

191

7M938.8-43

236

高等学校通用教材

非电量测量技术基础

张迎新 雷道振 编著
陈 胜 王盛军



A0962140

北京航空航天大学出版社

<http://www.buaapress.com.cn>

内容简介

本书主要介绍测量技术基础知识和非电量测量技术的一般原理及常用方法。全书内容可分为三大部分。第一部分是测量技术基础知识,包括第1~3章,介绍测量误差的一般处理方法和测量系统的基本特性。第二部分是电量测量技术,包括第4~6章,介绍常用传感器的基本原理和使用方法、调节电路的原理及显示记录器。第三部分是主要物理量的测量,包括第7~11章,介绍压力、推力、振动、流量、温度等参数的测量及现代数据采集系统的特点和分类。

本书可作为大专院校非仪器专业的机械类和航空航天类专业学生的教材,也可供从事相关专业的科研实验人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

非电量测量技术基础/张迎新等编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2002.2

ISBN 7-81077-141-8

I. 非… II. 张… III. 非电量测量—基本知识
IV. TP938.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 090619 号

非电量测量技术基础

张迎新 霍道振 编著
陈 胜 王盛军
责任编辑 王 实

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:82317024 传真:82328026

<http://www.buaapress.com.cn>

E-mail:pressell@publica.bj.cninfo.net

北京密云华都印刷厂印装 各地书店经销

开本:787×1092 1/16 印张:18.5 字数:474 千字

2002 年 2 月第 1 版 2002 年 2 月第 1 次印刷 印数:4850 册

ISBN 7-81077-141-8/TP·078 定价:27.00 元

前 言

随着科学的发展,人类已进入信息社会,为迅速获得准确的信息,离不开非电量测量技术。一个国家的现代化水平是用其自动化水平来衡量的,而自动化水平是与现代测量技术水平分不开的,因而非电量测量技术在科研、生产和国防事业中的作用越来越重要。现在很多大专院校已把“非电量测量技术”作为工科学生必须掌握的专业基础课。

由于现代科学技术的迅速发展,特别是电子技术、计算机技术的迅速发展,使非电量测量技术日新月异。近年来,不但传感器发展迅速,而且很多相配套的采集记录仪器也在不断地更新换代。例如,20世纪90年代以前经常使用的光线示波器、磁带记录仪等,现在已逐渐淘汰,而目前的一些相关教材中这方面的内容却还没有更新,本书在这方面作了补充和修改。此外,本书还在误差理论及数据处理章节中,增加了2001年国家计量技术法规统一宣贯教材中测量不确定度的内容;在流量测量方面,增加了深冷介质的测量方法;在数据采集系统部分,增加了当代最先进的太平洋6000采集系统的介绍。因而,本书在内容上具有一定特色,同时力求较全面地反映国内外先进的测量技术。

本书主要介绍测量技术基础知识和非电量测量技术的一般原理及常用方法。全书内容可分为三大部分。第一部分是测量技术基础知识,包括第1~3章,介绍测量误差的一般处理方法和测量系统的基本特性。第二部分是电量测量技术,包括第4~6章,介绍常用传感器的基本原理和使用方法、调节电路的原理及显示记录器。第三部分是主要物理量的测量,包括第7~11章,介绍压力、推力、振动、流量、温度等参数的测量及现代数据采集系统的特点和分类。

为了便于复习,在每章后边都附有习题。

“非电量测量技术”是一门综合性较强的课程,是建立在“物理”、“高等数学”、“电子技术”及“微机原理及应用”等课程上的专业基础课。

通过本教材的学习,可以使学生对非电量测量技术的内容有一个较完整的概念,并初步掌握一般物理量参数测量的基本原理和方法,掌握一定程度的实验测量技能、最基本的实验数据处理及误差分析方法;还可以使学生具备选择或设计一个较合理的非电量测量系统,正确使用、检验常用仪表,对测量参数进行数据处理和分析,并对一般测量系统中的技术问题具有一定的分析和处理能力。

本书在写作时特别注意到适当控制理论深度,减少公式推导,并在重点和难点的讲授上力求深入浅出、通俗易懂。

本课程将为培养学生独立解决工程问题和科学实验研究的能力打下一定基础。

本书可作为大专院校非仪器专业的机械类和航空航天类专业学生的教材,也

可供从事相关专业的科研实验人员参考。

本书是作者在多年从事“火箭发动机参数测量技术”的教学和科研实践的基础上,同时参阅了部分其他院校和科研单位出版的教材和资料编写完成的。在此,对引用文献的作者致以谢意。

本书由张迎新主编;雷道振编写了第3、5章,陈胜编写了第11章,王盛军编写了第6章,其余由张迎新编写。

本书由北京理工大学教授周生国担任主审,北京航空航天大学教授何立民审查了第1,3,5,11章,北京总装备部指挥技术学院李仕学教授审查了第2,3,5,11章,航天工业总公司叶德培研究员审查了第2章并做了多处修改。在此,对参加审稿的专家教授表示衷心的感谢,特别感谢担任主审工作的周生国教授,他对本书的主审认真负责,给以了真诚的支持和帮助。

本书在编写和出版过程中得到了很多同志的大力支持和帮助,其中包括:航天工业总公司101研究所副所长杨思峰、科研处长刘新民、测量室主任何国胜、工程师杨征,航天工业总公司高级工程师张恂,北京昆仑海岸传感技术中心张素琼总工程师等。他们对本书进行了审阅,并提出了很好的修改意见。陈胜、程小非等画了大部分插图。马利茹、马小龙、单宝堂、郭东文、贾东、姚丽坤、解文凯、程龙等同志参加了部分录入工作。北京航空航天大学出版社的副总编王小青、编辑王实为本书的出版付出了辛勤的劳动,在此一并表示衷心的感谢。

由于水平有限,错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2001年10月

目 录

第 1 章 概 论

- 1.1 非电量测量技术的作用..... 1
- 1.2 非电量测量系统的组成..... 3
- 1.3 非电量测量技术的发展..... 4

第 2 章 测量误差与数据处理

- 2.1 误差的基本概念..... 6
 - 2.1.1 测量误差的定义..... 6
 - 2.1.2 误差来源..... 7
 - 2.1.3 误差的分类..... 8
 - 2.1.4 测量的准确度、精密度 8
- 2.2 随机误差..... 9
 - 2.2.1 随机误差的分布规律..... 9
 - 2.2.2 标准偏差的特性与估计 ... 10
 - 2.2.3 测量值的置信区间与置信
概率 12
 - 2.2.4 异常数据的剔除 14
 - 2.2.5 测量列的数据处理步骤 ... 15
- 2.3 系统误差 17
 - 2.3.1 系统误差的产生原因 17
 - 2.3.2 系统误差的特点及常见变
化规律 17
 - 2.3.3 系统误差的发现 18
 - 2.3.4 系统误差的减小 19
- 2.4 测量不确定度^{[3][5]} 20
 - 2.4.1 不确定度的术语 20
 - 2.4.2 误差与不确定度的区别 ... 21
 - 2.4.3 不确定度的评定方法 22
 - 2.4.4 测量不确定度的评定步骤
..... 28
- 2.5 测量数据处理 30
 - 2.5.1 测量数据的表示方法 30
 - 2.5.2 建立经验公式的步骤 31
 - 2.5.3 一元线性回归 32

- 习 题..... 34

第 3 章 测量系统的基本特性

- 3.1 概 述 35
- 3.2 测量系统的静态特性 36
 - 3.2.1 静态特性曲线 36
 - 3.2.2 非线性 36
 - 3.2.3 迟滞性 37
 - 3.2.4 重复性 37
 - 3.2.5 灵敏度 38
 - 3.2.6 分辨力 38
 - 3.2.7 量 程 39
- 3.3 测量系统的动态特性 39
 - 3.3.1 传递函数 39
 - 3.3.2 频率响应函数 40
 - 3.3.3 测量系统的频率响应 41
 - 3.3.4 测量系统的阶跃响应 44
 - 3.3.5 测量系统动态特性参数的
测定 47
- 习 题..... 48

第 4 章 传感器

- 4.1 传感器概述 49
 - 4.1.1 传感器的作用 49
 - 4.1.2 传感器的组成 49
 - 4.1.3 传感器的分类 50
 - 4.1.4 传感器的命名法 50
 - 4.1.5 传感器的发展 51
- 4.2 电阻式传感器 51
 - 4.2.1 金属应变式传感器 51
 - 4.2.2 半导体压阻式传感器 56
- 4.3 电容式传感器 59
 - 4.3.1 电容式传感器的工作原理
..... 59
 - 4.3.2 差动电容传感器 61

4.3.3 测量电路	63	4.10.2 光导纤维导光的基本原理	106
4.3.4 电容传感器的特点及应用	64	4.10.3 光纤的类型	107
4.4 电感式传感器	65	4.10.4 光纤传感器的组成及原理	108
4.4.1 自感型	65	4.10.5 光纤传感器的分类	108
4.4.2 互感型	67	4.10.6 光纤传感器的主要元器件	110
4.5 电涡流式传感器	70	4.10.7 光纤传感器的应用	111
4.5.1 电涡流效应	70	4.11 传感器的不确定度计算	113
4.5.2 等效电路	70	4.11.1 传感器的静态校准曲线及曲线拟合	113
4.5.3 电涡流传感器的结构和工作原理	71	4.11.2 传感器的静态基本性能指标	114
4.5.4 测量电路	72	4.11.3 传感器的不确定度计算 ^[43]	114
4.5.5 被测体的材料、形状和大小对测量的影响	73	4.11.4 例 题	115
4.5.6 电涡流传感器的应用	74	习 题	117
4.6 磁电式传感器	75		
4.6.1 磁电感应式传感器	75	第5章 信号调节电路	
4.6.2 霍尔传感器	77	5.1 电桥电路	119
4.7 压电式传感器	82	5.1.1 直流电桥的工作原理	120
4.7.1 压电效应	82	5.1.2 电桥的基本特性	121
4.7.2 压电材料	84	5.1.3 电桥常用工作方式	122
4.7.3 压电式传感器的工作原理	85	5.1.4 电桥应用举例	123
4.7.4 压电式传感器的输出	86	5.1.5 交流电桥	124
4.7.5 压电式传感器的测量电路	87	5.2 放大器	126
4.7.6 压电式传感器的特点	89	5.2.1 测量放大器	126
4.8 热电式传感器	90	5.2.2 程控增益放大器 ^[49]	127
4.8.1 热电偶	90	5.3 滤波器	129
4.8.2 热电阻	95	5.3.1 理想滤波器 ^[25]	130
4.9 光电式传感器	98	5.3.2 实际滤波器	131
4.9.1 光电效应	99	5.4 线性化电路	134
4.9.2 光敏电阻	99	5.4.1 测量系统中的非线性	134
4.9.3 光电池	101	5.4.2 测量系统中非线性的处理方法	134
4.9.4 光敏晶体管	103	5.4.3 线性补偿环节特性的获取方法	135
4.9.5 光电传感器的类型及应用	104	5.4.4 非线性校正电路	136
4.10 光纤传感器	105		
4.10.1 斯乃尔定理	106		

5.5 调制与解调.....	139	7.2.1 电阻应变式压力传感器.....	161
5.5.1 调幅与解调 ^[25]	139	7.2.2 压电式压力传感器.....	164
5.5.2 调频与解调.....	142	7.2.3 压阻式压力传感器.....	165
习 题	144	7.3 压力传感器的校准.....	165
第 6 章 显示记录器		7.3.1 压力传感器的静态校准.....	165
6.1 笔式记录器.....	145	7.3.2 压力传感器的动态校准.....	167
6.2 动态测试分析记录仪.....	146	7.4 力传感器.....	169
6.2.1 动态测试分析记录仪的主要特点.....	146	7.4.1 力传感器的工作原理.....	170
6.2.2 动态测试分析记录仪的工作原理.....	147	7.4.2 电阻应变式力传感器举例.....	170
6.2.3 主要技术性能指标.....	148	7.4.3 应变式力传感器的桥路补偿 ^[2]	172
6.2.4 动态测试分析记录仪的使用注意事项.....	149	7.5 力传感器的校准.....	173
6.3 无纸记录仪.....	149	7.5.1 力传感器的静态较准.....	173
6.3.1 无纸记录仪的基本结构.....	150	7.5.2 力传感器的动态校准.....	176
6.3.2 输入处理单元.....	151	7.6 压力、力测量实例	178
6.3.3 组态操作介绍.....	153	7.6.1 测量系统的组建及准备.....	178
6.4 数字存储示波器.....	153	7.6.2 压力、推力测试系统的现场校准.....	180
6.4.1 数字存储示波器的基本工作原理 ^[19]	154	7.6.3 电校准.....	182
6.4.2 数据采样方式.....	155	7.6.4 压力、力测量时要注意的问题.....	184
6.4.3 数字存储示波器的主要功能特点.....	155	习 题	185
6.4.4 数字存储示波器的主要技术指标.....	156	第 8 章 温度测量	
习 题	157	8.1 温标及常用测温方法.....	186
第 7 章 压力与力的测量		8.1.1 温 标.....	186
7.1 概 述.....	158	8.1.2 常用测温方法.....	187
7.1.1 压力的基本概念.....	158	8.2 热电偶测温.....	188
7.1.2 压力量值的传递标准.....	158	8.2.1 热电偶结构.....	188
7.1.3 压力检测的基本方法.....	159	8.2.2 热电偶测温的冷端补偿.....	190
7.1.4 力的基本概念.....	159	8.2.3 与热电偶配套的测温仪表.....	192
7.1.5 力量值的传递标准.....	159	8.2.4 热电偶的连接方式.....	193
7.1.6 力检测的基本方法.....	161		
7.2 压力传感器.....	161		

8.2.5 热电偶用于固体表面温度测量	194
8.2.6 热电偶测量高速气流温度 ^[2]	195
8.2.7 热电偶测温误差	197
8.3 电阻温度计测温	199
8.3.1 金属热电阻的结构型式 ^{[26][32]}	199
8.3.2 热电阻测量线路	200
8.3.3 热电阻温度变送器	200
8.4 温度传感器的校验	201
8.4.1 比较法校验	201
8.4.2 在标准温标条件下校验	202
8.5 其他测温方法	203
8.5.1 全辐射高温计	203
8.5.2 红外测温仪	204
习 题	205

第9章 振动测量

9.1 振动基本理论知识	206
9.1.1 振动的分类	206
9.1.2 各类振动特点及变化规律	207
9.2 测振传感器	210
9.2.1 绝对式测振传感器的工作原理	211
9.2.2 相对式测振传感器的工作原理	214
9.2.3 测振传感器实例	216
9.3 测振传感器的校准	219
9.3.1 测振传感器校准的基本内容	219
9.3.2 常用校准方法	220
9.4 振动测量	221
9.4.1 选择适当测振传感器	221
9.4.2 选择测振放大器	222
9.4.3 测振系统的标定	223
9.4.4 振动测量点的选择和测振	

传感器的安装	224
9.4.5 振动测量及测振结果分析	226
9.4.6 振动测量记录与分析仪器	227
习 题	228

第10章 流量测量

10.1 流量传感器	229
10.1.1 涡轮流量计	230
10.1.2 靶式流量计	233
10.1.3 卡门旋涡流量计	234
10.1.4 超声波流量计	235
10.2 流量计的校准	236
10.2.1 定容法	237
10.2.2 称重法	238
10.2.3 比较法	239
10.3 流量计法测量流量	239
10.3.1 流量测试系统	239
10.3.2 流量系统标定	241
10.3.3 流量信号数据的处理	241
10.4 其他测量流量的方法	241
10.4.1 动态称重法测量流量	241
10.4.2 高精度分节式液面计测量流量	243
习 题	244

第11章 现代数据采集系统

11.1 现代数据采集系统概述	245
11.1.1 现代数据采集系统的功能	245
11.1.2 现代数据采集系统的特点	246
11.1.3 现代数据采集系统的分类	247
11.1.4 数据采集/控制系统的基本构成	248
11.1.5 系统总线概述	250
11.2 现代数据采集系统的设计	251

11.2.1 确定信号的特征	252	11.4.2 干扰电压	267
11.2.2 选择传感器	252	11.4.3 抑制干扰的措施	267
11.2.3 信号调节与处理	253	习 题	269
11.2.4 计算机系统硬件和软件 设计	254	附 录	
11.2.5 信号的分析与处理	255	附录 1 压力单位换算表	270
11.3 数据采集系统举例	255	附录 2 铂铑 10-铂热电偶(S 型)分 度表	271
11.3.1 标准总线数据采集系统	255	附录 3 镍铬 镍硅热电偶分度表	271
11.3.2 专用数据采集系统	259	附录 4 Pt100 铂热电阻分度表.....	278
11.3.3 数据采集系统应用举例	264	附录 5 Cu100 铜热电阻分度表 ...	281
11.4 测量系统的干扰及抑制方法	266	参考文献	
11.4.1 干扰源	266		

第 1 章 概 论

1.1 非电量测量技术的作用

测量是借助专门的仪器设备,把一个未知物理量与作为计量单位的标准量进行定量检查和比较,从而确定被测量的过程。简言之,测量是以确定被测量量值为目的的一系列操作。

测量有多种分类方法,常用的有按测量值的获得方法分类、按测量目的分类等。

按测量值的获得方法,可分为直接测量、间接测量和组合测量。

直接测量是直接得到被测量的测量方法;间接测量是直接测量与被测量之间有一定函数关系的其他量,再根据直接测量值与被测量的函数关系计算得到被测量;组合测量是用直接测量和间接测量得到的量值与相对应的被测量按已知关系组合,求出其拟合方程,再通过解方程的方法得到被测量。

按测量目的,可分为定值测量和参数检测。

定值测量是按一定不确定度确定被测量实际值的测量;参数检测是以技术标准、规范或检定规程为依据,判断被测量是否合格的测量。

非电量测量技术所涉及的内容主要是将除电量以外的物理量(及化学量)如温度、压力、振动、化学成分、位移等用各种手段变换为电量,从而进行准确测量的技术。

在科学实验中,为了了解一个物理现象或验证一个理论,必须对实验中有关物理量进行测量,以获得确切的数和量的概念;在生产过程中,为了检查、监督和控制生产过程,使之处于最佳工作状态,也必须对描述它们特性的各种参数进行测量,如大小、方向、变化速度等,以便掌握它们。

人类要想更好地认识和改造自然,推进工农业生产自动化的发展,加快国防现代化的步伐,就要正确地获取自然界、工农业生产及各种武器试验中所产生的物理量信息。只有正确地认识世界,才能更好地改造世界。所以,现代化的非电量测量技术水平是科学技术和生产力发展的重要标志。没有现代化的非电量测量技术就不可能快速发展国民经济,也不可能有现代化的国防事业。

测量与科学技术的关系如此紧密,它的应用之广是不言而喻的。现代工业、农业、国防、教育、医疗、交通、贸易等,各行各业都迫切需要测量技术。现代化的测量技术促进了人类社会的不断进步。

测量技术虽然从古代就开始了,但是现代测量技术却是在近 50 多年才发展起来的。

现代化的非电量测量技术具有许多突出的优点:

- ① 它的反应速度快,可以测量物理量的瞬态值及变化过程;
- ② 可以测量微弱信号,并将转换的电信号进行长距离传输,以便于远距离操作与控制;
- ③ 测量精度高、功能齐全、灵活方便,并能自动、连续地进行测量;
- ④ 可输出的电信号易于与计算机连接、记录和处理数据。

所以,在工农业生产、国防试验及各科学技术部门非电量测量技术都得到了广泛应用。

例如,在机械工业中最常用的机床,通过采用压电加速度计、力传感器和速度传感器等非电量测试仪表再配合单片机进行控制处理,便可以实时测量到机床工作时切削力的大小和变化、刀具的磨损情况、工件表面质量的变化以及在切削状态下的动态稳定性等情况,从而更好地控制机床的工作,大大地提高了自动化程度和产品精度。

又如,在石化行业的炼油自动化生产系统中,必须对炼油生产过程中各环节的工作状态如流体的压力、温度及成分等进行实时监测和控制,以确保炼制出合格产品。

此外,为了确保安全生产,对动力设备的工作情况也要实时进行严格地监测和控制等等,所有这些都离不开非电量测量技术。

在国防工业中则更是离不开非电量测量技术。例如,作为现代科学技术尖端之一的火箭发动机,从开始设计到样机试飞,中间要进行成百上千次试验。火箭发动机的地面试车台就是一套完整的非电量测量系统,在进行地面热试车(火箭发动机地面试验术语)时,为了研究发动机的强度,需要有上百个应变片和测振传感器;为了研究燃料工作的情况,需要测量发动机工作时有关部位的压力、流量、温度及转速等。现在理论和实践已证明,试验次数将随着测试系统精度的提高而减少。因而,要想取得火箭发动机准确、可靠的试验数据,要想节省火箭发动机试验的资金和时间,就必须采用现代化的非电量测量技术。

又如,每架新设计的飞机,均需要通过风洞试验测定机身、机翼的受力和振动分布情况,以验证和改进设计,仅此一项就要用到上千块应变片和相应的测量电路。而且还需要测量发动机的转速、扭矩、振动、温度、压力、气流等各种物理量。每架飞机上都装上百个传感器,用以监测飞行时各部位的工作状态,并将其转换成电信号传送到驾驶舱的指示仪表上。

在医学生物领域,由于心电图机、CT 多层螺旋扫描仪、磁共振成像设备、动态心电/动态血压测试系统、多普勒脑血管测量仪、超声诊断设备等现代医用诊断治疗仪的出现,使得人体各部位的生理状态、温度分布等情况能快速、准确地诊断出来,再通过积极配合药物治疗,可使人类诊断疾病的效率、准确性和可靠性大大提高,增加了人类战胜疾病的机会,提高了人类的寿命。

人类最杰出成果之一的机器人更是离不开非电量测量技术。在机器人上装有测量外部信号和内部信号的多种非电量传感器,例如,视觉传感器、位移传感器、速度传感器、听觉传感器等。内部信号传感器用来测量机器人的内部状态,而外部信号传感器用来测量与机器人的对象相关的各种物理量,由获取的信息去识别对象,然后再发出信号控制机器人的动作。

在其他各学科研究中也都要用到非电量测量技术,例如,环境工程中噪声、大气成分、水质等的测量;在农业机械中,对所研制的农业机械,如拖拉机、收割机等牵引力和悬杆应力的的大小、牵引效率、轴的传递功率和强度等都需要进行测量。

现在,非电量测量技术已经广泛应用到人们的日常生活中,例如,空调、电饭锅、洗衣机、电子报警器等。美国已经出现了全自动的电子住宅,在电子住宅中温度、湿度是时时刻刻要监测的物理量。

非电量测量技术的应用实例举不胜举。总之,非电量测量技术已渗透到工业、农业、国防、科学研究及人类生活的各个领域,其应用的广泛性和重要性已越来越为人们所关注。

1.2 非电量测量系统的组成

非电量测量一般是指非电量的电测量。现代的非电量测量技术,首先是将非电量转换为电量,然后通过信号的转换,加以显示和记录。一个完整的非电量测量系统应该包括传感器、信号调节器和显示记录器等3个主要部分,它们之间的关系如图1-1所示。

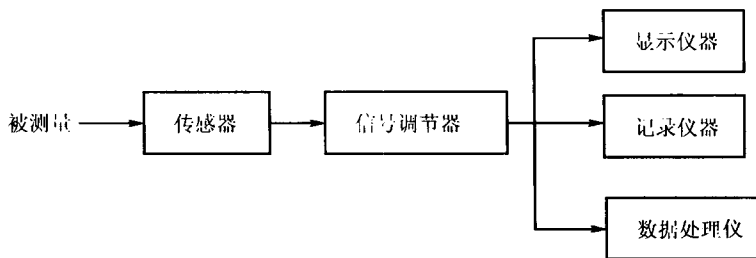


图 1-1 非电量测量系统组成方框图

1. 传感器

传感器(Transducer)是一种把物理量和化学量转换为电量的仪表。它的作用是直接感受被测物理量,并把其转换成与被测物理量有一定函数关系的电压、电流或电路参量(如电阻、电感、电容),再输出给其他仪表。显然,传感器获得信息的正确与否,关系到整个测试系统的精度。如果传感器的误差很大,后面的信号调节电路、显示器、记录器精度再高也难以提高整个测试系统的精度。所以传感器是测试系统的第1个环节,也是最重要的1个环节。

传感器类型很多,分类方法也不同。例如,按输入物理量分类,可分为压力、振动、温度等传感器。这种分类方法对使用者来说很方便,它可以根据被测参数选择传感器。但这种分类方法不便于对传感器的工作原理、特性等作归纳性分析研究,因而在理论学习中通常按工作原理分类,例如,应变式、电容式、电感式传感器等。本书主要以工作原理分类进行论述。

2. 信号调节器

信号调节器的作用是把传感器输出的电信号或电参数调节变换为记录显示仪器所需要的标准电压、电流信号,并输送到记录显示仪器中记录和显示。由于传感器种类很多,它所转换出的信号类型、特点也不同,因而与其相配的信号调节器内部电路也不同,较常见的有放大电路、电桥电路、滤波电路、相敏检波电路、谐振电路、阻抗变换电路、调制解调电路等。

3. 显示记录器

显示记录器是非电量测量系统的最后一个环节,也是必不可少的部分。因为测量的目的就是要知道被测物理量的数值,所以必须有显示记录器把测量结果显示并记录下来。常用的显示方式有3类:模拟显示、数字显示和图形显示。

- ① 模拟显示是利用指针对标尺的相对位置来表示读数,常用的有毫伏表、微安表等。
- ② 数字显示是直接利用数字形式来显示读数,例如数字电压表、数字频率计等。
- ③ 图形显示是用屏幕显示数值或变化的曲线,例如示波器等。

对于动态过程的变化,特别是瞬态过程的变化,根本无法用显示仪器指示,此时就要用记录器把信号自动记录下来。常用的自动记录器有笔式记录器、瞬态记录仪等,或者用计算机的

磁盘记录下来,再用打印机或绘图仪打印记录结果。

20 世纪 90 年代以前曾经把测量系统的这 3 部分称为一次仪表、二次仪表、三次仪表,也有过各自独立的仪表。但近年随着计算机技术、电子技术、半导体技术的发展,测量系统也有了很大变化,现在有些系统是把一次仪表、二次仪表组合在一起,有些系统是把二次仪表、三次仪表组合在一起,还有直接把三者组合在一起的仪器。

1.3 非电量测量技术的发展

非电量测量技术是一门新兴的学科,它的历史不过只有几十年,而一般的测量技术则由来已久。早在几千年前在人类生活和与自然界作斗争的过程中,测量技术就逐步发展起来。例如,土地丈量、物体称重等。测量技术的发展促进了科学技术的发展,而科学技术的发展又推进了测量技术的发展,并逐渐形成一门新的学科,即非电量测量技术。近三四十年来,由于电子技术、计算机技术的飞速发展,以及工农业生产、科学研究、人类生活的需求,使非电量测量技术也得到迅猛发展。目前非电量测量技术发展的总趋势是如下几个方面。

1. 不断扩大测量范围,提高可靠性和精度

随着科学技术的发展,对非电量测量技术的要求也在不断提高,尤其是测量范围的进一步扩大。例如,为了满足超低温技术发展的要求,利用超导体的约瑟夫逊效应已开发出能测量 10^{-6} K 的超低温传感器;用热电偶长时间连续测量高温介质的温度已可达 $2\,500\sim 3\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$,辐射型温度传感器最高测量温度原理上可达 10^5 K,但可控聚核反应理想温度却要达到 10^8 K,这就要求超高温测量的范围进一步扩大。此外,微差压(几十个帕)测量、超高压测量、大吨位(3×10^7 N 以上)测量等也都需要扩大测量范围。

随着测量范围的不断扩大,测量环境将变得越来越复杂和恶劣,这就要求测量的可靠性随之提高。例如,在导弹和卫星上安装的测量仪器,既要能耐高温,又要能在极低温和强辐射的环境下保持正常工作,因此它必须有极高的可靠性和工作寿命。总之,可靠性是仪器质量的重要因素,已越来越受到重视。

科学技术的发展,对测量精度的要求也在不断提高。因为只有测量精度更高,才能更准确地反映被测量的真实情况。例如,一般体温计的测温精度为 $\pm 0.1\sim \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,当人体内存在病变时,人体的温度分布场就会发生相应的变化,这种变化有时很微小,需要用精度为 $\pm 0.01\sim \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度计才能测量出来。

2. 开发集成化、一体化、多功能的传感器

由于传感器与信号调节电路分开,容易受到传输电缆干扰信号的影响,且体积大,使用麻烦。随着半导体技术的发展,现在已有部分传感器实现了传感器与信号调节电路的集成化、一体化。在半导体技术基础上,利用某些固体材料的物理性质变化(机械特性、电特性、热特性等)实现物理量的变换,同时把调节电路也组合在一起,可直接转换为所需要的电压、电流,供三次仪表使用,例如压阻式传感器。还有一种情况是把信号调节电路做成一个小组件,与传感器组装在一个壳体中。例如,现在很多压力传感器内部都加了放大电路。此外,多功能化是指把两种或两种以上的敏感元件集成于一体,在一块芯片上可实现多种功能。例如,将热敏元件和湿敏元件集成在一起,可同时完成温度和湿度的测量。以上做法的优点是结构简单、体积小、抗干扰好、成本低等。也有把信号调节电路和显示记录器组合在一起的情况,例如,数据采

集系统就是把这两部分组装在一起的。又如,CCD 摄像机,是把排成阵列的上万个光敏元件及扫描电路集成在一块芯片上。另外,其他领域也在不断开发新型的集成化、功能化的传感器。

3. 非接触测量技术

接触式测量是把传感器安装在被测对象上,直接感受其物理量的变化,在有些情况下,这会使被测对象增加负担,工作状态受到干扰。例如,把加速度计安置在被测对象上,相当于给它增加了一个负载,会影响其测量精度。又如,把温度传感器贴于被测物体上,会使被测物体的散热、导热状态发生变化,影响测温精度。此外,在有些被测物体上,不可能安装传感器,例如测量高速旋转轴的振动、转矩等。因此,非接触测量传感器越来越受到重视,已开发出光电式、电涡流式、超声波及微波等传感器。但这些传感器还存在测量精度不够高等问题,有待解决。同时人们也在研究利用其他的原理和方法进行非接触测量。

4. 开发新型传感器

随着科学技术的发展,需要测量的物理、化学量种类越来越多(例如,判断距离、味觉、嗅觉、识别颜色及光的强度等),范围也越来越大(例如,超高温、超高压、超低温等)。因此,要求人们继续探索新的测量原理,开发新型传感器。

5. 利用计算机,使测量智能化,提高测试水平

自从微处理器特别是单片机问世以来,新的技术迅速应用到非电量测量技术中,使传统的测量仪器变为智能仪器,增加了功能,提高了精度。例如,智能仪器一般都可完成自校准、自调零、自动测试,能对传感器的非线性及仪器零点进行校准,并可根据工作条件的变化修正测试结果,从而提高精度,增加可靠性。

此外,配备计算机的大型数据采集系统,可以同时采集多达数千路信号,具有更多、更强的数据处理功能;可根据误差理论对测量数据进行处理,求出误差,并自动剔除;可以对瞬态数据进行处理;可实现自动校准、自动修正、信号调节、故障诊断;处理后的结果,既可以用磁盘长期储存、用打印机打印、用绘图仪绘出曲线,又可以直接在计算机屏幕上观看。因而大大增强了数据采集的功能和测量水平。

20 世纪末,在计算机迅速发展和普及、软件对测量与控制技术起巨大作用的基础上,国外提出了虚拟仪器的概念。虚拟仪器最核心的思想是利用计算机的强大资源,使本来需要用硬件实现的功能用软件实现。也可以理解为,在通用计算机系统上,利用与此计算机相配的硬件板卡和组态软件所形成的具有测量控制功能的系统。在虚拟仪器中软件集成了数据的采集、控制、处理、打印输出及用户界面等功能。用户可以方便地根据自己的需要,组建自己专用的测量仪器。虚拟仪器的强大功能和高度灵活性给用户一个充分发挥自己才能的空间,打破了传统测量仪器由厂家定义而用户无法改变的方式,给测量领域注入了新的活力。

第 2 章 测量误差与数据处理

为了对设计对象进行研究,需要做大量的试验。试验和测量结果都是以数值形式或曲线形式对被测对象性能参数变化规律进行描述。通过对这些数值和曲线的进一步分析研究来发现被测对象设计、工艺等各方面的问題,以便改善它的性能。因而提供准确的(即能反映客观规律的)数据是极其重要的。

但是,由于实验方法和实验设备的不完善、周围环境的影响以及人为因素所限等,测量所得数值和真值之间总是存在一定的差异,在数值上即表现为误差。随着科学技术的日益发展和人们认识水平的不断提高,误差被控制得越来越小,但始终不能完全消除它。误差存在的必然性和普遍性已为实践所证明,即误差是不受人们主观意识影响的客观存在。那么怎样才能在经济合理的条件下,得到尽可能接近真值的近似值呢?怎样处理数据的误差才最合理呢?这些就是误差理论所要研究的内容。一切从事工程测试及科学实验的科技人员都必须关注这个问题。目前误差理论已发展为一门专门的学科,它包含的内容相当广泛,发展也相当迅速。由于篇幅所限,在此不能全面地介绍误差理论。本章重点介绍误差理论中的几个基本概念及与测量和数据处理有关的方法。

通过本章的学习,希望能达到以下目的:

- ① 正确认识误差的性质,分析误差产生的原因,以便尽可能地减小误差。
- ② 正确处理数据,合理计算所得结果,以便在一定条件下得到更接近真实值的数据。

2.1 误差的基本概念

2.1.1 测量误差的定义

测量误差就是测量结果与被测量的真值之差,可用下式表示:

$$\Delta = X - X_0$$

式中 Δ ——测量误差;

X ——测量结果;

X_0 ——真值。

上述表示方法也称为绝对误差表示法,通常绝对误差简称误差。

真值是在一定条件下被测量的客观实际值,是与被测量定义一致的量值,是被测量本身所具有的真实大小,只有通过完善的测量才有可能获得。实际上,由于被测量的定义和测量都不可能完善,因而真值往往是未知的,真值只是一个理想的概念。只有如下少数情况真值才可能知道。

理论真值:例如,三角形内角和为 180° ,同一量值自身之比为 1 等。

约定真值:是被承认的或是约定的值,是真值的最佳估计值。例如,约定 1 kg 为铂铱合金的国际千克原器的质量,约定 1 K 是水处于三相点时温度值的 $1/273.16$ 等等。此外,在给定

地点由测量标准所复现的量值可取作约定真值,如由各级计量机构(国际、国家、省)确定了若干物理量的不同准确度等级的标准。其中以国际标准或国家标准为各物理量的定值依据。用这些约定真值来代替真值进行量值传递和仪表的计量、校验,还可以用某量的多次测量结果来确定约定真值。显然,约定真值是具有不确定度(有关概念详见2.5节)的。

因为用绝对误差难以比较不同测量值的准确程度,因而引出相对误差的表示形式。相对误差为绝对误差与真值之比,用百分率表示:

$$\text{相对误差} = \text{绝对误差} \div \text{真值} \times 100\%$$

当绝对误差很小时可有以下近似式:

$$\text{相对误差} \approx \text{绝对误差} \div \text{测量结果(真值的最佳估计值)} \times 100\%$$

用符号表示,即

$$\delta_x = \Delta / X_0 \approx \Delta / X \times 100\%$$

在多档和连续刻度的仪表中,因为各档示值和对应真值都不一样,这时若按上式计算相对误差,所用的分母也不一样,故很麻烦。为方便计算,又定义了引用误差,这是一种简化和实用方便的相对误差。其分母一律取仪表满量程的最大刻度值(满刻度值),用 M 表示;其分子为在测量范围内产生的最大绝对误差,用 Δ 表示;用 δ_f 表示引用误差。其表达式为

$$\delta_f = \Delta / M \times 100\%$$

在实际应用时,常用引用误差来表示仪器仪表的质量,进行准确度分级。

2.1.2 误差来源

分析误差的来源是测量误差分析的重要环节,只有知道了误差源才能消除或减少测量误差。主要有以下4种误差源。

1. 设备装置误差

① 标准器误差:标准器即由各级计量机构确定的提供标准量值的基准器,如标准量块、标准电池、活塞压力计等,它们本身体现出来的量值,不可避免地含有误差。标准器提供的标准量值本身有误差,其随时间和空间位置变化的不均匀性也引起误差。如激光波长的长期稳定性、电池的老化等引起的误差。

② 仪器仪表误差:仪器仪表是用来直接或间接地将被测量和测量单位比较的设备。这些仪器仪表,如传感器、记录器、电压表等本身都具有误差。由于工艺制造、加工和长期磨损而产生设备机构误差。

③ 辅助设备和附件误差:仪器仪表或为测量创造必要条件的设备在使用时没有调整到理想的正确状态。如火箭发动机地面试验时产生的推力,必须通过台架传递给推力传感器,而台架本身的轴线没有对正而产生误差。另外,参与测量的各种辅助附件,如电源、导线、开关等都会引起误差。

2. 环境误差

由于各种环境因素与要求的标准状态不一致,而引起的测量装置和被测量本身的变化所造成的误差,如温度、湿度、气压(引起空气各部分的扰动)、振动(外界条件及测量人员引起的振动)、照明(视差)、电磁场、重力加速度等所引起的误差。通常仪器仪表在规定条件下使用产生的示值误差称为基本误差,超出此条件使用引起的误差称为附加误差。

3. 方法误差

方法误差有多种情况,例如由于采用近似的测量方法而造成的误差;又如测量圆轴直径 d 采用测其圆周长 s ,然后用 $d=s/\pi$ 计算的方法,由于 π 取值不同会引起误差。由于测量方法错误而引起的误差,如测量仪表安装和使用方法不正确。方法误差还包括测量时所依据的原理不正确而产生的误差。

4. 人员误差

由于测量者受分辨能力的限制,因工作疲劳引起的视觉器官的生理变化、反应速度及固有习惯引起的误差,以及精神上的因素产生的一时疏忽所引起的误差。

必须注意以上几种误差来源,有时是联合作用的,在给出测量结果时必须进行全面分析,力求不遗漏、不重复。特别要注意对误差影响较大的那些因素。

2.1.3 误差的分类

按照误差的特点与性质,误差可分为系统误差、随机误差和粗大误差 3 种。

1. 系统误差

系统误差是被测量的数学期望与真值之差(数学期望是无限多次测量结果的平均值)。它是在同一条件下(指在测量程序、测量者、测量仪器、地点都相同的情况下,在短时间内进行的重复测量)多次重复测量同一量值时,误差的绝对值和符号保持不变;或在条件改变时,按某一确定的规律变化的误差,表示测量结果偏离真值的程度。

2. 随机误差

随机误差是测量值与数学期望之差。它是在同一条件下多次测量同一量值时,误差的绝对值和符号以不可预测的规律随机变化的误差,表示测量结果分散性的程度。

因为在实际中不可能进行无限多次测量,也不可能得到真值,因此,以上两种误差都是一个定性的概念,不可能得到准确值。

3. 粗大误差

粗大误差是明显歪曲测量结果的误差。它一般是由测量者的主观原因引起,例如由于测量者的粗心大意、疲劳、缺乏经验等而读错、记错数所引起的误差。此外,由于测量条件意外地改变(如机械冲击、电源瞬时波动等)引起的误差均属粗大误差。含有粗大误差的测量值称为坏值或异常数值。正确的结果不应包含粗大误差,因而在处理数据时要把所有的异常数值都剔除。

必须注意系统误差和随机误差之间在一定条件下是可以相互转化的。对某一具体误差,在 A 条件下为系统误差,而在 B 条件下可能为随机误差,反之亦然。例如,尺子的刻度误差,对于制造尺子来说是随机误差;但将它作为基准去测量某长度时,则刻度误差就会造成测量结果的系统误差。掌握误差转换的特点,在有些情况下可将系统误差转化为随机误差,用增加测量次数并进行数据处理的方法减小误差的影响;或者将随机误差转化为系统误差,用修正的方法减小其影响。

2.1.4 测量的准确度、精密度

为便于反映不同性质误差对测量结果的影响,人们提出了准确度和精密度的概念。