

第一篇

基 础

| | |
|-------------------------------|----|
| 1. 引论 | 3 |
| 1.1 生物系统是复杂系统 | 3 |
| 1.2 协同学的目的 | 5 |
| 1.3 作为复杂系统的大脑 | 6 |
| 1.4 大脑功能的传统解释与协同学解释 | 7 |
| 2. 探索大脑 | 9 |
| 2.1 黑箱方法 | 9 |
| 2.2 打开黑箱 | 10 |
| 2.3 宏观层次的结构与功能 | 12 |
| 2.4 无创方法 | 13 |
| 2.4.1 X线体层照相术: | 13 |
| 2.4.2 脑电图 (EEG)..... | 14 |
| 2.4.3 脑磁图 (MEG) | 16 |
| 2.4.4 正电子发射 X线体层照相术(PET)..... | 19 |
| 2.4.5 磁共振成像(MRI)..... | 21 |
| 2.5 微观层次的结构与功能 | 26 |
| 2.6 学习与记忆 | 29 |
| 3. 模拟大脑的首次尝试: 大脑作为动力学系统 | 31 |
| 3.1 什么是动力学系统? | 31 |
| 3.2 大脑作为动力学系统 | 33 |
| 4. 协同学基本概念 I 序参量与役使原理 | 35 |
| 4.1 决定时间演化的因素 | 35 |
| 4.2 解的对策 | 39 |
| 4.2.1 不稳定性、序参量与役使原理 | 39 |
| 4.2.2 激光示例或湖上小舟 | 45 |

| | | |
|-------|-------------------|----|
| 4.2.3 | 役使原理 | 47 |
| 4.2.4 | 序参量的中心作用 | 50 |
| 4.3 | 自组织与热力学第二定律 | 51 |
| 5. | 序参量动力学 | 53 |
| 5.1 | 单序参量 | 53 |
| 5.2 | 双序参量 | 58 |
| 5.3 | 三个及三个以上序参量 | 64 |
| 5.4 | 序参量与范式* | 65 |

1. 引论

1.1 生物系统是复杂系统

所有的生物系统都是高度复杂的系统。绝大多数的生物系统，是由大量细胞组成的，而细胞本身亦是复杂系统。此外，这些系统表现出复杂的行为。动物最显著的特点之一是许多细胞的协作，其表现为，比如在行进及其他运动中多种肌肉的协调。因此，在 19 世纪与 20 世纪之交，著名生理学家谢林顿(Sherrington)创造了术语：肌肉的协同作用(synergy of muscles)。在呼吸、心脏搏动和血液循环中，也会观察到如此高度的协调。在更高层次的人脑中，许多细胞以有目的的方式协作，产生知觉、思考、言说、书写以及包括情感在内的其他现象。在所有这些情况中，在宏观层次上便涌现出新的属性，而这种属性，在微观层次的各个细胞中是不存在的。生物学的最大难题之一无疑是，伴随着微观层次和宏观层次之间联系的这种高度的整合。图 1.1 可以说明，我们大脑的整合功能有多么强。这是阿钦博尔多(Giuseppe Arcimboldo)的一幅油画。乍一看，我们以为是一张脸，但细细看来，却显示为各种水果和蔬菜的排布图。我们识别为一张面孔并没有其他原因，而是忽视了它的各个部分！这个例子可作为下面的隐喻，即所研究的各个部分主要是指神经元，而不指像水果那样的东西。



图 1.1 阿钦博尔多 (1527 ~ 1593) 的油画

怎样产生整合呢？在早期，我们会看到说明以下思想的图画：在人脑内部有一个人起到操纵或组织的作用。在 20 世纪，著名神经生理学家埃克尔斯（Eccles）与哲学家波普尔（Popper）合写了一本《自我与其大脑》（1977），在某种意义上，他们把那个自我看作程序员，而把大脑看作计算机。在我的书中，我将采用完全不同的看法。我并不认为，那种整合是由组织中心、程序员或者由某种计算机程序产生的，我将提出自组织概念。协同学可以被看作最先进的自组织理论，我想要研究如何把这个理论应用到见于生物系统的种种现象上，尤其是那些涉及到脑活动、行为和认知的问题。我将把生物系统看作一个以物理学定律为基础的巨系统（giant system）。但是，我们将看到，生物学定律并不能从若干物理学定律唯一地推导出来。存在着与新属性涌现（emergence）相关的其他辅助定律。由此可见，协同学原本并不与物理学相矛盾；但在另一方面，千万不要把协同学与任何物理体系相等同。协同学是一门学科，自组织是一种现象。

1.2 协同学的目的

复杂系统往往由大量以复杂方式相互作用的各个部分、要素或子系统组成。解决这类系统的一个经典处方，是由笛卡尔（Descartes）提出的。按照他的方法，我们要把复杂系统分解为越来越基本的成分，一直分解到尚能了解的基元层次。很明显，分子生物学走的就是这条路线。另一方面，通过系统诸要素的相互作用，在宏观层次产生了新的定性特征。因此，在我们了解微观层次与宏观层次之间的关系时，这里无疑遗留了一条巨大的鸿沟。协同学的目的，是为这条鸿沟架设桥梁。我们同时将会看到，在大多数情况下，结构不是由一个会

编织的手产生出来的，而是由系统自身产生的。这就是我们将谈论自组织的原因。我们所称的笛卡尔方法，还存在其他难点。描述各个部分所需的极其大量的信息，是谁也无法搜集到的。因而，我们必须建立压缩信息的适当方法。这个目标如何实现的一个简单例子，是我们对温度的感觉。我们知道，气体（比如空气）是由无数各种各样的分子组成的，但是，我们并不在意各个分子的运动。恰恰相反，我们从分子运动的整体去认识时，仅仅感觉到某种温度。同理，在大多数情况下，单个字词却代表着整个种类、范畴、物体或复杂活动。

我们能否建立一种自身能有效压缩信息的普遍理论呢？我们将会看到，这种信息压缩发生在当系统的宏观状态定性改变时。在非生命世界，存在着许多被称为相变的骤然变化。举几个冷却过程的例子：液态的水凝结为固态的冰，或磁体的磁化，或超导性的出现。我们将会看到，生物学亦有许多类似的定性变化，尽管处在远为复杂的层次。

1.3 作为复杂系统的大脑

人脑约由 1000 亿 (10^{11}) 个神经元组成，而每个神经元与其他神经元的连接多达 10^4 条。此外，每个神经元本身也是一个错综复杂的系统。这些神经元以高度复杂的方式联系在一起。为了说明神经元数量之巨大，让我们把它们分开，把 100 个神经元装进一个套筒，比如说 1 立方厘米的套筒。于是就是一间长、宽、高各 10 米的房屋才能装下所有的套筒。

对脑、行为和认知的科学研究有许多方面，平心而论，这些方面是无穷无尽的。因此，我们要有目的地提出问题。这些问题的解决，取决于我们的科学研究水平，而科学研究本身又由实验技术、理论概念以及数学方法所决定。然而除此之

外 还取决于爱好、时尚、我们以往的训练等。从大脑极其复杂的特点看，我们必须寻找模型、范例或者隐喻。然而，我们在什么层次以什么样的确切意义使用隐喻呢？我们将把这个问题留在下面讨论。

1.4 大脑功能的传统解释与协同学解释

为了使读者意识到协同学见解与传统方法的差别，我们只好提前介绍本书的一些基本结果。在表 1.1 的左栏列出了传统的概念，而相应的协同学概念列在右栏。

表 1.1 大脑功能的传统解释与协同学解释

| 传统解释 | 协同学解释 |
|-------|------------|
| 细胞 | 细胞网络 |
| 个体 | 整体 |
| 祖母细胞 | 细胞集体 |
| 引导细胞 | 细胞集体 |
| 定域的 | 非定域的 |
| 兴奋印迹 | 分布信息 |
| 编程计算机 | 自组织的 |
| 算法的 | 自组织的 |
| 序贯的 | 并行和序贯的 |
| 确定性的 | 确定性事件和偶然事件 |
| 稳定的 | 趋于不稳定点 |

我们比较仔细地考察一下表 1.1 的内容——逐行对照它的左栏和右栏的解释。大脑功能的传统实验和理论研究以单个细胞为依据；而协同学的注意力集中在整个细胞网络的活动中。因此，我们不研究单个细胞而考查整体。当我们以传统理论讨论祖母细胞问题时，便可最清楚地看出这两种观点之间的差别。按照传统观念，我们识别我们的祖母，是通过我们大脑中的一个可辨别她的细胞实现的。在协同学方法中，

模式识别由一个细胞集体的活动完成。与此类似，传统方法认为，运动的引导是由引导细胞引起的；而协同学认为，它是一个细胞集体活动的结局。十分明显，在传统方法中，活动是严格定域的；但它们现在变为非定域的——可以分布在相当延展的大脑区域上。按照这种观点，我们必须寻找分布信息以代替兴奋印迹。（这些观点已经被采用了，尤其被联系论采用 参看 18.4 节。）

当我们涉及受到广泛支持的论点——大脑作为以算法为基础的编程计算机而运作时，我们与其他学派的思想之间便出现了基本的差异。我们认为，大脑是通过自组织作用的，我们可以（也可以不）引用算法。在传统方法中，输入信息是序贯过程。在新方法中，输入信息主要是并行过程。编程计算机的概念意味着，整个系统以确定性方式工作。在本书中我们将会看到，生物系统的活动是由确定性事件和偶然事件两者共同确定的。进一步的基本差别表现在对稳定性的看法上。在传统方法中，假定大脑处于稳定状态，这是许多关于大脑功能实验的基础。我们将提供大脑趋于不稳定点的证据。

我期望表 1.1 说明，沿着这些新思路（尤其要注重实验证据）继续探索是值得的，我们要在我们对大脑功能的理论认识中提出这种变动。

2. 探索大脑

在这一章，我将简要介绍大脑研究中的几种最突出的实验方法。尤其要详细介绍各种物理方法。

2.1 黑箱方法

在电子和无线电工程中，黑箱方法是众所周知的。在许多情况下，当把各个部件装配在一起构造一个新的装置时，工程师只需了解各个部件的某些特性就足够了，即输入和输出之间的关系。在这种方法中，各个部件的内部结构无关紧要。同理，可以把人或动物看作一个黑箱，以特定方式对特定刺激做出反应。换句话说，在这种方法中研究的是行为。主要由斯金纳 (Skinner) 提出了这种方法论——即所谓行为主义，例如，他们建造了几个专门的笼子，研究动物对刺激（比如食物或处罚）的反应。在这种方法中，完全忽视了大脑的内部状态，更有甚者，若询问关于这种状态的问题，就被看成是不懂科学。这对不能说话的动物而言似乎是合理的，而对能够进行语言交流的人来说，我们可采用一种便利的重要工具，即内省。实际上，如今事情亦在变化，一些研究还在进行，以便透彻了解动物的思维状态。总之，在本书的后一部分，读者将会看到，尽管对不同行为的研究仍然是一种重要手段，但行为主义本身并不是现代科学研究的焦点。我们介绍几个这种行为研究的例子。人和动物的运动，是由运动科学这门学科研究

的。这类研究也是体育运动科学的兴趣所在。心理学和精神病学，在思维层次研究人的行为。在某种意义上，语言学的语言研究也可看作一种黑箱方法，因为它与大脑如何产生语言无关，而只与这种思维创作的抽象结构有关。可以把对视知觉和听知觉的心理研究看作外部世界与内部世界之间的某种桥梁，它的进展有赖于我们阐释相应实验结果的方式，即依赖于我们曾引用的内省的程度。

2.2 打开黑箱

当我们打开颅骨时，就看到灰白色的物质，它的形状使人骤然想起核桃仁（参见图 2.1 和图 2.2）。甚至在显微镜下也看不出多少细节。然而情况会发生变化，只要使用某种染色剂——由高尔基（Golgi）首先发明。然后，在显微镜下便可显示出含有许多节点的网状组织。这些节点是各种形状的神经元。例如，图 2.3a 中的神经元呈锥形，被称为锥体细胞。另一种细胞根据其发现者而被称为浦肯野（Purkinje）细胞。现

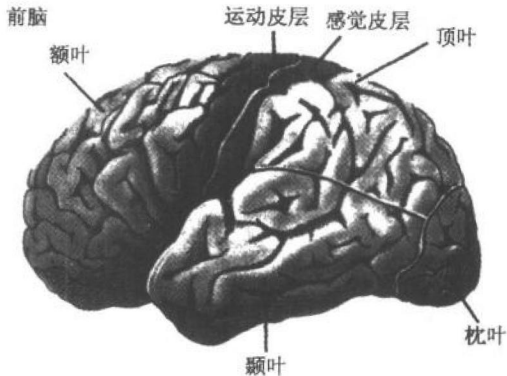


图 2.1 由左侧观察到的大脑

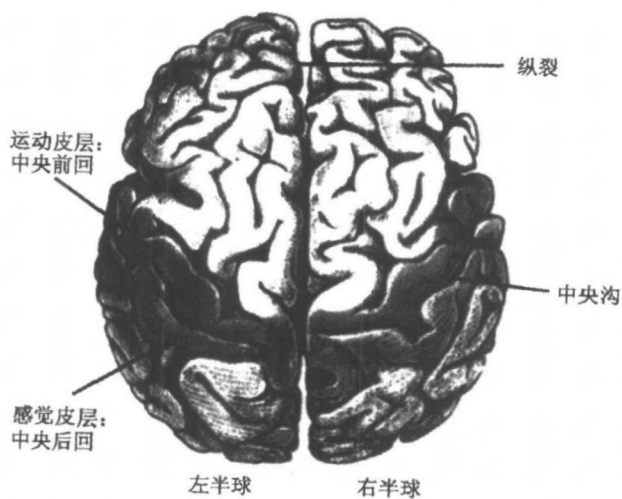


图 2.2 由上方观察到的大脑

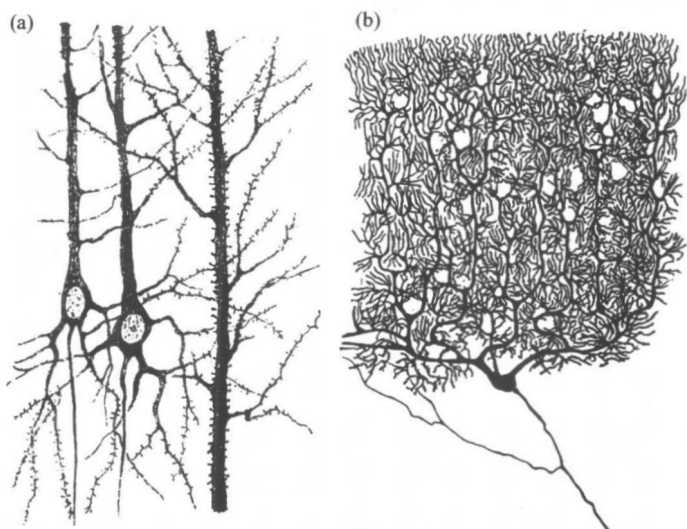


图 2.3 (a) 锥体细胞 (b) 浦肯野细胞 (引自 Bullock et al., 1977)

在已知的不同形态的神经元约有 20 种之多。

2.3 宏观层次的结构与功能

在对大脑的研究过程中发现，特定的功能可能源于大脑的某一区域。（我们应说明，从一开始就会有区域之间的功能移动，使得大脑的这种功能映射发生变化，例如，当大脑受损伤和出现某种程度的恢复时。）大脑的损伤和撞击是判明这种功能区域的头一个指示器。例如，撞击大脑的左半球会引起身体右侧瘫痪，比如右腿、右手臂和右手的瘫痪。与此类似，撞击大脑的右半球会引起身体左侧部位的瘫痪。布罗卡 (Brocca) 于 1861 年发现，撞击左半球一定的区域会引起语言障碍。后来 沃尼克 (Wernicke) 于 1874 年发现 接近布罗卡中心的另一个中心也支配语言。在布罗卡中心损伤时，人仍然能够说出有意义的语句，但不符合语法规则。另一方面，如果损伤了沃尼克中心，人能够说出似乎正确的语句，但是毫无意义。另一个重要发现，是由日本内科医生井上 (Inoue) 在 1904 ~ 1905 年的日俄战争期间得到的。俄国制造了一种能使子弹获得较大动量的新式步枪。这种子弹击中日本士兵便会穿透他们的颅骨。虽然在多数情况下子弹并没有击中这些士兵的眼睛，但他们仍然变成了瞎子。井上由此得出结论——大脑的后部负责视知觉。

我们现在简短地介绍一下大脑两半球的作用（参看图 2.2）。这两个半球由若干神经纤维束连接起来，我们把这种桥梁称为胼胝体。把胼胝体部分或整体切断时发现，肯定会对癫痫发作有良性作用。另一方面，这种手术具有相当明显的副作用。斯佩里 (Sperry) 研究了这类分裂脑患者的行为，由此发现了一些值得注意的结果。为了解释清楚，我们提醒读

者，右视野映射到左脑，而左视野映射到右脑。于是通过对视野的适当排布，我们可以激活大脑的左半部或右半部。当把物体置于左视野时，分裂脑患者不能有意识地视物，也不能叫出该物体的名称。但他（或她）可以毫不费力地摆弄这些物体。另一方面，当把这些物体放在右视野时，患者能正确地叫出物体的名称。确切地说，左半球负责语言和序贯过程，而右半球处理各种复杂情况（听音乐、视觉想象等）。然而研究表明，这种区分并不十分严格。

在后面几节中，我们将介绍几种无创方法的研究。

2.4 无创方法

在这一节中，我们将介绍几种物理学方法，使得研究者可以探测大脑的各种性质。这些方法是 X 线体层照相术、脑电图、脑磁图、磁共振成像和正电子发射体层照相术。以下将阐述这几种方法。

2.4.1 X 线体层照相术

自从伦琴 (Röntgen) 发现 X 射线能够穿透生物组织以来，X 射线成为医学诊断的一种重要工具。计算机辅助 X 线体层照相术 (CT) 的成功，使 X 射线的应用技术向前迈出了一大步。库尔麦克 (Kulmack) 和豪恩斯菲尔德 (Hounsfield) 各自独立地创立了计算机辅助 X 线体层照相术的原理。用这种方法，X 射线可以从一系列不同角度照射生物体，比如大脑。所得到的图象经计算机处理，可以构造三维图象。由此可以判明脑中的肿瘤情况；它不仅可以确定肿瘤的位置，而且可以显示肿瘤的形状。

2.4.2 脑电图 (EEG)

对大脑电场的实验研究已有很长的历史了。早在 1875 年卡顿 (Caton) 曾经说过：“Bringt man Elektroden an Zwei Punkten der Oberfläche des Gehirns... an, so fließen schwache Ströme wechselnder Polarität durch den Verstärker.”* 但是直到 1929 年,伯杰 (Berger)才引入对人的脑电图研究。

在测量脑电图时,把一个或几个电极放置在颅骨上,这些电极与一个参考电极(例如,也固定在颅骨上)之间的电势便测量为时间的函数。根据不同的思维活动,便绘出完全不同形式的曲线。为了进一步分析(至少在一般情况下),接着对这些曲线进行频率一滤波处理,由此探测到的只是某种频带。当人处于闭目休息的状态时,便出现 10Hz 左右的所谓 α 波。在睡眠状态,不同的相可加以区分。其中的一种与梦以及快速眼动(以下简称 REM)相联系。当使用几个电极时(图 2.4)我们可以考查时空模式。图 2.5 表示对应于各个电极的

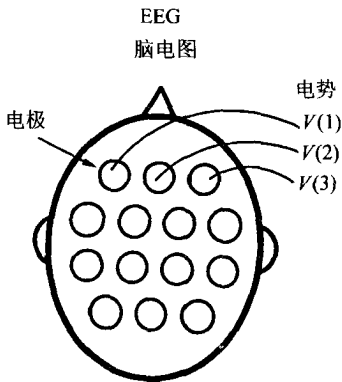


图 2.4 电极在脑颅上的位置

如果将电极置于大脑表面的两点……,振荡极的弱电流便流过放大器。

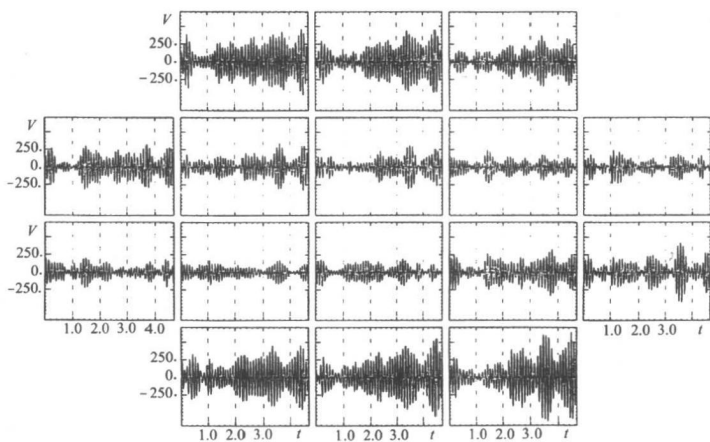


图 2.5 每个电极与参考电极之间电势差的时间关系曲线。方框位置与脑颅上电极位置相对应。[引自莱曼 (Lehmann) 私人通信]

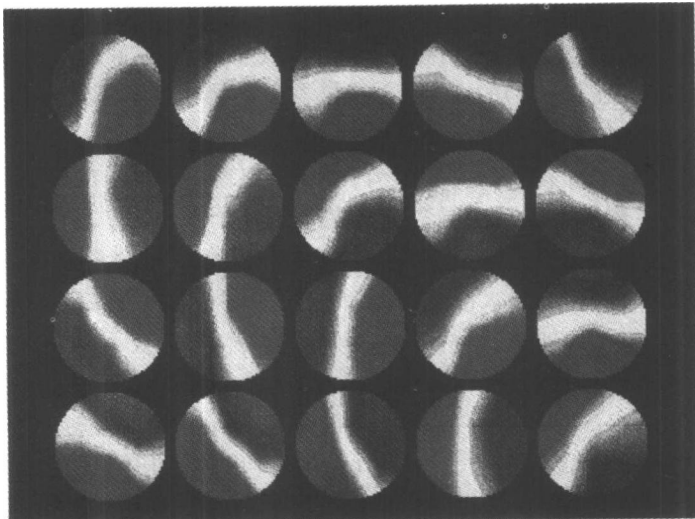


图 2.6 由图 2.5 所示的电极记录重构的时空信号。第一排的时间从左到右,第二排亦是从左到右,依次类推(引自 Fuchs et al., 1987)

时间序列，这里方框的排布对应于电极在脑颅上的排布位置。通过取各个方框在同一时刻的活动，我们便可构造各个电极位置处局部活动的图象。在这些位置之间作内插，我们得到图 2.6 中的一个圆环。对一系列时刻重复这个步骤，我们得到图 2.6，它显示随着时间推移的空间模式演化。

一批研究者 [比如苏黎世的莱曼 Lehmann) 和维也纳的佩切(Petsche)] 研究了大脑思维活动与高电活动 (high electric activity) 位置之间的关系。根据莱曼的研究结果，一个人的抽象思维活动，或者有具体对象的活动，可以表示在不同的中心。在本书的后一部分，我们将分析几种脑电图模式以及它们尤其是与混沌过程的关系。

2.4.3 脑磁图 (MEG)

用被称为 SQUID 的物理仪器，甚至能够测量非常弱的磁场。SQUID 一词是超导量子干涉器件 (superconducting quantum interference device) 的缩写；这种仪器以约瑟夫森效应 (Josephson effect) 为基础。我们介绍这种研究的一个最新例子。(详见第十五章。在这里有 37 个 SQUID 排布在头皮上的一个区域——覆盖了运动皮层和感觉皮层的各个部位 (图 2.7)。在这些由凯尔索及其合作者从事的实验中，给被试者播放一种周期声音信号，要求被试者的手指跟随信号在相继信号之间发出轻敲。最明显的结果是，提高信号频率时，人不是保持在切分状态，而是突然转换为同步状态，其结果示于图 2.8。脑磁图能探测出从一种行为方式到另一种行为方式的转变吗？图 2.9 表示转变前各个 SQUID 位置产生信号的时间序列；而图 2.10 表示转变后相应信号的时间序列。乍看起来，解释这些数据似乎很难，但是，我们将在第十五章说明如何详细地分析它们，它们极好地反映了上述转变。

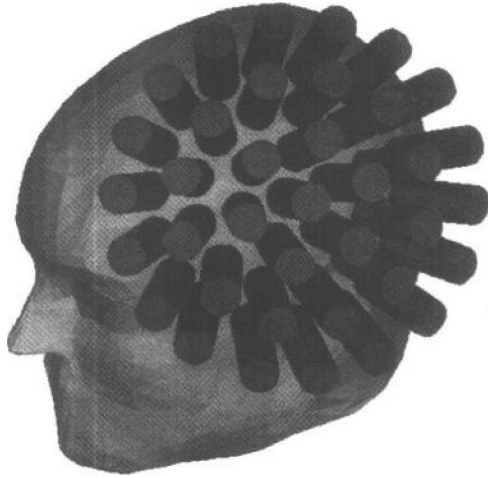


图 2.7 在凯尔索实验中，SQUID 探测器的排布。
 (引自 Kelso et al., 1992)

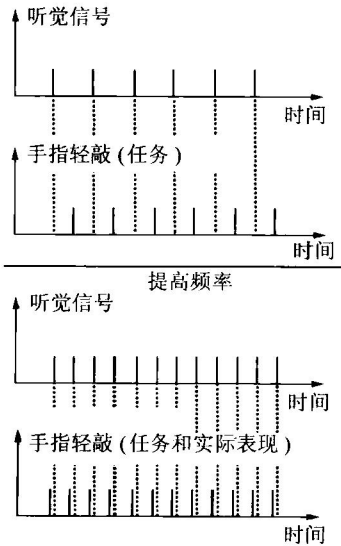


图 2.8 上部：手指轻敲出现在相继信号之间。
 下部：若提高听觉信号频率，手指轻敲便同步。虚线和实线之间的移动，正是该图要表明的。实际上，手指轻敲的线条数与听觉信号相同。