

基于工业物联网的跨境机械电商智能供应链协同模式研究

——以港口机械为例

褚晓毅

上海理工大学机械工程学院，上海

收稿日期：2025年12月12日；录用日期：2025年12月25日；发布日期：2025年12月31日

摘要

随着近年来工业4.0和贸易数字化在全球各行各业风靡，传统机械行业也面临机遇和挑战，传统机械行业存在产品定制化高、物流不确定性强、供应链协同较差等问题，传统电商模式较难与之进行匹配融合。本文以港口机械这一传统机械领域为例，融合时下流行的工业物联网(IoT)、大数据、区块链等新兴技术，构建跨境机械电商智能供应链协同模式。设计“需求-生产-物流-售后”全流程协同架构，解决原先港口机械跨境贸易存在的诸多问题，明确建立该平台的核心功能与实现路径，并以某港口机械企业跨境电商实践为例验证模式可行性。经调研验证，该模式可有效降低供应链响应周期30%以上，减少物流成本15%~20%，助力传统机械电商行业转型升级。

关键词

跨境机械电商，智能供应链协同，工业物联网，港口机械

Research on Intelligent Supply Chain Collaboration Models for Cross-Border Mechanical E-Commerce Based on Industrial IoT

—A Case Study of Port Machinery

Xiaoyi Chu

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: December 12, 2025; accepted: December 25, 2025; published: December 31, 2025

Abstract

With the recent global surge in Industry 4.0 and trade digitization across all industries, the traditional machinery sector faces both opportunities and challenges. This sector grapples with issues such as high product customization, strong logistics uncertainty, and poor supply chain coordination, making it difficult for traditional e-commerce models to integrate effectively. Taking port machinery—a traditional machinery field—as an example, this paper integrates emerging technologies like Industrial Internet of Things (IIoT), big data, and blockchain to establish a cross-border machinery e-commerce intelligent supply chain collaboration model. A comprehensive “demand-production-logistics-after-sales” collaborative framework is designed to resolve multiple challenges in cross-border port machinery trade. The core functionalities and implementation pathways of this platform are clearly defined, with its feasibility validated through the cross-border e-commerce practices of a specific port machinery enterprise. Research confirms this model can effectively reduce supply chain response cycles by over 30% and cut logistics costs by 15%~20%, thereby accelerating the transformation and upgrading of the traditional machinery e-commerce industry.

Keywords

Cross-Border Mechanical E-Commerce, Smart Supply Chain Collaboration, Industrial Internet of Things, Port Machinery

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景

机械工业作为国民经济的支柱产业，其跨境贸易规模持续扩大，2023年全球机械产品贸易总额突破5万亿美元，其中港口机械、工程机械等重型机械跨境贸易占比达18%¹。港口机械是一种特殊的装备制造业，具有数量大、品种多、技术复杂等特点，且大多为大型机电设备。目前，港口机械的生产流程主要包括制造、安装、调试和检修等环节。且港口机械行业具有技术密集、单价高(单台设备价值通常在数百万元至数千万元)、定制化需求突出、物流运输复杂、售后服务依赖强等特性，其跨境贸易长期依赖线下展会、代理商分销统一订购的传统模式[1]。

传统模式下，港口机械跨境贸易具有很大的发展潜力，但也存在诸多亟待解决的核心问题：一是信息存在壁垒，由于各国标准存在不统一，海外客户难以核对并全面获取设备技术参数、生产进度、交付情况等关键信息，供应商也无法对客户的定制化需求进行及时对接；二是供应链协同滞后，因为实地交流考察困难，交付周期易与海外客户需求脱节，物流方案也存在诸多不确定性，导致交付周期长达3~6个月；三是售后反馈不及时，各个机械设备分布于全球各地各个水运、海运港口，传统线下售后模式难以快速解决维修故障设备[2]。

¹中国重型机械工业协会《2023年重型机械行业进出口贸易报告》，2023年12月。

<http://www.chmia.org/detail.html?id=58&contentId=2780>

跨境电商与工业物联网的融合很好地提供了解决上述问题的路径与可能。工业物联网可实现全生命周期地对生产设备数据采集，并通过跨境电商来搭建高效的线上交易平台与客户经销商生产厂家之间信息交流的门户。然而，现有跨境电商平台多扎根于消费品贸易，缺乏针对机械产品个性化的供应链协同设计，难以满足港口机械等高精尖复杂产品的跨境贸易需求。因此，构建适配机械行业特性的智能供应链协同模式，将是决定港口机械产业能否走出去，开拓全球市场的关键[3]。

1.2. 行业现状分析与存在的不足

1.2.1. 机械行业跨境电商发展现状

全球机械行业与跨境电商合作比例逐年提高，至 2023 年这一比例已达到 12.7%，但在机械行业内部这一比例差异显著：普通小型机械(如通用机床配件)电商渗透率已达 25%以上，而港口机械、盾构机等大型复杂机械电商渗透率不足 5%²。

机械企业跨境电商模式主要分为三类：一是利用现有的成熟综合大型跨境电商平台(如阿里巴巴国际站机械专区)，进行产品展示与初步交流问价；二是由企业自行搭建的线上平台，来进行品牌宣传、商品展示与技术推广，但在线上交易与供应链协同功能上还有所欠缺；三是少数龙头企业(如振华重工)构建的一体化电商平台，实现订单管理、物流跟踪与售后管理，但极度依赖品牌影响力，可复制推广难度较大。

从技术应用来看，工业物联网在机械行业的应用主要集中于生产制造环节，在后续跨境贸易时需求对接、物流协同、售后维护等环节的参与度不足。据调研，仅 18%的机械企业利用了工业物联网实现了跨境订单信息与生产系统的实时同步，23%的企业采用物联网技术对跨境商品进行了物流追踪，在售后服务上，其问题商品远程诊断覆盖率不足 15%³ [4]。

1.2.2. 港口机械跨境贸易特性

港口机械作为大型密集型行业与传统小型机械的电商交易方式存在显著区别：一是定制化程度高，需根据港口水文情况、海水深度、吞吐量、贸易货物类型等参数进行专项设计，其中核心部件包括：起重机部分起升机构、运行机构等需单独研发；二是物流运输难度大，单台港口起重机重量可达数百吨，需采用特种运输船舶与吊装设备，有些设备甚至需进行拆装运输完成后再进行组装而且运输过程中还需提前规划港口及航道通航条件；三是生命周期长，单台设备使用寿命通常达 20~30 年，海外客户对备件供应、故障维修等售后服务的要求极高；四是合规要求严格，涉及各国工业安全认证(如欧盟 CE 认证、美国 FDA 认证)、海关特殊监管政策等。这些特性决定了港口机械跨境电商必须以供应链协同为核心，实现需求、生产、物流、售后的全流程全生命周期的管理[5]。

1.2.3. 港口机械跨境贸易存在的主要问题

综合现有研究[6]，港口机械跨境电商领域仍存在显著的研究空白：一是理论层面，现有跨境电商与供应链协同理论多基于消费品或普通机械产品，未充分考虑港口机械“定制化程度极高、物流复杂度高、售后依赖强”的行业特性，缺乏适配复杂机械产品的协同理论体系；二是实践层面，现有电商平台研究多聚焦于“展示 - 交易”核心流程，忽视了港口机械跨境贸易中“需求对接 - 生产协同 - 物流优化 - 售后保障”的全流程协同需求，尤其缺乏对定制化需求精准捕捉、生产进度可视化、特种物流动态优化等关键环节的技术与模式设计；三是技术融合层面，工业物联网、大数据等技术在跨境贸易中的应用多停留在单一环节(如物流跟踪、故障诊断)，未形成“数据采集 - 价值转化 - 信任保障”的全链路技术支撑体系，难以解决港口机械跨境贸易的多环节协同痛点。

²中国机械工业联合会：《2023 年中国机械工业经济运行报告》，2024 年 5 月。

³《企业物联网智能化设备远程诊断平台方案》，2025 年 11 月，<https://max.book118.com/html/2025/1129/7140053166011015.shtml>。

2. 跨境机械电商供应链协同痛点分析——以港口机械为例

2.1. 需求对接痛点

港口机械中机械结构、电气系统、控制程序等核心零部件与控制系统大多都需进行定制化设计，传统模式下存在需求表达失真、沟通试错成本高、周期长等问题。某港口机械企业调研数据显示，对于海外客户的定制化需求平均沟通周期达 45 天，其中 30% 的需求还要进行二次修改，包括由于各国标准不统一导致客户无法直观清晰表达设计诉求，供应商也难以精准捕捉需求细节⁴。此外，由于海外客户往往对设备能耗、环保标准等有着更高要求，而供应商缺乏对目标国家市场政策法规更新的实时掌握，往往会导致需求对接过程中频繁出现合规性调整[7]。

2.2. 生产协同痛点

港口机械生产涉及成千上万个零部件，包含标准件和个性化定制的非标准件，其配套的供应链覆盖全球数十家下游零部件企业，传统模式下生产计划往往与海外订单需求会产生脱节情况，首先由于生产进度不透明，海外客户无法实时查看设备生产状态，导致信任成本高；其次，供应链响应存在滞后延迟，核心零部件供应延迟、生产工艺调整等问题无法及时同步至海外客户，从而导致交付周期延长，影响企业资金流正常运转。某企业数据显示，港口机械跨境订单的平均交付周期为 150 天，其中因供应链协同不畅导致的延期占比达 40%⁵。

2.3. 物流协同痛点

港口机械跨境物流具有“重、大、特”的特点，物流方案有时需要分段运输，结合海运、陆运、港口吊装等多个环节，传统物流模式在对港口机械商品进行运输时存在三大痛点：一是物流方案较为标准化，难以适配不同港口的通航条件与吊装能力；二是物流状态跟踪不实时，由于物流可能横跨多个国家，有些地区存在信号不稳定传输定位不及时情况，客户无法掌握设备运输轨迹与到港时间；三是清关流程繁琐，港口机械涉及特种设备认证、超大件运输许可等多项合规文件，清关延误率达 25%，再加上物流成本占港口机械跨境贸易总成本的 18%~25%，传统模式下缺乏物流方案的动态优化机制，导致此方面的成本居高不下[8][9]。

2.4. 售后协同痛点

港口作为各国之间海上贸易的枢纽，其设备故障直接影响港口运营效率，客户对售后响应速度要求极高，一般通常要求 24 小时内响应，进行故障分析，72 小时内到场维修。不过对于传统线下售后模式而言，个别核心备件海外库存不足，需要周转调货，导致维修等待时间有时长达 1~2 个月；二是远程诊断能力弱，现场维修依赖资深工程师跨国出差，耗时耗力，维修成本很高[10][11]。某企业统计数据显示，海外港口机械的平均故障维修周期达 28 天，其中备件等待时间占比达 60%⁶。

3. 基于工业物联网的智能供应链协同模式构建

3.1. 模式总体架构

结合港口机械跨境贸易特性与供应链痛点，构建“1-4-3”智能供应链协同架构：以跨境机械电商平台为 1 个核心载体，实现“需求对接 - 生产协同 - 物流优化 - 售后保障”4 大环节协同，依托“工业物

⁴孚盟软件：《外贸出口从获客到交货，各行业周期有多长？》，2025 年 7 月 21 日，<https://www.fumasoft.com/news/4375.html>。

⁵《2025 年中国港口机械数据监测研究报告》，2015 年 6 月，<https://www.docin.com/p-4839128476.html>。

⁶中国企业报：《三一海洋重工有限公司国际服务工程师王贞洁：原创平台赋能港口机械售后智能蝶变》，2025 年 6 月。

联网感知层 - 大数据分析层 - 区块链信任层” 3 大技术支撑体系，形成全流程数字化、智能化的跨境贸易闭环，具体架构如图 1 所示。

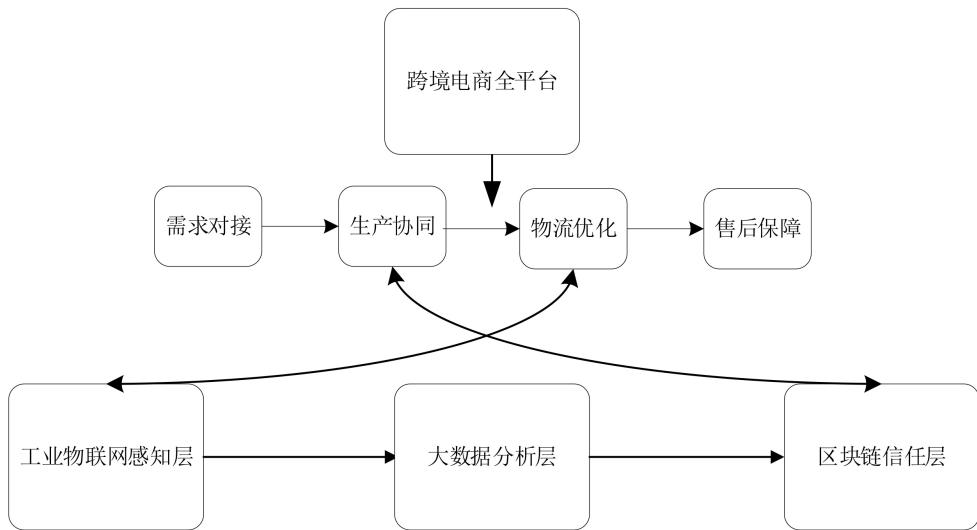


Figure 1. “1-4-3” intelligent supply chain collaboration architecture
图 1. “1-4-3” 智能供应链协同架构

3.2. 核心协同环节设计

需求对接协同：基于工业物联网的定制化需求精准捕捉通过跨境电商平台搭建“3D 可视化 + 技术参数模块化”需求对接模块：客户可通过 3D 模型直观调整设备结构参数，系统自动生成技术方案初稿；平台内置目标市场合规规则库，实时校验需求的合规性(如环保标准、安全认证要求)；采用在线协同编辑工具，实现客户与技术团队的实时沟通与方案迭代，将需求对接周期缩短至 15 天以内。

生产协同：订单 - 生产 - 供应链实时联动通过工业物联网设备采集生产车间机床、机器人等设备的运行数据，实现生产进度的实时可视化；平台将订单需求与生产系统、供应商系统打通，生产计划、零部件供应状态等信息实时同步至海外客户；建立供应链预警机制，当零部件供应延迟、生产工艺调整时，系统自动触发预警并推送替代方案，确保生产进度可控。

物流协同：全链路动态优化与可视化整合全球特种物流资源，基于大数据算法为港口机械定制“海运 + 港口吊装 + 陆运”一体化物流方案，充分考虑目标港口的通航条件、吊装设备能力等因素；通过物联网设备(如 GPS 定位、温湿度传感器)实时跟踪设备运输状态，客户可通过平台查看物流轨迹、预计到港时间等信息；平台内置清关文件生成模块，自动整合设备认证文件、合同信息等，生成标准化清关单据，提高清关效率。

售后协同：全生命周期智能服务构建“远程诊断 + 海外备件仓 + 现场服务”三位一体售后体系：通过工业物联网采集设备运行数据，实现故障预警与远程诊断；在全球主要港口布局海外备件仓，平台实时监控备件库存，客户可在线下单采购备件；建立全球服务工程师资源库，当远程诊断无法解决故障时，系统自动匹配就近工程师提供现场服务，缩短售后响应周期。

3.3. 技术支撑体系及其实现逻辑

1、**工业物联网：**工业物联网感知层的核心目标是打通物理世界与数字世界的数据链路，为全流程协同提供基础数据支撑，具体在生产、物流、售后三大场景针对性部署振动传感器、GPS 定位模块、工业

级数据采集终端等感知设备，搭配 RFID 标签采集生产进度、零部件出入库、运输轨迹、设备运行参数等核心数据，采用 MQTT 轻量化传输协议并结合 LoRa 技术适配跨境弱网场景，通过边缘网关对原始数据进行过滤、聚合与异常预警预处理，再经 OPC UA 协议实现与跨境电商平台、企业 MES/SCM 系统的标准化对接，将感知数据转化为业务可识别的结构化信息，降低云端计算压力与带宽占用。

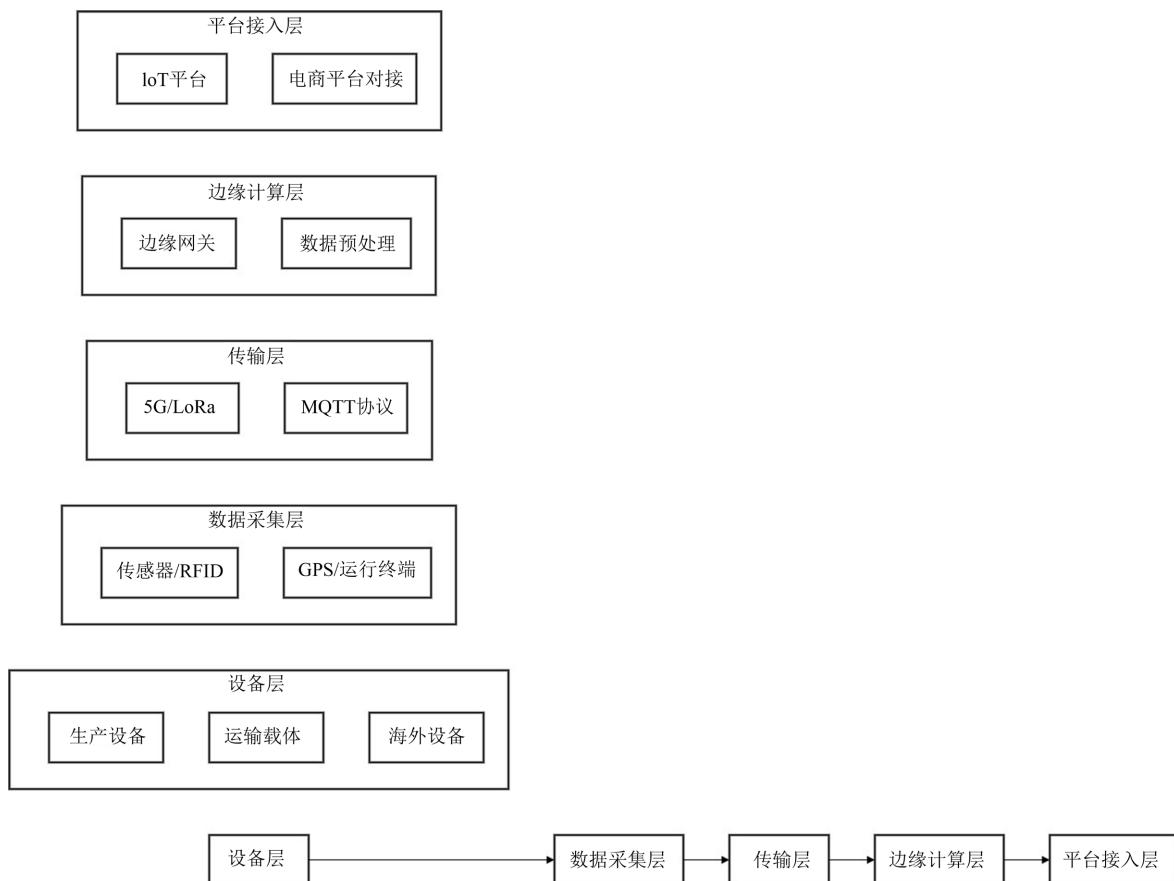


Figure 2. Industrial Internet of Things (IIoT) perception layer architecture diagram
图 2. 工业物联网(IIoT)感知层架构图

架构说明(见图 2): 工业物联网感知层以设备层 - 采集层 - 传输层 - 边缘层 - 接入层为核心链路，覆盖生产设备、运输载体、海外设备三类主体，通过传感器、RFID、GPS 等设备采集全流程数据，依托 5G/LoRa 与 MQTT 协议实现数据传输，经边缘网关完成预处理后，通过 IIoT 平台与跨境电商平台对接，打通物理与数字世界的数据通道。

2、大数据分析层: 大数据分析层是技术支撑体系的核心价值转化中枢，通过整合感知层设备运行数据、物流状态数据，企业 ERP/MES 系统的订单与生产数据，以及目标港口通航条件、海关政策等第三方数据，形成全域数据池，采用 MySQL/PostgreSQL 存储结构化业务数据、MongoDB 存储非结构化文档、InfluxDB 存储时序设备数据，并依托企业级数据湖实现海量原始数据低成本存储，在此基础上构建港口机械行业专属算法模型，包括基于余弦相似度的需求匹配模型、以成本和时效为目标函数的遗传算法物流路径优化模型、基于随机森林的故障诊断模型与 ARIMA 库存预测模型，最终通过 API 接口将算法计算结果推送至跨境电商平台对应模块，实现“数据 - 算法 - 业务”的无缝衔接，为全流程协同提供智能化决策支持。

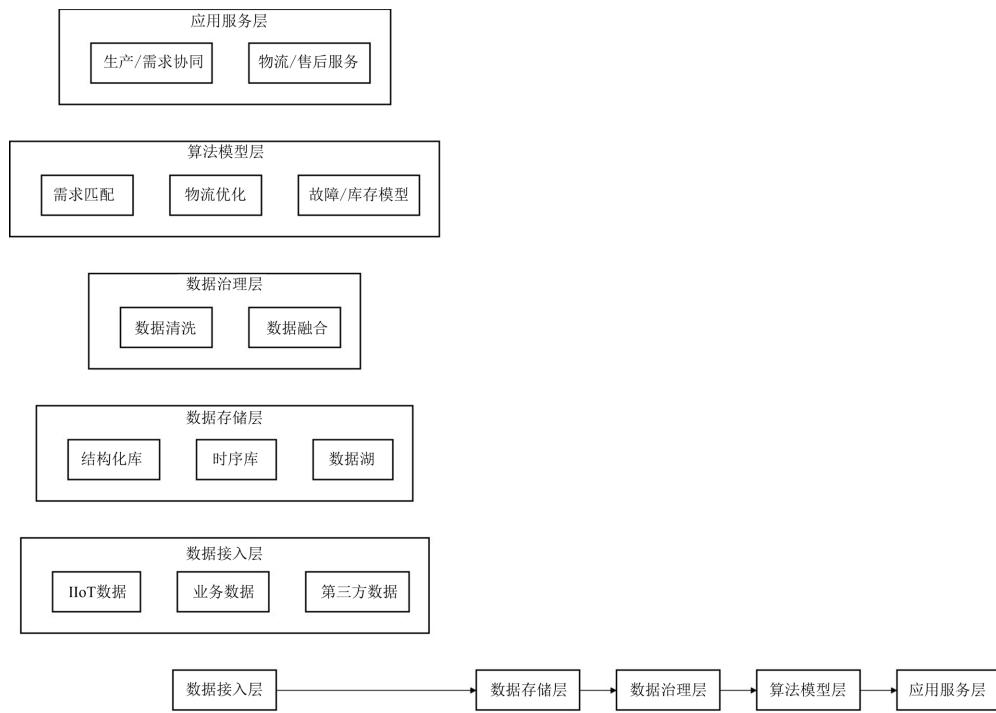


Figure 3. Big data analytics layer architecture diagram
图 3. 大数据分析层架构图

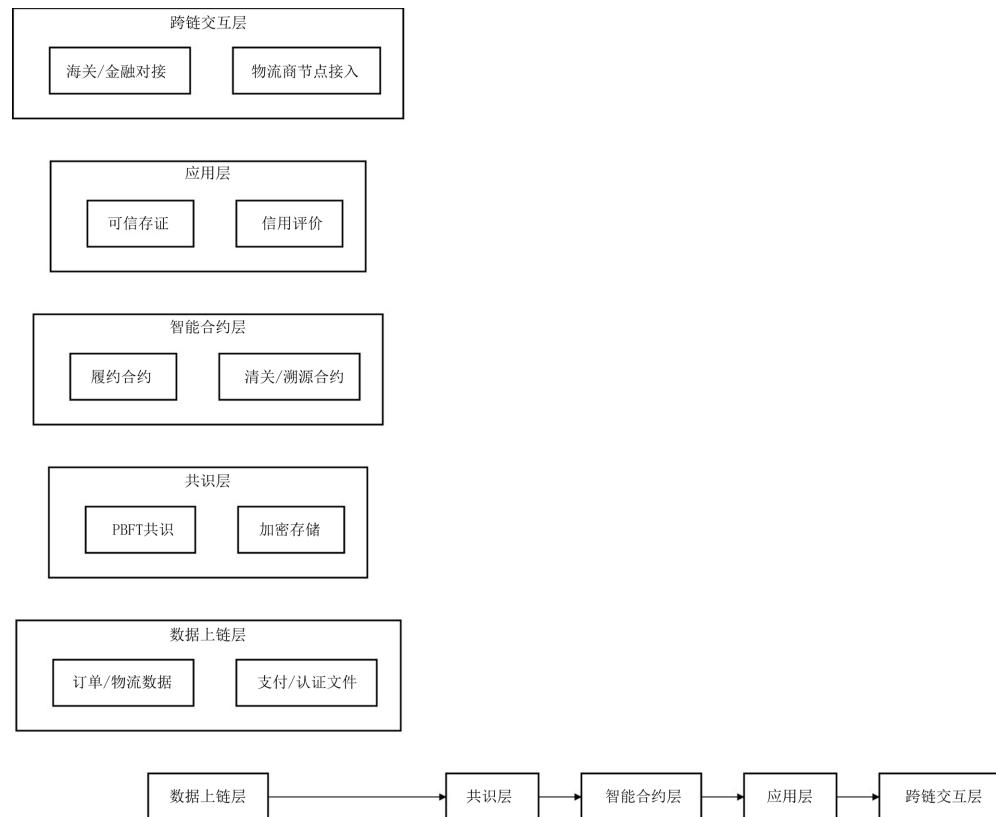


Figure 4. Blockchain trust layer architecture diagram
图 4. 区块链信任层架构图

架构说明(见图3): 大数据分析层构建接入层 - 存储层 - 治理层 - 算法层 - 应用层的层级架构, 整合 IIoT、业务及第三方多源数据, 采用结构化库、时序库与数据湖混合存储, 经数据清洗融合后, 通过需求匹配、物流优化等模型实现数据价值转化, 落地生产协同、售后服务等智能应用。

3、区块链信任层: 区块链信任层的核心目标是解决跨境贸易中的信息不对称与信任成本高问题, 采用以核心制造企业为盟主的联盟链架构, 设置由制造企业、核心供应商、海关组成的记账节点和由物流商、海外客户组成的查询节点, 保障数据隐私与权限可控, 筛选订单合同、物流轨迹、清关文件、支付凭证、售后工单等关键数据, 经非对称加密后上链存储, 采用实用拜占庭容错(PBFT)共识机制确保区块数据不可篡改, 同时编写订单履约、清关合规、备件溯源三大核心智能合约, 实现生产进度节点提醒、认证文件自动校验、备件全流程追溯等业务规则的自动化执行, 基于联盟链为海外客户提供订单与物流的可信查询、为海关提供简化查验的存证服务、为金融机构提供跨境贸易融资的数据支撑, 最终实现跨主体的可信协同。

架构说明(见图4): 区块链信任层搭建上链层 - 共识层 - 合约层 - 应用层 - 跨链层的联盟链体系, 筛选订单物流、支付认证等关键数据上链, 依托 PBFT 共识与加密存储保障数据可信, 通过履约、清关溯源等智能合约实现业务自动化, 为海关、金融机构等主体提供存证、信用评价服务, 支撑跨主体可信协同。

4. 跨境机械电商平台核心功能模块设计

基于上述协同模式, 设计适配港口机械特性的跨境电商平台, 核心功能模块包括需求对接、生产协同、物流优化、售后保障四大模块, 具体功能如下。

4.1. 需求对接模块

- 1、3D 可视化定制: 提供港口机械 3D 模型, 支持客户在线调整结构尺寸、配置参数等, 系统自动生成技术方案与报价;
- 2、技术参数模块化: 将设备参数拆解为机械结构、电气系统、控制程序等模块, 客户可勾选个性化需求, 系统自动校验合规性;
- 3、在线协同沟通: 内置视频会议、文件共享工具, 支持客户与技术团队实时沟通, 记录需求修改轨迹。

4.2. 生产协同模块

- 1、生产进度可视化: 基于工业物联网数据, 实时展示设备生产工序、零部件装配状态等, 客户可在线查看生产进度;
- 2、供应链状态监控: 展示核心零部件供应状态, 当出现供应延迟时自动推送预警信息与替代方案;
- 3、订单变更管理: 支持客户在线提交订单变更申请, 系统自动同步至生产系统, 生成变更评估报告。

4.3. 物流优化模块

- 1、个性化物流方案: 基于设备参数与目标港口信息, 推荐最优物流方案, 展示物流成本与预计交付周期;
- 2、物流轨迹跟踪: 实时展示设备运输位置、运输状态(如在途、到港、清关), 提供异常预警;
- 3、清关文件生成: 自动整合订单信息、设备认证文件等, 生成商业发票、装箱单、原产地证等标准化清关单据。

4.4. 售后保障模块

- 1、远程诊断服务: 基于设备运行数据进行故障预警, 提供视频指导、AR 远程调试等服务;

-
- 2、备件商城：支持备件在线查询、下单，展示海外仓库存与配送周期；
 - 3、服务工程师匹配：基于客户所在地区，匹配就近的服务工程师，提供现场维修服务预约。

5. 案例分析

5.1. 案例研究设计

5.1.1. 案例企业选择标准

为保证研究代表性与结论可复制性，企业选择遵循四大核心标准：

全球港口机械市场占有率为前 5%，业务覆盖 80+ 国家，年跨境贸易额 ≥ 40 亿元，具备全流程协同优化空间；产品线涵盖全系列港口设备，定制化订单占比 $\geq 70\%$ ，以超大件特种物流为主，契合研究对象特性；并且已部署基础工业物联网设备(生产环节覆盖率 $\geq 30\%$)，有明确的跨境全流程数字化需求；最后有意愿开放运营数据，配合 2 年跟踪调研，保障数据真实性与完整性。

最终选定某中国头部港口机械制造商，其全球市占率超 15%，年跨境贸易额 50 亿元，定制化订单占比 82%，符合上述标准。

5.1.2. 研究时间跨度

研究时间从 2021 年 1 月起至 2023 年 12 月止，共 36 个月。

基准数据采集阶段(2021.1~2021.6)：提取传统模式下核心运营数据，建立转型基准库；

模式落地阶段(2021.7~2022.12)：分阶段部署平台模块(需求对接→生产协同→物流优化→售后保障)；

效果验证阶段(2023.1~2023.12)：跟踪采集平台运行数据，与基准数据对比分析。

5.1.3. 数据收集方法

采用多源数据三角验证：包括企业一手数据，提取系统日志数据 1200 余条，开展季度半结构化访谈(累计 80+ 小时)，实地观测生产、物流、售后场景；也包括收集企业运营报告、订单合同等内部资料，结合行业报告、海关统计数据交叉验证后的二手数据。

5.2. 案例企业概况

某港口机械企业是全球领先的港口机械制造商，产品涵盖集装箱起重机、卸船机等全系列港口设备，业务覆盖全球 80 多个国家和地区，年跨境贸易额达 50 亿元。2021 年，该企业基于本文提出的协同模式构建跨境电商平台，实现港口机械跨境贸易的全流程数字化协同⁷。

5.3. 平台实施效果

对比 2021 年基准数据与 2023 年运营数据，核心指标显著优化：

- 1、需求对接效率提升：通过 3D 可视化定制与在线协同沟通功能，需求对接周期从 45 天缩短至 12 天，需求修改率从 30% 降至 8%；
- 2、生产协同优化：生产进度可视化使客户信任度显著提升，订单延期率从 40% 降至 12%，平均交付周期从 150 天缩短至 105 天；
- 3、物流成本降低：通过大数据优化物流方案，物流成本降低 18%，清关延误率从 25% 降至 7%；
- 4、售后响应提速：远程诊断覆盖率达 65%，海外备件交付周期从 30 天缩短至 7 天，设备故障维修周期从 28 天缩短至 10 天。

⁷《上海振华重工(集团)股份有限公司 2023 年年度报告摘要》，2024 年 3 月。

https://static.sse.com.cn/disclosure/listedinfo/announcement/c/new/2024-03-29/600320_20240329_H7GL.pdf。

5.4. 案例启示

该案例表明，基于工业物联网的智能供应链协同模式能够有效解决港口机械跨境贸易的核心痛点。其关键成功因素在于：一是精准适配行业特性，针对港口机械定制化、物流复杂等特点设计专属功能；二是强化技术与业务融合，通过工业物联网实现全链路数据贯通；三是聚焦全流程协同，打破“需求-生产-物流-售后”各环节的信息壁垒。

6. 结论与展望

6.1. 研究结论

本文以港口机械为典型研究对象，针对其跨境贸易“定制化强、物流复杂、协同滞后、售后依赖高”的核心痛点，构建基于工业物联网的“1-4-3”智能供应链协同模式，结合企业实践案例验证，得出以下核心结论：

第一，复杂机械产品跨境电商转型的核心是“全流程供应链协同”。港口机械的行业特性决定其无法复制消费品电商模式，必须以跨境电商平台为中枢，打通“需求对接-生产协同-物流优化-售后保障”四大环节，通过数字化手段消除传统模式的信息不对称与环节衔接壁垒，这一逻辑同样适用于工程机械、农业机械等其他复杂机械品类。

第二，技术融合是供应链协同的关键支撑。工业物联网实现“生产-物流-使用”全链路数据采集，大数据完成需求预测、物流优化等价值转化，区块链保障交易数据可信可追溯，三类技术协同解决了港口机械跨境贸易的核心痛点，为模式落地提供坚实的技术基础。

第三，模式具备明确实践价值与可复制性。案例验证显示，该模式可使需求对接周期缩短73%、订单延期率降低70%、物流成本下降18%、设备维修周期缩短64%，显著提升交易效率、降低成本，为机械企业拓展全球市场提供了切实路径。

第四，机械行业跨境电商的发展呈现“细分品类差异化”特征，大型复杂机械需走“专业化协同”路线。相较于普通小型机械(如机床配件)25%以上的电商渗透率，港口机械、盾构机等大型复杂机械的电商渗透率不足5%，核心原因在于其贸易流程的复杂性与多环节协同需求。本文构建的模式通过针对性设计(如3D可视化定制、特种物流方案优化、海外备件仓布局)，精准适配了大型复杂机械的贸易特性，为该类产品跨境电商渗透率的提升提供了有效抓手，也为工程机械、农业机械等其他复杂机械品类的跨境电商转型提供了参考范式。

6.2. 研究局限性与未来展望

本文研究虽取得阶段性成果，但仍存在以下局限性：其一，适用边界存在限定，模型以“年跨境贸易额 \geq 40亿元、具备基础数字化能力”的大型港口机械企业为核心适配对象，聚焦“定制化+超大件+强售后”的跨境贸易场景，对于小型机械企业(年贸易额低于5亿元)、标准化程度高的机械品类(如通用机床配件)，或以内销为主、跨境业务占比低于20%的企业，适配性需进一步验证。其二，技术落地条件存在门槛，模式依赖工业物联网设备部署、大数据算法开发及联盟链节点组网等技术基础，对企业初期的资金投入、数字化人才储备要求较高，中小企业难以直接复制。其三，研究场景未覆盖极端变量，案例验证聚焦常规跨境贸易环境，未充分考虑地缘政治冲突、全球供应链中断、重大疫情等极端事件对模式运行的影响，模型的抗风险能力有待进一步测试。其四，数据样本存在偏向性，案例数据与验证素材主要来源于单一龙头企业及行业头部机构报告，中小机械企业的实践数据占比不足，可能导致结论对中小企业的指导性存在偏差。

在现有架构的基础上，可从技术深化、场景拓展、绿色转型三大维度升级：一是强化多源数据融合与智能算法迭代，引入交通流量预测、事故风险预警等模型，构建“人车货、企政金”六网数据融通的服务生态，提升供应链资源配置效率与风险预判能力；二是拓展细分场景适配功能，开发多语言智能产品库与3D交互式展示模块，支持海外客户在线拆解查看设备结构、提交定制化参数，同时搭建动态合规规则库，自动校验不同国家认证标准与关税政策，实现合规风险前置拦截；三是融入绿色低碳目标，搭建供应链全生命周期碳数据平台，通过区块链存证碳足迹信息，建立绿色供应商准入标准与碳标签制度，同步构建包装物、核心零部件的逆向物流网络，推动循环经济发展。此外，可引入数字孪生技术还原仓储与物流场景，优化库位布局与运输路径，结合AGV智能搬运设备实现物流作业自动化，进一步提升供应链柔性与运营效率。

参考文献

- [1] 齐敏. 基于SAP ERP的港口机械生产流程再造与管理模式创新研究[J]. 模具制造, 2025, 25(11): 240-242.
- [2] 兰健. 港口机械电气自动化技术与控制分析[J]. 装备维修技术, 2020(1): 103
- [3] 赵青松, 张红静. 跨境电商海外仓对中国外贸出口的影响研究[J]. 经济界, 2025(5): 42-51.
- [4] 姚日煌, 李旦, 朱建东. 物联网现状和发展趋势分析[J]. 电子质量, 2023(7): 109-114.
- [5] 2023年工程机械产品进出口贸易情况分析[J]. 建筑机械, 2024(3): 12-18.
- [6] 陈强, 王勇, 吴迪清. 港口机械设备智能化改造策略分析[J]. 凿岩机械气动工具, 2025, 51(4): 206-208.
- [7] 杨文辉. 基于港口机械设备智能化升级改造的智能化实施路径分析[J]. 中国航务周刊, 2025(43): 45-47.
- [8] 刘忠. 机械制造业供应链管理及优化研究[J]. 商业2.0, 2025(20): 118-120.
- [9] 胡举. 高端装备制造业供应链流程再造研究[J]. 中国物流与采购, 2022(6): 76-77.
- [10] 滕俊伟. 基于信息化平台的工程机械售后管理方案研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2025.
- [11] Jha, A., Young, A. and Sattarvand, J. (2023) Blockchain Technology and Mining Industry: A Review. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 40, 2269-2280. <https://doi.org/10.1007/s42461-023-00874-3>