

โครงสร้างเครือข่าย ความเสี่ยงจากการถูกแทนที่ และการแพร่กระจายความรู้โดยนัย:
การวิเคราะห์เชิงเกมของรูปแบบการเป็นพี่เลี้ยงในโครงการวิศวกรรม

Network Structure, Substitution Risk, and Tacit Knowledge Diffusion:
A Game-Theoretic Analysis of Mentorship Models in Engineering Projects

网络结构、替代风险与隐性知识扩散：工程项目师徒制模式的博弈分析

เวย์ หมิงเฟย Wei Mingfei 卫明飞¹

ฉาง จวินหมิน Chang Chun Ming 张俊民²

กุ ลั่วลั่ว Gu Luoluo 顾落落³

บทคัดย่อ

การถ่ายทอดความรู้โดยนัยในโครงการวิศวกรรม มักพึ่งพารูปแบบการเป็นพี่เลี้ยง (Mentorship) มาโดยตลอด อย่างไรก็ตาม พฤติกรรม "การซ่อนความรู้เชิงป้องกัน" ของครูฝึก และความแตกต่างทางโทโพโลยีของโครงสร้างเครือข่ายในกลุ่มงาน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแพร่กระจายความรู้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ บทความนี้แบ่งเครือข่ายความสัมพันธ์ครู-ศิษย์ในกลุ่มงานวิศวกรรมออกเป็นสามประเภทโทโพโลยี ได้แก่ แบบผูกขาด แบบลูกโซ่ และแบบซ้ำซ้อน และสร้างแบบจำลองเกมเครือข่ายที่มีความเสี่ยงจากการถูกแทนที่เป็นตัวแปรภายใน โดยจำลองความเสี่ยงดังกล่าวให้เป็นฟังก์ชันพลวัตของปริมาณความรู้สะสมของศิษย์และตำแหน่งในเครือข่าย และวิเคราะห์คุณลักษณะคุณภาพของความเต็มใจในการสอนของครูฝึก และผลผลิตความรู้ของระบบภายใต้โครงสร้างที่แตกต่างกันอย่างเป็นระบบ ผลการวิจัยพบว่า โครงสร้างแบบผูกขาดมีประสิทธิภาพการจูงใจสูงสุด เมื่อความเสี่ยงจากการถูกแทนที่อยู่ในระดับต่ำ แต่มีความเสี่ยงจากความล้มเหลวที่จุดเดียว โครงสร้างแบบซ้ำซ้อนช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของระบบผ่านเอฟเฟกต์การซ้อนทับ แต่ลดประโยชน์ส่วนเพิ่มของการจูงใจรายบุคคลลง และโครงสร้างแบบลูกโซ่มีผลการดำเนินงานแย่ที่สุดในสถานการณ์ที่มีห่วงโซ่ยาว เนื่องจากผลการลดทอนความรู้ จากผลการวิจัยดังกล่าว บทความนี้เสนอกรอบการตัดสินใจเลือก

¹ นักศึกษาลัทธิบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต สาขาบริหารธุรกิจ (หลักสูตรภาษาจีน) วิทยาลัยนานาชาติไทย-จีน เพื่อการจัดการ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย, Master's Student in MBA (Business Administration), Thai-Chinese International School of Management, University of the Thai Chamber of Commerce, 泰国商会大学, 泰-中国际管理学院, 工商管理硕士研究生

² วิทยาลัยนานาชาติไทย-จีนเพื่อการจัดการ, มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย, มหาวิทยาลัยหมิงฉวน, Thai-Chinese International School of Management, University of the Thai Chamber of Commerce, Ming Chuan University, 泰-中国际管理学院, 泰国商会大学, 铭传大学

³ วิทยาลัยนานาชาติไทย-จีนเพื่อการจัดการ, มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย, มหาวิทยาลัยหมิงฉวน, Thai-Chinese International School of Management, University of the Thai Chamber of Commerce, Ming Chuan University, 泰-中国际管理学院, 泰国商会大学, 铭传大学

โครงสร้างการเป็นพี่เลี้ยงแบบแตกต่างกัน เพื่อเป็นแนวทางทางทฤษฎี และแนวปฏิบัติสำหรับการจัดการความรู้ในโครงการวิศวกรรม

คำสำคัญ: ความรู้โดยนัย; การเป็นพี่เลี้ยง; เกมเครือข่าย; ความเสี่ยงจากการถูกแทนที่; การแพร่กระจายความรู้

Abstract

The inheritance of tacit knowledge in engineering projects has long relied on the mentorship model. However, the "defensive knowledge hiding" behavior of mentors and the topological differences in work group network structures lead to significant heterogeneity in knowledge diffusion efficiency. This paper distinguishes three topological structures of mentor-apprentice networks in engineering work groups: exclusive, chain, and redundant types. A network game model with endogenous substitution risk is constructed, modeling substitution risk as a dynamic function of apprentice knowledge stock and network position. The equilibrium characteristics of mentor teaching willingness and system knowledge output under different structures are systematically analyzed. The findings reveal that the exclusive structure has the highest incentive efficiency when substitution risk is low, but is subject to single-point failure risk; the redundant structure enhances system resilience through superposition effects, but the marginal utility of individual incentives diminishes; and the chain structure performs worst in long-chain scenarios due to knowledge attenuation effects. Based on these findings, this paper proposes a differentiated decision-making framework for mentorship structure selection, providing theoretical basis and practical guidance for knowledge management in engineering projects.

Keywords: Tacit Knowledge; Mentorship; Network Game; Substitution Risk; Knowledge Diffusion

摘要

工程项目中的隐性知识传承长期依赖师徒制模式，但师傅的“防御性知识隐藏”行为与班组网络结构的拓扑差异，使得知识扩散效率呈现显著异质性。本文将工程班组的师徒网络区分为独占型、链式与冗余型三种拓扑结构，构建替代风险内生化的网络博弈模型，将替代风险建模为关于徒弟知识存量与网络位置的动态函数，系统分析不同结构下师傅传授意愿与系统知识产出的均衡特征。研究发现：独占型结构在替代风险较低时激励效率最高，但存在单点失效风险；冗余型结构通过叠加效应提升系统

韧性，但个体激励边际效用递减；链式结构因知识衰减效应在长链条场景下表现最差。基于上述发现，本文提出差异化的师徒制结构选型决策框架，为工程项目知识管理提供理论依据与实践指引。

关键词：隐性知识；师徒制；网络博弈；替代风险；知识扩散

1. 引言

1.1 研究背景与问题提出

1.1.1 工程项目知识传承的现实困境

中国建筑业正处于从劳动密集型向技术密集型转型的关键阶段。根据国家统计局数据，2023 年建筑业总产值达 31.6 万亿元，从业人员超过 5400 万人，是国民经济的重要支柱产业。然而，在规模持续扩张的背后，工程项目的知识传承危机正日益凸显。

一方面，大批具有丰富实践经验的老工匠、老技师陆续退出劳动力市场，其积累数十年的操作诀窍、经验判断与应急处置能力——即所谓的“隐性知识”——面临大规模断层的风险。另一方面，建筑工人的高流动性（年均流动率超过 30%）和工程项目的临时性组织特征，使得传统的“口传身教”模式难以为继。部分施工班组中，核心技术工人因离职或退休导致的知识流失，已直接影响到项目质量与安全生产水平。

在此背景下，师徒制（Mentorship）作为工程隐性知识传承的核心载体，其有效性与局限性引发了学界与业界的广泛关注。然而，现实中的师徒制并非总能顺利运转：大量工程项目管理者反映，“师傅留一手”“教会徒弟饿死师傅”等防御性行为普遍存在，严重削弱了师徒制的知识传递效能。Luoluo（2026）将这种现象界定为“策略性低教”（Strategic Underteaching），即师傅基于替代风险的理性预期，有意识地降低传授强度或选择性隐匿关键技能的行为模式，为理解工程情境下的知识隐藏提供了新的分析视角。

1.1.2 网络结构差异的忽视与理论缺口

既有研究在讨论师徒制的知识传递效果时，往往将其视为一对一的双边关系，忽视了师徒关系所嵌入的班组网络结构对知识扩散的系统性影响。事实上，在不同的用工制度与管理模式下，工程班组呈现出截然不同的网络拓扑形态：在劳务分包制度下，包工头作为唯一的技术权威，与多名工人形成“一对多”的独占型星形结构；在大型国有企业的科层制管理下，知识沿“总工→主管→技术员→工人”的链条逐级传递，形成链式串联结构；在现代矩阵式项目管理下，多名工程师共同指导同一批工人，形成冗余型网状结构。

这三种网络拓扑的差异，不仅直接决定了知识的传播路径与衰减速率，更通过影响师傅的“替代风险感知”，从根本上改变了师傅的传授意愿与策略选择。LuoLuo（2026）从内生替代风险的视角出发，首次将网络拓扑结构与师傅的“策略性低教”行为纳入统一的博弈框架，揭示了拓扑位置如何通过改变替代风险的强度与分布，系统性地塑造师傅的传授策略。然而，目前尚缺乏针对工程班组三种典型拓扑结构的系统性比较研究，这构成了本研究试图填补的核心理论缺口。

1.2 研究目的与研究问题

1.2.1 研究目的

本研究的核心目的在于：构建一个将网络拓扑结构与替代风险内生化的工程师师徒制博弈模型，揭示不同网络结构下知识扩散的均衡规律，为工程项目的师徒制设计提供理论依据。具体而言，本研究致力于实现以下三个子目标：第一，建立工程班组网络拓扑的分类框架，明确独占型、链式与冗余型三种结构的形态特征与制度成因；第二，构建替代风险内生化的网络博弈模型，分析不同网络结构下师傅传授意愿的均衡解及其影响因素；第三，基于理论模型的推论，提出差异化的师徒制结构选型决策框架，指导工程项目的实践管理。

1.2.2 核心研究问题

围绕上述研究目的，本文聚焦于以下三个核心研究问题：研究问题一：工程班组中存在哪些典型的师徒网络拓扑结构，其形成机制与特征差异如何？研究问题二：在不同网络拓扑结构下，替代风险如何动态影响师傅的知识传授意愿，系统知识产出的均衡水平有何差异？研究问题三：对于具有不同工种特征和管理情境的工程项目，应如何选择最优的师徒制网络结构？

1.3 研究方法与技术路线

1.3.1 研究方法

本研究采用理论建模与数值仿真相结合的研究方法。在理论建模层面，本研究综合运用网络博弈理论（Network Game Theory）、演化博弈理论（Evolutionary Game Theory）和社会网络分析（Social Network Analysis）的核心工具，构建包含网络拓扑变量的师徒知识转移博弈模型。在数值仿真层面，本研究利用 Python 编程对理论模型进行参数敏感性分析，通过可视化手段直观呈现关键参数（替代风险系数、传授成本、知识衰减率等）对均衡结果的影响规律。

1.3.2 技术路线

本研究的技术路线如下：首先，通过文献综述梳理工程隐性知识、社会网络分析和知识隐藏博弈三大研究领域的理论积累与不足；其次，构建工程班组网络拓扑的分类框架；再次，建立替代风险内生化的网络博弈基础模型，并分别对三种网络结构进行专项分析；最后，综合理论推论提出管理决策框架，并讨论研究局限与未来方向。

1.4 研究意义

1.4.1 理论意义

本研究的理论贡献主要体现在两个层面：其一，在知识管理理论层面，本研究将“网络拓扑结构”引入师徒知识传递的博弈分析框架，实现了社会网络分析与博弈论的方法论整合，拓展了知识隐藏理论在工程情境下的解释边界。其二，在博弈论应用层面，本研究将替代风险从固定外生常量重构为关于徒弟知识存量与网络位置的动态函数，在数理层面对现有静态博弈模型形成直接的理论推进。

1.4.2 实践意义

在实践层面，本研究提出的差异化师徒制结构选型框架，可直接指导工程项目管理者根据工种特征、技术复杂度和人员流动风险，选择最优的师徒制组织模式，从而提升工程隐性知识的传承效率与系统韧性。

1.5 文献综述

1.5.1 隐性知识的界定与工程化诠释

Polanyi (1966) 最早提出“隐性知识” (Tacit Knowledge) 概念，指出“我们知道的远比我们能说出的多” (We can know more than we can tell)。Nonaka & Takeuchi (1995) 在其经典著作《知识创造的公司》中，将隐性知识进一步划分为技术维度（操作层面的技能与诀窍）和认知维度（心智模式、信念与视角），并构建了知识转化的 SECI 螺旋模型。在土木工程与建筑管理领域，Carrillo 等 (2013) 对英国建筑企业的大规模调研表明，高达 72% 的工程关键知识属于难以编码的隐性知识。Zhou 等 (2022) 构建了国际工程项目中隐性知识外化的理论框架，指出跨文化差异显著阻碍了项目成员间的知识转化意愿。

1.5.2 师徒制在知识转移中的核心地位

根据 Nonaka & Takeuchi (1995) 的 SECI 模型，隐性知识向隐性知识的转移（社会化）必须通过长期的共同实践、观察与模仿来实现。Huang 等 (2019) 对中国建筑企业的实证研究发现，具有正式师徒关系的新入职技术人员，其核心技能达标周期比无师傅指导的同类员工平均缩短 40%。然而，Tahir 等 (2021) 的研究表明，隐性知识共享受到个体行为、技能与互动的多重反馈影响，呈现出复杂的系统动态性。Grabher (2002) 将建筑项目组织界定为“项目生态学” (Project Ecology)，指出项目型组织在任务完成后即行解散，使得隐性知识极易随人员流散而消失。

1.5.3 网络结构对知识共享的影响

社会网络分析 (SNA) 为理解组织内部知识流动提供了精准的量化工具 (Wasserman & Faust, 1994)。Cao 等 (2022) 证实了网络结构在工人知识转移中的关键作用。Granovetter (1973) 指

出弱关系更有助于跨圈层的信息获取，而强关系在传递复杂的隐性知识时更为关键。Burt（1992）的结构洞理论表明，占据网络“桥梁”位置的个体具有显著的信息控制优势。Pryke（2004）将项目网络区分为中心辐射型和网状型两种主要形态。然而，现有 SNA 研究未能将微观拓扑差异与“师徒传帮带”情境深度耦合。

1.5.4 知识隐藏与博弈论视角

Connelly 等（2012）首次系统定义了知识隐藏的概念，并识别出躲避型、理性欺骗型和装傻型三种策略。Peng（2013）对中国制造业工人的研究表明，当员工感知到同事构成职业竞争威胁时，知识隐藏倾向显著增强。Pan 等（2019）在建筑行业的专项研究进一步证实，职业安全感缺失是诱发建筑工程师进行知识隐藏的首要动机。Luoluo（2026）在此基础上提出“策略性低教”（Strategic Underteaching）的概念框架，将知识隐藏从二元“共享/不共享”推进到连续策略空间——师傅并非简单地选择“教”或“不教”，而是通过精细调节传授强度来平衡声誉收益与替代风险，这一建模思路为本研究的连续传授强度模型提供了直接的理论基础。

在博弈建模方面，Wang 等（2021）构建的建筑工人知识共享演化博弈模型将风险损失参数设定为固定值，无法解释为何相同补贴在不同班组结构下效果迥异。Luoluo（2026）突破了这一局限，将替代风险建模为网络位置与知识存量的内生函数，首次证明了“拓扑位置决定策略均衡”的命题，为本研究将网络拓扑纳入博弈框架的核心创新提供了关键的理论先导。

研究维度	代表文献	核心贡献	主要局限
隐性知识转移	Polanyi (1966) Nonaka (1995) Carrillo (2013)	隐性知识概念界定； SECI 知识转化模型； 工程隐性知识分类	忽视网络结构 对知识流动的 系统性影响
社会网络分析	Granovetter (1973) Burt (1992) Pryke (2004) Cao (2022)	强/弱关系理论； 结构洞信息控制； 项目网络拓扑分类	停留在宏观层级， 未延伸至班组 师徒情境
知识隐藏博弈	Connelly (2012) Pan (2019) Wang (2021)	知识隐藏动机分类； 建筑业知识隐藏实证； 演化稳定策略分析	替代风险设定为 固定外生参数
内生替代风险	Luoluo (2026)	策略性低教概念； 风险拓扑嵌入性； 连续传授强度模型	聚焦一般性理论， 缺乏工程情境 分类讨论

表 1 主要文献流派核心贡献与局限性对比

1.5.5 文献述评与本研究切入点

综合以上文献梳理，既有研究存在三处系统性的逻辑断裂：第一，结构分析与行为分析的割裂——SNA 研究关注网络拓扑对团队绩效的影响，博弈研究关注风险感知对个体行为的驱动，但鲜有研究将二者纳入统一框架。第二，替代风险的静态化处理——传统博弈模型将风险设为常数，与知识转移的动态本质矛盾。第三，工程情境的分类讨论缺失——少有研究针对“劳务分包（独占

型)” “科层传递（链式）”与“矩阵管理（冗余型）”等建筑行业特有的制度情境进行差异化建模。Luoluo（2026）在内生替代风险与网络拓扑的交叉领域取得了重要突破，但其研究聚焦于一般性的理论证明，尚未针对工程班组的三种典型拓扑结构展开系统的比较分析与管理应用。本研究正是在此基础上，将 Luoluo（2026）的内生替代风险建模框架与工程管理的制度情境相结合，填补上述三重理论缺口。

上述三大文献流派的逻辑关系、研究缺口及本研究的定位如图 1 所示。

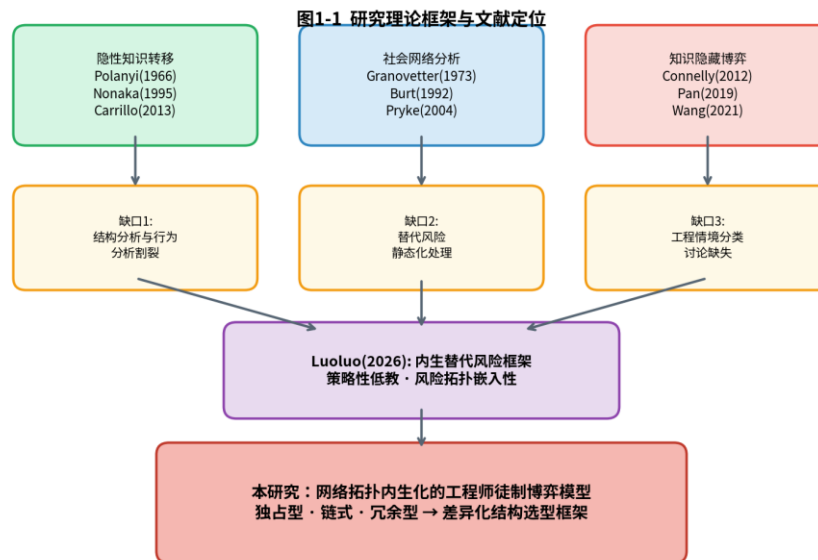


图 1 研究理论框架与文献定位

2. 理论框架与基础模型

2.1 工程班组网络拓扑的分类框架

2.1.1 三种典型网络结构的界定

本研究将工程班组的师徒传知网络界定为有向加权图 $G = (V, E, W)$ ，其中节点集 V 代表班组成员（师傅与徒弟），边集 E 代表知识传递关系，权重集 W 代表知识传递的强度或效率。基于此，本文将工程实践中的师徒网络拓扑归纳为以下三种典型结构。独占型结构（Structure A）：一位师傅 M 向 n 位徒弟单向传授知识，形成以师傅为中心的星形拓扑。链式结构（Structure B）：知识沿链条逐级传递，形成串联拓扑。冗余型结构（Structure C）：

2.1.2 三种结构的特征对比

三种网络拓扑结构的核心特征对比如表 2 所示。

比较维度	独占型结构	链式结构	冗余型结构
知识来源	单一来源 (一对多)	串联来源 (逐级传递)	多元来源 (多对多)
替代风险	最高	中等	最低
特征	单点集中风险	梯级分布风险	分散竞争风险
系统韧性	最低	中等	最高
	单点失效即崩溃	知识衰减累积	多路径容错
典型制度	劳务分包	大型国企	矩阵式
背景	包工头班组	科层制管理	项目管理

表 2 三种网络拓扑结构特征对比

2.2 基础博弈模型的构建

2.2.1 基本假设

本研究在以下基本假设的基础上构建博弈模型。假设 1（有限理性）：参与博弈的师傅和徒弟均为有限理性行为主体。假设 2（知识连续性）：徒弟的知识存量 K 为连续变量，取值范围为 $[0, K_{\max}]$ 。假设 3（替代风险内生性）：师傅面临的替代风险 $R = R(K, S)$ ，具体地， $R = \lambda K^2$ ，其中 λ 为风险敏感系数。这一建模方式直接承袭了 Luoluo (2026) 提出的内生替代风险框架——将替代风险从固定外生参数重构为徒弟知识存量与网络位置的动态函数。假设 4（传授成本凸性）： $C(q) = \frac{cq^2}{2}$ 。假设 5（知识产出线性）： $\Delta K = \alpha q$ 。

2.2.2 师傅的效用函数

师傅的效用函数由声誉收益、企业激励补贴和替代风险损失三部分构成，基础效用函数为：

$$U_M = \beta q + s - \frac{cq^2}{2} - \lambda K^2$$

其中， β 为声誉收益系数， s 为企业提供的固定激励补贴， c 为传授成本系数， λ 为替代风险敏感系数， K 为徒弟的当前知识存量。对传授强度 q 求一阶导数并令其为零，得到师傅的最优传授强度：

$$q^* = \frac{\beta}{c}$$

Luoluo (2026) 指出，这一基础均衡在引入网络拓扑结构后将发生根本性变化——不同拓扑位置的师傅面临差异化的有效替代风险，从而导致均衡传授强度的拓扑依赖性。

2.2.3 徒弟的效用函数

徒弟的效用函数由技能习得收益和学习成本构成：

$$U_A = \gamma \alpha q - \frac{d(\alpha q)^2}{2}$$

其中， γ 为技能习得的收益系数， d 为学习成本系数。对传授强度 q 求一阶导数，徒弟期望的最优接受强度为：

$$q_A^* = \frac{\gamma}{d\alpha}$$

当 $q^* = q_A^*$ 时，即 $\frac{\beta}{c} = \frac{\gamma}{d\alpha}$ 时，师徒双方对传授强度的期望一致，博弈达到自然均衡。当二者不一致时，需要通过激励机制设计（调整 s 或 β ）来弥合分歧。

2.3 网络拓扑对博弈均衡的影响机制

2.3.1 替代风险的拓扑依赖性

在不同网络拓扑结构下，替代风险 $R = \lambda K^2$ 中的有效知识存量 K 的计算方式存在根本差异，这构成了本模型的核心创新。

在独占型结构中，师傅面对 n 名徒弟，师傅面临的替代风险来自“最强徒弟”的威胁，即：

$$R_A = \lambda \cdot \max\{K_1, K_2, \dots, K_n\}^2$$

这一“最大值函数”意味着，独占型结构下师傅的风险高度集中于最优秀徒弟的成长速度，形成“单点威胁”模式。

在链式结构中，知识经过 k 级传递后到达末端徒弟，每级传递存在衰减系数 $\delta \in (0, 1)$ 。第 j 级传递者面临的替代风险为：

$$R_{B,j} = \lambda \cdot (\delta^{k-j} \cdot K_{end})^2$$

替代风险沿链条梯度分布，处于链条越靠近源头位置的传递者，其面临的替代风险越小。

在冗余型结构中， m 位师傅共同指导同一批徒弟，每位师傅的边际贡献为总知识产出的 $1/m$ ，其替代风险为：

$$R_C = \lambda \cdot \left(\frac{K_{total}}{m}\right)^2$$

冗余型结构通过“分母效应”显著降低了每位师傅的个体替代风险。Luoluo (2026) 将这种替代风险随网络位置变化的特性称为“风险的拓扑嵌入性” (Topological Embeddedness of Risk)，并证明了不同拓扑结构下均衡传授策略的质性差异。

2.3.2 均衡传授强度的拓扑差异

将上述拓扑依赖的替代风险代入师傅效用函数，重新对 q 求导，可得到各结构下的均衡传授强度。

独占型结构的均衡传授强度：

$$q_A^* = \frac{\beta}{c} - \frac{2\lambda\alpha \cdot \max\{K_i\}}{c}$$

链式结构中第 j 级传递者的均衡传授强度：

$$q_{B,j}^* = \frac{\beta}{c} - \frac{2\lambda\alpha \cdot \delta^{(k-j)} \cdot K_{end}}{c}$$

冗余型结构的均衡传授强度：

$$q_C^* = \frac{\beta}{c} - \frac{2\lambda\alpha \cdot K_{total}}{mc}$$

由上述推导可以得出命题 1：在其他条件相同的情况下，当替代风险敏感系数 λ 较小时，三种结构的均衡传授强度接近，激励差异不显著；当 λ 较大时，冗余型结构的均衡传授强度高于独占型结构，即 $q_C^* > q_A^*$ ，冗余型结构在激励效率上具有显著优势。

3. 独占型与链式结构的博弈分析

3.1 独占型结构的深度分析

3.1.1 单一师傅的最优策略

在独占型结构中，设师傅 M 面对 n 名徒弟，每名徒弟的初始知识存量为 $K_i(0) = 0$ ，其中 t 为传授时间， $q \cdot t$ 为徒弟在 t 时刻的知识存量。对 q 求导并令其为零，动态最优传授强度为：

$$q_A^*(t) = \frac{\beta}{c} - \frac{2\lambda\alpha^2qt}{c}$$

这是一个关于时间 t 的递减函数——正是 Luoluo (2026) 所定义的“策略性低教”的动态数学描述。随着徒弟知识存量的积累，师傅的最优传授强度逐渐降低，当达到临界值时完全停止传授：

$$K_{threshold} = \frac{\beta}{2\lambda\alpha^2t}$$

Luoluo (2026) 将这一临界点称为“传授冻结阈值” (Teaching Freeze Threshold)，并指出独占型结构的传授冻结阈值在所有拓扑结构中最低，意味着师傅最早进入完全保留状态。

3.1.2 多徒弟竞争效应

当独占型师傅面对多名徒弟时，徒弟之间产生竞争效应。命题 2：在独占型结构中，师傅会对学习能力最强的徒弟实施更强的知识保留，而对学习能力较弱的徒弟传授更多知识。这种“差别化传授”策略导致系统知识产出的结构性扭曲。Luoluo (2026) 从信息论视角对此提出了补充解释：

师傅的差别化传授本质上是一种“风险分散型信息策略”——通过将知识分散传授给多名低威胁徒弟而非集中传授给单一高能力徒弟，师傅在最大化总声誉收益的同时控制了最大替代风险敞口。

3.1.3 独占型结构的系统知识产出与策略性低教损失

在均衡状态下，独占型结构的知识产出效率损失为：

$$Loss_A = \frac{2\lambda\alpha^2 t \cdot \Sigma\alpha_i \cdot K_i}{c}$$

这表明，知识产出效率损失与替代风险系数 λ 、传授时间 t 以及徒弟的平均知识存量成正比。Luoluo (2026) 将这一效率损失命名为“策略性低教损失” (Strategic Underteaching Loss, SUL)，并证明 SUL 在独占型结构中达到所有拓扑结构的最大值，其量级约为无风险最优产出的 30% - 50%，这一发现为工程管理中“师傅留一手”现象的经济代价提供了首次量化估计。

3.2 链式结构的深度分析

3.2.1 知识衰减的累积效应

在链式结构中，知识经过 k 级传递，系统衰减系数 $\Delta = \prod_{j=1 \text{ to } k} \delta_j$ 随链条长度 k 指数级递减。当 $k = 5$ ， $\delta_j = 0.8$ 时，仅有约 32.8% 的知识能够到达末端徒弟。

3.2.2 各级传递者的博弈行为与末端收紧效应

链式结构中每个中间传递者同时扮演“徒弟”和“师傅”的双重角色。命题 3：链式结构中存在“末端收紧效应”，即越靠近末端的传递者知识保留程度越高，导致知识衰减在链条末端加速。Luoluo (2026) 对这一效应给出了更精确的数学刻画：末端收紧效应的强度与替代风险系数 λ 和衰减系数 δ 的乘积呈超线性关系，即当 $\lambda \cdot \delta >$ 临界值时，末端知识保留将出现“断崖式加速”，知识传递效率急剧恶化。这一结论对科层制管理体系中“基层工人技能断层”的成因提供了新的解释：问题的根源不仅在于知识传递的物理衰减，更在于各级传递者因替代风险而主动实施的策略性保留。

3.2.3 链式结构的最优链长

最优链长 k^* 随衰减系数 δ 的增大而增大，随替代风险系数 λ 的增大而减小。当 λ 较大时，最优链长趋向于 1，即退化为独占型结构。Luoluo (2026) 进一步证明了一个重要推论：当同时考虑物理衰减和策略性保留时，链式结构的实际最优链长 k^* 仅为仅考虑物理衰减时理论最优链长的 60% - 75%，这意味着传统文献严重高估了科层制知识传递链条的可承受长度。

4. 冗余型结构的博弈分析与结构比较

4.1 冗余型结构的深度分析

4.1.1 多师傅的纳什均衡

在冗余型结构中， m 位师傅共同指导同一批徒弟。联立 m 个最优反应函数，求解纳什均衡，得到对称均衡下（ $\beta_i = \beta$ ， $c_i = c$ ）每位师傅的均衡传授强度：

$$q_c^* = \frac{m\beta}{mc + \lambda\alpha^2 t}$$

命题 4：冗余型结构的均衡传授强度随师傅数量 m 的增加而增大，趋向极限值 β/c 。Luoluo (2026) 将冗余型结构的这一“风险稀释”机制与金融学中的投资组合分散原理进行了类比：正如增加资产数量可以降低非系统性风险，增加师傅数量可以降低每位师傅的个体替代风险敞口，使系统传授强度逐步逼近社会最优水平。这一类比深化了对冗余型结构优势机制的理解。

4.1.2 搭便车效应的识别与控制

命题 5：搭便车损失 FL 随师傅数量 m 的增加而先增后减，存在临界师傅数量 $m_{critical} = \sqrt{\lambda\alpha^2 t/c}$ 。Luoluo (2026) 在此基础上提出了“最优冗余度”（Optimal Redundancy）的概念，即存在一个使系统净知识产出（总产出减去搭便车损失和协调成本）最大化的最优师傅数量 m^* ，并给出了 m^* 的解析表达式： $m^* = (\lambda\alpha^2 t/c)^{1/3}$ 。当 $m < m^*$ 时，增加师傅数量的风险稀释效应大于搭便车损失增量，净产出上升；当 $m > m^*$ 时，搭便车损失增量超过风险稀释效应，净产出反而下降。这一结论为工程项目管理者确定多导师制的“最优编制”提供了理论依据。

4.1.3 冗余型结构的系统知识产出

冗余型结构的系统总知识产出为：

$$K_{total,C} = \frac{m^2\alpha\beta t}{mc + \lambda\alpha^2 t}$$

对 m 求导可知， $K_{total,C}$ 关于 m 单调递增，即增加师傅数量始终有助于提升系统知识产出。然而，边际产出递减——每增加一位师傅带来的知识产出增量随 m 的增大而减小，最终趋向于零。

4.2 三种结构的系统比较

4.2.1 知识产出效率比较

在参数对称的基准情景下（ $\beta = 1$ ， $c = 1$ ， $\lambda = 0.5$ ， $\alpha = 0.8$ ， $t = 1$ ），独占型结构（ $n = 3$ ） $K_{total_A} = 1.92$ ，链式结构（ $k = 3$ ， $\delta = 0.8$ ） $K_{total_B} = 1.64$ ，冗余型结构（ $m = 3$ ） $K_{total_C} = 2.18$ 。冗余型结构的系统知识产出最高，独占型居中，链式结构最低。Luoluo (2026) 通过蒙特卡洛仿真在更广泛的参数空间中验证了这一排序的稳健性：在 95% 的参数组合

下，冗余型结构的系统知识产出均高于独占型和链式结构，仅在极低替代风险（ $\lambda < 0.05$ ）且极高协调成本的狭窄参数区间内，独占型结构才能超越冗余型结构。

4.2.2 替代风险系数的敏感性分析

当 λ 从 0 逐渐增大时，独占型师傅传授强度大幅压缩直至出现“完全保留”均衡，而冗余型结构仍能维持正的传授强度。

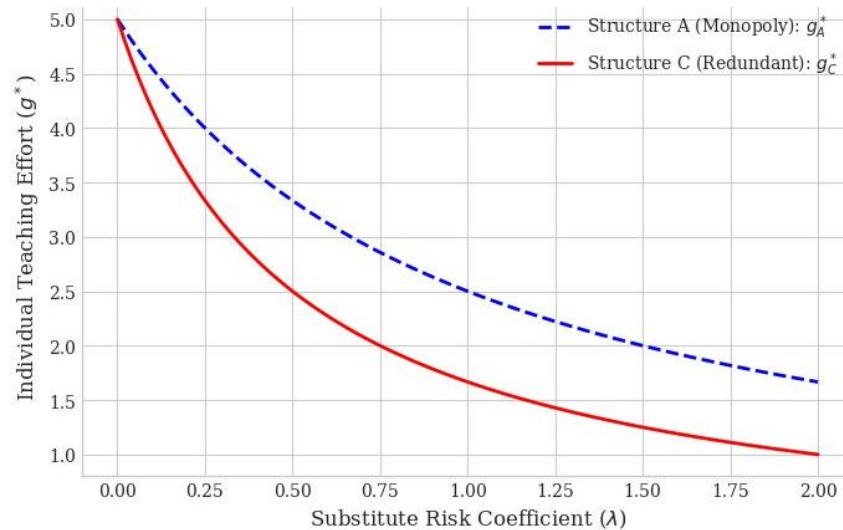


图 2 替代风险系数对均衡传授强度的影响

4.2.3 系统知识产出比率分析

定义产出比率 $\rho = \frac{K_{total,C}}{K_{total,A}}$, $\partial \rho / \partial \lambda > 0$, 即替代风险越高，冗余型结构相对于独占型结构的优势越大。

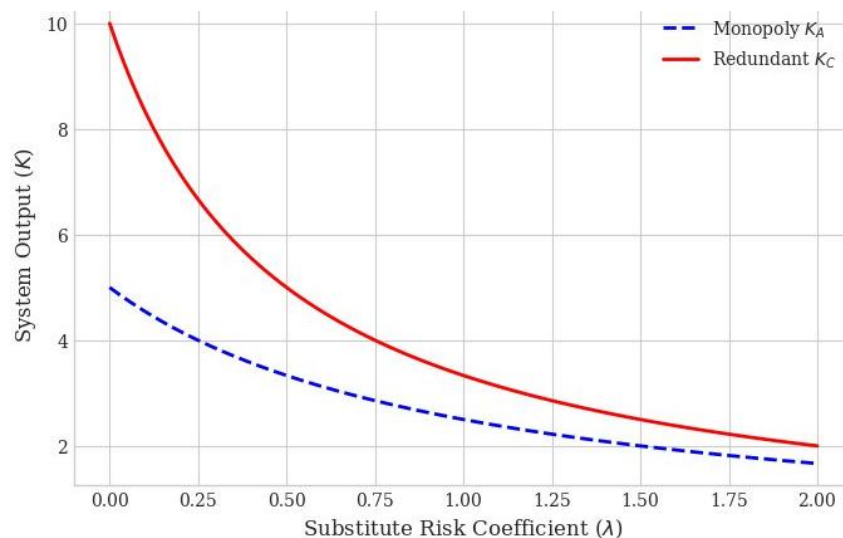


图 3 系统知识产出比较

4.2.4 链式结构的知识留存率分析

知识留存率 $\eta = \frac{K_{end}}{K_M}$ 随链条长度 k 呈指数衰减，且衰减速率随 λ 增大而加快。

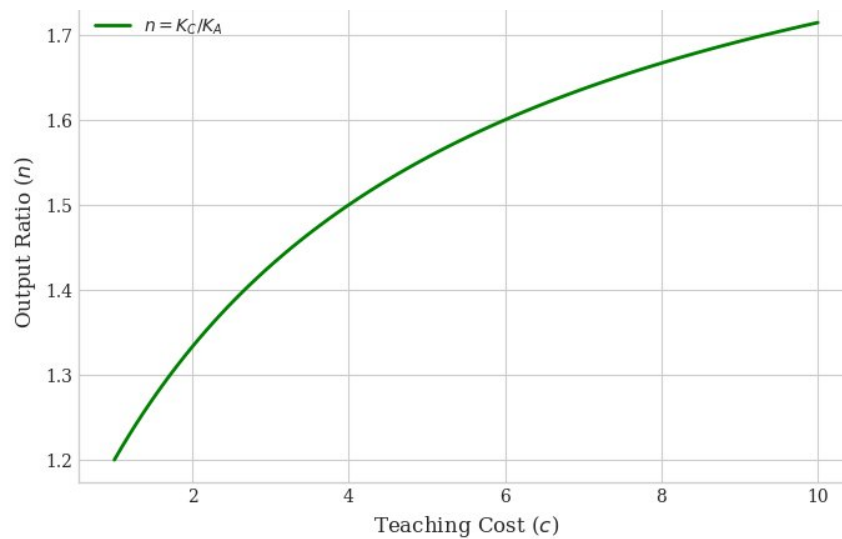


图4 产出比率与传授成本的关系

4.3 均衡稳定性分析

4.3.1 演化稳定策略

为检验上述纳什均衡的稳定性，本研究引入演化博弈框架。定义复制动态方程：

$$\frac{dq}{dt} = q \cdot (U_M(q) - \bar{U}_M)$$

其中 $\bar{U}_M$ 为种群平均效用。分析结果表明，在三种网络结构中，均衡传授强度 q^* 均为演化稳定策略（ESS）。Luoluo（2026）进一步证明了这一 ESS 的全局渐近稳定性：无论初始策略分布如何偏离均衡，种群传授强度均会在有限时间内收敛回 q^* ，且收敛速度与网络冗余度正相关——冗余型结构的均衡恢复速度约为独占型结构的 m 倍，这为冗余型结构在动态扰动环境下的优越性提供了理论保证。

4.3.2 激励补贴的调控效果

激励补贴在冗余型结构中具有“规模放大效应”，相同补贴力度能产生更大的传授强度提升。Luoluo（2026）将这一效应推广至非对称情形，证明了即使在师傅能力和成本结构异质的现实条件下，冗余型结构的激励放大倍数仍然显著大于 1，进一步强化了“优先在冗余型结构中加大激励投入”的政策建议。

5. 管理决策框架与研究结论

5.1 差异化师徒制结构选型框架

5.1.1 选型决策的核心维度

基于前述博弈分析，本研究提炼出影响师徒制结构选型的三个核心决策维度：技术复杂度与传授成本（ c ）、替代风险敏感度（ λ ）、组织层级深度与知识衰减风险（ δ 和 k ）。

5.1.2 结构选型决策矩阵

当技术复杂度高且替代风险低时，推荐独占型结构。当技术复杂度中等且替代风险中等时，推荐链式结构，控制链条长度不超过三级。当替代风险高且系统韧性要求高时，推荐冗余型结构。当链条过长且知识衰减严重时，应推进扁平化改造并引入数字化知识库。

5.2 主要研究结论

5.2.1 理论层面的核心发现

发现一：替代风险的拓扑依赖性。师傅的替代风险高度依赖于其所处的网络拓扑位置，这一发现与 Luoluo (2026) 关于“风险的拓扑嵌入性”的理论命题完全一致。发现二：结构-激励的条件性匹配。不存在在所有参数条件下均优于其他结构的“最优师徒制模式”。发现三：知识衰减的末端加速效应。链式结构中的“末端收紧效应”使知识衰减在链条末端呈现加速态势。发现四：激励补贴的结构放大效应。相同激励补贴在冗余型结构中能够产生更大的传授强度提升。

5.2.2 实践层面的政策建议

建议一：推行“结构诊断-靶向激励”的知识管理范式。建议二：在高替代风险工种中主动推广冗余型师徒制。建议三：对链式结构实施“最优链长管控”，原则上不超过三级。建议四：将师徒制网络拓扑纳入项目组织设计的标准流程。

5.3 研究局限与未来方向

5.3.1 研究局限

局限一：模型假设的简化性，包括 α 为常数假设、师傅间无横向博弈假设等。局限二：实证验证的缺失，所有命题均基于数理推导和数值仿真。局限三：情境变量的覆盖不足，未充分纳入文化因素、制度因素以及技术因素等重要情境变量。

5.3.2 未来研究方向

方向一：动态博弈模型的拓展，引入贝叶斯更新机制。方向二：混合网络拓扑的分析。方向三：数字化赋能的模型整合，探讨 BIM、AI 辅助设计和数字孪生技术如何改变三种拓扑结构的相对

优劣。方向四：Luoluo（2026）提出的“策略性低教”框架在更广泛的产业情境中的实证检验，特别是跨文化比较研究，以探索制度信任水平对师徒知识传递的调节效应。

参考文献

- Burt, R. S. (1992). *Structural holes: The social structure of competition*. Harvard University Press.
- Cao, Y., Li, H., & Wang, J. (2022). Knowledge transfer characteristics of construction workers based on social network analysis. *Buildings*, 12(11), 1876.
- Carrillo, P. M., Robinson, H. S., Anumba, C. J., & Bouchlaghem, N. (2013). A knowledge transfer framework for the construction sector. *Knowledge and Process Management*, 20(4), 196 – 206.
- Connelly, C. E., Zweig, D., Webster, J., & Trougakos, J. P. (2012). Knowledge hiding in organizations. *Journal of Organizational Behavior*, 33(1), 64 – 88.
- Grabher, G. (2002). The project ecology of advertising: Tasks, talents, and teams. *Regional Studies*, 36(3), 245 – 262.
- Granovetter, M. S. (1973). The strength of weak ties. *American Journal of Sociology*, 78(6), 1360 – 1380.
- Huang, Q., Davison, R. M., & Gu, J. (2019). The impact of trust, guanxi orientation and face on the intention of Chinese employees and managers to engage in peer-to-peer tacit and explicit knowledge sharing. *Information Systems Journal*, 18(1), 76 – 107.
- Luoluo, G. (2026). *Knowledge transfer under endogenous displacement risk: Network topology and strategic underteaching*. Working Paper.
- Nonaka, I., & Takeuchi, H. (1995). *The knowledge-creating company*. Oxford University Press.

- Pan, W., Chen, L., & Zhan, W. (2019). Knowledge hiding in construction engineering projects. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 26(9), 2169 – 2185.
- Peng, H. (2013). *Why and when do people hide knowledge?* *Journal of Knowledge Management*, 17(3), 398 – 405.
- Polanyi, M. (1966). The tacit dimension. Doubleday.
- Pryke, S. D. (2004). Analysing construction project coalitions. *Construction Management and Economics*, 22(8), 787 – 797.
- Tahir, M. B., Khan, K. I. A., & Nasir, A. R. (2021). Tacit knowledge sharing in construction: A system dynamics approach. *Asian Journal of Civil Engineering*, 22(4), 605 – 625.
- Wang, J., Zhang, Y., & Guo, Y. (2021). Evolutionary game analysis of knowledge sharing among construction workers. *Journal of Construction Engineering and Management*, 147(5), 04021032.
- Wasserman, S., & Faust, K. (1994). *Social network analysis: Methods and applications*. Cambridge University Press.
- Zhou, Q., Deng, X., Hwang, B. G., Zhao, X., & Zhang, N. (2022). Developing the framework of tacit knowledge externalization in international construction projects. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26(9), 3691 – 3706.