arXiv:2603.09963v1 [cs.MA] 10 Mar 2026

群体决策动力学中的情绪调制

DavidFreire-Obregón [a]SIANI，拉斯帕尔马斯大加那利大学，西班牙拉斯帕尔马斯大加那利，david.freire@ulpgc.es

关键词:
基于智能体的建模、情绪传染、效价–唤醒度、蜜蜂方程

摘要:
生物群体和人类群体中的集体决策，往往源于简单的交互规则，这些规则会将微小差异放大为共识。蜜蜂方程最初用于描述蜜蜂群的巢址选择，通过招募与抑制过程刻画了这一动态。在此，我们将蜜蜂方程扩展为一种基于智能体的模型，其中情绪效价（积极–消极）与唤醒度（低–高）作为交互速率的调节因素，从而有效改变招募和交叉抑制参数。智能体会展示根据其效价–唤醒度状态映射生成的模拟面部表情，使我们能够研究共识形成过程中的情绪传染。本文探讨了三种情境：（1）效价与唤醒度对共识结果及其形成速度的联合影响；（2）当效价相同时，唤醒度在打破平局中的作用；（3）“滚雪球”效应，即共识在支持度超过中间阈值后加速形成。结果表明，情绪调制能够通过改变有效招募率和抑制率，使决策结果产生偏向，并改变收敛所需时间。同时，即使情绪条件完全对称，内在非线性放大也可能带来压倒性胜利。这些发现将经典群体决策理论与情感及社会建模联系起来，凸显了情绪不对称和结构性临界点如何共同塑造集体结果。该框架为研究自然与人工系统中集体选择的情绪维度提供了一种灵活工具。

1 引言

集体决策是生物系统和人类系统中普遍存在的一项基本过程，从蜜蜂群选择新的筑巢地点，到委员会、人群和在线社区就共同选择达成一致，皆是如此。蜜蜂的决策动力学尤其适合用“蜜蜂方程”建模，该方程描述了招募以及竞争选项之间的交叉抑制如何推动共识的形成（Seeley 等人，2012；Chase 和 Peleg，2025）。由于具有强大的解释力且形式简洁，这一公式已广泛应用于蜂群智能和分布式协调研究。

与此同时，心理学和情感计算领域的研究表明，社会影响并非纯粹理性或基于信息：情绪线索往往通过面部表情、肢体语言或语调传递，在塑造偏好、加快或减缓达成一致的过程中发挥着重要作用（Hatfield 等人，1993；Freire-Obregón，2025）。情感维度模型以效价（积极—消极）和唤醒度（低—高）为轴描述情绪，广泛用于计算模型中，以表示和量化情绪状态（Russell，1980）。实证研究表明，情绪表达的正负倾向及其强度都会调节说服力和信任，进而影响意见在面对面交流和媒介交流中的传播。

尽管这两条研究脉络——群体决策模型与基于情绪的影响——各自已形成坚实的理论与实证基础，二者之间的整合仍然有限。蜜蜂方程的大多数应用都聚焦于招募信号，而未明确建模情绪状态所涉及的个

https://orcid.org/0000-0003-2378-4277

体或情感传染。相反，社会网络中的情绪传染模型很少纳入群体决策所特有的抑制动力学与反馈回路（van Haeringen等，2021）。这一空白限制了人们对情绪变量如何与招募动力学相互作用的理解，而这种相互作用不仅决定最终的决策结果，也决定共识形成的时间剖面。

本研究通过将蜜蜂方程扩展为基于智能体的模型来弥补这一空白。在该模型中，每个智能体都具有不断变化的情感状态，该状态由效价和唤醒度定义。这些变量被映射为模拟面部表情，进而调节决策过程中的招募与抑制率。智能体之间会发生情绪传染，使情感状态得以传播，从而增强或削弱对各个选项的支持。该框架能够探索这样的场景：对于其他方面完全相同的选项，情绪线索是其主要区别所在。

研究考察了三个实验场景：(1) 效价和唤醒度对达成共识概率及达成一致时间的联合影响；(2) 在效价相同的情况下，唤醒度在打破平局中的作用；以及 (3)“滚雪球”效应，即当支持度阈值被突破后，共识形成会加速。结果表明，即使选项在客观上完全等价，效价–唤醒动力学仍可能显著影响结果；而支持度在早期的快速增长，则能强烈预测最终胜出。通过将情绪传染融入成熟的群体决策模型，本研究连接了群体智能、情感计算与社会仿真，为考察集体选择的情绪维度提供了一个灵活的框架。

2 相关工作

群体决策模型与蜜蜂方程。蜜蜂方程最初用于描述蜜蜂群的巢址选择（Laomettachit 等，2015）：侦察蜂会招募其他蜜蜂前去考察潜在巢址，同时向竞争的招募者发送抑制性停止信号（Seeley 等人，2012；Bernardi 等，2018）。这种正负反馈机制使蜂群无需集中控制即可达成集体决策。蜜蜂方程的变体已被开发出来，用于分析噪声、时间限制

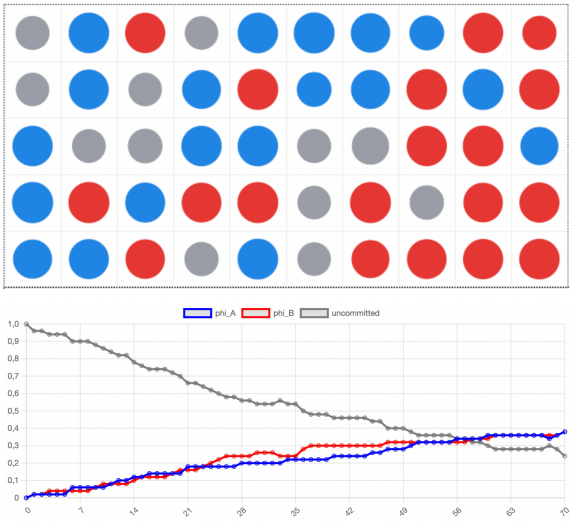

图1：蜜蜂决策模型的基于智能体的仿真。上：网格上智能体的空间分布，蓝色表示对选项A的承诺，红色表示对选项B的承诺，灰色表示未承诺个体。下：各状态智能体比例的时间演变（φ_A 为蓝色，φ_B 为红色，未承诺u 为灰色）。该动力学过程说明了从未承诺群体向两个选项的逐步招募，以及交叉抑制在塑造A与B相对增长中的作用。

或网络结构（Chase 和 Peleg，2025）条件下的决策动力学。除了生物系统，蜜蜂方程也已应用于群体机器人、集体搜索和分布式传感器网络等领域，在这些领域中，稳健性和可扩展性至关重要。Pais 等（Pais 等，2013）对这些动力学作出了颇具影响力的形式化描述，他们将蜜蜂方程扩展为一种价值敏感型决策框架，使其招募与抑制参数能够适用于不对称选项。

情绪传染与效价—唤醒度建模。在人类群体中，决策深受情绪状态的影响，这些情绪状态通过观察面部表情、语调及其他社交线索而传播（Shi 等人，2021）。这一过程被称为情绪传染，在心理学和行为科学中已有充分记载（Hatfield 等人，1993）。情绪通常在二维情感空间中建模，其中效价表示愉悦度，唤醒度表示激活（Russell，1980）。效价—唤醒度模型已被证明有助于群体动力学、在线社交网络和人机交互的计算研究，从而实现对情绪状态紧凑而富有表现力的表征。

结合社会与

情绪动力学的基于智能体的模型。基于智能体的建模（ABM）已广泛用于研究局部交互如何在社会系统中催生涌现模式（Templeton et al., 2024）。在情绪传染的背景下，ABM 可以模拟异质群体，其中个体根据交互更新认知状态和情感状态（Xue et al., 2023）。例如，van Haeringen 等人（van Haeringen et al., 2021）将效价–唤醒动力学融入 ABM，以模拟人群中的情绪扩散，并展示不同的情绪特征如何影响整体行为。然而，大多数关于情绪传播的 ABM 都省略了群集模型（如蜜蜂方程）中典型的显式招募与抑制项，因此难以捕捉特定的竞争性决策场景。

研究空白。尽管群体决策模型为共识形成提供了严谨的框架，情绪传染模型也刻画了情绪对群体动力学的影响，但两者的整合仍然鲜见。鲜有研究考察情绪效价和唤醒度如何与蜜蜂方程的招募–抑制动力学相互作用，进而影响集体决策的结果和时机。弥补这一空白有望为情绪在分布式协调中的作用带来新见解，并对自然与人工系统产生启示。

3 方法论

该模型实现为一种基于智能体的系统，其灵感来自用于集体决策的蜜蜂方程（Seeley 等人，2012；Chase 和 Peleg，2025），并扩展纳入效价–唤醒动力学（Russell，1980；van Haeringen 等人，2021）。环境表示为一个二维网格，每个智能体占据一个离散单元格，并可与摩尔邻域内的相邻智能体互动（八个相邻单元格）。模型采用周期性边界条件，以避免边界效应。

3.1 智能体状态与情绪表征

每个智能体i 具有三个主要状态变量：（1）其当前决策状态$d_i \in \{A,B,U\}$，其中A和B 表示对两个选项之一的承诺，U 表示未承诺状态；（2）其情绪效价$v_i \in [-1,1]$，正值表示愉悦度，负值表示不愉悦性；（3）其唤醒度$a_i \in [0,1]$，表示激活水平。效价与唤醒度共同定义智能体在二维空间中的情感状态，并映射为可视化中使用的模拟面部表情。

3.2 情绪调制下的蜜蜂方程

原始的“蜜蜂”决策模型可以看作 Pais 等，2013 针对蜜蜂群中的集体选择提出的更一般的价值敏感决策框架的一个简化对称情形。

群体比例。令 $\varphi_A(t) = N_A(t)/N$ 和$\varphi_B(t) = N_B(t)/N$ 分别表示在时间t承诺选择A 和B 的智能体比例，并令$u(t) = 1 - \varphi_A(t) - \varphi_B(t)$表示未承诺智能体的比例。全文均使用 φ 这一记号。

在这一简化表述中，承诺个体数量的变化由两个过程支配：(i) 社会招募，即已承诺个体以恒定速率r说服未承诺个体加入其选项；(ii) 交叉抑制，即某一选项的已承诺个体以恒定速率 σ向竞争选项的个体发送停止信号。在假设两个选项具有相同的招募率和抑制率、不存在自发放弃，并忽略随机波动的情况下，动力学可化简为：

$$\frac{d\varphi_A}{dt} = r\,\varphi_A\,u - \sigma\,\varphi_A\,\varphi_B, \tag{1}$$

$$\frac{d\varphi_B}{dt} = r\,\varphi_B\,u - \sigma\,\varphi_A\,\varphi_B, \tag{2}$$

其中u 是未承诺智能体所占的比例。在经典形式中，r 和 σ 为正常数。

在本研究中，招募率和抑制率均受到情绪状态的调节。具体而言，对于招募者i 与目标对象j之间的交互，招募率定义为：

$$r_{ij} = r_0\,[1 + \alpha_v\,v_i + \alpha_a\,a_i] \tag{3}$$

已承诺个体i （抑制者）与对立选项的已承诺个体j（目标对象）之间的抑制率定义为：

$$\sigma_{ij} = \sigma_0\,[1 - \beta_v\,v_j + \beta_a\,a_i], \tag{4}$$

其中，σ_0 是基准抑制率，β_v 和β_a 是敏感性参数，v_j 是

目标对象的效价，而a_i 是抑制者的唤醒度。项 $-\beta_v v_j$ 体现了这样一种观点：目标对象的正效价会降低其受抑制易感性，而负效价则会提高这种易感性。例如，如果$v_j > 0$，减法会降低σ_{ij}，使抑制者更难说服目标对象放弃其选择；如果$v_j < 0$，减法就会变成加法，增大 σ_{ij} ，使抑制更有可能发生。项 $+\beta_a a_i$用于模拟抑制者唤醒度的影响：唤醒度越高，抑制尝试的效果越强，不受效价影响。

3.3 情绪传染

当两个智能体互动时，目标对象j 的情绪状态根据传染规则更新：

$$v_j(t+1) = v_j(t) + \gamma_v\,[v_i(t) - v_j(t)] \qquad (5)$$

$$a_j(t+1) = a_j(t) + \gamma_a\,[a_i(t) - a_j(t)] \qquad (6)$$

其中 γ_v 和 γ_a 分别为效价和唤醒度的传染率。该公式实现了向影响者情绪状态的简单线性趋近。

3.4 智能体决策规则

在每个离散时间步：

1. 智能体按随机顺序更新，以避免同步伪影。
2. 已承诺个体以概率r_{ij}尝试招募一名未承诺的邻居。3. 已承诺个体可以概率 σ_{ij}尝试抑制一名承诺于相反选项的邻居。4. 无论招募或抑制的结果如何，只要两个智能体发生互动，就会发生情绪传染。5. 未承诺智能体若被招募，则采纳招募者的选项；已承诺个体若被抑制，则可能恢复到未承诺状态。

3.5 初始化与参数

仿真从指定比例的智能体承诺于每个选项开始，其余为未承诺。初始效价和唤醒度分布取决于场景：例如，在场景1中，承诺于A 的智能体可能以高正效价和中等唤醒度开始，而承诺于B 的智能体可能以中性效价和高唤醒度开始。模型参数（$r_0, \sigma_0, \alpha_v, \alpha_a, \beta_v, \beta_a, \gamma_v, \gamma_a$）经过调校，以探索对情绪调制的不同敏感度。

3.6 停止条件与指标

当达成共识（所有参与者就同一选项达成一致）或达到最大步数后，仿真终止。关键指标包括：

- 共识时间：所有智能体承诺同一选项（$\varphi_A = 1$ 或$\varphi_B = 1$）所需的步数。
- 胜率：给定选项胜出的仿真所占比例。
- 半衰期：对获胜选项（$\varphi_X = 0.5$）的承诺达到 50% 所需的时间。
- 情绪轨迹：各情绪状态下智能体的平均效价和唤醒度随时间的变化。

4 实验设置

为区分情绪状态对集体决策动态的影响，并检验基于文献提出的具体假设，本文考虑了三个实验场景。第一个场景——场景1：效价–唤醒度联合影响——为选择了选项A和B的智能体赋予不同的初始效价和唤醒度水平。这种配置使我们能够评估这两个情绪维度的综合影响，包括特定选项胜出的概率，以及达成共识所需的时间。之所以同时改变这两个变量，是因为需要考察它们可能产生的交互效应；此前的研究往往将效价和唤醒度分开讨论。

在场景2：唤醒度决胜中，支持 A 和 B 的智能体具有相同的初始效价，但唤醒度不同。这一设计旨在分离唤醒度对决策结果的具体影响，尤其是在任何一个选项都没有在愉悦度或积极性方面占据初始情绪优势的情况下。该情境基于实证证据：较高的唤醒度伴随着更强的说服能力和更快的决策转变，并可能打破群体互动中原本僵持不下的僵局。

最后，场景 3：滚雪球效应从两个选项在数量和情绪状态上完全均衡开始。这里重点探究的是，支持度超过中间阈值是否会触发自我强化的招募过程，从而加速共识形成。这有助于理解集体决策中的临界点：微弱的数量优势可能不断累积，迅速转化为压倒性优势；这一现象在生物群体和人类社会系统中均有观察。

这些情景的选择提供了互补的视角：第一个探讨效价与唤醒度之间的交互作用，第二个在受控条件下单独考察一种情绪驱动因素，第三个则研究均衡竞争中的非线性放大机制。它们共同构成一组连贯的实验，用于检验蜜蜂方程框架中的情绪调制如何改变集体决策的演变轨迹和结果。

实现细节。该模型由一组参数定义，这些参数控制交互动态和情绪传染率。基准招募率设为 $r_0 = 0.02$，用于控制在不受情绪影响时，已承诺个体招募未承诺邻居的可能性。基准抑制率为 $\sigma_0 = 0.02$，用于确定已承诺个体使对立方恢复到未承诺状态的可能性。

情绪对招募的调节由 $\alpha_v = 0.5$ 和 $\alpha_a = 0.5$ 控制，它们分别量化效价和唤醒度对成功招募概率的影响。同样， $\beta_v = 0.5$ 和 $\beta_a = 0.5$ 控制效价和唤醒度对成功抑制概率的调节。正效价通常会提高招募效果并降低受抑制的易感性，而高唤醒度则会同时提高招募率和抑制率。

情绪传染的参数为$\gamma_v = 0.1$ 和 $\gamma_a = 0.1$，它们决定了在社会接触期间，目标对象智能体的情绪状态向互动智能体的情绪状态转变的速率。

空间环境是一个 20×20 网格（400 个智能体），带有周期性边界，每个单元格中占据一个智能体。承诺状态的初始分布以及分配给智能体的情绪值取决于实验场景。未承诺智能体通常以$v = 0$ 和$a = 0.5$开始，分别代表中性效价和中等唤醒度。已承诺智能体会获得特定于场景的初始效价和唤醒度，这些数值可以是固定的，也可以从以场景指定均值为中心、标准差为 0.05 的截断正态分布中抽取，以引入异质性。不同场景的参数值可能有所不同，以探索不同的行为模式。

模拟方案。每种实验条件重复200次，以考虑随机变异。最大仿真长度为500步，若达成共识则提前终止。在每个模拟步中，记录承诺于每个选项的智能体比例（φ_A和 φ_B）、未承诺比例（u），以及每个子组的平均效价和唤醒度。仿真结束后，计算其他指标，包括共识时间，定义为所有智能体支持同一选项所需的步数；胜率，即某一特定选项获胜的运行所占比例；半衰期，即达到对最终获胜选项50%承诺所需的步数；以及情绪轨迹，表示群体平均效价和唤醒度的时间演变。

5 仿真情景评估

我们系统地评估了上一节所述的三个实验情景，以考察情绪效价和唤醒度如何影响蜜蜂方程框架中的集体决策动态。每种情景均进行了多次独立模拟运行，以确保统计结果稳健。

以下段落将展示场景1、场景2和场景3的结果，重点介绍关键趋势以及与基线对称情形的偏差。

场景1。表1总结了初始效价（v_A）和唤醒度（a_A）对该情景结果的影响。对于分配给承诺选择选项A的智能体的每种初始唤醒度（a_A）和初始效价（v_A）组合，表中报告了选项A获胜的模拟运行比例（选项A获胜率）、达到共识所需的平均模拟步数（t_{cons}），以及选项A与选项B承诺曲线下面积之差（$\text{AUC}_A - \text{AUC}_B$），该指标量化了A在整个决策过程中的相对优势。

呈现出两个明显的趋势。首先，较高的a_A

表1：场景1：效价–唤醒度联合影响

a_A	v_A	选项A获胜率	$\bar{t}_{\text{cons}}$	$\text{AUC}_A - \text{AUC}_B$
0.20	0.20	0.40	315.1	-0.125
0.20	0.50	0.50	303.7	0.029
0.20	0.80	0.65	305.2	0.139
0.20	1.00	0.50	338.6	-0.018
0.50	0.20	0.65	318.8	0.068
0.50	0.50	0.85	303.4	0.265
0.50	0.80	0.40	356.6	-0.076
0.50	1.00	0.75	312.1	0.288
0.80	0.20	0.70	336.1	0.148
0.80	0.50	0.55	330.0	0.082
0.80	0.80	0.70	318.5	0.190
0.80	1.00	0.75	303.2	0.283
1.00	0.20	0.65	275.2	0.166
1.00	0.50	0.55	304.5	0.057
1.00	0.80	0.80	311.0	0.313
1.00	1.00	0.80	273.1	0.312

通常会提高选项A的胜率，尤其是与中高v_A相结合时，这表明情绪强度会增强正效价的说服力。其次，在（v_A,a_A）平面中的相同区域，共识平均耗时的缩短更为显著，这表明当智能体展现愉悦且充满活力的表情时，招募动态会更快。AUC差值（$\text{AUC}_A - \text{AUC}_B$）与这些模式相符，显示当（$v_A$,$a_A$）同时升高时，选项A在整个轨迹中持续占据优势。综上，这些结果支持效价与唤醒度之间存在交互作用：单独改变任一维度的影响有限，但二者结合会持续改变获胜概率和收敛速度。

表2展示了场景2的结果。在该场景中，两个选项的效价保持一致，只有最初倾向于选项A的智能体的唤醒度有所不同。结果按最初倾向于选项A的智能体所对应的初始唤醒度（a_A）和效价（v_A）的各个组合呈现；两个选项的效价保持一致，以便单独考察唤醒度的影响。Win(A)列报告选项A胜出的仿真比例，而$\bar{t}_{\text{cons}}$ 表示达成共识所需的平均模拟步数。通过这一设计，我们可以评估：当效价并非区分因素时，仅提高唤醒度是否会影响决策优势和共识速度。

结果表明，较高的a_A 并不一定总能带来支配地位。不过，具有低至中等v_A 的配置往往

表2：场景2：唤醒度决胜。

a_A	v_A	选项A获胜率	$\bar{t}_{\text{cons}}$
0.20	0.20	0.80	335.6
0.20	0.50	0.60	329.6
0.20	0.80	0.75	308.5
0.20	1.00	0.60	297.7
0.50	0.20	0.50	296.1
0.50	0.50	0.65	284.2
0.50	0.80	0.65	358.4
0.50	1.00	0.75	287.4
0.80	0.20	0.60	261.6
0.80	0.50	0.65	337.1
0.80	0.80	0.65	322.8
0.80	1.00	0.65	325.1
1.00	0.20	0.55	307.7
1.00	0.50	0.70	325.0
1.00	0.80	0.70	320.1
1.00	1.00	0.65	330.3

更有利于 A 获胜，这表明即使不存在效价差异，较高的唤醒度本身也可能带来竞争优势。共识时间呈现出多种趋势：一些高唤醒度配置达成共识的速度更快，尤其是在v_A 较低时，这可能反映了更激进的招募动力学。总体而言，这些模式进一步印证了这样的结论：唤醒度往往会推动决策结果朝某一方向发展，但这一作用会受到两种选项之间占主导地位的效价调节。

图2展示了场景3的结果，其中两个选项最初获得的支持数量相同，情绪状态也完全一致。尽管存在这种对称性，随机波动与招募动力学相结合，仍会随着时间推移使一个选项逐渐占据主导地位。观测曲线显示，最大承诺水平最初缓慢上升，而在越过某个中间支持阈值后则加速攀升，这与假设的滚雪球效应一致。这一现象十分重要，因为它表明，即使起初在规模或情绪吸引力方面没有优势，一旦达到临界点，集体决策也可能发生骤变。这种非线性放大效应有助于理解现实世界中的现象：微小的随机失衡一旦被放大，便会推动共识迅速形成，生物群体和人类意见动力学中都能观察到这类现象。

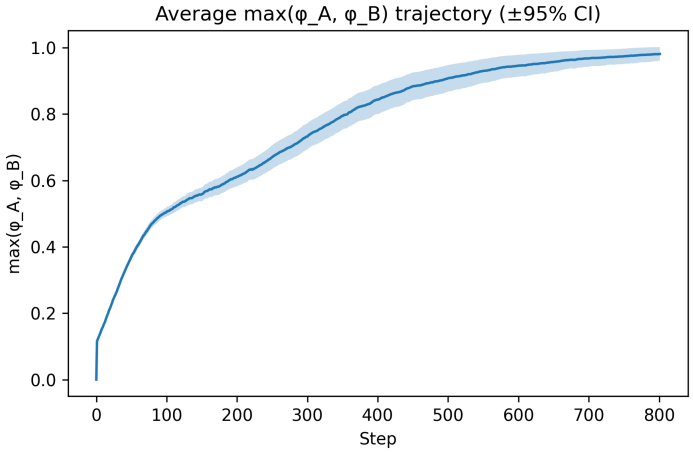

图2：场景 3：滚雪球效应。该图展示了 $\max(\varphi_A, \varphi_B)$ 的平均轨迹，其中 φ_X 表示在各模拟步中承诺选择X的智能体比例。阴影区域表示 95% 置信区间。系统从完全均衡的配置开始，最大承诺水平逐渐上升，直至某一选项接近完全占优。这反映了一种自我强化的招募动态：一旦支持超过中间阈值，领先选项便会以不断加快的速度继续招募未承诺的智能体。

6 结果分析

这三个仿真情景从不同角度揭示了情绪调制（此处以效价和唤醒度表示）如何与集体决策的经典招募—抑制框架相互作用，相关描述见（Pais 等，2013；Chase 和 Peleg，2025）。虽然原始的蜜蜂方程将招募率r 和交叉抑制率 σ 视为固定参数，但在我们的模型中，这些速率实际上受到智能体情绪状态的调制。较高的效价可理解为提升某个选项的吸引力，类似于提高其有效招募率。相比之下，较高的唤醒度则可视为增强招募与抑制交互的频率或强度。

6.1 情绪调节与经典动力学

在原始表述中，r 与 σ 之间的平衡同时决定了收敛速度以及给定选项胜出的概率。我们对效价和唤醒度的调控作为这些速率的乘性因子，这意味着情绪状态的差异会改变决策动力学，而不改变其底层的结构规则。这一解释与先前的理论研究一致，该研究表明，更强的招募（更高的有效r）会加速共识形成并使结果产生偏向，而更强的抑制（更高的有效 σ）可以减缓收敛或防止僵局（Pais 等，2013）。

6.2 逐情景解读

场景1（效价–唤醒度联合影响）表明，同时提高某一选项的效价和唤醒度，会带来更高的获胜率和更短的共识时间。按照经典模型的说法，受偏好的选项的 r 和 σ 均有效提高，从而加快承诺累积，并更有效地抑制竞争选项。观察到的效价与唤醒度之间的非线性交互，体现了招募–抑制之间的平衡：单独提高其中一个速率效果有限，但同时提高二者则可能显著改变系统轨迹（Chase 和 Peleg，2025）。

场景2（唤醒度决胜）在效价保持不变的情况下，单独考察唤醒度的作用。在此，唤醒度的差异主要体现为招募交互有效速率的差异，而抑制速率则保持对称。结果表明，较高的唤醒度仍能影响最终结果，尤其是在效价水平较低至中等时，因为它会提高未承诺智能体遇到并加入高唤醒度群体的可能性。这一效应与原始模型的预测一致：

即使吸引力没有差异，招募不对称性也能打破平局并推动共识形成（Pais 等，2013）。

情景3（滚雪球效应）开始时，种群分布和情绪状态都具有完全对称性，因此在r 和 σ 方面，各选项在$t = 0$时完全相同。在这种情况下，胜利者的出现完全由随机波动以及招募过程中固有的非线性放大所驱动。一旦随机不平衡使某个选项超过中间阈值，招募的自我强化循环就会加速承诺增长，导致其迅速占据主导地位；这一现象在（Pais 等，2013；Chase 和 Peleg，2025）中被明确认定为临界点或对称破缺事件。

6.3 情绪动力学

从直观角度看，效价就像一个选项的吸引力；它看起来越令人愉悦或越有吸引力，就越容易说服他人加入。另一方面，唤醒度是支持者招募他人时所具有的能量或紧迫感。场景1表明，同时拥有吸引力和能量是取得胜利的最快途径；场景2表明，当双方的吸引力都不占优势时，仅凭能量仍然可以扭转局势；而场景3表明，即使不存在情绪差异，微小的随机领先也可能滚雪球般发展，最终形成压倒性的共识。

6.4 情景关联

总的来说，这三个情景凸显了集体决策背后的两种关键机制：

1. 结构参数的情绪调制：效价和唤醒度的变化会有效改变经典蜜蜂方程中的招募率和抑制率，从而产生可预测的偏向和收敛速度（Pais 等，2013）。 2. 内在非线性放大：即使不存在情绪不对称性，一旦达到临界点，招募过程也能将微小优势放大为决定性胜利（Chase 和 Peleg，2025）。

这些发现将生物群体理论与社会情绪建模联系起来，表明在预测或影响集体决策结果时，必须同时考虑情绪状态和内在的招募动力学。

7 结论

本研究通过将情绪参数（效价和唤醒度）纳入招募与抑制的动力学过程，提出了对经典蜜蜂方程框架的扩展。原始模型采用固定速率，而我们的方法则将这些速率视为灵活可变、且会随智能体的情感状态而变化的参数。这种设计不仅拓宽了模型的生物学启发基础，也使其适用于更广泛的集体系统，在这些系统中，情绪、态度或动机状态会影响决策。

除了再现广为人知的群体动力学外，我们的仿真还揭示了情绪调制如何成为集体系统中的控制杠杆。通过调整个体的情绪特征，可以影响群体结果，加快或延缓共识的形成，甚至影响相互竞争状态的稳定性。这些洞见有望为从分布式机器人学到在线社区管理等领域的策略制定提供参考；在这些领域中，群体层面行为由反复的局部交互涌现而成。

加入基于情绪的变异性，也为连接自然与社会系统研究提供了一个方法论视角。从生物学角度看，效价和唤醒度可视为内在动机驱力或影响招募与抑制的外部线索的衡量指标。在涉及人际互动的日常情境中，它们与热情、紧迫感或感知到的吸引力等心理变量相呼应。这种双重可解释性使该模型能够充当概念桥梁，支持跨物种和决策环境的比较研究。

最后，本文所探讨的情景表明，集体决策不仅是结构动力学的产物，还可以通过调节情感参数加以引导。这表明，旨在改变群体结果的干预在情感或动机层面能够有效发挥作用，而不仅仅是通过改变结构连接或信息流。未来的工作可以通过纳入动态情绪反馈、异质智能体敏感度或多选项设置来扩展这一方法，从而加深我们对情感如何塑造集体选择的节奏与轨迹的理解。

致谢

本工作部分由项目 PID2021-122402OB-C22/科学、创新与大学部/国家研究署 /10.13039/501100011033 欧洲区域发展基金、欧盟，以及加那利群岛研究、创新与信息社会署-加那利群岛政府和欧洲区域发展基金在项目 ULPGC设施网络 与 GrantEIS 2021 04 项下资助。

参考文献

Bernardi, S., Colombi, A. 和 Scianna, M.（2018）。一种可复现蜂群集体动力学的离散粒子模型。《生物与医学中的计算机》，93:158–174。Chase, D. L. 和 Peleg, O.（2025）。动物群体感知与决策的物理学。《生物物理学年度评论》，54:329–351。Freire-Obregón, D.（2025）。错脸，错举动：基于智能体的模型中的情绪误感知社会动力学。载于《国际人类行为基于智能体建模研讨会论文集》。Hatfield, E., Cacioppo, J. T. 和 Rapson, R. L.（1993）。情绪传染。《心理科学当前方向》，2(3):96–100。Laomettachit, T., Termsaithong, T., Sae-Tang, A. 和 Duangphakdee, O.（2015）。蜜蜂群根据候选巢址的质量和距离信息进行决策。《理论生物学杂志》，364:21–30。Pais, D., Hogan, P., Schlegel, T., Franks, N., Leonard, N. 和 Marshall, J.（2013）。一种价值敏感型决策机制。《公共科学图书馆·综合》，8(9)。Russell, J. A.（1980）。情感环形模型。《人格与社会心理学杂志》，39(6):1161–1178。Seeley, T. D., Visscher, P. K., Schlegel, T., Hogan, P. M., Franks, N. R. 和 Marshall, J. A.（2012）。停止信号在蜜蜂群集体决策中提供交叉抑制。《科学》，335(6064):108–111。Shi, Y., Zhang, G., Lu, D., Lv, L. 和 Liu, H.（2021）。人群情绪传染的干预优化。《信息科学》，576:769–789。Templeton, A., Xie, H., Gwynne, S., Hunt, A., Thompson, P. 和 Köster, G.（2024）。疏散中的社会行为与沟通的基于智能体的模型：系统综述。《安全科学》，176:106520。van Haeringen, E., Bosse, T. 和 Gerritsen, C.（2021）。在情感传染的基于智能体的模型中整合效价与唤醒度。载于《多智能体仿真 XXI》，第63–75页。Springer。Xue, J., Zhang, M. 和 Yin, H.（2023）。基于人格的情绪传染模型及其在人群排队仿真中的控制。ACM《建模与计算机仿真汇刊》，33(1–2)。