arXiv:2603.12302v1 [math.CT] 12 Mar 2026

装饰余跨的实际应用：通过推出和粒子滤波器耦合异质动力系统

Wesley Phoa*

2026年3月

摘要

装饰余跨提供了一种范畴框架，可沿共享接口组合开放系统。本文是一项计算概念验证：我们展示了当装饰采用来自不同数学传统的定量模型时，该框架能够构造出一个可运行的耦合动力系统。具体而言，我们将线性化的新凯恩斯动态随机一般均衡模型、随机分舱流行病模型（多毒株SEIR模型）以及带滞后的非线性疫苗采用模型，耦合到一个序贯蒙特卡洛采样器中。每个模型都是一个带装饰余跨度——内部动力学作为装饰，暴露变量作为接口。复合系统是沿变量识别进行的推出，耦合函数则编码为因子图约束。推出并不关心模型内部是什么，只关心它们共享什么。校准采用最佳估计；模型刻意保持简单；我们的目的是展示范畴论机制能够计算，而非打造预测工具。

耦合系统产生了拒绝分岔：一些轨迹通过接种疫苗摆脱困境，另一些则陷入强制令反弹、拒绝接种疫苗、持续感染和经济衰退构成的自我强化循环。这是耦合的结构属性，而非输入假设。与非耦合系统相比，耦合使产出缺口偏移 -0.78 个百分点，使拒绝率偏移 $+22$ 个百分点。第四种叙事——财政/政治动力学，以美国新冠疫情财政应对为依据进行校准——通过第二次推出接入系统，并引入第一个正向耦合通道。在大流行规模支出参数下，14% 的轨迹超调至正产出缺口区间；看跌偏差从 -0.78 个百分点缩小至 -0.20 个百分点，但依然存在。可计算的偏差分解将这种非对称性的来源区分为三类——抽样、结构性和观测性——并将结构分量定位到特定耦合函数；这些函数的方向非对称性可通过历史类比进行检验。如果校准得当，就能针对每条原型轨迹制定应对方案——一份“行动方案”；随着实际历史路径演变，监测它在所有状态变量上的变化，并衡量其与各个原型的距离；当它逐渐趋近某个原型时，就实施相应的方案。

关键词： 带装饰余跨、推出、应用范畴论、粒子滤波器、耦合动力系统、因子图、动态随机一般均衡、流行病学、序贯蒙特卡洛

*通讯作者：wesley@topos.institute。探索、实现和编辑工作中使用了 Claude Opus 4.6 (Anthropic) 提供协助。

1 引言

装饰余跨（Fong，2016）为组合开放系统提供了一种优雅的代数结构：每个系统都暴露出接口，而推出则沿着共享的接口变量将系统粘合起来；内部动力学作为装饰保留下来，不受组合影响。该理论简洁明了。但它能用于计算吗？当装饰不是有限自动机或 Petri网，而是定量动力系统——常微分方程、随机过程、理性预期模型——推出能否生成一个可实际模拟的耦合系统?

本文回答了这个问题。配套论文（Phoa，2026）利用装饰余跨、因子图和粒子滤波器，构建了一个用于情景分析的定性框架。本文则通过计算将其具体化：取自不同数学传统的三个模型——线性化新凯恩斯主义动态随机一般均衡、随机分舱流行病模型，以及具有滞后的非线性疫苗接种采纳模型——通过六个因子图约束耦合，组成一个统一的序贯蒙特卡洛采样器。这些模型没有共同的数学结构，它们的共同点在于接口：即为耦合而公开的变量。推出并不关心内部是什么。

范畴论要点在于，异构复合是常态，而非特例。线性化理性预期模型、非线性常微分方程系统和随机跳跃过程，都可以通过同一种代数运算进行组合。实际意义在于，耦合系统产生了任何单个组件都无法预测的动力学：拒绝分岔、 -0.78 个百分点的构成性看跌偏差，以及可追溯至特定耦合函数的结构性不对称。如果经过现实校准，我们就能针对每种原型轨迹制定行动方案，而范畴结构已厘清了其跨叙事影响。

2 框架

我们总结 Phoa（2026）中的相关方法，只补充定量设定所需的内容。

2.1 单个叙事的粒子滤波器

一个叙事 是一个隐马尔可夫模型$(\mathcal{S}, \mathcal{Y}, f, g, \pi_0)$。粒子滤波器 通过传播$N$ 个加权样本来近似滤波分布（不要将其与第 3.2 节 SEIR 模型中的人口归一化N 混淆；上下文可以消除歧义）：

$$\text{Propagate:} \quad \tilde{x}_t^{(i)} \sim f(\cdot \mid x_{t-1}^{(i)}) \tag{1}$$

$$\text{Reweight:} \quad w_t^{(i)} \propto w_{t-1}^{(i)} \cdot g(y_t \mid \tilde{x}_t^{(i)}) \tag{2}$$

$$\text{Resample when:} \quad \text{ESS} = \frac{1}{\sum_i (w_t^{(i)})^2} < \tfrac{N}{2} \quad (\text{where } \textstyle\sum_i w_t^{(i)} = 1) \tag{3}$$

这里，转移核是 模型：新凯恩斯主义政策函数、SEIR微分方程、疫苗采纳动力学。

2.2 多个叙事的因子图

当k 个叙事发生交互时，它们的依赖关系会编码在因子图中（Kschischang 等，2001）：变量节点（状态空间变量）和因子节点（耦合约束）。每个因子要么修改状态（硬耦合，f*i*：$\mathcal{S}_{i_1} \times \mathcal{S}_{i_2} \to \mathcal{S}_{i_1}$ 或 $\mathcal{S}_{i_2}$），要么返回兼容性得分（软耦合，f*i*：$\mathcal{S}_{i_1} \times \mathcal{S}_{i_2} \to \mathbb{R}_{\geq 0}$）。

2.3 用装饰余跨映射进行异构复合

每个叙述 e 是一个带装饰余跨度（Fong，2016；Fong 和 Spivak，2019）（$A_i \to N_i \leftarrow B_i$，$\delta_i$）：

- N_i 是内部状态空间
- A_i、B_i 是接口——为耦合而暴露的变量
- δ_i 是装饰：动力学（转移核、观测函数）

复合系统是沿变量识别取出的推出 $N = \bigsqcup_i N_i / \sim_{\mathcal{V}}$，其乘积装饰受因子约束限制。范畴论要点是：推出与装饰无关。线性化动态随机一般均衡模型、非线性常微分方程和随机跳跃过程，均通过同一种代数运算沿各自的接口进行组合。内部动力学作为装饰，承载于只关心共享内容的结构之上。

备注*1*。由因子约束限制的乘积装饰，是 *Fong*（*2016*）意义下有效的带装饰余跨度组合。装饰函子 $F : (\text{有限集范畴}, +) \to (\text{集合范畴}, \times)$ 定义为 $F(N) = \{N \text{ 上的转移核}\} \times \{N \text{ 上的观测函数}\}$，其幺半结构由乘积给出。因子约束所施加的限制，对应于通过 F 的幺半结构组合装饰，正如 *Fong*（*2016*，定理*4.1*）所述。完整验证见配套论文（*Phoa*，*2026*）。简言之：定义 $F : (\text{有限集范畴}, +) \to (\text{集合范畴}, \times)$，使 $F(N) = Kern(N) \times Obs(N)$，其中 $Kern(N)$ 是 N 上马尔可夫核的集合，$Obs(N)$ 是 N 上观测函数的集合。松幺半结构由乘积给出：$F(N_1 + N_2) \to F(N_1) \times F(N_2)$ 将不交并上的核映射为其限制。带装饰余跨度的组合随后会产生受因子约束限制的乘积核，如定义*2*所述。因子约束作为对装饰的进一步限制，其与幺半结构相容，因为每个约束都是局部的（至多涉及两个组成部分状态空间）。

范畴框架提供了超越记号便利性的三项具体益处。首先，模块化：耦合架构（哪些变量被共享、哪些因子约束它们）独立于组成部分模型加以规定。将线性新凯恩斯主义模型替换为非线性动态随机一般均衡模型，只需改变一个余跨上的装饰，而无需改变耦合结构。其次，结合律：命题1保证，对多叙事系统进行层次分解时，无论组合顺序如何，都会得到相同的复合结果，从而为该方法的可扩展性提供依据。第三，因子—变量区分：范畴框架强制区分变量识别（推出）与因子耦合（装饰），从而纠正了我们最初非正式分析中将二者混为一谈的错误（详见配套论文）。

3 三种叙事

3.1 经济周期(N_1)：新凯恩斯主义动态随机一般均衡

标准的三方程新凯恩斯主义模型，在稳态附近线性化：

$$\pi_t = \beta\, \mathbb{E}_t[\pi_{t+1}] + \kappa\, y_t + \varepsilon_t^s \tag{4}$$

$$y_t = \mathbb{E}_t[y_{t+1}] - \sigma^{-1}(i_t - \mathbb{E}_t[\pi_{t+1}] - r_t^n) \tag{5}$$

$$i_t = \phi_\pi\, \pi_t + \phi_y\, y_t + \varepsilon_t^m \tag{6}$$

状态变量：产出缺口 y_t、通胀 π_t、名义利率 i_t。底层生产函数为 $Y_t = A_t L_t$，其中 L_t 是劳动力；在线性化模型中，L 被吸收到供给冲击 ε_t^s中。外生冲击：供应 ε_t^s（一阶自回归，持续性为 $\rho_s = 0.9$，季度频率）、货币

政策 ε_t^m（独立同分布）、自然利率 r_t^n（一阶自回归，持续性为 $\rho_r = 0.8$，季度频率）。一阶自回归持续性参数从季度频率转换为周频率： $\rho_s^w = \rho_s^{1/13} \approx 0.992$、 $\rho_r^w = \rho_r^{1/13} \approx 0.983$。校准遵循 Galı́（2015）： $\beta = 0.99$、 $\kappa = 0.024$、 $\phi_\pi = 1.5$、 $\phi_y = 0.125$。

已通过解析方法求得最小状态变量解：政策函数为 $x_t = Ps_{t-1} + Q\,\eta_t$，其中 s 汇集一阶自回归冲击状态， η 汇集创新项。提取后，将舍弃理性预期求解器，模型通过矩阵乘法向前推进——按每周进行，并将冲击方差按$\sqrt{1/13}$从季度频率进行缩放。

3.2 流行病(N_2)：带有毒株出现的易感者-暴露者-感染者-康复者模型

一种带有随机毒株替代的分舱式易感者-暴露者-感染者-康复者模型（Kermack 和 McKendrick, 1927），已针对新冠肺炎进行校准：

$$\dot{S} = -\beta_{\text{eff}}\, S_{\text{eff}}\, I/N + \omega\, R \tag{7}$$
$$\dot{E} = \beta_{\text{eff}}\, S_{\text{eff}}\, I/N - \sigma\, E \tag{8}$$
$$\dot{I} = \sigma\, E - \gamma\, I \tag{9}$$
$$\dot{R} = (1-\mu)\,\gamma\, I - \omega\, R \tag{10}$$
$$\dot{D} = \mu\,\gamma\, I \tag{11}$$

状态变量：S、E、I、R、D（满足 $S + E + I + R + D = 1$ 的人口比例），其中 S_{eff} 表示在计入疫苗接种后得到的有效易感人群（定义见第 4 节表 1）。固定参数：潜伏期 $\sigma = 1.41$/周，复苏 $\gamma = 0.7$/周，免疫力减退 $\omega = 1/52$/周。行为抑制： $\beta_{\text{eff}} = \beta(1 - \alpha I)$， $\alpha = 5$。在模拟中，将S_{eff}限制为 $[0, S]$，以防止在疫苗接种覆盖率较高时出现不符合实际的负值。

毒株出现。新的优势毒株以泊松过程到达，速率为 $\lambda = 1/40$/周（≈10 个月，与阿尔法→德尔塔→奥密克戎相符）。每个毒株的$R_0 \sim$ 服从（1.5、6.0）上的均匀分布，免疫逃逸 $\varepsilon \sim$服从（3、3）上的贝塔分布，感染病死率 $\mu \sim$服从（2、40）上的贝塔分布。到达时， ε的康复者比例重新转为易感者。同一时间只有一种优势毒株。

3.3 疫苗动态（N_3）：创新、采用、拒绝

三个状态变量：有效性$v \in [0,1]$、接种率$u \in [0,1]$、拒绝比例 $\rho \in [0,1]$。

$$v_{t+1} = v_t + \Delta v_{\text{innovation}} - \Delta v_{\text{drift}} \tag{12}$$
$$\rho_{t+1} = \rho_t + \theta_{\text{up}} \cdot m_t \cdot (1-\rho_t) - \theta_{\text{down}} \cdot (1-m_t) \cdot \rho_t \tag{13}$$
$$u_{t+1} = u_t + \theta_{\text{adopt}} \cdot (\bar{u}(I_t) - u_t)^+ - \theta_{\text{decay}} \cdot u_t, \quad u \le 1 - \rho \tag{14}$$

疫苗创新时有效性跃升（泊松过程，速率为 $\lambda_v = 1/26$/周），并在毒株逃逸时下降。接种率以 $\bar{u}(I) = 0.3 + 2I$为目标，随疫情严重程度上升，但受拒绝比例限制：只有不拒绝者才能采用。

关键动态是**拒绝滞后效应**。只有当$I > 2\%$时，强制接种压力才会启动。低于这一阈值：没有强制措施，也没有棘轮效应。高于这一阈值后，拒绝率以每周 $\theta_{\text{up}} = 0.005$的速度上升，并以每周 $\theta_{\text{down}} = 0.003$的速度下降——这种5:3 不对称会使一部分人永久地从犹豫者转变为抵制者。该模型大致根据美国新冠疫苗接种犹豫进行校准：初始值为 $\rho_0 = 0.15$（新型病原体的全新起点），随后上升，且永远不会完全回落。

表1：跨叙事耦合函数。

因子	方向	机制	函数形式
f_1	$N_2 \to N_1$	需求冲击	$\Delta r^n = -\eta_d(t) \cdot I_t$
f_2	$N_2 \to N_1$	劳动力	$\Delta \varepsilon^s = \eta_s(t) \cdot I_t$ （缺勤）
f_3	$N_2 \to N_3$	疫情暴发需求	嵌入于 $\bar{u}(I)$
f_4	$N_3 \to N_2$	有效免疫	$S_{\text{eff}} = S - v \cdot u \cdot (1-\rho)$
f_5	$N_1 \to N_3$	强制令反弹	$\theta_{\text{up}} \times [1 + 5 \cdot \max(0, -y)]$
f_6	$N_1 \to N_3$	研发资金	$\lambda_v \times \max(0.5, 1 - 0.4 \cdot (i - i^*))$

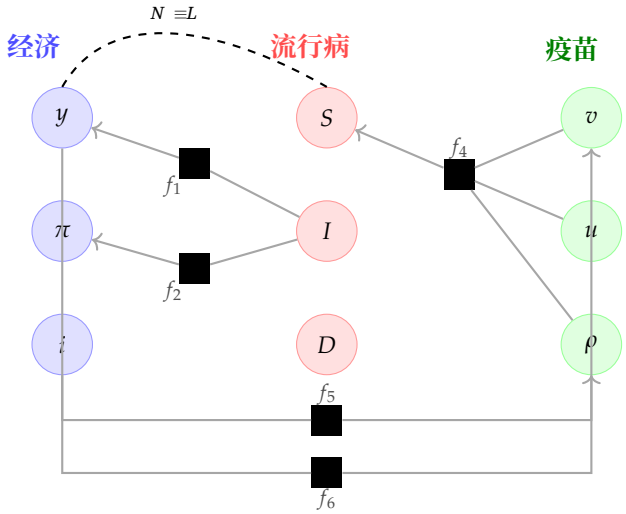


图1：耦合叙事系统的因子图。变量节点按叙事着色；因子节点（黑色方块）表示跨叙事耦合。虚线弧表示变量识别 $N \equiv L$（人口 $\equiv$ 劳动力）。因子 f_1 和 f_2 将疫情冲击传递给经济；f_4 将疫苗保护传递回流行病；f_5 和 f_6 将经济状况传递给疫苗动态。因子 f_3（暴发 $\to$ 接种需求）嵌入疫苗模型的目标函数中，因此不会作为单独节点出现。

4 跨叙事耦合

六个耦合函数连接了三个叙事（图1）。

校准依据。 需求与供给渠道（f_1, f_2）模拟纯粹的疾病渠道，而非封锁措施。f_1 描述自愿保持距离和消费者恐惧；f_2 是劳动力渠道——缺勤，其中 $\xi = 0.3$（任一时刻有30%的感染劳动者缺勤）。二者都会随着**习惯化**而衰减： $\eta_d(t) = 0.02 + 0.08e^{-0.02t}$，因此初始需求弹性为0.10，经过 ∼35 周后会降至0.02（半衰期）。人口会适应地方性流行病：第一波会扰乱经济；到了第五波，影响几乎微乎其微。若没有这种衰减，产出缺口将永远无法恢复——这是一次校准错误，在本分析的早期版本中导致了过度悲观的结论（见讨论）。在严重衰退中，强制令反弹（f_5）会使拒绝增长率提高三倍（$y = -10\%$）。研发渠道（f_6）的影响则刻意设得较弱。

强制令阈值。 只有当$I > 2\%$时，强制措施才会启动——地方性流行水平下不会启动。这会造成间歇性耦合：f_5 在谷底期间不起作用，在疫情暴发期间则会启动。结合滞后效应，这会造成路径依赖：早期疫情暴发严重的粒子会触发强制措施，使拒绝率棘轮式上升，且永远无法恢复。早期疫情波较轻的粒子则从未触发强制措施。

4.1 变量识别：$N \equiv L$

易感者-暴露者-感染者-康复者模型的人口N 与新凯恩斯主义劳动力L 是同一批人。这是一个推出——两个属于不同状态空间的变量，实际上表示同一个量。f_2 使这种识别在运作层面得以实现：有效劳动力为$L_t = (1 - D_t) - \xi I_t$，其中$D_t$ 是累计死亡率，而 ξ 是任一时点缺勤的感染劳动者所占比例。缺勤部分 ξI_t会推高边际成本——患病劳动者造成供给中断，以成本推动冲击的形式进入菲利普斯曲线。死亡会永久降低生产前沿，但其本身并非成本推动因素。需求渠道f_1 则是独立的：消费者恐惧和自愿保持距离通过自然利率进入IS曲线。

采用显式劳动力市场（Galı́，2011）后，识别$N \equiv L$ 会将失业作为一个独立的状态变量纳入模型，而将其分解为自愿不参与（照料生病的家人）、非自愿失业（企业裁员）和永久退出（死亡），则会影响福利。这值得研究，但概念验证旨在说明组合式耦合行之有效，而非构建最佳内部模型。

5 预期与信息结构

新凯恩斯主义主体对(y_t, π_t, i_t)形成理性预期，但不 对流行病或疫苗动态形成理性预期。原因有三。

计算方面。 对整个耦合系统形成理性预期，需要将新凯恩斯主义模型与非线性SEIR（$\beta SI/N$）模型联合求解。混合架构——新凯恩斯主义模块采用理性预期，其余部分采用前向模拟——要求两者明确分离。

实证方面。 新冠肺炎疫情期间，经济主体并未对流行病学过程形成理性预期。他们高估了疫苗效力，低估了毒株逃逸，并未能预见针对强制措施的行为反应。调查证据显示，通胀预期仍锚定于疫情前框架，调整缓慢。对货币政策形成理性预期是合理的；但对新出现的流行病学过程，则并非如此。

哲学层面。 该框架的价值来自部分耦合。如果主体将所有叙事整合为单一连贯的预测，粒子滤波器就会变得多余。新凯恩斯主义主体接收

流行病效应作为外生冲击——由他们并未建模的机制所生成的实现。每种叙事都有其自身的认识论。

6 概率与显著性

配套论文区分了概率（动力学能够产生什么）与显著性（如果某事发生，什么才重要），并坚持按以下顺序进行：按概率生成，再按显著性重新加权。定量框架让这两者都可操作化。

概率是生成模型给出的权重分布——耦合系统的先验预测分布。**显著性**是针对特定分析问题进行的第二轮重要性重新加权。“如果累计死亡率超过 5%，会怎样？”这一问题会将阈值以上的似然设为 1，阈值以下设为 0。“在严重衰退的情况下，什么才重要？”则以$y_T < -2\%$为条件。每种视角都会为同一组轨迹产生不同的分布。**强制行动**正是两者一致之处；在此处，它可以计算。

显著性加权有效样本量衡量分布的集中程度：有效样本量低意味着答案明确，有效样本量高则意味着该问题涵盖多种情景。

7 算法

每周时间步，三年时间范围（156 周），$N = 10,000$ 个粒子。

1. **初始化**：在稳态下抽取每个粒子的新凯恩斯主义状态；易感者-暴露者-感染者-康复者模型接近无病平衡（$S = 0.99$，少量E和I种子）；疫苗处于$(v, u, \rho) = (0, 0, 0.15)$。
2. **对于每一周** $t = 1, \ldots, 156$：

   (a) 根据当前状态（f_1–f_6）计算耦合值。(b) 推进易感者-暴露者-感染者-康复者模型：检查是否有毒株到达（伯努利分布），并积分一个星期（欧拉法）。(c) 推进疫苗状态：检查是否有创新，更新拒绝情况（阈值强制令），并更新接种量。(d) 推进新凯恩斯主义状态：将流行病耦合加入外生冲击，并应用政策函数。
3. **不进行观测重新加权**：纯模拟，从先验预测分布中抽样。

在纯模拟模式下，所有粒子的权重相同，因此 ESS 显然为N。值得关注的 ESS 出现在显著性重新加权中（第 6 节）。

8 结果

8.1 边际分布

图2展示了三年时间范围内的扇形图。产出缺口集中在 -2%附近——流行病耦合持续造成拖累。随着部分免疫逐渐累积，感染呈现反复的疫情波，且每一波的规模都更小。拒绝率扇形图的范围很宽（第5至第95百分位：0.21–0.80）。这一离散程度是核心发现。

8.2 跨叙事相关性

图3展示了两两相关性随时间的变化。产出缺口—拒绝率（y 与 ρ）到第3年达到-0.95：f_5 反馈循环使经济衰退和拒绝几乎成为彼此的确定性函数。感染—拒绝率（I 与 ρ）的相关性较弱（$+0.21$）——拒绝率在疫情暴发期间呈棘轮式上升，但会在多轮疫情波中累积。有效性—感染（v 与 I）的相关性为 -0.29：疫苗接种有所帮助，但毒株逃逸限制了其作用范围。

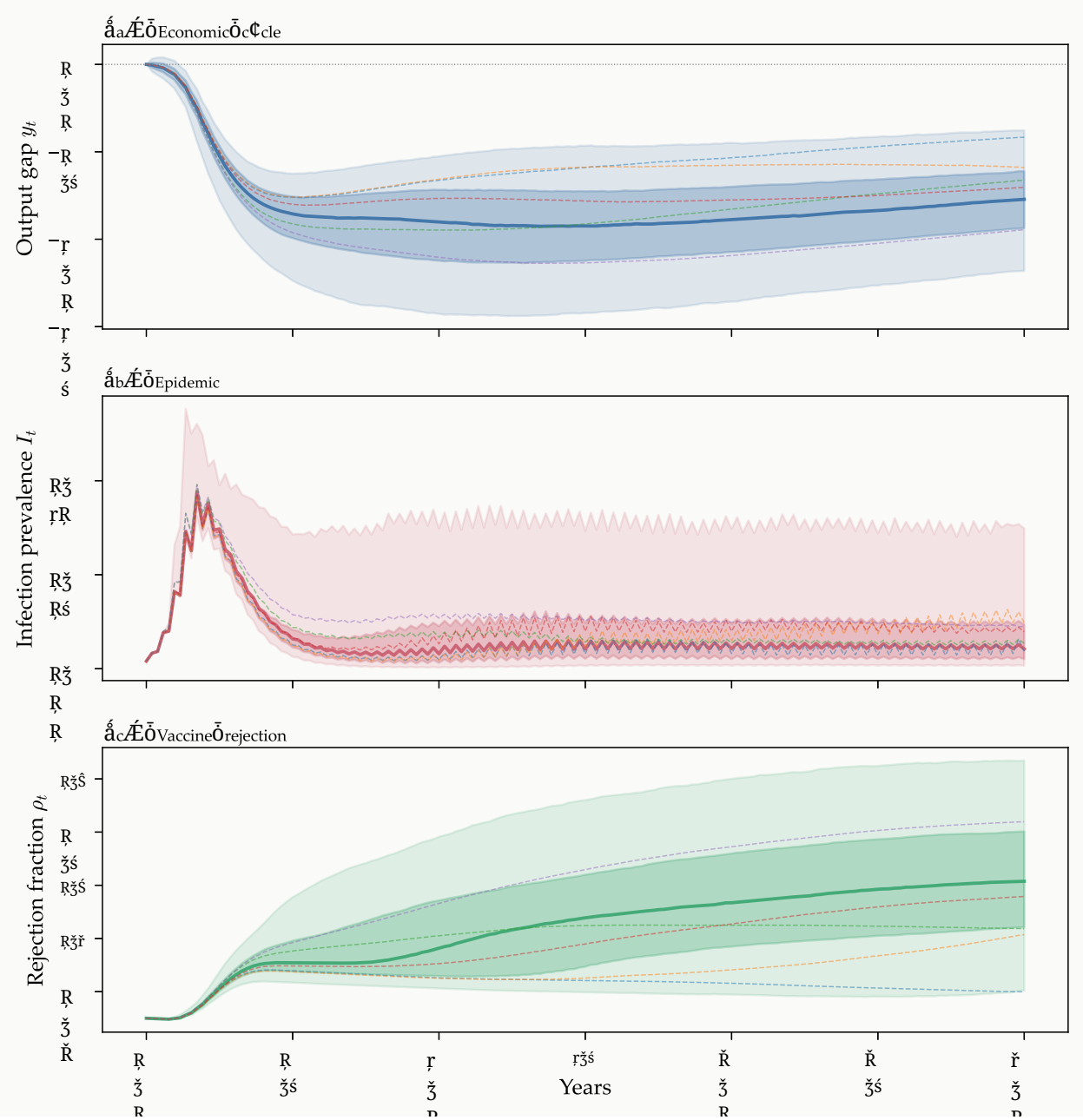


图2：（a）产出缺口、（b）感染流行率和（c）疫苗拒绝的扇形图。阴影带：第5至第95百分位数和第25至第75百分位数。实线：中位数。虚线：五条典型轨迹（粒子 A–E）。

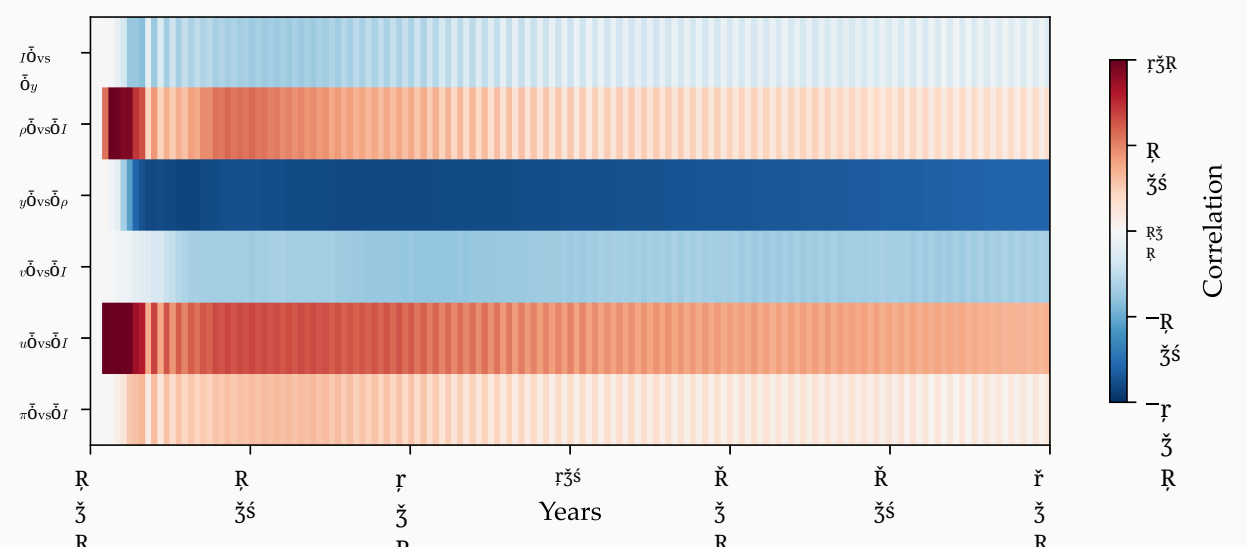


图 3：跨叙事相关性随时间的变化。颜色表示变量对之间的皮尔逊相关系数。

8.3 拒绝分岔

图 4 展示了全部 10,000 个粒子的最终 ρ_T 与D_T 的散点图，颜色按聚类区分。存在两种状态：

- **低拒绝**（A–C，$\rho \leq 0.32$，33%）：温和毒株或早期创新使拒绝程度保持适中。疫苗接种有效。习惯化使产出缺口得以恢复。
- **高拒绝**（D–E，$\rho \geq 0.38$，67%）：早期严重疫情暴发触发强制措施，拒绝棘轮越过临界点，疫苗接种失效，持续的流行病加剧经济衰退，而经济衰退又进一步放大拒绝。

$\rho = 0.32$（粒子 C）与 $\rho = 0.38$（粒子 D）之间的差距正是分岔所在之处。早期毒株抽取中的微小随机差异决定了吸引域。这并非分析者选定的两种情景，而是耦合动力学中涌现出的两个吸引子。

8.4 原型轨迹

对 9 维特征向量（感染峰值、时机、死亡、产出缺口低谷、最终拒绝、毒株、平均感染、平均产出缺口、有效疫苗周数）进行k-中心点聚类（$k = 5$）。每个原型都是其聚类中所有粒子轨迹的加权平均，其中权重为聚类内归一化后的终端粒子权重。与单个粒子中心点相比，加权平均轨迹更平滑，也更能代表聚类的质心，并且较少受到任何单条模拟路径特异性的影响。

趋势十分清晰：从粒子 A（毒株较少、疫苗有效、死亡率为 8.0%）到粒子 E（毒株较多、疫苗失效、死亡率为 15.8%）。有效疫苗周数——$\int v \cdot u \cdot (1-\rho) dt$——从 23.3 降至 7.2。在低拒绝粒子中，产出缺口有所恢复：粒子 A 最终达到 -0.42%。原因在于习惯化（第 4 节）：到第 2 年，需求弹性已降至 0.03，而地方性流行感染几乎没有影响。

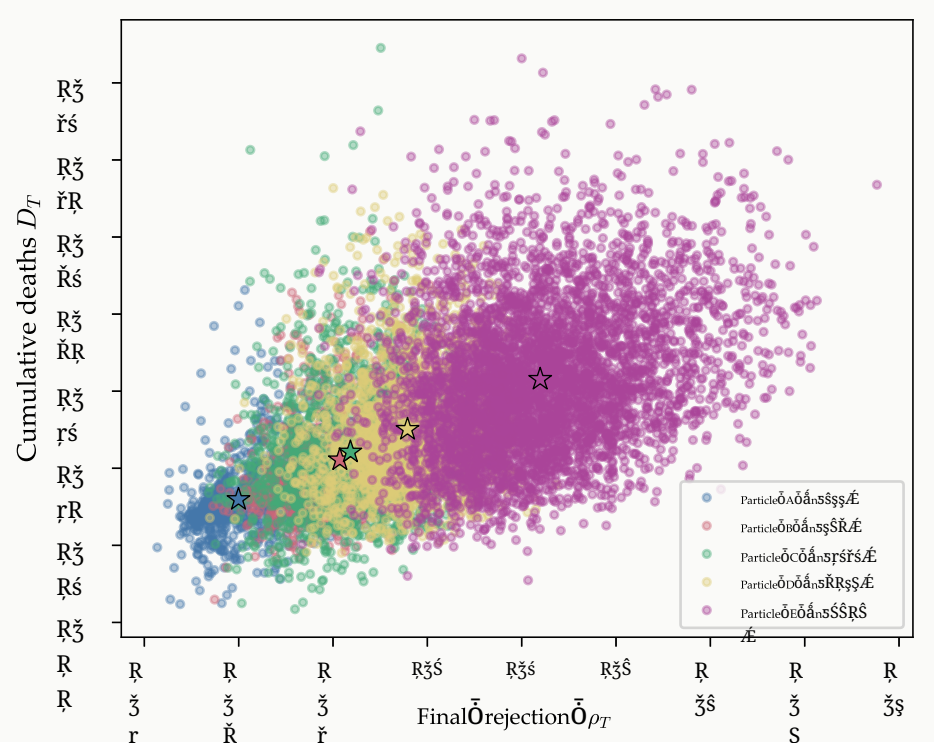


图 4：最终拒绝与累计死亡人数的关系，按聚类着色。星号标示加权平均原型（粒子 A–E）。分布分为低拒绝和高拒绝两种状态。

表 2：原型轨迹（聚类加权平均值）。

	权重	峰值 I	死亡	最小值 y	ρ_T	毒株	有效疫苗周数
A：疫苗挽救	8.0%	9.2%	8.0%	−0.8%	0.20	2.4	23.3
B：早期遏制	9.6%	9.2%	10.6%	−0.8%	0.31	3.8	22.8
C：受控煎熬	15.3%	9.8%	11.1%	−0.9%	0.32	3.7	15.7
D：缓慢棘轮	21.0%	9.3%	12.5%	−0.8%	0.38	4.4	10.6
E：结构性失败	46.1%	9.8%	15.8%	−1.1%	0.52	6.2	7.2

8.5 构成性看跌偏差

我们使用相同参数分别运行三个模型，不进行耦合，并比较终端分布（图5）。

表3：组合偏差：耦合与非耦合的终端分布。

	耦合		非耦合		偏移
	Mean	s.d.	Mean	s.d.	(耦合 −非耦合)
产出缺口 y_T	−0.77	0.24	0.00	0.16	−0.78
感染 I_T	0.020	0.023	0.029	0.005	−0.009
死亡 D_T	0.132	0.049	0.151	0.054	−0.018
拒绝 ρ_T	0.413	0.131	0.195	0.030	+0.218

耦合将均值为零的商业周期转变为持续衰退（−0.78 个百分点），并使拒绝率变化 +22 个百分点。随着习惯化，产出缺口的拖累程度适中——地方性流行感染不再导致持续收缩；此前版本的分析未考虑习惯化，曾对此作出错误预测（见讨论）。

耦合后的死亡人数较低 于非耦合情形（−2.0 个百分点）。经济衰退压低接触率（f_1），在一定程度上替代了疫苗接种；拒绝率升至如此之高，以致强制措施被放弃，从而消除了促使拒绝率上升的机制。系统陷入一种严峻的均衡：经济衰退成为非自愿的社交距离措施。

产出缺口变动由f_1（感染 $\to$ 经济衰退）驱动。拒绝转变由f_5（经济衰退$\to$ 拒绝）驱动，并被f_3（疫情暴发需求 $\to$ 强制措施 $\to$ 拒绝）放大。f_4（疫苗接种 $\to$免疫力）作用方向相反——这是唯一能改善结果的耦合——但它被棘轮效应压倒。

这一机制与配套论文中关于信贷市场的发现相符：负向耦合是特定的（感染导致缺勤，经济衰退导致强烈反弹），正向耦合则要求不存在不利耦合（疫苗接种可预防感染，但前提是拒绝尚未阻碍接种率）。破坏是机制性的；建设则具有条件性。

8.6 概率与显著性

图6比较了累计死亡人数的概率加权分布与在严重衰退条件下（$y_T < -1\%$）的显著性加权分布。显著性分布向右移动：这并非因为经济衰退直接导致死亡，而是因为经济衰退与高死亡率由同一耦合结构共同造成。

9 讨论

9.1 框架所揭示的内容

推出将模型组合起来，无需它们共享数学结构。线性、非线性和滞后都是装饰——它们依托于一种组合结构，而该结构只支配接口和耦合。将新凯恩斯主义模型换成非线性动态随机一般均衡模型，将易感者-暴露者-感染者-康复者模型换成基于主体的模型：耦合架构保持不变。接口和因子是稳定的；内部结构则是模块化的。

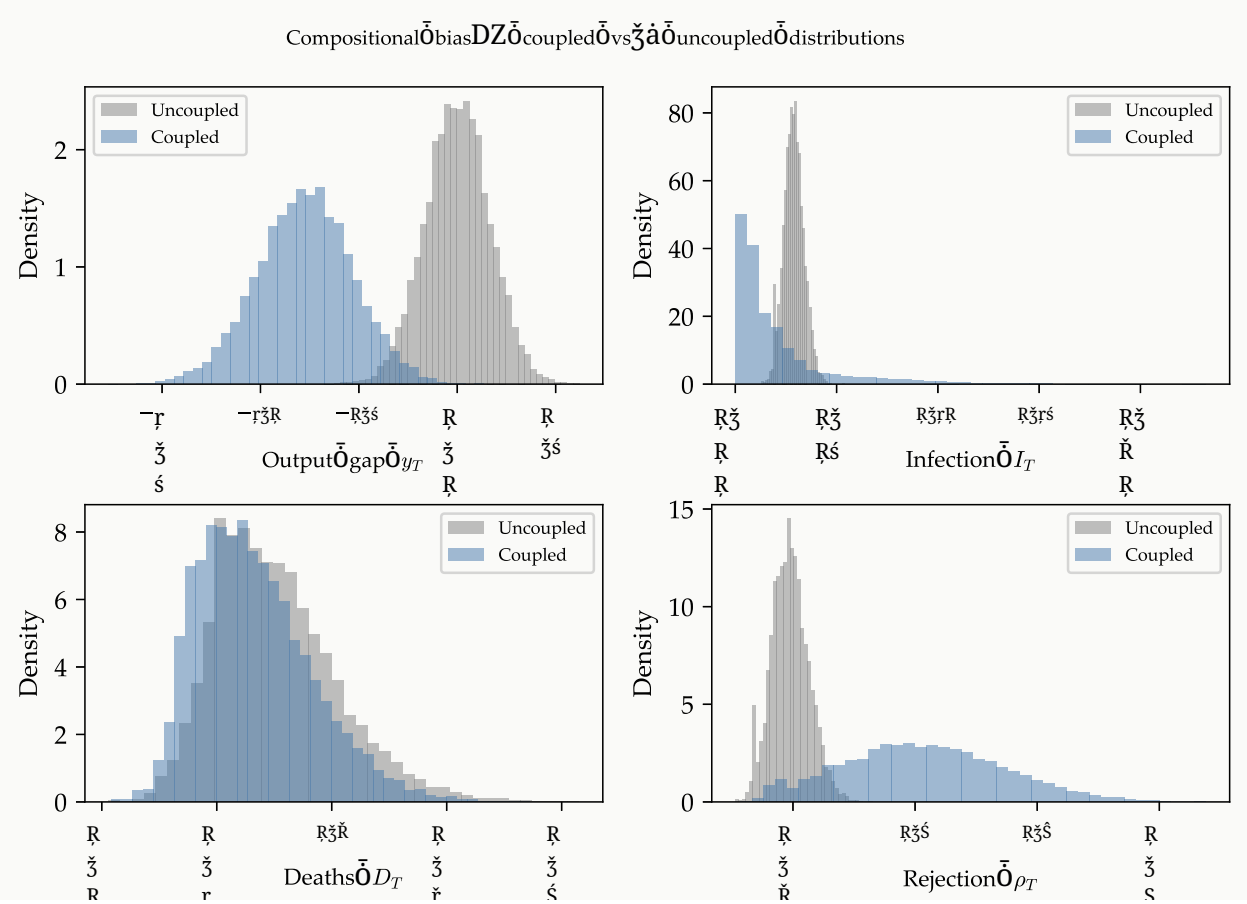


图5：耦合（蓝色）与非耦合（灰色）系统下关键变量的终端分布。耦合使产出缺口向左移动，并使拒绝向右移动。

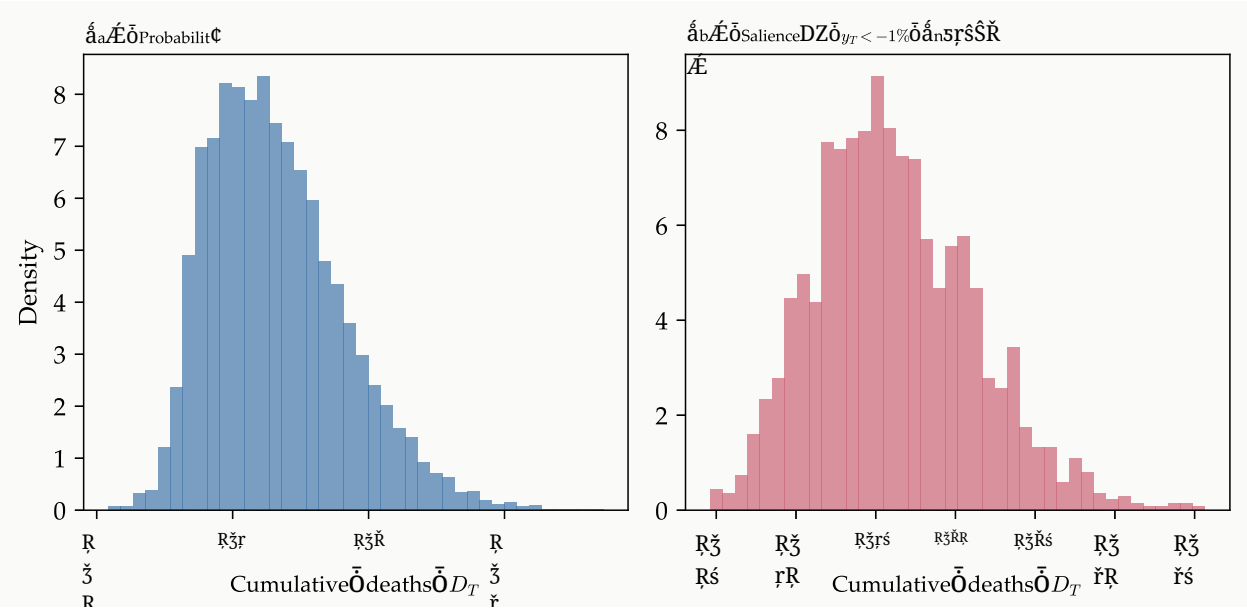


图6：（a）累计死亡人数的概率加权分布。（b）以$y_T < -1\%$为条件的显著性加权分布。显著性分布向右移动并趋于集中。

拒绝分岔具有结构性。它源自三个要素：触发阈值、非对称棘轮和强化回路。任何具备这三个特征的系统都会产生类似现象。校准决定分岔出现在哪里，而非是否出现。

9.2 校准经验

一个警示故事：习惯化。本分析的早期版本忽略了习惯化——需求和供应弹性保持不变。产出缺口始终未能恢复：每个粒子最终都陷入持续的经济衰退，因为无论地方性流行感染多么轻微，它在第150周造成的需求拖累与第1周相同。结果看似合理（耦合理应让情况恶化），分岔也十分显著。但经济学分析是错误的。

人口会适应地方性流行病；第一波疫情扰乱经济，第五波几乎没有影响。加入习惯化后——只需采用半衰期为35周的单一指数衰减——低拒绝粒子的产出缺口到第3年时便恢复至接近零，组合偏差也从 −1.95个百分点降至 −0.78个百分点。经验是：在耦合系统中，一个模型缺失的特征会通过耦合传播到每个模型。判断某种因素不存在——此处指适应——与判断某种因素存在同样重要。

习惯化与拒绝。 当前模型将习惯化视为外生因素——一种固定的指数衰减，与社会动态无关。有人可能会认为，较高的拒绝率会减缓习惯化：如果很大一部分人口否认疾病严重程度，那么习惯化所代表的集体适应（支出趋于常态、缺勤减少）可能会受到政治极化的阻碍。

但同样也可以提出相反的观点：拒绝接种疫苗的人，也是不愿改变支出或工作模式的人——这就是 习惯化，只不过是由意识形态而非适应所驱动。耦合方向并不明确，而且取决于模型无法判定的政治背景。我们让习惯化保持非耦合，并指出这一歧义。

局限性。 最佳猜测式校准。线性新凯恩斯模型。约化形式的行为抑制。无记忆的毒株出现。在 14 个状态和 10,000 个粒子的规模下尚可处理；更丰富的模型设定则需要 Rao-Blackwell化。

9.3 实际应用与扩展

如果内部模型经过现实校准——例如完整规模的动态随机一般均衡模型、基于监测数据拟合的流行病学模型，以及根据美国国会预算办公室评分得出的财政参数——就可以为每种原型轨迹制定一套应对方案，即“行动策略”。

这套方法很简单。在事件发生之前，针对每种原型制定一项行动计划：粒子 A（复苏）对应一种投资组合，粒子 C（分岔）对应另一种，粒子 E（财政超调）则对应第三种。随着历史粒子实时演变，同时监测其在所有状态变量上与各原型的距离——产出缺口、感染流行率、拒绝率和财政激活。当实际轨迹趋近某个原型时，就执行相应的计划。

其价值不在于预测，而在于准备度：五种预先分析的应对方案，每种方案在各自叙事内部都保持一致，其跨叙事含义也都已追溯。强制行动会指出无论先验信念如何，哪种原型需要关注。组合偏差量化了投资组合必须抵御的非对称性。该框架提供的不是预测，而是一种有条理的方法，让人能够预先了解每种意外情况意味着什么。

第10节通过一个财政/政治叙事展示了扩展机制。信息叙事（虚假信息、媒体两极化）则会将拒绝动态内生化。每增加一种叙事，就会增加一个带装饰余跨度；组合具有结合性，可据此扩展。

10 组合扩展：财政/政治叙事

三叙事系统没有正向耦合通道。每个因子要么传递损害（感染 $\to$ 经济衰退，经济衰退 $\to$ 拒绝），要么以条件性方式运作（疫苗接种 $\to$ 免疫，但仅当拒绝允许时）。产出缺口无法超调进入正值区间。这是一个问题，因为美国的疫情复苏确实出现了超调——国内生产总值在2021年年中超过了其疫情前趋势，其推动因素是规模上没有和平时期先例的财政转移。如果该框架无法产生这一结果，看跌偏差可能是缺失渠道所造成的假象，而非耦合系统的结构属性。

本节增加第四叙事——财政/政治动力学——并检验该偏差是否仍然存在。

10.1节 第四叙事

三个状态变量：政府支出占国内生产总值的比例g_t、累计债务偏差d_t，以及政治动员 $\phi_t \in [0,1]$。

$$g_{t+1} = g_t + \alpha_g \cdot \phi_t \cdot \mathbf{1}[y_t < -\tau] - g_{\text{decay}} \cdot g_t + \sigma_g \, \xi_t^g \tag{15}$$

$$d_{t+1} = d_t + g_t - \tau_{\text{tax}} \cdot y_t \tag{16}$$

$$\phi_{t+1} = \phi_t + \phi_{\text{up}} \cdot m_t^{\text{fiscal}} \cdot (1 - \phi_t) - \phi_{\text{down}} \cdot (1 - m_t^{\text{fiscal}}) \cdot \phi_t \tag{17}$$

其中，$m_t^{\text{fiscal}} = \mathbf{1}[y_t < -\tau]$ 是财政启动指标，τ 是触发支出的经济衰退阈值，而g^{decay} 是反映计划到期条款的支出衰减率。

支出方程（15）包含两个相加的通道。疫情紧急支出（f_{11}:$g \;\; += \;\; \alpha_I \cdot I_t \cdot (1 - \phi_t)$）只要出现感染就会启动，无需发生经济衰退——这就是在国内生产总值数据显现经济衰退之前，于2020年3月通过的《家庭优先法案》。衰退触发通道（$\alpha_g \cdot \phi_t \cdot \mathbf{1}[y_t < -\tau]$）则会在经济下行足够严重、足以凝聚政治意愿时叠加启动——这就是《冠状病毒援助、救济和经济安全法案》及其后续法案；它们规模更大，但出台较晚。随着计划到期，支出会逐渐减少（$g_{\text{decay}} = 0.06$/周，半衰期为 $\approx$12 周）。

预算恒等式（16）属于会计核算：债务随支出增加，并随税收收入（与产出缺口成比例）而减少。请注意，d 可以为负——超调会产生盈余收入。

政治棘轮（17）与拒绝棘轮相似，但作用方向相反。拒绝滞后效应会永久地将一部分犹豫者转变为抵制者，而政治动员则会永久地将一部分被动者转变为被动员者。当$y \;\; < \;\; -\tau$时，动员机制便会启动；非对称性（$\phi_{\text{up}} \;\; > \;\; \phi_{\text{down}}$）确保危机留下持久的政治印记。仅凭大流行，《家庭优先法案》便得以通过；而《冠状病毒援助、救济和经济安全法案》则需要经济衰退才能在完全不同的规模上促成政治联盟——这是一种阈值效应，而非政策函数。

表4：财政耦合函数。

因子	方向	机制	函数形式
f_7	$\mathrm{N}_1 \to \mathrm{N}_4$	经济衰退触发因素	$m_t^{\text{fiscal}} = \mathbf{1}[y_t < -\tau]$
f_8	$\mathrm{N}_4 \to \mathrm{N}_1$	财政需求	$\Delta r^n = +\text{弹性} \cdot g_t$
f_9	$\mathrm{N}_4 \to \mathrm{N}_3$	研发促进	$\lambda_v \times (1 + \text{促进} \cdot g_t)$
f_{10}	$\mathrm{N}_3 \to \mathrm{N}_4$	拒绝阻止支出	$\alpha_g \times (1 - \text{阻止} \cdot \rho_t)$
f_{11}	$\mathrm{N}_2 \to \mathrm{N}_4$	紧急支出	$\text{克}_t \mathrel{+}= \alpha_I \cdot \text{我}_t \cdot (1 - \phi_t)$

10.2 新耦合函数

另外五个耦合函数将财政叙事与现有的三个耦合函数连接起来（表4）。

f_8 是系统中的第一个正向耦合通道：政府支出作为自然利率的正向冲击，推动产出增长。其他所有跨叙事因素都会传递损害，或以条件性方式发挥作用；f_8 则直接改善经济状况。f_{11} 对下游影响的符号并不明确：由感染触发的紧急支出通过f_8, 支撑经济，但会通过预算恒等式累积债务；如果持续时间过长，还可能挤出私人经济活动。

10.3 组合结构

四叙事复合体是第二个推出。三叙事系统N_{123} （经济–流行病–疫苗）本身就是一个推出；财政叙事N_4 与N_{123} 共享接口（产出缺口y 和感染I）；四叙事系统N_{1234} 是N_{123} 与N_4 沿这些共享变量形成的推出。推出的结合律保证无论采用何种顺序，组合都有明确定义：$(N_1 \sqcup N_2 \sqcup N_3) \sqcup N_4 = N_1 \sqcup N_2 \sqcup N_3 \sqcup N_4$。

$$\begin{array}{ccccc} N_{12} & \longrightarrow & N_{123} & \longrightarrow & N_{1234} \\ \uparrow & & \uparrow & & \uparrow \\ A_{12} & \longrightarrow & A_{123,4} & \longrightarrow & N_4 \end{array}$$

g 与新凯恩斯主义财政工具之间的变量识别由f_8介导：支出作为自然利率冲击进入IS曲线，这是经由需求渠道的近似识别。包含显性政府支出的更丰富的新凯恩斯主义模型设定将使该识别精确成立。这一近似对于我们所提出的定性问题而言是充分的。

10.4 因子图

10.5 校准目标

三叙事系统没有使产出缺口超调的机制。f_8 提供了一种机制：财政需求作为正向自然利率冲击进入。财政扩展的校准目标是在不可忽略比例的轨迹中产生超调——即美国疫情复苏中观察到的定性模式。这需要相对基准做出四项参数变动：

- α_g：$0.03 \to 0.06$（$2\times$ 对经济衰退更强的政治响应）
- α_I：$0.05 \to 0.18$（$3.6\times$ 更强的疫情紧急支出，反映《冠状病毒援助、救济和经济安全法案》的规模）
- g衰减：每周 $0 \to 0.06$（加入计划日落，半衰期为 $\sim$12 周）

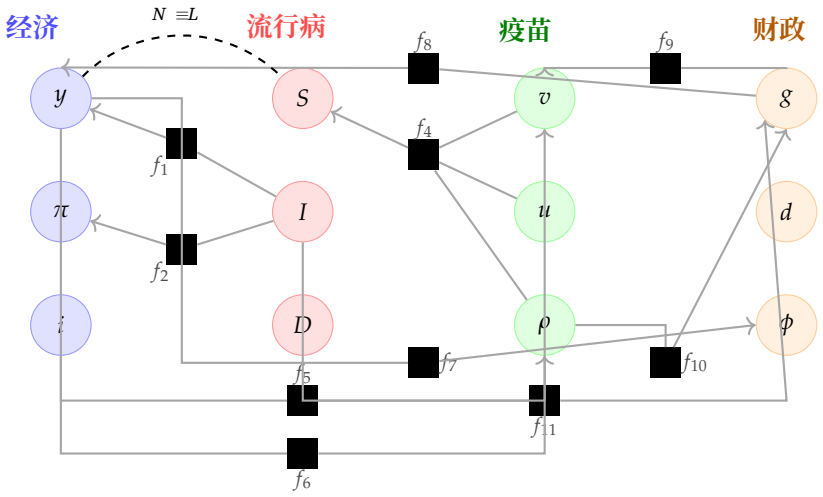


图 7：带财政扩展的耦合叙事系统的四列因子图。原有因子 f_1–f_6 连接经济、流行病和疫苗。新增因子 f_7–f_{11}（橙色连接）整合了财政列。f_8 是唯一的正向耦合通道：财政需求直接提振产出缺口。

- 财政需求弹性：0.5 → 0.6（零利率下限乘数略高于开放经济规范 ）

这些并非“最佳猜测”校准参数，而是经过调整，以产生美国观察到的定性模式：大规模财政激活、产出超调，随后债务积累。基准校准（$\alpha_g = 0.03$、$\alpha_I = 0.05$、无衰减，弹性为 $= 0.5$）完全不会产生超调——参见第10.8节。

10.6 模拟结果

采用k-中心点聚类，$k = 7$，基于13维特征空间（原有9项特征加上峰值支出、期末债务、终期政治激活和终期支出水平），每个原型由其聚类的加权平均轨迹表示。表5展示了七种原型轨迹。

表5：四叙事原型轨迹（聚类加权平均值）。

	Wt	峰值I	D_T	最小 y	y_T	ρ_T	Str	效率 v w	峰值 g	d_T
A：温和复苏	13.3%	9.5%	8.8%	−0.32	−0.32	0.19	2.9	25.4	8.0%	11.5
B：财政超调	13.9%	9.4%	13.2%	−0.08	+2.66	0.19	5.0	13.6	8.4%	−47.9
C：延迟磨耗	6.6%	9.4%	10.7%	−0.53	−0.50	0.21	3.3	12.3	7.9%	18.1
D：受控衰退	30.2%	9.5%	11.4%	−0.64	−0.64	0.30	4.3	14.0	8.0%	20.6
E：拒绝拖累	16.9%	9.4%	16.6%	−0.75	−0.75	0.39	6.0	8.5	7.9%	23.1
F：财政瘫痪	14.2%	10.3%	15.1%	−0.85	−0.82	0.40	6.3	7.6	9.5%	28.3
G：结构性失败	5.0%	9.5%	19.7%	−1.08	−1.05	0.57	8.5	4.3	8.3%	34.8

粒子 B 是超调粒子：终端产出缺口 $y_T = +2.66\%$，这是七种原型中唯一的正值，占权重的 13.9%。低拒绝率（$\rho_T = 0.19$）使疫苗计划得以正常运行；这场流行病可以应对（累计死亡率为 13.2%，属中等水平）。但其决定性特征是财政规模：峰值支出达到国内生产总值的 8.4%。The

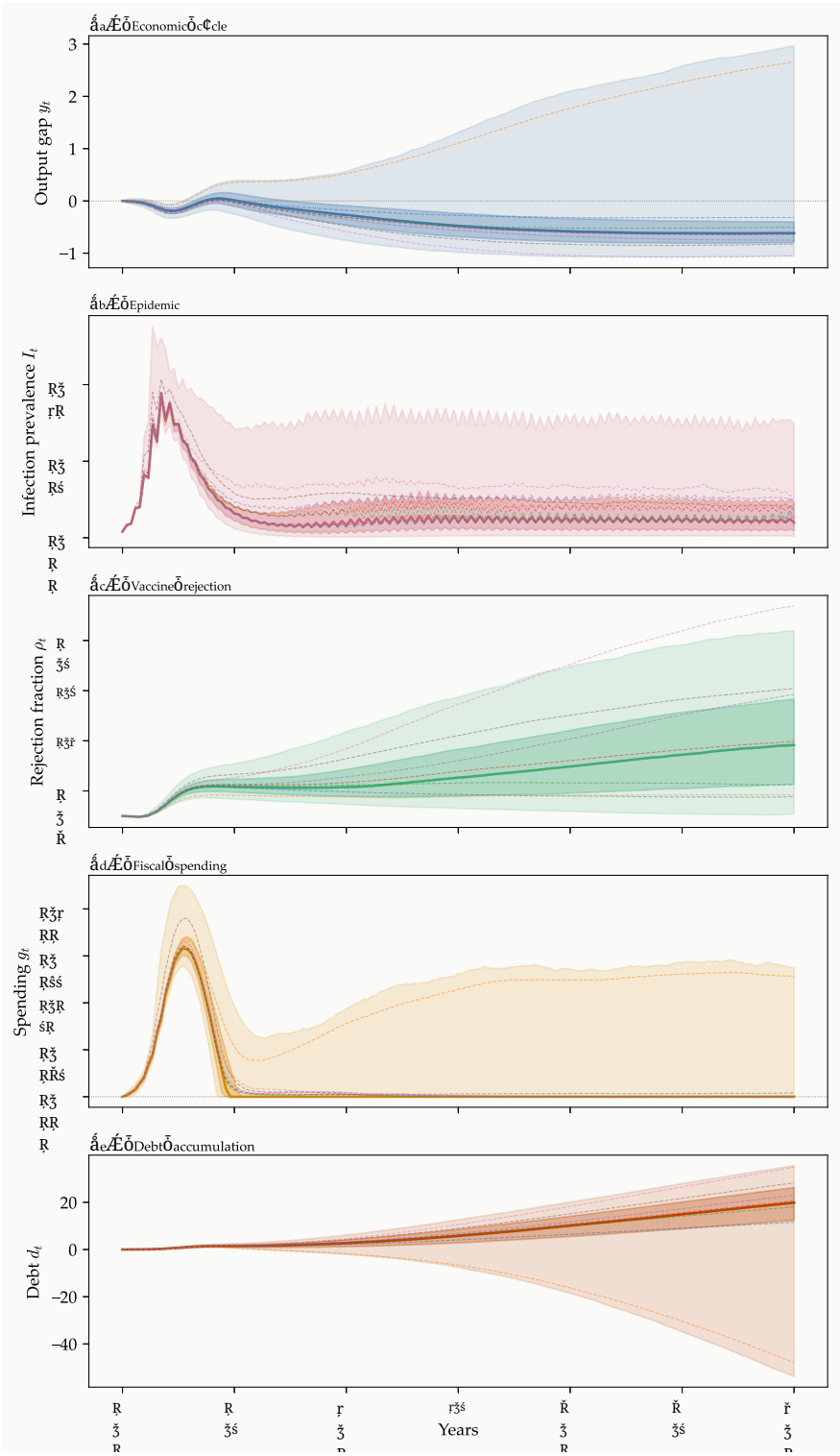


图8：四叙事系统的扇形图。与图2比较：产出缺口分布向右移动，上尾现在包含正值。注：正债务（$d > 0$）意味着相对于无疫情基线，债务正在上升。

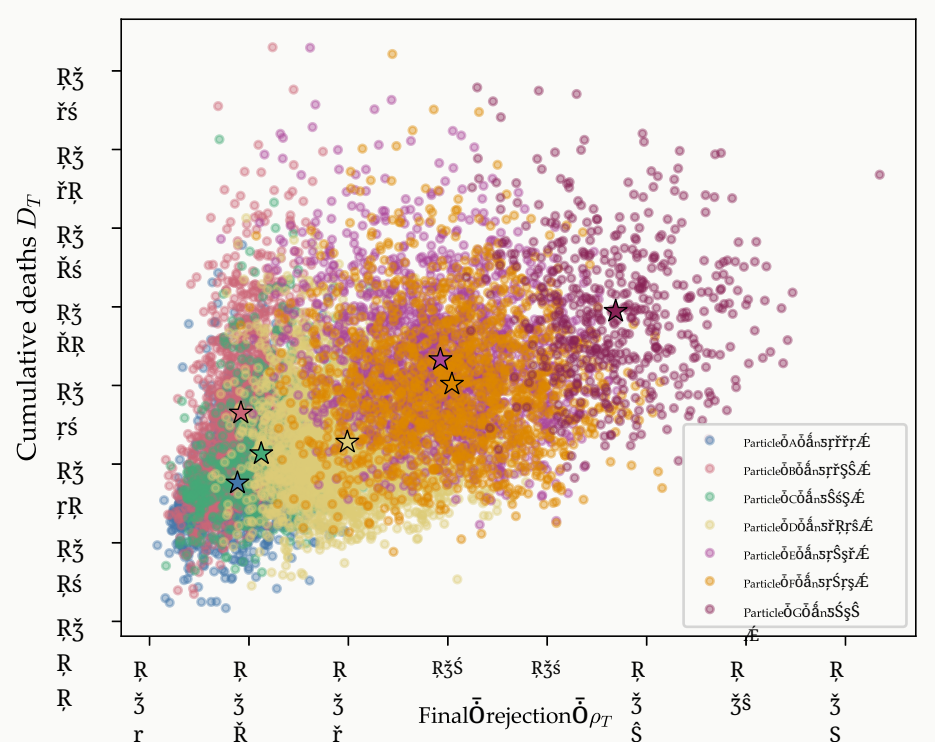


图 9：四叙事分岔图。最终拒绝与终端产出缺口的关系，按聚类着色。粒子 B（财政超调）独处于正值区域。

产出超调带来了足够的额外税收收入，使债务偏差 转为负值（相对于无疫情基线为$d_T = -47.9$ 个百分点）。这是美国的模式——大规模财政干预、快速复苏，以及恰恰因为超调奏效而改善的财政状况（相对于趋势而言）。

拒绝分岔持续存在，但有所缓和。低拒绝粒子（A–C，$\rho_T \le 0.21$）平均$y_T \approx +0.61\%$；高拒绝粒子（D–G，$\rho_T \ge 0.30$）平均$y_T \approx -0.81\%$。财政支持缩小了吸引域之间的差距，但并未消除该差距。

所有粒子的峰值支出占国内生产总值的7.9%至9.5%——与美国应对措施的规模一致（《冠状病毒援助、救济和经济安全法案》、《综合拨款法案》、《美国救援计划》：两年内约占国内生产总值的25%，按年度折算约为12%）。

政治棘轮中的一个微妙之处。财政积极主义在衰退粒子中达到饱和（$\phi \approx 0.9$）——持续的经济痛苦使政治激活渠道保持开放——但在超调粒子（$\phi = 0.05$）中并非如此。超调阻止了政治棘轮的启动，因为会触发它的经济衰退过于短暂。财政救助之所以奏效，正是因为它见效足够快，从而关闭了将其唤入存在的机制。自我消解式激活——与自我强化的拒绝循环相反。

10.7 对组合看跌偏差的影响

偏差缩小了四倍，但并未消失。正向渠道（f_8：财政需求）需要财政激活，而财政激活需要经济衰退，这意味着f_8 只有在之后f_1 和f_2 造成的损害已经发生后才会启动。建设渠道以破坏渠道先行运作为条件。破坏仍然是机械性的；建设仍然

表6：组合偏差：三叙事与四叙事。

	三叙事	四叙事	比率
产出缺口变动 Δy	-0.78 个百分点	-0.20 个百分点	$3.9\times$
拒绝变动 $\Delta\rho$	$+0.22$	$+0.11$	$2.0\times$
债务变动 Δd	—	$+11.9$ 个百分点	—

具有条件性。这种非对称性是结构性的，而非参数性的——在任何保留财政激活阈值结构的校准下，这种非对称性都会持续存在。

为什么偏差没有进一步缩小？因为财政支持集中在那些无论如何都会恢复的低拒绝粒子中（存在习惯化）。在高拒绝粒子中，财政激活达到饱和（$\phi \to 1$），但支出部分受到拒绝的阻碍，通过 f_{10},；而且产出缺口过深，财政乘数无法抵消$f_1, f_2,$ 和f_5造成的综合拖累。财政渠道帮助了最不需要它的粒子，却在最需要它的粒子中受到阻碍。这是耦合结构，而非校准选择。

10.8 附加补丁警告

加入财政叙事是一项有针对性的校准工作。通过调整四个参数，实现了校准目标——超调。采用另一种校准方案，即“最佳估计”基准情形（$\alpha_g = 0.03$、 $\alpha_I = 0.05$，无支出衰减，弹性为 $= 0.5$），则完全不会出现超调：财政渠道被负耦合压倒，支出峰值仅为国内生产总值的2–3%，而且每个粒子的产出缺口都始终为负。

“财政救助有效”与“财政救助失败”之间的差别，是一个参数（α_I）发生了 $3.6\times$ 的变化。最终得到美国的结果，还是更悲观的结果，取决于对政治意愿规模的校准判断——这正是范畴框架无法替你做出的那类判断。

因此，组合扩展有三条准则。第一，在看到结果之前先明确耦合函数——我们就是这样做的：根据机制而非期望的产出来定义f_7–f_{11}。第二，检查扩展会消除什么——超调粒子确实是新出现的；三叙事系统无法产生它。

第三，报告参数与定性预测的比率。四叙事系统有30+ 个参数，并产生一项新的定性预测（15% 的轨迹中出现超调）。这个比率如实呈现了情况，却不怎么好看。每增加一个叙事，就增加一个带装饰余跨度；代数扩展得很规整。经济学能否同样扩展，则是另一个问题。

11 偏差分解

构成性看跌偏差（第 8 节.5）及财政耦合对其进行的部分纠正（第 10 节.7），引出了一个定性分析尚未解答的问题：这种偏差是结构性的，还是模型设定方式造成的假象？在配套论文的定性情境中，人们会构造一个经过结构性设定的乐观粒子 E^+，并检验它在正确设定后是否会获得更高权重。而在这里，我们使用的是一个持续运行、具有数值权重的粒子滤波器，因此检验既更为严谨，也更为微妙。

建设性结果上的权重不对称有三个不同来源，其中只有两个属于偏差。

11.1 非对称性的三个来源

抽样偏差。 转移核在状态空间的建设性区域中提出的粒子不足。如果 AR(1) 创新项是对称的，但耦合函数将大多数轨迹推向压力状态，那么粒子云就会趋于悲观；这并非因为乐观不太可能，而是因为采样器没有探索乐观状态。这是定性情境中对 E^{+}规定不足的定量对应物——这是提议分布的问题，而非系统本身的属性。

结构性偏差。 耦合函数本身传递负向冲击的效率高于正向冲击。石油供应中断会立即扩大利差；生产率驱动的压缩则需要经过阈值穿越，且这需要时间。违约不可逆；利差扩大引发追加保证金通知，迫使人们卖出。自我强化动态确实是单向的。这种非对称性可能反映了现实，也可能是建模者的先验嵌入函数形式所致——区分两者正是这项检验的目的。

观测降权。 当前观测对建设性区域赋予较低的似然。如果利差为 400 基点，那么处于 100 基点的粒子应具有较低权重。这是信息，而非偏差。

11.2 三项可计算检验

检验 1： E^{+} **注入**。 明确构造乐观轨迹——定量的 E^{+}。将其作为一个粒子注入。根据似然测量其权重，并与粒子权重中位数进行比较。

- 如果 E^{+} 权重与中位数相近：这是抽样偏差。滤波器在该区域生成的粒子数量不足。调整提议分布。
- 如果E^{+} 权重可以忽略：那么观测结果或结构确实在排斥它。继续进行检验二。

检验二：耦合对称性审计。对于每个耦合函数f_k，在其取值范围内对输入变量进行均匀采样，计算f_k，并计算不对称比率

$$r_k = \frac{\int \max(f_k(x), 0)\, dx}{\int |f_k(x)|\, dx}. \tag{18}$$

比率为 0.5 表示完全对称；偏离 0.5 的程度量化了该耦合的方向性偏差。对于在其定义域上符号确定的耦合函数（例如$f_1 \le 0$ 始终如此），该比率显然为 0 或 1。在这种情况下，非对称性是结构性的而非分布性的，并且该比率确认的是耦合的方向，而不是衡量偏差。

为分离总体结构效应：运行滤波器两次，一次使用原始耦合，另一次使用对称化耦合 $\mathrm{f}^{\mathrm{sym}}\mathrm{k}(\mathrm{x}) = (\mathrm{f}_k(\mathrm{x}) + \mathrm{f}_k(-\mathrm{x}))/2$（偶部，在保持幅度的同时消除方向性偏差）。对于定义在有界定义域上的耦合函数$[0,1]^n$（例如 I、 ρ、u），对称化是围绕定义域中点进行的：$\mathrm{f}^{\mathrm{sym}}\mathrm{k}(\mathrm{x}) = (\mathrm{f}_k(\mathrm{x}) + \mathrm{f}_k(1-\mathrm{x}))/2$，将 $-\mathrm{x}$ 替换为定义域反射 $1-\mathrm{x}$。两次运行之间建设性区域权重的差异就是结构分量。

检验三：无观测运行。 使用均匀似然运行滤波器——所有粒子的权重相同，不依据观测量重新加权。由此得到的粒子云仅反映先验和耦合结构。如果在无观测运行中，E^{+} 的权重不足，那么这种非对称性就是结构性的。如果E^{+} 在无观测运行中权重合理，却在重新加权后失去优势，那么起作用的是观测——这是信息，而非偏差。

11.3 分解

建设性区域整体权重不足的问题，可以通过三项互补检验进行诊断，每项检验针对不同的偏差来源。虽然这些来源可能相互作用，但各项检验仍能提供独立的诊断信号：

表 7：偏差　分解：建设性结果中非对称权重的三个来源　.

来源	诊断	解释
抽样	E^+ 注入权重与中位数	提议分布问题；可通过以下方式解决：回火或重要性采样
结构性	对称耦合与非对称耦合运行	函数形式中的建模者先验；interrogate对照历史类比
观测性	无观测运行与完整运行	来自当前数据的信息；保留

对偏差检验而言，重要的数字是结构分量。若该值较大，下一个问题便是这种非对称性是否真实——在所建模的系统中，损害是否确实比修复传导得更快。就三叙事系统而言，有充分理由认为确实如此：拒绝棘轮确实是单向的（第 8 节.3），感染造成的需求拖累是即时的，而疫苗接种带来的复苏则较为缓慢，并且财政渠道需要经济衰退才能激活（第10节.7）。

但这项检验只是将问题定位，而非加以解决。它明确了是哪种耦合函数导致了非对称性、哪个参数驱动了这种非对称性，以及哪个历史类比为其提供了校准依据。操作人员决定这种非对称性究竟是系统特性还是缺陷。大流行模型发现，建设性情形需要的财政转移规模相当于信息技术革命生产率影响的 3–4× 倍——这一计算是结构非对称性主张的定量支柱。偏差分解是检验这一主张之处，也是其赢得或丧失可信度之处。

12 结论

三个异质动力系统沿各自接口通过单一推出进行组合，通过可计算函数实现耦合，并产生一个联合分布，其结构（拒绝分岔）和偏差（组合悲观）均可通过实证加以探究。由经济、流行病、疫苗构成的三叙事系统，在产出缺口上产生了 -0.78 个百分点的看跌偏差，以及 $+22$ 个百分点的拒绝变动；其驱动因素是耦合渠道以机制性方式传递损害，却仅有条件地传递复苏。

第四种叙事——经校准以匹配美国大流行规模应对的财政与政治动态——通过第二次推出接入，并引入首个正向耦合通道。在大流行规模支出参数下，14%的轨迹超调进入正产出缺口区域，看跌偏差从 -0.78个百分点收窄至 -0.20个百分点。系统究竟产生三个吸引盆（复苏、经济衰退和超调）还是两个，取决于支配紧急支出规模的单一参数。范畴框架决定耦合架构；校准决定结果。

强制行动是可计算的。偏差可以分解为抽样、结构性和观测分量（第 11 节），每个分量都可通过特定的诊断方法进行检验。结构分量将非对称性定位到特定的耦合函数；至于它们的方向性偏差

究竟是真实存在的，还是函数形式造成的伪影，是检验所提出的问题，但仅凭检验本身无法回答。叙事以实际的模拟轨迹为依据。构成性看跌偏差究竟是设定伪影，还是具有阈值触发棘轮和强化回路的系统的一种结构属性，仍未有定论——但如今已有两组来自不同维度系统的数据，都指向同一方向；分解结果也指出了值得探究之处。

这一切都无法无人值守地运行。该框架需要一位操作者——由其指定状态空间、选择耦合函数、设定校准、读取产出并进行修订。习惯化的故事（第9节）是最清楚的例子：最初的设定得出了看似合理却不正确的结果；操作者发现经济学方面不对；修订后则得到了不同且更好的结果。这并非该方法的缺陷，而正是该方法本身。范畴机器负责处理组合；耦合函数负责处理传导；粒子滤波器负责处理计算。这些工具都无法判断设定是否充分。这个判断——反复迭代、以领域知识为依据，并根据模型产出的结果作出调整——正是人类不可或缺的贡献。该框架是一种思维技术，而非自主技术。

一次校准

在为期三年（156周）的模拟中，所有参数均保持不变。三叙事系统采用下列新凯恩斯主义、易感者-暴露者-感染者-康复者模型和疫苗参数，并包含耦合，但不包含财政动态。四叙事系统则加入表11中的财政参数；“美国规模”列显示的是第10节所用的校准。

表8：新凯恩斯主义模型参数（季度设定，在模拟中换算为每周）。

参数	值	描述	来源
β	0.99	贴现因子	标准
κ	0.024	菲利普斯曲线斜率	Galí（2015）
σ^{-1}	1.0	逆跨期替代弹性	对数效用
ϕ_π	1.5	泰勒规则（通胀）	泰勒（1993）
ϕ_y	0.125	泰勒规则（产出缺口）	泰勒（1993），季度
ρ_s	0.9	供给冲击持续性	标准
σ_s	0.005	供给冲击标准差	≈2% 年度
ρ_r	0.8	自然利率持续性	标准
σ_r	0.005	自然利率冲击标准差	标准
σ_m	0.0025	货币冲击标准差	标准

B 原型轨迹的叙述性描述

在 9 维轨迹特征空间（第 8 节）中，使用 k-中心点聚类得到的五条原型轨迹，其中每个原型都由其聚类中所有粒子路径的加权平均表示。与任何单个粒子相比，加权平均生成的轨迹更平滑，也更能代表聚类的质心。选择原则是最大化差异：按最终拒绝对聚类排序，以确保涵盖完整的结果范围。

表 9：SEIR模型参数。

参数	值	描述	来源
σ	1.41/周	潜伏率	5天潜伏期
γ	0.7/周	康复率	10天传染期
ω	0.019/周	免疫衰减率	1年免疫
α	5	行为反应	我 $= 10\% \Rightarrow$ 接触减半
λ	0.025/周	毒株到达率	≈10 个月（COVID传播节奏）
初始R_0	2.5	首个毒株	武汉型
初始感染病死率	5%	首个毒株	疫情早期

表 10：疫苗动态参数。

参数	值	描述	依据
λ_v	0.038/周	创新率	≈6 个月（mRNA研发速度）
Δv	0.3	效力跃升	部分更新
δ_v	0.4	毒株漂移导致的损失	显著免疫逃逸
θ_{adopt}	0.05/周	接种速度	缓慢逻辑增长
θ_{decay}	0.005/周	接种率衰减	年度加强针
θ_{up}	0.005/周	抵制增加	强制令阶段
θ_{down}	0.003/周	抵制减少	5:3 不对称
$I_{\text{阈值}}$	2%	强制令阈值	暴发 ，非地方性流行
ρ_0	0.15	初始犹豫	大流行前基线
习惯化（耦合衰减）			
h	0.02/周	习惯化速率	∼35 周半衰期
$\eta_d^{\text{下限}}$	0.02	需求弹性下限	较初始值减少80%
$\eta_s^{\text{下限}}$	0.01	供给弹性下限	地方性缺勤调整后

表11：财政叙述参数：基准与美国规模校准。

参数	基准	美国规模	描述
α_g	0.03	0.06	对经济衰退的支出响应
τ	0.03	0.03	经济衰退阈值
σ_g	0.001	0.001	财政冲击标准差
ϕ_{up}	0.08	0.08	积极主义上升率
ϕ_{down}	0.005	0.005	积极主义衰减率 (16:1)
ϕ_0	0.05	0.05	初始积极主义
τ_{tax}	0.3	0.3	有效税率
α_I	0.05	0.18	疫情紧急支出
ϱ^{decay}	0	0.06/周	计划终止率
d^*	0	0	债务目标
耦合参数			
η_g	0.5	0.6	f_8：财政需求弹性
ζ	2.0	2.0	f_9：财政研发促进
κ_ρ	1.5	1.5	f_{10}：拒绝财政模块

粒子 A：疫苗挽救 （*8.0%*的粒子）
幸运抽签。大约三年内出现两种毒株——并非因为病毒仁慈，而是因为时间间隔给了疫苗平台喘息的空间。每一种变异株都在上一剂加强针有时间发挥作用之后才到来。

第一波在约第9周达到9.2%的流行率峰值。经济收缩0.8%——按和平时期标准，这是一次急剧的经济衰退，但却是中央银行知道如何谈论的那种。到第2年，习惯化已悄然发挥作用：需求弹性从0.10降至0.03，同样的地方性流行感染若在恒定耦合下本会使经济崩塌，如今在国内生产总值数据中几乎显现不出来。产出缺口最终为 −0.42%。并非复苏。但已接近到足以让政客称之为复苏的程度。

五分之一的人拒绝疫苗——这是所有原型中最低的拒绝率。其余五分之四的人口卷起袖子，该计划累计达到23.3个有效疫苗周，几乎是次优轨迹的两倍。死亡率：8.0%。失去亲人的家庭依然失去了亲人。但系统挺住了。

这是唯一一种所有耦合渠道最终都会减弱、而非强化的粒子。经济吸收了大流行，疫苗遏制了病毒，习惯化消解了残余拖累。它行之有效。但在所有轨迹中，这种结果所占比例不到十分之一，因此也并非最可能出现的结果。

粒子 B：早期遏制 （占粒子的 *9.6%*）
平均而言，毒株近乎四种，但早期毒株在拒绝棘轮启动之前便得到遏制。第一波疫情的峰值为 9.2%，疫苗平台紧跟变异株演化的步伐，恰好维持住防线。

拒绝率达到 0.31，属于中等水平。这还不至于引发报纸社论大谈社会崩溃——只是有足够多的人悄然拒绝，随着一个个预约被取消，计划的运作能力从 80% 降至 70%。累计有效疫苗周数为 22.8 周，足以遏制大多数疫情波。死亡率：10.6%。

产出缺口在 −0.76% 时触底，随后有所回升，最终为 −0.59%。原因在于习惯化：后续疫情波造成的经济冲击小于第一波，即使感染水平相近也是如此。劳动者不再请病假，消费者不再取消预订。需求弹性已降至最低点。人口适应了——不是适应病毒，而是适应扰乱。

并非救援，也非崩溃。系统学会以日益低廉的代价消化一种慢性状况，就像一个家庭逐渐适应某位家人长期患病：围绕问题重新安排生活，却始终无法解决，最终几乎不再察觉它。大流行变成了天气。

粒子 C：受控煎熬（占粒子的 *15.3%*）
平均接近四种毒株。第一波疫情在 9.8% 处达到峰值，随着疫情波不断累积，拒绝率开始稳步攀升至 0.32。尚未越过临界点，但疫苗计划正在失去优势。产出缺口在 −0.95% 触底。死亡率：11.1%。

与 B 相比：毒株数量相近，但流行病动态带来的压力更大。B 累积了 22.8 个有效疫苗周；C 则达到 15.7 个。更深的谷底会更强烈地触发 f_5 ，而更高的拒绝率也同时削减了符合接种条件的人群。病毒从一个方向上超越了平台，人口则开始从另一个方向上逐渐流失。

产出缺口最终为 −0.66%，略逊于 B 的 −0.59%。GDP走势相近。公共卫生走势开始出现分歧。拒绝接种的比例为三分之一，对比另一方也是三分之一——但趋势线比最终数值更重要。

粒子 D：缓慢棘轮（占粒子的 *21.0%*）
概率最高的单一聚类——五分之一的轨迹落在此处。平均超过四种毒株。拒绝棘轮已越过阈值：0.38，接近五分之二的人拒绝接种。每一波都会让拒绝接种的人数再增加一些，疫苗计划的有效周数则缩减至 10.6 周。产出缺口低谷为 −0.81%。

这是临界点。低于这一拒绝水平，疫苗计划能维持足够的覆盖率，从而遏制后续疫情波。高于这一水平，棘轮效应便会自我强化：拒绝越多，疫苗接种就越少，感染就越多，强制措施就越多，拒绝也就越多。粒子 D 位于边界上，是系统仍在奋力抗争、尚未趋于稳定的最后一个聚类。

死亡率：12.5%。终端产出缺口： −0.70%，而 C 为 −0.66%。国内生产总值的差异很小，结构性差异却不小：粒子 D 已进入一个疫苗计划正在收缩、而非仅仅表现不佳的状态。

粒子 E：结构性失败（占粒子的 *46.1%*）
平均而言，三年内出现六种以上毒株。每五到六个月就出现一种新的变异株，每一种都能部分逃逸其前代所建立的免疫力。疫苗平台尽职地更新，但每次更新在下一批疫苗运抵之前就已过时。病毒获胜并非因为它更危险，而是因为它的速度更快。

拒绝率升至 0.52。超过半数的人拒绝接种。该计划的有效覆盖率已经崩塌：三年内仅有 7.2 个有效疫苗周，而粒子 A 为 23.3。两者的比率超过三比一。

感染峰值：9.8%。累计死亡率：15.8%——接近粒子 A 的两倍。产出缺口在 −1.14% 触底，最终为 −0.95%。习惯化避免了恒定耦合会造成的 −3%，但它找到的底线是严重衰退，而非复苏。经济并未崩溃，只是停滞于此。

近半数模拟轨迹最终落在这一结局上——这是占主导地位的结果。疫苗计划失败，并非因为设计不当，而是因为其成功所需的条件——适度的拒绝率、经济稳定、可控的毒株演化——从未同时具备。这些条件彼此依存。耦合意味着，其中一项一旦失效，其余各项也会随之失效。习惯化虽能减轻冲击，却无法扭转方向。在这个粒子中，构成性看跌偏差并非分析伪象，而是事实。

C 四叙事原型轨迹

通过在 13 维轨迹特征空间（第 10.6 节）中进行*k*-中心点聚类得到的七条原型轨迹，其中每个原型均由其聚类中所有粒子路径的加权平均表示。按最终拒绝排序。

粒子 A：温和复苏 （粒子的 *13.3%*）
乐观主义者想象中的世界。三年内大约出现三种毒株。感染峰值勉强达到 9.5%，产出缺口在浅浅的 −0.32% 处触底，到预测期末已回升至−0.32%——足够接近零，以至于回望时，这场大流行看起来不过是一个糟糕的季度。拒绝率维持在 0.19，基本没有变化。没有人走上街头反对强制措施，因为几乎用不着采取这些措施。有效疫苗周为 25.4——大幅高于其他任何粒子。疫苗之所以有效，是因为没有什么能阻止它发挥作用。

财政渠道只是个脚注。峰值支出达到国内生产总值的 8.0%。政治棘轮效应确实启动了——行动主义上升至 $\phi = 0.76$——但经济衰退过于轻微，无法将高涨的行动主义转化为大规模支出冲击，而计划日落（g^{decay}）会侵蚀累积起来的支出。期末债务：11.5 个百分点。即便没有这些支出，经济也会复苏。政府只是略微助力，解决了一个本来就在自行解决的问题。当基本条件良好时，财政成功就是这个样子——而这并不能告诉你，当条件不再良好时会发生什么。

粒子 B：财政超调（占粒子的 *13.9%*）
美国粒子。这就是实际发生的情况——或者说，至少相差不远。

平均有五种毒株，流行病十分严重（感染峰值为 9.4%，死亡率为 13.2%），财政应对达到《冠状病毒援助、救济和经济安全法案》的全面规模：峰值支出占国内生产总值的 8.4%。经济几乎没有下滑——产出缺口最低为 -0.08%，经济衰退短暂得甚至不会出现在季度数据中——随后到预测期末超调至 $+2.66\%$。为正值。在整个模拟中，无论是三叙事还是四叙事，只有这一个粒子的产出缺口最终高于零。

超调并非温和毒株造成的偶然结果。这场流行病的严重程度与粒子 D 或 E 相当。B 的独特之处在于低拒绝（$\rho_T = 0.19$，使疫苗计划得以维持 13.6 个有效周）与大规模、不受阻碍的财政激活相结合。低拒绝意味着f_{10} 永远不会触发——支出得以全力注入经济。乘数效应不受任何阻碍。

接下来是关键结论：债务偏离值转为负值（$d_T = -47.9$ 个百分点）。需要说明一下计量单位：d 表示相对于无疫情基线的偏离，而该基线本身就在恶化——因此，负的d_T 意味着，超调带来的额外税收收入足以改善财政状况，使其好于原本的走向，并不意味着政府出现了盈余。但这种改善是真实的，而且只有干预奏效才会发生。在其他每个粒子中，同样的支出都会累积为额外债务。

政治动员维持在 $\phi = 0.05$——棘轮效应从未启动，因为经济衰退持续的时间始终不足以触发它。自我否定式干预：救援之所以成功，恰恰是因为它阻止了那些原本会让干预得以持续的条件形成。

粒子 C：延迟磨耗（占粒子的 *6.6%*）
纸面上看起来像 B，实际发展却像 D 的粒子。

大约有三种毒株，感染峰值为 9.4%，财政支出达到国内生产总值的 7.9%。经济没有出现超调。产出缺口在 -0.53% 触底，之后缓慢降至 -0.50%。

为什么？时机和拒绝。疫情波在财政渠道完全启动前就已到来，拒绝率达到 0.21——程度适中，但足以让 f_{10} 开始削弱财政乘数。经济吸收了财政支持，却将其转化为债务（18.1 个百分点），而非增长。同样的药方，不同的病人，不同的结果。这是模拟中权重最低的粒子：系统不喜欢刀刃情形。

粒子 D：受控衰退（粒子的 *30.2%*）
众数粒子。将近三分之一的轨迹落在这里——这是四叙事系统中最有可能出现的单一结果。当“正常”也包含大流行和财政应对时，这就是“正常”的样子。

平均毒株数超过四种，中等严重程度（感染峰值为 9.5%，死亡率为 11.4%），拒绝率为 0.30。经济在谷底收缩 0.64%，随后稳定在 -0.64%。峰值支出占国内生产总值的 8.0%——这并非因为缺乏政治意愿，而是因为经济衰退落在一个死区：

经济衰退严重到足以维持支出，却还没有严重到足以全力启动紧急渠道。有效疫苗周为十四周。计划得以运作，但能力仅为三分之二。

债务：20.6 个百分点。财政渠道使产出缺口减少了不到一个百分点——若没有它，这个粒子的产出缺口将达到 $y_T \approx -0.9\%$——代价是债务增加 21 个百分点。这不是救援，也不是失败，而是持续透支未来，以换取当下有限的收益。受控衰退：支出减缓了下滑，账单则稍后到来。相邻的粒子 E 和 F 合计还占 31%，最终落在相同的区域，只是程度不同，性质并无二致。D、E 和 F 合计占整体分布的 60% 以上。中位轨迹最终呈现轻度衰退和适度债务，以及一种令人疲惫的稳定状态——它不会成为头条，却会成为一代人切身经历的一部分。

粒子 E：拒绝拖累（占粒子的 *16.9%*）

平均有六种毒株，拒绝率为 0.39，死亡率为 16.6%。产出缺口在 -0.75% 触底，最终为 -0.75%。峰值支出占国内生产总值的 7.9%。财政努力是存在的——政府正在支出。但支出正逆风而行。f_1 通过感染拖累经济。f_2 扰乱供应。f_5 将经济衰退转变为强制令反弹。一个正向渠道对抗三个负向渠道。正向渠道落败。

债务：23.1 个百分点。有效疫苗周：8.5。支出不断累积，却没有带来复苏。这不是崩溃——系统处于两个吸引域之间，高于 G 的灾难状态，低于 D 所管理的平庸状态。拒绝程度足以阻碍复苏，却不足以击垮系统。财政渠道正在运转，只是在原地空转。

粒子 F：财政瘫痪（占粒子的 *14.2%*）

平均毒株数超过 6，拒绝率为 0.40，终端产出缺口为 -0.82%。这个名字本身就是诊断。

峰值支出：国内生产总值的 9.5%，是所有非超调粒子中最高的。政治棘轮效应已达饱和（$\phi \approx 0.93$）——系统正试图增加支出。但 0.40 的拒绝率意味着f_{10} 会使财政效力降低约 12%。资金流出了。每一美元中有 12 美分在抵达经济之前，就被耦合结构吸收了。渠道并未堵塞，只是流量受限。

有效疫苗周：7.6。债务：28.3 个百分点。若没有财政渠道，这个粒子的产出将达到$y_T \approx -1.1\%$。这笔支出换来了四分之一个百分点。在债务达到 28 个百分点时，每改善一个基点的产出缺口所付出的代价，是所有尚未彻底陷入结构性失败的粒子中最高的。财政渠道发挥了作用，但代价高昂。而那些因拒绝而拖累财政渠道的人口，也将承担由此累积的债务。

粒子 G：结构性失败（粒子占比 *5.0%*）

平均毒株数超过 8 种。拒绝率为 0.57——超过半数的人拒绝接种。死亡率：19.7%。五分之一的人死亡。产出缺口在 -1.08% 触底，最终为 -1.05%。没有复苏。曲线一片平坦。

峰值支出：国内生产总值的 8.3%。拒绝率超过 0.5 时，f_{10} 会抵消六分之一的每一笔财政支出。紧急渠道全力启动，但仍然不够。综合负耦合——感染拖累需求、感染扰乱供应、经济衰退助长拒绝——在财政刺激抵达实体经济之前就将其消耗殆尽。债务：34.8 个百分点。有效疫苗周：4.3——仅为粒子 A 的六分之一。

四叙事系统产生了与三叙事粒子 E 相同的结构性失败，债务还增加了 35 个百分点，却没有带来额外复苏。在这种条件下，财政渠道纯粹是成本。系统支出、借款，却一无所获，因为每一美元的正向收益都被耦合

结构吸收，还没来得及发挥作用。这里的粒子，其构成性看跌偏差根本不是偏差，而是描述。

参考文献

Fong, B.（2016）。开放与互联系统的代数。博士论文，牛津大学。Fong, B.与Spivak, D. I.（2019）。应用范畴论导论：组合性的七幅素描。剑桥大学出版社。Galí, J.（2011）。失业波动与稳定政策：新凯恩斯主义视角。*Zeuthen*讲座。麻省理工学院出版社。Galí, J.（2015）。货币政策、通胀与商业周期。普林斯顿大学出版社。第2版。Kermack, W. O.与McKendrick, A. G.（1927）。对流行病数学理论的一项贡献。皇家学会会刊*A*，115(772):700–721。Kschischang, F. R.、Frey, B. J.与Loeliger, H.-A.（2001）。因子图与和积算法。*IEEE*信息论汇刊，47(2):498–519。Phoa, W.（2026）。面向叙事空间的粒子滤波器与因子图：用于情景分析与资产配置的组合框架。撰写中。Taylor, J. B.（1993）。实践中的相机抉择与政策规则。卡内基-罗切斯特公共政策会议系列，39:195–214。