

工业数字化/智能化 2030



序言



李培根

很多人已认识到，软件定义世界，数据驱动未来。工业数字化显然已成为工业领域的必然选择。

在中国，智能制造、企业数字化转型的热潮经年不减，很多企业在数字化的过程中顺利地实现了转型升级。但数字—智能技术的进展似乎超出了我们的想象力，人工智能大模型的出现即是。也就是说，企业的数字化（包括智能化，以下同）之路没有止境，将永远在进程中。既然如此，就需要不断地洞察工业数字化的趋势。

《工业数字化/智能化2030白皮书》（以下简称《白皮书》）的问世正当其时。白皮书代表了华为、中国信通院和罗兰贝格作为全球领先的ICT企业和高端智库对工业数字化发展趋势的看法。

华为是ICT企业，也是制造企业，恐怕也正在成为一个软件和数据驱动的企业；华为是中国公司，也是一个高度国际化的公司；华为是高技术企业，又和很多传统制造业（如煤矿、油气、家电、钢铁等）有广泛深入的业务联系。这些都使其对企业数字化有特别的体认与心得。中国信通院是ICT领域高端智库，在行业数字化转型的重大战略、规划、政策、标准和测试认证等方面发挥了有力支撑作用，并形成了对行业数字化转型的现状、规律和趋势的深刻洞察。白皮书分析了当前企业在数字化过程中经常遇到的痛点，如设备不支持实时采集和上传数据、互为烟囱和孤岛、工业软件系统异构、工业知识封闭等问题。此外，还提供了一些痛点、问题、解决方案及案例——于众多企业而言都是可资借鉴的宝贵资料，无论是对当前还是未来的数字化之路。

作为一部由企业推出的白皮书，其客观中肯的观点尤其令人称道。如关于网络，“对于工业企业而言，没有‘最好’的网络技术、只有‘最合适’的网络技术。工业企业应立足于自身业务场景需求，综合权衡各技术的性能特点和成本投入，选择‘最合适’的技术路线组合。”

当然，此白皮书最大的贡献还是对工业数字化2030的预测和展望。

他们认为未来工业应是 IMAGINE 的，即虚实融合、大规模定制化、灵活适应变化、可靠互信、体面工作、自然友好、生态共荣的。

白皮书预测工业软件的上云是大势所趋。要重新定义工业软件的开发模式和商业模式，并进一步赋能工业新范式（例如云工厂）的形成，培育全新的数字工业生态。

在“工业数据价值化”中提出：向空间维延展，工业企业的数据从局限于自身内部转变为企业间数据协同、流通与共享；向时间维延展，工业企业不能只局限于产品研制阶段的数据，还需要追溯已售产品的运行态数据。

……见解独到，精彩纷呈。

白皮书不仅深刻地洞察和把握了数字技术的发展态势，而且认真分析了工业发展现状和趋势，如果对博大精深的工业没有心存敬畏，恐怕难以有动力去撰写此白皮书。

我也心存敬畏地阅读此白皮书！



中国工程院院士



余晓晖

《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》提出2035年远景目标：基本实现新型工业化，建成现代化经济体系。党的二十大做出推进新型工业化重大战略部署，提出了到2035年基本实现新型工业化的时间表。当前，数字化正在全面重塑工业生产函数，推动产生新的生产要素、制造体系、研发范式和组织形态，是重塑工业体系、工业化进程和全球工业格局最大的技术变量。这个变革过程也是对原有工业体系颠覆式重塑的过程，不仅会创造新赛道，而且会改变制造业的每个细分行业、产业链价值链的每个环节，在众多领域带来真正的换道赶超机遇。这为我国工业从源头打造新优势、另辟蹊径实现工业基础、核心技术追赶跨越以及以更高效率稳住发展动力提供了新的可能，是我国工业实现由大到强必须把握的历史性机遇。我国抓住了信息化革命成熟期的机遇，实现了信息技术产业的跨越式发展，已经具备抓住新一轮数字化变革机遇的基础、资源和能力。从这个角度来看，在推进新型工业化过程中，工业数字化需要贯穿到新型工业化发展的每个环节，不断探索信息化和工业化融合的新方法论、新路径，升级拓展战略主线。这一战略定位与《中国制造2025》关于“以加快新一代信息技术与制造业深度融合为主线”的发展思路一脉相承。

对企业而言，工业数字化并非锦上添花，而是关乎企业生存和发展的重要问题。当前，我们需要帮助企业解决的核心问题是：在数字经济时代的快速变革中，如何实现快速感知、敏捷响应，以便更好地应对市场的不确定性、需求、产品以及竞争者的快速迭代变化，并在实时感知和洞察的基础上实现动态策略优化和全局智能决策。拓展工业数字化的共性场景并配置关键支撑要素正是解决这些核心问题的重要途径。

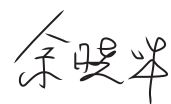
作为工业数字化应用的基本单元，工业数字化场景有利于企业数字化需求的挖掘、应用落地和实践经验的标准化、规模化推广。我国拥有海量的应用场景和丰富的数据资源，也具备全球领先的信息技术应用能力，为我国深化工业数字化应用探索，实现后发赶超提供了有利条件。与此同时，场景碎片化和需求差异化特点明显，且场景标准化、模块化推广仍面临较多挑战。如何为不同行业、企业和产业集群总结出可大规模复制推广的应用模式和推广路径仍需深入探索。

建设工业数字化场景的关键支撑包括数据、装备、网络 and 软件。在数据方面，作为新型生产要素，数据与传统行业机理 and 知识相结合，推动智能化发展，未来数据治理与共享流通将成为数据要素价值发挥的关键。在装备方面，工业芯片、智能传感器、边缘硬件等基础环节将进一步融入装备本体，加速装备功能、性能提升 and 短板突破。在网络方面，5G等先进网络技术将进一步提升设备联网率、数据互通水平，加速全要素、全产业、全价值链的深度互联。在软件方面，软件平台化、云化趋势明显，将变革工业知识的开发、封装、交互 and 使用方式，将成为智能化的关键中枢。

工业数字化创新潜力巨大，前景光明。展望未来，我们对工业数字化的认识将伴随实践不断深入，许多新技术、新模式 and 新业态将不断涌现，未来可能在资源组织模式、业务模式 and 商业模式上将形成重大创新重构，对工业发展产生深远影响。

本报告全面分析了未来工业愿景 and 工业数字化的当前进程，识别了16个细分行业和5组行业画像的共性场景，并基于数据、装备、网络 and 软件要素提出了产业发展趋势。我们相信，本报告所展现的实践洞察将为产业界带来有益启示，帮助企业更好地找到数字化转型 and 智能化升级的路径。

未来已至，工业数字化将改变工业的面貌，为人类带来更加美好的生活。



中国信息通信研究院院长



汪 涛

工业是国民经济繁荣发展的基石，数字化是行业腾飞的翅膀。展望2030年，随着ICT技术与制造业的深度融合，未来工业将向着柔性、智能、定制化和服务化的方向发展。基于此，生产关系将被重构、社会组织形式将被重组、商业模式也将被不断创新。未来工业将把劳动者从重复性的工作中解放出来，并为人们创造体面、安全、更富创造力和趣味性的工作，还将为人类带来更舒适的建筑、更便捷的交通、更普惠的教育、更精准的医疗，以及更美好的环境，将人类带向更美好的明天。

在《工业数字化/智能化2030白皮书》中，我们憧憬了“IMAGINE”的未来工业，分析了十六大工业行业的数字化进展和二十个共性的高价值工业数字化场景，洞悉了工业装备数字化、工业网络全连接、工业软件云化和工业数据价值化的发展趋势，并首次提出了“工业智能体”的解决方案架构。

华为是从研发到生产、到销售、到服务的全链条工业企业，从集成产品开发（IPD）到智能制造、从削足适履到融汇贯通，华为的数字化转型之路从未停步。华为公司从2015年开始推行智能制造，实施了设计与制造数字化融合打通、产线自动化/智能化升级和MES系统重构。工厂内全流程实现自动化配送，生产线所有关键工位都采用视觉AI质检，投入大量的自动化设备以及持续进行精益改善，使得平均每年生产效率提升27%。此外，通过全面的数字化转型，华为的产品开发及试制周期缩短了20%，订单履行周期缩短了76%，销售效率和服务质量都得到了有效提升。

经过若干年的努力，华为成为具备较强数字化能力的实体经济企业，我们希望能结合华为的实践和能力，去支持和使能广大工业企业、实体经济的数字化转型。2021年以来，华为本着为行业找技术、短链条为客户创造价值的初心，陆续成立了煤矿军团、电力数字化军团、制造行业数字化系统部和油气系统部，利用华为在5G、云计算和AI等方面的技术积累，聚焦工业场景，探索工业数字化转型之路，为客户创造价值。2年多来，华为与客户和合作伙伴一起创建工业智能体，取得了一些实践经验和案例，也集结于本白皮书中，期望对大家有所借鉴和启发。

未来已来，时不我待！华为愿与产业伙伴一起，为推动工业全面数字化转型共同努力、共创共赢。

华为常务董事
ICT基础设施业务管理委员会主任
企业BG总裁

摘要

回顾过往，自18世纪中期工业革命以来，人类迈入工业社会。在工业革命的历次浪潮中，伴随着人类不断的发明创造和管理革新，人们不断改进生产方式、降低成本、提高效率，随之而来是人们的生活、物质、文化、教育等方方面面的改变，人与人、人与社会、人与自然的关系也得以重塑。站在2023年的今天，工业的革新仍然是充满生命力和想象力的议题。而数字化技术的迅速发展，更是为工业注入了新鲜血液和源源动力。如何通过数字化转型撬动更大价值，成为这个时代每一个工业企业的必答题。

憧憬未来，白皮书提出IMAGINE作为工业2030愿景，即虚实融合（Interactive between physical and virtual worlds）、大规模定制化（Mass-customization）、灵活适应变化（Agility and adaptiveness）、可靠互信（Guaranteed trust）、体面工作（Ideal jobs）、自然友好（Nature-friendly）、生态共荣（Ecosystem based）的。而要实现这些美好的愿景，数字技术将会是关键的基础底座。

为了清晰刻画工业数字化的当前进展，白皮书通过4个维度、21个细项指标的工业数字化指数评估模型，以中国工业企业为样本，评估发现半导体、汽车、航空航天、石油化工行业整体数字化水平最高；采矿、建筑材料、轻工、纺织与服装等行业相对落后。在数字化指数的基础上，我们又进一步叠加考虑各行业的盈利能力，从这两个维度出发，将16个子行业划分为了引领型行业、敏捷型行业、前瞻型行业、谨慎型行业、沉

稳型行业五组行业画像。各组画像之间的数字化进程、发展诉求以及未来方向均存在显著差异。

结合行业实践，参考GB/T40647-2021《智能制造 系统架构》，我们系统梳理了20个高价值的工业数字化场景：生命周期维度，在设计环节提出了产品数字化设计，生产环节提出了智能排产与动态调度等，物流环节提出了自动化仓储与物流配送等；系统层级维度，在设备层，提出了智能机器与人员协同，在单元层提出了工业装备集成协同控制，在协同层面提出了供应链可视化与信息协同；智能特征维度，在互联互通层提出了设计与工艺一体化协同；在新兴业态维度提出了C2M产品个性化定制和云工厂共享制造等。这些场景将成为未来5-10年内工业企业的数字化转型部署重点，也将驱动一系列关键使能技术的迭代更新，值得工业企业和数字化解决方案提供商关注。

基于工业互联网实施架构，我们提出设备、边缘、企业、产业四个层级的工业数字化价值栈，工业数据贯穿各个层级，并依靠工业装备、工业网络和工业软件实现数字空间与物理世界的深度融合，构建数据优化闭环，驱动业务数字化转型。工业装备、工业网络、工业软件、工业数据四大要素是工业企业部署数字化场景的重要支撑，基于此，白皮书提出工业“新四化”作为四个要素的发展趋势，期望推动工业数字化转型。

一是工业装备数字化。工业装备作为执行作业的工具，是工业企业提质增效的基础和关键。当前大量制造装备存在未联网、无

法实时采集数据、交互方式传统、作业执行程序化、固定化等问题，难以胜任未来更加柔性、敏捷、高效的生产作业要求。而要推动传统设备装备迈向数字化装备、乃至智能化装备，发展操作系统、工业芯片、边缘智能是关键路径。

二是工业网络全连接。工业网络作为数据传输的媒介，广泛连接着工业的研产供销服全价值链以及生产的人机料法环等要素，支撑高稳定高可靠的数据交互、连续不间断的生产活动、柔性灵活的生产模式。当前大部分工厂已实现基础网络覆盖，可满足办公和基础生产活动需求；但面向数字化场景的拓宽和升级，工业企业对更高移动性能、更高确定性、更低时延、更大带宽的工业网络需求逐渐迫切，面向未来，针对移动性和确定性两大类需求，工业企业需要加快打造性能卓越、架构精简、安全可靠的工业网络，实现泛在连接、一网到底、智能运维、安全韧性的工业网络。

三是工业软件云化。工业软件发挥着数据汇聚、分析、决策、反馈的关键作用。回首过去，传统工业软件为工业企业提供了极大便利，帮助众多工业企业迈出了数字化转型的第一步；然而面向未来，传统工业软件本地化部署、软件系统异构、工业知识封闭、购买授权等模式，给工业企业带来系统间集成打通成本高昂、动态配置弹性不足以及买方锁定等问题；工业软件开发者也面临工业知识沉淀的壁垒：难以迸发创新活力的问题。因此，工业企业、工业软件开发者及

其他工业界伙伴需要凝聚力量，探索理念创新与模式变革，循序渐进推动工业软件上云，真正从“用软件”过渡到“用服务”。

四是工业数据价值化。数据已日益成为企业关键资产和生产力，海量、实时、多源的工业数据是工业企业开展深度分析、价值挖掘的宝贵资产。然而，工业数据的高效采集、集成打通、价值挖掘与安全合规，是工业界共同面临的挑战。破旧立新，工业企业的数据治理和应用需要在空间维、时间维两个维度充分延展，才能在更大范围内释放价值。

基于工业“新四化”的研判，白皮书进一步提出了“工业智能体”参考架构，作为工业企业开展数字化规划和落地部署的指引。工业智能体具体包括工业软件、工业云底座、工业边缘引擎、数字工业装备、先进工业网络、工业数据以及端到端安全等全要素：工业软件作为“大脑”，工业云底座作为“心脏”，工业边缘引擎、数字工业装备作为“四肢”，先进工业网络作为贯通全身的“神经”，工业数据作为无处不在、流动的“血液”，端到端安全作为“免疫系统”。白皮书的最后以煤矿行业为例，阐述了在工业智能体参考架构指导下的实践应用。

工业的未来将是万象更新、蒸蒸日上的。面向2030年“IMAGINE”的未来工业愿景，我们倡议业界共同携手，加快推进工业“新四化”，打造工业智能体，共同迈向2030智能世界。



目录

序言	1
摘要	6
第一章 未来工业展望	10
第二章 工业数字化的当前进程	16
第三章 行业共性需求与价值场景	21
第四章 产业发展趋势	33
4.1 工业装备数字化	37
4.2 工业网络全连接	44
4.3 工业软件云化	54
4.4 工业数据价值化	60
第五章 工业智能体架构与实践	70
5.1 参考架构	71
5.2 实践应用	72



第一章 未来工业展望

1.1 全球主要国家持续布局工业数字化

放眼世界，中国、美国、德国、日本等主要工业国家均出台国家顶层战略，加快推动工业数字化转型，强化工业核心竞争力，构筑新竞争优势。

美国多年来持续并强化布局先进制造业，在2011年发布《先进制造业伙伴计划》、2012年提出《国家制造业创新网络计划》、2014年成立工业互联网联盟（IIC）、2018年提出《关键与新兴技术国家战略》，为加快数字化技术在制造业的应用，在2020年更新《关键和新兴技术清单》、2021年提出《无尽前沿法案》并将IIC更名工业物联网联盟、2022年发布《2022国家先进制造业战略》，试图通过先进制造技术的突破引领工业数字化发展，持续扩大工业领域的核心竞争优势。

德国率先提出工业4.0概念，在2010年提出《高技术战略2020》、2014年发布《高技术战略2025》、2016年发布《数字战略2025》，为持续扩展人工智能等数字化技术领域，在2019年发布《工业战略2030》和《人工智能战略》修订版、2021年发布《德国新数字化战略》。

日本更强调打造数字基础，2015年成立日本价值链促进会（IVI）、2017年提出《“互联产业”东京倡议2017》、2018年发布《通过数据促进价值创造的数据管理方法和架构》，为进一步强调数据应用、推进工业互联网，2018年提出《数字治理守则》、2020年提出《制造业白皮书 2020》、2021年提出《第六期科学技术与创新基本计划》、2022年提出《制造业白皮书 2022》。

中国在2015、2016年分别提出了“智能制造”和“工业互联网”建设目标，在新时代的征程中，又提出了新型工业化的新内涵，促进科技创新与产业升级，加速传统制造业向智

能制造和服务型制造的转型，推进工业现代化进程，从而全面发展中国式现代化。

可见，各国都将工业数字化转型视为增长的“新动能”，期待工业企业探索传统制造升级、全新生产模式乃至商业范式的创新。

在新时代的征程中，中国式现代化是强国建设、民族复兴的唯一正确道路，而新型工业化则是推动中国式现代化的关键手段。通过实施新型工业化战略，促进科技创新与产业升级，加速传统制造业向智能制造和服务型制造的转型，我们将推进工业现代化进程，从而全面发展中国式现代化。新型工业化包含新的内涵与特征，把握新型工业化的要求，加速工业数字化转型，便是实现工业高端化的重要基础、实现工业智能化的关键路径以及实现工业绿色化的主要抓手。

1.2 工业数字化的愿景

过去的数十年里，工业企业一直在努力通过各种方式提高效率和降低成本。传统方法包括精益管理、本地化生产和自动化、信息化等，然而这些传统手段具有一定局限性。如今，数字技术的发展为工业领域带来了更多可能性。每个工业企业都面临着如何通过数字化转型来释放更大价值的紧迫问题。

在数字技术的影响下，未来工业将怎样发展呢？要思考这个问题，我们还需回到工业本质。工业是产出提升人类生活水平所需工具/物质的过程。但生产过程不是目的，拥有产品也不是目的，人们购买并使用生产出的产品成果，满足工作和生活需求，才是工业企业实现的价值。

如果我们以终为始，透过本质看未来工业，那么在将来的理想情况下，随着供应侧能力的发展，工业将从产品的生产供给不断延伸边界，最终发展成能够主动感知并满足客户需求，提供一体化方案，实现价值创造的形态。

模式将从供应推动式变为需求拉动式；交付形式将从卖产品变为卖服务；需求侧角色从购买者、接受者变为产品的共同定义者；供应侧角色从产品的提供者变为满足需求的价值创造者；产业链分工从清晰的上下游分工变为紧密合作共创，以实现整体产出的价值最大化。

憧憬2030年的世界，未来工业将改变我们的生活方式和社会组织形态，将人类带入更加美好的生活。建筑业将完成工业化，各类建筑在工厂完成标准化模块的制造，在现场快速完成组装，建设周期显著缩短，建筑质量明显提高。在建筑内生活的我们将拥有解放双手、双眼，无处不在的私人助理，它们能够感知我们的需求并指挥智能家居产品执行，让我们拥有舒适的家居生活；走出家庭，AI、机器人等

技术将把我们从重复性、危险性岗位中释放，更多的人在机器人的辅助下可以拥有安全及体面的工作，更多的精力可以投入到具有创造力和趣味性的工作中；离开办公室，智能汽车、智能飞机、智能轮船会给我们带来智慧化、共享化的第三空间，让我们拥有便捷、安全的出行体验；当我们需要购物时，我们会以低廉的价格买到大规模定制化生产的独一无二专属于我们的服装、家居、电器。其它标准化的产品都会被自动补货进入我们的冰箱、橱柜和储藏室；未来的工业，还会给我们带来普惠的、一人一策的、定制化的教育和医疗服务。当然，未来工业还会为我们带来清新的空气、洁净的水和美丽的蓝天。

展望2030年，我们认为未来工业应是IMAGINE的，即虚实融合、大规模定制化、灵活适应变化、可靠互信、体面工作、自然友好、生态共荣的。(图1-1: 2030年工业展望)

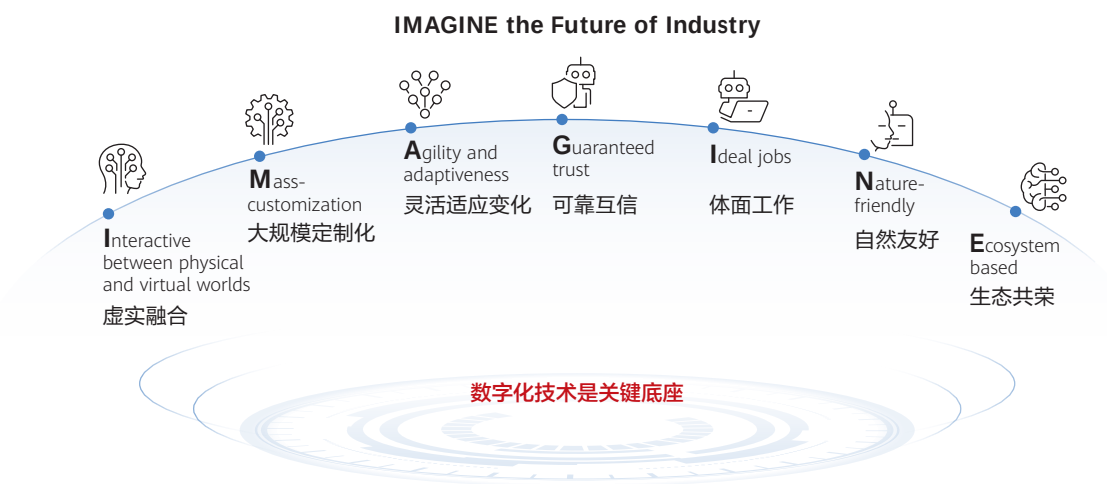


图1-1: 2030年工业展望

1.2.1 虚实融合

Interactive between physical and virtual worlds（虚实融合）。物理空间和数字空间实时映射、全面互联、深度协同。构建愈加完善的Digital Twin，在虚拟世界中进行模拟仿真，不断优化，并指导现实世界的行动。

随着智能传感、物联网、云计算、实时建模与仿真、VR/AR等技术创新应用，使得工业领域能够在虚拟空间中对物理世界进行高精度建模和实时仿真分析，采用数字模型代替物理实体开展验证分析和预测优化，进而获得较优结果或决策来指导实际工业生产。

一是基于数字样机的产品设计与仿真优化。通过建立多学科、多物理量、多尺度的产品数字样机，在虚拟空间中完成设计方案的仿真分析，功能、性能测试验证，多学科设计优化以及可制造性分析等，加速设计迭代。

二是基于数字孪生的生产过程监控与优化。通过构建装备、产线、车间、工厂等不同层级的生产数字孪生模型，通过实时数据采集和分析，在数字空间中实时映射真实生产制造过程，进而实现工艺仿真分析、虚拟调试、资源调度优化、过程优化等。

三是基于产品数字孪生的智能运维。通过构建产品数字孪生模型，通过实时采集来分析产品运行、工况和环境数据，监控物理产品运行状态，以及进行功能、性能衰减分析，从而对产品效能分析、寿命预测、故障诊断等提供分析决策支持。

1.2.2 大规模定制化

Mass-customization（大规模定制化）。以硬件为核心竞争力的产品逐渐被以“产品+”为代表的个性化体验经济所取代。供应侧感知、收集消费者需求，并有能力低成本高效的输出定制化产品或方案。

加速制造系统和消费系统的打通，通过客户需求驱动产品研发，生产制造和交付服务，以规模化生产满足个性化需求，进而获得更高的产品溢价，带动制造系统从追求规模经济价值到追求范围经济价值的深刻变革。

一是客户需求驱动的产品快速设计。依托产品模块库、设计知识库或者配置规则库等，能够基于客户需求灵活配置、调整和组合产品设计模块，快速获得满足客户个性化需求的定制设计方案。

二是规模化定制生产。通过全生产流程的数据打通，制造系统能够自动识别产品匹配个性化订单状态，并适配订单个性化设计需求，组织制造资源，执行生产作业、物流配送和质量检测等，完成个性化产品的定制生产。

三是数据驱动的个性化服务。依托具备感知、传输、分析和优化的智能产品，通过采集、传输、建模和分析用户数据，挖掘客户服务需求，进而开发满足个性化需求的增值服务，提升产品消费体验。

1.2.3 灵活适应变化

Agility and adaptiveness（灵活适应变化）。供应侧需持续强化敏捷响应、快速交付能力，满足多品种、小批量、短交期需求。此外，应对当今愈加多变的世界，工业企业应构建应对地缘政治、自然灾害、疫情等不可控风险的管理及调整能力。

数字技术加速传统制造体系走向具备自感知、自分析、自决策和自执行的新型制造系统。新型制造系统能够实时、精准掌控调整制造过程，自适应内外部环境和需求变化，将原来由人主导的柔性、敏捷制造转化为更具有智能特征，其程度、范围均达到更高水平的柔性、敏捷制造。

一是柔性、动态资源配置与调度。泛在

连接各类生产资源，实时感知生产要素状态，基于外部需求和内部生产状态，制定生产计划、车间排产等，并根据订单状态和异常扰动，动态实时调整计划排程，调度生产资源，快速响应变化。

二是柔性化、自适应生产作业。依托柔性可重构产线、柔性工装夹具和柔性线上物流搬运系统，能够自适应响应订单、计划、物料、工艺等变化开展生产作业，实现作业内容差异的多品种多批量定制产品的柔性生产。

1.2.4 可靠互信

Guaranteed trust（可靠互信）。在不远的将来，质量等关键信息全面可追溯为基本的要求，在此之上供应链安全韧性、上下游紧密协同也是不可或缺的关键能力。社会对产品供应链责任、全生命周期碳排放等信息透明公开的期待将促进企业切实地承担社会责任。

数字技术应用加速全产业链、全价值链的互联互通，进而推动订单、计划、生产、质量以及碳排放等数据的共性协同，进而推动全流程的质量追溯，全供应链条的高效协同与风险响应以及全链条的碳排放管理等全局性、系统性优化。

一是全流程质量追溯。全面汇聚设计、工艺、采购、生产、交付和运维全生命周期产品质量数据包，构建产品全生命周期质量履历，支持全生命周期质量改善活动。

二是弹性、韧性供应链系统。广泛连接上游基础材料和关键零件供应企业，下游仓储、物流服务商，实时感知采购供应、物流配送状态，分析和预警供应链风险，进而快速响应供应链交付异常。

三是全链条碳资产管理。通过采集和汇聚原料、能源、物流、生产、供应链等全价值链的碳排放数据，依托全生命周期环境负荷评价模型，实现全流程碳排放分布可视

比较，碳排放趋势分析、管控优化以及碳足迹追踪等。

1.2.5 体面工作

Ideal jobs（体面工作）。人工与机器将实现高效分工，各取所长、紧密配合，将人类从重复性工作中解放出来，把人的精力释放到更需要创造性、判断力、沟通力的岗位上。工作环境的安全性也将得到有力保障。

原有工业机器人只能用于标准化重复性作业场景，通过智能化升级实现生产过程自感知、自分析、自决策能力，能够像人一样柔性适应更多复杂工作场景，可推动在更多场景、更大范围内实现机器换人。

一是加快劳动力走向知识型。机器换人削减大量低技能水平、重复性劳动岗位，智能化企业内部保留下来的将是既懂OT也懂IT的复合型员工，员工整体素质能力水平显著提升，将推动劳动力结构从低水平员工密集的“正三角”走向高水平员工密集的“倒三角”。

二是创造大量高技术、高价值工作。算法设计、业务建模、装备调试等对专业能力要求较高的新兴岗位持续涌现，掌握数字技能的劳动者成为就业市场新增量，企业用工数量不降反增。

1.2.6 自然友好

Nature-friendly（自然友好）。除关注工厂日常运营能耗及污染排放外，工业企业将从产品设计时即考虑全生命周期碳排放。循环经济模式将得以发展。

应用人工智能、大数据、5G、工业互联网等提升工厂能耗、排放、污染、安全等管控能力，探索从根本上解决生产全流程安全、节能、减排等问题，逐步迈向绿色制造、绿色工厂和绿色供应链，加快制造业绿色化转型，创造良好的经济效益和社会效益。

一是全流程能耗监测与优化。基于数字传感、智能仪表、5G等实时采集多能源介质的消耗数据，构建多介质能耗分析模型，预测多种能源介质的消耗需求，分析影响能源效率的相关因素，进而可视化展示能耗数据，开展能源计划优化、平衡调度和高能耗设备能效优化等。

二是多污染源监测与优化。依托污染物监测仪表，采集生产全过程多种污染物排放数据，建立多维度环保质量分析和评价模型，实现排放数据可视化监控，污染物超限排放预警与控制，污染物溯源分析，以及环保控制策略优化等。

1.2.7 生态共荣

Ecosystem based（生态共荣）。产业、供应链内企业紧密合作将成为竞争力提升的刚需，工厂四壁的边界将被打破，鼓励信息共享，以实现整体系统效率最大化。

网络使得制造系统可以不断超越时空的限制进行更广泛的连接，将人、设备、系统

和产品等要素连接起来，打通全要素、全价值链和全产业链的“信息孤岛”，使数据能够在不同系统、不同业务和不同企业之间高效流动。

一是全产业链、供应链协同优化。依托跨企业信息系统集成或构建供应链协同平台，打造供应链协作入口，连接融合采购、库存、物流、销售等前后端的供应链环节，实现数据联动的供应链集成优化，提升内外部整体协作效能。

二是网络化协同制造。基于全要素、全产业链、全价值链的互联互通，实现跨地域、跨行业和跨领域的信息流转和业务协同，制造资源配置冲破企业、地域边界束缚，在产业层面实现全局最优，进而影响产业的空间布局。

三是平台化的产业生态体系。具有社会资源分配和生产活动组织功能的平台，能够支撑大量企业以平台为纽带开展互补合作，实现互利共赢，在工业领域打造平台经济属性的生态体系。



第二章

工业数字化的当前进程

数字化转型在过去10年中一直是企业的关键议程之一，但不同行业之间的数字化进程有显著差异。根据华为2021年发布的《战略到执行、实践到卓越》报告中的评估，工业处于数字化进程的第二波次，处于转型追随者的位置。（图2-1: 各行业数字化转型波次）

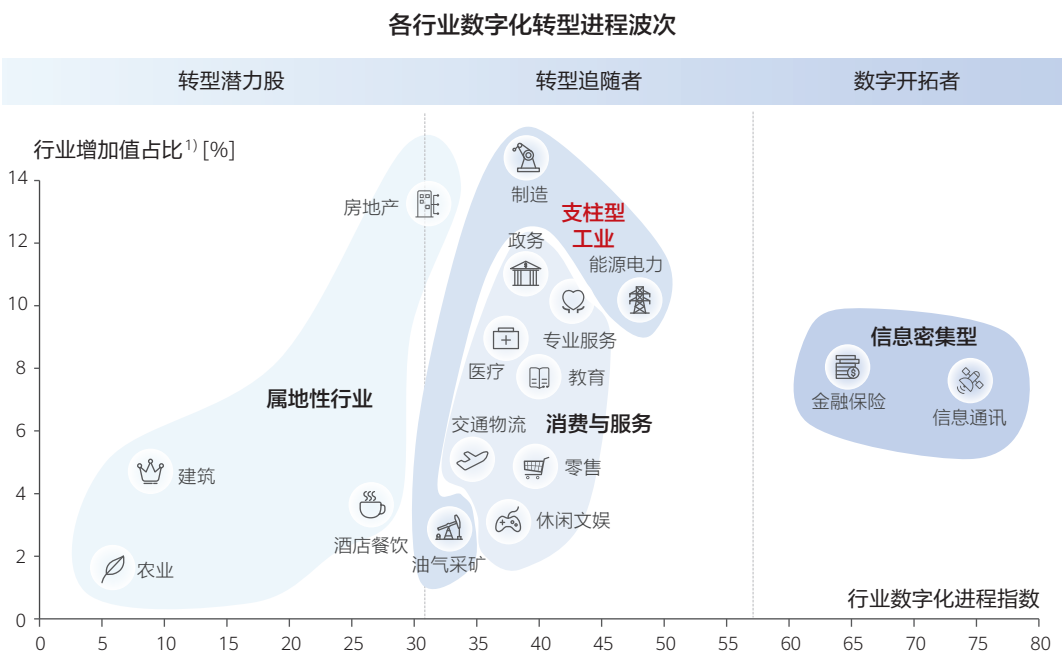


图2-1: 各行业数字化转型波次

插图注释：

1) 资料来源：2021 年华为《数字化转型，从战略到执行》；罗兰贝格

很多工业企业大多流程复杂、资产重，变革包袱大，其转型进程虽不及与数字化亲和度更高的信息密集型行业，但其希望通过数字化提升竞争的诉求强、应用场景丰富，想象空间巨大。

同时，工业领域宽广，子行业众多，为明确工业数字化转型的具体进程，我们参考《国民经济行业分类》¹（GB/T4754-

2017¹）和智能制造重点产业，在本白皮书中将工业划分为16个子行业进行分析，评估中国工业各子行业的数字化指数。

以可观测、易评价、可量化为原则，我们从工业产品的全生命周期出发，制定研发设计、生产管理、仓储物流、商业运营四大维度、包含21细项指标的评估模型²。（图2-2 工业数字化指数评估模型）

¹ 中华人民共和国国家标准，由中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会于 2017 年发布，2019 年修订

² 模型中的指标参考中国电子技术标准化研究院《智能制造发展指数报告 2021》中的公开指标

数字化指数评估模型			
A 研发设计	1 数字化设计2 数字化仿真		
B 生产管理	设备相关	质量相关	计划相关
	3 设备数字化率 4 设备联网率 5 自动物流设备应用率 6 设备预测性维护	7 生产数据自动采集 8 关键工序在线检测 9 全流程质量追溯	10 生产过程可视化 11 应用高级排产系统 12 作业文件自动下发
C 仓储物流	环境相关	13 能源管理平台应用率	14 碳排放统计
D 商业运营	15 基于标识的物料管理 16 仓库管理系统应用	17 基于生产需求的精准配送	
	18 产品个性化定制平台 19 供应商信息协同	20 大数据平台 21 电子商务平台应用率	

图2-2: 工业数字化指数评估模型

数据来源方面，行业均值参考了中国智能制造评估评价公共服务平台截至2021年12月的数据，覆盖中国31个省市自治区的2万余家工业企业的智能制造能力成熟度诊断数据³；各细分行业数据在行业均值的基础上，以调研、访谈方式，分别从行业内专家、工业数字

化供应商专家获取各指标评分，并交叉验证。

从结果来看，半导体、汽车、航空航天、石油化工行业整体数字化水平最高；采矿、建筑材料、轻工、纺织与服装相对落后。（图2-3 16个行业工业数字化指数评估结果）

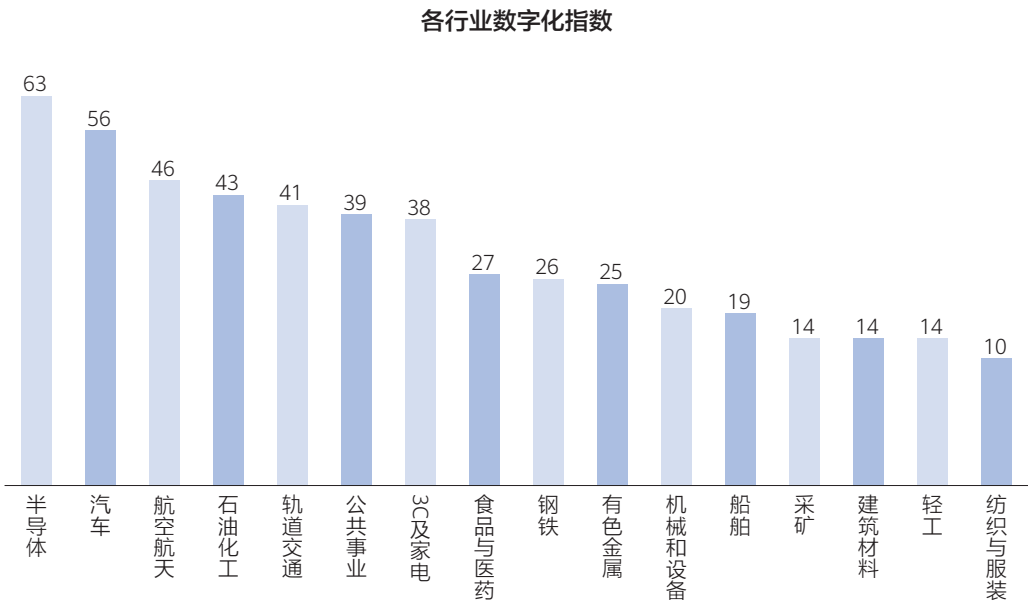


图2-3: 16个行业工业数字化指数评估结果

³ 参考中国电子技术标准化研究院《智能制造发展指数报告 2021》

从细项指标分数看，数字化设计、设备数字化、生产数据自动采集的整体水平较高，是企业数字化转型的基础场景和能力。（图2-4 16个行业工业数字化指数评估细项指标结果）

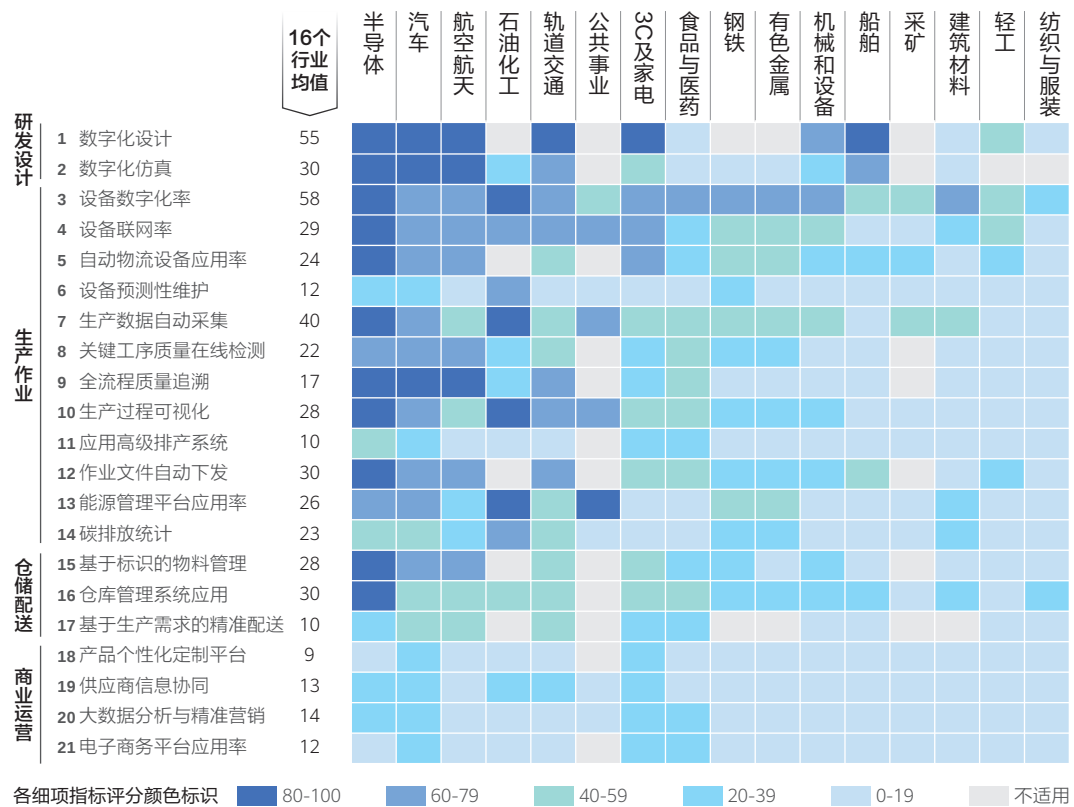


图2-4: 16个行业工业数字化指数评估细项指标结果

在数字化指数基础上，我们又叠加了各行业的盈利能力⁴，从这两个维度出发，将16个子行业划分为了引领型行业、敏捷型行业、前瞻型行业、谨慎型行业、沉稳型行业五种行业画像。（图2-5 工业数字化的行业画像）

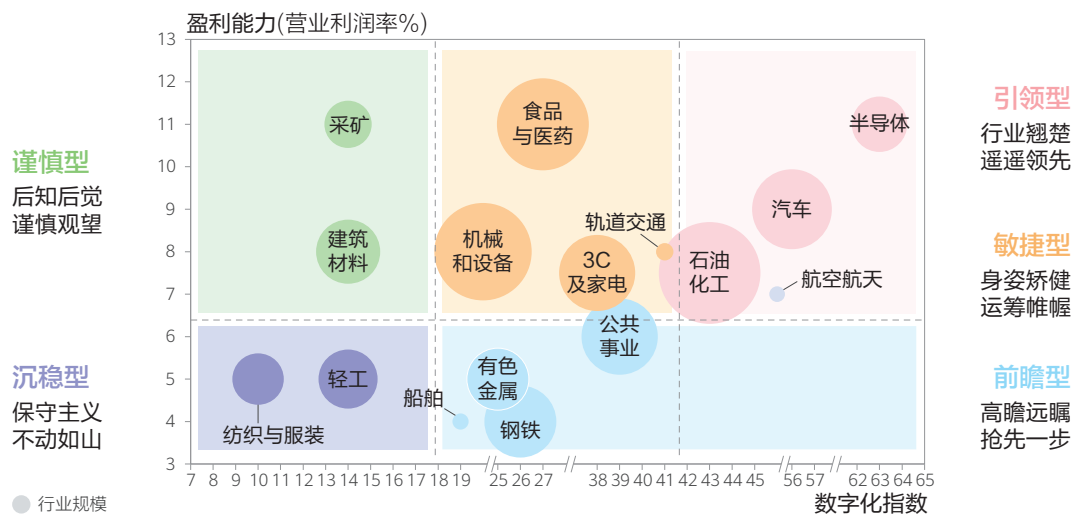


图2-5: 工业数字化的行业画像

⁴ 参考国家统计局《中国工业统计年鉴》、A股上市公司的营业利润数据

从这两个维度进行分析是因为数字化指数和盈利能力之间有一定相互促进的正相关关系，较高的数字化水平能够促进企业盈利水平提升，同时雄厚的资金实力才能够支撑数字化投入。

引领型行业：包括半导体、汽车、航空航天、石油化工行业。这些行业具有技术密集、固定资产投入高、大规模和高精度生产、流程标准化的天然属性，人工相比设备不具优势，因此数字化起步最早、转型最为成熟。同时，有极强的盈利能力作为有力支撑，保障对数字化的持续投入，由此形成“滚雪球效应”。当前生产过程数字化已经基本完成，未来将重点关注结合 AI、数字孪生、传感系统等前沿技术，发掘更为丰富的智能化应用。

敏捷型行业：包括轨道交通、3C 与家电、医药与食品、机械与设备行业。对这些行业来说，数字技术有利于精准洞悉市场需求并开展创新研发，同时对于生产活动的降本增效、精度与质量、可靠性提升效果显著。这些领域虽与引领型行业存在差距，但已具备一定的数字化基础，未来在补齐短板的同时，将关注应用的协同及集成，以及大数据应用。

前瞻型行业：包括公共事业、钢铁、有色金属、船舶行业。这些行业受生产活动的

属性影响，数字化是必备的生产要素，也是降本增效的必要条件。如对于钢铁、有色金属行业来说，流程制造的主生产环节的物理化学反应完全依赖于设备，人工仅作为辅助。因此在盈利能力不高的情况下，这些领域的企业仍然敢为人先，有动力去推动数字化转型。未来将进一步根据投入产出比进行数字化投资。

谨慎型行业：包括采矿、建筑材料行业。该领域生产模式较传统和粗放，工艺流程复杂度不高，长期以来都以人力劳作、经验传承为主，同时对于数字化的价值认知较晚，因此行动相对谨慎和保守。接下来在针对关键工序进行数字化改造的同时，将逐步扩大数字化范围，从点到面，拓宽应用场景，全面满足安全、环保的生产需求。

沉稳型行业：包括轻工、纺织与服装行业。这些领域中小企业众多，除少数已深耕数字化的头部企业，大部分企业受制于自身盈利和资金能力，数字化转型相对迟缓。对这些中小企业来说，轻量、投入少、见效快的云化工业应用软件将是重点。

虽然各子行业的数字化进程不一，在分析的过程中，我们仍发现有一些跨行业的共性需求场景，将在下个章节中进行分享。



第三章

行业共性需求与价值场景

透过现象看本质，我们发现16个细分行业、5组行业画像的背后，存在一些共性的场景，这些场景具有跨行业通用性和高价值特点。基于GB/T 40647-2021《智能制造 系统架构》，我们从生命周期、系统层级和智能特征三个维度识别了二十个高价值的共性

场景⁵。这些场景将成为未来5-10年内工业企业的数字化部署重点，也将驱动相关关键使能技术的迭代更新，因此值得工业企业以及数字化解决方案提供商重点关注。（图3-1：二十个共性价值场景）



图3-1：二十个共性价值场景

⁵ 部分场景参考了中国电子技术标准化研究院《智能制造能力成熟度应用实践报告》；中国信通院《中国智能制造发展研究报告：智能工厂》

3.1 产品数字化设计

企业在研发设计阶段存在以下痛点：成本方面，传统设计开发方式完全依靠实物验证，验证成本高；效率方面，大量设计知识无法积累，设计过程中重复“造轮子”现象严重；质量方面，设计方案缺乏可制造性，存在不合理、不正确，造成风险。

产品数字化设计是企业节约研发成本、提高设计效率、提升产品质量的一项重要举措。例如某电机制造企业部署PLM软件，一体化管理设计和工艺BOM；建立资源库和工艺库实现知识积累和快速重用；通过设计软件与管理系统的集成，搭建一体化研发设计平台；搭建仿真分析平台，实现设计快速验证，产品研制周期缩短25%，数据100%线上管理。

产品数字化设计的实现方式如下：工业软件方面，一是应用三维设计软件，采用TOP-DOWN方法实现产品设计，采用模块化、参数化方法提高设计质量和效率，融合人工智能算法实现创成式设计，全面提升设计效率；二是将设计软件和PDM、PLM等管理系统集成，打造数字化设计协同平台，实现设计数据的统一管理和高效复用；工业数据方面，建设通用件优选管理平台、组件模型库等设计知识库，实现通用化、标准化组件的快速调用及组合设计，避免重复“造轮子”。

典型行业：汽车、航空航天、轨道交通、3C与家电、船舶、机械与设备。

3.2 工艺仿真与虚拟调试

企业在工艺设计阶段存在以下痛点：成本方面，传统工艺设计依赖人员经验，无法在设计阶段进行工艺方案验证，往往在实物

制造过程中发现工艺设计问题，造成返工返修成本；效率方面，传统工艺设计重复“造轮子”现象明显，导致工艺设计效率提升困难。

通过在数字化环境中对工艺进行虚拟仿真验证，对产线进行虚拟调试，可以在设计阶段对工艺准确性进行全面验证，降低生产、调试成本。例如某装备制造公司，利用数字孪生系统进行各产线设备通用模型建模及仿真验证，实现了工厂布局的方案验证与设计优化，规划质量提升50%，规划设计周期缩短75%。

工艺仿真与虚拟调试的实现方式如下：工业软件方面，基于CAM、装配仿真、车间仿真等工艺仿真软件验证工艺可行性和正确性；基于SIMIT等虚拟调试系统，构建生产线数字孪生系统，实现工艺层级的虚拟调试，缩短产线调试周期同时降低成本；工业数据方面，构建工艺仿真与调试模板库，根据仿真对象自动匹配调用仿真配置文件，提高仿真效率。

典型行业：汽车、航空航天、轨道交通、石油化工。

3.3 设计与工艺一体化协同

设计与工艺一体化协同是缩短产品研发周期、提升产品研制效率的有效保障。例如徐工集团道路机械分公司建设了PDM系统、仿真分析平台、焊接仿真系统等项目，实现设计与工艺的一体化协同，产品研发成本降低30%，产品研发周期减少5个月，产品设计效率提升40%；鱼跃医疗运用基于模型的机械加工、装配等工艺设计，产品研发周期缩短30%。

工业软件和数据集成协同是实现设计与工艺一体化协同的主要解决方案：一是设计软件，基于三维设计软件开展研发和工艺设

计，确保设计数据的一致性；二是协同平台，通过设计软件-工艺软件-信息系统的集成（如CAD-CAPP-PLM），实现数据的准确交互、及时共享；三是可制造性设计分析软件，将工艺、制造过程中的工业知识模型化、标准化，在设计环节采用DFM分析软件进行可制造性设计分析，提前发现、修正设计隐患。

典型行业：汽车、轨道交通、航空航天、3C与家电。

3.4 关键工艺智能调优

工艺过程控制当前痛点总结如下：效率方面，根据经验人工调参难以实现实时调优与控制；质量方面，大量工业企业的工艺高度依赖于操作人员经验判断和人工操作，容易出现质量波动问题。

工程机械、钢铁石化、建材等行业龙头企业积极开展应用探索，例如，徐工集团通过工程机械焊接工艺调优，将焊接直通率提升14%，实现了效率与品质的跃迁；海螺水泥通过熟料研磨工艺调优，将水泥质量稳定

性提升15-20%；中石化通过催化裂化工艺调优，实现出油率提升5-10%。

关键工艺智能调优的实现方式如下：工业数据方面，应用数理模型破解过程黑箱实现动态优化工艺参数，应用AI算法模型实现工艺参数运算、推理与补偿优化，沉淀工艺知识库提供工艺参考与指导；工业装备方面，具有温度、压力、机器视觉等感知功能的智能工控设备实现动态优化操作参数，先进过程控制采用多变量优化算法处理多层次、多目标和多约束控制问题，实现全局优化；工业网络方面，确定性IP网络满足动态调参对确定性低时延的要求。

典型行业：汽车、钢铁、采矿、石油化工。

典型工序：焊接、焊锡、注塑、电镀。

3.5 智能机器与人员协同

在部分重复性强、标准化或危险系数高的场景中存在以下痛点：成本方面，熟练工人培训周期长，人工成本高；效率方面，人工劳动强度大，难以长时间高效工作；质量



方面，操作精度、生产质量受工人经验影响，产品质量一致性差。

机器具备感知、分析、决策能力，可以实现自适应作业，高效协同人员开展工作。例如中联重科应用模块化人机协同工作站进行挖掘机下车架部件装配，装配效率提升50%，上海航天应用智能喷涂机器人，实现工件自识别、参数自调用和轮廓自适应涂装，涂装效率提升30%。

智能机器与人员协同的实现方式如下：工业网络方面，基于5G/Wi-Fi 6开展设备组网，进行协同调度和生产信息传输，基于工业PON构建连接距离长、抗干扰、性能和安全性高的网络系统；工业装备方面，基于智能机床、工业机器人实现切削、抓取、喷涂、检测等加工作业自动化；工业数据方面，基于自然语言处理模型理解人类指令，配合工人工作，基于机器视觉模型，采集图像信息的自动分析识别，判断位置信息，基于智能决策算法，实现加工路径规划、位姿自适应调整。

典型行业：钢铁、机械与设备、汽车、半导体、3C与家电、食品与医药。

典型工序：上下料、搬运、外观检测、喷涂、焊接、装配。

3.6 工业现场边缘物联

当前痛点总结如下：安全方面，考虑数据安全要求，关键生产数据不能出厂；效率方面，重复数采成本高，且对边缘物联设备性能冲击大。

工业企业在工业现场部署一站式的IoT平台，将有利于数据采集、分析与现场联动，实现关键生产数据不出厂。例如，陕煤集团过去的智慧矿区建设多基于现有设施改造，一设备对接多系统，带来稳定性差、设备数

采耗时长，数据准确度低等问题；现在通过新建IoT边缘平台，实现井下检修效率提升30%、智能化采煤率大幅提升。

工业现场边缘物联的实现方式如下：工业数据方面，应用实时孪生可视化组合建模工具，实现小时级产线模型构建，百万级点位并发，秒级实时采集，毫秒级超低时延；工业装备方面，应用超融合硬件将全量云IoT平台业务能力下沉边缘，厂、矿、井口轻平台部署，实现高可靠性、安全性；工业软件方面，应用IoT Edge提供数据采集、低时延自治、云边协同、边缘计算等能力。

典型行业：汽车、3C与家电、食品与医药、采矿。

3.7 工业边缘智能化升级

当前痛点总结如下：成本方面，负样本数据收集难，设备缺陷类算法精度低；效率方面，算法调优时间长，门槛高，部署效率低，换线收集样本周期长。

因此，基于AI开发工具，降低算法开发难度、缩短算法移植周期就显得尤为重要。例如，华为为南方工厂在试点产线部署了华为昇腾全套AI质检方案，实现了成像子系统、训练子系统、推理子系统的有机结合，实现一站式部署、算法准确率大幅提升、模型迭代时长大幅缩短。

工业边缘智能化升级的实现方式如下：工业数据方面，应用难例识别实现半自动筛选难例，同等精度（ISV模型开发）仅需65%的样本，ISV算法精度提升10%，应用样本处理分析工具实现样本采集时间缩减50%，应用增量学习实现一键算法迁移，周期缩减50%。

典型行业：汽车、半导体、航空航天、3C与家电。

3.8 工业装备集成协同控制

传统工控系统功能单一，运动控制+视觉分析分离，多套系统叠加，复杂度高、性能差。

基于此，工业企业可探索极简架构、实时虚拟化、软件定义、安全可靠的新型工控平台。例如，某汽车装备公司通过AI硬件平台和实时操作系统共同构成的一体化智能工控系统，将集成开发效率提升4倍、成本减少30%。

工业装备集成协同控制的实现方式如下：工业装备方面，应用SoC+RTOS实现通用计算与智能计算合一，应用OICT融合组态平台实现控制与智能协同的开发与部署；工业网络方面，应用TSN确定性大带宽连接，如工业光总线，具有抗干扰能力强、带宽大（10Gbps）的优势。

场景涉及典型行业有：食品与医药、3C与家电、汽车。

3.9 工业装备远程控制

钢铁、采矿、港口等行业的工业现场环境相对恶劣、复杂，效率方面，员工劳动强度大，环境恶劣，生产效率低；安全方面，现场环境恶劣，危险源多，安全问题突出。

工业装备的远程控制成为应对恶劣现场工作环境的一项有效举措。例如，天津港的高空作业人员在50米高度作业，下楼难、工作期间饮食不便；同时港机不能远程维护，现场高空排查维修存在安全隐患。为此，天津港采用现场实景回传和拉远控制改造，使得操作员实现远程操控、现场无人化，工作的安全性、舒适性大幅提升，工作效率显著提高。

工业装备远程控制的实现方式如下：工业软件方面，基于工业控制软件管理设备调度、控制，显示设备运行状态；工业网络方面，基于5G低时延、高带宽的特性能快速传输工业现场数据，基于现场总线/TSN实现现



场数据实时上传和控制指令即时传递，满足控制精度要求；工业装备方面，工业机器人等智能装备执行指令，进行生产作业操作。

典型行业：石油化工、钢铁、有色金属、建筑材料、采矿。

3.10 产线柔性化配置

企业在柔性化制造方面存在以下痛点：成本方面，传统产线的构造/人员/操作固定，改造成本巨大，需增加产线投资；产线配置的标准化、自动化程度较低，耗费大量人力、物力；效率方面，部分设备不便移动，重构设备布局周期长，部分设备智能化程度较差，工装、模具、夹具、刀具等调试周期长。

根据订单需求灵活配置人、机、料、法等要素，可以快速组织生产和响应需求变化。例如华为Wi-Fi 6解决方案助力某消费电子厂商实现柔性产线配置，通过Wi-Fi 6 CPE + Wi-Fi 6 AP组建的无线生产网，给设备“剪辫子”，应对因产线频繁变更导致的机台临时移动与组合，换线时间缩短50%，AGV运行效率提升30%，网络运维OPEX降低50%。

为实现产线柔性化配置：工业网络方面采用5G、Wi-Fi等无线网络，构建超宽上行、高吞吐速率的高品质无线生产网络，实现产线的快速调整和按需配置；工业装备方面引入智能化装备、自主移动机器人、柔性化工装夹具等，搭建布局柔性、单元柔性、可复制性的柔性可重构产线。

典型行业：半导体、纺织与服装、汽车、3C与家电。

3.11 智能排产与动态调度

企业在排产和调度方面存在以下痛点：人工排产周期长、难以动态响应重排需求。

人工排产依靠业务规则和经验，对员工的经验积累和技能要求高，无法根据多约束条件生成最优化的生产计划，经常会出现资源冲突、资源浪费、加工周期长、订单延误的情况。

智能排产与动态调整可以提高缩短生产周期。华为南方工厂构建了各种场景的排产数学模型和数据模型，自动排产具体到线体/设备/夹具/人员/场地等资源，排产人员减少50%，同时实现了关键资源的最大化利用，产线产出提升20%。某电气公司基于APS系统及寻优算法，通过配置产线规则、库存规则、排程规则、优先级规则等，结合生产资源能力、约束理论、时间和物料，实现生产计划自动排产建议，工作效率提升25%，产品生产周期缩短21%。

智能排产与动态调度的实现方式如下：工业软件方面，可以使用高级计划排程系统，集成销售、仓储、物流等系统，基于需求、能力、原料、产能等多约束，实现详细作业计划的高级排程；工业数据方面，基于约束理论的有限产能算法、优先级规则的算法、启发式规则的算法、融合人工智能动态调整算法等，实现智能排产方案的寻优。

典型行业：汽车、航空航天、轨道交通、3C与家电、船舶、机械与设备。

3.12 自动化仓储与物流配送

企业在仓储与物流配送方面存在以下痛点：成本方面，仓储空间利用率低，库房、人力成本高；效率方面，物料盘点、出入库流程手续繁琐，耗时长；仓储信息透明度低，物料拣配准确率低，影响生产节奏；安全方面，人工搬运存在风险。

物料的收、存、发、配全过程任务，需要逐步走向自触发与自执行。例如，纬创资通建立PCBA智能仓储配送系统，将物料管理

用人从6人缩减至3人，PCBA平均库存周转天数从3天缩减至1.5天；海尔电器建立AGV物流配送系统，实现物料周转平均天数低至1.3天，待料导致的停机时率降低0.9%。

实现自动化仓储与物流配送的方式如下：工业软件方面，基于仓储管理系统（WMS）、工厂物料配送管控系统（TMS）实现仓储信息管理、物料调度优化；工业网络方面，基于5G/ Wi-Fi 6/工业无线实现物流装备控制、物流及出入库信息传输；工业装备方面，基于智能多层多向穿梭车、智能大型立体仓库等，实现物料搬运、装卸和信息记录；工业数据方面，基于智能决策算法优化物料存储策略和配送路线。

典型行业：钢铁、机械与设备、汽车、3C与家电、食品与医药。

3.13 环境监测与优化

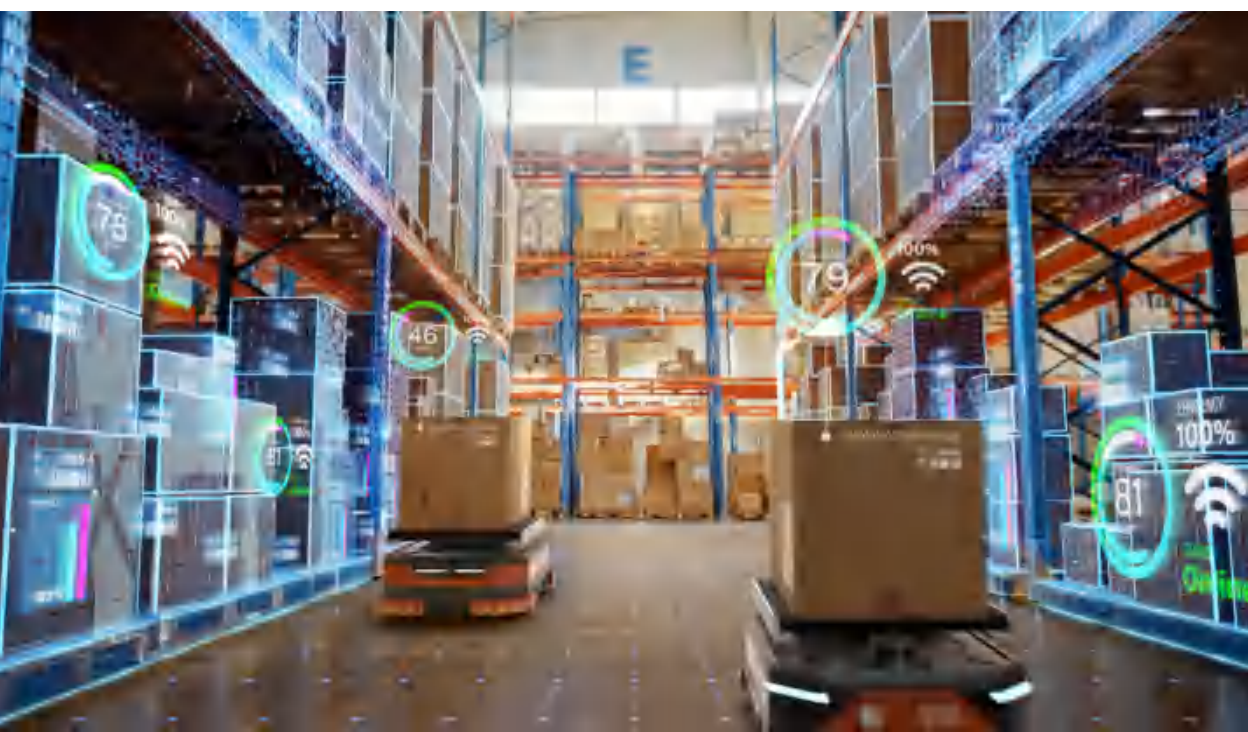
当前痛点总结如下：成本方面，一旦出现环境污染事件，会造成较大的资金损失。

安全方面，通常只对污染物总量排放和达标情况进行结果观测，缺少事前预测、风险预警与管控的全过程分析与管理。

工业企业应从被动管理走向主动管理，对环境与污染排放精准量化、超限报警和优化管控。例如，南京钢铁建立了220个悬浮微粒排放监控点，实时感知环境数据，并构建智慧环保模型，进行预测分析和环保控制策略的优化，使得生产异常带来的超标排放风险降低80%、加热炉排口硫超标现象减少90%。

环境监测与污染优化的实现方式如下：工业网络方面，应用5G/Wi-Fi 6/NB-IoT满足计量仪器的无线传输、长时间低功耗工作特点；工业软件方面，建立环境、碳排放管控软件，结合智能传感，对各类排放渠道数据进行实时采集、分析、查询、超限预警和管理优化。

典型行业：钢铁、有色金属、石油化工、采矿、建筑材料。



3.14 安全监测与优化

当前痛点总结如下：效率方面，故障风险、异常难以在第一时间发现并排除，改进周期长；安全方面，依赖人工定期巡检，安全预警、隐患排查不足存在盲区，工人巡检存在安全隐患的漏查问题。

工业企业在安全监测和优化场景中实施可视化监测、安全风险应急处理，才能构筑起安全的生命线。万华化学集成视频、报警、气象仪器等数据源，构建应急预案库，实现事故定位、预案启动和高效处置，将应急响应速度提升30%。某汽车公司利用物联网、摄像头等智能化手段实现重要安全参数在线监测预警，重复隐患发生率降低30%。

安全监测与优化的实现方式如下：工业数据方面，基于运行数据，通过知识图谱、AI模型等安全分析模型开展风险源识别、预测及管理优化；工业装备方面，应用巡检机器人实现产线、管道自动巡检和装备信息采集，应用边缘智能设备如Atlas等AI加速模块在端侧实现图像识别与分类；工业网络方面，应用5G/Wi-Fi 6/工业无线实现设备运行参数实时传输；工业软件方面，建立安全管理系统/应急指挥系统实现故障数据采集、分析、存储和事故发生时统一指挥调度。

典型行业：石油化工、钢铁、有色金属、采矿、汽车、建筑材料。

3.15 能耗监测与优化

当前痛点总结如下：成本方面，能耗缺少实时透明化、精细化管控，难以降低能耗成本；效率方面，能源数据采集与分析停留在人工抄表、人工分析阶段，能耗数据分析效率低。

工业企业对能耗实施可视化监测、精细化管理，合理利用能源，提高能源利用率。

例如，长城汽车采集室内外温度和制冷机系统负荷数据，利用算法模型实时决策制冷站运行的最佳效率点，使得制冷站整体能耗降低15%以上；某电气公司通过能源管理系统，实施监控各个点的用能数据，减少非必要用能，用电量减少约15%。

实现能耗监测与优化解决方案的方法如下：工业数据方面，应用多介质能耗分析模型预测多种能源介质的消耗需求，分析影响能源效率的相关因素，开展能源计划优化；工业装备方面，应用边缘计算网关EC-IoT部件实现海量终端数据本地分析和处理；工业网络方面，应用5G/Wi-Fi 6/NB-IoT满足计量仪器的无线传输、长时间低功耗工作特点；工业软件方面，建立能源管控系统结合各介质仪表数据，对各类能耗统计、分析、预测，实现能耗优化。

典型行业：石油化工、钢铁、有色金属、采矿、汽车。

3.16 质量在线检测与追溯

当前痛点总结如下：效率方面，质量信息手工记录，依赖纸质表单，执行效率低，追溯周期长；质量方面，涉及的生产环节、工艺问题信息记录不全，追溯困难，难以及时调整；人工判断一致性差，产品质量难以保证。

质量在线检测与追溯有利于实时识别、判断和定位质量缺陷，大幅提高缺陷识别率、降低质量损失风险。例如，华为昇腾AI助力宝德开展AI质检，在台式机、服务器等产品的主板放置，主板和内存条的安装、固定、接线、理线、盖板和下料等多道工序中运用了AI视觉检测，实现检测准确率和产线节拍双提升。

质量在线检测与追溯的实现方式如下：工业数据方面，应用质量分析模型，基于知

识图谱、深度学习等算法对产品图像等质量信息的分析识别，应用质量知识库支持质量分析决策等；工业装备方面，应用智能检测装备和仪器实现产品质量信息实时采集、记录与处理；工业网络方面，使用5G传输检测图像、视频等产品质量信息；工业软件方面，建立QMS（质量管理体系）实现质量信息记录，便于追溯与质量改进。

典型行业：石油化工、钢铁、3C与家电、食品与医药、汽车、机械与设备、航空航天。

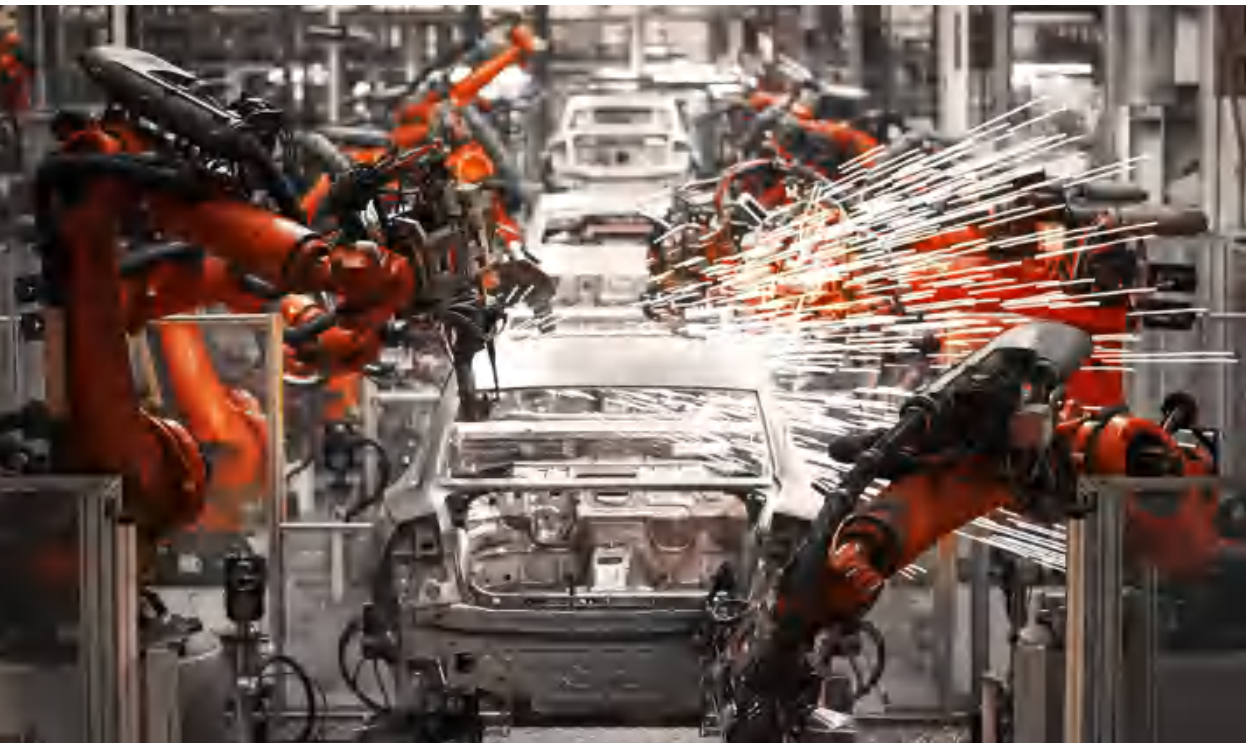
3.17 供应链可视化与信息协同

企业在供应链管理方面存在以下痛点：成本方面，无法及时获取供应商的产能、计划、出货、物流等信息，供应链异常导致生产异常；效率方面，供应链企业间信息不畅通，协作效率低。

供应链可视化与信息协同可以帮助企业精准掌握供应商的交货状态、成品库存、可分配产能等数据，降低交付风险。如蓝思科技构建供应商协同平台，向上游供应商提供云协作门户，集成供应商的生产、仓储、运输系统，实现采购成本降低8%；老板电器与供应商建立物料信息共享，实现生产端到供应商端的数据共享，优化配置供应链资源，交付周期缩短10%以上。

供应链可视化与信息协同的实现方式如下：工业软件方面，构建供应链一体化集成平台，打通供应链全链条企业，实现企业系统数据的互通互联，可视化监控、资源调度和绩效分析；工业数据方面，基于实时销售数据，分析决策最优供应链安全库存，保障采购准时供货的同时减少供应链库存成本，建立各类采购异常与解决策略的关联模型，针对异常事件智能化推荐解决方案。

典型行业：汽车、3C与家电、半导体、纺织与服装。



3.18 设备可视化与预测性维护

当前痛点总结如下：成本方面，人工点检和定期维护影响生产作业，造成产能浪费，运维成本高，关键设备故障影响生产计划，故障造成损失大；质量方面，难以及时发现潜在故障隐患和细微寿命衰减，长期积累导致突发停机，造成生产报废。

已有工业企业开展设备的可视化与预测性维护，实现设备状态监控、运行效率和性能综合分析，以及故障诊断和失效预警。例如，贵州航天电气开展设备在线状态监控，建立了设备故障诊断模型，实现设备综合利用率提升20%；华润三九医药开展设备数字孪生体应用，实现设备三维模型和设备实体的虚实映射和远程互操作，使得设备故障响应速度提升60%。

设备可视化与预测性维护的实现方式如下：工业数据方面，应用设备数字孪生模型实现设备运行状态的可视化、实时分析与故障预测，应用设备健康预测模型实现实时分析运行状态并在故障异常时自动报警，应用设备故障诊断模型实现精准判断设备失效模式，应用设备故障处置知识库实现快速决策修复策略；工业网络方面，应用5G/Wi-Fi 6/有线网络传输设备运行信息；工业软件方面，应用设备管理系统/设备运维系统实现设备管理、信息采集、故障诊断与处置、预测性维护等。

典型行业：钢铁、建筑材料、机械与设备、食品与医药、汽车。

3.19 大规模个性化定制

企业在大规模个性化定制方面存在以下痛点：成本方面，产线不具备柔性化生产能力，计划调度、生产执行等人工及管理成本

高，产线改造或新建投资成本高；效率方面，定制产品的BOM搭建及解析效率低，定制化零部件备货不准及供应不及时，产线柔性化较低，多品种定制化生产效率低。

部分市场嗅觉敏锐、具有卓识远见的工业企业探索并建立了C2M（客户直连制造）模式的成功样板，从大规模量产走向大规模定制。例如，曲美家居建立了1000余个设计案例库、5万套设计样本库，快速根据客户选配生成产品模型和工艺流程，由此实现店面定制家居设计效率提升400%；酷特智能为用户提供在线定制服装服务，可以自动匹配版型 and 服装设计，实现“一人一单”定制生产与直接交付，带来15%的订单收入增长。

大规模个性化定制的实现方法如下：工业软件方面，面向产品数字化设计场景实现设计软件与PLM系统的集成，面向产线柔性化配置场景引入面向产线的虚拟调试软件，面向供应链可视化与信息协同场景开展业务系统集成，构建供应链协同平台；工业网络方面，面向产线柔性配置场景布局5G、Wi-Fi6等网络；工业装备方面，面向产线柔性配置引进智能化装备、柔性化工装夹具等；工业数据方面，面向产品数字化设计场景采用知识库、人工智能算法，面向供应链可视化与信息协同场景采用安全库存算法、风险管理模型。

典型行业：纺织与服装、汽车、3C与家电。

3.20 云工厂共享制造

当前痛点总结如下：效率方面，模具、小家电、纺织等中小工业企业的数字化进程迟缓，难以应对市场灵活需求，产业链上下游冗长、信息流通慢、协同难，设备利用率季节波动、不稳定性高。

通过聚合工业企业及其上下游力量，由

各垂直领域的云工厂或产业运营商作为引领者，可以实现以订单驱动的产业链上下游资源整合，推动产业范式革新与产业整体的数字化升级。客户经由统一的入口下单，云工厂平台进行订单的拆解和分发，根据各工厂产能情况智能调度产能；并整合产业链上下

游的设计、供应链、物流等资源供工厂共享使用，由此培育形成协同设计、共享制造等全新的产业生态。

典型行业：纺织、机械与设备、3C与家电。（图3-2 云工厂模式示意）

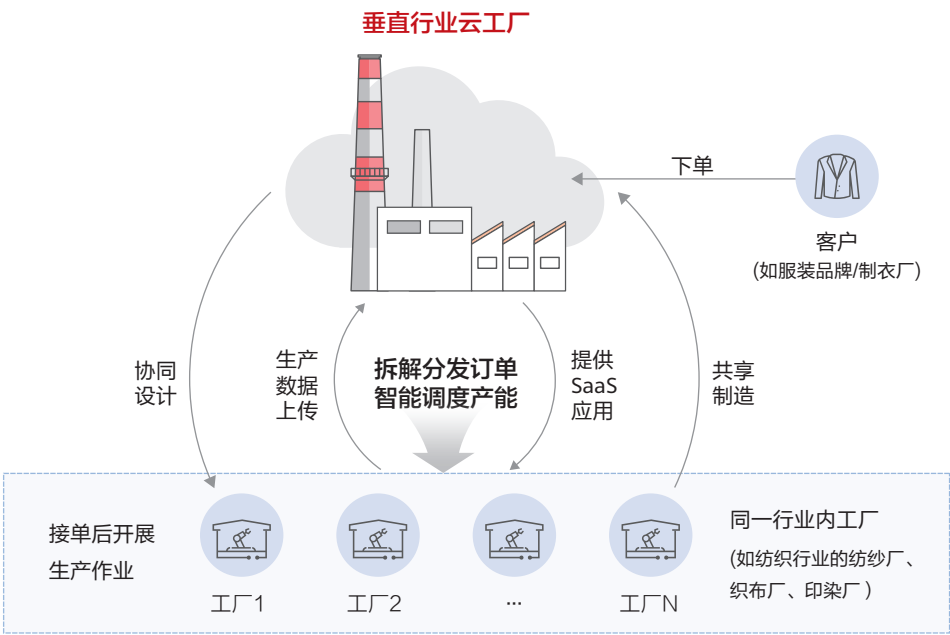


图3-2: 云工厂模式示意

要成功部署上述二十个共性价值场景，工业装备、工业网络、工业软件、工业数据是必不可少的关键支撑要素。工业装备作为高效、稳定、自动化作业的终端，是工业数字化的基础；工业网络是现场的人机料法环全要素的连接介质，实现协同；工业软件则帮助企业开展研产供销服全流程的精细化分析、决策与管理；工业数据是无处不在的资产，是沉淀的智慧结晶，是潜在价值无限的宝藏。



第四章

工业数字化产业发展趋势

我们认为，工业互联网基于“数据驱动+行业机理与知识”的优化范式是工业数字化的理论基础。工业数字化价值栈以《工业互联网体系架构2.0》为理论基础，参考工业互联网实施框架，按照设备、边缘、企业和产业四个层级展开设计。设备层关注工业装备及装备级数据，涵盖装备、产品的运行和维护功能，以及底层监控优化和故障诊断等应用。边缘层关注工业软件和车间级数据，涵盖车间或产线的运行维护功能，以及工艺配置、物料调度、能效管理和质量管控等应用。企业层关注工业软件和企业级数据，涵盖企业平台等关键能力，以及订单计划和绩

效优化等应用。产业层关注产业级平台和数据，涵盖跨企业平台、网络和安全系统，以及供应链协同和资源配置等应用。

在工业数字化价值栈中，工业数据贯穿各个层级，并依靠工业装备、工业网络和工业软件实现数字空间与物理世界的融合，构建数据优化闭环。基于这四大要素——工业装备、工业网络、工业软件和工业数据，我们描绘了一幅工业数字化价值栈全景图，可作为工业企业部署数字化场景和服务、分析市场机会与格局的参考。（图4-1 工业数字化价值栈）



图4-1: 工业数字化价值栈

脚踏实地、仰望星空，以工业数字化价值栈为参考蓝图，中国工业企业的数字化转型仍然任重而道远。在此，我们提出工业“新四化”的发展趋势，期望至2030年工业实现全面的数字化转型，推动实现新型工业化。(图4-2: 工业“新四化”发展趋势)

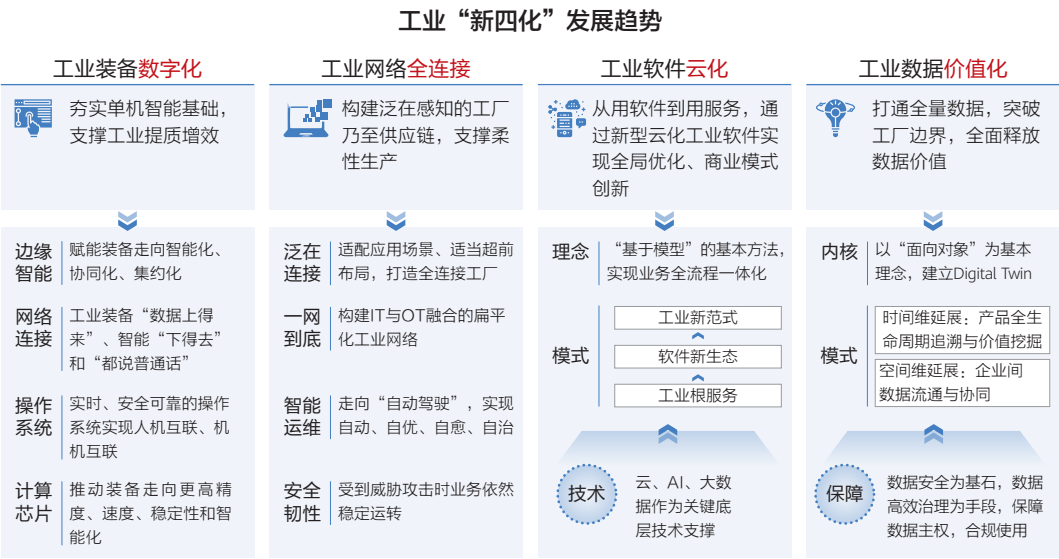


图4-2: 工业“新四化”发展趋势

1) 工业装备数字化

工业装备作为高效执行作业程序的工具，是工业企业实现提质增效的基础和关键。工欲善其事，必先利其器。当前工厂中大量的存量生产装备存在不联网、不支持实时采集和上传数据、缺少便捷友好的操作系统、只能执行简单程式化任务、互为烟囱和孤岛等问题，难以胜任未来更加复杂、高精度、高速度、智能化和协同的作业要求。

要推动传统装备迈向数字化装备，网络连接、操作系统、工业芯片这三件套是“装备数字化底座”。

具体而言：网络连接方面，不仅要让“哑设备”实现“张口说话”、做到“数据上得来”，还要让数据从“各说各话”变成“都说普通话”，才能走向互联互通；操作系统方面，要通过为传统装备嵌入实时、安全可靠的工业级操作系统，实现“一碰即连”、人机互联、机机互联，并能执行高实

时工作任务；工业芯片方面，通过为装备置入更优性能的工业芯片，使装备有能力胜任更高精度、速度、稳定性和智能化的作业任务；边缘智能方面，通过在单机装备的基础上引入边缘智能，可以赋能单机装备完成过去凭借自身配置难以胜任的高复杂度任务，例如基于实时数据的智能化分析与决策、装备间的协同作业与集中化远程控制。

2) 工业网络全连接

工业网络作为数据传输的媒介，广泛连接着工业现场的人机料法环等要素，支撑工业企业构建泛在感知的工厂乃至供应链，并实现高稳定高可靠的数据交互、连续不间断的生产活动、柔性灵活的生产模式。从当下看，大部分工厂已实现基础网络覆盖，可满足办公和基础生产活动需求；但面向数字化场景的持续拓宽和升级，工业企业正呼唤更优移动性能、更高确定性、更低时延、更大

带宽的工业网络，保障数字化场景的稳健落地。

面向未来，工业企业打造性能卓越、架构精简、安全可靠的工业网络，需要牢牢把握泛在连接、一网到底、智能运维、安全韧性四个要诀。

具体而言：泛在连接方面，工业企业需要从基础网络覆盖走向“能连尽连”，以适配应用场景、适当超前布局为原则，打造“全连接工厂”；一网到底方面，通过构建IT与OT融合的“一张网”，工业企业可以实现数据上得来、算力下得去、上下游贯通；智能运维方面，工业网络需要从人工运维走向“自动驾驶”网络，实现自动、自优、自愈、自治，为工业企业的运维工作“减负”；安全韧性方面，守好安全底线是业务活动的生命线，工业企业应建立安全韧性的工业网络，保障受到威胁攻击时业务依然稳定运转。

3) 工业软件云化

工业软件作为研产供销服各环节的管理中枢，承载着数据汇聚、分析、决策、反馈、执行等关键职责。回首过去，传统工业软件为工业企业在各环节的高效管理提供了极大的便利，帮助众多工业企业迈出了数字化转型的矫健步伐；然而面向未来，传统工业软件架构老化、本地化部署、软件系统异构、购买授权模式带来软件系统间集成打通的高昂成本、动态配置的弹性不足等问题，让工业企业背负起沉重的历史包袱；工业软件开发企业也面临工业知识沉淀的千沟万壑，在开发门槛高、开发周期长的困境下，难以迸发创新活力。

继往开来，站在传统工业软件的“巨人肩膀”上，工业企业、工业软件开发者及其他工业界伙伴需要凝聚力量，探索理念创新与模式变革，循序渐进推动工业软件上云，真正从“用软件”过渡到“用服务”。

为此，工业企业首先要建立新理念，采用“基于模型”的基本方法，朝着MBD乃至MBE的方向演进，打破传统工业软件下的异构系统，实现业务全流程一体化；其次要探索新模式，以工业经验、知识、工具等工业根服务的共建共享为基础，重新定义工业软件的开发模式和商业模式，并进一步赋能工业新范式（例如云工厂）的形成，培育全新的数字工业生态；最后，底层技术支撑也至关重要，工业界需把握云计算变革的机会窗口，以云、AI、大数据作为关键技术支撑，共筑新的工业软件技术体系。

4) 工业数据价值化

根据国务院《关于构建更加完善的要素市场化配置体制机制的意见》，数据成为继土地、劳动力、技术、资本之后的第五大生产要素，其对于工业企业的重要价值不言而喻。

然而，工业数据的高效采集、集成打通、价值挖掘与安全合规利用，是工业界共同面临的挑战。采集方面，“数据上不来”，采集源分散、难以实现低成本全量采集；汇聚方面，“数据没打通”，不同软件系统间的异构数据形成割裂的数据烟囱；应用方面，“数据难使用”，导致数据分析、价值挖掘的深度、广度不足；安全方面，“安全隐患多”，工业企业的数据安全与合规能力仍处于起步阶段。

破旧立新，工业企业的数据治理和应用需要在美国NIST提出的三条“数据流”的基础上深度融合，并且要突破工厂“四壁”，向空间维、时间维两个维度充分延展，才能在更大范围内释放价值。

为此，工业企业首先应建立强大的能力内核。第一步要树立新理念，从过去的面向产品、面向过程转变为“面向结果”，聚焦最有业务价值的环节，逐步打造基于物理世界的Digital Twin；第二步需要开展数据的高效治理，依托数据资产目录、数据标准、

信息模型、数据地图等手段，更好更快构建 Digital Twin；第三步则是开展数据的智能应用，经治理后的“清洁的数据”还需通过智能化分析与应用，才能成为“智慧的数据”，为创新应用赋能。

能力内核还需要进一步外溢和延展。具体而言：向空间维延展，工业企业的数据从局限于自身内部转变为企业间数据协同、流通与共享，这样有利于在上下游和产业间形成业务协同、在企业间和产业内形成知识经济和市场；向时间维延展，工业企业不能只局限于产品研制阶段的数据，还需要追溯已售产品的运行态数据，加深对产品使用状况与客户需求的认知，为产品使用者提供增值服务，并根据产品使用情况反馈推动产品研制改良升级。

数据安全作为数据价值化的基石，对于保障消费者隐私、企业数据主权，确保数据

使用合规至关重要。为此工业企业需要构建事前预防、事中预警、事后追溯的全套数据安全能力，让数据使用更安全。

接下来，我们将对工业“新四化”进行展开阐述，希望以此激发工业界伙伴的思考与共鸣。

4.1 工业装备数字化

4.1.1 当前进程

根据中国工业和信息化部定期统计和发布的设备数字化率、数字化设备联网率、关键工序数控化率三项反映指标⁶，当前我国的装备数字化水平整体处于40-50%的相对较低水平，还有很大提升空间。国内工业企业在工业装备的数字化、联网化方面仍需加大力、奋楫笃行。(图4-3: 我国装备数字化的当前水平与规划目标)

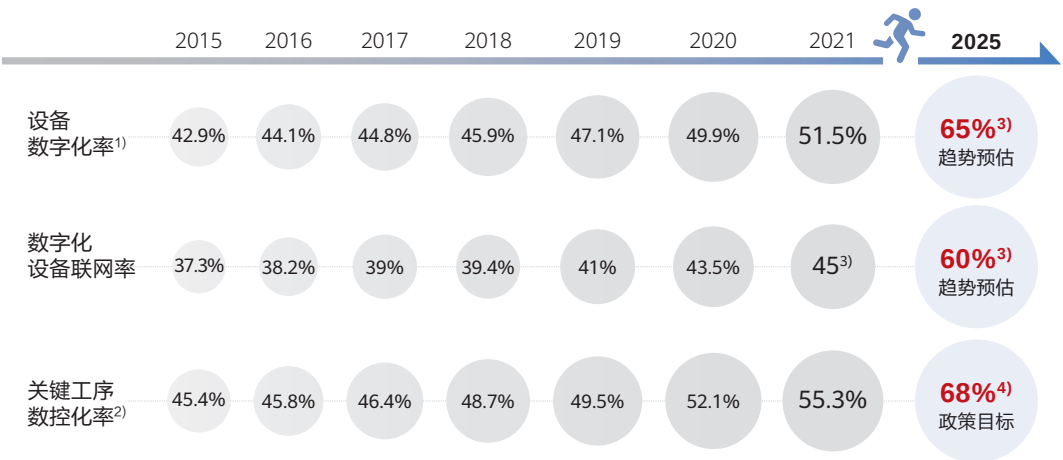


图4-3: 我国装备数字化的当前水平与规划目标

插图注释：

- 1) 在流程行业是指单体设备中具备自动信息采集功能的设备；在离散行业是指数控机床、数控加工中心、工业机器人、带数据接口的机电一体化设备等；
- 2) 主要指关键工序中过程控制系统（例如 PLC、DCS）的覆盖率；
- 3) 暂无公开权威数据，根据历史趋势预估；
- 4) 工信部《“十四五”信息化和工业化深度融合发展规划》。

⁶ 工信部、两化融合公共服务平台统计数据

4.1.2 主要痛点

工业现场存在大量的生产装备，既包含多个行业通用的装备，如加工装备、检测装备、物流装备、动力装备等，也包含应用于特定细分行业的专用装备，如采矿领域的钻孔设备、掘进设备、刨煤机、碎煤机等。这些生产装备均具有广泛的数字化升级需求。

然而，传统生产装备的数字化升级并非一路坦途，面临着网络连接、操作系统、工业芯片三方面的痛点问题亟待攻克。

在网络连接方面，装备联网是数字化升级的第一步，但当前工厂中的“哑设备”仍然大量存在。据工信部统计数据，2021年数字化设备联网率45%⁷，装备不联网导致大量工业数据“沉睡”在装备中，“数据上不来”问题突出。而即便是已实现联网的设备，也存在通信协议“七国八制”的问题，其使用的常见主流通信协议高达数十种，“各说各话”，形成烟囱式格局，制约装备能力升级和多设备互联协同工作。

在操作系统方面，存在装备“少魂”，智能化不足的问题。部分传统存量设备无操作系统，缺少标准化接口，难以满足强实时、高可靠、互操作性强的作业需求。

在工业芯片方面，当前工业装备内置入门、基础型工业芯片为主，算力低、演进慢，难以满足智能制造多场景融合、多连接、更智能、高速高精的作业需求，工业装备亟需换芯升级。

与此同时，工厂数字化应用场景的持续拓宽、加深，也对工业装备提出更高的智能化、协同化要求。首先，更广泛的物联场景，要求装备采集更多数据。工业装备采集全量数据后进行分析处理，可以有效赋能预测性维护、能耗监测、质量分析等应用场景；其次，更复杂的智能场景，要求装备具备更高算力。工业装备将实现更复杂、更

智能化的应用，例如AI质量检测、人机交互（例如依托AR）等应用，让一部分人力从重复劳动、主观经验判断的繁琐工作中解放出来；再者，更协同的控制场景，要求装备群集约化部署。多设备、多功能的协同化控制，对于工业现场的高效、柔性生产组织至关重要，例如1台工控机+N个机械臂，视觉识别+运动控制场景。

然而，当前的单机装备难以适配上述要求，日益呼唤边缘智能对其进行赋能。这是由于一方面单机装备的自身算力相对有限，难以完成基于大量实时数据自主分析、决策和执行的复杂任务；另一方面，人工经验判断的稳定性、准确性、效率和成本集约性不足，难以对装备进行精准、高效、快速的实时管理。

4.1.3 产业趋势：工业装备数字化

立足工业企业的当前需求与痛点、面向未来数字化应用场景的拓宽加深，我们提出“工业装备数字化”的产业趋势判断。其具体内涵是：装备全面联网、配备实时与安全的操作系统、以及更优性能的工业芯片，并基于业务需求引入边缘智能，共同构筑装备数字化底座。

1) 网络连接

首先要解决工业装备的联网化问题，才能做到“数据上得来”。工业企业需要立足于实际业务场景需求，对不联网的存量生产装备进行联网化改造，采取有线技术和无线技术相结合的方式。其中，在注重高稳定性、大带宽、低时延的场景，可考虑优先选择工业以太、光总线等有线连接方式；而在注重移动性、灵活性、柔性生产的场景，则可考虑优先选择5G、Wi-Fi 等无线连接方式。

其次要解决通信协议的兼容性问题，才

⁷ 工信部发布数据

能做到“都说普通话”。当前实现了联网的工业装备，普遍面临通信协议“七国八制”、“各说各话”的困境。因此在技术协议的选择上，工业企业需优先选择更加通用、灵活、端到端开放的IP协议（IPv6/IPv6+），推动传统工业以太网向IP化升级，让装备统一语言，都说“普通话”。（图4-4: 技术协议渗透率预测）

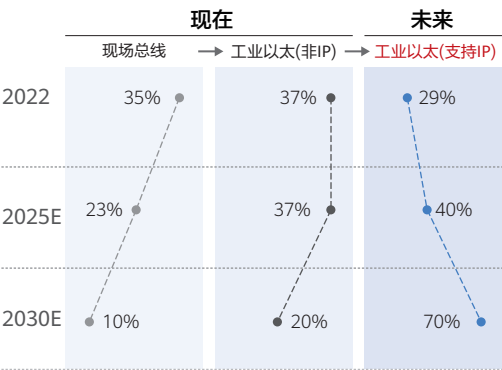


图4-4: 技术协议渗透率预测¹⁾

插图注释:

¹⁾ 参考华为、信通院等联合发布的《工业设备网联化技术与实践白皮书》

2)操作系统

工业装备需要低时延、安全可靠、轻量化的工业级操作系统，这将对工业生产活动产生巨大价值：一方面可以大幅提升装备互联互通水平，通过标准化的接口，打好系统与装备互联、装备间互联的坚实基础；另一方面也将助力提升生产作业效率，提升员工现场、远程操控的便捷性，实现“一碰即连”、人机互联。（图4-5: 工业装备中的操作系统）

3)工业芯片

芯片性能不足、存在安全隐患的存量生



图4-5: 工业装备中的操作系统

产装备需要尽快换芯升级。工业企业在装备升级改造中，应优选更高算力、安全可靠、兼容主流总线协议的工业芯片，才能保障装备的高性能计算与稳定运行。具体而言，工业芯片的选用应具备以下三方面特点：

更高的算力。8位、16位的入门级芯片仅在简单、基础功能场景适用，面向关键生产装备的复杂场景，高速高精度控制、中长期升级等需求，工业企业需优先考虑使用32位、多核、先进制程(40nm以下)的MCU/MPU。典型的重点领域包括多轴高速机器人、高档数控机床、大型工控装备（大型PLC或DCS）、高精度高速伺服驱动等。

安全性。除了算力升级，还要守好安全生产的生命线。工业企业需优先选择内置安全模块的MCU/MPU在工业装备中应用，有效抵御网络攻击。

兼容主流总线协议。工厂中存在大量不同种类、不同品牌的新老装备，为加强装备间的通信互通，工业企业需关注芯片对市场主流总线协议的兼容性，优先考虑兼容传统总线、以太网等主流协议的MCU/MPU，并融合支持新一代标准化协议。

4)边缘智能

应对传统单机装备难以适配的高复杂度场景，例如基于海量实时数据的智能应用、

多装备实时协同化和集中化控制、一机多能等场景，工业企业可积极探索物联边缘、智能边缘、控制边缘的融合应用，形成生产装备与边缘智能相协同的新架构。（图4-6：工业装备中的边缘智能）

通过引入边缘智能为单机装备赋能，工业企业可以更从容应对过去单纯凭借单机装备难以完成的复杂任务，有利于实现：更高层次

的智能化，依托更高算力、更大带宽，开展基于海量实时数据采集的自主分析、决策、执行和反馈全闭环；更高层次的协同化，依托边缘的集中控制，多装备乃至装备群实现实时的协同化作业；更高层次的集约化，依托边缘的集约部署，可有效减少原来单机装备所需的控制器、上位机、工控机数量。

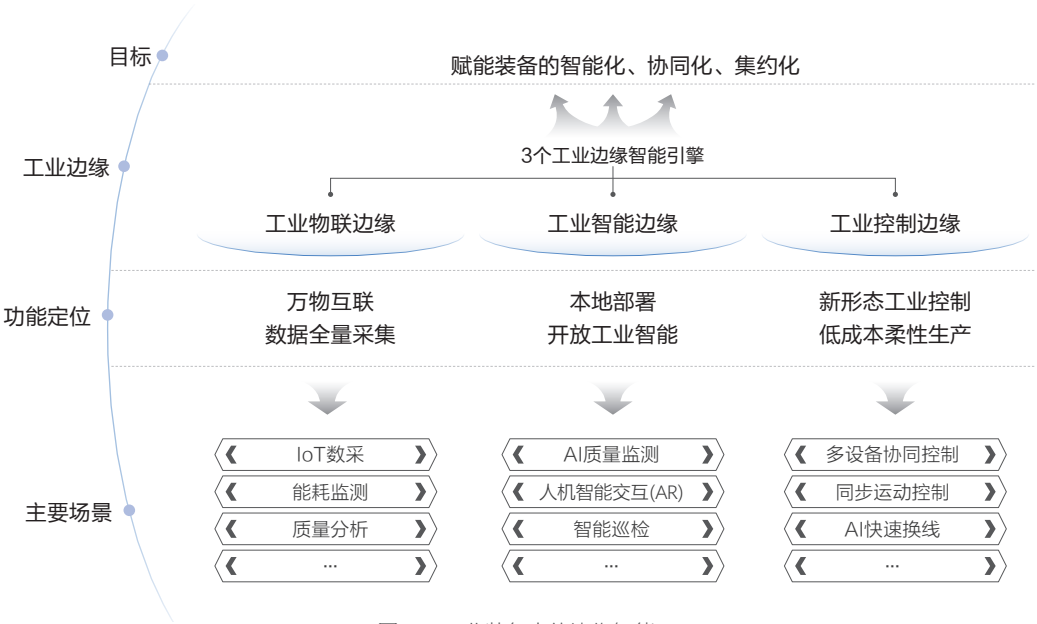
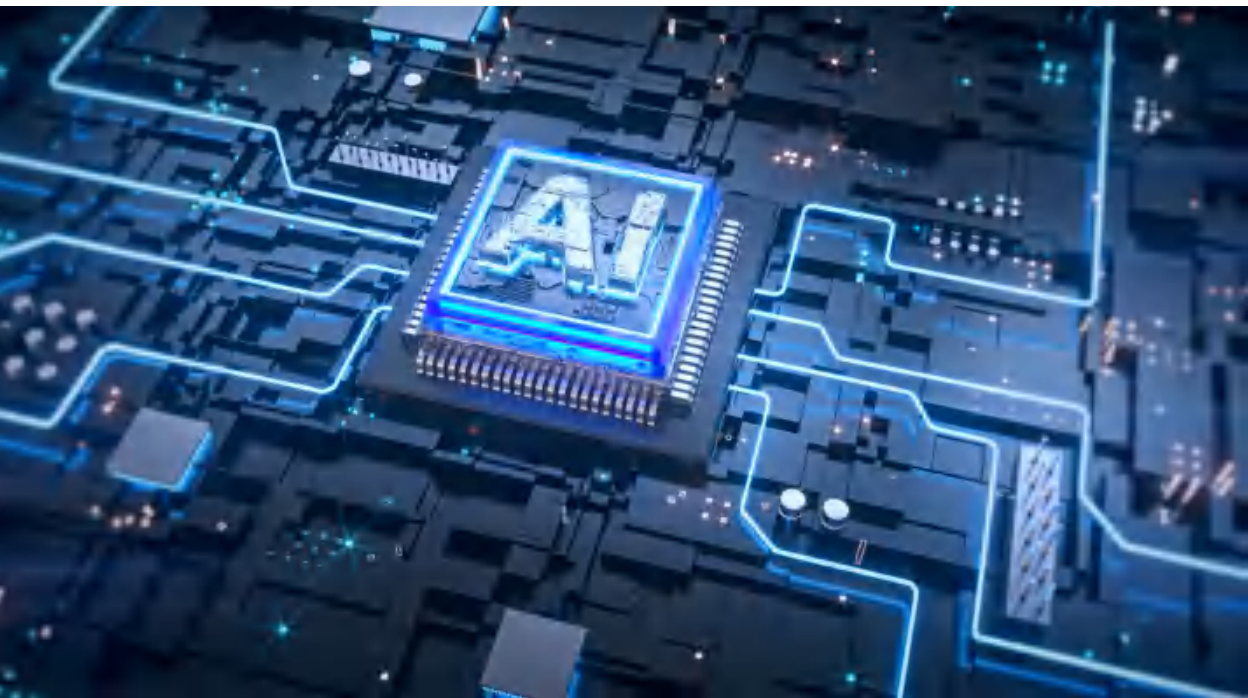


图4-6: 工业装备中的边缘智能



4.1.4 案例参考

案例1-网络连接：华为松山湖南方工厂位于广东省东莞市松山湖，生产基地提供从原材料、半成品加工、整机测试组装到发货的全流程服务。随着多品种、少批量的客制化订单增多，换线频繁，而工厂中的大量哑设备、有线设备难以支撑柔性化生产组织模式。为此，华为利用Wi-Fi 6对设备进行联网化改造，在车间内打造了一张先进的全无线工业网络，既满足数据采集与稳定传输的需求，也适配了频繁换线生产的柔性模式⁸。（图4-7：案例卡片-华为松山湖南方工厂）



图4-7: 案例卡片-华为松山湖南方工厂

案例2-网络连接：金川集团是中国的镍钴生产基地，属于特大型采、选、冶、化、深加工联合企业。采矿生产环境复杂，环节众多，温湿度传感器、压力传感器、转速传感器、重量传感器等采用的协议及接口各不相同。为此，金川集团规划建设了多元数据融合的统一IP网络，联接矿山现场的各种设备。为了对传统设备进行数据采集，金川集团采用内置容器功能的边缘工业网关，将 RS232与RS485等接口的数据转换成IP协议，再由统一IP网络上传到统一的数据平台，供不同的系统访问。多元数据融合的统一IP网络将分散在各个系统的不同设备数据通过工业网关转换成通用的IP协议，在一张IP网络中进行传输，显著降低了网络建设及运维成本，提升了数据的利用率，有助于提升工业生产的自动化、少人化水平⁹。（图4-8：案例卡片-金川集团）

⁸ 华为、信通院等《工业设备网联化技术与实践白皮书》
⁹ 华为、信通院、宝信软件等《工业网络联接 IP 化技术与实践白皮书》

金川集团		
 痛点问题	采矿环境中的温湿度传感器、压力传感器、转速传感器等采用协议及接口不同，形成信息孤岛。	
 解决方案	将非 IP 协议接口转换为通用的 IP 协议接口 <u>数据平台</u> 统一的IP网络  采用协议转换网关将RS232/RS485等设备接口转换为IP协议接口，再经由IP网络上传至数据平台	
 价值创造	① 不同设备、跨系统的多元数据融合 ② 提升数据采集与利用率	

图4-8: 案例卡片-金川集团

案例3-网络连接&操作系统：华为制造装备部基于工业光总线+实时操作系统，提供大带宽的确定性连接和低时延的确定性计算，满足装备的高速高精控制要求，并支撑机器视觉检测的功能联动。（图4-9：案例卡片-华为制造装备部）

华为制造装备部

痛点
问题

新一代自动化平台需要高速高精控制，要求周期小于 $125\mu\text{s}$ ，并能支撑与 2D/3D 机器视觉检测联动。

解决
方案

基于工业光总线 + RTOS
提供大带宽的确定性连接和低时延的确定性计算

The diagram illustrates the system architecture for a manufacturing equipment control system. It consists of three main components: an Upper Computer (上位机), a Controller (控制器), and an Industrial Optical Bus (工业光总线).

- Upper Computer (上位机):** Represented by a circle on the left, connected to the Controller.
- Controller (控制器):** A central box containing:
 - 自主算法 (Autonomous Algorithm):** Connected to the Upper Computer.
 - 光终端含算力 & RTOS (Optical Terminal with Computing Power & RTOS):** The main processing unit within the controller.
- Industrial Optical Bus (工业光总线):** A network of optical terminals connected to the Controller.
 - Top Row:** Four optical terminals connected to the Controller. The first is labeled "光终端 IO" (Optical Terminal IO), and the next three are labeled "光终端 伺服" (Optical Terminal Servo).
 - Bottom Row:** Four optical terminals connected to the Controller. All four are labeled "光终端 高速IO" (Optical Terminal High-Speed IO).

Below the bus, a note indicates the types of equipment supported: 接摄像头、高精伺服、光栅尺 / 编码器等 (Connect cameras, high-precision servos, grating rulers / encoders, etc.).

全新工业光总线协议，以光纤连接装备内各部件，进行接口转换及数据封装，实现万兆 μs 级确定性连接，RTOS 提供亚 μs 时延

价值
创造

- ① 装备自动化控制周期从 1ms 优化到 $125\mu\text{s}$ ，支撑高速高精
- ② 一套平台覆盖高速高精及常规装备，融合机器视觉功能

图4-9: 案例卡片-华为制造装备部

案例4-网络连接&操作系统：柏楚电子对装备内部连接归一化改造，实现自动控制随需部署和更高速高精的协同控制，支撑精密制造。（图4-10: 案例卡片-柏楚电子）

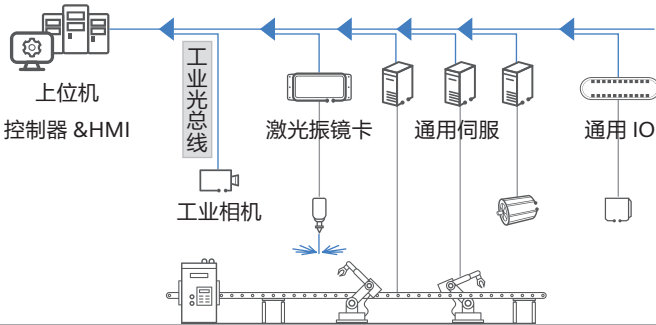
柏楚电子	
痛点问题	在新一代架构中需要归一化计算和连接，实现对更多个振镜系统的更高实时和更高频控制，支持优于微米的加工精度。
解决方案	领先一代的振镜激光加工子系统  全新工业光总线协议，以光纤实现万兆μs级确定性连接，一套系统支持多个振镜及驱动器系统协同加工，精度优于微米
价值创造	① 装备内计算和连接归一，简化调试，提升精度和稳定性 ② 万兆带宽，支持多个执行部件及相应机器视觉功能

图4-10: 案例卡片-柏楚电子

案例5-操作系统：神东煤炭集团公司是国能集团的骨干煤炭生产企业，下辖13个生产矿井，总产能2亿吨/年。煤矿领域设备通讯协议七国八制，难以实现互联互通和智能联动。为此，通过矿鸿系统对现有老旧装备进行智能化升级，打造万物互联的智能底座，实现了设备接口标准和数据协议的标准化、人机互联、机机互联，以及智能协作。（图4-11: 案例卡片-国能神东煤炭集团）

国能神东煤炭集团	
痛点问题	煤炭领域各类煤机设备使用厂商自有、私有化的操作系统、接口与协议，共计多达 10+ 种系统、500+ 种通信协议，导致互联互通难。
建设内容	应用华为基于鸿蒙系统打造的“矿鸿”系统 利用鸿蒙系统，基于采矿行业特性进行适应性改造，打造采矿领域的标准化系统“矿鸿”，实现底层设备的互联互通。 统一接口：通过标准的操作系统，实现不同设备以统一接口连接 统一协议：基于矿鸿制定的统一协议标准，煤机设备统一通信协议 具体有两种方式 与现有系统对接 矿鸿系统与原煤机设备的接口对接，实现与设备的联通与控制 替换设备原生系统 硬件安装环境允许时，直接安装矿鸿系统

图4-11: 案例卡片-国能神东煤炭集团

4.1.5 企业建议

千里之行，始于足下。工业企业面对大量传统存量装备的数字化升级需求，须奋发蹈厉、即刻行动。在此，建议工业企业将存量生产装备的数字化升级改造纳入近期行动计划，并探索工业边缘智能的应用，赋能装备走向智能化、协同化。具体有以下关键行动指南：

开展哑设备联网化升级改造。工业企业需首先对未联网装备进行联网化改造，适配场景需求，采用有线或无线网络技术相结合的方式，让“数据上得来”。

考虑采购多元化，谨防供应风险。工业企业在关键装备改造和采购时，需考虑供应链的中长期多样性和稳定性，谨防因地缘政治引发的供应风险。

探索应用工业边缘智能。在高复杂度、传统单机装备难以满足的场景，积极探索应用端边云协同的新架构方案，赋能装备的智能化、协同化升级。

4.2 工业网络全连接

4.2.1 关键需求

工业网络对生产数据采集与实时稳定传输、远程集控、产线柔性化配置、云边端协同等场景的实现至关重要，扮演着关键介质

的角色。新型工业化对工业网络提出新的要求，灵活化部署、泛在化连接、智能化运维的工业网络成为工业企业的刚需。

灵活化部署。多品种小批量、客制化订单持续增多是确定性趋势，工业企业需积极采用柔性生产组织模式应对，这要求工业装备需要频繁在不同生产域间灵活移动、排列组合、即插即用、减少布线、精简架构，由此才能实现全局实时动态优化、同时投入产出比最优。

泛在化连接。工业企业对生产作业稳定性、精度、产品质量的要求在精益求精，而高精度、高速度、高稳定性、数据全量采集的作业过程必须依托于大带宽、低时延、确定性的工业网络；不局限于生产制造环节，在更前端的资源计划与管理、协同研发、仿真等环节，日益呈现出云化趋势，其数据传输也需要广覆盖、优性能的网络作为支撑。

智能化运维。随着工业企业网络建设的推进，工业网络运维成本将逐年增高，让运维变得省事、省人、省钱尤为重要。为此，工业企业需要实现覆盖规划、仿真、配置、调优、安全的网络全生命周期运维管理，实现故障与风险的快速感知、定位和应对，减少人工干预、走向自主运维。（图4-12：工业企业对工业网络的新需求）

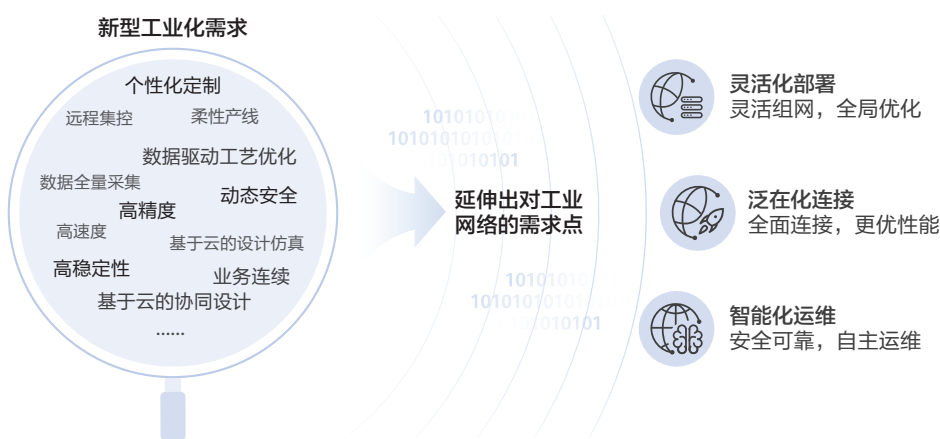


图4-12: 工业企业对工业网络的新需求

4.2.2 当前主流技术与新一代技术

当前市场上的主流网络技术众多，在工厂内外网均存在多种有线和无线网络路线。对于工业企业而言，没有“最好”的网络技术、只有“最合适”的网络技术。工业企业应立足于自身业务场景需求，综合权衡各技术的性能特点和成本投入，选择“最合适”的技术路线组合。（图4-13: 当前主流网络技术列举）

鉴往知来，当前主流网络技术将持续演进，网络能力还将持续升级，更好地满足工业生产的高速率、低时延、可靠性、移动性要求。站在今天展望新一代网络技术，我们可以预见的是，5.5G、F5.5G、Net5.5G等先进网络技术将成为未来5-10年内的“新生力量”，引领工业网络的再升级。

5.5G：相比5G，5.5G将实现更高速、更低时延、更高精度、更高密度的无线连接。其具体性能特点是：更快的速率，下行可达1Gbps、上行可达500Mbps；5ms级的更低时延；厘米级的更高定位精度；10⁷/km²的更

高联接密度。

F5.5G：相比F5G，F5.5G将在网络带宽、时延、可靠性等性能方面实现全面升级，将呈现出的主要优势是：绿色敏捷，10倍能效，OTN to Eversite；万兆接入，接入带宽10G Everywhere；确定可靠，工业 μs级时延，99.9999%超高可靠；泛在接入，10倍全光连接；光感知与智能化，1米精准定位，99%事件准确率，实现自定位、自优化、自运维。

Net5.5G：面向未来工业场景，Net5.5G可以实现更智能、更安全、更低时延、更大带宽、更高密度。在敏捷连接上，实现端到端的SRv6多云组网和IPv6+网络切片；在安全性上，云网端联动可以实现云网安一体化；在确定性上，实现端到端毫秒级确定性时延；在带宽上，Wi-Fi 7峰值可达30Gbps、500M@Anywhere；可实现高品质万兆工业园区；统一物联组网，IoT与Wi-Fi多技术融合协同，APL可达10Mbps@1km，实现终端即插即用、统一管理、无感可信接入。



图4-13: 当前主流网络技术列举

插图注释：

- 1) Segment Routing IPv6，基于 IPv6 转发平面的段路由
- 2) In-situ Flow Information Telemetry，随流检测

4.2.3 产业趋势：工业网络全连接

面向工业企业的网络升级需求、积极响应国家政策文件指引，我们提出“工业网络全连接”的产业趋势判断。其具体内涵是：工业企业需打造全连接的工厂，构建IT与OT融合的一张网，通过智能运维实现网络的高度自治，并构建安全韧性的网络能力。（图4-14 工业网络全连接）

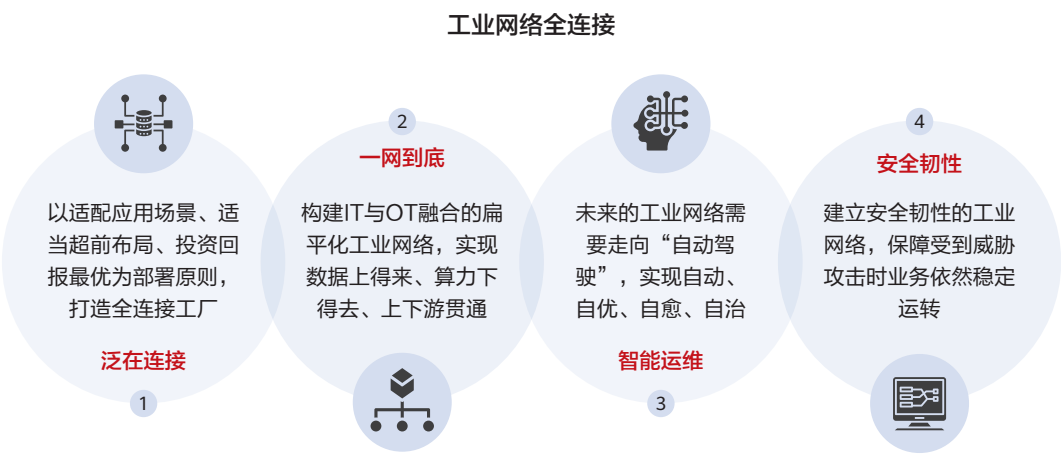


图4-14: 工业网络全连接

1) 泛在连接

面向未来，工业企业需建立全面的、无处不在的网络覆盖和连接，对研产供销服全价值链及人机料法环全要素、全场景“能连尽连”，打造全连接工厂¹⁰，为实现全局最优调度奠定基础。（图4-15: 工业网络泛在连接）



图4-15: 工业网络泛在连接

¹⁰ 参考工业互联网产业联盟 (AII) 《工业网络 3.0 白皮书》

在网络技术的选择上，工业企业不应盲目大干快上，而应以适配应用场景、适当超前布局、投资回报最优作为网络部署的原则。具体而言：

适配应用场景。工业企业需从特定业务场景出发，针对性选取“最合适”的网络技术；比如有移动和柔性配置需求的场景，可在5G和WiFi技术中选择。针对可靠性、时延要求高的场景，则优选有线的高确定性工业网络。

适当超前布局。工业企业无需盲目追随最先进的技术，但也要为未来5-10年的制造升级预留一定冗余空间，打好坚实的网络基础设施底座。因此，在网络技术的选择上需保持一定前瞻性，可考虑工业光网、TSN、IPv6/6+等先进网络技术的部署。

投资回报最优。工业企业不应盲目追

求最佳性能参数，而是要关注“经济又好用”，以最优的ROI作为准则，考量网络部署与运维成本最优的技术方案。

2)一网到底

当前工业网络多以ISA-95架构下的五层架构为主，存在网络层级多、通信协议多、IT/OT分离、数据采集难易损失等问题。面向未来，工业企业需要的是更加精简、扁平、通用、融合的工业网络，IT与OT充分融合打通，全量数据在“一张网”中畅通无阻地流动。（图4-16: IT/OT融合的网络架构）

打破传统多层级、IT与OT分离的网络架构，构建IT与OT融合的扁平化工业网络对于工业企业而言意义非凡，将真正实现“数据上得来、算力下得去、上下游贯通”。

数据上得来。数据“逐层上送”的过程

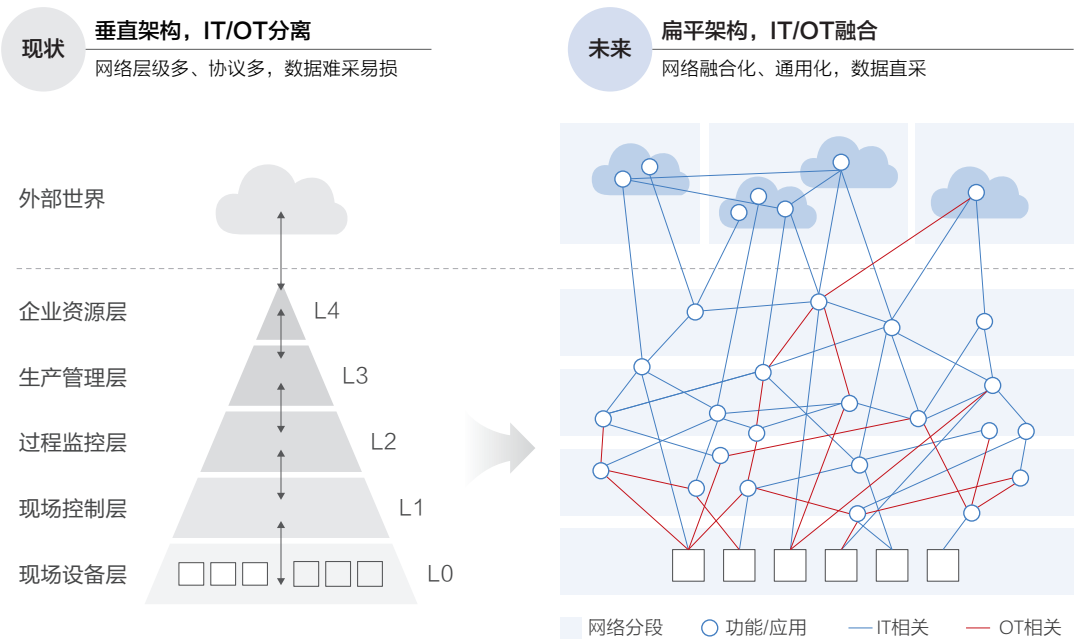


图4-16: IT/OT融合的网络架构¹¹

¹¹ 参考 OPC Foundation 2021 年 11 月《Extending OPC UA to the field: OPC UA for Field eXchange(FX)》

中，每一层的数据传递过程都存在较多的数据信息损失，因此工业企业需要打破层级壁垒，解决跨系统数据流转难问题，实现数据直采。

算力下得去。云端算力下沉至边缘/端侧，让工业数据与AI、算力相融合，帮助工业企业实现AI质检、智能排产、工艺优化等创新应用。

上下游贯通。通过生产现场进度与客户实时共享、产品设计方案与合作伙伴共享等上下游的连接和协同，帮助工业企业与客户、合作伙伴之间建立更紧密、更坚固的纽带。

3)智能运维

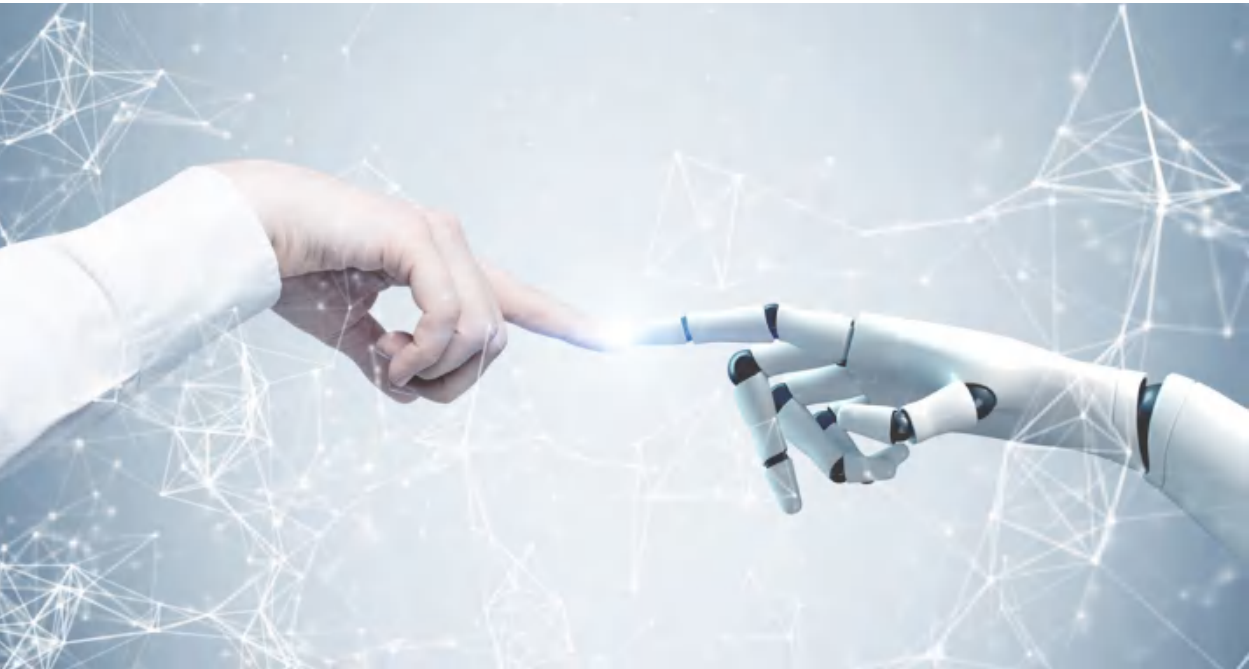
未来的工业网络应该是“自动驾驶”的，而不是人工过度干预和实时监控的。工业企业需要运用智能化的运维手段，让工业网络走向自动、自优、自愈、自治，让网络运维变得省事、省人、省钱。具体而言：自动，根据用户意图业务自动部署，最终目标业务全自动部署；自优，根据用户体验自适应调整优化，最终目标全自动优化；自愈，预测预防故障并

基于事件自我恢复，最终目标全自动运维；自治，在自动、自愈、自优的基础上，网络功能自适应、自学习、自演进。

当前，大部分工业企业仍处于部分自治、有条件自治的阶段，仍需大量依赖于人工介入，运营成本居高不下。预计至2030年，工业网络将实现完全自治，真正实现“自动驾驶”的美好愿景。（图4-17：工业网络走向“自动驾驶”的关键里程碑）



图4-17: 工业网络走向“自动驾驶”的关键里程碑



4)安全韧性

生产业务连续性和关键数据资产对于工业企业至关重要，但威胁防不胜防，我们很难以有限的资源对抗无穷无尽、无处不在的威胁。对于安全防范工作，很多工业企业时常感觉“平时用不上，出事不管用”。

工业企业需要重新定义和认知“安全”。安全并不是要实现零威胁，因为威胁是防不住的；但是安全是可以被守住的。工业企业通过建立安全韧性的工业网络，可以在威胁无法防御时，也有效确保业务的安全底线不被侵犯，把损失控制在可接受的程度。（图4-18：工业企业应如何认知和守住“安全”）

要建立安全韧性的工业网络，工业企业需要三个关键抓手。第一是保障业务安全底线，从针对威胁的防御，变成面向业务的保障，即使威胁防御失败，也能确保业务的安全底线；第二是构建安全韧性环境，“通过保护鱼缸来保护鱼缸里的鱼”，不去逐一分析工业协议以及威胁事件，而是要建立可信与韧性的网络环境，对所有业务提供安全保障；第三是非侵入式安全保障，在不触碰专有业务软硬件的前提下，提供“非侵入式”的安全保障能力，确保系统在任何情况下都能提供可接受的安全性。

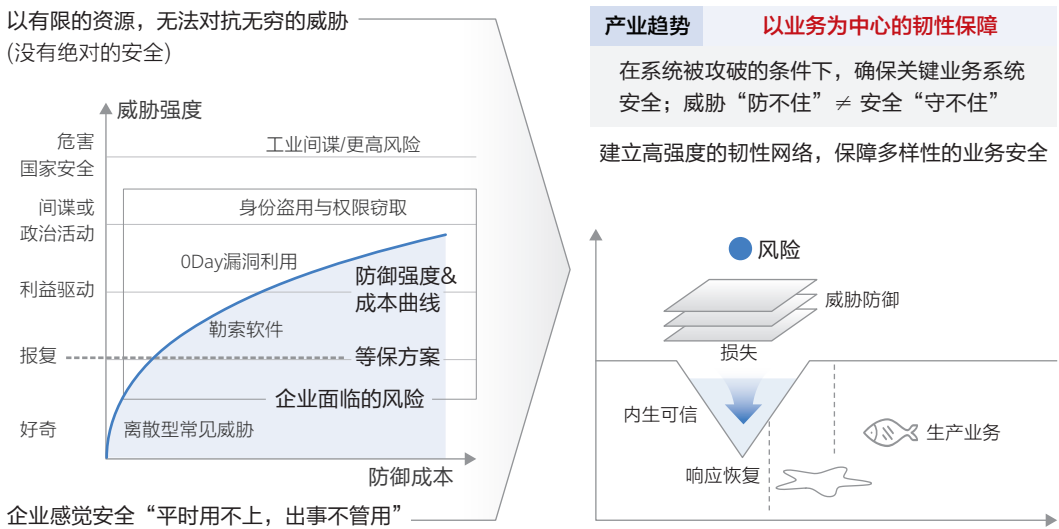


图4-18: 工业企业应如何认知和守住“安全”

4.2.5 案例参考

案例1-工业内网之5G：美的集团联合中国移动和华为在美的洗衣机荆州产业园打造的家电制造领域全球首个5G全连接工厂，是目前全球5G终端规模最大、应用覆盖最广、业务结合最深的5G智能工厂。荆州美的实现了全场景依赖于5G、全流程5G贯通，生产效率提升17%，下线直发率提升1倍，单台人工成本下降30%，荣获GSMA GLOMO“5G产业合作伙伴奖”。（图4-19: 案例卡片-美的5G全连接工厂）



图4-19: 案例卡片-美的5G全连接工厂

案例2-工厂内网之Wi-Fi 6：上汽宁德工厂与华为合作，打造Wi-Fi 6全连接工厂，实现亿级数据采集、秒级分析反馈。工厂可支持5个平台几十种车型装配，生产线柔性化达到国内最高水平；同时生产节拍大幅提升，每小时可生产60辆车；支持AGV小车漫游零丢包，保障精准完成各项任务¹²。（图4-20: 案例卡片-上汽宁德工厂）

¹² 参考华为、信通院等《工业设备网联化技术与实践白皮书》

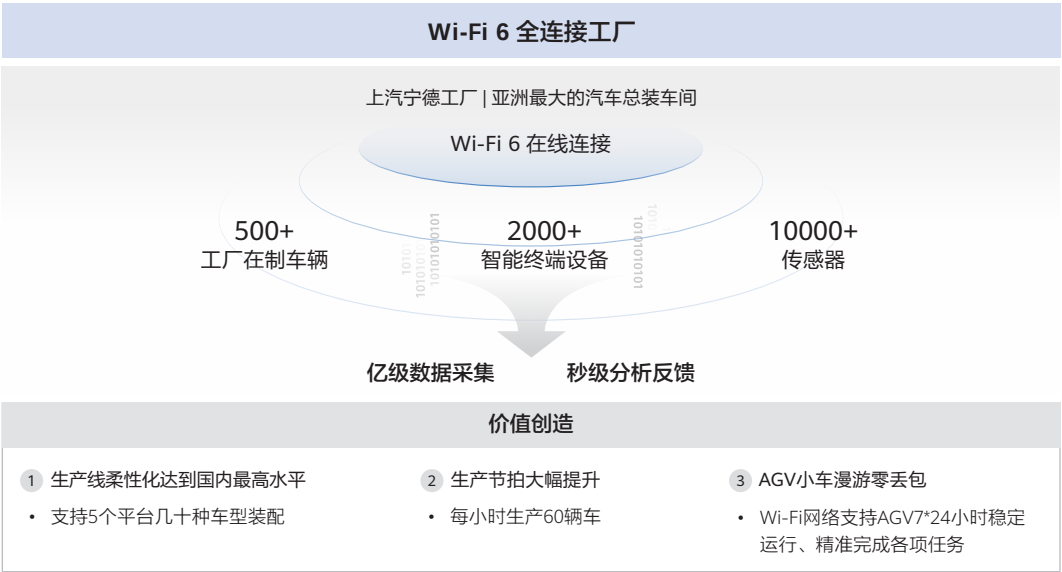


图4-20: 案例卡片-上汽宁德工厂

案例3-工厂内网之工业PON：华为FTTM（光纤到机器）助力宝武集团-马鞍山钢铁冷轧四厂实现远程自动巡检。依托于工业PON，仅OLT需管理IP，实现确定性低时延传输；光纤长距覆盖达40km，天然抗强电磁干扰，使用寿命长达30年；ONU即插即用，网管统一管理，实现网络智能运维。（图4-21: 案例卡片-宝武集团-马鞍山钢铁厂）

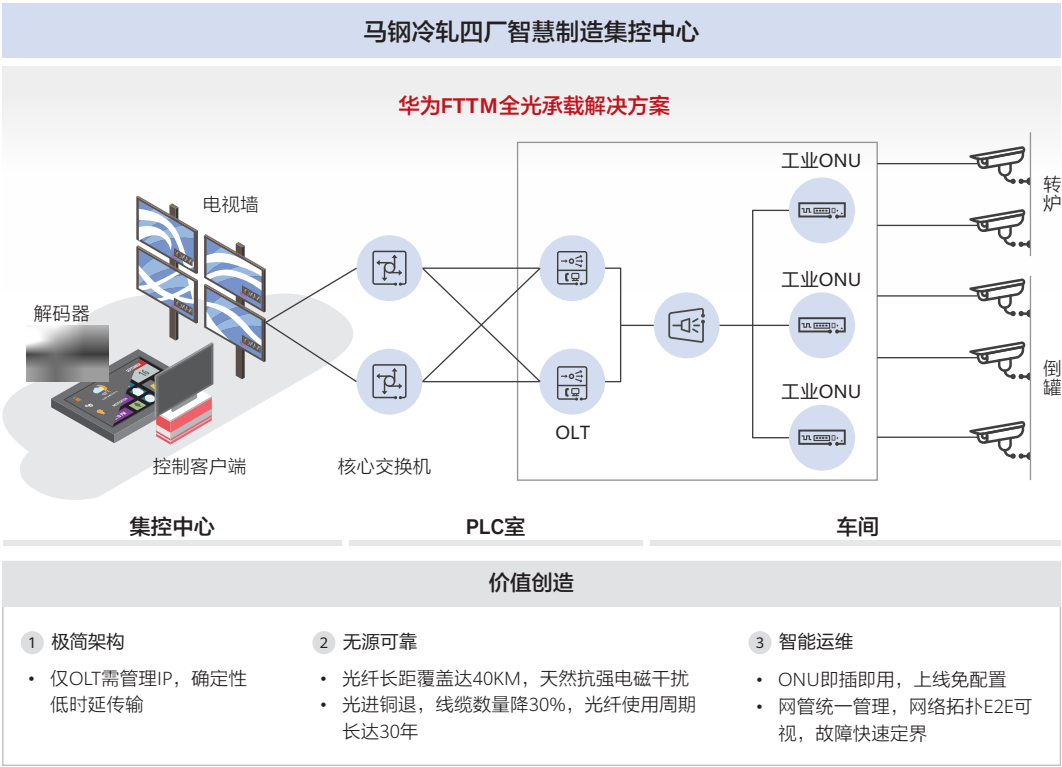


图4-21: 案例卡片-宝武集团-马鞍山钢铁厂

案例4-工厂外网：华为为马钢集团打造智能云网，可满足未来5-10年的业务发展需求，实现带宽100%保障、极低时延和网络智能化运维，助力打造新一代钢铁之城。（图4-22: 案例卡片-马钢集团）

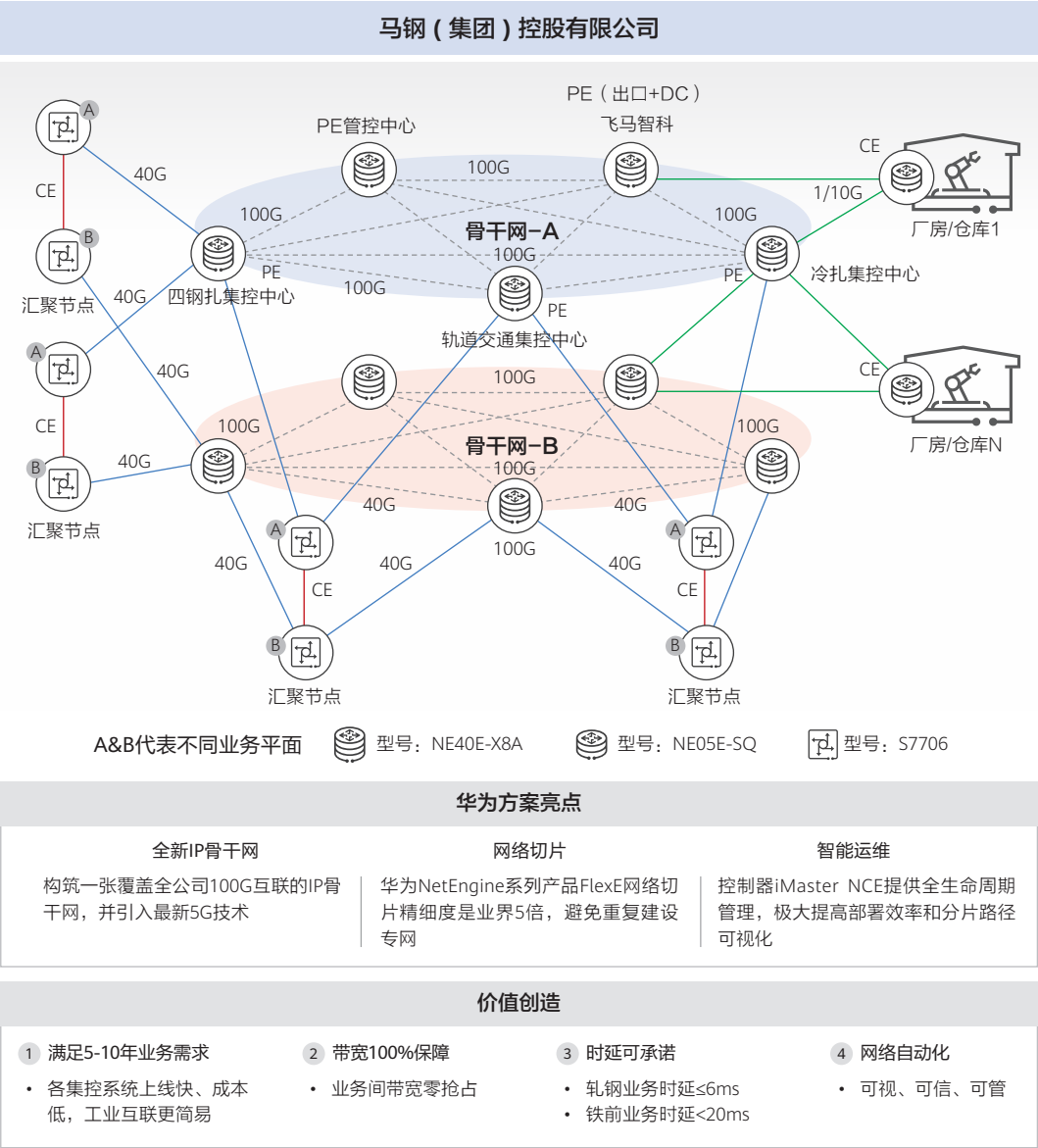


图4-22: 案例卡片-马钢集团

案例5-安全：华为助力某高端电子制造基地构建生产环境安全保障体系，实现全方位的事前防护、事中监控和事后处置。从实际成效看，特征未知的恶意软件平均检出率从60%提升至96%；威胁发现时间从数天缩小至分钟级；溯源处置时间从天缩短至秒。（图4-23: 案例卡片-某高端电子制造基地）

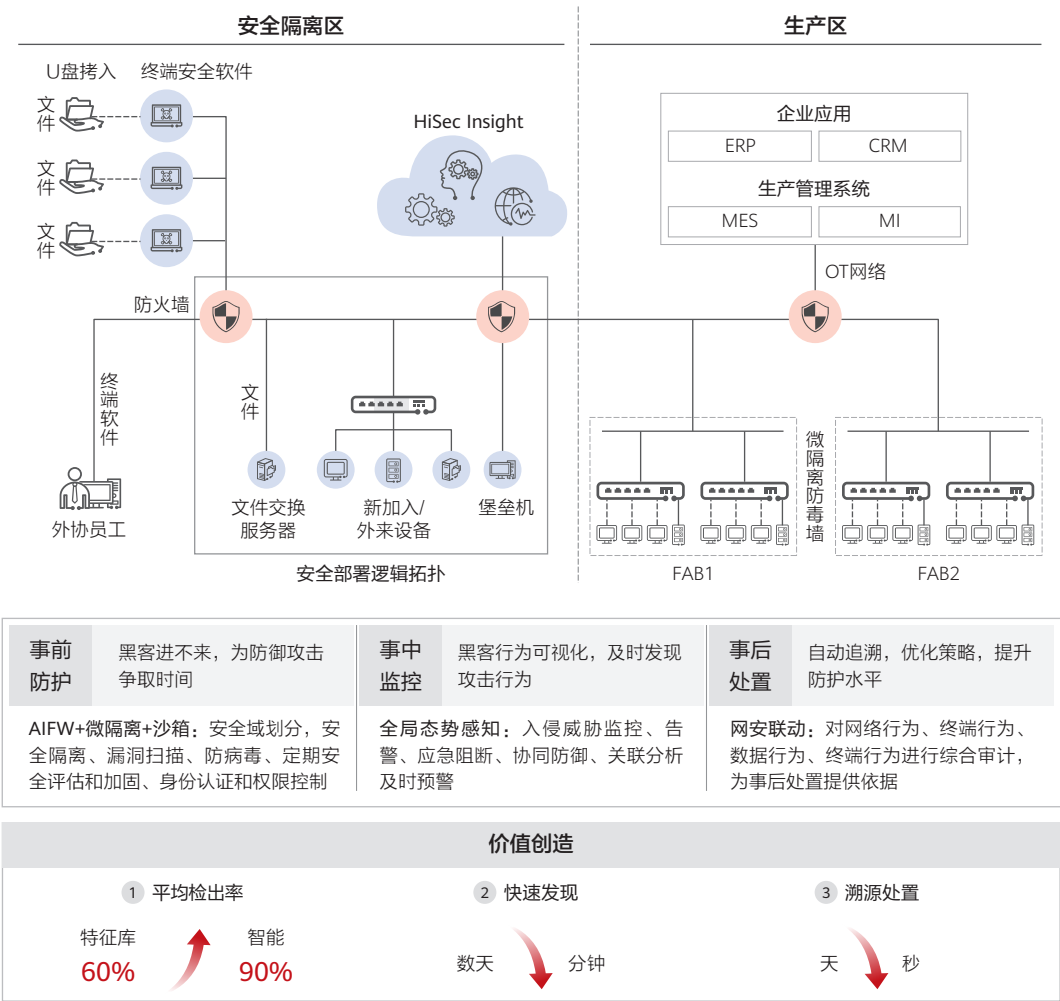


图4-23: 案例卡片-某高端电子制造基地

4.2.5 企业建议

固本强基，网络先行。工业企业的数字化转型需要工业网络的坚实地基。在此，我们倡议广大工业企业从实际业务需求出发，以按需配置、适度超前为基本原则进行组网规划，打造全连接工厂。具体有以下关键行动指南：

以按需配置、适度超前为原则。工业企业组网时除了要满足当下需求，还应具备一定前瞻性，主动预留未来5年业务升级的冗余空间，针对特定场景选取“最合适”的技术，打造适配、经济的工业网络。

领先企业、新产线率先试点新技术。部署当前主流技术的同时，工业企业也应密切追踪新一代技术的发展，适时地“吐故纳新”，逐步实现L1的光纤化、无线化，L2的以太网化、确定性，L3的IP化等，走向全面互联互通。

构建安全韧性的网络环境。工业企业需要建立韧性的网络能力，通过隔离区、安全水密舱等手段构建“非侵入式”的安全保障环境，严守业务安全底线，在危险“防不住”的情况下让安全“守得住”。

4.3 工业软件云化

4.3.1 当前痛点

回首过去，研产供销服各环节的工业软件，帮助广大工业企业迈出了数字化转型的第一步，为业务全流程的提质增效做出了卓越贡献。然而，“老九样”传统工业软件主要依托于物理机，具有相对封闭、孤岛、异构的特点，难以满足工业企业未来数字化应用拓宽加深的需求，也难以支撑工业更高质量的发展。具体而言，传统工业软件存在以下发展痛点：（图4-24：传统工业“老九样”）

在软件开发环节，开发门槛高、周期长、

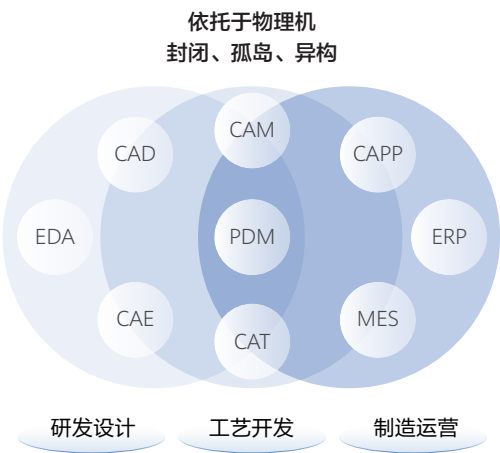


图4-24: 传统工业“老九样”

定制化不足的问题突出。传统工业软件的开发需要软件开发技术与工业知识经验的深度耦合，而工业知识沉淀壁垒高、仅掌握在少数寡头手中，导致工业软件开发者面临极高的开发门槛、开发难度以及时间和资金成本，工业企业要以较低成本获得量体裁衣的工业软件也十分困难。

在软件使用环节，软件系统异构、集成打通成本高昂是众多工业企业背负的历史包袱。研产供销服各环节的工业软件烟囱式部署，导致数据也呈现显著的异构特征，工业企业在打通异构系统、获取清洁数据上需要付出高昂的成本，由此也制约着数据沉淀为有价值的资产。

在软件运维环节，传统工业软件缺少充足的动态配置弹性。软件应用与单机或本地服务器强捆绑，面对应用变化或升级时不具备灵活伸缩的配置能力；同时，软件及其数据依附于物理单机，也存在一定程度的数据安全隐患。

4.3.2 产业趋势：工业软件云化

面对传统工业软件的不足，我们希望携手工业界伙伴共同推动传统工业软件的升级焕新。在此，我们提出“工业软件云化”的产业趋势判断。其具体内涵是：依托

云、AI、大数据等关键底层技术，以“基于模型”为核心理念，以工业根服务的共建共享为基础，培育工业软件新生态和工业新范式。（图4-25: 工业软件云化）

1)新理念

工业企业需采用“基于模型”的全新理念和方法，由此可以实现一套模型在研产供销服各环节无缝流转、高效协同，这对于工业企业的软件使用和数据治理将是划时代意义的革新。

“基于模型”将朝着MBD乃至MBE的方向

向演进，改进“老九样”形态下的弊端，为工业企业带来巨大价值。首先是统一数据源头，集成和打通异构软件、异构数据，将统一的模型作为“真理的源头”，让异构走向同构，大幅简化数据治理工作；其次是业务无缝协同，各环节、各部门基于统一模型开展工作，可以有效缩短产品研制周期、提升质量与效率；再者是驱动产品创新，基于产品全生命周期打通的数据，工业企业可以加强价值挖掘、需求预测和产品改进，加速产品的迭代更新。（图4-26: “基于模型”的新理念）

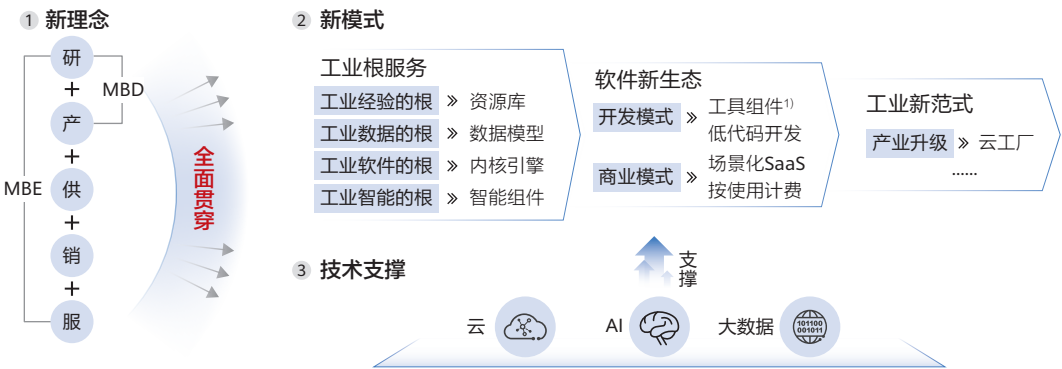


图4-25: 工业软件云化

插图注释:

1) 工业软件 DevOps 工具链，包括工业 API Center、工业 APP Center 等

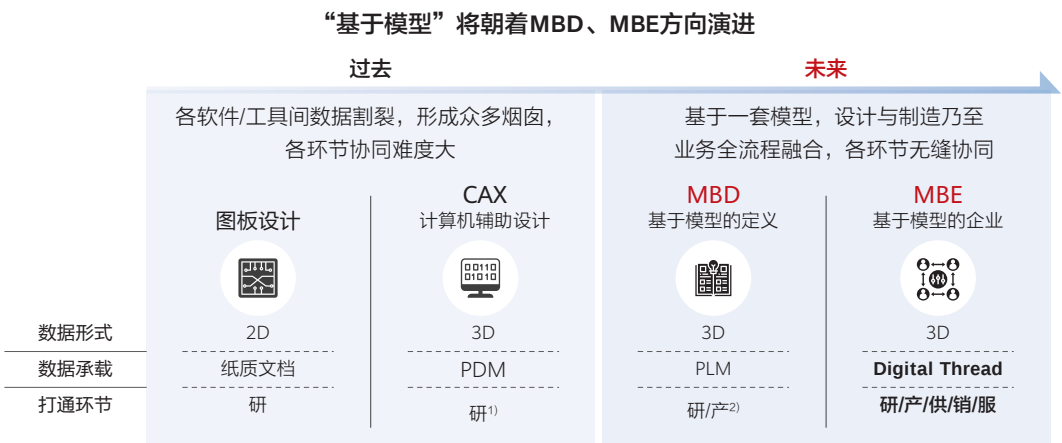


图4-26: “基于模型”的新理念

插图注释:

- 1) 产品定义与产品描述工艺分离，未采用一套模型来承载设计与工艺信息；
- 2) 将产品设计定义、工艺描述、属性和管理信息都附着在产品三维模型中，利用 BOM 和 3D 特征树制作 BOP(Bill of Process)

2)新模式

建立新理念后，工业界伙伴需要携手在工业知识沉淀、软件开发与商业化变现等方面探索模式的创新，创造开放供应的软件新生态。在这一过程中，我们认为应首先推动工业根服务的共建共享，然后通过重新定义开发模式、商业模式来培育新的工业软件生态，最后探索新的工业范式、实现产业链整体的数字化转型。

工业根服务。从过去到现在，工业知识主要沉淀在少数软件厂商手中，形成极高的开发壁垒，一定程度成为工业软件加速创新、百花齐放的阻碍。我们倡议，与工业界伙伴共建、共享和共用工业知识、经验、数据及工具，降低工业软件的开发门槛，让人

人成为开发者，真正实现“一切皆服务”。（图4-27: 工业根服务）

软件新生态。工业软件巨头各自“以我为中心”打造独立、封闭的生态，竖起层层高墙。这些软件应用之间数据标准不一、互不兼容，跨工具、跨系统的互通流转困难，而且具有较强的路径依赖、供应风险难预测。因此，工业软件生态需要从封闭、孤立走向开放、通用。这要求工业界伙伴凝聚起力量，携手重新定义新的开发模式、商业模式，真正拉通标准、加强兼容、实现共生共融，同时也有利于促进供应的多样化。另一方面，新的工业软件的销售模式也将从卖License向卖服务转变，工业企业可以在工业软件商城中按需选用工业软件服务，按使

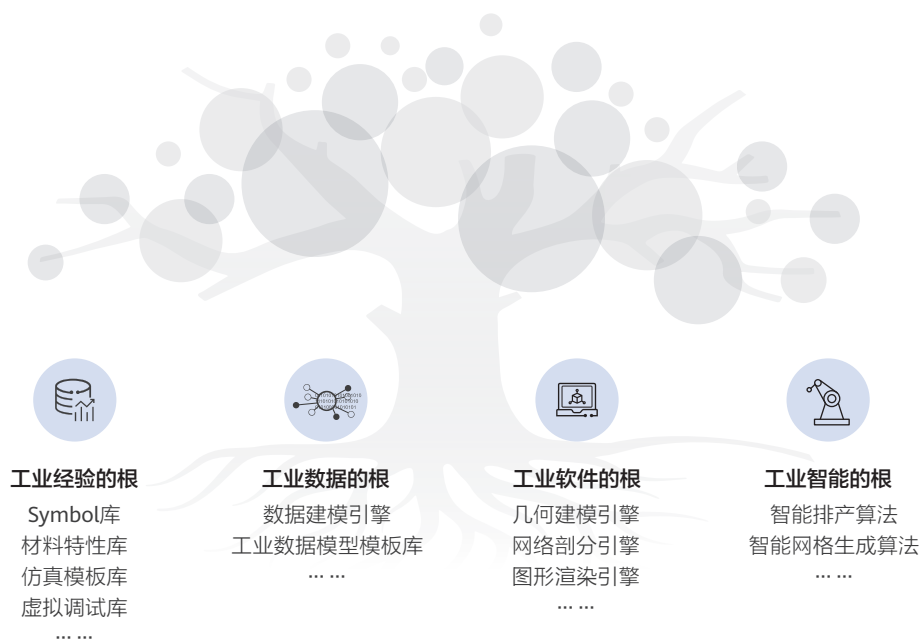


图4-27: 工业根服务

用量付费。而开发者也可以依托商城中的根服务，面向客户需求再次封装和开发新的场景化工业软件，服务于工业企业客户。（图4-28: 重新定义开发模式和商业模式）

工业新范式。新一代工业软件还将赋能产业升级，对产业的生产组织模式带来重构。例如，我们畅想云工厂将成为一种可能的新范式。云工厂通过整合众多小散弱的工业企业，走向订单驱动的业务一体化，不仅

帮助工业企业提质降本增效，也帮助产业链实现整体的数字化升级、变得更加集约和高效。具体而言，工业企业从人拉肩扛获取订单，到云工厂统一接单派单，根据各工厂的优势分工和产能情况分配订单，减少设备闲置、提升整体产能利用率；从单打独斗、孤军奋战，到聚合产业上下游的资源，充分拉通和共享设计、产能、供应链等资源，互通有无。（图4-29: 云工厂模式示意）



图4-28: 重新定义开发模式和商业模式

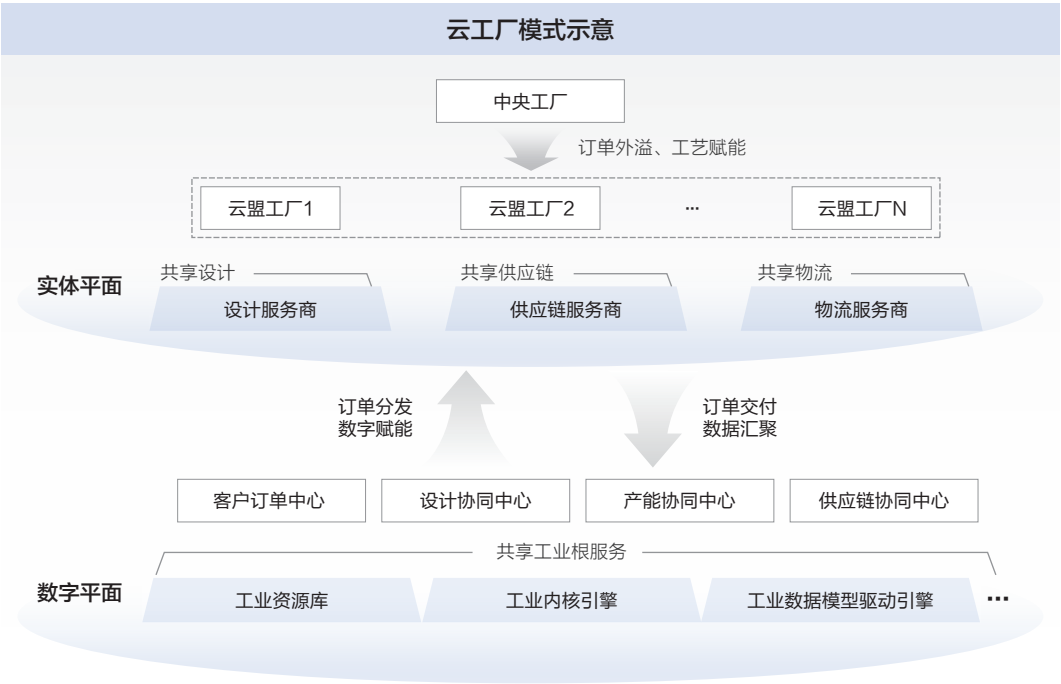


图4-29: 云工厂模式示意

3)技术支撑

要实现上述的新理念、新模式，工业软件的上云是大势所趋。工业软件应把握云计算变革的机会窗口，以云、AI、大数据作为关键底层技术支撑，走向全新的、云化的工业软件体系。（图4-30: 云化工业软件的关键底层技术）

具体而言，新一代工业软件需要基于云计算的架构，依托云的技术特点，实现易集成、易开发、易协同、易扩展四大特点。

易集成，主要指场景化SaaS。以基于模型为核心理念，工业界伙伴共同打造面向不同工业场景的工具链，形成可集成的场景化SaaS服务。

易开发，主要指aPaaS。工业界伙伴将

工业知识、经验、数据、工具沉淀在云平台，共建共享共用工业根服务，大幅降低工业软件开发门槛。

易协同，主要指工业软件开发运营中心。工业界伙伴通过共同开发工具组件、按需调用API接口，不仅实现service乃至service on service的敏捷开发，也满足工业企业灵活按需使用、按使用量计费的需求。

易扩展，主要指gPaaS、IaaS。基于云基础设施，工业企业基于场景需求，面向近期可以灵活调用云端算力、存储资源，实现资源配置的动态优化；面向远期也可以弹性满足业务升级扩容需求，大幅减少硬件置换和运维成本。（图4-31: 基于云计算架构的工业软件体系示意）



图4-30: 云化工业软件的关键底层技术

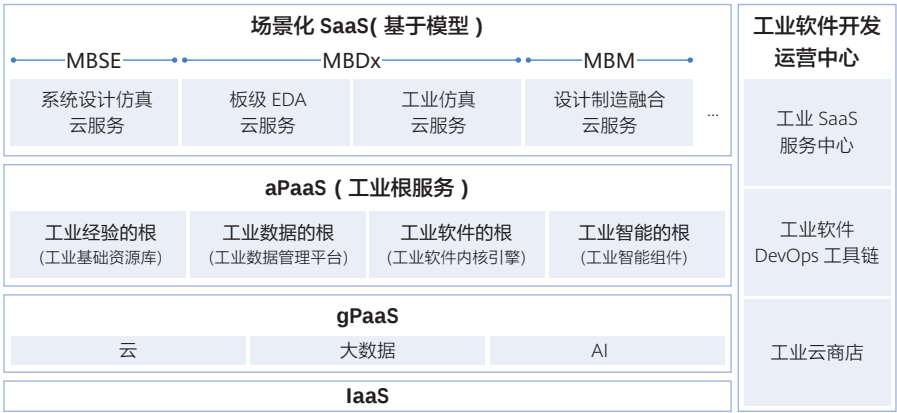


图4-31: 基于云计算架构的工业软件体系示意

4.3.3 案例参考

案例1：安世亚太依托华为云DME数据模型驱动引擎，快速构建数据管理平台，低成本、高效率管理工业数据，让大文件上传和下载速度、API响应时间、研发效率均实现大幅提升。（图4-32: 案例卡片-安世亚太）

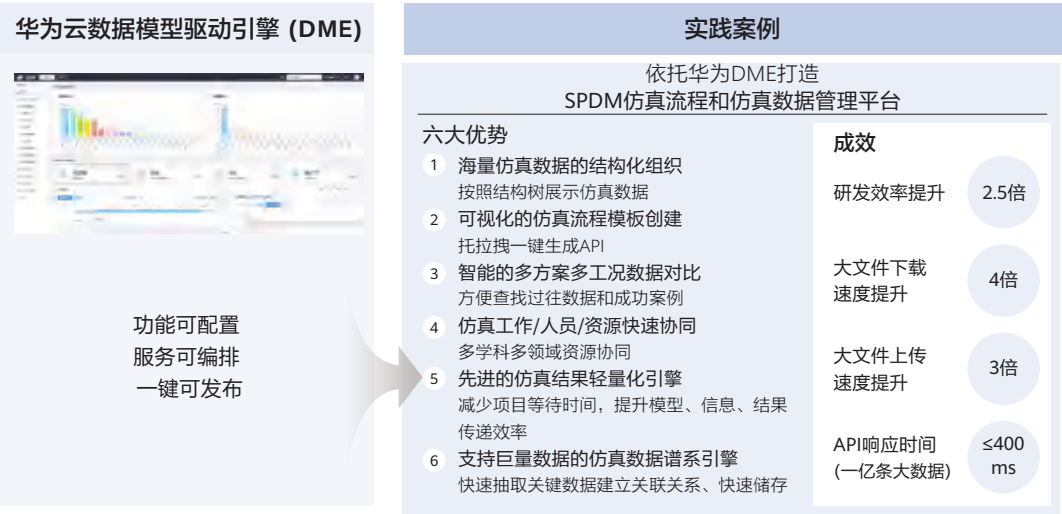


图4-32: 案例卡片-安世亚太

案例2：某煤矿集团采取云化两级架构，支撑集团及煤矿的智能化协同发展，有力实现集团与一线生产业务的高效协同，厘清核心职能边界，避免重复建设；也更有利于安全可靠提升，远程实时掌握煤矿生产业务的动态；还将有效节约成本，将非生产业务集中化部署，让下属煤矿按需灵活使用。（图4-33: 案例卡片-某煤矿集团）

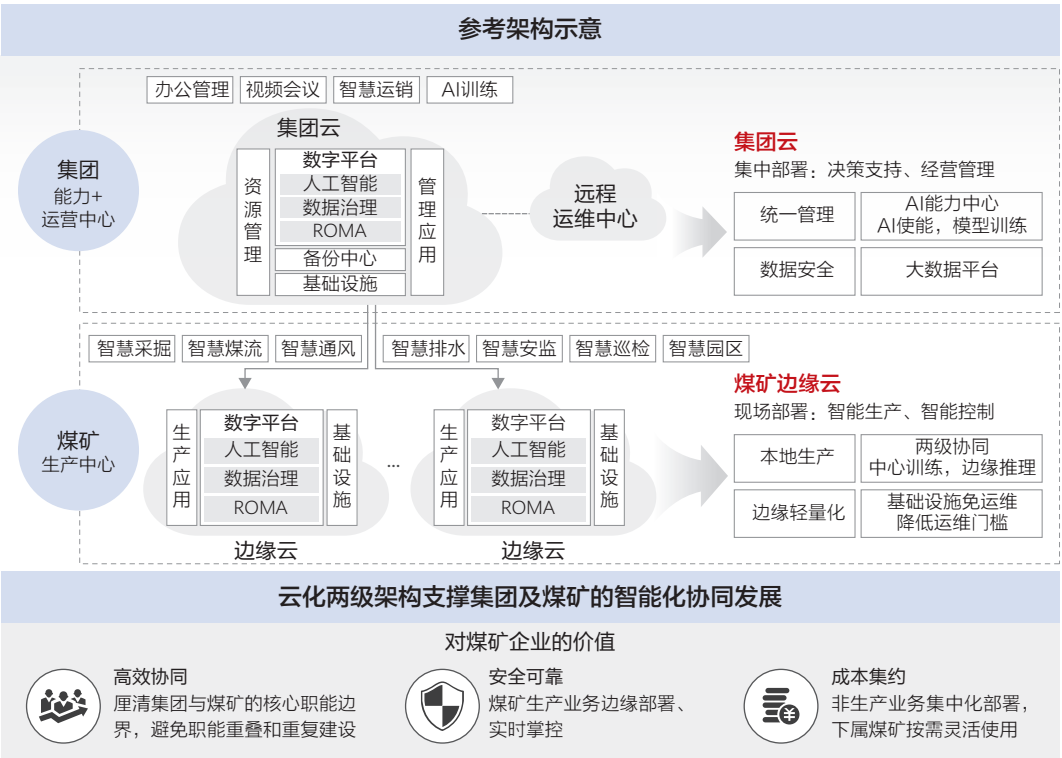


图4-33: 案例卡片-某煤矿集团

4.3.4 企业建议

继往开来，吐故纳新。站在传统工业软件的“巨人肩膀”上，工业界伙伴需要持续在继承中创新、在扬弃中前行。我们倡议广大工业企业从“用软件”逐步转变为“用服务”，制定从单机计算架构切换至云计算架构的时间表，并积极探索云工厂新范式。

基于业务需求循序渐进规划上云。工业企业需要立足于业务特点和实际需求，探索从单机计算框架转向云计算框架，从孤立、烟囱式应用走向集成、融合化应用，从购买软件授权转向按需订阅。为此，工业企业需要合理制定软件上云的行动计划，尽快行动。

基于云化软件探索全新工业范式。小家电、模具、服装、PCB、包装等行业的中长尾工业企业众多，同质化竞争激烈，可以探索新工业范式的应用，例如接入云工厂，以低成本撬动全面数字化，并实现企业间资源共享与协作共赢。

4.4 工业数据价值化

4.4.1 当前痛点

数据已成为继土地、劳动力、技术、资本之后的第五大生产要素，其重要性不言而喻。然而从工业数据的全生命周期来看，工业数据的高效采集、集成打通、价值挖掘与安全合规使用，是工业界共同面临的挑战。

采集阶段“数据上不来”。工业数据众多，研产供销服各个环节都产生大量数据，广泛分布在不同的生产设备、终端、产线、车间以及软件系统中。面对众多分散的采集源、异构的数据接口与协议，工业企业难以实现低成本、高效率的数据全量采集。据调查，39%的制造企业没有定期收集数据¹³，大

量的数据“石沉大海”。

汇聚阶段“数据没打通”。海量的异构数据形成众多林立的数据烟囱，数据格式不统一、缺值、异常跳变、噪音干扰等问题，导致工业企业面临巨大的数据治理压力，难以获得清洁的、高质量的工业数据。据调查，66%的制造企业发现其现存数据难以访问。

应用阶段“数据难使用”。一定程度受限于基础的数据治理工作不够扎实，同时也缺少数据价值挖掘的主动意识和高效工具，许多工业企业对数据分析、价值挖掘的深度、广度远远不够。据调查，96%制造企业表示收集的数据未使用起来。

数据安全是贯穿数据全生命周期的目标，但目前“安全隐患多”的问题仍然凸显。面对无处不在的外部威胁与风险，大部分工业企业的数据安全与合规能力仍显得捉襟见肘，难以对业务活动的安全性、连续性进行有效保障。据调查，63%的企业在2021一年当中遭遇过至少一次数据泄露¹⁴。

4.4.2 产业趋势：工业数据价值化

工业数据作为全新的生产要素，需要释放价值，驱动业务活动的提质增效。基于此，我们提出“工业数据价值化”的产业趋势判断。其具体内涵是：工业数据需要在三条“数据流”的基础上融合，在空间维、时间维上充分延展，才能在更大范围内释放价值。（图4-34: 工业数据价值化）

1)构建能力内核

首先要树立新的理念。从过去到现在，数据治理的理念从面向结果、面向过程到面向对象演进。要实现面向对象，Digital Twin是关键手段。工业企业通过Digital Twin构建起基于物理世界的真实映射，进而推动设计

¹³ 亚马逊云科技《打造智联工厂新时代》
¹⁴ 佛瑞斯特研究所《2021 年企业数据泄露状况》

立足“三条数据流”

Digital Twins建立物理世界映射，释放数据价值潜力

参考美国NIST——

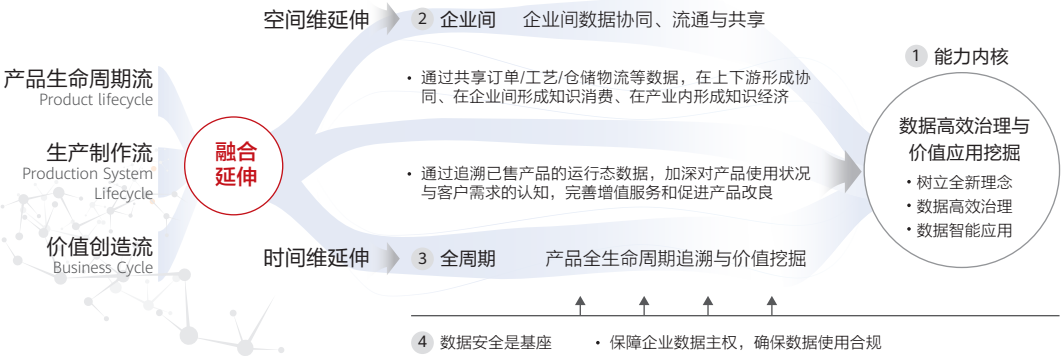


图4-34: 工业数据价值化

与全领域的融合，走向MBE (Model Based Enterprise)。在这一过程中，工业企业并不需要盲目追求物理世界100%的数字孪生、不追求一步到位，而是应该从最有业务价值的环节开始着手，以投资回报为准绳，逐步打造基于物理世界的Digital Twin。(图4-35: 建立“面向对象”的全新理念)

然后要开展数据的高效治理。在数据治理工作中，数据资产目录、数据标准、数据模型、数据字典、数据地图等手段，可以帮

助工业企业更好更快构建Digital Twin。具体而言：

数据资产目录的作用在于“盘家底”，通过分层架构表达，明晰数据的分类与定义，也是作为构建数据模型的关键输入。它可以帮助工业企业厘清数据资产，完成添加分类与标签、高效搜索、过滤、查看关系等工作。

数据标准的作用在于“立规矩”，统一格式、消除语言歧义，为数据资产梳理提供

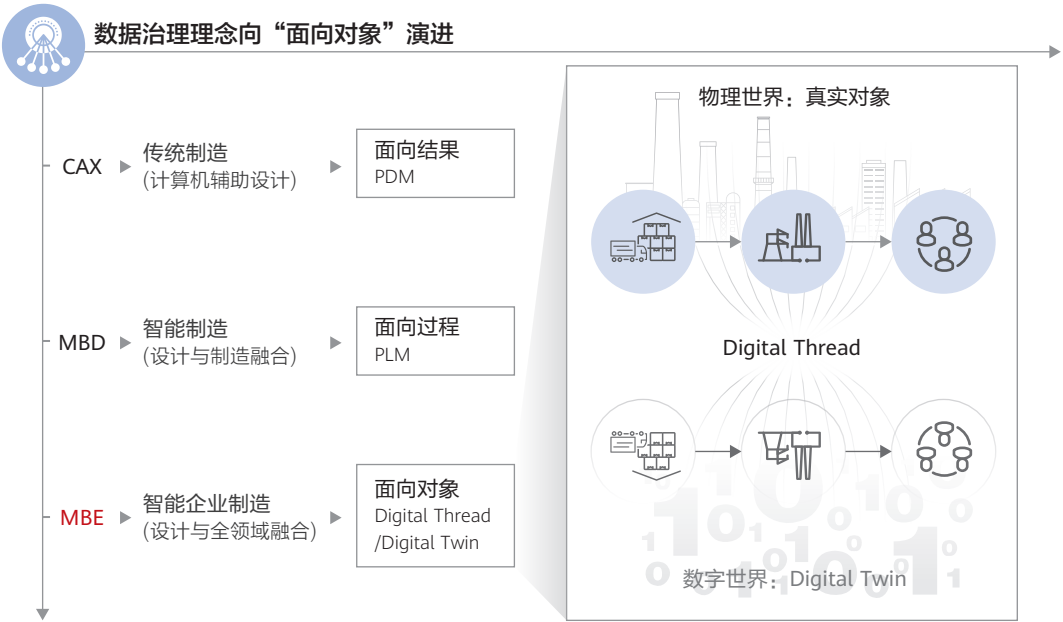


图4-35: 建立“面向对象”的全新理念

标准的业务含义和规范。它可以帮助工业企业高效获得高质量、清洁的工业数据，支撑数据的高效利用。

数据模型的作用在于“建镜像”，基于实际业务，建立数据与数据间的关系及其形式化表达，形成数字化镜像。它是工业企业下一步数据分析、多样化应用与价值挖掘的基础，可以对纷繁复杂的物理世界进行全方位的数字表达，是工业企业构建Digital Twin的关键手段，尤其值得重点关注。（图4-36: 数据模型的内涵）

数据地图的作用在于“览全局”，建立数据在业务流程和IT系统上的动态全景视图，实现海量数据可视化展示与分析。它可以帮助工业企业实现数据可视化，快速识别“来龙去脉”、精准导航和定位数据问题。

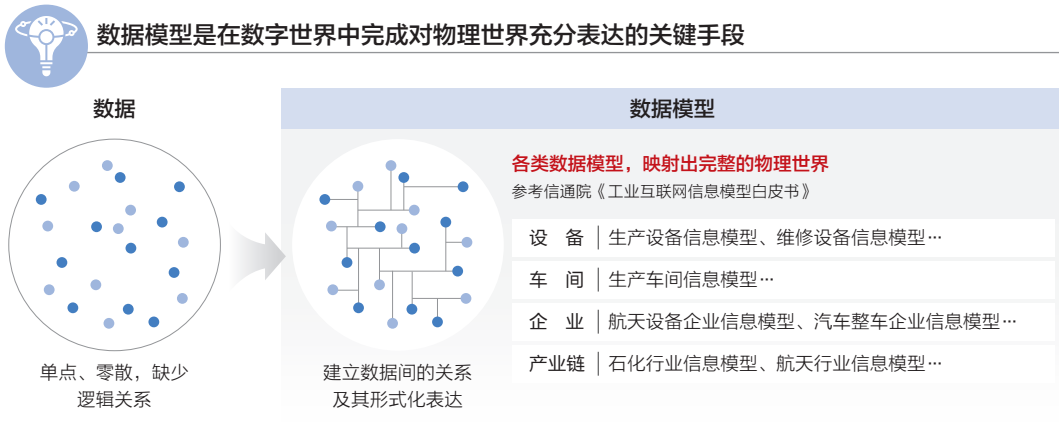
最后要开展数据的智能应用，这也是数据真正被“用起来”、产生价值的最后一公里。工业企业依托AI、工艺机理Know-how以及云/边算力的支持，可以将“清洁的数据”转化为“智慧的数据”，从依赖老师傅经验走向依托人工智能辅助决策，从手把手传帮带的经验传承走向Know-how的系统化积淀，让海量数据从沉睡走向价值盘活。工业数据在研产供销服各环节将产生大量的智

能化应用场景，已有领先企业在能源管理、设备运维、工艺参数优化、库存管理、销售预测等方面率先探索，其应用前景是广阔的、想象空间是巨大的。（图4-37: 工业数据具有广阔的应用前景）

2)全生命周期数据追溯

从时间维度看，工业企业所拥有的数据主要局限于产品研制阶段的数据，而鲜有对产品售后的运行态数据进行深入分析与挖掘，这使得工业企业的数据应用是不完整、不闭环的，因而工业数据的价值释放也是不充分的、不全面的。

因此，工业企业需要补齐产品运行态数据这一缺口，才能补全产品全生命周期的数据闭环，释放更大价值。一方面，基于运行态数据，工业企业可以为产品使用者提供预测性维护、性能评估、健康监测、故障检修等增值服务，为产品使用者创造价值。例如，Rolls-Royce通过分析航空公司飞机发动机运行数据，在一年内帮助某航空公司节省81万美元燃油成本；另一方面，工业企业通过深入洞悉产品运行状态与问题，加深对客户的理解，进而反向推动产品研发、制造的改良。例如某车企通过访问和分析车辆行驶



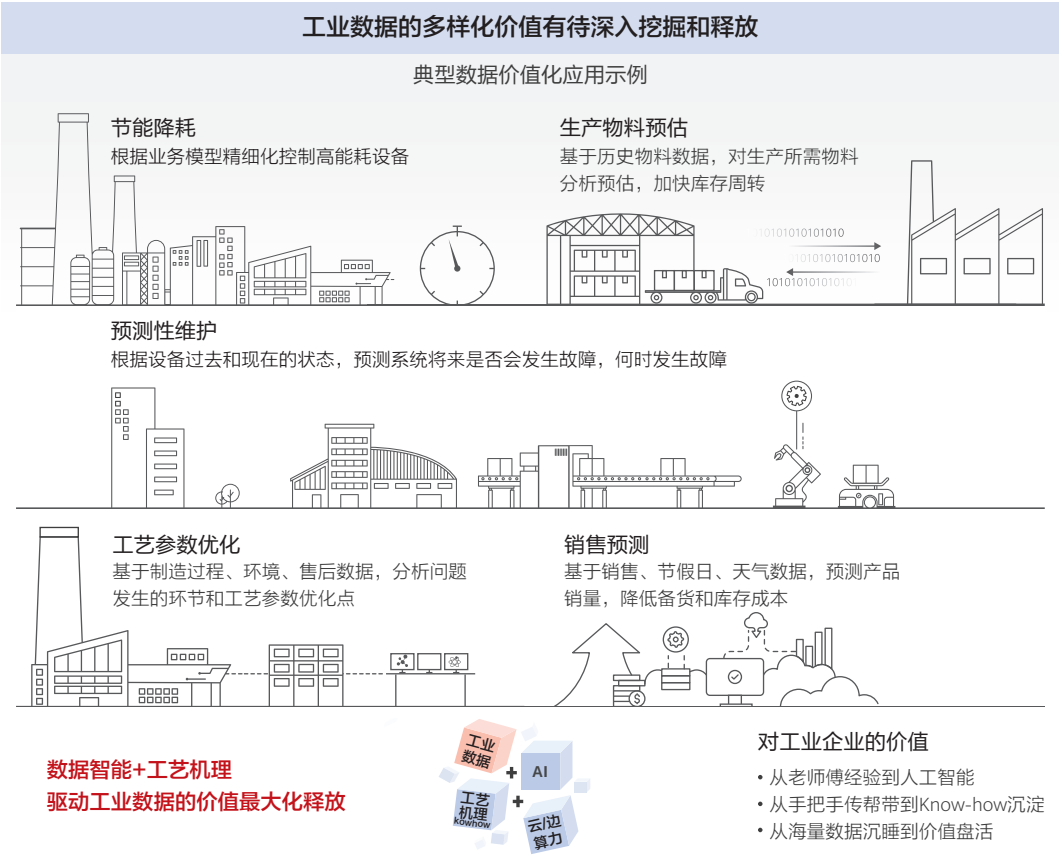


图4-37: 工业数据具有广阔的应用前景

数据，评估质量与性能，实现车辆系统的改良设计。（图4-38: 产品全生命周期数据追溯）

3)企业间数据流通

从空间维度看，工业企业的数据还需要

突破企业壁垒，在企业之间流动起来，才能创造更大价值、实现共赢。为此，国家层面出台了鼓励数据流通的相关政策，2022年12月19日中共中央、国务院发布的《关于构建数据基础制度更好发挥数据要素作用的意见》中明确指出，建立合规高效、场内外结

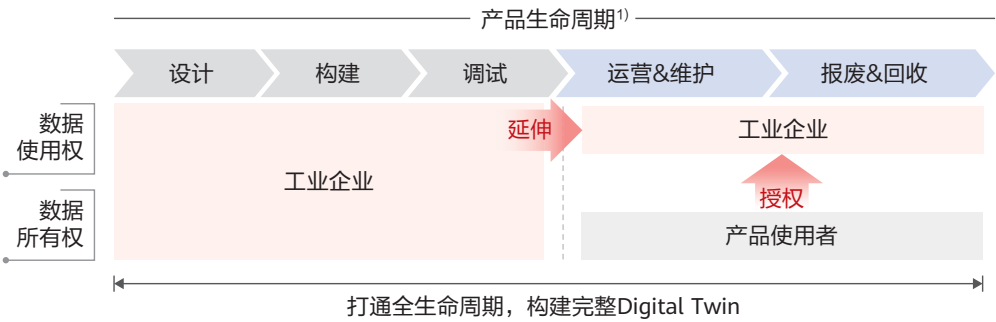


图4-38: 产品全生命周期数据追溯

插图注释：

1) 参考美国 NIST Production System Lifecycle

合的数据要素流通和交易制度；同时，地方层面也在积极探索数据流通机制，例如贵阳大数据交易所、上海大数据中心分别建立了各自的数据互联互通机制。

数据流通起来后，将“由点及面”地惠及更大范围的工业企业，实现可协同、可消费、可共享。行业、地方云平台和大数据中心将为工业企业和行业构建新的数据+行业知识（工业Know-How）驱动的应用架构的智能化业务底座¹⁵。首先是在上下游形成协同，将有效拉通产品设计、订单、产能、物流等数据，实现供应链敏捷响应、产品协同设计等，促进业务协同、形成合力；其次是在企业间形成工业知识消费市场，在保障数据主权的前提下，工业企业按需消费他方数据、按使用计价，促进知识有偿消费、惠及更多工业企业；最后是在产业内形成知识经济，产业、区域内企业对工艺知识、产能、供应链资源等数据进行拉通和共享，筑造知识经济。

4)数据安全

数据安全是工业数据价值化的基石，无论是工业企业内的数据治理与应用，还是工业企业间的数据流通和共享，都需要强有力的数据安全保障。为此，工业企业需要构建事前预防、事中预警、事后追溯的全套数据安全能力¹⁶，才能“让数据使用更安全”。（图4-39: 数据安全能力底座）

事前预防能力。对于无处不在的威胁与风险，防范于未然是至关重要的第一步，需要事先做好相应的功能模块、授权工作。这其中包括：通过风险标识，可以基于元数据标签，对数据的管理属性进行全方位评估与标识；通过加强数据保护，可以根据数据的风险等级，制定不同级别的数据保护要求，并在业务流程打点，严格执行到位；通过授权控制，在公司内部数据搬迁之前，依据数据分级结果，进行流程审核管控，做到事前预防；通过访问控制，依据数据风险与机要

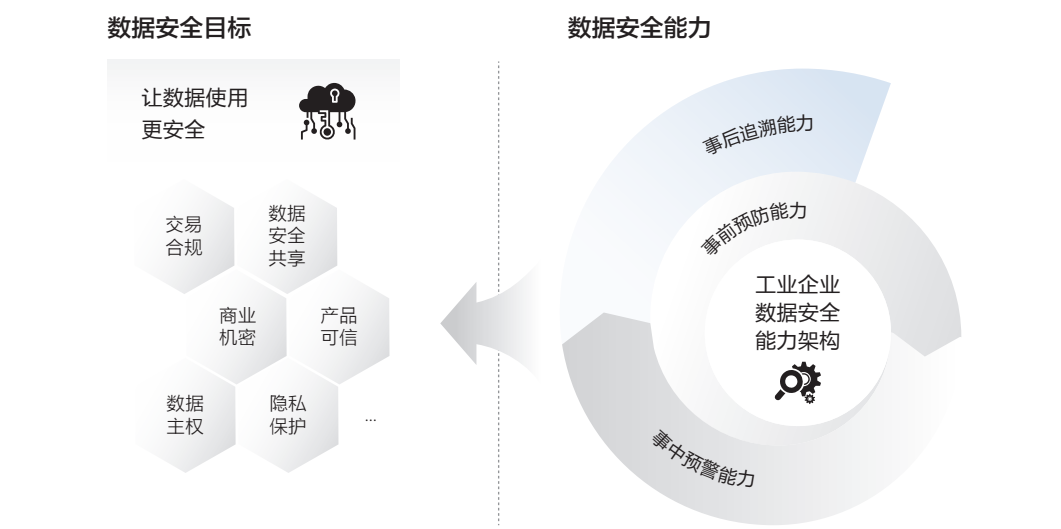


图4-39: 数据安全能力底座

¹⁵ 华为云、IDC《工业知识与 ICT 技术深度融合，驱动产业生态重构》白皮书

¹⁶ 参考《华为数据之道》

系统分级，建立机要人员管理机制，包括物理机房门禁、前台应用权限、后台权限的管理与监控等。

事中预警能力。安全的守卫过程中，需要做到数据流动与行为的实时可视。工业企业可以采用风险探针，应用数据防泄露保护技术，包括网络流量监控、用户行为分析等，让一切数据使用行为尽在掌控之中。

事后追溯能力。为可能发生的数据安全危机预留好处置空间也非常重要，这是工业企业守卫安全的最后一道防线。工业企业可以通过日志追溯，在产品或服务开发规范中，引入日志规范与标准，记录关键系统足

迹，引入数据水印，实现精准溯源。

4.4.3 案例参考

案例1-Digital Twin：某水泥集团构建跨多工厂多产线的大数据平台，构建业务“数字孪生”，实现全量感知、高效治理与智能决策。具体而言，通过构建生产运行监管平台，可以实现各区域工厂产线指标数据的横向对比与纵向寻优；同时也可以打通IT与OT数据，实现各类数据的采集与融合；并且也将构建统一的数据标准，支撑精细化的数据分析与运营。（图4-40: 案例卡片-某水泥集团）

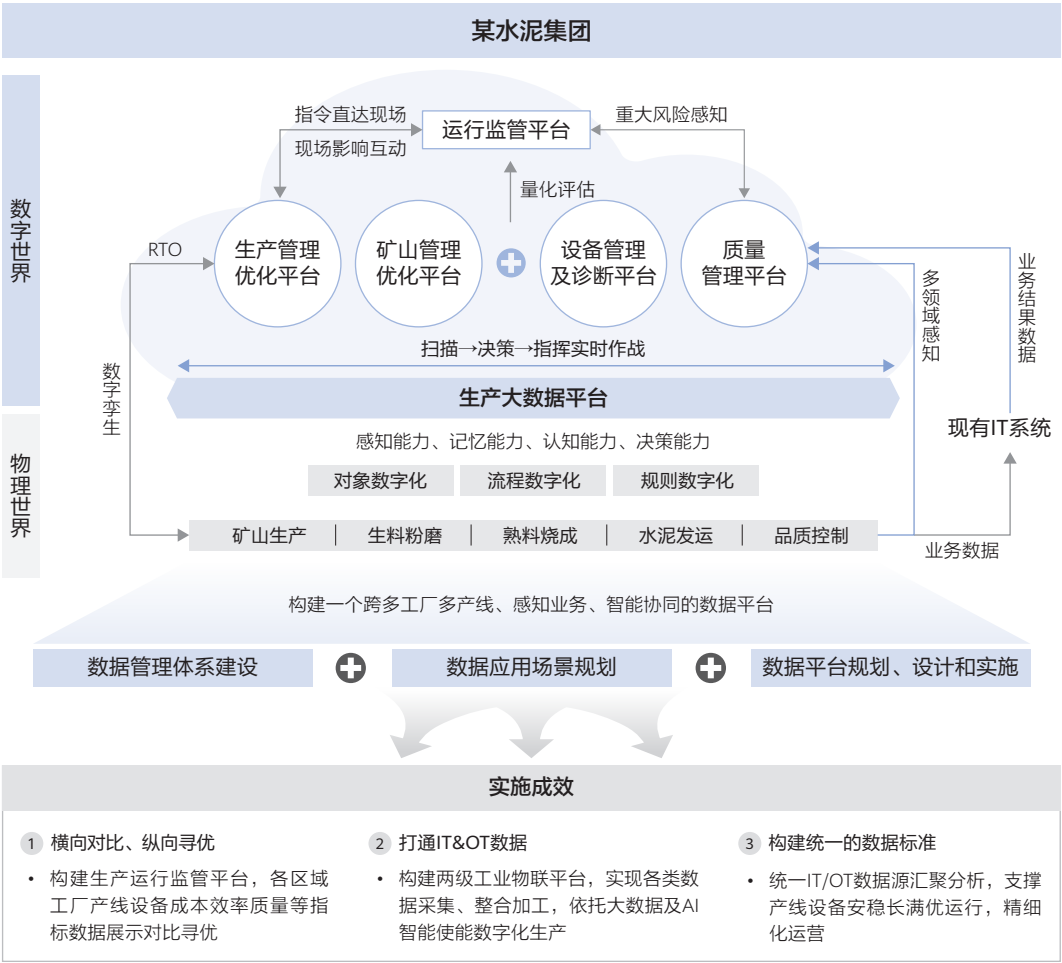


图4-40: 案例卡片-某水泥集团

案例2-数据治理与智能应用：某玻璃制造企业建设统一的数据底座和数据管理体系，实现 IT&OT数据融合、高效治理和智能化应用。其取得的成效包括：制作经营报表的时间从一周缩减至1个小时；基于实时数据的精细化能耗管理，年节省燃气费用数千万元；通过设备预测性维护，有效减少设备停机时间。（图4-41: 案例卡片-某玻璃制造企业）



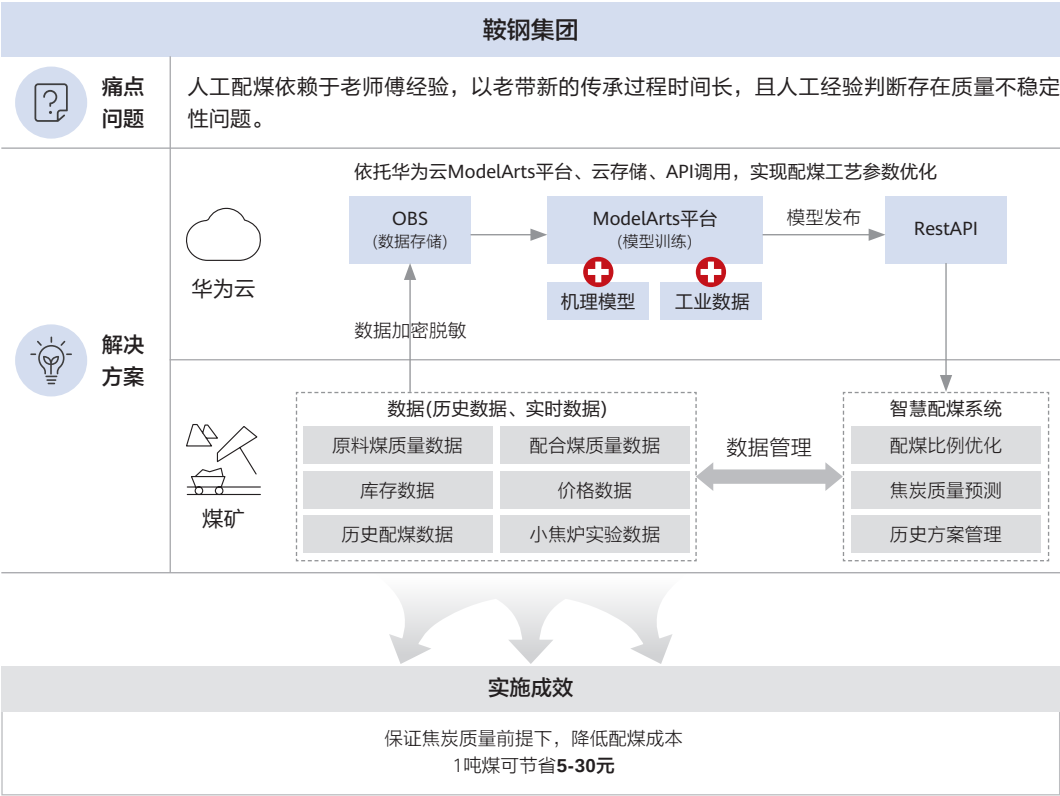


图4-42: 案例卡片-鞍钢集团

可控的基础上合规使用数据；可证，支撑提供方查证追溯、消费方可免证清白。目前，EDS已开通了20多个跨越华为及伙伴的数据交换空间，覆盖了研发、制造、物流、交付、售后等5个领域，上架了25种数据资产，实现了6000多次的有效交换¹⁷。（图4-43: 案例卡片-华为云EDS）

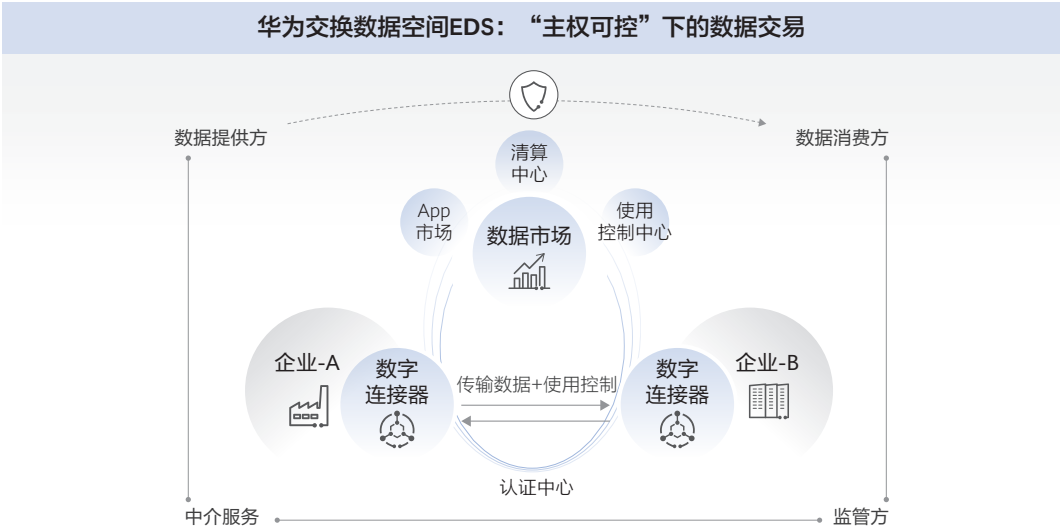


图4-43: 案例卡片-华为云EDS

¹⁷ 参考华为云官网

案例5-数据共享：欧洲Gaia-X平台推动区域内数据流转；德国汽车行业Catena-X平台打通供应链数据孤岛、挖掘产业链协同价值。（图4-44: 案例卡片- Gaia-X、Catena-X平台）

	欧洲Gaia-X平台	德国汽车行业Catena-X平台
成立背景	欧洲为应对AWS、Azure等美国云巨头的垄断，聚合电信服务商、本土云厂商、工业自动化巨头，建立区域性云平台、促进数据流转与产业创新	德国汽车工业协会为建立开放、可扩展的网络，聚合德国多个汽车制造商、电信服务商、工业自动化巨头，推动汽车工业的数字化转型
核心目标	打造欧洲本土化云服务 推动区域内数据流转 强化本土厂商云服务能力、确保数据主权，并推动跨企业协同创新，在10个领域推动跨企业的协作创新	打通供应链数据孤岛 挖掘产业链协同价值 汽车行业60%以上的价值创造来自供应链，通过规范数据传输标准、打通供应链各环节，实现降本增效
协同领域举例	Gaia-X 十大创新领域列举 农业能源汽车金融生命健康智慧城市	协同设计：与变速箱等供应商协同，辅以仿真软件赋能快速研发 精准排产：供应商WMS与整车厂APS/MES相连，整车厂基于实时数据排产，缩短交付周期

图4-44: 案例卡片- Gaia-X、Catena-X平台

案例6-数据安全：华为数据安全服务DSC为工业企业提供贯穿数据全生命周期的数据安全能力，构筑云上数据安全¹⁸。（图4-45: 案例卡片- 华为云数据安全中心）



4.4.4 企业建议

步步为营，点石成金。工业数据需要从当前的“乱而后治”逐步走向“不治而顺”。为此，我们倡议工业企业以“面向对象”为理念、以Digital Twin为目标，开展数据治理和智能化应用，并探索数据流通与共享，实现价值共创、协同共赢。具体有以下关键行动指南：

分阶段构建Digital Twin能力内核。树立全新理念是工业企业开展数据治理的第一步，建立“面向对象”的新理念，聚焦最有价值的业务环节，循序渐进构建Digital Twin，开展数据高效治理和智能化应用。

积极探索数据流通与共享。在空间维度，工业企业需要探索企业间的订单/制造/仓储物流等数据的协同、交易与共享，让工业数据“破壁”，推动业务协同、形成共赢。

追溯产品运行态数据，挖掘更多价值。在时间维度，工业企业还需考虑追溯已售产品的运行态数据，打通产品全生命周期的数据闭环，进而为客户提供增值服务，并反向促进产品研制的改良升级。

构建数据安全能力。工业企业需要加强安全意识，构建事前预防、事中预警、事后追溯的数据安全能力底座，让数据使用更安全。





第五章

工业智能体架构与实践

5.1 参考架构

基于工业“新四化”的研判和工业互联网的功能架构，我们进一步提出工业智能体参考架构，作为工业企业开展数字化规划和落地部署的参考范本。（图5-1：工业智能体参考架构）

我们将工业互联网功能架构中的平台、网络、安全、数据四大功能体系进行了解耦和映射：平台功能解耦至数字工业装备、工业边缘引擎、工业云底座、工业软件，网络功能对应先进工业网络，安全功能对应端到端安全，数据功能对应工业数据。工业软件、工业云底座、工业边缘引擎、数字工业装备、先进工业网络、工业数据以及端到端安全共同支撑了工业智能体的构建：

工业软件作为“大脑”。面向千行百

业、垂直深耕的云化工业软件需要工业界伙伴凝聚力量、共建共享共用，才能“枝繁叶茂”、为工业企业创造更大价值。

工业云底座作为“心脏”。云底座将汇聚和沉淀工业垂直领域的工艺机理、知识经验、工具等关键底层智慧，扎下“工业的根”，为工业界伙伴输出开放共享的工业根服务，实现“一切皆服务”。

工业边缘引擎、数字工业装备作为“四肢”。工业装备是关键的作业执行末端，在高复杂度场景引入边缘智能的辅助，共同打造生产作业第一线的“精兵猛将”，帮助工业企业完成高质量、高精度、高速度、智能化、协同化作业。

先进工业网络作为贯通全身的“神经”。工业网络为工业企业的业务活动提供全面泛在连接，并通过ICT与OT的融合，打造通



图5-1：工业智能体参考架构

用、灵活、精简、扁平、易维护的“一张网”，减轻工业企业数据采集汇聚、设备互联互通、网络运维的压力。

工业数据作为无处不在、流动的“血液”。工业数据既是业务活动产生的基础信息，更是宝贵的智慧结晶和无价资产。通过对人机料法环测全要素的数据全量采集，善用高效工具实现数据治理、智能应用，工业企业可以让“智慧的数据”释放巨大价值。

端到端安全作为工业企业的“免疫系统”。风险和威胁无处不在、防不胜防，工业企业必须构建贯通装备、网络、数据、云底座、软件的端到端安全能力，为生产活动的安全性和连续性保驾护航。

5.2 实践应用

行胜于言。工业智能体架构将在千行百业落地应用，帮助工业企业更高效地完成数字化解决方案设计和实施。以煤矿行业为例，在工业智能体参考架构指导下，形成矿鸿物联网-矿山工业网络-云数平台-矿山智能

应用的四层架构与建设内容。（图5-2: 工业智能体在煤矿领域的实践）

矿鸿物联网。当前煤机设备操作系统众多，导致互联互通困难。采用矿鸿操作系统、构筑矿鸿物联网，推动数据标准与接口的统一，一套系统覆盖大小设备，实现万物互联、安全可信。

矿山工业网络。构建井上井下统一的工业承载网，综合运用5G、Wi-Fi 6、全光无源网络、网络切片等技术，实现一网承载多种业务、网络智能运维，构建智能矿山全连接基础。

云数平台。一方面打造数据治理底座，基于华为云ROMA、DGC、ModelArts AI开发平台等，打造统一的数据底座，赋能业务升级迭代；另一方面应用盘古矿山大模型，依托于大模型，AI应用开发变得标准化、可复制、批量化，一套模型可覆盖采、掘、机、运、通等八大主业务场景。

矿山智能应用。在云数平台、智能装备与边缘、工业网络的协同使能下，丰富、创新性的矿山应用场景得以落地，助力矿企增



图 5-2: 工业智能体在煤矿领域的实践

安提质、降本增效。例如，运用人工智能和全景视频拼接技术使能综采面的远程操控，解决传统视频画面存在盲点、看不全也看不准的问题，还原完整画面，在井上即可实现沉浸式远程作业；运用机器视觉和人工智能技术进行掘进作业序列智能分析，识别掘进面工人作业流程中的截割头落地防护、打开机载前探支护、敲帮问顶、钻眼、注入药卷、搅拌时长达标等8个关键场景，监督作业规范性、保障安全生产；基于AI和大数据的智能洗选煤参数调优，不仅可以提升洗选煤、配煤质量，还可以降低配煤的时间、物

耗成本；依托AI芯片、无人驾驶算法等的矿山无人驾驶，将有效降低人力成本、减少燃油消耗和维护成本；对传统线下勾表、口头沟通等传统管理方式进行全面数字化、标准化改造，指挥大屏、运营中屏、作业小屏三屏联动，实现煤矿班组数字化作业；利用可穿戴设备、物联网、大数据等新技术，实现矿工的井下井上安全与健康健康管理，包括采集员工健康数据、提供员工健康服务、危险环境健康预警、指导自我健康管理等功能。总之，在数字化技术的赋能下，“煤矿工人穿西装打领带挖矿”的将来离我们已不遥远。



华为技术有限公司
深圳市龙岗区坂田华为基地
电话: (0755) 28780808
邮编: 518129
www.huawei.com

中国信息通信研究院
北京市海淀区花园北路52号
电话: (010) 62301618
邮编: 100191
www.caict.ac.cn

罗兰贝格企业管理（上海）有限公司
上海市南京西路1515号静安嘉里中心办公楼一座23F
电话: (021)52986677
邮编: 200040
www.rolandberger.com

商标声明

 HUAWEI，HUAWEI，是华为技术有限公司的商标或者注册商标。
 中国信通院，是中国信息通信研究院的商标或者注册商标。
，罗兰贝格，是罗兰贝格企业管理（上海）有限公司的商标或者注册商标。
在本手册中以及本手册描述的产品中，出现的其他商标、产品名称、服务名称以及公司名称，由其各自的所有人拥有。

免责声明

本文档可能含有预测信息，包括但不限于有关未来的财务、运营、产品系列、新技术等信息。由于实践中存在很多不确定因素，可能导致实际结果与预测信息有很大的差别。因此，本文档信息仅供参考，不构成任何要约或承诺，华为、中国信通院、罗兰贝格不对您在本文档基础上做出的任何行为承担责任，也可能不经通知修改上述信息，恕不另行通知。

版权所有 ©华为技术有限公司 ©中国信息通信研究院 ©罗兰贝格企业管理（上海）有限公司 2023。保留一切权利。非经华为技术有限公司、中国信息通信研究院、罗兰贝格企业管理（上海）有限公司书面同意，任何单位和个人不得擅自摘抄、复制本手册内容的部分或全部，并不得以任何形式传播。