arXiv:2303.02550v1 [physics.soc-ph] 5 Mar 2023

复杂网络上的意见动力学

Jiarui Dong北京邮电大学理学院，北京，中国

Yi-Cheng Zhang
弗里堡大学物理系，
弗里堡，瑞士

Yixiu Kong北京邮电大学理学院，北京，中国 yixiu.kong@bupt.edu.cn

摘要

社交媒体已成为人们获取信息的重要来源。主体通过社交媒体平台彼此互动，由此形成了众多复杂社会网络。在这些网络中，信息在个体之间传播，其意见可能会受到邻居影响而改变。本文探讨社交网络中的意见动力学，这些动力学受到复杂网络结构、确认偏误以及所讨论的具体议题的影响。我们在先前模型的基础上提出了一种新模型，用于模拟公众意见如何从共识演变为激进化和极化。我们还分析了个体如何在邻居影响下改变立场。模型揭示了意见群体的形成，并展示了不同因素如何影响意见动力学。本文有助于增进对社交网络中意见动力学及其在金融、市场营销、政治和社交媒体等领域潜在应用的理解。

关键词 意见动力学 · 复杂网络

1 引言

近年来，随着复杂网络的发展，复杂性理论在各个领域的应用日益增多[1, 2, 3, 4]。复杂性方法已应用于许多领域。受益于这一方法的领域之一是社会科学，在这一领域中，复杂网络有助于揭示不同社会现象背后的机制[5, 6, 7]。社交媒体已成为社会生活中重要且不可或缺的一部分，改变了信息获取和传播的方式[8]。社交媒体用户不仅是信息的被动接收者，也是信息的积极生产者[9]。因此，他们参与了一个相互影响、也受他人影响的动态过程。基于这些特征，可以构建复杂网络模型来表征社交媒体用户的行为。在该模型中，每个节点对应一名用户，每条连边代表用户之间的一种关系。

意见动力学旨在理解集体意见模式如何变化以及个体意见如何发展[10, 11, 12, 13, 14]。本文提出了一种基于 Fabian 等人提出的模型的新模型 [15]。本文将复杂网络理论与意见动力学模型相结合，提出了一种基于 Fabian 等人所提出模型的新模型[15]。我们以合理且符合实际的方式对原始模型进行了改进，纳入了网络结构及其他必要因素。此外，还发现并通过合理的假设解释了一些[15] 中被忽略的有趣现象。

本文的结构如下。第 2 节回顾意见动力学模型的发展。第 3 节介绍模型和实验设计，并从集体意见和个体意见两个角度呈现结果。第 4 节总结全文，并讨论所提出模型的局限性和未来发展方向。

2 相关研究

本节概述意见动力学领域中的一些具有影响力的模型。为便于后续讨论，本文定义了一些符号。由 N 个体组成的社会网络记为 G。当主体 i 与 j之间存在关系时，我们将邻接矩阵定义为 A 和 $A_{ij}=1$。针对不同的问题和模型，主体的意见可以定义在连续意见空间中，例如 $\mathbb{X}=[0,1]$，也可以定义在离散意见空间中，例如 $\mathbb{X}=\{0,1\}$。主体在时间 t 的意见可表示为 $x_i^{(t)}$。

随着时间推移，个体的意见会发生变化；无论是我们手动停止这一过程，还是系统自行收敛，群体意见最终都会呈现不同状态。在本文的语境中，我们观察到群体意见的几种状态。如果大多数个体持有相近的中立或温和意见，我们将这种状态称为共识。相反，如果大多数个体持有相近的激进立场，我们称这种状态为激进化。除了上述状态外，当个体仅分成两个意见相左的主要群体时，我们使用极化 这一术语。而碎片化 则意味着存在两个以上的意见群体。

我们首先介绍一些在离散意见空间中定义的模型。接下来，我们将讨论一些在连续意见空间中定义的模型，这些模型促使我们开发自己的模型。

离散意见空间模型 最经典的离散意见空间模型之一是 Holley 和 Liggett 提出的投票者模型[16]。正如模型所描述的，每个处于规则格点上的主体都采取一种二元立场，并以二元变量表示。在给定时间 t，随机选取的一个主体会根据随机选出的一个邻居的意见调整自己的意见。投票者模型的研究已拓展至不同的网络拓扑[17, 18, 19, 20]。此外，研究者还对个体意见更新规则进行了拓展。Vazques 和 Redner[21]提出了受限三态投票者模型，其中个体可以是左派、中间派或右派。Wang 等人将投票者模型与有界信任模型相结合，并在连续意见空间中定义了该模型[22]。Horstmeyer 和 Kuehn 提出了一种模型，这是自适应投票者模型的又一重大突破[23]。他们将自适应投票者模型应用于单纯复形[24]。

离散空间意见模型并非仅由投票者模型主导。Sznajd模型构建了一个由 N 个体组成的一维晶格。他们的意见可以是 $\{-1,1\}$。在时间 t，如果随机选取的主体 i和 $i+1$的意见满足 $x_i^{(t)}x_{i+1}^{(t)}=1$，那么主体 $i-1$ 和 $i+2$ 就分别采纳主体 i 和 $i+1$的意见。否则，主体 $i-1$ 和 $i+2$ 分别采纳主体 i 和 $i+1$的意见[25, 26]。

连续空间意见模型 在本节中，我们从DeGroot模型[27], 开始，该模型假设转移矩阵 W保持不变。个体意见的演化可以写为

$$X^{(t)}=WX^{(t-1)} \tag{1}$$

其中，$X^{(t)}$ 是时间 t 的个体意见向量；如果未特别说明，则 $X^{(t)}\subseteq\mathbb{R}^N$。$W$ 可以视为权重矩阵，它体现了一个主体的邻居对其的影响程度。由于DeGroot模型是线性的，[28] 中的作者给出了DeGroot模型达到共识的充分必要条件。考虑到个体的先入观念，Friedkin和Johnsen将DeGroot模型扩展为

$$X^{(t)}=AWX^{(t-1)}+(I-A)X^{(1)} \tag{2}$$

，其中 $A=diag(a_{11},\ a_{22},\ \cdots,\ a_{NN})$ 表示个体对他人影响的易感性，而 $0<a_{ii}<1$.

接下来我们介绍有界信任模型（BC 模型），它比 DeGroot 模型更加灵活。在有界信任模型中，个体对意见与自己差异过大的其他个体漠不关心。在 DW 模型中[29], ，如果随机选取的两个个体满足 $\left|x_i^{(t)}-x_j^{(t)}\right|\leq\varepsilon$，则他们的意见将按如下方式更新:

$$\begin{cases}x_i^{t+1}=x_i^t+\mu(x_j^t-x_i^t)\\ x_j^{t+1}=x_j^t+\mu(x_i^t-x_j^t)\end{cases} \tag{3}$$

其中 $\mu\in[0,0.5]$ 衡量个体 i 彼此影响的程度。另一个经典的有界信任模型是 HK 模型[30]。我们将主体 i的意见更新为:

$$x_j^{(t+1)}=\left|I(i,x^{(t)}))\right|^{-1}\sum_{j\in I(i,x^{(t)}))}x_j^{(t)} \tag{4}$$

其中 $I(i,\ x)=\{1<j\leq n\mid|x_i-x_j|\leq\varepsilon\}$，与DW模型类似。HK模型和DW模型在个体如何根据社会影响调整意见方面有所不同。在HK模型中，个体会考虑更大群体的平均

意见，而在DW模型中，个体则会受到与邻居随机进行的成对互动的影响。

前文我们已经介绍了同质有界信心模型，这意味着对于每个个体而言， ε 和 μ 都是一致的。否则，我们称这些模型为异质模型[30, 31]。当考虑其他效应时，有界信任模型还有其他变体。Jalili研究了这些模型中社会领袖和社会压力的影响[32]。Li等人提出了一种考虑同伴压力的HK模型[33]。Kurahashi-Nakamur等人尝试解释这样一种意见多样性模式：个体受到持有相去甚远观点的他人影响[34]。然而，这类交互很少发生。

最后，我们介绍Baumann等人提出的模型[15, 35]。对于一个具有 N 个个体的系统，每个个体都持有一个随时间变化的意见 $x_i^{(t)} \in$ （$-\infty$， $+\infty$）。 σ（x_i）描述个体对二元议题的定性立场，而 $|x_i|$量化其对自身立场的确信程度。个体意见根据活动驱动（AD）交互演化。每个个体 i 都具有一个活动水平 $a_i \in [\varepsilon, 1]$，它表示其与 m 个随机个体进行交互的倾向。a 服从幂律分布

$$F(a) = \frac{1-\gamma}{1-\varepsilon^{1-\gamma}} a^{-\gamma} \tag{5}$$

其中， γ 控制幂律衰减， ε 是最低活跃度。如果主体 i 被激活，他将根据同质性决定是否与主体 j 互动。换言之，互动概率为

$$p_{ij} = \frac{|x_i - x_j|^{-\beta}}{\sum_j |x_i - x_j|^{-\beta}} \tag{6}$$

，其中 β 包含各种同质性效应。然后，我们可以用邻接矩阵$A(t)$描述活动驱动时序网络，其中 $A_{ij}(t) = 1$ 表示主体 i 在给定时间 t影响主体 j 。考虑到互惠性，主体 j 也可以按照概率 r影响主体 i 。现在，我们得到主体的意见动力学

$$\dot{x} = -x_i + K \sum_{j=1}^{N} A_{ij}(t) tanh(\alpha x_j) \tag{7}$$

其中， $K > 0$ 是社会交互强度， α 由给定议题的争议性表征，它决定非线性函数的形状。

3 结果

本节首先基于Baumann模型提出我们的意见动力学模型。在 [15] 中，仅研究了集体意见模式。然而，尽管存在集体意见，仍可观察到各种细节。为了进一步探究这些现象及其机制，我们从个体与集体视角讨论意见动力学。

3.1 模型与方法

在 Baumann模型中，一个被激活的个体可以影响 m 个不同的个体。这意味着，无论社会距离如何，任何个体都可以通过社交媒体影响其他任何个体。然而，这一假设并不现实。例如，在 Twitter 上，个体可能会受到自己未关注之人的推文影响（正如 Baumann模型所假设的那样）。但根据文献 [36], ，个体往往会关注与自己持有相似意见的人。文献 [37] 还表明，尽管个体会通过推荐系统接触到许多志趣相投的人，但他们只会建立少数稳定连接。因此，在本文语境下，我们假设个体与其关注者和被关注者之间具有更强的社会关系。他们更有可能受到这些人的影响，也更有可能反过来影响这些人。为对这一情况进行建模，我们首先认为，个体具有由静态复杂网络表示的稳定社会关系。随后，我们使用随时间变化的矩阵 A（t）表示个体在给定时间 t相互影响的方式。因此，我们的模型推广了 Baumann模型；该模型假设使用全连接网络来表示个体相对稳定的社会关系。
从数学角度来看，意见动力学可描述如下：

$$\dot{x}_i = -x_i + \sum_{j=1}^{N} c_j A_{ij}(t) tan\left(\alpha x_j\right) \tag{8}$$

。首先，我们假设一个静态网络 S，其中包含 N 个体，代表个体稳定的社会关系。在这里， c_i 是社会网络中个体 i 的接近中心性[38] 。接近中心性是衡量节点在网络中传播信息效率的一种常用方法

。我们将 Baumann模型中的原始参数 K 替换为每个个体的个人中心性。这样做是因为我们认为，社会交互强度这一概念含义模糊，容易被人为操纵。相比之下，中心性是个体的一种内在属性，可能由其人格、社会地位或其他影响其在社会网络中所处位置的特征决定。这样一来，我们还可以将网络结构纳入考量，而原始模型忽略了这一点。

如参考文献 [15] 所述，Baumann模型仅基于最少数量的假设。因此，我们也不通过纳入实证社交网络中可观察到、但并非必要且基础的特征，来扩展先前的模型（例如 Baumman 等人提到的定向广告和用户可信度）；这些特征可能会影响个体意见的演变。为保留假设尽可能少这一特性，我们只需将社交网络中的社会关系（网络结构）纳入模型，即用社交网络中的节点中心性 c_i 替换社会影响力 K。

中心性是反映复杂网络中节点位置的重要指标。中心性的定义有很多种，可从不同角度刻画节点的特征。在本文中，我们使用接近中心性。Freeman 最早从概念和实证两方面对这种中心性进行了研究[40, 41], ，其计算方法如下

$$c_i = \frac{N-1}{\sum_{\forall j, i \neq j} d(j,i)} \tag{9}$$

其中，d（j，i）是从 i 到 j 的最短路径长度，N 是网络中的节点数。值得注意的是，上述接近中心性仅适用于不存在非连通分量的网络。但可以通过采用非连通网络的扩展版本[42]轻松克服这一局限。在许多实际应用中，信息沿最短路径[43]流动。在本文中，个体直接从其最近邻居接收影响，并对其最近邻居产生影响。然而，这并不意味着个体不会受到与其没有直接连边的人影响。根据我们的意见动力学模型，信息流动不局限于沿单一类型的轨迹（例如测地线）。Borgatti 从概念上分析了流过程的类型，以及适用于不同情境的中心性度量[44] 。Borgatti 列举了一些典型的信息流，例如电子邮件广播、态度影响等，这些更适合用接近中心性来衡量。因此，本文采用接近中心性，同时其他中心性也仍可作为将网络结构引入模型的备选方案。

我们保留活动驱动过程。如前所述，$A(t)$并不是时序网络的邻接矩阵。在给定时间 t，一个被激活的主体（参见公式 5）可以以公式 6 给出的概率影响其邻居。因此，与我们此前定义的静态社会网络相比，我们将 $A(t)$ 表示为个体之间的瞬时影响关系矩阵。

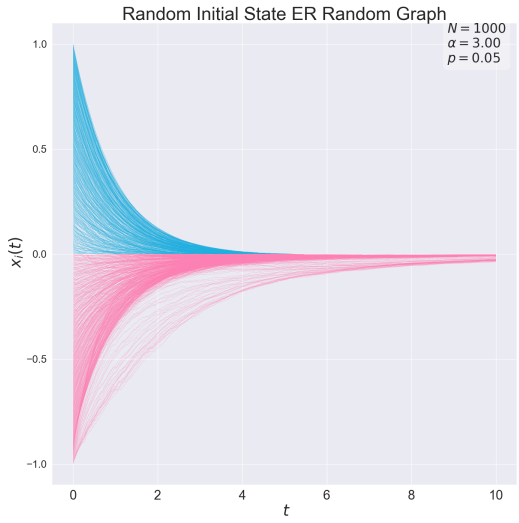
3.2 集体意见模式

当具有相似观点的人形成群体，并将自己与相反意见隔离开来时，集体意见及其转变模式便显而易见。这种被称为回音室的现象，已通过各种方法 [45, 46, 47, 48]在不同的社交网络平台上进行了实证分析。作者还通过研究 Twitter[15]上广泛讨论的一些议题，对其模型进行了验证。

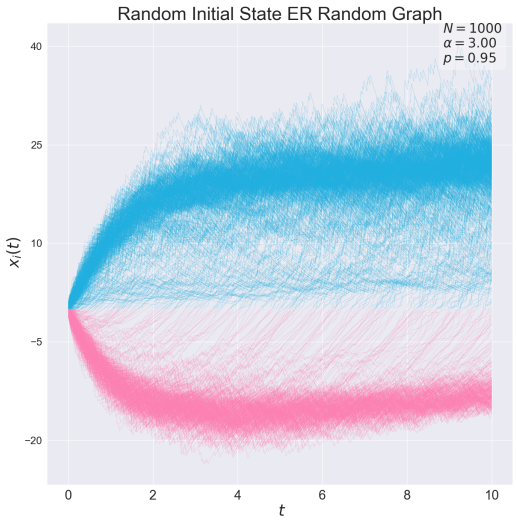
我们按照以下方案开始数值模拟。我们生成一个具有 N 个节点的静态随机网络 S，代表主体稳定的社会关系。我们通过改变平均度 $\langle k \rangle$ 来控制网络结构（我们通过调节建立随机连接的概率 ρ 来实现这一点）。我们可以用区间 $[-1,1]$内的随机值初始化主体的意见，因此，$x_i^{(0)} \in [-1,1]$。在此背景下，我们将意见变量 x 在空间 $[-1,1]$ 中均匀初始化，例如 [15]。不同于[15], 中的模型，我们不限制一个被激活的主体能够影响的个体数量。相反，一个被激活的主体可以从 S中的邻居里影响任意数量的个体。

在图1中，我们展示了三种不同的集体意见模式，并列出了详细的参数设置。在这一部分，我们暂不讨论同质性的影响，因此现在将 β 设为常数。由于争议性的影响已在 [15], 中研究过，我们也将 α 设为常数。与 Bau mann 的结果相比，我们观察到，当议题具有争议性，但主体所处的静态社交网络 S 较为稀疏时，个体仍会达成共识。尽管个体可能变得激进，并且在面对具有争议性的议题时更强烈地渴望与他人交流，但由于缺乏同伴的强化，他们会逐渐自发地变得动摇。随着 ρ 增加到0.5（见图1c），会发生激进化。不同的是，我们可以发现主导群体中存在明显的分层现象，这被称为碎片化。这一现象在原始模型中被忽略了。也就是说，在一个激进群体中，既有一些顽固派，也有一些温和派。下一节将讨论这一现象。如果我们使S 极其稠密（例如 $\rho = 1$），就会得到与 Baumann 模型相同的假设。

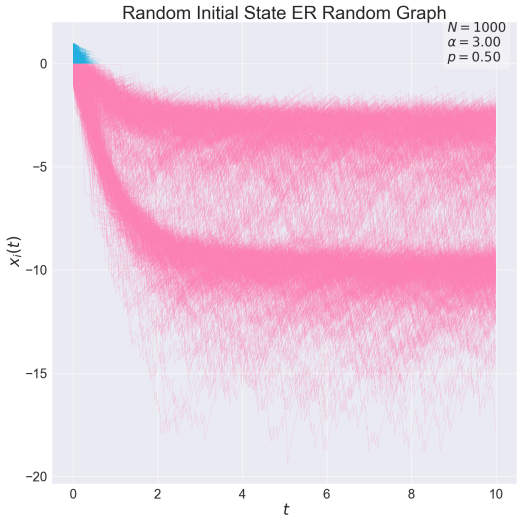
因此，我们在图 1b 中发现，达到了极化 状态。但我们仍然观察到一些有趣的现象。在个体意见的时间演化过程中，我们可以看到一些负向代理人改变了自己的立场。这更



(a)中性共识

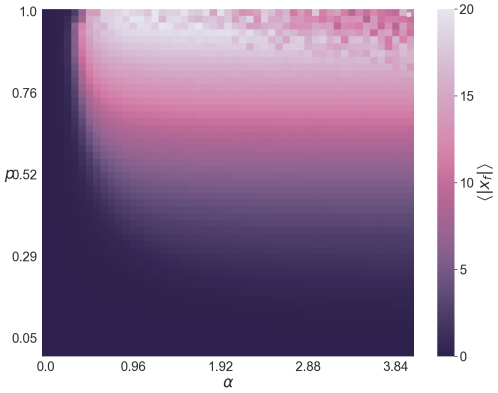


(b) 极化

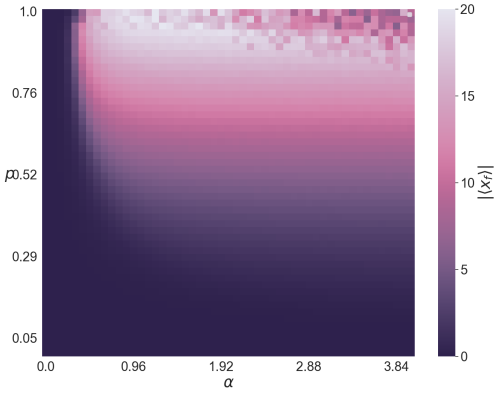


(c) 激进化

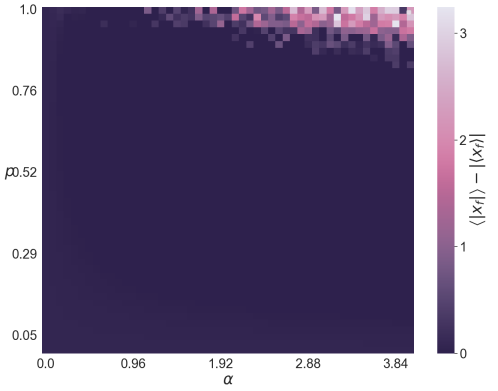
图 1：三种主要的集体意见模式。正面意见以蓝色标示，负面意见以粉色标示。每次模拟中，我们设定 $\beta = 1$, $\alpha = 3$, $dt = 0.01$ 。图 1a 展示了当大多数个体意见收敛至零时形成的共识 。在图 1c 中，我们可以看到大多数个体持有相同的立场。这种状态称为激进化。在图 1b 中，个体分成两个二分群体，由此形成意见极化。



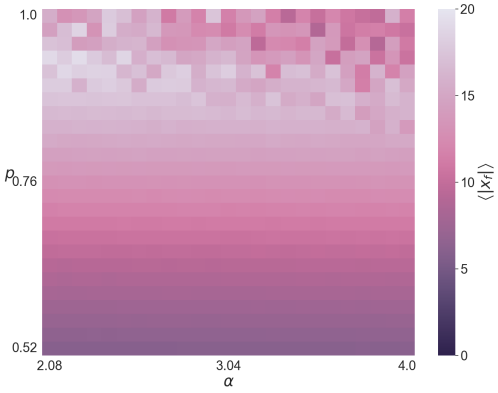
(a) $\langle|x_f|\rangle$



(b) $|\langle x_f\rangle|$



(c) $|\langle x_f\rangle| - \langle|x_f|\rangle$



(d) 图2a中杂项部分的局部放大图

图2：从共识到激进化再到极化的转变。参数设置与图1所示的一致，但 ρ 和 α除外。每个参数组的结果均取10次运行后的平均值。我们分别在图2a和图2b中展示平均最终意见 $|\langle x_f\rangle|$ 的绝对值和最终意见 $\langle|x_f|\rangle$ 绝对值的平均值。在深色区域中，个体达成共识。在中间的浅色区域中，会发生激进化，并且随着 α 和 ρ的增加，个体变得更加激进。而在顶部的杂项区域中，个体处于极化状态。图2c展示了相空间中的 $|\langle x_f\rangle| - \langle|x_f|\rangle$，仅保留极化状态。

这是合理的，因为人群并非一成不变。人们的想法确实一直在变化，唯一的区别在于，他们的态度是变得更加坚定，还是变得更加摇摆。下一节将进一步讨论这些变节者为何会表现出这样的行为。此外，我们注意到，原始模型对于初始条件的不对称性以及波动的影响具有稳健性。换言之，集体模式由所设定的参数预先决定。令人惊讶的是，即使负向代理人相较于正向代理人少得多，他们仍然会达到与两组人数相等时相同的结果。这似乎忽略了人们的流动性。在我们的论文中，不同的初始条件会导致不同的集体意见模式。

接下来，我们在图 2 中展示群体意见从共识 到激进化 再到极化 的相变。如果我们只计算最终平均意见 $|\langle x_f\rangle|$ 的绝对值，可能会混淆极化 和共识 状态，因为在极化 状态下，个体意见会相互抵消。因此，我们分别计算最终平均意见 $|\langle x_f\rangle|$ 的绝对值和最终意见绝对值的平均值$\langle|x_f|\rangle$。在深色区域，当 ρ 较小时， α 对个体的激进倾向几乎没有贡献，我们只能观察到共识。随着 ρ 和 α 增大，个体意见变得更加激进。而在顶部的杂项区域中，我们注意到明暗区域并存。为了弄清楚在 ρ 和 α 的这些设定下发生了什么，我们将 $|\langle x_f\rangle| - \langle|x_f|\rangle$ 绘制在相空间上。这是一个简单的想法。在共识状态下，个体处于中立状态。换句话说， $|x_f| = 0$，因此我们有 $|\langle x_f\rangle| - \langle|x_f|\rangle = 0$。同样地，当处于激进化状态时，大多数个体采取相同的立场。也就是说，

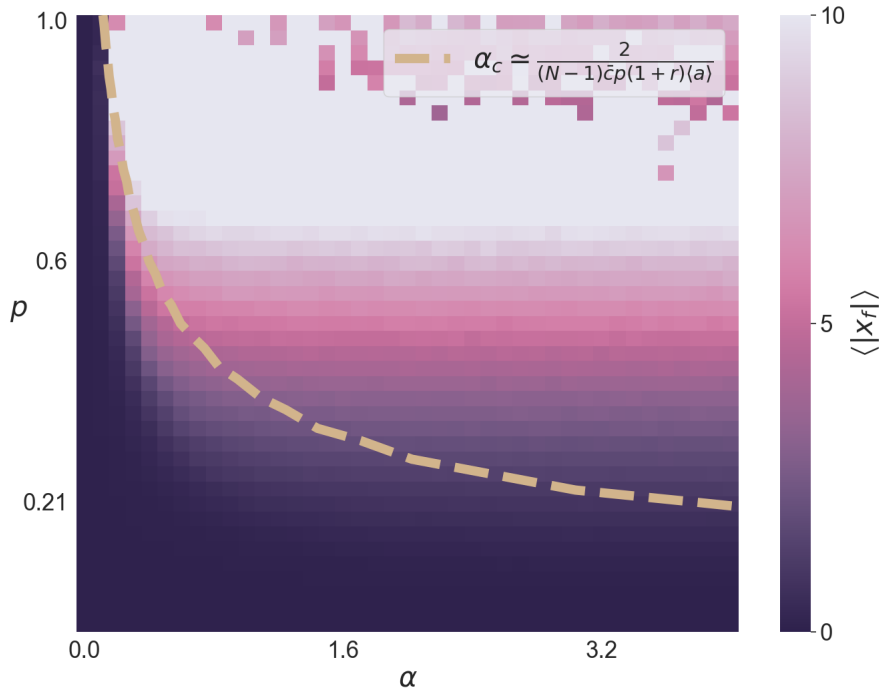


图 3：共识与激进化之间的临界性

$\sigma(x_f)$ 相同。我们还可以得到 $|\langle x_f\rangle| - \langle |x_f|\rangle = 0$。但是在极化状态下，在计算 $|x_f|$ 时，相互冲突的意见会相互抵消，因此 $|\langle x_f\rangle| \neq \langle |x_f|\rangle$。因此，在杂项部分，个体趋向于极化 （另见图 2c）。为了更直观地说明，我们还在图 2d 中放大了图 2a 的杂项部分。从激进化 到极化 的转变在文献 [15] 中尚未讨论。此外，我们在平均场假设下（设同质性 $\beta = 0$）计算了临界 α 的解析表达式。临界点的解析表达式为

$$\alpha_c \simeq \frac{2}{(N-1)\bar{c}p(1+r)\,\langle a\rangle} \tag{10}$$

其中，$\bar{c}$ 是 S 中个体的平均接近中心性，其他参数前文已提及。参见图 3 中的粉色星形虚线，它与数值模拟完全吻合。

3.3 个体意见的演化

本节研究个体意见如何演化。我们首先考察非线性函数 $tanh(x)$。如图 4 所示，当 α 大于 2 时（仅作定性参考），进一步增大 α 似乎对函数形状影响甚微。为了体现议题争议性，当 $\left|x^{(t)}\right|$ 较大时，我们需要一个奇函数且敏感的非线性函数，而不是 $tanh(x)$。这样的函数可以是：

$$f(x) = \begin{cases} ln(\alpha x + 1) \text{ if } x \geq 0 \\ -ln(-\alpha x + 1) \text{ if } x < 0 \end{cases} \tag{11}$$

。使用这一替代函数，我们将看到，在意见的时间演化过程中，关键意见群体如何形成，以及个体如何放弃原有立场。

在第 3.2 节中，我们发现了一种称为碎片化的现象，指个体被分成多个群体的情况。这与极化不同，因为持有相同立场的个体也可能被分隔开来。我们使用 $N = 1000, \beta = 1, \alpha = 2, \rho = 0.5$ 进行了模拟，并发现了碎片化现象。见图 5。出现了两个明显的意见群体。我们在图 6 中展示了意见群体的形成过程。我们记录了时间 $T = 1$、4、7、10 时个体意见的分布，并用彩色条标记主导意见（该时刻最常见的意见）。

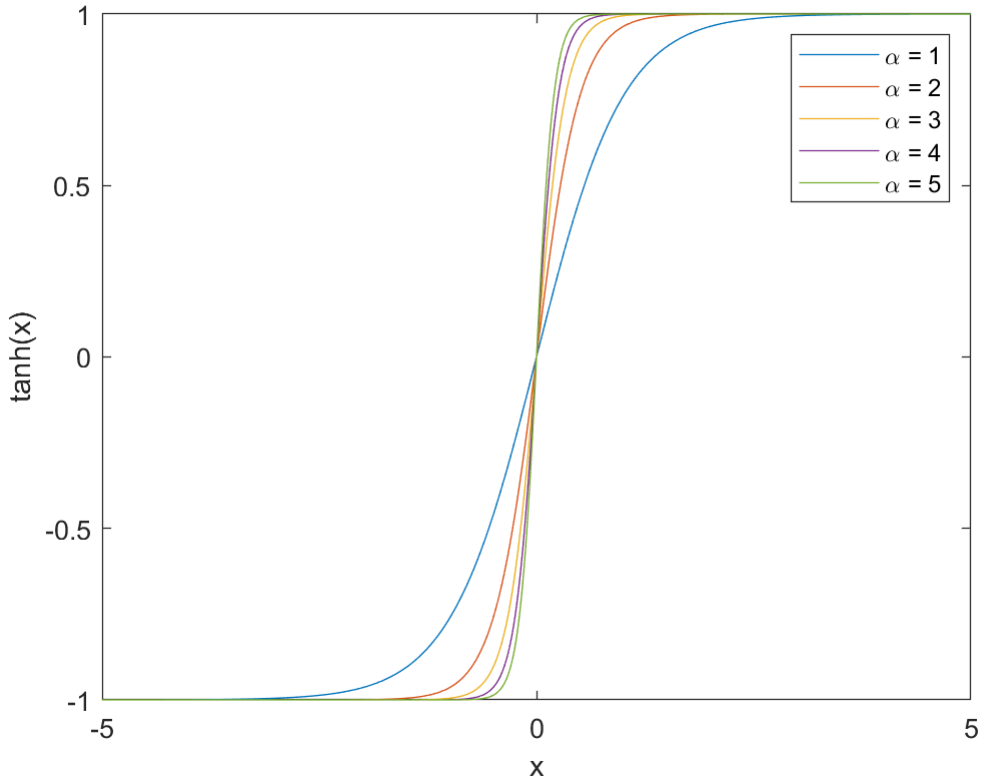


图4：具有不同 α的 $tanh\,(x)$

我们发现，意见群体很早就开始形成（时间为 $T=1$），随后主导意见随着时间推移变得越来越激进。一旦某些意见在局部传播开来，意见群体便开始形成。但由于我们将个体部署在静态社交网络 S 上，个体会直接与邻居互动，而只能与非最近邻居的个体间接互动。因此，意见群体可能具有局部性，并发生碎片化，除非出现某些在全球范围内传播的病毒式意见，从而可能实现彻底的激进化 。未来可以研究碎片化与激进化 之间的转变。

接下来，我们关注个体如何改变其立场。若一个主体在时间 $t+1$改变其立场，假设这是一个马尔可夫过程，我们认为该转变仅由时间 t的影响所致。我们从3个方面分析叛变者机制。如果个体 i 在 t 时为正（负），但在时间 $t+1$变为负（正），则称个体 i 在时间 t为叛变者。为了解时间 $t+1$发生的转变，我们分析时间 t的情况。

- 找出每个时间的叛变者，并计算其最近邻的平均意见 $\langle x^{NN}\rangle$。
- 立场不同的最有影响力的邻居。
- 叛变者的友方和敌方数量之差。

我们在图 7 中展示了图 5 所示的模拟机制。可以看到，人群出现了激进化。在图 7a 中，大多数点是粉色的，这意味着从正向转为负向的状态转换占主导。我们更关注异常现象，因为它们可能违反直觉。不过，我们也观察到，异常现象大多发生在模拟初期。初期，$|x_i|$ 相对较小。根据公式 6，意见相左的个体有更多机会相互影响。因此，例如某个主体最初持负向意见，受到负向个体的围攻，但之后转为正向，这种情况是可能发生的。随着时间推移，由于同质性（公式 6 表明），$|x_i|$ 不断增大，意见相悖的智能体更难互动。此外，向负向意见的激进化 已经开始，正向个体被负向个体包围，最终可能转为负向。因此，我们解释了为何所谓的异常现象主要发生在初期，而之后大多数状态转换都是从正向转为负向。在图 7b 和图 7c 中，我们还可以给出另一种解释。尽管有些个体被异见者包围（例如

$x_i^{(t+1)} \times \left\langle x_{NN}^{(t)} \right\rangle < 0$ 以及 $\sum_{j=1} I(x_j x_i > 0) - \sum_j I(x_j x_i < 0)$），一些相对更具影响力的邻居是 e

在其周围进行抵消，将其拉回自己的一方。我们在图 8 中展示了两个具体的异常主体转变模式，其中显示负向力量与正向力量处于僵持状态。但是，由于转变发生时 $|x_{476}|$ 和 $|x_{433}|$ 都很小，异常仍然会出现。总体而言，这与我们上述的解释一致。

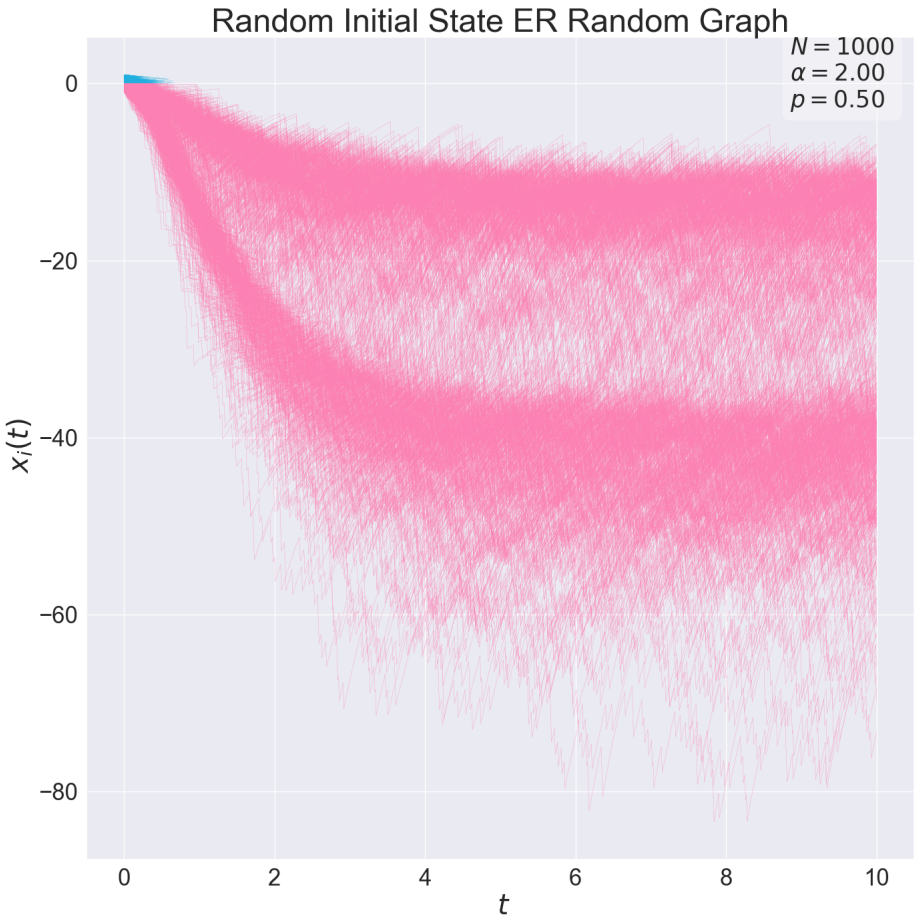
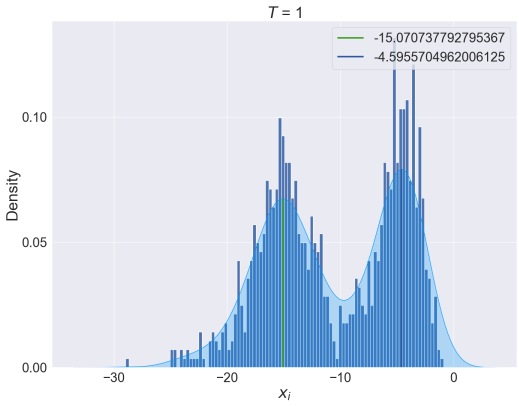
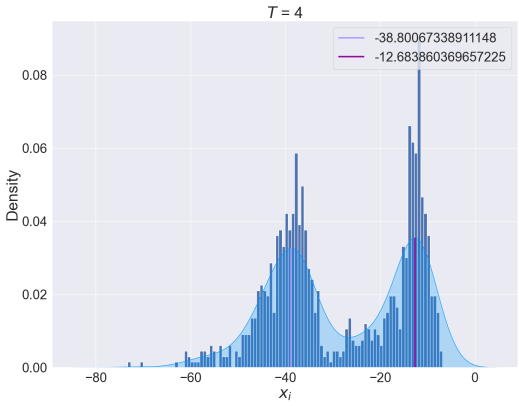


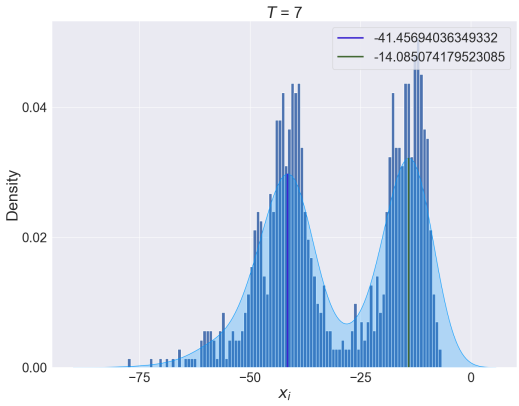
图 5：个体意见时间演化中的碎片化



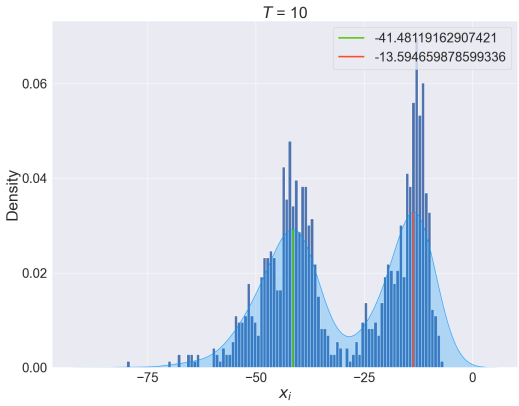
(a) $T = 1$



(b) $T = 4$

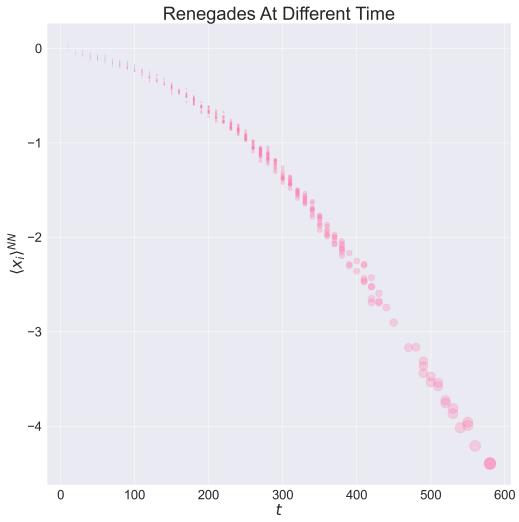


(c) $T = 7$

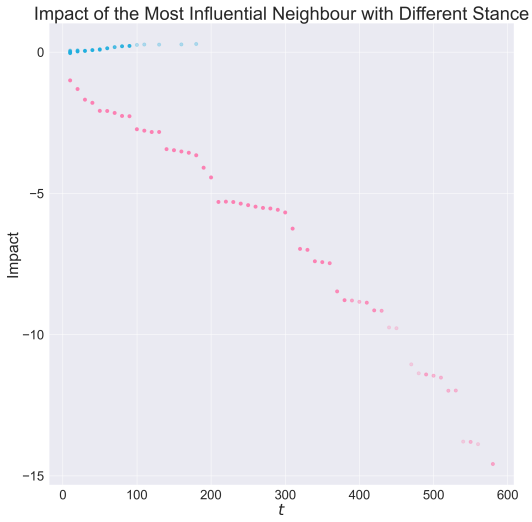


(d) $T = 10$

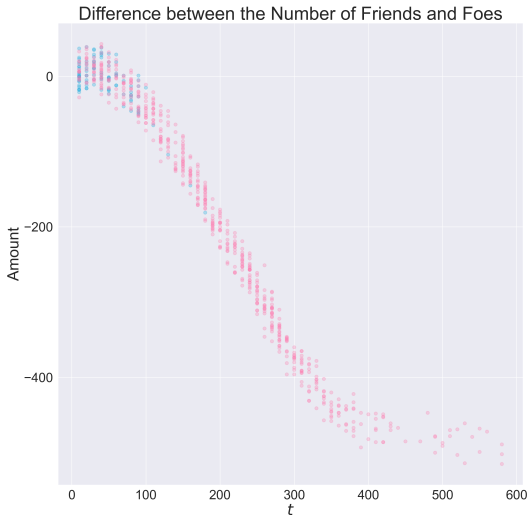
图6：涌现意见群体



（a）不同时刻的变节者

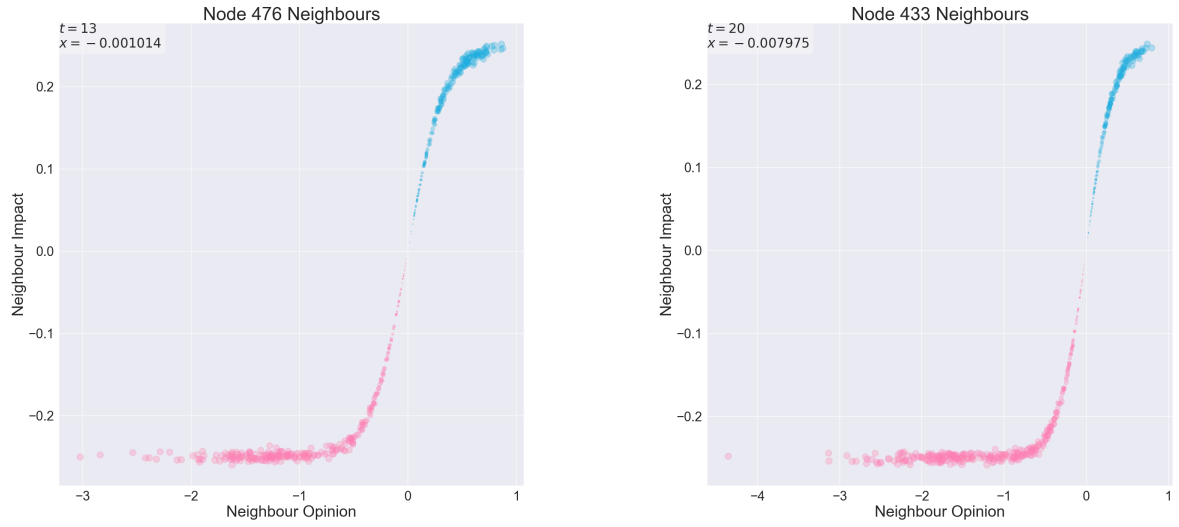


（b）立场不同的最有影响力的邻居



（c）朋友与敌人的数量差

图7：主体立场的转变。我们展示了图5所示模拟的结果。如果主体 i在时间 t持正向（负向）立场，并在时间 $t+1$转为负向（正向），则将其标记为粉色（蓝色）。图7a展示了变节者的最近邻居在不同时间步的平均意见 $\langle x^{NN} \rangle$。圆点的面积表示 $|\langle x^{NN} \rangle|$的相对值。图7b展示了立场不同的最有影响力邻居所产生的影响。图7c展示了朋友与敌人的数量差。对于正向个体，如果 y 轴上的值大于零，则朋友多于敌人；负向个体则相反。



（a）主体 476　　（b）主体 433

图 8：两个特定异常主体的状态转换

4 结论

本研究对 [15] 中提出的意见动力学模型进行了创新，并引入了一个新模型。与原模型不同，本研究假设个体拥有稳定的社会关系，这限制了他们与此前已经确认的人员进行互动。在此假设基础上，本研究针对具有各种网络结构的网络构建了一个新模型。因此，在这一背景下，与假设网络为全连接网络的原模型相比，本研究的模型具有更高的灵活性，也更贴近现实。如公式 7 所示，本研究通过将节点中心性纳入公式来考虑网络结构。由于社会交互强度这一参数具有歧义性，本研究舍弃了该参数。
本研究从宏观和微观两个视角考察意见动力学，即集体意见模式和个体意见演化。新模型能够再现三种主要的意见模式：共识、激进化和极化。此外，本研究还观察到碎片化现象，即个体可能分成两个以上的群体，而且这种分化可能发生在立场相同的个体之间。随后，本研究展示了意见模式如何随参数、议题争议性和网络结构而变化。通过一个简单的技巧，本研究揭示了从激进化 到极化的转变，而原始模型忽略了这一转变。本研究还在平均场假设下计算了共识 与激进化 之间的解析临界转变，其结果与模拟非常吻合。

关于个体意见的演化，我们指出了非线性函数 $tanh(x)$的局限性，并提出了一种新的非线性函数。我们通过分析每个时间步 $T(T = 1, 2, \cdots, n)$下个体的意见分布，研究碎片化 现象，并发现意见群体很早便形成，而且一些主导意见也会随时间变化。随后，我们从三个方面考察主体如何改变其立场。我们着重研究个体被异见者包围却仍改变意见的异常情况。我们发现，异常主要发生在时间演化的初期。最后，我们随机选取两名特定的变节者，评估其邻居对他们的影响，以验证我们的假设。

我们的研究为意见动力学研究提供了另一种范式。为简便起见，我们仅在随机ER网络上部署了模型。在应用于其他类型的复杂网络时，可能仍会存在不一致之处。我们希望本研究能为未来的意见动力学研究提供启发，并成为来自广泛背景的科学家研究人类行为的基础。

作者贡献

Yixiu Kong 设计了该研究，Jiarui Dong 进行了理论分析，Yixiu Kong 和 Yi-Cheng Zhang 设计了图表，Jiarui Dong 进行了数值实验。所有作者共同撰写了论文。

致谢

本项目获得北京邮电大学中央高校基本科研业务费资助，项目编号为 505022019。

参考文献

[1] Paul Erdos、阿尔弗雷德·雷尼等。《随机图的演化》。*Publ. Math. Inst. Hung. Acad. Sci*，5(1):17–60，1960年。[2] Duncan J Watts 和 Steven H Strogatz。《“小世界”网络的集体动力学》。*nature*，393(6684):440–442，1998年。[3] 艾伯特-拉斯洛·巴拉巴西和 Réka Albert。《随机网络中标度的涌现》。*science*，286(5439):509–512，1999年。[4] Stefano Boccaletti、Vito Latora、Yamir Moreno、Martin Chavez 和 D-U Hwang。《复杂网络：结构与动力学》。*Physics reports*，424(4-5):175–308，2006年。[5] Claudio Castellano、Santo Fortunato 和 Vittorio Loreto。《社会动力学的统计物理学》。*Reviewsofmodernphysics*，81(2):591，2009年。[6] David A Siegel。《社会网络与集体行动》。*American journal of political science*，53(1):122–138，2009年。[7] Marko Jusup、Petter Holme、Kiyoshi Kanazawa、Misako Takayasu、Ivan Romi´c、Zhen Wang、Sunˇcana Geˇcek、Tomislav Lipi´c、Boris Podobnik、Lin Wang 等。《社会物理学》。*Physics Reports*，948:1–148，2022年。[8] Caleb T Carr 和 Rebecca A Hayes。《社交媒体：定义、发展与预测》。*Atlantic journal ofcommunication*，23(1):46–65，2015年。[9] Jonathan A Obar 和 Steven S Wildman。《社交媒体定义与治理挑战——特刊导言》。*Obar, JA and Wildman, S.(2015). Social media definition and the governance challenge: An introduction to the special issue. Telecommunications policy*，39(9):745–750，2015年。[10] Jan Lorenz。《有界信任下的连续意见动力学：综述》。*International Journal of ModernPhysicsC*，18(12):1819–1838，2007年。[11] Daron Acemoglu 和 Asuman Ozdaglar。《社会网络中的意见动力学与学习》。*Dynamic Games andApplications*，1(1):3–49，2011年。[12] Yongcan Cao、Wenwu Yu、Wei Ren 和 Guanrong Chen。《分布式多智能体协调研究最新进展概述》。*IEEE Transactions on Industrialinformatics*，9(1):427–438，2012年。[13] Yucheng Dong、Min Zhan、Gang Kou、Zhaogang Ding 和 Haiming Liang。《意见动力学中的融合过程综述》。*Information Fusion*，43:57–65，2018年。[14] Hossein Noorazar。《意见传播动力学的最新进展：2020年综述》。*The EuropeanPhysicalJournalPlus*，135(6):1–20，2020年。[15] Fabian Baumann、Philipp Lorenz-Spreen、Igor M Sokolov 和 Michele Starnini。《社交网络中的回音室与极化动力学建模》。*Physical ReviewLetters*，124(4):048301，2020年。[16] Richard A Holley 和 Thomas M Liggett。《弱相互作用无限系统与投票者模型的遍历定理》。*Theannals ofprobability*，643–663页，1975年。[17] Krzysztof Suchecki、Victor M Eguiluz 和 Maxi San Miguel。《复杂网络中投票者模型的守恒定律》。*EPL (Europhysics Letters)*，69(2):228，2004年。[18] Krzysztof Suchecki、Víctor M Eguíluz 和 Maxi San Miguel。《复杂网络中的投票者模型动力学：维度、无序与度分布的作用》。*Physical ReviewE*，72(3):036132，2005年。[19] Vishal Sood 和 Sidney Redner。《异质图上的投票者模型》。*Physical review letters*，94(17):178701，2005年。

[20] Vishal Sood、Tibor Antal 和 Sidney Redner。《异质网络中的投票者模型》。Physical Review E，77(4):041121，2008年。[21] Federico Vazquez 和 Sidney Redner。《受约束投票者的最终命运》。Journal of Physics A: Mathematical and General，37(35):8479，2004年。[22] Xin Wang、Antonio D Sirianni、Shaoting Tang、Zhiming Zheng 和 Feng Fu。《由社会认知偏差驱动的公共话语与社交网络回音室》。Physical Review X，10(4):041042，2020年。[23] IJ Benczik、SZ Benczik、Beate Schmittmann 和 RKP Zia。《自适应随机网络上的意见动力学》。Physical Review E，79(4):046104，2009年。[24] Leonhard Horstmeyer 和 Christian Kuehn。《单纯复形上的自适应投票者模型》。Physical Review E，101(2):022305，2020年。[25] Katarzyna Sznajd-Weron 和 Jozef Sznajd。《封闭社区中的意见演化》。International Journal of Modern Physics C，11(06):1157–1165，2000年。[26] Katarzyna Sznajd-Weron。《Sznajd模型及其应用》。arXiv预印本 physics/0503239，2005年。[27] Morris H DeGroot。《达成共识》。Journal of the American Statistical association，69(345):118–121，1974年。[28] Roger L Berger。《使用 DeGroot 方法达成共识的充要条件》。Journal of the American Statistical Association，76(374):415–418，1981年。[29] Guillaume Deffuant、David Neau、Frederic Amblard 和 Gérard Weisbuch。《交互主体之间的信念融合》。Advances in Complex Systems，3(01n04):87–98，2000年。[30] Rainer Hegselmann、Ulrich Krause 等。《意见动力学与有界信任模型：分析与模拟》。Journal of artificial societies and social simulation，5(3)，2002年。[31] Gang Kou、Yiyi Zhao、Yi Peng 和 Yong Shi。《有界信任下的多层次意见动力学》。2012年。[32] Mahdi Jalili。《领导者与社会权力对复杂网络中意见形成的影响》。Simulation，89(5):578–588，2013年。[33] Dandan Li、Dun Han、Jing Ma、Mei Sun、Lixin Tian、Timothy Khouw 和 H Eugene Stanley。《活动驱动网络中的意见动力学》。EPL (Europhysics Letters)，120(2):28002，2018年。[34] Takasumi Kurahashi-Nakamura、Michael Mäs 和 Jan Lorenz。《广义有界信任模型中的稳健聚类》。Journal of Artificial Societies and Social Simulation，19(4)，2016年。[35] Fabian Baumann、Philipp Lorenz-Spreen、Igor M Sokolov 和 Michele Starnini。《多维主题空间中极化意识形态意见的涌现》。Physical Review X，11(1):011012，2021年。[36] Raymond S Nickerson。《确认偏误：以多种形式普遍存在的现象》。Review of general psychology，2(2):175–220，1998年。[37] Robin IM Dunbar。《新皮层大小对灵长类动物群体规模的约束》。Journal of human evolution，22(6):469–493，1992年。[38] Alex Bavelas。《任务导向群体中的沟通模式》。The journal of the acoustical society of America，22(6):725–730，1950年。[39] Junlong Zhang 和 Yu Luo。《社交网络中的度中心性、中介中心性与接近中心性》。载于2017年第2届建模、模拟与应用数学国际会议（MSAM2017），第300–303页。Atlantis press，2017年。[40] Linton C Freeman、Douglas Roeder 和 Robert R Mulholland。《社交网络中的中心性：II. 实验结果》。Social networks，2(2):119–141，1979年。[41] Linton C Freeman 等。《社交网络中的中心性：概念澄清》。Social network: critical concepts in sociology。伦敦：Routledge，1:238–263，2002年。[42] A Beaucha mp Murray 等。《改进的中心性指数》。Behavioral Science，10(2):161–163，1965年。[43] Akrati Saxena 和 Sudarshan Iyengar。《复杂网络中的中心性度量：综述》。arXiv预印本 arXiv:2011.07190，2020年。[44] Stephen P Borgatti。《中心性与网络流》。Social networks，27(1):55–71，2005年。[45] Michela Del Vicario、Gianna Vivaldo、Alessandro Bessi、Fabiana Zollo、Antonio Scala、Guido Caldarelli 和 Walter Quattrociocchi。《回音室：Facebook上的情绪传染与群体极化》。科学报告，6(1):1–12，2016年。

[46] Wesley Cota、Silvio C Ferreira、Romualdo Pastor-Satorras 和 Michele Starnini。量化政治传播网络中信息传播的回音室效应。*EPJData Science*，8(1):1–13，2019年。[47] Matteo Cinelli、Walter Quattrociocchi、Alessandro Galeazzi、Carlo Michele Valensise、Emanuele Brugnoli、Ana Lucia Schmidt、Paola Zola、Fabiana Zollo 和 Antonio Scala。新冠肺炎社交媒体信息疫情。《科学报告》，10(1):1–10，2020年。[48] Matteo Cinelli、Gianmarco De Francisci Morales、Alessandro Galeazzi、Walter Quattrociocchi 和 Michele Starnini。社交媒体上的回音室效应。美国国家科学院院刊，118(9):e2023301118，2021年。