

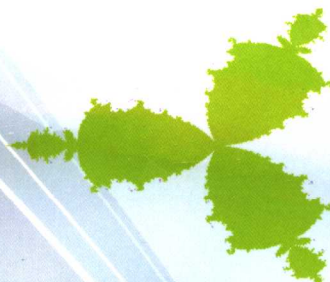
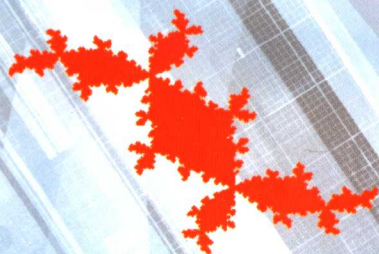
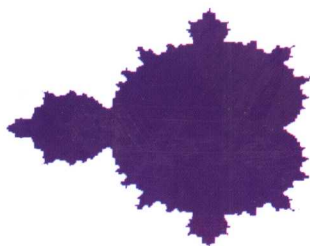


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

非线性物理学

(第二版)

席德勋 席 沁 编著



 南京大学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
面向21世纪课程教材

非线性物理学

(第二版)

席德勋 席 沁 编著

图书在版编目(CIP)数据

非线性物理学 / 席德勋编著. —2 版. —南京: 南京大学出版社, 2007. 3

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-305-03325-4

I. 非… II. 席… III. 物理学—非线性理论—高等学校—教材 IV. 0415

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 032178 号

出版者 南京大学出版社

社 址 南京市汉口路 22 号 邮编 210093

网 址 <http://press.nju.edu.cn>

出版人 左 健

丛 书 名 普通高等教育“十一五”国家级规划教材

书 名 非线性物理学

作 者 席德勋 席 沁

责任编辑 潘新华 编辑热线 025-83597141

照 排 南京玄武湖印刷照排中心

印 刷 阜宁人民印刷有限公司

开 本 787×960 1/16 印张 22.25 字数 381 千

版 次 2007 年 3 月第 1 版 2007 年 3 月第 1 次印刷

印 数 1~3 000

ISBN 978-7-305-03325-4

定 价 36.00 元

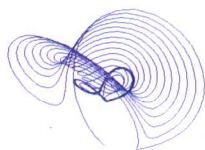
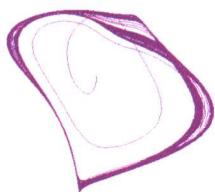
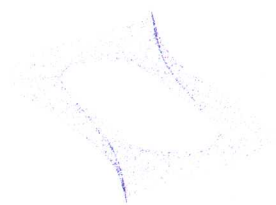
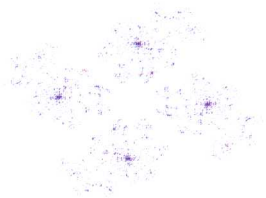
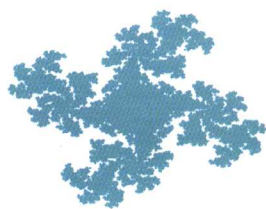
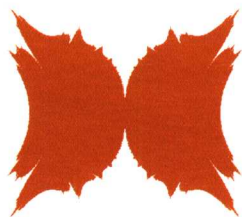
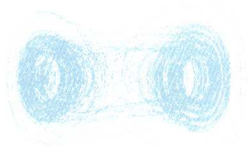
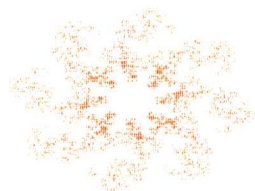
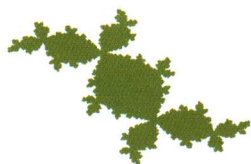
发行热线 025-83592169 025-83592317

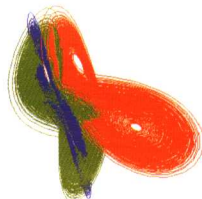
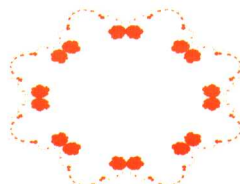
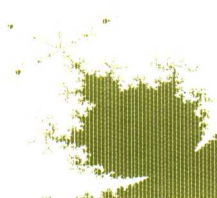
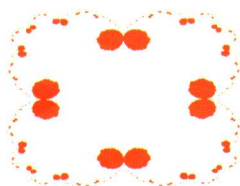
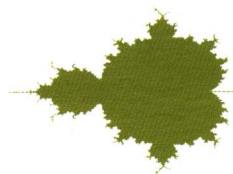
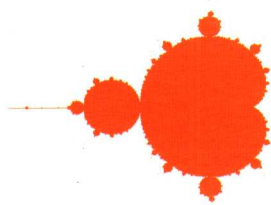
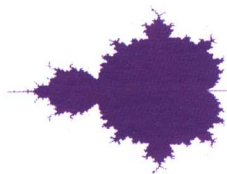
电子邮件 sales@press.nju.edu.cn (销售部)

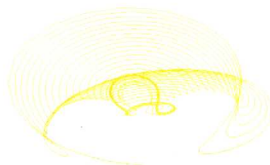
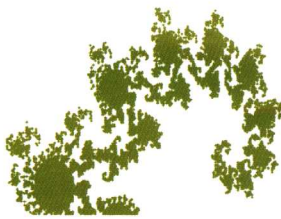
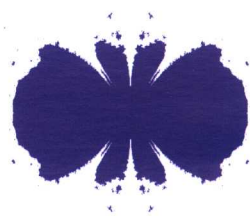
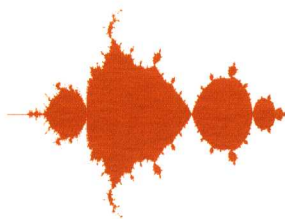
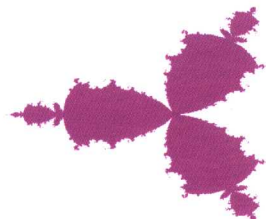
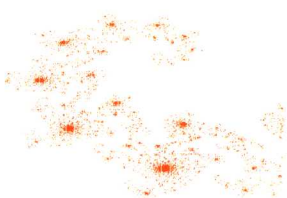
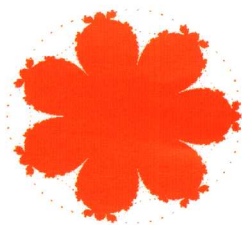
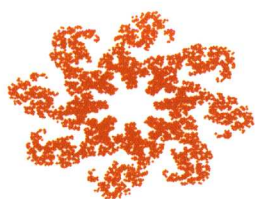
njuperss1@public1.ptt.js.cn

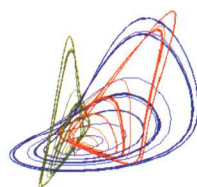
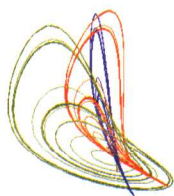
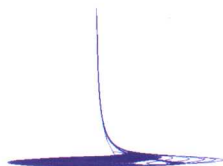
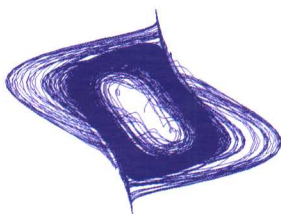
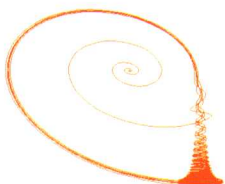
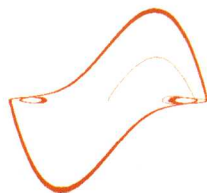
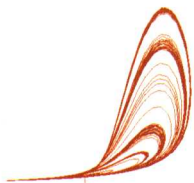
* 版权所有, 侵权必究

* 凡购买南大版图书, 如有印装质量问题, 请与所购
图书销售部门联系调换









第二版前言

随着非线性科学特别是它在各方面应用的发展,本教材有必要在加强物理概念以及内容方面作较多补充.非线性物理系统由非线性微分(差分)方程表征,通常,它们很少有解析解,因而在物理上理解这种系统比较困难(例如,混沌吸引子).用方程的数值解,画出运动的状态轨迹、庞加莱映射等是理解物理过程的有效方法,为此在本版中增加了相当数量的图示(用 MATLAB 作图).举例也是一种帮助理解的办法,在涉及一些难理解的概念或用法时,书中增加了不少例题.在内容方面,增加如下:于达混沌吸引子和非平稳态非线性受迫振荡(第 2.3 节);增殖过程(第 3.3 节);复映射(第 4.5 节);复洛伦茨模型(第 5.2 节);腊克斯对(第 6.4 节);耦合映射和元胞自动机(第 7 章);附录.其中,第 4.5 节和第 7 章由席沁编著;MATLAB 作图程序由席沁编写.

作 者

2006.11.30

第一版前言

非线性现象广泛地呈现在物理、化学、生命等各个领域(甚至在社会、经济等领域),随着科学的发展,对非线性问题的研究也越来越深入.研究非线性现象的普遍规律的学科是非线性动力学,它包含六个方面:分岔与混沌、分形、孤立子、模式、元胞自动机和复杂系统.

物理学发展到今天,在很多方面已向非线性发展(例如非线性光学、非线性声学等),因而在大学学习阶段,有必要开设有关非线性物理的课程,以适应面向 21 世纪的需要.本课程开设的目的是使大学物理系本科生对正在发展的非线性物理有所了解,并为之打下研究非线性物理的基础.

为了在大学期间让学习者对非线性物理有基本的了解,受到处理非线性问题的一些基本训练,因此,我们把最基本的三个方面——分岔与混沌、分形、孤立子作为“非线性物理”的主要内容.在课程内容的安排上,首先讲述普遍存在于物理、化学、生物等各个领域的非线性现象,接着讲述研究它的一般方法.在此基础上讲述物理学中存在的非线性共振,从它的特点引出非线性系统共有的特性:分岔和混沌,着重讲述两种有代表性的混沌吸引子:伯克霍夫-肖(Birkhoff-Shaw)吸引子和勒斯勒尔(Rössler)吸引子.之后着重讲述非线性系统的运动特点:从分岔到混沌、普适性、分形.然后回到物理学中,着重讲述强湍流、粒子在波场中的运动和孤立子及逆散射变换.

本教材内容安排如下:绪论中主要讲述物理学、化学和生态学中的一些非线性现象,说明非线性现象存在的普遍性.第一章讲述研究非线性物理系统的方法.从相平面内不动点的确定出发,研究不动点的类型和稳定性,不动点附近系统状态轨迹的运动特性,引入庞加莱(Poincaré)映射、中心流形方法和平均法,以使学生了解分析非线性物理系统的基本方法.第二章讲述非线性共振,在强迫力的作用下非线性物理系统振荡的特点,等离子体振荡,混沌吸引子,使学生开始认识物理系统中振荡的非线性特性.第三章讲述分形,从分形现象出发,讲述分形有关的维的计算,自然界和物理学中的

一些分形.第四章讲述非线性系统的特性,从分岔到混沌,混沌的普适性.使学生在对物理学中的非线性现象有初步了解的基础上,进一步了解非线性系统的普遍特性.第五章讲述物理学中的分岔和混沌.洛伦茨(Lorenz)吸引子,局部分岔和大范围分岔,混沌的产生,使学生了解对流会导致强烈的非线性直到混沌,并讲述粒子在波场中的运动,主要分析粒子被加速过程中在强聚焦条件下的非线性运动特性以及稳定性.第六章讲述孤立子和逆散射变换,由KdV方程的特殊解得到孤立子的独特的性质,由逆散射变换方法求出薛定谔(Schrödinger)方程中的势,得到KdV方程的一般解.

为使能够学好这门课,在本教材中插图数量较多,且内容丰富,同时配以软件显示庞加莱截面和混沌吸引子的形成(软件系李霞等同学所作:Nonlinear Explore).在课外,配以适量的习题,以巩固所学内容.

本书由徐龙道教授、倪皖荪教授审阅,李正中教授、柯善哲教授、刘楣教授、童培庆教授对书稿提出了很多宝贵意见,使作者受益匪浅;姚希贤教授曾支持和关心本书的出版;书中插图均由席沁同学完成,在此一并致谢.另外,书中外国人名译法,除少数物理学中已通行的译名(如李雅普诺夫、庞加莱、普里高津等)外,其余均按《世界人名翻译大辞典》[新华通讯社译名室.北京:中国对外翻译出版公司,1993.10]翻译.为便于读者查阅,书末附有非线性物理学英汉人名对照表.非线性物理学是物理学中的重要新发展,内容牵涉面宽,发展迅速,由于作者水平有限,难免有疏漏之处,敬请读者不吝赐教.

作 者

1999年3月

目 录

绪论 非线性现象	1
0.1 从线性到非线性	1
0.2 生态系统中的非线性现象	2
0.3 非线性化学振荡	6
0.4 单摆的非线性特性	9
0.5 非线性物理的基础——非线性动力学的发展	11
第1章 研究非线性物理系统的方法	14
1.1 相平面和不动点	16
1.1.1 不动点的分类	16
1.1.2 不动点的稳定性	17
1.2 庞加莱映射	23
1.3 李雅普诺夫稳定性和结构稳定性	26
1.3.1 李雅普诺夫意义下的稳定(稳定性理论)	27
1.3.2 结构稳定性	28
1.4 中心流形	29
1.4.1 状态空间的划分	29
1.4.2 不动点稳定性的判别	31
1.4.3 不动点的中心流形方法	32
1.5 近似方法	38
1.5.1 自治系统的 KBM 方法	38
1.5.2 非自治系统的 KBM 方法	40
第2章 物理学中的非线性振荡和混沌吸引子	43
2.1 非线性等离子体振荡	43
2.2 非线性共振	47
2.2.1 线性共振	47

2.2.2 非线性共振	50
2.2.3 自激系统	52
2.2.4 周期吸引子	53
2.3 混沌吸引子	56
2.3.1 抽象动力学基础	56
2.3.2 伯克霍夫-肖吸引子	58
2.3.3 非线性恢复力系统	65
2.3.4 于达混沌吸引子	72
2.3.5 非平稳态非线性受迫振荡	74
2.3.6 勒斯勒尔吸引子	77
第3章 分形	83
3.1 分形维的计算	83
3.2 康托尔集	87
3.3 增殖过程	89
3.4 布朗运动和分形	91
3.5 时间分形记录	95
3.6 自相似和自仿射	97
3.7 分形面	100
3.7.1 随机平移面	101
3.7.2 分形面的产生	101
3.7.3 分子分形面及分形面的观察	103
3.8 自然界中的分形	104
3.8.1 岛屿的分形	104
3.8.2 云的分形维	106
第4章 从分岔到混沌	108
4.1 流的分岔	108
4.1.1 不动点的局部分岔	109
4.1.2 环的局部分岔	120
4.1.3 连续分岔和不连续分岔	122
4.1.4 大范围分岔	124
4.2 突变	135
4.2.1 基本突变集	135

4.2.2 汤姆突变理论	137
4.2.3 塞曼突变机构	141
4.3 映射的分岔	144
4.3.1 一维映射的稳定性	145
4.3.2 一维映射的分岔	147
4.3.3 二维映射的稳定性	155
4.3.4 二维映射的分岔	160
4.4 映射的混沌行为	161
4.4.1 一维映射	162
4.4.2 一维映射的分岔与混沌	164
4.4.3 二维映射的分岔与混沌	176
4.5 复映射	181
4.5.1 复平面上的多项式映射	181
4.5.2 周期点	183
4.5.3 茹利亚集	184
4.5.4 芒德波罗集	190
4.6 混沌的实验观察	195
4.6.1 别洛乌索夫-扎博京斯基反应	195
4.6.2 瑞利-贝纳尔对流和库埃特-泰勒系统	198
4.7 混沌吸引子的分岔	201
4.7.1 倍周期	201
4.7.2 阵发	201
4.7.3 滞后与不可捉摸突变	204
4.7.4 双参数控制的分岔	206
4.8 混沌系统的控制	208
4.8.1 嵌入方法	209
4.8.2 控制	210
第 5 章 物理学中的分岔与混沌	212
5.1 非线性流	212
5.1.1 线性三阶方程	212
5.1.2 非线性流	214
5.2 洛伦茨吸引子	215
5.2.1 洛伦茨方程	216

5.2.2 对流的不稳定性	221
5.2.3 洛伦茨混沌吸引子	222
5.2.4 洛伦茨混沌吸引子的形成	224
5.2.5 复洛伦茨模型	228
5.3 波场中粒子运动的非线性现象	234
5.3.1 储存环中的物理现象	234
5.3.2 数学模型	235
5.3.3 KAM 定理,共振和阿诺德扩散	236
5.3.4 标准映射	240
5.4 量子混沌	243
5.4.1 能级间距分布	243
5.4.2 能级排斥	244
5.4.3 能级间距的分形分布	245
第 6 章 孤立子与逆散射变换	246
6.1 KdV 方程的基本性质	247
6.1.1 非线性效应和色散	247
6.1.2 行波解	249
6.1.3 守恒	250
6.1.4 缪拉变换	251
6.2 逆散射变换原理	253
6.2.1 和量子力学的联系	253
6.2.2 傅里叶变换	254
6.2.3 直接散射问题	255
6.2.4 逆散射问题	256
6.3 逆散射变换, KdV 方程的一般解	257
6.3.1 KdV 方程的一般解	257
6.3.2 逆散射变换	260
6.4 孤立子解	262
6.4.1 单孤立子解	264
6.4.2 双孤立子解	264
6.4.3 一般解	266
6.4.4 正弦戈登方程	267
6.4.5 非线性薛定谔方程	269

6.4.6 腊克斯对	271
6.5 贝克隆德变换	272
第7章 耦合映射与元胞自动机	277
7.1 耦合映射	277
7.1.1 图灵耦合映射	278
7.1.2 稳定性	278
7.1.3 初始条件	284
7.1.4 不同参数时的空-时图形	284
7.2 元胞自动机	286
7.2.1 基本元胞自动机	287
7.2.2 一般元胞自动机	295
7.2.3 一维元胞自动机的熵	301
7.3 序和自组织	306
7.3.1 复杂性	306
7.3.2 序	308
7.3.3 自组织	310
附录	315
A.1 非线性系统的稳定性判别	315
A.2 霍奇金-赫胥黎方程	317
A.3 某些一阶非线性微分方程的解	318
A.4 某些非线性差分方程的解	320
A.5 离散卷积	326
A.6 周期卷积	327
A.7 四次代数方程的解	328
习题	329
非线性物理学英汉人名对照表	337
参考文献	340

绪论 非线性现象

0.1 从线性到非线性

长期以来,人们往往习惯于这样来对待所发生的情形:一台电炉可以得到一份热量,两台相同功率、相同使用条件的电炉,可以获得两份热量,依此类推, n 台相同功率、相同使用条件的电炉,将取得 n 份热量;一个具有质量为 m 的物体,受到力 f 的作用,该物体获得的加速度为 a ,若力 nf 作用在该物体上,则物体得到的加速度为 na ,这是牛顿第二定律.上述关系之所以成立,原因是它们都属于线性系统,凡线性系统均满足线性叠加原理.一线性系统的动力学行为可以由一组一阶线性微分方程来表示,这组微分方程的解,结合初始条件(初始位置、初始速度等)或者边界条件(始端流形、终端流形)可以精确地反映该系统的动力学过程.可是在实际情形中,线性系统只是理想的或者说是近似的,它是真实系统在特定状态附近线性化的结果.

热力学告诉我们,有三种系统:孤立系统(它具有理想的绝缘壁,该系统与外界没有物质和能量的交换)、封闭系统(它与外界可有能量交换但没有物质交换)和开放系统.热力学第二定律指出,在一个孤立系统中,自然产生的任何过程,都一定伴随着系统熵的增加.这是一个时间过程,当熵达到它的极大值时,该孤立系统的时间演化就停止了,系统处于无序状态,系统耗尽了它发生变化的能力而达到热力学平衡状态.这一过程对孤立系统来说是不可逆的,在达到热力学平衡态后,熵不可能自动减小,即该孤立系统不会自动由无序变为有序.平衡态热力学对研究宏观系统不随时间而变的性

质很有用,然而它只涉及演化的终态而不能表现出演化的时间过程.对具有现实意义的过程,一般是非平衡态过程,真正的孤立系统在现实世界中是不存在的,因此真实系统一般应考虑为非平衡态过程,甚至是远离平衡过程.

非平衡态热力学中的线性考虑反映了近平衡的系统行为,而非线性考虑则是处理系统远离平衡时的系统行为.线性系统的作用是叠加的作用,非线性系统的作用就远非如此简单.在线性热力学中,昂萨格(Onsager)的倒易关系说得非常清楚,力产生流,流也产生力,物质的浓度梯度将产生热,这一关系在实验中也已经得到证实.在远离平衡的开放系统中,能量和物质都可以流动,系统表现出来的行为由复杂的非线性关系来支配.普里高津(Pri-gogine)和格兰斯道夫(Glansdorff)详细研究了远离平衡的开放系统,他们发现在远离平衡时,线性热力学中的稳恒态会变得不稳定,可能会出现分岔,系统在这里会离开稳恒态,而演变到某种别的状态,甚至在经过分岔之后,系统空间和时间的有序会达到惊人的程度.无数个分子在时空中的行为非常协调一致,只要能量和物质流动继续进行,这种有序结构可以继续维持下去.这样的结构称为**耗散结构**,它们发生在系统和外界间有物质和能量交换的情形下,伴随有系统的熵产生,而且熵可以从系统输送到外界.当然系统和外界的整体熵是增加的,但系统的熵却比它处于无序时减小了,这种导致产生耗散结构的过程叫做**自组织**.系统的分岔行为实际上是非线性系统的一个基本特性,其实,分岔行为可以多次(多级)发生,结果可能导致出现混沌状态.

非线性现象是自然界中广泛存在着的,线性行为只是在平衡状态附近的近似结果.

0.2 生态系统中的非线性现象

在自然界,整个生态是平衡的,但是这种平衡不是静态的,而是一种**动态平衡**.在食肉动物和被食动物间的关系是这样,在食草动物和植物间的关系也是这样.在食肉动物中,如果被食者的数量大幅度增长,一定会导致捕食者数量的快速增长,结果,引起被食者数量的下降,于是捕食者的食物来源减少而使其增长率下降以致于数量锐减.捕食者数量上的变化总是落后于被食者数量上的变化,因而捕食者数量的减少就会使被食者数量有增长的机会.这种演变是周而复始的.现在的问题是这种现象有没有规律,能不