

机械故障诊断丛书

故障诊断中 的振动信号处理

寇 惠 原培新 编

冶金工业出版社

内 容 简 介

《故障诊断中的振动信号处理》是根据故障诊断中振动诊断的需要编写的。全书共分10章，书中首先介绍了3个域（时域、幅值域、频率域）12种统计特征参数的数学定义及物理概念；接着介绍了随机数据处理的一般方法；重点介绍了工程实际应用最多的快速傅里叶变换（FFT）谱分析的原理与应用，其中包括倒谱在齿轮和轴承诊断中的应用问题。对相关与传递函数的应用书中也作了些典型的介绍，此外还列举了一些其他的应用例子。最后一部分介绍了与FFT分析技术不同的新方法，即时间序列法在信号处理中的应用问题。书中还以表格的形式汇总了国外进口和国产的应用较多的FFT分析仪的规格、型号功能及技术特性。

本书是机械故障诊断丛书之一，在内容上与本丛书其他册有联系但也有较大的独立性，可供从事机械设计，设备运转、维修及现场从事信号处理的工程技术人员学习使用，也可供有关专业研究生学习参考。

机 械 故 障 诊 断 丛 书 故障诊断中的振动信号处理

寇 惠 原培新 编

冶金工业出版社出版发行

（北京北海沿大街嵩祝院北巷89号）

新华书店总店科技发行所经销

河北省阜城县印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张7 字数181千字

1989年8月第一版 1989年8月第一次印刷

印数00,001~6,700册

ISBN 7-5024-0501-1

TH·32 定价5.10元

前 言

《故障诊断中的振动信号处理》是机械故障诊断丛书之一。本书以简明扼要、重点突出、联系实际和避免繁琐的理论推导为原则，介绍了振动信号特别是随机振动信号处理的统计特征及分析方法，重点阐述了谱分析的基本原理与快速傅里叶变换(FFT)分析技术在故障诊断中的应用，同时也介绍了信号处理的最新技术，如倒频谱分析、细化快速傅里叶变换(ZOOM—FFT)分析以及时序法建模分析的基本原理与应用。

几年来，该书稿曾作为力学、机械类研究生选修课教材，也曾几次在继续工程教育的工程师培训班上讲述过，课程安排需要85学时(包括实验)。

本书由寇惠主编。其中1~9章由寇惠编写，第10章由原培新编写。由于编者水平所限加之实践经验不足，难免有不当之处，恳请读者指正。

编者

1988.5.

目 录

1 绪言	1
1.1 信号处理与分析大意.....	1
1.2 信号处理技术发展概况.....	2
1.3 信号处理技术的工程应用概况.....	4
2 简单波形的分析	6
2.1 “拍”波的分析.....	6
2.2 波形的近似分析.....	8
2.3 波形的包络线分析.....	9
2.4 波形的叠加消去分析.....	11
3 随机信号的统计特征	14
3.1 随机信号的分类.....	14
3.2 随机信号的统计特征参数.....	20
4 信号处理的一般步骤	49
4.1 数据的准备.....	49
4.2 数据的检验.....	59
4.3 数据分析概述.....	67
5 频谱分析的理论基础	72
5.1 傅里叶级数和傅里叶变换.....	72
5.2 广义函数(奇异函数).....	82
5.3 褶积和褶积定理.....	88
5.4 采样波形的傅里叶变换.....	95

5.5	离散傅里叶变换(DFT)	98
5.6	离散傅里叶变换(DFT)与连续傅里叶变换的关系	104
5.7	离散傅里叶变换(DFT)应用举例	106
5.8	快速傅里叶变换(FFT)	112
6	功率谱密度函数分析及应用	123
6.1	导出过程的谱密度及其单位的注释	123
6.2	功率谱密度函数的模拟分析	126
6.3	功率谱密度函数的数字分析	131
6.4	互功率谱密度函数分析	148
6.5	功率谱密度函数分析的应用	149
7	相关分析与应用	157
7.1	自相关函数的快速傅里叶变换分析	157
7.2	互相关函数的快速傅里叶变换分析	158
7.3	相关分析的应用	159
8	传递与相干函数分析及应用	163
8.1	物理系统的响应特性	163
8.2	相干函数与传递函数的应用	166
9	倒频谱和细化快速傅里叶变换(ZOOM—FFT)分析	171
9.1	倒频谱分析	171
9.2	倒频谱分析的应用	173
9.3	细化快速傅里叶变换(ZOOM—FFT)分析	180
9.4	FFT分析装置简介	182
9.5	模数转换的机理简介	188

10 信号处理的时序法简介	188
10.1 时序模型的概念.....	188
10.2 自回归滑动平均模型 (ARMA), 格林函数和 逆函数.....	189
10.3 n 阶自回归模型 (AR(n)), m 阶滑动平均模型 (MA(m)), (n, m) 阶自回归滑动平均模型 (ARMA(n, m)) 的谱.....	196
10.4 模型阶的判别.....	199
10.5 时间序列的建模步骤.....	203
10.6 应用举例.....	207
参考文献	214

1 绪 言

1.1 信号处理与分析大意

信号(波形)或动态数据处理,是近年来现代科学技术中正在兴起和迅速发展着的边缘科学,一般称作为“信号处理”。

就机械工程、结构工程或力学范畴来说,由测试或监测所得到的各种动态波形,可以是简谐的、周期的、瞬态的、随机的形式。它们分别代表着各种物理量,如应力、应变、压力、位移、速度、加速度等。但是它们都可有一种共同的表现形式,即物理量随时间有一定的变化轨迹。若把时间作为横坐标,各种物理量作为纵坐标,便可得到一种变化的图形,这就是我们所说的波形。从这些波形中,可以直接得到一些关于物理量的信息,如幅值、周期等。但是这些信号往往是十分有限的。从随机波的波形中直接提不出什么有用的信息。所以必须对波形(信号)进行加工处理(信号处理)。也就是要把动态波形从以时间为坐标轴的时域转换到以频率为坐标轴的频域上进行分析(频谱、功率谱密度函数分析)。为了全面的、深刻地揭示出动态信号所包含的信息,除频域分析外,还应有幅值域(均值、方差、概率)、时差域(自相关、互相关)、计数域(峰值计数)、转速域(幅值变化、阶次)及倒频域(倒频谱)分析等。由此可见,信号在不同域上进行分析时,可以有多种函数,但它们之间都存在着内在的数理关系,处理时可以进行相互转换,如时域分析与频域分析是可以互相转换的,主要通过傅里叶变换原理来实现。

图 1-1 直观地表示了在观察动态信号时时域、频域和幅值域之间的有机联系。频域和时域表明了动态信息的两个观察面,是观察信号方法的两种角度不同。虽然时域分析具有直观、简明的

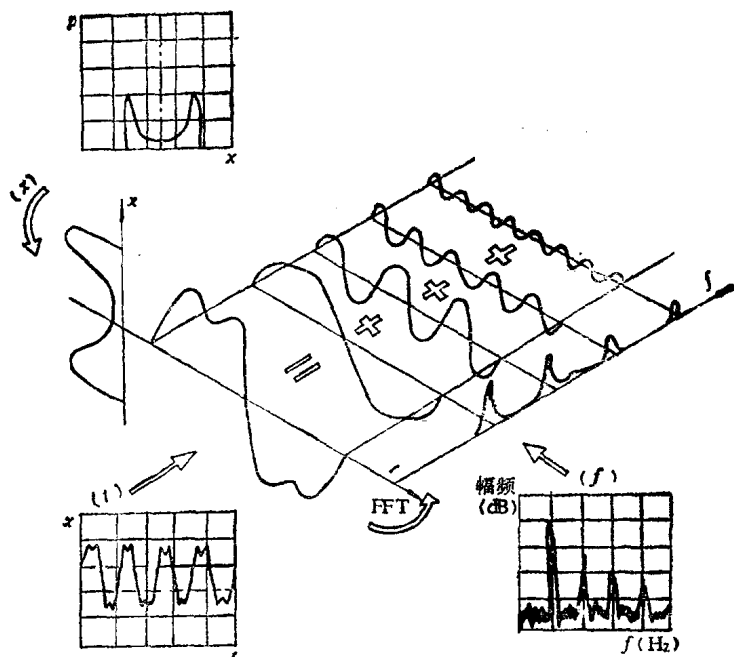


图 1-1 时域、频域、幅值域分析的相关示意图

特点，但在许多情况下，时域无论如何也不能全面揭示出频域的特征来。所以必须分析频域上的规律。故目前动态信号分析的趋势，是从时域向频域发展。然而，它们又是互相联系的，缺一不可。

对于动态信号在不同域上的描述，仅仅是信号中信息数据的不同排列而已，并不能增加或减少信号中任何成分（信息）。

1.2 信号处理技术发展概况

信号处理与分析虽然是一门新兴的科学，但在理论上早已成熟。目前在动态信号的研究日益广泛的情况下，已经从确定性信号分析发展到随机信号处理分析的阶段。它的理论基础在数学方面主要是概率论，统计原理（数理统计）及各种变换理论，特别

是傅里叶变换成为随机数据处理与分析的主要基础。傅里叶分析方法是1807年由法国数学家和工程师约瑟夫·傅里叶(1768~1830年)提出的。从此以后,很多科学家为此作了推广和应用。

五十年代中到六十年代末,由于计算机技术尚未应用到信号处理与分析中,当时主要应用模拟分析的方法,即从被分析的曲线 $x(t)$ 的图解表示出发,通过跟踪滤波的方式进行频谱分析。这种方法功能比较少(主要是频率分析)、分辨能力较低(3~5Hz带宽),分析的时间比较长,输出的方式也比较少,如只能照相或作 x - y 记录。由于受到方法的限制,信号处理与分析发展不快、应用不多。

六十年代末以来,由于科学技术迅速发展,特别是随着电子计算机科学的发展。信号的处理与分析开始向数字分析方法迅速地发展。特别是接着又出现了快速傅里叶变换(FFT)技术,使得对于信号的分析运算速度发生了大数量级变化(提高了几百倍),这就把信号处理技术推向了一个崭新的阶段,随之也形成了一整套的理论与实现的方法,应用的部门越来越广泛。

信号的数字处理,极大的改进了模拟分析的不足。具有极丰富的运算功能。一个数字处理的单机,可有十几种到几十种的功能,可以提供各种信息和各种分析数据。大幅度地提高了分辨能力,如低频段可在1Hz以下,若加上细化(ZOOM)功能,带宽可窄到 $\frac{1}{1000}$ Hz。高频段可达100kHz。运算速度快,如对1024个

数据序列进行FFT运算,最快的只需15ms(HP5451C机)输出的方式较多,如 x - y 记录、穿孔、打印、图象等。可以实现对各种高速运动的物体进行实时分析与监控等。所谓实时分析即指不舍弃观测信号,处理时间跟得上信号变化的需要或者说在非常短的时间内对信号进行整个谱分析。

国外最先研究这种技术的是美国。相继欧洲许多国家也很快的开展了这方面的工作。紧接着日本也较快的发展起来了,由于日本的分析仪小型、经济、适用,所以我国近几年进口了一些日

本的FFT分析仪器。丹麦的测试仪器在我国各部门使用的较早、也较多,具有多功能双通道FFT分析仪于1983年问世。随之我国一些电子仪器生产厂家在引进的基础上,也生产出了一些适合我国教学、科研和生产所需要的FFT分析仪和振动的监测、监控和诊断等仪器。

科学技术的发展是无止境的,人们对科学研究的深入程度也愈来愈高。虽然现代动态信号处理技术已经发展到比较完善的程度,但是对于振动信号的处理速度、分辨能力、功能范围的特殊处要求、机型的性能价格比、性能重量比等,随着发展的需要,继续提出更高的要求、新的处理技术(如时序法),新的器件、新的机型仍在不停的研制,不断地出现、迅速的向前发展。

1.3 信号处理技术的工程应用概况

信号数字处理技术广泛地应用在各种现代工程中。例如:

(1) 机械工程和电机工程。包括燃气轮机、柴油机的振动及由振动引起部件和整体的强度和刚度问题的研究;拖拉机、汽车等运输机械的振动分析及机床振动与切削自激振动的研究;电机磁场振动的研究;齿轮、轴承及轴系振动与磨削的研究;动力的传递和衰减特性研究等。

(2) 宇航工程。如各种飞行器结构振动的研究;声振疲劳分析的研究;航空发动机、直升飞机发动机振动监视、控制、维护和故障诊断的研究——如检查零部件的松动、磨损、裂纹等。

(3) 土木建筑工程。如地面振动对建筑结构的影响;海洋平台、桥梁构架振动的研究;大型土木结构的动态特性及结构振动模态的分析;隧道、水坝振动强度的分析等。

(4) 生物医学工程。如脑电、心电、肌电信号的分析研究;心血管系统动力过程的研究;振动对人体各部位影响的研究等。

(5) 声学工程。如各种噪声控制技术的研究;水声的研究;声发射技术的研究;语言声学的研究;生物语声训练的研究等。

(6) 地球物理工程。如地震信号的研究；探矿，爆破技术的研究；地层结构的研究等。

(7) 电讯工程。如数字通讯，雷达技术的研究等。

综上所述，说明信号处理技术与现代工业的发展密切相关，已经成为现代科学中的一个重要分支。因此，普及与提高这个学科的知识，推广和发展信号处理技术在工程中的应用，有其现实意义。

2 简单波形的分析

在机械或结构的振动测试中,有时测得的波形并不十分复杂。实用中往往需要简便地将振动波形分解成几个主要的谐波,以便及时地知道其频率和振幅。

2.1 “拍”波的分析

当两个振幅近似相同、频率相差很少的简谐波叠加时,其合成波形的振幅将随时间作周期性的缓慢变化,如图2-1所示,这种现象称之为“拍”波。

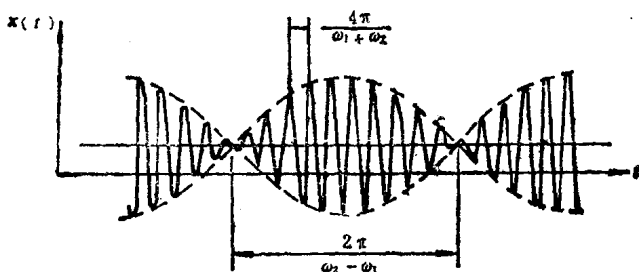


图 2-1 “拍”波形示意图

若两个合成波形的原方程式为:

$$x_1(t) = A_1 \cos(\omega_1 t + \varphi)$$

$$x_2(t) = A_2 \cos(\omega_2 t + \varphi)$$

则它们合成波形方程,在 $A_1 = A_2$ 时为:

$$\begin{aligned} x(t) &= x_1(t) + x_2(t) \\ &= A_1 [\cos(\omega_1 t + \varphi) + \cos(\omega_2 t + \varphi)] \end{aligned} \quad (2-1)$$

变换简化后得:

$$x(t) = A \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t + \varphi\right) \quad (2-2)$$

式中 $A = \left| 2A_1 \cos \frac{\omega_2 - \omega_1}{2}t \right|$ (2-3)

因为 $\omega_2 - \omega_1$ 很小,所以 A 表示极缓慢的周期变化的振幅。拍的周期 T_b 和频率 f_b 为:

$$T_b = \frac{2\pi}{|\omega_2 - \omega_1|} \quad (2-4)$$

$$f_b = |f_2 - f_1| \quad (2-5)$$

在 $A_1 \neq A_2$ 时,合成波形为:

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) = A \sin(\omega t + \varphi + \theta) \quad (2-6)$$

则 $A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\omega_2 - \omega_1)t}$ (2-7)

$$\omega = \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2) \quad (2-8)$$

$$\tan\theta = -\frac{A_1 + A_2\cos(\omega_2 - \omega_1)t}{A_2\sin(\omega_2 - \omega_1)t} \quad (2-9)$$

合成波形的最大振幅和最小振幅为:

$$\left. \begin{aligned} A_{\max} &= A_1 + A_2 \\ A_{\min} &= A_1 - A_2 \end{aligned} \right\} \quad (2-10)$$

合成波形的频率为:

$$f_{\text{合}} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \right) \quad (2-11)$$

拍波形的合成过程如图2-2所示。

拍波的特点:

(1) 振幅不是常数,而是随时间在二个简谐振动振幅之和及差之间作周期变化。

(2) 初相角 $(\varphi + \theta)$ 随时间而变化,使波形产生稀密不均的现象,因此“拍”成为振幅和初相角都在改变的一种调制波。

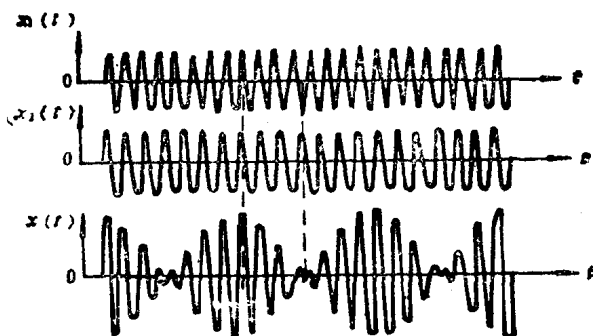


图 2-2 拍波的合成

2.2 波形的近似分析

对于接近正弦波的曲线，可以方便地确定其振动频率和幅值。在波形比较对称，基线又不易确定时，以读取波形峰峰值，即读取 $2A$ 值为好，如图 2-3 中 *a*、*b*、*c* 所示。若波形图在基线两边很不对称，如 *d* 图，只应读取峰值，即分别读取基线两边的振幅值 A_1 和 A_2 。频率值可通过读取周期 T 或半周期 $T/2$ 来确定。

被测参量数值是将测得波形的幅值除以测试仪器的放大倍数或标定灵敏度值，再结合测试系统的频率响应曲线加以处理而求得，即被测参量数值：

$$x = \frac{1}{B} \cdot \frac{A}{K} \quad (2-12)$$

式中 A ——记录波形幅值；

K ——测试系统的放大倍数或标定值；

B ——测试系统总的频响函数值，测试时一般均在频响平坦区范围内工作，这时 $B \approx 1$ 。

式 2-12 中的幅值 A ，可以是位移、速度、加速度、应力、应变、压力或其它各种物理量的记录幅值。计算时要注意峰值和峰峰值的区别。

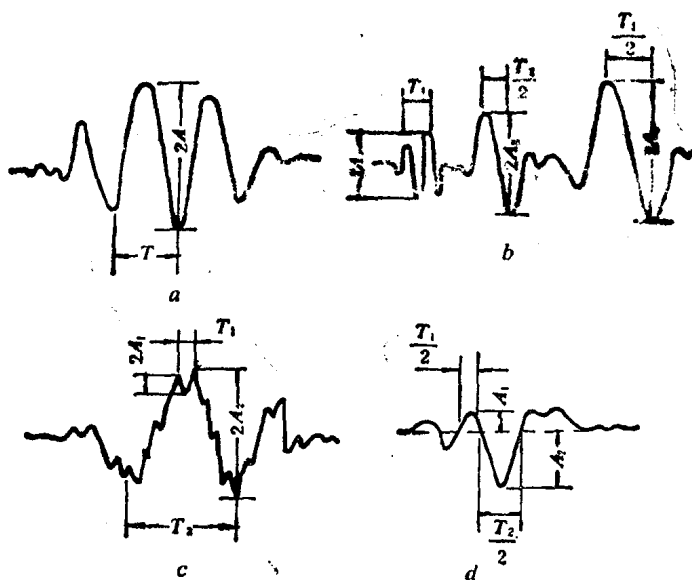


图 2-3 简单波形数据读取示例

对于频率，利用读取计算的周期 T 或 $T/2$ 和 $f=1/T$ 公式求得。

2.3 波形的包络线分析

有些合成波比简单波形复杂一些，但其波形变化有一定规律，它的包络线有一定的趋向，这时可用包络线法进行分析处理。

2.3.1 组成合成波的两频率值相差较大情况

当波形中两个谐波分量的频率值相差较大，例如其中一个频率为另一个的5倍或5倍以上时，则高频波明显地叠加在低频波上，根据两波形波幅的大小关系有如下三种情况：

(1) 高频波幅小于低频波幅时，例如：

$$x(t) = A_1 \sin \omega t + A_2 \cos 5\omega t, \quad A_1 > A_2$$

这时波形呈图2-4的形状。

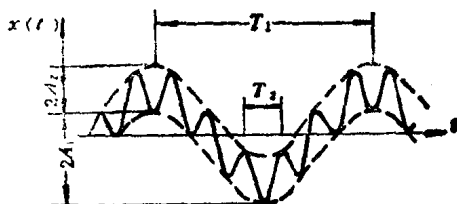


图 2-4 $A_1 > A_2$ 时的波形图

(2) 高频波幅等于低频波幅时，例如：

$$x(t) = 5(\cos 4t + \cos 15t)$$

波形如图2-5所示。

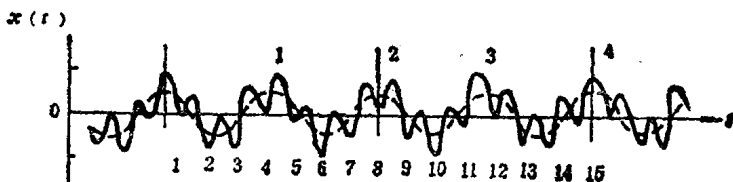


图 2-5 $A_1 = A_2$ 时的波形图

(3) 高频波幅大于低频波幅时，例如：

$$x(t) = A_1 \sin t + A_2 \cos 12t, \quad A_1 < A_2$$

则波形如图2-6所示。

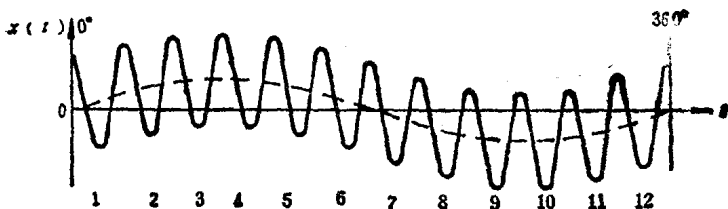


图 2-6 $A_1 < A_2$ 时的波形图

由以上示例看出，这类波形有下述特点：