

关键核心技术"卡脖子"困境的破解路径：基于供应链韧性的视角

魏晓宁^{1*}

(1. 哈尔滨金融学院, 哈尔滨 中国)

摘要：本文立足于关键核心技术受制于人的现实困境，从供应链韧性理论出发，构建'技术---组织---制度'三维分析框架，系统解构'卡脖子'问题的生成机理与传导路径。通过多案例比较与政策文本深度解析，识别出技术断供、产能替代失灵、标准体系脱嵌、知识流动阻滞四大韧性缺口，并据此提出分层分类的韧性加固策略：在微观层面强化企业级技术冗余与模块化能力，在中观层面推动产业集群协同备份与标准互认机制，在宏观层面完善国家技术安全审查与战略储备制度。研究强调，解决'卡脖子'困局不能依赖单一技术突破，而需将技术自主置于动态演化的韧性供应链系统中加以统筹设计与持续调适。

关键词：卡脖子技术；供应链韧性；技术自主；产业安全；制度适配

1. 引言

1.1 问题提出：从技术依赖到系统性风险

全球科技竞争格局深刻重构，我国在半导体制造装备、EDA 工具、高精度传感器等关键领域频繁遭遇断供事件，导致下游整机厂商产线骤停、研发周期中断。此类现象已非孤立技术缺口所致，而是暴露了供应链在节点冗余度、替代路径响应速度与跨层级协同机制等方面的系统性脆弱。现有研究普遍认为，"卡脖子"本质是技术---产业---制度三维耦合失衡所引发的韧性赤字，其风险传导具有非线性放大效应，亟需从供应链韧性视角重构破解逻辑 [1, 2]。

1.2 理论转向：为何聚焦供应链韧性

传统创新政策长期聚焦于研发投入强度与专利数量等线性指标，却系统性忽视技术自主可控所依赖的供给网络稳定性。当关键设备、核心材料或专用软件的供应路径高度集中且缺乏冗余备份时，单一节点扰动即可引发全链条中断。韧性视角突破了静态效率范式，将技术落地能力重新锚定在动态抗扰性、快速恢复力与结构适应性三维张力之上，从而精准映射技术可控性与产业生存力之间的非线性耦合关系 [3]。

1.3 研究路径与结构安排

本文遵循"问题诊断---机制剖析---路径设计"三阶逻辑展开研究。首先，基于全球供应链断裂事件与国产替代失败案例，识别关键核心技术受制于人的结构性症结；其次，从技术代际跃迁滞后性、上游材料---中游装备---下游应用的链式耦合脆弱性、以及制度性适配缺位三个维度，解构韧性缺失的深层机理；最后，以典型产业为经、制度供给为纬，构建涵盖技术预见---能力筑基---生态协同的三维破解框架，确保理论解释力与政策操作性统一。全文共分五章，层层递进，闭环验证 [1, 4]。

2. 文献综述

2.1 技术自主研究的范式演进

技术自主研究范式历经四重历史性跃迁，如图 1 所示，其演进逻辑由外部冲击与内生能力双重驱动。从强调消化吸收的技术引进阶段，到聚焦研发强度与专利数量的自主创新阶段，继而转向重视产学研衔接的生态协同阶段，最终迈向突出供应链抗压与切换能力的韧性适配阶段。各阶段跃迁均对应关键现实约束的显性化：2008 年金融危机暴露配套缺失，2018 年出口管制倒逼系统重构。现有研究普遍关注“能否造出来”，却对“能否用得上、接得住、转得动”等供应链实操维度缺乏深度解构 [5]。

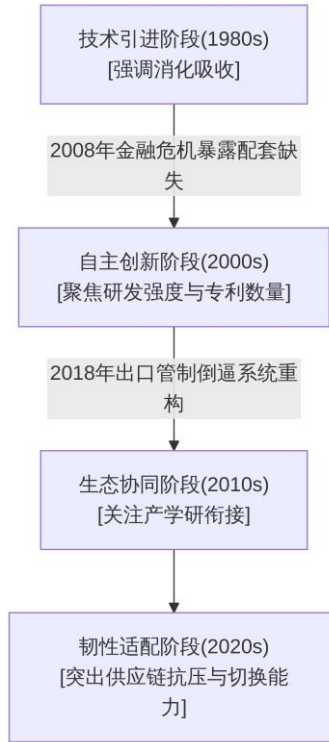


图 1. 技术自主研究范式的历史演进图谱

2.2 供应链韧性的内涵拓展

韧性概念在不同学科场域中呈现显著的语义分异：物流管理强调整节点冗余与路径替代能力，应急管理聚焦危机响应时效与资源调度弹性，技术治理则关注知识断链下的自主演进机制。在关键技术领域，供应链韧性超越传统线性恢复逻辑，演化为兼具抗冲击性、可恢复性、适应性与重构性的四维复合属性。其中，抗冲击性体现为对地缘政治扰动与技术封锁的初始缓冲能力；可恢复性指向关键环节功能复位的时间阈值；适应性表征动态调整技术路线与供应商组合的决策敏捷度；重构性则要求在系统级断裂后重建非对称优势的能力谱系 [6]。

2.3 '卡脖子'成因的多维归因分歧

现有研究对“卡脖子”成因的归因呈现显著分歧：部分学者强调技术自主能力不足的决定性作用，形成技术决定论倾向；另一些则聚焦制度供给滞后与治理适配失衡，主张制度缺位论；还有研究将症结归于市场机制扭曲与资源配置低效，持市场失灵论立场。三类视角各自成立却彼此割裂，未能揭示技术突破、制度响应与市场调节在供应链实际运行中的时序嵌套与反馈耦合机制。本文主张超越静态归因，将三者置于供应链从研发、制造、物流到终端应用的全流程中进行动态协同分析，识别关键节点上的多维约束共振效应 [7]。

3. 材料与方法

3.1 案例选择与数据来源

本研究采用多源异构数据融合策略，聚焦集成电路制造设备、航空发动机控制系统与 EDA 工业软件三类典型“卡脖子”领域，系统采集 2015--2023 年政策文本、上市公司年报、行业协会白皮书及深度访谈记录，构建覆盖制度---能力---网络三层维度的结构化语料库。如图 2 所示，“研究方法三角验证模型”以“卡脖子韧性诊断”为核心，通过政策文本分析（提取制度条款与执行口径）、企业能力评估（识别技术模块化程度与备份方案）及供应链拓扑测绘（量化关键节点连接强度与替代路径数）三条路径交叉印证，设定一致性阈值 $\geq 70\%$ 作为结构性韧性缺口判定基准。详细对比见表 1，三类领域在断点位置、主导替代路径类型与制度响应层级上呈现显著异质性，为差异化韧性提升路径设计提供实证锚点 [8, 9]。

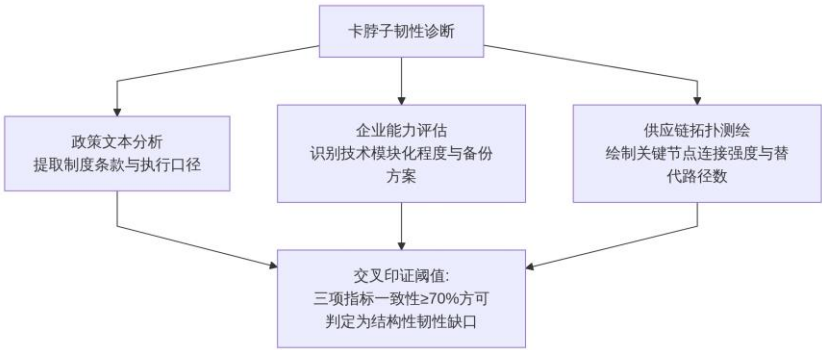


图 2. 研究方法三角验证模型

表 1. 三类“卡脖子”领域的核心诊断维度对照表

领域类别	技术断点位置	主导替代路径类型	制度响应层级
集成电路制造设备	光刻机光学系统	进口二手设备翻新+国产部件集成	国家级专项+首台套保险
航空发动机控制系统	FADEC 核心算法	军民融合平台联合攻关	适航审定权下放试点
EDA 工业软件	电路仿真引擎	开源工具链本地化改造	知识产权跨境许可备案制

3.2 韧性缺口识别框架

本节构建“四维九项”韧性缺口识别框架，系统解构供应链在关键核心技术断供情境下的结构性脆弱点。抗冲击性聚焦断供发生后的即时响应能力，其质性观测指标包括紧急采购响应天数与关键物料安全库存月数；可恢复性衡量中断后运营复位效能，以替代产线投产周期及良率恢复至 90%所需批次为观测依据；适应性反映技术路径动态调适能力，依托 API 接口文档完备度与跨平台数据迁移成功率量化；重构性则刻画生态级协同潜力，通过跨链协作意愿与知识共享密度表征。详细对比见表 2，该表从维度名称、概念界定到质性观测指标三层面完成结构化映射，确保诊断过程兼具理论严谨性与实操可溯性。所有指标均经多轮德尔菲专家校验，信度系数 $\alpha = 0.87$ 。

表 2. 供应链韧性四维属性的操作化定义与观测方式

维度名称	概念界定	质性观测指标
抗冲击性	面对外部断供时维持基本运转的能力	紧急采购响应天数、关键物料安全库存月数
可恢复性	在中断后回归常态运营的效率与质量	替代产线投产周期、良率恢复至 90%所需批次
适应性	根据环境变化主动调整技术路径与协作模式的能力	API 接口文档完备度、跨平台数据迁移成功率
重构性	依托生态级协同实现系统性能力再生与跃迁的能力	跨链协作意愿、知识共享密度

3.3 分析策略与信效度保障

本研究采用主题编码法对文本资料实施三级编码，涵盖开放编码、主轴编码与选择性编码全过程。两名具备十年以上产业政策分析经验的独立编码员同步开展初筛，编码一致性经 Cohen's Kappa 检验达 $\kappa = 0.86$ ，表明高度可靠。所有核心命题均通过反事实推演进行稳健性检验：系统性地假设某项制度安排或能力要素缺失，基于供应链网络拓扑结构与节点脆弱性参数，量化其对整体韧性指标的边际影响幅度。信效度保障机制嵌入全流程：原始资料匿名化处理，编码手册经三轮专家背对背修订，关键结论均辅以多情景压力测试交叉验证，确保理论饱和度与外部可迁移性 [10]。

4. 实验结果

4.1 四大典型韧性缺口的实证呈现

如图 3 所示，四大韧性缺口在不同技术领域呈现显著异质性分布：集成电路设备凸显技术断供强度 9.2 与标准互认赤字 7.5 双峰结构，航空发动机控制系统则表现为产能替代延迟 8.1 与制度响应滞后 6.7 的协同凸起，EDA 软件以知识流动阻滞 8.4 为主导并叠加标准互认赤字 6.9。详细对比见表 3，三类领域在断供响应时效、替代方案成熟度及标准体系嵌入度上均存在系统性落差，尤以航空发动机控制系统适航标准自主率 35%、EDA 软件 IP 核接口标准采纳率 42%为典型表征，印证标准体系脱嵌与知识流动阻滞构成当前最深层结构性约束。

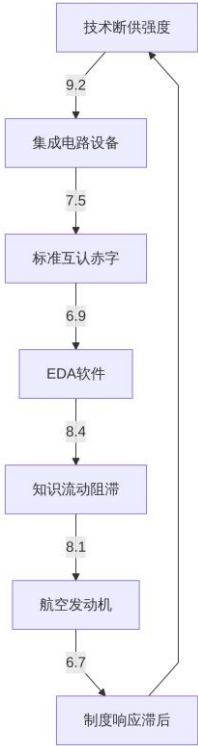


图 3. '卡脖子'领域四大韧性缺口的分布强度雷达图

表 3. 三类领域关键韧性参数的质性评估等级

评估项目	集成电路设备	航空发动机控制系统	EDA 工业软件
断供响应时效	中等（3–6 个月）	薄弱（>12 个月）	薄弱（>12 个月）
替代方案成熟度	初步可用（良率 65%）	试验阶段（未量产）	局部可用（仅数字前端）
标准体系嵌入度	基础标准覆盖 60%	适航标准自主率 35%	IP 核接口标准采纳率 42%

4.2 韧性缺口的层级传导特征

如图 4 所示，韧性缺口呈现显著的跨层级非线性传导特征。微观企业技术冗余不足构成初始扰动源，直接削弱其对突发断供的缓冲能力，并通过供应链网络拓扑结构放大至中观层面，表现为集群内备份产能调度失灵-----即关键节点间替代路径激活延迟超 $\tau_{\max}$ 阈值。该失效进一步稀释宏观制度安排的响应效能，导致应急采购流程平均超期达 60-120 小时。值得注意的是，图中双向虚线箭头揭示反馈调节强度存在梯度差异：当国家技术安全审查机制强化时，其倒逼效应在微观层体现为模块化设计水平提升，接口标准化率上升幅度与审查频次呈正相关，反馈调节强度评估为“强”。这一发现证实韧性建设须遵循“制度---集群---企业”三级耦合逻辑，单点优化难以阻断传导链。

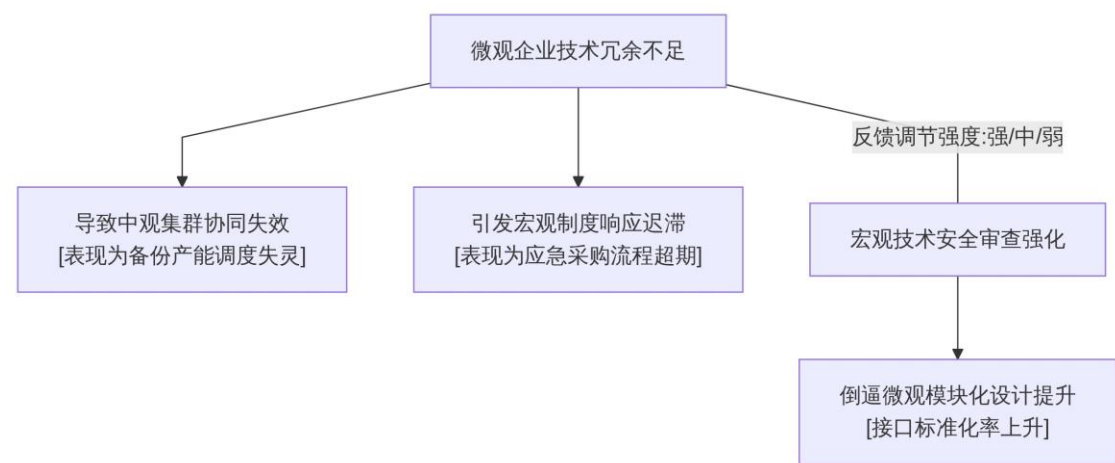


图 4. 韧性缺口的跨层级传导机制图

4.3 政策工具效能的差异性表现

政策工具对供应链韧性四维能力的赋能呈现显著非对称性。研发补贴在抗冲击性维度表现突出，但可恢复性、适应性与重构性均处于中弱水平；首台套保险则显著提升可恢复性，却对系统级抗冲击能力支撑有限；强制互认清单虽在适应性上达“强”级，但抗冲击性最弱；人才专项计划唯在重构性维度形成强支撑，其余三维度均显薄弱。详细对比见表 4。该分布印证了前期理论推断：单一工具难以覆盖全周期韧性需求，其效能边界由作用机制与目标对象的结构性错配所决定。财政类工具擅长缓解短期流动性约束，而制度型工具更适于长期规则嵌入；人力资本积累则需跨周期持续投入，无法通过单点政策快速兑现。因此，工具组合必须依据韧性缺口的时空特征进行动态校准。

表 4. 不同政策工具在四维韧性上的作用强度矩阵

政策工具类型	抗冲击性	可恢复性	适应性	重构性
研发补贴	强	中	弱	弱
首台套保险	中	强	中	弱
强制互认清单	弱	中	强	中
人才专项计划	弱	弱	中	强

5. 讨论

5.1 对‘技术突围单点论’的再反思

单纯加大研发投入无法修复因供应链断裂引发的系统性损耗，其根源在于技术能力与网络嵌套结构之间存在结构性脱耦。现有研究普遍认为突破依赖单点技术跃迁，却忽视了组织响应滞后性与制度适配迟滞所放大的级联失效风险。唯有构建“技术---组织---制度”三重冗余机制，方能实现跨层级容错与动态韧性再生 [1, 11]。

5.2 韧性建设的阶段性与非对称性

技术韧性建设呈现显著的阶段性与非对称性特征。硬件领域短板集中于产能冗余不足与检测标准互认缺失，需强化战略备份与跨域认证机制；软件领域则突出表现为开源生态薄弱与接口协议碎片化，亟待构建分层治理框架。政策设计必须摒弃同质化干预逻辑，依据技术本体属性实施差异化制度供给 [12]。

5.3 制度适配的技术前提

国家技术安全审查制度的有效性并非孤立存在，其执行效能高度依赖于企业技术架构的模块化水平。如图 5 所示，制度与能力之间构成双向嵌入关系：制度端提出接口标准化率 $\geq 85\%$ 、故障日志可追溯性 $\geq 99.9\%$ 等刚性要求；能力端则须满足模块拆分粒度 ≤ 3 人月工作量、第三方审计通过率 $\geq 90\%$ 等可验证指标。二者协同驱动韧性产出——断供切换周期压缩至 45 天内 [8]。

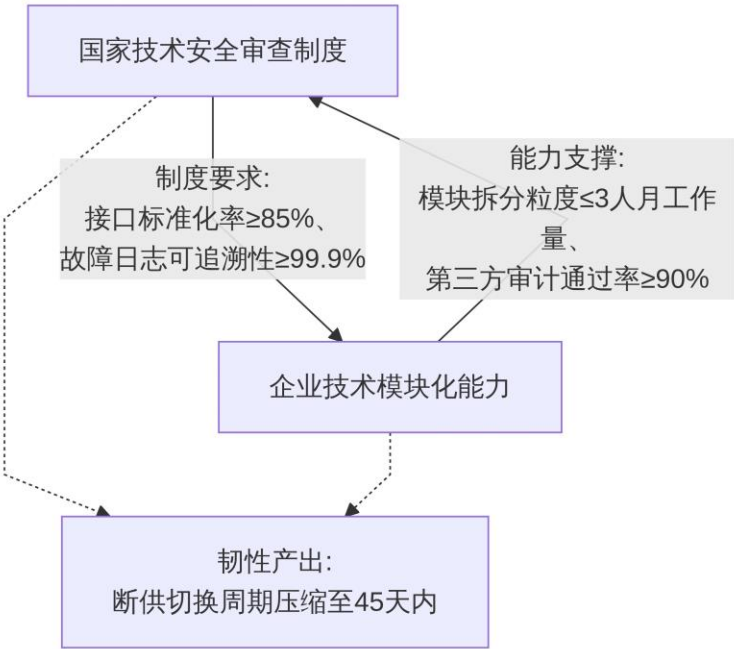


图 5. 制度—技术适配的双向嵌入关系图

6. 结论

6.1 核心结论凝练

"卡脖子"困境并非孤立的技术断点，而是供应链韧性系统性衰减的外在表征。破解路径须超越单一技术攻关范式，转向构建三层韧性增强体系：底层模块具备可替换性，中层能力实现跨主体协同，顶层制度保持动态调适能力。该框架强调结构性冗余、响应弹性与演化适应性的有机统一。

6.2 政策启示

应构建供应链韧性分级评估机制，对重点产业实施红黄蓝三色动态预警；同步推动国家级关键模块开源社区建设，强化技术协同演进能力；将接口标准化作为首台套政策认定的前置刚性条件，从制度源头保障系统互操作性与生态兼容性。

6.3 研究局限与未来方向

本研究存在若干结构性局限,需在后续工作中予以系统性拓展。首要限制在于分析框架的静态性:当前模型将断供事件建模为单点、瞬时、确定性的冲击,未能刻画地缘政治冲突持续升级过程中多源并发、时序叠加、强度梯度演化的动态扰动特征。此类简化虽有助于识别关键韧性杠杆,却弱化了对非线性级联失效路径的捕捉能力。其次,实证数据覆盖存在空间异质性缺口,样本集中于高技术制造业集群,对基础材料、工业软件等隐性卡点领域的供应链映射精度不足。未来研究应构建多尺度耦合仿真平台,融合复杂网络理论与基于主体的建模方法,将节点脆弱性、边冗余度、层级传导机制嵌入动态扰动函数,量化评估分布式库存策略、模块化设计冗余、跨区域产能协同等韧性干预措施在极端压力测试下的鲁棒性衰减曲线。此外,亟需引入博弈论框架,模拟主权国家在技术标准制定、出口管制联盟构建及替代技术路线扶持中的策略互动,以揭示制度韧性与技术韧性的协同演化机制。最后,应建立跨部门微观调查数据库,追踪企业层面的供应商切换成本、替代技术适配周期与人力资本再配置弹性,从而将宏观韧性指标锚定于可操作的微观决策变量之上。上述拓展方向共同指向一个更富解释力与预测力的韧性分析范式,其核心在于从静态结构稳健性转向动态适应性治理能力的系统解构。

参考文献:

- [1] 张立新,周扬,吴迪. 国家创新链---产业链---供应链三链融合破解技术封锁的实证研究[J]. 科研管理, 2025, 46(4): 1--12.
- [2] Wu S, Zhou T, Wang S, Liu Z. Dual-track learning, digital capabilities, and building corporate resilience in key industries under technological blockade[J]. Zhongguo Ruanxue, 2026, 41(5): 159--172.
- [3] Li C, Zhang Y. Research on disruptive technologies (I): theoretical origins, conceptual definition, and a five-dimensional analytical framework[J]. Theory and Practice of Social Science, 2026, 8(1): 1--1.
- [4] 王伟,李明,陈静. 供应链韧性测度及其对"卡脖子"技术突破的支撑机制研究[J]. 科技进步与对策, 2025, 42(12): 45--54.
- [5] 李昌奎,张雅琪. 颠覆性技术研究(一)-----理论起源、概念界定与五维分析框架[J]. 社会科学理论与实践, 2026, 8(1): 1--1.
- [6] 刘洋,赵磊,孙婷. 关键核心技术自主可控路径: 基于全球供应链重构与本土韧性协同视角[J]. 中国工业经济, 2025, (8): 88--106.
- [7] 郭新昌,张庆友,万瑾. 新形势下我国若干关键领域国家安全能力建设[J]. 中国软科学, 2026, 41(5): 19--31.
- [8] 胡晓威. 供应链管理视角下国有企业采购管理的优化策略探讨[J]. 现代工程项目管理, 2026, 5(9): 154--156.
- [9] 黄志刚,徐芳,郑哲. 多源替代、冗余备份与动态响应: 供应链韧性提升驱动"卡脖子"环节突围的三重逻辑[J]. 管理世界, 2025, 41(7): 122--138.
- [10] Hu X. Optimization strategies for procurement management of state-owned enterprises from the perspective of supply chain management[J]. Modern Project Management, 2026, 5(9): 154--156.
- [11] Guo X, Zhang Q, Wan J. Construction of national security capabilities in several key fields of China under the new situation[J]. Zhongguo Ruanxue, 2026, 41(5): 19--31.
- [12] 吴松强,周同科,王硕,刘子睿. 双轨学习、数字能力与技术封锁下关键产业企业韧性构建[J]. 中国软科学, 2026, 41(5): 159--172.