



PREAMBLE 序 言



物流行业和其他行业一样,正面临着前所未有的挑战: 三年新冠疫情刚过、大国竞争、地缘政治、多国混战、供应链中断成为常态、气候变化带来的可持续性要求不断提高。与此同时,工业革命 4.0 和数字经济的高速发展也给物流行业带来可见的冲击。所有这些挑战正驱使物流行业进行持续的数字化变革,以重塑物流行业,使其得以应对挑战,迈向繁荣的未来。

新兴数字技术正是帮助重塑物流行业的强大武器。其中,数字孪生更是变革和重塑物流行业最为重要的战略性武器之一。本白皮书通过对数字孪生发展现状和大量案例的研究,试图回答以下几个问题:

- 国内外数字孪生研究和应用现状?
- 物流数字孪生的概念、特征、能力和价值?
- 物流数字孪生的未来发展方向和应用前景?

国内物流数字孪生已经从点、线、面实践向物流大生态应用发展;从物流域向供应链域、客户域扩展;从模拟仿真向高逼真度优化进化。物流数字孪生在顺丰等领先企业的创新发展为行业开辟了进步新空间,当然还有更多值得探索提升的空间需要被解锁。

本白皮书围绕物流数字孪生的发展背景、概念特征、应用实践、领先创新和发展空间展开,为物流业提供了物流数字孪生的全景呈现,期望以此推动行业生产力创新变革加速,实现数字孪生的共性价值。



CONTENTS 目 录

序 言
目 录 · · · · · · · · 4
第一章 物流数字孪生发展驱动力 · · · · · · · · · · · · · · · · 8
1.1 宏观政策导向下的数字孪生 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
1.1.1 数字经济发展需要新兴数字智能技术 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
1.1.2 十四五规划新基建带来新机遇 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
1.2 数字孪生的价值呈现和全球市场高速发展态势 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
1.2.1 数字孪生的价值呈现正在塑造对数字孪生的需求 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
1.2.2 全球及中国数字孪生市场蓬勃发展·····14
1.3 物流业困境与物流数智化战略突围 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
1.4 小结 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
第二章 数字孪生概念和发展现状 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
2.1 数字孪生的概念、分类、关键技术和基本特征 · · · · · · · · · · · · · · · 18
2.1.1 数字孪生的概念和基本要素 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
2.1.2 数字孪生的基本特征 · · · · · · · · · · · · · · · · · 20
2.1.3 数字孪生的分类 · · · · · · · · · · · · · · · · · · 21
2.1.3.1 数字孪生技术分类 · · · · · · · · · 21
2.1.3.2 数字孪生层次结构分类 · · · · · · · · 23
2.1.3.3 数字孪生应用分类 · · · · · · · · · 23
2.1.4 数字孪生的关键底层技术 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
2.2 国内外数字孪生发展现状及应用现状 · · · · · · · 25
2.2.1 数字孪生发展历程 · · · · · · · · · · · · · · · · 25

2.2.2 国内外数字孪生研究概述 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · 26
2.2.2.1 国外数字孪生研究概述 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · 26
2.2.2.2 国内数字孪生研究概述 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · 27
2.2.3 国内外数字孪生标准体系简介······	· · 29
2.2.3.1 国外数字孪生标准体系 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	30
2.2.3.2 国内数字孪生标准体系 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · 31
2.2.4 国内外数字孪生应用场景分析 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · 32
2.2.4.1 数字孪生的应用场景框架 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	32
2.2.4.2 全球 250 个数字孪生的应用场景模型 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	33
2.3 国内外物流数字孪生应用现状 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	33
2.3.1 国外物流数字孪生应用现状 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	34
2.3.2 国内物流数字孪生应用现状 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · 35
2.4 物流领域数字孪生图谱 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	36
2.4.1 数字孪生产业格局 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	36
2.4.2 物流领域数字孪生图谱 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · 37
2.5 小结 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	38
第三章 物流数字孪生概念及系统参考架构 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	39
3.1 物流数字孪生概念和基本特征 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · 40
3.2 物流数字孪生系统参考架构 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	44
3.2.1 物流数字孪生概念架构 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	44
3.2.2 物流数字孪生系统架构 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · 45
3.2.3 物流数字孪生技术架构 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · 47
3.3 小结 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · 48
第四章 物流数字孪生价值与应用 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	49
4.1 满足精益生产需求的生产物流 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · 50
4.2 单一场所的设计与运营优化 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	52

目 录

物流数字孪生白皮书

4.3 赋能港口数字化智能化改造 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
4.4 提升机器人群体管理 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
4.5 增强物流包装和容器设计 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
4.6 实现物流设备的预测性维护 · · · · · · 58
4.7 全球物流网络的数字孪生 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
第五章 物流数字孪生赋能供应链 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
5.1 推动数据驱动的供应链决策 · · · · · · · · · · · · · · · · · · 61
5.2 实现供应链实时风险管理 · · · · · · 63
5.3 提高供应链协同 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
5.4 促进绿色供应链与可持续性发展 · · · · · · · 67
第六章 顺丰物流数字孪生创新应用 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
6.1 顺丰数字孪生发展背景 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
6.2 顺丰数字孪生发展历程 · · · · · · · · 71
6.3 顺丰在物流数字孪生方面的创新与应用 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
6.3.1 从点开始:数字孪生中转场 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
6.3.2 由点及面: 数字孪生物流网络 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
6.3.3 横向拓展: 数字孪生货运机场 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
6.4 物流数字孪生在顺丰的价值与未来 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
6.4.1 基于场景开发的数字孪生应用支持物流运营变革与持续优化 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
6.4.2 展望未来:规模化应用,提升行业整体质量·····85
6.4.2 展望未来: 规模化应用,提升行业整体质量·····85 第七章 物流数字孪生技术的主要挑战和风险····88
第七章 物流数字孪生技术的主要挑战和风险 · · · · · · · 88
第七章 物流数字孪生技术的主要挑战和风险 88 7.1 虚假错误数字孪生的风险 89
第七章 物流数字孪生技术的主要挑战和风险 88 7.1 虚假错误数字孪生的风险 89 7.1.1 数字孪生体不正确的风险 89

7.3 企业通往采用数字孪生成功的道路 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
第八章 展望未来发展趋势······97
8.1 数字孪生是供应链和物流战略性技术趋势 · · · · · · · · · · · · · · · · 98
8.1.1 Gartner 的八大供应链战略性技术趋势·····98
8.1.2 ASCM 2024 年供应链十大趋势 · · · · · · 99
8.1.3 DHL 最新物流趋势雷达 · · · · · · · 99
8.2 供应链和物流数字孪生技术的成熟度 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
8.2.1 几个典型的数字孪生技术成熟度模型 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
8.2.2 数字孪生网络及其成熟度模型 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
8.2.3 供应链和物流数字孪生技术的成熟度 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
8.2.4 供应链和物流数字孪生技术的发展周期曲线 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
8.3 数字孪生技术发展趋势 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
8.4 物流数字孪生应用领域拓展 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
8.4.1 全局 / 整体物流数字孪生的应用 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
8.4.2 客户的数字孪生(DToC) · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
8.4.3 数字孪生用于多式联运 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
8.4.4 数字孪生技术加速供应链可持续性 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
8.5 向智能化和自主化方向发展 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
8.6 小结 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
结论

物流数字孪生发展驱动力

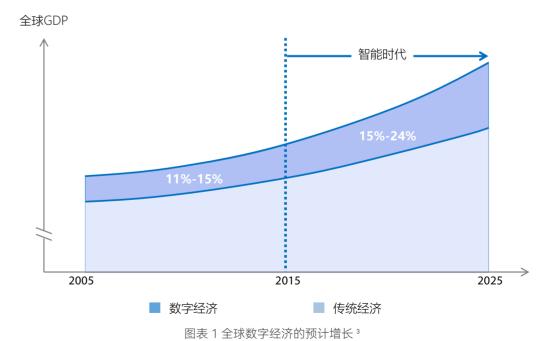
第一章 物流数字孪生发展驱动力

随着数字经济的蓬勃发展,数字化变革正在中国各行各业如火如荼地进行,"数字孪生"这个热词也广泛进入到人们的视野中。只要检索,百度¹搜索将给出约 61,200,000 条有关数字孪生的巨量信息。物流数字孪生是一种特殊的行业数字孪生,百度搜索也给出了约 6,750,000 条有关信息。这说明作为战略性新兴数字技术之一的数字孪生技术 ²已受到广泛关注,该技术激发了全世界学者、管理者和从业者的想象力,并推动着大量的技术商业应用。为什么要采用数字孪生技术,为什么是现在?作为本白皮书的开篇,将从世界和国家的发展战略、全球市场以及物流行业的发展战略三个宏观视角进行回答。

1.1 宏观政策导向下的数字孪生

1.1.1 数字经济发展需要新兴数字智能技术

数字经济是全球,特别是我国的发展战略。近年来,世界各国的数字经济正蓬勃发展。华为和牛津经济学人于2017 年曾在它们的联合研究报告《数字溢出(Digital Spillover)》中预测了全球数字经济的增长,并指出:在过去的 10 年(2005-2015)里,数字经济占全球 GDP 的比例从 11% 左右增长到了 15%。随着"+ 智能"时代的到来,报告预计到 2025 年,全球数字经济规模将进一步增长到全球 GDP 的 24.3%。



- ¹参考文献: 百度搜索, https://www.baidu.com/, 2023
- 2参考文献: 唐隆基, 数字孪生趋势, 概念, 技术及应用, 罗戈研究, 2023-10-16
- ³参考文献: 《数字溢出 (Digital Spillover)》,华为和牛津经济学人,2017

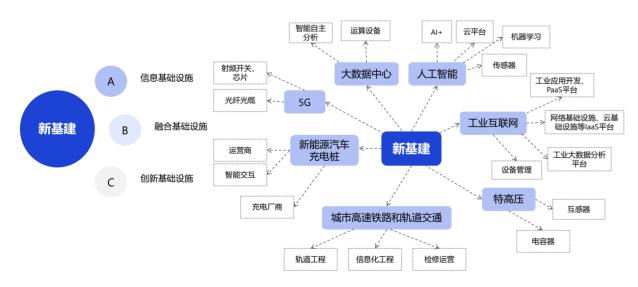
实际上,中国数字经济的发展大大超出了预期。中国信通院 2023 年元月发表的《中国数字经济的发展研究报告》 "指出: 2022 年我国数字经济规模首次突破 50 万亿元,达到 50.2 万亿元,同比名义增长 10.3%,已连续 11 年显著高于同期 GDP 名义增速,数字经济占 GDP 比重相当于第二产业占国民经济的比重,达到 41.5%。

数字经济和新兴数字技术(包括人工智能、数字孪生、云计算、自动化等)相辅相成。一方面新兴数字技术是数字经济的加速器,另一方面数字经济的发展催生了新兴数字技术,并进一步推动新兴数字技术的创新、应用和发展。中投产业研究院发布的《2023-2027年中国数字孪生技术深度调研及投资前景预测》5研究报告指出:数字孪生是战略科技发展的必然趋势,基于"物理实体+数字孪生"的资源优化配置体系,也将成为数字化发展的终极模式。当前,数字孪生的技术应用逐步向制造、医疗、城市管理等各个领域渗透,众多企业也已在尝试利用数字孪生促进产品全生命周期管理,为远程操控、智慧城市管理、健康监测与管理等方面提供了更多可能。作为数字化发展的高级阶段,数字孪生将向综合企业数字化、信息化、智能化发展历程融合推进。该报告的不足之处在于它忽略了近年来数字孪生技术在我国数字经济中扮演重要角色的供应链和物流领域也得到了快速的应用发展,本白皮书第六章呈现的顺丰实践就是很好的案例。

总而言之,数字经济的高速发展是新兴数字技术、尤其是数字孪生和物流数字孪生技术发展的原动力之一。

1.1.2 十四五规划新基建带来新机遇

我国的十四五规划是发展国家的经济,特别是数字经济的宏伟蓝图。"十四五"规划提出:系统布局新基建(新型基础设施),加快第五代移动通信、工业互联网、大数据中心、智慧城市等建设。新基建包括三大方向和七大领域。 新基建将为中国创新发展、绿色发展和人民美好生活创造基础性条件。



图表 2 新基建三大方向和七大领域

4参考文献: 《中国数字经济的发展研究报告》,中国信通院,2023年元月

5参考文献: 《2023-2027年中国数字孪生技术深度调研及投资前景预测》,中投产业研究院,2023

6参考文献:任泽平、中国新基建研究报告 2022

新基建三大方向和七大领域中的多个方面都离不开数字孪生技术的采用和创新,例如智慧交互、信息化工程、检修运营、设备管理(包括物流设备和设施)、智能分析和决策以及工业应用开发等。数字孪生技术也在多个政府文件中被多次提及(见下表),例如 2020 年 4 月,国家发改委印发的《关于推进"上云用数赋智"行动,培育新经济发育新经济发展实施方案》中,数字孪生技术受关注程度和云计算、AI、5G等一样,上升到国家高度。

时间	发文单位及政策名称	主要内容
2019.11	发改委,《关于推动先进制 造业和现代服务业深度融合 发展的实施意见》	深化制造业服务业和互联网融合发展。大力发展"互联网+"。激发发展活力和潜力,营造融合发展新生态。突破工业机理建模、数字孪生、信息物理系统等关键技术
2020.04	发改委,《关于推进"上云用数赋智"行动培育新经济发展实施方案》的通知	开展数字孪生创新计划。鼓励研究机构、产业联盟举办形式多样的创新活动,围 绕解决企业数字化转型所面临数字基础设施、通用软件和应用场景等难题,聚焦 数字孪生体专业化分工中的难点和痛点,引导各方参与提出数字孪生的解决方案
2020.12	工信部,《工业互联网创新 发展行动计划(2021-2023 年)》	支持建设云仿真、数字孪生等技术专业型平台,加快信息技术创新应用,研发构 建数字孪生创新工具,打造创新解决方案,发展基于数字孪生技术的工业智能解 决方案
2021.06	国务院,《"十四五"数字经济发展规划》	提升城市综合管理服务能力,完善城市信息模型平台和运行管理服务平台,因地制宜构建数字孪生城市
2021.11	工信部,《"十四五"大数据 产业发展规划》	融合应用市场加速繁荣,场景挖掘将从边缘浅层向核心深层拓展。基于数字孪生体的制造执行、跨系统跨产业链的综合性分析等深层次应用将加速涌现
2022.01	发改委、水利部,《"十四五" 水安全保障规划》	要推进数字流域、数字孪生流域建设,实现防洪调度、水资源管理与调配、水生态过程调节等功能,推动构建水安全模拟分析模型,要在重点防洪区域开展数字孪生流域试点建设
2022.10	国家能源局,《能源碳达峰 碳中和标准化提升行动计 划》	加快完善能源产业链数字化相关技术标准体系,推进能源各领域数字孪生、能源大数据、智能化等技术标准制修订
2023.01	中共中央、国务院,《数字中国建设整体布局规划》	推动生态环境智慧治理,加快构建智慧高效的生态环境信息化体系,运用数字技术推动山水林田湖草沙一体化保护和系统治理,完善自然资源三维立体"一张图"和国土空间基础信息平台,构建以数字孪生流域为核心的智慧水利体系

图表 3 2019-2023 年数字孪生相关政策概览 7

与此同时,各个部委也发文推进行业的新基建,这些文件也将采用数字孪生技术作为实现新基建重要的战略规划。 例如 2022 年 10 月 9 日,国家能源局发布关于印发《能源碳达峰碳中和标准化提升行动计划》的通知,明确提出 要加快完善能源产业链数字化相关技术标准体系,推进能源各领域数字孪生、大数据,智能化等技术标准制修订。

总而言之,数字孪生技术已经成为国家十四五规划中新基建的重要战略性技术之一。新基建为数字孪生技术提供了创造价值的新机遇和推动其发展创新的动力。

⁷参考文献:艾瑞咨询,中国数字孪生行业研究报告,2023年4月

1.2 数字孪生的价值呈现和全球市场高速发展态势

1.2.1 数字孪生的价值呈现正在塑造对数字孪生的需求

作为工业 4.0 核心技术之一的数字孪生,在新工业革命中已崭露头角,在智能制造、智慧城市、航空航天工业等已 表现出卓越的创新能力和价值创造的前景。特别是工业数字孪生正在重塑工业生产和运营模式:

虚实交互

优化目标。

闭环优化

环优化。

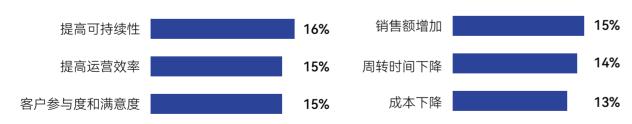
共生迭代

通过虚实结合、互联互通、工业数 工业数字孪生 +AI 能够实现从自动采 数字孪生的物理对象与虚拟世界中 字孪生基于虚拟空间的实时仿真模 集感知、决策分析到结果反馈的信 的数字孪生连接并演进实现同步迭 拟与预测分析、找到最佳的设计方案、息闭环传递、甚至能通过智能交互、代、可覆盖数字孪生与对象的设计、 确保提前发现现实隐患、实现生产 系统自动触发或纠正其物理对象的 生产,安装、调试、运维及报废的全 行为,从而推动工业全业务流程闭 生命周期。以实现工业物理对象在 其全生命周期中的优化和价值创造。

2023 年西门子公司和麻省理工学院技术评论联合发表了《新兴工业元宇宙的研究报告》,报告指出:数字孪生加 快了许多应用程序和用例的上市时间,因为开发团队不必每次构建应用程序时都花时间清理和重组原始数据。该报 告引用了麦肯锡在其 2022 年研究报告 8 中的发现:数字孪生将部署新的人工智能驱动能力所需的时间减少了 60%. 资本支出和运营支出减少了10%、商业效率提高了15%。

凯捷于 2021 年 9-10 月对全球 500 家正在进行数字孪生项目的组织进行了调查,并取各种使用案例中的平均效益。 调查结果显示。组织从数字孪生实施中实现了众多优势:

组织从其数字孪生实施中实现众多优势



图表 4 数字孪生的众多优势。

8 参考文献: McKinsey Digital, Digital twins: The foundation of the enterprise metaverse, 2022

9参考文献:凯捷,数字孪生:将智能引入现实世界,2022-09-15

数字孪生所具备的能力是巨大的, 为了简洁起见, 可以将其分为三大类;

高效的验证能力

使用建模和仿直来减少资产 / 产品 / 设施 / 运营系统组件和子系统设计 / 方案认证或采纳的时间和成本。

持续的分析能力

它能用规则、预测、各种算法以及 AI/ML 对整个产品 / 服务运营系统或网络的状态、解决方案等进行分析,从而能 够预测其物理实体的特征或服务的绩效,并建议 / 规定物理实体特征或服务的最佳方案以使其更加高效。这种分析 是通过虚实之间的数据交换不断迭代进行的,物理实体产生的新的数据(包括任何状态改变)将自动或半自动地驱 动进一步的分析,分析的结果将产生优化物理实体的建议/参考决策/指令。

智慧的决策能力

利用在整个产品/服务生命周期中获得的信息、对资产/产品/设施/运营系统组件和子系统的当前和未来状态做 出更智慧的决策,从而优化整个产品/服务运营系统或网络,并为未来的产品/服务实践和知识库提供反馈,从而 使产品 / 服务得到持续的改进,增加客户满意度并为企业和社会创造价值。

本章 1.3 节将介绍物流业困境与物流数智化战略突围,呈现数字孪生技术在物流领域中的应用发展潜力。

1.2.2 全球及中国数字孪生市场蓬勃发展

研究表明 ¹⁰,大型企业 70% 的高管都在探索和投资数字孪生。这种兴趣,加上快速发展的支持性技术,推动了市场对该领域的关注和看好——预计到 2026 年数字孪生投资将超过 480 亿美元,年复合增长率达 58%。

根据美通社 2023 年 8 月 23 日的最新报道: ResearchAndMarkets.com 发布了《2023-2028 年全球数字孪生行业研究报告: 增强卓越运营 -DT 引领行业范式转变》(简称新研报)"。报告指出: 全球数字孪生市场预计将实现显著扩张,从 2023 年的 101 亿美元跃升至 2028 年的 1101 亿美元, 年复合增长率高达 61.3%。

新研报还给出了以下重要的市场预测

- 制造企业越来越多地采用数字孪生解决方案来推动市场增长;
- 预测性维护领域将在整个预测期内主导市场:
- 2023 年, 汽车和运输行业将占据数字孪生最大市场份额;
- 在预测期内,中国将在全球数字孪生市场创下最高的年复合增长率。

其中最令人振奋的是最后一条预测,它表明中国的数字孪生创新及应用将会像人工智能技术一样有望走在世界前列。

新研报还指出了数字孪生市场高速发展的 几个来自实际应用趋势的驱动力

- 供应链行业越来越多地使用数字孪生技术降低成本、改善运营;
- 医疗行业对数字孪生技术的需求激增;
- 各行业越来越多地采用预测性维护模型。

其中第一条正是本白皮书聚焦的数字孪生的应用领域:供应链和物流, 而第三条也在供应链和物流装备及基础设施预测性维护的数字孪生应用中得到印证。

10 参考文献: 凯捷, 数字孪生: 将智能引入现实世界, 2022-09-15

"参考文献: 2023-2028 年全球数字孪生行业研究报告: 增强卓越运营 - DT 引领行业范式转变, 美通社, 2023 年 8 月 23 日

看回中国市场,中国数字孪生的市场正呈现高速增长。

根据艾瑞咨询 2023 年的研究报告 ¹²,2022 年中国数字孪生市场规模突破 100 亿,达 104 亿元,同比增长 35.0%,2020-2022 年复合增长率为 65.4%,未来仍将保持高增长。随着各行业数字化转型的推进,数字孪生渗透率也将上升,推动国内未来数字孪生市场规模增长,预计 2025 年国内市场规模将达 375 亿元,2022-2025 年复合增长率为 54.3%。

2020-2025年中国数字孪生市场规模



图表 5 2020-2025 年中国数字孪生的市场规模

1.3 物流业困境与物流数智化战略突围 13 14

今年以来,我们多次看到全球物流供应链企业裁员、倒闭的新闻,比如 C.H. Robinson、亚马逊无休止的裁员,以及有史以来规模最大的美国货运公司破产案——Yellow Corp 计划申请破产同时将解雇 3 万名员工等。

在我们看不到的地方,货运行业的衰退对于中小货运企业的影响更大,据 Tank Transport 统计,燃料成本上涨和运费下降导致 31,278 家卡车运输公司关闭或将其服务转移到更大的车队。美国卡车协会首席经济学家鲍勃 - 卡斯特罗表示,每周都有拥有上百辆卡车规模的运输公司倒闭,更多小规模的卡车公司将面临破产。

物流行业面临极大的降本、提效的压力。此外,受制于复杂的国际政治、经济局势,货主提出越来越高的供应链安全性需求。如何提供高效、安全、稳定的物流供应链变得越来越具挑战性。而数字孪生技术通过在虚拟环境中仿真和预测物流运作过程,并持续针对调优策略展开快速验证,为物流运营决策变革、运营效率优化、作业成本下降、安全性提升等均带来了一系列的价值和优势。

¹² 参考文献: 艾瑞咨询, 中国数字孪生行业研究报告, 2023 年 4 月

¹³ 参考文献: 裁员、倒闭不停! 全球一大批物流供应链企业撑不住了, 物流沙龙, 2023 年 12 月 2 日

¹⁴ 参考文献: 数字孪生物流行业有什么价值? ,六月 UAL,2023 年 11 月 14 日

运营决策变革

数字孪生技术具备的验证能力为物流运营决策变革带来巨大价值。

数字孪生技术为运营变革方案验证提供高度逼真的验证环境,具备结果真实、准确度高的显著特点。数字孪生虚拟场景远大于现实的加速比,可大大节省验证的时间、人力、物力成本,提升决策的效率。此外,由真实业务数据驱动的模型也极大地提升了决策的可信赖度。

运营效率优化

数字孪生技术可以通过仿真和优化物流运作过程、帮助提高物流效率。

在具体应用层面,数字孪生技术可以将物流运作过程中的各个环节,包括运输、仓储、包装、配送等,进行精确的仿真和预测。通过这种方式,企业可以更清晰直观地了解物流运作过程中的瓶颈和问题,并及时采取措施进行优化。例如,数字孪生技术可以对物流路线进行优化,减少运输时间和成本,提高效率。

作业成本下降

数字孪生技术可以通过精确的仿真和预测、帮助企业降低物流成本。

在具体应用层面,数字孪生技术可以对物流需求进行预测,并制定合理的配送计划和 库存管理策略。通过这种方式,企业可以减少库存积压和配送成本。此外,数字孪生 技术还可以通过自动化和智能化的方式,减少人力成本和错误率,进一步降低成本。

安全性提升

数字孪生技术可以通过仿真和预测物流运作过程中可能出现的安全问题,帮助企业增强物流安全性。

在具体应用层面,数字孪生技术可以对物流运作过程中的各个环节进行安全评估和预测,包括运输安全、仓储安全、包装安全等。通过这种方式,企业可以及时发现和解决潜在的安全隐患,保障物流安全。此外,数字孪生技术还可以通过智能监控和预警机制,提高物流安全监控水平,降低事故发生率。

1.4 小结

本章从宏观政策、价值呈现以及物流业困境三个维度,核心回答了"为什么数字孪生技术得以重视和发展",并阐述了物流数字孪生作为解决物流业困境的重要技术解决方案,其发展的关键价值。此外,高速发展的全球数字孪生市场也有力印证了数字孪生技术的价值呈现。

总而言之.

数字孪生的价值呈现和全球市场高速发展态势将持续推动数字孪生更广泛地应用,特别将促进其在原先应用相对较少的供应链和物流领域,加速生根开花。

数字孪生概念和发展现状

第二章 数字孪生概念和发展现状

数字孪生究竟是何方神圣,长得什么样,为何如此受市场青睐和受行业重视?现在发展及应用现状怎样?本章将试图回答这些问题。

2.1 数字孪生的概念、分类、关键技术和基本特征

2.1.1 数字孪生的概念和基本要素

1991 年,David Gelernter 在《镜像世界》一书中对数字孪生提出了预见。2002 年 Michael Grieves 于制造工程师协会会议上首次公开提出数字孪生的初始概念和模型。

数字孪生的第一个实际定义,源自美国航天局(NASA)于 2010 年试图改进航天器物理模型模拟的尝试。随后 NASA 的 John Vickers 在 2010 年的路线图报告中将其称为"数字孪生(Digital Twin)"。

经过多年发展,许多研究机构和知名企业给予了数字孪生新的定义,数字孪生的许多广泛定义可以在互联网上找到,本白皮书采用了 Gartner 对现代数字孪生的完整定义 ¹⁵: 数字孪生是现实世界实体或系统的数字表示。数字孪生的实现是一个封装的软件对象或模型,反映了独特的物理对象、流程、组织、人员或其他抽象。来自多个数字孪生的数据可以聚合起来,形成多个现实世界实体的综合视图。

从 2017 年开始,Gartner 已连续三年把数字孪生列入其每年发布的"十大战略性技术趋势"¹⁶。在 2019 年的定义中,Gartner 指出了数字孪生的四个基本要素,更进一步提出了复合数字孪生的概念,从而为数字孪生网络的研究及应用打下了基础。

数字孪生的基本要素:

模型

数字孪生是现实世界对象的功能性系统模型。数字孪生体包括现实世界对象的数据结构、元数据和关键变量。更复杂的复合数字孪生可以从更简单的原子数字孪生组装而成:

数据

数字孪生与现实世界对象相关的数据元素包括:身份、时间序列、当前数据、上下文数据和事件;

15 参考文献: 数字孪生, https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/digital-twin, Gartner, 2023 年 10 月 16 参考文献: 《数字供应链孪生研究报告》, 罗戈研究,2020-07-11

数字孪牛对应一个独特的物理事物:

监控能力

可以使用数字孪牛查询真实对象的状态,或接收粗略/精细的通知。

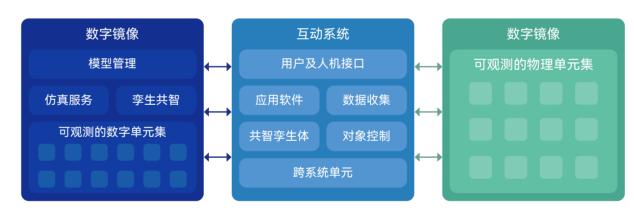
虽然 Gartner 的定义已经把数字孪生的动态特性及结构定义得非常清楚,或数字代表 / 表示,但并没有描述数字孪生和它的物理对象之间是如何互动和同步改进的。这就涉及到狭义和广义数字孪生的概念。数字孪生体系的逻辑引入了如下狭义和广义数字孪生的概念 17:

狭义数字孪生

数字孪生是它物理对象的一个动态软件模型 / 动态的数字模型 . 或数字代表 / 表示 / 镜像。

广义数字孪生

数字孪生广义上是由物理对象、数字镜像及互动系统构成的一个体系,其数字参考架构需要包含数字镜像和交互系统。



图表 6 广义数字孪生体系的逻辑

从数字孪生的广度视角来认识狭义和广义数字孪生。Grieves 教授于 2002 年提出基于 PLM(整个产品生命周期)的数字孪生的概念,此时的数字孪生统称为狭义数字孪生,其定义对象就是产品及产品全生命周期的数字化表征。例如一台汽车发动机和它的产品生命周期的数字表征 / 模型。美国航天局(NASA)首先把狭义数字孪生概念拓展到航天工程遥控方面,之后数字孪生应用域被进一步扩展到产品之外的更广泛的能源、城市环境、供应链和物流等领域。这些新晋的数字孪生,如供应链和物流数字孪生,都被称为广义数字孪生。广义数字孪生不仅仅是狭义数字孪生应用域的扩展,而且是数字孪生技术和价值创造能力的扩展,它也被称为数字孪生系统。

⁷ 参考文献: 田锋, 数字孪生体成熟度模型, 数字孪生体实验室, 2019-12-19

本白皮书还从另一个视角来认识它们,即概念的抽象和概念的能力实现逻辑。狭义数字孪生只是它的物理对象的抽象的数字表示/模型,不涉及它们是如何工作的。而广义数字孪生定义了物理实体和虚拟孪生之间具有一个交互系统,使得数字孪生不仅仅是物理实体的镜像,还是一个可与其对象互动和优化其对象并创造价值的体系。

狭义数字孪生的定义有助于我们对数字孪生概念的理解,而广义数字孪生的概念则为构建数字孪生的软件体系奠定 了逻辑或概念性基础。

2.1.2 数字孪生的基本特征

从上一节关于数字孪生概念的介绍中,已经呈现了数字孪生最基本的特征:数字孪生是对应物理实体对象的数字表示/虚拟模型,在两者之间可以进行连接和通讯。许多人误认为数字孪生只是一个对应实体的模型。

Gartner 指出: 数字孪生不仅仅是一个它的物理对象的模型, 其具有以下基本特征:

首要特征

对应实体对象的模型,具有模拟仿真物理实体、其特征及性能水平的能力。

控制

它能控制它所表示的对象。

监视器

它能找到物理对象的状态并获取通知,具有监控、维护和优化物理孪生操作的能力。

分析能力

它能用规则、预测、算法进行分析, 能够预测其物理对应物的特征, 并规定特征以使其更加高效。

唯一性

每个物理对象至少有一个唯一的数字孪生与之对应。

数据

它拥有表示它的对象的所有数据,如识别、状态、内容等。

模拟仿真

它能模拟仿真现实世界的物理对象、事件、流程。

图表 7 数字孪生不仅仅是模型 18

模拟真实世界的事物

随着人们对数字孪生的认识深入和应用实践,特别是 AI 和数字孪生的结合,使人们看到更多更重要的数字孪生的特征。下面是几个新添的最重要的特征 19 20:

自我更新能力

数字孪生与事物相连,根据已知的事物状态、条件或环境变化进行自我更新。物理和虚拟孪生状态的定期或近乎实时同步。

决策能力

数字孪生通过可视化、分析、预测或优化提供决策规划的价值。

连接性

数字孪生基于连接性。它实现了物理元素与其数字对 应物之间的连接。传感器创建物理产品的连接,使用 各种集成技术获取、集成和通信数据。

自我进化

规则、预测、算法

物理或数字孪生的任何变化都会反映在其对应物中, 从而创建一个闭合的反馈循环。数字孪生借助物理孪 生实时收集的数据进行自适应和自我优化,从而在其 整个生命周期中与其物理对应物一起成熟。

Gartner.

可重新编程且智能

通过传感器、人工智能技术和预测分析自动实现重新编程。

可组合性

多个数字孪生的数据可以聚合起来,形成多个现实世 界实体的综合视图。

2.1.3 数字孪生的分类

数字孪生可以根据不同的标准、如技术、层次结构、应用等、分为不同的类型。

2.1.3.1 数字孪生技术分类

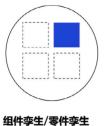
数字孪生技术应用有多种类型,它们之间的主要区别在于覆盖范围。虽然某些解决方案可能代表生产线的最小单元,但其他解决方案可能会模仿整个车间甚至工厂。下图表示了四种主要的数字孪生类型。

¹⁸ 参考文献: Marc Halpern, Busting the Myth of Digital Twins and Planning Them Realistically, Gartner, presented at PDT Europe in October 2017

¹⁹ 参考文献: 凯捷观点: 数字孪生, 2021, https://www.capgemini.com/insights/research-library/capgemini-perspective-digital-twins/

²⁰ 参考文献: 莫什里 ・ 辛格等, Digital Twin: Origin to Future (数字孪生: 从起源到未来), MDPI, 2021, https://www.mdpi.com/2571-5577/4/2/36

数字孪生:四种类型 举例:汽车工厂

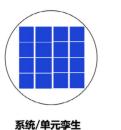


如:旋翼、电灯

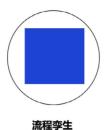




如:发动机或泵



生产单元的组合



如:整个制造过程

图表 8 四种类型数字孪生及其特点 21

组件孪生/零件孪生

这是系统中单个组件的孪生。其特点是:

- ① 这些是关键组件,对性能和功能有直接影响。
- ② 应用程序由不太重要但会受到持续高或不稳定影响的组件组成。

例如飞机发动机叶片是其关键部件之一. 发动机叶片数字李生能帮助防止叶片在发动机运行中发生散裂事故。

资产孪生

描述了各个组件如何作为一个整体资产一起工作。其特点是

- ① 资产孪生可以从组件孪生接收信息,也可以是组件孪生本身的集合;
- ② 虽然组件孪生更关心单个零件的稳定性和耐用性,但资产孪生允许探索整个系统;
- ③ 可以虚拟地(从而真正地)减少平均故障间隔时间和平均维修时间以及燃油消耗,同时提高性能等因素。分拣机的动力系统(电机) 数字孪生可作为资产孪生的典型例子。它们通常由多个组件数字孪生组成并能反映整个系统,从而帮助提高资产的可维护性、节约能源、改善运作性能等。

系统或单元孪生

结合了各类资产孪生,让组织有机会检查各资产如何协同工作。以汽车为例:系统孪生结合了推进所需的所有资产、电力所需的所有资产以及车身所需的所有资产等。系统孪生是一个可用于所有设备的系统。

流程孪生

它代表整个生产设施并提供对所有单元协作的深入了解。在整个流程的闭环中,单个单元可能生产得太快,导致某些单个零件过剩,从而造成高昂的存储成本或其他物流挑战。只有在这个层面上,通过数字孪生进行监控的整个复杂性才变得真正清晰。因为只有当所有单元、资产和组件都实现其目的时,流程才会发挥作用且有效。

以一个设备智能制造产线数字李生为例。它不仅能监控和优化生产过程的各个环节,还能监控和优化零部件库存和线边物流。此外物流运营流程数字李生能够帮助监控和优化从订单、仓储、配送 / 运输,到交付和退货全流程的各个环节,从而提高效率和客户满意度。

此处讨论的是更高级别和更低级别的数字孪生,但实际上每个级别对于功能流程都同样重要。为了发现公司的优化潜力和错误来源,需要在各个级别之间切换。

²¹ 参考文献: Thomas Plank. DIGITAL TWINS: THE 4 TYPES AND THEIR CHARACTERISTICS. 2019

2.1.3.2 数字孪牛层次结构分类 22

数字孪生的抽象级别

离散数字孪牛(单元级)

提供价值的单一数字孪生体。 无需讲一步细分:



复合数字孪生(系统级)

离散数字孪生的组合,表示包括多个单独组件或部件的数字孪生体。如有 2 万 多零件的 GE 发动机数字孪生就是由离散的零件数字孪生复合而成。



复杂系统数字孪生 (复杂系统级)

一个更大的复合数字孪生,例如整个工厂或城市或整个供应链/物流系统,其数字孪生由多个复合数字孪生组成,有助于不同企业或企业内不同部门(如供应链、设计、服务、维护等)的协作。

数字孪生之间的关系一般包括

分层

如在现实世界中一样,一组组件数字孪生可以组装成设备数字孪生,一组设备数字孪生可以装配成生产线数字孪生,一组生产线数字孪生可以组合成工厂数字孪生。

关联性

数字孪生之间存在关联,就像现实 世界中的双胞胎一样。

科等

对等关系是在一组执行相同或相似 功能的相同或相似类型的设备中观 察到的。所有设备的总效果是每台 设备产生的效果的简单总和。

2.1.3.3 数字孪生应用分类

莫什里·辛格²³认为,数字孪生可以根据其应用进行分类。数字孪生的两个广泛应用是预测和询问:**预测**其物理对应物的未来行为和性能;**询问**其物理对应物的当前或过去状态。数字孪生还可以根据应用的重点是产品、过程还是性能来划分:

产品数字孪生

用于原型设计。在不同条件下分析产品并确保下一个物理产品按计划运行。通过虚拟验证产品,将不再需要开发多个产品。总开发时间减少。原型设计可以很快。

²² 参考文献: Digital Twins for Industrial Applications, IIC(Industry Internet Consortium), 2020

²³ 参考文献:莫什里 · 辛格等,Digital Twin: Origin to Future(数字孪生:从起源到未来),MDPI,2021

生产数字孪生

用于在实际生产之前通过仿真和分析来验证流程。这有助于在不同条件下开发高效的生产方法。产品和生产数字孪生的数据可一起用于机械的监控和维护。

性能数字孪生

捕获、聚合和分析来自智能产品和工厂的数据,并用于决策过程。由于性能数字孪生包括产品和生产的性能,因此它根据工厂资源的可用性来优化运营,从而创造了通过反馈循环改进生产和产品数字孪生的机会。

2.1.4 数字孪生的关键底层技术

《数字供应链孪生研究报告》曾经引用了 DHL 的研究报告 ²⁴ 中的五项数字孪生的关键底层技术: 物联网(IoT),云计算(Cloud Computing),应用程序接口(APIs)和开放标准(APIs & Open Standards),人工智能(AI),增强、混合和虚拟现实(Augmented, Mixed, and Virtual Reality)。

	APIs和开放标准	人工智能	增强、混合和虚拟现实	云计算	物联网
摂	是供必要的工具 , 从多	利用历史和实时数据	渲染数字孪生的空间模	允许实时存储和处理	高精度传感器能够通过
1	`系统中提取、共享和	与机器学习框架相结	型和可视化。为合作和	来自资产及其数字孪	无线网络实时连续收集
协	协调数据,从而形成一	合,对资产上下文中	相互作用提供了媒介。	生模型的大量机器数	机器数据、状态和状态,
	个数字孪生。	发生的未来场景或事		据。	从物理资产到数字资产。
		件进行预测。			

图表 9 数字孪生的关键技术

此外本白皮书认为数字孪生的公共关键技术还应该特别考虑以下几个重要技术:

- 作为前端的传感器技术:
- 技术层的智能决策技术(仿真并不能产生决策);
- · 与物理层的交互技术,包括应用程序接口(APIs)、智能决策驱动程序从决策到执行的技术等。

2.2 国内外数字孪生发展现状及应用现状

2.2.1 数字孪生发展历程

罗戈研究在 2019 年《数字孪生在物流中的应用趋势》中解读 DHL 趋势研究报告《物流中的数字孪生》,并简要地描述了数字孪生演进史,指出了其发展的四个阶段:

数字孪生演变过程

1983-2001

自动化 CAD 在所有的工程和设计中变成实际的工具

1982

自动化 CAD 诞生

1977

计算机仿真飞行模拟器

1970

美国国家航空航天局阿波罗 13号任务配对技术

2015

GE 数字风电场计划

2011

NASA&USAF 关于数字孪生 的论文

2002

Ggrieves 博士提出关于数字 孪生的概念

McLaren F1 将数字孪生技术 用在产品发展和性能预测

2018

数字孪生在所有主要的软件和工业企业的产品组合被引用

2017

Gartner 列举数字孪生为十 大顶级技术趋势

仿真出现在特定的和高度专先进的仿真开始成为复杂、多学科系统设化的领域,仅供科学家们使计和工程的核心。增强的仿真应用范围使用基于模型的系统工程成为可能

仿真技术应用

仿真工具在价格上下降,扩大 可用性,并且被许多制造和涉 及领域所接受

数字孪生

虚拟模型(曾经仅用于仿真)在产品的整个生命周期中无缝且持续地更新,其中虚拟模型通过直接链接和表示其操作数据来支持物理产品的操作

图表 10 DHL 1960-2015 数字孪生发展历程 25

²⁴ 参考文献: DHL, 《Digital Twins in Logistics(物流中的数字孪生)》, DHL, 2019-06-27

数字孪生始于 1960 后,起源于计算机驱动的产品设计的仿真技术。1982 年诞生了 AutoCAD 技术,它们是数字孪生技术的基础。由于仿真工具价格下跌,且可用性扩大到适用于许多工程和设计领域,1985 年之后,仿真技术得到广泛应用。

2000年以后,高级仿真技术成为复杂的多科技领域的系统设计和工程的关键技术。仿真应用范围的扩大使基于模型的系统工程成为可能。在这一阶段,数字孪生的理论和实践得到了进一步发展。

随着数字孪生概念的研究、新工业革命的到来以及新兴数字技术的赋能,仿真技术被提升成数字孪生技术,并于2015 进入黄金时期。从2018 年开始,数字孪生技术被应用到所有主要的软件和工业公司的产品组合。

2.2.2 国内外数字孪生研究概述

数字孪生概念和技术源于美欧等西方发达国家,国外在数字孪生的理论、技术和标准体系方面走在前列。我国数字孪生研究起步较晚,现处于追赶阶段。

2.2.2.1 国外数字孪生研究概述

整体看, 国外在数字孪生的部分研究概况如下:

早期开创性的研究

例如 M. Grieves 教授的系列研究工作、美国航天局的研究工作。

应用研究

包括在一般工业领域,如 GE、波音、西门子等龙头企业在生产制造、供应链物流等场景的应用。欧美的科技巨头,如谷歌、微软、亚马逊、SAP等也较早将数字孪生的软件技术作为重要战略技术来布局,并研究开发出大型的软件系统,如微软的 Azure 数字孪生、亚马逊云(AWS)上的公有数字孪生服务 AWS IoT TwinMaker 等。

2013年德国政府制定高科技战略的科学家团队首次提出了工业 4.0,接着美国推出工业互联网和物联网。数字孪牛和人工智能一样成为工业 4.0 的核心技术之一。

值得一提的是欧美几家著名的科技咨询机构 Gartner、德勤、凯捷等,持续关注并追踪数字孪生技术的发展,尤其 Gartner 2016 年底就将数字孪生确定为 2017 年十大顶级战略性技术趋势之一,这大大推动了企业采用数字孪生技术创造商业价值的运动。之后,Gartner 每年都在研究数字孪生的应用前景并指导企业和组织如何成功使用该技术。

Gartner 研究报告 26 给出了最新的各类工业数字孪生玩家的图谱:

数字孪生的技术创新者



图表 11 各类工业数字孪生玩家的图谱

数字孪生近年来迅速得到了世界各国的战略重视,美国和欧盟等国家和地区率先把数字孪生作为重要资助方向,且力度逐年增强。

美国自然科学基金委(NSF)近年来对数字孪生的基础研究进行了大力支持。截至本文发布,NSF 资助的数字孪生领域的科研项目总计 111 项、经费合计 6.116 万美元。

德国科学基金会(DFG2)从 2017 年起,开始大力推进数字孪生领域的科研项目,2017 至 2022 年之间,项目数量逐年增加,立项项目总计 60 个。欧洲科学基金会(ESF)的公开数据同样表明了欧洲各国都在提高数字孪生领域的扶持力度,截至数字孪生工业软件白皮书(2023 年)发表,ESF 立项数字孪生相关项目总计 129 个,支持经费超 8 亿欧元。

2.2.2.2 国内数字孪生研究概述

国内对数字孪生的研究起步较晚,但经急起直追,近年来已接近或赶上世界水平。具体表现在以下几个方面 27:

01 论文数量指数增长

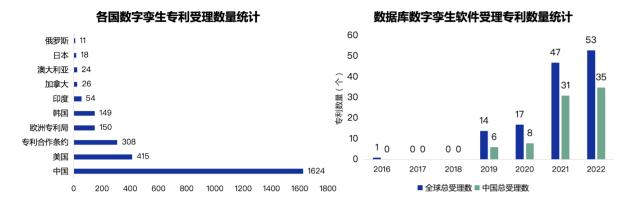
截止2022年底,学术界共发表数字孪生相关论文11,308篇,其中中国发表2,115篇,占比近19%。尤其自2017年以来,数字孪生相关文献数量特别是期刊论文数量呈指数增长,表明了中国对数字孪生的研究越来越深入和系统。

²⁶ 参考文献: Emerging Tech: Tech Innovators for Digital Twins – IT providers, Gartner 研究报告, 2023

²⁷ 参考文献: 陶飞,等,数字孪生工业软件白皮书(2023年)

02 专利数量呈现明显增长趋势

在世界知识产权组织 PATENTSCOPE 数据库中检索发现, 2013 到 2022 年间受理与数字孪生紧密相关的专利共 2,810 项、尤其是 2018 到 2022 年数字孪生相关的专利数量呈现明显增长趋势:



图表 12 数字孪生相关的专利数量呈现明显增长趋势

03 国家科研投入持续增长

中国国家自然科学基金委员会(NSFC)自 2017 年起资助数字孪生研究工作。据不完全统计,目前已支持相关项目 131 项,经费总额超 8,000 万人民币。同时,中国科技部和工信部等部门近年也不断立项支持数字孪生关键技术攻关与产业应用。"十四五"期间,国家重点研发计划"工业软件"、"储能与智能电网技术"、"交通载运装备与智能交通技术"、"交通基础设施"和"可再生能源技术"等均部署了数字孪生相关项目。

另外,一批专家和科研机构对中国数字孪牛的理论及应用研究的快速发展功不可没,包括:

01 北京航空航天大学陶飞教授的数字孪生技术团队

陶飞团队及中国高校的其他学者最为有影响的一系列研究工作包括:

- 创立数字孪生五维模型,为企业数字孪生应用和软件开发创建了一个参考框架:
- ·《2023 年数字孪生工业软件白皮书》发布了十一大领域应用及应用研究;
- · 创建了数字孪生软件平台参考框架 makeTwin。

02 中国信通院

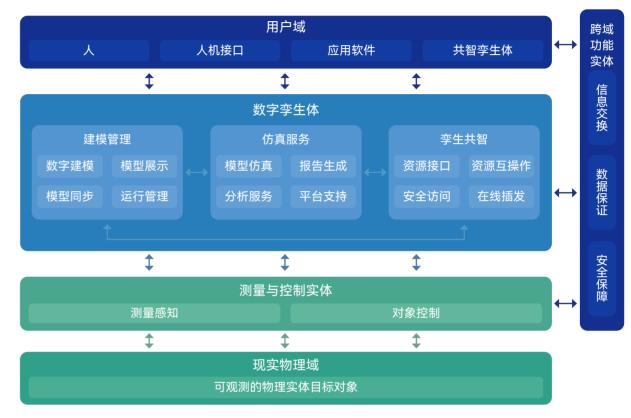
中国信通院 2021 年发布了《工业数字孪生白皮书》,建立了基于网络、计算和数据的数字支撑技术体系,提出了"工业数字孪生技术架构"。

03 以工业 4.0 研究院为首的数字孪生体联盟

2019 年 10 月,工业 4.0 研究院联合北京航空航天大学、中国信通院等单位,发起了"数字孪生体联盟"(DTC),成为全球第一家数字孪生体产业机构,并从 2020 年起每年发布《数字孪生体报告》。

04 安世亚太旗下的数字孪生体实验室

安世亚太 2019 年设立了数字孪生体实验室,并发布了《数字孪生体技术白皮书(2019)》²⁸,提出了一个包罗万象的数字孪生概念模型,将数字孪生的对象扩展到包含社会系统在内的全部物理实体,考虑从微观的各种尺度和从元素到体系的各种层次,将工业化、城市化和全球化的各种需求和应用场景都包含其中,为数字孪生体的参考架构开发和应用场景扩展提供了依据,并据此提出了数字孪生体系统的通用参考架构。



图表 13 数字孪生体系统的通用参考架构

新型数字化基础设施正在成为我国新一轮科技革命和产业变革的关键支撑和重要物质保障,并逐步走在世界前列, 也为中国数字孪生理论和应用研究创造了大好局面。但对比西方发达国家,我国数字孪生技术的创新研究仍然缺乏 系统性,同时在工业以及供应链物流等领域的应用研究与落地仍有待突破。

2.2.3 国内外数字孪牛标准体系简介

近年来,ISO(国际标准化组织)、IEC(国际电工委员会)、ITU(国际电信联盟)、IEEE(电气电子工程师学会)等国际和区域标准组织都积极推进数字孪生标准化工作。在我国,中国电子技术标准化研究院、北京自动化研究所等多家机构都积极开展了数字孪生工业软件的相关国家标准、行业标准和团体标准的立项和研制工作以及国际标准的采标转化工作。

数字孪生标准化工作对数字孪生技术应用推广的作用包括提高数字孪生互操作性、规范数字孪生建模方法、促进数字孪生技术发展、加强数字孪生技术安全性。

²⁸ 参考文献: 田锋, 数字孪生体白皮书, 安世亚太&数字孪生体实验室, 2019 年 12 月

2.2.3.1 国外数字孪生标准体系

Kai Wang 等人 ²⁹ 将 ISO、IEC、ITU、IEEE 的数字孪生相关标准映射到五维数字孪生模型,每个维度都由相应的标准组成:



图表 14 数字孪生国际标准框架

这个标准框架忽略了某些重要国际标准如 ISO/TR 24464: 2020 和正在开发的国际标准。



图表 15 正在开发的数字孪生国际标准(灰点) 30

2023年10月31日,国际标准化组织/国际电工委员会第一联合技术委员会/物联网与数字孪生分技术委员会(ISO/IEC JTC 1/SC 41)发布公告,ISO/IEC TR 30172:2023《数字孪生应用案例》国际技术报告正式发布 ³¹,也就是上图应用性栏中的灰点①将被抹去。该报告由中国电子技术标准化研究院专家担任编辑,收录了来自全球智慧建筑、智慧城市、智慧能源、智慧电力、智慧交通等领域 14 个数字孪生典型应用案例,并对应用特征进行了分析,为梳理和识别数字孪生重点标准化需求,支撑后续标准研制具有重要指导作用。

此外,IIC(工业互联网联盟)和 DTC(数字孪生联盟)等国际组织也提出了一些团体标准和指南,如 IIC 的"数字孪生体系结构与标准",DTC 的"数字孪生系统互操作性框架"和"数字孪生平台堆栈架构框架"。

2.2.3.2 国内数字孪生标准体系

国内数字孪生标准主要包括国标、团标两大类。全国信息技术标准化技术委员会(TC28)和全国自动化系统与集成标准化技术委员会(TC159)已经开展了数字孪生国标制定工作。另外有不少社会团体制定了相关领域和行业的数字孪牛团体标准。

01 数字孪生国标

据统计,共有五项数字孪生国家标准计划,目前四项正在制定中,只有《自动化系统与集成复杂产品数字孪生体系架构》已于 2020 年 11 月正式发布。³²

02 数字孪生团标

国内各行业组织,如中国机械工业联合会、中国电子装备技术开发协会、中国机电一体化技术应用协会、中国电子节能技术协会、中国技术市场协会以及中国互联网协会等多家协会发布了 48 项关于"数字孪生"的团体标准,范围涵盖了智能制造、智能建造、智慧城市和医疗保健等多个行业领域 33。

据悉深圳顺丰泰森控股(集团)有限公司等从 2023 年 6 月开始研制并积极推动立项首个邮政业的数字孪生应用标准项目。该行业标准总结和明确了邮政业数字孪生应用的 9 项基本要求。相信随着数字孪生应用的深入发展,供应链和物流行业数字孪生标准将会开花结果。

²⁹ 参考文献: Kai Wang 等, A review of the technology standards for enabling digital twin [version 1; peer review: awaiting peer review] Digital Twin, 2022, DOI:10.12688/digitaltwin.17549.1

³⁰ 参考文献: Antonio Kung, ISO/IEC JTC1/SC41 Digital Twins Activities, ETSI IoT Conference 2023

³¹ 参考文献: ISO/IEC 发布首个数字孪生国际标准,腾讯数字孪生多项案例入选! , 腾讯数字孪生, 2023-11-08

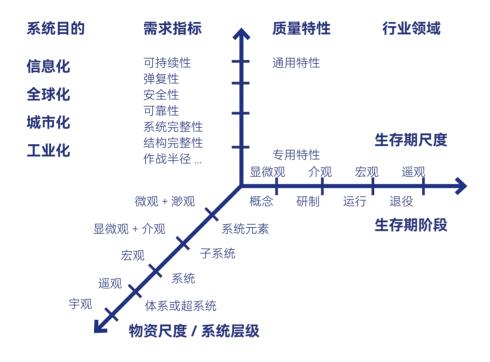
³² 参考文献: 陶飞,等,数字孪生工业软件白皮书(2023年)

³³ 参考文献:安之,数字孪生标准化工作现状,市场监管领域数字孪生重点实验室 2023-10-16

2.2.4 国内外数字孪生应用场景分析

2.2.4.1 数字孪生的应用场景框架

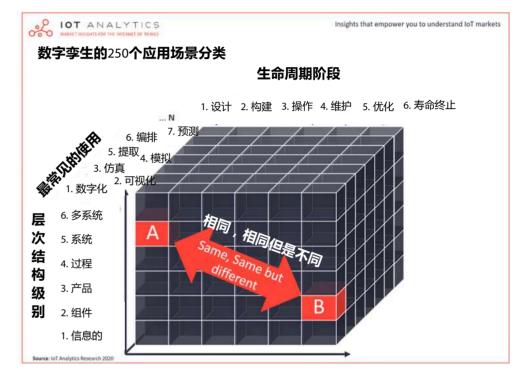
数字孪生体实验室白皮书 ³⁴ 基于数字孪生体概念模型和数字孪生系统参考架构,将系统目的、系统层次 / 物质尺度和系统生存期三个维度构成的三维空间作为数字孪生体应用场景的参考框架:



图表 16 数字孪生体应用场景的参考框架

2.2.4.2 全球 250 个数字孪生的应用场景模型

物联网分析公司(IoT Analytics)2020 年发布了一个《数字孪生的洞察报告(Digital Twin Insights Report)》³⁵。该报告构造一个数字孪生体应用场景的立方体分析模型。模型指出:数字孪生应用场景可以通过 3 个主要维度进行分类:数字孪生应用的层次级别(Y 轴,已确定 6 个级别)、使用数字孪生的生命周期阶段(X 轴,已确定 6 个阶段)、数字孪生的使用(Z 轴,已确定 7 种最常见用途)。



图表 17 数字孪生应用场景的立方体分析模型

6个级别、6个阶段和7个最常见用途共有252种潜在组合,所有这些组合描述了数字孪生不同应用场景的分类。由此产生的数字孪生应用场景立方体解释了为什么用于"设计阶段的产品仿真"的数字复制品与"制造操作期间的工艺参数预测"完全不同。两者都被称为数字孪生,但只有有限的重叠。

2.3 国内外物流数字孪生应用现状

数字孪生源于十几年前的想法,并且已成功地用于工业的许多方面,然而对于供应链和物流领域来说,数字孪生是一个全新的想法,是极具挑战的新的数字技术,这也是为什么过往的研究没有或很少提及物流数字孪生。然而近年来,随着物流领域的数字化进步和各种不确定因素的压力,物流数字孪生开始受到更多的关注和研究,并已在如顺丰这样的领先企业中取得了可喜的应用成果。首先我们需要认识到物流数字孪生是数字孪生在物流领域及更为广泛的供应链领域中的一种特殊的形式,有关其概念和特征将在第三章阐述。

³⁴ 参考文献: 田锋, 数字孪生体白皮书, 安世亚太&数字孪生体实验室, 2019年12月

³⁵ 参考文献: Digital Twin Insights Report 2020, 2020, https://iot-analytics.com/product/digital-twin-insights-report-2020

2.3.1 国外物流数字孪生应用现状

数字孪生之所以会进入到供应链和物流应追溯到世界的供应链数字化变革。它始于 2009 年 IBM 提出的智慧未来供应链。2013 年 4 月德国科学和工程研究院发布了《确保德国制造业的未来——实施创新的工业 4.0 战略的建议》,确定信息物理系统(CPS)为工业 4.0 的核心技术,同时提出了数字工厂和供应链和智慧物流。以上是数字孪生技术进入供应链和物流的基础,因为数字孪生要求供应链和物流首先实现全方位、端到端的数字化。下面选择了一些标志性事件来呈现西方发达国家是如何首先将数字孪生技术引入供应链和物流的:

2016 Gartner 发布了 2017 十大战略性技术趋势,数字孪生是其中之一。

2017 美国环境系统研究所公司(ESRI)发表了 A Digital Twin for the Supply Chain(供应链的数字孪生)。

3月, Gartner 的调查显示, 2018 年近一半的实施物联网的组织正在使用或计划使用数字孪生 36。 **2018** 5月, 美国供应链科技公司 Toolsgroup 发表文章介绍了用"数字孪生"建模供应链; 11月, 福布斯发表专栏文章"数字孪生支持供应链优化"。

3月, Gartner 发布了 2019 八大供应链战略性技术趋势研究报告,第一次将数字孪生纳入八大 **2019** 供应链战略性技术趋势之一,并第一次定义了数字供应链孪生概念;6月,DHL 发布《物流中的数字孪生》研究报告,综合介绍了物流数字孪生的若干应用。

以上只是西方供应链和物流领域早期应用数字孪生的缩影,此后数字孪生开始在供应链和物流领域推广应用。MDPI《物流》期刊文章 37 给出了许多供应链和物流数字孪生的应用案例,本白皮书第四 - 六章也将对物流数字孪生的应用有更多的介绍。

Gartner 自 2019 年以来,已连续四年将数字孪生评选为八大供应链战略性技术趋势。Gartner 的顶级供应链战略性技术趋势研究报告无疑是对数字孪生在世界供应链和物流领域扩展应用的一股强大推动力。Gartner 于 2023 年 1 月对 380 家供应链领导者进行的一项调查 38 发现,60% 的领导者正在试点或计划实施数字供应链孪生(全局 / 整体的供应链数字孪生)。

Gartner2018-2023及以后的顶级战略性供应链技术趋势

2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年
趋势1: 人工智能	趋势1: 人工智能	趋势1: 超级自动 化	趋势1: 超级自动 化	趋势1: 超级自动 化2.0	趋势1: 可操作的 人工智能
趋势2: 高级分析	趋势2: 高级分析	趋势2: 数字供应 链孪生	趋势2: 数字供应 链孪生	主题2: 下一代机 器人	主题2: 智能运营
趋势3: 物联网	趋势3: 物联网	趋势3: 持续智能 (CI)	趋势3: 沉浸式体 验与应用	主题3: 自主事物	主题3: 移动资产 优化
趋势4:智能事物	趋势4: 机器人过 程自动化	趋势4: 供应链治 理与安全	趋势4: 边缘生态 系统	主题4: 数字供应 链孪生	主题4: 行业云平台
趋势5: 会话系统	趋势5: 自主事物	趋势5: 边缘计算 和分析	趋势5: 供应链安 全	主题5: 无处不在 的分析	主题5: 员工敬业度
趋势6: 机器人过 程自动化	趋势6: 数字供应 链孪生	趋势6: 人工智能	趋势6: 环境社会 治理	主题6: 安全网络	主题6: 组合应用 架构
趋势7: 沉浸式技术	趋势7: 沉浸式技术	趋势7: 5G网络	趋势7: 嵌入式人 工智能和分析	主题7: 生态系统 合作	主题7: 网络弹性 供应链
趋势8: 区块链	趋势8: 供应链中 的区块链	趋势8: 沉浸式体 验	趋势8: 增强数据 智能	主题8:可持续发 展工具	主题8:供应链整 合服务

图表 18 Gartner 2018-2023 及以后的顶级战略性供应链技术趋势 39 40

2.3.2 国内物流数字孪生应用现状

国内供应链和物流数字孪生领域玩家不多,在工信部公示的 2023 年物联网赋能行业发展 139 个典型案例中,仅有一家是数字孪生在智慧物流的应用解决方案,有以下几点原因:

- 不像其他领域,如工业制造,供应链和物流数字孪生的概念相对不够清晰,并且对于供应链和物流企业来说非常新;
- 相比较其他领域,供应链和物流的应用场景更为复杂,且除了少数领军企业外,数字化程度偏低;
- 缺乏专业软件支持;
- 初始投资大:
- 面临一些本领域特殊的技术挑战(详见第七章)。

国内供应链和物流数字孪生应用正在追赶之中, 主要表现在以下几个方面:

- 开始出现一批供应链和物流数字孪生应用的玩家, 其中包括:
- ① 这个领域的领军企业, 如物流巨头顺丰、京东、菜鸟等;
- ② 国内软件厂商,如咪啰科技、四度科技、TBL 华清科盛、易知微等;
- ③ 高科技公司,如华为、中兴通讯等;
- ④ 国外在华的先进企业,如施耐德电气中国公司,西门子中国公司等:

³⁶ 参考文献: Gartner, Gartner Survey Reveals Nearly Half of Organizations Implementing IoT Are Using or Plan to Use Digital Twin Initiatives in 2018, 2018-3-13

³⁷ 参考文献: Gerlach, B 等, Digital Supply Chain Twins—Conceptual Clarification, Use Cases and Benefits, MDPI Logistics 2021, 5(4), 86

³⁸ 参考文献: Supply Chains Building a Digital Twin of the Customer, Gartner 白皮书, 2023

³⁹ 参考文献:唐隆基,值得关注的最新顶级战略性供应链技术趋势,罗戈研究,2023-07-20

⁴⁹ 参考文献:唐隆基,供应链的未来发展趋势和预测,在 SiMPL2023 大会上做出的题演讲

- ⑤ 大型先进港口企业、如上港集团打造了洋山四期自动化码头等。
- 已经出现一批应用成果, 详见本白皮书第四 六章;
- 数字孪生是智慧物流的基础技术之一,而国内正在大力发展智慧物流,政策如《"十四五"现代物流发展规划》也推动了物流数字孪生应用的发展:
- 物联网及传感技术、人工智能、物流仿真技术等数字技术是应用数字孪生的支柱,而这些技术在国内正迎来飞速发展。

2.4 物流领域数字孪生图谱

2.4.1 数字孪生产业格局

下图描绘了 2020-2022 年数字孪生世界产业格局。2022 年的产业格局视图主要包括了制造业、健康产业、AEC 工业(智慧楼宇,智慧建筑),以及智慧城市(城市规划、移动即服务和能源管理)。



图表 19 自 2020-2022 年数字孪生世界产业格局 4

初创公司研究机构 Start US 在 2020 年从 169 个数字孪生软件和解决方案初创公司中选出了影响工业 4.0 的世界顶级 5 家数字孪生初创公司 42。其中,德国初创公司 **MetaTwin**,为制造和物流公司开发预测性维护解决方案,使生产和仓储流程持续透明,并帮助车间经理预测瓶颈。2023 年 2 月 Start US 发布了研究报告《探索 2023 年和 2024年十大数字孪生用例》43,在交通领域主要表现为物流公司利用数字孪生来优化物流规划。

36

2.4.2 物流领域数字孪生图谱

罗戈研究根据国内外物流领域数字孪生相关企业情况,梳理了物流领域数字孪生图谱,涵盖了技术、数据、解决方案及应用等多个层次。



图表 20 物流领域数字孪生图谱

37

⁴¹ 参考文献: https://media.licdn.com/dms/image/

⁴² 参考文献: 参考文献: StartUS, Discover 5 Top Digital Twin Startups Impacting Industry 4.0, 2020

⁴³ 参考文献: StartUS, Explore the Top 10 Digital Twin Use Cases in 2023 & 2024, 2023

2.5 小结

本章整体呈现了数字孪生的概念、分类、关键技术和基本特征、以及国内外数字孪生发展现状及应用现状。

数字孪生是现实世界实体或系统的数字表示。数字孪生的实现是一个封装的软件对象或模型,反映了独特的物理对象、流程、组织、人员或其他抽象。来自多个数字孪生的数据可以聚合起来,形成多个现实世界实体(例如发电厂或城市及其相关流程)的综合视图。

数字孪生具备首要特征、唯一性、控制、数据、监视器、模拟仿真、分析能力等特征之外, 在和 AI 结合自我更新能力、自我进化、决策能力、可重新编程且智能、连接性、可组 合性等新的特征。

国内对数字孪生技术的研究、标准建立和应用相对国外起步较晚,但积极追赶,在工业领域的应用已取得一定成果,但在供应链物流领域,整体仍处在头部企业为主导的探索阶段。

物流数字孪生概念及系统参考架构

第三章 物流数字孪生概念及系统参考架构

在物流领域,数字孪生可以模拟完整的物流履约链路,尤其在以中转为核心的相对标准化的物流履约体系中,由于 具备更高确定性的场景,数字孪生能提供更具价值的解决方案。应用物流数字孪生,识别潜在的干扰,有助于发展 更强大、更有弹性和更高效的物流网络。

3.1 物流数字孪生概念和基本特征

在对各个"数字孪生"定义进行研究和比对之后,本白皮书尝试给出物流数字孪生的定义。其中数字孪生联盟定义"的数字孪生概念对本白皮书启发甚大。该定义与其他相比,放弃了"实时交互"、"双方数据自动交换"的严格要求,考虑了更接近多领域的实际应用情况,例如数字孪生如何应用于跨学科、多领域、人机混合、复杂而无固定形体的供应链和物流领域。它出自于多领域的数字孪生专家并经过了广泛审查以及基于数字孪生用例的定义压力测试,因而该定义更接地气,有助于理解复杂且离散的系统,正如物流数字孪生。

物流数字孪生(LDT) 定义如下:

物流数字孪生是对应物流实体和流程的虚拟数字表示 / 模型。它是数据对象之间各种关联的动态、实时和分时的表示,这些关联最终构成了物流实体的运营方式。物流数字孪生来源于整个对应物流实体及其运营环境的所有相关数据。

- 物流数字孪生使用历史和实时 / 分时数据来表示过去和现在并仿真预测未来,物流实体和数字表示在整个生命周期中以指定的频率和保真度同步;
- 物流数字孪生系统通过加速整体理解、最佳决策和有效行动来优化业务:
- 物流数字孪生以结果价值为导向,根据应用场景量身定制,由新兴数字技术(如 IoT、AI、区块链、云、仿真等)集成提供支持,以数据为基础,以领域知识为指导,并在 IT/OT 系统中实施。

40

根据上面的定义,物流数字孪生具备以下关键特征和属性:

物理和虚拟

物流数字孪生是唯一的,与物流实体和流程的单个特定实例相关联的虚拟数字表示/模型。

双向数据

物流数字孪生支持物理系统和虚拟系统之间的双向数据交换,数据可以是实时的、分时的、历史的,或者混合的形式。

交互同步

物流数字孪生支持物理系统和虚拟系统之间实时 / 分时或自动 / 半自动交互,以及按指定的频率和保真度同步,从而形成某种形式的闭环系统。

及时更新

物流数字孪生根据用例的要求提供及时更新,自主物流可能达到自主进化和实时更新。

维护状态

物流数字孪牛能够存储物理系统的最后状态,以便处理断开连接。

双方智能

物流数字孪生相关联的物理系统方需具备一定硬软智能,如自动化流程、控制系统(如 GPS)、IoT 传感器(对某些场景是必要的,如港口物流、冷链物流)等,而虚拟系统方需具备一定软智能,如提供建模 / 仿真和分析功能。

决策和报告

物流数字孪生将结果传递给人和/或机器。

价值创造的能力

物流实体执行的是广义的供应链物流服务,其数字孪生具有高效的验证能力、持续的分析能力和智慧的决策能力。

很明显,物流数字孪生的特征和属性不仅满足了数字孪生最基本的虚映实和数据连接的特征,而且也充分反映了物流数字孪生是一个复杂的、跨学科、兼硬软的物流实体的虚拟数字表示 / 模型。

41

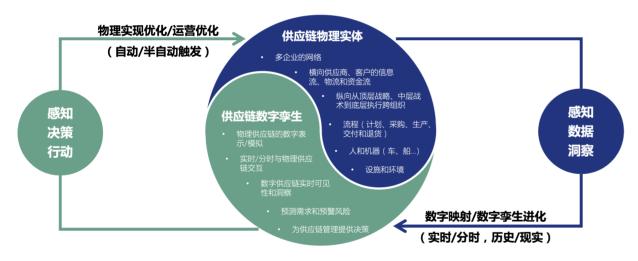
⁴⁴ 参考文献: Digital Twin Consortium Defines Digital Twin, DTC, 2020-12-03

研究文章 "指出:物理系统和数字系统之间数据的自动交换通常被强调为数字孪生的一个特征。一方面通过使用传感器来实现,另一方面通过使用执行器和其他控制元件来实现。然而就物流系统而言,这一特征是值得怀疑的,因为在许多场景下如快递收派、运输等,使用物联网传感器成本过高且无必要,是不现实的,而且人在大多数物流系统中仍然发挥着重要作用(如快递员收派快件时通过人工扫描二维码的方式输送快件分时状态数据)。

此外,从物流数字孪生到物流物理系统的数据交换也可以通过相关参与者分析数字孪生获得的知识来实现。对于物流数字孪生系统来说。实现真正实时自动交互只是一个愿景。

从更广泛的视角看,供应链数字孪生(Supply Chain Digital Twin)是面向单个或更多主体、更高交互、更复杂的 网络,其包含了物流数字孪生,Gartner 给一个全局 / 整体的供应链数字孪生取了个特殊的名字叫"数字供应链孪生 (Digital Supply Chain Twin)"并给出了其定义 "6" 数字供应链孪生是物理(通常是多企业)供应链的数字表示。它是 数据对象之间各种关联的动态、实时和分时的表示,这些关联最终构成了物理供应链的运营方式。它是供应链的本 地和端到端决策的基础,并确保该决策在整个供应链水平和垂直两个维度上保持一致。数字供应链孪生来源于整个 供应链及其运营环境的所有相关数据。

Gartner 的定义真实地反映了物理供应链的现实,也考虑了其数字孪生不同于工业中产品之类的数字孪生的特征。 结合数字孪生联盟的定义,下图描述了供应链数字孪生的闭环系统。



图表 21 供应链数字孪生的闭环系统

与 Gartner 定义的数字供应链孪生不同,供应链数字孪生可以包括供应链局部 / 部分数字孪生,允许物理实体是供应链的一部分,如物流、多式联运、供应链履约等。供应链数字孪生的物理实体不一定是多企业的网络,可以是单企业的资产实体,而数据可以只限于与资产实体有关联的数据。

通过观察数字模型,可以获得真实物流系统的信息,从而在现实世界中得出结论、做出决策并采取行动。供应链数字孪生可以充当物流和供应链管理决策者的工具,通过数据驱动的决策,全面提高整个客户订单流程的物流绩效。

Anselm Busse 等人 47 的研究揭示了物流与供应链数字孪生颗粒度:

大宏观层面

多利益相关者价值网络或供应链全局的数字孪生,即价值链网络的数字孪生。

小宏观层面

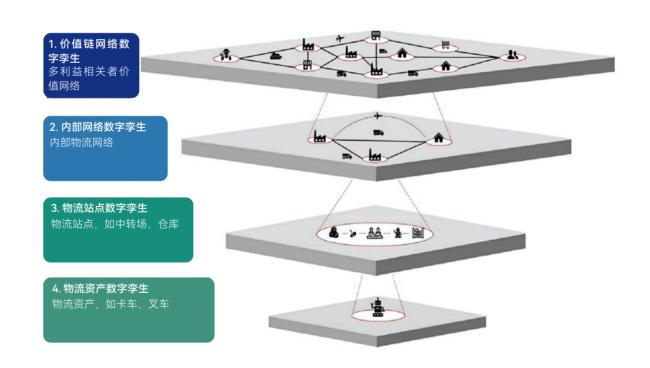
内部供应链网络或局部企业级的数字孪生,即内部网络的数字孪生。

微观站点级别

物流站点(如中转场、仓库等)或局部网点级的数字孪生。

微观资产级别

物流资产的数字孪生(如卡车、叉车等)。



图表 22 物流与供应链数字孪生颗粒度 48

⁴⁵ 参考文献: Benno Gerlach 等,Digital Supply Chain Twins—Conceptual Clarification, Use Cases and Benefits,Logistics 2021,5 (4), 86

⁴⁶ 参考文献: 《数字供应链孪生研究报告》, 罗戈研究, 2020-07-11

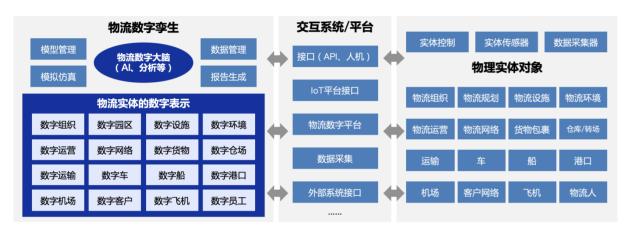
⁴⁷ 参考文献: Anselm Busse 等,Towards Digital Twins of Multimodal Supply Chains,Logistics 2021, 5, 25

⁴⁸ 参考文献: Digital Twin Consortium Defines Digital Twin, DTC, 2020-12-03

3.2 物流数字孪生系统参考架构

3.2.1 物流数字孪生概念架构

狭义的物流数字孪生是其物流实体的动态的、具有智能的数字表示 / 镜像。广义物流数字孪生系统由物流数字孪生和它的物流实体,以及连接孪生与实体之间的交互平台系统三部分组成。



图表 23 物流数字孪生概念架构

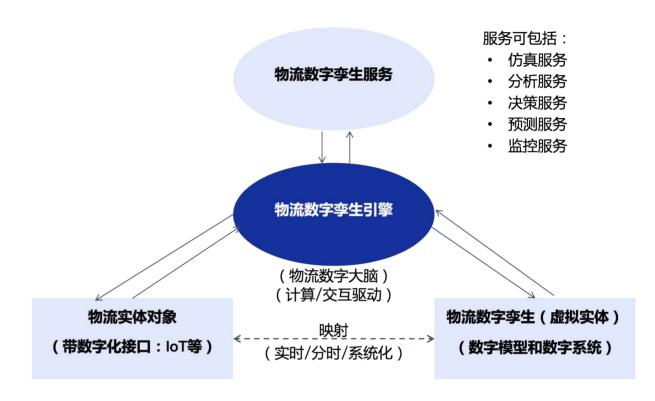
上图所示物流数字孪生概念架构包括以下三大部分:

- ① 物流实体对象: 一般物流实体对象的集合,也可以是单个物流实体,如中转场或仓库;
- ② 物流数字孪生系统: 物流实体对象的集合对应的数字表示 / 镜像的集合。当为单个物流实体对象时,集合中的镜像也是单个,此时的物流数字孪生可能叫中转场 / 仓库的数字孪生。该系统中还包含以下软件支持功能模块:
- 模型管理: 包含模型库管理, 模型评估和优化等;
- 模拟仿真:包含仿真引擎 / 平台(如 Unreal、Unity、anyLogic等)和仿真服务(任务管理、算法软件集成、仿真分析和报告生成):
- 数据管理:包括设计数据、生产数据、运维数据、故障数据、环境数据;
- 参考决策生成: 包括由大脑产生的分析报告、解决方案、洞见和参考决策等:
- 物流数字大脑: 一个基于 AI 和数据分析的核心软件系统, 它是虚实孪生共智的核心。
- ③ **孪生交互系统 / 平台**:在物流数字孪生和其物流实体对象之间,孪生互动平台系统负责连接、交互、数据交换、控制和用数字洞察驱动优化等。它主要包括:
- · 用户、API、人机接口等;
- 物联网平台及接口:
- 外部系统的接口;
- · 物流数字平台(包括 CRM、OMS、WMS、TMS等);
- · 物流监控、数据交换、可视化、安全等。

孪生互动平台系统是物流从实到虚的映射器、虚实之间的连接器、孪生智能的转换器、虚优化实的桥梁,也是数字洞察的驱动器。此处的连接和双方交互并没有严格要求是实时和自动的,因此可视场景及实际情况和要求而定。

3.2.2 物流数字孪生系统架构

参照《数字孪生技术与工程实践》⁴⁹ 提出的数字孪生系统通用参考架构,本白皮书提出了一个物流数字孪生系统的一般参考架构:



图表 24 物流数字孪生系统架构

上图的系统架构包括了四大部分:

① 物流实体

是物流数字孪生所要映射的在物理空间实际存在的一个系统。系统所包括的物流实体需要有数字化接口,如 GPS、IoT、仪表、遥感终端、手机 / 电脑等,它们能进行数据采集和信息映射。物流实体中的各个部分,通过物流硬软系统连接或活动关系结合起来。

物流实体中各异构要素的全面互联感知是构建数字孪生系统的前提和关键,智能感知的基础在于泛在的数据采集,常见的数据来源包括各类声光热电力传感器、条形及二维码、计算机 / 手机 / 平板电脑 / 手环等智能终端、系统固有的物流机器 / 设备或者智能仪表、系统人员数据、企业的管理数据、本地 / 云端存储的历史可追溯数据等,数据传输方式通常有现场总线、云技术、射频识别技术、无线蓝牙技术等。

物流实体信息感知的手段包括直接和间接两类:

- 直接手段: 指物流实体本身带有传感器. 能采集自身的数据;
- 间接手段: 通过物流实体外在的环境感知,间接获取物流实体的运行状态。例如,运输途中车辆可通过内置的 GPS,通过天气预报及交通管制系统的交通事故的感知,可以获取其运行的外在表现状态。这些外在传感器的信息 也是物理实体数据采集的一部分。

⁴⁹ 参考文献:陆剑峰,张浩,和赵荣泳,数字孪生系统的一般架构,《数字孪生技术与工程实践》,2022

物流实体可按照物流数字孪生所发送的报告、参考决策或指令自动或半自动更改装备配置,修改运行计划和执行优化方案,并将执行的结果自动或半自动反馈给物流数字孪生进一步迭代优化。简而言之,为了支撑物流数字孪生系统的实施,物流实体需要具备自动或半自动数字化接入能力。从角色来看,物流实体是物流数字孪生系统的实现基础,同时也是物流数字孪生系统最终所要优化的目标对象。

② 物流数字孪生(虚拟实体)

物流数字孪生是物流实体对应在信息空间的数字表示 / 模型,以及物流实体运行过程的相关信息系统。信息系统是物流实体对象的信息模型抽象,并且包括了一些物流实体运行过程的管理、控制等逻辑。

物流虚拟实体的模型定义了对应的物流实体。这些模型是指在物流实体设计和运行过程中所构建的三大类模型:

- 几何模型: 离散的地理环境模型, 如城市、站点库场、公路铁路、河海港口码头、天空航线机场等组成的复杂模型:
- **机理模型**: 物流模式有多种,快递、货代、生产物流等,每种模式有不同运行机制,如快递分拣、快递收派网络等,其运输方式也有多种,其中包括海运、空运、铁路、公路和多式联运等不同运行机制;
- 数据模型:物流主数据模型包括识别企业和贸易伙伴供应链中关键实体和关系的数据,它包括产品、客户、站点、供应商、物料清单和其他贸易伙伴组织等内容的标识符和名称。对于物流来说,数据模型还包括物流网络设计模型、快递分拣模型、港口物流管理模型、物流运行过程的概率统计数据模型等。

③ 物流数字孪生引擎

物流数字孪生引擎一方面是实现物流系统和物流虚拟系统实时 / 分时按指定的频率和保真度连接同步的驱动引擎,另一方面是物流数字孪生系统智能算法和智能计算引擎核心,为用户提供 AI/ML 高级智能化服务。在物流数字孪生引擎的支持下,物流数字孪生系统才真正形成,实现虚实交互驱动以及提供各类物流数字孪生智能化服务,所以物流数字孪生引擎即是数字孪生系统的"心脏和大脑"。

物流数字孪生引擎从功能上来说主要包括交互驱动和智能计算。物流数字孪生应用通过构建拟实的界面,充分利用 三维模型等来形象地展示计算和分析的结果,提高人机交互的水平。其智能计算是利用数据驱动模型进行仿真分析 与预测,提供传统虚拟实体应用所没有的智能计算结果。

④ 物流数字孪生服务

物流数字孪生服务是指物流数字孪生系统向用户各类应用系统提供的各类服务接口,是物流实体、物流虚拟实体在物流数字孪生引擎支持下提供的新一代应用服务,是数字孪生系统功能的体现。

物流实体和物流虚拟实体在没有物流数字孪生引擎的支持下,能进行传统意义上的系统运行,完成各自预定的功能,如仓储管理(WMS)、运输管理(TMS)。但是,物流数字孪生引擎能让物流实体和物流虚拟实体融合在一起,形成物流数字孪生系统,具有原来物流实体和物流虚拟实体独立运行所没有的新的功能。一个完整的物流数字孪生系统包括服务接口支持,也就是功能接口,能让物流数字孪生系统真正地为用户所用。

物流数字孪生服务包括物流仿真服务、物流监控服务、物流分析服务,物流预测服务,最重要的是可提供物流决策及优化服务,也就是将仿真、分析预测的结果 / 参考决策 / 指令(直接的行动决策:如给智能物流机器人或机器臂的指令)传送给人和或物流实体,从而优化物流实体的运营。同时,由于人机交互要求更高,虚拟现实(VR)、增强现实(AR)和混合现实(MR)是物流数字孪生应用的重要形式,因此,物流数字孪生服务也包括对这些应用的服务接口支持。

物流数字孪生服务是根据企业的发展和用户的需求而设计的,随着物流数字孪生系统的进化,会产生更多形式的服务。随着工业元宇宙的发展、物流元宇宙也在路上、未来物流数字孪生还将提供元宇宙的基础服务。

3.2.3 物流数字孪生技术架构

参考《数字孪生技术应用白皮书技术应用白皮书(2021)》⁵⁰ 的研究,为了构建物流数字化镜像,描述物流物理对象在现实世界中的变化,模拟物流物理对象在现实环境中行为和影响,以实现状态监测、故障诊断、趋势预测和综合优化的目的,需要 IoT、建模、仿真等基础支撑技术通过平台化的架构进行融合,搭建从物流物理世界到孪生空间的信息交互闭环。整体来看,一个完整的物流数字孪生系统应包含以下四个实体层级:

① 数据采集与控制实体

主要涵盖感知、控制、标识等技术,承担孪生体与物流物理对象间上行感知数据的采集和下行控制指令的执行。

② 核心实体

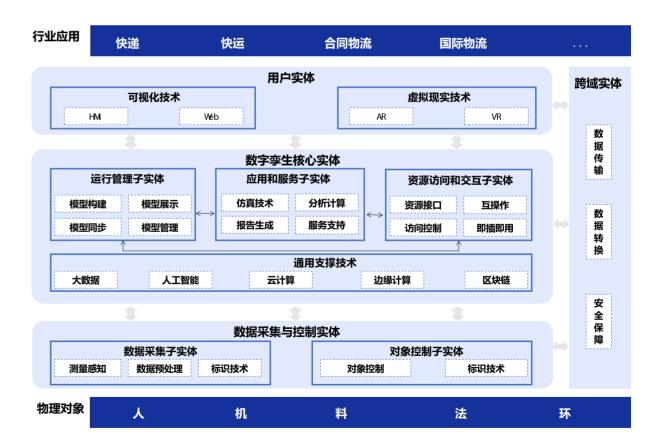
依托通用支撑技术,实现模型构建与融合、数据集成、仿真分析、系统扩展等功能,是生成孪生体并拓展应用的主要载体。

③ 用户实体

主要以可视化技术和虚拟现实技术为主、承担人机交互的职能。

④ 跨域实体

承担各实体层级之间的数据互通和安全保障职能。



图表 25 物流数字孪生系统架构

⁵⁰ 参考文献: 《数字孪生技术应用白皮书(2021)》,中国移动通信有限公司研究院等,2021 年

3.3 小结

本章给出了物流数字孪生的概念及系统参考架构、定义强调

物流数字孪生是数据对象之间各种关联的动态、实时和分时的表示,物流实体和数字表示在整个生命周期中以指定的频率和保真度同步,而并不强调实时交互和双方数据的自动交换。

此定义更加符合物流行业的作业场景与业务需求。

物流数字孪生价值与应用

第四章 物流数字孪生价值与应用

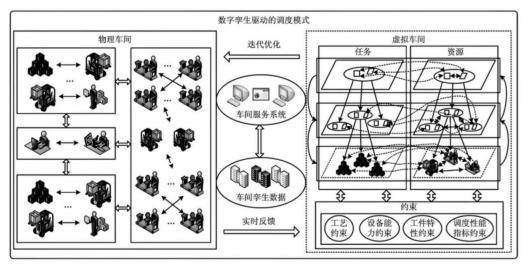
4.1 满足精益生产需求的生产物流

研究指出 ⁵¹,数字孪生赋能的制造将对工厂内物料流提出新的要求。公司可能必须调整其流程,以便使物料及时交付到产线边,并调整看板补货策略,以适应更短的交付周期和更高的产品复杂性。

在某些情况下,调整生产运营以适应数字孪生驱动产品和商业模式的要求将需要新的工作站和工厂布局设计方法。例如,公司可能希望从批处理转换为单件流,或者调整物料存储和处理系统以应付更复杂和多变的物料需求。通过与先进的存储和处理系统集成,或通过使用 AR 技术帮助员工快速定位和选择零件,数字孪生技术可以帮助公司管理这种额外的复杂性。数字孪生技术在生产物流场景的应用体现在两个方面:

① 基于数字孪生的车间生产调度优化

数字孪生驱动的调度模式下,调度要素在物理车间和虚拟车间相互映射,形成虚实共生的协同优化网络。物理车间主动感知生产状态,虚拟车间通过自组织、自学习、自仿真方式进行调度状态解析、调度方案调整、调度决策评估,快速确定异常范围,敏捷响应,智能决策,具有更好的变化适应能力、扰动响应能力和异常解决能力。

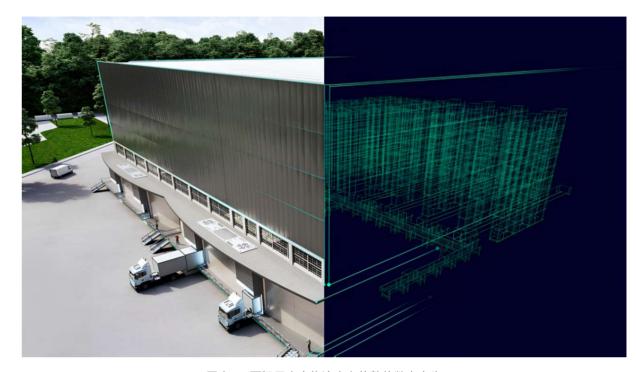


图表 26 物流数字孪生概念架构

② 基于数字孪生的生产物流精准配送

使用数字孪生作为管理工具,无论是在评估流程的操作变量还是根据现实的演变重新定义策略,都需要使用复杂的仿真模型,该模型需要考虑操作条件的变化场景、位置和/或其存储逻辑的物理重新分布的可能性。

从一个实例来呈现生产物流数字孪生应用。在"智能内部物流-体验流程"的口号下,西门子在 2023 年 3 月的 Logimat 展会上展示了真实物流中心的整体数字孪生 52。西门子在整个价值链上专门针对内部物流行业提供广泛的自动化和数字化产品组合,支持机器制造商和仓库运营商克服这些挑战。



图表 27 西门子真实物流中心的整体数字孪生

西门子数字化企业产品组合的数字化和自动化解决方案以及西门子 Xcelerator 产品组合的支持物联网的硬件和软件涵盖了仓库运营的所有领域,例如收货、运输、存储、拣选、包装和运输。全自动物料流系统可以加速仓库运营、优化流程、减少成本和错误,并最终实现更高的吞吐量。西门子用其位于纽伦堡的物流中心的数字孪生进行具体演示。该配送中心每天处理 12,000 个订单、22,000 个送货单、27 台堆垛机和 3 公里的自动传送带,为全球 25,000 家客户提供服务。通过这个现实生活中的例子,客户可以在贸易展上详细了解模拟场景如何帮助优化轮班计划,实现最大生产力。它还展示了数字孪生如何帮助识别瓶颈和峰值负载以优化物料流,以及如何保持吞吐量和整体仓库性能,从而实现接近 100% 的履行率。现实世界和数字世界之间的无缝交互提高了工厂的生产力和灵活性,可持续地降低了成本,提升运营效率。

50

⁵¹ 参考文献:陶飞等,数字孪生及其应用探索 . 计算机集成制造系统 24(1). 2018-01.

⁵² 参考文献: Maximum transparency: Siemens shows the holistic digital twin of a logistics center, Siemens, 2023-03-20

4.2 单一场所的设计与运营优化

数字孪生可以对物流基础设施的设计、运营和优化产生重大影响53。

- ① 数字孪生可以将设施设备本身的 3D 模型与仓库平台系统中收集的物联网、库存和运营数据结合起来,从而给出最佳的设计和运营方案。
- ② 数字孪生可以支持仓库的设计和布局,并模拟产品、人员和物料搬运设备的移动,允许组织优化空间利用率。
- ③ 数字孪生可以帮助实现更优质的库存管理。通过创建库存的数字孪生,管理人员可以深入了解产品的位置、数量和移动情况。帮助他们发现优化库存水平、减少缺货和缩短订单履行时间的机会。
- ④ 数字孪生可用于监控和分析仓库设备和机械的性能。通过将传感器和其他物联网设备与数字孪生集成,管理人员可以跟踪传送带和叉车等设备的实时状态和状况。识别潜在问题,优化维护计划并延长设备的使用寿命。
- ⑤ 数字孪生可以帮助仓库经理优化作业流程。通过创建仓库流程的数字孪生,管理人员可以识别出现瓶颈的区域、可以改进流程的区域以及可以更好地分配资源的区域。
- ⑥ 数字孪生可以在仓库操作期间不断更新数据,包括库存计数系统、自动引导车辆、货对人拣货系统以及自动存储和检索设备,以提供实时的仓库状态并通过分析向仓库管理人员提供优化的决策。

在电子商务实现等必须适应快速变化的数量和库存组合的环境中,数字孪生还可以支持动态优化操作。通过在数字孪生(与 AI 相结合)指导下不断调整库存位置、人员配备水平和设备配置、以满足当前或预测的需求。

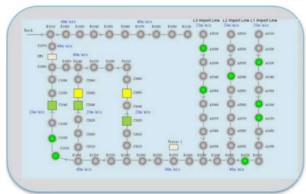
一个案例是施耐德电气 ⁵⁴ 上海物流中心利用数字孪生技术,减少仓库产线调试问题,优化仓储运营。 施耐德电气上海物流中心将 EcoStruxure 机器专家数字孪生软件 (EMT) 与 EcoStruxure 开放自动化平台 (EAE) 相结合,来发挥最佳优势,通过实时模拟来测试所有逻辑:

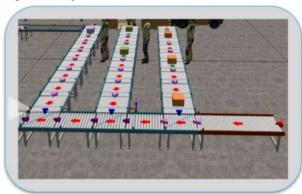
- 能够将对象直接拖放到模拟环境中;
- · 通过 Modbus 或 OPCUA 将设备快速连接到 EcoStruxure 开放自动化平台;
- 建立和测试操作站、信标和指示灯。

物流中心在产线调试时遇到的一个问题在于:决策人员基于对现场作业的检查和判断,生成测试计划,也对测试计划进行了交叉对照,但一旦进入调试,在进行第一次负载测试时,往往会出现问题。由于调试延迟,项目很快会超出预算。通过结合 EcoStruxure 开放自动化平台和 EcoStruxure 机器专家数字孪生软件,施耐德电气上海物流中心能在调试前就对系统进行监控和测试。

https://weibo.com/203422490/M1r3kuPna?layerid=4803423227347320

EAE and EMET side by side operation

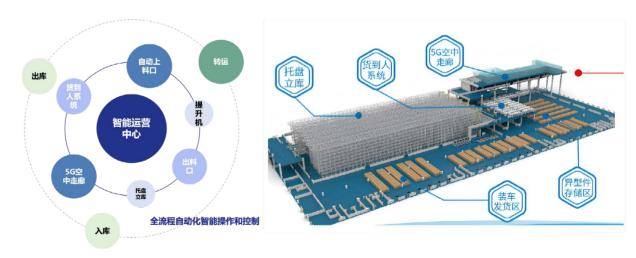




图表 28 施耐德上海物流中心采用数字孪生技术优化运营

在实际的调试中,应考虑物流环节和测试需要的时间,并多次重复这个步骤,还需要考虑其他成本。可以选择仅在晚上、周末测试,或在物流中心运营期间进行测试,而不是在调试阶段发现问题。施耐德电气上海物流中心通过模拟物流中心系统找到问题,用充足的时间来解决这些问题。

另一个案例来源于中兴通讯。在中兴通讯⁵⁵ (南京) 全球 5G 成品智能分拣中心,通过数字孪生将分拣中心的设备运行、储存等现实场景转换为 3D 图像实时映射至运营中心的中央大屏与平板等设备,直观地展示出设备的运行状态、储存信息、任务执行信息、运行效率统计,实现分拣中心的运营监控与任务调度,能够实现 25 万㎡内的设备任务远程调度,并实时收集设备故障信息并报警,提示人员及时处理。运营中心还配备了 VR 和 AR 等设备,让人员能够沉浸式完成任务和设备运行监控。



图表 29 工厂数字孪生一分拣中心

此外,顺丰在中转场和鄂州枢纽的数字孪生应用更是单一场所的设计与运营优化范例,具体内容参见本白皮书第六章。

52

⁵³ 参考文献: DHL, 《Digital Twins in Logistics(物流中的数字孪生)》, DHL, 2019-06-27

⁵⁴ 参考文献: 上海物流中心的高效流程究竟是怎么实现的?

⁵⁵ 参考文献: 中兴通讯南京滨江基地数字孪生案例介绍

4.3 赋能港口数字化智能化改造 56

在主要的全球物流枢纽,如集装箱港口,复杂、多利益相关者的环境最为明显。在今天的这些设施中,由于信息交换系统不完善,许多参与者依赖于可能出现错误和常常延迟的离线流程,加剧了有效运行的挑战。应用数字孪生体来提升港口的数字化水平将有助于减少差错,提高设施的运营效率。

上港集团以"数字港口"建设为抓手,在洋山四期自动化码头率先推出数字孪生系统 57。多维度、全流程的超大型自动化集装箱码头数字孪生平台实现了地理信息和码头设备精细三维建模,实现了道路、堆场、集装箱、岸桥、场桥、AGV 等设施设备的高精度建模。同时还原岸桥、场桥、AGV 三大设备的超精度行为和规则建模,实现了设备运行的高精度拟真。



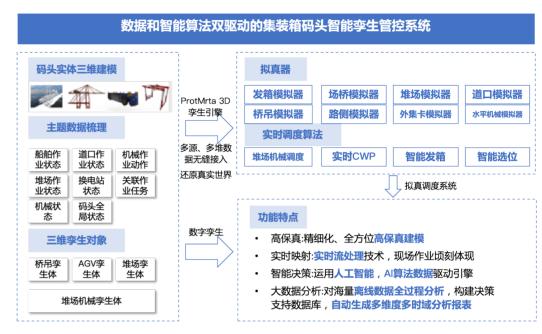
图表 30 上港集团自动化码头数字孪生

与港口传统运营管理相比,数字孪生平台具有不可比拟的场景优势。生产经营者、生产管理者、设备操作者可以在任何时间、地点使用数字孪生移动设备,全方位掌握港口生产运营状态。数字孪生平台利用强大的 3D 场景渲染能力,宏观可快速定位观测港口运营态势、集装箱堆区布局。微观可快速定位观测设备部件运动。监管力度可以到箱,设备可到某个运行部件。

孪生系统最为核心的部分是其后台所管理的港口业务生产大数据。利用全面的港口业务生产大数据,数字孪生平台中的 AI 智能模块实时学习港口生产的业务规律,对各种生产行为建模,并不断迭代优化模型,并进行可视化演算。数字孪生也可以建模分析不同气象环境对生产过程的影响,以设计出相应的生产计划。此外,港口如需扩建一个岸场也可以通过孪生系统推演出应配属多少堆区和吊机装备,以达到最佳的成本 / 吞吐量比。

上海咪啰信息科技有限公司(简称:海大咪啰)聚焦于港口物流智能化发展实际需求,将大数据、AI和数字孪生等

技术进行融合运用,研发了实时高保真、虚拟量化、海量实时数据接入的港口物流数字孪生管控系统,融合拟真等智能算法,实现港口事前拟真预测、事中孪生监控、事后离线分析的全域多维度管控,为港口生产作业提供态势推演、运行评估、异常预警等决策支持,赋能港航物流的数字化、智能化改造。海大咪啰数字孪生产品已经在上海港、大连港、南通港等成功推行和应用。



图表 31 数字孪生管控系统技术示意图

另一个案例是新加坡港务局和新加坡国立大学联合开发大型集装箱航运枢纽的数字孪生体来描述物流基础设施数字孪生体的未来发展趋势。下图显示了新加坡港口用数字孪生技术进行重大升级。



图表 32 新加坡港口用数字孪生技术进行重大升级 58

⁵⁶ 参考文献:海大咪啰港口物流数字孪生管控系列产品,港口科技,2023年6月7日

⁵⁷ 参考文献: 提升航运中心新能级,数字孪生新港口来了,上海临港,2022 年 9 月 6 日

⁵⁸ 参考文献: DHL, 《Digital Twins in Logistics(物流中的数字孪生)》, DHL, 2019-06-27

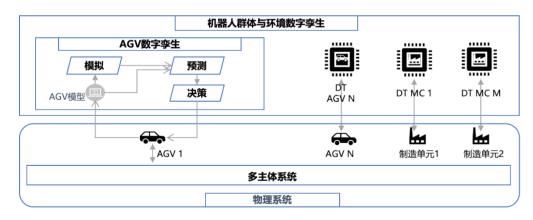
4.4 提升机器人群体管理

数字孪生可以作为机器人群体管理决策系统。当前的机器人群体管理实施缺少的是透明度、预测能力和自动化决策,所有这些都是数字孪生能提供的功能。

数字孪生有两个重要的特征:预测和询问。为了能够提供这种功能,AGV需要具有遥测能力——配备不同的传感器和无线数据传输机制,在数字孪生侧,传输的数据将被处理、分析,然后以易于理解的形式显示给人类主管。同样的数据将被用于预测 AGV 的能耗、等待时间、充电时间、机械磨损、维护等方面。

- 作为一个决策支持系统,AGV 的数字孪生需要能够模拟不同的场景,以便决策者采取最佳行动。
- 数字孪生中的模拟功能也可以查看关键绩效指标如成本、交付时间、等待时间、能源等。此外,模拟也可以通过 改变系统的不同参数来改进这些关键绩效指标。
- •数字孪生可以更好地帮助机器人群体进行任务分配、路径规划和交通管理,从而使机器人群体获得一个整体全局最优解决方案。由于 AGV 存在于一个不断变化的环境中,它们所采取的路径必须根据现实世界的条件和变化进行实时调整,这意味着只能使用路径规划算法。数字孪生可以模拟 AGV 行为,也可以模拟路径规划的不同候选方案,利用时间信息改进整体算法。路径计划的模拟很重要,因为它可以提前检测拥堵情况,否则只能在运行时被发现。

下图展示了一个与数字孪生相连的复杂物理系统的粗粒度架构 5°。在一个工业 4.0 工厂的车间进行建模,其中多个 AGV 与不同的制造单元协作,以满足个性化客户的订单。每个物理实体都使用传感器信息发送关于其状态和环境的 信息。数字孪生使用人工智能(AI)算法和模拟来分析接收到的数据,以识别错误的状态或行为,传感器故障,做 出预测和决策,并被发送回物理实体,结束反馈回路。



图表 33 数字孪生优化机器人群体管理的系统架构展示

由于是全数字化的,该系统能相对更加轻松地更改物理实体模型 ⁶⁰,以使用真实的背景和真实的数据仿真不同的场景和迭代。这些模型包含不同的信息和领域知识,能够实现更准确的分析和仿真,如:CAD 模型信息、运动学模型、行为模型、软件控制模块等。

4.5 增强物流包装和容器设计

绝大多数产品在物流过程中都必须采用一次性或可循环使用的包装或专门的容器作为外壳防护,以保护产品,因此包装和容器是物流的重要工具。包装和容器的设计和合理使用对降低物流成本和提高物流效率及质量都有重要意义。然而,它存在不少问题和面临许多设计、监控和管理的挑战。下表总结了物流包装容器面临的问题和挑战,以及数字孪生技术帮助解决它们的潜在能力和应用趋势。

物流中包装容器面临的问题和挑战 包装和容器数字孪生的应用趋势 电子商务的增长推动了需求、季节性 材料的数字孪生应用有助于开发更坚固、更轻、更环保和回收含量高的包装 波动和包装的多样性。 这反过来又会产生大量的浪费, 并由 家具巨头宜家甚至用一种由蘑菇种植的生物替代塑料泡沫。Math2 Market 开 干低容量利用率降低运营效率。因此 发的材料数字孪生应用可以帮助公司理解和预测新材料在包装应用中的性能。 设计多样性的包装和容器, 采用合适 这些材料的数字孪生可以模拟运输过程中温度、振动和冲击载荷下的材料行 的环保的包装材料, 降低包装成本给 物流带来了挑战。 新兴的 3D 摄影技术结合集装箱移动的历史数据, 可以创建一个数字孪生模型, 跟踪可回收/重复使用的容器可能很 用于帮助物流部门决策何时应使用、维修或报废特定资产。此外、在整个集 困难。公司不仅必须处理集装箱的回 装箱船队中汇总此类数据有助于船东对船队规模和分布做出最佳决策,并确 收路径, 还必须检查是否有损坏和污 定可能存在问题的趋势,如集装箱设计缺陷或在供应链中特定地点发生的粗 染。 暴装钿.

图表 34 物流中包装容器面临的问题和挑战及数字孪生技术应用趋势 61

此外,数字孪生可以在物流过程中加强对货物的保护,以及提升满载率。

如果要装运的物品的数字孪生已经创建,描述其几何结构的数据可以从预先存在的来源获得。或者物品数据可以在 装运准备时使用 3D 扫描以及计算机视觉技术生成,把物品的数字孪生合并到其包装或容器数字孪生中 ⁶²,结合产 品和包装数据可以帮助公司提高效率,例如通过自动化包装选择和集装箱包装策略来优化利用率和产品保护。

运输敏感、高价值的产品(如药品和精密电子元件)常见的做法是在这些产品中带上有监测温度、包装方向、冲击和振动的传感器。由 Roambe、Blulog、Kizy 和其他公司开发的提供越来越多数据点的新型传感器,允许在装运过程中持续传输数据。装运物品的数字孪生将作为这些传感器收集数据的存储库。数字孪生技术也可以使这些数据以新的方式产生价值,例如一个包含包装的隔热和减震特性的模型,可以允许从外部传感器收集的数据推断内部产品的条件,从而可预警内部物品可能产生的损坏等问题。

⁵⁹ 参考文献: Matei Alexandrua, 等,Digital Twin for automated guided vehicles fleet management, Procedia Computer Science 199 (2022) 1363-1369, 2022-01

[☞] 参考文献: Matei Alexandrua, 等,Digital Twin for automated guided vehicles fleet management, Procedia Computer Science 199 (2022) 1363-1369, 2022-01

[ी] 参考文献: DHL, 《Digital Twins in Logistics(物流中的数字孪生)》, DHL, 2019-06-27

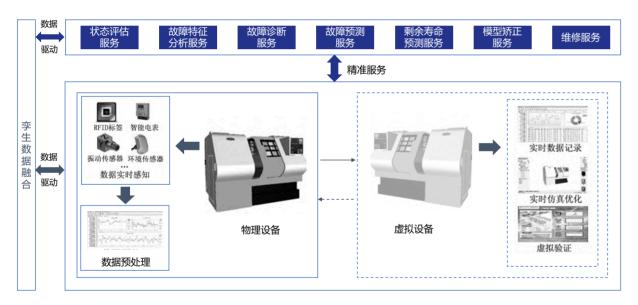
[△] 参考文献:陶飞等,数字孪生及其应用探索 . 计算机集成制造系统 24(1). 2018-01

4.6 实现物流设备的预测性维护

众所周知,大多数物流设备 / 机器通常会在出现故障后进行维修或定期维护,但这样做有很明显的缺点。首先,故障风险并未最小化,仍然存在停机和灾难性故障的风险;其次,没有充分发挥系统维护工程师的作用;第三,这些方法浪费自然资源,因为反应性维护可能会对组件造成更多损坏,而预防性维护不会覆盖组件的整个生命周期 ⁶³。

覆盖一个组件整个生命周期的一种方法是预测维护 (PdM)。预测维护调用配备了传感器的机器所产生的大型运行数据集。这些数据可以确定多个健康方面,例如剩余使用寿命、特定健康指标或异常检测 ⁴⁴。

然而通过数字孪生合成数据能够改进当前的预测性维护模型。数字孪生是基于物理、数据、规则、行为或几何形状的物理资产的高保真数字模型,它在设备运行期间获取传感器数据并存储历史运行数据以供进一步分析 65。同时,数字孪生可以生成可靠的合成数据,以建立更强大的预测维护模型。



图表 35 数字孪生驱动的预测与健康维护 66

4.7 全球物流网络的数字孪生

在物流领域,最终的数字孪生将是整个网络的模型 ⁶⁷,实际上,它是一个物流的数字孪生网络,不仅包括物流资产,还包括海洋、铁路、公路、街道、客户家庭和工作场所的数字孪生。然而,一个无所不包的数字孪生的构想,在很大程度上是目前物流业的一个愿望,重要的是要设想在哪里可以全面实现物流数字孪生网络。至少下面两项互补的技术的发展将有助于物流实现它的数字孪生网络的愿景。

- 当今发展非常迅速地理信息系统(GIS)技术远不止是静态数字地图,它们还可以包含动态数据,例如交通速度和密度信息、道路封闭以及事故和维修工程导致的停车限制。它们甚至可以集成特定人员和车辆的实时位置。物流供应商已经广泛使用地理信息系统数据,例如,规划运输路线,并根据天气状况、拥挤,和港口、机场、边境过境处的已知延误来预测到达时间。数字孪生网络可帮助供应商优化其传统的物流网络,例如,利用客户位置、需求模式和旅行时间等丰富的数据来规划配送路线和库存存储位置。
- 自主车辆技术的发展加速了在全球生成极其详细数据的进程。自主车辆将在两种方式上改变地理数据的可用性。 自主车辆技术的应用极其需要详细操作地图,数字孪生模型通过绘制函数,从摄像机和无线电或光检测及测距系统 (雷达和激光雷达方法) 收集数据,并将数据无线地共享到连续更新和测距,以改进地图数据库。



图表 36 供应链网络的数字孪生未来构想

很明显,上面的愿望不容易实现,可能离全面实施还有几年的时间。今天的数字孪生在范围上远没有那么雄心勃勃,它们的用户面临着计算资源、数据质量、精确表示和治理方面的挑战。此外必须指出的是,物流行业的异构性和分散性将使其成为数字孪生蓬勃发展的一个极具挑战的环境。目前尚不清楚这些问题能否得到充分解决,使数字孪生能够真正在全球范围内应用。

⁶³ 参考文献: Errandonea, S. Beltrán, S. Arrizabalaga. Digital twin for maintenance: A literature review. Computers in Industry, 123(2020), 2020.

[&]quot;参考文献: van Dinter, B. Tekinerdogan, C. Catal. Predictive maintenance using digital twins: A systematic literature review. Information and Software Technology, 107008 (2022), 2022.

⁶⁵ 参考文献: Luo, T. Hu, Y. Ye, C. Zhang, Y. Wei. A hybrid predictive maintenance approach for CNC machine tool driven by digital twin. Robotics and Computer–Integrated Manufacturing, 65 (2020), 2020.

⁶⁶ 参考文献: 陶飞等, 数字孪生及其应用探索, 计算机集成制造系统 24(1), 2018-01.

⁶⁷ 参考文献: DHL, 《Digital Twins in Logistics(物流中的数字孪生)》, DHL, 2019-06-27

物流数字孪生赋能供应链

第五章 物流数字孪生赋能供应链

数字孪生技术有潜力改变几乎每一个行业。随着物流数字孪生的广泛应用,它们将在更广泛的供应链维度上,对价值链的每个环节产生影响。然而,为了供应链价值的显现,组织必须能够将来自上游的数字洞察转化为下游的实际行动,这将需要对物流系统进行更为重大的优化改变,以管理通过整个价值链的材料、零件和产品流。

5.1 推动数据驱动的供应链决策

供应链组织正面临着巨大的压力。如今,消息灵通、精通数字技术的消费者需要快速、个性化的体验,许多企业难以提供。供应链流程必须以消费者为导向,具有灵活性。为了在竞争中满足客户需求,供应链网络需要持续改进,以确保按时交付货物和服务。传统的供应链必须向数字化转型,而供应链计划的数字化是供应链数字化转型的核心。改进供应链计划将有助于企业降本增效,有助于改善客户体验。在《数字供应链孪生研究报告》。48 中介绍了 Gartner 的供应链研究简报《数字化规划需要数字化供应链孪生》69,企业要达到供应链计划的第四阶段以上的成熟度(Gartner 将企业的供应链计划的成熟度分成五个阶段,最高阶段(第五阶段)是供应链计划的完全数字化。),必须采用数字供应链孪生(全局/整体的供应链数字孪生)技术,也就是重新规划数字时代的供应链规划流程。Gartner 的 Tim Payne 看到领先的公司之间有足够的共通性,他已经发布了第 5 阶段愿景的蓝图。Payne 将供应链计划从根本上视为决策过程,并认为在这些计划决策中将出现三大趋势:

01 横向一致性

这意味着在端到端供应链中"联合"规划决策。Payne 表示: "如今大多数公司希望需求计划决策能够得到供应链的供应方的支持,以获得更佳的预测能力。"随着时间的推移,他预计这种横向调整将延伸到企业的四面墙,延伸到客户和供应商中,以实现多企业集成的规划决策功能。

02 纵向一致性

在这种情况下,"联合"计划决策是从公司高层到底层,反之亦然。Payne 说:"这是将战略目标转变为执行力的方式,以及执行力最终会如何影响战略方向。"在公司层面的战略、运营和战术计划决策将达到高度协调。

03 自动化

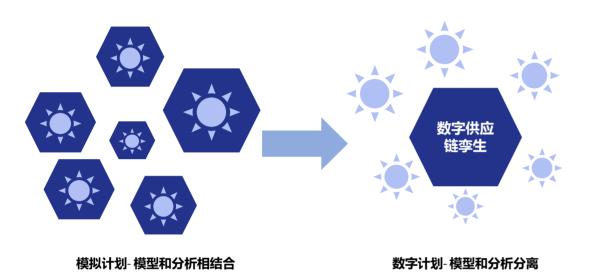
这意味着自动化预测和规定性计划决策。随着公司继续其数字规划计划,提高规划者的生产率将作为计划支持的主要推动力之一。

68 参考文献: 《数字供应链孪生研究报告》,罗戈研究,2020-07-11

6°参考文献: Tim Payne,数字化规划需要数字化供应链孪生, Gartner, 2018

传统的供应链计划解决方案很难实现这种具有代表性的供应链模型。传统规划(也称为模拟规划)解决方案是分析和模型的组合。无论是在需求计划解决方案还是生产调度上都是这样。历史上,我们从未想过要将任何规划解决方案的两个关键组成部分:分析和模型分开。公司利用多种解决方案建立规划技术组合(如需求规划、企业资源计划、物资需求计划、调度、运输规划等),最终的结果是多个模型(在多个解决方案中)只代表端到端供应链的一部分,但没有形成一个完整的供应链模型。

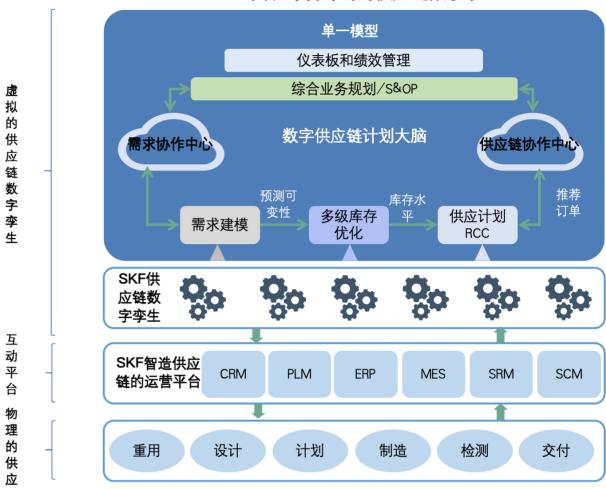
数字供应链孪生的兴起



图表 37 数字计划孪生一模型和分析分离

要使计划决策的横向和纵向一致性发挥作用,需要一个主要的供应链模型,在该模型上可以运行适当的预测和规定性分析。数字化供应链计划需要一个单独的、全面的供应链模型,其中包含一系列分析,然后可以针对该模型运行。如"第 5 阶段成熟度供应链规划的技术参考模型"所述,这种统一的供应链模型就是数字供应链孪生(全局/整体的供应链数字孪生)。它有效地使公司能够在整个供应链中调整其计划,并通过其组织进行垂直调整。

SKF实现综合计划的供应链数字孪生



图表 38 SKF 实现综合计划的供应链数字孪生

5.2 实现供应链实时风险管理

我们正处于一个 VUCA(易变性,不确定性,复杂性,和模糊性)时代。由于数字经济的腾飞以及全球化趋势,使得供应链趋于日益复杂,加之世界竞争格局的动荡、数据缺乏、信息不对称,供应链充满风险。这些风险或导致供应链中断甚至失去生意。供应链存在两大类风险 ⁷⁰:

62

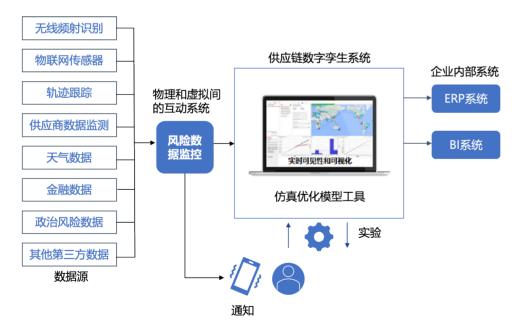
⁷⁰ 参考文献: DMITRY IVANOV, Managing Risks in Supply Chains with Digital Twins and Simulation, any Logistix, 2019.

供应链风险类型	供应链风险描述
运营风险或 经常性风险	来自于供应链本身。它们与业务流程有关,特别是与供需的不确定性有关。这些风险通常涉及牛鞭效应,当需求和供应的变化通过供应链向上增加库存变化的强度时,通常这些风险会影响运营参数,如提前期、库存等。由于每日或每周的缺货 / 超龄成本增加,当前绩效指标可能会降低。要解决这一问题,需要及时有效的协调,以平衡需求和供应。预防措施可能包括通过更好的客户和供应商协作改善价值链上的信息流。
破坏性风险	通常是特殊的风险。它们以罕见的发生和高性能的影响而著称。这些风险会干扰网络结构和关键绩效指标,如年度收入或利润。它们可以是自然的(如新型冠状病毒疫情),也可以是人为的(如中美贸易战和科技战),可能包括配送中心或生产设施的火灾或洪水、供应商法律冲突、航空公司或铁路公司的罢工等等。一旦中断发生,其影响往往会沿着供应链向下传播。这就是所谓的连锁反应。通常这种风险需要短期的稳定行动,然后是中长期的复苏过程。这些后果通常需要很多时间、精力和投资来克服。为了防止连锁反应,企业需要主动确保供应链的冗余性和灵活性。破坏性风险是供应链管理者面临的一个重大挑战,因为它们会影响供应链的完整性。

图表 39 供应链的两大类风险

如何管控供应链风险并降低风险所带来的损失是供应链的重大挑战。什么是供应链风险管理?国际供应链及运营管理协会 (ASCM) 的定义是系统地识别,评估和量化潜在的供应链中断,以控制风险或减少其对供应链绩效的负面影响"。传统的供应链风险管理由于缺乏数据缺乏分析,因此往往面对风险缺乏有效的解决方案,更谈不上有效分析和预测风险,防止和减少不必要的风险,如库存风险,以及风险来时,如何有备无患。供应链的数字化技术给供应链风险管理带来了全新的方法。下面将介绍 anyLogistix 采用供应链数字孪生技术管理供应链风险的解决方案。

如下图所示,模拟、优化和数据分析的结合构成了创建供应链数字孪生模型所需的全部技术。将此模型与实时数据流集成将表示网络的当前状态。



图表 40 基于数字孪生和仿真的供应链风险管理 7

迄今为止,优化和模拟主要应用于战略规划("离线"规划)。然而,在处理风险时,决策的质量在很大程度上取决于及时获得最新数据,因为决策往往必须立即做出。

今天的技术,包括在线风险数据库、物联网传感器、跟踪和跟踪系统 (T&T) 和 RFID 允许在线收集大量的供应链数据:路径中断概率、供应商数据和动态中断检测数据等。这些监控技术能够识别关键热点,并对可能扰乱供应链的事件及时发出警报。

所有这些实时中断数据都可以嵌入到仿真模型中,包括有关自然、金融或政治风险的第三方实时数据。仿真和优化与实时数据的集成使得在风险应对规划中应用模型变得可行。这样一个实时的供应链风险建模系统构成了一个数字 孪生。

数字孪生表示供应链的当前状态,包括实际的运输、库存、需求和容量数据。例如,如果一个国际物流中心发生罢工,风险数据监控工具可以发现这种破坏,并将其作为破坏性事件传输到仿真模型。然后,在数字孪生中进行仿真,可以帮助显示中断传播并量化其影响。

此外,模拟能够根据情况进行有效的恢复策略测试和应急计划调整,例如,在运行中重新考虑备选网络拓扑和备用路由。

数字孪生内部仿真的输出数据可以传输到 ERP 系统或商业智能(BI)工具,以分析中断对性能的影响。此外,仿真模型可以激活 BI 算法。例如,如果仿真模型中的服务级别降低到某个级别,数字孪生会激活 BI 算法来搜索问题产生的原因。

通过与其他供应链管理工具的交互,数字孪生系统为端到端供应链提供了控制塔式的实时可见性和可视性。利用数字孪生、管理者可以全面评估他们的供应链的风险和弹性、并提高灵活性。

5.3 提高供应链协同

应链协同(Supply Chain Collaboration, SCC)就是供应链的上下游及各参与和相关方彼此合作,以降低整成本增加整利润、绩效最优为目标,共同助力达成整个供需链条的通畅,以此达到多方合作共赢的局面。在今天全球化数字经济时代,供应链协同更为重要,供应链的参与方已经全球化了,企业(如华为,苹果)的供应商可能遍布全世界。任何有着全球雄心的企业都意识到,要想在全球展开竞争,就必须在全球范围内有效地寻找资源。随着供应链网络的迅速扩张、全球成品市场的不断扩大以及世界各地支持这些不断增长的市场设施所带来的复杂性,所有相关方都致力于实现无摩擦的供应链协作,这对于供应链的最优性能是绝对必要的。《数字化供应链综合研究报告》总结了供应链协同的三个层面,下面的表描述了基于供应链数字孪生的供应链管理平台系统怎么样在这三个层面来改善供应链协同。

64

⁷¹ 参考文献: DMITRY IVANOV, Managing Risks in Supply Chains with Digital Twins and Simulation, anyLogistix, 2019.

供应链协同层面	协同决策	供应链数字孪生助力供应链协同
事务集成	・销售订单,工作订单和采购订单・POS 详细信息・贷方和借方票据・发票・收款和付款	高度数字化的事务(订单,结算,支付等)集成事务的信息高度透明和可追溯各方系统连接数字化供应链的协同平台协调事务的参与方
供应链管理信息共享	 生产和运输计划 产量预测 材料清单 订单 产品详情 库存 价格和促销 产品供应 合约条款 分配 	 数字化供应链的协同平台 APIs 和开放标准 物联网感知 (位息的标准化,如数字孪生识别技术 (实时信息交换 (端到端的实时可见性和可视化 (共享结构性信息 (共享半结构性信息 (共享半结构性信息 (大数据
战略协同	 提高预测的准确性 加强战略供应链关系和盈利能力 加强销售和运营计划 加速和管理需求计划,在整个供应链中直接进行物料采购和执行 解决关键的供应链事件 生产能力 生产设施和履行网络扩展 定价方案 	 数字化供应链的协同平台 采用物联网实现运营网络管控一体化 人工智能,机器学习帮助提高预测精度 横向和纵向供应链计划的整体协同 灵活的响应计划 实时协作 自动化预测和规定性计划决策 支持数字化采购

图表 41 供应链协同的三个层面

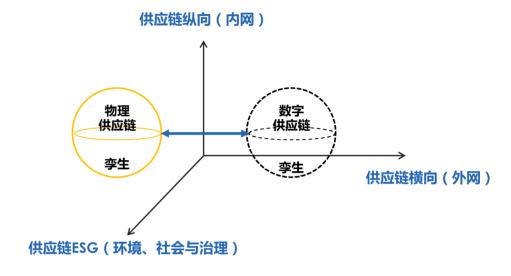
为了提高供应链的弹性和可见性,企业需要利用来自供应链合作伙伴的数据,包括适当的数据结构和共享协议。通过数字孪生的数字化供应链协同(见上表),企业能够容易获取所需信息和数据。

并且通过以下几个方面来提升供应链的弹性:

实时可见性	实时协作	灵活的响应计划
帮助企业提高监控和恢复能力。	允许企业在出现中断性关闭或库	使公司能够预测、模拟和评估假
	存损失时在替代供应商之间切换。	设情况,以便团队可以设计冗余
		和备用方案。

5.4 促进绿色供应链与可持续性发展

毕博咨询公司(BearingPoint, Inc.),前身为毕马威咨询(KPMG Consulting),是欧洲最大的管理技术咨询公司之一。毕博设计的 Log60 数字孪生供应链覆盖了人、地球和社会三个决策维度。在虚拟的 Logical60 供应链数字孪生中,不仅保持有 Gartner 定义中所指的供应链横向和纵向决策的一致性,还包括了与联合国可持续发展目标决策的一致性,也就是下图的供应链 ESG 维度。



图表 42 三决策维度的供应链数字孪生

Log360 代表企业供应链的一对一数字副本。它基于企业的运营数据,反映了企业供应链的所有细节。由于该系统由 ERP 提供数据并利用大数据方法,因此它始终是最新的,并且基于云的体系结构可以在不进行简化的情况下运行仿真和建模,从而使结果的准确性不被降低。实际场景和假设场景之间的比较和基准测试可以随时进行。

Log360 供应链数字孪生包含了一个系统 LogEC-- 供应链碳足迹的计算器 ⁷²,它包括传统的碳足迹工具和一个由欧洲标准 DIN EN 16258 和法国法令 2011 -1336 认证的物流排放计算器。建立更大的透明度是毕博方法的关键。企业无法管理其不能衡量的内容,而这正是毕博领先的解决方案 LogEC 的用武之地。

在欧盟,交通运输约占所有温室气体排放量的四分之一,到 2050 年,各种贸易通道的交通量预计将增长 400%。 所有针对交通方式的法规和法律越来越严格,对精确的碳足迹计算的需求不断增长。物流业务的成功与可持续性息息相关——LogEC 通过使企业能够计算和分析货运的足迹,帮助企业专注并改善可持续性。LogEC 提供了最准确的信息和最高的详细程度,可以自动计算每次装运的排放量。此外还可以通过运输数据的标准接口有效地集成新客户。在整个过程中,企业将完全符合 DIN EN16258 标准和法国法令 2011: 1336。它不仅将物理供应链的实现碳排放转换成数字的表示,而且提供碳排放标准的参照,从而为企业供应链碳减排优化提供决策意见。

实际上中国的交通和物流也面临着同样的碳减排挑战,毕博领先的解决方案值得中国企业学习和模仿,进而创新中国的解决方案。

²² 参考文献: 唐隆基和潘永刚, 《供应链零碳转型综合研究报告》, 罗戈研究, 2021-03-29

通过各经济领域公司的技术进步和数字化转型,全球物流系统变得如此高效,以至于我们今天处于前所未有的全球繁荣状态。然而,地球的自然边界和有限的自然资源正在明确结束对资源的持续增长和无尽的需求。因此,公司的系统优化必须同时考虑可持续性。除了生态方面之外,可持续发展的概念还需要解决经济和社会层面的问题,以实现面向未来的社会和环境平衡。

只有在数字化的支持下,才能解决日益复杂的环境破坏问题以及越来越重要的可持续发展问题。供应链数字孪生因 其基于模拟的行动建议、全球物流系统的前瞻性规划和控制而被认为是一个有前途的机会。供应链数字孪生一个主 要好处是,从供应商到客户的整个价值网络都是可视化的,并且创建了完全的透明度。供应链数字孪生可以用于预 测规划,以优化物流网络的生态可持续性,并根据环境可持续性进行重组,具有所有特征的完整供应链数字孪生能 够确定环境可持续性方面的最佳位置。

顺丰物流数字孪生创新应用

第六章 顺丰物流数字孪生创新应用

6.1 顺丰数字孪生发展背景

顺丰是中国及亚洲最大、全球第四大综合物流服务提供商,为客户提供国内及国际端到端一站式供应链服务。同时,依托领先的科技研发能力,顺丰致力于构建数字化供应链生态,成为全球智慧供应链的领导者。

截至 2023 年 6 月,顺丰服务超过 6.25 亿的个人客户和 190 万家的企业客户,在国内的车辆运输线路已超 15 万条。 在件量、资源数量级惊人的今天,智能算法如同大脑,扮演了思考如何匹配任务与资源的工作。如何更快速、低成本地验证物流运作过程的策略、算法是否合理,还有没有更优的方案,就成为了物流行业关注的核心问题之一。







图表 43 顺丰集团业务概览

物流和供应链的核心目标之一就是将具体的任务匹配合适的资源,在不浪费资源的情况下,尽可能提升流转的效率。顺丰基于在大数据、机器学习、运筹优化等技术上多年的积累,已形成了覆盖了物流收、转、运、派的全环节的智能决策体系。顺丰会根据市场行业趋势、历史情况等数据,提前预测未来的业务件量情况,并根据预测的信息,提前预备好人、车、场等资源。当客户下单后,再针对具体每一票快件的时效、服务等要求,综合同期其他快件对资源的使用情况,决定这票快件在运输过程中的具体安排。当遇见天气不好等突发情况时,顺丰会根据实际情况,动态预测这票快件的预计到达时间,如有延误风险,则会及时调整相关安排来确保快件如期送达。



图表 44 顺丰一票快件背后的旅程

作为一个实体行业,在实际生产过程中,对新策略、新算法的验证,往往需要投入大量的人力、财力,并且影响生产甚至停产,耗费大量的资源。同时,对环境不确定性估计的准确性、模型对现实场景还原度等因素,都与智慧算法落地效果的优劣有着较大的关联。

而数字孪生技术,通过建立在虚拟世界中与真实世界高度相似的孪生体,就可以让智能算法以极低的成本、极高效率进行验证并优化。顺丰科技致力于创新驱动和科技赋能,结合业务痛点和数字孪生特性,积极探索数字孪生技术的应用潜力,以作为加强顺丰服务和运营效率的催化剂,实现公司降本增效、服务客户的战略。

6.2 顺丰数字孪生发展历程

顺丰在数字孪生领域的探索和实践一直秉持稳扎稳打、服务于真实业务场景需求的原则。因此,顺丰的数字孪生技术发展,相较于业内领先企业如 UPS、DHL等,起步并不算早。在 2021年前,顺丰科技主要聚焦在传统的规划仿真,2021年开始系统研究数字孪生,并在物流业务场景中实现了落地。当前顺丰数字孪生核心的落地场景包括中转场和物流网络两个方面。

数字孪生中转场发展历程

顺丰科技团队从 2022 年初开始数字孪生技术布局,2022 上半年在某中转场搭建主线分拣模型以解决均衡缓存池算法优化问题。

团队顺利完成主线模型搭建和缓存池算法优化,打通了数据通路和逼真度的验证流程,但因均衡缓存池的特殊性和不可复制性,转而聚焦于小件分拣计划优化。2022 年下半年,顺丰科技启动了"某中转场数字孪生技术与应用"专项攻关,成功搭建出某中转场的小件分拣机模型和分拣计划优化验证,探索出数字孪生方法论,形成了一整套的数字孪生解决方案。

攻关成功后,2023年在全国范围内搭建了上百家中转场分拣机模型,数字孪生优化后的新分拣计划成功在数十个中转场应用,实现方法论的通用。同时,除了物流中转场内分拣领域,顺丰科技团队还尝试在物流发运领域中做物流网络支线排线的策略优化,最后的应用效果也很可观。

数字孪生物流网络发展历程

2022 年 10 月,顺丰科技团队从支线,干线,路由等场景着手,开启数字孪生物流网络的调研工作。

团队建立物流网络模型,成功输出排线规划结果,在2023年上半年成功在华南、华东、华西等城市试点,实现了 线路数量和运输成本的节约。

6.3 顺丰在物流数字孪生方面的创新与应用 73

顺丰科技作为物流科技的探索者,已率先将数字孪生技术研发应用于物流核心场景中,打造了不仅可以可视可交互,而且算法验证效率能提升600倍、逼真度高达99%的数字孪生仿真系统,同时突破了数字孪生复制难、落地难的问题,成为第一个在物流行业规模化研发应用数字孪生技术的企业。

下图呈现了顺丰科技单一物流设施 / 场所数字孪生技术架构, 其中:

用户域

包含了若干物流数字孪生服务。

数字孪生体

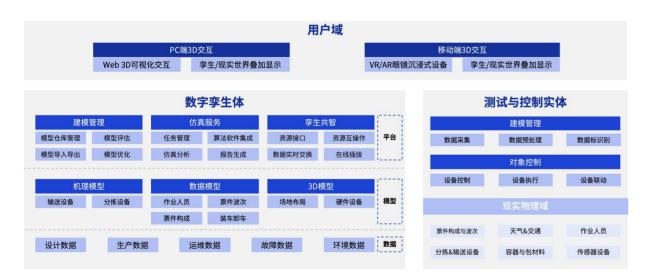
包括了物流数字孪生和部分物流数字孪生服务及物流 数字孪生引擎的功能,如仿真服务和报告生成,用机 器学习进行仿真分析,孪生共智中虚实的交互等。

测试与控制实体

包括了部分物流数字孪生引擎的功能、建模管理和对象控制。

现实物理域

包括了物流实体。

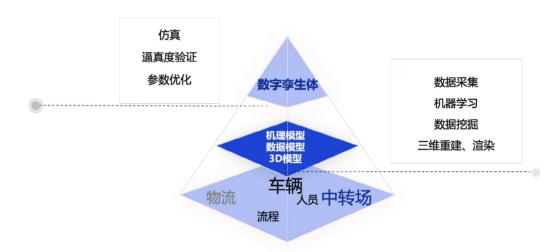


图表 45 顺丰单一物流设施 / 场所数字孪生技术架构

73 参考文献:顺丰"首个在物流领域大规模应用的数字孪生实践"发布,新华社,2023 年 9 月 25 日

顺丰已将数字孪生技术部署于全国上百个中转场,为实际运作过程缩短 10% 以上的分拣时长,平均提升 8% 以上的产能;并通过数字孪生技术优化车辆路线规划,平均每一城市每月可节省 500 条以上的线路。

要在虚拟世界中建立一个与现实世界高度相似的孪生体,并让它真正提升智能算法的效果,大致分为四步: 首先需要采集现实世界的各种数据,了解现实世界的情况,然后依据从现实世界中获取的数据,在虚拟世界建立它的孪生体。有了这样一个和现实世界一样的虚拟孪生后,可以去验证任何业务场景。当数字孪生系统完成了对相关场景的验证后,它会把这个效果反馈给智慧算法,从而指导算法进行优化。如此循环往复,智慧算法的效果就会越来越好。



图表 46 数字孪生体构建

顺丰科技聚焦的基于数字孪生的优化,构建了数据采集—模型构建—决策优化建议—应用生产的闭环网络。在优化孪生体阶段,固定策略,优化孪生体;在优化策略阶段,固定孪生体,优化策略。



图表 47 基于数字孪生的优化

6.3.1 从点开始: 数字孪生中转场

在需求场景挖掘过程中,顺丰率先把目光聚焦于中转业务场景,希望通过采用中转场的孪生,提升中转分拣的效率。

一方面,分拣是决定快递物流效率的核心之一,一台设备平时每天大概要处理 65 万票快件,同时在双 11、618 这些高峰期,快件量会增长到 80 万票。如何让发往全国各地的快件以最快、最优的方式落到对应方向的袋子里,起到关键作用的就是分拣计划。另一方面,顺丰在中转环节对于 Al+loT 技术的应用已经相对较为成熟,大量的 loT 设备已经可以快速获取现实中场地内的各种数据,对于数字孪生的研发也有先天的优势。

基于业务场景的调研,顺丰科技团队发现小件分拣机存在明显的痛点:

产能缺口

通过对场地数据的分析、发现全网部分场地的小件区存在产能缺口。

产能瓶颈

部分小件区产能瓶颈在分拣计划。这部分分拣计划管理员凭经验设置、缺乏数据指导、缺乏复盘优化能力。

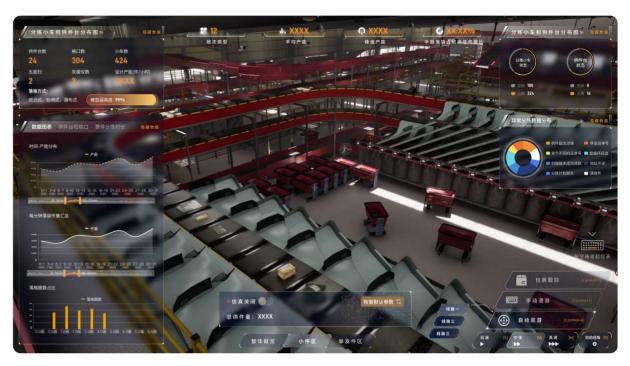
资源浪费

为解决小件区少量产能溢出的问题,场地会选择多开启一台或多台环形分拣机以弥补产能缺口,每台分拣机需配套 10+ 人 / 班次、造成人员、设备等浪费。

在此业务背景下,顺丰科技基于 Unreal Engine(虚幻引擎)平台,根据业务流程及流程自动化现状,建立和真实场地高度逼真的数字孪生系统,同时从 3D 层面、逻辑层面全方位引入各种约束条件,为分拣计划的优化提供真实可靠的验证环境。顺丰科技自研构建出高逼真度的数字孪生中转场,不仅仅是看起来长得像,内里的数据核心、机理核心都达到了高度的逼真程度,整体逼真度达到了 99% 以上,足以反映现实世界真实的物理情况。

在小件分拣计划优化这一场景中, 顺丰科技给出的解决方案是:

建立高度真实的中转场数字孪生体,在高度真实的虚拟环境中评价、验证真实环境中难以评价的策略、算法、方案,基于数字孪生中的评价、验证结果,优化对应的策略、算法、方案,提升对应指标、性能。



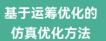
图表 48 顺丰物流数字孪生应用 - 小件分拣计划优化

顺丰通过这个数字孪生中转场,验证了一系列的问题,例如,新做的分拣计划好不好用;件多人少的情况下能否在规定时间内把快件分拣完;件量少时能否少开一台分拣机等等。

顺丰基于数字孪生仿真的分拣计划优化方法包含了三个层次:

基于大数据的人工、 仿真结合的优化方法 通过分析历史大数据,结合经验人工调整分拣计划,包括包流向的拆分与合并、 流向占用格口数量增加、位置调整

基于大规模仿真 搜索的优化方法 固定约束条件,降低搜索空间,设置搜索路径,以每天数百次的仿真速度,根据仿真结果动态调整分拣计划,寻求最优



基于中转场业务和场地设备逻辑建立数学模型,结合场地人工经验和机器学习 挖掘结果压缩空间,通过混合整数规划和智能优化算法进行多目标优化,生成 最优的分拣计划。

第一步 | 数据采集

采集现场环节的实时信息,包括设备状态信息;统计皮带线/摆轮的摩擦系数 μ 、速度 ν 等参数:分拣机的格口数量及分布信息。



第二步 | 模型构建

构建数字孪生体模型,包括上件台/皮带机//小件分拣机等设备的机理及数据模型;包裹/扫码/格口等的数据模型。所有构建的模型都是物理设备的



真实映射,具有高逼真度。



第三步 | 仿真验证

建立数字孪生平台,输入分拣计划进行验证。结合数字孪生体数据模型、机理模型,构建和真实高度逼真的小件分拣线孪生系统,对小件分拣计划进行多维度的仿真验证,输出测试验证及评价结果



依据仿真给出优化建议。将仿真结果进行反馈,明确分拣计划的性能瓶颈,

第四步 | 决策优化建议

并根据仿真结果,对分拣计划进行优化,最终实现将数字孪生验证过的最优分拣计划用于场地实际分拣

原本,在真实的中转场中,验证 1 个班次的分拣计划需要一整天的时间,还需要现场多个工作人员协调配合、投入测试包裹,既浪费时间也浪费精力。现在,利用该技术,可以 1 天在虚拟环境中迭代验证并优化 1,000 次分拣计划,实现了几乎零成本、高质量的切换。快速的反馈、优化,让数字孪生场地输出的分拣计划工序更流畅、布局更合理,中转场的产能得到了迅速的提升,包裹在中转场流转的速度大幅提升。

每一个中转场的规模大小、设备流程都会根据自身的业务情况,因地制宜地进行设计。而数字孪生也会基于每一个中转场个性化的情况,针对性输出优化的策略。个性化需求总是与快速规模复制总是有天然的矛盾关系,而顺丰通过将孪生体中各个设备、流程进行模块化处理,并按照各个场地的数据微调各个模块化模型,实现了数字孪生技术的快速复制。截至 2023 年 11 月,顺丰基于数字孪生技术的小件分拣计划优化已实现广泛落地:已完成上百个数字孪生分拣机模型搭建,小件分拣计划优化数字孪生解决方案已在全国数十家中转场部署应用。

综合来看,基于数字孪生技术的小件分拣计划优化为物流业务带来了巨大价值:

降低验证成本, 缩短落地时间

数字孪生提供了真实的评价验证体系,突破了复杂系统的评价难、验证难的瓶颈,以极低的人力、物力投入,数千倍的验证速度实现效果等同于真实环境下的验证。效果好、低成本的评价与验证能力为优化提供了先决条件。

提升场地产能上限

通过优化分拣计划,提升小件分拣 区的产能,减少回流,提高分拣质 量,此外还能提高人效,降低能耗, 提升时效。

规模化复制

通过搭建数字孪生平台,形成中转场小件区自动化分拣数字孪生解决方案,可为其他场地、其他系统提供类似的服务。未来还将成为解决算法/系统在小件区产能问题上的通用方法论,用于解决公司实际问题,创造收益。

第六章 | 顺丰物流数字孪生创新应用

6.3.2 由点及面: 数字孪生物流网络

随着单点的数字孪生中转场逐渐趋于成熟,顺丰将目光投向了更复杂、更有价值也更具挑战的物流网络的数字孪生。顺丰在全网有上万个网点、中转场,物流网络规划就是让场地与场地间建立连接。如何规划最合理的线路,以最低的成本、最高的时效完成货物在场间的运输,成为数字孪生的又一个命题。

顺丰科技对于物流网络优化这一需求场景进行了调研。调研发现,当前物流网络在路线规划和运力资源管理两方面存在困境:

路线规划

当前规划排线依赖人工经验,且规划场景多、难度大。此外在节假日、高峰期等时段,线路变动大,需要频繁进行线路调整。

运力资源管理

在路线规划需要频繁调整的背景下,外包供应商合同、车辆往返和自营司机排班等都将受到影响。人工组合下的车包不一定是最优方案,此外,规划容易未充分考虑车辆资源池和场地特殊性,造成需求车辆不够或车辆无法进入场地等问题。

在物流网络优化这一场景中,顺丰科技给出的解决方案是:将网点、站点、中转场等现实中的物理实体,在虚拟世界抽象为一个个具备各自不同特征的节点,并将其按照现实中的样子串联,形成数字孪生的物流网络。当一票票同样具有重量、体积、时效等特征的虚拟快件流转于这个数字孪生物流网络时,就能模拟出这些快件的完整轨迹。通过这个孪生体反馈的数据,顺丰就能够让智能算法计算推理出快件最佳的运输路径,合理的安排车辆、场地、人员等资源。

顺丰数字孪牛物流网络优化解决方案的特点如下:

在地区特异性和全网通用性之间的矛盾与平衡中,抓住地区特异性

顺丰将待优化的线路做了进一步的细分,例如常规线路、CBD/ 工业区派送、大营运模式等。针对不同的线路类型,设置不同的约束条件,进行精确建模,开展针对性的优化。

广泛的约束条件设置

在约束条件设置中,包括地区约束,如线路时效、车包往返、集中到车、载货量、车辆资源、变更成本等;也包括通过视觉识别技术的车厢装载图像识别。此外,针对一些难以描述的参数,顺丰科技采用历史数据,如车辆调度、装卸过程、装载率等,通过机器学习进行参数学习。

大量的子模型增强模拟仿真的可靠度

顺丰科技数字孪生物流网络优化包含了许多子模型,如包裹模型、车辆模型、场地节点模型和线路模型等,详细内容见下图。



图表 49 顺丰物流网络优化数字孪生体仿真建模

通过物流网络优化数字孪生体进行仿真推演后,最终输出线路排线优化差量表,以及装载率图,也会将线路结果通过可视化地图进行呈现。

物流网络优化数字孪生方案优势在于:

- 通过孪生仿真推演出现实缺失数据,并在具有与现实环境相似限制的虚拟环境中,对策略进行上千次验证,对算法经过千百次验证和迭代、最终超越人工优化的上限。
- 顺丰通过综合应用基于数字孪生的运筹优化技术,平均一个城市一个月可以节省 500 条以上的线路,孪生推荐的网络策略被采纳率达到 95% 以上,证明了数字孪生已经能够充分应用于大型网络场景。

在顺丰物流网络优化中,还包含一个参数的优化,即满载率优化。装载率是根据计费重量计算所得,但由于前端重量体积录入不完善和收费标准计算,该结果与实际车辆满载情况存在差异。机器学习满载率就是为了求出更真实的装载率,通过件量构成等因子,及图像识别推理,判断载货情况。在装载率现状判断基础上,通过数据处理,即加入 >100%(货物溢出)件量分布数据、输出重定义、定义问题为二分类问题、来判断货物是否溢出。

未来,顺丰在数字孪生物流网络方面将进行"纵向深挖,横向探索"。"纵向深挖"将探索更加深入的场景,"横向探索" 将会尝试更多、更广的与网络规划相关的优化。

6.3.3 横向拓展: 数字孪生货运机场 14

2022年7月17日,由顺丰与湖北省共建的亚洲首座、全球第四座大型专业货运机场——鄂州花湖机场正式投入运营。 截至2023年10月底,花湖机场共开通了44条国内货运航线、10条国际货运航线,每天在机场起降的货运航班近90架次,正逐步实现"一夜达全国,隔日连世界"的目标。

作为具有"三网融合"(天网 + 地网 + 信息网)网络优势和运营规模优势的智能物流运营商,顺丰自主研发构建的智慧机场数字孪生系统——云镜、为花湖机场的建设和运营提供了有力支撑。

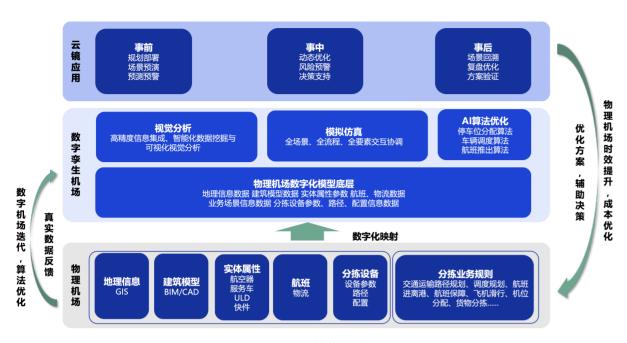
打造智慧机场中枢

顺丰融合应用大数据、仿真、AI、VA 视觉分析等技术,自主研发构建智慧机场数字孪生系统——云镜,通过对地理信息、建筑模型、作业实体、航班 / 物流、分拣设备及业务规则等物理机场运作数据的全流程数字化映射,使得物理机场与数字孪生机场数据同频交互和同步迭代优化,实现机场空侧机坪、快件分拣中心、机场陆侧交通运输三大业务板块的打通与协同联动。

作为智慧机场的中枢,云镜系统可深层解析机场运营管理系统规律,实现"事前规划预演、事中动态调整、事后复盘优化"的完整闭环。

⁷⁴ 参考文献: 顺丰云镜打造智慧机场,企业管理杂志, 2023 年 9 月 12 日

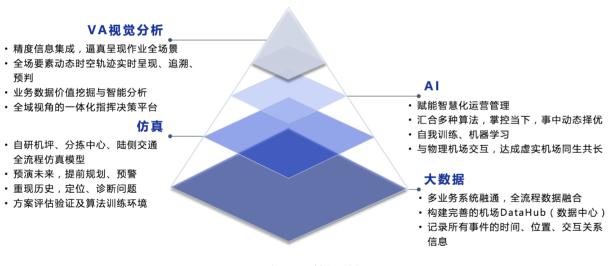
物流数字孪生白皮书 第六章 | 顺丰物流数字孪生创新应用



图表 50 云镜整体框架

"四核"奠定云镜基础

大数据、仿真、AI、VA 视觉分析四大核心技术奠定了云镜系统的基础。



图表 51 云镜"四核"

大数据是整个云镜系统的底盘和基础模块,整合机场、航司、枢纽、运营等十多个业务系统及地理空间、建筑、航班、物流、车辆、分拣设备等数据信息,形成机场 DataHub(数据中心),收集处理事前规划、事中实时、事后历史数据,精确记录机场各类实体的属性及运行数据,实现对机场运营管理的全要素、全时空、全流程追溯。

仿真是云镜系统的中枢,通过构建空侧机坪、分拣中心、陆侧交通三大业务板块的仿真模型,实现机场业务在虚拟 平行空间的全要素仿真运作。云镜仿真模型采用分布式架构,可同时运行百种仿真实例,为机场运营管理决策和算 - 法模型训练提供虚拟环境支持:仿真同时也是视觉分析的数据基石,实现与视觉分析的自动化、智能化融通。

AI 是机场智慧化运营的核心支撑,融合停机位分配、车辆调度、路径规划等多种算法,可实时、动态优化运营策略,减少对人工作业的依赖,避免人为因素导致的误差和风险问题,提升机场资源利用率、安全管理水平和运营管理效率,同时,通过 AI 算法促进物理机场与数字孪生机场的数据交互,实现虚实机场的同生共长和同步迭代优化。

VA 视觉分析是云镜的呈现和交互方式,可高精度集成机场各类业务运营信息数据,并基于预演、直播、历史回放等功能,将抽象的数据具象化,逼真地呈现机场作业全场景,将复杂场景化繁为简,提供更快速、准确、直观的策略指令;同时,运用 AI 算法对各类运营数据进行深入挖掘和智能分析,为机场运营管理提供全域视角的一体化决策指挥平台。

集成多维海量数据,构建机场数字孪生模型底盘

云镜融合运用 CAD(计算机辅助设计)、BIM(建筑信息模型)、GIS(地理信息系统)等技术,获取机场跑道/滑行道、转运中心、停机位、停车场、车道等高精度地理信息位置坐标,同时集成航空器、服务车辆、分拣设备等实体的海量数据,构建机场数字孪生模型底盘。通过底盘数据的关系处理,可以明确机场各类运作实体真实的地理空间与时间坐标,确定其在不同时间节点的位置和状态,使得大到建筑物、航空器、服务车辆、ULD(航空集装设备),小到每一票快件运行过程的事件时间、位置以及交互关系等信息数据都可精准定位。

全要素、全场景、全流程仿真, 还原机场业务场景

云镜仿真系统打破了单一业务板块模拟仿真的局限,能够对航班进离港、货物装卸、货物运输及分拣、陆侧交通运输等机场业务运作场景进行全要素、全场景、全流程仿真映射,逼真还原整个机场的业务运作场景,助力机场业务 各相关方的工作交互协同。



图表 52 机场业务运作全流程数字孪生

AI 算法赋能机场智慧运营

云镜数字孪生系统融合了停机位分配、车辆调度、车辆路径规划、特种车排班、航班推出时机、交通信号控制等 AI 算法,通过算法寻优、输出优化方案。

以停机位分配算法为例,可根据当日航班时刻、航班携带票件、航空集装设备、分拣中心生产计划、机坪运行状况等相关信息数据,在符合机坪安全使用规范前提下,综合考量航班滑行及货物拖运距离等多种时效因素,通过 AI 算法寻优、规划停机位分配最优方案、同时实时监控航班延误等信息并动态给出调整建议。

AI 算法不仅将停机位排布耗时缩短至人工无法企及的分钟甚至秒级别,更实现了人工排布经验难以做到的全部航班 全要素综合考量,大幅提升机位资源配置效率和机场运行效率。

随着机场投入运营,停机位算法已全面投入生产使用,每日输出时效最优停机位方案,算法的高效率、安全性、可靠性均已得到充分验证。同时算法伴随航班量增加、运行经验积累带来的业务规则不断完善,持续迭代升级。

航班推出时机算法则解决了人工指挥飞机推出超时及离港起飞排队等痛点问题,即在保障航班准时起飞的前提下,尽可能减少航班推出机位后在跑道头的排队等候时长,从而降低燃油消耗等运营成本,同时减少碳排放,助力机场绿色低碳发展。

三维视觉分析助力科学决策

云镜视觉分析系统采用可视化图形组件和数字引擎技术,搭建物理机场 1:1 比例的数字孪生场景,实现物理机场信息在数字孪生空间的全要素、多维度精准映射,可提前预演、实时直播、回放追溯全场航班、车辆、货物等实体的动态时空轨迹,并以直观生动的视觉效果呈现,最大程度降低业务相关方对海量业务数据的学习理解成本,助力业务相关方快速捕捉业务要点,做出科学决策。

云镜视觉分析系统具有友好的人机交互界面,具备常用分析指标的统计计算与结果展示、重点业务环节事件和关键 步骤时间追踪、特殊航班筛选与轨迹查询等功能,融合智能数据挖掘与可视化分析能力,以回溯—追踪—分析—解 决的关键步骤闭环管理,打造低学习成本、高真实度、多维度功能的视觉分析工具,为机场业务各相关方运营管理 决策提供直观生动、便捷易用的操作平台。

云镜数字孪生系统广泛应用于花湖机场从规划、建设到运营阶段的多种场景,为机场设计选型方案评估验证、资源 优化配置、安全高效运行等重要决策提供有力支撑。

01 分拣中心设计方案评估应用

快件分拣中心作为专业货运枢纽机场的业务板块中枢,其设计方案评审属于战略性决策,评审结果对未来的枢纽运营起到重要作用。

花湖机场在对快件分拣中心设计方案进行综合评估时,除了专家组基于历史经验的评审意见和成本概算,采用云镜数字孪生系统作为统一的衡量标尺,对各设计机构的设计方案进行仿真分析评估。

根据各设计机构提供的快件分拣中心设计方案,基于云镜系统分别构建各个方案的快件分拣中心仿真模型,还原其设计的分拣设备及设备间的关联关系;将各个方案的快件分拣中心仿真模型嵌入云镜系统,精准还原和记录每个模型内输入相同数据情况下,每一票快件从航班到港一卸机一拖车运送至分拣中心卸货口一经由各级分拣设备完成分拣作业和重新打包装箱一装机/装车离开机场的全流程场景;根据云镜数字孪生系统输出的数据结果,从时效性、应急能力、设备均衡性三个维度综合者量。遴选出综合水平最优的设计方案。

02 服务保障车辆资源投入评估与优化

服务保障车辆是机场空侧维持飞机保障、货物装卸与运输等业务流程顺畅的重要资源,仅凭过往业务经验和管理方法难以精准测算满足保障需求的车辆设备资源投入。

云镜系统通过分析货物拖运车、升降平台车、传送带车、污水车、牵引车、机组摆渡车等全类型保障车辆投放数量 的增减与运行时效等关键指标的变化关系,测算出各类车辆设备的准确需求数量和合理的组合方式,大幅提升了机 场空侧服务保障车辆资源的配置效率和效益。

此外,基于一定的航班、货量预测规划、车辆资源配置及任务时段,可通过云镜系统合理规划服务保障车辆充电时段的分配计划,实现所有车辆在完成当日保障任务前提下,可在低电价时段完成充电,从而降低车辆运行成本。

03 车辆路径规划与调度算法应用

对于货运机场而言,货物拖运效率对于整个货物中转过程至关重要。云镜系统运用 AI 算法,实时获取全场车辆位置和状态,通过智能分析任务类型、运输距离、任务时长等相关信息,自动指派最合适的车辆执行拖运任务,大幅提升车辆整体调度效率。

在路径规划方面,综合考量车辆、货物等目标位置和道路状况等多重因素,以 AI 算法快速分析计算、规划车辆最佳行驶路线及预估到达时间、缩短车辆等待时长和行驶距离。

此外,AI 算法还可以兼顾司机的工作时长、劳动强度等实际情况,灵活分配任务,使得每一名司机都能够承担适当的工作负荷。

04 陆侧交通设计方案评估应用

除了最核心的机场空侧设施,机场陆侧交通设施也是货运枢纽机场重要组成部分。在机场动工建设前,合理规划机场陆侧交通设施建设工程投入,使设计方案可以满足未来航班流、交通流的需要,并保证机场航班和车辆在高峰时段的安全、有序、高效运行,是陆侧交通设施设计规划的首要任务。

花湖机场应用云镜仿真系统模拟陆侧的通勤车、货车、客车等车辆在多个交通场景中的运行状态,对比分析多个不同的陆侧交通设施设计方案的优缺点,为方案评选、审定提供科学有效的方法、工具。

此外,云镜系统通过对花湖机场中、远期运营数据的科学分析预测,给出不建设机场南区陆侧高架桥的建议,为项目规划建设节省数千万元费用及相关管理成本。

05 发挥机场运营管理全流程"智慧大脑"作用

云镜系统的多维度功能、丰富的兼容场景,使其能够在货运枢纽机场运营管理的事前、事中、事后阶段均充分发挥"智慧大脑"的作用。

事前通过采集、分析航班计划、物流规划等相关数据,应用大数据、仿真技术精准模拟预演机场每日运行场景,提前为机场运行提供合理的停机位分配方案、保障资源配置等建议,同时预测、评估相关风险问题,帮助现场工作人员及时识别问题并快速作出正确响应、规避风险。

事中通过对航班、车辆、货物等业务系统实时数据的整合、分析管理,多维度掌控全场运行状况,并应用 AI 算法实时对机位动态调整、拖车任务指派等多个重要工作环节提供优化建议,支持机场货运枢纽运营管理科学决策,提升各业务系统、各环节的协同作业效率。

事后则通过仿真技术、视觉分析系统回溯重现业务运营场景,促进运营管理方案复盘优化,提升机场及货运枢纽运营决策水平和管理效率,降低运营成本。

作为一个多维度、多功能、多使命的复杂系统,云镜的设计开发和优化过程并非一蹴而就。伴随着花湖机场从规划、建设到投入运营,云镜系统从最初单一的仿真系统逐步迭代发展为目前的智慧机场数字孪生平台生态系统,通过全面数据融合、全要素/全场景/全流程仿真、AI 算法全局寻优、视觉分析直观呈现与智能交互,为机场全流程、全生命周期智慧运营管理提供全方位支持。

6.4 物流数字孪生在顺丰的价值与未来

6.4.1 基于场景开发的数字孪生应用支持物流运营变革与持续优化

顺丰关注数字孪生具备的四大能力:**验证能力**、**优化能力**、**迭代能力**和**可复制能力**,能够在物流领域,尤其是标准 化程度更高的快递业务中,寻找到合适的场景,为运营变革与持续优化带来有益价值:

验证能力

数字孪生技术为策略、算法、方案验证提供高度逼真的验证环境,结果真实、准确度高;且数字孪生虚拟场景远大于现实的加速比,可大大节省验证的时间、人力、物力成本。

优化能力

通过数字孪生技术建立和真实场地 / 区域高度逼真的孪生体,可从 3D 层面、逻辑层面全方位引入各种约束条件。基于约束条件,在数字孪生系统中建立数学模型进行优化。

迭代能力

基于数字孪生中的评价、验证结果、可迭代优化对应的策略、算法、方案、提升对应指标、性能。

复制能力

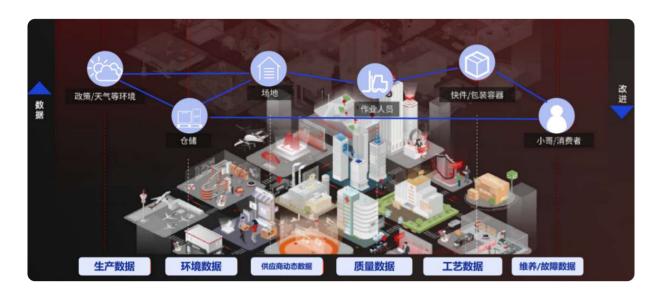
对模型做一些改动即可在短期内构建另一场地 / 区域的数字孪生, 可复制性强。

6.4.2 展望未来: 规模化应用, 提升行业整体质量

顺丰数字孪生愿景

用数据替代经验,让算法验证未来

顺丰希望通过全环节的真实运营、环境、资源数据,构建高度真实的虚拟顺丰数字孪生体,利用顺丰数字孪生体中的描述、诊断、预测、决策能力,赋能线下物流场景,持续优化规划与调度、工艺与运营。



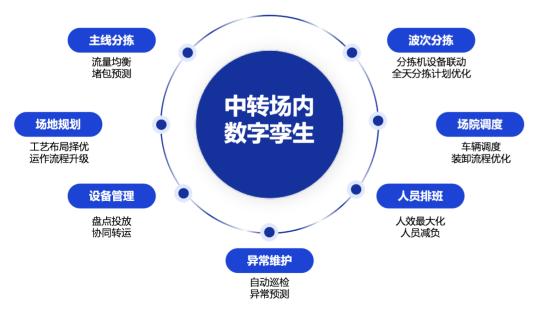
图表 53 顺丰数字孪生愿景: 用数据替代经验, 让算法验证未来

随着数字孪生技术在物流行业的应用越来越成熟,趋向规模化,数字孪生的场景也将从单点场景逐步扩展至全流程,甚至将从物流场景,扩展至上下游更为复杂的供应链场景中,通过建立可以控制、诊断、优化物理世界的数字世界,实现供应链全流程可视、可控、高效协同和持续优化。

从物流场景看,基于顺丰科技数字孪生研究与应用实例,未来顺丰将在两个层面实现应用场景扩张: 场内全流程数字孪生和物流全流程数字孪生。

场内全流程数字孪生

在中转场内,顺丰将拓展数字孪生应用场景至中转场内全流程,包括主线分拣、波次分拣、场地规划、场院调度、设备管理、人员排班和异常维护等。



图表 54 场内全流程数字孪生

物流全流程数字孪生

除了场内数字孪生,顺丰未来还将拓展应用场景至物流全流程,包括设备级数字孪生、场地级数字孪生、网络级数字孪生、以及上下游供应链数字孪生。



图表 55 物流全流程数字孪生

除了场景方面的进化,随着大模型等技术的发展,数字孪生也将更加有机地与相关前沿技术进行结合,降低数字孪生的应用门槛,提升数字孪生的应用效果。例如,未来语言大模型将成为数字孪生系统的一个入口,一个普通的工作人员只要对系统说"应用某年某日的数据,建设 A 场地的数字孪生体",系统便可以模块化、自动化生成相关孪生体,并基于各种数据,完成该工作人员需要的相关方案验证,输出优化后的智能决策方案。

顺丰科技 AloT 领域副总裁宋翔表示,顺丰作为中国物流与供应链的龙头企业,需要率先进入数字孪生这个在国际行业中备受瞩目的技术赛道,为中国物流企业对于数字孪生的研发与应用打好前站。同时,随着数字孪生技术的成熟以及价值的显现,整个行业的推广过程将变成一个共识形成和标准统一的过程,数字孪生应用成本的降低将成为必然。在资源排布、规划调度等更广泛复杂、计算量更大的场景中,未来将更快更准确地求出最优解,突破真正的智慧物流核心,带来可见的整体物流成本降低、避免产能浪费、更合理配置整个链路资源等效果,帮助提升中国物流在国际赛跑中的竞争力。

物流数字孪生技术的主要挑战和风险

第七章 物流数字孪生技术的主要挑战和风险

除了在制造业领域,数字孪生技术相对成熟外,数字孪生技术在其他应用领域,特别是物流和供应链领域,较之其他新兴技术,它更为年轻,全世界都还处于初级阶段,尤其是中国仍处于概念引进和验证阶段。但之所以全球企业对其如此着迷,最重要的原因是其出色的创建仿真的能力,可以轻松执行各种开发和测试工作,以及它对业务的分析洞察认知、预测以及创新的能力,可以帮助企业做出科学的决策并指导运营的优化,甚至创新技术及商业模式。但是,随着这个概念在商业和媒体的主流世界中开始变得越来越普遍,大多数企业对技术本身整体印象模糊不清。这不仅影响了企业对这个技术商业价值的认识,也阻碍了这一技术的发展和采用。本白皮书旨在引导企业对数字孪生,特别是物流和供应链数字孪生概念及应用架构,和其商业价值的正确认识,并且推动企业,特别是物流和供应链企业,采用该技术来驱动其数字化转型。这一章首先将分析若干在采用和实施物流数字孪生技术方面不正确的认识和做法,及其可能产生的风险 75 76。然后列举和分析了物流数字孪生技术的主要挑战,最后指出企业通向成功实施数字孪生技术的正确路线。

7.1 虚假错误数字孪生的风险

由于物流和供应链数字孪生技术是尚未成熟的新兴技术,加之人们对其还认识模糊,难免会出现对该技术的炒作,甚至会误把一般的数字化和传统的仿真技术也当作数字孪生,出现一些虚假错误的数字孪生,从而给企业数字化转型带来风险。下面将列举几个典型的案例。

7.1.1 数字孪生体不正确的风险

根据本白皮书第二章关于一般数字孪生及物流和供应链数字孪生定义,它首先是它对应物理对象的数字代表/表示/副本/镜像/模型。如果说数字孪生缺乏足够完整准确的物理对象的数据,它不能用数字完全地描述它的物理对象,这样的数字孪生体就无法给它的物理对象提供价值,甚至会产生错误的洞察和决策指导。特别是用数字孪生来表示复杂的无形的人机系统:物流和供应链。物流和供应链必须提供横向端到端各个环节及纵向各个部门的准确数据,以及外部的相关数据,否则不可能创建一个真实正确的物流和供应链数字孪生。这种缺胳膊少腿的物流和供应链数字孪生可能会造成误导物流及供应链计划/规划和运营的风险。

很显然,产生正确的数字孪生体依赖于企业的整体数字化变革,尤其是物流和供应链数字孪生更是依赖于跨行业、 跨系统、跨组织,甚至跨国家的在一个物流和 / 或供应链网络上整体数字化变革成果。

⁷⁵ 参考文献: 《数字供应链孪生研究报告》, 罗戈研究, 2020-07-11

[№] 参考文献: 唐隆基, 范围 3 碳排放管理的现状, 趋势和技术创新, 罗戈研究, 2023-06-25

7.1.2 使用数字孪生仿真未来场景的准确性风险

假设一个数字孪生能够获取足够的物理对象的数据并能准确完整地用数字表示它的物理对象。但如果此数字孪生采用了不准确的模型来仿真未来场景,或者采用了不适当的算法来分析预测未来场景,它就会产生不准确的洞察预测和模型,从而可能给其物理对象带来不准确甚至错误导向的风险。

因此要使数字孪生产生价值,光有一个正确完整的数字表示还不够,还必须正确采用人工智能、高级数据分析、模拟仿真等技术来分析和建模,然后将正确的洞察和预测用于优化它的物理对象。例如数字供应链计划孪生采用机器学习产生的综合一体计划用于改进企业的供应链计划,以达到降本增效的目的;又例如物流数字孪生利用物流仿真技术为供应链提供最优的物流规划等。第六章中顺丰采用机器学习方法来对物流网络设计数字孪生做仿真分析,从而获得了最佳的快递物流网络布局,减少了大量不必要的收派路线,不仅节约了成本,而且减少了碳排放,为公司和客户创造了极大的价值。

7.1.3 能力贫乏的虚假数字孪生的风险

尽管数字孪生技术已开始受到大多数企业和组织的关注,一部分企业和组织也开始行动,如开展概念论证,有些企业和组织(除顶尖的一些企业,如 GE、PTC、西门子等外)也声称正在投资和采用数字孪生技术。然而只有很少的企业真正理解数字孪生的概念、架构和应用价值,以及它的全部潜力。因此有些公司,无意中会创造出需要大量投资和努力的冒名的虚假数字孪生,它不会提供真正的数字孪生所支持的功能及商业价值,这些冒名顶替者对适应不断变化的技术环境和市场趋势的能力贫乏,反而会成为企业的数字陷阱,不仅不能使企业达到数字化变革的愿景,而且耗费公司的投资。Accenture 在其研究报告"中指出:落入数字冒名顶替者的陷阱是实现数字投资价值的一个非常现实的威胁。Accenture 对一系列年销售额超过 10 亿美元的公司的 1,350 名全球高管进行了调查。调查发现,大多数人表示难以实现价值,有些人完全失望:他们的数字投资回报率低于行业的总体资本回报率,超过 50%的数字概念验证(POC)无法扩展。企业不仅对数字化进程中运营效率的提高感到失望,那些转向为客户创造新价值的企业更是举步维艰。在调查中,78%的公司没有达到 10,00 多亿美元的预期收益。

Accenture 对制造领域冒牌的与真实的数字孪生进行了比较,其中冒牌的数字孪生仅限于产品初期的数字化和产品及流程的优化,因此仅具有有限的能力。而真实的数字孪生的数字化功能和优化贯穿整个产品的生命周期。

图表 56 冒牌的与真实的数字孪生的比较

上述比较对于物流和供应链数字孪生来说具有极大的启示。这意味着真正的物流数字孪生也需要贯穿某一场景或站点的全流程或全范围,建立高逼真度的模型,而不仅仅是针对某一业务场景的单一节点,或某一物流站点的模拟仿真。顺丰的物流中转场和小件分拣计划数字孪生之所以成功,是由于它们超越了物流仿真。顺丰基于 Unreal Engine(虚幻引擎)平台,对现实中转场内的数据,对设备、人员、流程进行了数字孪生的建模,自研构建出高逼真度的数字孪生中转场,它不仅仅是看起来长得像,内里的数据核心、机理核心都达到了高度的逼真程度,整体逼真度达到了99%以上,足以反映现实世界真实的物理情况。

DICITAL THREAD DICITAL IMPOSTOR DICITAL TWIN (5) 概念管理 需求 需求 优化的能力 ② 设计系统工程 可重复 可重复 进一步优化设计基于: 使用部件 供应链集成 使用部件 材料 • 材料成本 材料 规格 仿真/虚拟样机 规格 • 供应商(地区、合规性、风险等) 供应商 • 可重复使用的零件、现有库存和 制造工程 库存 数量考虑 生产&质量 • 制造方法 能力 产品发布 局限的能力: • (调整后的与传统对比)和工厂时 计划 • 基干需求产牛设计选项 上市/发 间表 产品使用体验 • 基于材料规格优化设计 • 产品发布时间表/地区 **※** 维护&服务 (如重量、再用等) • 基于历史产品年龄和同类产品性 历史产 ⟨ ∂ 退役 能指标的功能优先级 • 基于同类产品的专业服务记录的 可服务性

[&]quot;参考文献: Horst Groesser, Mike Duncan, Lisa Jackson, Is Your Digital Twin A Digital Impostor? Accenture, 2019

7.2 物流数字孪生技术的主要挑战

数字孪生在物流中的好处是显而易见的。它们能提高运营效率,提供预测能力并促进主动决策。所有这些都有助于组织节省资金。这些好处覆盖整个供应链,从供应商到最终客户,创建一个无缝、高效、敏捷的物流网络。

然而,所有新兴技术都存在采用障碍和技术挑战。艾瑞咨询在其研究报告 ⁷⁸ 中给出了一般数字孪生面临的主要技术 挑战:

数字孪生技术现面临主要挑战

商业模式不成熟

- 对企业而言,数字孪生落地需要对研发、生产、供应等流程进行改造,需要大量的资金和团队构建完整的技术栈和服务内容,投资成本高导致用户需求不旺盛
- 对厂商而言,各行业客户的需求差异大,解决方案均为定制化开发,复制性差,难以高效推广,且成熟的方案需长期迭代优化,导致交付成本高难以实现盈利

标准体系未统一

- 业内对数据层面的标准未统一,如采集尺度、参数、格式、周期等缺乏统一的数据标准,对数据融合与对接提出较大挑战
- 技术框架/技术协议不统一,在数字孪生项目集成和对接各孪生体过程中,软硬件产品缺乏互联互通标准
- 数字孪生项目建设内容、交付要求未有统一的标准, 大部分项目落地质量参差不齐,限制了数字孪生发展

支撑技术要求高

- 数字孪生对处理芯片、计算机设备都提出了高要求,由于 孪生设计的模型与数据规模大,需要计算机硬件具备强大 的处理与计算能力
- 数字孪生对可视化呈现有高互动、高沉浸、高清晰的要求, 终端设备的传输能力、显示技术面临更大挑战
- 核心软件自主可控能力差,以CAX为代表的基础软件、以 UE/Unity为代表的渲染引擎仍严重依赖于国外

主要挑战

▶ 数字孪生需要大量的数据,包括传感器数据、图像数据、 语音数据等,但这些数据可能存在质量不高或不完整的情况,导致数字孪生的准确性受到影响

数据能力不完善

- 数字孪生需要的数据格式和质量可能存在差异,需要在数据处理阶段进行大量的标准化和清洗
- 数字孪生技术涉及大量敏感数据,如产线布局、设备信息等,如何保证数据的安全和隐私成为关键

图表 57 数字孪生技术面临的主要挑战

上图展示的数字孪生技术面临的主要挑战当然也是供应链和物流数字孪生应用所面临的主要挑战。然而这些对于供应链和物流来说是远不够的,并且没有抓住这个行业的特征和根本问题。

几十年前,电路规划和性能测试已经应用了数字化设计(如 CAD)和"数字孪生";建筑师建造了这座大楼,并在大楼的"数字孪生"(建筑蓝图和模型)上布置了暖通空调和管道系统;一家公司在对"数字孪生"进行大量模拟和动画制作后,才投资了一个新的配送中心;牙医扫描了口腔并计划了牙齿的"数字孪生"的治疗;飞行员学习了如何在飞行模拟器上与敌人战斗或安全地运送乘客 上述各种数字模型、模拟器等的终极就是数字孪生。供应链和物流世界刚发现数字孪生概念不久(2019),此领域距离那些已有数十年历史的例子,在细节和复杂程度上相差很远。

戈研究发布的《数字供应链孪生研究报告》"早已指出了这个区别:大多数成功的数字孪生示例都在物理结构上使用硬科学,即它们的物理对象大多有精确的几何形状和尺寸,有些并具特有的物理特征,如重量、温度等,而且都易于用数字来描绘和模拟其几何形体,简而言之,这些物理对象相对容易产生一个高保真的数字孪生体。而供应链是硬科学和软科学混合的复杂且动态的人机系统。供应链和物流的运营往往是一个复杂的人机共同参与的系统工程。然而,用节点和弧线来表示供应链的老式数字表示就像画一个简笔画。具有强大计算能力和云、物联网等几乎无缝集成的当代技术可以更精确地表示供应链,并创建有用的数字孪生。因此,物流数字孪生面临的主要技术挑战包括以下六个方面:

人们必须看到供应链和物流领域和那些数字孪生已经采用多年的领域,特别是工业制造,有着一个根本的区别。罗

物流装备现代化

物流的设施装备,包括港口、仓库、转场、配送中心、运输工具等硬实体要实现现代化、自动化以及物件(如货物产品、包裹等)的包装和识别的标准化。要广泛采用物联网(IoT)传感器,它们是硬设备的智能终端,能使"死"的硬设备具有一定智慧(即能实时感知)。物联网传感器在提供实物资产的实时数据方面发挥着至关重要的作用。这些传感器可以监控货物、车辆和设备的状况、位置和状态。它使人、机、物能互相感知,同时人机物能感知环境(如温度、气候等)。这主要解决供应链和物流的实体可被数字化并与数字化虚拟孪生可动态交互的问题。

物流全面数字化

包括人、机器、环境、网络等物流物理对象的全面数字化。这可以是局部的,如仓库、港口的物流数字孪生;也可以是全局的,例如用于决策的数字孪生技术。以此首要解决如何精确表达全部或部分供应链和物流(即数字建模)。数据是数字孪生的灵魂。来自各种数据源(例如 GPS 设备、RFID 标签、传感器和库存系统等)的数据需要设计各种接口,被收集并集成到统一管理的数据集中。该数据作为构建虚拟表示的基础。数字孪生模型不是静态的,而是不断变化的,需要相关的实时数据。提供来自多个来源的所有信息是一项具有挑战性的任务。此外,物流中物件和载体处于一个地理环境中常在移动状态,物流不像有形的固体,而像一个复杂多变的流体,因此对于物流的移动中的地理环境感知和移动状态的数据采集非常重要且极具挑战。

物流虚实互联化

这包括采用云、物联网、5G、边缘计算、无线技术等网络及数字技术来建立强大的硬网络和软网络的具有强大互联和实时通讯机制的基础设施,以解决物理实体与其对应的数字孪生之间的实时和/或分时的通讯和交互。

物流管控智慧化

这包括实现局部和全局的虚拟模型,及交互数字系统和物流实体智慧化,也就是要在数字化的基础上,进一步采用现代模拟仿真技术、人工智能、高级分析、决策智能等新兴数字技术,综合数字管理平台、智能控制塔等使供应链和物流"活"起来。而仿真模型用于复制数字孪生环境中物理对象或过程的行为。这些模型有助于预测物流链某一部分的变化将如何影响整个系统。

⁷⁸ 参考文献: 艾瑞咨询, 中国数字孪生行业研究报告, 2023 年 4 月

⁷⁹ 参考文献: 《数字供应链孪生研究报告》, 罗戈研究, 2020-07-11

缺乏标准和框架

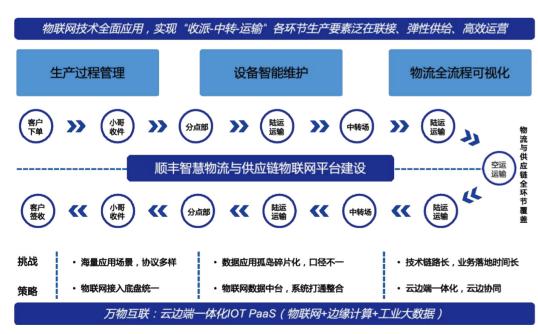
目前已有的标准和参考框架(见 2.2.3 节)大多是为制造业、智慧城市、建筑等行业所制定的,还尚未见物流数字孪生技术的标准和框架。这也给实施带来一定困难。一般,标准和框架都是建立在大量成功和成熟的用例和理论研究之上,但显然在供应链和物流领域这两者都缺乏。

缺乏数字化人才

采用新兴数字技术进行供应链和物流的变革和创新,人才是关键,尤其是采用数字孪生这种复杂而新兴的技术更是需要专业的数字人才。然而供应链和物流领域的人才,尤其是数字化人才短缺是一个世界性的问题,且在中国尤甚。据统计,目前国内数字化人才缺口达 2,500 万到 3,000 万,其中包括供应链和物流领域。这是该领域数字化转型,特别是采用像数字孪生,人工智能这类新兴战略件技术的一个障碍。

上面只是物流数字孪生面临的主要技术挑战,还有一些挑战也需要考虑,如与数据相关的问题(信任、隐私、网络安全、融合和治理、获取和大规模分析),以及由于所需的传感器和计算资源数量增加、实施成本高的问题等。

如果物流企业已确定要采用数字孪生技术作为其公司数字发展战略的一部分,那么这些企业如何应对上述的挑战呢? 首先要充分认识数字孪生技术所需要的技术基础,夯实企业的数字基石,招募人才,也包括与专业硬软件供应商合作等方式。顺丰最近发布了"首个在物流领域大规模应用的数字孪生实践",这不是偶然和碰巧的成功,首先是顺丰将采用数字孪生技术作为其公司数字化发展战略的一部分,并在创建数字孪生应用的基础技术上耕耘了多年。下图描绘了顺丰物流数字孪生成功最重要的数字基石之一: 万物互联 80,由于物联网技术全面应用,顺丰实现"收派 - 中转 - 运输"各环节生产要素泛在连接、弹性供给、高效运营,从而为物流数字孪生成功打下了坚实基础。



图表 58 顺丰物流数字孪生成功的数字基石之一 81

81参考文献:胡典钢,丰物互联:云边端一体化物联网平台建设,顺丰科技,2023-06-30

7.3 企业通往采用数字孪生成功的道路

在夯实数字基石的同时,企业要仔细规划,制定数字孪生发展的路线图。根据企业面临的困境和需优先解决的问题, 先从局部做起,选择数字化基础好的部门,如中转场、仓库、港口等作为起点,逐步发展推进。下图给出一个创建 数字孪生的路线图,可供实施物流数字孪生时参考。



图表 59 实施数字孪牛的旅程 82

麦肯锡在其研究 ⁸³ 中提出一个构建和扩展数字孪生需要采用的三步方法: **创建蓝图、构建初始数字孪生,然后增强 其功能**。

创建蓝图

让利益相关者对数字孪生的清晰愿景保持一致是至关重要的第一步。蓝图应定义组织将追求的孪生类型、构建它们以最大化价值和可重用性的顺序、它们能力的发展方式以及它们的所有权和治理结构。以下八个关键问题的答案可以帮助领导者制定这一蓝图:

- ① 数字孪生的总体愿景是什么?
- ② 哪对数字孪生为我们的企业提供了最大的杠杆作用和重用机会?
- ③ 风险的总价值是多少?
- ④ 我们应该首先交付的最高价值、最可行的用例是什么?将价值归因于数字孪生的过程是什么?
- ⑤ 我们需要收集哪些数据层和属性?
- ⑥ 我们将如何获取数据并建立数据模型?
- ⑦ 哪些模型将建立在数据之上? 什么是最终状态架构?
- ⑧项目团队将如何与业务用户合作,交付其支持的数字孪生和用例?

[®] 参考文献: Lu WANG 等,Digital twin-driven smart supply chain,Frontiers of Engineering Management,2022, 9(1): 5-70

⁸² 参考文献: The Digital Twin Journey: A Smooth Pathway to Digital Innovation, Mevea, 2019

⁸³ 参考文献: Joshan Abraham 等,Digital twins: How to build the first twin? Mckinsey, 2022-10

构建基础数字孪生

蓝图到位后,项目团队将在三到六个月内构建基本的数字孪生。构建阶段从组装核心数据产品开始。为此,数据团队设计结构化和非结构化数据,以确保其质量和可用性。这反过来又促进了可视化的发展,并允许数据科学专业人员构建一两个初始用例,以生成额外的数据和见解,并创建早期的数字孪生。组织不需要完美的数据或最先进的技术平台来开始,我们已经看到具有不同数据水平和平台成熟度的公司成功构建了数字孪生。然而,构建成功的数字孪生有几个关键点:

- ① 建立一个强大、平衡的数据模型;
- ② 从一开始就确立治理和利益归属;
- ③ 确保跨团队参与。

提升能力

一旦数字孪生的初始用例启动并运行,就可以通过添加更多数据层和分析来扩展其功能以支持新用例。在这个阶段,公司通常会通过使用人工智能和先进的建模技术来将孪生从简单地表示资产、人员或流程提升到提供仿真和方案决策。

数字孪生已经成为领先公司的关键业务工具,任何数字化基础好的组织,包括供应链和物流,都可以使用该技术。因此,我们预计数字孪生将很快成为每个行业优化流程和决策的关键工具。如今,高管们不仅投资数字孪生,还将企业元宇宙视为"多久"而不是"是否"的问题。在短期内,这些努力可以提供巨大的价值,使公司能够为数百个用例整理数据(只需一次),从而提供对复杂业务问题的深入见解并实时优化结果。从长远来看,这些投资为企业元宇宙奠定了基础,它将改变每个行业每个组织的运营方式,并释放数据和人工智能的全部潜力。

展望未来发展趋势

第八章 展望未来发展趋势

8.1 数字孪生是供应链和物流战略性技术趋势

8.1.1 Gartner 的八大供应链战略性技术趋势

Gartner 自 2018 年每年发布一份八大供应链战略性技术趋势的研究报告,旨在帮助供应链的专业和管理人员更好地了解供应链技术重点、举措、价值和挑战。同时帮助他们了解当下如何使用供应链技术以及如何投资未来的数字供应链。下面是前 5 大技术趋势:

技术趋势	排名 (最高/最低)	出现次数(2018-2023)
人工智能	1/6	4
数字供应链孪生 (全局 / 整体的供应链数字孪生)	2/4	4
机器人过程自动化 / 超级自动化	1/4	5
高级分析 / 边缘计算和分析等	2/5	5
沉浸式技术 / 体验 / 应用	7/3	4

图表 60 前 5 大技术趋势 84 85

此外,Gartner 每年对供应链技术和主题(物流和规划)做出未来发展趋势的中长期预测 ⁸⁶。文章第 3 条正是关于数字供应链孪生(全局 / 整体的供应链数字孪生)的预测:"到 2026 年,无论是通过更广泛的业务网络,还是通过计 / 规划应用程序或智能数据湖,都不会出现提供真正数字供应链孪生的主导领域"。本白皮书第三章已论述了供应链数字孪生包含物流数字孪生,因此我们可以视其为供应链和物流数字孪生的预测。该预测告诉我们迄今还没有出现真正的全局 / 整体的供应链或物流数字孪生,确实存在的只是局部 / 部分数字孪生,通常只覆盖几个特定的用例,如中转场、仓库、港口等的数字孪生。

8.1.2 ASCM 2024 年供应链十大趋势

今年9月,美国的国际供应链管理协会(ASCM)发布了2024年供应链十大趋势87,其中**数字供应链**占据了头把交椅,反映出在供应链管理中利用大数据和分析的重要性日益增加。同时也需要认识到全球的供应链数字化水平仍参差不齐、需要强调它不是一个选项、而是所有供应链组织战略的首要目标。

8.1.3 DHL 最新物流趋势雷达

DHL 研究团队自 2012 年开始每两年发布全球物流发展趋势雷达研究报告 (LTR),分析和预测物流技术发展趋势。 2018 年发布的第 4 版 LTR,第一次写入数字孪生,之后数字孪生被作为顶级物流技术趋势连续出现在第 5 版和最新的第 6 版 LTR⁸⁸。



图表 61 DHL 最新物流趋势雷达 (2022/2023)

⁸⁴ 参考文献: 唐隆基, 供应链的未来发展趋势和预测, 在 SiMPL2023 大会上做出的题演讲

B5参考文献: Anselm Busse 等, Towards Digital Twins of Multimodal Supply Chains, MDPILogistics 2021, 5, 25

⁸⁶ 参考文献: Predicts 2023: supply chain technology, Gartner, 2022

⁸⁷ 参考文献: Brian Straight, ASCM Releases Top 10 Supply Chain Trends for 2024, 2023-09-15

⁸⁸ 参考文献: DHL The logistics trend radar-6thedition, DHL, 2022-10-26

过去几年,传感器技术的日益多样化和应用,以及云计算和人工智能的发展,使人们能够为各种物体和系统创建更准确的数字孪生。这一进展引起了包括物流业在内的许多行业参与者的注意。尽管赋能技术已经成熟,供应链中的数字孪生实现也有所增加,但 DHL 认为,这一趋势在 5-10 年才能成为主流技术。随着物流组织开始采用该解决方案,数字孪生从单个应用程序转移到整个生态系统,从运营中的资产到整个供应链的所有内容端到端的集成,还需要一段时间。数字孪生的趋势在物流趋势雷达中保持了适度的低影响,帮助物流组织在不显著改变供应链整体特征的情况下解决效率、弹性、环境和可见性需求。

综合来看,主流研究机构和行业领先企业都认为物流数字孪生将是未来行业重要的技术趋势,同时我们也看到更多的应用实践在持续落地。但技术的发展需要周期,物流数字孪生将在未来较长的时间跨度内,根植于业务土壤,在物流单体/局部领域逐渐发展壮大。当然,我们期望在未来实现物流与供应链全局、端到端的数字孪生。这需要DHL、顺丰这样的行业领先企业躬身实践,为物流数字孪生的行业应用开辟道路。

8.2 供应链和物流数字孪生技术的成熟度

许多研究机构、企业和个人从不同行业、视角和维度对数字孪生技术的成熟度进行了研究。数字孪生技术的成熟度研究有助于该技术的发展,并帮助采用者持续地改进这项技术的价值创造。此外,数字孪生技术成熟度是构建数字孪生技术框架时需要考虑的关键因素,因为业务成果是根据成熟度级别定义的。成熟度越高,数字孪生技术框架就越复杂。

8.2.1 几个典型的数字孪生技术成熟度模型

2018 年 David Socha 在研究报告 ⁸⁹ 中介绍了一个成熟度模型,描绘了数字孪生从独立应用程序到未来企业核心的可能演变。

2019 年田锋在报告中 ⁹⁰ 提出一个数字孪生体成熟度模型。他指出:数字孪生体不仅仅是物理世界的镜像,也要接受物理世界实时信息,更要反过来实时驱动物理世界,而且进化为物理世界的先知、先觉甚至超体。这个演变过程称为成熟度进化。



图表 62 数字孪生体成熟度模型

2022 年中国信通联合联合 OSP 数园区和中国电子技术标准化研究院发布了《数字孪生城市成熟度研究报告》⁹¹ 并提出数字孪生城市成熟度等级模型:自低向高分别为一级(初始级)、二级(应用级)、三级(集成级)、四级(优化级)、五级(引领级)。

亚马逊总结了使用亚马逊云服务(AWS)的许多数字孪生案例,提出了具有 4 个级别的数字孪生水平指数的成熟度模型 ⁹²: **L1 描述性**,侧重于工程设计和视觉呈现; **L2 信息性**,侧重于物联网集成、资产历史和维护数据; **L3 预测性**,侧重于对未来数据的预测以及基于历史数据了解未来状态; **L4 鲜活性**,专注于可更新的模型以推动可操作的见解。

2023年艾瑞咨询基于虚实关系及互动功能,在其《中国数字孪生行业研究报告》提出了数字孪生5个等级划分模型:

100

⁸⁹ 参考文献: Brian Straight, ASCM Releases Top 10 Supply Chain Trends for 2024, 2023-09-15

⁹⁰ 参考文献: 田锋, 数字孪生体成熟度模型, 数字孪生体实验室, 2019-12-19

[&]quot;参考文献:数字孪生城市成熟度研究报告,中国信通院,OSP数园区,和中国电子技术标准化研究院,2022

[🤫] 参考文献: Adam Rasheed, Digital Twins on AWS: Unlocking business value and outcomes, Amazon, 2022-03-04



图表 63 数字孪生等级划分模型 93

综上介绍的几个典型数字孪生成熟度模型,它们的最高一级都是富有智慧而自主的数字孪生,虚拟和实体之间的互动是实时和自动的。要做到这一点,虚拟孪生和物理实体之间必须都要高度智能化。局部场景的数字孪生能达到,但全局 / 整体数字孪生,如供应链物流、智慧城市等复杂的人机系统要达到数字孪生的最高级阶段,就像真正的无方向盘自动驾驶汽车的实现一样,还要走很长一段路,但企业界都非常期待那一天的到来。

8.2.2 数字孪生网络及其成熟度模型

由数字技术(如物联网)连接在一起,互相可以通讯的数字孪生就形成了数字孪生网络。国际数据公司(IDC)数字孪生的成熟度模型引入了数字孪生网络的概念,并把数字孪生成熟度分为以下五级:



图表 64 IDC 的数字孪生成熟度模型

8.2.3 供应链和物流数字孪生技术的成熟度

目前,供应链和物流数字孪生技术的成熟度研究不多。本节将提出一个供应链数字孪生的五级成熟度模型。该模型以与供应链成熟度同步进化的思维方式将供应链数字孪生成熟度划分为以下五级,其中每一级对应一个水平的供应链:

供应链数字孪生成熟度		供应链成熟度水平
 初级供应链数字孪生	\rightarrow	水平 1:孤岛活动
功能级供应链数字孪生	\rightarrow	水平 2: 功能规模
企业级供应链数字孪生	\rightarrow	水平 3: 功能集成
网络级供应链数字孪生	\rightarrow	水平 4: 扩展协作
生态级供应链数字孪生	\rightarrow	水平 5: 生态编排

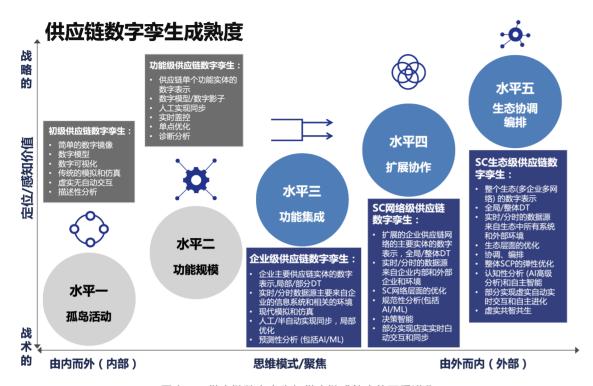
图表 65 供应链数字孪生成熟度与供应链成熟度的对应关系

此处供应链数字孪生包括局部/部分供应链和物流的数字孪生,以及全局/整体的供应链和物流的数字孪生。

供应链数字孪生成熟度模型的构建基于以下两个方面的研究:

- ① Gartner 在其《如何通过供应链基准提高供应链效率》的研究报告 ⁹⁴ 中呈现了其供应链成熟度模型,该模型将供应链成熟度按以下两个维度划分为从水平 1-5 的五个等级:
- 定位 / 感知价值: 从战略到战术;
- 思维模式 / 聚焦: 从内部到外部。
- ② 供应链数字孪生与供应链成熟度是同步进化的。

⁹³ 参考文献:艾瑞咨询,中国数字孪生行业研究报告,2023 年 4 月



图表 66 供应链数字孪生与供应链成熟度的双重进化

从上图可见, 供应链实体的成熟度分为五级阶梯, 而供应链数字孪生将随着供应链实体的成熟进化到它相应的成熟度。由于虚实的对应关系, 一个供应链成熟度在水平三的企业不可能构造出具有水平四及以上成熟度的供应链数字孪生。目前来看, 大多数供应链物流企业成熟度处在水平三或之下, 其供应链数字孪生成熟度也只可能在水平三或之下。少数供应链物流数字化领军企业的供应链成熟度在水平三或四, 它们的供应链数字孪生水平不会超过四级。世界上只有极少数企业在进军五级供应链成熟度, 它们的供应链数字孪生有望同步进阶到五级。

显然,上面所定义的供应链数字孪生与供应链成熟度将有助于企业审视自身的成熟度现状,从而为企业制定双重进化的战略提供指引。

8.2.4 供应链和物流数字孪生技术的发展周期曲线

著名研究机构 Gartner 常用它独创的供应链技术发展周期曲线来预测各种新兴技术的发展趋势 %。介绍了几种 2023年 Gartner 有关供应链及供应链执行数字孪生的发展周期曲线,现列举以下:

- 在 2023 年供应链计划(SCP)技术发展周期曲线中,数字供应链孪生(全局 / 整体的供应链数字孪生)已逼近曲线高峰,成熟期为 5-10 年;
- 在 2023 年供应链战略发展周期曲线中,新出现的客户数字孪生位于曲线左侧最底端,预计 5-10 年成熟;
- 在供应链执行技术发展曲线中,仓库的数字孪生仍然处于曲线左侧中部位置,预计 5-10 年成熟。

供应链的技术领导者可以使用 Gartner 有关供应链及供应链执行数字孪生的发展周期曲线来帮助转变他们的供应链及物流数字孪生技术的能力。它是各种功能和基础技术成熟度和可行性的指南,可以改变现在和未来供应链及物流技术的方式。

%参考文献: 唐隆基,全球供应链的未来发展趋势,罗戈研究,2023-11-16

8.3 数字孪生技术发展趋势

本节介绍数字孪生技术的若干发展趋势。这些发展趋势将有助于加速数字孪生技术的应用和提升该技术的价值。

趋势 1 - 可组合、能力驱动

2020 年 2021 年,无代码应用组合平台(XMPro)基于 Gartner 的可组合应用框架 %,创建了"可组合数字孪生"的概念 %,这仍然是 2022 年及之后的一个关键趋势。

打包业务功能 (PBC) 是可组合数字孪生的构建块,我们将看到组成这些 PBC 的功能打包成为焦点。XMPro 在数字孪生联盟的自然资源工作组中创建了数字孪生功能周期表,以帮助最终用户为其数字孪生用例识别和选择正确的功能。



图表 67 数字孪生能力周期表

能力周期表包括 6 大类共 62 个数字孪牛能力:

• 数据服务: 第 1-16 号能力

• 用户体验: 第 39-51 号能力

集成:第17-22号能力管理:第52-55号能力

智能:第 23-38 号能力诚信可靠:第 56-62 号能力

^{**}参考文献: Natis et al, Use Gartner's Reference Model to Deliver Intelligent Composable Business Applications, Gartner, 2020-10-14

⁹⁷ 参考文献: The Value of a Composable Digital Twin, XMPRO, 2021

它将启用能力驱动的方法来定义可组合数字孪生的要求,因此它将加速需求定义过程,并确保重点仍然放在能力交付上。

趋势 2 - BlockTwin (基于区块链的数字孪生) 新兴

罗戈研究早于 2020 年在 % 中指出: 虽然数字孪生长于用数字表示物理对象,基于实时数据分析和模拟物理对象及 其状态,并从中提取有价值的洞察。但是企业的信息孤岛和不可信数据是采用数字孪生技术的大敌。而区块链长于 安全信用地保存,共享和使用数据(不可篡改的分布式账本),在无中心或弱中心下按智能合约处理事务流程。两 者的融合和互补正成为构建企业的数字生态系统(包括供应链数字生态系统)的一个趋势。这将标志着 BlockTwin 的出现。Web 3.0 区块链技术将使自主数字孪生能够与其他数字孪生进行交易,通过透明的智能合约交换价值。

正如 ⁹⁹ 指出的,Web 3.0 提供了去中心化的网络基础设施,用于为跨越单个企业边界的数字孪生用例部署分布式应用程序(或区块链术语中的 dApp)。这些数字孪生用例将需要安全、防篡改、不可变的交易记录以及在分布式生态系统中执行智能合约 dApp 的能力。这是新兴的 BlockTwin 的基础,并将允许这些数字孪生彼此之间以及业务应用程序自主交互。

BlockTwin 用例将基于两种使用模式。第一个是熟悉的"可追溯性"用例模式,其中数字主线存储为相关物联网和交易信息的不可变审计跟踪。这是供应链解决方案中的主要用例模式。例如,新鲜农产品的温度、湿度和地理位置被捕获并存储在区块链上,以证明其在供应链中从生产者到消费者的多个节点传输时的来源和暴露条件。这本质上是一个供应链数字孪生,其中的交易被捕获并锁定在区块链上。

第二种使用模式将增加数字孪生在更高级的分布式部署或 Web 3.0 应用程序中的应用。BlockTwin 不仅会存储第一种使用模式中描述的交易信息,还会在区块链技术上存储数字孪生模型和实例。这将允许数字孪生通过智能合约和预言机服务跨领域和组织边界相互交互。

这种使用模式将允许将实物资产创建为非同质化代币 (Non-Fungible Token, NFT)。BlockTwin NFT 将成为新兴元宇宙中实体资产的数字化身,使该资产能够与元宇宙中的其他资产进行交互和价值交换。

这种使用模式与可转让资产、ESG 应用程序和数字孪生高度相关,这些资产通过智能合约与加密货币或代币进行自主交易。

趋势 3- 边缘到云的连续体

无代码应用组合平台(XMPro)的文章 100 指出: 从边缘到云的部署范围内运行的数字孪生的需求不断增加。人们对可以以分布式方式部署数字孪生的场景越来越感兴趣,其中需要边缘的特定功能和云中的其他功能,它们被称之为边缘到云连续体(E2C2)。Gartner 的研究报告 101 预测,我们将看到更多这种趋势,数字孪生将在边缘到云连续体中部署,以实现两全其美。边缘雾节点(或者实际上是本地数据中心)的出现是另一种模式,它正在成为许多工业数字孪生场景的要求。

趋势 4 - 数据宇宙

随着数字孪生在元宇宙中的发展,我们还将看到"数据宇宙"不断发展以支持这些新用例的复杂性和规模。此处所指的数据宇宙是支持下一代数字孪生应用的数据基础设施。无代码应用组合平台(XMPro)的文章指出:数字孪生非常适合基于图形的关系管理,而图形数据库对此提供了最好的支持。例如,Azure 数字孪生是基于图形模型构建的,我们将看到更多这种模式的出现。基于图形的模型的根本好处是它可以将数字孪生的网络影像编码化。随着更多实例和用例通过 TwinGraph 连接,数字孪生的价值和收益将快速增长。

传统的分层资产结构和框架将被基于图形的解决方案所取代,例如 Azure 数字孪生,并使用描述关系的数字孪生定义语言 (DTDL) 进行建模。这方面的一个例子是 XMPro 正在进行的将 ISO 14224 资产模型转换为 DTDL 和 Azure 数字孪生的工作。

趋势 5 - 数字孪生智能化(DT+AI)

无代码应用组合平台(XMPro)的文章指出:基于人工智能和机器学习构建的更智能的数字孪生是预测性维护和自主操作等用例的绝佳解决方案。与消费者数字孪生和基于应用程序的标准化预测模型(例如 CRM 或电信领域的客户流失)不同,事实证明,物联网传感器和控制系统的机载数据对工业人工智能用例来说是一个更为重大的挑战。数据并不像上面提到的示例那样干净、一致且格式良好。例如,对工业预测模型做出的决策的影响可能远高于 CRM 客户流失模型。与核反应堆冷却水泵系统 95% 准确度的故障预测模型相比,95% 的模型准确度可能非常适合识别可能寻求更换服务提供商的客户,并为他们提供更好的交易。

无代码应用组合平台(XMPro)的智能数字孪生(IDT)将在 2022 年在三个主要领域取得进展,以解决上述一些挑战。首先,更多具有虚拟传感器代理的数字孪生将用于训练人工智能和机器学习模型,例如异常检测。这将提高模型的质量,因为它们将接受质量更高的数据的训练。其次,趋势 4 中描述的新兴数据领域中增强的数据管理和争论将进一步提供更好的训练数据集。影响智能数字孪生发展的第三个也是最关键的领域是业务技术人员将模型嵌入到可操作的数字孪生中的能力。业务技术专家是主题专家,就像可靠性工程师一样,例如,他还具备用 Python 开发模型的分析和技术技能。将这些知识模型嵌入数字孪生中需要采用无代码开发方法。它使业务技术人员能够专注于解决方案的智能,而无代码平台则提供了交付数字孪生应用程序的操作平台。

100 参考文献: 7 Trends for Industrial Digital Twins in 2022, XMPRO, 2021

⁹⁸ 参考文献: 《数字供应链孪生研究报告》. 罗戈研究. 2020-07-11

^{***} 参考文献: 7 Trends for Industrial Digital Twins in 2022, XMPRO, 2021

最近坦佩雷大学信息技术和通信科学学院的弗兰克·埃默特 - 斯特雷布教授在《AI(人工智能)》期刊上的一个新的研究 102 表明 AI 在数字孪生系统中的关联作用包括以下 6 个方面:

① AI: 优化 (模型创建)

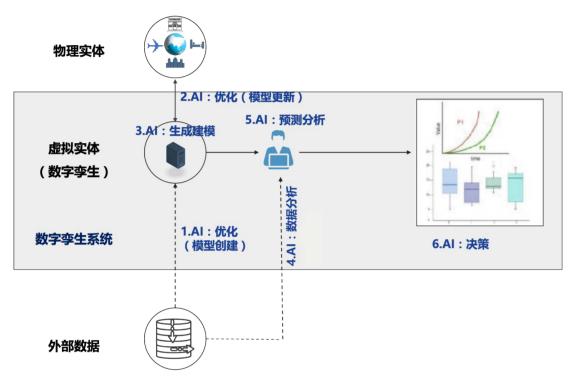
② AI: 优化(模型更新)

③ AI: 生成建模

④ AI: 数据分析

⑤ AI: 预测分析

⑥ AI: 决策



图表 68 数字孪生系统(显示为灰色矩形)

AI/ML 在本白皮书第六章中顺丰的两个快递物流转场中数字孪生案例发挥了重要作用,采用机器学习(ML)算法对数据和模型的分析使其取得很好的结果,大大减少了收派的线路和提高了分拣的效率。

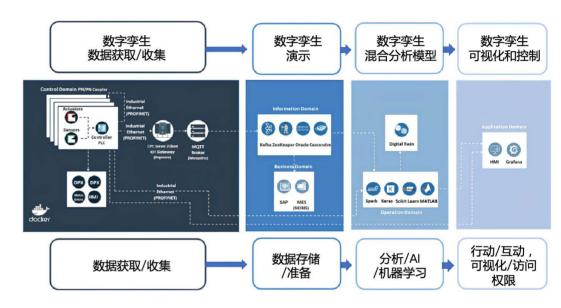
智能数字孪生 (IDT) 最显著的好处是它能够主动、持续地增强人类决策过程。通过主动、在线、寻求目标和前瞻性,IDT 可以提供实时见解和预测,以提高运营效率、优化流程并最大限度地减少物理资源的使用。这最终会带来更好的、数据驱动的决策、降低成本并提高整个产品生命周期的整体性能。开启智能数字孪生 (IDT) 之旅已成为全球行业领导者和创新者的现实,因为工程师和主题专家可以轻松获取 ChatGPT 等先进技术。这一转变使各个领域的专业人士能够利用人工智能的力量,加速 IDT 在各个行业的采用和实施。

102 参考文献: Frank Emmert-Streib, What Is the Role of Al for Digital Twins?, Al 2023, 4(3), 721-728

数字孪生与 AI 的融合加速数字孪生向其高级阶段进化:

· 数字孪生 + 生成式 Al → 认知数字孪生

认知数字孪生代表了一种更先进的数字孪生技术形式,融合了人工智能,特别是生成式 AI 驱动的认知计算。这些数字孪生不仅复制现实世界中对应对象的物理属性和行为,而且还拥有根据收集的数据进行理解、推理和决策的认知能力。下图展示了如何生成认知数字孪生的管道 103。



图表 69 生成认知数字孪生的管道

• 数字孪生 + 自适应 Al → 自适应数字孪生

自学习和自适应数字孪生(ADT)是数字孪生的一个子集,专注于自主学习和适应环境。这些孪生使用人工智能,特别是自适应 AI 和机器学习技术来发展和提高他们的表现。例如,在自主学习和自我学习中,孪生可以在无需人工干预的情况下获得新的知识和技能。他们从与物理世界和数据输入的交互中学习。ADT 的开发、部署和自适应性方面仍然存在许多挑战。特别是关于最后一点,称为主动学习的机器学习 (ML) 方法集和自适应 AI 很有发展前景。该框架允许 ADT 在选择用于训练监督机器学习模型的数据样本方面发挥积极作用 104。

自适应 AI 将一组方法 (即基于代理的设计) 和 AI 技术 (即强化学习) 结合在一起, 使系统能够调整其学习实践和行为, 从而在生产中适应不断变化的现实环境。 通过从过去的人类和机器经验中以及在运行时环境中学习行为模式, 自适应人工智能可以提供更快、更好的结果。自主供应链和物流自主智能设备需要具有学习和适应能力的自适应人工智能。自适应供应链数字孪生可助力提高供应链的弹性, 数字孪生的自适应性是其成熟度的最高级的特征之一。

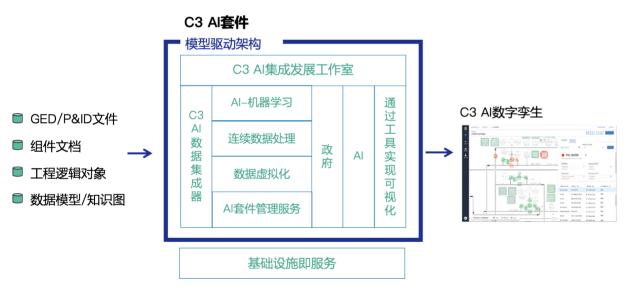
¹⁰³ 参考文献: Perin Ünal 博士,认知数字孪生: 能够自我学习、预见未来并采取相应行动的数字孪生, DTC, 2022 年 9 月 13 日 104 参考文献: John Ahmet Erkoyuncu 等, A design framework for adaptive digital twins, CIRP Annals Volume 69, Issue 1, 2020, Pages 145-148

趋势 6 - 数字孪生智能生成

开发数字孪生是一个极具挑战性的工作,它不仅需要有优秀软件开发的人才和有关业务的专家,而且过程复杂,成本高昂。为了使得数字孪生得到广泛采用,许多企业和组织都在努力寻求和创新数字孪生的智能生成方法,以加速软件开发,降低开发成本,加快部署到市场,提高竞争优势。下面列举几个利用人工智能创建数字孪生的解决方案。

- 利用 OpenUSD 和加速计算的力量来开发和运营工业规模的数字孪生 ¹º⁵: Pixar、Adobe、Apple、Autodesk 和 NVIDIA(英伟达)组成 OpenUSD 联盟。许多企业已开始部署 NVIDIA OVX ™上的 NVIDIA Omniverse ™ Cloud 和 NVIDIA Omniverse Enterprise 的强大功能来开发和运营物理精确、支持 AI 的数字孪生。这使他们能够在投入生产之前灵活地实时设计、模拟和优化产品、设备和流程。2023 年 5 月 29 日,英伟达在 COMPUTEX2023 上英伟达重磅宣布 AI 生成数字孪生场景。海示了数字孪生平台连接 ChatGPT。来简化 3D 工作流程开发。
- 使用 C3 AI 平台自动生成数字孪生 106: 欧洲最大的制造公司之一使用复杂的燃气轮机 (GT) 测试了潜在的供应商,其中超过 10,000 个部件被组织成相互关联的子组件。这些 GT 为多个行业执行关键任务功能,包括公用事业发电以及石油和天然气公司的泵供电。客户需要一种能够使用工程设计和运营数据自动生成数字 BOM 的解决方案。

由三名开发人员和数据科学家组成的 C3 AI 团队在短短四个星期内就使用机器学习和深度学习构建了数字 BOM 生成应用程序。该应用程序增强了过程模拟、故障预测和警报的功能,C3 AI 随后将其产品化为可配置的 SaaS 应用程序:C3 AI 数字孪生。



图表 70 解决方案 C3 AI 软体套件架构

许多全球制造商已经在使用 C3 AI 平台来推动数字化转型工作,取得的成果包括:库存减少高达 35%,因质量缺陷造成的浪费减少 20% 以上,并产生数亿美元的经济收入每年的价值。

利用 AI 技术智能生成数字孪生的场景和数字孪生已不是梦想,希望智能生成供应链数字孪生的解决方案将不久问世。

106 参考文献:Auto-Generating Digital Twins Using the C3 Al Platform,c3.ai

趋势 7 - 数字孪生作为服务 (DTaaS)

众所周知,SaaS(软件即服务)是一种在云中运行的软件许可和交付模式。与自托管产品不同,无需在自己的服务器上安装、监控或升级软件。此外,无需担心安全问题和补丁,因为这些责任由 SaaS 提供商负责。由于提供商通常负责软件的开发,因此他们拥有以最高效和有效的方式处理软件的专业知识。数字孪生会发展成为商品,即一个数字孪生 SaaS=DTaaS 吗?回答是肯定的,但它会不完全同于一般 SaaS 软件服务。

数字孪生即服务(DTaaS)是一种在云中运行的软件,它可以通过数据中心的安全隧道或直接通过移动网络与互联网上的传感器、执行器和其他数据源集成。由于它不是通用平台 (PaaS),因此它是针对特定物理资产而设计的,且包括监控、管理和维护这些资产通常所需的常见用例和最佳实践。例如,用于建筑的 DTaaS 不同于用于交通的 DTaaS,也不同于用于制造的 DTaaS。由于产品的集成性和复杂性,DTaaS 几乎总是以企业模式出售。此外,由于它们在大多数情况下都是关键任务且敏感,因此不需要多租户部署。

DTaaS 之所以成为一种发展趋势,是因为企业本身的业务不是开发数字孪生或在数据中心托管数字孪生解决方案。它们的业务是采用数字孪生技术以最佳方式来运营实物资产。 而且 DTaaS 的 SaaS 模式具有以下几个方面的优越性 107:

- **降低总拥有成本**: 开发数字孪生即服务的公司在所有客户之间分担开发和运营解决方案的费用: 研发成本、技术支持和托管都是随着规模扩大而变得更加高效的活动。这些成本节省通常会通过较低的订阅价格转嫁给客户。
- **解决方案时间**: DTaaS 解决方案的实施速度明显加快,并且不需要前期投资。安装可以完全远程完成,无需现场访问。实施可能需要几周而不是几年的时间,从而加快创新技术上市。
- **创新时间**: DTaaS 供应商有能力和资源将新技术和概念引入其产品。当他们为用户提供价值时,他们将投入时间和精力更快地引入创新。
- 更高的弹性:安全性和高可用性基于经过充分验证的云管理服务,并且远远优于任何自托管软件。

DTaaS 有许多好处,但也面临不少挑战,例如可用性,企业文化,模型的多样化,数据集成,信任和控制等。 Shohin Aheleroff 等给出了 DTaaS 的参考架构 ¹⁰⁸,Prasad Talasila 等讨论了如何构建 DTaaS 平台 ¹⁰⁹,并指出了该模式的关键系统模块。由于篇幅有限,不在此详细介绍。

值得关注的是已经有供应商开始提供 DTaaS 的服务,例如有名的供应链解决方案提供商 AIMMS 已经为客户创建了供应链网络设计的 DTaaS¹¹⁰。

¹⁰⁵ 参考文献: https://www.nvidia.com/en-us/omniverse/solutions/digital-twins/

¹⁰⁷ 参考文献: Ran Katzir, Digital Twins as a Service (DTaaS): What the SaaS is All About? 2023-0604

¹⁰⁸ 参考文献: Shohin Aheleroff 等,Digital Twin as a Service (DTaaS) in Industry 4.0: An Architecture Reference Model, Advanced Engineering Informatics,47(2021)

¹⁰⁹ 参考文献: Prasad Talasila 等,Digital Twin as a Service (DTaaS): A Platform for Digital Twin Developers and Users,arXiv,2023-05

¹¹⁰ 参考文献: AIMMS, https://www.aimms.com/data-and-modeling-service-for-network-design/

8.4 物流数字孪生应用领域拓展

本白皮书第四 - 六章呈现了数字孪生技术已经在物流和供应链的领域中得到了应用并开始显露出其价值创造的巨大潜力。我们认为物流数字孪生应用前景广阔,本节将指出若干其应用拓展的方向。

8.4.1 全局 / 整体物流数字孪生的应用

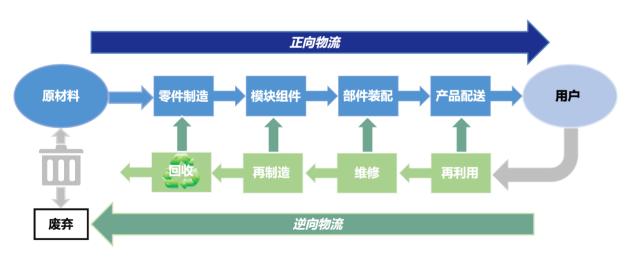
目前大多数物流数字孪生技术应用基本限于局部的特定的物流实体和/或资产。其应用主要可从以下两方面拓展。

01 从局部应用拓展到全局应用

局部物流数字孪生应用产生的价值是物流的局部优化,而全局的物流数字孪生创造的价值是对物流的全局优化,其中包括组织、人力、客户、计划、园区、网络等的优化。然而要实现这种数字孪生具有极大的挑战。首先物流实体必须现代化、标准化并具有各种数字接口,物流管理系统必须连接各种有关外部系统,如客户系统、环境系统,具备获取更多相关数据的能力。另外需要其基础设施具有 5G 网络的快速响应,以及使用更多的物联网传感器,尽可能达到必要的实时或近乎实时的感应。在此物流实体基础上建立全局或近乎全局的物流智能数字孪生,将持续地优化整体物流活动。

02 从物流应用拓展到供应链应用

从供应链管理的角度看,物流是供应链的一部分,它贯穿于整个供应链的生命周期 111。



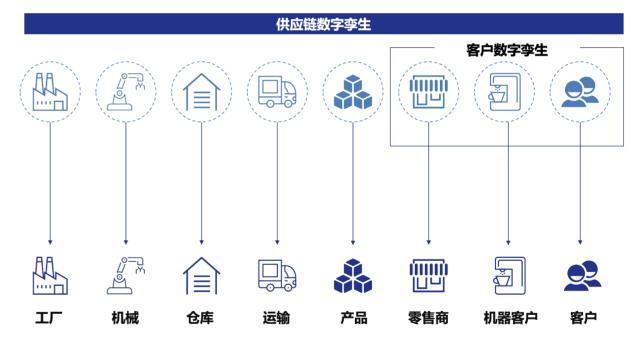
图表 71 供应链全生命周期中的物流

从现代物流的视角,我们正处于令人兴奋的范式转变的边缘。物流行业不再仅仅是"将物品从 A 点移动到 B 点",它 涉及利用全套数字技术来实现卓越运营并打造更强大、响应速度更快的供应链。物流发展成熟度的高级阶段就是供应链网络中的物流网络或供应链生态中的物流生态。因此,从供应链的视角,物流数字孪生可统一于供应链数字孪生,物流数字孪生应用可拓展到作为供应链数字孪生的应用。这样可在供应链数字孪生统一的框架下加速物流数字孪生的应用研究,使物流数字孪生反映供应链相关实体,如物流上下游(通常是企业 / 组织,货主,甚至个体)、物流服务供应商等,从而让其创造更多的价值。

8.4.2 客户的数字孪生(DToC)

Gartner 于 2023 年 1 月对 380 家供应链领导者进行的一项调查发现 ¹¹²,虽然 60% 的领导者正在试点或计划实施数字供应链孪生(全局 / 整体的供应链数字孪生),但只有 27% 的领导者还计划将客户的数字孪生 (DToC) 纳入他们的数字战略的一部分。

Gartner 指出:客户的数字孪生是整个数字供应链孪生(全局 / 整体的供应链数字孪生)不可或缺的一部分,目前被大多数供应链领导所忽略,忽略者将会落后于开始重视者,并失去竞争优势。



图表 72 带客户的数字孪生的完整供应链数字孪生概念视图

Gartner 调查定义客户的数字孪生是客户的动态虚拟镜像,它具有如下特征:

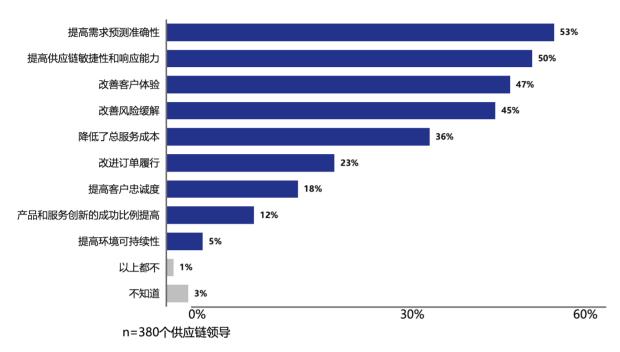
- ·可用于仿真、模拟和预测客户的行为。客户可以是个人、企业客户、人物角色、人群或机器。"客户"可能因行业而异,例如患者、医生、买家、消费者、企业、市场,甚至内部客户(代理人、员工等);
- 客户的数字孪生对供应链的作用不仅在于它可被单独应用,还在于它与数字供应链孪生(全局 / 整体的供应链数字孪生)的集成。

111参考文献: 唐隆基,全球供应链的未来发展趋势,罗戈研究,2023-11-16

¹¹² 参考文献: Supply Chains Building a Digital Twin of the Customer, Gartner, 2023

客户的数字孪生采用计划的预期结果见下图:

DToC采用计划的预期结果回复者的百分比



图表 73 客户的数字孪牛采用计划的预期结果

8.4.3 数字孪生用于多式联运 113

多式联运是指在一次运输旅程中使用至少两种不同的运输方式将货物从一个地点运送到另一个地点。这可能涉及公路、铁路、海运或空运,并且通常与负责整个旅程的一家运输提供商签订一份合同。因此它不仅涉及多家货主(甚至是跨国 / 区域的供应网络)及收货客户,还涉及联运服务商及多家承运商和多种运输方式。多式联运是一种高效但复杂的供应链物流模式,现代多式联运供应链在提供大量优化潜力的同时,对控制和维护提出了重大挑战。

全球 90% 以上的贸易货物和德国约四分之一的对外贸易量通过海上运输,海运链等多式联运链是全球物流网络的核心组成部分。运输链的协调需要众多连续运输和转运过程的同步。这些都是由大量不同的物流参与者执行的,例如货运代理、CT(集装箱码头)运营商、航运公司、铁路公司、海港码头运营商等。尽管非常需要跨参与者协调,但目前这些参与者之间的信息透明度非常低,因此没有参与者可以详细跟踪运输的整体进度。原因之一是进程跟踪仅部分实现,整条链没有可用的连续状态信息。另一个原因是通信过程数字化程度低、IT系统缺乏兼容性和保密要求,现有信息没有系统地传输给其他参与者。

因此,运输链的规划和控制遵循一个非常静态且不太灵活的自上而下的过程,并且不是在整体优化的意义上进行的,而是每个参与者对其责任范围进行孤立的优化,因此运输方式和资源的可用能力没有得到最佳利用。此外,缺乏信息造成的不确定性会导致链条内出现高风险缓冲,从而导致运输时间较长。这种情况的另一个结果是对中断的处理不太理想,因为透明度低使得早期发现和跨利益相关者协调措施变得更加困难。

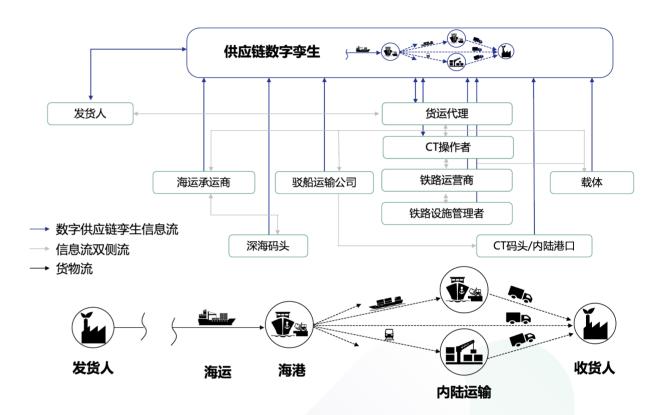
114

113 参考文献: Anselm Busse 等, Towards Digital Twins of Multimodal Supply Chains, Logistics 2021, 5, 25

为了满足上述要求,需要具有优化和同步的运输规划和控制程序的现代和数字化的解决方案,它提供以下功能:

- 可见性: 整个运输网络的实时透明度,包括可用容量、中断和流程状态信息;
- 数据分析: 对系统未来状态的预测,例如即将到来的中断和容量缺乏:
- 广泛的决策支持: 通过为运输规划和中断处理提供决策支持来优化流程。

整体多式联运供应链数字孪生正是解决当前多式联运网络问题的现代和数字化解决方案。下图描绘了具有附加供应链数字孪生的海运链内的示例性货物和信息流。



图表 74 具有附加供应链数字孪生的海运链内的示例性货物和信息流 114

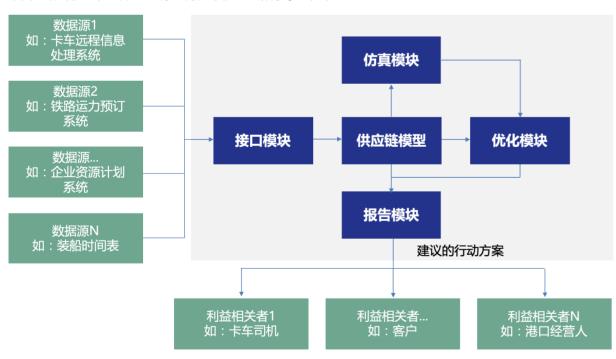
¹¹⁴ 参考文献: Anselm Busse 等, Towards Digital Twins of Multimodal Supply Chains, Logistics 2021,5,25

解决方案的标准和建议采用技术列举如下:

标准	需求	建议采用技术
可见性和透明的	覆盖整个网络,包括	云计算 连接(5G)
更新频率	例如,在某些用例中是实时的	物联网技术 连接(5G)
数据采集	例如:在某些情况下 + 外部数 据 + 物联网数据	物联网技术 云计算(存储) 隐私保护计算
数据分析	先进的预测分析 + 整体优化	云计算(计算) 人工智能
仿真能力	启用假设场景	模型模块(供应链数字孪生)
决策支持能力	用于运输规划和中断处理	参考决策报告模块(供应链数字孪生)

图表 75 解决方案的标准和建议采用技术

下面还给出了一个建议的迈向多式联运供应链的数字孪生框架:



图表 76 建议的迈向多式联运整体供应链的数字孪生(供应链数字孪生)框架 115

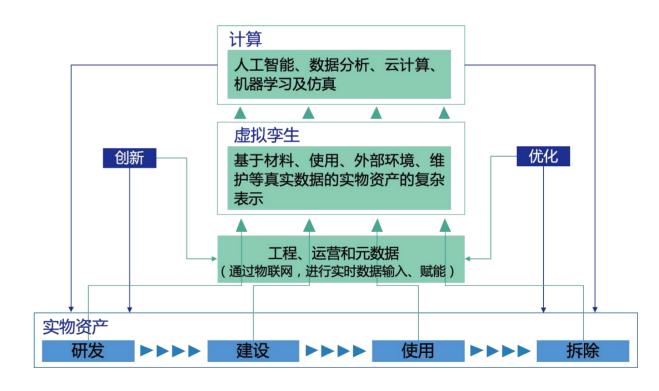
¹¹⁵ 参考文献: Anselm Busse 等,Towards Digital Twins of Multimodal Supply Chains,Logistics 2021, 5, 25

对于多式联运这样复杂的供应链,供应链数字孪生可以带来很多好处。例如,通过供应链数字孪生考虑不同运输方式的各种个体因素,可以改进交货时间预测。通过供应链数字孪生的机器学习,可以从之前通过供应链的货物运输中学习,进一步改进预测。供应链数字孪生的另一个核心功能是仿真,可以深入了解现有传输网络。例如,很容易确定当必须卸货的船舶数量增加时可能出现的供应链限制和瓶颈。供应链数字孪生还可用于确定解决这些问题的最具成本效益的措施。

8.4.4 数字孪生技术加速供应链可持续性

据世界经济论坛统计,全球每年生产、运输和销售的消费品超过四万亿件。食品、建筑、时尚、快速消费品、电子、汽车、专业服务和货运等领域的供应链占全球温室气体排放量的一半以上。供应链对企业可持续发展目标的重要性现已被广泛接受。首席执行官们一致认为,技术正在催生新的商业模式,并将开启行业脱碳的未来。跟踪产品从原材料到消费者家门口直至产品最终寿命的每个阶段的能力现在是企业的首要考虑因素。

2021年初,埃森哲联合达索系统发布报告《颠覆设计:虚拟孪生在加速可持续发展中的关键作用》16。报告指出:虚拟孪生是产品、平台或生态系统的实时虚拟表示,可用于建模、可视化、预测和提供有关特性和性能的反馈。虚拟孪生技术提供了一个尚未开发的机会,可以降低运营成本,推动价值链中的可持续、循环、端到端的颠覆。



图表 77 虚拟孪生在加速可持续发展中的关键作用

¹¹⁶ 参考文献: The critical role of virtual twins in accelerating sustainability, Accenture & Dassault, 2021

根据埃森哲针对五个用例的研究, 到 2030 年, 数字孪生可以带来 1.3 万亿美元的经济价值, 并减少 7.5 Gt 的二氧化碳排放量。

罗戈研究定义了具有三个决策维度的数字供应链孪生(全局 / 整体的供应链数字孪生)¹¹⁷,它是在 Gartner 纵向和横向两个决策维度的数字供应链孪生定义上增加了一个可持续性的 ESG 决策维度。

这个模型要求在物理供应链端必须具有碳排放监测的数字化接口,在供应链数字孪生端必须具有碳排放的数字表示及计算分析能力。在供应链数字孪生产生决策时不仅要考虑与纵向战略和战术选择,以及影响企业的运营决策的一致性,而且要考虑与横向的所有参与者和流程决策保持一致,还要考虑与 ESG 要求的可持续性指标保持一致。因此该模型给设计应用于加速供应链可持续性的供应链数字孪生提供了一个概念性的参考框架。

8.5 向智能化和自主化方向发展

从整篇白皮书,读者已经看到了供应链和物流正在经历着自它诞生以来最伟大的变革,那就是智能化和自主化的变革,它是自近十年来数字化变革的延续和其更高阶段的发展。Blue Yonder(BY)可能是世界上首个将自己称为一家自主供应链的公司。来自 BY 中国分公司负责人苏昱彰描述了这个前所未有的大变革的图景:

- 从传统的线性供应链变为以智能控制塔为核心的供应链生态系统。
- 从传统的供应链转变为自主的供应链,这个自主的供应链的核心技术之一就是能自主适应现实(包括实体供应链和其环境)变化的动态数字孪生。



从:传统

到:自主

- 稳定、线性的供应链产品流
- 非整合式或节点型解决方案
- 由内部数据和因素驱动的回溯型决策
- 与数据脱节的缓慢、低效决策
- 有关产能、网络、提前期等的静态假设
- 主要参与人对真实起因和编排调度茫然不知

- 靠近客户的动态产品流和供应链
- 贯穿每个节点的端到端同步优化
- 多企业决策和业务规划
- 基于实时数据和洞察的边缘链接决策
- 能自主适应现实变化的动态数字孪生
- 可在价值链内打破筒仓的通用控制塔

图表 78 供应链从传统到自主的进化 118

和人工智能一样,数字孪生是实现供应链及其物流的全面智能化和自主化的核心技术。因为供应链是一个复杂的人机系统,全面的智能化和自主化要求物理供应链实现全面智能化(如采用超级自动化技术,物联网及传感器技术等),并且供应链设施装备工具要互联互通,而其对应的供应链数字孪生要求成为自主(或近乎自主)的动态数字孪生,也就是要达到它的成熟度的第4~5级的水平。

自主(或近乎自主)的动态数字孪生提升了基于整个供应链网络或生态上可用资产、时间、能力和约束的可能性意识。借助人工智能和物联网,数字孪生能成为一个可预测和思考的智慧引擎,用于应对任何商业挑战以及做出更智能的响应和解决方案。

尽管实现供应链的全面 / 全局 / 整体智能化和自主自适应(或部分自主)目前还只是一个愿景,但是局部 / 部分供应链孪生的智能化自主化已经开始实现了,如中兴通讯南京的智能制造基地中,基于 AI, 5G 和数字孪生技术的立体库 + 线边库 +AGV 工业机器人 + 自动化产线的一体已经实现了智能化和自主化 11%。因此我们期待在不远的将来,全面的供应链智能化自主化(或部分自主)将会由梦想变为现实。

8.6 小结

本章的主题是展望未来发展趋势。它包括以下重点:

- 数字孪生是供应链和物流战略性技术趋势中最重要的趋势之一。
- 数字孪生技术的成熟度研究将有助于该项技术的发展和帮助采用者持续地改进这项技术的价值创造。此外,数字孪生技术成熟度是构建数字孪生技术框架时需要考虑的关键因素,因为业务成果是根据成熟度级别定义的。成熟度越高、数字孪生技术框架就越复杂。
- 6 个数字孪生技术发展趋势,这些发展趋势将有助于加速数字孪生技术的采用和价值提升。
- 物流数字孪生应用领域拓展,强调从局部 / 部分数字孪生向全局 / 整体发展,从物流数字孪生向供应链数字孪生发展,并指出了一些新的应用方向:客户的数字孪生,多式联运数字孪生和可持续发展的数字孪生。
- 传统的供应链将转变为自主的供应链,这个自主的供应链的核心技术之一就是能自主适应现实(包括实体供应链和其环境)变化的动态数字孪生。

¹¹⁷ 考文献: 唐隆基和潘永刚, 《供应链零碳转型综合研究报告》, 罗戈研究, 03/29/2021

¹¹⁸ 参考文献: 苏昱彰, 在高科技制造领域打造有韧性的供应链, Blue Yonder, 2023-03-23

¹¹⁹ 参考文献: 中兴通讯南京滨江基地数字孪生案例介绍, 中兴通讯, 2023-11-20

CONCLUSION 结 论



数字孪生听起来像是科幻小说里的概念,但已经实实在在地在物流世界中发挥了作用,利用人工智能、大数据和数字化实现了巨大价值。相比模拟仿真,数字孪生不是通过人工构想出来相应的虚拟世界来进行离线模拟,而是使用现实世界数据进行高逼真度的数字孪生体构建,利用数字孪生引擎进行现实世界与虚拟世界的实时或分时同步,进而以现实世界映像开展逼真测试、算法验证、现实控制和用户服务等等。

顺丰科技作为物流科技的探索者,已率先将数字孪生技术研发应用于物流核心场景中,打造了不仅可以可视可交互,而且算法验证效率能提升 600 倍、逼真度高达 99% 的数字孪生仿真系统,同时突破了数字孪生复制难、落地难的问题,成为第一个在物流行业规模化研发应用数字孪生技术的企业。

随着时间推移,更多的设备和应用程序进行连接,越来越多的行业和企业开始使用更多种类的数字孪生。物流数字孪生、供应链数字孪生将连接更广泛的、全域的价值链。从微观层面看,物流数字孪生将充分发挥生产力变革的力量,推动企业深化降本增效;从中观层面看,数字孪生解决方案将提升物流行业产业链效能,激发行业发展潜能;从宏观层面看,物流数字孪生赋能整个链路资源的合理配置,将帮助提升中国物流在国际赛道中的竞争力。

随着物流物理和虚拟孪生两个世界不断地相互监测、相互学习、相互影响,并且做出适应性调整,物流数字孪生的价值创造将有无尽可能。朝着可以预见的未来,我们已经在路上!

