

全国高校测控技术与仪器相关专业教材

过程检测技术

李新光 张 华 孙 岩 等编著



全国高校测控技术与仪器相关专业教材

过程检测技术

李新光 张 华 孙 岩 等编著



机械工业出版社

本书是根据教育部高等院校仪表学科教学委员会的意见和有关院校的要求而编写的,是对《热工测量仪表》、《过程分析仪器》和《过程机械量仪表》三本教材进行精选的结果。全书共分9章,第1章介绍过程检测技术的基本概念、测量不确定度和仪器的各种技术性能指标;第2~7章分别介绍温度测量、压力与压差测量、流量测量、物位测量、过程成分检测和过程机械量检测,着重介绍检测原理和使用特点;第8章介绍信号放大与抗干扰技术;第9章介绍检测领域新技术;并在附录中给出标准化热电偶分配表以及主要热电偶的参考函数和逆函数等内容。

本书内容系统全面,讲解深入浅出,结构清晰,可作为高等院校测控技术与仪器专业的本科教材,也可供其他相关专业的师生及仪器仪表与测控领域的工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

过程检测技术/李新光等编著. -北京:机械工业出版社, 2004.9

(全国高校测控技术与仪器相关专业教材)

ISBN 7-111-15339-1

I. 过… II. 李… III. 自动检测 IV. TP274

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第099821号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:姜淑欣

版式设计:郭新义

北京蓝海印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004年10月第1版第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·25印张·587千字

0001-4000册

定价:34.00元

凡购本图书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话:(010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

《过程检测技术》是根据教育部高等院校仪器仪表学科教学指导委员会的意见和有关院校的要求而编写的，是高等学校测控技术与仪器专业大学本科生的教材，同时可作为其他相关专业师生使用或供广大科技工作者自学或参考。

目前，制约一些生产过程自动化水平提高的瓶颈，往往在于过程参数难以被实时可靠地检测出来，因此过程检测是实现过程控制的前提条件。全国共有 100 多所院校设有测控技术与仪器专业，迫切需要具有新的知识体系、能够适应教学改革需要的新教材。

本书是将《热工测量仪表》、《过程分析仪器》和《过程机械量仪表》三本教材的内容进行取舍、更新后编写而成的。书中既介绍各种传统的检测原理和方法，使知识结构具有系统性、渐进性，又以较大篇幅介绍新技术、新方法及其发展方向，以满足现代科技发展和生产的需要。书中着重提取各种检测技术中有共性和有规律性的内容，并辅以归纳总结，使读者能够具有一个系统、完整的概念，掌握具有指导作用的一般规律。

检测技术涉及的学科面较广，学生在学习此课程时，要注意掌握各种检测技术的基本原理与应用特点，并强调对共性内容的掌握和各种方法的分析比较。

全书共分 9 章，第 1 章绪论主要介绍过程检测技术的基本概念、分类及测量误差与测量不确定度的表示方法；第 2 章主要介绍接触式和非接触式温度测量方法；第 3 章介绍压力、差压测量方法；第 4 章主要介绍节流式差压流量计与其他 9 种流量计的测量原理和应用特点；第 5 章主要介绍物位测量原理与方法；第 6 章主要介绍生产过程中成分的自动检测原理；第 7 章主要介绍重量、速度、位移、尺寸等过程机械量的检测原理；第 8 章主要介绍检测信号的放大与处理；第 9 章简要介绍软测量技术、虚拟仪器、模糊传感器和多传感器数据融合新技术。在附录中给出标准化热电偶配表以及热电偶的参考函数和逆函数等内容。

全书内容由李新光、张华统稿。第 1 章、第 4 章和第 6 章由李新光编写；第 2 章和第 3 章由张华编写；第 5 章和第 7 章由孙岩编写；第 8 章由方景林编写；第 9 章由董洪光编写。

由于编者水平所限，书中不妥及错误之处恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前 言

第1章 绪 论.....	1
1.1 过程检测技术的基本概念及研究内容	1
1.2 过程检测技术的分类	2
1.3 测量误差与测量不确定度的评定与表示方法	2
1.3.1 测量误差	2
1.3.2 测量不确定度的评定与表示方法.....	4
1.4 测量仪器的基本技术性能和术语	14
思考题	17
第2章 温度测量	18
2.1 概述	18
2.1.1 温度和温标	18
2.1.2 测温方法分类	21
2.2 接触式测温方法及仪表	22
2.2.1 膨胀式温度计和压力式温度计.....	22
2.2.2 热电偶测温	24
2.2.3 热电阻测温	46
2.3 非接触式测温方法及仪表	56
2.3.1 辐射测温的物理基础及其基本方法.....	56
2.3.2 亮度温度计	62
2.3.3 全辐射高温计	68
2.3.4 比色高温计	70
2.3.5 测真温的辐射温度计	73
2.3.6 辐射测温的干扰分析	75
2.4 其他测温技术	76
2.4.1 光导纤维测温技术	76
2.4.2 集成温度传感器测温技术.....	85
思考题	86
第3章 压力、压差测量	88
3.1 概述	88
3.1.1 基本概念	88

3.1.2 压力检测的主要方法和分类.....	89
3.2 液柱式压力检测	90
3.2.1 U形管压力计	90
3.2.2 单管压力计	91
3.2.3 斜管压力计	92
3.3 弹性式压力检测	92
3.3.1 原理	93
3.3.2 弹性元件	93
3.3.3 单圈弹簧管压力计	95
3.4 负荷式压力检测	96
3.4.1 活塞式压力计	96
3.4.2 浮球式压力计	98
3.5 电气式压力检测	99
3.5.1 压电式压力计	99
3.5.2 电阻式压力计	101
3.6 其他压力检测方法	104
3.6.1 弹性振动式压力计	104
3.6.2 压磁式压力计	104
3.6.3 真空度测量	105
3.6.4 压力分布测量系统	106
3.7 压力变送器	106
3.7.1 电容式压力变送器	107
3.7.2 霍尔式压力变送器	108
3.8 压力表的选择与安装	109
3.8.1 压力表的选择	109
3.8.2 压力表的安装	111
思考题	114
第4章 流量测量	115
4.1 节流式差压流量计	115
4.1.1 标准节流装置	116
4.1.2 标准节流装置的流量公式	123
4.1.3 节流装置流量测量不确定度的估算	130
4.1.4 节流式流量计的安装	133
4.1.5 标准节流装置的设计计算	137
4.1.6 非标准节流装置	146
4.2 动压测量管	149

4.2.1	工作原理	149
4.2.2	基型动压测量管	150
4.2.3	动压平均管	152
4.3	转子流量计	153
4.3.1	工作原理	153
4.3.2	工作特性	155
4.3.3	被测介质密度改变时示值的换算	156
4.3.4	金属管转子流量计	157
4.4	靶式流量计	158
4.4.1	工作原理	158
4.4.2	流量的换算和压力损失	159
4.4.3	靶式流量计的特点与安装	161
4.5	涡轮流量计	161
4.5.1	工作原理	161
4.5.2	涡轮变送器的工作原理	163
4.5.3	涡轮流量计的特点	166
4.6	电磁流量计	166
4.6.1	工作原理	167
4.6.2	电磁流量计的变送器	169
4.6.3	电磁流量计的转换器	170
4.6.4	电磁流量计的安装和使用	174
4.6.5	电磁流量计的发展	175
4.7	涡街流量计	176
4.7.1	工作原理	176
4.7.2	漩涡频率的检测	177
4.7.3	涡街流量计的特点	179
4.8	容积式流量计	180
4.8.1	椭圆齿轮流量计	180
4.8.2	腰轮流量计	181
4.8.3	双转子流量计	182
4.8.4	容积式流量计的误差	183
4.9	质量流量计	184
4.9.1	量热式质量流量计	184
4.9.2	科里奥利式质量流量计	186
4.9.3	差压式质量流量计	190
4.9.4	涡街式质量流量计	191
4.10	超声波流量计	192

4.10.1	时间差法	193
4.10.2	锁相环路频差法超声流量计的工作原理	195
4.10.3	多普勒法	196
4.10.4	超声波流量计的灵敏度	198
4.10.5	温度对超声波流量计的影响	199
4.10.6	有效断面上流速分布的影响	199
4.11	流量校验系统	199
4.11.1	校验方法	199
4.11.2	校验装置	200
	思考题	202
第 5 章	物位测量	203
5.1	概述	203
5.2	浮力式液位计	205
5.2.1	浮子式液位计	205
5.2.2	浮筒式液位计	206
5.2.3	浮子法测量液-液相界面 (浮子式液位界面信号器)	206
5.3	差压式液位计	207
5.4	电容式液位计	208
5.4.1	导电介质电容液位计	208
5.4.2	非导电介质电容液位计	210
5.5	超声波式物位计	212
5.6	微波式物位计	214
5.6.1	测功率反射式微波物位计	215
5.6.2	测时间反射式微波物位式	216
5.7	激光式物位计	216
5.8	核辐射式物位计	218
5.8.1	核辐射式物位计的原理与特点	218
5.8.2	γ 射物位计的几种类型	219
	思考题	221
第 6 章	过程成分检测	222
6.1	电极电位检测器与 ISFET 离子敏检测器	223
6.1.1	电极电位检测器	223
6.1.2	ISFET 离子敏检测器	233
6.2	电导检测器	237
6.2.1	溶液的电导与浓度的关系	237
6.2.2	电导检测器的结构	239

6.2.3	影响电导检测器精度的因素及应采取的措施.....	240
6.2.4	电导式过程分析仪器的温度补偿措施.....	242
6.3	热导检测器	243
6.3.1	气体的热导率	243
6.3.2	热导检测原理	245
6.3.3	热导检测器的结构	246
6.3.4	热导检测器输出与被测气体组分浓度的关系.....	247
6.4	磁性氧分析器	248
6.4.1	热磁式氧分析器的理论基础.....	248
6.4.2	热磁式氧分析器	250
6.4.3	磁力式氧分析器	252
6.5	氧化锆氧量计	255
6.5.1	检测器原理	255
6.5.2	氧化锆氧量计	257
6.6	吸收式光学分析仪器	259
6.6.1	朗伯-比耳定律.....	259
6.6.2	滤光片	260
6.6.3	薄膜电容检测器	262
6.6.4	红外线气体分析器	265
6.6.5	红外线水分仪	268
6.7	气相色谱仪.....	269
6.7.1	色谱分析原理及理论	270
6.7.2	气相色谱仪的结构特点.....	272
6.7.3	检测器	274
6.8	X 射线荧光光谱检测系统	276
6.8.1	X 射线与 X 射线荧光.....	276
6.8.2	X 射线被物质吸收的规律.....	279
6.8.3	X 射线荧光光谱检测系统.....	279
	思考题	286
第 7 章	过程机械量检测	288
7.1	概述	288
7.2	质量测量	289
7.2.1	电阻应变式称重传感器.....	289
7.2.2	电子皮带秤	297
7.3	速度测量	302
7.3.1	概述	302

7.3.2	模拟式测速法	303
7.3.3	计数式测速法	304
7.3.4	激光测速法	308
7.3.5	线阵 CCD 测速法	310
7.4	位移测量仪表	311
7.4.1	概述	311
7.4.2	计量光栅	311
7.4.3	光纤位移传感器	317
7.5	测径、测厚仪表	320
7.5.1	激光测径仪表	320
7.5.2	CCD 尺寸测量系统	325
7.5.3	测厚仪表	330
	思考题	334
第 8 章	检测信号处理电路	335
8.1	仪用放大器	335
8.1.1	仪用放大器基本原理	336
8.1.2	仪用放大器的精度分析	337
8.1.3	通用型仪用放大器	341
8.1.4	增益可编程仪用放大器	343
8.1.5	单电源差分仪用放大器	346
8.1.6	斩波自稳零仪用放大器	348
8.1.7	ISO 100 小型低漂移宽带隔离放大器	351
8.1.8	使用仪用放大器的注意事项	352
8.2	仪表的干扰及抑制	353
8.2.1	仪表干扰的来源	353
8.2.2	仪表干扰的传输途径	353
8.2.3	差模干扰与共模干扰	355
8.2.4	仪表干扰的抑制	356
8.2.5	数字仪表抗干扰的特殊问题	359
	思考题	362
第 9 章	检测领域新技术	363
9.1	检测领域新技术概述	363
9.1.1	新的检测仪器特点	364
9.1.2	新的检测系统特点	365
9.2	软测量技术	366
9.2.1	软测量的概念	366

9.2.2	软测量中传感器的模型及测量方式.....	366
9.2.3	软测量的应用举例	367
9.3	虚拟仪器	368
9.3.1	虚拟仪器的概念和结构框图.....	368
9.3.2	虚拟仪器的编程语言	368
9.3.3	虚拟仪器的应用举例	369
9.4	模糊传感器	370
9.4.1	模糊传感器的概念和结构框图.....	370
9.4.2	模糊传感器的应用举例.....	371
9.5	多传感器数据融合	371
9.5.1	多传感器数据融合的概念.....	371
9.5.2	多传感器数据融合的结构.....	372
9.5.3	多传感器数据融合的应用举例.....	373
思考题		374
附 录		375
附录 A	标准化热电偶分度表	375
附录 B	主要热电偶的参考函数和逆函数.....	382
附录 C	压力单位换算表.....	385
参考文献		386

第 1 章

绪 论

1.1 过程检测技术的基本概念及研究内容

检测是意义更为广泛的测量。根据国际通用计量学基本名词的定义,“测量是以确定量值为目的的一组操作”。这种“操作”就是测量中的比较过程——将被测参数的量值与作为单位的标准量进行比较,比出的倍数为测量结果。与测量概念相近的是检验,它常常需要分辨出参数量值所隶属的某一范围带,以此来判别被测参数合格与否或现象的有、无等。检测包含了测量和检验的双重含义。

检测技术,有时也称为测试技术,是研究信息获取的学科,属于信息科学的范畴。它是信息技术的三大支柱(计算机技术、自动控制技术、通信技术)之一。

检测可以指对产品的手动检测,也可以指对生产过程或运动目标的自动检测。现代化的生产过程是高效、连续的生产过程,为了确保生产安全,保证产品的产量和质量,减少能源消耗和降低成本,必须对反映生产过程进行情况的诸参数如温度、压力、流量、物位分量、机械量等进行自动检测和控制。过程检测技术就是研究对生产过程和运动对象实施自动定性检查和定量测量的技术。

由于参数测量涉及的原理非常广泛,应用对象又各种各样,这就要求检测技术人员必须具有宽广的知识面和扎实的理论基础知识。

要实现对生产过程的自动控制,首先必须实现对生产过程参数进行实时、可靠的检测。生产过程参数的自动检测是实现自动控制的前提条件。没有参数的检测,就会使自动控制失去前提和依据。检测技术发展了,控制水平才能提高。一些生产过程制约其自动化水平提高的瓶颈,往往在于参数难以被实时、可靠地检测出来。

一个完整的检测过程,一般应包括:

① 信息的提取——用传感器来完成。信号是信息的载体。一般将被测信息转换成电信号,也就是说,把被测信息转换成电压、电流或电路参数(电阻、电感、电容)等电信号输出。

② 信号的放大、转换与传输——用中间转换装置来完成。一般是把信号放大并转换成传输方便、功率足够的电量(如电流、电压或频率)。信号的传输也包括通过网络的传输。

③ 信号的显示和记录——用显示器、指示器或记录仪完成。

④ 信号的处理和分析——用计算机、数据分析仪、频谱分析仪等来完成。找出被测信息的规律，为研究和鉴定工作提供有效依据，为控制提供信号。

检测技术的发展是以生产发展为基础的，随着生产的发展而迅速地发展。特别是微电子技术的发展，为检测技术的发展提供了物质手段，使检测仪表、传感器有可能实现小型化、智能化和网络化，实现多功能和高可靠性。软测量技术、数据融合处理方法等新技术的应用，使原先不能实现的一些难测参数的测量得以实现。同时，生产的发展又不断地提出新的检测任务，促使人们去研究和解决这些新课题，从而推动了检测技术的发展。

1.2 过程检测技术的分类

过程检测技术从不同的角度出发，有不同的分类方法。按被检测量值的物理属性是电量与非电量，可分为电量与非电量电测技术。按传感器的测量原理，可分为电磁法、光学法、超声法、微波法、电化学法等。按测量敏感元件是否与被测介质接触，可分为接触式测量与非接触式测量。按测量方法分类有：偏差法、零位法和微差法。按如何取得测量结果分类有：

① 直接测量法。不必去测量与被测量有函数关系的其他量，而直接得到被测量值的一种方法。直接测量的特点是简便，例如用压力表测量容器中气体的压力等。

② 间接测量法。通过测量与被测量有函数关系的其他量而得到被测量值的一种方法。例如为了测量某电阻值的大小，通过测量流过该电阻的电流和在该电阻上的电压降，通过计算便可求出其电阻值的大小。

③ 组合测量法。当被测量与直接测量的一些量不是一个函数关系，需要求解一个方程组才能取得时即为组合测量。例如测量某电阻的温度系数，其电阻与温度的关系为： $R_t = R_0(1 + at + bt^2)$ ，式中 R_t 为温度为 $t^\circ\text{C}$ 时电阻的数值，可以直接测得。要取得系数 a 和 b ，需要解一个二元一次方程组。

按被测参数进行分类，有热工量（通常指温度、流量、压力和物位）、成分量和机械量。本书是以生产过程中的被测参数进行分类，对其检测原理和特点进行阐述的。

1.3 测量误差与测量不确定度的评定与表示方法

1.3.1 测量误差

1. 真值

定义：真值是与给定的特定量的定义一致的值。

真值只有在被测量有完善的定义, 并通过完善的测量才有可能获得。由于被测量的定义和测量都不可能做到理想的完美无缺, 所以真值按其本性就是不确定的。因而在实际测量中真值用约定真值来代替。

2. 约定真值

定义: 约定真值是对给定不确定度的、赋予特定量的值, 有时该值是约定采用的。约定真值有时称为指定值、最佳估计值、约定值或参考值。获得特定量的约定真值的方法, 通常有以下几种:

- ① 由计量基准、标准复现而赋予该特定量的值。
- ② 采用权威组织推荐的该量的值。例如, 由常数委员会 (CODATA) 推荐的真空光速、阿伏加德罗常数等特定量的最新值。
- ③ 用某量的多次测量结果来确定该量的约定真值。
- ④ 对于硬度等类不能用数值乘单位表示的量, 则用其在约定参考标尺中的值作为约定真值。

3. 测量误差

定义: 测量误差为测量结果减去被测量的真值, 即

$$\Delta Y = y - Y_0 \quad (1-1)$$

式中, ΔY 为测量误差; y 为测量结果; Y_0 为真值。

由于真值不能确定, 一般是以约定真值代替真值。误差只与测量结果有关, 不论采用何种仪器, 只要测量结果相同, 其误差是一样的。误差有恒定的符号, 非正即负, 而不应出现 $\pm 2\text{mg}$ 这种写法。过去人们有时会误用误差一词, 即通过误差分析给出的往往是被测量值不能确定的范围, 而不是真正的误差值。

在测量中, 由于所引用的约定真值不同, 相对误差有以下 3 种表示方法:

(1) 实际相对误差

$$\delta_{\text{实}} = \frac{\Delta Y}{Y_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

这里的约定真值是用被测量的实际值。

(2) 标称相对误差

$$\delta_{\text{标}} = \frac{\Delta Y}{y} \times 100\%$$

式中, y 为被测量的标称值 (或示值); $\delta_{\text{标}}$ 为示值相对误差。

(3) 引用相对误差

$$\delta_{\text{引}} = \frac{\Delta Y}{\text{标尺刻度上限} - \text{标尺刻度下限}} \times 100\% = \frac{\Delta Y}{\text{量程}} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中, 约定真值为仪器 (包括仪表) 刻度上限与刻度下限之差, 对于用零作为仪器刻度始点的仪器, 其约定真值即为仪器的刻度上限。对于多档仪器, 引用相对误差需要按每档

的量程计算。

误差按照其本身的性质和出现的特点又可分为系统误差、随机误差和疏忽误差 3 种。

① 系统误差。系统误差是指在重复条件下，对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值与被测量的真值之差。由于只能进行有限次数的重复测量，真值也只能用约定真值代替，因此可能确定的系统误差只是其估计值，并具有一定的不确定度。系统误差是固定的或按一定规律变化的，可以对其进行有限程度的修正。

② 随机误差。随机误差是指测量结果与在重复条件下，对同一被测量进行无限多次测量所得测量结果的平均值之差。随机误差的特点是这类误差的数值和符号就其个体而言是没有规律的，以随机方式出现，但就其总体而言是服从统计规律的。随机误差导致了重复观测中数据的分散性。

③ 疏忽误差。疏忽误差是由于仪器产生故障、操作者失误或重大的外界干扰所引起的测量值的偏差。这种测量值一般称为坏值，应根据一定的规则加以判断后剔除。

1.3.2 测量不确定度的评定与表示方法

一切测量结果都会存在不确定度，如何确定不确定度，并定量加以表示呢？《测量不确定度表示指南》即 GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) 是目前全世界都在执行的国际标准。我国有关部门根据 GUM 的内容制定了中华人民共和国国家计量技术规范 JJF1059-1999，即《测量不确定度评定与表示》，并规定从 1999 年 5 月 1 日起实施，同时规定从实施之日起代替旧的技术规范 JJF1027-1991，即《测量误差及数据处理》中有关误差部分的内容。

1. 预备知识

(1) 正态分布函数及其特点

正态分布函数也称为高斯函数，它的函数表达式为

$$y = f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2} \quad (1-4)$$

式中， y 是误差为 x 的测量值出现的次数即出现的概率密度； x 为测量值的误差； σ 为标准偏差，即均方根误差。

由概率论的中心极限定理可知，大量的、微小的及独立的随机变量的总和服从正态分布，因此式 (1-4) 也是随机误差的函数表达式。当 σ 确定后概率密度 y 就是只随误差 x 变化的单值函数了。

从式 (1-4) 可以看出，当 $x=0$ 时， $y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}$ ，即曲线的顶点，它是函数的最大值；

当 $x=\sigma$ 时， $y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}$ ，即曲线上的拐点， σ 值越小，曲线越是瘦高，表示测量值的分散

性越小。对于所有的 x 值来讲, y 值均大于零即为正值, 且 y 为左右对称的偶函数。曲线在拐点以上时呈上凸的形状, 在拐点以下时呈下凸的形状, 如图 1-1 所示。

(2) 置信区间与置信概率

在研究随机误差的统计规律时, 不仅要知道随机变量在哪个范围内取值, 而且要知道在该范围内取值的概率, 两者是互相关联的。

什么叫置信区间呢? 随机变量取值的范围称为置信区间, 它常用正态分布的标准偏差 σ 的倍数来表示, 即 $\pm z\sigma$, z 为置信系数, σ 是置信区间的半宽。什么叫置信概率呢? 随机变量在置信区间 $\pm z\sigma$ 的范围内取值的概率称为置信概率, 用 p 表示。若对正态分布函数 $y=f(x)$ 在 $-\sigma \sim +\sigma$ 之间即 $z=1$ 时积分, 则有

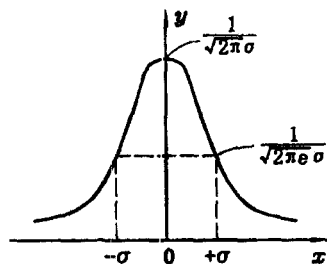


图 1-1 误差函数的正态分布曲线

$$p = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(x) dx = 0.6827 \quad (1-5)$$

若置信系数 $z=2$ 或 $z=3$, 则置信概率 p 分别为 0.9545 和 0.9973。

(3) 算术平均值与标准偏差

设测量方程为 $y=f(x)$, 测量列中共有 n 个测量值, 即 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 算术平均值为 $\bar{x}$ 为

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-6)$$

根据概率理论, 当测量次数 n 足够大时, 算术平均值 $\bar{x}$ 最接近真值 A_0 。当 $n \rightarrow \infty$ 时, 则有 $\bar{x} = A_0$ 。在有限次测量时, 可以用算术平均值 $\bar{x}$ 代替真值 A_0 , 称为约定真值。

测量列中各个测量值 x_i 与算术平均值 $\bar{x}$ 的差称为残余误差即残差 v_i , 它具有正号或负号, 如果将 n 个测量值的残差求代数和, 其值为 0, 即

$$\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) = \sum_{i=1}^n v_i = v_1 + v_2 + \dots + v_n = 0 \quad (1-7)$$

标准偏差可分为总体标准偏差 σ 、实验标准偏差 $S_{(x_i)}$ 和算术平均值标准偏差 $S_{(\bar{x})}$ 。

1) 总体标准偏差 σ

对于一组同等精度的测量值 M_i 及其真值 A_0 , 它们的绝对误差为 $\delta_i = M_i - A_0$, 则有

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

这是一个在理想条件下得到的结果, 所谓理想条件即真值 A_0 已知, 测量次数 $n \rightarrow \infty$, 仪器的灵敏度无限高, 所有的随机效应的影响都能表现出来, 这实际上是不可能的。所以总体标准偏差 σ 只具有理论的意义, 它与前面所讨论到的标准偏差 σ 是同一概念。

2) 实验标准偏差 $S_{(x_i)}$

在实际的应用中,用测量列的算术平均值 $\bar{x}$ 来代替真值 A_0 ,用残差 v_i 代替绝对误差 δ_i ,这时只能得到 σ 的近似估计值 $S_{(x_i)}$,则有

$$S_{(x_i)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \quad (1-9)$$

这就是贝塞尔 (Bessel) 公式,实验标准偏差 $S_{(x_i)}$ 是按一定的置信概率 $p=0.6827$ 给出的随机误差变化范围内的一个基本评定参数,它会随着测量次数 n 的增加而趋于稳定。 $S_{(x_i)}$ 值是对整个测量列的任意值 x_i 而言的,也就是说它表示了整个一组测量值 x_i 的重复性和复现性的好坏。

3) 算术平均值标准偏差 $S_{(\bar{x})}$

$S_{(\bar{x})}$ 值是针对测量列中的最佳值即算术平均值而言的,因为 $\bar{x}$ 值比测量列 x_i 中任何一个值都更加接近真值,所以 $S_{(\bar{x})}$ 要比 $S_{(x_i)}$ 小 $\sqrt{n}$ 倍,则有

$$S_{(\bar{x})} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n(n-1)}} \quad (1-10)$$

$S_{(\bar{x})}$ 值是最常用的,在后面章节讨论到测量不确定度的估计以及对测量列的评定时所提到的标准偏差 S 即指 $S_{(\bar{x})}$ 。

2. 测量不确定度的定义及与测量误差的比较

表征合理地赋予被测量之值的分散性,与测量结果相联系的参数称为测量不确定度。

不确定度指可疑程度。测量不确定度则指对测量正确性的可疑程度,它是测量结果质量高低的一种定量表示方法。测量不确定度是测量结果,带有一个参数,表明了合理地赋予被测量值的分散性。测量不确定度说明了随机效应和系统效应测量结果所造成的影响有多大。

测量不确定度恒为正值,可以用标准偏差及其倍数来表示,它说明了具有一定置信概率的置信区间的半宽。在测量结果的完整表达中应包括不确定度。

不确定度又可分为标准不确定度 u 、合成不确定度 u_c 和扩展不确定度 U 和 U_p 。在对测量结果的不确定度评定时,首先找出对测量结果的各种影响因素,对每个因素估算它的标准不确定度值称为不确定度分量,因为每一个不确定度分量都会对总的 uncertainty 做出贡献,因此要求合成不确定度的大小,最后对合成不确定度乘以一个系数即得到扩展不确定度值,它表明了测量结果以一定的置信概率所处的区间的半宽。

误差与不确定度是完全不同的两个概念,不应该混淆或误用。对于同一个被测量,无论其测量程序和测量条件如何,相同的测量结果,误差是相同的。而在重复性测量条件下,测量列中不同的测量结果都具有相同的不确定度。表 1-1 中列出了测量误差和测量不确定