

热能与动力工程 测试技术

王子延 主编



西安交通大学出版社

TK113

W/50

444396

热能与动力工程测试技术

王子延 主编

西安交通大学出版社

内容提要

本书包括热能与动力工程中经常遇到的温度、压力、力及位移、转速及功率、流速及流量、振动及噪声等参量的基本概念、测量方法、测试仪表的原理及应用。测量误差分析及计算机在测量中的应用也在各自的章节中分别作了介绍。全书共分十一章,每章附有思考题。

本书为大专院校能源与动力工程各专业的专业基础课教材,亦可供有关技术人员参考。

(陕)新登字 007 号

热能与动力工程测试技术

王子延 主编

责任编辑 刘影

*

西安交通大学出版社出版发行

(西安市咸宁西路 28 号 邮政编码:710049 电话:(029)3268316)

西安电子科技大学印刷厂印装

各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张: 14.5 字数:345 千字

1998 年 10 月第 1 版 1998 年 10 月第 1 次印刷

印数:1~3 000

ISBN 7-5605-1023-X /TK·62 定价:15.00 元

若发现本社图书有倒页、白页、少页及影响阅读的质量问题,请去当地销售部门调换或与我社发行科联系调换。发行科电话:(029)3268357,3267874

前 言

《热能与动力工程测试技术》课程是面向能源和动力工程各类专业本科生的一门专业基础课。它涉及热能与动力工程中的试验技术、计量技术及非电量电测技术等领域知识,是工业生产及科学研究必不可少的重要手段。

以往各专业均独自授课,所使用的教材专业性很强,不适合当前所提出的拓宽专业口径、扩大学生知识面,调整学生知识结构的高等工程教育目标。为满足院设课程授课的需要而编写了该教材。本书的特点在于:1.以原能源及动力各专业测试课程教材为基础,集中其具有普遍意义的基础性内容。2.改变了原教材讲授专业实验仪表、实验手段及方法的教材结构,以各专业技术中主要的物理参量测量为目标,引入传感器及其二次仪表所构成的测量系统概念。强调对测试方法的选择及测试仪表的选用。特别加强了以现代科技为特征的传感器技术及计算机技术的介绍。3.为方便教学,在教材的写法上力求通过便于理解的原理示意图或简单实际结构图讲授测量装置,而不直接取用产品结构图。二次仪表的介绍也是着重讲解示意性电子电路,而避免过多繁复的实用仪表电路。4.为加强教学效果并利于对基础知识的训练,各章均附有思考题。

编者在教材的撰写过程中,注意结合多年来的教学实践经验,并融入现代新技术成果,力求扩大本教材向读者提供的信息量。

本教材建议的教学学时数为40~60学时,教师可根据需要选取内容讲授,并应辅助以相应的实验环节。

本书由西安交通大学能源与动力工程学院王子延教授(第一、二、三、五、八、九、十章及第四章4.9),陈流芳高级工程师(第四章),曹淑珍副教授(第六章),单桂琴副教授(第七章)和刘传李副教授(第十一章)共同编写。全书共分十一章,由王子延教授担任主编,负责统稿及修改工作。邱平工程师参加了本稿件文字的整理、录入及校定工作。

王纘先教授审阅了本书稿件,并提出了宝贵的意见与建议,编者深表谢意。

同时对西安交通大学能源与动力工程学院各专业测试技术课程教师在编写过程中给予的帮助和支持表示感谢!

本书编者衷心地期望使用本教材的教师、工程技术人员及学生在阅读本教材之后,能提出宝贵的反馈意见。共同为提高该教材的质量而努力,为此我们将不胜感激。

编者

1997年8月与于西安交通大学

目 录

1 测量方法及误差分析

1.1 测量方法	(2)
1.1.1 被测参数	(2)
1.1.2 测量过程	(2)
1.1.3 一次仪表和二次仪表	(3)
1.1.4 测量方法的分类	(3)
1.2 测量误差	(3)
1.2.1 真值与测量值	(3)
1.2.2 误差的定义、来源及分类	(4)
1.2.3 随机误差	(5)
1.2.4 测量精度的衡量标准	(5)
1.2.5 测量结果最佳值及贝塞尔公式	(6)
1.2.6 间接测量中的误差传递	(8)
1.2.7 测量误差的计算处理	(8)
1.3 测量仪表的技术指标	(10)
1.3.1 测量仪表的精度	(10)
1.3.2 测量装置的静态特性	(11)
1.3.3 测量仪表的动态特性	(12)
思考题与习题	(15)

2 转速测量仪表

2.1 接触式转速测量仪表	(17)
2.1.1 机械式转速表	(17)
2.1.2 测速发电机	(18)
2.2 非接触式转速测量仪表	(18)
2.2.1 光电传感器	(18)
2.2.2 磁电式传感器	(21)
2.2.3 数字式频率计	(22)
2.2.4 闪光测速仪	(23)
思考题与习题	(24)

3 力、位移测量及其常用传感器

3.1 测力系统中的电阻应变式传感器	(26)
3.1.1 金属电阻应变片	(26)
3.1.2 半导体应变片	(28)
3.1.3 应变片的粘贴及温度补偿	(29)
3.1.4 应变片的测量电路	(30)
3.1.5 电阻应变仪	(31)
3.1.6 应变式测力传感器	(32)
3.2 位移测量系统中的几种传感器	(33)
3.2.1 电位计式位移传感器	(34)
3.2.2 电感式位移传感器	(34)
3.2.3 电容式位移传感器	(37)
3.2.4 电涡流式位移传感器	(41)
思考题与习题	(43)

4 温度测量

4.1 温度测量的物理基础	(46)
4.1.1 温度的基本概念	(46)
4.1.2 温度测量的基本原理	(46)
4.1.3 温标	(46)
4.1.4 温标的传递	(48)
4.1.5 温度测量的基本方法及测温仪表	(49)
4.2 玻璃管液体温度计	(49)
4.2.1 测温原理	(49)
4.2.2 玻璃管液体温度计的主要特点	(49)
4.2.3 玻璃管液体温度计的分类	(50)
4.2.4 玻璃管液体温度计的使用与误差分析	(50)
4.3 温差热电偶	(51)
4.3.1 热电偶测温原理	(51)
4.3.2 热电偶的基本定律	(53)
4.3.3 热电偶材料的选择与分类	(54)
4.3.4 热电偶的主要结构型式	(56)
4.3.5 热电偶的冷端补偿	(56)
4.3.6 热电偶的焊接	(57)
4.3.7 热电偶的选择、安装使用和校验	(57)
4.3.8 热电偶测温误差分析	(57)
4.4 电阻测温	(58)
4.4.1 电阻测温原理	(58)

4.4.2	电阻温度计的特点	(58)
4.4.3	电阻温度传感器	(58)
4.4.4	半导体热敏电阻温度计	(60)
4.4.5	电阻温度计的测量误差	(60)
4.5	二极管测温	(60)
4.5.1	二极管测温的原理	(60)
4.5.2	二极管的种类与感温特性	(61)
4.5.3	二极管测温系统的组成	(61)
4.5.4	硅二极管温度计	(62)
4.6	测温显示仪表	(62)
4.6.1	动圈式显示仪表	(62)
4.6.2	直流电位差计	(63)
4.7	辐射测温	(64)
4.7.1	辐射测温的物理基础	(64)
4.7.2	光学高温计	(64)
4.7.3	全辐射高温计(辐射高温计)	(66)
4.7.4	比色高温计	(66)
4.8	测温仪表的检验	(67)
4.8.1	温度计校验的目的	(67)
4.8.2	温度计的校验方法	(67)
4.9	温度测量技术的应用	(69)
4.9.1	低温测量	(69)
4.9.2	气流温度测量	(70)
4.9.3	固体内部及表面温度的测量	(73)
	思考题与习题	(79)

5 压力测量系统

5.1	液柱式压力传感器	(82)
5.1.1	U形管	(83)
5.1.2	斜管式微压计	(83)
5.2	机械式压力传感器	(84)
5.3	应变式及压阻式压力传感器	(85)
5.4	压电式压力传感器	(88)
5.4.1	压电材料	(88)
5.4.2	压电式压力传感器	(89)
5.4.3	压电式压力传感器的测量电路	(90)
5.4.4	压电式压力传感器应用中的一些问题	(93)
5.5	压力传感器的标定	(94)
5.5.1	压力传感器的静态标定	(94)

5.5.2 压力传感器的动态标定	(95)
思考题与习题	(98)

6 流体速度的测量

6.1 测压管	(99)
6.1.1 测压管测速原理	(99)
6.1.2 流体总压、静压的测量——总压管、静压管	(100)
6.1.3 毕托管	(102)
6.1.4 可压缩性对气流速度测量的影响	(103)
6.1.5 测压管的标定	(104)
6.2 流动方向的测量与复合测压管	(108)
6.2.1 平面流动方向的测量与二元复合测压管	(108)
6.2.2 空间流动方向的测量与三元复合测压管	(114)
6.3 热线风速仪	(115)
6.3.1 热线风速仪探头结构	(115)
6.3.2 工作原理	(116)
6.3.3 静态响应特性和热线的基本方程	(116)
6.3.4 热线风速仪的方向特性	(119)
6.3.5 热线风速仪的动态特性	(120)
6.3.6 热线风速仪的标定	(120)
6.4 激光多普勒测速技术	(121)
6.4.1 激光多普勒效应测速原理	(122)
6.4.2 激光测速光学布置基本模式和光路结构	(123)
6.4.3 主要光学部件	(125)
6.4.4 多普勒信号处理器	(126)
思考题与习题	(127)

7 流量检测及仪表

7.1 流量检测概述	(128)
7.2 节流式流量计	(130)
7.2.1 标准节流装置	(130)
7.2.2 标准节流装置的流量公式	(134)
7.2.3 标准节流装置的设计	(138)
7.2.4 非标准节流件及其应用	(144)
7.3 涡轮流量计	(146)
7.3.1 概述	(146)
7.3.2 涡轮流量计的结构和工作原理	(146)
7.3.3 涡轮流量计的安装	(147)
7.4 电磁流量计	(148)

7.4.1	电磁流量计的基本原理	(148)
7.4.2	电磁流量计的变送器及转换器	(149)
7.4.3	电磁流量计的安装和使用	(149)
7.5	超声波流量计	(149)
7.5.1	超声波多普勒法基本原理	(150)
7.5.2	超声波传播速度法基本原理	(151)
7.5.3	超声波流量计的特点	(152)
7.6	涡街流量计	(153)
7.6.1	工作原理	(153)
7.6.2	涡街流量计的结构	(154)
7.6.3	旋涡产生频率的检测	(154)
7.6.4	涡街流量计的安装	(155)
	思考题与习题	(156)

8 功率测量系统

8.1	吸收型测功器	(158)
8.1.1	水力测功器	(158)
8.1.2	电力测功器	(162)
8.1.3	电涡流测功器	(165)
8.2	扭矩仪	(167)
8.2.1	应变式扭矩传感器	(168)
8.2.2	相位差式扭矩传感器	(170)
8.3	测功器的选择	(171)
	思考题与习题	(173)

9 振动测量系统

9.1	振动传感器	(174)
9.1.1	加速度型振动传感器	(175)
9.1.2	位移型振动传感器	(177)
9.1.3	速度型振动传感器	(177)
9.2	振动测量仪器	(179)
9.2.1	测振仪	(180)
9.2.2	频谱分析仪	(181)
9.3	振动系统的动态测试与激振器	(183)
9.3.1	脉冲锤与脉冲激振	(183)
9.3.2	电动式激振器	(183)
9.4	振动传感器的性能指标及其安装使用	(185)
9.5	振动测量应用举例	(188)
	思考题与习题	(191)

10 噪声测量系统

10.1 基本概念	(193)
10.2 噪声的主观量度	(194)
10.3 噪声的合成	(195)
10.4 噪声测量仪器	(195)
10.5 噪声测量方法	(197)
思考题与习题	(199)

11 微机技术在测量与试验中的应用

11.1 概述	(200)
11.1.1 微型计算机与测试技术	(200)
11.1.2 自动测试系统的构成	(200)
11.1.3 微机技术在热能与动力工程的应用	(203)
11.2 检测信号的放大与变换	(204)
11.2.1 运算放大器与测量放大器	(204)
11.2.2 可编程增益放大器	(207)
11.2.3 隔离放大器	(207)
11.2.4 信号变换器(电压/电流变换电路)	(208)
11.3 数据的采集及保持	(209)
11.3.1 多路开关及连接方法	(209)
11.3.2 采样保持电路	(209)
11.4 数模及模数转换技术	(210)
11.4.1 概述	(210)
11.4.2 D/A 转换技术	(211)
11.4.3 A/D 转换技术	(213)
11.4.4 数据采集技术	(214)
11.5 智能仪表的组成及特点	(217)
11.5.1 智能仪表的组成	(217)
11.5.2 智能仪表的特点与功能	(218)
思考题与习题	(219)

主要参考文献

1 测量方法及误差分析

热能与动力工程测试技术跨接着热能动力机械工程与测量试验技术两个领域,它所涉及的知识面很广,一方面研究领域内所遇到的许多试验要求采用新的测试手段来进行,而新测试手段的应用,又为能源与动力工程提出新的研究方向,从而促进了双方的发展。这种相互间的促进构成了测试技术这一特殊学科的发展。从测试技术的应用来看,所涉及的内容很多,总的看可以分为两类,一类是工业动力机械的常规试验,如压力、功率、温度、流动参数、转速、扭矩等方面的测量。这类试验一般都用现成的设备装置,试验本身往往是规范化的。对于我们来讲,任务在于正确选用测试设备及掌握试验方法。另一类属于非常规试验,这是一种具有探索性的特殊试验。比如:用高速摄影来研究内燃机的燃烧,用热线风速仪或激光测速仪来测量风机、管道及泵类的流场,用表面热电偶来分析瞬态热传导等等。这类试验对实验条件及实验方法均要求较严,一般科研单位才配备这些试验所需的专用仪器设备。要完成这类试验,需参考相关资料,并要在实践中不断摸索。测试过程的完成是通过测试系统来实现的。下面举例来对图中各环节加以详细说明:

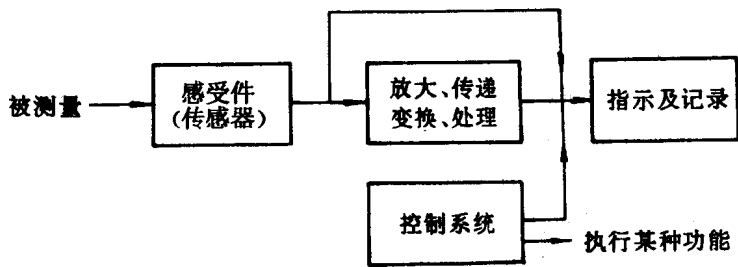


图 1-1 测试系统构成

(1) 被测量:是一个测试系统的输入量,如旋转机械的转速、扭矩或者某热能设备的温度、压力等物理量。

(2) 感受器:又称传感器,它的作用是把被测量的物理量转换为另一种易于直接传递、记录或指示的物理量。比如在转速表中把旋转轴转速转变为电脉冲的光电式传感器;把温度变化转化为水银柱高度变化的温度计;还有我们后面要大量介绍的把压力、位移、温度、振动等信号转变为电信号的各种传感器。

(3) 放大、传递,变换处理:经传感器转化后的信号将在这个环节中得到适当的处理,使之适于显示与记录。比如对转速脉冲信号进行整形、放大处理。

(4) 指示器:其作用是显示信号,如指针、数字式仪表。对于动态信号往往引入连续记录装置,如医院中所使用的心电图测录仪的记录部分。

(5) 控制系统:它可以利用所获得的信号去执行某种任务,例如把汽车发动机转速及扭矩的信号送入微处理机,经计算机计算可以直接给出功率值,并控制发动机的调节机构,自行进行最佳方案的选择及调整。

随着电子技术的发展,非电量电测法在能源与动力工程测试技术中得到愈来愈广泛的应用。采用电子技术对非电物理量进行测量称之为非电量电测法,这种方法的优点是:频率响应快,可用于测量动态过程,能连续地进行测量及记录;易实现自动化控制及信号计算机处理;测量精度高。

目前热能与动力工程测试技术的发展趋势体现在以下几个方面:

(1) 计算机技术的广泛应用。带有高速及大容量数据采集芯片的计算机系统越来越多地应用在测试技术领域,使得测量过程中的数据采集处理、试验操作调节、实验结果显示分析等环节实现自动化。高速数据采集系统的应用还使许多瞬变过程测量的精度、分辨率及实时处理能力大大地提高。

(2) 新型传感器的研制。传感器技术与计算机技术是同步发展起来的,各种功能的陶瓷传感器、光纤传感器以及传感器与计算机处理一体化的集成化芯片等等,近年来都开始由实验室走向工程应用。许多传统温度、压力传感器的应用范围及精度也大大提高。

(3) 新技术、新设备的应用。激光、超声波、红外线等技术在测试技术中的应用也越来越广泛。例如三维激光测速仪、激光相位多普勒技术、超声波流场测试仪、宽量程红外测温仪、热像仪、高速摄影技术等等。

1.1 测量方法

1.1.1 被测参数(量)

我们在实验中,往往必须知道某个物理量在某一时刻的数值大小,因而必须对它进行检测,我们称需要检测的物理量为被测量参数或称为被测量。如在热能与动力工程的测量中,经常涉及到的被测参数有温度、压力、流量、转速、位移、扭矩、振动等。

按照被测量参数随时间变化关系可将其分为静态参数与动态参数。

被测参数在整个测量过程中的数值大小不随时间变化的量称为静态参数。例如环境大气压力;压缩机及内燃机稳定工况下的转速等,严格地讲,这些参数的数值并非绝对恒定不变,只是随时间变化非常缓慢而已,在进行测量的时间间隔内其数值大小变化甚微。

随时间不断改变自身量值的被测量称为动态参数,例如非稳定工况或过渡过程的压缩机、内燃机的转速;机械设备的振动加速度、燃烧爆炸过程的压力波、加热及冷却过程的温度等等,均属于动态参数。这些参数随时间变化的函数可以是周期函数、随机函数等等。

1.1.2 测量过程

所谓测量过程,就是将被测物理参数信号转换成可供识别记录的物理量,并与相应的测量单位进行比较的过程。这种转换有机械量向机械量转换,机械量向电量转换,电量向电量转换等多种形式。例如弹簧管式压力表把压力变化转换成弹簧管变形的位移,测振过程中振动传感器将振动或位移信号转换成电信号,热电偶利用其热电效应把温度转换成电势信号等。

1.1.3 一次仪表和二次仪表

测量仪表视其在测量过程中所起的作用不同而分为一次仪表和二次仪表。

传感器又称为一次仪表。一次仪表是在测量过程中直接感受被测参数并将其转换成某一信号(能量)的仪表。例如压力表中的弹簧管、热电偶测温仪表中的热电偶。

二次仪表是接受一次仪表的输出信号,并将其放大或转换成其他信号,最后显示出测量结果的仪表。如压力表中的杠杆传动机构、指针和标尺,热电偶测温仪表中的电位差计(或毫伏表)。

1.1.4 测量方法的分类

按照获得测量参数结果的方法不同,通常把测量方法区分为直接测量和间接测量。

直接测量是指被测量数值可直接由测试设备上获得,而不需对所获值进行运算的测量。比如:用水银温度计测温,用万用电表测量电压、电流、电阻值等。

被测量的数值不能直接由测试设备上获得,而是通过所测量到的数值同被测量间的某种函数关系经运算而获得的这样一种测量叫间接测量。例如,对一台汽车发动机的输出功率进行测量时,总是先测出发动机转速 n 及输出扭矩 M ,再由关系式 $N_c = K \cdot M \cdot n$ (K 为常数)计算出其功率值来。

测量仪表测量值的读出方式可分为直读法、零位法。

在直读法中,被测量的数值是用仪表指示件的位移量来表示的,如压力表的指针偏转量表示了被测压力的大小;水银温度计的液面高度表示了被测对象的温度。这类方法比较简单,但精度低。

零位法又称平衡式或补偿式测量法,这种方法是用仪表的零位指示来检测测量系统的平衡状态,从而用已知的标准量确定被测量的值。如用电位差计测量电势,用平衡电桥测量电阻,用天平称重等。这种方法精度高,但较之直读法复杂些。

1.2 测量误差

在实际测量工作中,无论测量仪器多么完善,误差总是存在的。本章节将讨论误差的种类、性质,并讨论如何对所测得的数据进行处理、加工,从而求得被测量的最可靠值,并估计其精确程度。

1.2.1 真值与测量值

某一时刻某一物理量客观存在的量 n 值称之为真值,用 X_0 表示。通过测量仪表对该物理量检测得到的结果称为测量值,用 X 表示。

严格地讲,客观存在的物质时刻都在变化之中,而且由于测量中总是存在误差,所以实际上真值 X_0 是难以测量到的。因此,在实际应用中一般就把相对高一级仪表测量得到的值近似看作真值(也称相对真值)。例如国家各级计量站所提供的标准质量在某种程度上就可作为真值看待。

1.2.2 误差的定义、来源及分类

根据定义误差可分为

(1) 绝对误差

测量值与被测量的真值之差称为绝对误差,记作

$$\delta = L - X \quad (1-1)$$

式中 L 是测量值, X 是真值,从式中可见绝对误差 δ 是有正有负的。在实际问题中,由于 X 一般是未知的,通常用高一级仪器的指示值 X_0 来代替真值。这样一来,绝对误差又可以写成

$$\delta = L - X_0 \quad (1-2)$$

(2) 相对误差

除了绝对误差外,我们常用到相对误差 γ 的概念。相对误差是绝对误差与真值之比,记作

$$\gamma = (\delta/X)100\% \quad (1-3)$$

同绝对误差中的问题一样,相对误差表达式在实际应用中写作

$$\gamma = (\delta/X_0)100\% \quad (1-4)$$

根据误差来源的性质,可以将误差分为系统误差、粗大误差和随机误差。在讨论误差问题时,我们引进一个概念:等精度测量。所谓等精度测量是指用同一仪器设备,按同一方法,由同一观测者在环境条件不变的条件下所进行的测量。

(1) 系统误差

系统误差具有这种特点,在做等精度测量时,误差呈现出绝对值与符号保持恒定的规律性,这种误差的影响程度可以确定,并采用控制或修正的方法加以消除。例如,压力表指针的零位不准,射击时枪的准星偏离等。这种误差产生的原因是多方面的,我们举几个例子来说明系统误差产生的原因。仪器本身安装不当,如把水银温度计倒挂,这样附加了重力对液柱的影响;环境影响,如大气压、气温的变化造成仪表读数的漂移;测量方法不正确,如对某些指针式仪表来说,观测者视线的角度不正确会造成读数误差。有些高精度的万用表在指针后面装有反光镜,就是为了消除视觉误差;另外,我们后面所讲到的动态误差也可以归在系统误差的范围之内。

(2) 粗大误差

又称过失误差,这显然是一种不能容忍的误差,因为它同测量要求本身是不相容的,完全是测量者粗心大意所致,如在测量中测错、记错。含有粗大误差的测量值称为坏值,是应予以剔除的值。

(3) 随机误差

对某物理量进行等精度测量时,多次测量的误差的绝对值时大时小,符号时正时负,无确定规律,这种误差叫随机误差,又称偶然误差。这种误差是由多方面复杂的因素所引起的,比如环境、仪器、测量者工作状态的波动。因而它既不能预计也不能消除。单次偶然误差虽然没有规律性,但随着测量次数的增加,测量总体反映出的误差便服从统计规律了。可以通过数据处理,估计出随机误差对测量结果的影响。关于随机误差我们下面将进行专门的讨论。

应当指出,在实际的测量中,系统误差和随机误差往往都是同时存在的,它们之间也没有绝对的界限,尤其在系统误差不易发现时,往往会被当成随机误差来对待。因此对具体问题要

具体分析。

1.2.3 随机误差

以下在讨论随机误差的问题时,均认为系统误差已被消除。随机误差的分布规律,可以在大量重复测量数据的基础上总结出来,它符合统计学上的规律性,具有以下的几个特点:

- (1) 绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的机会多;
- (2) 绝对值相等的正误差与负误差出现的机会相等;
- (3) 绝对值很大的误差出现的机会很小,可以认为在一定的测量条件下,随机误差的绝对值不会超过一定的界限;
- (4) 随着测量次数的无限增加,随机误差的算术平均值趋于零,即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n} = 0$$

式中 n ——测量次数

δ_i ——第 i 次测量的绝对误差

具有上述四个特性的随机误差服从正态分布,分布曲线如图 1-2 所示,该曲线的数学表达式为

$$y = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 \delta^2} \quad (1-5)$$

式中 y ——随机误差 δ 的概率密度

δ ——随机误差

h ——精密度指数

由式(1-5)可见, δ 越小则 y 越大,这说明小误差出现的概率大, δ 越大则 y 越小,这说明大误差出现的概率小, y_{\max} 出现在 δ 为零处,其值为 $h/\sqrt{\pi}$,且 h 值越大, y_{\max} 亦越大,曲线下所围的面积为定值 1。这是由于全部随机误差出现的概率为 1,故 h 越大,曲线就越瘦越高,如图 1-3 所示,这说明测量误差小而集中,且无系统误差存在,这表明测量精度高。反之, h 小则测量精度低。

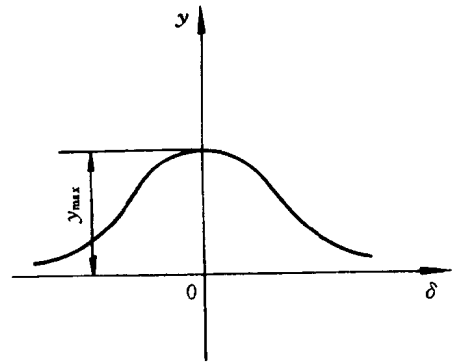


图 1-2 误差分布曲线

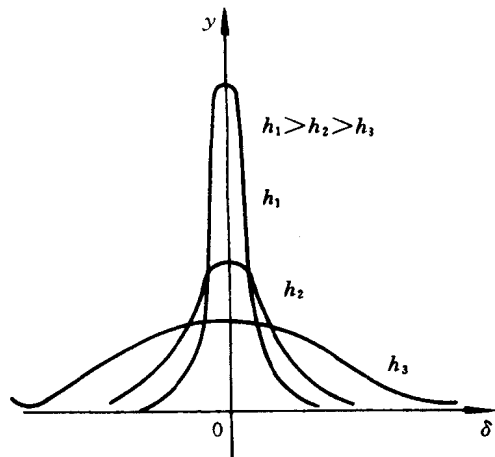


图 1-3 不同 h 值的误差分布曲线

1.2.4 测量精度的衡量标准

由上面的分析可知, h 可以做为衡量测量精度的参量。但实际上,用数学方法来计算得出 h 值是困难的,因而通常采用别的方式来确定测量的精度。比如用平均误差或均方误差做为测量精度的衡量标准。

- (1) 平均误差 η

平均误差的定义式为：

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n |\delta_i|}{n} \quad (1-6)$$

式中各量的含义同式(1-5)。

由误差理论可以给出 η 同 h 之间的关系：

$$\eta = 0.5642/h \quad (1-7)$$

平均误差 η 的计算比较简单,但有时用它来衡量测量的精度存在不足之处。比如,我们对某一量进行了两组测量,其相应的绝对误差如表 1-1 所示。计算表明,由公式(1-6)所求出的平均误差均为 2.4,但是第二组中出现了 -7、+8 这样较大数值的误差,显然这组测量的精度不及第一组高。为了解决这个矛盾,我们采用均方误差 σ 来做为评定测量精度的标准。

表 1-1

第一组误差	-3	-2	+4	+2	+1	0	-4	+3	-2	+3
第二组误差	0	-1	-7	+2	+1	+1	+8	0	-3	+1

(2)均方误差 σ

均方误差又称为标准误差,其定义式为

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2/n} \quad (1-8)$$

由式 1-8 可见, σ 同绝对误差 δ 的量纲相同并且 δ 小的测量其标准误差就小。类似于平均误差 η ,由误差理论可以给出均方误差同 h 值的关系式:

$$\sigma = 1/(\sqrt{2}h) \quad (1-9)$$

仍以表 1-1 的数据做计算,可以得出第一组的 σ 为 2.7;第二组的 σ 为 3.6,这就反映了第二组数据测量精度低这一事实。

由误差理论还可以给出这样的分析结果:随机误差 $|\delta|$ 出现在

$$\begin{aligned} &\leq 0.6745\sigma && \text{的概率为 } 50\%; \\ &\leq \sigma && \text{的概率为 } 68.27\%; \\ &\leq 2\sigma && \text{的概率为 } 95.45\%; \\ &\leq 3\sigma && \text{的概率为 } 99.73\%。 \end{aligned}$$

由上面的结论可知,当随机误差 $|\delta|$ 大于 3σ 时,它出现的概率仅为 0.27%。所以,凡是超出 3σ 的误差便可以认为不属于随机误差,而可以认为是过失误差,并允许将含有这种误差的数据去除掉,我们通常把 $\delta = \pm 3\sigma$ 称为极限误差。

1.2.5 测量结果最佳值及贝塞尔公式

在实际测量中,虽然无法获得被测量量的真值,但我们可以找到一个与真值最接近的值,这一值称为最佳值,并对其偏离真值的程度予以估计。设 X 为被测量的真值, L_1, L_2, \dots, L_n 为等精度测量过程中所获得的 n 个测量值,则各测量值的误差为

$$\begin{aligned}\delta_1 &= L_1 - X; \\ \delta_2 &= L_2 - X; \\ &\dots \dots \\ \delta_n &= L_n - X\end{aligned}$$

将上面各式相加则有

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^n \delta_i &= \sum_{i=1}^n L_i - nX \\ X &= -\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{n}\end{aligned}\quad (1-10)$$

根据随机误差的特性(4) $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n} = 0$, 式(1-10)变为

$$X = \left[\frac{\sum_{i=1}^n L_i}{n} \right]_{n \rightarrow \infty} \quad (1-11)$$

而表达式 $\frac{\sum_{i=1}^n L_i}{n}$ 正是测量值的算术平均值。这说明,当测量次数无限增加时,等精度测量的算术平均值趋于真值。由于实际测量的次数总是有限的,我们便把有限次测量的算术平均值看作是被测量的最佳值,表示为 \bar{X} , 即

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{n} \quad (1-12)$$

定义 \bar{X} 与各测量值之差为残差,记作 V :

$$V = L - \bar{X}$$

我们引入残差的概念是为了应用于下面介绍的贝塞尔公式。

我们把算术平均值 \bar{X} 看作是被测量的最佳值,但 \bar{X} 毕竟不是真值,我们十分关心算术平均值偏离真值的程度。由误差传递理论可以导出算术平均值的标准误差(均方误差) $\sigma_{\bar{X}}$ 表达式,并用它表征 \bar{X} 的精度。

$$\sigma_{\bar{X}} = \sigma / \sqrt{n} \quad (1-13)$$

该式是由误差传递定律导出的,从式(1-13)可以看出,增加测量次数可以提高测量精度,但当 n 增大到一定数值之后,对精度的提高作用就很小了。由于式(1-13)中用到了均方误差 σ , 而 σ 的计算从式(1-8)可见是需用到真值的,真值未知时,无法求出 σ 。为了计算均方误差,我们引入贝塞尔公式,贝塞尔公式利用残差来计算均方误差(推导从略)。其形式为

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_i^2}{n-1}} \quad (1-14)$$

为区别式(1-8)中的 σ , 这里用 $\bar{\sigma}$ 来表示均方误差。(1-14)及(1-13)两式联立,可以给出计算算术平均值的均方误差的公式: