

高等学校试用教材

试验参量的检测与控制

重庆大学 朱麟章 编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

ξ	阻尼系数。	θ	温度, 角度, 转角。
σ	标准误差, 应力, 汤逊系数。	μ	泊松比, 磁导率, 流束收缩系数。
σ_0	斯忒藩-玻耳兹曼常数。	μ_0	氧势。
σ_s	算术平均标准误差。	τ	时间常数, 剪应力。
σ_x'	加权算术平均标准误差。	Δ	圆弧误差, 不灵敏区。

前 言

金属材料通过适合的热处理工艺,可提高材料的力学性能与使用性能,从而可充分利用和发挥材料的潜力,达到提高产品质量、延长使用寿命、提高技术与经济效益等目的。研究新材料或合理使用材料,应对材料的力学性能,诸如弹性、强度、冲击韧性、断裂强度、疲劳强度以及蠕变等特性进行必要的试验与分析,基本的试验手段是进行应力与应变的检测与分析。材料的热处理是通过加热、保温与冷却过程以改善金属零件的整体、局部或表面的组织结构以获得零件在服役过程中所必需具有的使用性能。金属材料热处理既是一个热过程,就必然涉及到炉温、炉内压力与气氛组成,以及保证供热的能源计量等参量的自动检测和自动控制。

按教学大纲的要求,本书以温度的检测、显示与控制为主,其它参数的检测与控制,除应力与应变检测仪表外,只作一般的介绍。对于那些与金属材料研究、与热处理工艺过程研究密切相关的 $X-Y$ 函数记录仪与光线示波器,从正确使用角度出发,也作了简要的介绍。由于各院校对本课安排的学时差异较大,在组织教学时可结合实际情况选择讲授主要内容。

根据教学大纲的需要,本书尽量做到深入浅出,注意仪表原理的阐述,仪表选型、调校与正确使用,并适当介绍新近发展的仪表以及微电脑在热处理过程中的应用。由于本课程学时有限,对有关电路与集成器件,只求说明外部联系,内部结构与原理均从略。

初稿完成后于1985年4月召开了审稿会,教材编委会委员李春信教授主持并宣读了“教材编写纲要标准”;由清华大学王天宰副教授主审,参加审稿会的有上海交通大学程德琦副教授,上海工程技术大学唐伟扬副教授,重庆大学马文光副教授,沈阳工业大学贾德文,西安交通大学马似如,太原工业大学李新华,武汉工业大学冯工。对初稿进行了审议,“一致认为教材初稿基本上符合本课程教学大纲的需要,满足‘教材编写纲要标准’,既具有先进性,也突出了三基,深度适当,推荐出版”。还提出了一些修改意见。会议建议于1986年秋将部份修改后的书稿油印成试用教材供各校试用,并组织召开本课程的首次教学研究会。1986年12月由程德琦、马文光、华南工学院黄济元副教授、广西大学温浦生副教授、山东工业大学霍宪义副教授、大连工学院陈淑媛高级工程师、河北工学院许伯钧以及编者分别对测量误差、模拟显示仪表、压力与真空测量、炉温PID控制示教仪、动圈表与补偿电桥、数字式仪表以及炉温PID控制与微电脑控制等进行了结合试用教材的讨论性讲课,并围绕教材内容进行了认真热烈的讨论,“对新编试用教材内容的更新与充实给予了肯定”,并提出了一些积极有益的意见。哈尔滨工业大学刘志福副教授、西北工业大学曾祥模副教授、西安交通大学周志渊副教授等对本书的编写提供了宝贵资料和有益意见;特别是主审为了使本书更好地适合专业的特点和需要,提出了不少珍贵意见和资料;教材编委会委员燕山大学康大韬教授对编写本书的关注和支持,都促进了本书编写的完成。还有重庆大学研究生蒙建波对微电脑应用程序所作的工作,刘春庭与王德卿工程师以及胡学智等同志对本书的抄写、绘图与审稿所作的努力,对四川仪表总厂及其一厂、四厂、九厂、十四厂、十六厂、十七厂、十八厂等为本书提供资料和慷慨支持,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者的学识和水平有限,教材中错误和不当之处恳切希望读者和同行提出宝贵意见。

编 者 一九八七年三月于重庆

主要符号说明

A	断面积, 动圆面积, 系数, 运算放大器。	q_V	流体体积流量。
a	管弹簧短直径, 系数, 显著性水平。	q_m	质量流量。
B	材料特性系数。	q	热流密度。
B	双铂铑热电偶分度号。	R	热阻, 气阻, 流阻, 或然误差, 误差, 理想 气体常数。
b	宽度, 系数, 管弹簧长直径。	Re	雷诺数。
C	容量系数或容量, 余差, 流出系数, 常数。	r	参数绝对值, 设定值, 或然误差, 方程的 根。
C_i	电流系数。	r_r	相对误差。
c	修正值, 光速, 置信系数。	S	灵敏度, 算术平均误差。
D	常数。微分作用。	S	铂铑 ₁₀ -铂热电偶分度号。
d	厚度。	S_s	斯特劳哈尔数。
d	电动势。	s	算子。
E	镍铬-考铜热电偶分度号。	T	铜-康铜热电偶分度号。
F	干扰系数。	V	容积, 气体体积。
G	剪切弹性模量。	W	电阻比。
h	测量精度指数, 普朗克常数。	$W(S)$	传递函数。
I	积分作用, 积分速度。	$X(S)$	输入函数。
J	转动惯量。	x	输入量。
J	铁-康铜热电偶分度号。	x_0	单位扰动量。
K	放大系数, 常数, 形状系数。	$Y(S)$	输出函数。
K	镍铬-镍硅热电偶分度号。	y	输出量, 被控量。
k	红外吸收系数, 系数, 玻耳兹曼常数。	z	执行机构位移量, 测量值。
K_F	比例放大系数, 平衡常数。	$\bar{x}_0$	算术平均值。
K_D	微分增益。	α	流量系数, 吸收系数, 气体膨胀系数, 电阻 温度系数, 管弹簧包角。
K_I	积分增益。	α_C	碳势。
L	线性度, 区同。	α_E	弹性模量温度系数。
l	长度, 位移, 气体层厚度。	β	直径比, 电流放大倍数, 气体压缩系数, 反 射偏转角。
M	参数真实值, 辐射出射度, 互感系数, 力 矩。	δ	误差, 极限误差, 脉冲宽度。
m	流速比。	ϵ	流束膨胀系数, 发射率(黑度), 应变量, 量 化误差, 误差。
m_i	线差。	κ	零嫡指数(比热比)。
N	自由电子密度。	η	效率。
NA	数值孔径。	ϕ	相位。
N	绕组匝数。	φ	相角, 相位差, 转角, 体积分数。
n	测量次数, 采样次数或序列, 动圆匝数, 透 减比, 折射率。	ξ	流速修正系数。
P	概率积分, 输出功率, 比例带, 比例作用。		
P	权, 压力, 差压, 置信度。		
Q	热量。		

目 录

前言

主要符号说明

第一章 绪论 1

§ 1-1 仪表的类别 1

一、按检测测量分类 1

二、按仪表的功能分类 2

§ 1-2 仪表的特性 2

一、仪表的静态特性 3

二、仪表的动态特性 4

§ 1-3 仪表的测量误差 6

一、一般概念 6

二、误差的来源与分类 7

三、偶然误差的表示方法 7

四、不等精度测量的误差——加权算术平均 10

五、误差检验 10

本章小结 14

复习思考题与习题 14

参考文献 14

第二章 温度传感器 15

§ 2-1 概述 15

一、温度及温度测量 15

二、温标 16

三、温度测量系统组成 19

§ 2-2 热电偶 21

一、热电效应 21

二、热电回路的基本定律 22

三、热电极与热电偶 24

四、热电偶的静态特性与分度表 33

五、特殊形式的热电偶 35

六、热电偶测温回路 39

七、热电偶的工业检定 44

八、热电偶测温系统的误差分配 46

§ 2-3 热电阻 47

一、铂电阻 47

二、铂电阻 47

三、热敏电阻 48

四、热电阻的测量桥路 50

§ 2-4 光电温度传感器 52

一、光学测温法 52

二、全辐射测温法 55

三、红外辐射测温法 58

四、光纤测温法 59

本章小结 63

复习思考题与习题 63

参考文献 64

第三章 温度显示与记录仪表 65

§ 3-1 概述 65

§ 3-2 动圈表 65

一、工作原理 65

二、测量线路 67

三、动圈表的使用与量程调整 69

§ 3-3 自动平衡仪表 70

一、电子电位差计 70

二、电子平衡电桥 78

§ 3-4 X-Y 函数记录仪 79

一、测量回路 80

二、电子放大器 81

三、仪器的使用与调整 82

四、仪器的校正 82

§ 3-5 数字温度显示仪表 83

一、采样和采样定理 83

二、量化误差 84

三、标度变换 85

四、数字温度表结构原理 86

五、数字采集系统 90

§ 3-6 温度变送器 92

本章小结 94

复习思考题与习题 94

参考文献 94

第四章 温度控制仪表 95

§ 4-1 概述 95

一、自动控制系统的概念 95

二、自动控制系统的类别 97

三、自动控制系统的特性与品质指标 97

§ 4-2 被控对象的特性 99

一、对象的动态特性	99	§ 6-1 概述	154
二、影响对象动态特性的因素	100	一、应变仪的组成	154
§ 4-3 炉温位式控制	101	二、应变电阻传感器的类别	155
一、位式控制原理	101	§ 6-2 应变检测原理	156
二、双位控制器	102	一、金属丝应变电阻片	156
三、三位控制器	104	二、半导体应变电阻片	158
四、带时间比例的双位控制器	105	三、应变仪的组成	159
五、饱和电阻调功器	106	§ 6-3 应变传感器	160
六、磁性调压调功器	107	一、圆柱或圆筒形应变传感器	161
§ 4-4 炉温比例积分微分控制	108	二、聚形应变传感器	162
一、比例积分微分控制原理	108	§ 6-4 应变检测桥路	163
二、比例积分微分控制器	112	一、零位平衡	163
三、炉温PID控制系统	116	二、温度补偿	164
四、准连续PD炉温控制	122	三、应变传感器的灵敏度	164
§ 4-5 微型计算机炉温控制	123	§ 6-5 应变传感器的应用	165
一、微型计算机概念	123	§ 6-6 光线示波器	169
二、微型计算机炉温控制系统的组成	128	一、光学系统	169
三、控制算法设计	133	二、振子	170
本章小结	138	本章小结	173
复习思考题与习题	139	复习思考题与习题	174
参考文献	139	参考文献	174
第五章 压力与真空检测仪表	140	第七章 流量检测仪表与流量控制	175
§ 5-1 概述	140	§ 7-1 概述	175
一、压力与压力测量单位	140	§ 7-2 节流式流量计	175
二、压力测量方法	141	一、节流装置工作原理	176
§ 5-2 普通压力表	144	二、标准节流装置	177
一、管嘴弹簧压力表	144	三、标准节流装置的使用	178
二、波纹管压力表	145	四、差压计	179
三、膜片与膜盒式压力表	145	五、节流装置测量流量的误差	180
§ 5-3 远传压力表	146	§ 7-3 转子流量计	181
一、差动变压器式远传压力表	146	一、工作原理	181
二、霍尔式远传压力表	147	二、远传转子流量计	182
三、力平衡式压力与差压变送器	148	三、转子流量计的选用	182
四、压力表的选用与测量误差	149	§ 7-4 其它流量计	183
§ 5-4 真空测量	150	一、转轮式容积流量计	183
一、压缩式真空规——麦式真空计	151	二、均速管流量计	185
二、热导式真空规	151	三、涡轮流量计	185
三、电离式真空规	152	四、涡轮流量计	186
本章小结	153	§ 7-5 燃气(油)热处理炉流量比例	
复习思考题与习题	153	控制	187
参考文献	153	本章小结	188
第六章 应变检测仪表	154	复习思考题与习题	188

参考文献	189	§ 8-4 红外CO ₂ 气体分器与碳势控制	197
第八章 成分分析仪表及气氛控制	190	一、红外CO ₂ 分器	197
§ 8-1 概述	190	二、碳势控制	199
§ 8-2 氧分器及氧势控制	190	三、真空渗碳炉微电脑控制	201
一、氧分器	190	本章小结	206
二、氧势控制系统	193	复习思考题与习题	206
§ 8-3 露点仪及露点控制	194	参考文献	207
一、氯化锂露点仪及露点控制	194	附录一 热电偶分度表	208
二、光电式露点仪	195	附录二 热电阻分度表	214

第一章 绪 论

“试验参量的检测与控制”是金属材料及热处理专业的一门技术基础课，它涉及的内容包括温度、压力与真空、流量、应力与应变以及气体成分等参量的检测与控制。“温度的检测与控制”是保证金属材料热处理质量中十分重要的一环；“应力与应变的检测”是研究材料力学性能不可缺少的试验手段；这两部分是本课要着重讲述的内容。其它参量的检测与控制方法，在材料试验与热处理工艺过程中应用的也不少，都应当有所了解。

学习“试验参量的检测与控制”课程，主要是解决对检测与控制仪表工作原理的认识与正确选用的问题。由于检测与控制仪表的种类繁多，仪表的结构、性能与品种的不断更新，本书只是结合金属材料及热处理工艺过程中的现实需要，介绍常用仪表的工作基本原理与选用中的基本技术问题。

§ 1-1 仪 表 的 类 别

参量的检测与控制仪表是多种多样的，分类的方法也不一致，可概括为以下两类

一、按检测参量分类

(1) 温度仪表 用来检测温度、温度差及控制温度的仪表，主要有以下几种：

1) 膨胀式温度仪表 根据材料受热膨胀的特性检测温度变化值，如液柱式酒精或水银温度计，双金属片温度计等。

2) 热电式温度仪表 不同导体组成的热电回路，由于回路中接点温度差而产生电动势，借此测定温度变化，如各种各样的热电偶。这是研究时间最久也比较完善的检测仪表，是本书阐述的重点内容之一。

3) 电阻温度仪表 导体的电阻随温度不同而变化，如各种热电阻、热敏电阻与PN结等。

以上三种仪表都将感温元件与被测介质直接接触，当感温元件与被测介质的温度平衡时，感温元件所检测到的温度就代表被测介质的温度。这是目前应用最广也是最成功的方法，通称为接触式温度仪表。

4) 热辐射温度仪表 根据物体热辐射能量的大小反映物体本身温度高低的原理，可以间接测量温度，如光学高温计，辐射温度计，光电温度计等。因为感温器件不与被测介质接触，故又称为不接触温度测量仪表。此类仪表的量程较宽，又不干扰被测介质，受被测介质的影响也较小，因而它的适应范围广。由于热敏与光敏元件质量的提高，集成元件与微电脑的广泛应用，过去在工业上应用不多的光电及红外辐射温度仪表，目前应用日多，质量也有明显的提高。

(2) 压力仪表 测定单位面积上压力的仪表，最普遍使用的是液柱式压力计如U形压力计及单管压力计。比较好的是采用弹性元件如管弹簧或弹性膜片作成的压力传感器、配合差动变压器或霍尔元件将传感器的位移转换成电信号的远传压力表。

(3) 流量仪表 测定单位时间内流过单位截面上流体容积或质量的仪表，流量仪表的

种类很多,应用最普遍的是节流式流量计与转子流量计。

(4) 应力与应变仪表 在研究金属结构与测定材料力学性能中,应力与应变测量是主要手段。感受应力与应变的传感器是将金属丝(或半导体)应变电阻片,贴在专门设计的弹性体上,配合检测桥路将应变量转换成电信号进行测量,这也是将着重介绍的内容之一。

(5) 气体成分分析仪表 热处理可控气氛中的氧、二氧化碳或水分含量直接影响热处理工件的质量,常用的仪器有氧分析器、二氧化碳分析器与露点仪等。

二、按仪表的功能分类

(1) 检测仪表 感受参量的变化并转换成适当的可测信号的元器件,通称为检测仪表,它包括传感器与变送器(转换器)两大类,上述五种仪表都属于检测仪表。

(2) 显示仪表 将检测仪表输出的可测信号,以指针、记录笔或数字显示出来,通称为显示仪表,主要有模拟显示与数字显示两大类,前者应用已久,并且十分广泛,后者是近20年发展起来的,应用日益普遍。

(3) 控制仪表 将检测仪表输出的信号值与热处理工艺所设定的值相比,对被控量实施自动控制作用的仪表,它分为模拟控制仪表与数字控制仪表两大类,后者与微电脑技术结合又分为可编程数字控制仪表与智能控制仪表。本书只讲述模拟控制仪表,微电脑控制则只作一般的介绍。

(4) 执行器 将控制器发出的电(气)动控制信号,通过执行器转换成机械(直线或角)位移以调整被控参量的数值,使之符合热处理工艺的要求。对于燃油或燃气热处理炉炉温控制是电(气)动执行器与电(气)动控制阀;对于电热处理炉则是晶闸管或调功器;简单的位式控制系统则是接触器或电磁阀等。

从上述可见,试验参量的检测与控制仪表原理系统见图1-1所示。

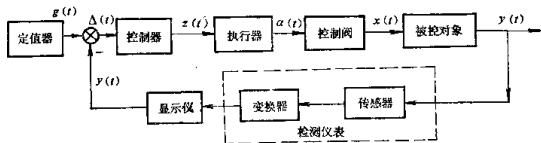


图1-1 参量的检测与控制仪表原理系统图

§ 1-2 仪表的特性

人们对仪表的希望是正确而及时地测出被测量,并且能尽量排除干扰;当需要对被测量进行自动控制时,仪表能迅速克服偏差值,保持工艺参数在规定的范围内变化或按规定的程序自动进行下去。这些都决定于仪表的性能,当然还与使用条件和操作方法有关。

仪表特性有静态特性与动态特性之分。当被测参量变化缓慢或恒定不变时,只考虑其静态特性指标是可行的;而当参量的变化较快或者是不断变化的,则必须考虑仪表输出与输入随时间而变的关系,这就是动态特性。

一、仪表的静态特性

仪表的静态指标决定于仪表的静态特性。它是以标准量作为被测量,在保持各种干扰为恒定或为零的情况下,于一定范围内改变标准量,使仪表输出量在相应一定范围内变化,这种在平衡状态下的输入输出特性,就是仪表的静态特性,它有以下一些静态指标。

(1) 灵敏度 仪表输出信号相对于输入信号变化量的比值定义为灵敏度,以 S 表示

$$S = \frac{\text{输出信号变化量}}{\text{输入信号变化量}} = \frac{\Delta x_o}{\Delta x_i} \quad (1-1)$$

也可用相反的比例式表示。以热电偶的静态特性为例,其灵敏度可定义为温度变化 1 摄氏度时,热电偶的输出电动势的变化,单位为 $\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ 或电动势变化 1 毫伏时温度的变化,单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{mV}$ 。

当参量变化是线性时,则 $\frac{\Delta x_o}{\Delta x_i}$ 为常数,灵敏度就是特性直线的斜率如图 1-2 a, 如是非线性的,则灵敏度不是常数,这就要求进行线性化处理如图 1-2 b。

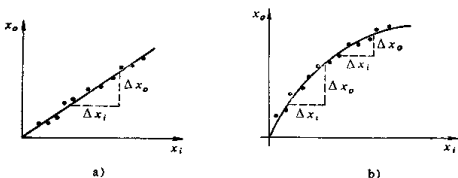


图1-2 仪表的灵敏度

(2) 线性度 仪表的输入-输出关系的特性曲线,与理想直线相近程度称为线性度,它定义为与理想直线的最大偏差值 B 与仪表的输出范围 A 的比值,以 L 表示

$$L = \frac{B}{A} \times 100\% \quad (1-2)$$

理想直线是通过回归分析法确定的,输出变化范围就是仪表量程最大与最小值之差如图 1-3 所示。线性度好,仪表的输出可以平均刻度,仪表标尺是均匀的。如果把理想直线作为仪表的实际特性曲线,则 L 就是仪表的非线性误差。图中曲线 1 与 2 的非线性误差是不同的。

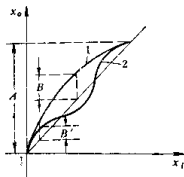


图1-3 仪表的线性度

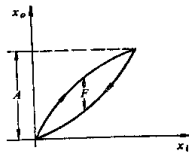


图1-4 仪表的变差

(3) 变差 输出信号随输入信号的增大而上升与随输入信号的减小而下降的

两条特性曲线不一致时,则仪表存在变差或回差。由于两条曲线在起始点与终点会汇合,构成一个回线,故也称为滞环。两条特性曲线间的最大差值 F 与仪表量程范围 A 之比值定义为变差,以 δ_p 表示

$$\delta_F = \frac{F}{A} \times 100\% \quad (1-2)$$

变差是由于仪表的机械结构存在间隙、摩擦或阻尼特性造成的，只能通过实验方法测定。这是仪表本身结构上存在的误差，是难以避免的，一般规定在一定范围以内。

当仪表的输出特性不一致，表明仪表的重复性差，除受变差影响外，还受其它不稳定因素影响，如环境温度、湿度、电源电压或频率波动、振动及电磁场的影响等。

(4) 分辨率 引起仪表指示值发生变化的最小输入量变化值称为仪表的分辨率，这是仪表能检测到被测量最小变化的能力。模拟仪表规定为刻度标尺最小分度值的一半，数字仪表则规定为最末位的一个字。

二、仪表的动态特性

当仪表的输入信号变化时，仪表的输出随时间变化的响应曲线称为动态特性，与静态特性的区别在于仪表的输出是时间的函数，并随输入信号的频率不同而变，输出与输入信号之间可能存在相位差。参量的检测与控制基本的方法是仪表在阶跃输入信号作用下分析输出信号的特性；表征仪表输出信号与输入信号的关系是微分方程，为了方便，广泛采用一种微分方程的缩写——传递函数，它表示输出函数与输入函数的比值，本书也采用此法。

1. 一阶响应

当仪表或元件的质量 (m) 小，惯性可忽略不计，阻尼与容积都较小，能迅速反映被测参量变化的称为具有一阶响应的系统，可用一阶微分方程表示。例如液柱式温度计，它的质量 (m) 不大，容量 (C) 与阻尼 (R) 均较小，当其接触温度为 θ_i 的被测介质吸收热流 q 而显示出温度 θ_o ，其动态过程可用一阶微分方程表示

$$RC \frac{d\theta_o}{dt} + \theta_o = K\theta_i \quad (1-4)$$

设 $\frac{d}{dt} = S$, $\frac{d^2}{dt^2} = S^2 \dots$ ，输入 $\theta_i = x$ ，输出 $\theta_o = y$, $RC = T$ ，则得

$$(Ts + 1)y = Kx$$

用传递函数表示为

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{y}{x} = \frac{K}{Ts + 1} \quad (1-5)$$

一阶微分方程的解可表示为

$$y = K\Delta x(1 - e^{-t/T}) \quad (1-6)$$

当 $t =$ 时间常数 T 时，则有

$$\begin{aligned} y &= K\Delta x(1 - e^{-1}) = K\Delta x(1 - 2.718^{-1}) \\ &= 0.632K\Delta x \end{aligned} \quad (1-7)$$

这是一非周期过程 (见图 1-5)，具有这种特性的系统称为惯性环节，测量温度用的液柱式温度计，裸露热电偶、小容量热处理炉都具有这种特性。

影响一阶特性响应速度的因素是时间常数 T ，它决定于系统的阻尼与容量特性，前者如摩擦力、热阻、流阻、气阻等，后者如容积、气容、热容、电容等。时间常数大，意味着响应比较缓慢，相反则响应

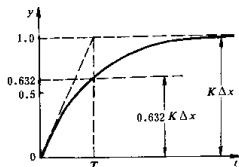


图1-5 一阶响应曲线

比较快速。

时间常数的测定按式 (1-7) 进行, 以裸露热电偶为例, 当把热电偶插入恒温水浴(100°C) 时, 立即同时计时和测定热电动势, 当热电动势升到额定值 (这里是指相当于 100°C 时的电动势) 的 63.2% 时停止计时, 所经历的时间就是时间常数 T 。如果继续计时和测定电动势将有如下关系

T	0	1	2	3	4	5
$y/K\Delta x$	0	0.632	0.865	0.950	0.982	0.988

理论上, 输出须经无限长时间以后达到稳定, 但这并没有必要, 一般以输出为 $0.982K\Delta x$, 即达到 $4T$ 时间后即认为达到稳定状态, 作为判定元件或系统稳定快慢的指标之一。

2. 二阶响应

仪表或检测元件具有惯性、质量或阻尼较大时, 用二阶微分方程才能表达。例如 U 形压力计, 当压力变化时, U 形管内的液柱受到三种力的综合作用: 即与质量因素相关的惯性力 $m \frac{d^2 h}{dt^2}$, 介质在管内移动的摩擦阻力 $\xi \frac{dh}{dt}$, 以及液柱平衡压力作用的弹性力 βh , 使液位 h 发生变化, 其动态过程应用二阶微分方程表示

$$m \frac{d^2 h}{dt^2} + \xi \frac{dh}{dt} + \beta h = f \quad (1-8)$$

令 $\frac{m}{\beta} = T_1$, $\frac{\xi}{\beta} = T_2$, $\frac{1}{\beta} = K$, 则上式可表示为

$$(T_1 s^2 + T_2 s + 1) h = K f$$

写成传递函数形式, 则

$$W(s) = \frac{H(s)}{F(s)} = \frac{K}{T_1 s^2 + T_2 s + 1}$$

令 $\zeta = \frac{\xi}{2\sqrt{m\beta}}$, $\omega_n = \sqrt{\frac{\beta}{m}}$, 则传递函数可表示为

$$W(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1-9)$$

式中 ω_n ——系统的固有频率;

ζ ——系统的阻尼系数。

上式表明二阶系统的响应快慢, 决定于阻尼系数 ζ , 并与固有频率 ω_n 有关。当 ω_n 一定时, 系统的阻尼不同, 响应曲线如图 1-6 所示。最基本的情况有三: 一是 $\zeta = 1$ 时, 处于临界阻尼状态, 输出会平稳达到稳定值, 显然平衡过程较慢; 二是 $\zeta < 1$ 时, 为欠阻尼状态, 输出会产生振

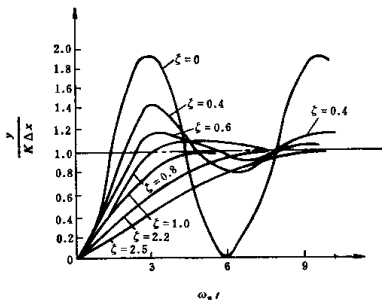


图1-6 二阶响应曲线

荡, 曲线衰减程度决定于 ζ 的大小; 三是 $\zeta > 1$, 为过阻尼状态, 输出不会出现振荡, 但达到稳定值的时间较长。可见, 阻尼过小或过大都不适宜, 一般取 $\zeta = 0.6 \sim 0.8$, 输出只是波动一两次就稳定下来, 这是比较适宜的。

固有频率 ω_n 越高, 输出响应速度愈快, 相反则输出响应速度愈慢, 到达稳定时间长。

弹性压力传感器与动圈表等均具有二阶响应特性。二阶响应曲线除稳定时间快慢外, 还应考虑输出响应的上升时间、动态偏差与速度比等, 这将在第四章中介绍。

§ 1-3 仪表的测量误差

一、一般概念

测量是指应用一定的工具或仪器, 去查明某一试验参量在某一时刻的大小, 并显示出该参量的瞬时值或连续变化的值。人们不能指望此测量值绝对正确, 原因是无论测量工具或仪表本身都存在不足, 测量方法也有缺陷, 因而测量值与实际值必然存在偏差, 这个差值称为测量误差。我们只能尽力将误差减到最小或减到可以接受的程度。本节只介绍基本误差及误差评定, 至于误差的综合与分配以及误差的传递, 将结合温度与流量测量分别介绍。

1. 绝对误差

测量值 z 与真实值 M 之差的绝对值 r 为

$$r = M - z \quad (1-10)$$

当绝对值 r 用测量单位表示时称为绝对误差。实际上真实值是得不到的, 所用工具或仪器的指示值, 是以某种标准量具或标准仪表进行比较而得到的, 这种比较本身虽然也存在误差, 人们只好认为工具或仪表的示值加上已给出的修正值为真实值。

2. 相对误差

绝对值 r 与测量值 z 或真实值 M 之比称为相对误差 r_r ,

$$r_r = \frac{r}{z} \times 100\% \quad (1-11)$$

或

$$r_r = \frac{r}{M} \times 100\%$$

既然真实值难以得到, 要衡量测量值的真实性只能用一些比较性的概念。

3. 精密度与准确度

对某一参量进行同样的重复测量, 所得各测量值之间的接近程度差别愈小, 测量值密集, 则测量值的精密度高, 相反, 测量值分散则精密度低。由此可见, 精密度具有较大的随机性。

准确度是指测量值接近真实值的程度, 它比较有规律性。

准确度高, 不一定精密度高, 而精密度高可能准确度也高。因为多次重复测量值很相近, 但可能与真实值相差很大。譬如打靶, 当“精密地”打在偏靶的某一方, 中弹密集, 但记录环数却很低, 又如准确打在靶心附近, 虽然分散在靶心周围, 但记录环数很高, 即精密度与准确度均较高。反之, 如果分散并离靶心较远, 则精密度与准确度两者均低。

4. 仪表精度与精度等级

仪表精度是指仪表的指示值与真实值接近的程度。精度等级则是仪表的基本误差, 一般

以仪表的示值范围的百分数表示,例如仪表的基本误差为最大值的 $\pm 0.5\%$ 或 $\pm 1\%$,则仪表的精度等级分别是0.5级或1.0级,依此类推。仪表的基本误差是仪表在规定的工作条件如环境温度、湿度、电源电压与频率符合规定的情况下校准仪表所具有的误差。

二、误差的来源与分类

归纳起来可分为三类,其相互关系与来源如图1-7所示。

1. 系统误差

由测量工具和仪表不准确或其量值不正确引起的,其变化有规律,如电源电压波动或频率不符,仪表零点未调整好,环境温度或湿度有变化,接触电阻改变等,主要影响仪表的准确度。这些误差可以通过定期校正仪表或采用不同测试方案加以避免或消除。

2. 疏失误差

仪器或工具使用不正确,读数错误或测试方案错误,甚至使用人员技术水平差等原因均会造成疏失误差。这种误差是不能接受的,当然也是不允许的。

3. 偶然误差

这是由种种难以预料的因素引起的,具有随机性,故也称为随机误差,主要影响仪表或工具的精密度和精度。可以通过大量反复进行测试来减小。在相当多的情况下,这种误差服从概率统计规律,所谓分析和处理误差都是指偶然误差而言。

对于一组测量数据是否符合要求,首先要消除系统误差,剔除疏失误差,然后按偶然误差进行统计分析,才能对它进行数据处理。

三、偶然误差的表示方法

1. 算术平均值

由于真实值是无法测到的,一般以算术平均值代之,只要测量次数足够多,各次测量值 z_i 的算术平均值 z_0 为

$$z_0 = \frac{z_1 + z_2 + \cdots + z_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n} = \frac{\Sigma z_i}{n} \quad (1-12)$$

为简明起见,以下均以 Σ 代替 $\sum_{i=1}^n$ 。

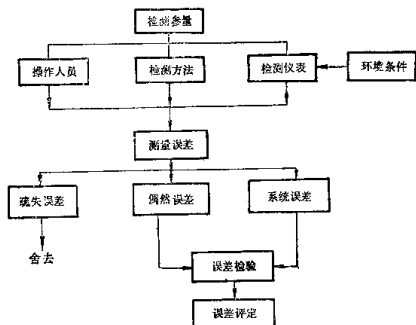


图1-7 误差来源与类别

显然, 当 $n \rightarrow \infty$ 时, 随着测量次数 n 的增多误差减小很慢, 一般情况下测量 10~20 次就行了。各次测量值与算术平均值之差称为残余误差, 简称残差或余差 m_i ,

$$m_i = z_i - \bar{z}_0 \quad (1-13)$$

残差有正有负, 其代数和为零, 即 $\sum m_i = 0$ 。

算术平均值是真值的期望值, 由于测量次数有限, 必然存在误差, 以残差表示的算术平均误差 S 为

$$S = \frac{\sum |m_i|}{\sqrt{n(n-1)}} \quad (1-14)$$

也可简单地表示为

$$S = \frac{\sum |m_i|}{n} \quad (1-15)$$

2. 偶然误差的概率分布

偶然误差虽然具有随机性, 从统计分析表明, 误差出现的几率服从正态分布规律, 即误差出现的次数 y 可用下式表示

$$y = f(R) = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 R^2} \quad (1-16)$$

式中 h ——测量的精度指数, $h = \frac{1}{\sigma \sqrt{2}}$;

R ——误差。

偶然误差具有以下特性:

- (1) 对称性 绝对值相等而符号相反的误差出现次数相等;
- (2) 单峰性 绝对值小的误差比绝对值大的误差出现次数多;
- (3) 有界性 在一定条件下, 偶然误差的绝对值被限制在一定范围内;
- (4) 抵偿性 随着测量次数的增多, 偶然误差的算术平均值趋于零。

从这些特性看来, 正负误差是互相抵消的, 误差 R 从 $-\infty$ 到 $+\infty$ 范围内都出现, 无论误差有多大, 通常认为是在 $-\infty$ 与 $+\infty$ 区间内积分面积为 100% 的积分值

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} f(R) dR = \frac{h}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-h^2 R^2} dR = 1 \quad (1-17)$$

P 称为函数 $y = f(R)$ 的概率积分。如误差只出现在某一区域如 $\pm R$ 内, 则 $y = f(R)$ 的曲线所包围的面积就是 P 如图 1-8 所示。误差的分布是对称的称为正态分布或高斯分布, 这是一般的规律。误差分布并非都是对称的, 如 χ^2 分布与指数分布都不是对称的, 应另作处理, 这里从略。以下的分析均属于正态分布。

3. 标准误差

每次测量值 z_i 绝对值的均方根称为标准误差

σ ;

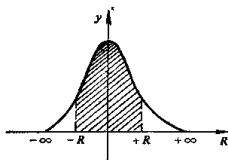


图1-8 正态分布规律

$$\sigma = \sqrt{\frac{z_1^2 + z_2^2 + \dots + z_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum z_i^2}{n}} \quad (1-18)$$

由于真实值并不知道,通常用测量值 z_i 与测量值的算术平均值 z_0 之差,即以残差 m_i 进行计算,按算术平均的标准误差 σ_z 为

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{m_1^2 + m_2^2 + \dots + m_n^2}{(n-1)}} = \sqrt{\frac{\Sigma m_i^2}{(n-1)}} \quad (1-19)$$

算术平均误差 S 与标准误差 σ 的关系为

$$S = \left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} \right) \sigma = 0.7979 \sigma \quad (1-20)$$

通过概率积分,式(1-18)中的测量精度 h 与 σ 的关系为

$$h = \frac{1}{\sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma} \quad (1-21)$$

如果标准误差的数值小,表明测量值中的小误差占优势,各次测量值与算术平均值的分散性小,测量的可靠性大,说明测量精度高。相反,如 σ 数值大,则测量精度低。

4. 极限误差

这是指可能出现的最大误差。由概率积分值 P 可知:

$R = \pm 0.3 \sigma$	$P = 0.235823$
$R = \pm 0.6745 \sigma$	$P = 0.5$
$R = \pm \sigma$	$P = 0.682689$
$R = \pm 2 \sigma$	$P = 0.9545$
$R = \pm 3 \sigma$	$P = 0.9973002$
$R = \pm 4 \sigma$	$P = 0.9999367$
$R = \pm 5 \sigma$	$P = 0.9999994$

概率积分值 P 表示误差 $R = \pm c\sigma$ 的各种误差出现的次数与误差在 $R = \pm \infty$ 区间内全部出现次数的百分数。 $R \leq \pm \sigma$ 的误差出现 31.7%, $R \leq \pm 2\sigma$ 的误差出现 4.5%, $R \leq \pm 3\sigma$ 的误差出现 0.27%。因此一般规定极限误差 δ 为

$$\delta \geq \pm 3\sigma \quad \text{或} \quad \sigma \geq \pm 2\sigma$$

实践证明,测量有 95% 的可靠性已足够,即可取 $\delta \geq \pm 2\sigma$ 。为稳妥起见,一般仍取 $\delta \geq 3\sigma$ 。

极限误差所考虑的是置信水平 $(1 - \alpha) = p$ 或 $\alpha = 1 - p$, 置信水平也称置信概率或置信度, α 称为显著性水平或显著度。当 $\delta = \pm 2\sigma$ 时, $\alpha = 1 - p = 1 - 0.95 = 0.05$, 当 $\delta = \pm 3\sigma$ 时, $\alpha = 1 - 0.99 = 0.01$ 。 $\pm c\sigma$ 为正态分布的不确定度,一般称为置信区间, c 称为置信系数,也有称为置信因子的。

按算术平均标准误差 σ , 计算极限误差, 也按 $\pm 3\sigma$, 或 $\pm 2\sigma$ 计; 按算术平均误差 S 计算极限误差则应取 $\pm 4S$ 。

5. 测量次数少的偶然误差

测量次数较小, 误差出现的概率就不一定是正态分布, 标准误差可表示为

$$\sigma = K \sigma_s \sqrt{\frac{\Sigma m_i^2}{n-1}} \quad (1-22)$$

系数 K , 随测量次数增多而减小有如下关系: 当 $n \geq 30$ 时, 误差在 1% 以内, 标准误差 σ 可以不必修正。当 $n = 10$ 时, 误差值为 3%, 因此一般认为测量次数不宜少于 10 次。

n	2	3	4	5	6	7	8	9
K_v	1.2533	1.1284	1.0854	1.0638	1.0509	1.0424	1.0362	1.0317
n	10	15	20	25	30	40	50	100
K_v	1.0281	1.0180	1.0132	1.0105	1.0087	1.0064	1.0051	1.0025

四、不等精度测量的误差——加权算术平均值及其误差

前面讲的都是采用同一仪表或工具以相同方法重复测量某一参量值，这是一种等精度测量，并认为各次测量值具有同等的可靠性。当使用不同仪表或采用不同测试方法对某一参量进行重复测量时，这是一种不等精度测量，所测量的数值不一定都可靠，其误差也不能同等看待。显然精度高的测量值具有较大的可靠性，这种可靠性的大小称为“权”，而“权”的大小也是相对的。将各组测量值进行比较，精度高的取“权”大，精度低的取“权”小。在 m 组不等精度测量结果中，任一误差平方的倒数的比值表示“权”，并取误差大的为分母，其“权”为 1，即

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{1/\sigma_1^2}{1/\sigma_2^2} = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2} \quad (p_2 = 1, \sigma_1 < \sigma_2) \quad (1-23)$$

也可用各组测量列的测量次数 n 的比值表示，并以测量次数少的为分母，其“权”为 1，即

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (n_1 > n_2, p_2 = 1) \quad (1-24)$$

m 组测量值各自的算术平均值 $z_{01}, z_{02}, \dots, z_{0m}$ ，相应的“权”分别为 $p_1, p_2, \dots, p_m$ ，则加权算术平均值 z'_0 为

$$z'_0 = \frac{z_{01}p_1 + z_{02}p_2 + \dots + z_{0m}p_m}{p_1 + p_2 + \dots + p_m} = \frac{\sum z_{0i}p_i}{\sum p_i} \quad (1-25)$$

加权算术平均值的标准误差 $\sigma_{z'}$ 为

$$\sigma_{z'} = \frac{\sum p_i m_i'}{(n-1) \sum p_i} \quad (1-26)$$

式中 m_i' 为各次测量的算术平均值 z_{0i} 与加“权”算术平均值 z'_0 的差值。

五、误差检验

对一组测量值进行误差分析，在于研究误差产生的原因，寻求消除或者减少产生误差的途径，以提高测量的准确度，计算测量误差的大小及其变化规律，修正测量结果并对测量值的可信性作出判断。首先要剔除疏失误差并舍去可疑值，检验系统误差，然后进行分析计算并评定测量值。

1. 舍去可疑值

凡是明显不符合规律、特大或特小的测量值被认为是疏失造成的均应舍去。按常用的方法即当 $\delta > 3\sigma$ 时应当舍去，也可根据残差 m_i 值，当 $m_i > 4S$ 时也应舍去。

对可疑值的检验，还有其它一些方法和准则，这里从略。

2. 检查系统误差

消除系统误差，才能保证和提高测量精度。但发现和消除系统误差并不是简单的问题，这里只能介绍一些常用的简便方法。

几个测量值，残差的正号与负号个数的差值 $|S|$ ，如果 $|S| \geq 2\sqrt{n}$ 就可能存在系统误