

# 协同论在脑和行为研究方面的一些应用

庄建程 张侃

中国科学院心理研究所(北京 100012)

[摘要] 本文详细介绍了协同论的基本概念和方法, 在脑磁以及动作行为的自发相变和学习过程研究中的具体应用。重点介绍了协同动力学对人的运动机制的解释, 并用其中的数学方法讨论了一些新的实验结果。

关键词 协同论, 自组织, 相变, 耦合

协同论(synergetics)自创建以来<sup>[1][2]</sup>, 已与其它非线性科学理论耗散论和混沌学一起成为当今科学发展的新动力和新视野。它们在学科的各个分支都有广泛的应用, 包括在自然科学和社会科学。它也被很多心理学家应用于语言, 视觉, 运动和脑等方面研究的实验设计和结果分析<sup>[3]</sup>。

本质上, 任何线性系统不会有进化和质变的过程。协同论正是考虑了子系统之间以及系统内外的非线性相互作用, 建立起一些定律和概念(非稳定性、振荡和俘获等), 以此能够成功地描述自组织(self-organization, 复杂系统内模式的自发形成)等现象, 并使一些心理活动现象的数学表达和分析成为可能。它和其它非线性科学一样, 研究的是相(系统不同的内部组合状态)和相变(相之间的转变)。它首先解释了大量系统内部成分是如何建构成某种模式的; 其次解释了为什么会产生多种模式以适应环境条件; 另外解释了某一模式或结构如何在不同的环境条件下保持下去(稳定性), 它又如何调整以适应变化的内部和外部条件(适应性); 还有, 自组织的定律决定了一种模式如何从大量可能性中被选择出来。

其中Haken提出过俘获原理: 在临界点(相变点)附近, 系统变化伴随着自由度的变化。协同论一般处理以下典型形式的方程:  $\dot{q} = N(q, \text{parameters}, \text{noise})$ 。q 代表系统的多维态势矢量, 上点表示对时间的微商, N 是一个状态矢量的非线性函数, 它依赖于多个参量和系统的随机外力。

新的证据表明大脑基本上就是一个符合非线性动力学定律的能动的自组织系统。

## 1 对脑中自组织现象的研究

非线性系统的相变往往表现为一种跳跃过程。近年的一些 SQUID (超导量子干涉仪, superconducting quantum interference devices) 的研究正是在实践和理论上检验和分析模

拟这种相变过程<sup>[4][5][6]</sup>。

Kelso 等人的实验<sup>[6]</sup>是这样做的: 被试听到周期声音刺激时, 要求在两个相继的声音之间按一下按钮, 也就是切分这些信号。刺激呈现或重复频率从 1Hz 起每 10 次后增加 0.25Hz 直到 3Hz。在某一临界频率, 被试不再切分刺激信号, 而是自动转化为和刺激同步的模式。此过程脑的活动被置于左颞颞皮质外的 37- SQUID 系列仪器所记录。它能实时地记录下脑内树突细胞电流所产生磁场的空间分布。

他们从两个 SQUID 感受器所得到的数据可以看出, 在相变之前刺激和反应是反相的(相差 180 度, 切分模式), 在相变之后反应几乎和刺激同相。在此任务中脑的神经活动表现出很强的周期性, 特别是在相变前。

更有意义的是在刺激和以上脑信号的相差外, 同时看刺激和行为反应的相差。不管是脑还是行为在相差上都有明显的相变, 其曲线陡然上升到另一个平台并且在模式变化前不稳定地振荡。正如协同理论所预言, 模式的形成和转化都采取系统不稳定化的方式。

一种 Karuhunen- Loeve(KL) 方法被用于分析描述 37 个感受器采集的整个空间系列随着时间演化的过程, 它能够用少数几种模式描述脑信号的大部分变化。在此实验中用此方法提取了两个主要的频率模的空间函数。第一种模覆盖了全部信号的 60% 的能量, 是一种很强的周期性成分。在相变区域前后, 整个谱表现出质的变化。在相变前, 第一 KL 模以刺激(或反应)的频率振荡, 在相变发生时, 第二 KL 模成为较大的频率成分, 它的频率两倍于刺激频率。同时可以看到, 第一 KL 模表现出清晰的 180 度位相的转变。

总之, 尽管脑是如此复杂和多样性的结构, 但它仍然表现出相变、新模式的形成等特征, 并且可以用这些协同学的概念和方法加以描述。一个符合以上数据很好的理论模型请详见 Jirsa, Friedrich, Haken & Kelso 1994 年的论文<sup>[7]</sup>。

## 2 手运动模式中自组织现象的研究

协同论的基本定律第一次是在研究人的协调运动时得到应用的<sup>[8][9]</sup>, 最早的是关于手的运动模式的实验研究<sup>[10][11]</sup>。

要求被试有节奏地以反相方式移动两手的食指, (两手指同时向左右一样的方向, 如果两手指同时向相反方向, 称为同相), 不断增加运动的频率, 到某一临界频率后, 反相方式自动转化为同相方式。但当频率相反地减少时, 从同相到反相这样的转变不会发生。同样当被试一开始就以同相方式运动, 即使运动频率增加, 它也不会转化为反相方式。

在这个简单的实验中, 包含了自组织现象基本的非线性特征, 如多稳定点、从一个有序态到另一有序态的相变、以及滞后记忆等等。

一种能反映所有的实验结果的最简单的协同动力学系统是:

$$\ddot{\theta} = -a \sin \theta - 2b \sin 2\theta$$

其中  $\theta$  是两个相互作用的节律运动部分的相差,  $a$  是两部分之间的耦合参量, 第二项是两倍频于第一项的相互作用部分,  $b/a$  是一个控制参量。以上这个动力学也可以直观成一个物体在一个势能函数  $V(\theta)$  形状的地势中运动的情景。所以一个同等的系统公式也可写为:

$$\ddot{\theta} = -\frac{dV(\theta)}{d\theta} \text{ 并且 } V(\theta) = -a \cos \theta - b \cos 2\theta$$

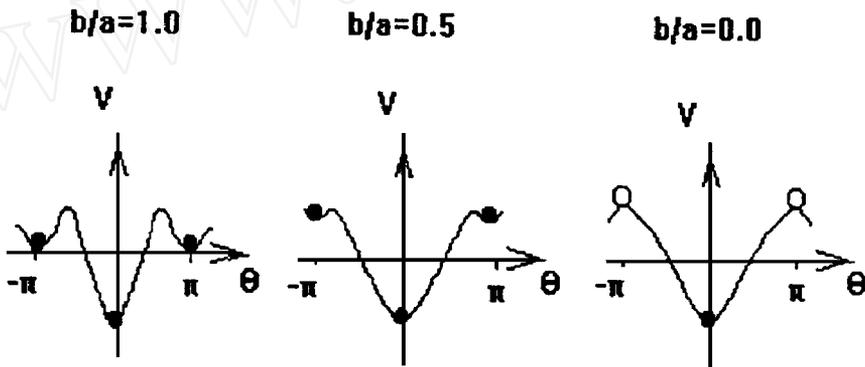
以上被称为 HKB 动力学系统。它包含了以上实验中所观察到的事实。

首先, 它有两个稳定点的吸引子,  $\theta = 0$  (同相) 和  $\theta = \pm \pi$  (反相)。当比率  $b/a$  较大时, 两个稳定点同时存在, 表现出双稳定性。这是实验中被试的初始态。

其次, 当运动频率增加时, 第一耦合项 ( $a$ ) 变大, 比率  $b/a$  减小, 在  $\pi$  处的稳定点将失去稳定性, 任何小起伏都会使系统滑入仅剩的  $\theta = 0$  的稳定点。在自发的相变之后只有  $\theta = 0$  的模式是稳定的。

最后, 当  $b/a$  变化的方向相反时, 系统会停留在同相的吸引子中。滞后是由于  $\theta = 0$  的稳定点总是稳定的事实引起的。

请看下图:



Kelso 于 1990 年曾做过一个两手 90 度相等的学习任务实验<sup>[12]</sup>。要求被试按左右两个声调的刺激分别运动左右食指, 左右两个声调间相差为 90 度。被试共做五天的练习, 每次练习后, 给他完成情况好坏的反馈。每天的练习前和练习后, 都要做 0 到 180 度的扫描测试, 每 15 度做一次, 形式与练习相似, 相差为 0 到 180 度之间 15 度的倍数, 没有反馈。一周后要求被试再来做一次扫描测试。

结果发现, 被试的初始态是 0 和 180 度相差的双稳态。做 0 和  $\pi$  相邻角度相差的测试时, 被试实际完成的相差明显向这两个角度吸引 (偏向), 而这两个角度的完成误差最小, 几乎为 0。这说明相差为 0 和  $\pi$  时是两个稳定点。

但是到了第二天或第三天, 这个图象发生了质变。可以看到原来不稳定的 90 度相差变成新的稳定点。此角度下完成的误差接近于 0, 其相邻角度区域的实际完成相差从两边向它吸引。并且原 0 和 180 度的稳定性开始消失。新的模式一直保持下去。

当被试一周后重复测试时, 仍然是 90 度单一稳定点的模式。由此证明, 此种运动的学习过程是新稳定点形成的相变过程。

上面的协同动力学的公式也解释了这个实验的结果。被试的注意  $I$  作为一项被引入公式, 使上述公式变为  $a \sin(\theta - \theta)$ , 在  $\theta$  处形成单一的稳定点。详细过程请见以上作者的论文。

### 3 协同动力学对一些新实验结果的解释

既然动作的学习是一种相变, 根据协同学, 系统内子系统之间的非线性耦合对这种相变起着非常重要的作用。最近的一个实验<sup>[13]</sup>研究了学习过程中这种耦合的变化。

要求被试学习双手画图——左手画圆同时右手画线的任务, 并且双手画图的频率之比为 1/2 或者 2/3。观察他练习过程中双手频率之比的变化, 可以看出系统是从练习前的模式(没有任何练习的、已完成练习的“1/2”或“2/3”)转变为练习要求的模式。同时测量他左手画圆的方向比, 即圆的 X 轴方向大小除上 Y 轴方向大小, 这个参数反映了双手之间的耦合。因为当左右手相互作用比较大时, 左手画的圆将更像右手 X 方向画的线, 其方向比更大。当左右手干扰较小时, 左手画的圆更接近标准圆, 方向比更小而接近于 1。实验结果表明练习后比较练习前, 双手间耦合明显减小。

根据以上协同动力学公式, 我们采用主要的第一项,

$$\dot{\theta} = c \sin \theta$$

其中  $c > 0$  是耦合强度。在这个实验中, 只有双手速度差这个变量, 也就是只考虑相差的时间变化率,

$$\dot{\theta} = c \cos \theta \cdot \theta$$

因为  $\cos \theta = 1 - \frac{\theta^2}{2} + \frac{\theta^4}{24} - \dots$  并且从  $\dot{\theta} = c \sin \theta$  的第一近似形式  $\dot{\theta} = c\theta$  得到  $\theta = \theta/c$ , 从而推导出:

$$\theta = -c\theta + \frac{c}{2}\theta(\theta/c)^2 - \frac{c}{24}\theta(\theta/c)^4 + \dots$$

这个动力学系统的势能函数为:

$$V(\theta) = \frac{1}{2}c \cdot \theta^2 - \frac{1}{8c} \cdot \theta^4 + \frac{1}{144c^3}\theta^6 \dots$$

如果双手的耦合  $C$  很大时, 第一项很大, 和其它项比较成为最主要的部分。

$$V(\theta) = \frac{1}{2}c \cdot \theta^2$$

此时系统只有一个稳定点, 在  $\theta = 0$  处, 这就是频率比为 1/1 的情况(实际上另外的稳定点在离原点很远的地方)。在学习 2/1 或 3/2 过程中, 耦合  $C$  变得更小, 第二项和第三项也变得同等重要起来。从势能函数的形状可以看出, 新的多重稳定点的形成, 与实验结果中新的学习模式出现相一致。从而说明了非线性耦合在此运动学习过程中的作用。

用同样这个动力学公式还可以解释较早的一个实验的结果<sup>[14]</sup>。这个实验测量了被试分别完成频率比为 1/1, 1/2, 2/3 时, 左手画圆右手画线任务的方向比, 结果发现 1/1 时耦合最大, 1/2 其次, 2/3 最小。

利用上面近似到第三项的动力学公式, 我们得到除了 1/1 在原点的稳定点外, 另外的稳定点在

$$\theta = \pm (6 + 2\sqrt{3})C$$

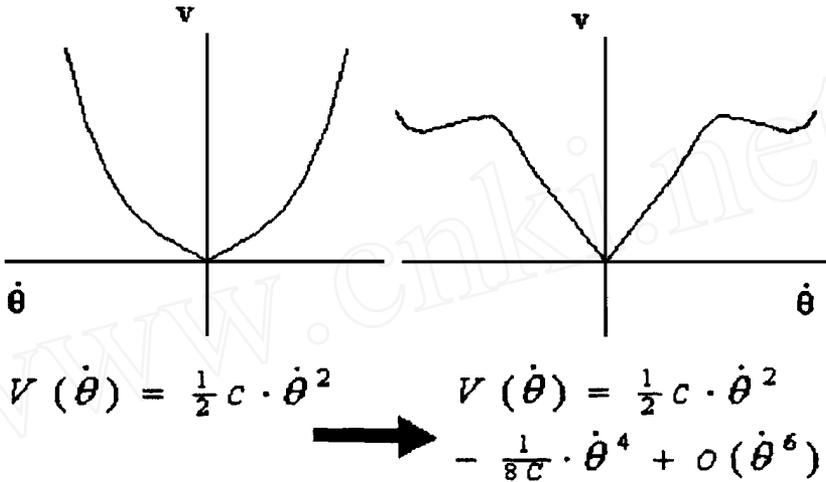
频率为 1/1 时耦合最大(上面已经解释过)。当左手画圆频率为 2Hz 时, 有:

$$|\theta_{1/2}| = 4\pi/\text{second} > |\theta_{2/3}| = 2\pi/\text{second}$$

所以耦合  $C$  也是频率比为 1/2 时大于 2/3 的情形。

由此证明了以上动力学系统运用的正确性。并借此说明协同论的概念和方法在心理学

中有着深刻和广泛的应用。



## 参考文献

- [1]Haken H. Lecture at Stuttgart University, 1969.
- [2]Haken H. Synergetics: An Introduction. Berlin: Springer, 1977.
- [3]Haken H, Stadler M. Synergetics of Cognition. Berlin: Springer, 1990.
- [4]Kelso JAS, Bressler SL, Buchanan S, DeGuzman GC, Ding M, Fuchs A, Holroyd T. Cooperative and critical phenomena in the human brain revealed by multiple SQUIDS. In: D Duke, W Pritchard ed. Measuring Chaos in the Human Brain. Singapore: World Scientific, 1991. 97- 112.
- [5]Kelso JAS, Bressler SL, Buchanan S, DeGuzman GC, Ding M, Fuchs A, Holroyd T. A phase transition in human brain and behavior. Physics Letters, 1992, A169: 134- 144.
- [6]Fuchs A, Kelso JAS. Pattern formation in the human brain during qualitative changes in sensorimotor coordination. World Congress on the Neural Networks, 1993, (4): 476- 479.
- [7]Jirsa V K, Friedrich R, Haken H, Kelso JAS. A theoretical model of phase transition in the human brain. Biological Cybernetics, 1994, 71: 27- 35.
- [8]Haken H, Kelso JAS, Bunz H. A theoretical model of phase transitions in human hand movements. Biological Cybernetics, 1985, 51: 347- 356.
- [9]Schoner G, Haken H, Kelso JAS. A stochastic theory of phase transitions in the human hand movement. Biological Cybernetics, 1986, 53: 442- 452.
- [10]Kelso JAS. On the oscillatory basis of movement. Bulletin of the Psychonomic Society, 1981, 18: 63.
- [11]Kelso JAS. Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. American Journal of Psychology: Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, 1984, 15: 1000- 1004.
- [12]Kelso, JAS. Phase transition: Foundations of Behavior. In: H Haken, M Stadler ed. Synergetics of Cognition. Berlin: Springer, 1990.
- [13]Zhuang J C, Chan T. Coupling in the Dynamics of Learning (preprint), 1996.
- [14]Chan T, Chan K. Effect of frequency ratio and environmental information on spatial coupling: a study of attention. Ecological psychology, 1995, 7(2): 125- 144.