通过智能安置思想温和的个体来减少观点回音室

Prithwish Jana*，成员，*IEEE*，Romit Roy Choudhury†，*IEEE* 会士，Niloy Ganguly‡，*IEEE* 高级会员 *E*

arXiv:2304.10745v1 [cs.SI] 21 Apr 2023

摘要——**在社交媒体时代，人们经常在网上分享自己对各种问题的观点，同时也会接触到他人的观点。无论是新闻推送推荐算法所导致的选择性接触，还是我们自身倾向于倾听支持自己观点的意见，最终结果都是我们越来越多地接触与自身观点相近的观点。此外，任何群体本质上都是异质的，即人们最初对某一话题持有各种不同的观点，并且在接受他人观点影响方面表现出不同程度的开放性。本文展示了思想开放型个体与思想封闭型个体在能够自由混合和交流的情况下，针对某一问题所表现出的不同行为。**

我们已经证明，人们之间的相互交往会导致观点回音室的形成，即由一小群持有相似观点、彼此构成封闭网络，且不受网络外部人群观点影响的人所组成的群体。显然，回音室对社会有害，因为它阻碍了所有人之间自由、健康的交流，进而阻止观点交换、传播错误信息并加剧极端主义信念。因此，有必要减少回音室的数量，因为在社会中，观点完全一致既不可能实现，也不值得提倡。我们发现，回音室的数量取决于思想封闭的个体数量，而增加开放型个体的数量并不能减少回音室。在此背景下，我们识别出一类特定的"中等心态"个体，他们具备操纵并减少回音室数量的能力。本文提出了一种算法，用于在观点—时间谱中智能地布置中等心态个体，从而最大限度地减少观点回音室。通过多种实验设置，我们证明，与布置其他类型的个体（思想开放或思想封闭）以及随机布置"中等心态"个体相比，所提出的算法表现更为出色。

索引词—**意见动力学、回音室、社会影响、社交媒体**

I. 引言

BEFORE 社交媒体的出现，使人们只能与少数亲近的熟人分享自己的看法和观点，而这些熟人通常居住在其地理位置附近。随着 Twitter、Facebook、Pinterest 等在线平台的兴起，意见交流的整体方式以及倾听个人观点的受众范围都发生了变化。特定社交媒体帖文的受众在很大程度上取决于该平台所采用的内容推荐算法 。这些平台特有的个性化推荐算法会分析我们在社交媒体上的行为模式。平台。因此，它们会调节 [1] 新闻推送中对我们可见并突出显示的帖子。人类（无意识地）强烈渴望 [2] 听取能够印证自身既有观点的观点。因此，这通常会导致两件事。首先，按照我们自己的意愿，社交媒体上的朋友圈大多由在各种话题上的倾向与我们相支持的人组成。其次，推荐算法会向我们呈现经过筛选的帖子（选择性接触 [3]），这些帖子最有可能增加并延长我们在该平台上的在线时间 [4]。实际上，这两者结合起来意味着，完整的观点光谱往往对我们来说变得模糊不清，或被我们忽视。也就是说，我们被一群志趣相投的朋友包围，而他们反过来又让我们更多地接触与自身倾向更接近的内容，从而有效形成回音室 [5]。

回音室是由持有相似信念的人组成的封闭网络，他们大多与外界及外界的观点隔绝。研究人员 [6]–[8] 认同这样一个事实：社交媒体上的互联网用户可以忽略自己不认同或不喜欢的观点，因此，社交媒体在助长思想封闭、引发回音室效应方面发挥着毋庸置疑的作用。因此，人们认为回音室会强化既有信念，并阻碍思想的健康交流。

但是，当人们身处观点回音室时，他们的信念/观点会发生怎样的变化？在日常生活中，总体而言，有三个因素在我们自身的观点形成过程中发挥着关键作用：（i）我们自身过去的经历，这些经历会影响我们的认知推理，使我们对某个主题产生偏好；（ii）信息来源，例如媒体传播，这些来源可能是中立的，也可能带有偏见，服务于某种特定议程；（iii）与同伴及亲近之人的社会互动。此外，观点本身具有短暂性和动态性。人们的观点可能受到与其他个体的人际互动或具有影响力的人物所发表的精彩演讲的左右和操纵。在此背景下，我们考虑一个个体 A_{self} 以及其他几个可能影响 A_{self}观点的个体 $A_1, A_2, \ldots, A_k$。因此， A_{self} 的观点动态主要取决于以下因素：（i） A_{self} 对他人观点的开放程度，即 A_{self} 在多大程度上愿意倾听他人的观点；（ii）A_{self} 受到他人观点影响的易感性 [9] ，即使 A_{self} 愿意倾听，如果存在持有不同观点且能够影响她的其他个体，也可能受到影响；（iii）其他个体为说服 A_{self} 并使她的观点转向自身观点而施加的实际影响力。在现实世界中，这种人际互动和观点形成动态极其复杂，并且因人而异，具有很强的主观性。

*Prithwish Jana 任职于加拿大滑铁卢大学大卫·R·切里顿计算机科学学院 †Romit Roy Choudhury 任职于美国伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校电子与计算机工程系 ‡Niloy Ganguly 任职于印度理工学院卡拉格普尔分校计算机科学与工程系

回音室的形成会导致既有信念在封闭圈子内不断强化，从而可能造成错误信息的传播，并妨碍我们在开放辩论中进行自由判断。此外，正如 Botte 等人 [10], 所指出的，社交媒体新闻推送中的持续内容过滤是当今观点局部聚集的主要原因之一，长此以往会导致回音室的形成。基于这一背景，并考虑到观点回音室的负面影响，本文重点探讨监管机构（如政府）如何限制当今群体中多个小型观点回音室 的形成。我们发现，如果能够促成更大群体之间的局部共识，就可以实现这一目标。即使无法达成观点上的完全共识，我们也可以找出减少回音室数量的方法。通过减少此类回音室的数量，我们可以确保每个回音室中容纳更多的人。由此，我们能够促进群体内部更多的互动，这对于构建健康的社群以及防止小型社群中极端观点的形成至关重要。

II. 相关工作

根据社会影响理论 [11]，人们在交流时往往会相互影响，从而使彼此的观点趋于相似。在这一研究方向中，观点演变的动态过程取决于邻域的选择，以及一组协议的设定。这些协议用于确定个体集合的观点聚合函数，而这些个体被认为是影响一个人观点的影响者。在群体中的人们相互互动时，一个人的观点可能会表现为邻域中的多数派观点 [12]、邻域中的随机观点 [13] ，或者与其距离最近的个体的观点（基于某种预先定义的度量标准）。DeG-root、Friedkin-Johnsen、Deffuant-Weisbuch 和 Hegselmann-Krause 是一些广为人知的经典协议或模型，每种模型都有一套规则来决定个体之间如何互动。然而，现实生活中人与人之间的意见动力学并不受此类严格规则的约束。但为了实现我们减少回音室的研究目标，我们尝试采用一种能够最真实地模拟社交媒体平台上观点动态变化的模型。

在 DeGroot 模型 [14],中，群体里的每个人都对其他所有人设有相应的权重，用以表示自己受到他人观点影响的程度。在该模型中，每个个体的邻居集合始终固定，且在每个离散时间步中，所有个体都会按照加权平均方案同步更新各自的观点。Friedkin-Johnsen 模型 [15], [16] 遵循类似的思路，邻居网络固定，但该模型允许存在固执的个体，他们更倾向于坚持自己的观点。Deffuant-Weisbuch 模型 [17],则不同，并非所有个体同时更新观点，而是随机选取一对个体进行更新。这类模型的问题在于，它们难以适应现代现实世界中的意见交流机制。在互联网和社交媒体出现之前，意见交流遵循这些模型所描述的动态。当时，人们只能与固定的一群地理邻居交往。近年来，人们通过社交媒体平台在线交换观点，只需观点趋势相似 [18]，便能结识远在地球另一端的人。在这种情况下，我们的邻居不再固定，也不再受地理位置限制；他们会根据我们当前的观点以及群体中其他人的观点动态变化。Hegselmann-Krause（H-K）有界信任模型 [9] 通过随时间变化的邻接矩阵，对邻居的定义提供了更灵活的视角；我们将在问题表述部分对此作进一步阐述。本文后续章节将基于 H-K 模型提出我们的方案，并采用动态的邻居交互网络。

Pineda等人 [19]和 Vasca等人 [20]指出，我们的群体在本质上是异质的，由思想封闭和思想开放的个体组成，他们在改变自身观点方面表现出不同的行为。Baumann等人 [21] 认为，个体开放程度的异质性、不同的交往模式以及极化的观点，是群体通过社交媒体上的互动或接触形成回音室的关键原因之一。Begby [22] 还提到，人们可能会因为在自己紧密的朋友圈网络中进行意见交流，而开始持有极端主义信念。Borelli等人 [23]指出，当在线讨论中存在两个群体时，人们关注的是群体之间的差异，而不是相似之处。从长远来看，这会滋生偏见、针对另一群体的攻击性情绪以及情感极化。尽管这种现象以及回音室形成本身是有害的，但这却是任何社会认知行动序列中一种自然且不可避免的结果。不过，本文将展示，通过在群体中引入一些外部个体，可以减少回音室的数量。结构洞理论 [24] 的一个有趣观察是，社交媒体中彼此不相连的人群可能会在社会结构中形成一个空洞，而这个空洞可以由外部引入的个体占据；这些个体能够帮助两个群体之间建立和谐。出于类似目的，本文将探讨如何在当今主要在线活动的群体中，最大限度地减弱回音室效应。

III. 问题表述

我们考虑一个由 n 个体组成的群体。每个个体 $i \in \{1, 2, \ldots, n\}$ 对某个议题都有自己的观点。观点以连续变量 $x_i(t) \in [0, 1]$ 的形式表示，并随时间动态变化。时间点 $t = 0$、1、.....被视为离散的。在某一特定时间点 t，个体i 的观点 $x_i(t)$代表其对两个对立极点 P_{left} 和 P_{right}的信念倾向。对立极点可以分别代表 $\{P_{left}$ =自由派、 $P_{right} =$ 保守派$\}$、 $\{P_{left} =$ 民主党人、 P_{right} =共和党人$\}$、 $\{P_{left} =$ 左倾党派媒体、 P_{right} =右倾党派媒体$\}$ 等。在时间点 t，信念与 P_{left} 完全一致的个体的观点为 $x_i(t) = 0$；同样，与 P_{right} 完全一致的个体的观点为 $x_i(t) = 1$；其他个体的观点则介于 0 和 1 之间。于是，时间点 t 群体的意见分布可表示为 x(t)=$[x_1(t)\ x_2(t)$ ....., $x_n(t)]$。

随着时间推移，每个个体都会与群体中的其他个体互动，其信念也会受到影响。在引言中，我们指出，社交媒体的兴起导致群体中形成了回音室。在回音室中，每个个体主要受到志趣相投的朋友的影响，而这些朋友也持有相似的观点。为了在我们的框架中模拟这一现象，我们采用有界信任模型，其中每个个体 i 都有一个固定的置信区间 ϵ_i 。在时间点 t，个体只会受到观点位于其观点$x_i(t)$的 ϵ_i邻域内的相邻个体的影响。也就是说，在时间点 t，个体i的邻域 $N_i(t)$定义为以下个体的集合：

$$N_i(t) = \{j \mid \ |x_j(t) - x_i(t)| \leq \epsilon_i, \quad j \in [1, n]\} \tag{1}$$

因此，个体 i 只向处于其置信区间内的相邻个体吐露心声。此外，个体也是自己的邻居。因此，置信区间定义了一个人的邻域——区间越大，一个人的邻居数量越多，他也就越愿意倾听他人的观点。如果群体中的每个个体都具有相同的置信区间 ϵ，则称该群体为同质群体。相反，在现实情境中，群体由置信区间各不相同的人组成，即异质群体，其中不同个体可以具有不同的 ϵ_i，如图 1a 所示。

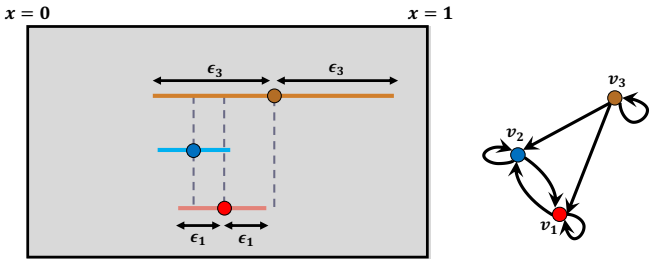


图 1：异质群体中有界信任模型及其图论表示示意图。**(a)** 三个个体 $\{1, 2, 3\}$ 的意见分布$[x_1(t)\ x_2(t)\ x_3(t)]$。X 轴表示整个 $[0, 1]$ 观点谱，置信区间用彩色线段表示。个体 1 和 2 互为邻居，且二者都是个体 3 的邻居。**(b)** 对应的图 $\mathcal{G}(\mathcal{V}, E, t)$，其中有向边 $(v_i \to v_j) \in E$ 对于 v_i，$v_j \in \mathcal{V}$ 表示在时刻 t个体 i 受到个体 j 的影响。

A. Hegselmann-Krause 有界信任模型

回音室形成与 Hegselmann-Krause（H-K）有界信任模型 [9] 密切相关。根据该模型，个体 i 在时间点 $t + 1$ 的观点表现为其在 $N_i(t)$中所有相邻个体观点的平均值。因此，意见动力学可表示为：

$$x_i^{HK}(t+1) = \frac{1}{|N_i(t)|} \times \sum_{j \in N_i(t)} x_j(t) \tag{2}$$

根据 H-K 模型，在每次迭代中，一个个体的观点会变为包括自身在内的所有邻居观点的平均值。然而，现实中，个体往往会更长时间地坚持先前的观点。换句话说，在改变观点时，个体赋予自己先前观点的权重，高于赋予所有其他邻居观点总和的权重。这种动态可以通过修改公式 2 表示为：

$$x_i^{HK_{mod}}(t+1) = w_{own} \times x_i(t) + \frac{1 - w_{own}}{|N_i(t) \setminus \{i\}|} \times \sum_{j \in N_i(t) \setminus \{i\}} x_j(t) \tag{3}$$

where, $1 - w_{own} < w_{own} \leq 1 \implies w_{own} \in (0.5, 1]$.

B. 示例

假设一个由十个个体组成的群体的意见分布在时刻 $t = T$ 为 $\mathbf{x}(T) = [0.1, 0.2, 0.4, 0.4, 0.5, 0.7, 0.7, 0.8, 0.8, 1.0]$。第五个个体的观点为 $x_5(T) = 0.5$，其置信区间为 $\epsilon_5 = 0.25$。因此，根据公式 1，在这一时刻，第五个个体的邻居为 $N_5(T) = \{3, 4, 5, 6, 7\}$。根据公式 2 中的标准 H-K 意见动力学模型，该个体会以相同的权重因子 $\frac{1}{5} = 0.2$，平等地考虑所有邻居的观点以及自己的观点。也就是说，在时刻 $t = T + 1$，第五个个体的观点将为：

$$\begin{aligned} x_5^{HK}(T+1) &= \frac{1}{5} \times (x_3(T) + x_4(T) + x_5(T) + x_6(T) + x_7(T)) \\ &= \frac{0.4 + 0.4 + 0.5 + 0.7 + 0.7}{5} \ = \ 0.54 \end{aligned} \tag{4}$$

相反，根据公式 3 中修正后的 H-K 模型，在赋予自身观点 $w_{own} = 0.6$ （例如）权重后，第五个智能体将以 $\frac{1-0.6}{4} = 0.1$ 为权重系数来衡量其所有邻居的观点。因此，第五个智能体在时间点$t = T + 1$ 的观点将为：

$$\begin{aligned} x_5^{HK_{mod}}(T+1) &= (0.6) \times x_5(T) + \\ &\quad \left(\frac{1 - 0.6}{4}\right) \times (x_3(T) + x_4(T) + x_6(T) + x_7(T)) \\ &= 0.6 \times 0.5 + \frac{0.4 + 0.4 + 0.7 + 0.7}{10} = 0.52 \\ &\quad \text{(which is closer to } x_5(T), \text{ than } x_5^{HK}(T+1)) \end{aligned} \tag{5}$$

C. 均衡时间。

我们将均衡时间 (t_{eqm})定义为观点分布不再发生变化时的时间点 t_*。数学上，它可表示为满足 $\forall j \in \{1, 2, \ldots, n\}$, $|x_j(t) - x_j(t+1)| \leq \delta$的最小值 $t \in \{0, 1, \ldots\}$，其中δ 是一个趋近于 0 的极小正实数。均衡时刻(t_{eqm})的观点簇(C_{eqm})定义为均衡后观点分布中存在的不同取值。均衡时只有一个观点簇表示群体达成了共识，两个观点簇表示极化，多个观点簇则表示群体中的观点碎片化。

D. 图论表示。

我们旨在以图网络的形式表示群体及其各自的邻域。考虑一个时变图 $\mathcal{G}(\mathcal{V}, E, t)$。其中，每个顶点 $v_i \in \mathcal{V}$对应于群体中的一个个体 $i \in \{1, 2, \ldots, n\}$。因此，每个顶点都关联着一个时变观点$x_i(t) \in [0, 1]$。如果个体 j 是个体 i 的邻居，即观点 $x_j(t)$ 位于观点 $x_i(t)$ 的 ϵ_i-邻域内，也就是说， $j \in N_i(t)$，则存在一条有向边 $(v_i \to v_j) \in E$。换言之，边 $(v_i \to v_j) \in E$ 表示个体 i 受到个体 j的影响。集合 $\{v \mid v_i \to v \in E\}$ 则构成个体 i 在时刻 t的邻域 $N_i(t)$。从对应于个体 i的顶点出发，存在指向所有影响个体 i观点的顶点（个体）的出边。所有边的权重均为 1。如图 1b 所示。

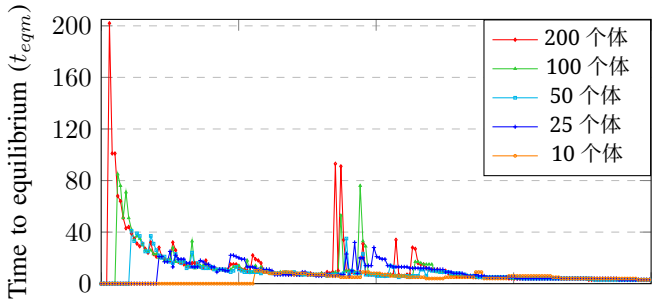
用图来描述意见动力学问题，有助于识别个体在保持联通社群成员身份的同时，随时间所受到的拉力（向左或向右）；在这个社群中，每个人的观点都在随时间变化。个体 a 所感受到的拉力，可以表示为指向从 a出发存在出边的那些个体的平均观点位置。事实上，两个个体 a_i 和a_j 的观点最终是否会趋于一致（即能否达成观点共识），与图中是否存在路径有关。具体而言，这两个个体在某个阶段达成共识的必要条件，取决于是否存在一条从a_i 到 a_j 或反向的路径（由一系列有向边构成）。但需要注意，存在路径并非达成观点共识的充分条件——这还取决于邻居的观点。在下一节中，我们将根据个体的开放程度对其进行分类，并说明如何借助这种图形表示来解释各自的意见动力学。

IV. 基于开放性的智能体分类

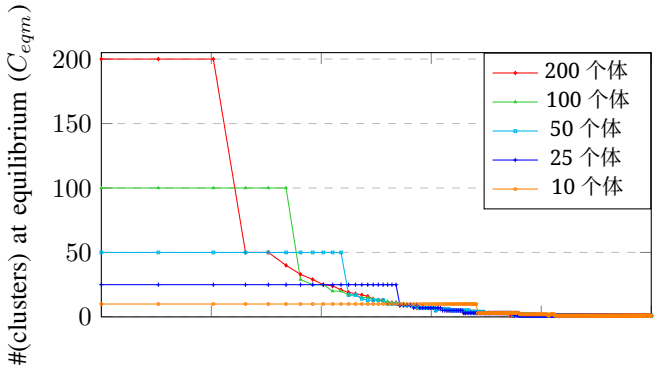
如上一节所述，从现实生活中的社交媒体群体中随机均匀抽取的任何子集，在人们的置信区间方面都具有异质性。也就是说，人们对他人观点的开放程度各不相同。基于这一思路，我们尝试根据均衡时间（t_{eqm}）对个体进行分类，即根据他们达到观点均衡状态的速度进行分类。对于每一个开放程度值，即置信区间（δ），我们考虑一个同质群体，其中所有个体对他人观点具有相同的开放程度，并研究整个群体达到观点均衡的速度。

我们考虑一个同质群体，其中每个个体都具有相同的置信区间，即 $\epsilon_i = \epsilon \; \forall i \in \{1, 2, \ldots, n\}$。并且在 $t = 0$ 时，观点在 0 和 1 之间（包括两端）均匀分布，使得观点相邻的两个个体之间的观点差为 $\frac{1}{n-1}$。实际上，这意味着 $\mathcal{G}(\mathcal{V}, E, t)$ 是一个 k-正则图，其中每个节点（观点接近 0 和 1 的极端个体除外）都有 $k = \min(n,\ 2 \times \lfloor \epsilon * (n-1) \rfloor + 1)$ 条出边，以及数量相同的入边。因此，随着 ϵ 越来越接近 0，该图将变成一个非连通图，其中包含 n 个顶点和 n 条边，每个顶点都与自身相连。

在顶点之间没有交互时，系统已处于均衡状态，因此 $t_{eqm} = 0$。增加 ϵ 时，刚开始形成少量边， t_{eqm} 应该会急剧上升，因为 ϵ （开放区间）仍然较小，开放区间较小的个体需要时间才能达成局部共识。事实上，随着开放区间增大、引入的边越来越多，收敛到共识的速度会呈指数级加快 [25]。进一步增加 ϵ ，当它接近 1 时，每个顶点都与其他所有顶点相连，包括自身，因此形成了带自环的完全连接图。在这样的图中，收敛到均衡的速度非常快，因为每个个体从一开始就朝着全局观点共识均值移动。因此，直观来看，在同质群体中，达到均衡所需的时间 t_{eqm} 应随 ϵ 的增加而单调递减，而这也会使图中的个体间边更多。



(a)



(b)

图2：均衡到达时间和均衡时簇数量的变化，对于一个每个代理都有 ϵ 置信区间的同质群体。

但在实际使用这种设置进行实验时，有一些重要的性质值得注意。如图 2 所示，我们对不同的群体规模进行了实验。首先，对于较低的 ϵ 值，t_{eqm} 始终从 0 开始，不受群体规模的影响。当图中刚开始形成边时，t_{eqm} 会迅速上升。然而，随着群体规模的增大，触发这一突然而显著的上升所需的 ϵ 值相对更小。

发生在 t_{eqm}。这是因为，群体规模越大，即使一个人只愿意倾听自己观点附近极短范围内的意见，也更有可能找到与自己观点相近的人。当 ϵ 超过 0.1 时， t_{eqm} 并不会单调下降。相反，置信区间 ϵ 存在一个特定范围，在该范围内达到均衡所需的时间会变长，与整体趋势相反。所有群体规模下均如此，且如图 2a 所示，当 ϵ 位于 $[0.17, 0.22]$ 时就会出现这种情况。此外，如图 2b 所示，无论群体规模如何，当 $\epsilon \geq 0.25$ 时，均衡状态下都会达到全局共识（$C_{eqm} = 1$）。

因此，正如图 2 所示，随着置信区间的变化，达到均衡所需的时间以及观点回音室或簇的数量也会受到显著影响。考虑到这一点，我们可以识别出三种类型的个体，它们在回音室的形成过程中可能发挥不同但重要的作用。第一类是思想封闭个体，其开放程度/置信区间 ϵ_{close} 非常接近于零。这些个体只与非常有限的一组邻居进行交互，因此很难改变他们已有的信念。第二类包括开放型个体，其观点几乎可以受到整个观点范围内所有个体的影响。他们很容易被塑造，达成观点共识和均衡所需的时间也非常短。他们的置信区间 ϵ_{open} 较大，超过 0.5（从图 2 可以看出，所有$\epsilon \in [0.5, 1]$的行为都相似）。第三类是思想温和个体，其置信区间为 $\epsilon_{moderate} \in [0.17, 0.22]$。他们的开放程度高于思想封闭个体，但低于开放型个体（$0 \approx \epsilon_{close} < \epsilon_{moderate} < \epsilon_{open} \approx 0.5$）。

V. 不同个体在簇形成中的作用

正如我们在上一节中所解释的，在分析簇形成行为时，我们尤其关注三种特定类型的个体：思想开放的、思想封闭的 以及思想温和的 。根据定义，开放型个体的置信区间较大 ϵ_{open} ，因此邻域也较大。与这类个体对应的顶点具有较高的出度。类似地，与思想封闭个体（置信区间较小 ϵ_{close}）对应的顶点，其出度为零或非常低。

研究 [26], [27] 发现，在疫情期间，人们对自己持有的信念变得更加保守派，甚至其政治意识形态也随着时间的推移保持不变。

此外，在另一项研究中，研究人员考察了一个由生活在冲突频发社会中的年轻成年人组成的群体 [28] 。作者发现，在特定的不利条件下，任何人都可能对一系列信念产生强烈的依附，因为这些信念与人类固有的“行为倾向”有关，而在这方面，有些人比其他人更容易产生此类依附。这证实了这样一个事实：社会中始终存在一些思想封闭的人，他们坚定地坚持自己的既有信念。假设在一个假设情境中，群体中只有封闭型个体，且他们并未完全摆脱彼此的影响。也就是说，相应的图中至少存在一些边 $\mathcal{G}(\mathcal{V},\ E,\ t)$。如图2所示，由于这是一个低$\epsilon$的同质群体，因此将产生大量的簇，即回音室。

（这大约等于个体的数量），而且由于个体众多，需要很长时间才能达到均衡。以此为前提，我们提出第一个主张：

主张 *1*：在包含思想封闭者的群体中，引入更多思想封闭者会增加回音室的数量。

依据 *1*：这实质上意味着增加由观点相近的个体组成的同质群体中的个体数量。从图2b可以看出，对于相同的 ϵ，增加个体数量意味着簇或回音室数量的增加。

主张 2：在一个只包含思想封闭个体的同质群体中，减少意见簇的直观方法是不断增加思想开放个体。但实际上，引入新的思想开放者无法干扰并减少现有的回音室。

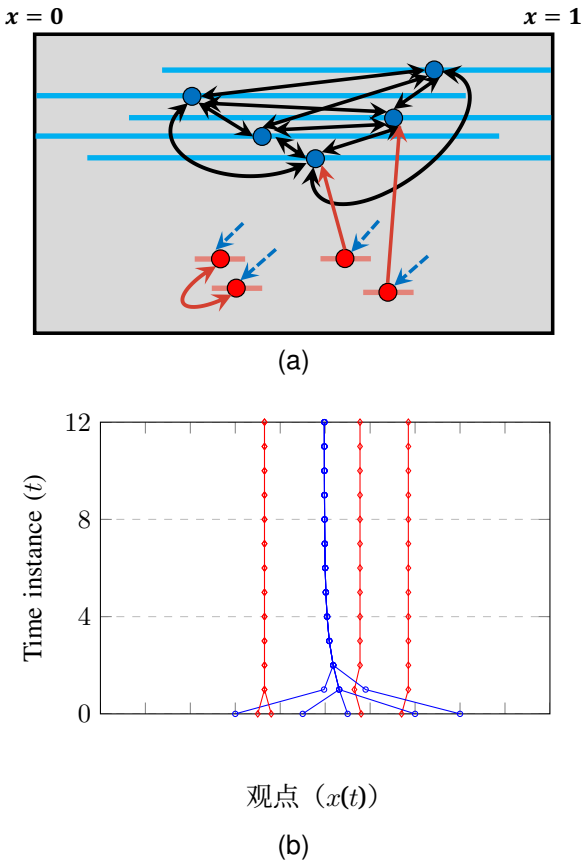


图 3：由五个开放型个体（蓝色）和四个思想封闭个体（红色）组成的群体示例，展示了相应的图和意见动力学。在图中，黑色箭头表示开放型个体形成的团，蓝色点状箭头表示来自全部五个开放型顶点的入射箭头。

论证 *2*：假设 A_c 是思想封闭个体的集合，每个个体的置信区间为 ϵ_c。 A_o 是开放型个体的集合，每个个体的置信区间为 ϵ_o。他们随机分布在意见谱 $[0, 1]$ 上。

每个开放型个体 $A \in A_o$ 的置信区间（两侧各一个）合起来几乎覆盖了整个意见谱。因此，另一个随机放置的个体很可能落在某个开放型个体 $A \in A_o$ 的置信区间内（出度较高）。同样，某个开放型个体 $A \in A_o$ 很可能落在另一个随机放置的开放型个体的置信区间内，因为后者的置信区间几乎覆盖了整个意见谱（入度较高）。因此，开放型个体既影响其他开放型个体，也同时受到其他开放型个体的影响。结果是，与开放型个体对应的顶点构成一个强连通分量，甚至可能形成一个团（例如图3a中的蓝色顶点）。

另一方面，鉴于 $\epsilon_c \approx 0$，另一个随机放置的个体极不可能落在某个个体 $A \in A_c$ 的置信区间内。这些顶点的出度较低，会成为附着在强连通开放型分量上的悬挂入顶点（例如图3a中的红色顶点）。由于开放型个体构成了一个强连通分量，它们彼此之间将以指数级的速度迅速达成多数共识。另一方面，封闭型个体要么已经达到均衡，要么被收敛速度更快的开放型分量抛在后面。图3b对此进行了说明：封闭型（红色）个体的簇（回音室）保持原样，而开放型（蓝色）个体则在 $t = 2$ 处形成一个单一的簇。因此，开放型个体无助于减少封闭型个体形成的现有回音室，因为它们各自达到均衡所需的时间相差悬殊。

主张 *3*：在一个包含思想封闭者和思想开放者混合群体中，引入思想温和者有助于减少现存的回音室。

论证*3:* 在一个同时存在思想封闭和思想开放个体的社会中，我们将证明，只有思想温和的个体才有能力减少均衡状态下的簇（回音室）总数。假设 A_c 是思想封闭个体的集合，每个个体的置信区间为 ϵ_c。A_o 是思想开放个体的集合，每个个体的置信区间为 ϵ_o。A_m 是思想温和个体的集合，每个个体的置信区间为 ϵ_m。这些个体随机分布在意见谱 $[0, 1]$上。正如我们在论证2中所讨论的，思想开放的顶点会形成一个强连通分量，其结构接近一个团。思想封闭的顶点将作为悬挂的入顶点，附着在思想开放个体构成的强连通分量上。因此，与引入新的思想温和个体的情况相比，这不会对团结构造成太大影响。由于思想温和的顶点比思想封闭的对应顶点具有相对更高的出度，因此它们将更紧密地附着在思想开放个体构成的强连通分量上，但不会与现有团中的每个其他个体相连。因此，它们会破坏团结构。这样一来，思想开放个体原本凭借团结构实现的快速收敛便不再能够实现。而现在，当思想开放个体以较慢的速度收敛时，它们将有机会逐渐将缓慢趋于一致或已经达成共识的思想封闭型个体聚集在一起，形成局部的联合多数共识（更大的回音室），从而有效减少观点簇的数量。

均衡时簇的数量与收敛过程减缓之间的关系，也得到了实验部分各图的验证，即图 4、5 和 7。也就是说，对于异质群体而言，达到均衡所需的时间与簇的数量平均呈负相关。因此，减缓收敛过程最终可能减少回音室的数量。在这里，思想温和的主体充当缓慢收敛或已收敛的思想封闭个体与快速收敛的思想开放个体之间的桥梁，能够减缓群体整体达到观点均衡的过程，从而减少观点簇的数量。

VI. 思想温和个体的智能布局

可以确定的是，无论是封闭型个体还是开放型个体，都无法帮助减少群体中已有的回音室——只有思想温和的主体才能带来这种改变。他们有可能减缓开放型个体的快速收敛，从而为封闭型个体与他们互动创造机会。然而，要减缓开放型个体的收敛，随之而来的问题是：应在群体中引入多少外部思想温和的主体？应将他们安排在意见谱的什么位置？在现有观点的动态演变过程中，又应在什么时间点引入他们?

假设我们有一项预算 $\mathcal{B}$，用于确定可引入群体的外部思想温和主体的最大数量。我们的目的是以一种能最大限度减缓开放型个体达成共识的方式安排思想温和的主体。每个时间步，都可以通过识别一对彼此靠近的相邻（中间没有其他个体）开放型个体 i，$i+1$ 来实现。随后，我们可以通过引入新的思想温和主体来限制或逆转这一移动。首先，只有当这两个个体的邻域并不完全相同时，他们才会彼此靠近（如果邻域完全相同，他们受到的作用力也完全相同，不会方向相反）。因此，即使他们的邻域部分重合，也就是说他们有一些共同的出边（用图表示时），这些邻域也不可能完全相同。

在图表示中，对于这样一对智能体中的左侧智能体 i，其右侧邻居的观点之和应大于左侧邻居的观点之和（因此，根据公式（2）中的意见动力学表述，它会受到向右的拉力）。类似地，这对中的右侧智能体 $i+1$ 会受到向左的拉力，因为其左侧邻居的观点之和大于右侧邻居的观点之和。为了抵消这种吸引力，我们对这样一对智能体中的左侧（右侧）智能体施加一个向左（向右）的拉力。

算法 1: 一种放置思想温和აგენტ的方法处于最佳时空位置的个体

数据： 初始意见分布 $x(t=0)$，开放度分布 $\mathcal{E}$，预算 $\mathcal{B}$
结果： 最优安置的时空位置。思想温和的主体
$t \leftarrow 0$;
当 $\mathcal{B} > 0$ **时执行**
  生成图 $\mathcal{G}(\mathcal{V},\ E,\ t)$;
  ▷ 在 t=0 时的初始状态，意见动力学针对 t>0
  根据对应的观点 $x_i(t)$ 排列 $v_i \in \mathcal{V}$；
  对于 $v_i \in \mathcal{V}$，**执行**
    $E_i^{out} \leftarrow$ 来自 v_i的出边集合；
    $N_i^L \leftarrow \{x_i(t) - x_k(t) | (v_i, v_k) \in E_i^{out}, x_i(t) < x_k(t)\}$;
    $N_i^R \leftarrow \{x_k(t) - x_i(t) | (v_i, v_k) \in E_i^{out}, x_i(t) > x_k(t)\}$;
  end
  对 $i = 1;\quad i < |\mathcal{V}|;\quad i = i + 1$ **执行**
    如果$(v_i, v_{i+1}$ 是思想开放的) **并且** $\left(\sum N_i^L < \sum N_i^R\right)$ **和** $\left(\sum N_{i+1}^L > \sum N_{i+1}^R\right)$ **then**
      $numNewL \leftarrow \lceil \frac{\sum N_i^R - \sum N_i^L}{\mathcal{E}_i} \rceil$;
      $numNewR \leftarrow \lceil \frac{\sum N_{i+1}^L - \sum N_{i+1}^R}{\mathcal{E}_{i+1}} \rceil$;
      如果 $\mathcal{B} \geq numNewL$ **那么**
        引入 $numNewL$思想温和的观点为 $= x_i(t) - \mathcal{E}_i$ 的个体，在时间 $= t$;
        $\mathcal{B} \leftarrow \mathcal{B} - numNewL$;
      else
        中断;
      end
      如果 $\mathcal{B} \geq numNewR$ **则**
        引入 $numNewR$ 思想温和观点为 $= x_{i+1}(t) + \mathcal{E}_{i+1}$ 的个体，在时间 $= t$;
        $\mathcal{B} \leftarrow \mathcal{B} - numNewR$;
      else
        断<款式
      end **i**
    end **d**
  end **='1'>;</**
  $t \leftarrow t + 1$; **款式>**
end

对。为了将左侧个体 i 向左拉动，我们引入最少数量的个体来扭转其移动方向，并将它们放置在这样的位置：它们的 x 最低，因而会成为前者的邻居。为了将右侧个体 $i+1$ 向右拉动，我们引入最少数量的个体来扭转其移动方向，并将它们放置在这样的位置：它们的 x 最高，因而会成为前者的邻居。我们在每个时间步都继续这样做，直到用完思想温和个体的预算。整个过程在算法 1 中进行了说明。

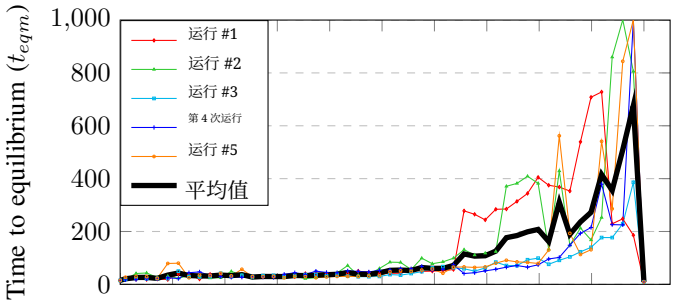
VII. 实验结果

现在，我们研究在异质群体中随机和智能地引入温和个体的影响。

A. 在社区中随机布置思想温和个体的效果

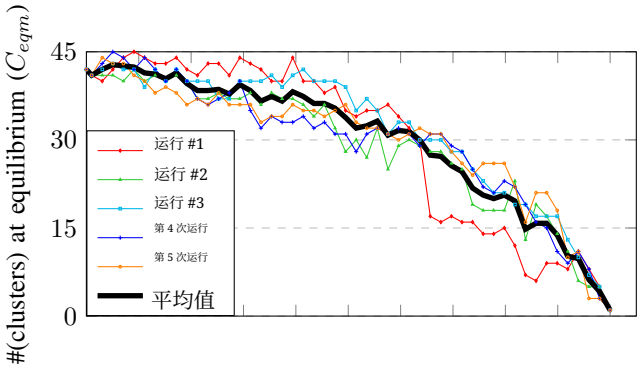
假设有一个由 200 人组成的群体。为符合现实情况，我们根据人们的开放性，即 ϵ 邻域，将其设计为一个异质群体。为简单起见，我们不设定每个人具有不同的开放性，而是假设群体由两个同质子群组成：开放型子群和封闭型子群。属于封闭型子群的每个人都具有相同的开放性，即 $\epsilon_c = 0.01$；同样，每个开放型个体都具有 $\epsilon_o = 0.45$。为了更贴近现实场景，我们不区分封闭型个体和开放型个体的初始观点。封闭型个体不一定持有极端观点（即接近 $x = 0$ 或 $x = 1$）；他们完全可能持有接近中心区域的观点。同样，开放型个体也不总是持有中间派观点。因此，我们分别从以 0.5, 0.5 4 为中心、取值范围截取在 0 到 1 之间的正态分布 $\mathcal{N}$ 中，抽取开放型子群和封闭型子群的初始意见分布 $x_o(t = 0)$ 和 $x_c(t = 0)$。因此，整个群体的初始意见分布 $x(t = 0)$ 是相应意见分布 $x_o(t = 0)$ 和 $x_c(t = 0)$ 的串联。现在，我们研究将现有个体转变为思想温和的个体，或引入新的思想温和个体所产生的影响，其中每个个体都具有 $\epsilon_m = 0.2$。

1) 以封闭心态个体为主的初始群体：首先，我们考虑一个由 80% 的封闭型个体和 20% 的开放型个体组成的群体。实际上，这个以封闭心态个体为主的群体的平均开放程度为 $(0.8 \times \epsilon_c) + (0.2 \times \epsilon_o) = (0.8 \times 0.01) + (0.2 \times 0.45) = 0.098$。在这一初始配置下，我们系统地将封闭型个体逐步替换为思想温和的个体，直至所有封闭型个体均被替换。所有封闭型个体的初始观点均保持固定。在图 4 中，我们研究了随着越来越多的封闭型个体被思想温和的个体替换，(a) 达到均衡所需的时间，以及 (b) 形成的簇的数量。由于思想温和的个体在意见谱中的初始位置是随机的，我们进行了五次不同的实验（Run #1 - Run #5），并取其平均值以了解总体趋势。在每次实验中，$x_o(t = 0)$ 均相同。但每次实验对应于思想温和的个体的不同初始意见分布 $x_m(t = 0) \subseteq x_c(t = 0)$，以及尚未被替换的其余封闭型个体 $x_{cRem}(t = 0) = x_c(t = 0) \setminus x_m(t = 0)$。所有这些实验的共同趋势是，无论思想温和的个体最初位于何处，随着群体中思想温和的个体数量增加，达到均衡所需的时间都会延长。事实上，当越来越多的封闭型个体被思想温和的个体替换时，群体的平均开放程度会提高。然而，与同质群体中的总体趋势不同（图 2a 中，均衡时间随着开放程度的提高而缩短），在这里，达到均衡所需的时间反而会随着群体平均开放程度的提高而延长。唯一的例外是，当群体中不存在任何封闭型个体时，达到均衡所需的时间和簇的数量都会急剧下降。在这一延长的时间内，会形成规模更大的簇，而簇的总体数量则会减少。



思想封闭者转变为思想温和者的比例

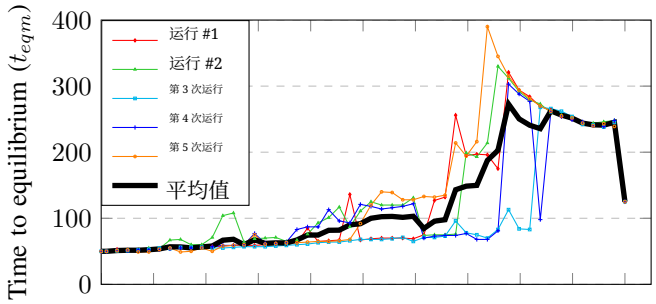
(a)



思想封闭者转变为思想温和者的比例

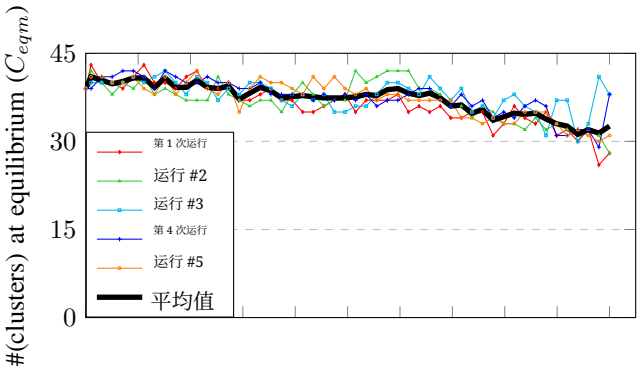
(b)

图 4：在包含 200 个个体的群体中，将封闭心态个体转变为思想温和个体的影响。该群体的初始意见分布为 $x(t=0) \in \mathcal{N}(0.5, 0.5^4)$，其中包含 80% 的封闭心态个体和 20% 的开放型个体。无论选择哪些封闭心态个体进行转变，随着异质群体中此类转变越来越多，达到均衡所需的时间会延长，同时形成的观点簇会更大、数量更少。



思想开放转变为思想温和的比例

(a)



思想开放者转变为思想温和者的比例

(b)

图 5：在一个包含 200 个个体的群体中，将开放型个体转变为思想温和个体的影响，其中初始意见分布为 $x(t=0) \in \mathcal{N}(0.5, 0.5^4)$，包含 80% 的开放型个体和 20% 的封闭型个体。无论选择哪些开放型个体进行转变，群体中思想温和个体的比例越高，平均而言，达到均衡所需的时间越长，观点簇的数量越少。

2）以思想开放个体为主的初始群体：其次，我们考虑一个以思想开放个体为主的群体，其中 80% 为思想开放个体，20% 为思想封闭个体。与先前的设置不同，这次我们系统地将思想开放个体逐步替换为思想温和个体，直至所有思想开放个体都被替换。在此，所有思想封闭个体的初始观点均保持不变。随着越来越多的思想开放个体被思想温和个体替换，我们在图 5 中绘制了达到均衡所需的时间以及形成的簇数。这里，我们同样进行了五次不同的实验（运行 #1 - 运行 #5），其中 $x_c(t=0)$ 相同，但思想温和个体的初始意见分布$x_m(t=0)$和未被替换的其余思想开放个体的初始意见分布各不相同。总体趋势与之前的设置相似。群体中随机放置的思想温和个体越多，达到均衡所需的时间越长，形成的簇总数越少。

在图 6 中，我们观察到相同意见分布下的意见动力学，其中思想封闭个体的初始位置固定，但思想温和者和思想开放者的比例不同。可以观察到，当不存在思想温和的主体时，会形成更多的观点簇，其中大多数簇要么由思想封闭个体组成，要么由思想开放者组成，但不会同时包含两者。相反，当存在一些思想温和的主体时，达到均衡所需的时间更长，观点簇的数量则会减少。此外，此时思想封闭个体会与思想开放者和思想温和的主体处于同一个簇中。

3）初始群体中思想开放与思想封闭的个体各占一半：第三，我们考虑一个由50%的思想开放型个体和50%的思想封闭型个体组成的群体。在群体中引入新的思想温和型个体后，其变化趋势与前述情形相似。在这种情况下，平衡时间同样有所增加，而观点簇的数量则有所减少。

总体而言，可以观察到，在仅由思想接近和思想温和的主体组成的群体中，情况总是如此。

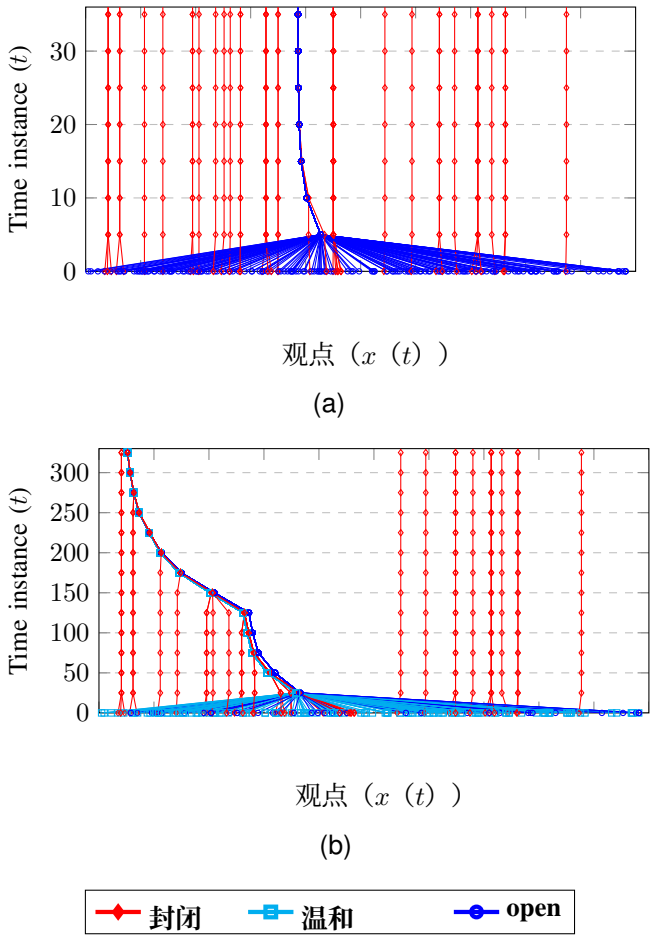


图 6：对由 20% 封闭型个体（初始观点固定）和 （**a**）80% 开放型个体组成的群体，以及由 （**b**）45% 思想温和的主体和 35% 开放型个体组成的群体进行意见动力学仿真，两者的初始意见分布相同。在（**a**）中，开放型个体形成一个较大的观点簇，而封闭型个体形成若干较小的观点簇。但在（**b**）中，由于存在思想温和的主体，达到均衡的时间有所延长，封闭型与开放型个体共同形成了更大的观点簇。

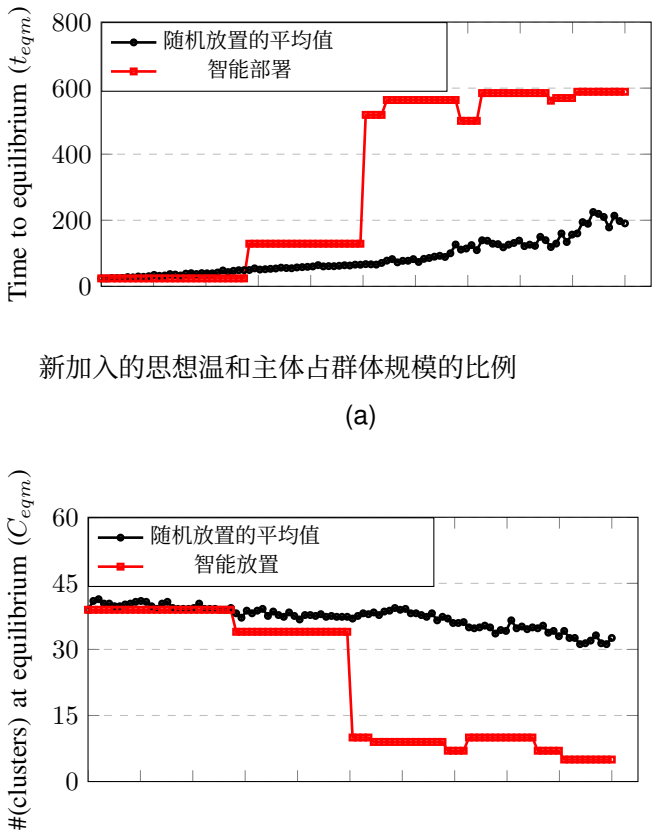


图 7：比较随机布置（第 VII-A3 节）与智能布置（算法 1）新引入的思想温和个体所产生的影响。群体由 200 个个体组成，其中初始意见分布为 $x(t=0) \in \mathcal{N}(0.5, \underline{0.5\ 4})$，包含 50% 的思想开放个体和 50% 的思想封闭个体。当思想温和的个体被智能地布置在意见时空谱中计算得出的位置时，其效果更为显著：能够延缓达到均衡的时间，并缩小（和扩大）观点簇。

这表明，用思想温和的主体替换现有个体或引入新的思想温和个体，会减缓收敛过程，并实际上减少观点簇的数量。即使在意见谱中随机放置思想温和的主体，在异质性群体中也始终会观察到这一现象。此外，如果群体中已经包含一些思想温和的主体，增加其数量将减少簇的数量，直到群体完全由思想温和的主体组成。

B. 思想温和主体的智能布置效果

现在，我们根据算法 1 中的描述，评估用于智能部署思想温和个体的算法。其设置与随机部署思想温和个体的设置类似。我们考虑一个由 200 人组成的异质群体，其中 50% 的人是思想封闭的，其余 50% 是思想开放的。每个属于思想封闭.....

思想温和子群有 $\epsilon_c = 0.01$，而每个思想开放者都有 $\epsilon_o = 0.45$。思想开放子群和思想封闭子群的初始意见分布均从以 0.5, $\underline{0.5\ 4}$ 为参数、以 0.5 为中心的正态分布 $\mathcal{N}$ 中抽样，并将取值限制在 0 和 1 之间。现在，我们在群体中引入新的思想温和个体（$\epsilon_m = 0.20$），使其在空间和时间上的放置达到最优（由算法 1 得出），并在图 7 中研究其影响。可以观察到，与随机放置相比，智能放置在更大程度上减缓了收敛过程。因此，在均衡状态下形成的观点簇数量更少。

VIII. 结论

本文研究了群体中回音室的形成过程，其中人们接受他人观点的开放程度各不相同。通过有界信任模型对观点动态进行建模，我们观察到

在这样的群体中，由于不同个体的收敛速度存在差异，观点簇（回音室）往往会大量形成。有一部分思想开放程度“适中”的人能够弥合这种差异：他们减缓开放型个体的收敛，并让封闭型个体有机会在这段延缓期间与开放型个体互动。研究发现，在仅由封闭型和中等心态个体组成的群体中，以中等心态个体替换现有个体，或随机引入新的中等心态个体，都会减缓收敛过程，从而减少观点簇的数量。本文还提出了一种算法，可在观点空间和时间维度上智能部署中等心态个体。与随机部署相比，该算法能够最优地减缓开放型个体快速收敛的过程，大幅减少观点回音室的数量。因此，若能随时间推移，有策略地引入持有特定观点的外部中等心态个体，便有助于消解多个小型回音室，促进群体中更健康的观点交流。

参考文献

[1] G. Etta、M. Cinelli、A. Galeazzi、C. M. Valensise、W. Quattrociocchi 和 M. Conti，《比较社交媒体监管对新闻消费的影响》，*IEEE* 计算社会系统汇刊，2022 年。[2] M. S. Levendusky，《党派媒体为何会使观众产生极化？》，美国政治科学杂志，第 57 卷，第 3 期，第 611–623 页，2013 年。[3] M. Cinelli、G. D. F. Morales、A. Galeazzi、W. Quattrociocchi 和 M. Starnini，《社交媒体上的回音室效应》，美国国家科学院院刊，第 118 卷，第 9 期，2021 年。[4] N. Perra 和 L. E. Rocha，《算法个性化时代的意见动力学建模》，科学报告，第 9 卷，第 1 期，2019 年。[5] W. Cota、S. C. Ferreira、R. Pastor-Satorras 和 M. Starnini，《政治传播网络中信息传播的回音室效应量化》，*EPJ* 数据科学，第 8 卷，第 1 期，2019 年。[6] J. Carpenter、D. Preotiuc-Pietro、J. Clark、L. Flekova、L. Smith、M. L. Kern、A. Buffone、L. Ungar 和 M. Seligman，《积极思想开放性思维对社交媒体交流的影响》，判断与决策，第 13 卷，第 6 期，2018 年。[7] P. Barberá、J. T. Jost、J. Nagler、J. A. Tucker 和 R. Bonneau，《从左到右发推文：在线政治交流是否超越了回音室？》，心理科学，第 26 卷，第 10 期，第 1531–42 页，2015 年。[8] E. Bakshy、S. Messing 和 L. A. Adamic，《Facebook 上对意识形态多元化新闻和观点的接触》，科学，第 348 卷，第 6239 期，第 1130–1132 页，2015 年。[9] R. Hegselmann 和 U. Krause，《意见动力学与有界信任模型：分析与仿真》，人工社会与社会仿真杂志，第 5 卷，第 3 期，2002 年。[10] N. Botte、J. Ryckebusch 和 L. E. Rocha，《聚类与固执性对个性化意见动力学中回音室形成的调节作用》，物理学 *A*：统计力学及其应用，2022 年。[11] H. C. Kelman，《顺从、认同与内化：态度改变的三种过程》，冲突解决杂志，第 2 卷，第 1 期，第 51–60 页，1958 年。[12] S. Galam，《随机几何中的少数派观点传播》，欧洲物理学杂志 *B*：凝聚态物质与复杂系统，第 25 卷，第 4 期，第 403–406 页，2002 年。[13] R. A. Holley 和 T. M. Liggett，《弱相互作用无限系统与投票者模型的遍历定理》，概率年刊，第 643–663 页，1975 年。[14] M. H. DeGroot，《达成共识》，美国统计学会杂志，第 69 卷，第 345 期，第 118–121 页，1974 年。[15] N. E. Friedkin 和 E. C. Johnsen，《社会影响与观点》，数学社会学杂志，第 15 卷，第 3–4 期，第 193–206 页，1990 年。[16] N. Friedkin 和 E. Johnsen，《社会影响网络与观点形成的观点变化模型》，群体过程进展，第 16 卷，1999 年 1 月。

[17] G. Deffuant、D. Neau、F. Amblard 和 G. Weisbuch，《交互个体之间的信念混合》，复杂系统进展，第 3 期，2001 年。[18] H. Noorazar、K. R. Vixie、A. Talebanpour 和 Y. Hu，《从经典到现代的意见动力学》，现代物理学国际期刊 *C*，第 31 卷，第 07 期，2020 年。[19] M. Pineda 和 G. Buendía，《大众媒体与连续意见动力学中的异质置信界限》，*Physica A*：统计力学及其应用，第 420 卷，第 73–84 页，2015 年。[20] F. Vasca、C. Bernardo 和 R. Iervolino，《有界置信意见动力学中的实用共识》，*Automatica*，第 129 卷，2021 年。[21] F. Baumann、P. Lorenz-Spreen、I. M. Sokolov 和 M. Starnini，《社交网络中回音室与极化动力学的建模》，物理评论快报，第 124 卷，第 4 期，2020 年。[22] E. Begby，《从信念极化到回音室：一种理性化解释》，*Episteme*，2022 年。[23] D. Borrelli、L. Iandoli、J. E. Ramirez-Marquez 和 C. Lipizzi，《一种评估反叙事对在线讨论中情感极化影响的定量与基于内容的方法》，*IEEE* 计算社会系统汇刊，第 9 卷，第 914–925 页，2021 年。[24] Z. Lin、Y. Zhang、Q. Gong、Y. Chen、A. Oksanen 和 A. Y. Ding，《社会网络分析中的结构洞理论：综述》，*IEEE* 计算社会系统汇刊，2021 年。[25] G. Li、S. Motsch 和 D. Weber，《有界置信动力学与图控制：实现共识》，网络与异质介质，第 15 卷，第 3 期，第 489 页，2020 年。[26] D. L. Rosenfeld 和 A. J. Tomiyama，《疫情会使人们在社会层面变得更加保守吗？政治意识形态、性别角色与 COVID-19 案例》，应用社会心理学杂志，第 51 卷，第 4 期，第 425–433 页，2021 年。[27] L. Liu、Z. Cao、P. Zhao、P. J.-H. Hu、D. D. Zeng 和 Y. Luo，《一种用于社交媒体上 COVID-19 相关污名语义分析的深度学习方法》，*IEEE* 计算社会系统汇刊，2022 年。[28] G. Kneževi´c、L. B. Lazarevic、J. Me¯dedovi´c、B. Petrovi´c 和 L. Stankov，《后冲突社会中思想封闭与激进极端主义之间的关系》，攻击性行为，第 48 卷，第 2 期，第 253–263 页，2022 年。



Prithwish Jana（IEEE会员）是加拿大滑铁卢大学 David R. Cheriton计算机科学学院的计算机科学博士生。在加入滑铁卢大学（UW）之前，他曾在印度理工学院卡拉格普尔分校攻读计算机科学硕士学位（MTech），并获得学院银质奖章，同时入选最佳硕士论文奖候选名单。他本科毕业于贾达夫普尔大学，获得计算机科学工程学士学位（BE），并因在系内排名第一而荣获大学金质奖章。他曾获得多项享有盛誉的荣誉和研究奖学金。

曾获得印度政府颁发的奖学金及荣誉，包括 JBNSTS、KVPY 和 NTSE。他的研究兴趣包括人工智能、逻辑求解器、机器学习、社会计算、自然语言处理和计算机视觉。



Romit Roy Chowdhury（IEEE 会士）是杰里·桑德斯三世 AMD 学者，也是伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校（UIUC）电子与计算机工程系及计算机科学系教授。他于 2013 年秋季加入 UIUC，此前曾任杜克大学副教授。Romit 于 2006 年秋季在 UIUC 计算机科学系获得博士学位。他的研究兴趣包括无线网络、嵌入式感知和应用信号处理。他与学生共同获得过若干研究奖项，包括 ACM Sigmobile Rockstar 奖、UIUC 杰出...

校友奖、2017 年 MobiSys 最佳论文奖等。他于 2018 年晋升为 IEEE 会士。



Niloy Ganguly（IEEE 高级会员）是印度理工学院卡拉格普尔分校计算机科学与工程系的教授，也是印度工程学院院士。2021 年至 2022 年期间，他曾在汉诺威莱布尼茨大学担任访问教授，为期两年。他本科毕业于印度理工学院卡拉格普尔分校，博士毕业于印度工程科学与技术学院（IIEST）Shibpur 分校。他的研究兴趣主要集中在社会计算、机器学习和网络科学领域。他长期在 NeurIPS、KDD、ICDM、CSCW、AAAI、IJCAI 等国际顶级学术会议上发表论文，

WWW、ACL、EMNLP、CHI、ICWSM、IEEE 和 ACM Transactions 等，并曾荣获多个最佳论文奖。