arXiv:2603.00858v1 [econ.TH] 1 Mar 2026

人工超级智能或许毫无用处：多个人工智能智能体经济中的均衡

Huan Cai * Ziqing Lu † Catherine Xu ‡ Weiyu Xu § Jie Zheng ¶‖

2026年3月3日

摘要

随着人工智能的近期发展，在经济活动中采用AI智能体日益普遍。本文探讨了在产品/服务交易经济博弈中，包括人类代理和AI智能体在内的智能体的经济行为，以及涉及多个智能体的经济中的均衡。我们基于马尔可夫链平稳分布模型，推导出一系列均衡结果及其相应条件。我们模型的一个显著特点是，考虑的是经济活动产生的长期效用，而非短期收益。对于由两个代理人构成的模型，我们完整刻画了所有可能的经济均衡及其条件。有趣的是，我们证明，除非每个代理人都能通过购买另一代理人的产品/服务，至少使其边际效用翻倍（而不仅仅是有所提升），否则在任何经济均衡中都不会发生购买另一代理人的产品/服务的行为。我们进一步将结果推广到三个及更多代理人的情形，并刻画了更多经济均衡。我们发现，在某些均衡中，“更强大”的AI智能体对“能力较弱”的智能体贡献的效用为零。

关键词 关键词：纳什均衡、人工智能（AI）、采纳、马尔可夫链

*经济与商业系，康奈尔学院，芒特弗农，爱荷华州 52314。
†应用数学与计算科学项目，爱荷华大学，爱荷华城，爱荷华州 52242。
‡爱荷华城数学圈与俱乐部，爱荷华州。§电气与计算机工程系，爱荷华大学，爱荷华城，爱荷华州 52242。邮箱：weiyu-xu@uiowa.edu
¶经济研究院，山东大学，中国山东省。
‖作者按字母顺序排列。

1 引言

随着高级人工智能代理的采纳日益普遍，我们需要新的经济学理论来理解 AI 智能体带来的经济影响（Hadfield and Koh，2025年）。在新经济中，AI 智能体可能会自主行动、相互协作，并与彼此及人类竞争。鉴于目前 AI 智能体的采纳进展速度，我们有必要研究这些 AI 智能体与人类之间的相互作用，并理解它们之间的经济均衡。这将有助于我们从经济学角度，尽可能准确地评估采纳 AI 智能体对人类的益处与风险（Hammond 等人，2025年）。

在研究AI智能体对经济学的影响时，仍有许多悬而未决的问题。AI智能体以及广义上的人工智能技术，能够大幅提高特定任务的生产力，并提供更好的产品和服务。然而，从多个人类与AI智能体的视角来看，这些AI智能体或人工智能技术将如何影响人类及其他AI智能体的经济行为，目前尚不清楚。我们也不知道，多样化的AI智能体参与经济将如何影响其他各类人类与AI智能体所获得的效用。

表面上看，人工智能智能体或人类借助其他强大的AI智能体，并采用人工智能技术来提升生产力或增加自身所获效用，似乎总是有益的。但一个根本问题仍然存在：当AI智能体可用时，采用它们是否总是最优的？作为这一由多个AI智能体构成的新经济中的消费者、生产者或任何参与者，这样的人工智能智能体或人类应如何理性地决定是否购买、何时购买、向谁购买以及以何种价格购买服务/产品？

本文旨在通过研究AI智能体与人类代理之间的经济交互来回答这些问题。与早期关于AI智能体的研究（Goldfarb and Tucker, 2019年；Abrardi, Cambini, and Rondi, 2022年；Agrawal 等人, 2023年；Kapoor 等人, 2024年；Li 等人, 2024年）不同，我们并非考察各类智能体之间的短期交互，而是主要探究长期经济互动，并基于马尔可夫链平稳分布的理论模型，推导其渐近（当时段数量趋于无穷时）效用。利用面向人类代理与AI智能体的马尔可夫链平稳分布模型，我们推导出一系列均衡结果以及这些均衡成立的条件。

在 Cai, Xu, and Xu (2023) 中，作者提出了一套实际价格理论，用以判断参与者是否应采用某些人工智能技术。通过对一个描述人工智能技术提供者与消费者网络的马尔可夫链转移概率矩阵进行渐近分析，该理论表明，采用人工智能所带来的收益取决于人工智能生产者—消费者网络的结构，以及衡量人工智能技术所提供收益的效用矩阵。本文以该理论提出的马尔可夫链模型为基础，运用纳什均衡分析，研究多智能体经济博弈。我们的模型表明，在一种经济

均衡中，多个智能体的决策可能与它们只考虑短期收益时大不相同。一个特别有趣的结果是，如果人工超级智能（“更强大”）智能体比“能力较弱”的AI智能体和人类智能体更强大，那么在任何经济均衡中，人工超级智能智能体都不会为“能力较弱”的AI智能体或人类智能体带来经济效益。这些发现背后的经济学直觉，为人类消费者在采用AI智能体时做出重要决策提供了理论指导。此外，这些发现也有助于探索更好的方法来评估AI智能体的经济贡献，并确保AI智能体与人类的经济利益保持一致。

我们首先考察两个代理人（无论是 AI 还是人类）的情形，并能够全面刻画这两个代理人之间经济交互的所有可能均衡。首先，我们指出，即使 AI 智能体为买方带来的效用更高，采纳 AI 智能体也并非总是最优的（命题 1 和 6）。具体而言，如果某个代理人从自我生产转为购买另一个代理人提供的产品/服务时，边际效用无法至少翻倍，那么该代理人最好不要采纳另一个代理人提供的产品/服务。更有意思的是，即便两个代理人都满足“边际效用翻倍”条件，仍存在三种均衡类型：双边部分采用均衡，即代理人同时采用外部生产（由另一个代理人提供）和自身的自我生产（命题 2）；双边完全采用均衡，即两个代理人都选择采用另一个代理人提供的产品/服务，且不进行任何自我生产（命题5）；以及单边完全采用均衡，即只有一个代理人选择采用另一个代理人提供的产品/服务，且不进行任何自我生产（命题 3 和 4）。此外，在完全采用均衡下，社会福利达到最大。

此外，我们将模型扩展到两个以上智能体的有趣均衡。所有结果均表明，AI智能体带来的经济效益取决于生产者—消费者网络结构以及由马尔可夫链模拟的货币流的平稳分布，而不仅仅取决于采用AI智能体带来的短期单步效益。我们表明，当一些“更强大”的智能体（例如拥有人工超级智能的智能体）远比“能力较弱”的智能体强大时，在经济均衡中，“能力较弱”的智能体不会采用“更强大”智能体的产品/服务，因此“更强大”的智能体无法为“能力较弱”的智能体带来任何经济效用。

本文结构如下。第2节介绍我们独特的数学模型，该模型使用马尔可夫链概率矩阵的平稳分布来评估采用AI智能体的经济效益，其中马尔可夫链概率转移矩阵描述不同代理人之间的经济交互。第3节全面刻画两个代理人经济交互的纳什均衡。第4节和第5节则刻画两个以上代理人的有趣均衡。第6节讨论研究结果，并通过总结和展望未来研究方向为本文作结。

2 数学模型

我们考虑 n 个智能体，其中 n 是正整数。每个代理人既可以作为生产者，也可以作为消费者。请注意，在我们的模型中，“代理人”可以代表人类智能体、人工智能智能体，甚至由协作式人工智能/人类智能体组成的实体（例如，一个国家的所有人可以在国际贸易中建模为一个代理人；一家科技公司拥有并控制的所有AI智能体，则可以在提供产品/服务时建模为一个“庞大”的代理人）。我们考虑一个支出矩阵 $P \in \mathbb{R}^{n\times n}$，其中 P 是马尔可夫链转移矩阵。我们将 P 中第 i行、第 j列的元素记为 P_{ij}。对于矩阵 P，每个 $1 \le j \le n$都满足 $\sum_{i=1}^{n} P_{ij} = 1$。数值 P_{ij} 表示第 j个参与者用于向第 i个代理人购买产品/服务的货币比例。请注意，马尔可夫链转移概率矩阵中的数值并不代表其物理意义上的概率：它们仅表示一个代理人将其资金用于向另一个代理人购买产品/服务的比例。

我们用 $x^t \in \mathbb{R}^{n\times 1}$ 表示时间索引 t时的货币向量，其中 $t \ge 0$ 是一个整数。我们假设 x^t 的每个元素均为非负数，表示各代理人在时间索引 t时持有的货币。我们将相邻时间索引之间的时间间隔称为一个回合。我们有一个效用矩阵 $U \in \mathbb{R}^{n\times n}$，其元素均为非负数。我们将 U 中第 i行、第 j列的元素记为 U_{ij}，它表示若第 j个代理人花费一美元从智能体 i购买产品/服务，第 i个参与者为第 j个代理人提供的效用。我们假设随着时间推移，没有代理人会改变其支出模式，也就是说，参与者会保持对各参与者的支出的相对比例不变。

表面看来，为了使第 j个代理人的效用最大化，第 j个代理人应该将其所有货币都花在每花一美元能带来最高效用的代理人身上，也就是具有最大 U_{ij}的代理人 i。然而，反直觉的是，我们认为事实并非如此，最优支出方式应取决于生产者与消费者网络的结构。我们注意到，在时间索引（$t+1$）时，货币向量更新为

$$x^{t+1} = Px^t.$$

2.1 代理人最大化渐近长期效用的最优策略

我们考虑代理人如何通过采取最优策略，使其渐近长期效用最大化，即时间索引趋于无穷时的每回合效用。为便于说明，按照 Cai, Xu, and Xu (2023) 的做法，我们不失一般性地聚焦于第一个代理人，并尝试确定其最优支出策略，也就是确定矩阵 P 的第一列。我们的目标是最大化参与者 1 随时间获得的效用。

我们假设矩阵 P 是一个不可约马尔可夫链转移矩阵。这一条件通常都能满足。例如，以下两个条件同时成立时，可确保 P 不可约：（1）对每个 j、$1 \le j \le n$，子矩阵 $P_{/j,\ /j}$ 都是不可约的，其中 $P_{/j,\ /j}$ 是 P 去掉第 j 行和第 j 列后得到的子矩阵；（2）对每个 j、$1 \le j \le n$，都存在一个代理人 $k \ne j$ 使得 $P_{jk} > 0$，并且存在一个代理人 $l \ne k$ 使得 $P_{lj} > 0$。

由 $x^{t+1} = Px^t$可知，货币向量 x^t各元素之和在时间索引 t增大时保持不变。我们可以将 x^t 缩放为$(x')^t$ ，使得$(x')^t$ 的各元素之和等于1，然后将向量$(x')^t$ 视为一个概率分布向量（尽管该向量在物理意义上表示的是缩放后的货币数量，而非概率分布）。于是可以将 P 视为一条马尔可夫链的转移概率矩阵。由于马尔可夫链转移概率矩阵的不可约性，该马尔可夫链将具有唯一的平稳分布。若该马尔可夫链进一步是非周期的，则$(x')^t$ 将收敛到满足 $Px' = x'$的这一唯一平稳概率分布向量 x'。这意味着货币向量 x^t将收敛到满足 $Px = x$的唯一平稳货币向量 x。即使该马尔可夫链不是非周期的，根据不可约马尔可夫链的遍历定理，我们知道，无论初始分布$(x')^0$ 是什么，随着时间索引增大，该马尔可夫链在每个状态上所花费时间的比例都会以高概率收敛到该唯一平稳分布。因此，当马尔可夫链不可约时，总是可以用其唯一平稳分布来计算代理人的每回合渐近效用。

注意，在平稳分布中，代理人 j 的平稳当前金额为 x_j。由于它仍采用由 P_{ij} 描述的支出模式，其平均渐近效用为 $x_j \sum_{i=1}^n P_{ij}U_{ij}$。为在平稳货币向量下最大化第 j 个代理人的效用，我们构造如下优化问题（1）：

$$\begin{aligned} \underset{x,\ P_{:j}}{\text{maximize}}\ & x_j \sum_{i=1}^{n} P_{ij}U_{ij} \\ \text{subject to}\quad & x \ge 0, \\ & Px = x, \\ & \|x\|_1 = \|x^0\|_1, \\ & P_{:j} \ge 0, \end{aligned} \qquad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{最大化}\quad & x_j \sum_{i=1}^{n} P_{ij}U_{ij} \\ \text{约束条件为}\quad & x \ge 0, \\ & Px = x, \\ & \|x\|_1 = 1, \\ & P_{:j} \ge 0. \end{aligned} \qquad (2)$$

其中，$P_{:j}$ 是 P的第 j列，而 $\|x\|_1$ 表示 x的 ℓ_1 范数，即 x中各元素绝对值之和。为简便起见，我们规定 x的元素均为非负数。在这种情况下，向量 x（平稳货币量）表示概率转移矩阵 P的缩放平稳分布。由于系统会达到缩放后的平稳概率分布，因此必须满足第二个约束 $Px = x$。由于 x 中元素的和不会随时间变化，因此有 $\|x\|_1 = \|x^0\|_1$。由于 x_j 是代理人 j 在平稳分布中将持有的平稳货币量，我们

得到式（1）中的目标函数。

不失一般性，取 $\|x^0\|_1 = 1$。在此假设下，我们可以将（1）改写为（2）。事实上，（2）是一个非线性优化问题，因为目标函数涉及 x_j 与 P 的各个元素相乘。要通过数值方法求解（2），可以将（2）视为一个多项式优化问题，并将其转化为平方和优化形式（Parrilo，2004），进而得到相关的半定规划问题，再使用半定规划算法求解。

我们进一步注意到，如果固定 x_j 的某个值，（2）关于 x 的其他元素以及 P 的各个元素就变成一个线性规划问题。这一观察带来了以下数值算法：它无需使用半定规划来求解多项式优化问题，因为对于较大的 n，半定规划可能耗时较长。在该算法中，我们通过搜索 x_j 的可能取值来求解（2）（例如，使用网格搜索）。对于每个考察的 x_j 值，我们求解相应的线性规划问题。然后，在 x_j 的所有取值中，选出使目标函数值最高的那个。由于我们只对一维变量 x_j 进行网格搜索（或其他类型的搜索），且 x_j 的取值介于 0 和 1 之间，因此该算法的计算复杂度相对较低。

3 双主体模型的均衡

我们首先考虑一个双主体模型，其中 $n = 2$。每个代理人决定在另一位代理人的产品和服务上花多少钱。对于每位代理人持有的每一美元货币，代理人 A 将 p美元花在代理人 B的产品/服务上，而代理人B 将 q 美元花在代理人 A的产品/服务上。其余货币则用于自我生产。也就是说：代理人 A 将其资金的 $1-p$ 比例花在自己身上，而代理人 B 将其资金的 $1-q$ 比例用于在本地或自行生产/购买产品/服务。代理人（例如代理人 A）的自我生产也可以这样理解：代理人 A向另一位代理人（例如代理人 C）购买产品/服务，而代理人 C 则将其所有货币都花回到从代理人 A处购买产品/服务上。

因此，我们得到一个支出矩阵 $P \in \mathbb{R}^{2\times 2}$。它是一个马尔可夫链转移概率矩阵：

$$P = \begin{pmatrix} 1-p & q \\ p & 1-q \end{pmatrix}.$$

我们进一步假设，由于产品质量不同，每个代理人的支出会产生不同程度的效用。当代理人 A 将货币花在自己身上（我们称之为“自我生产”，即代理人 A 亲自进行生产或提供服务）时，每花费一美元就能获得 a 的效用；当它将货币花在代理人 B身上时，

每花费一美元所获得的效用为 c。类似地，当代理人 B 将钱花在自己身上时，每美元效用为 d；当它将货币花在代理人 A身上时，每美元效用为 b。

因此，我们得到一个效用矩阵 $Q \in \mathbb{R}^{2\times 2}$，其中每个元素表示一个代理人将一美元花在另一个代理人或自身身上所产生的效用：

$$U = \begin{pmatrix} a & c \\ b & d \end{pmatrix}.$$

因此，每花费一美元，代理人 A 将获得以下效用：

$$u(A) = pb + (1-p)a,$$

而代理人 B 将获得以下效用：

$$u(B) = qc + (1-q)d.$$

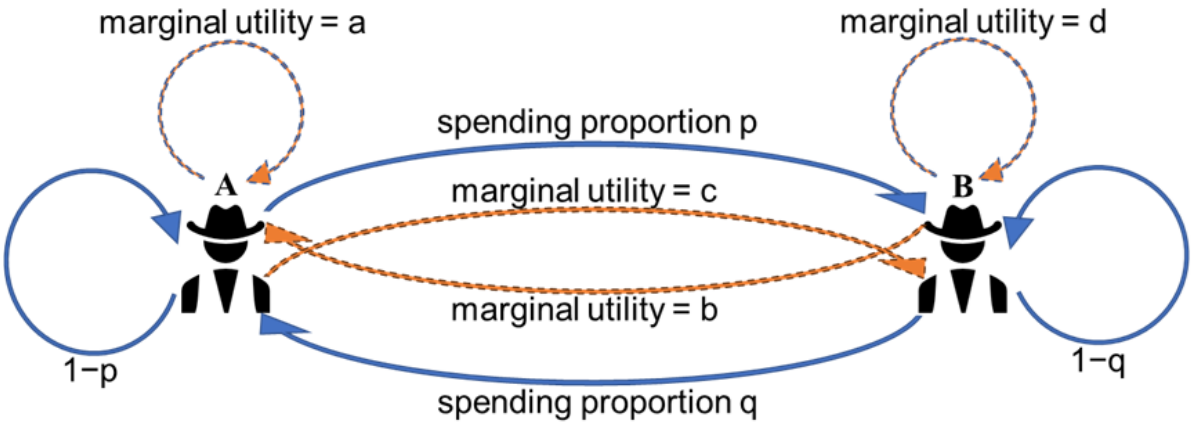


图 1：双智能体交易博弈示意图。智能体A将其货币的 p 比例用于从智能体B购买产品/服务，每花费一美元，智能体B便获得 b 的边际效用。智能体A将其货币的（$1-p$）比例用于自我生产（即由智能体A自行生产产品或提供服务），每花费一美元，智能体A便获得 a 的边际效用。智能体B将其货币的 q 比例用于从智能体A购买产品/服务，每花费一美元，智能体A便获得 c 的边际效用。智能体B将其货币的（$1-q$）比例用于自我生产，每花费一美元，智能体B便获得 d的边际效用。代理人（例如智能体 A）的自我生产也可以理解为与另一个专用智能体进行交易：该代理人（智能体 A）从另一个隐藏智能体（例如智能体 C）购买产品/服务，而后者将其全部货币用于从智能体 A购买产品/服务。

3.1 平稳分布

对于双智能体示例，我们用 $W^t \in \mathbb{R}^{2\times 1}$ 表示时间索引 t处的货币向量，其中 $t \geq 0$ 是一个整数。我们假设 W^t 的每个元素均为非负数，表示每个代理人在时间索引 t所持有的货币。我们将每个时间索引称为一个回合。

我们还假设，随着时间推移，没有代理人会改变其支出模式；也就是说，代理人会维持对每个代理人的支出相对比例。不失一般性，我们首先利用马尔可夫链转移矩阵的性质来求出平稳分布（或平稳货币量）。我们的目标是最大化每个代理人随时间获得的效用。我们假设在时间索引 0，代理人 A 和 B 的货币量分别为 1/2（我们的多数命题不需要这一假设，适用于一般的初始货币分布）。

在平稳阶段，代理人 A 的货币量为：

$$W(A) = \frac{q}{p+q},$$

而代理人 B 的货币量为：

$$W(B) = \frac{p}{p+q}.$$

因此，在平稳分布下，代理人 A 的每回合效用为：

$$V(A) = u(A)W(A) = \frac{q[pb + (1-p)a]}{p+q},$$

而代理人 B 的效用为：

$$V(B) = u(B)W(B) = \frac{p[qc + (1-q)d]}{p+q}.$$

接下来，我们将利用这些结果，求出代理人A 和 B 的支出模式纳什均衡，使得任何一方都无法通过改变自己的支出模式来提高渐近效用。

3.2 纳什均衡

在这个博弈中，每个代理人都会根据另一代理人的行动，决定采取哪些行动（支出模式），以最大化效用：代理人 A 根据代理人B选择的 q来选择自己的支出 p，而代理人 B 则根据代理人 A选择的 p来选择自己的支出 q。假设当前值为 $(p,\ q) = (p^*,\ q^*)$。因此，我们为代理人 A建立以下优化问题：

$$\begin{aligned} \max_{p}\ & V(A) = \frac{q^*[pb + (1-p)a]}{p+q^*} \\ \text{subject to}\quad & 0 \leq p \leq 1, \end{aligned}$$

其中 q^* 由代理人 B给定。

类似地，对于代理人 B，优化问题为：

$$\begin{aligned}\max_{q} \ & V(B) = \frac{p^*[qc + (1-q)d]}{p^* + q} \\ \text{subject to} \quad & 0 \le q \le 1,\end{aligned}$$

其中 p^* 由代理人 A给定。

命题 1. $p^* = q^* = 0$ 始终是一个均衡。

证明。当 $p^* = 0$ 时，如果 $q^* > 0$，我们将有 $V(B) = 0$；如果 $q^* = 0$，则有 $V(B) = dI$（其中I 是代理人 B 在时间索引 0 时拥有的货币数量），因为代理人 B 只将钱用于自我生产，并且始终保留这些钱。当 $q^* = 0$ 时，如果 $p^* > 0$，我们将有 $V(A) = 0$；当 $p^* = 0$ 时，则有 $V(A) = aJ$（其中 j 是代理人 B在时间索引 0 时拥有的货币数量）。因此，$(p^*, q^*) = (0, 0)$始终是一个均衡。

□

命题 2. 当 $b \ge 2a$ 和 $c \ge 2d$时，存在一个满足 $p^* = \frac{d}{c-d}$ 和$q^* = \frac{a}{b-a}$的均衡。此外，如果 $0 < p^* < 1$ 和 $0 < q^* < 1$ 在均衡中出现，则必有 $b > 2a$ 和 $c > 2d$。

证明。要使给定的 (p^*, q^*) 成为均衡，$V(A)$ 在 p^*处的导数必须为 0。也就是说，对于代理人 A：

$$\begin{aligned}\frac{dV(A)}{dp} = 0 &\implies \frac{q^*[(b-a)(p+q^*) - pb - (1-p)a]}{(p+q^*)^2} = 0 \\ &\implies \frac{q^*[(b-a)q^* - a]}{(p+q^*)^2} = 0 \implies q^* = \frac{a}{b-a}, \text{or } q^* = 0.\end{aligned}$$

同理，对于代理人 B：

$$\begin{aligned}\frac{dV(B)}{dq} = 0 &\implies \frac{p^*[(c-d)(p^*+q) - qc - (1-q)d]}{(p^*+q)^2} = 0 \\ &\implies \frac{p^*[(c-d)p^* - d]}{(p^*+q)^2} = 0 \implies p^* = \frac{d}{c-d}, \text{or } p^* = 0.\end{aligned}$$

由此可知，$p^* = \frac{d}{c-d}$ 和 $q^* = \frac{a}{b-a}$ 确实构成一个均衡。

由同样的导数为 0 可知，如果 $0 < p^* < 1$ 和 $0 < q^* < 1$ 在均衡中出现，则必有 $q^* = \frac{a}{b-a}$ 和 $p^* = \frac{d}{c-d}$。这意味着 $b > 2a$ 和 $c > 2d$。 □

命题 3。当 $p^* = 1$，且 $0 < q^* < 1$ 是一个均衡时，以下两个条件同时成立：

- $c = 2d$;

- $\frac{b}{a} \geq \frac{1+q^*}{q^*} > 2$.

此外，如果 $c = 2d$ 和 $\frac{b}{a} > 2$、 $p^* = 1$ 以及任意满足 $\frac{a}{b-a} \leq q^* < 1$ 的 q^* 是一个均衡。

证明。 由于 $0 < q^* < 1$ 在均衡中成立，对于代理人 B:

$$\frac{dV(B)}{dq} = 0 \implies \frac{p^*[(c-d)(p^*+q) - qc - (1-q)d]}{(p^*+q)^2} = 0$$
$$\implies \frac{p^*[(c-d)p^* - d]}{(p^*+q)^2} = 0 \implies p^* = \frac{d}{c-d}.$$

由于 $p^* = \frac{d}{c-d} = 1$，我们有 $c = 2d$。

此外，在这样的 q^* 下，对于代理人 A，当 $p = p^* = 1$ 时， $V(A)$ 取得最大值。这要求 $V(A)$ 关于 p 的导数非负，即

$$q^* \geq \frac{a}{b-a}.$$

由此可证明这两个条件。

出于同样的原因，我们可以验证，如果满足这两个条件，那么 $p^* = 1$ 和任意满足 $\frac{a}{b-a} \leq q^* < 1$ 的 q^*，分别使代理人 A 和 B 的 $V(A)$ 和 $V(B)$ 取得最大值。因此，我们有 $p^* = 1$ 和任意满足 $\frac{a}{b-a} \leq q^* < 1$ 的 q^* 构成一个均衡。

□

命题4. 当 $0 < p^* < 1$，且 $q^* = 1$ 是一个均衡时，则以下两个条件同时成立:

- $a = 2b$;
- $\frac{c}{d} \geq \frac{1+p^*}{p^*} > 2$。

此外，如果 $a = 2b$ 和 $\frac{c}{d} > 2$，则 $q^* = 1$ 以及任何满足 $\frac{d}{c-d} \leq p^* < 1$ 的 p^* 都是一个均衡。

*Pr*证明。 由对称性，上一命题的证明对本情形同样适用， o. □

命题5. 如果 $p^* = q^* = 1$ 是一个均衡，则必有 $b \geq 2a$ 和 $c \geq 2d$。反之，当 $b \geq 2a$ 且 $c \geq 2d$时，$p^* = q^* = 1$ 是一个均衡。

证明。 首先，对于代理人 A， $V(A)$ 在 $p^* = 1$ 处达到最大值。这要求 $(b-a)q^* - a \geq 0$. 。根据 $q^* = 1$，这就是 $b \geq 2a$。根据对称性，对于代理人 B，我们有 $c \geq 2d$。

此外，当 $b \geq 2a$ 和 $c \geq 2d$时，我们可以验证， $p^* = 1$ 和 $q^* = 1$ 分别使用户 A 和用户 B 的相应效用最大化，从而证明命题的第二部分。

□

备注：当 $c > 2d$ 和 $b > 2a$时，我们有三组均衡点：(0，0)、(1， 1) 或 $(\frac{d}{c-d}, \frac{a}{b-a})$。

备注：当 $c = 2d$ 和 $b > 2a$、 $p^* = 1$ 和 q^* 满足条件$1 \geq q^* \geq \frac{a}{b-a}$时，它们构成一个均衡。（此外还有另一个均衡 (0，0)）

备注：当 $b = 2a$ 和 $c > 2d$、 $q^* = 1$ 满足条件 $1 \geq p^* \geq \frac{d}{c-d}$时，它们构成一个均衡。（此外还有另一个均衡 (0，0)）

命题6. 假设 $\max(a,b) > 0$ 且 $\max(c,d) > 0$。那么，如果 $b < 2a$ 或 $c < 2d$，则只有一个满足 $p^* = q^* = 0$的均衡。

证明。 根据上述讨论，如果 p^* 和 q^* 都为正且构成一个均衡，那么必有 $b \geq 2a$ 和 $c \geq 2d$，这与本命题的假设矛盾。

现在我们证明，不可能存在一个均衡，使得 p^* 和 p^* 中只有一个为 0。我们用反证法证明。不失一般性，假设 $p^* = 0$ 和 $p^* > 0$。那么在平稳分布中，代理人 B 的平稳质量将为 0，因此其每回合效用也为 0。假设代理人 B最初拥有非零（$_{12}$）货币，则代理人 B 可以通过将所有货币用于自我生产，严格提高这一效用。这说明 $p^* = 0$ 和 $p^* > 0$ 无法构成均衡。同理， $p^* > 0$ 和 $q^* = 0$也不可能。因此，唯一的均衡是 $p^* = q^* = 0$。

□

总之　　对于两个代理人，所有可能的均衡均列于表1中。

情形	均衡结果	均衡条件	命题
1	不采用（$p^* = q^* = 0$）	始终成立	1 和 6
2	双边部分采用（$p^* = \frac{d}{c-d}$ 以及 $q^* = \frac{a}{b-a}$）	$b > 2a$ 和 $c > 2d$	2
3	双边完全采用（$p^* = q^* = 1$）	$b \geq 2a$ 和 $c \geq 2d$	5
4	单边完全采用（$p^* = 1$，和 $0 < q^* < 1$ 或， $0 < p^* < 1$和 $q^* = 1$）	$b \leq \frac{q^*+1}{q^*}a$ 和 $c = 2d$ 或， $b = 2a$ 和 $c \geq \frac{p^*+1}{p^*}d$	3 和 4

表1：双智能体均衡摘要

4 三个主体的平稳分布

现在我们考虑一个交易产品/服务的三主体网络。首先，给定马尔可夫链转移矩阵 P，我们推导该三主体网络的平稳分布。注意，在本节中，P_{ji} 表示代理人 i用于购买代理人 j的服务和产品的货币比例。对于每个代理人 i，其资源$\sum_{j=1}^{3} P_{ji} = 1$（每列的列和为 1）。我们令 x 为表示平稳分布的 3×1 向量，因此可得以下 $Px = x$

$$\begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}$$

这等价于

$$(-P_{21} - P_{31})x_1 + P_{12}x_2 + P_{13}x_3 = 0, \tag{3}$$
$$P_{21}x_1 + (-P_{12} - P_{32})x_2 + P_{23}x_3 = 0, \tag{4}$$
$$P_{31}x_1 + P_{32}x_2 + (-P_{13} - P_{23})x_3 = 0, \tag{5}$$
$$x_1 + x_2 + x_3 = 1. \tag{6}$$

我们求解参数为 $P'_{ji}s$ 时的平稳支出（x_1，x_2，x_3）。首先改写 $x_3 = 1 - x_1 - x_2$，将 x_3 代入方程 (6) 的第一个方程，得到

$$\begin{aligned} &(-P_{21} - P_{31})x_1 + P_{12}x_2 + P_{13}(1 - x_1 - x_2) = 0 \\ \Longrightarrow\ &(-P_{21} - P_{31} - P_{13})x_1 + (P_{12} - P_{13})x_2 + P_{13} = 0. \end{aligned}$$

我们还将 x_3 代入方程 (6) 的第二个方程，得到

$$\begin{aligned} &P_{21}x_1 + (-P_{12} - P_{32})x_2 + P_{23}(1 - x_1 - x_2) = 0 \\ \Longrightarrow\ &(P_{21} - P_{23})x_1 + (-P_{12} - P_{32} - P_{23})x_2 + P_{23} = 0. \end{aligned}$$

然后，我们求解含两个变量 x_1，x_2 的简化方程组，

$$\begin{cases} (-P_{21} - P_{31} - P_{13})x_1 + (P_{12} - P_{13})x_2 + P_{13} = 0, \\ (P_{21} - P_{23})x_1 + (-P_{12} - P_{32} - P_{23})x_2 + P_{23} = 0. \end{cases} \tag{7}$$

假设行列式 $\Delta = (P_{12} + P_{32} + P_{23})(P_{21} + P_{31} + P_{13}) - (P_{12} - P_{13})(P_{21} - P_{23}) \neq 0$。为求解 x_1，我们将第一式乘以 $(-P_{12} - P_{32} - P_{23})$，将简化系统 (7) 的第二式乘以 $(P_{12} - P_{13})$。得到

$$x_1 = \Big(P_{13}(P_{12} + P_{32} + P_{23}) + P_{23}(P_{12} - P_{13})\Big) \Big/ \Big((P_{12} + P_{32} + P_{23})(P_{21} + P_{31} + P_{13}) - (P_{12} - P_{13})(P_{21} - P_{23})\Big).$$

同理，为求解 x_2，我们将第一式乘以 $(P_{21}-P_{23})$，将系统 (7) 的第二式乘以 $(-P_{21}-P_{31}-P_{23})$。得到

$$x_2=\Big(P_{23}(P_{21}+P_{31}+P_{13})+P_{13}(P_{21}-P_{23})\Big)\Big/\Big((P_{12}+P_{32}+P_{23})(P_{21}+P_{31}+P_{13})-(P_{12}-P_{13})(P_{21}-P_{23})\Big).$$

因此，平稳支出的解为

$$\begin{pmatrix}x_1\\x_2\\x_3\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\Big(P_{13}(P_{12}+P_{32}+P_{23})+P_{23}(P_{12}-P_{13})\Big)/\Delta\\\Big(P_{23}(P_{21}+P_{31}+P_{13})+P_{13}(P_{21}-P_{23})\Big)/\Delta\\1-x_1-x_2\end{pmatrix}. \tag{8}$$

5 三个及更多智能体的均衡

在第3节中，我们已经找到了两个代理人情形下的所有均衡。现在，我们基于第4节的结果，转而讨论三个及更多智能体的情形。我们有以下定理。

定理1. 设 n 为智能体的数量，且 $n\geq 3$。那么，至少存在一个均衡，其中每个智能体都不将支出用于其他智能体的产品/服务。

证明. 我们证明，每个智能体只选择购买自身的产品/服务便构成一个均衡。事实上，如果某个智能体（例如智能体1）选择了其他支出模式，将其货币的一部分用于购买另一个智能体的服务/产品，那么由于没有其他智能体向智能体1购买，智能体1的平稳分布将为0。这会使智能体1获得的效用为零，其效用不可能因此增加。因此，每个智能体只将货币用于购买自身的产品/服务便构成一个均衡。

□

定理2。 假设代理人1 每花费一美元，就能从自身获得比其他任何智能体为代理人1提供的效用都更大的效用。那么存在以下均衡：*a*）代理人1只向自己购买；*b*）代理人2和代理人3 不向代理人1购买；*c*）代理人2 和代理人3 达到双代理人情形中仅涉及代理人2 和代理人3时所描述的均衡。

此外，在每一种可能的均衡中，代理人1 都必须花费自己的货币购买自己的产品/服务；如果仅代理人2 和代理人3 就能达到各自每回合效用均非零的均衡，那么其他智能体在购买代理人1的产品/服务时必须0 花费货币。

证明。 我们首先证明第一部分。假设智能体1转而选择将其货币的非零比例用于购买其他智能体的产品以及

服务，而其他智能体不改变其支出模式。那么在平稳分布中，流向智能体1的货币与从智能体1流向其他智能体的货币必须相等。但由于其他智能体不会花钱购买智能体1的产品/服务，该货币流必须为0。这进而意味着从智能体1流向其他智能体的货币流必须等于0。因此智能体1的平稳概率必须为0，从而意味着智能体1将只有0效用。因此智能体1无法通过改变其当前支出模式来提高其效用。

出于同样的原因，智能体2或智能体3无法通过将货币用于购买智能体1的产品和服务来提高自身效用。因此，如果智能体2和智能体3已经处于仅涉及彼此的双智能体均衡中，那么三智能体系统就处于均衡状态。

现在我们证明第二部分。假设在某个均衡中，智能体1将非零比例的货币用于购买智能体2或智能体3的产品/服务。那么智能体1可以把这部分支出转而用于购买自己的产品/服务。这样做不会降低智能体1的平稳分布概率，因为不会有货币从智能体1流向其他智能体（注意，之前智能体1的净货币流为0）。在此过程中，智能体1的效用会提高，因为智能体1自身提供的每单位支出的产品/服务效用更高。假设智能体2或智能体3将非零比例的支出用于购买智能体1的产品和服务，那么智能体2（或智能体3）的平稳概率必定等于0，导致智能体2（或智能体3）的效用为0。因此，如果其他智能体能够达到各自每回合效用均非零的均衡，它们就不会花钱购买智能体1的产品/服务。

□

定理3。 假设每个代理人都会为其他任何代理人购买其产品/服务时所花费的每一美元提供单位效用，但购买自己的产品/服务时提供0效用。则每个代理人采取以下行动构成一个均衡：*(1)* 每个代理人将其货币的一半花在另外两个代理人各自提供的产品/服务上；*(2)* 每个代理人花0 购买自己的服务/产品。

证明。 由于对称性，我们只考察智能体1，并判断在假设另外两个代理人保持行动不变的情况下，它是否能通过改变自己的行动来提高效用。也就是说，

$$P_{12} = P_{32} = P_{13} = P_{23} = 1/2,$$

and

$$P_{22} = P_{33} = 0.$$

$$P_{22} = P_{33} = 0.$$

因此，在第4节的推导中，智能体1的平稳概率（质量） is

$$x_1 = \frac{\frac{1}{2} \times \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\right)}{\frac{3}{2}\left(P_{21} + P_{31} + \frac{1}{2}\right)} = \frac{1}{2P_{21} + 2P_{31} + 1}$$

.

在此平稳质量下，智能体1的效用为

$$x_1 \times (P_{21} \times 1 + P_{31} \times 1) = \frac{P_{21} + P_{31}}{2P_{21} + 2P_{31} + 1}.$$

当 $P_{21} + P_{31}$ 达到最大值时，这一数量也达到最大值。因此，$P_{21} = P_{31} = \frac{1}{2}$ 使智能体1的效用最大化，这证明所考虑的行动集合能够实现纳什均衡。

□

有趣的是，我们证明了以下“旋转”对称策略并非纳什均衡，尽管它为智能体1带来的效用与上一条定理中讨论的策略相同。

定理4. 假设每个代理人都会为任何其他代理人购买其产品/服务所花费的每一美元提供单位效用，但如果代理人购买自己的产品/服务，则提供0 效用。那么，每个代理人采取以下行动并不能构成均衡：*(1)* 智能体1 将全部货币花在智能体2身上；*(2)* 智能体2 将全部货币花在智能体3身上；*(3)* 智能体3 将全部货币花在智能体1身上。

证明。 可以证明，平稳质量为

$$x_1 = x_2 = x_3 = \frac{1}{3}.$$

智能体1的效用为1 3。让我们来考察智能体1，并假设智能体1将其支出策略从“把全部货币花在智能体2身上”改为“把全部货币花在智能体3身上”。

切换后，会出现一个新的平稳分布，可验证如下：

$$x_1 = x_3 = \frac{1}{2},\ x_2 = 0.$$

新的 智能体1的效用为 1 2。因此，先前的策略并非纳什均衡 .

□

从以上讨论可以看出，尽管在两种策略中，智能体都选择了能为自己带来最佳短视效用的智能体，但这些策略在是否构成纳什均衡方面可能有所不同。

在下一个定理中，我们给出一种均衡情形：一个参与者控制两个智能体，或两个智能体进行合作。

定理 5. 假设代理人1 在代理人花费一美元时，向代理人2 或代理人3提供效用 c 。假设代理人*2* 或3 在代理人1花费一美元时，向代理人1 提供效用 b 。假设代理人2 将一美元用于购买自己的产品/服务时，会为自己提供效用 d 。假设代理人3 将一美元用于购买自己的产品/服务时，会为自己提供效用 d 。假设代理人1将一美元用于购买自己的产品/服务时，会为自己提供效用 a 。我们假设，如果代理人3将一美元用于从代理人2 （3）处购买，代理人2 （3）会向代理人3 （2）提供0 效用。

假设智能体2 和智能体3 合作以最大化其总效用，或者由一位参与者同时控制智能体2和3，以最大化其总效用。我们假设智能体2 和智能体3不会花费货币购买彼此的产品/服务；并且智能体2 和智能体3 将相同比例的货币用于购买智能体1提供的产品/服务。

那么，以下行动构成一个均衡：*(1)* 智能体1 将其货币的$_{c-d()}^{d}$2 用于购买智能体2提供的产品/服务；智能体1 将其货币的$_{c-d()}^{d}$2 用于购买智能体3提供的产品/服务；智能体1 将剩余比例用于购买自己的产品/服务；*(2)* 智能体2 将 $_{b-a}^{a}$ 比例用于购买智能体1提供的产品/服务；智能体2 将剩余比例用于购买自身的产品/服务；*(3)*智能体3 将 $_{b-a}^{a}$ 比例用于购买智能体1提供的产品/服务；智能体3 将剩余比例用于购买自身的产品/服务。

证明。 我们首先关注智能体1。从它的角度来看，智能体2和智能体3共同构成一个“联合”智能体，该智能体将其货币的$_{b-a}^{a}$ 比例用于从智能体1购买产品/服务，其余比例则用于从这个“联合”智能体自身购买产品/服务。因此，根据命题 2，智能体1无法通过改变当前的支出行为来提高自身效用。

此外，由于我们假设智能体2和智能体3将相同比例的资金用于从智能体1购买产品/服务，且不会将货币花在彼此身上，因此它们无法通过改变自己的行为来提高效用。

□

定理 6。 假设共有四个智能体。其中两个是“能力更强”的*AI*智能体，另外两个是“能力较弱”的人类。我们假设，对于任何购买方代理人，“能力更强”这一组中的任何销售方代理人所提供的效用都严格高于“能力较弱”这一组中的任何销售方代理人所提供的效用。

那么，以下情形构成一种均衡：*1*）代理人1 和代理人2 彼此购买产品/服务，或向自己购买；*2*）代理人 3和代理人4 彼此购买产品/服务，或向自己购买。*3*）其他任何代理人对之间都没有购买行为。

此外　因此，任何可能的均衡都必须满足：*1*）没有“能力较弱”的代理人会花费 s

非零货币向任何“能力更强”的代理人购买任何东西；2）没有“能力更强”的代理人会花费非零货币向任何“能力较弱”的代理人购买任何东西。

证明。 我们先证明该定理的第一部分。首先，任何“更强大”的代理人都不会向任何“能力较弱”的智能体购买。这与定理2的证明中所述原因相同：“更强大”的智能体1（或2）向能力较弱的智能体购买，而“能力较弱”的智能体不向任何“更强大”的智能体购买，这会导致智能体1的平稳概率或质量降至0。这反过来会使“更强大”的代理人的效用变为0，无法提高智能体1的效用。

其次，任何“能力较弱”的智能体（例如智能体3）都不会向任何“更强大”的智能体购买。原因相同：由于“更强大”的智能体不会向任何“能力较弱”的智能体购买，智能体3向任何“更强大”的智能体购买都会导致其平稳质量变为0，无法改善其效用。

现在我们证明该定理的第二部分。首先，我们说明，任何“更强大”的智能体都不会向“能力较弱”的智能体购买产品/服务。反设一个“更强大”的智能体（比如智能体1）向“能力较弱”的智能体购买产品/服务。那么，智能体1可以将原本花在“能力较弱”的智能体上的全部支出转为花在自己身上。如此一来，智能体1的平稳质量和每美元效用都会提高，从而带来更高的渐近效用。这就证明了第二个结论。

由于没有“更强大”的智能体向任何“能力较弱”的智能体支出，因此任何“能力较弱”的智能体都不会向任何“更强大”的智能体支出，因为这样会导致其平稳质量变为0。

□

在上述均衡中，人们可能会疑惑，为什么智能体的最优策略不是向每美元支出所带来的效用最高的最强大供应商代理人购买产品/服务。这是因为在我们的模型中，智能体的支出模式或策略不仅会影响其支出所获得的即时效用，也会影响平稳分布。接下来，我们将举例说明，智能体的最优策略并非选择最强大的供应商。

5.1 一个代理人在最优策略中不选择最强供应商的示例

为简化起见，我们考虑一个三主体网络（尽管计算最优策略的方法和代码适用于一般的 n）。在这个网络中，我们着重于

在智能体2和智能体3的支出策略固定的情况下，优化智能体1的支出策略。我们考虑以下马尔可夫链矩阵：

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{pmatrix},$$

其中我们需要优化 P_{11}、 P_{21} 和 P_{31}。这里， P_{ij} 表示代理人 j将其货币中用于购买代理人 i的产品/服务的比例。在我们的实验中， P最后两列的数值如下：

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & \alpha & 0.5 \\ P_{21} & 1-\alpha-0.02 & 0.01 \\ P_{31} & 0.02 & 0.49 \end{pmatrix},$$

其中， α 是代理人2的可调参数。 α 越大，代理人2就越愿意将其货币用于购买代理人1的产品和服务。在此示例中，我们取 $\alpha = 0.01$。

我们采用如下 U 矩阵

$$U = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 9.8 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{pmatrix}.$$

尽管代理人2每花费一美元能为代理人1提供高得多的效用（9.8），但代理人1的最优策略是将其全部货币花在代理人3身上。这是因为该策略会使代理人1获得更大的平稳分布。值得注意的是，代理人3将其货币中用于向代理人1购买产品的比例，远高于代理人2。

6 结论与未来方向

本文研究了由多个智能体（包括人类代理和AI智能体）组成的经济中的均衡。我们基于一个以马尔可夫链平稳分布为基础的产品/服务交易模型推导出这些均衡；在该模型中，我们考察经济活动产生的长期效用，而非其短期收益。对于由两个代理人组成的模型，我们完整刻画了所有可能的经济均衡及其出现条件。有趣的是，我们证明，除非每个代理人都能通过购买另一个代理人的产品/服务使自身边际效用至少翻倍（而非仅仅增加），否则在任何经济均衡中都不会发生购买另一个代理人的产品/服务的行为。我们还将研究结果扩展至三个及更多智能体，并刻画了更多经济均衡。我们发现

在某些均衡中，“能力更强”的AI智能体对“能力较弱”的智能体贡献的效用为0。

我们的结果表明，采用 AI智能体的益处不仅取决于其能力/生产率，还取决于由人类和 AI智能体作为节点构成的生产者-消费者网络的图结构。

在未来的研究中，我们将扩展研究结果，考虑每个智能体提供的特定且不同类型的产品/服务。除了每回合渐近效用外，我们还将考虑贴现效用，以平衡长期效用与短期效用。另一个值得探讨的问题是，中央银行政策和总体生产率提高导致货币总量增加的情形。在本文中，我们只考虑每个智能体自主行动的情形；未来的研究还可以考虑某些参与者能够控制一组智能体，或者多个智能体能够协作，并且其效用是 AI智能体联合行动和联合支出的函数的情形。我们想指出的是，我们使用马尔可夫链概率转移矩阵对经济活动建模的方法，也有望应用于其他研究主题，例如互联经济体中的国际贸易与投资、关税政策、经济和金融制裁，以及购买本地产品的经济政策。在这些主题中，经济活动可以用经济互动网络来描述，其中相关实体是网络中的节点。

参考文献

Abrardi, L.、C. Cambini 和 L. Rondi。2022年。人工智能、企业与消费者行为：综述。《经济调查杂志》36：969–91。

Agrawal, A. K. 等，2019年。通用技术采纳方面的相似性与差异。美国国家经济研究局 。

Cai, H.、C. Xu 和 W. Xu，2023年。选择人工智能还是不选择人工智能，选择本地购买还是不选择本地购买：实际价格的数学理论。*arXiv* 预印本 *arXiv:2305.05134* 。

Goldfarb, A. 和 C. Tucker，2019年。数字经济学。《经济文献杂志》57：3–43。

Hadfield, G. K. 和 A. Koh，2025年。智能体经济。*arXiv* 预印本 *arXiv:2509.01063* 。

Hammond, L. 等，2025年。先进人工智能带来的多智能体风险。*arXiv* 预印本 *arXiv:2502.14143* 。

Kapoor, S. 等. 2024年. 真正重要的AI智能体. *arXiv*预印本 *arXiv:2407.01502* . Li, J. 等. 2024年. 更多智能体就是你所需要的一切. *arXiv*预印本 *arXiv:2402.05120* .

Parrilo, P. A. 2004年. 平方和规划与多项式不等式. 载于*SIAG/OPT Views-and-News*：*SIAM*优化活动组论坛，第15卷，7– 15.