

供应链冗余策略分类及构建路径综述

李易隆

重庆交通大学 经济与管理学院, 重庆, 400074;

摘要: 在全球供应链高耦合且不确定性因素增多的背景下, 针对冗余策略定义与分类尚未统一的问题, 本文系统梳理了代表性文献, 归纳了供应商配置与制造商产能的冗余构建路径, 并总结了各类冗余策略的机制与建模方法, 构建了现有的术语体系与分类框架。研究结果表明, 多种冗余策略的综合应用可显著提升供应链韧性, 为在成本与弹性之间实现平衡提供了参考。

关键词: 供应链冗余; 供应链韧性; 冗余策略

DOI: 10.69979/3029-2700.26.01.090

引言

供应链通过围绕关键企业, 基于物流、商流与信息流活动以高效、及时地满足客户需求, 其主要参与对象包含制造商、供应商、零售商及客户。在全球供应链体系高度耦合且频繁波动的背景下, 企业运营日益容易受到地缘摩擦、气候变化以及运输环节受阻等外部因素的影响, 单纯以降低成本与提升效率为导向的传统供应链设计也愈发显露出其脆弱性。为应对多源风险带来的挑战, 学术界与企业逐渐聚焦于构建具备缓冲能力与抗干扰能力的供应链体系, 以在遭遇外部供需剧烈变化时维持系统内各节点的基本运转, 并将其视为现代物流体系中应对不确定性最具通用性的策略之一。在多种增强供应链韧性的方法中, 冗余策略通过整合备用产能、替代供应源及多条运输路线等预设方案, 在关键节点或流程中预留可灵活调配的资源, 从而进一步缓解供应链压力。

尽管已有大量文献对供应链风险管理及韧性进行了探讨, 但冗余策略的概念边界在不同研究中仍存在分歧。从不同研究视角出发, 供应链冗余被赋予了多样化的定义, 分别被视为库存缓冲、设施备用、供应链灵活性要素或网络结构的延伸部分。这些差异虽呈现了冗余策略的多维特征, 却也导致研究框架缺乏紧凑性, 难以形成系统性的分类体系。此外, 冗余策略的分类亦呈现差异化: 部分研究基于功能侧重将其划分为库存类、产能类与运输类冗余; 另一些研究则基于网络特征, 将其分为结构类、路径类与供应类冗余。总体而言, 学界尚未对供应链冗余策略的定义及其分类达成统一解释。

本文选取若干具有代表性的参考文献, 对供应链冗余策略的分类与构建路径进行了系统性梳理, 以帮助研

究者理解冗余策略的内在结构与功能差异, 并为后续理论研究提供可选的术语体系。同时, 研究可揭示传统方法与新兴技术之间的联系, 为动态化冗余设计提供思路。通过对不同情景下策略适用性的分析, 为企业在复杂环境中制定兼顾成本与韧性的运营方案提供参考。

1 基于供应商配置构建冗余机制

在供应链侧风险较高的情景下, 构建多层次、多渠道的供应关系被普遍视为提升系统韧性的有效措施。李新军等^[1]以由战略供应商与备份供应商构成的双层供应结构为研究对象, 通过比较推式与推-拉结合的两类期权执行模式, 分析了制造商在订货量与能力预定方面的最优决策。算例结果表明, 结合需求信息进行补货的混合机制通常能够获得更高的系统收益, 研究进一步强调了供应可靠性与成本结构在供应商冗余构建中的关键作用。在此基础上, Kamalahmadi 和 Parast^[2]进一步从多情景风险视角出发, 比较了前置库存、备用供应商与受保护供应商三类备选策略的效果。通过构建两阶段混合整数规划模型并结合数值实验, 研究表明不同形式的冗余策略均能在供应链遭受环境或供应扰动时有效降低成本、提高系统稳健性。同时, 研究指出供应链的区域化布局对于增强风险抵御能力具有显著作用。针对多周期、多供应对象的管理问题, Feng 等^[3]将环境约束与供应商选择相结合, 采用鲁棒优化方法刻画市场需求与碳排放量的不确定性, 并利用锥对偶理论将半无限规划模型转化为混合整数二阶锥规划模型。此外, 研究基于层次分析法选取产品质量、订购成本、服务水平以及应急能力作为供应商评价指标, 以确定各供应商的订购权重。在需求不确定与碳排放约束并存的算例中, 验证了

模型及其求解策略的有效性。

另一方面,供应侧不确定性亦会改变多条供应链间的竞争结构。Fang 和 Shou^[4]以由单个具有随机产量的供应商与零售商构成的供应链为研究对象,考察供应不确定性与竞争强度对均衡决策的影响。通过构建不确定性背景下的 Cournot 竞争模型,研究揭示了供应波动对集中化决策及订货策略的作用机制,并指出在供应风险较高时,集中化更可能成为优势选择,即供应链集中化更易表现为占优策略。库存作为市场需求的“蓄水池”,能够有效缓冲供需逆差对供应链的冲击。其中,安全库存作为库存的“保险丝”,其设置有助于应对短期需求扩张,从而提升供应链下游的冗余程度。Serel^[5]基于有效利用最新需求信息的快速响应机制,设计了二次需求订单采购模式,以利用市场信息修正第二次订单的需求水平。据此构建了一种采用正态分布刻画需求信息、考虑采购预算约束的多品类单周期库存模型,并开发了相应的动态规划算法求解带容量限制的多品类报童问题。数值实验表明,该机制能够提升零售商对需求变化的适应能力,也体现了需求波动性与预算约束对最优策略的影响。

相关研究表明,供应商冗余已超越单纯的多源配置,逐步演化为结合风险分析、信息更新与环境约束的综合优化策略。然而,现有成果多侧重于单一冗余手段,模型情景相对理想化,且当前静态或单周期框架难以充分反映供应链在扰动下的动态决策过程,对网络层面的结构冗余关注也仍为有限。

2 制造商产能冗余规划与设计

除在供应层面引入冗余外,制造企业通过产能储备、产能扩展及生产线配置等手段提升供应链系统的灵活性亦至关重要。位于供应链上游的制造商受层层传递的“牛鞭效应”影响,其产能规划不仅决定自身运行效率,也直接影响整个供应链上游的冗余水平。Rajagopalan 和 Swaminathan^[6]从多品类、多周期的视角出发,研究了在产品需求存在波动趋势的背景下,设备换线成本与库存持有成本对大型消费品制造商生产线产能扩张策略的影响。通过构建一种整数规划模型,并结合高效求解方法,以确定整个规划期内的最优产能配置方案。数值实验结果表明,即使生产调整带来的额外成本较高,合理的产能扩张仍可有效降低系统费用,验证了模型与求解策略的有效性,并为类似企业的长期产能规划提供

了量化参考。产能调整成本是影响制造商产能规划的重要因素之一, Qi 等^[7]在研究中分别考虑了单次与多次产能调整的生产场景,将问题建模为随机动态规划,并结合数据驱动的启发式算法实现高效求解。结果表明,在需求信息随决策阶段逐步揭示的情境下,多次决策可显著提高产能的配置效率,同时数据驱动的求解策略在实际算例中展现出可靠且稳定的性能。

供应提前期的不确定性及其对库存与应急机制的影响,是提升供应链稳定性的核心因素。Kouvelis 和 Li^[8]聚焦于供应提前期波动问题,在传统静态安全提前期规划的基础上,提出了一种结合安全库存、动态应急措施及安全提前期调整的综合策略。研究表明,当生产系统内供应提前期的变异系数较大时,单纯依赖预设的安全提前期难以有效应对显著波动,而通过引入应急库存与事后调整机制,系统稳定性可得到显著改善。从更长周期的视角出发,Chaturvedi 和 Martínez-de-Albéniz^[9]构建了一个将安全库存、冗余产能及供应来源多样化联合优化的决策框架。研究发现,在供应风险增加的情况下,这三类措施通常需同步增强,而需求波动对策略组合的影响并非单调,供需的不确定性表现出更为复杂的耦合关系。进一步将制造系统的服务时间与产能规划结合,可得到一个在随机需求情景下具有 NP-hard 性质的制造系统服务时间与缓冲区容量联合优化问题。Kassoul 等^[10]针对传统扰动分析方法仅能优化单一类型决策变量的局限性,从生产线设计与调度的视角出发,将遗传算法与有限扰动分析方法相结合,实现了服务时间与缓冲区容量的联合优化。研究凸显了产线结构与产能配置之间的紧密关联,并为大规模生产系统中产能冗余策略的规划提供了可行思路。

现有研究虽然从产能储备、扩产策略、生产线与缓冲区优化等方面探讨了制造企业提升供应链灵活性与冗余的路径,但多数工作仍局限于单一维度或局部策略,难以全面呈现系统的协同效应。

3 结论

供应链冗余作为供应链的“蓄水池”,能够有效应对短期内急剧变化的市场需求,提高供应环节的可靠性。本文总结了供应商配置与产能规划等方面的冗余策略构建机制,并揭示了传统方法与新兴技术之间的联系,为企业在复杂环境中兼顾成本与韧性制定运营方案提供了参考。

参考文献

- [1] 李新军, 王建军, 达庆利. 供应中断情况下基于备份供应商的应急决策分析[J]. 中国管理科学, 2016, 24(7): 63-71.
- [2] Kamalahmadi M, Parast M M. An assessment of supply chain disruption mitigation strategies [J]. International Journal of Production Economics, 2017, 184: 210-230.
- [3] Feng Y, Liu Y, Chen Y. A robust multi-supplier multi-period inventory model with uncertain market demand and carbon emission constraint [J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 165: 107937.
- [4] Fang Y, Shou B. Managing supply uncertainty under supply chain Cournot competition[J]. European Journal of Operational Research, 2015, 243(1): 156-176.
- [5] Serel D A. Multi-item quick response system with budget constraint[J]. International Journal of Production Economics, 2012, 137(2): 235-249.
- [6] Rajagopalan S, Swaminathan J M. A coordinated production planning model with capacity expansion and inventory management[J]. Management Science, 2001, 47(11): 1562-1580.
- [7] Qi A, Ahn H S, Sinha A. Capacity investment with demand learning[J]. Operations Research, 2017, 65(1): 145-164.
- [8] Kouvelis P, Li J. Contingency strategies in managing supply systems with uncertain lead-times[J]. Production and Operations Management, 2012, 21(1): 161-176.
- [9] Chaturvedi A, Martínez-de-Albéniz V. Safety stock, excess capacity or diversification: Trade-offs under supply and demand uncertainty [J]. Production and Operations Management, 2016, 25(1): 77-95.
- [10] Kassoul K, Cheikhrouhou N, Zufferey N. Simultaneous allocation of buffer capacities and service times in unreliable production lines [J]. International Journal of Production Research, 2024, 62(3): 644-664.