

工业智能创新发展报告

(2026 年)

中国信息通信研究院信息化与工业化融合研究所

2026年3月

版权声明

本报告版权属于中国信息通信研究院，并受法律保护。转载、摘编或利用其它方式使用本报告文字或者观点的，应注明“来源：中国信息通信研究院”。违反上述声明者，本院将追究其相关法律责任。

前 言

当前，制造业正处于加速转型升级、迈向高质量发展的关键阶段，这既是战略发展要求，也是未来发展的必然趋势。新一轮人工智能技术创新演进，驱动制造业从“判别分析智能”向“自主决策智能”跃升，为制造业转型升级带来深刻的变革动力与重大历史机遇。

人工智能的深度融合发展勾勒出未来制造图景，呈现三个核心方向：**一是主动高效与持续增值的创新**，快速识别市场需求、创造新的产品方案，无缝连接研发与生产，实现创新效率、成本风险与价值链条的极限提升。**二是高度自主化和敏捷柔性的生产**，广泛形成几乎无需人工干预的黑灯自适应工厂，实现“换产不换线、改规格不停机、接单即投产”的敏捷制造。**三是强韧性、开放化的资源组织**，在面对市场波动、环境变化等极端情况下仍能保持连续、高效的交付运行。

未来图景对制造系统提出了全面感知理解、精准建模分析、深度智能决策和自主协同执行的新要求，驱动其面临一场体系“进化”：未来 3-5 年，有望构建形成“智能模型+数字孪生+智能体”的工业智能化系统。其中，智能模型具备强大的知识管理与综合推理能力，用于复杂决策支持与方案生成；数字孪生将提供可解释、高准确的分析能力，解决工业场景中低容错、高可靠问题；智能体是具备感知、决策、执行一体化能力的软硬融合系统，实现复杂决策的自主化执行。三者深度协同，共同构建需求到执行的智能闭环。

新的能力要求与体系带动呈现出技术应用演进的新趋势。技术创

新方面，**一是**智能模型实现多类型工业信息更广泛的理解与领域知识更深程度的认知；**二是**孪生与智能技术的融合实现更高效的建模、更精准的描述和更动态的进化；**三是**工业智能体向更自主与更协同的规划执行演进。模式演进方面，人工智能逐步与研发设计全流程、生产制造全过程以及供应链全环节融合，驱动形成全生命周期一体化优化、零缺陷精益制造、可重构柔性生产等未来制造模式。

我们希望本报告能够为政府决策部门和行业企业提供有益参考，助力各方精准把握工业智能发展方向和机遇，共同应对未来图景实现过程中可能面临的多重挑战，系统推进制造业智能化变革，共同为制造强国建设作出更大贡献。

目 录

一、 愿景篇：智能主导的制造新体系.....	1
（一）新机遇：制造业转型升级与人工智能颠覆性变革迎来历史交汇，带来全新发展机遇.....	1
（二）新图景：形成主动创新、柔性自主、韧性开放的未来工业图景.....	3
（三）新要求：未来图景对制造系统提出全面理解、精准映射、深度决策和自主规划的新能力要求.....	4
（四）新体系：智能模型、数字孪生与智能体构筑未来系统架构.....	6
二、 技术篇：工业机理与数据智能深度融合.....	10
（一）智能模型实现多类型工业信息更广泛的理解与领域知识更深程度的认知.....	13
（二）孪生与智能技术的融合实现更高效的建模、更精准的描述和更动态的进化.....	15
（三）工业智能体向更自主与更协同的规划执行演进.....	18
三、 应用篇：制造模式演进与重塑.....	20
（一）研发设计：从效率优先走向高确定性自主性的流程变革.....	20
（二）生产制造：走向效率与柔性多目标平衡兼顾，拓展制造边界.....	24
（三）供应链：走向开放韧性的供应网络.....	29
四、 展望篇：迈向未来图景的挑战与建议.....	34
（一）挑战：未来工业图景的实现是一个需要长期探索和坚持的过程.....	34
（二）建议：做好未来准备，迎接智能化的“必答题”.....	35

图 目 录

图 1 工业人工智能体系架构.....	7
图 2 针对石化领域某具体问题的工业智能系统运行示例.....	10
图 3 工业智能技术体系与核心趋势.....	12
图 4 全生命周期一体化研发流程图.....	21
图 5 空客代理模型工厂端到端流程.....	24
图 6 生产制造流程与变革趋势.....	25
图 7 全面质量管理体系.....	27
图 8 智能岛柔性生产方式.....	29
图 9 未来供应链体系图.....	30
图 10 供应链智能控制塔.....	33

一、愿景篇：智能主导的制造新体系

（一）新机遇：制造业转型升级与人工智能颠覆性变革迎来历史交汇，带来全新发展机遇

1.制造业正处于产业全面升级的关键时期

从工业化起步、初期、中期、后期到全面实现工业化的全过程视角看，当前工业尤其是我国制造业，正逐步告别粗放式增长、单点式改造的传统阶段，步入产业全面升级的新纪元。一是需求快速变化驱动的生产制造模式深度重塑。个性化多样化定制需求爆发式增长，迫使企业将效率提升的重心从“局部工序提速”转向以敏捷和柔性为核心的“全要素生产率提升”，实现快速需求响应与资源动态配置。同时要求企业加速新产品、新材料、新工艺的迭代速度，构筑长期竞争优势。二是传统产业焕新与新兴产业壮大的结构化转型。钢铁、化工、纺织、轻工等传统支柱产业有望通过新技术新手段升级生产工艺、优化产品结构，实现“老树发新芽”，从低端同质化竞争转向高端制造，附加值与竞争力大幅提升；航空航天、储能装备、人形机器人等新兴领域快速发展，成为拉动制造业增长的新引擎。三是制造强国战略目标冲刺，我国步入关键的攻坚阶段。我国明确提出到 2035 年要基本实现新型工业化，制造强国建设实现“第二步走”战略目标，达到世界制造强国阵营中等水平，必须加快推动产业全面转型升级，通过智能化生产经营模式提质增效，确保实体经济的稳固。大力推进产业自主创新能力提升，在提升产业链供应链韧性与安全水平的同时，持续向

产业链价值链高端环节攀升，实现从“制造大国”向“工业强国”的本质跨越。

2.新一轮 AI 创新演进为产业升级带来强劲动能

ChatGPT 诞生以来，人工智能发展进入爆发期，GPT-4o、V-JEPA 2、OpenClaw 等多模态模型、智能体和具身智能前沿领域快速迭代，AI 技术从“序列预测”走向世界模型、从智能对话到智能体协同、从虚拟智能走向物理 AI，并展现巨大的社会经济变革潜力，驱动制造业智能化从以判别分析为主的“自动化智能”向具备自主决策与生成能力的“自主化智能”演进，这一过程中实现了三个关键转变。一是从单一场景的感知级应用走向更复杂的认知级决策。传统的智能模型通常局限于视觉检测和参数预测等具体、规则明确的单一任务，生成式 AI 和大模型技术不仅具备了对复杂工业信息的深刻理解能力，还能够进行逻辑推理与知识生成。二是从静态分析预测走向动态自主优化。传统智能分析多依赖于历史数据进行离线或静态预测，在面对极端异常工况或快速变化的市场环境时表现出明显的滞后性。借助强化学习和在线学习等技术，工业智能系统能够实时适应环境和工况的变化，持续优化决策并在运行中实时进化。三是从局部工具应用转向系统级跨流程协同。以往智能技术工具通常作为“外挂”叠加至现有生产体系，并未改变既有运行模式，智能体等技术使 AI 演变为驱动整个工业系统运行的技术架构，实时感知厂内外各流程的运行状态，主动调整生产调度、库存管理等各环节。未来的智能工厂可能由一个中央智能系

统统筹管理，通过无缝协作和自主决策，推动工业系统的智能化升级，实现全流程协同优化。

（二）新图景：形成主动创新、柔性自主、韧性开放的 未来工业图景

1.产品全生命周期：主动高效与持续增值的创新

一是自主挖掘市场潜在需求，极快速度抢占市场。快速识别潜在的创新方向与市场需求，匹配技术可行性，高效完成新产品新材料的创新设计、多场景仿真验证与结构性能优化，全程无需人工主导反复迭代，企业能在极短的时间内推出更加符合市场需求、具有竞争力的产品。二是研发成果高效落地，创新成本与风险实现最小化。打通研发与后续生产、运维等各环节，提前规避生产端工艺瓶颈与使用端性能缺陷，实现对产品研发的质量、成本和风险的精确控制。三是产品内涵和功能快速迭代，延长价值链条。产品在运行中实时学习，智能水平、可靠性与适配能力越来越强大。产品的运行数据、健康预测模型、运维经验与优化逻辑等可随产品一同交付，形成“硬件、软件、模型、知识”的一体化交付方式，提升产品附加价值。

2.生产制造全过程：高度自主化和敏捷柔性的生产

一是形成几乎无需人工干预的“黑灯”自适应生产。制造系统具备强大的预测性与实时纠偏能力，能够在线监测质量波动、设备非计划停机风险并自动补偿，人从重复性劳动中解放，转变为拥有 AI 加持的“增强型员工”、生产意图的定义者与最终审核者，机器大幅参与各

类决策制定与优化，装备产线等在物理意义上具备“自我修复”和“持续进化”能力，将生产效率、加工精度和良率推向理论极限。二是实现极致敏捷和柔性的生产。系统实时预测市场需求、统筹分析生产管理数据，自主完成生产计划优化、作业指令快速重排、工艺与装备自动组织与质量管理优化等，快速适配多品类、定制化订单，无需人工调整产线即可自动切换生产流程，平衡生产效率、产品质量与订单灵活性。

3.供应组织全环节：强韧性开放化的资源组织

一是实现供应组织全环节协同。通过天气、物流运力及消费者行为等多维度数据实现精准需求预判，联动上下游供应商、物流方与仓储节点完成智能备货、运力调度与库存优化，实现物料供需精准匹配，破解传统供应链协同低效、抗风险能力弱的核心问题。二是风险异常的提前预警与自愈。面对复杂多变的市场环境与突发的供应链风险，系统可快速识别并自动生成备选方案，实现风险提前预警、事件快速响应与自主化解，提升制造体系抵御外部冲击、适应环境变化的能力。

（三）新要求：未来图景对制造系统提出全面理解、精准映射、深度决策和自主规划的新能力要求

1.全面感知理解

不同于传统基于传感器或单一维度有限数据的采集分析，制造系统需要在实时获取设备运行参数、生产工艺数据、物料流转状态、环境工况、外部订单需求等各类信息的基础上，串联并提炼信息背后的

生产意图、工艺逻辑关联和规律等，为主动创新提供市场需求的全面获取能力、为敏捷柔性生产提供实时工况与订单变动依据、为供应资源韧性开放的组织提供信息透明化支持。

2. 精准建模分析

区别于消费领域 AI，工业 AI 的最大特点是“必须对物理世界负责”，即模型的结果最终将落到工艺参数动态调整、机械臂轨迹优化等真实生产上，也就意味着与完全基于数据驱动的“黑箱”建模方式不同，需要立足工业机理、工艺规则、设备特性与专家经验等，构建数据驱动与机理深度融合的混合模型，通过精准建模确保预测结果与决策指令具备物理世界的一致性和高可靠性，降低各类不确定性与风险。

3. 深度智能决策

与传统基于规则、基础统计模型的被动决策模式不同，基于强化学习及大模型驱动的深度智能决策助力三个方面的跨越式提升。一是实现多目标全局决策，平衡生产效率、能耗成本、产品质量、设备运维等多目标多约束。二是跨领域复杂决策，融合多个领域的工业数据和知识，生成决策建议并给出人类可理解的决策理由。三是自适应的决策，决策系统可以在与环境的交互中不断迭代策略，实现对生产环境变化等不确定性的应对能力。

4. 自主协同执行

区别于依赖固定规则和流程的执行方式，同时打破单设备、单产

线、单环节的独立运行壁垒，面向统一的任务目标，将深度智能决策输出的指令，无缝对接制造系统，完成自主调度、自主纠偏、自主应急处置等，构建“感知 - 建模 - 决策 - 执行 - 反馈”的完整闭环。满足主动高效的创新需求、敏捷柔性生产的动态调度需求以及自动优化自愈的供应资源组织需求。

（四）新体系：智能模型、数字孪生与智能体构筑未来系统架构

实现全面感知、精准建模、深度决策与自主执行的共性能力，本质是对制造系统感知、认知、计算、决策、行动等全链条提出了升级要求，这种升级无法依靠传统架构或单一要素实现，需要系统具备能理解海量多源异构工业数据、具备认知决策能力的“大脑”，还需具备一个能精准刻画工业机理，提供可解释、高准确、高可靠分析能力的“高保真镜像”，以及一套能将任务意图转化为复杂动作并执行的“执行中枢”。因此，智能模型、数字孪生与智能体共同构成了未来 AI 驱动制造系统的核心要素。

1. 架构形态：三个核心引擎、一个基础底座实现综合赋能



来源：中国信息通信研究院

图 1 工业人工智能体系架构

一是智能模型，成为制造系统处理复杂信息的逻辑中枢。包括基础模型与专用模型两类核心模型，基础模型将工业语料知识与多模态数据深度融入通用模型，使其具备特定领域的知识管理与综合推理能力，面向复杂决策环节提供智能化方案生成与辅助决策；专用模型针对缺陷识别、参数优化等特定工业任务，满足高精度、强实时性的细分场景需求。二是数字孪生，构成物理世界的高精度数字化镜像，提供“确定性验证”。结合几何对象、物理机理及过程仿真等能力，实现对设备、产线甚至全企业的实时映射与精准建模，基于虚拟空间开展超前预测与分析，在解决工业场景低容错、零容错需求中发挥关键作

用。三是工业智能体，驱动形成需求到执行的自主闭环。通常包含 workflow 编排智能体和专业智能体，编排智能体作为任务组织与调度的中枢，将问题拆解为可执行的任务序列，进一步基于智能模型与数字孪生的分析、预测、验证等能力完成任务，驱动各专业智能体集群按需组合与联动执行，并通过运营管理体系提供监控评估与全生命周期管理能力。四是数字化平台，为分析决策与应用提供统一数据与语义底座。面向底层工业物理系统实现设备接入与数据汇聚处理，通过集成高性能计算与高可靠存储网络，高效承载模型训练、仿真及各类应用的快速部署。最重要的是通过数据治理和语义关联为智能模型、数字孪生提供高质量、结构化且语义一致的数据基础。

总体看，智能模型与数字孪生双系统是工业智能系统的核心。二者并非两个并行系统的简单耦合，而是持续融合、相互重构的过程。一方面，数字孪生为智能模型提供具备机理约束的训练资源和验证环境。孪生模型积累沉淀的机理知识、物理规律和工业规则等，为智能模型的训练与推理划定“物理红线”，使学习过程具备工程约束与可验证性；同时利用高保真的仿真环境进行方案预演，为模型迭代提供低成本、高效率的虚拟验证空间。另一方面，智能模型驱动数字孪生的动态校准与自主优化。数字孪生将大量叠加生成式 AI、强化学习等智能技术，提升孪生模型构建的精度与效率，并在运行反馈中推动孪生模型的持续迭代更新。随着生产运行数据的不断回流和知识经验的持续沉淀，系统的智能化水平将产生“滚雪球”效应，形成“越用越精

准、越用越可靠”的自进化闭环。

2.运行机理：数据机理双驱动下，需求到执行的自主闭环

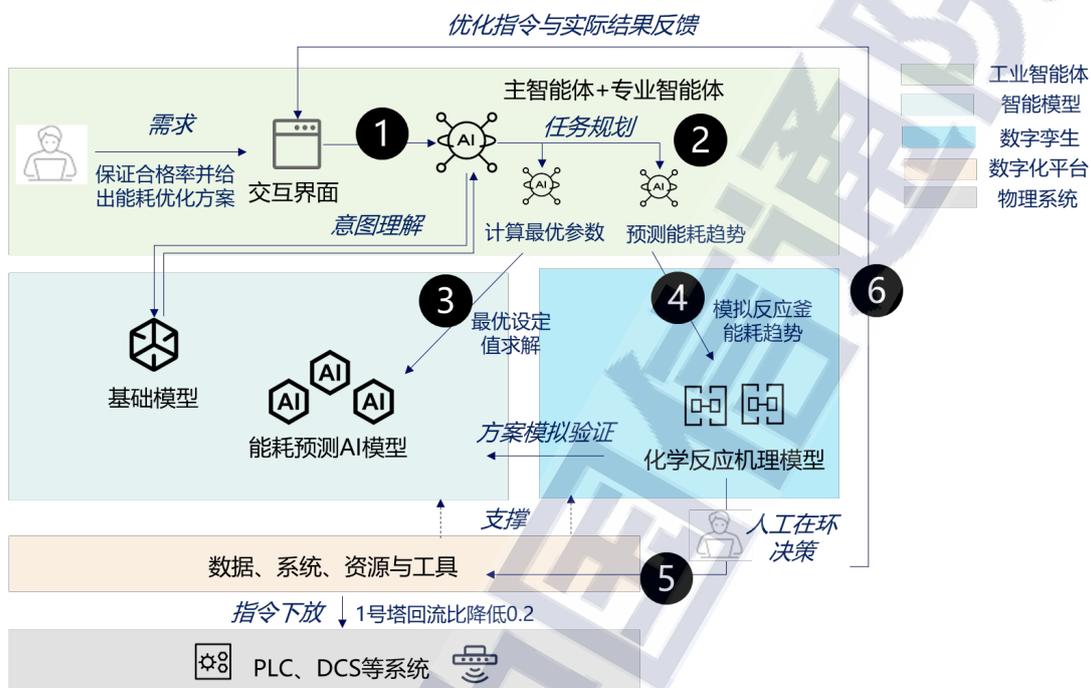
首先，智能体感知到环境变化或接收到任务，编排智能体将精准识别复杂任务意图，并将其转化为可执行的计划与流程，分配给相应的专业智能体。专业智能体进行各类模型与工具调度，输出或完成可执行的操作。在这个过程中，工业智能模型提供两类核心能力，基础模型负责复杂意图理解、知识检索、关联推理和决策生成等智能体分配的具体工作；场景化专用模型承担预测、检测、优化等具体任务。数字孪生在虚拟空间对机理规律进行实时解构与仿真推演，驱动智能模型生成可靠的决策逻辑。最终，将经过验证的策略下发到业务系统或控制系统执行，并通过实时数据回流持续评估效果、触发再学习与再优化，形成闭环。

【工业智能系统运行：以石化领域某具体问题为例】

假设调度员提出“在保证产品合格率前提下，给出未来 4 小时能耗最低运行方案”的需求，工业智能系统将按以下步骤运行：

- 1.意图理解。智能体借助智能模型对自然语言进行深度语义解析，准确识别生产意图。
- 2.任务规划。基于意图理解结果，主智能体将需求拆解为两项可执行的任务规划：预测能耗趋势和计算最优控制参数，并分发给专业智能体。
- 3.候选控制策略生成。专业智能体调用能耗预测智能模型，对关键控制参数进行搜索，生成多组候选运行策略。

4.能耗趋势预测。专业智能体调用数字孪生模型，孪生模型实时同步底层数字化平台的数据，针对候选运行策略，依托化学反应动力学模型进行模拟反应与约束校验，验证原料波动下产品指标能否达标、装置是否触碰安全边界等。



来源：中国信息通信研究院

图 2 针对石化领域某具体问题的工业智能系统运行示例

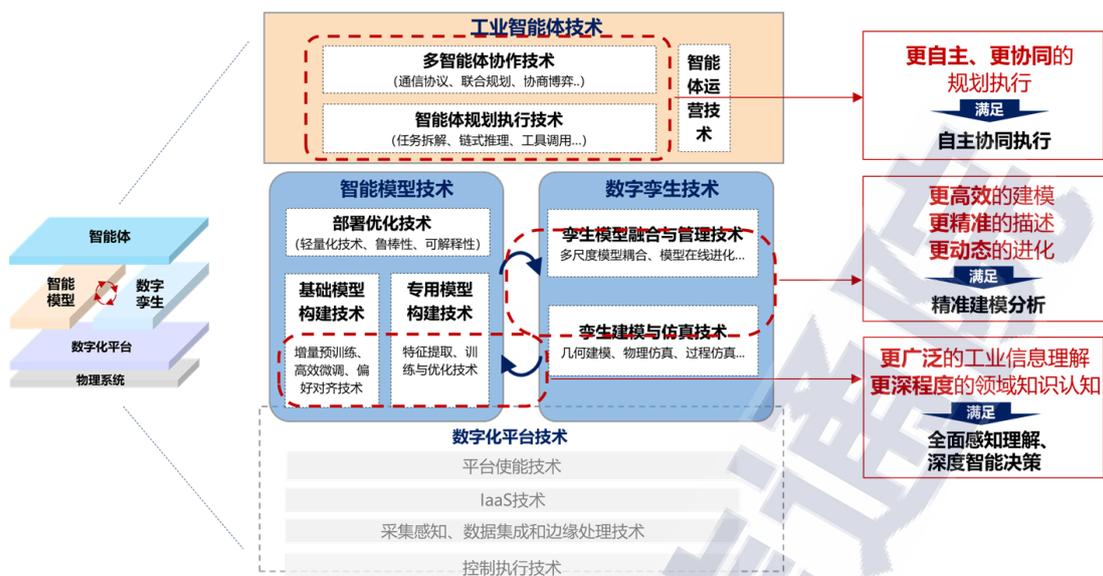
5.方案输出与人工在环决策。在多轮评估基础上，形成经验证的“能耗最低且质量可控”推荐方案，由工程师进行必要的确认和审批后，通过应用层界面推送给操作员，并通过平台能力将指令下发至 PLC、DCS 等控制系统执行。

6.执行反馈与再优化。持续采集执行后的过程与质量反馈，触发策略再优化，形成“推荐、验证、执行、反馈、再优化”的闭环流程。

二、技术篇：工业机理与数据智能深度融合

工业智能系统映射到技术领域，形成由数字化平台技术、智能模型技术、数字孪生技术及智能体技术构成的融合体系，共同支撑系统

全面感知理解、精准建模分析、深度智能决策和自主协同执行。**数字化平台技术**主要涵盖数据采集、数据标注、湖仓一体与元数据治理、边缘计算与云边协同、虚拟化与容器化、向量检索与安全治理等一系列关键基础技术，为模型训练、推理与仿真计算提供统一底座。**智能模型技术**主要涉及构建专用模型的各类机器学习算法和特征工程等技术，构建基础模型的模型增量预训练、微调、多模态深度学习、检索增强生成等技术，以及实现模型部署优化的蒸馏与轻量化等技术，重点提升智能模型在复杂认知、知识理解、内容生成、任务推理和工业适配等方面的能力。**数字孪生技术**主要涉及高保真几何建模、对象关系建模、多物理场耦合仿真、实时同步渲染及全生命周期管理等关键技术，通过构建高保真的数字孪生体实现对物理世界对象的精准、全面描述。**智能体技术**主要包括单智能体的任务理解、知识检索、规划执行、工具调用，多智能体的通信互联、协同与互操作，以及智能体运营技术，支撑智能体在复杂工业场景下实现自主感知、自主决策、协同控制与闭环执行。



来源：中国信息通信研究院

图 3 工业智能技术体系与核心趋势

结合工业智能系统核心技术体系与四大能力新要求，形成三个核心技术趋势。一是智能模型实现多类型工业信息更广泛的理解与领域知识更深程度的认知，满足全面感知理解和深度智能决策的能力要求。深度嵌入工业知识的多模态大模型打通文本、图纸图像、3D 几何、时序信号等多源异构数据的统一理解与关联分析，通过持续增强在特定工业领域知识等“粗约束”的认知能力，使模型实现对工业机理、业务规则与运行约束更全面的认知和更精准的决策，已成为当前产业关注的焦点。二是孪生与智能技术的融合实现更高效的建模、更精准的描述和更动态的进化，满足精准建模分析的能力要求。通过孪生能力的组件化解耦和基于 AI 自主建模能力的不断强化，建模方式已从固化流程、人工建模逐渐走向灵活重构、自动生成，数字孪生的建模效率和精度也大幅提升。同时，通过数据的不断汇入与模型的在线自进

化，将实现“模型越用越准、决策越用越稳”的持续优化效果。三是工业智能体向更自主与更协同的规划执行演进、满足自主协同执行的能力要求。工业智能体的感知理解、任务规划、工具调用和闭环执行能力持续提升，不断突破传统工业软件以固定功能和预设流程为主的运行模式。通过多智能体的协同组织、动态分工与复杂任务处置，将进一步提升复杂工业场景下的协同响应与自主执行水平，实现从单点智能应用向全流程、全局优化执行的跃升。此外，具身智能与工业智能体的结合，实现了感知、决策到物理世界执行的闭环，使自主运行能力能够从数字空间延伸到现场作业环节，支撑生产组织方式和业务流程向全自主、高柔性方向变革。

（一）智能模型实现多类型工业信息更广泛的理解与领域知识更深程度的认知

1. 通过工业多源异构数据的全方位理解，实现对工业环境与任务的全面决策

智能模型持续深化对 CAX 几何数据、传感器时序信号、图像数据及工艺规范文档等多源异构工业数据的整合分析能力，使模型能更好地理解复杂的生产环境与任务需求，实现更全面的决策支撑。例如，西门子基于语义映射与特征融合对 3D CAD 模型、2D 工程图纸、传感器时间序列数据、技术规范手册及 PLC 代码等工业数据进行了统一的整合处理，打造工业智能模型 IFM，帮助工程师快速理解复杂流程并做出专业决策：针对辅助 CAM 编程，IFM 能够即时读取几何形

状、识别特征，并立即提供正确的切削策略；针对制造计划生成，IFM 能够将工程物料清单快速转换为制造物料清单或工艺流程清单；针对工程技术支持，IFM 彻底改变了工业经验的积累传承模式，通过将数十年积累的 BOM 历史、工艺卡片、维修记录转化为可搜索和推理的向量数据库，使工程师通过自然语言对话即可轻松获取“专家级建议”。

2.通过工业领域知识的深度嵌入，提升决策可用性、可靠性和可解释性

以基础大语言模型为代表的通用智能模型往往缺乏对工业特有知识的理解，需要针对不同领域进行定制化的知识嵌入、训练与优化，由于数据量和应用场景的不同，形成了三条差异化的知识嵌入路径：**一是基于海量行业知识的深度训练，让模型深度掌握行业特有规律与逻辑。**针对石化、电力、集成电路设计等存在海量（TB 甚至 PB 级）通用模型未接触过的工程知识的领域，在通用模型底座上进行自监督训练，虽然计算资源需求极大，但可使模型深度适应特定领域。例如，英伟达 Cosmos 基础模型利用真实世界采集的 3D 数据与高保真合成数据进行增量预训练，从而深刻理解了物理世界的运作逻辑，实现对复杂物理环境的全面模拟与未来状态的精准预测，支撑机器人和自动驾驶汽车的感知与执行策略训练、场景规划与验证。**二是基于少量现场数据的快速适配，使模型准确理解作业场景与操作指令。**在现场标注数据有限（如万条工业高质量问答对）、迭代周期紧、算力受限情况下，针对特定任务进行专项训练。例如，谷歌依托“大模型底座+机

机器人数据微调”的技术路径构建具身智能机器人领域基础模型，能够精准解析机器人视觉场景语义、理解自然语言指令。三是贴合实操规范与专家经验的校准，使模型的输出符合使用者工作习惯和规范要求，将特定任务的“问题 - 好答案 - 坏答案”等转化为训练样本，持续校准工业基础模型输出，使其符合工业规范，适用于较高合规要求的任务场景。例如，针对大模型赋能计划排程，航天九院正探索利用此方法将企业产能、交期等实际约束补充至通用模型；针对机床故障检测及维护建议生成，某高校提出视觉大模型，将资深工程师的诊断逻辑与处置经验深度对齐至模型，确保生成的处置建议高度符合实际安全规程与操作逻辑。

（二）孪生与智能技术的融合实现更高效的建模、更精准的描述和更动态的进化

1. 孪生能力解耦与组件化，提高模型构建效率和灵活性

随着数字孪生架构的迭代，数字孪生所需的几何建模引擎、多物理场求解器、离散事件与过程仿真引擎等强机理核心功能，将逐步从工业软件中解耦，在统一平台上重构为标准化的微服务组件，数字孪生得以摆脱传统模型构建受限于 CAD/CAE 等单体工业软件固化流程与功能的束缚，实现与智能模型和智能体的便捷交互，支持跨系统、跨场景的灵活编排调用。在这一模式下，企业不必再单独维护每个产品线、每套软件，而是围绕平台沉淀一套可组合可扩展的孪生建模能力池，上层孪生模型、智能体可以按需调用，灵活构建从单设备产品

到整个工厂的数字孪生应用。例如，在芯片设计领域，楷登电子提出“加速计算平台+基于原理的仿真优化+AI 智能体”三层架构，上层 AI 可在工具族内自动调用布局布线、CFD、仿真等能力。英伟达以 Omniverse 为底座，将 PhysX 物理仿真、RTX 渲染、传感器模拟等能力封装为平台组件，结合上层的 Isaac Sim、Isaac Lab 等应用实现智能机器人从仿真到训练再到部署的一体化开发与验证。

2. 孪生建模方式智能化，降低构建门槛、提升机理描述的精准性

孪生建模方式从“人工建模”走向“工程师意图驱动的自动化建模”。工程师围绕功能需求、边界约束和评价指标等界定问题空间，由基础模型自动生成几何方案、仿真设置与求解参数或离散事件模型结构与调度规则等，并完成初步校核与实验设计，工程师在此基础上进行筛选、修正与决策，显著降低建模与仿真专业门槛。例如，奥特克中的 AI 引擎可根据工程师需求和约束，自动生成大量可制造的几何方案，并给出性能评估。Ansys 工程助手内嵌仿真工具，加速仿真前处理与配置流程。西门子推出 Plant Simulation Copilot，实现模型结构优化、实验设置指导以及逻辑自动生成等，提升离散事件仿真建模和调试效率。

同时，通过物理规律与约束的内嵌，数字孪生实现对真实世界更精准的描述，由此形成了两条典型技术路径：物理信息神经网络技术（PINN）通过将机理方程嵌入神经网络的损失函数中，驱动智能模型

输出符合物理规律的解，适用于流体动力学等边界条件异常复杂、高维度非线性的科学问题。例如，英伟达基于平台内嵌的 PINN 技术帮助企业预测热回收蒸汽发生器的运行工况，在保持高精度的前提下，计算速度比传统数值法提升数千倍。深度有限元法等混合架构利用深度学习拟合复杂的基函数或多尺度映射，使孪生模型可以从数据中“学习”到难以用方程表达的物理特性，从而在粗网格上达到极精细网格的精度。例如，达索、Ansys 等领先企业已经结合智能算法优化传统有限元方法的收敛速度和稳定性，在复杂的结构分析、碰撞仿真和热传导等问题中取得显著成效。

3. 孪生模型实现动态可进化，持续优化决策的准确性

在运行数据实时更新和持续强化学习等多方面的驱动下，孪生模型从离线仿真的静态模型，走向能随工况变化的在线可进化形态。通过实时运行数据的不断汇入，寿命预测、故障诊断等孪生模型不再是一次性训练形成的预设程序，而是随时间不断演化的“学习体”。通过叠加强化学习、在线学习等技术，持续积累实时运行数据与工况变化信息，动态调整模型参数与决策策略，实现模型越用越准、越用越智能。例如，日立集团构建叠加强化学习的设备寿命预测模型，基于实时传感器数据、工况信息与故障维修记录，在设备健康指标空间中不断搜索最优指标函数，使其随时间更好反映设备退化状态，从而提升故障预警与剩余寿命预测的准确性。

（三）工业智能体向更自主与更协同的规划执行演进

1. 从对话式辅助工具走向主动式系统，实现任务全流程自主规划与执行

工业智能体的核心演进是从基于规则的标准化执行，走向人机协同的人工参与，再进一步迈向自主学习驱动的工作流自优化。这一过程中，工业智能体逐步摆脱单纯依赖指令触发的对话式工具形态，开始具备更强的环境感知、任务理解、工具调用、执行反馈与持续优化能力。**第一阶段：工业智能体主要表现为基于规则的对话式辅助工具**，通过“信息查询—知识生成—工具执行”的流程辅助生产决策与操作。这类智能体多体现为规则驱动和人工主导，即由工程师提出明确需求，智能体完成信息理解、知识调用与工具操作，辅助实现局部任务提效。例如，西门子的“设计智能体”能帮助工程师用自然语言与 CAD、仿真工具等工业软件交互，工程师通过语音或文本提出设计需求，智能体解析意图并调用设计软件完成模型草图生成等操作，显著提升研发和工程效率；罗克韦尔推出 FactoryTalk®智能体，能辅助用户完成 PLC 代码生成、工程项目自动配置等功能。**第二阶段：工业智能体开始进入人机协同的人工参与闭环**，智能体能够结合上下文、历史数据和任务目标，对问题进行初步分析、方案生成和流程衔接，但关键判断、异常处置和结果确认仍需人工参与完成。**第三阶段：智能体可基于工业场景的实时信息主动感知，实现工业任务的自调度、自优化与自闭环**，智能体不再被动等待指令，而是通过实时监控生产过程或根据复

杂的工况变化主动触发，并记录每一次决策执行的结果，持续调整和优化自身策略。例如，IBM 的 Maximo 智能体能访问庞大的历史和运营数据库，自主开展监测并主动制定维护策略，最大限度地减少停机时间和运营风险；美国软件技术企业 LogicMonitor 的 AI 智能体能主动分析设备运行数据，确定故障原因并给出解决方案，使警报减少 80%。

2. 多智能体协同实现复杂工业流程调度和全局资源优化

在单智能体的自主执行与决策能力基础上，多智能体协同系统通过多主体间的信息交互、能力互补与任务协同，突破单智能体的能力边界，目前行业内已形成两条成熟的技术落地路径：一是“**中心协调器+多个执行智能体**”结构，解决步骤明确且相互独立的复杂工业任务。由一个基于智能模型的核心协调器负责意图理解、任务拆解与调度，并为每个子任务匹配合适的子智能体负责具体执行，协作完成系统级复杂目标。例如，西门子工业 AI 智能体系统采用“智能指挥家”作为核心协调器，灵活调配设计、规划、工程、运营、服务等不同专业的 AI 代理协同作业，在指挥家的调度下协同完成全流程任务；SAP 的智能体具备多智能体编排与管理能力，通过自然语言交互获取用户意图后，基于知识图谱将复杂的业务需求拆解为分步任务，中心智能体调用分布在不同业务模块中的专用智能体进行处理。二是“**去中心化、分布式**”结构，多个执行智能体自主实时完成任务与能力的对接，解决强不确定性和动态变化的工业任务。面向大规模设备集群调控、柔

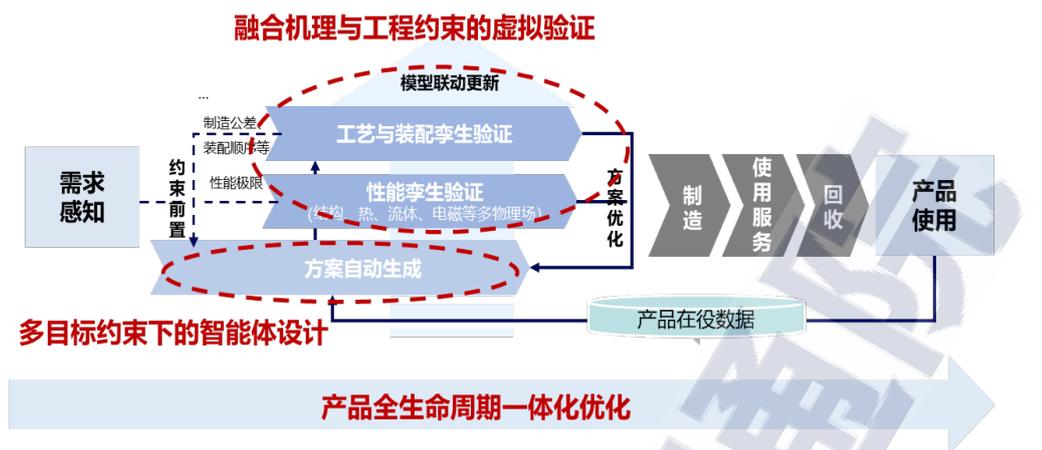
性作业调度与产线重构等任务，多个工业智能体通过信息、能力的对接共享共同完成目标，每个智能体都拥有一定程度的自主决策能力，实现极速的局部响应。例如，亚马逊通过分布式智能模型 DeepFleet 赋予每个机器人局部预测与自主决策能力，能根据周围几米内的其它机器人位置、障碍物等自主预测未来路径，使机器人集群的行驶效率提升 10%；欧洲某高校提出一种用于自行车零件加工、喷涂和组装的多智能体系统，当某一个车间检测到潜在瓶颈（如喷涂车间因换色导致效率降低），会与其他智能体进行分布式协商，调整物料流向和任务优先级，经验证这种分布式协同使生产率提高约 15%—20%。

三、应用篇：制造模式演进与重塑

随着 AI 全面融入工业制造，将驱动实现更精准自主的感知与优化决策，更快速响应市场变化以及需求、生产、供应链等更大范围协同优化，驱动研发设计全环节、生产制造全过程以及供应链全环节三大方向发生系统性变革。

（一）研发设计：从效率优先走向高确定性自主性的流程变革

未来研发设计将基于统一数据与模型底座，深度融合 AI 与快速仿真，构建贯穿“需求、生成、仿真、迭代、反馈”的持续优化闭环，形成多目标约束下的智能化设计、融合机理约束的虚拟验证以及产品全生命周期一体化优化等典型模式变革方向。



来源：中国信息通信研究院

图 4 全生命周期一体化研发流程图

1. 重构“创意 - 设计”流程，实现多目标约束下的智能化设计

在概念设计阶段，利用智能模型、知识图谱等技术，基于用户需求、标准条款和工程经验知识，将零部件结构关系、材料选型边界、工艺窗口、制造公差、装配顺序、合规与成本等关键约束前置并内嵌到设计环境，由 AI 在多目标约束下自动生成候选方案，开展方案对比并快速筛选最优方案，并在建模和参数调整过程中实时进行越界校核，明确提示风险来源与调整方向。从而推动设计从以参数化生成为主、约束后置验证的黑箱方案产出，升级为内嵌工程知识、在多目标约束下的方案生成与优化。例如南钢推出船用低温钢研发助手，能够在给定目标性能要求和约束条件下，智能推荐最优化的合金成分方案与关键工艺参数组合。

2. 融合机理与工程约束的虚拟验证，实现设计即正确

在设计阶段就联动工艺参数与产线能力开展面向制造的虚拟调试，加速设计与工艺迭代。**一方面**，方案生成后即对产品结构、热、流体等关键性能开展多物理场仿真，提前识别性能瓶颈；**另一方面**，将加工、焊接、装配等工艺参数，以及设备能力与精度、工装夹具条件、节拍与资源约束等产线能力同步纳入孪生环境，对不同的参数组合、装配顺序与工艺方案进行虚拟调试，提前识别公差敏感点、装配干涉、工艺不可达、质量风险与节拍瓶颈，并形成针对性的设计与工艺调整建议，从而推动设计与工艺在同一验证框架下快速迭代，加速从方案到量产的工程化落地。例如发动机制造商赛峰集团利用 AI 在评估每种架构的性能、排放和可靠性指标的同时，严格执行安全约束与工程规则，在不到一天的时间里自主评估了超过 2600 种电氢动力系统架构。

3. 产品全生命周期一体化优化，加速产品创新迭代

一是将需求定义、三维建模、仿真验证、工艺路线、排产与质量控制、产品运行等关键数据整合到一个底座上，让不同阶段的模型能“听懂”彼此。**二是**面对设计中“既要性能好、又要成本低”的多目标难题，建立需求、方案、仿真、排程、根因分析的多智能体协同机制，寻求最优设计策略。**三是**将产品生产、在役阶段的质量、维保、用户反馈等数据进行沉淀并回流至设计阶段，用来修正最初的设计参数和材料选择，推动模型与策略在全生命周期的持续进化。例如麻省理工团队采用多智能体协作框架，整合了“视觉 - 语言”模型用于草图风格

化渲染、几何深度学习模型用于 3D 形状生成与检索，以及大语言模型驱动智能体交互，实现草图模型生成、网格划分到实时性能预测的全流程自动化，将传统需要数周的汽车概念设计周期压缩至分钟级。

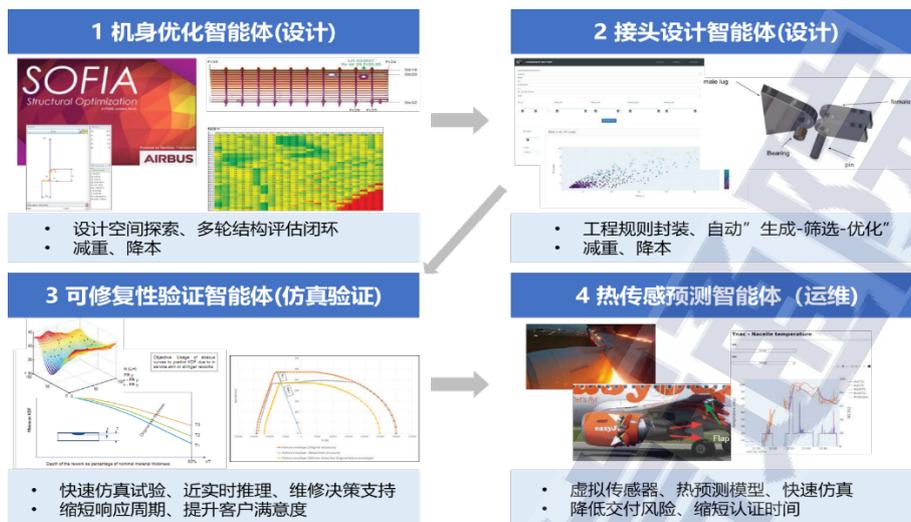
【专栏一 产品全生命周期一体化优化——空客代理模型工厂】

航空发动机的多学科设计优化过程面临诸多挑战，如设计变量繁多、计算量庞大、各学科分析模型间数据交互错综复杂以及系统集成难度大等问题。代理模型技术通过构建计算成本更低的近似表达模型，显著提升多学科设计优化求解的计算效率。

空客代理模型工厂（Surrogate Factory）采用端到端流程，已在研发设计的四个环节成功应用：**在机身优化设计方面**，利用代理模型对海量设计空间进行“地毯式”探索，打破了对高保真算例的计算资源依赖。在 AI 驱动的快速评估闭环下，实现了减重与成本的最优收敛；**在接头设计方面**，将几何造型、结构强度等工程规则深度封装。智能体能够自主完成设计候选的生成与筛选，显著提升了接头设计的自动化水平与精细化程度；**在可修复性分析方面**，采用代理模型替代复杂的内部仿真与试验流程，实现近实时的性能推理，能够针对一线维修与适航取证难题，即时给出精准的技术建议；**在服务支持方面**，通过 AI 热预测技术构建虚拟传感器网络，实时感知零部件在不同工况下的热流与热应力分布，在物理失效发生前预判风险，大幅缩短适航认证周期。

空客代理模型工厂通过从数据到模型的端到端流程并配套完整检验验证保障，使代理模型在工程中规模化可用，从而在设计端实现减重降本、在服务

端加速技术响应并降低交付与认证风险。

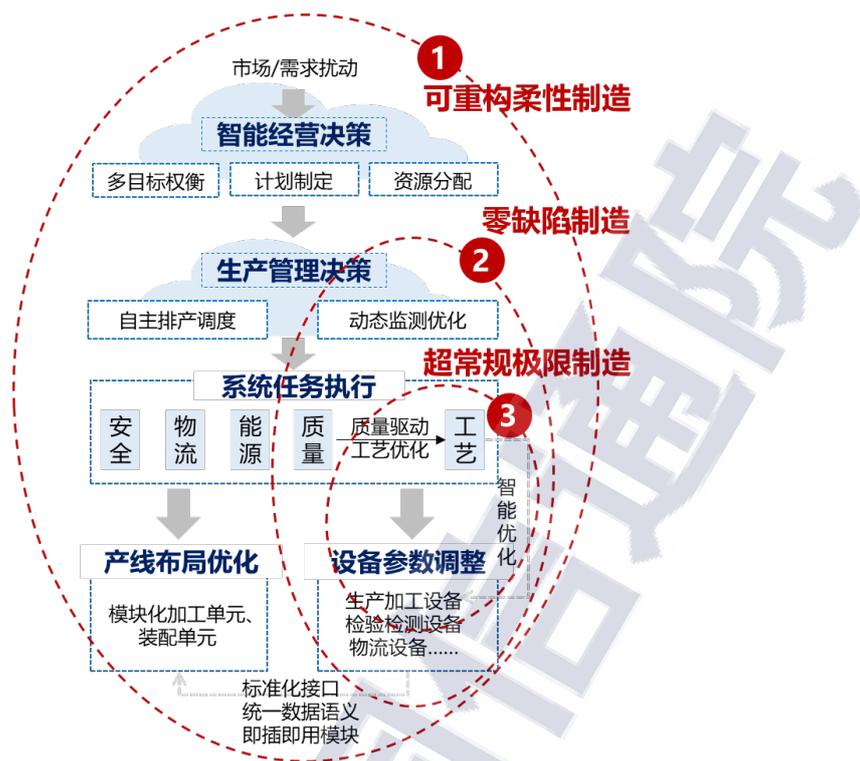


来源：中国信息通信研究院

图 5 空客代理模型工厂端到端流程

（二）生产制造：走向效率与柔性多目标平衡兼顾，拓展制造边界

AI 赋能驱动生产全过程的范式重构，打破传统制造只能聚焦单一目标的局限，推动从“效率优先”的单维目标向“效率、柔性、精准”等多维协同并重转变，极大地拓展制造边界。进一步形成超常规极限制造、零缺陷制造和可重构柔性生产等模式变革方向。



来源：中国信息通信研究院

图 6 生产制造流程与变革趋势

1. 制造工艺叠加仿真与智能优化，实现超常规极限制制造

一是“零成本”的工艺试错。企业建立涵盖产品尺寸精度、表面质量、强度等关键指标，以及加工路径等工艺任务的仿真模型，AI在不占用产线的情况下对多种工艺方案进行快速虚拟试验与对比评估，提前收敛并锁定可行的工艺路线与参数范围，显著降低试错成本与导入周期。二是动态调优实现加工精度的极致控制。进入生产阶段，系统实时采集工艺参数与过程信号，AI进行偏差识别、趋势预测与质量风险预警，同时滚动优化作业策略，生成参数自适应优化、路径重规划、工序切换、维护排程等可执行的调整建议，并将策略下发至设备与现场执行。三是工艺知识沉淀与自进化。执行结果反馈沉淀为可复

用的工艺知识，驱动工艺规程、作业指导书与参数模板迭代更新，形成持续自进化工艺管理体系，最终实现对常规制造边界的持续突破，形成超大、超小、超精密制造能力，例如长飞光纤基于 AI 开展设备、流程两级自适应的工艺趋势控制及调优，实现超大尺寸超高速率棒纤缆制造，单根预制棒拉丝长度提高 3 倍，光纤合格率提高 6.5%。

2. 生产管理全过程主动优化防控，实现零缺陷精益制造

设计阶段，AI 驱动的工艺建模与仿真对方案进行快速虚拟验证，自动识别可制造性、可装配性风险点，并结合智能优化算法开展可制造性与公差链协同优化，提前收敛可行工艺路线与参数窗口。**生产检测环节**，AI 融合声、光、振等多模态数据进行特征学习与实时推理，提升复杂缺陷检出率，实现高精度、毫秒级判异，同时通过无监督异常检测等智能技术，覆盖未知缺陷与早期弱信号，确保问题在形成批量前被及时发现。**工艺调整环节**，AI 以预测性质量控制与自动根因分析为核心，将机理模型与数据模型融合建模，并借助知识图谱把工艺、设备、物料与缺陷建立语义关联，生成可解释的因果链与风险评分，提前识别质量漂移与风险趋势，推动质量管理从“事后追责”转向“事前预警与预防”。**防控方面**，AI 实现跨系统协同，根据缺陷信息自动调整工艺策略，如自适应调参、路径或工序重规划、复检触发、排程优化等，并下发至 MES、QMS、设备与现场系统执行，执行效果反馈再回流沉淀为新知识与新数据，持续迭代缺陷识别模型，实现越生产越会控、越会控越少缺陷，最终逼近零缺陷目标。

【专栏二 零缺陷制造——京东方 AI 零缺陷生产】

京东方面板制造的质量管理面临两个核心挑战：一是低效率，显示面板制造工艺复杂，工艺飞速发展，涉及的缺陷类型越来越多，人工质检效率低、准确率不足，一旦缺陷发生往往已经进入后续流程，造成返工。二是高成本，培训一名熟练的检测工程师需要数月时间，需要培训和安排大量工程师来保障产品质量，平均单产线每天需要安排 36 个工程师，分三班轮流工作，带来巨大的成本支出。

通过开发 AI 融合的全面质量管理体系，探索实现零缺陷制造。**检测端**，利用深度学习算法开发检测软件，实现缺陷定位、缺陷检测和缺陷分类等功能，实现一块大屏上上百种不同缺陷类型的同时检测。**追溯端**，汇聚检测数据、生产履历及设备参数等数据，对特定的不良相关性因素进行分析，并挖掘出影响产线效率的根本原因，把质量控制从被动响应推向主动干预。**调控端**，整合工艺系统，将根因分析结果作为工艺调整的输入，并把处理过的异常案例转化为规则库，不断优化调整标准，实现质量管理的闭环。



来源：中国信息通信研究院

图 7 全面质量管理体系

通过构建从检测发现→根因识别→调整→验证→记录的零缺陷质量闭环管理流程，其工厂全流程生产效率和产品质量显著提升，产线效率提升 56%，产品缺陷率降低 75%，检测准确率达 96%，检测工艺和维修工艺的操作人员减

少 60%以上。

3.生产资源自动调度重组，实现可重构的柔性生产

一是通过全局智能编排，达成最优计划。AI 实时融合订单、工艺、设备、物流、质量与能耗等多源信息，通过多目标约束优化与滚动重算，形成从计划排产到资源配置的系统编排与全局最优决策。二是生产资源动态调度。生产系统基于上层决策开展动态调度，改变传统的层级管理，让质量、物流、能源等模块实现“横向联动”。系统根据现场波动自发优化，确保生产节拍高度同步。三是零成本集成的产线快速重构。AI 将生产策略转化为可执行程序并自动生成控制代码，最终借助标准接口、统一数据语义与即插即用模块，完成设备、工装、检测与物流等物理单元的近乎成本集成与灵活重构。由此，在面对订单与产品变化时，生产系统能快速实现策略切换和产线重组，显著提升市场响应速度，例如丰田通过搭建覆盖工厂现场的统一 AI 平台，把生产数据实时汇聚并实现一线模型快速开发、部署，从而能随订单与现场波动快速调整工艺与资源配置。

【专栏三 可重构柔性生产——上汽通用五菱“智能岛”制造体系】

汽车整车制造存在产线柔性化程度不足问题，难以满足多车型生产需求，具体表现为传统产线车型导入时共用工装少、工装开发投资成本高，且产线车型切换时间长、效率低。

上汽通用五菱将工艺模块解耦封装为“智能岛”，与主线分离，实现主线极简、支线差异化，工艺流程可动态调整，多岛分布式布局结合智能群控系统，优化 AGV 调度，实现时空协同的产线重构，支持多车型混线高效生产。1) 智

能调度系统。自研 AI 群控智能调度系统，应用分布式群控技术，实时采集数据并动态匹配车料参数，实现工艺路径全要素定制与设备程序智能适配，确保产线快速切换车型，提升生产效率。**2) 智能质量管控。**结合“岛式”自动装配模式，通过智能排序技术、AGV 引导技术和 2D/3D 视觉、激光测量等技术应用，保证零部件在装配、焊接、涂胶等关键工序中可以有效进行防错和实现精准定位，对焊接参数和涂胶质量、拧紧参数进行实时监控，AI 算法实现复杂检测场景的图像处理分析。**3) 智能设备管理。**通过构建多源数据融合的监控网络，建立 AI 设备智能化管理系统，运用分布式控制系统和多类型传感器，结合数字孪生，实现车间各工艺装备数据及运行状态的实时获取和设备健康状态的实时评估与故障提前预警，提前发现设备隐患，提前修复，避免设备长时间故障停线。



来源：中国信息通信研究院

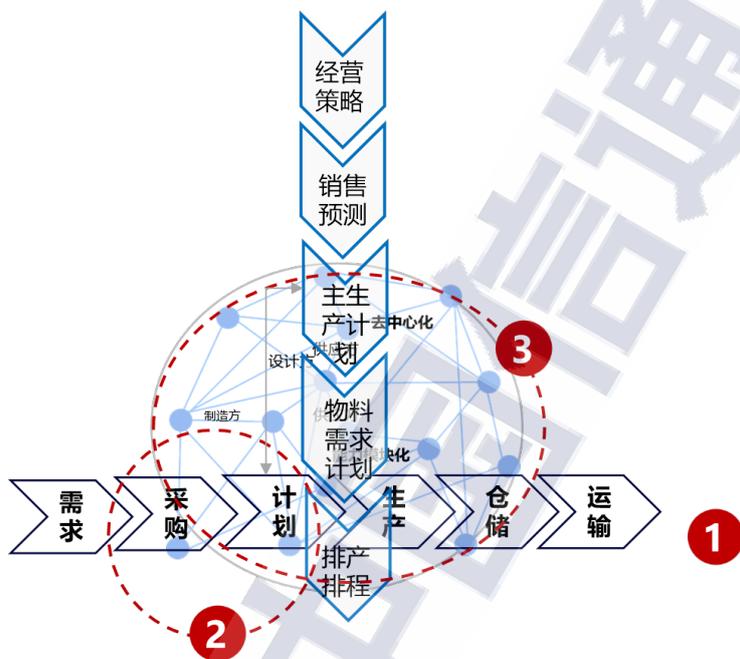
图 8 智能岛柔性生产方式

依托 78 个智能岛及其组成的三大岛群，工厂可高效混线生产 24 款车型，支持在产车型配置达 919 种，单车下线时间缩短至仅 24 秒，实现了生产潜能的全面释放。

（三）供应链：走向开放韧性的供应网络

全面贯通供应商、制造工厂、分销中心及物流链路等要素节点，

基于实时市场数据、多渠道订单库存数据、物流数据和外部环境信息实现全链条可视，利用数字孪生模拟各种中断风险，精准评估不同应对策略，动态优化资源配置，提升供应链弹性，形成一个端到端透明、具备业务自决策与资源自调度能力的智能网络。



来源：中国信息通信研究院

图 9 未来供应链体系图

1.需求到供应的全局最优配置，快速应对市场变动

改变传统“计划驱动+层层传递”的供应组织模式，形成以需求为核心的“端到端编排”，彻底消除“牛鞭效应”。一是打通市场侧实时需求数据和企业内部订单、产能、库存、交付数据，二是在此基础上，AI 把需求拆解成原料/零部件保障、排产节拍、运输资源等可执行的任务，并在约束条件变化时自动按成本、交期、服务水平等目标进行

重新规划，例如当某个供应商产能出现微小波动时，AI系统能立即在无需人为干预的情况下，自动调整物料拉动计划、重新优化生产排程，甚至自动与下一级供应商重新协商交付合同条款，确保供需匹配的快速响应和全局最优。博世在其供应链数字化方案中大规模采用AI预测采购需求、库存水平和供应商表现，把供需错配降低约35%，整体供应链效率提升约30%。

2. 风险主动预测与异常自修复，提升供应链稳定性

突破传统“被动响应”模式，基于数字孪生实现对关键物料、关键设备、关键节点到外部环境的全面描述，把供应链运行状态转变为可推演的动态系统。AI一旦监测到需求激增、在途延误、港口拥堵、能源价格剧烈变化等异常苗头，系统计算得出概率与影响，基于孪生自动生成替代料与替代供应商切换、订单优先级重排、跨工厂重分配、分销网络改道等可执行的干预组合，并对每种组合给出“代价-收益-风险情况”的量化对比。更进一步，系统把历史各类风险的应对效果沉淀为可复用的策略与知识，使企业供应组织的韧性能力具备可积累、可持续优化的进化能力，例如雷诺汽车考虑天气、边境延误和交通状况等因素，及早发现潜在中断。

3. 分布式生产网络，实现定制响应与敏捷交付

面对需求碎片化、交付时效改变与地缘不确定性增强等制造挑战，基于微工厂的生产网络将成为供应链重构的重要途径。一方面，依托企业模块化产线、柔性工艺与标准化数字底座能力，在区域内形成多

点部署、近端交付的供给网络。另一方面，AI作为“网络级调度者”实时评估各微工厂的产能、质量、能耗、物料情况与交付距离，动态决定生产地址、生产内容和交付路径，并在需求波峰或供应受限时自动触发跨点扩产、临时外协、产能互济与工艺替代，实现“资源自调度”。更长远看，微工厂将推动供应链从“以物流搬运库存”转向“以数字搬运设计与工艺”为主，即把产品配置、工艺参数、质量模型与设备程序以数字方式快速下发到就近产能，供应链既能保持规模体系的成本优势，又能获得分布式网络带来的时效与抗冲击能力，最终形成面向不确定性挑战的“弹性制造供给网”，例如 HADDY-3D 打印微工厂配备持续学习的自动化机器人，可以提供按需、高度定制化的产品。

【专栏四：供应链端到端管理自适应优化——联想供应链智能控制塔】

联想传统的供应链管理面临以下问题：一是信息孤立，缺乏实时、透明的端到端数据视角，难以全面掌握供应链战略和运营状态。二是风险与异常响应滞后，分析通常仅限于事后追踪，难以在异常发生前及时干预。三是决策缺乏数据支持，许多运营决策仍依赖经验，运营决策过度依赖个人经验。

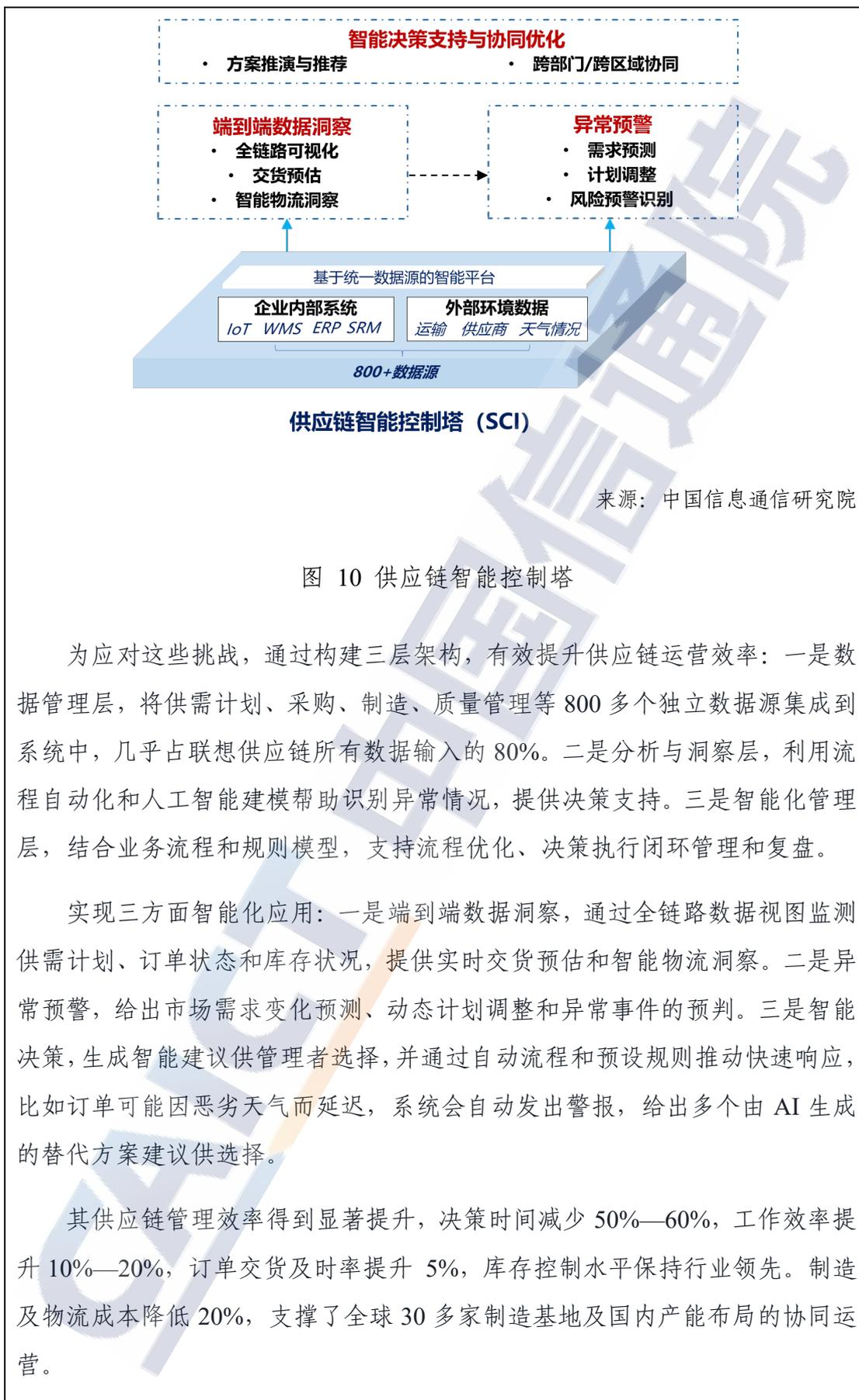


图 10 供应链智能控制塔

为应对这些挑战，通过构建三层架构，有效提升供应链运营效率：一是数据管理层，将供需计划、采购、制造、质量管理等 800 多个独立数据源集成到系统中，几乎占联想供应链所有数据输入的 80%。二是分析与洞察层，利用流程自动化和人工智能建模帮助识别异常情况，提供决策支持。三是智能化管理层，结合业务流程和规则模型，支持流程优化、决策执行闭环管理和复盘。

实现三方面智能化应用：一是端到端数据洞察，通过全链路数据视图监测供需计划、订单状态和库存状况，提供实时交货预估和智能物流洞察。二是异常预警，给出市场需求变化预测、动态计划调整和异常事件的预判。三是智能决策，生成智能建议供管理者选择，并通过自动流程和预设规则推动快速响应，比如订单可能因恶劣天气而延迟，系统会自动发出警报，给出多个由 AI 生成的替代方案建议供选择。

其供应链管理效率得到显著提升，决策时间减少 50%—60%，工作效率提升 10%—20%，订单交货及时率提升 5%，库存控制水平保持行业领先。制造及物流成本降低 20%，支撑了全球 30 多家制造基地及国内产能布局的协同运营。

四、展望篇：迈向未来图景的挑战与建议

（一）挑战：未来工业图景的实现是一个需要长期探索和坚持的过程

可以说，目前绝大多数工业企业已经认可了工业智能的价值作用，领先企业已经开展广泛的探索实践，并带来切实回报，但总体看，工业智能的深入发展还面临几方面挑战。一是如何进一步推动工业智能从单点应用走向制造模式整体变革。AI 在领先企业的场景渗透率已经达到 45%甚至 70%的高占比，但基本集中在质量检测、工艺指标预测等局部场景，尚未形成制造模式的变革，这就需要在系统架构层打通感知、建模、决策与执行全环节，并与既有的工艺体系、装备和组织流程深度耦合，嵌入生产的整个运行逻辑。二是如何进一步提升 AI 与制造机理融合的深度。目前的工业 AI 多侧重在通过历史数据拟合规律的浅层关联性分析，缺乏对制造机理、工程知识与运行经验的融合理解，导致不可解释性和稳定性差的不足。这种融合既是充满复杂性的技术难题，也并非一蹴而就的算法叠加，而是一个动态的持续校准的工程，决定了 AI 必须在长周期运行中不断吸收各类数据知识，并与生产现场的实际反馈进行对齐，真正渗透到制造核心领域。三是如何推进现有系统向未来智能化生产系统演进过渡。存量工业系统在设计之初并未考虑未来智能化变革需求，设备年代跨度大、控制系统封闭、数据格式和语义标准不统一，形成了高度异构、碎片化的运行环境，且不同的行业企业在数据基础、装备水平和管理模式上差异巨

大。这种“工业老包袱”使 AI 难以像互联网场景通过统一平台快速部署，而必须在持续运行中逐步完成数据标准化、接口开放和架构解耦，本身是一项周期长、投入高的复杂工程。四是如何应对自主化带来的日益凸显的安全与治理挑战。当决策权逐步由人工转向 AI，如何确保系统在极端条件下的稳定运行、如何界定各类风险损失的责任归属，成为企业深度应用 AI 的核心顾虑，所以工业智能不仅是技术挑战，更涉及工程规范、管理模式与制度设计的系统性创新。

（二）建议：做好未来准备，迎接智能化的“必答题”

一是做好用于智能模型构建的数据与知识准备。多数制造企业的¹数据治理水平不高、数据质量参差不齐、知识内嵌程度不够，导致大部分工业数据无法直接用于智能模型训练。需要补齐数据标签、探索建立统一主数据与编码体系，并行构建知识内嵌的高质量数据集，建设机理模型库、流程工艺包、故障规则库等，推动工业数据与工业知识深度融合，强化工业基础模型开发。

二是做好存量系统的渐进式改造准备。应避免盲目追逐大平台大架构，采取“边运行边改造、分步走”的过渡路径，结合自身实际数据基础、装备水平和资金实力，先从痛点突出、高价值、见效快的“最小闭环”场景入手，推动智能模型开发、孪生模型构建与智能体部署，再逐步拓展至全流程，打造适合自己业务需要的融合技术栈，避免盲目投入和大规模停产改造。

三是做好行业差异化落地规划。制造业智能化升级没有万能模板，

不同行业的工艺流程、数据特征及场景需求差异显著，即便是同一行业内的企业，装备水平、管理模式、数据基础也存在悬殊差距。应根据行业的成熟度、核心需求以及技术趋势等，制定符合本行业特点的智能化实施路线图。

四是提前布局面向智能的关键标准规范。应积极关注并参与模型接口和业务流程规范化、智能体跨平台跨系统互操作等标准，实现“同语同模同接口、可插拔可替换”，提升不同人工智能模型、智能体及工业软件的协同应用。也要研究制定工业智能安全能力要求、模型可解释性等标准规范，在安全可控前提下，让企业敢用、善用人工智能。

五是做好人工智能时代的人才准备。“AI 无法完全取代人，但不使用 AI 的人将被善用 AI 的人取代”，企业需通过变革管理方式，促进员工学习和利用人工智能工具，提升解决实际问题的效率、优化现有流程，适应人机协作的新工作模式。

未来已来，智能化已经成为制造业变革的确定性方向，成为产业未来竞争发展的“必答题”。未来五到十年乃至更长的周期内，人工智能将释放出前所未有的变革能量与价值空间，对工业发展带来的影响必将远超目前想象。希望各方携手推进，全方位构筑兼具场景领先、技术能力与产业韧性的制造业系统性竞争优势，为实现制造强国战略目标提供硬核支撑。

中国信息通信研究院 信息化与工业化融合研究所

地址：北京市海淀区花园北路 52 号

邮编：100191

电话：010-62304384

传真：010-62304980

网址：www.caict.ac.cn

