



物流数字孪生 白皮书 (2024)

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	3
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	9
1.1.1 数字经济发展需要新兴数字智能技术	9
1.1.2 十四五规划新基建带来新机遇	10
1.2 数字孪生的价值呈现和全球市场高速发展态势	12
1.2.1 数字孪生的价值呈现正在塑造对数字孪生的需求	12
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	15
1.4 小结	16
第二章 数字孪生概念和发展现状	17
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	18
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	24
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

4.3 赋能港口数字化智能化改造 54

4.4 提升机器人群体管理 56

4.5 增强物流包装和容器设计 57

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 59

第五章 物流数字孪生赋能供应链 60

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 65

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 69

6.1 顺丰数字孪生发展背景 70

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 72

6.3.1 从点开始：数字孪生中转场 74

6.3.2 由点及面：数字孪生物流网络 77

6.3.3 横向拓展：数字孪生货运机场 79

6.4 物流数字孪生在顺丰的价值与未来 85

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 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

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

7.1.2 使用数字孪生仿真未来场景的准确性风险 90

7.1.3 能力贫乏的虚假数字孪生的风险 90

7.2 物流数字孪生技术的主要挑战 92

7.3 企业通往采用数字孪生成功的道路 95

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 101

8.2.1 几个典型的数字孪生技术成熟度模型 101

8.2.2 数字孪生网络及其成熟度模型 102

8.2.3 供应链和物流数字孪生技术的成熟度 103

8.2.4 供应链和物流数字孪生技术的发展周期曲线 104

8.3 数字孪生技术发展趋势 105

8.4 物流数字孪生应用领域拓展 112

8.4.1 全局 / 整体物流数字孪生的应用 112

8.4.2 客户的数字孪生（DToC） 113

8.4.3 数字孪生用于多式联运 114

8.4.4 数字孪生技术加速供应链可持续性 117

8.5 向智能化和自主化方向发展 118

8.6 小结 119

结 论 120

01

物流数字孪生发展驱动力

01 第一章

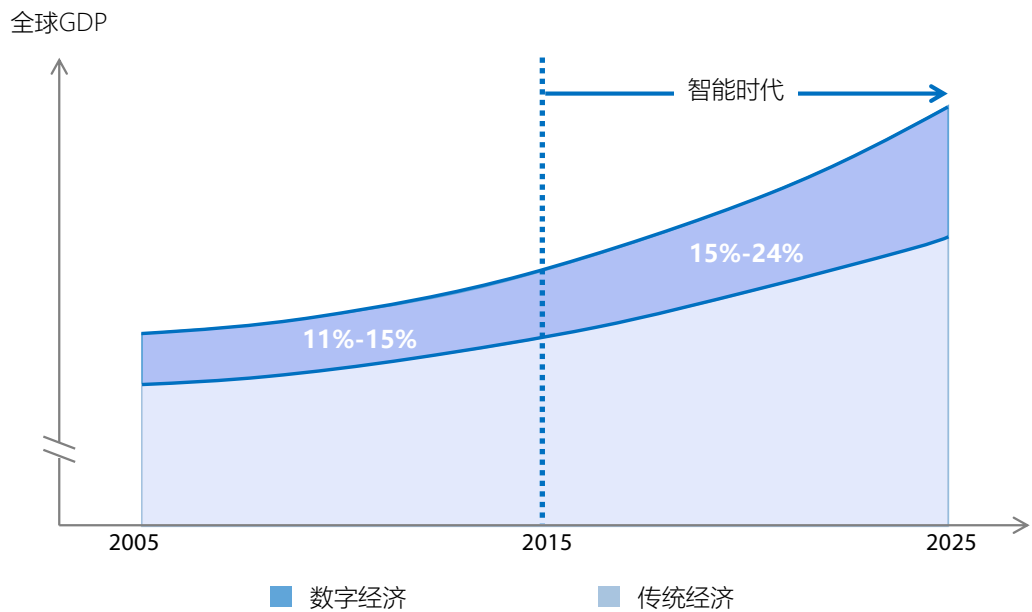
物流数字孪生发展驱动力

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产业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%。



图表 1 全球数字经济的预计增长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

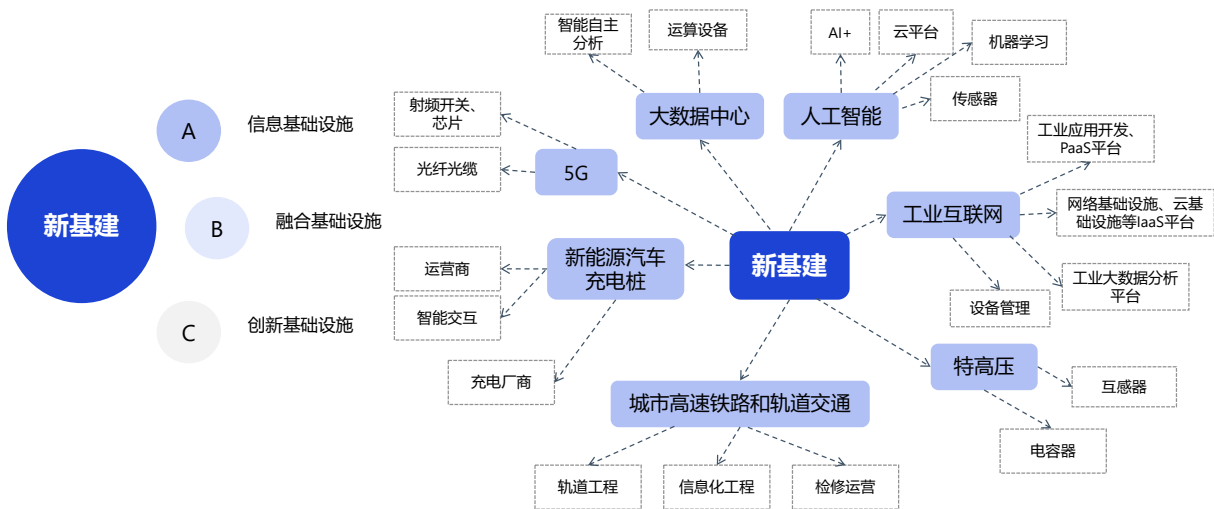
实际上，中国数字经济的发展大大超出了预期。中国信通院 2023 年元月发表的《中国数字经济的发展研究报告》⁴指出：2022 年我国数字经济规模首次突破 50 万亿元，达到 50.2 万亿元，同比名义增长 10.3%，已连续 11 年显著高于同期 GDP 名义增速，数字经济占 GDP 比重相当于第二产业占国民经济的比重，达到 41.5%。

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⁶。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

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，培育新经济发展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。

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

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

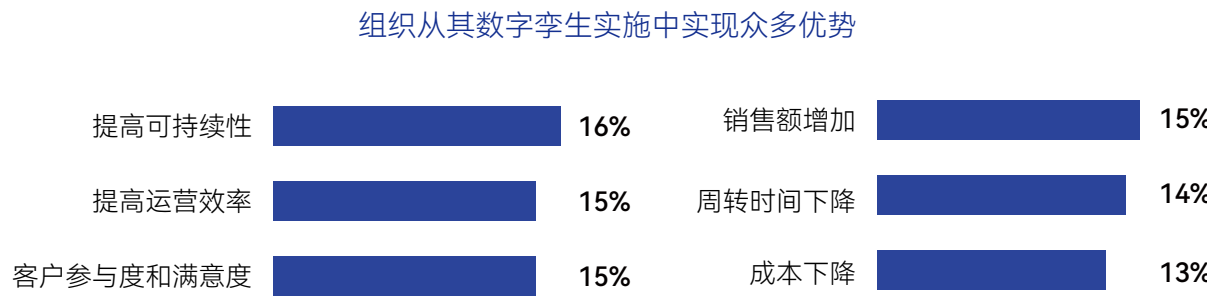
1.2.1 数字孪生的价值呈现正在塑造对数字孪生的需求

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



图表 4 数字孪生的众多优势⁹

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

使用建模和仿真来减少资产 / 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。

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

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）¹¹。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。**

其中最令人兴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。

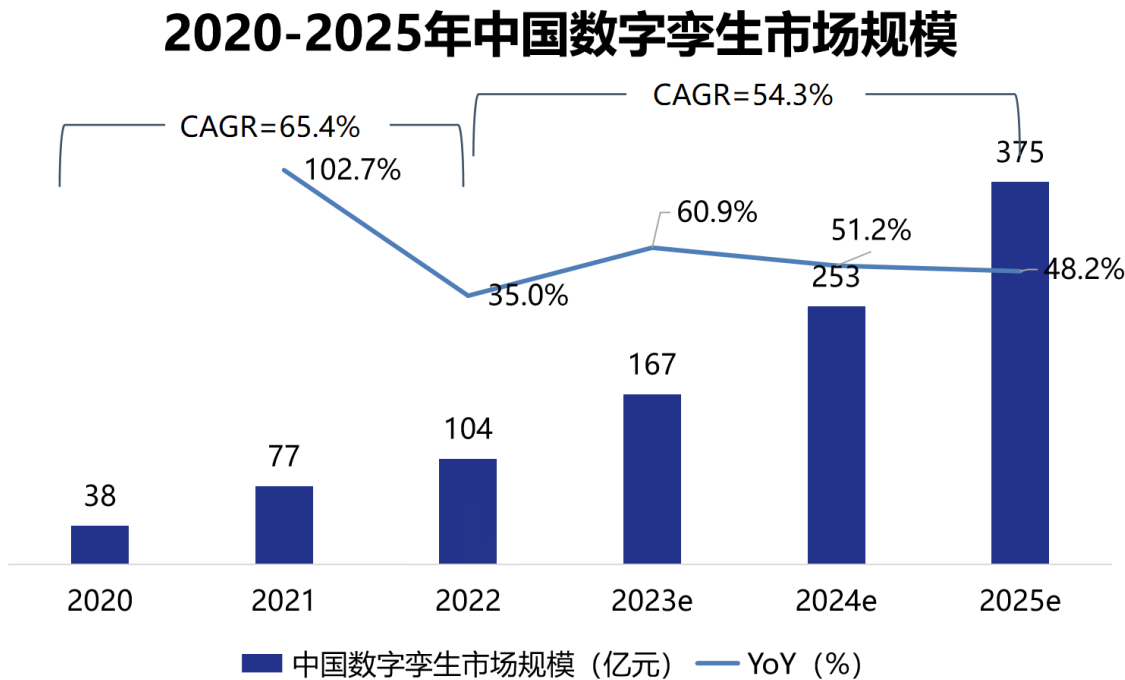
新研报还指出了数字孪生市场高速发展的几个来自实际应用趋势的驱动力

- 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。

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%。



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

¹⁰ 参考文献：凯捷，数字孪生：将智能引入现实世界，2022-09-15

¹¹ 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

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。

02

数字孪生概念和发展现状

02

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；

独特性

数字孪生对应一个独特的物理事物；

监控能力

可以使用数字孪生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。

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

¹⁷ 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。

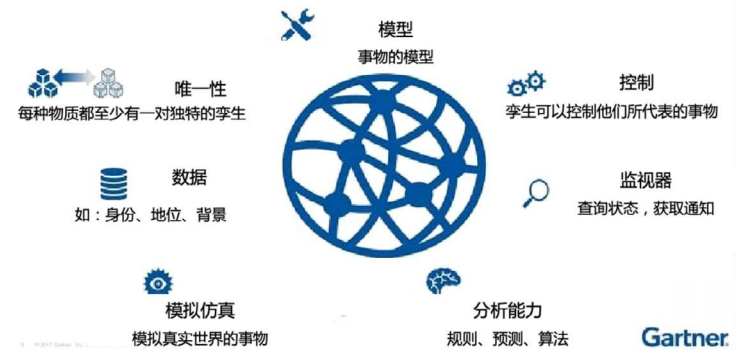
2.1.2 数字孪生的基本特征

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	唯一性
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。	每个物理对象至少有一个唯一的数字孪生与之对应。
控制	数据
它能控制它所表示的对象。	它拥有表示它的对象的所有数据，如识别、状态、内容等。
监视器	模拟仿真
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。	它能模拟仿真现实世界的物理对象、事件、流程。
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。	

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

数字孪生不只是模型



图表 7 数字孪生不仅仅是模型 ¹⁸

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

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。

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。

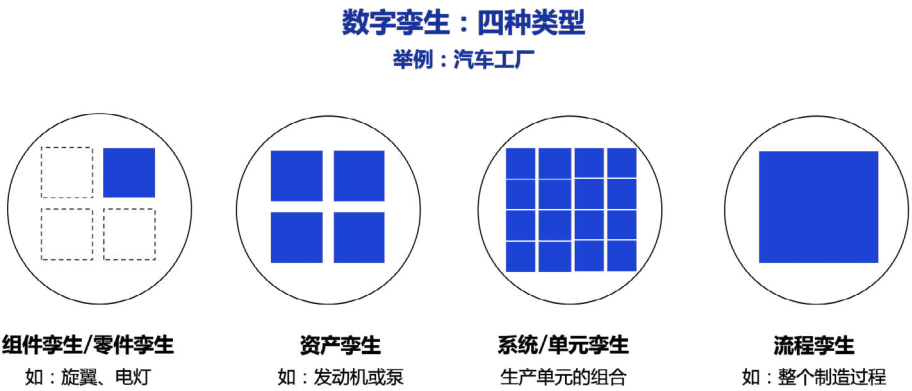
2.1.3 数字孪生的分类

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。

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>



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，发动机叶片数字孪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。

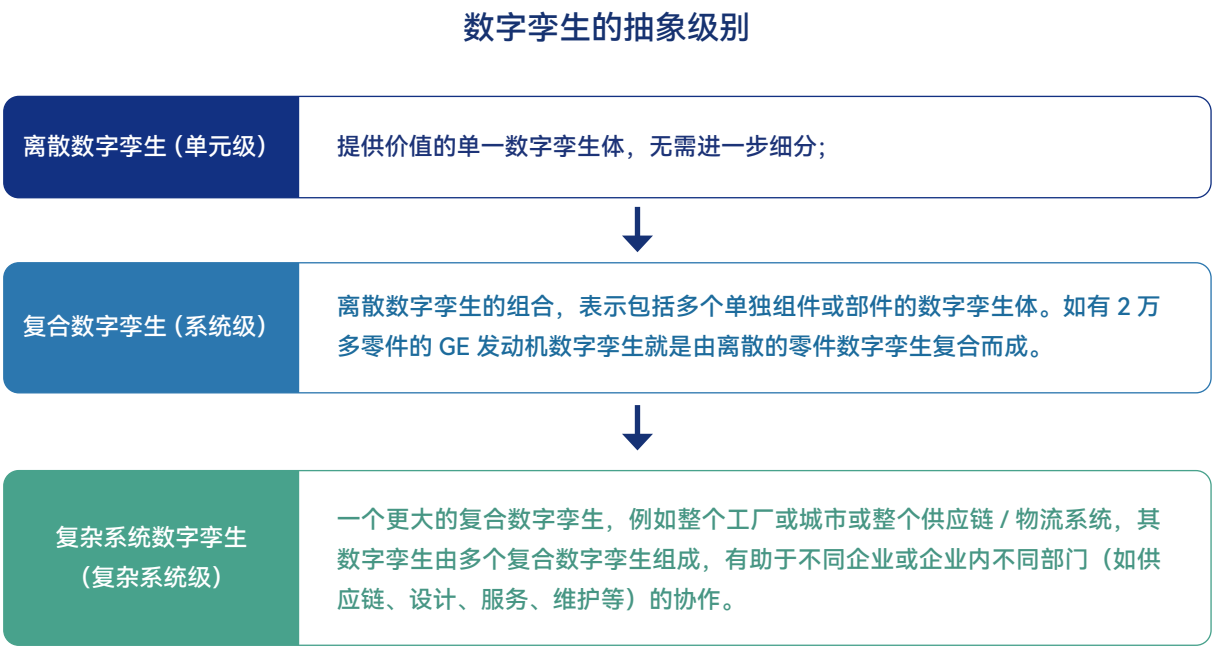
流程孪生

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孪生为例。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孪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。

2.1.3.2 数字孪生层次结构分类²²



数字孪生之间的关系一般包括

分层	关联性	对等
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。	数字孪生之间存在关联，就像现实世界中的双胞胎一样。	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

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

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
提供必要的工具，从多个系统中提取、共享和协调数据，从而形成一个数字孪生。	利用历史和实时数据与机器学习框架相结合，对资产上下文中发生的未来场景或事件进行预测。	渲染数字孪生的空间模型和可视化。为合作和相互作用提供了媒介。	允许实时存储和处理来自资产及其数字孪生模型的大量机器数据。	高精度传感器能够通过无线网络实时连续收集机器数据、状态和状态，从物理资产到数字资产。

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：

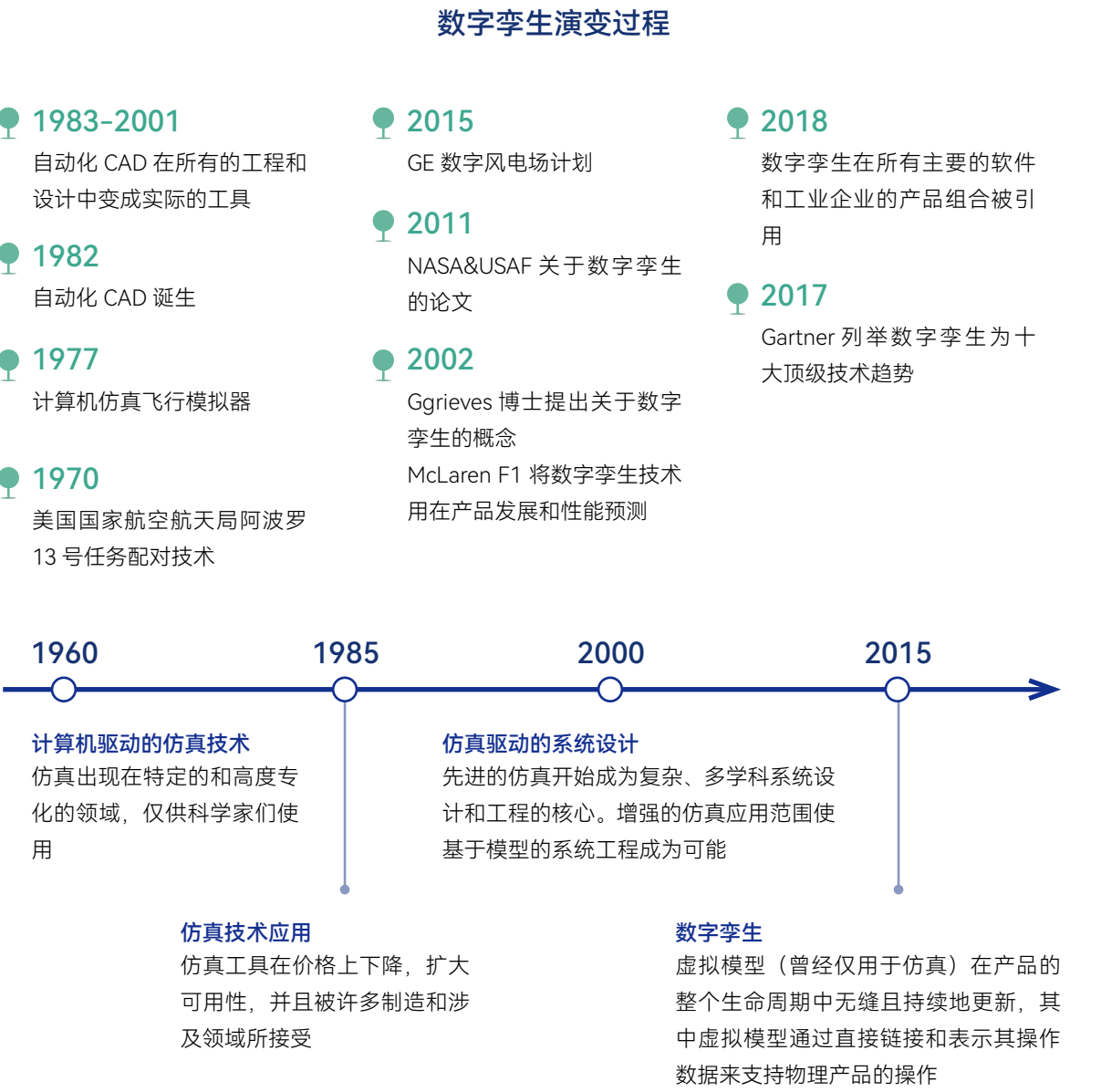
- 作为前端的传感器技术；
- 技术层的智能决策技术（仿真并不能产生决策）；
- 与物理层的交互技术，包括应用程序接口（APIs）、智能决策驱动程序从决策到执行的技术等。

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

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：



图表 10 DHL 1960-2015 数字孪生发展历程²⁵

²⁵ 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。数字孪生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：



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

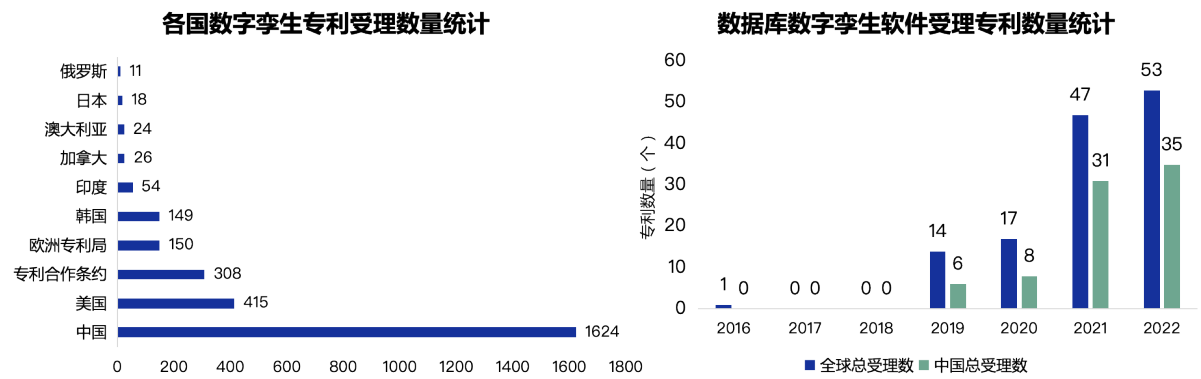
截止 2022 年底，学术界共发表数字孪生相关论文 11,308 篇，其中中国发表 2,115 篇，占比近 19%。尤其自 2017 年以来，数字孪生相关文献数量特别是期刊论文数量呈指数增长，表明了中国对数字孪生的研究越来越深入和系统。

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生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

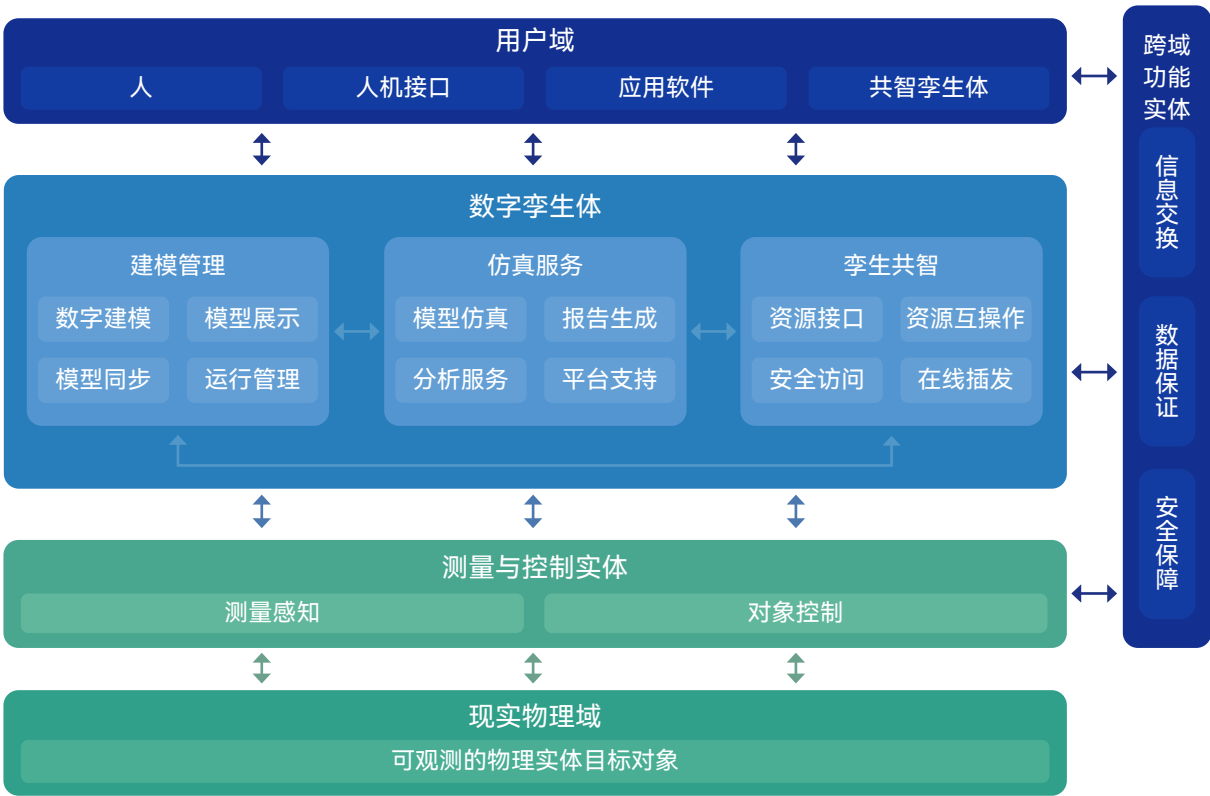
中国信通院 2021 年发布了《工业数字孪生白皮书》，建立了基于网络、计算和数据的数字支撑技术体系，提出了“工业数字孪生技术架构”。

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 国内外数字孪生标准体系简介

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。

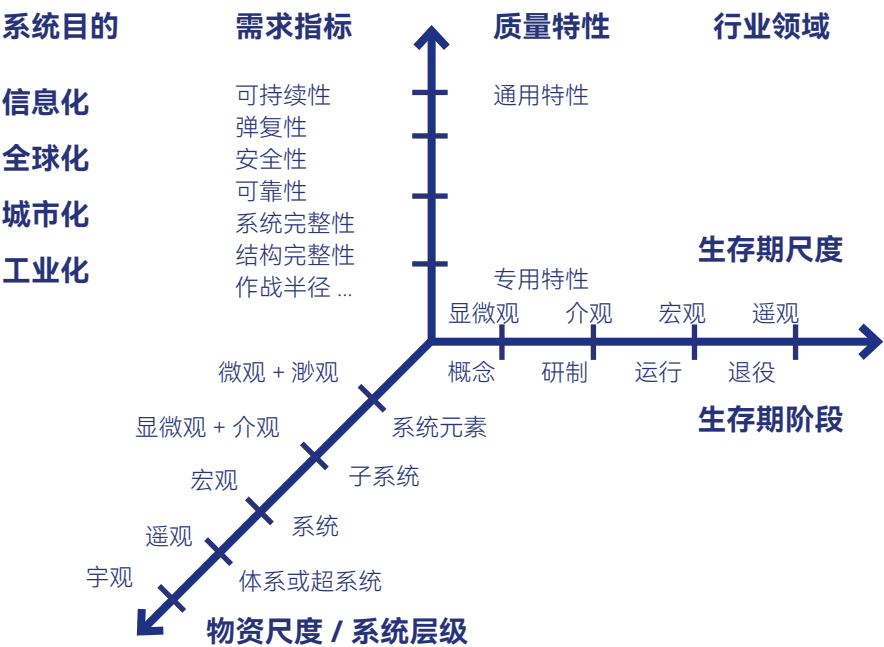
数字孪生标准化工作对数字孪生技术应用推广的作用包括提高数字孪生互操作性、规范数字孪生建模方法、促进数字孪生技术发展、加强数字孪生技术安全性。

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

2.2.4 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

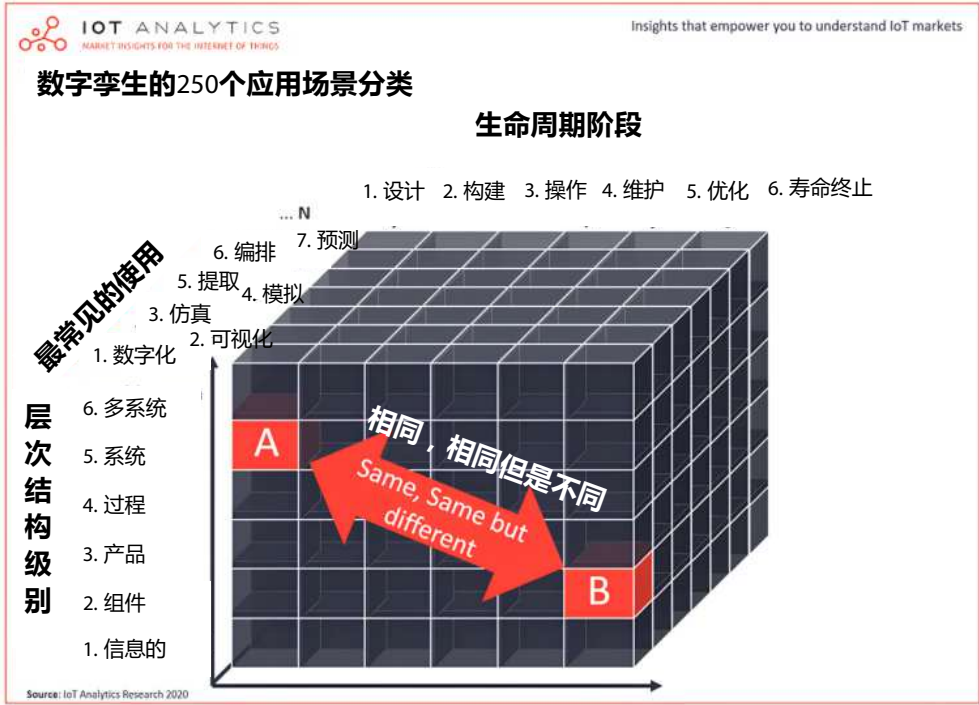
数字孪生体实验室白皮书³⁴ 基于数字孪生体概念模型和数字孪生系统参考架构，将系统目的、系统层次 / 物质尺度和系统生存期三个维度构成的三维空间作为数字孪生体应用场景的参考框架：



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>

2.5 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。

03

物流数字孪生概念及系统参考架构

03

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“⁴⁴ 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。

”

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

物流数字孪生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。

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

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。

04

物流数字孪生价值与应用

05

物流数字孪生赋能供应链

05 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》⁶⁸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。

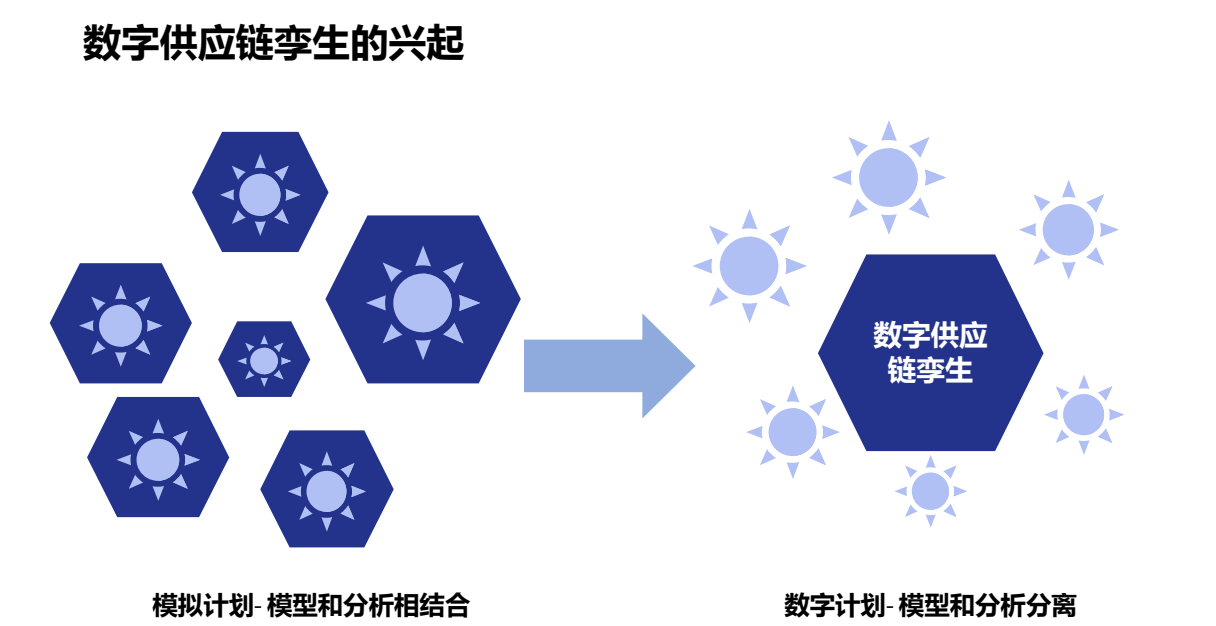
03 自动化

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

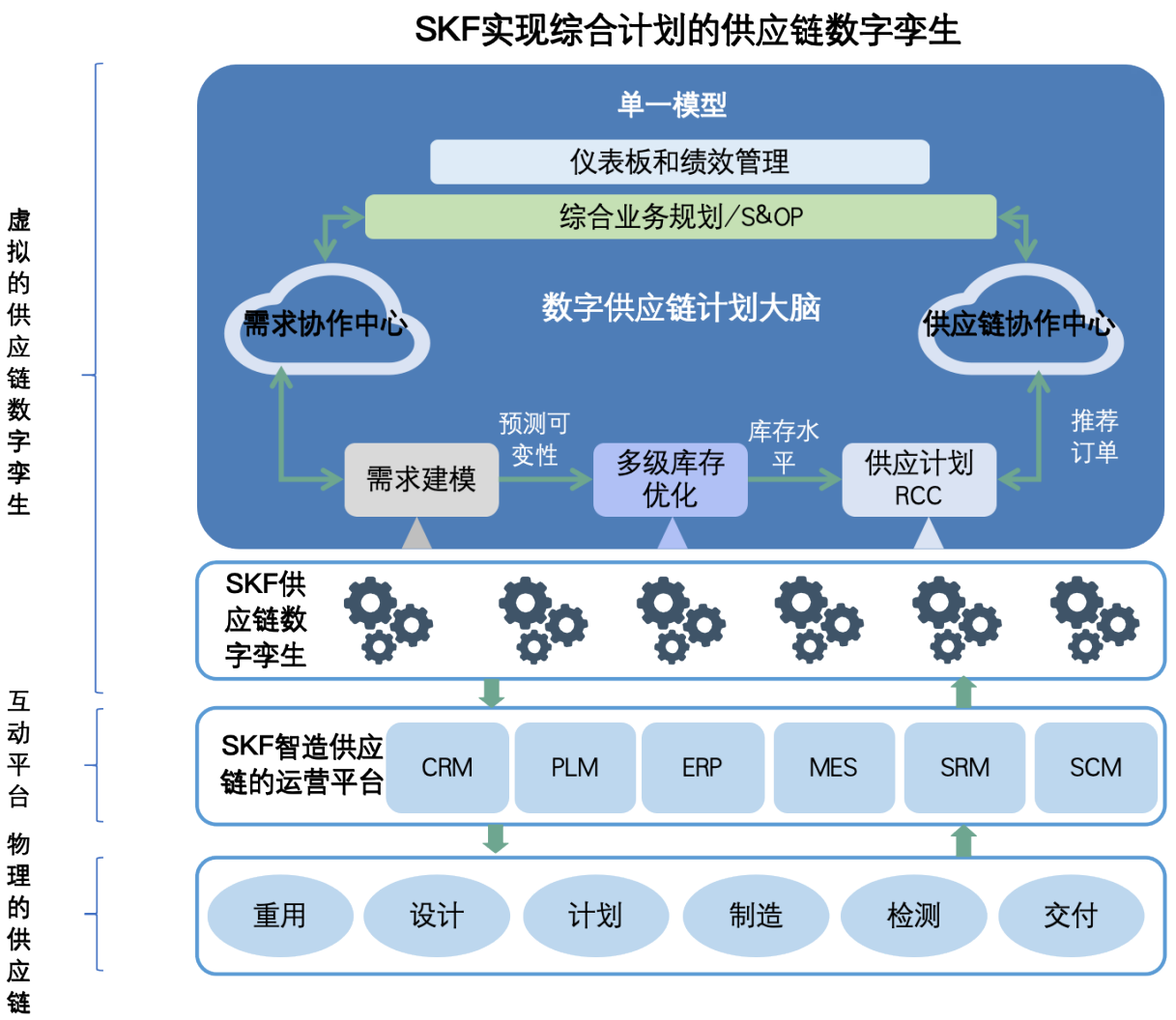
⁶⁹ 参考文献：Tim Payne，数字化规划需要数字化供应链孪生，Gartner，2018

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。



图表 37 数字计划孪生—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。



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：

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

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。

06

顺丰物流数字孪生创新应用

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。

08

展望未来发展趋势

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！

