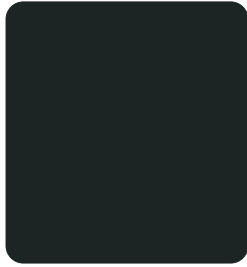


系统思维与反馈

墙上的小圆盘能守住一个温度，抵御严寒；把这招放大到行星尺度，它也能把世界推过临界拐点。



恒温器：一台廉价机器，能守住一个目标，抵抗世界的拉扯。

墙上有一只小小的塑料圆盘，螺丝固定在墙上，正在默默完成一桩十八世纪最顶尖工程师都束手无策的壮举：它在守住一个目标。你告诉它 21°C；窗外寒冬想尽办法让房间变冷；它就是不答应。它读取温度，把读数和你设定的数字比较——如果房间偏凉，就闭合电路招来热量，然后观察自己的干预是否奏效，再调整。感知、比较、修正、重复，永不停歇。系统与自己目标之间这圈小小的循环对话，是人类偶然发现的最强大思想之一。今天，我们要跟着它，从一只恒温器一直走到一颗正在失稳的行星边缘。

这个想法有个名字——反馈¹——还有一门围绕它建立起来的学问：系统思维²。它的核心主张略带颠覆：要理解几乎所有重要的事物——身体、市场、森林、气候——你不能只盯着零件，而要看回路：系统输出沿哪些线路折返，变成自己的输入。把回路看准，令人困惑的行为忽然就通了；把回路看错，世界会一而再、再而三地给你惊喜，而且方向总是不妙。

● 核心模型

我们身在何处

昨天（第 8 日）我们看着一群椋鸟用简单的局部规则化作了令人惊叹的全局秩序，并给它起了名字：涌现。今天，我们要点出那台引擎在罩子下嗡嗡作

¹反馈指系统的输出反过来影响自身输入，从而形成自我修正或自我放大的回路。

²系统思维关注部分之间的联结、回路和整体行为，而非孤立地研究单个零件。

响的名字——反馈——并学习让它整体不同于零件的语法：存量、流量、回路、延迟。还有两处回响会反复出现：第 5 日，珀尔的因果箭头被禁止回环，而反馈恰恰故意打破这条规则；以及第 1 日，弗里斯顿的预测性大脑本质上是一台最小化惊奇的恒温器。五条主线——信息、能量、演化、涌现、计算——今天最倚重的是涌现与能量，并为第 177 日的气候科学悄悄埋下伏笔。

掌舵的回路

从源头那台机器说起。1788 年，詹姆斯·瓦特碰到了一个难堪的问题。他的蒸汽机宏伟却喜怒无常：负荷轻就狂飙，负荷重就拖不动。一台不能稳速运转的机器，对织布或磨面几乎没用。瓦特的解决办法借自风车匠：一种小巧而精巧的铜制装置，叫做离心调速器——它是纯粹的反馈，由黄铜铸成。



转速加快 -> 飞球外张 -> 套筒上升 -> 阀门关闭 -> 机器减速。

看看它的逻辑。两根铰接臂末端各挂一只金属球，连在与发动机联动的旋转轴上。转速一快，球因离心效应向外飞；臂随之抬高；抬高的臂通过连杆关小蒸汽阀门；蒸汽减少，发动机慢下来。转速太慢，球下垂，阀门打开，发动机又加速。发动机用自己的速度绕过一圈，抓住油门，自我修正。没有操作员，没有思想——只有一条回路，被设计成任何偏离目标速度的变化都会触发自我抵消。这就是负反馈：变化引来反向反应，系统趋向稳定目标。你的恒温器、你的体温、你的瞳孔、竞争性市场的定价——都是同一招。

几十年里，调速器是工匠的胜利，却没人能真正解释——直到詹姆斯·克拉克·麦克斯韦（没错，就是电磁学那位——他的另一项杰作我们将在第 36 日遇见）在 1868 年坐下来，用一篇标题干巴巴的论文《论调速器》做了数学分析。麦克斯韦真正的贡献不是赞美反馈，而是提出一个危险问题：自校正回路何时会失效？他把发动机的运动方程线性化，证明调速器可能不仅无法修正，还会过度修正，再过度修正，摆幅越来越大，直到机器把自己撕碎。稳定性并非善意所能保证，它微妙地取决于具体数字。那篇论文是现代控制理论的种子，却几乎被遗忘了八十年。

重新发现它的是数学家诺伯特·维纳。1948年，他出版了一本造词的书：《控制论》。这个词来自希腊语 *kybernetes*，意为「舵手」——有趣的是，「调速器」和后来的「政府」也同源。维纳的飞跃在于发现：同一套回路——感知、比较、修正——是恒温器、蒸汽调速器、伸手取杯的手、调节血糖的动物和大脑的共同秘密。他甚至特别指出麦克斯韦 1868 年的论文，称它是第一篇严肃的反馈研究。这个模式不在乎自己是黄铜、血肉还是算术。反馈与基质无关。这一洞见——控制是一种抽象结构，可以从一个系统里抽出来，投进另一个系统——正是整门课程要追寻的跨领域模式。

两种回路，两种命运

反馈分两种口味，复杂系统中几乎所有戏剧性场面，都是其中之一换了身戏服。

负反馈，又称平衡反馈，抗拒变化、追求目标。它是伟大的稳定器：恒温器、调速器、稳态、走钢丝的人无休无止的微调。系统动力学的人把这些回路标为 B 。正因为它们，你才有体温，而不是一个体温问题。

正反馈，又称增强反馈，放大变化、自我喂养。它是伟大的加速器：麦克风离音箱太近时耳语瞬间变成尖啸，复利，谣言，人口繁殖，火越烧越热地加热自己的燃料。这些回路标为 R 。正反馈不等于「好」，负反馈也不等于「坏」——名字说的是方向，不是道德。增强回路既造就所有指数级成功故事，也造就所有失控灾难。今天末尾我们会看到，一颗行星是摇晃后恢复，还是翻入全新状态，差别往往就在于某个沉睡的 R 回路突然觉醒，压倒了维持稳定的 B 回路。

反馈引擎的三个状态

设置	系统行为	要点
低增益、短延迟、负反馈	平稳靠近 21°C	修正足够温和，也来得足够早。
高增益、长延迟、负反馈	围绕目标振荡	修正抵达时状态已经变了，系统开始追着自己的影子跑。
正反馈	偏差越修越大	符号翻转后，目标追踪者变成失控放大器。

存量与流量：累积的物理学

如果说反馈是系统思维的动词，存量与流量就是它的名词。这个想法简单到近乎侮辱——这正是人们会把它灾难性地搞错的原因。

存量是任何会累积的东西：浴缸里的水、账户里的钱、大气中的碳、人口中的人、婚姻中的怨气。流量是改变存量的速率：注满浴缸的水龙头、排空浴缸的下水道。而整个看似简单却深刻的规则就是：

只要流入大于流出，存量就会上升——无论流量本身正在做什么。

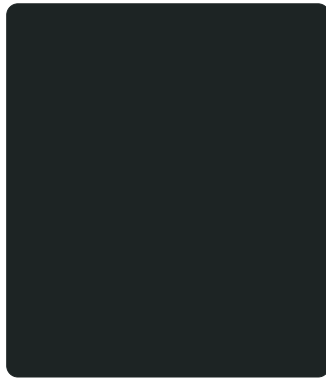
读两遍，因为人类直觉强烈反对它。为什么？因为我们很擅长追踪眼前可见的运动，却很不擅长在脑中把一个速率随时间积分。当水龙头曲线下降时，眼睛会想让水位也跟着下降。但存量不是任何一条流量曲线的复制品；它是流入减去流出的运行总和。所以，正在下降的流入，只要仍然高于流出，仍会让存量上升。这个小差别，就是整个陷阱。

把存量与流量打造成一门可用学问的是杰伊·福雷斯特，一位麻省理工工程师，他先造过飞行模拟器和开创性计算机存储器，然后在 1950 年代转向一台更古怪的机器：企业。他被请去解释，为什么通用电气家家电厂在消费需求稳定的情况下，却每隔三年就经历一轮疯狂招工和残酷裁员。福雷斯特证明，这些盛衰周期并非市场造成，而是企业内部的管理者如何对库存和订单作出反应时，由延迟与反馈回路制造出来的。周期是系统结构的属性，而非环境的属性。他把这门新领域叫做系统动力学，其核心洞见令人不安：复杂系统是反直觉的。它们会主动误导身处其中的人。

福雷斯特最具影响力的学生是非凡的唐娜拉·梅多斯，1972 年全球畅销书《增长的极限》的主要作者，也是几十年后该领域广受喜爱的入门书《系统之美》的作者。梅多斯有一种把方程式变成大白话的天赋，她反复回到最朴素的教学工具：一只浴缸。

36% 难题

这是真实研究结果，不是课程里的小故事。来源是琳达·布思·斯威尼和约翰·斯特曼 2000 年发表在 *System Dynamics Review* 的论文“Bathtub dynamics: initial results of a systems thinking inventory”。他们给受过高等教育的研究生看一张简单图表：这是浴缸随时间的流入，这是流出；请画出水位。它不需要微积分，只需要上面那条规则。只有大约 36% 的人画对了形状。2009 年 Cronin、Gonzalez 与 Sterman 的后续研究把主导错误称为相关启发式：人们把水位画得随流入一起升降，好像存量应该模仿流量。事实并非如此。



斯威尼与斯特曼的浴缸题：许多人画出的不是累积曲线，而是与流入同步起伏的曲线。

这个错误只有在看见正确图形后才显得简单。在那之前，错法非常自然：「水龙头在变小，所以水位也该下降。」被藏起来的操作是累积。只要流入高于流出的面积仍在增加，水位就会继续上升。

为什么要在意一只浴缸？因为大气就是一只浴缸。二氧化碳是存量，我们的排放是流入，自然汇（海洋、植物）是排水口。目前人类向空气中排放二氧化碳的速度，大约是排水口能清除速度的两倍。斯特曼指出，正是同样 36% 式的错误感染了公众对气候的推理：许多人以为，只要停止增加排放，浓度就会平稳。不会。只要水龙头比排水口大，水位就继续上升。要稳定存量，必须把流入一路削减到与流出相等——这是苛刻得多的要求，而浴缸只要你看一眼，大约十秒钟就能教会你。

水槽的存量与流量

阶段	流量关系	水位
水龙头上升	流入大于流出	快速上升
水龙头回落但仍高于排水	流入仍大于流出	继续上升
水龙头低于排水	流出大于流入	才开始下降

回路、延迟与我们

把存量、流量和反馈连起来，你几乎可以把任何系统画成一张因果回路图：箭头表示谁影响谁，每个闭合回路标为 R （增强）或 B （平衡）。符号很朴素，回报却很丰厚：反复出现的形状会跳出来——梅多斯等人称之为系统基模。



每个真实人口都是增长引擎与限制刹车之间的拔河。

更多人 -> 更多出生 -> 更多人，这是 R 回路：增长的引擎。但更多人 -> 更多拥挤和稀缺 -> 更少净出生，这是 B 回路：刹车。每个真实人口都是两者之间的拔河；多数真实系统也会混合二者：增强回路制造运动，平衡回路设定限制，延迟决定结果是平滑还是混乱。

两个复杂因素把这些整洁的图变成现实世界的灾难素材。第一个是延迟。带有长时滞的平衡回路不会温柔平息，而是会超调，就像热水器反应慢，你刚把冷水调大，紧接着就被烫到。（你在反馈引擎里已经直接体验过：加上延迟，平静的恒温器开始振荡。）第二个是非线性：在反馈系统中，原因加倍很少让效果也加倍。轻轻推，纹丝不动；再加一点力，整个系统就猛地一倾。

最经典的演示是一个游戏。麻省理工的啤酒分销游戏让玩家坐在一条供应链上——零售商、批发商、分销商、工厂——每个人都向上游订货，彼此之间有发货延迟，没有人能看见全局。客户需求几乎平坦：只有一次不大的一次性小幅上涨。然而每次玩，零售端那道微小涟漪都会放大成上游疯狂加单又绝望取消的加速摆动——这就是牛鞭效应。约翰·斯特曼 1989 年的经典研究表明，原因不是愚蠢或贪婪，而是人们无法感知自己所嵌入的反馈结构，系统性地误判延迟并过度反应。教训令人谦卑，而且远不止啤酒：善意的人们，基于眼前事实做出合理反应，却会可靠地破坏一个他们看不见的回路所构成的系统。

这就是为什么梅多斯毕生都在问另一个问题：不是「我怎么用力推？」，而是「杠杆在哪里？」她那著名的杠杆点排序清单——干预系统的位置——把直觉颠倒了过来。大家伸手就去的地方（调一个数字、改一项税、定一个目标）位于清单底部，是最弱的推手。真正的杠杆高高在上：反馈结构本身、系统的规则、信息的流动，以及最强有力的——系统所围绕的目标与范式。改一个参数，系统耸耸肩；改一个系统的目标，下游一切都会重组。这是整个领域最实用的想法，我们会在课程后续反复借用。

拆开它，还是整体看待？

这一切之下潜伏着一个真正古老的争论：如何理解任何事物。科学的主流方法——叫它还原论——说：要理解一物，就把它拆成零件，理解每个零件，再拼回去。它取得了辉煌的成功。细胞解释身体，原子解释化学，这一策略构建了现代世界。

但系统思想家追随生物学家路德维希·冯·贝塔朗菲和他 1968 年的《一般系统论》，提出反驳：对于一个各部分紧密回环相连的系统，把它拆开会毁掉你本想研究的东西。切断反馈回路，你手里只剩下惰性组件和一滩只存在于相互作用中的行为。活细胞是一个开放系统，不断与周围环境交换物质和能量，以维持自己远离平衡态；把它的分子孤立研究，生命气息就蒸发了。这是整体论者的抱怨：整体不是部分之和；它是部分之和加上它们连接的模式。

这里我们可以比旧口号更精确，因为第 8 日已经给了我们工具。诚实的解决方案不是整体论或还原论，而是知道何时该用哪一个。还原论在部分弱耦合、组合大致呈线性时效果奇佳；你可以逐个研究，再把答案相加。它恰恰在部分强回环且非线性时崩溃——此时反馈让整体表现出任何孤立零件都无法展示的行为。这不是神秘主义，而是弱涌现（第 8 日）：系统级行为完全扎根于零件，却只有让它们相互作用——让回路跑起来——才能知道。是否存在强涌现——真正不可约的、比如能下行因果的整体力量——仍像我们之前看到的那样有争议，且目前困在意识的谜题里。反馈让「多即不同」从一句口号变成可处理的工程事实。注意它与第 5 日的悄然押韵：珀尔的因果图必须是有向无环图——不允许箭头回环——而反馈故意违反的正是这个结构。恒温器就是一个因果循环。系统思维，部分地说，就是一旦允许箭头兜成一圈，因果推理会变成什么样子。

边缘：当回路失控

现在把这一切押到最高风险的系统上。大多数时候，地球的伟大系统由平衡回路支配——推它一下，它会把自己推回原处。森林让上方空气凉爽湿润；冰盖明亮的表面反射阳光，让自己保持冰冻。稳定，由负反馈买来。但这些系统内部还藏着一个沉睡的增强回路——如果某个驱动因素（比如升温）推得够猛，R 回路就会醒来，压倒 B 回路，独自把系统带进一个完全不同的状态。那个阈值就是临界拐点，跨过它可能突然、自我维持，而且极难逆转。

其数学是临界转变理论，最有影响力的描绘者是生态学家马滕·舍费尔。把系统状态想象成一只停在山谷里的球——一个由反馈维持的稳定盆。随着驱动因素变化，地貌本身会变形：你的山谷变浅，附近另一个山谷加深。有一段时间球原地不动。但到了临界点——一次折叠分岔——你的山谷彻底变平，球就不可逆地滚进另一个盆。最刺痛的是滞后：要回到原处，光是撤销原来的推动不够，你必须把驱动因素往反方向推很远，直到第二个山谷消失。门只有一扇方向推起来便宜。这种不对称性正是为什么「以后我们再逆转就好了」对许多临界要素来说是个危险幻想。

最美的是，理论预言了一个警示信号。当山谷朝着临界拐点变平，球从每次随机摇晃中恢复得越来越慢——这个现象叫临界慢化。统计上，它表现为方差增大（球晃得更远）和自相关增大（每一刻都更像上一刻，因为系统弹不回来）。这些早期

预警信号由舍费尔等人在 2009 年一篇里程碑式的《自然》论文中提出，无论系统是湖泊、电网还是冰盖，都同样出现。下面这个面板让你一次感受这三个想法。

边缘 01·警示信号

● 临界慢化·已确立

● 作为日期预测器·有争议

警示信号——及其限度

临界慢化在理论和受控全湖实验中都真实存在。但标题常常跳过的一个硬陷阱是：检测系统正在丧失恢复力是一回事，外推到它将在哪一年翻过临界拐点是另一回事。2024 年本-亚米等人的一项冷静分析（《科学进展》）认为，不确定性「太大，无法从历史数据预测主要地球系统组成部分的临界时间」——记录短且残缺，答案严重依赖模型假设。所以：这个信号是一根真正的恢复力温度计，但不是具体日期的水晶球。记住这个区别——它马上会变得极其重要。

稳定地貌的预警信号

位置	预警信号	结果
深盆地	恢复力高，方差低	扰动后会回到原状态
临界边缘	恢复力低，方差和自相关高	小扰动也可能触发翻转
越过折叠点	旧盆地消失	回撤驱动因素也不会立刻回来

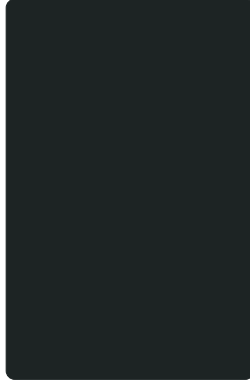
边缘 02·气候阈值

● 临界要素存在·已确立

● 确切阈值·高度不确定

地球哪些部分会翻转——以及何时

最谨慎的系统估算来自大卫·阿姆斯特朗·麦凯和蒂姆·伦顿领衔的 2022 年《科学》论文，它识别出大约九个「核心」全球临界要素，外加若干区域性子系统，每个都附有估算的升温阈值。它令人清醒的标题是：地球已经比工业化前高出约 1.2–1.3°C，我们已进入其中五个要素阈值不确定范围的下限；而在《巴黎协定》力图守住的 1.5–2°C 窗口内，还有几个会变为「很可能」。下图给出了经核验的中心估计和它们（非常宽的）不确定范围。形状里蕴含着两个教训：范围巨大（这是真正的科学谦逊，不是含糊），而且有几根条已经跨过今天的升温线。



中心估计与不确定范围；几项下界已经进入当前升温区间。

两份评估如今为政策制定者锚定了这个领域：第一份《全球临界拐点报告》（伦敦等，2023 年 12 月在 COP28 发布），是该领域最大规模的综合；以及它的 2025 年第二版（374 页，2025 年 10 月，超过 160 位科学家）。2025 年报告的沉重核心结论是：暖水珊瑚礁现在被认为正在越过其临界拐点——其阈值中心估计接近 1.2°C，低于当前升温；即便守住 1.5°C，广泛损失也被评估为几乎确定。这不是抽象结论：美国国家海洋和大气管理局珊瑚礁观测站报告，2023 年到 2025 年持续的珊瑚白化事件影响了全球约 84% 的礁区，创历史纪录。报告也强调了一个充满希望的镜像——正向临界拐点，技术（太阳能、电池、电动车）中的增强回路正在驱动自我加速的好变化。同一套失控数学可以两边倒。

边缘 03·AMOC 谨慎阅读

● AMOC 正在减弱且面临风险·已确立

● 「约 2057 年崩溃」·有争议/炒作风险

大西洋的传送带——一次谨慎阅读的案例

没有哪个临界要素比大西洋经向翻转环流（AMOC）更能说明前沿校准器为何重要——这条巨大的海洋传送带把暖水送往北方，让西北欧拥有难以想象地温和的气候。请分三层理清楚：

已确立的部分。AMOC 是一个真正的临界要素；它很可能已经减弱；本世纪它「很可能」进一步减弱。这是主流 IPCC（政府间气候变化专门委员会）的评估。值得注意的是，IPCC 2021 年报告降低了本世纪不会发生突然崩溃的信心——只对「2100 年前不会崩溃」给出「中等信心」——恰恰因为气候模型已知偏向过度稳定。风险真实存在，而且是升级而非被否定。

有争议的部分。2023 年 7 月，彼得和苏珊娜·迪特勒夫森发表了一篇广为宣传的《自然·通讯》论文，把临界模型拟合到大西洋海面温度上，估计崩溃时间约在世纪中叶——中心年份 2057，95% 范围为 2025–2095。（该论文 2025 年的一份更正修正了代码错误，把中心估计移到约 2065，范围 2037–2109。）这些具体日期招致强烈批评——它们依赖短温度代理和强统计假设，正是边缘 01 里「太不确定，无法定日」的

问题。警告值得认真对待；精确年份不值得被当作事实引用。请把这些日期视为炒作风险，而不是已定时间。

崭新且扎实的部分。2024 年 2 月，范·韦斯滕、克利菲伊斯和迪克斯特拉（《科学进展》）完成了一项真正重要的工作：首次在复杂全球气候模型中模拟出 AMOC 全面崩溃，得出一个基于物理的早期预警信号，并发现当今 AMOC 似乎正在「走向临界」。关键且令人钦佩的是，这篇论文没有给出日历日期。它告诉我们行进方向令人担忧，却不假装知道到达时间。同年晚些时候，44 位科学家签署公开信，敦促政府认真对待被低估的风险。诚实的 2026 年总结是：AMOC 正在减弱，本世纪跨过临界拐点的风险真实存在，且可能被低估——但任何给你报出具体崩溃年份的人，贩卖的确定性都超过了科学能买得起的。

一年不是阈值

你一定见过这个标题：2024 年是第一个比工业化前高出 1.5°C 以上的日历年（ 1.60°C ，据哥白尼气候变化服务局 2025 年 1 月）。这是真实而令人警醒的里程碑——但它不是《巴黎协定》目标的违反，因为巴黎目标指的是数十年平均，而不是单独一个炎热年份。这本身就是一堂存量与流量的课：气候目标定义在慢变量（长期温度）上，而非嘈杂的年份流量。把时间尺度分清，你就能同时避开虚假警报和虚假安慰。

真正悬而未决的问题

- 我们能否预测临界日期？早期预警信号在干净实验中可靠地检测恢复力丧失。它们能否为 AMOC 这类嘈杂、半观测系统提供可信的时间预测，目前是一场真实而开放的方法论争斗。
- 临界要素之间有多耦合？最可怕的场景是级联——格陵兰融水削弱 AMOC，削弱的 AMOC 让亚马逊变干，一个接一个多米诺倒下。这些联系合理且部分已被建模，但强度尚未确定。
- 还原论止步于何处？我们可以说反馈与非线性标志边界——但把「这个系统需要整体处理」变成尖锐的定量检验（而非判断）仍是未竟事业，并与第 8 日留下的强涌现问题纠缠不清。
- 我们能否有意设计「正向」社会临界拐点？如果增强回路能把系统翻入毁灭，能否被有意播种以翻向好处——比如快速脱碳？2025 年报告赌可以。这是稳健的系统工程，还是充满希望的叙事，正在被实时检验。
- 大脑真的是控制系统吗？第 1 日的线索回来了：预测性处理把认知刻画为最小化惊奇的反馈。有用框架，还是字面架构？（我们将在第 119 日和第 123–126 日继续追问。）

今日三句话

核心观点：要理解身体、市场或气候，要看回路，而不只是零件：反馈（稳定系统的平衡回路、失控的增强回路）、存量与流量，以及它们之间的延迟，会产生任何孤立零件都无法展示的行为——而人类直觉可靠地把它弄错。

最佳类比：恒温器顶住寒冷守住目标（负反馈），以及水龙头开始关小后水位仍持续上涨的水槽（存量滞后于流量）——一路放大到一颗球在变浅的山谷里，不可逆地滚进新盆地。

现实争议：地球系统会发生临界拐点，早期预警信号能检测到恢复力丧失；但预测具体崩溃日期——AMOC 备受争议的「约 2057/2065 年」——超出了数据能支撑的范围，尽管其背后风险真实存在，甚至可能被低估。

今日线索：涌现（反馈作为「多即不同」底下的引擎）·能量（开放系统靠通量维持远离平衡 -> 第 33、83-85 日）·计算（系统动力学；大脑作为控制器）·信息（存量/流量；早期预警信号作为证据）——再轻轻带上演化（稳态，被选择出来的控制）。

“明日 -> 第 10 日”

模型、地图与理想化

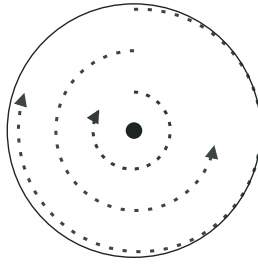
今天我们搭建了系统模型——福雷斯特的、梅多斯的 World3、山谷里的球——并信任它们能教会我们一些东西。明天我们把镜头转向建模本身。「地图不是领土」；「所有模型都是错的，但有些有用」。何时简化是启发，何时是谎言？我们将遇见现实主义与工具主义之争，以及模拟和数字孪生的现代认识论——也就是，我们该在多大程度上相信我们刚刚用过的这些工具。

资料与延伸阅读

1. Maxwell, J. C. (1868). "On Governors." *Proceedings of the Royal Society of London* 16: 270-283. doi:10.1098/rspl.1867.0055 — 控制论的数学诞生。doi.org/10.1098/rspl.1867.0055
2. Wiener, N. (1948). *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*. MIT Press. — 创造「控制论」；指认麦克斯韦 1868 年为第一篇反馈论文；恒温器与调速器作为范例。
3. Forrester, J. W. (1961). *Industrial Dynamics*. MIT Press. 另见 *Urban Dynamics* (1969)、*World Dynamics* (1971) 及 "Counterintuitive Behavior of Social Systems" (1971).
4. Meadows, D. H. (2008). *Thinking in Systems: A Primer* (中译《系统之美》，ed. D. Wright). Chelsea Green. — 该领域的标准入门书（遗作）。
5. Meadows, D. H. (1999). *Leverage Points: Places to Intervene in a System*. The Sustainability Institute. (扩展自 1997 年《Whole Earth Review》文章)。donellameadows.org
6. Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J. & Behrens, W. W. (1972). *The Limits to Growth*. Universe Books (罗马俱乐部；World3 模型)。
7. Booth Sweeney, L. & Sterman, J. D. (2000). "Bathtub dynamics: initial results of a systems thinking inventory." *System Dynamics Review* 16(4): 249-286. — 仅约 36% 的受教育者被正确理解累积。

8. Cronin, M. A., Gonzalez, C. & Sterman, J. D. (2009). "Why don't well-educated adults understand accumulation?" *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 108(1): 116–130. —「相关启发式」；二氧化碳水槽误解。
9. Sterman, J. D. (1989). "Modeling Managerial Behavior: Misperceptions of Feedback in a Dynamic Decision-Making Experiment." *Management Science* 35(3): 321–339. doi:10.1287/mnsc.35.3.321 —啤酒游戏与牛鞭效应。doi.org/10.1287/mnsc.35.3.321
10. von Bertalanffy, L. (1968). *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. George Braziller. —开放系统、等终性、整体论纲领。
11. Scheffer, M. et al. (2009). "Early-warning signals for critical transitions." *Nature* 461: 53–59 (3 Sep 2009). doi:10.1038/nature08227 —临界慢化、方差与自相关上升。doi.org/10.1038/nature08227
12. Scheffer, M. (2009). *Critical Transitions in Nature and Society*. Princeton University Press. —分岔、替代稳定态、滞后。
13. Armstrong McKay, D. I., Staal, A., Abrams, J. F., Winkelmann, R., Sakschewski, B., Loriani, S., Fetzer, I., Cornell, S. E., Rockstrom, J. & Lenton, T. M. (2022). "Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points." *Science* 377(6611): eabn7950 (9 Sep 2022). doi:10.1126/science.abn7950 —经检验的阈值表。doi.org/10.1126/science.abn7950
14. Ben-Yami, M., Morr, A., Bathiany, S. & Boers, N. (2024). "Uncertainties too large to predict tipping times of major Earth system components from historical data." *Science Advances* 10(31): eadl4841 (2 Aug 2024). doi:10.1126/sciadv.adl4841 —对日期预测的方法论刹车。doi.org/10.1126/sciadv.adl4841
15. Ditlevsen, P. & Ditlevsen, S. (2023). "Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation." *Nature Communications* 14: 4254 (25 Jul 2023). doi:10.1038/s41467-023-39810-w —中心估计 2057 (2025–2095)；2025 年更正 -> 约 2065 (2037–2109)。日期有争议。doi.org/10.1038/s41467-023-39810-w
16. van Westen, R. M., Kliphuis, M. & Dijkstra, H. A. (2024). "Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course." *Science Advances* 10(6): eadk1189 (9 Feb 2024). doi:10.1126/sciadv.adk1189 —复杂模型中首次完整 AMOC 崩溃；故意不给日期。doi.org/10.1126/sciadv.adk1189
17. Flores, B. M. et al. (2024). "Critical transitions in the Amazon forest system." *Nature* 626: 555–564 (14 Feb 2024). doi:10.1038/s41586-023-06970-0 —到 2050 年 10–47% 的森林面临复合干扰。doi.org/10.1038/s41586-023-06970-0
18. Boulton, C. A., Lenton, T. M. & Boers, N. (2022). "Pronounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s." *Nature Climate Change* 12: 271–278. doi:10.1038/s41558-022-01287-8 —亚马逊自相关上升（早期预警信号）。
19. Lenton, T. M. et al. (eds.) (2023; 2nd ed. 2025). *Global Tipping Points Report*. University of Exeter. —COP28 综合报告及 2025 年 10 月更新（暖水珊瑚礁正在越过临界点；正向临界点）。global-tipping-points.org
20. Copernicus Climate Change Service (2025). "Global Climate Highlights 2024" (10 Jan 2025). —2024 年首个日历年升温超过 1.5°C，较 1850–1900 年高 1.60°C；单年不等于巴黎目标 breach。climate.copernicus.eu

可选附录：更深水域



回路之内还有回路；看得越深，回路越多。

正文把我们留在了一颗正在失稳的行星边缘，带着一个来之不易的区分：检测系统的恢复力丧失，并不等于说出它会在哪一年崩溃。这个差距——感知脆弱与预测失败之间——正是本附录的入口。下面所有内容都活在这个缝隙里。我们已经认识了系统思维的骨架：恒温器、调速器、存量与流量、浴缸、山谷里滚动的球。现在我们要越过教科书，走进引擎室——那些缔造这门科学的怪人、他们发现的深层定律，以及他们最疯狂的想法：一颗没有大脑、没有计划的行星，仅凭反馈就能在数十亿年里稳住自己的温度。以下内容都不是为了「通过」今天而必须掌握的；它们全是精华。

“RETURN 从主楼层带下来的内容”

以下内容默认你已掌握（因此不再重复）：负/平衡（*B*）回路稳定系统，正/增强（*R*）回路让系统失控；存量累积流量带来的东西；延迟把修正变成振荡；带有滞后的折叠分岔是临界拐点的形状；临界慢化是它的警示信号。我们会在这些基础上继续往下加盖楼层。

● 深度潜流

战争、渡轮与晚宴如何发明控制论

诺伯特·维纳原本不是要创立一门控制科学。他是要打下飞机。1940年，英国正遭轰炸，这位美国数学家接到一个极其务实的问题：防空炮手打不中快速飞机，因为炮弹需要时间爬升，等它到达时飞机已经移动。要命中目标，你不能瞄准它现在在哪里，而要瞄准它将会在哪里——你必须预测。维纳建造了一个统计预测器，把飞行员规避机动当作需要外推的嘈杂信号；在与它搏斗的过程中，他注意到了

一件会消耗他余生的事：大炮、雷达和躲避的飞行员形成了一个单一的回路——感知、预测、修正，而这个回路同样能描述一只潜行捕猎的动物、一只伸手取杯的手、一个大脑。预测与反馈是同一枚硬币的两面。（历史学家彼得·加里森认为，这种战时把人与机器熔进一个反馈回路的做法，悄然塑造了控制论的整个世界观。）

故事的硬件一面更精彩，而且它早十年就发生在一艘通勤渡轮上。1927年8月，年轻的贝尔实验室工程师哈罗德·布莱克正在横渡哈德逊河，被一个问题卡住：长途电话的放大器会轻微失真，而经过数千英里的中继器，这些轻微失真累积成一片杂音。布莱克灵光一闪，把这一顿悟写在手边仅有的纸上——一份《纽约时报》——这个点子几近悖谬：故意把放大器输出的一部分反反馈送回输入，让放大器持续修正自己的错误。他在用增益换取精度。负反馈放大器让跨洲电话成为可能，也顺便验证了麦克斯韦在主文件里的老警告：反馈可以稳定，但接错线它就会尖叫。没过几年，哈里·奈奎斯特和亨德里克·博德（都在贝尔实验室）就算出了反馈回路何时稳定、何时爆发振荡的数学——控制与灾难之间那条线的形式化工程。

然后是晚宴。1946到1953年间，一群本世纪最不安分的大脑轮番相聚于乔赛亚·梅西基金会资助的一系列会议——梅西会议——他们想知道，反馈、信息与控制是否可能是一门跨越机器、大脑与社会的统一语言。嘉宾名单密集到近乎滑稽：维纳、通才约翰·冯·诺依曼、神经生理学家沃伦·麦卡洛克、人类学家玛格丽特·米德与格雷戈里·贝特森，以及英国精神病学家 W·罗斯·阿什比。这口大熔炉里诞生了一种信念：组织本身——细胞里、恒温器里、市场里、心智里——可以作为一门学科来研究。后来的思想家，以海因茨·冯·福斯特为首，又加上了一个令人眩晕的转折，他们称之为二阶控制论：观察系统的观察者本身也与系统构成一个反馈回路，因此并不存在「无处之见」。科学家观察社会时，观察行为就在改变社会；一种「控制论的控制论」。当本课程抵达心智科学时，我们还会遇见那条咬自己尾巴的蛇。

阿什比定律：只有多样性才能吸收多样性

那个时期涌现的深层定律中，最值得一并带走的是阿什比的。它听起来简单到不像深刻的。一个调节器——恒温器、免疫系统、政府、守门员——面对的世界可以向它抛出若干种不同的扰动。把这个数字叫做世界的多样性。阿什比证明：要保持一个结果稳定，调节器必须掌握至少与所面对扰动同样多的多样性。只有多样性才能吸收多样性。只会一种固定扑救的守门员挡不住射向四面八方的球；只有十种抗体的免疫系统打不赢一千种病原体；只有一根杠杠的政策治理不了一个能往一百个方向出错的社会。这就是必需多样性定律，它铁一般地解释了为什么简单控制器会在复杂世界中失败——也解释了为什么每个成功的调节器，暗地里都和它的问题一样复杂。



调节器只能中和与它拥有的响应种类同样多的麻烦。

把这个定律揣进口袋。它以后会变形再现：解释大语言模型为何需要惊人规模才能应对语言的多样性；解释生物多样性如何缓冲生态系统；也解释「你无法管理你无法匹配的东西」这句话背后的安静数学。

你的身体里有一万台恒温器

远在维纳之前，地球上最精密的反馈机器就坐在每一位读者的身体里。1865年，法国生理学家克洛德·贝尔纳注意到一件本该引起更大轰动的事：浸润我们细胞的液体——内环境 (*milieu interieur*，即「内部环境」)——即便外界剧烈波动，也保持着惊人的恒定。无论你是身处暴风雪还是桑拿房，你的血液都是同样温暖、咸度适中、糖分平衡的汤。贝尔纳的这句话成了生物学中被引用最多的名言之一：内环境的恒定是自由而独立生活的条件。七十年后，美国生理学家沃尔特·坎农给这种现象起了名字——稳态³，「稳定状态」——并阐明它是由我们一直在追踪的负反馈回路实现的，只不过材质从黄铜换成了血肉与激素。

例子一旦看见就无处不在。你的血糖是一个由两股相反流量调节的存量：餐后血糖升高，胰腺释放胰岛素把葡萄糖推进细胞；血糖下降时，胰高血糖素又把储备中的葡萄糖释放出来——一台用两种激素做传感器和开关的恒温器。你的核心体温靠出汗、发抖和血液重新分配维持在大约 37°C。你的血压由压力感受反射每秒监管：动脉里的牵张感受器感知压力，反射性地调整心率以对抗它。站得太快时，你会感到那半秒钟的滞后，然后回路才追上——那短暂的眩晕就是延迟导致的超调，是你的压力反射在做啤酒游戏式的跟踪。你不是一台恒温器；你是一个由它们组成的、大多时候都为你争吵的繁忙共和国。

³稳态指生物体通过负反馈维持内部环境相对稳定的状态。

有用的例外：当身体想要一次失控

生物学大多追求稳定，因此大多使用负反馈。但偶尔它也需要一个事件——快速、果断、不可逆——于是它会小心地借用正反馈。分娩是经典例子：婴儿头部撑开宫颈，触发催产素，催产素加强宫缩，宫缩进一步撑开宫颈——一个爆炸性的 R 回路，不断升温，直到婴儿娩出才关闭。血液凝固级联也是如此；神经元放电也是如此，一股微弱电荷会猛然打开闸门，让洪流涌入。正反馈不是身体的敌人，它是身体的起爆器——少用，且总有一只手按在关闭开关上。

到这里，本附录又绕回了课程的第一天。旧的稳态图景纯粹是反应性的：等待偏差，然后修正。但生理学家越来越青睐一个更丰富的概念，叫做变稳态⁴——「通过变化实现稳定」——在这种图景中，身体根本不等待误差。它预测需求并提前调整：你的皮质醇在醒来前升高，你的心率在用力之前就开始攀升，而不是作为反应。调节变成了前馈，不只是反馈——预判性控制。如果这听起来耳熟，那是对的：它是第 1 日的预测性大脑的身体表亲，弗里斯顿那台通过预先建模世界来最小化惊奇的机器。控制论最深的现代转向，是意识到最优秀的控制器不只是对世界作出反应——它们能看见世界正在到来。

一间社会主义控制室与一个末日模型

如果反馈能支配身体和机器，那么难以抗拒的诱惑就是：为什么不用它来支配经济呢？1971 年，英国管理理论家斯塔福德·比尔——一位抽雪茄、练瑜伽的「管理控制论」大师——受萨尔瓦多·阿连德新当选的社会主义政府邀请，为整个智利做这件事。成果——*Cybersyn* 计划（西班牙语里叫 *Synco*）——是技术史上最奇怪、最令人难忘的事件之一：试图把整个国民经济当作一个单一的自我调节有机体来实时运行，而计算能力只有一台大型机和几百台电传机。

⁴变稳态指身体通过预测需求并提前调整，而非等待误差出现后再修正，以维持稳定。



七把转椅、大按钮扶手、墙上的经济状态：个人电脑出现前的国家反馈仪表盘。

这个系统有每日心跳。工厂通过改造过的电传网络（「Cybernet」）把生产数字发往圣地亚哥的一台中央计算机，当某个数字偏离预期范围时，系统就发回警告——一条全国性的神经系统在发出疼痛信号。它的核心是那个操作室：一间六边形房间，七把白色玻璃纤维转椅，每把扶手上有大按钮，面对墙上的屏幕，显示经济状态。它看起来像星舰舰桥，本应是管理者能够看见国家反馈回路并驾驭它们的地方。它最辉煌的时刻出现在 1972 年 10 月：卡车主罢工威胁要掐断国家供应链；政府用 Cybernet 电传网络近乎实时地协调几千辆忠诚卡车，让国家免于挨饿。一年多以后，项目在一个下午死亡——1973 年 9 月 11 日的军事政变卷走了阿连德，也卷走了 Cybersyn。它仍是有史以来最雄心勃勃的尝试：用显式反馈来治理一个社会，兼具启发与警示。● 真实系统，确实运转过 —— 尽管它若要在规模上真正奏效，会直接撞上阿什比定律：一间控制室能否掌握足以匹配整个经济的多样性？

那个拒绝死去的模型

另一个试图建模整个系统的伟大尝试更安静，但余响更大。我们在主文件里把《增长的极限》（1972）作为唐娜拉·梅多斯的作品遇见；这里说说它到底做了什么，以及为什么五十年后仍在争论。麻省理工的一个团队用系统动力学模型 *World3* 把五个紧密回环的全球存量——人口、粮食生产、工业产出、污染、不可再生资源——联系起来，让它按不同假设运行到 2100 年。头条式的「标准运行」大致按「一切照旧」推进，产生了一个令人不安的形状：增长持续数十年，然后在 21 世纪因资源枯竭和污染追上来而出现过冲，人口与产出急剧下降。反应激烈。经济学家猛烈抨击：模型粗糙，资源估计悲观，忽略了价格驱动的适应与人类智慧。对一代人来说，「增长的极限」成了历史据称已经证伪的末日预言代名词。

然后数据开始到来。2008 年和 2014 年，澳大利亚物理学家格雷厄姆·特纳（CSIRO）把三四十年的现实统计与 1972 年的情景比较，不安地发现世界一直以诡异的精确度跟踪「标准运行」。2021 年，分析师盖娅·赫林顿用新数据更新了比较，得出类似结论：经验趋势最接近模型的「一切照旧」和「综合技术」运行，两者都意味着增长将在 2040 年代左右停滞。诚实的、经过前沿校准的阅读在这里很重要，因为它两边都切。这不是一个被验证的预言——*World3* 是粗糙模型，吻合部分出于巧合，「标准运行目前吻合」对任何下降的确切时间或必然性都说得很少。

●「被证明正确」——有争议/炒作风险。但那种懒散的否定——说它干脆就是错的——也是假的。●数据追踪研究是真实的。真相是更令人不安的中间地带：一个五十岁的过冲系统模型还没有被现实打脸。这正好把你交给明天的问题——我们该在多大程度上相信一个模型？——但我们跑得太快了。

十二处推手

唐娜拉·梅多斯写过的最实用的东西是一份排序清单。我们在主文件里勾勒过它——参数最弱，范式最强——但完整的梯子值得认真看，因为它几乎把我们对「如何改变系统」的直觉完全颠倒。我们本能地伸手去够底部横档（调一个数字、定一个目标），恰恰因为它们容易抓、容易推。麻烦在于它们也是最弱的。真正的力量高高在上：杠杆巨大，但手点难抓。爬一爬这个梯子；点击任意横档打开它。

梅多斯杠杆点分组

层级	例子	为什么重要
12-10	参数、缓冲、存量-流量结构	最容易看见，也常常只是微调。
9-6	延迟、平衡回路、增强回路、信息流	改变反馈如何抵达行动者。
5-1	规则、自组织、目标、范式、超越范式	改变系统真正优化和能够想象的东西。

注意这个教训的形状。税收微调与目标——大多数政治争论的全部实质——住在底部。变革性的横档关乎反馈（8-6层：加强平衡回路、减缓增强回路、增加缺失的信息渠道），然后关乎结构与规则（5-4层），最后关乎目的与世界观（3-1层）。梅多斯最喜欢的高杠杆信息修复例子几乎精巧到不真实：荷兰一处住宅区因设计偶然，有些家庭的电表装在显眼的前厅，有些则藏在地下室。电表可见的家庭用电量明显更少——大约少三分之一——唯一原因是原本隐藏的反馈回路突然被看见了。没有税收，没有规则，没有新技术。只是信息补完了回路。这就是杠杆。

反复出现的同样陷阱

画够多因果回路图，你会注意到一件解放的事：同样的少数回路形状制造了世界上惊人比例的慢性问题。福雷斯特、梅多斯和彼得·圣吉把这些反复出现的结构编目为系统基模——功能障碍的常备角色。学会识别几个，你就能一眼诊断许多卡住的局面，并且（更有用地）预测显而易见的修复会在哪里反噬。下面是最有用的几个，每个都是一口气能说完了的回路故事。

公地悲剧·R

每个使用者获利 -> 大家一起过度使用 -> 共享资源崩溃 -> 所有人受损当资源共有而收益私有时，每个理性行动者都会多拿一点，个体收益的增强拉力把公共牧场啃光。修复位于梯子高处：改变规则或信息，让过度使用的成本被使用者感受到。

转移负担·B

问题 -> 快速症状性缓解 -> 缓解 -> 真正能力萎缩 -> 问题恶化这是「成瘾」基模。症状性缓解解除了可能推动根本解决的压力——于是底层能力萎缩，依赖加深。缓解是真实的；这就是陷阱。

治标不治本·B

问题 -> 修复 -> 快速缓解 -> 延迟的副作用 -> 问题以更重形式回来一个方案短期效果美妙，却悄悄种下长期后果，让问题以更糟的形式重现。借钱填补缺口；喷药害虫同时消灭其天敌。延迟隐藏了成本。

富者愈富·R

A 早期获胜 -> A 获得更多资源 -> A 赢得更多 -> B 饿死当胜利者被奖励以再次获胜的手段时，微小初始差异会放大为失控的主导——市场垄断、学术声望、学校不平等背后的「富者愈富」回路。纯增强反馈，规模化。

增长极限·R+B

增长引擎 (R) 加速 -> 撞上隐藏约束 (B) -> 增长停滞或崩溃每个增强的成功最终都会遇到一个没看见的平衡极限——资源、市场规模、承载能力。World3 模型就是把把这个基模写到行星尺度。增长从来不会简单继续；它要与天花板谈判。

升级·R

A 行动 -> B 反制 -> A 升级 -> B 升级 -> 双方更糟两个平衡回路，各自试图恢复自己的安全感，却耦合成一个单一的增强螺旋：军备竞赛、价格战、社交媒体愤怒循环。没人不理性；是结构在造成伤害。

深层要点不是目录本身——而是结构驱动行为。在每个基模中，善意的人们基于局部合理选择，却集体制造出可怕结果，原因不是谁愚蠢，而是他们嵌入的回路在把他们推向那里。换人，陷阱仍在；改结构，行为自己变。这就是系统思维全部信条的一句话版本。

恢复力如何死亡——三种不同方式

主文件给了你临界拐点的一种图像：山谷变平，直到球滚出去。这是对的，但它只是系统可能翻车的三种不同方式之一，把它们混为一谈会在气候争论中造成真正的混乱。首先，我们需要更锐利地理解系统「翻倒」时真正失去的是什么——为此我们回到生态学家 C·S·「巴兹」·霍林 1973 年的奠基论文，他把所有人都叫「稳定性」的两件事撬开了。

工程恢复力是系统被敲了一下之后多快弹回来——山谷壁的陡峭程度。生态恢复力则完全是另一回事：系统在翻进另一个盆之前能吸收多大冲击——山谷的宽度，它能吞下的扰动大小。这两者可能朝相反方向拉扯，而这正是要紧之处。一个系统可能对小的敲击弹回得很漂亮（高工程恢复力），却坐在一个狭窄盆地里，一次大冲击就会永远翻倒（低生态恢复力）。效率往往通过悄悄消耗第二个来购买第一个。主文件量的是山谷的深度；霍林教你也要看它的宽度。



快速回弹与大冲击耐受并不是同一件事。

现在，三条通向崩溃的路。动力系统理论家（尤其彼得·阿什温及其同事在 2012 年一篇澄清论文中）把临界分成了三种机制，这个区分真正具有启发性：



三条通向翻车的路：阈值、冲击，以及变化太快。

分岔临界 (B -临界) 是我们已经知道的那种：把驱动因素推过阈值，稳定状态消失。噪声诱导临界 (N -临界) 是驱动因素还安全地低于阈值，但一次足够大的随机涨落——一场异常热浪、一场百年一遇的暴风雨——还是把系统踢过了山脊。然后是真正反直觉的：速率诱导临界 (R -临界)，关键不是驱动因素移动了多远，而是多快。一个能从容跟上缓慢变化的系统，可能被同样大小但太快施加的变化推翻

——山谷底倾斜得比球能滚过去还快，于是它滚落出去，尽管同样变化若是悠闲进行就能幸存。这对气候令人警醒，因为它意味着温度的阈值不是唯一危险；升温速率的阈值可能同样重要。生态系统和冰不只关心我们最终到达哪里，也关心我们多快到达那里。

多米诺，与更新的轮子

两个最后的想法为深层理论收尾。第一个是让气候科学家夜不能寐的：临界连锁。地球的关键要素并非独立——它们互相连线，一个翻倒会把另一个推向边缘。波茨坦研究所的建模工作（旺德林、东格斯等，2021）发现，要素之间的相互作用总体上倾向于降低安全阈值并提高多米诺效应的几率，大冰盖往往充当第一块多米诺，削弱的大西洋传送带则作为传播者。量级仍然真正不确定 ● 有前景但尚未确定，但发现的方向令人担忧：耦合系统比其各部分之和更脆弱——第 8 日的涌现，穿上了它最黑暗的外套。

第二个想法奇怪地令人安慰。生态学家霍林晚年提出，复杂系统不只是坐在盆里或翻出盆外——它们会经历一个反复出现的适应性循环：快速增长阶段，然后是漫长的刚性积累与效率阶段，然后是突然的释放或崩溃（他把它标为 Ω ，「创造性破坏」），然后是肥沃的重组，新的增长从中萌发。在这种视角下，崩溃不只是灾难；它也是系统为更新清理棋盘，而这些循环在不同尺度上互相嵌套——他把这个框架称为泛层循环（panarchy）。它提醒我们，「翻倒」并不总是故事的终点。有时它只是两个故事之间的铰链。

雏菊世界：无主的稳态

我们在系统思维几乎变成哲学的地方结束。1970 年代，化学家詹姆斯·洛夫洛克提出了盖亚假说：生命与地球表面形成一个单一的自我调节系统，把温度、大气化学、海洋盐度维持生命所需的狭窄范围内——就像身体维持它的内环境。这个想法很美，却立刻遭到一个毁灭性反对：它似乎要求远见。行星上的微生物怎么会「想要」调节气候？演化没有目标；自然选择作用于个体生物，而非行星。为整体利益而进行的调节看起来像是把目的论偷偷塞进了生物学——而生物学家，理所当然地，不允许这样。

洛夫洛克的回答，与安德鲁·沃森在 1983 年一起构建，是科学中最优雅的玩具模型之一，它彻底解决了这个反对。它叫雏菊世界，里面没有一点生物学家的含糊其辞——只有反馈。想象一颗灰色行星绕着一颗缓慢变亮的恒星运转，上面播种了两种雏菊：黑色雏菊吸收阳光、温暖周围；白色雏菊反射阳光、保持凉爽。每朵雏菊只是在一个舒适温度附近生长最快，太热或太冷就死亡。没有远见，没有合作，没有行星「目的」——只有个体雏菊自私地在最适合的地方生长。看看它们盲目的反馈对整个世界温度做了什么。

雏菊世界：没有远见的调节

太阳亮度	雏菊组成	温度结果
偏暗	黑雏菊较多	吸收更多热量，世界被暖起来
中等	黑白雏菊共同调节	温度保持在适生平台
过亮	雏菊死亡	调节失败，温度跟随裸岩上升

那段平坦的高原就是全部要点——而模型里没有一丝远见。当恒星昏暗时，只有黑色雏菊能立足；它们蔓延，让行星变暗、变暖——一个增强回路，把世界自举到宜居温度。随着恒星变亮，行星本将过热，白色雏菊开始比黑色更有竞争力（它们更凉，因此在炎热中长得更好），而随着白色覆盖蔓延，它反射更多阳光，冷却行星。雏菊的组成自动转变以抵消变化的太阳。稳健的行星自我调节从自私的局部生长加反馈中涌现出来——正是第 8 日的「多即不同」，现在维持着一个世界存活。雏菊世界没有证明盖亚为真；地球生物圈确实为生命利益主动调节行星这一强主张仍 ● 有争议。但它粉碎了「这种调节会要求远见」的指控——这是一个深刻的结果。目的似的行为可以从纯粹机制中涌现出来。行星保持温度，与你的身体保持温度，原因相同：不是因为任何东西想要它，而是因为回路就那么接的。

本附录打开的问题

- 必需多样性是治理的硬上限吗？如果阿什比是对的，无论 Cybersyn 还是别的什么，一间控制室永远不可能匹配整个经济的多样性。这会注定中央计划失败，还是只意味着复杂性必须用分布式控制而非一个英雄般的仪表盘来应对？
- 调节在多大程度上是预测性的？变稳态说身体看见需求正在到来。大脑（第 1 日）可能也一样。这种预判性、前馈性控制能向下延伸多远——到单个细胞？到生态系统？
- 速率诱导临界会改变气候目标吗？如果系统可以因变化速度而翻车，而不仅是大小，那么「守住 1.5°C」可能必要但不充分——接近的节奏可能独立地重要。
- 崩溃有时是更新吗？泛层循环把 Omega 阶段重构为创造性破坏。什么时候临界拐点必须阻止的灾难，什么时候是僵化系统重组所需的铰链？
- 如果雏菊世界无需远见就能自我调节，还有什么也行？市场、免疫系统、语言，也许心智——自然界里有多少看似「目的」的东西，其实只是我们尚未画出回路的反馈？

本附录三句话

历史：反馈控制从战时大炮和渡轮草图成长为控制论，其最深定律——阿什比的必需多样性——说调节器必须和面对的麻烦一样多样；你可以在自己身体里一万个稳态回路中，以及智利那间注定失败的未來主义控制室里，感受到这条定律。

深层理论：恢复力有两种口味（快反弹与大冲击耐受），它们可以无形地此消彼长；系统有三种翻车方式——跨阈值、被随机冲击、以及最狡猾的、被推

得太快；而耦合的临界要素让整个系统比零件之和更脆弱。

顶点：雏菊世界证明，一颗行星可以仅凭自私的局部生长加反馈，在漫长岁月里稳住自己的温度——无主的稳态，也是科学最干净的演示：目的似的有序可以从盲目机制中涌现。

“-> 回到主线”

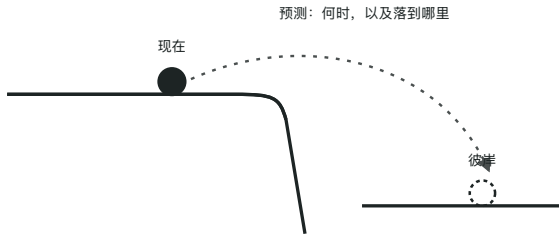
这里的一切都是对第 9 日的深化。下降本身在第 10 日——模型、地图与理想化继续：我们刚刚信任了 World3、杠杆梯子和一个由雏菊组成的行星来教我们真实的东西——所以明天我们要问那个潜伏在所有这些之下的问题。地图不是领土；所有模型都是错的，但有些有用。什么时候简化是一盏灯，什么时候是一个谎言？

资料与延伸阅读

- Wiener, N. (1948). *Cybernetics*. MIT Press. 另见 Galison, P. (1994). "The Ontology of the Enemy: Norbert Wiener and the Cybernetic Vision." *Critical Inquiry* 21(1): 228–266. — 防空预测器作为反馈思维的种子。
- Black, H. S. (1934). "Stabilized Feedback Amplifiers." *Bell System Technical Journal* 13(1): 1–18. (构处于 1927 年 8 月；美国专利 2,102,671, 1937 年) —— 负反馈电子学的渡轮草图起源。
- Nyquist, H. (1932). "Regeneration Theory." *Bell System Technical Journal*; Bode, H. (1945). *Network Analysis and Feedback Amplifier Design*. — 反馈的稳定性数学。
- Macy Conferences on Cybernetics (1946–1953). 见 Heims, S. J. (1991). *The Cybernetics Group*. MIT Press; Pias, C. (ed.) (2016). *Cybernetics: The Macy Conferences 1946–1953*. — 维纳、冯·诺依曼、麦卡洛克、米德、贝特森、阿什比。
- von Foerster, H. (1974). *Cybernetics of Cybernetics*. Univ. of Illinois. — 一二阶控制论；观察者身处回路之中。
- Ashby, W. R. (1956). *An Introduction to Cybernetics*. Chapman & Hall. — 必需多样性定律；稳态机。full text
- Bernard, C. (1865). *Introduction a l'etude de la medecine experimentale*. — 内环境 (milieu interieur)。
- Cannon, W. B. (1932). *The Wisdom of the Body*. Norton. — 创造「稳态」(术语 1926 年引入)。
- Sterling, P. (2012). "Allostasis: A model of predictive regulation." *Physiology & Behavior* 106(1): 5–15. (概念: Sterling & Eyer 1988) —— 通过预判性变化实现稳定；与预测性调节的关联。
- Medina, E. (2011). *Cybernetic Revolutionaries: Technology and Politics in Allende's Chile*. MIT Press; Beer, S. (1972). *Brain of the Firm*. —— Cybersyn 计划 (1971–73) 与可存活系统模型。
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J. & Behrens, W. W. (1972). *The Limits to Growth*. Universe Books. —— World3 模型。
- Turner, G. M. (2008). "A comparison of The Limits to Growth with 30 years of reality." *Global Environmental Change* 18(3): 397–411; Turner (2014), MSSI Research Paper No. 4, Univ. of Melbourne. —— 数据跟踪「标准运行」。
- Herrington, G. (2021). "Update to limits to growth: Comparing the World3 model with empirical data." *Journal of Industrial Ecology* 25(3): 614–626. doi:10.1111/jiec.13084 —— 经验数据最接近 BAU2 / 综合技术运行。doi.org/10.1111/jiec.13084
- Meadows, D. H. (1999). *Leverage Points: Places to Intervene in a System*. The Sustainability Institute. —— 排序的十二个杠杆点；荷兰电表例子 (亦见《系统之美》2008)。donellameadows.org

15. Senge, P. (1990). *The Fifth Discipline*. Doubleday. — 系统基模 (承福雷斯特与梅多斯谱系)。
16. Holling, C. S. (1973). "Resilience and Stability of Ecological Systems." *Annual Review of Ecology and Systematics* 4: 1–23. — 工程恢复力与生态恢复力。Gunderson, L. & Holling, C. S. (2002). *Panarchy*. Island Press. — 适应性循环。
17. Ashwin, P., Wieczorek, S., Vitolo, R. & Cox, P. (2012). "Tipping points in open systems: bifurcation, noise-induced and rate-dependent examples in the climate system." *Phil. Trans. R. Soc. A* 370: 1166–1184. doi:10.1098/rsta.2011.0306 — B / N / R 分类。doi.org/10.1098/rsta.2011.0306
18. Wunderling, N., Donges, J. F., Kurths, J. & Winkelmann, R. (2021). "Interacting tipping elements increase risk of climate tipping cascades." *Earth System Dynamics* 12: 601–619. doi:10.5194/esd-12-601-2021 — 耦合降低阈值；冰盖作为触发者。doi.org/10.5194/esd-12-601-2021
19. Watson, A. J. & Lovelock, J. E. (1983). "Biological homeostasis of the global environment: the parable of Daisyworld." *Tellus B* 35(4): 284–289. doi:10.1111/j.1600-0889.1983.tb00031.x — 无需远见的自我调节。doi.org/10.1111/j.1600-0889.1983.tb00031.x

可选附录：捕捉临界悬崖



旧科学能感到地面变软；新科学想知道日期、深度，以及彼岸山谷的地图。

六十年來，临界拐点科学只敢诚实地做一件事：感觉脚下的地面正在变软。正如主文件所示，接近悬崖的系统会慢下来——它摇晃得更宽、恢复得更慢，而那些统计震颤（方差增大、自相关增大）是真实的早期预警信号。但这个信号令人沮丧地沉默。它告诉你有东西正在到来，却不告诉你是什么、何时，或者彼岸的世界长什么样。大约从 2020 年起，一波工作——大量依赖机器学习、卫星和新的数学——一直试图把这沉默的震颤变成会说话的东西。本附录是那片前沿的现场报道：过去六年里五个活跃的研究项目，每一个都真正激动人心，没有一个已经完成，全部无情地通过了前沿校准器。请把这里的每个主张都当作来自移动前线的急件，而不是一张已绘好的地图。

“RETURN 你已拥有的（不再重复）”

来自主文件：折叠分岔、滞后、临界慢化、通用早期预警信号 (Scheffer 等, 2009)、本-亚米等 2024 关于为何日期难定，以及气候细节 (AMOC、亚马逊、珊瑚、2022 年阈值表)。来自附录一：霍林恢复力、B/N/R 临界分类、临界连锁、雏菊世界。这里我们在这一切之上继续搭建——只覆盖 2020 年及以后发表的工作。

● 前沿

知道灾难形状的 AI

从经典预警信号最深的问题开始：它们通用到近乎缺陷。方差和自相关上升几乎出现在任何临界之前，这是它们的力量——放之四海而皆准——但也是弱点：它们无法告诉你将要来临的是哪一种临界，因此无法告诉你新世界会是什么样。系

统会突然跳到一个遥远状态？开始剧烈振荡？还是温柔地滑入新状态？通用信号对三者都耸耸肩。

2021 年，托马斯·伯里领衔的团队——成员包括克里斯·鲍奇、玛杜尔·阿南德，还有——注意名字——马滕·舍费尔和蒂姆·伦顿本人（经典方法的创始人，如今却帮助超越它）——在《美国科学院院刊》(PNAS) 发表了一个引人注目的结果。他们的洞见建立在主文件世界里一块美丽的数学上：当任何系统接近临界拐点时，其动力学都会坍缩到少数几个通用模板之一，叫做标准型（折叠、霍普夫、跨临界——稳定状态失去稳定性的基本方式）。只有少数几种。于是伯里的团队训练了一个深度神经网络——卷积加循环的混合架构——用从这几类标准型中抽取的数十万个模拟时间序列训练它，教会它识别每一条崩溃路径的微妙指纹。

回报是：他们的网络能在从未训练过的系统中发现临界拐点——包括真实气候与生态数据，以及一项热声实验——比经典指标更敏感、误报更少。关键且重要的是，它做了旧信号做不到的事：它说出分岔的类型，告诉你新状态将是突然跳跃、振荡，还是温和转变。鲍奇称这可能「改变我们预见重大转变的能力」。2025 年的一篇后续（诸葛、李、陈，《皇家学会开放科学》）把该方法推向现实的混乱，设计了一个网络来预测不规则采样时间序列中的临界发生——而真实世界监测恰恰产生这种数据，这也是原方法最尖锐的局限之一。

临界分类器的三条路径

路径	形状	落点
折叠	缓慢接近后突然跳跃	系统落入远处状态
霍普夫	振荡幅度增长	未来不是新水平，而是周期振荡
跨临界	两种稳定性互换	一个状态滑让给另一个状态

诚实的标签：这是一项真实而重要的进展，但它的胜利仍主要在计算机模拟和少数经验案例中。一个用标准型训练的网络，能否在嘈杂、高维的真实地球系统全貌中可靠地呼叫临界拐点——并留出足够的提前量——仍有待大规模证明。

● 有前景的暗示——模拟中很强，现实世界履历仍薄

造访远侧的数字孪生

检测到悬崖临近是一回事。一个更大胆的 2020–2021 项目问：一台机器，如果只见过系统正常时的行为，能否预测它将在哪一点崩溃——然后描述彼岸那个陌生的世界？工具是储备池计算，一种效率惊人的循环神经网络，它以近乎不可思议的能力从原始数据中学习混沌系统的「语法」，而无需底层物理模型。

2021 年《物理评论研究》的一篇论文中，孔令伟、赖英成和同事做了一件听起来像作弊的事。他们喂给储备池计算机的不只是系统的行为，还有把它推向边缘的缓慢漂移参数的值——一条「参数输入通道」。仅在安全区域的数据上训练后，机器就能外推到从未见过的参数值，既预测临界转变位于何处，又——令人瞠

目地——预测最终崩溃前那段短暂瞬态的统计特性。后续工作（Dhruvit Patel 与 Edward Ott, 《混沌》，2023）明确用机器学习来「预测临界点并外推到崩溃后的动力学」，而孔的团队进一步把这些训练好的储备池框定为非线性系统的数字孪生——快速、数据驱动的替身，你可以在软件里把它推过悬崖，看会发生什么，而不必推动真实系统。

梦想是一座灾难风洞：一个学会的重制品，你可以让它坠毁一千次，以测绘一个你永远不能真正打破的系统的边缘。

这是一个真正美丽的想法，在基准混沌系统上有效。但在这里，前沿校准器咬得最狠。这些成功是相对低维、采样良好、测量干净的数学系统。真实气候高维、观测稀疏、非平稳，这些都会破坏该方法的核心假设——未来会与训练过的过去「押韵」。同一社群也发表了关于储备池计算局限的冷静「进退两难」分析。一个混沌玩具的数字孪生是胜利；一个可信赖的 AMOC 数字孪生尚不存在。

● 有前景

● 真实地球应用——有争议/未证实

斑图如何让系统避开悬崖

现在是一个不怎么预测临界点、反而质疑它们的成果——它可能是本附录最安静的激进想法。标准图景，也就是主文件卖给你的那个，是严峻的：把生态系统推过阈值，它就会突然、整体地崩溃，从绿变沙。2021 年，马克斯·里特克尔克和同事在《科学》提出，对于空间上延展的系统，这个图景常常是错的——而且是朝着有希望的方向错。

他们的主张：受压力的空间延展系统不会一次性崩溃，而是可以重组为一种斑图——你在世界各地干旱区上空能看到的植被斑点、条纹和迷宫。这些是图灵斑图，艾伦·图灵 1952 年预言过的自组织结构。而这里有一个颠覆教科书的转折：生态学家长期把这些斑图读作崩溃即将来临的警告信号，里特克尔克的分析却说它们可能相反——是恢复力的标志。通过碎裂成斑块，系统在远超均匀版本会翻车的压力水平下存活。它用全面崩溃换取一种优雅、常常可逆的斑图撤退。悬崖被替换成了斜坡。

斑图规避的两种系统设计

模式	压力升高时	教训
均匀	跨过阈值后整体崩溃	没有空间结构可供系统退守
允许斑图	形成斑块并撑过更高压力	自组织可以暂时规避临界点
压力过高	斑图也变稀并失败	规避不是免疫，只是买时间

为何重要，以及谨慎之处在哪里：如果里特克尔克是对的，那么整类被标记为「容易临界」的生态系统——也许还包括地球系统组成部分——可能比灾难性崩溃模

型暗示的更有恢复力，因为那些模型忽略了空间动力学。这是真正的好消息，既有数学也有野外观测的仔细论证。但它是一篇综述和理论框架，不是普遍定律：这个逃生舱口能推广多远——到冰盖、到亚马逊、到整个地球系统——正是作者自己提出的开放问题。而且它正反两面都切中预警信号，因为斑图既可能意味着接近崩溃，也可能意味着来之不易的坚持，而区分两者很难。

● 有前景——若能推广则将范式转移

从轨道读取地球恢复力

经典预警信号诞生于小而干净的数据集——全湖实验、冰芯。2020 年后的跃迁是同时处处计算它们，把几十年的卫星影像变成一台行星恢复力监测仪。逻辑与主文件相同——失去恢复力的系统恢复得更慢，所以它的自相关悄悄上升——但画布现在成了整个陆地表面，逐像素。

结果蜂拥而至。2021 年，尼古拉斯·伯斯在 AMOC 的八个独立观测指纹中发现了统计显著的早期预警信号，结论是过去一个世纪大西洋环流可能已从「相对稳定状态漂移到了接近临界转变的点」（《自然·气候变化》）。同年，伯斯与吕普达尔报告了临界慢化，表明格陵兰西部冰盖靠近临界拐点（PNAS）。随后卫星打开了生物圈：2022 年两篇里程碑论文——史密斯、特拉克斯尔与伯斯在《自然·气候变化》，以及福尔齐耶里等人在《自然》——用卫星植被指数显示，地球大片森林自 2000 年代初以来一直在丧失恢复力，热带最令人担忧，尽管一些北方森林的恢复力有所增加。蒂姆·伦顿的团队提议把所有这些建成一个永久的「生物圈恢复力感知系统」（2022）——一个面向活星球的早期预警仪表盘。

可靠性问题——在恐慌或放松之前请先读这段

这是最容易过度解读结果的前沿，因此这些警告是承重墙。2024 年《自然·生态与演化》的一项研究表明，卫星恢复力估计在高生物量区域（如茂密热带雨林）变得不可靠——恰恰是我们最想信任它们的地方——部分因为浓密树冠使光学信号饱和。2023–2025 年的其他工作指出，数据缺口、异常值和仪器选择都会扭曲这些指标；而 2025 年《自然·气候变化》的一项分析则认为，气候临界点的早期预警信号可能根本上模棱两可。信号真实存在，全球恢复力下降的格局引人注目——但一个嘈杂像素里上升的自相关只是一个假设，不是判决。

AMOC 的故事自带内置平衡重，这正是健康科学应有的样子。即便观测预警信号不断累积，2025 年一项《自然》研究认为，南大洋风驱动上升流可能足以稳定大西洋环流，让本世纪发生彻底崩溃成为不太可能。两项发现都严肃，都经过同行评议；分歧本身就是科学的实际状态。公平的 2026 年总结：基于观测的恢复力丧失证据首次正被从行星上读取 ● 真正的新能力，但把这些信号转化成关于哪个系统何时翻转的自信陈述，仍 ● 有争议。

触发我们想要的多米诺

到目前为止，课程里每个临界点都是要害怕或预测的东西。最后一个前沿项目把符号翻转。推理是：如果增强回路能把系统拖入毁灭，那么增强回路也可以被有意播种，让系统翻向好事——而且很快。这就是正向临界点科学，自 2020 年以来它成了系统思维最活跃、后果最深远的角落之一，原因正是脱碳的数学要求它：要把升温守在 1.5°C 附近，排放下降速度必须超过任何渐进线性政策所能提供的。只有自我加速的变化才够快。

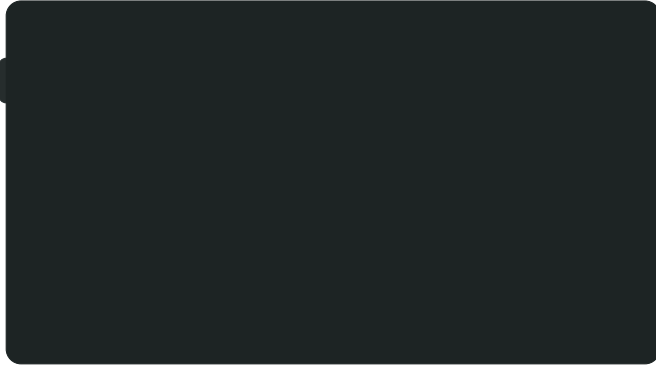
奠定议程的论文是伊洛娜·奥托、乔纳森·东格斯等人在 PNAS (2020) 的工作，他们召集专家识别「社会临界要素」——杠杆丰富的子系统，在那里一次适度而精准的推动可能触发向碳中和的失控变化。他们的候选：能源市场、金融撤资、碳中和城市、规范与价值观、教育，以及——注意回调到附录一的杠杆梯子——信息披露。蒂姆·伦顿的团队随后提出了一个「操作化」这些点的框架 (2022)，以及一种识别方法，并用他们自己谨慎的话说，「避免一厢情愿地认为它们存在」。最清晰的现实例子已经在这里：太阳能和电池成本的坍塌，已在一个又一个行业跨过了清洁能源干脆跑赢化石燃料的点，触发自我增强的采用——一条 S 曲线，增强回路获胜的签名。增强反馈，气候故事里的反派，被重铸为最大希望。

这里的前沿校准器很不寻常，因为对象部分地是规范性的——既是目标，也是事实。一些正向临界点确实真实且已成过去（英国退出煤炭；太阳能成本交叉点）。另一些则是关于社会系统的充满希望猜想，我们对它们传播动力学的理解远不如对融化冰盖的理解——批评者（在对奥托等的回复中）警告，把社会当作物理系统会忽略冲突、政治和「变化实际如何发生」。

● 部分案例已确立

● 整个项目——有前景但部分只是愿望

六年，一个加速的田野



色彩：预测、规避与恢复力感知、正向临界点、现实检验。

各主张实际位置，2026 年中

- 深度学习能检测临界并命名分岔类型。伯里等，PNAS 2021；诸葛等，R. Soc. Open Sci. 2025。判断：有前景。模拟和少数经验案例中表现极佳；广泛的现实可靠性尚未证实。
- 储备池计算预测崩溃与崩溃后动力学。孔与赖，Phys. Rev. Research 2021；Patel & Ott, Chaos 2023。判断：有前景，但大规模应用有争议。在混沌基准上有效；可信赖的地球系统「数字孪生」尚不存在。
- 空间斑图让系统规避灾难性临界。里特克尔克等，Science 2021。判断：有前景，可能带来范式转移。论证充分的理论加野外案例；能否推广到冰盖或整个地球仍是开放问题。
- 我们能从全球卫星上读取恢复力丧失。史密斯等与福尔齐耶里等，2022；伯斯，Nat. Clim. Change 2021。判断：新能力，但附带条件。引人注目的全球格局；茂密森林中估计不可靠，信号可能模棱两可。
- 正向临界点可被触发以加速脱碳。奥托等，PNAS 2020；伦顿等，2022。判断：部分案例真实，部分仍是愿望。太阳能/煤炭案例已确立；社会传播远比物理难预测。
- 但我们能命名崩溃日期吗？本-亚米等，Sci. Adv. 2024（来自主文件）。判断：还不能。检测恢复力丧失不等于预测时机。这是最深层的未解问题。

未来六年必须回答的问题

- 有任何方法能提供可信的提前量吗？这里的每个项目都改进了检测；没有一个令人信服地破解了真实、半观测地球系统组成部分的时机。这是该领域核心而

顽固的缺口。

- AI 预测器能在真实地球上幸存吗？标准型网络和储备池孪生在干净系统上发光。开放考验是它们在稀疏、嘈杂、非平稳的行星数据上是否仍然成立——还是悄悄过拟合了过去。
- 空间逃生舱口能延伸多远？里特克尔克的规避已在干旱区得到演示。它能否扩展到森林、冰、海洋环流——还是那些正是悬崖真实存在的地方？
- 能区分下坠的斑图与上升的斑图吗？如果空间斑图既可能意味着迫在眉睫的崩溃，也可能意味着有恢复力的坚持，那么每个空间早期预警信号都需要一种判读符号的方法。2024–2025 年若干团队正在为此竞速。
- 社会系统真的像物理系统那样翻转吗？正向临界点项目把冰盖的数学借用于人类行为。这个类比在何处成立、在何处被政治与冲突打破，正在被实时检验，而气候时钟正在滴答。

前沿三句话

飞跃：自 2020 年以来，机器学习（标准型训练的深度学习；带参数通道的储备池「数字孪生」）和行星尺度卫星分析，开始把临界慢化的沉默震颤，变成能够命名临界类型、预演彼岸世界、并测绘整个地球恢复力丧失的东西。

转折：同一时代也产生了一股充满希望的逆流——里特克尔克证明空间自组织可以让系统完全规避灾难性临界，以及一个严肃的项目，试图有意触发正向临界点以实现快速脱碳。

诚实的底线：检测正在快速改善，而且是真正的新东西；但为真实系统预测具体崩溃日期仍未解决，最令人兴奋的工具仍在干净模拟中证明自己，而不是在嘈杂的行星上——这是承诺，还不是证明。

“-> 回到主线”

这是第 9 日的最前线。下降本身在第 10 日——模型、地图与理想化继续，而这是再好不过的下一个问题，因为本附录里几乎每个工具都是一个模型，在赌未来会与训练过的过去押韵。什么时候这个赌是一盏灯，什么时候是一个谎言？明天我们审问模型本身。

资料与延伸阅读

1. Bury, T. M., Sujith, R. I., Pavithran, I., Scheffer, M., Lenton, T. M., Anand, M. & Bauch, C. T. (2021). "Deep learning for early warning signals of tipping points." *PNAS* 118(39): e2106140118 (28 Sep 2021). doi:10.1073/pnas.2106140118 — 用分岔标准型训练深度学习；在未训练系统中检测并分类临界。doi.org/10.1073/pnas.2106140118
2. Zhuge, C., Li, J. & Chen, W. (2025). "Deep learning for predicting the occurrence of tipping points." *Royal Society Open Science* 12(7): 242240 (1 Jul 2025). doi:10.1098/rsos.242240 — 把深度学习预测扩展到不规则采样的真实世界时间序列。doi.org/10.1098/rsos.242240

3. Deb, S., Sidheekh, S., Clements, C. F., Krishnan, N. C. & Dutta, P. S. (2022). "Machine learning methods trained on simple models can predict critical transitions in complex natural systems." *Royal Society Open Science* 9(2): 211475. doi:10.1098/rsos.211475.
4. Kong, L.-W., Fan, H.-W., Grebogi, C. & Lai, Y.-C. (2021). "Machine learning prediction of critical transition and system collapse." *Physical Review Research* 3(1): 013090 (28 Jan 2021). doi:10.1103/PhysRevResearch.3.013090 — 一带参数通道的储备池计算预测转变与瞬态寿命。doi.org/10.1103/PhysRevResearch.3.013090
5. Patel, D. & Ott, E. (2023). "Using machine learning to anticipate tipping points and extrapolate to post-tipping dynamics of non-stationary dynamical systems." *Chaos* 33(2): 023143. doi:10.1063/5.0131787. 另见 Kong, L.-W. et al. (2023), "Reservoir computing as digital twins for nonlinear dynamical systems." *Chaos* 33(3): 033111.
6. Rietkerk, M., Bastiaansen, R., Banerjee, S., van de Koppel, J., Baudena, M. & Doelman, A. (2021). "Evasion of tipping in complex systems through spatial pattern formation." *Science* 374(6564): eabj0359 (8 Oct 2021). doi:10.1126/science.abj0359 — 一图灵斑图作为恢复力，而非警告。doi.org/10.1126/science.abj0359
7. Boers, N. (2021). "Observation-based early-warning signals for a collapse of the Atlantic Meridional Overturning Circulation." *Nature Climate Change* 11(8): 680–688 (5 Aug 2021). doi:10.1038/s41558-021-01097-4 — AMOC 八个独立指标中的早期预警信号。doi.org/10.1038/s41558-021-01097-4
8. Boers, N. & Rypdal, M. (2021). "Critical slowing down suggests that the western Greenland Ice Sheet is close to a tipping point." *PNAS* 118(21): e2024192118. doi:10.1073/pnas.2024192118.
9. Smith, T., Traxl, D. & Boers, N. (2022). "Empirical evidence for recent global shifts in vegetation resilience." *Nature Climate Change* 12(5): 477–484. doi:10.1038/s41558-022-01352-2. 另见 Smith, T. & Boers, N. (2023), *Nature Communications* 14: 498.
10. Forzieri, G., Dakos, V., McDowell, N. G., Ramdane, A. & Cescatti, A. (2022). "Emerging signals of declining forest resilience under climate change." *Nature* 608: 534–539. doi:10.1038/s41586-022-04959-9.
11. Lenton, T. M., Buxton, J. E., Armstrong McKay, D. I. et al. (2022). "A resilience sensing system for the biosphere." *Phil. Trans. R. Soc. B* 377(1857): 20210383 (15 Aug 2022). doi:10.1098/rstb.2021.0383.
12. Smith, T., Zotta, R.-M., Boulton, C. A., Lenton, T. M., Dorigo, W. & Boers, N. (2023). "Reliability of resilience estimation based on multi-instrument time series." *Earth System Dynamics* 14(1): 173–183. — 仪器选择影响恢复力估计。
13. Smith, T. et al. (2024). "Reliability of vegetation resilience estimates depends on biomass density." *Nature Ecology & Evolution* 8: 740–749. doi:10.1038/s41559-023-02194-7 — 高生物量森林中估计不可靠。
14. "Ambiguity of early warning signals for climate tipping points." *Nature Climate Change* (2025). — 认为气候临界早期预警信号可能根本上模棱两可。(2024–2025 若干可靠性批评之一；另见 Lapeyrolerie & Boettger 2021。)
15. Otto, I. M., Donges, J. F., Cremades, R. et al. (2020). "Social tipping dynamics for stabilizing Earth's climate by 2050." *PNAS* 117(5): 2354–2365 (21 Jan 2020). doi:10.1073/pnas.1900577117 — 一个社会临界要素。见批评回复：Smith et al. & Willis, PNAS 2020. doi.org/10.1073/pnas.1900577117
16. Lenton, T. M., Benson, S., Smith, T. et al. (2022). "Operationalising positive tipping points towards global sustainability." *Global Sustainability* 5: e1. doi:10.1017/sus.2021.30.
17. "Continued Atlantic overturning circulation even under climate extremes." *Nature* (2025). — 南大洋上流可能使本世纪 AMOC 崩溃不太可能；同行评议的平衡重。
18. Ben-Yami, M., Morr, A., Bathiany, S. & Boers, N. (2024). "Uncertainties too large to predict tipping times of major Earth system components from historical data." *Science Advances* 10(31): eadl4841. doi:10.1126/sciadv.adl4841 — 一日期预测的长期限制（主文件亦引用）。