



湖南省重点学科（机械工程）建设项目资助

机械工程测试技术

Testing Technology in
Mechanical Engineering

胡耀斌 李 胜 谢 静 编著
李必文 主审



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

湖南省重点学科(机械工程)建设项目资助

机械工程测试技术

胡耀斌 李 胜 谢 静 编著
李必文 主审

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

本书内容结合了作者二十多年的教学经验和科研成果,注重基本概念融入工程应用的阐述,重点突出、条理清晰,并确保了一定的理论应用于实践的实例内容。

全书包括测试系统基础知识、信号分析基础、电阻式传感器、电感式传感器、电容式传感器、压电式传感器、光电式传感器、热电式传感器、磁电式传感器、辐射式传感器、光纤传感器、数字式传感器、现代测试技术共 13 章内容。

本书可作为高等学校机械类和相近专业本科生教材,也可作为各类职业学院、职工大学等相关专业的教学用书,还可供相关专业研究生和工程技术人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

机械工程测试技术/胡耀斌,李胜,谢静编著. —北京:北京理工大学出版社, 2015. 10

ISBN 978-7-5682-1194-9

I. ①机… II. ①胡… ②李… ③谢… III. ①机械工程-测试技术 IV. ①TG806

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 207151 号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址/<http://www.bitpress.com.cn>

经 销/全国各地新华书店

印 刷/三河市华骏印务包装有限公司

开 本/787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张/15.5 印张

字 数/358 千字

版 次/2015 年 10 月第 1 版 2015 年 10 月第 1 次印刷

定 价/36.00 元

责任编辑/梁铜华

文案编辑/李秀梅

责任校对/周瑞红

责任印制/王美丽

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前 言

测试技术是一门与材料科学、微电子技术、信息技术密切相关的综合性学科。为了适应目前应用型工程技术人才培养的需要,充分反映我国机械工程测试技术的发展情况,我们以“厚基础、宽口径、提高综合能力”为原则编著了本书。在本书编著过程中,作者结合了二十多年的教学经验与教研成果,不仅继承了传统知识,而且根据我国工程测试技术的发展注入了新的内容。在内容安排上,将传感器与相应的测量电路、应用实例放在一起,便于讲授,易学易记,避免了前后重复。每章内容相对独立,并附有习题以供练习,力求简明扼要、通俗易懂。书中图文并茂,内容由浅入深,便于教与学。

本书主要包括:

- 1) 测试系统基础知识:主要介绍测量、计量、测试等概念,以及测试系统的特性、传感器的基础知识。
- 2) 信号分析基础:主要介绍信号的分类与描述、周期信号与离散频谱、非周期信号与连续频谱、随机信号。
- 3) 常用传感器技术:主要介绍电阻式、电感式、电容式、压电式、光电式、热电式、磁电式、辐射式、光纤、数字式等传感器的工作原理、测量电路及其应用。
- 4) 现代测试技术:主要介绍智能仪器、计算机仪器、虚拟测试仪器技术。

本书由南华大学胡耀斌、李胜、谢静编著,其中胡耀斌负责绪论及第3、4、5、6章,李胜负责第1、8、10章,谢静负责第9、11章,蒋彦负责第13章,王玉林负责第7、12章,胡良斌负责第2章。南华大学李必文教授负责全书的审稿工作。

在本书编著过程中,得到了南华大学机械工程学院领导及机械系、测控系等老师的指导与大力支持,作者在此表示衷心感谢,同时也对参考文献里的各位作者表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中难免有不妥和错误之处,敬请同行和广大读者批评指正。

作 者
2015 年 5 月

目 录

绪论	1
第1章 测试系统基础知识	3
1.1 测量、计量、测试	3
1.1.1 量与量纲	4
1.1.2 测试方法的分类	4
1.1.3 测量误差	5
1.1.4 测量数据处理	9
1.1.5 测试系统的组成	12
1.1.6 测试技术的发展概况	13
1.2 测试系统的特性	14
1.2.1 测试系统与线性系统	14
1.2.2 测试系统的静态特性	16
1.2.3 测试系统的动态特性	21
1.2.4 实现系统不失真测试的条件	29
1.3 传感器的基础知识	30
1.3.1 传感器的定义及其组成	31
1.3.2 传感器的分类	32
1.3.3 传感技术的起源与发展	33
1.3.4 传感技术的现状	34
1.3.5 传感技术的典型应用	35
1.3.6 传感器的发展趋势	37
习题	38
第2章 信号分析基础	40
2.1 信号的分类与描述	40
2.1.1 信号的分类	40
2.1.2 信号的描述	41
2.2 周期信号与离散频谱	42
2.2.1 傅里叶级数与周期信号的分解	42
2.2.2 周期信号的频谱	44
2.2.3 周期信号的功率	47
2.3 非周期信号与连续频谱	48
2.3.1 傅里叶变换	49
2.3.2 傅里叶变换的基本性质	51

2.4 随机信号	52
2.4.1 平均值、方值、均方值和均方根值	53
2.4.2 概率密度函数	54
习题	55
第3章 电阻式传感器	56
3.1 工作原理	56
3.2 应变片的种类、材料及粘贴	57
3.2.1 金属电阻应变片的种类	57
3.2.2 金属电阻应变片的材料	59
3.2.3 金属电阻应变片的粘贴	59
3.3 电阻应变片的特性	60
3.3.1 弹性敏感元件及其基本特性	60
3.3.2 灵敏系数	61
3.3.3 横向效应	62
3.3.4 绝缘电阻和最大工作电流	62
3.3.5 应变片的动态响应特性	63
3.3.6 应变片的温度误差及补偿	64
3.4 电阻应变片的测量电路	66
3.4.1 直流电桥	66
3.4.2 交流电桥	69
3.5 应变式传感器的应用	71
3.5.1 应变式力传感器	71
3.5.2 应变式压力传感器	72
3.5.3 应变式容器内液体重量传感器	73
3.5.4 应变式加速度传感器	74
习题	74
第4章 电感式传感器	76
4.1 变磁阻式传感器	76
4.1.1 工作原理	76
4.1.2 输出特性	77
4.1.3 测量电路	78
4.1.4 变磁阻式传感器的应用	82
4.2 差动变压器式传感器	82
4.2.1 变隙式差动变压器	82
4.2.2 螺线管式差动变压器	85
4.3 电涡流式传感器	91
4.3.1 工作原理	91
4.3.2 基本特性	91

4.3.3 电涡流形成范围	93
4.3.4 电涡流传感器测量电路	94
4.3.5 涡流式传感器的应用	95
习题	97
第5章 电容式传感器	99
5.1 工作原理和结构	99
5.1.1 变极距型电容式传感器	100
5.1.2 变面积型电容式传感器	101
5.1.3 变介质型电容式传感器	102
5.2 灵敏度及非线性	103
5.3 等效电路	104
5.4 测量电路	105
5.4.1 调频电路	105
5.4.2 运算放大器式电路	106
5.4.3 二极管双T形交流电桥	106
5.4.4 环形二极管充放电法	108
5.4.5 脉冲宽度调制电路	109
5.5 电容式传感器的应用	110
5.5.1 电容式压力传感器	110
5.5.2 电容式加速度传感器	111
5.5.3 差动式电容测厚传感器	111
习题	112
第6章 压电式传感器	114
6.1 压电效应及压电材料	114
6.1.1 压电效应	114
6.1.2 压电材料	116
6.2 测量电路	119
6.2.1 等效电路	119
6.2.2 测量电路	120
6.3 压电式传感器的应用	124
6.3.1 压电式加速度传感器	124
6.3.2 压电式测力传感器	127
6.3.3 压电式压力传感器	128
习题	129
第7章 光电式传感器	130
7.1 光电效应	130
7.1.1 外光电效应	130
7.1.2 内光电效应	131

7.1.3 光生伏特效应	131
7.2 光电管及光电倍增管	131
7.2.1 光电管	131
7.2.2 光电倍增管	133
7.3 光敏电阻	135
7.3.1 结构原理	135
7.3.2 基本特征	135
7.4 光电池	137
7.4.1 硅光电池的结构原理	137
7.4.2 光电池的基本特性	138
7.5 光电二极管和光电三极管	140
7.5.1 结构原理	140
7.5.2 基本特性	140
7.5.3 结构及技术参数	142
7.6 光电式传感器及其应用	144
7.6.1 光电式传感器的类型	144
7.6.2 应用实例	144
习题	147
第8章 热电式传感器	148
8.1 概述	148
8.1.1 测温方法	148
8.1.2 温度和温标	150
8.2 电阻式温度传感器	150
8.2.1 热电阻	150
8.2.2 热敏电阻	154
8.2.3 电阻式温度传感器的应用	156
8.3 热电偶	159
8.3.1 热电偶的工作原理	159
8.3.2 常用热电偶的结构	165
8.3.3 热电偶材料	167
8.3.4 热电偶的种类	167
8.3.5 热电偶的冷端补偿方法	168
8.4 新型热电式传感器	171
8.4.1 半导体PN结温度传感器	171
8.4.2 压电型温度传感器	171
8.4.3 磁热敏传感器	172
8.4.4 数字式温度传感器 DS1820	172
习题	173

第9章 磁电式传感器	174
9.1 磁电式传感器工作原理	174
9.2 磁电式传感器基本特性	176
9.2.1 非线性误差	176
9.2.2 温度误差	176
9.3 霍尔式传感器	177
9.3.1 霍尔效应	177
9.3.2 霍尔元件基本结构	178
9.3.3 霍尔元件基本特性	178
9.3.4 霍尔元件不等位电势补偿	179
9.3.5 霍尔元件温度补偿	180
9.3.6 霍尔传感器的应用	180
9.4 磁敏传感器	182
9.4.1 磁敏电阻器	183
9.4.2 磁敏二极管	184
习题.....	186
第10章 辐射式传感器	187
10.1 红外辐射传感器.....	187
10.1.1 红外辐射的基本原理.....	187
10.1.2 红外辐射的物理基础.....	188
10.1.3 红外探测器(传感器)	190
10.1.4 红外辐射测试技术的应用.....	192
10.2 超声波传感器.....	194
10.2.1 超声波检测的物理基础.....	194
10.2.2 超声波探头.....	195
10.2.3 超声波传感器的应用.....	196
10.3 核辐射传感器.....	198
10.3.1 核辐射及其物理特性.....	198
10.3.2 核辐射传感器.....	200
10.3.3 核辐射传感器的应用.....	201
习题.....	202
第11章 光纤传感器	203
11.1 光纤的结构和传光原理.....	203
11.1.1 光纤的结构.....	203
11.1.2 光纤传光原理	203
11.2 光的调制技术.....	204
11.2.1 光的强度调制.....	204
11.2.2 光的相位调制.....	205

11.2.3 光的波长调制·····	206
11.2.4 光的偏振态调制·····	206
11.3 光纤传感器的应用·····	206
11.3.1 光纤位移传感器·····	206
11.3.2 光纤温度传感器·····	207
11.3.3 光纤液位传感器·····	207
习题·····	208
第12章 数字式传感器 ·····	209
12.1 光栅数字式传感器·····	209
12.1.1 光栅的结构类型·····	209
12.1.2 光栅传感器的工作原理·····	210
12.1.3 数字转换原理·····	212
12.2 感应同步器·····	214
12.2.1 感应同步器的基本结构·····	214
12.2.2 感应同步器的工作原理·····	215
12.2.3 感应同步器的应用·····	218
12.3 光电编码器·····	218
12.3.1 增量式光电编码器·····	218
12.3.2 绝对式光电编码器·····	219
12.3.3 光电编码器的应用·····	220
12.4 容栅传感器·····	221
习题·····	222
第13章 现代测试技术 ·····	224
13.1 概述·····	224
13.1.1 现代测试系统的基本概念·····	224
13.1.2 现代测试系统的基本组成·····	226
13.1.3 现代测试系统的特点·····	227
13.2 智能仪器·····	227
13.2.1 智能仪器的工作原理·····	228
13.2.2 智能仪器的功能特点·····	228
13.3 计算机仪器·····	229
13.4 虚拟测试仪器技术·····	229
13.4.1 虚拟仪器含义及其特点·····	229
13.4.2 虚拟仪器的组成·····	230
13.4.3 虚拟仪器典型单元模块·····	232
13.4.4 虚拟仪器开发系统·····	232
13.4.5 虚拟仪器的应用·····	234
习题·····	234
参考文献 ·····	235

绪 论

测试技术是一门新兴的、蓬勃发展的、富有生命力的技术学科,同时也是一门与材料科学、微电子技术、信息技术密切相关的综合性学科,广泛应用于国民经济各个领域。

一、测试技术的内容

测试的基本任务就是获取有用的信息,通过借助专门的仪器、设备,设计合理的实验方法以及进行必要的信号分析与数据处理,从而获得与被测对象有关的信息,最后将其结果提供显示或输入其他信息处理装置、控制系统。

测试技术属于信息科学的范畴,与计算机技术、通信技术一起分别构成信息技术系统的“感官”“大脑”和“神经”,是信息技术的三大支柱之一。因此,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。

二、测试技术的发展

测试技术的发展与生产和科学技术的发展是密不可分的,它们互相依赖、相互促进。现代科技的发展不断地向测试技术提出新的要求,从而推动了测试技术的发展,与此同时,测试技术迅速吸取和综合各个科技领域(如材料科学、微电子学、计算机科学等)的新成就,开发出新的测试方法和先进的测试仪器,又给科学研究提供了有力的工具和先进的手段,从而促进了科学技术的发展。所以,有专家认为,谁支配了传感器技术,谁就能把握住新时代。能不能开发出上乘的测试装置,关键在于传感器的开发和应用。目前,传感器正经历着从以结构型为主转向以物性型为主的过程。

三、测试技术的应用

在工程技术领域中,工程研究、产品开发、生产监督、质量控制和性能实验等都离不开测试技术。特别是近代自动控制技术已越来越多地运用测试技术,测试装置已成为控制系统的重要组成部分。测试技术广泛应用于机械、电子、生物、海洋、航天、气象、地质、通信、控制等领域,尤其是在机械工程领域中的产品开发与性能实验、机械故障诊断、质量控制与生产监督等方面起着越来越重要的作用。

四、课程的教学目标

课程教学内容以“测试技术、传感器原理”为基础,以“工程应用”为线索,以“实际应用”为目标。学生在学完本课程后应具有以下方面的知识:(1)掌握信号的时域与频域的描述方法,建立明确的信号的频谱结构的概念;(2)掌握测试装置基本特性的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分析和选择。(3)了解常用传感器、常用信号调理电路和记录仪器的工作原理与性能,并能较合理地选用。(4)对动态测试工作的基本问题有一个比

较完整的概念,并能初步测试机械工程中某些参数。

测试技术是一门实践性很强的应用学科,离开实践将无法掌握。学生只有通过足够和必要的实验,才能消化、理解所学的基本理论和基本方法,才能掌握关于动态测试工作比较完整的概念,才能初步具有实际测试工作的能力。

第 1 章

测试系统基础知识

测试技术是测量和实验技术 (Measurement and Test Technique, MTT) 的统称, 定量地描述事物的状态变化和特征总离不开测试, 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, 例如, 火炮膛内的燃气压力、温度、燃速是火炮膛内的基本信息。

自古以来, 测试技术早就渗透到人类的生产活动、科学实验和日常生活的各个方面。

在生产斗争领域, 广泛地应用测试技术, 例如, 生产过程中产品质量的检测和控制、提高生产经济效益、节能和生产过程的自动化等。这些都要测量生产过程中的有关参数和进行反馈控制, 以保证生产过程中的这些参数处在最佳状态。

在科学研究领域内, 人们通过观察、实验, 并用已有的知识和经验, 对测试结果进行分析、对比、概括、推理。通过不断地观察、实验, 从中找出规律, 再上升为理论。因此, 能否通过观察实验得到结果, 而且是可靠的结果, 就决定于测试技术的水平。从这个意义上讲, 科学的发展和进步是以测试技术的水平为基础的。例如, 人类在光学显微镜出现以前, 只能用肉眼分辨物质。而 16 世纪出现了光学显微镜, 这就使人们能借助显微镜观察细胞, 从而大大地推动了生物科学的发展。而 20 世纪 30 年代出现了电子显微镜, 又使人们的观察能力进入微观世界, 这又推动了生物科学、电子科学和材料科学的发展。当然, 科学的发展又反过来促进测试技术的发展。

现代航空航天技术的发展水平, 在很大程度上与测试技术的水平密切相关, 如果没有精确的、可靠的测试技术, 航天器要进入预定轨道, 完成各种任务是不可能的。

现代人们的日常生活, 越来越离不开测试技术。例如, 现代起居室的温度、湿度、亮度、空气新鲜度、防火、防盗和防尘等的测试和控制, 以及有视觉、听觉、嗅觉、触觉和味觉等感觉器官并有思维的机器人参与的各种家庭事务管理与劳动等, 都需要依靠测试技术。

1.1 测量、计量、测试

测量、计量、测试是三个密切关联的技术术语。测量是以确定被测对象的量值为目的的全部操作。如果测量的目的是实现测量单位统一和量值准确可靠则称为计量。具体来讲, 计量的内容包括计量理论、计量技术与计量管理, 并主要体现在计量单位、计量基准 (标准)、量值传递、计量管理等方面。测试则是具有实验性质的测量, 或者可理解为测量和实验的综合。

一个完整的测试过程必定涉及被测对象、计量单位、测试方法和测试误差, 它们通常被称

为测量四要素。

1.1.1 量与量纲

量是指现象、物体或物质可定性区别和定量确定的一种属性。不同类的量彼此可以定性地区别,如长度与质量是不同类的量;同一类的量之间是以量值的大小区分的。

1. 量值

量值是用数值和计量单位的乘积表示的,它可用来定量地表达被测对象相应属性的大小,如 5.6 m、48 kg、20 °C 等。其中,5.6、48、20 是量值的数值。显然,量值的数值就是被测量与计量单位之比值。

2. 基本量和导出量

在科学技术领域中存在着许许多多的量,它们彼此有关,因此专门约定选取某些量作为基本量,而其他量则作为基本量的导出量。量的这种特定组合称为量制:在量制中,约定地认为基本量是相互独立的量,而导出量则是由基本量按一定函数关系定义的。

3. 量纲和量的单位

量纲代表一个实体(被测量)的确定特征,而量纲单位则是该实体的量化基础。例如,长度是一个量纲,而厘米则是长度的一个单位;时间是一个量纲,而秒则是时间的一个单位。一个量纲是唯一的,然而一种特定的量纲(如长度)可用不同的单位测量,如英尺^①、米、英寸^②或英里^③等。不同的单位制必须被建立和认同,即这些单位制必须被标准化。由于存在着不同的单位制,在不同单位制间的转换基础方面也必须有协议。

在国际单位(SI)制中,基本量约定为:长度、质量、时间、温度、电流、发光强度和物质的量等 7 个量。它们的量纲分别用 L、M、T、H、I、N、J 表示。导出量的量纲可用基本量量纲的幂的乘积表示。例如,导出量——力的量纲是 LMT^{-2} ,电阻的量纲是 $L^2MT^{-3}I^{-2}$ 。工程上会遇到无量纲量,其量纲中的幂都为零,实际上它是一个数。弧度(rad)就是这种量。

1.1.2 测试方法的分类

测试方法是指在实施测试中所涉及的理论运算和实际操作方法,测试方法可按多种原则分类,通常采用以下原则分类。

1. 按是否直接测定被测量的原则分类(可分为直接测量法和间接测量法)

(1) 直接测量法。指被测量直接与测量单位进行比较,或者用预先标定好的测量仪器或测试设备进行测量,而不需要对所获取数值进行运算的测量方法。例如,用直尺测量长度、用万用表测量电压、电流和电阻值等。

(2) 间接测量法。指通过测量与被测量有函数关系的其他量,得到被测量量值的测量方法。例如,为了测量一台发动机的输出功率,必须首先测量发动机的转速 n 及输出转矩 M ,通过公式 $P=M \cdot n$ 可计算出其功率值。

① 1 英尺 ≈ 0.3048 米。

② 1 英寸 = 2.54 厘米。

③ 1 英里 ≈ 1.609 千米。

2. 按测量时是否与被测对象接触的原则(可分为接触式测量和非接触式测量)

(1) 接触式测量。这种测量比较简单,例如,测量振动时采用带磁铁座的加速度计直接放在被测位置进行测量。

(2) 非接触式测量。这种测量可以避免对被测对象的运行工况及其特性的影响,也可避免测量设备受到磨损。例如,用多普勒超声测速仪测量汽车超速就属于非接触测量。

3. 按被测量是否随时间变化的原则(可分为静态测量和动态测量)

(1) 静态测量。指被测量不随时间变化或变化缓慢的测量。

(2) 动态测量。指被测量随时间变化的测量。因此,在动态测量中,要确定被测量就必须测量它的瞬时值及其随时间变化的规律。

注意:这里的“静态”和“动态”是指被测量是否随时间变化,而不是指被测对象是否处于静止或运动中。

1.1.3 测量误差

应当清楚认识到,测量结果总是有误差的,误差自始至终存在于一切科学实验和测量过程中。

1. 测量误差定义

测量结果与被测量真值之差称为测量误差,即

$$\text{测量误差} = \text{测量结果} - \text{真值} \quad (1-1)$$

测量误差简称为误差。此定义联系着三个量,显然只需要已知其中的两个量,就能得到第三个量。但是,在现实中往往只知道测量结果,其余两个量却是未知的。这就带来许多问题。例如,测量结果究竟能不能代表被测量、有多大的置信水平、测量误差的规律是怎样的、如何评估等。

(1) 真值。指被测量在被观测时所具有的量值。从测量的角度来看,真值是不能确切获知的,是一个理想的概念。

在测量中,一方面无法获得真值;另一方面又往往需要运用真值,因此引进了所谓的“约定真值”。约定真值是指对给定的目的而言,可以认为它充分接近于真值,因而可以代替真值来使用的量值。在实际测量中,被测量的实际值、已修正过的算术平均值,均可作为约定真值。实际值是指高一等级的计量标准器具所复现的量值,或者测量实际表明它满足规定准确度要求,可用来代替真值使用的量值。

(2) 测量结果。由测量所得的被测量值,在测量结果的表述中,还应当包括测量不确定度和有关影响量的值。

2. 误差分类

如果根据误差的统计特征分类,可将误差分为以下几种。

(1) 系统误差。在对同一个被测量进行多次测量过程中,出现某种保持恒定或按确定的方式变化着的误差,就是系统误差。在测量偏离了规定的测量条件时,或测量方法引入了会引起某种按确定规律变化的因素时就会出现系统误差。

通常按系统误差的正负号和绝对值是否已经确定,可将系统误差分为已定系统误差和未定系统误差。

在测量中,已定系统误差可以通过修正予以消除,在实践中应当消除此类误差。

(2) 随机误差。当对同一个量进行多次测量中,误差的正负号和绝对值以不可预知的方式变化着,则此类误差称为随机误差。测量过程中有着众多的、微弱的随机影响因素存在,它们是产生随机误差的原因。

随机误差就其个体而言是不确定的,但其总体却有一定的统计规律。随机误差不可能被修正,但在了解其统计规律性之后,还是可以控制和减少它们对测量结果的影响的。

(3) 粗大误差。这是一种明显超出规定条件下预期误差范围的误差,是由于某种不正常的原因造成的。在数据处理时,允许也应该剔除含有粗大误差的数据,但必须有充分依据。

实际工作中常根据产生误差的原因,将误差分为器具误差、方法误差、调整误差、观测误差和环境误差。

3. 误差表示方法

根据误差的定义,误差的量纲、单位应当和被测量一样,这是误差表述的根本出发点。然而在习惯上,常用与被测量量纲、单位不同的量表述误差。严格地说,它们只是误差的某种特征的描述,而不是误差量值本身,学习时应注意它们的区别。

常用的误差表示方法有下列几种。

(1) 绝对误差。直接用式(1-1)表示的。它是一个量纲、单位和被测量一样的量。

(2) 相对误差。相对误差的定义为

$$\text{相对误差} = \text{误差} \div \text{真值} \quad (1-2a)$$

当误差值较小时,可采用下式表示,即

$$\text{相对误差} \approx \text{误差} \div \text{测量结果} \quad (1-2b)$$

显然,相对误差是无量纲量,其大小是描述误差和真值的比值的大小,而不是误差本身的绝对大小。在多数情况下,相对误差常用%、‰或百万分数(10^{-6})表示。

例 1-1 设真值 $x_0 = 2.00 \text{ mA}$, 测量结果 $x_r = 1.99 \text{ mA}$, 则有以下计算公式:

$$\text{误差} = (1.99 - 2.00) \text{ mA} = -0.01 \text{ mA}$$

$$\text{绝对误差} = -0.01 \text{ mA}$$

$$\text{相对误差} = -\frac{0.01}{2.00} = -0.005 = -0.5\%$$

(3) 引用误差。这种表示方法只用于表示计量器具特性的情况中。计量器具的引用误差就是计量器具的绝对误差与引用值之比,引用值一般是指计量器具的标称范围的最高值或量程。例如,温度计标称范围为 $-20^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$, 其量程为 70°C , 引用值为 50°C 。

例 1-2 用标称范围为 $0 \sim 150 \text{ V}$ 的电压表测量电压时,当示值为 100.0 V 时,电压实际值为 99.4 V 。这时电压表的引用误差为

$$\text{引用误差} = (100.0 \text{ V} - 99.4 \text{ V}) \div 150 \text{ V} = 0.4\%$$

显然,在此例中,用测量器具的示值代替测量结果;用实际值代替真值;引用值则采用量程。

(4) 分贝误差。分贝误差的定义为

$$\text{分贝误差} = 20 \times \lg(\text{测量结果} \div \text{真值}) \quad (1-3a)$$

分贝误差的单位为 dB。

对于一部分的量(如广义功),其分贝误差需要用下式表示,即

分贝误差 = 10×lg(测量结果÷真值) (1-3b)

根据此定义,当测量结果等于真值,即误差为零时,分贝误差必定等于 0 dB。

分贝误差本质上是无量纲量,是一种特殊形式的相对误差。在数值上分贝误差和相对误差有着一定的关系。

例 1-3 计算例 1-1 的分贝误差,即

分贝误差 = 20×lg(1.99÷2.00)dB = -20×0.002 18 dB = -0.044 dB

必须特别指出,初学者往往不注意区分误差和误差特征量这两个完全不同的概念,以致无法理解某些问题。

下面利用图 1-1 说明测量误差和其分布特征量的关系。

从原则上来说,μ 为测量值的平均值;σ 却不是误差值,而是描述随机误差分布特性的特征量,简言之,σ 是误差的统计特征量之一。为了强调这些概念之间的区别,图 1-1 是在特定的系统误差 δs 和测量值服从正态分布 N~(σ, μ)下做出的。

图 1-1 中, x0 为被测量真值; xi 为第 i 次的测量值; μ 为测量值概率分布的期望(平均值); σ 为测量值概率分布的标准偏差,是常用的误差特征量之一; δi 为第 i 次测量的误差值; δri 为第 i 次测量的随机误差值; δs 为系统误差。

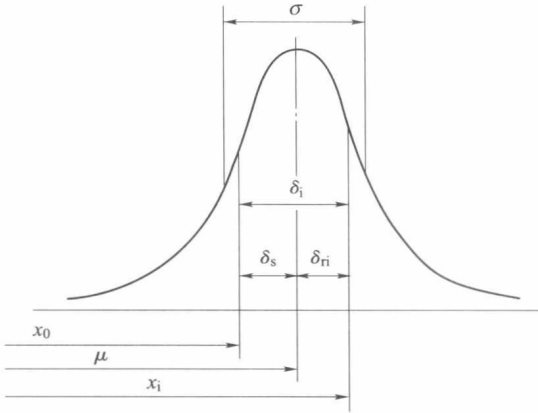


图 1-1 测量误差及其分布特性的分布量

不言而喻,误差值和分布的标准偏差是不一样的,各次测量的误差值彼此不同。误差分布的标准偏差能说明误差值的分散程度,在许多场合下考查它比考查误差值简易可行,因而在用语上常把两者混为一谈。

4. 测量器具的误差

测量器具在完成测量任务的同时也给测量结果带来误差。在研究测量器具的误差时,会涉及下面的一些概念。

- (1) 示值误差。指测量器具的示值与被测量真值(约定真值)之差。例如,电压表的示值 $V_i = 30\text{ V}$, 而电压实际值 $V_t = 30.5\text{ V}$, 则电压表的示值误差为 -0.5 V 。
- (2) 基本误差。指测量器具在标准条件下所具有的误差,也称为固有误差。
- (3) 允许误差。指技术标准、检定规程等对测量仪器所规定的允许的误差极限值。
- (4) 测量器具的准确度。指测量器具给出接近于被测量真值的示值的能力。
- (5) 测量器具的重复性和重复性误差。测量器具的重复性是指在规定的使用条件下,测量器具重复接收相同的输入,测量器具给出非常相似输出的能力;测量器具的重复性误差就是测量器具造成的随机误差分量。
- (6) 回程误差。也称为滞后误差,是指在相同条件下,被测量值不变、测量器具行程方向不同时,其示值之差的绝对值。