

# 面向关键核心技术攻关的知识生态系统： 融合、演化、协同与冲击

储节旺，安怡然，李佳轩

(安徽大学管理学院，合肥 230601)

**摘要** 知识生态系统的构建有利于知识共享、技术共用、人才交流，以及提升技术创新体系能力。通过探究知识生态系统的协同、演化、融合与冲击可以打破知识主体之间彼此分割、各自为政的局面，改变传统攻关组织实施模式，协同关键核心技术攻关。本文结合知识生态系统和多重螺旋理论，根据关键核心技术特点以及攻关现状，构建了面向关键核心技术的演化路径、知识主体协同模式，分析了环境冲击对知识主体的影响，并形成知识生态系统。最后，研究利用DICE (distribution, interaction, competition, and evolution) 模型解释知识生态系统运行机理，以量子信息技术为例研究其适用性，为关键核心技术攻关新型组织模式的构建提供思路。

**关键词** 关键核心技术攻关；知识生态系统；多重螺旋；知识协同；量子信息

## The Knowledge Ecosystem for Key Core Technologies: Integration, Evolution, Synergy, and Impact

Chu Jiewang, An Yiran and Li Jiakuan

(School of Management, Anhui University, Hefei 230601)

**Abstract:** The construction of the knowledge ecosystem is conducive to knowledge sharing, technology sharing, and talent exchange and enhances the capability of the technological innovation system. By exploring the synergy, evolution, integration, and impact of the knowledge ecosystem, the study can resolve the situation in which knowledge subjects are separated from each other and work in isolation, transform the traditional organization and implementation mode of tackling key problems, and collaborate with the key core technology tackling. This study combines the knowledge ecosystem and multiple helix theory, constructs the technology evolution path for key core technologies, the collaboration mode of knowledge subjects, analyzes the environmental impact on knowledge subjects, and finally forms the knowledge ecosystem according to the characteristics of key core technologies and the current situation of tapping. Finally, the study uses the Distribution, Interaction, Competition, and Evolution (DICE) model to explain the operation mechanism of the knowledge ecosystem, takes quantum information technology as an example to study its applicability, and provides a new idea for the construction of a new organizational model for key core technology tackling.

**Keywords:** key core technology tackling; knowledge ecosystem; multiple helix; knowledge synergy; quantum information

收稿日期：2022-03-21；修回日期：2022-06-05

基金项目：安徽省哲学社会科学重大项目“安徽打造具有重要影响力的科技创新策源地研究”（AHSKZD2021D02）。

作者简介：储节旺，男，1969年生，博士，教授，博士生导师，研究方向为知识管理、科技管理；安怡然，女，2000年生，硕士研究生，研究方向为知识管理；李佳轩，男，1999年生，硕士研究生，研究方向为知识管理、科技管理，E-mail: 1159892696@qq.com。

## 0 引言

当今世界,创新能力的竞争已经成为国际竞争的实质,世界主要科技强国把加强国家创新体系建设作为参与国际竞争的重要战略,把努力建设一流科研机构作为重中之重。面对世界百年未有之大变局,我国必须要将加强关键核心技术创新能力放在我国科技创新体系的突出位置,以科技创新催生新发展动能。推进关键核心技术攻关,打破欧美国家的技术垄断,保障国家的平稳发展,关键在于加快建设科技创新攻坚力量体系,探索关键核心技术攻关组织实施的新模式,充分激发各类创新主体的活力和其研发过程的动力。

进入21世纪以来,国际竞争日趋激烈,关键核心技术在国际竞争中处于核心位置,近年来,科技创新攻坚力量体系基本建成,攻坚能力全面进步,攻坚成效显著提升,但是,仍然存在部分亟待攻坚的“卡脖子”关键核心技术,这不仅对我国科研工作者提出了更高要求,也对关键核心技术攻关背景下新型科研组织的实施模式提出了新的要求。目前已有多位学者针对关键核心技术突破问题提出了诸如“产学研”融合<sup>[1]</sup>,面向产业链、创新链、价值链<sup>[2-4]</sup>等的组织模式研究。关键核心技术与普通技术突破有所不同,关键核心技术的攻坚与突破是一项复杂的系统工程<sup>[5]</sup>,本文认为其主要包括三个阶段。第一阶段是技术层面的协同共生,主要是指关键核心技术及其相关技术群的识别与感知,首先关键核心技术不是指某一个技术,而是制约众多技术突破并对技术突破具有实质性帮助的技术种群<sup>[6]</sup>,各个技术之间相互嵌套、相互依赖,单纯的一项技术革新并不能解决某一个领域的“卡脖子”问题,因此如何加强关键技术的弱信号感知,增加技术预知预见能力是该阶段的首要任务;第二阶段在于知识创新主体间的协同共生,关键核心技术的突破涉及科研院所、企业、政府、用户多个主体参与,如何使各主体之间形成不同类型的合作关系,从而最大限度地进行知识交流与知识创新,是关键核心技术突破的核心环节;第三阶段在于将外部环境(包括自然环境和社会环境)等非生命体纳入分析框架,外部环境不再只是给定的静态条件,而是参与到主体的演化过程中,对于不同的技术种类,在面对不同的环境条件时,所需的知识创新模式也各有不同,建立外部环境参与演化、多种模式共存的知识生态系统以增加关键技术攻关的整体效能,是本

阶段的最终目标。

以往运用知识生态系统的研究大多只关注到了知识创新主体之间的共生关系,忽略了技术层面的感知与演进,外部环境没有作为动态变化的主体参与攻关,演化模式较为单一,不能很好地契合关键核心技术的特点。基于此,本文将引入知识生态系统以及多重螺旋理论,从微观、中观、宏观三个层面对面向关键核心技术的知识生态系统进行分析。融合多重螺旋理论的知识生态系统将解决关键核心技术的演化路径、知识创新主体之间的协同关系以及外部环境冲击对知识主体的影响这三个问题。通过三个层面的解析,本文最后构建了面向关键核心技术攻关的多层级、多主体、多模式协同共生的生态系统,并以量子信息技术为例进行实证研究,为关键核心技术攻关新型组织模式的构建提供思路。

## 1 理论分析与模型构建

融合多重螺旋理论的知识生态系统是一个纳入技术、知识主体、知识环境的复杂系统。对于关键技术的攻关,本文认为首先要确定该技术的发展路径,之后以知识主体间的协同创新实现技术的攻关,同时应注意外部环境对知识主体的冲击。因此,本文将以微观角度分析关键核心技术的演化过程,以中观角度探讨知识主体的协同创新,以宏观角度探析外部环境对知识主体的冲击,最后形成面向关键技术攻关的知识生态系统。

### 1.1 知识生态系统

生态系统的概念最早是生态学领域提出的,后被广泛应用到组织行为研究中。Moore<sup>[7]</sup>率先将此概念融入企业经营管理中,提出了一种“基于机构互动的经济联合体”和“商业生态系统”的框架。自此,生态系统观开始逐渐应用在区域创新创业载体方面的研究。近年来,国内也有很多学者将生态系统的理论应用到创新领域,例如,邹华等<sup>[8]</sup>通过分析创新生态系统中产学研之间的互动关系来达到价值共创,谭劲松等<sup>[9]</sup>从创新生态视角出发研究核心企业如何在关键核心技术攻关中发挥作用。然而,现有的从生态系统观的角度解决关键核心技术攻关问题的研究没有涉及最根本的动力机制研究,同时也极少探析内部动力机制。在知识管理领域,知识生态系统被广泛应用于企业的创新与发展。Pórr<sup>[10-11]</sup>将生态学引入知识管理领域并提出了知识生态系统的概念,其认为知识是知识生态系统中的底

层要素，知识间的流动交互是维持知识生态系统稳定发展的前提。Bray<sup>[12]</sup>根据系统学理论，将知识生态系统由内部向外部延伸，着重解释了环境与系统之间的知识交互，探讨提高知识流动效率和效益的相关因素。对于知识生态系统，复杂系统理论、协同学、突变论、耗散结构理论等是研究其演化机理的主要方法<sup>[13]</sup>。

知识作为关键核心技术攻关中最重要的因素之一<sup>[14]</sup>，其在各攻关主体之间的流动与转化不可忽视。知识生态系统将知识作为客体，把知识在不同知识主体间的流动交互放到知识环境中进行研究，正如目前关键核心技术攻关的研究环境一般，核心技术的突破既需要知识主体间的协同共生，也需要知识环境的稳定演化。基于此，本文将知识生态系统的理论引入关键核心技术攻关问题中，以知识生态系统的视域去着重分析知识主体之间协调演化以及知识的流动创新，搭建开放式创新路径作为关键核心技术攻关的新方式并实现知识主体间的智慧涌现。

## 1.2 多重螺旋理论

多重螺旋理论原型是一种灌溉农业的水利创新系统，起源于古美索不达米亚人发明的提水螺旋，后来三螺旋创新模式的奠基人亨利·埃茨科威兹将其用于社会创新<sup>[15]</sup>。美国学者Etzkowitz和Leydesdorff最早提出并完善三螺旋模型<sup>[16-17]</sup>，该理论在我国的应用研究主要集中在产学研合作、创新型大学和区域创新发展三个方面<sup>[18]</sup>。例如，王建华<sup>[19]</sup>分析了大学-产业-政府 in 合作时应该注意的问题，刁叔钧<sup>[20]</sup>基于共生理论视角尝试构建了产学研合作教育联盟，王向华<sup>[21]</sup>提出了三螺旋理论与区域智力资本相结合的协同创新机制。然而三螺旋模型从本质上还是一种“准动态”模型，无法解释现实中多个演化模式共存和不同边界的主体仍能进行有效创新的问题<sup>[22]</sup>。为解决这一问题，国外学者又提出了多重螺旋的知识范式<sup>[23]</sup>，该范式将不同的知识创新模式与生态观、系统观相结合，将一切具有倾向性的“行动者”纳入分析框架，提出应把技术看作可以进化的生命体，构建多主体、多层次、多样化路径、多种知识创新模式并行共存与协同演化的创新“生态”系统<sup>[22-23]</sup>。

知识生态系统旨在解决知识主体之间的协同创新，缺乏对技术本身以及外部环境的分析，而多重螺旋理论的观点弥补了这项不足，使其可以成为从

微观角度分析技术演化，以及从宏观角度建立关键核心技术攻关的生态框架，实现外部环境与知识主体动态协同，解决关键核心技术攻关这个复杂的系统问题的重要理论基础。

## 2 面向关键核心技术攻关的知识生态系统层次分析

### 2.1 微观视角下关键核心技术演化路径研究

在知识生态系统中，知识种群与知识主体之间的关联是研究的重要方向。从关键核心技术的角度出发，关键核心技术的攻关同样是单一技术与技术群的关系。关键核心技术的攻关并不是要解决某一个技术的问题，单个技术的突破并不能解决“卡脖子”问题。本文根据多重螺旋理论，把技术看作可以进化的生命体，构建了从单项技术到技术群的演化过程，如图1所示。在关键核心技术的演化路径中，关键核心技术共经历了聚合、协同、共生三个阶段。在聚合阶段，各技术只关注自身发展，试图达到自身产业链、资金链、价值链和创新链的可持续发展，相互之间缺少交流。对于该阶段，本文认为既需要加强对已知技术的研发，也需要加强对未知技术的感知，通过技术的关联预测吸纳可以形成技术群，促进现有技术创新的边缘技术。在协同阶段，各技术之间开始产生竞争与合作关系，此时它们互相开始产生知识交换与资源交流，力图在竞争与合作中达到创新。在这种协同创新的过程中，各技术之间的联系越来越深，并且从核心技术开始辐射，感知其他边缘技术发出的信号，逐渐形成一个技术群，技术之间的知识与资源融会贯通实现价值共创，到达共生阶段。关键核心技术的耦合程度越高，其价值性就越大，同时突破难度也越高。在共生阶段，各技术已经形成完整的技术群，共用一条产业链和资金链，技术群内部的知识可以在群内的各个角落流通。在技术群内部，创新的目的已经不满足于突破某一项技术的瓶颈，而是带领整个技术群不断突破，创造社会价值。

### 2.2 中观视角下知识主体协同攻关模式研究

在以往研究中，知识生态系统主要包括知识<sup>[24]</sup>、知识主体<sup>[25]</sup>、知识环境<sup>[26]</sup>三个要素。本文根据知识生态系统理论构建知识主体协同攻关模式，如图2所示。在本项研究中，中观视角下的知识生态系统主要是通过知识主体的协同创新实现关键核

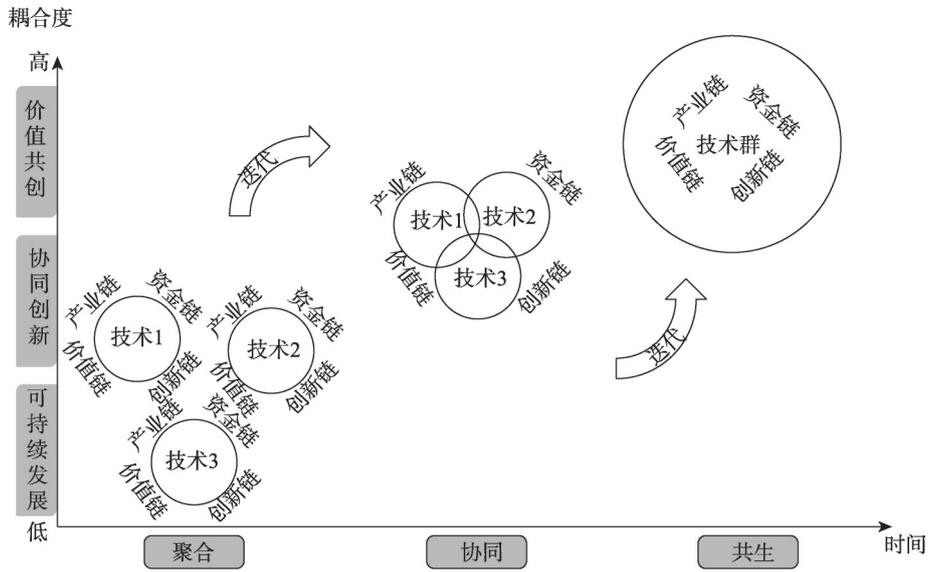


图1 关键核心技术演化路径

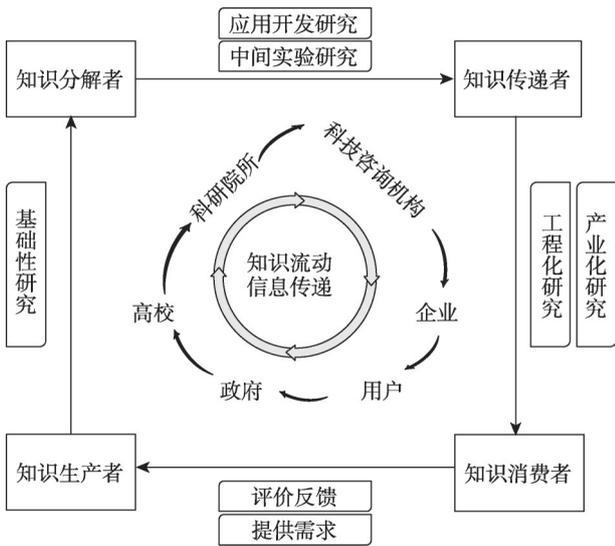


图2 知识主体协同攻关模式

心技术的攻关。知识主体按功能主要分为知识生产者、知识分解者、知识传递者、知识消费者。其中，知识生产者多为进行基础性研究的高校和科研院所等科研机构；知识分解者主要是根据基础性研究成果进行分解，以便进一步开展应用开发研究及中间的实验研究，包括设有技术开发部门的龙头企业，这些企业的技术开发部门对基础性研究取得的突破进行分解再创造；知识传递者作为知识枢纽，承担着对已有知识进行整合、促进知识在主体之间的共享的作用，常见的知识传递者有中介机构、情报咨询机构等；知识消费者对知识成果进行评价，将评价结果反馈给知识生产者并产生新的需求，为整个生态链提供内生动力，包括用户和政府机构，

其中政府机构作为知识主体应起到统筹引领作用，提供政策和资金支持。知识生产者中的科研院所、高校之间的知识协同形成专家智慧，知识消费者中该项技术的政府机构与核心用户、知识传递者中的工作人员等主体之间形成大众智慧，与知识分解者中的企业智慧实现智慧协同、横向沟通，保证了知识在不同领域、机构间的流转速度，促进知识向应用的转化，增强技术攻关的全面性。总体来说，知识主体之间的知识交流、信息传递是推动科技突破与技术攻关的主要动力。

但是在关键核心技术的攻关中，不同知识主体所承担的任务不再像以往研究中那么固定<sup>[27]</sup>。从协同学的角度理解，知识主体不再是单纯的扮演某一种角色，而是承担多种角色的职能，在不同角色之间不断转换。基于此，中观层次的知识生态系统主要解决知识主体之间的协同问题，尝试构建稳定的技术攻关关系以实现关键核心技术的攻关。

### 2.3 宏观视角下环境对知识主体的冲击

宏观视角下的知识生态系统主要是探析外部环境对知识主体的冲击。与自然生态系统类似，环境为知识主体的创造与交流提供重要的物质文化基础，任何知识主体间的协同都必须高度重视其面临的复杂环境，正视环境的存在。如图3所示，外部的政治、经济、市场等环境为知识主体提供设备、资金、人才等物质能量，以此来保证知识主体的生命力与活力。经济环境与市场环境为知识主体之间的协同提供了空间基础；国际、政治与政策环境为

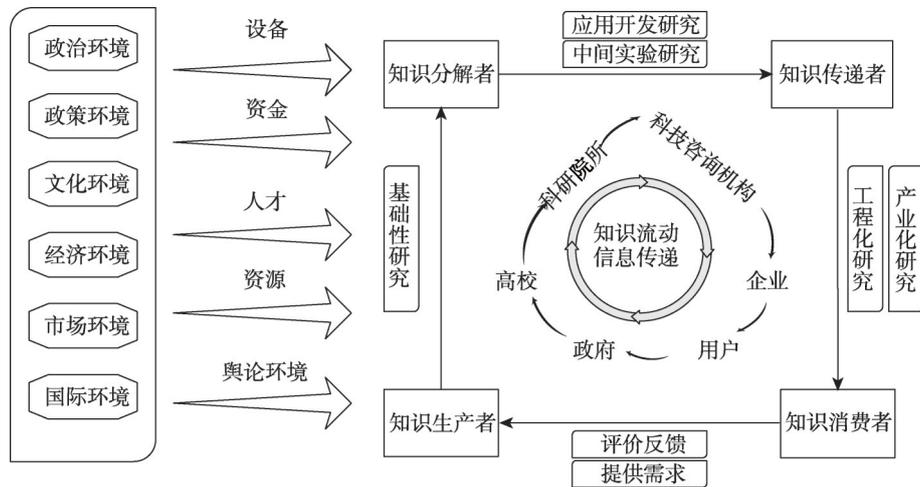


图3 环境对知识主体的冲击

知识主体提供方向，起引领作用；良好的文化、舆论环境有利于营造开放包容的氛围，鼓励知识主体进行创新。

知识主体与环境之间不断进行物质、信息和知识的交换，知识主体的协同受外部环境的制约和影响，同时也会反作用于外部环境，知识主体应该积极应对它们所处的环境，在适应环境的基础上进一步研究与预测环境未来的发展与变化，努力营造开放包容的外部环境，在动态的环境变化中维持内部平衡。

### 3 面向关键技术攻关的知识生态系统模型构建

综合微观、中观与宏观三个角度，本文构建了面向关键核心技术攻关的多层级、多模式、多主体的知识生态系统，如图4所示。知识生态系统分为技术层、产业层和环境层三个层级，每个层级中存在多个知识演化模式平行并存，层级与层级之间存在知识交流，技术层为核心要素，技术层的突破带领产业层的发展，环境层通过宏观调控手段和顶层设计把握整体攻关方向，最终通过使技术和主体与外部环境达到动态平衡，来实现关键技术攻关，解决“卡脖子”问题。

图5为知识生态系统的纵切图，分别从技术层、主体层和功能层展示知识生态系统的内部结构。按照多重螺旋理论对传统知识生态系统进行的创新，将参与攻关的主体分为政府、科研机构、企业、社会公众、自然环境和社会环境。社会公众泛指中介机构、非营利机构、社区、消费者等。社会环境包括国际形势、市场环境、舆论等。不同知识创新范

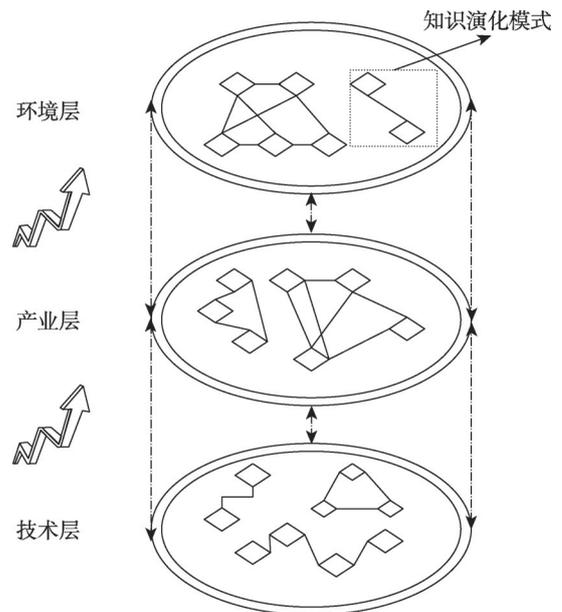


图4 面向关键核心技术攻关的知识生态系统垂直图

式和创新阶段的知识主体可以自由地与其他知识主体合作，共同创造新的价值，可以是“政府-科研机构-企业”，也可以是“企业-政府”，合作形式可以是资金合作，也可以是科研合作等多种模式并存。

在整个生态系统的运行过程中，各层级各个知识种群之间存在知识流动，且这种知识流动是非线性的，是一种复杂的网状结构，如图4所示。为了能更好地解释生态系统的运行机制，Chen等<sup>[28]</sup>提出了适用于组织知识生态学的理论体系，构建了包括知识分布（distribution）、知识互动（interaction）、知识竞争（competition）和知识演化（evolution）的DICE模型，阐释了知识生态系统运行过程中各组合要素之间的复杂关系。基于此，本文利用DICE模

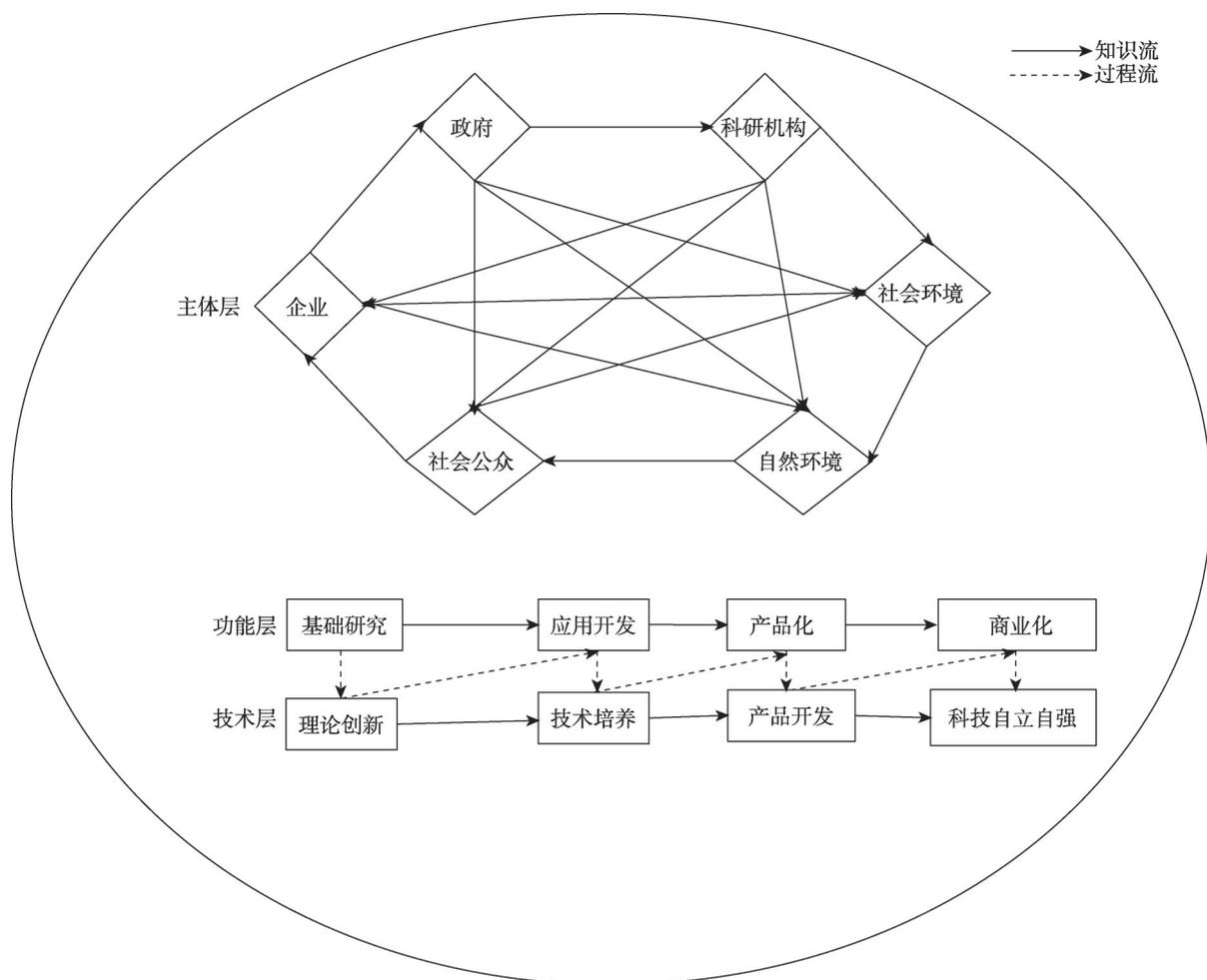


图5 面向关键核心技术攻关的知识生态系统纵切图

型以及多重螺旋理论解释面向关键核心技术攻关的知识生态系统的运行机制。

(1) 知识感知。在技术层面，知识生态系统的运作主要针对技术的感知与关联。在关键核心技术的演化初期，技术之间缺乏关联，知识主体对此要加强未知关联技术的预知，促使单一技术向技术群发展，实现技术的协同共生。对此，知识主体应采取多种方式加强对可能产生关联的技术进行态势感知，包括利用综合监测系统对多元异构的科技知识进行初步扫描，以及结合专家智慧与大众智慧对感知技术进行二次评审等方式。通过多种遴选方式，最终构建关键核心技术的关联图谱，实现技术之间的知识与资源融会贯通，实现价值共创。

(2) 知识协同。每个知识主体中都蕴含着隐性知识与显性知识，各个主体的知识分布并不平均，这种不平均使知识在各个主体间流动，并在流动过程中得以创新。知识生态系统并不是静态的，各个知识主体不断进行自我更新的同时，也与其他主体

进行互动，传递和分享已有知识。其中科研机构所蕴含的大量隐性知识处于整个知识生态系统的基础部分，为整个知识生态系统中的知识流动提供知识储备。企业洞察市场提供技术需求，社会环境调节用户市场，中介用户收集传播信息促进知识互动，用户市场作为消费者提供反馈。在自然环境与社会环境中也蕴含着大量隐性知识，自然环境的变化直接关系到人们的消费习惯、关键核心技术原材料供应等问题。社会环境如国际形势的变化直接影响到政策变化。在知识互动过程中，整个生态系统的知识储备在不断扩充更新，为关键核心技术攻关提供条件。

(3) 知识冲击。知识冲击是指当外部环境发生改变时，知识主体之间的协同模式会发生相应的变化。外部环境的变化会直接影响到关键核心技术的攻关现状，在进行攻关的过程中应时刻注意外部环境的变化，可以成立专门的冲击应对小组，对环境变化进行监测，建立科技安全预警监测体系，通过收集情报预测环境的变化，及时调整攻关模式，合

理应对冲击。

(4) 知识演化。知识突变是指知识种群内部不断进行技术革新，推动标准创新和升级，而知识互换则是与外部知识种群进行交流合作<sup>[29]</sup>，这两者是知识演化的主要动力。在面向关键核心技术的知识生态系统中，知识协同的过程存在着知识互换，环境的冲击会促使知识进行突变。因此，知识主体应不断加大知识之间的互动，尝试多种协同模式，如建立跨区域、跨学科的技术攻关项目，吸引多种企业参与协同，在冲击中寻找机遇，最终实现关键核心技术的突破，达到科技自立自强的目标。

### 4 仿真分析——以量子信息技术攻关为例

量子是现代物理的重要概念之一，量子物理与信息技术相结合诞生了以量子计算、量子通信、量子测量为代表的量子信息技术。全球知名咨询公司高德纳（Gartner）指出，量子信息技术、区块链和人工智能将很有可能创造全新的商业模式<sup>[30]</sup>。中央网络安全和信息化委员会印发的《“十四五”国家信息化规划》<sup>[31]</sup>中也明确提出，要探索建立面向未来的量子信息设施和试验环境，加强量子信息等领域的价值专利培育及知识产权保护，布局探索量子信息技术研究。新一轮的量子革命的到来很有可能催生一系列颠覆性技术，量子信息技术已经成为亟须攻关的关键核心技术之一。本文以此技术为例，具体论述面向量子信息技术攻关的知识生态系统的运行模式及稳定性。

#### 4.1 微观视角下的技术演化路径

量子信息技术是一个复杂的技术群，包括量子计算、量子通信、量子测量三大领域。每个技术领域从基础性研究到应用研究都可以形成独立的技术生态链，如量子测量技术通过对微观粒子系统及其

量子态的精密测量可以广泛应用于基础科研、生物医疗、惯性制导等领域。同时，这三大领域必须通过协同演化才能促进整个量子信息技术的攻关。量子计算技术的突破带来的算力的飞跃对量子通信技术中的密钥分发与信息加密技术具有重要意义，量子测量技术在基础科研领域的应用又可以促进其他两项技术的基础性研究。随着这三项技术的演进，在术语定义、性能评价、接口协议等方面的标准化需求开始逐渐出现，最终演化为一个稳定的技术群，实现价值共创。

本文以量子信息技术为例，根据多重螺旋理论分析其微观视角下的演化路径。量子信息技术的形成主要包括核心技术、关联技术、底层技术以及边缘技术四个层面，在技术攻关上需要层层辐射以及关联突破。在量子信息技术的演化路径中，量子信息技术共经历了聚合、协同、共生三个阶段。在聚合阶段，量子信息技术的核心技术如会话密钥、量子态、单光子探测等均为单轨道发展，彼此间缺乏科研交流。在协同阶段，各技术的底层技术开始交互，如会话密钥下的共享密钥、加密密钥等与编解码技术下的相位编码产生关联，形成技术桥梁，技术与技术间进行知识流动。在协同创新阶段，量子信息的核心技术关联更加深入，包括底层技术与核心技术的多层次联系，逐渐形成技术群，技术之间的知识与资源融会贯通最终实现价值共创，到达共生阶段，如图 6 所示。

#### 4.2 中观视角下知识主体间的协同攻关

从微观视角下分析量子信息技术，其演化路径是核心技术向关联技术辐射的过程。在技术演化路径中，知识主体始终占据主要地位。以中观视角研究，我国量子信息技术的研究主体大多来自高校等科研机构，在知识演化模式上，多为“科技企业+科研院所”，比如，阿里巴巴、腾讯和华为等通过

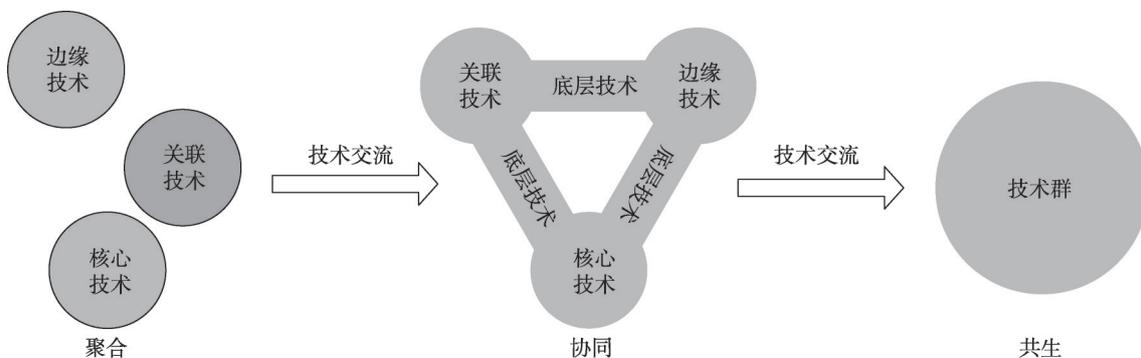


图 6 微观视角下的技术演化路径

与科研机构合作或者聘请具有国际知名度的科学家开展量子研究。然而，与美国等国家相比，我国知识主体在协同配合上仍然存在一定问题，学术界存在以论文为导向的科研模式，科研合作与应用转化机制亟待探索完善。

因此，本文尝试构建面向量子信息技术的知识生态系统，以知识生态系统的相关理论探析知识主体间的协同模式。在量子计算领域，美国已经形成了政府、科研机构、产业、投资力量多主体协同的良好局面，我国可以根据量子信息技术的特质以及国情搭建技术攻关的理论框架。在实践中，“科

研机构+政府+企业”的知识演化模式最为普遍<sup>[32]</sup>。其中，科研机构拥有大量人才和专业设备，建立了完善的智库机构，拥有完善的机制体系，能够高质量地产出知识，但是往往缺乏资金，这时可以选择和企业合作，由企业科研机构提供资金，同时企业的技术开发部门与科研机构可以共享知识成果，实现智慧协同，再结合大众智慧促进技术突破。科技管理部门以及相关决策部门作为政府方，平时面临多方面的财政支出，如何为关键技术攻关提供资金政策等方面的支持也是亟待考虑的问题。具体而言，中观视角下知识主体间的协同攻关如图7所示。

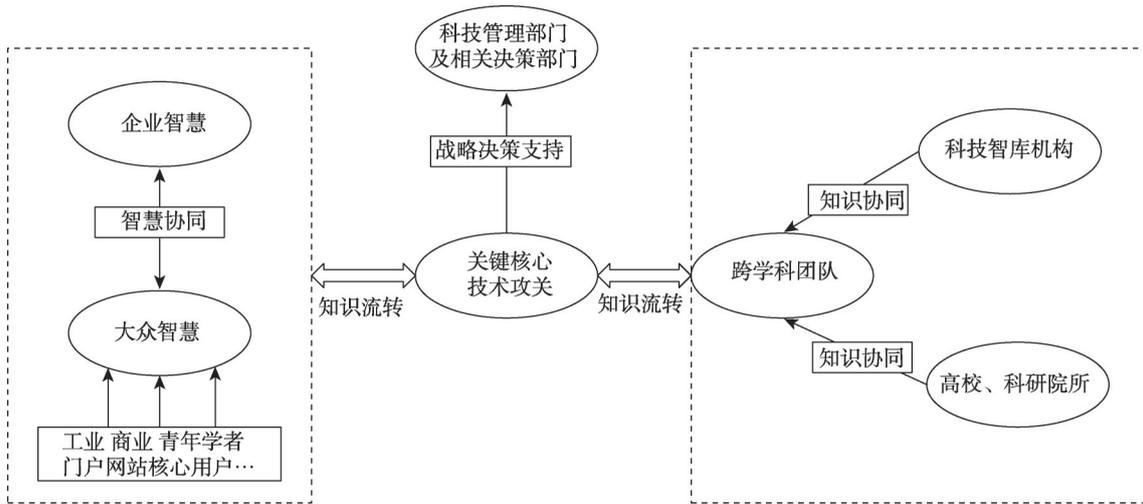


图7 中观视角下知识主体间的协同攻关

4.2.1 知识主体间策略分析

在知识生态系统中，知识主体间的协同共生是系统稳定的前提<sup>[33]</sup>。对于量子信息技术攻关主体，在本实验中，主要包括企业、政府以及科研机构。因此，研究三方主体如何达到稳态协同是实现量子信息技术攻关的首要任务。本文基于此提出以下假设(表1)：

假设1. 参与主体。科研机构、企业和政府三方知识主体共存于知识生态系统中，彼此间存在博弈，并且三方都在有限理性的前提下进行策略选择。

假设2. 博弈策略。科研机构博弈策略的选择空间为(参与合作，不参与合作)，并且以 $x$  ( $0 \leq x \leq 1$ )的概率选择与企业进行合作和 $(1-x)$ 的概率选择不与企业进行合作。企业博弈策略的选择空间为(投资，不投资)，并以 $y$  ( $0 \leq y \leq 1$ )的概率选择投资科研机构，以 $(1-y)$ 的概率选择不投资。政府博弈策略的选择空间为(支持，不支持)，并以 $z$  ( $0 \leq z \leq 1$ )的概率

选择支持关键核心技术攻关工作和 $(1-z)$ 的概率选择不支持。

假设3. 成本。科研机构选择与企业进行合作时，付出更大的人力、物力以及设备支持和科研成果共享，付出的成本设为 $C_1$ ，不参与合作时的成本为 $C_s$  ( $C_1 > C_s > 0$ )。企业选择投资科研机构时付出更多的精力和资金，相应的成本设为 $C_e$ ，不投资的成本为 $C_d$  ( $C_e > C_d > 0$ )。政府选择支持关键核心技术攻关工作时，提供更多的政策倾斜和资金投入，为了模型的简洁性，将政府不支持工作时的成本设为0，支持工作时的成本设为 $C_p$  ( $C_p > 0$ )。

假设4. 补贴。由于科研机构属于事业单位，无论政府是否支持关键核心技术攻关工作，都需向其提供财政拨款。当政府选择不支持工作时，只需向科研机构提供 $S_{sp}$ 的补贴。反之，当政府选择支持工作时，给予参与合作的科研机构的补贴为 $S_p$ ，给予选择投资的企业补贴为 $S_{ep}$ ；给与不参与合作的科研机构的补贴为 $S_{sp}$ ，给予不投资的企业补贴为

表 1 科研机构、企业和政府的三方混合策略博弈矩阵

| 企业   |          | 政府       |   |   |
|------|----------|----------|---|---|
|      |          | 支持(z)    | 不支持(1-z)  |   |
| 科研机构 | 合作(x)    | 投资(y)    | $R_t+R_1+S_{tp}+I_s-C_t$<br>$R_e+S_{ep}+R_h-I_s-C_e$<br>$R_p-S_{ep}-S_{sp}-C_p+A$ | $R_t+R_1+S_{bp}+I_s-C_t$<br>$R_e+R_h-I_s-C_e$<br>$R_q-S_{bp}$ |
|      |          | 不投资(1-y) | $R_t+S_{tp}-C_t$<br>$R_d+S_{dp}-C_d$<br>$R_p-S_{dp}-S_{sp}-C_p+A$                 | $R_t+S_{bp}-C_t$<br>$R_d-C_d$<br>$R_q-S_{bp}$                 |
|      | 不合作(1-x) | 投资(y)    | $R_s+I_s+S_{sp}-C_s$<br>$R_e+S_{ep}-I_s-C_e$<br>$R_p-S_{ep}-S_{sp}+A-C_p$         | $R_s+S_{bp}+I_s-C_s$<br>$R_e-I_s-C_e$<br>$R_q-S_{bp}$         |
|      |          | 不投资(1-y) | $R_s+S_{sp}-C_s$<br>$R_d+S_{dp}-C_d$<br>$R_p-S_{sp}-S_{dp}+A-C_p$                 | $R_s+S_{bp}-C_s$<br>$R_d-C_d$<br>$R_q-S_{bp}$                 |

$S_{dp}$  ( $S_{tp}>S_{sp}>0$ ,  $S_{ep}>S_{dp}>0$ )。并且，当政府选择支持关键核心技术攻关工作时，国家会给予政府数目为 A 的财政补贴。

假设 5. 投资。假设企业选择投资科研机构时，给予的投资数目为  $I_s$  ( $I_s<C_e-C_d$ )。

假设 6. 收益。用  $R_t$  表示科研机构选择与企业合作时的收益，用  $R_s$  表示科研机构选择不与企业进行合作时的收益 ( $R_t>R_s>0$ )，科研机构的总收益受合作收益、成本、补贴、投资的综合影响；用  $R_e$  表示企业投资科研机构的收益， $R_d$  表示企业不投资科研机构时的收益 ( $R_e>R_d>0$ )，企业总收益受投资收益、成本、补贴的综合影响； $R_p$  表示政府支持关键核心技术攻关工作时的收益， $R_q$  为选择不支持时的

收益 ( $R_p>R_q>0$ )，政府的总收益受支持收益、成本、补贴的综合影响。

假设 7. 当企业与科研机构双方同时选择投资与合作时，企业会因为科研机构的合作获得由技术带来的更多利益，用  $R_h$  表示；科研机构不仅会获得企业的资金支持，还会受到科研机构研发部的技术支持，用  $R_1$  表示。

#### 4.2.2 知识主体间协同演化稳定性研究

科研机构选择合作时的总收益为  $E_{t1}$ ，选择不合作时的收益为  $E_{s1}$ ，平均期望收益为  $\bar{E}_1$ ，根据表 1 分别计算出各知识主体的复制动态方程并构建复制动态方程系统：

$$\begin{cases} U_{(x)} = x(1-x)[R_t - C_t - R_s + C_s + z(S_{tp} - S_{sp}) + yR_1] \\ U_{(y)} = y(1-y)[xR_h + z(S_{ep} - S_{dp}) - I_s - C_e - R_d + R_e + C_d] \\ U_{(z)} = z(1-z)[R_p + A + S_{bp} - C_p - R_q - yS_{ep} - xS_{tp} + (y-1)S_{dp} + (x-1)S_{sp}] \end{cases}$$

Friedman<sup>[34]</sup> 提出，系统演化均衡的稳定性可以通过雅克比矩阵的局部稳定性来判断，由复制动态

方程系统可得该系统的雅克比矩阵为

$$\begin{bmatrix} (1-2x)[R_t - C_t - R_s + C_s + z(S_{tp} - S_{sp}) + yR_1] & x(1-x)R_1 & x(1-x)(S_{tp} - S_{sp}) \\ y(1-y)R_h & (1-2y)[xR_h + z(S_{ep} - S_{dp}) - I_s - C_e - R_d + R_e + C_d] & y(1-y)(S_{ep} - S_{dp}) \\ z(1-z)(S_{sp} - S_{tp}) & z(1-z)(S_{dp} - S_{ep}) & (1-2z)[R_p + A + S_{bp} - C_p - R_q - yS_{ep} - xS_{tp} + (y-1)S_{dp} + (x-1)S_{sp}] \end{bmatrix}$$

对三方系统进行整体性分析，令  $U(x)=U(y)=U(z)=0$ ，可得系统均衡点： $N_1(0,0,0)$ ， $N_2(0,0,1)$ ， $N_3(0,1,0)$ ， $N_4(1,0,0)$ ， $N_5(1,1,0)$ ， $N_6(1,0,1)$ ， $N_7(0,1,1)$ ， $N_8(1,1,1)$ 。根据李雅普诺夫间接法<sup>[32]</sup>对均衡点进行分析，如表 2 所示。

情况 1. 当  $R_t-C_t<R_s-C_s$ ， $R_e-C_e-I_s<R_d-C_d$ ，且  $R_p+A-S_{dp}-S_{sp}-C_p<R_q-S_{bp}$  时， $N_1(0,0,0)$  为系统的演化均衡点。演化三方的策略为(不合作，不投资，不支持)。

情况 2. 当  $R_t-C_t<R_s-C_s+S_{ep}$ ， $R_e-C_e-I_s+S_{ep}<R_d-C_d+S_{dp}$ ，且  $R_q-S_{bp}<R_p+A-S_{dp}-S_{sp}-C_p$  时， $N_2(0,0,1)$  为系统

表 2 均衡点稳定性分析

| 均衡点          | 雅可比矩阵特征值( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ )   |
|--------------|---|
| $N_1(0,0,0)$ | $R_t - C_t - R_s + C_s, -I_s - C_e - R_d + R_c + C_d, R_p + A + S_{bp} - C_p - R_q - S_{dp} - S_{sp}$   |
| $N_2(0,0,1)$ | $C_s - S_{sp} + R_t - C_t - R_s + S_{tp}, S_{ep} - S_{dp} - I_s - C_e - R_d + R_c + C_d, -R_p - A - S_{bp} + C_p + R_q + S_{dp} + S_{sp}$               |
| $N_3(0,1,0)$ | $R_t + C_s + R_t - C_t - R_s, I_s + C_e + R_d - R_c - C_d, R_p + A + S_{bp} - C_p - R_q - S_{ep} - S_{sp}$  |
| $N_4(1,0,0)$ | $-R_t + C_t + R_s - C_s, R_h - I_s - C_e - R_d + R_c + C_d, R_p + A + S_{bp} - C_p - R_q - S_{dp} - S_{tp}$   |
| $N_5(1,1,0)$ | $-R_t - C_s - R_t + C_t + R_s, -R_h + I_s + C_e + R_d - R_c - C_d, R_p + A + S_{bp} - C_p - R_q - S_{ep} - S_{tp}$                                      |
| $N_6(1,0,1)$ | $-C_s + S_{sp} - R_t + C_t + R_s - S_{tp}, R_h + S_{ep} - S_{dp} - I_s - C_e - R_d + R_c + C_d, -R_p - A - S_{bp} + C_p + R_q + S_{dp} + S_{sp}$        |
| $N_7(0,1,1)$ | $S_{tp} - S_{sp} + R_t + C_s + R_t - C_t - R_s, -S_{ep} + S_{dp} + I_s + C_e - R_d - R_c - C_d, -R_p - A - S_{bp} + C_p + R_q + S_{ep} + S_{sp}$        |
| $N_8(1,1,1)$ | $-S_{tp} + S_{sp} - R_t - C_s - R_t + C_t + R_s, -R_h - S_{ep} + S_{dp} + I_s + C_e + R_d - R_c - C_d, -R_p - A - S_{bp} + C_p + R_q + S_{ep} + S_{tp}$ |

的演化均衡点。演化三方的策略为(不合作,不投资,支持)。

情况 3. 当  $R_t - C_t + R_t < R_s - C_s$ ,  $R_d - C_d < R_c - C_e - I_s$ , 且  $R_p + A - C_p - S_{ep} - S_{sp} < R_q - S_{bp}$  时,  $N_3(0,1,0)$  为系统的演化均衡点。演化三方的策略为(不合作, 投资, 不支持)。

情况 4. 当  $R_s - C_s < R_t - C_t$ ,  $R_h + R_c - I_s - C_e < R_d - C_d$ , 且  $R_h - C_p + A - S_{dp} - S_{tp} < R_q - S_{bp}$  时,  $N_4(1,0,0)$  为系统的演化均衡点。演化三方的策略为(合作, 不投资, 不支持)。

情况 5. 当  $R_t - C_t + R_t > R_s - C_s$ ,  $R_c - C_e + R_h - I_s > R_d - C_d$ , 且  $R_p - C_p + A - S_{ep} - S_{tp} < R_q - S_{bp}$  时,  $N_5(1,1,0)$  为系统的演化均衡点。演化三方的策略为(合作, 投资, 不支持)。

情况 6. 当  $R_t - C_s + S_{sp} < R_t - C_t + S_{tp}$ ,  $R_c - C_e - I_s + S_{ep} + R_h < R_d - C_d + S_{dp}$ , 且  $R_q - S_{bp} < R_p - C_p - S_{ep} - S_{sp} + A$  时,  $N_6(1,0,1)$  为系统的演化均衡点。演化三方的策略为(合作, 不投资, 支持)。

情况 7. 当  $R_t - C_t + R_t + S_{tp} < R_s - C_s + S_{sp}$ ,  $R_d - C_d + S_{dp} < R_c - C_e - I_s + S_{ep}$ , 且  $R_q - S_{bp} < R_p - C_p - S_{ep} - S_{sp} + A$  时,  $N_7(0,1,1)$  为系统的演化均衡点。演化三方的策略为(不合作, 投资, 支持)。

情况 8. 当  $R_s - C_s + S_{sp} < R_t - C_t + R_t + S_{tp}$ ,  $R_d - C_d + S_{dp} < R_c - C_e - I_s + S_{ep} + R_h$ , 且  $R_q - S_{bp} < R_p - C_p + A - S_{ep} - S_{tp}$  时,  $N_8(1,1,1)$  为系统的演化均衡点。演化三方的策略为(合作, 投资, 支持)。

在知识生态系统中, 根据帕累托最优理论, 科研机构、企业和政府三方选择(合作, 投资, 支持)的博弈策略为实现量子信息技术攻关的最佳决策。

4.2.3 知识主体间演化仿真分析

由以上分析可知, 符合情况 8 的条件时, 知识生态系统达到帕累托最优状态<sup>[35]</sup>。为进一步验证知识生态系统在达到帕累托最优状态时的稳定性, 本文根据约束条件将参数设置为  $R_t=8, C_t=4, R_s=4, C_s=3.5, S_{tp}=5, S_{sp}=8, R_t=8, R_h=8, S_{ep}=8, S_{dp}=6, I_s=5, C_e=4.5, R_d=4.5, R_c=5, C_d=4, R_p=4.5, A=8, S_{bp}=7.5, C_p=4, R_q=2.5$ 。本文分别考虑科研机构、企

业、政府三方初始意愿为低、中、高三个程度的情况, 并设  $x, y, z$  的初始值分别为 0.1、0.5、0.8, 具体演化结果如图 8~图 10 所示。

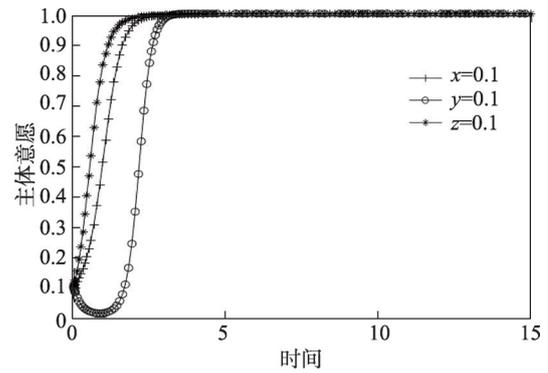


图 8 初始意愿为(0.1,0.1,0.1)时三方动态演化趋势

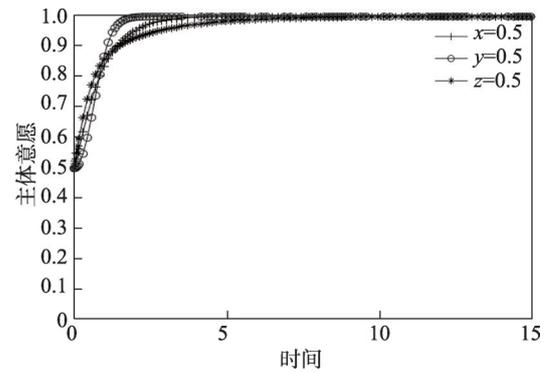


图 9 初始意愿为(0.5,0.5,0.5)时三方动态演化趋势

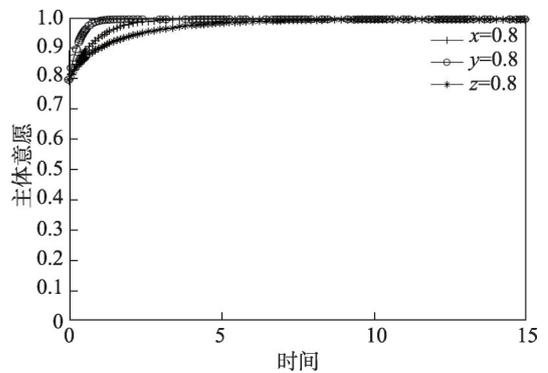


图 10 初始意愿为(0.8,0.8,0.8)时三方动态演化趋势

仿真结果验证了理论计算结果的正确性，当满足情况 8 的约束条件时，无论三方初始意愿如何变化，三方演化终点均为(1,1,1)，系统达到帕累托最优状态。演化终点虽然相同，但是演化过程略有不同。当三方初始意愿居中或者较高时，三方演化路径显著持续趋向于 1，中间无明显波动。但是当三方初始意愿较低时，政府的演化路径先趋于 0，后来才逐渐趋于 1。这说明当政府与科研机构合作意愿较低时，企业可能会先观望一段时间，当政府与科研机构意愿逐渐提高时，企业会参与创新。因此，在中观视角下，通过构建知识生态系统能够有效促进知识主体间的协同共生，从而促进关键核心技术的攻关。本文接下来将以宏观视域分析外部环境因素在知识生态系统中对知识主体的影响效果。

### 4.3 宏观视角下环境与知识主体的关联分析

宏观视角主要探析知识生态系统中外部环境对知识主体创新能力的影响效果。在实现量子信息技术攻关的过程中，除了知识主体间的协同共生，外部环境同样对技术的攻关产生显著影响。在本次实验中，外部因素主要包括政治、文化、国际等多种环境因素。在知识生态系统中，假设知识主体与外部环境对关键核心技术的创新、攻关起主要推动作用，而环境与知识主体间存在相互阻滞作用，同时知识主体与外部环境之间的演化均遵循 Logistic 规律<sup>[32]</sup>。从生态学角度来讲，知识生态系统中知识主体的创新能力主要受到知识主体间的协同水平以及外部环境影响，知识主体低协同水平以及不利的外部环境均会对知识创新水平产生阻滞作用。根据上述逻辑，知识生态系统中知识主体与外部环境的动态演化方程为

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = r_1 x_1 \left[ 1 - \frac{x_1}{N_1} - \alpha \frac{x_2}{N_2} \right], x_1(t), x_1(0) = x_{10} \\ \frac{dx_2}{dt} = r_2 x_2 \left[ 1 - \frac{x_2}{N_2} - \beta \frac{x_1}{N_1} \right], x_2(t), x_2(0) = x_{20} \end{cases}$$

其中， $r_1$ 、 $r_2$ 为知识主体与外部环境的发展状况与趋势； $x_1$ 、 $x_2$ 为两者目前的发展水平； $N_1$ 、 $N_2$ 为两者在知识生态系统中的发展极值； $1 - \frac{x_1}{N_1}$ 、 $1 - \frac{x_2}{N_2}$ 为各知识主体以及外部环境对于知识资源内耗而产生的阻滞作用的相关系数。设  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为知识主体与环境因素相互之间的共生系数，则得到知识主体与外部环境因素之间的协同共生演化方程：

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = r_1 x_1 \left[ 1 - \frac{x_1}{N_1} - \alpha \frac{x_2}{N_2} \right], x_1(t), x_1(0) = x_{10} \\ \frac{dx_2}{dt} = r_2 x_2 \left[ 1 - \frac{x_2}{N_2} - \beta \frac{x_1}{N_1} \right], x_2(t), x_2(0) = x_{20} \end{cases}$$

基于此，本文假设知识主体与外部环境因素之间的发展态势系数  $r_1$ 、 $r_2$  均为 1，两者的发展最大水平为 100；同时，还设置知识主体的共生系数  $\alpha$  为 0.5，外部环境因素的共生系数  $\beta$  为 2，得到的实验结果如图 11 所示。

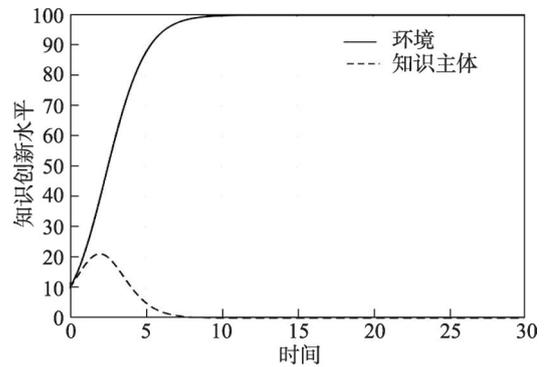


图 11 知识主体与外部环境竞争共生模式

在图 11 中，外部环境因素对知识资源过度占用，具体表现为政策偏移、科技环境较差、国际排挤等多种形式，导致知识主体间的创新能力极度下滑，难以实现关键核心技术的攻关。

之后设置知识主体共生系数  $\alpha$  为 3，外部环境共生系数  $\beta$  为 2，如图 12 所示。可以看出，在这种情况下，外部环境与知识主体间达到稳态平衡，外部环境加大了对知识主体的支持，包括政策的扶持、资金的注入，有效促进了知识主体的知识创新水平。同时，通过实验可以看出，在知识主体的发展过程中，外部环境的发展也得到有效提升，两者之间处于稳态共生，并最终实现量子信息技术的攻关突破。

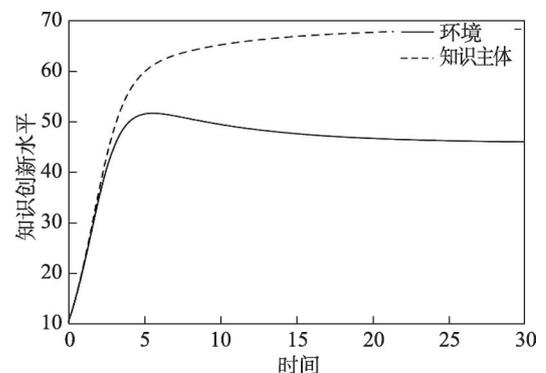


图 12 知识主体与外部环境协同共生模式

## 5 实践启示

本文对关键核心技术“卡脖子”问题进行了分析,从微观、中观、宏观三个层面构建面向关键核心技术的攻关模式,并以量子信息技术为例进行仿真研究,验证该攻关模式的适用性。本文通过仿真分析发现,可以从以下几个角度探求关键核心技术攻关的解决之道。

其一,解决关键核心技术是一个复杂的系统问题,技术是这个系统问题最底层的要素。关键核心技术攻关不能着眼于某一个技术,应该谋求某一个领域技术群的突破,寻找技术群中具有关联的技术,从技术的资金链、创新链、产业链入手,促进底层技术的融合,带领核心技术吸引边缘技术,结合关键技术形成技术群落,共享知识,实现价值创新。

其二,知识主体作为解决关键核心技术“卡脖子”问题中最具活力的要素,其之间的知识流动过程为根本解决这个问题提供内生动力。在对科研机构、企业、政府这三个主体的演化博弈中发现政府可以通过价格补贴、收入政策等宏观手段<sup>[36]</sup>调节各方资源配置,拉动内需,激发用户市场活力,及时根据外界环境变化改变资源配置,保持各方选择合作时的净利润大于成本。当外界环境动荡,市场失调时,政府可以通过加大补贴力度来维持生态系统稳定于最优状态。除此之外,科研机构与企业应在金融机构、中介机构的帮助下建立合理的利益分配机制,对协同创新收益与成本进行动态分配,尽可能满足各方需求,形成良性竞争<sup>[37]</sup>,促进双方之间的知识流动。科研机构与企业的博弈策略一定程度上影响着政府的选择,如果双方恶性竞争,将会对演化均衡点产生影响,进而影响知识生态系统的演化方向。科研机构、企业、政府三个主体间的相互配合,可以有效推动知识在生态系统各主体之间的有序流动,完成知识演化,加速关键核心技术攻关进程。

其三,关键核心技术攻关是一个动态的长期过程,不能把它放到固定的情境中去讨论,不能忽略环境要素变化给技术攻关带来的影响,良好的科研环境、政策的倾斜、开放的社会环境有助于提升知识主体的创新能力,可以通过给予科研团队在科研安排、团队管理、经费使用等方面更大的自主权<sup>[38]</sup>,建立完善的激励机制,创造良好的科研环境,激发知识主体的主观能动性。另外,在漫长的攻关过程中,会不可避免地出现新的亟待攻关的技术,要允许处于不同创新阶段的技术、不同创新模

式共存,形成开放包容的创新环境,全面激发创新效能。

## 参考文献

- [1] 张嘉毅,原长弘.产学研融合的组织模式特征——基于不同主体主导的典型案例分析[J].中国科技论坛,2022(5):71-80,98.
- [2] 陈会航,张虎翼,邓文星.面向产业链升级的创新路径方法及平台建设探究[J].科技和产业,2022,22(4):161-166.
- [3] 张其仔,许明.中国参与全球价值链与创新链、产业链的协同升级[J].改革,2020(6):58-70.
- [4] 林学军,梁媛,韩佳旭,等.基于全球创新链与全球价值链双重螺旋模型的产业升级研究——以华为公司为例[J].国际商务研究,2018,39(5):39-48.
- [5] 饶子和.筑牢“科学地基”,突破“卡脖子”瓶颈[J].中国政协,2019(12):12.
- [6] 许端阳,徐峰.产业共性技术的界定及选择方法研究——基于科技计划管理的视角[J].中国软科学,2010(4):73-79.
- [7] Moore J F. Predators and prey: a new ecology of competition[J]. Harvard Business Review, 1993, 71(3): 75-86.
- [8] 邹华,刘旭,何得雨.创新生态系统中产学研互动价值共创博弈研究[J].沈阳工业大学学报(社会科学版),2023,16(1):57-64.
- [9] 谭劲松,宋娟,王可欣,等.创新生态系统视角下核心企业突破关键核心技术“卡脖子”——以中国高速铁路牵引系统为例[J/OL].南开管理评论,(2022-03-16)[2022-09-18].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1288.f.20220311.1333.002.html>.
- [10] Pór G. Knowledge ecology and communities of practice: twin enablers of organizational intelligence[EB/OL].(1998-11-01)[2021-11-06].[https://www.researchgate.net/publication/278017244\\_Knowledge\\_Ecology\\_Communities\\_of\\_Practice\\_Twin\\_Enablers\\_of\\_Organizational\\_Intelligence](https://www.researchgate.net/publication/278017244_Knowledge_Ecology_Communities_of_Practice_Twin_Enablers_of_Organizational_Intelligence).
- [11] Pór G. Creating a meshwork of communities of practice for unleashing the emancipatory potential of AI-enhanced collective intelligence[C]// Proceedings of the 9th International Conference on Innovation and Knowledge Management in Asia Pacific, Hangzhou, China, 2018.
- [12] Bray D. Knowledge ecosystems: a theoretical lens for organizations confronting hyperturbulent environments[C]// Proceedings of IFIP International Working Conference on Organizational Dynamics of Technology-Based Innovation. Boston: Springer, 2007: 457-462.
- [13] 陈灯能.知识生态理论的建构与实证[EB/OL]. [2021-10-25].<https://epaper.mis.nsysu.edu.tw/papers/20050316/2005031602.htm>.
- [14] 孙振领,李后卿.关于知识生态系统的理论研究[J].图书与情报,2008(5):22-27,58.
- [15] 亨利·埃茨科威兹.三螺旋:大学·产业·政府三元一体的创新战略[M].周春彦,译.北京:东方出版社,2005.
- [16] Etzkowitz H, Leydesdorff L. The triple helix—university-indus-

- try-government relations: a laboratory for knowledge based economic development[J]. *EASST Review*, 1995, 14(1): 14-19.
- [17] Leydesdorff L, Etzkowitz H. The triple helix as a model for innovation studies[J]. *Science and Public Policy*, 1998, 25(3): 195-203.
- [18] 孙思捷. 我国三螺旋创新理论研究综述[J]. *科技经济市场*, 2020(11): 143-146, 150.
- [19] 王建华. 论绿色技术创新中的官产学合作——基于三重螺旋模型的分析[J]. *科学·经济·社会*, 2010, 28(4): 41-44.
- [20] 刁叔钧. 论基于共生理论的产学研合作教育联盟[J]. *高教探索*, 2012(2): 144-146.
- [21] 王向华. 基于三螺旋理论的区域智力资本协同创新机制研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [22] 王璐瑶, 曲冠楠, Juan Rogers. 面向“卡脖子”问题的知识创新生态系统分析: 核心挑战、理论构建与现实路径[J]. *科研管理*, 2022, 43(4): 94-102.
- [23] Carayannis E G, Campbell D F J. ‘Mode 3’ and ‘Quadruple Helix’: toward a 21st century fractal innovation ecosystem[J]. *International Journal of Technology Management*, 2009, 46(3-4): 201-234.
- [24] 吴玉浩, 姜红, 陈晨. 智库联盟知识生态系统的演化与运行机理研究——以阿里研究院为例[J]. *情报理论与实践*, 2022, 45(1): 54-62.
- [25] 徐谦. 知识生态系统的共享机制研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2006.
- [26] 储节旺, 李佳轩, 唐亮亮. 元宇宙视域下的知识生态系统探析——要素、机理与展望[J/OL]. *情报科学*, (2022-12-16) [2023-02-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1264.G2.20221215.2327.007.html>.
- [27] 张杰. 中国关键核心技术创新的机制体制障碍与改革突破方向[J]. *南通大学学报(社会科学版)*, 2020, 36(4): 108-116.
- [28] Chen D N, Liang T P. Knowledge diversity and firm performance: an ecological view[J]. *Journal of Knowledge Management*, 2016, 20(4): 671-686.
- [29] 姜红, 孙舒榆, 吴玉浩. 技术标准联盟知识生态系统演化机理分析——闪联产业联盟案例[J]. *科技进步与对策*, 2019, 36(21): 1-9.
- [30] Ji K, Sheng R. Hype cycle for ICT in China, 2019[R/OL]. (2019-12-09) [2022-01-23]. <https://www.i-search.com.cn/en/Hype-Cycle-for-ICT-in-China-2019.pdf>.
- [31] “十四五”国家信息化规划[EB/OL]. (2021-12-27) [2022-01-23]. [http://www.cac.gov.cn/2021-12/27/c\\_1642205314518676.htm](http://www.cac.gov.cn/2021-12/27/c_1642205314518676.htm).
- [32] 储节旺, 李佳轩. 基于知识生态系统视角下的产学研协同共生演化机理研究[J/OL]. *情报科学*, (2022-03-10) [2022-09-18]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1264.G2.20220309.1214.004.html>.
- [33] 储节旺, 李佳轩. 知识生态系统中知识演化及智慧创生研究——以知乎社区为例[J]. *情报理论与实践*, 2022, 45(9): 51-58.
- [34] Friedman D. Evolutionary games in economics[J]. *Econometrica*, 1991, 59(3): 637-666.
- [35] 夏松洁, 黄明儒. 公共图像信息公民查阅权的生成逻辑与实现路径——基于帕累托最优理论视角[J]. *广东社会科学*, 2020(6): 234-242.
- [36] 姜彩楼, 杨望. 以高质量市场驱动新兴产业关键核心技术突破[J]. *江苏海洋大学学报(人文社会科学版)*, 2021, 19(5): 101-108.
- [37] 贾纯洁, 张海峰, 刘钰. 基于演化博弈的航空专业产学研协同创新策略[J]. *安阳工学院学报*, 2022, 21(2): 1-5, 42.
- [38] 徐军海. 加快建设“卡脖子”技术攻关人才队伍[J]. *中国人才*, 2022(4): 21-23.

(责任编辑 魏瑞斌)