物理世界的互动，也是一场博弈？从自由能视角看纳什均衡与不可判定性 MDPI Games

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/41299.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

物理世界的互动，也是一场博弈？从自由能视角看纳什均衡与不可判定性 MDPI Games。论文标题：Nash Equilibria and Undecidability in Generic Physical Interactions—A Free Energy Perspective

论文链接：https://www.mdpi.com/2073-4336/15/5/30

期刊名： Games

期刊主页：https://www.mdpi.com/journal/games

一、一个根本性的问题

博弈论自冯·诺依曼和摩根斯坦创立以来，已经深刻地影响了经济学、社会科学乃至生物学。纳什均衡（Nash Equilibrium, NE）更是其中的核心概念：每个玩家都选择了对其他玩家策略的最优回应，没有人有单方面改变的动机。

但有一个根本性的问题常常被忽略：在一个通用的物理互动中，系统如何知道自己是否达到了纳什均衡？它能否在有限时间内确定自己正走在通往均衡的路上？

这篇文章的作者（来自塔夫茨大学、东伊利诺伊大学和伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校）从一个非常基础的假设出发：任何物理互动都可以被解释为一场博弈。他们借助自由能原理（Free Energy Principle, FEP）和量子参考系（Quantum Reference Frames, QRF）理论，试图将纳什均衡置于一个更广阔的背景中——在这个背景下，博弈论中的不完全性、不可判定性，以及策略的本质，都可以被看作某些不可行定理（no-go theorems）的必然结果。

二、把物理互动看作信息交换

文章的核心思想是：将两个相互作用的物理系统S（玩家）和E（环境/对手）视为在交换信息。

想象它们之间有一个边界B（在量子力学中称为全息屏）。S在B上编码信息（行动），E读取并解码，然后反过来行动。这个编码-读取-回应的过程，就是一场博弈的物理实现。

• 行动：系统S或E在边界B上准备一个量子比特（qubit）的状态（比如上下、左右）。

• 策略：为了完成这个行动，系统需要一个量子参考系（QRF）——简单说，就是一个定义何为上、何为下的物理标准。选择哪个QRF，就是选择哪种策略。

作者强调，S和E对QRF的选择是独立且自由的。如果它们选择了不同的参考系，那么一方读到的信息就会出现偏差（类似噪音），这恰好对应了博弈论中对手选择了不同策略带来的不确定性。

三、自由能：通用的得分函数

既然物理互动是博弈，那得分或收益是什么？

作者引入了自由能原理（FEP）。简单说，一个系统（比如生物体）要维持自身的存在（保持与环境的边界清晰），就必须不断预测环境的行为，并采取行动来最小化预测误差。

这个预测误差，或者更准确地说，变分自由能（VFE），就成了一种通用的负收益度量：

• 预测越准，VFE越低，得分越高。

• 预测越不准，VFE越高，得分越低。

从这个角度看，所有物理系统（从单细胞生物到人类）都在无时无刻地玩着同一个最基础的游戏——通过最小化自由能来维持自身存在。而我们所熟悉的象棋、扑克、商业竞争，都是在这个生存游戏之上构建的特殊案例。

四、关键问题：如何知道自己赢了？（不可判定性）

如果博弈就是预测和最小化自由能，那系统最终能达到一个稳定的均衡（即完美的相互预测）吗？

• 存在性（有答案）：是的。纳什定理保证了均衡的存在。在物理上，这对应于两个系统达到广义同步——双方都能精确预测对方的行为，VFE最小。

• 可判定性（没答案）：问题在于，系统能否在有限时间内知道自己达到了均衡？

作者的回答是：通常不能。 原因植根于几个深刻的数理逻辑和物理定理：

1.哥德尔不完全性定理：任何足够强大的公理系统都存在无法证明的真命题。类似地，对于足够复杂的博弈，某个策略组合是否是纳什均衡，可能是无法证明的。

2.图灵停机问题与莱斯定理：玩家无法通过有限观察来确定对手的内部状态（比如对手的记忆长度或决策算法）。因此，它无法可靠地预测对手的下一步。

3.摩尔定理的推广：任何有限次数的输入-输出观察，都不足以完全刻画一个通用黑箱的行为。在迭代博弈中，无论对手之前合作了多少次，你都无法确定下一次他会不会背叛。

4.量子层面：系统甚至无法通过观测来确定自己与环境是否发生了量子纠缠。如果连是否处于量子均衡都不知道，就更谈不上判定到达均衡了。

五、量子博弈：策略可以不按常理出牌

文章的后半部分讨论了量子博弈。当玩家可以采用量子策略（如叠加态、纠缠态）时，事情变得更加不同：

• 量子策略优于经典策略：在囚徒困境等博弈中，采用量子策略的玩家可以获得比经典策略更高的收益，甚至能让（合作，合作）成为均衡。

• 贝尔/EPR博弈：这是一种检测量子纠缠的博弈。两个玩家（Alice和Bob）各自测量一个纠缠粒子对的一部分，通过统计结果来确认他们是否共享了量子资源。这个过程中，他们必须同时利用量子资源（纠缠粒子）和经典通信（事后对结果）。

• 局域操作与经典通信（LOCC）：作者指出，许多量子博弈本质上都是LOCC协议——玩家们操作共享的量子资源，并通过一个单独的经典信道交换信息。

六、一个核心观点：理性与预测的冲突

作者在讨论中指出，传统的博弈论假设玩家是完全理性的，即总能做出最优决策。但本文的分析表明：

• 在非均衡状态下，理性玩家也无法可靠预测对手。已有研究证明，存在一些博弈，无论玩家采用何种学习规则，都无法（甚至近似地）预测对手的未来行为。

• 混沌与认知偏差：在简单的博弈中，混沌动力学和人类的认知偏差往往会阻止理性学习的发生，导致无法收敛到纳什均衡。

• 理性本身也可能不可判定：如果将理性玩家视为图灵机，那么判断一个决策过程是否理性，可能本身就是一个不可判定问题。

这篇文章的独特之处在于，它没有停留在分析特定博弈的胜负，而是试图回答一个更根本的问题：在物理世界允许的范围内，我们可以知道关于博弈的什么？

答案似乎是：我们知道的比我们以为的要少。纳什均衡作为博弈论的核心概念，在通用物理互动中可能不是一个可以判定的属性，而是一个可以被逼近但无法被确证的理想状态。

期刊介绍

主编：Prof. Dr. Ulrich Berger, Vienna University of Economics and Business, Austria; Prof. Dr. Kjell Hausken, University of Stavanger, Norway

Games（ISSN：2073-4336）创建于2010年，是一个国际性、同行评审、审稿高效的开放获取期刊(读者免费)，为博弈论及其应用研究提供前沿论坛。本刊旨在为所有运用博弈论工具、模型与方法的学科 (包括经济学、心理学、政治学、人类学、数学、计算机科学、生物学)

提供跨学科交流平台。现已被 Scopus, ESCI (Web of Science), MathSciNet, zbMATH, EconLit, EconBi, ABDC, CABS等多个关键数据库收录，5-Year Impact Factor: 0.7 (2025)。

2024 Impact Factor 0.7 2024 CiteScore 1.2 Time to First Decision 29.1 Days Acceptance to Publication 5.2 Days
来源：Games

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发