

高等学校教学用书

选矿测试技术

东北工学院 罗 涛 邓常烈 编

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街高第街北巷39号)

新华书店总店科技发行所发行

北京市西城区德外印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张 15 字数 350 千字

1989年11月第一版 1989年11月第一次印刷

印数00,001~3,500册

ISBN 7-5024-0586-0

TD·100 (课) 定价3.00元

前 言

随着科学技术的发展,生产自动化的水平也在不断提高。实现生产自动化的第一步是实现待控制的过程参量的自动检测。

编写选矿专业“选矿测试技术”课的教材的目的就是向学生介绍需要自动检测的选矿参量的性质,检测它们的主要方法的基本原理和所用主要仪表的结构及性能。

虽然选矿过程参量的测试技术发展迅速,文献资料也很多,但迄今还没有见到一本完整而系统的专著或教科书。在我国高等学校内也还没有一个成型的统一的教学大纲,因此本教科书无论从体系上还是从内容选取上都属于初次尝试,它有待于和选矿专业师生见面后经受评议。

本书第一至第十章的前半部份是供选矿专业本科生按40学时学习的“选矿测试技术”课程使用,而第十章后半部份和第十一章则是为选矿专业研究生继续学习选矿理论研究测试技术提供的教学纲要。

有关选矿测试技术的国内外资料浩如烟海,作为教科书的参考文献我们只能择其极少一部份供学生学习参考。

几年来,为建设和编写此教材,许多同志给予无私帮助,为本书提供了大量的资料。北京科技大学松全元、孙维约,马鞍山矿山研究院王福震和唐山工程技术学院张学敏等同志参加了本书初稿的审查,提出了许多宝贵的意见和建议,在此一并向他们致以衷心的感谢。

本书由罗蕾主编,第一、二、三、六、八、十一章由罗蕾编写,第四、五、七、九章由邓常烈编写,第十章为合编。由于编者水平有限,书中难免有错误及不当之处,敬请有关专家和读者批评指正。

编 者

1988年8月

目 录

绪论	1
第一章 测量与数据处理	4
1.1 信号和信号变换	4
1.1.1 信号的分类	4
1.1.2 信号变换	4
1.2 测量方法和测量系统	5
1.2.1 等精度测量	5
1.2.2 真值和近真值	5
1.2.3 测量方法	5
1.2.4 测量系统和仪表的基本性能	6
1.3 测量误差	8
1.3.1 系统误差	8
1.3.2 粗大误差	9
1.3.3 随机误差	9
1.4 测量数据处理	9
1.4.1 随机误差性质分析	9
1.4.2 测量不确定度	11
1.4.3 测量次数及其置信概率	11
1.4.4 随机过程的测量误差	12
1.4.5 仪器标定及数据处理	13
1.4.6 测量结果的表示	14
1.4.7 间接测量误差的标准偏差	15
1.4.8 组合测量的标准偏差计算	16
第二章 物料粒度测试	17
2.1 概述	17
2.2 筛分法	18
2.2.1 概述	18
2.2.2 筛分微细物料的声波筛和气喷筛	19
2.2.3 粗粒物料在线检测筛	20
2.2.4 湿式细粒物料在线检测筛	21
2.3 流动分级法	21
2.3.1 概述	21
2.3.2 连续水析器	22
2.3.3 水力旋流器作为在线粒度分析器	24
2.4 沉积分析法	26
2.4.1 沉积天平	26
2.4.2 光电扫描粒度分析仪	28

2.4.3 沉降式在线粒度计	30
2.4.4 离心沉积式在线粒度计	30
2.5 光学法	32
2.5.1 显微镜	32
2.5.2 激光粒度计	33
2.5.3 块状物料在线光学检测	35
2.6 鼓(搏)动法	37
2.7 超声波法	38
2.8 电感应法(Coulter粒度计)	41
2.9 表面积测定法	42
2.9.1 渗透法	42
2.9.2 吸附法	45
第三章 选矿产品成分的测试	49
3.1 概述	49
3.2 射线及中子的基本知识	49
3.2.1 γ 、X射线及中子的基本性质和它们的源	49
3.2.2 γ 及X射线和物质的相互作用	55
3.2.3 射线探测器	56
3.3 X射线荧光分析	58
3.3.1 基本原理	58
3.3.2 X射线荧光分析仪的分类	59
3.3.3 X射线荧光分析仪结构	60
3.3.4 数据处理及标定	65
3.4 γ 射线成分分析	66
3.4.1 吸收型 γ 射线分析仪	66
3.4.2 γ 射线共振散射法测定矿块品位	66
3.4.3 在线测定煤的灰分	67
3.5 中子分析法	71
3.5.1 中子活化分析	71
3.5.2 瞬时中子- γ 法	72
3.6 磁性铁分析	73
3.6.1 磁分析仪	73
3.6.2 磁力秤	74
3.6.3 在线分析物料中磁铁矿含量	74
第四章 矿浆浓度测试	77
4.1 静压力法	77
4.1.1 水柱平衡式(测压管式)密度计	77
4.1.2 压差式浓度计	78
4.2 重力法	81
4.3 浮子法	82
4.3.1 漂浮浮子式密度计	82
4.3.2 浸没浮子式密度计	83

4.4	γ射线法	84
4.5	超声波法	87
4.5.1	概述	87
4.5.2	阻抗法超声波密度计	87
4.5.3	自循环法超声波密度计	88
4.6	振动式法	88
4.6.1	单管振动式密度计	89
4.6.2	双管音叉振动式密度计	89
4.7	电磁感应法	91
4.8	浊度计	91
4.8.1	透射光浊度计	91
4.8.2	散射光浊度计	92
4.8.3	散射透射光浊度计	93
4.8.4	电容式浊度计	94
4.8.5	放射性同位素式浊度计	95
第五章	料量和流量测试	96
5.1	电子秤	96
5.1.1	电阻应变片式荷重传感器	96
5.1.2	压磁式荷重传感器	100
5.1.3	皮带电子秤	101
5.1.4	定值电子秤	102
5.2	核秤	103
5.3	冲量式流量计	104
5.4	浮子式流量计	104
5.5	旋涡流量计	107
5.6	超声波流量计	109
5.6.1	频差法超声波流量计	109
5.6.2	多普勒频移法超声波流量计	111
5.7	电磁流量计	112
5.7.1	变送器的工作原理及结构型式	112
5.7.2	转换器的工作原理	113
5.7.3	电磁流量计的使用	115
5.8	其它类型的矿浆流量计	116
5.8.1	环流式及孔板式矿浆流量计	117
5.8.2	可变溢流面式流量计	118
5.8.3	矿浆计量秤	118
5.9	浮选机内充气量的检测	120
第六章	物位测试	122
6.1	浮力法	122
6.2	静压力法	123
6.2.1	压力式液位计	123
6.2.2	差压式物位计	123

6.2.3 电阻应变式探头液位计	124
6.2.4 吹气式液位计	124
6.2.5 钟罩式液位计	125
6.3 电容法	125
6.3.1 电容式物位计原理	125
6.3.2 电容绳式料位计	127
6.3.3 电容绳式液位计	128
6.4 电阻法	128
6.5 超声波法	129
6.6 γ 射线法	131
6.7 微波法	132
6.8 其它型式料位计	134
第七章 矿浆和溶液离子浓度测试	135
7.1 电位法	135
7.1.1 工作原理	135
7.1.2 参比电极	136
7.1.3 指示电极	137
7.1.4 pH 计	139
7.1.5 其它离子浓度的电位法测试	140
7.1.6 极谱法	142
7.2 电导法	143
7.2.1 电极—电导式离子浓度计	144
7.2.2 电磁—电导式离子浓度计	147
7.3 光学法	148
7.3.1 工作原理	149
7.3.2 光电比色法(光度计)	151
7.3.3 可见光及紫外分光光度计	152
7.3.4 选矿厂用的光学式离子浓度计	154
第八章 物料水分测试	157
8.1 选矿物料中水的赋存形式	157
8.2 电气法	157
8.2.1 电容式水分计	157
8.2.2 电导式水分计	158
8.3 微波法	159
8.3.1 微波衰减式水分计	159
8.3.2 微波加热式水分计	160
8.4 红外法	160
8.5 中子法	161
8.6 快速失重法	163
第九章 粘性测试	164
9.1 概述	164
9.1.1 粘度和流变参数	164
9.1.2 粘度单位	166

9.1.3 温度对粘度的影响	167
9.2 毛细管粘度计	167
9.3 旋转粘度计	171
9.4 其它粘度计	175
9.4.1 恩格列粘度计	175
9.4.2 超声波粘度计	176
9.4.3 落球粘度计	177
9.5 在线粘度计	177
第十章 选矿设备性能测试	179
10.1 振动选矿设备运动特性测试	179
10.1.1 周期振动的分析	179
10.1.2 测振传感器	181
10.1.3 测振仪表	191
10.2 磨矿机负荷测试	198
10.2.1 振动压电法	198
10.2.2 声响法	198
10.2.3 功率法	201
10.3 分级机返砂量测试	202
10.4 选矿设备中流场特性测试	203
10.4.1 激光多普勒测速法	203
10.4.2 示踪法	205
10.5 选矿设备中矿粒运动测试	207
10.5.1 示踪法	208
10.5.2 光纤法	208
第十一章 物质表面性质测试简介	210
11.1 红外光谱	210
11.1.1 基本原理	210
11.1.2 红外分光光度计	212
11.1.3 应用	214
11.2 核磁共振波谱法 (NMR波谱)	215
11.2.1 基本原理	215
11.2.2 核磁共振波谱仪	216
11.3 X光电子能谱	218
11.3.1 基本原理	218
11.3.2 基本结构	218
11.3.3 应用	220
11.4 俄歇电子能谱	221
11.4.1 基本原理	221
11.4.2 仪器基本结构	222
11.4.3 应用	222
11.5 扫描电镜及电子探针	223
11.6 离子探针概述	226
主要参考文献	227

绪 论

测量是为确定被测对象的量值而进行的实验过程。测量的是对象的量值。“对象”则是客观事物性质的表征，或称之为参量。所以测量的是客观事物的参量的值，而不是笼统的客观事物或参量。例如说测量矿粒的粒度大小(粒度是矿粒的一种性质或一个参量)，而不能说测量矿粒。更具体地说，测量是用专门的技术工具，把未知待测量和一个已知标准量进行比较的实验和计算过程。现代测量技术的内涵则更加丰富，包括测量变换；记录及显示方式、方法；与微机的配合；数学模型；提供的信息量等。由于感到原有的测量概念已不能充分容纳这些新的内容，所以在许多情况下用“测试”这一内涵更多的新概念。检测的概念则更有检查和测量的意义，但实际的目的和测试是一致的。

测试的具体目的大致是：

1. 监视生产，保持生产正常进行

为此须随时或定期测量生产过程的参量，例如选矿生产过程中的矿浆浓度、跳汰机床层松散度等；根据测试结果，人工地或自动地调节过程参量，保证生产在良好状态下进行。

2. 检验和控制产品质量

如检测和控制选矿产品品位、水分等。

3. 为设计新设备或新选厂提供原始数据

4. 理论研究

如测定矿粒表面对浮选药剂的吸附；矿粒在水流中的运动速度等。

没有测量，也就没有科学。测量是人类认识事物本质所不可缺少的。科学技术的发展和测试技术的发展和相辅相成的，测试技术达到的水平愈高，则科学技术的成就愈为深广，而科学技术的发展又为测试技术提供了新的方法及途径，同时也提出了新的课题。

选矿学科的特点是：(1) 工艺性强，过程较复杂；(2) 正在不断发展中；(3) 涉及的理论及技术面很广。因此，选矿测试的内容也非常广泛，涉及力学、流体力学、电磁学、物理化学等多方面的量值。

选矿过程测试、选矿过程数学模型是选矿过程自动控制的基础。必须通过测试将待控制的参量(信号)值取出来，才能实现对过程的控制。

选矿厂生产过程需要控制的参量很多，可按生产作业归纳如表1。

在选矿试验研究中也需要检测上述的一些参量。现将这些参量归纳为十大类，列于表2中。

为了检测上述参量可以采用多种方法，例如可以用化学分析鉴定选矿入料及产品的品位；用烘干法测定选矿产品的水分；用粗、细筛网的筛子确定物料的粒度组成等。这些方法的共同优点是比较准确，人们容易掌握，但是，不仅是上述的参量中尚有一些难以用简单的、直接的方法检测，而且这些方法的共同缺点是速度慢、滞后于过程，不能实现实时检测，更无法实现自动控制。因此，随着近代测试技术的发展及选矿自动控制的要求，选矿参量的近代测试方法也迅速发展。表2所列的选矿参量的测试方法和传感器主要是一些近代的、常用的测量方法。

表 1 选煤厂、选矿厂生产过程检测及控制参量

过 程	选 煤 厂	选 矿 厂
粗 碎	1. 灰分； 2. 入碎物中过大块含量； 3. 金属物。	1. 矿量； 2. 仓中料位面； 3. 入碎及碎后产品 粒度； 4. 金属物； 5. 磁铁矿含量（对黑色金属 选矿厂）； 6. 碎矿机堵塞。
中 细 碎		1. 矿量； 2. 仓中料位面； 3. 粒度； 4. 碎矿机生产率。
磨矿和分级筛分	1. 煤进入筛子的量； 2. 筛上混杂量； 3. 筛下混杂量。	1. 入料粒度及粒度组成； 2. 按指定粒度计的生产率； 3. 矿量； 4. 分级溢流浓度； 5. 磨矿浓度； 6. 磨矿机介质充填率； 7. 分级产品粒度组成； 8. 循环负荷量。
磁 选		1. 生产率； 2. 磁铁矿含量； 3. 粒度； 4. 浓度
浮 选	1. 给矿量； 2. 浓度； 3. 灰分； 4. 药剂用量； 5. 液面。	1. 给矿量； 2. 泡沫和矿浆面； 3. pH值； 4. 药剂浓度和用量； 5. 离子成分和浓度； 6. 温度； 7. 产品品位； 8. 泡沫强度； 9. 充气量； 10. 矿浆浓度。
脱 水	1. 入料量及产品量； 2. 重产品的混杂量； 3. 灰分； 4. 水分； 5. 粒度； 6. 床层松散度； 7. 循环水（流量，固体 含量）； 8. 压缩空气（流量，压力）	1. 筛下水量； 2. 产品品位（或重产品的混杂）； 3. 床层厚度及松散度。
重 介 质	1. 轻、重产品的混杂量； 2. 密度； 3. 粘度； 4. 液面； 5. 加重介质（介质损失量、密度、泥化度）； 6. 浓度。	1. 入选量； 2. 密度； 3. 粘度； 4. 产率； 5. 金属含量（品位）。
浓 缩	1. 浓度； 2. 溢流浊度； 3. 絮凝剂、凝聚剂用量。	1. 浓密机机架过载； 2. 产品浓度，密度； 3. 溢流浊度； 4. 澄清液面高度； 5. 絮凝剂、凝聚剂用量。
过 滤	1. 水分； 2. 灰分； 3. 滤液的固体含量，过大粒子； 4. 液面； 5. 压力； 6. 真空度； 7. 助滤剂浓度和用量。	1. 矿浆浓度； 2. 水分； 3. 过滤机液面； 4. 真空度； 5. 矿量； 6. 助滤剂浓度及用量。
离心脱水机 干 燥	1. 处理量； 2. 水分； 3. 温度； 4. 空气消耗量。	1. 处理量； 2. 水分； 3. 温度。

此外对于选矿设备（包括碎矿、磨矿、筛分、分级、脱水等设备）的某些生产性能参数。例如磨机负荷、碎矿机负荷、振动设备的振动特性、碎矿机排矿口等，也有多种近代测试方法。

由表 2 可见，检测选矿各参量的方法很多，总的又可分为用于实验室内的方法和直接随生产过程进行的方法，或称为在线(On-Stream)检测法。在线检测根据具体情况还可以分出一一种在流(In-Stream)检测。这时，在线检测是指从生产流程中引取出一股有代表性的矿样送入检测仪器中进行检测；在流检测则是将检测仪器的探头直接插入过程矿浆中检测。用

表 2 选矿参量测试方法及传感器类型

测试参量	测试方法或传感器
1. 产品粒度	1. 实验室：筛分式、沉降式、光散射式、光吸收式、电阻式、辐射线式、吸附式等 2. 在线(生产过程)：超声波式、光散射式、辐射线式、电阻式、沉降及流动式
2. 产品成分	γ 射线式、X射线式、中子活化式等
3. 矿浆离子浓度	电化学式、光学式
4. 矿浆浓(密度)	射线式、振动式、超声波式、流体式、光学式、电磁式
5. 矿浆粘度及油度	落球式、毛细管式、转子式、超声波式
6. 散状物料料量	射线式、压电式、电磁式、压磁式、超声波式、冲量式
7. 流体及矿浆流量	堰式、节流式、电磁式、浮子式、超声波式、旋涡式
8. 物位(料位、液位)	射线式、超声波式、微波式、浮子式、电学式、机械式、液体式
9. 产品水分	烘干式、化学式、红外式、微波式、中子活化式、电阻式、电导式
10. 温度	热电式、电阻式、辐射式、膨胀式、半导体式

于实验室的检测方法和在线检测方法的基本原理一般是一致的，而且这两类方法间也并无严格的界线，例如所谓近流检测法就是在现场直接取样放在轻便型的检测仪器中进行快速检测，可以认为是介于在线及实验室两类方法间的方法；另外，两类方法所用的仪器有时是统一的，有时也很不相同。由于有些参量（例如粒度、浓度、离子浓度、水分等）的实验室检测的普通方法已在其它课程中介绍，本课程将基本不涉及，而以在线检测为主。又因为在选矿中需要检测温度的场合较少，限于篇幅，在本书中也删除了。选矿理论研究中涉及到的一些测试技术，简介于本书的最后。当前选矿测试的仪表已经很多，作为教科书，本书将以被测参量的性质为基础，介绍各种测试方法的基本原理及有代表性的仪表的主要性能，以期达到举一反三的效果。

第一章 测量与数据处理

欲利用检测仪表得到理想的测量结果，必须对被测量的性质有深入的理解，才能合理地选择测量方法和测量仪表，为此又必须对测量方法和测试仪表有正确的了解，同时要能恰当地处理所得的测量结果。

1.1 信号和信号变换

1.1.1 信号的分类

从近代测试的角度，我们可以把被测量统称为信号，把测得的结果称为数据。结合选矿工艺的特点，可将被测量（信号）分为两大类，一类是静态信号，它们在测量过程中是不随或基本不随时间而变的，在选矿实验室内某些既定的对象，例如矿浆、矿块、粉末、溶液等样品的一些待测量，如浓度、品位、pH值、温度、离子浓度、粒度等属于静态信号；另一类则是动态信号，它们的量值随时间而变化，又可分为周期的和随机的两种。周期信号的量值随时间作周期性的变化，例如简谐振动的振幅、速度和加速度，均随时间变化，并可用正弦数学关系表述（某些周期信号则难以用数学关系式描述）；随机信号则随时间作无规律的波动（但一般仍符合统计性规律）。在线检测选矿过程的参量，例如分级机溢流浓度，它每时每刻都在波动，虽然在正常情况下波动值不太大，但也是一种随机信号。

一般地说能够检测动态信号的仪表可以检测静态信号，虽然常常是不经济的。例如， γ —射线浓度计可以用于在线检测变动的矿浆浓度，也可以检测静态矿浆的浓度；而检测静态信号的仪表则通常不能检测动态信号。

1.1.2 信号变换

已如绪言所述，选矿测试的对象是选矿过程中的主要参量（参数）、选矿设备生产性能参数以及理论研究中为揭示机理所需测试的物理或化学量。这些量都是非电量。现代测试技术的特点是利用测量变换技术把被测量按一定的规律或原理转变为另一个便于传递、显

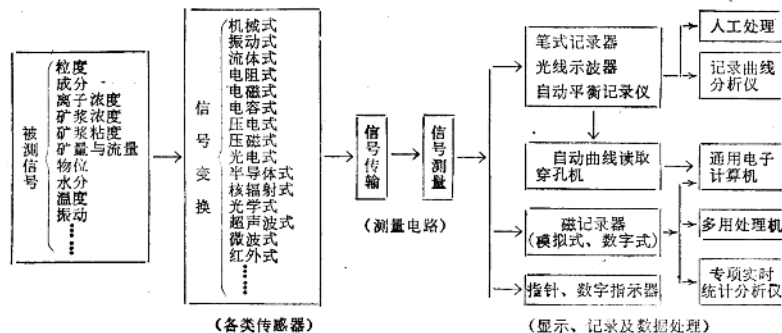


图 1-1 选矿近代测试系统图

示、记录及处理的物理量，通常是电量（电流、电压、电脉冲、频率等）。完成这种信号变换的元件称为变换器，根据不同被测量的特点设计成的变换装置称为传感器。最理想的变换规律是变换前与变换后的参数呈简单的比例关系。变换元件的这种特性便称为线性。图1-1是一个包括信号变换（或传感器）的近代选矿测试系统图，是表2的综述方式。

1.2 测量方法和测量系统

图1-1具体说明测量首先要将被测量用仪器及装置所组成的测量系统检出和变换，使之成为人们能感知的量值。

1.2.1 等精度测量

对同一被测量，用同一台仪器、装置，由同一个人，在同样的精心程度，同一个环境下，在间隔的时间不太长的条件下，进行多次系列测量，即称为等精度测量。否则，则称为非等精度测量。我们研究的前提是等精度测量。由后叙内容可知，等精度测量就是等标准偏差测量。

1.2.2 真值和近真值

真值 一个被测量本身所具有的真实大小。被测量的真值是理想的概念，一般来说是不知道的。

测得值 直接或间接测量或经过必要的计算而得出的被测量的值。

实际值 由于各种原因，测得值与真值之间总存在差异，为了知道差异的大小，须要找出可以代替真值的量值，通常把高一级的计量标准所测得的量值称为实际值，它是满足规定准确度的、用来代替真值使用的量值。

近真值 又称最佳值。在检测条件下得到的最接近真值的测得值。由数理统计可知，在等精度测量条件下，多次测量被测量的测得值的算术平均值即为真值的最佳估值。

1.2.3 测量方法

测量是一个比较过程，是将被测量和某标准量进行对比。按对比的方法可将测量分为直接对比测量和间接对比测量。

按照得到测试结果的方法，又可将测量分为如下几种。

1. 直接测量

是用预先标定好了的测量仪器和装置直接测取待测量值。用温度计测温度，用压力表测压力，流量计测流量等都是直接测量。

2. 间接测量

是通过被测量与若干个变量相联系的关系式，先分别对各变量进行直接测量，再经过计算求出被测量值，例如通过直接测量过水断面面积及流速进而确定流量，即： $Q = A \cdot v$ (m^3/s) Q 为流量， A 为过水断面面积 m^2 ； v 为流速 m/s 。间接测量的测量精度时常比直接测量的精度更高，这是由测量各参数的仪表原理及性能等所决定的。

3. 组合测量

当被测量由于由两个以上相关量组成的函数之中时，必须先通过试验测定出相关量，再由函数关系求出待测量。例如，宾汉体悬浮液的流变性有两个参数，即初始切应力 τ_0 。

和刚性系数 η ，难以直接或间接测出。但它们和管壁切应力 τ_w 及平均切应变 $\frac{8v}{D}$ 存在 $\tau_w = \frac{4}{3}\tau_s + \eta\frac{8v}{D}$ 的关系。通过一组测定 τ_w 及 $\frac{8v}{D}$ 的试验，便可由 $\tau_w - \frac{8v}{D}$ 的关系曲线定出 τ_s 及 η 。

1.2.4 测量系统和仪表的基本性能

测量系统是指整个测量用的仪器及装置，如图1-1所示。测量系统总的可分为两大类：模拟系统及数字系统。模拟测量系统是把被测量最终变为电压、电流、电阻、指针位移、笔迹曲线等模拟量。数字测量系统是经模-数（A-D）转换。把被测量最终变为二进制或十进制的数码等数字量。

正确选择和了解测量系统是进行测量的基础，例如对于某些随机信号最好选用数字跟踪式测量系统，才能随时显示确切的数值。而对一些周期信号，则最好选用记录曲线的模拟测量系统。由此可见选择测量系统的最基本的依据是被测信号的性质。

测量系统或测量仪表的基本性能是指表征其测量能力（数量及质量）的一些基本指标，例如，精确度、稳定性、测量范围、输入-输出特性等。

1.2.4.1 精确度

精确度（精度）是用仪表测量被测量可能达到的测得值和真值的符合程度。测得值不符合真值的原因是存在测量误差，其间的关系是

$$\text{测量误差}(\xi) = \text{测得值}(x) - \text{真值}(\mu) \quad (1-1)$$

测量误差可以是正值，也可以是负值。测量误差越小，测量的精确度越高。

关于仪表的精确度的概念，目前国内外都还没有统一。有的是指该仪表所能测量的最小量值，或仪表的最小分度值。例如，所谓万分之一的天平的精度比千分之一的天平高，实际上是指万分之一的天平的感量为1/10000g，千分之一的天平的感量为1/1000g；又如 γ 射线浓度计的精度为0.01g/ml，实际上指它的灵敏度为0.01g/ml，即可以测出0.01g/ml浓度的变化。工程上常用的概念是以最大量程时的相对误差来表示仪表的精度。具体确定是用该仪表在规定条件下测量多次，以几次中相对误差最大值定为其精度，即

$$R_{\max} = \frac{[\text{测得值} - \text{实际值}]_{\max}}{\text{仪表测量范围}} \times 100\% \quad (1-2)$$

也就是说，用该仪器测量时，在正常情况下，测量误差不会超过 $R_{\max}$ 。

1.2.4.2 量程

示值范围 仪表所能指示的起始值和终止值的范围。

测量范围 仪表在允许误差范围内能测量值的范围，其最高值（上限值）和最低值（下限值）之差即为量程。

1.2.4.3 稳定性

表明测量示值稳定性的指标是稳定度及外部环境的影响系数。

稳定度 仪表示值随时间的变化程度，例如因漂移引起流量示值波动为8小时0.02m³/s，则稳定度为 $\delta_s = 0.02\text{m}^3/\text{s}/8\text{h}$ 。

影响系数 由外部诸如温度、气压等因素引起的示值变化用相应的系数来修正。

1.2.4.4 仪表的输入、输出特性

仪表对于输入的反应不同,表现于输出示值的区别,可以用灵敏度、线性度、滞后差及动态特性等来说明。

(1) 灵敏度 称测量系统对被测量的变化的反应能力为其灵敏度 S

$$S = \frac{\text{输出信号的变化量}(\Delta y)}{\text{输入信号的变化量}(\Delta x)} \quad (1-3)$$

例如对于差动变压器,当输入信号的变化量为1mm时,产生的输出信号的变化量为2mV的电压信号,其灵敏度 $S = 2\text{mV}/1\text{mm}$ 。

灵敏度也可以用输入信号的变化量/输出信号的变化量表示,例如记录仪的灵敏度 $S = 0.05\text{V}/\text{cm}$ 。

灵敏度有时也表示为测量系统能检出的最小的被测量值,或最小变化量。例如电阻应变片的灵敏度为 $10^{-6}\epsilon$,就是表示它检测出来的最小应变为1微应变($\mu\epsilon$)($1\mu\epsilon = 10^{-6}\epsilon$),有时单独把它称之为灵敏域或灵敏限。

(2) 线性度 输出与输入信号量值间的关系曲线,理想的情况应为线性关系,即灵敏度为定值。实际上由于种种原因,既或是仪表的理论特性为直线,实际上的输出-输入曲线也会偏离直线,通常以非线性误差 L_N 表示测量系统的线性度。

$$L_N = \frac{\Delta L_{\max}}{A} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 $\Delta L_{\max}$ ——实际的输出-输入曲线和理论的线关系曲线间最大的差值;

A ——输出值的变化范围(见图1-2)。

商品仪器的 L_N 通常已由厂家标定好。

(3) 滞后差 当输入信号逐渐增加而后再逐渐减小时,对应同一输入信号值,会出

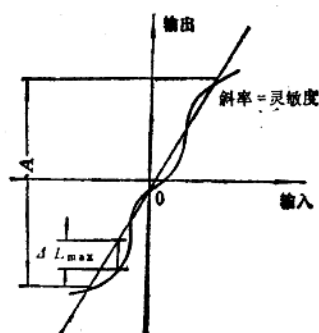


图 1-2 测量系统的线性

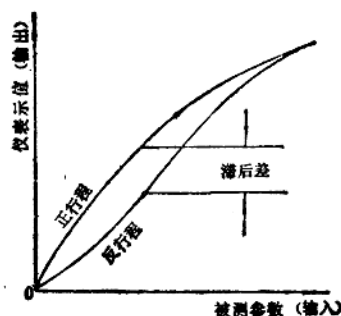


图 1-3 滞后差

现不同的输出信号, (如图1-3)。把对应同一输入信号的两输出信号的最大差称为滞后差。滞后差表示进回程之间输出与输入的关系。通常是由于仪表的内摩擦及阻尼所引起。为尽可能地减少滞后对测量结果的影响,可读出输入上升和下降时的两个测量数值,然后取其平均值作为测得值。

1.2.4.5 动态特性

当被测量作频率较高的周期性或非周期性变化时,测试仪表的指示值也随之变动,但其变化(亦即输出量值的变化)无论在幅值上还是在相位(时间差)上都与输入值不完全相同,幅度将减小,相位将落后。其相差程度一方面取决于仪表的质量,也与被测量值的变化频率有关。我们称这种相差为仪表的动态特性。通常用稳定时间、幅频特性和相频特性等参数来表示仪表的动态特性,并在仪器出厂时作出标定和标明。

1.3 测量误差

无数不断变化着的因素影响测量过程和测量仪表。有时,测量仪表还可能反过来影响被测量的原始状态。所以,测量是一个复杂的过程,测量的结果对被测量永远是一个近似值而得不到真值,即测量总存在误差。测量误差来源于测量仪器及测量过程(包括测量方法、测量环境、测量者等)。要尽量减小测量误差,就必须认真分析误差来源。

测量误差可分为系统误差、粗大误差及随机误差。

1.3.1 系统误差

系统误差或称恒定(确定性)误差,其特点是误差值恒定不变或遵循一定的规律变化。系统误差主要来源于仪器本身、安装的精确及准确程度、选择制定的测量方法、外界的恒定性干扰以及操作者的人身心理及生理状态等。系统误差分为可定的及不可定的两种。可定或已定的系统误差是指其符号和绝对值是确定的。不可定或未定的系统误差则是符号和绝对值都不能或未能确定的。前一种系统误差是可以而且应该设法消除或基本消除的。后一种则很难消除,实际上和随机误差混在一起。

在测试过程中为了消除系统误差,必须首先检验测试结果是否存在系统误差。其具体做法大致是:

(1) 分析在实验或测量中,依据的理论公式所要求的约束条件在测量中是否已被满足;

(2) 分析实验或测试仪表、仪器所要求的使用条件是否已经达到了;

(3) 采用对比的方法(包括对比实验的方法、仪器、测量方法、测量条件等)寻找是否存在系统误差;

(4) 采用数据分析的方法研究是否存在系统误差。这类方法也很多,通常是先按下式计算出测量残差 δ_i ,

$$\delta_i = x_i - \bar{x} \quad (1-5)$$

式中 x_i ——各次测量某被测量的测得值;

$\bar{x}$ ——多次测量所得 x_i 值的算术平均值。

再将 δ_i 按测量的先后次序排列,观察其数值和符号的变化,若发现 δ_i 的大小向一个方向有规律的变化,说明有累进的线性系统误差,若 δ_i 的符号作规律性交替变化,说明有周期性系统误差。但是,总的情况是只有当系统误差大于偶然误差时,才可用数据法分析出来。

从测量技术上消除系统误差的方法很多。典型的有零示法、微差法、代替法、补偿法、对照法、交叉读数法等。只有认真消除或减小系统误差才能提高测量的正确度。系统误差愈小,测量的正确度愈大,测量的结果愈接近实际值。换句话说,测量的正确度是表示测量的测得值偏离真值的偏离程度。

1.3.2 粗大误差 (过失误差)

测量中的粗心大意等可导致很大的残差,一般容易发现,也容易剔除。常用莱特判别法(或最大可能误差法)来判别,即当某 $|\delta_i| > 3\sigma$ 时,就认为它是粗大误差,因为由概率统计可知,随机误差大于 3σ 的概率仅0.3%,故 $|\delta_i| > 3\sigma$ 者应认为是粗大误差。 σ 为测量的标准偏差。

1.3.3 随机误差 (偶然误差)

随机误差从表面上看是无规律的误差,实际上是遵循统计规律的误差。引起随机误差的原因更加复杂而隐蔽,不易察觉。也大致来源于仪器内部的摩擦、间隙等的不规则变化;外界环境无规律地干扰;测量者对测量的最后一位数字估计不准等多方面的因素。随机误差一般无法消除,或者因将耗费大量经费及人力等而不去消除。

随机误差的大小反映了测量的精密性,也就是测得值的相互接近程度。随机误差越小,测量的精密性越高,即测量越精确,测得值的分散程度越小。但是,测量的精密性高,测量的正确度并不一定高,即测得值并不一定接近真值。

所以,测量的精确性是测量正确度和精密性之和。测量精确度高,表示既正确又精密。

由于测量的精密性是反映测得值的分散程度,所以可以用残差或残差的均方差来表示它。在测量次数较少时,残差的波动得大,不能反映一组数据的离散程度,而均方差则符合数理统计的概念,所以用均方差来描述测量的精密性。

1.4 测量数据处理

1.4.1 随机误差性质分析

消除了粗大误差和确定的系统误差的测量结果仍然存在着随机误差和不确定的系统误差(可视作随机误差)。此时,测得值 x_i 和真值 μ 之间的差,即真误差 ξ 为 $\xi_i = x_i - \mu$,而真值则可表示为

$$\mu = \frac{1}{N}(x_1 + x_2 + \dots + x_N) (N \rightarrow \infty) \quad (1-6)$$

有限的 N 次等精度测量某一被测量所得测得值 x_i 的算术平均值 $\bar{x}$ 为

$$\bar{x} = \frac{1}{N}(x_1 + x_2 + \dots + x_N) \quad (1-7)$$

由数理统计可以证明, $\bar{x}$ 是真值 μ 的无偏估计, $\bar{x}$ 和测得值 x_i 之差即为残差 δ_i ,即式(1-5)

真误差 ξ_i 是随机变量,所以 δ_i 也是随机变量,并服从相同的规律。实际统计证明,绝大部分的随机误差都遵循正态分布律,因此具有以下四个特点:

- (1) 对称性——绝对值相等的正、负误差出现的概率相同;
- (2) 单峰性——绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大;
- (3) 有限性——在一定的测量条件下,随机误差的绝对值不会超过一定界线;
- (4) 抵偿性——随着测量次数增加,随机误差的算术平均值趋向于零。

根据以上的叙述得知,真值 μ 是无法测知的,因测量次数不可能是无限的,因此在实际测量中是以 $\bar{x}$ 代替 μ ,以残差 δ_i 代替真误差 ξ_i 。符合正态分布律的随机测量误差 δ_i 的