

# Construction of dynamic control model of material procurement and contract performance driven by digital twin technology

Chengcheng Song<sup>1</sup> Dayang Wang<sup>1</sup> Man Li<sup>2</sup>

1.State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Lu'an Power Supply Company, Lu'an, Anhui, 237000

2.State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Lu'an Yeji Power Supply Company, Lu'an, Anhui, 237431

## Abstract

This study investigates the application of digital twin technology in material procurement and contract fulfillment management. Addressing critical pain points in traditional procurement processes—including redundant workflows, information silos, and high fulfillment risks—the research establishes a dynamic control model. The paper analyzes the traceability, conceptual framework, and core components of digital twin technology, highlighting its defining characteristics as “physical-virtual mapping” and “data-driven operations.” It examines the limitations of traditional linear procurement models and systemic challenges in fulfillment management. Building on this foundation, a four-layer architecture model—“physical entity → virtual mapping → data interaction → decision optimization”—is proposed. The study details data collection strategies, implementation pathways for model construction, and operational mechanisms of dynamic control. The findings demonstrate that this model enables full-process visual monitoring, intelligent scheduling, and risk early warning systems, providing both technical support and practical solutions to overcome challenges in material procurement and fulfillment management.

## Keywords

digital twin technology; material procurement; dynamic management; model construction

# 数字孪生技术驱动的物资采购与履约动态管控模型构建

宋诚诚<sup>1</sup> 王大洋<sup>1</sup> 李满<sup>2</sup>

1. 国网安徽省电力有限公司六安供电公司, 中国·安徽 六安 237000

2. 国网安徽省电力有限公司六安市叶集供电公司, 中国·安徽 六安 237431

## 摘要

本文研究数字孪生技术在物资采购以及履约管控方面的应用, 针对传统采购流程存在冗余情况、形成信息孤岛以及履约风险较高等诸多痛点问题, 构建了动态管控模型。对数字孪生技术的溯源、内涵以及核心构成展开剖析, 明确其有“虚实映射、数据驱动”这样的技术特性, 分析传统物资采购流程的线性模式所存在的缺陷以及履约管控面临的系统性挑战。基于此提出了“物理实体—虚拟映射—数据交互—决策优化”的四层架构模型, 阐述了数据采集处理的相关策略、模型构建的实现路径以及动态管控的功能机制。研究显示, 该模型可达成采购全流程的可视化监控、智能调度以及风险预警, 为解决物资采购与履约管控方面的困境提供了技术支撑以及实践路径。

## 关键词

数字孪生技术; 物资采购; 动态管理; 模型构建

## 1 引言

在工业数字化转型加快推进的大背景下, 物资采购以及履约身为供应链的核心环节, 其管控效率会直接对企业运营成本以及市场响应速度产生影响。在传统模式当中, 采购流程存在冗长的情况、信息存在不对称的问题、履约风险难以进行预判等诸多问题突显出来, 对供应链协同效率的提升形成了制约。数字孪生技术作为达成物理世界与虚拟世界实时交互的关键技术, 已经在制造业、物流等领域呈现出可优

化流程、实现精准决策的优势, 面对物资采购全链条所有的复杂性与动态性, 如何借助数字孪生技术构建智能化管控模型, 打破信息壁垒、提高履约透明度、降低运营风险, 成了迫切需要解决的关键问题。

## 2 数字孪生技术剖析

### 2.1 技术溯源与内涵

数字孪生技术这一概念最早可追溯到 2003 年, 当时美国密歇根大学的迈克尔·格里夫斯在产品生命周期管理课程里提出了“物理产品的数字等价物”这一理念, 其核心内涵是运用数字化方式构建物理实体的虚拟映射, 实现物理世界与虚拟世界的实时交互以及协同<sup>[1]</sup>。这项技术以数据作为组

【作者简介】宋诚诚(1989-), 男, 中国安徽六安人, 本科, 工程师, 从事电气工程研究。

带，融合了传感器感知、三维建模、物联网等多项技术，打造出动态更新的虚拟模型。它可以精确复刻物理实体的形态与性能，还可模拟运行过程、预测潜在问题，形成“感知—建模—分析—决策—优化”的闭环，为全生命周期管理给予智能化支撑，成为工业数字化转型的关键技术之一。

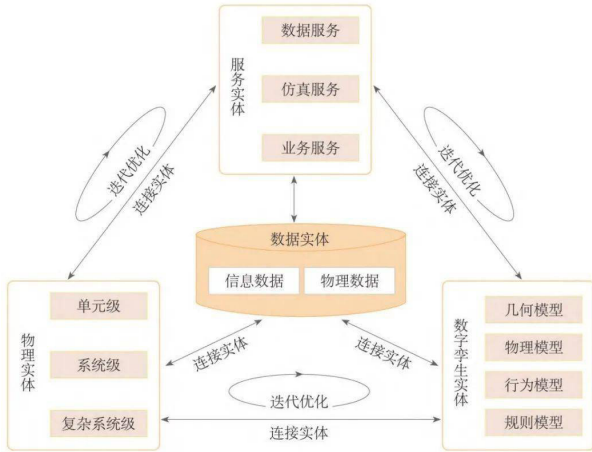


图1 数字孪生技术模型

## 2.2 技术构成与关键技术

数字孪生技术体系主要是由数据层、模型层以及应用层这三大核心部分所组成。其中数据层依靠物联网传感器、RFID以及工业互联网等手段来实现物理实体数据的实时采集与传输，所涉及的信息包含状态数据、环境数据等多个维度，模型层借助三维建模、机理建模以及数据驱动建模等技术来构建高保真虚拟模型，以此实现物理特性与行为的精确映射。关键支撑技术有实时数据处理技术、高性能仿真引擎、数字线程技术以及人工智能算法，这些技术一同保障虚拟模型与物理实体有同步性、动态性以及交互性，为各类场景应用奠定技术基础<sup>[2]</sup>。

## 3 物资采购与履约动态管控的现状困境

### 3.1 传统物资采购流程解析与痛点挖掘

传统物资采购流程一般依照“需求申报—招标采购—合同签订—验收入库—付款结算”的线性模式来进行，需求部门把采购申请提交上去之后，要经过多层审批的流转过程，借助线下招标或者询价的方式来确定供应商，合同签订完毕后就进入到履约阶段，最后依据验收单来完成付款。该流程存在着一些十分突出的问题：其一，流程存在冗余且效率不高的情况，人工审批环节较多致使周期变得很长，平均采购周期相较于数字化模式要长出30%以上。其二，信息孤岛现象非常严重，需求端和供应端的数据处于割裂状态，需求预测依靠经验判断，容易出现过量采购或者库存短缺的状况。其三，对供应商的管理比较粗放，缺少动态评估机制，很难实时了解供应商资质的变化。其四，成本控制比较滞后，采购价格与市场波动不一致，议价的时候缺乏数据的支持。其五，过程透明度不够，存在暗箱操作的风险，合规监管难

度较大，对采购效率和效益的提升形成了制约。

### 3.2 履约动态管控的难点与风险剖析

履约动态管控在物资生产、运输以及验收的整个流程中都有体现，面临着诸多难点和风险，就管控难点而言，供应链节点较为分散，造成信息不对称，供应商的生产进度、物流运输状态等关键信息难以及时获取，使得监控出现滞后情况，多种品类的物资特性差异较大，对于存储环境以及运输条件有着各不相同的要求，制定统一的管控标准存在困难，跨部门协同不够顺畅，采购、仓储、财务等部门的数据没有打通，履约异常时的响应效率较低<sup>[3]</sup>。在风险层面主要有：供应商履约能力波动带来的风险，比如产能不足、质量不达标致使交货延迟，物流环节的风险，极端天气、交通管制等突发状况会影响物资按时送达，合同条款执行存在偏差的风险，付款条件与验收标准不匹配会引发纠纷，库存衔接的风险，过早到货会占用仓储资源，或者延迟到货会导致生产停工，这些问题共同构成了履约管控的系统性挑战。

## 4 数字孪生技术驱动的物资采购与履约动态管控模型构建

### 4.1 模型构建的总体架构与设计思路

模型构建运用“物理实体—虚拟映射—数据交互—决策优化”的四层架构来进行设计。物理层包含物资采购整个链条的实体要素，像供应商的生产设备、物流运输的工具、仓储设施以及采购管理系统等。虚拟层借助数字建模技术构建出物理实体的精确镜像，实现形态、状态、行为的数字化复制。数据交互层依靠物联网、5G等技术搭建实时数据传输的通道，实现物理层与虚拟层的双向数据流动。决策优化层集成人工智能算法，经由虚拟仿真分析对采购计划、履约调度以及风险应对策略加以优化，设计思路把“数据驱动、虚实融合、动态协同”当作核心，着重全流程可视化管控与智能化决策支持，构建覆盖采购需求、供应商选择、合同执行、物流跟踪、验收结算的全生命周期管控体系<sup>[4]</sup>。

### 4.2 数据采集与处理策略

数据采集运用“全域感知、多维采集”的策略，依靠分布式传感器网络、RFID标签以及智能终端等设备，实时收集物资采购与履约各个环节的数据，这些数据涉及了供应商基础信息，像是资质、产能以及历史履约记录，生产过程数据，例如设备运行参数、生产进度以及质量检测数据；物流数据，包含运输位置、温湿度、振动等环境参数以及在途时间；仓储数据，有库存数量、存储条件以及出入库记录，以及需求数据，如采购申请、需求变更以及消耗速率等。数据处理依照“标准化、实时化、智能化”的原则，构建多级数据处理体系，边缘层对原始数据做预处理，过滤噪声并压缩数据量，传输层采用加密传输协议保障数据安全，云端层借助数据清洗、格式转换、关联融合等技术形成标准化数据集，分析层运用数据挖掘、机器学习算法提取关键特征与

关联规则,构建采购需求预测模型、供应商评估模型以及履约风险预警模型。建立数据质量管控机制,依靠异常值检测、数据校验等方式保证数据准确性与完整性,为模型决策提供可靠的数据支撑。

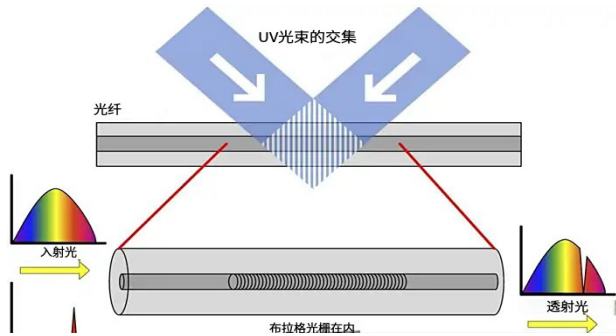


图2 分布式传感器

#### 4.3 数字孪生模型的构建与实现

数字孪生模型构建运用“多尺度建模、分步集成”办法,分阶段实现物理实体的数字化映射,一开始开展基础几何建模,借助三维扫描、CAD建模等技术打造供应商厂区、物流路线、仓储设施的精确三维模型,还原物理空间布局情况,接着进行行为建模,依据机理分析与数据驱动相结合的形式,构建生产设备运行模型、物流运输动态模型、库存变动模型等,精确模拟实体行为规律<sup>[5]</sup>。关键实现技术有:运用数字线程技术连通各环节数据链路,实现模型数据的实时更新,采用多体动力学、流体力学等仿真引擎提高模型动态仿真精度,借助数字孪生体间的关联建模实现跨实体协同仿真,模型实现过程中要建立动态更新机制,依照物理实体状态变化与数据反馈持续优化模型参数,保证虚拟模型与物理实体的高度同步。同时开发模型配置工具,支持用户依照业务需求自定义模型参数与仿真场景,提高模型的适应性与扩展性,最终形成可交互、可分析、可预测的高保真数字孪生模型。

#### 4.4 动态管控功能的实现机制

动态管控功能借助“虚实交互、仿真优化”机制实现全流程智能化管控,实时监控功能依靠虚拟模型与物理实体的实时数据同步。在虚拟空间搭建采购与履约全流程可视化看板,清晰呈现供应商生产进度、物资在途状态、库存水平等关键指标,实现异常状态自动标识以及实时告警,智能

调度机制运用虚拟仿真技术模拟不同采购方案、运输路线、库存策略的实施效果,依据成本、效率、风险等多目标优化算法生成最优调度方案,如动态调整采购批次、优化运输路径、合理配置仓储资源等。风险管控机制凭借构建虚拟测试环境,模拟供应商违约、物流延迟、质量异常等风险场景,采用蒙特卡洛仿真等方法评估风险影响程度,自动生成风险应对预案,协同管控机制支持多主体在线协同,借助虚拟模型共享实现采购方、供应商、物流方的实时信息交互与业务协同,打通需求对接、问题协商、进度跟踪的沟通渠道,形成动态响应的闭环管控体系,提高采购与履约过程的灵活性与抗风险能力。

## 5 结语

本文构建了由数字孪生技术驱动的物质采购与履约动态管控模型,为解决传统管控模式面临的困境提供了新的思考方向,此模型依靠四层架构达成物理实体与虚拟空间的紧密融合,凭借全域数据采集以及智能处理构建决策支撑体系,借助动态管控机制提高采购全流程的可视程度与可控程度。研究说明,数字孪生技术可有效提升采购流程效率、提高履约风险预判能力、推动供应链多方协同。未来的研究可以拓展模型在多品类物资适配、跨企业数据共享等应用深度,同时关注技术落地过程中的成本控制与数据安全问题,促使该模型在实践中不断优化并得以推广。

## 参考文献

- [1] 肖志勇,李华,刘朝霞. 基于云计算技术的船载物资调度系统设计[J]. 现代信息科技, 2023, 7 (03): 75-78+82. DOI:10.19850/j.cnki.2096-4706.2023.03.017.
- [2] 赵叶,李文院,涂潇波,等. 数字孪生技术在电力物资仓储管理中的应用[J]. 海峡科学, 2022, (08): 71-73+81.
- [3] 郭振,王嘉燕,翟韦. 基于数字孪生技术的EPC项目物资数据库建设[J]. 建筑施工, 2022, 44 (05): 1063-1066. DOI:10.14144/j.cnki.jzsg.2022.05.053.
- [4] 冯曙明, 基于边缘计算的数字孪生仓储协同调度关键技术及应用. 江苏省, 江苏电力信息技术有限公司, 2021-12-01.
- [5] 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 (06): 58-65. DOI:10.14089/j.cnki.cn11-3664/f.2019.06.006.