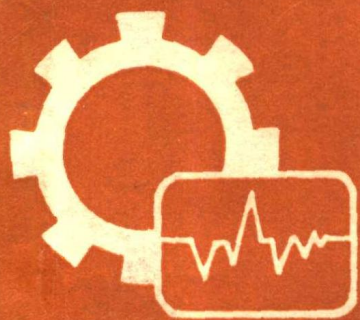
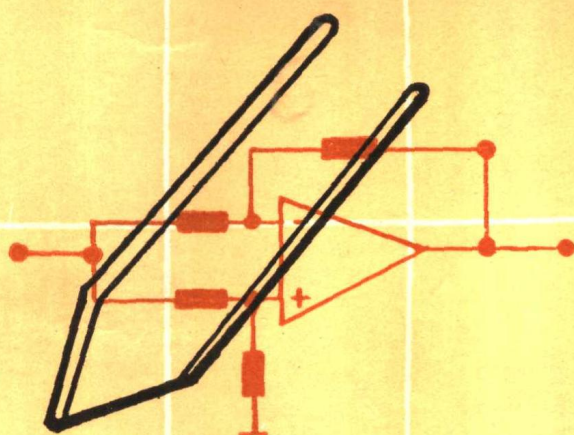




工业检测技术

职工高等学校试用教材



上海科学技术文献出版社

上海市职工高等学校试用教材

工 业 检 测 技 术

张人伟 汪永芬 编
周道宏 钱祖培

上海科学技术文献出版社

上海市职工高等学校试用教材

工业检测技术

张人伟 汪永芬 编
周道宏 钱祖培

•

上海科学技术文献出版社出版

(上海市武康路2号)

新华书店上海发行所发行

上海商务印刷厂印刷

•

开本 787×1092 1/16 印张 17 字数 424,000

1986年5月第1版 1986年5月第1次印刷

印数: 1—7,500

书号: 15192·446 定价: 3.15元

《科技新书目》117—223

前 言

本书是根据上海市和江苏省高等教育局制定的职工高校教材编写计划,以及全国高校工业自动化专业委员会职工教育组(筹)一九八二年九月苏州教材会议通过的〈工业检测技术〉大纲编写的,并已确定为上海市和江苏省职工高等学校工业自动化及有关专业的试用教材。

工业检测技术是电类、自动化类、仪器仪表类有关专业的专业基础课之一。它的任务是介绍工程中常用的传感器和非电量的检测技术;电信号的测量、转换和处理的基本原理及方法;组成检测装置的基本设计思想及方法;测量误差的分析及综合,以及干扰的抑制等工程应用技术方面的基础知识和专业知识。本书的编写顺序为:电量的检测、电信号的变换和处理、检测系统的组成。因考虑到大多数职工高校的有关专业不开设电工计量和电子测量等电测课程,为此在本书的第一、二章中先介绍了测量基础和电测等内容。

全书共分五章,总学时为76学时(不包括实验),在考虑取材的深度和广度时,除了考虑到职工高校的特点外还力图适应广播电视大学、刊、函授大学以及高级职业技术培训的教学需要。本书在正式出版之前,曾在上海第二工业大学有关专业的二届学生的教学中试用。

本书由上海第二工业大学张人伟(主编)、汪永芬、周道宏、钱祖培同志编写,由上海交通大学林明邦副教授主审。书中插图由戚切同志绘制。

一九八四年十二月上海

目 录

绪论	1
第一章 测量技术基础	4
第一节 测量方法及测量仪表的基本性能	4
第二节 误差理论及测量数据的处理	10
第三节 测量数据的处理	29
第二章 电量的测量	34
第一节 电压的测量	34
第二节 频率的测量(计数法)	54
第三节 阻抗的测量	60
第三章 非电量的检测	78
第一节 非电量的检测与传感器	78
第二节 位移-电信号的转换	82
第三节 应变-电信号的转换	102
第四节 磁-电信号的转换	112
第五节 力-电信号的转换	116
第六节 热-电信号的转换	129
第七节 光-电信号的转换	135
第八节 超声波、同位素和激光在检测技术中的应用	145
第四章 电信号的放大和转换	154
第一节 缓变微弱信号的放大	154
第二节 采样-保持电路	172
第三节 数-模转换(D/A 转换)电路	177
第四节 模-数转换(A/D 转换)电路	185
第五节 非线性的线性化处理	204
第五章 自动检测装置	213
第一节 自动检测装置的一般设计方法	219
第二节 误差分析及精度计算示例	234
第三节 干扰及其抑制	234
附录	261

绪 论

检测,是利用各种物理效应,将物质世界的有关信息检取出来,再通过测量的方法赋以定性或定量概念的过程。在信息社会的一切活动领域中——从日常生活、生产活动到科学实验——时时处处都离不开检测。

随着生产过程自动化水平不断提高、自动化应用范围扩大、各类新工业产品剧增、生产技术进步,检测面临着越来越多的新课题,推动了检测技术进一步向深度和广度发展,并提供了大量新的技术手段和物质基础,从而大大丰富和提高了检测技术的内容和水平。

工业检测技术是研究工业生产及其过程自动化领域中,有关信息的检取和测量的实践性应用技术科学,并是一门以物理学、电子技术、自动控制、计算机技术等为基础的综合性课程。学生在学习时往往并不认识到这门课程的必要性和重要性,而在毕业后的实际工作中才体会到离开检测就谈不上自动化。

一、检测技术在现代工业生产领域中的作用

任何工厂为了保证和提高产品质量,必须对原材料、零部件和产品的有关性能、指标进行检测;任何加工设备为了保证正常运转,也必须对这些设备的工况进行检测,同样各种自动化系统(包括生产设备自动化,生产过程自动化,生产管理自动化)也存在着大量工业信息的检测问题。随着现代工业生产向高效率、高精度和高可靠性方向发展,检测技术已进入了主动检测及在线检测的新阶段。传统的只对加工完毕的零部件、半成品进行检测或对产品进行质量检查、计数和分类人们已不满足,而力求使检测与生产(加工)过程同步,及时用检测的结果对生产(加工)过程进行控制(即主动检测技术)。

近二十年来,自控理论、计算机和微型计算机技术的迅速发展,为工业控制、管理创造了有利条件。这说明工业生产的发展不断向检测技术提出新的要求;而检测技术上的新突破,又为工业生产或科学技术上的成功提供可能。

二、工业检测技术的内容

检测技术涉及的内容比较广,除了上述的信息检取和测量方法外,还包括信号的变换和处理、自动检测装置的构成、误差分析以及干扰的抑制等内容,而其重点则是信息的检取,具体地说,就是应用物理的、化学的或其他原理和效应,通过一些传感器或元件,将某些寓有工业信息的非电物理量(或电量),例如压力、流量、温度等转换成便于传输、处理和测量的物理量(通常是电参量,如电流、电压、频率等等)。

在工业领域,常见的检测量有:

- 热工量
1. 温度、热量、比热;
 2. 压力、压差、压强;
 3. 流量、流速、容量;
 4. 物位、液位、界面。

- 机械量
1. 直线位移、角位移、速度及加速度等;
 2. 长度、厚度、直径、间距、斜率等几何量;

3. 力、应力、力矩、振动、重量;
4. 物性、材料缺陷等。
- 电工量
 1. 电压、电流、电功率、电阻抗;
 2. 频率、相位、波形、频谱成分;
 3. 磁场强度、磁感应强度、材料磁性能等。
- 成分量
 1. 气体、液体、固体的化学成分;
 2. 浓度、粘度、湿度、密度、比重;
 3. 酸碱度、盐度。
- 状态量
 1. 工作机械运动状态—启停、振动、位移、声响等;
 2. 生产设备异常状态—超温、过载、泄漏、变形、磨损、管道闭塞、裂纹等。

显然,在实际工程中需要检测的远不止以上所举,如检测非金属物质中的金属、鱼鲜类食品的新鲜程度、各种镀层和涂层的牢度,电焊条芯体及电缆芯线的偏心率等等。

一般检测装置的检测过程如下:

被检测的量经传感器或变换器转换成电信号以后,进行放大或衰减、调制和解调、阻抗变换、分析和运算、模拟量和数字量的相互转换、线性化处理、温度补偿等等,最终以模拟量、数字量或图形、曲线等形式通过各种显示装置,如示波器、记录仪、图象显示装置、打印机、数字显示设备和表计等显示或记录下来。显示的各种量值,表征着检测的结果,只要再作一些标准化处理,如电平转移、量值的比例变换、阻抗变换和考虑抗干扰的隔离措施等,就可以输送给计算机系统或自动控制系统作为信息依据。

构成上述检测装置的各部分的有关原理和方法包括:系统的构成、误差的分析和综合、干扰的排除等等。这些原理和方法都是工业检测技术的内容。

三、检测技术的进展

近年来,随着半导体技术、数字技术及计算机技术的发展,传感器及检测装置也向小型化、高精度化、半导体化、数字化、固体化及智能化方向变革。由于生产自动化的需要,促使检测技术向非接触式检测、无损检测、在线检测、动态检测以及多功能检测等方向发展。当前,检测技术的进展主要表现在以下几个方面:

1. 检测技术性能提高 检测技术性能的不断提 高表现在测量精度、范围、可靠性及使用寿命等方面。

测量精度是检测技术中的主要指标,在三十年代到四十年代间,测量精度一般仅为百分之几到千分之几,而目前已可达万分之几,甚至百万分之几。用直线光栅测量直线位移时,测量范围可达几米数量级,而精度已达微米级。用固态压力传感器检测气体压力及用数字式自动精密电桥测电感、电容、电导和 Q 值时,精度都可达万分之几,近期的数字式电压表的分辨力已高达亿分之五。

2. 检测领域扩大 六十年代,检测技术主要用于工业部门,检测对象大多是温度、压力、流量、液位、转速等工业参量。而今检测的领域正扩大到整个社会需要的各方面,不仅包括核工程、海洋开发、宇宙航行等尖端科学技术和新兴工业领域,而且已涉及生物医疗、环境污染监测、三废治理等方面,甚至已开始渗入日常生活设施中。

3. 应用新技术和新物理效应 检测原理大多以各种物理效应为基础,近代物理学的进展如激光、红外、超声、微波、半导体、放射性同位素等新的成就都为检测技术的开发提供

了更多的依据。如激光测距、测微粒,红外谱线测气体中的二氧化碳的含量,超声波作无损探伤,放射性同位素测厚等。

随着激光和光纤技术的不断发展,以光缆作为传输线的光学传感器已给检测技术带来新的变革,在可望的将来,某些领域中光测法将逐步取代传统的电测法。不仅如此,检测原理已开始吸取现代仿生学的各种成就。大家知道,自然界的生物在亿万年进化过程中形成的许多独特感官其小巧、灵敏、快速、高效、可靠、抗干扰性强等特点,是目前一些先进的传感器也无法与之相比的。这启示我们模拟这些器官来改善甚至创制新型传感器,例如人们从研究响尾蛇捕获青蛙得到启示,从而创制了红外跟踪系统;模仿蝇眼(复眼)制成的照相机,其镜头由1329块小透镜粘合而成,一次可拍摄1329张照片,分辨率达4000条线/厘米。这种照相机可用来大量复制电子计算机精细的显微电路。

微型计算机的应用使检测装置发生了根本性的变革,带微机的检测装置既可扩大各种功能,又能提高测量精度和可靠性。例如这类装置可以自动选择量程、调节平衡、调节最佳值等。利用微机的存贮功能,还可将实验室的标准件作为被测件,测出系统误差并从中扣除,从而达到实验室标准的精度,实现自动校准。另外,这类装置还能对传感器输出的信号进行非线性校正及零点补偿,对测试的数据进行运算和处理,实现模拟量数字量间转换,时域信号与频域信号的转换,单位的换算等等。

四、本课程的任务及学习方法

本教材为测量技术基础,按电量的测量,非电物理量—电量的变换,电信号的转换与处理以及自动检测装置的组成为序进行介绍。通过学习,希望学生能达到下列要求:

1. 掌握测量技术的基本概念与基本理论,掌握测量误差、精度的初步概念。
2. 掌握电量与非电量的测量原理和方法,了解常用传感器的原理、基本结构、性能及分析方法,并能合理选用。
3. 了解电信号转换与处理的一般方法。
4. 了解构成自动检测装置的基本思想方法,初步掌握误差的分析与综合方法。

在学习方法上应注意:

1. 本课程中各章内容都具有其独立性,但又有一定的有机联系,在学习过程中,可能会感到内容散和不易掌握重点。为此,在学习时应时时围绕如何构成检测装置这一要求来理解学习目的,并以信号的流程线将各部分似是孤立的内容联系起来;
2. 传感器部分,着重理解基本原理以及解决信息检取和能量变换的基本思想方法,选用的依据和必须注意的技术性能和指标;
3. 电信号的转换与处理部分,着重理解转换与处理的目的、原理与功能以及组成该环节的思想方法。对具体电路只要求能作原理性分析;
4. 自动检测装置部分着重分析构成装置的基本思想方法,误差的计算,并为课程设计或毕业设计在设计步骤和方法上打好基础;
5. 学好这门课的关键在于联系实际和着眼于应用,要充分发挥在职学习的特点,善于联系本单位的实际,要富于设想,善于借鉴,敢于实践,乐于开发,这样才能学得活,学得好,学得生动而有兴趣。

第一章 测量技术基础

第一节 测量方法及测量仪表的基本性能

一、测量的一般概念

测量对于现代技术和科学的重要性是不言而喻的,可以说没有测量便没有科学,也没有现代技术。在当今的信息革命时代,没有信息的检取与随后的数据测量与处理是很难想象的。

测量是借助于仪器、设备,采用一定的方法,对客观事物取得定性或定量数据资料的认识过程。所谓“定性的”,即通过测量能大致判断出被测量存在与否,或在某一个数量范围内。例如,用检漏仪测试密闭容器是否漏气、用测电笔检测电子设备外壳是否带电、用超声波探伤仪检查铸件内部是否有裂缝和气孔等。所谓“定量的”,即用一定精度等级的测量仪器、仪表对被测量有比较精确的数值大小反映。例如,用电子秤称出被测物的实际重量值、用核辐射探测器测出某种钢板的厚度等。

测量的过程实质上是一个比较的过程,即进行测量时,将一个被测量与一个被选作测量单位的已知标准量进行比较,从而确定被测量对此标准量的倍数,并以数字表示。选定的标准量应该是国际上或国家所公认的,而且性能必须稳定。

上述定义又可用一个测量基本方程式来表示:

$$g = \frac{x}{Q} \quad (1-1)$$

式中: x ——被测物理量;

Q ——标准量;

g ——比值,无量纲的数值。

例如,用水银温度计测量室温时,被测室温是 x ,温度计上的刻度就是标准量 Q 。

由于种种原因,测量结果不可避免地存在误差,因此,测量结果一般应包括数值(大小和符号)、单位及误差范围。例如,某一电阻值测量结果为 $100\Omega(I)$,表明该电阻的阻值为 100、单位为欧姆、误差(I)级,即 $\pm 5\%$ 亦为测量结果的可信赖程度。

电子技术与测量技术有着不可分割的密切关系,以电子技术为手段的测量方法分为两类:一类是测量电量(如电流、电压、频率、阻抗等);另一类是测量非电量,称为非电量的电测。在工业生产中需要测量的物理量很大一部分是非电量(如机械量、热工量和成分量等)。考虑到电信号最便于测量、处理和传输,因而往往将待测的非电量依据一定的物理原理转换为电量后进行测量。而在各种电参量的测量中,又以频率的测量精度为最高,所以电量又常常设法转换为频率进行测量。

检测比测量的含意更广。从字面上理解,检测的意思为信号的检取和测量。一般地说,检测过程是从被测对象取得信息,进行处理,最后数量化的过程。但检测作为现代工程技术

领域中被广泛使用的技术术语,所包含的内容是极其广泛的,因为工业检测的对象不仅涉及到机械量、热工量、成份量等,还有诸如织物的色泽触感,食品的色、香、味,钢笔尖的圆滑程度等感觉量也正逐渐成为工业检测的对象。

二、测量方法

测量方法的分类多种多样,例如根据被测量是否随时间变化可分为静态测量和动态测量;根据测量手段可分为直接测量和间接测量;根据测量方式可分为偏位式测量、零位式测量及微差式测量;根据测量时是否与被测对象接触可分为接触式测量与非接触式测量;根据测量结果的显示方式可分为模拟式测量和数字式测量。另外,为监视生产过程或在水流水线上监视产品质量的测量称为在线测量,反之称为离线测量;在测量时被采集的信息来源多的,称为多点测量,反之称为单点测量等。

(一) 直接测量和间接测量

1. 直接测量 用预先已标定好的测量仪表对某个未知量直接进行测量,从而得到未知量的值。例如,用磁电式仪表测电流、电压;用弹簧秤测物体重量等。使用电桥、电位差计等比较式仪表所进行的测量,因为测量对象就是被测量本身,所以也属于直接测量。

2. 间接测量 对几个与被测量有确定函数关系的物理量进行直接测量,将测得的结果通过表示它们之间关系的公式、曲线或表格,求出该被测量,这一类测量称为间接测量。例如,为了求某一匀质金属球的密度,可分别用天平秤称出球的质量 M ,用游标卡尺测出球的直径 D ,然后通过公式 $\rho = M / \frac{1}{6}\pi D^3$ 即可求出该球的密度。

直接测量的优点是测量过程简单而迅速,因而在工程测量中常用;间接测量因手续繁多,而花费的时间往往较长,除了一般的工程测量外在科学实验中常用。

(二) 偏位式、零位式及微差式测量

1. 偏位式测量 以指针的偏移表示被测量值的测量方法称为偏位式测量。事先用标准量具(体现测量单位的器件,且为已知量)对仪表刻度进行校正,当被测量输入仪表后,指针在刻度盘(或标尺)上的指示值,即表示被测量的大小。显然,采用偏位式测量方式的仪表内不包含标准量具,比较工作往往由测量人员事先完成了。例如,用磁电式电压表测量某电子线路两端的电压、用弹簧秤测物体重量等均为偏位式测量(见图 1-1)。众所周知,年长月

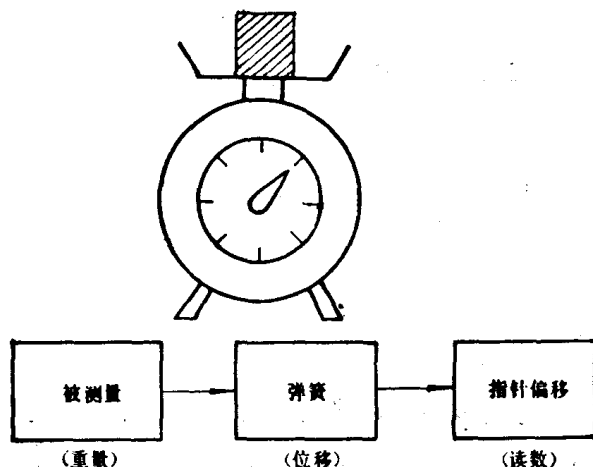


图 1-1 偏位式测量

久,随着弹簧的弹性系数变化,弹簧秤的读数就会不准确。故这种测量方式虽然简单、迅速、方便,但精度不高。

2. 零位式测量 测量系统是否已达到平衡状态以指零仪表指示,当测量系统平衡时,用已知基准量的值决定被测量的值,这种测量方式称为零位式测量。在零位式测量仪表中,标准量具是装在测量仪表内的。在测量过程中,用调整标准量来进行平衡操作的过程,即为将被测量与标准量进行比较的过程。当两者相等时,指零仪表指“0”。例如,用电位差计测量电动势,用天平秤测物体质量都属零位测量。

图 1-2 为天平秤测物体质量的测量过程示意图。这里,砝码是标准量具,它借助天平秤的横梁将被测重量与砝码的差值检出来,并通过检测人员加减砝码使天平达到平衡状态,从而使差值为零。在这个例子中,只要天平横梁足够灵敏,可以检出微小的力矩差值,这时砝码的重量极其接近被测物的重量。

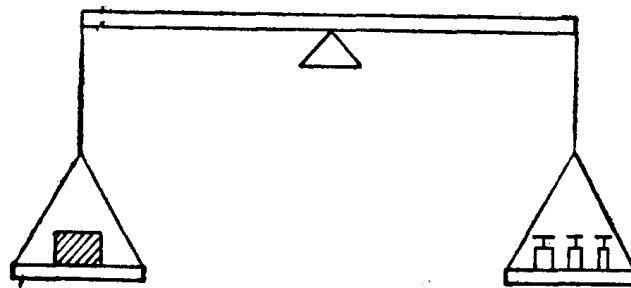


图 1-2 天平秤测量系统

图 1-3 所示为自动平衡电位差计。这是一种随动测量仪表,输出为模拟量方式。测量前调整 R_1 , 以获得适当量程,当被测量 U_x 接入后,与基准量 U_K 值进行比较,其差值由检零放大器输出,控制伺服电机带动滑动电阻接点及指针移动,直到 U_x 等于滑动电阻上的压降 U_K 时检零放大器输出为零,系统达到平衡,基准电压 U_K 的指示值就表示被测电压 U_x 的值。

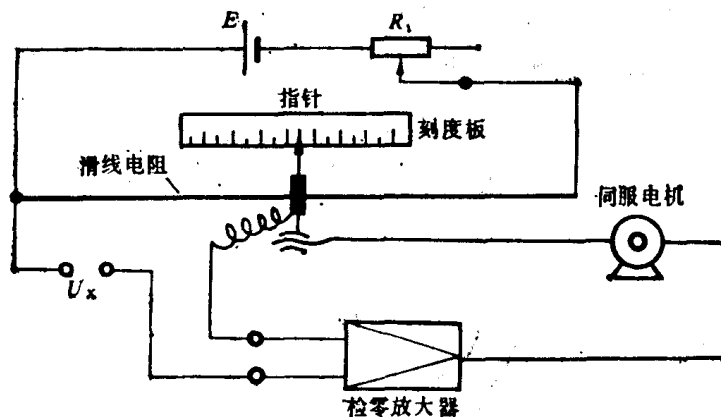


图 1-3 随动测量仪表原理

3. 微差测量法 该方法分两步进行。首先被测量与将要与之进行对比的标准量取得平衡,然后当被测量有微小变动时,测量仪表即因失去平衡而指示其变动部分的值。图 1-4 为用高灵敏度电压表和电位差计测量稳压电源因负载变化而引起输出电压变化的电路,

该电路采用的是微差法。图中 E_1 、 r_1 、 R 为电位差计； E 及 r 为稳压电源输出电压及内阻。当为某一负载 R_L 时，通过调节 R 值使电路达到平衡，指示表头 G 即指示为“0”。当负载有变化时，其输出电压也随之有微小变化，其值即能由 G 指示出来。

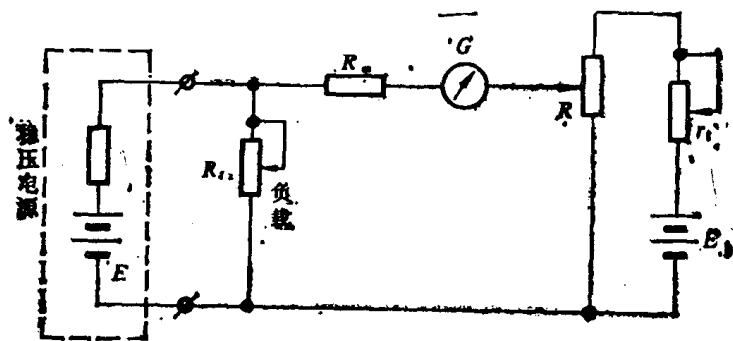


图 1-4 微差法的应用实例

微差式测量电路可接成差动形式，所以这种方式也被称为差动式测量。图 1-5 为检测平印机上纸张是否双张的测量原理框图。正常时，来自标准样品纸张的信号与被测纸张的正常信号平衡，差动放大器没有输出，一旦被测纸张为双张，差动放大器即有输出。

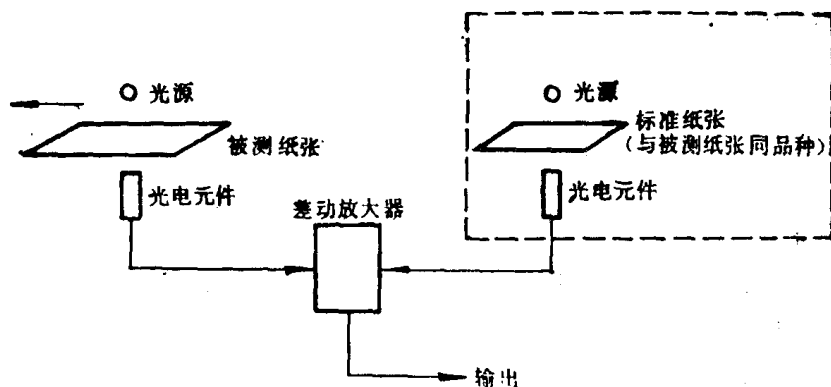


图 1-5 双张检测电路原理

三、测量仪表的基本性能

衡量测量仪表性能的主要指标有：精确度、稳定性和输入输出特性等。

(一) 精确度

测量仪表精确度的内容有三个：精密度、准确度和精确度。

1. 精密度 在相同测量条件下，使用同一测量仪表对同一被测量进行多次重复测量时，所得到的测量值是不完全相同的，这些测量值的分散程度由精密度反映出来，它表示随机误差的大小。

2. 准确度 表示测量仪表的示值与实际值(真值)的偏离程度，即为系统误差的大小。

3. 精确度 简称精度，是精密度和准确度的综合反映(精度有时单指精密度)，常以测量误差的相对值表示。例如，某测量仪表等级为 S ，则

$$S\% = \frac{\Delta Y}{X_{\max} - X_{\min}} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中： ΔY ——仪表在全刻度范围内最大允许绝对误差；

$X_{\max}, X_{\min}$ ——仪表刻度盘的上限和下限值。

精度等级 S 规定取一系列标准值,我国电工仪表精度分 7 级,即 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 级。

为了加深对精密度、准确度及精确度的理解,举一个实例进一步说明。设一支制造精密的小口径步枪,射手技术也很高超,但由于枪上准星未经校准,因此靶面上弹着点虽较集中,但大都集中在靶面的左上角,而不在靶心[见图 1-6(a)]。这种情况可以解释为步枪的精密度高,但准确度差。若枪制造粗糙,射手水平又低,但因为枪事先经过严格校准,因此靶面上弹着点虽然很分散,却均匀分布在靶心的四周[见图 1-6(b)]。这时可说枪的精密度低但准确度高。当枪制造精密,射手水平也高超,枪又经过校准,于是靶面上弹着点密集于靶心周围,分散程度很小,这相当于枪的精确度高[见图 1-6(c)]。

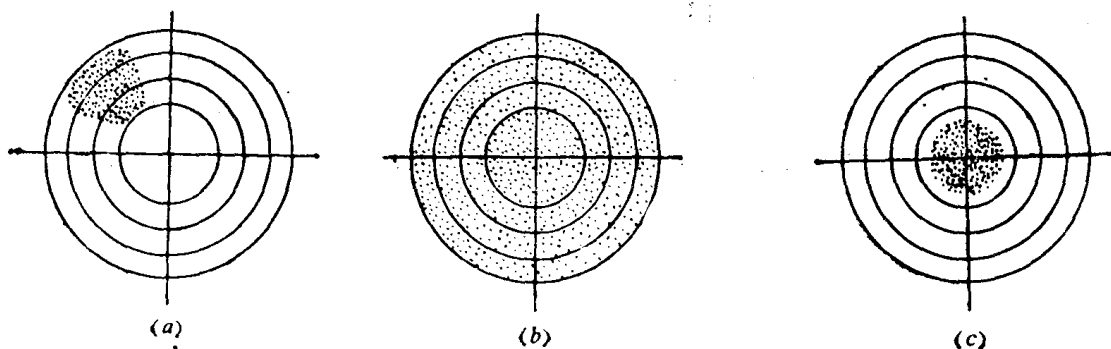


图 1-6 靶面弹着点

(二) 稳定性

1. 稳定度 仪表在规定时间内所有条件都恒定不变的情况下,能维持其示值不变的能力。稳定度一般以仪表精密度的数值和时间的长短来表示,例如,某仪表电压值每 8 小时变化 1.3 mV,可写成 1.3 mV/8h。

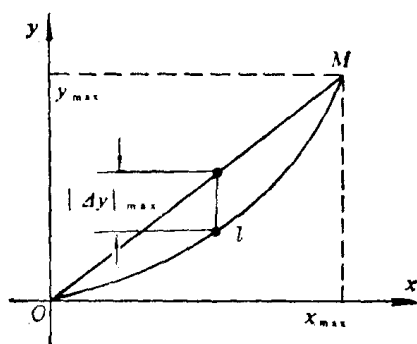
2. 环境影响量 仅由于外界环境变化而引起的示值变化量。造成环境影响量的因素有:温度、气压、电源电压、电源频率、电磁场等。表示环境影响量时必须同时写出示值偏差及造成这一偏差的影响因素的大小。例如,0.02 mA/U $\pm$ 10% 表示电源电压变化 $\pm$ 10% 引起示值变化 0.02 mA。0.3 mV/10 $^{\circ}$ C 表示温度每变化 10 $^{\circ}$ C 引起示值变化 0.3 mV。

(三) 输入输出特性

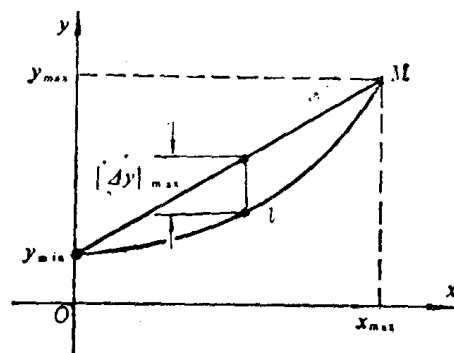
测量仪表的输入输出特性分静特性和动特性。静特性主要有线性度、灵敏度和滞环等。

1. 线性度 如测量仪表的输入量(被测量)为 x , 输出量(指示值)为 y , 则 $y=f(x)$ 就是仪表的静态输入输出特性。一般总希望仪表的静态特性是线性的,但实际仪表的静态特性却往往是非线性的。仪表静特性偏离线性的程度由线性度反映出来。在图 1-7(a) 中, O 点为零点, M 点对应于最大输入的输出量, 则 OM 为理想的输出特性曲线,而实际的输出特性曲线为 l , 设 l 与直线 OM 之间的最大偏差为 $|\Delta y|_{\max}$, 于是线性度 $E_l = |\Delta y|_{\max}/y_{\max}$ 。对于图 1-7(b) 所示, 当 $x=0$ 时, $y=y_{\min}$, 则线性度

$$E_l = \frac{|\Delta y|_{\max}}{y_{\max} - y_{\min}}$$



(a)



(b)

图 1-7 线性度的定义

2. 灵敏度 稳态下仪表输出量的变化值对输入量变化值的比,即 $S = dy/dx$,显然,只有静态特性为线性的仪表灵敏度才是常数,而实际仪表中,输出 y 不仅仅与输入量 x 有关,还受其它因素或干扰的影响,可以下式表示

$$y = f(x, u_1, u_2, \dots, u_n)$$

有害灵敏度是输出量的变化与引起这一变化的其它物理量的变化之比。当然,有害灵敏度越小越好。

仪表的灵敏度阈是使仪表示值发生微小变化所必须输入的被测量的最小变化值,其单位与被测量相同。对于数字式测量仪表,灵敏度阈以分辨力表示。分辨力等于数字式仪表最后一位数字所代表的值。当被测量的变化小于分辨力时,因为仪表最后一位数字不变,而示值亦不变,即仪表对输入量的这个变化没有任何反应,也即不能分辨。

3. 滞环 滞环反映了测量仪表正向特性与反向特性的不一致性。滞环误差 $\varepsilon_{hm} = |y_1 - y_2|$ (见图 1-8)。设在整个测量范围内的最大滞环误差为 ε_{hm} ,则最大滞环误差率 $E_{hm} = \varepsilon_{hm}/y_{max}$ 。一般 E_{hm} 以百分数表示。

4. 动态特性 动态特性反映了当被测量随时间迅速变化时,仪表示值与被测量之间的关系。动态情况下仪表的输入输出关系用微分方程或传递函数来描述。仪表的动态数学模型可用分析法或实验法来建立,但有时较为困难。在实际工作中,常用典型输入信号及给定初始条件下的特解描述仪表动态特性。典型的动态输入信号有单位阶跃输入和单位脉冲输入等,仪表对上述输入的响应分别称为阶跃响应和脉冲响应。

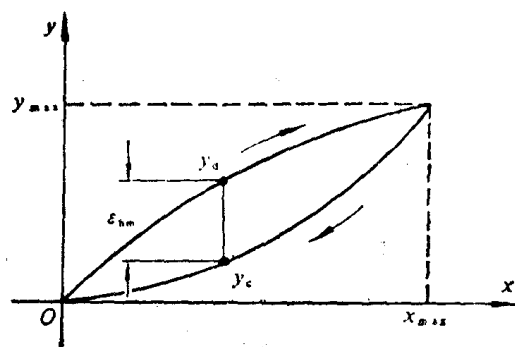


图 1-8 滞环

图 1-9 所示为表示动态过程性能指标的阶跃响应曲线。图中所示主要时域性能指标有:延迟时间 t_d 、上升时间 t_r 、峰值时间 t_p 、调整时间 t_s 、超调量 M_p 等。

对线性定常测量系统,也可以用单一频率的正弦波输入,这时系统的频率特性表现为幅频特性和相频特性。常用的频域性能指标有:开环增益 K_o 、谐振频率 ω_r 、谐振峰值 M_r 、开环相移 φ 、闭环截止频率 ω_c 、闭环带宽 $(0 \sim \omega_c)$ 等。闭环系统的幅值不小于 -3dB (或 -6dB) 时,

对应的频率范围为 $0 \leq \omega \leq \omega_c$ 称为系统带宽, 它反映测量系统的响应速度。一般静态测量要求带宽 $0 \sim 2\text{Hz}$, 动态测量要求带宽为 $10 \sim 10^4\text{Hz}$ 。

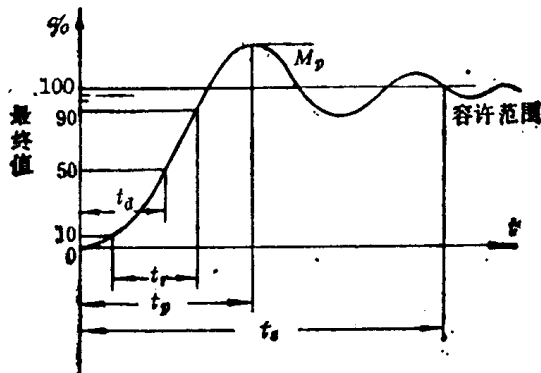


图 1-9 阶跃响应曲线

第二节 误差理论基础

一、测量误差

由实践经验可知, 即使用同一测量仪器来测量同一被测量, 在多次反复测量中所测得的值, 也总有一定程度的差异。某量值的误差定义为该量的给出值与真值之差, 即

$$\text{误差} = \text{给出值} - \text{真值} \quad (1-3)$$

广义地说, 所谓给出值, 不仅指测量值, 还包括标称值、示值、计算近似值等, 但在检测技术中, 给出值一般指测量值或示值。若某个量没有给出值, 也就谈不上误差的大小。因为测量结果不可避免地存在误差, 这就使误差理论在测量技术中占有很重要的地位。

真值是指在一定条件下, 被测量的实际值。一般情况下, 真值往往是未知的, 但有时是已知的, 或从相对意义上说来是已知的。例如, 三角形内角之和为 180° , 称为理论真值。其次是计量学上的约定真值, 例如, 水的三相点温度为 273.16°K 。凡精度高一级仪器的误差与精度低一级仪器的误差相比, 前者小于后者的 $1/5 \sim 1/20$ 时, 则高一级仪器的指示值可以认为是低一级仪器指示值的相对真值。

反映给出值偏离真值大小的误差, 称为绝对误差, 与绝对误差大小相等、符号相反的量称为修正值, 即

$$\text{修正值} = \text{真值} - \text{给出值} = -\text{误差} \quad (1-4)$$

通过校准仪器可以得到修正值, 再由给出值和修正值即可算得真值。

为了叙述方便, 以后一般用示值作为给出值。但需要指出的是, 示值与读数是有所区别的, 读数通常指从仪表刻度盘, 显示器等读数装置上读到的数字, 而示值则是该数字所代表的被测量的值。

二、误差的分类

误差的分类名目繁多, 其中最常用的是按表示方式分为绝对误差和相对误差; 按误差出现的规律分为系统误差、随机误差和粗差。实用中有时也根据误差的来源分为仪器误差、人员误差、方法误差等。在工业检测中, 还有空间的误差和时间的误差。时间误差也称动态误差。另外, 由于在工业检测中, 被测量往往处于变化之中, 而测量系统都具有一定的动态特性, 故仪表的示值不一定能反映该时刻被测量的大小, 从而引起附加误差。工业检测中的被测对

象又往往在空间具有一定的广延度,而所进行的一般是点测量,使这种空间误差成为不可避免。例如,对炉温进行测量时,实际测得的是炉内一点或几点的温度,但炉温却构成的是一个温度场,因此最理想的测量是将该温度场全面地准确地显示出来。

(一) 绝对误差

设真值为 A , 示值为 x , 则绝对误差为

$$\Delta x = x - A \quad (1-5)$$

x 可能比真值 A 小, 也可能比真值 A 大, 因此绝对误差 Δx 是一个代数值, 可能为正, 也可能为负。

(二) 相对误差

有时绝对误差不足以反映示值偏离真值大小的程度, 所以还要用相对误差来表示:

1. 实际相对误差

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \text{ 或 } \gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1-6)$$

2. 示值相对误差

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \text{ 或 } \gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\%$$

仅在 Δx 很小时, $\gamma_x \approx \gamma_A$ 。

3. 满度相对误差(又称引用相对误差)

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

式中: x_m ——仪表量程。

满度相对误差是为了比较和划分仪表的准确程度而引入的。前面所提仪表的精度等级 s , $s\%$ 正表示了合格仪表的最大相对误差, 也就是满度相对误差, 因为这里 Δx 表示了该量程内绝对误差的最大可能值。在这一量程内, $\Delta x \leq x_m \cdot s\%$, $\frac{\Delta x}{x} \leq \frac{x_m}{x} \cdot s\%$, 显然, x 越大, 相对误差越小, 这说明仪表越是接近满度值使用, 其相对误差越小。又由于 $x \leq x_m$, 所以仪表在满度值附近的相对误差最大不超过 $s\%$ 。

4. 对数相对误差(又称分贝误差)。在无线电、声学等领域的测量中, 经常用到分贝误差。设两个电压比为 $x = \frac{U_2}{U_1}$, 以分贝表示为 $K = 20 \lg x \text{ dB}$, 若 x 出现误差 Δx , 则 K 也出现相应的误差 ΔK , 即

$$\begin{aligned} K + \Delta K &= 20 \lg(x + \Delta x) \\ \Delta K &= 20 \lg\left(1 + \frac{\Delta x}{x}\right) \text{ dB} \end{aligned} \quad (1-8)$$

所以

若以 γ_{dB} 表示分贝误差(即上式中的 ΔK), 而 $\frac{\Delta x}{x} = \gamma_x$ 表示相对误差, 于是上式又可表示为

$$\gamma_{dB} = 20 \lg(1 + \gamma_x) \text{ dB} \quad (1-9)$$

[例] 已知待测电压略小于 100V, 现有两只电压表, 一只为 0.5 级, 量程为 0~300V; 另一只为 0.1 级, 量程为 0~100V, 问选用哪一只电压表测量较好?

[解] 用 0.5 级 0~300V 电压表测量 100V 电压时, 最大相对误差为

$$\gamma_{x1} = \frac{x_{m1}}{x} s_1 \% = \frac{300}{100} \times 0.5\% = 1.5\%$$

若用 1.0 级 0~100V 电压表测量 100V 电压,最大相对误差为

$$\gamma_{x2} = \frac{x_{m2}}{x} \cdot s_2 \% = \frac{100}{100} \times 1.0\% = 1.0\%$$

所以,用 1.0 级表测量误差反而较小。

此例说明,在选用测量仪表时,应纠正单纯追求精度等级,认为等级越高越好的片面观点,而要根据被测量的大小,在选择仪表精度等级时,要考虑合适的量程。

(三) 系统误差

倘若电压表的零点未经校准,例如偏正时,则所测得的电压值都将比实际值偏大,这就是系统误差。一般在同一条件下,多次测量同一被测量时,误差的绝对值和符号保持不变,而在条件改变时出现按某一确定规律变化的误差,称为系统误差。系统误差往往是由某一因素或某几个因素造成的,它与这些因素的关系一般可用解析公式、曲线或图表来表示。以射击为例,因枪的准星未校准而造成的误差就是系统误差。

(四) 随机误差

使用校准过准星的枪射击,也未必能每枪击中靶心,当前一枪击中某一点时,其后一枪击中靶面何处,是难以预料的,即每一枪击中点离靶心的距离及方向完全是随机的。造成类似这种随机误差的原因是复杂的(多个微小因素),其表现往往时大时小,时正时负,对单个误差无规律可言,而其整体分布却遵循一定的规律,即服从正态分布。

(五) 粗差

明显偏离真值的误差称为粗差,例如测错、读错、记错等造成的误差。瞬发性的系统误差,如果数值很大,也会造成粗差。就数值大小而言,粗差一般明显地超过正常条件下的系统误差和随机误差。含有粗差的测量值称为坏值或异常值。正常的测量结果中不应含有坏值,所有坏值都应予以剔除(关于坏值的判别与剔除在后面介绍)。

三、随机误差

(一) 正态分布

随机误差一般服从正态分布。这是因为随机误差是由大量相互独立的随机因素的综合影响造成,而每一个别因素对总误差的影响是很小的,根据概率论中的中心极限定理,这类随机误差近似服从正态分布。

连续型正态随机变量 X 的概率密度函数为

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1-10)$$

简记为 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ 。 $p(x)$ 的图形如图 1-10(a) 所示,最大值点在 $x = \mu$ 处 (μ 称为均值或期望值),曲线对称于直线 $x = \mu$,在 $x = \mu \pm \sigma$ 处有拐点,当 $x \rightarrow \pm\infty$ 时,曲线以 x 轴为其渐近线。

以 x 表示测量值, μ 代表真值 A ,则 $x - \mu = x - A = \delta$ 就是随机误差,于是

$$p(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1-11)$$

$p(\delta)$ 的图形如图 1-10(b) 所示,曲线对称于纵轴,最大值点在 $s = 0$ 处。这表明,在多次重复