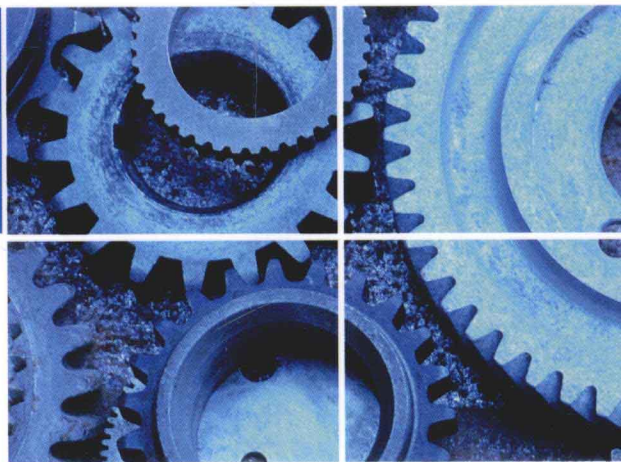


普通高等教育“十二五”规划教材



机械工程 测试技术

谢里阳 孙红春 林贵瑜 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

机械工程测试技术

主 编 谢里阳 孙红春 林贵瑜
参 编 李 佳 李 沈 赵 飞
主 审 张洪亭



机械工业出版社

本书是普通高等教育“十二五”规划教材,是为适应机械工程及自动化学科高等教育改革之需而编写的。

本书包括上、下两篇。上篇为测试基础,内容有绪论、信号的分类与描述、测试系统的特性、信号的分析与处理、常用传感器的变换原理、电信号的调理与记录、计算机数据采集与分析系统、测量误差的分析与处理;下篇为实用测试技术,内容有力及其导出量的测量、振动的测量、噪声的测量、位移与厚度测量、温度的测量、流体参数的测量。

本书适合高校机械工程及自动化专业的教学,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程测试技术/谢里阳,孙红春,林贵瑜主编. —北京:机械工业出版社,2012.8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-39170-8

I. ①机… II. ①谢…②孙…③林… III. ①机械工程—测试技术—高等学校—教材 IV. ①TG806

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第162884号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:刘小慧 责任编辑:刘小慧 王 荣 卢若薇

版式设计:纪 敬 责任校对:申春香

封面设计:张 静 责任印制:乔 宇

三河市国英印务有限公司印刷

2012年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm·23.75印张·585千字

标准书号:ISBN 978-7-111-39170-8

定价:43.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前言

在总结多年的教学经验和工程实践的基础上,参考同类教材的优点编写而成的。教材力图体现测试技术的基本理论,反映测试技术的工程应用。

《机械工程测试技术》是为适应机械工程及自动化学科高等教育改革的需要,该课程需40~60学时,实验课需10学时。

本书在论述上力求由浅入深,从实践到理论,从数学逻辑式到物理概念,简明易懂,重点突出,难点分段,以对实际例子的讨论引导学生和读者钻研,便于自学。

本书以传感器测试原理及变换、信号分析与处理及测试系统特性为主线,着重介绍测试中的基本内容及在机械工程中的应用实例。全书分上、下两篇,共有14章。第1章介绍了测试的基本内容和任务,测试的信息及信号的概念、测试方法及系统的组成和应用,以及测试技术的发展概况;第2章和第4章是测试信号的描述、分析和处理方法;第3章对测试系统的特性进行了分析讨论;第5章、第6章是信号的获取与变换、调理与记录的工作原理和特性;第7章介绍了信号数字化处理中的主要问题、快速傅里叶变换原理、数据采集元件、虚拟仪器及应用;第8章是测量误差的分析与处理的基本知识;第9章对应力、扭矩测量及应用进行了分析讨论;第10章是机械振动的测量,它是动态测试理论在实践中的具体应用;第11章分析讨论了评价噪声的主要参数、噪声测量仪器及技术和噪声测量实例;第12章是位移与厚度测量,介绍了常用位移与厚度测量的传感技术与测量方法;第13章分析讨论了温度标准与测量方法、接触与非接触测温传感器和测温法及测量实例;第14章分析讨论了压力、流量、流速及液位的测量原理和测量方法。由于目前大多数软件中的运算放大器使用国际流行符号,为便于交流,本书中运算放大器的图形符号采用国际流行符号。

参加本书编写工作的有谢里阳、李佳、林贵瑜、孙红春、李沈、赵飞。其中谢里阳编写了第1章、第8章,李佳编写了第2章、第3章、第11章、第13章,林贵瑜编写了第4章、第14章,孙红春编写了第5章、第6章、第7章,李沈编写了第9章、第10章,赵飞编写了第12章。本书由谢里阳、孙红春和林贵瑜担任主编并负责全书的修改和统稿。

本书由张洪亭教授担任主审,他对初稿提出了许多宝贵意见,谨致以衷心的感谢。

本书在编写过程中,参考了大量资料和参考书,感谢书后所列参考文献的作者,有漏登之处,深表歉意。

由于编者水平所限,书中疏漏和欠妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

目 录

前言

上篇 测试基础

第1章 绪论 2

- 1.1 测试技术的任务 2
- 1.2 测试技术的主要内容 3
- 1.3 测试系统的组成 3
- 1.4 测试技术的发展 4
- 1.5 测试技术课程的学习要求 5

第2章 信号的分类与描述 6

- 2.1 信号的分类及描述方法 6
 - 2.1.1 信号的分类 6
 - 2.1.2 信号的描述方法 8
- 2.2 周期信号的频谱——傅里叶级数 8
 - 2.2.1 三角函数展开式 8
 - 2.2.2 傅里叶级数的复指数展开式 11
- 2.3 非周期信号的频谱 13
 - 2.3.1 概述 13
 - 2.3.2 瞬变信号的频谱——傅里叶变换 13
 - 2.3.3 傅里叶变换的主要性质 15
- 2.4 几种典型信号的频谱 19
 - 2.4.1 单位脉冲函数信号及其频谱 19
 - 2.4.2 单边指数函数信号的频谱 21
 - 2.4.3 正、余弦函数信号的频谱 22
 - 2.4.4 周期矩形脉冲函数信号的频谱 22
 - 2.4.5 符号函数信号的频谱 25
 - 2.4.6 阶跃函数信号的频谱 26
- 2.5 随机信号的概念及分类 27
 - 2.5.1 随机信号的概念 27
 - 2.5.2 随机信号的分类 28
- 习题 29

第3章 测试系统的特性 30

- 3.1 测试系统及其主要性质 30
 - 3.1.1 测试系统概述 30
 - 3.1.2 线性系统的主要性质 31
- 3.2 测试系统的静态特性 32

- 3.2.1 线性度 33
- 3.2.2 灵敏度 33
- 3.2.3 分辨率（分辨力） 33
- 3.2.4 滞后 33
- 3.2.5 重复性误差 34
- 3.2.6 其他特性 34

3.3 测试系统的动态特性 35

- 3.3.1 传递函数 35
- 3.3.2 脉冲响应函数 37
- 3.3.3 频率响应函数 38
- 3.3.4 一阶系统和二阶系统的动态特性 39

3.4 测试系统在典型输入下的响应 42

- 3.4.1 测试系统在单位阶跃输入下的响应 43
- 3.4.2 测试系统在正弦输入下的响应 44
- 3.5 实现不失真测试的条件 44
- 3.6 测试系统特性参数的测定 46
 - 3.6.1 测试系统静态特性参数的测定 46
 - 3.6.2 测试系统动态特性参数的测定 47

习题 51

第4章 信号的分析与处理 52

- 4.1 信号的时域分析 52
 - 4.1.1 信号的时域统计参数 52
 - 4.1.2 信号的概率密度函数 55
- 4.2 信号的相关分析 57
 - 4.2.1 相关系数 57
 - 4.2.2 自相关函数分析 58
 - 4.2.3 互相关函数分析 61
 - 4.2.4 相关函数的应用 63
- 4.3 信号的频域分析 66
 - 4.3.1 功率谱密度函数 67
 - 4.3.2 功率谱的应用 69
 - 4.3.3 相干函数 72
 - 4.3.4 倒频谱分析及其应用 74
- 4.4 信号时频分析的基本概念 77
 - 4.4.1 从傅里叶变换到时频分析 77

4.4.2 信号的分辨率	78	6.3.2 使用运算放大器的放大器	141
4.4.3 瞬时频率	80	6.3.3 信号衰减	144
4.4.4 非平稳随机信号	81	6.4 滤波器	144
习题	83	6.4.1 滤波器的分类	144
第5章 常用传感器的变换原理	85	6.4.2 理想滤波器与实际滤波器	146
5.1 传感器概述	85	6.4.3 恒带宽比和恒带宽滤波器	149
5.1.1 传感器的定义与组成	85	6.5 信号的显示与记录	150
5.1.2 传感器的分类	86	6.5.1 模拟指示仪表	150
5.1.3 传感器的主要技术指标及选择	87	6.5.2 数码显示仪表	151
5.1.4 传感器技术的主要应用及发展趋势	88	6.5.3 图像显示仪表	152
5.2 电阻式传感器	90	6.5.4 信号的记录和存储	153
5.2.1 电阻应变传感器	90	习题	157
5.2.2 压阻式传感器	93	第7章 计算机数据采集与分析系统	160
5.2.3 变阻式传感器	94	7.1 数据采集与分析系统的构成	160
5.3 电感传感器	96	7.2 信号数字化处理中的主要问题	161
5.3.1 自感式传感器	97	7.2.1 采样	161
5.3.2 互感式传感器	98	7.2.2 量化	163
5.3.3 压磁式传感器	101	7.2.3 泄漏和窗函数	165
5.4 电容传感器	103	7.2.4 频域采样和栅栏效应	168
5.5 压电传感器	107	7.3 快速傅里叶变换原理	169
5.6 磁电式传感器	111	7.3.1 离散的傅里叶变换	169
5.6.1 磁电感应式传感器	111	7.3.2 傅里叶变换的快速算法 (FFT)	170
5.6.2 霍尔传感器	113	7.3.3 FFT 的逆变换 (IFFT)	173
5.7 光电传感器	114	7.4 数据采集元件	174
5.7.1 光电效应及光电器件	114	7.4.1 多路转换器	174
5.7.2 光电传感器的应用	117	7.4.2 数-模 (D-A) 转换器	175
5.7.3 光固态图像传感器	118	7.4.3 模-数 (A-D) 转换器	175
5.8 光纤传感器	120	7.4.4 同步采样-保持子系统	177
5.9 新型传感器	121	7.4.5 数据采集卡	178
5.9.1 微机械传感器	121	7.4.6 数据采集卡的接口编程	180
5.9.2 智能传感器	122	7.5 虚拟仪器	181
5.9.3 无线传感器网络	124	7.5.1 虚拟仪器的组成	182
习题	127	7.5.2 虚拟仪器的分类与应用	183
第6章 电信号的调理与记录	128	7.6 基于计算机的数据采集系统设计	185
6.1 电桥	128	7.6.1 基本原则	185
6.1.1 直流电桥	128	7.6.2 系统设计的一般步骤	185
6.1.2 交流电桥	132	习题	186
6.2 调制与解调	133	第8章 测量误差分析与处理	187
6.2.1 幅值调制与解调	134	8.1 误差的基本概念	187
6.2.2 频率调制与解调	137	8.1.1 测量误差与精度	187
6.3 信号的放大与衰减	139	8.1.2 误差的表示方法	188
6.3.1 信号放大器的主要特性	139	8.2 随机误差	189

8.2.1 随机误差的分布规律	189	10.3.2 电荷放大器	257
8.2.2 随机误差统计分析	190	10.4 振动的激励与激振器	259
8.2.3 可疑数据的取舍	195	10.4.1 振动的激励	259
8.3 系统误差	198	10.4.2 激振器	261
8.3.1 系统误差对测量结果的影响	198	10.5 振动的检测方法及其实例	263
8.3.2 系统误差的识别与修正	199	10.5.1 振幅的测量方法	263
8.3.3 消除系统误差的措施	204	10.5.2 振动频率的测量方法	264
8.4 间接测量中的误差计算	204	10.5.3 同频简谐振动相位差的测量 方法	266
8.4.1 间接测试参量的估计值	204	10.5.4 机械系统固有频率的测量 方法	266
8.4.2 间接测量误差计算	205	10.5.5 阻尼的测量方法	268
8.5 误差分析与测试数据处理	206	10.5.6 振型的测量方法	270
8.5.1 系统误差和随机误差成分分析	206	10.5.7 振动测量实例	271
8.5.2 误差分析的步骤	206	习题	273
8.5.3 测试数据的处理	207	第11章 噪声的测量	275
习题	208	11.1 声音的特征	275
下篇 实用测试技术			
第9章 力及其导出量的测量			
9.1 电阻应变计的应用			
9.1.1 电阻应变计的工作特性及选择			
9.1.2 电阻应变计的安装			
9.2 应力测量			
9.2.1 应变仪的使用			
9.2.2 单向应力测量			
9.2.3 平面应力状态下主应力的测量			
9.2.4 常用的测力装置			
9.2.5 力参数测量实例			
9.3 扭矩的测量			
9.3.1 应变式扭矩测量的机理			
9.3.2 扭矩测量信号的传输			
9.3.3 扭矩的标定			
习题			
第10章 振动的测量			
10.1 概述			
10.1.1 振动测量的内容与目的			
10.1.2 振动测量系统的基本组成和各 部分功能			
10.2 测振传感器			
10.2.1 测振传感器的分类及原理			
10.2.2 常用的测振传感器			
10.2.3 接触式测振传感器的校准			
10.3 常用的测振放大器			
10.3.1 电压放大器			
11.1 基本声学参数			
11.2.1 声压与声压级			
11.2.2 声强与声强级			
11.2.3 声功率与声功率级			
11.2.4 级的合成			
11.3 噪声的频谱分析			
11.4 噪声的主观量与评价			
11.4.1 纯音的等响曲线、响度及响 度级			
11.4.2 宽带噪声的响度			
11.4.3 声级计的频率计权网络			
11.4.4 等效连续声级与噪声评价 标准			
11.5 噪声测量仪器			
11.5.1 传声器			
11.5.2 声级计			
11.5.3 声级计的校准			
11.6 噪声测量技术			
11.6.1 声功率的测量和计算			
11.6.2 噪声测量应注意的问题			
11.6.3 噪声测量环境的影响及环境 噪声的修正			
11.7 机床噪声测量实例			
11.7.1 机床的噪声源及噪声标准			
11.7.2 机床噪声声压级测量			
习题			

第 12 章 位移与厚度测量	293	13.3 非接触式测温	334
12.1 常用位移传感器	293	13.3.1 热辐射原理	334
12.2 光栅式传感器	294	13.3.2 红外测温	335
12.2.1 光栅式传感器的基本原理和 分类	295	13.3.3 全辐射温度计	337
12.2.2 光栅的光学系统	298	13.3.4 光学高温计	338
12.2.3 计量光栅的种类	300	13.3.5 比色高温计	339
12.3 光电盘传感器和编码盘传感器	301	13.4 温度测量实例	340
12.3.1 光电盘传感器	301	13.4.1 机床的温升测量	340
12.3.2 编码盘传感器	302	13.4.2 切削温度测量	341
12.4 感应同步器	307	习题	342
12.4.1 感应同步器的结构	308	第 14 章 流体参数的测量	343
12.4.2 感应同步器的基本工作原理	309	14.1 压力的测量	343
12.4.3 输出信号的处理方式	310	14.1.1 压力测量原理	343
12.4.4 感应同步器的参数分析	312	14.1.2 压力测量传感器	344
12.5 激光干涉仪	314	14.1.3 测压传感器的标定	347
12.5.1 基本工作原理	315	14.2 流量的测量	348
12.5.2 双频激光干涉仪	316	14.2.1 节流变压降式流量计	350
12.6 厚度测量	319	14.2.2 阻力式流量计	353
12.6.1 非接触式测厚仪	319	14.2.3 涡轮流量计	355
12.6.2 接触式测厚仪	321	14.2.4 容积式流量计	357
习题	322	14.2.5 质量流量计	359
第 13 章 温度的测量	323	14.2.6 流量计的标定	360
13.1 温度标准与测量方法	323	14.3 流速测量系统	361
13.1.1 温度和温标	323	14.3.1 皮托管流速计	361
13.1.2 温度测量方法	324	14.3.2 热线和热膜风速计	362
13.2 接触式测温传感器	324	14.3.3 利用激光多普勒效应的流速 测量	365
13.2.1 热电偶	324	习题	367
13.2.2 热电阻温度计	329	参考文献	368
13.2.3 热敏电阻和集成温度传感器	330	读者信息反馈表	
13.2.4 机械温度传感器	333		

上篇 测试基础

测试基础

第1章 绪 论

测试技术 (technique of measurement and test) 是科学研究和技术评价的基本方法之一, 它是具有试验性质的测量技术, 是测量和试验的综合。测量是确定被测对象属性量值的过程, 所做的是将被测量与一个预定的标准尺度的量值比较; 试验是对研究对象或系统进行试验性研究的过程。

1.1 测试技术的任务

在科学研究和工程实践中, 测试技术的应用十分广泛。随着测试技术的发展, 该技术越来越多地应用于认识自然界和工程实际中的各种现象、了解研究对象的状态及其变化规律等。工程实际中的机械装备, 结构形式繁多、运动规律各异、工作环境多种多样。为了掌握机械装备及其零部件的运动学、动力学以及受力和变形状态, 理论分析方法有时难以应用或无法满足工程需求, 在这种情况下, 通常需要借助测试技术, 检测、分析和研究有关现象及其规律。

例如, 为了获得汽车的载荷谱、评价车架的强度与寿命, 需要测定汽车所承受的随机载荷和车架的应力、应变分布; 为了研究飞机发动机零部件的服役安全性, 首先需要对其动负荷及温度、压力等参数进行测试; 为了消除机床刀架系统的颤振以保证加工精度, 需要测定机床的振动速度、加速度以及机械阻抗等动态特性参数; 为了确定轧钢机的真实载荷水平和应力状态, 评价设备的服役安全性和可靠性、改进工艺和提高设备的生产能力, 需要测定轧制力、传动轴扭矩等; 设备振动和噪声会严重降低工作效率并危害健康, 因此需要现场实测各种设备的振动和噪声, 分析振源和振动传播的路径, 以便采取减振、隔振等措施。

测试技术在机械工程等领域的功能包括:

1) 产品开发和性能试验。在装备设计及改造过程中, 通过模型试验或现场实测, 可以获得设备及其零部件的载荷、应力、变形以及工艺参数和力能参数等, 实现对产品质量和性能的客观评价, 为产品技术参数优化提供基础数据。例如, 对齿轮传动系统, 要做承载能力、传动精确度、运行噪声、振动机械效率和寿命等性能试验。

2) 质量控制和生产监督。测试技术是质量控制和生产监督的基本手段。在设备运行和环境监测中, 经常需要测量设备的振动和噪声, 分析振源及其传播途径, 进行有效的生产监督, 以便采取有效的减振、防噪措施; 在工业自动化生产中, 通过对有关工艺参数的测试和数据采集, 可以实现对产品的质量控制和生产监督。

3) 设备的状态监测和故障诊断。利用机器在运行或试验过程中出现的诸多现象, 如温升、振动、噪声、应力变化、润滑油状态来分析、推测和判断, 结合其他综合监测信息, 如温度、压力、流量等, 运用故障诊断技术可以实现故障的精确定位和故障分析。

1.2 测试技术的主要内容

测试过程是借助专门设备,通过合适的试验和必要的数据处理,从研究对象中获得有关信息的认识过程。通常,测试技术的主要内容包括测量原理、测量方法、测量系统和数据处理4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,利用压电晶体测振动加速度依据的是压电效应;利用电涡流位移传感器测静态位移和振动位移依据的是电磁效应;利用热电偶测量温度依据的是热电效应。不同性质的被测量依据不同的原理测量,同一性质的被测量也可通过不同的原理去测量。

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、等精度测量法或不等精度测量法等。

确定了被测量的测量原理和测量方法以后,需要设计或选用合适的装置组成测量系统。

最后,通过对测试数据的分析、处理,获得所需要的信息,实现测试目标。

信息是事物状态和特征的表征。信息的载体就是信号。表征无用信息的信号统称噪声。通常测得的信号中包含有用信号和噪声。测试技术最终目标就是从测得的复杂信号中提取有用信号,排除噪声。

本书主要介绍非电量电测技术。非电量电测技术的原理是把非电物理量转换成电流、电压等电量,根据待测量与电流、电压等电量之间的关系,通过测试电量获取待测量的信息。

作为机械工程测试技术,本书讨论如下几方面参数的测量:

- 1) 运动参数。包括固体的位移、速度、加速度,流体的流量、流速等。
- 2) 力能参数。包括应力、应变、力、扭矩和流体压力等。
- 3) 动力学参数。包括弹性体的固有频率、阻尼比、振型等。
- 4) 其他与设备状态直接相关的参数。例如温度、噪声等。

1.3 测试系统的组成

测试系统一般由激励装置、传感器、信号调理、信号处理和显示记录等几大部分组成,如图1-1所示。

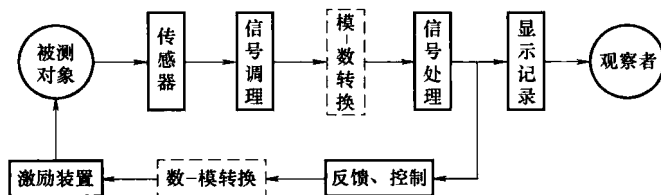


图 1-1 测试系统的组成

测试对象的信息,即测试对象存在方式和运动状态的特征,需要通过一定的物理量表现出来,这些物理量就是信号。信号需要通过不同的系统或环节传输。有些信息在测试对象处

于自然状态时就能显现出来,有些信息则需要在被测对象受到激励后才能产生便于测量的输出信号。

传感器是对被测量敏感、并能将其转换成电信号的器件,包括敏感器和转换器两部分。敏感器把温度、压力、位移、振动、噪声和流量等被测量转换成某种容易变换成电量的物理量,然后通过转换器把这些物理量转换成容易检测的电量,例如电阻、电容、电感的变化。本书中关于信号的概念指的是这些转换成电量的物理量。

信号的调理环节把传感器的输出信号转换成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,例如把阻抗变化转换成电压变化,还有滤波、幅值放大或者把幅值的变化转换成频率的变化等。

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。

图 1-1 中虚线框的模-数(A-D)转换和数-模(D-A)转换环节是在采用计算机、PLC 等测试、控制系统时,进行模拟信号与数字信号相互转换的环节。

信号显示、记录环节则是将来自信号处理环节的信号——测试的结果以易于观察的形式显示或存储。

需要指出的是,任何测量结果都存在误差,因而必须把误差限制在允许范围内。为了准确获得被测对象的信息,要求测试系统中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,并且其输出的变化在给定的误差范围内反映其输入的变化,即实现不失真的测试。

1.4 测试技术的发展

测试技术是科学技术发展水平的综合体现。随着传感器技术、计算机技术、通信技术和自动控制技术的发展,测试技术也在不断应用新的测量原理和测试方法,提出新的信号分析理论,开发新型、高性能的测量仪器和设备。测试技术及系统的发展趋势是:

1) 传感器趋向微型化、智能化、集成化和网络化。

2) 测试仪器向高精度、多功能方向发展。

3) 参数测量与数据处理以计算机为核心,参数测量、信号分析、数据处理、状态显示及故障预报的自动化程度越来越高。

另一方面,机械科学与技术的发展也对测试技术提出了新要求:

1) 多传感器融合技术。多传感器融合是测量过程中获取信息的新方法,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) 柔性测试系统。采用积木式、组合式测量方法,实现不同层次不同目标的测试目的。

3) 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。

4) 智能结构。智能结构是融合智能技术、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。

5) 视觉测试技术。视觉测试技术是建立在计算机视觉基础上的新兴测试技术。与计算机视觉研究的视觉模式识别、视觉理解等内容不同,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。视觉测试技术可以广泛应用于在线测量、逆向工程等主动、实时测量过程。

6) 大型设备测试。例如飞机外形的测量、大型设备关键部件测量、高层建筑电梯导轨的校准测量、油罐车的现场校准等都要求能进行大尺寸测量。为此,需要开发便携式测量仪器用于解决现场大尺寸的测量问题,例如便携式光纤干涉测量仪、便携式大量程三维测量系统等。

7) 微观系统测试。近年来,微电子技术、生物技术的快速发展对探索物质微观世界提出了新要求,为了提高测量精度,需要进行微米、纳米级的测试。

8) 无损检测。为了保证产品质量、保障设备服役安全,或为了给设备或设施的维护、维修提供支持,需要在不破坏观测对象的条件下检测其可能存在的缺陷、损伤等。

1.5 测试技术课程的学习要求

测试技术是一门综合性技术。现代测试系统通常是集机电于一体,软硬件相结合的自动化、智能化系统。它涉及传感技术、微电子技术、控制技术、计算机技术、信号处理技术和精密机械设计理论等众多技术领域。因此,要求测试工作者具有深厚的多学科知识背景,如力学、机械学、电学、信号处理、自动控制、机械振动、计算机和数学等。测试技术也是实验科学的分支,学习中必须把理论学习与实验密切结合,进行必要的实验,得到基本实验技能的训练。

课程学习要求如下:

1) 掌握测试基本理论,包括信号的时域和频域描述方法、频谱分析和相关分析原理及应用,信号调理和信号处理基本概念和方法。

2) 熟练掌握常用传感器、记录仪器的基本原理及适用范围。

3) 掌握常用机械参量的测量原理和方法,具有一定的测试系统机、电及计算机方面的设计能力。

4) 具有实验数据处理和误差分析能力。

第2章 信号的分类与描述

在工程实践和科学研究中,存在着各种各样的物理量(如机械振动、噪声、切削力、温度和变形等),并且经常由于科学研究或工程技术的需要,要求人们对由物理对象所产生的这些量进行测量,被测的物理量以及由其转换所得的量统称为信号。信号是运载信息的物理量函数,信号中包含着某些反映被测物理系统或过程的状态和特性等方面的有用信息,是人们认识客观事物内在规律、研究事物之间相互关系、预测事物未来发展的重要依据。由于信号中蕴涵着分析、解决问题所需要的信息,要获得有用信息,就需要测试信号。由于信号本身的特性对测试工作有着直接的重要影响,因此,对信号的研究具有十分重要的意义。研究测试技术必须从信号入手,通过对信号的描述与分析,了解信号的频域构成以及时域与频域特性的内在联系。

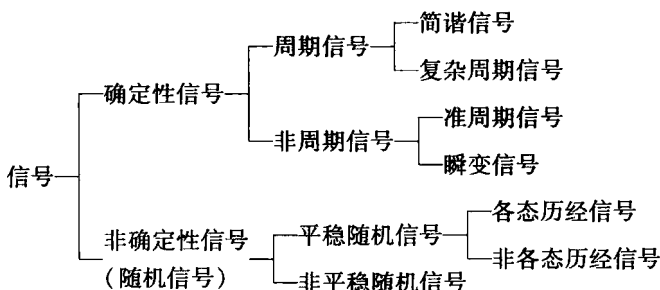
2.1 信号的分类及描述方法

2.1.1 信号的分类

为了深入了解信号的物理实质,需要将其分类加以研究。根据考虑问题的角度可以按不同的方式对信号进行分类。

1. 确定性信号和非确定性信号

信号按其随时间变化的规律可以分为确定性信号(deterministic signal)和非确定性信号(nondeterministic signal)两大类,如下所示:



可以用明确的时间函数表示的信号称为确定性信号。例如集中质量的单自由度振动系统作无阻尼自由振动时的位移就是确定性信号。确定性信号又分为周期信号和非周期信号。

周期信号(periodic signal)是其振幅按一定时间间隔 T (周期)做有规则的连续变化的信号,可表示为

$$x(t) = x(t + nT) \quad (2-1)$$

式中, n 为正整数; T 为周期。

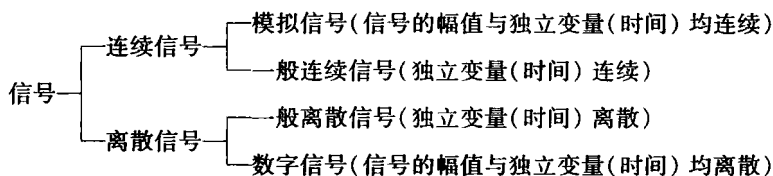
周期信号分为简谐信号 (simple harmonic signal) 和复杂周期信号 (complicated periodic signal)。在周期信号中, 按正弦或余弦规律变化的信号称为简谐信号。复杂周期信号是由两个以上的频率比为有理数的简谐信号合成的, 例如周期方波、周期三角波、周期锯齿波等。

非周期信号 (aperiodic signal) 分为准周期信号 (quasi-periodic signal) 和瞬变信号 (transient signal)。准周期信号也是由两个以上的简谐信号合成的, 但是其频率比为无理数, 在其组成分量之间无法找到公共周期, 所以无法按某一周期重复出现。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。

非确定性信号又称为随机信号 (random signal), 是指不能用准确的数学关系式来描述, 只能用概率统计方法进行的信号, 例如机加工车间内的噪声、汽车行驶中的振动等。

2. 连续信号和离散信号

按信号的取值特征, 即根据信号的幅值及其自变量 (即时间 t) 是连续的还是离散的可将信号分成连续信号 (continuous signal) 和离散信号 (discrete signal) 两大类。



连续信号是指在某一时间间隔内, 除若干点外, 对任意时间都具有确定函数值的信号, 若信号的独立变量取值是连续的, 则称该信号为连续信号, 如图 2-1 所示。连续信号的幅值可以是连续的, 也可以是离散的 (只取某些规定值)。自变量 (即时间 t) 和幅值均为连续的信号称为模拟信号 (analog signal), 在实际应用中, 模拟信号与连续信号两个名词往往不予以区分。离散信号是指只在某些离散的瞬时才具有确定的函数值的信号, 若信号的独立变量取值是离散的, 则称为离散信号, 如图 2-2 所示。若信号幅值和独立变量均离散, 则称为数字信号 (digital signal)。计算机所使用的信号都是数字信号。

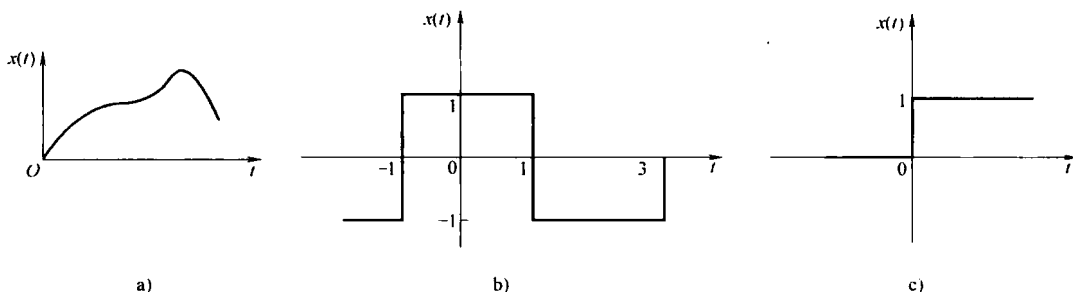


图 2-1 连续信号

a) 模拟信号 b) 矩形信号 c) 单位阶跃信号

3. 能量信号和功率信号

根据信号用能量或功率表示,可分为能量信号 (energy signal) 和功率信号 (power signal)。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。显然,电压信号 $x(t)$ 加在单位电阻 ($R=1\Omega$ 时) 上的瞬时功率为 $P(t) = x^2(t)/R = x^2(t)$ 。瞬时功率对时间积分即是信号在该时间内的能量。通常不考虑量纲,而直接把信号的二次方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

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

时,则信号的能量有限,称为能量有限信号,简称为能量信号,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。

若 $x(t)$ 在区间 $(-\infty, \infty)$ 的能量无限,不满足式 (2-2) 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,即

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x^2(t) dt < \infty \quad (2-3)$$

则称为功率信号,如各种周期信号、常值信号、阶跃信号等。

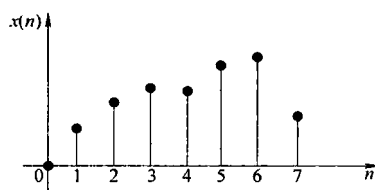


图 2-2 离散信号

2.1.2 信号的描述方法

信号可以用时域表示也可以用频域描述。在时域描述 (describe by domain of time) 中,信号的自变量为时间,信号的历程随时间而展开。信号的时域描述主要反映信号的幅值随时间的变化规律。频域描述 (describe by domain of frequency) 以频率为自变量,描述信号中所含频率成分的幅值和相位。频域描述的结果是以频率为横坐标的各种物理量的谱线或曲线,从频率分布的角度出发研究信号的结构及各种频率成分的幅值和相位关系,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的时域、频域转换。

2.2 周期信号的频谱——傅里叶级数

2.2.1 三角函数展开式

对于满足狄利赫利条件,即在区间 $(-T/2, T/2)$ 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,均可展开为

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \quad (2-4)$$

式中,常值分量

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) dt \quad (2-5)$$

余弦分量的幅值

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) \cos n\omega_0 t dt \quad (2-6)$$

正弦分量的幅值

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) \sin n\omega_0 t dt \quad (2-7)$$

式中, a_0 、 a_n 、 b_n 分别为傅里叶系数; T_0 为信号的周期, $T_0 = 2\pi/\omega_0$; ω_0 为信号的基频, 用圆频率或角频率表示; $n\omega_0$ 为 n 次谐波; n 为正整数。

由式 (2-6) 和式 (2-7) 可知, a_n 是 n 或 $n\omega_0$ 的偶函数; b_n 是 n 或 $n\omega_0$ 的奇函数。

应用三角函数变换, 可将式 (2-4) 正、余弦函数的同频率项合并、整理, 可得信号 $x(t)$ 另一种形式的傅里叶级数表达式

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega_0 t + \varphi_n) \quad (2-8)$$

式中, 常值分量

$$A_0 = a_0 = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) dt$$

各次谐波分量频率成分的幅值

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (2-9)$$

各次谐波分量频率成分的初相角

$$\varphi_n = \arctan\left(\frac{a_n}{b_n}\right) \quad (2-10)$$

从式 (2-4) 和式 (2-8) 可知, 周期信号可分解成众多具有不同频率的正、余弦 (即谐波) 分量。式中, 第一项 A_0 为周期信号中的常值或直流分量, 从第二项依次向下分别称为信号的基波或一次谐波、二次谐波、三次谐波、……、 n 次谐波, 即当 $n=1$ 时的谐波称为基波 (fundamental wave), n 次倍频成分 $A_n \sin(n\omega_0 t + \varphi_n)$ 称为 n 次谐波 (harmonic)。 A_n 为 n 次谐波的幅值, φ_n 为其初相角。

为直观地表示出一个信号的频率成分结构, 以 ω 为横坐标, 以 A_n 和 φ_n 为纵坐标所作的图称为频谱 (spectrum) 图。 $A_n - \omega$ 图称为幅值谱 (amplitude spectrum) 图, $\varphi_n - \omega$ 图称为相位谱 (phase spectrum) 图。

由于 n 是整数序列, 相邻频率的间隔为 $\Delta\omega = \omega_0 = 2\pi/T_0$, 即各频率成分都是 ω_0 的整数倍, 因此谱线是离散的。频谱中的每一根谱线对应其中一个谐波, 频谱比较形象地反映了周期信号的频率结构及其特征。

【例 2-1】 求周期方波 (见图 2-3a) 的频谱, 并作出频谱图。

解: 周期方波 $x(t)$ 在一个周期内表示为

$$x(t) = \begin{cases} A & 0 \leq t < T_0/2 \\ -A & -T_0/2 \leq t < 0 \end{cases}$$

因 $x(t)$ 是奇函数, 所以有

$$a_0 = 0$$

...