

普通高等院校能源动力类精品教材



能源与动力工程测试技术

NENGYUAN YU DONGLI GONGCHENG CESHI JISHU

张师帅 编



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

能源与动力工程 测试技术

张师帅 编



华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 提 要

本书系统介绍能源与动力工程测试技术。全书分为10章。第1章介绍测量系统及测量误差等基础知识;第2~9章着重介绍能源与动力工程中主要热工参数的测量原理、测量方法、测量仪器以及误差分析等,具体包括温度、压力、流速、流量、转速、功率、振动、噪声、气体成分和液位等参数;第10章介绍微机在测试系统中的应用。理论与实践并重,实用性强,是本书的最大特点。

本书可作为能源与动力工程专业本科生教材,也可供相关专业研究生、科研人员及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

能源与动力工程测试技术/张师帅编. —武汉:华中科技大学出版社, 2018.9

普通高等院校能源动力类精品教材

ISBN 978-7-5680-4105-8

I. ①能… II. ①张… III. ①能源-测试技术-高等学校-教材 ②动力工程-测试技术-高等学校-教材
IV. ①TK

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 217643 号

能源与动力工程测试技术

张师帅 编

Nengyuan yu Dongli Gongcheng Ceshi Jishu

策划编辑:王新华

责任编辑:王新华

封面设计:潘 群

责任校对:刘 竣

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:武汉科源印刷设计有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:18.5

字 数:465千字

版 次:2018年9月第1版第1次印刷

定 价:43.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

随着科学技术的迅速发展,能源与动力工程测试技术也发生了深刻的变化,特别是计算机技术、传感器技术以及激光技术的应用,为测试技术注入了大量新内容。有鉴于此,作者在编写本书时既注意介绍能源动力工程传统的基本测试技术,又力求反映国内外测试技术的新成就、新发展和新趋势。

全书内容共分 10 章,第 1 章重点讲述测量系统及测量误差等基础知识,主要使读者能从测量系统的角度对测试技术有一个总的认识。第 2~9 章着重介绍能源与动力工程中主要热工参数的测量原理、测量方法、测量仪器以及误差分析等内容。其中既包含传统的测试方法,又包含新发展起来的测试方法。主要帮助读者掌握能源与动力工程中所需的测试技术,提高解决实际问题的能力。第 10 章介绍微机在测试系统中的应用,为读者掌握计算机测试技术打下一定基础。

理论与实践并重,实用性强,是本书的最大特点。本书可作为能源与动力工程专业本科生教材,也可供相关专业研究生、科研人员及工程技术人员参考。

在本书编写过程中,得到了华中科技大学能源与动力工程学院郑正泉老师、姚贵喜老师、马芳梅老师、戴汝平老师以及研究生智博文、陈俊君、陈文昊和郑钧的支持和帮助。在本书出版过程中,得到了华中科技大学教材基金的资助,同时还得到了华中科技大学出版社的大力支持。在此一并致以深深的谢意!

限于编者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正,不胜感激。

张师帅

2018 年 7 月于武汉

目 录

第 1 章 测量系统与测量误差	(1)
1.1 测量系统	(1)
1.1.1 测量系统的基本概念	(1)
1.1.2 测量仪表的主要性能	(4)
1.2 测量误差	(6)
1.2.1 测量误差的分类	(6)
1.2.2 测量误差的分析	(7)
1.2.3 间接测量的误差分析	(11)
思考题与习题	(15)
第 2 章 温度测量	(16)
2.1 测温原理与温标	(16)
2.1.1 测温原理	(16)
2.1.2 温标	(17)
2.2 热电偶测温	(19)
2.2.1 热电偶测温的原理	(19)
2.2.2 热电偶回路的性质	(21)
2.2.3 热电偶参比端的处理	(23)
2.2.4 热电偶热电势的测量	(27)
2.2.5 几种常用的热电偶及其性能	(31)
2.2.6 热电偶总温探针	(35)
2.3 热电阻测温	(36)
2.3.1 热电阻测温的原理	(36)
2.3.2 常用的热电阻元件	(36)
2.3.3 热电阻测温元件的结构	(39)
2.3.4 热电阻阻值的测量	(41)
2.4 其他接触式测温仪表	(43)
2.4.1 二极管温度计	(43)
2.4.2 双金属温度计	(44)
2.4.3 压力式温度计	(45)
2.5 非接触式温度测量	(45)
2.5.1 热辐射的理论基础	(46)
2.5.2 亮度温度计	(47)
2.5.3 全辐射高温计	(50)
2.5.4 比色温度计	(52)
2.5.5 红外测温仪	(54)

2.6	温度计的选择、安装与标定	(55)
2.6.1	温度计的选择与安装	(55)
2.6.2	温度计的标定	(58)
	思考题与习题	(62)
第3章	压力测量	(64)
3.1	压力的定义与分类	(64)
3.1.1	压力的定义	(64)
3.1.2	压力的分类	(65)
3.2	稳态压力的测量	(65)
3.2.1	流体稳态压力测量的基本原理	(65)
3.2.2	流体静压的测量及静压探针	(67)
3.2.3	流体总压的测量及总压探针	(69)
3.2.4	压力探针的测量误差分析	(70)
3.3	稳态压力指示仪表	(72)
3.3.1	液柱式压力计	(72)
3.3.2	弹性式压力计	(74)
3.4	动态压力的测量	(76)
3.4.1	应变式压力传感器	(76)
3.4.2	压电式压力传感器	(80)
3.4.3	电感式压力传感器	(82)
3.4.4	电容式压力传感器	(87)
3.4.5	压阻式压力传感器	(89)
3.4.6	压磁式压力传感器	(89)
3.4.7	霍尔效应压力传感器	(90)
3.5	测压仪器及测压系统的标定与安装	(91)
3.5.1	测压仪器及测压系统的标定	(91)
3.5.2	测压仪器及测压系统的安装	(94)
3.6	真空测量	(97)
3.6.1	真空测量仪	(97)
3.6.2	真空测量仪表的使用与安装	(101)
	思考题与习题	(102)
第4章	流速测量	(104)
4.1	流速大小的测量	(104)
4.1.1	速度探针	(105)
4.1.2	可压缩性对气流速度测量的影响	(107)
4.2	流速方向的测量	(109)
4.2.1	方向探针	(109)
4.2.2	平面流速的测量	(110)
4.2.3	空间流速的测量	(115)
4.3	热线风速仪	(120)

4.3.1	热线探头及其工作原理	(120)
4.3.2	热线测速方法及方向特性	(122)
4.4	激光多普勒测速仪	(124)
4.4.1	激光多普勒测速仪的工作原理	(125)
4.4.2	激光多普勒测速仪的光学部件	(125)
4.4.3	激光多普勒测速仪的信号处理系统	(127)
4.5	粒子图像测速技术	(129)
4.5.1	粒子图像测速原理	(130)
4.5.2	粒子图像测速的信号处理	(132)
4.5.3	示踪粒子的选择	(135)
	思考题与习题	(137)
第5章 流量测量		(138)
5.1	流量测量方法概述	(138)
5.2	节流压差式流量计	(139)
5.2.1	基本原理	(139)
5.2.2	标准节流装置	(141)
5.2.3	标准节流装置的流量测量误差	(146)
5.3	速度式流量计	(148)
5.3.1	涡轮流量计	(148)
5.3.2	涡街流量计	(149)
5.3.3	电磁流量计	(151)
5.3.4	流速法测量流量	(154)
5.4	其他型式的流量计	(155)
5.4.1	罗茨流量计	(155)
5.4.2	浮子流量计	(156)
	思考题与习题	(157)
第6章 转速及功率测量		(158)
6.1	转速测量方法概述	(158)
6.2	转速的测量	(160)
6.2.1	转速传感器	(160)
6.2.2	数字式转速仪	(161)
6.2.3	激光转速仪	(163)
6.3	功率测量方法概述	(164)
6.4	转矩的测量	(166)
6.4.1	相位差式转矩仪	(166)
6.4.2	应变式转矩测量仪	(172)
6.5	电机功率的测量	(174)
6.6	测功器	(176)
6.6.1	电力测功器	(176)
6.6.2	水力测功器	(179)

思考题与习题	(180)
第7章 振动及噪声测量	(181)
7.1 振动测量概述	(181)
7.2 测振原理及测振传感器	(183)
7.2.1 相对式测振仪的原理	(183)
7.2.2 惯性式测振仪的原理	(185)
7.2.3 涡电流式振动位移传感器	(189)
7.2.4 测振传感器的选择与使用	(190)
7.3 振动测试仪器及振动测量	(193)
7.3.1 振动测试仪器	(194)
7.3.2 振动测试仪器的选用原则	(196)
7.3.3 振动测量	(197)
7.4 噪声测量中的基本概念	(199)
7.4.1 噪声的物理度量	(200)
7.4.2 级的合成、分解与平均	(202)
7.5 噪声的频谱与噪声的评价	(205)
7.5.1 噪声的频谱	(205)
7.5.2 噪声的评价	(206)
7.6 噪声测试仪器及噪声测量	(209)
7.6.1 噪声测试仪器	(209)
7.6.2 噪声测量	(211)
思考题与习题	(215)
第8章 气体成分分析	(217)
8.1 气相色谱分析	(217)
8.1.1 气相色谱分析简介	(217)
8.1.2 色谱图及色谱定性定量分析方法	(220)
8.2 氧气分析仪	(223)
8.2.1 氧化锆氧气分析仪	(223)
8.2.2 热磁式氧气分析仪	(226)
8.3 红外气体分析仪	(231)
8.4 化学发光气体分析仪	(233)
8.5 烟度计	(234)
思考题与习题	(237)
第9章 液位测量	(238)
9.1 低温液体液位的测量	(238)
9.1.1 电阻式低温液位计	(238)
9.1.2 超导式低温液位计	(239)
9.1.3 电容式低温液位计	(240)
9.1.4 差压式低温液位计	(241)
9.2 常温及高温液体液位的测量	(242)

9.2.1 静压式液位计	(242)
9.2.2 连通器式液位计	(243)
9.2.3 差压式水位计	(247)
思考题与习题	(253)
第 10 章 微机在测试系统中的应用	(254)
10.1 微机测试系统的基本组成及其功能	(254)
10.2 数据采集系统	(258)
10.2.1 模拟通道数据预处理	(258)
10.2.2 高速数据采集	(259)
10.2.3 数据采集系统的标定	(261)
10.3 微机测试系统的应用	(262)
思考题与习题	(267)
附录	(268)
附录 A 铂铑 10-铂热电偶分度表	(268)
附录 B 镍铬-镍硅热电偶分度表	(271)
附录 C 铜-康铜热电偶分度表	(274)
附录 D 铂电阻温度计分度表	(279)
附录 E 铂电阻温度计分度表	(281)
参考文献	(283)

第 1 章 测量系统与测量误差

在能源与动力工程中,要想通过纯理论的方法来提高机器设备的性能是不可能的,因为它们的实际工作过程极为复杂。尽管目前已有许多简化的理论模型,但它们都与实物差别较大。因此,用试验测量的方法来解决能源与动力工程中一些基本问题就显得十分重要。

为便于分析测量参数的可信度,在学习测试技术之前,先介绍有关测量系统和测量误差的基本知识。

1.1 测量系统

1.1.1 测量系统的基本概念

1. 被测量

在能源与动力工程中,常常需要对某些物理量的大小进行检测,通常把要检测的物理量称为被测量或被测参数。在能源与动力工程测试中经常遇到的被测量有压力、温度、流速、流量、液位、运转机械的转速、功率、振动频率及噪声等。按被测量在测试中的变化情况,被测量可分为静态量和动态量两种。

(1) 静态量

所测量的物理量在整个测量过程中其数值始终保持不变,即被测量不随时间变化而变化,这种量称为静态量。例如,稳定状态下流体压力、温度和速度。

(2) 动态量

所测量的物理量在测量过程中随时间变化而不断改变其值,这种量称为动态量。例如:汽轮机启动过程中的转速、功率;非稳定工况下流体的压力、温度和速度。

2. 测量过程

要知道被测量的大小,就要用相应的测量仪表来检测它的数值,而仪表的测量过程就是把被测量的信号,以能量的形式进行一次或多次转换和传递,并与相应的测量单位进行比较的过程。例如,弹簧管压力计对压力的测量过程是,被测压力作用在弹簧管上使其发生角变形,再通过杠杆传动机构的传递和放大以及齿轮机构的传动,角变形变成压力表指针的偏转,最后与压力刻度标尺上的测压单位进行比较而显示出被测压力的数值。又如,用热电偶测量温度时,它是利用热电偶的热电效应,把被测温度转换成热电势信号,然后把热电势信号转换成毫伏表上的指针偏转,并与温度标尺相比较而显示出被测温度的数值的。

3. 测量方法

根据获得测量结果的方式不同,测量可分为直接测量和间接测量两种。

(1) 直接测量

凡是将被测参数直接与测量单位进行比较,其测量结果可以直接从测量仪表上获得的测量称为直接测量。直接测量又可以分为直读法测量和比较法测量两种。

①直读法。

被测参数可以直接从仪表上读出,如水银温度计、压力表等,这种方法的优点是使用方便,但一般精度较差。

②比较法。

这种测量方法一般不能从测量仪表上直接读得测量结果,而往往要使用标准量具,因此,测量手续麻烦,但测量仪表本身的误差往往能在测量中抵消,故测量准确度比直读法的高。比较法又分为如下三种。

a. 零值法。

在测量时,使被测量的作用与已知量的作用相抵消,使总效应为零,这种方法称为零值法。这样被测量就等于已知量,例如,用电位差计来测量热电偶在测量温度时产生的热电势的大小。

b. 差值法。

若测出被测量 X 与已知量 a 之差为 $(X-a)$,则有

$$X = (X - a) + a$$

这种方法称为差值法。例如,用热电偶和毫伏计测量温度 t 时,从毫伏计上得到的电动势,应是被测温度 t 与冷端温度 t_0 之差所产生的热电势,然后根据冷端温度 t_0 ,在相关表上查出一个热电势,二者相加就得到所要求的热电势,再根据它求得被测温度。

c. 代替法。

在被测量无法直接测量的条件下,可选择一可测的能产生相同效应的已知量代替它,这种方法称为代替法。例如,用光学高温计测量钢水的温度。

(2)间接测量

在由若干基本物理量组成的一个新物理量中,有许多量是不能用直接测量方法测出的。例如:汽轮机、内燃机和压缩机的轴功率;管道中介质的流量;运行机组的效率等。这时就需要用间接测量方法对它们进行测量。

所谓间接测量,就是在所求量与若干相关变量的关系中,先对各相关变量进行直接测量,然后将所得数值代入某关系式进行计算,从而求得未知量的数值的测量。在间接测量中,未知量 Y 可以表示成

$$Y = f(X_1, X_2, \dots)$$

式中: X_1, X_2, \dots 是用直接测量方法得到的变量值。例如,透平机械的轴功率可表示为

$$P = \frac{2\pi Mn}{60 \times 10^3} \quad (1-1)$$

式中: P 为透平机械的轴功率, kW;

M 为透平机械传递的扭矩, N·m;

n 为主轴转速, r/min。

若先分别对扭矩 M 和转速 n 进行直接测量,再将它们代入上式,就可以计算出轴功率 P 的数值。

4. 测量系统

测量过程中所使用的一切量具、仪器仪表及各种辅助设备统称测量系统。有些测量只要用一种简单仪表就能完成测量任务,有些则需要多种仪器仪表及辅助设备,才能完成测量任务。因此,测量系统有简单与复杂之分。

(1)简单测量系统

例如,水银温度计中,装水银的小球感受到温度变化后,在玻璃体的毛细管内水银体积随之变化,这时有刻度的玻璃管就将水银的体积变化转换成温度变化。又如,半导体点温计中,装有热敏电阻的感温元件感受到温度变化后,热敏电阻值就会随温度的变化而变化,通过桥式电路的电流值也跟着变化,这反映在表盘上相应的值就是温度变化。上述两种都是简单测量系统。

(2)复杂测量系统

用声级计测量噪声的系统是一种复杂测量系统,如图 1-1 所示。声音信号经电容式(或压电式)传声器变成电信号,此信号经信号调节器放大或衰减,再经信号处理器中计权网络滤波,最后在显示器的表盘上显示出噪声值的大小。在精密声级计中有频谱分析仪。频谱分析仪能将不同频率段的噪声分检出来,然后在显示器的表盘上显示出来或由自动记录仪记录下来,这些组成元件需供电施以能量。

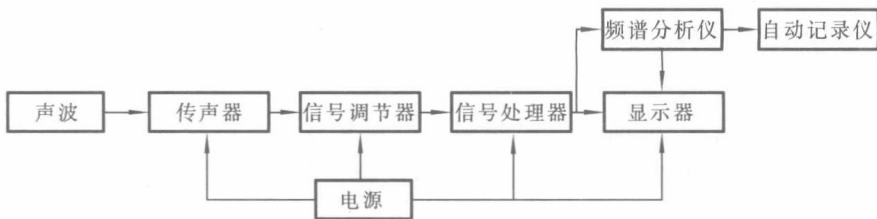


图 1-1 声级计测量噪声的系统

5. 测量元件

从上述可知,任何一个测量系统,都要有三个主要作用元件:感受元件、传递元件及显示元件。下面将分别叙述它们的功能及对它们的要求。

(1)感受元件

感受元件直接与被测对象发生联系,但并不一定要直接接触,它的作用是感受被测量的变化,随之内部产生变化,并向外发出一个相应的信号。

水银温度计的感温泡能感受被测介质的温度变化,并按温度高低发出与之相应的水银柱位移信号,这就是水银温度计感受元件的作用。

作为测量系统的感受元件,必须满足下列条件:

①只能感受被测参数的变化而发出相应的信号。如被测量是压力,感受元件只能在压力变化时发出信号,其他量变化时就不应发出同样的信号。

②感受元件发出的信号与被测量之间呈单值函数关系,最好是线性关系。

事实上有些仪表不能完全满足上述两个条件,经常遇到感受元件在非被测量变化时也会产生内部变化,在这种情况下,只好限制这类无用信号的量级,使它远远小于有用信号。例如,用金属热电阻测量温度时,要忽略压力变化对电阻的影响。有时用理论计算的方法(如引入修正系数)或用试验手段(如在线路上加补偿装置)来消除附加因素的影响。

(2)传递元件

传递元件的作用是将感受元件发出的信号,经过加工或转换传递给显示元件。例如,电阻应变片在工作时发出的信号是电阻变化值,它通过电桥变成电压信号,再由直流电压表来显示。当感受元件发出的信号过小(或过大)时,传递元件应将信号进行放大(或衰减),使之成为能被显示元件接收的信号。

用测压探针和 U 形管测量压力时,连接它们之间的橡皮管就是传递元件,这种简单的传递元件,一般只有在感受元件发出的信号较强和感受元件与显示元件之间的距离不大时才能应用。当感受元件发出的信号较弱或感受元件与显示元件距离较远时,往往要将感受元件发出的信号加以放大,甚至改变信号性质,才能进行远距离传送。

传递元件中的放大方式有两类:一类是将感受的信号利用机械式的机构(杠杆、齿轮等)放大,如用弹簧管压力表测压时,压力信号使弹簧管发生角变形,此变形量很小,需由拉杆和齿轮机构加以放大;另一类是将感受的信号利用电子电路加以放大,例如,用热电偶和电位差计测温时,电位差计中的晶体管电路就能将热电偶产生的温差电动势放大。

当选用测压探针为测量系统的感受元件,而选用压力巡回检测仪做显示元件时,由于它要求输入循环码电信号,这样,传递元件的任务就在于通过本身的转换装置,将压力信号单值地转换成显示元件能接收的循环码电信号。数字编码压力传感器就能完成上述的转化功能。

(3) 显示元件

显示元件直接与测量人员发生联系,它的作用是根据传递元件传来的信号向观测人员显示出被测量在数量上的大小和变化。根据显示方式的不同,仪表可分为指示式、记录式和数字显示式(简称数字式)三种。

①指示式仪表是以指针、液面和标尺的相对位置来显示被测量的数值的。例如,弹簧式压力计是以指针偏转角度来显示压力大小的,U形管是以液面高低来显示压力大小的,大气压力计是以标尺的位置来显示大气压力的。指示式仪表只能指出被测量当时的瞬时值,如要知道被测量随时间的变化而变化的情况,就需要用记录式仪表。

②记录式仪表可以将测量值记录在随时间变化而连续移动的纸上,如 X-Y 记录仪、磁带记录仪及电子电位差计等。

③数字式仪表是将模拟量,通过模数(A/D)转换器转换成二进码的数字量,再由译码器将二进制数字量译成十进制数字量,并通过数码管直接向观测人员显示被测量的数值和单位的仪表。数字频率计和数字电压表是最典型的数字式仪表。

除上述三种显示方式的仪表以外,还有一种信号式仪表,它不需要显示正常运转状态下的瞬时值,而只要求机器出现异常时它能够报警。例如轴位移指示器,当转子的轴向窜动过大时,它能够以灯光闪烁的方式向观测人员报警,实现机器的自动保护。

1.1.2 测量仪表的主要性能

为了正确地选择和使用仪表,应当对测量仪表的主要性能和指标有所了解。下面对测量仪表中常用的性能作简要介绍。

1. 量程

仪表的量程是指仪表能测量的最大输入量与最小输入量之间的范围,量程也可称为测量范围。

选用仪表时,首先要对被测量有一大致估计,务必使测量值落在仪表量程之内(最好落在 $2/3$ 量程附近),因为在测量过程中,如被测量超过仪表量程,时间长了就会损坏仪表或使仪表精度降低。

2. 精度

仪表的精度(精确度)是指测量某物理量时,测量值与真值的符合程度。仪表的精度常用满量程时仪表所允许的最大相对误差的百分数来表示,即

$$\delta = \frac{\Delta_{\max}}{A_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中： δ 为仪表的精度；

Δ_{\max} 为仪表所允许的最大误差；

A_0 为仪表的量程。

例如，某压力表的量程是 10 MPa，测量值的误差不允许超过 0.02 MPa，则仪表的精度为

$$\delta = \frac{0.02}{10} \times 100\% = 0.2\%$$

即该仪表的精度等级为 0.2 级。

仪表的精度等级如下：

I 级标准表：0.005、0.02、0.05 级；

II 级标准表：0.1、0.2、0.35、0.5 级；

工业仪表：1.0、1.5、2.5、4.0 级。

仪表的精度越高，其测量误差越小，但仪表的造价越昂贵。因此，在满足使用要求的条件下，应尽可能选用精度较低的仪表。

3. 灵敏度

灵敏度是指用仪表作静态测量时，输出端的信号增量 ΔY 与输入端的信号增量 ΔX 之比，即

$$K = \Delta Y / \Delta X \quad (1-3)$$

显然 K 值越大，仪表灵敏度越高。

仪表的用途不同，其灵敏度的表示方式也不同。对于电量压力传感器，灵敏度常用 mV/Pa 表示，而对于指示型压力表，灵敏度则用小格/Pa 表示。

4. 分辨率

分辨率是指仪表能够检测出被测量最小变化的能力。在精度较高的指示仪表上，为了提高分辨率，刻度盘的刻度又密又细。

5. 稳定性

仪表的稳定性是指在规定的工作条件下和规定的时间内，仪表性能的稳定程度。它用观测时间内的误差来表示。例如，用毫伏计测量热电偶的温差电动势时，在测点温度和环境温度不变的条件下，24 h 内示值变化 1.5 mV，则该仪表的稳定度为 $\frac{1.5}{24}$ mV/h。

6. 重复性

重复性通常表示为在同一测量条件下，对同一数值的被测量进行重复测量时，测量结果的一致程度。重复性误差用 R_N 表示，即

$$R_N = \frac{\Delta R_{\max}}{Y_{\max}} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中： ΔR_{\max} 为全量程中被测量最大的重复性差值；

Y_{\max} 为满量程输出值。

7. 温度误差

仪表的输出特性将随工作环境温度的不同而变化。当工作环境温度偏离仪表的定标温度 (20 °C) 时，其输出值的变化称为温度误差。温度误差通常用相对误差 δ_t 表示，即

$$\delta_t = \frac{Y_t - Y_{20}}{Y_{\max}} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中: Y_t 和 Y_{20} 分别为在同一输入量条件下, 仪表在 t °C 和 20 °C 工作环境温度下的输出值;
 Y_{\max} 为仪表在 20 °C 工作环境温度下满量程的输出值。

8. 零点温漂

零点温漂是指仪表工作环境温度偏离 20 °C 时, 零位的温度误差随温度变化而变化的变化率, 表示为

$$X_{st} = \frac{Y_{0,t} - Y_{0,20}}{Y_{\max,20} \Delta t} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中: $Y_{0,t}$ 、 $Y_{0,20}$ 分别为仪表工作环境温度在 t °C 和 20 °C 时, 零位的输出值;

$Y_{\max,20}$ 为仪表在 20 °C 以下满量程的输出值;

Δt 为仪表的工作环境温度相对于 20 °C 的温差。

为了确定仪表的零点温漂, 需要对仪表进行不同环境温度的试验。

9. 动态误差与频响特性

在对随时间变化而变化的物理量进行测量时, 仪表在动态下的读数和它在同一瞬间相应量值的静态读数之间的差值, 称为仪表的动态误差或动态特性。

一台仪表可以看作一个振动系统, 一般可通过拉普拉斯变换来求解其微分方程, 获得传递函数 $H(j\omega)$ 。当仪表输入一个正弦信号 $x(t) = X\sin(\omega t)$, 输出一个信号 $y(t) = Y\sin(\omega t + \varphi)$ 时, 仪表的传递函数为

$$H(j\omega) = \frac{y(t)}{x(t)} = \frac{Y\sin(\omega t + \varphi)}{X\sin(\omega t)} \quad (1-7)$$

其复数形式为

$$H(j\omega) = R(\omega)e^{j\varphi(\omega)} \quad (1-8)$$

它可分解成幅频特性 $R(\omega)$ 和相频特性 $\varphi(\omega)$ 两部分。因此, 传递函数 $H(j\omega)$ 又可称为幅相频特性或仪器的频响特性。式(1-8)中, $R=Y/X$ 为输出与输入信号的幅值比, φ 为输出与输入信号的相位差。若以角频率 ω 为横坐标, 以 R 和 φ 为纵坐标, 则可画出幅频特性和相频特性的曲线来。在动态测量中, 要求仪表具有良好的频响特性, 也就是说, 它的幅值比 $R=Y/X$ 在所要求的频率范围内不能有大的变化, 这也就是要求该系统的动态误差很小, 同时在这个频率范围内相位差 φ 也很小。若相位差太大, 将会导致仪表失真。

1.2 测量误差

测量的目的是求出被测量的真实值, 然而在任何一次试验中, 不管使用多么精密的仪器, 测量方法多么完善, 操作多么细心, 都不可避免地会产生误差, 使得测量结果并非真值而是近似值。因此, 对于每次测量, 需知道测量误差是否在允许范围内。分析研究测量误差的目的在于: 找出测量误差产生的原因, 并设法避免或减少产生误差的因素, 提高测量的精度; 其次是通过测量误差的分析和研究, 求出测量误差的大小或其变化规律, 修正测量结果并判断测量的可靠性。

1.2.1 测量误差的分类

根据误差的性质及其产生原因, 误差可分为系统误差、过失误差及随机误差三种。下面分

别叙述它们的特点。

1. 系统误差

系统误差的特点是:在同一试验中,其误差值的大小及符号或是固定不变,或是按一定规律变化。

系统误差产生的原因可能是仪表制造、安装或使用不正确,或试验装置受外界干扰。例如,仪表有零点温漂,测量区域受电磁场干扰,测压探针的孔开得不正确等。另一类原因是试验理论和试验方法不完善。例如,测量脉动气流的速度时,用了稳态测量的速度探针,由于速度探针频响效果差,它不能准确地反映脉动气流的速度变化。系统误差是客观存在的,有时难以消除,这就只能通过修正测量值达到测量精度,修正值是从专门的试验中求得的。例如,用静压探针或总压探针测量静压或总压时,由于制造探针时测压孔的位置开得不正确,测量时它就会引起测量误差,这时可以通过在风洞上对探针校正所得到的系数来对测量结果加以修正。

2. 过失误差

过失误差是测量人员粗心大意、读错、记错、算错或错误操作仪表等原因造成的,也称为粗大误差。

例如,在用铜-康铜热电偶测温时,错误地使用了铂铑 10-铂热电偶分度表,使测量结果明显歪曲。又如,在均匀气流中的同一管道截面上,测得的静压大于总压,这显然是不正确的。这时要检查仪表,并消除产生错误的原因。就其数值而言,过失误差往往远远超过同一条件下的系统误差和随机误差。判断过失误差最简单的方法是拉伊特法,即残差大于 3σ 时就可以判定它是过失误差,它已经不属于随机误差的范畴,应该剔除。

3. 随机误差

在通常情况下,测量某一参数只测一次。在知道仪表精度并有修正值或校正曲线,又确信测量方法正确,并且无过失误差的条件下,可以明确判断测量误差的大小,但是测量误差范围越大,测量精度就越低。

为了提高测量精度,就需要进行多次测量。在多次测量后发现在剔除过失误差和系统误差之后,各测量值并不完全一致,误差有时大、有时小,有时正、有时负,但也发现测量次数足够多时,这种误差的分布服从统计规律,称之为随机误差,也称为偶然误差或概率误差。

随机误差不能通过试验方法加以剔除,但可以用误差理论估计它对测量结果的影响。产生随机误差的原因如下:

①仪表内部零件存在间隙和摩擦,其变化不规则。

②测量人员对指示型仪表最末一位数估计不准,在数字式仪表中,计数脉冲闸门开关会造成 ± 1 的数字误差。

③周围环境不稳定对测量对象和测量仪器的影响,如大气压力、温度、电磁干扰、振动等因素的随机变化,都会对测量结果产生影响。

随机误差与测量次数有关,当测量次数增加时,随机误差的算术平均值将逐渐减小,并趋近零,这样,多次测量后的算术平均值更接近真值。

1.2.2 测量误差的分析

在测量结果中,当把系统误差修正过来,并把过失误差除掉后,所得数值的测量精度就取决于随机误差的大小了。

1. 随机误差的正态分布性质

任何一次测量,随机误差的存在都是不可避免的。这一事实可以由下述现象反映出来:对同一静态物理量进行等精度重复测量,每一次测量所获得的测定值都各不相同,尤其是在各个测定值的尾数上,总是存在着差异,表现出不稳定的波动状态。测定值的随机性表明了测量误差的随机性质。

随机误差就其个体来说变化是无规律的,在总体上却遵循一定的统计规律。在对大量的随机误差进行统计分析后,人们认识并总结出随机误差分布的如下几点性质。

①有界性。在一定的测量条件下,测量的随机误差总是在一定的、相当窄的范围内变动,绝对值很大的误差出现的概率接近于零。也就是说,随机误差的绝对值实际上不会超过一定的界限。

②单峰性。随机误差具有分布上的单峰性。绝对值小的误差出现的概率大,绝对值大的误差出现的概率小,零误差出现的概率比任何其他数值的误差出现的概率都大。

③对称性。大小相等、符号相反的随机误差出现的概率相同,其分布呈对称性。

④抵偿性。在等精度测量条件下,当测量次数趋于无穷大时,全部随机误差的算术平均值趋于零,即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i = 0 \quad (1-9)$$

上述四点性质是从大量的观察统计中得到的,为人们所公认。因此,有时也称这些性质是随机误差分布的四条公理。

理论和实践都证明了,大多数测量的随机误差都服从正态分布的规律,其分布密度函数可用下式表示:

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1-10)$$

如果用测定值 x 本身来表示,则

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1-11)$$

式中: μ 和 σ 为决定正态分布的两个特征参数。在误差理论中, μ 代表被测参数的真值,全由被测参数本身所决定。当测量次数趋于无穷大时,有

$$\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-12)$$

σ 称为均方根误差,表示测定值在真值周围的散布程度,由测量条件所决定。其定义式为

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (1-13)$$

μ 和 σ 确定之后,正态分布就完全确定了。正态分布的密度函数 $f(x)$ 的曲线如图 1-2 所示。正态分布很好地反映了随机误差的分布规律,与前述四条公理相互印证。随机误差的这种正态分布性质可以由概率论的中心极限定理给出理论上的解释。同时由随机误差分布的四条公理也可以推导出随机误差服从正态分布。

应该指出,在测量技术中并非所有随机误差都服从正态分布,还存在着其他一些非正态分布(如均匀分布、反正弦分布等)的随机误差。由于大多数测量误差服从正态分布,或者可以由