

混沌工程学

龙运佳

(中国农业大学, 北京 100083)

[摘要] 世界是非线性的, 线性只是其近似描述, 混沌的发现表明: 某些确定性非线性系统具有内在的随机行为。事实上, 以往 20 年, 无所不在的混沌现象几乎在每个学科都有所报道, 如数学、物理学、化学, 甚至社会科学。但理论研究学者的主要兴趣在于探究混沌的本质。与此同时, 混沌的实际利用在许多工程领域受到重视, 如信息工程、系统工程、医药工程、农业工程、电气工程、生物工程、机械工程、土木工程等。混沌工程学是一门新的研究混沌实际利用及其基本理论的非线性工程科学。文章对现代混沌工程学的定义、对象、概念、方法、理论与应用加以总结, 并介绍其近来的进展及作者的工作。混沌工程学在国民经济与国防建设中研究的热点是: 混沌分析技术, 混沌控制技术与混沌生成技术。

[关键词] 非线性; 混沌; 振荡; 振动; 波

1890 年, 为证明太阳系的稳定性, 瑞典国王奥斯卡颁布了一个奖项, 以解决求 N 个天体轨道的问题。法国学者 Poincare 的工作, 因最接近于要解决的问题而得奖。他发现相互作用的仅三个或三个以上的非线性天体系统, 就呈现无规而不定的运动状态, 从此揭开了混沌研究的序幕。

1 混沌

混沌是一种普遍存在于从微观到宏观非线性系统(包括天然、人为)中内在的无规而不定的运动状态(包括振荡、振动、波)。它含有丰富的频率成分, 它是人类对振荡(或振动、波)认识的新飞跃, 也是人类利用(包括分析、控制、生成)振荡(或振动、波)的新科技。对混沌的详尽描述见英国剑桥大学 1998 年版“解释混沌”^[1]。

近代科学各学科随着混沌的发现所呈现的交叉渗透格局, 从以下著作可见:

《微分方程模型与混沌》, 《天体物理学中的混沌》, 《混沌理论与大气科学》, 《非线性电路与混

沌》, 《光学混沌》, 《混沌振动研究: 方法与实践》^[2], 《经典与量子力学中的混沌》, 《流体中的湍流与混沌现象》, 《近代工程动力学——随机·混沌》^[3], 《生物系统的混沌》, 《混沌管理》, 《混沌经济动力学等》。

1.1 混沌与近代工程

混沌在研究的初级阶段就与近代工程有关(当时还没用华裔 T. Y. Li 提出的“混沌”这个词)。在电气工程方面, 有 20 世纪 20 年代 Van der Pol 等, 60 年代 Ueda, 80 年代华裔 L. O. Chua 对混沌 Chua 电路的研究。在化学工程方面, 前苏联 Белоусов 发现 Белоусов - Жаботинский 化学反应(周期性液态氧化反应)从有序到混沌的转变^[4]。在核能工程方面, 前苏联核物理研究所 Чериков 在设计粒子加速器时也发现了混沌。在生物工程方面, DNA(脱氧核苷酸)分子的基因(DNA 片段)排列顺序中, 贮存着遗传信息。激光对 DNA 分子的作用, 使基因排列进入混沌状态而产生遗传变异, 在应用于水稻育种等方面已取得丰硕成果^[5]。

[收稿日期] 2000-09-30; **修回日期** 2000-11-09

[基金项目] 国家博士学科点专项科研基金资助项目(980112)

[作者简介] 龙运佳(1937-), 男, 广东广州市人, 中国农业大学教授, 博士生导师

在航天工程方面，1983 年，美国宇航局利用太阳系的混沌摄动，使发往太阳晕轮的探测器 3 号飞船躲过慧星的突然袭击^[6]。近年来，世界各国将混沌在工程中的应用研究转化为机电产品，如日本三洋公司的混沌暖风机，松下公司的混沌洗碗机，韩国 LG 公司的混沌空调机及混沌洗衣机已进入家电市场，以其良好的性能（空调更柔和，洗衣更清洁）提高了与同类产品的竞争力。

1.2 混沌工程学

20 世纪 90 年代初，美国召开了混沌应用国际会议，日本成立了混沌工程研究会。混沌工程学是一门新兴的研究混沌利用实践（包括分析、控制、生成）及其理论基础的工程非线性科学。在国民经济与国防建设中，可望得到利用的工程门类有：软件、信息、系统、通讯、医药、化学、电子、电气、电力、电器、雷达、声纳、船舶、农业、种子、生物、饲料、粉体、机械、车辆、选矿、核能、管道、土木、抗震、筑路、桥梁、通风、航空、航天等工程。混沌工程学由混沌分析技术、混沌控制技术、混沌生成技术三部分组成。

2 混沌分析技术

混沌分析技术主要由混沌识别、混沌复杂度统计评判和混沌短期预测三部分组成。

2.1 混沌识别

混沌识别有定性分析与定量分析两种。

2.1.1 定性分析 用相图，功率谱，自相关作定性分析以识别混沌。

1) 混沌相图有奇怪吸引子。相图的纵坐标变量为横坐标变量的导数或时延变量。相图按周期采样后得到的相点图，称为 Poincare 图。相图最终收缩（称为吸引）形成的形态奇异之相轨或相点集，称为奇怪吸引子。它具有全局与局部的自相似结构，即所谓分形结构。

例 1 图 1 为磁悬浮系统振摆实验所得的 Poincare 图^[7]。

例 2 1990 年 Li 等人^[2]研究一对齿轮，当其一个作周期振摆时，另一个作混沌振摆，其 Poincare 图见图 2。

2) 混沌功率谱为连续谱。功率谱即能量随频率的分布。横坐标是频率 (Hz)，纵坐标可以是均方值、均方根值或对数值 (dB)。混沌功率谱具有连续谱线。

例 3 在上海研制的 14 t 重型混沌振动压路机^[8]，其振动轮实测连续功率谱见图 3。

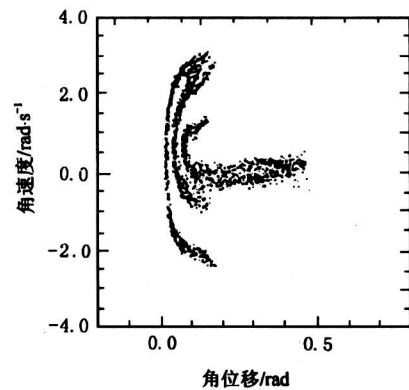


图 1 磁悬浮振动系统的奇怪吸引子
Fig.1 Strange attractor of magnetically levitated vibration system

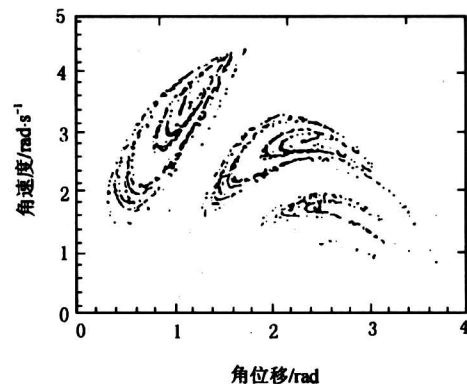


图 2 齿轮振动的奇怪吸引子
Fig.2 Strange attractor of gear vibration

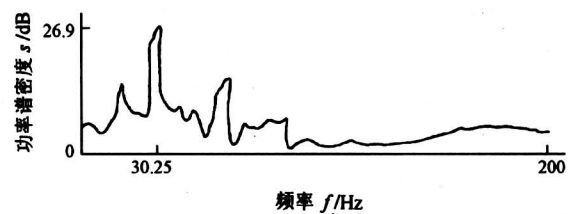


图 3 振动轮功率谱
Fig.3 The power spectrum of drum

3) 混沌时具有衰减的相关系数并趋于零。

例 4 日本的 Kazuyuki Aihara 与 Kenshi Sakai 对拖拉机悬挂农机具的混沌振动进行实验研究^[2]，得到其自相关系数图 4，从图中可见，自相关系数

从1衰减为零0。

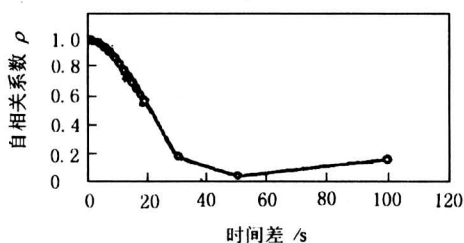


图4 农机具混沌振动自相关系数

Fig.4 Autocorrelation of chaotic vibration for agricultural implement

2.1.2 定量识别

1) 混沌时最大 Lyapunov 指数为正。Lyapunov 指数谱是用以表征奇怪吸引子中相轨间指数般分离快慢的指标，其中最大的一个称为最大 Lyapunov 指数。它若为正，则为混沌。

例5 松本, Leon.O^[9] 计算了 Chua 电路的 Lyapunov 指数谱为 0.23, 0, -1.78, 其中最大 Lyapunov 指数 0.23 为正, 证明 Chua 电路是混沌的。这个电路仅含 1 个非线性的分段线性电阻器, 1 个电感, 2 个电容。

2) 混沌吸引子有分(数)维。相空间被轨道充满的程度用维数加以度量。分数维, 即分维是奇怪吸引子的特征之一。

例6 在混沌经济学中, 用 1969—1984 年间 807 周的货币需求量数据, 以 5 周时延构成相图, 求出货币吸引子相关维为 1.5, 证明货币需求是混沌的^[10]。

例7 1997 年, 重庆医科大学与重庆大学合作测试了 52 人的脑电图分维, 发现: 人在思维时的脑电图分维大于人在不思维时的脑电图分维。抽象思维时, 左脑的脑电图分维大于右脑; 形象思维时, 右脑的脑电图分维大于左脑。总体看(左右脑平均), 抽象思维时的脑电图分维大于形象思维时的。

3) 混沌时 Melnikov 函数有简单零点。Melnikov 函数为 Poincare 图中稳定流形(相点经过的曲线)与不稳定流形之间距离的度量, 一旦为零, 即有混沌。

例8 超导 Josephson 结的混沌。将两个超导体相联, 若能通过弱电流, 则称为 Josephson 结。从电路方程推出的 Melnikov 函数为^[11]:

$$h[(\delta/\delta^0) + \sin \omega t_0],$$

其中 δ 是电路方程中的一个变量, h , δ^0 由电路方程中的系数决定。当 δ/δ^0 的绝对值 ≤ 1 时, 上式有简单零点。由此证明超导 Josephson 结存在混沌。

2.2 混沌复杂度统计评判

1993 年, Lorenz 提出有限混沌与完全混沌这样两个定性(用眼睛看非周期轨道的多少)判别混沌复杂程度的概念^[12]。

作者最近提出更为精确的定量评判混沌吸引子幅值复杂性强弱程度的统计指标——复杂度 G ^[13]。

$$G = [1 - \rho(T_0)]/2,$$

式中: $T_0 = 2\pi\sigma_x/\sigma_{\dot{x}}$, $\rho(T_0)$ 是 T_0 时的自相关系数。 σ_x , $\sigma_{\dot{x}}$ 分别是变量与变量导数的标准差。在国民经济与国防建设中, G 可作为故障诊断、状态监测、目标识别的特征量。

例9 电力工程中的 Ueda 吸引子:

$$\ddot{x} + K\dot{x} + x^3 = B\cos t$$

当 $K=0.67$, $B=5.2$ 时, $G=16.06\%$ (图5)

$K=0.35$, $B=9.2$ 时, $G=52.88\%$ (图6)

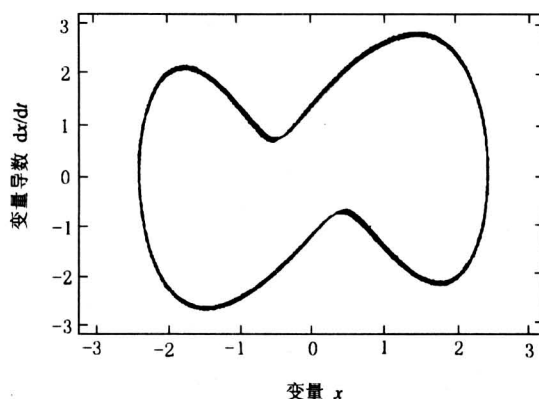


图5 Ueda 吸引子相轨图 ($K=0.67$, $B=5.2$)

Fig.5 The trajectory of Ueda attractor ($K=0.67$, $B=5.2$)

2.3 混沌短期预测

由于世界是非线性的, 因而不可作长期预测, 只可作短期预报。如位于英国的欧洲中期天气预报中心, 其使命便是做 10 天以内的天气预报。

能否作短期预测也是区分混沌信号与随机信号的方法之一。

混沌短期预测的方法有:

1) 建立系统数学模型。以数学模型作数值仿真进行预测。但有时模型与实际情况相距甚远, 有

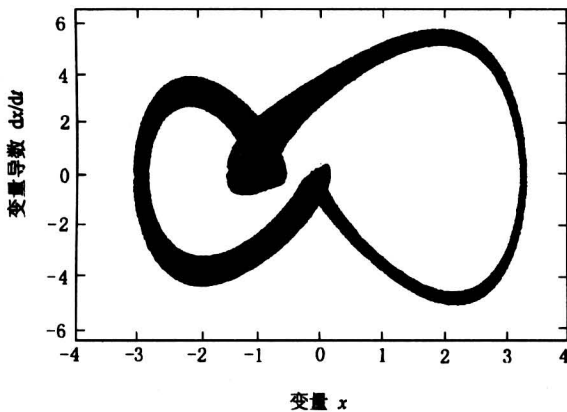


图6 Ueda 吸引子相轨图 ($K=0.35, B=9.2$)

Fig.6 The trajectory of Ueda attractor
($K=0.35, B=9.2$)

时因物理机制复杂而难以建立模型,有时因变量太多而难以计算,如全球大气环流模型就是一个含有500万个变量的模型。

2) 对混沌时间序列数据进行预测。用全部时间序列数据做预测,称为全局预测;用预测点附近的时间序列数据做预测,则称为局部预测。可应用于从自然科学到社会科学的各领域,如预测冰川期,预测股票行情等。预测时,可以用最小二乘法先求出预设数学模型系数,再用此模型(又称为预测器)做预测。也可以不用先设数学模型,直接用时间序列的 Lyapunov 指数规律进行预测。采用此法预测东北电力负荷,得到满意的结果。上海大学用神经网络与遗传算法相结合,预测上海中百一店股票行情,得到理想的结果^[14]。

3 混沌控制技术

混沌控制就是要将混沌运动转化为稳定周期、期望的混沌或混沌加周期的状态,或转化为与其他运动同步的状态。在工程中的主要应用是使系统(如作混沌颤振的机翼)稳定。

3.1 控制参数

在由参数构成的空间中,运动趋于某些吸引子的区域称为吸引域,域间参数构成域界。实验证明:域界并非清晰光滑而是分形的。在分形域界的上下限之间,提供了控制的柔性,参数的微小扰动都会使吸引子从1个变成另1个,故控制参数就能将运动转化为期望的非混沌或更混沌的运动状态。若不加控制,分形域界的存在有时会影响系统的可

靠性。

3.2 OGY 控制方案

1990年,美国马里兰大学 Ott, Grebogi, Yorke 三人提出,并由 Ditto 等人用磁条实验加以证明,在混沌吸引子中,任选1条轨道,通过微扰参数稳住该轨道,可用于控制单周期,双周期,三周期等低周期轨道。

3.3 OPF (偶然正比反馈) 技术

为能控制所有周期轨道,1991年,美国俄亥俄大学 Hunt 在激光系统中应用了 OPF 分析技术(调整限制信号微扰的窗口宽度及反馈信号的增益),提高了激光器的功率。1992年,乔治亚大学的 Roy 将此技术用于固态激光器^[15]。核磁共振激光器也用了这种技术。

3.4 无反馈控制法

1993年,美国加州大学 L.O.Chua 等与波兰 Lodz 科技大学 T.Kapitaniak 一起提出了无反馈控制理论,用线性子系统控制非线性主系统的混沌摆动。1995年,作者用一个实物试验系统与研究生一起对此理论进行了实验验证^[3]。

3.5 脉冲控制法

1994年, Schiff 等采用电脉冲刺激混沌脑电波,以控制癫痫发作^[16]。

3.6 混沌同步

由激励系统驱动响应系统时,只要响应系统的 Lyapunov 指数为负,则与激励系统(也称为驱动系统)同步。1989年,Carroll 与 Pecora 做出了第一个同步混沌电路。1993年,Carroll 与 Neff 做出了混沌同步保密通讯电路。

在机械工程方面,由作者主持,与徐州工程机械厂联合研制的自行式 10 t 重型混沌振动压路机,1999年在振动试验中发现振动轮左右振动加速度的一致性,这证明在振动轮左右两腔中,液压驱动的两个独立混沌激振器是同步的。

4 混沌生成技术

4.1 生成

通过简单的非线性系统,人工产生混沌信号或混沌运动,例如:

1) 信息工程 计算机中的伪随机信号发生器,混沌信息存储器,编码器,解码器。所谓编码,如字母 C,排序第3,用二进制编码为 00011;所谓解码为其逆过程。

2) 通讯工程 用混沌信号发生器施行混沌同步保密通讯,即在甲地将需要保密的信号加上已知的混沌信号传到乙地后,卸去已知的混沌信号即得到所要的保密信号,并不时变换所用混沌信号,以增强抗破译性。

3) 软件工程 软件的混沌同步加密,以提高软件的安全性,原理与2)类似。

4) 医药工程 普通的心脏起搏器只能简单地使心脏以预先设置的一定心率跳动,而心脏混沌起搏器可以使心脏维持其原有的自然节律。

5) 电子工程 1992年, YAMAKAWA 实验室研制的混沌芯片见图7^[17]。



图7 混沌芯片

Fig.7 Chaos chip

6) 机械工程 1995~1996年,作者研制的混沌振动台、混沌激振器,取得两项国家专利(ZL95214278.3与ZL95217738.2)

7) 筑路工程 在1998~2000年,在作者主持下,先研制0.75t混沌振动压路机,后与上海工程机械厂合作研制自行式14t重型混沌振动压路机,均已用于开发我国西部高速公路;与徐州工程机械厂合作研制的自行式10t重型混沌振动压路机可提高工效12.2%。这是由于混沌振动的宽频带与宽幅域,将大小不同颗粒间的摩擦减少,呈现流动状态而充填间隙,从而可比常规振动压路机更有效地压实各类土壤铺层及岩石填方。

4.2 杂生成

混沌系统+其他系统,例如:

1) 混沌神经网络 神经网络的自学习,联想存贮与高速寻优功能,再加上混沌系统的柔性 with 适应能力,使得神经网络更神奇。用它可提高对手写字体的识别质量。

2) 混沌人工智能 人工智能的感知、学习、推理功能,再加上混沌系统的柔性 with 适应能力,就使人工智能更聪明。如:优化时用它可更快地逃出

局部最小区。

4.3 逆问题

从复杂信号中找回能人工产生的简单非线性系统或简单非线性动力学方程组的少量参数。

例如,在处理图像数据时,用这种方法只要存贮上述少量参数,相对原来的图像数据存贮量大为减少,从而实现图像压缩,称之为图像数据的混沌压缩技术^[18]。

5 结语

本文总结了混沌工程学的定义、对象、概念、理论、方法与应用,主要介绍了混沌分析技术、混沌控制技术、混沌生成技术三部分研究的新进展,及作者近期在混沌吸引子幅值复杂度与混沌振动压路机方面的研究工作。

在混沌工程学研究,主观上不可将混沌与非混沌对立起来,客观上两者往往有时并存,有时混沌是主要的,有时非混沌是主要的。研究混沌在工程中应用的同时,诸多理论问题不可忽视。新实践有新问题,理论研究要同步深入探索。

新兴的混沌工程学之发展,正在对国民经济与国防建设作出贡献,混沌在工程中的应用,前景广阔,前途无量。

参考文献

- [1] Smith P. Explaining Chaos [M]. Cambridge University Press, 1998
- [2] 龙运佳. 混沌振动研究: 方法与实践 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997
- [3] 龙运佳, 梁以德. 近代工程动力学——随机·混沌 [M]. 北京: 科学出版社, 1998
- [4] Жаботинский А М. Периодические окислительные реакции в жидкой фазе [J]. Наука, 1964, 157 (2): 392~395
- [5] 周凌云, 王瑞丽, 吴光敏, 等. 非线性物理理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2000
- [6] Farquhar R, Muhonen D, Church L C. Trajectories and orbital maneuvers for ISEE-3/ICE comet mission [J]. J Astronaut, 1985, 33(3): 235~254
- [7] Hideyuki Tamura, Xu Zhixiang, Nobuyuki Souwa, et al. Experiment study on chaotic vibration of a magnetically levitated system [J]. 日本機械学会論文集 (C編), 1993, 59(11): 3291~3298
- [8] Long Yunjia, Yang Yong, Wang Congling. Chaotic vibration mechanics & heavy roller engineering [A].

- Proceeding of international conference on engineering and technological sciences 2000. CAE [C]. Science Press, 2000, Session 5. 845~850
- [9] 葛真, 徐云. 非线性电路与混沌 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1989
- [10] Barnett W A, Chen P. Deterministic chaos and fractal attractors as tools for non-parametric dynamical econometric inference [J]. Mathematical computer modeling, 1988, (10): 275~296
- [11] 李继彬. 混沌与 Melnikov 方法 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1989
- [12] Lorenz E N. The essence of chaos [M]. University of Washington Press, 1993
- [13] 龙运佳. 混沌吸引子幅值复杂度统计评判 [J], 非线性动力学学报, 2000 (1~2): 19~24
- [14] 童颖, 费良俊. 发现金融市场预测模型的计算智能方法 [J]. 软件学报, 1999, (4): 395~399
- [15] Roy R, Murphy T W, Maier T D, et al. Dynamical control of a chaotic laser: Experimental stabilization of a globally coupled system [J]. Phys Rev Lett, 1992, (68): 1259~1262
- [16] Schiff S J, Jerger K, Duong D H, et al. Controlling chaos in the brain [J]. Nature, 1994, 370 (6491): 615~620
- [17] 合原一幸, 德永隆治. カオス應用戰略 [M]. オーム社, 1993.86
- [18] Nakagawa M. Chaos and fractals in engineering [M]. World Scientific, 1999

Chaos Engineering

Long Yunjia

(China Agricultural University, Beijing 100083, China)

[Abstract] The world is nonlinear, linearity is only its approximate description. The discovery of chaos has showed that some deterministic nonlinear systems exhibit inner random behavior. Over the past two decades, chaos was such a universal phenomenon that it was reported virtually in every scientific discipline: mathematics, physics, chemistry, and even the social sciences. The main interest for theoretical academicians has been to investigate the essence of chaos. At the same time, practical applications of chaos have been widely appreciated in many engineering fields such as information engineering, system engineering, medical engineering, agricultural engineering, electrical engineering, biological engineering, mechanical engineering, civil engineering, etc. Chaos Engineering is a new nonlinear engineering science to research the practical use of chaos and its fundamental theory. In this paper, the object, definition, concept, method, theory and application of modern Chaos Engineering are summarized. Some works done by the author and the recent advances are introduced. The focus of Chaos Engineering research and development in national economy and national defense may include chaos analytic technique, chaos control technique and chaos synthetic technique.

[Key words] nonlinear; chaos; oscillation; vibration; wave

* * * * *

《中国工程科学》(月刊) 是中国工程院院刊
欢迎读者直接向本刊编辑部订阅