

机械设计制造及其自动化专业应用型本科系列规划教材

# 石油机械测试技术

SHIYOU JIXIE CESHI JISHU

主 编 徐 倩 何 霞 张明洪



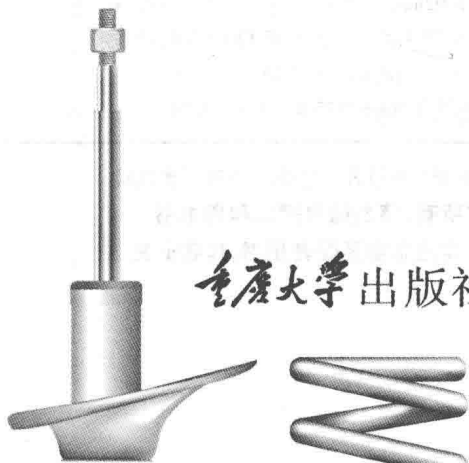
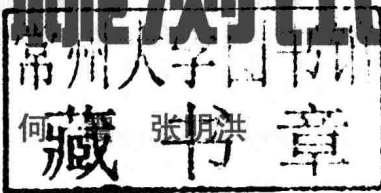
重庆大学出版社



机械设计制造及其自动化专业应用型本科系列规划教材

# 石油机械测试技术

主 编 徐 倩



石油大学出版社

2016年5月

## 内容提要

本书共 11 章,主要介绍了有关机械测试技术的基础理论,包括信号分析基础、测试系统及其特性、常用传感器、信号的转换与调理、振动测试、应力应变测量、噪声测量、位移测试、压力测试,同时对现代测试技术作了简介,特别是对几种较常见的石油机械——钻井振动筛、井架、柱塞泵进行了较为详细的介绍。本书在强调测试技术的基本概念和原理的基础上,突出了实际应用,不仅具有通用机械测试技术的基础知识,同时强调了这些基础知识在石油机械测试技术中的应用。

本书可作为本科学生的机械测试技术基础课程教材,也可作为相关专业本科学生的参考用书,还可供工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

石油机械测试技术/徐倩,何霞,张明洪主编. —  
重庆:重庆大学出版社,2016.12  
机械设计制造及其自动化专业应用型本科系列教材  
ISBN 978-7-5689-0315-8

I. ①石… II. ①徐…②何…③张… III. ①石油机械—测试技术—高等学校—教材 IV. ①TE9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 308639 号

## 石油机械测试技术

主 编 徐 倩 何 霞 张明洪

策划编辑:彭 宁 何 梅

责任编辑:李定群 版式设计:彭 宁 何 梅

责任校对:贾 梅 责任印制:赵 晟

\*

重庆大学出版社出版发行

出版人:易树平

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023)88617190 88617185(中小学)

传真:(023)88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

重庆市正前方彩色印刷有限公司印刷

\*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:17.75 字数:388 千

2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷

印数:1—2 000

ISBN 978-7-5689-0315-8 定价:38.00 元

---

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

# 前言

本书作为高等院校机械类本科学生技术基础课程之一的《石油机械测试技术》教材,针对石油院校的机械本科生,既要培养训练学生掌握通用机械测试技术的基础理论和基本方法,同时又要结合石油机械这一极具专业性的对象群体,让学生了解和掌握其特殊性。也就是说,本书既具有通用机械测试技术的共性,又具有石油机械测试技术的个性。通过“石油机械测试技术”课程的学习,使石油院校的机械本科生在踏上实际生产岗位或进入教学科研单位之后能够尽快地适应并独立工作,特别是在面对石油机械行业的设备对象群体时,能够从石油机械的特殊个性出发去考虑和探索发现问题和解决问题的思路和方法。

书中既讲述了国内外通用的机械测试技术的理论和方法,同时还着重介绍了我国具有国际先进水平的控件化虚拟仪器技术,这对培养学生的开拓创新精神和拓宽思路具有很好的启发推进作用。

本书的对象测试部分以石油装备中常见的钻井振动筛、井架、柱塞泵为例,系统、全面、简要地介绍了机械动态参量测试的全过程以及智能控件化振动筛动态特性检测仪等,这对学生今后在实际的机械测试工作中能尽快地进入状态和担当起相应的角色也是极具好处的。

祝愿本书的出版能在当今“大众创业、万众创新”的历史洪流中发挥其应有的“螺丝钉”作用。

本书中引用了有关专家、教授、工程技术人员、研究生等的成果,在此一并表示由衷的感谢。

书中不足和疏漏处在所难免,恳请指正。

编者

2016年5月

# 目 录

绪论 .....	1
<b>第 1 章 信号分析基础 .....</b>	<b>5</b>
1.1 信号分类 .....	5
1.2 信号描述 .....	12
1.3 信号的时域统计分析 .....	12
1.4 信号的幅值域分析 .....	13
1.5 信号的频域分析 .....	15
1.6 信号的相关分析 .....	31
1.7 卷积 .....	38
习题 .....	42
<b>第 2 章 测试系统及其基本特性 .....</b>	<b>45</b>
2.1 测试系统的组成 .....	45
2.2 测试系统的数学描述 .....	47
2.3 线性系统的主要特性 .....	48
2.4 测试系统的静态特性 .....	50
2.5 测试系统的动态特性 .....	54
2.6 测试系统的级连 .....	68
2.7 测试系统不失真传递信号的条件 .....	69
习题 .....	71
<b>第 3 章 常用传感器 .....</b>	<b>73</b>
3.1 传感器基本概念 .....	73
3.2 电阻式传感器 .....	77

3.3	电容式传感器 .....	84
3.4	电感式传感器 .....	92
3.5	磁电式传感器 .....	100
3.6	压电式传感器 .....	103
3.7	光电式传感器 .....	110
3.8	霍尔传感器 .....	120
3.9	传感器的发展趋势 .....	123
	习题 .....	125
<b>第4章 信号的转换、调理与处理 .....</b>		<b>126</b>
4.1	调制与解调 .....	126
4.2	滤波 .....	132
4.3	信号处理 .....	137
	习题 .....	142
<b>第5章 振动测试 .....</b>		<b>143</b>
5.1	概述 .....	143
5.2	单自由度系统的受迫振动 .....	144
5.3	测振传感器 .....	148
5.4	振动的激励 .....	155
5.5	振动测试系统 .....	157
5.6	测试系统的标定 .....	161
	习题 .....	162
<b>第6章 应力应变测量 .....</b>		<b>164</b>
6.1	概述 .....	164
6.2	应变测量电路 .....	166
6.3	应变测量实例 .....	169
6.4	提高应变测量精度的措施 .....	174
	习题 .....	175
<b>第7章 噪声测量 .....</b>		<b>177</b>
7.1	基本声学知识 .....	177
7.2	噪声测量仪器 .....	185
7.3	工业噪声和环境噪声的测量 .....	187
7.4	噪声测量的环境 .....	189
	习题 .....	190

<b>第 8 章 位移测试</b> .....	191
8.1 电阻式位移传感器 .....	191
8.2 电感式位移传感器 .....	193
8.3 光栅式位移传感器 .....	195
习题 .....	200
<b>第 9 章 压力测试</b> .....	201
9.1 概述 .....	201
9.2 液柱式压力计 .....	203
9.3 弹性式压力计 .....	205
9.4 电气式压力计 .....	207
9.5 负荷式压力计 .....	214
9.6 压力仪表的选择与安装 .....	218
9.7 压力仪表的标定 .....	221
习题 .....	226
<b>第 10 章 现代测试技术简介</b> .....	227
10.1 现代测试技术的特点 .....	227
10.2 现场总线技术 .....	228
10.3 测试系统的智能化技术 .....	232
10.4 测试系统的网络化技术 .....	236
10.5 测试系统的虚拟仪器技术 .....	239
习题 .....	252
<b>第 11 章 石油机械测试实例</b> .....	253
11.1 钻井振动筛动态特性参数的测试 .....	253
11.2 井架应力应变测试 .....	262
11.3 柱塞泵工作性能测试 .....	266
习题 .....	271
<b>参考文献</b> .....	272

# 绪 论

## (1) 测试的基本概念

测试是人们从客观事物中提取所需信息,借以认识客观事物,并掌握其客观规律的一种科学方法。从广义来看,测试属于信息科学的范畴,与计算机技术、自动控制技术和通信技术构成完整的信息技术学科。

测试技术包含了测量(Measurement)和试验(Test)两方面的含义。它是指具有试验性质的测量,或测量与试验的综合。而测量则是指以确定被测对象属性量值为目的的全部操作。

## (2) 测试技术的任务

机械工程测试的对象是机械系统(包括各种机械零件、机构和部件)及其组成部分(包括与机械系统有关的电路、电器等)。机械工程测试过程包括测量、试验、测试、计量、检验及故障诊断等过程。

测量的基本任务有两个:一是提供被测对象(如产品)的质量依据;二是提供机械工程设计、制造、研究所需的信息。设计、工艺、测试共同构成了机械工程的3大技术支柱。

具体到机械工程中,如一部机器或机构,从设计、制造、运行、维修到最终报废,都与机械测试与测量密不可分。现代机械设备的动态分析设计、过程检测控制、产品的质量检验、设备现代化管理、工况监测和故障诊断等都离不开机械测试,都要依靠机械测试,机械测试是实现这些过程的技术基础。同时,测试技术还是进行科学探索、科学发现和技术发明的技术手段。

具体来说,测试技术的任务主要有以下5个方面:

①在机械设备的设计中,通过对新旧产品的模型试验或现场实测,为产品质量和性能提供客观的评价,为技术参数的优化提供基础数据。

②在机械设备的改造中,可通过实测机械设备或零部件的载荷、应力、工艺参数等,为提高机械设备强度校核和承载能力提供依据,挖掘机械设备的潜力。

③在环境监测中,通过测量振动和噪声的强度和频谱,找出振源,并采取相应的减振降噪



措施,改善劳动条件与工作环境。

④科学规律的发现和新的定律、公式的诞生都离不开测试技术。从试验中可以发现规律,验证理论研究的成果,试验和理论可以相互促进、共同发展。

⑤在工业自动化生产中,要想对设备进行状态监测、质量控制和故障诊断,需要对工艺参数进行测试和数据采集及分析。

### (3) 测试过程和测试系统的组成

#### 1) 测试过程

机械工程测试的最终目的是从机械设备的测试信号中提取所需的特征信息。对于机械系统,信息是其客观存在的静动态特征。信号中包含有丰富的信息,根据不同的目的要求,信号中所包含的信息有的是有用信息,而另一些则为无用信息。无用信息通常称为噪声。信号也是多种多样的,按物理性质可分为非电信号和电信号。为便于拾取、传输、放大、分析处理及显示记录等,一般都需要将非电信号转换为电信号。

因此,机械工程测试过程一般包含了从被测对象拾取机械信号,再将非电性质的机械信号转换为电信号,信号经放大后输入后续信号处理设备进行分析处理。信号分析处理可采用模拟系统或数字分析处理系统。由于数字分析处理系统具有较高的性价比、稳定性好、精度高,故目前多采用数字式分析处理系统进行信号分析处理。

为了从被测对象提取所需要的信息,需要采用适当的方式对被测对象实行激励,使其既能产生特征信息,同时又能产生便于检测的信号。例如,在测取机械系统的固有频率时,采用瞬态激振或稳态正弦扫描激振,激发该系统的振动响应,拾取其响应信号。通过分析便可求出系统固有频率、阻尼比等参数。

#### 2) 测试系统的组成

测试系统由一个或若干个功能元件组成。广义来说,一个测试系统的功能是将被测对象置于预定状态下,并对被测对象所输出的特征信息进行拾取、变换放大、分析处理、判断、记录显示,最终获得测试目的所需要的信息。如图 0.1 所示为测试系统的构成。由图 0.1 可知,一个测试系统一般由试验装置、测量装置、数据处理装置及显示记录装置等组成。

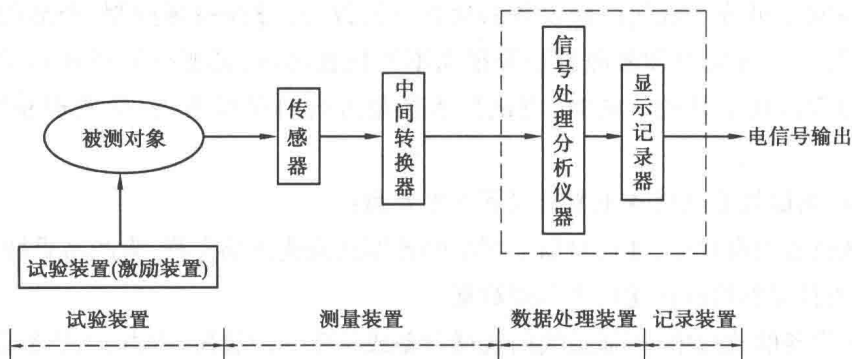


图 0.1 测试系统构成的方框图

### ①试验装置

试验装置是使被测对象处于预定状态下,并将其有关方面的内在联系充分显露出来,以便进行有效测量的一种专门装置。试验装置是用来使被测对象处于预定状态下,并将其有关方面的内在联系充分显露出来以便进行有效测量的专门装置。如在测定结构固有频率时,所使用的激振系统就是试验装置,如图 0.2 所示。激振器、功率放大器、信号发生器构成了该测试系统的激振系统,即试验装置。信号发生器产生频率在一定范围内可调的正弦信号,经功率放大器功率放大后驱动激振器顶杆产生与信号发生器频率相同的交变激振力。此交变力作用在被测构件上,使构件也处于一个该频率作用下的强迫振动。

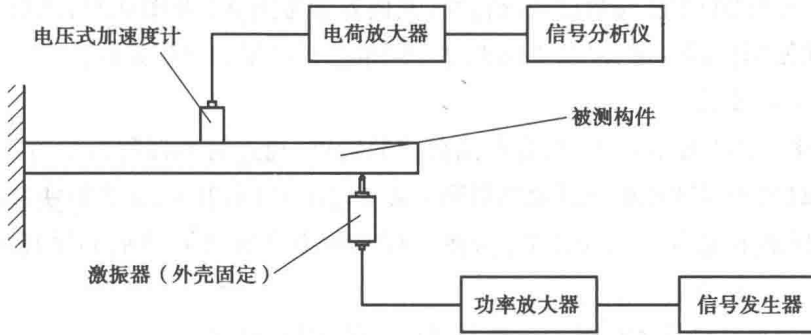


图 0.2 结构固有频率测试系统

### ②测量装置

测量装置一般包含传感器和中间转换器。其作用主要是把被测量通过传感器转换成与被测量成一定关系的电信号,然后通过中间转换器将该电信号转换为另一种与之对应的更适合传输、处理和记录的电信号。图 0.2 中,压电式加速度计和电荷放大器就构成该测试系统的测量装置。压电式加速度计拾取结构的振动信号,将振动加速度信号转换成电荷量,通过电荷放大器再将传感器的输出转换成电压信号。被测量不同,所选用的传感器不同,所需的中间转换器也不同。如图 0.2 所示,压电式加速度传感器所连接的中间转换器为电荷放大器。

### ③数据处理装置

数据处理装置是将测量装置输出的电信号进一步进行处理以排除干扰和噪声污染,并进行数据分析,如图 0.2 中的信号分析仪。信号分析仪可以实现各种信号分析功能,如信号的时域分析、概率密度函数分析、概率分布函数分析、频谱分析、相关分析、倒频谱分析、小波分析等,通过不同的分析,可以得到关于信号的不同信息。如图 0.2 中的信号分析仪可以得出结构在不同频率正弦信号激励下结构稳态输出时的幅值和相位,根据这些幅值和相位做出构件的幅频图或相频图,便可得到被测构件的固有频率。

### ④显示记录装置

显示记录装置是将拾取到的被测对象的信号显示记录下来。数据显示一般可采用各种表盘、电子示波器、显示屏等。数据记录可采用模拟式的磁带记录仪、光线示波器等,磁带记录仪

能将原始的模拟信号记录下来,但目前数据记录一般是采用虚拟仪器直接记录并储存在硬盘或其他储存设备上。

#### (4)课程的研究对象和学习要求

##### 1)课程的研究对象

本课程的研究对象有以下两个:

①本课程研究的是动态测试技术,本书所涉及的主要是动态量的测试。例如,对机器设备的振动、噪声的测试;对机器设备的各种物理参量如应力应变、力、压力、位移等的测试。通过测试结果对机器设备的质量进行评价和控制,特别是对常见石油机械设备的测试和评价。

②研究测量测试的方法与测试系统特性(其内容参考图 0.1 和图 0.2),从而正确地设计测试方案,正确地使用仪器设备,以及正确地进行测量测试结果的分析处理。

##### 2)课程的学习要求

根据本门学科的对象和任务,结合石油高校的特点,通过对本课程的学习,培养学生能根据具体的测试对象和测试要求合理地选用测试装置,并初步掌握静、动态机械参量测试方法和常用工程试验所需的基本知识和技能,为在工程实际中完成对对象的测试任务打下必要的基础。

具体而言,学生在学完本门课程后应具备以下的知识和技能:

①对机械工程测试工作的概貌和思路有一个比较完整的概念。对机械工程测试系统及其各环节有一个比较清楚的认识,并能初步运用于机械工程中某些静、动态参量的测试和产品或结构的动态特性试验。

②了解常用传感器、中间转换放大器的工作原理、性能和特点,并能依据测试工作的具体要求进行较为合理的选用。

③掌握测试装置静、动态特性的评价、测试方法,以及测试装置实现不失真测量的条件,并能正确地运用于测试装置的分析和选择。

④掌握信号在基本变换域(时域:幅值域和频域)的描述方法,信号分析的一些基本概念;掌握信号频谱分析、相关分析的基本原理和方法,并对其延拓的其他分析方法有所了解。

⑤了解一些现代测试技术的基本原理和应用。

⑥掌握常用石油机械,如钻井泵、钻井振动筛、井架等的测试技术。

⑦通过本课程的学习和实践,应对机械工程中某些静、动态参数的测试自行选择,设计测试仪器仪表,组建测试系统和确定测试方法,并能对测试结果进行必要的数据处理,以获得有用的信息。

由于本门课程综合应用了多学科的原理和技术,既是多门学科的交叉,又是数学、物理学、电工学、电子学、机械振动工程、自动控制工程及计算机技术的交叉融合。因此,要学好本门课程,需要学生在学习本课程之前,具备相关学科的基础知识。

# 第 1 章

## 信号分析基础

一般来说,信息的载体称为信号,信息蕴涵在信号之中。信息总是通过某些物理量的形式表现出来,这些物理量也就是信号。根据一定的理论、方法,对测试系统中的信号进行变换与处理的过程称为信号分析。信号分析的目的是使我们能够更有效地从被测对象中获得有用信息。

### 1.1 信号的分类

#### 1.1.1 信号的概念及其描述方法

信号是信号本身在其传输的起点到终点的过程中所携带的信息的物理表现。例如,在研究质量—弹簧—阻尼系统受到激励后的运动状况时,可通过系统质量块的位移-时间关系来描述。反映质量块位移的时间变化过程的信号则包含了该系统的固有频率和阻尼比的信息。

现实世界中的信号有两种:一种是自然和物理信号,如语音、图像、振动信号、地震信号、物理信号等;另一种是人工产生信号经自然的作用和影响而形成的信号,如雷达信号、通信信号、医用超声信号及机械探伤信号等。

在机械工程领域的生产实践和科学实验中,需要研究大量的现象及其参量的变化。这些变化可通过特定的测试装置转换成可供测量、记录和分析的电信号。这些信号包含着反映被测系统的状态或特性的某些有用信息,它是人们认识客观事物规律、研究事物之间相互联系及预测未来发展的依据。

数学上,信号可描述为一个或若干个自变量的函数或序列的形式。例如,信号  $x(t)$ ,其中,  $t$  是抽象化了的自变量,它可以是时间,也可以是空间。信号也可用“波形”描述,即按照函数随自变量的变化关系,把信号的波形画出来。信号的波形描述方式比函数或序列表达式描

述更具一般性。有些信号无法用某个数学函数或序列描述,但却可画出它的波形图。

同时需要提到的是噪声的概念。噪声也是一种信号,它是指任何干扰对信号的感知和解释的现象。信噪比是信号被噪声污染程度的一种度量。事实上,信号与噪声的区别是人为划分的,且取决于使用者对两者的评价标准。在一种场合被认为是干扰的噪声信号,在另一种场合却可能是有用的信号。

### 1.1.2 信号分类

信号分类的方法很多,从不同的角度、不同的特征以及根据不同的使用目的都可以对信号进行分类。对于机械工程测试信号,一般有以下几种分类方法:

#### (1) 确定性信号与非确定性信号

##### 1) 确定性信号

能用确定的数学关系式表达的信号或者可用实验的方法以足够的精度重复产生的信号,称为确定性信号。确定性信号又分为周期信号、非周期信号和准周期信号。

##### ① 周期信号

周期信号是按一定的时间间隔周而复始重复出现的信号,可表达为

$$x(t) = x(t + nT_0) \quad n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (1.1)$$

式中  $T_0$ ——周期,  $T_0 = 2\pi/\omega_0$ ;

$\omega_0$ ——基频。

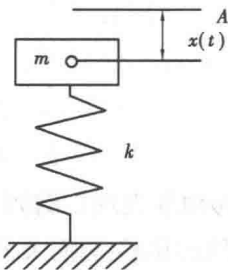


图 1.1 单自由度振动系统

A—质点  $m$  的静态平衡位置

例如,如图 1.1 所示的集中参量的单自由度振动系统作无阻尼自由振动时,其位移  $x(t)$  就是确定性的,它可用下式来确定质点的瞬时位置,即

$$x(t) = x_0 \sin \left( \sqrt{\frac{k}{m}} t + \varphi_0 \right) \quad (1.2)$$

式中  $x_0, \varphi_0$ ——初始条件的常数;

$m$ ——质量;

$k$ ——弹簧刚度。

其周期  $T_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{k/m}}$ , 圆频率  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 。

余弦信号、三角波、方波和调幅信号都是典型的周期信号,如图 1.2 所示。

周期信号可分为简单周期信号和复杂周期信号。简单周期信号是由单一频率构成的信号,如谐波信号;复杂周期信号是由不同频率的谐波信号组成的。

##### ② 非周期信号

非周期信号指的是确定性信号中不具有周期重复性的信号,主要指的是瞬变信号。瞬变信号具有瞬变性,或在一定时间区间内存在,或随时间的增长而衰减至零。锤子的敲击力、承载缆绳断裂时的应力变化、热电偶插入加热炉中温度的变化过程等,这些信号都属于瞬变非周

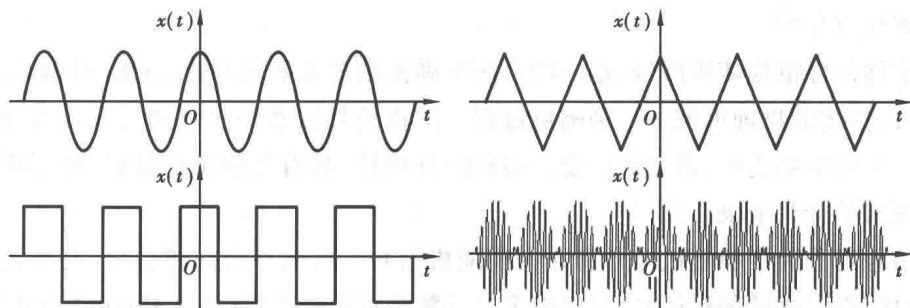


图 1.2 典型的周期信号(余弦信号、三角波、方波和调幅信号)

期信号,并且可用数学关系式描述。如图 1.1 所示的振动系统,若加阻尼装置后,其质点位移  $x(t)$  则为

$$x(t) = x_0 e^{-at} \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1.3)$$

其图形如图 1.3 所示。它是衰减振动信号,随时间的无限增加而衰减至零,属于非周期信号。常见的非周期信号有三角形脉冲、矩形脉冲等,如图 1.4 所示。

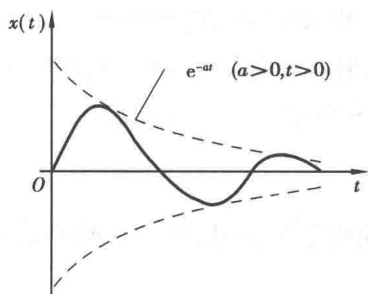


图 1.3 衰减振动信号

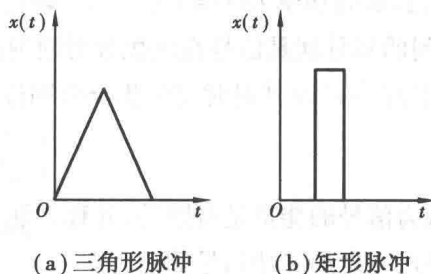


图 1.4 瞬变信号

### ③ 准周期信号

准周期信号和复杂周期信号一样,也是由两种以上的周期信号合成的,但各周期信号的频率相互之间不是公倍关系,没有公有周期,其合成信号不满足周期信号的条件,因而无法按某一时间间隔周而复始重复出现。例如,信号  $x(t) = \sin \omega_0 t + \sin \sqrt{2} \omega_0 t$  就是准周期信号,如图 1.5 所示。在工程实际中,由不同独立振动激励的系统响应,往往属于这一类。这种信号往往出现于通信、振动系统,应用于机械转子振动分析、齿轮噪声分析、语音分析等场合。准周期信号的频谱具有周期信号的特点。

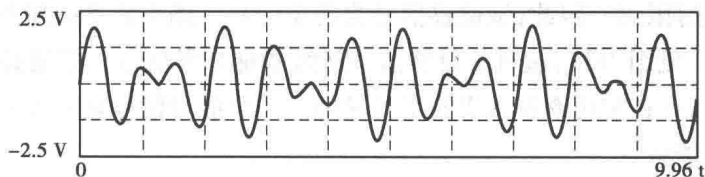


图 1.5 准周期信号

## 2) 非确定性信号

非确定性信号也称随机信号,是一种不能准确预测其未来瞬时值,也无法用数学关系式来描述的信号,描述的物理现象是一种随机过程。随机信号任意一次观测值只代表在其变化范围中可能产生的结果之一,但其值的变化服从统计规律,具有某些统计特征,可用概率统计方法由其过去来估计其未来。

随机信号可分为平稳随机信号和非平稳随机信号。所谓平稳随机信号,是指其统计特征参数不随时间而变化的随机信号,其概率密度函数为正态分布(见图 1.12(d)),否则就为非平稳随机信号。

如果一个平稳随机信号的统计平均值等于该信号的时间平均值,则称该信号为各态历经的。对于各态历经随机信号,则可用一个样本的时间平均来代替其集合平均。

### (2) 能量信号与功率信号

#### 1) 能量信号

在非电量测量中,常把被测信号转换为电压和电流信号来处理。当电压信号  $x(t)$  加到电阻  $R$  上,其瞬时功率  $P(t) = x^2(t)/R$ 。若电阻为单位电阻,即  $R=1$  时,则  $P(t) = x^2(t)$ 。瞬时功率对时间的积分就是信号在该积分时间内的能量。因此,若不考虑信号实际的量纲,可把信号  $x(t)$  的平方  $x^2(t)$  及其对时间的积分分别称为信号的功率和能量。当  $x(t)$  满足

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt < \infty \quad (1.4)$$

时,则认为信号的能量是有限的,并称为能量有限信号,简称能量信号,如矩形脉冲信号、指数衰减信号、三角形脉冲信号等。

#### 2) 功率信号

若信号在区间  $(-\infty, \infty)$  的能量是无限的,即

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt \rightarrow \infty \quad (1.5)$$

但在有限区间  $(t_1, t_2)$  的平均功率是有限的,即

$$\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} x^2(t) dt < \infty \quad (1.6)$$

则被称为功率有限信号,简称功率信号。

如图 1.1 所示的单自由度振动系统。其位移信号就是能量无限的正弦信号,但在一定时间区间内其功率是有限的。因此,该位移信号为功率信号。如果该系统加上阻尼装置,其振动能量随时间而衰减(见图 1.3),这时的位移信号就为能量有限信号。但是必须注意,信号的功率和能量,不一定具有真实功率和真实能量的量纲。一个能量信号具有零平均功率,而一个功率信号具有无限大能量。

### (3) 时限信号与频限信号

#### 1) 时限信号

时限信号是指在时域有限区间  $(t_1, t_2)$  内定义,而其外恒等于零的信号。例如,矩形脉冲、

三角脉冲、余弦脉冲等；反之，若信号在时域无穷区间内定义则被称为时域无限信号，如周期信号、指数衰减信号、随机信号等。

## 2) 频限信号

频限信号是指在频域内占据一定的带宽 $(f_1, f_2)$ ，而其外恒等于零的信号。例如，正弦信号 $\sin c(t)$ 、限带白噪声等的频域函数。若信号在频域内的带宽延伸至无穷区间，则称为频域无限信号。

时间有限信号的频谱，在频率轴上可延伸至无限远处；同理，一个有限带宽信号，也在时间轴上延伸至无限远处。一个信号不能够在时域和频域上都是有限的，可阐述为以下定理：一个严格的频限信号，不能同时是时限信号；一个严格的时限信号，不可能同时是频限信号。

## (4) 连续时间信号与离散时间信号

按信号函数表达式中的独立变量取值是连续的还是离散的，可将信号分为连续信号和离散信号。通常独立变量为时间，相应地对应连续时间信号和离散时间信号。

### 1) 连续时间信号

在所讨论的时间间隔内，对任意时间值，除若干个第一类间断点外，都可给出确定的函数值，此类信号称为连续时间信号或模拟信号。常见的正弦、直流、阶跃、锯齿波、矩形脉冲及截断信号等都属连续时间信号。

### 2) 离散时间信号

离散时间信号又称时域离散信号或时间序列。它是在所讨论的时间区间内，在所规定的不连续的瞬时给出函数值，如图 1.6 所示。

离散时间信号又可分为两种：采样信号与数字信号。采样信号是时间离散而幅值连续的信号；数字信号是时间离散幅值量化的信号。计算机或信号分析仪所接收的一般是数字信号。

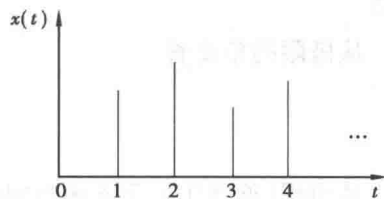


图 1.6 离散时间信号

## (5) 物理可实现信号与物理不可实现信号

### 1) 物理可实现信号

物理可实现信号又称为单边信号，满足条件： $t < 0$  时， $x(t) = 0$ ，即在时刻小于零的一侧全为零，信号完全由时刻大于零的一侧确定。

在实际中出现的信号，大量的是物理可实现信号，因为这种信号反映了物理上的因果律，故也被称为因果信号。实际中所能测得的信号，许多都是由一个激发脉冲或某种激励作用于一个物理系统之后所输出的信号。

### 2) 物理不可实现信号

物理不可实现信号也称为非因果信号，它在事件发生之前，即  $t < 0$  时就预知信号。

## (6) 其他分类

在对信号做频谱分析时，还常常根据信号的能量或功率的频谱来将信号分为低频信号、高



频信号、窄带信号、宽带信号、带限信号等；根据信号的波形相对于纵轴对称性将信号分为奇信号和偶信号；根据信号的函数值是实数还是复数将信号分为实信号和复信号等。

### 1.1.3 信号分析中的常用函数

#### (1) 单位冲激信号( $\delta$ 函数)

##### 1) $\delta$ 函数的定义

自然界中常有这样的现象,某个动作只发生在一个很短的瞬间,而在其他时刻没有任何动作。例如,闪电在很短的时间内有很大的能量释放;又如,锤击在很短的时间有一个很强的冲击力。为了描述这种现象,把该现象抽象化,引入单位冲激信号的概念。单位冲击信号的“狄拉克(Dirac)定义法”为

$$\begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \\ \delta(t) = 0 \quad t \neq 0 \end{cases} \quad (1.7)$$

把满足式(1.7)的信号 $\delta(t)$ 称为单位冲激信号,其冲激强度为1。单位冲激信号也可利用规则信号(如对称矩形脉冲或三角脉冲信号等)“在保证面积不变的前提下使宽度取极限0”的逼近方法来定义,如图1.7(a)所示的一个矩形脉冲 $S_\varepsilon(t)$ ,其面积为1。保持矩形脉冲 $S_\varepsilon(t)$ 的面积为1,当 $\varepsilon \rightarrow 0$ 时, $S_\varepsilon(t)$ 的极限就称为 $\delta$ 函数,如图1.7(b)所示。 $\delta$ 函数也称为单位脉冲函数。

从极限的角度看

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & t = 0 \\ 0 & t \neq 0 \end{cases} \quad (1.8)$$

从面积(通常也称为 $\delta$ 函数的强度)的角度来看

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{-\infty}^{\infty} S_\varepsilon(t) dt = 1 \quad (1.9)$$

如果将 $\delta(t)$ 出现的时间沿时间轴右移时间 $t_0$ ,得到 $\delta(t-t_0)$ (见图1.8),则

$$\delta(t-t_0) = \begin{cases} \infty & t = t_0 \\ 0 & t \neq t_0 \end{cases} \quad (1.10)$$

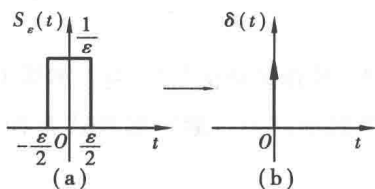


图 1.7 矩形脉冲与 $\delta$ 函数

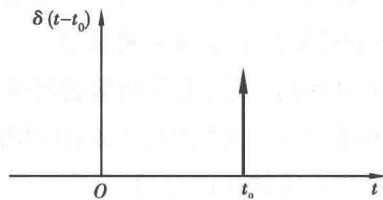


图 1.8 有时延的 $\delta$ 函数

##### 2) $\delta$ 函数的性质

$\delta$ 函数是信号分析中经常会用到的函数,它有一些特殊的性质,利用这些性质可使被分析