

汽车故障诊断中的 信号处理方法

贾继德 张大鹏 梅检民 姜斯平 编著

时域分析 · 频域分析 · 高阶统计量分析 · 阶比分析 · 小波分析 · 时频分析 · Hilbert-Huang分析



QICHE
GUZHANG
ZHENDUANZHONG
DE
XINHAO
CHULI
FANGFA



化学工业出版社

汽车故障诊断中的 信号处理方法

贾继德 张大鹏 梅检民 姜斯平 编著



化学工业出版社

·北京·

本书介绍了汽车故障诊断中的信号处理方法与工程应用,阐述了汽车故障信号的特点、信号处理的方法及在汽车故障诊断中的应用现状,内容包括信号的时域分析、频域分析、高阶统计量分析、阶比分析、小波分析、时频分析、Hilbert-Huang 分析等。

本书取材先进,实用性强,适合作高等院校车辆工程、载运工具运用工程、动力工程、仪器科学技术等学科专业的研究生、高年级本科生的教材或参考书,对于从事汽车动态分析、汽车故障诊断、汽车维修的工程技术人员也具有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

汽车故障诊断中的信号处理方法/贾继德等编著. —北京:
化学工业出版社, 2015. 12
ISBN 978-7-122-25355-2

I. ①汽… II. ①贾… III. ①汽车-信号系统-故障诊断
IV. ①U472.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 240340 号

责任编辑: 辛 田 陈景薇

装帧设计: 尹琳琳

责任校对: 吴 静

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 8 字数 193 千字 2016 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 48.00 元

版权所有 违者必究



前言

汽车结构复杂、工作状态多变,其动态信号常常具有非平稳、非线性、非高斯等特点。在不解体条件下对汽车进行故障诊断,必须充分运用信号处理,特别是通过现代信号处理方法,分析测取各种信息,提取故障特征,综合判断各种故障现象的属性、形成与发展,才能提高故障诊断的准确率和故障早期预报的可靠性。

笔者在多年研究的基础上,广泛吸收了国内外学者在信号处理、汽车故障诊断方面的研究成果,详细论述了多种信号分析处理方法及其相互联系,重点讨论非平稳、非高斯信号处理方法及工程应用。全书力求文字简练、通俗易懂,同时注重内容的实用性、系统性和先进性。

本书共分8章,第1章为信号处理概述,简要介绍了信号处理的基本概念、现代信号处理研究内容、信号分类、信号处理在汽车故障诊断中的应用现状;第2章为信号的时域分析,重点介绍了信号的时域统计参数指标及应用、相关分析及应用;第3章为信号的频域分析,重点介绍了功率谱密度函数、传递函数、频谱细化、相干函数、倒频谱、Hilbert 包络解调相关概念及在汽车故障诊断中的应用;第4章为信号的高阶统计量分析,重点介绍了高阶统计量、高阶循环统计量、高阶统计量与高阶循环统计量的应用;第5章为信号的阶比分析,重点介绍了阶比分析的理论基础、计算阶比跟踪仿真试验、阶比分析在汽车故障诊断中的应用;第6章为信号的小波分析,重点介绍了连续小波变换、离散小波变换、小波包、小波变换在汽车故障诊断中的应用;第7章为信号的时频分析,重点介绍了时频表示的基本概念、Wigner-Ville 分布、模糊函数、Cohen 时频分布、时频分布的性能评价与改进、时频分布的应用;第8章为信号的 Hilbert-Huang 分析,重点介绍了 Hilbert-Huang 变换基本理论和算法、Hilbert-Huang 变换与二进小波变换比较、Hilbert-Huang 变换的改进、Hilbert-Huang 变换在汽车故障诊断中的应用。

本书由贾继德、张大鹏、梅检民、姜斯平编著,张宪主审,李春亮、江红辉、张玲玲、吴春志等人参加了编写的辅助工作。

本书对引用到研究成果的学者致以崇高的敬意,由于书稿总字数的限制,参考文献不能一一列出,在此也表示深深的歉意。笔者水平有限,加之时间仓促,书中不足之处在所难免,欢迎读者不吝赐教,以便今后修改完善。

编著者



目录



第1章 信号处理概述

1.1 信号处理研究内容	1
1.2 信号分类	2
1.3 信号处理在汽车故障诊断中的研究现状	6



第2章 信号的时域分析

2.1 信号的时域统计分析	13
2.2 相关分析在汽车故障诊断中的应用	18



第3章 信号的频域分析

3.1 功率谱	24
3.2 传递函数	26
3.3 频谱细化	27
3.4 相干函数	30
3.5 倒频谱	32
3.6 Hilbert 包络解调	34



第4章 信号的高阶统计量分析

4.1 高阶统计量	37
4.2 高阶循环统计量	38
4.3 双谱及循环双谱计算	39
4.4 高阶统计量在汽车故障诊断中的应用	42



第5章 信号的阶比分析

- 5.1 阶比分析的理论基础 47
- 5.2 阶比分析仿真试验 52
- 5.3 阶比分析在汽车故障诊断中的应用 54



第6章 信号的小波分析

- 6.1 连续小波变换 60
- 6.2 离散小波变换 68
- 6.3 小波包 71
- 6.4 小波变换在汽车故障诊断中的应用 72



第7章 信号的时频分析

- 7.1 时频表示的基本概念 83
- 7.2 时频分布的性能评价与改进 89
- 7.3 时频分布在汽车故障诊断中的应用 93



第8章 信号的Hilbert-Huang分析

- 8.1 Hilbert-Huang 变换基本理论和算法 98
- 8.2 Hilbert-Huang 变换与二进小波变换比较 102
- 8.3 Hilbert-Huang 变换的改进 105
- 8.4 Hilbert-Huang 变换在汽车故障诊断中的应用 113



参考文献



第 1 章

信号处理概述

对于信息有不同版本的诠释。控制论创始人维纳认为“信息就是信息，不是物质也不是能量”。信息论创始人香农对信息的定义是“信息是用来消除不确定的东西，是熵的减少”。通常对于信息的解释是“信息是现实物质世界的反映，是物质运动的动态和方式，具有可识别、转换、存储、传输的特性，并与能量密切相关；信号是信息的载体，表现为一定的物理量、包含着反映被测系统状态或特性的某些有用信息，可以用函数、图形等描述”。

所谓“信号处理”，就是要把记录在某种媒体上的信号进行处理，以便抽取出有用信息的过程，它是对信号进行提取、变换、分析、综合等处理过程的统称，其本质是信息的变换和提取。信号处理的主要目的就是削弱信号中的多余内容，滤除混杂的噪声和干扰，或者将信号变换成容易处理、传输、分析与识别的形式，以便后续的其他处理。

1.1 信号处理研究内容

传统的信号处理主要研究确定性信号的相关问题，如确定性离散信号的频谱分析、滤波理论和应用等（如离散傅里叶/Z变换、FIR/IIR数字滤波），主要理论基础是信号与系统。

近年来，随着现代通信、信息理论和计算机科学与技术的飞速发展，信号处理的经典理论也在向现代理论演化，已从研究简单的线性时不变的最小相位系统，发展为研究非线性时变的非最小相位系统；同时由于高阶统计量及小波变换等数学工具的新发展，使人们可以有效地分析和处理非高斯信号和非平稳时变的信号，这就使得现代信号处理成为现代通信信息系统、电子科学技术以及自动控制等众多学科的理论基础和有力工具。

现代信号处理主要研究离散随机信号的谱分析及滤波等（如现代谱分析、现代滤波器），实际中处理的信号也大多是随机信号，它的理论基础是信号虽然是随机的，但服从一定的统计规律，可以利用其统计规律对信号进行处理，故需要应用统计学的方法进行分析，除了信号与系统相关基础外，还需要借助概率论、随机过程相关的数学工具。

因此，现代信号处理与传统的数字信号处理相比，最大的区别在于处理的信号是统计性的随机信号而不再是确定性信号。

现代信号处理主要研究内容包括统计信号处理、非平稳信号处理、非高斯信号处理、多维多信道信号处理等。

① 统计信号处理涉及参数估计理论、波形估计、现代频谱分析、自适应滤波器、鲁棒参数估计、倒谱分析、统计性能分析、信号检测等方面的内容。



② 非平稳信号处理则涉及时频分析的信号检测、基于多尺度估计理论的信号检测（小波变换、分布式系统状态融合估计等）、智能信息处理技术（模糊计算技术、人工神经网络）等方面的内容。

③ 非高斯信号处理涉及非参数化双谱估计、非最小相位系统辨识、非因果系统辨识、有色噪声中的谐波恢复、非高斯噪声中非高斯信号检测等方面的内容。

④ 多维多信道信号处理涉及二维信号处理、多信道信号处理等方面的内容。

近年来，现代信号处理研究领域的几个热点问题是时频分析、小波分析、高阶统计量信号处理、神经网络、非线性理论与非线性技术等。

1.2 信号分类

根据信息自身的形态及其承载信息的方式不同，信号可分为多种类型。

1.2.1 时域信号与频域信号

1.2.1.1 时域信号

时域信号多用 $x(t)$ 表示，反映的是物理量的幅度随时间变化的历程，这种将幅度按时间进行展开的信号称为时间域信号，简称时域信号，如图 1-1(a) 所示。

1.2.1.2 频域信号

频域信号多用 $X(f)$ 表示，是一个复数，这个将信号的幅度和相位按频率展开的信号称为频率域信号，简称频域信号，如图 1-1(b) 所示。

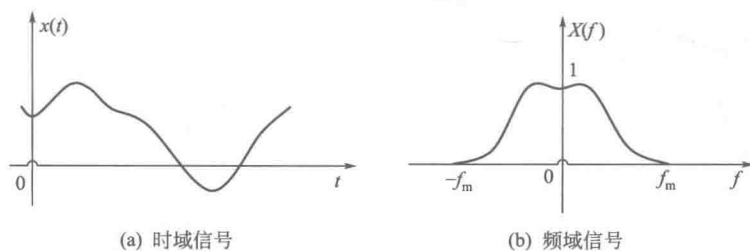


图 1-1 时域和频域信号波形

1.2.2 连续信号与离散信号

1.2.2.1 连续信号

连续信号定义为时间 t 或频率 f 连续取值的信号，如图 1-2 所示。

图 1-2(a) 是正弦信号，其表达式为

$$x_1(t) = A \sin(\pi t) \quad (1-1)$$

式中， A 是常数；自变量 t 在定义域 $(-\infty, \infty)$ 内连续变化，信号在值域 $[-A, A]$ 上连续取值。

图 1-2(b) 是单位阶跃信号，其表达式为

$$x_2(t) = \begin{cases} 1 & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases} \quad (1-2)$$

信号定义域为 $(-\infty, \infty)$ ，信号值取 0 和 1；信号在 $t=0$ 处有间断点。

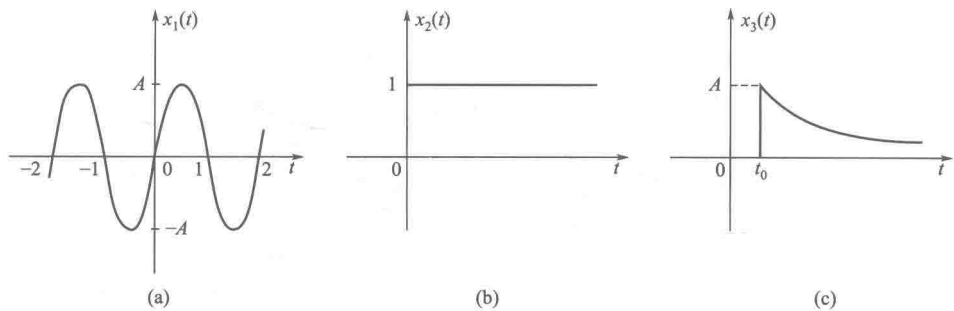


图 1-2 连续信号

图 1-2(c) 表示一个延时的单边指数信号，其表达式为

$$x_3(t) = \begin{cases} A e^{-\alpha(t-t_0)} & (t \geq t_0) \\ 0 & (t < t_0) \end{cases} \quad (1-3)$$

式中， A 是常数， $\alpha > 0$ ；信号自变量 t 在定义域 $(-\infty, \infty)$ 内连续变化，信号 $x_3(t)$ 在值域 $[0, A)$ 上连续取值；信号在 $t=t_0$ 处有间断点。

工程测试中的大部分是连续信号，按其随时间变化的不同又可分成如图 1-3 所示的各种信号。其中动态信号是指幅值随时间变化的信号，而静态信号是指幅值随时间不变或变化非常缓慢的信号。

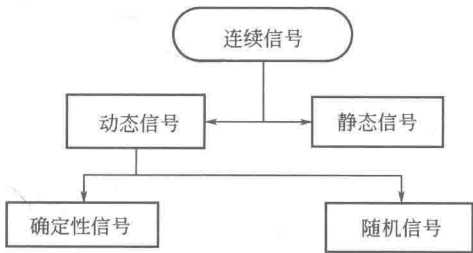


图 1-3 连续信号的分类

1.2.2.2 离散信号

离散信号定义为时间 t 或频率 f 不连续取值的信号，如图 1-4 所示。若信号的幅值和时间均离散，并且信号幅值只能取规定的若干数值，这种离散信号则称为数字信号。工程实际中数字信号通常由信号的数字化设备（数据采集卡等）获得，现代数字仪表和计算机测试、分析系统都是专门处理数字信号的应用装置。

图 1-4(a) 是正弦序列，其表达式为

$$f_1(k) = A \sin\left(\frac{\pi}{4}k\right) \quad (1-4)$$

随 k 的变化，序列值在值域 $[-A, A]$ 上连续取值。

图 1-4(b) 所示的序列则可表示为

$$f_2(k) = \begin{cases} 2 & k = -1, 0 \\ 1 & k = 1 \\ -1 & k = 2 \\ 0 & \text{其他 } k \end{cases} \quad (1-5)$$

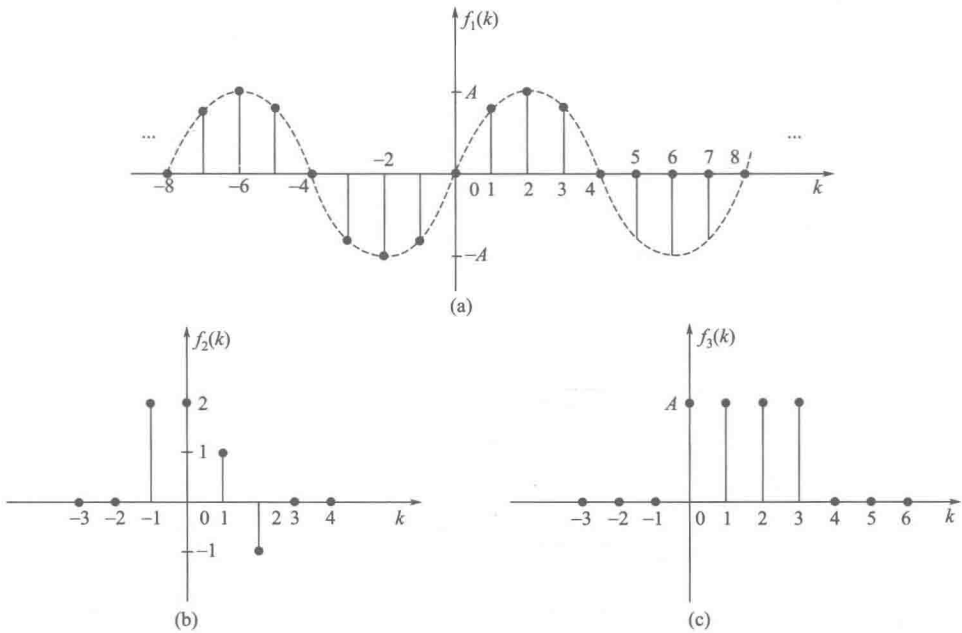


图 1-4 离散信号

图 1-4(c) 所示的序列则可表示为

$$f_3(k) = \begin{cases} A & k=0,1,2,3 \\ 0 & k=-3,-2,-1,4,5,6 \end{cases} \quad (1-6)$$

1.2.3 确定性信号与随机信号

1.2.3.1 确定性信号

确定性信号可以用明确的数学关系来描述，对于指定的某一时刻，可以确定其相应的函数值，如图 1-5 所示。确定性信号又分为周期信号和非周期信号。

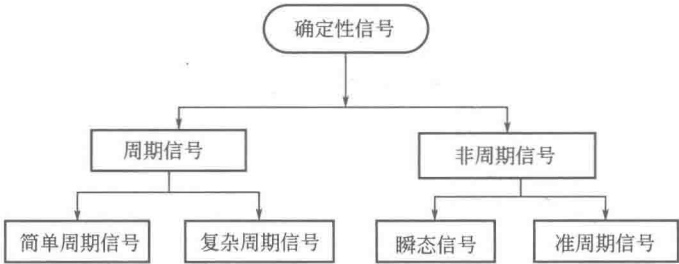


图 1-5 确定性信号的分类

1.2.3.2 随机信号

随机信号具有随机特点，无法用精确的数学关系式来描述，更不能由此准确预测未来的结果，而只能用概率统计的方法来描述它的规律，如图 1-6 所示。

随机信号根据其取值特征，可分为平稳随机信号和非平稳随机信号两类。平稳随机信号又可分为各态历经随机信号和非各态历经的随机信号，如图 1-7 所示。

若总体样本集合中的各个样本函数在任一时刻的平均值及其他的全部统计特征参数（如概率密度函数、方差、自相关函数、高阶矩等）均不随时间的变化而变化，则该随机过程为

强平稳的或严格平稳的。若总体样本集合中的各个样本函数在某一时刻的平均值和方差不随时间变化，则该随机过程为是弱平稳的。

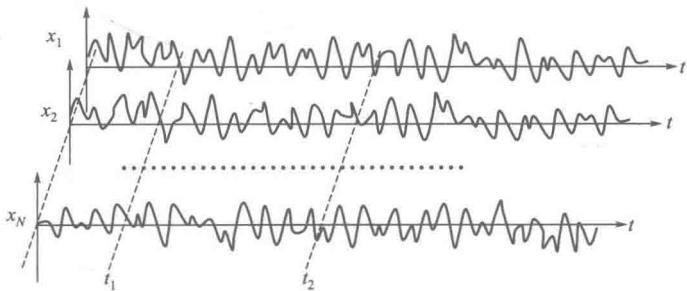


图 1-6 随机信号

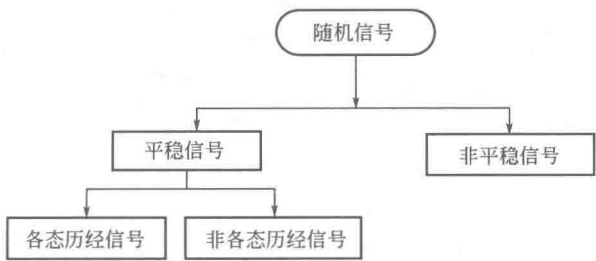


图 1-7 随机信号的分类

1.2.4 周期信号与非周期信号

1.2.4.1 周期信号

周期信号是指经过一定时间可以重复出现的信号，包括简单周期信号和复杂周期信号，如图 1-8 所示。简单周期信号即指简谐波信号，而复杂周期信号是由和基频成整数倍的简谐波信号组合而成的周期信号。

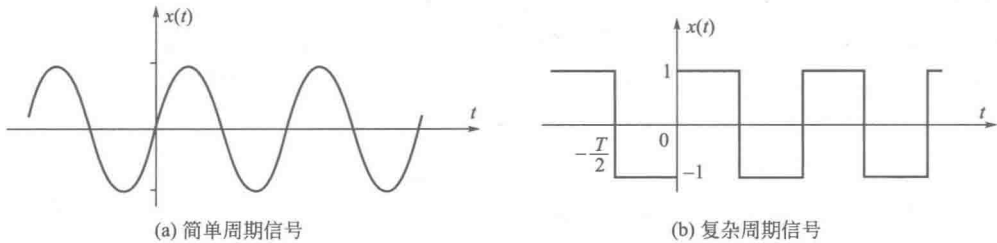


图 1-8 典型周期信号波形

1.2.4.2 非周期信号

非周期信号是指不会重复出现的信号，包括准周期信号和瞬变信号。准周期信号是由一些不同频率的简谐波信号合成的信号，组成它的简谐波分量中总会有两个信号的频率比值是无理数。例如， $x(t) = \sin(\omega_0 t) + \sin(\sqrt{2}\omega_0 t)$ ，各简谐成分在合成后不可能经过某一时间间隔后重演，其合成信号就不是周期信号。但这种信号有离散频谱，故称为准周期信号。通常所说的非周期信号是指瞬变信号。瞬变信号是持续时间较短的各种脉冲函数或者衰减函数，如图 1-9 所示。

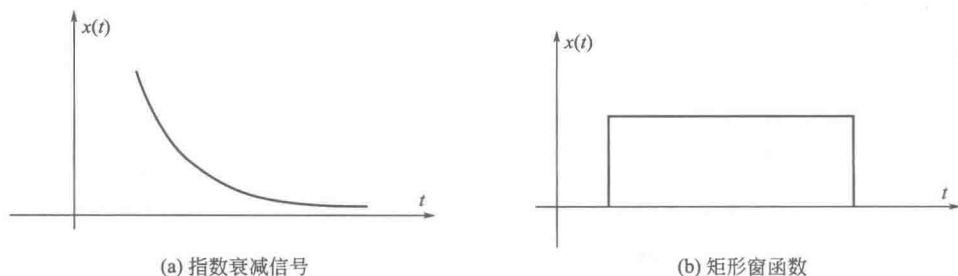


图 1-9 典型非周期信号波形

1.2.5 模拟信号与数字信号

电气与信息工程中只处理电信号,因此,对于经观测所得到的各种原始状态的时间信号都换成电信号(电压或电流信号)之后才能加以处理,模拟信号的幅值范围一般为 $0\sim 5\text{V}$ (电压信号)或 $0\sim 20\text{mA}$ (电流信号)。这种转换称为“模拟”,相应地,由原始时间信号转换而来的电信号被称为模拟信号。为了保证模拟转换不丢失信息,模拟信号幅度的取值是连续的(幅值可由无限个数值表示)。时间上连续的模拟信号是连续变化的信号,时间上离散的模拟信号是一种抽样信号。

数字信号是指以二进制数字符号“0”或“1”为代码对信息进行编码的信号。在实际应用中,数字信号是一种电压信号,它通常取值 0V 和 $+5\text{V}$ 两个离散值,这两个具体的离散值分别用来表示两个抽象的代码“0”和“1”,数字信号也称为代码信号。

模拟信号的特点是具体、直观,便于人的理解和运用;数字信号则便于计算机处理。

1.3 信号处理在汽车故障诊断中的研究现状

我国汽车维修是采取“定期检测、强制维护、视情修理”的维修制度,视情修理必须以现代诊断技术作为技术保证。同时,随着人们对汽车的动力性、经济性、安全性、舒适性和环保性等方面的要求不断提高,汽车技术正向电子化、自动化、智能化方向发展,而这一发展方向必须依赖汽车故障诊断技术的支持。在汽车维修过程中,资料统计、查找故障的时间约为 70% ,而排除故障时间约占 30% 。随着汽车结构日益复杂,汽车故障诊断的地位越来越重要。

汽车大体上分为三大系统,即汽车机械系统、汽车液压系统、汽车电器与电子控制系统,每个系统的故障信号有其独有的特点。

(1) 汽车机械系统故障的特点

① 机械运行过程是动态过程,就其本质而言是随机过程。机械系统不同时刻观察的数据通常是不重复的,用检测数据直接判断运行过程故障是不可靠的,不同时刻观察值不一致,只能从统计意义上比较它们的差异。

② 从系统特性上看,汽车机械系统故障除了有连续性、离散性、间歇性、缓变性、突发性、随机性、趋势性和模糊性等一般特性外,汽车各总成都是由成百上千个零件装配而成,零部件间相互耦合,决定了汽车各总成故障的多层次性,一种故障由多层次故障原因所构成。故障现象与故障原因之间没有一一对应关系,很难从一个侧面或某个检测信息的分析

结果作出正确的决策。

(2) 汽车液压系统故障特点

近年来, 液压系统在汽车上的应用越来越广泛。液压系统对污染等干扰因素敏感, 而液压伺服系统是结构复杂的机、电、液综合系统, 其可能的故障既有结构性的, 又有参数性的, 导致系统具有液耦合、时变性和非线性等特征。另外液压伺服系统具有自动校正功能, 即当一个环节发生故障时不易直接察觉。绝大多数液压系统故障是由油液污染和磨损所引起的, 同时由于制造材料和生产工艺缺陷以及疲劳、气蚀等原因导致液压系统故障分布具有明显的随机性。

液压系统的故障发生率较高, 而且液压系统一旦发生故障, 又难以进行定位和诊断, 致使发生故障的系统得不到及时的维修, 故障得不到及时的排除。

因此液压系统故障的特点、原因普遍存在模糊性, 表现为同一故障可能由不同的原因造成, 同一故障可能会产生不同的故障特征, 不同的故障也可能引起同样的故障特征, 多故障并发时, 故障特征更复杂。

(3) 汽车电器与电子控制系统故障特点

汽车电器与电子控制系统故障诊断分数字电路故障诊断和模拟电路故障诊断。

数字电路仅有两种状态, 即 0 和 1。列出其输入、输出关系真值表, 便可以很方便地找出原因-结果对应关系。数字电路的故障诊断理论发展迅速, 并日趋成熟。目前已经有相当多的诊断程序和诊断设备投入实际使用, 如用于汽车电子控制系统诊断的解码器便是其中的一例。

模拟电路故障诊断具有多样性。信号的连续性、非线性、容差和噪声以及检测点的有限性, 使诊断问题变得十分复杂, 难度大、精度低、稳定性差, 从而导致检测诊断的效益低。目前汽车模拟电路故障诊断尚未建立完整的理论, 还没有通用的诊断方法。

诊断模拟电路故障, 一般借助于相似产品的使用经验或通过电路模拟得到的故障特征集, 然后通过主动或被动的测试, 将测试结果与故障特征比较, 以发现和定位故障。

汽车电子控制系统由电子控制器 (ECU)、传感器、执行元件和互相联接的线路组成。在电子控制系统中, 既有数字电路, 又有模拟电路。传感器传递给 ECU 的控制信号进行 A/D 变换前是模拟信号, 而 ECU 输出给执行机构的控制信号进行 D/A 变换后也是模拟信号。因而, 诊断像汽车电子控制系统这种数字电路和模拟电路综合体故障具有多样性、复杂性, 给故障诊断带来了很大的难度。

随着新型汽车不断问世, 出现了各种电子控制系统。每一种电子控制系统又有它独特的结构。这样给汽车电子控制系统故障带来了更大的困难。

从以上介绍可以看出, 汽车故障信号是复杂信号, 要有效地对汽车进行故障诊断, 就必须搞清故障机理, 采用现代信号处理方法, 提取故障的特征, 实现故障诊断的目的。

1.3.1 傅里叶变换

傅里叶变换 (Fourier Transformation) 是经典的信号处理方法, 最初它并没有得到广泛的应用。1965 年库利·图基对其改进后, 提出了快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transformation, FFT), 它才在工程技术领域获得了广泛的应用。应用 FFT 开展对汽车故障诊断研究, 成为最初研究的首选工具, 也成为其他方法分析效果的参照物。以 FFT 为核心的信号处理方法在汽车故障诊断中发挥了巨大作用, 包括频谱分析、相关分析、传递函数、细



化谱分析、时间序列分析、倒频谱分析、包络分析等。频谱分析给出了信号不同频率成分下能量的分布情况，当汽车内部零部件出现故障后，依靠频谱中某些频段能量的改变，来诊断汽车故障。尽管近年来出现了许多新的信号分析方法，但是，FFT 由于运算速度快、方便直观，易于掌握等优点，在汽车故障诊断中它仍然有举足轻重的作用。

1.3.2 非高斯信号处理方法

功率谱分析（二阶统计量）的前提是假设信号具有线性、高斯性和最小相位性质，而对于实际信号中包含的非线性、非高斯性、非最小相位信号成分，则无法有效地进行分析。处理非最小相位系统和非高斯信号的主要数学分析工具是高阶统计量（Higher-Order Statistics, HOS）。

HOS 从更高阶概率结构表征随机信号，可以弥补二阶统计量（功率谱）不包含相位信息的缺陷，描述二次相位耦合（Quadratic Phase Coupling），并通过频率成分的非线性耦合来反映机器状态变化。另外，当信号中含有加性高斯有色噪声时，在理论上高阶累积量（高阶谱）可以完全抑制噪声的影响，提高信噪比。对于 HOS 在诊断中的应用研究刚刚起步，主要集中在三阶累积量谱（双谱，Bispectrum）的应用研究上，它成为分析非高斯、非线性信号的有力工具。

非高斯信号处理方法在故障特征信息提取上面具有很大的潜力，早在 1977 年，T. Sato 就将双谱应用于齿轮振动信号分析，但由于双谱的物理解释困难，在当时其应用受到了限制。1995 年，J. W. A. Fackereil 在将双谱用于故障诊断上做了有益的尝试。他们指出双谱应用于故障诊断有以下三个优势。

① 机器故障总是与零部件的失效及运行状态的非线性有关，双相关只用一个传感器的数据即可提供非线性信息，并且双谱可用于检测二次相位耦合，并确定是否存在二次非线性。

② 许多机器包含了旋转部分，其振动信号带有周期性，而周期性的偏离往往预示着机械故障。周期性信号的双谱一般呈“钉床”形。

③ 故障诊断中一般能获得大量实验数据，可以得到比较准确的 HOS 估计。

近年来，HOS 在汽车的应用研究开始增多，Kocur 采用基于阶比双谱的诊断策略，并应用于往复机械的状态监测。杨其俊利用阀箱上振动信号的双谱识别泵阀故障获得成功。贾继德应用阶比双谱对于汽车故障噪声信号进行了特征提取，消除了直接进行双谱估计所引起的频率混叠，有效地提取了故障特征信息。李涛利用非高斯 AR 模型的双谱估计方法对柴油机缸盖振动信号进行分析，提取双谱主对角线切片的最大峰值位置和幅值作为特征参数，实现对气门故障的有效诊断。肖云魁利用双谱分析柴油机曲轴轴承、活塞销磨损故障振动信号，搜索双谱特征频率面，对柴油机曲轴轴承和活塞销的磨损故障诊断效果良好。梅检民利用高阶累积量的 AR 双谱方法分辨柴油机各运行部件的激励频率，有效诊断出柴油机曲轴和连杆轴承的并发故障。夏天应用循环双谱分析振动信号，利用循环双谱特征频率平面有效反映活塞销磨损故障。

1.3.3 非平稳信号处理方法

平稳随机信号的各阶统计量与时间无关，而某阶统计量随时间变化的信号称为非平稳信号或时变信号。基于傅里叶变换传统信号处理方法无法准确地处理非平稳信号。

对于非平稳信号的处理,可以通过阶比采样,将非平稳信号转变成平稳信号,采用FFT进行分析,如阶比谱(Order Spectrum)、阶比跟踪谱(Order Tracking Spectrum)、阶比双谱(Order Bispectrum);也可以采用适合于非平稳信号的分析方法,联合时频分析,如Gabor变换、短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transform, STFT)、小波变换(Wavelet Transform, WT)、魏格纳维尔分布(Wigner-Ville Distribution, WVD)、希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)、循环平稳性分析(Cyclostationary Analysis Method, CAM)等方法。采用不同的方法对汽车信号进行分析,可以获得不同的分析效果。

1.3.3.1 阶比分析

阶比分析技术产生于20世纪50年代,随着计算机技术的广泛应用,该技术得到迅速发展,近期又出现了新一轮的研究热潮。阶比分析技术通过恒定的角增量重采样技术,将时域与转速相关的非稳态信号转变为角域的稳态信号,即将时域等间隔分布的数据转换为角域等角度分布的数据,使其能更好地反映与转速相关的信息。

目前常用的阶比分析方法主要可分为模拟阶比跟踪法、计算阶比跟踪法、无转速计的阶比跟踪法等几大类。其中,计算阶比跟踪算法同步采集汽车振动信号和转速信号,利用转速信号对振动信号进行数字阶比抗混叠滤波与鉴相,对振动信号进行等角域重采样,得到角域平稳信号,由于该方法可通过数值计算方法实现信号重采样,具有成本低、传感器安装方便等优点,在国内外得到广泛应用。

K. R. Fyfe 等对影响计算阶比采样精度的几个因素——键相时间精度和分辨率、多键相脉冲、采样频率、数字滤波、转速和加速度、插值方法、数据块尺寸、噪声的影响进行了深入的研究,发现采用一些方法能改善其估计精度,如用较高的采样频率采集转速信号和振动信号(需要较多的计算时间),准确的键相脉冲抵达时间,高阶次插值方法等。K. M. Bossley 等提出组合阶比分析方法,即联合利用高精度的插值算法和硬件脉冲计数器实现了高精度阶比跟踪。

丹麦 B&K 公司提出了拥有专利技术的商业软件 Vold-Kalman 滤波阶比分析方法。Michael F. Albright 等提出了基于 Gabor 变换的阶比分析方法。徐敏强等提出了基于 Haar 小波分析的旋转机械高速启动过程振动信号瞬时频率的计算方法。以秦树人为首的课题组对于旋转机械阶比跟踪进行了大量的研究,希望能通过短时傅里叶变换等手段得到信号的瞬时频率,并以此进行阶比分析,摆脱对于硬件的依赖。

1998 年 Jason Richard Blough 对旋转机械振动信号采用阶比跟踪技术与传统的频谱方法进行分析对比,结果表明阶比跟踪方法可以避免信号 FFT 转化时的能量泄漏,获取与旋转机械工频及其谐波分量相关的故障信息。J. Antoni 利用基于角域采样的循环谱算法对发动机振动信号进行分析和处理,实现了喷油提前角异常、失火及敲缸等故障的在线监测。贾继德提出了瞬变工况阶比跟踪算法,比较发动机正常与故障状态下的非平稳瞬变信号 50~100 阶信号能量值,对连杆轴承磨损故障取得了较好的识别效果。吴剑采用样条插值的计算阶比跟踪算法,分析了航空发动机变速过程的振动信号,有效估计出振动幅值信息。秦树人等结合时频分析与阶比跟踪对旋转机械非平稳信号进行了研究,利用虚拟仪器技术开发出旋转机械特征分析仪,在实际应用中产生了较好的应用效果。徐敏强利用 Haar 小波系数与变频信号瞬时频率的关系,提出了基于 Haar 小波分析的旋转机械高速启动过程振动信号瞬时频率的计算方法。郭瑜提出了基于短时傅里叶变换峰值估计瞬时频率的旋转机械阶比跟踪技术。



1.3.3.2 小波变换

小波变换是 20 世纪 80 年代后期发展起来的一门新兴的应用数学分支。1984 年由法国地质物理学家 J. Morlet 提出,在理论物理学家 A. Grossman 的帮助下, Morlet 规范了小波变换并建立了反演公式。1986 年法国数学家 Y. Meyer 偶然构造出了一个在时域和频域都有优良集中性的正交小波。1987 年,法国学者 S. Mallat 提出了快速小波算法,即 S. Mallat 算法。Mallat 算法在小波分析中的地位相当于快速傅里叶变换在经典傅里叶分析中的地位。后来,美国学者 I. Daubechies 通过迭代算法构造出了紧支集正交小波。1989~1991 年,美国学者 R. R. Coifman 和 M. V. Wickerhauser 提出了小波包 (WaveletPacket) 概念。

小波变换作为信号处理的一种手段,已经在信号消噪、特征提取、故障诊断等方面得到广泛的应用,取得了一批成果。重庆大学秦树人教授领导的课题组研制开发了小波变换信号分析仪,填补了国内空白。西安交通大学何正嘉教授领导的课题组应用小波变换在故障诊断中做了大量的工作,并撰写了非常有指导意义的著作。

林京提出一种基于 Morlet 连续小波变换的信号消噪方法,建立了基于连续小波变换的奇异性检测技术,并给出了定量描述指标,有效地识别了气阀的多种故障。刘世元提出了小波包改进算法,通过移频处理,克服了原算法中的频率混叠现象,通过对完整工作循环汽车缸盖振动信号的小波包分解,实现了整循环诊断特征向量的快速提取。伍学奎应用小波包方法对缸盖振动信号的分析来诊断汽车气阀漏气故障,并建立了基于马氏距离法的气阀漏气多指标诊断模型,通过实机诊断,取得了预期的效果。夏勇通过对汽车发动机缸盖振动信号的小波包分解得到时频谱,运用图像处理技术对发动机的状态进行监测,另外,结合小波变换和神经网络实现了气阀机构故障的诊断。肖云魁将小波包变换与 AR 谱分析结合,计算经过小波包分解与重构后得到的振动信号各频带内 AR 谱,找出了 AR 谱能量与故障之间的对应关系,用于柴油机曲轴轴承的故障诊断。刘成材建立 AR 模型确定小波包分解层数,通过合理取舍小波包变换子空间信息,有效提取出发动机爆震特征。杜灿谊利用不同转速下缸盖振动信号小波包分解后的各频段能量,有效识别出发动机排气管阻塞故障。耿相军采用小波分析方法对缸盖振动信号进行时频分析,得到气门漏气、气门间隙异常、供油时刻异常及喷油压力异常 4 种常见故障下振动信号变化规律。

1.3.3.3 时频分布

WVD 是 Wigner 于 1932 年在量子力学中引入的,由 Ville 于 1948 年在定义中采用解析信号的方式来消除 Wigner 分布中正负频率之间的交叉项,并把它应用于信号分析领域,WVD 奠定了现代时频分布理论的基础。Cohen 在 1989 年提出了广义核概念,并定义了能量化的 Cohen 类,被认为是时频分布系统化道路上的里程碑。François Auger 提供了用于时频分布分析的 Matlab 工具箱,为时频分布的应用推广提供了帮助。WVD 能同时描述信号在不同时间和频率的能量密度,是单分量线性调频信号最佳的分辨工具,然而,对于多分量信号的时频分布,存在着虚假的信号成分,称为交叉干扰项。如何有效地消除和削弱交叉项的影响,成为从事时频分布研究的学者多年来主要研究目标,他们提出了许多方法,从 WVD 衍生出新的时频分布,以达到消除或削弱交叉项的目的。

时频分布作为一种信号分析与处理的方法,非常适合于故障的诊断,在汽车故障诊断领域已得到较多的应用。

B. Samimy 应用时频分布诊断汽车爆燃敲缸故障取得了较好的效果,并提出了两种新的时频分布算法 (Moving Match Filter Detector 和 Training Data-Based Quadratic Detector)。

M. Chiollaz 采用 WVD 对汽车的噪声信号进行了分析。Yun-Sik Han 提出一种叫作 Directional Wigner 分布的时频分布,以减少干扰项。耿遵敏在柴油机振声诊断中做了很多工作,提出基于 AR 模型 Wigner 分布的 AR-Wigner 时频谱。郑海波应用重分配伪魏格纳维尔分布对于汽车几种故障信号进行了特征提取。贾继德采用时频信息熵优化的方法给出了时频分布参数的选择范围,该方法应用于发动机轴承磨损状态监测中,有效提取出故障特征。蔡艳萍、程利军分别采用经验模态分解和阶比跟踪技术与时频分布相结合,对柴油机表面振动信号进行分析,有效识别出进排气门间隙异常和曲轴轴承磨损故障。

1.3.3.4 高阶时频分布

高阶时频分析 (Higher-Order Time-Frequency Distribution, HOTFD) 是从高阶统计量的角度来讨论 WVD (WVD 的高阶扩展),即高阶统计量与 WVD 相结合的产物。既能有效利用高阶统计量对非线性信号分析的优点,又能发挥 WVD 准确地描述非平稳信号时变、局部的时频特征的能力,还可以有效地抑制交叉项的干扰。1988 年, N. L. Gerr 首先提出三阶 WVD, Swami 等学者对时变高阶谱 (TVHOS) 的定义、性质及应用进一步研究,取得了较大的进展。

S. K. Lee 通过试验得出, Wigner 三谱 (Wigner Trispectrum) 相比 WVD 更适应于分析冲击信号,并将该方法应用于从汽车齿轮箱所得冲击信号的分析,取得了较好的效果。贾继德通过仿真信号比较,证实采用 Wigner 三谱 (Wigner Trispectrum) 结合指数核滤波技术 (Choi Wiliams Distribution, CWD) 的切片谱 (SWTCWD) 更能有效地消除交叉项的干扰,将该方法应用于汽车故障信号分析,结果表明,谱的切片图能清晰地分辨不同故障状态,而且具有较好的时频分辨能力。

1.3.3.5 希尔伯特-黄变换

1998 年,由美国宇航局的 Norden E Huang (黄锷) 提出的称之为希尔伯特-黄 (Hilbert-Huang) 变换的信号处理方法被认为是近年来信号分析的一个重大突破。该方法将时间序列经过经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 成为一组本征模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMFs), 对每个 IMF 作 Hilbert 变换,可得 Hilbert 谱 (Hilbert Transform Spectrum, HTS), 而对 HTS 进行时间积分便得到边际谱 (Marginal Spectrum, MS)。Hilbert-Huang 变换局部性能良好而且是自适应的,不仅可以分析线性的稳态信号,而且非常适用于非线性、非平稳信号分析。

王珍分别采用 Hilbert 谱和边际谱应用于柴油机缸套活塞磨损故障诊断上,效果十分明显。樊新海利用 Hilbert 变换求取主固有模态分量的瞬时频率函数,将周期性排气噪声基频的波动方差和平均穿越率作为特征参数,有效识别出柴油机失火故障。郝大海采用 Hilbert-Huang 变换与小波分析相结合的方法,通过对 Hilbert 谱沿频率轴积分得到不同频带能量分布,有效提取出发动机振动信号特征。曹冲锋提出了基于端点优化对称延拓的抑制 EMD 端点效应新方法,能够精确提取出旋转机械振动信号的典型故障特征,运算效率较高。沈志熙提出了一种基于 EMD 和支持向量机的故障诊断方法,研究表明该方法能有效克服传统小波分析方法频率分辨率不高、易受相邻谐波交叠影响的缺陷,可对 6135 型柴油机气门常见故障进行准确判断。

1.3.3.6 循环平稳性分析

在非平稳信号中有一个重要的子类,它们的统计量随时间按周期或多周期规律变化,这类信号称为循环平稳信号。循环平稳性分析方法是一种特殊的信号非平稳分析方法。