

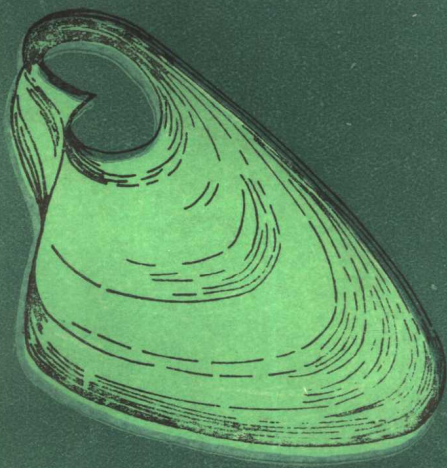
中学生课外读物

现代科学技术丛书



· 混沌现象

胡 岗 著



人民教育出版社

中学生课外读物
现代科学技术丛书

混沌现象

胡 岗 著

人民教育出版社

中学生课外读物
现代科学技术丛书
混沌现象
胡 岗 著

*

人民教育出版社出版
新华书店总店科技发行所发行
北京东光印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 3.125 字数 65,000

1989 年 9 月第 1 版 1989 年 9 月第 1 次印刷

印数 1—1,000

ISBN 7-107-10397-6

G·1491 定价 1.10 元

内 容 提 要

数百年来,物理学所揭示的自然规律几乎都具有简单的数学形式。然而,近二十年来科学家们发现,在一定条件下,由这些自然规律所支配的简单现象能产生出极为复杂的类似于随机的运动,即混沌运动。进一步研究表明,这种混沌运动极为普遍地存在于自然界、社会现象及我们的日常生活中。因此,寻找混沌运动的规律不仅在探索大自然奥秘的科学研究中具有巨大的理论价值,而且还在利用自然规律为人类造福的实践中具有重大意义。

本书从具体、生动的生活实例出发,深入浅出地引导读者进入物理科学研究的这块前沿阵地——混沌运动的世界。通过大量的图解使抽象的物理概念变得直观明了,不仅可以使读者了解混沌现象的一般规律,而且通过一些事例可以了解混沌现象与人类生活的关系,使眼界大为开阔。本书可供想了解物理学新领域的高中学生和具有中等文化程度的其他青年阅读,也可供有关专业的科技人员、大学生和中学教师参考。

前 言

迄今为止,物理学所揭示的自然规律,绝大多数具有简单的数学形式。从牛顿力学、相对论力学到量子力学,从力学、电学到光学等各种运动形式的基本方程都不复杂。人们预期通过求解这些方程可以得到各种物理量的变化规律。例如,求解阻尼摆的力学方程就可以预言,随着时间的推移摆会越来越趋向平衡位置,最后将停止摆动;求解太阳、地球运动的牛顿方程,可以预言地球绕太阳的周而复始的运动轨道;求解电路方程,可以得到在外界周期信号下放大器的周期输出,等等。总之,这些趋于平衡态,趋于周期或准周期运动的图象,构成了中学生对自然界发展的基本认识。

然而,这只是自然界中所发生的一切的一部分,或更确切地说只代表极小的一部分。更多的运动系统不趋于平衡态,也不趋于简单的周期、准周期运动。尽管它们也遵从简单的运动方程,但它们的运动形式却极其复杂。例如,奔腾的河水遇到障碍物后的流动会呈现出复杂形态;在一定条件下收音机从天线接收来音乐,却输出了噪声;人体中通常周期性跳动的心脏会出现心律不齐的病态搏动;尽管现代技术手段越来越先进,尽管气象测报网点遍布全球,尽管人类对天气的短期预报取得了极大成功,然而对气候的长期预报仍然是不可能——几千年来,十多天以外的阴晴云雨一直还为人类捉摸不定,保持着自己的秘密,等等。深入研究表明,出现这些复

杂现象的系统可以遵循十分简单的数学方程。这种由简单的决定性的运动方程中产生出复杂的看起来是随机的运动形式的现象，叫做混沌现象。

混沌现象进入到物理学词汇中只是最近 20 来年的事。由于混沌现象在自然界中极其普遍地存在，由于它对人类改造和控制自然活动起着重要作用，短短十几年来，这个领域已突飞猛进成为物理学发展的重要前沿之一。这些似乎无规则的运动形态后面隐藏着明确的规律性。揭示这种规律将大大扩大人类的认识视野，加强人类驾驭自然的能力。

混沌现象可以出现在看来十分简单的数学形式中。这在数学领域同样引起了极大兴趣。这本小册子在从物理学角度介绍混沌运动的同时，详细分析了一些数学模型。从中可以看到人们熟知的一些简单数学形式能表现出多么丰富的数学奥秘，包含着多么深刻的物理本质！

本文尽量从具体、直观的生活实例出发引入抽象的物理概念，并用简明的图解代替繁杂的数学计算。这本小册子适合于具有中学数学、物理基础的同学们阅读，也可作为工作于其他领域而对混沌现象感兴趣的科学工作者的普及读物。

目 录

前 言	1
一、湍流运动	1
(一) 层流和湍流	1
(二) 自然界中形形色色的湍流	4
(三) 平稳流动是怎样转变成湍流的	9
二、混沌现象	12
(一) 一个形式简单而内容丰富的模型——虫口模型	12
(二) 从倍周期分叉到混沌	16
(三) 混沌世界的秩序	27
(四) 自然界中又一类普适性	33
三、奇怪吸引子	42
(一) 自然界中的吸引子	42
(二) 混沌运动和奇怪吸引子	51
(三) 奇怪吸引子的自相似性	60
(四) 分数维数	65
四、决定性与随机性	68
(一) 自由落体运动和掷骰子	68
(二) 决定性过程的内在随机性	72
(三) 牛顿力学的第三条边界	77
五、通往混沌的条条道路	80
(一) 条条道路通往混沌	80
(二) 在湍流和实验中的混沌现象	85
六、混沌现象与人类生活	90

一、湍流运动

(一) 层流和湍流

人们无数次让河水从自己身旁静静流过，有多少人注意到其中的千变万化呢？

在流水中放进一个障碍物——一座桥墩，一块石头，或一根插入河床的标杆，并在不同日子耐心地观察河水流经障碍物后的状态。当流速很慢时，流水平静而缓缓地绕道而过，除了在障碍物处稍稍偏转流向，看不出有明显变化（图 1-1 甲），这种流动叫做层流。随着流速的增加，变化开始出现。首先在障碍物后产生了旋涡（图 1-2 甲）。起初这旋涡的位置是固定的，继续增大流速，旋涡开始运动起来，并被流水带走（图 1-3 甲）。由于旋涡不断产生又不断被冲走，在障碍物后各个部位水流的速度就发生周期性的变化。进一步增大流速，障碍物后的水面变得非常不安，这时大旋涡被击碎成小旋涡，小旋涡里又套着更小的旋涡，旋涡不断产生，不断破碎，又不断被冲走。水流的样子变得极其复杂，瞬息万变（图 1-4 甲），这种流动叫做湍流。

用测速计测量流水中固定点 A 处水的流速，可以发现，在第一、第二种情况下，流速不随时间变化，在第三种情况下，A 点的水的流速要周期性地改变。在发生湍流时，流速表现出无规则、十分杂乱的特征。图 1-1 乙，1-2 乙，1-3 乙，1-4 乙

定性地表示了在这四种情况下, A 点流速随时间变化的行为。

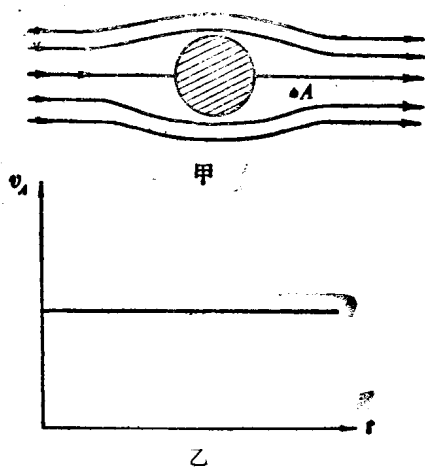


图 1-1 甲 层流; 乙 层流时 A 点流速

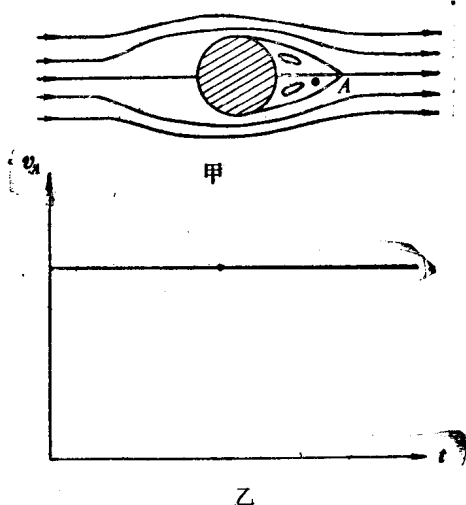
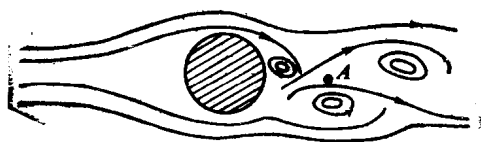
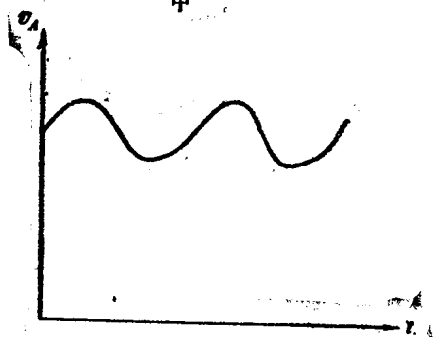


图 1-2 甲 固定旋涡; 乙 A 点的固定流速

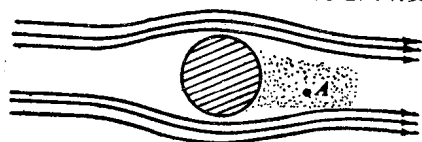


甲

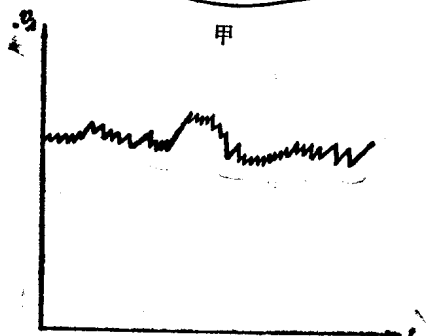


乙

图 1-3 甲 流动旋涡; 乙 A 点流速周期变化



甲



乙

图 1-4 甲 湍流; 乙 A 点流速无规则变化

事实上即使不在流体中放入障碍物也能观察到从层流到湍流的变化。平时小河的水以层流形式无声无息地缓缓流淌；暴雨以后滚滚洪流咆哮而来，翻滚轰鸣，浪花四溅，这就是湍流。

(二) 自然界中形形色色的湍流

湍流不仅存在于动人心魄的奔腾的激流里，也会以不同形态出现在各种物理过程及自然界的其他运动形式中。

让我们来观察一个有趣的实验。做一个面积很大的扁盒，上下底面为导热性很好的金属平板，盒内注入某种液体（例如在低温下注入液态氮），并使上下金属板分别与两个不同温度的热源接触，控制它们保持下高上低的温度差（见图 1-5）。当

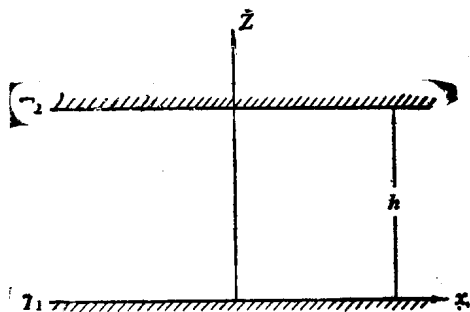


图 1-5 $T_1 > T_2, \Delta T < \Delta T_c$ 。

上、下两板温差

$$\Delta T = T_1 - T_2$$

很小时，在液体内部各点也会相应地出现下高上低的温度差异（或叫温度梯度），这时热量就逐渐从高温的下板面通过液体

的热传导传到低温的上板面，而整个液体保持静止。逐步增大两板温差，当 ΔT 超过一定阈值（也叫临界值） ΔT_c 时，液体的静止状态变得不稳了，整个液体开始运动起来。这种对流在 1900 年被著名法国物理学家贝纳德 (Benard) 所演示，叫做贝纳德流。如果将一些带色的液滴滴入流体以显示液体流动的路线，我们能看到很有规则的漂亮图样。图 1-6 是这种

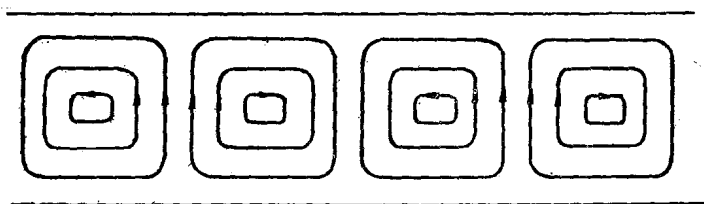
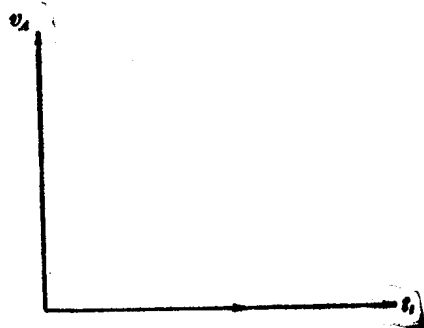


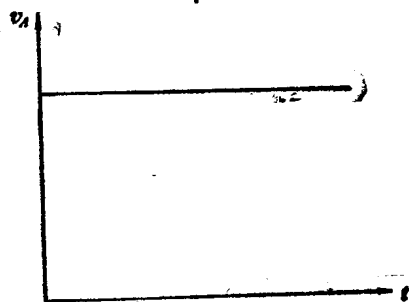
图 1-6 贝纳德对流图样

流动的示意图。起初这种流动是平稳的，即尽管容器内各点的液体流速的大小、方向各不相同，但每一固定点的流速不随时间变化。继续增大温差到 $\Delta T'_c$ ，流速的这种稳定性又被打破，图 1-6 的规则图样随时间周期变化。进一步增大 ΔT 到足够大时，对流运动失去了原来的空间的规则性和时间的周期性，容器内各点的速度杂乱地改变着，这时液体的运动进入湍流态（也叫混沌态）。

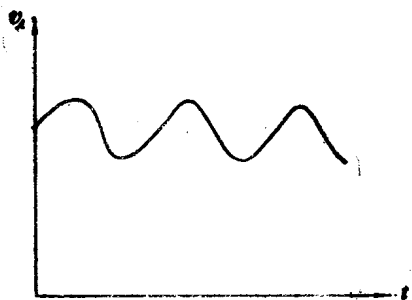
用测速器测量容器内某一定点 A 处的流速。图 1-7 甲、乙、丙和丁分别表示了热传导、稳定对流、不稳定对流和湍流四种情况下流速随时间的变化。我们看到了流速从零到非零，从不变化到变化，从规则变化到无规则变化的演变。与图 1-1 乙—图 1-4 乙相比，可以看到它们是十分相似的。



甲



乙



丙

图 1-7 甲 $\Delta T < \Delta T_c, v_A = 0$; 乙 $\Delta T_c < \Delta T < \Delta T'_c, v_A = c$

丙 $\Delta T > \Delta T'_c, v_A$ 周期变化

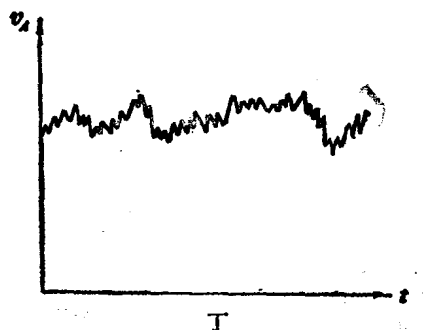


图 1-7 $\Delta T \gg \Delta T'_A$, v_A 无规则变化

温差引起对流和湍流的实验很能反应大气中发生的物理过程。地球的各处由于其纬度不同、离地面的高度不同而具有不同的温度、压强。这个气温、气压的差异随着季节、白天、黑夜，即随着太阳、地球和月亮的不同位置而有很大变化。各地的特殊地形，山脉、河流、湖泊都直接、间接地影响大气中各处温度、压强的分布。在一定环境下，这种温度压强的不均匀会造成大气中形成湍流的条件。一时天高云淡，风和日暖，骤然狂风卷地，暴雨倾盆。这种变幻莫测的气象变化，正是大气湍流送给我们的礼物！

自然界运动形式多种多样。这种由平稳的、周期性的运动到混乱的、无规则运动的转化也有各种表现。表现在光的辐射上，叫光学湍流；表现在声的传播上，叫声学湍流；以及等离子①湍流、固体湍流、化学湍流等各式各样的湍流应运而生。可以毫不夸张地说，湍流作为一种重要的运动形式在我

① 物质在高温下会电离成正离子和游离电子，这种由正离子和游离电子组成的物体叫做等离子体。

们的身边到处存在，它深深地进入到我们的生活。从热核反应的控制，飞行火箭的导航到与人的生命休戚相关的心脏的跳动，到处可以觉察到湍流的存在和影响。小到日常司空见惯的现象——从一支燃着的香烟上冒出的清烟，也可以领悟到湍流的形态。图 1-8 是一幅照片，从中可以清晰地看到，当烟上升到某一高度后，层流突然转变为湍流。

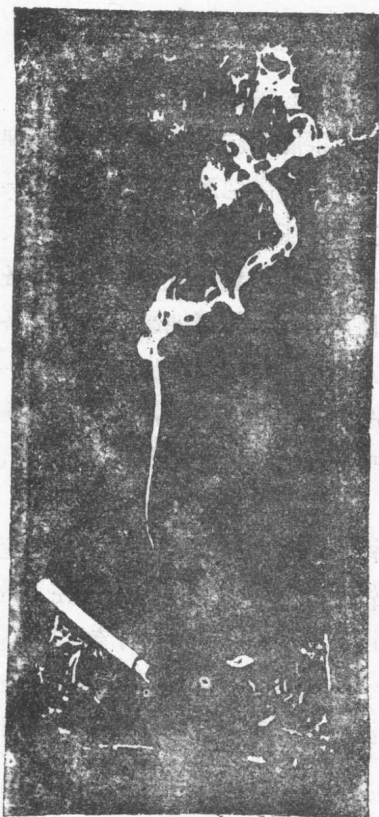


图 1-8 从香烟上冒出的清烟
下部为层流，上部为湍流

不仅在自然界,在社会活动、经济领域也存在着类似的杂乱运动形态。每过一个阶段资本主义经济会进入危机状态,这时供求之间的协调崩溃,企业倒闭,市场萧条,经济失去了控制。不同地区和同一地区的不同时刻表现出复杂的、有些从正常眼光看来不可思议的经济行为,这在一定意义上也具有间息性湍流运动的特点。

(三) 平稳流动是怎样转变成湍流的

千百年来人们目睹了湍流在自己周围发生,积累了丰富的感性认识。然而,人类对湍流现象有意识地系统探索是直到 1883 年英国著名科学家雷诺(Reynold, 1842—1912)的不朽工作后才开始的。

设计一个装置可以控制圆形水管内液体的流速,并在管的轴线或靠近轴线处引入颜料流丝。如水管中液体流速不大,颜料丝呈规则的光滑流线。当流速足够大时,颜料丝将剧烈

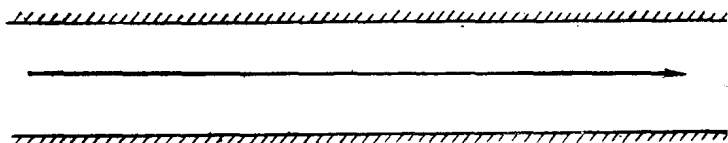


图 1-9 层流时,颜料丝表现出光滑流线

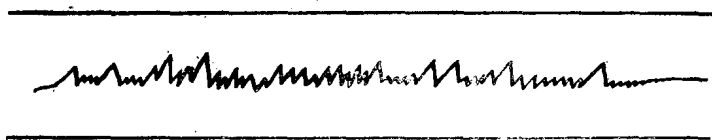


图 1-10 湍流时,颜料丝无规则地剧烈振荡

地振荡,这时湍流发生了(图 1-9,图 1-10)。为了确定湍流发生的条件,雷诺改变了液体的流速、管子的直径及流体的种类,发现湍流的产生与一个控制量 R 有关:

$$R = \frac{\rho \alpha v}{S}.$$

其中 v 为液体流速, ρ 为液体密度, α 为流体内部与摩擦强度有关的一个系数——粘滞系数, S 为管子直径。这个控制量的数值被命名为雷诺数。当雷诺数低于一个确定值时,流动表现为层流,当 R 高于这个值时,层流就突变为湍流。

在图 1-5 的贝纳德对流实验中,也存在着温差 ΔT 的一个确定值。当 ΔT 低于这个值时液体或静止,或表现出稳定或周期性的对流,当 ΔT 高于这个值时,湍流就被诱发出来。以后我们把这类作为不同运动形态分界线的值叫阈值或临界值。

类似的临界行为也出现在其他各类湍流现象中,一是某种阈值的存在,二是在阈值附近运动形态的突然变化,雷诺抓住了湍流出现的这两个特征。

雷诺实验后七八十年间,人们对湍流现象继续作了大量的研究工作,但收获甚微。湍流运动是一种极为复杂的运动。在图 1-4 甲中各种空间尺度的旋涡互相嵌套,涉及到从微观到宏观各种级别的相互作用、能量的传递,没有现存的数学和物理工具适合于解决这一问题。一百多年来湍流的机制作为一个老大难问题一代一代地传了下来。

本世纪 50 年代后,对湍流运动的研究有了新的发展。实验设备的改进使人们可以对湍流进行细致和精确得多的测