arXiv:2601.00433v1 [physics.soc-ph] 1 Jan 2026

文化演化建模

Fredrik Jansson

商业与数学系，梅拉达伦大学，韦斯特罗斯，瑞典；文化演化中心，斯德哥尔摩大学心理学系，瑞典；未来研究所，斯德哥尔摩，瑞典

预印本*†

形式化建模提供了一套工具，帮助我们理解文化动态，从个体决策到反复出现的变化模式。本章阐释模型是什么，以及模型为何重要。借助精确、共享的语言，模型将模糊的假设转化为清晰、可比较、可检验的主张，从而助力思考与交流。本章介绍建模过程，探讨如何在解释的清晰度与预测的具体性之间权衡。文中综述了四类模型：从微观层面采用优化型主体的模型，到宏观层面采用启发式甚至隐式主体的动态模型；涉及推理（贝叶斯推断、博弈论）、适应性更新（强化学习、演化博弈）、平均场方法（分舱模型、种群动态）以及复杂系统（基于主体的模型、社会网络）。在此基础上，本文概述了一个用于文化演化建模的通用框架，将系统状态、认知过程、行为与宏观层面的结果联结起来，形成动态循环，并将个体、群体、制度及其环境联系起来。总而言之，这些工具有助于以多元而连贯的方式理解文化变迁。

关键词： 科学方法，数学模型，基于主体的模型，模拟，复杂适应系统，贝叶斯推断，博弈论，强化学习，种群动态，社会网络

1 引言

想象一下，你和一位特别的人一起旅行，想共度一段惬意的时光。你正在寻找一家烹饪精良、环境安静的餐馆。你路过几家看起来还不错、也确实很安静的餐馆，最后却排起了其中最繁忙的一家。

*Johan Lind 和 Anna Jon-And 编（即将出版）：《从最小原则出发的文化演化》。英国剑桥：剑桥大学出版社。†本研究由玛丽安娜与马库斯·瓦伦贝里基金会（2021.0039）资助。

发生了什么？事情是这样的：最先看到的几家餐馆很安静，因为几乎没有顾客，而这家餐馆之所以更受欢迎，肯定是有原因的。即使其他顾客看起来也都像游客，他们似乎知道一些你不知道的事情。这家店可能有最好的食物，而其他餐馆的质量可能很低，所以何必冒险呢？值得等下去。

更正式地描述这一情形：你观察到顾客在各家餐馆之间的分布严重不均。你很快推测了造成这种分布的过程：有些餐馆的食物比其他餐馆更好，因此吸引了更多顾客；而顾客寥寥的餐馆则因食物或服务差，或价格高而赶走了顾客。或许你并未意识到，但你已经为这一情形构建了一个心智模型，并以此做出了明智的决定。

心智模型是对外部现实的内部表征。但你不必止步于此：你可能会向伴侣解释，为什么你觉得值得在一家餐馆等上半小时，只为坐下来后几乎听不清彼此说话。设计并阐述抽象模型，或许听起来不像是开启浪漫夜晚的活动，但这相当准确地描绘了接下来会发生的事，也是人们常做的事。当你表达自己对情形的理解时，你其实是在构建一个经过粗略简化的版本。你无须考虑排在你前面那个人的胡子、脚下鹅卵石的形状，甚至一天中的时刻；你只需关注关键之处：好餐馆吸引很多人，差的餐馆则不会；这家餐馆门口排着队，隔壁那家却空无一人；因此，这家餐馆更好。你设计出了一个抽象模型：一种有可能表征现实世界现象的结构。你大概会就此作罢，让语言模型和直觉推理足以使自己满意于这个选择，然后转而聊起其他话题。

幸运的是，我们有空间对此展开论述，并构建一个稍微更形式化的模型，从外部观察这一情境。我们将寻找能够解释这一现象的最简单的解释。因此，凭借局外人的视角，我们可以注意到，这个故事中至少有两个过程在起作用：人们了解餐馆的质量，以及人们会模仿他人的行为。后者是这个故事的关键部分，至少对于那对缺乏必要知识的浪漫情侣来说是如此。那么，假设只有后一个过程在起作用，看看我们能走多远。

那么，假设你均匀随机地挑选一个人，并模仿此人所做的选择。如果这听起来不切实际，也与餐馆情境中实际发生的情况相去甚远，那么也可以等价地表述为：按照当前顾客人数所占的比例来选择餐馆。我们可以先假设这种比例关系不仅是成比例的，而且恰好相等，也就是说，

$$p_i = \frac{n_i + 1}{(n_1 + 1) + (n_2 + 1) + \cdots + (n_k + 1)}$$

如果 p_i 是选择餐馆 i 的概率，而 n_i 是餐馆 i的顾客人数。我们给每家餐馆都加上 1，使其被选中的概率不为零。我们按离散时间步迭代这一过程：每个时间步都会有一位新顾客根据指定的概率做出选择，而所有餐馆的每位顾客都会以一定概率（例如 2%）离开。图1a展示了这个模型在五家餐馆情况下的一次模拟。

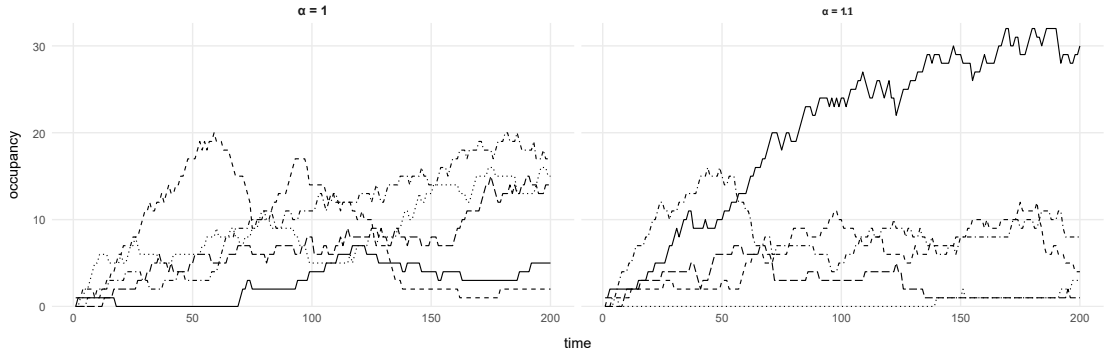

图1：随着时间推移，五家餐馆各自的顾客人数变化。图中分别展示了不含从众偏差和含从众偏差的模拟结果。

从图1a可以看出，即使基于这些简单的假设，餐馆的人气分布也已经很不均匀。不过，我们也可以注意到，这里并不存在自我强化效应；哪家餐馆最受欢迎，甚至会在晚间时段不断变化。正如预期的那样，我们需要进一步完善模型。

不过，在考虑食物质量、声誉和过往经验这些更复杂的因素之前，我们可以借鉴文化演化理论，尝试调整关于社会模仿如何发生的假设。有人提出（例如 Henrich and Boyd，1998），人们常常会表现出从众偏差，也就是说，相较于罕见行为，我们不成比例地更常模仿常见行为。在我们的模型中，可以通过将顾客人数提高到 α 次方来实现这一点，即：

$$p_i = \frac{(n_i + 1)^\alpha}{(n_1 + 1)^\alpha + (n_2 + 1)^\alpha + \cdots + (n_k + 1)^\alpha}$$

希望这个例子能说明模型的普遍性、建模过程，以及形式化模型的用途。模型无处不在：我们构建自己的心智模型，用它们理解世界，然后将其转化为言语模型，与他人交流。我们的大脑能力有限，因此现实必然需要简化，这是一种生理上的必然。离开日常情境，进入科学领域后，言语模型可以转化为理论和假设，并经过形式化，以便接受系统审视。本章将聚焦于文化进化过程建模的形式化部分，不过，这些模型通常源于日常观察。举一个引人注目的例子，并与自然科学作比较：牛顿万有引力定律就著名地源于日常观察。按照传统说法，一个苹果从树上掉落，促使艾萨克·牛顿思考物体为何会径直落向地球。这一简单的观察使他提出了质量之间存在普适吸引力的假设（Westfall，1980）。牛顿将这一直觉形式化为万有引力数学定律。这一模型描述了任意两个物体如何相互吸引：吸引力与它们的质量成正比，与其中心之间距离的平方成反比（Newton，1687）。

苹果落地与行星轨道是截然不同、却高度规律的变化模式

，两者都可以用一种简单的机制来解释：物体彼此吸引。文化与社会变迁显然没有那么规律，但往往仍能辨识出总体的经验模式。首先，文化可能几乎不会发生变化。例如，尽管语言会演变，但语法等基本方面以及一种语言的词汇量，都可能表现出显著的延续性（Pagel 等人，2007年）。在同一文化领域内，例如道德观念，有时变化甚微；比如美国公众对堕胎权或色情制品禁令的看法，而公众对同性婚姻的普遍接受度则在过去50年里呈线性增长（Mulligan 等人，2013年；Strimling 等人，2019年）。文化进化在某些领域也可能呈现快速加速增长。例如，某一科学领域的出版物数量（Bornmann 和 Mutz，2015年）、转推数量或信息在社交媒体上的病毒式传播（Vosoughi 等人，2018年），以及微芯片上的晶体管数量（摩尔定律）（Schaller，1997年）。有时，增长会受到限制，并呈现逻辑斯蒂S形曲线（Rogers，1962年），例如创新在种群中的传播，如移动通信订阅的发展（Gruber 和 Verboven，2001年）。对于某些现象，存在明显的临界点和阈值效应：一段变化甚微的时期之后，传播会突然爆发；#MeToo运动（Centola 等 2018）和阿拉伯之春（Howard 等 2011）便是如此。另一些现象则类似时尚潮流，其采纳率呈倒U形变化（Acerbi 等人，2012年）。这些倒U形模式可能周期性重现，形成趋势周期，例如商业周期（Burns 和 Mitchell，1946年）。为了理解这些模式为何会在不同文化领域中反复出现，以及某些模式为何与特定现象相对应，我们希望找出能够产生这些模式的合理过程。

上述变化模式都出现在群体层面，即宏观层面。然而，这些模式并非完全由群体过程所产生，而是都涉及微观层面上个体主体的行动。宏观层面与微观层面之间的相互作用，可以用一幅图示来呈现（见图 2），这幅图常被称为科尔曼之船（Coleman，1973年）：宏观层面的变化会影响微观层面的主体，进而改变他们的行为，并通过文化传递进一步影响其他主体。主体行为的变化汇聚起来，在宏观层面产生后果；这些后果往往并非简单的汇总，而是只有通过多个主体之间的互动才会出现的涌现模式。随后，这些后果又会带来宏观层面的变化，循环由此重新开始。我们最初关于按比例模仿来选择餐馆的模型，只假设了简单汇总这一微不足道的互动；但在引入从众偏差后，顾客数量的宏观层面变化会对主体产生不成比例的影响，并共同形成餐馆的马太效应。一个更引人深思、借鉴了更多社会理论的例子是：社会条件的改善如何引发革命。改善的社会条件首先会使个体的期望提高，却无法得到满足，从而产生挫折感并引发攻击性；攻击性又会将挫折感传播给其他个体，最终，当参与其中的人达到一定数量时，这种集体攻击性便会演变为革命（Coleman，1990年）。

这些微观—宏观相互作用的复杂性很快就会超出我们的认知极限，使非正式推理或纯粹的言语推理变得不够充分。形式化建模在这里是一种非常有用的工具：它迫使我们明确阐述假设，揭示原本可能被隐藏的逻辑后果，并使我们能够系统地探索个体层面的

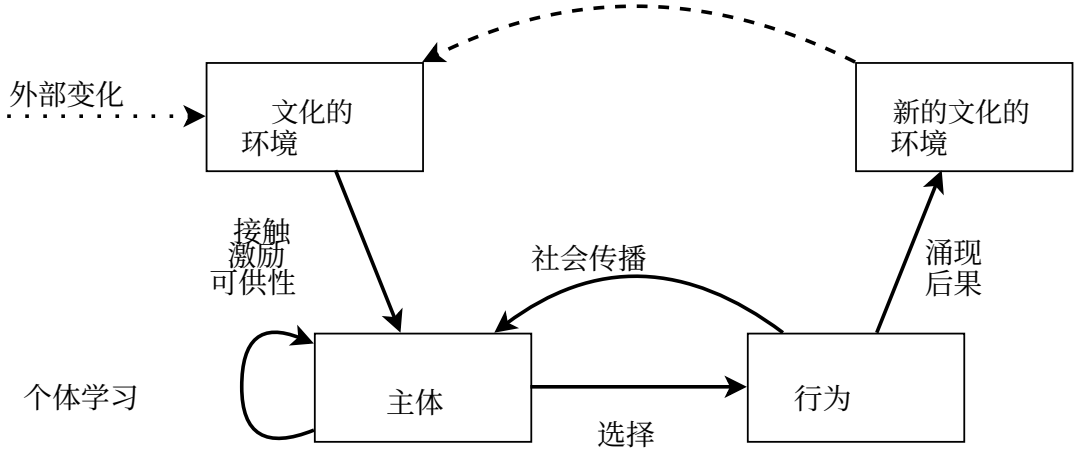

图 2：对科尔曼之船在文化演化中的改编。宏观层面的文化背景与微观个体行动之间的关系。

机制如何扩展为宏观层面的模式。通过采用形式模型，我们可以严格检验相互竞争的假设，量化不同微观过程的相对重要性，并识别出仅凭言语解释往往难以揭示的阈值或临界点。最终，形式模型为理解文化演化提供了一种精确的语言，将理论洞见与经验数据紧密联系起来。

2 关于建模

为了让形式模型这一概念更加形式化一些（双关语意），我们可以将其定义为：对一个系统的简化版本，并明确说明其组成部分及其关系。简化不仅是必需的，也是其一项主要特征。要找到从 A 到 B 的路，颗粒度恰当的地图比过于详尽的地图更有帮助。合适的颗粒度取决于你的目的：不妨比较一下用于在市中心步行游览的旅游地图和地铁地图。要弄清楚乘坐哪些列车可以到达某个地铁站，你无需了解地形、街道名称或桥梁的位置。地图描述的是静态结构，而理解文化演化通常需要描述一个过程；因此，我们关注的是动态模型。如果我们能用数学语言描述这些模型，就能使其明确无歧义，同时也构建起一个逻辑引擎，将假设推导为结论。随后便可以用这个逻辑引擎对假设进行形式化检验。

假设你提出假设 A，认为某种机制会产生观测到的现象 B。你设计了一个形式模型来探究 A 的后果，而模型的输出确实是 B。你能得出什么结论？嗯，你并未证明 A 是现实世界中导致 B 的原因，因为也可能存在其他能够产生 B 的机制。不过，你已经证明 A足以 产生 B。这一点可能很有启发性，因为它对更复杂的解释提出了质疑。在我们的餐馆示例中，我们看到，要产生一家餐馆占据主导地位、入住率高度偏斜的现象，人们无需具备关于哪些餐馆好的知识、拥有同质偏好并做出知情选择；

这些都不是必要的假设；只需假设存在从众偏差，就足以产生这种现象。我们还看到，假设人们进行无偏随机模仿（A），并不会产生如此严重的偏斜（B），也就是说，A 并未产生 B。这并不一定意味着 A 是错误的，但它是不充分的，还需要进一步的假设，或者可能需要其他假设。在我们更一般的餐馆选择模型中，该模型包含参数 α，我们发现，必须假设 $\alpha > 1$，也就是说，至少在其他参数保持不变时，必须存在某种偏差。

最后，模型可能表明，A 会导致 C，而非 B。如果我们恰好知道 C 为假，那么就可以推导出一个有力的结论：A 也为假（这条推理规则称为 否定后件式 或 否定结论）。如果我们起初有理由相信 A，那么证伪 A 就是波普尔意义上的真正科学进步（波普尔 1962）。例如，托勒密天文学便是如此：它将地球置于宇宙中心，认为行星和恒星沿完美的圆周围绕地球运行，却因此得出与观测到的行星运动不符的预测，例如火星逆行（库恩 1957，1962）。再举一个文化演化领域的例子：人们通常假设，理性选择会引导人们作出决定。将这一假设应用于流行音乐排行榜这类文化市场时，人们应当根据歌曲的质量而非同伴影响来选择歌曲。研究者在一项实验中比较了两种情况：受访者可以听新音乐，但无法或可以获得其他用户选择的社会信息。结果表明，缺乏社会信息会使成功率的分布更加均匀，同时也让单首歌曲能否成功更容易预测（Salganik 等人 2006年）。与此相反，现实中的流行专辑排行榜呈现幂律分布，单首歌曲能否成功难以预测——仅假设存在随机复制，就能生成这种模式（Bentley 等人 2007年；Eriksson 等人 2010）。在有社会信息的市场中，随机复制可以说是一种零假设：在此基础上加入更多假设时，它可作为参照模型。在这种情况下，加入关于知情理性选择的假设，反而会让预测变得更差。

关于形式模型是什么以及它们能做什么的描述，希望也说明了它们为何有用。若进一步展开后一点，我们可以将数学建模的理由概括为四项关键特性：精确性、预测、可处理性和思考（参见 Smaldino，2023）。

精确性意味着清楚阐明模型包含和不包含哪些内容。通过明确界定假设、关系和约束，形式模型能够最大限度地减少歧义、避免隐含假设，并实现精确交流。由于数学模型依赖共同的符号语言，不同研究人员可以理解、复现并拓展彼此的工作。在跨学科研究中，这一点尤其有用，因为不同领域的人可能会用不同术语描述相同的结构。

预测涉及揭示明确陈述的假设所带来的后果。一旦界定了模型前提，逻辑框架便能据此预测必然会出现的结果。这样一来，模型的适用范围就清晰明了，也能明确指出模型可以可靠解释哪些现象，以及适用于什么条件。间接而言，这使假设检验成为可能，因为明确的预测可以被证伪；但很多时候，预测本身也可能就是模型的目标。天气预报就是一个例子，在这个例子中，预测是模型的核心目标。

可处理性指模型在分析上的可处理性。由于模型经过简化且具有精确性，因此可以进行形式化探索，并清晰地展示特定机

制如何产生观察到的模式。通过明确定义各个组成部分及其关系，我们可以严格地展示某些机制如何产生观察到的模式。如上所述，我们可以检验某些假设是否充分（能够产生某种结果）、必要（对产生某种结果不可或缺），甚至是错误的（会产生不正确的预测）。这种形式上的清晰性可以辨明哪些假设至关重要，哪些具有误导性。

最后，数学模型可作为思维框架，帮助我们以结构化的方式思考复杂动力学。模型是具体的类比或思维工具，帮助我们理解交织的相互作用，并通过更简单、抽象的表征把握错综复杂的动力学。这与隐喻的运用有关，隐喻同样是一种抽象类比，能够促进思考，并让我们更直观地识别和归类不同类型的情境。通过将隐喻形式化为模型，我们可以检验自己的直觉。数学模型往往能让我们探索仅凭直觉难以处理的更复杂的相互作用。

尽管这四项特性都是建模的理由，但根据目标不同，我们对它们的侧重也可能不同：我们是想理解观测到的现象，寻找一般机制，还是更希望准确预测未来？我们需要捕捉系统的多少复杂性？根据采用的方法和所需的细节程度，我们可以绘制出一张模型类型图，明确应选择哪些模型（Smaldino 2020）。

这种方法涵盖从解析模型到计算模型的各种类型。解析模型通常用方程描述，这些方程可以进行分析和求解，也就是说，我们能够准确知道每个时间步所有变量的取值以及各自的相对贡献。因此，我们可以全面理解系统。对于动力系统中实体之间的某些交互，也可以进行此类分析；但随着实体和交互增多，模型很快就会变得难以进行解析处理。通常，我们可以找到近似数值解；对于更复杂的情况，则可以模拟系统随时间演变的行为。一个能够让模型简化为简单方程组的假设是，主体具有同质性。在我们的餐厅选择模型中，所有主体都遵循相同的规则，尽管这些规则带有随机性。实际上，人们拥有不同的知识和经验，因此可能采用不同的规则，甚至会在模型展开过程中根据新的经验更新规则。基于主体的模型（基于主体的建模）能够捕捉这种异质性；这类模型是模拟自主主体行动与交互的计算机程序。基于主体的模型比基于方程的模型更灵活，也有可能更贴近现实，但代价是可处理性和理解程度降低，而且由于自由度增加会带来更多假设，因此需要更多数据来支撑这些假设。

模型可以描述不同细致程度的现象。理想情况下，我们或许更倾向于采用细节丰富、能够做出精确且高分辨率预测的模型。然而，在对人类行为和社会过程等复杂系统进行建模时，要实现高分辨率，就必须纳入大量变量和假设。每增加一个参数，都会提高模型的复杂性，并需要大量数据来准确校准模型、验证其底层假设。此外，许多人类行为和社会现象可以通过多种方式进行操作化，而选择合适的测量指标颇具挑战。数据驱动模型以操作化有效为前提，要求模型中的参数与实测变量之间存在明确对应关系。例如，考

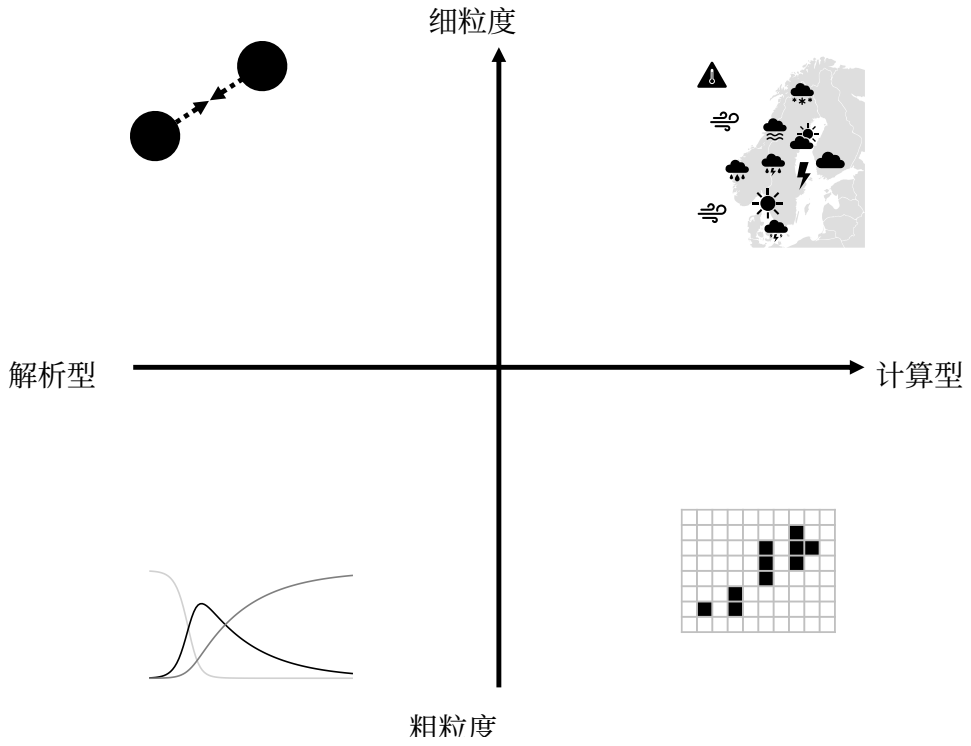

图3：二维建模方法。

虑对选举中的投票行为进行建模。细节丰富的模型可能会纳入个体心理特征、社会经济地位、同伴影响、媒体接触、历史投票模式和地区文化因素等变量。每个变量都可以用不同方式操作化；例如，社会经济地位可以通过收入、教育水平、职业或这些指标的组合来测量。不同的操作化方式与其他变量的各种操作化方式之间，可能产生不同的交互作用。增加参数需要进行专门的实证验证，而潜在参数数量庞大，也会增加模型参数与现实世界变量不匹配的风险。有时，在较简单的系统（如物理学研究的系统）或数据充足且操作化方式明确的特定文化领域中，可以实现高分辨率。例如，在在线数字媒体中，通常可以通过点击、浏览、分享和点赞，精确追踪用户行为；这些行为的操作化方式和测量方法都很明确，因此可以校准预测模型。这类模型可用于预测用户参与度、个性化内容推荐以及优化广告策略。不过，通常而言，粗粒度预测是我们最有希望实现的目标，尤其是在还希望模型易于处理的情况下。因此，许多模型更多是概念性的，而非真正具有预测能力，它们识别的是模式生成机制。

将模型类型的两个维度结合起来，我们便得到一张有四个角的图（见图3）。其中一个角代表理想的解析型、细粒度模型；这类模型在研究物理世界时比研究社会世界更常见，例如牛顿万有引力定律。进—

入复杂系统领域，例如天气，或数字平台上的特定行为，我们仍能保留较高的细节程度，但只能采用计算方法。如果我们希望模型保持可处理性，那么可能就只能接受粗粒度预测，例如流行病学和易感者-感染者-康复者（SIR）模型（追踪易感者、感染者和康复者主体的数量）。我们中的许多人可能还记得，新冠疫情期间的策略预测的是传染病的传播模式，而不是感染人数的准确预测，尤其无法预测哪些人会感染。模型被用于粗略评估应对措施在“拉平曲线”方面的效果（例如 Ferguson等，2020年）。最后，如果我们要对复杂行为进行建模，例如包含同质主体或许多相互作用的组成部分，那么计算型粗粒度模型可能就足以胜任；这类模型仍有助于深入了解系统动力学、评估不同情景、指导政策决策，或识别系统中潜在的临界点。基于主体的模型通常属于这一类，并因其灵活性而得到广泛应用。

所有这些类型的模型都有一些共同的属性和实践。将模型视为一个系统时，我们需要描述这个系统，也就是确定它由哪些部分组成，以及哪些部分彼此相连。我们还要明确系统内部的运作方式，以及系统如何受到外部因素的影响；这些外部因素可以称为环境。因此，我们需要表述各组成部分的内部状态，量化环境的影响，并确定各组成部分行为及其相互作用的结构。一个简单的例子是Lotka–Volterra捕食者—猎物模型（Lotka，1925年；Volterra，1926年）。模型包含两个组成部分，分别代表两个种群：猎物（如兔子）和捕食者（如狐狸）。每个组成部分的内部状态，是其在特定时间的种群规模。由于环境因素，在没有捕食者时，猎物种群会自然增长；而在没有猎物时，捕食者种群则会因死亡率而自然减少。这两个组成部分相互作用：猎物种群会减少，捕食者种群则会增加，变化幅度与捕食者—猎物相遇的次数成正比（而相遇次数又假定与种群规模成正比）。这个简单模型得出两个重要结果：两个种群的规模往往会发生振荡，且可能出现大幅波动；此外，也许有悖直觉的是，改善猎物的环境、提高其增长率，受益的反而是捕食者，而不是猎物。构建这类概念性数学模型，是运用溯因原则的实践；溯因原则是一种形式化的推理，旨在找出最佳解释（Douven，2021年）。无论我们的目标是高精确度地进行预测，还是解释概念，都可以运用奥卡姆剃刀：尽可能简单，但也要复杂到满足需要（Baker，2022年）。文化演化模型的一个常见目标是，它们应当“足够简单，让人能够完全理解，同时又能近似地反映世界实际运作的方式”（Boyd和Richerson，1985年）。

我们可以用一个数学建模模型来总结建模过程（见图 4）。通常，我们从一个现实世界问题开始，即某种具体且可观察、需要理解或解决的事物。例如，这可能涉及理解某些文化现象为何会出现并持续存在，例如餐馆流行度的偏斜。为了解决这一问题，我们将现实世界情境简化为一个概念性文字模型，只关注关键特征，同时舍弃无关细节。基于这一简化情境，我们将其形式化并引入抽象概念，把现实模型转化为一个更精确且

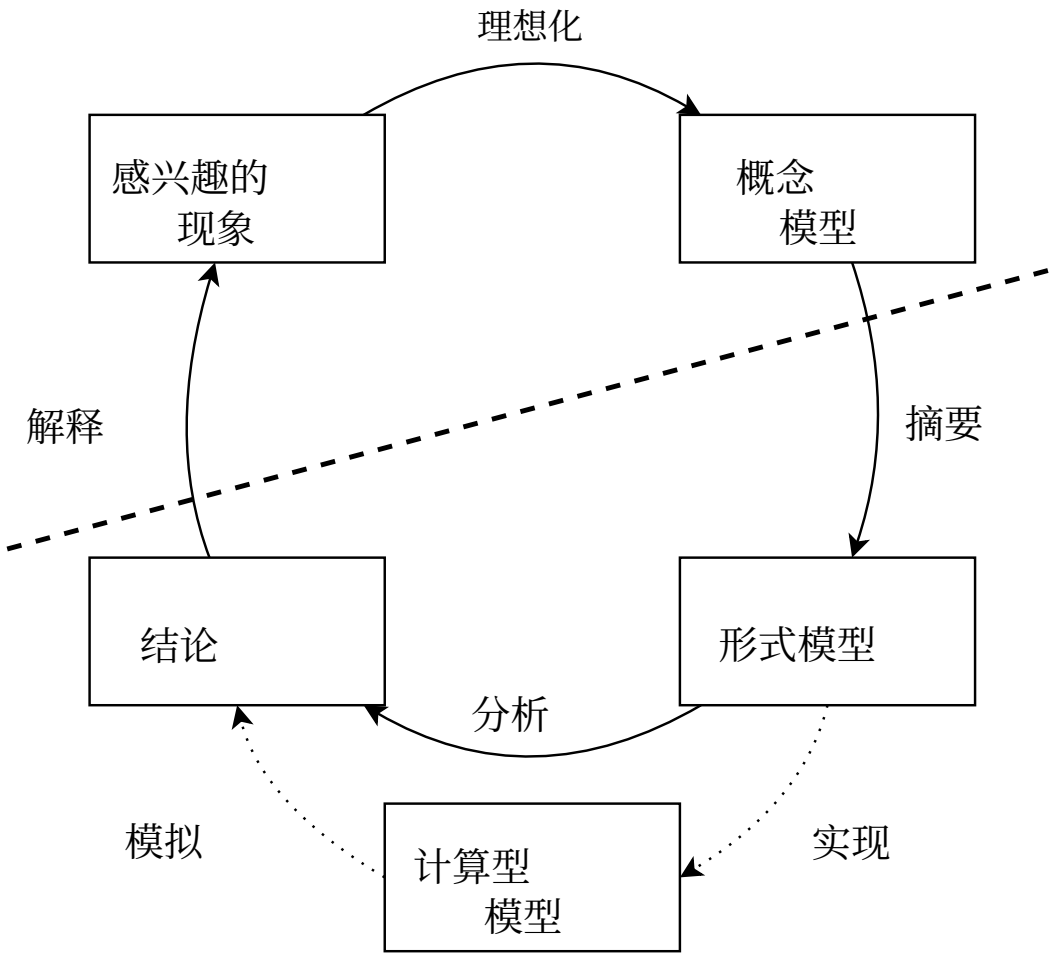

图4： 建模过程的模型。

无歧义的数学模型，并通过变量和方程对其进行明确定义。这种数学形式使我们能够清晰地阐述假设和关系，并为计算奠定基础。根据其可处理性，我们可以直接通过解析处理得出结论；如果模型过于复杂，则可以通过编程将数学模型转化为计算机模型，从而进行计算并模拟那些难以通过解析方式计算的结果。随后，通过分析或模拟，我们生成预测和形式化结论。我们对这些结论进行解释，并将其联系回现实世界问题，以评估其有效性。有效性通常通过模型预测与经验观察之间的匹配程度来衡量。通常，经过一次迭代后会存在相当大的偏差，因此这一循环会反复进行，不断改进每个步骤，以提高模型的准确性和解释力。与所有模型一样，这个建模过程模型也是一种简化，但希望它足够准确，能够发挥作用。

3 文化演化中的建模范式

在人类行动者的建模中，各组成部分及其相互作用很容易变得复杂，从而使模型落入计算型和粗粒度这一端。不过，这并非总是必要的；具体取决于我们想要捕捉哪些现象，有时简单的模型也足以胜任。例如，行人群体总体运动的许多特征，例如行人通道的形成、行走方向的振荡变化，或恐慌情境下的拥堵，都可以用物理学中的基于方程的模型来捕捉，即使假设人被表示为粒子也是如此（Helbing 和 Molnár 1995；Helbing 等，2000）。不过，人并非总能被表示为粒子，这一点并不令人意外：与无生命的物理物体不同，我们各不相同；我们具有能动性，因此不仅会对环境作出反应；我们有目的性，却也容易犯错，所以即便内部或外部力量引导我们采取某些行动，我们仍可能无法贯彻到底；我们既会学习，也会受到社会影响，因此环境和系统的其他组成部分（也就是人）可能改变我们的内在状态，以及不同组成部分之间的互动方式。单个个体的动态已经是许多心理和生理过程共同作用的复杂结果，更不用说社会系统本身的复杂性了。不过，值得注意的是，以人群行为或人们选择餐馆为例，大规模现象的定性特征并不总是取决于微观细节。

对人类行动者进行建模，通常需要以某种方式表征认知。根据我们希望捕捉的现象及其所处情境，假设人们只是基于规则行事，或假设他们高度理性、会思考并以最优方式解决问题，或许就足够了。第一种假设可能适用于无需动脑的低风险环境，例如人群中的移动：人们只要能从 A 移动到 B，且不撞到其他人，就会感到满意。相比之下，第二种假设可能适用于高风险环境，例如买房，或企业制定企业战略。通常，答案介于两者之间：自适应主体遵循自适应规则，并在当前策略失效或发现遵循其他策略的主体似乎做得更好时更新这些规则。

许多不同的假设都可能合乎情理，并能构建出有用的模型。并不存在一个能够统摄一切的统一模型；要研究某种现象的不同方面，我们需要许多模型（Page 2018；Smaldino 2017）。这里可以用盲人摸象寓言作类比：一群从未见过大象的盲人，试图通过触摸一头大象来理解它是什么样子。他们每人触摸大象的一个部位，并各自断言大象是什么样的：如果摸到的是尾巴、耳朵、腿或身体侧面，他们就会说大象像蛇、扇子、树或墙。虽然他们的认识彼此大相径庭，但没有人对自己研究的那个部位说错。与此同时，这则寓言也强调了寻求综合性或统一理论的重要性。尽管每个盲人只能体验大象的一个方面，但大象本身是真实、连贯且统一的。视野拉远会让我们失去细节，但也可能让我们看见大象的全貌，并综合盲人们的发现。拉远视野并不能取代细致审视，但可以为其提供指引。要理解大象的尾巴，先认出大象会有所帮助。文化演化理论或许能发挥辨认大象的作用，但它会纳入各种各样的模型，以研究大象的不同部位。

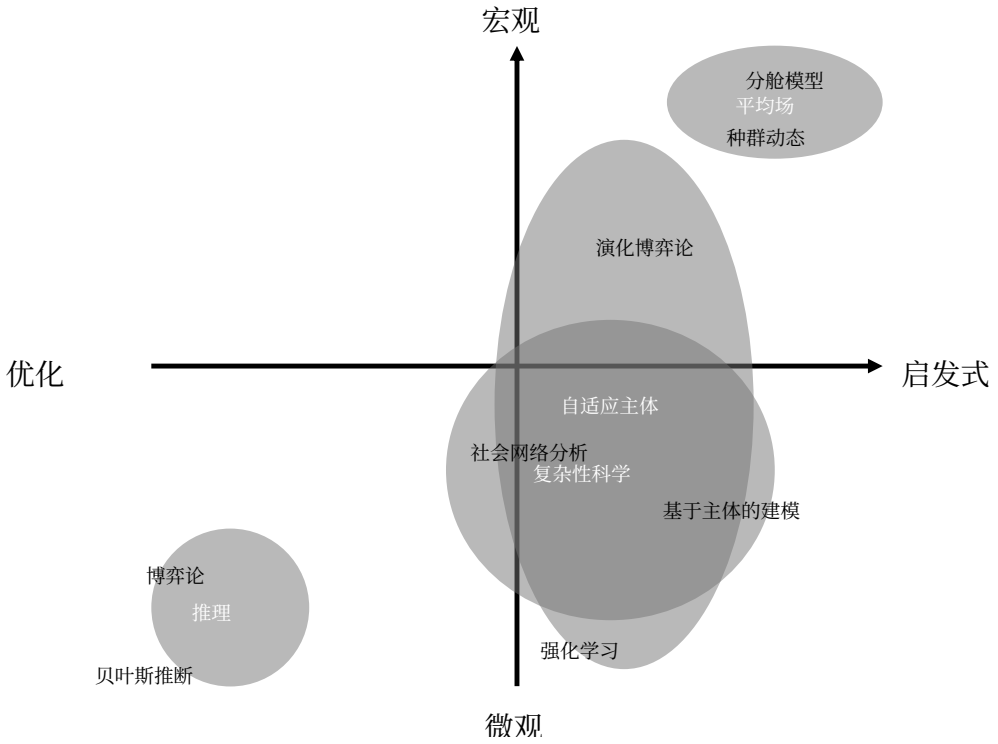

图 5：文化演化中常见的建模范式。这些范式根据主体的评价层级以及被建模实体的规模，映射到一个坐标系中。这些范式分为四个灰色区域，代表不同的模型群组。

我们将在此梳理与文化演化理论相一致、但对行为者认知持有不同假设的各种建模范式，这些假设从理性到基于规则不等；这些范式的组成部分及其所针对的现象也处于不同层级，从聚焦于个体的微观层面，到聚焦于种群的宏观层面。如果将这两个维度设为相互正交的轴，就可以把不同范式置于一个坐标系中（见图 5）。

我们将优化型到启发式放在第一轴上，将微观到宏观放在第二轴上。由此可见，推理模型位于左下角，因为它们以个体理性为目标。这里包括贝叶斯推断和博弈论这两种范式：前者认为理性意味着利用信息构建合理的世界观，后者则意味着最大化结果。在第一轴的中间位置，且横跨从微观到宏观的整个范围，我们可以找到自适应主体模型。这包括强化学习，它将前述两者结合起来，作为一种微观层面模型，通过利用信息来最大化奖励，但其方式更基于规则。更偏向种群层面的方法是演化博弈论，它像经典博弈论一样考察策略情境，但假设存在选择压力，而非理性。在右上角，我们可以找到质量作用或平均场模型，用于描述种群动态或流行病学，分别考察种群中频率的变化以及疾病的传播，并假设个体同质且充分混合。最后，打破

从理性微观层面到基于规则的宏观层面模型这条轴线的，是复杂性科学；它所涉及的模型通常关注个体基于规则的行动或适应性行动，以及这些行动如何产生涌现的群体结果，而这些结果并非个体行动的简单叠加。我们将进一步考察社会网络分析和基于主体的建模，前者关注社会互动的结构，后者关注自主异质主体。在本章余下部分，我们将逐一介绍不同范式，并结合若干示例，最后勾勒出一个用于文化演化建模的通用模板。

3.1 推理

有些模型关注个体与环境或其他主体互动时的个体思维，假设主体要么像贝叶斯推断中那样具有认知理性，要么像博弈论中那样具有策略理性。

3.1.1 贝叶斯推断

文化演化的贝叶斯模型将主体根据证据进行信念更新的过程形式化，并已被用于研究信念极化（Nielsen and Stewart 2021年；Weather- all and O'Connor 2021年）以及语言结构的涌现（Griffiths and Kalish 2007年；Kirby et al. 2014年）等现象。这些模型假设主体具有认知理性，并基于所有可获得的证据进行概率推理。主体从初始信念出发，这些信念构成其先验概率，并且可能因文化背景或个体学习经历而有所不同。假设你对假设 H 感兴趣。你的先验信念是一个主观概率 $P(H)$，表示 H 是否为真。随后，你观察到一些证据 E，这些证据支持或反对 H。作为具有认知理性的主体，这一观察会促使你将对 H 的信念更新为条件概率 $P(H|E)$，即在你看到 E的情况下 H 成立的概率。假设可以涉及例如哪种科学理论或治疗方法更好、某种语言中的语法参数、适用哪一项规范，或一枚硬币是否有偏。相应地，证据可能是实验结果、语言使用、观察到的行为或连续抛硬币结果。同样，由于你是理性的，你会使用贝叶斯定理来进行这一推断，该定理表明：

$$P(H|E) = \frac{P(E|H)P(H)}{P(E)}$$

正如我们所见，这还要求你能够估算在假设 H 为真的前提下，最初观察到证据的似然 $P(E|H)$。有时这纯粹是数学问题（例如参见蒙提霍尔问题），有时则需要关于世界的知识。作为后一种情况的例子，假设你服用了一片止痛药片，却忘了查看它的颜色。你知道它不是红色就是蓝色，但由于你认为两种颜色的药片数量大致相同，因此它们被选中的概率相等。现在，你担心自己究竟身处现实世界 H_R，还是处于矩阵梦境 H_B之中；这分别是两种药片可能引发的、不太寻常的副作用，而你的先验信念是 $P(H_R) = P(H_B) = \frac{1}{2}$。然而，你意识到自己仍然感到疼痛；这种情况在现实世界中很可能发生，比如 $P(E|H_R) = .7$，但在矩阵中不太可能发生，比如 $P(E|H_B) = .1$，因此这种体验发生的概率是 $P(E) = P(E|H_R)P(H_R) + P(E|H_B)P(H_B) = .4$（你服用了红色药片后感到疼痛的概率，以及

你服用了蓝色药片后感到疼痛的概率之和）。有了这条新证据，

$$P(H_R|E) = \frac{P(E|H_R)P(H_R)}{P(E)} = \frac{0.7 \cdot 0.5}{0.4} = 0.84$$

既然我们已经深入认识论领域，不妨从相关文献中举几个例子，看看模型如何以违背直觉的结果令我们感到意外。Nielsen and Stewart（Nielsen and Stewart 2021）研究了贝叶斯智能体是否必然会在信念上达成一致。尽管主体会理性地更新信念，并且接收到相同的证据，作者仍表明，先验信念的差异可能导致后验信念分歧；在某些条件下（例如，对某个事件赋予零概率，而其他人认为该事件有可能发生），这些差异可能持续存在，甚至随时间扩大。因此，即使是能够获取相同证据的理想理性主体，也可能出现持续分歧和极化。类似地，O'Connor and Weatherall 发现，即使其中一种信念是错误的，只要将其他主体的证据视为不确定，这种极化仍有可能出现（O'Connor and Weatherall 2018）；而且，这种极化还可能传播到其他信念上（Weatherall and O'Connor 2021）。

3.1.2 博弈论

博弈论或许是首个雄心勃勃、旨在以统一方式将社会科学形式化的主要框架；如果可能，还要"以促成物理科学建立的方式"实现这一目标（von Neumann and Morgenstern, 1944）。与早期孤立地对种群或个体进行建模的尝试不同，博弈论纳入了相互依存的决策，而这可以说是理解社会行为所必需的。因此，博弈是指这样一种情境：既定规则界定了一组策略，而参与者的结果不仅取决于其自身的决策，也取决于其他参与者的决策。结果则由主体的偏好或效用决定。

一个著名的例子是囚徒困境 （囚徒困境）。我们不妨不考虑囚徒，而是来看两家争夺同一批顾客的公司。假设它们提供相同的商品，价格也相同，并且市场份额均等。如果它们彼此合作（而不是对顾客合作），就会维持现有价格，继续平分市场。然而，双方都有降低价格的动机，或者也许会发起一场成本高昂的广告宣传活动，因为这样就能提高自己的市场份额。但与此同时，每售出一件商品所带来的收入也会减少。为了简化这一情形，我们把各种不同的竞争策略归为一种，称为背叛，并为双方的各种选择赋予一些数值，那么就可以用一个 2×2 矩阵来表示这个博弈，矩阵中的数字对代表各参与者的效用。假设市场价值为四十亿。背叛需要付出十亿的代价，却能吸引竞争对手的所有顾客。这些数字看起来或许有些随意，但在我们的分析中，重要的只是效用的相对大小，而不是绝对数值。于是，我们得到如下矩阵：

玩家1 \ 玩家2	合作	背叛
合作	2 2	3 0
背叛	0 3	1 1

从矩阵中可以看出，相互合作带来的总收益最高，尽管单方面背叛能让一方获得更高收益。唯一会被另一种策略（帕累托）支配、因而处于劣势的策略是相互背叛；与相互合作相比，这对双方都更不利。现在进入有趣的部分：参与者会怎么做?

我们需要对主体如何作出决策作出一些假设。通过上文的贝叶斯推断，主体已充分利用了现有信息。在这里，我们已经掌握完全信息，但主体对结果有着不同的偏好。类比认识理性，我们假设主体具有经济理性，会使其期望收益最大化。这种纯粹的自利听起来或许有些愤世嫉俗，但收益未必是金钱上的，通常更广义地说是效用；这样一来，这种说法便或多或少成了同义反复：主体会最大化自己想要的东西（其中可能包括他人的福祉）。接下来的部分则更棘手：我们不仅假设主体能够识别所处情境并知道自己想要什么，还假设他们知道另一位参与者想要什么。你是理性的，因此假设与你共同参与博弈的人也是理性的；而你又假设对方认为你是理性的，如此等等。这或许正是经济学作为一门社会科学，广泛运用博弈论的一个关键原因：博弈论被用于分析具有金钱收益、参与者彼此互不相识的经济情境。

不过，我们也可以想象一些更日常的情境。你和室友可能都有好几次机会把垃圾拿出去，这对你们双方都有好处；但你们都想省去这个麻烦，并希望室友去做，同时也冒着垃圾可能会一直留在厨房里发臭的风险。这种情况也可以用囚徒困境来建模，其矩阵与上面的类似。

那么，如果另一位参与者选择合作，理性行动者会怎么做呢？合作的收益是 2，背叛的收益是 3，因此他们会选择背叛。如果另一位参与者选择背叛，那么合作的收益是 0，背叛的收益是 1，因此他们还是会选择背叛。也就是说，无论另一位参与者做什么，背叛都是理性回应。由于这个博弈是对称的，另一位参与者面临的情况也一样，因此，考虑另一位参与者选择合作的情形纯粹是假设；无论是在价格竞争中、用广告惹恼公众，还是弄得厨房脏乱不堪，他们都会选择背叛。相互背叛是这个博弈唯一的均衡：一对策略，在这对策略下，任何一位参与者都没有单方面改变策略的意愿。这就是为什么这种情况是一种困境：尽管存在一个我们双方都认为更好的结果——相互合作，我们最终却得到一个糟糕的结果。将这一结论推广到两位以上的参与者，就会出现公地悲剧（参见 Ostrom 1990），我们最终会过度使用宝贵资源，因为收益归我们，而边际成本却由社会承担。污染、过度放牧和过度捕捞都是这样的例子。类似的模型也可以用来解释为什么午餐室总是乱糟糟的。

不过，情况并非全无希望。我们经常会重复进行博弈，而未来也会投下阴影。我现在的行动可能影响你明天的行动，甚至影响其他人的行动，

通过谣言和声誉。如果我的合作得到合作回应，那么合作就可能成为一种理性选择。如果我们能够维持那些抑制背叛行为的社会规范，也可能实现相互合作（深入讨论请参见即将出版的 Jansson 和 Sundelin）。这些过程可以将局面转变为猎鹿博弈或其他协调博弈。

协调博弈的一个简单例子是选择在道路的哪一侧行驶。与囚徒困境不同，这显然是一个具有两个均衡的情形：只要我们协调一致，选择哪一侧并没有那么重要，而且我们都没有单方面改变策略的动机（否则可能会导致致命后果）。

猎鹿博弈是一个有趣的特殊案例，同样具有两个均衡，但性质不同。假设有一个即将举行的聚会，你对此并不是特别感兴趣，但你怀疑某个特别的人（你羞于直接询问对方）可能会参加。碰巧的是，这个特别的人对你和聚会也有同样的考量。我们可以通过下面的矩阵来建模这种情形：你们都要在参加聚会和舒适地待在家里之间做出选择（效用以表情符号严格表示）：

他者 / Ego	聚会	Home
聚会	☺ ☺	☹ ☹
Home	☹ ☹	☹ ☹

和囚徒困境一样，参加聚会是一个双方都想要的选项。与囚徒困境不同的是，这是一个均衡：如果玩家2在那里，你就会继续选择参加。因此，对于拥有完全信息的理性玩家来说，这是一个乏味的游戏。然而，如果其中某个假设不成立，就像本例一样（这不一定意味着你不理性，只是缺乏信息），你就有可能独自坐完一场无聊的聚会。虽然双方都去参加聚会是最优均衡，但待在家里是风险占优均衡：无论另一个人做什么，你都能确定自己在家会过得还不错（也许是在读这本书）。

博弈论提供了一种严谨的方法来分析策略相互依赖，揭示从市场竞争到家务分工等情境中合作、冲突与协调背后的逻辑。然而，这种分析依赖于一些强假设：主体是理性的，能够识别博弈的结构，并且能够正确判断他人的理性程度和偏好。这些假设一直受到广泛讨论和质疑，由此催生了行为博弈论等扩展理论——它借鉴心理学的见解；以及演化博弈论——它探究策略如何在种群中传播，而不要求进行显式推理。即便如此，标准模型仍然很有价值，可作为清晰的基准。它虽是理想化的，却往往能带来出人意料的启发。

3.2 适应性

另一种让模型保持简单且易于处理的方法，是作出相反的假设：主体完全不思考。如果主体仍会通过改变策略来应对环境，那么它们就是适应性的。若我们关注个体层面，强化学习研究的是个体如何随时间与环境互动。若我们转而将环境视为拥有策略的其他行动者，那么我们又回到了博弈论所讨论的相互依赖关系。然而，若不考虑理性，我们可以改为假设在群体层面存在选择性进化压力。不出所料，这一范式称为演化博弈论。也可以有多个强化学习者；在某些条件下，这两种范式存在交集（Bloembergen 等，2015）。

3.2.1 强化学习

强化学习研究的是主体（无论是动物、人类还是机器）如何通过经验学习调整自身行为以适应环境。其特点是试错学习：主体与环境互动，观察以奖励或惩罚形式呈现的结果，并据此调整行动。一个值得关注的参数是探索与利用之间的权衡。回到最初选择餐馆的例子，假设你是当地人，有很多外出就餐的机会，不理会社会信息，而且很乐意成为一家好餐馆的常客。在决定利用——也就是选定一家餐馆——之前，你应该探索多少家餐馆？又应该给每家餐馆多少次机会？即使你已经找到一家不错的餐馆，附近可能仍有更好的选择。然而，尝试一家新餐馆也有可能令人失望。也许你已经找到了镇上最好的餐馆，却恰好在不怎么样的一天去了那里，或者点的那道菜不合口味。

让我们先来看看，你会如何评估在餐馆用餐时获得的信息。最简单且影响力最大的学习模型之一是 Rescorla 和 Wagner（Rescorla 和 Wagner，1972）模型，它将刺激与结果之间的联结如何更新形式化。该模型最初用于解释动物的巴甫洛夫条件作用，此后广泛应用于心理学和神经科学，用来描述预期如何根据意外程度或预测误差而更新。其最简单的形式可以表述为：

$$\Delta V = \alpha(\lambda - V)$$

其中，V是当前的联结强度，λ是刺激能够获得的最大强度，α是学习率。也许你会把 Pizzeria Rodentio 和美味的食物体验（V）联系起来；但下次光顾时，你却在披萨里发现了一条老鼠尾巴，这可能具有极强的负面价值（λ），于是你会根据它与你的预期之间的差异，并结合例如你对老鼠作为食材有多在意或多敏感（α），相应地更新这种联结价值。

现在的问题是，联结强度如何引导你的行为。如果你有若干个特定的选择，那么它们应当转化为进行每个选择的概率。一个常见的模型是*softmax* 函数。它平衡了探索与利用，确实是一个概率函数，而且在数学上很方便。这个平衡由“温度”参数控制 。

如果一个主体对可用选择 $V_1, \ldots, V_n$ 估计出的值为$A_1, \ldots, A_n$，那么选择 A_i 的概率为：

$$P(A_i) = \frac{e^{\beta V_i}}{e^{\beta V_1} + \ldots + e^{\beta V_n}}$$

如果 $\beta = 0$，那么主体总是进行探索，也就是说，联结值并不重要。β 越大，主体就越倾向于利用，但也有可能错过更好的选择。

这一模型可以与社会学习相结合，例如采用引言中的例子，以研究个体学习与社会学习，以及探索与利用之间的权衡。通常，只要种群中有相当程度的个体学习和探索，大量的社会学习就会有益（参见例如 Mesoudi 2021）。

强化学习不仅是一种理解学习与决策的范式（Enquist 等，2023），而且作为机器学习的基本范式之一，也已成功用于实现和开发人工智能（Sutton and Barto 2018）；无论是机器人在迷宫中导航，还是软件精通某款游戏，著名的例子都是 AlphaGo——它是首个在 2015年 击败职业围棋棋手的计算机程序。

3.2.2 演化博弈论

博弈论中策略互动的逻辑并不要求主体具备有意识的理性，只要求它们拥有一种策略。将博弈重新理解为遗传的（或通过社会传播的）策略之间的竞争，而非具有前瞻性的心智之间的竞争，促成了演化博弈论（EGT）这一领域的诞生（Smith 和 Price，1973；Maynard Smith，1982）。因此，EGT 将博弈论应用于演化种群。经典博弈论（CGT）根植于经济学，而 EGT 起源于生物学，但此后也被用于社会科学，作为理性选择的一种替代方案。

其底层博弈结构与 CGT 中的相同，因此我们可以在假设参与者是理性行动者或演化种群的情况下，分析同样的博弈。然而，由于关于主体的假设不同，它们往往适用的情境也不同。

一个经典例子是鹰鸽博弈，它对资源争夺中的冲突进行建模。想象两个个体正在争夺一项价值为V的资源。鹰派会升级每一场争夺，但也会冒着对手同样升级并可能获胜的风险；在这种情况下，该主体需要承担受伤成本C。因此，一只鹰派遇到另一只鹰派时获得的收益是可变的，但其期望值为$(V - C)/2$。面对攻击性行为时，鸽派会退让；因此，两只鸽派相遇时会共享资源。对于一个行动者（自我）而言，其收益矩阵取决于自身策略以及另一位参与者（他者）的策略，具体如下

Ego \ 他者	Hawk	Dove
Hawk	$\frac{V-C}{2}$ $\frac{V-C}{2}$	V 0
Dove	0 V	$\frac{V}{2}$ $\frac{V}{2}$

设 x 表示鹰派的频率， π_H 和 π_D 分别表示鹰派和鸽派的平均收益。利用复制子动力学，我们可以发现，鹰派的频率会随时间发生变化（$\dot{x}$），其变化为 $\dot{x} = x(1-x)(\pi_H - \pi_D)$。因此，只要种群中同时存在鹰派和鸽派，且鹰派的平均收益高于鸽派，鹰派的频率就会增加。当$x = \frac{V}{C}$时，我们会在 $\dot{x} = 0$处发现一个均衡，此时频率保持不变，前提是失败成本大于资源价值。因此，攻击性行为与和解行为会共存，其比例取决于资源价值与成本之间的关系。日常生活中，一个稀缺资源的例子是交通中车道合并或交叉时出现的瓶颈；人们要么像鹰派一样强硬地主张自己的通行权，要么像鸽派一样协商谁先通行。

让我们回到经典博弈论部分的囚徒困境（PD）例子。我们看到，理性行动者陷入了困境，因为相互背叛会使他们失去更好的结果，除非重复互动能够带来未来收益。这类重复博弈似乎很适合从进化视角加以研究。事实上，政治学家 Robert Axelrod（Axelrod 和 Hamilton，1981年；Axelrod，1984年）很早就邀请研究者提交策略，参加一场计算机锦标赛，在循环赛制重复囚徒困境中进行博弈，其中收益代表适应度，而采用成功策略的主体，其繁殖数量会多于采用不成功策略的主体。虽然无条件合作者相互对局时表现良好，但无条件背叛者却可以轻易利用并入侵由无条件合作者组成的种群。然而，当无条件背叛者变得更加普遍时，它们不得不更频繁地与同类对局，因此相对而言表现不佳。看来，需要的不是这些简单而极端的策略，而是一种相当复杂的剥削性策略。颇令人意外的是，最终获胜的却是简单的以牙还牙（TFT）：第一步选择合作，之后复制对手上一轮的行动。TFT不仅简单明了，而且友善（从不首先背叛）、具有报复性（立即惩罚背叛），并且宽容（通过一次合作行为恢复合作）。凭借这些特点，它能够抵御背叛者的利用，同时与亲缘关系较近的主体合作，展示了互惠如何能够在没有预见能力的情况下进化出来。

在进化生物学中，进化博弈论为原本令人费解的特征提供了简约的机制性解释。然而，将收益建模为策略的适应度，而非个体效用，虽然有助于解释生物进化，但在文化演化方面却更具挑战性。文化适应度并没有明确的定义（例如，参见 Jansson 等人即将发表的文章，其中对此有所讨论）。它取决于具体情境，具有多维性，受认知影响，也不一定与个体行动者的保留或繁殖相关。或许可以通过强化学习的视角来理解文化适应度。采用强化学习的主体会根据经历或观察到的奖励，按比例调整采取某种策略的倾向。当许多这样的主体相互作用时，其总体动力学近似于一个复制子方程，其中预期奖励率发挥着适应度的作用（Bloembergen 等，2015）。在这种情况下，与其从传递的角度理解适应度，不如从保留的角度理解，或许更为准确。

3.3 质量作用或平均场

再从微观层面模型沿阶梯向上，来到宏观层面模型，我们会发现一些将种群作为整体来研究、忽略个体异质性的模型。由于我们不考虑个体特有的过程，因此可以将这些种群视为基于规则的。要使这种做法成立，我们需要假设质量作用定律成立：相互作用的速率与相关状态变量的乘积成正比；简单来说，就是种群充分混合；再简单一点说，就是两类个体相遇的概率与各自的数量成正比，而且每个个体受到其他个体平均影响的作用。这些过程通常用常微分方程建模：方程根据某个量当前的值及相关量的值，描述该量在每个时刻如何变化。有时，正如物理学中的平均场模型，这些方程是更复杂的高维模型的简化易处理版本，用来近似其行为。我们将探讨种群动力学，即对一个或多个相互作用种群随时间变化的建模；以及分舱模型，即种群的不同部分在离散的“舱室”之间移动的模型。

3.3.1 种群动态

种群动态在数学生物学中有着悠久的历史，始于马尔萨斯增长模型（马尔萨斯，1798年）。该模型指出，所有生命形式都有指数增长的倾向。这类模型将种群的规模和组成随时间的变化视为动态系统。简单来说，种群在时间$t+1$ 的个体数量 N_{t+1} 是

$$N_{t+1} = N_t + B_t - D_t + I_t - E_t$$

其中，时间 t 的个体数量 N_t 之后的各项，分别表示时间 t 和 $t+1$之间的出生、死亡、迁入者和迁出者数量。在没有迁移的封闭系统中，我们得到一个简单的变化率：

$$N_{t+1} - N_t = B_t - D_t = \left(\frac{B_t}{N_t} - \frac{D_t}{N_t}\right) N_t = RN_t$$

或者用连续时间表示，

$$\frac{dN}{dt} = rN$$

其中， r 是内禀自然增长率， $\frac{dN}{dt}$ 是导数，即 N随时间的变化率。假设存在一个环境容纳量 K，种群无法超过该容量继续增长，例如由于资源限制；并且种群的增长与剩余容量成反比，那么该方程将乘以一个限制因子：

$$\frac{dN}{dt} = rN\left(1 - \frac{N}{K}\right)$$

其中，$\frac{N}{K}$是已使用的资源量，因此$1-\frac{N}{K}$是剩余资源量。第一个连续时间方程会产生指数增长，而加入的这一因子则会产生熟悉的S形（逻辑斯蒂）增长曲线。

我们通常关注相互作用种群的动力学。前文“作为实践的建模”一节提到的 Lotka–Volterra捕食者—猎物模型，就是一个将动力学扩展到两个相互作用物种的例子。令 x 和 y 分别表示猎物和捕食者的种群密度。猎物以 α 的内禀增长率增长，并以 β捕食率随捕食者密度增加而减少。捕食者随猎物密度增加而增长，转化效率率为 γ，并以 δ死亡率自然减少。由于这些速率与种群当前规模成正比，我们将猎物的表达式乘以x，将捕食者的表达式乘以 y，得到以下微分方程组（$\dot{x}$ 是表示 x的导数，即变化率的另一种写法）：

$$\begin{cases} \dot{x} &= \alpha x - \beta xy \\ \dot{y} &= \gamma xy - \delta y \end{cases}$$

这个相对简单的模型会产生振荡动力学和反直觉反馈（例如，改善猎物栖息地可能会让捕食者获益更多）。

例如，人们曾使用这一模型的变体研究语言衰退的动力学（Abrams 和 Strogatz（2003））。现在，我们的物种密度 x和 y表示两种语言使用者的频率，其中，例如，x 指当今的多数语言。我们暂且忽略出生和死亡，并引入一个频率偏差α，它类似于餐馆选择入门模型中的偏差，使语言吸引使用者的程度分别与 x^α 和y^α成正比。除此之外，我们还将引入多数语言的地位偏差 s 以及用于切换语言的转换率 c。少数语言使用者转而使用多数语言的概率为 csx^α，反过来的概率则为 $c\left(1-s\right)y^\alpha$。为了推导多数语言使用者数量随时间的变化，我们将这些表达式分别乘以能够从一种语言转用另一种语言的使用者数量，即 y 和 x，然后用第一项减去第二项。首先要注意，种群中的每个人都以这两种语言之一为主要语言，因此 $x+y=1$，也就是说 $y=1-x$。这意味着我们只需计算 x，从而得到一个方程：

$$\dot{x} = csx^\alpha(1-x) - c(1-s)x(1-x)^\alpha$$

通过恰当选择参数值，该模型与所研究社会中苏格兰盖尔语、威尔士语和克丘亚语使用者的历史数据高度吻合。它表明，如果一种少数语言缺乏足够的声望，或使用者人数低于临界规模，那么它几乎不可避免地会逐渐走向消亡，除非其地位得到提升，或从众压力有所减弱。

3.3.2 分舱模型

与其描述不同的物种或群体，分舱模型描述的是同一种群中的子群体，或称分舱，以及个体在这些分舱之间的流动。新冠疫情爆发后，这类模型突然进入公众视野（也让数学建模者短暂地声名鹊起）

2020年新冠疫情席卷全球时，这类模型的重要性凸显出来，因为它们是流行病学和传染病建模的基础。疫情期间尤其受到关注的一类模型是SIR模型，其中的字母代表易感者、感染者和康复者。模型的时间演化通常从大多数主体都易感某种疾病开始，只有少数主体已经感染并正处于感染状态，其中可能只有一位零号病人。易感主体与感染者接触时，会以传染率 β 转为感染者；感染者则会以速率 γ 自发康复。若用*S*、*I*和*R*表示三个分舱中主体的数量或占比，并假设种群充分混合，使感染者与易感主体接触的比例对应于速率 $S \cdot I$，那么我们就得到微分方程组

$$\begin{cases} \dot{S} &= -\beta SI \\ \dot{I} &= \beta SI - \gamma I \\ \dot{R} &= \gamma I \end{cases}$$

求解（或模拟）这个系统，可以得到表示各个隔室中主体数量随时间变化的曲线（见图3左下角）。“拉平曲线”这一说法便由此而来：疫情暴发期间，一个重点是让 β 保持较小（例如通过保持社交距离），使感染者曲线的峰值尽可能平缓，从而避免医院人满为患。

具有传染性的不仅有病原体，思想也一样。流行病学模型也有助于文化传播的建模（Cavalli-Sforza 和 Feldman，1981年）。相关术语可能需要作比喻性理解（当然，有些思想和风潮确实比其他的更容易被我们称为疾病），但方程仍然相同。

例如，我们可以用传统的易感者-感染者-康复者框架对生物病原体建模。然后，我们可以将其与一个平行的、类似易感者-感染者-康复者的模型结合起来，把反疫苗情绪视为一种文化病原体，它与流行病学病原体一同传播，或助长后者的传播。研究表明，借助这种框架，可以说明疾病传播如何与反疫苗情绪及各种社会接触相互作用，并据此提出减轻疾病传播的潜在策略（Mehta 和 Rosenberg，2020年）。

进一步延伸这一逻辑，我们可以专门对思想的传播进行建模。例如，在科学思想方面，Bettencourt等人（Bettencourt等人，2006年）采用易感者-感染者-康复者式框架，拟合了理论物理学家采用费曼图的历史数据。在他们的研究中，“感染”指首次发表或使用费曼图；“康复”则指转而采用其他方法或退休。他们发现，与接触率起主导作用的典型疾病不同，费曼图长期的“感染者”状态（采用之后，往往会持续使用数十年）以及有组织的社交渠道（如会议和合作），才是推动其迅速普及的主要因素。

这与模因学中频繁使用流行病学术语的情况如出一辙：文化特征，即模因，常被比作寄生虫（道金斯，1976）或病毒（丹尼特，1995；布莱克莫尔，1999）。因此，流行病学模型被用于描述宗教的传播与多样化，也就不足为奇了（多贝利和伊斯波拉托夫，2010）。这些模型还被扩展到涵盖自发的非社会性“感染”，例如个体自行发现信息或获得奖励，以研究行为现象。一个典型

案例是肥胖：尽管没有生物病原体参与，增重行为仍会以类似易感者-感染者-康复者模型的方式，通过社会关系传播（希尔等，2010）。

这让我们重新回到疾病，由此形成闭环，说明流行病学模型也可以用来研究文化传播，而文化传播又能解释这类模型最初旨在说明的现象（即疾病的传播）。

3.4 复杂性

最后，连接微观与宏观的一种研究方向是**复杂系统**，它自下而上地研究宏观结果，关注彼此相互作用的自组织组件。复杂性并不一定意味着事物复杂或包含许多部分，而是特指系统行为所具有的非线性、相互关联和涌现特性。天体运动的预测就是一个很好的例子，例如行星轨道。对于只有两个物体的系统，比如一颗恒星和一颗行星，它们之间的引力相互作用可以用牛顿运动定律和万有引力定律轻松计算。这会产生可预测的椭圆轨道。加入第三个天体后，它们的引力会以非线性的方式相互作用。系统由此变得复杂：位置上的微小变化会导致轨道发生巨大变化。这些轨道具有混沌性，长期来看难以预测。动力系统无法精确求解，只能通过模拟来研究。即使结果很复杂，其机制却非常简单：每个天体只遵循牛顿万有引力定律，受到其他天体的吸引力与它们的质量成正比，与距离的平方成反比。正是这些相互作用使系统变得无法预测。

一个关键概念是涌现：某一层级上的简单规则，会在更高层级催生新的模式、行为或结构，而这些并不能从规则本身直接看出。例如，粒子通过物理力相互作用，形成原子；原子结合成具有化学性质的分子；分子形成能够自我组织并复制的结构，进而成为活细胞；细胞构建出具有神经系统的多细胞生物；神经活动产生思想和情绪；而思考的个体相互作用，则会涌现出社会系统。每一层都会引入新的状态和相互作用类型，它们受下层影响，却无法简化为下层。

为了研究社会系统，我们常将个体建模为自适应主体：与天体不同，它们会对环境作出反应，从经验中学习，并随着时间推移调整自己的行为。当许多这样的主体相互作用时，它们的适应会彼此影响，形成反馈回路，并演化出集体模式。由此便产生了**复杂适应系统**，其结构和动态变化涌现于各组成部分持续不断的适应之中。因此，市场、规范或文化趋势等社会系统，可以被视为复杂适应系统：它们由个体决策塑造，却会产生没有任何单一主体能够掌控或预测的结果。

引言中选择餐馆的例子已经同时包含了主体之间的互动以及人气上的非线性，这是从众偏差造成的。如果我们不引入从众偏差，而改为引入异质性，也就是说，允许主体彼此不同，那么就能找到其他会导致更突发的非线性反馈过程，使人气骤然跃升。假设主体并不会因为餐馆更受欢迎就更想去那里，而是会避开那些看起来太空的餐馆。如果主体采用不同的门槛，比如有些人要求入住率达到 10%，另一些人要求达到 20%，其余主体的要求则更高，那么一旦

某家餐馆的入住率达到 10%，它就会吸引所有此时认为餐馆已经足够满的主体。这些主体到来后，入住率很可能已经超过 20%，于是这家餐馆也会吸引门槛为 20% 的、更挑剔的主体，从而进一步提高入住率，如此等等。只需再来一位起到引爆作用的顾客，餐馆的入住率就可能迅速从 9% 飙升至座无虚席。有人认为，类似过程也是社会运动和抗议活动（如阿拉伯之春）背后的驱动机制：当足够多的人参与时，其他人也会加入；例如，当人们觉得足够安全时便会参与（参见 Granovetter 1978；Howard 等 2011；González-Bailón 等 2011；Centola 等 2018）。

本书有一整章（Michaud 和 Enquist，即将出版）专门讨论复杂系统，另有一章（Jansson，即将出版）专门讨论文化系统，因此我们在此不再赘述。不过，我们将简要介绍两种能够体现异质性的常见建模范式：基于主体的建模（ABM）允许主体属性存在变异，而社会网络分析（SNA）则关注互动模式的变异，即主体会优先与某些其他主体建立联系。基于主体的模型通常包含空间结构或网络结构，而社会网络分析则专门研究互动的拓扑结构如何塑造系统动力学。

3.4.1 基于主体的模型

基于主体的模型（ABMs）是旨在模拟自主主体在特定环境中行动与互动的计算工具。与基于汇总方程的模型不同，基于主体的模型会明确纳入个体层面的异质性与决策，通常旨在研究由微观层面动力学产生的涌现现象。每个主体都按照一套既定规则或适应性行为行事，并与其他主体及环境互动；这种方式可以捕捉社会系统和文化演化中固有的复杂非线性过程。基于主体的模型在对细节丰富、贴近现实且互动微妙的情景进行建模时具有很高的灵活性，但这种灵活性也会降低模型的透明度和解析可处理性；这类模型通常以计算机模拟的形式实现。

虽然基于主体的模型通常比这里讨论的其他模型更复杂，但设计起来未必更困难；恰恰相反，NetLogo 等入门工具让缺乏经验的形式化建模学习者也能轻松上手。由于添加参数和额外假设十分容易，加之自由度很多，因此很容易找到可以赋予吸引人叙事的模式——有时甚至可能过于容易。人们也很容易添加过多内容，继而迷失在参数的丛林中：假设可能过于具体，无法对应到普遍的人类驱动力；也可能过于笼统，无法与经验数据相对应，而且难以厘清究竟是什么导致了结果。基于主体的模拟具有复杂性和随机性，这可能使人难以清楚地理解或预测系统层面的结果；解读结果往往需要进行大量敏感性分析和计算实验。自由参数众多时，人们可能容易忽略驱动结果的参数其实并非真正关注的参数（Jansson 2013）。

一如既往，我们应尽可能追求简单性。事实上，一些最具开创性的模型足够简单，让我们能够直观地理解其中发生了什么，甚至在一定程度上只用纸笔就能推演。

一个鲜明的例子是谢林隔离模型（Schelling 1971, 1978）。设想两类主体生活在一个格点上。只要周围有一些邻居属于自己的群体，每个主体即使处于少数群体中也会感到满意。比如，假设每个主体都要求至少三分之一的邻居与自己属于同一类型；否则，他们就会搬到一个随机的空位上。如果我们从随机分布开始，按照这些规则进行模拟，结果会令人惊讶：主体会自发组织成大型同质簇。换言之，即使个体能够包容多样性，显著的隔离仍会出现。这一结果可以通过临界点的概念来理解。即使是微小的局部失衡也可能触发迁移：如果几个邻居搬走，其他主体周围同群体邻居的比例就可能跌破门槛，促使他们也离开。这种局部连锁反应会不断扩大，强化隔离模式。最初只是对某种相似性的轻微偏好，却由此一步步演变成大规模分离。

另一个相关模型，更侧重于文化演化，是阿克塞尔罗德文化传播模型（Axelrod 1997）。主体仍然生活在格点上，但不再移动，而是与紧邻的邻居互动，根据相似程度交换文化特征。每个主体都由一组文化特征来表征，其中每项特征都可以取不同的特征值。具有相似特征的主体之间互动更频繁，从而变得更加相似。有趣的是，这种局部趋同可能会产生全球极化：尽管互动会推动局部的文化同质化，但由于不同特征组合的集群逐渐形成，宏观层面上仍会出现彼此不同的文化区域。同样，局部模式与全球模式有所不同：前者趋向相似，后者则走向极化。

更复杂的模型也能带来新的见解。在演化博弈论一节中，我们已经接触过一个基于主体的建模案例：Axelrod（1984）举办了囚徒困境模拟竞赛，结果最简单的策略之一取得了成功。然而，尽管模拟包含许多组成部分，我们仍然可以理解获胜策略成功的原因。

3.4.2 社会网络分析

我们最后讨论的范式研究主体之间互动的拓扑结构，以及这种结构会导致何种动态。社会网络分析（SNA）关注社会关系的结构（即谁与谁互动）如何塑造文化特征的传递与进化。社会网络分析不假设主体是同质混合或随机互动的，而是强调节点之间的连接方式如何影响文化动态。在网络（又称图）中，主体表示为节点，它们之间的连接表示为连边，以此捕捉社会影响、交流或模仿的模式。值得考察的一些典型测量指标包括网络规模、连接数（节点度）及其分布、中心性和聚类（Newman 2003；Jackson 2008）。

不同的社会行为会产生不同类型的网络：例如，优先连接机制——个体更倾向于与已经拥有众多连接的其他个体建立联系——可以生成具有高度连接枢纽节点的无标度网络（Barabási 和 Albert 1999）。这类网络与优先连接相结合，可以产生富者愈富现象，例如，新网站更可能链接到已经颇受欢迎的网站、合作网络的形成，以及城市规模的分布；在城市规模分布中，人口与其在一个国家或地区内的排名成反比，

人口与其在一个国家或地区内的排名成反比。相比之下，基于局部互动或社会强化的网络往往会形成聚类程度高、平均路径长度短的小世界网络（Watts 和 Strogatz 1998）。这体现并概括了一个著名观点：任意两个人之间相隔不超过六层社会关系，通常称为六度分隔；它也为这类网络何时以及如何形成提供了一种机制。这些结构差异对文化特征的传播方式有着深远影响。例如，病毒式传播视频或谣言等简单传染，可以在小世界网络中迅速扩散。然而，复杂传染，也就是需要多位同伴强化的行为，例如采纳新的社会规范或技术，则更可能在聚类网络中传播，因为个体嵌于联系紧密的社群之中（Centola 和 Macy 2007年）。

通过研究互动的拓扑结构，我们可以理解一种奇特的观察结果，即所谓的友谊悖论：许多读者可能都注意到，自己的朋友往往比自己拥有更多朋友——这一点在连接数量可被统计和展示的社交媒体上尤其明显。“许多读者？”你可能会问。没错，而这（不一定）说明社交能力差，因为平均而言，人们的朋友拥有的朋友比他们更多。乍听之下，这种现象似乎自相矛盾，但其产生原因在于，朋友较多的人更有可能出现在他人的好友列表中，因此，当考察随机选取的某个人的朋友时，社交联系广泛的个体会占据过高比例。这一特性会直接影响文化演化。一个人从其直接社交网络中观察到的信息或行为，可能会不成比例地反映受欢迎个体的行动。因此，它可能会放大感知规范：如果有影响力的人采纳了某种做法，那么这种做法看起来就会比实际更普遍，从而加速其传播（Lerman 等人 2016）。这种效应可用于干预措施；例如，研究表明，在健康宣传活动中以核心个体为目标，可以提高总体参与率（Banerjee 等人 2019）。而找到这些个体的一种方法，就是让人们去询问自己的朋友。

社会网络分析强调，社会传播的结构可能与其规则同样重要。比如，同一种传播偏差，根据网络的不同，可能导致完全不同的种群层面结果。例如，一种规范在连通性良好的网络中容易传播，却可能无法在更加分散的网络中扎根（Centola 2010）；极化可能取决于连通性；而由于友谊悖论等结构不对称性，感知流行率可能会偏离实际频率。

社会网络分析常与基于主体的模型结合，以纳入在给定网络中行动的主体之间的异质性，并研究局部互动如何扩展为涌现的宏观层面结果。由于网络以图的形式进行形式化表示，同一框架既可用于理论模型，也可用于分析现实世界的数据，例如观察到的友谊、合作或在线联系。为此，人们开发了统计方法来描述、建模和分析网络，例如衡量网络的中心化或聚类程度，或估计某些网络结构形成的可能性。这些方法因此有助于将形式模型与经验观察联系起来，并使模型立足于现实。

4 文化演化的一般模板

不同范式可以揭示文化动态的不同方面。就像盲人摸象的故事一样，我们可以用不同类型的模型研究同一现象，并获得迥然不同的见解；这些见解都正确，只是针对不同方面。某种思想之所以传播，可能是因为朋友们采纳了它，因为它在认知上或策略上是理性的，因为它提高了适应度，或者因为它以另一种思想为食或胜过了另一种思想。所有这些因素都可能发挥作用，但它从何而来？朋友们为什么会采纳它？我怎么知道它讲得通？它为何能给我带来优势？它又如何与其他思想互动？我们能否把不同部分结合起来，将这些片段联系起来，形成一套全面的理论？如果我们退后一步，看到完整的大象，那么所有不同的部分就会更有意义。

在自然科学中，进化理论提供了这样一种整合性框架。它将各种 disparate 的观察结果——从雀类的喙形到种群的遗传结构——统一起来，形成对生物多样性如何产生并持续存在的连贯理解。进化理论并不取代诸如代谢通路或生态相互作用等领域的详细模型，而是将它们联系起来，置于一个共同的解释结构之中。

文化演化为连接文化发生变化的多种机制提供了一个框架：信念、实践和人造物的变异生成；这些变体通过教学、模仿或交流进行传递；某些变体相较于其他变体取得更大成功或产生更大影响；文化特征在记忆、制度或传统中的保留；以及思想在被解释、扭曲或重新组合时发生的转变。它并不寻求取代推理、学习、影响或创新的模型，而是将它们联系起来，展示多样的认知过程、社会结构和传播机制如何结合起来，产生文化变化，同时又受到文化变化的塑造。通过这一视角来看，道德规范、语言模式、技术扩散或病毒式模因等多种多样的现象，都可以被解释为同一动态过程的组成部分，只是各自具有不同的具体属性。

为了给文化演化建模提供一个通用模板，我们可以借鉴科尔曼之船，正如引言中所述。

首先，我们定义系统状态，其中包括我们希望找出其变化因果机制的各个组成部分。这可以是某一时刻 t 的特征频率 $F(t)$ 的汇总，例如使用少数语言、相信某个特定故事或践行某种行为的种群比例。它也可以不是对种群中特征的汇总，而是制度环境 $I(t)$，例如规范、法律和正式组织，它们共同构成行为的框架。主体彼此相连，信息通过某种社会结构 $S(t)$ 在他们之间流动，例如社会网络。所有这些状态都可能是内生的，也就是说，它们可以在系统内部由社会建构而成。我们还可以加入来自环境的外生影响 $E(t)$，例如资源匮乏或气候。

从宏观走向微观，特征频率、制度规则、社会结构以及环境线索和限制共同塑造每个个体的感知。这可能取决于某种特征的普遍程度；网络会筛选你遇到的人，并使你感知到的分布产生偏差，而制度和环境则限制你能做什么或看到什么。

每个主体都会解读自己接触到的内容，并将其与内部规则和参数结合起来；或许还会考虑当前的信念，通过贝叶斯推断或某种预先设定的

自适应规则。也可以假定这些规则是先天的。还可能存在某种类似选择的复制，例如餐馆示例中的从众偏差，或向文化吸引子偏向性转变（Sperber 1996）。简而言之，接触世界状态会带来心智层面的更新。

每次心智层面的更新都会继而促成一次行为选择，从而产生一种行动：采纳、舍弃、调整、触发、更新、合作或背叛。博弈论模型会将其视为战略选择，而强化学习则依赖先前与接触之间形成的关联。在其他模型中，信念会被修正，或者执行预先设定的和/或自适应规则。行为反应受到制度环境 $I(t)$ 和环境 $E(t)$ 的引导与限制。

这种选择会带来可见行为，例如讲述故事、穿着服装或使用工具。这种行为会成为所有观察者的新证据。观察者是谁，取决于社会结构和互动拓扑 $S(t)$，例如社会网络。同样，每个主体都会解读自己接触到的信息，并将其与内部规则和参数结合起来，这与上文类似，但此时观察的是某个个体，而非种群层面的现象。这会带来心智层面的更新和更多新的个体选择，并最终形成个体互动的反馈回路。

随着个体开始以不同方式行事，集体结果和种群图景也会发生变化。文化选择可能偏向了与更高收益、声望、从众或其他因素相关的变体，或者反复重构可能使叙事和实践朝着心理或生态吸引子转变。我们得到了新的频率分布$F(t+1)$。行为的聚合也可能导致涌现现象，例如通过阈值效应。这可能例如促成一套新的制度安排 $I(t+1)$。一个简单的例子是，主体直接投票支持一项新政策。社会互动可能已经被重新连接，例如由于技术创新，或由于追随者纷纷拥向一位走红的名人，从而形成新的社会结构 $S(t+1)$。环境 $E(t+1)$也可能发生了变化，无论是自行改变，还是由于文化实践所致，例如过度采收。现在，我们拥有了新的系统状态，并且所有步骤都将在这些新条件下重复进行。

正如我们所见，并非所有模型都会详细呈现每个步骤，而是往往侧重其中一些步骤。综合起来，我们便能看到全貌。质量作用模型或平均场模型往往直接将箭头从 $[F(t)\ I(t)\ S(t)\ E(t)]$ 指向 $[F(t+1)\ I(t+1)\ S(t+1)\ E(t+1)]$，而不真正深入探究其中的因果机制。复杂系统模型揭示了从微观到宏观的联系，在一定程度上也揭示了从宏观到微观的联系；适应性模型也同样如此。许多文化演化模型聚焦于微观层面的反馈回路，在这个过程中，个体将文化特征传递给其他个体。从个体的视角出发，我们可以采用一个更简单的模板：

主体具有特征（变异），其中大多数是文化特征，并且可以传递。主体通过互动（传递）了解他人的特征。主体根据环境、种群、发送者、接收者以及特征本身的属性，传递并获取特征（选择）。随后，主体的特征分布发生变化，循环继续。随着时间推移，文化特征便经历一个进化过程。

这种模板假设选择步骤中发生了大量活动，而规则往往被视为一个能自行运作的黑箱，或许有经验观察作为支撑。正如个体层面

的互动会产生涌现的社会现象，个体层面的选择机制也可能是涌现的，源自文化特征之间的互动，以及它们与个体和环境之间的相互作用（Buskell 等人，2019；Jansson 等人，2021、2023）。本书最后一章将探讨此类文化系统所发挥的作用（Jansson，待刊）。

形式化建模是理解文化演化的强大而灵活的工具。它能带来清晰性和精确性，展现简单的假设如何生成复杂的社会模式。关键问题不在于是否要建立现实的简化模型——事实上，所有研究者，乃至普通人，都有自己的心智模型——而在于我们是否将这些模型明确表达出来，并开放给人们探索、审视和批评。清晰阐述模型并不一定会限制我们的视野；相反，它们会引导我们以更系统、更深入的方式思考。

一般理论和极简通用模型是重要的基础，提供概念框架，使更详尽的解释得以发展。驯服复杂性最可靠的方法，或许是从透明的“示例模型”入手，只捕捉核心因果力量（Boyd和Richerson，1985年）。通过聚焦基本过程，这些基础模型揭示关键机制，阐明个体行动如何累积为社会结果，并使我们能够在增加更多复杂层次之前检验定性预测。因此，一组核心的简单模型有助于组织和指导更详尽、专业且具有预测力的理论。

在本章中，我们以多种形式探讨了演化动力学：由从众偏差驱动的偏斜的流行度；理性主体之间持续存在的极化；适应性博弈中合作与背叛的循环；语言优势的逐渐转变；以及由简单的个体偏好自发产生的隔离。尽管这些模型各不相同，但它们都共享一种基于复制、变异和选择的共同进化逻辑。

形式化建模的价值并不止于解释特定现象。将直觉性的思想转化为明确的数学结构，能够培养精确的分析性思维，深化概念理解，并促进跨学科对话。建模能力会随着实践而提高。对于希望加深理解的读者而言，探索现有模型或尝试构建自己的模型，尤其能够带来收获。无论你的目标是理解、预测还是解释文化变迁，形式模型都能为结构化探究和清晰思考提供有力工具。

参考文献

Abrams, Daniel M. and Steven H. Strogatz（2003）：语言消亡动态的建模。《自然》424(6951): 900。doi:10.1038/424900a Acerbi, Alberto, Stefano Ghirlanda and Magnus Enquist（2012）：时尚周期的逻辑。《公共科学图书馆·综合》7(3)。doi:10.1371/journal.pone.0032541 Axelrod, Robert（1984）：《合作的演化》。纽约州纽约市：Basic Books Axelrod, Robert（1997）：文化的传播：一个具有局部趋同和全球极化的模型。《冲突解决杂志》41(2): 203–226。doi:10.1177/0022002797041002001

Axelrod, Robert and William D. Hamilton（1981年）：合作的演化。《科学》211(4489): 1390–1396。doi:10.1086/383541 Baker, Alan（2022）：简单性。载于Edward N. Zalta 编：《斯坦福哲学百科全书》。加利福尼亚州斯坦福：斯坦福大学，2022年夏季版。Banerjee, Abhijit, Arun G Chandrasekhar, Esther Duflo and Matthew O Jackson（2019）：利用闲谈传播信息：理论与来自两项随机对照试验的证据。《经济研究评论》86(6): 2453–2490。doi:10.1093/restud/rdz008 Barabási, Albert-László and Réka Albert（1999）：随机网络中标度的涌现。《科学》286(5439): 509–512。doi:10.1126/science.286.5439.509 Bentley, R. Alexander, Carl P. Lipo, Harold A. Herzog and Matthew W. Hahn（2007年）：流行文化的变化率稳定，反映了随机复制。《演化与人类行为》28(3): 151–158。doi:10.1016/j.evolhumbehav.2006.10.002 Bettencourt, Luís M. A., Ariel Cintrón-Arias, David I. Kaiser and Carlos Castillo-Chávez（2006年）：好思想的力量：利用流行病学模型对思想传播进行定量建模。《物理学*A*：统计力学及其应用》364: 513–536。doi:10.1016/j.physa.2005.08.083 Blackmore, Susan（1999）：《模因机器》。英国牛津：牛津大学出版社 Bloembergen, Daan, Karl Tuyls, Daniel Hennes and Michael Kaisers（2015年）：多智能体学习的演化动力学：综述。《人工智能研究杂志》53: 659–697。doi:10.1613/jair.4818 Bornmann, Lutz and Rüdiger Mutz（2015年）：现代科学的增长率：基于出版物数量和被引参考文献的文献计量分析。《信息科学与技术协会杂志》66(11): 2215–2222。doi:10.1002/asi.23329 Boyd, Robert and Peter J. Richerson（1985）：《文化与演化过程》。伊利诺伊州芝加哥：芝加哥大学出版社 Burns, Arthur F. and Wesley C. Mitchell（1946）：《测量商业周期》。纽约州纽约市：美国国家经济研究局 Buskell, Andrew, Magnus Enquist and Fredrik Jansson（2019）：文化演化的系统方法。《帕尔格雷夫通信》5(131): 1–15。doi:10.1057/s41599-019-0343-5 Cavalli-Sforza, Luigi Luca and Marcus W. Feldman（1981年）：《文化传播与演化：一种定量方法》。《种群生物学专论》第16卷。新泽西州普林斯顿：普林斯顿大学出版社 Centola, Damon（2010）：在线社交网络实验中的行为传播。《科学》329(5996): 1194–1197。doi:10.1126/science.1185231 Centola, Damon, Joshua Becker, Devon Brackbill and Andrea Baronchelli（2018）：社会惯例中临界点的实验性证据。《科学》360(6393): 1116–1119。doi:10.1126/science.aas8827 Centola, Damon and Michael Macy（2007年）：复杂传染与长联系的弱点。《美国社会学杂志》113(3): 702–734。doi:10.1086/521848 Coleman, James S.（1973）：集体行动数学。方法论视角。伊利诺伊州芝加哥：Aldine出版公司 Coleman, James S.（1990）：《社会理论基础》。马萨诸塞州剑桥：哈佛大学出版社贝尔纳普出版社

Dawkins, Richard（1976）：《自私的基因》。英国牛津：牛津大学出版社 Dennett, Daniel C.（1995）：《达尔文的危险思想：进化与生命的意义》。纽约：西蒙与舒斯特出版社 Doebeli, Michael and Iaroslav Ispolatov（2010）：宗教演化多样化模型。《理论生物学杂志》267(4)：676–684。doi:10.1016/j.jtbi.2010.09.013 Douven, Igor（2021）：溯因推理。载于 Edward N. Zalta 编：《斯坦福哲学百科全书》。加利福尼亚州斯坦福：斯坦福大学，2021年夏季版。Enquist, Magnus, Stefano Ghirlanda and Johan Lind（2023）：《人类演化转变：从动物智能到文化》。新泽西州普林斯顿：普林斯顿大学出版社 Eriksson, Kimmo, Fredrik Jansson and Jonas Sjöstrand（2010）：随机复制下人气排行榜更替的本特利猜想。《拉马努金杂志》23(1)：371–396。doi:10.1007/s11139-010-9280-z Ferguson, Neil, Daniel Laydon, Gemma Nedjati Gilani, Natsuko Imai, Kylie Ainslie, Marc Baguelin 等（2020）：报告9：非药物干预措施（NPIs）对降低新冠肺炎死亡率和医疗需求的影响。技术报告，伦敦帝国学院。doi:10.25561/77482 González-Bailón, Sandra, Javier Borge-Holthoefer, 亚历杭德罗·里韦罗 and Yamir Moreno（2011）：在线网络中的抗议动员动态。《科学报告》1(1)：197。doi:10.1038/srep00197 Granovetter, Mark S.（1978）：集体行为的阈值模型。《美国社会学杂志》83：1420–1443。doi:10.1086/226707 Griffiths, Thomas L. and 迈克尔·L·卡利什（2007）：贝叶斯智能体通过迭代学习实现语言演化。《认知科学》31(3)：441–480。doi:10.1080/15326900701326576 Gruber, Harald and 弗兰克·费尔博芬（2001）：准入与标准监管下的市场演化——以全球移动通信为例。《国际产业组织杂志》19(7)：1189–1212。doi:10.1016/S0167-7187(01)00069-8 Helbing, Dirk, 伊莱什·法尔卡什 and 塔马什·维切克（2000）：模拟逃生恐慌的动态特征。《自然》407(6803)：487–490。doi:10.1038/35035023 Helbing, Dirk and 彼得·莫尔纳尔（1995）：行人动力学的社会力模型。《物理评论*E*》51(5)：4282–4286。doi:10.1103/PhysRevE.51.4282 约瑟夫·亨里奇 and Robert Boyd（1998）：从众传播的演化与群体间差异的涌现。《演化与人类行为》19(4)：215–241。doi:10.1016/S1090-5138(98)00018-X 艾莉森·L·希尔, 戴维·G·兰德, 马丁·A·诺瓦克 and 尼古拉斯·A·克里斯塔基斯（2010）：社会网络中社会传染的传染病建模。《公共科学图书馆·计算生物学》6(11)：e1000968。doi:10.1371/journal.pcbi.1000968 菲利普·N·霍华德, 艾登·达菲, 迪恩·弗里隆, 穆扎米尔·侯赛因, 威尔·马里 and 马尔瓦·马齐亚德（2011）：开启封闭政权：阿拉伯之春期间社交媒体发挥了什么作用？社会科学研究网络。doi:10.2139/ssrn.2595096 Jackson, Matthew O.（2008）：《社会与经济网络》。普林斯顿大学出版社。doi:10.2307/j.ctvcm4gh1 Jansson, Fredrik（2013）：民族中心主义空间建模中的陷阱：哈蒙德与阿克塞尔罗德模型的仿真分析。《人工社会与社会模拟杂志》

16(3)：2。doi:10.18564/jasss.2163 Jansson, Fredrik（即将出版）：文化系统的动态。载于 Johan Lind and Anna Jon-And 编：《从最小原则出发的文化演化》。英国剑桥：剑桥大学出版社 Jansson, Fredrik, Elliot Aguilar, Alberto Acerbi and Magnus Enquist（2021）：文化系统与选择性过滤器建模。《皇家学会哲学汇刊*B*辑：生物科学》376：20200045。doi:10.1098/rstb.2020.0045 Jansson, Fredrik, Andrew Buskell and Magnus Enquist（2023）：文化系统。载于 Jamshid J. Tehrani, Jeremy Kendal and Rachel Kendal 编：《牛津文化演化手册（第42–52页）。英国牛津：牛津大学出版社。doi:10.1093/oxfordhb/9780198869252.013.9 Jansson, Fredrik, Ekström and Johan Lind（即将出版）：文化演化思维：从过去到现在。载于 Johan Lind and Anna Jon-And 编：《从最小原则出发的文化演化》。英国剑桥：剑桥大学出版社 Jansson, Fredrik and Tina Sundelin（即将出版）：规范的涌现与变化。载于 Johan Lind and Anna Jon-And 编：《从最小原则出发的文化演化》。英国剑桥：剑桥大学出版社 Kirby, Simon, Tom Griffiths and Kenny Smith（2014）：迭代学习与语言演化。《神经生物学最新观点》28：108–114。doi:10.1016/j.conb.2014.07.014 Thomas S. Kuhn（1957）：《哥白尼革命：行星天文学在西方思想发展中的作用》。马萨诸塞州剑桥：哈佛大学出版社 Thomas S. Kuhn（1962）：《科学革命的结构》。伊利诺伊州芝加哥：芝加哥大学出版社 Lerman, Kristina, Xiaoran Yan and Xin-Zeng Wu（2016）：社会网络中的“多数错觉”。《公共科学图书馆·综合》11(2)：e0147617。doi:10.1371/journal.pone.0147617 Alfred J. Lotka（1925）：《物理生物学原理》。马里兰州巴尔的摩：威廉斯与威尔金斯公司 Thomas R. Malthus（1798年）：《人口原理》。英国伦敦：J. Johnson John Maynard Smith（1982）：《演化与博弈论》。英国剑桥：剑桥大学出版社 Mehta, Rohan S. and Noah A. Rosenberg（2020）：将反疫苗情绪建模为文化病原体。《演化人类科学》2：e21。doi:10.1017/ehs.2020.17 Mesoudi, Alex（2021）：R语言中的文化演化仿真模型。技术报告，Zenodo。doi:10.5281/zenodo.5155821 Michaud, Jérôme and Magnus Enquist（即将出版）：文化演化的复杂系统视角。载于 Johan Lind and Anna Jon-And 编：《从最小原则出发的文化演化》。英国剑桥：剑桥大学出版社 Mulligan, Kenneth, Tobin Grant and Daniel Bennett（2013）：美国1972—2010年公众对文化政策议题的舆论动态。《政治行为》35(4)：807–829。doi:10.1007/s11109-012-9209-x John von Neumann and Oskar Morgenstern（1944）：《博弈论与经济行为》。新泽西州普林斯顿：普林斯顿大学出版社 M. E. J. Newman（2003）：复杂网络的结构与功能。《*SIAM*评论》

45(2): 167–256. doi:10.1137/S003614450342480 牛顿，艾萨克（1687）：《自然哲学的数学原理》。英国伦敦：伦敦皇家学会 Nielsen, Michael 和 Rush T. Stewart（2021）：在贝叶斯情境下的持续分歧与极化。《英国科学哲学杂志》72(1): 51–78. doi:10.1093/bjps/axy056 Ostrom, Elinor（1990）：《公共事务的治理：集体行动制度的演进》。英国剑桥：剑桥大学出版社 O'Connor, Cailin 和 James Owen Weatherall（2018）：科学极化。《欧洲科学哲学杂志》8(3): 855–875. doi:10.1007/s13194-018-0213-9 Page, Scott E.（2018）：《模型思考者》。纽约州纽约市：Basic Books Pagel, Mark、Quentin D. Atkinson 和 Andrew Meade（2007）：词语使用频率可以预测印欧语系历史上词汇演变的速度。《自然》449(7163): 717–720. doi:10.1038/nature06176 波普尔，卡尔·波普尔（1962）：《猜想与反驳：科学知识的增长》。英国伦敦：Basic Books Rescorla, Robert A. 和 Allan R. Wagner（1972）：巴甫洛夫条件作用理论：强化与非强化的效力变异。载于 Abraham H. Black 和 William F. Prokasy 编：《经典条件作用 *II*：当前理论与研究》。纽约州纽约市：Appleton-Century-Crofts Rogers, Everett M.（1962）：《创新扩散》。纽约州纽约市：The Free Press Salganik, Matthew J.、Peter S. Dodds 和 Duncan J. Watts（2006年）：人工文化市场中不平等与不可预测性的实验研究。《科学》311(5762): 854–856. doi:10.1126/science.1121066 Schaller, R.R.（1997）：摩尔定律：过去、现在与未来。《*IEEE Spectrum*》34(6): 52–59. doi:10.1109/6.591665 Schelling, Thomas C.（1971）：隔离的动态模型。《数学社会学杂志》1(2): 143–186. doi:10.1080/0022250X.1971.9989794 Schelling，托马斯·谢林（1978）：《微观动机与宏观行为》。纽约州纽约市：W. W. Norton & Company。doi:10.2307/2989930 Smaldino, Paul E.（2017）：模型很愚蠢，我们需要更多模型。载于 Robin R. Vallacher、Stephen J. Read 和 Andrzej Nowak 编：《计算社会心理学》（第 311–331 页）。纽约州纽约市：Routledge。doi:10.4324/9781315173726 Smaldino, Paul E.（2020）：如何将言语理论转化为形式模型。《社会心理学》51(4): 207–218. doi:10.1027/1864-9335/a000425 Smaldino, Paul E.（2023）：《社会行为建模：社会动力学与文化演化的数学模型和基于主体的模型》。新泽西州普林斯顿：Princeton University press Smith, J. Maynard 和 G. R. Price（1973）：《动物冲突的逻辑》。《自然》246(5427): 15–18. doi:10.1038/246015a0 Sperber, Dan（1996）：《解释文化：自然主义方法》。英国牛津：Blackwell Strimling, Pontus、Irina Vartanova、Fredrik Jansson 和 Kimmo Eriksson（2019）：道德立场与道德论证之间的联系推动意见变化。《自然·人类行为》3(9): 922–930. doi:10.1038/s41562-019-0647-x

Sutton, Richard S. 和 Andrew G. Barto（2018）：《强化学习：导论》。自适应计算与机器学习丛书。马萨诸塞州剑桥：麻省理工学院出版社，第2版。Volterra, Vito（1926）：共存动物物种个体数量的变化与波动。罗马林赛科学院院刊2: 31–113 Vosoughi, Soroush、Deb Roy 和 Sinan Aral（2018）：真假新闻在网上的传播。《科学》359(6380): 1146–1151. doi:10.1126/science.aap9559 Watts, Duncan J. 和 Steven H. Strogatz（1998）：小世界网络的集体动力学。《自然》393(六月): 440–442. doi:10.1038/30918 Weatherall, James Owen 和 Cailin O'Connor（2021）：内生性认识论派系化。《综合》198(S25): 6179–6200. doi:10.1007/s11229-020-02675-3 Westfall, Richard S.（1980）：《从未静止：艾萨克·牛顿传》。纽约州纽约市：剑桥大学出版社