



非电量电测技术

高等教育出版社

内 容 提 要

本书以机械量的电测技术为主,以信息的获得、转换与处理为线索作为编写体系。全书共十四章,可分为四部分:第一部分介绍非电量电测技术的基本概念、误差及其在国民经济中的作用和地位;第二部分介绍常用传感器的原理特性、测量电路和应用特例;第三部分介绍测量结果的显示和记录;第四部分介绍微计算机在非电量电测技术中的应用。

本书可作为高等学校非电类专业的《电工学》补充教材,也可供电测技术和仪表专业以及从事非电量电测技术工作的工程技术人员参考。

高等学校教学参考书

非电量电测技术

强金龙 主编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

*

开本850×1168 1/32 印张8.25 字数210 000

1989年6月第1版 1989年6月第1次印刷

印数0 001—2 580

ISBN 7-04-001030-5/TM·59

定价 2.25元

前 言

本书是参考哈尔滨工业大学和一机部所属高等学校对口专业《非电量电测技术教学大纲》和教材编写的。

近年来，非电量电测技术在科学技术研究和生产领域中的地位和作用越来越重要，各类工程技术人员均迫切需要这方面的知识。目前，高等学校采用的《电工学》教材中大多没有专门介绍电气测量方面的内容。为此，编写本书作为《电工学》的补充参考教材。

非电量电测技术涉及的技术面较广，发展也很迅速，内容比较丰富。本书以机械量的电测技术为主，以信息的获得、转换与处理为线索进行编写。全书共十四章，着重叙述与分析大部分常用传感器的结构原理、基本特性、测量电路和应用举例。考虑到计算机技术的迅速发展，最后还简介了微计算机在非电量电测技术中的应用实例。

本书可作为高等院校非电类专业学生学习《电工学》的补充参考教材，也可供电测技术和仪表专业以及从事非电量电测技术工作的工程技术人员参考。

参加编写本书的有哈尔滨工业大学电工学教研室强金龙（第二、八、十、十一、十二章）、刘昭和（第三、五、六、十三章）、赵焕庆（第四、七、九章）、杨世权（第二、八章）和电测技术与仪表教研室张荣祥（第一章）、洪文学（第十四章）等同志，由强金龙同志担任主编。本书由上海交通大学史淦森同志审阅。

由于编者学识有限，水平不高，对本书内容的编写定有许多缺点和错误，热诚希望读者提出批评和指正。

编 者

1987年9月

目 录

第一章 非电量电测技术概述	1
1-1 非电量电测技术在国民经济中的意义	1
1-2 非电量电测技术的基本概念	3
1-3 测量误差	8
第二章 电阻式传感器	15
2-1 电位器式传感器	15
2-2 电阻应变式传感器	25
第三章 电感式传感器	44
3-1 自感式传感器	44
3-2 差动变压器	52
3-3 电感式传感器的误差	60
3-4 电感式传感器的应用	63
第四章 电容式传感器	66
4-1 电容式传感器的结构及原理	66
4-2 电容式传感器的灵敏度和非线性	73
4-3 电容式传感器的测量电路	74
4-4 电容式传感器的应用	82
4-5 使用电容式传感器的注意事项	84
第五章 涡流式传感器	86
5-1 涡流式传感器的工作原理	86
5-2 涡流式传感器的结构和使用	89
5-3 测量电路	92
5-4 涡流式传感器的应用	94
第六章 压电式传感器	98
6-1 压电效应	98
6-2 压电式传感器的常用结构形式和等效电路	102
6-3 压电式传感器的测量电路	104
6-4 压电式传感器的应用	107
第七章 光电式传感器	109
7-1 光电效应	109

7-2	光电变换元件.....	110
7-3	光电式传感器的类型和应用.....	125
第八章	热电式传感器	130
8-1	热电偶.....	130
8-2	热电阻.....	147
8-3	热敏电阻.....	151
第九章	霍尔传感器	156
9-1	霍尔效应.....	156
9-2	霍尔片的结构材料和主要参数.....	158
9-3	霍尔片不等位电动势和温度的补偿.....	160
9-4	霍尔传感器的应用.....	162
第十章	频率式传感器	165
10-1	振弦式频率传感器.....	165
10-2	振筒式频率传感器.....	175
10-3	振膜式频率传感器.....	181
10-4	石英晶体频率传感器.....	182
第十一章	数字式传感器	186
11-1	感应同步器.....	186
11-2	光栅传感器.....	194
11-3	激光传感器.....	203
第十二章	力平衡式传感器	205
12-1	力平衡式传感器的基本原理.....	205
12-2	力平衡反馈测量系统方框图和变换函数.....	208
12-3	力平衡式传感器的基本特性.....	210
第十三章	信号的显示与记录	216
13-1	笔记录仪.....	216
13-2	光线示波器.....	223
13-3	磁带记录仪.....	231
第十四章	微计算机在非电量电测技术中的应用	241
14-1	微计算机与传感器.....	241
14-2	电机转速测量系统.....	243
14-3	带微计算机的煤发热量测量仪.....	248

第一章 非电量电测技术概述

1-1 非电量电测技术在国民经济中的意义

测量技术的发展与生产的发展总是齐头并进的，因为测量是取得表征各种物理及化学等现象或过程的量值信息的唯一方法。在国民经济中无论是航空，宇航、航海，还是工业、农业及医学等部门，都有很多物理的、化学的“量”需要认识或掌握。它们之中绝大多数是非电磁量，在很长时间内对非电量是采取非电测量方法，而对非电量采用电磁学领域中的测量方法即电测技术则是后来的事情。直到现今这个信息时代，电测技术已渐臻成熟，微电子学及计算技术的进步，为电测技术提供了十分先进的手段，为自动检测开辟了新的途径。

电测仪器具有如下优点：

一、可在极宽的被测量范围内十分方便的调整整机灵敏度，即具有很宽的幅值域。利用电子技术能把信号放大数万倍，因此可测量极微弱的电信号。

二、电测仪器具有极小的惯性，即具有相当宽广的频域。因而既能测量缓慢变化的信号，又能测量随时间作快速变化的信号。

三、精度高且便于传输，特别是电信号可以用无线电发射、接收，也可以直接输给计算机，将信号进行加工等等。

四、电测仪器能够用单元电气部件来装配组合成装置或自动系统，这就大大地便于科研及工业应用。

非电量电测技术首先应用在飞机及机械制造业中，我国在六十年代就已利用应变片测量飞机和机床的应变，为飞机和机床强度的设计计算提供必要的的数据，对改进飞机和机床的结构发挥了很大的作用。一架飞机从开始设计，经过模型风洞试验，直到样

机的试飞也都要经过严格的测试。为了研究飞机的静特性，要贴上数以百计的应变片。为了求得飞机的模态参数和各阶共振频率，需要对飞机进行多点激振和对所获信号进行分析。在试飞时还要测量发动机的转速、转矩；机上有关点的应力、振动、温度；管路内的压力、流量、温度及油箱中的液位、温度等。当前又提出了动态特性测量问题，例如研究机床切削情况时的动稳定性，自激现象及加工精度等问题时，就要利用压电式加速度计、力传感器或“阻抗头”测量刀架、床身等有关部位的加速度或机械阻抗，从检验机床的动特性中，找出提高机床精度的薄弱环节。又如通过测量切削力，可以研究金属切削机理，为制定切削量，设计机床、夹具提供必要的切削力数据，这也是评定刀架结构和刀具材料的重要依据。在动力工业中，为了保证大型机组的可靠运行，必须在运行过程中测量主轴的振动，以避免旋转部分和固定部分的碰撞。有时还要同时测量定子和基座部分的振动以便监视机组的工作，在超过允许值时发出报警信号。

非电量电测技术，它包含着电测量技术、自动控制技术、微电子学技术、计算机技术及传感器技术，是多种先进技术的综合体，而其特点则体现在传感器技术上。

能将各种不同的非电参数转换成电信号的传感器近年来发展较快，愈来愈为人们所重视，有人对2000年进行了科学预测，将各个领域中的重大科研课题进行了排列，并选其中的前十项进行比较，发现传感器在科技领域中占有极重要的地位，见表1-1所示。

表 1-1

领 域	重 大 课 题 数	直接与传感器有关课题数
宇宙开发	10	9
海洋开发	10	6
环境开发	10	9
能 源	10	5
医疗保健	10	6
安 全	10	9

据统计，美国为实现“汽车电子化”，将在一台汽车上安装多达90多只传感器；在日本，机器人成本的二分之一是耗费在高性能的传感器上。同时也有如下的预测：在欧洲传感器的销售额1990年将是1980年的4.4倍，在美国将为4.7倍，在我国1990年市场销售量将超过两千万只。

以上表明非电量电测技术已成为现代科学技术的主要组成部分，它的推广与应用对于促进我国的社会主义现代化建设具有重要的意义。

1-2 非电量电测技术的基本概念

为建立起一些必要的概念，以测量汽车油箱中汽油液位为例作简单的分析。如图1-1(a)所示，油箱中被测汽油液位的高度

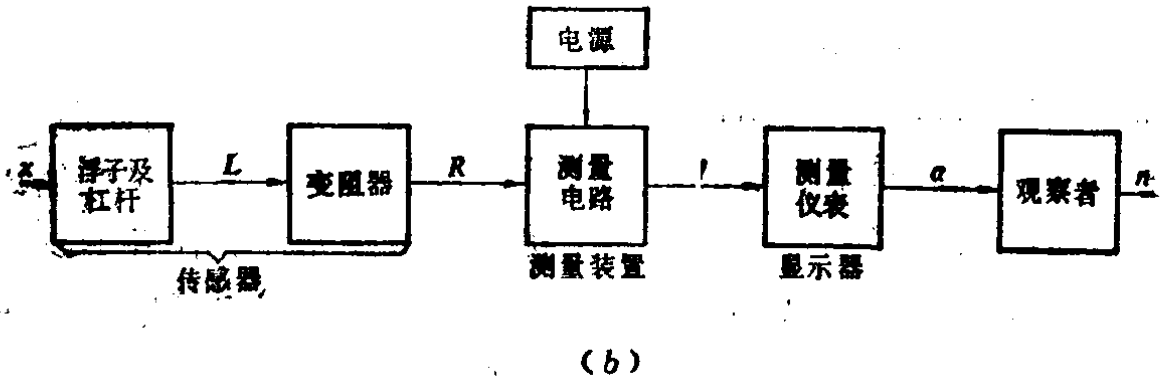
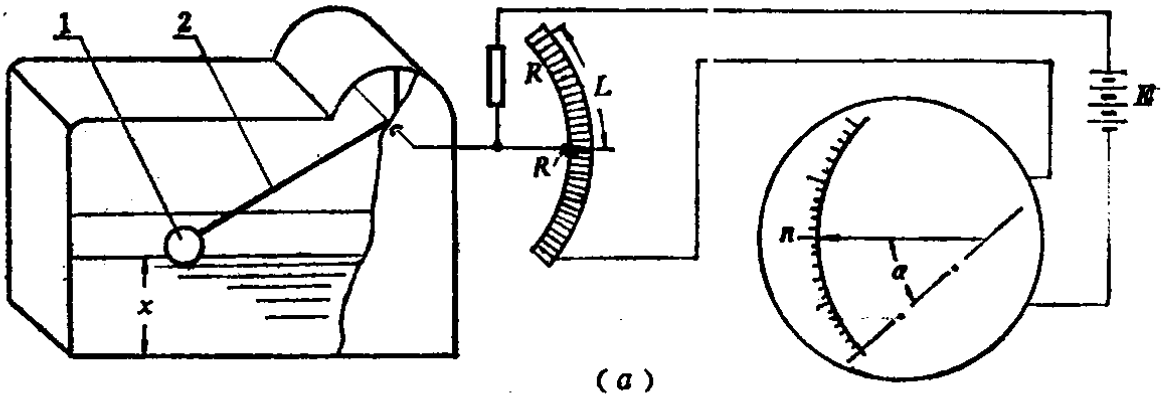


图1-1 油箱液位测量原理图

x 先由浮子 1 感受到，然后通过杠杆 2 去推动电阻器 R 的滑动触头，触头在电阻器上转动一段弧度 L ， L 与 x 成正比，均匀绕制的

电阻器给出电阻 R 与角位移 L 的单值关系 $R = \varphi(L)$ 。在测量电路中,若保证电源电压 E 及电路中除电阻器串入部分阻值 R' 随触点变化而改变之外的一切阻值都为常值时,显然电路中电流 I 与电阻器串入的电阻值 R' 有单值关系,该电流 I 的大小可由测量仪表指针的偏转角 α 读数与显示,于是就可以给出一个读数值 n ,用以表示汽油液位的高低。

由上例可见,油箱是含有被测量的物体,称为测量对象;油位高度是待测的物理量,称为被测量;而测量结果则是以数字、图表、曲线或是参数的综合结果表示的量。图1-1(b)所示的是非电量电测量过程,它可划归为三个部分:传感器、测量电路和显示仪器。

一、传感器

传感器是将各种非电量转换成电量的部件,它又可细分为敏感元件及变换元件两个部分,或者在二者中间再区分出第三者,称为传感元件,如图1-2所示。

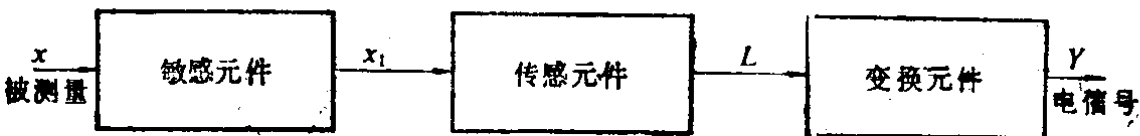


图1-2 传感器方框图

在上例中的浮子就是敏感元件,它的功能是感受被测量。通常在被测对象上同时给敏感元件以众多的物理参数,例如温度、气压等等,我们希望选取的敏感元件只对被测量敏感,对其他量均不反映,这些其他量均被视为干扰量。敏感元件往往并不直接给出变化完了的电参数,而多数是给出变换过了的非电量 x' ,在上述油箱液位测量中非电量是浮子的上下位移。变换元件为电位器,它的输入量是非电量 L (在这里是电位器触点的角位移),而输出量则是电量 Y (这里是电阻 R'),对输入输出的变换关系要求是单值,最好是线性关系,其表达式为 $Y = f(L)$ 。如果变换元件

的输入量与敏感元件的输出量是同一个量，则传感器就由两个部分组成，但在上例中敏感元件浮子的输出量是位移 x_1 ，而变换元件的输入量是角位移 L ，这两个非电量并不一致，为此在传感器中尚须增加能由非电量 x_1 变换为角位移的非电量 L 的变换元件，如选用杠杆机构。当然在设计传感器时总是力求减少中间环节。

二、测量电路

传感器输出的信号常需要进行加工和处理，如衰减、放大、调制、解调、滤波、运算以及数字化等等，有时只是简单的传输。根据测量任务的复杂程度，被测量的种类和数量，被测结果显示方法等要求，测量电路可以是简单的传输电缆，也可以是一套复杂的设备，甚至包括计算机在内的庞大装置。在上述例子中只有传输电缆及电源，将电阻的变化转换为电流的变化，直接用电表显示油箱液位的高低。

三、输出显示或记录器

输出测量结果的是输出显示或记录设备，它能显示和记录图形。表头是最简单的显示方法。为了显示被测量的变化过程，常采用笔记录仪、光线示波器和磁带记录仪等输出设备。

通过上述实例可知，一个典型的非电量电测系统，首先是将非电信号转换成电信号，之后再用电测量手段测取直接结果。这样在系统中就有一个变换链，如上例中的变换链为

$$x \rightarrow L \rightarrow R \rightarrow i \rightarrow C \rightarrow n$$

被测量 x 在系统中是经过多次变换，最后才给出结果 n ，因此系统中的各环节有时统称为“变换器”，而每个变换器给出的参数，如 L ， R …都是被测量信息 x 的载荷者。

当然，其它测量系统的结构原理框图可能要比图1-1复杂得多，但是任何测量系统都是一个能够接受并变换被测量信息的大小通道，该系统是由一系列简单的或是复杂的测量变换器所组成。

关于传感器的名称，常采用下述命名法：“ $\times \times$ 式 $\times \times$ 传感

表 1-2

变换元 件分类	变换原理	固有输入量	固有输出量	变换器名称	典型应用
电阻式变换元件	移动电位器触点改变阻值	位 移	电 阻	电 位 器	位移、压力、力
	改变电阻丝（片）的几何尺寸	变 形	电 阻	电阻丝应变片 半导体应变片	力、压力、力矩， 应变、位移、振动
	电阻的温度效应	温 度	电 阻	热丝计	气流或液流的速度、流量
				电阻温度计	温度
				热敏电阻	温度
	电阻的光敏效应	光通量	电 阻	光敏电阻	光通量
	电阻的湿度效应	湿 度	电 阻	电阻湿度计	湿度
	改变电容的几何尺寸	位 移	电 容	电容式压力计	位移、力、压力
				电容式话筒	声强
	改变电容的介质		液位移动	电 容	电容式液面计
介质厚度			电 容	电容式测厚计	带衬的厚度
介质成份			电 容	含水测量仪	含水量
参 数 变 换 元 件					
电 容 式 变 换 元 件					

参 数 变 换 元 件

参数变换元件			电感式变换元件			发电式变换元件		
改变磁路磁阻	位移	电 感	电感变换器	位移、力、压力、振动				
			压磁计	力、压力				
			差动变压器	位移、力				
			涡流计	位移、厚度				
改变物体的固有频率	弦丝变形、张力	频率	振弦	位移、力、压力				
			振筒	压力				
			石英谐振器	压力、温度				
温差电动势	温度	电动势	热电偶	温度、位移、力				
			感应式变换器	运动速度				
			霍尔片	位移、力、乘法器磁场强度				
			光电池	光通量				
电磁感应现象	运动速度	电动势	霍尔片	位移、力、乘法器磁场强度				
			霍尔片	位移、力、乘法器磁场强度				
			霍尔片	位移、力、乘法器磁场强度				
			霍尔片	位移、力、乘法器磁场强度				
霍尔效应	磁场强度	电动势	霍尔片	位移、力、乘法器磁场强度				
			霍尔片	位移、力、乘法器磁场强度				
			霍尔片	位移、力、乘法器磁场强度				
			霍尔片	位移、力、乘法器磁场强度				
光磁效应	光通量	电荷	发光管	光通量、放射性				
			发光管	光通量、放射性				
			发光管	光通量、放射性				
			发光管	光通量、放射性				
压电效应	变形	电荷	压电元件	力、加速度、表面光洁度				
			压电元件	力、加速度、表面光洁度				
			压电元件	力、加速度、表面光洁度				
			压电元件	力、加速度、表面光洁度				

器”。前面两个字“××”是表示变换元件(将非电量直接转换成电量的元件)的名称,如电阻式,压电式,电感式等等,它指出了传感器所采用的变换原理的种类;后边的“××”用以表示传感器的用途,指出了传感器所接受的被测量的种类,如压力、温度、液位等。在上例中传感器可以称为电阻式(或电位计式)液位传感器。相应地可以有诸如:应变式力传感器、振弦式压力传感器,磁电式振动速度传感器、压电式加速度传感器等等。

传感器的核心是变换元件,但应指出在变换元件的输入端除了作用被测量之外,常常还作用着许多其他非被测参数,比如环境参数(振动、温度、湿度、外界电压的感应等等),在此条件下工作的变换元件,应能从作用于它的多种因素中仅仅将被测量 x 的值分离提取出来,并使它不受其他干扰因素的影响。当允许干扰因素带来的误差较大时($1\sim 5\%$)还是容易作到的,但若要求误差很小(如 $0.1\sim 0.01\%$)时,却是比较困难的。因此,对每一个变换元件来说,应找出一个所谓“固有输入量”,以便在其他干扰因素存在的条件下能很好地被接受。如上例中,变阻器式变换元件的电阻值受温度、骨架变形、湿度等因素的影响,但它的固有输入量应是滑动触头的位移。

表1-2中列举了常见的一些变换元件,其中包括变换元件的分类、变换原理、固有输入量、固有输出量、变换元件名称及其应用,可见同一种变换元件,可以用在不同的传感器中,选择适当的敏感元件及传感元件就可以组成相应的传感器,以测取不同的被测物理量。

1-3 测量误差

一、测量误差的表达方法

没有误差的测量是不存在的,只是误差大小不同而已,表示误差的方法有三种。

1. 绝对误差

绝对误差是测量结果与被测量真值间的差值，它是具有与被测量值相同量纲的量，表达式为

$$\Delta_x = x - A_0 \quad (1-1)$$

式中： x 为示值；

A_0 为被测量的真值；

Δ_x 为绝对误差。

绝对误差可以说明测量结果接近被测真值的程度。实际使用时被测真值 A_0 是得不到的，而是用更精确的测量方法所测得的值 X_0 来代替 A_0 ，式 (1-1) 可写成

$$\Delta_x = x - X_0 \quad (1-2)$$

在一般的测量仪器中常常给出修正值 α_0 ，其意义为： $\alpha_0 = X_0 - x = -\Delta_x$ ，修正值常以表格或修正曲线的形式给出。

2. 相对误差

相对误差是绝对误差与真值之比值的百分数。因此相对误差是个无量纲的值，表达式为

$$\Gamma_x = \frac{\Delta_x}{A_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

实际使用时也是用 X_0 代替 A_0 ，即

$$\Gamma_x = \frac{\Delta_x}{X_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

为了方便起见常作如下的近似：

$$\Gamma_x = \frac{\Delta_x}{x} \times 100\% \quad (1-5)$$

相对误差是用来衡量测量结果的精度。例如有两组测量，第一组是测量实重为100kg的重物，绝对误差 Δ_{x_1} 为0.1kg；第二组测量实重为10kg的重物，绝对误差 Δ_{x_2} 也为0.1kg，若单从绝对误差的角度看，这两个测量结果的绝对误差值虽然均为0.1kg，但不能说两组测量精度是相同的，因为绝对误差不能表示测量的精度，还需借助于两组测量的相对误差来加以权衡。第一组测量的相对误差为

$$\Gamma_{x_1} = \frac{\Delta_{x_1}}{x_1} \times 100\% = \frac{0.1\text{kg}}{100\text{kg}} \times 100\% = 0.1\%$$

而第二组测量的相对误差为

$$\Gamma_{x_2} = \frac{\Delta_{x_2}}{x_2} \times 100\% = \frac{0.1\text{kg}}{10\text{kg}} \times 100\% = 1\%$$

可见第一组测量精度优于第二组测量精度。

3. 引用误差

引用误差是仪表整个测量范围内最大的绝对误差值 Δ_{x_m} 与仪表满量程示值 X_m 之比的百分数，即

$$\Gamma_0 = \frac{\Delta_{x_m}}{X_m} \times 100\% \quad (1-6)$$

对仪表量程不是从零值开始，而是有一个最小量程值 $X_{\min}$ 的仪表，引用误差定义为

$$\Gamma_0 = \frac{\Delta_{x_m}}{X_m - X_{\min}} \times 100\% \quad (1-7)$$

可见引用误差也是个无量纲的值，它是用来衡量仪表精度的。例如有两只电压表，在整个测量范围内最大绝对误差均不超过 0.05V ，第一只电压表的满量程为 50V 即 $X_{m_1} = 50\text{V}$ ，第二只电压表的满量程为 5V 即 $X_{m_2} = 5\text{V}$ ，这两只电压表的精度可以用引用误差来衡量。对第一只电压表有：

$$\Gamma_{0_1} = \frac{0.05\text{V}}{50\text{V}} \times 100\% = 0.1\%$$

第二只电压表有：

$$\Gamma_{0_2} = \frac{0.05\text{V}}{5\text{V}} \times 100\% = 1\%$$

显然第一只电压表比第二只电压表的精度要高些。传感器的误差一般是采用引用误差表示。例如，传感器的精度为 $\pm 1\%$ ，就是指引用误差而言。但对量子化显示仪器仪表来说，常采用引用误

差加恒定值的表示方法来表示精度更为确切。

二、误差分类

测量系统与各环节的变换器及测量结果的质量，确切地说是很难用精度表述的，实际上都是用“容许误差”来表征。由于误差的出现是多种多样的，所以可按不同方法归类。

1. 方法误差与工具误差

这是按产生误差的来源来分类的。方法误差是由于测量方法不完善或理论上的缺陷所造成的误差。例如在测量某一部件振动加速度时，而此部件质量又不太大，由于测量用的加速度传感器自身的质量与被测部件的质量相比前者已不可忽略，这样传感器安装在被测部件上，必然要改变原来部件的振动状态，从而使被测量产生畸变，由此产生的误差就是方法误差。一般可以这样理解，若传感器或测量仪表，从其工作原理上说，它们必须从被测对象上吸收能量，由于被测对象供给了测量仪表能量，改变了原来的被测状态，这样所造成的测量误差即为方法误差。

工具误差是指测量工具不具备理想条件，如仪表刻度不准、所用元器件参数值的变化或调整不准确等等所造成的误差。

2. 基本误差和附加误差

这是按使用条件不同所产生误差来分类的。任何测量仪器都是工作在一定环境条件下，在标准条件下使用时产生的误差称为基本误差；而实际运行时，往往偏离此标准条件，这时示值的变化部分称为附加误差；如果是环境温度偏离了标准温度范围，这时产生的是附加温度误差。

3. ④系统误差、渐进误差和随机误差

按误差出现的规律区分，误差可分为系统误差、渐进误差和随机误差。

系统误差是不随时间变化的、定值的或与某些参数成函数关系的有规律的误差，如刻度（或称标定）误差、零位误差等。系统误差可以用修正值或补偿校正的方法来加以消除。

渐进误差是随时间作缓慢变化的测量误差。通常是由于仪表的某些零部件、元器件的老化所引起的误差,如化学电源放电,电路中电阻、电容的老化等所引起的误差。这种误差虽然是单调缓慢地变化,但其变化规律难以掌握,只能通过定期的检定方法进行调整和校正。

随机误差是指误差中那些数值不确定的或是对其各个值的出现不能确定某种规律的未被足够了解的误差。这是一种服从统计规律的误差,它们是由许多难以分析的原因共同作用的结果。随机误差的个别值无法预见,而对于它们的全部总和所能确定的规律仅是其个别值出现的“概率”。但是这种误差很容易觉察,在多次重复测量时它会以测量结果的某种分散性表现出来,在绝大多数场合下,随机误差的出现过程是遍历随机过程。因此,随机误差的各种形态可用它们的概率分布或其他参数表征。

4. 静态误差和动态误差

这是按误差与被测量变化速度的关系来进行分类的。凡是与被测量变化速度无关的误差称为静态误差,例如零位误差、线性化误差、迟滞误差等等;在被测量随时间而变化的过程中所产生的附加误差称为动态误差。由于传感器或测量设备对动态信号需要一段响应时间,输出信号来不及立即反映输入信号的量值,加上传感器对不同频率的输入信号的增益和时间延迟也不同,因此,输出信号与原端的输入信号波形将不完全一致,造成了动态误差。动态误差一般用幅值误差和相位误差两部分来表示。

5. 量子化误差

这是离散型传感器中所特有的一种静态误差,比如电位器式传感器,随电位器触头的滑动,传感器阻值的变化是非连续的阶梯特性,这一实际的阶梯特性与理想的直线特性之差可用量子化误差表示。

6. 加和误差与倍率误差

按与被测量值的关系分类可以有加和误差和倍率误差。