

制造业数字创新生态系统中多元主体共生演化模式

龚银银, 张永庆, 郑苏江, 罗婷

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 数字创新是驱动制造业转型升级和提升国际竞争力的核心动力。基于共生理论, 拓展以企业为主导的分析视角, 将数字产品用户纳入研究框架, 构建包含核心制造企业、配套支持企业和数字产品用户的多元主体 Lotka-Volterra 动态演化模型, 使用 Matlab 进行数值模拟, 以探索共生演化模式。研究发现: 互惠共生模式是系统演化的最佳模式, 有利于实现系统内所有参与主体的共生协同发展; 非互惠共生模式导致系统规模发展有限, 尽管寄生共生和偏利共生可以暂时增强个体参与者的竞争力, 但它会破坏共生协作的整体稳定性。进一步发现, 数字产品用户作为生态系统的价值共创者, 其需求和反馈是推动生态系统创新不可替代的部分。以比亚迪为代表的智能汽车数字创新生态系统的案例充分验证了在互惠共生最佳模式下, 能够催生“1+1+1>3”的可持续共生协同价值。基于此, 提出深化互惠共生、破解寄生依赖、激发需求驱动等建议。

关键词: 制造业; 数字创新生态系统; Lotka-Volterra 模型; 共生演化; 案例分析

中图分类号: F 49; F 273.1

文献标志码: A

Symbiotic evolution mode of multiple actors in the digital innovation ecosystem of manufacturing industry

GONG Yinyin, ZHANG Yongqing, ZHENG Sujiang, LUO Ting

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Digital innovation is the fundamental driver of manufacturing transformation and the enhancement of global competitiveness. Based on symbiosis theory, the enterprise-dominated analytical perspective was expanded, and digital product users were incorporated into the research framework. A multiple actors Lotka-Volterra dynamic evolution model composed of core manufacturing enterprises, supporting enterprises and digital product users was established. Numerical simulations were conducted

收稿日期: 2025-02-25

基金项目: 国家社会科学基金资助项目(23BJL070); 上海市自然科学基金资助项目(23ZR1444300)

第一作者: 龚银银(1996—), 女, 博士研究生。研究方向: 数智化、数字创新生态发展。E-mail: gongyinyin96@163.com

通信作者: 张永庆(1962—), 男, 教授。研究方向: 数字经济、区域与产业经济。E-mail: zyzq28@usst.edu.cn

引文格式: 龚银银, 张永庆, 郑苏江, 等. 制造业数字创新生态系统中多元主体共生演化模式[J]. 上海理工大学学报, 2026, 48(3): 352-363.

Citation: GONG Yinyin, ZHANG Yongqing, ZHENG Sujiang, et al. Symbiotic evolution mode of multiple actors in the digital innovation ecosystem of manufacturing industry[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2026, 48(3): 352-363.

via Matlab to explore the symbiosis evolution pattern. The results revealed that the mutualistic symbiosis pattern is the optimal mode for system evolution, which promotes the coordinated symbiotic development of all actors within the system. Non-mutualistic symbiosis patterns restrict the overall development scale of the system. Although parasitic symbiosis and commensal symbiosis could temporarily enhance the competitiveness of individual actors, the overall stability of symbiotic collaboration was undermined. Further findings indicated that digital product users, as value co-creators of the ecosystem, provide irreplaceable demands and feedback for ecosystem innovation. The case of BYD's intelligent vehicle digital innovation ecosystem fully verified that the sustainable collaborative symbiotic value of "1+1+1>3" can be generated under the optimal mutualistic symbiosis pattern. Accordingly, relevant suggestions were put forward to consolidate mutualistic symbiosis, eliminate parasitic dependence and stimulate demand-driven development.

Keywords: *manufacturing; digital innovation ecosystem; Lotka-Volterra model; symbiotic evolution; case analysis*

数字技术的深度渗透正重塑全球制造业竞争格局。大数据、云计算、人工智能与物联网等技术不仅加速了生产流程的数字化转型,更推动了价值创造逻辑的根本性变革——从单一企业创新转向多主体协同共创。“十四五”时期,数字经济核心产业增加值占 GDP 比重超过 10.5%,未来,数字化创新引领有望取得更大进展,制造业数字化与智能化融合向深度发展。制造业企业在创造卓越价值时,已经不再单纯依靠内部技术和产品创新,而是与其他多主体合作,在数字创新生态系统情境下实现价值共创^[1-2]。技术高度复杂化背景下,数字创新生态系统中创新主体之间必须建立不同程度的相互依存关联,才能在创新生态系统持续迭代演化中获得生存空间^[3],收获数字技术产业化应用中商业价值释放的红利^[4]。通过核心制造企业、配套支持企业与数字产品用户的资源互补与技术协同,实现系统级创新涌现。例如,西门子基于工业物联网平台 MindSphere 构建的开放生态,连接全球超过 500 家设备制造商与开发者,通过数据共享与算法协同将设备运维效率显著提升,凸显出多主体共生的价值潜力。可见,创新要素的数字化和创新过程的智能化从根本上改变了工业组织内部价值共创的逻辑^[5]。这种转变激发制造业融入数字化生态背景的迫切需求,以及构建强大理论框架的重要性,以指导多元主体在数字创新生态下的长期共生合作和可持续发展。

基于此,本文以共生理论为基础,采用 Lotka-

Volterra 模型从整体系统视角分析制造业数字创新生态系统中多元主体间的共生关系,可能的边际贡献如下:第一,从共生视角出发,创新性地将核心制造企业、配套支持企业与数字产品用户三大主体置于同一 Lotka-Volterra 动态演化框架下,丰富了多元主体间非线性交互的相关研究视角。第二,将 Matlab 数值仿真与新能源汽车数字生态案例分析相结合,通过独立、寄生、偏利与互惠 4 种共生模式仿真,比较各模式对生态系统稳定性与规模扩张的影响,并以案例验证仿真结论,为优化制造业数字创新生态系统的健康发展提供方法借鉴。第三,研究提出唯有互惠共生模式能释放“1+1+1>3”的持续溢出效应,而寄生与偏利共生虽可短期提升个体竞争力,却削弱系统长期韧性。此外,强调数字产品用户不仅是被动使用者,更是价值共创者,其需求与反馈对生态系统持续创新具有关键驱动作用,为构建高韧性制造业数字创新生态提供新洞见。

1 文献综述

1.1 创新生态系统与数字创新生态系统研究进展

创新生态系统是指由多个创新主体通过合作与竞争实现创新的动态过程。Moore^[6]最早提出“商业生态系统”的概念,将企业与其合作伙伴、供应商、客户和其他利益相关者视为一个有机整体。随后,商业生态系统过渡到创新生态系统^[7],开始关注多主体间的合作与竞争关系,特别

是在数字化背景下，企业不再依赖于单一主体的创新能力，而是通过跨组织合作实现技术创新^[8]。学术界对创新生态系统的研究主要聚焦在创新生态系统的类型、动态演化、战略和商业模式 3 个方面。首先，就创新生态系统的类型来看，学者们探讨了企业层面^[9]、产业^[10]和区域层面^[11]以及国家层面^[12]的创新生态系统要素结构和运行机制。其次，创新生态系统演化情境下，可以通过“个体繁衍—种群塑造—群落融合”的演化过程推动关键核心技术突破^[13]。制度部署和参与者双重决策逻辑塑造了创新生态系统的结构，决策逻辑更新推动创新生态系统结构更新^[14]。最后，在创新生态系统的战略和商业模式方面，创新生态系统的战略基础、战略要素和战略维度对持续竞争优势至关重要^[15]。系统内的价值共创由服务主导逻辑和顾客参与理论向商业模式创新转变^[16]。

随着数字技术的发展，数字创新生态系统应运而生。现有研究对数字创新生态系统的概念存在不同角度的定义，观点一认为数字创新生态系统是数字技术赋能的创新生态系统，强调数字技术推动创新生态系统的持续扩容与迭代，逐渐拓展系统边界，重塑多主体竞合与共生关系^[17-18]。观点二侧重于数字化原生的创新生态系统，主要表现为平台化生态，由技术原生企业主导，以模块架构、开放准入、权力分配为主要构成，生态系统以模块化互补、非等级控制、多边交互与网络效应等为特征^[19]。观点三强调数字技术融合的创新生态系统，表现为数字创新主体、数据资源和平台、数字化环境在系统中的融入^[20]。本文整合已有概念，以创新核心主体为切入点，认为数字创新生态系统是在数字生态环境的影响下，由多元创新主体与创新生态环境相互交织构成的复杂系统。各参与主体基于价值共创愿景，通过数据资源共享、能力互补与规则共建推动数字创新生态系统健康可持续运行。

1.2 制造业数字创新生态系统的多元主体协同

制造业数字创新生态系统作为数字创新生态系统的一个重要分支，关注点在于制造业中的各创新主体如何通过数字技术实现协同创新和共同发展。制造业中的数字产品用户既是核心数据源与价值共创者，通过反馈与协同催化网络效应并参与治理，驱动生态持续优化与共赢。研究表明，随着更多外部创新主体的加入，制造业数字

创新生态系统的主体之间开始面临更加复杂的资源竞争和协同创新问题。Brea^[21]认为数字技术带来了前所未有的互联互通，并提出一个根据多主体的功能、活动和结构位置来指定其在生态系统中角色的框架，以展示不同角色在价值创造中的作用。现有研究主要探讨数字化转型对制造业的影响，包括生产效率的提升、供应链管理的优化和新产品开发的加速。总体上，数字技术的引入促进了制造业中各主体间的信息共享和资源整合，提升了整个生态系统的协同创新能力。

1.3 共生理论在创新生态系统中的应用

在生态系统相关的研究中，共生理论是研究系统内多元主体互动机制的重要理论之一。制造业数字创新生态系统中，多元主体间的共生关系复杂，往往表现出明显的动态不平衡特征。Lotka-Volterra 模型能够通过非线性微分方程直接捕捉制造业数字创新生态系统中多个参与者之间的复杂动态交互和进化关系^[22]。与其他可能的建模方法相比，传统的进化博弈论不足以有效地捕捉长期互动进化过程中的不平衡状态。系统动力学通常关注宏观层面的反馈回路，以及库存和流动关系，但它在捕捉微观层面的互动和个体层面的动态变化方面存在局限性^[23]。尽管基于智能体的建模可以有效地模拟个体层面的行为，但它需要大量微观层面的经验数据和参数校准，这在制造业数字创新生态系统的背景下很难实现。此外，基于主体的建模(agent-based modeling, ABM)表现出很高的计算复杂性，随着参与者数量和交互复杂性的增加，模型的可扩展性和可解释性显著降低^[24]。Lotka-Volterra 模型在参数可解释性、非线性动态轨迹可视化和临界条件解析方面具备显著优势，能够对生态系统参与者之间的非线性和复杂的共生相互作用进行清晰的描述，与本文的研究内容高度契合。

综上，学者们已经围绕创新生态系统和数字创新生态系统展开了较为扎实的研究，但从共生演化视角探讨制造业数字创新生态系统的多元主体间的共生关系和演化模式研究有限。大多数研究聚焦于以核心企业为主导的双边互动，关注部分主体间的竞合关系和价值共创^[25-26]，对制造业数字创新生态系统中多元主体的全面系统化解构尚未形成完整认识。因此，本文基于共生理论和演化博弈理论，探讨制造业数字创新生态系统共

生演化模式、稳定性及管理策略。首先,通过提炼核心创新层、辅助创新层和应用创新层的代表性主体,将制造业数字创新生态系统主体划分为核心制造企业、配套支持企业和数字产品用户,模拟分析系统内多元主体间的共生进化关系并识别最佳共生模式。其次,在数值模拟的基础上,采用智能汽车数字创新生态系统为例进行解释性案例分析,清楚地确定了互惠共生模式的运作逻辑和最优性。最后,提出深化互惠共生、破解寄生依赖、激发需求驱动等建议,为制造业数字生态系统的发展范式提供参考。

2 共生演化模型构建

2.1 概念框架

随着数字技术的广泛应用,制造业的数字化转型日益加深,形成了复杂的数字创新生态系统,包含核心制造企业、配套支持企业和数字产品用户等多方主体。这些主体通过资源共享、技术合作和知识交流进行协同创新。然而,数字化转型也面临着资源分配不均、依赖程度高和协同创新效率低下等方面的诸多挑战,不同主体间的竞合关系也日益复杂。数字技术的应用,一方面拓展了创新生态系统的合作范围,另一方面也加剧了资源竞争和利益冲突,制约了系统的整体发展。

基于 Lotka-Volterra 模型解析制造业数字创新生态系统的多元主体共生演化规律,通过对比不同共生模式的演化结果,揭示互惠共生模式对系统效能的优化作用,为生态治理提供数理依据。制造业数字创新生态系统是由系统中的共生主体、共生模式以及共生环境组成,其中,共生主体即是生态系统中的数字创新主体,是共生行动中最基本的能量产生单元,根据其在制造业数字创新生态系统中的重要性,以及在数字创新过程中所承担的创新功能差异,可以按照核心创新层、辅助创新层、应用创新层划分共生主体^[27]。核心创新层主体以核心制造企业为主导型代表,通常由行业领军企业或科技巨头企业构成,包括新能源汽车制造企业、高端装备制造企业、生物医疗设备制造企业等;辅助创新层主体以配套支持企业为代表,主要包括原材料供应商、技术提供商、金融机构、政府、高校及科研机构等,为数字创新活动提供各类资源和技术研发支持。数

字产品用户是生态系统的价值共创者,不仅消费制造业产品,更在数字平台上持续产出大数据,参与算法测试与功能迭代,其需求和反馈是推动生态系统创新的关键因素。共生环境中的主体相互作用,通过价值创造和获取等创新行为产生新的共生能量,以在共生主体间循环分配,实现可持续发展的数字创新发展。

2.2 研究假设

为模拟制造业数字创新生态系统中多主体间的复杂竞合关系,本文基于 Lotka-Volterra 模型提出假设,这些假设旨在量化系统中的资源限制、增长率及协同创新互动机制,以刻画多元主体共生关系的最佳演化形态。假设核心制造企业、配套支持企业、数字产品用户的实际种群密度分别为 x_1 、 x_2 、 x_3 ; 三者的自然增长率分别为 k_1 、 k_2 、 k_3 ; 三者最大共生环境容量分别为 N_1 、 N_2 、 N_3 。

本研究提出以下假设:

假设 1 在制造业数字创新生态系统中,核心企业、配套支持企业和数字产品用户等多主体共享资源,而这些资源(如数字技术、市场资源、资金等)通常是有限的,无法满足所有主体的无限增长需求。因此,数字创新生态环境下存在最大共生环境容量 N_1 、 N_2 、 N_3 。

假设 2 核心制造企业与配套支持企业、数字产品用户之间既可能通过协同创新实现共赢,也可能因为资源争夺而产生竞争。根据共生理论,主体间的互动可以通过共生作用系数体现合作、竞争或寄生关系^[28],这与现实中制造业各主体的创新协作模式高度一致,即制造业数字创新生态系统参与主体间存在交互影响,共生作用系数反映主体间共生关系。

假设 3 制造业数字创新生态系统中的每个主体都有其固有的增长能力,这一能力受其内在资源、数字化能力和市场竞争力等因素影响。制造业数字创新生态系统参与主体在未受到外部环境影响下的自然增长率分别为 k_1 、 k_2 、 k_3 ,由三者固有属性决定,且在所研究时期内自然增长率保持不变。

假设 4 随着制造业数字创新生态系统中主体数量或规模的增加,系统内部的资源竞争必然加剧。这是因为各主体共享有限的资源,主体密度的上升意味着每个主体可以获取的资源量减少,从而导致竞争压力增大。根据生态学中的种群竞

争理论，Lotka-Volterra 模型通过引入“竞争因子”来反映这一现象^[29]。制造业数字创新生态系统参与主体符合生态学中的生物种群发展规律，随着种群密度的增加，资源紧张，竞争加剧，进

而产生发展阻碍因子。

根据共生作用系数的取值，判断主体间不同的共生模式，如表 1 所示。其中， α_{ab} 为共生单元 b 对共生单元 a 的共生作用系数。

表 1 制造业数字创新生态系统主体间共生模式

Tab.1 Symbiosis patterns among actors in the manufacturing digital innovation ecosystem

取值组合	共生模式	特点
$\alpha_{ab} = \alpha_{ba} = 0$	独立	3个数字创新群体互不干扰, 独立发展
$\alpha_{ab}\alpha_{ba} < 0$	寄生	正共生度为获益单元, 负共生度为损失单元
$\alpha_{ab} > 0, \alpha_{ba} = 0$	偏利	正共生度为获益单元, 共生度为0的是无影响单元
$\alpha_{ab} > 0, \alpha_{ba} > 0$	互惠	3个数字创新群体都将获益

注: $a, b \in [1, 2, 3, 4], a \neq b$

2.3 模型构建

基于上述分析，构建 Lotka-Volterra 模型来表示核心制造企业、配套支持企业和数字产品用户之间的互动，如式(1)所示。

$$\begin{cases} \frac{dx_1(t)}{dt} = k_1 x_1(t) \left(1 - \frac{x_1(t)}{N_1} + \alpha_{12} \frac{x_2(t)}{N_2} + \alpha_{13} \frac{x_3(t)}{N_3} \right) \\ \frac{dx_2(t)}{dt} = k_2 x_2(t) \left(1 - \frac{x_2(t)}{N_2} + \alpha_{21} \frac{x_1(t)}{N_1} + \alpha_{23} \frac{x_3(t)}{N_3} \right) \\ \frac{dx_3(t)}{dt} = k_3 x_3(t) \left(1 - \frac{x_3(t)}{N_3} + \alpha_{31} \frac{x_1(t)}{N_1} + \alpha_{32} \frac{x_2(t)}{N_2} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $k_1x_1(t)$ 、 $k_2x_2(t)$ 、 $k_3x_3(t)$ 分别表示核心制造企业、配套支持企业和数字产品用户自身的发展趋势； $x_1(t)/N_1$ 、 $x_2(t)/N_2$ 、 $x_3(t)/N_3$ 指种群规模占自身最大规模比例； $1 - \frac{x_1(t)}{N_1}$ 、 $1 - \frac{x_2(t)}{N_2}$ 、 $1 - \frac{x_3(t)}{N_3}$ 为发展阻碍因子，它们受外部环境影响，对自然增长率具有抑制作用。

为了分析模型的渐近稳定性，构造雅可比矩阵如下：

$$J = \begin{bmatrix} k_1 \left(\frac{\alpha_{12}x_2(t)}{N_2} - \frac{x_1(t)}{N_1} + \frac{\alpha_{13}x_3(t)}{N_3} + 1 \right) - \frac{k_1x_1(t)}{N_1} & \frac{k_1\alpha_{12}x_1(t)}{N_2} & \frac{k_1\alpha_{13}x_1(t)}{N_3} \\ \frac{k_2\alpha_{21}x_2(t)}{N_1} & k_2 \left(\frac{\alpha_{21}x_1(t)}{N_1} - \frac{x_2(t)}{N_2} + \frac{\alpha_{23}x_3(t)}{N_3} + 1 \right) - \frac{k_2x_2(t)}{N_2} & \frac{k_2\alpha_{23}x_2(t)}{N_3} \\ \frac{k_3\alpha_{31}x_3(t)}{N_1} & \frac{k_3\alpha_{32}x_3(t)}{N_2} & k_3 \left(\frac{\alpha_{31}x_1(t)}{N_1} - \frac{x_3(t)}{N_3} + \frac{\alpha_{32}x_2(t)}{N_2} + 1 \right) - \frac{k_3x_3(t)}{N_3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

当 $dx_1(t)/dt=0$ 、 $dx_2(t)/dt=0$ 、 $dx_3(t)/dt=0$ ，求解得到 8 个平衡点，如表 2 所示。

对平衡点 $E_8(x_1^*, x_2^*, x_3^*)$ 求三主体的相互作用矩阵：

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-k_1}{N_1} & \frac{k_1\alpha_{12}}{N_2} & \frac{k_1\alpha_{13}}{N_3} \\ \frac{k_2\alpha_{21}}{N_1} & \frac{-k_2}{N_2} & \frac{k_2\alpha_{23}}{N_3} \\ \frac{k_3\alpha_{31}}{N_1} & \frac{k_3\alpha_{32}}{N_2} & \frac{-k_3}{N_3} \end{bmatrix} \quad (3)$$

当行列式 $|A|=k_1k_2k_3(-1+\alpha_{13}\alpha_{21}\alpha_{32}+\alpha_{12}\alpha_{23}\alpha_{31}+\alpha_{13}\alpha_{31}+\alpha_{23}\alpha_{32}+\alpha_{12}\alpha_{21})/N_1N_2N_3 < 0$ ，特征值 $\lambda_1 < 0$ 、 $\lambda_2 < 0$ 、 $\lambda_3 < 0$ ，且 $x_1^*(t) > 0$ 、 $x_2^*(t) > 0$ 、 $x_3^*(t) > 0$ ，则平衡

点 $E_8(x_1^*, x_2^*, x_3^*)$ 为全局稳定点^[30]，其中， x_1^* 、 x_2^* 、 x_3^* 的表达式如式(4)所示。推理如下：a. 根据微分方程理论，如果某平衡点处雅可比矩阵的所有特征值实部均为负，则该平衡点局部渐近稳定。经代入计算验证，只有 E_8 的所有特征值实部为负；b. 当 $|A| < 0$ 时，表明平衡点周边的相互作用不会导致系统过度失稳，从而确保平衡点的全局稳定性和唯一性；c. 条件 $x_1^*(t) > 0$ 、 $x_2^*(t) > 0$ 、 $x_3^*(t) > 0$ ，保证主体规模在资源约束下收敛至有限正值，这意味着主体间共生关系与资源分配已达到动态平衡，进而形成唯一稳定的共存状态。

$$\begin{cases} x_1^*(t) = \frac{N_1(-1 + \alpha_{23}\alpha_{32} - \alpha_{12} - \alpha_{13}\alpha_{32} - \alpha_{13} - \alpha_{12}\alpha_{23})}{-1 + \alpha_{13}\alpha_{21}\alpha_{32} + \alpha_{12}\alpha_{23}\alpha_{31} + \alpha_{13}\alpha_{31} + \alpha_{23}\alpha_{32} + \alpha_{12}\alpha_{21}} > 0 \\ x_2^*(t) = \frac{N_2(-1 + \alpha_{13}\alpha_{31} - \alpha_{21} - \alpha_{12}\alpha_{21} - \alpha_{23} - \alpha_{23}\alpha_{31})}{-1 + \alpha_{13}\alpha_{21}\alpha_{32} + \alpha_{12}\alpha_{23}\alpha_{31} + \alpha_{13}\alpha_{31} + \alpha_{23}\alpha_{32} + \alpha_{12}\alpha_{21}} > 0 \\ x_3^*(t) = \frac{N_3(-1 + \alpha_{12}\alpha_{21} - \alpha_{31} - \alpha_{31}\alpha_{12} - \alpha_{32} - \alpha_{32}\alpha_{21})}{-1 + \alpha_{13}\alpha_{21}\alpha_{32} + \alpha_{12}\alpha_{23}\alpha_{31} + \alpha_{13}\alpha_{31} + \alpha_{23}\alpha_{32} + \alpha_{12}\alpha_{21}} > 0 \end{cases} \quad (4)$$

情境 1 当 $E_1(0, 0, 0)$ 出现时, 表明所有参与者规模为 0, 系统尚未启动或已完全崩溃。这种情况发生在所有参与者因资源稀缺或市场需求下降而无法维持正常运营或合作时^[31]。

情境 2 当 $E_2(0, 0, N_3)$ 出现时, 核心制造企业主导系统, 产能达到最大。核心制造企业对关键资源或核心技术的垄断, 导致配套支持企业和数字产品用户的发展相对滞后。例如, 苹果公司通过控制 iOS 封闭生态垄断数字创新价值链, 导致代工厂富士康研发萎缩, 第三方开发者创新受限。虽然短期实现行业利润, 但长期抑制配套企业升级与用户选择权, 不利于行业的创新活力和多元化发展。

情境 3 当 $E_3(0, N_2, 0)$ 出现时, 配套支持企业主导系统。然而, 由于缺乏核心制造企业和数字产品用户的支持, 这些企业往往因技术单一或缺乏战略合作而难以发展核心竞争力。如果核心制造企业长期缺席, 系统可能会陷入低水平创新陷阱, 迫切需要进行技术升级以及多元主体的整合以实现转型。

情境 4 当 $E_4(N_1, 0, 0)$ 出现时, 数字产品用户主导系统。在数字创新生态系统中, 多元主体间的密切合作对于技术的成功商业化至关重要。然而, 当数字产品用户占据主导地位时, 与核心制造企业缺乏密切合作可能会阻碍技术的市场化进程。

情境 5 当 $E_5 = \left(\frac{N_1(1 + \alpha_{12})}{1 - \alpha_{12}\alpha_{21}}, \frac{N_2(1 + \alpha_{21})}{1 - \alpha_{12}\alpha_{21}}, 0 \right)$ 出现时, 核心制造企业和配套支持企业通过互利合作共同发展, 但数字产品用户未参与, 导致核心制造企业和配套支持企业之间形成双边平衡。例如, 丰田及其核心供应商通过长期合作建立了相互依赖的合作机制。这体现在丰田控制核心技术, 同时配套供应商深度参与产品设计和技术迭代。然而, 若数字产品用户参与程度低, 同样会面临技术迭代延迟和市场需求匹配落后的风险。

情境 6 当 $E_6 = \left(\frac{N_1(1 + \alpha_{13})}{1 - \alpha_{13}\alpha_{31}}, 0, \frac{N_3(1 + \alpha_{31})}{1 - \alpha_{13}\alpha_{31}} \right)$ 出现时, 核心制造企业与数字产品用户合作, 但配套支持企业缺席。这种缺乏支持企业的情境可能会导致供应链整合的丧失, 从而对数字创新生态系统的健康发展产生负面影响。

情境 7 当 $E_7 = \left(0, \frac{N_2(1 + \alpha_{23})}{1 - \alpha_{23}\alpha_{32}}, \frac{N_3(1 + \alpha_{32})}{1 - \alpha_{23}\alpha_{32}} \right)$ 出现时, 配套支持企业与数字产品用户合作, 但核心制造企业不参与, 导致配套支持企业和数字产品用户之间出现双边均衡。核心制造企业通过设定目标和促进协作, 在数字创新生态系统中发挥着关键作用。如果核心制造企业缺席, 不利于形成完整可持续的数字创新生态系统。

情境 8 当 $E_8(x_1^*(t), x_2^*(t), x_3^*(t))$ 出现时, 所有参与者相互协作, 资源分配达到动态平衡, 从而产生唯一的稳定共存状态。

表 2 制造业数字创新生态系统主体共生演化平衡点
Tab.2 Symbiotic evolution equilibrium point of the manufacturing digital innovation ecosystem

均衡点	$x_1(t)$	$x_2(t)$	$x_3(t)$
E_1	0	0	0
E_2	N_1	0	0
E_3	0	N_2	0
E_4	0	0	N_3
E_5	$\frac{N_1(\alpha_{12} + 1)}{1 - \alpha_{12}\alpha_{21}}$	$\frac{N_2(\alpha_{21} + 1)}{1 - \alpha_{12}\alpha_{21}}$	0
E_6	$\frac{N_1(\alpha_{13} + 1)}{1 - \alpha_{13}\alpha_{31}}$	0	$\frac{N_3(\alpha_{31} + 1)}{1 - \alpha_{13}\alpha_{31}}$
E_7	0	$\frac{N_2(\alpha_{23} + 1)}{1 - \alpha_{23}\alpha_{32}}$	$\frac{N_3(\alpha_{32} + 1)}{1 - \alpha_{23}\alpha_{32}}$
E_8	$x_1(t) > 0$	$x_2(t) > 0$	$x_3(t) > 0$

3 制造业数字创新生态系统共生演化仿真分析

制造业数字创新生态系统演化动力模型需通过多次迭代揭示宏观规律, 数值仿真适用于以演化时间为统计单位的研究。利用 Matlab R2020b 对式(1)进行数值模拟仿真, 借鉴典型文献的理论基础和仿真参数设置规则^[32-33], 并结合制造业中创新主体发展的实际增速情况, 预设核心制造企业、配套支持企业、数字产品用户 3 类创新主体的自然增长率分别为 $k_1=0.15$ 、 $k_2=0.10$ 、 $k_3=0.08$ 。初始种群 $x_1(t)=200$ 、 $x_2(t)=120$ 、 $x_3(t)=50$ 。最大环境

容量 $N=1\,000$ ，设为标准化规模单位(千台级产能或千亿元市场)，仿真周期 $t=1\,000$ 。参数区间借鉴 Modis^[34] 在生态系统建模中的常用经验设置，通过系统地改变 α 组合(见表 1)，模拟独立、寄生、偏利与互惠 4 种共生模式下的演化路径。

3.1 制造业数字创新生态系统三主体独立共生模式

当制造业数字创新生态系统中核心制造企业、配套支持企业与数字产品用户的共生作用系数均为 0 时，三主体呈现无交互的独立演化状态，构成理想状态下的独立共生模式，这种模式在现实情境中通常不存在，具体如图 1 所示。该模式下，3 个群体独立发展，互不影响。各个种群的规模只与各自的自然增长率和环境约束有关，在均衡状态下，每个种群的规模达到最大。

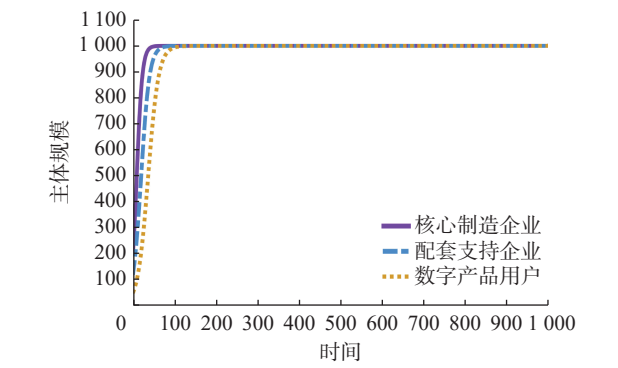


图 1 制造业数字创新生态系统三主体独立共生模式
Fig.1 Independent symbiosis pattern in the three-actor manufacturing digital innovation ecosystem

3.2 制造业数字创新生态系统三主体寄生共生模式

寄生共生是指一方通过过度开发另一方的资源，阻碍另一方的发展，从而使自身利益最大化的过程。当共生作用系数满足 $\alpha_{ab}\alpha_{ba}<0$ 时，具体取值见表 3。此时，三主体呈现寄生共生模式，如图 2 所示。具体来看，在图 2(a) 中，核心制造企业寄生于配套支持企业和数字产品用户。这种寄生行为使核心制造企业通过汲取资源实现种群规模的超常扩张，远超过独立发展时的最大规模。图 2(b) 展示了核心制造企业被其他两个种群寄生的情景，此时其发展规模较主动寄生时大幅下降，失去发展优势。图 2(c) 和图 2(d) 分别展示了配套支持企业和数字产品用户寄生于其他种群的情境。显然，在寄生共生模式下，利益的单向流动导致系统内行为体之间的发展不平衡，主导寄生的群体获得绝对优势，而被寄生群体的可持续

发展能力被削弱。因此，这种模式虽然可能在短期内增强生态主导者的竞争力，但从全系统的角度来看，它可能会损害协作网络的整体稳定性和创新能力。这揭示了寄生行为对资源有限环境中系统协作进化的不利影响。

表 3 主体间寄生共生系数取值
Tab.3 Value of parasitic symbiosis coefficient between actors

主体间关系	共生系数取值					
	α_{12}	α_{13}	α_{21}	α_{23}	α_{31}	α_{32}
核心制造企业寄生于其他种群	0.25	0.35	-0.20	-0.18	-0.15	-0.10
核心制造企业被其他种群寄生	-0.25	-0.35	0.20	0.18	0.15	0.10
配套支持企业寄生于其他种群	-0.25	-0.35	0.20	0.18	-0.15	-0.10
数字产品用户寄生于其他种群	-0.25	-0.35	-0.20	-0.18	0.15	0.10

3.3 制造业数字创新生态系统三主体偏利共生模式

当参数取值符合 $\alpha_{ab}>0$ ， $\alpha_{ba}=0$ 时，具体取值见表 4。制造业数字创新生态系统中核心制造企业、配套支持企业和数字产品用户间呈现偏利共生模式，演化结果如图 3 所示。此模式的核心特征为单向利益输送，即一方可从交互中获取显著收益，而另一方既无增益也无减损，形成非对称交互关系。具体而言，图 3(a) 中，配套支持企业和数字产品用户通过技术协同或资源供给显著促进核心制造企业种群规模扩张，然而核心制造企业对这两个种群的发展却无明显正向或负向作用。这种单向促进关系凸显了生态系统中资源流动的不均衡性。与之相反，图 3(b) 展示了另一种非对称场景：核心制造企业对配套支持企业和数字产品用户的发展具有显著促进作用，自身却未从这种交互中受益，进一步印证了生态系统中存在的非对称赋能现象。这种现象表明，核心制造企业可能因技术锁定或单向资源流动而陷入“单边贡献者”角色。尽管短期内，这种偏利共生可提升系统局部效能，但从长期来看，主体间激励失衡将使系统隐藏脆弱性，一旦受益方发展受阻，贡献方将面临资源错配与发展受限的双重风险。同样的逻辑，图 3(c) 和图 3(d) 分别展示了配套支持企业和数字产品用户受益的情况。总之，偏利共生模式深刻揭示了数字创新生态系统中，不同主体间非对称影响的复杂性，以及个体与整体动态关系的多样性。它不仅影响着各主体的资

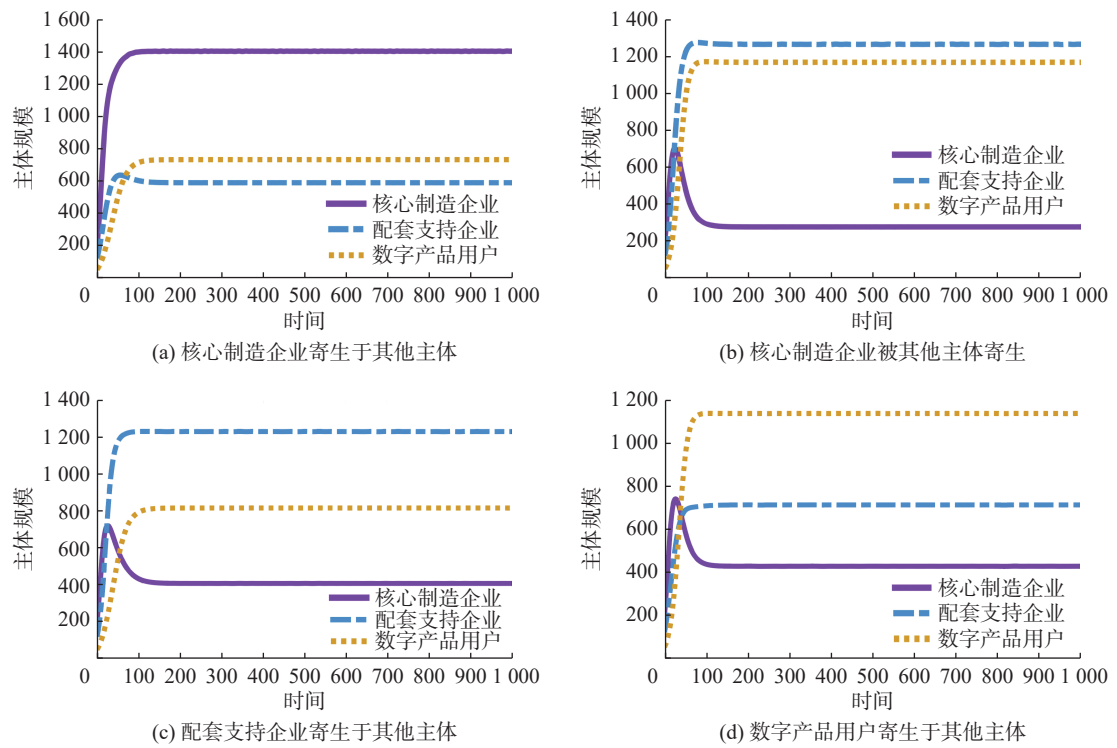


图2 制造业数字创新生态系统三主体寄生共生模式

Fig.2 Parasitic symbiosis pattern in the three-actor manufacturing digital innovation ecosystem

源获取与发展空间，更对生态系统的长期稳定性与可持续性构成挑战，凸显出在复杂生态系统中协调主体间交互关系、促进均衡发展的重要性。

表4 主体间偏利共生关系系数取值

Tab.4 Value of commensal symbiosis coefficient between actors

主体间关系	共生系数取值					
	α_{12}	α_{13}	α_{21}	α_{23}	α_{31}	α_{32}
核心制造企业受益	0.25	0.35	0	0	0	0
核心制造企业不受益	0	0	0.20	0.18	0.15	0.10
配套支持企业受益	0	0	0.20	0.18	0	0
数字产品用户受益	0	0	0	0	0.15	0.10

3.4 制造业数字创新生态系统三主体互惠共生模式

当制造业数字创新生态系统中核心制造企业、配套支持企业与数字产品用户的共生作用系数均为正值时，即 $\alpha_{12}=0.20$ 、 $\alpha_{13}=0.35$ 、 $\alpha_{21}=0.30$ 、 $\alpha_{23}=0.18$ 、 $\alpha_{31}=0.15$ 、 $\alpha_{32}=0.10$ 时，三主体间形成互惠共生模式，如图4所示。在此模式下，核心制造企业、配套支持企业与数字产品用户的种群最大规模显著超越寄生共生和偏利共生模式。这一现象表明，主体间的协同互动不仅突破了自身发展

的固有局限，更借助彼此优势实现规模扩张与效益提升。具体而言，核心制造企业和配套支持企业通过资源共享和协作实现快速增长，体现出互惠关系的积极效果。同时，数字产品用户规模保持稳定，通过需求反馈与应用场景提供，促进前两者的产品迭代与服务优化。互惠共生模式通过主体协同和资源共享的多向积极交互，显著提升数字创新能力，为增强系统竞争优势提供重要支撑。

上述分析表明，制造业数字创新生态系统中核心制造企业、配套支持企业和数字产品用户的演化结果高度依赖于三者的共生关系。寄生共生模式导致资源单向攫取和过度依赖，而偏利共生模式则存在资源配置失衡问题。相较而言，互惠共生模式凭借主体间的双向赋能与协同共进，不仅能够实现资源的高效配置与共享，更能有力推动三主体的协同发展。因此，未来的发展应注重合作研发，建立联合利益机制，增强数字创新生态系统的稳定性与韧性，促进实现资源的最佳配置和可持续发展。

3.5 参数敏感性分析

互惠共生模式不仅在理论层面契合制造业创新生态系统的协同演化机制，也具备重要的实践意义。参数 k_1 和 k_2 分别代表核心制造企业和配套支持企业对系统的正向驱动作用，影响主体间互

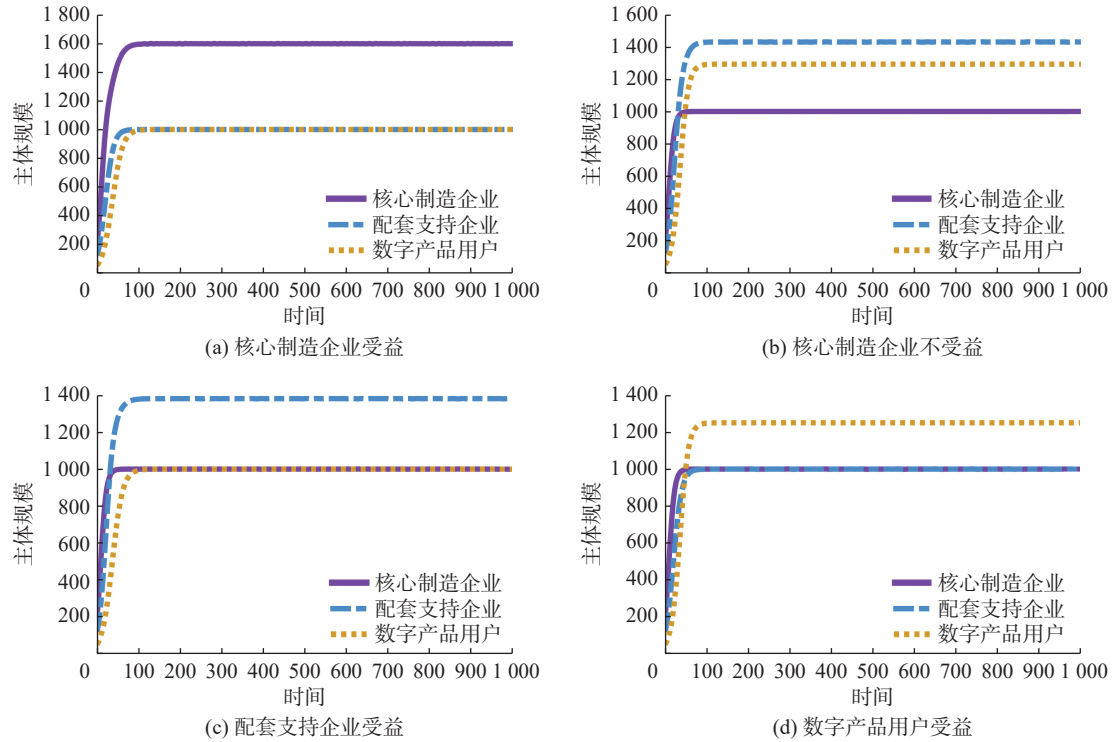


图3 制造业数字创新生态系统三主体偏利共生模式

Fig.3 Commensal symbiosis pattern in the three-actor manufacturing digital innovation ecosystem

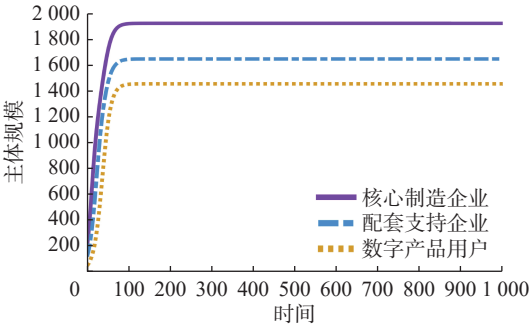


图4 制造业数字创新生态系统三主体互惠共生模式

Fig.4 Mutualistic symbiosis pattern in the three-actor manufacturing digital innovation ecosystem

动强度及协同效果，是刻画多元主体合作特征的关键参数。参数 N 则代表系统的环境承载能力，决定了每个主体的最大规模和系统最大环境容量。基于此，本文在敏感性分析中选取典型的三方互惠共生情景，模拟不同 k_1 、 k_2 和 N 取值下系统的演化结果，以检验参数设定的合理性。

a. 参数 k_1 敏感性分析。参数 k_1 代表核心制造企业的自然增长率。为考察其对系统的影响，避免极值导致模型不稳定或偏离实际，设定 k_1 的变化范围为 0.05~0.30，增量为 0.05，如图 5 所示。结果表明：尽管不同的 k_1 值会在一定程度上影响核心制造企业、配套支持企业及数字产品用户的

增长速率，但 3 类主体总体走势保持一致，均呈现稳步上升趋势，系统表现出较强的稳健性，进一步验证了研究结论的可靠性。

b. 参数 k_2 敏感性分析。参数 k_2 代表配套支持企业的自然增长率。其取值范围为 0.05~0.30，与 k_1 相同，增量为 0.05，相应的分析结果如图 6 所示。尽管 k_2 影响核心制造企业、配套支持企业和数字产品用户的成长，但总体趋势保持一致，且整体增长势头稳定。此项分析再次印证了模型参数选择的合理性及研究结论的稳健性。

c. 参数 N 敏感性分析。参数 N 表示系统的整体环境承载能力，取值范围为 500~3000，增量为 500，结果如图 7 所示。不同 N 值下，核心制造企业、配套支持企业和数字产品用户 3 类主体的增长速率存在差异： N 越大，主体规模扩张速度略有提升，但系统的演化模式并未发生根本性改变，仍沿着稳定增长轨迹发展。该结果进一步支持了本研究模型的可靠性及参数设置的科学性。

4 案例分析：智能汽车数字创新生态系统多元主体共生模式

以智能汽车数字创新生态系统为例，通过对比亚迪智能汽车数字创新生态进行深入剖析，可

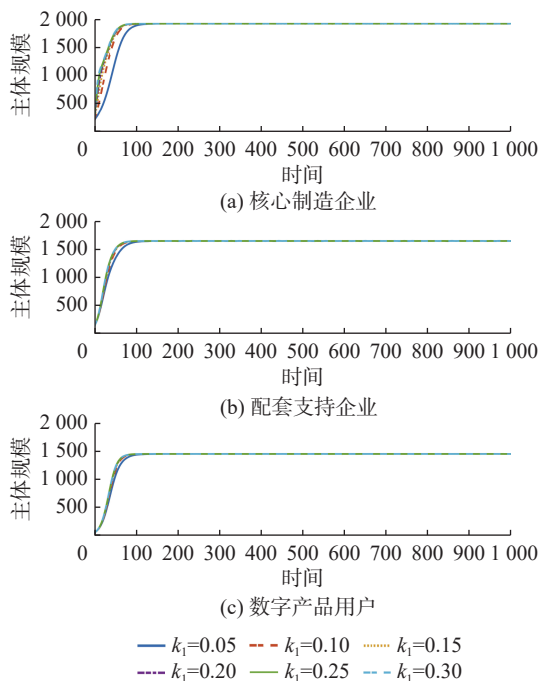


Fig.5 Sensitivity analysis results of parameter k_1

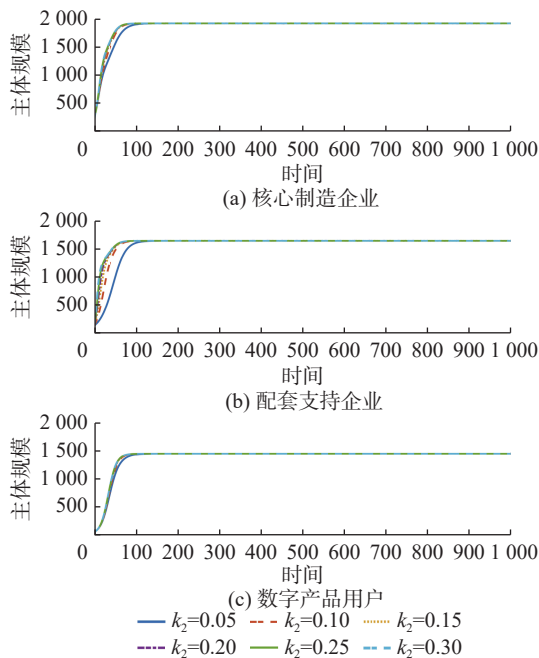


Fig.6 Sensitivity analysis results of parameter k_1

以有效补充数值模拟难以展现的多方协同机制。2024年，比亚迪以累计销量427万辆的卓越表现，一举斩获中国车企销量冠军、中国品牌销量冠军、全球新能源车销量冠军三项桂冠，成为全球汽车工业数字化转型的标杆。因此，选取比亚迪为典型案例，对其构建的制造企业、配套支持企业、超级消费者三方共生生态进行解释性案例

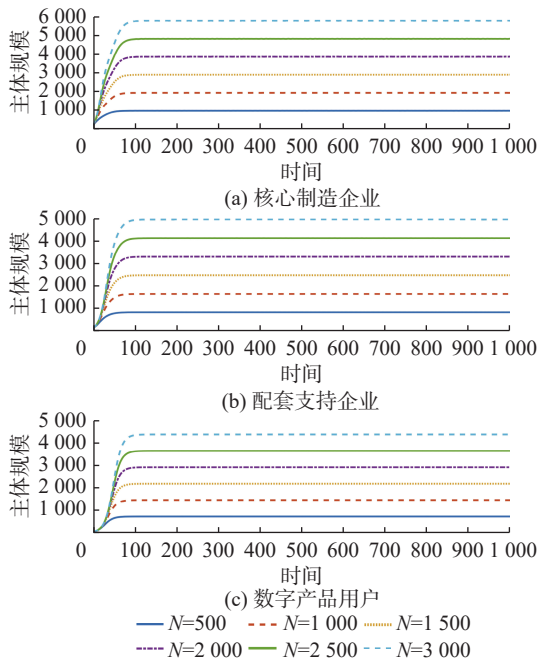


Fig.7 Sensitivity analysis results of parameter N

分析,有助于揭示多元主体在数字创新链条中如何相互赋能与协同进化。

4.1 智能汽车数字创新生态系统中多元主体共生关系

在数字经济浪潮下，智能汽车产业正从单一制造向生态协同跃迁。以比亚迪为代表的中国车企，通过垂直整合刀片电池、e平台架构等核心技术与开放数字生态，构建了覆盖研发、生产、服务的全链条创新网络。这种转型不仅打破了传统行业壁垒，更催生出“制造为基、数据为脉、用户为源”的新型创新生态系统。

智能制造核心企业在生态系统中承担主导型角色，与多家配套龙头企业共治，并分享生态领导权，通过跨主体协同获得创新突破的临界规模。超级消费者既是深入参与功能测试的车主，也可以是基于开放 SDK 打造新场景应用的第三方开发者，他们在产品试验与需求反馈中扮演着双重角色，既消费创新成果，也为生态迭代贡献创意与数据。智能制造核心企业、配套龙头企业、超级消费者三者交互赋能，实现多元主体共生演化，通过构建高效的共性技术供给体系产生各创新主体协同效应，推动数字创新发展，多元主体的共生协同如图 8 所示。

4.2 智能汽车数字创新生态系统中多元主体互惠共生演化

在比亚迪智能汽车数字创新生态系统中，核

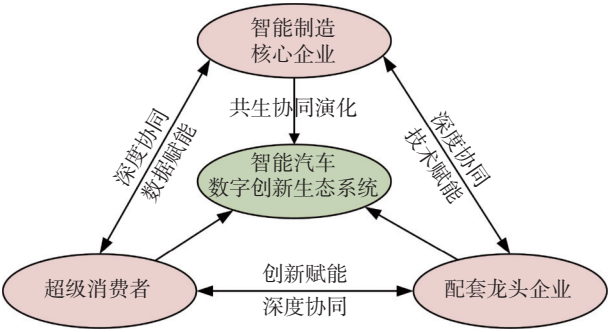


图8 智能汽车数字创新生态系统多元主体共生协同
Fig.8 Multiple actors symbiosis and collaboration in the intelligent automotive digital innovation ecosystem

心制造者、配套龙头企业与超级消费者并非简单的上下游关系，而是通过持续的赋能与反馈紧密联动。制造者持续打磨可迭代的整车平台，配套龙头供应商不断升级硬件与云端能力以满足新场景需求，而超级消费者既是深度体验者，又借助开放平台贡献真实使用数据和创意，促使技术与产品在实践中相互塑造、共同演进。

随着生态的不断演进，各方在合作中实现互惠共生的持续升级。2019年，比亚迪向配套企业开放 DiLink 2.0SDK，硬件厂商快速完成适配，首批应用上线后，超级消费者通过月度调研和使用日志为供应商与比亚迪提供了最直接的校准依据。2020年，“汉”EV 配备刀片电池与 DiPilot L2+系统后，比亚迪在数周内推送首轮 OTA 升级，配套企业据车主反馈优化传感器标定与电控算法，比亚迪同步升级软件，性能与体验双重提升。2021年，高通与英飞凌发布新版算力芯片与雷达模块，比亚迪在 DiLink 3.0 中引入多源数据融合，超级消费者利用更强算力测试并反馈高负载场景应用，供应商据此调整硬件策略，比亚迪最终通过 OTA 发布成熟版本，确保系统稳定可靠。2022年，依托“e 平台 3.0”，比亚迪与配套龙头企业在联合实验室与超级消费者代表共同完成千余次自动泊车测试，用户体验数据帮助筛选最优算法，使泊车成功率大幅跃升。2023年，DiPilot 3.0 多场景辅助驾驶量产并上线远程诊断服务，配套龙头企业依托海量在线异常数据提升硬件耐久性，比亚迪优化交互界面，开发者社区推出智能路况预测插件，三方协作实现用户月活率稳定增长。2024年，以“天神之眼”高阶智能驾驶系统在全系车型上的普及落地为节点，核心制造企业通过平台化设计将 L3 自动驾驶能力带给每

一位超级消费者，彻底打破智能驾驶“高端专属”的固有格局。

总体而言，比亚迪智能汽车数字创新生态的演化路径，从技术开放到迭代升级，从硬件打磨到应用共创，始终贯穿着核心制造企业、配套支持企业与超级消费者的互惠共生。此案例不仅为多主体 Lotka-Volterra 共生模型提供了实证支撑，也为传统制造业构建高效协同的数字创新生态提供了可借鉴的实践范式，充分彰显“1+1+1>3”的可持续共生协同价值。

5 研究结论与政策建议

5.1 研究结论

本研究基于共生理论和 Lotka-Volterra 模型，构建了三方共生演化模型，并得出以下主要结论：a. 互惠共生是系统演化的最优模式，通过资源共享和技术协作促进核心制造企业、配套支持企业和数字产品用户共同稳定发展，实现整体利益最大化。b. 寄生共生虽然暂时增强了主导型寄生主体的竞争力，但资源开采导致被寄生主体的发展长期停滞，破坏系统稳定性；由于利益的单向流动，偏利共生激发受益主体快速发展，导致系统整体不平衡，限制系统的规模发展。c. 数字产品用户作为创新参与者，其需求和反馈为创新活动提供支持，显著推动产业链协同升级，是系统可持续发展不可或缺的主体。智能汽车数字创新生态系统的案例进一步验证了系统中多元主体深度协同共生所实现的颠覆性价值创造。

5.2 政策建议

基于上述研究结论，提出几点建议：第一，深化互惠共生。政府机构应带头建立国家级“制造业创新云平台”，并制定准入指南，鼓励核心制造企业和配套支持企业等多元主体参与。为了解决互惠共生过程中技术泄露的担忧，可以引入区块链或可信审计机制，为所有数据交换与协同开发活动留痕，确保任何技术共享都可追溯。第二，破解寄生依赖。在工业互联网或制造业创新中心内设立能力提升平台，汇聚行业领先的数字化工具、标准化模块和专业培训资源，向配套支持企业或发展落后主体开放。平台不仅提供工艺改造、模块化设计和远程运维等技术支持，还可以组织定期的协同攻关工作坊，由核心制造企

业、配套支持企业和数字产品用户等多元生态主体共同研讨痛点、共建解决方案,避免单方面依赖、弱化寄生或偏利关系。从而,通过制度化、常态化的技术和管理赋能,使各方主体都能成为稳定可靠的合作伙伴。第三,激发需求驱动。将数字产品用户纳入制造业数字创新治理框架:由行业协会或第三方组织定期举办“用户共创大会”,邀请深度体验者、行业专家和企业代表共同参与产品原型评审与迭代讨论。在企业内部设立用户小组,让用户代表直接参与到设计决策、体验验证和服务优化中。通过制度化的共创闭环,将用户需求和反馈转化为创新输入,激发用户从被动接受者向主动共创者进一步升级,确保生态系统的持续活力与市场适配性。

参考文献:

- [1] ADNER R, KAPOOR R. Value creation in innovation ecosystems: how the structure of technological interdependence affects firm performance in new technology generations[J]. *Strategic Management Journal*, 2010, 31(3): 306–333.
- [2] 戎珂,柳卸林,魏江,等.数字经济时代创新生态系统研究[J]. *管理工程学报*, 2023, 37(6): 1–7.
- [3] GANCO M, KAPOOR R, LEE G K. From rugged landscapes to rugged ecosystems: structure of interdependencies and firms' innovative search[J]. *Academy of Management Review*, 2020, 45(3): 646–674.
- [4] 金治州,陈宏权,曾赛星.重大工程创新生态系统共生逻辑及治理[J]. *管理科学学报*, 2022, 25(5): 29–45.
- [5] ABOU-FOUL M, RUIZ-ALBA J L, SOARES A. The impact of digitalization and servitization on the financial performance of a firm: an empirical analysis[J]. *Production Planning & Control*, 2021, 32(12): 975–989.
- [6] MOORE J F. Predators and prey: a new ecology of competition[J]. *Harvard Business Review*, 1993, 71(3): 76–86.
- [7] DE VASCONCELOS GOMES L A, FACIN A L F, SALERNO M S, et al. Unpacking the innovation ecosystem construct: evolution, gaps and trends[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2018, 136: 30–48.
- [8] 王倩,柳卸林.企业跨界创新中的价值共创研究:基于生态系统视角[J]. *科研管理*, 2023, 44(4): 11–18.
- [9] 罗均梅,徐翠丰,王水莲.数字孪生如何影响企业创新生态系统价值共创?——基于可供性视角的案例研究[J]. *研究与发展管理*, 2025, 37(1): 60–73.
- [10] 陈权,薛捷.产业创新生态系统周期性演进及其政策建议——基于自然技术与社会技术共演化的视角[J]. *科技管理研究*, 2023, 43(22): 23–30.
- [11] 王珍愚,胡彩文,王宁,等.区域创新生态系统评价体系研究——基于 AHP-CRITIC-TOPSIS 方法[J]. *科学学与科学技术管理*, 2025, 46(4): 54–71,86.
- [12] 李君然,魏莹.国家目标下的创新生态系统构建:以极紫外光刻机为例[J]. *学术研究*, 2024(1): 89–97.
- [13] 李天柱,马佳,高皓天,等.创新生态系统演化情境下的关键核心技术突破[J]. *科研管理*, 2024, 45(1): 51–63.
- [14] 周锦来,赵晨,林晨,等.移动通信科技自立自强决策逻辑与创新生态系统协同演化机制研究[J]. *科学学与科学技术管理*, 2023, 44(11): 79–93.
- [15] 陈健,高太山,马雪梅.创新生态系统的战略思考[J]. *科学管理研究*, 2016, 34(1): 1–4,17.
- [16] 姜尚荣,乔晗,张思,等.价值共创研究前沿:生态系统和商业模式创新[J]. *管理评论*, 2020, 32(2): 3–17.
- [17] 单子丹,曾燕红,李慧敏,等.数据资源如何重塑数字创新生态系统多主体竞合关系?——基于智能驾驶数字创新生态系统的解构与重组[J]. *研究与发展管理*, 2022, 34(6): 79–91.
- [18] 邵云飞,周湘蓉,杨雪程.从0到1:数字化如何赋能创新生态系统构建? [J]. *技术经济*, 2022, 41(6): 44–58.
- [19] 李玥,钱科研,徐岸峰,等.平台生态系统:理论框架与未来展望[J]. *系统工程理论与实践*, 2026, 46(1): 19–35.
- [20] 龚银银,张永庆,郑苏江.数字创新生态系统驱动绿色创新绩效的组态路径研究[J]. *统计与信息论坛*, 2025, 40(9): 90–103.
- [21] BREA E. A framework for mapping actor roles and their innovation potential in digital ecosystems[J]. *Technovation*, 2023, 125: 102783.
- [22] CRESSMAN R, GARAY J. Evolutionary stability in Lotka-Volterra systems[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2003, 222(2): 233–245.
- [23] NACHBAR J H. A comment on ‘evolution in economic games’ [J]. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 1991, 16(3): 355–360.
- [24] SCHUSTER P. Models of evolution and evolutionary game theory: a comment on “Evolutionary game theory using agent based models” by Christoph Adami, Jory Schossau, Arend Hintze[J]. *Physics of Life Reviews*, 2016, 19: 32–35.
- [25] 陈璐,吴洁,盛永祥,等.专利创新生态系统中多主体竞合关系研究[J]. *情报杂志*, 2017, 36(12): 82–89.
- [26] 何得雨,邹华,王海军,等.竞合视角下企业创新生态系统演进——基于京东方的案例研究[J]. *中国科技论坛*, 2022(5): 99–108.

[30] ABROR A, PATRISIA D, ENGRIANI Y, et al. Antecedents of Muslim tourist loyalty: the role of Islamic religiosity and tourist value co-creation[J]. *Cogent Business & Management*, 2023, 10(2): 2247871.

[31] COVER T M, THOMAS J A. Elements of information theory[M]. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. , 2006.

[32] SUN Y H, HUANG Z H, CHI F D. Analysis of systemic factors affecting carbon reduction in Chinese energy-intensive industries: a dual-driven DEMATEL model[J]. *Energy*, 2023, 285: 129319.

[33] 张语轩, 耿秀丽, 潘飞. 基于多源数据的智慧养老服务供需匹配研究 [J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(2): 214–224.

[34] 李勇建, 李佳佳, 孙晓晨, 等. 基于系统动力学的 “制造链+平台” 双模式价值共创实现动因研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2023, 43(12): 3549–3569.

(编辑: 丁红艺)

(上接第 363 页)

[27] 何建洪, 李林, 朱浩, 等. 新兴技术创新生态系统中主体共生演化分析 [J]. *中国软科学*, 2024(1): 186–200.

[28] 曹全垚, 肖忠东. 碳交易下考虑产业共生的制造商减排行为演化博弈分析 [J]. *系统工程*, 2023, 41(4): 22–28.

[29] NIIYAMA T, FURUHATA G, UCHIDA A, et al. Lotka-Volterra competition mechanism embedded in a decision-making method[J]. *Journal of the Physical Society of Japan*, 2020, 89(1): 014801.

[30] HUANG A, WENG P. Traveling wavefronts for a Lotka-Volterra system of type- K with delays[J]. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 2013, 14(2): 1114–1129.

[31] LUTHRA S, MANGLA S K. Evaluating challenges to Industry 4.0 initiatives for supply chain sustainability in emerging economies[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 117: 168–179.

[32] FANG G C, LU L X, TIAN L X, et al. Can China achieve the Energy-saving and emission reducing objectives during the “ 13th Five-Year-Plan” ? — — a systematic evolutionary analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 262: 121256.

[33] ADNER R, KAPOOR R. Innovation ecosystems and the pace of substitution: Re-examining technology S-curves[J]. *Strategic Management Journal*, 2016, 37(4): 625–648.

[34] MODIS T. Technological forecasting at the stock market[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 1999, 62(3): 173–202.

(编辑: 丁红艺)