



机械故障 诊断的 分形方法

——理论与实践

石博强 著
申焱华

冶金工业出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版
国家自然科学基金资助项目

机械故障诊断的分形方法

——理论与实践

石博强 申焱华 著

北 京
冶金工业出版社

2001

内 容 提 要

本书用一般科技人员容易理解的简明语言,扼要介绍了分形、分形维数及无标度区等基本概念,给出了混沌和奇怪吸引子的特征,以及李雅普洛夫指数、关联维数、柯尔莫哥洛夫熵的计算方法,同时也讨论了小波及其在故障诊断中的应用;深入浅出地对机械系统的非线性特征、演变机制和系统状态的可预报性问题做了叙述;讨论了滑动轴承、滚动轴承的动力学模型,轴承中的混沌以及基于混沌的轴承故障诊断;以发动机为对象重点分析了有关振动信号的分形特性、发动机状态历程的分形与混沌和基于混沌的发动机状态预测。

本书适合于研究生阅读,也可供有关科技人员和高年级本科生参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械故障诊断的分形方法:理论与实践/石博强,申焱华
著.—北京:冶金工业出版社,2001.3
ISBN 7-5024-2554-3

I. 机… II. ①石…②申… III. 机械系统—故障诊断—分形
理论 IV. TH17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 84171 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 刘小峰 美术编辑 李 心 责任校对 栾雅谦

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2001 年 3 月第 1 版,2001 年 3 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 10.625 印张; 283 千字; 324 页; 1-2000 册

25.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

分形学是一门新学科、一种新理论。了解它，不是科技工作者的一种“时髦”、一种“前卫”，而是 21 世纪对地球上每一个人的“新”要求。我们知道，客观世界的复杂性，常常被我们“简单地”、“规则地”、“线性地”……处理了。对这些“美丽”处理，人们骄傲、陶醉、自我欣赏。正是曼德尔布罗特提出的“英国海岸线有多长的问题”，才使人们忽然猛醒、恢复理智的思考。当你举头遥望朗夜的星空、鸟瞰山川河流、聆听美妙的音乐、面对所谓“新经济”的惊心动魄、感受身边朋友情绪的变化……可曾想到隐藏在它们背后的秘密？

分形对事物的本质揭示具有独特性。当你以分形之眼看世界之物时、用分形之剑拨开笼罩它们的迷彩之衣时，你将惊奇地发现其中的绚丽、差别、一致、相似以及令人陶醉的种种诱惑……。一般说来，分形是研究非线性问题的。它是处理自然与工程中不规则图形强有力的工具，但目前它的应用已涉及各个领域。本书试图不以数学的严密来阐述分形的基本理论，而是从工程的角度介绍其精髓，并在此基础上给出该理论在机械故障诊断中的应用及方法。

把分形理论应用于机械故障诊断领域，是近年来国际学术界的新动向。在传统的故障诊断中，状态监测及各种各样的信号分析技术已经得到广泛的应用，但对于复杂的

机械系统，它是一个多层次系统，各层次子系统之间不仅在结构和功能上存在差异，而且子系统之间也存在着非常复杂的耦合关系。在影响这些关系的一些因素中，有些因素的变化具有不确定性，这导致复杂机械系统输出的复杂性变化。另外，从机械系统的时间演化角度来看，可视为复杂的非线性动力系统。对于一个非线性复杂机械系统的状态（或故障）长期预测，存在“初始条件敏感性问题”，即相同的一种复杂机械系统，其初始工作条件（状态）存在微小差异，工作一定时期后，其工作状态和性能发生较大的差异。从这种角度出发，使得我们在传统上对机械系统故障诊断和状态预测的种种考虑，以及基于此所取得的一系列有关的成果，未免产生“缺陷感”。而且可以想像，随着科学技术的发展，更多的和更复杂的机械设备的出现，这种“缺陷感”会变得愈加强烈，这迫使我们必须对此给予更完美的回答。本书对此做了一定的努力，仅算作引玉之举。

书中内容主要来自于国家自然科学基金资助课题“基于分形的复杂机械系统故障诊断研究”的成果，同时也参考了国内外其他学科领域（如气象、地震、分子科学和岩石力学等）有关分形的研究成果和专著。本书从系统的角度、特别是从研究复杂系统的基点出发，来探讨机械系统的故障诊断问题，把机械系统状态的复杂变化用简单的数字——分维数的变化来表征，既给出了状态变化的量化指

标, 又减少状态(或故障)表征的参数, 从而使诊断输出的结果更加明显、直观; 根据系统的结构和功能进行层次划分以及各子系统(或系统)所表现出的不同层次的征兆信息, 基于分形的故障诊断方法可以应用到任意子系统级。

全书共分 11 章, 包括了分形基本理论的介绍以及实际的工程应用。第 1 章介绍了分形、自相似性及无标度区等的基本概念; 第 2 章给出了各种分形维数的数学定义, 并介绍了几种常用的分形方法, 如分形插值、重整化群等; 第 3 章描述了规则分形与随机分形; 第 4 章的内容包括混沌和奇怪吸引子的特征, 以及李雅普洛夫指数、关联维数、柯尔莫哥洛夫熵的计算方法; 第 5 章是对机械故障诊断领域相关内容的概述; 第 6 章具体讨论了滑动轴承、滚动轴承的动力学模型, 轴承中的混沌以及基于混沌的轴承故障诊断; 在第 7 章中, 利用小波技术, 探讨了其在复杂机械系统故障诊断领域的应用; 第 8 章和第 9 章以发动机为对象, 介绍了复杂机械系统中的非线性特性, 以及基于分形的机械系统故障诊断; 在本书的最后两章, 提出了基于混沌的复杂机械系统预测的思想, 给出了发动机状态的最大可预测时间以及基于相空间重构的 GMDH 方法的应用。

全书是我与合作者申焱华在仔细、深入研究的基础上并对研究成果进行筛选、取舍之后成稿的。我要特别提到我的合作者, 她为这一专著的出版付出了许多宝贵的时间和心血, 并且读者发现的精彩之处, 可能就是由于她特有

的细致、严谨和智慧所产生。杨文平博士参加了第 7 章内容的撰写。我的研究生薛辉在课题的研究中做出了重要贡献，他同时参加了第 11 章部分内容的撰写。

本书得到国家科学技术学术著作出版基金资助出版，研究中得到国家自然科学基金的资助。感谢这两个基金委员会的大力支持与指导。在研究和写作过程中，北京科技大学高澜庆教授、方湄教授、张文明教授给予作者支持和鼓励，在此深致谢意。作者感谢李后强、谢和平、刘式达等一大批学者，是他们为推进我国有关分形理论的应用研究所表现出的孜孜不倦的探索精神给予我们巨大鞭策，以及他们的研究成果和著作给予我们在研究中许多重要启迪。感谢李莉博士和研究生廖明在课题研究所所做的努力，感谢清华大学韦文林教授和昆明理工大学教授李英龙博士的支持与鼓励。

本书虽试图系统地阐述分形理论在机械故障诊断中应用的各个方面，但由于该领域的研究时间还很短，许多问题尚需进一步探讨，加之作者水平所限，疏漏和不当甚至错误之处在所难免，恳请读者批评指正。希望大家的帮助和共同努力下，使该领域的研究取得更大进展，从而使本书更趋完善、内容更加丰富。

石博强

2000 年 1 月

目 录

第 1 章 引论	1
1.1 分形学的兴起	1
1.2 分形理论的基本内容	5
1.2.1 自相似性	5
1.2.2 无标度性	7
1.3 分形的分类	8
1.4 分形的研究过程	9
1.5 分形学的实际应用	10
第 2 章 分形的数学基础与方法	14
2.1 分形维数	14
2.1.1 盒维数	16
2.1.2 信息维数	16
2.1.3 点形维数和平均点形维数	17
2.1.4 自相似维数	18
2.1.5 豪斯道夫维数	19
2.1.6 谱维数	20
2.1.7 自仿射的分维	21
2.1.8 生长现象的分维	22
2.1.9 关联维数	23
2.1.10 分形维数的一般定义	24
2.1.11 分维数的物理意义及应用	25
2.2 分形插值	26
2.2.1 经典插值方法	26
2.2.2 分形插值函数	28

2.2.3	隐变量分形插值函数	31
2.3	重整化群	33
2.3.1	重整化群的定义	33
2.3.2	重整化群的应用	36
2.4	因次解析	38
第3章	规则分形和随机分形	40
3.1	规则分形和自相似性	40
3.1.1	欧氏维和拓扑维	40
3.1.2	康托尔集	41
3.1.3	科赫曲线	44
3.1.4	四次科赫曲线	45
3.1.5	科赫雪花	47
3.1.6	自相似维数超过2的曲线	49
3.1.7	谢尔宾斯基集合	50
3.1.8	门格海绵	51
3.1.9	皮亚诺曲线	52
3.2	随机分形	53
3.2.1	随机康托尔集和随机科赫曲线	53
3.2.2	分形边界	55
3.2.3	盒维数和豪斯道夫维数的计算	57
3.2.4	周长-面积关系	68
3.3	布朗运动	70
3.3.1	规则布朗运动	70
3.3.2	分维数布朗运动	76
3.3.3	高维布朗运动——分维数布朗曲面	83
3.3.4	分维数式布朗运动——空间轨迹	85
3.3.5	有限扩散凝聚	89
3.3.6	噪声	91

第4章 混沌系统	92
4.1 混沌简介	92
4.1.1 非线性与复杂性	94
4.1.2 混沌的内在随机性	96
4.1.3 对初始条件的敏感依赖性	97
4.1.4 临界点	98
4.1.5 混沌与分形的联系	99
4.1.6 混沌的研究过程	100
4.1.7 混沌理论的实际应用	100
4.2 迭代反馈过程和混沌	104
4.2.1 种群增长和维尔赫斯特模型	104
4.2.2 实平面中的迭代函数	106
4.2.3 二维映射	122
4.2.4 复平面中的迭代函数	123
4.3 几种典型的动力系统	128
4.3.1 相空间和维数	128
4.3.2 吸引子	129
4.3.3 奇怪吸引子	129
4.3.4 洛伦兹系统	130
4.3.5 鲁斯勒系统	133
4.3.6 杜芬振子	135
4.3.7 空间扩展系统——耦合振子	141
4.3.8 空间扩展系统——流体	143
4.4 混沌的特征描述	146
4.4.1 混沌的初步判断方法	147
4.4.2 混沌的特征描述	149
4.4.3 柯尔莫哥洛夫熵或 K 熵	164
4.4.4 赫斯特指数或功率谱指数	166

4.4.5	几种方法的综合运用	166
4.4.6	梅尔尼柯夫方法	167
第5章	机械故障诊断概述	170
5.1	设备维修与故障诊断技术	170
5.1.1	设备维修的发展过程	170
5.1.2	机械设备故障诊断的发展过程	171
5.2	开展故障诊断技术研究的意义	172
5.3	设备故障诊断技术的现状	173
5.4	设备故障诊断技术发展趋势	175
5.5	小波分析在故障诊断技术中的应用	176
5.6	非线性科学在机械故障诊断中的应用	179
第6章	轴承中的混沌及其故障分析	182
6.1	滑动轴承的动力学模型	182
6.2	滑动轴承中的混沌	189
6.2.1	数值模拟	189
6.2.2	实验模拟	199
6.2.3	实验结果分析	201
6.2.4	滑动轴承模拟实验结论	204
6.3	滚动轴承的动力学模型	205
6.3.1	滚动轴承的动力学分析	207
6.3.2	滚动轴承的内部振动源	208
6.4	滚动轴承中的混沌	211
6.4.1	转子速度对运动的影响	212
6.4.2	通往混沌运动的谐波途径	215
6.4.3	通往混沌运动的准周期途径	217
6.4.4	滚动轴承缺陷的影响	222
6.4.5	轴承座圈和滚珠失去接触对混沌运动 的影响	224

第 7 章 小波理论及其在故障诊断中的应用	227
7.1 连续小波变换的定义及其数字实现	227
7.1.1 连续小波变换的定义	227
7.1.2 连续小波变换的数字实现	229
7.1.3 离散小波变换	231
7.2 一维玛拉特算法	232
7.3 小波去噪模型的建立及应用	236
7.3.1 小波去噪模型的建立	236
7.3.2 小波去噪模型的应用	239
7.4 小波包理论在复杂机械故障诊断中的应用	240
7.4.1 小波包理论	240
7.4.2 小波包滤波	243
7.4.3 小波包理论在 KTA50 汽车发动机故障 诊断中的应用	244
第 8 章 复杂机械系统中的混沌	250
8.1 复杂机械系统的功能输出和附加输出	251
8.2 复杂机械系统中的混沌	252
8.2.1 复杂机械系统中的混沌	254
8.2.2 混沌理论在复杂机械系统故障诊断中 的应用	255
8.3 混沌的特征描述	256
8.3.1 分维数	257
8.3.2 李雅普诺夫指数	259
8.3.3 柯尔莫哥洛夫熵或 K 熵	260
8.3.4 庞加莱映射	261
8.4 复杂机械系统混沌运动的判据	262
8.4.1 发动机燃烧振动信号的关联维数	263
8.4.2 发动机燃烧振动信号的李雅普诺夫 指数	264

8.4.3	发动机燃烧振动信号的柯氏熵	266
第 9 章	基于分形的机械系统故障诊断	267
9.1	基于分形的滚动轴承故障诊断	268
9.1.1	滚动轴承振动信号中的分形	268
9.1.2	信号采集与处理系统	270
9.1.3	不同工况下的分维数	270
9.2	基于分形的滑动轴承故障诊断	271
9.3	基于分形的发动机燃烧振动信号的研究	275
9.3.1	基于分形的发动机燃烧振动信号分析	276
9.3.2	实例分析 1——斯太尔汽车发动机	276
9.3.3	实例分析 2——康明斯发动机的振动 信号	278
9.4	分形在柴油机燃油系故障诊断中的应用	282
9.4.1	自相似过程	283
9.4.2	柴油机高压油管振动的特点	285
第 10 章	复杂机械系统状态最大可预测时间	288
10.1	基于混沌的复杂机械系统状态预测的 可行性研究	288
10.2	基于混沌的复杂机械系统状态预测思想	291
10.3	复杂机械系统状态的最大可预测时间	292
10.3.1	混沌系统最大可预测时间	292
10.3.2	复杂机械系统状态的最大可预测时间 计算模型	294
10.3.3	实例分析	299
第 11 章	基于混沌的复杂机械系统状态预测	300
11.1	复杂机械系统状态预测的动力学模式	300
11.2	GMDH 方法简介	303
11.3	基于相空间重构的 GMDH 方法在复杂机械	

系统状态预测中的应用.....	308
11.3.1 相空间重构.....	309
11.3.2 基于相空间重构的 GMDH 方法	309
11.3.3 实例分析.....	313
结束语.....	318
参考文献.....	321

第1章 引论

当今科学技术的发展是空前的，并取得了许多激动人心伟大的成果。分形几何和混沌动力学就是其中的一对孪生“果实”。它们从开花到结果，然后到成长的进展速度已经跟不上人们对它们的意识以及模拟。化学家、生物学家、物理学家、心理学家、地理学家、经济学家和工程师们（机械、电子、化学、宇航等领域）都在用由分形几何和混沌动力学发展起来的方法来解释变化多端的物理现象：从树木到紊流，从城市到裂缝，从音乐到月球上的坑地等等。关于分形几何和混沌动力学的思想在很久以前就已经存在了，但是，只有当计算机出现后，满足才快速准确进行大容量、反复计算的能力，人们才具有深层挖掘这些领域的必备工具。近年来，随着计算机技术的不断进步，人们掀起了研究分形理论和混沌动力学的热潮。

1.1 分形学的兴起

任何一门新学科的创立，不仅是理论进步的结果，也是为了更深入了解自然界、发展生产和社会实践深化的需要。

欧氏几何研究的图形只是用圆规及规尺画的简单图形，这样的图形是光滑的；牛顿以后，由于微积分和几何学的结合，产生了黎曼几何，研究的对象才能是更为复杂的形状，但这些对象的重要特征是具有特征长度，是平滑的，可微分的集合和系统。对那些呈现出不光滑或不规则的形状的集合（或无序系统），以欧氏几何和黎曼几何为代表的传统几何学无能为力，认为是“病态的”，不值得研究的。

然而，大自然中或日常生活中有很多这样的系统，它们的图形

是如此地不规则和支离破碎，它们具有较高程度的复杂性，而且拥有完全不同层次的复杂度。运用传统的方法就意味着回避了大自然中很多更为本质的东西，也就不能从更深的层次解释自然界的千变万化、瑰丽多彩。

开始于 20 世纪 70 年代的一种新的数学语言——分形几何正是弥补了传统几何学中的不足。分形（fractal）这个词最初由曼德尔布罗特（B. B. Mandelbrot）提出，因此他被尊称为“分形几何之父”。Fractal 一词由拉丁文 fractus 而来，意思是“破碎的、碎裂的”，它同时还具有“不规则”的含义，其描述的对象是很不规则的，是不适合用经典几何来描述的。运用这种新的方法，人们认识到数学上的许多不光滑集或不规则集是可以研究的，而且，用不规则集表达许多自然现象要比规则集好得多。建立在一种全新的理论体系上的分形几何，正是研究这些不规则集的工具。分形几何学与欧氏几何学的差异如表 1-1 所示。

表 1-1 分形几何学与欧氏几何学的差异

差 异	描述对象	特征尺度	描述方式	维 数
欧氏几何学	人类创造的简单物体	有	数学语言	0 及正整数
分形几何学	大自然创造的真实物体	无	迭代语言	分数维

分形研究的是自然界常见的、变幻莫测的、不稳定的、非常不规则的现象。如图 1-1~图 1-4 分别表示山脉、地表、云彩与蕨类植物。山脉不是标准的锥体、云彩不是球体。推及自然界中的许多事物，可以发现海岸线不是直线，也不是圆周，树皮并不光滑。

近十几年来，随着研究的深入，分形几何已经扩展到了许多领域。分形几何与分形物体的特性有关，因此通常也称为分形体。分形既可以在自然界当中找到，也可以用数学模型生成。曼德尔布罗特意识到如果只用传统的欧氏几何不可能描述自然界当中的物体，因为欧氏几何所研究的图形只限于规则的点、线、曲线、面等等。

在传统的几何学中，量仅仅能够以整数形式度量，比如一个三维的球能够有一个二维的影子，并带有一维的外形轮廓。分形和分形几何却可以用来描述真实的物体，如树木、闪电、蜿蜒曲折的河流和海岸线。



图 1-1 山脉

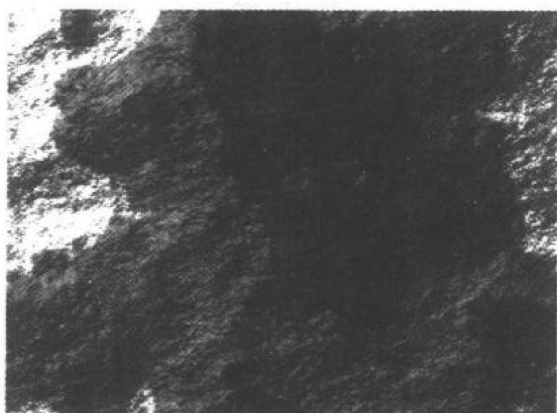


图 1-2 地表