

基于混沌和小波的 故障信息诊断

Chaos and Wavelet Based Fault Information Diagnosis

姜万录 张淑清 王益群 著

國防工業出版社

<http://www.ndip.cn>

基于混沌和小波的 故障信息诊断

**Chaos and Wavelet Based
Fault Information Diagnosis**

姜万录 张淑清 王益群 著

國防工業出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

基于混沌和小波的故障信息诊断/姜万录等著. —北京:国防工业出版社, 2005.8

ISBN 7-118-03458-4

I. 基... II. 姜... III. ①混沌学—应用—生产线—故障诊断②小波分析—应用—生产线—故障诊断

IV. TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 038556 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)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 8% 218 千字

2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月北京第 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:68428422

发行邮购:68414474

发行传真:68411535

发行业务:68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金

第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员 陈达植

顾问 黄 宁

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘书长 张又栋

副秘书长 彭华良 蔡 镭

委员 于景元 王小谟 甘茂治 冯允成
(按姓名笔画排序)

刘世参 杨星豪 李德毅 吴有生

何新贵 佟玉民 宋家树 张立同

张鸿元 陈火旺 侯正明 常显奇

崔尔杰 韩祖南 舒长胜

前 言

故障诊断是根据设备或系统运行状态信息查找故障源,并确定相应决策的一门综合性交叉科学。设备故障诊断技术能够保证设备的安全可靠运行,产生巨大的经济效益和社会效益。因此这门科学从 20 世纪 60 年代一出现就受到人们的青睐,在军事、航空航天、冶金、能源、石化、电子等许多重要领域都得到广泛的应用。故障诊断技术经过近 40 年的发展,已取得了长足的进步。随着科学技术的发展,被诊系统的结构日趋复杂,系统的非线性更强,系统故障引起的外部特征更加复杂,因而现有诊断方法不能有效地解决复杂系统的故障诊断问题,对于强干扰故障的诊断还有待研究,致使目前的故障诊断理论还远满足不了实用化的要求,故障诊断理论亟待进一步完善。不断提高故障诊断技术的水平,研究和开发各类新的准确有效的故障诊断方法,在现代工业生产中具有十分重要的意义。

本书不拟追求故障信息诊断理论方法的全面性,而是重点论述以混沌理论和多分辨分析理论为基础的强干扰背景的故障信息诊断新理论、新方法、新经验。近年来混沌工程学成为工程领域广泛关注的课题,但混沌理论在故障诊断中的应用研究还只是刚刚起步。此外,近年来出现的小波理论,以其特有的优势成了故障诊断领域的另一个热门话题,但是由于其概念体系的数学抽象性,限制了它的工程应用。本书在系统深入的理论依据基础上,提出了利用混沌振子的间歇混沌现象进行强噪声背景微弱信号检测的方法,并将其应用到强干扰背景下的故障信息诊断中;从信号分析的角度对小波分析的各种性质进行了工程解释,对小波分析在故障

诊断中应用的几个不同方面进行了从理论到实际应用的界定。

全书共9章。第1章介绍了故障诊断技术的研究现状及发展趋势。第2章介绍了混沌工程学的研究分支、混沌运动的主要特征及通向混沌的各种道路。第3章阐述了工程中应用的各种混沌识别方法。第4章推导了Duffing方程振子产生混沌的条件;利用次谐Melnikov方法推导该方程次谐内轨和外轨的存在性,为选择检测轨道提供理论依据。第5章阐述了Duffing振子的间歇混沌运动机理,提出利用该振子的间歇混沌现象进行强噪声背景微弱信号检测的方法,为利用间歇混沌进行强噪声背景故障诊断奠定理论基础。第6章分析了小波变换在时-频局部化方面的优良的变焦性能。第7章阐述了正交小波的频带分割能力,指出了正交多分辨分析存在的“高频低分辨”缺陷。正交小波包分析的频带分割能力,为克服正交小波变换的不足,有效地提取信号中的特定频率成分奠定了理论基础,本章提出一种基于正交小波包分析的混沌识别方法。本章还叙述了信号的奇异点和随机噪声在小波变换下的模极大值传播特征,以及对信号某些频率区间进行抑制或衰减的方法,为强噪声背景故障信号的小波消噪奠定了理论基础。第8章给出了利用间歇混沌故障诊断方法与小波变换方法对电液伺服系统的重要元部件液压泵、传感器的常见故障进行实际诊断的实例。对间歇混沌故障诊断方法、基于小波分析的故障诊断方法与传统方法进行了对比,指出了新理论方法的优势。对小波分析在故障诊断中应用的几个不同方面进行了从理论到实际应用的界定。第9章将上述理论方法集成构建出一套现代故障诊断体系,可广泛地应用在轧机的轴、轴承和齿轮的故障诊断中。给出了诊断系统的硬件和软件设计、实测数据的分析结果以及诊断报告。

本书是作者长期从事设备故障诊断科研的结晶,书中引用的实例都是作者进行设备状态监测与故障诊断的研究成果。本书内容取材于国家自然科学基金资助项目“非线性系统的控制混沌及智能故障诊断预报的研究”(69872031)、“基于混沌弱信号检测理论和信息融合技术的超声探测系统”(60102002)和“基于流态复

杂性测度的流量软测量模型及虚拟动态流量计”(60374042);霍英东青年教师基金项目“基于混沌的微弱信号检测理论方法及应用”(71061)、“超声波目标探测及目标信息融合处理技术的研究”(81057);教育部高等学校骨干教师资助项目“多智能理论方法集成的故障诊断预报系统”;以及河北省自然科学基金“超声波微弱信号检测与目标模拟技术研究”(601224)的相关研究成果。

作者

2004年3月于燕园

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 液压系统故障诊断的意义	1
1.2 液压系统故障检测与诊断技术的研究现状	2
1.3 本书的主要内容	14
第 2 章 混沌运动的特征及工程应用	17
2.1 混沌工程学的研究分支	17
2.2 混沌的定义	22
2.3 混沌运动的特征	25
2.4 通向混沌的道路	28
第 3 章 混沌识别方法	33
3.1 相轨及状态变量时间历程的直接观察法	33
3.2 频闪采样法	39
3.3 Poincare 截面法	41
3.4 赝相空间法	43
3.5 自功率谱密度分析法	47
3.6 Lyapunov 指数分析法	49
3.7 分维数分析法	56
第 4 章 Duffing 振子的周期轨道	61
4.1 Duffing 方程与 Melnikov 方法	61
4.2 椭圆函数及椭圆积分	62
4.3 Duffing 振子产生混沌的条件	64
4.4 Duffing 振子周期轨道存在的条件	70
第 5 章 Duffing 振子的混沌运动及间歇混沌运动	84
5.1 Duffing 振子混沌运动的数值实验研究	84

5.2	Duffing 振子的间歇混沌运动机理	91
5.3	噪声对 Duffing 振子混沌运动的影响	98
5.4	间歇混沌微弱信号检测方法与时一频分析 象的比较	102
5.5	Duffing 振子在故障诊断中应用的方案	107
5.6	基于虚拟仪器的弱超声检测系统	108
第 6 章	小波变换与时一频分析	112
6.1	小波分析在信号处理中的应用概况	112
6.2	小波与小波变换	116
6.3	Fourier 分析和小波分析的对比	122
6.4	窗口 Fourier 变换与时一频分析	126
6.5	小波变换与时一频分析	135
第 7 章	信号的正交多分辨分析与正交小波包分析	142
7.1	正交多分辨分析和正交小波的构造	142
7.2	正交小波包分析	149
7.3	信号的分解与重构	158
7.4	混沌运动信号在正交小波包分析下的特征	165
7.5	信号的奇异性检测	170
7.6	信号的小波去噪	176
第 8 章	基于混沌和小波的故障诊断实例	184
8.1	液压泵的故障诊断	184
8.2	传感器故障的诊断	204
8.3	本书所提出的理论方法的优势	225
第 9 章	故障诊断系统在机械设备上的应用	229
9.1	轧机的结构及故障分析	229
9.2	故障诊断系统硬件设计	232
9.3	故障诊断系统软件设计	235
9.4	系统实验及结果分析	237
	参考文献	250

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Fault diagnosis significance of hydraulic system	1
1.2	Current research situations of fault detection and diagnosis technology of hydraulic system	2
1.3	Main research contents of this book	14
Chapter 2	Chaotic motion characters and their applications in engineering	17
2.1	Research branches of engineering chaos	17
2.2	Definitions of chaos	22
2.3	Characteristics of chaotic motion	25
2.4	Ways leading to chaos	28
Chapter 3	Methods for identifying chaos	33
3.1	Direct observing method of phase trajectory and time course of state variables	33
3.2	Stroboscopic sampling method	39
3.3	Method of Poincare surface of section	41
3.4	Pseudo phase space method	43
3.5	Method of self-power density spectrum analysis	47
3.6	Lyapunov exponent analysis method	49
3.7	Fractal dimension analysis method	56
Chapter 4	Periodic orbits of Duffing oscillator	61
4.1	Duffing equations and Melnikov methods	61
4.2	Elliptic functions and elliptic integrals	62
4.3	Conditions of chaos producing in Duffing	

oscillator	64
4.4 Existence conditions of periodic orbits in Duffing oscillator	70
Chapter 5 Chaotic and intermittent chaotic motion of Duffing oscillator	84
5.1 Numerical experiment research of chaotic motion of Duffing oscillator	84
5.2 Intermittent chaotic motion mechanism of Duffing oscillator	91
5.3 Influences of noise to chaotic motion of Duffing oscillator	98
5.4 Comparison of intermittent chaos-based weak signal detection method with stochastic resonance phenomenon	102
5.5 Scheme of applying Duffing oscillator to fault diagnosis	107
5.6 Virtual instrument-based weak ultrasonic signal detecting system	108
Chapter 6 Wavelet transform and time-frequency analysis	112
6.1 Review on applications of wavelet analysis in signal processing	112
6.2 Wavelets and wavelet transform	116
6.3 Comparison of Fourier analysis and wavelet analysis	122
6.4 Windowed Fourier transform and time-frequency analysis	126
6.5 Wavelet transform and time-frequency analysis	135
Chapter 7 Orthogonal multiresolution analysis and orthogonal wavelet packet analysis for signals ...	142

7.1	Orthogonal multiresolution analysis and construction of orthogonal wavelets	142
7.2	Orthogonal wavelet packet analysis	149
7.3	Signal decomposition and reconstruction	158
7.4	Characters of chaotic motion signal under orthogonal wavelet packet analysis	165
7.5	Signal singularity detection	170
7.6	Noise elimination in signal based on wavelet transform	176
Chapter 8 Chaos and wavelet based fault diagnosis		
	examples	184
8.1	Fault diagnosis for hydraulic pump	184
8.2	Fault diagnosis for sensor	204
8.3	Advantages of theoretical methods advanced in this book	225
Chapter 9 Fault diagnosis system used in mechanical		
	equipments	229
9.1	Structure and Fault analysis of the rolling mill	229
9.2	Hardware design of the diagnosis system	232
9.3	Software design of the diagnosis system	235
9.4	The experiment of the system and the results analysis	237
References		250

第 1 章 概 论

1.1 液压系统故障诊断的意义

随着现代大规模生产的发展和科学技术的进步,现代设备的自动化水平日益提高,系统的规模正在日益扩大,系统的功能和复杂性也已迅速增加,系统的投资也越来越大。由于诸多无法避免因素的影响,设备有时会发生各种故障,以致降低或失去其预定的功能,甚至会发生严重的以至灾难性的事故。因此,人们迫切希望提高控制系统的可靠性和安全性。为此,人们采取了一系列措施,包括提高元器件的可靠性、进行系统的高可靠性设计以及进行控制系统的容错设计等。即便如此,系统最终还是难免发生故障。因此故障检测与诊断、故障预报技术就成了提高系统的可靠性和安全性的最后一道防线。

由于液压系统具有功率大、体积小、重量轻、响应快、精度高及抗负载刚性大等优点,因此在许多重要领域(如冶金工业、工程机械、航空航天、舰船等)得到广泛应用。液压系统在各类设备中起核心的控制或传动作用。随着液压系统向快速、大功率、高精度的方向发展,液压系统及设备的功能越来越多,结构和信息越来越复杂,性能指标越来越高,工作强度越来越重,各部分的关联越来越密切。这种局面带来两方面结果:一方面使生产率、产品质量得到提高;另一方面出现故障的几率也提高了。

液压系统一旦出故障,造成的经济损失将十分巨大。液压系统的故障不仅对液压系统自身有影响,而且会导致其他更大的间接影响,轻者严重影响产品质量,重者造成设备报废、人员伤亡、环

境污染等。飞机的液压控制系统失灵会造成飞机坠毁,潜艇上的液压系统出现故障将会贻误战机,一条轧钢生产线停工一个小时会造成数十万元的损失。因此有必要对液压系统进行故障检测和诊断、故障预报,及早地发现故障,尽快地消除故障,避免更大的经济损失。这使得液压系统故障诊断技术日益成为工程技术领域的研究热点。

应用故障检测与诊断(FDD, Fault Detection and Diagnosis)技术能够:

(1) 及时地、准确地对各种异常状态作出诊断,提高设备运行的可靠性、安全性和有效性,尽快地消除故障,把故障损失降低到最低水平。

(2) 帮助设备维修人员及早发现异常,查明故障原因,预测故障影响,进行视情维修。防止突发大事故,克服定期维修造成的过剩维修或不足维修的弊病,减少维修费用和提高设备利用率。充分发挥设备潜力,延长设备的服役期限和使用寿命,降低设备全寿命费用。

总之,设备故障诊断技术既可保证设备的安全可靠运行,又可获得巨大的经济效益和社会效益。因此不断提高故障诊断技术的水平,研究和开发各类新的准确有效的故障诊断方法,在国防武器装备、现代工业生产中具有十分重要的意义。

1.2 液压系统故障检测与诊断技术的研究现状

在越来越多的工业设备中,动力传递和伺服控制依靠液压系统来完成。由于现代化生产的需要和液压工业的发展,液压系统和设备的功能越来越多,其自身的结构组成、信息传递过程变得日益复杂,因而发生故障的几率也随之增多。如以轧机自动辊缝控制(AGC, Automatic Gauge Control)系统为代表的工业电液伺服系统,是一种结构复杂的机电液综合系统,其工作的可靠性是保证连续轧制的关键。因此,液压系统的 FDD 技术是生产监控系统研究

的主要课题之一。由于液压系统各元件在封闭的油路内工作,不像机械设备那么直观,也不像电气设备那样可以方便地测取有关参数,影响液压系统性能的因素又多种多样,给液压系统的 FDD 造成很大困难。

液压系统的 FDD 技术相对落后于其他领域,主要是以吸收应用其他领域的一些成果为基础发展起来的。液压系统的 FDD 是针对具体的液压系统,通过分析液压系统特有的失效形式和故障机理,利用现代信息处理技术,对提取的状态监测信号进行模式识别或分类,对系统故障进行诊断,对故障原因进行分析,进行故障定位和故障预报等。

在液压系统中,FDD 信息包括机械、液压、电气方面的综合信息。因此,机械设备中所有可能发生的故障在液压系统中都可能发生,如形变或应力疲劳断裂、腐蚀、磨损、冲击断裂、热应力与热变形等。除此之外,液压传动与控制系统还具有其特有的失效形式,如油液污染、泄漏、腐蚀、气蚀、液压卡死、油液温升、管路谐振、电气信号失真、噪声及系统振荡等。

液压系统是靠液压油来传递压力能的,油液的状态对液压系统工作的可靠性影响最大。据统计,液压系统的故障有 70% 以上是由于油液污染引起的,而油液中杂质引起的故障又占其中的 90%。因此,对油液污染度的控制是提高液压系统可靠性的重要保证。有约 30% 的故障是液压元件和辅件的磨损、液压卡死及冲击造成的。此外,系统参数调整和设定不当等也会使液压系统发生故障。

油液的粘性和所含空气量变化的非线性、液压系统元件的运动形式多样、系统回路间的相互干涉、动力的传递封闭、参数可测性差等,都使得液压系统的故障机理分析难以精确。同时,液压系统的功能多样性,每一液压系统都有其特有的故障形式,也使液压系统的状态监测有很大困难。因此,针对每个系统进行故障机理分析,建立系统特有的故障档案仍将是今后的研究课题。

由于液压系统的失效形式及故障机理的复杂性和多样性,故