

思维到思维异协调：连续的情节记忆引发的型号

s. V. S. Afraimovich,1,a) M. A. Zaks,2,3 and M. I. Rabinovich4

1 德圣路易斯波托西大学，圣路易斯波托西，物理系

2 德国柏林研究所超级计算

3 诺夫哥罗德州大学，俄罗斯研究所

4 美国加州大学圣地亚哥分校，加利福尼亚州拉霍亚洪堡大学

(2018年1月26日收稿;2018年4月25日接受;2018年10月出版)

情景记忆的检索是在大型大脑网络一个动态的过程。在社会群体中，神经活动模式，由单一的成员直接遇到的特定事件相关联，进行编码，召回，并通过所有参与者共享。在这里，我们构建并研究形成的动力学模型和交互心目中的小合奏情节记忆的保持。我们证明了这个不同寻常的动力吸引的过程，非光滑异环面结构稳定的内洛特卡 - 沃尔泰拉样套公式。在此环面动力学结合了不存在与每一个单独的轨迹的渐近不稳定混沌;其充足的数量特征是长相关的Lyapunov指数。在不同类型的亚稳状态之间顺序切换参与者结果之间的耦合强度的变化量;我们将其解释为情景记忆的形成和修改阶段。出版 AIP 出版。

<https://doi.org/10.1063/1.5023692>

我们对移植物的图像和想法到其他人的心目中能力是科学,技术,文学的存在至关重要。在事件(事件)的事件或群体社区成员参与足以植入这一事件的记忆到整个社会的思想。在我们的日常生活中,我们把这种能力是理所当然的,但只能测量技术的最新进展已披露如何,例如,电影观众编码和传输后验到听众观看特定的事件,以及这些事件的特定模式相关的神经活动模式大脑之间是共用的。在个人大脑的大型网络,情节记忆的检索中发生的事件,永久之间顺序切换的方式“无赢家竞争。”我们提出并探讨形成的数学模型和交互心中共同记忆的保持。通过严格证明与数值模拟研究相结合,我们证明了参与者的心灵之间弱耦合保证了模型的相空间中所谓的“吸引异圆环”的存在。改变耦合强度,我们观察到不同类型的动态对应于各种形式的情景记忆。

引言

跨越不同的语言,我们的大脑甚至表现出类似的活动,或成为“对齐”当我们听到同样的想法或故事。这个惊人的神经机制允许我们发射的大脑模式,分享技术和科学,以及口服的绝对存在的发展和书面文学多欠的事实,在事件的个人参与度不保持该事件在一个人的记忆的必要前提:人类能够在精神上构建发作时阅读或听其他人的回忆。最近的一项研究中,语言交流任务的执行期间,基于磁共振脑成像的分析,追踪在电影观看特定场景相关的模式是如何的神经被编码,召回,然后转移到一组听众谁没有见过.1它公开了事件特异性的图案,大脑默认模式网络中观察到的,横跨编码,回顾,构建同一发作的过程被共享。这样的研究揭开情节记忆的编码和建筑之间和下划线的共同语言中的内存传输到其他大脑的作用贴心对应。

在持续的社会群体(家庭,朋友,同事等)的通信由普通情节记忆方便:过去的人际知识,通过组内的分布式组成员.2共享,例如内存作为干周围的新层共享信息的积累。值得注意的是,情节记忆是不是生活的精确复制品:经验,不是,他们是有组织的摘要,在3的连续组的形式,根据最近的成像数据进行编码,负责存储和情节记忆检索的大脑区域包括海马,纹状体和前额叶皮层.4,5

低维思维动力学

下面，我们现在和研究头脑到心灵情景记忆相互作用的低维模型)。我们从一开始就强调，我们不打算把自己模拟大脑的系统，但创建这个系统的活性的动力学模型。我们的最终目标是描述，理解，使头脑动态预测，获得，这样的活动是认知，创造力和自传记忆的特定类别的特别动力模式。

最近的技术进步已经允许研究人员与只能预先梦想的分辨率和清晰度，观察大脑模式。中的突出作用目前由功能性磁共振成像 (fMRI)，其跟踪与通过大脑血流相关联的更改播放。实验结果表明在人类大脑的认知，以及某些哺乳动物的良心：

- (a) 是更接近决定比对的随机过程；
- (b) 带有低维动力学特征，
- (c) 本身表现的连续亚稳时空模式的形式。

我们仅仅举几个相关的出版物：

- 在最近的研究中，马，张调查静息态功能连接 (RSFC) 的清醒啮齿动物和人类的时间组织性。他们报告说：“我们发现，RSFC 模式之间的转换不是随机的，而是遵循特定顺序的订单。RSFC 模式之间的转换表现出高重现性和均显著以上的机会“，并得出结论：‘自发的大脑活动不仅非随机的空间，但也非随机的时间。’⁶
- 通过在麻醉状态下，哈德森等人从大鼠皮层分析局部场电位。找出“大脑穿越了一系列稳中间活动配置后出现意识恢复。”⁷ 他们证明了“恢复被限制在低维子空间”，并得出结论：“亚稳状态的组织，与戏剧性的降维一起，显著采样参数空间的简化了任务。”
- 从服务等[8]的研究无关的个人大样本的高时间分辨率的人类功能磁共振成像数据的分析表明，“大脑区域..... 操纵跨吸引景观大脑的低维结构的综合核心通过高度保守调节神经递质系统”；状态空间轨迹的重建明确证实“存在低维，动态的，集成的组件跨多个唯一任务复发和标定人类大脑内的共同认知结构”。该研究总结的作者：“全球大脑状态沿着低维流形存在。”⁸
- 在该组体力活动的成年人进行增量详尽循环的研究[9]，参与者奉命监视与不适和疼痛的身体区域。跟踪演习期间的疼痛，关注发展，研究人员发明的“分块的生物认知系统用来管理大的信息序列分成更小的单位，以促进信息处理的动态现象”；他们得出的结论是“大块亚稳状态的异周期，每个亚稳态本身的基本信息项的异循环操作。”
- 最后，在情节记忆¹⁰形成实验研究表明皮质结构如何”产生的叙事过程中的感知事件的陈述和这些事件是如何存储和从存储器中检索。的数据驱动方法允许检测事件边界作为大脑活动的稳定图案之间的变化，而不依赖于刺激注释和揭示了从在感官区域中高次区域长事件短事件嵌套层级（包括角回和后内侧皮质），其代表抽象的，多情境模型“。下面，我们解释这些“转变”为亚稳态模式之间切换异。

根据这一令人信服的证据，某些种类的心灵活动的绝对是可以（并且已经是）低于低维动力模型。¹¹⁻¹³ 我们的建模方法的对象是基于以下假设，实验数据表明：

1. 感官，语义和情感的信息进行编码，存储，存储，并通过全脑网络检索。
2. 在感知，编码模式对于不同的人类似，对于同样的现实生活事件。¹⁴
3. 在连续感知的过程中，大脑会自动分段经验转化为离散事件，¹⁵ 共享内存的表示“一个人的有意义的细分生活中，一个人的个人历史的连贯单位。”¹⁶ 分段的信息是在高级别海

马及皮质区域. 14

4. 记住事件的记忆中抽象图案的形式分割成分块. 17 时间上有组织块形成集, 举办与环境. 18
5. 最近的研究改变序列提供了证据表明事件内, 时间存储器被相应地与脑记忆模式. 19 的经时稳定性, 在相位空间中, 事件模式应显示亚稳态: 在检索过程中, 块竞争并形成依次切换亚稳模式. 20-22 的异链。

这些假设使我们相互心灵对心灵的交互的简化动力学模型。我们表明, 在用于广泛的参数两个相互作用的子系统 (大脑) 的情况下, 模型的吸引是非常规对象: 二维非平滑不变环面。在其上的动态特性是严格没有混乱的, 具有不稳定性的对比 (在李亚普诺夫的意义上的) 每个轨迹的。值得注意的是, 不稳定性的适当特性不是常规的 Lyapunov 指数 (每单位时间的不稳定生长的平均速率), 但在相空间中每轨道长度单位不稳定生长的平均速率。在较大的力量合伙人之间的耦合, 所述环面经历破裂, 并将得到的动态模式指示某种合作互动的, 类似于在某些特征的同步, 但在其他的从它不同。

本文的布局如下。以秒为单位。从一般要求单独的脑动力学的特性和各种大脑之间的相互作用的开始, 我们划定类考虑动力系统和它减少到一组耦合单元, 每一个所管辖的 Lotka-Volterra 的样普通差动方程。每个子系统具有非自主情景记忆回忆; 在数学上, 我们把它解释为通过来自合作伙伴的子系统序列下参数激励的长期记忆发作的封闭异链。纸张的堆积集中在最简单的情况: 单向心到心夹带, “主从” 动力学。以秒为单位。第三, 我们表明, 该系统的吸引子是二维非光滑不变环面。当子系统解耦, 这个环面显示为两个异周期的直接产物, 正如我们严格证明, 它仍然存在至少在足够小的耦合强度。在圆环每轨迹是异连接连接平衡两个亚稳态。因此, 在环形动力是绝对不乱。然而, 在秒数值实验。四, 迫使我们相信, 在这个吸引流域各轨迹是李雅普诺夫不稳定。当在更强的耦合, 圆环断裂后, 在从属子系统匝成遵循在主控子系统开关分段恒定段交替动力学。

基本型社会合作

动力电池组件编码属于在信息处理中的个别人脑的上下文普遍的概念。在全球脑功能网络, 这些组件形成不同的时空模式。当心中的相互作用, 具体的网络是负责具体认知功能在合作伙伴的成效。由于编码对人口水平发生时, 模式的动力学通常是许多元素形式模式, 并且可从通过应用, 例如, 主成分分析中的记录中提取的相干活性低维. 6 低维的结果。7, 8-我们假定 N 个不同的时空模式 (脑模式) $p_i(\vec{r}, t), i=1, 2, \dots, N$; 由一组离散的空间坐标 \vec{r} 的表征。该模式的时空结构的影响, 除了生理因素, 受到社会环境。值得注意的是, $p_i(\vec{r}, t)$ 可能有不同的意义, 关系到不同的认知和行为任务的性能。

图案 $p_i(\vec{r}, t)$ 可以基于几个脑子网像感知, 记忆和马达脑回路; 因此, 其内在动力是相当的复杂。在某些情况下, 所述模式中的时间和空间模式可以分离: $p_i(\vec{r}, t) = Q_i(\vec{r})R_i(t)$ 其中 $Q_i(\vec{r})$ 描述第 i 模式的空间组织和 $R_i(t)$ 特点及其时空演化。值得注意的是, 日振幅不能 “从外部” 启动: 该模式下, 不存在在特定的时间的时刻, 将缺席随后的所有时间。假设所有 $R_i(t)$ 服从一个动力学方程到第二阶 (最低平凡)。如果作为推理处理的结果, 所述模的时空结构是已知的, 那么, 分解后, 对于单个脑的基本动力学模型可以写成广义 Lotka-Volterra 的形式

$$\dot{R}_i(t) = R_i(\bar{\sigma}_i - R_i - \sum_{j \neq i} \bar{\rho}_{ij} R_j) + \varepsilon \zeta_i(R_i), i=1, \dots, N \quad (1)$$

这里， $\bar{\sigma}_i$ 表示的第 i 个模式的激发率 $\{\bar{\rho}_{ij}\}$ 是认知抑制矩阵表征模式之间的相互作用， ζ_i 参数化环境状态依赖性波动网络连接。

下面我们描述两个社会伙伴之间的相互作用；推广到更大的参与人数为直截了当。由集功能 $x_i(t)$ 的表示时间模式 $R_i(t)$ 为合作伙伴 X ($i=1, \dots, N_x$) 和 Y ($s=1, \dots, N_y$) 中，分别。在一般情况下， X 的每个模式应能与相互作用的 Y 每一个模式，反之亦然。然后，集体动力学是由系统管辖

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= x_i(\sigma_i - x_i - \sum_{j \neq i} \bar{\rho}_{ij} x_j - q \sum_{s=1}^{N_y} \theta_{is} y_s) + \varepsilon \zeta_i(x_i) \quad (2) \\ \dot{y}_k(t) &= y_k(\delta_k - y_k - \sum_{j \neq i} \zeta_{ij} x_j - q \sum_{s=1}^{N_x} \eta_{ks} y_s) + \varepsilon \zeta_k(y_k) \end{aligned}$$

其中 σ_i 和 δ_k 是激发率的相应组的参加 X 和 Y ， $\{\rho_{ij}\}$ 和 $\{\zeta_{ks}\}$ 是他们的认知抑制矩阵，参数 p 和 q 测量社会相互作用的强度，并且相互作用本身是由矩阵 $\{\theta_{is}\}$ 规定和 $\{\eta_{ks}\}$ 。最后，网络连接 ζ_i 和 ζ_k 为波动（噪声），其将在下面说明。

形式上，系统（2）是（1）刚刚分解。然而，由 X 和那些 Y 形成的形成的图案之间我们的设置区分。因此，我们预计，在矩阵 ρ 的最大元素； ζ ， θ ， η 是一阶的，而耦合系数 p 和 q 的停留相对较小。

参数值的宽域

A. 配置是能够表示事件/事件的序列

系统（2）的社会夹带动力学性质的由此，对于对情节记忆的性能相互社会影响力分析模型方便。在它的参数空间的不同区域，各个吸引可能遇到；例如，许多 $(N_x + N_y)$ 的固定溶液（平衡态）是在一定的参数范围是稳定的。但是我们现在，不是在稳定平衡或简单的极限周期感兴趣的是：情节记忆，因为它从实验知道，既不是与时间无关，也没有严格的周期。因此，我们在参数空间中寻求平衡地方的所有状态是不稳定的节点或鞍点的域。在相空间中的许多不变超平面存在有利于形成的结构稳定的异连接（Lotka-Volterra 型样的系统的框架内）鞍点之间。在存储器功能的上下文中，这样的连接使得能够通过健壮顺序切换信息编码的基础上，无赢家竞争原理的高效动力方式。这种在相空间中编码的图像是稳定的异信道（参见图 1）。

在我们下面的数学和数值模拟研究，我们限制与 $N_x = N_y = 3$ 最低配置：只有三种模式为每两个合作伙伴的工作提供的在脑海中对心灵的动态异切换的启迪例子。大 N_x 和 N_y 的情况下，尽管更苛刻的计算，可以在类似的方式处理。

如果参与者之间的信息交流是单向的 ($|q| \ll |p|$) - 这种情况发生，例如，如果 X 不关

注他/她的注意力集中在Y型模型的视觉或口头信号(2)允许简化,使分析调查。

纯粹的单向连接获取重要性,但另一种情况,相关记忆过程的建模。假设大脑X不是其他人的大脑,但它为Y,在过去的大脑。然后,指出问题转化成了问题,如何从过去的记忆编码的动态对未来的情景记忆:想象力过程的动态描述。几十年前,英格瓦认可:为了有用,对未来事件的模拟应被编码到内存中,使得获取的信息可以在稍后的时间,当模拟的行为实际上是进行检索;他被称为23(对于更多细节,参见参考文献24和25)从视动力学理论点这一过程“未来的存储器”,“未来的存储器”是从事件模式中的抑制性相互作用的结果在当前时间模式过去情景记忆(见参考文献26)。关于内存抑制的序列的想象力的作用,见参考文献27。

这种设置不同于异谐波夹带,下正弦单三态网络中观察到的强迫:28的信息单元的定位于时间的行动不仅由异循环的频率,而且通过亚稳的特性(出口倍)测定状态。

B. 动态特性:长度相关Lyapunov指数

当在模型(2)动态特性的制度,我们不能依靠像传统的标准工具Lyapunov指数:在边界到平衡的状态的情况下,他们的帮助不大。回想一下,Lyapunov指数被用于N阶系统为参考轨迹定义

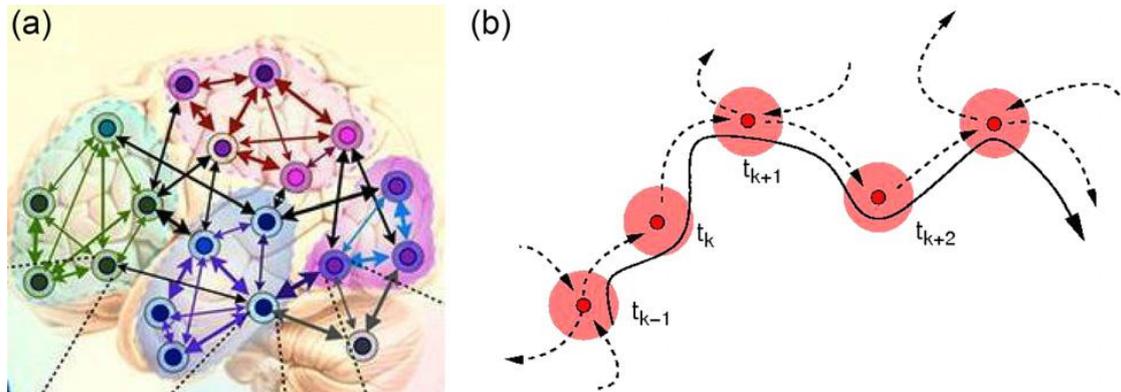


图1。(a)全球脑网络,其活性可在通过鲁棒顺序切换所述认知空间来表示;不同的网络模式的激励电平由不同的颜色示出。(b)与亚稳状态(信息性图案)链稳定异信道。虚线:亚稳态的分离式。从参考改编。26。

$$\lambda_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \log \frac{\|x_i(t)\|}{\|x_i(0)\|}, i=1, \dots, N \quad (3)$$

其中 $x_i(t)$ 是线性接近这个参考轨迹的线性化的独立解决方案,其中从N个适当的扰动矢量 $x_i(0)$ 启动。就我们而言,我们预计大 λ_i 消失并不能帮助我们衡量存储在吸引盆地不稳定的量。

这可以通过下面的推理来解释。常规的Lyapunov指数表征每单位扰动生长的时间速率。对于轨迹接近异质性及其扰动切线不变的超平面中的(2)相空间,绝大多数(渐近趋于1)的时间比例是花费了近静态配置,因此在时间单位上一个表征失去它的优点。在这种情况下弱不稳定性更适当的特性,需要轨迹的不同参数化:扰动生长的每参考轨迹的长度的单元在相空间中的速率

$$\Lambda_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{L(t)} \log \frac{\|x_i(t)\|}{\|x_i(0)\|}, i=1, \dots, N \quad (4)$$

其中， $L(t)$ 为基准相位轨迹的段的时刻 0 和 t 之间的（欧几里德）长度。这种特性的参考文献进行了介绍。30，其中 Lyapunov 指数消失出于类似原因的标准（时间相关），而长度相关的那些呈阳性。在二段以下处理的数值示例。IV，在一个范围内的耦合强度的有两个正长度相关的指数系数，因此 $\Lambda_{1,2i}$ 和 $\|x_{1,2}(t)\| \sim \exp(\Lambda_{1,2}L(t))$ 。回顾与两个或两个以上正 λ_i 动力被称为“混沌”，在这里我们可以弱混沌发言。

长度相关 Lyapunov 指数不仅量化这种动态的，但也可以作为重要的过渡的指标：在我们的背景下，圆环分手的分岔。在二段处理的示例性系统。IV，发生这样的分岔由于部分由属于吸引平衡恢复稳定性的：其前身二维不稳定流形成为一维的。此事件后，只有一个长度相关 Lyapunov 指数停留阳性。因此，动力学学变为“一维”，但在一个棘手的方式：可观察的时间曲线图几乎分段常数，与对应于活动的间隔各为高原的主变量（细节见下）。

C. 非光滑环面：严谨的结果

在这里，我们引入和研究一个新的动态对象：二维非平滑不变环面 T^2 ，可以被看作是相互作用的数学图像，在主从方式，两种认知系统。当系统解耦，该对象显示为两个异周期的直接产物，而且，正如我们下面证明，它至少在耦合的小率仍然存在。由于在 T^2 每轨迹在两个鞍点之间的异连接，在其动力不能乱。然而，从以秒为单位的数值实验如下。IV，在该吸引子的盆每个轨迹是李雅普诺夫不稳定。因此，我们在处理这里的情况，无论是从混沌吸引子的情况下，并从那里轨迹的不稳定性是由不稳定的混沌集的存在边界处的吸引。29 对于造成短暂混乱的现象完全不同第一次，这种动态报道在文献。30：相互作用的两个系统，它们中的一个具有一个异周期，而另一个具有一个稳定的极限环。31 二维集，完全由异连接之间的数值研究中，也研究了参考文献。在吸引子的盆轨迹 32 和 33，但不稳定性是那些出版物的范围进行。

在本节中，我们把无波动方面的系统 (2) 单侧耦合和变种

$$\dot{x}_i(t) = x_i(\sigma_i - x_i - \sum_{j \neq i} \bar{\rho}_{ij} x_j) \quad (5)$$

$$\dot{y}_k(t) = y_k(\delta_k - y_k - \sum_{j \neq i} \zeta_{ij} y_j - q \sum_{s=1}^3 \eta_{ks} y_s) \quad (6)$$

$$\sigma_i > 0, \rho_{ij} > 0, \delta_k > 0, \eta_{ks} > 0, i, j, k, s \in \{1, 2, 3\}$$

非耦合系统 我们的分析是指耦合强度 p 的小值。我们先解耦情况

$$\dot{x}_i(t) = x_i(\sigma_i - x_i - \sum_{j \neq i} \bar{\rho}_{ij} x_j) \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (7)$$

$$\dot{y}_k(t) = y_k(\delta_k - y_k - \sum_{j \neq i} \zeta_{ij} y_j) \quad k, s = 1, 2, 3 \quad (8)$$

首先，我们施加在其下子系统 (7) 具有一个异环. 35 该系统具有共平衡的 8 个状态的条件。其中，三种状态趴在坐标轴。

这是 $O_1=(\sigma_1,0,0)$; $O_2=(0,\sigma_2,0)$; $O_3=(0,0,\sigma_3)$ 特征值等于

$$\begin{aligned} \sigma_2 - \rho_{21}\sigma_1 &> 0, \quad \sigma_3 - \rho_{31}\sigma_1 < 0, \\ \sigma_3 - \rho_{32}\sigma_2 &> 0, \quad \sigma_1 - \rho_{13}\sigma_3 < 0, \\ \sigma_1 - \rho_{13}\sigma_3 &> 0, \quad \sigma_2 - \rho_{23}\sigma_3 < 0, \end{aligned} \quad (9)$$

每一个 $O_i(i=1,2,3)$ 具有一维不稳定，二维稳定流形。

此外，如果 $\rho_{21}\rho_{12} \neq 1$; $\rho_{32}\rho_{23} \neq 1$, 和 $\rho_{31}\rho_{13} \neq 1$; 爱的不稳定歧管包含一个异轨迹次; $\Gamma_{i,(i \bmod 3)+1}$ 接合 O_i 和 $O_{i,(i \bmod 3)+1}$ 。下的所有这些条件的组合，该系统 (7) 具有一个异周期

$$\Gamma = \cup_i O_i \cup \Gamma_{i,(i \bmod 3)+1}$$

对于定性起见，我们假设在 O_i 的稳定歧管中的主导方向不同于坐标轴，即

$$\begin{aligned} -\sigma_1 &< \sigma_3 - \rho_{31}\sigma_1, \\ -\sigma_2 &< \sigma_1 - \rho_{12}\sigma_2, \\ -\sigma_3 &< \sigma_2 - \rho_{23}\sigma_3, \end{aligned} \quad (10)$$

然后，将异周期具有图勾勒的形状。图 2 (a)。最后，我们实行稳定的条件

$$\begin{aligned} -\frac{(\sigma_3 - \rho_{31}\sigma_1)}{(\sigma_2 - \rho_{21}\sigma_1)} &> 1 \\ -\frac{(\sigma_1 - \rho_{32}\sigma_2)}{(\sigma_3 - \rho_{32}\sigma_2)} &> 1 \quad (11) \\ -\frac{(\sigma_2 - \rho_{23}\sigma_3)}{(\sigma_1 - \rho_{13}\sigma_3)} &> 1 \end{aligned}$$

类似地，对于子系统 (8)，我们考虑三个平衡点 $O_1=(\sigma_1,0,0)$; $O_2=(0,\sigma_2,0)$; $O_3=(0,0,\sigma_3)$ 并处

在 O_i 的一维不稳定和二维稳定流形的存在条件：

$$\begin{aligned} \sigma_2 - \xi_{21}\delta_1 &> 0, \quad \sigma_3 - \xi_{31}\delta_1 > 0, \\ \sigma_3 - \xi_{32}\delta_2 &> 0, \quad \sigma_1 - \xi_{12}\delta_2 < 0, \quad (12) \\ \sigma_1 - \xi_{13}\delta_3 &> 0, \quad \sigma_2 - \xi_{23}\delta_3 < 0, \end{aligned}$$

为主导方向的条件：

$$\begin{aligned} -\delta_1 &< \sigma_3 - \xi_{31}\delta_1, \\ -\delta_2 &< \sigma_1 - \xi_{12}\delta_2, \quad (13) \\ -\delta_3 &< \sigma_2 - \xi_{23}\delta_3 \end{aligned}$$

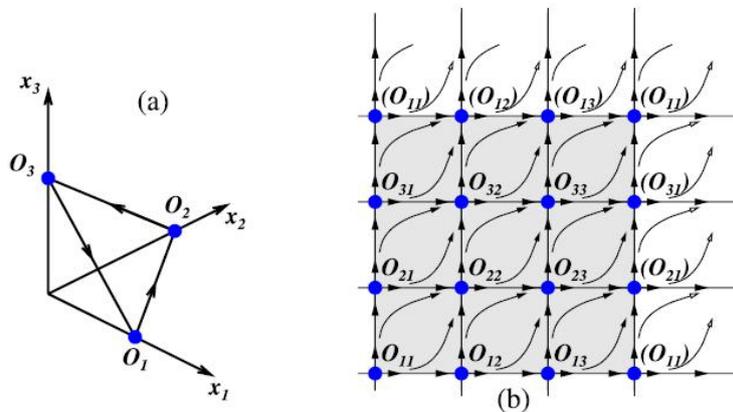


图 2. (a) 中的异周期和 (b) 展开在平面上的圆环的 T: 草图矢量场。

表 I. 线性化的系统特征值 (7) 和 (8)

| Saddle | Eigenvalues |
|----------|--|
| O_{11} | $-\sigma_1, \sigma_2 - \rho_{21}\sigma_1, \sigma_3 - \rho_{31}\sigma_1, -\delta_1, \delta_2 - \xi_{21}\delta_1, \delta_3 - \xi_{31}\delta_1$ |
| O_{12} | $-\sigma_1, \sigma_2 - \rho_{21}\sigma_1, \sigma_3 - \rho_{31}\sigma_1, -\delta_2, \delta_3 - \xi_{32}\delta_2, \delta_1 - \xi_{12}\delta_2$ |
| O_{13} | $-\sigma_1, \sigma_2 - \rho_{21}\sigma_1, \sigma_3 - \rho_{31}\sigma_1, -\delta_3, \delta_1 - \xi_{13}\delta_3, \delta_2 - \xi_{23}\delta_3$ |
| O_{21} | $-\sigma_2, \sigma_3 - \rho_{32}\sigma_2, \sigma_1 - \rho_{12}\sigma_2, -\delta_1, \delta_2 - \xi_{21}\delta_1, \delta_3 - \xi_{31}\delta_1$ |
| O_{22} | $-\sigma_2, \sigma_3 - \rho_{32}\sigma_2, \sigma_1 - \rho_{12}\sigma_2, -\delta_2, \delta_3 - \xi_{32}\delta_2, \delta_1 - \xi_{12}\delta_2$ |
| O_{23} | $-\sigma_2, \sigma_3 - \rho_{32}\sigma_2, \sigma_1 - \rho_{12}\sigma_2, -\delta_3, \delta_1 - \xi_{13}\delta_3, \delta_2 - \xi_{23}\delta_3$ |
| O_{31} | $-\sigma_3, \sigma_1 - \rho_{13}\sigma_3, \sigma_2 - \rho_{23}\sigma_3, -\delta_1, \delta_2 - \xi_{21}\delta_1, \delta_3 - \xi_{31}\delta_1$ |
| O_{32} | $-\sigma_3, \sigma_1 - \rho_{13}\sigma_3, \sigma_2 - \rho_{23}\sigma_3, -\delta_2, \delta_3 - \xi_{32}\delta_2, \delta_1 - \xi_{12}\delta_2$ |
| O_{33} | $-\sigma_3, \sigma_1 - \rho_{13}\sigma_3, \sigma_2 - \rho_{23}\sigma_3, -\delta_3, \delta_1 - \xi_{13}\delta_3, \delta_2 - \xi_{23}\delta_3$ |

(iii) 用于异轨迹的存在条件:

实行稳定的条件

$$\begin{aligned} -\frac{(\sigma_3 - \rho_{31}\sigma_1)}{(\sigma_2 - \rho_{21}\sigma_1)} &> 1 \\ -\frac{(\sigma_1 - \rho_{32}\sigma_2)}{(\sigma_3 - \rho_{32}\sigma_2)} &> 1 \quad (11) \\ -\frac{(\sigma_2 - \rho_{23}\sigma_3)}{(\sigma_1 - \rho_{13}\sigma_3)} &> 1 \end{aligned}$$

根据这些规定, 子系统 (8) 具有一个吸引

$$\tilde{\Gamma} = \cup_i \tilde{O}_i \cup \tilde{\Gamma}_{i,(i \bmod 3)+1}$$

在那里 $\tilde{\Gamma}_{i,(i \bmod 3)+1}$ 是异轨迹。所述异周期 $\tilde{\Gamma} = \cup_i \tilde{O}_i \cup \tilde{\Gamma}_{i,(i \bmod 3)+1}$ 类似于看起来至 C 在图 2 (a) 中。因此, 由此得出的系统 (7) 和 (8) 有一个不变集线性化的系统 (7) 和 (8) 的特征值总结于表 I.

假定条件意味着每个点 O_{ij} 具有二维不稳定歧管和所述四维稳定歧管 (下面我们表示这些歧管通过分别 W^u 和 W^s)。此外, 一些 O_{ij} 都是由异轨迹加盟。要列出他们, 我们介绍了以下符号: 让 $H(A \rightarrow B)$ 是异轨迹加入平衡点 A 和 B 对于异周期 Γ 和 $\tilde{\Gamma}$, 我们有异轨迹见表 II.

表 II. τ_0 的基本异网同, 异轨迹。

| | | | |
|---------------|---|---|---|
| O_1 | $H(O_{11} \rightarrow O_{12}) = O_1 \times \tilde{\Gamma}_{12}$ | $H(O_{12} \rightarrow O_{13}) = O_1 \times \tilde{\Gamma}_{23}$ | $H(O_{13} \rightarrow O_{11}) = O_1 \times \tilde{\Gamma}_{31}$ |
| O_2 | $H(O_{21} \rightarrow O_{22}) = O_2 \times \tilde{\Gamma}_{12}$ | $H(O_{22} \rightarrow O_{23}) = O_2 \times \tilde{\Gamma}_{23}$ | $H(O_{23} \rightarrow O_{21}) = O_2 \times \tilde{\Gamma}_{31}$ |
| O_3 | $H(O_{31} \rightarrow O_{32}) = O_3 \times \tilde{\Gamma}_{12}$ | $H(O_{32} \rightarrow O_{33}) = O_3 \times \tilde{\Gamma}_{23}$ | $H(O_{33} \rightarrow O_{31}) = O_3 \times \tilde{\Gamma}_{31}$ |
| \tilde{O}_1 | $H(O_{11} \rightarrow O_{21}) = \Gamma_{12} \times \tilde{O}_1$ | $H(O_{21} \rightarrow O_{31}) = \Gamma_{23} \times \tilde{O}_1$ | $H(O_{31} \rightarrow O_{11}) = \Gamma_{31} \times \tilde{O}_1$ |
| \tilde{O}_2 | $H(O_{12} \rightarrow O_{22}) = \Gamma_{12} \times \tilde{O}_2$ | $H(O_{22} \rightarrow O_{32}) = \Gamma_{23} \times \tilde{O}_2$ | $H(O_{32} \rightarrow O_{12}) = \Gamma_{31} \times \tilde{O}_2$ |
| \tilde{O}_3 | $H(O_{13} \rightarrow O_{23}) = \Gamma_{12} \times \tilde{O}_3$ | $H(O_{23} \rightarrow O_{33}) = \Gamma_{23} \times \tilde{O}_3$ | $H(O_{33} \rightarrow O_{13}) = \Gamma_{31} \times \tilde{O}_3$ |

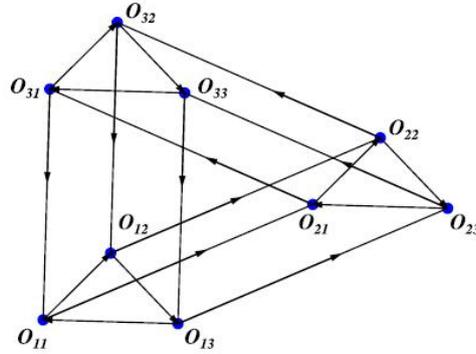


图 3 环面异宿 Γ_0 网络

直接产品。这些 18 个异轨迹形成一个基本的异网：见图 3。现在让我们建立一个二维不变的表面，其中 Γ_0 扮演的角色“骨架”。为此，我们表明，每个“矩形”在 Γ_0 用作二维不变表面的边界。考虑，例如，矩形由异轨迹。所有这些异轨迹和鞍点属于四维不变平面 $O_{31}, O_{32}, O_{33}, O_{11}$ 我们表示由 R^4 ，以同样的方式，我们证明了有其他 8 米的矩形与来自基本网络，由异轨迹的边界（参见图 3）。它们形成了一个二维表面，也就是说， Γ_0 ，同胚于二维圆环。事实上， Γ_0 是在系统 (7) 和 (8) 异周期的直接产物。

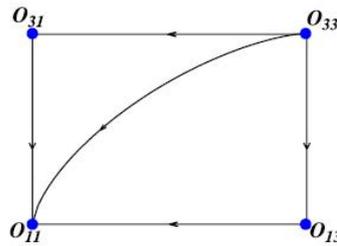


图 4. 矩形 R_0

通过建设，成套的 Γ_0 轨迹由九个亚稳态平衡 O_{ij} 和异连接加入他们两两。因为在系统 (7) 和 (8) 的全部相位空间中的所有 O_{ij} 是结构稳定的鞍形物，其在环形表面上存在（在不补偿节点或病灶的）可能看起来违反索引定理。然而，减少到 Γ_0 涉及“折叠”沿鞍座的分离式。如在示意性 Γ_0 的在图勾勒的二维平面展开看到图 2 (b)，折叠线匝稳定的状态到化合物均衡的过程：在平面的相邻节段，它们中的每一个的源极象限，在另一个的水槽，并在两个剩余的象限一个鞍点，让每一个稳定状态的所得庞加莱索引是恒为零。因此， Γ_0 的总

索引消失，以及根据需要，每两维环形表面。

现在，我们制定充分条件 Γ_0 是一个吸引。为此，我们提醒鞍的概念，如果 O 是雅可比特征值双曲鞍点；使得 $\lambda_1, \dots, \lambda_m, \gamma_1, \dots, \gamma_n$ ，则数

$$\nu = -\frac{\max_i \operatorname{Re} \lambda_i}{\max_j \operatorname{Re} \gamma_j}$$

被称为 O 。如果 $\nu > 1$ 的鞍指数，点被称为耗散鞍。例如，对于点 O_{33} ，鞍指数等号

$$\nu = -\frac{\max\{\sigma_2 - \rho_{23}\sigma_3\}}{\max\{\sigma_1 - \rho_{13}\sigma_3\}}$$

见表 I 和不等式 (9) - (13)。

定理 1 如果 Γ_0 所有鞍点耗散，那么 Γ_0 为吸引子。

证明。这足以说明，通过任何初始点传递 Γ_0 的附近的轨迹代表点趋于 Γ_0 为 $t \rightarrow \infty$ 。不失一般性的损失，我们先从一个初始点 q_0 是接近 Γ_0 的平衡的一个；让这种平衡是，例如，(见参考文献 34 和 38)。该轨道通过 Γ_0 的叶子传递 q_{33} 的附近在点 q_1 ，如果已经足够小，重现前面的考虑点代替。再次重复此过程，并再次，我们保证是时间，其中所述轨迹相交 K 个连续的街区后的代表点。备注，我们应该独立的只有有限多次选择常数 C ，因为从平衡到另一个在同一矩形的邻域中的经过时间是从上面有界的。因此，代表点趋于 Γ_0 为 $t \rightarrow \infty$ 。

对于陆路交通局的较小值 Γ_0 和 T_0 的持久性现在我们介绍公式。(8) 从子系统 X 弱非零耦合来子系统 Y 。

1. Γ_0 到的持久性展现异网 Γ_0 的持续性，我们认为所有异轨道属于它。不失一般性的损失，我们选择矩形 R_0 ；对于其他矩形证明是相似的。

表 III 鞍平衡点的鞍指数。

| Saddle | Saddle index ν |
|----------|--|
| O_{11} | $-\frac{\max\{\sigma_3 - \rho_{31}\sigma_1, \delta_3 - \xi_{31}\delta_1\}}{\max\{\sigma_2 - \rho_{21}\sigma_1, \delta_2 - \xi_{21}\delta_1\}}$ |
| O_{12} | $-\frac{\max\{\sigma_3 - \rho_{31}\sigma_1, \delta_1 - \xi_{12}\delta_2\}}{\max\{\sigma_2 - \rho_{21}\sigma_1, \delta_3 - \xi_{32}\delta_2\}}$ |
| O_{13} | $-\frac{\max\{\sigma_3 - \rho_{31}\sigma_1, \delta_2 - \xi_{23}\delta_3\}}{\max\{\sigma_2 - \rho_{21}\sigma_1, \delta_1 - \xi_{13}\delta_3\}}$ |
| O_{21} | $-\frac{\max\{\sigma_1 - \rho_{12}\sigma_2, \delta_3 - \xi_{31}\delta_1\}}{\max\{\sigma_3 - \rho_{32}\sigma_2, \delta_2 - \xi_{21}\delta_1\}}$ |
| O_{22} | $-\frac{\max\{\sigma_1 - \rho_{12}\sigma_2, \delta_1 - \xi_{12}\delta_2\}}{\max\{\sigma_3 - \rho_{32}\sigma_2, \delta_3 - \xi_{32}\delta_3\}}$ |
| O_{23} | $-\frac{\max\{\sigma_1 - \rho_{12}\sigma_2, \delta_2 - \xi_{23}\delta_3\}}{\max\{\sigma_3 - \rho_{32}\sigma_2, \delta_1 - \xi_{13}\delta_3\}}$ |
| O_{31} | $-\frac{\max\{\sigma_2 - \rho_{23}\sigma_3, \delta_3 - \xi_{31}\delta_1\}}{\max\{\sigma_1 - \rho_{13}\sigma_3, \delta_2 - \xi_{21}\delta_1\}}$ |
| O_{32} | $-\frac{\max\{\sigma_3 - \rho_{23}\sigma_3, \delta_1 - \xi_{12}\delta_2\}}{\max\{\sigma_1 - \rho_{13}\sigma_3, \delta_3 - \xi_{32}\delta_2\}}$ |

2. 异吸引要显示在弱耦合 Γ_0 一个异吸引子的存在的持久性，证明所有的矩形这种形式 T_0 的持久性。作为一个例子，我们取矩形 R_0 ；对于其他的矩形

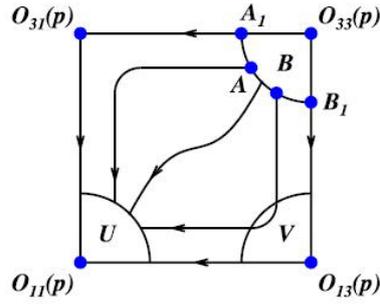


图 5. 在矩形轨迹

定理 3. 吸引 T_0 持续小 $\|P\|$ 。由于所有均衡的鞍索引页上连续地取决于以下式子：

定理 4. 在定理 3 的条件下，环面 $T(P)$ 保持为用于小型 $\|P\|$ 一个吸引子。

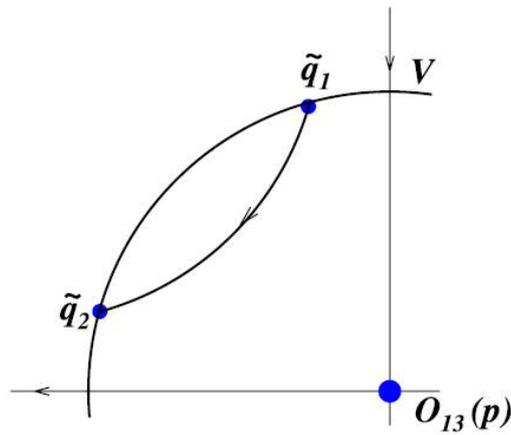


图 6. 在 V 中的轨迹

数值分析

A. 一般问题

对于系统 (5) 和 (6) 的数值研究中，我们在固定 $\sigma_1=1, \sigma_2=1.1, \sigma_3=0.9$, 线性项的系数。对于基质，所述值在等式的 (5) 和 (6)，正好两个 3 个 x 和 y 三个易消失的。在系数的上述值和消失或足够弱耦合 p ，所有这些平衡是具有二维不稳定流形马鞍。在 $p=0$ ， x 和 y 的子空间解耦；它们中的每具有三个鞍座与一维不稳定歧管和由连接这些鞍座的分列式形成的异轮廓。参数的上述值的选择确保（在相应的鞍指数而言），每个轮廓在各个子系统的局部子空间吸引。按照二段的结果。III，在 p 的小值在接头相空间的吸引子应该是一个持久的二维圆环 T_0 与在其上的异网络 Γ_0 （见图 3）。

吸引附近异轮廓动态的特殊性导致很长的时期，当在鞍点附近具有轨迹徘徊。这些重复纪元时间呈指数级增长，并有完善的数字集成商，而不是提供对整个吸引的状态信息，在不稳定的平衡附近越来越长通道排气的时间资源。已知的是，不可避免的不准确性的数值（至少，在舍入水平）和/或引入显式噪声都能够从踢鞍座的附近的轨迹；作为这些缺陷的结果是，与异吸引轮廓显示几乎周期性的行为，用“周期”正比于缺陷振幅的对数的系统。下面，我

们介绍了这个缺陷在明确可控的方式;这应该使我们能够推断出从扰动数值进化的可观察到的性质上 T0 未受扰动的动力学的渐近性质。

公式 (5) 和 (6) 具有不变的超平面: $x_i=0$ 或 $y_i=0$ 。我们坚不可摧的壁垒平行强加给这些超平面: 无坐标被允许消失。通过这种方式, 我们通过分段连续更换的连续动态: (5) 和 (6) 整合的每一个时间步之后, “校准”

$$x_i \rightarrow \max(x_i, \varepsilon)$$

$$y_i \rightarrow \max(y_i, \varepsilon)$$

被执行, 以固定的小 $\varepsilon > 0$ 。这样, 电子成为动力系统的一个管理参数。

B. 测量不稳定率

沿着不变的二维表面运动的一个标志是二消失 Lyapunov 指数。

图 3 的顶部面板 7 示出从大到小的顺序所有六个 Lyapunov 指数, 以标准方式进行评价 [参见

(4)] 为系统 (5), (6), 和 (14) 中的一个相对的弱耦合 $p=0.01$ 轨迹为 $t=5*10^5$ 和 ε 从 10^{-3}

到 10^{-36} 。事实上, 在这个级别的图形分辨率, 我们得到的印象是, 以 ε 足够小的值 Lyapunov

指数趋于恒定值, 及其与值集表征沿着吸引二维环面运动。然而, 邻近于零的区域的适当的放大率 (图的中间面板 7) 公开了用于两个最大指数饱和是欺骗性的: 既指数接近零相当缓慢日志即以 ε 有限值, 估计逗留阳性, 表明不稳定的两种模式存在, 尽管很弱。

常规 Lyapunov 指数的计算按照 (3) 是不明确的两个最大的。

我们相反, 如果我们使用常规特色文, 由公式定义的服务要好得多。(4) [对于具有运动的沿在相空间吸引子非零平均速度普遍的情况下, 特性 (3) 和 (4) 是, 至多一个常数因子, 等效。这并不适用于 (5) 和 (6) 和类似的系统, 其中平均速度在极限吨趋于零。如可视化在图 7 (c) 所示, 两个长度相关指数系数的估计停留在电子商务所考虑的范围内几乎恒定。

同样的行话基于传统 Lyapunov 指数, 其中两个更积极 LE 的存在被称为“混沌”, 在这里, 我们可以讲“弱混沌”。图中所示的两个正指数。7 (c) 中的, 较大的一个从所述方程的 y 子系统茎。(5) 和 (6), 而较小的一个是与所述 x 子系统的固有动态特性。

选择适当的长度呈现系数的反应到耦合振幅 p 的变化之前, 一个重要的技术方面进行讨论。流 (5) 和 (6) 是歪斜系统: 变量 $\{y_i\}$ 无反向作用于集行事。通过构造, 在该子空间 x_i 的内部动力是

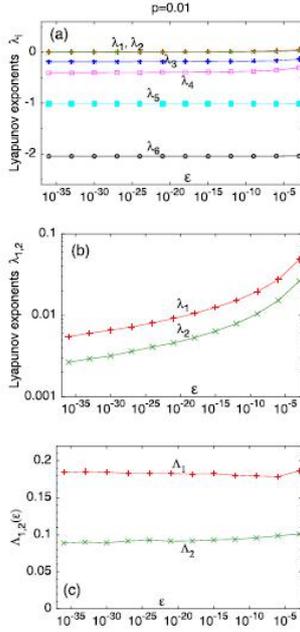


图 7. 不稳定的公式的特点。(5), (6) 的 (a) 和 (b) 常规的 Lyapunov 指数。(c) 长度有关的 Lyapunov 指数。

独立 p 的值的。六个 Lyapunov 指数的三个表征扰动的进化子空间内，并且不依赖于磷；在图 7 中，这些都与 K2 以来，负指数 K3 和 K5。被限制到子系统 x 的内部动态，重新参数指数 K2 应保持对独立的为好。然而，相位轨迹的总长度包括坐标 y_i 和从而取决于磷；因此，它不能在 K2 的评价中使用，并应通过所述投影的长度到 x 的子空间有取代。对于两个增长率的比较不稳定模式，我们不能表达它们在不同长度的方面，因此，下面我们在等式代替 $L(t)$ 的。值得注意的是，对于 K1 这个过程是不消失并且 p 的非常小的值特别准确：以上，如所提到在，K1 表征不稳定的分离的子系统 y 中的生长，其中相对于归一化到 $L(t)$ 将是一个明显的选择。在非常小的 p ，则耦合子系统 x 的影响弱，和在 $L(t)$ 的方面的评估可能扭曲的全貌。这在图的左侧面板证实 8：在那里，K1 基于 $L(t)$ 的估计明显较慢的接近在小 E 中的水平渐近线比基于 $L(t)$ 的或总长度 $L(t)$ 。长度值类似的估计已经按照确定的用以下方案：为电子的所有值（并在下面进一步，参数 p 的）中，该轨迹从相同的初始条件开始，和 103 个时间单位一（丢弃）瞬变之后被进一步集成为 5 个 105 个时间单位中，这样在 6 维相空间的相位曲线。对于该曲线，我们计算出其总欧几里德长度 $L(t)$ 以及其突起到三维 x 和 y 的子空间的长度：分别为 $L(t)$ 。

参数 p 的耦合强度变异变化影响系统 (5), (6), 和 (14) 中，在数量和质量的动态。在用于生长速率 (4), 在参考轨道的长度 $L(t)$ 和在常态 K 扰动的此关注的 y 有关术语的表达。我们先从 p 的在信用证项下固定观测时间 t 的影响。当在常数耦合 p 被增加时，在 y 子空间鞍座附近斥力减弱（定量，这可以读出相应的鞍索引），因此系统停留时间较长那些鞍座的街区，和横跨在 y 子空间下降运动的平均速度。其结果是，参考轨道的总长度，以及其 y 投影的长度减小。这种效应在图的右侧面板 8 所示。在 p 值低，部件支配的总长度；在较大的 p ，与此相反， $L(t)$ 的比对独立 $L(t)$ 的短得多，从而使总长度和 x 方向的投影的长度之间的差变得几乎可以忽略不计。对于扰动的平均生长速率系数的估计，我们使用该 p 独立长度，使得整个效果是由于值的变化。召回该速率 K_2 表征内部动力学在子系统并且由此不敏感至 p 的变体。与此相反， K_1 的值（在 $p=0$ 通过在空间 Y 动力学确定的），改变当 p 被改变。这在图

9 所示。

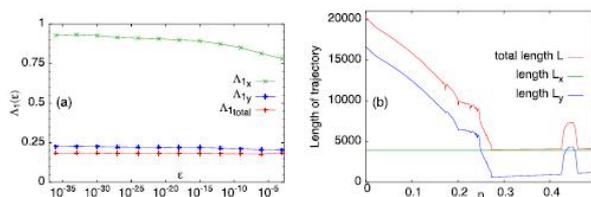


图 8. 特征长度为 (5) 和 (6) 相轨迹。绿色、蓝色和红色的曲线对应于根据 L_x 以及 L_y 的，并且分别的总长度 L 。积分区间 $t = 5 * 10^{-5}$ ；(a) 中的不稳定性速率 (4) 在 p 和变量 ϵ 在轨迹的不同投影的条款。(b) 在耦合强度 $p = 0.01$ 长度的依赖性 $p = 0.01$ 。

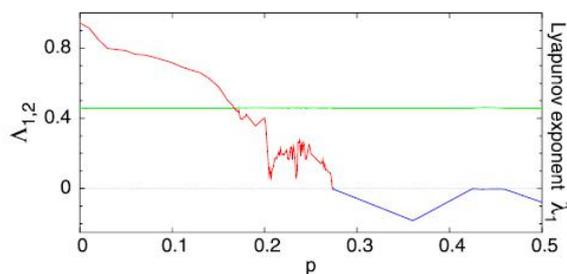


图 9. 红色和绿色固体曲线：长度有关的指数分别 K_1 和 K_2 。蓝色实线：传统的（时间相关）负 Lyapunov 指数。 ϵ 的值固定为 10^{-27} 。

正如我们在情节看，增加 p 中削弱了这种不稳定性模式： K_1 的价值近单调衰减，直到在 p 0.175 它变得比指数 K_2 小。

在锯齿状非单调模式 p 的结果的进一步生长：大概，内部转换的在该弱混乱状态的指示器。最后， K_1 改变符号接近 $p = 0.27$ 。在那里，缓慢生长的不稳定性此模式是由指数衰减的扰动，其特征在于负常规 Lyapunov 指数代替。

只有一个弱混乱的部分，对应于 x 变量挖墙角的演变；在 Y 型变量的预测，几乎不存在动态：几乎所有的时间，他们盘旋接近鞍点和轨迹 L 的总长度几乎与 x 的长度 $L(x)$ 的一致。通过这种方式，弱混沌动力学接近整个系统的圆环 T_0 由主 x 子系统的异轮廓附近的“简单”弱混沌动力学取代。大约 $p = 0.45$ ，有 p 的短程其中负 Lyapunov 指数再次接近消失；还有， y 由短抽搐的变量，和投影的长度到空间 y 变得与方向的投影可比的动力学（图 8 比照）。

转换在不稳定的价格，由 p 的变化造成的相位空间的变化，反映在相图的变化。在一个合理的广泛的参数范围，这些变化似乎是主要定量：相轨迹的形状是定性地持久性。在这个范围 p 的两个值单个变量的示例性进化呈现在图 10 的所有变量显示更多或更少的有序图案。回想一下，由于电子商务有限值的轨迹保持在从不平面有界距离。出于这个原因，居住在鞍座的附近的时间，而不是形成在生长几何级数，（如将 $\epsilon = 0$ 的情况下），近恒定值弱振荡。值得注意的是，对于两个子系统，这些值是不同的：有没有简单的相位锁定。在两个子系统，我们观察到的典型无赢家竞争。

所有这三个变量 x （上排）的依次以及所有三 y 型变量（下排）振动：虽然他们中的一个穿越高原，另外两个的人几乎消失。为在 y 系统的每个变量的高原由具有三个不同高度段： $\epsilon = 0$ 是主系统的在其鞍点的坐标。高原高度之间的差异成比例的磷；他们是弱在情节的左栏

表达，但都清晰可见（尤其是量 Y_2 ）在右列。在 p 时间模式显然弱紊乱；此外， Y_2 的高原是明显高于其他驱动变量的高原更宽： Y_3 的活动的历元和，尤其是， Y_1 的转进尖头分离由不均匀的间隔。

相位肖像到用于此振荡状态三维子空间特性突起示于图 11. 在主的 X 子系统（未示出）中，我们观察刚刚吸附异轮廓。与从主系统中的两个坐标的曲线图和一个从从动的 y 子系统坐标（图 11 左图）具有直角三角形棱柱的形状；平衡被投射到顶点，而沿边缘运行不稳定流形。在有限的 ϵ 中的吸引轨道逃逸沿着棱镜脸上的顶点。

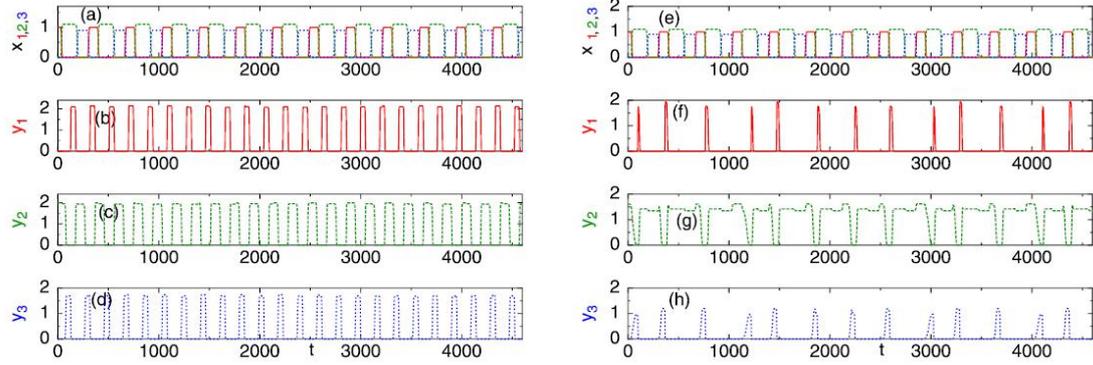


图 10. 动力学上非光滑圆环 $\epsilon = 10^{-18}$ 的系统 (5), (6), 和 (14) 的时间演化。左柱: $p = 0.05$; 右列: $p = 0.22$ 。
 上排: 主系统的变量。下排: 强制系统的变量。

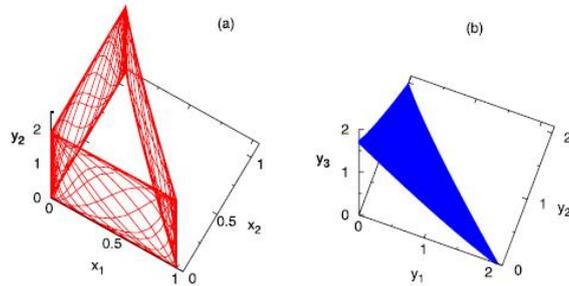


图 11. 预测在 $p = 0.05$ 的系统 (5), (6), 和 (14) 的相位肖像 $\epsilon = 10^{-18}$ 。

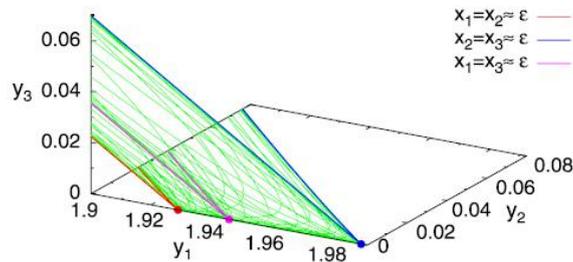


图 12. y_2 轴附近的相位空间区域的爆破。实心圆而厚曲线: 平衡及其分离点。参数值像图 11。

与来自驱动子系统完全坐标的投影（图 11 的右图）具有三角形形状。回想一下，从来自 x 系

统的三个不同的（并且在坐标方面很好地分离）平衡的点伸出的三角形的结果的各项点。中的坐标义方面，这三个突出部之间的距离成比例 p 和图细看图 12 示出的是，三角形具有一个“宽度”：它的顶点（和，相应地在整个相位纵向）分割成三个组件。欺骗性靠近在 y 投影中，这些组件中的 x 坐标的术语宏观分离。

非光滑圆环从几个异轮廓建：当主 y 在其鞍平衡的一个被冻结，该驱动系统有三个鞍点，其的一维不稳定流形形成轮廓。总之，有三个这样的轮廓，并为每个的整体鞍指数应单独检查，考虑到仅与在 y 子空间的特征值。召回：如果其整体指数超过 1 一个异轮廓吸引。图 14 示出了在耦合强度 p 的所有三个整体指数的依赖。为每条曲线，初始弱降低是由随后的生长所取代：吸引力的轮廓变得更强。值得注意的是，单独的鞍座的鞍座指数可能降低，并且低于 1（在图中未示出 14）；什么事情，但是，都没有单独的指数，但其整体产品和它的增长。此外，一个接一个，整体产品的值发散：各正的特征值中的一个变小，并且最后消失：平衡失去不稳定和匝数从鞍进入稳定节点。

对于平衡躺在子系统的坐标轴，稳定化是跨临界分叉的结果。与冷冻在其鞍座，从动子系统的一个，具有一组的三个这样的“轴向”均衡沿主系统，具有三个进一步稳定状态，一个在每一个不变的平面。所有三个“面”州，除零，一正一负的坐标毅；从而，它们位于在相空间中的“非物理”的一部分。这些国家中有两个是在空间 y 渐近稳定，而第三个是一个负和两个正雅可比特征值鞍。由于这些平衡的坐标是耦合 p 的线性函数，它们中的一些移动到正八分圆当 p 增加。穿越途与有关的坐标轴，它们碰撞与相应的“轴向”平衡。在这种跨分叉的均衡汇率稳定和轴向一个趋于稳定的过程。为分岔参数值显式表情过于冗长在这里引用。

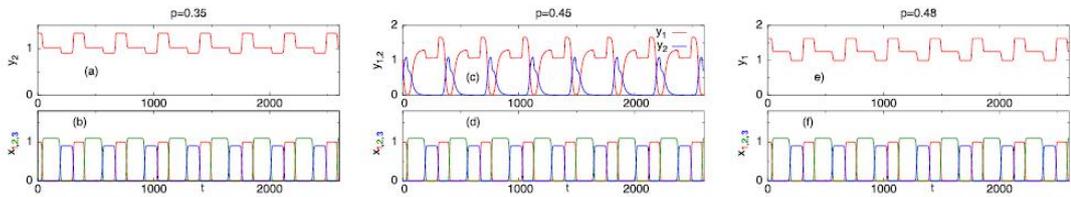


图 13. 动力学后的非光滑圆环的解体：在 E 中的系统 (5) 的时间演化，(6)，和 (14)。左柱： $p = 0.35$ ；中间列： $p = 0.45$ ；和右列： $p = 0.48$ 。顶排：非衰减从动系统的变量：(a) y_2 ；(c) y_1 ；(e) y_1 。下排：主系统的变量： x_1 ； x_2 ； x_3 。

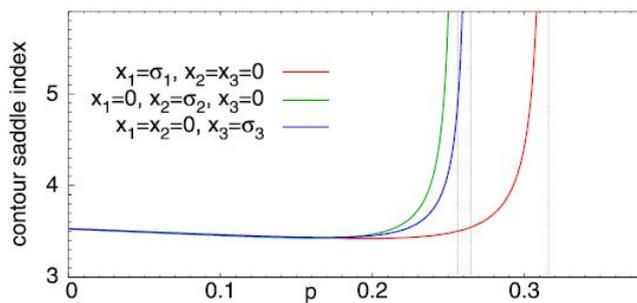


图 14. 总的来说鞍指数，特征值组成，领先于子空间。着色表示鞍点的位置在 x 子空间：用于蓝色曲线垂直虚线：稳定（通过跨临界分叉）各自的马鞍注：整体指数增长并不排除在单独的鞍（此处未示出）的指数的降低。

前鞍 (S) 的稳定改变 y 的动态冷冻在 X ：现在有一个简单的吸引，该子系统最终收敛于它，并保持永远存在。

“解冻”导致快速开关在驱动子系统的动力学：在其下鞍点的主系统的到来意味着对于

驱动的一个相空间，那里仍然可以是三个鞍点和一个异的新结构轮廓，或者，相反，稳定的“轴向”吸引在该从动系统驻留直到下一个开关。在后一种情况下，两个坐标义衰变的，而第三个假定的平衡值。在 P 中的进一步增加的过程中，鞍状态，一步一步的稳定化发生在所有三个“冻结”的子空间，并且在驱动系统终于异动力学模具出来。在图 13 中的左和右列的情况下，稳定平衡点之前/在同一坐标轴上的开关谎言后，从动子系统因此进化成为有效的一维；在中间列，从动子系统均衡之间跳跃在两个轴上，保持第三坐标可以忽略。

在图 13 的左，右列中的状态说明更换由准稳态“赢家通吃”的局面在从子系统 y 中的无赢家竞争：只要主人 X 遗体在近静态配置在其鞍点之一，从子系统与它同步，成为静态的为好。非平凡动力学出现在的情况“灵活掌握，懒惰从属”时的在主控子系统异切换的典型时间比松弛在从属子系统平衡的时间小；这个动态的细节将另行报道。

准稳定状态的变化也说明了在负 Lyapunov 指数 P 的实际分段线性依赖性（图蓝色固体曲线。9 的上方）。在这些州中，从动子系统（新兴）稳定平衡点之间跳跃，和 Lyapunov 指数仅仅是这些平衡的至少负雅可比特征值的加权和；权重是相应的高原的标准化长度。由于所有特征值是 P 的线性函数，其加和是相同为好。

讨论

在本文中，我们已经讨论再加异网络，其动力学模拟连续的亚稳态信息单元的开关之间的协调。不同级别的大脑元素层次的这种存在耦合网络。层次结构本身的复杂功能的相互作用的结果，居住隔离和一体化趋势的灯杆为执行联合特定的认知和/或行为任务网络之间。特别是，我们已经建议有关的基本信息在大脑中连续单元. 10 这种协调的主要现象处理低维协调的动力机制是多模态脑活动. 36 本地化单位夹带面向上位网络层次的，我们已经提出了脑脑相互作用的低维数学模型。该模型属于广义的 Lotka-Volterra 系统的是，分离时，功能节律活动。制度，在最简单的主 - 从配置的情况下，相位空间观察到的，可以被看作是相应的认知过程的数学图像。下足够弱耦合，吸引是不光滑的，它包含上述鞍乘型的平衡点和由异轨道接合那些点的两维环形。在吸引子的盆所有轨迹的不稳定性是由两个正长度相关的 Lyapunov 指数的存在确认。在吸引子行为的典型模式是沿不同异通道. 37（所描述的环面是所述信道的变体）的鞍座之间连续切换。在强耦合，系统经历有关不变环面的解体分叉。分手后，在从子系统无赢家竞争力度是赢家通吃准静态取代。这限制在从属子系统选项的数量，使主机和从机更刚性之间的合作。

A. **适当考虑波动数值研究**，我们在方程（例如，明确乘噪声）通过不断的轨迹过于接近，以不变超平面正式施工取代了波动条款。更换的事实，波动的唯一角色，不管他们的显形的，是系统踢出平衡在哪里，否则，系统将花费它的时间压倒性比例的附近的有道理。因此，我们预计定性相同的结果相反，如果公式的随机形式（2）进行了模拟。

B. **关于双向耦合我们的分析**，几句话已经被限制到单向耦合；在动力系统（2），这对应于消失参数，负责参与者的 Y 在我们的结果的参与者 X 。部分反向影响可以扩展到双向交互的情况下；这是指，特别地，该存在在吸引非光滑圆环与异网络的弱耦合率。以秒为单位的证明。III 是基于在子系统解耦的情况下，以及在连续性论据足够弱单方面耦合 P 上的环面的存在。类似连续性参数确保此吸引的持久性下反向耦合 Q 的足够小的值也是如此。因此，具有弱双向耦合的系统也应当特征中的“环形”无赢家竞争，与不沿着一维分离式但沿二维流形形成的鞍座之间异通道。在耦合系数 p 和 q 的任一个（或两者）大幅增加强制执行非光滑圆环的解体；沿着与上述机构（部分在子系统中的一个恢复由鞍点稳定性的），其他情况下可以通过一些异轮廓的和随后的发展，以及，例如，吸引损失的各个角的“平滑”吸引。这些效果

的细节将在别处报道。

C. **主从的情况：**我们是奴隶的我们的记忆？正如引言中提到的，耦合的单向配置可以模拟情景记忆的过去时动态内存在未来的影响。在这方面，赢家通吃以秒结束描述的行为。可能是对某些类型的精神障碍，其中一个病人的注意力牢固地固定在几个过去事件的兴趣：在过去的记忆（主）几个情节与长期停留在他们每个人之间循环切换；这些停留期间，当前的内存（驱动子系统）保持冻结，但只要在过去的情节变化，当前内存的平衡不复存在，而突然的存储移动到其新的暂定吸引。

D. **脑-大脑信息生成情景**记忆的现实生活中涉及到的多个时间编排尺度动力学过程，包括分层分块和事件的多结合。要在情节夹带现象的核心集中，我们已经限制了我们的治疗，最简单的近似。我们假设形成发作的特征时间，即，分块 TCH 大于发作之间顺序切换的特征时间 TEP 短得多。基于情景记忆的广义分层模型，26 夹带以任意的比例 TCH TEP 可以考虑。有趣的新动力是这种建模框架内的预期。特别地，混淆或从不同情节的事件的缠结在夹带存储器可以发生。这种存储器错误的动力来源可以是代表在顺序夹带过程不同的情节弱混沌时间序列的重叠（约误差的神经生理学起源和失真在情景记忆，参见，例如，参考文献 40）为了估计信息化水平。

致谢

研究三是与 V. A. 财政支持开展俄罗斯科学基金会（项目编号 16-42-0143）。M. Z. 的数值研究以秒为单位。IV 是由 RSF（项目编号 17-1201534）的支持。

参考文献

- 1A. Zadbood, J. Chen, Y. C. Leong, K. A. Norman, and U. Hasson, *Cerebral Cortex* 27, 4988 (2017).
- 2L. M. Bietti, *Discourse Soc.* 21, 499 (2010).
- 3A. C. Heusser, Y. Ezzyat, I. Shiff, and L. Davachi, <https://psyarxiv.com/z3tsd/> (2017).
- 4T. Sadeh, D. Shohamy, D. R. Levy, N. Reggev, and A. Maril, *J. Cogn. Neurosci.* 23, 1597 (2011).
- 5S. H. P. Collin, B. Milivojevic, and C. F. Doelle, *Curr. Opin. Behav. Sci.* 17, 71 (2017).
- 6Z. Ma and N. Zhang, *Elife* 7, e33562 (2018).
- 7A. E. Hudson, D. P. Calderon, D. W. Pfaff, and A. Proekt, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 111, 9283 (2014).
- 8J. M. Shine, M. Breakspear, P. Bell, K. E. Martens, R. Shine, O. Koyejo, O. Sporns, and R. Poldrack, *bioRxiv* 266635 (2017); doi: <https://doi.org/10.1101/266635>.
- 9A. Slapsinskaite, R. Hristovski, S. Razon, N. Balaguri, and G. Tenenbaum, *Front. Psychol.* 7, 2054 (2017).
- 10C. Baldassano, J. Chen, A. Zadbood, J. W. Pillow, U. Hasson, and K. A. Norman, *Neuron* 95, 709 (2017).
- 11K. J. Friston, *Philos. Trans. R. Soc. London, B* 355, 215 (2000).
- 12E. Tognoli and J. A. S. Kelso, *Neuron* 81, 35 (2014).
- 13L. Cocchi, L. L. Gollo, A. Zalesky, and M. Breakspear, *Prog. Neurobiol.* 158, 132 (2017).
- 14J. Chen, Y. C. Leong, C. J. Honey, C. H. Yong, K. A. Norman, and U. Hasson, *Nat. Neurosci.* 20, 115 (2017).
- 15C. Baldassano, D. M. Beck, and L. Fei-Fei, *Cerebral Cortex* 27, 2276 (2017).
- 16D. J. Beal and H. M. Weiss, "The episodic structure of life at work," in *A Day in the Life of a Happy Worker*, edited by A. B. Bakker and K. Daniels (Psychology Press, London, 2013), Chap.

2.

- 17M. I. Rabinovich, P. Varona, I. Tristan, and V. S. Afraimovich, [Front.Comput. Neurosci.](#) 8, 22 (2014).
- 18B. I. Cohn-Sheehy and C. Ranganath, [Curr. Opin. Behav. Sci.](#) 17, 169 (2017).
- 19D. Clewett and L. Davachi, [Curr. Opin. Behav. Sci.](#) 17, 186 (2017).
- 20M. I. Rabinovich, R. Huerta, P. Varona, and V. S. Afraimovich, [PLoS Comput. Biol.](#) 4, e1000072 (2008).
- 21M. I. Rabinovich, A. N. Simmons, and P. Varona, [Trends Cogn. Sci.](#) 19, 453 (2015).
- 22C. Bick and M. I. Rabinovich, [Phys. Rev. Lett.](#) 103, 218101 (2009).
- 23D. H. Ingvar, [Hum. Neurobiol.](#) 4, 127 (1985).
- 24K. K. Szpunar, D. R. Addis, V. C. McLelland, and D. L. Schacter, [Front.Behav. Neurosci.](#) 7, 47 (2013).
- 25D. L. Schacter, D. R. Addis, and K. K. Szpunar, in *The Hippocampus from Cells to Systems*, edited by D. E. Hannula and M. C. Duff (Springer, 2017), p.439.
- 26P. Varona and M. I. Rabinovich, [Proc. R. Soc. B](#) 283, 20160475 (2016).
- 27C. J. Gómez-Ariza, F. del Prete, L. Prieto del Val, T. Valle, M. T. Bajo, and A. Fernandez, [J. Exp. Psychol.](#) 43, 986 (2017).
- 28M. I. Rabinovich, R. Huerta, and P. Varona, [Phys. Rev. Lett.](#) 96, 014101 (2006).
- 29C. Grebogi, E. Ott, and J. A. Yorke, [Physica D](#) 7, 181 (1983).
- 30V. S. Afraimovich and A. B. Neiman, "Weak transient chaos," in *Advances in Dynamics, Patterns, Cognition, Nonlinear Systems and Complexity Vol. 20*, edited by I. S. Aranson, A. Pikovsky, N. F. Rulkov, and L. S. Tsimring (Springer, 2017), p. 3.
- 31V. Afraimovich, D. Cuevas, and T. Young, [Dyn. Syst.](#) 28, 154 (2013).
- 32M. Agarwal, A. Rodrigues, and M. Field, [Dyn. Syst.](#) 4, 199 (2011).
- 33V. Afraimovich, G. Moses, and T. Young, [Nonlinearity](#) 29, 1645 (2016).
- 34L. P. Shilnikov, A. L. Shilnikov, D. V. Turaev, and L. O. Chua, *Methods of Qualitative Theory in Nonlinear Dynamics* (World Scientific, New Jersey, 1998).
- 35V. S. Afraimovich, V. P. Zhigulin, and M. I. Rabinovich, [Chaos](#) 14, 1123 (2004).
- 36M. I. Rabinovich, V. S. Afraimovich, and P. Varona, [Dyn. Syst.](#) 25, 433 (2010).
- 37V. Afraimovich, X. Gong, and M. Rabinovich, [Chaos](#) 25, 103118 (2015).
- 38V. Afraimovich and S. B. Hsu, *Lectures in Chaotic Dynamics*, AMS/IP Studies in Advanced Mathematics (International Press, 2003), Vol. 28.
- 39V. S. Afraimovich, M. I. Rabinovich, and P. Varona, [Int. J. Bifurcation Chaos](#) 14, 1195 (2004).
- 40D. L. Schacter, [Dialogues Clin. Neurosci.](#) 14, 7 (2012).
- 41M. I. Rabinovich, V. S. Afraimovich, C. Bick, and P. Varona, [Phys. Life Rev.](#) 9, 51 (2012).