

基于数字孪生技术供应链成本管理优化研究

罗雅情

武汉交通职业学院物流学院, 湖北武汉, 中国

【摘要】随着数字孪生技术不断发展,其在供应链成本管理优化领域的应用逐渐受到关注。数字孪生技术通过构建虚拟模型,实现供应链全流程的实时监控与精准模拟,优化仓储布局、运输路径及设备维护策略,显著降低库存积压、运输成本和设备故障损失。同时,该技术打破信息孤岛,促进供应链各环节协同运作。本文提出数字孪生技术在供应链成本管理中的优化策略,旨在为企业降低成本、提升效率的新思路,推动供应链管理智能化与数字化转型。

【关键词】数字孪生; 供应链; 成本管理; 优化策略

【基金项目】2025年度中国物流学会、中国物流与采购联合会课题“基于数字孪生技术供应链成本管理优化研究”(编号:2025CSLKT3-186)

1. 引言

随着数字经济的快速发展,数字化转型成为各行业的重要发展方向。数字孪生技术与大数据、人工智能、物联网等技术的深度融合,进一步推动了产业升级和资源优化配置。全球经济的深度互联和数字化转型的加速推进,现代供应链正经历着深刻的变革,其特征愈发显著地表现为网络化、动态化和智能化。这种趋势不仅重塑了供应链的运作模式,也推动了其在全球范围内的高效协同与创新发展。

2. 数字孪生技术概念与发展趋势

数字孪生技术(Digital Twin Technology)是近年来随着物联网、大数据、云计算、人工智能等技术发展而迅速崛起的新兴技术。它通过构建物理实体的虚拟数字模型,实现对物理实体的实时监控、优化和预测,从而为各行业提供智能化解决方案。随着工业4.0和智能制造的推进,数字孪生技术已成为推动产业升级和转型的关键技术之一。自2017年起连续三年被全球权威咨询机构Gartner纳入“未来科技十大趋势”,并受到国家层面的高度关注与政策支持[1]。

2020年4月,国家发改委印发的《关于推进“上云用数赋智”行动,培育新经济发展实施方案》明确提出,围绕解决企业在数字化转型过程中面临的挑战,应提出数字孪生技术的解决方案。数字孪生技术与云计算、人工智能(AI)、5G等前沿技术一样,已成为国家战略层面的重要技术方向。2021年12月,国家相关部门印发《“十四五”数字经济发展规划》明确提出要加快数字孪生技术在工业互联

网、智慧城市、智能制造等领域的应用,推动物理世界与数字世界的深度融合。2024年11月,国家相关部门印发了《有效降低全社会物流成本行动方案》。该方案明确提出要大力加强仓配运智能一体化、数字孪生等技术应用,积极创新规模化应用场景。这一政策为数字孪生技术在物流领域的应用提供了明确的政策支持,推动其在降低物流成本方面的潜力发挥[2]。国家各部委陆续出台的政策文件持续强调对新兴技术的重视,为数字孪生技术的发展与应用落地提供了有力的政策支撑。这些政策的出台不仅推动了数字孪生技术在理论研究上的深化,也加速了其在实际场景中的广泛应用,特别是在供应链管理、智能制造、智慧城市等领域。

在供应链管理中,数字孪生技术可以构建整个供应链的数字模型,包括供应商、制造商、分销商和零售商等各个环节。通过整合物联网、大数据和人工智能等技术,数字孪生能够实时收集和处理供应链各环节的数据,为管理者提供全面的可视化信息和深入的洞察分析。

3. 供应链成本管理的现状分析

供应链成本管理是企业供应链管理中的核心环节,是指通过对供应链各环节的成本进行识别、分析、控制和优化,以实现供应链整体成本最低化的过程。它不仅关注直接成本,如采购成本、运输成本和库存成本,还涉及间接成本,如管理成本、机会成本和客户满意度成本等。供应链成本管理的目标是通过协调供应链各环节的成本,实现成本与效益的平衡,从而提升供应链的竞争力和可持续发展能力。

在当前全球化、数字化和市场竞争日益激烈的背景下，供应链成本管理已成为企业获取竞争优势的关键领域。企业逐渐意识到，仅仅关注局部成本的降低已经不足以应对复杂的市场环境，而是需要从全局视角出发，优化整个供应链的成本结构[3]。

首先，数字化技术的广泛应用正在重塑供应链成本管理的模式。许多企业通过引入物联网、大数据分析和人工智能等技术，实现了供应链成本管理的精细化和智能化。例如，小米集团通过智能生产线和数字化监控，实现了对生产过程的实时监控与数据分析，有效降低了营业成本。海尔智家则通过数智化手段优化仓储物流成本管理，提升了资源利用效率。其次，供应链成本管理的范围正在不断扩大。传统上，企业主要关注采购成本和生产成本，而现在的成本管理已经延伸到供应链的全生命周期，包括采购、生产、物流、销售和售后服务等各个环节。企业开始采用“总拥有成本（TCO）”的概念，不仅关注产品的采购价格，还考虑运输、库存、维护和处置等成本。同时，隐性成本的管理也受到了更多重视，例如库存积压、供应链中断、运输延误等以往容易被忽视的成本，现在都被纳入成本管理的范畴。最后，供应链协同和合作伙伴关系的深化也是当前成本管理的一个重要趋势。企业逐渐意识到，单打独斗的成本优化模式已经无法适应复杂的市场环境，必须通过与供应商、物流服务商和客户之间的紧密合作来实现整体成本的降低。

4. 供应链成本管理存在的问题

尽管供应链成本管理在技术和理念上取得了显著进展，但仍面临一些挑战。这些问题不仅影响企业的运营效率，还直接关系到企业的竞争力和盈利能力。

首先，信息孤岛与协同不足是供应链成本管理的核心问题之一。尽管数字化工具的应用逐步普及，但许多企业的系统之间缺乏有效整合，导致信息孤岛现象严重。供应链涉及多个环节和众多参与者，企业内部的IT系统与供应商的系统之间往往难以实现无缝对接，导致信息传递不畅。例如，订单信息传递延迟或错误，不仅影响生产计划的准确性，还可能导致库存积压或缺货[4]。此外，供应链上下游企业之间的协同性差，信息不对称，导致库存积压、生产计划不合理、运输效率低下等问题，使得企业在资源分配和物流安排上难以达到最优状态。

其次，需求预测不准确是供应链成本管理

中的另一个关键问题。市场需求受到多种因素的影响，如季节性变化、经济波动、消费者偏好等。市场需求的不确定性使得企业难以准确预测未来的销售量，从而导致库存管理困难。传统的需求预测方法往往依赖于历史数据和简单的统计模型，难以应对快速变化的市场环境。如果预测过高，企业可能会积压大量库存，增加仓储成本和资金占用；如果预测过低，则可能导致缺货，影响客户满意度并增加紧急采购的成本。这种需求预测的不准确性不仅增加了供应链的运营成本，还可能导致企业错失市场机会。

最后，风险管理能力不足也是企业面临的重要问题。供应链的复杂性使其面临着诸多风险，如供应中断、需求波动、运输延误等。然而，企业在应对这些风险时往往显得力不从心。传统的供应链管理往往依赖于事后应对，缺乏事前预警和预防机制，企业在面对突发事件时，往往只能被动应对，这种被动式的风险管理方式会增加供应链的不确定性和成本[5]。

5. 基于数字孪生技术供应链成本管理优化策略

5.1 构建数字孪生供应链管理平台

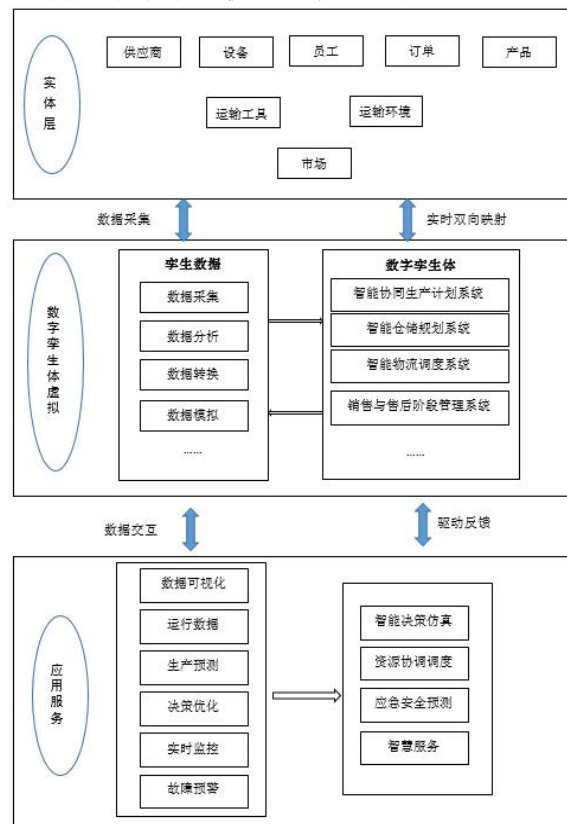


图 1. 数字孪生供应链成本管理平台体系架构

构建数字孪生供应链管理平台需要明确将供应链的物理实体（如供应商、生产线、仓

储、物流等)映射为数字孪生模型,并实现数据的实时采集、传输和分析。通过这一平台,企业能够将供应链的各个环节数字化,形成一个虚拟的供应链生态系统,从而为成本管理提供数据支持和优化基础。数字孪生的核心要素包括物理实体、虚拟模型、孪生数据、连接和服务。基于供应链全流程模型,构建数字孪生供应链成本管理平台体系架构,如图1所示。

5.1.1 智能协同生产计划系统

智能协同生产计划系统,首先从数据采集与建模开始,会实时收集生产设备运行参数、物料库存状态、订单需求信息及人员配置情况等全要素数据,以此构建与物理工厂完全映射的数字孪生模型;接着进入计划模拟与优化阶段,在数字孪生环境中输入具体生产需求,对不同排产方案(如设备负载分配、物料配送路径规划等)进行模拟推演,借助算法筛选出最优生产计划;随后是协同执行与监控环节,将优化后的计划下发至物理生产系统,同时实时同步数字孪生模型与物理系统的运行状态,动态追踪订单进度、设备是否正常运转、物料是否短缺等情况;最后是动态调整与反馈步骤,当物理系统出现设备停机、质量波动等异常时,数字孪生模型会实时发出预警,重新模拟并生成调整方案,快速下发新计划,同时将执行过程中的数据反馈至系统,持续优化算法模型。

该系统的核心作用体现在多个方面,它能够通过数字孪生的模拟功能规避物理试错成本,减少设备重叠使用、物料断供等排产冲突,大幅提升计划准确性;还能打破生产、物料、设备、订单等部门间的数据壁垒,实现“计划-执行-监控-调整”的端到端协同,显著降低跨部门沟通成本;同时,通过实时优化设备负载与物料配送路径,减少设备空转率和物料浪费,有效提升资源利用率;另外,面对生产异常时,数字孪生的实时预警和快速方案生成能力,能缩短异常处理时间,保障生产稳定运行[6]。

5.1.2 智能仓储规划系统

基于数字孪生技术的智能仓储规划系统,其作业流程始于物理仓储环境的数据采集与映射,通过物联网设备实时捕捉货架位置、货物信息、设备状态等数据,构建与物理仓库1:1对应的数字孪生模型。在规划阶段,系统依托数字孪生模型进行虚拟仿真,模拟货物入库、存储分配、拣选路径、出库调度等全流程,可提前排查路径拥堵、空间利用率低等问题,并通过算法优化生成最优作业方案;方案确定后,系统将指令同步至物理仓库的自动化设备(如

AGV、机械臂),指导实际作业,同时实时接收物理端反馈数据,动态更新数字孪生模型,确保虚拟与物理场景的实时同步,实现作业过程的闭环管控。

该系统的核心作用,一方面体现在提升仓储运营效率上,通过虚拟仿真优化减少设备空跑、路径冗余等问题,缩短货物周转时间,同时借助实时数据监控实现设备故障预警与快速排查,降低停机风险;另一方面,它能精准提升仓储空间与资源利用率,通过数字孪生模型对货架布局、货物存储策略进行反复模拟优化,最大化利用仓储空间,还可根据历史数据预测货物流量,合理调配人力、设备资源,避免资源浪费。此外,系统还具备较强的柔性适配能力,当仓储需求(如货物品类变化、订单峰值波动)调整时,无需对物理仓库进行大规模改造,只需在数字孪生模型中调整参数并仿真验证,即可快速适配新的作业需求。

5.1.3 智能物流调度系统

智能物流调度系统的作业流程以全链路数据贯通为核心,首先通过物联网设备实时采集物流网络中的关键数据,包括运输车辆位置、货物实时状态(温度、湿度、完整性)、仓储库存水平、配送站点订单量及道路通行状况等,将这些物理世界的动态信息同步映射到数字孪生模型中,构建出与实际物流网络完全匹配的虚拟调度场景。在调度决策阶段,系统依托数字孪生模型对多维度数据进行整合分析,结合订单优先级、运输成本、时效要求等参数,通过算法模拟不同调度方案下的运输路径、车辆分配、货物中转衔接等全流程,提前预判可能出现的拥堵、运力不足或货物延误风险,并自动优化生成最优调度方案[7]。方案执行过程中,系统持续接收物理端的实时反馈数据,动态更新数字孪生模型,若出现突发状况(如道路临时封闭、车辆故障),模型可快速模拟调整后的调度路径与资源分配方案,同步将新指令下发至对应的运输车辆、仓储站点或配送人员,实现调度方案的实时动态修正,形成“数据采集-虚拟仿真-优化决策-实际执行-动态反馈”的闭环作业流程。

该系统的核心作用体现在对物流全链路效率与精准度的双重提升上:一方面,通过数字孪生的虚拟仿真与优化,避免了传统调度依赖人工经验导致的运力浪费、路径冗余等问题,例如通过合理规划运输路线减少车辆空驶率,优化车辆与货物的匹配关系提升装载率,同时基于实时路况动态调整路径,缩短货物运输时

效；另一方面，借助数字孪生模型对货物状态的全程可视化监控，可精准追踪货物位置与状态，有效降低货物丢失、损坏的风险，尤其针对生鲜、医药等对运输环境敏感的货物，能通过实时监控温湿度并联动调整运输条件，保障货物质量。此外，系统还具备强大的资源协同能力，可打破物流网络中仓储、运输、配送等环节的信息壁垒，实现跨区域、跨环节的运力资源（车辆、人员、仓储空间）动态调配，例如当某区域出现订单峰值时，能快速从邻近区域调度闲置运力支援，避免局部运力紧张或过剩，提升整个物流网络的资源利用率。

5.2 通过数字孪生技术实现供应链成本的实时监控与动态优化

传统供应链成本管理往往依赖于历史数据和静态分析，难以应对快速变化的市场环境。数字孪生技术能够实时获取供应链各环节的数据，包括生产、仓储、运输等。通过物联网传感器，企业可以实时监控货物的位置、状态、库存水平以及设备的运行情况。例如，在仓储环节，数字孪生模型可以实时反映仓库内的货物存储情况、设备运行状态，帮助企业精准掌握仓储成本。在运输过程中，通过实时跟踪货物的位置、速度和运输环境，企业可以优化运输路径，降低运输成本。数字孪生技术还可实时监测物流设备的运行状态和性能指标，预测设备故障和部件损耗时间。企业可以提前安排维护，避免突发故障导致的物流中断和高额维修成本，延长设备使用寿命，降低维护成本[8]。

在动态优化方面，数字孪生技术利用先进的仿真和预测算法，对供应链的未来状态进行模拟和预测。这些预测不仅考虑了当前的操作条件，还纳入了市场需求变化、供应链中断风险等多种外部因素。基于这些预测结果，系统能够自动生成优化建议，如调整生产计划以适应市场需求波动、优化库存策略以降低持有成本、改进物流路径以减少运输成本等。这些建议旨在帮助管理者在保持供应链灵活性的同时，最大限度地降低成本。

5.3 利用数字孪生技术提升供应链成本预测与风险管理的能力

在供应链成本预测方面，数字孪生技术通过集成各类数据源，包括物联网传感器、企业资源规划系统、财务系统等，实时捕捉和分析供应链中的成本数据。这些数据涵盖了原材料采购、生产制造、物流配送、库存管理等各个环节，为成本预测提供了丰富的素材[9]。通过运用先进的算法和模型，数字孪生能够准确预

测未来的成本变动趋势，帮助企业提前制定成本控制策略。例如，当原材料价格波动时，数字孪生可以迅速分析这一变化对生产成本的影响，并为企业提供调整采购策略、优化生产计划等建议，以最小化成本波动带来的风险。

在风险管理方面，数字孪生技术通过模拟和预测，为企业提供了强大的风险预警和应对能力。它能够实时监控供应链各环节的状态，识别潜在的风险点。例如，在运输过程中，数字孪生技术可以结合实时交通数据、天气情况等，优化运输路线，降低运输延误的风险。此外，通过模拟供应链中断等极端情况，企业可以提前制定应对预案，增强供应链的韧性。

5.4 通过数字孪生技术实现供应链各环节的协同与共享

供应链成本管理不仅涉及企业内部，还涉及供应商、制造商、分销商等多个外部主体。传统的供应链管理往往存在信息不对称和协调困难的问题，导致成本增加。数字孪生技术打破供应链各环节之间的信息孤岛，将供应商、生产商、物流商和零售商等各方连接到统一的数字化平台上[10]。各方可以实时共享信息，协同开展需求预测、生产计划和物流配送安排，减少库存积压和缺货损失，降低整体供应链成本。例如，企业可以通过数字孪生模型与供应商共享生产计划和库存信息，确保原材料的及时供应，避免因供应链中断导致的成本增加。

6. 结语

数字孪生技术为供应链成本管理提供了全新的优化思路。通过构建供应链的数字孪生模型，企业可以实现供应链的实时监控、预测和优化，从而降低供应链成本，提高运营效率。然而，数字孪生技术的应用也面临着数据安全、技术集成等挑战。未来，企业需要还进一步加强技术研发和人才培养，推动数字孪生技术在供应链管理中的广泛应用。

参考文献

- [1]许继平, 孔德政, 王昭洋, 等. 基于工业互联网的大米供应链数字孪生系统构建[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 372-381.
- [2]刘佳兴, 和征, 杨小红, 供应链数字孪生系统构建研究[J]. 智能制造, 2024, (02): 82-89.
- [3]杨洋. 数字孪生技术在供应链管理中的应用与挑战[J]. 中国流通经济, 2019, 33(6): 58-65.
- [4]白燕飞, 翟冬雪, 吴德林, 等. 基于区块链

- 的供应链金融平台优化策略研究[J]. 金融经济研究, 2020, 35 (4): 119-132.
- [5]张椿琳.数字孪生好比供应链的“雷达”[J]. 经营者(汽车商业评论), 2021 (03): 92-94.
- [6]庄存波, 刘检华, 熊辉, 等.产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势[J].计算机集成制造系统, 2017, 23 (4): 753-768.
- [7]辜明华.基于大数据的内部供应链成本控制策略探究[J].财会通讯, 2019 (8): 91-95.
- [8]向燕.大数据分析在企业供应链成本管理中的应用探讨[J].中国物流与采购, 2024, (02): 59-60.
- [9]杨俊.大数据背景下电商企业供应链成本管理分析[J].互联网周刊, 2023 (01): 23-25.
- [10]孙丽丽, 李富忠.大数据背景下现代农业连锁品牌演化逻辑—基于物流供应链的分析[J].商业经济研究, 2021 (3): 127-130.