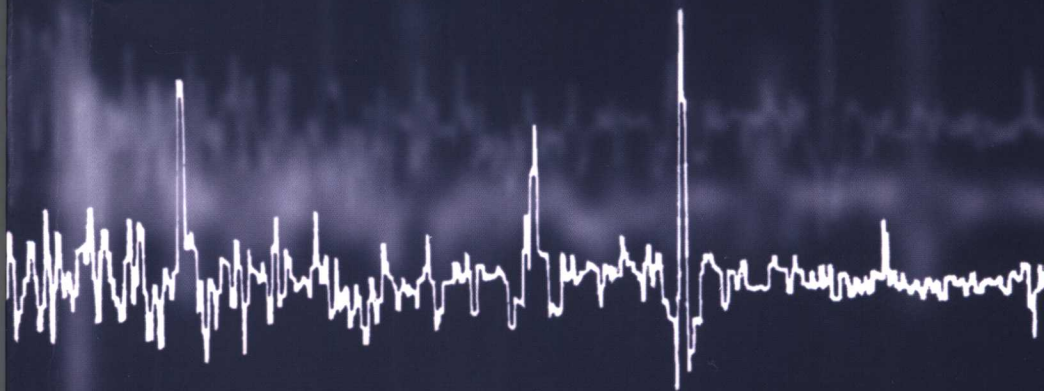




频谱分析仪 及其在故障诊断中的应用

常西畅 赵力行 著



中国宇航出版社

频谱分析仪 及其在故障诊断中的应用

常西畅 赵力行 著



中国宇航出版社

·北京·

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

频谱分析仪及其在故障诊断中的应用 / 常西畅, 赵力
行著. —北京: 中国宇航出版社, 2005. 11

ISBN 7-80218-016-3

I. 频... II. ①常... ②赵... III. 频谱分析仪 - 应用 - 故障诊断 IV. TM935.210.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 132556 号

责任编辑 曹晓勇

责任校对 王妍 封面设计 姜旭

出版 中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号 邮编 100830
(010)68768548

网址 www.caphbook.com/www.caphbook.com.cn

经销 新华书店

发行部 (010)68371900 (010)88530478(传真)
(010)68768541 (010)68767294(传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑
(010)68371105 (010)62529336

承印 北京京科印刷有限公司

版次 2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月第 1 次印刷

规格 850×1168 开本 1/32

印张 6.75 字数 178 千字

书号 ISBN 7-80218-016-3

定价 22.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部调换

前 言

频谱分析是一项有着扎实理论基础,非常实用,应用面很广的技术。频谱分析所依据的傅里叶变换方法可以说是非常“老”的数学方法。人们为了在工程上方便快捷地使用它,对它进行了种种变形和改进,尤其是 20 世纪 60 年代中期,美国的库利、图基发明了快速傅里叶变换算法,使得这项技术迅速实用化,从而带动了其在各个工程领域中的广泛应用,在通讯、雷达、振动工程、水声、语音、动态分析、生物电信号分析等领域都有大量成功的例子。今天,尽管已经发展了许多正交变换方法、算法去处理和识别各种工程信号,但使用快速傅里叶变换(FFT),进而让人们在频率域识别各种信号,仍然是工程上经常使用的一种常规手段和方法。从本质上说,对工程信号进行傅里叶变换和频谱分析,可以排除背景干扰,使信号的特征更易于提取和识别。有鉴于此,熟悉和掌握这种分析方法,并能熟练的操作使用频谱分析仪,对于工程信号的测量和分析都是非常重要的。

本书是以机械设备故障诊断为应用背景,对频谱分析仪作论述的,主要从应用的角度对频谱分析仪的原理、结构、操作使用方法作阐述,因而,在讨论频谱分析的数学方法时尽量避免作繁杂的数学推导和证明,而直接引用已有的结论,并且注意讨论数学方法的适用范围和条件。需要更深入了解其数学原理的读者,可以参考有关的专门著作。

全书共分为 5 章,第 1 章和第 2 章集中讨论了频谱分析仪所

依据的数学方法,频谱分析仪的结构和功能,频谱分析仪的性能指标和操作使用方法,使读者对频谱分析仪有比较深入和全面地了解。在第3章、第4章中,结合工程实例,介绍了使用频谱分析方法进行机械设备故障诊断,尤其是精密诊断的原理、步骤和方法要点,以期对实际工程信号的测量和分析有所帮助。第4章还对企业中开展机械设备故障诊断的方法,频谱分析在振动工程等其他方面的应用展开了讨论。第5章介绍了频谱分析仪的一些新的发展。在附录中给出了频谱分析仪常用术语的中英文对照表。

本书的第3.3节由沈水福教授撰写,第5章由赵力行高级工程师撰写,其他章节全部由常西畅撰写。

本书是作者和同事多年来在信号处理、机械设备故障诊断、频谱分析仪等方面研究工作的经验积累。在20世纪80年代初,作者有幸和上海交通大学、南京航空学院、西安交通大学、哈尔滨工业大学、北京交通大学、郑州机械所等院所从事振动工程的专家教授一起,合作编写了“振动数字信号处理程序库”,为以后从事振动信号分析和设备开发打下了良好的基础。继而,在邹昭平、王永强、赵梦杰、梁海、颜必长、王磊等同事的合作下,开发了SP-820“双通道频谱分析仪”;在此基础上,和南京航空学院张令弥教授、曾庆华博士合作完成了“多信道模态分析系统”;紧接着,又与清华大学精密仪器系、北京测振仪器厂的教授、专家合作研制了BB-1, BB-2“电站大型发电机组振动监测和安全保护系统”,并开发了化工空分机组、冶金中制氧机组的相应振动监测和安全保护系统。在这期间,还开发了专门为企业设备点检使用的、国内首批生产的SP-100, SP-200振动数据采集器。这些项目,大多获得了省、部级或国家级科技进步奖奖励,并进行小批量生产和使用,说明这些研究成果已经走到了国内该行业的前沿。尤其是在电站系统的攻关中,作者和邹昭平、孙佐、李明、赵力行、周红、梁海、罗明、

程煜、邢炎、黄焱、王丽君、保笑梅、温红星、陶洛文、宋玉梅、岳玉荣等同事,为此都付出了艰苦的劳动,我们至今仍能想起那些紧张而又振奋的工作场景。在这里,要对支持这些工作的领导和同事们表示由衷的感谢。并借此机会,向长期支持我研究工作,我的夫人周大捷执礼。

常西畅

目 录

第 1 章 频谱分析的基本原理和数学基础	1
1.1 绪论	1
1.1.1 频域分析	1
1.1.2 数字信号处理与频谱分析	3
1.1.3 信号的数字化	5
1.2 快速傅里叶变换	8
1.2.1 傅里叶级数	8
1.2.2 傅里叶积分和傅里叶变换	9
1.2.3 傅里叶变换的基本性质	10
1.2.4 有限离散傅里叶变换	12
1.2.5 快速傅里叶变换	13
1.3 频谱分析仪的主要分析方法	18
1.3.1 傅氏谱	18
1.3.2 功率谱密度	18
1.3.3 相关分析	21
1.3.4 传递函数和频响应函数	30
1.3.5 相干函数和相干功率谱	33
1.3.6 倒谱	34
1.3.7 频率细化分析	37
1.3.8 希尔伯特变换	39
1.3.9 幅值概率密度函数和幅值概率分布函数	40
第 2 章 频谱分析仪的原理、结构和操作使用	43
2.1 概述	43

2.1.1	频谱分析仪的原理和分类	43
2.1.2	频谱分析的几种结构	45
2.2	频谱分析仪的主要组成和实现方法	49
2.2.1	频谱分析仪的主要组成和作用简述	49
2.2.2	信号的输入通道	50
2.2.3	计算单元和管理程序	55
2.2.4	显示、存储和打印	57
2.2.5	数据接口	59
2.3	频谱分析仪的主要性能指标和操作使用要点	65
2.3.1	传感器的选择和接入	65
2.3.2	信号输入部分	73
2.3.3	主要分析功能和辅助功能	76
2.3.4	显示打印输出功能和常规仪器的要求	84
2.3.5	典型分析仪性能指标示例	91
第3章	运用频谱分析仪对机械设备作精密诊断	97
3.1	机械设备精密诊断	97
3.1.1	机械设备故障诊断的目的和意义	97
3.1.2	简易诊断和精密诊断	102
3.2	滚动轴承的故障诊断	103
3.2.1	轴承的分类、故障诊断的意义和基本的诊断方法	103
3.2.2	滚珠轴承的结构、振动特性和频谱	106
3.2.3	滚珠轴承常见故障形成机理和振动信号特点	111
3.2.4	滚珠轴承的振动诊断方法	114
3.2.5	使用频谱分析仪对滚珠轴承进行诊断的例子	120
3.3	齿轮故障诊断	122
3.3.1	概述	122

3.3.2	齿轮加工、装配及安装质量对齿轮传动的影响	123
3.3.3	常见的齿轮失效型式	124
3.3.4	齿轮传动中的振动信息	125
3.3.5	齿轮故障诊断技术	132
第4章	频谱分析仪在其他方面的应用	143
4.1	频谱分析仪在设备振动监测和安全保护系统中的 应用	143
4.1.1	企业机械设备振动检测和故障诊断对策	143
4.1.2	机械设备的周期性振动监测	144
4.1.3	大型机组在线实时振动监测和安全保护系统	151
4.1.4	核电站设备安全监测	153
4.2	频谱分析仪在振动工程中的应用	154
4.2.1	频谱分析仪在实验模态分析中的应用	155
4.2.2	随机振动环境模拟和随机振动台数字控制	168
4.2.3	桩基检测的动测法	171
4.3	声学分析	174
4.3.1	声压、声级	175
4.3.2	倍频程分析	178
4.3.3	声强分析	180
第5章	频谱分析仪的发展	183
5.1	频谱分析幅值相位的修正	183
5.1.1	对传统快速傅里叶变换的误差分析	184
5.1.2	矩形窗的修正方法	187
5.1.3	汉宁窗的修正方法	191
5.1.4	小结	194
5.2	数字信号处理器在频谱分析仪中的应用	195
5.2.1	数字信号处理器的产生	195

5.2.2 DSP 在频谱分析仪中的优势	196
5.2.3 小结	198
附录 频谱分析仪常用术语中英文对照表	199
参考文献	203

第 1 章 频谱分析的基本原理 和数学基础

1.1 绪 论

1.1.1 频域分析

频域分析又称频率分析,是将时间域的信号,即随时间而变化的函数,放在频率域中去分析处理的方法。通过频率分析,可以清楚地了解信号的频率成分和频率特征,从而可以对信号分离、组合、识别和再加工,为实际应用提供新的途径。频率分析法在通讯、雷达、水声、生物医学、动态特性分析等方面都得到广泛而深入的应用;在机械设备故障诊断中,频率分析是振动、噪声诊断方法的主要手段。

如图 1.1 所示,可以形象地说明时间域和频率域的关系。

由于频率分析方法的广泛应用,专门的频谱分析仪自 20 世纪 50 年代以来即开始使用。频谱分析仪大致可分为模拟式和数字式两大类。模拟式的频谱分析仪以滤波器的形式为主流,包括平行滤波器式频率分析仪和扫描式频率分析仪,其原理分别如图 1.2 和图 1.3 所示。

平行滤波器式频谱分析仪采用 n 个窄带滤波器,将信号通过各个窄带滤波器的功率分别测量出来,就可以得到信号的频谱。将这些滤波器的中心频率分别调谐,各自不同,依次覆盖想要分析的频段。如果想提高这种频率分析仪的分辨能力和拓宽频率覆盖范围,则要采用大量的平行滤波器,而每个窄带滤波器的成本都很高,这就限制了这种频谱分析仪的分辨力和频率覆盖范围。

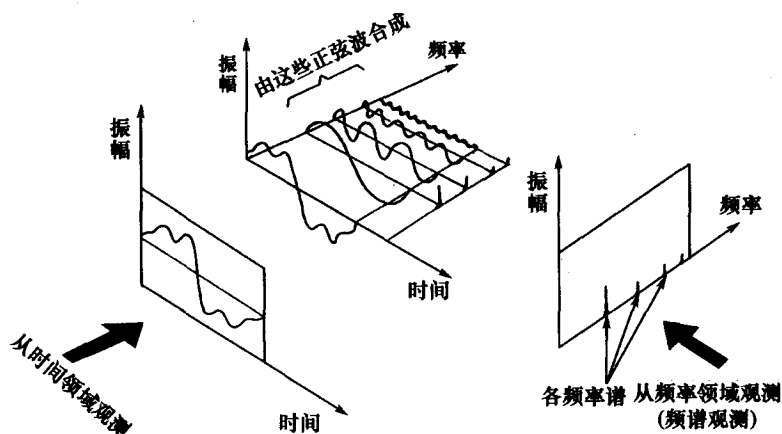


图 1.1 时间域和频率域关系示意图

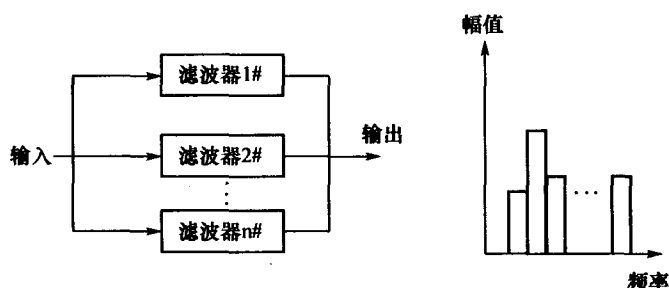


图 1.2 平行滤波器式频谱分析仪示意图

扫描式频率分析仪只采用 1 个滤波器,使其缓慢地在所关心的频率范围内扫描,即可得到输入信号的频谱。这种技术常常用于高频及微波范围内的频率分析。这种分析的最大问题是滤波器频带越窄,响应时间越长;若滤波器扫描的速度过快,会使其输出不能充分反映信号的性质,显示的频谱出现幅值偏低的现象。

随着数字化时代的到来,如同数字式彩色电视机取代模拟式的彩色电视机一样,数字式频谱分析仪已经在多数场合取代了传

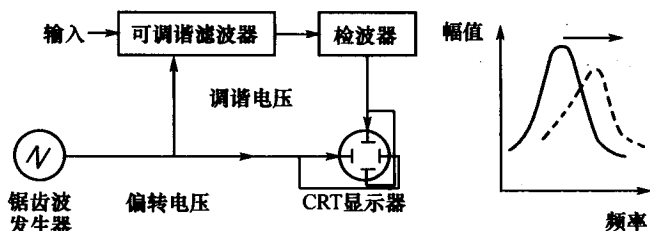


图 1.3 扫描式频率分析仪原理图

统的模拟式频谱分析仪,只不过其进程更早更快。数字式频谱分析仪是先将数字信号采样量化,然后进行数字信号处理,用傅里叶变换的方法求得频谱。因而,数字式频谱分析仪又称傅里叶分析仪,或者依据算法的不同,称作 FFT 分析仪或快速傅里叶变换分析仪。

数字式频谱分析仪的原理、结构和实现方法将在第 2 章中详细讨论。

1.1.2 数字信号处理与频谱分析

从大的学科范围讲,数字化的频谱分析是数字信号处理技术的一个重要组成部分。

信号处理是各个工程领域中常用的技术手段。例如在雷达、语音、生物医学工程(脑电、肌电、心电、胃电及生物电信号)、地震、通信、核能等领域,凡是希望能提取某些特征量、剔除噪声和干扰,或者补偿某些失真,都需要对信号进行处理。而数字信号处理则是对量化后的上述信号进行数字处理,实际上是在研究用数字式符号序列表示信号,并对这些序列进行变换和处理。它是一门既老又新的学科,其数学原理可以追溯到 17、18 世纪,它的基础是经典的数值分析技术,相当完善和成熟;而它的应用和发展又随着现代数字计算机和大规模集成电路而日新月异,并且仍在拓展新的领地。图 1.4 可以概括数字信号处理学科的脉络,也有助于了解

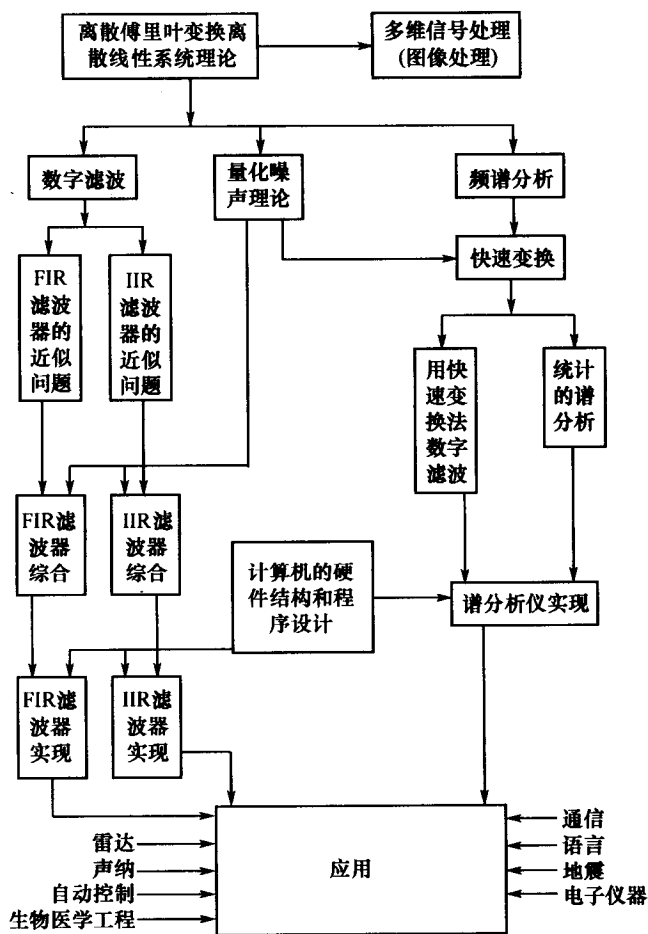


图 1.4 数字信号处理的基本理论内容示意图

频谱分析的各种算法和它们的作用。

在这里,数字信号处理被分为数字滤波和频谱分析、快速变换两大主要方面的内容。以快速傅里叶变换为基础的频谱分析有着

极为广泛的应用。

1.1.3 信号的数字化

数字信号处理和数字式频谱分析仪处理的都是数字信号,也就是离散的时间序列信号。这就需要将连续的时间信号(模拟信号)转变成离散的时间序列信号,即数字信号。对模拟信号的数字化处理在工程实际中通过 A/D(模拟/数字)转换器件来完成,同时进行了采样和量化两个过程。整个转换过程中需要遵循采样定理,同时要考虑量化误差。

1.1.3.1 采样和采样定理

对模拟信号 $x(t)$ 的采样过程如图 1.5 所示,即对连续信号 $x(t)$ 按照一定的时间间隔(通常按照等时间间隔) Δt ,逐点取得其瞬时值,从而形成一个离散时间序列

$$x_0, x_1, x_2, \dots, x_n, \dots$$

这里称 Δt 为采样时间间隔,或者称作采样周期,其倒数 F_s 称作采样频率。则有

$$F_s = 1/\Delta t \quad (1.1)$$

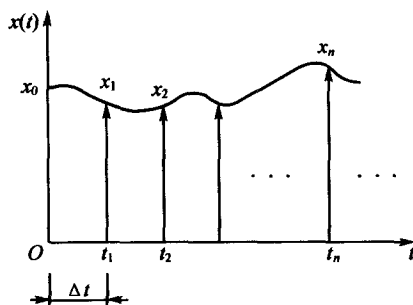


图 1.5 对模拟信号的采样过程

采样的最主要的技术指标是采样频率和采样长度。一般来说,采样频率越高,所取得的数字信号序列越能真实地代表原来的

连续信号 $x(t)$, 尤其对于快速变化的信号更是如此, 但提高采样频率必然会增加采样设备的成本。保证不丢失信息的最低采样频率需遵循采样定理。

采样定理为: 对于连续信号 $x(t)$, 假定其频谱分布在有限带宽之内, 则

$$f_s \geq 2f_{\max} \quad (1.2)$$

其中 $f_{\max}$ 为原信号中最高频率成分的频率。

如果不满足采样定理, 就会产生频率混淆现象。频率混淆现象的物理解释可以很方便地如图 1.6 所示。其中“.”为采样点, 当 $f_{\max}/f_s > 1/2$ 时, 例如 $f_{\max}/f_s = 3$, 就会出现图中虚线所示的混淆波形, 就会产生混淆频率。

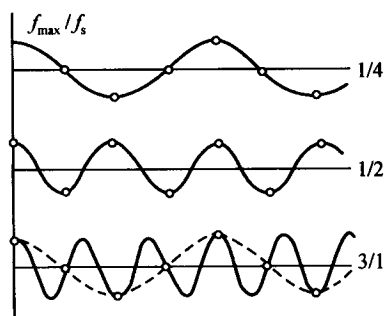


图 1.6 频率混淆的示意图

为了保证不产生频率混淆, 必须提高采样频率, 一般取 f_s 为 $f_{\max}$ 的 2.56~4 倍。为了工程实现上的方便, 常常取 $f_s = 2.56 f_{\max}$ 。同时, 用低通滤波将高次谐波滤去, 避免其混淆到所要观测的频率范围中去。

在这里可以认识到, 去除可能混淆到观测频带的高次谐波的低通滤波(常称之为抗混淆滤波)过程需要在采样之前进行, 因为采样时就会发生混淆现象, 因而单靠采样后的数字滤波是无法消除频率混淆现象的。

1.1.3.2 量化和量化误差

对连续信号采样的过程,除了要将信号在时间上离散化,同时也要将信号在幅值上数字化,即量化。这个量化过程和所有数字式仪器一样,都是由 A/D 完成的。将在幅值上连续的模拟量,量化为二进制的数字量,即用一定位数(如 8,10,12,16 位)的二进制数表示在一定电压范围内(如 5 V)的信号。

假定这个表示的电压范围为 v ,而 A/D 转换的位数为 6,则对应于 v 的范围,可以 2^6 有个状态与其对应,而每两个状态之间的间隔为 $\Delta v = v / 2^6$,这样,落在最小取值间隔 Δv 中的实际值和最终表达式的数字量之间,就会产生误差,即量化误差。

量化误差是一个绝对误差,它总是 A/D 转换最后一位的一半,因而作 A/D 转换时,要尽量使信号和 A/D 转换的满量程接近,减少相对误差。

可以明显地看出,A/D 的位数越高,则量化误差越小,但造价会相对增高。

量化误差的范围和影响如表 1.1 所示。

表 1.1 A/D 转换器位数和量化单位及最大信噪比的关系

A/D 转换器位数	量化电平数	最大信噪比	转换精度
8	256	49.8	$\pm (0.5 \sim 1)$
10	1 024	62	$\pm (0.1 \sim 0.2)$
12	4 096	74	$\pm (0.025 \sim 0.05)$
16	65 536	98	$\pm (0.001 5 \sim 0.003)$

信噪比可沿用下式计算

$$S/R = 20b \lg + 1.8 \approx 6b + 1.8 \quad (1.3)$$

其中 b 为 A/D 转换的位数。