

机电技术应用专业教材


# 自动检测与 转换技术



邓海龙 主编

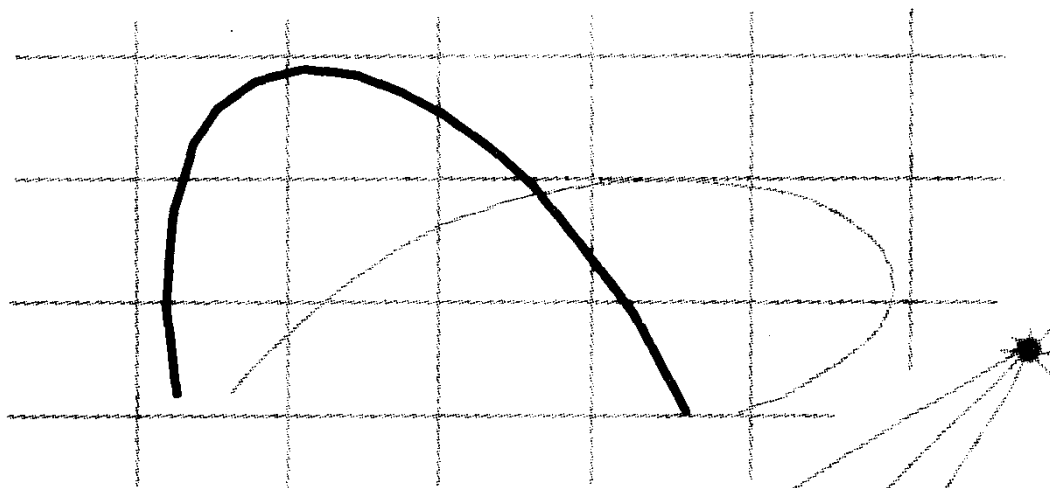
274  
8b

ZDJCY ZHHJSH

 中国纺织出版社

机电技术应用专业教材

邓海龙 主编



**自动检测**

**与**

**转换技术**



中国纺织出版社

## 内 容 提 要

本教材是根据国家纺织局纺织教育学会组织制定的《自动检测与转换技术》课程教学大纲编写的。本教材阐明了自动检测系统中的各个环节及其相互关系,着重讨论了工业中常用传感器的工作原理、转换电路及其典型应用,在叙述上能做到深入浅出,并尽可能反映自动检测技术领域的新成果、新进展。对微机在自动检测中的应用也作了简要介绍,每章均有思考题与习题,全书最后还配有实验指导。

本教材适用于中等专业学校、职业技术学院与技校等机电技术、电气自动化、计算机控制等专业的教学,也可供其他专业师生及有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

自动检测与转换技术/邓海龙主编. - 北京:中国纺织出版社,2000.2

ISBN 7-5064-1463-5/ TP·0020

I.自… II.邓… III.①自动检测-基本知识②转换-电路-基本知识 IV.TP274

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第76570号

---

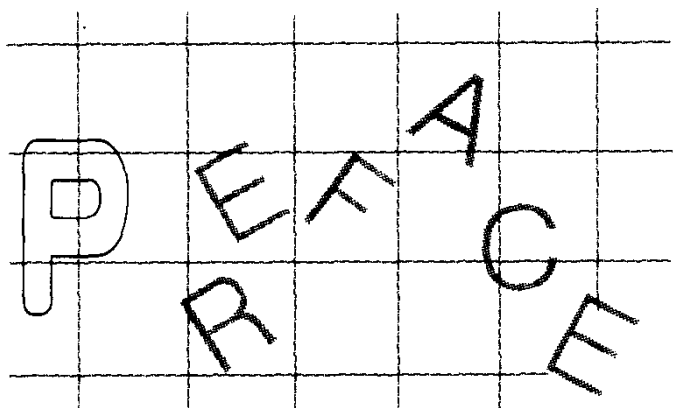
责任编辑:马 涟 特约编辑:王云红 责任校对:楼旭红  
责任设计:何 建 责任印制:刘 强

---

中国纺织出版社出版发行  
地址:北京东直门南大街6号  
邮政编码:100027 电话:010-64168226  
中国纺织出版社印刷厂印刷 各地新华书店经销  
2000年2月第一版第一次印刷  
开本:787×1092 1/16 印张:8  
字数:175千字 印数:1—3000 定价:15.00元

---

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换



## 前 言

本教材是国家纺织局纺织教育学会规划并组织编写的系列教材之一。整套系列教材共5本,包括《自动检测与转换技术》、《机械制造基础》、《液压与气动基础》、《机电控制技术》、《电机与控制系统》。

本教材内容丰富,层次清晰,重点突出,注重实用。压缩和删除了一些不必要的理论及公式推导过程,在叙述上能做到深入浅出,并尽可能反映自动检测技术领域的新成果、新进展。

本教材由江苏省南通纺织职业技术学院邓海龙担任主编,并编写绪论,第一、三、五、十章,第四章第五节,第九章第一、二节;山西省纺织工业学校郑改成编写第八、十一章,第九章第三节,第十章第五节;沈阳纺织工业学校张洪峰编写第六、七章,第四章第一、二、三、四节;南通纺织职业技术学院陈群编写第二、十二章。全书由山西省纺织工业学校王建国主审,参加审稿工作的还有河北省纺织工业学校杨秦建、上海纺织机电学校许德平、吉林省纺织工业学校刘树卿、南通第二棉纺织厂曹德明。他们对本书提出了许多宝贵的意见,编者在此谨表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,殷切地希望广大读者批评指正。

编 者  
1999年7月

# 绪 论

当今社会是一个信息社会,时时处处充满着大量表征客观世界万物时空特性的信息。人们为了达到某些特定的目的,总希望从纷繁众多的信息中挑选出自己所需要的那部分信息,加以测量与分析。客观世界的信息虽然很多,但一般可分为电量与非电量两种信息。电量可以借助于电压表、电流表等仪器仪表加以测量,但诸如机床的切削速度、炉窑的温度、棉层的厚度等这类非电量却难以直接进行测试,必须通过一定的方法,借助必要的仪器设备加以检查与测量,从而达到调整工艺参数、控制加工质量等目的,简单地讲,这就是所谓的检测。严格讲,检测就是利用各种物理特性,采集客观世界的有关非电量信息,并加以测量赋予定性或定量结果的过程。能够自动完成整个检测处理过程的技术称为自动检测与转换技术,它是自动检测技术和自动转换技术的总称。

## 一、自动检测与转换技术的作用

自动检测与转换技术的发展非常迅速,应用日益广泛,现已渗透到信息社会的一切活动领域。

自动检测与转换技术是科学实验中必不可少的手段。任何一项现代自然科学成就或技术发明,总是离不开通过自动检测与转换技术获取的大量的准确的数据。自动检测与转换技术能够涉及到的测量范围与能够达到的测量精度,在很大程度上,决定着现代科技进步的广度与深度。例如在国防科技中,没有自动检测与转换技术,导弹发射与卫星上天是不可能的。

自动检测与转换技术是工业生产中的一项重要的基础技术。利用自动检测与转换技术处理获取的数据信息,能为产品的质量 and 性能作出客观的评价,能为设计人员进行最佳设计或改进制造工艺提供依据。在现代大工业生产中,没有自动检测与转换技术,新设备的研制、以及复杂工艺流程的具体实现也是不可能的。

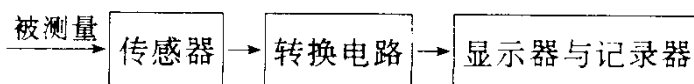
自动检测与转换技术是自动控制系统中一个十分重要的环节。利用自动检测与转换技术可以对生产过程中的一些非电参数及其变化及时进行检测,最终可作为反馈信号对自动控制系统进行调节控制,使系统运行在最佳工作状态。

自动检测与转换技术也为生活水平的提高注入了新的活力。家电业中的冰箱、空调可以说就是自动检测与转换技术带来的高科技产品,它们能够自动测试与控制温度。

自动检测与转换技术在纺织业中的作用也是十分重要的。纺织业从劳动密集型生产向技术密集型生产跨越的过程中,工艺的实施,新设备、新产品的研制、开发、维修都离不开自动检测与转换技术。

## 二、自动检测系统的组成

自动检测系统是帮助完成整个检测处理过程的系统。目前,非电量的检测常常采用电测法,即先将采集到的各种非电量转换为电量,然后再进行处理,最后将非电量值显示出来或记录下来,系统的组成框图如下所示。



在系统组成框图中,传感器处于整个检测系统的第一环节,其作用是将采集到的被测非电量转换为容易进行测试的电量。例如将机床的切削速度、炉窑的温度、棉层的厚度等转换为电阻、电容、电感和电压等电量。

转换电路是检测系统的中间环节,其作用是对传感器输出的电量进行处理,使之成为电压或电流,或进行整流、检波,或进行放大、调制与解调,以求能更方便地进行显示或记录。

显示器、记录器部分是检测系统的最后一个环节,其作用是将转换电路送来的信号显示出来或记录下来,供观测与研究。

信号的显示或记录方式,可分为数字方式和模拟方式两大类。显示器多采用数字方式,如LED数码管与液晶显示等,可以直接

将测量值显示出来。记录器多采用模拟方式,常见的有笔记录仪、光线示波器等,主要用来记录被测量的动态变化过程。

### **三、本课程的主要教学任务**

作为机电类专业的一门非常重要的课程,本课程的主要教学任务是:在阐明测量的基本理论的基础上,重点介绍常用传感器的结构特点、工作原理、转换电路及其在工业中的应用等内容,以对新型传感器与微机控制的自动检测与转换技术进行简单介绍,培养学生选用、使用与维护传感器的实际能力。

本课程是一门综合性的技术学科,涉及的知识面广,实践性又较强,因此在教学过程中,应理论联系实际,重视实验环节,加强现场教学,以自动检测与转换技术的应用为出发点和归宿。

# 第一章

## 自动检测与转换技术基本知识

### 第一节 测量误差及数据处理

#### 一、测量的概念与国际单位制

##### (一)测量的概念

测量是人们借助于仪器设备,通过一定的方法,对被测对象进行定性认识或定量认识的过程。所谓定性认识,就像用电笔测试电源插孔是否有电,能够大致判断被测量存在或是不存在。所谓定量认识,就像用万用表去测量电源插孔间的电压值,能够得到一个比较准确的数值。

测量过程实际上是一个比较过程,即将被测量与同性质的标准量进行比较,从而确定被测量与标准量比值的过程。例如,用直尺与直立人体进行比较,可以确定人体的身高。但在一般情况下,测量过程需要将被测量与标准量同时转换为另一种性质的中间量后才能进行。例如,指针式万用表是将被测电流、电压等转换为指针的角位移与刻度盘上的标定值进行比较后,才能确定出被测量的数据。由此可见,测量的概念是与被测量的转换概念密不可分的,自动检测与转换技术正是从这一重要现象出发而逐步发展与完善起来的。

测量结果一般表现为一定的数值或曲线,或者是某种形式的图形与现象,但作为定量测量的结果总包括数值和单位两方面的内容。例如,对电源插孔间电压的测量值为220伏特,220是数值,伏特是单位。显然,测量单位是测量结果必不可少的一部分,没有单位的测量结果是毫无意义的。

##### (二)国际单位制

由于历史的原因,世界各国及各个地区出现了许多不同的计量单位,这对于世界性科技、生产、经济及文化交流等十分不利。1960年在十一届国际计量大会上正式通过了一种新的国际单位制(SI制),并得到了全世界大多数工业发达国家的积极响应。我国也于1978年成立了中国国际单位推广委员会,专门从事SI制的推广工作。

SI单位由SI基本单位、SI导出单位及SI单位的倍数单位三部分构成。SI基本单位是国际单位制的基础,由国际计量局严格定义的SI基本单位共有七个,如表1-1所示。

表 1-1 SI 基本单位

量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克(公斤)	kg
时间	秒	s
电流	安[培]	A
热力学温度	开[尔文]	K
物质的量	摩[尔]	mol
发光强度	坎[德拉]	cd

SI导出单位是用SI基本单位以代数形式表示的单位,其中还包括SI单位弧度和球面两个尚未确定是基本单位还是导出单位的

单位,这两个单位被称为 SI 辅助单位。表 1-2 给出了包括 SI 辅助单位在内的常见的 SI 导出单位。

表 1-2 包括 SI 辅助单位在内的 SI 导出单位

量的名称	SI 导出单位		
	名称	符号	用 SI 基本单位和 SI 导出单位表示
[平面]角	弧度	rad	$1 \text{ rad} = 1 \text{ m/m} = 1$
立体角	球面度	sr	$1 \text{ sr} = 1 \text{ m}^2/\text{m}^2 = 1$
频率	赫[兹]	Hz	$1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$
力	牛[顿]	N	$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$
压力,压强,应力	帕[斯卡]	Pa	$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$
能[量],功,热量	焦[耳]	J	$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$
功率,辐[射能]通量	瓦[特]	W	$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$
电荷[量]	库[仑]	C	$1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}$
电压,电动势,电位,(电势)	伏[特]	V	$1 \text{ V} = 1 \text{ W/A}$
电容	法[拉]	F	$1 \text{ F} = 1 \text{ C/V}$
电阻	欧[姆]	$\Omega$	$1 \Omega = 1 \text{ V/A}$
电导	西[门子]	S	$1 \text{ S} = 1 \Omega^{-1}$
磁通[量]	韦[伯]	Wb	$1 \text{ Wb} = 1 \text{ V} \cdot \text{s}$
磁通[量]密度,磁感应强度	特[斯拉]	T	$1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$
电感	亨[利]	H	$1 \text{ H} = 1 \text{ Wb/A}$
摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}\text{C}$	$1 \text{ }^{\circ}\text{C} = 1 \text{ K}$
光通量	流[明]	lm	$1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr}$
[光]照度	勒[克斯]	lx	$1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$

## 二、测量误差及其分类

测量的目的是希望求取被测量的真实值。真实值简称真值,是在一定条件下,被测量客观存在的实际值。在测量过程中,由于受到仪器设备、测量方法等因素的限制,总是存在着一定的误差,使被测量的真值很难确定,因而人们常用约定真值代替真值。所谓约定真值,是指在实际测量中用上一级标准仪器为下一级仪器标定的真值。测量结果与

约定真值之间的偏差称为测量误差。通过对测量误差的研究,可以分析测量误差产生的原因,并采取相应的措施克服误差,或将误差限制在允许的范围之内。

归纳起来测量误差一般有按误差的性质分类和按误差的表达方式分类两种方法。

### (一)按误差的性质分类

按此种分类方法,误差可分为系统误差、随机误差与粗大误差。

**1. 系统误差** 系统误差是指具有确定变化规律的误差,反映的是测量结果偏离真值的程度。系统误差越小,说明测量结果越正确,所以系统误差可用来评价测量结果的准确度。系统误差有两种,一种是定值系统误差,另一种是变值系统误差。定值系统误差对每次测量值的影响都是相同的,如由于仪表刻度盘的偏移所产生的测量误差。变值系统误差对每次测量值的影响按某种规律变化,如由于蓄电池在使用过程中因放电而使其电动势逐渐减小所产生的测量误差。

引起系统误差的原因一般有以下几个:一是仪器本身的精度不够;二是使用测量仪器方法不当;三是检测的原理不完善;四是检测系统所处的环境不理想。由于系统误差呈现一定的规律,因而在认真分析产生系统误差原因的基础上,可通过实验方法或引入修正值加以消除,使测量结果尽量接近约定真值,以提高测量结果的准确度。

**2. 随机误差** 随机误差是指误差的大小和符号都发生变化而且没有规律可循的测量误差。引起随机误差的原因往往是由于偶然因素(如测量仪器本身元件性能不稳定)的影响而随机产生的,因而随机误差不能用实验方法或引入修正值加以消除,也不可避免,但可以通过概率统计处理的方法来减少其影响。随机误差能够反映测量结果的分散程度。随机误差越小,说明多次测量时的分散性越小,通常称为精密度。应当指出:一个精



密的测量结果可能是不准确的,因为它包括有系统误差在内。一个既精密又准确的测量结果,才能比较全面地反映检测的质量。检测技术中,用精确度(简称精度,它从精密度和准确度中各取一字)反映精密度和准确度

的综合结果。如图 1-1 所示的射击例子有助于加深对准确度、精密度和精度三个概念的理解。图(a)精密度高但准确度低,图(b)精密度低,图(c)精确度高。

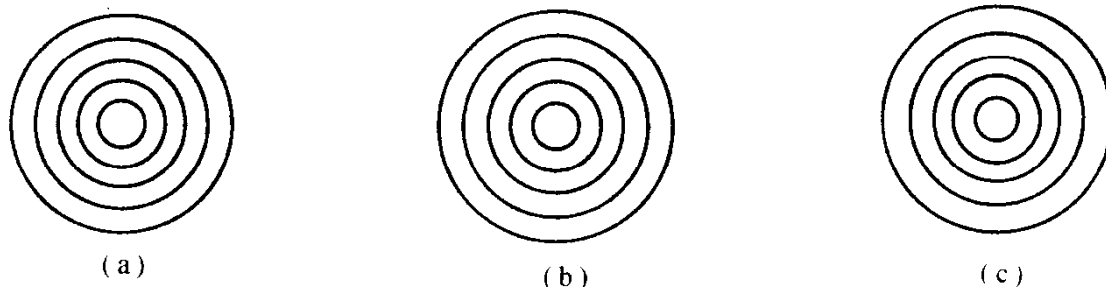


图 1-1 准确度、精密度及精度示意图

3. **粗大误差** 粗大误差是指明显偏离约定真值的误差。引起粗大误差的根本原因主要是由测量人员操作失误或读错与记错数据而引起的,也完全没有规律。当发现有粗大误差的测量数据时应及时去除。

#### (二)按误差的表示方式分类

按此种分类方法,误差可分为绝对误差与相对误差。

1. **绝对误差** 绝对误差是指测量值  $A_x$  与约定真值  $A_0$  间的差值,可用下式表示:

$$\Delta X = A_x - A_0 \quad (1-1)$$

绝对误差可以直接反映测量结果与约定真值间的偏差值,但不可作为衡量测量精度的指标。例如,在两次测量电压时,绝对误差都是  $\Delta X = 0.2\text{mV}$ ,当测量值  $A_x$  为  $1\text{V}$  时,可以认为误差很小,精度很高。当测量值  $A_x$  为  $1\text{mV}$  时,就不能认为误差还是很小,精度还是很高,而是误差很大,精度很低。

2. **相对误差** 绝对误差不能作为完全反映测量精度的指标,相对误差则完全可以。相对误差有实际相对误差、示值相对误差和满度相对误差三种表示方法。

实际相对误差用绝对误差对约定真值  $A_0$  的百分比表示,即:

$$\gamma_A = \frac{\Delta X}{A_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

示值相对误差用绝对误差  $\Delta X$  对测量值  $A_x$  的百分比表示,即:

$$\gamma_x = \frac{\Delta X}{A_x} \times 100\% \quad (1-3)$$

满度相对误差用绝对误差  $\Delta X$  对测量仪器满度值  $A_m$  的百分比表示,即

$$\gamma_m = \frac{\Delta X}{A_m} \times 100\% \quad (1-4)$$

满度相对误差是常用的一种相对误差表示方式。我国的电工仪表精度分为七级,而其精度等级  $S$  的确定是利用最大满度相对误差得到的,即

$$S = \frac{|\Delta X_m|}{A_m} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中: $\Delta X_m$ ——绝对误差  $\Delta X$  的最大值。

当测量仪表的下限刻度值不为零时, $S$  由下式表示:

$$S = \frac{|\Delta X|}{A_{\max} - A_{\min}} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中: $A_{\max}$ ——测量仪器的上限刻度值;

$A_{\min}$ ——测量仪器的下限刻度值。

电工仪表精度等级  $S$  规定取一系列标称值,分别称为 0.1 级、0.2 级、0.5 级、1.0 级、1.5 级、2.5 级、5.0 级。5.0 级即表示该等级的电工仪表的满度相对误差的最大值不超过 5.0%。

例:两只电压表的精度等级及量程范围分别是0.5级0~500V、1.0级0~100V,现要测80V的电压,问选用哪只电压表较好?

解:用最大示值相对误差来比较,则有

$$\gamma_{X1} = \frac{\Delta X_{m1}}{A_x} \times 100\% = \frac{500 \times 0.5\%}{80} \times 100\% = 3.125\%$$

$$\gamma_{X2} = \frac{\Delta X_{m2}}{A_x} \times 100\% = \frac{100 \times 1.0\%}{80} \times 100\% = 1.25\%$$

计算结果表明,用1.0级表比用0.5级表更合适。这说明在选用电工仪表时应兼顾精度等级与量程两个方面,而不应片面追求仪表的精度等级。同时在测量中要合理选择量程,尽量让指示值接近满量程值,以减小测量误差。

测量误差的分类除了以上这两种方法外,还可根据被测量随不随时间变化而分成静态误差与动态误差两种。被测量不随时间变化所产生的测量误差称为静态误差,否则就称为动态误差。

### 三、数据处理

在测量过程中,测量误差总是不可避免地存在着。为了评价测量数据的质量,往往要对它们进行必要的处理,这就是数据处理。如前所述,系统误差是可以修正或在测量中设法消除的,因而数据处理主要是指剔除粗大误差和估算随机误差。

#### (一)剔除粗大误差

理论和实践证明,绝大多数测量数据的随机误差服从正态分布规律,标准误差 $\sigma$ 是对正态分布曲线产生影响的唯一参数。正态分布理论中的分布范围虽为无穷大,但其实际分布范围通常取为 $\pm 3\sigma$ ,这是由于测量数据超出 $\pm 3\sigma$ 的概率仅为0.27%,因而一般将 $\pm 3\sigma$ 称为测量结果的极限误差。当有测量数据的剩余误差较极限误差大,则认为该数据有粗大误差存在,必须剔除。这里所谓

的剩余误差是指每一个测量数据 $A_i$ 与算术平均值 $\bar{A}$ 的差值,用 $U_i$ 表示,表明该次测量数据对平均值的偏离程度。算术平均值是指相同的测量条件下,对同一被测量进行 $n$ 次测量所得的数据之和与测量次数 $n$ 的比值。

#### (二)估算随机误差

在实际测量中,对于某一被测值,重复测量的次数 $n$ 是有限的。由于 $n$ 次测量的数据带有随机性,在算术平均值中仍然不可避免地存在着误差,因此在数据处理中,采用算术平均值的标准误差 $\bar{\sigma}$ 来评价算术平均值的精度。根据误差理论, $\bar{\sigma}$ 与 $\sigma$ 存在下列关系:

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

这样就使随机误差减小为原来的 $1/\sqrt{n}$ 。

#### (三)数据处理的一般步骤

##### 1. 计算 $n$ 次测量数据的算术平均值 $\bar{A}$

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n}$$

##### 2. 计算标准误差 $\sigma$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n U_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2}{n-1}}$$

3. 检查有无粗大误差数据 若有剩余误差超过 $\pm 3\sigma$ ,则加以剔除,然后重复以上步骤,直到无粗大误差数据存在。

##### 4. 计算算术平均值的标准误差

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

##### 5. 写出测量结果的表达式

$$A_0 = \bar{A} \pm 3\bar{\sigma}$$

例:现对某液体测量温度11次,测量序号与测量数据如表1-3所示。

表 1-3 某液体测量温度

测量序号 $i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
测量数据/ $^{\circ}\text{C}$	20.72	20.75	20.65	20.71	20.62	20.45	20.62	20.70	20.67	20.73	20.74

解:1. 算术平均值

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n} = 20.67^{\circ}\text{C}$$

2. 标准误差

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2}{n-1}} = 0.086^{\circ}\text{C}$$

3. 检查有无粗大误差数据

通过计算发现,  $A_6$  的剩余误差最大

$U_6 = 0.22^{\circ}\text{C}$ , 而极限误差为  $0.258^{\circ}\text{C}$ , 大于  $U_6$ , 因而可以认为 11 个测量数据中无粗大误差数据存在。

4. 算术平均值的标准误差

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = 0.026^{\circ}\text{C}$$

5. 测量结果表达式:

$$A_0 = \bar{A} \pm 3\bar{\sigma} = 20.67^{\circ}\text{C} \pm 0.078^{\circ}\text{C}$$

## 第二节 传感器及其基本特性

### 一、传感器的构成

传感器是一种转换器件, 以一定的精度将被测非电量转换为与之有确定关系并易于

测量的电量。它一般由敏感元件、传感元件和转换电路三部分组成。其框图如图 1-2 所示。

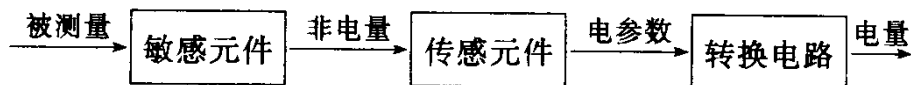


图 1-2 传感器的组成

在传感器框图中, 敏感元件的作用是将直接感受到的非电量转换为另一种非电量, 这两种非电量在数值上具有确定关系。传感元件的作用是将敏感元件送出的非电量再转换为与其有确定关系的电参数, 如电阻、电容、电感等。转换电路的作用则是将传感元件送出的电参数转换为电压、电流等电量。应该指出, 不是所有的传感器都有传感元件这部分, 例如, 热电偶传感器中就没有传感元件; 也不是所有的传感器都具备转换电路, 例如, 光电式传感器中的光电池就能直接将入射光转换为光生电动势。因此图 1-2 所示的传感器的组成框图只是一个一般形式。

### 二、传感器的分类

自动检测技术中所使用的传感器种类众多, 分类方法也不尽相同, 下面就几种常用的分类方法作简要介绍。

#### (一) 按输入被测量进行分类

可分为速度传感器、温度传感器、位移传感器、压力传感器等。这种分类方法直接反映了检测的目的, 给传感器的实际选用提供了一定的方便。

#### (二) 按转换原理进行分类

可分为电阻式、电容式、电感式、压电式、光电式、热电式传感器等。这种分类方法基本上反映了传感器的工作原理, 对于掌握传感器的工作原理、性能特点及选用较为有利。一般在教材中也采用这种分类方法。

### (三)按工作机理进行分类

可分为结构型传感器和物性型传感器两类。结构型传感器是依靠其结构参数变化来实现传感功能的,如电容式传感器中的变极距型电容传感器是依靠改变电容极板间距的结构参数工作的。物性型传感器是依靠其敏感元件物理性质、化学性质的变化来实现传感功能的,而与传感元件的结构参数无关,如光电式传感器就属于这类传感器。

### (四)按输出量形式进行分类

可分为数字传感器与模拟传感器两类。数字传感器输出量为数字量,如光栅传感器、码盘等。模拟传感器输出量为模拟量,如光电式传感器、电感式传感器等。

### (五)按输入输出特性的线性与否分类

可分为线性传感器和非线性传感器两类。本教材主要介绍各种线性传感器。

## 三、传感器基本特性与指标

传感器的基本特性是指其输出输入之间的关系特性。传感器的基本特性又分为静态特性和动态特性。所谓静态特性是指静态信号作用下的输出输入关系特性,所谓动态特性是指动态信号作用下的输出输入关系特性。下面主要介绍传感器静态特性中几个衡量传感器基本特性优劣的重要性能指标:线性度、灵敏度、迟滞、重复性与分辨力。

### (一)线性度

线性度是指传感器实际特性曲线与拟合直线间的最大偏差  $L_{\max}$  对传感器满量程输出值  $Y_{\max}$  的百分比(如图 1-3 所示),可用下式表示:

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{\max}} \times 100\% \quad (1-7)$$

图中 1 为拟合直线,2 为实际特性曲线。

### (二)灵敏度

灵敏度是指传感器输出变化量  $\Delta y$  与输入变化量  $\Delta x$  之比,用下式表示:

$$K = \Delta y / \Delta x \quad (1-8)$$

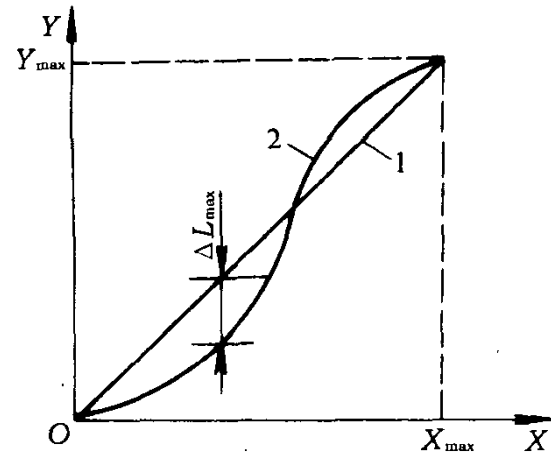


图 1-3 传感器线性度示意图

对于理想线性传感器,灵敏度特性曲线显然是一条直线,直线的斜率就是传感器的灵敏度。当检测系统的输入量与输出量的单位相同时,传感器的灵敏度就是该系统的放大倍数。灵敏度的高低,表明了传感器检测能力的强弱,但在选择时,应注意其合理性,因为传感器灵敏度越高,检测系统的抗扰能力就越弱,稳定性就越差,同时检测的范围也越窄。

### (三)迟滞

迟滞是指传感器正向特性曲线和反向特性曲线间不一致的程度,又称回程误差,其值越小越好。迟滞大小一般由实验方法确定。迟滞定义为正反行程间最大输出的偏差  $\Delta H_{\max}$  对满量程输出  $Y_{\max}$  的百分比(如图 1-4 所示),可用下式表示:

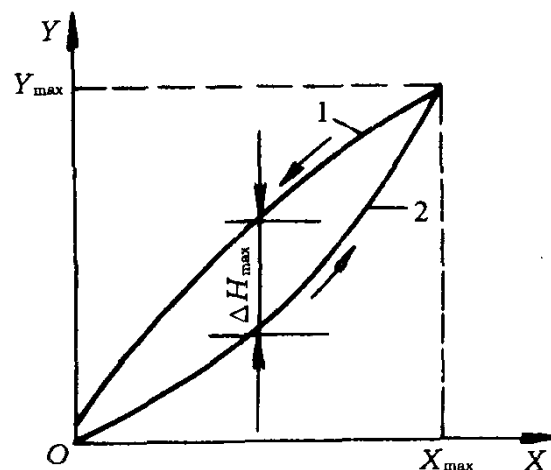


图 1-4 迟滞特性示意图

$$\gamma_H = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{\max}} \times 100\% \quad (1-9)$$

图中 1 为反向特性, 2 为正向特性。在实际测量中, 迟滞会使传感器出现滞后现象与工作死区, 带来测量误差。

#### (四) 重复性

重复性是指传感器在输入量按同一方向作全程多次测试时所得特性曲线不一致的程度, 定义为正反两个行程的两个最大重复性偏差  $\Delta m_1$  与  $\Delta m_2$  中较大的值  $\Delta m$  对满量程输出  $Y_{\max}$  的百分比(如图 1-5 所示), 可用下式表示:

$$\gamma_R = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta m}{Y_{\max}} \times 100\% \quad (1-10)$$

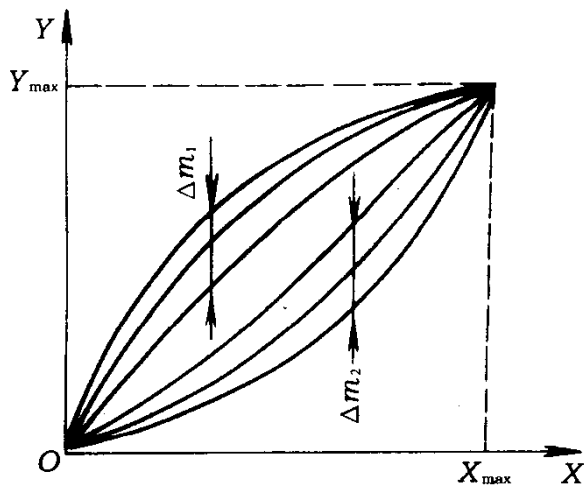


图 1-5 重复性示意图

#### (五) 分辨力

分辨力是指传感器能够检测出的被测量

的最小变化量。当被测量的变化值小于分辨力时, 传感器对输出量的变化无任何反应。分辨力从输出方面看有一定的模糊性, 通常认为数字式传感器的分辨力为最后一位的一个字, 而模拟式传感器的分辨力为最小刻度分格值的一半。

在选用传感器时, 不应片面追求其线性度要好、灵敏度要高、迟滞要小、重复性要优、分辨力要强, 而是应该根据检测的具体需要, 保证主要性能指标满足要求即可。

#### 思考题与习题:

1. 什么叫测量? 测量结果的形式有哪些? 试举例说明。
2. 国际单位制由哪几部分组成? 其基本单位有几个?
3. 测量误差有哪几种表示方法? 分别写出其表达式。
4. 现有精度为 0.5 级的温度表, 量程有 150℃ 和 300℃ 两档, 欲测量 100℃ 的温度, 应选用哪个量程? 为什么?
5. 现有精度 0.5 级、量程 0~300V 和 1.5 级、量程 0~100V 的两个电压表, 欲测量 80V 的电压, 应选用哪只电压表?
6. 试叙述数据处理的一般步骤。
7. 传感器有哪几部分组成? 各有什么作用?
8. 传感器的静态特性性能指标及其各自的意义是什么?

## 第二章

# 电阻应变式传感器

传感器的种类很多,电阻应变式传感器是自动检测技术中用途十分广泛的一类传感器,它的基本原理是利用电阻应变片将被测非电量的变化所产生的应力或应变转换成电阻值的变化,然后通过测量该电阻值达到检

测非电量的目的。电阻应变式传感器具有结构简单、使用方便、灵敏度高、误差小、测量范围大等一系列优点,被广泛用于力、加速度、扭矩、压力等非电量的检测及其科学实验中。

### 第一节 应变片

#### 一、应变片的工作原理

##### (一)电阻应变效应

金属或半导体材料在外力作用下产生机械变形时,其电阻值也随之发生变化的现象,称为电阻应变效应。材料单位长度的变形称为应变。根据电阻应变效应,可将应变片粘贴在被测试件或弹性元件的表面,在外力作用下,应变片将会随同被测试件或弹性元件一起变形,其电阻值发生变化。通过测量应变片电阻值的变化就可测出被测非电量的大小。下面我们以金属丝应变片为例分析电阻应变片的工作原理。

##### (二)基本工作原理

设有一长度为  $l$ 、半径为  $r$ 、电阻率为  $\rho$  的金属丝,其电阻值  $R$  为:

$$R = \rho \frac{l}{s} = \rho \frac{l}{\pi r^2} \quad (2-1)$$

当金属丝在轴线方向受到拉力  $F$  作用时,式(2-1)中的  $\rho$ 、 $r$ 、 $l$  都将发生变化,如图 2-1 所示,长度伸长了  $dl$ ,半径缩小了  $dr$ ,电阻率也因金属晶格发生变形而变化了  $d\rho$ ,这些量的变化使金属丝的电阻值也有相应的变化  $dR$ 。 $dR$  值可按下式求取:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - 2 \frac{dr}{r} \quad (2-2)$$

令:  $\epsilon_l = \frac{dl}{l}, \epsilon_r = \frac{dr}{r}$

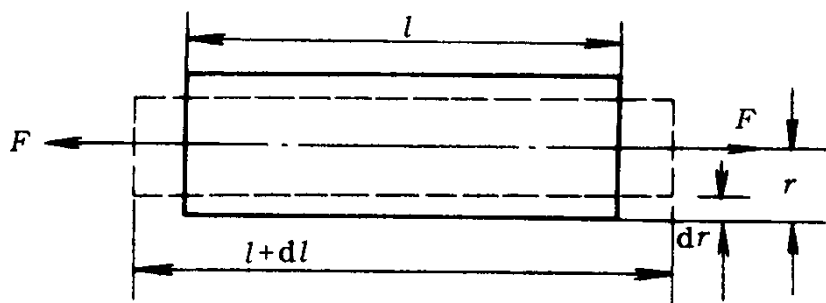


图 2-1 金属丝的电阻应变效应

$$\text{则有: } \frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \epsilon_1 - 2\epsilon_r \quad (2-3)$$

式中:  $\epsilon_1$ ——电阻丝的轴向应变, 又称纵向应变, 简称应变;

$\epsilon_r$ ——电阻丝的径向应变, 又称横向应变。

由材料力学知识可知, 径向应变  $\epsilon_r$  与轴向应变  $\epsilon_1$  间存在着比例关系, 其比例系数为泊松比  $\mu$ , 且两者符号相反, 表达式为:  $\epsilon_r = -\mu\epsilon_1$ , 故式(2-3)可变换为:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \epsilon_1 + 2\mu\epsilon_1 = \left(1 + 2\mu + \frac{d\rho/\rho}{\epsilon_1}\right)\epsilon_1 \quad (2-4)$$

令:  $K_0 = \left(1 + 2\mu + \frac{d\rho/\rho}{\epsilon_1}\right)$  称为电阻应变灵敏系数,

$$\text{则有: } \frac{dR}{R} = K_0\epsilon_1 \quad (2-5)$$

式(2-4)表达了金属电阻丝在外力作用下其电阻值的相对变化量与应变之间的转换关系, 它就是应变片将被测力引起的应变转换为电阻参数变化的基本理论依据。它是在拉伸情况下得出来的, 但也适用于压缩情况。

应变灵敏系数  $K_0$  表示单位应变所引起的电阻相对变化量。它受两方面因素影响, 一方面是由材料几何尺寸发生变化所引起的, 体现在  $(1 + 2\mu)$  这项中; 另一方面是材料发生变形时, 晶格结构变化所引起的, 体现在  $\frac{d\rho/\rho}{\epsilon_1}$  这项中。对于金属材料来讲, 以前一因素为主, 而对于半导体材料, 则以后一因素为主。

对于大多数金属电阻材料, 在其弹性范围内, 无论是拉伸还是压缩,  $K_0$  是一个常数, 一般在 1.6~3.6 之间。

实验证明, 电阻应变片的电阻相对变化量  $\Delta R/R$  ( $\Delta R$  很小时相对变化量就写成  $dR/R$ ) 与  $\epsilon_1$  的关系在很大范围内是线性的, 即

$$\frac{\Delta R}{R} = K_0\epsilon_1 \quad (2-6)$$

式(2-6)中的  $\epsilon_1$  是应变片受力后的应变, 它代表了测试件在应变处的应变。严格来讲, 由于试件与应变片之间存在胶体的传递变形失真等影响, 所以应变片与试件这两者的应变实际上是稍有差异的。

## 二、应变片的结构类型与粘贴

### (一) 应变片的结构类型

电阻应变片的种类较多, 但基本结构都差不多, 如图 2-2 所示。从图中可以看出, 电阻应变片主要由以下几部分组成: 电阻丝 1 (也称敏感栅), 它是应变片的核心部分, 为提高灵敏度, 电阻丝排列成栅网状; 基底 2 和覆盖层 3, 基底是将传感器弹性体表面的应变传递到电阻丝上的中间介质, 并起到电阻丝和弹性体之间的绝缘作用, 覆盖层起着保护电阻丝的作用, 电阻丝与基底及覆盖层是通过粘合剂粘在一起的; 引出线 4, 电阻丝两端焊有引出线, 作为连接测量导线之用。

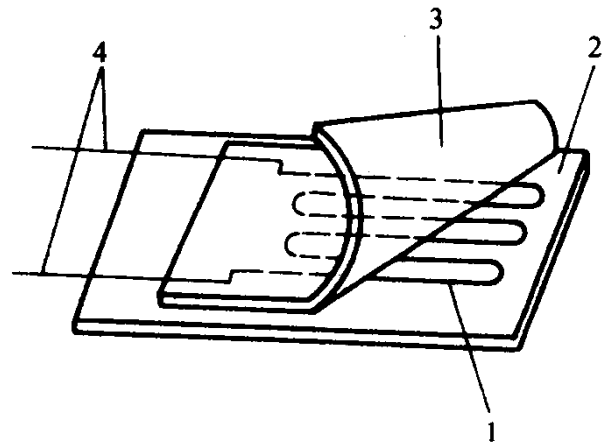


图 2-2 电阻丝应变片结构示意图

按应变片敏感栅材料不同, 可把应变片分为金属电阻应变片和半导体应变片两大类。

1. 金属电阻应变片 目前, 金属电阻应变片有丝式、箔式和薄膜式三种, 用得较多的是前两种, 如图 2-3 所示。

在图(a)所示的丝式应变片中, 是以具有高电阻率的金属丝作敏感栅, 金属丝直径一

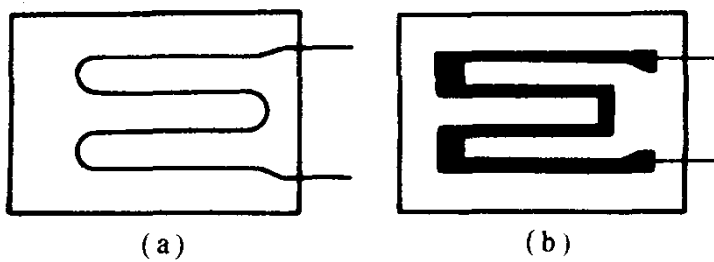


图 2-3 几种金属电阻应变片敏感栅形状  
(a)丝式应变片 (b)箔式应变片

一般为 0.025mm, 电阻值不小于 30Ω, 一般在 50~1000Ω 之间。

在图(b)所示的箔式应变片中, 其敏感栅是用很薄的金属箔片经过照相制版或光刻腐蚀制成。箔片厚度约为 0.003~0.01mm。与丝式应变片相比, 箔式应变片有许多优点: 片面积大, 散热条件好, 允许通过较大的电流; 栅片极薄, 感受的应力较接近试件表面应力状态, 测量精度高; 易加工, 可按需要做成各种形状, 便于批量生产, 成本低。因而箔式应变片已在许多应用场合取代了丝式应变片。

在金属薄膜应变片中, 其敏感栅是将金属材料在基片上采用真空蒸镀或真空沉淀技术, 最后加上保护层制成。这种应变片灵敏系数高, 允许通过较大电流, 易实现批量生产。

**2. 半导体应变片** 半导体应变片是利用半导体材料作敏感栅制成的, 其工作原理是基于半导体材料的电阻率随外力作用而变化的所谓压阻效应。半导体应变片的灵敏系数可用下式表示:

$$K_0 = \pi_1 E \quad (2-7)$$

式中:  $\pi_1$ ——半导体材料的压阻系数;

$E$ ——半导体材料的弹性模量。

半导体应变片的主要优点是灵敏系数高(一般  $K_0$  在 50~100 之间)、体积小。但是, 它与金属应变片相比也有一些较为严重的缺陷, 主要表现在灵敏系数受温度影响较大、允

许工作温度较低、电阻与应变间非线性严重, 因此, 在使用中需采取温度补偿及非线性补偿措施。不过, 近年来相继出现了扩散型、外延型及薄膜型半导体应变片, 已使其缺陷得到了很大改善。

## (二)应变片的使用

应变片工作时总是被粘合剂粘贴到被测试件或弹性元件的表面, 因此如何使被测试件或弹性元件表面的应变能准确传递给应变片是应变片使用的关键之一。此外, 粘贴应变片所用的粘合剂形成的胶层以及粘贴技术也起着非常重要的作用。粘合剂的种类很多, 选用时要根据基片材料、工作温度、潮湿程度、稳定性要求、粘贴时间等因素合理选择。

应变片的粘贴质量将直接影响应变测量的精度, 在粘贴时必须遵循正确的粘贴工艺, 保证粘贴质量。粘贴工艺包括: 被测试件或弹性元件贴片处的表面处理、贴片位置的确定、应变片的粘贴、固化、引出线的焊接和保护处理等。一般先用细纱布将被测试件或弹性元件表面打磨平整光洁, 清除杂质及表面氧化层, 接着按要求划线定位, 再用甲苯、四氯化碳等溶剂清洗被测试件或弹性元件表面。贴片时先在被测试件或弹性元件表面处理和应变片的底面各涂一层粘合剂, 稍干后将应变片贴于划线位置处, 手指滚压挤出气泡及多余的粘合剂。贴好后, 按固化工艺要求进行固化处理。最后还应对贴片质量进行检查, 包括敏感栅是否短路或开路、绝缘性能是否合格、粘贴位置是否准确等, 检查合格后才可焊接引出线。

此外还应指出, 尽管能使应变片有较好的粘贴质量, 但不能正确选用应变片也不会得到满意的检测结果。应变片的选用是否恰当, 将直接影响着传感器测量精度, 必须加以重视。



## 第二节 电阻应变式传感器的转换电路

应变片将应变转换为电阻的变化以后,为了显示或记录,必须将电阻的变化转换为电压或电流的变化,这一任务由转换电路来完成,常用的转换电路是电桥电路。按电源性质的不同,电桥可分为直流电桥和交流电桥两大类。

### 一、直流电桥

#### (一)直流电桥的工作原理

图 2-4 所示为直流电桥的一般结构形式。图中  $U_i$  为直流电源电压,  $U_o$  为电桥输出电压,四个桥臂电阻分别为  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ ,它们可以全部或部分为应变片。为使电桥在测量前处于平衡状态,即桥路输出  $U_o = 0$ ,应该选择四个桥臂电阻满足:

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (2-8)$$

式(2-8)称为电桥平衡条件。

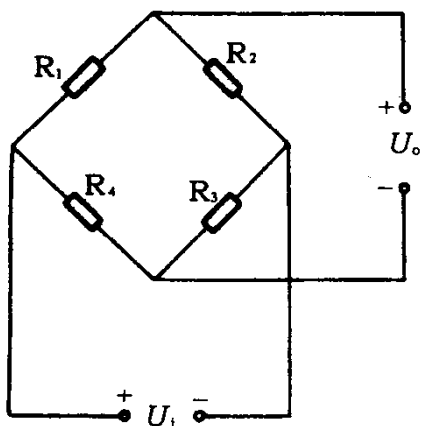


图 2-4 直流电桥电路

根据电路分析,当电桥负载为无穷大时,可求出输出电压  $U_o$  为:

$$U_o = U_i \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (2-9)$$

由式(2-9)可知,在测量前当电桥处于平衡状态时,可消除电桥的恒定输出,使其输出电压只与应变片电阻变化有关。

同样通过分析可知,当四个桥臂都为应变片并感受应变而有电阻变化、且变化值远小于桥臂电阻,即  $\Delta R_i \ll R_i$ 、电桥负载为无穷大时,输出电压  $U_o$  可近似地用下式表示:

$$U_o = U_i \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (2-10)$$

一般应变式传感器中转换电路采用全等臂桥形式,即  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ,这样式(2-10)可变换为:

$$U_o = \frac{U_i}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (2-11)$$

当各桥臂应变片的灵敏系数相同且都为  $K_0$  时,根据式(2-6),式(2-11)可变换为:

$$U_o = \frac{U_i}{4} K_0 (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) \quad (2-12)$$

式(2-12)表示电桥输出电压  $U_o$  与四桥臂电阻相对变化量之间的关系,这就是电桥转换电路的基本工作原理,式中  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ 、 $\epsilon_3$ 、 $\epsilon_4$  分别是四个应变片的应变。若为拉应变,  $\epsilon$  为正值;若为压应变,  $\epsilon$  为负值。

#### (二)直流电桥的工作方式

根据不同的需要,电桥有不同的工作方式。通常有单臂、双臂、四臂等三种典型的方式。

1. 单臂工作方式 即只有一个桥臂电阻是应变片,其余三臂接固定电阻的情况。若令  $R_1$  为应变片,则在测量过程中有  $\epsilon_2 = \epsilon_3 = \epsilon_4 = 0$ ,当  $\Delta R_1 \ll R_1$  时,由式(2-12)可得:

$$U_o = \frac{U_i}{4} K_0 \epsilon_1 \quad (2-13)$$