

从局部优化到全局均衡: 多品种小批量生产均衡性影响机制

钱颖¹, 李茂², 翟小婷¹, 任文秀¹, 邹宗峰³

(1. 上海理工大学管理学院, 上海 200093; 2. 西南电子设备研究所, 成都 610036; 3. 上海大学管理学院, 上海 201900)

摘要: 高端制造企业产品结构复杂、市场个性化需求突出, 普遍采用多品种小批量离散生产模式, 属于典型的推拉混合生产类型。针对推拉混合生产情境下生产均衡性波动显著、影响因素识别不系统及作用机制不清晰等问题, 以多品种小批量高端制造企业为案例, 运用扎根理论对深度访谈资料进行编码分析, 提炼出供应链协同失效、排程动态博弈、物理系统刚性和心智模型反馈 4 个主范畴。借助二阶极小基模矩阵与网络中心性分析, 识别出舍本逐末、成长上限与饮鸩止渴 3 个逐层嵌套的系统基模, 揭示局部优化的症状解反复失效、生产失衡的内在机制。基于此, 从认知调适、信息透明、激励联动和组织缓冲 4 个维度提出杠杆解, 为高端制造企业优化多品种小批量生产组织模式提供分析框架与管理启示。

关键词: 生产均衡性; 扎根理论; 系统基模; 二阶极小基模矩阵; 心智模型

中图分类号: F 270 **文献标志码:** A

From local optimization to global equilibrium: the influencing mechanisms of balance in multi-variety and small-batch production

QIAN Ying¹, LI Mao², ZHAI Xiaoting¹, REN Wenxiu¹, ZOU Zongfeng³

(1. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Southwest Electronic Equipment Research Institute, Chengdu 610036, China; 3. School of Management, Shanghai University, Shanghai 201900, China)

Abstract: High-end manufacturing enterprises have complex product structures and prominent individualized market demands. They generally adopt a multi-variety and small-batch discrete production mode, which represents a typical mixed push-pull production type. To address the obvious fluctuations in production equilibrium, unsystematic identification of influencing factors and unclear

收稿日期: 2026-05-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (72474130, 72274122); 四川省宽频带电子产品智能制造工程技术研究中心基金项目 (BEIM2024B003)

第一作者: 钱颖 (1976—), 女, 教授。研究方向: 应急管理、舆情传播、系统动力学。E-mail: qianying@usst.edu.cn

通信作者: 邹宗峰 (1974—), 男, 教授。研究方向: 人工智能、管理信息系统。E-mail: zfzou@mail.shu.edu.cn

引文格式: 钱颖, 李茂, 翟小婷, 等. 从局部优化到全局均衡: 多品种小批量生产均衡性影响机制[J]. 上海理工大学学报, 2026, 48(3): 281-294.

Citation: QIAN Ying, LI Mao, ZHAI Xiaoting, et al. From local optimization to global equilibrium: the influencing mechanisms of balance in multi-variety and small-batch production[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2026, 48(3): 281-294.

action mechanisms in the mixed push-pull production scenario, this study selected multi-variety and small-batch high-end manufacturing enterprises as research cases and adopted grounded theory to code and analyze in-depth interview data. Four main categories were extracted: supply chain collaboration failure, dynamic scheduling game, physical system rigidity, and mental model feedback. Using the second-order minimal archetype matrix and network centrality analysis, this study identified three hierarchically nested system archetypes: Fixes That Fail, Limits to Growth and Shifting the Burden, which revealed the internal mechanism of repeated failures of symptomatic solutions for local optimization and the resulting production imbalance. Accordingly, leverage solutions were proposed from four dimensions: cognitive adjustment, information transparency, incentive linkage and organizational buffering. This paper provides an analytical framework and managerial implications for high-end manufacturers to optimize their multi-variety and small-batch production organization modes.

Keywords: *production equilibrium; grounded theory; system archetypes; second-order minimal basis archetype matrix; mental models*

在全球制造业加速向高端化、智能化、绿色化转型的背景下，高端制造业已成为支撑产业升级和提升国际竞争力的重要力量^[1]。党的二十大报告明确提出“坚持把发展经济的着力点放在实体经济上”，将“推动制造业高端化、智能化、绿色化转型”视为破局方向，以“提升产业链供应链韧性和安全水平”为目标。然而，在此类制造业模式中，订单定制化、工艺路线多元化、资源异质性等要求的叠加，加剧了生产调度的复杂性，导致生产均衡性管理难以适配，造成生产过程周期延长、在制品呆滞或缺乏、窝工现象频发、营运总成本上升等。据世界制造业报告，全球约 65% 的离散型制造企业因生产不均衡导致设备利用率不足 70%，资源浪费与交付延迟问题频繁发生^[2]。

高端制造企业普遍采用多品种小批量生产模式，属于典型的推拉混合生产类型^[3-4]。前端零部件加工往往基于预测和批量逻辑组织生产，具有典型的“推式”属性；而末端总装与交付则严格围绕客户订单、项目节点和齐套关系展开，具有显著的“拉式”属性^[5]。这种混合模式在理论上可以平衡规模效益与响应速度，但在实际运行中，往往导致生产节奏失调^[6-7]。特别是在推拉边界、共享资源与交付压力相互耦合的情况下，该局面常常使局部优化无法自动转化为系统均衡，进而导致周期性波动现象反复出现^[8]。

高端制造业采用数字化手段，推广精益管理，以期提高生产均衡性。管理信息系统，如高级排程

系统(advanced planning and scheduling, APS)、制造执行系统(manufacturing execution system, MES)等的实施，形成了“计划—排产—执行—反馈”的闭环管控^[9-12]。然而，实践表明，信息化水平的提升不一定会带来生产均衡性的同步改善。对于多品种小批量企业而言，即使具备较强的计划可视化、任务跟踪和进度反馈能力，总装端仍可能长期存在任务前松后紧、能力阶段性失衡和月末集中赶工等问题^[8, 10-11]。生产均衡性问题已不再是单纯的排程算法或信息传递问题，而是一个涉及人、组织、信息系统和设备资源深度耦合的复杂管理技术问题^[13-16]。只有从系统和结构、反馈机制和动态演化过程出发，才能更深入地解释生产失衡现象的形成原因。

针对这类复杂问题，钱学森等^[17]和王丹力等^[18]创立的开放复杂巨系统理论及系统集成方法论，为研究工作带来了关键的方法论指导。该方法强调从整体视角出发，采用人机结合、以人为为主的研究方式，将专家经验、统计数据、信息资料与计算机技术有机融合，实现由定性认识到定量分析的跨越。这一思想与高端制造企业生产均衡性研究高度契合：一方面，影响生产均衡性的因素既包括计划规则、资源能力、物料齐套等显性因素，也包括组织行为、绩效压力和异常响应等隐性因素；另一方面，这些因素之间并非简单的线性关系，而是通过反馈回路、时间滞后和相互强化不断塑造系统行为^[13, 16, 19]。因此，在真实的企业情境中，需要先识别关键影响因素，提炼其结构

关系,进而构建系统基模,探索杠杆解。

基于此,本研究聚焦多品种小批量高端制造企业。首先,运用扎根理论对访谈资料进行编码分析,识别影响生产均衡性的核心范畴及其作用关系^[20-22];随后,借助系统基模方法提炼典型反馈结构,揭示系统内部的结构性矛盾;在此基础上,识别改善生产均衡性的关键杠杆点,为高端制造企业生产组织优化与均衡化管理提供更具解释力的理论框架与实践启示。

1 文献综述

1.1 多品种小批量生产均衡性研究

关于多品种小批量生产均衡性的研究,现有文献主要从生产平准化、负荷控制、订单释放与作业协同等角度展开。相关研究普遍认为,在产品类型多、批量离散、工艺路线差异大且交付约束较强的条件下,制造系统运行绩效已不再取决于单一工序效率,而更体现为任务投放节奏、工序衔接状态、资源负载水平和在制品规模之间的整体协调^[1,9]。据此,生产均衡性通常被理解为交期、负荷、节拍和库存等多维目标之间的相对稳定状态,其核心在于降低系统波动并提高生产组织的连续性与可控性。

在具体研究思路层面,精益生产侧重依托平准化生产、稳定生产节拍以抑制系统波动;负荷控制相关研究则聚焦借助订单投放管控与在制品约束,缓解作业系统拥堵问题^[3,7,23-24]。这类研究为理解多品种小批量条件下的生产控制提供了重要基础,但其适用性具有明显情境边界。已有实证研究表明,当需求波动较大、产品差异显著、换型时间较长且能力裕度有限时,单纯依赖 Heijunka 或一般性释放规则未必能够改善系统绩效,甚至可能因计划刚性增强而削弱现场响应性^[3]。因此,生产均衡研究的重点已逐步由“如何平准排产”转向“如何解释失衡形成机制”,即进一步关注计划波动、资源约束、物料状态和组织响应之间的联动关系。

1.2 推拉混合生产与计划排程研究

在生产控制结构研究中,客户订单解耦点(customer order decoupling point, CODP)和混合按库存生产/按订单生产(make to stock/make to order, MTS/MTO)模式是解释推-拉并存现象的核心分析

框架。Olhager^[5]指出,CODP是产品由预测驱动转向订单驱动的关键界面,它不仅决定库存布局与交付响应模式,也深刻影响制造系统和供应链中的计划控制结构。在此基础上,Peeters等^[6]从综述角度进一步将混合MTS/MTO系统区分为顺序型、并行型和浮动型等不同模式,并指出混合控制通常能够在交期、库存和柔性之间取得优于纯MTS或纯MTO的绩效表现,但其代价是系统控制复杂性的显著提升。Hopp等^[7]则从推拉机制的本质出发指出,拉动并不等同于简单接单生产,其核心在于对在制品水平与系统波动的约束,因此,对复杂制造企业而言,推-拉关系本质上是一个关于缓冲、约束与响应机制配置的问题。

在计划与排程研究中,国内外学者已对多品种小批量和面向订单环境下的计划控制展开了大量探讨。Stevenson等^[9]指出,传统生产计划与控制(production planning and control, PPC)中的若干经典概念在MTO行业中的适用性存在明显限制,特别是在订单异质性高、路径多变和交付履行压力较大的情况下,需要重新理解计划、释放和控制之间的关系。国内研究也表明,随着APS和MES在制造现场逐步普及,计划与调度系统已从单纯关注设备利用率和产量,转向同时考虑订单承诺、能力匹配、执行跟踪和动态调整^[8,10]。例如,蔡洋等^[8]基于APS思想构建了面向订单的钢铁企业一体化计划与调度体系,强调“订单-能力-排程”的一体化协调;姚丽平等^[11]针对半导体封装测试这一典型复杂制造场景指出,静态排产虽然具有全局优化意义,但在复杂工艺逻辑、批处理规则和机组组织约束下,必须嵌入业务逻辑才能提升可执行性;王艳红等^[12]则进一步提出了动态制造系统中生产计划与调度协同优化的重要性。由此可见,多品种小批量情境中的生产均衡问题,已不能仅从单一排程算法或局部资源优化角度解释,而需要被置于推-拉混合结构和跨车间协同框架下重新审视。

综上所述,现有研究仍存在以下不足:a.关于生产均衡性的研究更多聚焦于平准化理念、局部排程和资源配置,较少揭示失衡在复杂制造系统中的动态生成机制;b.推拉混合研究虽然揭示了CODP与混合控制的重要性,但对“前端批量加工、后端台套装配”这一高端制造典型结构下的均衡性问题关注不足。基于上述不足,本文拟从

案例企业真实情境出发,运用扎根理论识别影响因素,借助系统基模提炼典型反馈结构,以形成对高端制造企业多品种小批量生产均衡性问题更具解释力的研究框架。

2 分析工具

生产均衡性问题涉及供应链、排程、物理设备与人员决策等多层面要素的动态交互,具有非线性、延迟性和多重反馈特征。对此类问题,需采用能够刻画系统结构、辨识反馈回路的研究工具。

2.1 扎根理论

扎根理论强调从经验材料出发,通过持续比较和逐步编码来提炼范畴、发现关系并建构理论。Glaser等^[21]最早提出扎根理论,强调理论应“从资料中生长出来”;Strauss等^[22]则进一步系统化了其开放式编码、主轴编码和选择性编码的分析路径。在运营管理领域,Binder等^[20]指出,扎根理论特别适用于探索性强、影响因素复杂且既有理论解释不足的问题,但其形成的理论框架通常仍需借助其他方法进行进一步验证与拓展。近年来,扎根理论已逐渐应用于制造企业数字化能力、智能制造与创新机制等研究中,显示出较强的情境解释力和理论建构能力^[25-26]。

在复杂制造与运营管理研究中,生产均衡性并非单一变量决定的结果,而是计划规则、资源能力、物料状态、跨部门协同及管理认知等多重因素共同作用的结果。相较于传统变量式研究,扎根理论能够通过访谈、观察和企业运行资料的持续比较与逐步编码,识别复杂情境中的关键影响因素及其潜在关系,从而较好地弥补既有研究对现场经验、组织行为和隐性规则关注不足的问题^[20, 25-26]。因此,将扎根理论作为前置分析工具,有助于从企业真实运行情境中识别影响生产均衡性的核心范畴,为后续系统结构提炼提供变量基础。

2.2 系统基模

然而,仅依赖扎根理论识别因素与关系,仍难以揭示生产均衡问题中的反馈性、时滞性和非线性特征。系统动力学自Forrester提出以来,始终强调系统行为是由反馈结构决定的,适用于研究制造、供应链和运营管理中的波动、积压、延迟和政策失灵问题^[13-16]。Sterman等^[13]指出,运营管理中的许多复杂问题并非源于单点约束,而是

源于决策规则、信息反馈与物理流程之间的动态耦合;Adane等^[14]则通过制造系统建模说明,系统动力学能够较好地解释制造系统在需求波动和运行扰动下的行为演化。在此基础上,系统基模为识别典型反馈结构提供了结构化工具,如“目标漂移”、“转嫁负担”、“成长上限”等基模有助于将经验现象上升为可解释的系统结构^[19]。

系统基模由彼得·圣吉在《第五项修炼》中系统提出,是系统思考领域的核心分析工具之一。该方法通过因果回路图刻画复杂系统中反复出现的共性行为模式^[27]。因果回路图由变量和因果链构成,因果链以“+”标记同向变化、“-”标记反向变化^[28]。该方法已被应用于安全管理、组织行为、生产运作等领域,其典型分析路径为界定系统边界、识别变量间因果关联、构建因果回路图、识别反馈回路类型并提出杠杆解^[29]。对于多品种小批量生产均衡问题而言,系统基模能够将扎根理论所提炼出的分散因素进一步组织为闭环反馈结构,从而实现由“因素发现”向“结构解释”的推进。

在系统基模的传统应用中,反馈结构所属基模类型的判别,大多依赖研究者将案例特征与经典基模进行直观比对,判别结论受主观经验影响较大。为弥补这一局限,傅红等^[30]提出了二阶极小基模矩阵生成法。该方法将基模识别从定性对照推进为基于变量关系的矩阵运算,其核心流程为:定义流位变量、流率变量与辅助变量,构建因果极性矩阵;以流率变量为分析核心,计算变量之间的二阶交叉影响关系,形成二阶交叉影响矩阵;根据矩阵中极性组合的闭环特征,检测并归类反馈结构所属基模类型。该方法的主要特点在于,基模类型是从变量关系的矩阵运算中涌现而成的,判别过程具备可重复的形式化依据。

2.3 网络中心性分析

为增强反馈结构识别结果的稳健性,本研究进一步引入网络中心性分析作为结构验证的补充工具。网络中心性分析源于社会网络分析领域,主要用于识别复杂网络中具有结构重要性的节点^[31]。其中,介数中心性反映某一节点位于其他节点最短路径上的频率,能够衡量其在网络中所发挥的“桥梁”作用。与因果极性矩阵侧重影响方向和极性的分析不同,介数中心性主要基于网络拓扑结构评估变量的重要性,因此能够为基模分析提供独立的验证视角。

在具体操作中, 可将因果极性矩阵转化为有向邻接矩阵, 进而计算各变量的介数中心性, 并结合其在反馈结构中的位置判断其在系统中的结构重要性。若某些变量在基模识别结果中处于关键反馈链条, 同时又表现出较高的介数中心性, 则说明其在系统运行中具有较强的桥接和传导作用, 可作为后续干预设计的重要依据。

基于上述分析工具, 本研究形成了“扎根理论识别因素-系统基模提炼结构-网络中心性辅助验证”的综合分析框架: 首先, 通过访谈、现场观察和企业运行资料获取质性信息, 并运用扎根理论提炼核心变量; 随后, 采用二阶极小基模矩阵生成法识别反馈结构对应的基模类型, 并借助因果回路图进行可视化表达; 最后, 结合网络中心性分析验证关键变量的结构地位, 据此识别系统中的关键杠杆点并提出干预策略。该分析框架既保留了扎根理论对真实情境的敏感性, 又增强了系统基模识别的结构化与可验证性, 能够较好地适用于多品种小批量生产均衡性问题的机制分析。

3 案例分析

3.1 案例描述

本研究以生产微波射频部件与组件为核心业务的高端制造企业为案例, 其产品主要服务于航空航天、精密仪器等领域。该企业产品种类繁多, 生产工艺复杂, 订单呈现明显的小批量化特征, 60%~70%的生产批量小于10件套, 部分特殊定制件甚至仅为1件套, 是典型的多品种小批

量离散制造企业。

企业的生产流程分为3个主要车间环节(图1)。前端的组件车间和部件车间分别承担基础元器件和中间模块的加工制造任务, 采用批量推式生产模式, 以降低单件成本为导向, 按经济批量集中加工后向下游流转。末端的总装车间依据台套式装配工艺进行成品的最终组装、调试和检验, 其生产驱动逻辑为拉式需求导向, 在收到交付指令后启动对应产品的组装工序。

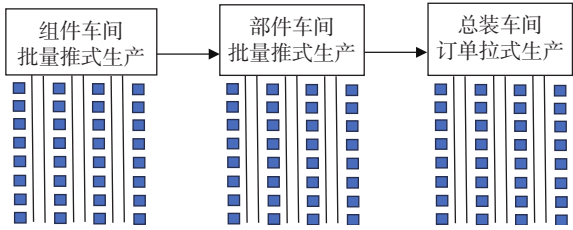


图1 生产流程示意图
Fig.1 Production process flowchart

在计划与排程层面, 企业已部署APS高级排程系统和MES制造执行系统, 形成“计划—排产—执行—反馈”的数字化管控闭环。尽管信息化手段已覆盖主要生产环节, 总装车间的生产均衡性却始终未能改善, 时常面临反复波动的问题, 如图2所示。

3.2 生产均衡性影响因素扎根模型构建

3.2.1 因素识别与范畴提炼

为系统识别构成上述复杂系统的关键变量及其静态关系, 本研究依托扎根理论生成实质性概念理论的程序方法^[32], 通过半结构化访谈, 挖掘关键信息, 全面提取影响生产均衡性的核心因

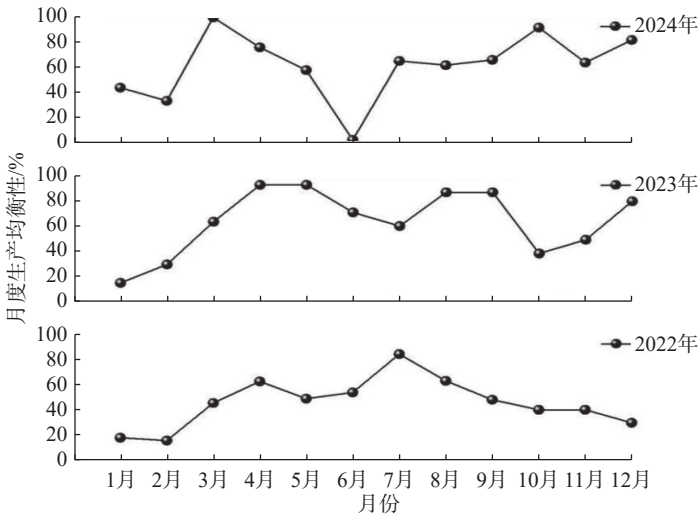


图2 2022—2024年车间生产均衡性波动情况

Fig.2 Fluctuations of workshop production equilibrium from 2022 to 2024

素。访谈内容主要聚焦以下 5 个维度：a. 制定排程计划的规则，包括正向排程(从前往后)、逆向排程(从后往前)策略的选择，是否预留缓冲余量以应对生产的不确定性等；b. 排程计划的考虑因素，涉及物料供应稳定性、设备可用性、人员效率等；c. 项目之间的相互影响，重点分析项目间的资源冲突及应对方式；d. 加班、质量、返工等问题，探讨是否会加班，加班对质量的影响，是否会返工等；e. 项目排程及实施中的关键点。

研究团队对总装车间的计划组、信息组、产品经理、管理人员，总公司计划组、采购人员以及外协单位等多名人员进行两轮深度访谈，形成 22 份访谈记录。在整理访谈记录形成文本资料之后，遵循理论抽样原则，随机抽取 18 份访谈资料，剩余 4 份用作理论饱和度检验。依据“持续比较”方法，对原始数据进行编码(开放编码、主轴编码、选择性编码)，最终提炼出 4 个主范畴、10 个初始范畴及 19 个概念化标签(见表 1)。

3.2.2 核心范畴与因果传导机制

经过理论饱和度检验，其余 4 份访谈资料未发现新范畴，模型达到饱和，据此构建总装车间生产均衡性影响因素的理论框架(图 3)。

通过扎根理论的选择性编码，提炼出“物料齐套率低”作为连接各范畴并放大系统矛盾的核心范畴，从而梳理出一条从隐性认知偏差到显性生产波动的因果传导链条：心智模型固化→供应链协同失效→物料齐套率低→排程动态博弈→物理系统刚性凸显→生产均衡性差。

供应链协同失效是链条的起点，揭示了生产不均衡的制度性根源。企业的前端组件车间和部件车间的计划人员，在其 KPI 以成本为导向的考核体系下，倾向于组织大批量集中生产来摊薄单件成本。此种推式生产模式下，不同型号、不同批次的物料产出节奏按照各自的效率逻辑展开，而非按照总装台套的需求时间进行协同配套，供需错位由此产生。访谈中显示，“前道工序计划人员有种思维定势，后续会有人来兜底，到了总装车间，就是后墙了”。这种“总装车间会兜底”的心理预期，使前端部门缺乏主动改善齐套的内在动力，而物料齐套率又未被量化纳入绩效考核指标体系，进一步固化了这一“责任真空”状态。

排程动态博弈是物料齐套率低的直接表现，即总装车间面对不齐套困境时的应对行为及其后

表 1 开放编码与主轴编码
Tab.1 Open coding and axial coding

主范畴	初始范畴	概念
供应链协同失效	前道推式生产	批量生产优先成本
		需求预测与生产脱节
	齐套责任推诿	“总装会兜底”思维定势
		跨部门信息孤岛
	考核指标缺陷	物料齐套率未纳入KPI
排程动态博弈		成本导向考核偏差
	赶工-资源冲突	月末集中加班设备冲突
		关键设备等待时间延长
	并行生产局限性	工作台约束下的多线并行
		调度复杂性激增、物流拥堵
物理系统刚性	能力建设边际效应	一人多能效果递减
		技能培训收益递减
	关键设备瓶颈	暗室/特殊信号源稀缺性
	检测自动化上限	设备维护周期长、外协检测成本高
	计划弹性认知	自动检测效率已达技术上限
心智模型反馈		冗余时间低估
	前端压力感知弱化	风险缓冲意识薄弱
		距离交付期远、压力感知不足
		“后续车间可弥补”思维

果。由于前端来料不配套，总装车间无法按照计划时间正常开工，导致任务积压和进度延迟。为追赶进度、弥补交付缺口，总装车间被迫采取一系列应对措施：组织加班赶工、启动多条生产线并行推进、调配人员跨线支援。这些措施虽然短期内消化了部分积压，但随之引发了一系列冲突——月末集中加班使关键设备成为多个项目争夺的焦点，计划人员反映“暗室等待 1 周”已成为常态。一人多能这种被广泛推崇的柔性策略，在企业中的实施效果也出现明显的边际递减规律，受访者指出“从一人两能到一人三能对生产均衡性改善有限”。

物理系统刚性是物料齐套率的限制条件，暗室和信号源的稀缺性直接制约生产节拍，总装车间会根据项目的紧急程度，先排紧急任务，排在后面的项目就需要等待。自动化检测可以 24 h 不间断开展检测工作，提高了检测工序的效率，压缩了工期，但“异常处理仍需人工干预”，目前，车间里有些检测步骤已经达到 100% 自动检测，技

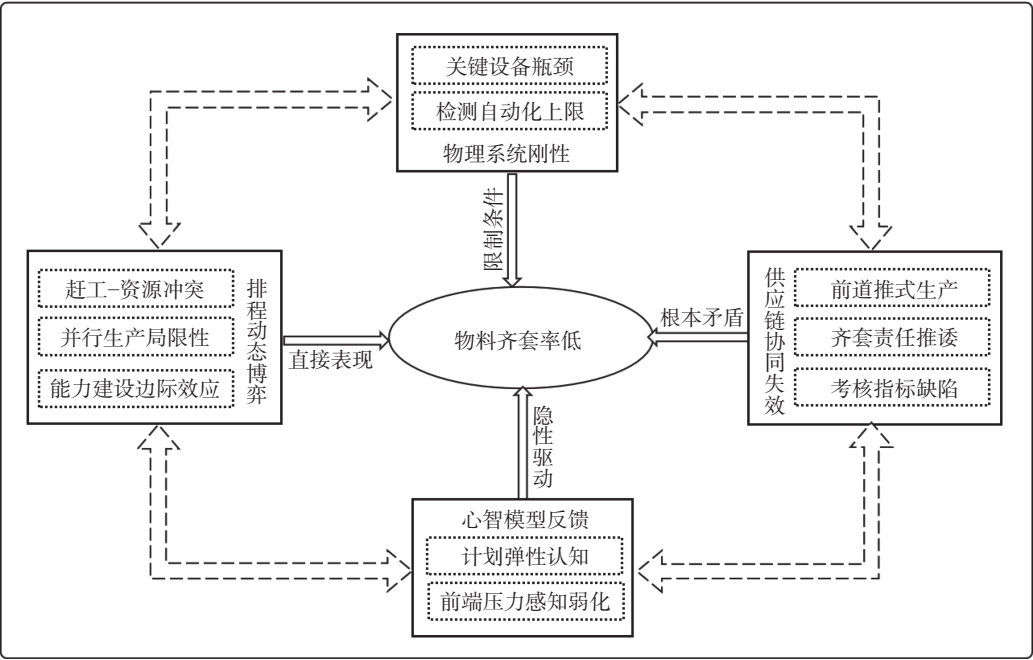


图 3 生产均衡性影响因素扎根理论模型

Fig.3 Grounded theory model for influencing factors of the production equilibrium

术极限下效率提升空间有限。这些物理刚性意味着，任何仅依赖于调度层面或管理层面的改善努力，在触及物理约束时都将迅速失去效用。

心智模型反馈是物料齐套率低的隐性驱动，计划人员的认知偏差与行为偏好放大了系统矛盾。其一，计划弹性认知偏差。计划人员在排程时普遍低估各项任务实际所需的时间冗余，其根源在于“风险缓冲意识薄弱”，访谈中提及“开工延迟后设备冲突加剧”，即弹性认知偏差的后果呈现。其二，前端压力感知弱化。由于前端车间距最终交付节点尚远，其计划人员对任务紧迫性的感知远弱于总装车间，加之“后续车间可弥补”的思维惯性，使得前端在排产决策时倾向于忽视生产节点准时性对整个生产链条的连锁影响。初期微小的前端延迟，在经过多个环节的逐级传导和放大后，最终演变为期末总装车间的集中爆发。

3.3 基于系统基模的生产均衡性机制

3.3.1 变量定义与因果极性矩阵构建

扎根理论提炼了因素之间的递推关系，但这种关系是单向的。实际系统中，赶工在消化积压的同时强化前端的兜底预期，激化设备冲突，这些反向回路驱动着周期性波动，静态模型无法捕捉这种反馈耦合。要理解生产均衡性为何反复陷入波动，需要将单向递推转化为回路结构的动态

分析。实现这一转化，需要将扎根理论用自然语言描述的因素关系转化为可供回路运算的形式化变量。依据系统动力学流率基本入树建模法的基本范式，将 19 个概念化标签和 4 个主范畴归纳为流位变量、流率变量及辅助变量 3 类，定义如表 2 所示。

基于访谈资料中反复出现的因果陈述，对 3 个流率变量建立辅助变量函数

$$\begin{cases} R_1 = f(A_1, A_2) = \alpha_1 A_1 + \alpha_2 A_2 & (\text{极性: } +) \\ R_2 = g(A_4, A_5, A_6) = -\beta_1 A_4 - \beta_2 A_5 + \beta_3 A_6 & (\text{极性: } -) \\ R_3 = h(A_1, A_2) = \gamma_{11} + \gamma_{21} A_2 & (\text{极性: } +) \end{cases}$$

式中： $f(A_1, A_2)$ 、 $g(A_4, A_5, A_6)$ 、 $h(A_1, A_2)$ 分别为 3 个流率变量 R_1 、 R_2 、 R_3 对应的函数； α 、 β 、 γ 为影响强度的参数，取值符号表示极性方向。 R_1 随 A_1 和 A_2 增加而增加，即赶工和并行加速任务消化。 R_2 随 A_4 和 A_5 增加而减小，即前端批量和兜底心理越强，物料完工率越低； R_2 随 A_6 增加而增加，即缓冲冗余度越大，物料完工率越趋于改善。 R_3 随 A_1 和 A_2 增加而增加，即赶工和并行越强，资源满足度下降越快。需要指出的是，物料齐套率 A_7 与流位变量 L_2 (可用物料) 呈概念互补与负向共变关系，故仅围绕 L_2 建立变化率函数 R_2 ， A_7 由 L_2 间接导出，不另设流率方程；生产均衡性指数 A_8 则定位于系统输出变量，由流位

表 2 生产均衡性系统的核心变量定义

Tab.2 Core variable definitions of the production equilibrium system

变量类型	变量名称	符号	定义与说明
流位变量	项目进程差距	L_1	总装车间待处理任务的量, 衡量实际进度与计划进度的偏差
	可用物料	L_2	当前项目可以使用的物料
	资源满足度	L_3	人员/设备满足程度
流率变量	项目任务完成率	R_1	任务到达速率与完成速率的差值
	物料完工率	R_2	物料完工
	资源满足度变化率	R_3	可用人员/设备变化
辅助变量	总装车间赶工强度	A_1	加班的频率与力度
	并行生产	A_2	同时开展的并行生产线条数
	关键设备等待时间	A_3	暗室、信号源的排队时间
	前端批量生产规模	A_4	组件/部件车间单批次生产量
	“总装车间兜底”心理强度	A_5	依赖后续车间弥补的认知偏差程度
	风险缓冲冗余度	A_6	计划中预留的时间缓冲
	物料齐套率	A_7	同一时段物料配套齐全率
	生产均衡性指数	A_8	综合反映生产节奏平稳性的指标

L_1 (项目进程差距)的波动特征导出, 同样不纳入流率函数。综合所有变量间的因果指向关系, 建立 12×12 因果极性矩阵如表 3 所示。表 3 中, 矩阵极性基于 22 份访谈资料的因果陈述频次统计, 因果陈述须在 3 份及以上独立访谈中被提及方予标注, 所有关系均经 3 位回访专家确认。 A_3 未出现

在流率函数中, 该变量为 A_1 、 A_2 共同作用的结果, 是因果传导链的中间变量, 并非流率的直接驱动源; 但其在因果网络中承担衔接赶工行为与积压后果的关键节点作用, 故在矩阵中保留其位置。

从矩阵中可读取多条关键因果传导链。前端批量生产规模 A_4 通过减少可用物料 L_2 扩大项目进程差距 L_1 , 传导链为 $A_4 \rightarrow R_2 \rightarrow L_2 \rightarrow L_1$, 刻画推式生产与拉式需求脱节的结构性根源。总装车间赶工强度 A_1 通过强化总装车间兜底心理强度 A_5 反向抑制齐套改善, 传导链为 $A_1 \rightarrow A_5 \rightarrow R_2 \rightarrow L_2 \rightarrow L_1$, 揭示舍本逐末的副作用机制。总装车间赶工强度 A_1 和并行生产规模 A_2 通过加剧关键设备等待时间 A_3 阻滞任务消化, 传导链为 $A_1/A_2 \rightarrow A_3 \rightarrow L_1$, 这是连接症状解与物理刚性的关键路径。值得注意的是, A_1 短期内对 L_1 的影响为负(赶工消化项目进程差距), 但经由 A_3 和 A_5 的两条间接路径, 长期反而扩大 L_1 , 构成“短期缓解、长期恶化”的饮鸩止渴结构。以 R_1 、 R_2 、 R_3 为分析核心, 追溯各流率通过中间变量影响另一流率的二阶传导路径, 形成二阶交叉影响矩阵, 如表 4 所示。

二阶矩阵中 3 个非零影响关系对应不同的系统行为模式。 $R_1 \rightarrow R_3(+)$ 的传导链为 $R_1 \rightarrow A_2 \rightarrow R_3$, 即项目任务完成率下降驱动并行生产, 进而加剧资源满足度的下滑, 体现成长上限基模中症状解激活限制因素的特征。 $R_2 \rightarrow R_1(-)$ 的传导链物理层为 R_2 降低 $\rightarrow L_2$ 减少 $\rightarrow L_1$ 扩大 $\rightarrow R_1$ 恶化, 此路径匹配

表 3 核心变量间因果影响极性矩阵

Tab.3 Matrix of causal influence polarity among core variables

影响/被影响	L_1	L_2	L_3	R_1	R_2	R_3	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
L_1	—	0	0	—	0	0	+	+	0	0	0	0
L_2	0	—	0	0	—	0	0	0	0	0	0	0
L_3	0	0	—	0	0	—	0	0	0	0	0	0
R_1	—	0	0	0	0	0	+	+	0	0	0	0
R_2	0	—	0	0	0	0	0	0	0	—	—	+
R_3	0	0	—	0	0	0	+	+	0	0	0	0
A_1	—	0	+	+	0	+	0	0	+	0	+	0
A_2	+	0	+	+	0	+	0	0	+	0	0	0
A_3	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A_4	0	+	0	0	—	0	0	0	0	0	0	0
A_5	0	0	0	0	—	0	0	0	0	0	0	0
A_6	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0

注：“+”为正向影响；“—”为负向影响；“0”为未在访谈中检测到直接显著影响；“—”为不讨论。

表 4 流率变量的二阶交叉影响矩阵

Tab.4 Second-order cross-influence matrix of flow variables

影响方向	R_1 (项目任务完成变化)	R_2 (物料完工变化)	R_3 (资源满足度变化)
$R_1 \rightarrow$	—	0	+
$R_2 \rightarrow$	-	×	0
$R_3 \rightarrow$	+	0	×

注: “×”表示存在自我强化增强回路,将在结构检测中结合公式化条件分析;“0”表示经二阶路径追溯未检测到显著影响关系。

舍本逐末基模中副作用回路侵蚀根本解的结构。 $R_3 \rightarrow R_1(+)$ 的传导链为 R_3 下降 $\rightarrow L_3$ 减少 $\rightarrow L_1$ 扩大 $\rightarrow R_1$ 恶化,资源消耗反噬项目推进能力,对应饮鸩止渴结构的核心回路。此3条二阶关系分别对应3类基模,但其传导路径的权重与影响强度尚未开展独立验证。为此引入介数中心性分析,从网络拓扑视角评判各变量在因果网络中的枢纽作用,识别3条传导路径中的关键节点。

3.3.2 因果网络节点中心性分析

介数中心性衡量的是一个节点在其他节点之间最短路径中充当“桥梁”的频率。其公式为

$$C_B(v) = \sum_{s \neq v \neq t} \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}}$$

式中: σ_{st} 为节点 s 到 t 的最短路径总数; $\sigma_{st}(v)$ 为其中经过 v 的路径条数。

归一化后的 $C_B(v) \in [0,1]$, 值越大表示该节点在因果传导中的桥梁作用越强。

将表3中, 的因果极性矩阵转化为有向邻接矩阵 $A=[a_{ij}]$, 转化规则为: 若表3中变量 i 对 j 存在正向或负向的直接影响(“+”或“-”), 则 $a_{ij}=1$; 否则 $a_{ij}=0$ 。由此构建 12×12 的有向无权网络。基于 Dijkstra 最短路径算法, 使用 Python networkx 库计算所有节点对的全部最短路径, 统计每个节点的归一化介数中心性, 计算结果如表5所示。

核心传导链的枢纽节点高度集中。排名前三的节点: L_1 (项目进度差距, 0.4303)、 R_2 (物料完工率, 0.4182)、 A_1 (总装车间赶工强度, 0.3939), 介数中心性之和占12个节点总中心性的约60%。三者构成“决策(A_1) $\rightarrow$ 物料完工瓶颈(R_2) $\rightarrow$ 项目进程差距扩大(L_1)”的核心传导骨架。 L_1 排名最高, 体现其在因果网络中的多路径汇聚地位, 来自赶工决策、物料缺口和物理约束的因果效应最终都在此处汇合。 R_2 紧随其后, 作为驱动 L_2 的唯

表 5 因果网络节点介数中心性排序

Tab.5 Causal network node betweenness centrality ranking

排名	节点	符号	介数中心性	所属主范畴
1	项目进度差距	L_1	0.4303	(核心状态变量)
2	物料完工率	R_2	0.4182	(流率变量)
3	总装车间赶工强度	A_1	0.3939	排程动态博弈
4	可用物料	L_2	0.2545	供应链协同失效
4	“总装车间兜底”心理强度	A_5	0.2545	心智模型反馈
5	并行生产	A_2	0.1212	排程动态博弈
6	资源满足度变化率	R_3	0.0576	(流率变量)
7	项目任务完成率	R_1	0.0212	(流率变量)
8	资源满足率	L_3	0.0030	物理系统刚性
9	关键设备等待时间	A_3	0	物理系统刚性
9	前端批量生产规模	A_4	0	供应链协同失效
9	风险缓冲冗余度	A_6	0	—

一入口, 其在网络拓扑中的枢纽地位表明齐套改善是因果传导中最关键的“阀门”。

物料变量与心智模型变量并列枢纽。 L_2 (可用物料)与 A_5 (兜底心理强度)以相同的介数中心性(0.2545)并列第4。这一结果从网络拓扑角度印证扎根编码中将“物料齐套率低”提炼为核心范畴的定性判断, 物料端的显性状态与心智端的隐性驱动在结构上具有同等重要的枢纽地位。后续基模分析中, 舍本逐末基模的核心回路 $A_1 \rightarrow A_5 \rightarrow R_2 \rightarrow L_2 \rightarrow L_1 \rightarrow A_1$ 恰好经过上述高中心性节点, 中心性分析为回路的结构重要性提供独立佐证。

流率变量 R_2 的枢纽地位突出。 R_2 以介数中心性 0.4182 位居第2, 显著高于同为流率变量的 R_3 (0.0576)和 R_1 (0.0212)。这是因为在因果极性矩阵中, R_2 是 A_4 (前端批量)、 A_5 (兜底心理)、 A_6 (缓冲冗余)3个辅助变量到达 L_2 的共同通道, 承担供应链协同侧多个方向的信息汇聚功能。这一发现从网络结构角度表明, 物料完工率是系统中信息传导最繁忙的节点之一, 对其施加干预将产生最大的结构波及效应。

外生驱动变量与中间约束变量中心性置于低位。 A_4 (前端批量生产规模)、 A_6 (风险缓冲冗余度)、 A_3 (关键设备等待时间)的介数中心性均为0。 A_4 和 A_6 是外生输入常量, 仅在网络中充当起点而不被其他节点影响, 其介数中心性为0是网络拓扑位置的自然结果, 反映它们在因果传导中扮演“驱动源”而非“传导桥”的结构角色。

A_3 的介数中心性为 0 则是二值化有向网络的算法特征所致, A_1 到 L_1 存在直达连接(长度 1), 而 $A_1 \rightarrow A_3 \rightarrow L_1$ 为间接路径(长度 2), 在最短路径算法下前者绕过后者。需要强调的是, A_3 在后续基模检测中处于成长上限基模的关键调节位置, 其动力学意义不因拓扑介数中心性为 0 而被削弱。

3.3.3 多基模耦合关系分析

中心性分析识别出的枢纽节点, 在因果网络中构成系统的反馈骨架。3 个基模通过共享这些节点, 形成逐层嵌套的耦合结构。

舍本逐末基模。该基模由 $R_2 \rightarrow R_1$ 的负向路径主导, 揭示生产失衡的制度性根源。如图 4 所示, 项目进程差距 L_1 扩大时, 总装车间以总装车间赶工强度 A_1 作为症状解, 短期缩小差距。该策略的副作用在于, 赶工行为持续强化“总装车间兜底”心理强度 A_5 , 后者通过抑制物料完工率 R_2 减少可用物料 L_2 , 进而扩大项目进程差距 L_1 , 使得“改善供应链协同以保障物料供应”这一根本解被系统性地边缘化。

表 5 的网络中心性分析为舍本逐末回路的结构重要性提供独立佐证。核心回路 $A_1 \rightarrow A_5 \rightarrow R_2 \rightarrow L_2 \rightarrow L_1 \rightarrow A_1$ 所经过的节点中, L_1 (中心性排名第 1)、 R_2 (排名第 2)、 A_1 (排名第 3)、 L_2 与 A_5 (并列第 4)全部处于因果网络枢纽节点的前列。这一高度吻合表明, 舍本逐末基模构成系统的“根源层”, 不仅因为它最先被触发, 更因为它的回路恰好嵌入因果网络中信息传导最繁忙的节点群, 干预这些节点将产生最大的系统影响。其中, 耦合削弱链 $A_1 \rightarrow A_5 \rightarrow R_2$, A_1 通过强化 A_5 来抑制 R_2 的改善通道, 而 R_2 正是因果网络中排名第 2 的枢纽节点(中心性 0.4182)。这意味着症状解对根本解的侵蚀, 恰好发生在系统中最关键的传导瓶颈

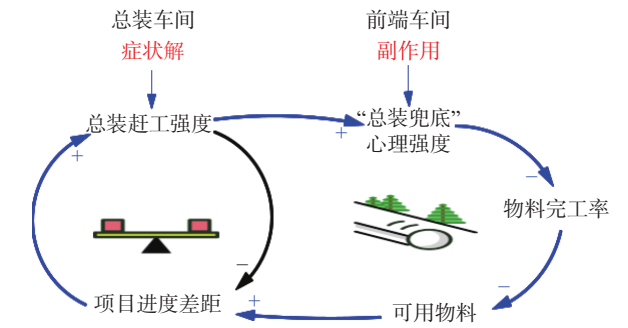


图 4 供应链协同失效的舍本逐末基模

Fig.4 System archetypes of supply chain collaboration failure

处, 解释为何局部优化能够长期压制根本解, 直接在结构枢纽处切断了改善的传导链。

成长上限基模。舍本逐末基模中症状解的持续使用, 必然触发成长上限的调节机制。如图 5 所示, 当总装车间不断增加并行生产(A_2)以追求更快的进度追赶时, 会不可避免地将系统推向物理刚性天花板。平衡型回路 $R_1 \rightarrow A_2 \rightarrow L_1 \rightarrow R_1$ 在短期内有效, 但并行制造的大量并发设备需求, 转化为关键设备等待时间(A_3)的攀升; 关键设备等待时间又反过来抑制任务推进, 使项目进程差距(L_1)反弹, 项目任务完成率(R_1)随之恶化, 形成加强型回路 $R_1 \rightarrow A_2 \rightarrow A_3 \rightarrow L_1 \rightarrow R_1$ 。成长上限基模刻画症状解撞上物理边界的必然过程, 解释为何局部优化无法持续转化为系统均衡。

该基模分析与网络中心性分析结果并非简单“吻合”, 反而呈现出值得深思的差异: A_3 在表 5 中介数中心性为 0, 却在基模分析中被判定为关键调节变量。恰恰揭示两种方法的互补性, A_3 在二值化有向网络中不处于任何最短路径上(因为 A_1 和 A_2 均可直接到达 L_1), 因此, 拓扑中心性无法捕捉其重要性; 但在反馈动力学中, A_3 通过引入时间延迟和强度衰减调节着症状解与积压后果

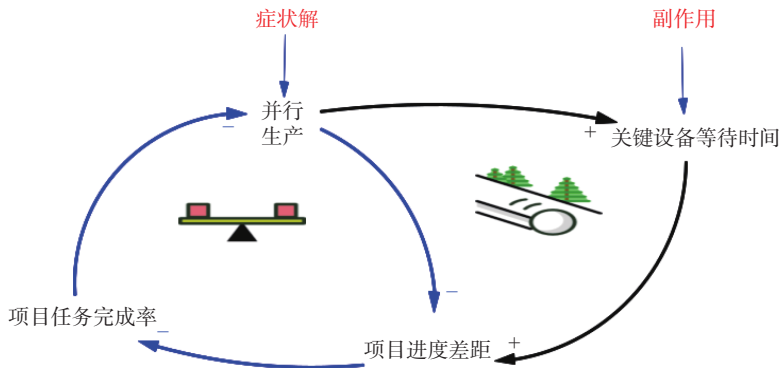


图 5 物理系统刚性制约的成长上限基模

Fig.5 System archetypes of the growth upper limit constrained by the rigidity of the physical system

之间的传导效率,是不可或缺的调节器。差异说明,单纯依赖网络中心性可能遗漏那些不充当“传导桥”但扮演“调节阀”的关键变量,基模分析的回路视角恰好弥补这一盲区。

饮鸩止渴基模。当赶工策略在成长上限处碰壁后,系统并未自动转向根本解,而是陷入饮鸩止渴的恶性循环。如图6所示,短期见效回路

$R_1 \rightarrow A_1 \rightarrow L_1 \rightarrow R_1$ 能暂时缩小项目进程差距,这使管理者难以舍弃赶工行为。然而,赶工经过1~2个周期的滞延后,赶工推高资源满足度变化率 R_3 ,导致资源满足度 L_3 持续走低,资源的紧缺通过空间约束扩大项目进程差距 L_1 。这条副作用路径构成饮鸩止渴基模的后遗症,使系统固化于“越赶越堵、越堵越赶”的路径依赖之中。

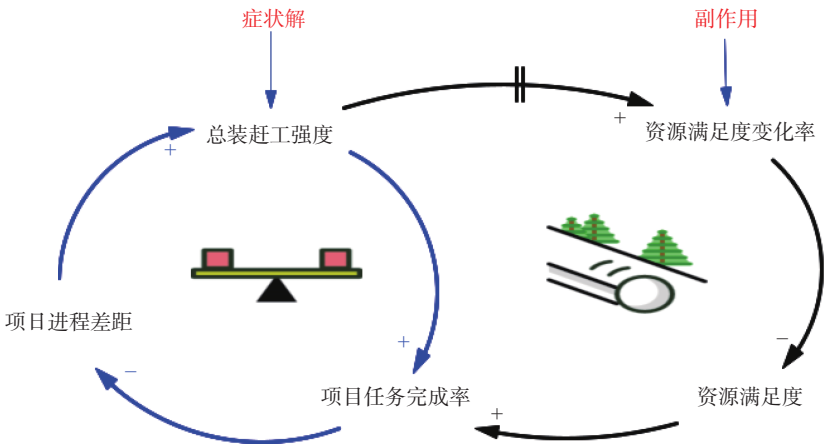


图6 心智模型反馈的饮鸩止渴基模
Fig.6 Fixes That Backfire archetype based on mental model feedback

从网络拓扑角度审视饮鸩止渴基模,可以看到其延迟反噬路径在结构上处于因果网络的边缘地带。物理反噬路径经过的 R_3 (排名第7)和 L_3 (排名第9)中心性均较低,均不处于网络枢纽位置。这一结构特征恰好解释了饮鸩止渴困境的隐蔽性,正是因为反噬路径绕开信息传导繁忙的枢纽节点,其延迟效应难以被管理者及时察觉,问题在边缘处悄然累积,等到汇聚至 L_1 时已成显性危机。低中心性的传导链意味着更长的延迟周期和更弱的预警信号。

综合上述3个基模的耦合关系,生产均衡性不足的核心矛盾根植于“前端推式生产与后端拉式需求的脱节”。舍本逐末基模揭示了总装车间以总装车间赶工强度(A_1)作为症状解消化项目进度差距,通过强化“总装车间兜底”心理强度(A_5)反向侵蚀物料完工率改善这一根本解。成长上限基模从物理层面揭示症状解的不可持续性,并行生产必然触发关键设备等待时间(A_3)的调节约束,局部优化无法突破系统刚性。饮鸩止渴基模进一步从行为层面锁定恶性循环,系统对赶工的依赖通过物理反噬(L_3 路径)延迟效应不断固化,使生产系统长期陷入“项目进度差距扩大→

总装车间赶工强度增大→资源满足度下降→生产均衡性恶化”的困境。

3.4 生产均衡性的杠杆解

上述基模耦合分析为杠杆解的提出提供了结构性依据。舍本逐末基模的耦合削弱链 $A_1 \rightarrow A_5 \rightarrow R_2$ 指向认知调适的必要性, R_2 作为网络中排名第2的枢纽节点,是干预的最优靶点之一,而阻断 A_1 对 A_5 的强化效应即可解除对 R_2 的抑制。成长上限基模的调节环路指向柔性组织界面的制度化设计, A_3 虽不处于网络枢纽,但在回路中承担着不可替代的调节功能,需要以组织冗余而非网络干预来应对。饮鸩止渴基模的延迟反噬路径则要求信息反馈结构的重塑以缩短滞延,需要设计预警机制。依据系统基模的“根本解”干预逻辑,研究从调适认知偏差、信息协同、激励设计、组织结构4个层面提炼杠杆解,其作用框架如图7所示。

杠杆解1:调适主体认知模型。作用于 A_5 (兜底心理强度)和 A_6 (风险缓冲冗余度),切断舍本逐末基模中症状解侵蚀根本解的耦合回路。措施为建立跨部门轮岗制度,要求前端计划人员深度参与总装车间排程会议与现场跟产,轮岗后提交《交

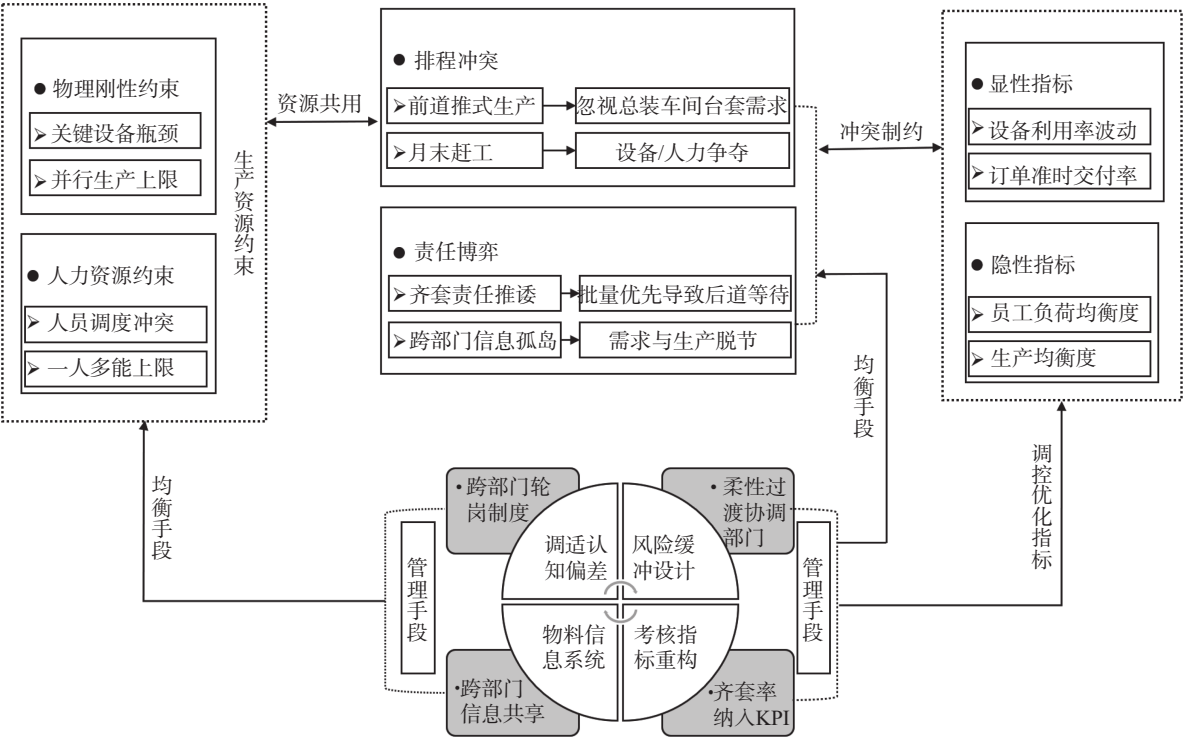


图 7 生产均衡性多层次约束及其杠杆解作用框架

Fig.7 Multi-level constraints and leverage solution framework for production equilibrium

付链路影响分析报告》并纳入考核，将总装车间交付压力直接传导至前端心智模型。

杠杆解 2：重塑信息反馈结构。作用于 L_2 (可用物料)的信息透明度与反馈时效，消除因果传导的延迟条件。措施为开发集成化物料信息协同平台，内嵌基于总装车间需求逆向排序的计划模块、前端库存实时看板和分级齐套预警阈值，通过物联网自动采数剪除人为延迟。

杠杆解 3：重构系统目标函数。作用于 A_4 (前端批量生产规模)和 A_7 (物料齐套率)，激活舍本逐末结构中的根本解回路。措施为将物料齐套率提升为前端车间核心 KPI，权重依据历史停工工时占比设定；同时为总装车间设立均衡性稳定奖励，形成前后拉通的双向激励。

杠杆解 4：设计柔性组织界面。作用于 L_3 (资源满足率)的缓冲调控，对应成长上限中物理刚性的制度化补偿。措施为增设生产经营协调组，建立跨车间成本对冲核算体系使隐性代价显性化，并预测持有关键物料与产能缓冲库存，以结构化冗余度吸收前端波动。

4 结 论

本研究以一家多品种小批量离散制造企业的

总装车间为案例，运用扎根理论识别影响生产均衡性的关键因素，并借助二阶极小基模矩阵和网络中心性分析，揭示局部优化反复失效的内在机制。研究发现，生产均衡性不足的核心矛盾在于推式生产与拉式需求的结构性脱节。企业采用的赶工、并行生产等局部措施，非但未能实现全局均衡，反而通过 3 个逐层嵌套的系统基模加剧波动，舍本逐末基模揭示赶工行为如何强化“总装车间兜底”心理、抑制物料完工率这一根本解；成长上限基模表明并行生产必然触发关键设备等待的物理约束，使局部优化触及产能天花板后即告失效；饮鸩止渴基模揭示赶工行为如何通过资源消耗的延迟反噬，使系统陷入“越赶越堵”的恶性循环。网络中心性分析进一步证实，连接症状解与根本解的物料完工率是因果网络中的核心枢纽节点，正是此处切断局部优化向全局均衡转化的通道。

上述发现为多品种小批量生产均衡性管理提供新的分析框架。与把均衡性问题归咎于排程算法不足或局部资源瓶颈的通行视角不同，本文揭示“症状解替代根本解、物理刚性约束触发增长极限、物理延迟效应造成行为锁定”的逐层传导机制，解释为何信息化水平持续提升仍难根本改

善均衡性。基于这一机制,本文提出从认知调适、信息透明、激励联动和组织缓冲4个维度切入的干预策略,其核心逻辑不是叠加更多优化措施,而是打通从局部优化通向全局均衡的结构性梗阻,具体包括切断从 A_1 经 A_5 到 R_2 的耦合削弱链、缩短 L_2 的反馈延迟、激活根本解回路、以组织冗余补偿物理刚性。

从方法论角度审视,本研究所构建的分析框架与钱学森等提出的综合集成方法论高度契合。该方法论强调整体视角出发,采用人机结合、以人为为主的研究方式,将专家经验、统计数据、信息资料与计算机技术有机融合。本研究的推进路径正体现这一逻辑,以深度访谈获取企业真实情境下的专家经验与质性资料,形成定性认识,继而运用扎根理论进行系统化编码,再借助二阶极小基模矩阵与网络中心性分析完成结构化建模与定量验证。此“定性—定量—定性”的循环迭代过程,兼顾扎根理论对复杂情境的敏感性,以及系统基模识别的结构化与可验证性,为探索高端制造企业生产均衡性这一复杂管理技术问题,提供可操作的综合集成分析范式。

参考文献:

- [1] 郑力,江平宇,乔立红,等.制造系统研究的挑战和前沿[J].*机械工程学报*,2010,46(21):124-136.
- [2] ZHOU Y, ZANG J, MIAO Z, et al. Upgrading pathways of intelligent manufacturing in China: transitioning across technological paradigms[J]. *Engineering*, 2019, 5(4): 691-701.
- [3] ALVAREZ L, AVELLA L, MARTINEZ R. Impact and critical factors in Heijunka implementation an action research study[J]. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 2024, 17(3): 753-776.
- [4] THOMAS G. Line levelling for high variant low volume mix[D]. Jonkoping: Jonkoping University, 2016.
- [5] OLHAGER J. The role of the customer order decoupling point in production and supply chain management[J]. *Computers in Industry*, 2010, 61(9): 863-868.
- [6] PEETERS K, VAN OOIJEN H. Hybrid make-to-stock and make-to-order systems: a taxonomic review[J]. *International Journal of Production Research*, 2020, 58(15): 4659-4688.
- [7] HOPP W J, SPEARMAN M L. To pull or not to pull: what is the question?[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2004, 6(2): 133-148.
- [8] 蔡洋,李铁克.面向订单的钢铁企业生产管理一体化系

- 统[J].*北京科技大学学报*,2008,30(3):302-306.
- [9] STEVENSON M, HENDRY L C, KINGSMAN B G. A review of production planning and control: the applicability of key concepts to the make-to-order industry[J]. *International Journal of Production Research*, 2005, 43(5): 869-898.
- [10] 罗小峰,胡莹,余翔.基于多目标多约束条件下排产算法设计与应用[J].*制造技术与机床*,2022(4):159-164.
- [11] 姚丽丽,史海波,刘昶.半导体封装测试生产线排产研究[J].*自动化学报*,2014,40(5):892-900.
- [12] 王艳红,于宁,蔡明,等.动态制造系统生产计划与调度协同优化[J].*中国机械工程*,2018,29(22):2767-2771.
- [13] STERMAN J, OLIVA R, LINDERMAN K, et al. System dynamics perspectives and modeling opportunities for research in operations management[J]. *Journal of Operations Management*, 2015, 39-40: 1-5.
- [14] ADANE T F, BIANCHI M F, ARCHENTI A, et al. Application of system dynamics for analysis of performance of manufacturing systems[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2019, 53: 212-233.
- [15] FORRESTER J W. Industrial dynamics[M]. Cambridge: MIT Press, 1961.
- [16] STERMAN J D. Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world[M]. Boston: Irwin/McGraw-Hill, 2000.
- [17] 钱学森,于景元,戴汝为.一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论[J].*自然杂志*,1990,13(1):3-10.
- [18] 王丹力,郑楠,刘成林.综合集成研讨厅体系起源、发展现状与趋势[J].*自动化学报*,2021,47(8):1822-1839.
- [19] KIM D H, ANDERSON V. Systems archetype basics: from story to structure[M]. Waltham: Pegasus Communications, 1998.
- [20] BINDER M, EDWARDS J S. Using grounded theory method for theory building in operations management research: a study on inter-firm relationship governance[J]. *International Journal of Operations & Production Management*, 2010, 30(3): 232-259.
- [21] GLASER B G, STRAUSS A L. The discovery of grounded theory: strategies for qualitative research[M]. Chicago: Aldine, 1967.
- [22] STRAUSS A, CORBIN J. Basics of qualitative research: grounded theory procedures and techniques[M]. Newbury Park: SAGE, 1990.
- [23] STEVENSON M, HUANG Y, HENDRY L C, et al. The theory and practice of workload control: a research agenda and implementation strategy[J]. *International Journal of Production Economics*, 2011, 131(2): 689-700.
- [24] THÜRER M, STEVENSON M, SILVA C, et al. Workload control and order release: a lean solution for make-to-order

companies[J]. *Production and Operations Management*, 2012, 21(5): 939–953.

[25] 王海军, 于佳文, 田晓冉, 等. 智能制造对企业颠覆性创新的作用机理——来自扎根理论的海尔案例研究 [J]. *科技进步与对策*, 2023, 40(1): 102–113.

[26] 方聪聪, 刘韬, 崔森, 等. 各有所长: 基于扎根理论的制造企业数字化能力的构成维度与类型研究 [J]. *管理案例研究与评论*, 2023, 16(2): 222–238.

[27] RAJAH J K, KOPAINSKY B. A systematic method to integrate co-produced causal loop diagrams based on feedback stories[J]. *System Dynamics Review*, 2025, 41(1): e1794.

[28] 杨佳, 李雪峰. 基于系统基模的甘肃白银“5·22”越野马拉松事件分析 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2022, 18(11): 39–45.

[29] 潘建林. 新质生产力视域下新零售企业数字化转型的演化及治理机制——基于系统基模的分析 [J]. *中国商论*, 2025, 34(19): 15–19.

[30] 傅红, 李晶, 宋全瑞, 等. 国企混改背景下高管股权激励作用系统的成长上限基模分析 [J]. *经济问题探索*, 2021(1): 70–78.

[31] 吴一丁, 张立文, 刘青. 供应链网络位置与制造业企业数字化转型——基于社会网络分析的视角 [J]. *技术经济*, 2026, 45(3): 65–80.

[32] 毛燕玲, 潘祖志. 经典扎根理论新视角: 认识不足、应用原则与操作流程 [J]. *图书馆论坛*, 2025, 45(5): 70–80.

(编辑: 毕莉明)