

复杂系统科学及其应用的简介

An Introduction to Complex Systems Science and its Applications

Alexander F. Siegenfeld^{1,2*} and Yaneer Bar-Yam²

¹*Department of Physics, Massachusetts Institute of Technology, 77 Massachusetts Ave., Cambridge, MA and*

²*New England Complex Systems Institute, 277 Broadway, Cambridge, MA*

很多概念和定量的分析框架所基于的标准假设对于众多复杂的物理、生物和社会系统并不满足。复杂系统科学可以告诉我们这些假设在什么情况下失效，以及为什么失效，并提供了可以理解复杂系统属性的另一个框架。本综述介绍了复杂系统科学的一些基本概念，包括复杂度曲线，有效性和适应性的权衡，系统复杂度和环境复杂度匹配的必要性，多尺度分析以及进化过程。复杂系统科学的目的是对系统一般属性的理解和讨论，而不是对于具体系统动态的建模。相对于提供全面的综述，本文更希望是来科普一些可用于对我们世界里的复杂系统进行理解和应用的简单概念和分析方法。本文将以简单的语言进行，只需要高中层次的数学和科学背景即可，以便让各个领域的学者与各个行业、各级政府机构和慈善机构的决策者以及其他任何对系统和社会感兴趣的人都可以看懂。

I. 引言

我们应该如何科学地研究物理、生物和社会等复杂系统？实证研究虽然有用，但它们本身还不够，因为所有实验都需要一个可以解释它们的理论框架。尽管当前存在许多这样的框架来理解系统的特定组成部分或方面，但大多数定量研究所依据的标准假设通常并不适用于整个系统层次，从而导致大尺度行为的原因和后果被错误地描述。

本文对复杂系统科学进行了介绍，展示了它的一些应用，它能帮助我们在周边复杂系统中进行有效决策。复杂系统科学着重于复杂系统的一般属性，而不是像动态系统、多主体建模、网络科学和混沌理论等子领域中对特定动态行为的建模。第II节介绍了关键概念，包括复杂度曲线，效率与适应性之间的此消彼长以及使系统的复杂度与其环境复杂度相匹配性的必要性。本文第III节讨论了对复杂系统的分析，关注了一个经常被忽略的问题，即标准假设何时适用何时不适用（不适用的情况更加重要）。第IV节讨论了一些有效干预复杂系统的原则，即使它们的完整描述通常超出了人类的理解范围。第V节进行总结。

II. 复杂系统科学中的基本原理 (BASIC PRINCIPLES OF COMPLEX SYSTEMS SCIENCE)

A. 为什么要复杂系统科学 (Why complex systems science) ?

复杂系统科学研究的对象是包含很多构成组元 (components) 的系统，范围极广，包括物理系统、生态系统和社会系统等。但不像其他学科那样关注构成系统的组元本身，复杂系统科学关注的是系统中的组元是如何关联起来的 [2]。如图1所示，不同的列分属不同的学科，如物理学科会研究雪花、炮弹弹道、气体这些由分子构成不同对象，而复杂性研究会从横向上综合来进行，如一群气体分子、一群生物、一群人这些系统的共同规律。系统的性质主要取决于其组元的关系，而不是组元本身¹。复杂系统科学的目的是提供统一的科学框架，允许思想的泛化（和在此基础上的锐化），促使新应用、新连接的发现。

即使有一个非常简单的系统，要想对其所有的细节进行完整的描述也是不可能的。好的分析研究需要寻找那些并不依赖于所有细节的系统属性。这种属性是存在的，因为复杂系统往往具有普适性 (universal-

* 通讯作者. Email: asiegenf@mit.edu

¹ 译者注：我们学过物理的人知道，无论动物和植物，都是由有限种类的原子构成，再微观一些就是6种夸克和6种轻子。但动物和植物具有不同的功能。即使是同一类生物，个体之间的差别也很大，其原因在于其物质的组合形式不同。

Examples of Behaviors

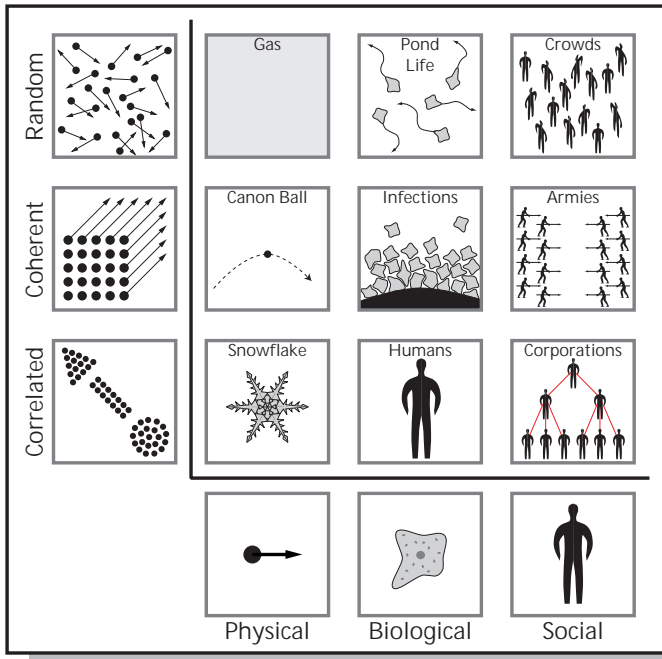


图 1. 图片来源 [1]。图上每列包含 3 个示例，都是由相同组元构成的系统（从左到右的基本组元分别是：分子、细胞、人）。但系统中组元的关系不同，最上面是随机 (random) 系统，每个组元的行为都独立于所有其他组元的行为。下面是相干 (coherent) 系统，所有组元表现出相同的行为；例如，某部分的行为（例如炮弹的位置，方向和速度）完全决定了其他组元的行为。最下面的相关 (correlated) 系统介于上面两个极端之间，系统各组元的行为确实相互依赖，但又没有那么强烈，以至于每个组元都以相同的方式起作用。例如，一片雪花某部分的形状会和另外部分的形状相关，但不会完全决定另外部分的形状。

ity)²。统计物理科学告诉大家人类有洞察这种系统特征的能力。统计物理上，尝试刻画系统特定状态的行为（例如一个气体系统）是一个艰巨的不可能的任务，但刻画所有可能状态的集合不仅容易处理，而且还可以为我们提供相关信息的模型（例如压力，温度，密度，可压缩性等）。这是一个功能强大的分析视角，不仅可以应用于物理系统，也可用于生物系统和社会系统。比如，熵 (entropy) 是物理学的一个重要概念，它描述系统可能状态的数量。复杂系统科学所关注的系统的复杂度 (complexity) 或者复杂性程度，本质上就

² 译者注：方福康教授曾指出：“在复杂系统中所涉及的一些基本特征，如非线性、非平衡、突变、分叉、混沌、路径依赖等等，有其非常的普适性。即在某一特定研究对象上所获得的某些概念和规律，常常可以在一些其它的研究领域再次实现。非线性现象的一些基本特征，可以在各种具体复杂系统中以各自的方式展现出来，非洲白蚁作窝过程的非线性生态行为，竟与单模激光的基本模式是一致的。这种非线性现象的普适性，是学科交叉可以获得实质性进展的重要基础。”

是一种广义熵。

B. 什么是复杂度 (What is complexity)

行为的复杂度可以用描述这个行为的信息长度 (length of its description) 来表示，这个长度取决于系统可能的状态数量。例如一个电灯只有两种可能状态——开或者关，这需要 1 个比特长度的信息就可以表示出来 (0 或者 1)。而 2 个比特长度的信息可以用来表示 4 种可能行为，分别是 00、01、10 和 11。同样的，可以用 3 个比特的信息来区分 8 种行为。复杂度可以简单表示为 $C = \log_2 N$ ，其中 N 为可能行为的数量。严格的说，这个公式是给出了一个关于复杂度的上界，如果一个系统中各个行为出现的概率不一致，则可以通过用较短的长度来描述常见的行为，用较长的长度描述小概率行为来降低平均描述长度。在这儿，最重要的是：**可能的系统行为数量越多，系统的复杂度越大** (the greater the number of possible behaviors, the greater the complexity)。

定义可能的行为空间要非常小心，根据不同的要求形成的可能的行为空间是不同的。比如，如果只关心灯泡的明暗，就只有两种可能性，但如果关心制作一个灯泡的复杂度，则要考虑灯泡各个组成部分如何安排在一起，行为空间就要大很多³。另一个例子，让一个计算机程序正确地解决一个 4 项的选择题，看起来用两个比特就可以搞定（可以描述 4 种选择），但这样的计算机编程实际难度是很大的。这种困难是因为我们并不能预先知道会有些什么题目，而希望计算机程序能对任意多项选择题进行正确回答。只有考虑大量的可能，计算机程序才可能对任意的多项选择序列给出正确反应。

C. 什么是复杂系统 (What is a complex system)

一个人体和一个由相同分子构成的气体系统，哪个更加复杂？后者具有更多可能的分子排列组合，所以

³ 译者注：补充一个例子，对于普通人，他/她只关心电视机是否能看，电视机就只有正常和不正常两个状态。但对于电器修理工，就必须弄清里面的电子元器件的相互配合，会有更多的状态——例如不同的元器件损坏了。对于后者，这个电视机的复杂度更大。

具有更大的复杂度和更大的熵或者无序度 (disorder), 这是因为构成人体的分子不能随机排列组合, 但气体系统中的分子可以。但我们在讨论复杂系统的时候, 我们会选择有特定分子排列顺序的人体而不是气体来进行研究。植物、城市都可能是复杂系统科学讨论的对象, 这些对象看起来是更加有序、熵更低。是否低熵的就是复杂系统? 并不是这样的! 无序程度最低的时候, 系统中所有组元具有同样的行为 (像图1 所提及的相干系统一样), 我们直觉上也不会认可这是复杂系统。

看起来这儿存在矛盾, 解决这个矛盾的关键是明白系统描述的长度取决于用来描述它的细节的层次。**复杂度依赖于尺度 (scale)**。在微观状态, 气体比人体复杂, 描述气体中所有分子的位置和速度要比描述人体中所有分子的位置和速度更加困难。但在人类的感知层次, 人类只能感受到气体宏观一些的行为, 如温度和压强。相反, 在这个层次上, 人体的行为更为复杂, 他们有各种活动或运动形式, 还有喜怒哀乐的情感。在人类感知的层次, 气体是非常简单的, 因为只有涉及数万亿规模的分子行为才能被人感知, 而对于这种规模的气体分子人类感知可以区分的行为种类没有多少。熵只是对于最微观层次上复杂度的度量, 但对一个系统的刻画 (characterizing) 需要在多个尺度上理解系统的复杂性。图2描绘了一些系统的复杂度曲线 (complexity profile), 系统复杂度是尺度 (规模) 的函数, 行为的尺度 (规模) 等于系统中的耦合相关的组元数量。

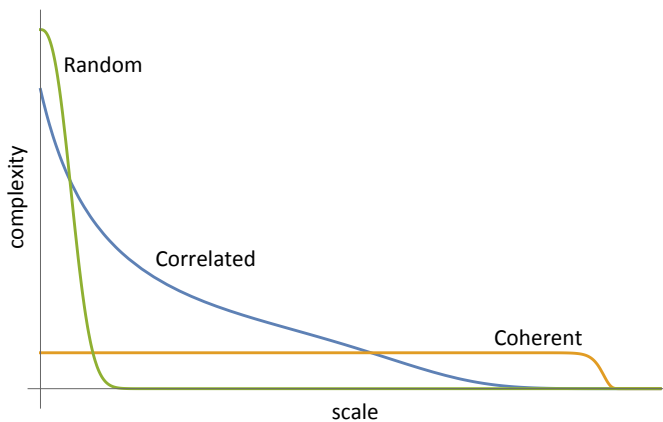


图 2. 随机、相关和相干系统的复杂度曲线。随机系统在微观小尺度上具有大复杂度, 在宏观大尺度上复杂度低。相干系统的复杂度不会随着观察的层次发生变化。相关系统介于二者之间。所有复杂度随着尺度的减少有增加的趋势。

如图所示, 随机 (random) 系统在最小尺度上很复杂, 但尺度升高时复杂度迅速降低。而相干 (coherent) 系统在不同尺度上的复杂度保持不变, 例如一个炮弹的运行速度和炮弹上的所有原子的运行速度是一致的, 而整体的位置和所有原子的位置也是相对固定的。相关 (correlated) 系统介于二者之间, 在不同的尺度上会有不同的行为。例如, 远远地勉强才能看清的一个人, 谈不上什么复杂程度, 但如果越靠近细节会逐步增加, 首先会有其位置和速度信息, 然后有四肢的信息, 然后有语言、面部表情、手指的细微动作等, 尺度再小就会到达 DNA 和蛋白质层次, 最后到达单个的原子和分子层次, 随着观察或研究的层次越细微, “人” 这个系统的复杂程度会逐步增加。复杂度和尺度是相关的, 随着尺度的变化, 系统的复杂度会发生变化。对同一个系统来讲, 层次越低尺度越小时, 系统的复杂度越高⁴。复杂度会随着观察尺度发生变化, 往往呈现递减 (或不变) 的函数形式。在 s 尺度上系统的复杂度可定义为

$$C(s) = \sum_{A \subset X, |A| \geq s} I(A|B),$$

其中 A 表示这个尺度及以上的所有可能子集, $I(A|B)$ 表示 B 条件下 A 集合中所有随机变量的多变量互信息 (multivariate mutual information)[3]。

D. 复杂度和尺度上的此消彼长 (tradeoffs between complexity and scale)

复杂性需要序 (order), 复杂系统的形成确实涉及熵的降低, 需要降低系统在小尺度上的复杂度。即**要获得高尺度上的复杂性 (增加复杂度), 系统中的微观个体必须有一定的关联, 这种微观关联会降低系统在低尺度上的复杂性 (减少复杂度)**。更精确地讲, 对于固定组元集合及个体可能行为集合的系统, 复杂度与尺度的关系曲线下方的面积是一定的, 与组元的相互作用无关 [3]。需要注意的是, 有时候引入系统组元之间的交互可能会改变系统组元的行为种类, 从而使曲

⁴ 译者注: 前面提到的电器修理工观察电视机的尺度或者层次就要比使用者观察的层次低, 修理工除了判断电视机能否工作外, 还要了解更多的电视机元件的细节, 因此, 对于修理工, 电视机有更大的复杂度。

线下方的面积增加。例如当系统中的两个人进入交谈，这能反映出两个人的关系，而交谈也是一个新的原先没有考虑的个体行为。

考虑一个有一些工人的工厂 [1]，可以将一个有很多工人的工厂在一定的时间内生产的同类产品的数量作为尺度（规模）的表示；而在要求的尺度（规模）条件下，工厂能够生产的产品类型的数量可以作为工厂的复杂度。这儿的规模和复杂度是紧密相关的，要想大规模地生产同类产品，就需要很多工人同时进行同样的工作，从而减少复杂度；反之，只有在工人具有较高的独立性时，才有机会创造出更多类型的产品，但此时就不能在产品的数量上有高的要求。当然，可以通过增加机器和工人使工厂在复杂度和规模上都有所提高，但当工人和机器的数量一定时，就只能追求其中的一个：要么规模要么复杂度，它们中的一个增加时另一个就会减小⁵，如图3所示。



图 3. 工厂的复杂度曲线。可以选择产品种类少，但数量大的生产方式；也可以选择数量少但种类多的生产方式。前者是大规模（尺度）小复杂度，后者是小规模（尺度）大复杂度。

对复杂度和规模的抉择实际上是对适应（adaptive）还是效率（effective）的抉择。复杂度越高，个体行为相对独立，具有更多的行为方式，整个系统会有更大的适应性；反之，若系统中的很多个体都进行高度协作，可以高效率完成既定任务，满足大规模或者大尺度上的要求，但这种有效系统对于自身或者环境未来不确定变化的适应能力会降低。设计一个可以应

付所有可能冲击的高适应性系统，一定是以牺牲系统的某些大尺度功能为代价的。前苏联的人相信他们的经济将超过资本主义经济，因为资本主义经济体有太多浪费，例如很多企业会做一样的事情而存在相互竞争 [4, Chapter 16]，而让经济体中的每个人都协作起来会让经济运作会更加有效。确实如此！但构建大规模的经济结构是以牺牲低尺度（规模）的复杂度为代价的，结果就丧失了适应性，这种经济体面对多变环境的新情况会缺乏应变能力。当然，监管不当的资本主义经济，也可能会因为市场力量的过于集中、有害反馈回路的存在或者个体的从众行为而变得适应性不良 [5]。

无论市场、政府还是其他系统，想要提高其在大尺度上的复杂度，就必须减小其中组成个体的复杂度。但很多时候，以小尺度部分个体的自由为代价，而换取大尺度（规模）上的合作，可能是非常值得的。

E. 为什么要复杂（Why be complex）

必要多样性法则（Law of Requisite Variety）要求，为了保证有效性，系统必须足够复杂得和环境一样，这样系统才能对于环境的交互进行合适的应答。若环境有 100 种不同行为需要应答，一个系统如果能对这些不同行为都给予不同的反应，那么这个系统就是有效的；但如果系统只有 10 种可能行为，那么这个系统对于环境而言是无效的⁶。

前文提到，复杂度必须定义在一定的尺度之上，所以我们要完善这个必要多样性法则：为了保证有效性，系统必须匹配它与环境在所有行为交互尺度上的复杂度 [3]。如图4，讨论两支作战的军队 [6]，任何一方都可以将自己作为系统，而将对方作为需要应答的环境的一部分。如果两支具有相同的行为数量，即具有相同的复杂度，如果某一个具有更大的尺度（都是严格控制的军队，其中一个规模比较大），规模大的军队获胜的可能性大一些。如果这两支军队的规模一样，但复杂度不一样（如两个规模和武力强度一样的舰队，一方

⁵ 一个学者的精力总量是有限的，他/她可以广泛涉猎不同的领域，但容易浅尝辄止，很难在某一个领域获得深入的洞察；他/她也可以长期在一个具体领域钻研，由一系列内容相关逐步深入的文章形成丰硕的成果集。

⁶ 译者注：极端一点，如果一个系统对于外界所有输入都只有一种应答方式，说明系统的功能完全丧失，这个系统也就是彻底无效的。在有效的对话时，一方的提问总能获得对方合理的应答，问题多样性大于回答多样性的时候就会显得回答者没有认真应对或者没有能力应对。

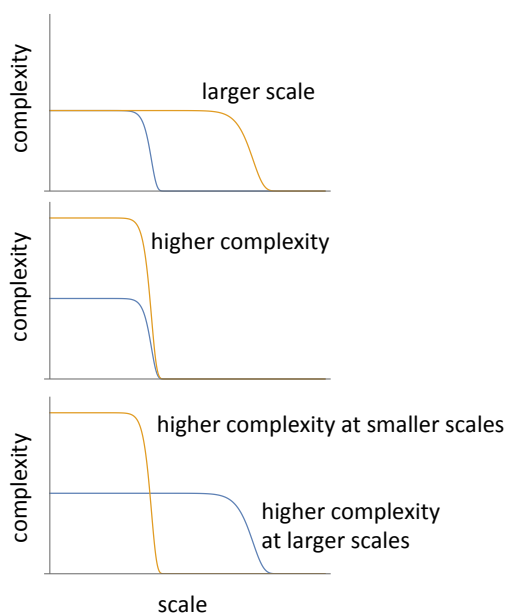


图 4. 冲突中的两只军队的复杂度曲线示意图。顶部：如果两支军队具有同样的可能行为，复杂度一样，但规模（尺度）不同，规模更大的一方更有优势。中：如果两支军队规模相同，但可能的行为数量不同，后者更有优势，因为其复杂度更高。下：如果有两支军队以不同的规模和行为数量运行，哪一方占优势很大程度上取决于具体作战时的地形。例如在广阔平坦的地面或者在山区丛林地带会有不一样的结果。

比另外一方机动性能更好)，高复杂度的军队取胜的可能性更大，因为高复杂度军队可以针对低复杂度军队的不同行为采取不同的动作，但反过来不行。但若两军情况像图4中最下面子图所描述的，一个是大规模小复杂度，一个是小规模高复杂度，其作战的结果就会取决于具体的地形（此时尺度或规模将被限定）：在广阔平坦的地方，高尺度高复杂度的军队更可能获得胜利，若在山区丛林，在尺度小情况下具有高复杂度的军队大概率会赢。美军和越南游击队，前苏联军队和阿富汗游击队就是非常好的例子。

有另一个有意思的例子，人类的健康医疗体系往往会包括这两种不同的任务：个案治疗——对于不同个体不同的疾病具体处理，具有小尺度（规模）但高复杂度特征；而接种免疫——对所有的人采用同样的处理方式，具有大规模低复杂度的特征 [7]⁷。

欧元区的境况提供了一个多尺度复杂度不匹配的可能例证。在这个区域，财政政策的制定主要在单个

国家和地区进行的，因此在国家范围内具有更高的复杂度但在整个欧元区尺度上的复杂度相对较小，而货币政策的制定尺度就在整个欧元区，因此在整个欧元区这个大尺度上有较好的复杂度，但它会缺乏在各个国家/地区这个小尺度上变化的能力（即缺乏小尺度复杂性）。许多人认为欧元区的经济发展受阻，就是因为这种不匹配阻碍了财政政策与货币政策之间有效的交互作用 [8-12]。

实际问题处理时是很难做精确讨论的，因为精确地估计尺度和复杂度是难以做到的，所以复杂度随着尺度变化的曲线基本上不能准确地描绘出来，但近似的有关复杂度不匹配的分析还是可以做的。正如即使在系统的精确机制和结果存在不确定性时也可以使用这种对可能行为空间的分析一样，物理学家可以利用熵的性质（有时考虑与熵有关的量如何在整个尺度上变化）对相变进行分类。即使它们无法根据第一原理确定精确的数量，例如相变所产生的热量或发生的温度。只是如果要讨论如何纠正具体的不匹配问题，还是需要更细节的分析。

无论在什么尺度上讨论，复杂度的大小本质上没有好坏。只是如果要执行的任务的复杂度与执行该任务系统的复杂度不匹配时，就有问题了。尤其要注意，某种情况下的系统又可能是另外情况下的一个任务或者环境，这样，一种帮助某个系统与其环境进行交互的复杂度可能会阻止其他系统的有效管理。顺带一提，人类的情感特点似乎反映了这一原理：当我们所处的环境过于简单时，我们会感到无聊；若环境太复杂了，我们又会不知所措 [13]。

F. 分块的系统 (Subdivided system)

即使当系统的复杂度和环境的复杂度一致的情况下，仍可能存在复杂度不匹配的问题。举一个例子，一个系统有四个人，他们每个人能搬动 100 斤的物体，假设每一对中的两个人会一起协调一致干活而组成两个朋友对。若当前任务是搬走两个各 200 斤的沙发，这个任务是能被完成的，因为这个 4 人系统在适当的尺度下具有足够的复杂度，每对朋友一起搬一个沙发就能完成任务。但如果让每对朋友中的人被安排去搬不同的沙发，这个时候搬同一个沙发的就不是一对协作的朋友，按我们的假设不是朋友的人不能协作，他们

⁷ 译者注：各个国家的教育也具有这样的特征，书籍和电视传媒提供了大尺度低复杂度的教育方式，家教或者其他一对一培训等提供了最低尺度最大灵活度的教育方式，学校则在中间尺度上提供了中间复杂度的教育。

就搬不动沙发了。这个任务失败的原因是虽然两对朋友的系统具有搬动两个沙发的复杂度，但朋友系统的某一种划分与自然的沙发系统的划分是不匹配的。这种不匹配可以这样看，某个沙发需要 200 斤的协作能力，但这两个人分别提供了 100 斤的能力。

学术部门的组织可以提供更好的划分不匹配 (subdivision mismatch) 的例子。当前，为了组织知识和协调人员，学术界形成了多层的分块结构，包括各个部类、子领域等，整个学术界在多个尺度上都有足够的复杂度（这个尺度可以用协调的人员数量或者知识的量表示）。但学术界需要处理的学术问题集合存在一个自然的细分。如果这两种细分不同，即使学术界在多个尺度上能保证复杂性要求，但没有办法解决看起来应该可以解决的学术问题。最近几十年交叉学科中心和计划的兴起，表明人们已经察觉到这种不匹配，但整个学术体系的结构（包括学生的培训方式，学术成果的发表等）仍可能会阻碍一些没有完全属于某个学科或子学科的科学问题的研究进展 [14-19]。

以上示例说明了这个原理——**为了使系统对其环境的某些行为集做出不同反应，不仅要在整个系统的各个尺度上和环境行为各个尺度的复杂度相匹配，而且系统的每个子集的复杂度也要和环境所对应的子集在所有尺度上都能匹配。**这种匹配要求前者至少具有和后者相同的复杂度。应用此方法的良好经验法则如下：有关系统独立部分的决策可以独立做出，而相关联的部分则需要相关联地制定。因此，做出此类决策的组织应进行相应划分，以便其划分与它们相互作用的环境的自然划分相匹配。在人类大脑中是存在这种分块的，一些神经网络也采用分块的形式研究。一些文献研究表明 [2, Chapters 2.4-2.5]，系统采取分块的方式匹配环境的自然划分要比采用增加内部交互作用的方式要获得更好的效果⁸。

G. 层级性 (Hierarchies)

系统的一般组织方式是通过控制其层次结构。在一种理想化的系统层次结构中，没有横向连接，涉及层

级结构多个组元的决策都必须通过一个公共节点，其他组元都（直接或间接）在这个节点的管辖下。如图5所示，这种层次结构系统的复杂度曲线取决于控制结构的紧性程度 (rigidity)。一个极端情况是，任何决定（无论大小）都由层次结构的顶部做出。这种结构在不同尺度（层级）上会具有同样的复杂度，因为所有的决定都是同样的人做出的，具有同样的可能应对方式。另一种极端是层次结构中的所有个体在此结构中没有信息沟通，自行决策，此时整个结构的复杂度比个体层次的复杂度高不了多少。一般的层次结构都是介于这两种极端之间，不同的决策是分别在不同的层级做出的。

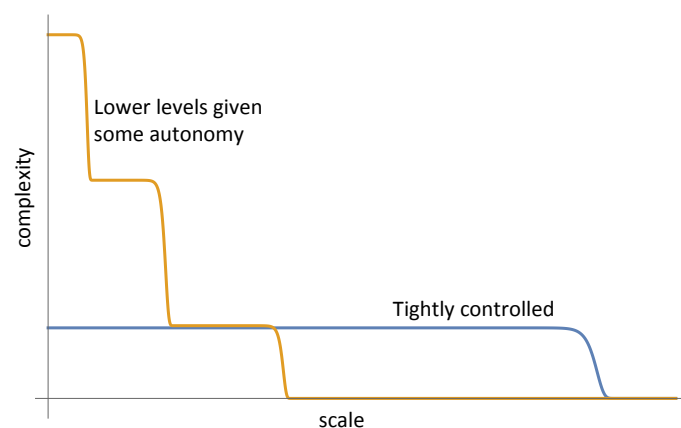


图 5. 两种层次结构的复杂度曲线。每个层次结构的总人数相同。在这里，尺度由协调的工时表示。在一个层次结构中，所有决策，无论规模如何，都是由一个人决定；在另一种层次结构中，不同的决策在结构中的不同层次做出。

没有天生就优异的层次结构类型。对于一种具体的环境，最好的层次结构是它的复杂度构型可以和需要其完成的任务复杂度相匹配。紧控制这种顶层决定 (top-heavy) 的层次结构不适合这种底层具有很多变动需要应对的环境状况。同样，松控制 (loose control) 的层次结构也不适合处理需要大尺度 (规模) 处理应答的环境。例如，美国政府系统具有较强的中心化特征，相对地方的州政府，联邦政府的权力很大。这种层次结构无法在小尺度上具有充分的复杂度来匹配和应对地方性的变动。但反过来，一个去中心化的系统无法保证在大尺度 (规模) 上具有足够的复杂度来很好地处理国家层级的问题和应对。将决策权赋予层次结构的高层可以提高尺度 (规模) 和有效性，但会减少适应性，因为这种情况下一旦决策是错的，影响巨大，恢

⁸ 译者注：对资源的管理，包括人力资源和物质资源，其中最重要的是要素的优化配置，这个配置实际上也是对于自然任务划分的合理应对。为满足不同业务的需求，有效的公司进行合理的部门调整以积极应对。

复也更困难。我们不仅要考虑政府整体的复杂度匹配, 同样还要考虑到施政系统的子划分(结构)以适应环境的自然划分。在同样的州, 美国的城市区域在某些方面彼此较为相似, 但它们和乡村的差异很大。所以, 将美国划分为 50 个州, 确实提供了低尺度(规模)管理的复杂度, 但这种复杂度对于自然的城市-乡村划分还不够, 而这种不匹配会导致州层次上的一些问题。更好的方式应该是在更低的层次, 例如允许城市和乡村可以有不一样的政策。类似的, 也有人认为联邦政府应该将一些权力转移给州政府。

很有必要区分清楚层次的复杂度和层次中的人能做的决策的复杂度。例如, 可以设计一个紧控制的层次结构, 该层次结构可以进行大量的大尺度(规模)行为的可能, 即在最高层次上具有高复杂度, 但要知道即使是最有才能的人, 他或她的决策能力也是有限的, 从而顶部的个人可能因为缺乏足够的复杂度来做出正确的决定。这种不匹配就会导致层次结构的一个重要局限: 层次系统最大尺度上的复杂度可以决定整个组织的行为, 但这又取决于层次结构中顶层的一部分人的能力(复杂度) [1]。因此, 当将最大尺度(规模)的行为被要求匹配的复杂度超过试图进行监管的个人或委员会可实现的决策复杂度时, 这样的层次结构必定会失败。指令经济(command economies)的失败就是一个这样的例子: 整个国家的资源和劳动力的优化配置是一个非常复杂的问题, 是任何个人或团体来他们难以完全弄清并给出正确指令的。而市场经济不同, 市场不是通过个人而是通过网络化的系统来分配资源, 这种决策类似于人脑做出决策, 但它并不是基于任何神经元的功能。要注意, 系统为应对环境行为的决策任务的复杂度通常远大于系统或环境单独存在时的复杂性。例如, 如果系统和环境都具有 10 种可能的行为, 则系统具有足够的复杂度以匹配环境, 这样的对应方式总数有 3,628,800 (10 的阶乘) 种。但系统适当的决策行为需要对应到具体的环境条件, 就是要从 3,628,800 种可能性挑出一个正确的。这说明, 系统及其环境的可能行为空间可能要比有关系统行为和环境管理的可能决策空间要小很多。

我们先前考虑了只有垂直连接的一种理想的层次结构, 若加入横向连接则可以提供另一种让系统实现更大尺度(规模)行为的机制。例如, 让城市之间相互交流要比它们只与州和中央政府互动更好, 它们可

以相互借鉴好的政策, 还可以基于其他城市的错误教训预防自己的错误。通过这种我们下面会提到的进化过程, 所得到的大尺度(规模)的决策行为(如某一个政策可能被多个城市采用)要比任何个体单元做出的决策都要更加复杂。这样的横向连接也可以引入到一个顶层(如中央政府)保持重要控制权的层次系统中。更进一步, 我们还可以考虑可以改变权重的横向连接, 但要注意, 过强的横向连接会导致微观个体们出现类似羊群效应的行为, 使得系统小尺度上的多样性不足; 而过弱的横向连接会导致个体合作的不足, 从而影响大尺度上的功能实现(依赖于复杂度) [20-22]。

III. 第二部分、分析复杂系统 (ANALYZING COMPLEX SYSTEMS)

前面已经介绍了具有多组元的系统的一些一般特征, 本部分试图回答这些问题: 1 我们如何研究具体系统? 2 我们如何分析复杂系统中的数据? 3 我们应该选择什么样的数据研究?

A. 我们如何理解系统 (How do we understand any system)

即使是非常简单的机械系统也具有数万亿个分子, 但令人吃惊的是我们仍然可以很好地理解一些宏观系统, 因为这种系统具有“尺度分离”(separation of scales)的特性 [23]。如图6, 我们感兴趣的系统行为发生在很高的尺度上, 远离单个分子行为的尺度, 而中间尺度没有什么行为。这种分离让我们可以分别讨论系统的微观层次和宏观层次, 例如对于机械系统, 在宏观上我们用牛顿力学来分析它, 在微观上用热力学来进行讨论。

更一般的讲, 上面说的方法是一种平均场理论(mean-field theory) [24]。在这种理论中, 系统组元的平均行为被建模, 而单个组元对于平均行为的偏差被视作相互统计独立的随机变动(statistically independent random fluctuations)。这种方法非常适用于计算机、汽车、飞机和建筑物等系统的研究, 因为各个分子的运动除了一些主要不相关的波动外, 剩下的部分可以很好地用它们所在的部件整体的运动来描述。人们在分析生物、社会和经济系统时也经常采用这种方法。

这种独立的随机性假设在许多情况下都适用，但并不总是适用于复杂系统。所以，弄清楚使用平均场的条件尤为重要。

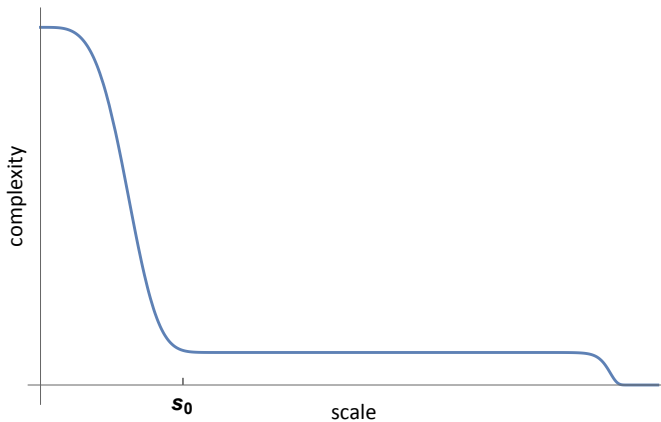


图 6. 具有尺度分离特征的复杂度曲线。尺度分离要求发生在特征尺度 s_0 之下的行为基本独立，这样它们的行为的平均效果才是和大尺度有关的。

B. 什么时候平均场理论失效 (When mean-field theory breaks down)

平均场理论能分析的系统所呈现的大尺度行为是其组元行为的平均效果。这种系统必须满足尺度分离特性，而尺度分离要求系统在一定尺度（规模）之上看低尺度组元的变动在统计上要近似独立。需要强调的是，即使对于组元具有很强相互作用的系统，只要这种作用能反应在系统的平均行为上，平均场理论仍然是适用的。此时，系统的每个组元被建模，就像它们是在与系统的平均相互作用一样（系统的平均就是平均场）。例如，平均场理论可以很好地描述了固体在大尺度上的运动，虽然在固体中分子之间的相互作用非常强，但这种作用的效果只是用来保持了每个分子与平均位置（质心）的距离和方向。在一些情况下，对于经济市场的建模可以考虑每个市场参与者与市场平均的供需合力的作用，而不必考虑所有参与者之间的相互作用。

当系统中的组元之间有足够强的关联，或者说系统中的某个组元与其他的一些特定组元的相互作用不能被忽视（与这个组元和系统其它部分的一般交互非常不一样）的情况下，平均场理论就会失效。这个时候，系统的大尺度行为不仅仅由系统各个组元的特征决定，

还取决于组元之间的相互关系。例如肌肉整体的行为可以大致由单个肌细胞的行为大致了解，但人类大脑的行为相对单个神经元的行为有根本性的偏离，因为认知行为主要决定于神经元之间突触连接的变化。同样，森林的复杂生态行为并不是由各个分离的组成生物的行为所确定的。顺便说一句，平均场理论无法描述某些物理相变（phase transitions），导致物理学家开发出重整化群（renormalization group）这样的新的多尺度研究方法，可以作为许多复杂系统科学研究的基础工具。

在小尺度的随机现象不满足统计独立性时，复杂系统往往在大尺度上表现出平均场理论所不能解释的波动或偏离（fluctuations）现象，如森林火灾、社交媒体上流传甚广的虚假消息和经济市场的崩溃等。在有些时候，这些大波动是为了适应性，它们让系统对于小的输入产生集体反应 [25]。例如，人体对于空气密度一种小扰动会有强烈的反应，就是当他或者她听到自己的名字时。但要提防的是，这种大尺度（规模）上的波动有时会造成系统性风险⁹。

C. 胖尾分布及及系统风险 (Fat-tailed distributions and systemic risk)

当系统的组元在某个尺度之上表现相互独立时，系统在大尺度上的波动幅度会呈现钟形的正态分布特征，这是中心极限定理所保证的。此时，系统的大尺度行为会有明确的均值和标准差，偏离均值几个标准差之外的事件极不可能发生（astronomically improbable）。但若组元相互关联，就可能导致另外一种分布，在这种情况下，一些极端事件（extreme event）虽然发生的概率还是比较小，但要比正态分布所预测的要大得多。这种分布被称为胖尾分布（或厚尾分布），如图7所示。例如，某个地区成年男性的身高服从正态分布，统计发现最高的人的身高也不会有平均身高的 2 倍那么大；但财富分布就不一样，它具有胖尾特征，你会发现很多人拥有的财富超过平均值的 1 万倍以上 [26]¹⁰。

⁹ 译者注：银行之间的借贷网络可以有效地进行金融资源的优化配置，低成本快速应对环境的变化，但这种网络连接也是出现系统性金融风险的基础。

¹⁰ 译者注，有一个简单的货币转移模型揭示了财富分布的幂律机制——当个体有随机储蓄率的时候，通过个体之间货币的随机交换，得到财富分布

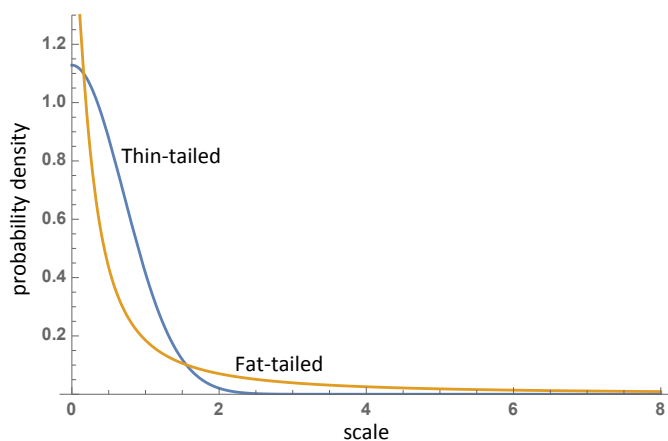


图 7. 正态分布(细尾)和幂律衰减分布(胖尾)。胖尾分布可能看起来更稳定,因为小尺度(规模)波动的概率更小,应该不容易产生极端事件。而实际上,胖尾分布可以有相对交大的概率产生极端事件的,即使这种事件在正态分布的情况下可能要等上几万倍的宇宙寿命才可能发生。注意,该图的轴是被截断了的,图示的肥尾分布可以很小的但不可忽略的概率(0.04%)到在 100 万或者更高的尺度(规模)的地方发生事件。

组元的相互依赖可能会使系统看起来更稳定,因为可以减少小尺度波动的程度,但也不尽然。举一个例子,想象一下 100 个梯子,每个梯子都有 1/10 滑倒的可能性。如果梯子彼此独立,则所有梯子滑倒的概率会极其低,这个概率要比从宇宙中所有原子中随机选择一个刚好选出特定原子的概率的 10^{20} 分之一倍还小。如果我们把所有梯子绑在一起,从某种意义上讲,我们将使它们更安全,因为任何单个梯子滑倒的可能性都会比单独使用小得多。但我们若真的把它们绑在一起,也将使所有梯子一起倒下的可能性变得不可忽视。其他还有一些例子,如金融系统的相互关联导致全球市场崩溃的可能性,出行线路的连接增加了传染病爆发的可能性 [27] (如西班牙流感)。一般而言,当某个事件发生的概率具有胖尾分布特征时,标准的统计方法往往会失效,胖尾分布会导致人们严重低估极端事件发生的可能性 [28]。要知道,一些胖尾分布的期望和方差可能都不存在,即使存在,通过有限的数据也难以获得可靠估计¹¹。

的幂律分布。在模型中,货币在个体转移使得个体的财富并不是独立的,而是具有广泛的关联。

¹¹ 译者注:无论数据多少,从观测数据来估计的均值和方差一定是有限的,对于期望和方差无限的理论分布来讲,这种估计一定是偏小的。

D. 理解复杂系统 (Understanding complex systems)

实证研究复杂系统失败的主要原因有如下几点:(1)通常收集系统组元的数据要比收集组元之间交互作用的数据要更加容易。如果没有捕获到与复杂系统的有关信息就会造成实证工作的失败,因为复杂的大尺度行为严重依赖于此类交互。(2)不适当的数据分析可能严重低估极端事件的可能性(尾部风险)。(3)一些实证分析通常采用线性(linearity)假设,即假设一组因素的总影响等于单个因素影响的和,但非线性作用恰恰是复杂系统的一个重要特点。

如果常用的标准方法不适用,我们该如何来理解复杂系统?我们对于所有这种具有许多组元系统的理解依赖于普适性 [29],即系统存在不依赖于微观细节的大尺度行为。基于组元之间足够独立的假设,通过平均场理论讨论系统的大尺度行为而无需考虑到系统的所有细节(在一定尺度之上,组元的变动必须具有足够的独立性,以满足中心极限定理的要求)。另外要注意平均场理论只是普适性的一个例子。

声音是另一个例子。所有材料,无论它们的成分,都可以传播声波,而且声音在所有材料中的行为都非常相似。这是因为在与声波相关的长度范畴(length scale)远远大于介质中单个原子或者分子的大小,原子和分子尺度上的微观参数只会影响声音的速度。要注意,声波不能通过系统平均行为的某个属性来理解,如材料的平均密度,而恰恰是密度对平均偏差的系统关联形成了声音。人类也无法通过关注原子运动这样的小尺度细节来理解声音。实际上,科学家对声音的理解是在了解原子是什么之前。理解声波的关键是要认识到它们具有多尺度结构——对应于较低频率的较大尺度(幅度)波动和对应于较高频率的较小尺度(幅度)波动,再对他们进行相应的建模。

Lim 等人将这种方法用于研究种族之间的暴力冲突 [30] (图8)。他们建立了一个预测模型来分析种族暴力可能在何处发生,并将其模型应用于解释发生在印度和南斯拉夫的实际现象。种族暴力有多种原因,如文化依赖机制或包括人口统计或经济统计特征的区域平均属性等,但作者关注了种族在地理分布上的多尺度格局(multiscale patterns)。他们发现当多个种族比较好地混合在一起时,或者隔离得比较好时候,都不会发生种族暴力。种族暴力只在不同的种族人群被分

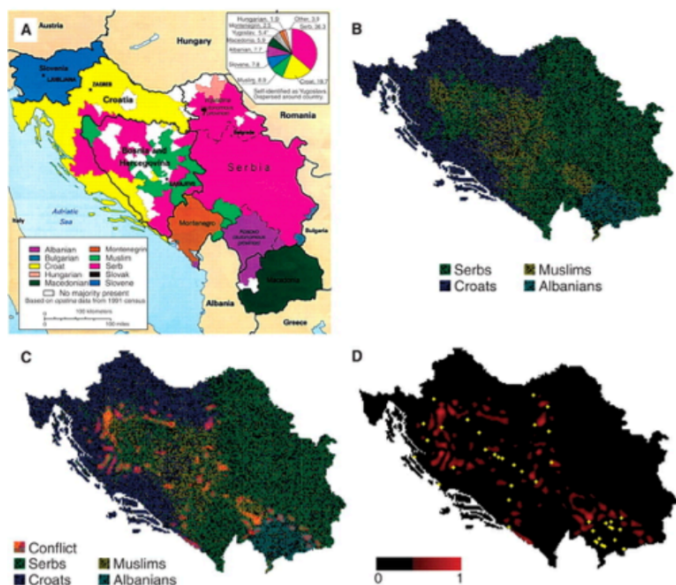


图 8. 暴力冲突地点预测, 图片来源 [30]。A 为问题背景; B 为不同种族分布的地理格局; C 和 D 中的红色是他们的模型预测了潜力的暴力冲突点; D 中黄色的点是历史上有过报道的证实的点。

开放入一些地理区片的情况下 (类似于水和油的混合) 才会发生, 而且冲突发生的可能性和区片的大小有密切的关系。当然, 两个种族之间的仇恨既可能是这种地理混据的原因, 又可能是地理混据的结果 [31]。文章的研究表明通过设定合适的边界可以有效预防种族冲突 (就像另一篇文章提到的瑞士当前的一些自然和非自然的政治边界的作用那样 [32])。

弄清楚任何一个复杂系统的所有细节都是不可能的, 大多数系统具有尺度分离特性, 系统在小尺度上具有很高的复杂度。但不同于普通的具有尺度分离的系统行为, 复杂系统的重要的大尺度行为并不是对小尺度行为的简单平均。多尺度上的相关性使得人们不清楚小尺度的行为究竟是如何造成更大尺度的行为的。然而, 即使是复杂的系统, 大尺度行为的复杂度也大大低于小尺度行为的复杂度, 大尺度行为往往不取决于系统的大部分细节 (如图9所示)。通常, 了解复杂系统大尺度行为的关键是找到合适的数学 (或概念性) 描述, 不是对于所有细节的简单的平均, 也不是对所有细节的全盘考虑, 关于多尺度方法的其他例子可以参考文献 [23]¹²。

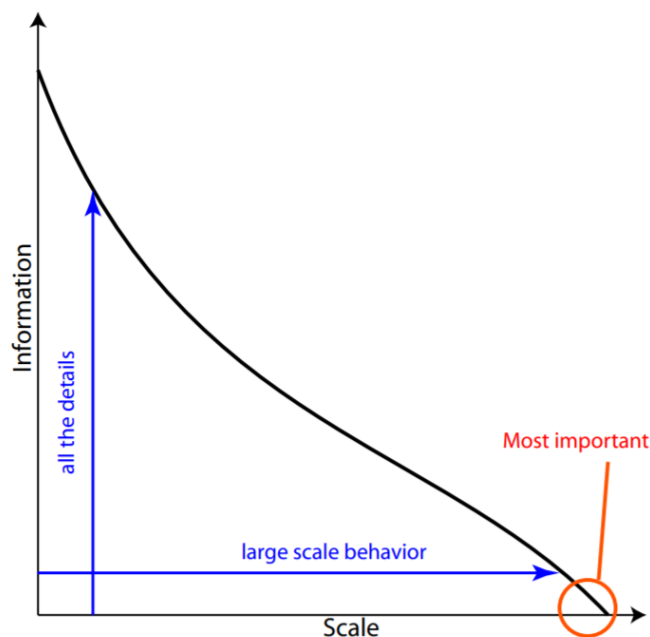


图 9. 一个复杂系统复杂度曲线示意图, 图片来源 [23]。在这, 信息是复杂度的同义词, 因为复杂度就是在特定尺度上驱使系统行为必须的信息量。了解系统的所有细节 (所有的微观尺度的行为) 是不可能也是不必要的。最重要的信息是大尺度行为所包含的。当然, 对于平均场理论不适用的系统, 弄清这些行为特征可能很困难。。

IV. 第三部分、复杂系统与不确定性 (COMPLEX SYSTEMS AND UNCERTAINTY)

虽然前面的部分可以帮助我们了解系统的基本属性和局限性, 但我们对大多数复杂系统的理解不可避免地是不完善的。而且, 无论有多周到的考虑方案, 一个真正复杂的系统都会呈现出未提前考虑的要素。对于一个具有高复杂度的功能系统, 任何一种改动, 更可能带来坏的影响而不是好的影响, 例如改变计算机或者飞机中内的一条连线很可能让系统不能工作。从这个角度来看, 系统的高复杂度意味着可能只有一种配置是有效的, 而其他配置方式都是无效的。如果缺

gogine 学派的重要成员 A. Babloyantz 明确提出, 在复杂的非线性多维系统中存在着一个少维子系统, 在这个少维子系统中可以描述脑神经认知功能的基本规律。协同学创始人 H. Haken 教授曾指出, 学习和模式识别过程是大脑不同状态的跃迁, 而这一过程可以利用少维的序参量来刻画。T. Kohonen 结合神经网络与自组织理论, 用映射的方法, 将复杂、多维的大脑微观构造约化为二维的平面结构, 并构造出自组织特征映射模型 (SOM), 在一定程度上解释了语言的特征及其障碍的产生机理。方福康教授认为这些理论工作的共同特点是, 对复杂神经系统的认知活动进行某种抽象, 将具有庞大维数的真实系统投影到少维空间, 并在此基础上进行可操作性的分析工作。这些研究在很多方面获得了成功, 表明了复杂系统概念和自组织理论是研究神经系统认知活动的很好的工具。

¹² 方福康教授在“神经系统复杂性研究中的几个问题”一文中写到, Pri-

乏完备的知识，如何确保我们设计或参与其中的系统能成功？虽然许多系统的成功基于正确决策的假设，但一些决策者容易犯错误（无论是由于腐败，潜意识偏见还是人类思想的根本局限）的系统仍然表现良好。复杂系统的研究通过（隐式或显式）将决策者本身视为系统的一部分并且具有有限的复杂度/决策能力，从而科学地处理这一问题。这样一来，问题就成为：我们如何设计包含决策者而超出决策者本身复杂度的系统？

A. 进化过程 (Evolutionary processes)

一个关键现象是，尽管不确定性 (uncertainty) 会使大多数系统变弱，但某些系统却受益于不确定性和可变性 (variability) [33–36]。这些系统的共同特征是它们都体现出某种进化过程，即复制成功的变更（并进一步修改），而忽视或抛弃没有成功的变更。经典的进化过程表现在生物学上：正是由于随机突变导致的变异性，才最终使得具体人体这样尺度和复杂度的机体逐步由单细胞生物体进化而来的。此外，人类自身也具有从随机冲击中受益的特点（前提是冲击不会太强）。如：通过早期暴露于非致命性病原体，可提高免疫系统的性能 [37, 38]；肌肉和骨骼会因为微挫或小的破损得以增强；我们通过接触新信息和解决问题来学习；只要逆境不太严重，我们的心理就会因逆境而被锻炼得更加强壮 [39, 40]¹³。

竞争性市场经济提供了系统如何在不确定性条件下蓬勃发展的另一个例子。由于我们天生并不知道如何成功，必须同时创造和改进许多潜在的创新和业务，成功的创新和业务将扩大而不成功的创新和业务将被抛弃。这样的过程将使成功的部分得到进一步改进。但是，如果没有被有效监管的多尺度合作框架，经济体系的大尺度部分可能会针对错误的目标进行优化，从而造成有害的社会均衡 (harmful societal equilibria) [41]。

同样，大型组织的内部流程可以遵循这样的演化模式，组织中的一小部分可能会失败但整体会因此得

到改善；而如果没有这种灵活性 (flexibility)，面对不断变化的外部环境，整个组织可能会立即失败。在某些情况下，整个组织的失败为更有效的组织取代它提供了空间（假设经济已充分分散且具有竞争力，因此所讨论的组织不会有“太大而不能倒闭”的情况）。但是，政府的倒闭要尽量避免 [42]，因此，施政系统更应该本身具有一定的灵活性以从随机性和不确定性中受益。**不允许发生小的故障，就会终止进化过程并建立相互依存关系，长期来看会削弱系统的功能，最终导致系统风险**（这或许违反大家的直觉，但确实如此）。

为了在不确定性中蓬勃发展并超越个体决策的复杂性，系统可以包含进化过程，即使它们最初非常有限，但它们会随着时间的推移自然得到改善。一般来说，一个系统只能设计出复杂度更低的系统，但随着时间推移，进化可以让系统变得比其设计者变得更加复杂。要利用这个机制，需要做到如下两点：

第一是**允许系统中有足够的变化**，让系统可以探索所有可能的空间。由于大量的变化意味着大的复杂度，而复杂度与尺度此消彼长，因此这种变化必须是在小尺度的空间和时间上发生。例如，对于一个施政系统，允许每个城市具有一定的独立性，就可以让它们同时并不断地试行不同的方案。相反，如果让国家的每个城市执行同样的方案，结果就会差很多。

第二就是**允许在系统的各个部分之间进行通信**，以便在其他地方采用成功的选择（例如，某个城市复制了其他城市的成功做法）。计划总会有意想不到的后果；关键是要让意想不到的后果对整个系统有利而不是有害。这需要经常放弃直接控制，以使复杂度可以随时间自动增加。

B. 多尺度进化过程 (Multi-scale evolutionary processes)

成功的进化过程通常不是只有无休止的竞争，而是包含着竞争和合作，这两者均发生在多个尺度上 [43]。例如，细胞在多细胞生物内合作以更有效地与其他生物竞争，而生物会在物种内部和物种之间进行合作以更有效地与其他物种竞争。大尺度的竞争会自然地孕育小尺度的合作——为了使一个团队有效地与另一个团队竞争（在大尺度上竞争），必须在该团队内部进行合作。合作也可以促进竞争——有时候，实现

¹³ 译者注：最近发表的文章 “The Eighty Five Percent Rule for Optimal Learning”，通过研究表明对于动物学习和人工神经网络的学习在错误率为 (error rate) 达到 15% 左右时候最优，学习效率最高，暗示着这种可以带来益处的不确定性和可变性具有一定的优化尺度（比率），太小则让进化速度太慢，过大则缺乏足够的稳定性，会让系统失去前进的方向。

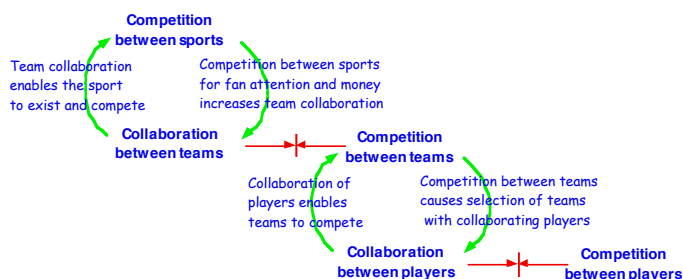


图 10. 系统中的竞争与协作，图片来源 [4, Chapter 7]。集体中的竞争和协作的交替。

集团共同目标的最佳方法是鼓励小集团之间的健康竞争。这些小集团又必须促进内部合作以有效地在子集团之间展开竞争，他们也可以通过在成员之间引入一些健康的竞争来提高内部合作的有效性。如果这些成员本身又是团体，则竞争引起合作再引起竞争的过程可以扩展到更小的尺度，具体过程如图10所示。这个过程也可以反向进行：为了更有效地竞争，个人可以相互合作以形成团体，而团体又可以合作以形成更大的群体，依此类推。因此，各种规模（尺度）的团体之间合作与竞争的复杂网络自然可以发展演变。

为了促进有效的团队合作，竞争必须有合适的结构设计（properly structured）。一支足球队各个队员以自己得分为目标，与团队的其他成员竞争，这不会让球队取得更好的成绩（有效），但让队员竞争“最佳球员”的头衔可能会让整个球队更有竞争力。竞争必须设计得让竞争者被激励，让他们做对集体更好的事情（可能有好有坏，但整体要好），否则会发生常见的悲剧。竞争可能会误入歧途，这凸显了要有多尺度结构的重要性（让竞争在多个层次上发生），而不是让系统中的每个人都与其他人竞争 [44, 45]。市场经济系统的成功不是因为自由市场产生最佳结果（现实世界中的市场通常会大大偏离自由市场模型的假设，并且具有很多外部性），而是让内部尽其所能。适当监管的市场体系允许自然地发生多尺度的进化过程，使得创新和复杂性可以远远超出任何人的想象，更不用说设计者了。

V. 总结

具有许多组元的系统通常表现出涌现行为，这是一种源自组元之间的关系而不是组元本身特征的行

为。然而，统计物理学的早期见解是，尽管不可能描述数万亿个分子的细节，但通过分析这些分子状态可能性的空间，而不是这些分子的运动等具体特征，就可以获得对于宏观性质的理解。尽管可以用分子的平均行为来描述许多宏观特性，但是某些物理现象（例如相变）的宏观特性不能通过对系统组元行为的平均来理解。因此，物理学家被迫开发新的多尺度研究方法。同样，虽然标准的统计方法可以推断出系统许多组成部分的平均属性，甚至可以成功地对某些生物和社会系统进行建模，但这些方法对于其他系统更可能是失效的结果。

通过考虑可能的行为空间的系统视角，可能会对系统有更深入洞察（insights），这是仅仅考虑特定问题或危机的大致因果关系所不能得到的。系统的复杂性，取决于系统潜在行为数量（即可能性的空间），是把握大尺度特征的一个出发点，就像熵往往作为统计物理的出发点一样。因为系统的不同行为数量取决于细节的程度（如在较低分辨率下表现相同的行为，在较高分辨率下可能会不同），所以复杂度取决于尺度。组元之间的相互依赖会通过限制单个组元的自由度来减小系统在较小尺度上的复杂度，而同时通过多个组元一起协同工作来创建较大尺度上的复杂度。因此，对于由相同组元组成的系统，在小尺度和大尺度的行为数量之间存在根本的此消彼长（tradeoff）。这种尺度上和复杂度上的权衡关系到系统在适应性和效率之间的取舍抉择，适应性取决于系统对小尺度扰动的响应多样性，而效率则取决于系统可以运行的尺度（规模）。系统不存在必须具有某个复杂度的最优尺度，相反，最有效的系统需要在各个尺度上都与环境的复杂性相匹配。

在分析数据或创建组织结构时，传统标准方法往往低估了组元相关的重要性以及由这些相互依赖性引起的复杂度，它们将不再适用。在某种程度上，可以通过将数据分析或组织结构与系统中的自然划分进行匹配来缓解这些问题。由于复杂系统是行为发生在多个尺度上，因此对复杂系统成功的分析和组织本质上也必须是多尺度的。但是，即使配备了所有适当的信息和工具，人类对大多数复杂系统的理解也将不可避免地存在不足，系统具有不可预测性（with unpredictability being the best prediction）。为了面对这个现实，我们必须设计系统具有这样的能力，它能像进化过程一样

被不可预测性增强而不是削弱。这样的系统是灵活的，可以同时执行多个过程，并让这些过程在多尺度合作框架内相互竞争，让有效的行为在系统中得到复制传递。只有这种随着时间的流逝通过不断尝试和试错而变得越来越复杂的系统，才能达到可以解决超出人类理解能力极限的复杂问题的复杂度。

VI. 译者说明

本文¹⁴由陈清华翻译，沈忱和刘培源审校。陈清华工作于北京师范大学系统科学学院，现为 Brandeis 大学和 NECSI 访问学者¹⁵；沈忱现工作于 NECSI，为研究员；刘培源工作于集智俱乐部。感谢 Yaneer Bar-Yam 教授同意我们翻译此文，也感谢集智俱乐部协助的翻译和传播工作。

这篇文章浓缩了 NECSI 创始人及所长 Yaneer Bar-Yam 教授长期以来进行复杂性科学研究的心得。NECSI 的近期研究主要围绕物理、社会经济和生物三个大系统及其耦合展开，具体包括复杂网络，基于多

主体的建模，多尺度分析和复杂性，混乱和可预测性，演化，生态，生物多样性，利他主义，系统生物学，细胞反应，医疗保健，系统工程，谈判，军事冲突，种族暴力和国际发展等众多领域。NECSI 除了进行复杂性方面的研究外，还致力于面对公众的复杂性科学方面的宣传和培训。由 NECSI 主办的第十届国际复杂系统学术会议将于 2020 年 7 月 26 日-31 日在美国新罕布什尔州 (NH) 纳舒厄 (Nashua) 举行¹⁶，会议主页 <https://necsi.edu/iccs-2020>。更多其他信息请访问 <https://necsi.edu>。

为阅读方便，翻译过程中去掉了原文中少量难懂脚注，其他脚注内容被放入正文。为便于理解，译者补充了部分相关内容（脚注形式）以供参考。需要特别说明的是，Complexity 和 Scale 是文章中两个最重要的概念，但译者感觉其意义极为丰富，很难用某个具体的汉语词汇表达，译者在文字中大部分会将他们翻译为复杂度和尺度，在一些地方也会采用其他的词，如复杂性、规模等。为方便理解，一些重要的词汇或者句子附上了英文原文。原文致谢部分没有翻译。

-
- [1] Bar-Yam, Y. Complexity rising: From human beings to human civilization, a complexity profile. In *Encyclopedia of Life Support Systems* (EOLSS UNESCO Publishers, Oxford, UK, 2002).
- [2] Bar-Yam, Y. *Dynamics of complex systems* (Addison-Wesley, 1997).
- [3] Allen, B., Stacey, B. & Bar-Yam, Y. Multiscale information theory and the marginal utility of information. *Entropy* **19**, 273 (2017).
- [4] Bar-Yam, Y. *Making things work: Solving complex problems in a complex world* (Knowledge Press, 2004).
- [5] Bouchaud, J.-P. Crises and collective socio-economic phenomena: Simple models and challenges. *Journal of Statistical Physics* **151**, 567–606 (2013).
- [6] Bar-Yam, Y. Complexity of military conflict: Multi-scale complex systems analysis of littoral warfare. *Report to Chief of Naval Operations Strategic Studies Group* (2003).
- [7] Bar-Yam, Y. Improving the effectiveness of health care and public health: A multiscale complex systems analysis. *American Journal of Public Health* **96**, 459–466 (2006).
- [8] Canzoneri, M. B., Cumby, R. E. & Diba, B. T. How do monetary and fiscal policy interact in the European monetary union? Tech. Rep., National Bureau of Economic Research (2005).
- [9] Semmler, W. & Zhang, W. Monetary and fiscal policy interactions in the euro area. *Empirica* **31**, 205–227 (2004).
- [10] Alessandrini, P. & Fratianni, M. U. In the absence of fiscal union, the eurozone needs a more flexible monetary policy. *PSL Quarterly Review* **68** (2015).
- [11] Dan, H. The euro zone—between fiscal heterogeneity and monetary unity. *Transylvanian Review of Administrative Sciences* **43 E**, 68–84 (2014).
- [12] Drudi, F., Durré, A. & Mongelli, F. P. The interplay of economic reforms and monetary policy: The case of the

¹⁴ 我们翻译的版本来自于 <https://arxiv.org/abs/1912.05088>，文章正式发表在刊物《Complexity》上，引用方式：Alexander F. Siegenfeld, Yaneer Bar-Yam, An Introduction to Complex Systems Science and Its Applications, Complexity, vol. 2020, Article ID 6105872, 16 pages, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/6105872>。

¹⁵ NECSI 为新英格兰复杂系统研究所 (New England Complex Systems Institute)。本翻译工作得到中国国家留学基金及科技委“复杂体系的人机协同演化研究”等项目支持。

¹⁶ 该会议因为疫情关系实际为在线举行。

- eurozone. *JCMS: Journal of Common Market Studies* **50**, 881–898 (2012).
- [13] Davidson, A. W. & Bar-Yam, Y. Environmental complexity: Information for human-environment well-being. In Minai, A. A. & Bar-Yam, Y. (eds.) *Unifying Themes in Complex Systems*, 157–168 (Springer, 2006).
- [14] Nissani, M. Ten cheers for interdisciplinarity: The case for interdisciplinary knowledge and research. *The Social Science Journal* **34**, 201–216 (1997).
- [15] Brewer, G. D. The challenges of interdisciplinarity. *Policy Sciences* **32**, 327–337 (1999).
- [16] Feller, I. New organizations, old cultures: Strategy and implementation of interdisciplinary programs. *Research Evaluation* **11**, 109–116 (2002).
- [17] Rhoten, D. & Parker, A. Risks and rewards of an interdisciplinary research path. *Science* **306**, 2046–2046 (2004).
- [18] Lélé, S. & Norgaard, R. B. Practicing interdisciplinarity. *BioScience* **55**, 967–975 (2005).
- [19] Jacobs, J. A. & Frickel, S. Interdisciplinarity: A critical assessment. *Annual Review of Sociology* **35**, 43–65 (2009).
- [20] Janis, I. L. Groupthink. *IEEE Engineering Management Review* **36**, 36 (2008).
- [21] Trueman, B. Analyst forecasts and herding behavior. *The Review of Financial Studies* **7**, 97–124 (1994).
- [22] Pan, W., Altshuler, Y. & Pentland, A. Decoding social influence and the wisdom of the crowd in financial trading network. In *2012 International Conference on Privacy, Security, Risk and Trust and 2012 International Conference on Social Computing*, 203–209 (IEEE, 2012).
- [23] Bar-Yam, Y. From big data to important information. *Complexity* **21**, 73–98 (2016).
- [24] Kadanoff, L. P. More is the same; phase transitions and mean field theories. *Journal of Statistical Physics* **137**, 777 (2009).
- [25] Mora, T. & Bialek, W. Are biological systems poised at criticality? *Journal of Statistical Physics* **144**, 268–302 (2011).
- [26] Davies, J. B., Lluberas, R. & Shorrocks, A. F. Estimating the level and distribution of global wealth, 2000–2014. *Review of Income and Wealth* **63**, 731–759 (2017).
- [27] Rauch, E. M. & Bar-Yam, Y. Long-range interactions and evolutionary stability in a predator-prey system. *Physical Review E* **73**, 020903 (2006).
- [28] Taleb, N. N. How much data do you need? an operational, pre-asymptotic metric for fat-tailedness. *International Journal of Forecasting* **35**, 677–686 (2019).
- [29] Kardar, M. *Statistical Physics of Fields* (Cambridge University Press, 2007).
- [30] Lim, M., Metzler, R. & Bar-Yam, Y. Global pattern formation and ethnic/cultural violence. *Science* **317**, 1540–1544 (2007).
- [31] Schelling, T. C. Dynamic models of segregation. *Journal of Mathematical Sociology* **1**, 143–186 (1971).
- [32] Rutherford, A. *et al.* Good fences: The importance of setting boundaries for peaceful coexistence. *PLOS One* **9**, e95660 (2014).
- [33] Turing, A. M. Computing machinery and intelligence. In Epstein, R., Roberts, G. & Beber, G. (eds.) *Parsing the Turing Test*, 23–65 (Springer, 2009).
- [34] McDonnell, M. D. & Ward, L. M. The benefits of noise in neural systems: Bridging theory and experiment. *Nature Reviews Neuroscience* **12**, 415 (2011).
- [35] Goldenfeld, N. & Woese, C. Life is physics: Evolution as a collective phenomenon far from equilibrium. *Annual Review of Condensed Matter Physics* **2**, 375–399 (2011).
- [36] Taleb, N. N. *Antifragile: Things that gain from disorder* (Random House Incorporated, 2012).
- [37] Olszak, T. *et al.* Microbial exposure during early life has persistent effects on natural killer t cell function. *Science* **336**, 489–493 (2012).
- [38] Su, L. F., Kidd, B. A., Han, A., Kotzin, J. J. & Davis, M. M. Virus-specific cd4+ memory-phenotype t cells are abundant in unexposed adults. *Immunity* **38**, 373–383 (2013).
- [39] Seery, M. D. Resilience: A silver lining to experiencing adverse life events? *Current Directions in Psychological Science* **20**, 390–394 (2011).
- [40] Lukianoff, G. & Haidt, J. The coddling of the american mind. *The Atlantic* **316**, 42–52 (2015).
- [41] Bar-Yam, Y. Complexity theory in applied policy worldwide. *Modeling complex systems for public policies. Alves B, Furtado P, Sakowski M, Tóvolli M. Brasília: IPEA* (2015).
- [42] Gard-Murray, A. S. & Bar-Yam, Y. Complexity and the limits of revolution: What will happen to the arab spring? In Fellman, P. V., Bar-Yam, Y. & Minai, A. A. (eds.) *Conflict and Complexity*, 281–292 (Springer, 2015).
- [43] Bar-Yam, Y. When systems engineering fails—toward complex systems engineering. *Exchange* **16**, 1990–1993 (2003).
- [44] Werfel, J. & Bar-Yam, Y. The evolution of reproduc-

tive restraint through social communication. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **101**, 11019–11024

(2004).

[45] Wilson, D. S. *Does altruism exist?: Culture, genes, and the welfare of others* (Yale University Press, 2015).