透等
安全管理		安全策略篡改、风险评估偏差、安全更新失效、安全计划缺失等

### 7.2.1.1 信息-物理融合面临的威胁

CPS在物理空间和信息-物理融合的层次将面临物理攻击、感知组件攻击等威胁；前者包含物理攻击、设备故障、线路故障、电磁泄漏等，后者是CPS的数据来源和控制命令执行器，是信息空间和物理世界连接点；感知部件面临的安全威胁有节点捕获攻击威胁、传感器侧信道攻击威胁、能耗攻击等；控制设备是信息空间和物理世界的交互点，其面临的安全威胁主要有控制命令伪装攻击、控制协议攻击、控制网络攻击等。

### 7.2.1.2 基础安全面临的威胁

CPS的基础安全方面涉及的对象包括网络、主机、应用和数据。因此基础安全面临的威胁主要源于针对CPS基础网络、主机和数据的拒绝服务攻击、路由攻击、控制网络DoS攻击、汇聚节点攻击、方向误导攻击、黑洞攻击、泛洪攻击等。这些安全攻击将威胁基础网络、主机和数据的拓扑安全、访问边界控制、协议完整性、内容安全、行为抗抵赖性、系统可用性等重要属性，同时也将承受信息物理融合传递的安全威胁。

### 7.2.1.3 业务安全面临的威胁

CPS业务安全面临的威胁主要针对其互操作和协同安全。主要威胁形式包括数据注入攻击、机器学习算法攻击、跨域身份伪造、非授权域操作、恶意代码、数据库渗透等，同时也将承受信息物理融合和基础安全传递的安全威胁。

### 7.2.1.4 安全管理面临的威胁

CPS在安全管理上面临的威胁主要来自信息-物理融合安全、基础安全和业务安全管理过程中，在安全策略、安全计划、安全风险管控等方面，面临的安全策略篡改、风险评估偏差、安全更新失效、安全计划缺失等威胁。安全管理上面临的威胁将影响多个层次，从信息空间把威胁传递到物理空间，因而对CPS的安全管理和风险评估是对基础信息安全、物理安全、业务安全的综合性管理与评估。



### 7.2.2 CPS安全需求

依据CPS特征，以硬件、软件、网络 and 平台为核心要素，本节提出CPS6大类安全需求：

- 1) CPS特定系统使用专有通信协议，需要可靠的认证、加密机制，以及交互消息完整性验证机制；
- 2) CPS系统设备的专有信息、运行参数必须进行严格保护；
- 3) CPS是IT系统与控制系统的混合，需要对CPS采用IT系统标准后的安全性进行严格验证和测试；
- 4) CPS系统层次结构中，必须严格限制在应用层网络中使用设计生产/作业的CPS系统服务，对资源使用加强认证和访问控制，同时制定必要的网络划分、域控制和隔离策略；
- 5) CPS系统在各个层次间存在控制、监控、测量等设备和计算机服务间的通信，必须对层间或跨域通信引入可靠的互操作加密和认证机制；
- 6) 当CPS与IT系统融合时，需要考虑对现有IT系统安全解决方案在CPS系统中的应用进行扩展、裁剪、修改或再开发。

## 7.3 CPS安全保障总体建设思路

在总结美国NIST CPS参考架构和我国等级保护相关工作的基础上，结合CPS系统特点，把CPS安全保障建设划分为五个关键环节，即安全识别、安全防护、安全检测、安全响应和安全恢复。CPS安全保障针对CPS系统划分为四个方面：物理安全、基础安全、业务安全和安全管理，如图7-1所示，其中四个方面进一步细分为：互操作安全、协同安全、网络安全、主机安全、应用安全、数据安全、环境安全和物理安全。CPS安全研究与建设内容包括CPS系统面临的安全威胁分析、安全技术需求和安全保障实施，针对的对象包括硬件、软件、网络、平台安全和安全交互管理，伴随整体建设过程的是CPS安全保障标准化工作，同时还需要把上述建设



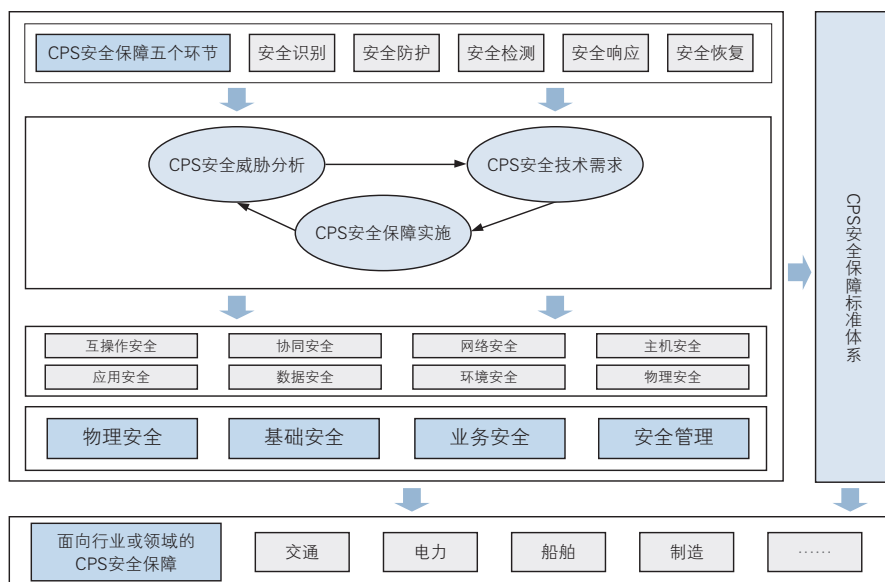


图7-1 CPS安全保障总体建设思路

内容映射到我国具体的行业或领域中。

## 7.4 CPS安全保障实施过程

### 7.4.1 安全识别

**资产识别。**信息物理安全资产识别与评估目的是为了明晰与信息物理安全相关的资产清单、资产关系和资产价值。

**风险识别。**确认来自外部网络的介质攻击、PLC程序病毒、无线网络入侵等威胁。

### 7.4.2 安全防护

#### 7.4.2.1 业务安全

**互操作安全。**应利用安全认证、访问控制、安全散列等技术，实现



CPS方法互用、数据互用中的身份鉴别、权限配置、数据完整性保护。

协同安全。应利用安全认证、访问控制、数字证书等技术，实现CPS业务协同流程中的身份鉴别、动态授权、身份融合、跨域授权。

#### 7.4.2.2 基础安全

网络安全。应利用拓扑安全检测、访问边界控制、协议验证、内容检测等措施，保护CPS网络资源的完整性、可用性等重要安全属性。

主机安全。应利用身份鉴别、访问控制、加密、入侵检测、行为审计等措施，保护主机对象的机密性、完整性、可用性等重要安全属性。

应用安全。应利用身份鉴别、访问控制、沙箱检测、策略验证等措施，解决应用权限冲突，保护应用对象的完整性、可用性，行为抗抵赖性等重要安全属性。

数据安全。应采取加密、泛化、加噪、备份等措施，保护数据对象的机密性、隐私性、可恢复等重要安全属性。

#### 7.4.2.3 物理安全

环境安全。应采取物理访问控制、防盗窃和防破坏、防雷击、防火、防水和防潮、温湿度控制和电力供应等环境防护措施，保护CPS运行环境安全。

物理安全。应采取故障检测技术、事件树分析、危险与可操作性分析等功能安全防护技术，并结合信息安全风险分析技术，防止因误操作、网络攻击等造成随机硬件失效和系统性功能失效，使得CPS保持设备受控状态，保护CPS物理安全。

#### 7.4.2.4 安全管理

安全管理。应对CPS资源对象设置相应的安全策略、对各类安全措施进行指导和管理，从而保护实体和虚拟资产的重要安全属性。

### 7.4.3 安全检测

能够对CPS系统中的平台、系统和软硬件进行检测，检测内容涵盖兼容性、安全性、功能性等方面。同时在检测的基础上还可以进行已知漏洞的扫描和未知漏洞的挖掘。

### 7.4.4 安全响应

CPS应急响应包括应急计划的策略和规程、应急计划培训、应急计划测试与演练、应急处理流程、事件监控措施、应急事件报告流程、应急支持资源、应急响应计划等。

### 7.4.5 安全恢复

CPS安全恢复机制需通过各层级或系统的数据收集与分析，及时更新优化防护措施，形成持续改进的防御闭环，确保相关层级系统数据一致性。恢复机制主要包括响应决策、备份恢复、分析评估等。

## 7.5 CPS安全保障实施案例

### 7.5.1 钢铁行业案例—共用控制器及控制系统安全

钢铁生产控制系统是典型的CPS。钢铁企业在信息管理层面大量引入IT技术，同时也包括各种IT网络安全技术，如防火墙、IDS、VPN、防病毒等常规网络安全技术，这些技术主要面向商用网络应用，应用也相对成熟。与此同时，在信息技术不断发展的推动下，生产管理理念和技术也在不断发展，控制系统发展到今天，已经进入了第四代，新一代控制系统呈现的一个突出特点就是开放性的提高。钢铁企业普遍开始采用基于ERP/SCM、MES和PCS三层架构的管控一体化信息模型思想，随着两化融合政

策的推进，越来越多的企业实施MES系统，使得管理实现了管控一体化。

随着钢铁企业管控一体化的实现，越来越多的控制网络系统通过信息网络连接到互联网上，潜在的威胁就越来越大。在这种背景下，对于工业控制网络进行的网络安全防护显得尤为重要。

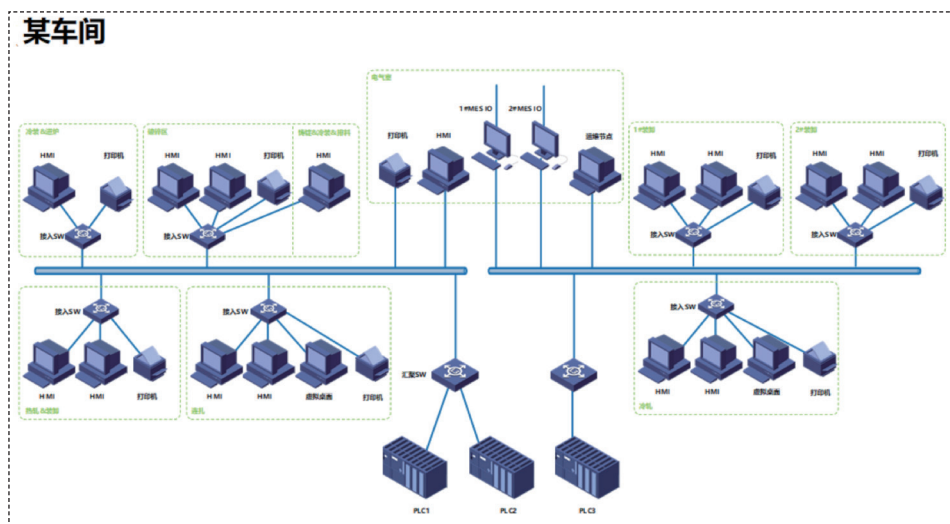


图7-2 共用控制器车间网络拓扑

如图7-2所示，钢铁企业某车间控制器为多套工段公用，电气室工程师站直接与L1接入交换连接，网络经由两台MES前置输出至L2.5网络，MES前置为双网卡不同网段设计。

在安全设计过程中着重考虑对控制过程的监测审计、对控制系统外部访问行为的管控以及对主机的管控。MES前置双网卡设计，可以视作存在一定程度的隔离效果，但该种方式存在被称为中间件即攻击跳板的作用，故视作不可信的隔离。

### 7.5.1.1 安全设计

设计过程基于可用性优先原则与适量性原则，在不影响控制系统独立运行的情况下，充分保障网络节点信息安全，如图7-3所示。

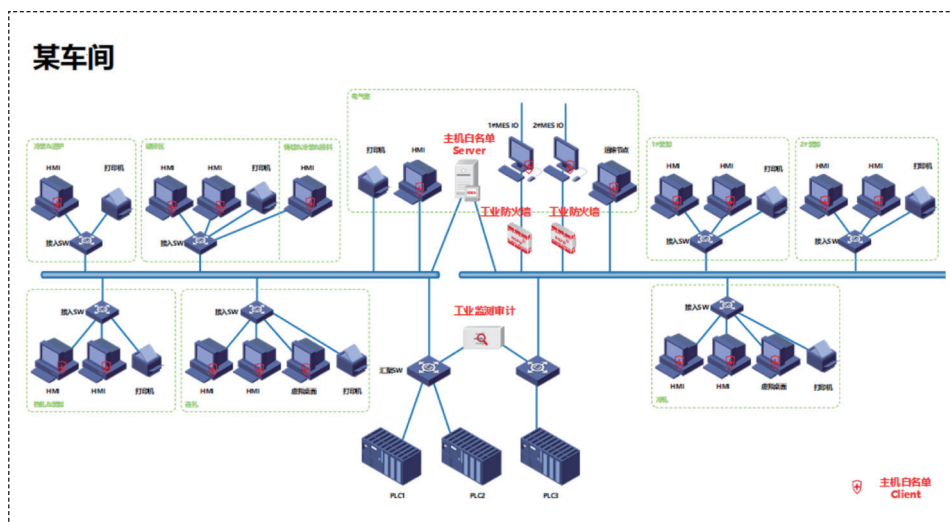


图7-3 共用控制器车间安全设计

### 7.5.1.2 访问控制

在MES前置的内侧或外侧部署工业防火墙，对可能存在的基于外部网络的访问行为进行细粒度管控。禁用对控制器的写操作指令，以此防范基于控制系统外部的未经授权访问威胁。

### 7.5.1.3 行为监测审计

在接入交换旁路部署工业行为监测审计系统，通过对访问控制器的流量进行细粒度监测，还原操作过程，对“谁”、“何时”、“通过何种手段”、“执行操作内容”、“操作结果”进行还原；在检测到非法操作内容或非法访问内容后（EX：冷轧HMI访问热轧寄存器）进行报警并做审计。同时基于自学习功能，对生产场景进行识别并构建生产模型（需要学习2~3个完整工艺流程），形成基于生产行为的网络白名单。

### 7.5.1.4 终端管控

考虑到经济型以及适用性，在电气室部署主机白名单服务端，并且在网络内所有PC节点部署主机白名单客户端；主机白名单以最小化设定



为原则，对主机中应用进行管控，针对目标应用必要进程及服务开放白名单，非限定进程及服务均禁止运行。该策略在保证生产持续进行条件下有效降低对工控计算资源的占用。

工控环境区别于IT环境，其应用多为工业特定应用，且调用进程执行方式在IT主机恶意代码检测工具下多会误判为恶意程序加以删除或隔离，从而影响生产正常进行。故基于白名单不仅保障工业应用的正常运行，同时可限定以感染恶意代码运行，有效保障了主机工作环境。

#### 7.5.1.5 脆弱性检测

由于网络不可达的现状，本着经济性的原则，脆弱性检测以服务方式进行。

### 7.5.2 电力CPS安全威胁分析

电力CPS网络攻击具有隐蔽性强、潜伏期长、攻击代价小破坏力大等特点，虽然无法直接破坏电力一次设备，但可以通过影响、削弱、篡改和破坏二次系统的正常功能，达到类似于物理攻击的效果，对电力CPS系统稳定、经济运行和社会安定产生严重影响。电力CPS涉及网络安全场景包括发电控制、输电操作、变电转换、配电自动化、高级量测体系、需求响应、用户交互等。

#### 7.5.2.1 发电侧攻击场景

发电机自动励磁装置和调速装置的控制模块与控制中心之间一般通过以太网进行通信。本地控制数据采集来源于本地，可攻击范围较小。但是本地采集的数据通过网络跨网传递给如监管机构等第三方、发电侧终端感染恶意软件以及跨网侵入本地控制网并篡改数字控制逻辑或设置的攻击，均给发电侧带来较大安全风险。

#### 7.5.2.2 输电侧攻击场景

电力系统输电侧的操作主要利用SCADA/EMS和继电保护、稳定控制

设备等对输电网进行监视、评估和控制。广域量测系统WAMS为电力系统保护、控制或监视提供同步采集和带有时间戳的电压、电流全系统参考值。整个系统的采样时钟需要对同一个时间参考保持同步是系统可靠运行的关键。常见的攻击有DoS攻击、失去同步攻击(基于时间的攻击)、错误数据注入攻击等均会导致量测失步、数据错误从而影响电力系统实时感知，继而可能导致控制决策失误。

### 7.5.2.3 配用电侧攻击场景

配用电可能出现网络攻击的场景包括高级量测AMI系统、配电自动化系统等。恶意网络攻击将破坏AMI系统智能表计数据保密性以及远程开关控制命令的整体性与可用性，引起用户侧停电，甚至舆情风险，影响经济社会稳定运行。恶意攻击配电自动化系统监控馈线上的DTU、FTU等设备，可能导致远程开关开合、电容器投退、紧急状况响应等自动化操，另外通过伪造配电自动化终端可以接入配电网络并对配电主站进行攻击，导致配电自动化系统的主站和终端瘫痪。



## 八、信息物理系统发展建议

CPS作为支撑信息化和工业化深度融合的技术体系，能够对传统制造业进行全方位、全角度、全链条的改造。目前，我国制造业正由高速增长阶段向高质量发展阶段转变，CPS的发展进入全面实施阶段，诸多问题仍亟待突破，下面结合工业互联网、数字化转型的战略部署、标准体系、平台建设、行业推广、工程教育等方面CPS发展需求提出建议。

协调发展。一是重点明确CPS的定位与联系，建立各有侧重、相互配合的协同发展机制。二是把握系统性推进方法，以技术研究为起点、以验证和测试为手段、用标准固化经验，先试点示范再应用推广，实现CPS与工业互联网、制造业数字化转型的共融共促发展。

标准引领。一是依托工信部CPS发展论坛聚集产学研用各方资源，充分掌握国内外CPS发展现状，分析发展趋势，持续调整完善现有CPS综合标准化体系，开展CPS参考架构、术语等关键标准的研制工作。二是推动标准的落实与推广，梳理CPS的核心技术和产业链条，提炼CPS的关键共性组成要素，结合CPS参考架构标准，整合测试床、测试软件、测试工具集合测试资源库等，开展技术验证与测试评估服务。三是聚焦数字孪生，推动CPS与数字孪生在技术、安全、应用等重点标准方面的相互配合、协同发展，引导数字孪生技术和应用的提升与进步。

平台支撑。一是依托工业转型升级项目成果和共性技术测试验证平台，建设行业测试验证平台，形成各类平台建设指南。二是依托地方经信系统、龙头企业，针对代表行业和典型应用场景建设体验中心。三是依托高校和龙头企业，建设开源社区以及有区域产业特点、孵化作用的制造业创新中心。

行业推广。一是在制造领域基于CPS信息空间认知与决策赋予实体空



间资源优化的能力，构建平台对接用户需求，发展按需、众包、众创等应用推广模式，促进形成技术产品应用多方参与、相互促进、快速迭代的创新机制，带动新模式、新业态的发展，催生新的经济增长点。二是推进CPS制造领域以外的应用实践，结合物联网技术，开展电力物联网、车联网、城市数字孪生等方面的研究，基于CPS在制造领域的成熟应用经验，分析处理更为复杂的实际问题，拓展智能电网、智慧城市以及智能运输的业务边界。

人才培养。一是大力开展新工科建设，高校开发和增设CPS导论课程，设定相应CPS工程师教育计划。升级传统工科课程，融入CPS相关内容，鼓励高校教师关注CPS的前沿性和交叉性研究，设立人工智能、大数据和智能制造等主题的新课程计划，建设多学科交融多、主体参与、多涉及面的新工科。二是重视CPS实践教育，通过产业介入、教育资源筹措共享等机制，成立CPS工程师的实训基地，提供面向培养CPS工程师的实践性学习活动、项目选题和实验环境。



## 参 考 文 献

- [1] 《信息物理系统白皮书 (2017)》.信息物理系统发展论坛,2017.3
- [2] Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication[J]. White paper, 2014, 1: 1-7.
- [3] Edward Ashford Lee. 信息物理融合系统 (CPS) 设计、建模与仿真基于Ptolemy II平台: System Design Modeling, and Simulation Using Ptolemy II [M]. 2017.
- [4] Lu Y, Liu C, Kevin I, et al. Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 61: 101837.
- [5] Usage View of Asset Administration. Shell.Industrie 4.0. 2019.
- [6] 5G Non-Public Networks for Industrial Scenarios(white paper). 5G Alliance for Connected Industries and Automation. 2019. 3.
- [7] Cyber-Physical Systems and Internet of Things. NIST Special Publication 1900-202. 2019. 3.
- [8] Internet of Things / Cyber-physical Systems Opportunity Report.EU-US ICT collaboration. 2018. 5.
- [9] Bertrand Copigneaux, Sebastian Engell, Radoslav Paulen, et al. Proposal of a European Research and Innovation Agenda on Cyber-physical Systems of Systems 2016-2025, The CPSoS Working Groups, 2016.10
- [10] Zhou Ji, Zhou Yanhong, Wang Baicun, and Zang Jiyuan. Human-Cyber-Physical Systems(HCPSs) in the Context of New-Generation Intelligent Manufacturing. Engineering(2019). DOI: doi.org/10.1016/j.eng.2019.07.015.



- [11] Tao F, Qi Q. Make more digital twins[J]. 2019.
- [12] Tao F, Zhang H, Liu A, et al. Digital twin in industry: State-of-the-art[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 15(4): 2405-2415.
- [13] 中国电子技术标准化研究院.信息物理系统 (CPS) 典型应用案例集 [M]. 2019
- [14] 胡虎、赵敏、宁振波等.三体智能革命[M]. 北京:机械工业出版社, 2016
- [15] 李杰,邱伯华等.工业大数据:工业4.0时代的工业转型与价值创造[M]. 北京:机械工业出版社, 2019
- [16] 李杰, 邱伯华, 刘宗长, 魏慕恒. CPS: 新一代工业智能[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2017
- [17] 安筱鹏.重构:数字化转型的逻辑[M]. 北京:电子工业出版社, 2019
- [18] 智能制造术语解读[M]. 北京:电子工业出版社, 2018
- [19] Cheng J, Zhang H, Tao F, et al. DT-II: Digital twin enhanced Industrial Internet reference framework towards smart manufacturing [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 62: 101881.
- [20] Kong X, Chang J, Niu M, et al. Research on real time feature extraction method for complex manufacturing big data [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 99(5-8): 1101-1108.
- [21] 孔宪光. 数字孪生将成数字化企业标配[EB/OL].中国电子报改革开放40周年两化融合特刊2018.
- [22] 邢黎闻. 孙优贤院士论工业信息物理融合系统[J].信息化建设. 2018(01).
- [23] 邱伯华,蒋云鹏,魏慕恒,何晓,朱武.知识经济与CPS在船舶工业中的应用实践[J].信息技术与标准化. 2016(11).
- [24] N. Jazdi. Cyber Physical Systems in the Context of Industry 4.0.

- Automation, Quality and Testing, Robotics . 2014.
- [25] J. Lee, B. Bagheri, H.A. Kao. A cyber–physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems, 2015.
- [26] T.H.J. Uhlemann, C. Lehmann, R. Steinhilper The digital twin: realizing the cyber–physical production system for Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 61 2017.
- [27] F. Tao, Q. Qi, L. Wang, A.Y.C. Nee Digital twins and cyber–physical systems toward smart manufacturing and Industry 4.0: correlation and comparison *Engineering*. Forthcoming. 2019.
- [28] 李洪阳,魏慕恒,黄洁,邱伯华,赵晔,骆文城,何晓,何潇. 信息物理系统技术综述[J]. *自动化学报*. 2019(01).
- [29] 艾纳·安德尔. 信息物理系统和工业4.0[J]. *智能制造*. 2015(09).



## 致 谢

本《指南》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，在此特别感谢宁振波、赵敏、郭朝晖、邱伯华、郎燕、王湘念、朱毅明、丁德宇、李晓理、胡权等专家对《指南》编写提供的宝贵修改意见。同时，感谢中国船舶工业系统工程研究院、中航工业北京航空制造工程研究所、上海优也信息科技有限公司、北京工业大学、工业4.0研究院等企业及科研单位为《指南》编写做出的宝贵贡献。



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)

建设指南联络人：王程安

联系方式：010-64102806

邮 箱：wangca@cesi.cn