



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



机械设计制造及其自动化

专业系列教材

测试技术

第三版

主编 贾民平 张洪亭

高等教育出版社

“十二五”普通规划教材

机械设计制造及其自动化专业系列教材

测 试 技 术

Ceshi Jishu

第三版

主编 贾民平 张洪亭

高等教育出版社·北京

内容简介

本书是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材,在第二版的基础上修订而来的。

本书系统地阐述了测试技术的研究对象、理论基础以及典型物理量的测试方法。

本书以加强学科基础、培养读者动手能力为宗旨,着重叙述基本的测试原理、信号的分析与处理方法、测试系统的特性以及测试技术的发展趋势,并在此基础上,对位移、振动、噪声、力、扭矩、压力、温度、流量等的测试分别进行了阐述。为了帮助读者掌握各章内容,每章后设有一定量的习题。

本次修订增加了课程项目设计附录,期望通过3个相关的项目设计培养学生的自学能力、实验动手能力、分析问题与解决问题能力,以及写作能力。

本书可作为高等学校本科机械类各专业、自动控制、仪器仪表类有关专业“测试技术”课程的教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

测试技术 / 贾民平,张洪亭主编.--3版.--北京:高等教育出版社,2016.8

ISBN 978-7-04-045762-9

I. ①测… II. ①贾… ②张… III. ①测试技术-高等学校-教材 IV. ①TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 146901 号

策划编辑 卢广	责任编辑 卢广	封面设计 李卫青	版式设计 童丹
插图绘制 杜晓丹	责任校对 吕红颖	责任印制 毛斯璐	

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 北京中科印刷有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 21.75
字 数 540千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>
<http://www.hepmall.com>
<http://www.hepmall.cn>
版 次 2001年12月第1版
2016年8月第3版
印 次 2016年8月第1次印刷
定 价 41.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物料号 45762-00

第三版前言

本书于2001年出版第一版,2009年出版第二版,先后被评为普通高等教育“十五”、“十一五”国家级规划教材和“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

本次修订增加了课程项目设计附录,期望通过三个相关的项目设计培养学生的自学能力、实验动手能力、分析问题与解决问题能力,以及写作能力。

全书除绪论外共13章。前6章着重介绍测试技术的基本知识,包括信号及其描述、信号的分析与处理、测试系统的特性、常用传感器、信号的调理与记录、现代测试系统等,是测试技术的必修知识,强调了动态信号的测试、计算机应用及数字信号分析。第7~12章介绍机电工程中典型的物理量(位移、振动、噪声、力、扭矩、压力、温度、流量)的测量方法和应用,不同的专业可以根据教学要求有选择地进行讲授。第13章介绍了测试过程中的误差理论及数据处理方法。

测试技术是一门实践性很强的课程,为了保证教学质量,必须进行适量的实验。因此,本书增加了学习本课程的实验指导原则。

本次修订由贾民平、张洪亭担任主编,参加修订工作的有东南大学贾民平(绪论,第5、8、13章,附录)、东北大学张洪亭(第1、2、9章)、东北大学孙红春(第3、4章)、东南大学许飞云(第6章)、东南大学胡建中(第7、12章)、南京林业大学陈勇(第10、11章)。

本书由史铁林主审。审稿人对全书进行了全面、认真、细致的审读工作,提出了许多宝贵意见,编者在此表示深切谢意。

本书的出版得到参编学校、高等教育出版社的大力支持,编者在此表示感谢。同时,也向参考文献的作者致谢。

由于编者水平所限,时间仓促,书中难免有错误和不妥之处,恳请各位读者批评指正。联系邮箱 mpjia@seu.edu.cn。

编 者

2016年4月

目 录

绪论	1	2.3.1 功率谱密度函数	47
第1章 信号及其描述	5	2.3.2 功率谱的应用	50
1.1 信号的分类与描述	5	2.3.3 相干函数	53
1.1.1 信号的分类	5	2.3.4 倒谱分析	55
1.1.2 信号的描述方法	8	2.4 信号的时频分析概述	59
1.2 周期信号	9	2.4.1 时频分析的基本概念	59
1.2.1 周期信号的三角函数展开	9	2.4.2 常用时频分析法的应用	60
1.2.2 周期信号的复指数展开	11	2.5 数字信号处理基础	61
1.3 瞬变信号	14	2.5.1 数字信号处理的基本步骤	61
1.3.1 瞬变信号的傅里叶变换	14	2.5.2 时域采样和采样定理	62
1.3.2 傅里叶变换的主要性质	16	2.5.3 截断、泄漏和窗函数	64
1.4 几种典型信号的频谱	20	2.5.4 频域采样与栅栏效应	67
1.4.1 单位脉冲函数(δ 函数)的频谱	20	2.5.5 DFT 和 FFT	69
1.4.2 矩形窗函数和常值函数的频谱	22	习题	73
1.4.3 指数函数的频谱	23	第3章 测试系统的特性	75
1.4.4 符号函数和单位阶跃函数的 频谱	24	3.1 线性系统及其主要性质	75
1.4.5 正、余弦函数的频谱	25	3.2 测试系统的静态特性	77
1.4.6 周期单位脉冲序列的频谱	25	3.2.1 非线性度	77
1.5 随机信号	26	3.2.2 灵敏度	78
1.5.1 随机信号的概念及分类	26	3.2.3 分辨力	78
1.5.2 随机信号的主要统计参数	28	3.2.4 回程误差	79
习题	29	3.2.5 漂移	79
第2章 信号的分析与处理	32	3.2.6 信噪比	79
2.1 信号的时域分析	32	3.3 测试系统的动态特性	79
2.1.1 特征值分析	32	3.3.1 传递函数	80
2.1.2 概率密度函数分析	35	3.3.2 频率响应函数	80
2.2 信号的相关分析	38	3.3.3 脉冲响应函数	81
2.2.1 相关系数	38	3.3.4 环节的串联和并联	81
2.2.2 自相关分析	39	3.4 测试系统在典型输入下的响应	82
2.2.3 互相关分析	41	3.5 实现不失真测试的条件	84
2.2.4 相关分析的应用	44	3.6 测试系统特性参数的测定	86
2.3 信号的频域分析	47	3.6.1 测试系统静态特性的测定	86
		3.6.2 测试系统动态特性的测定	87

3.7 负载效应	89	5.2.2 测量放大器	137
3.7.1 负载效应	89	5.2.3 隔离放大器	138
3.7.2 减轻负载效应的措施	90	5.3 调制与解调	140
习题	90	5.3.1 幅值调制与解调	140
第4章 常用传感器	92	5.3.2 频率调制与解调	144
4.1 传感器概述	92	5.4 滤波器	146
4.1.1 传感器的分类	92	5.4.1 滤波器分类	147
4.1.2 传感器技术的主要应用	93	5.4.2 理想滤波器与实际滤波器	147
4.1.3 传感器技术的发展趋势	94	5.4.3 恒带宽比和恒带宽滤波器	152
4.2 传感器的选用	95	5.4.4 无源滤波器与有源滤波器	154
4.2.1 传感器的主要技术指标	95	5.4.5 数字滤波器	157
4.2.2 传感器的选用原则	95	5.5 信号记录装置	159
4.3 电阻式传感器	97	5.5.1 磁光盘记录器	159
4.3.1 电阻应变式传感器	97	5.5.2 高速摄像机	161
4.3.2 压阻式传感器	101	5.5.3 数字存储示波器	161
4.3.3 变阻式传感器	102	5.6 工业控制系统中模拟信号标准	163
4.4 电感传感器	104	习题	164
4.4.1 自感式传感器	104	第6章 现代测试系统	166
4.4.2 互感式传感器	106	6.1 计算机测试系统的基本组成	166
4.4.3 压磁式传感器	109	6.1.1 多路模拟开关	166
4.5 电容传感器	111	6.1.2 A/D 转换与 D/A 转换	167
4.6 压电式传感器	116	6.1.3 采样保持(S/H)	172
4.7 磁电传感器	118	6.1.4 多通道数据采集系统的组成方式	173
4.7.1 磁电感应传感器	119	6.2 计算机测试系统的总线技术	174
4.7.2 霍尔传感器	120	6.2.1 总线的基本概念及其标准化	174
4.8 光电传感器	122	6.2.2 总线的通信方式	175
4.8.1 光电效应及光电器件	122	6.2.3 测控系统内部总线	175
4.8.2 光电传感器的应用	124	6.2.4 测控系统外部总线	178
4.9 光纤传感器	126	6.3 虚拟仪器	182
4.10 新型传感器	128	6.3.1 虚拟仪器的出现	183
4.10.1 微传感器	128	6.3.2 虚拟仪器的硬件系统	184
4.10.2 智能传感器	129	6.3.3 虚拟仪器的软件系统	185
习题	131	6.3.4 基于 LabVIEW 的虚拟仪器示例	186
第5章 信号的调理与记录	132	6.3.5 虚拟仪器的发展趋势	186
5.1 电桥	132	6.4 网络化测试仪器	188
5.1.1 直流电桥	132	6.4.1 基于现场总线技术的网络化 测控系统	189
5.1.2 交流电桥	134	6.4.2 面向 Internet 的网络测控系统	190
5.2 信号的放大与隔离	136	6.4.3 无线传感网络测控系统	191
5.2.1 基本放大器	136	6.4.4 网络化测试仪器与系统实例	191

习题	195	9.4.1 噪声测量应注意的问题	250
第7章 位移的测量	196	9.4.2 声功率的测量和计算	251
7.1 常用位移传感器	196	9.4.3 噪声诊断的应用	252
7.2 位移测量应用实例	198	9.4.4 噪声测量环境的影响及修正	252
7.2.1 轴位移的测量	198	习题	254
7.2.2 回转轴径向运动误差的测量	199	第10章 力、扭矩、压力的测量	255
7.2.3 气动法位移测量	201	10.1 力的测量	255
7.2.4 厚度测量	202	10.1.1 应力、应变的测量	255
7.2.5 刚度测量	203	10.1.2 力的测量装置	260
7.2.6 机床位移测量	204	10.2 扭矩的测量	265
7.2.7 光纤光栅位移测量	209	10.2.1 应变式扭矩测量	266
习题	211	10.2.2 压磁式扭矩测量	269
第8章 振动的测量	212	10.2.3 磁电感应式扭矩测量	269
8.1 振动的基础知识	212	10.2.4 光电式扭矩测量	270
8.1.1 振动的类型及其表征参数	212	10.3 压力的测量	270
8.1.2 单自由度系统的受迫振动	214	10.3.1 压力测量弹性元件	270
8.2 振动的激励与激振器	216	10.3.2 压力测量装置	273
8.2.1 振动的激励	216	习题	274
8.2.2 激振器	219	第11章 温度的测量	276
8.3 振动测量与测振传感器	222	11.1 温度标准和测量方法	276
8.3.1 常用测振传感器	222	11.1.1 温度的测量方法	276
8.3.2 振动量测量及应用	229	11.1.2 温标及其传递	277
8.3.3 机械振动参数的估计	233	11.2 热电偶温度计	279
8.3.4 测振装置的校准	236	11.2.1 热电效应和热电偶	279
习题	237	11.2.2 热电偶基本定律	281
第9章 噪声的测量	239	11.2.3 标准化热电偶	282
9.1 噪声测量的主要参数	239	11.3 热电阻温度计	286
9.1.1 声压与声压级	239	11.3.1 金属电阻温度计	286
9.1.2 声强与声强级	240	11.3.2 半导体热敏电阻	288
9.1.3 声功率及声功率级	240	11.4 非接触式测温法	289
9.1.4 多声源的噪声强度	241	11.4.1 全辐射温度计	290
9.2 噪声的分析方法与评价	242	11.4.2 光学高温计和光电高温计	291
9.2.1 噪声的频谱分析	242	11.4.3 比色高温计	292
9.2.2 噪声的响度分析及评价	243	11.4.4 红外测温	292
9.3 噪声测量仪器	247	习题	293
9.3.1 传声器	247	第12章 流量的测量	294
9.3.2 声级计	248	12.1 容积式流量计	294
9.3.3 声级计的校准	249	12.1.1 椭圆齿轮流量计	294
9.4 噪声测量及其应用	250	12.1.2 腰轮转子流量计	295

12.1.3 齿轮流量计	296	13.1.1 测量误差的表示方法	309
12.2 压差式流量计	297	13.1.2 测量误差的分类	310
12.2.1 压差式流量计的计算公式	297	13.1.3 测量结果的评价	311
12.2.2 节流装置	298	13.2 测量误差的影响及其消除	312
12.3 流体阻力式流量计	298	13.2.1 随机误差	312
12.3.1 转子流量计(浮子流量计)	298	13.2.2 系统误差	313
12.3.2 靶式流量计	299	13.2.3 疏失误差	317
12.4 速度式流量计	301	13.3 数据处理的一般方法	321
12.4.1 涡轮流量计	301	13.3.1 最小二乘线性拟合	321
12.4.2 超声波流量计	302	13.3.2 最小二乘多元线性拟合	322
12.4.3 电磁流量计	304	13.3.3 简单的一元非线性拟合	324
12.5 涡街流量计	305	习题	325
12.5.1 工作原理	305	附录 1 实验指导原则	327
12.5.2 结构特性分析	306	附录 2 课程项目设计	330
习题	308	常用术语(词汇)中英文对照表	332
第 13 章 误差理论与数据处理	309	参考文献	339
13.1 测量误差的基本概念	309		

绪 论

1. 测试的基本概念

测试技术属于信息科学的范畴,与计算机技术、自动控制技术、通信技术共同构成了完整的信息技术学科。

测量是指确定被测对象属性量值为目的的全部操作。测试是具有试验性质的测量,或者可以理解为测量和试验的综合。

在工程实际中,无论是工程研究、产品开发,还是质量监控、性能试验等,都离不开测试技术。测试技术是人类认识客观世界的手段,是科学研究的基本方法。

2. 测试技术的内容和任务

(1) 测试技术的内容

测试技术研究的主要内容为被测量的测量原理、测量方法、测量系统及数据处理四个方面。

测量原理是指实现测量所依据的物理、化学、生物等现象及有关定律的总体。例如,用压电晶体测振动加速度时所依据的是压电效应;用电涡流位移传感器测静态位移和振动位移时所依据的是电磁效应;用热电偶测量温度时所依据的是热电效应等。不同性质的被测量用不同的原理去测量,同一性质的被测量亦可用不同的原理去测量,如位移、温度等的测量。

测量原理确定后,根据对测量任务的具体要求和现场实际情况,需要采用不同的测量方法,如直接测量法或间接测量法、电测法或非电测法、模拟量测量法或数字量测量法、等精度或不等精度测量法等。

在确定了被测量的测量原理和测量方法以后,就要设计或选用装置组成测量系统。

最后,实际测试得到的数据必须加以处理,才能得到正确可靠的结果。

(2) 测试技术的任务

测试技术的任务主要有以下五个方面:

1) 在设备设计中,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,为技术参数的优化和效率的提高提供基础数据。

2) 在设备改造中,为了挖掘设备的潜力,以便提高产量和质量,经常需要实测设备或零件的载荷、应力、工艺参数和电机参数,为设备强度校验和承载能力的提高提供依据。

3) 在工作和生活环境的净化及监测中,经常需要测量振动和噪声的强度及频谱,经过分析找出振源,并采取相应的减振、防噪措施,改善劳动条件与工作环境,保证人的身心健康。

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。从实验中可以发现规律,验证理论研究结果,实验与理论可以相互促进,共同发展。

5) 在工业自动化生产中,通过对工艺参数的测试和数据采集,实现对设备的状态监测、质量控制和故障诊断。

3. 测试系统的组成

测试系统是指由相关的器件、仪器和测试装置有机组合而成的具有获取某种信息之功能的整体(图 0.1)。

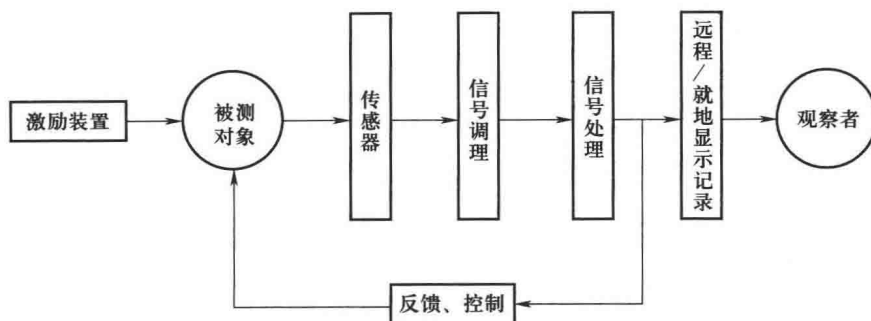


图 0.1 测试系统的组成

一个被测对象的信息总是通过一定的物理量——信号所表现出来。有些信息可以在被测对象处于自然状态时所表现出的物理量中显现出来,而有些信息却无法显现或显现得不明显。在后一种情况下,需要通过激励装置作用于被测对象,使之产生出要获取的信息载于其中的一种新的信号。

传感器是将被测信息转换成某种电信号的器件。它包括敏感器和转换器两部分。敏感器一般是将被测量如温度、压力、位移、振动、噪声、流量等转换成某种容易检测的信号,而转换器则是将这种信号变成某种易于传输、记录、处理的电信号。

信号调理环节是把来自传感器的信号转换成更适合于进一步传输和处理的形式。这种信号的转换多数是电信号之间的转换,如幅值放大,将阻抗的变化转换成电压的变化或频率的变化等。

信号处理环节是对来自信号调理环节的信号进行各种运算、滤波和分析。

信号显示、记录环节是将来自信号处理环节的信号以观察者易于观察的形式来显示或存储测试的结果,包括就地仪表显示记录、仪表框中仪表显示记录,以及通过网络远程传输、显示记录。

而反馈、控制环节主要用于闭环控制系统中的测试系统。

图 0.1 中信号调理、信号处理、反馈、控制、显示等环节,目前的发展趋势是经 A/D 转换后采用计算机等进行分析、处理,并经 D/A 转换控制被测对象。

在这里,需要指出的是为了准确地获得被测对象的信息,要求测试系统中的每一个环节的输出量与输入量之间必须具有一一对应的关系,而且其输出的变化能够准确地反映出其输入的变化,即实现不失真的测试。

4. 测试技术的发展动向

先进技术的发展日新月异,测试技术应该适应这种发展。根据先进制造技术发展的要求以及测试技术自身的发展规律,不断拓展着新的测量原理和测试方法及测试信息处理技术。具体体现在:

- 1) 网络化测试系统、远程网络测试系统迅速发展。
- 2) 传感器向新型、微型、智能型方向发展,微型、弹性、低功耗的无线网络传感器越来越

普及。

3) 测试仪器向高精度、多功能、小型化、在线监测、性能标准化和低成本发展。

4) 参数测量与数据处理以计算机为核心,使测量、分析、处理、打印、绘图、状态显示及故障预报向自动化、集成化、网络化发展。

5) 软测量技术(soft sensing technique)的迅速发展以易测过程变量(辅助变量或二次变量)为基础,利用易测过程变量和待测过程变量(难测主导变量)之间的数学关系(软测量模型),通过各种数学计算和估计实现对待测过程变量的测量。软测量是目前过程检测和控制研究发展的重要方向。

而就机械工程而言,测试技术在以下几个方面需要发展:

(1) 测量方式的多样化

1) 多传感器融合技术在制造现场中的应用 多传感器融合是解决测量过程中测量信息获取的方法,它可以提高测量信息的准确性。由于多传感器是以不同的方法或从不同的角度获取信息的,因此可以通过它们之间的信息融合去伪存真,提高测量精度。

2) 积木式、组合式测量方法 增加测试系统的柔性,实现不同层次不同目标的测试目的。

3) 便携式测量仪器 如便携式光纤干涉测量仪、便携式大量程三维测量系统等,用于解决现场大尺寸的测量问题。

4) 虚拟仪器 虚拟仪器是虚拟现实技术在精密测试领域的应用。一种是将多种数字化的测试仪器虚拟成一台以计算机为硬件支撑的数字式的智能化测试仪器;另一种是研究虚拟制造中的虚拟测量,如虚拟量块、虚拟坐标测量机等。

5) 智能结构 它属于结构检测与故障诊断,是融合智能技术、传感技术、信息技术、仿生技术、材料科学等的一门交叉学科,使监测的概念过渡到在线、动态、主动的实时监测与控制。

(2) 视觉测试技术

视觉测试技术是建立在计算机视觉研究基础上的一门新兴测试技术。与计算机视觉研究的视觉模式识别、视觉理解等内容不同,视觉测试技术重点研究物体的几何尺寸及物体的位置测量,如三维面形的快速测量、大型工件同轴度测量、共面性测量等。它可以广泛应用于在线测量、逆向工程等主动、实时测量过程。

(3) 测量尺寸继续向两个极端发展

两个极端就是指相对于现在测量尺寸的大尺寸和小尺寸。通常尺寸的测量已被广为注意,也开发了多种多样的测试方法。近年来,由于国民经济的快速发展和迫切需要,使得很多方面的生产和工程中测试的要求超过了测试的范围,如飞机外形的测量、大型机械关键部件测量、高层建筑电梯导轨的准直测量、油罐车的现场校准等都要能进行大尺寸测量;微电子技术、生物技术的快速发展,探索物质微观世界的需求,测量精度的不断提高,又要求进行微米、纳米测试。纳米测量也多种多样,有光干涉测量仪、量子干涉仪、电容测微仪、X射线干涉仪、频率跟踪式法珀标准量具、扫描电子显微镜(SEM)、扫描隧道显微镜(STM)、原子力显微镜(AFM)、分子测量机M3(molecular measuring machine)等。

5. 本课程的学习要求

测试技术是一门综合性技术。现代测试系统常常是集机电于一体,软硬件相结合,具有智能化、自动化的系统。它涉及传感技术、微电子技术、控制技术、计算机技术、信号处理技术、精密机

机械设计技术等众多技术。因此,要求测试工作者具有深厚的多学科知识,如力学、电学、信号处理、自动控制、机械振动、计算机、数学等。

测试技术也是实验科学的分支,学习中必须将理论学习与实验密切结合,参加必要的实验,以便得到基本实验技能的训练。

通过本课程的学习,要求学生能做到:

- 1) 掌握测试技术的基本理论,包括信号的时域和频域的描述方法、频谱分析和相关分析的原理和方法、信号调理和信号处理基本概念和方法。
- 2) 熟练掌握各类典型传感器、记录仪器的基本原理和适用范围。
- 3) 具有测试系统的机、电、计算机方面的总体设计能力,实践动手能力。
- 4) 具有实验数据处理和误差分析能力。

第 1 章 信号及其描述

从信息论的观点看,信息就是事物存在方式和运动状态的特征。在生产实践和科学研究中,经常要对许多客观存在的物体或物理过程进行观测,就是为了获取有关研究对象状态与运动等特征方面的信息。被研究对象的信息量往往是非常丰富的,测试工作是按一定的目的和要求,获取感兴趣的、有限的某些特定信息,而不是全部信息。

工程测试信息总是通过某些物理量的形式表现出来,这些物理量就是信号。信号是信息的载体,信息则是信号所载的内容。信息与信号是互相联系的两个概念,但是信号不等于信息。例如一台机床在运行过程中,某一时间某一位置均会有热、声、振动等内部信息的外部表现,人们用测试仪器观测到的就是温度、声音、振动等变化的(数据形式或图像形式)信号。可以说,工程测试就是信号的获取、加工、处理、显示记录及分析的过程,因此深入地了解信号及其表述是工程测试的基础。

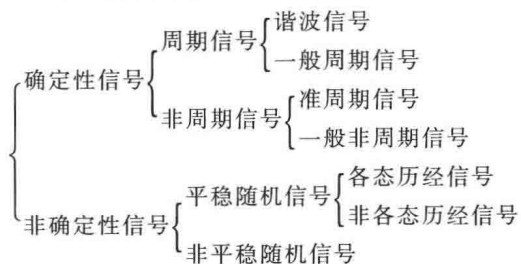
1.1 信号的分类与描述

1.1.1 信号的分类

信号按数学关系、取值特征、能量功率、处理分析等,可以分为确定性信号和非确定性信号、连续信号和离散信号、能量信号和功率信号、时域信号与频域信号等。

1. 确定性信号和非确定性信号

根据信号随时间的变化规律可分为确定性信号和非确定性信号,其分类如下:



(1) 确定性信号

能用明确的数学关系式或图像表达的信号称为确定性信号。

例如单自由度的无阻尼质量-弹簧振动系统,如图 1.1a 所示。其位移信号 $x(t)$ 可以写为

$$x(t) = A \cos \left(\sqrt{\frac{k}{m}} t + \varphi_0 \right) \quad (1.1)$$

式中: A ——振幅;

k ——弹簧刚度;

m ——质量;

φ_0 ——初始相位。

图 1.1b 所示为位移 $x(t)$ 随时间 t 的变化曲线。

确定性信号可以分为周期信号和非周期信号两类。当信号按一定时间间隔周而复始重复出现时称为周期信号,否则称为非周期信号。

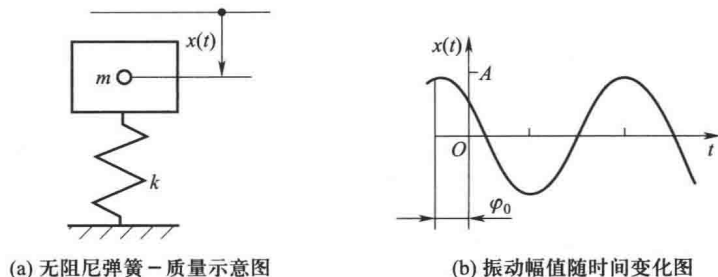


图 1.1 无阻尼弹簧-质量系统

周期信号的数学表达式为

$$x(t) = x(t + nT_0) \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1.2)$$

式中: T_0 ——周期, $T_0 = 2\pi/\omega_0 = 1/f_0$;

ω_0 ——角频率;

f_0 ——频率。

式(1.1)表达的信号显然是周期信号,其角频率 $\omega_0 = \sqrt{k/m}$, 周期为 $T_0 = 2\pi/\omega_0 = 2\pi/\sqrt{k/m}$, 这种频率单一的正弦或余弦信号称为谐波信号。周期信号的常用特征参量有均值、绝对均值、均方差值、均方根值(有效值)和均方值(平均功率)等。

一般周期信号(如周期方波、周期三角波等)是由多个乃至无穷多个频率成分(频率不同的谐波分量)叠加所组成,叠加后存在公共周期。典型的周期信号见表 1.1。

非周期信号分为准周期信号和瞬变信号。

准周期信号是由两个以上的简谐信号合成的,但是其频率比为无理数,在其分量之间没有公共周期,所以无法按某一周期重复出现。例如,下式所表达的信号:

$$x(t) = A_1 \sin(\sqrt{2}t + \theta_1) + A_2 \sin(3t + \theta_2) + A_3 \sin(2\sqrt{7}t + \theta_3)$$

这种由没有公共整数倍周期的各个分量合成的信号是一种非周期信号,但是这种信号的频谱图仍然是离散的,保持着周期信号的特点,这种信号称为准周期信号。在工程技术领域内,多个独立振源共同作用所引起的振动往往属于这类信号。

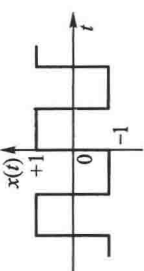
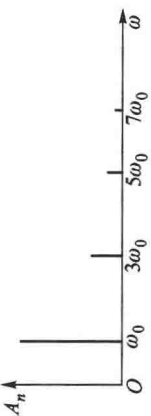
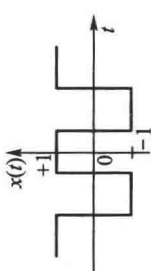
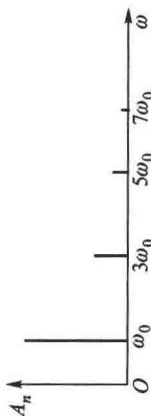
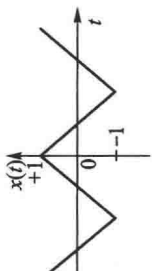
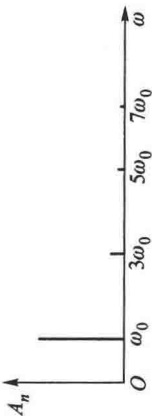
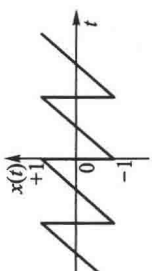
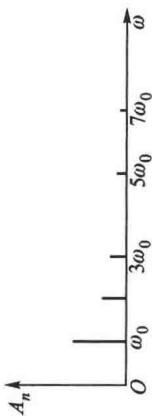
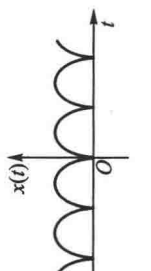
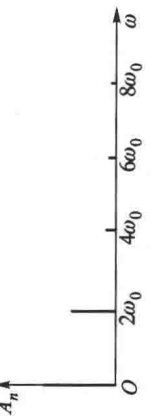
瞬变信号是在一定时间区间内存在或者随着时间的增长而衰减至零的信号,其时间历程较短。例如,有阻尼的、集中质量的单自由度振动系统的位移是一种瞬变信号。

(2) 非确定性信号

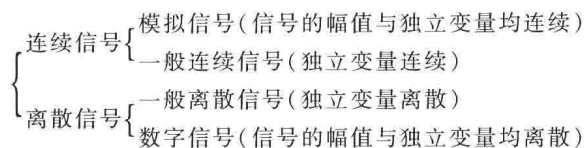
非确定性信号又称为随机信号,是无法用明确的数学关系式表达的信号。如加工零件的尺寸、机械振动、环境的噪声等,这类信号需要采用数理统计理论来描述,无法准确预见某一瞬时的信号幅值。根据是否满足平稳随机过程的条件,又可以分成平稳随机信号和非平稳随机信号。

2. 连续信号和离散信号

表 1.1 典型的周期信号

信号名称	时域波形	傅里叶级数三角展开式	幅频谱图
周期方波(奇函数)		$x(t) = \frac{4}{\pi} \left[\sin \omega_0 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_0 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_0 t + \dots \right]$	
周期方波(偶函数)		$x(t) = \frac{4}{\pi} \left[\cos \omega_0 t - \frac{1}{3} \cos 3\omega_0 t + \frac{1}{5} \cos 5\omega_0 t - \dots \right]$	
周期三角波		$x(t) = \frac{8}{\pi^2} \left[\cos \omega_0 t + \frac{1}{9} \cos 3\omega_0 t + \frac{1}{25} \cos 5\omega_0 t + \dots \right]$	
周期锯齿波		$x(t) = \frac{2}{\pi} \left[-\sin \omega_0 t - \frac{1}{2} \sin 2\omega_0 t - \frac{1}{3} \sin 3\omega_0 t - \dots \right]$	
全波整流		$x(t) = \frac{2}{\pi} \left[1 - \frac{2}{3} \cos 2\omega_0 t + \frac{2}{15} \cos 4\omega_0 t - \dots - \frac{2}{4n^2 - 1} \cos 2n\omega_0 t - \dots \right]$	

根据时间信号的连续性可分为连续信号和离散信号,其分类如下:



若信号的独立变量取值连续,则是连续信号;若信号的独立变量取值离散,则是离散信号,如图 1.2 所示。信号幅值也可分为连续的和离散的两种,若信号的幅值和独立变量均连续,则称为模拟信号;若信号幅值和独立变量均离散,则称为数字信号。目前,数字计算机所使用的信号都是数字信号。

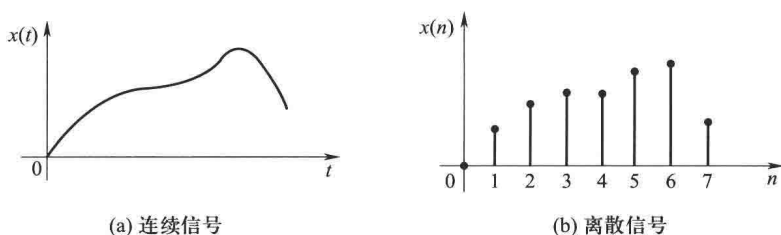


图 1.2 连续信号和离散信号

3. 能量信号和功率信号

在非电量测量中,常将被测信号转换为电压或电流信号来处理。在信号分析时,通常不考虑量纲,而直接把信号的平方及其对时间的积分分别称为信号的能量和功率。当 $x(t)$ 满足

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt < \infty \quad (1.3)$$

时,则信号的能量有限,称为能量有限信号,简称能量信号,如各类瞬变信号。满足能量有限条件,实际上就满足了绝对可积条件。要对信号进行傅里叶变换,要求信号必须是能量信号。

若 $x(t)$ 在区间 $(-\infty, \infty)$ 的能量无限,不满足式 (1.3) 的条件,但在有限区间 $(-T/2, T/2)$ 内满足平均功率有限的条件

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x^2(t) dt < \infty \quad (1.4)$$

则称为功率信号,如各种周期信号、常值信号、阶跃信号等。

4. 时域信号和频域信号

根据描述信号的自变量不同,可分为时域信号和频域信号。时域信号描述信号的幅值随时间的变化规律。频域信号是以频率为自变量,描述信号中所含频率成分的幅值与所对应频率的关系。频域描述是以频率为横坐标的各种物理量的曲线,如幅值谱、相位谱、功率谱和谱密度等。

时域描述和频域描述为从不同的角度观察、分析信号提供了方便。运用傅里叶级数、傅里叶变换及其逆变换,可以方便地实现信号在时域与频域的转变。

1.1.2 信号的描述方法

直接检测或记录到的信号一般是随时间变化的物理量,称为信号的时域描述。这种以时

间作为独立变量的方式能反映信号幅值随时间变化的关系,而不能揭示信号的频率结构特征。为了更加全面深入地研究信号,从中获得更多有用的信息,常把时域描述的信号变换为信号的频域描述,也就是所谓信号的频谱分析。信号的时、频域描述是可以相互转换的,而且包含同样的信息量。一般将从时域数学表达式转换为频域表达式称为频谱分析,相对应的图形分别称为时域图和频谱图。以频率(ω 或 f)为横坐标,幅值或相位为纵坐标的图形,分别称为幅频谱图或相频谱图。本节将对周期信号、非周期信号和随机信号从时间域和频率域两方面进行描述和分析。

1.2 周期信号

谐波信号是最简单的周期信号,只有一种频率成分。一般周期信号可以利用傅里叶级数展开成多个乃至无穷多个不同频率的谐波信号的线性叠加。

1.2.1 周期信号的三角函数展开

对于满足狄里赫利条件[函数在 $(-T_0/2, T_0/2)$ 区间连续或只有有限个第一类间断点,且只有有限个极值点]的周期信号,均可展开成

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \quad (1.5)$$

式中常值分量 a_0 、余弦分量幅值 a_n 、正弦分量幅值 b_n 分别为

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) dt \\ a_n &= \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) \cos n\omega_0 t dt \\ b_n &= \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) \sin n\omega_0 t dt \end{aligned} \quad (1.6)$$

式中: a_0, a_n, b_n ——傅里叶系数;

T_0 ——信号的周期,也是信号基波成分的周期;

ω_0 ——信号的基频, $\omega_0 = 2\pi/T_0$;

$n\omega_0$ —— n 次谐频。

顺便说明:如果用 $-n$ 代替式(1.6)中的 n ,可知 a_n 为 n 的偶函数, b_n 为 n 的奇函数。

由三角函数变换,式(1.5)可写为

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega_0 t + \varphi_n) \quad (1.7)$$

式中,常值分量

$$A_0 = a_0$$

各谐波分量的幅值

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (1.8)$$

各谐波分量的初相角

$$\varphi_n = \arctan \frac{a_n}{b_n} \quad (1.9)$$