电路中的混沌与故障诊断

马红光　韩崇昭　编著

国防工业出版社
National Defense Industry Press

电路中的混沌与故障诊断

马红光　韩崇昭　编著

国防工業出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

电路中的混沌与故障诊断/马红光，韩崇昭编著.
北京:国防工业出版社,2006.3
ISBN 7-118-04351-6

Ⅰ.电… Ⅱ.①马…②韩… Ⅲ.①混沌学—应用
—电路②电路—故障诊断 Ⅳ.TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 004762 号

※

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)
国防工业出版社印刷厂印刷
新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 **印张** 8⅜ **字数** 218 千字
2006 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 **印数** 1—3000 册 **定价** 19.00 元

国防书店:(010)68428422 发行邮购:(010)68414474
发行传真:(010)68411535 发行业务:(010)68472764

前　言

自 20 世纪 70 年代以来，混沌作为非线性科学的重要分支，与其他科学相互渗透，在数学、物理学、生命科学、地球科学、信息科学、经济学和天文学等领域均得到了广泛的重视。20 多年来，混沌科学虽然在基础理论方面取得了很大的进展，但还没有取得根本性的突破，还有许多理论问题没有得到圆满的解决；目前，对混沌的研究及应用主要仍是用数值方法。尽管如此，人们仍旧致力于将其应用到解决各类复杂的工程问题中，以期从应用的角度促进对混沌的研究。在混沌的应用方面，根据从混沌系统提取的非线性时间序列对系统的现状和未来进行估计和预测，是一个十分重要的方面，它所研究的理论与方法实质就是故障诊断，与传统意义上的故障诊断的主要区别是，基于信号分析和知识处理的故障诊断是以被测对象在运行过程中出现的外部特征为基础的，没有涉及对象的动力学本质。由于系统自身结构的复杂性，机、光、电、液、气之间的耦合非线性、状态变量演化的非线性等，使得系统故障引起的外部特征可能减弱、重叠、甚至消失，因而现有的诊断方法不能有效地解决复杂系统的故障诊断问题。基于混沌理论的故障诊断方法从系统的非线性动力学特性出发，应用混沌特征量对系统的工作状态进行分析，得到系统状态变化与混沌特征量变化之间的关系，由此找出与之相对应的故障源，从而有效地克服了传统故障诊断方法存在的不足。此外，人们在研究混沌的过程中发现，非线性电路中存在着大量的混沌现象，借助于电路产生混沌信号是研究混沌的一个有效的途径。通过研究电路中的混沌，得到复杂电子系统状态估计和预测的方法，这些方法不仅适合于电子系统，并且可以应用于其他非电类的非线性混沌动力系统，从而获得复杂系统故障诊断的一般方法。本书正是从这点出发，以近年

来国内外相关方面的研究成果为基础，结合笔者在科研工作中获得的成果和心得，试图对该领域所涉及的主要问题进行理论概括和技术总结，供相关领域的科技工作者阅读参考。

全书共分 8 章。第一章简单介绍了混沌的起源、定义和本质，混沌研究的历史与现状，以及混沌时间序列分析的主要方法。第二章为非线性动力系统与混沌的基础理论，重点从数学上给出了非线性动力系统和混沌的定义，介绍了相关的基本概念和典型的混沌动力系统。第三章较系统地叙述了混沌数值分析的理论与目前常用的方法，并结合经典的混沌动力系统，给出了实际应用的例子。第四章介绍了著名的 Chua 电路及其混沌特性分析，举例说明了具体电路实现和若干较实用的 Chua 电路。第五章论述了混沌振荡器的一般设计原则与方法，给出了洛伦兹(Lorenz)系统的电路实现以及典型的混沌振荡器电路。第六章对 Colpitts 振荡器、间歇振荡器和弛张振荡器等常用振荡器的混沌特性进行了较为深入的分析，简要介绍了 3 种 UHF 混沌振荡器的电路和混沌特性分析。第七章在介绍复杂系统故障诊断方法的基础上，结合某型雷达引信，较系统地介绍了 3 种基于混沌不变量的故障诊断方法。第八章结合雷达引信的实际电路，介绍了建立广义频谱响应函数(GFRF)前 3 阶核函数的方法，在此基础上，深入探讨了基于混沌和 GFRF 的故障诊断方法。书末附有一百余篇有关混沌、混沌电路分析和故障诊断方面的文献资料，这对那些希望从事该领域研究的科技工作者无疑是有益的。

在本书的撰写过程中，得到了第二炮兵工程学院训练部部长王耀鹏、一系主任刘国庆、政委尚兰学等领导的关心和大力支持。同时还得到了第二炮兵工程学院 101 教研室王国华、朱小菲、许建锋和李站良等诸多同事的帮助，在此表示衷心感谢。

由于作者水平有限，书中不当之处再所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2005 年 8 月

目　　录

第一章　绪　论

在人类认识世界的历程中，首先是用相对简单的线性关系（线性模型）来刻画物理系统的定量（定性）关系；对于系统中的非线性因素不能够完全忽略的情况，则往往采取线性近似或线性迭代的方法来处理。这样做在某些情况下能够得到较好的结果，但这些情况一般出现在比较“简单”的非线性问题中，或者只是在研究系统的一些“常规”行为特征时。随着人们对社会、自然认识的不断深化，人们越来越不敢“小看”非线性问题了。首先，现实世界中的任何物理系统从本质上看都是非线性系统；再者，许多问题中的强非线性作用与长时间尺度的系统行为均不能用线性方法（包括线性近似）来描述，即使在表面看上去很简单的非线性系统中，也可能表现出令人惊异的复杂性。于是，人们越来越重视对广泛存在于社会与自然中的非线性现象的研究，并由此诞生出非线性科学[1]。

近 20 年来关于非线性科学的研究发展很快，这主要归结为：第一，电子计算机的进步使对非线性系统的定量仿真与实验成为可能，甚至出现了实验数学这一新学科；第二，各学科均发现大量的普适的非线性现象；第三，新的数学分析工具与方法的有效使用，在短短的时间里使非线性科学取得了一系列重要的成果与突破，在许多方面，甚至改变了人们对社会、自然的基本看法。但无论在理论上还是在实践上，非线性科学面前都有重重障碍难以逾越，如关于多重分形的奇异点集的标度结构，图像形成系统的系列方程，复杂图形对湍流边界层的作用，确定性混沌系统的预测等。还有，非线性科学正扩展到经济学、社会科学、管理科学甚至国际关系研究中。

非线性科学是一门研究非线性现象共性的基础科学[2]，它是20世纪60年代以来，在各门以非线性为特征的分支学科的基础上逐步发展起来的综合性学科，被誉为20世纪自然科学的“第三次大革命”。科学界认为：非线性科学的研究不仅具有重大的科学意义，而且具有广泛的应用前景，它几乎涉及到自然科学和社会科学的各个领域，并正在改变人们对现实世界的传统看法。在非线性科学的研究中，已涉及对确定性与随机性、有序与无序、偶然性与必然性、量变与质变及整体与局部等范畴和概念的重新认识，它将深刻地影响人类的思维方法，并涉及现代科学的逻辑体系的根本性问题。一般认为非线性科学的主体包括混沌(Chaos)、分形(Fractal)和孤子(Soliton)。由于本书主要涉及复杂系统中的混沌现象和与之相关的故障诊断技术，因此，在以后的章节中仅限于讨论混沌理论及其应用。

1.1 混沌的起源

混沌研究的鼻祖是法国的庞加莱(H. Poincare，1854年—1912年)，他在研究能否从数学上证明太阳系的稳定性问题时，发现即使只有3个星体的模型，仍产生明显的随机结果。1903年，庞加莱在他的《科学与方法》一书中提出了庞加莱猜想。他把动力学系统和拓扑学有机地结合起来，并提出三体问题在一定范围内，其解是随机的。实际上这是一种保守系统中的混沌。

1954年，苏联概率论大师柯尔莫哥洛夫(Kolmogorov)，在探索概率起源的过程中发表了《哈密顿(Hamilton)函数中微小变化时条件周期运动的保持》一文，这一文章是KAM定理的雏形。1963年，Kolmogorov的学生，年轻的、具有超群才华的V. I. Arnold对此给出了严格的数学证明。几乎同时，瑞士数学家J. Moser对此给出了改进表述，并独立地作出了数学证明。此文思想为混沌未发生之初，在保守系统中如何出现混沌提供了信息。这为早期明确不仅耗散系统有混沌，而且保守系统也有混沌的理论铺

平了道路。

1963年，洛伦兹在著名论文《确定性的非周期流》(Deterministic Non - periodic Flow, J. Arums. Sci, 1963, 20: 130 ~ 141) 中指出：在三阶非线性自治系统中可能会出现混乱解。他研究的是大气在温度梯度作用下的自然对流系统，这是天气预报的一种极端简化模型，即著名的洛伦兹方程：

$$
\begin{aligned}
\dot{x} &= -\sigma(x-y) \\
\dot{y} &= -xz+\gamma x-y \\
\dot{z} &= xy-bz
\end{aligned}
\tag{1.1}
$$

方程右端不显含时间，它是一个完全确定的三阶常微分方程组。3个参数σ(普兰德尔 Pranatl 数)，γ(瑞利数与其临界值之比)，b为正实数，如取$b=8/3$，$\sigma=10$，改变参数γ：若$\gamma<1$，其解的性质趋于无对流时的稳态；若$\gamma>1$，其解为非周期的，看起来很混乱。这就是在耗散系统中，一个确定的方程却能导出混沌解的第一个实例。2000年，《自然》杂志发表论文“The Lorenz Attractor Exists”，首次从数学上严格证明了洛伦兹吸引子在自然界中存在。KAM定理讨论的是保守系统，而洛伦兹方程讨论的是耗散系统，它们分别从不同的角度说明了两种不同类型的动力系统，在长期的演化过程中是怎样出现混沌态的。

1964年，法国天文学家伊依(Henon)从研究球状星团以及洛伦兹吸引子中得到启发，给出了下面的 Henon 映射：

$$
\begin{aligned}
x_{n+1} &= 1+by_n-ax_n^2 \\
y_{n+1} &= x_n
\end{aligned}
\tag{1.2}
$$

在上述方程中，当参数$b=0.3$，改变参数a时，发现其系统运动轨线在相空间中分布似乎越来越随机。伊依得到了一个最简单的吸引子，并用它建立了“热引力崩坍”理论，解释了几个世纪以来一直遗留的太阳系的稳定性问题。

1971年，法国数学物理学家 D. Ruelle 和荷兰学者 F. Takens

联名发表了著名论文《论湍流的本质》，在学术界第一个提出用混沌来描述湍流形成机理的新观点，并证明了 L. D. Landau 关于湍流发生机制的权威理论的不正确性。他们通过严格的数学分析，独立地发现了动力系统存在一套特别复杂的新型吸引子，描述了它的几何特征，证明了与这种吸引子有关的运动即为混沌，发现了第一条通向混沌的道路，并命名这类新型吸引子为奇异吸引子。

1975 年，美籍华人学者李天岩和美国数学家约克(Yorke) 在美国《数学月刊》上联名发表了一篇震动整个学术界的论文《周期 3 蕴涵混沌》，这是一个关于混沌的数学定理。基本思想是 Yorke 受洛伦兹 1963 年的论文启发而得，李天岩给出了具体证明，这就是著名的 Li - Yorke 定理。

1976 年，美国数学生态学家梅(R · May) 在美国《自然》杂志上发表了题为《具有复杂动力学过程的简单数学模型》综述文章，以单峰映射为对象，重点讨论了 Logistic 方程：$x_{n+1} = ax_n(1 - x_n)$，系统地分析了方程的动力学特征，考察了混沌区的精细结构，绘制了分叉轮廓图，汇集了敏感函数、周期窗口、树枝分叉、切分叉、基本动力学单元和不动点谐波等混沌学词汇，促进了不同领域混沌学研究联成一体。

1978 年 —1979 年费根包姆(Feigenbaum) 在梅的基础上独立地发现了倍周期分岔过程中分叉间距的几何收敛率，并发现了收敛率即每次缩小的倍数为 4.6692… 是个常数，这就是著名的 Feigenbaum 常数。Feigenbaum 还把相变临界态理论中的普适性、标度性、重正化群方法引入混沌研究，计算出了一组新的普适常数，建立了关于一维映射混沌现象的普适理论，发现了怎样作尺度变换，给出了一条走向混沌的具体道路，把混沌学研究从定性分析推进到定量计算阶段，成为混沌学研究的一个重要的里程碑。

20 世纪 80 年代以来，人们着重研究系统如何从有序进入新的混沌，以及混沌的性质和特点。除此之外，借助于(单) 多标度分形理论和符号动力学，还进一步对混沌结构进行了研究和理论上的总结。法国数学家曼德布罗特(Mandelbrot) 于 1980 年用计算机绘

出了世界上第一张 Mandelbrot 集的混沌图像。20 世纪 80 年代初 Takens，Packard，Farmer 等人根据 Whitney 拓扑嵌入定理提出重构动力学轨线相空间的延迟法。Grassberger 和 Procaccia 首次运用这种相空间重构法，从实验数据时间序列计算出实验系统的奇异吸引子的统计特征，如分数维、Lyapunov 指数和 Kolmogorov 熵等混沌特征量，从而使得混沌理论进入实际应用阶段。

1984 年，我国著名科学家郝柏林编撰的《混沌》一书在新加坡出版，为混沌科学的发展起到了一定的推动作用。1986 年，中国第一届混沌会议在桂林召开。我国科学家徐京华提出 3 种神经细胞的复合网络，并证明它存在混沌而且得到与人脑脑电图相似的输出。1988 年，丁明洲和郝柏林对洛伦兹模型周期窗口进行了系统研究，找出了其与反对称三次映射的关系。1989 年，郝柏林、郑伟谋在《现代物理学国际杂志》上发表文章，抛弃了人工造作的"反谐波"与"谐波"概念，推广了星号组合律。这是近年来混沌学理论上的重要进步。1989 年，卢侃、林雅谷、卢火在人脑脑电图的分维数上找出了脑功能锻炼历史时间的回归方程，即林雅谷功能方程式。这为应用混沌维数找出了可行的方式。1994 年，谢法根和郝柏林在《Physica》A202 卷上发表论文，完全解决了具有多个临界点的一维连续映射的周期数目问题。对于某些具备有限个断裂点的映射，周期数目也已清楚，而且绝大多数周期轨线都是不稳定的(参见 1995 年《Communications in Theoretical Physics》第 23 卷(175 ～ 180) 上面的文章)。

著名物理学家 J. Ford 认为混沌是 20 世纪物理学第三次大革命，前两次是量子力学和相对论。1975 年，混沌(Chaos) 作为一个数学名词首次在科学文献中出现，20 多年来，它以前所未有的速度，迅猛发展成为有丰富非线性物理背景和深刻数学内涵的现代学科。数学家认为，混沌是数学的新分支；而物理学家却认为，混沌是非线性物理的新分支。其实，混沌应该是物理科学和数学科学两栖的边缘科学。它讨论系统对初值的敏感依赖性、拓扑传递性与混合性、周期点的稠密性、随机性和遍历性、正的 Lyapunov 指数、分

数维和奇异吸引子等。同时，混沌在许多领域得到或开始得到广泛应用，如声学、光学、湍流、化学反应中的混沌变化、地震的混沌特性、天气长期预报的“蝴蝶效应”、商业周期中蕴涵着的有序性、股市细微分散的交易和大规模变动情况之间的重要关系等。

1.2 混沌的本质

当今科学认为，混沌无处不在：一支上翘的香烟，烟纹袅袅涡卷；在风中旗帜前后拍动；滴水的自来水龙头其滴水的花样由稳态变为随机；在气候变化中；在飞行的飞机性态中；在高速公路上汽车拥挤的性态中；在地下油管内油的流动性态中，都会出现混沌，不管介质是什么。这些性态都遵循着同一条或同一类新发现的定律。这一事实改变了管理人员有关保险的决策，改变了天文学家观测太阳系的方式，也改变了政治理论家讨论紧张局势导致武装冲突的方式。

从本质上说，混沌是直接研究我们所看得见摸得着的宇宙，以及在与人类本身的尺度大小差不多的对象中发生的过程。所有日常生活经验与这个世界的真实都是我们研究混沌时所探索的目标。因此，混沌是一种关于过程的科学而不是一种关于状态的科学；是关于演化的科学而不是关于存在的科学。

一个动力学系统呈现出混沌现象，既不是因为系统中存在的随机力或受环境中外界噪声源的影响，也不是由于无穷多自由度的相互作用，更不是与量子力学的不确定性有关。确定论规律的非线性是混沌运动存在的必要条件。而非线性系统的内在对称性又赋予混沌行为以某种结构与秩序。混沌行为最本质的特点是非线性系统对于初始条件的极端敏感性。对于一个给定的系统，我们希望弄清楚以下 3 个问题：(1) 怎样判断一个系统是否为混沌系统；(2) 对于一个混沌系统，怎样进行定量和定性描述；(3) 对于一个混沌系统，怎样根据历史信息进行预测。

我们的世界究竟是一个必须用严格确定论描述的有序世界，

还是一个必须用概率论描述的混沌世界呢？这两种世界观何者更基本呢？爱因斯坦主张前者，他说“上帝不会玩骰子”；而玻尔则认为“我们不能断言上帝该干什么”。这两种观点是不可调和的。由于混沌学的兴起，一些人认为确定性与随机性之间的鸿沟正趋于消失：由确定性可以产生随机性，而且是内在的随机性（即不是由于外界偶然干扰所产生的外在随机性）。如福特指出：混沌是确定性的随机性。另一种说法更清楚：“混沌是确定性系统的内在随机性”。由确定性可产生随机性，确是惊人之谈。他们论证如下：

迭代式 $x_{n+1}=f(x_n)$ 是确定性的，但对某些敏感函数 f，当 n 很大时 $\{x_n\}$ 不可预测，因而是随机的。著名的例子是 Ulam von Neumann 映射 $f:(-1,1)\to(-1,1)$。

$$f(x)=1-2x^2 \tag{1.3}$$

迭代式为

$$x_{n+1}=1-2x_n^2 \tag{1.4}$$

作变换 $x=\cos t$ 后，可解得

$$x_n=-2\cos(2^n\cos^{-1}x_0) \tag{1.5}$$

如取 x_0 使 $\cos^{-1}x_0/2\pi$ 为无理数，则

$$\theta_n=2^n\cos^{-1}x_0(\bmod 2\pi) \tag{1.6}$$

是一伪随机数列，从而 $\{x_n\}$ 亦然。如 θ 在 $[0,2\pi]$ 上均匀分布，则 $x=-\cos\theta$ 有分布密度为 $\dfrac{1}{\pi\sqrt{1-x^2}}$，故可认为 $\{x_n\}$ 来自具有密度为 $\dfrac{1}{\pi\sqrt{1-x^2}}$ 的母体，$|x|<1$。于是，从确定系统式(1.4)产生了“随机性”。

其实这是一种误解，根源在于混淆了随机性与伪随机性两个不同的概念，伪随机性并不等同于随机性。我们称事件 A 在某条件 c 下是随机的，是指在 c 下进行试验时，A 可能发生也可能不发生，即使在上次试验中发生了，下次实验中仍不一定发生。如抛硬

币，第一次得国徽，第二次未必仍是国徽，即“出现国徽”是随机事件。甲扔3次是“正、正、反”，而乙扔3次一般不会相同，因为这样的概率只有1/8。设F为某概率分布，从母体F中独立地抽取m个数$x_1,x_2,\cdots,x_m$称此数列为F-随机数。此数列具有若干与F有关的性质$F_1,F_2,\cdots,F_l$，例如$(x_1+x_2+\cdots+x_n)/m$，当m充分大时应该接近F的平均值。F-随机数列的一个显著特征是：设甲从F中抽得$x_1,x_2,\cdots,x_m$；乙也从F中抽得$y_1,y_2,\cdots,y_m$。则一般$\{x_i\}$不会全等同于$\{y_i\}$，尽管它们都具有性质$F_1,F_2,\cdots,F_l$。这种不可准确预测性正是“随机性”的精髓所在。现假设我们用某种确定性方法（如式(1.4)）也得到一列数$x_1,x_2,\cdots,x_m$；通过统计检验，发现$\{x_i\}$具有性质$F_1,F_2,\cdots,F_l$，但却失去了上述精髓性，即，从同一初值b_0出发，甲、乙各用此法得到两数列$\{x_i\}$，$\{y_i\}$，因方法是确定性的，故必有$x_i=y_i$，$(i=1,2,\cdots,m)$。显然，不能称$\{x_i\}$为F-随机数（矢量）列，有人称其为F-伪随机数列。故式(1.4)仅是一种伪随机数列的“发生器”，如Monte-Carlo方法发生器。由此，用确定性迭代，至多只能产生伪随机数列。从而上述“混沌是确定性系统的内随机性”，应更精确地称为“混沌是确定性系统的伪随机性”，或“混沌是确定性的伪随机性”。

另一方面，一些研究者如美国圣克鲁斯加州大学动态系统研究组的4位教授于1987年4月在《Scientific American》上发表文章《混沌现象》中说：“混沌现象是丝毫不带随机因素的固定规则所产生的”。从纯理论的观点看，这有一定的道理，因为迭代函数f是确定性的，但还需要一个理想的条件，即初始值和每次迭代运算都必须绝对精确，不能有丝毫误差。但在现实中，这是不可能的。

在日常生活中，撇开掷骰子和湍流等随机性，人们发现：气候变化、地震发生、人脑电波、股票行情和社会发展等，尽管可以看做是受到某种确定性规则的支配，但其长时间的行为仍然是无法进行预测的。