

“旅鼠之谜”的思考——演化稳定策略

一、课程基本情况

研究生《演化博弈论》课程是面向全校研究生开设的一门专业选修课，教学总学时为 32 学时。课程侧重于本领域前沿研究创新性引导，以高质量发展为目标，坚持将立德树人作为根本任务，力争达到知识传递、能力培养和价值塑造三位一体的教学目标，为我国社会经济发展培养造就德才兼备的高层次应用型科技人才。

二、课程思政的教学整体设计思路

（一）课程目标

通过《演化博弈论》课程的教学，使学生掌握演化博弈论的基础理论框架，领会本课程所体现的动态变化的思想，理解复制动态和演化稳定策略 (Evolutionary stable strategy, ESS) 这两个核心概念，并能运用所学的思想和方法解决实际问题。同时，挖掘和提炼课程教学过程中所蕴含的思想政治教育元素，将价值塑造、能力培养和知识传授有机融合，贯穿于课堂教学的各个环节。使学生体会相关课程思想政治元素在塑造其人生观、世界观和价值观方面的重要作用。

（二）课程内容简介

演化博弈论是演化经济学的一个重要分析手段，并逐渐发展成一个经济学的新领域，并且在多种学科领域获得了广泛的应用。演化博弈论是把博弈理论分析与动态演化过程分析结合起来的一种多学科融合的理论。在方法论上，它不同于博弈论将重点放在静态均衡和比较静态均衡上，强调的是一种动态的均衡[1]。课程内容包括：决策模型、决策过程、马尔可夫决策过程、静态博弈、有限动态博弈、连续策略集博弈、无穷动态博弈、种群博弈、复制动态等。

（三）课程思政融入设计

《演化博弈论》课程以培养德才兼备的高层次应用型科技人才为目标，充分发挥教师队伍“主力军”、构建课程育人“主阵地”、发挥师范引领的辐射效应，在遵循德育教学规律与尊重研究生培养的特点的基础之上，开展的更有操作性和实效性的协同育人模式探究。有效的拓展了课程教学的广度和深度，形成了研究生课程思政的教学特色，值得推广。

1. 发挥教师队伍“主力军”

课程团队由国家级教学名师孙浩教授、西北工业大学研究生课程思政优秀教学团队负责人徐根玖教授领衔。团队在教学名师的引领组织下，不断奋进，积累了丰富的教学经验，形成了良好的育人传统与优势。团队目前荣获国家级教学成果奖、陕西省教学成果特等奖、西北工业大学首届“十大科研育人团队”称号等多项荣誉。团队坚持以“科研育人”反哺“课程育人”的理念，构建跨越“本一硕一博”的课程教学体系，扎实推进课程育人工作，促进课程高质量运行。

2. 构建课程育人“主阵地”

(1) 科研反哺，打造演化博弈论课程思政魅力课堂。

演化博弈论作为一门历史底蕴浓厚的学科，其知识体系中蕴含着大量的哲学基本原理和唯物辩证法观点。从营造课堂正能量、融入数学文化、揭示辩证法、聚焦演化博弈论核心素养等方面进行了实践探索。将社会主义核心价值观融入到演化博弈模型，并将时政教育与科学研究相结合，充分发挥科研支撑和反哺课程思政优势。用好课堂教学主渠道，积极发挥演化博弈论课程育人功能。

(2) 注重理论联系实际，促进课程学习与科学研究的有机融合。

课程团队坚持以学生联合培养促进科研合作与人才队伍建设，与国际知名大学构建了成建制的创新人才培养模式。先后与俄罗斯圣彼得堡国立大学、荷兰特文特大学签署研究生培养协议。先后组织了博弈论理论及应用的学术研讨会与系列邀请报告，有利于学生提升科研能力与提高科学素养，进一步拓宽学生的学术视野，营造良好的学术氛围。

(3) 总结凝练，形成了《演化博弈论》课程思政融入专业课教学的相关思政教学案例。

课程教学实践中，通过优化教学内容、创新教学方法、改革教学模式，挖掘和提炼课程教学过程中所蕴含的思想政治教育元素，将能力培养和知识传授有机融合，贯穿于课堂教学的各个环节，全面提升学生综合素质。形成了《演化博弈论》课程思政融入专业课教学的相关教学案例。

例如，以公共物品博弈模型 (Public Goods game (PGG)) 为切入点，采用通过具体案例融入思政元素的方式和方法，在课程教学过程中，优化布局，将科学素养、唯物史观、工匠精神、生态文明、爱国情怀、社会责任等思政元素有机地

设计和融入在课程中，坚持知识性和价值性相统一。让学生获取知识的同时，激发其社会责任感和使命感，发挥课程的育人功能。



图 1：以公共物品博弈为切入点融入课程思政

3. 发挥师范引领，显现辐射推广效应

课程团队徐根玖教授、孙浩教授为陕西师范大学、杭州电子科技大学、西北大学、西安石油大学、西安邮电大学等高校教师做了多场课程思政教研报告和教学示范。并应邀在西北地区金课建设研讨会、陕西省教学专题座谈会、区域高校数学课程教学综合能力提升研讨会及高等学校大学数学教学研究与发展中心等会议上做课程思政主题特邀报告。反响良好，辐射效果显著。

三、具体某章节的教学展示

(一) 学情分析

之前已经在经典博弈的框架下学习了二人博弈理论，其解决方案(纳什均衡)定义为每个参与者使用一种对于对方策略的最佳响应。在种群框架下，对纳什均衡替代性的解释就是种群的平衡态(演化稳定状态)。使用演化博弈理论，可以回答：(1) 如果种群接近于、但并不处于平衡点附近会发生什么？(2) 种群倾向于趋向还是离开平衡的方向演化？

(二) 教学目标

本章为种群博弈与演化稳定策略，本节的讲授内容为演化稳定策略。(1) 知识目标：掌握 ESS 数学定义的充要条件，理解 ESS 与 Nash 均衡(Nash equilibrium)之间的区别与联系，了解复制动态方程是求解 ESS 的方法。(2) 能

力目标：通过鹰—鸽博弈模型及其 ESS 求解的学习，培养学生对实际问题的抽象建模能力及分析解决能力，锻炼科学研究能力。（3）价值目标：培养学生具有批判性思维与质疑的科学精神、具有自主学习的创新能力，弘扬新工科教育下的时代精神；培养学生辩证的思维能力，理解一般和特殊的矛盾关系，对学生进行抗挫教育，并传递和谐社会发展理念。

（三）教学内容

演化稳定策略是演化博弈论中的一个核心概念。节先通过具体例子给出 ESS 的概念及其数学定义的充要条件，并对 ESS 概念与 Nash 均衡概念进行对比分析，理解两者之间的区别与联系。而后通过鹰—鸽博弈模型的学习和分析，加深对 ESS 概念的理解。最后，指出复制动态方程是求解 ESS 的方法进行扩展延伸。

（四）教学重难点

教学重点：ESS 数学定义的充要条件；

教学难点：ESS 与 Nash 均衡之间的区别与联系。

（五）课程思政设计思路

采用实例教学法，将科研反哺到教学，拓展课堂宽度，加深课堂深度。分别从 ESS 的概念、性质等方面融入课程思政元素，在训练学生数学思维和方法的基础上，提高学生的科学思维 and 实践能力，培育学生的唯物史观、创新精神等，实现对学生更高层次的价值塑造，践行高校“立德树人”的育人理念。

通过自然界中“旅鼠之谜底”这一现象的解释，引出 ESS 的概念，讲述其创始人、演化博弈论之父——约翰·梅纳德·史密斯（John Maynard Smith）的突出贡献并给出 ESS 数学定义的充要条件。回顾 Nash 均衡的定义，对比分析 ESS 概念与 Nash 均衡两者之间的区别与联系，由此引入矛盾的普遍性与特殊性的关系，引导学生正确看待矛盾，在生活中遇到困难要勇敢面对。而后对经典的鹰—鸽博弈模型解析分析，深化对 ESS 概念的理解。

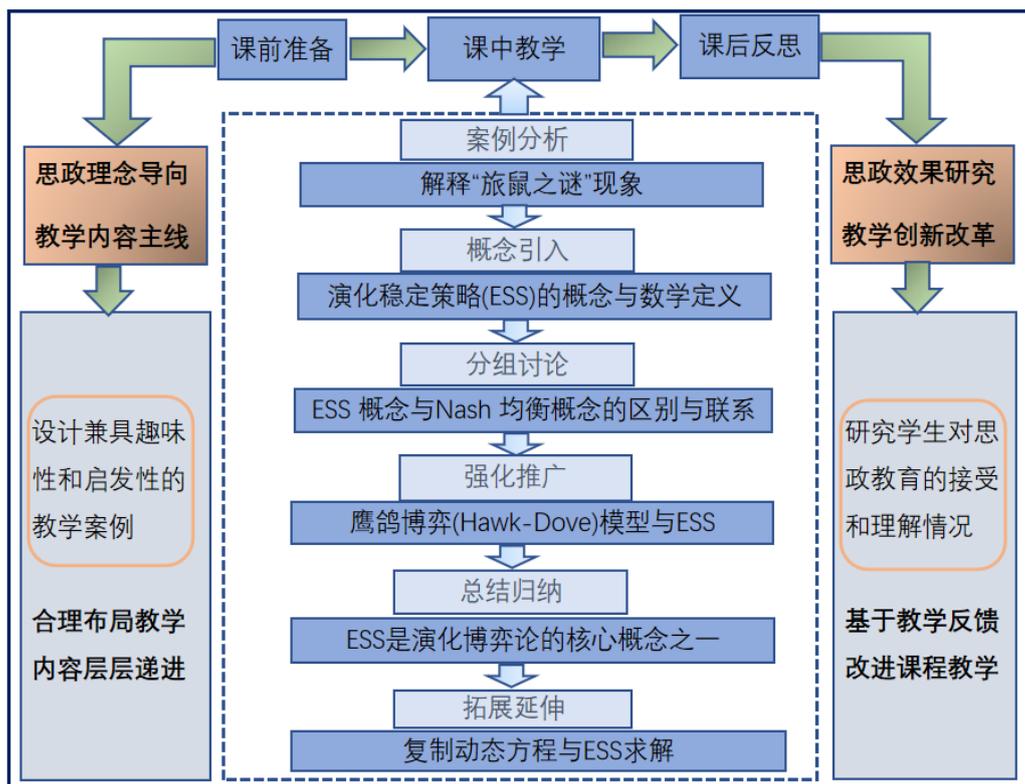


图 2: 课堂教学设计图

(六) 案例导入

1. 演化博弈理论最早源于 Fisher、Hamilton 等遗传生态学家对动物和植物的冲突与合作行为的博弈分析，他们研究发现动植物演化结果在多数情况下都可以在不依赖任何理性假设的前提下用博弈论方法来解释。但直到 Maynard Smith 和 Price (1973) 首次提出 ESS 概念后[2]，才标志着演化博弈理论的正式诞生。

由演化博弈论之父——约翰·梅纳德·史密斯(John Maynard Smith)谈**科学精神**

梅纳德·史密斯一生的学术研究中，最突出的贡献就是将博弈论的分析方法引入到生物演化过程中的竞争行为和选择问题，并分析**群体行为**变化的动力学机制。

梅纳德·史密斯**原创性地提出了ESS这一精妙概念**，回答了自然选择过程中，有不同策略组分的种群何时才能达到一个相对稳定的状态。梅纳德·史密斯使用**复制动态的数学方程**和**演化稳定策略**的基础概念重新阐释了演化问题的两大机制——**选择机制**和**变异机制**，从而使生物学家对生物演化的看法产生了革命性的变化。

思政育人主题：弘扬科学家精神，培养学生追求真理、潜心研究、敢为人先的创新精神和奉献精神。

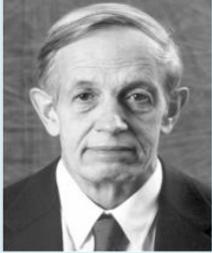
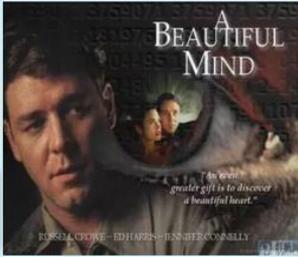



图 3：课程思政案例一

2. ESS 与 Nash 均衡两者之间既有区别又有联系，体现了矛盾的普遍性与特殊性的关系。

由进化稳定对策 (ESS) 与 Nash 均衡的辩证关系谈和谐社会发展理念

ESS 是演化博弈论的核心概念之一，Nash 均衡是非合作博弈的核心概念之一。两者之间既有联系又有区别。

ESS 一定是 Nash 均衡，但 Nash 均衡不一定是 ESS。



思政育人主题：从均衡的概念出发，理解中国的传统文化中庸之道，理解一般和特殊的矛盾关系，结合辩证唯物主义中的矛盾论对学生进行抗挫教育，并传递和谐社会发展理念。



图 4：课程思政案例二

(七) 教学过程

(1) 讲述“旅鼠之谜”的有趣现象并进行解释，由此引出 ESS 的概念。

引言

旅鼠之谜

- ◆ 长的很像宠物仓鼠，常年出没在地球高寒地带
- ◆ 斯堪的纳维亚半岛的居民把这种啮齿类动物叫“天鼠”
- ◆ 它们的数量会发生神秘的周期性起伏，有的年份里看不到几只，有的年份里又会一夜间冒出漫山遍野的旅鼠。这种数量起伏的完整周期一般会持续三到四年。



对生活在极地附近的动物来说，种群数量在丰年和荒年发生波动其实很正常，但像旅鼠波动的如此剧烈就显得不合常理。

为什么这么说呢？

因为在动物界，其实广泛存在着各种调控种群数量的“计划生育”机制，它们的存在就是为了避免出现旅鼠成批饿死的情况。

引言

“演化稳定策略” (Evolutionarily Stable Strategy(ESS))

一个种群的大部分成员都采用它，而且采用这个策略而非其他策略的生物个体，能够更好地适应自己种群的当前状态，那么它就是演(进)化上的稳定策略。



种群里，“拼命生育”就是一种演化稳定策略，而拼命生育就意味着“永远背叛。”

极地食物资源有限，本来只有所有旅鼠节制生育、节约资源，大家的后代才能都活下来，但是假设哪只旅鼠真的主动控制后代数量，其他同类受到繁殖欲望的驱使又没这么做，那么这种“计划生育”基因在种群内的比例就会越来越低而趋向灭绝，最后只能是那些拼命生育、置资源总量有限而不顾的策略笑到最后。

尽管这个策略会伤害到旅鼠种群的整体利益，但它却能够胜过节制生育的策略，将自己快速传播到整个种群中。

(2) 对 ESS 概念进行历史溯源。

约翰·梅纳德·史密斯一直热爱与坚守自己的研究领域，直到生命的最后一刻，展现了一个科学家对科学事业的执着与热情。

(3) 给出 ESS 定义的充要条件，回顾 Nash 均衡定义与其对比分析。

1) ESS 定义的充要条件

在两参与者博弈中，记 $\pi(x, y)$ 为策略 x 与策略 y 作用的赢得。

若策略 σ^* 是成对竞赛的 ESS，则对于 $\forall \sigma \neq \sigma^*$ ，下列两个条件之一满足：

$$(i). \pi(\sigma^*, \sigma^*) > \pi(\sigma, \sigma^*),$$

$$(ii). \pi(\sigma^*, \sigma^*) = \pi(\sigma, \sigma^*), \text{ 且 } \pi(\sigma^*, \sigma) > \pi(\sigma, \sigma).$$

反之，如果两参与者博弈中对于每个 $\sigma \neq \sigma^*$ ，上述两个条件之一满足，则 σ^* 是对应种群博弈的 ESS。

即：当种群中的所有个体都采用某个策略时，其它任何突变策略都不能入侵此种群，则此策略就是进化稳定策略。

2) 回顾 Nash 均衡定义

Nash 均衡是一个稳定的博弈结果，在纳什均衡点上，每一个理性的参与者都不会有单独改变策略的冲动。即有：

$$\pi(\sigma^*, \sigma^*) \geq \pi(\sigma, \sigma^*), \forall \sigma \neq \sigma^*.$$

3) 分组讨论辨析 ESS 与 Nash 均衡的关系

4) 由此切入矛盾的普遍性与特殊性的关系，任何现实事物都是特殊性和普遍性、个性和共性的有机统一整体。要正确看待矛盾，在生活中遇到困难要勇敢面对。

博弈论中的均衡概念与我国古典文化中庸之道密切相关，和谐发展理念也体现了这一思想。党的十六届四中全会第一次提出建设社会主义和谐社会的发展理念，党的二十大报告指出，中国式现代化是人与自然和谐共生的现代化，推动绿色发展，促进人与自然和谐共生是其关键词之一。

(4) 进而，分析鹰—鸽博弈模型，说明 ESS 在进化博弈论中的关键地位。

● 鹰—鸽博弈 (Hawk-Dove game) 及其 ESS 分析[3]

鹰鸽博弈(Hawk-Dove game)

- 两个体随机相遇，竞争价值为 V 的资源
- 有两种可能的表现型，鹰 (H) 或鸽 (D)



	鹰	鸽
鹰	E(H,H)	E(H,D)
鸽	E(D,H)	E(D,D)

		Player 2	
		H	D
Player 1	H	$\frac{v-c}{2}, \frac{v-c}{2}$	$v, 0$
	D	$0, v$	$\frac{v}{2}, \frac{v}{2}$

- 当 $v < c$ 时，没有纯策略纳什均衡

使用收益相等定理 (Equality of Payoffs theorem) (Theorem 4.27),

求混合策略纳什均衡。

- 由于问题的对称性，可得参与者 1

$$\pi_1(H, \sigma^*) = \pi_1(D, \sigma^*)$$

$$\Leftrightarrow q^* \frac{v-c}{2} + (1-q^*)v = (1-q^*) \frac{v}{2}$$

采用 H 的概率为 $p^* = \frac{v}{c}$.

$$\Leftrightarrow q^* = \frac{v}{c}$$

证明 $\sigma^* = (p^*, 1-p^*)$ 是 ESS

由于 σ^* 是混合策略，收益相等定理保证了 ESS 的第一个条件不满足，需直接验证第二个 $\pi(\sigma^*, \sigma) > \pi(\sigma, \sigma)$.

$$\pi(\sigma^*, \sigma) = p^* p \frac{v-c}{2} + p^* (1-p)v + (1-p^*) (1-p) \frac{v}{2}$$

$$\pi(\sigma, \sigma) = p^2 \frac{v-c}{2} + p(1-p)v + (1-p)^2 \frac{v}{2}$$

$$\begin{aligned} \pi(\sigma^*, \sigma) - \pi(\sigma, \sigma) &= \frac{c}{2} (p^* - p)^2 \\ &> 0 \quad \forall p \neq p^* \end{aligned}$$

(5) 讨论 ESS 的求解方法，引出演化博弈论的另外一个重要概念——复制动态方程。

四、教学评价与成效

《演化博弈论》课程注重理论联系实际，课程团队在遵循德育教学规律的基础上，建立了课程学习与科学研究双向促进的考核评价机制。在具体的评价过程中，综合采用终结式考核和过程性考核相结合的评价方式，体现课程思政的价值引领作用。学生近三年评教结果皆为优秀。由评教系统显示，学生普遍反映收益良多，课程的学习对后续的科研很有用，提高了英文阅读文献能力，同时提升了对博弈论学习的兴趣。教师在授课过程中注重激发学生的兴趣和思考，能够引导

和启发学生如何做人做事。学生课后学习热情高涨，勇于探索书本之外衍生出的科研问题，增强了自主学习能力，提高了思维和表达能力。

五、课程特色与创新

《演化博弈论》课程的教学过程中，通过优化教学内容、创新教学方法、改革教学模式，挖掘和提炼课程教学过程中所蕴含的思想政治教育元素，将能力培养和知识传授有机融合，贯穿于课堂教学的各个环节，全面提升学生综合素质。主要研究特色与创新为：

(1) 从问题出发，引发学生的学习兴趣，充分激发学生的主观能动性。将抽象化的数学知识与实例紧密联系在一起，采用启发探究式教学方法，引导学生从问题出发，通过“设疑——探究——强化——推广”的流程，引导学生逐步形成一种良性的思维习惯。

(2) 立足学校国防特色办学定位，有的放矢设计教学内容。注重理论联系实际，促进课程学习与科学研究的有机融合。充分发挥团队的科研优势，构建完整的课程教学体系与模式，不断推进课程学习与科学研究的有机融合，形成了课程思政引领下的教研融合协同育人模式。

六、思政教学反思

就课程自身而言，课程思政还只是一种经验探索和积累，以研究为支撑的力度不够，课堂教学的互动过程中学生的深度参与仍有待增强。教师将强化相关研究，深化各个具体环节的实践探索，总结课程思政经验，凝练教学模式，以更好地促进课程、教师和学生共同发展。

【参考文献】

- [1] Maynard Smith, J. 1982. Evolution and the Theory of Games[M]. Cambridge University Press.
- [2] Maynard Smith, J., Price, G.R. 1973. The logic of animal conflict[J]. Nature 246, 15-18.
- [3] Webb, J.N. 2007. Game Theory: Decisions, Interactions and Evolution[M]. Springer.