声明

本电子书由中国农业出版社数字出版，相关权利归中国农业出版社拥有。读者、著作权人和（或）依法可以行使著作权的权利人如有疑问，请与中国农业出版社联系：

地址：北京市朝阳区麦子店街１８号楼

邮编：100026

电话：010-64194921　010-65005894

E-mail：lishanzhao@sina.com

中国农业出版社

全国高等农业院校教材

全国高等农业院校教材指导委员会审定

检测技术与自动化仪表

王一鸣 主编

农业电气化与自动化专业用

中国农业出版社

内 容 简 介

本书介绍检测技术理论基础，常用传感器的工作原理与特性、测量电路、信号变换与处理电路；过程参数检测仪表，基本控制规律，电动单元组合仪表的原理、特性、选用原则等。

为加强工程实用性，本书选编了一定数量的工程实例、习题和思考题，以利读者掌握和应用。

本书可作为高等农业院校农业电气化自动化专业的基本教材，也可作为高等工业院校工业电气自动化专业及有关专业的参考教材和供从事检测技术与自动化仪表的工程技术人员参考。

全国高等农业院校教材

检测技术与自动化仪表

王一鸣　主编

农业电气化与自动化专业

中国农业出版社

主　编　王一鸣（北京农业工程大学）
编　者　王一鸣（北京农业工程大学）
　　李永常（东北农业大学）
主　审　王绍纯（北京科技大学）

前　言

本书是根据农业部1989年高等农业院校教材编审出版规划，作为高等农业院校“农业电气化自动化专业”检测技术与自动化仪表课程教材而编写的。

本书涉及的领域比较广泛，为使读者获得比较系统和完整的概念，全书共分上、下二篇。上篇介绍了检测技术理论基础、常用传感器的工作原理与特性、测量电路、信号变换与处理电路。下篇介绍压力、流量、物位、成分分析仪表；动圈指示调节仪表、电动单元组合仪表的原理、特性、选用原则。

由于检测技术与自动化仪表是一门知识面宽、实践性强的学科，单靠书本知识显然不够，应重视自学和实际能力的培养。为此，除课堂讲授外，必须安排实物观察、参观、演示及实验等环节。

本书为高等农业院校农业电气化自动化专业的基本教材，也可作为高等工科院校电气自动化专业的参考教材。对从事检测技术和自动化仪表的工程技术人员也具有参考价值。

参加本书编写的有王一鸣（第一至十二章）和李永常（第十三至十六章）同志。全书由王一鸣同志主编。北京科技大学王绍纯教授对本书进行了全面审阅。北京农业工程大学汪懋华教授对本书的编写给予了热情支持和帮助。在此一并表示深切的谢意。

由于编者水平有限，不妥及错误之处，恳切希望读者批评指正。

编　者

1993年6月

目　　录

绪论 …… 1

上篇　检测技术

概述 …… 3

第一章　检测技术理论基础 …… 4

第一节　测量方法 …… 4

第二节　测量仪表及测量系统 …… 6

第二章　误差分析与数据处理 …… 14

第一节　误差的概念和分类 …… 14

第二节　随机误差 …… 16

第三节　系统误差 …… 23

第四节　实验数据的回归分析方法 …… 25

习题及思考题 …… 30

第三章　电阻式传感器 …… 31

第一节　电阻应变式传感器 …… 31

第二节　电位器式电阻传感器 …… 43

第三节　应用举例 …… 48

习题及思考题 …… 49

第四章　电感式传感器 …… 51

第一节　可变磁阻式传感器 …… 51

第二节　差动变压器 …… 62

第三节　涡流式传感器 …… 65

第四节　电感式传感器的设计与应用 …… 72

习题及思考题 …… 79

第五章　电容式传感器 …… 80

第一节　电容式传感器的工作原理及结构型式 …… 80

第二节　电容式传感器的静态特性 …… 81

第三节　测量电路 …… 83

第四节　电容式传感器的设计与应用 …… 90

习题及思考题 …… 92

第六章　电势式传感器 …… 94

第一节　磁电式传感器 …… 94

第二节　压电式传感器 …… 97

第三节　霍尔式传感器 …… 107

习题及思考题……117
第七章　光电式传感器……118
第一节　光电效应与光电器件……118
第二节　光电式传感器测量电路……131
第三节　光电传感器的应用……134
习题及思考题……135
第八章　温度测量……136
第一节　温度与温标……136
第二节　温度检测原理及其仪表分类……138
第三节　热电偶传感器……139
第四节　热电阻传感器……152
习题及思考题……158
第九章　信号的处理与变换……159
第一节　信号处理电路……159
第二节　数模转换与模数转换……164
习题及思考题……178

下篇　自动化仪表

概述……181
第十章　成分自动分析仪表……182
第一节　概述……182
第二节　空气湿度及固体散料中水分的检测……183
第三节　氧含量分析仪……190
第四节　红外线气体分析仪……194
第五节　工业酸度计……196
第六节　气相色谱仪……199
习题及思考题……201
第十一章　物位检测仪表……202
第一节　浮力式液位计……203
第二节　差压式液位计……204
第三节　电容式物位计……206
习题及思考题……208
第十二章　压力、流量检测仪表……209
第一节　压力检测仪表……209
第二节　流量测量仪表……214
习题及思考题……223
第十三章　动圈指示调节仪表……224
第一节　动圈式指示仪表的原理与结构……224
第二节　配热电偶的动圈温度指示仪表……228
第三节　配热电阻的动圈温度指示仪表……230
第四节　动圈式双位调节仪表……231

第五节　动圈式连续电流输出PID调节仪表……238
习题及思考题……243
第十四章　DDZ-Ⅱ系列电动单元组合仪表……244
第一节　概述……244
第二节　差压变送器……245
第三节　DDZ-Ⅱ型温度变送器……259
第四节　DDZ-Ⅱ型调节器……263
习题及思考题……270
第十五章　DDZ-Ⅲ系列电动单元组合仪表……271
第一节　概述……271
第二节　DDZ-Ⅲ型温度变送器……274
第三节　DDZ-Ⅲ型差压变送器……281
第四节　DDZ-Ⅲ型调节器……284
第五节　DDZ-Ⅲ型电/气转换器……293
习题及思考题……294
第十六章　执行器……295
第一节　电动执行器……295
第二节　气动执行器……297
习题及思考题……306
附录Ⅰ　标准化热电偶分度表……307
附表Ⅰ—1　铂铑$_{10}$-铂热电偶分度表……307
附表Ⅰ—2　铂铑$_{30}$-铂铑$_{6}$热电偶分度表……309
附表Ⅰ—3　镍铬-镍硅（镍铝）热电偶分度表……311
附表Ⅰ—4　镍铬-考铜热电偶分度表……313
附表Ⅰ—5　铜-康铜热电偶分度表……314
附录Ⅱ　标准化热电阻分度表……315
附表Ⅱ—1　铂热电阻温度与电阻值换算表……315
附表Ⅱ—2　铂热电阻温度与电阻值换算表……316
附表Ⅱ—3　铜热电阻温度与电阻值换算表……317
附录Ⅲ　湿度表……318
附表Ⅲ—1　相对湿度表（表中所列数值均为百分数）……318
附表Ⅲ—2　露点温度与测量头平衡温度及铂电阻值关系表……320
主要参考文献……321

绪　论

检测技术与自动化仪表是以物理学、电子学、自动控制、电子计算机、测量技术等原理为基础的一门综合性技术学科。它的研究对象为：对各种材料和构件进行测量和计量；对自动化系统中各种工艺参数进行自动检测。通过采用各种检测仪表、调节仪表、控制装置及电子计算机等自动化技术工具，对整个生产过程进行自动检测、监督和控制，以达到实现各种最优的技术经济指标、提高经济效益和劳动生产率、节约能源、改善劳动条件、保护环境等目的。它的研究内容为检测技术和自动化仪表的基本工作原理、结构、类型、性能、特点和适用范围。

作为一个完整的检测系统，包括了信息的获得、转换、显示和处理等几个部分。一般包括传感器、测量电路、放大器、指示仪、记录仪等，有时还有数据处理仪器。

传感器是一个把被测的非电量变换成电量的装置，它在检测系统中占有重要的位置，它获得信息的正确与否，关系到整个测量系统的精度，如果传感器的误差很大，后面的测量电路、放大器、指示仪等的精度再高也将难以提高测量系统的精度。

测量电路的作用是把传感器的输出变量变成电压或电流信号，使能在指示仪上指示或在记录仪中记录。测量电路的种类常由传感器的类型而定，如电阻式传感器需采用一电桥电路把电阻值变换成电压或电流值输出，所以它属于信号的转换部分，由于测量电路的输出信号一般比较小，为了能使指示仪工作或记录机构运动，常常要将信号加以放大，所以在测量电路中一般还带有放大器，这也是一种信息的转换。

测量的目的是使人们了解要测的数值，所以必须有显示装置。显示的方式，目前常用的有三类：模拟显示、数字显示和图像显示。

对于动态信号的测量过程，有时还必须对测得的信号数值加以分析和数据处理，属于这方面的仪器有频谱分析仪、波形分析仪、实时信号分析仪等。

科学技术的发展和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。而在另一方面，科学技术的发展又为检测技术的发展提供了新的前提和新的途径，同时也提出了新的课题。

在现代化生产，特别是在专业化生产中，由于采用了新的工艺、高效设备和自动化手段等措施，而使生产过程自动化水平不断提高，自动化范围逐步扩大，从而提高了劳动生产率和产品质量，改善了生产劳动条件。

在实现自动化过程中，检测技术和自动化仪表的采用是首当其冲的，因为没有这些，建立任何一个自动化系统是难以想象的。

为了进一步说明检测技术与自动化仪表在自动化系统中的应用和地位，现将自动化系统分组叙述如下：

1.自动检测系统　为了对生产设备和工艺过程进行自动保护、自动监视；为了对产品

按某项指标进行分类；为了实行生产管理而对材料、构件和产品的计量所构成的自动系统叫做自动检测系统。

2.模拟反馈控制系统　对生产过程工艺参数采用模拟量测量，并进行负反馈自动调节的系统叫做模拟反馈控制系统，一般称为PID调节。

3.数字计算机控制系统　计算机控制系统应用于过程控制领域，实现了直接数字控制（DDC）与设定值控制（SPC）。

4.集中分散型控制系统　由于生产过程是一个分散系统，因此，过程控制的方式最好是分散进行，而监视、操作与最佳化管理，则以集中为好，应用计算机可以实现集中分散的分级控制。

检测技术与自动化仪表虽然已经得到广泛的应用，但是随着现代科学技术的发展，对它提出了愈来愈高的要求，因此仍然在继续不断地向前发展。当前除不断提高性能，可靠性外，总的趋向是小型轻量化，测量放大一体化，无接触化、智能化。

上篇　检测技术

概　　述

科学技术和生产的发展与测量技术及测量仪表是息息相关的。在科学实验和生产过程中，为了及时了解实验进展情况，生产过程的情况及它们的结果。人们要经常对某些物理量，如拉压力、加速度、位移、温度等参数进行测量。可以说，离开测量，科学研究工作和生产过程自动化是无法实现的。

科学研究工作常常对事物进行实验性的探讨，这实际上就是一系列的测量，没有适当的测量方法和测量仪表就不能达到目的。从科学发展史可以了解，测量技术的完善，测量精度的提高，会促使人们发现新的自然规律。反过来，科学技术的进步又给测量技术的发展创造了条件。

测量在生产中也起着巨大的作用，现代的自动化生产是基于先进和发达的测量技术和测量与控制仪表。

测量是人们借助于专门的技术工具，通过实验的方法，对某一客观事物取得数量观念的认识过程。它也是一个比较过程，即将被测量与和它同性质的标准量进行比较，获得被测量为标准量的若干倍的数量概念（标准量应该为国际或国内所公认的性能稳定的量）。

测量的结果可以表现为一定的数字，也可以表现为一条曲线或者显示成某种图形等。但无论其表现形式如何，测量结果总应包含其数值大小和相应的单位。

随着科学技术和生产发展的需要，测量技术已经发展成为一门较完整的技术学科。它所涉及的内容是比较广泛的，从被检测物理量的实际情况出发，首先探讨能够应用什么物理原理，将被检测物理量（其中绝大部分是非电量，如热工参数：温度、压力、流量、液位等；机械量参数：位移、力、速度、加速度等；其它参数如酸碱度、混合物的各成分含量等）转换成便于传输和处理的物理量。进而研究信号的放大和加工变换方法；信号的接收与显示方法；最后还要研究数据的处理方法以及相应的技术措施，以便为生产过程的自动化及科学研究等提供可靠的数据。

学习和掌握了检测技术，就能够在科学研究和生产中所面临的检测任务面前，正确地选择测量原理和方法，正确地选择检测所需要的技术工具（如传感器、测量和变换电路、显示电路或仪表等），组成恰当的测量系统，完成所提出的检测任务。

第一章　检测技术理论基础

第一节　测量方法

一、概　　述

一切测量过程可概括为“并列”、“示差”、“平衡”、“读数”四步过程。测量方法就是针对不同的测量任务，去正确实现上述四步测量过程所采取的具体措施。测量方法的正确与否是十分重要的，它直接关系到测量工作是否能正常进行，能否符合规定的技术要求。因此，必须根据不同的测量任务要求，找出切实可行的测量方法，然后根据测量方法选择合适的测量工具，组成测量系统，进行实际测量。如果测量方法不合理，既使有精密的测量仪器或设备，也不能得到理想的测量结果。

测量方法分类形式有多种。按测量手续分类有：直接测量、间接测量和组合测量；按测量方式分类有：偏差式测量、零位式测量和微差式测量。除此之外，还有许多其它分类方法，例如按测量敏感元件是否与被测介质接触，可分为接触式测量与非接触式测量；按被测量变化快慢，可分为静态测量与动态测量，按测量系统是否向被测对象施加能量，可分为主动式测量与被动式测量等。

二、直接测量、间接测量与组合测量

1.直接测量　用已经标定好的测量仪器，对某一未知量直接进行测量，得出未知量的数值，这类测量称直接测量。例如，用弹簧管式压力表测量压力，用磁电式电表测量电压或电流等。直接测量的优点是测量过程简单而迅速，是工程上采用得比较广泛的测量方法。

2.间接测量　对几个与被测量有确切函数关系的物理量进行直接测量，然后通过代表该函数关系的公式、曲线或表格，求出该未知量，这类测量称为间接测量。例如，在直流电路中，直接测出负载的电流I和电压U，根据功率$P=UI$的函数关系，便可求得负载消耗的电功率。

间接测量方法手续较多，花费时间也较多，但是，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。

3.组合测量　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，则称这样的测量为组合测量。在进行组合测量时，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。

例如，为了测量电阻的温度系数，可以利用电阻值与温度间的关系公式

$$R_t = R_{20} + \alpha(t-20) + \beta(t-20)^2$$

式中　α、β——电阻的温度系数

R_{20}——电阻在20℃时的阻值

t——测试时的温度

为了测出电阻的 α 与 β 值，采用改变测试温度的办法，在三种温度 t_1、t_2 及 t_3 下，分别测出对应的电阻值 R_{t1}、R_{t2}、R_{t3}，然后代入上述公式，得到一组联立方程，解此联立方程组后，便可求得 α、β 和 R_{20}。

组合测量的测量过程比较复杂，花时较多，是一种特殊的精密测量方法，一般适用于科学实验或特殊场合。

三、偏差式测量、零位式测量与微差式测量

1.偏差式测量　在测量过程中，用仪表指针相对于刻度线的位移（偏差）来直接表示被测量，这种方法称为偏差式测量法。采用这种方法进行测量，测量过程比较简单、迅速，但是，测量结果的精度较低，被广泛用于工程测量。

图1—1所示的压力表就是偏差式测量仪表。由于被测介质压力的作用使弹簧变形，产生一个弹簧反作用力，当被测介质压力产生的作用力与弹簧变形反作用力相平衡时，活塞达到平衡，这时指针位移在标尺上对应的刻度值，就表示被测介质压力值。显然，此压力表的指示精度取决于弹簧质量及刻度标准情况；由于弹簧变形不是力的标准量，必须用标准重量校准弹簧，因此，这类仪表一般精度不高。

2.零位式测量（又称补偿式或平衡式测量）　在测量过程中，用指零仪表的零位指示，检测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。例如，用电位差计测量电势就属于零位式测量法。图1—2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 为零，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。

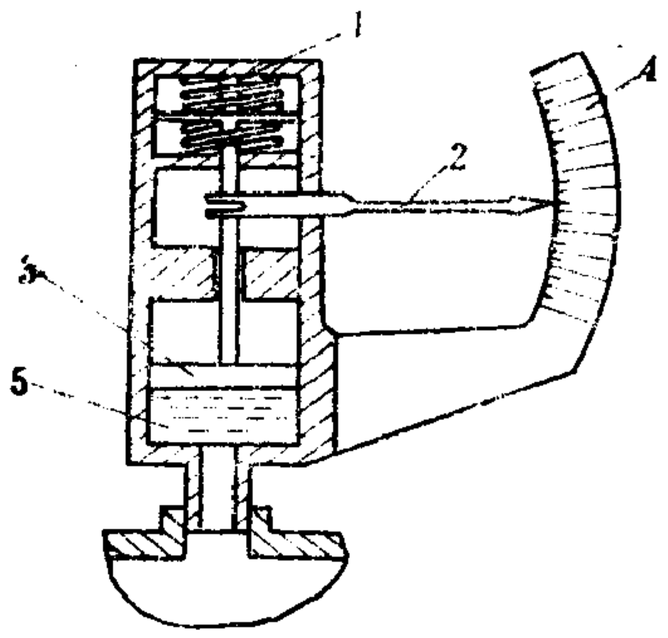


图1—1　压力表

1.弹簧　2.指针　3.活塞　4.刻度盘　5.被测介质

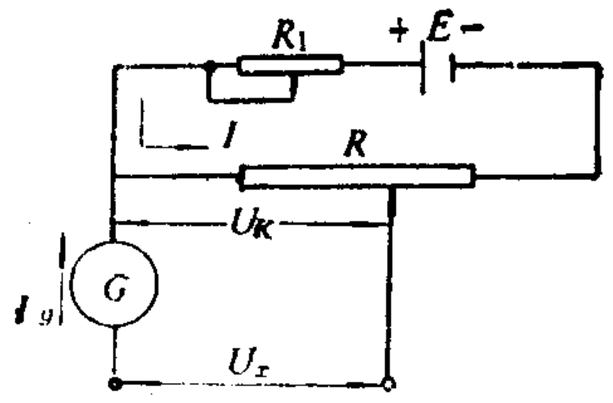


图1—2　电位差计简化等效电路

零位式测量法的优点是可以获得比较高的测量精度。但此法在测量过程中要进行平衡操作，费时较多，所以不适宜于测量变化迅速的信号，只适用于测量变化较缓慢的信号。这种测量方法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测量法与零位式测量法的优点而提出的

一种测量方法，它将被测的未知量与已知的标准量进行比较，并取得差值，然后用偏差式测量法求得此偏差值。

设 N 为标准量，x 为被测量，Δ 为二者之差。则 $x=N+\Delta$，即被测量是标准量与偏差之和。由于 N 是标准量，其误差很小并且 $\Delta \ll N$，因此可选用高灵敏度的偏差式仪表测量 Δ。既使测量 Δ 的精度较低，但因 $\Delta \ll x$，故总的测量精度仍很高。

例如，当负载变动时用高灵敏度电压表和电位差计，采用微差法测量稳压电源输出电压的微小变动值。如图1—3所示，r 和 E 表示稳压电源的等效内阻和电势，R_L 表示稳压电源的负载，R、r_1 和 E_1 组成电位差计，G 和 R_m 为高灵敏度电压表的表头和内阻。在测量之前，应预先调整 r_1 值，使电位差计工作电流 I_1 为标准值。然后，使稳压电源的负载电阻 R_L 为额定值，进而调整 R 的活动触点位置，使高灵敏度电压表指零。增加或减小 R_L 值，这时高灵敏度电压表的偏差示值即是负载变动时，所引起的稳压电源输出电压的微小波动值。注意，在这种电路中，要求高灵敏度电压表的内阻 R_m 足够大，即要求 $R_m \gg R$、r_1、R_L、r，否则测量误差会较大。微差式测量法的优点是反应快，而且测量精度高，在工程测量中已获得越来越广泛的应用。

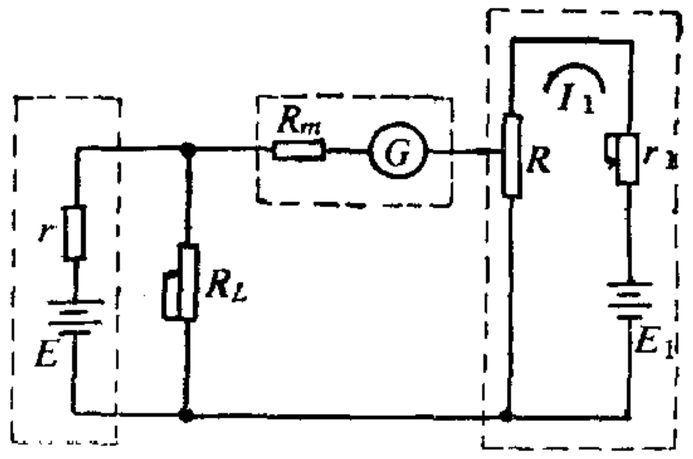


图 1—3　微差法测量稳压电源输出电压的变化

第二节　测量仪表及测量系统

一、概　述

测量仪表是进行测量所需要的技术工具的总称。很显然，这里所说的测量仪表这一概念是广义的。广义概念下的测量仪表可以由许多单独的部件组成，也可以是一个不可分的整体。前者多用于复杂的仪表或实验室中，后者多为工业用的简单仪表。不管是简单仪表，或是复杂仪表，原则上它们均是由几个环节所组成。这几个环节是传感器、变换器、显示器等。它们间的关系可用图1—4的框图来表示。

传感器是检测仪表与被测对象直接发生联系的部分，它的作用是直接从对象中提取被测量的信息，并转换成相应的输出信号。传感器在检测仪表中占有重要的位置，它获得信息的正确与否，关系到整个测量系统的精度。

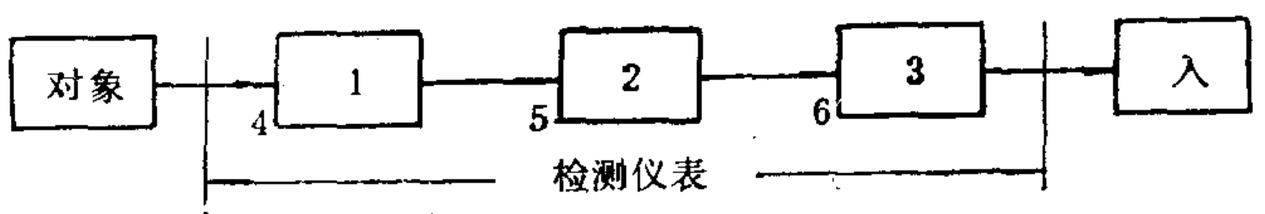


图 1—4　检测仪表方框图

1.传感器　2.变换器　3.显示器　4、5、6.传输通道

变换器的作用是将传感器的输出信号进行远距离传送、放大、线性化或转换成统一信号使能在显示器上显示或在记录仪中记录。

显示器的作用是向观察者显示被测量数值的大小，它有模拟式、数字式和屏幕式三

种。

模拟式显示，又称指示式显示，被测量的大小用指针在标尺上的相对位置来表示。指示式仪表结构简单，价格低廉，显示直观，一直被大量应用。

数字式显示，直接以数字形式给出被测量的数值大小，也可附加打印设备，打印出数据。数字式显示减少了读数的主观误差，提高了读数精度，还能方便地与计算机连用。

屏幕式显示，是用图像显示读数或者被测参数变化的曲线，具有形象性和易于读数的优点。

根据要求，正确地选择和使用仪表，对于测量工作者是十分重要的，全面掌握测量仪表的功能、构成原理、性能指标，有助于正确选用仪表。

测量系统是测量仪表的有机组合，对于比较复杂、要求高的测量工作，往往需要使用多台测量仪表，并且按照一定规则组合起来，构成测量系统。在现代化生产过程中，过程参数的检测都是自动进行的，即由测量系统自动完成的。因此，了解和掌握测量系统的功能和构成原理十分必要。

二、测量仪表的特性

仪表的特性，一般分为静态特性和动态特性两种。静态特性表示测量仪表在被测量处于稳定状态时的输出量和输入量之间的关系。衡量静态特性的重要指标是线性度、灵敏度、滞环等。

1.测量仪表的静态特性

（1）线性度。我们希望仪表的输出—输入关系具有直线特性。这样可使仪表刻度均匀，在整个测量范围内具有相同的灵敏度，并且不必采用线性化环节，从而简化了测量电路。但实际上许多测量仪表，尤其是传感器的输出—输入特性总是具有不同程度的非线性。

线性度（非线性误差）是用特性曲线与其拟合直线之间的最大偏差与仪表或传感器的满量程(y_{FS})输出之比（%）来表示，即

$$\delta_f = \frac{|\Delta m|}{y_{FS}} \times 100\% \qquad (1—1)$$

δ_f——线性度（非线性误差）

Δm——输出量与输入量实际关系曲线与拟合直线之间的最大偏差值

y_{FS}——仪表输出满量程

拟合直线的选取方法，最简单的是采用理论直线作为拟合直线。只需校正仪表的零点和对应于最大输入量 x_{FS} 的最大示值 y_{FS} 点，连接这两点的直线作为拟合直线，见图1—5。此法简单方便，但精度不高。根据误差理论，采用最小二乘法来确定拟合直线，拟合精度最高，但它的计算也最繁。

令输出量y与输入量x满足下述关系式：

$$y = a + bx \qquad (1—2)$$

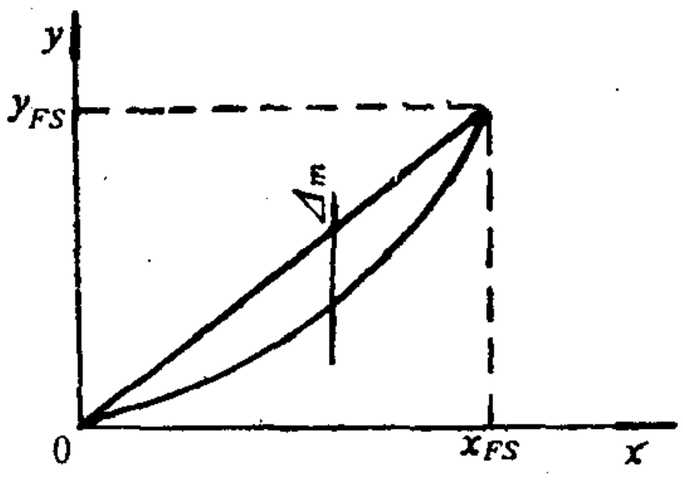


图1—5　理论线性度示意图

式中 a 和 b 值应当使实际测量值 y_i 和由方程（1—2）给出的值 y 之间的偏差为极小。最好的方法就是使 $y_i - y$ 的平方和为最小的拟合，称为最小二乘拟合。设 z^2 是各数据点与计算的拟合直线的偏差平方和。

$$z^2 = \sum_{i=1}^{n} (y_i - a - bx_i)^2 \qquad (1—3)$$

z^2 的极小值是使每一个系数的偏导数都等于零的值，即

$$\frac{\partial}{\partial a}(z^2) = 0 \text{和} \ \frac{\partial}{\partial b}(z^2) = 0 \qquad (1—4)$$

由此可以推得式 $y = a + bx$ 中的系数 a 和 b 应满足：

$$a = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} y_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} x_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} x_i y_i\right)}{n\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2} \qquad (1—5)$$

$$b = \frac{n\sum_{i=1}^{n} x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^{n} y_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)}{n\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2} \qquad (1—6)$$

（2）灵敏度。表示仪表在稳态下输出变化对输入变化的比值，用 K 表示，即

$$K = \frac{dy}{dx} \qquad (1—7)$$

在线性特性的仪表中，灵敏度 K 是常数，在非线性特性仪表中灵敏度在整个量程内不

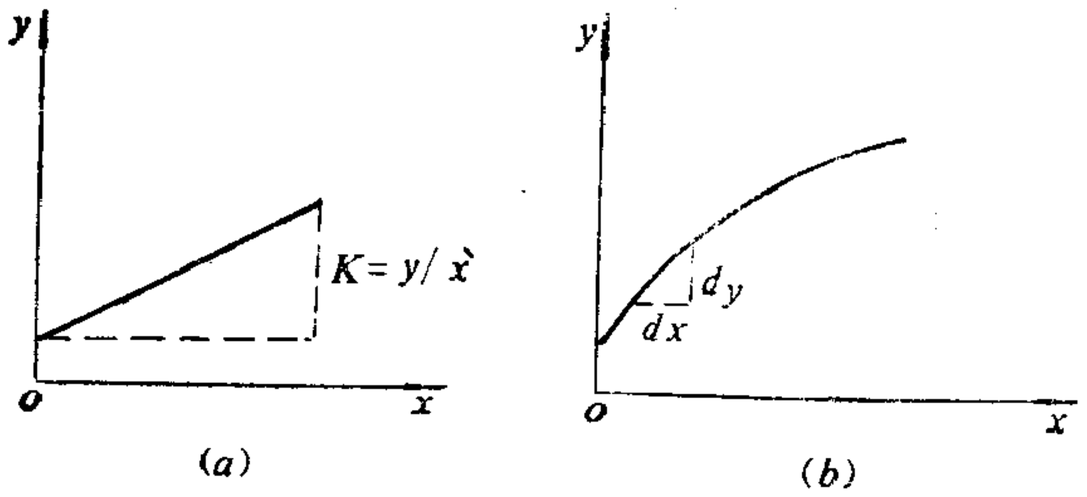


图 1—6　灵敏度定义

(a)线性测量系统　(b)非线性测量系统

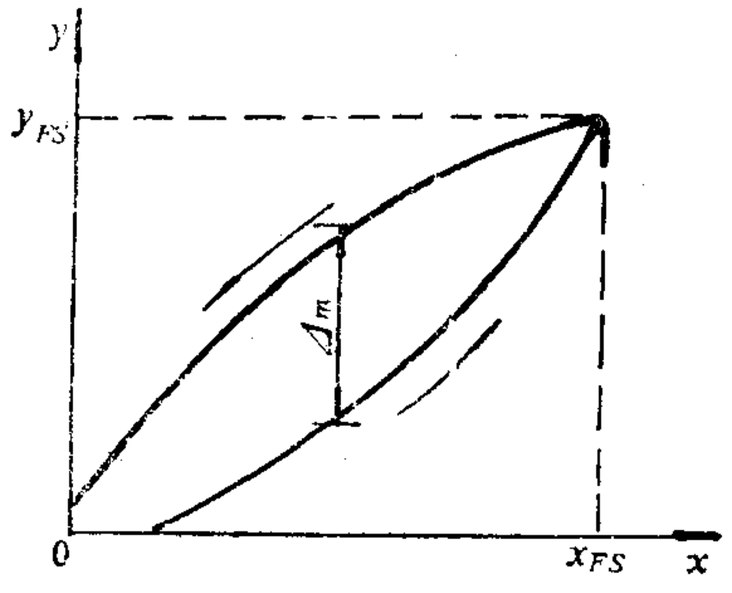


图 1—7　滞环特性示意图

是常数（图1—6所示）。

（3）滞环。滞环表示仪表正向（上升）特性和反向（下降）特性不一致的程度，亦即对应于同一大小的输入信号，仪表在正、反行程时的输出信号的数值不相等。滞环一般由实验确定，其值以满量程输出 y_{FS} 的百分数表示，见图 1—7。

$$\delta_t = \frac{\Delta_m}{y_{FS}} \times 100\% \qquad (1—8)$$