

参赛学生姓名：赵嘉妮、宁亮钦

中学：上海交通大学附属中学

省份：上海市

国家/地区：中国

指导老师姓名：林小萍

指导老师单位：上海交通大学附属中学

论文题目：稳定币脱锚危机中的 AMM 费用-延迟菜单
筛选机制：套利损失控制与清算连续性

稳定币脱锚危机中的 AMM 费用-延迟菜单筛选机制： 套利损失控制与清算连续性

赵嘉妮、宁亮钦

摘要：稳定币脱锚期间，自动做市商（AMM）的链上报价可能滞后于外部市场价格变化，使套利者能够利用旧报价从流动性提供者处提取价值；但统一提高交易费用或统一延迟执行，又可能阻碍具有严格时间约束的清算等关键交易。由于协议无法直接观察交易动机，如何在交易类型隐藏的条件下降低套利损失并维持关键交易连续性，构成一个市场设计问题。

本文构造一种费用-延迟双通道筛选机制：低费常规通道延迟执行，高费优先通道提供近即时执行，使交易者依据自身即时收益和等待成本进行自我选择。本文建立隐藏交易类型下的机制设计模型，并刻画目标配置的激励相容、参与及失效条件。

理论分析表明，时间成本异质性可以形成单一费用之外的额外筛选路径，使套利者转向低费延迟通道或退出，而时间敏感的清算者选择高费近即时通道；双通道能够覆盖单一费用可实现的分离状态，并在满足相应条件的部分市场状态中实现单一费用无法完成的目标配置。在给定最低清算连续性约束后，机制设计问题进一步转化为费用差与执行延迟的联合选择，以最小化剩余套利损失。

本文基于 2023 年 USDC 脱锚期间的 Uniswap v3 USDC/WETH 0.05% 池进行历史路径评价，并以标准化 Model L 情景检验时间敏感清算机会的执行连续性。在共同测试样本上，费用-延迟双通道相较无附加防御将剩余套利损失降低 82.68%，同时保持 30/30 的 Model L 覆盖，其 RAL 控制也优于本文的统一固定费与三档状态依赖动态费基线。机制分解表明，等待后的重新报价是历史路径中 RAL 下降的直接来源，而费用差与清算时间成本共同影响交易分流。稳健性分析进一步显示，双通道的相对优势主要集中于高损失尾部套利机会。

本文表明，在交易类型不可直接观察且不同类型具有异质时间成本的 AMM 市场中，执行速度可以与费用共同构成筛选工具。稳定币脱锚是这一冲突尤为突出的应用环境；从市场设计角度看，在维持关键金融功能连续性的约束下控制有害价值提取，为危机状态下的可编程交易机制提供了一条经济学路径。

关键词：信息不对称；筛选机制；市场设计；稳定币脱锚；自动做市商；去中心化金融

目录

术语与缩写表

3

第一章 引言

4

1.1 研究背景：稳定币与数字金融基础设施	4
1.2 脱锚风险与典型危机	4
1.3 AMM、LP 损失与清算连续性	4
1.4 研究问题：统一费率下的结构性冲突	5
1.5 时间机制的市场设计启发	6
1.6 双通道筛选机制与研究问题	6
1.7 本文贡献	7

第二章 相关工作与机制来源

8

2.1 稳定币脱锚与跨市场价格调整	8
2.2 AMM 中的 LP 损失与手续费防御	8
2.3 时间机制与批量交易设计	9
2.4 筛选机制与价格-等待时间菜单	9
2.5 DeFi 清算与本文研究缺口	10

第三章 机制设计与模型设定

11

3.1 双通道筛选机制概述	11
3.2 模型场景与参与者	11
3.3 信息结构、状态更新与执行规则	12
3.4 收益、费用与时间风险	13

第四章 费用-延迟菜单的自我筛选与可实施性

16

4.1 时间风险与类型异质性	16
4.2 目标自我筛选与激励条件	17
4.3 定向筛选的存在条件	17
4.4 两条实现路径	18
4.5 经济机制、可实施区域与失败边界	19
4.6 与单一费用机制的可实施性比较	20
4.7 信息与清算约束下的稳健机制选择	22

第五章 实验设计

25

5.1 数据与样本窗口	25
5.2 样本构建与划分	27
5.3 比较机制与执行规则	29
5.4 参数设定与验证集选择	31
5.5 评价指标	33

第六章 实验结果

35

6.1 主要结果	35
6.2 机制分解	36
6.3 稳健性检验	37

第七章 结论与讨论

40

7.1 主要结论	40
7.2 经济与治理含义	40
7.3 研究边界与未来方向	41

附录 A 第四章证明与补充技术细节

46

术语与缩写表

缩写/术语	英文全称	中文含义
AMM	Automated Market Maker	自动做市商
LP	Liquidity Provider	流动性提供者
DeFi	Decentralized Finance	去中心化金融
DEX	Decentralized Exchange	去中心化交易所
CEX	Centralized Exchange	中心化交易所
RAL	Residual Arbitrage Loss	剩余套利损失
LVR	Loss-versus-Rebalancing	损失相对再平衡
USDC	USD Coin	美元稳定币 USDC
WETH	Wrapped Ether	封装以太币
ETH	Ether	以太币
USD	United States Dollar	美元
bps	basis points	基点, 1 bps = 0.01%
MiCA	Markets in Crypto-Assets Regulation	欧盟《加密资产市场条例》
GENIUS Act	Guiding and Establishing National Innovation for U.S. Stablecoins Act	美国《GENIUS Act》稳定币法案
SVB	Silicon Valley Bank	硅谷银行
UTC	Coordinated Universal Time	协调世界时
VWAP	Volume-Weighted Average Price	成交量加权平均价
MAE	Mean Absolute Error	平均绝对误差
FM-AMM	Function Maximizing Automated Market Maker	函数最大化自动做市商
am-AMM	Auction-Managed Automated Market Maker	拍卖管理型自动做市商
CoW AMM	CoW Automated Market Maker (CoW = Coincidence of Wants)	CoW 自动做市商

注：模型中的 A/L 参与者符号、 $P/R/E$ 行动符号及其他参数符号见表 3.1，此处不重复列示。

第一章 引言

1.1 研究背景：稳定币与数字金融基础设施

稳定币已成为去中心化金融市场中的重要结算与价值交换工具。由于其价值通常与法定货币挂钩，稳定币相较于比特币等价格波动较大的加密资产，更适合承担交易计价、资产转移、抵押和清算等货币功能。[1]

近年来，多个国家和地区开始围绕稳定币的发行、储备、赎回及支付用途建立监管框架，欧盟《加密资产市场条例》(MiCA) 中针对资产参考代币和电子货币代币的规定已于 2024 年 6 月 30 日起适用；香港于 2025 年 8 月实施《稳定币条例》，建立法币稳定币发行人发牌制度；美国也于同年通过《GENIUS Act》，确立支付稳定币发行人的联邦监管框架。[2, 3, 4] 这些政策进展表明稳定币正在逐步由加密货币市场内部的交易工具，转变为连接链上金融活动与传统金融系统的数字化媒介。

1.2 脱锚风险与典型危机

稳定币在大多数时期围绕其目标价格交易，但这种价格锚定并非绝对稳定。在市场压力、储备资产风险或赎回信心下降时，稳定币的二级市场价格可能显著偏离其目标锚定价格，这种现象通常被称为稳定币脱锚。对于去中心化市场而言，稳定币脱锚可能引发单边交易、池内资产比例失衡、套利流增加和流动性撤出，从而放大流动性提供者 (LP) 的损失，并影响依赖该稳定币价格和流动性的清算交易。美联储指出，不同结构的稳定币均曾在市场压力期间出现脱锚，其背后的风险来源包括储备资产、一级赎回渠道与二级市场流动性之间的错配。[5, 6]

以 USDC 为例，2023 年 3 月，发行方 Circle 披露约 33 亿美元储备资产存放于已被接管的硅谷银行，引发市场对储备可得性和赎回能力的担忧。USDC 的二级市场价格一度跌至约 0.87 美元，并在美国政府宣布保障硅谷银行存款人权益后逐步恢复至接近 1 美元。[7, 8, 5] 该事件也是本文后续历史机制评价所使用的危机场景。

将稳定币纳入金融监管体系，可以改善发行人准入、储备透明度和赎回规则，但不能自动消除二级市场中的流动性冲击、价格偏离和挤兑风险。相反，随着稳定币的应用范围扩大，并与支付、交易、抵押和传统金融市场形成更深联系，同等规模的脱锚事件可能波及更多用户与金融协议。近期国际研究也开始关注稳定币活动向传统外汇和金融市场传导的可能性。[6, 9] 因此，研究稳定币危机中的价格稳定、流动性保护和清算连续性，仍然具有重要的金融基础设施意义。

1.3 AMM、LP 损失与清算连续性

自动做市商 (Automated Market Maker, AMM) 是一种由智能合约执行的链上交易机制。它通过管理由流动性提供者 (LP) 存入的资产池，并按照预设的定

价规则，自动计算不同资产之间的交换价格和成交数量。以常见的恒定乘积模型为例，池内两种资产的储备数量满足

$$x \cdot y = k.$$

交易者直接与流动性池交换资产，每笔交易都会改变池内资产比例和后续交易价格。需要说明的是，恒定乘积公式只是 AMM 的一种典型形式，并非所有 AMM 都采用完全相同的定价规则。[10, 11, 1]

AMM 通常不会主动读取其他交易市场的实时价格，而是通过用户交易不断调整池内报价。当池内价格与外部市场价格出现差异时，套利者会在价格较低的市场买入、在价格较高的市场卖出，使不同市场的报价逐渐接近。在正常时期，这一过程有助于价格校准；但在稳定币快速脱锚时，外部市场价格可能已经下降，而 AMM 仍按照相对滞后的价格交易。套利者此时可以利用价格差异，将正在贬值的稳定币卖入流动性池，并换走价值相对稳定的另一类资产。由此，LP 可能被动持有更多贬值资产，并承担额外损失。[12, 13]

另一方面，AMM 提供的连续交易能力也可能支持危机期间的清算。在去中心化借贷协议中，当借款人的抵押品价值下降、无法充分覆盖其债务时，清算者可以代替借款人偿还部分债务，并获得相应抵押品和清算奖励，从而降低协议形成坏账的风险。AMM 本身不负责判断某个借款头寸是否需要清算，但清算者通常需要通过 AMM 取得用于偿债的资产，或者出售清算后获得的抵押品。[14, 15, 16]

因此，AMM 在危机中具有双重作用：一方面，它可能成为价格冲击传入链上市场并造成 LP 损失的渠道；另一方面，它也是维持资产兑换和清算执行的重要流动性基础设施。

1.4 研究问题：统一费率下的结构性冲突

本文聚焦于稳定币脱锚情境下的一个两难问题：一方面，遏制利用 AMM 滞后报价获利的有毒套利流，保护流动性提供者（LP）的利益；另一方面，保障必要清算交易的顺利执行。有毒套利流利用池内报价相对于外部市场调整较慢的时刻，在链上交易市场（DEX）与中心化交易所（CEX）等外部市场之间进行低买高卖，将更多正在贬值的资产卖入池中，并换走价值相对稳定的资产，使 LP 承担因滞后报价产生的额外损失。[12, 13] 与之不同，危机时刻的清算流承担偿还高风险债务、处置抵押品和减少协议坏账的重要职责，从而维护借贷协议的正常运行。[15, 16]

同时达成这两个目标的矛盾在于，AMM 通常只能观察交易金额、方向、提交时间和当时的市场状态，无法直接判断每笔交易的真实性质或目的。某些行为特征虽然能够提供有限信号，但难以实现高准确度的区分：利用价差获利的套利交易与时间敏感的清算交易都可能需要快速执行，并可能表现出方向集中或交易规模较大的特点。因此，仅通过交易者身份或表面行为对两类交易进行直接分类并不可靠，需要寻找能够使不同类型交易者根据自身收益和时间成本作出不同选择的筛选机制。

从市场设计角度看，近即时执行是一项具有额外价值的服务条件，因为它能够帮

助参与者避免等待造成的收益损失。若交易功能可以直接观察，机制可以按类型配置不同执行条件；现实中的类型不可观察使这种直接配置不可行，因此本文考察能否利用公开的费用与等待条件形成激励相容的自我选择。

一种常见且具有代表性的防御思路是根据市场状态动态调整手续费。当市场波动、外部价格变化或池内风险上升时，提高费率可以降低部分套利交易的收益并保护 LP，但也会同时提高其他交易的执行成本。已有研究表明，动态手续费能够在一定程度上减少套利损失并改善 LP 收益，因此动态手续费构成本文的重要比较基线。[17, 18]

然而，如果机制仍然只提供一个对所有交易统一适用的手续费率，这一结构性冲突仍然存在：费率过高虽然能够抑制部分套利流，却可能使部分时间敏感的清算交易失去执行收益；费率过低虽然有利于维持清算参与，却可能不足以限制利用滞后报价获利的套利交易。其根本原因在于，统一费率只能利用交易者对价格成本的差异，却无法进一步利用不同交易类型对等待和执行时效的不同敏感程度。因此，仅依靠单一费用维度难以在危机状态下稳定地区分具有不同经济功能的交易需求。如何在无法直接观察交易真实类型的情况下，引入额外的筛选维度，使不同交易者根据自身收益与时间成本自主选择执行方式，是本文后续机制设计所考虑的问题。

1.5 时间机制的市场设计启发

传统金融市场中的熔断与停牌、集合竞价、频繁批量拍卖和速度缓冲表明，时间可以被主动用作市场设计变量，通过改变交易执行时点影响信息吸收、价格形成与速度竞争。[19, 20, 21, 22, 23, 24] 这些机制通常对触发范围内的订单统一改变执行过程，而本文关注的区别是把不同费用与执行速度组成可选择的服务条件，使交易者依据自身收益和等待成本进行自我选择。

1.6 双通道筛选机制与研究问题

为研究隐藏交易类型下的执行配置问题，本文考虑一种面向稳定币脱锚危机的费用-延迟双通道筛选菜单，包括常规通道与优先通道。常规通道收取较低费用，但交易需要等待一定时间并承担由等待造成的收益损失；优先通道收取更高费用，但不承受机制额外设置的延迟。机制设计者在给定市场状态下设置等待时间和优先费差，使具有不同即时收益和时间成本的交易者自主选择交易路径。

该菜单利用的是两类交易在即时收益与时间成本上的异质性。套利者的收益通常来自短暂存在的跨市场价差，等待可能使价差缩小、消失或重新定价，因此其是否愿意支付优先费取决于即时执行相对于等待的价值。清算者同样具有明显的时间敏感性：等待可能使清算机会被其他执行者抢先，使抵押品价值继续变化，或使交易错过可执行窗口。因此，当优先费足以使套利者放弃即时执行、但仍低于清算者为避免等待所愿意承担的成本时，两类交易可能自主选择不同通道。[12, 15]

由此，当等待时间与优先费差位于适当区间时，套利者可能选择低费延迟的常规通道或退出交易，而时间敏感的清算者则选择高费近即时的优先通道，从而形成基于

交易者自主选择的筛选配置。本文的目标是在保障必要金融功能连续性的前提下，降低套利流利用滞后报价对 LP 造成的价值提取。第四章将详细说明套利者选择常规通道或退出交易这两条实现路径的成立条件，并进一步分析其失效边界。

具体而言，本文将最低清算连续性设为机制可行性的约束，并在满足该约束的菜单参数中尽可能降低剩余套利损失，采用“清算连续性约束-套利损失最小化”的制度设计结构。

本文的研究问题如下：

1. 在预设最低清算连续性约束下，费用-延迟双通道菜单能否减少稳定币危机期间套利者利用滞后报价从 LP 处提取的价值？
2. 在真实交易类型不可直接观察时，套利者与清算者在即时收益和延迟成本上的异质性，是否足以支持激励相容的自我选择？目标配置在什么条件下可实施，又在什么条件下失效？
3. 在相同最低清算连续性要求下，费用-延迟双通道菜单与统一固定费、状态依赖动态费和统一延迟机制相比，对剩余套利损失的控制有何差异？

1.7 本文贡献

本文的贡献表现在如下方面：

1. **研究问题与经济学视角。** 本文将稳定币脱锚危机中的 LP 保护与清算连续性表述为交易类型不可直接观察的信息不对称筛选问题，并采用“最低清算连续性约束-剩余套利损失最小化”的制度设计结构。
2. **机制与可实施性结果。** 本文以低费延迟与高费近即时执行相结合的费用-延迟菜单为研究工具，推导目标配置的激励相容、参与、退出与失效条件，并证明双通道能够覆盖单一费用可实现的分离状态，并在满足路径 A 存在条件的部分市场状态中实现单一费用无法完成的目标配置。
3. **历史数据下的机制评价与边界识别。** 本文基于 2023 年 USDC 脱锚历史路径，在统一样本、时间顺序划分和最低模型清算连续性要求下比较五类机制，并通过机制分解、消融、极端交易与参数敏感性检验识别费用、延迟、重新报价与尾部损失结构的作用边界。
4. **市场设计与治理意义。** 本文表明，危机市场设计可以把必要金融功能的连续性写入机制可行性约束，并利用参与者对价格与时间的异质性设计差异化交易条件，为可编程金融基础设施中的危机治理提供一种可检验思路。

第二章 相关工作与机制来源

本文的研究同时涉及稳定币脱锚、自动做市商、市场时间机制、经济学筛选理论和 DeFi 清算。现有研究已经分别讨论了这些问题中的部分环节，但较少将其放入同一个危机治理框架。本章按照研究问题之间的逻辑关系，对相关文献进行梳理，并在此基础上说明本文的研究位置。

2.1 稳定币脱锚与跨市场价格调整

稳定币的目标价格通常由一级发行赎回机制和二级市场交易共同维持。发行人或其授权客户在一级市场完成稳定币的铸造与赎回，而大多数普通交易者则在中心化交易所和去中心化交易所中进行二级市场交易。当市场对储备资产、赎回能力或发行人信用产生担忧时，二级市场可能首先出现集中抛售，随后将压力传递至一级赎回市场。Watsky 等人对 2023 年 USDC 脱锚事件的研究表明，一级市场的可进入性、赎回渠道和不同二级市场的流动性结构，会共同影响稳定币价格偏离及其恢复过程。[5]

中心化交易所与去中心化交易所采用不同的交易机制，但两者的稳定币价格会通过套利行为相互影响。当同一种稳定币在两个市场中的报价出现差异时，套利者会在价格较低的市场买入，并在价格较高的市场卖出，从而推动价格重新接近。在正常状态下，这种行为有利于价格校准；在脱锚危机中，套利者也会将外部市场已经发生的价格下跌传入链上流动性池。美联储的研究发现，中心化与去中心化市场在危机期间的交易活动和流动性表现存在差异，但对稳定币的定价总体较为接近。[5]

现有稳定币研究主要解释脱锚为何发生、价格如何在市场之间传播，以及一级赎回和二级流动性如何影响锚定恢复。它们尚未充分回答另一个更局部的问题：当脱锚已经发生并传入 AMM 后，应如何设计池内交易规则，减少危机订单流对流动性提供者的损害，同时维持必要的链上金融活动。

2.2 AMM 中的 LP 损失与手续费防御

自动做市商依靠流动性提供者预先存入的资产持续提供交易。由于 AMM 通常不会主动读取外部市场的即时价格，池内报价需要通过交易和套利逐步调整。当外部价格已经改变、池内报价仍然滞后时，套利者可以按照对自己有利的旧价格与流动性池交易。

Milionis 等人将这种损失概括为损失相对再平衡 (Loss-versus-Rebalancing, LVR)。该指标比较流动性提供者在 AMM 中被动持有资产，与按照外部市场价格持续调整相同资产组合之间的财富差异。其核心含义是：掌握较新价格信息的套利者可以利用滞后报价进行交易，而相应收益主要由流动性提供者承担。后续实证研究发现，在部分主要 AMM 池中，LP 承担的套利损失甚至可能超过其获得的手续费收入。[12, 13]

针对这一问题，现有研究提出了多种 AMM 防御方式。动态手续费根据波动率、库存状态或外部价格变化调整交易费用，在风险较高时提高套利成本。Campbell 等人的研究表明，较高费率在极端波动期间可以保护被动 LP，但手续费过高也会减少普通交易量。Baggiani 等人进一步从动态控制角度研究随库存和外部价格变化调整的最优费率。am-AMM 则通过拍卖池管理权，使临时管理者能够设置手续费并获取部分套利价值，再将其转移给 LP。[17, 18, 25]

这些研究建立了手续费、套利损失和 LP 收益之间的基本关系，也构成本文实验中的主要比较基线。但其核心目标通常是降低 LVR、增加手续费收入或改善 LP 财富，清算交易能否继续执行并未被普遍设为明确约束。由此，当统一手续费在危机中上升时，它对套利交易和必要清算交易可能产生相同的成本冲击，这一问题仍有进一步研究空间。

2.3 时间机制与批量交易设计

时间长期以来都是金融市场设计中的重要变量。传统市场中的熔断、集合竞价和波动中断，会在异常波动期间暂时改变交易执行方式。例如，德国 Xetra 市场在潜在成交价格突破预设区间时，会中断连续交易并转入临时集合竞价，使订单在一段时间内集中形成新的成交价格。该机制主要用于保持价格连续性和减少异常成交。[23, 24]

Budish、Cramton 和 Shim 从市场设计角度研究了高频交易中的速度竞争。他们认为，连续交易和逐笔排序会产生机械性的短暂套利机会。其提出的频繁批量拍卖将交易时间划分为多个极短区间，并在每个区间末端统一撮合订单，使交易者更多地通过价格竞争，而非依靠微秒级速度优势竞争。[21]

这一思想也被引入 AMM。Canidio 和 Fritsch 提出 FM-AMM，将一段时间内的交易集中后统一执行，利用套利者之间的竞争减少套利利润、LVR 和夹击交易。CoW AMM 同样通过批量拍卖处理交易，并将保护 LP 免受滞后报价利用作为主要设计目标。[26, 27]

这些时间机制证明，延迟和批量执行能够改变交易者之间的竞争方式，并减少部分速度优势。但它们通常按照统一规则改变一组或全部订单的执行过程。一旦触发机制，套利交易、普通交易和清算交易都会进入相同的等待或批处理流程。本文关注的差异在于，不对全部交易设置同样的延迟，而是保留不同费用和执行速度的可选通道。

2.4 筛选机制与价格-等待时间菜单

在传统经济学中，当机制设计者无法直接观察参与者的真实类型时，可以提供条件不同的合同或服务菜单，让参与者按照自身收益和成本自主选择。这类方法通常被称为筛选机制。Rothschild 和 Stiglitz 在保险市场模型中说明，保险公司虽然无法直接观察消费者的风险类型，但可以通过设置保费和保障程度不同的合同，使不同风险类型的消费者进行自我选择。[28]

在排队和服务定价研究中，价格与等待时间被进一步结合。Marchand 研究了

顾客是否可以通过支付不同价格自主选择服务优先级。Mendelson 和 Whang 构建了具有激励相容性的优先定价机制：用户具有不同的单位等待成本，服务系统通过价格和执行优先级，引导用户分散选择适合自己的服务等级。Afèche 和 Pavlin 则直接研究价格-等待时间菜单，讨论服务者如何面对具有不同即时价值和延迟成本的顾客进行分组。[29, 30, 31]

本文的增量在于将既有价格-等待菜单用于稳定币危机中的单个 AMM 池，并围绕套利者避开优先通道、清算者保留即时执行路径这一目标配置建立参与约束与激励相容条件。

2.5 DeFi 清算与本文研究缺口

清算是 DeFi 借贷协议控制坏账的重要机制。当借款人的抵押品价值无法充分覆盖债务时，清算者可以代替借款人偿还部分债务，并获得相应抵押品和清算奖励。Perez 等人发现，较小的资产价格变化也可能使大量借贷头寸进入可清算状态。Qin 等人进一步研究了 Aave、Compound、MakerDAO 和 dYdX 等协议中的清算激励、执行竞争和风险，说明清算者是否及时参与会影响借贷协议的稳定性。[14, 15]

Aave 的实际机制同样表明，清算具有明显的时间敏感性。清算者需要监控抵押品价格和健康因子，并与其他执行者竞争优先完成交易。清算延误可能使原有机会被抢先，也可能使抵押品继续下跌并增加协议坏账。[16]

近期研究开始直接讨论 AMM 手续费与清算之间的关系。Sadeghi 和 Feinstein 发现，AMM 手续费能够降低利用价格操纵触发清算的收益，并在一定条件下阻止攻击性清算。但该研究主要关注操纵性清算和预言机安全，而非在稳定币脱锚期间如何保护正常清算交易。[32]

表 2.1: 相关研究路径与本文定位

研究路径	代表文献	已有研究核心	本文相对定位
稳定币脱锚与跨市场价格调整	[5]	脱锚、赎回渠道及 CEX/DEX 价格传导	研究脱锚冲击进入 AMM 后的交易规则设计
AMM 套利损失与费率防御	[12, 13, 17, 18, 25]	LVR、套利价值提取、固定与动态手续费	将清算连续性加入 LP 防御机制的显式约束
时间与批量交易机制	[21, 23, 24, 26, 27]	延迟、集合执行、批量撮合与重新定价	将时间由统一执行规则转化为可选择的筛选属性
筛选与优先定价	[28, 29, 30, 31]	隐藏类型、自我选择、价格-等待时间菜单	将价格-时间筛选用于稳定币危机中的套利者与清算者
DeFi 清算	[14, 15, 16, 32]	清算激励、执行竞争、时间敏感性与手续费	将清算功能连续性纳入 AMM 危机市场设计

表 2.1 表明，本文位于上述研究路径的交叉处：将稳定币危机中的 AMM 套利损失、清算连续性、隐藏交易类型与价格-时间筛选纳入同一市场设计框架。在此基础上，本文研究套利者不进入优先通道、清算者进入优先通道的成立与失效条件，并比较时间菜单与单一费用机制的可实施范围。

第三章 机制设计与模型设定

3.1 双通道筛选机制概述

本文设计了一套面向稳定币脱锚危机的双通道菜单交易机制。该机制主要用于预先界定的危机窗口。本文以交易到达前可观察的市场波动率 σ 作为危机状态代理，用于理论参数化和实验操作化。机制向所有交易者提供统一菜单，并通过不同交易者对费用和延迟的自主选择实现自我筛选。理论分析主要关注套利者与清算者两类参与者。

该菜单由常规通道与优先通道组成，并允许交易者选择退出：

- **常规通道 (Regular Channel, 记为 R)**：交易者支付较低的常规费用 f_R ，但需要承受长度为 τ 的机制延迟。等待会带来类型相关的收益损失，本文以 $D_i(\tau, \sigma)$ 对其进行概括；第五章再根据套利型交易与模型 L 的不同实验口径分别操作化等待后的收益变化。
- **优先通道 (Priority Channel, 记为 P)**：交易者需要在基础费用 f_R 之上支付额外优先费 Δf ，总费用为 $f_P = f_R + \Delta f$ 。选择该通道的交易不承受机制额外施加的延迟，但仍受到区块确认、网络传播和链上执行时间的影响。
- **退出选项 (Exit, 记为 E)**：交易者在比较两条通道的预期收益与成本后，可以选择不在该机制下执行交易。本文将退出效用归一化为零。当常规通道和优先通道均不能提供高于退出选项的效用时，交易者选择退出。

交易者被假定为理性经济主体，会比较常规通道、优先通道和退出选项的预期效用，并选择其中效用最高的行动。机制的目标是在适当的费用和延迟条件下实现优先通道的定向配置，即清算者选择优先通道，而套利者不选择优先通道。套利者可以转向常规通道，也可能因两条交易路径均无利可图而退出。

3.2 模型场景与参与者

本文研究单个稳定币自动做市商池在脱锚危机下的连续交易过程。理论部分不限定某一种稳定币或具体交易池，而是建立适用于一般危机状态的模型；后续正式机制评估仅使用 2023 年硅谷银行事件引发的 USDC 脱锚作为历史危机场景。

池内包含两种资产：一类是本文研究的脱锚稳定币；另一类是与其构成交易对的手资产。对手资产可以是另一种稳定币，也可以是 ETH 等具有较高市场流动性的加密资产。本文不要求对手资产的价格保持不变，而只要求市场中存在可以与池内报价进行比较的外部参考价格。

本文将稳定币基础价值冲击视为外生状态，重点研究该冲击经市场价格传导进入 AMM 后产生的套利、LP 损失与清算执行问题。

模型设定两类直接进行交易路径选择的参与者，即套利者和清算者，并将流动性

提供者作为承担机制结果的相关主体。

- **套利者 (Arbitrageur, A):** 观察 AMM 池内价格与外部市场价格之间的差异, 通过跨市场买卖获取价差收益。套利者会比较不同通道下的手续费、执行时间和价差消失风险, 并选择能够使自身净收益最大化的交易路径。
- **清算者 (Liquidator, L):** 在去中心化借贷协议中的抵押头寸达到清算条件后, 代替借款人偿还部分债务, 并获得相应抵押品及清算奖励。清算者会比较清算收益、交易费用、等待造成的机会损失和执行失败风险, 再决定选择何种通道或退出交易。
- **流动性提供者 (Liquidity Provider, LP):** 向 AMM 池存入两种资产, 并承担池内交易造成的资产结构和财富变化。LP 不参与本文的通道筛选模型, 而作为套利价值转移的承担者, 在机制结果评价中出现。为简化分析, 本文假设 LP 在单次危机研究窗口内持续提供流动性, 不主动撤出资金。

普通交易者不属于本文重点研究的筛选对象, 因此不单独纳入理论模型。借款人与借贷协议也不作为直接进行通道选择的参与者。清算者是否参与由其私人净收益决定。本文以标准化模型清算情景能否按时且以正净收益完成来表示不同机制下的清算连续性, 不直接估计现实清算成功率或协议最终坏账。

3.3 信息结构、状态更新与执行规则

作为信息结构的基准, 若交易类型 $i \in \{A, L\}$ 可以被机制直接观察, 则无需依赖自我选择即可按类型实施本文关注的目标配置: 套利者不进入优先通道, 清算者进入优先通道。

然而, 现实中交易类型无法被机制直接观察, 因此上述完全信息基准无法直接实施。机制只能依据可公开观察的市场状态设计对所有交易者统一开放的费用与等待菜单, 再由不同类型根据自身即时收益与时间成本选择交易路径。本文以波动率 σ 表示可观察市场状态, 并令机制设计者在给定 σ 下选择常规通道延迟 τ 与优先费差 Δf ; 交易者在观察菜单后, 从 P 、 R 与 E 中选择效用最高的行动。由此, 信息约束下的机制问题转化为: 是否存在一组公开菜单, 使套利者避开优先通道而清算者选择优先通道, 并由参与约束与激励相容条件刻画其可实施范围。

常规通道中的交易需要承担机制设定的等待时间。理论模型不直接模拟等待期间及目标时点的完整交易路径, 而是用类型相关的时间风险函数 $D_i(\tau, \sigma)$ 概括等待造成的预期收益损失; 第五章再分别给出套利型交易 A 与模型 L 的实验实现。

优先通道中的交易不承受机制额外设置的延迟, 在交易得到链上确认后按照当前池内状态执行。这里的“即时执行”是指机制附加延迟被归一化化为零, 并不意味着现实中的网络传播、区块确认和基础执行时间完全消失。

3.4 收益、费用与时间风险

对于任意参与者类型 $i \in \{A, L\}$ ，本文以 Π_i 表示其在交易立即执行时能够获得的毛收益。该收益尚未扣除通道费用和时间延迟造成的损失。在每一个给定的市场状态下， Π_A 和 Π_L 被视为已知，但二者可以随着危机状态和市场条件变化。

套利者的即时毛收益记为 Π_A ，其经济含义是套利者利用去中心化交易所与中心化交易所之间的价格差异进行交易所获得的价差收益。清算者的即时毛收益记为 Π_L ，其经济含义是清算者扣除偿还债务等清算必要支出后获得的即时清算收益，包括取得的抵押品净价值和协议提供的清算奖励。

常规通道的费用记为 f_R ，优先通道的总费用记为 f_P 。由于优先通道要求参与者支付额外的即时执行费用，因此：

$$f_P > f_R \geq 0.$$

定义优先通道相对于常规通道的额外费用为：

$$\Delta f = f_P - f_R > 0,$$

因此：

$$f_P = f_R + \Delta f.$$

其中， Δf 是机制通过菜单设计进行筛选的主要价格变量。底层 Gas 等两条通道共同承担的基础执行成本在通道效用比较中统一省略， Δf 仅表示优先通道相对于常规通道的额外费用。

参与者选择常规通道时，还需要承担等待造成的时间风险。本文以 $D_i(\tau, \sigma)$ 表示在给定波动状态 σ 下，类型 i 的参与者因等待时间 τ 而产生的预期收益损失。第四章中的 τ 是以时间长度表示的一般理论变量。第五章的链上实验另以 τ_b 表示机制规定的等待区块数，并以 $\tau_{i,s}$ 表示第 i 笔机会实际经过的秒数；延迟成本函数代入 $\tau_{i,s}$ ，而不是直接把区块数当作秒数。该函数是等待造成的预期收益损失的简化表示，用于概括价格变化、交易机会消失、执行失败和收益下降等风险。

对套利者而言，延迟损失主要来自跨市场价差缩小或消失、其他套利者提前完成交易，以及到期时池内价格发生变化。对清算者而言，延迟损失主要来自清算机会被其他参与者抢先、抵押品进一步贬值、清算收益下降或交易最终无法执行。一般模型假设：

$$D_i(0, \sigma) = 0,$$

并且在给定市场状态下，等待时间越长，时间风险越高。

因此，参与者选择优先通道、常规通道和退出选项时的效用分别为：

$$U_i^P = \Pi_i - f_P,$$

$$U_i^R = \Pi_i - f_R - D_i(\tau, \sigma),$$

$$U_i^E = 0.$$

优先通道不承受机制额外设置的延迟，因此不扣除时间风险；常规通道费用较低，但需要同时承担费用与延迟损失；退出选项的效用被归一化为零。套利者与清算者均被假定为理性参与者，会在三种行动中选择预期效用最高的一项。

双通道菜单可以直观理解为一种“用费用购买时间”的交易安排。交易者需要在较低费用但存在等待风险的常规通道，与较高费用但不承担额外机制延迟的优先通道之间作出权衡。不同类型参与者对时间的敏感程度和即时收益不同，因此可能通过自主选择形成分离。

表 3.1: 核心理论符号及经济含义

符号	名称	经济含义	类型
A	套利者	利用 AMM 池内价格与外部市场价格差异获取收益的交易者	参与者类型
L	清算者	执行借贷协议清算并获得清算收益的交易者	参与者类型
LP	流动性提供者	为 AMM 提供资金并承担池内资产结构与财富变化的主体	结果承担者
P	优先通道	支付较高费用且不承担机制额外延迟的交易路径	行动
R	常规通道	支付较低费用但承担机制延迟的交易路径	行动
E	退出选项	不在该机制下执行交易，效用归一化为零	外部选项
S	行动集合	参与者可选择的行动集合, $S = \{P, R, E\}$	集合
τ	理论延迟时间	第四章一般模型中的机制附加时间, 按时间长度理解	机制变量
τ_b	实验等待区块数	第五章菜单规则规定的等待区块数量	实验参数
$\tau_{i,s}$	实际等待秒数	第 i 笔机会从到达区块至目标区块实际经过的秒数	实验变量

表 3.1 (续)

符号	名称	经济含义	类型
f_R	常规通道费用	选择常规通道时需支付的费用	机制参数
f_P	优先通道总费用	选择优先通道时需支付的总费用	机制参数
Δf	优先费差	优先通道相对常规通道的额外费用, $\Delta f = f_P - f_R$	机制变量
Π_i	即时毛收益	类型 i 立即执行交易时、尚未扣除通道费用与延迟损失的收益	状态相关收益
$D_i(\tau, \sigma)$	时间风险	类型 i 在波动状态 σ 下因等待时间 τ 而产生的预期收益损失	类型相关函数
U_i^P	优先通道效用	类型 i 选择优先通道后的净收益, $U_i^P = \Pi_i - f_P$	内生效用
U_i^R	常规通道效用	类型 i 选择常规通道后的净收益, $U_i^R = \Pi_i - f_R - D_i(\tau, \sigma)$	内生效用
U_i^E	退出效用	类型 i 不参与交易时的效用, 归一化为 0	外部选择基准
σ	市场波动率	本文用于表示可观察危机状态的波动代理; 实验使用严格过去信息构造	外生状态参数
k_A	套利延迟风险系数	衡量套利者对波动和等待风险的敏感程度	正参数
$c(\sigma)$	清算延迟风险系数	给定波动状态下, 清算损失随等待增长的系数	正函数

注: $i \in \{A, L\}$ 表示参与者类型。第四章将进一步采用 $D_A(\tau, \sigma) = k_A \sigma \sqrt{\tau}$ 与 $D_L(\tau, \sigma) = c(\sigma)\tau$ 作为基准参数化; 第五章再将理论时间变量映射为逐笔实际等待秒数 $\tau_{i,so}$

第四章 费用-延迟菜单的自我筛选与可实施性

本章研究在交易真实类型不可直接观察的条件下，费用-延迟菜单何时能够实现目标自我筛选、时间维度是否扩大单一费用机制的可实施范围，以及如何在最低清算连续性约束下选择菜单参数。定理、引理、推论、命题、定义、假设、说明与公式均采用全文连续编号。

4.1 时间风险与类型异质性

假设 1 (状态条件下给定的即时收益)。 在每一个给定的市场状态和决策时点，套利者与清算者的即时毛收益 Π_A 和 Π_L 被视为已知参数；二者可以随市场状态、交易机会和决策时点变化。

假设 2 (时间风险)。 套利者与清算者均存在非负的时间风险函数 $D_i(\tau, \sigma)$ ，满足 $D_i(0, \sigma) = 0$ ；对于 $\tau > 0$ ，有 $D_i(\tau, \sigma) > 0$ ，且在给定市场状态下随等待时间严格增加。

假设 3 (市场波动)。 市场状态由市场波动指数 $\sigma > 0$ 描述，且两类参与者时间风险函数的增长与 σ 正相关。市场波动越大，等待带来的风险惩罚越大。

假设 4 (理性选择)。 套利者与清算者均选择预期效用最大的选项，即使其他选项也可能带来非负收益。

此外，假设 $k_A > 0$ ， $c(\sigma) > 0$ ， $\tau > 0$ 。本文采用严格偏好刻画唯一选择；等号情形作为边界情况处理。

本文采用以下具体时间风险函数：

$$D_A(\tau, \sigma) = k_A \sigma \sqrt{\tau}. \quad (1)$$

$$D_L(\tau, \sigma) = c(\sigma) \tau. \quad (2)$$

前者表示套利者的时间风险随等待时间以平方根形式增加；后者假设清算者的延迟风险成本随等待时间线性累积。本章的 τ 按时间长度理解；在第五章的逐笔实现中，公式中的 τ 由实际等待秒数 $\tau_{i,s}$ 替代。

上述函数是为刻画两类交易者时间风险差异而采用的基准参数化。套利者的平方根形式借鉴扩散型资产价格模型中的平方根时间尺度：在 **Brownian-motion-driven diffusion** 下，价格增量的不确定性尺度随时间长度的平方根增长。[33] 本文据此将 $k_A \sigma \sqrt{\tau}$ 作为等待期间套利机会风险的基准代理，用于参数化时间风险。清算者的线性形式则作为对截止时间、机会被抢先与抵押品继续变化等风险随等待累积的简化刻画。定理 1 的基本筛选逻辑只依赖类型相关时间风险及其随等待增加的性质，不依赖上述两种特殊化函数形式；后续闭式参数区间与比较结论则在式 (1)-(2) 的基准参数

化下给出。

4.2 目标自我筛选与激励条件

在第三章的信息结构下，机制向两类参与者提供相同的 $P/R/E$ 菜单，并由其依据自身收益与时间成本进行选择。

定义 1 (优先通道定向配置)。 若套利者不选择优先通道，而清算者选择优先通道，即

$$A \nrightarrow P, \quad L \rightarrow P,$$

则称该机制实现了优先通道定向配置。该定义允许套利者选择常规通道或退出交易。机制成功的关键在于套利者不占用优先通道，同时清算者仍愿意进入优先通道。

引理 1 (最优反应条件)。 优先通道定向配置成立，当且仅当以下条件同时成立：

$$U_A^R > U_A^P \quad \text{或} \quad U_A^E > U_A^P, \quad (3)$$

$$U_L^P > U_L^R, \quad (4)$$

$$U_L^P > U_L^E. \quad (5)$$

式 (3) 排除套利者选择优先通道；式 (4) 要求清算者相对于等待更偏好即时执行；式 (5) 要求清算者支付优先费后仍愿意参与。就筛选机制而言，式 (3)–(4) 对应目标配置中的激励相容要求，式 (5) 对应清算者的参与约束。

将第三章效用函数代入后，四个比较可压缩为：

$$U_A^R > U_A^P \iff D_A(\tau, \sigma) < \Delta f, \quad (6)$$

$$U_A^E > U_A^P \iff f_P > \Pi_A, \quad (7)$$

$$U_L^P > U_L^R \iff \Delta f < D_L(\tau, \sigma), \quad (8)$$

$$U_L^P > U_L^E \iff f_P < \Pi_L. \quad (9)$$

完整代数替换见附录 A.1。

4.3 定向筛选的存在条件

定理 1 (优先通道定向配置的充要条件)。 在假设 1–4 成立的条件下，给定机制参数 (f_R, f_P, τ) ，优先通道定向配置成立，当且仅当

$$\Delta f > D_A(\tau, \sigma) \quad \text{或} \quad f_P > \Pi_A, \quad (10)$$

并且

$$\Delta f < D_L(\tau, \sigma), \quad (11)$$

$$f_P < \Pi_L. \quad (12)$$

在具体函数 $D_A(\tau, \sigma) = k_A \sigma \sqrt{\tau}$ 、 $D_L(\tau, \sigma) = c(\sigma)\tau$ 下，上述条件等价于

$$\Delta f > k_A \sigma \sqrt{\tau} \quad \text{或} \quad f_P > \Pi_A, \quad (13)$$

$$\Delta f < c(\sigma)\tau, \quad (14)$$

$$f_P < \Pi_L. \quad (15)$$

证明思路。根据引理 1，套利者避开优先通道有两种方式：常规通道优于优先通道，或退出优于优先通道；清算者则同时需要优先通道优于常规通道并满足参与约束。将式 (6)–(9) 联立即得。完整证明见附录 A.2。

4.4 两条实现路径

4.4.1 路径 A：常规通道优于优先通道

推论 1 (路径 A 的参数区间)。若通过 $U_A^R > U_A^P$ 排除套利者进入优先通道，则参数必须满足

$$k_A \sigma \sqrt{\tau} < \Delta f < \min\{c(\sigma)\tau, \Pi_L - f_R\}. \quad (16)$$

存在满足式 (16) 的 Δf ，当且仅当

$$k_A \sigma \sqrt{\tau} < c(\sigma)\tau, \quad (17)$$

$$k_A \sigma \sqrt{\tau} < \Pi_L - f_R. \quad (18)$$

由式 (18) 还需有 $\Pi_L > f_R$ ；在这一正值条件下平方可得

$$\left(\frac{k_A \sigma}{c(\sigma)}\right)^2 < \tau < \left(\frac{\Pi_L - f_R}{k_A \sigma}\right)^2. \quad (19)$$

结合 $\Pi_L > f_R$ ，上述区间非空，当且仅当

$$\Pi_L - f_R > \frac{(k_A \sigma)^2}{c(\sigma)}. \quad (20)$$

完整证明见附录 A.3。关于小额常规通道费用近似以及套利者是否最终参与常规通道的补充讨论见附录 A.4。

式 (16) 给出一组双侧激励约束：优先费差必须高到足以使套利者不选择即时执行，同时又必须低于清算者因等待承担的时间风险，并满足清算者支付优先费后仍愿

意参与的收益约束。因而，路径 A 的可行性来自两类交易者对时间的异质性。

4.4.2 路径 B：退出优于优先通道

推论 2 (路径 B 的参数条件)。 若通过 $U_A^E > U_A^P$ 排除套利者进入优先通道，则参数需满足

$$\Pi_A < f_P < \Pi_L, \quad (21)$$

$$\Delta f < c(\sigma)\tau. \quad (22)$$

因此，路径 B 的费用区间非空要求 $\Pi_A < \Pi_L$ 。完整证明见附录 A.5。

路径 B 的经济逻辑更接近单一费用筛选：当清算者即时收益高于套利者即时收益时，可以在两者之间选择优先通道总费用，使套利者不愿购买即时执行，而清算者仍愿意参与。相较之下，路径 A 才利用了价格之外的时间成本异质性，并构成双通道相对于单一费用机制新增的筛选路径。

4.5 经济机制、可实施区域与失败边界

路径 A 的延时下界

$$\sqrt{\tau} > \frac{k_A \sigma}{c(\sigma)}$$

反映两类交易者延迟损失的相对关系。给定其他参数， $k_A \sigma$ 越大，套利者进入常规通道所承担的延迟损失越高，路径 A 的费差下界上升且可行延迟区间收窄； $c(\sigma)$ 越大，清算者相对于套利者承担的延迟损失越高，优先通道相对于常规通道的吸引力增强，分离更容易。因此，当清算者相对于套利者承担更高的延迟损失，或具有更高的即时执行支付意愿时，机制更容易形成可行的优先费区间。延时也不能无限增加，因为随着 τ 上升，套利者筛选所需的费差下界持续提高，并最终受到清算者参与约束给出的费用上限限制。

路径 A 的上界

$$\sqrt{\tau} < \frac{\Pi_L - f_R}{k_A \sigma}$$

反映清算者即时收益对优先费用的承受能力。清算者的即时收益必须足够高，才能在支付优先费用后继续参与交易。

命题 1 (机制失败的主要边界)。 优先通道定向配置可能在以下情形下失败：

- 套利者选择优先通道。当 $\Delta f \leq k_A \sigma \sqrt{\tau}$ 且 $f_P \leq \Pi_A$ 时，优先通道同时不劣于常规通道和退出交易。
- 清算者不再严格偏好优先通道。当 $\Delta f \geq c(\sigma)\tau$ 时，常规通道不劣于优先通道。若要进一步断言清算者实际选择常规通道，还需同时满足 $U_L^R > 0$ 。
- 清算者不再愿意参与优先通道。当 $f_P \geq \Pi_L$ 时，优先通道效用不高于退出交易。若要断言清算者最终退出，还需同时满足 $U_L^R \leq 0$ 。

- 若路径 A 和路径 B 的参数存在条件均不成立，则优先通道定向配置的可行参数集合为空。

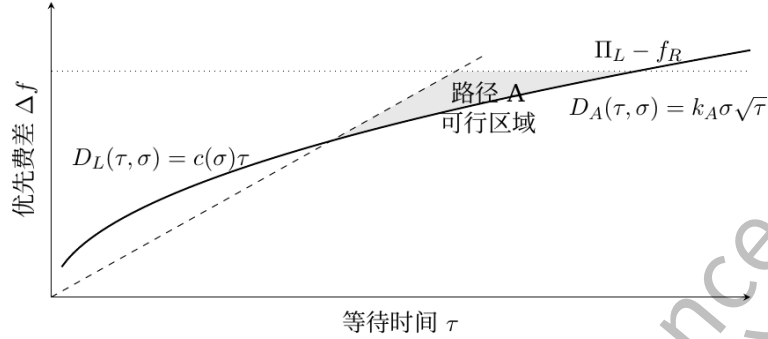


图 4.1: 路径 A 的费用-延迟可实施区域示意图

注: 固定给定市场状态 σ 、常规通道费用 f_R 与清算即时收益 Π_L 。阴影对应 $k_A\sigma\sqrt{\tau} < \Delta f < \min\{c(\sigma)\tau, \Pi_L - f_R\}$ 的理论可行区域; 曲线位置仅作示意, 不对应具体实验参数。

上述边界共同说明, 机制的可实施性来自内部参数区间, 而非单调提高优先费或延长等待时间: 费差过低会造成筛选不足, 费差过高或等待配置不当则可能削弱清算者选择优先通道的激励或参与条件。

4.6 与单一费用机制的可实施性比较

为比较“增加时间维度”是否真正带来额外筛选能力, 本节把传统状态依赖动态手续费在每一个给定市场状态下视为单通道单一费用机制。该机制可以随状态调整 f , 但同一状态下所有交易面对相同费用。

4.6.1 单一费用机制

对于单一费用机制, 分离清算者与套利者依赖手续费 f , 使得

$$\Pi_A < f < \Pi_L \quad (23)$$

成立, 即套利者选择不交易, 清算者选择交易。

引理 2 (单一费用机制分离区间的存在条件)。 单一费用机制存在能够分离套利者与清算者的手续费 f , 当且仅当

$$\Pi_A < \Pi_L. \quad (24)$$

一旦 $\Pi_A \geq \Pi_L$, 则无论手续费如何设定, 都不可能分离套利者与清算者。完整证明见附录 A.6。

4.6.2 双通道的额外筛选路径

对于双通道模型，路径 B 的条件与单一费用机制的收益排序相同。路径 B 要求

$$\Pi_A < f_P < \Pi_L, \quad (25)$$

并且

$$\Delta f < c(\sigma)\tau, \quad \Delta f = f_P - f_R > 0. \quad (26)$$

因此，只要单一费用机制在某一市场状态下存在可分离费率，双通道也可以通过路径 B 复制这一分离逻辑。双通道真正新增的能力来自路径 A：当即时收益排序不足以产生式 (23) 的费用区间时，机制仍可能利用两类交易对等待的不同敏感程度形成分离。

对于 $\Pi_A \geq \Pi_L$ 的情形，路径 B 失效。但若存在常规通道费用 f_R 使

$$\Pi_L - f_R > \frac{(k_A\sigma)^2}{c(\sigma)}, \quad (27)$$

则路径 A 存在分离区间。此时可以选择

$$\left(\frac{k_A\sigma}{c(\sigma)}\right)^2 < \tau < \left(\frac{\Pi_L - f_R}{k_A\sigma}\right)^2 \quad (28)$$

并进一步选择

$$k_A\sigma\sqrt{\tau} < \Delta f < \min\{c(\sigma)\tau, \Pi_L - f_R\}. \quad (29)$$

于是，套利者不选择优先通道，而清算者选择优先通道。

4.6.3 时间菜单扩大可分离市场状态集合

为避免直接比较不同维度的机制参数集合，给定 $k_A > 0$ 和 $c(\cdot) > 0$ ，记外生交易机会状态为 $x = (\Pi_A, \Pi_L, \sigma)$ 。定义单一费用机制与费用-延迟菜单各自能够实现目标分离的市场状态集合：

$$S_F = \{x : \exists f \geq 0, \text{ 使 } \Pi_A < f < \Pi_L\},$$

$$S_M = \{x : \exists (f_R, \Delta f, \tau), \text{ 使定理 1 的目标配置成立}\}.$$

定理 2 (时间菜单扩大可分离市场状态集合)。在当前模型设定下：

- $S_F \subseteq S_M$ 。即任何单一费用机制能够实现分离的市场状态，双通道菜单都能够通过路径 B 实现。
- 对任一满足 $\Pi_A \geq \Pi_L$ 且 $\Pi_L > (k_A\sigma)^2/c(\sigma)$ 的市场状态，单一费用机制失效；但若 $f_R = 0$ 可选，则双通道菜单可以通过路径 A 实现分离。

因此，只要模型允许的市场状态空间中至少存在一个满足第二点条件的状态，就有

$$S_F \subsetneq S_M.$$

证明思路。集合包含关系由路径 B 的构造得到；严格性则由一类单一费用无法分离、但满足路径 A 存在条件的市场状态提供。完整证明见附录 A.7。

定理 2 的关键在于它引入了价格之外的第二个筛选属性——等待成本。单一费用只能依据即时收益与支付能力的排序分离类型；而当这一排序不足以实现筛选分离时，路径 A 仍可利用套利者与清算者对等待风险的不同敏感程度，使不可直接观察的交易类型通过自我选择实现分离。因此，时间维度扩大的是目标配置可被实施的市场状态集合。

4.7 信息与清算约束下的稳健机制选择

本节进一步在最低清算连续性约束下讨论可行菜单的参数选择。候选菜单需同时满足由自我选择产生的激励约束与功能连续性约束，因此机制设计问题转化为在两类约束共同作用下选择费用与延迟参数。

4.7.1 稳健筛选可行集

常规通道费用为 f_R ，一般理论中的延迟时间为 τ ；优先通道总费用为 $f_P = f_R + \Delta f$ ，其中 $\Delta f > 0$ 。定义菜单参数向量为

$$\theta = (f_R, \tau, \Delta f).$$

相应地，一般参数空间定义为

$$\Theta = \{(f_R, \tau, \Delta f) : 0 \leq f_R \leq f_R^{\max}, \tau_{\min} \leq \tau \leq \tau_{\max}, 0 < \Delta f_{\min} \leq \Delta f \leq \Delta f_{\max}\},$$

即所有允许的菜单参数组合。为避免参数选择完全由人为设定的边界决定，进一步定义参数内部区域 $\Theta_\eta \subseteq \Theta$ ；其具体边界表达式见附录 A.8。理论模型保留 $f_R \geq 0$ ；第五章正式实验只考察 $f_R = 0$ 的受限情形。

为刻画类型选择对小幅参数扰动的稳健性，引入严格为正的效用安全余量 $\varepsilon_A > 0$ 、 $\varepsilon_L > 0$ 。其中， ε_A 保证套利者不选择优先通道具有严格效用缓冲， ε_L 保证清算者选择并参与优先通道具有严格效用缓冲。

根据定理 1 的分离条件，定义稳健分离可行域

$$F_\varepsilon = \left\{ \theta \in \Theta_\eta : \begin{array}{l} U_A^P(\theta) + \varepsilon_A \leq \max\{U_A^R(\theta), U_A^E(\theta)\}, \\ U_L^P(\theta) \geq \max\{U_L^R(\theta), U_L^E(\theta)\} + \varepsilon_L \end{array} \right\}.$$

第一项排除套利者对高费即时通道的选择，同时允许其进入常规通道或退出；第二项

保证清算者以不低于 ε_L 的效用余量选择并参与优先通道。本文另将 F_ε 进一步拆为套利者选择常规通道与退出的两个子区域 F_R^ε 、 F_E^ε ；完整定义见附录 A.8。

4.7.2 剩余套利损失与清算连续性

令 ω 表示影响交易机会与执行结果的状态， $\ell_A(\theta, \omega) \geq 0$ 表示参数 θ 在状态 ω 下产生的剩余套利损失（Residual Arbitrage Loss, RAL）。定义

$$L_A(\theta) = \mathbb{E}[\ell_A(\theta, \omega) \mid A],$$

并假设该条件期望对所有可行参数均存在且有限。 $L_A(\theta)$ 衡量菜单实施后，套利型交易者仍能从流动性提供者处提取的预期价值；该定义允许机制通过交易退出、到期取消或降低可实现套利价值减少剩余损失。

令 $I_L(\theta, \omega)$ 表示清算机会是否在截止时间前完成执行：

$$I_L(\theta, \omega) = \begin{cases} 1, & \text{按时完成,} \\ 0, & \text{未按时完成.} \end{cases}$$

定义清算连续性为

$$Q_L(\theta) = \Pr(I_L(\theta, \omega) = 1 \mid L) = \mathbb{E}[I_L(\theta, \omega) \mid L] \in [0, 1].$$

机制设计者预先设定最低清算连续性要求 $q_{\min} \in [0, 1]$ 。在稳健分离可行域中，定义约束可行集

$$C(q_{\min}) = \{\theta \in F_\varepsilon : Q_L(\theta) \geq q_{\min}\}.$$

4.7.3 约束下的最优菜单

定义最优参数集合为

$$\Theta^*(q_{\min}) = \arg \min_{\theta \in C(q_{\min})} L_A(\theta),$$

并定义最低可实现剩余套利损失

$$\Psi(q_{\min}) = \min_{\theta \in C(q_{\min})} L_A(\theta).$$

这一定义契合了“清算连续性约束-套利损失最小化”的研究框架：只有达到最低清算连续性要求的菜单才进入 RAL 比较。因而， $\Psi(q_{\min})$ 可以视为给定最低清算连续性要求时的 RAL 值函数，它记录在相应可行集中能够达到的最低剩余套利损失。该函数用于描述功能连续性约束与 RAL 控制之间的约束权衡。

定理 3（稳健分离下的最优参数选择）。 给定参数空间 Θ 、参数内部区域 Θ_η 、严格为

正的效用安全余量 $\varepsilon_A > 0$ 与 $\varepsilon_L > 0$ ，以及由定理 1 推导的稳健分离可行域 F_ε 。对于外生给定的最低清算连续性要求 $q_{\min}$ ，若 $C(q_{\min})$ 非空且紧致，且 $L_A(\theta)$ 在 $C(q_{\min})$ 上连续，则 $\Theta^*(q_{\min})$ 非空，即至少存在一组满足稳健分离和最低清算连续性要求、并使剩余套利损失达到最小值的菜单参数。

证明思路。该结论直接来自非空紧集上的连续函数取得最小值。完整证明见附录 A.9。

推论 3 (清算连续性要求收紧时的最优损失)。 设 $q_2 \geq q_1$ ，且 $C(q_1)$ 与 $C(q_2)$ 均非空，则

$$C(q_2) \subseteq C(q_1), \quad \Psi(q_2) \geq \Psi(q_1).$$

因此，最低清算连续性要求提高时，机制设计者可选择的菜单参数集合弱收缩，最低可实现的剩余套利损失不会下降。完整证明见附录 A.10。

4.7.4 与实验操作化的关系

定理 3 定义了连续模型中的稳健分离可行域与清算连续性约束。第五章的有限网格实验保留“模型 L 覆盖约束下最小化样本 RAL”的目标结构，并通过离散的 $P/R/E$ 行动规则评价交易分流；正式选参不另行施加理论中的 ε_A 、 ε_L 安全余量约束。因此，实验是对理论设计目标的操作化对应，而非对 F_ε 可行集的直接离散化。具体的样本目标函数、覆盖率与有限网格选择规则见第 5.4.3 节。

第五章 实验设计

本章基于 2023 年 USDC 脱锚历史路径构建机制评价，并延续第四章“清算连续性约束-套利损失最小化”的框架完成参数选择与比较。

5.1 数据与样本窗口

5.1.1 危机与目标池

2023 年 3 月，硅谷银行 (Silicon Valley Bank, SVB) 倒闭使市场担忧 Circle 存放于该银行的部分 USDC 储备能否及时取回，由此引发 USDC 短期脱锚。[7, 8] 在本次危机中，目标自动做市商 (Automated Market Maker, AMM) 池内出现大量卖出 USDC、买入 WETH 的交易，套利型交易与池内价格压力相伴；与此同时，清算交易对及时执行的要求并未消失。本文关注的机制问题不是简单提高所有交易的成本，而是在危机中限制利用滞后报价获利的套利型交易，同时尽可能保留时间敏感的必要清算。

本文选择 Ethereum Mainnet 上的 Uniswap v3 USDC/WETH 0.05% 池作为研究对象，池地址为

0x88e6A0c2dDD26FEEb64F039a2c41296FcB3f5640.

该池采用 5 bps 固定费率层和集中流动性设计。USDC 与 WETH 的组合还允许通过 ETH/USD 与 USDC/USD 两条外部价格腿构造独立的 ETH/USDC 参考价格，因而适合用于观察稳定币压力下的池内价格、套利空间与流动性提供者面临的不利选择损失。后文设置的动态费机制属于反事实比较基线，并非该历史池的原生费率规则。

正式样本窗口覆盖区块 16,790,000-16,815,000，对应 UTC 时间 2023 年 3 月 9 日 10:16:59 至 2023 年 3 月 12 日 22:45:23，共包含 25,001 个连续区块。该窗口覆盖冲击前基准阶段、脱锚扩散阶段与初步恢复阶段。为确定窗口内首笔交易之前的池状态，历史状态重建从区块 16,789,999 开始。

5.1.2 链上数据与外部价格

链上数据来自 Ethereum Mainnet，包含目标池事件、交易、交易收据和调用轨迹。样本共记录 55,439 个目标池事件，其中 52,595 个为 Swap；Mint、Burn、Collect 与 Flash 等非 Swap 事件仅用于历史池状态重建。

外部价格采用 Bitfinex 的 ETH/USD 与 USDC/USD 历史逐笔成交数据。经统一时间口径和重复记录清理后，最终保留 ETH/USD 成交 123,476 笔、USDC/USD 成交 22,412 笔，用于构造危机期间的 ETH/USDC 外部参考价格。

USDC 在脱锚期间并不始终等于 1 美元。本文以美元为共同计价媒介，利用两

条价格腿构造 ETH/USDC 外部参考价格。对区块 b ，先定义

$$V_{j,b} = \text{VWAP}_j([T_b - 30s, T_b]),$$

其中 j 分别表示 ETH/USD 与 USDC/USD，再计算

$$P_b^{\text{ext}} = \frac{V_{\text{ETH/USD},b}}{V_{\text{USDC/USD},b}}.$$

其中 $V_{\text{ETH/USD}}$ 的单位为 USD/ETH, $V_{\text{USDC/USD}}$ 的单位为 USD/USDC, 因此二者之比表示每单位 ETH 对应的 USDC 数量 (USDC/ETH), 与目标 USDC/WETH 池的相对价格采用同一计价方向。研究对象是 ETH 与 USDC 之间的相对价格, 因此 ETH 自身的价格变化也是外部参考价格变化的一部分。价格窗口严格限定为 $[T_b - 30s, T_b)$, 只使用区块时间之前的成交, 不包含目标时刻本身, 也不使用未来成交。任一价格腿缺失时, 该观测被标记为不可评价, 不通过插值、前向填充或假定 USDC/USD 等于 1 进行补足。

5.1.3 交易单位与原始样本

本文以交易哈希 (transaction_hash) 而非单个 Swap 事件作为识别单位。一笔链上交易可能包含多个目标池 Swap; 若将每个 Swap 分别分类, 可能把同一经济决策重复计数。研究先聚合同一交易中的目标池 Swap, 并使用第一笔目标池 Swap 发生前的池状态计算事前价格与套利空间。

将链上交易数据与 Bitfinex 逐笔价格合并后, 生成包含 52,346 笔 Swap 交易级记录的主数据表。该主表保留至少包含一个目标池 Swap、可进入交易级分类的记录; 其后的套利型交易与模型 L 情景均在此基础上构建。

表 5.1: 数据来源、研究窗口与原始样本规模

类别	项目	研究口径
研究对象	网络	Ethereum Mainnet
研究对象	目标池	Uniswap v3 USDC/WETH 0.05%
池参数	手续费	500 pips, 即 5 bps
时间范围	正式样本区块	16,790,000-16,815,000
时间范围	UTC 时间	2023-03-09 10:16:59-2023-03-12 22:45:23
时间范围	连续区块数	25,001
链上数据	Swap 事件	52,595

表 5.1 (续)

类别	项目	研究口径
交易主表	Swap 交易级记录	52,346
外部价格	Bitfinex ETH/USD 逐笔成交	123,476
外部价格	Bitfinex USDC/USD 逐笔成交	22,412

5.2 样本构建与划分

5.2.1 套利型交易识别

本文以一笔完整交易而非单个 Swap 作为分类对象。由于链上订单没有直接标注交易动机，本文根据交易发生前能够观察到的行为特征识别套利型交易。

若一笔交易与借贷协议清算事件及调用轨迹相匹配，则优先将其识别为清算型交易。对于其余非清算型交易，只有同时满足以下条件时，才标记为套利型交易：第一，聚合后的净交易方向为在目标池中卖出 USDC、买入 WETH；第二，交易发生前的池内价格与严格早于该区块时间的外部价格之间存在价差；第三，在考虑目标池 5 bps 手续费后，该价差达到预先设定的识别阈值。

数据构建阶段比较 5、10、25、50 和 100 bps 五组候选阈值，并在正式机制参数选择前将 25 bps 确定为主规格。该阈值用于过滤小额价格噪声，同时保留足够的套利型交易样本。正式主表中共有 4,216 笔交易被标记为套利型交易，方向均为卖 USDC、买 WETH。

未被识别为套利型或清算型的交易归入 U （未识别或非目标交易），共 48,079 笔。该组交易保留在原始交易主表中，但不进入本文以套利损失和清算连续性为目标的正式机制比较。

5.2.2 历史清算样本与标准化模型 L 情景

本文在链上数据中识别到 51 笔具有借贷协议事件和调用轨迹证据的历史清算交易。这些记录用于提供危机期间实际清算活动的背景；由于链上主要完整记录已经提交并成功执行的清算，正式比较采用标准化模型 L 情景覆盖不同收益和截止时间条件。

模型 L 输入共包含 121 个清算机会，其中训练集 61 个、验证集 30 个、测试集 30 个。每个情景预先规定到达区块、标准化即时收益、最迟执行区块、波动状态、输入资产方向和交易规模。即时收益设为 500、750、1000 和 1250 bps，最迟执行时间设为到达后 1、2、3、5 或 10 个区块。实验中的模型 L 即时收益采用外生标准化参数设定，用于覆盖不同的清算盈利空间，并与第三章一般模型中的 Π_L 相对应；

该参数并非由 51 笔历史清算的抵押品价值、偿债支出和清算奖励逐笔估计得到。模型 L 保留输入资产方向与交易规模，用于附加费用的币种换算与记账；当前标准化情景不进一步映射到具体借贷头寸的债务资产与抵押资产组合。

模型 L 用于构造统一的清算压力测试条件，以比较不同机制对时间敏感清算机会的影响。正式测试阶段使用 30 个模型 L 情景，每个权重均为 1，因此后续模型 L 覆盖率以 30 作为固定分母。

5.2.3 样本划分

本文按照区块时间顺序将完整危机窗口连续划分为训练、验证和测试三个阶段，不随机打乱交易。训练集用于估计只依赖历史样本的参数和波动状态阈值；验证集用于在预先规定的候选参数中选择每种机制的方案；测试集只在参数确定后用于评价。

表 5.2: 训练、验证与测试样本

阶段	区块范围	原始套利型交易	模型 L
训练	16,790,000- 16,804,990	1,820	61
验证	16,804,991- 16,809,983	2,150	30
测试	16,809,984- 16,815,000	246	30

为保证不同机制候选面对相同的损失分母，候选参数比较只使用目标状态完整的共同样本。正式 900 秒波动率口径下，训练期有 1,816 笔 A 可进入 k_A 参数估计；进一步要求所有候选目标长度均可评价后，训练集和验证集的候选共同样本分别为 1,771 笔和 2,112 笔。

采用连续时间划分具有信息隔离含义：危机期间的价格、波动和订单流具有明确的时间顺序，随机打乱会使后期状态进入前期参数估计。

5.2.4 共同测试样本

原始测试阶段包含 246 笔套利型交易。由于双通道和固定边界批处理机制需要目标区块的历史池价与外部价格进行重新报价，并非每笔交易在验证集选定的等待长度下都具有完整目标状态。正式比较对验证集选定的 batch 和双通道所需目标状态取交集，最终得到 235 笔共同可评价套利型交易，排除 11 笔目标状态不完整的交易。

共同样本保留原始测试套利型交易的 95.528%、名义交易量的 98.605% 和基准损失的 99.577%。五种机制均在相同的 235 笔 A 和 30 个模型 L 情景上评价，以避免样本差异影响横向比较。

5.3 比较机制与执行规则

本文设置五种比较场景：无额外防御（No Additional Defense）、统一固定费（Fixed Fee）、状态依赖动态费（Dynamic Fee）、固定边界批处理（Fixed-Boundary Batch）和费用-延迟双通道（Fee-Delay Dual Channel）。五种场景使用相同的历史危机路径、交易样本、底层池费和外部价格口径，但采用不同收费与执行规则，并在共同的历史外部价格、交易机会与池状态基准下进行比较。

表 5.3: 五种比较场景及其主要规则

场景	比较机制	交易者可选行为	主要比较目的
A	无额外防御	立即执行或退出	建立空白对照和基准损失
B	统一固定费	支付统一费用后立即执行或退出	检验单一费用工具的作用
C	状态依赖动态费	按波动状态支付相应费用后立即执行或退出	检验三档状态依赖收费
D	固定边界批处理	等待至批次终点后执行或退出	检验统一延迟和重新定价
E	费用-延迟双通道	优先通道、常规通道或退出	操作化费用与时间联合自选择

5.3.1 费用类机制

场景 A 不增加额外费用或机制延迟，交易仍承担目标池原有的 5 bps 手续费。具有正净收益的套利型交易立即执行，模型 L 机会也不受到额外阻碍。该场景提供统一基准损失。

场景 B 对所有交易施加相同的额外即时费用。提高统一费用可以压缩部分套利交易利润，但也可能降低模型 L 的净收益。场景 C 根据交易到达前严格过去信息计算的波动状态采用三档费率，作为本文的状态依赖动态费基线。

5.3.2 固定边界批处理

场景 D 按照预先确定的共同区间处理订单。区间以 $B_0 = 16,790,167$ 为起点；长度为 h 个区块的批次采用左闭右开规则，到达右边界的订单进入下一批。订单等待至批次终点后，按历史批次终点价格重新计算利润；净利润为正则执行，否则取消。

本文将固定边界批处理设为统一延迟基线，保留共享批次终点和终点重新定价两个机制成分。频繁批量拍卖或 FM-AMM 的完整设计通常还包含集中撮合、统一执

行/定价及批内竞争等环节 [21, 26, 27], 这些环节不纳入本基线。与双通道常规路径不同, 固定边界 batch 共享批次终点, 而双通道按订单到达区块分别确定目标区块。

5.3.3 双通道机制

场景 E 对应第三、第四章提出的费用-延迟双通道。交易者可以选择:

1. 优先通道 P : 支付较高费用, 不承受机制额外延迟;
2. 常规通道 R : 支付较低费用, 等待 τ_b 个区块后按对应类型的实验规则处理;
3. 退出 E : 不在该机制下完成交易。

双通道先在交易到达时比较 P 、 R 和 E 。等待损失按逐笔实际等待秒数计算: 套利型交易为

$$D_{A,i} = k_A \sigma_i \sqrt{\tau_{i,s}},$$

模型 L 为

$$D_{L,i} = c(\sigma_i) \tau_{i,s},$$

其中

$$\tau_{i,s} = T_{b_i + \tau_b} - T_{b_i}.$$

两类实验对象在常规通道中的等待后处理不同。对套利型交易 A, 目标区块到达后, 根据当时的池内价格与外部参考价格重新计算剩余套利空间; 净收益不为正则退出, 否则执行。对模型 L, 等待后的通道效用由标准化即时收益扣除清算时间成本和通道费用计算, 不再根据目标时点市场价格重新估计清算收益。模型 L 首先依据 $P/R/E$ 的效用比较选择行动; 若选择常规通道 R , 再检查目标区块是否超过该情景预先设定的最迟执行区块, 超过截止时间则记为未覆盖。本轮历史重放不内生更新订单延迟、取消或路由变化对后续池状态产生的反馈, 相关动态反事实可在未来研究中进一步展开。

理论一般式为

$$U_A^R = \Pi_A - f_R - k_A \sigma \sqrt{\tau}.$$

正式实验固定 $f_R = 0$, 因此常规通道不收取额外附加费, 优先通道费用等于 Δf ; 延迟后净收益不为正的交易直接退出。正的常规通道费用 $f_R > 0$ 不纳入本文实验范围, 可作为未来扩展。

5.3.4 统一比较口径

五种机制使用相同的 235 笔共同 A、30 个模型 L 情景、原交易方向和规模、底层池费以及外部价格构造方法。协议附加费用进入交易者净收益计算, 但不直接冲减 RAL。

5.4 参数设定与验证集选择

5.4.1 波动率与套利延迟风险系数

本文以严格过去信息计算的 ETH/USDC 对数收益滚动标准差 σ_i 作为可观察危机状态代理。为校准套利者的延迟风险系数，本文根据历史目标区块状态构造套利机会衰减量 $y_{A,i}$ ，即交易到达时的初始套利空间与等待后按原交易方向和规模重新报价所得剩余套利空间之差，并对负值截零。该指标用于近似等待期间套利机会的历史衰减程度。

对 60、300 和 900 秒三个候选波动窗口，训练期内部按时间顺序划分为 80% 校准集和 20% 选择集。对每个候选窗口， k_A 采用比例中位数校准：

$$k_A = \max \left\{ \text{median}_i \left(\frac{y_{A,i}}{\sigma_i \sqrt{\tau_i}} \right), 0 \right\}.$$

随后在内部选择集上比较模型预测的套利机会衰减与历史衰减量之间的平均绝对误差。60、300 和 900 秒窗口的 MAE 分别为 26.7356、24.4377 和 22.7287 bps，因此选择 900 秒窗口。窗口确定后，使用完整训练期的 18,075 个 opportunity-horizon 观测、对应 1,816 个不同套利机会重新校准，得到

$$k_A = 0.13119597297864458.$$

验证集和测试集均未参与波动窗口选择或 k_A 校准。

训练期 900 秒波动率的 1/3 和 2/3 分位点分别为 1.0798117540 bps 和 2.5964388765 bps，用于划分低、中、高波动状态。其中 σ 是本文的状态代理。

5.4.2 清算时间成本情景

模型 L 使用三组条件性清算时间成本情景。每组按低、中、高波动状态分别给定 $c(\sigma)$ ：

表 5.4: 条件性清算时间成本情景 (bps/second)

情景	低波动	中波动	高波动
low	1	1.5	2
mid	3	4.5	6
high	6	9	12

三组 $c(\sigma)$ 分别构成 low、mid 和 high 清算时间成本情景，用于检验不同延迟成本强度下的机制表现。

5.4.3 有限候选网格与选定方案

一般理论保留连续参数空间 Θ ；实验另在预先设定的有限候选网格

$$\Theta_{\text{grid}} \subset \Theta$$

中进行验证集选择。对验证集套利样本 $\mathcal{A}_{\text{val}}$ ，样本剩余损失为

$$\hat{L}_{A,\text{val}}(\theta) = \sum_{i \in \mathcal{A}_{\text{val}}} \ell_i^A(\theta).$$

对验证集模型清算机会，样本清算连续性为

$$\hat{Q}_{L,\text{val}}(\theta) = \frac{1}{N_{L,\text{val}}} \sum_{j=1}^{N_{L,\text{val}}} \mathbf{1}_{\{\text{情景 } j \text{ 按时完成且净收益为正}\}}.$$

实验选择

$$\hat{\theta} \in \arg \min_{\theta \in \Theta_{\text{grid}}} \hat{L}_{A,\text{val}}(\theta) \quad \text{s.t.} \quad \hat{Q}_{L,\text{val}}(\theta) \geq q_{\min}.$$

这一选择保留“模型 L 覆盖约束下最小化样本 RAL”的目标结构，并通过离散 $P/R/E$ 行动规则评价交易分流；正式实验不另行施加理论 F_ϵ 中的 ε_A 、 ε_L 安全余量约束。

候选附加费率为 1-1,250 bps，步长 1 bps；双通道等待 τ_b 和 batch 长度 h 均为 1-10 个区块；最低模型 L 覆盖要求为

$$q_{\min} = 0.96.$$

动态费基线的低、中、高波动乘数为 0.75、1 和 1.25。候选方案先满足模型 L 覆盖约束，再按验证集 RAL 最低选择；平局时依次考虑更高模型 L 覆盖、较低中位等待、较低 h 和较低费率。

表 5.5：预先设定网格内的验证集选定参数

机制	选定参数	适用说明
无额外防御	附加参数为 0	统一空白对照
固定费	210 bps	单一即时附加费
动态费	基准 247 bps；乘数 0.75/1/1.25	本文采用的三档动态费基线
固定边界 batch	low/mid 情景 $h = 4$ ； $B_0 = 16,790,167$ high 情景 $h = 1$	

表 5.5 (续)

机制	选定参数	适用说明
双通道	$\tau_b = 6$; $\Delta f = 27 \text{ bps}$; 当前 $f_P = \Delta f = 27 \text{ bps}$ $f_R = 0$	

5.5 评价指标

本文使用两项核心指标：剩余套利损失（Residual Arbitrage Loss, RAL）和模型 L 覆盖率。前者衡量机制作用后仍可实现的套利价值提取，后者衡量标准化清算情景在截止时间内保持可执行的比例。

表 5.6: 核心评价符号

符号	含义
m	被评价的机制
$\mathcal{A}_{\text{test}}$	共同测试样本中的套利型交易集合
L_A^m	机制 m 下的 RAL
L_A^0	无额外防御场景下的基准套利损失
ΔL_A^m	机制 m 避免的套利损失
ρ_A^m	相对于无额外防御场景的损失下降比例
Q_L^m	机制 m 下的模型 L 覆盖率
N_L	模型 L 情景总数，正式测试阶段为 30
$q_{\min}$	最低模型 L 覆盖要求

5.5.1 剩余套利损失 (RAL)

对第 i 笔 A，名义金额记为 N_i ，当前原始利润率记为 $g_{i,0}$ 。基准套利损失为

$$L_i^0 = N_i \frac{g_{i,0}}{10^4}.$$

若交易通过优先通道立即执行，则其剩余损失为 $L_i^P = L_i^0$ 。若常规通道到期取消，则 $L_i^R = 0$ ；若到期执行，则使用历史目标价格下的原始利润率 $g_{i,\tau}^{\text{raw}}$ ：

$$L_i^R = N_i \frac{g_{i,\tau}^{\text{raw}}}{10^4}.$$

机制 m 在共同测试样本上的总剩余损失为

$$L_A^m = \sum_{i \in \mathcal{A}_{\text{test}}} \ell_{i,m}^A.$$

避免的套利损失和下降比例分别为

$$\Delta L_A^m = L_A^0 - L_A^m, \quad \rho_A^m = \frac{L_A^0 - L_A^m}{L_A^0}.$$

未执行交易不记为负损失，也不解释为 LP 获得额外收益。RAL 聚焦于本文识别的套利型交易在机制作用后仍可实现的滞后报价价值提取。它不等同于完整社会福利损失，也不等同于 LP 总收益或 LVR。本文评价边界内的附加费用主要作为交易参与者之间的支付转移进入通道效用，而不与 RAL 合并为统一福利指标；因此，本文分别报告 RAL 与模型 L 覆盖率，用于描述 LP 侧套利价值提取与关键清算功能连续性。

5.5.2 模型 L 覆盖率

对第 j 个模型 L 情景，只有同时满足以下条件时才记为及时通过：其一，执行区块不晚于预设截止区块；其二，扣除通道费用和延迟成本后净收益严格为正。机制 m 下的模型 L 覆盖率为

$$Q_L^m = \frac{1}{N_L} \sum_{j=1}^{N_L} \mathbf{1} \left\{ t_{j,m}^{\text{exec}} \leq t_j^{\text{deadline}}, \quad U_{j,m}^L > 0 \right\}.$$

正式测试阶段 $N_L = 30$ 。若目标区块时间缺失，等待被视为不可及时完成，不计为通过。该指标代表给定模型收益、截止时间和条件性 $c(\sigma)$ 情景下的覆盖率。

第六章 实验结果

6.1 主要结果

表 6.1和图 6.1报告了五种机制在共同测试样本上的表现。无额外防御场景记录了套利型交易在基准状态下从 LP 处提取的价值，以及没有额外机制干预时的模型清算连续性，为后续机制比较提供统一参照。该场景下，剩余套利型损失（RAL）为 1,267,860.11 USDC，30 个模型清算情景均能按时且以正净收益完成。

表 6.1: 五种机制的主要实验结果

机制	主要参数	剩余 RAL (USDC)	RAL 下 降	模型 L 通过	覆盖率
无额外防御	—	1,267,860.11	0.00%	30/30	100.00%
统一固定费	210 bps	681,579.67	46.24%	30/30	100.00%
状态依赖 动态费	247 bps $\times 0.75/1/1.25$	603,163.87	52.43%	30/30	100.00%
批处理: 低/中 情景	$h = 4$	269,942.34	78.71%	17/30	56.67%
批处理: 高情 景	$h = 1$	328,911.75	74.06%	29/30	96.67%
费用-延迟 双通道	$\tau_b = 6, \Delta f = 27,$ $f_R = 0$	219,580.66	82.68%	30/30	100.00%

注：共同测试样本包括 235 笔套利型交易和 30 个模型 L 情景；费用单位为 bps，等待单位为区块。

统一固定费和状态依赖动态费分别使 RAL 下降 46.24% 和 52.43%，同时保持 30/30 的模型清算连续性。这说明，在较低费率下，两种收费机制均具有一定防御作用，并未阻碍模型清算；但其对套利型交易的阻拦仍然有限，未能在保持清算连续性的同时实现较强的损失控制。本文的三档状态依赖动态费基线根据波动状态调整收费，因此表现略好于统一固定费，但单一费用工具仍无法利用套利者和清算者在时间敏感度上的差异。

固定边界批处理表明，等待至批次终点并重新定价能够压缩或消除原有套利空间，从而显著减少 RAL。4 区块批处理使 RAL 下降 78.71%，但模型清算连续性降至 17/30；1 区块批处理的 RAL 下降比例为 74.06%，清算连续性则提高至 29/30。较长等待提供了更长的重新报价窗口，但也更容易使时间敏感的清算错过截止时间。因此，本实验支持的是“等待窗口 + 目标时点重新报价”的损失控制作用，而非等待本身自动降低 RAL。

费用-延迟双通道在预先设定的有限参数网格内，使 RAL 下降 82.68%，并保持 30/30 的模型清算连续性。与本文三档状态依赖动态费基线相比，双通道在不额外损害清算连续性的情况下取得了更高的 RAL 下降；与批处理相比，双通道避免了统一

等待对清算造成的明显阻碍。该结果表明，在本组参数下，引入费用-时间菜单能够形成与理论自选择方向一致的交易分流，使时间敏感的清算者保留即时执行机会，同时使部分套利型交易进入延迟通道或退出，从而缓解套利阻拦与清算连续性之间的两难。

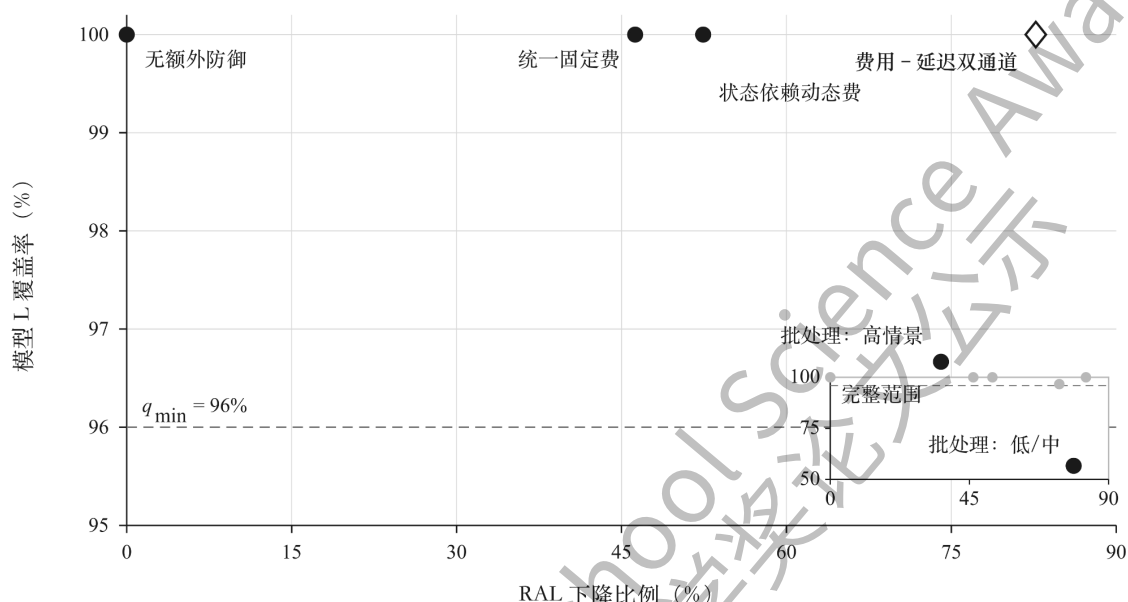


图 6.1：候选机制在套利损失控制-清算连续性平面上的表现

注：横轴为 RAL 下降比例，纵轴为模型 L 覆盖率；虚线表示最低清算连续性约束 $q_{\min} = 96\%$ ，嵌入图展示完整纵轴范围。

在本次历史路径和共同测试样本中，费用-延迟双通道在满足最低模型清算连续性要求的候选机制中取得最低 RAL。

6.2 机制分解

在最终双通道参数下，235 笔套利型交易在提交时均选择低费延迟通道，30 个模型清算情景均选择即时通道。在这 235 笔交易中，69 笔交易在等待结束并重新报价后不再具有正净收益，因而自动终止；其余 166 笔交易仍有利可图并继续执行。

69 笔自动终止的交易说明，延迟使部分原有套利机会在重新定价过程中缩小或消失，套利者无利可图后便不再执行。该部分减少 RAL 805,129.40 USDC，占无额外防御基准损失的 63.50%，是双通道降低 RAL 的主要来源。在本次实验中，一些损失金额较大的交易被自动终止，因此对总结果的贡献较大。

166 笔继续执行的交易并不表示延迟没有发挥作用。对于部分继续执行的交易，按目标时点的池内执行价格和外部参考价格重新计算后，其净套利空间低于到达时立即执行的基准值，因此 LP 承担的 RAL 相应减少。这部分共减少 RAL 264,696.17 USDC，占基准损失的 20.88%。

延迟也并非对每笔交易都有利。在少数交易中，目标时点重新报价后的套利空间

反而扩大，导致 RAL 增加 21,546.12 USDC，占基准损失的 1.70%。稳定币价格、外部市场价格和池内报价都会随时间波动，价差既可能收窄，也可能扩大。因此，双通道的作用是总体上的净改善，而不是保证每笔交易的套利空间都随等待时间下降。

表 6.2: 双通道的 RAL 分解

分解项	金额 (USDC)	占基准损失
自动终止减少的 RAL	805,129.40	63.50%
继续执行交易减少的 RAL	264,696.17	20.88%
损失恶化	-21,546.12	-1.70%
双通道剩余 RAL	219,580.66	17.32%

注：正值表示相对于无额外防御场景减少的 RAL；损失恶化以负值列示。

综合以上三部分，双通道将剩余 RAL 降至 219,580.66 USDC，即剩余为基准损失的 17.32%，共减少 82.68%。其效果主要来自两条路径：一部分套利机会消失后交易自动终止；另一部分交易虽然继续执行，但能够提取的套利价值已经减少。

6.3 稳健性检验

6.3.1 极端交易与等权检验

表 6.3 比较了删除极端交易和交易等权口径下的机制表现。主规格中，双通道的 RAL 下降比例为 82.68%，高于动态费的 52.43% 和固定费的 46.24%。删除最大一笔交易后，动态费的下降比例提高至 100%，固定费提高至 88.20%，双通道则降至 66.97%；删除前五笔后，三者分别为 100%、92.91% 和 64.57%。交易等权时，动态费和固定费同样高于双通道。

表 6.3: 不同稳健性口径下的 RAL 下降比例

评价口径	统一固定费	状态依赖动态费	费用-延迟双通道
主规格	46.24%	52.43%	82.68%
删除最大 1 笔	88.20%	100.00%	66.97%
删除前 5 笔	92.91%	100.00%	64.57%
交易等权	93.26%	96.53%	56.84%

注：各稳健性口径沿用主实验参数，没有针对删除极端交易或交易等权重新选择参数。

这一排名变化说明，双通道对尾部大额交易的防御效果较强。本文的三档状态依赖动态费与统一固定费基线能够拦截大量利润空间较小的套利型交易，但对套利利润极高的交易作用有限。由于大额毒性订单会给 LP 造成更高损失，双通道在总损失口

径下仍具有明显的经济意义。本文关注危机期间 RAL 总额的变化, 因此以实际损失金额加总作为主规格; 交易等权结果则用于检验机制在不同交易之间的普遍防御表现。

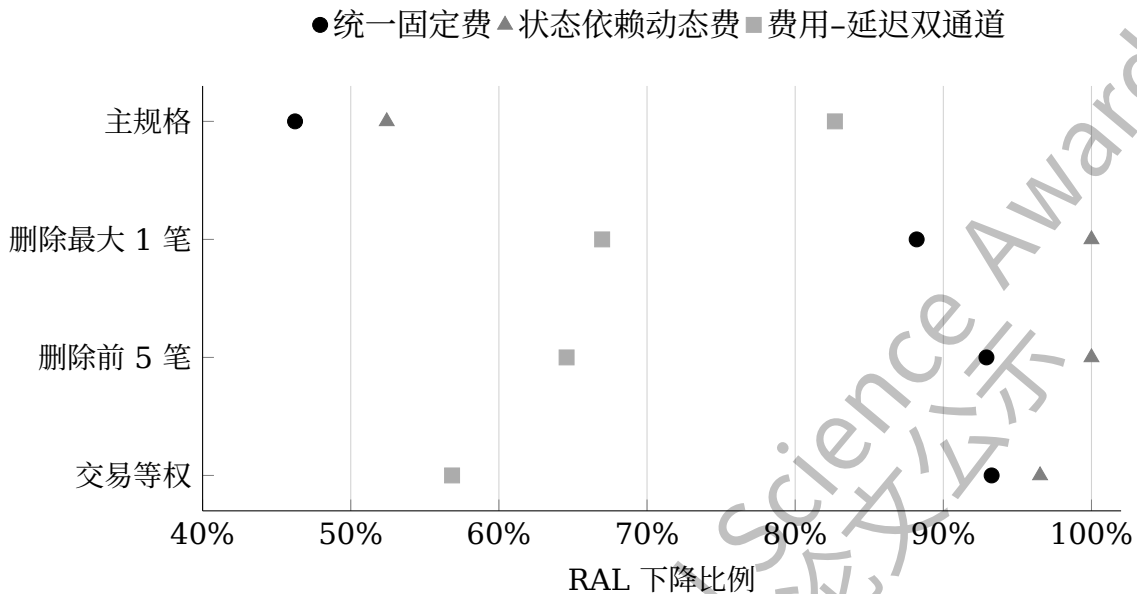


图 6.2: 不同稳健性口径下的机制表现

6.3.2 损失集中与排名变化

测试样本的基准 RAL 呈明显的尾部集中: 损失最大的一笔交易占基准 RAL 的 47.57%, 前五笔占 62.04%, 前十笔占 74.09%, 前二十笔占 85.43%。这一结构解释了删除少数大额交易后机制排名发生明显变化的原因。

删除最大一笔或前五笔后, 本文三档状态依赖动态费基线在剩余样本中的 RAL 下降比例达到 100%, 表明其在该样本上对利润空间较小的套利型交易具有更广的覆盖。与主规格的排名差异进一步说明, 机制绩效取决于损失分布: 本文三档动态费基线更擅长覆盖数量较多的中小套利机会, 而双通道在总损失由少数大额尾部交易主导时具有更强的损失控制能力。

6.3.3 机制成分消融

为区分套利时间成本、清算时间成本和套利型交易 A 的目标时点重新报价三个机制成分的作用, 本文在保持正式参数不变的条件下, 分别去除 D_A 、 D_L 以及 A 的目标时点重新报价。消融过程中不重新选择参数。

去除 D_A 后, 235 笔套利型交易仍全部选择常规通道, 到期后仍有 69 笔取消、166 笔执行, RAL 下降比例保持 82.68%。这说明在最终参数点上, 套利者的事前通道选择主要由优先费差驱动, D_A 并非当前配置中的绑定因素; 其一般理论作用仍由第四章的筛选条件刻画。

去除 D_L 后, 模型 L 全部由优先通道转向常规通道, 最终只有 4 个情景能够在截止时间前完成, 覆盖率由 30/30 降至 4/30。说明清算时间损失是模型 L 选择优先通道的重要原因; 与此同时, deadline 又独立阻止了 26 个进入常规通道的清算情

景及时完成。

表 6.4: 固定参数机制成分消融

场景	A 事前选择 P/R/E	到期取消/执行	剩余 RAL (USDC)	RAL 下降	模型 L 通过
完整机制	0/235/0	69/166	219,580.66	82.68%	30/30
去除 D_A	0/235/0	69/166	219,580.66	82.68%	30/30
去除 D_L	0/235/0	69/166	219,580.66	82.68%	4/30
去除 D_A 、 D_L	0/235/0	69/166	219,580.66	82.68%	4/30
去除重新报价	0/235/0	0/235	1,267,860.11	0.00%	30/30

注：各场景固定使用正式双通道参数，没有重新调参；模型 L 在 low、mid 和 high 三组条件情景下结果相同。

去除目标时点重新报价后，235 笔套利型交易均继续执行，取消数量由 69 笔降至 0，剩余 RAL 恢复至无额外防御场景的 1,267,860.11 USDC，RAL 下降比例降至 0。该结果说明，等待本身不会自动减少 RAL；本次实验中的损失改善主要来自延迟结束后的重新报价，以及根据更新后的套利空间决定执行或退出。

总体而言，费用差主要影响套利型交易的事前通道选择，清算时间损失推动模型 L 选择优先通道，而目标时点重新报价则是 RAL 下降的直接来源。

6.3.4 约束、参数与测量敏感性

本文进一步检验正式结果是否依赖最低清算连续性要求、外部价格窗口以及双通道参数。所有敏感性测试均保持既定训练-验证-测试划分，测试集不参与重新选参。首先，将最低模型 L 覆盖要求 $q_{\min}$ 从 0.90 提高至 1.00 时，低、中、高三种清算时间成本情景下的验证集最优菜单均保持为 (6, 27, 0)。其中 $q_{\min} = 0.95$ 与 0.96 都对应 29/30 的最低通过要求，因此形成相同的离散约束。其次，该窗口敏感性固定正式 A 标签、235 笔共同测试样本与 k_A ，并重新计算不同过去价格窗口下的目标时点价格与 RAL。在固定正式等待参数 $\tau_b = 6$ 的条件下，将严格过去信息的外部价格窗口由 30 秒改为 60 秒和 120 秒时，RAL 下降比例分别为 81.00% 和 81.92%，与正式 30 秒窗口下的 82.68% 接近，说明主结果对合理的过去价格窗口选择较为稳定。最后，将正式优先费差 27 bps 扩展至 7-81 bps 进行压力测试可见，费差过低时，部分套利型交易会重新进入优先通道；费差过高时，部分低时间成本的模型 L 情景会失去目标配置。固定样本诊断给出的两侧边界约为 8.895 bps 和 72 bps，正式取值 27 bps 位于两者之间：

$$8.895 < 27 < 72 \text{ bps.}$$

这说明正式菜单处于内部可实施区间之内。上述边界仅用于固定样本诊断，不参与正式参数选择。

第七章 结论与讨论

7.1 主要结论

本文将稳定币脱锚期间的 AMM 套利价值提取与必要清算连续性表述为隐藏交易类型下的筛选问题，并采用“最低清算连续性约束-RAL 最小化”的制度设计结构。理论上，单一费用机制能够分离的市场状态可由双通道路径 B 覆盖；路径 A 进一步利用两类参与者对等待风险的不同敏感程度形成额外分离路径。因此，双通道能够覆盖单一费用可实现的分离状态，并在满足路径 A 存在条件的部分市场状态中实现单一费用无法完成的目标配置。同时，最低清算连续性要求提高会使可行菜单集合弱收缩，因此在当前约束优化框架下，最低可实现 RAL 不会下降。

在固定的 2023 年 USDC 脱锚历史路径和共同测试样本下，无额外防御时 RAL 为 1,267,860.11 USDC。统一固定费与本文三档状态依赖动态费基线分别将 RAL 降低 46.24% 和 52.43%，并均保持 30/30 的模型 L 覆盖；费用-延迟双通道将 RAL 降至 219,580.66 USDC，下降 82.68%，同样保持 30/30 覆盖。固定边界批处理也能通过等待至目标时点并重新报价压缩套利空间，但更长等待伴随模型清算连续性下降。因此，本轮历史路径评价支持的是“等待窗口 + 目标时点重新报价”的损失控制作用，而非等待本身自动降低 RAL。

机制分解显示，最终双通道参数下 235 笔套利型交易均先选择低费延迟通道，其中 69 笔在重新报价后退出，166 笔继续执行；自动终止与继续执行交易的套利空间压缩分别贡献基准损失的 63.50% 和 20.88%，另有 1.70% 的损失恶化。消融结果进一步表明，费用差主要影响套利交易的事前通道选择，清算时间损失推动模型 L 选择即时通道，而目标时点重新报价是本轮历史路径中 RAL 下降的直接来源；去除重新报价后 RAL 下降率回到 0，去除清算时间损失后模型 L 覆盖由 30/30 降至 4/30。

稳健性分析表明，主规格优势与测试样本的尾部损失集中有关：最大一笔交易占基准 RAL 的 47.57%，前五笔占 62.04%；删除极端交易或采用交易等权口径后，本文的统一固定费与三档动态费基线排名超过双通道。与此同时，最低模型 L 覆盖要求、past-only 外部价格窗口和优先费差压力测试显示，正式菜单在多组参数与测量扰动下保持较稳定的总体表现，且费差过低与过高时出现的双侧边界与第四章的内部可实施区域相一致。

7.2 经济与治理含义

本文的结果表明，可编程金融市场为危机治理提供了价格之外的制度工具。当交易者的真实类型难以直接观察、但不同交易需求具有不同的时间敏感性时，执行速度可以成为筛选属性。机制通过公开的费用、等待时间和执行优先级条件，把私人时间成本转化为可观察的自我选择，而无需直接识别交易者身份。对于稳定币市场，这意

意味着风险治理除了关注发行端因素，还可以进一步考虑危机已经传导至二级市场后，交易基础设施如何利用时间异质性限制有害的价值提取并维持关键链上功能。

这一结果具有更一般的市场设计含义。传统金融中的熔断、集合竞价、交易优先级和流动性安排同样涉及压力状态下交易速度、市场准入与功能连续性的制度选择。本文结果据此支持的更一般原则是：**危机市场设计可以把关键金融功能的连续性写入制度约束，并利用参与者对价格和时间的异质性设计差异化的执行条件。**随着支付、抵押、交易和清算逐渐进入可编程基础设施，这一原则可为自动化市场中的危机规则设计提供参考。

7.3 研究边界与未来方向

本文的历史机制评价集中于 2023 年 USDC 脱锚及单一 USDC/WETH 流动性池，因此当前证据首先对应这一类稳定币危机环境。不同稳定币在储备结构、赎回机制和市场流动性上存在差异，未来可将相同框架扩展到更多脱锚事件与交易池，以检验费用-延迟筛选在不同市场结构中的适用性。

清算侧的评价采用标准化模型 L 情景，以统一比较不同机制面对不同收益和截止时间约束时的表现；同时，历史机制评价固定了已实现的价格与池状态路径，使不同机制在共同历史状态基准下进行比较，但尚未内生重建机制改变当前交易后对后续流动性、订单路由和套利行为产生的反馈。后续研究可以结合更完整的清算机会数据和动态 AMM 反事实模型，对清算者时间成本进行行为校准，并研究机制干预沿危机路径产生的内生市场反馈。在此基础上，费用-延迟菜单还可以进一步扩展至更丰富的收费结构与多层执行优先级，从而检验本文筛选逻辑在更一般的可编程市场中的表现。

参考文献

- [1] ARAMONTE S, HUANG W, SCHRIMPF A. Trading in the DeFi era: automated market-makers[J/OL]. BIS Quarterly Review, 2021(12). https://www.bis.org/publ/qtrpdf/r_qt2112v.htm
- [2] EUROPEAN PARLIAMENT, COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. Regulation (EU) 2023/1114 of 31 May 2023 on markets in crypto-assets[Z/OL]. Official Journal of the European Union, 2023, L150: 40-205. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1114/oj/eng>
- [3] HONG KONG MONETARY AUTHORITY. Implementation of regulatory regime for stablecoin issuers[EB/OL]. (2025-07-29)[2026-07-29]. <https://www.hkma.gov.hk/eng/news-and-media/press-releases/2025/07/20250729-4/>
- [4] UNITED STATES CONGRESS. Guiding and Establishing National Innovation for U.S. Stablecoins Act, Pub. L. No. 119-27, 139 Stat. 419[Z/OL]. (2025-07-18)[2026-07-29]. <https://www.govinfo.gov/link/plaw/119/public/27>
- [5] WATSKY C, ALLEN J, DAUD H, et al. Primary and secondary markets for stablecoins[R/OL]. FEDS Notes. Washington: Board of Governors of the Federal Reserve System, 2024. DOI: 10.17016/2380-7172.3447. <https://www.federalreserve.gov/econres/notes/feds-notes/primary-and-secondary-markets-for-stablecoins-20240223.html>
- [6] BOARD OF GOVERNORS OF THE FEDERAL RESERVE SYSTEM. Financial Stability Report: May 2023[R/OL]. Washington, D.C.: Federal Reserve, 2023. <https://www.federalreserve.gov/publications/files/financial-stability-report-20230508.pdf>
- [7] CIRCLE. \$3.3 billion of USDC reserve risk removed, dollar de-peg closes[EB/OL]. (2023-03-12)[2026-07-29]. <https://www.circle.com/press-room/3-3-billion-of-usdc-reserve-risk-removed-dollar-de-peg-closes>
- [8] U.S. DEPARTMENT OF THE TREASURY, FEDERAL RESERVE, FDIC. Joint statement on actions to protect the U.S. economy by strengthening public confidence in our banking system[EB/OL]. (2023-03-12)[2026-07-29]. <https://www.fdic.gov/news/press-releases/2023/pr23017.html>
- [9] ALDASORO I, BELTRÁN P, GRINBERG F. Stablecoin flows and spillovers to FX markets[R/OL]. BIS Working Papers, No. 1340. Basel: BIS, 2026. <https://www.bis.org/publ/work1340.htm>

- [10] ADAMS H, ZINSMEISTER N, ROBINSON D. Uniswap v2 core[R/OL]. 2020. <https://uniswap.org/whitepaper.pdf>
- [11] UNISWAP LABS. Automated market maker, constant product formula and pricing mechanics[EB/OL]. [2026-07-29]. <https://docs.uniswap.org/>
- [12] MILIONIS J, MOALLEMI C C, ROUGHGARDEN T, et al. Automated market making and loss-versus-rebalancing[EB/OL]. arXiv:2208.06046, 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2208.06046. <https://arxiv.org/abs/2208.06046>
- [13] FRITSCH R, CANIDIO A. Measuring arbitrage losses and profitability of AMM liquidity[C]//Proceedings of the ACM Web Conference 2024. New York: ACM, 2024. DOI: 10.1145/3589335.3651961. <https://doi.org/10.1145/3589335.3651961>
- [14] PEREZ D, WERNER S M, XU J, et al. Liquidations: DeFi on a knife-edge[C]//Financial Cryptography and Data Security. Cham: Springer, 2021: 457-476. DOI: 10.1007/978-3-662-64331-0_24. https://doi.org/10.1007/978-3-662-64331-0_24
- [15] QIN K, ZHOU L, GAMITO P, et al. An empirical study of DeFi liquidations: incentives, risks, and instabilities[C]//Proceedings of the 21st ACM Internet Measurement Conference. New York: ACM, 2021: 336-350. DOI: 10.1145/3487552.3487811. <https://doi.org/10.1145/3487552.3487811>
- [16] AAVE. Positions and liquidations: Aave protocol documentation[EB/OL]. [2026-07-29]. <https://aave.com/docs/aave-v4/positions/liquidations>
- [17] CAMPBELL S, BERGAULT P, MILIONIS J, et al. Optimal fees for liquidity provision in automated market makers[EB/OL]. arXiv:2508.08152, 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2508.08152. <https://arxiv.org/abs/2508.08152>
- [18] BAGGIANI L, HERDEGEN M, SÁNCHEZ-BETANCOURT L. Optimal dynamic fees in automated market makers[EB/OL]. arXiv:2506.02869, 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2506.02869. <https://arxiv.org/abs/2506.02869>
- [19] U.S. SECURITIES AND EXCHANGE COMMISSION. SEC approves proposals to address extraordinary volatility in individual stocks and broader stock market[EB/OL]. (2012-06-01)[2026-07-29]. <https://www.sec.gov/newsroom/press-releases/2012-2012-107htm>
- [20] NASDAQ. The Nasdaq opening and closing crosses[EB/OL]. [2026-07-29]. https://nasdaqtrader.com/content/productsservices/trading/crosses/open_close_faqs.pdf

- [21] BUDISH E, CRAMTON P, SHIM J. The high-frequency trading arms race: frequent batch auctions as a market design response[J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 2015, 130(4): 1547–1621. DOI: 10.1093/qje/qjv027. <https://doi.org/10.1093/qje/qjv027>
- [22] U.S. SECURITIES AND EXCHANGE COMMISSION. Equity market structure in 2016 and for the future[EB/OL]. 2016.
- [23] DEUTSCHE BÖRSE GROUP. Protective mechanisms in continuous trading and auctions: Xetra volatility interruptions[EB/OL]. [2026-07-29]. <https://www.xetra.com/>
- [24] ZIMMERMANN K. Price discovery in European volatility interruptions[R/OL]. Frankfurt: Goethe University Frankfurt, 2014. <https://www.fese.eu/app/uploads/2025/01/dlv-winner-2014.pdf>
- [25] ADAMS A, MOALLEMI C C, REYNOLDS S, et al. am-AMM: an auction-managed automated market maker[C]//*Financial Cryptography and Data Security*. Cham: Springer, 2026: 93–108. DOI: 10.1007/978-3-032-07024-1_6. https://doi.org/10.1007/978-3-032-07024-1_6
- [26] CANIDIO A, FRITSCH R. Arbitrageurs' profits, LVR, and sandwich attacks: batch trading as an AMM design response[EB/OL]. arXiv:2307.02074, 2023, revised 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2307.02074. <https://arxiv.org/abs/2307.02074>
- [27] COW PROTOCOL. CoW AMM documentation[EB/OL]. [2026-07-29]. <https://docs.cow.fi/cow-amm/>
- [28] ROTHSCCHILD M, STIGLITZ J E. Equilibrium in competitive insurance markets: an essay on the economics of imperfect information[J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 1976, 90(4): 629–649. DOI: 10.2307/1885326. <https://doi.org/10.2307/1885326>
- [29] MARCHAND M G. Priority pricing[J]. *Management Science*, 1974, 20(7): 1131–1140. DOI: 10.1287/mnsc.20.7.1131. <https://doi.org/10.1287/mnsc.20.7.1131>
- [30] MENDELSON H, WHANG S. Optimal incentive-compatible priority pricing for the M/M/1 queue[J]. *Operations Research*, 1990, 38(5): 870–883. DOI: 10.1287/opre.38.5.870. <https://doi.org/10.1287/opre.38.5.870>
- [31] AFÈCHE P, PAVLIN J M. Optimal price/lead-time menus for queues with customer choice: segmentation, pooling, and strategic delay[J]. *Management Science*, 2016, 62(8): 2412–2436. DOI: 10.1287/mnsc.2015.2236. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2015.2236>

- [32] SADEGHI A, FEINSTEIN Z. Liquidation dynamics in DeFi and the role of transaction fees[EB/OL]. arXiv:2602.12104, 2026. DOI: 10.48550/arXiv.2602.12104. <https://arxiv.org/abs/2602.12104>
- [33] BLACK F, SCHOLES M. The pricing of options and corporate liabilities[J]. Journal of Political Economy, 1973, 81(3): 637-654. DOI: 10.1086/260062. <https://doi.org/10.1086/260062>

附录 A 第四章证明与补充技术细节

本附录给出第四章主要定理、引理与推论的完整证明，并补充正文中省略的技术定义与参数讨论。

A.1 引理 1 的效用比较代数

将第三章的效用函数代入式 (3)-(5)，可得：

$$U_A^R > U_A^P \iff \Pi_A - f_R - D_A(\tau, \sigma) > \Pi_A - f_P \iff D_A(\tau, \sigma) < \Delta f,$$

$$U_A^E > U_A^P \iff 0 > \Pi_A - f_P \iff f_P > \Pi_A,$$

$$U_L^P > U_L^R \iff \Pi_L - f_P > \Pi_L - f_R - D_L(\tau, \sigma) \iff \Delta f < D_L(\tau, \sigma),$$

$$U_L^P > U_L^E \iff \Pi_L - f_P > 0 \iff f_P < \Pi_L.$$

A.2 定理 1 的完整证明

证明。根据引理 1，机制成立的充要条件可表示为以下两组条件之一：(1, 3, 4) 或 (2, 3, 4)，其中 (1) $U_A^R > U_A^P$ ，(2) $U_A^E > U_A^P$ ，(3) $U_L^P > U_L^R$ ，(4) $U_L^P > 0$ 。

由式 (6)-(9)，条件 (1, 3, 4) 等价于 $D_A(\tau, \sigma) < \Delta f < D_L(\tau, \sigma)$ ， $f_P < \Pi_L$ ；而条件 (2, 3, 4) 等价于 $f_P > \Pi_A$ ， $\Delta f < D_L(\tau, \sigma)$ ， $f_P < \Pi_L$ 。将两组条件合并，即得到定理中的充要条件。

A.3 推论 1（路径 A）的完整证明

证明。由 $U_A^R > U_A^P$ 可得 $k_A \sigma \sqrt{\tau} < \Delta f$ 。由 $U_L^P > U_L^R$ 可得 $\Delta f < c(\sigma) \tau$ 。又由清算者参与约束 $U_L^P > 0$ 可得 $f_R + \Delta f < \Pi_L$ ，即 $\Delta f < \Pi_L - f_R$ 。

因此， Δf 的可行区间为式 (16)。该区间非空需要式 (17) 与式 (18) 同时成立。由式 (18) 先得到 $\Pi_L > f_R$ ，在该正值条件下再平方整理，可得式 (19)；结合 $\Pi_L > f_R$ ，该 τ 区间非空的条件为式 (20)。

A.4 路径 A 的补充说明

说明 1（小额常规通道费用近似）。当常规通道费用 f_R 相对于 Π_L 足够小时，有

$$f_P = f_R + \Delta f \approx \Delta f.$$

此时式 (19)可近似写为

$$\left(\frac{k_A \sigma}{c(\sigma)}\right)^2 < \tau < \left(\frac{\Pi_L}{k_A \sigma}\right)^2.$$

相应的参数存在条件近似为

$$\Pi_L > \frac{(k_A \sigma)^2}{c(\sigma)}.$$

更精确地说, 只要 $\Delta f < \Pi_L$, 就存在 $f_R \in (0, \Pi_L - \Delta f)$ 使 $f_R + \Delta f < \Pi_L$ 。因此, 小额 f_R 的近似主要用于简化经济解释, 而非替代精确关系。

说明 2 (套利者参与常规通道)。 路径 A 本身只说明常规通道优于优先通道, 并不必然说明套利者最终选择常规通道。若进一步要求套利者参与常规通道, 还需满足 $U_A^R > U_A^E$, 即

$$\Pi_A - f_R - k_A \sigma \sqrt{\tau} > 0.$$

这首先要要求 $\Pi_A > f_R$; 在该正值条件下, 等价地,

$$\tau < \left(\frac{\Pi_A - f_R}{k_A \sigma}\right)^2.$$

因此, 套利者参与常规通道的附加条件为 $\Pi_A > f_R$ 以及上述 τ 上界; 它们并非优先通道定向配置成立的必要条件。

A.5 推论 2 (路径 B) 的完整证明

证明。 由 $U_A^E > U_A^P$ 得到 $f_P > \Pi_A$; 由 $U_L^P > U_L^R$ 得到 $\Delta f < c(\sigma)\tau$; 由 $U_L^P > 0$ 得到 $f_P < \Pi_L$ 。联立即得 $\Pi_A < f_P < \Pi_L$, $\Delta f < c(\sigma)\tau$ 。

A.6 引理 2 的完整证明

证明。 套利者选择不交易要求 $\Pi_A - f < 0$, 即 $f > \Pi_A$ 。清算者选择交易要求 $\Pi_L - f > 0$, 即 $f < \Pi_L$ 。因此, 手续费模型的分离条件正是式 (23)。该区间非空, 当且仅当 $\Pi_A < \Pi_L$ 。因而, 一旦 $\Pi_A \geq \Pi_L$, 手续费模型的 f 解集为空, 手续费模型失效。

A.7 定理 2 的完整证明

对于第一点, 传统动态手续费能够实现分离, 意味着存在 f 满足 $\Pi_A < f < \Pi_L$ 。令 $f_P = f$, 再选择 $f_R < f_P$ 以及足够大的 τ , 即可使路径 B 的条件成立。因此, 手续费模型能够解决的情况, 双通道模型也能够解决。

对于第二点, 当 $\Pi_A \geq \Pi_L$ 时, 不存在 f 满足 $\Pi_A < f < \Pi_L$, 所以手续费模型和路径 B 都失效。若同时满足路径 A 的存在条件, 则相应的 τ 区间非空; 在任意这样的 τ 下, Δf 区间也非空。因此, 双通道模型仍可以通过路径 A 实现分离。

若 $x \in S_F$, 则存在 f 使 $\Pi_A < f < \Pi_L$ 。取 $f_P = f$, 再选 $0 \leq f_R < f_P$ 和满足

$\Delta f < c(\sigma)\tau$ 的 τ , 可构造出路径 B, 因此 $x \in S_M$, 故 $S_F \subseteq S_M$ 。

若存在状态满足 $\Pi_A \geq \Pi_L$ 且 $\Pi_L > (k_A\sigma)^2/c(\sigma)$, 则单一费用区间为空; 同时取 $f_R = 0$ 后, 式 (20) 的条件成立, 故存在 τ 和 Δf 满足路径 A。因此该状态属于 S_M 但不属于 S_F 。只要允许的市场状态空间包含至少一个此类状态, 即有 $S_F \subsetneq S_M$ 。

A.8 参数内部区域与两类稳健分离区域

所有允许的参数组合构成一般参数空间

$$\Theta = \{(f_R, \tau, \Delta f) \in \mathbb{R}^3 : 0 \leq f_R \leq f_R^{\max}, \tau_{\min} \leq \tau \leq \tau_{\max}, 0 < \Delta f_{\min} \leq \Delta f \leq \Delta f_{\max}\}.$$

为避免参数选择完全由人为设定的边界决定, 引入参数边界余量 $\eta = (\eta_R, \eta_\tau, \eta_{\Delta f})$, $\eta_R, \eta_\tau, \eta_{\Delta f} \geq 0$, 并定义参数内部区域

$$\Theta_\eta = \left\{ \theta \in \Theta : \begin{array}{l} \eta_R \leq f_R \leq f_R^{\max} - \eta_R, \\ \tau_{\min} + \eta_\tau \leq \tau \leq \tau_{\max} - \eta_\tau, \\ \Delta f_{\min} + \eta_{\Delta f} \leq \Delta f \leq \Delta f_{\max} - \eta_{\Delta f} \end{array} \right\}.$$

取 η 使 $\Theta_\eta \neq \emptyset$ 。参数边界余量只限制参数与外生边界之间的距离, 并不直接保证交易者类型能够被分离。

为展开套利者的两条可能路径, 定义 $F_\epsilon = F_R^\epsilon \cup F_E^\epsilon$, 其中

$$F_R^\epsilon = \left\{ \theta \in \Theta_\eta : \begin{array}{l} U_A^R \geq U_A^P + \epsilon_A, \\ U_A^R \geq U_A^E, \\ U_L^P \geq U_L^R + \epsilon_L, \\ U_L^P \geq U_L^E + \epsilon_L \end{array} \right\}$$

表示常规通道成为套利者最优选择之一的区域; 而

$$F_E^\epsilon = \left\{ \theta \in \Theta_\eta : \begin{array}{l} U_A^E \geq U_A^P + \epsilon_A, \\ U_A^E \geq U_A^R, \\ U_L^P \geq U_L^R + \epsilon_L, \\ U_L^P \geq U_L^E + \epsilon_L \end{array} \right\}$$

表示退出成为套利者最优选择之一的区域。因此, F_ϵ 可能由多个子区域构成, 未必连通; 可行域不连通仅表示不同参数区域可能通过不同路径排除套利者, 并不意味着效用函数或模型本身不连续。

A.9 定理 3 的完整证明

证明。由定理 3 的条件, $C(q_{\min})$ 为非空紧集, 且 $L_A(\theta)$ 在 $C(q_{\min})$ 上连续。 F_ε 由数个关于 Δf 、 f_R 、 τ 的约束构成, 并位于有界参数空间内; $C(q_{\min})$ 是在 F_ε 的基础上进一步加入清算连续性约束 $Q_L(\theta) \geq q_{\min}$ 得到的可行集。

因此, 在 $C(q_{\min})$ 非空且紧致的前提下, 根据极值定理, 必然存在 $(\Delta f, f_R, \tau)$ 的组合使得 $L_A(\theta)$ 取得最小值。于是至少存在一个 $\theta^* \in C(q_{\min})$, 满足

$$L_A(\theta^*) = \min\{L_A(\theta) : \theta \in C(q_{\min})\},$$

因此最优参数集合非空。

A.10 推论 3 的完整证明

证明。若提高清算要求 $q_2 \geq q_1$, 则任意 $\theta \in C(q_2)$ 都满足 $Q_L(\theta) \geq q_2 \geq q_1$, 因此 $C(q_2) \subseteq C(q_1)$ 。假设存在 $\theta \in C(q_2)$ 使新的 $L_A(\theta)$ 小于原先在 $C(q_1)$ 上的最小值, 由于 θ 同时属于 $C(q_1)$, 这与原先 $L_A(\theta)$ 在 $C(q_1)$ 中已经取得最小值矛盾。因而, 提高清算要求后新的最小 $L_A(\theta)$ 不会低于原先的最小值, 即 $\Psi(q_2) \geq \Psi(q_1)$ 。