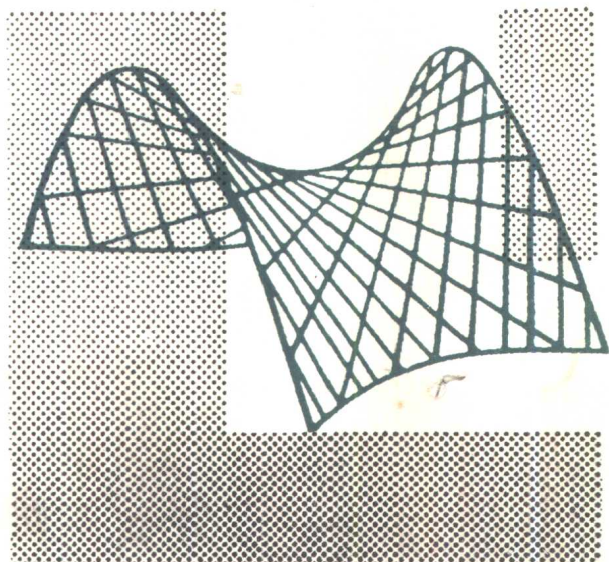


高等学校试用教材

热工测量 与自动控制

张子慧 主编

● 中国建筑工业出版社



本书为高等院校供热通风空调专业与燃气热能供应专业本科教材。全书分为热工测量与自动控制两篇。第一篇热工测量讲述测量与测量仪表的基本知识,误差的基本性质与处理,各种热工参数测量仪表的结构、原理与使用。第二篇自动控制讲述自动控制原理、自控仪表、自控系统和专业应用实例。

全书结构合理,系统性强,符合认识规律,讲叙清楚,取材较新,吸取了现代新技术,加强了计算机技术及节能技术在本专业的应用,反映了本专业热工测量与自动控制现代科技水平。内容选择合适,有专业特点。介绍了设计、调整及应用实例,有利于学生能力培养。

本书也可供函授、夜大同类专业使用,亦可供设计、使用等部门的专业工程技术人员参考。

高等学校试用教材
热工测量与自动控制
张子慧 主编

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店总店科技发行所发行
北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:17½ 字数:426千字
1996年11月第一版 2000年11月第五次印刷
印数:13,601—16,600册 定价:18.00元

ISBN 7-112-02798-5
TU·2154(7908)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换
(邮政编码 100037)

前 言

本书是高等工科院校供热通风空调专业及燃气热能供应工程专业本科的《热工测量与自动控制》课的教材，亦可供函授、夜大同类专业使用。按照“全国高等院校供热通风空调及燃气工程学科专业指导委员会”指示：本书兼顾两个专业、教学学时 70~80，并依据 1993 年 6 月由专业指导委员会主持制定的本科本课程教学基本要求编写而成。

随着社会的进步和技术的发展，供热通风空调与城市燃气的应用越来越广泛，它正在人们的生产和生活中，发挥着重要作用。同时，人们也注意到供热通风空调及燃气供应的能量与能源的消耗，在建筑物与工业生产的能耗中，占有相当大的比重。

为了使供热通风空调及燃气供应系统的运行与调节，在保证合理和节能的前提下，既要保证人们对生产和生活上的要求，又能安全运行，采用热工测量与自动控制，就具有重大意义。热工测量与自动控制已成为供热通风空调与燃气供应技术中的发展方向，是该技术中不可缺少的组成部分。

热工测量与自动控制的发展十分迅速。以供热通风空调为例，许多国家都生产了本专业的专用热工测量仪表与自动控制仪表，其中包括应用计算机技术的智能化仪表和微机控制装置，使设计、使用十分方便。在节能控制方面，已从 60 年代末期的个别环节控制，进入到综合节能控制，现已发展到基于电子计算机控制的能量管理控制系统，使系统达到最佳控制。

我国近年来，在供热通风空调与燃气供应工程方面的热工测量与自动控制有很大发展。在自动化装置方面，已能生产供热通风空调专用的功能模件式电子组装式仪表和集散式微机控制装置，为自动控制设计、使用提供了性能稳定、功能齐全的仪表。在控制系统方面，不仅采用单回路控制，也采用了多回路、多功能的节能控制。现已在供热通风空调及燃气供应工程中，采用了基于微机控制技术的集散控制系统，显示出无比的优越性。

工程技术的发展，要求供热通风空调与燃气供应工程师，都必须具有一定的热工测量与自动控制的知识。在热工测量方面应达到正确选择和使用测量仪器、仪表，合理组建测量系统，初步掌握测量方法及误差分析与数据处理；在自动控制方面应达到初步掌握自动控制的基本原理，能准确地提出本专业对自动控制的要求，正确绘制自动控制原理示意图，并能配合自控技术人员进行工程调试。目前，越来越多的工程技术人员，参加或将要参加供热通风空调与燃气供应的热工测量与自动控制系统的的设计、安装、调试与运行管理工作。因此，本书不仅可作为在校同学的教材，还可作为有关工程技术人员的参考书。

本书前身为《热工测量与自动控制》(西安冶金建筑学院、西安交通大学、太原工业大学和北京建筑工程学院编，1993 年，西北工业大学出版社)，经过多所院校使用，获得宝贵反馈意见；并且得到了全国供热通风空调与燃气热能供应工程学科专业指导委员会的指导，使本书在重编时，有了可靠的修改依据。本次编写注意总结了多年教学过程中的实践经验；又注意吸取当代一些新技术、新成果，力求反映现代水平。全书分为热工测量与自动控制

两篇。前篇主要讲述测量与测量仪表的基本知识、误差的基本性质与处理、各种热工参数测量仪表的结构、原理与使用。后一篇主要讲述自动控制原理、自动控制仪表、自动控制系统和专业应用实例。

本书由西安建筑科技大学张子慧教授主编，并编写第一篇第一、二、三、四、五、十章，第二篇第十一、十二章，第十三章中的第一、二节，第十四章第一节的一、二，第二节，第三节中的一、二、三；太原工业大学苏保青副教授编写第一篇第六、七、八、九章；西安交通大学曹琦副教授编写第二篇第十三章第三节，第十四章第一节中的三及第三节中的四；北京建筑工程学院郭全讲师编写第二篇第十四章第四节。

本书由天津大学刘耀浩副教授主审，在编写过程中得到了全国高等院校供热通风空调及燃气工程学科专业指导委员会的指导和帮助，在此一并致谢。

由于我们水平有限，错误和不妥之处难免，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第一篇 热工测量

第一章 测量与测量仪表的基本知识	1
第一节 测量的意义和测量方法	1
一、测量的意义	1
二、测量方法	1
第二节 测量系统的组成及其功能	2
一、测量系统的组成	2
二、测量环节的功能	3
第三节 测量误差与测量精度	4
一、测量误差的概念	4
二、测量误差的分类	4
三、测量精度	4
第四节 测量仪表的基本技术指标	5
一、量程范围	5
二、仪表精度	5
三、变差	6
四、灵敏度和灵敏限(分辨率)	6
第二章 误差的基本性质与处理	8
第一节 随机误差	8
一、正态分布	8
二、算术平均值原理	8
三、测量值误差的评价指标	9
第二节 直接测量值的处理	11
一、直接测量值的最优概值	11
二、计算标准误差	11
三、测量结果的表达式	11
第三节 间接测量值的处理	12
一、函数误差的基本公式	12
二、函数系统误差计算	13
三、函数随机误差计算	14
四、函数误差的分配	15
第四节 测量结果的不确定度	18
一、测量不确定度定义及其构成	18
二、不确定度的估算	18
三、不确定度的合成	19

四、测量结果的表示	19
第三章 温度测量	20
第一节 概述	20
一、温标	20
二、温度计的分类	21
第二节 热电偶温度计	22
一、热电偶的测温原理	22
二、热电偶的基本定律	24
三、热电偶类型	25
四、热电偶的构造	25
五、热电偶冷端温度补偿	25
第三节 电阻温度计	27
一、铂电阻	28
二、铜电阻	29
三、半导体热敏电阻	29
第四节 接触测温的误差分析	29
一、传感器的传热误差	30
二、传感器的动态误差	30
第五节 热电偶与热电阻的校验	31
一、热电偶的校验	31
二、热电阻的校验	32
第六节 温度变送器与显示记录仪表	32
一、温度变送器	32
二、动圈式指示仪表	33
三、自动平衡记录仪表	34
四、数字式测量仪表	35
第四章 湿度测量	37
第一节 干湿球湿度计	37
一、普通干湿球温度计	38
二、电动干湿球温度计	38
第二节 氯化锂电阻式湿度计	39
一、氯化锂电阻式湿度计的原理	39
二、氯化锂电阻湿度传感器	39
三、氯化锂电阻湿度变送器	41
第三节 氯化锂露点式湿度计	41
一、氯化锂露点湿度传感器	41

二、氯化锂露点式湿度变送器	43	第一节 毕托管	83
第四节 电容式湿度计	44	一、毕托管的工作原理	83
一、电容湿度传感器	44	二、毕托管的形式	84
二、电容式湿度变送器	45	三、毕托管的使用	85
第五节 毛发式湿度计	46	第二节 热电风速仪	88
第六节 湿度计的标定与校正装置	46	一、热球风速仪的工作原理及其组成	88
第五章 压力测量	49	二、结构特点及性能	89
第一节 液柱式压力计	49	第三节 风速仪表的校验	89
一、U 形管压力计	49	一、风洞的原理结构	89
二、单管液柱式压力计	51	二、风速仪表的校验	89
第二节 弹性式压力计	52	第八章 液位测量	91
一、弹性元件及其特性	52	第一节 浮力式液位计	91
二、弹簧管压力表	53	第二节 差压式液位计	94
三、膜盒式微压计	54	一、利用静压差测量液位的原理	94
第三节 电气式压力计及变送器	54	二、开口容器的液位测量	94
一、位移式压力、压差变送器	55	三、密闭容器的液位测量	95
二、力平衡式压力、压差变送器	57	四、锅炉汽包水位的测量	97
三、固体压阻式压力、压差变送器	57	第三节 电接触式液位计	98
第四节 压力表的选择、安装与校验	58	第九章 其他参数测量	99
一、压力表的选择	58	第一节 热阻式热流计	99
二、压力表的安装	59	一、热流传感器——热阻式热流测头	99
三、压力表的校验	59	二、热流显示仪表	102
第六章 流量测量	61	三、热阻式热流计的使用误差计算	105
第一节 差压流量计	62	四、热阻式热流计的使用	108
一、差压流量计的组成	62	第二节 热水热量指示积算仪	110
二、节流件的工作原理	62	一、热水热量指示积算仪工作原理	110
三、流量基本方程式及压力损失公式	63	二、热水热量指示积算仪的组成	110
四、实用流量方程式	64	三、热水热量指示积算仪的使用	111
五、流量系数的确定	64	第三节 饱和蒸汽热量指示积算仪	113
六、标准节流装置	65	一、饱和蒸汽热量指示积算仪的	
七、标准节流元件的设计计算	69	工作原理	113
第二节 转子流量计	74	二、饱和蒸汽热量指示积算仪的组成	113
一、概述	74	三、饱和蒸汽热量指示积算仪的使用	115
二、转子流量计的工作原理	74	第四节 氧化锆氧量计	115
三、关于刻度校正	75	一、氧化锆氧量计的工作原理	115
第三节 电磁流量计	76	二、氧化锆传感器的结构	116
一、电磁流量计的工作原理	76	三、氧化锆传感器的安装与测量系统	117
二、电磁流量变送器的结构	76	第十章 微机在热工测量中的应用	118
第四节 其他流量计	77	第一节 概述	118
一、涡街流量计	77	一、微处理器与微计算机	118
二、涡轮流量计	79	二、微计算机化量测系统与智能仪表	119
三、容积式流量计	81	第二节 微机技术在热工测量中的应用	119
第七章 流速测量	83		

一、巡回检测和定时打印制表	118
二、实现信号滤波以提高测量值的可靠性	118
三、利用软件对测量仪表进行非线性补偿	120
四、完成复杂参数的综合测试和数据处理	120

第二篇 自动控制

第十一章 自动控制原理	121
第一节 概述	121
一、自动控制系统及其组成	121
二、自动控制系统的分类	124
三、自动控制系统的过渡响应	125
第二节 构成环节的特性	127
一、环节信号的传递和特性	128
二、拉普拉斯变换与传递函数	129
三、对象的过渡响应和数学描述	135
四、传感器和变送器特性	140
五、控制器特性	141
六、执行器特性	144
第三节 环节的综合和特性分析	145
一、环节的综合和等效变换	145
二、系统的传递函数和过渡响应	147
三、影响过渡响应的因素	153
第十二章 自动控制仪表	161
第一节 自动控制仪表的分类	161
一、按能源分类	161
二、按结构形式分类	162
第二节 电气式控制器	163
第三节 电子式控制器	164
一、断续输出的电子控制器	165
二、连续输出的电子控制器	171
第四节 执行器	174
一、电磁阀	174
二、电动调节阀	175
三、电动调节风门	177
四、电动阀门定位器 (EPOS)	177
五、电压调节装置	178
六、气动执行器	179
七、电一气转换器	180

第五节 调节阀的选择与计算	180
一、调节阀的流量特性及其选择	180
二、调节阀的流通能力及其口径的选择	183
三、风量调节阀的流量特性及其选择	185
第十三章 自动控制系统	188
第一节 单回路控制系统	188
一、被控变量的选取	188
二、操作量的选取	190
三、控制规律的选择	192
四、控制系统的调整	193
第二节 多回路控制系统	195
一、串级控制系统	195
二、前馈—反馈控制系统	196
三、比值控制系统	198
四、分程控制系统	199
五、自动选择控制系统	201
第三节 微型计算机控制系统	203
一、计算机控制的一般概念	204
二、微型计算机控制的典型应用方式	204
三、计算机控制算式	209
第十四章 自动控制系统的应用	213
第一节 空气调节自动控制	213
一、空调单回路控制系统	214
二、空调多回路控制系统	217
三、空调计算机控制系统	222
第二节 制冷自动控制	233
一、蒸发器的控制	234
二、制冷压缩机的控制	240
第三节 工业锅炉与集中供热系统自动控制	246
一、工业锅炉自动检测与自动控制简介	246
二、工业锅炉汽包水位自动控制	246
三、燃烧自动控制	250
四、集中供热系统的自动控制	253
第四节 燃气燃烧自动控制	255
一、燃气燃烧装置的自动点火	256
二、火焰安全装置	258
三、燃烧过程控制	263
主要参考文献	273

第一篇 热 工 测 量

第一章 测量与测量仪表的基本知识

第一节 测量的意义和测量方法

一、测量的意义

测量是人们对客观事物取得数量观念的一种认识过程。在这一过程中，人们借助于专门工具，通过试验和对试验数据的分析计算，求得被测量的值，获得对于客观事物的定量的概念和内在规律的认识。

人类的知识许多是依靠测量得到的。在科学技术领域内，许多新的发现、新的发明，往往是以测量技术的发展为基础的。在生产活动中，新的工艺、新的设备的产生，也依赖于测量技术的发展水平。而且，可靠的测量技术对于生产过程自动化、设备的安全以及经济运行，都是不可少的先决条件。

供热、供燃气、通风、空调以及环境科学领域与其它科学技术领域一样，需要对若干物理量、化学量进行测量，获得必要的信息，以便进行过程监测、过程控制和科学实验。

测量技术可分为若干分支，例如力学测量、电学测量、热工测量等等。其中热工测量是指温度、湿度、压力、流量、烟气成分等参数的测量，供热、供燃气及通风空调系统中的参数测量，多属热工测量的范畴。本书介绍热工测量。

二、测量方法

测量就是用实验的方法，把被测量与同性质的标准量进行比较，确定被测量与标准量的比值，从而得到被测量的量值。欲使测量结果有意义，测量必须满足以下要求：1. 用来进行比较的标准量应该是国际上或国家公认的；2. 进行比较所用的方法和仪器必须经过验证。

根据上述测量的概念，被测量的值可表达为：

$$X = aU$$

式中 X ——被测量；

U ——标准量（即选用的测量单位）；

a ——被测量与标准量的数字比值。

从式中可知，比值 a 的大小与所选用标准量的大小有关。当所选用的标准量单位改变时，求得的数字比值 a 也将随之产生相应的变化。

测量方法就是实现被测量与标准量比较的方法。一般分为直接测量、间接测量和组合

测量等方法。这种分类方法有利于研究测量误差。

1. 直接测量

使被测量直接与选用的标准量进行比较, 或者用预先标定好的测量仪表进行测量, 从而直接求得被测量数值的测量方法, 称为直接测量。例如, 用压力表测量容器内介质压力, 用温度计测量介质温度等。

2. 间接测量

通过直接测量与被测量有确定函数关系的其它各个变量, 然后将所测得的数值代入函数关系式进行计算, 从而求得被测量数值的方法, 称为间接测量。例如, 用测压管测出管道中流体的动压值, 以此计算出管道中流体的流速与流量。

3. 组合测量

测量中使各个未知量以不同的组合形式出现 (或改变测量条件以获得这种不同的组合), 根据直接测量或间接测量所获得的数据, 通过解联立方程组以求得未知量的数值, 这类测量称为组合测量。例如, 铂电阻温度传感器的电阻值与温度的关系是

$$R_{\theta}=R_0(1+a\theta+b\theta^2)$$

式中 R_{θ} ——温度为 $\theta^{\circ}\text{C}$ 时铂电阻电阻值, Ω ;

R_0 ——温度为 0°C 时铂电阻电阻值, Ω ;

a 、 b ——铂电阻常数, 单位分别为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 、 $^{\circ}\text{C}^{-2}$ 。

为了确定系数 a 、 b , 首先需要测定铂电阻在不同温度下的电阻值, 然后再建立联立方程求解, 得到 a 、 b 的数值。

除上述按测量结果产生的方式对测量方法分类外, 还可以根据测量中的其它因素分类。例如按不同的测量条件, 可分为等精度测量与非等精度测量。在测量条件完全相同的情况下, 进行的一系列重复测量称为等精度测量。反之, 在多次测量中, 测量条件不尽相同, 此种测量称非等精度测量。所谓测量条件, 一般指测量者水平, 仪器、仪表精度, 测量方法, 环境条件等。

按被测量在测量过程中的状态不同, 又可分为静态和动态测量。在测量过程中, 被测量不随时间而变化, 称为静态测量。若被测量随时间而具有明显的变化, 则称为动态测量。例如, 恒温房间稳定的温度、风速等, 在测量过程中不随时间而发生明显的变化, 因而对此量的测量属静态测量。压力容器在升压或降压过程中的压力测量、人工气候室在升温或降温过程中的温度测量, 则属动态测量。相对于静态测量来说, 动态测量更为困难, 这时测量系统的动态特性对测量的影响是很复杂的。

第二节 测量系统的组成及其功能

一、测量系统的组成

测量设备与被测对象组合成测量系统。任何一次有意义的测量都必须由测量系统来实现。当然, 由于测量原理不同, 测量精度要求不同, 测量系统的构成会有很大差别。它可能是仅有一个测量仪表与被测对象构成的简单测量系统; 也可能是由计算机数据采集和处理系统构成的复杂测量系统。对任何一个测量系统都是由若干具有一定基本功能的测量环节组成的。所谓环节是指建立输出与输入量之间某种函数关系的一个基本部件。

测量系统中的测量设备一般由传感器、变换器或变送器、传输通道和显示装置组成，图 1-1 是测量系统的组成框图。

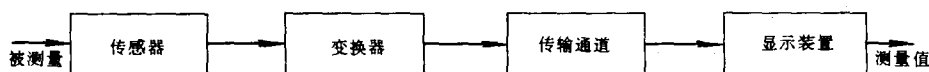


图 1-1 一般测量系统框图

二、测量环节的功能

1. 传感器 又称敏感元件，因它是与被测对象直接发生联系的部分，故又称一次仪表。它是将被测量（包括物理量、化学量、生物量等）按一定规律转换成便于处理和传输的另一物理量（一般多为电量）的元件。它是实现测量与自动控制的首要环节。对其转换要求是将被测量以单值函数关系，稳定而准确地变成另一种物理量，以便提供后续环节变换、比较、运算与显示记录被测量。例如温度传感器中的热电偶、热电阻等。

传感器能否精确、快速地产生与被测量相应的信号，对测量系统的测量质量有着决定性的影响。一个完善的、理想的传感器是十分难得的。首先，要找到一个选择性很强、以单值函数关系转换的元件并非易事。这时，只好限制无用信号在全部信号中的成分，可采用线路补偿等方法提高选择性。其次，传感器总要从被测介质中取得能量，或多或少总要对被测介质有所干扰。一个良好的传感器，只能是尽量减少这种干扰。

2. 变换器与变送器 它是将传感器输出的信号变换成显示装置易于接受的部件。传感器输出的物理量有机械位移、电阻、电势、电容量等等。在多数情况下，它们在性质上、信号强度上总是与显示装置所能接受的信号有所差异。通过变换器将传感器输出的信号进行变换，此变换可能是物理性质的变换，如通过测量电桥将电阻信号变成电压信号；也可能是将同性质的物理量加以放大，如通过机械连杆机构将微小位移量变成放大的位移量，以带动显示装置中的指针。

现代的自动指示、记录与调节仪表，除了可直接接受传感器信号外，为了标准化，有的仪表接受标准信号（如 $0\sim 10\text{mA} \cdot \text{DC}$ 、 $4\sim 20\text{mA} \cdot \text{DC}$ 、 $0\sim 10\text{V} \cdot \text{DC}$ 等）。为此需要将传感器转换来的信号变换到标准信号。将传感器输出信号变换到标准信号的器件称变送器，它在自动检测与自动控制中广泛应用。

3. 显示装置 它是与观测者直接发生联系的部分，又称显示仪表。分为模拟式、数字式和屏幕式三种。模拟式仪表最常见的为指针式仪表，结构简单、价格低廉，容易产生视差，但仍是目前主要显示仪表。数字式仪表是以数字形式给出被测量值，不会产生视差。记录时可以打出数据。显示仪表存在量化误差，量化误差的大小取决于模-数转换器的位数，直观性不如模拟仪表。屏幕式显示仪表是电视技术在测量中的应用，它既可以按模拟方式给出曲线，也可以给出数字，或者两者同时显示，具有形象性和易于读数的优点，并能在屏幕上显出大量的数据，便于比较判断。它是目前最先进的显示方式。

4. 传输通道 是仪表各环节间输入、输出信号的连接部分，它分为电线、光导纤维和管路等。它应按规定要求进行选择和布置，否则会造成信息损失，信号失真或引入干扰。

第三节 测量误差与测量精度

一、测量误差的概念

测量值与被测量真值之差称为测量的绝对误差，或简称测量误差，用下式表示

$$\Delta = x - x_0$$

式中 Δ ——绝对误差；

x ——测量值；

x_0 ——被测量真值。

绝对误差或大或小、或正或负。若已知测量值和绝对误差，可由上式求得被测量真值。

应该指出，测量过程中测量误差的存在是不可避免的，任何测量值都只能近似地反映被测量的真值。这首先是因为测量过程中无数随机因素的影响，使得即使在同一条件下，对同一对象进行重复测量也不会得到完全相同的测定值。其次，传感器总要从被测介质中吸取能量，这就意味着测量值不能完全准确地反映被测量的真值。因此，无论所采用的测量方法多么完善、测量仪表多么精确、测量者多么精心认真，测量误差是必然存在的。在科学研究中，只有当测量结果的误差已经知道，或者测量误差的可能范围已经指出时，科学试验所提供的数据才是有意义的。

二、测量误差的分类

按测量误差出现的规律不同，测量误差可分为三类：系统误差、随机误差和粗大误差。

1. 系统误差 在相同测量条件下，对同一被测量进行多次测量，误差的绝对值和符号保持不变，或按一定规律变化，这类误差称为系统误差。前者称恒值误差，后者称变值误差。例如，测量仪表指针零点偏移将产生恒值系统误差；利用标准孔板测量蒸汽流量，由于实际测量时的蒸汽压力和温度与计算孔板孔径时所采用的数值存在差异，而引起变值测量误差。

系统误差就个体而言是具有规律的，其产生的原因往往是可知的。例如，由于仪表使用不当或测量时外界条件变化等因素。因此可以通过试验的方法加以消除，也可以通过引入修正值的方法加以修正。

2. 随机误差 在相同测量条件下，对同一被测量进行多次测量，由于受到大量的、微小的随机因素的影响，测量误差的绝对值的大小和符号没有一定的规律，且无法简单估计，这类误差为随机误差。例如，仪表内部存在有摩擦和间隙等不规则变化，测量过程中外界环境（如气压、温度、湿度、电磁干扰等）的瞬间变化，测量过程中不稳定的读数等引起的误差。这类误差一般用统计理论来进行估价。

3. 粗大误差 明显地歪曲了测量结果的误差称为粗大误差，大多是由于测量者粗心大意造成的，例如读数错误、记录或运算错误，测量过程中的失误等等。粗大误差其数值往往大大地超过同样测量条件下的系统误差和随机误差，它对测量结果的歪曲是严重的，以至于使测量完全不可信赖。因此，粗大误差一经发现，必须从测量数据中剔除。

三、测量精度

测量精度可分为以下三方面内容，它们与误差大小相对应。

1. 准确度 它反映系统误差影响程度。系统误差小准确度高；系统误差大，准确度低。

显然，准确度是反映对同一被测量进行多次测量，测量值偏离被测量真值的程度，故称准确度。

2. 精密度 它是反映随机误差影响的程度，随机误差小，精密度高。显然，精密度是反映对同一被测量进行多次测量，测量值重复一致的程度，或者说测量值分布密集的程度，故称精密度。

3. 精确度 它反映系统误差和随机误差综合影响的程度，又称精度。

对于具体测量，精密度高的，准确度不一定高；准确度高的，精密度也不一定高；但精确度高的，则精密度与准确度都高。图 1-2 说明上述三种情况。图中 x_0 代表被测量真值， $\bar{x}$ 代表多次测量获得的被测量的平均值，黑点代表单个测量值。从图中可以看出，图 (a) 的测量密集于平均值 $\bar{x}$ 周围，随机误差小，表明测量精密度高，但测量的平均值偏离被测量真值较大，系统误差大，表明准确度低。图 (b) 的测量值分散性大，随机误差大，表明精密度低。但平均值较接近真值 x_0 ，表明系统误差小，准确度高。图 (c) 测量值 x_K 明显地异于其他测量值，可判定是含有粗大误差的坏值，可剔除。在剔除坏值 x_K 之后，随机误差和系统误差都小，表明精确度高。

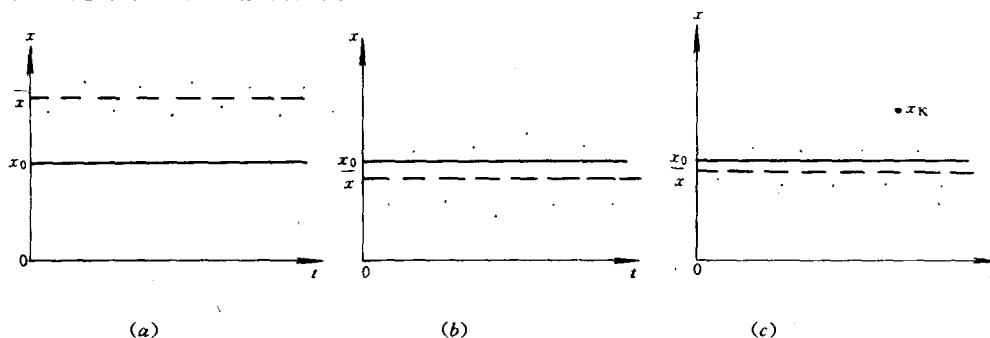


图 1-2 精密度、准确度、精确度示意图

(a) 精密度高、准确度低；(b) 准确度高、精密度低；(c) 精确度高

第四节 测量仪表的基本技术指标

选择与评价测量仪表，需要了解仪表的基本性能指标，一般有测量范围、精度、灵敏度及变差等。

一、量程范围

仪表能够测量的最大输入量与最小输入量之间的范围称作仪表的量程范围，简称量程，在数值上等于仪表上限值减去仪表下限值，用 L_m 表示。

选用仪表时，首先应对被测量的大小有一初步估计，务必使被测量的值都在仪表的量程之内，如果被测量在满刻度的三分之二左右，则能提高测量精度。

二、仪表精度

用任何仪表进行测量其测量结果都存在着误差，因此在进行测量时，不仅需要知道仪表的指示值，而且还应知道该测量仪表的精度，即所得测量值接近真实值的准确程度，以便估计到测量误差的大小。

较合理的误差表示方法是利用仪表的基本误差 σ_j ，它的含义是：仪表测量值中的最大示值绝对误差 Δ_m 与仪表量程 L_m 之比值。

$$\sigma_j = \frac{\Delta_m}{L_m} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 σ_j ——仪表的基本误差；

Δ_m ——最大示值绝对误差；

L_m ——仪表量程。

仪表商品根据质量不同，要求基本误差不超过某一规定值，故又称基本误差为允许误差。

仪表工业规定基本误差去掉“%”的数值定为仪表的精度等级，简称精度。它是衡量仪表质量的主要指标之一。一般模拟仪表精度等级有…0.02、0.04、0.05、0.1、0.2、0.5、1.0、1.5…。

应说明，仪表基本误差系指仪表在正常使用条件下的最大相对百分误差，若仪表不在规定的正常条件下使用，则会引起额外误差称为附加误差。显然，仪表精度只能用来估计基本误差。

另外，对同一精度的仪表，如果量程不同，则在测量中产生的绝对误差是不同的，这可以从式 (1-1) 看出。同一精度的窄量程仪表产生的绝对误差，小于同一精度的宽量程仪表的绝对误差。所以在选用仪表时，在满足被测量的数值范围的前提下，尽可能选择窄量程的仪表，并尽量使测量值在满刻度的三分之二左右，这样既满足测量误差的要求，又可选择精度等级低的仪表，从而降低仪表的价格。当被测量在仪表刻度的三分之二左右时，可以避免测量中过大的相对误差（仪表绝对误差与被测量值的百分误差）。例如，被测温度在 40°C 左右变化，要求绝对误差不超过 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ，则选用 $0\sim 50^\circ\text{C}$ 量程的仪表，其精度为 1.0 级就可以满足 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 精度的要求；如果选用 $0\sim 100^\circ\text{C}$ 的仪表，为了满足 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 精度要求，则必须选用 0.5 级的仪表，后者价格高于前者。

三、变差

在外界条件不变的情况下，使用同一仪表对被测量进行反复测量（正行程和反行程）时，所产生的最大差值 ΔL_m 与仪表量程 L_m 之比值称变差，用 ϵ 表示，即

$$\epsilon = \frac{\Delta L_m}{L_m} \times 100\% \quad (1-2)$$

图 1-3 表明仪表变差。造成变差的原因很多，例如，传动机构间正反向的间隙和摩擦力均不相同造成的等等。

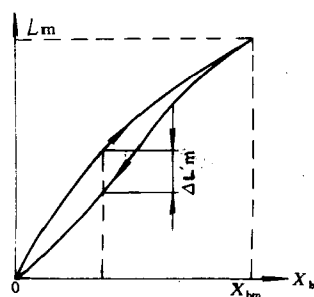


图 1-3 测量仪表的变差

四、灵敏度和灵敏限（分辨率）

在稳定情况下，仪表输出变化量 ΔL （指针的直线位移或角位移）与引起此变化的输入量（被测量）的变化量 ΔX_b 之比值，定义为仪表的灵敏度，用 S 表示，即

$$S = \frac{\Delta L}{\Delta X_b} \quad (1-3)$$

式中 S ——仪表灵敏度；

ΔL ——输出变化量；

ΔX_b ——输入变化量。

可见，灵敏度是仪表的静态参数，是衡量仪表对被测参数变化的敏感程度。对一台线性仪表而言，它的灵敏度是常数。一般，灵敏度高，仪表的精度也相应比较高。但必须指出，仪表的精度主要取决于仪表本身的基本误差，而不能单纯地靠提高灵敏度来达到提高精度的目的。例如，把一个毫伏表的指针接得很长，虽然可把直线位移的灵敏度提高，但其读数精度不一定提高，相反，可能由于平衡状况变坏而精度反而下降。为了防止这种虚假灵敏度，常规定仪表读数标尺的分格值，不能小于仪表允许误差的绝对值。

仪表的灵敏限是指能够引起测量仪表动作的被测量的最小变化量，故又称分辨率或仪表死区。一般，仪表的灵敏限应不大于仪表测量值中最大绝对误差 Δ_m 的一半。

第二章 误差的基本性质与处理

通过测量可得到测量数据,但这种数据会含有误差和不确定性。为了提高测量精度,必须尽可能消除或减小误差。因此有必要对误差性质、出现规律以及测量结果的处理等方面,作一定的分析。从而通过有关方法,估计测量中各个误差分量,对测量结果作出科学的评价,并把测量结果正确地表达出来。

第一节 随机误差

当对同一量进行多次等精度重复测量,得到一系列不同的测量值,称为测量列。每个测量值都含有误差,就个体而言是无规律的。但当测量次数足够多时,则会发现,从总体上说随机误差服从一定的统计规律。我们可以利用统计学的方法,从理论上来估计随机误差对测量结果的影响。也就是首先从测量列中求得一个最优概值,然后对最优概值的测量误差作出估计,得出测量值,这就是数据处理。

一、正态分布

若测量中不含系统误差和粗大误差,则该测量列中的随机误差服从正态分布规律。

测量列中的随机误差

$$\Delta_i = x_i - x_0 \quad (2-1)$$

式中 Δ_i ——测量列的随机误差, $i=1, 2, 3, \dots, n$;

x_i ——测量列的测量值;

x_0 ——被测量真值。

如用 $f(\Delta)$ 表示正态分布的分布密度,则有

$$f(\Delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}} \quad (2-2)$$

式中 σ ——标准误差 (均方根误差);

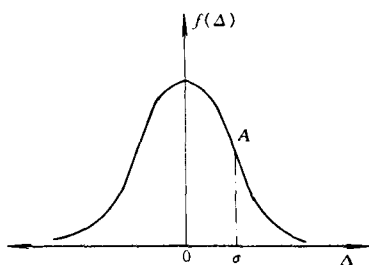


图 2-1 正态分布曲线

e ——自然对数的底。

图 2-1 为正态分布曲线,它明显地反映了正态分布的特征:绝对值小的误差出现的机率大;绝对值相等的正误差与负误差出现的次数相等;非常大的正负误差出现的概率都趋于零;当测量次数增加,随机误差的算术平均值趋于零。 σ 值为曲线上拐点 A 的横坐标。

二、算术平均值原理

对某一量进行一系列等精度测量,由于随机误差的存在,其测量值皆不相同。在测量中只能对其真值作出最佳估计,即求出所谓最优概值。在直接测量中,最优概值就是全部测量值的算术平均值。

(一) 算术平均值的意义

设 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为 n 次测量所得的值, 则算术平均值 $\bar{x}$ 为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2-3)$$

算术平均值与被测量真值最为接近, 由概率论的大数定律可知, 若测量次数无限增加, 则算术平均值 $\bar{x}$ 必然趋近于真值 x_0 。

由式 (2-1) 求和得

$$\Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_n = (x_1 + x_2 + \dots + x_n) - nx_0$$

$$\sum_{i=1}^n \Delta_i = \sum_{i=1}^n x_i - nx_0 \quad (2-4)$$

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} - \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n}$$

由随机误差的性质可知, 当 $n \rightarrow \infty$ 时, 有 $\sum_{i=1}^n \Delta_i / n \rightarrow 0$ 。所以,

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n \rightarrow x_0$$

由此可见, 如果可能对某一量进行无限多次测量, 就可以得到不受随机误差影响的值, 或其影响甚微, 可以忽略。由于实际上都是有限次测量, 所以我们在直接测量中, 把算术平均值作为接近真值的最优概值。

(二) 算术平均值的两个性质

一般情况下, 被测量的真值为未知, 不可能按式 (2-1) 求得随机误差, 这时可用算术平均值代替被测量的真值, 则有

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (2-5)$$

式中 v_i —— x_i 的剩余误差;

x_i ——第 i 个测量值, $i=1, 2, \dots, n$ 。

根据式 (2-5) 可证明算术平均值有以下两个性质:

1. 剩余误差的代数和等于零, 即

$$\sum_{i=1}^n v_i = 0 \quad (2-6)$$

根据算术平均值这一性质, 可用来检验在测量列中所计算的算术平均值和剩余误差是否正确。

2. 剩余误差的平方和为最小, 即,

$$\sum_{i=1}^n v_i^2 = \text{最小}$$

剩余误差这一性质, 建立了最小二乘法的原理。

三、测量值误差的评价指标

为了评定测量列和它的最优概值的优劣, 需要引入一些评价指标, 常用的有标准误差 σ 和极限误差 $\Delta_{\max}$ 。

1. 测量列的标准误差 σ

测量列的标准误差 σ 由下式定义:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \cdots + \Delta_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n}} \quad (2-7)$$

即均方根。

因被测量的真值 X_0 为未知, 式 (2-7) 中的 $\Delta_i = x_i - X_0$ 不能计算, 因此必须用剩余误差 $v_i = x_i - \bar{x}$ 来表示标准误差, 可以证明

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

此式称贝塞尔公式, 根据它可以由剩余误差求测量列的标准误差。

剩余误差的分布密度为

$$f(v) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{v^2}{2\sigma^2}} \quad (2-9)$$

标准误差 σ 的数值小, 该测量列相应小的误差就占优势, 任一测量值对算术平均值的分散就小, 测量的可靠性就大, 即测量精度高; 反之, 测量精度就低。 σ 是正态分布曲线的拐点, 随机误差落在 $[-\sigma, \sigma]$ 之内的随机误差占 68.3%, 而落在该区之外的机会少。因此测量列的标准差 σ 可以看作在给定条件下, 所有测量值随机误差的一个代表, 它明确地、单值地表征着测量列的精密性。测量过程是由一个测量列来体现的, 测量列标准误差 σ 就具体地从数量上表示了测量过程的情况, 它取决于测量方法、仪器设备质量、环境条件的优劣和测量者的技术水平等因素。

2. 算术平均值的标准误差 $\sigma_{\bar{x}}$

服从正态分布的直接测量值的最优概值就是这组测量列的算术平均值 $\bar{x}$, 以此作为测量结果。因此, 必须研究算术平均值的不可靠性。算术平均值要比每个测量值都更接近于真值, 因此不能用测量标准误差 σ 来评价算术平均值的优劣。当然最优概值的标准误差应和测量列的标准误差有关, 因为最优概值可以从测量列计算。可以推得算术平均值的标准误差 $\sigma_{\bar{x}}$ 为

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

用剩余误差表示则有

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

真值落在 $[\bar{x} - \sigma_{\bar{x}}, \bar{x} + \sigma_{\bar{x}}]$ 之内的可能性是 68.3%, 也称置信度为 68.3%。真值落在 $[\bar{x} - 2\sigma_{\bar{x}}, \bar{x} + 2\sigma_{\bar{x}}]$ 之内的置信度为 95.5%, 而真值落在 $[\bar{x} - 3\sigma_{\bar{x}}, \bar{x} + 3\sigma_{\bar{x}}]$ 之内的置信度为 99.7%。

3. 测量列的极限误差 $\Delta_{\max}$

从概率论中得知, 随机误差落在 $[-3\sigma_{\bar{x}}, 3\sigma_{\bar{x}}]$ 区间内概率为 99.7%, 而落在外面的只有 0.3%, 即每测得 1000 次其误差绝对值大于 3σ 的次数仅有 3 次。因此, 在有限次的测量