

# 协同作用学导論

(上册一)

(西 德) H·哈 肯 著

西 北 大 学 張 纪 岳 译  
大 连 铁 道 学 院 郭 治 安  
江 仁 寿 审 校

一 九 八 〇 年 七 月

## 說在前面

“上册”是在教学任务相当紧张的情况下翻译的。由于水平低、时间紧，来不及仔细琢磨和加工。一定存在不少缺点，甚至错误。肯请同志们批评指正。

在此，向江老表示衷心的感谢，他在年老繁忙的情况下审核完稿前，对翻译中出现的错误，悉心指导，使译者受益匪浅。感到在理论基础的薄弱，对某些问题的理解，由于学习期间的翻译，对某些问题的理解，由于学习期间的翻译，对某些问题的理解，由于学习期间的翻译，我们先将前六章做为单册印出，供同志们参考。

译者

一九八〇.七.廿于大连

译者

一九八〇.七  
于大连

# 协同作用学导论

## 目 录

### 第一章 目的

- 1.1 有序和无序：一些典型的现象
- 1.2 一些典型的问题与困难
- 1.3 从何处着手

### 第二章 概率

- 2.1 我们的研究对象：取样空间
- 2.2 无规变量
- 2.3 概 率
- 2.4 分 布
- 2.5 连续无规变量
- 2.6 联合概率
- 2.7 数学期望  $E(x)$  和矩
- 2.8 条件概率
- 2.9 独立和相关无规变量
- 2.10\* 生成函数和特性函数
- 2.11 特殊概率分布：二项式分布

- 2·12 泊松分布
- 2·13 正态分布(高斯分布)
- 2·14 斯特灵公式
- 2·15<sup>\*</sup> 中心极限定理

## 第三章 信息

- 3·1 一些基本概念
- 3·2<sup>\*</sup> 信息增益；一个说明性的推导
- 3·3 信息的嫡和约束
- 3·4 物理学的例子；热力学
- 3·5<sup>\*</sup> 不可逆热力学入门
- 3·6 嫡——统计力学的灾难吗？

## 第四章 偶然性

- 4·1 布朗运动的模型
- 4·2 无规行走模型及其主方程
- 4·3<sup>\*</sup> 联合概率与路径、马尔可夫过程、卡卜曼—郭尔莫哥洛夫方程、路径积分
- 4·4<sup>\*</sup> 如何用联合概率、矩、特征函数、高斯过程
- 4·5 主方程
- 4·6 细致平衡下系统主方程的严格定态解
- 4·7<sup>\*</sup> 细致平衡下的主方程、对称化

- 4 · 8<sup>\*</sup> 求解主方程的克希荷夫方法
- 4 · 9<sup>\*</sup> 有关求解主方程的几个定理
- 4 · 10 无规过程的意义，定态、涨落、回归时间
- 4 · 11<sup>\*</sup> 主方程与不可逆热力学的极限

## 第五章 必然性

- 5 · 1 动力学过程
- 5 · 2<sup>\*</sup> 临界点和相平面上的轨道、二次极限环
- 5 · 3<sup>\*</sup> 稳定性
- 5 · 4 关于分支与稳定性的例子和练习
- 5 · 5<sup>\*</sup> 静不稳定性分类，或托姆斯艾变论的构造方法

## 第六章 偶然性与必然性

- 6 · 1 朗兹万方程；例子
- 6 · 2<sup>\*</sup> 热流和无规力
- 6 · 3 福克-普朗克方程
- 6 · 4 福克-普朗克方程的一些性质和定态解
- 6 · 5 福克-普朗克方程的含时解
- 6 · 6<sup>\*</sup> 用路径积分解福克-普朗克方程
- 6 · 7 相变类比
- 6 · 8 连续介质中的相变类比，含坐标的序参量

## 第七章 自组织

- 7·1 组织
- 7·2 自组织
- 7·3 激落的作用：可靠性还是适应性？软模
- 7·4<sup>\*</sup> 福克-普朗克方程中快弛豫参量的绝热消去
- 7·5<sup>\*</sup> 主方程中快弛豫参量的绝热消去
- 7·6 连续介质中的自组织、数学方法概述
- 7·7<sup>\*</sup> 非平衡相变的广义金兹保-朗道方程
- 7·8<sup>\*</sup> 广义金兹保-朗道方程的高阶贡献
- 7·9<sup>\*</sup> 连续的非平衡系统的标度理论
- 7·10<sup>\*</sup> 软模的不稳定性
- 7·11<sup>\*</sup> 硬模的不稳定性

## 第八章 物理学系统

- 8·1 激光中的合作效应：自组织与相变
- 8·2 波型景象中的激光方程
- 8·3 序参量的概念
- 8·4 单模激光
- 8·5 多模激光
- 8·6 连续多模激光，与超导性的类比
- 8·7 单模激光的一级相变
- 8·8 激光不稳定性的层次和超短激光脉冲
- 8·9 流体动力学中的不稳定性：贝纳问题和台劳问题

- 8 · 10 茎干方程
- 8 · 11 阻尼与随迁解 ( $R \leq R_c$ )
- 8 · 12 近  $R = R_c$  解 (非线性区) 有效朗兹万方程
- 8 · 13 福克-普朗克方程及其定态解
- 8 · 14 阈值、值取内不稳定性的统计动力学模型
- 8 · 15 弹性不稳定性; 一些茎干概念的概述

## 第九章 化学和生物化学系统

- 9 · 1 化学和生化反应
- 9 · 2 确定过程, 无扩散, 单变数
- 9 · 3 反应方程和扩散方程
- 9 · 4 双变数和三变数的反应扩散模型; 布鲁塞尔机 (Brusselator) 和俄勒哥恩机 (Oregonator)
- 9 · 5 非扩散化学反应的随机模型, 生灭过程, 单变数
- 9 · 6 扩散化学反应的随机模型, 单变数
- 9 · 7<sup>x</sup> 布鲁塞尔机在接近软模不稳定性时的随机处理
- 9 · 8 化学网络

## 第十章 对生物学的应用

- 10 · 1 生态学、种群动力学
- 10 · 2 一个捕食者与被捕食者系统的随机模型

10·3 进化过程的简单数学模型

10·4 一个形态发生的模型

第十一章 社会学：民意形成的随机模型

第十二章 历史的回顾与展望

参攷 进一步阅读材料与注释

索引



# 第一章 目 的

## 你为什么要读这本书

### 1.1 有序和无序：一些典型的现象

让我们从日常生活中的一些典型观察开始吧。当我们把一个冷的物体与一个热的物体相接触时，这两个物体就要交换热量，直到二者具有相同的温度为止（图1·1）。此时，至少在宏观上该系统已变成一个完全均匀的系统了。但是，在自然界中从没有见到过相反的过程。因此，过程的进行具有一个唯一的方向性。

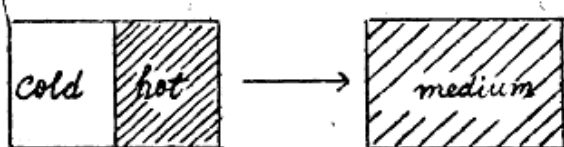


图1·1 不可逆的热交换

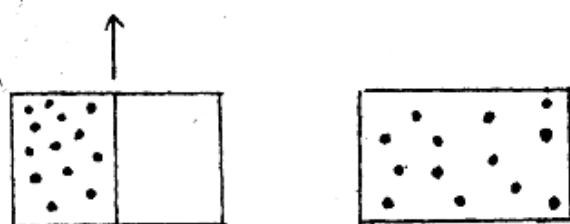


图1·2 不可逆的气体膨胀



图1·3 墨水滴在水中的扩散

当我们把一个充满气体分子的容器的活塞打开时，气体会充满整个容器（图 1·2），相反的过程决不会出现。气体独自是不会再收缩到恰好是容器的一半的容积里去的。当我们把一滴墨水滴入水中时，墨水就会逐渐散开，直至达到均匀分布为止（图 1·3）。相反的过程从未见到过。当一架飞机用烟在空中写字时，字母就会逐渐模糊并消失（图 1·4）。在所有这些情形下，系统都要发展到一个唯一的末态，叫做热平衡态。原有的结构消失了，代之以一个均匀的系统。当从分子、分子运动的微观水平上来分析这些现象时，我们发现其无序度都增加了。

让我们以能量损失的例子来作为结束吧。考察一个其发动机已停止了的运动着的汽车，从物理学家的观点来看，它是一个具有一定动能的单一自由度（在一个方向上运动），该动能被摩擦所消耗

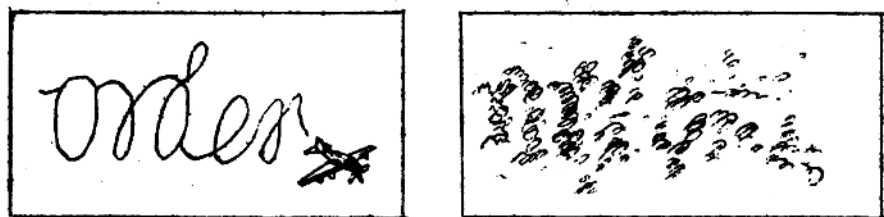


图 1·4 云的扩散

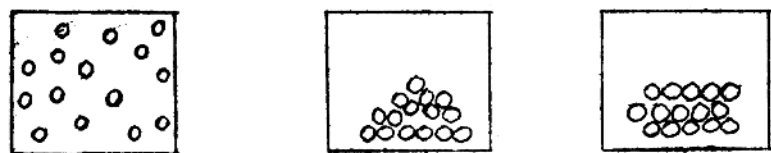


图 1·5 处于不同相中的水

，把动能变为热（使轮子变热等）。而热就意味着许多粒子的运动，所以单一自由度的运动已分配到许多自由度上去了。另一方面，显然，只加热轮子是不会使车辆开动起来的。

在热力学范围内，对这些现象已建立了专门的描述。有一个叫做熵的量，它是无序度的量度。热力学定律说：在一个闭合系统中（即一个与外界不接触的系统），其熵总是增加到极大值。另一方面，如果我们从外界来控制一个系统，那么我们就能够改变它的有序度。例如，考察水汽（图 1·5）。在高温下，水分子互不关连地自由运动；若降低其温度，就会形成液滴。这时，分子之间保持着一个平均距离，从而它们的运动是高度相关的。最后，继续降低温度到凝固点时，水就变成冰。这时，水分子以固定的秩序规则地排列。在不同的聚集态（也叫做相）之间的转变是突变的。虽然一直都是同一种分子，然而这三个相的宏观性质却是截然不同的。显然，它们的力学、光学、电学和热学性质是大不一样的。

在铁磁体中出现了另外一种类型的有序（即罗盘的磁针）。若把一块磁体加热，它就会突然失去其磁性；但若降低其温度，则它又会突然重新获得磁性（图 1·6）。

在微观的原子水平上所发生的争辩是：我们可以把磁体想象为由许多元磁体（叫做自旋）组成的。在高温下，各个元磁体的指向是无规的（图 1·7），当把它们的磁相加时，就互相抵消而不呈现宏观磁性。在临界温度  $T_c$  以下元磁体就排列起来，从而就产

生了宏观磁矩。因之，微观水平上的有序是材料在宏观水平上具有新特点的一个原因。从一个相到另一个相的转变叫做相变。在超导体中也观察到了非常类似的相变，在某些金属和合金中，在某温度下，其电阻突然地完全变为零（图1·8），这一现象是由于金属电子的一定的序所产生的。这类相变的例子还很多，它们常常呈现出惊人的相似。

尽管这是一个十分有趣的研究领域，但它对任何生物学过程的解释并不能给我们提供线索。在这里，有序和特定的功能是不能靠降低温度来得到的，而是靠通过系统的能量和物质的流来维持的。在其它许多情况下所发生的事情是：能量以化学能的形式馈送给系统，其中包含了许多微观步骤，最后终于在宏观尺度上导致有序现象，形成花样（形态形成），行动（即减少自由度！）等等。

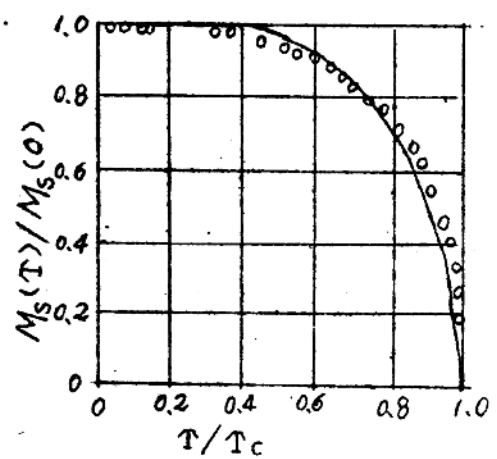
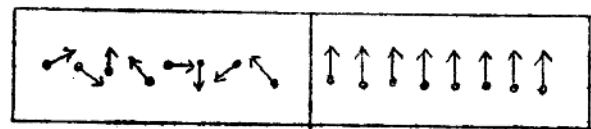


图1·6 铁磁体的磁化

随温度的变化

图1·7 无规指向的元磁体 ( $T > T_c$ ) (左边), 全列的元磁体 ( $T < T_c$ ) (右边)。



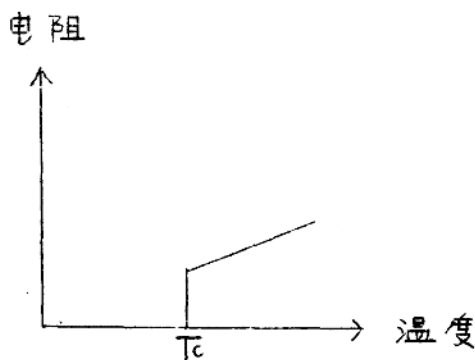


图 1·8 超导体的电阻与

温度的关系

鉴于我们在上面所提到的物理学现象和热力学定律，解释生物学现象的可能性，尤其是从混沌态产生宏观序，似乎是颇为希望的了。这已经使得那些杰出的科学家都以为，这种解释是不可能的。然而，我们不要因一些作者的意见而灰心丧气，还是让我们从不同的观点来重新考察该问题。汽车的例子就告诉我们，能量从多个自由度集中到单个自由度是可能的，在汽车发动机中，汽油的化学能实际是先转化为热，然后在汽缸中活塞就在规定的单一方向来完成了能量从多个自由度到单个自由度的集中。在这里，要记住两个重要的事实：

1)、整个过程是通过人造机口成为可能的，在其中，我们已建立起一个确定的约束；

2)、我们从远离热平衡开始，实际上，推动活塞就相当于在给定的约束下达到热平衡。

直接反对把这个机口作为生物学系统的模型的事实是，生物学系统是自组织的，而不是人造的。这就给我们提示了一个问题，我

们能否在自然界中找到一些系统运转在远离平衡的情况，并且在自然约束的作用下，这类系统，有些只是在最近才发现，而另一些则早就知道了。我们描述几个典型的例子：

处于自然系统与人造装置之边界线上的一个系统就是激光。在这里，我们把激光当作一个元件来处理，但是激光作用（在微波区）已在星际空间进行了。我们以固体激光口为例来观察，它是由一个在其内部掺有特定原子的棒状材料所组成（图 1·9）。通常，反射镜就固定在该棒的两个端面上，每个原子都可从外界激发，如被光的辐照所激发，然后原子作为一个微观天线发射光波列。在经典情况下，这一发射过程持续  $10^{-8}$  秒，而波列就有 3 米之长。反射镜是用于选择波列的，它使得那些在轴线方向上的波列能够在两反射镜之间来回反射多次并能在激光口中逗留较长的时间，而其它的波列则很快就离开了激光口（图 1·10）。若我们开始把能量泵浦到

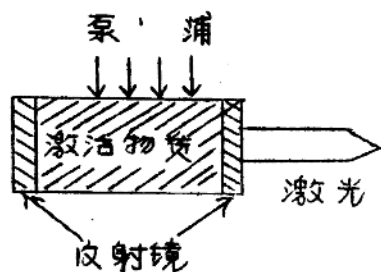


图 1·9 激光口的  
典型装置

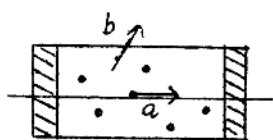


图 1·10 在轴向上发射的光子(a)·  
在腔内的寿命长。比所有其它光子  
(b)的寿命都长。

激光口中去，那就会发生如下的情况：在小的泵浦功率下，激光口就象一只灯一样地透射，原子天线彼此独立地（即无规地）发射光

波列，但当泵浦功率达到某一阈值时，就出现了全新的现象，好象是有一个不知道的魔鬼使得原子天线同相振荡。此时，发射出单一的大波列，其长度比方说是30万公里（图1·11）！发射的光强（即输出功率）随输入功率的增加而急剧增加（图1·12）。显然，激光宏观性质的剧烈变化就使人联想起铁磁相变的例子。

正如在本书的后面我们将会看到的那样，这种类比还会变得更

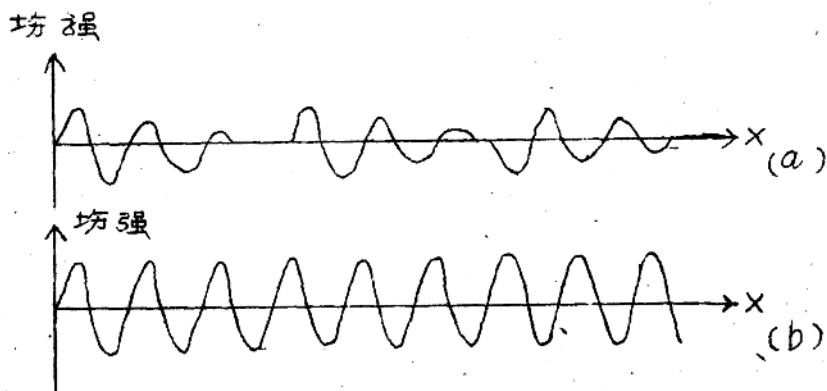


图1·11 (a) 发射的波列  
(b) 激光中发射的波列

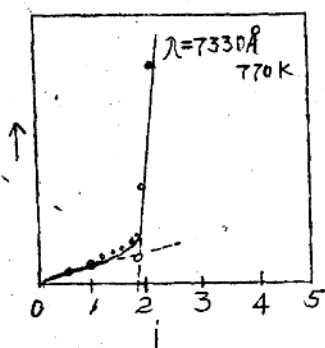


图1·12 输出功率与阈值下和  
阈值上的输入功率的关系

加深远。显然，激光是一个远离平衡的系统。当泵浦能量进入该系统

流时，它就变为具有独特性质的激光，随后，激光就离开了激光回。  
 很明显的一个问题是：是什么力量（魔鬼）使得这些子系统（即  
 原子）以这样好的组织动作起来呢？或者说，用更科学的语言讲，  
 用什么机制或原理能够解释原子（或原子云）的自组织呢？若继  
 续把激光回向更高水平泵浦，则突然地又出现了一个全新的现象，  
 棒规则地发射时间极短的脉冲，比如说  $10^{-12}$  秒。作为第二个例子，  
 我们来观察一下流体力学，或者更具体地说，是流体绕圆柱体的  
 流动。在低速下，流动图形如图 1·13 (a) 所示；在高速下，  
 突然出现了一个新的静态花样：一对涡旋 (b)。随着流速的不断  
 增高，出现了动态花样，此时涡旋在振荡 (c)。最后，在更高的

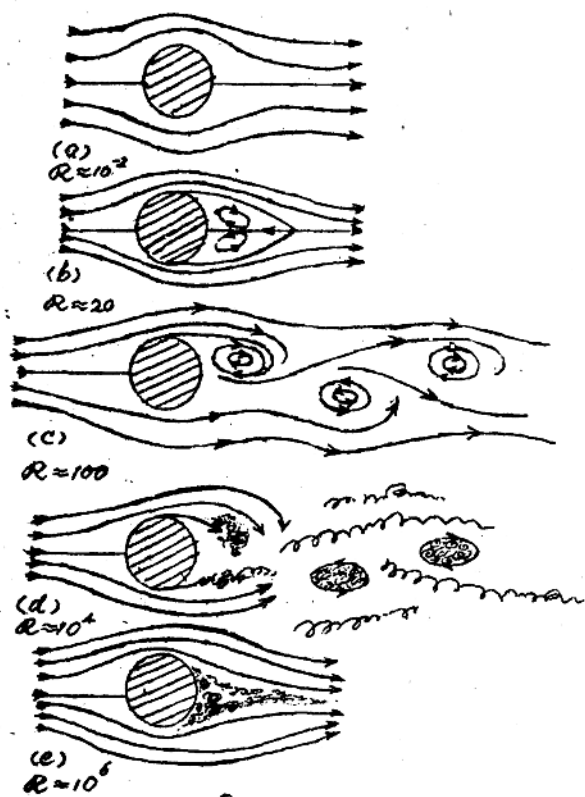


图 1·13  
 流体以不同的  
 流速绕圆柱体  
 的流动



速度下，出现了叫做湍流的不规则花样（e）。尽管在本书中我们不会处理这种情况，下面还是要作一研究。

对流不稳定性（贝纳不稳定性）。我们讨论从下面加热的上层保持固定温度差的流层（图 1·14），在水的温差下（更确切地说是温度梯度），热是靠热传导来运输的，而流层则保持静止不动。当温度梯度达到某一临界值时，流层就开始作宏观运动，因为受热的部分膨胀，这部分就向上浮动，冷了以后又下落到低层，奇怪的是，这种运动是很规则的。无论是卷筒状的（图 1·15），还是六角形的（图 1·16）都观察到了。这样一来，从完全均匀的状态中出现了很有秩序的空间花样。当温度梯度进一步增加时，又出现了新的现象，卷筒开始沿其轴线作波浪运动。进一步的花样如图 1·17 所示。注意：卷筒的振荡是暂时的。在气象学中，这些现象在决定空气的运动和云的形成图 1·18 方面起着至关重要的作用。

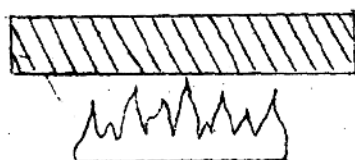


图 1·14 从下面加热的流层对于小的瑞利数热是靠热传导来运输的

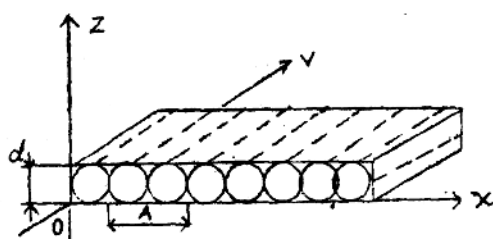


图 1·15 对于比临界值稍大一些的瑞利数，流层以滚动的形式运动

一个密切相关的现象就是台劳不稳定性。在这里，流层被放