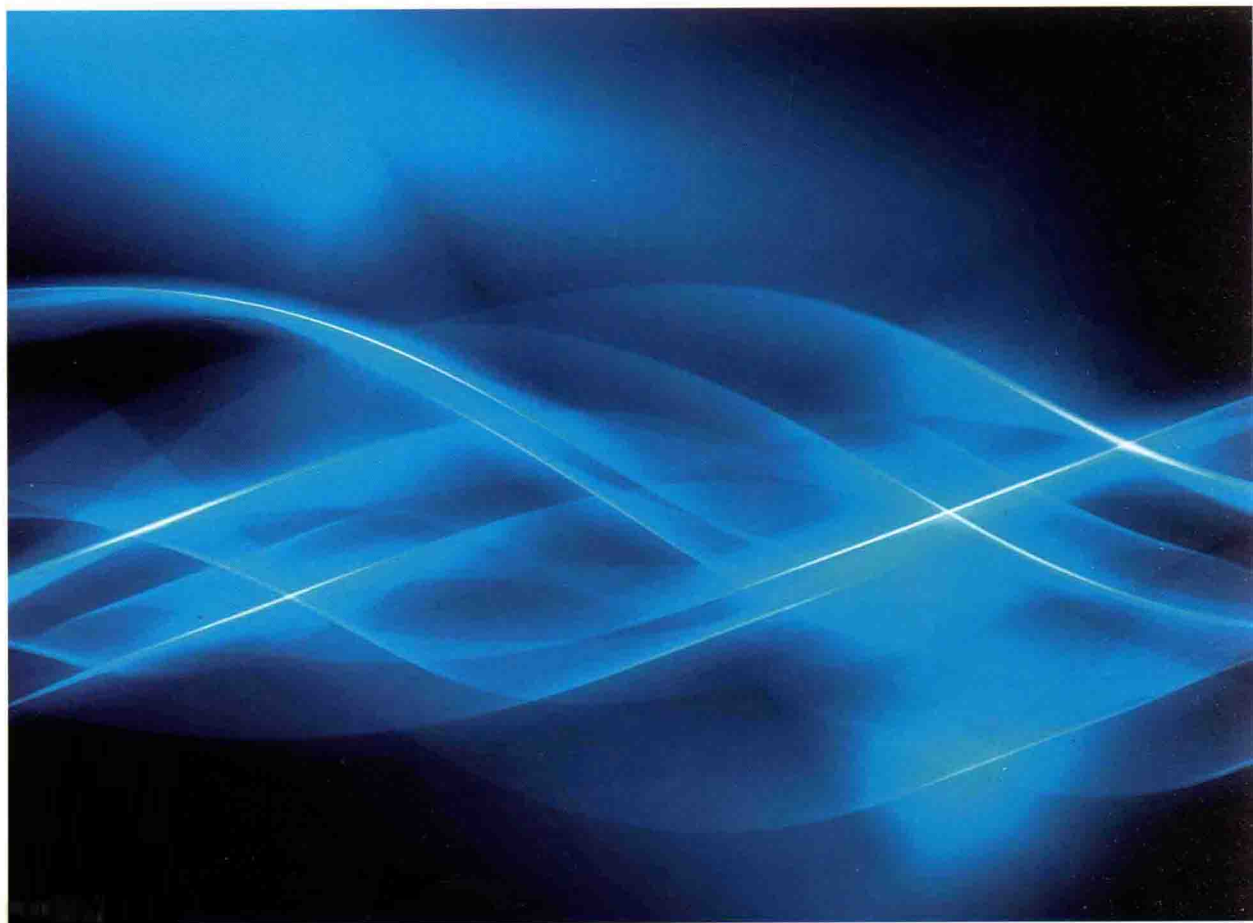


工程信号处理新方法探索

——最优频率匹配法和模式滤波法研究与应用

吕苗荣 古德生 著



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

工程信号处理新方法探索

——最优频率匹配法和模式滤波法研究与应用

吕苗荣 古德生 著

上海交通大学出版社

内容提要

本书以工程声振信号为研究对象,根据信号自身的周期特点提出了信号的基元分段方法,以便于同类信号的聚类与干扰抑制处理;阐述了用于确定信号真实频率、振幅、相位组合的最优频率匹配法,结合众多的案例详细描述了使用该方法进行信号特征提取和单信道多分量混叠信号分离的方法、处理流程,以及用于识别信号、验证信号处理效果的数字化音频测试技术。针对最优频率匹配法在处理多变量、长时段信号时存在的计算速度慢、效率低等问题,构建了用于单信道多分量混叠信号快速分离的模式滤波算法,介绍了采用模式滤波法分离单通道混叠信号的操作方法,以及该方法在机械设备故障诊断中的应用。在此基础上,本书深入研究了基于信号自身参数的信号分析方法、基于物理学原理的信号分析方法和基于动力学仿真的信号分析方法,介绍了这些方法在机械设备状态检测、故障诊断及工况参数评测中的应用。

本书对信号处理工作者、机械设备故障诊断工程师、科研院校相关领域的科技工作者具有很好的参考价值,也可作为普通高等院校相关专业本科生、研究生学习和参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

工程信号处理新方法探索:最优频率匹配法和模式滤波法研究与应用/吕苗荣,

古德生著. —上海:上海交通大学出版社,2014

ISBN 978-7-313-11397-9

I. ①工… II. ①吕…②古… III. ①信号处理—研究
IV. ①TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 108681 号



工程信号处理新方法探索

——最优频率匹配法和模式滤波法研究与应用

著 者: 吕苗荣 古德生

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: 常熟市梅李印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

字 数: 339 千字

版 次: 2014 年 8 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-11397-9/TN

定 价: 48.00 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: 14.5

印 次: 2014 年 8 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: 0512-52661481

符号注释

- A ——振幅;
 A_p ——液缸横截面积, m^2 ;
 A_c ——缸套泄漏环环形面积, m^2 ;
 A_E ——排出阀泄漏环环形面积, m^2 ;
 A_s ——吸入阀泄漏环环形面积, m^2 ;
 $a(k)$ ——AR 模型系数;
 a_0, a_n, b_n ——傅里叶系数;
 a, a_{cx}, a_{cy} ——活塞在 x 方向的加速度, 以及连杆在 x, y 方向的加速度, m/s^2 ;
 C_p ——峭度指标;
 c ——声波传播速度, m/s ;
 d_s, d_d ——吸入阀、排出阀阀盘直径, m ;
 e ——优化搜索计算精度;
 E ——材料的杨氏弹性模量, Pa ;
 f ——频率, Hz ;
 f_2 ——导板摩擦系数;
 f_s, f_d ——阀盘面积, $f_s = (\pi d_s^2)/4, f_d = (\pi d_d^2)/4, m^2$;
 f_m ——信号采样率, Hz ;
 f_p ——活塞摩擦系数;
 f_{xs}, f_{xd} ——吸入阀、排出阀阀隙过流面积, m^2 ;
 F ——轴向应力载荷, Pa ;
 F_p ——活塞杆的推力, kN ;
 F_{2y} ——导板对十字头的正压力 F_{2y} ;
 $F'_{3x}, F''_{3x}, F'''_{3x}, F'_{3y}, F''_{3y}, F'''_{3y}$ ——与 1、2、3 缸套对应的曲轴在 x, y 方向的作用力, kN ;
 $F(x, t)$ ——纵向外力密度与质量密度之比;
 g ——重力场方向单位矢量;
 I_p ——峰值指标;
 I_c ——连杆转动惯量;
 I_s ——泵中全部旋转质量转化到曲轴上的等效转动惯量;
 L ——连杆长度, m ;
 L_1 ——连杆质心到曲柄连接点之间的距离, m ;
 L_i ——第 i 段的基元信号的起始点;
 M ——信号采样点数量;
 M_{max} ——优化搜索最大迭代次数;
 m_1 ——活塞、活塞杆质量, kg ;
 m_2 ——介杆、十字头、十字头销、十字头轴承及其他往复运动附件的总质量, kg ;
 m_3 ——连杆重量, kg ;
 m_4 ——曲柄偏心质量, kg ;
 N ——频线数量;
 N_a ——AR 模型阶数;
 N_c ——模板信号数量;
 N_i ——第 i 段基元信号的数据点数量;
 n ——阻尼振动衰减系数, s^{-1} ;
 n_n ——模式滤波时频子波数量;
 n_c ——缸套泄漏系数;
 n_E ——排出阀泄漏系数;
 n_s ——吸入阀泄漏系数;
 P_s, P_d, P ——吸入管内吸入阀口处的吸入压力、排出管内排出阀口处的排出压力和缸套内流体压力, Pa ;
 q ——信号到达传感器时信号的相对强度;
 Q_c ——缸套泄漏流量, m^3/s ;
 Q_E ——排出阀泄漏流量, m^3/s ;



- Q_s ——吸入阀泄漏流量, m^3/s ;
 R ——曲柄半径, m ;
 R_i ——第 i 个基元信号的自相关性系数;
 S ——钻柱的横截面积, m^2 ;
 $s(t)$ ——信号仿真冲击波形源信号;
 t ——时间, s ;
 u ——轴向位移, m ;
 x ——井眼方向线, m ;
 X_a ——传感器位置, m ;
 X_b ——敲击位置, m ;
 x_0 ——余隙长度, 即将余隙容积 V_0 转化成液缸横截面圆柱体所对应的长度, m ;
 x_1 ——液缸内液体压力, MPa ;
 x_2 ——吸入阀升程, m ;
 x_3 ——吸入阀运动速度, m/s ;
 x_4 ——排出阀升程, m ;
 x_5 ——排出阀运动速度, m/s ;
 x_p ——时刻 t 的活塞位移, m ;
 $y(t)$ ——信号时域波形函数;
 $\bar{Y}_i$ ——第 i 段基元信号的振幅平均值;
 $Y(f)$ ——信号频谱函数;
 $Y(\cdot)$ ——第 i 段基元信号的样本数据序列;
 Y_p ——信号峰值;
 Y_{rms} ——信号有效值;
 $\bar{Y}$ ——信号平均值;
 z ——管柱轴向坐标, m ;
 Z_L ——杆的波阻;
 Z_H ——接头波阻;
 Δp ——压差, MPa ;
 α ——衰减因子, s^{-2} ;
 α_s, α_d ——吸入和排出阀阀盘锥角, $^\circ$;
 α_n ——法向啮合角, 标准齿轮 $\alpha_n = 20^\circ$;
 β ——时频子波系数;
 β_0 ——斜齿轮的节圆螺旋角, $^\circ$;
 λ ——系数, $\lambda = R/L$;
 ϕ ——相位角, rad ;
 ϕ', ϕ'', ϕ''' ——与 1、2、3 缸套所对应曲柄的转角, $^\circ$;
 $\phi(f)$ ——傅里叶基函数;
 $\phi(x)$ ——各单元节点的初始位移函数;
 $\Psi(x)$ ——各单元节点的初始速度函数;
 ρ ——钻柱材料密度, kg/m^3 ;
 ρ_{xs}, ρ ——吸入阀吸入端及缸套内流体的密度, g/cm^3 ;
 η ——轴向阻尼系数, $Pa \cdot s/m$;
 η_{ml} ——传动轴中所有滚动轴承和齿轮引起的机械效率部分;
 $\epsilon(n)$ ——高斯白噪声序列;
 ϵ_c ——连杆角加速度, rad/s^2 ;
 ϵ_s ——曲轴角加速度, rad/s^2 ;
 ϵ_s, ϵ_d ——系数。当吸入阀开启时, $\epsilon_s = 1$ 否则 $\epsilon_s = 0$; 当排出阀开启时, $\epsilon_d = 1$ 否则 $\epsilon_d = 0$;
 λ ——接头处反射系数;
 μ ——接头处透射系数;
 μ_s, μ_d ——吸入阀、排出阀处流量系数;
 ω ——角速度, rad/s ;
 ω_d ——阻尼系统的振动角速度, rad/s 。

前言

根据工程对象和应用领域的不同,人们对工程信号的概念有着不同的理解与表述。本书从工程应用的角度来认识信号,既重视信号处理理论与方法的完善,但更重视实际的工程应用。传统的信号处理方法是以前信号的平稳性为前提,无法对复杂的机械设备的非线性、非平稳信号进行有效的分析与处理。小波变换有很好的时频局部化特征,是处理非平稳信号的一种有力工具,但仔细分析可以发现它有着与傅里叶变换相同的渊源。虽然有了很大的突破,但没有从根本上解决傅里叶变换存在的问题。原子分解是近年来提出的一种新的信号处理方法,包括匹配追踪和基追踪,但这种完美的思想受到实际的计算机容量、计算速度和处理能力限制,只能采取折中的策略成为一个委曲求全、难求卓越的信号处理方法。Hilbert—Huang 变换是一种优秀的、由数据驱动的非线性信号处理工具,但它没有能够很好地解决信号处理的尺度问题,导致代表多种物理现象的信号成分在一个或多个经验模态分解信号中相互混叠,不能实现有效的分解或分离。

针对目前信号处理方法中存在的问题,本书将最优化理论引入到工程信号处理领域,提出了信号处理的最优频率匹配法和模式滤波法,并以语音信号和机械设备声振信号为研究对象,开展了单通道多分量混叠信号分离的研究与探索。从工程的角度来处理声振信号中的周期现象,解决了信号处理的时间尺度选择,提出了基元分段的思想,实现了不同周期混叠分量信号的去噪与信号特征的提取。利用信号基元参数、波形特征和研究对象物理参量之间的内在联系与规律性,以及这些信息随基元时间的变化来实现信号的微观建模和宏观趋势的分析预测。本文围绕上述内容开展了大量的探索实践和应用研究,提出了基于信号自身参数的信号分析方法、基于物理学原理的信号分析方法和基于动力学仿真的信号分析方法,介绍了这些方法在机械设备状态检测、故障诊断及工况参数评测中的应用。

本文起源于井下声波层析成像信号的研究,而后利用语音信号开展了信号处理新方法、新技术的研究应用,并最终将信号处理的新理论、新方法和新技术应用于石油钻井机械设备声振信号中的处理与故障诊断的应用实践之中。利用这些新方法、新理论实现了单通道语音信号和机械设备声振信号的分离、识别与特征提取处理,以便为工程安全、设备检测、自动控制与石油钻井井下故障诊断服务。

本书共分 9 章,各章节的主要内容概述如下:

第 1 章介绍了信号变换的原理和方法,指出了目前常用的信号变换方法的局限性。针对工程信号应用领域,提出了信号处理方法研究中一点新思路和新观点,并概述了单通道多分量信号分离的研究状况和发展趋势,以及最优化理论在单通道信号分离研究与应用的现状与进展。



第2章从自然界信号的周期性特点出发,阐述了信号处理基本操作单元(Basic Operation Unit, BOU)的定义、切分依据和切分方法,基元分段处理在语音信号声调识别和往复式钻井泵声振信号建模中的应用,并介绍了基于基元分段多种混叠成分的振动信号周期的确定方法。

第3章对信号处理的最优频率匹配法展开了详细的介绍,描述该方法的原理、基本特征、功能及方法的适用条件,论述了进行信号分离应遵循的基本原则、分离途径和信号完整性检测方法。在此基础上对信号的匹配滤波法进行了探讨,以工频干扰钻井泵振动信号建模与信号分离,以及语音信号声韵母分离为例介绍了最优频率匹配法的应用。

为了检验信号分离的合理性与完整性,本文在第4章介绍了声振信号的数字化音频测试技术,通过将信号转化为数字化音频信号,利用数字信号音频测试来检验信号处理的效果。实践表明,这是一种非常简捷、高效的信号完整性检测方法。

利用信号的数字化音频测试方法,结合具体的应用实例,本书在第5章详细论述了进行信号最优分解模式滤波算法的基本原理、功能,结合具体的实例介绍了信号模式滤波处理的主要操作流程与方法。

在第6章以钻井泵振动信号为例,介绍了信号最优分解时频子波在模式滤波参数空间内的分布特征,探讨了利用时频子波在参数空间内的分布规律,分析研究了模式滤波法在机械设备故障诊断中的可行和可靠性。在此基础上分别针对轴承和车刀工作期间测量得到的振动信号,开展了机械设备故障检测、诊断方法的研究实践。

第7章主要介绍了如何利用模式滤波参数和最优频率匹配法,实现不同尺度信号的量化建模与仿真,并构建了基于信号自身参数的信号分析方法。同时,也以管柱振动信号系统仿真为例,介绍了基于物理学原理的信号分析方法。

第8章以钻井泵为例,介绍了基于动力学模型的信号分析方法。同时,以齿轮传动系统振动信号为例,在如何利用分离信号时域统计参数来开展机械设备状态的检测,以及设备工作参数评测方面开展了有益的探索。

在第9章进行了信号处理新理论、新方法探索的回顾和总结,并概述了今后有待研究的方向及有望取得的成果。

十一年前,我们对井间声波层析成像信号的噪声感到茫然,是瞬间的灵感我们意识到通过将信号转换成为数字音频信号,滴滴答答地一播放,终于知道了这种令人愉悦的噪声的来源;也是因为被傅里叶变换之美所吸引,却不能容忍频段滤波带来的信号畸变,所以才想到要用最优化方法去求解信号的真实频率、振幅与相位。在一次偶然的处理中,我们从混叠信号中获得了较为完美的井间声波层析成像与噪声之间的分离信号,才想到应当将这一偶然事件转变成必然的处理方法,所以才有了最优频率匹配法和模式滤波法在一些科技杂志上亮相、登台。等到自己想回头的时候已经有点爱不释手,所以也就只好这么糊涂地、唐吉可德式固执地、误入歧途地一干到现在。但要将一个个的疑问解决,一个个的难题破解,让滋生的理论和思想在自己的脑袋里自圆其说本身就不是一件容易的事情。好在自己坚持着走了下来,一晃就是这么充实、劳累、痛并快乐着的十年。

作者由衷地感谢我的家人为完成本书所付出的默默无闻的努力与牺牲,感谢中南大学彭振斌教授对本研究提供的大力帮助,感谢上海交通大学航天航空学院张晓晶副研究员对

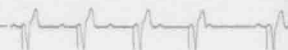
本书所做细致、认真的审校工作,感谢硕士研究生王丽、陈志强、李梅、魏宝建等为资料收集、整理、声振实验测试等方面工作付出的辛勤劳动。

由于作者水平有限,时间仓促,加上自身视野的局限性,书中存在的错误和不当之处。恳请广大读者批评指正。

第1章 绪论	1
1.1 信号的变换	1
1.2 信号变换方法的局限性	3
1.3 信号处理方法的新思路	6
1.4 单信号多分量信号的分离	12
第2章 信号处理基本单元的研究与应用	15
2.1 信号的周期性	15
2.2 具有周期特征信号处理单元的研究	24
2.3 基元分频在汉语语音信号处理中的应用	33
2.4 钻井泵激力谐波分频模型的建立与应用	49
2.5 利用基元分频方法确定振动成分周期	52
第3章 信号处理的量优频率匹配法	65
3.1 最优频率匹配法的原理与方法	66
3.2 信号分离的基本原则与信号完整性检测	88
3.3 信号的匹配滤波方法	91
3.4 工频干扰振动信号的变换与分离处理	96
3.5 汉语音节信号的声韵匹配滤波分离	101
3.6 最优频率匹配法的优缺点	106
第4章 数字化音频测试技术	107
4.1 信号的数字化音频转换方法	107
4.2 用数字化音频测试技术识别声波CT信号	109
4.3 钻井泵振动信号的识别	111
第5章 信号处理的模式识别法	114
5.1 信号处理理论	114
5.2 模式识别法的基本原理	121
5.3 信号模式识别法的功能	124

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 信号的变换	1
1.2 信号变换方法的局限性	3
1.3 信号处理方法的新思路	5
1.4 单信道多分量信号的分离	12
第 2 章 信号处理基本单元的研究与应用	15
2.1 信号的周期性	15
2.2 具有周期特征信号处理单元的研究	24
2.3 基元分段在汉语音节信号处理中的应用	33
2.4 钻井泵液力端振动模型的建立与应用	49
2.5 利用基元分段方法确定振动成分周期	57
第 3 章 信号处理的最优频率匹配法	66
3.1 最优频率匹配法的原理与方法	66
3.2 信号分离的基本原则与信号完整性检测	86
3.3 信号的匹配滤波方法	91
3.4 工频干扰振动信号的建模与分离处理	96
3.5 汉语音节信号的声韵母匹配法分离	101
3.6 最优频率匹配法的优缺点	106
第 4 章 数字化音频测试技术	107
4.1 信号的数字化音频转换方法	109
4.2 用数字化音频测试技术识别声波 CT 信号	109
4.3 钻井泵振动信号的识别	111
第 5 章 信号处理的模式滤波法	114
5.1 信号处理概述	114
5.2 模式滤波法的基本原理	121
5.3 信号模式滤波法的功能	124



5.4 模式滤波法分离信号的操作实践	128
第6章 信号模式滤波法应用实践	137
6.1 模式滤波法参数分布规律分析	137
6.2 轴承振动信号分离的应用研究	144
6.3 车刀振动信号研究及磨损工况的识别	154
第7章 机械设备振动信号建模的研究与应用	165
7.1 模式滤波法在机械设备振动信号建模中的应用	166
7.2 管柱振动信号的系统仿真与实试验证	174
第8章 机械设备振动的动力学仿真中的信号处理	188
8.1 面向故障诊断的钻井泵动力学系统仿真研究与应用	188
8.2 利用齿轮传动系统振动信号时域参数预测系统工况	199
第9章 研究展望	210
参考文献	212
索引	219

第1章

绪论

1.1.1 信号变换的基本概念

在信号处理过程中,信号变换是一个重要的环节。信号变换就是将信号转换到一种简明易懂的方式,以便于信号的分析和处理。信号变换的基本概念是:将信号从一种形式转换为另一种形式,以便于信号的分析和处理。信号变换的基本概念是:将信号从一种形式转换为另一种形式,以便于信号的分析和处理。信号变换的基本概念是:将信号从一种形式转换为另一种形式,以便于信号的分析和处理。

1.1 信号的变换

信号变换就是将信号从一种形式转换成另一形式的过程。信号变换在不同的场合有不同的含义,在信号采集和传输领域,信号变换就是将实测信号转变为可以接受、传输、显示的其他形式的信号(如电信号)。在通讯领域,信号变换就是将要发送的信号转变成为容易传输的形式发射出去,并在接收过程中再变换成为实际的信号。在信号分析、处理过程中,信号变换就是通过特定的算法,将信号转变成为容易处理的形式,以便提取信号的特征,并合理解释信号。笔者指的是后者,即信号处理过程中的变换。实际上,任何一个简谐波信号可以在时域表示成为

$$y(t) = A \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (1-1)$$

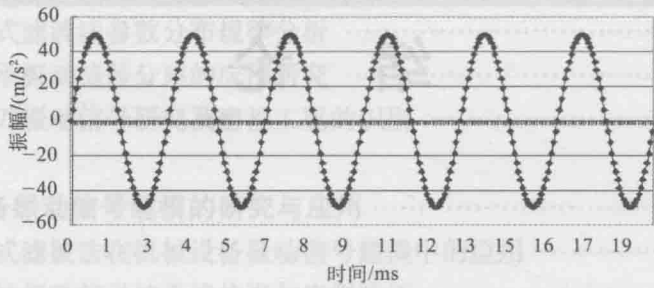
其具体波形可参见图 1-1(a)(其中 $A = 50$, $f = 300$, $\varphi = 0$)。同时,式(1-1)也可以在频域用如图 1-1(b)所示的方式表示,它在“ $A-f$ ”平面上成为一条垂直于频率 f 轴的直线,直线与频率 f 轴交点所对应的频率为 300 Hz,直线的高度为振幅 A 。

而图 1-1(c), (d)则是由三种频率成分的简谐波叠加而成的复合信号及频谱,即

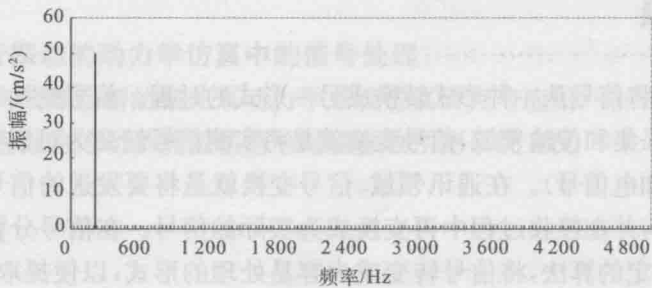
$$y(t) = 27 \sin\left(2\pi \times 33t + \frac{11}{60}\pi\right) + 43 \sin\left(2\pi \times 2687t + \frac{31}{60}\pi\right) + 68 \sin\left(2\pi \times 2354t + \frac{73}{45}\pi\right) \quad (1-2)$$

显然,对于一个周期性函数而言,在时域上很难把握其周期特征,而在频域上能够非常直观、简捷地获得信号的特征信息。将信号从时域转换到频域表示的方法,就是理论意义上的变换;信号变换的目的就是为了获得信号的特征描述,如振幅、频率和周期等。

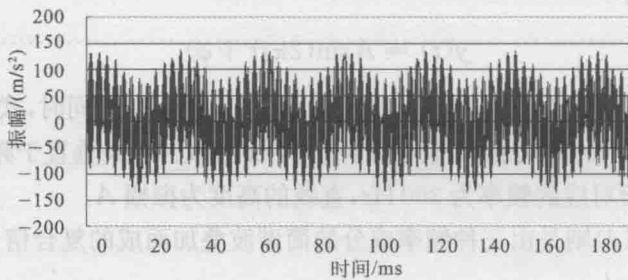
数学意义上的变换是一种数学工具,这种工具在力学、光学、化学、量子物理、线性系统分析等众多领域,特别是通信和控制领域得到广泛的应用。它的产生、发展已经经历了 100 多年的历程,期间形成了多种变换方法,如信号处理领域常见的傅里叶变换、时频分析、小波变换、Hilbert-Huang 变换等。



(a)



(b)



(c)



(d)

图 1-1 简谐波信号的时频域表示

- (a) 时域简谐波信号 (b) 频域简谐波信号
(c) 复合简谐波时域信号 (d) 复合简谐波信号频谱

1.2 信号变换方法的局限性

1.2.1 信号变换基函数的局限性

在信号处理过程中,变换是一种非常重要的手段。变换的目的就是将信号转换到一种简明易懂的方式,实现对信号的解释、过滤、分离、特征参数提取,及信号的表达与识别处理。就目前而言,信号变换基本上都是建立在变换基函数与信号卷积基础上的,这些基函数有傅里叶变换的谐波函数、小波变换的小波基函数、匹配追踪的时频原子等(见表1-1)。这些变换的基函数有三个共同的特征:

表1-1 信号变换方法与基函数^[1]

序号	变换方法	变换公式	基函数
1	傅里叶变换	$Y(f) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) e^{-j2\pi ft} dt = \langle y(t), e^{j2\pi ft} \rangle$ $y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} Y(f) e^{j2\pi ft} df = \langle Y(f), e^{-j2\pi ft} \rangle$	$e^{j2\pi ft}$ $e^{-j2\pi ft}$
2	短时窗傅里叶变换	$STFT(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} y(\tau) g^*(\tau - t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$ $= \langle y(\tau) g^*(\tau - t), e^{j2\pi f\tau} \rangle$	$g^*(\tau - t) e^{-j2\pi f\tau}$ $g(t)$ 为窗口函数
3	小波变换	$WT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int y(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$ $= \int y(t) \psi_{a,b}^*(t) dt = \langle y(t), \psi_{a,b}(t) \rangle$	$\psi(t) = h(t) e^{j\omega_0 t}$
4	信号稀疏分解	$f = \sum_{i \in I} \lambda_i \pi(x_i) \phi$	参数化波形函数 ϕ_γ

(1) 离散,所有基函数在理论上是连续的,但在实际信号处理过程中又是离散、不连续的。例如,离散傅里叶变换中的基函数为

$$\phi(f) = e^{j2\pi f_i t}, f_i = \frac{i \times f_m}{2N+1}, (i = 0, 1, 2, \dots, N) \quad (1-3)$$

式中: f_m 为信号的采样率; N 为频谱图形中的谱线数量, N 与采样点数量 M 之间有如下关系:

$$N = \begin{cases} \frac{M-1}{2}, & M \text{ 为奇数} \\ \frac{M}{2}, & M \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (1-4)$$

由式(1-3)可以看出,实际处理过程中的傅里叶变换三角基函数的谱线频率 f_i 是离散的,并且与信号的长度有关。类似地,小波变换基函数也存在时间-尺度平面上的离散性,信号稀疏分解算法中参数化波形函数词典或波形库,也是离散、有限的。

(2) 有限度的近似,基函数是对信号的一种逼近,而这种逼近不是最佳逼近,不是基函数去适应信号,而是信号对基函数的一种近似,是信号对基函数的匹配或相关程度。



例如,信号傅里叶变换的谱线位置固定,是对实际信号频谱的一种离散与近似。与傅里叶变换具有唯一的基函数不同,为了达到较好的分析效果,小波变换可以根据不同要求构造或选择最佳的小波基。但小波基对信号的局部并没有适用性,对某一信号,依据什么原则,用什么判据选择小波基,目前在理论和实际应用上都还是一个难点。小波分析的结果与小波基有直接的关系,小波变换中的小波基一旦确定,在整个分解和重构过程中都无法更换,即不具备自适应的信号分解特性。

(3) 鉴于基函数的刚性和对信号有限度的近似,导致基函数对信号的表达只是一种比较满意的描述,而不是最佳逼近或最佳结果。另外,这些信号变换表示方法的效果直接受到基函数和信号之间相似程度的影响,如果基函数与信号的主要成分相似,则可以用少数基函数组合就能够精确地表示信号。反之,若基函数与信号的特征结构相去甚远,就需要大量的基函数才能够较为精确地逼近信号,导致信号中包含的信息分散在过多的基函数中,不利于信号的有效表示和分析。

在信号处理长度、处理阶数一定的情况下,表 1-1 中各种变换的基函数,其具体表达形式固定,不可改变。鉴于变换基函数所具有的这种刚性特征,建立在这一变换基础上的各种信号处理方法,将不可避免地导致处理过程中存在的模糊、交叉、分辨能力有限等问题。在两个或多个信号混叠情况下进行时频分析、信号功率谱与倒谱分析时,信号之间的交叉项不可避免,信号的时频特征提取困难。而小波变换基函数在时频平面所做的机械格型分割,导致无法同时获得高的时间分辨率和频率分辨率^[2]。对信号进行小波包分解时,高频带二抽取会出现不满足采样定理的情况,导致频谱混叠,影响语音合成后的可懂度与清晰度^[3]。

显然,基函数选择是一个非常重要的处理步骤。但目前基函数的具体形式是由信号处理方法决定的,不同方法对应不同的刚性基函数,很难适应现代工程信号处理的需要。

1.2.2 信号稀疏分解和匹配追踪算法评述

正交线性变换在信号处理中具有十分重要的地位和作用,傅里叶变换就是以一系列三角正弦波为基函数的线性加权和分析和处理信号的。为了对任意复杂多变的信号进行有效的表示,人们一直在寻找建立各种基函数的信号表示方法。原子分解或信号的稀疏分解就是其中具有代表性的信号处理方法。该方法的基本思想是,应用称为原子字典的参数化波形函数库取代传统的基函数,通过在波形函数库中寻找与信号结构特征相匹配的参数化波形,将信号表达为一系列参数化波形的叠加形式。因此,信号的稀疏分解实际上是基函数展开形式的扩展,常见的正交基函数展开都可以视为原子分解的特例。

在信号处理领域,原子分解是在参数化波形函数库的基础之上的,将信号表达为与信号结构相匹配的最佳参数化波形的叠加形式。在具体的应用中,应当根据先验性知识来构造参数化波形函数集合组成的字典;然后结合信号的结构特征,以及分析的目的和要求,从字典中自适应地选择匹配原子,对信号特征结构进行最佳匹配,通过最优原子的线性叠加来实现对任意信号的合理表示。

与传统的基函数展开相比较,原子分解方法是在冗余、过完备参数化波形字典,即参数化波形函数集中选择具体的波形函数及其组合,来表示任意复杂多变的信号;信号分解结果并不唯一,信号的表示具有自适应特性。通过选择与信号结构特征最相似的原子对信号进行最佳

匹配,使得信号表示具有稀疏性;能够直接从信号中提取特征信息,没有冗余的中间变换环节,减少或避免了信号变换过程中的信息损失。显然,这是一种非常合乎逻辑的信号变换方法。

在原子分解思想的推动下,为了获得较高分辨率的时频分布,对于随时间变化、成分复杂的非平稳信号,就应当能够自适应地选取各种基函数,因此,信号的匹配追踪算法(Matching Pursuit)应运而生。自1993年Mallat和Zhang^[4]首次提出基于超完备冗余字典的信号稀疏表示思想以来,超完备信号稀疏表示已成为调和分析 and 信号处理领域的一个研究热点,在非平稳信号处理、时频压缩、噪声抑制、生物医学等众多应用中成为一个新的发展方向。冗余波形库和匹配追踪算法是获取稀疏信号表示的两个重要途径。尽管理论上匹配追踪算法是一种优秀的算法,但它在实现上却是一种“贪婪”算法,为了寻找最优时频原子,迭代分解的每一步都要对时频原子字典进行全局搜索,其计算的复杂度非常高。事实上,寻找信号最佳匹配时频原子的优化逼近计算是十分困难的,是一个NP问题^[5]。

为了降低计算的复杂度,追踪法采用搜索有效但不一定是最优逼近的折中策略。为了提高匹配追踪的计算速度,人们已经开展了大量的探索,在算法研究上包括高(多)分辨匹配追踪^{[6][7]}、信号的自适应展开^[8]、进化追踪原子分解^[9]等,在合理波形库尺寸与索引方式的探索上有字典函数的近似或特殊构造^[10]、构造多尺度字典和子带字典来减少最优原子搜索的复杂度^{[11][12]}、采用递归滤波器来生成阻尼正弦波字典^[13]、采用矢量量化方法对字典进行修正、减少字典的冗余性^{[14][15]}等。国内学者则提出了采用遗传算法^[16]、混合编码遗传算法^[17]、量子遗传优化^[18],以及基于免疫克隆和核匹配追踪算法^[19]等来降低匹配算法的计算工作量,加速追踪进程。但不论如何改进,各种原子分解算法均摆脱不了基函数离散、刚性、有限度近似,以及采用信号稀疏分解的匹配追踪搜索效率低、计算量大等弊病。

1.3 信号处理方法的新思路

1.3.1 信号处理方法的选择

在自然界和人工信号中,振动是一种非常普遍的特征。振动信号的理论基础源于力学、动力学和电磁振荡等。因此,要解决信号处理的各种问题,实现信号分离、识别、特征提取和合成等工作,就需要从源头出发进行具体的研究,并针对问题的本质特征,采取相应的办法来解决。笔者认为:

(1) 应当从信号本身的特点出发来描述处理信号,而不是让信号来适应某种特定的方法,或者说是让信号削足适履地去适应某种特定类型的基函数。

(2) 应当首先了解信号的各种影响因素,简化或去除那些次要因素,在此基础上建立合适的信号模型,来开展相应的研究,而不是描述模型越全面、考虑因素越多,眉毛胡子一把抓,处理的效果就会越好。

(3) 信号处理方法的核心就是基函数的确定,不同的基函数处理同一个信号,会有不同的处理结果,基函数的选择与建立应当尽可能地反映实际信号的变化规律。

信号模型或基函数的选择决定了信号处理的方法与过程,模型合理与否也决定了信号处理的效果。例如,图1-2(a)是用声压传感器采集得到的电子琴声信号及其频谱,如果将该信号进行AR建模可以获得图1-2(b)的信号及其频谱。从波形上看这两个信号非常相



似,误差很小;但如果从频谱图形上考察,由于模型本身的局限性,AR 模型信号在大于 2500 Hz 的高频区域(即图 1-2(b)用虚线椭圆圈闭的部分)出现了明显的频谱成分,得到的声信号次生了非常明显的高频噪声。这一缺陷是由模型不当造成的,会伴随整个信号处理过程。因此,信号处理领域信号模型的合理选择是一个非常重要的课题。

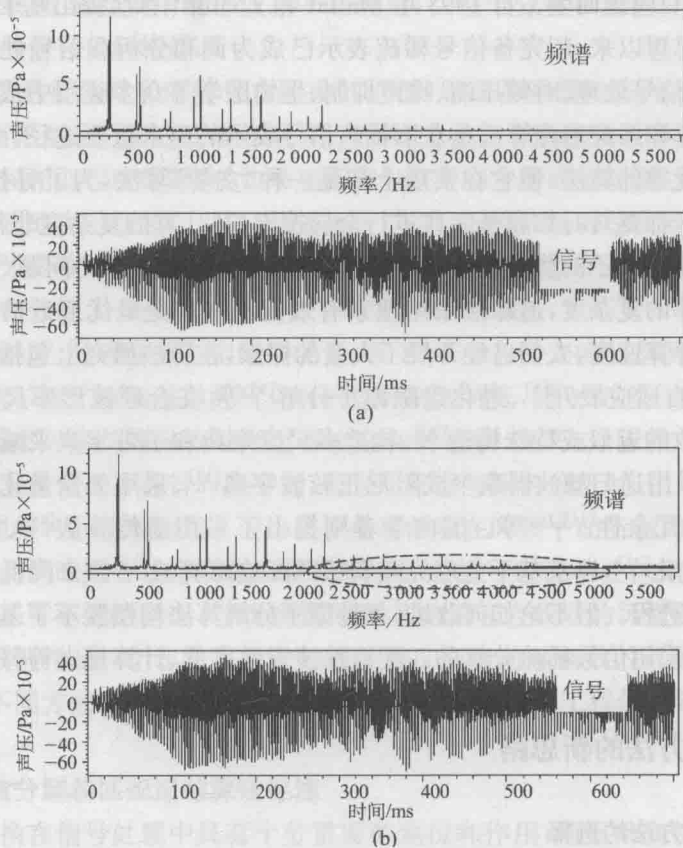


图 1-2 采集与 AR 建模的电子琴信号及其频谱

(a) 采集的电子琴信号与频谱图 (b) AR 模型电子琴信号与频谱图

1.3.2 工程信号处理中的三个重要问题

在信号采集过程中,应当尽可能地排除各种干扰的影响,以便采集到干扰小、成分单一的目标信号。这就要研究信号采集的途径,传感器的选择,测点的位置和布局,采集参数的确定等一系列问题。但从另一个角度看,即使采用最先进的仪器,设计最完美的方案也无法彻底排除各种干扰的影响,这就要求所选择的信号模型和信号处理方法应当具备噪声抑制与信号的自我修复的能力。

笔者通过大量分析矿山和日常生活中不同类型的声信号得出:所有这些信号基本上可以分成三类,即谐振(或平稳信号)、摩擦和冲击非平稳信号。这些信号的典型实例可参见图 1-3,该图 1-3(a)是拖拉机运转的声信号,属于有节律的冲击声信号;图 1-3(b)为汽车喇叭声,谐振特征非常明显;图 1-3(c)是水龙头流水的声音,水流流动时与固体边界的摩擦和冲击作用交织在一起,形成了一个近似噪声的信号。可以认为汽车喇叭和水流动的声音,

是拖拉机声信号的两个极端的例子,或者说摩擦和谐振是周期性冲击非平稳信号的两种极端情况。为了提取工程信号的特征规律,可以从研究冲击信号开始,在解决了冲击信号特征规律描述和基本处理方法后,再进一步将这种处理方法应用于谐振和摩擦信号的处理。

针对图 1-3(a)的拖拉机运转声信号,其内部包含了可以耳听识别的众多的声信号成分,这些信号重叠在一起,将它们合理分离是进行声信号处理所遇到的第一个问题。对于实际的声信号,由于各种干扰的影响,即使是理想的谐振源也很难接收得到理想的谐振信号。在信号处理过程中,实现的办法是将它们切分成为一段段子信号,分别进行比较研究。但是,目前在信号分帧长度或信号处理时间段长度的选择上是比较随意的,没有一个统一的划分方法,但分帧长度选择的合理与否直接影响信号处理的效果,甚至是信号处理的成败。由此可见,如何合理地切分信号,即信号处理单元的选择,是信号处理所面临的第二个非常重要的问题。如果能够较为合理地确定信号处理时间分段的长度,就可以有效地抑制干扰,实现同类信号成分的聚类、识别,以及信号特征的提取处理。因此,如何从这些同类型、相似单元中提取得到它们的共同特征,是第三个必须解决的问题。

