

● 陈润泰 许 琨 编著

检测技术

与

智能仪表

● 中南工业大学出版社

检测技术与智能仪表

陈润泰 许 琨 编 著

责任编辑: 肖梓高

*

中南工业大学出版社出版发行

湘潭大学印刷厂印装

湖南省新华书店经销

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 17.5 字数: 439 千字

1990年9月第1版 1990年9月第1次印刷

印数: 0001~2000

*

ISBN 7-81020-317-7/TP·014

定价: 3.50元

内容简介

全书共十九章。第一章介绍了检测技术基础；传感器技术，微型机的接口技术和数据处理；机电一体化仪表。在编写中，汲取了近年来传感技术和微型计算机技术的新内容，并注重理论和实践相结合。

本书是工业自动化专业教材，并可供工业自动化仪表、计算机应用专业研究生及有关工程技术人员参考。

前 言

检测技术是信息技术的核心之一。传统的检测技术包含两方面的内容,即测量非电参数的传感器技术及应用电测方法的测量仪表。随着微型计算机技术的发展及其在工业过程控制中的广泛应用,检测技术发生了深刻的变革,目前已进入智能传感器、智能仪器仪表和智能检测系统阶段。为了适应现代科学技术发展的需要,必须对检测技术及仪表课程的内容作相应的扩充和更新,此书是在多年教学和科研实践的基础上编写而成的。

本书以信息的获取(传感器)、信息的转换(检测电路)、信息的处理(微机技术)和显示(仪表)为线索,系统介绍了各类传感器的原理、特性,检测技术理论,数据采集及处理技术,抗干扰技术及微型机的接口技术,并竭力将计算机技术与检测技术融汇一体。

本书是工业自动化专业高年级本科生的教材,也可供工业自动化仪表、计算机过程控制等专业研究生及工程技术人员参考。

在编写过程中,湘潭大学贺剑锋老师在文稿校阅方面做了不少工作,在此表示由衷的谢意。

由于编者学识水平有限,加之时间短促,缺点和错误在所难免,敬请读者批评指正。

编者

九八九年八月

目 录

第一篇 检测技术基础

1 结 论	(1)
1.1 检测技术与自动化科学技术的关系	(1)
1.2 电子测量装置的组成和功能	(2)
1.3 微型计算机在检测系统中的作用	(3)
2 测量方法及检测装置的基本性能	(4)
2.1 测量的基本方程式	(4)
2.2 测量的基本方法	(4)
2.3 检测装置的基本性能	(6)
3 误差理论基础	(9)
3.1 测量误差的概念	(9)
3.2 随机误差分析	(12)
3.3 系统误差分析	(18)
3.4 误差的合成	(21)

第二篇 传感器技术

4 传感器概述	(24)
4.1 传感器的定义及其重要性	(24)
4.2 传感器的分类	(25)
4.3 传感器应具备的特性	(27)
4.4 传感器的发展趋势	(27)
5 电阻式传感器	(30)
5.1 电位器式传感器	(30)
5.2 热电阻式传感器	(36)
5.3 热电阻传感器的应用	(39)
6 电感式传感器及流量检测计	(43)
6.1 自感式传感器	(43)
6.2 互感式传感器(差动变压器式传感器)	(50)
6.3 电涡流式传感器	(56)
6.4 差压式流量计	(61)
6.5 电磁式流量计	(66)
7 电容式传感器	(69)
7.1 工作原理和类型	(69)

7.2	电容式传感器的静态特性	(69)
7.3	电容式传感器的检测电路	(72)
7.4	电容式传感器的应用	(77)
8	电阻应变式传感器	(79)
8.1	金属电阻丝的应变效应	(79)
8.2	电阻应变片的构造及分类	(81)
8.3	温度误差及其补偿	(84)
8.4	测量电路	(86)
8.5	电阻应变式传感器的应用	(93)
9	热电式传感器	(96)
9.1	热电偶的测温原理	(96)
9.2	热电偶的类型及构造	(99)
9.3	热电偶的冷端温度误差及补偿	(103)
9.4	热电偶测量电路	(106)
10	霍尔式传感器	(108)
10.1	霍尔元件的工作原理	(108)
10.2	霍尔元件的电磁特性	(113)
10.3	霍尔元件的误差及其补偿	(114)
10.4	霍尔式传感器的应用	(119)
11	光电式传感器	(124)
11.1	光敏电阻	(124)
11.2	光电池	(128)
11.3	光敏晶体管	(131)
11.4	光电式传感器的应用	(136)
12	光导纤维传感器	(140)
12.1	光导纤维及其分类	(140)
12.2	光在光导纤维中的传输原理	(141)
12.3	光导纤维传感器的分类	(144)
12.4	光纤传感器的应用	(146)

第三篇 智能仪表

13	检测信号的放大与变换	(152)
13.1	运算放大器与测量放大器	(152)
13.2	程控测量放大器 PGA (可编程增益控制放大器)	(155)
13.3	隔离放大器	(157)
13.4	信号变换器 (电压-电流变换电路)	(159)
14	多路模拟开关及采样/保持器	(163)
14.1	作用及基本技术指标	(163)
14.2	机电式多路模拟开关	(164)

14.3	集成模块多路模拟开关	(167)
14.4	采样/保持器	(171)
15	A/D、D/A转换技术	(174)
15.1	D/A转换器的原理及技术指标	(174)
15.2	集成芯片D/A转换器	(178)
15.3	D/A转换器的输出特性及调整方法	(180)
15.4	D/A转换器与CPU接口电路及程序设计	(182)
15.5	A/D转换器的结构和工作原理	(186)
15.6	A/D转换器的性能指标及选择原则	(194)
15.7	A/D转换器与微处理器的接口电路及接口技术	(195)
16	数字信号处理技术	(202)
16.1	常用的数字滤波方法	(202)
16.2	标度变换(工程量变换)	(208)
16.3	非线性补偿技术	(214)
17	传感器数据采集技术	(223)
17.1	数据采集装置的功能及流程	(223)
17.2	数据采集装置的结构配置	(223)
17.3	数据采集装置的定时	(227)
17.4	数据采集装置的技术性能	(230)
17.5	数据采集装置的发展	(231)
18	智能仪表的组成及功能	(233)
18.1	智能仪表的组成及特点	(233)
18.2	智能仪表的软件	(235)
18.3	智能仪表的功能	(236)
18.4	应用举例(压力测量智能仪表)	(244)
19	干扰及其抑制技术	(250)
19.1	干扰的来源	(250)
19.2	噪声的传输途径	(252)
19.3	差模干扰和共模干扰	(256)
19.4	干扰抑制技术	(258)
	参考文献	(269)

第一篇 检测技术基础

1 绪 论

1.1 检测技术与自动化科学技术的关系

在科学实验和工业生产过程中,为了及时了解工艺过程、生产过程的情况及他们的结果,需要对描述被控对象特征的某些参数进行测量或检测,其目的是为了准确获得表征它们的定量信息,为生产过程的自动化及科研提供可靠的数据。至于检测技术的意义就更广泛了。它们包括根据被测对象的特点,选用合适的测量仪器仪表及实验方法,通过测量及数据处理和误差分析,准确得到被测量的数据,并为提高测量精度、改进实验方法及测量仪表,为生产过程的自动化等提供可靠的依据。

科学技术的发展与检测技术的发展是密切相关的,检测技术达到的水平愈高,则科学技术成就愈为深广,而科学技术的发展,特别是新材料、新结构的传感器研制成功,以及微型计算机的广泛开发,给检测技术带来了变革性的影响,它们在检测系统的准确性、快速性、可靠性和抗干扰等方面发挥了明显作用,大大丰富了检测技术所包含的内容,扩大了检测技术的应用范围,同时也提出了新的课题。

在现代化生产中,为提高劳动生产率和产品质量,改善劳动条件,必需不断提高生产过程自动化水平和扩大自动化应用范围。在实现自动化过程中,所用的检测技术和装置是自动化系统的“感觉器官”,因为只有知道生产过程的状态和工艺参数的条件下才能进行自动控制。

为了阐明检测技术在自动化系统中的应用和地位,下面以图 1-1 所示的数字计算机控制系统为例说明。

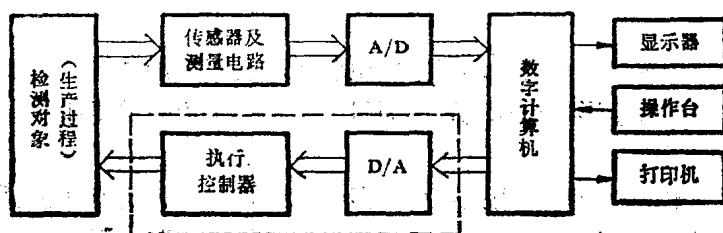


图1-1 数字控制系统典型框图

图1-1 控制系统的特点之一是按多控制对象或多参量反馈控制来设计的,其目的是充分发挥计算机快速的优势,提高计算机控制系统的性能价格比。显然,在数字计算机控制系统中需要解决大量工艺参数的检测和数字量的转换问题,在计算机应用中的这一重要分支即为

巡回检测系统。去掉图1-1中的虚框部分即为此类系统的典型框图。在生产过程中,采用微型计算机进行巡回检测 and 数据处理不仅具有强的实时性,也给工作带来更多的方便。

从自动控制系统分类观点出发,一个控制系统不设执行控制器部分,而系统主要用于对生产设备和工艺过程进行自动监视和自动保护,则称为自动检测系统。

从图1-1典型框图看出,自动检测技术和装置是自动化系统中不可缺少的组成部分。自动控制系统的控制精度在很大程度上取决于检测和转换技术的精度,随着自动化水平的不断提高,对检测和转换装置的要求亦愈来愈高。

1.2 电子检测装置的组成和功能

对生产过程的各种物理量进行检测和转换是构成自动检测系统的关键环节,由于半导体技术和微型计算机的飞跃发展,在检测和转换装置中广泛采用电子检测装置,这是本门学科发展的一个特点,物理量的电子检测装置具有以下特点:

- (1) 便于连续进行测量、放大和记录,并能根据测得的结果自行判断与运算。
- (2) 电子装置惯性小,反应速度快,故不仅适用于静态测量,亦适用于动态过程的测量。
- (3) 便于自动改变量程(放大倍数),故测量的精确度和灵敏度均高,测量范围广。
- (4) 电信号便于远距离传送,从而能实现集中控制和遥远控制。
- (5) 能进行多点扫描检测,即组成数据采集装置。
- (6) 易于实现检测系统智能化。

电子检测装置的任务首先将被测参数的变化转换成电信号,再经放大和传输,然后用显示仪表显示测量结果。因此,电子检测装置的方块图可表示为图1-2所示。

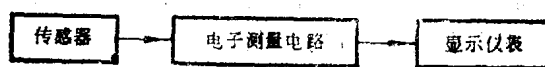


图1-2 电子检测装置方块图

检测装置亦称测量仪表,主要由三个环节组成:传感器,测量电路、显示器(指示仪、记录仪,数字显示器等)。对于简单的测量仪表,这几个环节的界线不大明显,它们可以是一个不可分的整体。若测量工作较简单,则一台测量仪表就可以了,但对于精度高的测量工作,需要将测量仪表按一定规则扩大成为一个检测系统。

(1) 传感器。传感器直接与被测对象发生联系,它的功能是将被测参数直接或间接转换成电信号。它的好坏直接影响检测装置的质量,是检测装置的重要部件。传感器往往也被称为敏感元件或一次元件。

(2) 电子测量电路。它的作用是将传感器的输出信号进行变换(包括放大、线性化等),根据传感器要求不同而异,通常分为模拟电路(相敏电路、测量放大器等)和数字逻辑电路(门电路、电压频率变换、A/D、D/A等)。

(3) 显示器。它的作用是将被测的非电量用电参数指示或记录出来。它可以是瞬时值的显示、累积值的显示及越限报警显示。对于变化缓慢的参数可用模拟式显示,而对变化迅速的动态参量,可用光线示波器或数字式显示。使用它既可提高读数精度,还可与计算机连接(包括打印数据和曲线)。

1.3 微型计算机在检测系统中的作用

自从70年代微型机问世之后，不久就被用到检测技术领域，随着微型机价格的下降和功能的不断改善，以及解决了许多传统检测装置难于解决的难题，使它成为检测技术中不可缺少的部分。因此，微处理器与传感器、微处理器与测量仪表相结合的技术也越来越引起人们的广泛关注，近年来出现带微处理器的传感器和带微处理器的测量仪表，分别称为智能传感器和智能仪表。微处理器的应用，从几个方面革新了它们的功能。

- (1) 扩展了检测量的数目，提高了测量的准确度。
- (2) 革新了检测方法，使过去不能进行的某些测量，现在能够进行了。
- (3) 简化了仪表与仪表或其它设备间的接口，也简化了仪表的操作，实现了集中控制。
- (4) 具有各种数据处理功能，能存贮信息，并能进行各种算术逻辑运算，把使用者从繁重的数据处理工作中解放出来。甚至还具有辅助专家推断、分析与决策的功能。

2 测量方法及检测装置的基本性能

2.1 测量的基本方程式

2.1.1 测量的概念

测量对于现代科学技术的重要性是不言而喻的，在当今的信息革命时代，没有信息的检取与处理是很难想象的。

测量是借助于仪器仪表或设备，采用一定的方法对被测量取得定性或定量信息的认识过程。所谓“定性”指通过测量大致判断出被测量存在与否，或者在某一个数量范围内。所谓“定量”指用一定精度等级的测量仪表确定出被测量比较精确的数值大小。

测量的过程实质上是一个比较的过程。在进行测量时，把被测量与一个被选为测量单位的标准量进行比较，从而确定被测量对标准量的倍数，并以数字表示这个倍数。选定的标准量应该是国际上或国家所公认的，而且必需稳定。

2.1.2 测量基本方程式

设被测量为 X ，其标准单位为 Q ，二者的比值为 x_0 （无量纲的数值），则测量过程可用数学形式描述如下：

$$x_0 = \frac{X}{Q} \quad \text{或} \quad X = x_0 Q \quad (2-1)$$

上式称为测量的基本方程式。式中，数值化后的比值 x_0 称为被测量的真实数值，简称真值。因为在实际求取比值时，只能用有限位数的数字来表示，并且在测量过程中也必然存在各种误差（见3.1.3），故测量基本方程式为：

$$X \approx x Q \quad (2-2)$$

式中 x ——测量值。

从式（2-2）看出，测量过程有三要素：

- （1）测量单位；
- （2）测量方法。它是将被测量与其单位进行比较的实验方法；
- （3）测量仪器与仪表。它是求取比值而实际使用的仪器仪表。

通过测量可以得到所需的测量值，然而测量目的还未全部达到，为使测量值精确，还需要对测试结果进行数据处理与误差分析，估计所得结果的准确性。

2.2 测量的基本方法

测量方法指被测量与其标准单位进行比较的具体方法。测量方法的分类多种多样，按被

测量变化的快慢可分为静态测量与动态测量，按测量手段可分为直接测量和间接测量；按测量方式可分为偏差式测量，零位式测量和微差式测量。

2.2.1 直接测量和间接测量

1. **直接测量** 通常测量仪表已标定好，用它对某个未知量进行测量时，就能直接读出测量值，称为直接测量。例如，用磁电式仪表测电流、电压；用弹簧管式压力表测量锅炉压力等就属直接测量。直接测量的优点是测量过程简单、迅速，缺点是测量精度不容易达到很高。这种测量方法在一般的工程中大量采用。

2. **间接测量** 首先确定被测量的函数关系式，然后用标定好的仪表测量函数关系式中的有关量，最后代入函数关系式进行计算，得到被测数，称为间接测量。例如，测量导线电阻率，其函数关系式为：

$$\rho = \frac{\pi d^2 R}{4l}$$

需要先直接测量导线的电阻 R ，导线长度 l 和导线直径 d ，然后代入上式，求出电阻率 ρ 的值。间接测量广泛用于科学实验中。

2.2.2 偏差式测量、零位式测量及微差式测量

1. **偏差式测量** 以仪表指针的偏移量表示被测量值的测量方法，称为偏差式测量。例如，用磁电式电流表测量电路中的电流，当有电流流入电流表时，在电磁力的作用下，经传动机构带动指针转动，并压缩表内的弹性元件，若弹性元件的反作用力矩与电磁力矩平衡，指针就稳定指示在刻度盘的某个位置。若该电流表的刻度已用标准量具进行校准，则该位置就对应于所测电流的值。目前工程测量中，大多数的测量仪表均依据此原理。这种仪表结构简单、直观、经济，故应用甚广。但其精度较低，且要消耗被测对象的部分能量，损失部分信号。

2. **零位式测量（又称平衡式测量）** 在测量过程中，用指零仪表的零位指示来检测该系统的平衡状态，而在检测过程中是通过改变可知的基准量与被测量达到平衡状态，从而决定被测量的值，这种检测方法称为零位式测量。很明显，标准量具装在仪表内，以便调节。例如，用电位差计测量电势，即属于零位式测量法，如图2.1所示。在进行测量前，应先调节 R_1 ，校准工作电流 I 。测量时，接入被测电压 U_x ，使与基准电压 U_k 进行比较，差值 ΔU 为

$$\Delta U = U_x - U_k$$

作为检零放大器 G 输入信号，其输出电压 U_G 控制伺服电动机，通过小型减速装置带

动电位计滑动触头 A 及指针，从而亦改变基准电压 U_k ，直至 $\Delta U = 0$ ，系统达到新的平衡。此时 U_k 的指示值即为被测电压 U_x 。这种测量方法优点是，可以获得高的测量精度，但测量过

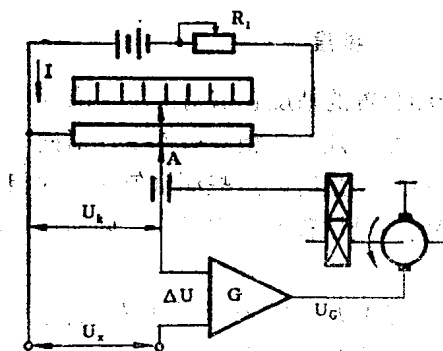


图 2-1 电位差计简化电路图

程中要进行平衡运行，速度不快，适用于测量变化较缓慢的信号，在工程实践和实验室中应用很普遍。

3. 微差式测量 微差式测量法是综合了偏差式和零位式两种测量法的优点而提出的测量方法。此法在测量时分两步进行，第一步将被测量基本工作点与标准量进行比较，并调节达到平衡状态。在此基础上，当被测量离开工作点（有微小变动），测量仪表便离开平衡状态，此时仪表的指示值即为变动部分的值。由于不需要进行平衡调整，大大提高了测量速度。图2-2为用微差法测量稳压电源输出电压随负载变动而引起的微小变化值。图中 R_{fz} 为稳压电源的负载，G为高灵敏电流计。

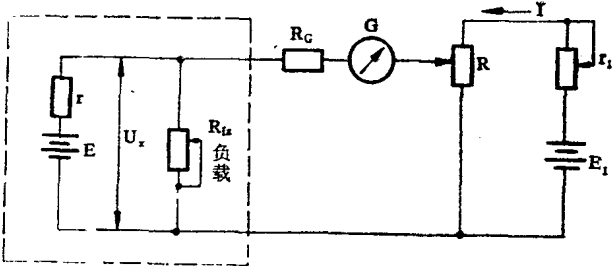


图 2-2 微差法测稳压电源输出电压的微小变化

在测量之前，预先调整 r_1 ，使电位差计的工作电流 I 为标准值，然后，在某一负载 R_{fz} 时，调整电位计 R，使高灵敏电压表 G 指零。系统处于平衡状态。当负载 R_{fz} 有变化时，稳压电源的输出电压 U_x 也必有相应的微小变化，此时平衡状态被破坏， $U_G \neq 0$ ，其数值即为被测量。值得注意，这种电路要求 G 的内阻 R_G 要足够高，满足 $R_G \gg R, r_1, R_{fz}, r$ ，否则，测量误差增大。

微差式测量法的优点是反应快，精度高，它较适用于在线控制参数的检测。

2.3 检测装置的基本性能

衡量检测装置性能主要指标有精度，稳定性和输入输出特性。

2.3.1 精度

检测装置的精度包括精密度、准确度和精确度三个内容。

1. 精密度 在相同条件下，对同一个量进行重复测量时，这些测量值之间的相互接近程度即分散程度，它反映了随机误差的大小。

2. 准确度 它表示测量仪表指示值对真值的偏离程度、它反映了系统误差的大小。

3. 精确度（简称精度） 它是精密度和准确度的综合反映，它反映了系统综合误差的大小，并且常用测量误差的相对值表示。

为了加深对精密度、准确度和精确度的理解，举一个打靶实例说明。打靶结果如图 2-3

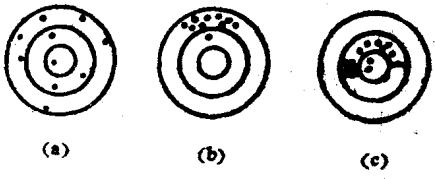


图2-3 打靶弹着点分布图

所示。子弹落在靶心周围有三种情况：图2-3（a）的随机误差大，而系统误差小，故它的精密度低而准确度高；图2-3（b）的随机误差小，而系统误差大，故它反映精密度高而准确度低；图2-3（c）的随机误差和系统误差均小，故反映精确度高。在实际测量中，人们总是希望得到精确度高的结果。

2.3.2 稳定性能

在一定条件下，保持输入信号不变，输出信号随时间或温度的缓慢变化，称为漂移。随时间的漂移称为时漂，随环境温度的漂移称之为温漂。例如，弹性元件的时效，电子元件的老化，放大器的温漂和温度、气压、电源电压、电磁场等外界环境都能引起漂移。

漂移能够说明检测装置工作的稳定性能，需要长时间运行的检测装置，这个指标更为重要。

2.3.3 输入输出特性

无论多复杂的检测装置和检测系统，都是由测量元件、放大元件、执行元件等组成的。每一个元件的输入输出特性均可用典型环节或它们的组合来描述。传感器和检测装置是检测系统的重要组成部分，因而对它们的静态特性和动态特性的分析研究也是很重要的。这里主要讨论它们的静态特性，即稳定状态时的输入输出关系。衡量检测装置静态特性的重要指标是线性度、灵敏度、滞环……

1. 线性度 对于没有迟滞、蠕变效应的理想检测装置，其静态特性函数 $y = f(x)$ ，可由下列方程式来表示：

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n \quad (2-3)$$

式中 x ——输入量（被测信号）；

y ——输出量；

a_0 ——零位输出；

a_1 ——灵敏度；

$a_2, a_3, \dots, a_n$ ——非线性项的常数。

从式（2-3）可见，一般的静态特性是由线性项 $(a_0 + a_1 x)$ 和 x 的高次项所决定。

当 $a_0 \neq 0$ ，表示即使输入量等于零，仍有输出，称为零位输出或零位偏移。

通常，检测装置的静态特性为非线性关系，典型的静特性如图2-4所示。实际特性 $a b c$ 与直线有一定差距，但在实用中，人们又总希望用某一规定的拟合直线代替曲线，至少在工作范围内应该如此。常用的拟合直线是切线或割线，如线段 $a c$ ，两者不吻合的程度称为该检测装置的“非线性误差”，或称“线性度”，常用实际曲线与理论直线之间的最大偏差与检测装置满量程输出之比（%）来表示，

$$\text{即：} E = \frac{\Delta y_{\max}}{y_{\max} - y_{\min}} \times 100\% \quad (2-4)$$

式中 E ——线性度（非线性误差）；

$\Delta y_{\max}$ ——实际曲线与理论直线的最大偏差；

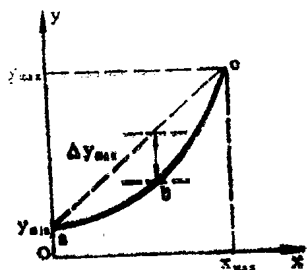


图 2-4 线性度的定义

y_{max} ——输出最大值,

y_{min} ——输出最小值。

由此可见,线性度的大小是以规定的直线作为基准计算出来的,因此,基准直线不同,得出的线性精度也不一样。而且采用的基准直线不同,线性度的定义也有差异。本书中采用理论直线作为拟合直线来确定检测装置的线性度,因为这种方法在阐明检测装置或传感器的线性度时比较明确和方便。所谓理论直线即式(2-3)中高次项系数为零(通常也设 $a_0=0$),即:

$$y = a_1 x \quad (2-5)$$

由理论直线求得的线性度称为理论线性度。在检测技术中,也常用最小二乘法来确定拟合直线,根据误差理论,最小二乘法线性度的拟合精度最高,但它的计算也最繁。

2. 灵敏度与分辨率 灵敏度指传感器或检测仪表在稳态下输出的变化量 Δy 与输入变化量 Δx 之比值,用 k 来表示,即:

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (2-6)$$

对于线性传感器和检测仪表,它的灵敏度就是它的传递系数,亦即:

$$k = \frac{y}{x} \quad (2-7)$$

传感器或检测仪表的灵敏度阈是引起输出量发生微小变化所必需的最小输入量的变化量。对于数字式测量仪表,灵敏度阈以分辨率表示,分辨率等于数字式仪表最后一位数字所代表的值。

3. 滞环(迟滞) 滞环反映传感器或检测仪表的正向特性(输入量增大)与反向特性(输入量减小)的不一致性,如图2-5所示,一般由实验确定。

设在整个测量范围内的最大滞环误差为:

$$\Delta_m = y_d - y_c$$

则最大滞环误差率 E_m ,以满量程输出 y_{max} 的百分数表示:

$$E_m = \frac{\Delta_m}{y_{max}} \times 100\% \quad (2-8)$$

近年来,在检测技术中,对检测仪表及检测系统动态特性的研究颇为重视,其研究方法不外乎在控制理论中介绍的几种,此处不再重复。

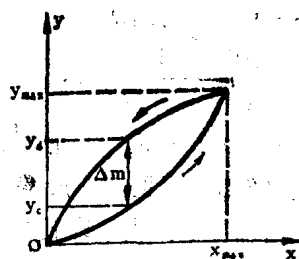


图2-5 滞环特性示意图

3 误差理论基础

3.1 测量误差的概念

3.1.1 测量误差

在检测过程中, 由于所选用的仪表精确度有限, 实验手段不够完善, 环境中存在各种干扰因素, 以及检测技术水平的限制等原因, 必然使测量值和真实值之间存在着一定的差值, 这个差值称为测量误差。由于误差自始至终存在于一切科学实验和检测之中, 被检测量的真值永远是难于得到的, 这就是所谓的误差公理。

3.1.2 研究误差的意义

对检测过程中出现的误差的研究, 不论在理论上还是在实践中都有现实的意义。

- (1) 能合理确定检测结果的误差;
- (2) 能正确地认识误差的性质, 分析产生误差的原因, 采取措施、达到减少误差的目的;
- (3) 有助于正确处理实验数据, 合理计算测量结果, 以便在一定的条件下, 得到最接近于真实值的最佳结果;
- (4) 有助于合理选择试验仪器, 测量条件及测量方法, 使能在较经济的条件下, 得到预期的结果。

3.1.3 误差的表示方法

在实际检测中, 测量误差的表示方法有多种, 最常用的是绝对误差、相对误差和引用误差。

1. 绝对误差 测量误差可用下面的误差基本方程式来定义:

$$\Delta = x - x_0 \quad (3-1)$$

式中 Δ —— 绝对误差;
 x_0 —— 被测量的真值;
 x —— 测量值。

一般情况下, 被测量的真值 x_0 是未知的, 所以误差也是未知的, 但下面几种情况真值是可行的:

- (1) 理论真值。例如, 平面三角形的内角之和恒为 180° 。
- (2) 计量学约定真值。国际计量大会的决议已定义了长度、质量、时间、电流强度、热力学温度、发光强度及物质的量等七大基本单位。凡是满足有关规定条件复现出的数值即为计量学约定真值。
- (3) 标准器的相对真值。在有些情况下, 可以认为高一级标准器的测量值是低一级标准器或普通仪器的测量值之相对真值。

采用绝对误差表示测量误差不能很好说明测量质量的好坏。例如，温度测量的绝对误差 $\Delta = 1^\circ\text{C}$ ，若对人体温测量来说，则误差过大，而对钢水温度测量来说，它则是目前尚达不到的最佳测量结果了。然而，绝对误差说明了测量值偏离真值的大小，它能够说明测量的精确度，故它一般适用于标准仪器仪表的校准，在校准工作中，常用到修正值 C ，其定义为：

$$C \triangleq x_0 - x \quad (3-2)$$

公式表明，修正值与绝对值误差在数值上相等，而符号相反，其实际含义是真值等于测量值加上修正值，这样使用起来更方便些。

2. 相对误差 被测量的绝对误差与真值之比，称为相对误差 δ ，一般用百分数表示

$$\delta = \frac{\Delta}{x_0} \times 100\% \quad (3-3)$$

用相对误差表示法比绝对误差表示法最突出的优点是能够更好说明测量质量的好坏。但在实际应用中，由于被测量的真值 x_0 是不知道的，使利用上式计算相对误差也不方便，而且在使用仪表测量时，一般不宜测量过小的量，而多用于接近上限的量，如 $2/3$ 的量程处，因此用下面介绍的引用误差来评价仪表的质量更为方便，

3. 引用误差及最大引用误差 测量的绝对误差与仪表的满量程之比，称为仪表的引用误差 r ，它常以百分数表示。

$$r = \frac{\Delta}{L} \times 100\% \quad (3-4)$$

式中 L ——仪表的满量程值。

比较式 (3-3) 和式 (3-4) 可知，引用误差是相对误差的一种特殊形式而已，用满量程 L 代替真值 x_0 ，在使用上方便多了。然而，实践证明，在仪表测量范围的各个示值的绝对误差 Δ 都是不同的，因此引用误差仍与仪表的具体示值 x 有关，使用仍不方便。为此，又引入最大引用误差的概念，既能克服上述的不足，又更好地说明了误差的测量精度。所以它常被用来确定仪表的精度等级。

在规定条件下，当被测量平稳增加或减少时，在仪表全量程内所测得各示值的绝对误差（取绝对值）的最大者与满量程的比值之百分数，称为仪表的最大引用误差 $r_{\max}$ 。

$$r_{\max} = \frac{|\Delta|_{\max}}{L} \times 100\% = \frac{|x - x_0|_{\max}}{L} \times 100\% \quad (3-5)$$

最大引用误差是仪表基本误差的主要形式，它能很好表明仪表的测量精确度，故是仪表最主要的质量指标。

3.1.4 仪表的精度等级

最大引用误差 $r_{\max}$ 既作为工业仪表精度等级的标致，它应由制造厂家给出，仪表在出厂检验时，不论指针在刻度的那一点，其引用误差都不允许超过 $r_{\max}$ 值。

国家规定电工仪表精度等级 G ，分为 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 5.0 八级。人为规定：取最大引用误差百分数的分子作为精度等级的标志，即精度等级 G 为最大引用误差去掉百分号 (%) 后的数字，公式表示为：

$$G = r_{\max} \times 100 \quad (3-6)$$

显然，仪表精度等级的数字愈小，精度愈高。例如，0.5 级的仪表优于 1.0 级仪表。