



普通高等院校机械类「十一五」规划教材

工程测试 与信息处理

GONGCHENG CESHI
YU XINXI CHULI

(第2版)

狄长安 孔德仁 贾云飞 申爱平 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等院校机械类“十一五”规划教材

工程测试与信息处理

(第2版)

狄长安 孔德仁 贾云飞 申爱平 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书详细介绍了工程测量的基础知识、工程信号的可测性分析方法、测试系统的基本特性、工程测试中常用传感器技术、常用信号调理及记录仪器、计算机在测试技术中的应用、常用参量测量技术、测试信号处理的数字信号分析基础及工程测试中的常用测试信号处理方法。

为便于读者学习和掌握本书的主要内容,每章都列出学习要点、配有一定的工程应用实例及习题。

本书可作为机械设计制造及其自动化、武器系统与发射工程、地面武器机动工程、过程装备与控制工程、测控技术及仪器、精密仪器与机械及机械电子工程等专业的教科书或参考书,亦可供相关专业的研究生、教师及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程测试与信息处理 / 狄长安等编著. —2 版. —北京:
国防工业出版社, 2010. 6
普通高等院校机械类“十一五”规划教材
ISBN 978 - 7 - 118 - 06620 - 3

I. ①工... II. ①狄... ②孔... III. ①自动检测 - 信息
处理 - 高等学校 - 教材 IV. ①TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 081133 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

涿中印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 21 字数 551 千字

2010 年 6 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 36.00 元(含光盘)

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

信息的获取是人类最基本的活动之一,人类可通过感觉器官获取满足生活的大量信息。但在浩瀚的科学技术领域中欲获取揭示事物内在规律的信息,无论在获取信息的幅值上,还是时间、空间上,或在分辨信息的能力方面,人类的感覺和大脑功能是十分有限的。测试作为定量地获取事物信息的一种手段,而成为现代科学技术研究的一个重要领域。

测试技术是一门专业技术基础课程。本教材针对各专业测试工作中的共性问题展开系统讨论,以测试技术涵盖的经典内容为重点,适当介绍测试技术发展中的新技术,新内容,力求让读者较全面地理解及掌握测试技术。

本书共分为三篇 11 章内容:第一篇为工程测试技术基础篇;第二篇为工程测试应用篇;第三篇为测试信号处理篇。

绪论简要介绍了测试技术及信息处理的内涵和发展趋势,重点阐明本教材的特点及目的;第 1 章工程测量的基础知识介绍了测量的基本方法、标准量及其传递及现代测试系统的组成作初步介绍。第 2 章工程信号的分析及处理基础介绍了信号的分类及描述方法和典型的动态激励信号,重点讨论了工程中常见的周期信号和时限信号的分解及频谱分析方法和随机信号的分析方法,为信号的可测性提供依据。第 3 章测试系统及基本特性针对动态测试的特点,研究测量系统的基本特性及其分析方法。第 4 章工程测试中的传感器技术将传感器按其工作原理分类,阐述其工作原理、结构及特性。第 5 章信号调理、显示及记录仪器介绍了信号调理中的信号放大、滤波、调制解调等重要单元,分析研究其工作原理和用途,同时讨论了常见的显示方式。第 6 章计算机化测试技术介绍了采样定理、数据采集系统、计算机辅助测试技术中常用的接口技术、仪器总线及虚拟仪器系统。第 7 章试验数据处理主要介绍了实验数据的表示方法及回归分析方法。第 8 章误差分析及不确定度评估主要介绍了误差的基本概念及 A 类、B 类不确定度评估的方法。第 9 章常用参量测量介绍了工程中常见的参量(如应力、应变、力、压力、流量、噪声、温度、位移、速度、加速度、振动等的测量)。第 10 章数字信号处理基础讲述数字信号分析、处理方法,重点讨论窗函数、离散傅里叶变换(DFT)、快速傅里叶变换(FFT)及数字滤波器。第 11 章工程测试信号处理讨论了常用的数据处理方法,重点介绍了信号的相关分析、功率谱分析、倒频谱分析、频谱细化分析、小波变换,还介绍了数字滤波及动态补偿技术。

全书由狄长安、孔德仁、贾云飞编写,其中孔德仁、申爱平编写了第 3、4、5、9 章,其余章节由狄长安、贾云飞合作完成。全书由狄长安统稿。

本教材的编写过程中,参考和引用了许多专家学者的论著及教材,在此表示衷心感谢。研究生庞忠根、李幸、白仲斐、蒋东东、周征等协助完成了书稿的录入工作,也在此表示感谢。

由于时间仓促,加上编者们的学识水平有限,教材中的错误与不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

目 录

绪论	1
----	---

第一篇 工程测试技术基础篇

第 1 章 测量的基础知识	4	2.6.2 单位阶跃信号及其谱分析	31
1.1 测量的基本方法	4	2.6.3 单位斜坡信号及其谱分析	32
1.1.1 直接测量	4	习题	33
1.1.2 间接测量	5	第 3 章 测试系统及基本特性	34
1.1.3 组合测量	5	3.1 概述	34
1.1.4 软测量	5	3.1.1 测量系统的基本要求	34
1.2 标准量及其传递	5	3.1.2 线性系统及其主要性质	35
1.2.1 SI 的构成	6	3.1.3 测量系统选用注意事项	36
1.2.2 SI 基本单位	6	3.2 测量系统的静态特性	37
1.3 非电量电测系统的组成	7	3.2.1 灵敏度	37
习题	10	3.2.2 量程及测量范围	38
第 2 章 工程信号描述及其分析方法	11	3.2.3 非线性	38
2.1 概述	11	3.2.4 迟滞性	39
2.2 工程信号的分类	12	3.2.5 重复性	39
2.2.1 确定性信号	13	3.2.6 准确度	40
2.2.2 随机信号	14	3.2.7 分辨率	40
2.3 周期信号	15	3.2.8 漂移	40
2.3.1 周期信号的分解和频谱	15	3.3 测量系统静态特性获取方法	41
2.3.2 周期信号的可测性分析	21	3.4 测量系统动态特性	42
2.4 时限信号(瞬态信号)	23	3.4.1 动态参数测试的特殊问题	42
2.4.1 时限信号的分解和频谱	23	3.4.2 测量系统动态特性的分析	
2.4.2 时限信号与周期信号的		方法及技术指标	42
异同点	26	3.4.3 测量系统的数学模型	43
2.4.3 时限信号的可测性分析	26	3.4.4 传递函数	44
2.5 随机信号	26	3.4.5 频率响应函数	44
2.5.1 随机信号的特征参数	27	3.4.6 冲激响应函数	45
2.5.2 随机信号的幅值域特征估计	28	3.5 测量系统动态特性分析	46
2.6 典型激励信号	29	3.5.1 典型系统的频率响应	46
2.6.1 冲激函数及其谱分析	29	3.5.2 典型激励的系统瞬态响应	50

3.5.3 相似系统	52	4.8.3 热敏电阻	110
3.6 测量系统的动态特性参数 获取方法	53	4.9 智能传感器	112
3.7 测量系统无失真测试条件	55	4.9.1 智能传感器的结构	112
3.8 动态误差修正	56	4.9.2 智能传感器的功能	113
3.8.1 频域修正方法	57	4.9.3 智能传感器的特点	114
3.8.1 时域修正方法	57	习题	115
习题	57	第5章 信号调理、显示及记录仪器	117
第4章 工程测试中的传感器技术	59	5.1 滤波器	117
4.1 概述	59	5.1.1 滤波器的基本参数	118
4.2 应变式电阻传感器	59	5.1.2 一阶无源滤波器	119
4.2.1 金属电阻应变片	60	5.1.3 有源滤波器	121
4.2.2 半导体应变片	61	5.1.4 开关电容滤波器	123
4.2.3 电阻应变片的选用注意事项	62	5.2 信号放大电路	124
4.2.4 应变片的粘贴	64	5.2.1 运算放大器	124
4.2.5 电阻应变片的测量电路	66	5.2.2 实际运算放大器存在的问题	126
4.3 电感式传感器	69	5.2.3 测量放大器	128
4.3.1 自感式传感器	69	5.2.4 程控放大器	130
4.3.2 互感式传感器	71	5.3 调制与解调	132
4.3.3 电涡流传感器	72	5.3.1 幅值调制与解调	132
4.4 电容传感器	74	5.3.2 频率调制与解调	136
4.4.1 工作原理与结构	74	5.4 模拟显示	138
4.4.2 电容传感器的性能改善	76	5.4.1 动圈式显示仪表	138
4.5 磁电式传感器	77	5.4.2 自平衡式显示仪表	138
4.5.1 电磁感应式传感器	77	5.5 数字显示	139
4.5.2 霍尔传感器	78	5.5.1 发光二极管(LED)	139
4.6 压电式传感器	81	5.5.2 液晶显示	140
4.6.1 压电效应	81	习题	142
4.6.2 压电传感器的测量电路	81	第6章 计算机化测试技术	143
4.6.3 应用	84	6.1 概述	143
4.7 光电式传感器	85	6.1.1 智能测量仪器	143
4.7.1 光电效应	85	6.1.2 计算机自动测试系统	143
4.7.2 光电器件	86	6.1.3 计算机数据处理	144
4.7.3 光纤传感器	94	6.2 采样	145
4.7.4 红外传感器	97	6.2.1 采样过程	145
4.7.5 光栅	100	6.2.2 采样定理	145
4.7.6 光电编码器	101	6.2.3 量化	146
4.8 热电式传感器	103	6.2.4 编码	147
4.8.1 热电偶	104	6.3 数据采集系统	149
4.8.2 热电阻	108	6.3.1 数据采集系统的主要组成	149

6.3.2	数据采集系统的主要性能指标	150	8.1.1	误差的概念	181
6.3.3	数据采集系统的结构形式	151	8.1.2	误差的分类	181
6.4	计算机辅助测试技术中的接口技术	152	8.1.3	误差的表示方法	182
6.4.1	概述	152	8.1.4	表征测量结果质量的指标	183
6.4.2	RS232C 标准接口总线	154	8.2	不确定度评定的基本知识	183
6.4.3	GPIB 标准接口总线	156	8.2.1	有关不确定度的术语	184
6.4.4	其他标准接口总线简介	161	8.2.2	产生测量不确定度的原因和测量模型	184
6.5	总线系统	162	8.3	标准不确定度的 A 类评定	186
6.5.1	VXI 总线系统	162	8.3.1	单次测量结果实验标准差与平均值实验标准差	186
6.5.2	PXI 总线系统	164	8.3.2	最小二乘法	190
6.6	虚拟仪器系统	166	8.3.3	不确定度 A 类评定的独立性	190
6.6.1	概述	166	8.3.4	不确定度 A 类评定的自由度和评定度	191
6.6.2	虚拟仪器的结构及特点	166	8.4	标准不确定度的 B 类评定	191
6.6.3	虚拟仪器的系统组成	167	8.4.1	不确定度 B 类评定的信息来源	191
6.6.4	虚拟仪器软件开发平台	168	8.4.2	不确定度的 B 类评定方法	192
习题		168	8.4.3	标准不确定度 B 类评定的流程	195
第 7 章	实验数据处理	169	8.5	合成标准不确定度的评定	195
7.1	概述	169	8.5.1	输入量不相关时不确定度的合成	195
7.2	实验数据的表示方法	169	8.5.2	输入量相关时不确定度的合成	196
7.2.1	表格法	169	8.5.3	合成标准不确定度的自由度	197
7.2.2	图解法	169	8.5.4	合成不确定度的计算流程	198
7.2.3	经验公式	170	8.6	扩展不确定度的评定及报告形式	199
7.2.4	有效数字及数据修约	170	8.6.1	扩展不确定度的评定	199
7.3	回归分析及其应用	171	8.6.2	测量不确定度的报告与表示	199
7.3.1	一元线性回归	171	习题		200
7.3.2	多元线性回归	176			
7.3.3	非线性回归	177			
7.3.4	回归分析应用举例	178			
习题		179			
第 8 章	误差分析及不确定度评估	181			
8.1	误差的定义及分类	181			

第二篇 工程测试应用篇

第 9 章	常用参量测量	202	9.1.1	力值传递	202
9.1	应力、应变及力的测量	202	9.1.2	应变、应力的测量	203
			9.1.3	力的测量	209

9.1.4 测力传感器的标定	211	9.5 温度测量	240
9.2 压力测量	212	9.5.1 概述	240
9.2.1 概述	212	9.5.2 接触式温度测量	243
9.2.2 常用测压传感器	215	9.5.3 非接触式温度测量	247
9.2.3 动态压力测量时管道传输 效应	217	9.6 位移、速度及加速度的测量	248
9.2.4 测压系统的标定	218	9.6.1 概述	248
9.3 流量测量	220	9.6.2 位移测量	249
9.3.1 概述	220	9.6.3 速度测量	252
9.3.2 常用流量计	223	9.6.4 加速度测量	258
9.3.3 流量计的定度	227	9.7 机械振动测试	263
9.4 噪声测量	229	9.7.1 概述	263
9.4.1 噪声测量的基础知识	229	9.7.2 测振系统的组成及合理选择	263
9.4.2 常用噪声测量仪器	233	9.7.3 振动系统特性测试	267
9.4.3 噪声测量的方法	237	9.7.4 机械阻抗测试	274
9.4.4 噪声测量不确定度的影响 因素	240	9.7.5 振动分析方法及仪器	275
		习题	277

第三篇 测试信号处理篇

第10章 数字信号处理基础	279	第11章 工程测试信号处理	298
10.1 数字信号的截断及窗函数	279	11.1 工程测试信号处理的目的	298
10.1.1 信号的截断及能量 泄漏	279	11.2 相关分析及其应用	298
10.1.2 常用窗函数	281	11.2.1 随机信号的相关函数	299
10.2 离散时间信号变换	283	11.2.2 信号相关函数的实现	300
10.2.1 DFS(离散傅里叶级数)	283	11.2.3 信号相关的物理解释 和工程应用	302
10.2.2 DFT(离散傅里叶变换)	284	11.3 功率谱分析及其应用	305
10.2.3 DFT的主要性质	284	11.3.1 定义	305
10.3 FFT(快速傅里叶变换)	285	11.3.2 物理意义	305
10.3.1 DFT直接计算的 工作量	285	11.3.3 功率谱分析的实现	306
10.3.2 提高DFT运算效率的 思路	285	11.3.4 功率谱的应用	308
10.3.3 FFT算法	286	11.3.5 相干函数	310
10.4 数字滤波器	291	11.4 倒频谱技术	311
10.4.1 数字滤波器的分类	291	11.4.1 倒频谱分析的基本原理	311
10.4.2 IIR数字滤波器的设计	292	11.4.2 倒频谱分析的意义	311
10.4.3 FIR数字滤波器设计	294	11.4.3 倒频谱技术的应用	311
习题	297	11.5 频谱细化分析	313
		11.5.1 基于复调制的FFT方法	313
		11.5.2 相位补偿细化方法	315
		11.5.3 应用	316

11.6	动态补偿数字滤波器	317	11.7.2	小波分析在测试信号	
11.6.1	硬件补偿方法.....	317		分析中的应用.....	323
11.6.2	软件补偿方法.....	320	习题		326
11.6.3	动态补偿滤波器应用	321	参考文献.....		327
11.7	小波分析	322			
11.7.1	小波分析基础.....	322			

绪 论

1. 测试技术的内涵

人类对客观世界的认识和改造总是以测试工作为基础的。自古以来,测试技术就渗透在人类的生产活动、科学实验与日常生活的各个方面。人类早期在从事生产活动时,就已经对长度(距离)、面积、时间和重量进行测量,其最初的计量单位或是和自身生理特点相联系(长度),或是与自然环境相联系(如时间)。如古代利用“步弓”丈量土地;利用“日晷”计量时间;利用“绳扣”记录数量等。秦始皇在建立了统一的中央政府以后,立即建立了统一的度量衡制度,说明了恰当的测试工作对发展生产和社会交往的重要性。

在科学研究过程之中,往往需要探求物理现象之间的数量关系。为了确定被测对象的量值而进行的实验过程称为测量。测量是人类认识客观世界,获取定量信息的重要手段。

工程技术中的研究对象往往比较复杂,有许多问题至今还难以进行完善的理论分析和计算,需依靠实验研究来解决实际问题。如牛顿通过实验发表了万有引力定律,伽利略通过实验创造了力学,波义耳通过实验创造了化学,麦克斯韦通过实验创造电磁场理论等。其中,伽利略不满足古代思想家对宇宙进行哲理性的定性描述,主张根据观测和实验对自然界的现象和运动规律进行定量的描述,开创了实验科学,从而开创了近代意义的自然科学。

测试工作需要一定的测试设备,而测试系统是将被测参数转换成具有可直接指示、观测或等效信息的测试设备。信息本身不具备传输、交换的功能,只有通过信号才能实现这种功能,因此测试技术与信号密切相关。信息、信号、测试系统之间关系可表述为获取信息是测试的目的,信号是信息的载体,测试是得到被测参数信息的技术手段。

由此可以了解,测试技术是测量技术与实验技术的总称。定量的描述事物的状态变化和特征总离不开测试。简言之,测试是依靠一定的科学技术手段定量地获取某种研究对象原始信息的过程。这里所讲的“信息”是指事物的状态或属性。如火炮膛内的燃气压力、温度、燃速是其膛内的基本信息。

测试工作的基本任务是通过测试手段,对研究对象中有关信息量做出比较客观、准确的描述,使人们对其有一个恰当的全面认识,并能达到进一步改造和控制研究对象的目的。研究对象所包含的信息是相当丰富的,在实践中,人们总是根据要求测出所感兴趣的有限的信息,而不是全部信息。如测量结果通常是随时间变化的电信号,在这些电信号中,包含着有用信息,也包含有大量不需要的干扰信号。干扰的存在给测试工作带来麻烦,测试工作中的一项艰巨的任务就是要从复杂的信号中提取有用的信号或从含有干扰的信号中提取有用的信息。应该指出的是所谓“干扰”是相对的,在一种场合中,被认为是干扰信号,在另一种场合中却可能是有用信号。

测试工作是一件非常复杂的工作,需要多种学科知识的综合运用。例如,如何估计一个研究对象的模型结构,如何设计试验方法以最大限度的突出所需要的信息,并以比较明显的信号形式表现出来等。但并不是每项测试工作都要经历相同的步骤,应根据测试任务的繁简和要求而不

同。如用天平和砝码就可以称重,用一根尺子就可以量布。而测定自动武器自动机的运动或研究机床的动态特性所进行的测试应是相当复杂的。

从广义的角度来讲,测试工作涉及到试验设计、模型试验、传感器、信号加工与处理(传输、加工和分析、处理)、误差理论、控制工程、系统辨识和参数估计等内容。因此测试工作者应当具备这些方面的相关知识。从狭义来讲,测试工作则是在选定激励方式下,信号的检测、变换、处理、显示、记录以及电量输出的数据处理工作。本教材限于从狭义的范围来讨论测试技术中的基础知识。

2. 测试技术的发展趋势

测试作为定量地获取事物信息的一种手段,已成为现代科学技术研究的一个重要领域。现代科技水平的不断发展,为测试技术水平的提高提供了基础,同时,测试技术水平的提高又会促进新的科技成果和创新。根据编者所掌握的资料来分析,测试技术有以下几个发展方向:

(1) 高灵敏度、高精度、宽量程和多功能测量仪器。

测量仪器及整个测量系统精度的提高,使测得数据的可信度也相应提高。在产品研制过程中要进行大量试验,测量某些性能参数,然后对所测数据进行统计分析。在相同条件下要试验若干次,所测参数才具有一定的可信度。仪器精度的提高,可减少试验次数,从而减少试验经费,降低产品成本。

科学技术的发展需要宽量程的测试仪器。在火炮膛压测试技术中,对常规火炮膛压小于 600MPa 的测试,采用铜柱(或铜球)测压器或压电传感器均可满足要求。为提高火炮射程和射击精度,在高膛压火炮的研究中,膛压可达到 800MPa ~ 1000MPa,甚至 1000MPa 以上,并伴随着 $10^5 \times 9.8 \text{ms}^{-2}$ 的高冲击加速度,这就促使膛压测试技术要相应的发展,研制测压范围更宽的压力传感器以及配套的压力动态标定装置。

(2) 高性能、微型、智能传感器。

新材料,特别是新型半导体材料方面的成就,已经促使很多对力、热、光、磁等物理量或气体化学成分敏感的器件的发展。可以预料,不久的将来,高分子材料、金属氧化物、超导体与半导体的结合材料、非晶半导体、超微粒陶瓷、记忆合金、功能性薄膜等新型材料,将会导致一批新型传感器的出现。光导纤维不仅可用来传输信号,而且可作为物性型传感器。另一个引人注目的发展是由于微电子的发展使得很有可能把某些电路乃至微处理器和传感测量部分做成一体,即传感器具有放大、校正、判断和一定的信号处理功能,组成所谓的“智能传感器”。

(3) 计算机化智能测试系统。

大型综合性试验时,待测参数多,准备时间长,众多的数据依靠手工去处理,不仅精度低,处理周期也太长。采用以计算机为核心的自动测试系统,利用现代数据处理及信息处理技术,可以实现自动校准、自动修正、故障诊断、信号调理、多路采集、自动分析处理并能打印输出测试结果等功能。

(4) 多系统的信息融合技术。

多系统的信息融合是指对来自多个测量系统的数据进行多级别、多方面、多层次的处理,从而产生新的有意义的信息,而这种新信息是任何单一测量系统或传感器所无法获得的。

早在 20 世纪 80 年代中期,一些西方发达国家就开始广泛开展多传感器信息融合技术的研究与应用,现在已研制出“多传感器多平台跟踪情报相关处理”等近百种多传感器信息融合系统,并相继出版了 10 多部信息融合方面的专著。国内对该领域的研究则在 20 世纪 90 年代初才开始逐渐形成高潮,现已研制出少量的初级多传感器信息融合系统。

除军事应用外,多系统信息融合在工业、交通和金融领域进有十分好的应用前景。

3. 信息的处理

由信息论的观点看,信息是客观事物的时间、空间的特殊性,是无所不在、无时不有的,是一个“场”的概念。人们为了某些特定的目的,将需研究的那些信息以各种技术手段表达出来,这种对信息的表达形式称为“信号”。因此信号是某一特定信息的载体,在测试过程中,需要对测试信号进行分析及处理,才能获得信息。

信号分析的目的是使我们能够更加有效地从被测对象中获得有用信息,常用的方法是将复杂信号分解为若干简单信号分量叠加,并以这些分量的组成情况去考察信号的特性,从而使复杂问题简单化。信号分析中一个最基本的方法:把频率作为信号的自变量,在频域里进行信号的频谱分析,研究信号的幅频特性和相频特性。如在动态测试过程中,需对被测信号进行频谱分析,以确定所选的传感器的频率响应范围。

信号处理是指对信号进行某种加工变换或运算(如滤波、变换、增强、压缩、估计、识别等),来获取信息或将之转换成人们希望的另一种信号形式。信号处理包括时域和频域两部分。如采用模拟低通滤波器对加速度传感器输出的振动信号进行滤波,可以避免信号混叠现象的发生。

4. 本书的特点及目的

本课程主要讨论机械工程动态测试中的传感器、中间变换电路及记录显示分析设备的工作及原理,测量系统的静、动态特性的评价方法,测量信号的描述、分析和处理,计算机化测试系统的应用,常用物理量的动态测试方法等。

对高等学校机械工程各有关专业来说,本课程是一门技术基础课。本课程是数学、物理学、电工学、电子学、力学、控制工程及计算机技术等课程的综合应用。本课程具有很强的实践性,只有在学习过程中密切联系实际,加强实验,注重物理概念的理解,才能真正掌握有关知识。本课程在教学环节中安排了相关的必要实验,学习中学生必须主动积极地参加实验,才能受到应有的实验能力的训练,才能获得关于动态测试工作的完整概念,也只有这样,才能初步具有处理实际测试工作的能力。

通过本课程的学习,培养学生能较正确地选用测试系统并初步掌握进行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技术问题打下坚实的基础。从进行测试工作所必备的基本条件出发,学生在学完本课程后应具有下列几个方面的知识和技能:

(1) 掌握信号在基本变换域的描述方法,明确信号的频谱概念,掌握频谱分析的基本原理和方法;了解信号处理的基本方法,相关分析、功率谱分析的基本原理及其应用。

(2) 了解常用传感器、中间变换电路及记录显示设备的工作原理及性能,并能依据测试要求进行合理的选择。

(3) 掌握测试系统的静、动态特性的评价方法和不失真测量条件,并且能正确运用相关理论对测试系统进行分析和选择。了解动态误差的基本概念及常用动态误差修正方法。

(4) 掌握误差的性质、不确定度的评估方法及数据处理的基本方法。

(5) 对动态测试工作的基本问题有一个比较完整的概念,对机械工程中的某些参数的测试能自行确定测试方法,自行设计或选用测试系统,并能对测量结果正确地进行数据处理。

第一篇 工程测试技术基础篇

第1章 测量的基础知识

学习要点

测量的基本方法及分类

标准量及其传递方法

非电量电测系统的组成

测量具有普遍科学意义的条件

1.1 测量的基本方法

测量的最基本形式是比较,即将待测的未知量和预定的标准作比较。由测量所得到的被测对象的量值表示为数值和计量单位的乘积。测量可分为直接测量、间接测量、组合测量及软测量。

1.1.1 直接测量

无需经过函数关系的计算,直接通过测量仪器得到被测量值的测量为直接测量。直接测量又可分为两种:直接比较和间接比较。

直接比较 直接把被测物理量和标准作比较的测量方法称为直接比较。例如要测量一根圆钢的长度,最常用的办法是用一把钢皮尺和它作比较。钢皮尺(米尺)就是作长度测量用的标准。假设测得的圆钢长度是长度标准(米)的2.4倍,就用2.4m作为圆钢长度的示值。长度测量是最简单的直接比较。但是,并不是任何物理量和标准之间的比较,都能直接由人的感官来完成。例如,要比较两只电阻的大小,这就不是人的感官所能胜任的,需要借助于惠斯通电桥来进行未知电阻和标准电阻之间的比较。电阻测量也是一种直接测量,直接比较的一个显著特点是待测物理量和标准量是同一种物理量。

间接比较 直接测量的另一种方法是间接比较。例如测量体温,最常用的是水银温度计。根据水银热胀冷缩的物理规律,温度越高,水银膨胀得越利害,毛细管中的水银柱就上升得越高,水银柱的高度和体温之间有着确定的函数关系,因此可以用水银柱的高度作为被测温度的量度。这里是通过热胀冷缩的规律把温度的高低转化为水银柱的长度,然后,通过对水银柱长度的比较间接地得出被测温度的大小。这就是间接比较。概括来讲,间接比较是利用仪器仪表——统称之为测量系统——把原始形态的待测物理量的变化变换成与之保持已知函数关系(通常是线性关系)的另一种物理量的变化,并以人的感官所能接受的形式(通常是位置的变化),在测量系统的输出端显示出来。用弹簧测力,用直流电流表测电流等都是间接比较的例子。

无论直接比较还是间接比较,都是直接用测量仪器测出待测量的大小,都属于直接测量。

1.1.2 间接测量

间接测量是在直接测量的基础上,根据已知的函数关系,计算出所要测量的物理量的大小。例如在弹道实验中利用平均速度法测量弹丸的初速,就是先用直接测量测出两靶之间的距离和弹丸通过这段距离所需要的时间,然后由平均速度公式计算出弹丸的运动速度。这种测定弹丸速度的方法,属于间接测量。

一般,尽可能地不采用间接测量,因为它的准确度往往不如直接测量高,但是,有时所要测的物理量本身就是根据数学关系定义的,没有比较的标准可供使用(如冲量、马赫数等),或者没有能够探测所要测量的物理量的仪器,在这些场合,就不得不采用间接测量了。

1.1.3 组合测量

将直接测量值或间接测量值与被测量值之间按已知关系组合成一组方程(函数关系),通过解方程组得到被测值的方法。组合测量实质是间接测量的推广,其目的就是不提高计量仪器准确度的情况下,提高被测量值的准确度。例如,分别对线段 x 和 10 倍 x 的线段进行直接测量。测得结果分别为 l_1 、 l_2 , 即有

$$\begin{cases} x = l_1 \\ 10x = l_2 \end{cases}$$

可得 $x = l_2/10$, 明显比 $x = l_1$ 直接测量具有更高的测量精度。本例实质是组合测量的特例及应用。

1.1.4 软测量

软测量技术(Soft Sensor Technology)就是利用易测过程变量与难以直接测量的待测过程变量之间的数学关系,通过数学计算和方法估计,在测定易测量的基础上实现对待测过程变量的测量。

软测量技术出现在近年来的过程控制及检测领域,其实质也是基于间接测量的思想。软测量是在成熟的硬件基础上,以计算机技术为核心,通过模型运算处理而完成的,以软测量技术为基础的软仪表,具有通用性好、灵活性强、适用范围宽等优点。软测量技术的关键是建立表征辅助变量(易测过程变量)与主导变量(难以直接测量的待测过程变量)之间数学关系的软测量模型。按建立软测量的数学模型的方法不同可将软测量技术分为:机理建模、回归分析、状态估计和辨识、模式识别、人工神经网络、模糊数学、相关分析、过程层析成像、非线性处理技术等。

如对于辅助变量较少的情况,常采用多元线性回归中的逐步回归技术可获得较好的软测量数学模型。对于辅助变量较多的情况,通常要借助机理分析,首先获得模型各变量组合的大致框架,然后再采用逐步回归方法获得软测量模型等方法。

1.2 标准量及其传递

为使测量结果具有普遍的科学意义,测量必须具备以下两个条件:首先用作比较的标准必须是精确已知的,得到公认的;其次,进行比较的测量系统必须工作稳定,经得起检验。

1.2.1 SI 的构成

为了求得国际上的统一,国际计量会议建立了统一的“国际单位制”(International System of Unit),简称 SI 制。SI 由 SI 单位和 SI 单位的倍数单位构成。SI 单位是国际单位制中由基本单位和导出单位构成一贯单位制的那些单位,SI 导出单位又包括 SI 辅助单位在内的具有专门名称的 SI 导出单位和具有组合形式的导出单位。

为表述方便,SI 规定了 7 个基本单位。SI 导出单位是用基本单位以代数形式表示的单位。其中采用基本单位的乘除运算符号来表示的单位称为组合单位。如速度的 SI 单位为 m/s。

在 SI 的导出单位中,规定了具有国际计量大会通过的专门名称和符号,如能量的单位通常用焦耳(J)来代替牛顿米(N·m)。

用 SI 基本单位和具有专门名称的 SI 导出单位和 SI 辅助单位以代数形式表示的单位称为组合形式的 SI 导出单位。

SI 单位的倍数单位包括 SI 单位的十进制倍数和分数单位,如10⁶ 称为兆(M)。SI 单位的倍数单位不能单独使用。

1.2.2 SI 基本单位

国际单位规定 7 个基本单位:米、千克、秒、安培、开尔文、坎德拉、摩尔。

① 米 长度单位,单位符号为 m。1884 年曾规定 1m 等于保存在巴黎国际标准计量局内的铂铱合金棒上两根细线在 0℃时的距离。1960 年第十一次国际计量会议重新规定,1m 等于真空中氪-86(Kr-86)在 2p₁₀和 5d₅能级间跃迁时辐射的桔红光的波长的 1650763.73 倍。1983 年新基准定义 1m 是光在真空中(1/299792458)s 时间内运动的距离。

规定英制长度单位和 SI 制长度单位之间的换算关系为

1 英寸 = 2.54cm (1-1)

② 千克(公斤) 质量单位,单位符号为 kg。1889 年规定以保存在巴黎国际标准计量局内的高度和直径均为 39mm 的铂铱合金圆柱体—国际公斤原器为质量标准。质量标准可保持(1~2)×10⁻⁸的准确度。

规定英制质量单位与 SI 制质量单位之间的换算关系为

1 磅 = 453.59237g (1-2)

③ 秒 时间单位,单位符号为 s。规定以英国格林尼治 1899 年 12 月 31 日正午算起的回归年的 1/31556925.9747 为 1s。但该标准的建立需要依靠天文观测,使用起来不方便,1967 年第十三次国际计量会议上规定 1s 为铯-133(Cs-133)原子基态的两个超精细能级之间跃迁所产生的辐射周期的 9192631770 倍的持续时间。该标准的准确度可达 3×10⁻⁹。

④ 安培 电流强度单位,单位符号为 A。真空中两根相距 1m 的无限长的圆截面极小的平行直导线内通以恒定的电流,使这两根导线之间每米长度产生的力等于 2×10⁻⁷N,这个恒定电流就是 1A。它由电流天平(安培天平)来实现。

⑤ 开尔文 热力学温度单位,单位符号为 K。是水的三相点(即水的固、液、气三相共存的温度)的热力学温度的 1/273.15。热力学温标是建立在热力学第二定律的基础上的,它和工作介质的性质无关,因此是一种理想的温标。热力学温标因绝对零度无法达到而难以实现,故又规定用国际温标来复制温度基准。国际温标由基准点、基准温度计和补插公式三部分组成。它选择一些纯净物质和平衡态温度作为温标的基准点,1968 年国际温标共规定了十一个基准点,然后又规定了在不同温度区间中使用的基准温度计和插值公式。例如,在冰点(0℃)和铟点

(630.5℃)之间,采用纯铂电阻温度计为基准温度计,在这个温度区间内各中间点的温度,用纯铂电阻温度计按式(1-3)计算,即

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (1-3)$$

式(1-3)中, R_0 、 A 和 B 三个常数,通过冰点(0℃)、汽点(100℃)、硫点(444.600℃)来测定。

摄氏温标是工程上通用的温标。摄氏温度和国际温标间的换算关系为

$$t = T - 273.15(^\circ\text{C}) \quad (1-4)$$

$$T = t + 273.15(\text{K}) \quad (1-5)$$

式(1-4)、式(1-5)中, t 为摄氏温度, T 为国际温标。

⑥ 坎德拉 发光强度单位,单位符号为 cd。规定 1cd 是一光源在给定方向上的发光强度,该光源发出为的频率 $540 \times 10^{12}\text{Hz}$ 的单色辐射,且在此方向上的辐射强度为 $(1/683)\text{W/sr}$ 。

⑦ 摩尔 物质质量的单位,单位符号为 mol。规定构成物质系统的结构粒子数目和 0.012kg 碳-12 中的原子数目相等时,这个系统的物质的量为 1mol。使用这个单位时,应指明结构粒子,它们可是原子、分子、离子、电子、光子及其他粒子,或是这些粒子的特定组合。

在国际单位制中,其他物理量的单位可通过与基本单位相联系的物理关系来定。例如,速度单位用物理方程 $v = kl/t$ 来定义,若长度 l 和时间 t 的单位分别为米和秒,并令 $k = 1$,得速度单位 (ms^{-1})。

1977 年 5 月 17 日,国务院发布《中华人民共和国计量管理条例》规定:“国家基准计量仪器是实现全国量值统一的基本依据,由中华人民共和国标准计量局(简称国家计量局)根据生产的需要组织研究和建立,经国家鉴定合格后使用”。1984 年 2 月 27 日国务院又发布了统一实行法定计量单位的命令,进一步统一我国的计量单位,颁布了《中华人民共和国计量单位》。1993 年 12 月 27 日国家技术监督局参照先进的国际单位制,结合我国的实际情况发布了新的国家标准 GB 3100 ~ GB 3102—93《量和单位》。

为适应全国各地区、各部门生产建设和科学研究的需要,除国家标准计量局管理的国家计量基准器外,还要根据不同等级的准确度建立各级计量标准器及日常使用的工作标准器。例如温度测量,除国家标准计量局遵照国际温标规定,建立一套温度基准(包括基准温度计和定点分度装置)作为全国温度最高标准外,还设立了一级和二级标准温度计,逐级比较检定,把量值传递到工作温度计,使全国温度计示值都一致,以得到统一的温度测量。

对于各个导出单位,我国也建立了相应的测量标准,如力的标准、加速度标准等。这些量的标准制定和建立及量值的传递,是进行准确测量的基础,对实际测量具有重大意义。

1.3 非电量电测系统的组成

现代测量技术的一个显著特点是采用非电量的电测法。即首先将输入物理量转换成电量,然后再进行必要的调节、转换、运算,最后以适当的形式输出。这一转换过程决定了测量系统的组成。只有对测试系统有一个完整的了解,才能按照实际需要设计或搭配出一个有效的测试系统,以解决实际测试课题。另一个特点是采用计算机作为测量系统的核心器件,具有数据处理、信号分析及显示功能。

按照信号传递方式来分,常用的测试系统可分为模拟式测试系统和数字式测试系统。

如图 1-1 所示,一个完整的测试系统包括以下几部分:传感器、信号变换与测量电路、显示与记录器及数据处理器、打印机等外围设备。此外还有传感器标定设备、电源和校准设备等都是附属部分,不属于测试系统主体范围内,数据处理器与打印机也按具体情况的需要而添置。

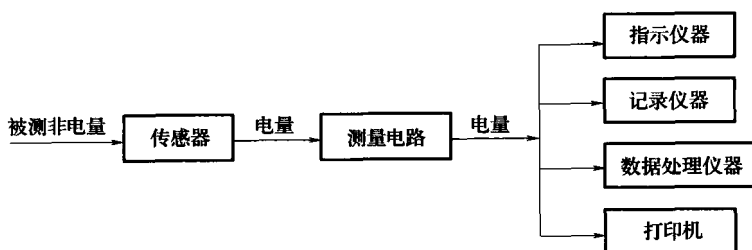


图 1-1 测试系统的组成

现对上述各组成部分扼要介绍如下：

1) 传感器

传感器是整个测试系统实现测试与自动控制(包括遥感、遥测和遥控)的首要关键环节,它的作用是将被测非电量转换成便于放大、记录的电量。在工业生产的自控过程中,几乎全靠各种传感器对瞬息变化的众多参数信息进行准确、可靠、及时的采集(捕获),以达到对生产过程按预定工艺要求进行随时监控,使设备和生产系统处于最佳的正常运转状态,从而保证生产的高效率和高质量。因此,在国内外人们对传感器的重要作用已有充分认识,投入了大量的人力与物力从事研究与开发性能优良、测试原理新颖的传感器。

传感器是整个测试系统中采集信息的首要环节,所以有时称传感器为测试系统的一次仪表,其余部分为二次仪表或三次仪表。作为一次仪表的传感器往往又由两个基本环节组成,如图 1-2 所示。

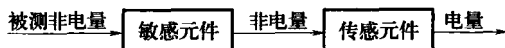


图 1-2 传感器的组成

(1) 敏感元件(或称预变换器,也统称弹性敏感元件)。非电量到电量的变换时,有时需利用弹性敏感元件,先将被测非电量预先变换为另一种易于变换成电量的非电量(例如应变或位移),然后再利用传感元件,将这种非电量变换成电量。弹性敏感元件是传感器的核心部分,在电测技术中占有极为重要的地位。它常由金属或非金属材料做成,当承受外力作用时,它会产生弹性变形;当去除外力后,弹性变形消失并能完全恢复其原来的尺寸和形状。

(2) 传感元件。凡是能将感受到的非电量(如力、压力、温度梯度等)直接变换为电量的器件称为传感元件(或称变换元件)。例如应变计、压电晶体、压磁式器件、光电元件及热电偶等。传感元件是利用各种物理效应或化学效应等原理制成的。因此,新的物理或化学效应被发现并应用到测试技术中,则将使传感元件的品种日趋丰富,性能更加优良。但应指出,并不是所有的传感器都包括敏感元件和传感元件两部分。有时在机—电量变换过程中,不需要进行预变换这一步,例如热敏电阻、光电器件等。另外一些传感器,敏感元件与传感元件合二为一,如固态压阻式压力传感器等。

2) 中间变换与测量电路

中间变换与测量电路依测量任务的不同而有很大的伸缩性。在简单的测量中可完全省略,将传感器的输出直接进行显示或记录。在一般的测量中信号的转换(放大、调制解调、滤波等)是不可缺少的,可能包括多台仪器。复杂的测量往往借助于计算机进行数据处理。如果是远距离测量,则数据传输系统是不可少的。

3) 显示与记录仪器

显示与记录仪器的作用是把中间变换与测量电路送来的电压或电流信号不失真地显示和记