

机械设备诊断的现代信号处理方法

JIXIE SHEBEI ZHENDUAN DE
XIANDAI XINHAO CHULI FANGFA

樊永生 著

本书特色：

- * 概述盲信号分离技术；
- * 讲解小波奇异性检测技术；
- * 涉及机械设备的监控机理和应用；
- * 强调现代信号处理理论在故障诊断中的应用；
- * 以齿轮箱早期故障诊断为例，力求理论联系实际。



国防工业出版社

National Defense Industry Press

机械设备诊断的 现代信号处理方法

樊永生 著

國防工業出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

机械设备诊断的现代信号处理方法/樊永生著. —北京:
国防工业出版社, 2009. 5

ISBN 978-7-118-06277-9

I. 机... II. 樊... III. 信号处理—应用—机械设备—故障诊断 IV. TH17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 044599 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 100048)
北京奥鑫印刷厂印刷
新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 10¼ 字数 285 千字
2009 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 29.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

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

随着现代机械设备的结构和功能日趋复杂化,人们对设备正常、安全、稳定运行的要求越来越高,因而设备状态监测与故障诊断已成为现代工业发展的迫切需要。而设备状态监测与诊断的关键问题之一是如何对机械动态信号的非平稳性进行有效分析,获取设备异常振动信号的特征。信号的非平稳性是指信号的时间域及频率域统计特征随时间变化而变化。传统的基于统计信号处理以及傅里叶分析方法无法对非平稳信号进行有效的分析和处理,因而无法满足复杂机械设备状态监测与诊断的要求。现代计算机技术和信息科学的迅速发展,推动着非平稳信号处理技术研究的不断深入,新的理论和算法层出不穷,并已广泛应用于设备故障信号处理与特征提取,取得许多研究成果。

本书作者多年从事设备故障诊断研究,在攻读博士学位期间有幸承担了国防科工委基础科研项目“双线性时间—频率变换探测技术研究”(项目编号:J1300A002)和山西省自然科学基金项目“基于瞬态过程分析的复杂传动系统故障诊断研究”(项目编号:20051023),对设备故障信号处理方法进行了一些探索,在此基础上写成本书,供从事机械设备监测与诊断的科技人员参考。书中以齿轮箱状态监测与早期故障诊断为例,分析了旋转机械设备振动信号产生、传播和测量的特点,以及设备典型故障所产生的信号源特征,建立了信号源的数学模型。介绍了如何根据设备典型故障特征,将小波包络分析和奇异性检测理论、盲信号分离技术、双线性时间—频率变换及其快速算法等现代信号处理方法应用于故障信号探测与特征提取的思路和方法。并通过大量的故障诊断实例,对这些新理论诊断效果进行了验证和说明。

本书编写过程中,余红英博士进行了部分数据处理以及图表制作编辑工作,在此深表感谢!

由于作者水平限制,编写时间仓促,书中错误和不妥之处在所难免,欢迎各位专家学者不吝指教,作者深表感谢。

作者
2009年3月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 传统的故障特征提取方法	1
1.1.1 时域分析方法	1
1.1.2 频域分析方法	4
1.2 现代信号处理方法	5
1.2.1 盲信号分离	5
1.2.2 短时傅里叶变换	6
1.2.3 小波变换	7
1.2.4 双线性时间—频率分布	7
1.2.5 双线性时间—频率变换的快速计算	8
1.3 本书内容安排	9
第 2 章 信号源特征分析及提取	10
2.1 引言	10
2.2 齿轮振动信号特征分析	10
2.2.1 齿轮的振动	11
2.2.2 齿轮振动数学模型	13
2.2.3 齿轮典型故障信号特征	13
2.2.4 齿轮故障对运动参数的影响	14
2.3 轴承振动信号特征分析	15
2.3.1 正常轴承的振动信号特征	16
2.3.2 故障轴承的振动信号特征	16
2.3.3 轴承振动信号的频谱结构分析	16
2.4 齿轮箱振动信号的传播与测量	17
2.4.1 振动信号的传播	17
2.4.2 振动信号的测量	19

2.4.3	齿轮箱状态信号的特点	20
2.5	传统故障特征提取方法及工程应用	20
2.5.1	时域平均技术 ^[31,126]	20
2.5.2	包络分析技术 ^[1,31]	24
2.5.3	倒频谱分析 ^[1,31]	34
第3章	盲信号分离技术	39
3.1	引言	39
3.2	盲信号分离的基本问题	39
3.2.1	线性瞬时混合模型	40
3.2.2	卷积混合模型	40
3.2.3	盲分离的不确定性 ^[33-39]	41
3.3	独立分量分析	41
3.3.1	独立性的判定——目标函数	42
3.3.2	独立分量分析的实现	44
3.4	卷积混合模型的盲分离	48
3.4.1	测量信号的短时傅里叶变换	48
3.4.2	频率域盲分离	49
3.4.3	频域分离信号的调整	50
3.4.4	逆短时傅里叶变换	50
3.4.5	数字仿真	50
3.5	盲信号分离技术的应用	52
3.5.1	齿轮箱振动信号特征及数学模型	53
3.5.2	齿轮箱振动信号的频域特征及其分离	57
3.5.3	齿轮箱实验装置	59
3.5.4	实验数据分析	59
第4章	小波包络分析技术	68
4.1	引言	68
4.2	小波变换的基本理论	68
4.2.1	小波变换的定义 ^[88]	68
4.2.2	小波变换的特点 ^[60]	69
4.2.3	小波变换的反演及对基本小波的要求 ^[88]	70

4.2.4	离散小波变换	71
4.2.5	多分辨率分析与二尺度方程	71
4.2.6	Mallat 算法	73
4.3	连续小波变换与包络分析	75
4.3.1	Morlet 小波	75
4.3.2	Morlet 小波与包络检波 ^[31]	77
4.3.3	复 Morlet 小波包络检波快速算法	78
4.4	工程应用	78
4.4.1	Morlet 小波包络检波算法在滚动轴承故障诊断中的应用	78
4.4.2	Morlet 小波包络检波算法在齿轮故障诊断中的应用	81
第 5 章	小波奇异性检测技术	85
5.1	引言	85
5.2	小波变换的奇异性检测原理	85
5.2.1	奇异性的定义	85
5.2.2	小波变换的卷积表达	86
5.2.3	小波变换的极值点、过零点与信号奇异性的关系 ^[31,60]	86
5.2.4	几种检测局部性能常用的小波 ^[31]	87
5.3	二进小波变换的基本理论	89
5.3.1	二进小波及二进小波变换 ^[60]	89
5.3.2	基于 B 样条的二进小波函数与尺度函数	91
5.3.3	小波多孔算法	92
5.4	小波变换模极大值与奇异性检测	93
5.5	小波变换的模极大值去噪算法	94
5.6	小波奇异性检测原理的应用	95
第 6 章	双线性时间—频率变换探测技术	101
6.1	引言	101
6.2	双线性时间—频率变换的基本理论	101
6.2.1	双线性时间—频率分布的定义 ^[87]	102
6.2.2	时频分布的性质	103
6.2.3	多分量信号的时频分布	104
6.2.4	减小交叉项核设计 ^[97]	105

6.2.5	常用时频分布 ^[83-85]	106
6.2.6	离散时间 Cohen 类分布 ^[96,101]	110
6.3	核函数设计与选择	111
6.3.1	常用时频分布特点分析 ^[98,130]	111
6.3.2	核函数设计 ^[130]	112
6.4	应用仿真与实验分析	114
6.4.1	数字仿真	114
6.4.2	故障检测实例	115
第 7 章	双线性时间—频率变换的快速计算	127
7.1	引言	127
7.2	离散时间时频分布	127
7.2.1	连续时间时频分布简介 ^[83,87]	127
7.2.2	离散时间时频分布	128
7.2.3	无混叠离散时间时频分布的基本性质	130
7.3	离散时频分布的快速算法	132
7.3.1	离散时频分布的快速算法概述	132
7.3.2	双线性时间—频率分布的核分解	136
7.4	快速算法的应用	141
7.4.1	仿真算例	141
7.4.2	齿轮箱早期故障信号处理	145
参考文献		149

第1章 绪 论

现代机械设备功能越来越多,结构越来越复杂,长期运行在高速、高温、重载等恶劣环境下。一旦关键设备发生故障,不仅会使设备受损、产品质量下降或生产线停工,造成巨大的经济损失,还可能危及职工安全,引发环境污染,带来严重的社会问题。因此,设备状态监测与故障诊断技术的研究对现代工业发展具有重要意义,目前已经形成了一门既有理论基础、又有实际应用背景的交叉性学科。状态监测与故障诊断的实质是监控机械设备的运行状态,预测设备的可靠性,及早发现设备故障,预报故障发展趋势,并提供维修意见和措施。由此可见,设备状态监测与故障诊断技术应包括识别设备状态和预测发展趋势两方面内容^[1]。诊断过程一般分为三个步骤:①获取诊断信息;②提取故障特征;③状态识别和故障诊断。获取诊断信息是在设备运行过程中,对设备特征信息进行检测、分析处理并显示、存储,是设备故障诊断的基础性工作。由传感器获取的信息往往特征不明显、不直观,需要通过信号分析处理方法把获得的信息进行变换处理,从多重分析域、多个角度分析观察检测信息,提取故障特征信息。信号处理方法的选择、处理过程的准确性,以及表达的直观性都会对结果产生较大影响。状态识别和故障诊断是根据信息获取和信号分析处理所提供的反映设备运行状态的征兆或特征参数的变化情况,来判断设备工作是否正常。如果存在故障,还要诊断故障的性质、产生原因和发生部位,提出处理意见。因此,故障诊断的关键是从设备动态测量信号中提取故障特征,借助信号处理等手段从传感器测量数据中提取特征信息和特征量,准确地进行故障监测与诊断。而信号处理、特征提取是故障诊断中必不可少的重要环节^[2]。

1.1 传统的故障特征提取方法

传统的信号处理方法主要是傅里叶分析,傅里叶变换与反变换建立了信号在时间域与频率域之间相互变换的桥梁,提供了信号的时域分析和频域分析两种方法。因此,传统的故障特征提取方法有时域分析方法和频域分析方法。

1.1.1 时域分析方法

在设备状态监测中,直接利用时域振动信号进行分析并给出结果,是最简单最直接的振动监测方法,特别是当信号中明显含有简谐成分、周期成分或瞬时脉冲成分时更为有效。但这种方法要求分析人员具有比较丰富的实际经验。时域信号分析主要采用以下特

征量^[1,124]：

1. 振动幅值

对于一组离散的测试信号 $[x_1, x_2, \dots, x_n]$ ，振幅参数主要包括：

均值
$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

绝对平均值
$$|\bar{X}| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i|$$

最大值
$$X_{\max} = \max(|x_i|) \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

均方根值
$$X_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}$$

方根幅值
$$X_r = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{x_i} \right]^2$$

歪度
$$\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^3$$

峭度
$$\beta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^4$$

在实际应用中，信号的均值对故障诊断的意义不大，但对计算其他参数有很大影响，在分析计算时应做零均值处理，以突出对故障诊断更有用的动态信号部分；歪度 α 反映信号幅值的分布密度的不对称性，峭度 β 对幅值变化非常敏感，这对探测信号中是否含有脉冲性故障信息比较有效。一般说来，随着故障的发生和发展，均方根值、方根幅值、绝对平均值和峭度等都会逐渐增大。

2. 与幅值有关的其他参数

有量纲参数指标不但与机器的状态有关，且与机器的运动参数如转速、载荷等有关。而无量纲参数指标对信号幅值和频率变化均不敏感，只依赖于振动信号的分布密度函数。所以无量纲参数指标是一种较好的机器状态监测诊断参数。常用的无量纲参数指标有：

波形指标
$$S = \frac{X_{\text{rms}}}{|\bar{X}|}$$

峰值指标
$$C = \frac{X_{\max}}{X_{\text{rms}}}$$

脉冲指标
$$I = \frac{X_{\max}}{|\bar{X}|}$$

裕度指标

$$L = \frac{X_{\max}}{X_r}$$

峭度指标

$$K = \frac{\beta}{X_{\text{rms}}^4}$$

在上述无量纲参数中,峭度指标、裕度指标和脉冲指标对于冲击类型的故障比较敏感,特别是在故障早期,它们的值有比较明显的增加,是设备早期故障诊断的常用评价指标。

3. 相关分析

信号相关性指信号之间的线性联系或相互依赖关系。两个信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的相关函数定义为^[1,86]

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau) dt$$

函数 $R(\tau)$ 的变化反映了信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的相关性。

1) 自相关函数

信号的自相关函数反映信号自身取值在两个不同时刻的自相似性,信号 $x(t)$ 的自相关函数定义为

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau) dt$$

若随机信号 $x(t)$ 含有周期成分,则它的自相关函数 $R_x(\tau)$ 中亦含有周期成分,而且 $R_x(\tau)$ 的周期与信号 $x(t)$ 的周期成分相同。因此,自相关函数有利于探测被随机噪声干扰的信号中的周期成分。正常设备的噪声主要是由大量无序的随机成分叠加的结果,它的频谱较宽而且均匀,相关性较小。当设备发生异常时,随机噪声中将出现有规则、周期性的信号,而且其幅度要比正常噪声的幅度大。利用自相关函数 $R_x(\tau)$ 就可在复杂的噪声中发现隐藏的周期分量,确定机器的故障。特别是对于早期故障,周期信号不明显,直接观察难以发现,自相关分析就显得尤为重要。

2) 互相关函数

互相关函数描述两个信号之间的线性相关情况或取值相互依赖关系,随机信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的互相关函数定义为

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau) dt$$

如果两个信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 均含有周期性分量,而且周期相等,则互相关函数 $R_{xy}(\tau)$ 也含有相同周期的周期性分量。互相关函数的这一特性在信号检测和特征提取中有重要的应用。如:可在噪声背景下提取有用信息,计算系统中信号的幅频、相频传输特性以及速度的测量等。

1.1.2 频域分析方法

1. 频谱分析

信号频谱是在频率域中对原信号分布情况的描述,能够提供比时域波形更加直观的特征信息,被广泛用作为故障诊断的依据。通过傅里叶变换可以获得信号的频谱,即

$$\text{傅里叶变换} \quad X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

$$\text{傅里叶反变换} \quad x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{j2\pi ft} df$$

$$\text{信号的幅值谱} \quad |X(f)| = \sqrt{\text{Re}^2[X(f)] + \text{Im}^2[X(f)]}$$

$$\text{信号的相位谱} \quad \varphi(f) = \arctan \frac{\text{Im}[X(f)]}{\text{Re}[X(f)]}$$

傅里叶变换也可以写成指数形式: $X(f) = |X(f)| e^{i\varphi(f)}$

式中: $|X(f)|$ 为信号的幅值谱, $\varphi(f)$ 为信号的相位谱。

信号的功率谱密度函数反映了信号的功率在频域随频率 f 的分布情况。自功率谱密度函数是信号 $x(t)$ 的自相关函数 $R_x(\tau)$ 的傅里叶变换,随机信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的互功率谱密度函数定义为互相关函数 $R_{xy}(\tau)$ 的傅里叶变换。其定义为

$$\text{自功率谱密度} \quad S_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

$$\text{互功率谱密度} \quad S_{xy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

$S_x(f)$ 的逆傅里叶变换为自相关函数 $R_x(\tau)$, $S_{xy}(f)$ 的逆变换为互相关函数 $R_{xy}(\tau)$, 即

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(f) e^{j2\pi f\tau} df$$

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{xy}(f) e^{j2\pi f\tau} df$$

进行频谱分析时,首先应该注意幅值较大的谱峰,分析产生这些频率分量的原因。其次是幅值较小,但增长很快的频率分量。特别是一些在原频谱图上不存在或比较微弱的频率分量突然出现并急剧增大时,极有可能在较短时间内破坏设备的正常工作状态。因此,在频谱分析中要注意各分量的绝对大小,更要注意各个谱峰的发展变化趋势。频谱分析的结果还可以用于趋势估计:把一些特殊频率分量的多次分析结果按时间顺序描绘出来,形成“幅值—时间”趋势曲线,对设备运行状态进行有效地监控,估计设备达到危险程度的时间。

2. 倒频谱分析

倒频谱分析也称为二次频谱分析,是近代信号处理学中的一项新技术,也是检测复杂谱图中周期分量的有用工具。设信号 $x(t)$ 的傅里叶变换为 $X(f)$, 功率谱密度函数为 $S_x(f)$ 。所谓倒频谱,就是对功率谱 $S_x(f)$ 的对数值进行傅里叶逆变换。倒频谱函数 $C_x(q)$ (Power Cepstrum) 的定义为^[1,124]

$$C_x(q) = F^{-1} \{ \lg S_x(f) \} = \int_{-\infty}^{+\infty} \lg S_x(f) e^{i2\pi fq} df$$

倒频谱中自变量 q 称为倒频率,它具有与自相关函数 $R_x(\tau)$ 中的自变量 τ 相同的时间量纲。通过对信号的功率谱进行倒频谱分析,使得较低的幅值有较高的加权,可以清楚地识别信号的组成,突出信号中的周期成分。因此,倒频谱具有检测和分离频谱中周期性成分的能力,会使原来谱图上成簇的边频谱线简化为倒频谱上的单根谱线,从而使频谱中的复杂周期成分变得清晰易辨,以利于故障诊断。倒频谱分析还可以应用于语音和回声分析及解卷积:振源或声源信号往往受到传播路径影响,采用倒频分析技术可以分离和提取源信号与传递系统影响,有利于故障特征的提取和识别。

3. 包络分析

包络分析也称为解调分析^[62,124],是提取载附在高频信号上的低频信号,即提取时域信号波形的包络轨迹。当旋转机械的轴承和齿轮等零部件出现局部故障时,都会产生周期性脉冲冲击力,激起设备的固有振动。选择冲击激起的高频固有振动为研究对象,通过滤波将其从信号中分离出来,然后通过包络检波,提取载附在高频固有振动上的与周期冲击相对应的包络信号,从包络信号的强度和频次就可以判断零件损伤的程度和部位。这种信号检测技术称为包络解调,它是判断设备零件损伤类故障的一种有效的手段。

包络技术可以分为宽带解调技术、共振解调技术、选频解调技术、希尔伯特解调技术、同态滤波技术等,其核心都是把调制在高频段上的低频故障信息,解调到低频进行分析处理,提取故障信息。在处理过程中剔除了低频段的信号,而旋转机械的干扰和噪声的能量一般集中在低频段,这样就减少了设备振动检测信号中的中、低频环境振动干扰和噪声的影响。因此,利用包络技术分析高频中的故障信息,可以提高信噪比。

1.2 现代信号处理方法

随着计算机技术和信息科学的飞速发展,信号处理理论也获得了迅速发展,新理论和新算法层出不穷,如:小波分析、人工神经网络、分形理论、时频分析、高阶统计量分析、盲信号处理等。本书仅以小波分析、盲信号分离、时频分析等新理论为主题,介绍现代信号处理方法在设备状态监测中的应用。

1.2.1 盲信号分离

在机械设备状态监测和信号探测与处理中,传感器测量信号一般是由若干个源信号

以某种方式混合后的信号。如:语音信号、医学信号、雷达信号、地震波信号、机械设备振动信号等。如果能从测量信号中把各个源信号恢复(分离)出来,无疑对信号探测与处理有重要意义。盲信号分离(Blind Signal Separation 或 Blind Source Separation, BSS)正是在此基础上发展起来一个新的研究领域^[33-40]。

盲信号分离的基本问题是:设有 N 个未知的相互统计独立的源信号和 M 个测量信号,其中 M 个测量信号是由 N 个源信号以某种方式混合得到的。盲信号分离的目的是:在源信号和混合方式均未知的情况下,仅根据测量信号来恢复(分离)出源信号。盲信号分离问题可分为线性瞬时混合模型盲分离(独立分量分析 Independent Component Analysis, ICA)、线性卷积混合模型盲分离(盲解卷 Blind Deconvolution)与非线性混合模型盲分离。其中独立分量分析发展最快,理论也较为成熟。独立分量分析假设测量信号是源信号的线性组合(或线性变换),其基本思路是:设计一个逆线性变换对测量信号进行变换,并根据源信号独立性原则确定分离准则或目标函数,当某一逆变换使目标函数达到最大或最小值时,则变换后的信号相互统计独立,达到信号分离的目的。常用的目标函数有:负熵最大化、互信息最小化、Kullbak - Leibler 散度最小化、极大似然函数和基于非高斯性最大化(如:峭度最大化和高阶累计量)等目标函数,这些判别准则在一定条件下是等价的。确定了目标函数以后,利用最优化理论,求解使目标函数达到最大(或最小)值的变换,使测量信号相互独立,从而实现源信号的分离。卷积混合模型假设测量信号是源信号与传输信道冲击响应的线性卷积,非线性混合模型假设测量信号是源信号的非线性函数。由于卷积混合与非线性混合模型的盲分离问题比独立分量分析复杂得多,目前还没有成熟的算法,现有的算法也只适用于某些特定类型的问题,不具有广泛的实用性。

目前,盲信号分离技术还有很多问题有待解决,如:非线性混合模型的盲分离、欠定问题(传感器数量少于信号源数量)的盲分离、含有噪声源的独立分量分析、非平稳问题的盲分离(源信号可能突然出现、消失或移动,混合方式随时间变化)、有效利用先验知识问题。总之,盲信号分离是一个新兴学科,还有待于进一步发展和完善。

1.2.2 短时傅里叶变换

设备故障诊断的关键问题是如何对监测中得到的机械振动信号的非平稳性进行有效分析,准确探测其中的异常振动信号。非平稳性是指信号的时域和频域统计特性都随着时间变化,对这类信号的分析 and 处理应在时域与频域同时进行。非平稳信号处理方法有很多,本书仅介绍短时傅里叶变换、小波变换和小波包分析、双线性时间-频率变换等非平稳信号处理方法。

傅里叶分析提供了在时间域或频率域观察一个信号的两种方式。但傅里叶变换是在整体上把信号分解为不同的频率分量,而缺乏信号的局部性信息,它不能表示某一频率分量是什么时间发生的,也不能表示某一时刻信号中包含哪些频率分量。对于含有瞬时成分的非平稳信号分析来说,这些信息是十分重要的。因此,非平稳信号分析应同时考虑信号的时间与频率特性,在时间-频率平面内进行。典型的非平稳信号分析工具当属短时

傅里叶变换^[2,83],其基本思路是:假定非平稳信号在给定的分析窗内的短时间间隔内是平稳的(伪平稳),沿时间方向移动分析窗,在不同时刻得到不同的伪平稳信号,并计算出各个不同时刻的功率谱。该方法有明显的缺陷,对于给定时刻,只对其附近窗内的信号作分析,若选择的窗函数比较窄,可提高时间分辨率,但降低了频率分辨率;如果为了提高频率分辨率而取较宽的时间窗函数,则窗内信号的伪平稳性假设的近似程度会变差,时间分辨率会降低。许多自然界的信号和人工信号,它们的频谱分量的变化很快且不规则,很难找到一个合适的短时窗函数,能够使信号在其时间宽度内满足平稳性假设,又不至于窗函数过窄。因此,短时傅里叶变换本质上存在着时间分辨率与频率分辨率之间的折中,对于频率变化很快的信号,其分析效果不理想。但这并不妨碍它成为非平稳信号分析和瞬时信号检测的重要工具。

1.2.3 小波变换

小波变换的思想是由法国地球物理学家 Morlet 于 1984 年提出来的。小波变换吸取了傅里叶变换中的三角基函数与短时傅里叶变换中的时移窗函数的特点,形成新的振荡、衰减的基函数,小波基函数是时间 t 、尺度因子 a 和时移参数 b 的函数,时移参数 b 与时间相对应,尺度因子与频率相对应^[88]。因此,小波变换把信号变换在联合时间—尺度平面内,以不同的尺度(分辨率)来观察信号,将信号分解到不同的频带中,即能看到信号的全貌,又能看到信号的细节,具有多分辨能力^[88]。但应注意到小波变换的多分辨率是高频带信号的时间分辨率高而频率分辨率低,低频带信号的时间分辨率低而频率分辨率高。这与人们的视觉与听觉相适应,而实际应用中往往希望提高高频带信号的频率分辨率。小波包就是在这一背景下发展起来的。小波包分析对小波变换中没有分解的高频带信号进行了再分解,在不同层次上对各频率段作不同的分辨率选择,在实际应用中更具灵活性。Mallat 算法为小波包信号分解与重构提供了快速算法,工程实用性更强^[60,88]。小波变换与小波包分析已在机械设备状态监测与故障诊断中获得了广泛的应用^[2]。

短时傅里叶变换以固定分辨率来观察信号,小波分析能够以不同的“尺度”(或“分辨率”)来观察信号,信号分析中的这种多尺度(多分辨率)的观点是小波分析的基本点。小波分析的目的在于“即要看到森林(信号的全貌),又要看到树木(信号的细节)”。小波包理论可以对各种频率作不同分辨率选择。小波分析与短时傅里叶变换相比,理论上更加完善^[83]。

1.2.4 双线性时间—频率分布

以 Gabor、Ville 和 Page 等人的研究工作为开端,出现了时变频谱研究的一种新方法,这就是信号的双线性时间—频率分布^[84,87](Bilinear Time – Frequency Distribution,时频分布)方法。其基本思想是设计一个时间与频率的联合函数,同时在时间域与频率域来描述信号的能量密度或强度分布情况。利用该分布函数能够描述信号在某一时刻频率分布情况,或某一频率分量出现的时间等,对非平稳信号处理较为有利。

双线性时间—频率分布最初是 Wigner 在研究量子统计力学时提出一种双线性时间—频率变换, Ville 首先将 Wigner 变换引入信号处理领域, 这就是著名的 Wigner - Ville 分布(WVD), WVD 在时间域与频率域同时具有很高的分辨率, 而且具有很多良好的性质, 但对于多分量信号会产生很强的交叉项。交叉项的存在会引起一些无法解释的结果。当信号成分较复杂时, WVD 分布甚至变得没有意义, 这对设备故障信号处理极为不利^[52,98]。因此, 如何保持 WVD 分布的优良性质, 同时有效抑制交叉项就成为时频分布的重要研究内容。为此, 人们提出了许多新的时频分布, 如 Page 分布、Born - Jordan 分布、锥形核分布等。Cohen 对各种时频变换方法进行了分析与总结, 并给出双线性时频分布的统一形式: Cohen 类时频分布。该类分布用二维核函数对 WVD 分布进行平滑来抑制交叉项。根据 Cohen 类时频分布理论, Choi 和 Williams 提出指数形式的乘积核 Cohen 类时频分布(CWD), Jeong 和 Williams 提出一类减小交叉项的核函数设计方法。这些时频分布在有效抑制交叉项的同时能够保持较高的时频分辨率。

双线性时间—频率分布已广泛应用于设备状态监测与故障诊断中。但每一种时频分布都对应着一个核函数, 该核函数决定时频分布的性质及交叉项抑制能力。一种双线性变换方法往往只对某种类型的信号最有效, 目前尚没有统一的、普遍有效的变换方法。而设备故障信号复杂多变, 有必要根据故障信号的特点, 设计适合于设备异常信号探测的核函数和时频分布。

1.2.5 双线性时间—频率变换的快速计算

双线性时频分布同时在时间域与频率域具有较高的分辨率和较强的噪声抑制能力, 已广泛应用于各类非平稳信号处理中。但时频分布的运算量大, 占用内存多, 没有专用的软、硬件设备对它进行快速计算。在实际的信号处理中, 双线性时频分布只能离线计算, 不能在线实现。这些问题的存在使双线性时频分布的推广与应用受到极大的限制^[103-115]。

为了提高双线性时频分布的计算速度, 研究人员针对不同的时频分布提出不同的快速计算方法。如: 利用自相关函数的对称结构对 WVD 分布实现快速计算; 利用矩阵运算及 CWD 分布的对称性提高 CWD 的计算速度; 计算给定频率点或频率片断的时频分布的方法等; 1994 年, Amin 提出利用函数的谱分解理论^[114], 把满足一定条件的时频分布表示为 WVD 分布或频谱图的加权和。由于已有专用的软、硬件资源实现频谱图的快速计算, 该理论的提出给时频分布快速计算提供了一条新途径。在此理论的基础上, 又出现了一些新时频分布快速算法, 如: 把时频分布表示为以小波基函数为窗函数的频谱图的加权和; 对具有中心对称核函数的时频分布进行分解等算法。但这些算法多是针对特定时频分布或具有特殊结构的核函数提出的, 使用范围与计算效率都比较有限。

设备状态监测与诊断要求对故障信号进行实时的处理, 对时频分布的计算速度要求很高。现有的快速算法不同程度的减小了计算量, 提高了计算速度, 但是还不能达到实时实现的要求。而且每一种算法只适用于特定的时频分布, 存在缺点和局限性。因此, 有必

要针对设备故障信号处理的特点,对双线性时频分布的快速算法继续进行深入的研究。

1.3 本书内容安排

综上所述,本书主要介绍现代信号处理方法和信号特征提取理论及其在设备故障诊断中的应用,着重介绍盲信号分离理论、小波包络分析、小波奇异性检测、双线性时频分析、时频分析的快速计算等信号处理及检测的理论和算法。本书主要内容安排如下:

- 第1章 绪论。对设备故障诊断中的信号处理方法进行概括介绍,简要介绍传统信号处理方法和现代信号处理方法的特点及其在故障诊断中应用。
- 第2章 信号源特征分析及提取。以齿轮箱振动信号处理与检测为例,研究设备振动信号的产生、传播和测量的特点;分析设备典型故障信号的特征,以及传播路径对振动信号的影响;建立设备振动信号与传感器测量信号的数学模型等。
- 第3章 盲信号分离技术。介绍盲信号处理的基本问题和处理思路,针对源信号的不同混合模型,分析盲信号分离的理论及算法,实现多源混合信号的盲分离。根据机械设备振动信号的特点,研究适合于设备故障诊断的盲信号分离方法。
- 第4章 小波包络分析技术。介绍小波变换的基本理论,重点分析基于连续小波变换的复 Morlet 小波包络检波算法。通过小波包络谱分析确定振动信号是否包含瞬时冲击分量及冲击信号所在频带及出现时间。
- 第5章 小波奇异性检测技术。介绍基于小波变换模极大值理论的信号奇异性检测方法,重点研究基于 B 样条二进小波变换及其快速多孔算法求解模极大值的方法,根据模极大值位置实现信号奇异点的准确定位。
- 第6章 双线性时间—频率变换探测技术。介绍基于双线性时间—频率变换的微弱瞬时信号探测技术;针对设备局部故障所产生的瞬时冲击信号的特点,介绍双线性时间—频率变换的设计思路和方法;并把该方法用于故障信号特征提取。
- 第7章 双线性时间—频率变换的快速计算。双线性时间—频率变换的运算量大,占用内存空间多,运算效率低。本章介绍各种双线性时间—频率变换的快速算法及其特点,重点讲解一种基于特征分解的快速近似算法。