

ZIDONG
JIANCE
JISHU

自动检测技术

宋文绪 主编

冶金工业出版社

自动检测技术

主 编 宋文绪
副主编 刘学庆
参 编 林 澄 曹 艳
杨 帆

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2000

图书在版编目(CIP)数据

自动检测技术/宋文绪主编. —北京:冶金工业出版社, 2000. 12

ISBN 7-5024-2711-2

I. 自… II. 宋… III. 自动检测技术 IV. TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 8118 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 宋良 美术编辑 王耀忠 责任校对 符燕蓉 责任印制 刘静

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2000 年 12 月第 1 版, 2000 年 12 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 17.5 印张; 424 千字; 274 页; 1-3000 册

27.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

自动检测技术涉及到许多学科知识,并且在工业生产和科学研究的各个领域中都得到了广泛的应用。为了使读者能够获得比较系统和完整的自动检测技术方面的知识,本书较为详尽地介绍了检测理论基础,各类传感器的工作原理与特性,电测系统中的抗干扰技术,以及测量系统的线性化技术。全书力求有较好的系统性和完整性,并有一定的广度。在内容的组织上,注意了尽量反映检测技术领域中的新内容,如数字测量技术;在内容的叙述上,力求达到深入浅出,注重概念的阐述,尽量避免繁琐的数学推导,以利于读者自学。注重应用是本书的特点,在介绍完每一类传感器的工作原理后,都配有此类传感器的应用实例,为读者学以致用奠定了基础,对从事检测技术的工程技术人员也有一定的参考价值。

参加本书编写工作的有宋文绪(第1、2、10、11、12章)、刘学庆(第3章)、林澄(第4、6章)、曹艳(第5章)、杨帆(第7、8、9章)。宋文绪同志为主编,刘学庆同志为副主编。全书由刘学庆同志统稿。

在本书的编写过程中,我们参考了许多同行们的著作,在此表示衷心感谢。

由于我们水平有限,不妥之处在所难免,恳切希望读者批评指正。

编 者

2000.10

目 录

1 检测技术的基础知识	(1)
1.1 检测技术的基本概念	(1)
1.2 测量方法	(3)
1.3 测量误差	(5)
1.4 传感器的基本特性	(12)
2 电阻式传感器	(25)
2.1 电位器式电阻传感器	(25)
2.2 电阻应变式传感器	(32)
2.3 电阻传感器的应用	(49)
3 电感式传感器	(56)
3.1 自感式传感器	(56)
3.2 差动变压器	(68)
3.3 电涡流式传感器	(79)
3.4 电感式传感器的应用	(89)
4 电容式传感器	(96)
4.1 电容式传感器的工作原理和结构形式	(96)
4.2 电容式传感器的等效电路	(102)
4.3 电容式传感器的转换输出电路	(103)
4.4 电容式传感器的抗干扰措施	(108)
4.5 电容式物位测量仪	(111)
4.6 电容式压力传感器	(117)
4.7 其他电容式传感器	(125)
5 热电式传感器	(128)
5.1 热电偶	(128)
5.2 热电阻和热敏电阻	(145)

6 压电式传感器	(155)
6.1 压电式传感器的工作原理	(155)
6.2 压电式传感器及其等效电路	(160)
6.3 压电式传感器的输出转换电路	(163)
6.4 压电式传感器的应用	(168)
7 磁电式传感器	(178)
7.1 磁电感应式传感器	(178)
7.2 霍尔式传感器	(183)
7.3 感应同步器	(191)
8 光电式传感器	(197)
8.1 外光电效应及器件	(197)
8.2 内光电效应及器件	(200)
8.3 阻挡层光电效应及器件	(202)
8.4 光栅式传感器	(207)
8.5 码盘式传感器	(211)
9 核辐射传感器	(216)
9.1 放射源和探测器	(216)
9.2 测量电路	(221)
9.3 核辐射传感器的应用	(223)
9.4 放射性辐射的防护	(226)
10 频率式传感器	(228)
10.1 振筒式频率传感器	(228)
10.2 压电式谐振传感器	(234)
11 线性化及温度补偿	(240)
11.1 非线性特性的线性化	(240)
11.2 温度补偿技术	(254)
12 抗干扰技术	(260)
12.1 干扰的类型及产生	(260)
12.2 干扰信号的耦合方式	(262)
12.3 常用的抑制干扰措施	(266)
12.4 其他抑制干扰措施	(270)

1 检测技术的基础知识

1.1 检测技术的基本概念

1.1.1 检测技术

检测技术是以研究自动检测系统中的信息提取、信息转换以及信号处理的理论和技术为主要内容的一门应用技术学科。

广义地讲,检测技术是自动化技术四个支柱之一。从信息科学的角度考察,检测技术任务为:寻找与自然信息具有对应关系的种种表现形式的信号,以及确定二者间的定性、定量关系;从反映某一信息的多种信号表现中挑选出在所处条件下最为合适的表现形式,以及寻求最佳的采集、变换、处理、传输、存贮、显示等的方法和相应的设备。

信息采集是指从自然界诸多被检查与测量量(物理量、化学量、生物量与社会量)中提取有用的信息。

信息变换是将所提取出的有用信息进行电量形式、幅值、功率等的转换。

信息处理的任务,视输出环节的需要,可将变换后的电信号进行数值运算(求均值、极值等)、模拟量-数字量变换等处理。

信息传输的任务是在排除干扰的情况下,经济地、准确无误地把信息进行远、近距离的传递。

1.1.2 自动检测系统

自动检测系统是自动测量、自动计量、自动保护、自动诊断、自动信号等诸系统的总称,它的组成如图 1.1.1 所示。在上述诸系统中,都包含有被测量、敏感元件和电子测量电路,它们间的区别仅在于输出单元。如果输出单元是显示器或记录器,则该系统叫做自动测量系统;如果输出单元是计数器或累加器,则该系统叫做自动计量系统;如果输出单元是报警器,则该系统是自动保护系统或自动诊断系统;如果输出单元是处理电路,则该系统是部分数据分析系统、自动管理系统或自动控制系统等等。

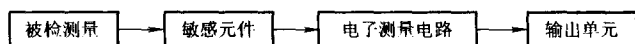


图 1.1.1 自动检测系统框图

1.1.3 传感器

A 传感器

传感器是一种以一定的精确度把被测量转换为与之有确定对应关系的、便于应用的某种物理量的测量装置。这一概念包含以下四个方面的含义:

- (1) 传感器是测量装置,能完成检测任务。
- (2) 它的输入量是某一被测量,可能是物理量,也可能是化学量、生物量等。
- (3) 它的输出量是某种物理量,这种量要便于传输、转换、处理、显示等等,这种量可以是气、光、电量,但主要是电量。
- (4) 输出输入有对应关系,且应有一定的精确程度。

B 传感器的组成

传感器的功用是一感二传,即感受被测信息,并传送出去。传感器一般由敏感元件、转换元件、转换电路三部分组成。如图 1.1.2 所示。

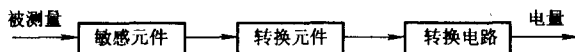


图 1.1.2 传感器组成框图

a 敏感元件

它是直接感受被测量,并且输出与被测量成确定关系的某一物理元件。

b 转换元件

敏感元件的输出就是转换元件的输入。转换元件把输入转换成电路参数量。

c 转换电路

上述电路参数接入转换电路,便可转换成电量输出。实际上,有些传感器很简单,有些则较复杂,也有些是带反馈的闭环系统。

最简单的传感器由一个敏感元件(兼转换元件)组成,它感受被测量时直接输出电量,如热电偶。有些传感器由敏感元件和转换元件组成,没有转换电路,如压电式加速度传感器,其中质量块是敏感元件,压电片是转换元件。有些传感器转换元件不只一个,要经过若干次转换。

由于传感器空间限制等其他原因,转换电路常装入电箱中。然而,因为不少传感器要在通过转换电路之后才能输出电量信号,从而决定了转换电路是传感器组成部分之一。

C 传感器的分类

目前传感器主要有四种分类方法:根据传感器工作原理分类法、根据传感器能量转换情况分类法、根据传感器转换原理分类法和按照传感器的使用分类法。

表 1.1.1 给出了按传感器转换原理分类和它们的典型应用。

表 1.1.1 传感器分类表

传感器分类		转换原理	传感器名称	典型应用
转换形式	中间参量			
电 				

1.2 测量方法

对于测量方法,从不同的角度出发,有不同的分类方法。本节重点阐述按测量手续分类

的直接测量、间接测量和联立测量及按测量方式分类的偏差式测量、零位式测量和微差式测量。

1.2.1 直接测量、间接测量与联立测量

A 直接测量

在使用测量仪表进行测量时,对仪表读数不需要经过任何运算,就能直接表示测量的结果,称为直接测量。例如用弹簧管式压力表测量流体压力就是直接测量。直接测量的优点是测量过程简单而迅速,缺点是测量精度不是很高。这种测量方法是工程上广泛采用的方法。

B 间接测量

在使用仪表进行测量时,首先对与被测物理量有确定函数关系的几个量进行测量,将测量值代入函数关系式,经过计算得到测量所需的结果,这种测量称为间接测量。例如,导线电阻率 ρ 的测量就是间接测量,由于 $\rho = \pi d^2 R / 4l$,其中 R 、 l 、 d 分别表示导线的电阻值、长度和直径。这时,只有先经过直接测量,得到导线的 R 、 l 、 d 以后,再代入 ρ 的表达式,经计算得到最后所需要的结果 ρ 值。在这种测量过程中,手续较多,花费时间较长,有时可以得到较高的测量精度。间接测量多用于科学实验中的实验室测量,工程测量中亦有应用。

C 联立测量

在应用仪表进行测量时,若被测物理量必须经过求解联立方程组才能得到最后结果,则称这样的测量为联立测量。在进行联立测量时,一般需要改变测试条件,才能获得一组联立方程所需要的数据。

对联立测量,其操作手续很复杂,花费时间长,是一种特殊的测量方法。它只适用于科学实验或特殊场合。

1.2.2 偏差式测量、零位式测量和微差式测量

A 偏差式测量

在测量过程中,用仪表指针的位移(即偏差)决定被测量的测量方法,称为偏差式测量法。应用这种方法进行测量时,标准量具不装在仪表内,而是事先用标准量具对仪表刻度进行校准;在测量时,输入被测量,按照仪表指针在标尺上的示值,决定被测量的数值。它是间接方式实现被测量与标准量具的比较。例如,用磁电式电流表测量电路中某支路的电流,用磁电式电压表测量某电气元件两端的电压等,就属于偏差式测量法。采用这种方法进行测量,测量过程比较简单、迅速,但测量结果的精度低。这种测量方法广泛用于工程测量。

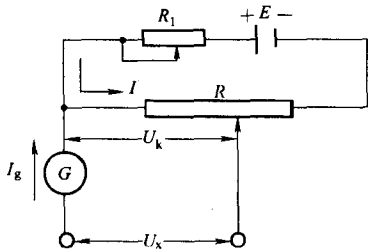


图 1.2.1 电位差计简化等效电路

B 零位式测量

在测量过程中,用指零仪表的零位指示测量系统的平衡状态;在测量系统达到平衡时,用已知的基准量决定被测未知量的测量方法,称为零位式测量法。应用这种方法进行测量时,标准量具装在仪表内。在测量过程中,标准量直接与被测量相比较;调整标准量,一直到被测量与标准量相等,即使指零仪表回零。如图 1.2.1 所示电

路是电位差计的简化等效电路。在进行测量之前,应先调 R_1 ,将回路工作电流 I 校准;在测量时,要调整 R 的活动触点,使检流计 G 回零,这时 $I_g = 0$,即 $U_k = U_x$,这样,标准电压 U_k 的值就表示被测未知电压值 U_x 。

采用零位式测量法进行测量,优点是可以获得比较高的测量精度,但是测量过程比较复杂。采用自动平衡操作以后,虽然可以加快测量过程,但由于受工作原理所限,它的反应速度也不会很高。因此,这种测量方法不适用测量变化迅速的信号,只适用于测量变化较缓慢的信号。

C 微差式测量

微差式测量法是综合了偏差式测量法与零位式测量法的优点而提出的测量方法。这种方法是将被测的未知量与已知的标准量进行比较并取得差值后,用偏差法测得此值。应用这种方法测量时,标准量具装在仪表内,并在测量过程中将标准量直接与被测量进行比较。由于二者的值很接近,因此在测量过程中不需要调整标准量,而只需要测量二者的差值。

微差式测量法的优点是反应快而且测量精度高,特别适用于在线控制参数的检测。

1.3 测量误差

人们对客观世界的认识总是带有一定的局限性,与客观事物的本来面貌存在差异。测量是在一定的物质基础上进行的。因此,人们在进行各种实际测量时,尽管被测量在理论上存在真值,但由于客观实验条件的限制,被测量的真值实际上是测不到的,因而测量结果只能是真值的近似值,这样就不可避免地存在着测量误差。

1.3.1 误差的基本概念及表达方式

A 绝对误差

绝对误差是示值与被测量真值之间的差值。设被测量的真值为 L_0 ,测量值或示值为 x ,则绝对误差 Δx 为

$$\Delta x = x - L_0 \quad (1.3.1)$$

由于真值 L_0 一般来说是未知的,所以在实际应用时,常用实际值 L 来代表真值 L_0 ,并采用高一级标准仪器的示值作为实际值。故通常用

$$\Delta x = x - L \quad (1.3.2)$$

来代表绝对误差。

在实际测量中,还经常用到修正值这个名称,它的绝对值与 Δx 相等但符号相反,用符号 C 表示:

$$C = -\Delta x = L - x$$

修正值给出的方式不一定是具体的数值,也可以是一条曲线、公式或数表。在某些智能化仪表中,修正值预先被编制成有关程序贮存于其中,所得测量结果已自动对误差进行了修正。

B 相对误差

绝对误差的表示方法有不足之处,因为它不能确切地反映出测量的准确程度。例如,测量两个电阻,其中 $R_1 = 10\Omega$,误差 $\Delta R_1 = 0.1\Omega$; $R_2 = 1000\Omega$,误差 $\Delta R_2 = 1\Omega$,尽管 $\Delta R_1 <$

ΔR_2 ,但不能由此得出测量电阻 R_1 比测量电阻 R_2 准确程度高的结论。因 $\Delta R_1 = 0.1\Omega$, 相对于 10Ω 来讲是 1% , 而 $\Delta R_2 = 1\Omega$, 相对于 1000Ω 来讲是 0.1% , 所得结论是 R_2 的测量比 R_1 的测量更准。因此,为反映测量质量的高低,需引出相对误差的概念,由绝对误差与真值或实际值之比表示相对误差 δ ,即

$$\delta = \frac{\Delta x}{L_0} \times 100\% \approx \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1.3.3)$$

相对误差通常用于衡量测量的准确程度,相对误差越小,准确程度越高。

C 引用误差

引用误差是一种实用方便的相对误差,常在多档和连续刻度的仪器仪表中应用。这类仪器仪表测量范围不是一个点,而是一个量程,这时按式(1.3.3)计算,由于分母是变量,随被测量的变化而变化,所以计算很烦。为了计算和划分仪表的精度等级的方便,通常采用引用误差,它是从相对误差演变过来的,其分母为常数,取仪器仪表中的量程值,因而引用误差 γ 为

$$\gamma = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1.3.4)$$

式中 A ——仪表的满量程。

我国电工仪表共分七级:0.1,0.2,0.5,1.0,1.5,2.5及5.0。例如,0.1级表的引用误差的最大值不超过 $\pm 0.1\%$;0.5级表的引用误差最大值不超过 $\pm 0.5\%$ 等。工业自动化仪表的精度等级一般在0.2~4.0级之间。

引用误差从形式上看像相对误差,但是对某一具体仪表来说,由于其分母 A 是一个常数,与被测量大小无关,因此它实质是一个绝对误差的最大值。例如,量限为 $1V$ 的毫伏表,精度等级为 5.0,即 $\gamma = (\Delta x/A) \times 100\% = 5.0\%$ 。从这个式子可以求出 $\Delta x = 1 \times 5.0\% = 50mV$,这说明无论指示在刻度的哪一点,其最大绝对误差不超过 $50mV$,但各点的相对误差是不同的。在选用仪表时,一般最好能工作在不小于满度值 $2/3$ 的区域。

1.3.2 误差的分类与来源

根据误差出现的规律可分为系统误差、随机误差和粗大误差三种。

A 系统误差

在相同的条件下多次测量同一量时,误差的绝对值和符号保持恒定,或在条件改变时,与某一个或几个因素成函数关系的有规律的误差,称为系统误差,简称系差。例如仪表的刻度误差和零位误差,应变片电阻值随温度的变化等等,都属于系统误差。它产生的主要原因是仪表制造、安装或使用方法不正确,也可能是测量人员一些不良的读数习惯造成的。

系统误差是一种有规律的误差,故可以采用修正值或补偿校正的方法来减小或消除。

B 随机误差

服从统计规律的误差称随机误差,简称随差,又称偶然误差。只要测试系统的灵敏度足够高,在相同条件下,重复测量某一量时,每次测量的数据或大或小,或正或负,不能预知。虽然单次测量的随机误差没有规律,但多次测量的总体却服从统计规律,通过对测量数据的统计处理,能在理论上估计其对测量结果的影响。

随机误差是由很多复杂因素,如电磁场的微变,零件的摩擦、间隙,热起伏,空气扰动,气

压及湿度的变化,测量人员感觉器官的生理变化等,对测量值的综合影响所造成的。它不能用修正或采取某种技术措施的办法来消除。

应该指出,在任何一次测量中,系统误差与随机误差一般都是同时存在的,而且两者之间并不存在绝对的界限。

C 粗大误差

粗大误差是一种显然与实际值不符的误差。如测错、读错、记错以及实验条件未达到预定的要求而匆忙实验等,都会引起粗差。含有粗差的测量值称为坏值或异常值,在处理数据时应剔除掉。这样,测量中要估计的误差就只有系统误差和随机误差两类。

误差的来源是多方面的,例如测量用的工具不完善(称工具误差);测试的设备和电路的安装、布置、调整不完善(称装置误差);测量方法本身的理论根据不完善(称方法误差);测量环境如温度、湿度、气压、电磁场的变化(称环境误差);甚至测量人员生理上的原因,如反应速度、分辨能力(称人员误差)等。

1.3.3 系统误差和随机误差的表达式

设对某被测量进行了等精度,独立的 n 次测量,得值 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 则测定值的算术平均值 $\bar{x}$ 为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.3.5)$$

式中, $\bar{x}$ 又可称为取样平均值。

当测量次数 n 趋于无穷大($n \rightarrow \infty$)时,取样平均值的极限称为测定值的总体平均值,用符号 A 表示

$$A = \lim_{n \rightarrow \infty} \bar{x} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.3.6)$$

测定值的总体平均值 A 与测定值真值 L_0 之差被定义为系统误差,用符号 ϵ 表示

$$\epsilon = A - L_0 \quad (1.3.7)$$

n 次测量中,各次测定值 x_i ($i = 1 \sim n$) 与其总体平均值 A 之差被定义为随机误差,用符号 δ_i 表示

$$\delta_i = x_i - A \quad (i = 1 \sim n) \quad (1.3.8)$$

将式(1.3.7)和式(1.3.8)等号两边分别相加,得

$$\epsilon + \delta_i = (A - L_0) + (x_i - A) = x_i - L_0 = \Delta x_i \quad (1.3.9)$$

式中 Δx_i ——各次测定的绝对误差。

式(1.3.9)表明,各次测量值的绝对误差等于系统误差 ϵ 和随机误差 δ_i 的代数和。

1.3.4 基本误差和附加误差

按使用条件划分,可将误差分为基本误差和附加误差。

A 基本误差

任何测量仪器和传感器都是在一定的环境条件下使用的。环境条件在变化,测量误差也因环境条件(如温度、气压、湿度、电源电压和频率、振动等)的变化而变化。这样在对传感器和仪器进行检定和刻度时,应把所有起影响作用的外界因素控制在变化较窄的条件内。

此条件由国家标准或企业标准文件明确规定,称为标准条件。仪器在标准条件下使用所具有的误差称为基本误差,它属于系统误差。

例如,仪表是在电源电压 $220\text{V} \pm 5\text{V}$ 、电网频率 $50\text{Hz} \pm 2\text{Hz}$ 、环境温度 $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 、大气压力 $101.3\text{kPa} \pm 1\text{kPa}$ 、湿度 $65\% \pm 5\%$ 的条件下标定的。如果这台仪表在这个条件下工作,则仪表所具有的误差就是基本误差。换句话说,基本误差是测量仪表在额定条件下工作所具有的误差。

测量仪表的精度等级就是由其基本误差决定的。不同等级的传感器和仪表的基本误差在国家和企业标准中都有明确规定。

B 附加误差

当使用条件偏离标准条件时,传感器和仪表必然在基本误差的基础上增加了新的系统误差,称为附加误差。例如,温度附加误差、频率附加误差、电源电压波动附加误差等。

在使用传感器和仪表进行测量时,应根据使用条件在基本误差上再分别加以各项附加误差,例如,在电源电压是 $220\text{V} \pm 10\%$ 、温度范围是 $0 \sim 50^\circ\text{C}$ 、仪表可过载运行等条件范围内工作,可以知道测量仪表总误差不超过多少。

1.3.5 测量误差的估计和校正

测量误差中包括有系统误差和随机误差。它们的性质不同,对测量结果的影响及处理方法也不同。

A 随机误差的影响及统计处理

在测量中,当系统误差被尽量消除或减小到可以忽略的程度之后,仍会出现对同一被测量重复进行多次测量时有读数不稳定现象,这说明有随机误差存在。由随机误差性质可知,它服从于统计规律。它对测量结果的影响可用均方根误差来表示。

均方根误差(又称标准误差) σ 为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{n}} \quad (1.3.10)$$

式中 n ——测量次数;

$\Delta x_i = x_i - L$, L 为真值, x_i 为第 i 次测量值。

在实际测量中,测量次数 n 为有限的,真值 L 不易得到,因而用 n 次测量值的算术均值 $\bar{x}$ 代替真值,第 i 次测量误差 $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$,这时的均方根误差则为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (1.3.11)$$

用 $\bar{x}$ 代替 L 产生的均方根误差 $\bar{\sigma}$ 为

$$\bar{\sigma} = \frac{\delta}{\sqrt{n}}$$

测量结果可表示为

$$x = \bar{x} \pm \bar{\sigma} \text{ 或 } x = \bar{x} \pm 3\bar{\sigma} \quad (1.3.12)$$

均方根误差 σ 的物理意义是:在测量结果中随机误差出现在 $-\sigma \sim +\sigma$ 范围内的概率是

68.3%, 出现在 $-3\sigma \sim +3\sigma$ 范围内的概率是 99.7%。 3σ 是置信限, 大于 3σ 的随机误差被认为是粗大误差, 测量结果无效, 此数予以剔除。

B 系统误差的发现与校正

a 系统误差的发现与判别

由于系统误差对测量精度影响比较大, 必须消除系统误差的影响, 才能有效地提高测量精度。下面介绍的是发现系统误差的常用方法。

(1) 实验对比法

这种方法是通过改变产生系统误差的条件从而进行不同条件的测量, 以发现系统误差。这种方法适用于发现不变的系统误差。例如, 一台测量仪表本身存在固定的系统误差, 即使进行多次测量也不能发现。只有用精度更高一级的测量仪表测量, 才能发现这台测量仪表的系统误差。

(2) 剩余误差观察法

剩余误差为某测量值与测量平均值之差即 $p_i = x_i - \bar{x}$ 。根据测量数据的各个剩余误差大小和符号的变化规律, 可以直接由误差数据或误差曲线图来判断有无系统误差。这种方法主要适用于发现有规律变化的系统误差。如图 1.3.1 所示: (a) 若剩余误差大体上是正负相间, 且无显著变化规律, 则不存在系统误差; (b) 若剩余误差有规律地递增或递减, 且测量开始与结果时误差相反, 则存在线性系统误差; (c) 若剩余误差符号有规律地逐渐由负变正, 再由正变负, 且循环交替重复变化, 则存在周期性系统误差; 若剩余误差有图 (d) 所示的变化规律, 且应怀疑同时存在线性系统误差和周期性系统误差。图中 n 为测量次数。

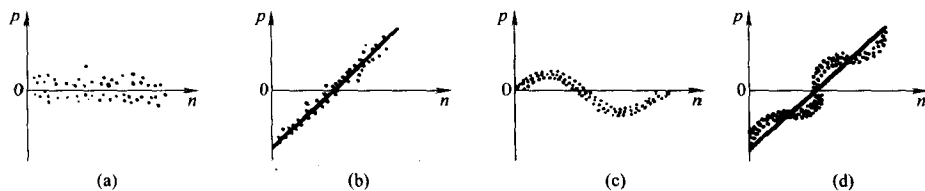


图 1.3.1 $p-n$ 示意图

(3) 不同公式计算标准误差比较法

对等精度测量, 可用不同公式计算标准误差, 通过比较可以发现系统误差。使用上常采用贝塞尔公式和佩捷斯公式计算比较, 即

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n p_i^2}{n-1}} \quad \sigma_2 = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\sum_{i=1}^n |p_i|}{\sqrt{n(n-1)}}$$

$$\text{令 } \sigma_2/\sigma_1 = 1 + u$$

若

$$|u| \geq \frac{2}{\sqrt{n}}$$

则怀疑测量中存在系统误差。

(4) 计算数据比较法

对同一量测量得到多组数据, 通过计算数据比较, 判断是否满足随机误差条件, 以发现系统误差。例如, 对同一量独立测量 m 组结果, 并计算求得算术平均值和均方根误差为:

$\bar{x}_1, \sigma_1; \bar{x}_2, \sigma_2; \cdots; \bar{x}_m, \sigma_m$ 。任意两数据 $(\bar{x}_i, \bar{x}_j)$ 的均方根误差为 $\sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2}$ 。任意两组数据 $\bar{x}_i$ 和 $\bar{x}_j$ 间不存在系统误差的条件是

$$|\bar{x}_i - \bar{x}_j| < 2\sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2}$$

b 系统误差的校正

这里阐述的是当存在系统误差时,如何从电路设计、测量方法和测量数据的处理方面对误差进行修正。

(1) 补偿法

在电路和传感器结构设计中,常选用在同一有害干扰变量作用下能产生误差相等而符号相反的零部件或元器件作为补偿元件。例如,采用负温度系数的热敏电阻补偿正温度系数电阻的温度误差,采用负温度系数的电容补偿正温度系数的电阻引起的时间常数的变化,采用磁分流器补偿磁路气隙中因温度变化引起的磁感应强度的变化等。

(2) 差动法

相同的参数变换器(如电阻、电容、电感变换器)具有相同的温度系数。若将它们接入电桥相邻两个臂时,变换器的参数值输入量作差动变化,即一个臂的参数增加,另一个臂的参数则减小。这时的电桥输出是单个参数变换器输出的两倍。但他们在同一温度场的作用下,由于两臂的参数值相等,温度系数相同,则温度变化引起的参数值相等,尽管参数变化了,然而电桥输出却不受影响。利用信号差动工作而对有害变量是对称作用的差动法,即可提高灵敏度,又能有效地彼此抵消有害因素引起的误差。在检测仪器中,各种参数式变换器几乎都采用差动法接成差动电桥的形式,以降低温度和零位引起的误差。

(3) 比值补偿法

测量电路中经常采用分压器及放大器。它们的变换系数总是与所用电阻元件的电阻比值有关。为了保证精确的比值,可以要求每一个电阻具有精确的电阻值,然而这并非绝对需要,且代价很高。当所选用的电阻具有相等的相对误差和相同的电阻温度系数时,温度变化虽使电阻值变化,但它们仍能保证相互比值的精确性,从而可采用低精度的元件实现比值稳定的高精度分压比或放大倍数。

(4) 测量数据的修正

测量传感器和仪器经过检定后可以准确知道它的测量误差。当再次测量时,可以将已知的测量误差作为修正值,对测量数据进行修正,从而获得更精确的测量结果。

1.3.6 测量误差的合成与分配

系统误差和随机误差由于其规律和特点不同,它们合成与分配的处理方法也不同,须研究各自的理论和方法。

A 测量误差的合成

一个测量系统或一台测量仪表都是由若干部分组成,而各部分又都存在测量误差,各局部误差对整个测量系统或仪表测量误差的影响就是误差的合成问题。

a 系统误差的合成

设测量系统或仪表各环节输入参数分别为 $x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n$,总的输出与输入函数关系为

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

又令 $dx_1, dx_2, \dots, dx_n$ 分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的绝对误差, 则可近似得到各部分系统误差的绝对误差 Δ 的合成表达式为:

$$\Delta = dy = \frac{\partial y}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} dx_n \quad (1.3.13)$$

相对误差 δ 合成的表达式为

$$\delta = \frac{dy}{y} = \frac{\partial y}{\partial x_1} \frac{dx_1}{y} + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} \frac{dx_n}{y} \quad (1.3.14)$$

b 随机误差的合成

设测量系统或仪表有 n 个环节组成, 各部分的标准误差分别为 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_n$, 误差合成的表达式为

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 + 2 \sum_{i < j < n} \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j} \quad (1.3.15)$$

式中 ρ_{ij} ——第 i 和第 j 个单项随机误差之间的相关函数, ρ 的取值为 $-1 \leq \rho \leq 1$ 。

若各环节标准误差相互独立, 则误差合成表达式为

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2} \quad (1.3.16)$$

c 总合成误差

设测量系统或仪表的系统误差和随机误差均为相互独立的, 总的合成误差的极限值可表示为

$$\epsilon = \sum_{i=1}^n \Delta_i + \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2} \quad (1.3.17)$$

B 测量误差的分配

若预先对测量系统或仪表总误差提出要求, 如何确定各组成环节的单项误差之值, 这就是误差合理分配问题。

a 系统误差的分配

系统误差的分配是指在组成一测量系统或设计一台测量仪表时, 应当怎样合理分配各环节或各元件的系统误差。下面以四臂电桥的系统误差分配为例说明系统误差分配方法。

已知四臂电桥的系统综合公式是

$$\delta R_x = \delta R_N + \delta R_2 - \delta R_3$$

式中 δR_N ——标准电阻的相对误差。

$\delta R_2, \delta R_3$ 是非标准电阻相对误差, 一般数值较大, 但 δR_3 前有负号。

若取 $\delta R_2 = \delta R_3$, 则 $\delta R_x = \delta R_N$, 即 R_x 的测量误差 δR_x 只取决于可变标准电阻 R_N 的误差值。在精密电桥中正是按照这种原则设计的, 由于 δR_2 与 δR_3 的相对误差互相抵消, 大大提高了测量精度。

b 随机误差的分配

随机误差本身的特点给误差分配带来了困难, 在误差分配时采用等分配原则, 即认为各环节随机误差均相等, 把总的误差平均分配给各环节。

c 最佳测量方案的选择