

XIANDAIGONGCHENGJIANCEJIYIBIAO

现代工程

检测及仪表

吴九辅◎主 编
汤 楠◎副主编

Detect
Meter

石油工业出版社

现代工程检测及仪表

吴九辅 主 编

汤 楠 副主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书全面系统地讲述了温度、压力、流量（包括多相流在内）、物位、物性、成分量、机械量、电流量等工程量的现代检测原理、方法及检测仪表；对智能检测仪表与现场总线FCS的配套连接，测量精度与误差，某些量值传递与标定，检测系统及仪表的抗干扰、防爆等问题也做了较为详细的介绍。本书集中反映了现代工程检测的最新技术成就，理论性、工程性和实用性强，可供从事工程检测、信控、自动化、机电等行业的科技人员使用，也可作为高等学校本科高年级及相关专业研究生的教学用书。

图书在版编目（CIP）数据

现代工程检测及仪表/吴九辅主编.

北京：石油工业出版社，2004.8

ISBN 7-5021-4434-X

I. 现…

II. 吴…

III. ①工程测量

②工程测量—检测仪表

IV. TB22

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2003）第 096217 号

石油工业出版社出版

（100011 北京安定门外安华里二区一号楼）

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 31.5 印张 803 千字 印 1—2000

2004 年 8 月北京第 1 版 2004 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-4434-X/TE·3108

定价：39.80 元

前 言

当今是信息化时代,如何获取信息,使用什么样的技术方法和手段处理、传递信息、享用信息,就成为当前社会、科技界一项重要课题。《现代工程检测及仪表》就是为了适应和满足科学技术部门、工程部门,包括石油、化工、电力、矿冶、轻工、交通(海陆空)、国防军事等领域的工程检测要求而编写的一部书,通过工程检测获取信息,从而知道对象状态,以便实现控制自动化,达到高效、优质、优化。本书比较全面地讲述了温度、压力、流量、物位、物性、机械量、成分量、电工量等各种工程量的基本概念、检测原理、技术方法及检测仪表;介绍了量值传递、标定方法;还介绍了多相流、核磁共振、激光光纤、智能化检测仪表等。

本书理论性、工程性、实践性、实用性很强,书中内容融合了我们近些年来科研项目、工程实践、教学教材积累的成果和体会。

全书共分12章,第一章讲述了测量及误差理论,第二至第九章分别论述的是各种检测工程量,最后三章分别讲述了智能仪表与FCS现场总线的配接、仪表与系统抗干扰和防爆安全的内容。

本书由吴九辅教授任主编、汤楠教授任副主编。第一章由霍爱清编写,第二章由付清锋、霍爱清编写,第三章由汤楠编写,第四章、第五章、第十章由吴九辅、汤楠编写,第六章、第七章、第八章由吴九辅、霍爱清、付启刚、胡小英编写,第九章由张奇志、胡小英、吴九辅编写,第十一章由吴九辅、左延祺编写,第十二章由吴九辅编写。

外文资料翻译、整理、校图由左延祺老师完成。

本书选取了国内外一些经典型的文献内容,在此对原文作者致以衷心的感谢。

吴应龙教授、李福刚教授对本书进行了校审,在此致以诚挚的谢意。

由于作者知识水平有限,在书中的观点、论述等方面肯定存在不少缺点和错误,敬请各位专家和读者指正,以便再次修改完善。

编者
2003年10月

目 录

第一章 检测技术基础	(1)
第一节 测量误差.....	(1)
第二节 测量系统的基本特性.....	(6)
第二章 温度检测	(14)
第一节 温度检测的基本知识	(14)
第二节 热力学温标和国际实用温标	(15)
第三节 温标的演变及其发展	(17)
第四节 温度测量方法及测温仪表的分类	(19)
第五节 热电偶温度计	(20)
第六节 热电阻温度计	(27)
第七节 热电偶和热电阻测温时的误差	(35)
第八节 辐射测温法	(42)
第九节 温度检测仪表的选用	(46)
第十节 温度计量的量值传递系统及标定	(48)
第十一节 热电阻、热电偶常用数据及分度表	(50)
第三章 压力检测	(83)
第一节 压力检测的基本知识	(83)
第二节 压力仪表的分类	(84)
第三节 液柱式压力计	(87)
第四节 弹性式压力计	(89)
第五节 应变式压力计	(91)
第六节 霍尔式压力计	(97)
第七节 振弦式压力计.....	(101)
第八节 压电式压力计.....	(104)
第九节 真空测量.....	(110)
第十节 压力检测仪表的选用.....	(115)
第十一节 压力标准的传递及标准压力计.....	(117)
第四章 流量检测	(123)
第一节 流量测量的基本知识.....	(123)
第二节 容积式流量计.....	(126)
第三节 节流式差压流量计.....	(129)
第四节 转子流量计.....	(137)
第五节 靶式流量计.....	(140)
第六节 电磁流量计.....	(144)
第七节 蜗轮流量计.....	(151)

第八节	超声波流量计	(156)
第九节	漩涡式流量计	(163)
第十节	质量式流量计	(166)
第十一节	科里奥利质量流量计	(170)
第十二节	特殊流量测量和其他流量计	(174)
第十三节	多相流的检测	(180)
第十四节	流量计的选型	(203)
第十五节	流量标准传递及其装置	(204)
第十六节	预组装系统	(210)
第五章	物位检测	(220)
第一节	物位测量概述	(220)
第二节	直读式液位计	(221)
第三节	浮力式液位计	(223)
第四节	压力式液位计	(226)
第五节	电参量式物位计	(228)
第六节	超声波液位计	(236)
第七节	放射性物位计	(245)
第八节	其他料位、液位及界面检测仪表	(249)
第九节	物位检测仪表的选用及标定	(270)
第六章	成分分析及仪表	(273)
第一节	概述	(273)
第二节	热导式气体分析器	(274)
第三节	热磁式氧气分析器	(278)
第四节	红外线气体分析器	(281)
第五节	气相色谱分析仪	(287)
第六节	可燃性气体检测及仪表	(297)
第七节	原油含水分析仪	(306)
第七章	物性检测	(311)
第一节	密度检测及仪表	(311)
第二节	粘度检测及仪表	(320)
第三节	湿度检测及仪表	(324)
第四节	酸碱度检测及 pH 计	(336)
第五节	电导检测	(341)
第八章	机械量的检测及仪表	(348)
第一节	机械量的检测	(348)
第二节	厚度测量及仪表	(350)
第三节	速度、转速及加速度测量	(351)
第四节	力、力矩、机械功率的测量	(369)
第五节	机械振动测量及仪表	(381)
第九章	电工量检测及仪表	(406)

第一节	电工量检测·····	(406)
第二节	电流互感器和电压互感器·····	(414)
第十章	智能检测仪表与 HART 协议及现场总线 ·····	(425)
第一节	智能检测仪表·····	(425)
第二节	智能压力变送器·····	(429)
第三节	HART 协议与现场总线 ·····	(431)
第十一章	噪声干扰及对策 ·····	(446)
第一节	噪声与干扰·····	(446)
第二节	噪声的耦合方式·····	(450)
第三节	抑制电磁干扰的基本方法和措施·····	(453)
第四节	抗干扰技术·····	(464)
第十二章	检测工程的防爆 ·····	(475)
第一节	检测工程防爆概述·····	(475)
第二节	仪表电气设备的防爆·····	(477)
第三节	防爆仪表选型及应用·····	(481)
附录 ·····		(485)
主要参考文献 ·····		(496)

第一章 检测技术基础

第一节 测量误差

一、测量误差概述

1. 测量与误差

测量是人们借助于专门设备,通过实验手段对客观事物的量获取数值的认识过程。它的实质是将未知参量 x 与作为该参量测量单位的已知量 x_k 进行比较,获取 x 的量为 x_k 的 α 倍的信息。因此测量可用下式表述:

$$x = \alpha x_k$$

或

$$\alpha = \frac{x}{x_k}$$

任何一个被测参量,在一定时间空间条件下,总有一个客观存在的量值,称为真值。测量的目的就是获取此真值。

通常,要完成对某参量的测定,必须具备三个条件,即测量设备、测量方法和测量人员。由于测量设备不可能绝对精密,测量方法不可能绝对精确,测量人员也不可能做到绝对精细,因而人们在测量中所获得的某参量的值与其客观真值并不一致。这种不一致性在数值上的表现称为误差。

测量误差的客观存在,使得人们难以获得某事物量的真值,其大小直接关系到测量值与真值的逼近程度。因此,必须对测量误差进行研究。

研究测量误差,就是研究其产生、传递和特点,以使人们能合理地设计和选择测量设备与测量方法,正确地进行测量,尽可能减少误差,从而获得最佳测量结果。

2. 误差的产生

产生误差的主要因素有四类。

(1) 设备误差

设备误差是指测量过程中采用的量具及测试仪器本身性能不完善所产生的测量误差。其中首先是标准器的误差。而仪器设计制造本身不完善,也会产生误差。某些仪器在设计时就存在理论误差。如光线示波器的输出与输入,其记录显示结果与被测量之间的线性关系,是在线图偏转角 θ 很小,将 $\cos\theta$ 视作 1 的情况下得到的,而实际测量时并非如此。此外,仪器本身的特性参数不稳定,例如测量仪器中的电阻、电容和电池等的老化,晶体振荡器频率的长期漂移和短时波动,机械零件的磨损等等,都会产生测量误差。

(2) 方法误差

方法误差是指测量方法或计算方法不完善所产生的测量误差。例如,欲测量化纤织物定型时的表面温度,由于各种因素所限,常采用测量热定型装置内空气的温度来表示织物表面温度。显然,两者之间存在差异。又如,在间接测量中,需通过测量与被测量有关的其他量,换算成被测量。换算中的近似,也会产生误差。

(3) 人员误差

人员误差是指测量人员本身因素所带来的测量误差。测量人员由于感觉器官的功能不同、固有习惯不同、测量知识与技能不同以及责任心不同等等，对同一被测量，会得出不同的测量结果。例如，有的人习惯于斜视，对指针式仪器读出的结果就偏大或偏小。甚至同一测量者在不同情况下，因情绪变化，也会使测量结果产生不同的误差。

(4) 环境误差

环境误差是指测量环境的条件不满足要求或者发生变化，使测量设备或被测量发生不应有的变化而产生的测量误差。影响测量误差的环境条件通常有温度、湿度、震动、光照和电磁场等等。

3. 误差的表示

测量误差通常用以下几种方法来表示。

(1) 绝对误差

1) 绝对误差的定义：某参量的测量值 x 与该参量的真值 x_0 之间的差值 Δx 为绝对误差，即

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-1)$$

真值 x_0 是某参量本身所具有的真实大小。它客观存在，却无法确知。在实际测量中，常以更高一级的标准仪对某参量的示值，视为该参量的真值，通常称为约定真值。实际上，两者无需区分。

由式 (1-1) 可知，如已知绝对误差 Δx ，则某参量的真值为

$$x_0 = x - \Delta x \quad (1-2)$$

令
$$c = -\Delta x \quad (1-3)$$

则
$$x_0 = x + c \quad (1-4)$$

式中 c 称为修正值。式 (1-4) 表明，含有误差的测量值 x 加上修正值 c 后，即可消除误差的影响。

2) 绝对误差的特点：

- ①绝对误差是有量纲的，它与被测参量具有同一量纲，其数值大小与所取的单位有关；
- ②能反映误差的大小与方向；
- ③当被测量大小不同时，不能确切地反映测量的精确程度。

(2) 相对误差

1) 相对误差的定义：绝对误差 Δx 与被测参量的真值 x_0 之比称为相对误差 γ ，常用百分数表示，即

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

当绝对误差 Δx 很小时，相对误差 γ 也可用绝对误差 Δx 与测量值 x 之比表示，即

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1-6)$$

2) 相对误差的特点：

- ①相对误差是一个比值，其大小与被测量所取的单位无关；
- ②能反映误差的大小和方向；
- ③能够确切地反映出测量的精确程度。

(3) 引用误差

1) 引用误差的定义：绝对误差 Δx 与仪表测量范围的满度值 x_n 之比称为引用误差或满度相对误差 γ_n ，常用百分数表示，即

$$\gamma_n = \frac{\Delta x}{x_n} \times 100\% \quad (1-7)$$

2) 引用误差的特点：

① 引用误差是一个比值，其大小与被测量所取单位无关；

② 引用误差只与仪器某一量程的满度值（即测量上限）有关，而与被测量的大小无关。

引用误差常用在多挡和连续分度的仪器中。这类仪器在其可测范围内的各分度点上的相对误差随被测量而变化。

通常以某仪表最大的引用误差 $\gamma_{\max}$ 来确定该仪表的精确度等级，我国仪表划分为以下六级：0.1 级、0.2 级、0.5 级、1.0 级、1.5 级、2.5 级。

由式 (1-7) 可知，当绝对误差 Δx 取最大值 $\Delta x_{\max}$ 时，引用误差亦为该仪表的最大引用误差 $\gamma_{\max}$ ，故可得

$$\Delta x_{\max} = \frac{\gamma_{\max} x_n}{100} \quad (1-8)$$

将此绝对误差与被测量的测定值（即仪表的示值） x 之比用百分数表示后，便得到用该仪表进行测量时所可能有的最大相对误差，即

$$\gamma_{\max} = \frac{\Delta x_{\max}}{x} \times 100\% = \gamma_{\max} \frac{x_n}{x} \quad (1-9)$$

综上所述，若一台合格仪表的精度等级为 S 级，则仅说明该仪表的最大引用误差不会超过 $S\%$ ，即 $\gamma_{\max} \leq S\%$ ，而不能认为该仪表在全量程内任意分度点上的示值误差都不超过 $S\%$ 。因为对于量程为 $0 \sim x_n$ 的仪表，测量点 x 处的相对误差为

$$\gamma \leq \frac{x_n}{x} \cdot S\% \quad (1-10)$$

它不仅与仪表的精度等级 S 有关，而且还和仪表测量范围的满度值 x_n 与仪表的示值 x 之比有关。当仪表的示值较满度值为甚小时，相对误差将很大。特别是在使用电工和热工仪表时，应注意选用测量值与仪表满度值接近的量程。一般测量值应不低于仪表量程的 $2/3$ 。

[例 1-1] 某温度计的最大引用误差为 $\pm 1.0\%$ ，刻度由 $-50 \sim +150^\circ\text{C}$ ，试求这个温度计的最大绝对误差以及用它测量 -40°C 和 $+140^\circ\text{C}$ 时的最大绝对误差和最大相对误差。

解 由题意知，该表的测量范围为

$$150^\circ\text{C} - (-50^\circ\text{C}) = 200^\circ\text{C}$$

其最大引用误差为 $\pm 1.0\%$ 。由式 (1-8) 知，这个温度计的最大绝对误差及用该表测量 -40°C 和 $+140^\circ\text{C}$ 时最大绝对误差均为

$$\Delta x_{\max} = \frac{\pm 1.0 \times 200^\circ\text{C}}{100} = \pm 2.0^\circ\text{C}$$

由式 (1-9) 知，用该仪表测量 -40°C 时，最大相对误差为

$$\gamma_{-40} = \pm 1.0 \times \frac{200}{-40 - (-50)} \times 100\% = \pm 20\%$$

测量 $+140^\circ\text{C}$ 时，最大相对误差为

$$\gamma_{140} = \pm 1.0 \times \frac{200}{140 - (-50)} \times 100\% = \pm 1.1\%$$

由此可见,测量值接近仪表的满度时,相对误差小。否则,测量的相对误差将很大,以致超过允许的误差范围。

[例 1-2] 某待测电流约为 200mA,现有 0.5 级 0~1A 和 1.0 级 0~250mA 的电流表各一个,问应选用哪一个?

解 用 0.5 级 0~1A 的电流表测量时,最大相对误差为

$$\gamma_{1\max} = \pm 0.5 \times \frac{1000}{200} \times 100\% = \pm 2.5\%$$

用 1.0 级 0~250mA 的电流表测量时,最大相对误差为

$$\gamma_{2\max} = \pm 1.0 \times \frac{250}{200} \times 100\% = \pm 1.25\%$$

显然,应当选用后者。

此例说明,选用仪表时,除考虑仪表的精度等级外,还必须根据被测量的大小,选择适当的量程。

4. 误差的种类

根据误差产生的条件和出现的规律,可分为如下五类。

(1) 基本误差

基本误差是指仪器在正常工作条件下产生的最大相对误差。所谓正常工作条件是指外部因素,如温度、湿度、大气压力、供电电源等均在所容许的使用范围内。这些条件一般由国家标准或企业标准规定。

仪表的精度等级均由其基本误差确定。例如某一仪表的基本误差为 $\pm 1.5\%$,则该仪表的精确度等级就是 1.5,或称 1.5 级的仪表。

(2) 附加误差

附加误差是指当仪器不在额定条件下工作,例如因周围温度、电源电压偏高或偏低而引起的额外误差,分别称为温度附加误差、电源电压附加误差,等等。使用时按当时条件分别叠加到基本误差上。

(3) 系统误差

在相同条件下,多次测量某一参数,其误差值恒定不变或按某种规律变化,且可以用公式或具有某种规律的曲线来描述的误差,称为系统误差。例如游标卡尺的测量头磨损,会使测量值始终偏小,存在着一个负的数值不变的误差。又如标准电池的电动势、标准电阻的阻值等随环境温度而变,使测量产生误差,可用相应的公式表述。

系统误差的大小表明测量值偏离真值的程度。在误差理论中,常用“准确度”一词来表征。它可以通过引入修正值或检查并消除产生的原因以及采取特殊的方法来削弱。

(4) 随机误差

在相同条件下,多次测量某参数,其误差不相同,不能确定其变化规律,但从其整体看,服从统计规律的误差称为随机误差。

随机误差主要由测量仪器的元器件性能不稳定、测量环境偶然变化,而人们尚未足够认识和掌握其变化规律所造成,此类误差难以修正。

在对某一被测量的多次测量中,随机误差很容易发现,它会以测量结果的某种分散性表现出来。

随机误差的大小,表明了测量结果的分散程度。在误差理论中,常用“精密度”一词来

表征。由于它服从统计规律，故可用概率评估测量结果的可信赖程度。

若测量结果的随机误差及系统误差都很小，则表明测量既精密又准确，故常用“精确度”一词来表征两者总的大小。

(5) 粗大误差

在相同条件下，多次测量某参数，测量结果中出现的某次或某几次明显偏离其真值的测量值所对应的误差称为粗大误差。这种误差主要是由于测量人员的粗心大意，如对仪器操作、读数、记录等出现差错而引起的。粗大误差显著地歪曲了测量值，必须剔除。

二、系统误差的消除

1. 系统误差的特点和种类

系统误差不同于随机误差，它以固定的规律影响测量数据。在一定的测量条件下，通过对所用测量仪器、测量方法和测量环境等仔细分析与实验即可了解系统误差产生的原因及其变化规律。

根据系统误差在测量过程中所具有的不同特性，通常将它分为定值系统误差和变值系统误差两类。

(1) 定值系统误差

在整个测量过程中，误差的大小和方向均始终不变，即对每一个测量数据的影响均相同，此种误差就是定值系统误差，最为常见。

例如对某参量进行多次重复测量时，存在定值系统误差 θ_0 ，即这一组测量数据 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 中都含有 θ_0 。若把定值系统误差 θ_0 除去，则测量数据应为 $x'_1 = x_1 - \theta_0, x'_2 = x_2 - \theta_0, \dots, x'_n = x_n - \theta_0$ ，其算术平均值为

$$\bar{x}' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x'_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \theta_0) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \frac{1}{n} n \theta_0 = \bar{x} - \theta_0 \quad (1-11)$$

(2) 变值系统误差

在整个测量过程中，误差的大小和方向随测试条件按确定的函数规律而变，即对每一个测量数据的影响都不同，但不是随机的，是有规律的且可用函数描述。此类误差属于变值系统误差。

变值系统误差，按其变化规律又可分为线性变化系统误差、周期性变化的系统误差和按复杂规律变化的系统误差等。

例如一组含有变值系统误差的测量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，若除去系统误差，测量数据应为 $x'_1 = x_1 - \theta_1, x'_2 = x_2 - \theta_2, \dots, x'_n = x_n - \theta_n$ ，其算术平均值为

$$\bar{x}' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x'_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \theta_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i = \bar{x} - \bar{\theta} \quad (1-12)$$

2. 系统误差的发现

定值系统误差不影响随机误差的剩余误差（即残差 $\bar{x}_i - \bar{x}$ ）及分布规律，只影响其算术平均值，而变值系统误差总按确定的规律变化，因此无论是定值还是变值的系统误差，用在相同条件下重复测量的办法，都是无法发现的。

由于系统误差来源于测量条件，即测量仪器、测量工具、测量人员、测量方法和测量环境等，因此改变测量条件是发现系统误差的有效措施。如果某测量条件存在时，一组测量数据的剩余误差基本上保持相同符号，而该条件不存在时，剩余误差改变符号，就说明此测量数据中含有系统误差。

如果用原仪器测量之后，又换用更标准的仪器去测同一被测量，所得结果出现有规律的偏差，说明原仪器存在系统误差。

如果将一组测量数据排列起来，其剩余误差有规则地向一个方向变化。或者将剩余误差按测量顺序分成两部分，若前一部分剩余误差之和与后一部分剩余误差之和的差值显著不为零，说明该测量中含有线性变化的系统误差（后者即所谓马利科夫判别准则）。

如果发现剩余误差的符号有规律地交替变化，则说明测量中含有周期性变化的系统误差。

检查和发现系统误差的方法不限于此，需要根据情况具体分析，仔细观察研究，不断积累经验。

3. 系统误差的削弱与消除

在不同测量条件下，系统误差出现的规律及其大小都各不相同，因此很难给出一个普遍适用的方法来消除系统误差。一般常用的方法有两种。

（1）消除系统误差的根源

这是最基本的方法。测量之前应对全部的测量条件（设备、环境、方法等）进行仔细的检查、分析。凡是估计有可能产生系统误差的根源，都要尽力消除。例如，所用仪器设备的安放布局要规范、合理，检查仪器零位，正确调整与使用仪器，注意观察并排除环境场的干扰，合理选择基准等等。

（2）修正测量值

这是一种常用方法。它是对所用测量仪器设备事先进行检查，若发现仪器设备本身有系统误差，则给出校正值表或校正曲线、校正公式等，在用该仪器设备进行测量后，将测量值与修正值相加，就可消除由仪器设备不准造成的系统误差。例如，用某电流表测电流，示值为 8.60mA，查该表的校正曲线知其校正值为 -0.03mA ，则被测电流实际值为

$$8.60 + (-0.03) = 8.57 \text{ (mA)}$$

一般来说，测量所用的仪器设备应按规定定期送计量部门检定，或者用精确度等级更高的仪表进行比较，以便消除系统误差。

第二节 测量系统的基本特性

一、概述

一个完整的测量系统，由检测变换单元、信号处理单元和记录显示单元组成。如图 1-1 所示的加速度测量系统，被测加速度 a 经过加速度传感器变成电压信号 $\tilde{U}$ ，又经过测量电路放大处理，再送到指示器显示出来。

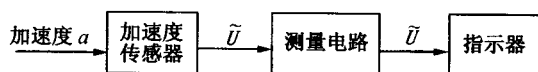


图 1-1 加速度测量系统

量系统中的任何一个单元，均有一定的滞后性，即被测量改变后，测量系统要经过一段时间才能反映其变化。因此，在进行测量时必须了解被测系统的基本特性。

在测量中，无论是整个测量系统，还是组成测量系统的各个环节，用来评价它们基本特性的参数指标都是一样的。因此，在讨论测量系统基本特性时所说的“系统”，既可视为一

由此可知，测量系统就是一个信号通道。一个理想的测量系统必须具有如实地传递被测信号的功能。只有这样，测量系统才能如实地反映被测信号。在一般情况下，测

个完整的测量系统的整体，也可视为测量系统中的任一个环节。

一般根据被测量在测量过程中的状态，测量系统的基本特性分为静态特性和动态特性。静态特性系指测量系统对静态输入量的响应。它所表示的是测量系统在测量不随时间变化的量时输出与输入的关系。

动态特性系指测量系统对动态输入量的响应。它表示的是测量系统在测量随时间变化的量时输出与输入的关系。

在研究中，通常将已知信号（常用的有直流信号、阶跃信号、脉冲信号、斜坡信号、正弦信号等）输入测量系统，通过对输出信号的分析，即可推断测量系统本身的特性。显然，若已知测量系统的基本特性，通过对输出信号的分析，也可推断其输入信号的情况。

二、测量系统的静态特性

测量系统的静态特性，常用下述指标评价。

1. 线性度

测量系统的静态特性曲线对参考直线的最大偏差 $|y_i - y'_i|_{\max}$ 与标称输出量 $y_{\max}$ 的百分比称为测量系统的线性度，如图 1-2 所示，又称为测量系统的非线性误差，即

$$e_f = \frac{|y_i - y'_i|_{\max}}{y_{\max}} \times 100(\%) \quad (1-13)$$

式中 e_f ——测量系统的线性度；

y_i ——测量系统中与输入量 x_i 对应的输出量；

y'_i ——与输入量 x_i 对应的参考直线上的点的量值；

$y_{\max}$ ——测量系统的标称输出量。

静态特性曲线是指在静态测量中，测量系统的输出量 y 与输入量 x 之间的关系曲线，又称标定曲线。一般可用代数多项式表示

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (1-14)$$

式中 y ——测量系统的输出量；

x ——测量系统的输入量；

$a_0, a_1, a_2, \cdots, a_n$ ——标定系数（或刻度因子）。

由式（1-14）可知，一般的静态特性曲线可视为在线性关系项 $(a_0 + a_1x)$ 的基础上叠加高次项输入分量。如果 x 的高次项为零，则静态特性方程变成

$$y = a_0 + a_1x$$

静态特性曲线就成为一条直线。式中 a_0 为零位输出。

设计一个测量系统时，必须使它在无输入信号时输出为零，即零位输出 $a_0 = 0$ 。这样，静态特性曲线就变成一条过原点的直线，即

$$y = a_1x \quad (1-15)$$

此时，非线性误差 $e_f = 0$ 。这是一种理想状态，此直线称为理论直线。实际上，测量系统的静态特性曲线一般不是直线，因此引入了线性度指标，即一个测量系统的静态特性曲线对一条指定的直线（参考直线）的吻合程度这一特性指标。对同一测出值，所取参考直线不同，其线性度也不同。

参考直线也称为拟合直线或理想直线。它的确定有多种标准。若把理论直线作为参考直

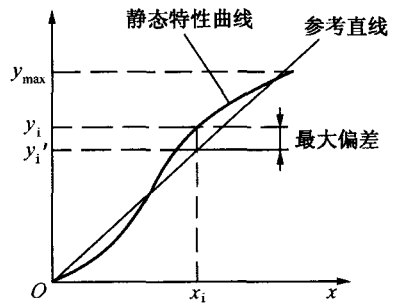


图 1-2 线性度示意图

线，这时的线性度称为理论线性度，如图 1-3 所示。若把端基直线（连接特性曲线上、下限值的直线）作为参考直线，此时的线性度称为端基线性度，如图 1-4 所示。精度较高的是最小二乘法线性度。

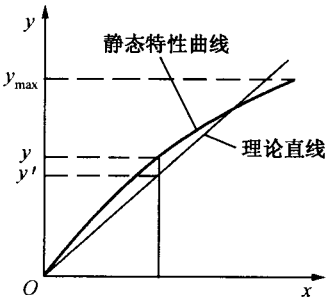


图 1-3 理论线性度

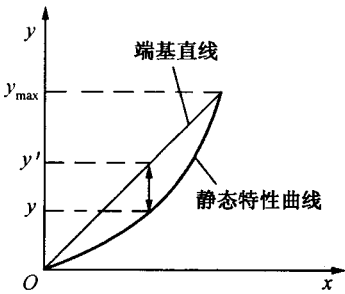


图 1-4 端基线性度

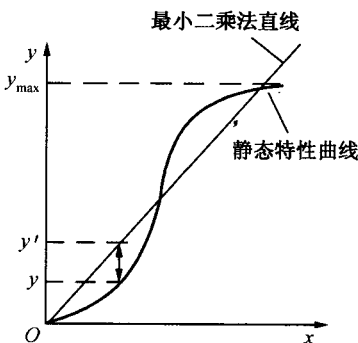


图 1-5 最小二乘法线性度

最小二乘法原理用于从一组等精度测量数据中决定最佳值或最可信赖值。该原理指明：在具有同一精密度的许多测量值中，最佳值是能够使各测量值的误差的平方和为最小的那个值。最小二乘法线性度就是把测量系统的静态特性曲线的最小二乘法直线作为参考直线的线性度，如图 1-5 所示。也就是说该直线与静态特性曲线的各点的总的偏差的平方和为最小。依据这样的吻合原则，使得这种线性度的拟合精度较高，也较常用。

2. 灵敏度

在稳态下，测量系统输出与输入两信号的变化量之比称为测量系统的灵敏度，用 K 表示，即

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\text{输出信号的变化量}}{\text{输入信号的变化量}} \tag{1-16}$$

由定义可知，灵敏度即静态特性曲线上相应点的斜率。若特性曲线是一条直线，各点斜率相等，则 K 为一常数，如图 1-6 所示。若静态特性曲线不是直线，则灵敏度将随被测量的大小而变，如图 1-7 所示。此时，灵敏度应表示为

$$K = \frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} \tag{1-17}$$

表示灵敏度的输入量和输出量必须用实际物理量单位。例如，某位移传感器位移 1mm 时输出变化 1mV，则其灵敏度 $K = 1\text{mV/mm}$ 。当测量系统的输出和输入同量纲时，常用“放大倍数”一词来代替灵敏度。例如，某电子测量仪器输入量变化 10mV 时，输出量变化 0.1V，则其放大倍数 $K = 10$ 。

在测量中，往往需要提高测量系统的灵敏度，但灵敏度越高，越容易受外界干扰，测量系统的稳定性越差，测量范围也就越窄。因此，不能单纯地追求高灵敏度。

3. 滞后差

测量中，对同一输入信号，正反行程（输入量由小逐渐增大和输入量由大逐渐减小）所对应的输出信号的差异称为滞后差，如图 1-8 所示，以满量程输出的百分数表示，即

$$e_i = \frac{|y_f - y_n|_{\max}}{y_{\max}} \times 100\% \tag{1-18}$$

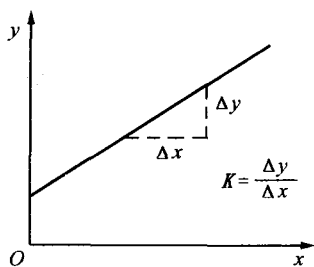


图 1-6 静态特性曲线为直线的灵敏度

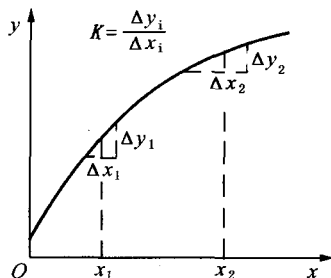


图 1-7 非直线静态特性曲线的灵敏度

式中 e_i ——滞后差，也称为回差、滞差、迟滞或滞后量；
 y_n ——对同一输入量 x_i 正行程时相应的输出量；
 y_f ——对同一输入量 x_i 反行程时相应的输出量。

滞后差的大小通常用实验方法确定。其来源包括滞环与死区。滞环是由于测量仪器设备内含有储能元件所引起的，当磁性材料磁化和一些材料受力变形时都可能发生。死区是由于测量仪器设备内的机械元件之间存在的摩擦、间隙等引起的，它是仪器设备的不工作区，亦即输入变化时对输出不产生影响的范围。

4. 分辨率

使测量仪器的示值发生变化的最小的输入量的变化值称为测量仪器的分辨率。它表明测量仪器能够检测的最小变化量的能力。分辨率越高，则仪器能检测的最小变化量的值越小。

通常模拟式仪表的分辨率就是其最小刻度分格值的一半或更小，数字式仪表的分辨率就是其最后一位的一个字所代表的量。

5. 精确度

精确度是精密度与准确度之综合反映，是衡量仪器在测量性能上综合优良程度的指标。

三、测量系统的动态特性

1. 测量系统的数学模型

(1) 测量系统的动态特性的数学模型——常系数线性微分方程式

对用于动态测量的系统，必须了解其动态特性，即了解在输入量变化时，测量系统的输出特性。只有如此，才能根据所测得的输出，正确确定所要测定的输入量，才能判断测量系统选择得是否合适，以及测量时所带来的误差。

为了研究测量系统的动态特性，必须建立测量系统的数学模型，即用数学语言描述测量系统的输出量（测量结果） y 与输入量（被测量） x 之间的关系。

在静态测量中，输出量 y 仅仅与输入量 x 本身的大小有关。在动态测量中，由于测量系统中存在具有惯性或阻尼的元件，当输入量 x 随时间改变时，输出量 y 不可能立即随之而变。因此输出量 y 不仅与输入量 x 的大小有关，而且还与 x 的变化速度 $\frac{dx}{dt}$ 以及加速度

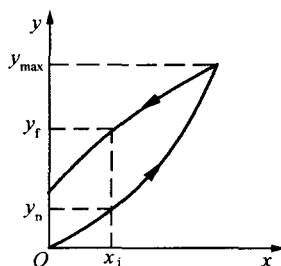


图 1-8 滞后差

$\frac{d^2x}{dt^2}$ 等有关。

在实际中,要想精确地建立测量系统的数学模型是十分困难的,而且即使建立了,也很难求解。因此,往往采取近似的方法,只考虑主要因素。例如,只考虑对动态特性影响较大的惯性、阻尼、形变以及储能电气元件(电感、电容等等)的影响。对变形较小的机械零件视为刚体,对各电气元件视为理想的纯电阻、纯电感、纯电容等。经过这样近似之后,通常可用常系数线性微分方程式作为描述测量系统动态特性的数学模型。方程的通式为

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (1-19)$$

式中, $a_n, a_{n-1}, \cdots, a_1, a_0$ 和 $b_m, b_{m-1}, \cdots, b_1, b_0$ 均为与系统结构物理参量有关的参数。

可用常系数线性微分方程式来描述其输出与输入之间关系的系统称为常系数线性系统。

(2) 常系数线性系统的重要性质

稳态时,常系数线性系统的输出信号频率等于其输入信号的频率,此为常系数线性系统的频率不变性质。当系统的输入为某一频率的正弦信号时,系统的稳态输出也是同一频率的正弦信号。

只要对式(1-19)求解即可求得测量系统的输出量 y 与输入量 x 的关系。但对阶次较高的微分方程求解是比较困难的,因此需利用传递函数和频率响应函数来描述测量系统的动态特性,将其输出与输入联系起来。

2. 传递函数

系统的传递函数就是在零初始条件下,该系统的输出量 $y(t)$ 的拉氏变换象函数与输入量 $x(t)$ 的拉氏变换象函数之比。

通式(1-19)所描述的测量系统,其传递函数为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (1-20)$$

式中 $Y(s)$ —— $y(t)$ 的拉氏变换象函数;

$X(s)$ —— $x(t)$ 的拉氏变换象函数。

3. 频率响应函数

频率响应函数简称频率响应或频率特性。它是在频率域内对测量系统传递信号特性的描述,亦即描述测量系统对输入信号各频率分量的响应。

系统的频率响应函数就是该系统的输出量的频谱与输入量的频谱之比,即输出量 $y(t)$ 的傅里叶变换象函数与输入量 $x(t)$ 的傅里叶变换象函数之比,故式(1-19)描述的测量系统的频率响应函数为

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{b_m (j\omega)^m + b_{m-1} (j\omega)^{m-1} + \cdots + b_1 (j\omega) + b_0}{a_n (j\omega)^n + a_{n-1} (j\omega)^{n-1} + \cdots + a_1 (j\omega) + a_0} = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)} \quad (1-21)$$

式中 $Y(j\omega)$ ——输出量 $y(t)$ 的傅里叶变换象函数;

$X(j\omega)$ ——输入量 $x(t)$ 的傅里叶变换象函数;

$A(\omega)$ ——测量系统的幅频特性;

$\varphi(\omega)$ ——测量系统的相频特性。