

# Mastodon 去中心化的三层结构动力学治理框架

## --基于跨实例互动的实证研究

计算与智能创新学院 李佳凝 沈天裕 罗睿麒 邢涵博

指导老师：计算与智能创新学院 陈阳

### 摘要

去中心化是联邦式社交平台的核心治理理念,其能否稳定维持,取决于跨实例互动行为、语义社区边界以及多维中心性分布等多层结构动力的协同作用。基于 Mastodon 平台两周内约 136 万条跨实例交互记录,本文提出一个围绕去中心化治理的“三层结构动力学治理框架”,即行为动力层、语义结构层与系统结构层,系统刻画 Mastodon 联邦网络中去中心化治理的运行逻辑与结构瓶颈。

在行为动力层,本文通过跨实例互动率 (Cross-Instance Interaction Rate, CIIR) 指标刻画实例的外向开放程度,发现实例规模与 CIIR 呈稳健的倒 U 型关系:小型实例内向性较高,中型实例(约 20 名活跃用户)外向程度上升,大型实例外向性再度下降。在语义结构层,基于 Louvain 等社区检测方法识别的跨实例社区,本文计算语言与主题的同质性指标,发现社区边界主要由语言同质性主导,而主题兴趣在跨语言的桥接中发挥重要作用,形成以语言为边界、主题为桥梁的双轨语义结构。在系统结构层,本文结合 PageRank、Betweenness 以及主动输出指标、被动吸引指标等多维指标,利用 Gini 系数衡量集中度分布,并通过核心规模敏感性分析,识别出核心规模在 3-7 个实例之间时网络呈现相对稳态的去中心化结构,超过该规模则出现集中化回流的风险。

基于上述三层分析,本文从去中心化治理视角出发,提出围绕跨实例互动行为、语义桥接机制和核心规模监测的多项治理建议,为联邦社交网络的结构健康评估与治理实践提供了实证支持和方法工具。

**关键词:** 去中心化治理; 联邦社交网络; Mastodon; 跨实例互动; 最优规模窗口; 多维中心性

## 引言

### 1.1 研究背景与问题提出

联邦式社交平台通过多实例互联与本地自治的架构设计,被广泛视为对中心化平台的一种制度性替代。Mastodon 作为代表性平台,为各实例提供自治治理空间和互联协议,使用户可以跨实例交互。但实践经验表明,即便在名义上的联邦结构之下,网络中仍可能出现跨实例交互高度集中于少数核心实例的现象,从而削弱去中心化治理的实质效果。

从治理角度看，去中心化不仅是节点拓扑意义上的“多点分布”，更是权力分散、资源分布相对均衡、信息能够在不同实例之间顺畅流动的动态结构状态。决定这一状态的关键机制至少包括三个层面：一是行为动力层，实例之间是否存在足够多、足够均衡的跨实例互动；二是语义结构层，语言和主题等语义属性如何塑造社区边界与桥接路径；三是系统结构层，多维中心性指标及其集中度如何反映整体网络的权力分配结构。

现有关于 Mastodon 等联邦平台的研究，多聚焦于架构设计、实例自治原则或单一结构指标（如 PageRank）的测量，对“行为—语义—结构”三层机制如何共同影响去中心化治理的系统性分析仍然不足。尤其是在具体的实证框架中，如何将跨实例互动数据、语义社区检测、多维中心性及 Gini 系数等工具有机整合，形成一个可执行的去中心化治理分析框架，仍有待深入探讨。

## 1.2 研究思路与三层结构动力学治理框架

围绕“如何理解与维护 Mastodon 联邦网络的去中心化治理结构”这一核心问题，本文提出一个以跨实例互动为基础的“三层结构动力学治理框架”。该框架的基本思路如下：

（1）在**行为动力层**，通过实例规模分布、跨实例互动率（CIIR）等指标，分析实例规模与外向互动行为之间的关系，揭示不同规模实例在跨实例互动中的位置与作用，识别可能削弱去中心化的行为模式，例如中-大型实例的外向化程度下降。

（2）在**语义结构层**，基于跨实例交互网络进行社区检测，结合实例的语言和主题属性，度量社区内部语言同质性与主题同质性，分析语言主导边界与主题桥接机制如何共同塑造语义社区结构及其对跨社区信息流动的影响。

（3）在**系统结构层**，利用多维指标衡量各实例在网络中的结构位置与影响力分布，通过这些指标的 Gini 系数刻画整体集中度，并进行核心与非核心的动态划分。一方面，在给定行为和语义约束下评估联邦网络在多大程度上呈现出“自然的集中化压力”；另一方面，在多维指标共同约束下识别有利于维持“多核心、相对分散”去中心化结构的核心规模区间，以及超过该区间后出现集中化回流的风险。

（4）通过上述三层分析，本文尝试从行为、语义与结构三个维度，构建一个兼具数据可操作性与治理解释力的去中心化分析框架，并在此基础上讨论对 Mastodon 这类联邦网络平台的治理启示与策略建议。

## 1.3 研究意义与价值

本研究的意义体现在以下三个方面：

第一，**治理视角下重构去中心化分析框架**。相较于仅从网络拓扑或单一中心性角度评估去中心化，本文将跨实例互动行为、语义社区结构和多维中心性集中度整合到同一分析框架之中，更加贴合“去中心化治理”中对行为、语义与权力结构的综合关注。

第二，**以跨实例互动的实证数据支撑去中心化评估**。基于 13 日约 136 万条跨实例交互记录，本文从实例规模与 CIIR 的关系、语言与主题同质性的差异、核心规模 3-7 的稳态窗口等方面，提供了围绕 Mastodon 实际运行数据的量化证据，有助于从实证角度理解去中心化结构的形成与潜在风险。

第三，**为联邦平台治理提供可落地的指标与工具**。通过主动输出得分、被动吸引得分、Gini 系数以及核心规模敏感性分析等一系列指标与方法，本文为平台运营者与研究者提供了一套可用于监测与诊断去中心化健康度的工具箱，为今后制定和评估治理策略提供基础。

## 1.4 论文结构安排

为清晰呈现“三层结构动力学治理框架”的分析思路，本文其余部分安排如下：第 2 节介绍数据来源以及用于刻画行为动力层、语义结构层与系统结构层的指标体系与方法；第 3 节聚焦行为动力层，从实例规模与跨实例互动行为出发，分析规模效应与倒 U 型结构特征；第 4 节聚焦语义结构层，分析社区语言同质性与主题桥接机制对跨实例信息流动的影响；第 5 节聚焦系统结构层，利用多维中心性及核心规模敏感性分析刻画集中度及其对去中心化治理的含义；第 6 节在三层框架下进行综合讨论；第 7 节提出基于实证结果的去中心化治理策略建议；第 8 节总结全文并提出未来研究方向。

# 2 数据与方法

## 2.1 数据来源与样本范围

本研究的核心数据来源于 Fedilive 项目在 GitHub 平台公开共享的 Mastodon 社交网络交互数据集，该数据集通过标准化数据采集脚本与平台公开接口同步获取，确保了数据的时效性与完整性。采集周期为连续 13 个自然日，原始数据包含 139 万条用户发帖记录及关联的互动行为数据，互动类型全面覆盖 Mastodon 平台核心功能场景，具体包括用户间的点赞、转发、回复三类关键交互行为，为系统性分析跨实例互动特征提供了丰富的基础素材。

在数据预处理阶段，针对原始数据存在的质量问题实施了多维度清洗流程：一是格式标准化处理，统一实例 ID、用户 ID 的字符串编码格式（将部分数字型 ID 转换为字符串类型），规范时间戳的 ISO 格式存储，修正用户信息存储中“列表-字典”混用的异常结构；二是噪声数据剔除，通过构建“互动类型+发起

用户+目标用户+时间戳”的唯一 event ID，精准识别并移除重复记录，同时过滤内容为空、交互对象无效等异常数据；三是冗余信息剥离，剔除与跨实例互动分析无关的字段（如用户个性化签名、非公开操作记录等），聚焦核心分析维度。经上述预处理后，最终保留的跨实例交互记录均包含交互发起方实例 ID、接收方实例 ID、交互时间、互动类型等关键字段，为后续构建跨实例有向加权网络奠定了坚实的数据基础。

为确保分析的统计稳健性与治理解释力，本研究明确以“实例”作为基本研究单元。通过将用户层面的分散互动行为按发起方与接收方实例进行聚合，实现了从微观用户互动到宏观实例关联的维度提升，有效规避了个体用户行为的随机性对整体网络结构分析的干扰，使研究结论更能反映 Mastodon 联邦生态的系统性特征。

## 2.2 实例筛选与网络构建

### 2.2.1 活跃用户与有效实例筛选

为精准刻画具有实质影响力的实例互动特征，本研究建立了分层筛选标准：在用户层面，定义“活跃用户”为同时满足“观测期内至少发布 1 条有效内容”且“产生不少于 3 次互动行为（点赞、转发、回复任一类型）”的用户，并且当且仅当双方都为活跃用户时才将互动计入统计。该定义既排除了仅浏览不参与的“沉默用户”，也避免了偶然互动用户对分析结果的偏差影响；在实例层面，在原本 8020 个有效实例的基础上，以“活跃用户数不少于设定阈值”为核心筛选原则，通过统计各实例的活跃用户规模，筛选出活跃用户数大于等于 20 人的 72 个实例，作为多维度分析去平台中心化的核心实例确保了研究样本的典型性与可靠性。

### 2.2.2 跨实例网络构建方法

基于筛选后的有效实例与互动数据，本研究采用复杂网络分析方法构建有向加权网络：将每个有效实例抽象为网络中的一个节点，节点属性包含实例的活跃用户数、核心讨论标签、互动总量等关键特征；将“实例 i 的活跃用户向实例 j 的活跃用户发起的跨实例互动”聚合为一条有向边（ $i \rightarrow j$ ），边的权重定义为观测期内该方向上的累计互动次数（点赞、转发、回复次数求和），权重大小直接反映实例间互动的频繁程度与关联强度。

通过上述构建过程，最终形成了一个包含 8020 个节点、10 万条有向加权边的跨实例互动网络。同时，基于该网络衍生出四类核心分析数据集：一是实例互动总表，记录所有实例间的互动类型、方向与频次；二是实例属性表，统计各实例的活跃用户数、总互动量、Top5 核心讨论标签等基础特征；三是实例互动矩阵，以矩阵形式直观呈现实例间各类互动的频率分布；四是实例互动属性表，量化各实例的实例内互动占比、跨实例主动输出量与被动接收量等关键指标。该

网络结构与衍生数据集全面支撑了后续行为动力层、语义结构层与系统结构层的多维度分析需求,为分析 Mastodon 去中心化治理机制提供了标准化的分析载体。

## 2.3 指标体系与三层分析映射

为支撑“三层结构动力学治理框架”的实证分析,本文构建了如下指标体系,并将其映射到三个分析层次。

### 2.3.1 行为动力层指标:跨实例互动率 (CIIR)

跨实例互动率 (CIIR) 用于刻画实例在交互行为上的外向性。对于给定实例,其 CIIR 定义为该实例与其他实例之间的跨实例交互量占其所有交互量 (包括本地交互) 的比例。CIIR 越高,说明该实例越倾向于将互动行为投向联邦网络的其他节点,对于去中心化的信息流动越有利。

在实证分析中,本文将实例按照活跃用户规模进行分组,结合 CIIR 的分布情况和回归分析结果,考察不同规模实例在行为动力层对去中心化结构的影响。

### 2.3.2 语义结构层指标:语言与主题同质性

在语义结构层,本文首先在跨实例网络上运行 Louvain 等社区检测算法,识别出若干个跨实例社区。然后结合实例的语言标签与主题标签,分别计算每个社区内的语言同质性与主题同质性。语言同质性定义为社区内使用某一主导语言的实例占比;主题同质性则基于实例主题标签统计社区内主导主题的占比。

通过比较语言同质性与主题同质性的整体水平以及不同社区之间的差异,本文分析语言在塑造社区边界方面的主导作用,以及主题兴趣在跨社区桥接方面的促进作用。

### 2.3.3 系统结构层指标:多维中心性与 Gini 系数

在系统结构层,本文计算了多种反映实例在网络中结构位置与影响力以及网络去中心化特性的指标,包括:

第一,基于网络结构的中心性指标: Betweenness Centrality 和 Katz Centrality。Betweenness 反映实例在最短路径上的中介作用,用于识别潜在的路径瓶颈和桥接节点;Katz 则通过衰减因子综合考虑邻居及其邻居的贡献,用于刻画具有长程影响力的结构位置。

第二,基于交互行为与规模的复合指标:主动输出指标和被动吸引指标。分别以人均加权出度或入度及连接多样性为基础,通过几何加权形式综合得到,用来表征实例在行为层面“向外广播”和“吸引关注”的能力。

$$\begin{aligned}\text{Output\_Score}(i) &= (\text{per\_capita\_out\_weight}(i) + \epsilon)^\alpha \times (\text{per\_capita\_out\_diversity}(i) + \epsilon)^{1-\alpha} \\ \text{Input\_Score}(i) &= (\text{per\_capita\_in\_weight}(i) + \epsilon)^\alpha \times (\text{per\_capita\_in\_diversity}(i) + \epsilon)^{1-\alpha} \\ \text{where } \alpha &= 0.6, \epsilon = 10^{-6}\end{aligned}$$

第三，集中度指标：对上述各指标的分布计算 Gini 系数，用于衡量在不同指标意义下网络影响力的整体不均衡程度，为判断是否存在明显的结构性集中化提供量化依据。

在后续分析中，本文将基于上述多维指标分别对实例进行排序，并在此基础上设定不同核心规模  $k \in [3, 30]$ ，逐点扫描核心—非核心划分，以检验核心规模对集中化风险及去中心化稳态的影响。

## 2.4 分析方法与技术路线

### 2.4.1 实例规模与 CIIR 的关系分析

在行为动力层，本文首先根据实例活跃用户数对实例进行分组，比较各组 CIIR 的分布特征，识别不同规模组之间在跨实例互动率上的差异。随后，采用包含二次项的回归模型，对 CIIR 与实例规模之间的关系进行拟合，以检验是否存在倒 U 型结构特征；同时结合非参数方法和可视化手段，对拟合结果进行稳健性检查。

### 2.4.2 语义社区检测与同质性计算

在语义结构层，本文基于跨实例网络使用 Louvain 算法、标签传播算法等社区检测算法识别社区结构。对每个社区，结合实例的语言和主题标签，计算语言同质性与主题同质性。通过比较不同社区的同质性指标，分析语言对社区边界的主导作用，以及主题兴趣在跨语言连接中的桥接作用。

使用 Louvain 算法进行社区检测的过程分两个阶段：在第一阶段，对所有节点初始化，将每个节点视为独立的社区，遍历所有节点，对于任意一个节点  $i$ ，如果将节点  $i$  移动到包含其邻居的社区可以提高模块度，那就执行迁移，重复至模块不再提高。在第二阶段，将第一阶段识别出的每个社区聚合为单个节点，更新新节点的边权重，重新执行一阶段的操作直到得到一个社区结构。

使用标签传播算法检测社区结构：每个节点初始化一个标签，节点根据邻居节点的标签分布更新自身标签，通过迭代传播，紧密连接的阶段群收敛至最终标签，具有相同标签的节点最终形成一个社区。

### 2.4.3 多维中心性、Gini 与最优规模窗口

在跨实例网络上计算四类指标并得到其 Gini 分布，随后按指标排序定义前  $k$  个为核心子网，余者为非核心子网， $k \in [3, 30]$  逐点扫描，记录两类子网的 Gini 曲线。为检验稳健性，进行 200 次随机置换试验：在每次试验中随机抽取核心成员并计算最小 Gini 对应的  $k^*$ ，与原始排序结果对比，以评估 3–7 窗口的统计显著性。

### 3 行为动力层：实例规模与跨实例互动

#### 3.1 实例规模统计与分布

本节首先将实例按活跃用户数分为若干规模组，例如小型、中型与大型等，接着分析实例分布情况，最后统计各组的 CIIR 分布情况。通过比较不同规模组的 CIIR 均值、中位数与分布形态，初步观察实例规模与跨实例互动率之间的关系，为后续回归分析提供直观依据。

##### 3.1.1 实例规模统计

分别按照实例规模、活跃用户规模、跨实例互动频率等指标对实例排序并划分等级，以找出更外向的实例。

对实例类型进行初步统计，发现实例规模分布呈现出极不均匀的特征：前 10 大实例集中 35.4% 的用户，有 7 个实例用户总数在 1000 以上，81 个实例用户总数在 1000-10000 之间，469 个实例用户总数在 100-1000 之间，8406 个实例用户总数不足 100。实例规模分布 Gini 系数为 0.928，表现出分布极不均匀的特征。

##### 3.1.2 实例规模分布

根据本研究中实例列表爬取在 instance.social 网站上爬取实例规模信息。

分别使用幂律分布、对数正态分布、指数分布对基于互动的实例规模分布和爬取到的实例规模分布进行拟合分析。

三项分布的拟合结果 P-Value 均不足 0.0001, 但幂律分布的拟合优度  $R^2$  达到 0.968，暗示出实例规模分布具有幂律分布的特点。

#### 3.2 实例规模与 CIIR 的倒 U 型结构

为减少极端规模样本的干扰，依据实例规模的分位数将样本划分为五档 (level 1 - 5)，并绘制各组的 CIIR 箱线图。单因素方差分析表明组间差异显著 ( $F$  远大于 1)，提示至少存在一组均值与其他组明显不同。随后进行的 Tukey HSD 事后检验用于定位显著差异点。综合图形与分组检验结果，CIIR 随实例规模呈现非线性变化的证据较为一致：CIIR 在某一对数规模处达到峰值，此后出现下降趋势。

为定量验证上述模式，构建了二次项回归模型和广义可加模型 (GAM)。二次项回归中，二次项系数  $\beta_2$  显著为负，模型拟合优度  $R^2 = 0.566$ ，表明该二次模型能够解释约 56.6% 的 CIIR 变异；由拟合曲线估计的极值点位于规模约 2.71。GAM 的平滑项同样呈现出先上升后下降的趋势。Bootstrap 稳健性检验表明  $\beta_2$  的 95% 置信区间为负且不含 0，进一步验证了该倒 U 型结构在不同抽样条件下的稳健性。

#### 3.3 中-大型实例的内向化趋势识别与解释

基于上述回归结果与规模分组的 CIIR 分布，本文进一步识别出一种值得

关注的结构性特征：中-大型实例的外向化程度下降。当实例规模进入中-大型（用户数达到百人），内部社群已具备一定活跃度，本地用户间的互动开始占据主导，从而减少了与外部实例的链接。当跨实例互动下降到一定程度时，中-大型实例可能逐渐形成相对封闭的内部互动结构，不利于联邦网络整体的去中心化。

造成这一现象的潜在机制包括：

- 1、资源充足性中位区域的转折效应：中-大型实例资源相对充足，本地互动开始替代外部互动；但与超大型实例相比，又缺乏足够的社群异质性来维持结构性连接。
- 2、本地社群黏性的增强：用户规模扩大到一定程度后，其内部社群逐渐稳固，用户更倾向于在本实例内部互动。
- 3、管理负担的提升：中-大型实例开始面临较大的日常管理压力，却未必拥有超大型实例成熟的运营机制，可能进一步限制跨实例社交的扩展。

### 3.4 行为动力层对去中心化治理的含义

上述规模—CIIR 关系及中—大型内向化趋势对联邦网络的治理具有若干重要启示：

- 1、网络连通性的可能削弱：若中-大型实例普遍倾向于将互动保留在本实例内部，则联邦网络的跨实例信息流与桥接性可能受到限制，从而降低整体网络的可达性与信息扩散效率。
- 2、角色分化与策略差异化需求：小型实例通过较高的 CIIR 为网络提供外部链接与多样性；超大型实例则凭借中心性维持稳定的跨实例桥接；中-大型实例若出现内向化，则需要差异化的激励与支持以维持联邦结构的多样性与连通性。
- 3、治理政策与实践建议：为防止中-大型内向化趋势削弱全局连通性，治理方可考虑（a）为中-大型实例提供联接激励机制；（b）改善中-大型实例的运维与治理支持以降低其对外互动的组织成本。



## 4 语义结构层：语言社区与主题桥接

### 4.1 跨实例社区结构识别

本节简要说明基于跨实例网络构建的社区检测结果，包括社区数量、规模分布等。通过 Louvain 等算法识别出的社区，为后续的语言同质性和主题同质性分析提供结构基础。

首先以实例为节点分别使用 Louvain 算法和标签传播算法进行社区检测，在不考虑实例内部互动的情况下 Louvain 算法得到社区检测结果更优，但模块度仅为 0.2055；在考虑内部互动的情况下进行社区检测，其中 Louvain 算法得到的社区结构模块度仅为 0.3817。这表明在实例层面，Mastodon 社交网络并未形成明显社区结构。

接着以用户为节点分别使用 Louvain 算法和标签传播算法进行社区检测，得到的社区结构模块度高达 0.8935，表明找到了边界清晰的社区结构。

这暗示着在 Mastodon 网络中，真正的社交边界在用户层面而不是实例层面。

### 4.2 语言同质性与语义边界

在已识别的每个社区内部，本文统计使用主导语言的实例比例，计算语言同质性指标。分析结果表明，多数社区的语言同质性较高，说明语言是塑造语义社区边界的重要因素。这种高语言同质性的社区结构，有助于形成内部沟通顺畅的本地语境，但也可能在跨语言的信息流动中形成明显的语义边界。

编写数据爬虫爬取 instance.social 网站上实例语言信息，对于未给出语言信息的实例，分析其主题描述为该实例分配一个语言。

基于整理后的实例语言数据，进一步统计每个社区内各语言的占比，识别主导语言，并计算语言熵以衡量社区语言多样性的程度。

分析结果显示，多数社区呈现高度的语言同质性。主导语言占比超过 90% 的社区占比达到 71%，平均语言熵仅为 0.15，表明绝大部分社区由单一语言主导。在结构层面，这种高度同质的语言分布有助于提高社区内部的沟通效率，但同时也使语言成为塑造语义社区边界的重要因素。

### 4.3 主题同质性与跨社区桥接

与语言同质性相比，社区内部的主题同质性通常较低，表明即便在同一语言社区内部，用户的兴趣主题也存在较大差异。另一方面，不同社区之间在主题上往往存在交集，一些用户通过多样化的主题参与，在跨社区的互动中扮演桥接角色。本节将结合主题标签分布和跨社区边连接的情况，说明主题如何在语言划定的边界之上，构建跨社区的信息通道。

使用自然语言处理模型处理实例的主题描述，处理分隔符，清理文本，过滤短标签，并对关键词进行匹配从而提取实例的主题特征。

使用 K-means 聚类，并基于簇中心与预设主题的相似度为每个簇分配对应的主题名称。

在此基础上统计各社区内不同主题的占比，识别主导主题，并计算主题熵以衡量社区在主题维度上的多样性程度。

对主题同质性的分析表明，与语言显著集中的结构不同，主导主题占比超过 90% 的社区仅占 34%，平均主题熵达到 0.64。这表明虽然多数社区语言相对单一，但在主题层面具有较高的多样性，为跨社区联系提供了潜在的桥接机制。

#### 4.4 语言-主题联合结构与语义社区的复合形成机制

在分别考察语言与主题的结构特征之后，进一步对二者的联合模式进行分析。基于语言熵与主题熵的中位数，将全部社区划分为四类结构类型：（1）语言集中－主题集中；（2）语言集中－主题多样；（3）语言多样－主题集中；（4）语言多样－主题多样。

分析结果表明，大多数社区归属于“语言多样-主题多样”类型，即在语言与主题两个维度上均呈现高度多元化，而未形成显著的语言或主题聚类结构。这说明整体语义社区分布较为松散，缺乏稳定的单一语言核心或主题核心，社区结构更多呈现开放性。

值得注意的是，“语言多样－主题集中”类型的社区虽然占比极低（2.6%），但具有重要的结构意义。该类社区能够跨越语言边界，通过对共同主题的集体关注维持稳定的互动结构，表明在特定条件下主题因素能够成为跨语言聚合的重要驱动力。

总体来看，高语言同质性通常对应较强的语义边界，使互动结构呈现语言分区化；而共同主题能够穿透语言划分，在社区之间构成桥接节点，从而促进跨社区信息流动。

#### 4.5 双轨语义结构对去中心化的影响

分析显示，语言与主题在去中心化网络中形成两条并行运作的语义路径：语言主要塑造社区边界，而主题在边界之上构建跨社区的信息桥接。

从社区内部结构来看，高语言同质性增强了社区的内聚力。语言作为交流与文化表达的基础，使语言一致的社区更容易形成稳定结构和密集互动。然而，这种凝聚性也可能带来语义上的局部封闭：高语言同质性往往伴随跨社区边数量减少，使部分社区在语义空间中呈现相对孤立，从而限制信息在网络中的广泛流动。

相对地，跨语言的主题桥接实例在一定程度上缓解了语言边界造成的封闭趋势。前述分析表明，即使语言分区明显，社区之间在主题结构上仍存在显著重叠。一些实例因涉入多个主题而拥有更高的跨社区连接度，成为跨语言传播的关键节点。这些桥接节点不仅增加了跨语言边的数量，同时在语义层面提升了信息流动的开放性与跨区域传播能力。

从双轨结构整体来看，语言主导社区内部的组织逻辑，而主题为更大范围的信息整合提供基础。二者的共同作用使网络在保持基层社区自治性与稳定性的同时，仍具备较高的跨社区连通性，从而避免形成单一语言或主题的中心化结构。

本节从治理角度讨论“语言主导边界、主题提供桥接”的双轨语义结构对去中心化的影响。一方面，语言同质性增强了本地社区的内聚力，但可能导致语义层面的“局部封闭”；另一方面，跨语言的主题桥接实例和话题，为不同语言社区之间的信息传播提供了通路，有助于在语义层面支撑去中心化信息结构。本节将结合实际数据的特徵，分析语义层结构与行为层跨实例互动之间的关联。

## 5 系统结构层：多维中心性与最优规模窗口

### 5.1 多维中心性分布与集中度特征

Figure 1 Top 10 Instances Overlap Analysis Across Different Metrics

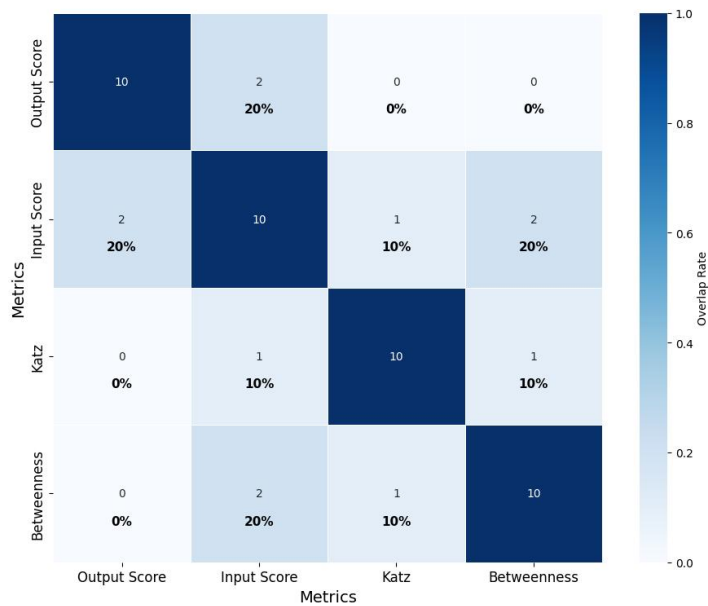
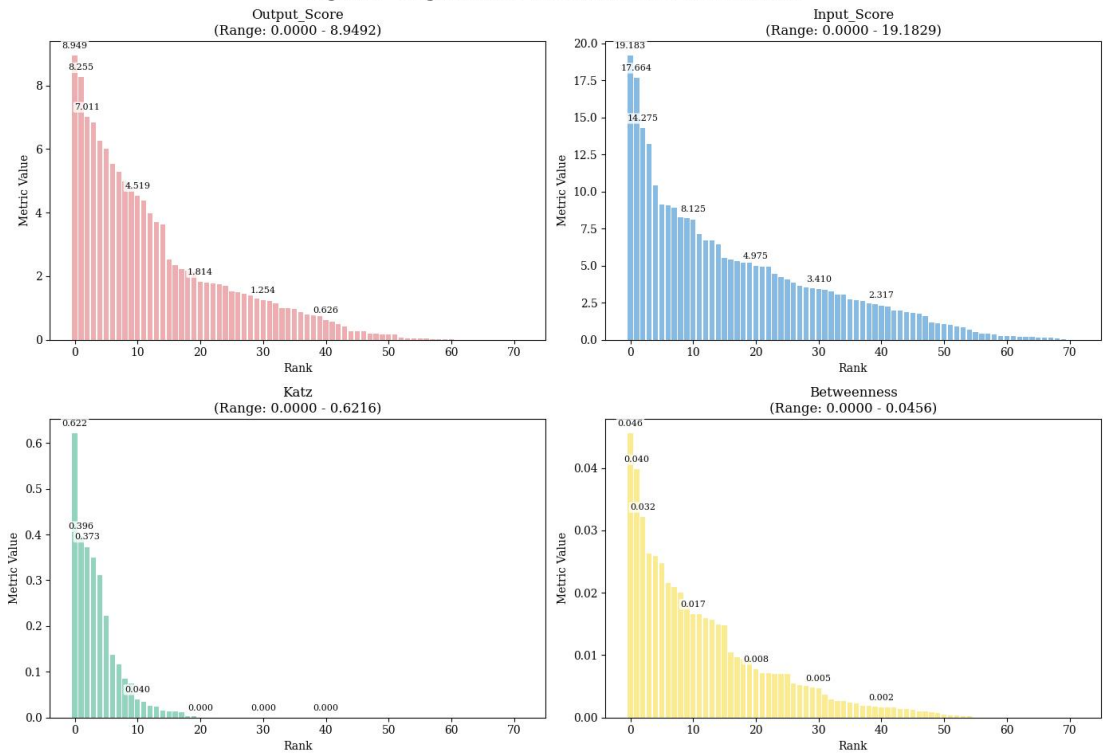


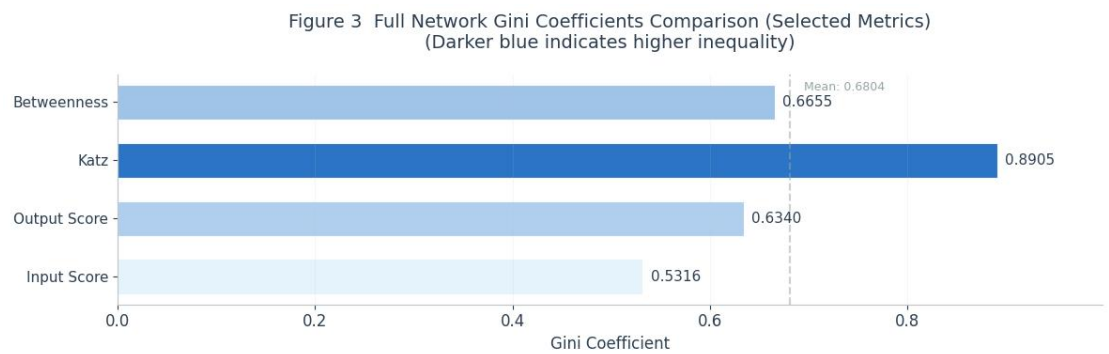
Figure 2 Original Scale Distribution of 4 Core Metrics



为刻画系统结构层的权力分布特征，本文从桥接性、影响力与行为贡献三个维度选取四类指标（Betweenness、Katz、主动输出、被动吸引）。图一显示四类指标排名前十的实例重叠度较低，表明指标指向结构的不同侧面，从而验证多维中心性结合的合理性，并体现网络呈现“多核心”特征而非单中心结构。

图二表明所有指标均呈重尾分布，显示出显著的结构性集中化压力。其中，被动吸引指标均值明显高于主动输出指标，说明少数实例在跨实例互动中吸引了大量输入，而大多数实例主要承担跨实例互动的输出，为网络整体连通贡献外向流。

此外，如图三所示，四类指标的 Gini 系数均超过 0.5，进一步验证权力与注意力分布存在显著不均衡性，为后续探究核心规模在去中心化结构中的作用奠定分析基础。

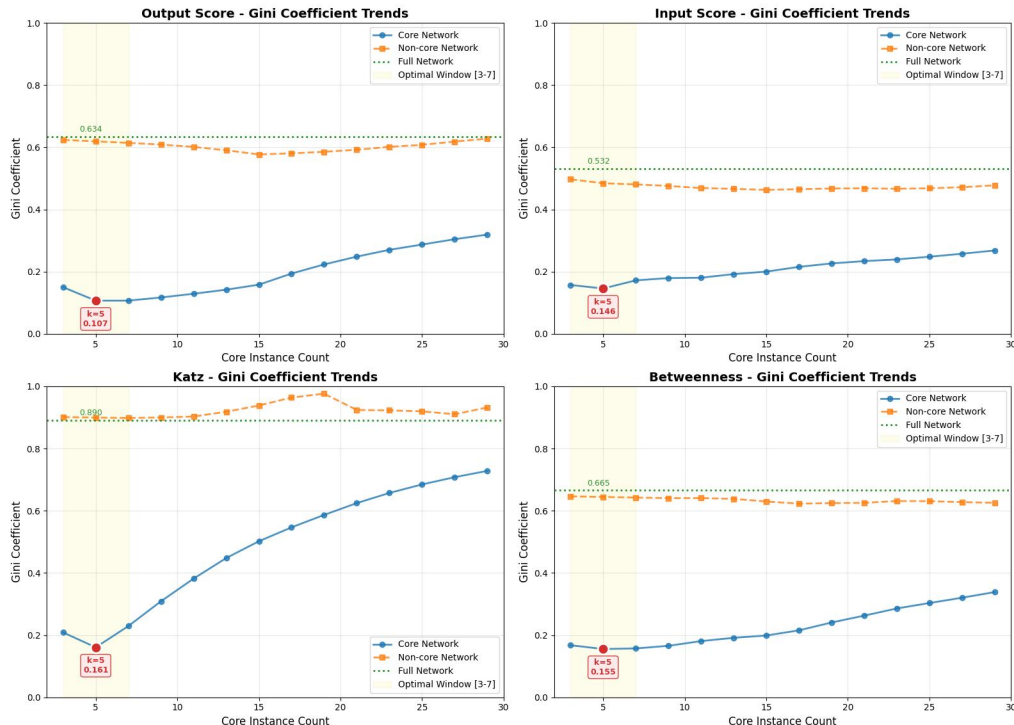


## 5.2 核心—非核心划分与分层结构

基于多维中心性指标，本文采用排名式划分方法：对给定指标与核心规模  $k$ ，将排名前  $k$  的实例视为核心，其余为非核心，并分别计算 Gini 系数。图 5.4 显示：

1. 当  $k \in [3, 7]$  时，核心 Gini 降至较低水平且增长缓慢，同时非核心 Gini 保持相对稳定；
2. 当  $k > 7$  后，核心 Gini 快速升高，而非核心 Gini 基本稳定不变。

Figure 4 Gini Coefficient Trends: Optimal Window [3-7] (All Metrics)



该现象表明：仅扩大头部规模（吸纳更多核心实例）并不必然提升分布平等度，反而可能在短暂改善后出现集中化回流，表现为头部扩张但内部差异急剧拉大，权力再度聚集于扩张后的少数节点之中。

另一方面，非核心 Gini 的稳定性表明网络具有显著的分层刚性结构：外围难以因核心规模变化而获得更均衡的发展机会。

### 5.3 最优规模窗口的稳健性验证

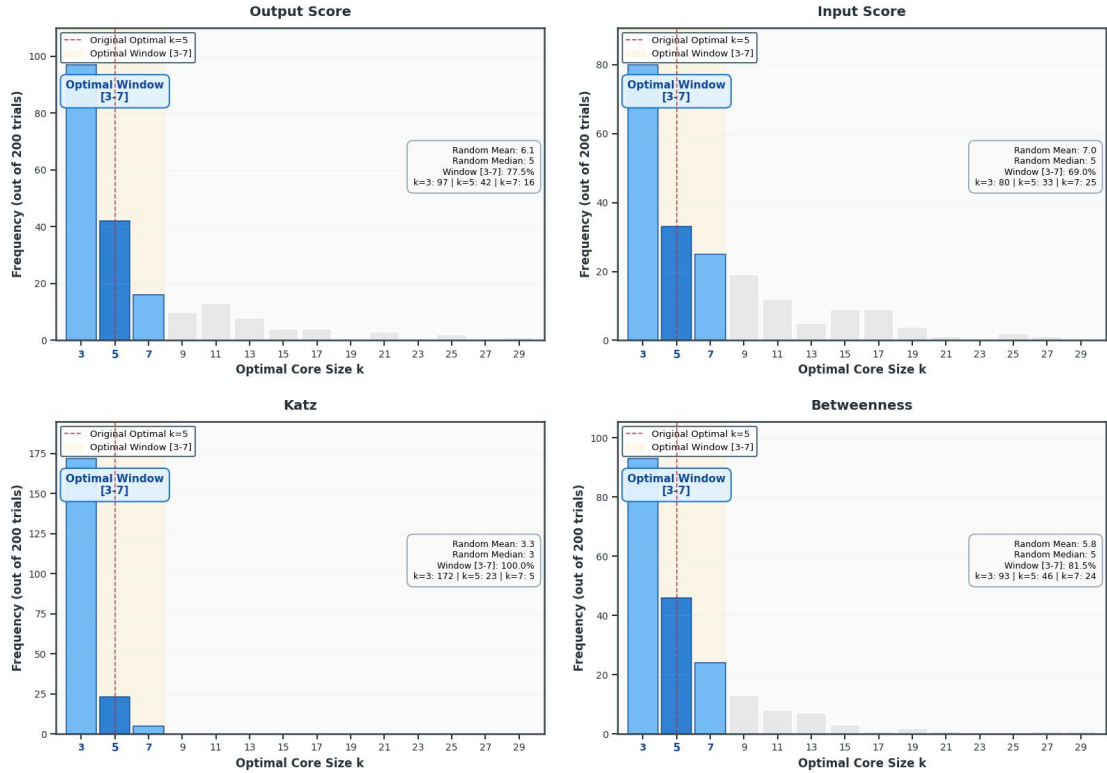
为验证上述核心规模窗口具有结构基础而非偶然结果，本文在核心规模敏感性扫描基础上进一步实施随机置换检验。具体方法为：在保持跨实例网络拓扑与边权不变的前提下，随机打乱四类中心性指标值与实例标识之间的映射关系，依据置换后的指标重新排序并重复核心规模扫描过程。该过程共执行 200 次，以构建随机基线分布。

图五显示了 200 次随机置换试验中核心 Gini 最小对应规模  $k^*$  的分布情况。结果表明：

1. 在随机置换的基线条件下， $k^*$  的分布依然呈现向 3-7 区间集中趋势，落入该区间的比例显著高于随机均匀分布预期；
2. 随机置换下的最优规模未出现系统性偏移或扩散至远离窗口的区间，表明该窗口具有显著的结构稳健性。

综上，核心规模的最优窗口并非源于特定排序方式或指标噪声，而是由现有跨实例行为动力与语义结构约束共同塑造的内生稳态区间。这佐证了“小规模多核心”是联邦网络实现去中心化治理的关键结构条件。

Figure 5 Optimal Core Size Distribution: Window [3-7] Consensus Across All Metrics  
200 Random Trials



## 5.4 机制解释与治理含义

行为层的规模—外向性倒 U 型与语义层的语言边界共同构成结构层集中化压力背景。在此约束下，小规模多核心更能兼顾头部不过度集中与外围均衡。3-7 窗口应作为结构健康参考带，用于监测头部扩张与不平等同步上升的风险，并据此进行导流与连接优化。

## 6 三层结构动力学治理框架的综合讨论

### 6.1 行为、语义与结构三层机制的耦合关系

本节基于前述分析，系统讨论行为动力层、语义结构层与系统结构层之间的耦合关系。实例规模与 CIIR 的倒 U 型关系决定了不同规模实例在跨实例互动中的行为角色；语言主导的语义边界和主题桥接机制，影响这些行为在不同社区之间的传播路径；多维中心性及其集中度指标，则从全局结构上反映这些行为与语义机制累积后的分布结果。三层机制共同构成了 Mastodon 联邦网络去中心化治理的结构动力学基础。

### 6.2 去中心化稳定性的条件与脆弱环节

结合三层分析结果，本文指出去中心化结构稳定性需要满足若干条件。例如，在行为层，小型和大型实例需要保持足够的外向互动；在语义层，需要有足够多

的跨语言主题桥接实例和话题；在系统层，核心规模需要控制在一个相对有限的范围内，避免过度集中。与此同时，小、大型实例的内向化、语义社区的语言封闭、核心规模的过度扩张，构成了去中心化结构的主要脆弱环节。

## 7 去中心化治理策略建议

### 7.1 面向行为动力层的治理措施

基于实例规模与跨实例互动呈倒 U 型的结构性关系，行为动力层的治理核心在于抑制中-大型实例的内向化趋势，并维持联邦网络整体的跨实例连通性。研究表明，小型实例具有外向性，大型实例具备稳定的桥接功能，而中-大型实例在内部活跃度提升后出现跨实例互动下降，可能成为联邦网络连通性的瓶颈区间。因此，治理措施应将重点放在以下两点：

#### 第一，提升中-大型实例的外向互动能力。

通过降低跨实例互动的组织成本、提供跨实例协作的技术支持（如跨实例活动模块）、向实例管理员反馈跨实例连接度等方式，帮助中-大型实例克服治理负担、内部黏性上升等带来的封闭化趋势，维持其对外连通度。

#### 第二，强化小型与大型实例在联邦结构中的功能定位。

小型实例应获得必要的运维支持，以持续发挥外向扩散与多样性贡献；大型实例应保持其跨社区桥接能力，并通过规范治理与开放机制避免形成新的中心化节点。整体而言，需要引导用户在选择实例时弱化对规模的偏好，使网络长期维持多中心、分布式的结构。

总体来看，行为动力层的治理关键在于：稳住小型与大型实例的开放性，重点防止中-大型实例的内向化，从而维护联邦网络的去中心化特征。

### 7.2 面向语义结构层的治理措施

语义结构层呈现“语言划分边界、主题桥接”的双轨特征：语言同质性形成社区内部的稳定边界，而跨语言主题参与则构成连接不同社区的关键通路。因此，治理的核心在于减少语言边界的封闭性，并强化主题驱动的跨社区连接。

首先，应通过跨语言话题活动等方式弱化语言隔离，使不同语言社区在主题层面获得更高的可见性与交互机会。其次，需要识别并扶持承担跨语言主题桥接功能的节点（如多主题活跃实例或用户），以增强语义层的整体连通性。此外，鉴于



真实社交边界主要存在于用户层面，实例管理者应鼓励围绕特定兴趣构建主题化社群，而客户端开发者可以通过多群组或多频道等机制强化“以兴趣为中心”的用户体验。

整体而言，语义层治理的关键在于：减弱语言的边界划分效应，扩大主题在跨社区连通中的桥接作用，以支持联邦网络的多语、多主题共存与去中心化传播。

### 7.3 面向系统结构层的治理措施

1. 结构健康监测与预警（“3-7 核心窗口”）
  - 指标与方法：对  $k \in [3, 30]$  逐点扫描，监测  $G_{core}(k)$ 、 $G_{noncore}(k)$ ，并做月度跟踪与趋势预警。
  - 预警阈值：当头部规模  $> 7$  且  $G_{core}$  上升、 $G_{noncore}$  不降，即判定进入“集中化回流”。
  - 响应机制：启动限流与分流策略包；公布“核心名单规模”和指标面板，形成透明的结构健康监控。
2. 流量与资源分流（扶持中腰部，抑制极头部偏好）
  - 新用户与内容导流：注册默认实例列表去偏，配额/轮转将增量更多分配至中等规模实例。
  - 算法去偏：推荐、搜索、API 速率与权重下调极头部、上调中腰部；联邦级负载均衡与服务镜像为中小实例提供缓存/存储/队列支持。
  - 评估闭环：以  $G_{core} \downarrow$ 、 $G_{noncore}$  稳定  $\downarrow$  为目标做置换检验，确保结构性改善而非“拉长头部”。
3. 连接结构与路由优化（打通核心-边缘，避免核心内循环）
  - 连接激励：鼓励核心-边缘双向互关/转发/列表互荐，设置多样性约束与软上限，抑制头部内部过密互连的放大效应。
  - 联邦路由：优化跨层级路径与重试策略，提升边缘可达性与时延稳定性，避免信息在核心内回流。

## 8 结论与展望

### 8.1 研究结论

本文基于 Mastodon 平台 13 日内约 136 万条跨实例交互数据，提出并实践了一个围绕去中心化治理的“三层结构动力学治理框架”。通过行为动力层、语义结构层和系统结构层的联合分析，本文揭示了实例规模与跨实例互动率的倒 U 型关系、中型实例的内向化陷阱、语言主导的语义社区边界以及以 3-7 个实

例为核心规模的相对稳态去中心化结构区间,并在此基础上提出了面向三层的治理策略建议。

## **8.2 理论与实践贡献**

本节总结本文在去中心化治理理论、联邦平台实证分析方法和治理工具方面的贡献。包括在理论上从行为—语义—结构三层重构去中心化分析框架,在方法上整合 CIIR、多维中心性、Gini 和核心导通率等指标体系,在实践上为 Mastodon 等联邦平台提供一套可用于监测和评估去中心化结构的指标与分析流程。

## **8.3 研究局限与未来方向**

本节指出本文研究在时间跨度、变量丰富度和因果识别等方面存在的局限。例如,数据覆盖时间相对有限、部分语义标签依赖已有分类结果、多数分析为相关性而非因果推断等。未来研究可在更长时间尺度和更丰富数据维度上扩展该框架,也可在不同联邦平台间进行比较,进一步检验“三层结构动力学治理框架”的适用性和稳健性。