

机械工 程 学 科  
研 究 生 教 学 用 书

# 机械故障诊断理论及应用

*Theories and Applications of  
Machinery Fault Diagnostics*

何正嘉 陈 进 王太勇 褚福磊 编著



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

机械工程学科  
研究生教学用书

# 机械故障诊断理论及应用

JIXIE GUZHANG ZHENDUAN LILUN JI YINGYONG

Theories and Applications of  
Machinery Fault Diagnostics

何正嘉 陈 进 王太勇 褚福磊 编著



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容简介

本书介绍机械故障诊断的基础理论和工程应用,阐述机械动态信号数学变换的本质、物理意义和工程背景。内容包括信号的时域分析、频域分析、时频域分析,基于小波变换和第二代小波变换、模型以及动力学机理的故障诊断方法,故障微弱信号的随机共振、循环平稳理论以及盲源分离诊断技术,智能诊断与状态评估、典型故障诊断系统、远程监测诊断系统以及故障诊断标准(振动与噪声)等。列举了所介绍的理论和技术在工矿企业中机械设备动态分析与监测诊断方面的应用实例。

本书取材于清华大学、天津大学、上海交通大学和西安交通大学研究生教学的先进内容,工程实用性强,适合作为高等院校机械工程、仪器仪表和能源动力等学科专业的研究生、高年级本科生的教材或参考书,也可供从事机械设备动态分析、状态监测、故障诊断、设备管理与维修的广大科技人员使用和参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

机械故障诊断理论及应用/何正嘉等编著. —北京:高等教育出版社,2010.6

ISBN 978-7-04-029536-8

I. ①机… II. ①何… III. ①机械设备-故障诊断-研究生-教材 IV. ①TH17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 060594 号

策划编辑 宋 晓 责任编辑 查成东 封面设计 李卫青 责任绘图 尹 莉  
版式设计 张 岚 责任校对 王 雨 责任印制 张泽业

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100120	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
总 机	010-58581000		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	<a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>
印 刷	北京市卫顺印刷厂		<a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a>
		畅想教育	<a href="http://www.widedu.com">http://www.widedu.com</a>
开 本	787×1092 1/16	版 次	2010 年 6 月第 1 版
印 张	26.25	印 次	2010 年 6 月第 1 次印刷
字 数	630 000	定 价	40.70 元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 29536-00

# 总 序

随着中国高等教育持续发展,研究生教育发生了很大变化,我国已经迅速跨入了世界研究生教育大国的行列。为了满足研究生教育的需求,高等教育出版社组织了若干套丛书作为研究生教学参考用书。其中,机械工程学科研究生教学用书是在对全国机械工程学科研究生教育及其教学用书进行全面调研的基础上,由“机械工程学科研究生教学资源建设委员会”组织编写的。组织、编写、出版这套研究生教学用书是一件既有教学价值,又有学术价值的工作。

培养研究生应当特别重视能力的培养。所谓能力,包括自我充实的能力,即独立从一个领域进入另一个领域的的能力,以及解决问题的能力。知识是一个动态的集合:昨天的新知识,今天就可能变成一般的知识,明天也许就要变为需要加以更新的知识。竞争迫使人们不断更新自己的知识和进入新的领域。任何人都不能将他一生中解决问题需要用到的知识都在学校里装进大脑,也不可能年轻时学了的就可以用一辈子。因此,如何培养自我充实能力是非常重要的教育课题,特别是在研究生培养阶段。

自我充实主要有三个途径:浏览、读书和实践。在信息技术高度发展的时代,为一个名词搜集几万条信息,往往只是几秒钟的事。因此,需要将浏览和读书作为两个不同的学习方法区分开来。浏览是遍历广泛的信息而可以不甚了了,读书则不同,读书是为了对所描述的领域进行深入的了解。要了解一个领域,并且想进入这个领域,最好的办法就是先找一本这个领域的经典著作,老老实实地读完。不仅要掌握书中阐述的基本概念,还要弄懂书中介绍的基本理论,学好书中采用的基本方法。如果有计算公式,那么最好一个一个地推导,如果有作业,最好一个一个做一遍。读完以后,再依照书和借助其他工具的引导,去浏览可能得到的信息以丰富自己。此时,对于得到的信息,不仅要能够辨别信息的可信程度,而且要估计它的重要性并判断是否需要花时间和需要花多少时间去进一步了解。这样就完成了从不了解到进入一个领域的第一步。一本好书,还应当起到帮助初学者掌握正确的学习方法和以严谨、科学的治学态度潜移默化地感染读者的作用。

进入一个领域的第二步,也是不可缺少的一步,就是实践。一个人,不论他读了多少书,如果没有亲自做过,他就不可能真正领会很多理论和方法的精髓。当他要用读到的知识去解决问题时,就会觉得没有把握。另外,任何书都不可能完美无缺,经过实践,不仅能够更深入地理解书中正确的方面,更可以发现书中论点和方法的不足之处。读书不是为了做书呆子,而是为了在前人成功的基础上找到自己前进的方向。

从上面的分析可以看到,一本经典著作,对于引领一个人进入一个领域,是多么的重要。可惜现在这样的好书太少了,按照这种要求来写的书太少了。另外,能够这样读书的人也太少了。很多人往往满足于在网络上浏览,或者用对待查手册的态度对待读书。读得也不少,但是越读越理不出头绪。另一方面,没有好书可读也是事实。读文献不等于读书,一篇文献

讲的往往是很局部的问题,不可能从一条缝隙中看到一片天;综述文献又太概括,对于还不熟悉这个领域的人,很难从中了解问题的本质。

高等教育出版社组织的若干套研究生教学用书,按照人们的期望,应当走出去写本科生教材的框框,应当能够向专门的学术著作方向发展,希望其中一部分,能够在一段时间以后成为相应领域中的经典著作。从组织这套机械工程学科研究生教学用书已经确定的选题来看,覆盖了机械工程学科许多非常重要的基础领域,如果能够写好,将会对研究生培养起到重要作用,对于工作在非教育岗位上的同行,也是自我充实的宝贵资源,是继续教育的重要组成部分。从研究生自我充实能力培养的角度出发,这些领域的好书太重要了。研究生不能再靠听课来充实自己,也不能再靠以考试打分去考察他们的能力。这就是为什么人们对这套机械工程学科研究生教学用书寄以殷切期望的原因。

愿它们能够早日与大家见面。

中国工程院 院士 谢友柏  
上海交通大学 西安交通大学 教授  
2008年6月

# 前 言

改革开放的三十年是中国高等教育发展的最好阶段,特别是国家对一批高水平大学进行“211工程”和“985工程”的重点建设,大大缩短了我国高等教育与发达国家的差距,一批重点大学正在成为我国科学研究和技术创新事业中的主力军,成为新一代科学家和原创性成果的摇篮,成为新知识、新科技、新发明的重要源头。党中央、国务院做出了坚持自主创新、建设创新型国家的重大决策,部署了《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》,这不仅对推进我国科技事业发展乃至整个社会主义现代化建设具有里程碑的意义,而且对我国高等教育的改革和发展也将产生深远的影响。为此,我们有必要根据国家中长期科技发展规划,围绕“建设什么样的大学,怎样建设这样的大学”这一根本问题,在办好大学和培养人才方面进行深入思考和不懈努力。

科学技术是第一生产力。科学是求“真”,即研究、认识、掌握客观世界及其规律;技术是致“实”,即创造合乎科学的有效方法和手段。1809年,德国思想家、教育家洪堡在筹建洪堡大学时,提出“教学与研究相统一”和“学术自由”的原则,并指出大学的主要职能是追求真理和学术研究,洪堡强调的“教学与研究相统一”的原则,奠定了学术研究在大学的地位,促进了杰出人才的培养。在诺贝尔奖设立的最初40年间,洪堡大学出现了普朗克、劳厄、哈恩等16位诺贝尔奖获得者。洪堡的教育思想对世界科学技术的发展和高等教育的提升产生了深远的影响。到上世纪初,美国威斯康星大学查尔斯·范海斯校长,针对社会对专门人才的迫切需求,提出“大学必须为社会发展服务”的办学理念,并要求威斯康星大学的实验室向社会开放。威斯康星大学为社会经济发展服务的实践极大地促进了当地的经济和社会发展,形成了著名的“威斯康星思想”,成为美国大学延续至今的办学基本宗旨。

现代高等教育发展到今天,大学在恪守人才培养这一基本宗旨的同时,面临着科技创新成为大学发展的内在驱动力、服务社会成为大学发展的外部驱动力这种新挑战,必须清醒地认识人才培养、科学研究和社会服务之间的关系。为适应我国大学研究生教学改革和研究生人才培养发展形势,开展研究生创新教育的教材建设势在必行,本书正是为满足这一需求而诞生的。

本书取材于作者所在的清华大学、天津大学、上海交通大学和西安交通大学近年来获得的国家级和省部级科技成果研究内容,引用已承担的国家“973计划”、“863计划”、国家自然科学基金重点项目和面上项目以及企业委托项目的最新研究成果。本书在数据采集、信号处理方面继承传统的理论和技术的基础上,汲取现代信号处理和机械故障诊断的前沿内容,引入了现代非平稳信号处理方法、信号的时频域分析、小波和二代小波理论;介绍了基于模型、动力学原理、随机共振理论、现代信号处理的故障诊断方法,以及智能诊断与状态评估、典型故障诊断系统和故障诊断标准(振动与噪声),具有学科交叉、新颖性和创造性等特点。本书适用于机械工程、仪器科学与技术两个一级学科及其下属的二级学科,包括机械制造及

其自动化、机械电子工程、机械设计及理论、车辆工程、精密仪器及机械和测试计量技术及仪器等。本书备有大量来自机械工程、仪器科学与技术学科领域的工程应用实例,既阐明现代信号处理的基本原理,又介绍如何应用于工程实践,有利于研究生掌握基础理论和培养创新能力。本书的内容可根据课程学时的设置和教学要求,选取相应的章节进行讲授、自学或共同研讨。

大学坚持以育人为中心,培养造就一流的人才,是学校一切工作的出发点。在高等学校中研究生是科技创新的一支生力军,要用科学精神引导和培养研究生。所谓科学精神就是追求自然客观世界的本质,追求认识的真理,坚持认识的客观性和辩证性。科学精神也是科学研究中所必备的精神状态和思维方式,是由探索和追求真理这一活动的性质决定的。加强科学精神教育,有助于研究生树立起对待自然、社会与人生的科学态度,有助于研究生自觉接受正确的世界观、价值观和人生观,有助于形成创造性的思维和能力,有助于培养勇于开拓进取的精神。我们希望在讲授这本书的过程中,力图造就一支具有追求理想、严谨求实、淡泊名利的科学精神的研究生队伍。我们教师首先要真正成为科学精神教育的直接示范者和教育者,甘于寂寞,甘于清简,以身作则,将教书育人贯穿于培养研究生的全过程。《论语》中孔子说:“君子食无求饱,居无求安,敏于事而慎于言,就有道而正焉,可谓好学也已。”我们提倡一个科技工作者在饮食上不追求丰满,在居住上不追求舒适,从事科技工作要敏捷勤奋,发表观点要求实谨慎,接近有道德的人匡正是非,这样的人可以说是爱好学习的了。在本课程的教学进程中,师生共勉,使我们成为新时代的好学者。

本书总论,第3、4、5章和第6.3、10.3、10.6、10.7节由西安交通大学何正嘉、訾艳阳、陈雪峰、李兵、张西宁、张周锁、雷亚国、袁静等完成;第9章,第6.2、7.2、10.4、10.5、11.1、12.2节和附录由上海交通大学陈进、董广明、肖文斌、何俊、朱义、潘玉娜、贾文强、赵发刚、从飞云、刘雨、王志阳、周宇、明阳等完成;第1、2、8章和第6.1、11.2节内容由天津大学王太勇、王国峰、冷永刚、赵坚、张莹、李强、蒋永翔、万建、刘清建、刘路、何慧龙、邓辉、曹康平、黄国龙等完成;第7.1、10.1、10.2、12.1节由清华大学褚福磊、卢文秀、宋光雄、于湘涛、郝如江等完成。全书由何正嘉统稿,在统稿过程中,李兵、袁静在文稿、图样及其他方面做了大量的工作。衷心感谢华中科技大学史铁林教授对本书的认真评审和提出的宝贵意见。谨向长期以来关心、支持和资助我们工作的科技部、发改委、工信部、国家自然科学基金委员会、中国振动工程学会和故障诊断专业委员会以及本领域的众多同仁致以衷心的感谢!

由于作者水平所限,书中疏漏和不妥之处在所难免,殷切希望得到宝贵的批评和指正。

何正嘉

2009年7月于古城西安

# 目 录

总论 .....	1
0.1 机械故障诊断的意义 .....	1
0.2 机械故障诊断的国内外研究现状 .....	2
0.3 机械故障诊断中的基础和关键科学问题 .....	3
0.4 促进机械故障诊断科学技术的发展 .....	7
参考文献 .....	9
第 1 章 信号采集与预处理 .....	13
1.1 信号的定义与分类 .....	13
1.2 信号的调理与采集 .....	17
1.3 信号预处理 .....	19
思考题 .....	29
参考文献 .....	29
第 2 章 信号的时域分析 .....	31
2.1 时域统计分析 .....	31
2.2 相关分析 .....	36
思考题 .....	41
参考文献 .....	41
第 3 章 信号的频域分析 .....	42
3.1 频谱分析和 FFT 算法 .....	42
3.2 相干分析 .....	53
3.3 频谱细化分析 .....	54
3.4 倒频谱分析 .....	56
3.5 信号调制与解调分析 .....	58
3.6 全息谱理论和方法 .....	61
思考题 .....	66
参考文献 .....	67
第 4 章 信号的时频域分析 .....	68
4.1 短时傅里叶变换 .....	68
4.2 Wigner - Ville 分布 .....	70
4.3 经验模式分解 .....	74
思考题 .....	82
参考文献 .....	82



<b>第 5 章 基于小波理论的故障诊断方法</b> .....	84
5.1 基于小波变换的非平稳信号故障诊断 .....	85
5.2 连续小波变换及工程应用 .....	97
5.3 第二代小波变换及工程应用 .....	115
思考题 .....	126
参考文献 .....	126
<b>第 6 章 基于模型的故障诊断方法</b> .....	129
6.1 基于时间序列模型的故障诊断方法 .....	129
6.2 基于隐 Markov 模型的故障诊断方法 .....	140
6.3 小波有限元模型及裂纹故障诊断方法 .....	151
思考题 .....	163
参考文献 .....	164
<b>第 7 章 基于动力学机理的转子故障诊断方法</b> .....	167
7.1 转子系统常见故障的机理与诊断 .....	167
7.2 现场动平衡方法 .....	187
思考题 .....	202
参考文献 .....	202
<b>第 8 章 故障微弱信号的随机共振诊断</b> .....	203
8.1 随机共振的发展 .....	203
8.2 双稳随机共振的基本理论 .....	204
8.3 微弱信号的变尺度随机共振辨识技术 .....	210
8.4 微弱信号的级联双稳随机共振辨识技术 .....	213
8.5 微弱信号的自适应随机共振辨识技术 .....	218
8.6 微弱信号随机共振辨识的工程应用 .....	222
思考题 .....	227
参考文献 .....	227
<b>第 9 章 故障特征提取的新方法</b> .....	229
9.1 基于循环平稳理论的微弱故障特征提取方法 .....	229
9.2 盲源分离技术用于故障特征提纯 .....	239
9.3 基于决策树理论的故障特征优化方法 .....	253
思考题 .....	260
参考文献 .....	261
<b>第 10 章 智能诊断与状态评估</b> .....	263
10.1 专家系统及其在故障诊断中的应用 .....	263
10.2 神经网络及其在故障诊断中的应用 .....	272
10.3 模糊理论及其在故障诊断中的应用 .....	280
10.4 故障树分析方法 .....	289
10.5 粗糙集理论及其在故障诊断中的应用 .....	298
10.6 支持向量机及其在故障诊断中的应用 .....	308

---

10.7 混合智能故障诊断技术 .....	316
思考题 .....	326
参考文献 .....	328
<b>第 11 章 典型故障诊断系统 .....</b>	<b>333</b>
11.1 基于网络的设备远程监测和故障诊断系统的基本框架 .....	333
11.2 典型故障诊断系统 .....	341
思考题 .....	370
参考文献 .....	370
<b>第 12 章 其他故障诊断方法 .....</b>	<b>372</b>
12.1 声发射检测技术 .....	372
12.2 噪声诊断方法 .....	380
思考题 .....	389
参考文献 .....	389
<b>附录 故障诊断标准 .....</b>	<b>391</b>
1. 名词术语 .....	391
2. 机械设备故障诊断技术的主要理论和方法 .....	396
3. 监测与诊断阈值确定方法 .....	399
参考文献 .....	407

# 总 论

## 0.1 机械故障诊断的意义

近半个世纪以来,机械故障诊断借助机械、力学、电子、计算机、信号处理、人工智能等学科的现代化科学技术成果,迅速发展成为一门新兴学科。其突出特点是理论研究与工程实际应用紧密结合。随着科学技术和现代工业的飞速发展,国民经济的机械、能源、石化、运载和国防等行业的机械设备日趋大型化、高速化、集成化和自动化。如:百万千瓦大型发电机组、百万吨级乙烯及重催成套装备、300 km/h 的高速列车、大型连轧机组、大型舰船、大型盾构掘进装备、成套集成电路制造装备、航空航天运载工具等,对机械故障诊断提出严峻的挑战。关键机械设备一旦出现事故,将带来巨大的经济损失和人员伤亡,国内外因机械设备故障失效而引起的灾难性事故屡有发生<sup>[1]</sup>。1984 年印度博帕尔农药厂毒气泄漏、1986 年苏联切尔诺贝利核电站核泄漏以及 1998 年德国高速列车轮箍踏面断裂导致翻车事故人们尚记忆犹新。进入 21 世纪,2002 年我国三峡工地塔带机断裂事故、2003 年美国哥伦比亚号载人航天飞机失事、2005 年我国吉林化工厂设备恶性爆炸、2007 年美国空军 F15 战机空中解体事件、2008 年我国华能伊敏煤电公司 600 MW 机组发生转子裂纹事故、2009 年波音 737 及空客 330 先后失事等事故令人触目惊心。若能准确及时识别运行过程中萌生和演变的故障,对机械系统安全运行,避免重大和灾难性事故意义重大。国家中长期规划(2006—2020 年)和国家自然科学基金委学科发展战略研究报告(2006—2010 年),均将与机械故障诊断相关的重大产品和重大设施运行可靠性、安全性、可维护性关键技术列为重要的研究方向<sup>[2-4]</sup>。

正因为机械故障诊断对于保障设备安全运行意义重大,机械故障诊断理论与技术已成为国内外的研究热点。近年来,故障诊断技术在国内外受到高度重视,许多著名研究机构分别就故障诊断前沿问题召开国际会议。设备状态监测与故障诊断国际学术会议(International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, CMD)两年一届,由 IEEE 等国际性学术组织技术支持,主要针对电力系统的设备状态检测与故障诊断。世界维修大会由巴西维修协会和欧盟国家维修联合会共同倡议,并得到许多国家积极响应,每两年召开一届,由各国申请轮流主办。国际结构、材料和环境健康监测大会(HMSME)每两年在世界不同国家举办一次,是国际结构健康监测和结构控制研究领域的盛会。结构健康监测会议是美国斯坦福大学每三年举办的关于大型结构健康监测的会议,每次大会吸引大量的研究人员,特别是军方研究人员参加会议;结构损伤评估国际会议(Damage Assessment of Structures, DAMAS)是两年一届的国际会议,它为学术界和工业界的科学家和工程师在损伤评价、结构健康监测和非破坏性评估等方面提供一个交流和合作的平台。状态监测与诊断工程管理国际会议(Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management,

COMADEM)是每年举行一次的国际会议,至今已举办 22 届,每届会议都交流和讨论工业系统性能监测、失效模式分析、故障诊断与故障预示和主动维护等技术在近期的发展、创新、应用情况。在国内,中国振动工程学会、中国机械工程学会、中国设备管理协会等均每三年召开一次故障诊断会议,中国振动工程学会故障诊断专业委员会每两年召开学术会议,旨在加强学术交流和推广成果应用。

随着基础学科和前沿学科的不断发展和交叉渗透,机械故障诊断学在基础理论和技术方法上不断创新,取得了令人瞩目的成就,已初步形成比较完备的科学体系。机械故障诊断在早期微弱故障诊断、寿命预测方面存在研究难题。目前,对于中期、晚期较为明显的故障已形成一系列较为成熟有效的检测手段,但是在工程实践中,我们期望对故障的发生与发展能够做到防微杜渐,不期望亡羊补牢般地处理事故。因此,研究开发有效的早期故障诊断技术、定量诊断故障程度并预测其扩展趋势和剩余寿命,具有重要的科学理论意义和工程应用价值。早期故障包含两方面含义,其一是指处于早期阶段的微弱故障或潜在故障,具有症状不明显、特征信息微弱、信噪比低等特点;其二是从物理意义上讲,某一故障是另一故障的早期阶段,如不平衡与动静碰摩等,并随着时间推移进一步诱发复合故障。机械系统早期故障、微弱故障和复合故障的定量诊断与预示、剩余寿命预测方法,一直是国际故障诊断领域的前沿与挑战性难题。

## 0.2 机械故障诊断的国内外研究现状

机械故障诊断学是识别机器或机组运行状态的科学,它研究的是机器或机组运行状态的变化在诊断信息中的反映<sup>[5]</sup>。自 20 世纪 60 年代美国机械故障预防小组和英国机器保健中心成立以来,故障诊断技术逐步在世界范围内推广普及,全球工程和科研领域工作者在信号获取与传感技术、故障机理与征兆联系、信号处理与特征提取、识别分类与智能决策等方面开展了积极的探索,例如美国麻省理工学院(MIT)综合利用混合智能系统实现核电站大型复杂机电系统的在线监测、故障诊断和预知维修<sup>[6]</sup>;在美国宇航局(NASA)倡导下美国成立了机械故障预防小组,主要研究故障机理研究、检测、诊断和预测技术、可靠性设计和材料耐久性评估<sup>[7]</sup>;美国密歇根大学、辛辛那提大学和密苏里罗拉大学在美国自然科学基金的资助下,联合工业界共同成立了“智能维护系统(IMS)中心”,旨在研究机械系统性能衰退分析和预测性维护方法<sup>[8]</sup>;美国斯坦福大学的 Fu-Kuo Chang 在复合材料结构健康监测方面取得了显著的研究成果<sup>[9]</sup>;美国佐治亚理工学院的 Mark A. Lawley 等在机床制造与寿命预测的研究中提出了新思路<sup>[10]</sup>;英国曼彻斯特大学、南安普顿大学、剑桥大学等长期致力于基于先进检测方法的设备在线监测与损伤识别、可靠性、可维护性的研究工作及其应用推广<sup>[11]</sup>;德国柏林科技大学 Gasch 等深入研究了裂纹转子的动力学行为<sup>[12]</sup>;日本九州工业大学丰田立利和三重大学陈鹏等在故障机理与特征提取等实用技术方面进行大量研究<sup>[13]</sup>;澳大利亚新威尔士大学 R. B. Randall 和法国贡皮埃涅技术大学 J. Antoni 一直致力于故障信号处理与特征提取的底层研究<sup>[14-15]</sup>;澳大利亚悉尼大学的 Lin Ye 等长期从事复合材料健康监测研究,并提出了数码指纹损伤识别的新观念<sup>[16]</sup>;加拿大阿尔伯塔大学 M. J. Zuo 等对齿轮、轴承等典型零部件的故障诊断方法进行了深入研究<sup>[17]</sup>;印度理工学院的 Sekhar 研究了转子多裂纹动力学行为及其辨识方法<sup>[18]</sup>。

在国内,香港城市大学 P. W. Tse 等在基于小波变换的信号处理与特征提取技术方面进行了深入探索<sup>[19]</sup>。北京化工大学高金吉归纳总结了旋转机械常见故障机理及其征兆、自愈诊断<sup>[20]</sup>;东北大学闻邦椿和哈尔滨工业大学陈予恕等基于混沌和分岔理论对轴系非线性动力学行为进行了深入研究<sup>[21-22]</sup>;中南大学钟掘等一直致力于研究现代大型复杂机电系统耦合机理问题<sup>[23]</sup>;华中科技大学杨叔子和史铁林等在先进制造技术和故障诊断新技术等方面取得一系列成果<sup>[24]</sup>;西安交通大学屈梁生、何正嘉、张优云等长期致力于全息谱、小波变换等先进故障诊断技术的底层研究<sup>[25-26]</sup>;清华大学褚福磊和彭志科在小波变换理论研究及转子碰摩故障诊断技术等方面取得了显著的进展<sup>[27]</sup>;天津大学王太勇、冷永刚和国防科技大学胡葛庆等采用随机共振技术为早期微弱故障检测开辟了新途径<sup>[28-29]</sup>;上海交通大学陈进等在信号处理技术与故障诊断专家系统等方面进行了大量研究<sup>[30]</sup>;北京工业大学高立新等在高速线材轧机在线监测与诊断方面取得了显著应用效果<sup>[31]</sup>;太原理工大学熊诗波,浙江大学吴昭同、杨世锡,哈尔滨工业大学黄文虎、韩清凯,北京信息科技大学徐小力,重庆大学秦树人,郑州大学韩捷和湖南大学于德介等学者长期从事机械系统状态监测与故障智能诊断技术的研究<sup>[32-33]</sup>。

为了实现故障诊断技术的实用化和产业化,国内外诸多研究机构相继开发研制多种监测诊断系统。国外典型产品有美国 Bently 公司的 3300、3500 系统和 EA3.0 系统,Scientific Atlanta 公司的 M6000 系统,西屋电气公司的汽轮发电机组人工智能大型在线诊断系统,ENTEK 公司推出的故障诊断专家系统,IRD 公司的 Mpulse 联网机械状态监测系统和 Pmpower 旋转机械振动诊断系统等,丹麦 B&K 公司的 B&K3450 型 COMPASS 系统,荷兰 Philips 公司的 PR3000 和 RMS700 系统,英国中心发电部的 TSE 和 TEM 系统,瑞士 ABB 公司的 MMC 系统和 VIBRO - METER 公司的 MMS 系统,法国的 PSAD 系统以及德国 SCHENCK 公司的 VIBROCONTROL2000 和 VIBROCAM5000 系统,日本三菱重工研制的 MHMS 系统等。在国内,中国运载火箭技术研究所、南京汽轮机研究所、西安热工研究院、西安交通大学、上海交通大学、哈尔滨工业大学、华中科技大学、清华大学、浙江大学等研究院校也开发研制了一大批各具特色、适合不同对象的在线监测与诊断系统和远程故障监测与诊断系统,给企业带来了良好的经济效益。

## 0.3 机械故障诊断中的基础和关键科学问题

### 0.3.1 故障机理与征兆联系

故障机理是指通过理论或大量的实验分析得到反映设备故障状态信号与设备系统参数之间联系的表达式,依之改变系统的参数可改变设备的状态信号<sup>[22]</sup>。机理研究可以揭示故障萌生和演化的一般规律,建立故障与征兆间的内在联系和映射关系。它是机械故障诊断技术的重要基础和依据,对准确识别故障特征、确诊故障类型和分析故障原因都具有重要意义。

例如清华大学褚福磊针对碰摩故障机理开展了深入研究。基于旋转机械故障诊断的需要,分析了一个由油膜轴承支承的转子系统在转子与定子碰摩时的振动特征,模型考虑了碰撞时定子的线性变形以及摩擦时的库仑摩擦。分析表明,系统除具有各种形式的周期和概周期振动以外,还具有丰富的混沌运动、倍周期分岔和 Hopf 分岔现象。碰摩转子系统所

展示的混沌运动以及所具有的各种现象,作为这类系统的显著特征,可以用于诊断汽轮发电机组中经常发生的碰摩故障和早期预测<sup>[34-35]</sup>。

根据研究对象的物理特点,建立相应的数学力学模型,通过仿真研究获得其响应特征;再结合实验修正模型,准确获知某一故障的表征。这一反复过程是故障机理及故障征兆研究的有效手段。由于通常获得某一系统较全面的故障数据样本是不现实的,因此只有通过机理仿真研究,才能对系统的未知故障、弱故障具有较强的预知和识别能力;才能避免漏诊、误诊;才能有效地做到故障早期预示、防微杜渐。

### 0.3.2 信号处理与特征提取

信号特征提取技术是实现故障诊断的重要手段。机械系统结构复杂,部件繁多,采集到的动态信号是各部件振动的综合反映,且传递途径的影响增加了信号的复杂程度。在诊断过程中,首先分析设备运转中所获取的各种信号,提取信号中的各种特征信息,从中获取与故障相关的征兆,利用征兆进行故障诊断。

工程实践表明不同类型的机械故障在动态信号中会表现出不同的特征波形,如旋转机械失衡振动的波形与正弦波相似;内燃机燃爆振动波形具有高斯函数包络的高频信号;齿轮、轴承等机械零部件出现剥落、裂纹等故障,往复机械的气缸、活塞、气阀磨损缺陷,它们在运行中产生冲击振动呈现接近单边振荡衰减的响应波形,而且随着损伤程度的发展,其特征波形也会发生改变。近年来,广泛应用的傅里叶变换、短时傅里叶变换、小波变换、第二代小波变换和多小波变换等可以说都是基于内积原理的特征波形基函数信号分解,旨在灵活运用与特征波形相匹配的基函数去更好地处理信号,提取故障特征<sup>[26]</sup>。基于内积原理的信号处理与特征提取技术的本质是探求信号  $x(t)$  中包含与“基函数” $y(t)$  最相关或最相似的分量,其关键在于构造和选择与故障特征波形相匹配、且具有优良性质的合适基函数,以获得不同物理意义并符合工程实际的故障特征信息。

华南理工大学丁康长期以来致力于研究 FFT 信号处理方法。1965 年 Cooley - Tukey 在《计算数学》杂志上首次发表快速傅里叶变换(FFT)算法,FFT 和频谱分析很快发展成为机械设备故障诊断等多种学科重要的理论基础。然而长期的应用和近年来的理论分析表明:经快速傅里叶变换得到的离散频谱,频率、幅值和相位均可能产生一定的误差,单频率谐波信号加矩形窗时的幅值最大误差从理论上分析可达 36.4%;即使加其他窗时,也不能完全消除此误差,加 Hanning 窗且只进行幅值恢复时的最大幅值误差仍高达 15.3%,相位误差高达  $\pm 90^\circ$ ,频率最大误差为 0.5 个频率分辨率。因此大大限制了该技术的工程应用。丁康先后研究提出了离散频谱分析加窗后幅值恢复系数遵守的幅值相等及能量相等的两个原则,系统地解决了离散频谱校正问题<sup>[36-37]</sup>。

西安交通大学从 20 世纪 90 年代初开始致力于小波分析技术的研究。目前的小波理论提供了包括傅里叶分析所采用的三角基函数以外的多种小波基函数,其基函数种类丰富,使小波分析充满了活力。在经典小波基础上发展起来的第二代小波变换<sup>[38]</sup>是一种不依赖傅里叶变换、在时域采用提升方法构造小波的方法,被认为是近年来小波分析领域的重大突破。第二代小波也是建立在内积运算的基础上,通过设计预测算子和更新算子构造出符合待分析信号波形特征的小波基函数,从而实现故障特征的自适应提取<sup>[39-40]</sup>。近年来兴起的多小波变换,不仅兼备单小波所无法同时满足的正交性、对称性、短支撑性及高阶消失矩性

质,同时拥有多个小波基函数可以作为信号分解的特征波形混合基来匹配信号中的多个特征信息,这使得多小波变换在机械故障诊断中获得应用<sup>[41-42]</sup>。

在非平稳、非线性特征提取方面,现有信号处理方法取得了长足进展,提出了许多有效的“望闻问测”诊断学手段。但是在早期故障、微弱故障、复合故障等信号的处理方面还存在不足,难以有效地提取复杂机械系统故障动态特征。

### 0.3.3 结构裂纹损伤定量识别

如何从服役机械设备的动态特征中提取损伤和故障的严重性程度,即故障的定量诊断,一直是本领域的研究重点。以结构裂纹损伤定量识别为例,机械、能源、运载和国防等行业的关键装备,由于初始微小裂纹扩展,导致恶性事故屡屡发生,带来巨额损失。据英国安全技术公司(Safe Tech)统计,欧洲每年结构断裂造成的损失达 800 亿欧元,而美国每年结构断裂造成的损失达 1 190 亿美元,其中 95% 是由于疲劳裂纹引起的断裂。据美国空军材料试验室(AFML)统计,在航空发动机的事故中,属于航空发动机转子的循环疲劳裂纹破坏超过 74% 以上。机械结构裂纹损伤这一“隐形杀手”被形象地称为“裂纹顽魔”,具有难发现、易扩展、强破坏的特点。正如学者匡震邦在文献<sup>[43]</sup>中所写:“在所有的应力分析问题中,没有哪个问题像裂纹问题那样,受到如此众多的力学和材料学工作者持久的关切和在如此广泛的工况下进行过详尽的分析;也没有哪个问题像裂纹问题那样,愈分析愈感到问题的复杂和困难。究其原因,裂纹问题与工程结构的破坏和可靠性紧密相连,强大的工程实际需要是推动裂纹问题研究的主要动力。”国际上通常把裂纹损伤识别的研究工作划分为四个层次,首先确定损伤是否存在;其次是能够确定损伤的位置;第三是能够确定损伤的定量程度;第四是预测剩余寿命。国内外学者针对前三层次的内容开展了大量的研究工作。

美籍希腊学者 Dimarogonas(1938—2000)早在 20 世纪 70 年代就开始转子裂纹的研究,该项研究工作是在他为通用电气公司汽轮机事业部服务期间开展的,Dimarogonas 在他 1983 年出版的转子动力学<sup>[44]</sup>书中作了较系统的论述,并于 1996 年发表了著名的裂纹结构振动综述文章<sup>[45]</sup>,2008 年他的长期合作者 Papadopoulos 综述了能量释放率在转子裂纹建模方面的应用情况<sup>[46]</sup>。印度 IIT 学者 Sekhar 和 Maiti 在转子和结构裂纹诊断方面开展了大量的研究工作<sup>[18,47]</sup>。此外,美国 Bently 转子动力学研究公司的研究人员 Bently 与 Muszynska 开展了包括裂纹等大量故障转子的研究与实验,所研制的高速实验转子、转子监测系统以及所获得的研究结论被世界各国广泛采用<sup>[48]</sup>。2008 年国际期刊 MSSP 专门针对裂纹研究 50 周年做了一期专刊,系统地综述了裂纹相关研究进展<sup>[49]</sup>。

西安交通大学采用正问题(有限元建模与动力学分析)与反问题(动态信号特征准确提取)相结合的研究方法,实现了裂纹定量诊断。机械系统的损伤定量诊断是安全性能评估、预防灾难性事故发生的前提和基础,要实现机械系统损伤的定量识别,必须分析损伤程度与损伤信号动态特征的定量因果关系。在正问题方面,由于裂纹损伤奇异性的存在,使得采用传统有限元模型求解结构损伤问题精度不高。小波有限元作为一种优于传统单元网格加密和阶次升高的自适应有限元算法,能够提供多种基函数作为有限元插值函数,弥补了传统有限元只以多项式作为插值函数的不足,能够实现裂纹高精度求解和奇异性建模,从而建立准确可靠的损伤定量诊断模型数据库<sup>[50]</sup>。反问题方面研究裂纹结构动态响应信号的特征提取技术。最后正反问题结合,以实测的结构前三阶固有频率作为输入,利用小波有限元

计算获得的裂纹结构频率响应数据库,获得裂纹等效刚度与裂纹位置的三条频率响应曲线,根据三条曲线的交点定量诊断出裂纹的位置与深度,该方法克服了现有无损检测方法多适用于静态且难以定量诊断的不足,适合机械结构裂纹在线快速定量检测<sup>[51]</sup>。

裂纹损伤识别第四层次的研究工作是剩余寿命预测方法。机械、运载和能源等行业的典型重大装备已经服役多年时间,可靠预测含裂纹构件的剩余寿命,是有效提高装备服役性能和控制失效事故发生的重要途径,因为过早判废退役则意味着巨额浪费和经济损失,继续运行则需要合理的剩余寿命预测以保证安全。例如目前我国大多数在役航空发动机采用工作时数和日历寿命进行寿命控制,当这两者之一达到设计值时,发动机将返厂修理。这种“经典”的发动机寿命管理办法就是定期维修、到期退役。在发动机服役期间缺乏有效的剩余寿命预测方法,会造成尚有较长剩余寿命的航空发动机到期退役,或者未到达检修周期就发生裂纹断裂事故。因此需要在裂纹损伤定量诊断基础上开展剩余寿命预测方法研究。

### 0.3.4 人工智能诊断方法

在上述传统的诊断方法的基础上,将人工智能的理论和方法用于故障诊断。发展智能化的诊断方法,是故障诊断的一条全新的途径,目前已广泛应用,成为设备故障诊断的主要方向。人工智能的目的是使计算机去做原来只有人才能做的智能任务,包括推理、理解、规划、决策、抽象、学习等功能。专家系统、神经网络、模糊逻辑、粗糙集、遗传算法、支持向量机、粒计算等方法是实现人工智能的重要基础,目前已广泛用于机械故障智能诊断领域。

自组织特征映射神经网络利用简单的算法达到了有效地表示数据和实现保拓扑性的双重目的,得到了广泛的应用。芬兰科学院院士 Kohonen 博士长期致力于人工神经网络与模式识别研究,发表了 300 多篇研究论文,出版了 4 本专著,原创性提出自组织特征映射神经网络(SOMNN)<sup>[52-53]</sup>。2006 年英国 Wong M. L. D. 等人提出了一种基于 SOMNN 和新的统计特征提取技术的故障检测新方法,利用功率谱密度函数的高阶统计技术提取特征,基于改进的 SOMNN 进行状态识别,采用两种来源于完全不同装置的实际数据集(轴承实验台和美国海军直升机振动数据集)测试了提出的方法<sup>[54]</sup>。2008 年 Perreri 等提出了一种基于主分量与 SOMNN 的在线故障检测与诊断系统,并将其应用于乙烯裂解炉在线监测与诊断中<sup>[55]</sup>。2009 年 Jianbo Liu 等人研究了基于时频分析、主分量分析与 SOMNN 的设备异常检测与故障诊断方法,并将其应用于汽车发动机控制系统中<sup>[56]</sup>。

人工智能方法针对某一特定的、相对简单的对象进行故障诊断时有其各自的优点和不足。例如专家系统缺乏有效的诊断知识表达方式,推理效率低,存在知识获取“瓶颈”;神经网络需要的训练样本获取困难;模糊故障诊断技术往往需要由先验知识人工确定隶属函数及模糊关系矩阵,但实际上获得与设备实际情况相符的隶属函数及模糊关系矩阵存在许多困难。要真正实现智能诊断,只靠单纯一两种方法很难满足要求,其应用也会有一定局限。如果将几种性能互补的智能技术经适当组合,取长补短、优势互补,其解决问题的能力会大大提高。

### 0.3.5 基础和关键科学问题

根据以上底层基础研究的本质和特性,将机械故障诊断学中的基础和关键科学问题归纳如下:



- 1) 机械系统运行状态下故障动态演化机理;
- 2) 机械系统动态信号处理的内积匹配原理与微弱信号特征增强机制;
- 3) 故障定量识别和剩余寿命预测原理;
- 4) 人工智能诊断与机械故障预示方法。

上述科学问题各自独立,又相辅相成,为机械故障诊断技术奠定坚实的基础。科学问题 1 旨在揭示机械系统运行过程中故障物理现象的萌生与发展演化规律,故障与系统动态响应映射关系的机理,为故障诊断奠定基础。科学问题 2 旨在揭示动态信号故障特征提取的原理,基于内积变换数学原理构造和选取与故障相匹配的基函数,通过抑制噪声和利用噪声增强故障特征,有效地提取故障动态特征,为故障诊断提供手段。科学问题 3 旨在揭示故障部位、种类和程度的定量诊断原理,动态地分析设备性能变化,可靠地预测装备剩余寿命,使故障诊断从定性走向定量。在前三个科学问题的基础上,科学问题 4 旨在综合研究智能化诊断方法,提供正确合理的诊断结论,预示故障发展趋势,实现机械设备预测性维护管理。

## 0.4 促进机械故障诊断科学技术的发展

科学技术是第一生产力。高新科学技术的创新与进步是时代革命的关键,也是社会发展的支柱。科学是求“真”,即研究、认识、掌握客观世界及其规律;技术是致“实”,即创造合乎科学的有效方法和手段<sup>[24]</sup>。安全生产和国民经济的可持续发展对运行中的机械设备进行故障诊断提出了更高的要求<sup>[1]</sup>,特别是迫切要求为工程实际中大型复杂机械设备开展早期、动态、定量和智能的故障诊断与预示,机械故障诊断学在科学和技术层面上面临着严峻的挑战,同样也迎来有利的发展机遇。

机械设备发生事故一般可以归结为损伤(damage)产生,继而故障(fault)出现,最后导致失效(failure),这是客观规律发展的一个过程。如何掌握这一过程,特别是掌握损伤和早期故障的监测和诊断,是实现机械故障诊断的科学发展的底层基础研究的关键。应该以工程应用为立足点,以底层基础研究为基石,以解决基础科学问题为支柱,进行自主的原创性研究,促进机械故障诊断科学技术的发展。为此,应当重视以下问题的研究:

1) 加强故障机理研究。故障机理是反映故障的原因和效应,加强故障机理研究是认识客观事物的科学实践,是通过理论或大量实验分析得到反映设备故障状态信号与设备系统参数之间联系的表达式,依之改变系统的参数可改变设备的状态信号<sup>[22]</sup>。20 世纪 80 年代初,屈梁生院士就把机械设备分为齿轮、轴承和旋转轴系三大基础零部件,并归纳总结了它们的故障原因、现象和在动态信号中的特征<sup>[5]</sup>;1993 年高金吉院士在他的博士学位论文中总结并发展了 20 世纪 60 年代国外提出的高速旋转机械故障种类及其动态响应特征<sup>[20]</sup>;2007 年陈予恕院士全面分析了大型旋转机械可建模系统和不可建模系统中某些重大振动故障的非线性机理<sup>[22]</sup>。随着科学技术的迅速发展,新颖、大型、高速机械设备,如数万吨锻压设备、大功率盾构机、铁路动车组等,新的故障机理有待承前启后地深入研究。例如针对典型的不对中故障,建立数学和力学模型,搭建实验平台,研究不对中所对应的故障征兆和频谱特征;再如,利用间隙机构动力学的研究成果,研究不同间隙大小对应的信号频谱特征,甚至建立起间隙大小和信号特征的定量关系,用于指导机构间隙的故障诊断,从而为诊断奠定基础。