



上海科技专著出版资金资助
上海交通大学学术出版基金资助

机械故障特征提取的 循环平稳理论及方法

陈 进 董广明 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

上海科技专著出版资金资助
上海交通大学学术出版基金资助

机械故障特征提取的 循环平稳理论及方法



陈 进 董广明 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

循环平稳信号是一类特殊的非平稳信号,其统计特征具有随时间呈周期变化的特点。旋转机械由于周期运行方式其振动信号具有循环平稳特性,因此利用循环平稳分析方法能够提取出在平稳假设下所不能得到的隐藏故障特征信息,为有效地分离和识别旋转机械早期微弱故障特征提供可能。

本书基于循环统计量理论,首先系统详细给出一阶循环统计量(循环均值)、二阶循环系统量(循环自相关和谱相关密度)以及高阶循环统计量(高阶循环矩、高阶循环累积量以及相应的循环矩谱、循环累计量谱)的理论与方法。在此基础上,以滚动轴承、齿轮及齿轮箱等典型旋转机械设备或零部件为研究对象,分别从建立循环平稳模型、分析循环平稳特征、创建故障特征提取方法、诊断理论和应用等不同角度,全新演绎了将循环平稳信号处理的基本理论运用于机械设备故障特征提取的循环平稳理论和方法。主要创新方面包括:①提出了循环平稳解调分析方法;②提出了循环频率域切片分析方法;③提出了循环频率域能量累积因子的概念;④针对典型机械零部件,研究了循环平稳信号处理方法在滤波、时频分析、高阶谱分析等方面的应用。

图书在版编目(CIP)数据

机械故障特征提取的循环平稳理论及方法 / 陈进,董广明著. — 上海:上海交通大学出版社,2013

ISBN 978-7-313-09692-0

I. 机... II. ①陈... ②董... III. 机械—故障—信号分析 IV. TH17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 094576 号

机械故障特征提取的循环平稳理论及方法

著 者:陈 进 董广明

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:韩建民

印 制:浙江云广印业有限公司

开 本:787mm×960mm 1/16

字 数:279 千字

版 次:2013 年 12 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-09692-0/TH

定 价:68.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:15

印 次:2013 年 12 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0573-86577317

出版说明

科学技术是第一生产力。21 世纪,科学技术和生产力必将发生新的革命性突破。

为贯彻落实“科教兴国”和“科教兴市”战略,上海市科学技术委员会和上海市新闻出版局于 2000 年设立“上海科技专著出版资金”,资助优秀科技著作在上海出版。

本书出版受“上海科技专著出版资金”资助。

上海科技专著出版资金管理委员会

前 言

劳动生产率和产品质量是构成现代工业企业核心竞争力的重要部分,一旦工业流程中的某一设备发生故障或失效,就很可能影响企业正常生产和产品质量,从而造成巨大的经济损失,严重影响企业的市场竞争力,甚至会导致灾难性的人员伤亡、环境污染和恶劣的社会影响。机械设备状态监测和故障诊断技术(Condition Monitoring and Fault Diagnosis)就是为避免机械设备发生故障的工程需要而逐步形成和发展起来的。应用先进的状态监测和故障诊断技术,不仅可以发现早期故障,及时采取措施避免恶性事故的发生,还可以从根本上解决设备定期维修中的维修不足和过剩维修的问题。

在石油、化工、电力、冶金等大中型企业中,压缩机、鼓风机、汽轮机、发电机、轧钢机等旋转机械往往是企业的核心机械动力设备,一旦发生事故,通常直接和间接损失都较严重。因此,研究和发展旋转机械的状态监测和故障诊断技术,具有重要的现实意义。构成设备的每个零部件都对其运转产生一定的影响,其中一些部件是至关重要的,其工作状态往往决定了整个机械设备乃至整条生产线的运行状态。对关键部件进行监测,从而掌握整个设备的运转情况,是最经济、最高效的监测手段。在旋转机械中,滚动轴承和齿轮是两类广泛使用的,同时也是最易损伤的元件,因此,本书以滚动轴承和齿轮为主要研究对象,探讨全新的状态监测和故障诊断技术。

机械设备状态监测和故障诊断技术中的关键问题之一是故障特征提取技术。故障特征捕捉的好坏直接关系到故障诊断的准确率和故障早期预报的可靠性。而特征提取技术的发展在很大程度上又取决于信号处理新理论、新方法的出现。现代信号分析与处理技术的本质从整体上来说可以用七个“非”字加以高度的概括,即:非线性、非因果、非最小相位系统、非高斯、非平稳、非整数维(分形)信号和非白色的加性噪声(有色噪声),随着各种新的信号处理方法的引入,如时频分析、小波分析、非线性时间序列分析等等,振动信号分析方法在非线性、非高斯、非最小相位信号处理方面有了一定的进步。这些特征提取技术及其相应的模式识别方法已经取得了初步成效,带来了一定的社会效益。

然而,现有的特征提取技术并未或无法充分考虑到旋转机械设备固有的周期时变特性。由于旋转机械设备自身的物理结构、运转机制等因素所导致的周期时

变特征是其一种固有的属性,且与系统本身的物理参量有着内在的联系。旋转机械的运行特点决定了其振动信号具有一定的周期性,当出现异常或发生故障时,一般还会表现出非平稳性,两者叠加就形成了带有周期性的非平稳信号。为了解决这类具有典型特征的信号分析问题,人们开始寻求新的信号处理方法。于是,循环平稳信号分析方法出现了。

循环平稳信号处理理论成型于 20 世纪 80 年代,之后得到迅速发展,它的研究对象是非平稳信号中的一类特殊信号——带有周期变化特征的非平稳信号,即循环平稳信号。这类信号带有周期性变化或者多周期性变化的统计参量。以 W. A. Gardner 为代表的众多学者,为循环平稳分析在通信领域的长足发展作出了巨大贡献,形成了一套较为成熟的循环统计量理论,为研究各领域广泛存在的循环平稳现象提供了理论保障。与传统的信号处理手段相比,循环平稳信号处理方法最大的不同是它引入了循环频率这个概念,从而将非平稳信号转化为在某个特定意义上平稳的信号进行处理。该方法能够很好地进行非平稳信号中、弱周期性信号的检测,对于具有循环平稳特性的通信信号以及旋转机械振动信号等的处理有非常重要的意义。因此,如果从循环平稳的假设出发,在循环平稳理论框架内分析旋转机械运行状况,从其物理本质入手研究其循环平稳机理,旋转机械的振动特征将得到更加真实、更加准确的反映。

本书的学术价值和贡献体现在循环平稳理论及方法在机械领域里的旋转机械状态监测与故障诊断中的应用。本书根据旋转机械在运转过程中,尤其是在故障状态下,其物理参数具有周期时变的特点、且呈现循环平稳特征的特点,从故障的物理本质入手,洞悉故障产生机理,利用循环平稳分析方法研究了滚动轴承、齿轮等旋转机械部件的早期微弱故障特征提取理论及方法。

本书的相关研究内容受到多项国家自然科学基金的持续资助([国家自然科学基金]:基于循环平稳信号处理的微弱机械故障特征提取方法(50175068);[国家自然科学基金重点]:大型复杂机电系统早期故障智能预示的理论与技术(50335030);[国家自然科学基金]:面向 IMS 并基于信息融合的设备性能退化评估与预测(50675140);[国家自然科学基金]:基于循环统计量的盲源分离方法研究及其在旋转机械故障特征提取中的应用(50875162),充分反映了循环平稳理论及方法在旋转机械状态监测与故障诊断中应用的最新的研究成果。

本书主要材料来自于上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室的研究团队成员的学位论文、期刊论文以及国内外相关学者公开发表的学术论文。本书系统、详细地给出一阶循环统计量(循环均值)、二阶循环统计量(循环自相关和谱相关密度)以及高阶循环统计量(高阶循环矩、高阶循环累积量以及相应的循环矩谱、循环累积量谱)的理论与方法;在此基础上,本书以滚动轴承、齿轮及齿轮箱等典型

旋转机械设备或零部件为研究对象,分别从建立循环平稳模型,分析循环平稳特征,创建故障特征提取方法、诊断理论和应用等不同角度,全新演绎了将循环平稳信号处理的基本理论运用于机械设备故障特征提取的循环平稳理论和方法。主要创新方面包括:①提出了循环平稳解调分析方法;②提出了循环频率域切片分析方法;③提出了循环频率域能量累积因子的概念;④针对典型机械零部件,研究了循环平稳信号的滤波、时频分析、高阶谱及盲分离算法。

本书可供机械、石油、化工、冶金、电力等行业从事机电设备动态分析、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,同时也可作为高等院校机械工程、仪器仪表和能源动力等专业的研究生、高年级本科生的研究参考书。衷心希望本书能对机械设备状态监测与故障诊断学科的发展和技术的应用起到添砖加瓦的作用。由于作者水平所限,书中如有不当之处,恳请广大读者批评指正。

作者

2013年4月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 引言	1
1.2 循环统计量理论的发展概况	3
1.3 基于循环平稳的故障诊断技术	7
1.4 本书主要内容	10
第 2 章 随机信号处理基础	13
2.1 随机变量	13
2.2 随机信号	16
2.3 平稳随机信号	18
2.4 平稳随机信号的经典谱估计	21
第 3 章 循环平稳信号处理初步	26
3.1 时变矩与时变累积量	27
3.2 循环平稳信号的基本定义	27
3.3 基于时间平均的循环平稳信号的定义	28
3.4 一阶循环统计量理论	32
第 4 章 二阶循环统计量理论及其计算方法	39
4.1 循环自相关函数	39
4.2 二阶循环平稳的谱相关	47
4.3 谱相关密度函数的估计	56
第 5 章 基于循环统计量理论的解调分析	72
5.1 循环自相关函数对调幅信号的解调性能分析	72
5.2 调频信号的解调性能分析	81
第 6 章 旋转机械的循环平稳模型	105
6.1 引言	105

6.2	齿轮振动信号的循环平稳模型	106
6.3	滚动轴承循环平稳模型	112
6.4	齿轮箱综合故障信号模型	124
第 7 章	基于谱相关密度函数的分析方法	127
7.1	引言	127
7.2	循环平稳度分析	128
7.3	基于 Hilbert 变换的谱相关密度单切片分析	136
7.4	谱相关密度组合切片分析	151
7.5	基于谱相关的状态监测	161
第 8 章	循环平稳信号的滤波	168
8.1	引言	168
8.2	维纳滤波器	168
8.3	循环维纳滤波器	172
8.4	循环平稳信号自适应增强器	178
第 9 章	循环平稳信号的时频分析	184
9.1	Wigner-Ville 分布	184
9.2	基于谱相关密度函数的 Wigner-Ville 分布	185
9.3	基于匹配追踪的时频分布算法	188
9.4	算例分析及对比	190
第 10 章	高阶循环平稳信号处理	201
10.1	引言	201
10.2	高阶统计量基础	202
10.3	高阶循环统计量	207
10.4	三阶循环统计量的研究	211
参考文献		217
符号表		227
关键词索引		229

第 1 章 概 论

1.1 引言

随着现代化大生产的发展和科学技术的进步,机械设备的结构越来越复杂,功能越来越完备,自动化程度也越来越高。目前,在石化、能源、冶金、电力、航空、机械等各领域广泛使用的旋转机械,如汽轮机、发电机、鼓风机、压缩机、发动机等,是企业中的关键设备,该类设备安全、稳定、长时间、满负荷、优质运行,会产生良好的经济效益和社会效益。但由于工作条件的变化及使用寿命的限制,一旦在某处发生故障,就可能引起连锁反应,导致整台设备甚至整个生产过程不能正常工作,造成巨大的经济损失,甚至造成灾难性的人员伤亡,产生不良的社会影响。近几十年来,国内外因关键的设备故障而引起的各种空难、海难、爆炸、断裂、倒塌、毁坏、泄漏等恶性事故时有发生。例如,1972 年日本关西电力公司 Kainan 电厂的 3 号 600MW 汽轮发电机,因振动引起的断轴毁机事件,直接经济损失达 9 千万马克;1984 年印度博帕尔市农场毒气泄漏事故造成上千人死亡,20 万人受害;1985 年中国大同电厂和 1988 年中国秦岭电厂的 200MW 汽轮发电机的严重断轴毁机事件;1986 年美国航天飞机“挑战者”号由于装液态燃料的管道泄漏,使得燃料未进入高温区就发生爆炸事故,造成七名宇航员丧生并导致美国宇航计划推迟两年,其经济损失无法估计;1986 年 4 月 27 日前苏联切尔诺贝利核电站四号机组发生严重振动而造成核泄漏,致使两千多人死亡,经济损失达 30 亿美元;1988 年英国北海油田帕尔波·阿尔法号大型采油平台的爆炸失火事件;1998 年我国某钢厂一台大功率高炉鼓风机数级叶片折断,致使该高炉停产,直接经济损失达数十万元;又如,英国 CEGB 下属的 60 万 kW 和 55 万 kW 的发电厂,每年因机械设备故障而引起而停车所造成的经济损失就高达 100 万英镑,一台 20 万千瓦的发电机组停机一天就损失 500 万 kW·h 电,仅直接经济损失就达几十万英镑。据报道四川一化工厂一台合成氨压缩机停产一天就造成 70 万元的损失。所以,有计划、有组织、有针对性地对关键设备进行实时监测与诊断,做到尽早地发现设备在运行过程中的各种隐患,从而防止灾难性事故的发生,成为机械设备故障诊断系统面临和必须解决的首要问题。

在机械设备状态监测与故障诊断技术中,研究振动信号处理理论和方法是提取故障特征、有效开展机械设备故障诊断研究的基础。在以往的理论分析和应用研究中,为了便于分析与处理,多数情况下要对分析对象进行一些理性化的处理和简化,例如假设被分析的信号具有线性性、平稳性和最小相位等特征,并在此基础上形成了完整的理论体系和方法^[1],如同步平均法、功率谱、细化谱、包络分析及因数判别法^[2~7]等,它们分别仅从时域或频域给出信号的统计平均结果,无法同时兼顾信号在时域和频域的全貌和局部化特征。然而,在很多情况下,这样的处理会忽略信号中一些重要特征,特别是一些细微的信息,而这些细微信息往往预示着设备状态的发展趋势。在对状态监测要求较高的场合,如精密机械设备或者复杂工况设备,这样的假设显然力不从心,容易造成漏诊和误判。

现代信号分析与处理技术的本质从整体上来说,可以用七个“非”字加以高度的概括,即:非线性、非因果、非最小相位系统、非高斯、非平稳、非整数维(分形)信号和非白色的加性噪声(有色噪声),文献^[8]对其进行了详细的论述。现代信号处理技术的迅猛发展为机械振动信号分析带来了新的活力。随着各种新的信号处理方法的引入,如时频分析^[9~11]、小波分析^[12~14]、非线性时间序列分析^[15~19]等等,振动信号分析方法在非线性、非高斯、非最小相位信号处理方面有了一定的进步^[20~22]。这些特征提取技术及其相应的模式识别方法已经取得了初步成效,带来了一定的社会 and 经济效益。

小波分析技术作为一种灵活的时频分析技术,由于其算法的多样性、信息的敏感性以及信息可再提取性,在故障诊断领域得到了极为广泛的应用研究^[23~29],例如,在低信噪比下,利用基于 Morlet 小波的软阈值消噪来实现对不同信号中我们所感兴趣成分的提取^[23],利用离散小波包变换技术实现多频带滤波以提取出低速滚动轴承的故障信息^[24],将小波分析技术和包络分析结合提取出淹没在噪声和结构振动中的滚动轴承特征频率^[25],通过修正小波变换模的极大强度,从而使得滚动轴承故障特征得到增强^[26],对旋转机械振动信号进行基于梳状小波的降噪处理^[27],利用小波变换进行窄带滤波实现不同转速下的感应电机的故障诊断^[28],利用遗传算法实现小波与观测信号的精准匹配,从而提高故障诊断的精准性^[29]。

经验模态分解^[30]是近年来发展起来的另一种时频分析方法,不同于其他分析方法,它不需要先验的基底,本征模函数是基于序列数据自适应得到的,该方法得到的 Hilbert 谱具有比较明确的物理意义,可以很好地表明信号在某一瞬时的频率组成及各频率的幅值,因此,该方法在设备故障诊断领域得到了广泛的应用^[31~33],例如,对信号进行经验模态分解后,对每个本征模函数进行能量算子解调,实现对滚动轴承和齿轮信号的故障特征提取^[31],利用经验模态分解提高对齿

轮故障诊断的可靠性^[32],利用经验模态分解对信号进行平稳化处理后,把每个本征模函数的 AR 系数作为特征量,从而实现对滚动轴承的故障识别^[33]。文献[34]则对该方法和小波分析在滚动轴承故障诊断中的应用进行了对比分析。

但是,应当指出的是,现有的特征提取技术并未充分考虑到旋转机械设备固有的周期时变特性。由于旋转机械设备自身的物理结构、运转机制等因素所导致的周期时变特征是其一种固有的属性,且与系统本身的物理参量有着内在的联系。旋转机械的运行特点决定了其振动信号具有一定的周期性,其非平稳性并不强,其统计特征具有周期时变的特点。无视旋转机械振动信号的这种特性,将其作为一般的非平稳信号,利用通用的非平稳信号分析方法进行处理,将会人为增加分析难度。

循环平稳信号处理理论是在 20 世纪中叶产生,并在世纪末期得到迅速发展的一种新兴的信号处理手段,它的研究对象是非平稳信号中的一类特殊信号——带有周期变化特征的非平稳信号,即循环平稳信号,这类信号带有周期性变化或者多周期性变化的统计参量。与传统的信号处理手段分析相比,循环平稳信号处理最大的不同是它引入了循环频率这个概念,从而将非平稳信号转化为在一定的程度上平稳的信号进行处理。该方法能够很好地进行非平稳信号中、弱周期性信号的检测,对于具有循环平稳特性的通信信号以及旋转机械振动信号等的处理有非常重要的意义。因此,如果从循环平稳的假设出发,在循环平稳理论框架内分析旋转机械运行状况,从其物理本质入手研究其循环平稳机理,旋转机械的振动特征将得到更加真实、更加准确的反映。

1.2 循环统计量理论的发展概况

现代信号分析与处理技术完全是为了更加有效地解决非线性、非平稳等系统和信号而发展起来的。建立循环统计量理论的主要目的是处理特殊非平稳信号,即这类非平稳信号带有周期性特征。

1.2.1 高阶统计量理论

高阶统计量理论出现在 20 世纪的 60 年代初期,首先是在数学、统计学和信号处理等领域进行了探索性的研究。但是人员寥寥,主要是分布在东北大学、南加州大学以及 Exxon 的三个研究小组,其成果也很有限,其中最为突出的是 Li 和 Rosenblatt 证明了最小相位传递函数可以用输出信号的任意高阶谱获得。到了 80 年代中后期,高阶统计量理论的研究迎来了高潮。1989 年召开了首届高阶谱分析学会,1990 年 1 月 IEEE Transaction on Automatic Control 和 7 月 IEEE

Transaction on Acoustics, Speech, and Signal Processing 先后出版了有关高阶统计量的专刊,这些都标志着高阶统计量的研究开始了一个崭新的发展阶段^[23]。现在,高阶统计量理论已经成为非平稳、非高斯信号和非最小相位系统的主要数学分析工具,相应的高阶谱分析则是信号处理学科的前沿性研究方向。

在以往的故障诊断技术研究中,使用的均值属于一阶统计量,相关函数和功率谱密度属于二阶统计量。高阶统计量理论是在低阶(一阶和二阶)统计量理论基础上发展起来的,其克服了低阶统计量由于缺少相位信息而无法直接处理非最小相位系统的固有缺陷,并且包含有更为丰富的内容。简言之,一切用二阶统计量方法可以处理但又不能够圆满解决的问题,原则上都可以利用高阶统计量方法加以处理^[35]。

针对功率谱密度分析在实际应用中暴露出来的种种不足,高阶统计量分析的优势主要集中在以下几点:

(1) 自相关函数和功率谱密度可以完全确定零均值平稳高斯过程的统计特性,但是对于实际中出现的非高斯过程就显得无能为力。高阶统计量和高阶谱是分析非高斯信号的主要工具。

(2) 功率谱密度估计中的最小方差优化准则使得在谱估计过程中丢失了相位信息,只有当信号具有最小相位时才能得以恢复。使用高阶谱分析方法可以求得非最小相位系统的真实相位。

(3) 对于输入为随机信号的线性系统,可以通过自相关函数和功率谱密度进行分析,而对于相应的非线性系统,只能用高阶谱进行分析。

正是由于以上这些原因,近些年来高阶统计量分析理论和应用研究得到了飞速的发展,并在自动控制、生物医学工程、地质勘探、无损探伤、雷达信号处理、声呐信号处理、语音信号处理、振动分析、故障诊断等多个领域中得到成功的应用^[36,37]。

高阶统计量通常指的是高阶矩(Higher-Order Moment, HOM)、高阶累积量(Higher-Order Cumulant, HOC)、高阶矩谱(Higher-Order Moment Spectrum, HOMS)和高阶累积量谱(Higher-Order Cumulant Spectrum, HOCS)这四种主要的形式,此外,还包括倒高阶累积量以及倒高阶累积量谱(简称倒多谱)。在工程应用中,多是使用高阶累积量和高阶累积量谱(简称高阶谱)而不是高阶矩和高阶矩谱作为分析非高斯、非平稳随机过程的主要手段。

1.2.2 循环平稳理论

在非平稳随机信号中,有一类特殊的信号,它们的非平稳特性表现为一定的周期性,也就是说其统计特征参量随时间呈现出周期或多周期(各周期互质)的变化

规律。此类信号被称为循环平稳或周期平稳(Cyclostationary, CS)信号^[38~42]。具有季节性变化或周期性变化的天然信号,例如水文信号、气象信号、大气信号、海洋信号和天文信号等,都是典型的循环平稳信号。由于旋转机械运转模式的周期性,齿轮、轴、轴承、活塞等设备的振动信号也具有循环平稳特征^[43~51]。相对其他非平稳信号而言,循环平稳信号具有一些独特的性质^[52,53]。通过非线性变换,循环平稳信号可以产生有限强度的正弦波,而信号本身并不显性地包含任何有限强度的加性正弦量。分析和处理循环平稳信号的各种方法的根本出发点就是通过选取适当的非线性变换来提取出信号中的正弦波分量,进而再分析信号的时变特征,最终获取信号中的有用信息。根据统计特征函数周期性的不同,循环平稳信号可分为一阶循环平稳、二阶循环平稳和高阶循环平稳。

在循环平稳理论的基础上,现又形成了几乎循环平稳(Almost Cyclostationary, ACS)理论^[54]。若非零循环频率都是单个基频的整数倍,则称此信号是循环平稳的,否则就称此信号是几乎循环平稳(或多循环平稳)的。几乎循环平稳过程与循环平稳过程有着显著的差异:前者的统计特征函数是几乎周期函数,而后者是时间上严格的周期函数。从这种意义上说,几乎循环平稳过程是循环平稳过程的推广,循环平稳过程仅为几乎循环平稳过程的一个特例。在几乎循环平稳理论的基础上,进一步拓展,引申出广义几乎循环平稳(Generalized Almost Cyclostationary, GACS)理论^[55]。广义几乎循环平稳与几乎循环平稳的区别在于几乎循环平稳信号的参数是 Fourier 级数的几乎周期函数,其频率相对独立于序列的滞后量,通过二次或高次非线性变换可以产生正弦波,其算法对于背景噪声和干扰是渐近无影响的;广义几乎循环平稳信号的多变量统计特征函数是 Fourier 级数的时间几乎周期函数,其相关系数和频率依赖于时间序列的滞后参量。图 1.1 给出了循环平稳、几乎循环平稳和广义几乎循环平稳三者之间的关系。

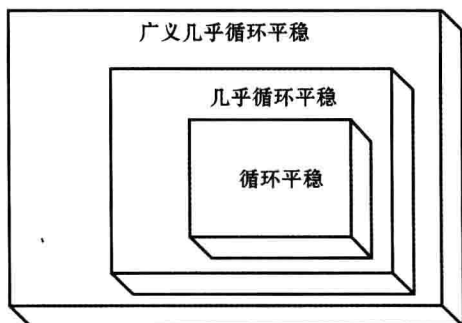


图 1.1 三个循环平稳过程的关系

1.2.3 循环平稳理论研究现状

虽然人们很早就已经意识到许多信号中存在有循环平稳性这一个客观事实,但只有当高阶统计量这一数学工具诞生以后才得以真正揭开循环平稳信号的本质,从而形成了一门崭新的理论学科——循环统计量理论。在循环统计量理论的研究中,存在过两个研究方向:一个是以 W. A. Gardner 等为代表的时间序列研究学派,另一个是以 B. G. Giannakis 等为代表的随机过程研究学派。这两个研究流派的主要代表性著作可分别参见文献[56~63]和参考文献[64~70]。

循环平稳理论作为一门新兴的技术应用于信号与信息处理领域只有 20 年左右的历史,而循环统计量理论,特别是高阶循环统计量理论应用在工程实际分析与研究中则仅仅是最近几年的事情。

按照统计特征参数的不同,循环统计量分为一阶循环统计量(循环均值)、二阶循环统计量(循环自相关函数和谱相关密度函数)和高阶循环统计量。高阶循环统计量是构筑在循环平稳信号的高阶数字特征函数基础之上的,包括高阶循环矩、高阶循环累积量以及它们相应的高阶矩谱和高阶累积量谱。

和高阶统计量的应用情况一样,在高阶循环统计量中,也是主要应用高阶循环累积量作为处理手段。高阶循环累积量具有循环平稳理论和高阶累积量分析方法两者的优点,特别是在对噪声和干扰的免疫性能上具有后两者所无法比拟的优势,其对于高斯噪声和非高斯噪声,都具有自动免疫性能。但是,高阶循环累积量也继承了高阶统计量和循环平稳两者的缺点,突出表现为高阶循环域的分析需要更长的时间序列,其计算方法也将更加复杂,这是目前应用中急需解决但又难以解决的两个棘手问题。另外,这里特别值得指出的是,高阶循环累积量对于噪声的免疫性是一种渐近的性质,也就是说,只有当观测样本是无限长时才能保证对噪声的完全抗干扰能力。在实际使用时,为了提高分析结果的精度,只需适当地增加采样数据的长度即可。关于高阶循环统计量理论的详细论述可参见文献[35、71~74]。

实际工程应用中往往利用一次样本实现对随机过程的统计特征量进行估计,估计方法的可靠性和效率将直接关系到能否准确地描述信号的特征。许多情况下,循环平稳分析的计算量及复杂程度远远高于传统的谱分析方法,这主要是因为循环平稳分析方法以循环统计量的估计为基础,估计方法本身实现较为复杂,尤其是对于谱相关的估计,算法需要估计出众多频率成分之间的关系,而并非仅仅计算出频率成分本身。时域平均和频域平滑是经典功率谱估计中的两种基本方式,目前大多数循环统计量非参数估计算法也都是基于这两种方法来消除随机噪声的干扰,提高估计精度^[75~78]。当估计样本的长度足够大时,这两种估计方法是完全等价的,但两者在计算效率方面有一些的差别^[79]。如果要估计所有谱线之间的相关

性时,基于时域平均的算法计算效率较高,当仅需要估计出某些循环频率对应的谱相关密度切片时,或者对循环频率分辨率要求较高的场合,将会优先选择频域平滑算法。Gardner(1990)^[53]详细地介绍了估计二阶循环统计量时最常用的方法:循环周期图和循环相关图。为了得到高估计效率,人们还对二阶循环统计量估计的循环周期图进行了多方改进,提出了多种高效算法^[80~82]。其中最具有代表性的是Roberts等(1991)^[83]提出的FFT累积方法(FFT Accumulation Method, FAM),该方法将谱相关平面分成多个循环谱分析区域,对不同区域里面的循环频率利用FFT选抽进行细化,大大提高了计算效率。同样循环周期图和循环相关图也会面临功率谱估计时所面对的问题,即估计值的方差并不会随着估计样本长度的增加而减小,也就是说循环周期图和循环相关图得到的估计是非一致估计。

1.3 基于循环平稳的故障诊断技术

循环统计量理论的发展带动了循环平稳分析在机械领域内的应用性研究,人们开始以循环平稳的角度看待和解释旋转机械中的某些现象。同步平均技术是旋转机械状态监测和故障诊断中,尤其是在齿轮振动分析中常用的方法。它能够消除随机噪声的干扰,提高信噪比,从而使得信号特征得以显现^[7,84~89]。这一方法假设感兴趣的信号具有严格的周期性,假定环境噪声平稳随机,利用鉴相信号对信号进行同步平均,从而削弱噪声,提高信噪比。早在几十年前,“同步平均”的术语就已经提出^[84,85,87],并且在实际应用中取得了较好的效果。但是,当人们从循环平稳的角度重新审视这一方法时,发现同步平均技术之所以能够有效提取信号的特征,正是由于其理论根源来自一阶循环平稳^[90]。环境噪声具有宽频、随机的特点,将会一定程度上掩盖感兴趣的频率成分,特别当环境噪声较强时,相对较弱的特征频率就会完全淹没在噪声当中,从时域角度则观察到呈现随机特性的振动信号。假定环境噪声是零均值的加性噪声干扰,如果能够对这一随机过程的多次样本进行集总平均,其均值将不包括这一加性随机噪声,而仅得到感兴趣的周期信号。换言之,该随机过程的均值是周期的,从而该随机过程一阶循环平稳。信号同步平均的结果是利用一次样本实现得到的一阶循环矩的估计,在一定的估计精度下,能够有效削弱噪声干扰,识别信号特征。

同步平均并不是适应于任何场合。实际应用发现,很多情况下振动信号的同步平均在消除噪声的同时也削弱了信号本身。但是无论如何,旋转机械的运转方式决定了其振动信号必然含有周期性的特征,实际的工程环境又决定了信号必然存在随机性的特点。因此,一阶循环平稳,即同步平均技术,在旋转机械振动信号分析上的优势启发人们利用二阶、甚至高阶循环平稳分析方法研究旋转机械的振

动情况^[91~93]。

人们较早利用二阶循环平稳分析方法进行研究的旋转机械是滚动轴承。P. D. Mcfadden 和 J. D. Smith 在 1984 年首次从信号最终构成的角度提出了滚动轴承点蚀等单一局部故障的理论模型^[94], 此后对多点点蚀故障、不同运转状态以及其他故障情况提出了改进模型^[95~98]。不同于以往的滚动轴承模型, 这些模型不是从滚动轴承的几何结构和响应方式上构建模型, 而是仅仅从故障引起的振动信号本身建模。就点蚀故障而言, 将信号构建成低频现象和高频现象的综合体, 故障频率为信号中的低频成分, 对其高频成分, 即系统共振频率进行调制。因此, 调制特征是滚动轴承点蚀故障的主要表现形式。

为简单起见, 最初阶段人们对滚动轴承振动信号的循环平稳分析围绕一般的调幅模型展开, 得到了各种形式下的二阶循环平稳特征, 从中分析信号可能存在的故障形式^[99~109]。除故障识别外, 有些学者还利用信号的循环平稳度估计滚动轴承所在转子的实际转速, 利用循环统计量实现滚动轴承点蚀故障振动信号的自动分类, 这些工作也取得了一定的成果。

滚动轴承实际信号所表现出的频谱形式并不像齿轮振动信号一样, 属于非常典型的调制现象。在很多情况下, 其幅值谱上在共振频率附近并不能识别出离散的调制边带特征, 而是出现频率模糊的现象。造成这一现象的原因是点蚀部位引起的冲击序列的周期性并不严格, 微小的时间偏差使得在高频段的谱线交叠在一起, 无法辨认。因此, 为了更精确地把握滚动轴承点蚀故障的循环平稳特征, J. Antoni 和 R. B. Randall 改进了 Mcfadden 的滚动轴承单点点蚀振动信号模型, 将是造成频率模糊的主要因素, 即滚道和滚珠之间的微小随机滑动引入模型中^[44, 110~112]。由此, 信号的严格周期性被打破, 其二阶循环平稳分析结果表明, 滚动轴承点蚀故障振动信号是在频率谱域连续、在循环频率域具有离散特征的典型的二阶循环平稳信号。在建模的过程中, 对滚动轴承滚道和滚珠之间随机的、不可避免的微小滑动可以有不同的假设, 当假设滑动为 δ 相关的随机过程时, 信号的谱相关密度函数在循环频域离散。当假设滑动为马尔可夫过程时, 信号的时变自相关在时域具有伪随机性, 虽然其谱相关密度函数在循环频率域连续, 但能够表现出突出的谱峰。严格意义上, 这种信号被称为伪循环平稳信号, 但工程上可以将其作为一般的循环平稳信号进行分析和处理。作为旋转机械的重要部件, 齿轮振动信号被认为是典型的调制信号, 其严格的周期性使得同步平均技术, 即一阶循环平稳分析在其状态监测中得到广泛应用, 同时一些学者也利用二阶循环平稳分析监测齿轮调制现象的改变^[108, 113~115]。

除滚动轴承和齿轮两个主要的研究对象外, 学者们围绕内燃机故障以及转子碰摩故障等一般旋转机械的循环平稳机理也展开了一定的研究工作^[116, 117]。实际