



高等学校
电子信息类 规划教材

DIANZIKEJIDAXUECHUBANSHE

XILIEJIAOCAI

本科机械电子工程

机械工程 测试技术基础

李迅波 编著

Testing Technology
in
Mechanical
Engineering



电子科技大学出版社

UESTC PUBLISHING HOUSE

TG8

L370

141393

高等学校
电子信息类 规划教材

机械工程测试技术基础

李迅波 编著

电子科技大学出版社

内 容 提 要

本书系统、全面地论述机械工程测试领域的基本测试理论、方法和测试手段。全书由五部分内容构成。第一章至第三章为机械工程测试技术基本理论和方法；第四章至第六章为机械工程测试系统；第七章为机械工程计算机辅助测试；第八章和第九章为机械量测试技术及机械噪声测量；第十章为机械设备的故障诊断技术。

全书有机地把机械工程测试理论、方法和应用结合在一起，内容新、覆盖面广，分析深入浅出，反映了该学科的技术发展。它适用于机械工程类教学，亦可作为测试技术有关专业的选课教材或教学参考用书，也可供有关教师科技人员参考。

声 明

本书无四川省版权防盗标识，不得销售；版权所有，违者必究，
举报有奖，举报电话：(028) 6636481 6241146 3201496

高 等 学 校
电 子 信 息 类 规 划 教 材

机械工程测试技术基础

李 迅 波 编 著

出 版：电子科技大学出版社（成都建设北路二段四号） 邮编（610054）
责任编辑：舒 标 李 阳 周 立
发 行：新华书店
印 刷：峨眉电影制片厂印刷厂
开 本：787×1092 1/16 印张 26.25 字数 638.8 千字
版 次：1998 年 11 月 第 一 版
印 次：1998 年 11 月 第 一 次
书 号：ISBN 7—81065—003—3/TH·1
印 数：1—3000 册
定 价：28.00 元

出版说明

为做好全国电子信息类专业“九五”教材的规划和出版工作，根据国家教委《关于“九五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》和《普通高等教育“九五”国家级重点教材立项、管理办法》，我们组织各有关高等学校、中等专业学校、出版社、各专业教学指导委员会，在总结前四轮规划教材编审、出版工作的基础上，根据当代电子信息科学技术的发展和面向21世纪教学内容和课程体系改革的要求，编制了《1996—2000年全国电子信息类专业教材编审出版规划》。

本轮规划教材是由个人申报，经各学校、出版社推荐，由各专业教学指导委员会评选，并由我部教材办协商各专指委、出版社后，审核确定的。本轮规划教材的编制，注意了将教学改革力度较大、有创新精神、特色风格的教材和质量较高、教学适用性较好、需要修订的教材以及教学急需，尚无正式教材的选题优先列入规划。在重点规划本科、专科和中专教材的同时，选择了一批对学科发展具有重要意义，反映学科前沿的选修课、研究生课教材列入规划，以适应高层次专门人才培养的需要。

限于我们的水平和经验，这批教材的编审、出版工作还可能存在不少缺点和不足，希望使用教材的学校、教师、同学和广大读者积极提出批评和建议，以不断提高教材的编写、出版质量，共同为电子信息类专业教材建设服务。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部的《1996—2000年全国电子信息类专业教材编审出版规划》，由全国自动控制专业教学指导委员会编审、推荐出版。主审陈光福教授，责任编委熊世和教授。

本教材的参考学时数为60学时，其主要内容可分为五部分共十章。第一部分包含第一、二、三章：信号描述及其分析，测试系统的特性分析，工程测量误差分析与数据处理；系统讲述了机械工程测试的基本理论和方法。第二部分包含第四、五、六章：传感器技术，传感器常用的中间变换电路，信号显示与记录仪器；该部分讲述了机械工程测试系统的组成及应用。第三部分包含第七章，机械工程计算机辅助测试技术，该章为工程信号的采集、恢复与传输，离散傅里叶变换、快速傅里叶变换基础知识，工程信号数字处理及自动测试系统等有关内容。第四部分包含第八章、第九章：机械相关量的电测量，机械噪声的测量；比较全面地介绍了机械量测试技术的方法和手段。第五部分包含第十章，机械设备的故障诊断技术，该章介绍了机械故障诊断原理与方法及应用。

本书在编写和出版过程中，得到了电子工业部教材办公室和电子科技大学教材办公室及机械电子工程系领导大力支持和帮助，在此表示诚挚感谢，同时还衷心感谢主审、责任编委、出版社编辑等同志们的辛勤工作和帮助。由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1997年12月于电子科技大学

绪 论

一、测试技术在国民经济中的地位和作用

科学技术和生产的发展都离不开测试,任何科学理论的建立都要通过大量的试验与测量,对获取的数据进行分析来验证理论的正确性和可靠性。工业生产中的机械化、自动化,必须建立在生产过程中对种种参数的测量、分析基础上进行控制和监视,才能保证产品的质量和生产的效率。所以,测试技术是机械工业发展的一个重要基础技术。

测试技术在工业生产中的作用有如下几个方面:

1. 提供设备在运转过程中或其他情况下的有关信息,以便监视生产过程,使之保持在最佳工作状态运行;或将生产过程的种种数据信号测出,经处理后,分析工作状态是否正常,判断出故障位置和性质,以决定是否继续生产或进行维修。

2. 作为控制生产的依据。将生产过程中各种工艺参数即时测量出来,与要求的数值相比较,进行反馈,自动调节后使生产过程在符合规定要求的参数下工作,即所谓用信息流来控制物质流和能量流(见图0-1)。

3. 对工艺过程或设备的分析。机械工程中,对一些待改进的工艺过程、工艺设备需做系统的测试,才能对原有的状态作出分析、评价,找出改进措施。在改进措施实施后,是否达到了预期效果,仍需做系统的测试来进行分析和鉴定。这些测试结果也是今后改进新设备和工艺设计的依据(见图0-1)。

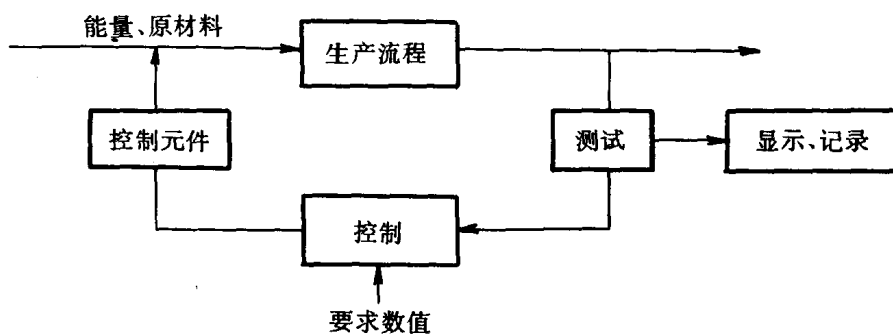


图0-1 工业控制框图

4. 作为线性系统及结构动力分析,机械工程测试大量采用频谱分析技术。线性系统的响应计算可归纳为频域内简单的乘法运算,利用线性系统的频率保持性,进行系统的频谱分析对每一个频率分别进行处理,而不必考虑在其他频率上所发生的情况。对系统结构动力学研究主要有以下三个方面:

- (1) 响应预估: 已知激励及系统特性, 研究响应。
- (2) 系统辨识: 已知激励及响应, 研究系统特性。
- (3) 载荷识别: 已知系统的特性和响应, 研究激励。

以上内容在频域内解决, 可将微分方程的求解变为代数方程的求解, 将卷积积分转变为普通乘法, 将多度耦合的复杂系统转变为单度独立的简单系统的叠加处理, 因此频谱分析在解决实际问题中获得了广泛的应用。

值得注意的是现在从事机械工程领域内工作的科技人员不仅面临一般的静态物理量的测量, 而且随着科技、生产的发展越来越多地面临着许多不可避免的动态物理量的测量。动态测试在研究的观点上和技术手段上与静态测量有很大差别, 这就需要在理论上和实践上进一步学习, 认识动态测量所遵循的特殊规律。因此测试技术所涉及的面极广, 有不断的测试新问题等待解决, 测试技术是否先进是国家科学技术水平的重要标志。

二、测试系统的组成和技术特性

工程信号测试系统, 可以分为以下两类:

1. 模拟信号测试系统

图0-2 给出了这类系统的原理框图。

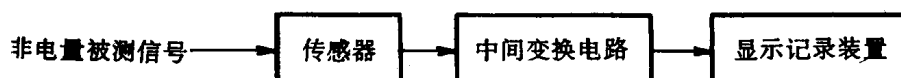


图0-2 模拟信号测试系统

2. 数字信号测试系统

数字信号测试系统是先把测试中获取的模拟信号变换成数字信号, 然后用计算机进行处理, 所以系统的输入是取自工程实际的模拟信号。图0-3 给出了这类系统的原理框图。各部分具体功能如下:

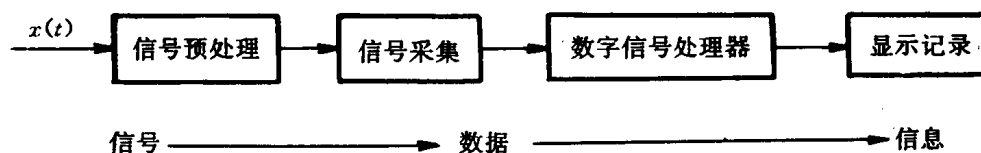


图0-3 数字信号处理系统

- (1) 预处理: 目的是把模拟信号变成适合于数字处理的形式, 以便进行数字信号处理。预

处理包括以下几个部分：Ⅰ、解调器。Ⅱ、输入放大器或衰减器。Ⅲ、抗混滤波器。Ⅳ、隔直装置。其中输入放大器或衰减器、抗混滤波器则是预处理部份的关键部件。

(2)信号采集：信号采集是将预处理后的模拟信号变为数字信号，其核心是模/数(A/D)转换器。信号处理系统的性能指标与A/D密切相关。信号采集部分包含以下几部分电路。Ⅰ、采样保持电路。Ⅱ、时基信号发生器。产生定时脉冲信号，控制采样。Ⅲ、触发系统，决定采样的开始点。Ⅳ、控制器。对多道数据采样进行控制。

(3)数字信号处理器：这是整个系统的核心，它既可用硬件组成的数字信号处理器，也可用计算机来完成该系统所需要的各种分析和运算。

(4)显示结果：结果显示是为显示分析处理结果的数据、图形而设置的。一般采用CRT屏幕显示；打印机打印结果数据或图形，绘图机绘出相应的曲线等。

总之，原始信号输入无论是模拟信号处理系统或数字信号处理系统，在进行适当的变换后，即能输出所希望的结果——信息。

目前，国内外已生产了许多型号的数字信号处理系统，按其数字信号处理部分的形式，可以分为两类。一类是专用的信号处理机，另一类是以通用微型计算机为主的信号处理系统。专用的信号处理机，一般用下面三种方式之一进行工作。

其一为软件控制。根据输入的软件程序进行分析计算。这种机器理论上功能不受限制，适合于重复处理大量的实验数据。如日本生产的7T08S就是这种类型的产品。

其二为硬件控制。这种机器处理速度较快，但功能比较单一，只能作几种规定的分析处理工作。如丹麦“B&K”公司生产的2031等。

其三为软、硬结合控制。这种机器功能全面，处理速度快，即有专用程序，又可自编程序，使用方便，但操作复杂、价格昂贵。如美国“HP”公司生产的5451C就属此类。

以通用微机为主，配备部分外设组成信号处理系统，是近年发展起来的一种信号处理系统。系统中的微型计算机即可作信号处理、又可作一般科学计算，提高了微型计算机的利用率。对信号的分析处理程序可以自行编写，处理功能不受限制。随着计算机技术的高速发展，其CPU运算速度大大提高，信号处理速度大大加快，这类系统将得到较大地发展。

三、测试方法、计量标准、基本术语及其定义

测试是人们认识客观事物的一种方法，是从客观事物中摄取有关信息的认识过程。在这一过程中，需要专门设备，通过合适的测量方法和必要的数据处理，由测得的信号求取所研究对象的有关信息的量值。根据测量的对象不同，采用的测试方法也就不同。测试方法以测试实时性分，可分为在线测试、非在线测试；以测试信号分，可分为模拟信号测试、数字信号测试；以域来分，可分为时域测试、频域测试；以测试手段来分，可分为接触测试、非接触测试等。实际采用哪种测试方法，视具体情况而定。

测试最终结果是所研究对象的有关信息的量值。量值是否准确取决于测试系统的正确标定，而标定又涉及到计量标准。国际测量制(International Measuring Sys)的四个基本量是长度、时间、质量和温度。而其他所有量的单位和基准都是由这四个基本量导出的。例如在力的测量中，力是用方程 $F=MA$ 来定义的，因而力的基准量(标准力)取决于质量和加速

度的基准量,质量是基本量,以国际标准为依据,加速度不是一个基本量,而是由长度基本量和时间基本量导出的量。地球上的重力加速度 g 可方便地作为加速度的标准参考值。这样,地球上选取一个标准质量,标准力即可确定。为了保证国民经济各部门测力的准确一致性,国家在各地区计量中心都设有一套计算基准和标准,以使根据基准——标准工作来进行工作系统量值的标定。不同物理量,有不同的标准,这在设计测试系统时,应该注意。

测试涉及到信号、信息这两个基本概念,所谓信号,是指传递某个实际系统状态或行为信息的一种物理现象或过程。它的基本表现形式是变化着的电压或电流。而信息是人类社会、自然界一切事物运动与状态的特征,是提供判断或决策的一种资料。信号是信息的实际载体,信息则是信号经过处理之后的有用部分,脱离信息的信号是毫无实际意义的。

四、现代测试技术的发展方向

现代测试技术是建立在新型传感器技术、计算机基础上的一种信号采集、处理的综合性技术。其发展方向有以下几个方面:

1. 传感器向新型、微型、智能型发展

现代的科学技术和工业自动化的发展,对测试技术提出了更高更新的要求。例如,在某些测试中提出双参数传感器问题,即同一个传感器同时测量两个不同的参数,如同时测量压力和温度、力和位移、压力和速度等。在机器人工程的发展中,需要研制灵敏度高的新型视觉、触觉、听觉、嗅觉传感器。在航空、宇航、生物医学工程中要求使用的传感器尺寸要尽量小、重量要尽量轻。如美国的航天飞机的控制系统就由几千个传感器组成,如果传感器不实现小型化或微型化,它是不可能应用的。

目前,许多传感器已向智能化方向发展。如现在已开发出一种电子测压器,它是集压力转换、信号放大、数据采集与储存于一体,组成一个智能传感器,其外型尺寸为 $20 \times 10 \times 10$ (mm)。

2. 测量仪器向高精度和多功能发展

测量仪器及测量系统的精度提高,使测得数据的可信度也相应提高,在产品的研制过程中可减小试验次数,从而缩短研制周期,降低产品成本,因此测量系统精度提高具有重要实际意义。

在提高测量仪器精度的同时应扩大仪器的功能。以前采用的测试系统是由多台仪器所组成;在使用中需对每台仪器进行调试,即不方便又容易出错。近几年来,出现一种计算机辅助测试系统(CAT),它是把诸如示波器、记录仪等多个测试仪缩小成一块一块的卡(一本书的大小),插在带格子的框架内,各卡通过连接器与计算机的母线相连,不仅可使各仪器的电源、旋钮、表头、显示屏大大简化,而且可通过计算机的键盘来操作各卡式仪器的功能,并按预定程序来控制复杂的测试系统。

3. 参数测量与数据处理向自动化发展

一个产品的大型、综合性试验,准备时间长,待测的参数多,少则几十,多则几百个数据通道。众多的数据若依靠手工处理,则是不可能的。随着现代测试技术的发展,越来越多的测试系统是采用以计算机为核心的多通道自动测试系统,这样的系统能实现自动校准,自动修正,故障诊断,信号调制,多路采集,自动分析、处理,并打印与绘图。这些功能都是通过计算机预定的程序来完成的。

五、课程研究对象和性质

综上所述,本课程所研究的对象是机械工程测试中常用的传感器,中间变换电路及记录仪的工作原理,测试系统的静、动态特性的评价方法,机械工程信号分析,测量误差及数据的处理,测试信号的计算机处理,以及常见的物理量的动态测试方法。

对高等学校机械工程各有关专业来说,《机械工程测试技术基础》是一门技术基础课。通过本课程学习,培养学生能正确地掌握测试系统(包括模拟系统和数字系统)的设计方法,掌握进行静态、动态测试所需要的基本知识和技能,为学生进一步学习、研究和处理机械工程测试技术问题打下基础。

从进行机械工程测试工作所必要的基本条件出发,学生在学完本课程后应具有下列几个方面的知识:

1. 掌握信号的时域和频域的描述方法,建立明确的信号频谱概念;掌握数字系统及信号分析的方法;掌握频谱分析和相关分析的基本原理和方法。了解功率谱分析原理及其应用。
2. 掌握测试装置和静、动态评价方法和不失真测试条件,并能正确地运用于测试装置的设计或选择;建立对机械工程测试工作的完整概念,并能运用于机械工程中某些参数的测试。
3. 掌握工程信号转换为数字信号的原理和方法,了解数字信号处理方法。
4. 了解传感器、中间变换电路、记录仪器的工作原理,并能正确地选用和组合。

本课程具有很强的实践性。教材编写着重理论联系实际。学生在学习过程中,必须参加必要的实验,并注意物理概念,这样,才能真正掌握有关知识,具有处理实际工作的能力。

目 录

绪 论

第一章 信号描述及其分析

第一节	引言	1
第二节	信号及分类	1
第三节	连续信号及幅值分布	2
第四节	信号的相关分析	9
第五节	信号的频域描述	19
习题一		39

第二章 测试系统的特性分析

第一节	引言	42
第二节	测试装置与线性系统	42
第三节	测试系统的静态特性及其分析	44
第四节	测试系统的动态特性及其分析	47
习题二		63

第三章 工程测量误差分析与数据处理

第一节	概述	64
第二节	测量误差的基本概念	64
第三节	系统误差	67
第四节	随机误差理论	76
第五节	标准偏差的计算方法	79
第六节	测试系统误差的综合方法	82
第七节	测量数据处理方法	92
习题三		100

第四章 传感器技术

第一节	概述	101
第二节	传感器发展近况及其分类	101
第三节	位移传感器	101
第四节	速度传感器	132
第五节	力传感器	136

第六节	加速度传感器	142
第七节	传感器的选用原则	145
习题四		146

第五章 传感器常用的中间变换电路

第一节	概述	149
第二节	电桥电路	149
第三节	调制与解调	158
第四节	运算放大器	172
第五节	滤波器	183
习题五		193

第六章 信号显示与记录仪器

第一节	概述	195
第二节	模拟式电压表	195
第三节	数字万用表	197
第四节	笔式记录仪	199
第五节	光线示波器	201
第六节	数字式存储示波器	206
第七节	磁带记录仪	209
习题六		213

第七章 计算机辅助测试技术

第一节	概述	214
第二节	工程信号的采集	216
第三节	信号恢复与传输	231
第四节	频谱分析技术	237
第五节	数字滤波	259
第六节	自动测试系统	284
习题七		294

第八章 机械相关量的电测量

第一节	概述	297
第二节	力的测量	297
第三节	线位移与角位移、速度、加速度的测量	313
第四节	温度的测量	333
习题八		347

第九章 机械噪声的测量

第一节	机械噪声测量的内容	349
第二节	机械噪声测量的几个基础量	350
第三节	机械噪声测量及频谱分析技术	351
第四节	机械噪声测量仪器的工作原理及测试方法	357
习题九		367

第十章 机械设备故障诊断及监视

第一节	概述	368
第二节	机械故障诊断原理与方法	372
第三节	机械设备故障诊断举例	392
习题十		403

参考文献

第一章 信号描述及其分析

第一节 引言

机械工程信号,如力、加速度、温度、位移等信号大多表现为非电量信号,这类信号需要转换成电信号,才能被记录分析和处理。

工程测试包含了测量和试验,是从客观事物中获取有关信息的认识过程。而信息又蕴含在电信号之中,人们常都通过它的载体——信号的分析,来获取工程信息。

第二节 信号及分类

在人类社会的发展过程中,离不开信号。信号是可以描述范围极为广泛的一类物理现象。它所含的信息总是寄寓在某种形式的波形之中。例如,人的声道系统所产生的语音信号就是一种声压的起伏变化。图1-1示出一个通过传感器感受的声压变化所转换成电的信号。由图可见,不同的语音对应不同的声压变化波形。又如,一幅黑白照片,照片上各点的亮度变化波形构成了影像信息。

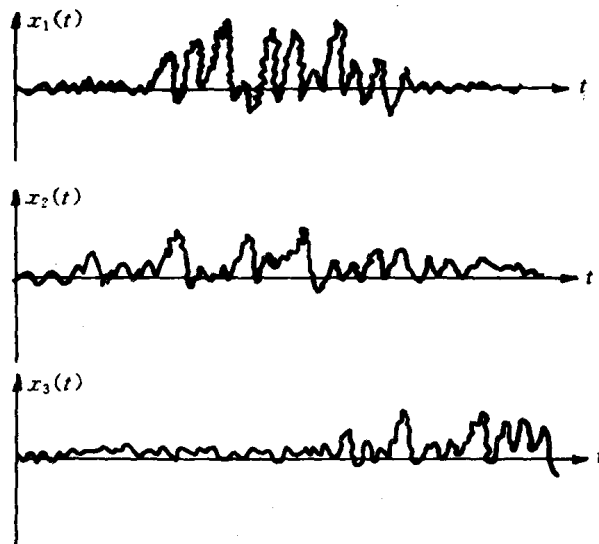


图1-1 不同语音所对应的不同声压波形

在数学上,信号可以表示为一个或多个变量的函数,称为信号函数。比如,上面所举的语音信号,就是时间一维函数;黑白照片图像就是两维空间变量的函数。为了方便,习惯上常用

“时间”这个术语表示信号函数的独立变量,它可以是多维的,虽然在事实上它不一定是时间。在上面的例子中信号是随时间连续变化的。在有些情况,信号则仅仅在离散时间点上取值。比如每周上海股票市场值就是离散时间信号的一个例子。又例如像交通事故率、年平均收入、受教育年数都可表示成离散时间信号;连续的电信号经A/D采样,亦变成离散时间信号。弄清楚自然界的信号的分类,为我们以后从信号分析中获取信息,是至关重要的。

● 根据信号的特性,信号可分为连续信号和离散信号两大类。连续信号是指信号函数的变量为连续的信号,而离散信号中的变量是离散变化的。连续信号又可以分为,可以用数学关系式确定其规律的确定性信号和其规律无法确定的随机信号。确定性信号又可分为周期信号和非周期信号。随机信号可分为平稳的和非平稳的两类信号。通过以上简要说明可把信号按图1-2所示进行分类。

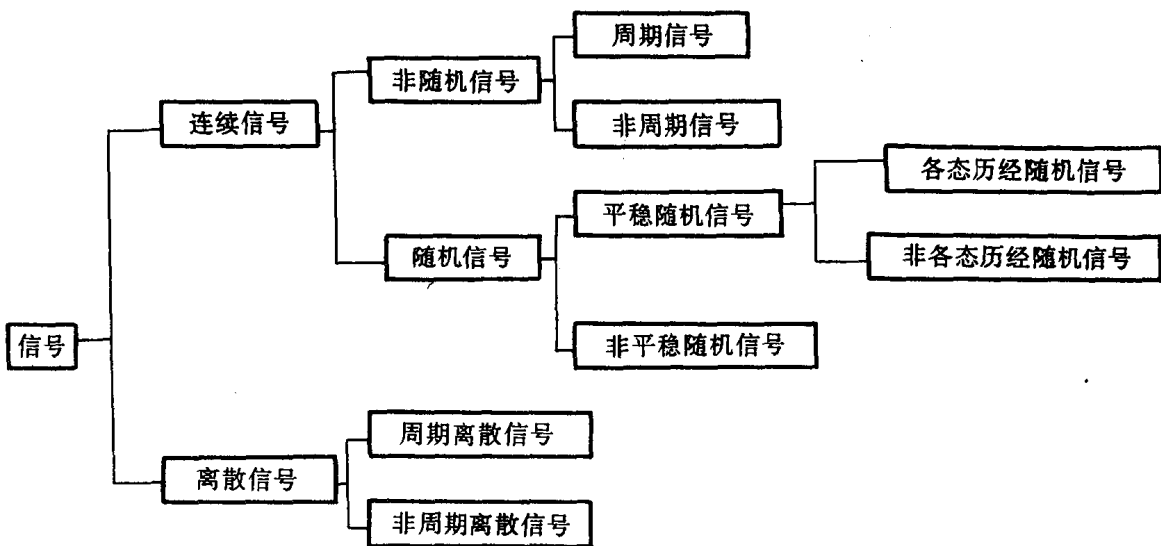


图1-2 信号分类

第三节 连续信号及幅值分布

一、确定性信号

确定性信号是指可用明确的数学关系来描述的信号,反之不能用精确的数学关系式描述的信号称之为随机信号。

在确定性信号中,信号的幅值是周期重复变化的,这种信号称之为周期信号。例如,单自由度振动系统(图1-3),作无阻尼自由振动时,其位移 $x(t)$ 就是确定性的,并可用数学表达式来描述振动质量的瞬时精确位置,即

$$x(t) = x_0 \cos\left(t \sqrt{\frac{k}{m}} + \Phi_0\right) \quad (1-1)$$

式中： x_0 ——初始幅值 m ——质量
 Φ_0 ——初始相位角 t ——时间
 k ——弹簧刚度

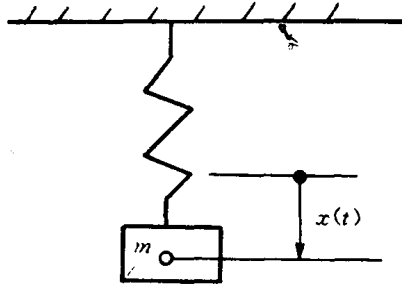


图1-3 单自由度振动系统

分析式(1-1)可知,当 $t = t + nT$ 。其中 $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, n 为任意整数时,有:

$$x(t) = x(t + nT)$$

即 $x(t)$ 是一个周期重复出现的信号。所以,满足上式的信号称之为周期信号,其中 T 为周期,有关系式: $T = 2\pi/\omega$, $f = 1/T$ 。 ω 是角频率, f 为频率,单位是赫兹(Hz)。

非周期信号是一种信号取值时间有限的信号,其波形总可以以足够精确度用确切的数学表达式表达出来。物理和工程上很多现象都可看作非周期信号。如机械脉冲或电脉冲信号,阶跃信号和指数衰减信号等。

常见的非周期信号,表达如下:

1. 单位阶跃信号

$$\text{数学表达式为: } x(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

图形见图1-4。

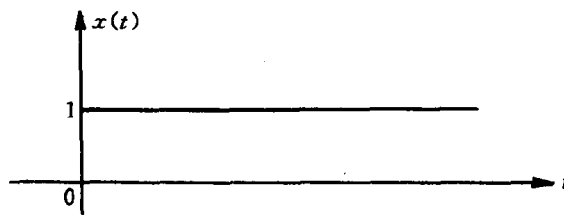


图1-4 阶跃信号

工程上,在某时刻给系统加载或卸载来实现,常采用这种信号来测试系统的动态特性,即分析其阶跃响应曲线等。

2. 单位脉冲信号

物理学中常运用质点、瞬时力的抽象模型。即视质点的体积为零,密度(质量/体积)为无限大,而总质量(密度的体积积分)为某一确定的单位值;视瞬时力的作用时间为零(无限小),力为无限大,冲量(力的时间积分)又为某一确定有限值。为描述这一类概念,物理学和控制工程中都定义了单位脉冲信号,简称为 $\delta(t)$ 函数,数学表达式为:

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

且
$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - t_0) dt = 1$$

若
$$t_0 = 0,$$

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

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1$$

两者区别在函数的作用点产生的时刻不同(图1-5所示)。在实际应用中,常采用瞬时冲击来近似实现 $\delta(t)$ 信号(如图1-6所示)。

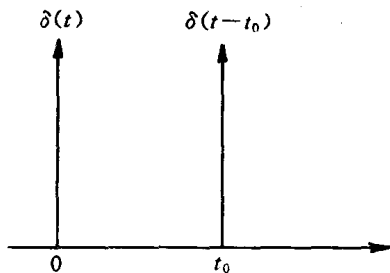


图1-5 δ 信号

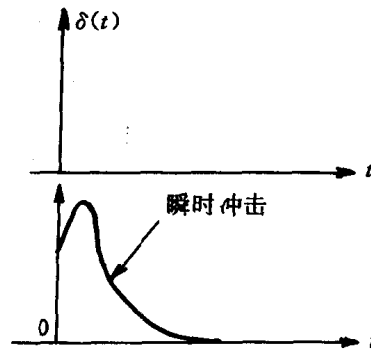


图1-6 瞬时冲击近似 $\delta(t)$ 信号

在工程测试中, $\delta(t)$ 信号非常有用,常用系统的单位脉冲响应来表征一个系统的动态特性。 $\delta(t)$ 函数有很多特殊性质,例如筛选性质。有延时的 δ 函数 $\delta(t-t_0)$,对于任意信号 $x(t)$,总有:

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \delta(t - t_0) dt = \int_{-\infty}^{\infty} x(t_0) \cdot \delta(t - t_0) dt = x(t_0)$$

特殊地,当 $t_0=0$ 时,有:

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \delta(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} x(0) \cdot \delta(t) dt = x(0)$$

该性质可用来描述模拟信号的离散采样过程。

$\delta(t)$ 信号具有无限广的频谱, $\delta(t)$ 信号又称为理想的“白噪声”。