

面向工程的混沌学

—— 理论、应用及控制 (第2版)

Chaos for Engineers
Theory, Applications, and Control
Second, Revised Edition

[波兰] Tomasz Kapitaniak 著
施 引 朱石坚 俞翔 楼京俊 译



国防工业出版社
National Defense Industry Press

0415.5/18

2008

面向工程的混沌学

——理论、应用及控制

(第2版)

Chaos for Engineers
Theory, Applications, and Control
Second, Revised Edition

(波兰) Tomasz Kapitaniak 著
施引 朱石坚 俞翔 楼京俊 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2007-068 号

图书在版编目(CIP)数据

面向工程的混沌学:理论、应用及控制/(波)卡毕坦尼亚克(Kapitaniak, T.)著;施引等译. —北京:国防工业出版社, 2008. 7

ISBN 978-7-118-05666-2

I. 面... II. ①卡... ②施... III. 混沌学 - 应用 - 工业产品 - 技术开发 IV. F273.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 054016 号

Translation from the English language edition:

Chaos for Engineers by Tomasz Kapitaniak,

Copyright ©1998, 2000 Springer - Verlag Berlin Heidelberg

Springer is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

在 Springer 的授权下,原作品的简体中文版由国防工业出版社在中华人民共和国境内独家出版发行。版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

※

开本 710 × 960 1/16 印张 10· 字数 138 千字

2008 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 30.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

译 序

混沌科学是随着现代科学技术的迅猛发展,尤其是在计算机技术的出现和普遍应用的基础上发展起来的新兴交叉学科。当前混沌学研究的重要趋势之一是如何在工程中利用混沌,例如通过混沌同步实现保密通信;利用宽带混沌信号的随机性和良好的相关特性提高雷达的探测能力;利用混沌系统具有对小信号的敏感性及对噪声的免疫性等特点,来提高探测系统对弱信号的检测能力等,这些研究在各自的应用领域均具有十分重要的意义。

混沌学源自于数学、物理学等理论学科,要求研究者具备群论、拓扑学、微分几何等现代数学知识背景,而这正是大多数工程技术人员所不具备的。为了实现混沌在工程中的应用,须得有座沟通纯理论与工程实际的桥梁,本书便起到这样的作用。本书从混沌的基本定义、定理出发,介绍了混沌研究基本方法,给出了机械、化学、电子、土木工程以及流体动力学等领域中可能产生混沌的若干实例,最后介绍了混沌控制,即如何在实际系统中抑制或引入混沌。本书适合作为工科大学生、研究生的教学用书,同时可以作为工程技术人员处理非线性动力学特别是混沌运动相关问题的参考用书。

本书作者 Tomasz Kapitaniak 教授长期从事混沌、随机动力学、非线性振动等领域的研究工作,著有 11 部专著,发表 120 余篇论文,并担任国际期刊 *Mechanics and Mechanical Engineering* 主编, *Chaos, Solitons and Fractals* 副编辑。由 Kapitaniak 教授编著的本书,用平实、易于理解的语言阐述了混沌各种复杂的特性,既富含数学的严密逻辑,又极具工程实用价值,对各个领域的工程技术人员具有很强的指导意义。

译者对原书的若干印刷错误进行了订正。由于本书涉及多个学科,翻译难度大,加之水平有限,书中难免有疏漏和错误,欢迎广大读者批评指正。

译者
2008年3月

前 言

这是本书第一版的修订本,增加了利用混沌同步估计最大李雅普洛夫指数的新章节,该方法对工程实际系统十分有用。此外增加了新的参考文献,修正了一些文稿与印刷错误。

感谢 A. Stafanski 及 M. Wiercigroch 的有益建议,以及 J. Wojewoda 在撰稿中的热情帮助。

Lodz, 2000, 1

Tomasz Kapitaniak

第一版前言

20 多年对非线性动力学的深入研究,证明了混沌广泛存在于工程与自然界中。过去,常常认为混沌仅是由外部随机因素引起的不规则且不可测的行为,通常是有害的,应尽可能予以消除。而进一步研究表明混沌是完全确定性的非线性系统的典型特性。

相关研究提出了混沌在工程中的可能应用,其中之一就是控制混沌运动,使之可被预测。最近已有若干关于混沌可能应用的报道,这使得工程师和科学家们对混沌的兴趣更为浓厚。

本书的主要目的是将混沌这一非线性动力学中新的数学概念加以阐述,以便工程师们能将其应用到实际系统中去。另一方面,试图通过给出基本定义和定理(虽没有给出严格证明)来强调数学精确性的重要。

本书适用于理学学士、工学研究生或者具备常微分方程理论、动力学、振动理论中级水平知识背景的读者。

本书组织如下。

第一部分(第 1 章~第 5 章)介绍非线性动力学基本理论。第 6 章给出若干可能产生混沌的工程实例。最后,第 7 章讨论如何控制混沌即如何利用混沌而获益。

第 1 章简要描述线性与非线性振动系统的区别。第 2 章介绍非线性动力学的基本方法,如不动点分析、线性化方法、庞加莱映射、李雅普诺夫指数及谱分析等。第 3 章讨论离散时间动力系统及其与连续时间动力系统的联系。第 4 章介绍分形及其在动力学中的应用。第 5 章介绍通向混沌运动的

典型道路。第6章给出机械、化学、土木工程以及流体动力学等领域中可能产生混沌运动的若干实例。第7章阐述反馈与无反馈混沌控制的概念与实现混沌同步的方法。

在本书中,作者利用大量的例子来说明抽象的数学概念和方法,在例子的末端用符号“□”作为结束。

理论部分(第1章~第5章)的每章结尾,都会提出一些问题供读者思考,其中大部分问题的解答需要借助于计算机。读者既可以自己编写程序,也可利用现成的软件。对于后一种情况,我推荐 DYNAMICS 软件包(H. Nusse, J. A. York. Dynamics Numerical explorations, New York: Springer, 1994)或者 INSITE 软件(T. Parker, L. O. Chua. Practical numerical algorithms for Chaotic systems, New York: Springer, 1988)。

最后,感谢 S. Bishop, J. Brindley, L. O. Chua, C. Grebogi, M. S. El Naschie, T. Mullin, M. Ogorzalek, W. H. Steeb 及 J. Wojewoda 等学者,与他们所作的讨论以及他们提出的宝贵建议有助于使本书更为清晰。

Rosanow, 1997.8

Tomasz Kapitaniak

内 容 简 介

混沌广泛存在于工程与自然界中。最近已有若干关于混沌可能应用的报道,这使得工程师和科学家们对混沌的兴趣更为浓厚。本书从混沌的基本定义、定理出发,介绍了混沌研究基本方法,给出了机械、化学、电子、土木工程以及流体动力学等领域中可能产生混沌的若干实例,介绍了混沌控制,即如何在实际系统中抑制或引入混沌。本书适合作为工科大学生、研究生的教学用书,同时可以作为工程技术人员处理非线性动力学特别是混沌运动相关问题的参考用书。

目 录

第 1 章 非线性系统的响应	1
练习题	4
第 2 章 连续动力系统	6
2.1 相空间与吸引子	6
2.2 不动点及线性化	12
2.3 非线性与线性系统的关系	19
2.4 庞加莱映射	22
2.5 李雅普诺夫指数与混沌	25
2.6 谱分析	29
2.7 不同吸引子的描述	32
2.8 从时间序列重构吸引子	36
练习题	38
第 3 章 离散动力系统	41
3.1 引例	41
3.2 一维映射	43
3.3 一维映射的分岔	51
3.4 一维映射与更高维系统	53
练习题	54

第4章 分形	56
4.1 康托集	56
4.2 分形维	59
4.3 分形集	62
4.4 斯梅尔马蹄	64
4.5 分形盆边界	67
练习题	70
第5章 通向混沌的道路	72
5.1 倍周期分岔	72
5.2 拟周期道路	74
5.3 阵发混沌道路	78
5.4 杜芬振子:离散动力学方法	80
5.5 经倍周期分岔通向混沌的条件	85
练习题	89
第6章 混沌的应用	91
6.1 干摩擦系统的混沌	91
6.2 化学反应中的混沌	98
6.3 弹性变形与空间混沌	102
6.4 电路和混沌	106
6.5 厄尔尼诺现象模型中的混沌	111
第7章 混沌控制	118
7.1 控制方法	118
7.1.1 反馈控制	118
7.1.2 基于系统设计的混沌控制方法	122
7.1.3 控制方法的选择	126

7.2	混沌同步	127
7.2.1	Pecora – Carroll 方法	127
7.2.2	连续控制实现混沌同步	130
7.3	保密通信	135
7.4	用混沌同步估计最大李雅普诺夫指数	138
	参考文献	144

第 1 章 非线性系统的响应

本章简要说明非线性系统在工程中为何如此重要。在本章中,将展示在非线性系统中出现的、迥异于我们所熟知的线性系统的某些现象。

工程中的许多振动系统可描述为

$$m \frac{d^2 u}{dt^2} + f\left(u, \frac{du}{dt}, c, k\right) = 0 \quad (1.1)$$

其物理模型如图 1.1 所示。

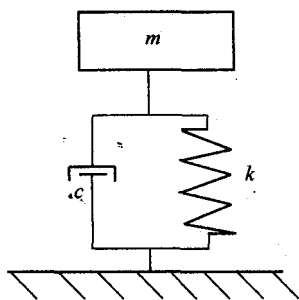


图 1.1 振动系统的物理模型

在此模型中 m 代表质量, c 为阻尼系数, k 为弹簧元件的刚度。函数 f 可能为一个三角函数(例如单摆),也可能代表某弹簧的非线性载荷——位移曲线(图 1.2)。

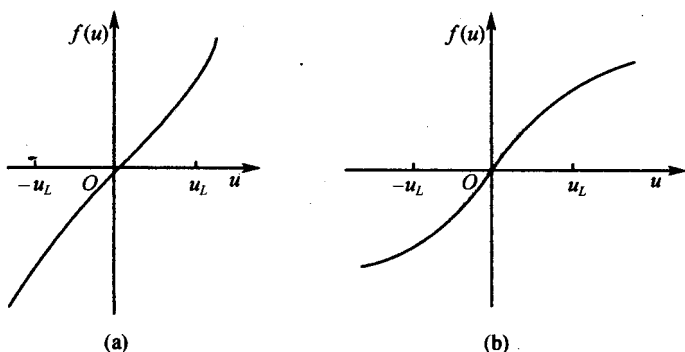


图 1.2 弹簧刚度的典型特征曲线

若系统没有能量耗散,并且恢复力可近似地表示为 $f(u) = ku - \frac{1}{6}\mu ku^3$,

则可得到微分方程:

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \omega_0^2 u - \frac{1}{6}\mu \omega_0^2 u^3 = 0 \quad (1.2)$$

式中: $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$ 。式(1.2)称为杜芬(Duffing)方程,它是许多动力学系统的模型,因而在非线性振动中十分重要。

现在介绍谐波平衡法,该方法对于研究杜芬方程十分有益。假设式(1.2)有一近似解为

$$u(t) = C \sin \omega t \quad (1.3)$$

式中: C 为常数。将式(1.3)与恒等式

$$u^3 = C^3 \sin^3 \omega t = C^3 \left(\frac{3}{4} \sin \omega t - \frac{1}{4} \sin 3\omega t \right)$$

一起代入式(1.2),得

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \omega_0^2 \left(u - \frac{\mu u^3}{6} \right) =$$

$$\left(\omega_0^2 - \omega^2 - \mu\omega_0^2 \frac{C^2}{8}\right)C\sin\omega t + \mu\omega_0^2\left(\frac{C^3}{24}\right)\sin 3\omega t$$

上式通常不为零,然而可令

$$\omega^2 = \omega_0^2\left(1 - \mu \frac{C^2}{8}\right) \quad (1.4)$$

而使 $\sin\omega t$ 系数为零,并假定 C^3 很小。式(1.4)说明当 $\mu \neq 0$ 时,非线性振动系统的圆频率与振幅 C 有关。这是非线性振动系统的特征,而线性系统不具有。在线性系统中振动频率只与系统的性质相关。

例如,考虑小幅振动时($u \in (-u_L, u_L)$),如图 1.2 所示),可取 $\mu = 0$,而式(1.4)变为

$$\omega^2 = \omega_0^2$$

有关谐波平衡法更详细的描述请参阅 5.5 节(有关该方法及其他近似方法的全面论述见 Hayashi^[1.1], Nayfeh 和 Mook^[1.2], Thomsen^[1.3], Chen 和 Leung^[1.4], Blekhman^[1.5]等的著作)。

非线性系统的其他基本性质将以范德波尔(Van der Pol)方程

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + 0.1(1 - u^2)\frac{du}{dt} + u = 0 \quad (1.5)$$

为例来展示。式(1.5)的典型解如图 1.3 所示。

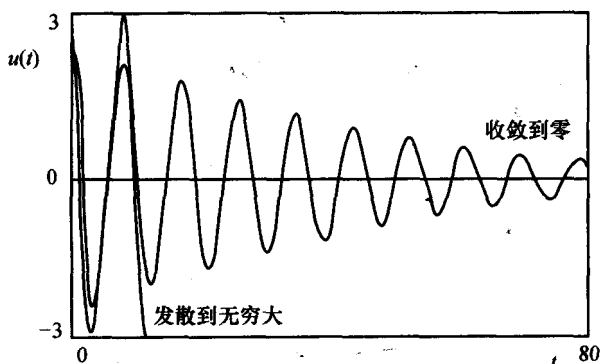


图 1.3 式(1.5)的典型解

图中两个解仅初始条件不同,而不同的初始条件使得解有可能收敛到零,也有可能趋向无穷。这种取决于初始条件的稳定性也是非线性系统所特有的性质。

将式(1.5)改写为

$$\frac{d^2 u}{dt^2} - 0.1(1 - u^2) \frac{du}{dt} + u = 0 \quad (1.6)$$

并考虑不同初始条件下的解,可以观察到非线性系统的另一个特征现象,即周期振动的振幅与初始条件无关,如图 1.4 所示。

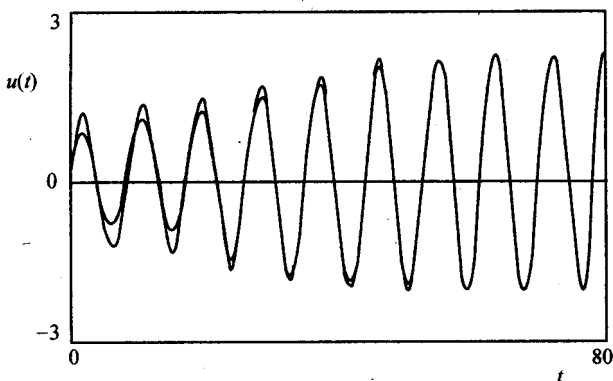


图 1.4 式(1.6)的解

非线性系统除了这些区别于线性系统的基本特征外,还存在一些有趣的现象,如分岔、混沌、吸引子共存等,这些将在本书以后的章节中逐一加以描述。

练习题

1.1 考虑线性系统

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + u = 0$$

式中: $u_0 = u(0)$, $\frac{du(0)}{dt} = 0$, 试证其振动的幅值只与初始条件有关。

1.2 一质量块悬于刚度为 k 的弹簧上。假如符合虎克定律即恢复力正比于 u , 并考虑空气阻力, 系统的运动方程为

$$m \frac{d^2 u}{dt^2} + f\left(\frac{du}{dt}\right) + ku = 0$$

考虑以下情况的解:

$$u(0) = u_0, \frac{du(0)}{dt} = 0$$

及① $f\left(\frac{du}{dt}\right) = 0$, ② $f\left(\frac{du}{dt}\right) = 0.0001\left(\frac{du}{dt}\right)^3$, 问: ①是否为②的一个良好近似?