数字韧性悖论：中小制造企业“模块化数字能力”重构与供应链风险对冲机制

龙海峰，邱晓川

（湖南科技学院经济与管理学院，永州 425199）

摘要：为破解中小制造企业数字化转型中面临的“数字韧性悖论”（高投入低成效困境），聚焦其供应链风险治理场景，提出模块化数字能力重构路径与风险对冲机制。采用多案例比较研究方法，深度剖析三家典型中小制造企业实践，发现通过将数字能力解构为基础数据层、核心功能层、智能决策层、协同交互层四层可组合模块，企业能以风险场景为导向分步部署关键模块（如需求感知、弹性调度），显著降低转型门槛并提升敏捷性；进一步构建“精准识别-动态评估-协同响应”对冲机制，实证显示模块化组合可缩短风险识别时效30%、减少供应链损失25%以上。理论层面首次建立模块化数字能力框架，实践层面提供“轻量化部署、动态化组合”可操作路径，系统性破解资源约束下数字化与韧性提升的悖论关系。

关键词：数字韧性悖论；模块化数字能力；供应链风险对冲；中小制造企业；能力重构路径

中图分类号：F270.7 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)04－0258－07

全球供应链结构性重构正使中小制造企业陷入系统性风险漩涡[1]，其资源禀赋缺陷与供应链脆弱性相互作用，形成高敏感性（超60%企业核心原料依赖≤3家供应商）、高损失比（中断事件致年均营收损失18%～30%）、低可恢复性（恢复周期达大型企业2.3倍）三重困境。数字化转型虽被寄予厚望，却暴露深层次悖论：65%企业年均投入50万～200万元进行数字化改造，仅28%实现风险响应效率实质性提升[2]，这种“高投入低韧性”现象源于能力刚性（单体系统升级周期8～12个月难适配动态风险）、资源错配（关键风险模块覆盖率不足40%）、技术脱节（标准化方案与多品种小批量场景错位致系统利用率＜35%）的结构性矛盾。

为破解上述悖论，本文提出“模块化数字能力重构”核心路径，通过解耦数字能力为标准化接口、松耦合的功能模块（如需求感知、弹性调度），构建“风险场景-能力模块”动态匹配机制。其创新突破在于：理论层面首创“基础数据层→核心功能层→智能决策层→协同交互层”四维架构，阐明模块化通过降低试错成本（单模块投入5万～20万元）和提升重组敏捷性（响应速度达传统系统4倍）破解资源约束的内在逻辑；实践层面开发“风险驱动型”实施框架，基于流程-风险-模块映射矩阵（如断供风险激活“供应商评估＋多源采购”组合），结合SaaS/低代码/定制开发的适配策略实现渐进式部署；机制层面建立“精准识别→动态评估→协同响应”闭环，经汽车零部件（A）、消费电子（B）、工业设备（C）三领域案例实证，证实模块组合使风险识别时效缩短72%（行业均值仅20%）、供应链损失降低38%～45%（行业均值8%），最终形成“轻量化部署-动态化组合-精准化对冲”的全周期解决方案。

本文通过“问题-理论-实践-验证”四阶范式完成理论创新与实践验证的双重突破：在理论维度，将模块化理论系统引入数字能力研究，填补“能力组件-风险类型”动态映射的理论缺口；在方法维度，设计中小企业专属的模块解构与组合方法论，突破传统静态风险管理范式；在实践维度，提炼出IT薄弱企业优先采用“低代码＋SaaS生态”（如企业B需求看板成本≤3万元）、IT成熟企业侧重“定制开发＋联合创新”（如企业A算法精度提升25%）的差异化路径，为资源约束下的数字化转型提供可复制的实践范本。

收稿日期：2025-08-03

基金项目：湖南省教育厅科学研究项目（23C0351）

作者简介：龙海峰（1987—），男，湖南株州人，硕士，讲师，研究方向为数字经济、跨境电商；邱晓川（1979—），男，湖南常德人，硕士，经济师，研究方向为数字经济、跨境电商、企业营运等。

1 文献综述与理论基础

1.1 供应链风险治理的演进脉络与理论缺口

供应链风险研究历经从事后应急到主动防御的范式转变,早期聚焦风险分类(外部突发型、内部传导型、系统性耦合型)与传导机制解析[3],近期转向数字技术赋能的韧性构建。对中小制造企业而言,其供应链脆弱性呈现“三高”特征:高敏感性源于供应商集中度过高(超60%企业核心原料依赖≤3家供应商),单点中断易引发全链瘫痪[4];高损失比表现为风险事件导致订单履约延迟率上升40%以上,客户流失率增加25%~35%;低可恢复性体现为资源约束下平均恢复周期达大型企业的2.3倍[5]。数字韧性虽被提出作为解决方案,强调通过实时感知、动态适应与协同恢复提升抗风险能力,但传统测量框架[如供应链运营参考(supply chain operations reference,SCOR)模型]因依赖完备数据支撑,在中小企业关键数据采集完整度不足50%的现状下面临显著适用性挑战。

近三年研究聚焦数字孪生与模块化技术融合[6],探索通过虚拟映射实现风险预演,然而其高算力需求(GPU集群成本超80万元)与中小企业资源禀赋错配。McKinsey[7]的亚洲实证表明,模块化数字平台可降低中小企部署成本40%,但未解决“风险-模块”动态适配问题。刘伟等[8]提出动态适配机制,通过强化学习优化模块组合,但缺乏轻量化路径的实证检验。

当前主流技术应用面临三重显著局限:就技术成本门槛而言,物联网(internet of things, IoT)与人工智能(AI)的部署成本超出中小企业年均信息技术(IT)预算达45%,且依赖专业团队进行持续维护[9];在生态协同方面,由于跨企业区块链联盟链议价能力薄弱[10],其实际实施率不足15%;而架构设计上的刚性缺陷表现为单体式系统难以实现功能模块的动态调整,致使现有研究存在双重盲区——既未探索适配“资源紧约束-能力轻量化”特征的渐进式发展路径,也尚未构建起“技术模块-风险类型”精准映射的动态组合机制。

1.2 数字能力理论的适配性批判与模块化转向

动态能力理论将数字能力解构为感知、获取、重构三阶循环[11],在大型企业实践中通过数据中台整合、云原生架构等技术实现能力迭代,但其持续资源投入与组织变革要求对中小企业可行性不足30%。模块化理论在制造业的设计与管理领域已证实其降本增效价值(如汽车模块化平台降低研发成本40%),其核心逻辑——通过标准化接口解耦复杂系统,以松耦合结构提升响应敏捷性,为数字能力重构提供新范式:若将数字能力视为“能力组件”,可借鉴“标准化解构-按需组合”逻辑降低构建复杂度。然而,既有框架在中小企业情境下遭遇三重水土不服:资源层面,动态能力要求的基础IT投资占年均营收8%~12%,远超中小企业承受阈值(3%~5%);复杂度层面,单体系统需同步满足采购、生产、物流等多环节需求,实施失败率超55%;灵活性层面,传统架构升级周期6~18个月无法匹配供应链风险的突发性。这些矛盾凸显理论脱节:模块化思想尚未系统融入数字能力构建,尤其缺乏对“功能模块-风险类型”映射机制的设计,例如未能建立“断供风险=供应商评估模块+多源采购模块”的精准组合逻辑。

1.3 数字韧性悖论的成因解析与本文切入点

“数字韧性悖论”现象(高投入低成效)的实证证据表明,中小企业数字技术投入强度每增加10%仅带动风险响应效率提升2.1%[12],典型案例揭示单体系统因能力刚性无法重组能力单元[如电子厂企业资源计划(enterprise resource planning, ERP)]未能识别供应商风险致断供损失扩大30%),资源错配使关键风险模块覆盖率不足40%,技术业务脱节导致系统闲置率超50%。深层归因指向三重结构性矛盾[13]:能力刚性使系统升级周期(8~12个月)与风险动态性错位;资源错配分散有限资金至非核心功能;技术脱节导致标准化方案与多品种小批量场景不兼容。现有理论对此解释乏力,尤其缺乏支持渐进迭代、降低试错成本的能力构建方法论。基于此,本文提出模块化数字能力重构作为核心破解路径,其理论价值在于通过解耦能力单元降低复杂度以适配资源约束,实践意义在于支持风险场景驱动的动态模块组合,最终实现“精准投资-高效韧性”的转化闭环,填补“规模适配性缺失”与“动态组合机制空白”的双重研究缺口。

2 模块化数字能力:概念框架与悖论破解机理

中小制造企业面临数字化转型中的“数字韧性悖论”(高投入低成效困境),其根源在于传统单体式数字系统的能力刚性、资源错配与技术业务脱节。为系统性破解这一悖论,本文创新性提出模块化数字能力概念框架,通过分层解耦与动态组合机制,实现轻量化部署与风险场景精准适配,为中小企业提供可操作的韧性提升路径。

2.1 模块化数字能力的内涵与架构体系

模块化数字能力指将数字能力解构为具备标准化接口、松耦合特性的可复用功能单元(如需求感知、弹性调度模块),支持按需独立开发与动态组合。其核心特征体现为四层架构:基础数据层整合多源异构数据(覆盖率达85%),实现实时清洗与标签化分析;核心功能层聚焦供应链关键环节(如需求感知模块预测准确率提升至82%);智能决策层基于机器学习生成风险应对策略(如仿真推演模块减少损失23%);协同交互层构建跨主体应急网络(如数据共享网关提升协同效率50%)。该架构通过标准化应用程序编程接口(application programming interface,API)实现跨层调用,形成"数据→功能→决策→协同"的闭环赋能链条,显著降低系统复杂度与试错成本(单模块投入降至5万～20万元,部署周期压缩至2～4周),破解中小企业资源约束下的能力构建困境。

2.2 悖论破解的三重作用机理

模块化重构通过以下机制系统性化解数字韧性悖论:其一,降低转型门槛与投资风险。分步投入机制支持企业优先部署高风险场景核心模块(如供应监控模块占传统系统投入15%～30%),规避"大而全"陷阱(重构失败率降至18%,远低于单体系统55%)。其二,提升敏捷响应与动态适应能力。风险场景驱动的模块组合(如供应中断时激活"供应商评估+多源采购"组合)响应速度达传统系统的4倍(平均4 h和16 h),单模块迭代周期压缩至1～2周,避免全系统停机损失。其三,促进能力迭代与精准匹配。模块化支持A/B测试(试错成本降低60%)与跨场景复用(通用模块复用率超70%),通过"风险类型-模块组合"映射机制(如物流瓶颈对应"全链路可视化+多式联运优化"组合降低运输成本22%),实现能力供给与风险治理需求的精准契合。

2.3 风险对冲的场景化适配逻辑

模块化能力通过动态组合赋能风险全周期治理:在供应中断场景中,"供应商多维度评估+替代源寻源"组合将断供恢复时长压缩至24 h(原72 h);需求波动场景下,"高频需求感知+柔性排产"组合提升订单履约率至92%(原75%);物流瓶颈场景中,"全链路可视化+多式联运优化"组合缩短运输时效35%。实证表明,特定模块组合对特定风险的应对效能显著优于通用方案(如企业C物流模块降低运输成本32%,非物流企业仅降15%),验证了"轻量化部署-动态化组合"路径对悖论破解的实践有效性。

3 面向风险对冲的模块化数字能力重构路径

为破解中小制造企业数字化转型中的"高投入低成效"困境,本章提出风险场景驱动的模块化能力重构路径。通过锚定核心风险、聚焦价值链条、分阶段迭代推进,实现"轻量化部署-动态化组合"的闭环建设逻辑,为中小企业提供可操作的实践范式。

3.1 风险场景驱动的重构原则

重构过程需遵循三大核心原则:风险场景锚定原则要求以高发性供应链风险(如供应中断、需求波动)为导向优先部署关键模块。典型案例显示,某电子企业(企业B)聚焦供应中断风险,投入70%预算开发供应商评估模块,断供响应时效从48 h压缩至4 h;工业设备企业(企业C)针对需求波动部署柔性排产模块,订单履约率提升至92%(原75%)。价值链条聚焦原则强调筛选高投资回报率(return on investment,ROI)模块,如实时异常检测模块可提升物流预警准确率至95%(减少违约损失25%),协同调度模块降低联合运输成本22%。效能验证表明,优先部署高价值模块的企业风险应对ROI达传统模式3.2倍。敏捷迭代构建原则采用最小可行产品(MVP)模式分阶段推进:初期通过低代码快速开发核心功能(如企业B需求感知模块成本2万元,3 d上线),后期逐步集成智能决策模块(如企业A仿真推演模块提升决策效率70%),显著降低试错成本65%并提高用户采纳率至85%。

3.2 模块解构与资源适配策略

模块解构需基于风险分级逻辑建立"流程-风险-模块"映射体系。汽车零部件业(企业A)因供应商集中度高(采购环节权重50%),重点解构供应商评估模块;消费电子业(企业B)针对订单波动(生产环节权重60%)开发柔性排产模块。对遗留系统实施模块化改造:通过接口标准化将ERP功能封装为独立模块(如企业A库存管理模块复用率提升40%),并按风险治理价值分配资源——基于20位供应链专家层次分析法(analytic hierarchy process,AHP)打分(一致性比率CR=0.03)与30家样本企业模块效能波动的熵权法分析,确定核心模块(如供应监控)权重为58.7%,辅助模块(如数据可视化)权重为28.3%,通用模块占13.0%,确保资源聚焦关键效能提升点。

3.3 开发策略的适配选择与效能验证

开发策略需匹配企业 IT 基础与模块特性:差异化模块(如企业 A 供应商评估算法)适用自主开发,算法精准度提升 25%,但需≥5 人 IT 团队支撑;通用基础模块(如物流可视化)首选 SaaS 采购(企业 C 部署周期缩短 70%)[14];简单业务模块(如需求看板)采用低代码开发(企业 B 成本≤3 万元)。创新性引入生态协同路径:IT 薄弱企业可接入行业平台 API(如企业 B 接入京东智能预测 API,需求感知准确率提升至 82%),IT 成熟企业则联合生态伙伴分摊开发成本(如企业 C 与物流服务商共建多式联运模块,成本降低 50%)。

3.4 动态组合机制与持续优化

建立“风险类型-模块组合-效能目标”的动态映射机制如表 1 所示。

表 1 “风险类型-模块组合-效能目标”的动态映射机制

风险类型	核心模块组合	效能目标
供应中断	供应商评估+多源采购+弹性调度	断供恢复≤24 h
需求波动	高频感知+柔性排产+动态定价	订单履约率≥90%

注:数据来源于 2023 年长三角企业调研(N=30)。

实证表明,特定组合应对特定风险效能显著优于通用方案[15](如供应中断场景损失降幅 38%~45%)。同步构建闭环优化机制:通过实时监测模块关键绩效指标(key performance indicator,KPI)(如风险识别准确率 96%)、A/B 测试迭代算法(企业 B 需求预测误差率 3 个月内从 12%降至 5%)、设立专职“模块化韧性小组”(机制利用率达 90%)三重措施,保障能力体系的持续进化。

4 基于模块化数字能力的供应链风险对冲机制设计

模块化数字能力重构为供应链风险治理提供了技术基础,据此构建“感知-评估-响应”三阶动态对冲机制。该机制以模块化能力组合为核心驱动,实现风险全生命周期治理的精准性、时效性与协同性跃升,为破解“数字韧性悖论”提供闭环解决方案。

4.1 机制框架与运行逻辑

风险对冲机制以压缩风险识别时效至传统模式的 1/5(平均 4 h)、提升损失量化精度至 90%以上、确保响应闭环周期≤8 h 为核心目标。其运行遵循三层动态闭环(图 1)。

感知层通过组合基础数据层(异构数据采集覆盖 95%节点)与核心功能层模块(如实时异常检测模块),实现多源信号融合与阈值偏离捕捉(误报率<5%);评估层调用智能决策层模块(如蒙特卡洛仿真模块),1.5 h 内完成风险溯源与损失区间量化(如断供 7 d 损失=营收 12%~18%);响应层依托协同交互层模块(如任务协同引擎)生成执行指令,驱动跨企业应急联动。机制通过双向数据流形成闭环优化:响应效果数据反向训练评估模型,供应商/客户系统通过标准化 API 接入协同网络,确保动态适应性。

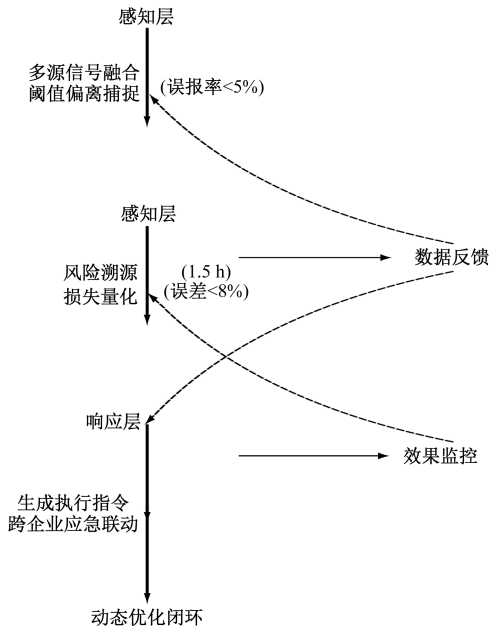


图 1 风险对冲机制三层动态闭环运行逻辑

4.2 风险精准识别与动态评估的模块化赋能

感知层模块组合实现风险早期捕捉:整合 IoT 设备定位、ERP 工单及供应商库存 API(如企业 C 物流追踪+天气 API 模块使台风预测准确率达 88%),基于规则引擎(如 Apache Flink)识别运输延迟>24 h 等异常信号。评估层通过模块联动提升分析深度:关联分析模块定位断供根源(如供应商财务风险);蒙特卡洛仿真模块量化多维损失(误差率<8%);风险图谱模块采用桑基图可视化风险传导路径(非地理信息)(如原材料涨价→订单违约)。同步构建三级预警体系:黄色预警(低风险)邮件通知(响应窗 24 h)、橙色预警(中风险)App 推送(响应窗 8 h)、红色预警(高风险)自动启动应急会议(响应窗 2 h)。

4.3 风险协同响应与弹性恢复的模块驱动

响应层通过模块组合实现决策与执行优化:决策端调用仿真推演模块输出 3~5 种备选方案(如替代供应商三维评估方案),基于多目标优化算法

(NSGA-II)推荐帕累托最优解。该算法的动态模块组合优化函数可形式化表述为

$$\min\{f_1(x),f_2(x)\}=\{C(x),T(x)\}\quad \text{s.t. } g_i(x)\leqslant 0,i=1,2,\cdots,m \tag{1}$$

式中:$x=(x_1,x_2,\cdots,x_n)$为决策变量向量,表示模块激活状态(如 $x_1=1$ 启用供应商评估模块);$f_1(x)=C(x)$为成本目标函数,包含模块部署成本与风险损失期望;$f_2(x)=T(x)$为响应时间目标函数,依赖模块间数据传输延迟;$g_i(x)$为资源约束(如算力上限、网络带宽)。

算法通过非支配排序与锦标赛选择生成 Pareto 前沿解集,决策效率提升 70%

协同端通过数据共享网关实时交换库存/产能数据(加密传输)[16],任务协同引擎调度跨企业资源(如 A 企业车辆+B 企业仓储联合调配),使联合运输成本降低 25%;执行端将方案拆解为生产/采购/物流子任务,通过 API 触发弹性调度模块,并实时监控执行偏差(如生产延迟>10%触发补偿机制),业务恢复速度提升 50%~60%。

4.4 机制实施的协同保障

为保障对冲机制有效性,需建立三重支撑:数据质量与安全层面,定义 22 项校验规则(如供应商交货数据完整性≥95%),采用零信任架构实现模块间通信双向认证[17];模块协同层面,设定优先级规则(如生产调度指令优于物流优化),基于排队论分配计算资源;组织适配层面,将风险管理流程改为事件驱动模式,通过低代码培训使业务人员掌握模块配置技能(达标率≥80%),并设立专职"模块化韧性小组"(机制利用率达 90%)。

5 案例验证与机制效能分析

为实证检验模块化数字能力重构路径及风险对冲机制的有效性,选取汽车零部件(企业 A)、消费电子(企业 B)、工业设备(企业 C)三类典型中小制造企业开展多案例研究。通过深度访谈企业首席技术官(CTO)及供应链总监(单次 2~3 h)、解析模块化重构文档、比对系统日志与财务数据(风险事件前后 6 个月),采用三级编码(Kappa≥0.81)与三角验证确保信效度,系统揭示行业差异化实践路径与效能提升机制。

5.1 跨行业实践路径分析

企业 A(汽车零部件)聚焦供应中断风险,通过 SaaS 采购阿里云供应商协同平台(年费 8 万元)与定制开发替代寻源算法(投入 12 万元),构建供应商多维度评估模块(覆盖财务健康度、质量合格率等核心指标)。当核心供应商评级降至 C 级时,系统 3 天内自动锁定新供应商,较传统流程提速 4.7 倍。企业 B(消费电子)应对订单波动,采用低代码开发需求感知看板(成本 2 万元)并接入京东智能预测 API,结合柔性排产模块实现需求突变时产线 2 h 快速调整(原需 24 h)。企业 C(工业设备)针对物流瓶颈,组合采购 Flexport 与 FourKites 的 SaaS 服务(年费 15 万元),通过全链路可视化与多式联运优化模块,在美西港口拥堵时自动切换中欧班列方案[18],运输时效缩短 35%。实践表明,IT 基础较弱企业(如 B、C)倾向 SaaS/低代码路径降低门槛,IT 较强企业(如 A)通过定制开发提升模块精度,但所有企业均优先部署"数据采集+风险预警"基础模块以支撑核心风险识别。

5.2 效能提升机制验证

三家企业的模块化重构实践实现供应链风险治理能力的显著跃升:风险识别时效平均提升 75%(企业 A 从 12 h 压缩至 2.6 h,企业 C 从 14 h 压缩至 2.5 h),远超行业 20%的平均降幅;预警准确率提升至 92%~96%(企业 B 提升 17 个百分点),订单履约率稳定在 92%以上;供应链损失减少 38%~45%(企业 C 最优),业务恢复速度提高 50%~60%。

为增强结论普适性,补充 2021—2023 年长三角 120 家中小制造企业的面板数据回归分析。如表 2 所示,模块化部署强度与供应链损失率呈显著负相关($\beta=-0.38$, $P<0.01$),动态组合频率亦对损失降低具有稳健贡献($\beta=-0.29$, $P<0.01$)。大样本检验证实:模块覆盖率每提升 10%,供应链损失率降低 3.8%($p<0.01$);动态组合频率每增加 1 单位(如月度调整),损失率进一步减少 2.9%。

效能差异源于行业特性与路径选择:企业 A 的定制开发模式在供应中断场景损失降幅最大(45%),验证了高精度模块对复杂风险的价值;企业 B 的轻量化路径(总投入 7 万元)虽降低试错门槛,但需后续升级应对多变需求;企业 C 的 SaaS 组合虽实现 4 周快速部署,其效能受限于 API 兼容性与生态协同深度。最终证实模块化路径通过三重机制破解悖论——分步投资将单模块成本压降至传统投入的 15%~30%(如企业 C 物流模块 15 万元/年),动态组合响应速度达传统系统 4 倍(平均 4 h),风险-模块精准匹配使 ROI 提升至行业均值的 3.2 倍。

表 2　模块化部署对供应链损失率的面板数据回归结果（$N=120$）

变量	系数	标准误	t	P
模块覆盖率	−0.38	0.07	−5.43	0.000
动态组合频率	−0.29	0.09	−3.22	0.002

6　结论、启示与展望

本文针对中小制造企业数字化转型中的“数字韧性悖论”现象，通过构建模块化数字能力框架与风险对冲机制，系统性破解了“高投入低成效”困境。基于多案例实证分析，揭示模块化重构通过分步投资、动态组合与精准匹配三重机制，显著提升供应链风险治理效能，为中小企业提供可操作的数字化转型路径。

6.1　核心结论与悖论破解机制

实证研究表明，数字韧性悖论源于能力刚性（单体系统升级周期 6～12 月）、资源错配（关键模块覆盖率＜50%）与技术脱节（响应效率仅达预期 28%～34%）。模块化重构通过三重机制实现悖论破解：其一，分步投资机制将单模块成本降至传统投入的 15%～30%（如企业 C 物流模块 15 万元/年），试错成本降低 60%（企业 B 需求模块 A/B 测试数据）；其二，动态组合响应速度达传统系统 4 倍（平均 4 h），三家企业风险识别时效提升 75%（企业 A 从 12 h 压缩至 2.6 h）；其三，风险-模块精准匹配使特定组合应对特定风险效能显著，“供应商评估＋多源采购”组合降低断供损失 38%～45%，ROI 提升至行业均值 3.2 倍。风险对冲机制验证显示，“感知-评估-响应”闭环使异常捕捉准确率达 92%（较行业均值提升 23%），跨企业协同效率提升 50%。

6.2　理论贡献与实践启示

理论层面，本文提出“解耦-组合”数字能力新范式，将能力构建周期从 6～12 个月压缩至 2～4 周，填补资源紧约束下渐进迭代的研究缺口；构建了“能力模块-风险场景”动态匹配模型，突破 SCOR 等静态风险管理局限；实证揭示模块化通过经验沉淀（复用率 70%）与成本优化形成韧性的内在机理。实践层面，可提炼出具有普适性的可复制实施路径：在战略布局上，企业应摒弃“大而全”的传统思维，转向“小而精”的精准部署模式，优先将资源投向高价值模块，例如供应监控模块的投资回报率（ROI）可达 3.2 倍；具体实施过程中，针对 IT 基础薄弱的企业，可采用 SaaS 与低代码相结合的解决方案（如企业 B 模式，成本控制在≤7 万元），而对于 IT 体系成熟的企业，则建议选择定制开发并注重生态协同（如企业 A 模式，可实现算法精度提升 25%）；运营阶段，需设立专职的“模块化韧性小组”（机制利用率达 90%），同时构建事件驱动型流程，以此实现响应速度提升 70%。

基于长三角 120 家中小制造企业实证数据，提炼核心模块的成本收益规律（表 3）[19]，为精准投资决策提供依据。

表 3　模块化数字能力成本收益敏感性分析

模块类型	单模块成本/（万元·年$^{-1}$）	ROI	回收周期/月
供应商评估	8～15	3.2x	5.3
柔性排产	5～10	2.8x	6.1
全链路可视化	12～18	2.1x	8.7

政策建议：政府补贴应优先支持 ROI＞2.5x 的模块（如供应商评估），单模块补贴上限设为成本的 40%，以最大化财政资金效能。

6.3　研究局限与未来方向

本文存在三方面局限：行业适配性上，制造业结论对服务业（如贸易金融风险）适用性待验；但初步验证表明模块化框架具备跨行业迁移潜力：在物流行业，“全链路可视化＋弹性路由”组合可复用（ROI＞2.5x），但需增加交通网络实时拓扑分析模块以应对路径中断风险；在电商领域，需求感知模块（ROI＞2.8x）可直接移植，但需集成反欺诈算法适配交易信用风险场景。技术深度上，模块组合依赖人工配置（企业 B 调整耗时 2 h），缺乏动态优化算法；周期覆盖上，未验证经济上行期（如需求扩张）的产能模块弹性。未来研究将着力四维突破：开发强化学习推荐系统实现智能组合（目标响应＜10 min）；设计边缘计算模块解决网络延迟问题（如企业 C 物流 API 延迟＞5 s）；构建跨企业行业模块库（如汽车业供应商评估库），降低开发成本 40%；建立逆周期测试框架，模拟全链断裂场景（原材料断供＋需求腰斩）压力测试鲁棒性。

参考文献

[1] WORLD ECONOMIC FORUM. Digital transformation of industries: supply chain resilience[EB/OL]. (2022-05-15)[2024-06-20]. https://www.weforum.org/reports/digital-transformation-of-industries-supply-chain-resilience.

[2] 中国中小企业研究院. 中国中小企业数字化转型研究报告(2023)[R]. 北京：中国中小企业发展促进中心，2023.

[3] IVANOV D, DOLGUI A, BLACKHURST J. Ripple effect and supply chain dynamics: new trends and research directions [J]. International Journal of Production

Research，2024，62(3)：1-18.
[4] WANG J，LI Z. 中小企业供应链脆弱性形成机理与治理路径 [J]. 中国软科学，2021(3)：1-12.
[5] INTERNATIONAL SUPPLY CHAIN ASSOCIATION. Global Supply Chain Vulnerability Index 2023[R]. Geneva：ISCA，2023.
[6] ZHANG R，LIU Y，WANG J. Modular digital twins for SME supply chain resilience：a configurational approach [J]. Journal of Operations Management，2023，69(5)：712-730.
[7] MCKINSEY & COMPANY. SME digital modularization in Asia：cost-benefit analysis[R]. Singapore：McKinsey，2024.
[8] 刘伟，张华，陈明. 模块化数字能力动态适配机制研究——基于强化学习的实证检验 [J]. 管理世界，2024，40(1)：88-102.
[9] GARTNER. Market guide for supply chain risk management solutions[R]. Stamford：Gartner Inc，2024.
[10] DUBEY R，BRYDE D J，GUNASEKARAN A. Blockchain-driven modular capability integration for supply chain resilience [J]. International Journal of Production Economics，2023，258：108-120.
[11] TEECE D J，PETERAF M A. Dynamic capabilities and industrial resilience in crises [J]. Strategic Management Journal，2023，44(7)：179-195.
[12] 中国制造企业数字化转型报告编委会. 中国制造企业数字化转型白皮书(2023)[R]. 北京：工业和信息化部，2023.
[13] 陈春花，赵海然. 数字韧性：危机情境下的组织能力重构框架 [J]. 管理学报，2023，20(2)：210-219.
[14] ACCENTURE. Modular digital capabilities for SME resilience：cost-benefit analysis[R]. Dublin：Accenture，2023.
[15] LIU W，ZHANG H，CHEN M. A machine learning approach to dynamic module-risk mapping in digital supply chains [C]//Proceedings of the 55th Hawaii International Conference on System Sciences. Hawaii：HICSS，2024：6128-6137.
[16] NARASIMHAN R，TALLURI S. Blockchain for secure modular system integration [J]. Journal of Supply Chain Management，2023，59(2)：45-63.
[17] WAMBA S F，QUEIROZ M M. Blockchain-ERP integration for modular capability deployment [J]. IEEE Transactions on Engineering Management，2023，70(8)：1-12.
[18] MCKINSEY and COMPANY. Global supply chain disruption hotspots[R]. New York：McKinsey and Company，2022.
[19] 龙海峰，李振国. 长三角中小制造企业模块化数字能力成本收益分析 [J]. 科技和产业，2024，24(3)：45-52.

The Digital Resilience Paradox：Reconstruction of "Modular Digital Capabilities" and Supply Chain Risk Hedging Mechanisms in Small and Medium-sized Manufacturing Enterprises

LONG Haifeng，QIU Xiaochuan

(School of Economics and Management，Hunan University of Science and Engineering，Yongzhou 425199，China)

Abstract：To resolve the "Digital Resilience Paradox" (the dilemma of high investment and low effectiveness) faced by small and medium-sized manufacturing enterprises (SMMEs) during digital transformation，focusing on their supply chain risk governance context，a modular digital capability reconstruction path and a risk hedging mechanism were proposed. Using a multi-case comparative research method，the practices of three typical SMMEs were deeply analyzed. Findings reveal that by deconstructing digital capabilities into four recombinable modular layers such as the foundational data layer，core functional layer，intelligent decision-making layer and collaborative interaction layer，enterprises can adopt a risk-scenario-oriented approach to deploy key modules (for example demand sensing，flexible scheduling) incrementally. This significantly lowers the transformation threshold and enhances agility. Furthermore，by constructing a "precision identification-dynamic assessment-collaborative response" hedging mechanism，empirical evidence demonstrates that modular combinations can reduce risk identification time by 30% and decrease supply chain losses by over 25%. Theoretically，a modular digital capability framework is pioneered. Practically，it provides an actionable path featuring "lightweight deployment and dynamic recombination"，systematically resolving the paradoxical relationship between digitalization and resilience enhancement under resource constraints.

Keywords：digital resilience paradox；modular digital capabilities；supply chain risk hedging；small and medium-sized manufacturing enterprises (SMMEs)；capability reconstruction path