arXiv:2602.16186v1 [cs.GT] 18 Feb 2026

# 支付系统压力下的信任与流动性建模：多主体方法

Masoud Amouzgar沙里夫理工大学，计算机科学（2012年毕业）支付业务主管，blu Bank（2020—2026年）
m.amouzgar@bluteam.ir

2026年2月19日

**摘要**

零售支付中的运营中断可能引发持续到技术恢复之后的行为反应，并可能加剧流动性压力。我们提出一种多主体模型，将银行卡支付中断与信任动态、渠道规避及阈值门控式提款联系起来。客户和商户通过反复的支付尝试进行互动，客户还会在 Watts–Strogatz 小世界网络中相互影响。客户会更新有界记忆变量，以反映累积的负面体验（创伤）和感知系统性风险（谣言）；商户则提供持续的广播信号，其影响可能滞后于运营恢复。我们证明，在记忆持续性和阈值门控满足温和条件时，总体提款压力的峰值可能严格晚于故障低谷出现，包括在恢复阶段。模拟结果再现了行为滞后，并证实资金流出会延迟达到峰值。我们进一步研究通过即时转账进行的支付替代：替代始终能降低峰值规避，但在现实的商户广播持续性条件下，其对累计流出的影响并非单调变化。针对不同随机种子的稳健性实验显示，模型的定性行为保持稳定。模型揭示了为何“状态绿色”并不等同于风险已经消除，并说明事件响应策略除了技术补救之外，还应关注认知、商户信息传达以及恢复后沟通。

## 1 引言

现代经济体日益依赖零售和批发支付服务不间断地运行。当银行卡授权、收单网关、发卡方处理系统或核心支付基础设施性能下降时，影响并不局限于交易损失或运营成本。支付中断可能改变客户对安全性和可靠性的信念，引发对某一支付渠道的持续回避；在极端情况下，还可能导致资金迅速流出，因为存款人会试图将资金转移至其他地方。中央银行和监管机构日益将运营中断视为金融稳定方面的潜在隐忧，而非纯粹的技术风险 [2, 1, 7]。

一个关键挑战在于，技术恢复并不必然意味着行为恢复。即使在服务恢复之后，客户仍可能因近期失败、商户信息传达（例如“仅收现金”标牌或受损的受理能力）以及社会传播放大而保持谨慎。关于数字媒介协调的最新证据表明，包括社交媒体在内的信息渠道可以加速集体提款行为，并缩短挤兑动态的时间线 [3]。这些观察促使我们以耦合视角看待支付可靠性与存款人行为，其中中断模式与记忆、社会影响以及来自商户的外部信号相互作用。

学术文献提供了相互补充的基础，但很少将它们端到端地贯通起来。经典银行挤兑模型在流动性转换与策略互补性条件下，对自我实现的提款进行了形式化 [4]。另有阈值模型表明，当个体在已有关键比例的同伴采取行动后才行动时，二元决策如何能够发生级联 [6]。网络科学进一步表明，小世界拓扑可在保持聚类的同时实现快速扩散，进而影响传染阈值与持续性 [9]。基于主体的方法已被用于研究带有邻域效应和序贯提款的银行挤兑 [5]。与此同时，针对支付及银行间系统的操作风险研究强调了扰动如何经由结算与流动性渠道传播 [8]。然而，现有研究通常将支付中断视为外生操作事件，或在未对塑造信任与协调的支付体验层进行建模的情况下讨论银行挤兑。

本文提出一种多主体计算模型，将支付中断及恢复动态与信任侵蚀、渠道规避和条件性挤兑行为联系起来。模型包含嵌入 Watts–Strogatz小世界社交网络中的异质性客户和商户。客户通过有界记忆过程更新信任，这些过程由以下因素驱动：(i) 经历的交易结果（成功、失败和不确定超时）；(ii) 表现出粘性恢复的商户广播信号；以及 (iii) 邻居规避状态所带来的社会影响。商户则依据滚动证据和持久标牌更新广播状态，从而捕捉后端修复后“受损的受理能力”信息持续很久这一现实中的长尾现象。本文将挤兑机制设定为一种阈值门控行动：只有当个人创伤记忆和感知谣言都超过各自的个体阈值时，才会发生提款，因此挤兑压力可能以延迟相变的形式显现。

我们的贡献如下：

- 我们提出一种多主体系统框架，通过明确的行为微观基础和商户广播持续性，将支付中断与信任损失及流动性流出联系起来。
- 我们证明了延迟峰值结果：在关于记忆和阈值门控的温和假设下，挤兑压力峰值可能出现在故障低谷之后，包括技术恢复期间。
- 我们提供了覆盖服务中断与恢复情景、且需求处于峰值时段的仿真证据，量化替代渠道在何种情况下会降低峰值规避，以及在何种情况下可能无法减少累计流出。
- 我们讨论事件响应的操作层面影响，包括为何“状态绿色”可能与升高的行为风险同时出现，以及哪些杠杆（沟通质量、商户指导与替代设计）能够降低尾部风险。

本文其余部分结构如下。第2节回顾关于银行挤兑、传染效应与运营韧性的相关研究。第3至第5节界定主体、网络结构与更新规则。第6节给出理论结果，包括延迟峰值定理。第7节与第8节描述仿真设计及研究发现。第9节讨论相关影响。第10节阐述局限性与未来工作，第11节作出结论。

## 2 相关研究

本研究处于银行挤兑理论、集体行为的传染效应与阈值模型、基于主体的金融仿真以及支付系统运营韧性的交叉领域。尽管上述各类文献分别探讨了问题的一部分，但很少有研究在单一计算框架内整合支付可靠性、行为记忆与流动性压力。

### 2.1 银行挤兑与流动性压力

银行挤兑的经典模型源自Diamond与Dybvig [4], ，他们将挤兑形式化为期限转换条件下存款人之间的协调失败。在其框架中，提款由对他人行为的预期驱动，而非由运营摩擦驱动。后续研究将这一设定扩展至信息不对称、部分存款保险和策略互补性，但总体上仍对交易执行保持抽象视角。

较新的实证和理论研究强调了现代挤兑的速度与协调性，尤其是在数字银行环境中。近期事件的证据表明，借助数字化访问和实时信息渠道，提款可能迅速大规模发生 [3]。这些研究突出了信念形成和信息扩散的作用，但并未建模支付系统可靠性本身如何在存款人作出提款决定之前影响其行为。

我们的研究补充了这类文献：我们将挤兑建模为支付体验导致信任长期侵蚀后的条件性结果，而非对资产负债表疑虑的即时响应。

### 2.2 阈值模型与社会传染

基于阈值的集体行为模型为理解社会技术系统中的级联现象提供了自然的框架。Granovetter 的开创性研究 [6]表明，即便个体行为简单，异质性阈值也能产生非线性的总体响应。后续研究进一步表明，网络拓扑会影响级联规模、持续性和临界阈值。

Watts 和 Strogatz [9] 提出了小世界网络，这类网络兼具高聚类和短路径长度，这种结构常见于现实社会系统。已知这类网络有助于快速扩散，同时维持局部强化，因此尤其适用于研究谣言传播和信任侵蚀。

本研究采用阈值视角，并通过纳入记忆、异质性体验信号和商户媒介广播对其进行拓展；这些因素共同产生了静态阈值模型无法捕捉的滞后效应。

### 2.3 金融传染的基于主体的模型

基于主体的建模（ABM）已被广泛用于研究金融不稳定，包括银行挤兑、银行间传染和流动性囤积。例如，dos Santos 和 Nakane [5] 对动态提款决策进行建模，并纳入邻域效应，展示了局部交互如何放大系统性风险。

相关的 ABM 研究聚焦于银行间网络、结算系统和流动性冲击，通常强调资产负债表关联和清算机制。尽管这些模型捕捉了重要的结构性依赖关系，却往往抽象掉零售用户和商户所面临的支付体验层。

我们的方法有所不同，明确对客户层面的支付尝试、感知到的失败以及不确定性（超时）进行建模，并将这些微观体验与信任动态及最终的提款行为联系起来。

### 2.4 运营风险与支付系统韧性

支付系统中的运营中断长期以来一直被视为系统性风险的来源。有关大额支付系统的研究记录了运营故障如何通过

流动性短缺和延迟结算蔓延 [8]。巴塞尔委员会和国际货币基金组织近期更具政策导向的研究将运营韧性视为金融稳定的核心组成部分，尤其是在日益数字化的支付生态系统中 [2, 7]。

然而，现有文献大多从基础设施或机构视角探讨运营韧性，重点关注恢复时间目标、冗余和治理。终端用户和商户的行为响应通常不在建模范围之内。

本文通过将运营中断嵌入行为多智能体系统，弥合了这一研究空白，使我们能够研究认知和信任的延迟恢复如何在技术恢复之后仍产生宏观层面的后果。

### 2.5 本文的定位

与以往研究不同，本文明确将支付系统可靠性与行为传染和条件性银行挤兑动态相结合。通过将记忆、基于阈值的规避、商户广播持续性和小世界社交网络整合进统一的多智能体系统，我们提出了一个框架，用以刻画现实支付事件中观察到的延迟且非单调的风险模式。

这一定位使我们能够推导有关延迟挤兑压力的理论结果，并在单一且连贯的模型中评估与政策相关的机制，例如支付替代和沟通质量。

## 3 模型概述

我们构建了一个离散时间多智能体系统，用于刻画支付中断及恢复如何通过行为渠道传播，进而导致信任侵蚀、回避支付工具以及条件性流动性流出。该模型明确区分技术可靠性与感知可靠性，并允许这两个维度随时间出现偏离。

该系统由三个相互作用的组成部分构成：客户、商户和外生的支付基础设施。客户与商户通过反复的支付尝试进行交互，而客户之间还通过社交网络相互影响。时间以离散步进演化，每一步代表一个较短的运营时段，在此期间会发生支付尝试、认知更新以及可能的提款。

### 主体与交互层

**客户** 代表在银行持有余额的个体零售用户。客户会在商户处尝试银行卡支付，观察结果（成功、失败或不确定），更新内部的信任与记忆状态，并可能在不同的行为模式之间转换，从正常使用到回避该支付渠道不等。在条件极为不利时，客户可能会发起提款，从而导致总流动性流出。

**商户** 代表零售受理点。每个商户都会观察近期的支付结果，并维护内部运营状态和外部可见的广播状态（例如，正常受理、受损的受理能力或回退提示）。即使潜在问题已经解决，广播状态仍可能持续存在，以反映事件期间及之后标牌和收银员引导所呈现出的经验性持续性。

**支付基础设施** 被建模为一种外生随机过程，用于确定每个时间步支付成功、失败和不确定性的概率。该过程编码了

中断发生、性能退化、恢复和峰值需求压力，但不会直接适应智能体行为。

这些组成部分通过三个相互耦合的层发挥作用：(i) 交易层，支付尝试会产生体验信号；(ii) 信息层，商户会传播受理质量；(iii) 社会层，客户会观察同伴中的回避行为。

### 网络结构

客户间互动嵌入在 Watts–Strogatz小世界网络中。这一选择反映了真实社交网络的实证特征，即兼具高聚类性和较短的平均路径长度。这类网络能够促进行为信号快速扩散，同时保留局部强化，这对于模拟谣言持续性和基于阈值的转变至关重要。

商户之间不构成网络，而是通过消费者习惯性消费模式中的反复接触来影响客户。

### 行为记忆与滞后效应

该模型的一个核心特征是存在有界记忆过程。客户的反应并非仅取决于支付系统当前的质量，还取决于累积经验和信号。不利结果会增加个人的“创伤”变量，而社会和商户信号则会影响“谣言”或感知系统性风险变量。这两个变量都会随时间缓慢衰减。

由于行为状态取决于施加于这些记忆变量的阈值，恢复过程会表现出滞后效应：即使支付成功率恢复到较高水平，信任和正常行为也不会立即恢复。技术恢复与行为恢复之间的这种分离，是导致延迟规避和取款动态的关键机制。

### 条件性挤兑机制

提款并非被建模为服务中断的自动反应。相反，当客户同时满足多个条件时，挤兑会内生地产生：持续的回避行为、对不利体验的记忆增强，以及较高的感知系统性风险。这种门控机制确保流动性流出是长期压力所导致的更高阶效应，而非孤立故障的直接后果。

由此产生的动态允许出现这样的情形：总体提款压力在支付事件的恢复阶段期间或之后达到峰值，而不是在技术表现最差时达到峰值。

### 范围与建模理念

该模型有意采用行为建模，而非资产负债表驱动的建模。它并不试图描述银行间市场、监管干预或详细的结算机制。相反，它聚焦于微观层面的支付体验和信息信号如何通过社会互动与记忆，形成宏观层面的风险模式。

这种抽象使我们能够分离并分析那些难以通过纯粹的解析模型捕捉的机制，同时保持足够的结构化程度，以支持形式命题和可复现的模拟。

# 4 主体定义与状态变量

该模型由异质的客户主体和商户主体构成，它们在离散时间范围内相互作用。本节定义了这些主体、它们的状态变量，以及它们运行所处的结构环境。更新规则和动态将在第 5 节中说明。

## 4.1 客户代理

令 $\mathcal{I} = \{1, 2, \ldots\ldots, N\}$ 表示客户代理的集合。每个客户 $i \in \mathcal{I}$ 代表一名在银行持有存款余额，并通过反复进行银行卡支付尝试与支付系统交互的零售用户。

在每个时间步 $t$，客户 $i$ 由以下状态变量描述 s:

- **信任** $T_i(t) \in [0, 1]$，表示客户对支付系统可靠性以及继续使用该系统是否安全的内在信心。
- **创伤** $C_i(t) \in [0, 1]$，表示过去支付失败或不确定性累积造成的负面体验。该变量反映路径依赖，且会随时间缓慢消退。
- **谣言** $R_i(t) \in [0, 1]$，表示从社交信号和商户广播推断出的感知系统性风险，而非仅来自直接经验。
- **行为模式** $S_i(t) \in \{\text{正常}, \text{沮丧}, \text{回避}\}$，描述客户与支付渠道的定性交互状态。
- **余额** $B_i(t) \geq 0$，表示可用于提款的剩余存款余额。

除状态变量外，每位客户还被赋予从异质分布中抽取的固定行为参数，包括信任阈值、风险敏感度、记忆衰减率和取款敏感度。这些参数决定经验和信号如何转化为状态转变与决策。

假定客户是有限理性的。他们无法观察支付基础设施的真实技术状态，而只能通过亲身经历的结果、商户信息传达和社会接触来推断可靠性。

## 4.2 商户代理

令 $\mathcal{M} = \{1, 2, \ldots, M\}$ 表示商户代理集合。每个商户代表一个零售受理点，客户会在此尝试进行银行卡支付。

在时间 $t$，每个商户 $m \in \mathcal{M}$ 都维护两种不同的状态:

- **运营状态** $O_m(t) \in \{\text{接受}, \text{降级}, \text{回退}\}$，反映商户对近期支付表现的内部评估。
- **广播状态** $B_m(t) \in \{\text{接受}, \text{降级}, \text{回退}\}$，代表客户感知到的外部信息（例如标牌、收银员引导或销售点行为）。

运营状态与广播状态不必一致。具体而言，即使运营表现有所改善，广播状态仍可能持续处于降级或回退状态，这体现了在现实支付事件中观察到的标牌延迟撤除以及商户行为趋于保守的现象。

商户根据近期交易结果的滚动窗口更新自身状态，并通过明确的黏性机制保持状态持续性。商户之间不会直接协调，也无法观察支付基础设施的全局状态。

### 4.3 支付基础设施

支付基础设施被建模为一个外生随机过程，用于决定每次银行卡支付尝试的结果。在每个时间步 $t$，该基础设施都会设定交易成功、失败和不确定的概率（例如超时或不确定响应）。

基础设施过程对中断发生、性能退化、恢复和峰值需求压力进行编码，但不会根据智能体行为进行调整。这种抽象方式将技术可靠性与行为响应区分开来。

### 4.4 社交网络结构

客户间互动嵌入在一个静态无向社交网络 $G = (\mathcal{I}\ E)$ 中，其中 $E$ 表示边的集合。该网络采用 Watts–Strogatz 小世界构造生成，并具有固定的平均度和重连概率。

边代表客户观察或推断同伴行为模式的渠道。客户不会直接分享数值化的信任或谣言值；相反，他们会接触到根据邻居的回避行为得出的定性信号。

这种网络结构通过聚类实现局部强化，并通过短路径长度实现快速全局扩散；这些特性对于模拟谣言持续性和阈值级联至关重要。

### 4.5 商户接触模式

每位客户都会习惯性地接触一小部分商户，这反映了重复出现的消费模式。商户接触权重决定了某次支付尝试指向特定商户的可能性。

通过这些接触模式，商户广播状态构成一个外部信息场，影响客户的认知与信任，且不依赖于直接的社会互动。

## 5 动态与更新规则

本节说明系统的时间演化。时间是离散的，按 $t$ =1、2、.....、$T$编索引。在每个时间步，客户代理可以尝试支付、观察支付基础设施产生的结果，并记录这些经历，以便后续进行行为更新。本小节首先定义支付尝试与结果过程；行为更新和系统更新将在后续小节中介绍。

### 5.1 支付尝试过程

在每个时间步 $t$，每位客户 $i \in$我 都会独立决定是否发起一次银行卡支付尝试。尝试决策是随机的，取决于外生需求因素以及客户当前的行为模式。

令 $A_i(t) \in \{0,1\}$ 表示客户 $i$ 在时间 $t$是否尝试进行支付。我们假设

$$\mathbb{P}\left(A_i(t) = 1\right) = \lambda_i \cdot D(t) \cdot \phi\big(S_i(t)\big),$$

其中：

- $\lambda_i \in (0, 1)$ 是个体基准支付倾向，
- $D(t) \geq 1$ 是反映高峰时段效应的共同需求乘数，
- $\phi(S_i(t)) \in (0, 1]$ 是模式相关活动因子，其值随回避程度增加而降低。

这一表述反映了经验观察：客户在感到沮丧或回避某一支付渠道时会减少支付尝试，但在有必要时仍可能尝试支付。

在给定 $A_i(t) = 1$ 的条件下，客户 $i$ 根据代表习惯性消费模式的固定暴露权重选择商户 $m \in \mathcal{M}$ 。

## 5.2 支付结果生成

给定客户 $i$ 在时间 $t$于商户 $m$ 发起的支付尝试，交易结果由支付基础设施作为外生随机过程生成。

令 $Y_i(t) \in \{$成功,失败, 未知$\}$ 表示观测结果，其中：

- **成功** 表示已完成且已确认的交易，
- **失败** 表示明确拒绝，
- **未知**表示不确定结果，例如超时或模糊响应。

在每个时间 $t$，结果概率由下式给出：

$$\mathbb{P}\big(Y_i(t) = \text{SUCCESS}\big) = p_s(t), \quad \mathbb{P}\big(Y_i(t) = \text{FAILURE}\big) = p_f(t), \quad \mathbb{P}\big(Y_i(t) = \text{UNKNOWN}\big) = p_u(t),$$

其中 $p_s(t) + p_f(t) + p_u(t) = 1$。

函数 $p_s(t)$、$p_f(t)$ 和 $p_u(t)$ 对高峰需求期间的中断发生、性能退化、恢复和压力进行编码。这些概率在所有客户和商户之间相同，且不受智能体行为影响。

## 5.3 商户级结果观测

每个商户 $m$ 都会观测在时间 $t$向其发起的所有支付尝试的结果。令 $\mathcal{I}_m(t)$ 表示在时间 $t$于商户 $m$尝试支付的客户集合。

商户会记录滚动观测窗口内观测到的成功、失败和未知结果的数量。这些记录是商户运营评估和广播状态更新的唯一依据，相关定义见第5.7节。

商户无法观测其他商户的结果，也无法直接了解支付基础设施的全局状态。

## 5.4 客户体验记录

每位客户都会记录自己的支付尝试结果。这些结果构成客户的直接体验历史，并作为后续小节中介绍的信任、创伤和行为状态更新的输入。

至关重要的是，客户仅观察其自身的交易结果和商户广播状态。他们并不直接观察基础设施概率（$p_s(t)$ $p_f(t)$ $p_u(t)$），从而强化了技术可靠性与感知可靠性之间的区别。

## 5.5 讨论

这一支付尝试与结果过程界定了客户、商户与支付基础设施之间的基础互动。通过将结果生成视为外生因素、将体验记录视为局部过程，该模型确保更高阶的行为动态源于累积的微观层面信号，而非对系统整体状况的直接观察。

接下来的小节将介绍这些记录下来的经历如何通过记忆、社会影响和商户信息传达而传播，进而产生回避行为和条件性流动性流出。

## 5.6 信任、创伤与谣言更新

客户通过有界记忆过程更新其对支付系统可靠性的内部认知。这些更新由直接交易结果、商户广播信号和社会接触所驱动。由此产生的动态会引入路径依赖和滞后效应，这对于回避和提款行为的延迟出现至关重要。

### 5.6.1 体验编码

对于每位客户 $i$ 在时间 $t$，若发生支付尝试，则令 $Y_i(t)$ 表示观察到的支付结果；否则令 $Y_i(t) = \varnothing$。结果被编码为带符号体验信号 $E_i(t)$，定义如下：

$$E_i(t) = \begin{cases} +1, & \text{if } Y_i(t) = \text{SUCCESS}, \\ -\alpha_f, & \text{if } Y_i(t) = \text{FAILURE}, \\ -\alpha_u, & \text{if } Y_i(t) = \text{UNKNOWN}, \\ 0, & \text{if } Y_i(t) = \varnothing, \end{cases}$$

其中 $\alpha_u \geq \alpha_f > 0$，这反映了一个经验观察：不确定结果通常被认为比明确失败更具破坏性。

### 5.6.2 创伤累积

创伤变量 $C_i(t)$表示累积的负面体验。其演变遵循：

$$C_i(t+1) = \min\left\{1,\ \rho_C C_i(t) + \gamma_C \cdot \mathbb{I}\big(E_i(t) < 0\big)\right\},$$

其中 $\rho_C \in (0,1)$ 控制记忆衰减，而 $\gamma_C > 0$ 控制单次不利体验的影响。

这一公式确保反复失败或不确定性会推动 $C_i(t)$趋近其上限，而孤立事件则会随着时间推移逐渐消退。

### 5.6.3 信任动态

信任 $T_i(t)$ 被建模为归一化体验信号与外部˜感知输入的有界移动平均。设 $E_i(t) \in [0,1]$ 表示原始体验信号的归一化版本，负面结果映射为较低的值。我们采用以下确定性归一化：

$$\tilde{E}_i(t) = \begin{cases} \dfrac{E_i(t) + \alpha_u}{1 + \alpha_u}, & \text{if } Y_i(t) \neq \varnothing, \\ T_i(t), & \text{if } Y_i(t) = \varnothing, \end{cases}$$

˜并在必要时将 $E_i(t)$ 截断至 $[0,1]$ 。

信任的演变如下:

$$T_i(t+1) = \rho_T T_i(t) + (1-\rho_T)\,\tilde{E}_i(t) - \beta_T C_i(t),$$

其中， $\rho_T \in (0,1)$控制信任持久性，而 $\beta_T > 0$ 则体现累积创伤导致的信任侵蚀。

每次更新后，信任值都会限制在区间 $[0,1]$ 内。

### 5.6.4 谣言形成

谣言 $R_i(t)$ 表示根据间接信号推断出的感知系统性风险。其更新方式为 s:

$$R_i(t+1) = \rho_R R_i(t) + (1-\rho_R)\,\Psi_i(t),$$

其中， $\rho_R \in (0,1)$ 是谣言持续性参数，而 $\Psi_i(t)$ 是下文定义的综合感知信号。

该综合信号聚合了商户广播和社会接触:

$$\Psi_i(t) = w_m \cdot \overline{B}_i(t) + w_s \cdot \overline{a}_i(t), \quad w_m + w_s = 1,$$

其中:

- $\overline{B}_i(t)$ 是客户 $i$ 常去的商户的平均广播严重程度,
- $\overline{a}_i(t)$ 是客户 $i$ 的邻居中当前处于规避状态的比例。

为便于聚合，广播状态会映射到归一化严重度尺度（接受 $=0$、降级$=0.5$、回退 $=1$）。

形式上，令 $\mathcal{N}(i)$ 表示客户 $i$ 在 $G$中的邻居集合，我们定义

$$\overline{a}_i(t) = \frac{1}{|\mathcal{N}(i)|} \sum_{j \in \mathcal{N}(i)} \mathbb{I}\{S_j(t) = \text{AVOIDING}\}.$$

这一表述反映了这样一个事实：当直接经验有限或模糊时，客户主要通过外部线索推断系统性健康状况。

### 5.6.5 行为模式转换

客户 行为模式根据应用于信任和创伤的阈值规则演变:

$$S_i(t+1) = \begin{cases} \text{OK}, & \text{if } T_i(t) - \kappa_C C_i(t) \geq \theta_i^{(1)}, \\ \text{FRUSTRATED}, & \text{if } \theta_i^{(2)} \leq T_i(t) - \kappa_C C_i(t) < \theta_i^{(1)}, \\ \text{AVOIDING}, & \text{if } T_i(t) - \kappa_C C_i(t) < \theta_i^{(2)}, \end{cases}$$

其中， $\theta_i^{(1)} > \theta_i^{(2)}$ 为异质客户阈值， $\kappa_C > 0$ 用于缩放创伤对有效信任的影响。

### 5.6.6 讨论

信任、创伤和谣言的耦合动态为系统引入了非线性和记忆。尤其是，基于阈值的模式转换意味着，交易成功概率的提升并不能立即恢复正常行为。相反，行为恢复取决于累积的创伤和谣言逐渐消退，由此产生的滞后效应将在第6节中正式分析。

### 5.7 商户广播动态与撤出机制 m

本小节说明商户如何根据观察到的交易结果更新广播状态，以及客户的提款决策如何由累积的行为压力内生地产生。

#### 5.7.1 商户运营评估

每个商户 $m \in \mathcal{M}$ 都会维护一个记录近期交易结果的滚动观测窗口。令 $A_m(t)$、$F_m(t)$ 和 $U_m(t)$ 分别表示商户 $m$ 在时间 $t$于此窗口内观测到的尝试次数、失败次数和未知结果数。

商户会计算本地退化比率：

$$\delta_m(t) = \frac{F_m(t) + \eta U_m(t)}{A_m(t) + \varepsilon},$$

其中，$\eta \in (0,1)$表示未知结果的相对权重，而 $\varepsilon > 0$ 用于避免除以零。

运营状态 $O_m(t)$根据阈值规则进行更新：

$$O_m(t) = \begin{cases} \text{ACCEPTING}, & \text{if } \delta_m(t) < \theta_m^{(1)}, \\ \text{DEGRADED}, & \text{if } \theta_m^{(1)} \le \delta_m(t) < \theta_m^{(2)}, \\ \text{FALLBACK}, & \text{if } \delta_m(t) \ge \theta_m^{(2)}, \end{cases}$$

采用商户特定阈值 $\theta_m^{(2)} > \theta_m^{(1)} > 0$。

#### 5.7.2 广播黏性与恢复延迟

外部可见的广播状态 $B_m(t)$不会瞬间跟随运营状态变化。相反，降级或回退广播会持续至少一段最小驻留时间，体现了标牌惯性、员工指导和保守风险管理。

令 $\tau_m(t) \ge 0$ 表示广播持续计时器。当 $O_m(t)$ 进入降级或回退状态时，$\tau_m(t)$ 会被设为正值。在 $\tau_m(t) > 0$期间，广播状态满足：

$$B_m(t) \in \{\text{DEGRADED}, \text{FALLBACK}\},$$

即使运营表现有所改善，情况仍然如此。计时器会随时间逐渐递减，且可能因外生通信质量而加速递减。

只有在 $\tau_m(t) = 0$ 且有足够的成功交易证据后，广播状态才会恢复为接受。此机制明确区分了技术恢复与商户层面的感知恢复。

#### 5.7.3 客户对商户广播的暴露

每位客户 $i$ 都会受到一组固定商户广播状态的影响，该商户子集由习惯性消费模式决定。令$\mathcal{M}_i$ 表示该子集。客户 $i$ 在时间 $t$ 感知到的平均广播严重程度记为 $B_i(t)$，并用于第 5.6 节定义的谣言更新。

#### 5.7.4 提款资格

提款被建模为一种条件性行为，只有在多个行为条件同时满足时才会发生。这确保流动性流出是持续压力产生的高阶效应，而非对孤立故障的即时响应。

客户 $i$ 在时间 $t$ 满足以下条件即可获得提款资格：

$$S_i(t) = \text{AVOIDING}, \quad C_i(t) \geq \theta_C, \quad R_i(t) \geq \theta_R,$$

其中， $\theta_C$ 和 $\theta_R$ 是全局阈值或异质性阈值，用于控制创伤敏感度和谣言敏感度。

#### 5.7.5 提款决策与流出

在满足提款资格的前提下，客户 $i$ 以以下概率发起提款：

$$\mathbb{P}(W_i(t) = 1) = \sigma(\alpha_R R_i(t) + \alpha_C C_i(t) - \alpha_T T_i(t)),$$

其中， $\sigma(\cdot)$ 是 Sigmoid函数， $\alpha_R$， $\alpha_C$， $\alpha_T > 0$ 是敏感度参数。

If 发生提款时，客户 $i$ 提取其剩余余额的一部分 ：

$$B_i(t+1) = B_i(t) - \omega_i B_i(t),$$

其中 $\omega_i \in$ (0,1)为个体提款比例。

时刻 $t$ 的系统总流出由下式给出：

$$W(t) = \sum_{i \in \mathcal{I}} \omega_i B_i(t) \cdot \mathbb{I}\{W_i(t) = 1\}.$$

#### 5.7.6 流出反馈

总流出 $W(t)$作为额外的系统性信号。大规模或加速的提款可能在后续时期促成谣言形成，即使支付成功率有所改善，也会强化人们感知到的不稳定性。

#### 5.7.7 讨论

粘性商户广播与阈值门控提款决策相结合，引入了一种延迟反馈结构。即使支付结果概率有所改善，残余的商户退化和累积的谣言仍可能维持提款资格。这一机制构成了第6节中对挤兑压力延迟峰值进行形式化分析的基础。

## 6 理论结果

本节介绍根据第 4 节和第 5 节所定义模型的结构推导出的理论结果。这些结果形式化阐释了有界记忆、基于阈值的行为与商户广播持续性如何共同导致延迟且非单调的系统性风险模式。证明以分析性概述的形式给出，并基于与仿真模型一致的明确假设。

### 6.1 假设

我们陈述主要结果所需的最小假设。

**A1 有界记忆**。 伤疤与谣言过程（$C_i(t)$ $R_i(t)$）遵循压缩更新规则，其持续性参数为 $\rho_C$， $\rho_R \in (0, 1)$，且输入为非负值，如第 5.6 节所定义。

**A2 阈值门控行为**。 只有当有效信任和记忆变量跨越固定阈值时，客户才会进入规避状态并具备提款资格。

**A3 粘性商户广播**。 商户广播状态具有持续性：即使运营恢复，降级或回退广播仍会在最小驻留时间内保持启用。

**A4 外生技术恢复**。 服务中断低谷之后，支付基础设施的结果概率（$p_s(t)$ $p_f(t)$ $p_u(t)$）会单调改善，且不受智能体行为影响。

这些假设反映了支付事件中经实证观察到的特征，并且第 7 节的仿真设计满足这些假设。

### 6.2 定理1：挤兑压力延迟峰值

**定理1 (**挤兑压力延迟峰值**)**。 令 $W(t)$ 表示时刻 $t$ 的总提款流出，并令

$$t_{\min} = \arg\min_t p_s(t)$$

表示支付成功概率最低的时刻（故障低谷）。在假设***A1–A4***下，存在中断与恢复轨迹，使得

$$\arg\max_t W(t) > t_{\min}.$$

也就是说，总体提款压力峰值严格晚于技术支付表现最差的时刻。

### 6.3 证明概要

我们分三步概述论证。

**步骤 1：记忆变量的滞后累积**。在假设 **A1** 下， $C_i(t)$ 和 $R_i(t)$ 都是由非负输入驱动的有界压缩过程。在中断区间内，不利的交易结果和降级的商户广播会为这些过程产生正输入。即使这些输入在 $t_{\min}$ 处达到峰值，由于持续性参数 $\rho_C$， $\rho_R > 0$， $C_i(t)$ 和 $R_i(t)$ 的累积通常仍会持续若干个时期。因此，对于一组不可忽略的客户而言， $C_i(t)$ 和 $R_i(t)$ 的最大值会在 $t > t_{\min}$ 时出现。

**步骤 2：技术恢复后的阈值跨越**。 根据假设 **A2**，提款资格取决于对 $C_i(t)$和 $R_i(t)$设定的阈值，以及行为模式。由于这些状态变量在 $t_{\min}$之后可能继续上升或维持在较高水平，因此即使支付成功概率有所改善，仍有相当比例的客户可能要到恢复阶段才跨越提款资格阈值。

**步骤 3：外部信号的持续性**。 假设**A3** 意味着，商户广播状态在 $t_{\min}$之后仍可能维持降级，从而持续为谣言形成提供正向输入。因此，感知系统性风险 $R_i(t)$的下降速度慢于技术故障概率。这种持续性扩大了故障低谷之后满足提款资格条件的客户范围。

综合这些步骤，对个体提款行为求和得到的总提款流出 $W(t)$，可以在严格晚于 $t_{\min}$时达到最大值。由此确立了该命题。

### 6.4 解释

定理1将技术与行为时间线之间的分离形式化。尽管支付基础设施可能迅速恢复，但由记忆和阈值支配的行为变量会延迟响应。商户广播持续性进一步放大了这一效应。因此，系统可能在恢复阶段而非运营表现最差的时刻表现出最高的流动性压力。

这一延迟峰值机制对客户参数的异质性具有稳健性，且不依赖于战略协调或完全信息。它仅源于有界记忆、局部信息和基于阈值的决策规则。

## 7 仿真设计

本节描述用于实例化第4节和第5节所定义模型的仿真设置。其目标并非针对某一特定机构进行校准，而是在异质且现实的条件下，对第6节所识别的定性机制进行系统评估。

### 7.1 人口与网络参数

模拟系统由 $N$ 个客户代理和 $M$ 个商户代理组成。客户嵌入在一个静态、无向的 Watts–Strogatz小世界网络中，该网络具有固定的平均度 $k$和重连概率 $\beta$。这种构造产生了较高的聚类系数和较短的平均路径长度，与实证观察到的社会互动模式一致。

在各项模拟中，网络参数保持不变，以便将行为动态与结构变化区分开来。通过在稳健性实验中改变 $\beta$，单独考察对网络拓扑的敏感性。

### 7.2 客户异质性

客户代理在以下几个方面存在异质性：

- 基准支付尝试倾向，
- 决定行为模式转换的信任阈值，
- 信任、创伤和谣言的记忆衰减率，
- 风险敏感度和取款敏感度，
- 初始存款余额和提款比例。

所有参数均从有界分布中独立抽取，这些分布旨在体现离散度，而非极端行为。没有任何客户能够观测到全局系统变量或支付基础设施的真实状态。

### 7.3 商户配置

为每位客户分配一小组固定的商户，以体现其习惯性消费模式。商户接触权重决定了支付尝试指向特定商户的可能性。

商户维护近期交易结果的滚动观测窗口，并依据第5.7节所述的阈值与持久性规则更新运营状态和广播状态。即使运营状况有所改善，广播持久性计时器仍会在客户感知中引入延迟恢复。

### 7.4 支付基础设施情景

支付基础设施被建模为一个外生随机过程，用于指定成功、失败和未知结果随时间变化的概率。情景的构建包括:

- 事件前稳定期,
- 性能退化与中断区间,
- 一个成功概率不断提高的恢复阶段,
- 需求峰值区间会在恢复期间放大交易量。

这些情景确保技术恢复不会与行为压力降低简单地同时发生，从而能够直接评估定理1所指出的延迟峰值机制。

### 7.5 模拟时间范围与初始化

模拟在固定的时间范围 $T$ 内运行，足以涵盖服务中断发生、恢复以及恢复后的行为动态。所有客户均以高信任度、创伤和谣言均为零的OK行为模式进行初始化。商户广播状态初始化为接受。

为考虑随机变化，每种情景均使用多个随机种子进行模拟。在比较政策干预时，采用使用相同随机种子的成对模拟，以确保差异源于模型机制，而非随机波动。

### 7.6 结果指标

每个时间步记录的主要系统级指标包括:

- 各行为模式下的客户占比,
- 总提款流出 $W(t)$,
- 峰值提款压力 $\max_t W(t)$,
- 模拟时域内的累积提款量。

这些指标旨在 与第6节分析的理论量直接对应 .

### 7.7 可复现性

所有模拟均采用离散时间基于主体模型实现，并明确设置随机种子、记录参数分布。附录提供了伪代码和参数表，以便其他研究人员复现并扩展研究。

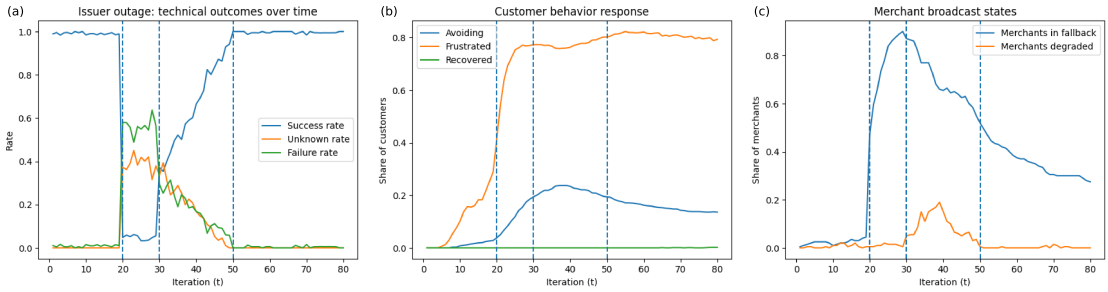


图1：支付中断与行为响应。支付成功概率（左轴）在服务中断期间降至最低，而客户回避和商户广播严重程度（右轴）随后达到峰值，并在恢复期间缓慢下降。

# 8 结果

本节报告根据第 4 节和第 5 节所述多主体模型得出的模拟结果。我们聚焦于四个问题：(i) 行为恢复是否滞后于技术恢复；(ii) 提款压力是否在故障低谷之后达到峰值；(iii) 商户广播持续性如何影响这些动态；以及 (iv) 支付替代如何影响恐慌和流动性结果。下文提及的所有图表均根据第 7 节所述模拟生成。

## 8.1 中断动态与行为滞后

图1概述了一个具有代表性的服务中断与恢复轨迹。面板（a）显示外生的支付基础设施结果：成功概率在中断区间内骤降，随后逐步恢复。面板（b）和（c）则分别展示相应的客户行为响应和商户广播状态。

客户回避在服务中断期间迅速上升，但支付成功率恢复后并不会立即下降。相反，处于规避状态的客户占比在故障低谷之后达到峰值，并随时间缓慢下降（图1b）。与此同时，商户广播状态在恢复阶段仍长时间处于回退或降级模式（图1c），持续释放负面感知信号。

总之，这些结果表明存在行为滞后：感知到的系统可靠性恢复速度显著慢于技术可靠性。

## 8.2 提款压力的延迟峰值

图2绘制了每个时间步的总提款流出以及服务中断时间线。尽管服务中断期间出现了严重的技术性能退化，但在早期阶段，提款仍微乎其微。只有在持续回避且记忆变量升高，使客户具备提款资格后，提款活动才会出现。

与定理1一致，最大提款压力严格出现在最低支付成功概率之后。在本次及所有其他已考察的运行中，流出峰值与恢复阶段重合，而非与故障低谷重合，这证实流动性压力是一种滞后的行为效应，而非对瞬时技术表现的直接反应。

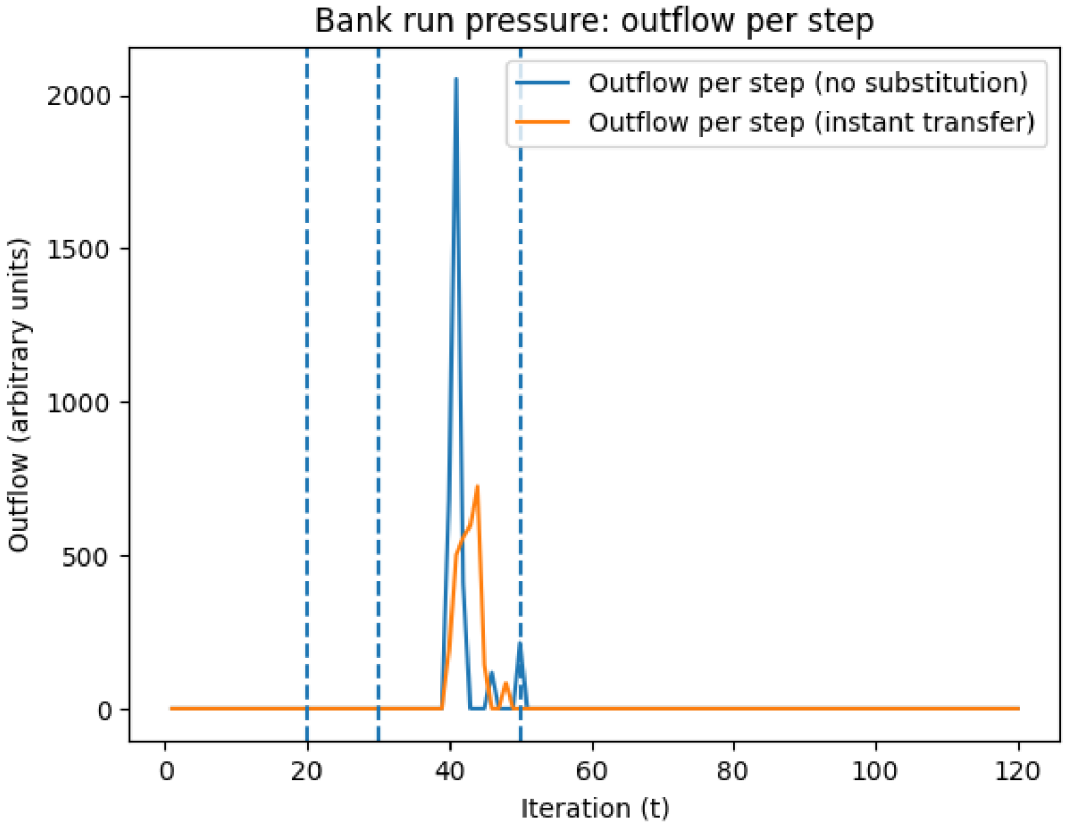


图2：提款压力延迟显现。总提款流出在故障低谷之后达到峰值，通常出现在恢复阶段，这证实了定理1。

### 8.3 商户广播持续性作为放大渠道 1

图3单独刻画了商户运营恢复与外部可见的广播恢复之间的分化。随着支付结果改善，运营回退相对较快地消退，而广播回退与降级状态则持续长得多的时间。

这种持续性维持了谣言形成，并延缓了行为正常化。没有广播黏性的模拟显示，回避程度下降得明显更快，累积提款量也更低（为简洁起见，省略相关结果），这表明商户信息传达是一个关键的放大渠道，有别于社会传染和基础设施可靠性。

### 8.4 支付替代对客户回避的影响

图4比较了采用和未采用即时转账替代时的客户规避行为轨迹。启用替代后，回避客户的峰值比例始终有所下降，同时规避曲线的整体形态保持不变。

这一效应源于，成功的替代将原本负面的银行卡支付体验转化为正向强化的成功信号，从而减轻局部传染，并在事件最严重时缓解恐慌。在成对模拟中，替代使峰值回避降低约一至两个百分点。

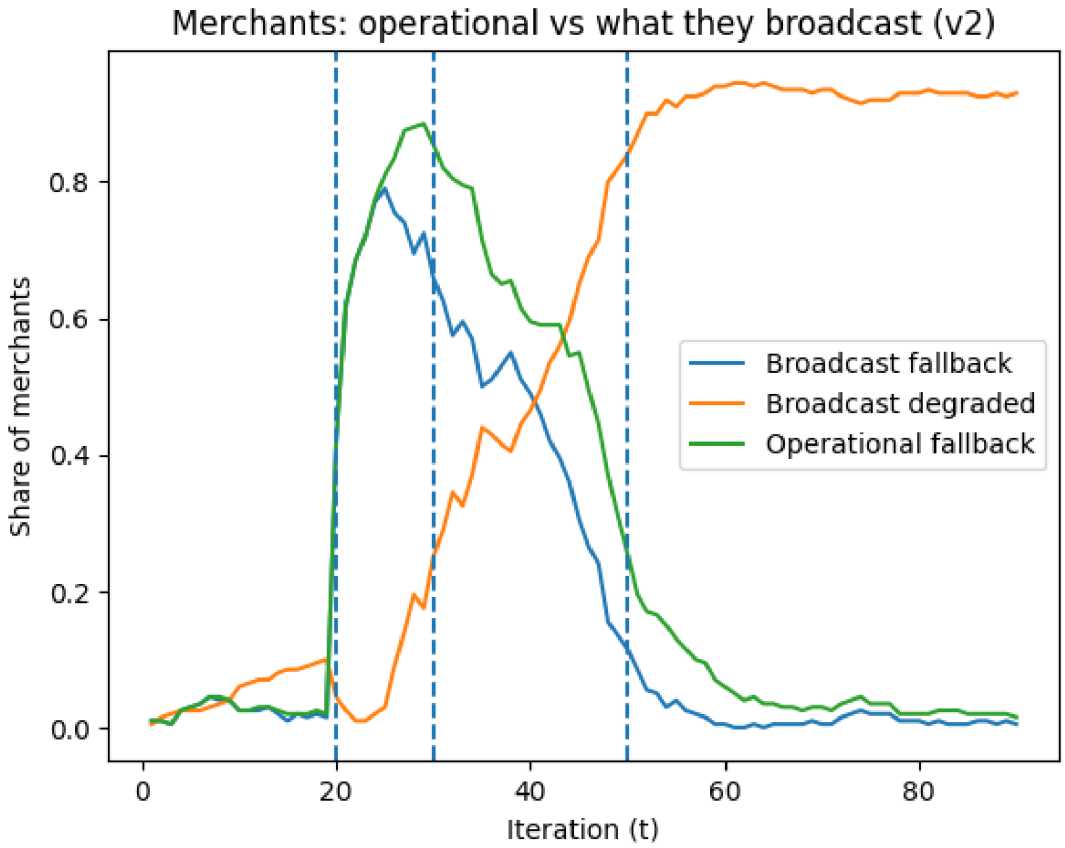


图3：商户广播持续性的影响。即使运营恢复，持续的降级广播仍会维持较高的回避水平；而立即清除广播则能更快实现行为正常化。

### 8.5 L替代对流动性的影响：峰值效应与累积效应 s

图5考察了替代对取款动态的影响。面板(a)显示，与无替代基线相比，即时转账的可用性降低了峰值提款压力。面板(b)显示累积提款量占总余额的比例。

虽然替代能减少峰值流出，但其对累计提款的影响并非单调。在商户广播持续性符合现实的情景中，即使行为风险仍处于较高水平，替代仍能让客户保持运营参与。因此，部分客户在资格阈值被突破后仍有能力进行提款，尽管峰值恐慌有所减轻。

### 8.6 替代使用动态

图6展示了替代渠道（面临不利银行卡结果的客户使用即时转账）使用率随时间的变化。在银行卡不确定性和失败加剧期间，使用率会上升，但这种使用是间歇性的，而非持续性的。

这一模式有助于解释为何替代能够降低峰值规避（图 4），却无法完全消除累积的行为压力。替代会间歇性地带来“成功结果”，在压力峰值时抑制传染效应，但持续出现的失败和未知结果仍会

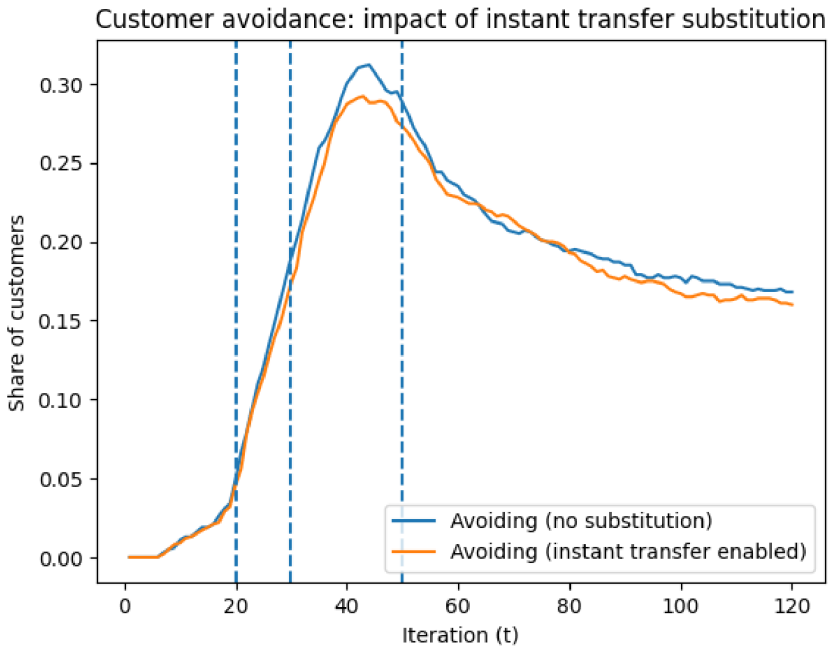


图4：有无支付替代时的峰值规避。即时转账的可用性在各随机种子中持续降低峰值规避。

不断累积创伤并助长谣言传播，尤其是在商户广播仍处于降级状态时。

### 8.7 跨随机种子的稳健性

图7汇总了十二个随机种子的稳健性，采用基线与替代条件下（a）峰值规避、（b）峰值提款压力和（c）累计挤兑规模的分布。

在各随机种子中，替代持续使峰值规避分布下移（图7a）。在替代条件下，峰值挤兑压力的中位数也更低，但尾部事件和离群值仍然存在（图7b）。累计挤兑规模呈现类似模式：替代降低了结果的中位数，但并未消除最坏情形的实现（图7c）。

总体而言，这些分布表明，时间序列结果中报告的定性效应并非单一随机实现的人为假象。尤其是，峰值延迟行为在各随机种子中均持续存在，从而支持定理1所形式化机制的稳健性。

### 8.8 结果总结

结果支持三项核心发现。第一，由于有界记忆和广播持久性，行为恢复滞后于技术恢复。第二，总体提款压力在服务中断低谷之后达到峰值，且往往发生在恢复期间。第三，支付替代能够降低峰值恐慌，但除非配合主动减少谣言和创伤的机制，否则无法保证累积流动性流出减少。

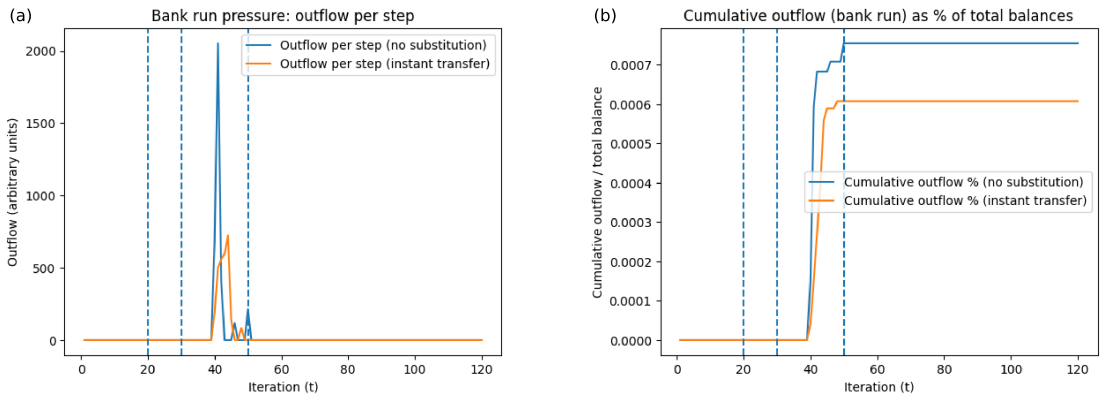


图5：支付替代对流动性的影响。尽管替代会降低峰值恐慌，但在商户广播持续性符合现实情况时，它对累计提款的影响并非单调。

# 9 讨论

本节解读第8节呈现的结果，并讨论其对支付系统设计、事件响应和金融稳定性分析的启示。我们着重关注机制而非数值大小，因为该模型旨在解释，而非预测。

## 9.1 技术恢复与行为恢复的分离

本研究的一项核心发现是，技术恢复与行为恢复之间存在系统性的分离。即使支付成功概率恢复到事件发生前的水平，由于有界记忆、阈值效应以及商户广播的持续影响，客户回避和提款压力仍然居高不下。

这种分离意味着，正常运行时间、授权成功率或平均恢复时间等传统运营指标，不足以作为系统性风险的有效指标。行为变量的演变速度较慢，并且在恢复阶段可能主导风险动态。从系统视角来看，技术指标恢复正常并不意味着事件结束；只有当行为状态趋于稳定时，事件才算结束。

## 9.2 为什么峰值风险出现在“状态绿色”之后

定理1所识别并经实证确认的提款压力延迟峰值，挑战了事件管理中的一个常见假设：风险最高时恰逢技术表现最差之际。

在模型中，提款需要持续接触不利信号，并且跨越多个阈值。这些条件在服务中断刚开始时很少同时满足。相反，它们会随着时间推移逐渐累积，并且往往在恢复期间达到临界水平；此时，客户仍受到降级的商户信息传达和社会确认的影响，同时仍有能力转移资金。

这一机制从形式上解释了，为什么系统被宣布恢复时，流动性压力反而可能加剧。

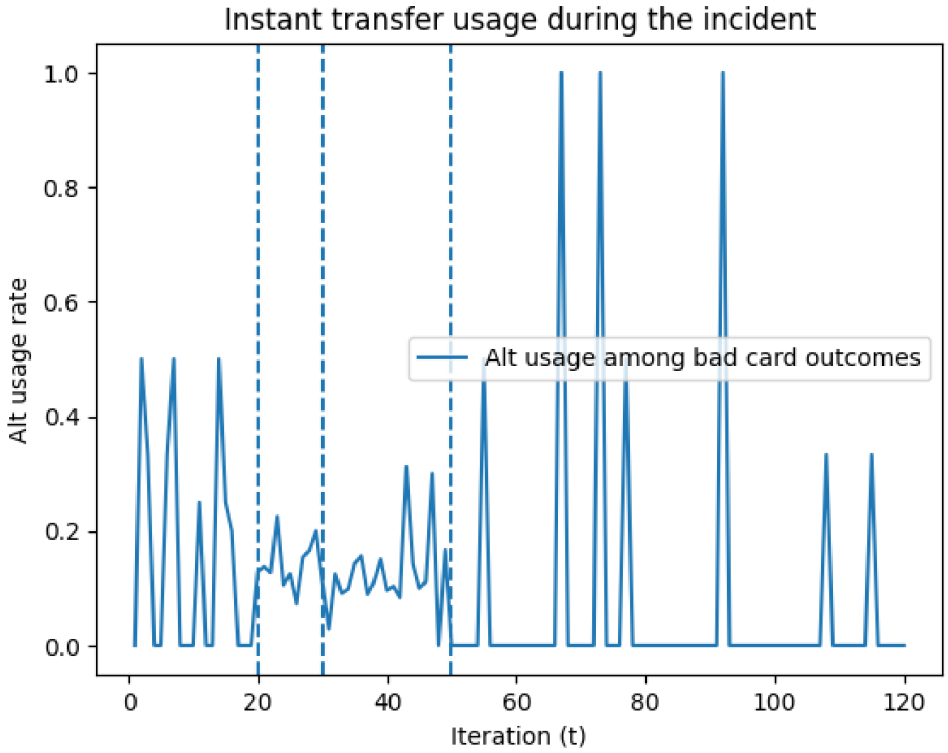


图6：事件期间即时转账替代的使用情况。图中比率衡量了不利的银行卡结果中，随时间变化的替代使用比例。

### 9.3 商户广播作为结构性放大因素

商户行为在模型中发挥着独特且具有重要结构意义的作用。广播持久性如同一种长记忆外部场，即使不受社会传染和基础设施可靠性的影响，也能持续推动谣言形成。

从运营角度看，这表明商户指导和标牌并非次要的沟通材料，而是影响客户感知的首要因素。在商户广播难以迅速恢复正常的环境中，除非配合协调一致的商户沟通策略，否则对冗余和故障切换的技术投资可能会产生递减的回报。

### 9.4 解读支付替代的作用

此处建模的支付替代，即作为银行卡支付替代方案的即时转账，呈现出双重效应。一方面，在银行卡性能下降期间，替代方案通过带来成功的交易体验，持续减少峰值规避并缓解恐慌。另一方面，在现实的广播持久性条件下，替代方案并不能可靠地减少累计提款。

这种表面上的悖论之所以出现，是因为替代维持了运营参与度，而行为风险仍然居高不下。原本可能退出的客户仍保持活跃，并在跨越资格阈值后能够执行提款。因此，替代能够缓解急性恐慌，但其本身并不能消除潜在挤兑风险。

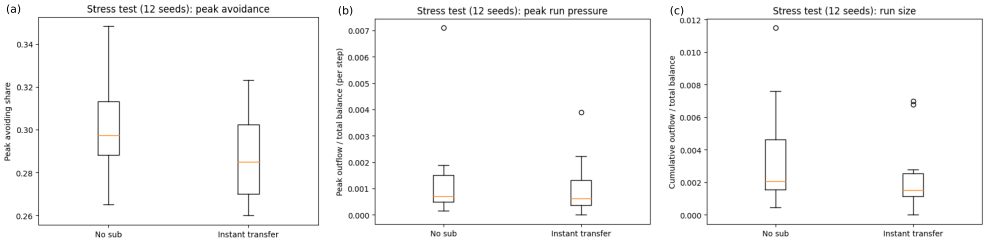


图 7：不同随机种子下的稳健性。(a) 峰值规避、(b) 峰值提款压力和 (c) 累计挤兑规模的分布表明，不同随机实现下的定性行为一致。

从设计角度看，应将替代视为一种缓解恐慌的机制，而非完整的风险控制。

### 9.5 事件响应与沟通的启示

模型凸显了恢复后沟通的重要性。由于谣言和创伤消退缓慢，恢复期间的沉默或含糊其辞可能被误解为隐瞒，从而加剧感知系统性风险。

因此，有效的事件响应不应局限于技术补救，还应包括明确的安抚、透明的事后分析报告以及协调一致的商户信息传达。在模型中，这些干预可被视为加速谣言和创伤消退的机制，从而缩短行为风险持续的时间并降低其程度。

### 9.6 监管与研究启示

对于监管机构而言，研究结果表明，运营韧性框架应明确考虑行为滞后和信息传播。如果忽略行为放大渠道，那么仅关注交易量或结算延迟的压力测试可能会低估尾部风险。

从研究视角来看，该模型在银行挤兑理论与操作风险分析之间架起了一座桥梁。它表明，微观层面的支付体验如何能够在无需资产负债表恶化或战略协调的情况下，产生宏观层面的流动性压力。

### 9.7 范围与解释

这些发现应被理解为定性而非定量预测。该模型并不试图复现任何特定机构或事件。相反，它分离出那些很可能在广泛的数字支付环境中发挥作用的机制。

尽管存在抽象，理论结果与仿真结果之间的一致性表明，延迟行为风险是社会技术支付系统的一个稳健特征，而非特定参数选择的产物。

## 10 局限性与未来工作

尽管所提出的模型捕捉了将支付中断与信任侵蚀及流动性压力联系起来的关键行为与信息机制，但仍应承认其存在若干局限。这些

这些局限性也提示了未来研究的方向。

### 10.1 缺乏资产负债表与银行间动态

模型未表示银行资产负债表、银行间风险敞口或流动性管理行动。提款被视为直接的资金流出，不考虑融资约束、监管缓冲或央行干预所产生的反馈。因此，该模型并非旨在预测偿付能力结果或银行间网络中的系统性级联。

未来的研究可以整合简化的资产负债表动态，或将当前行为模型与现有的银行间传染框架相耦合，以研究存款人行为与机构流动性管理之间的反馈。

### 10.2 简化的客户决策

客户代理具有有限理性，并遵循基于阈值的规则。尽管这一结构能够刻画非线性响应与滞后效应，但它抽象掉了策略推理、学习，以及固定参数分布之外的信息处理异质性。

扩展研究可以探索自适应阈值、基于学习的更新，或依据支付使用情况及事件期间存款人反应的实证数据所启发的其他行为模型。

### 10.3 商户行为的简化表示

商户代理采用简化的运营评估和广播规则进行建模。现实中的商户行为受到合同义务、收单机构指导以及异质的风险承受能力影响，而这些因素并未得到明确体现。

未来的研究可以纳入商户与收单机构的互动、合同激励或不同类型的商户，以更好地反映实践中观察到的受理行为多样性。

### 10.4 外生支付基础设施

支付基础设施被视为独立于智能体行为的外生随机过程。现实中，运营表现可能因负载、重试或客户行为触发的风险控制措施而内生地恶化或恢复。

将基础设施动态与智能体行为相耦合，有助于研究行为响应与技术表现之间的反馈循环，包括过载导致的故障和恢复延迟。

### 10.5 数据与校准

该模型并未针对任何特定机构或历史事件进行校准。参数的选取旨在反映合理的范围，而非经验估计。因此，数值结果应作定性解读。

未来工作的重要方向之一，是利用事件日志、交易级数据或受控实验进行校准和验证。此类数据可用于估算记忆衰减率、广播持久性和替代使用模式。

### 10.6 额外渠道与政策干预

当前模型聚焦于银行卡支付和单一替代渠道。其他渠道，如现金取款、移动钱包或点对点支付，并未明确纳入模型。同样，取款限额、担保或公共沟通策略等政策干预也未被内生化。

未来的扩展研究可以纳入多种渠道和明确的政策行动，以评估它们在缓解行为风险和流动性压力方面的相对成效。

## 11 结论

本文研究了支付中断及其恢复如何通过信任侵蚀、商户信号传递和社会传染，导致延迟行为风险与流动性压力。我们利用小世界网络上的多智能体模拟，将微观层面的支付体验与宏观层面的取款动态联系起来，而不依赖资产负债表恶化或战略协调。

我们发现，有界记忆、基于阈值的行为以及持续的商户广播共同导致技术恢复与行为恢复之间出现系统性分离。在温和且符合现实的假设下，总体提款压力可能在故障低谷之后达到峰值，包括支付系统已在技术层面恢复的时期。这一延迟峰值机制通过分析方法加以形式化，并在一系列模拟场景中得到实证验证。

模拟结果进一步表明，在现实条件下，支付替代能够降低峰值恐慌，但无法可靠地消除累积流动性流出。替代措施能够维持运营连续性，但其本身无法消除累积的创伤和谣言。这些发现表明，评估韧性机制时，不应只看其恢复功能的能力，还应考察其对行为记忆和认知的影响。

本文提出的框架通过明确整合支付可靠性、商户行为和社会影响，为银行挤兑、运营韧性以及基于智能体的金融建模相关文献作出贡献。由此，它凸显了通常处于传统运营或流动性压力测试范围之外的行为放大渠道。

从实践角度看，研究结果凸显了恢复后沟通、协调一致的商户信息传达以及行为指标在事件响应中的重要性。宣布系统已恢复并不意味着系统性风险已经消退。管理行为风险的尾部与恢复技术表现同样关键。

未来研究可通过纳入资产负债表动态、内生基础设施绩效和经验校准来扩展这一框架。尽管存在抽象之处，该模型仍为研究日益数字化的金融环境中支付系统韧性的行为维度提供了可处理且可扩展的基础。

## 参考文献

[1] Rachel Adeney、Adrian Hitchins、Claudia Lane、Harsh Mehta和Alison Quashie。《宏观审慎框架下的运营韧性》。金融稳定论文第50号，英格兰银行，2024年8月。发表于2024年8月27日。

[2] 巴塞尔银行监管委员会。《运营韧性原则》。技术报告，国际清算银行，2021年3月。BCBS，2021年3月。

[3] J. Anthony Cookson、Corbin Fox、Javier Gil-Bazo、Juan F. Imbet 和 Christoph Schiller。《社交媒体作为银行挤兑催化剂》。技术报告，FDIC，2023年4月。工作论文日期为2023年4月18日；后续版本发表于期刊。[4] Douglas W. Diamond 和 Philip H. Dybvig。《银行挤兑、存款保险与流动性》。《政治经济学杂志》，91(3):401–419，1983年6月。[5] Toni Ricardo Eugenio dos Santos 和 Marcio Issao Nakane。《动态银行挤兑：一种基于主体的方法》。工作论文系列第465号，巴西中央银行，2017年。[6] Mark Granovetter。《集体行为的阈值模型》。《美国社会学杂志》，83(6):1420–1443，1978年5月。[7] Tanai Khiaonarong、Harry Leinonen 和 Ryan Rizaldy。《数字支付中的运营韧性：经验与问题》。国际货币基金组织工作论文 WP/21/288，国际货币基金组织，2021年12月。[8] Stefan W. Schmitz 等。《奥地利大额支付系统 ARTIS 中的操作风险与传染效应》。金融稳定报告，专题，奥地利国家银行（OeNB），2006年。通常引用为 Schmitz 等（2006）；PDF 收录于 OeNB《金融稳定报告》第11期。

[9] Duncan J. Watts 和 Steven H. Strogatz。《小世界》网络的集体动态。《自然》，393(6684):440–442，1998年6月。

# A 附录

## A.1 仿真伪代码

算法1概述了全文使用的多主体仿真 .

## A.2 模型参数

表1概述了模型的主要参数。在每次仿真挤兑过程中，所有参数均保持固定，但在不同实验之间可能有所变化。

## A.3 可复现性说明

所有模拟均使用明确指定的随机种子执行。配对实验（例如，启用和不启用替代的实验）使用相同的随机种子，以隔离因果效应。参数值的选取旨在突出定性动态，而非针对特定机构进行校准。每个时间步的计算复杂度与主体和商户的数量呈线性关系，为 O(N + M)，因为所有更新均为局部更新，无需进行全局优化或不动点计算。

**算法1** 支付中断与恢复的多智能体仿真

初始化客户代理，设置为 $(T_i(0)\ C_i(0)\ R_i(0)\ S_i(0)\ =$ 正常 $\ B_i(0))$
初始化商户代理，设置为 $\ O_m(0) = B_m(0)\ =$ 接受
生成瓦茨–斯特罗加茨社交网络 $\ G = (\mathcal{I}\ E)$
**对** $\ t = 1$ 至 $\ T$ **循环执行**
    设置基础设施结果概率 $(p_s(t)\, p_f(t)\ p_u(t))$
    **对于**每个客户 $\ i$**执行**
        抽取支付尝试 $\ A_i(t)$
        **如果** $\ A_i(t) = 1$ **则**
            选择商户 $\ m \in \mathcal{M}_i$
            抽取结果 $Y_i(t)$
            记录经验信号 $\ E_i(t)$
        **结束条件判断**
    **结束循环**
    **遍历** 每个商户 $\ m$**执行**
        更新运营状态 $\ O_m(t)$
        更新广播状态 $B_m(t)$
    **结束循环**
    **对于**每位客户 $\ i$**执行**
        更新 $\ C_i(t)\ T_i(t)\ R_i(t)\ S_i(t)$
        **如果**满足提款资格**则**
            抽取提款决策 $\ W_i(t)$
            **如果** $\ W_i(t) = 1$ **则**
                减少余额 $\ B_i(t)$
            **结束如果**
        **结束如果**
    **结束循环**
    记录系统指标
**结束循环**

表1：关键模型参数及范围

| 符号 | 描述 | 典型范围 |
|---|---|---|
| $N$ | 客户数量 | $10^3$–$10^4$ |
| $M$ | 商户数量 | $10^2$–$10^3$ |
| $k$ | 平均社会度 | 6–12 |
| $\beta$ | 网络重连概率 | 0.05–0.2 |
| $\lambda_i$ | 基线支付尝试率 | $[0.1, 0.4]$ |
| $\rho_C$ | 创伤记忆持续性 | 0.9–0.99 |
| $\rho_T$ | 信任持久性 | 0.8–0.95 |
| $\rho_R$ | 谣言持续性 | 0.9–0.99 |
| $\gamma_C$ | 伤痕增量 | 0。05–0。2 |
| $\alpha_f$ | 失败严重性权重 | 0.5–1.0 |
| $\alpha_u$ | 未知严重性权重 | 0.8–1.2 |
| $\theta_C$ | 伤痕阈值（提款） | 0.4–0.7 |
| $\theta_R$ | 谣言阈值（提款） | 0.4–0.7 |
| $\theta_i^{(1,2)}$ | 信任阈值 | 异质的 |
| $\omega_i$ | 撤回比例 | 0.05–0.3 |
| $\tau_m$ | 广播持续时间 | 5–20 个步骤 |
| $D(t)$ | 需求乘数 | 1–2 |