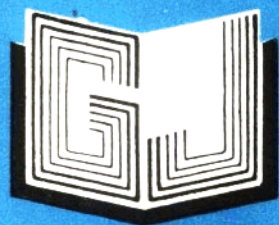


989457



高等学校教材

水文电测技术

四川联合大学 李世镇
河海大学 姜德宝 合编
四川联合大学 杨明江



高 等 学 校 教 材

水 文 电 测 技 术

四川联合大学 李世镇
河 海 大 学 姜德宝 合编
四川联合大学 杨明江

中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书主要介绍各种水文电测仪器和设备的基本组成、基本原理和使用方法。全书共六章,主要内容有:传感器的基础知识、水位和水深电测仪器、流速电测仪器、泥沙测量、水文缆道信号传输和记录控制仪器、水文电测技术发展简介等。

本书为高等水利院校选修课教材,适合水文及水资源利用或水文、水资源与水环境专业使用,亦可供水利类其它专业师生和水利工程或水文测站技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水文电测技术/李世镇等编. --北京:中国水利水电出版社, 1996
高等学校教材

ISBN 7-80124-252-1

I. 水… II. 李… III. 水文观测-电测法-高等学校-教材 IV. P335

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 17451 号

书 名	高等学校教材 水文电测技术 四川联合大学 李世镇
作 者	河 海 大 学 姜德宝 合编 四川联合大学 杨明江
出 版	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044)
发 行	新华书店北京发行所
经 售	全国各地新华书店
排 版	北京市金剑照排厂
印 刷	北京市朝阳区小红门印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 9.75 印张 222 千字
版 次	1997 年 6 月第一版 1997 年 6 月北京第一次印刷
印 数	001—690 册
定 价	7.70 元

前 言

本书是根据全国水利水电类专业教学委员会水文教学组于1991年10月在南京制定的教材编审规划组织编写的。此后,参编单位有关人员根据南京会议制订的专业教学计划的要求,共同研究制定了《水文电测技术》编写大纲,在征得主审人同意后,由四川联合大学水利系与河海大学水资源水文系的三位同志分工进行编写。

《水文电测技术》是水文专业的一门选修课程,编写中除结合两校多年教学实践经验外,力求突出电测的特点,推陈出新,学用一致。对于一些具有代表性的水文电测仪器,着重介绍其基本结构、基本原理和使用方法。全书内容按课内40学时进行安排,共分六章,分别介绍了传感器基础知识、水位与水深、流速、泥沙和水文缆道的电测仪器,并对水文电测技术的发展也略加介绍,尽量反映目前国内外在水文电测技术方面的发展水平。

本教材由四川联合大学的李世镇、杨明江和河海大学的姜德宝合编,其中绪论、第一、二章由李世镇编写;第三、五章由杨明江编写;第四、六章由姜德宝编写,全书由李世镇负责统稿和修改整理,梁瑞驹教授主审。本书在编写过程中,得到了南京水利水文自动化研究所高级工程师周益琪、庞文瑞、张静兰及河北省水文总站赵造中老同志,以及四川省水文水资源勘测局和黄河水利委员会水文局等单位的大力支持与帮助,谨此表示感谢。

由于时间、篇幅和编者水平所限,书中不妥或疏漏、错误之处,欢迎读者批评指正。

编 者

目 录

前 言	
绪 论	1
第一章 传感器的基础知识	3
第一节 概述	3
第二节 参数式传感器	8
第三节 压电式传感器	15
第四节 光电式传感器	19
第五节 数字式传感器	26
第二章 水位和水深电测仪器	31
第一节 水位电测仪器	31
第二节 水深电测仪器	50
第三章 流速电测仪器	58
第一节 转子式流速仪计数器	58
第二节 超声波测流仪	68
第三节 电波流速仪	78
第四节 电磁流速仪和光纤流速仪简介	80
第四章 泥沙测量	81
第一节 光电测沙仪	81
第二节 同位素测沙仪	89
第三节 振动式测沙仪	92
第四节 超声波测沙仪	95
第五章 水文缆道信号传输与记录控制仪器	99
第一节 缆道信号传输特点和传输效率	99
第二节 缆道测流信号的发生	102
第三节 缆道信号的接收	110
第四节 缆道运行控制	117
第六章 水文电测技术发展简介	122
第一节 智能型水文电测仪器	122
第二节 水文自动测报系统	142
第三节 无人值守水文站——固态存储、流星余迹通讯简介	148

绪 论

水文学所涉及的基本物理量(降水量、水位、水深、流速、流量、泥沙等)都是非电量,各个水文要素资料的收集,是水文学研究的基础。水文电测技术就是研讨如何用电测的方法收集各种水文信息的基本途径和方法。由于电子测量装置具有灵敏、准确地检测信息的能力,快速高效传输信息的能力,方便多样记录显示信息的能力,对信息进行贮存、变换、运算和判断的能力,以及及时准确地自动执行控制任务的能力,因此日益受到广泛的重视。特别是计算机技术和遥感遥测技术的发展,一批智能化水文电测仪器开始出现,有的已在实际生产中得到应用。

一、水文电测技术发展现状

降水量观测仪器虽然发展很快,传感器种类也很多,但仍以虹吸式和翻斗式应用最广。国外从70年代开始发展自动气象站、自动雨量站、雷达测雨和卫星遥测等技术。目前,我国研制的长周期雨量计(如重庆水文仪器厂的JDM30型远传月记雨量计、南京水利水文自动化研究所的JDW01型长期自记雨量计等)已开始推广应用,其分辨率为1mm,特别是单片机技术和CMOS器件的发展,使降水量观测逐渐向遥测化、系统化和网络化方向发展。完备的降水量数据采集系统也正在部分地区试用。

水位观测仪器种类很多,主要有浮子式、压力式(气泡式、压敏式)、超声波式(液介式、气介式)、接触式等。记录方式主要有模拟记录、穿孔记录、打印记录和固态自动存储记录等。80年代以来,通过引进国外先进技术,结合我国实际情况、开发研制了一批雨量、水位系列设备(如南京水利水文自动化研究所研制的WFZ-1型水位系统、长江水利委员会水文局研制的YAC9100系列设备等)、四川渔子溪流域和长江水利委员会大宁河流域引进的美国卫星遥测固态存储水文数据系统,经改进后也已在生产中投入使用。

在水深测量中,超声波测深技术的应用在国外已较普遍,80年代以来,随着微机的推广应用,我国测深仪器的技术性能也有所提高,四川省水文水资源勘测局研制的CJ-83型、MS48型测深仪和黄河水利委员会水文局研制的HSW-1000型测深仪都先后在生产中投入使用。

流速测量,国内外仍以转子式流速仪为主,我国重庆水文仪器厂生产的LS25-3A型旋桨流速仪和南京水利水文自动化研究所的LS-20型旋桨流速仪,在测速范围和防水防沙性能方面均优于国外同类产品。在流速仪计数器方面涌现了一批可靠性高、功耗小、成本低的电子计数器等。由于功能齐全、接口方便,已具有较好的配套功能。

流量测验设备方面,缆道测验设备已被广泛采用,对于缆道信号传输、测流缆道控制、计数仪器等都进行了大量研究和改进。一些水文业务部门应用PC-1500等计算机进行缆道控制、测流和数据处理。动船法测流也在一些大河测站(如武汉、长江口等)得到应用。

悬移质泥沙测验设备有取样分析和直接测量两类。取样分析仍是国内外普遍使用的手段,调压式(AYX系列)、皮囊式(ANX系列)和瓶式采样器等均具有测速和取样功能,仪器的可靠性、适应性和测验精度都有显著的提高。超声波测沙仪、同位素测沙仪、光电测沙仪和振动式测沙仪等都先后作了许多试验研究,有的已开始在测站上应用。推移质采样器

虽然也有不少研究,但能广泛推广应用的还为数不多,特别是高新技术的应用,尚是薄弱环节。

随着巡测工作的开展,一批巡测设备和水文自动测报系统已研制成功并投入使用。今后,我国水文仪器设备发展的重点是以电子技术推动传统测验设备的改造,使仪器设备的技术性能和可靠性进一步得到提高。

二、电测仪器的基本组成

由于各种水文要素都是非电量,为了便于检测,首先应将它们转换成相应的电参量(如电阻、电容、电感;连续或断续的脉冲电压或电流等),用来完成这种转换的器件称为传感器或变换器。其输出电量由测量电路(如电桥、放大器等)加以检测,经过适当处理,加工成合适的电量去推动执行机构,并按照被测量的单位进行标度、显示或记录,如图 0-1 所示。

感受被测量的传感器,其输出和输入应有确定的关系,它可以是单个元件,也可能是包括一次敏感元件和其它附属部件的整体结构。一种物理量可以用多种传感器来检测,一种传感器也可以检测多种物理量。

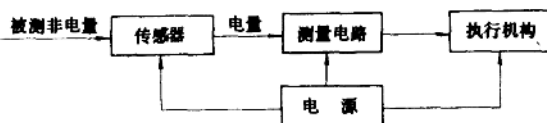


图 0-1 非电量电测仪器的组成

测量电路是联系传感器和终端记录显示机构的中间环节,它应当与所选用的传感器相匹配。常用的测量电路有各种交直流电桥、放大器、振荡器、检波滤波电路、微分或积分电路、调制或解调电路、模/数或数/模转换电路等。

执行机构是用来指示测量的结果,如指示、记录、显示、电传打印等。对于智能化仪表,还可通过接口电路直接与微型计算机相连,由计算机软件程序控制测量和进行数据处理。

第一章 传感器的基础知识

第一节 概 述

传感器是一种检测变换器件,它根据一定的物理效应和定律,将各种非电量(机械量、光学量、热学量或其它物理量)变换成与之有确定对应关系的电学量(如电压、电流、电阻、电容、电感或振动频率等),以便于信息的传输、处理、显示、记录和控制等。由于传感器是整个测量系统的“感觉器官”,它对测量结果的质量起着决定性作用,因此了解传感器类型,研究传感方法和掌握各种传感器性能,便是非电量电测技术的必备基础,也是学习传感器基础知识的主要目的所在。

一、传感器的分类

由于被测参量种类繁多,其工作原理和使用条件又各不相同,因此传感器的种类和规格十分繁杂,分类方法也很多。

(1) 按输入物理量分类:如位移传感器,速度或加速度传感器,力或压力传感器,温度传感器等。这种分类方法明确地说明了传感器的用途,对于使用者选择传感器比较方便。

(2) 按工作原理分类:有电阻式、电容式、电感式、触点式、光电式、热电式、压电式、电磁式、核辐射式、半导体式传感器等。这种分类方法便于对传感器的工作原理作归纳性研究,故最常采用。有时也常把用途和原理结合起来命名,如电感式位移传感器,压电式力—电传感器等,以避免传感器名目过于繁多。

(3) 按能量传递方式分类:可分为有源(发电式)和无源(参量式)传感器两大类。有源传感器类似一台微型电机,它能将非电功率转换成电功率,传感器本身勿需外加电源,信号能量直接从被测对象取得。其中常用型式有电磁感应式、动圈式、压电式、热电偶、光电池等,它所配用的测量电路通常是信号放大器;无源传感器不起换能作用,需要外加电源,被测非电量只是对传感器中的能量起控制或调制作用。其中常用型式有电阻式、电容式和电感式等,配用测量电路通常是电桥电路或谐振电路。此外,触点式或霍尔式传感器也属此类。

(4) 按输出信号性质分类:有模拟式和数字式两种。模拟式传感器将被测非电量转换成连续变化的电压或电流,如要求配合数字显示器或数字计算机,需要配备模/数(A/D)转换装置;数字式传感器将被测非电量转换成电脉冲或数码信号,可以直接用于数字计算和显示。不过,数字式传感器目前种类不多,加强对它的研究和开发是传感器技术发展的重要途径。

二、传感器的静态特性

被测物理量有静态量和动态量两类,因此传感器的特性也有静态特性和动态特性两种。

静态特性是指被测物理量处于稳定状态时的输出—输入关系。测量中的主要问题是输出一输入关系的线性度。为了便于测量仪表的标定和数据处理,通常总希望静态特性具有良好线性特性。一般情况下,由于多种原因的制约,这一要求难于实现,总会不同程度地存在一定的偏差。

设传感器没有迟滞及蠕变效应,其输出—输入关系一般可用下述代数多项式方程表示:

$$y = y_0 + \alpha x + \beta x^2 + \gamma x^3 + \epsilon(x) \quad (1-1)$$

式中, x 为输入物理量; y 为输出量; y_0 为零位输出量; α 、 β 、 γ 为系数; $\epsilon(x)$ 为总括 x^4 以上的高次项和不能简单表示的函数, 它往往可以忽略而成为变换的误差项。

在理想情况下, y_0 和 x 的所有高次项均为零, 则上式变换为

$$y = \alpha x \quad (1-2)$$

这时, 传感器便具有线性特性, 其灵敏度 k 为

$$k = \frac{y}{x} = \alpha = \text{常数} \quad (1-3)$$

如果式(1-1)中 y_0 及 x 的所有偶次项均为零, 只存在奇次项, 则

$$y = \alpha x + \gamma x^3 + \delta x^5 + \dots \quad (1-4)$$

这时, 在原点附近相当宽的范围内, 静态特性基本上是线性的, 具有 $y(x) = -y(-x)$ 的对称特性, γ 的大小可以作为衡量非线性度的尺度。

如果式(1-1)中 y_0 及 x^3 以上的所有奇次项均为零, 则

$$y = \alpha x + \beta x^2 + \mu x^4 + \dots \quad (1-5)$$

这时, 静态特性便不对称, β 越大, 则不对称性越强, 即非线性程度也越严重。

因此, 传感器的静态特性常用 α 、 β 、 γ 的大小来评价, α 大、 $\beta=0$ 、 γ 小的特性实际上是比较理想的特性, 应设法力求避免出现偶次项。图 1-1 是不同情况下传感器的静态特性。

对于 $\beta \neq 0$ 的电气传感元件, 往往可以把两个特性相同的传感元件接成差动形式, 使两个传感元件在同一输入量作用下, 其输出向相反方向变化, 它们的合成特性是两元件输出相减的结果, 这样便可以消除 y_0 和 x 的偶次项, 并有

$$y = 2(\alpha x + \gamma x^3) \quad (1-6)$$

这种差动传感器既能改善线性度, 也可以提高灵敏度, 并可获得对温度及其它干扰量的补偿, 因此得到了广泛应用。图 1-2 的差动变压器就是实际应用中的一个典型例子。显然, 当铁芯处于中心位置时, 其总输出电压 $U_0 = U_{01} - U_{02} = 0$; 当铁芯在被测量作用下偏离中心位置而产生位移时, U_{01} 、 U_{02} 也随之改变, 且 $U_0 = \Delta U_{01} - \Delta U_{02}$, 偶次项被相互抵消, 从而保证了合成特性的良好线性度。

需要指出, 由于非线性的存在, 为

了评定非线性误差的大小, 需要在静态标准条件下(即环境温度 $20 \pm 5^\circ\text{C}$, 环境湿度不大于 85%, 大气压力 $760 \pm 60\text{mmHg}$, $1\text{mmHg} = 1.333224 \times 10^2\text{Pa}$), 用高精度等级的校准设备进行校准, 得出校准曲线, 该曲线与传感器最佳拟合直线的最大相对偏差, 即为该传感器的非线性误差或线性度。

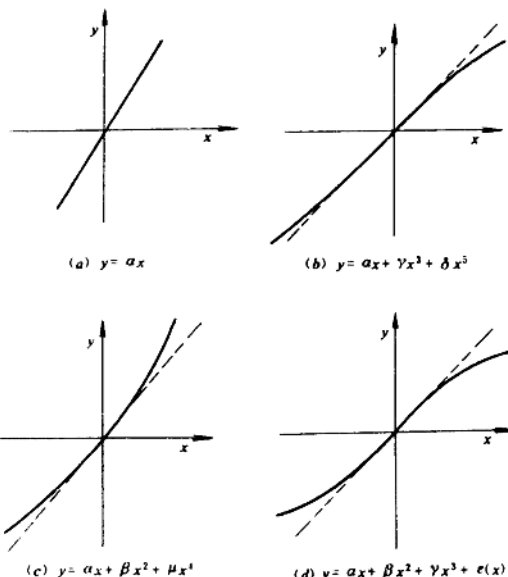


图 1-1 传感器的静态特性

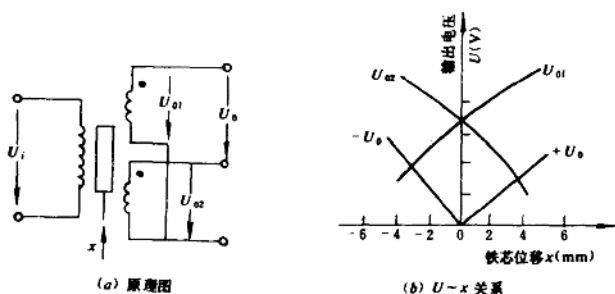


图 1-2 差动变压器

三、传感器的动态特性

动态特性是指传感器对于随时间变化的输入量的响应特性。由于输入量是时间的函数，故传感器输出量也应是时间的函数，它们随时间变化的动态曲线通常是一致的或相近的。研究传感器的动态特性，对于传感器的正确设计与合理使用都具有重要的意义。

任何线性变换系统的一个重要性质是满足叠加原理。设输入量为 $x(t)$ ，输出量为 $y(t)$ ，它们都是正弦信号或阶跃信号，则传感器动态特性的一般数学模型可以表示为

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (1-7)$$

式中，系数 a_i 和 b_i 的物理意义由系统性质而定，可以采用 D 算子法或拉氏变换对方程求解。显然，该方程的解由齐次方程的通解和特解两部分之和组成，前者反映系统的暂态过程，后者是系统的稳态输出。方程式(1-7)的几种典型情况为

$$a_0 y = b_0 x, \text{ 即 } y = \frac{b_0}{a_0} x, \text{ 为零阶传感器方程}$$

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x, \text{ 为一阶传感器方程}$$

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x, \text{ 为二阶传感器方程}$$

下面，用典型的试验信号作为输入量，对传感器的动态响应特性进行分析。

(一) 输入正弦信号时的频率响应

所谓频率响应，是指传感器对正弦输入信号的稳态响应，它通常是用该系统的幅频特性和相频特性来描述。

(1) 零阶传感器的频率特性：由 $a_0 y = b_0 x$ 知

$$\frac{y}{x} = \frac{b_0}{a_0} = k \quad (1-8)$$

这表明，无论 $x(t)$ 是何种变化，零阶系统的输出比输入总是确定的比例关系，时间上没有滞后。图 1-3 的电位器式传感器即属此类。

这时， $y = \frac{E}{l} x = kx$ ，在此， k 即为静态灵敏度。

(2) 一阶传感器的频响特性：由前述可知

$$\frac{a_1}{a_0} \frac{dy}{dt} + y = \frac{b_0}{a_0} x$$

令 $a_1/a_0 = \tau$ ，它是系统的时间常数； $b_0/a_0 = k$ ，为系统的

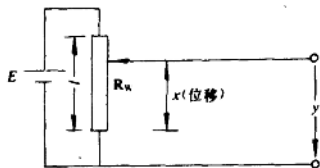


图 1-3 零阶传感器

静态灵敏度。于是上式可变换为

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = kx \quad (1-9)$$

若以 B/A 表示传感器输出与输入的幅值比, 则可得出其频响特性为

$$\left. \begin{aligned} \frac{B}{A} &= \left| \frac{y}{x}(j\omega) \right| = \frac{k}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} \\ \phi &= \arctg(-\omega\tau) \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

可见, 在一阶系统中, 随着角频率 ω 和时间常数 τ 的增大, 系统增益将要降低, 滞后时间也将增长。图 1-4 即为一阶传感器的频响特性曲线。具有弹簧—阻尼力学系统或 RC 谐振电路的传感器即属此类。

(3) 二阶传感器的频响特性: 由前述知

$$\frac{a_2}{a_0} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{a_1}{a_0} \frac{dy}{dt} + y = \frac{b_0}{a_0} x$$

令 $b_0/a_0 = k$, 为静态灵敏度; $\sqrt{a_0/a_2} = \omega_0$, 为系统的无阻尼

自振频率; $a_1/(2\sqrt{a_0 a_2}) = \xi$, 为系统阻尼比, 则有

$$\frac{1}{\omega_0^2} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{2\xi}{\omega_0} \frac{dy}{dt} + y = kx \quad (1-11)$$

其频响特性可表示为

$$\left. \begin{aligned} \frac{B}{A} &= \left| \frac{y}{x}(j\omega) \right| = \frac{k}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{2\xi\omega}{\omega_0}\right)^2}} \\ \varphi &= \arctg \left[\frac{2\xi \frac{\omega}{\omega_0}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

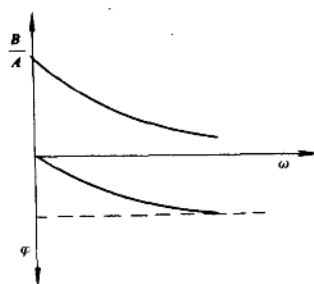


图 1-4 一阶传感器的频响特性

二阶传感器的频响特性如图 1-5 所示。具有弹簧—阻尼—惯性质量块的振动系统就是典型的二阶传感器。

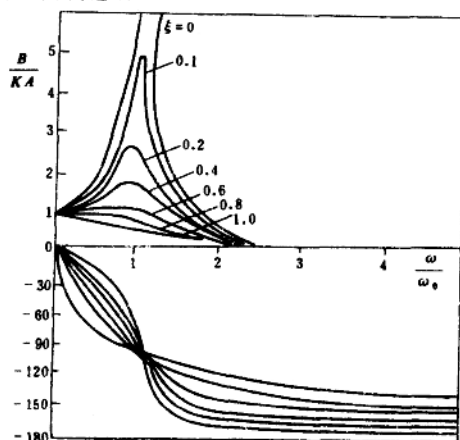


图 1-5 二阶传感器的频响特性

从上述讨论可知, 当输入正弦信号进行动态测量时, 主要考虑其幅值误差就行了, 因为相位误差只是使输出波形滞后输入一段时间, 但波形不会改变。

(二) 输入阶跃信号的瞬态响应

(1) 一阶传感器的阶跃响应: 设系统输入如图 1-6 所示阶跃信号为 $x(t)$, 其特点为

$$\begin{aligned} x(t) &= 0 & (t < 0) \\ x(t) &= A & (t > 0) \end{aligned}$$

由一阶传感器方程式(1-9)可得:

$$y = A(1 - e^{-t/\tau}) \quad (1-13)$$

这表明, 一阶系统的输出是一条按指数规律单调上升的曲线, 上升速度由时间常数

τ 决定。当稳定输出时间 $t_s = (3 \sim 5)\tau$ 时, 相应的幅值误差约为 $(5 \sim 1)\%$ 。可见, τ 是决定一阶系统响应速度的重要参数。

(2) 二阶传感器的阶跃响应: 由二阶传感器方程(1-11)式, 根据系统阻尼情况不同, 该方程的解有三种不同情况。

1) 临界阻尼: 即 $\xi = 1$ 时, 可得

$$y = KA [1 - (\omega_0 t) e^{-\omega_0 t}] \quad (1-14)$$

2) 过阻尼: 即 $\xi > 1$, 可得

$$y = KA \left[1 - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{\xi^2}}} \right) e^{-(1 - \sqrt{1 - \frac{1}{\xi^2}})\xi\omega_0 t} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{\xi^2}}} \right) e^{-(1 + \sqrt{1 - \frac{1}{\xi^2}})\xi\omega_0 t} \right] \quad (1-15)$$

3) 欠阻尼: 即 $\xi < 1$ 时, 可得

$$y = KA \left[1 - \frac{e^{-\xi\omega_0 t}}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin(\sqrt{1 - \xi^2}\omega_0 t + \varphi) \right] \quad (1-16)$$

式中

$$\varphi = \arcsin \sqrt{1 - \xi^2}$$

以上三种情况所表示的响应曲线如图 1-7 所示。由图可见, 二阶系统的输出对输入总有一定的延迟时间, 其阶跃响应曲线的形状决定于系统阻尼比 ξ 的大小。对于过阻尼情况, 输出量单调上升, 纵坐标(无量纲数) y/KA 逐渐趋近于 1, 但不会超过 1; 对于欠阻尼而言, 输出呈衰减振荡, 衰减振荡的频率即为系统阻尼振荡的频率 $\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}$; 临界阻尼情况介于上述二者之间。 ξ 很大或很小时, 接近稳态输出所需时间(即稳定时间 t_s) 越长。实践表明, 为了获得满意的瞬态响应, 阻尼比应选择在 $\xi = 0.6 \sim 0.8$ 之间为宜, 以 $\xi = 0.7$ 为最佳。

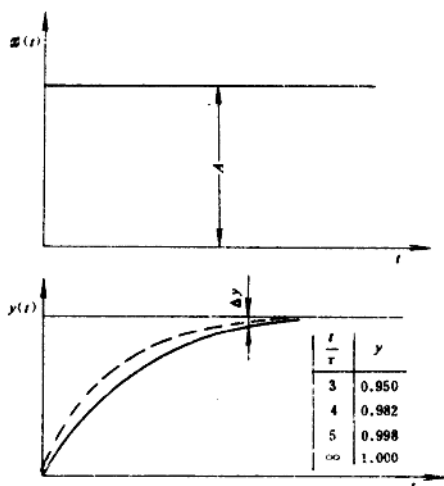


图 1-6 一阶传感器的阶跃响应曲线

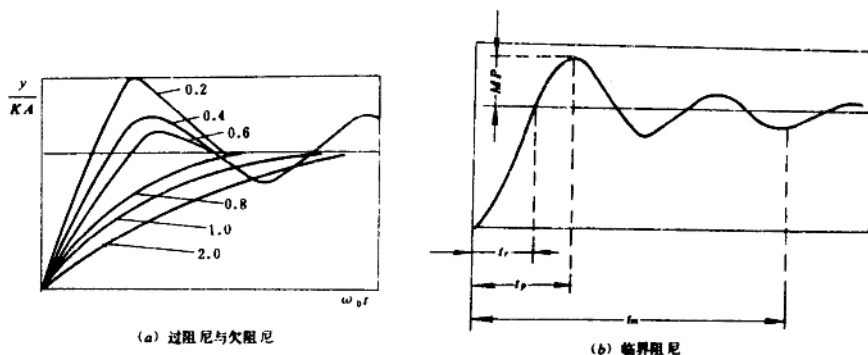


图 1-7 二阶传感器的瞬态响应曲线

四、传感器的主要性能指标

反映传感器性能的主要质量指标一般有：

- (1) 灵敏度：传感器输出量变化值与输入量变化值之比；
 - (2) 分辨力(鉴别阈)：是指输出端产生可以观测到的变化量时所对应的被测量的最小变化值，其值与灵敏度有关；
 - (3) 误差：指测量的指示值与被测量的真值之差，通常用百分数(相对误差)表示；
 - (4) 非线性：表示在静态标准条件下，传感器的校准曲线与最佳拟合直线的偏离程度，一般可用全量程内的最大偏差与满量程输出(平均值)的百分比表示；
 - (5) 迟滞：表示正、反行程测得的输出—输入关系不一致的程度，通常用正、反行程测量值的最大偏差与满量程输出的百分比表示；
 - (6) 量程：量程是测量上下限的代数差。
- 此外，实际生产中尚有其它一些质量指标，如重复性、蠕变等，在此从略。

第二节 参数式传感器

参数式传感器有电阻式、电感式和电容式三种典型型式。下面，分别介绍它们的工作原理、性能和测量电路。

一、电阻式传感器

电阻式传感器有许多不同型式，按其工作原理可分为电位器式和电阻应变式两类。

(一) 电位器式传感器

通常，它有线位移式和角位移式两种形式，如图 1-8 所示。结构上它们都是由电阻丝、绕线骨架和触点机构等几部分组成。其共同原理是：当被测参量 F 发生变化时，使活动触

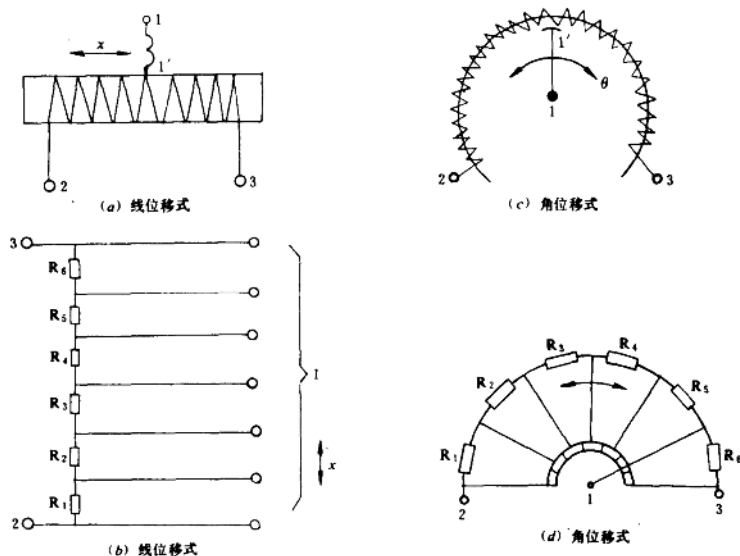


图 1-8 电位器式传感器

点1的位置也发生变化,从而动触点和另一固定端(2或3)之间的电阻值 R 随之变化,只要测量该阻值的变化,便可反映被测量的变化。其中,线位移式是把线位移 x 转换成电阻的线性变化,角位移式则是将转角 θ 变成线性变化的电阻输出。被测参量 F 与电阻 R 之间的关系可表示为

$$R = f(F) \quad (1-17)$$

由于精密线绕电阻精度较高,因此应用较广。电阻丝通常采用合金材料制成,如康铜合金、镍铬合金、铂铑合金、银钯合金等。

这种传感器的等效电路如图1-9(a)所示。图中, R' 为外接补偿可调电阻; R 和 R_L 分别

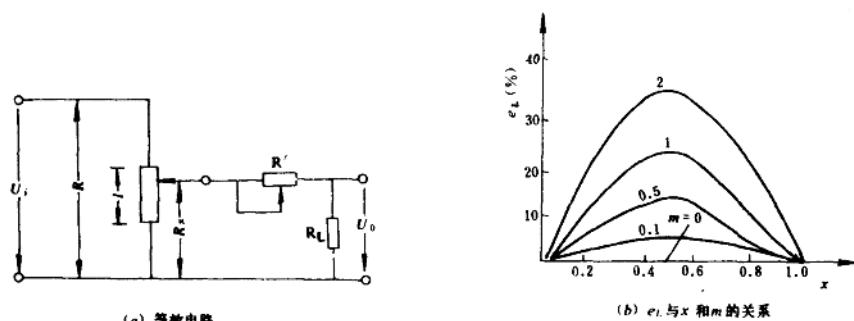


图 1-9 电位器式传感器

是传感器电阻和负载电阻。当令 $x = R_x/R$ 为空载分压比, $U'_0 = U_i \frac{R_x}{R}$ 为空载输出电压,若 $R' = 0$ 并令 $m = R/R_L$ 时,则接入负载后的输出电压可表示为

$$U_0 = U_i \frac{x}{1 + mx(1-x)} \quad (1-18)$$

线性误差 e_L 为

$$e_L = \frac{U'_0 - U_0}{U'_0} \times 100\% = \left[1 - \frac{1}{1 + mx(1-x)} \right] \times 100\% \quad (1-19)$$

可见, e_L 与 m 和 x 之间是非线性关系,如图1-9(b)所示。不难证明,最大线性误差 e_{Lm} 正好发生在 $x = 1/2$ 处,其值为

$$e_{Lm} = \left(1 - \frac{1}{1 + 0.25m} \right) \times 100\% \quad (1-20)$$

欲使线性误差在全量程中保持在1%~2%以内,则应使 $m < 0.04 \sim 0.08$,即 $R_L > (12 \sim 25)R$ 。否则,就应在电路上采用相应补偿措施(即接入 R')进行补偿。

(二) 电阻应变式传感器

这种传感器是将被测外力(如压力、应力等)转换成电阻变化的一种检测元件,它通常由电阻应变片和测量电路两部分组成。常用型有金属电阻应变片和半导体应变片两种。

金属电阻应变片在结构上有丝式和箔式两种型式,如图1-10所示。它们的工作原理相同,都是建立在当导体在外力作用下产生机械变形时,其电阻阻值将会随之发生变化的基础上。

设电阻应变片导体长度为 l ,电阻值为 R ,电阻率为 ρ ,反映导体受力后纵横向尺寸相对变化的泊松比为 μ ,则应变片的相对灵敏度(或灵敏系数)为

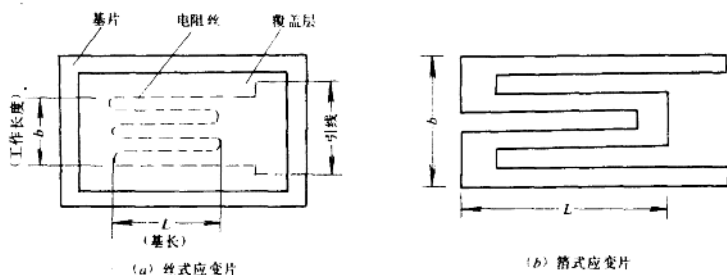


图 1-10 金属电阻应变片结构

$$k = \frac{dR/R}{dL/L} = (1 + 2\mu) + \frac{d\rho/\rho}{dL/L} \quad (1-21)$$

在实际应用中,为改善其温度特性,常常采用差动贴片法(即在试件相对两侧同时贴片)进行补偿。国产应变片允许工作电流一般为 15~25mA。为了减小滞后影响,一般在安装好后应反复加载,以取得比较稳定的结果。

半导体应变片是根据压阻效应而制成的另一类应变检测元件,不同类型半导体或同类半导体因施加应力方向不同,其压阻效应也不相同。压阻效应的大小用压阻系数 π 来表示。分析表明,在轴向应力作用下(π 用 π_L 代替)所引起的电阻变化率为

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu)\epsilon + \frac{d\rho}{\rho} = (1 + 2\mu + \pi_L E)\epsilon \quad (1-22)$$

式中, E 为杨氏弹性模数; ϵ 是轴向应变。可以看出,在外应力作用下的电阻变化率受到应变几何尺寸变化(上式右边前两项)和压阻效应(右边第三项)的双重影响。由于后者的影响远比前者大,故可以认为

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \pi_L E \epsilon \quad (1-23)$$

通常,将电阻的相对变化与应变的比值定义为应变片的灵敏系数 k , 于是有

$$k = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} = \pi_L E \quad (1-24)$$

一般说来,半导体应变片的 k 值比金属电阻应变片高几十倍,可达 60~170,而且阻值范围更大(5 Ω ~50k Ω),体积更小,频响范围更宽,适应性更强,因此得到了广泛应用。

(三) 电阻式传感器的测量电路

测量电路是电阻式传感器的重要组成部分,其主要任务是将电阻值的微小变化测量出来,并由它来反映被测参数的变化。

测量电路有简单串联电路、差动式电路和电桥测量电路三种,如图 1-11 所示。其中以电桥测量电路应用最广,它可在各桥臂中随意接入 1~4 个应变元件,安排比较灵活。为了提高测量精度,应注意电桥的零点调整,并应采取适当措施进行温度和弹性模数补偿。

二、电感式传感器

电感式传感器是利用电感元件将被测量的变化转换成线圈的自感或互感量的变化,再通过测量电路将它们变换成相应电压或电流信号输出。因此,传感器的类型也有自感式和互感式(即变压器式)两种,它们可以用来测量位移、压力和振动等参数。

(一) 自感式传感器

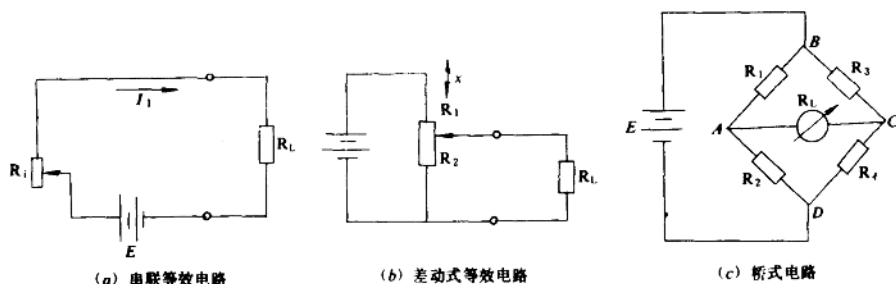


图 1-11 测量电路

由电磁学知,在匝数为 W 的铁芯线圈中,若磁路平均长度为 l ,铁芯和气隙 δ 的导磁系数分别为 μ 和 $\mu_0 (=4\pi \times 10^{-9} \text{H/cm})$,铁芯面积为 A ,则反映铁芯和气隙串联后对应的有效导磁系数 μ_{eff} 为

$$\mu_{eff} = \frac{\mu}{1 + \frac{\delta}{l}\mu} \quad (1-25)$$

电感量 L 为

$$L = \frac{W^2 \mu_0 \mu_{eff} A}{2\delta} \quad (1-26)$$

可见,改变 δ 、 A 或 μ 值便可引起电感量的变化。因此,实际电感变换元件也相应有三种基本型式,即变气隙式、变截面式和螺管式(或称变 μ 式),它们的结构如图 1-12 所示。

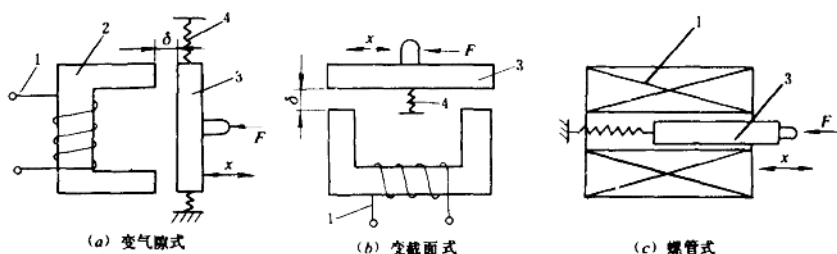


图 1-12 自感变换器结构原理

1—线圈; 2—铁芯; 3—衔铁; 4—弹簧;

F —外力; δ —气隙; x —位移

自感变换器虽然结构简单,但其共同缺点是使用过程中一直有电流通过,使衔铁始终具有吸力,加之电流方向一定,也不能反映出被测量方向的变化,故实用中常常采用差动式自感变换器,如图 1-13 所示。例如,图 1-13(a)的变气隙式差动电感变换器,若初始状态下衔铁居中位移为零时,因 $|I_{L1}| = |I_{L2}|$,故流过负载 Z_L 的电流为零,即 $\Delta I = I_{L1} - I_{L2} = 0$;当衔铁在外力作用下沿 x 方向移动时,由于两气隙一增一减导致两个线圈的电感量不等,因此 $|I_{L1}| \neq |I_{L2}|$,即 $\Delta I \neq 0$,负载中有电流流过,并有电压输出。输出电流或电压的大小与衔铁位移量有关,输出电压极性则反映了位移的方向。这种传感器因其线性度和灵敏度高,在实际检测工作中得到广泛应用。不过,当在高频下工作时,因铁损剧增使线圈的 Q 值降低,灵敏度下降,这时宜改用短路环式变换器为好。图 1-14 中是短路环式电感变换器的

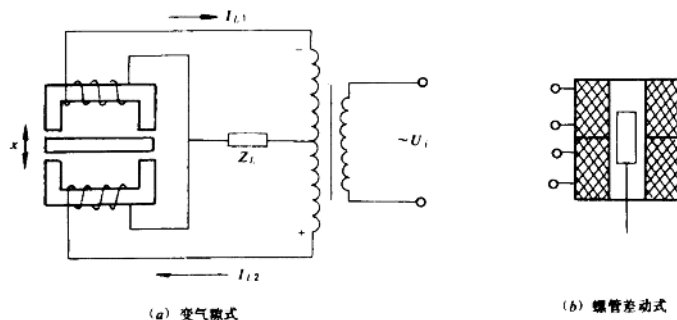


图 1-13 差动式自感变换器

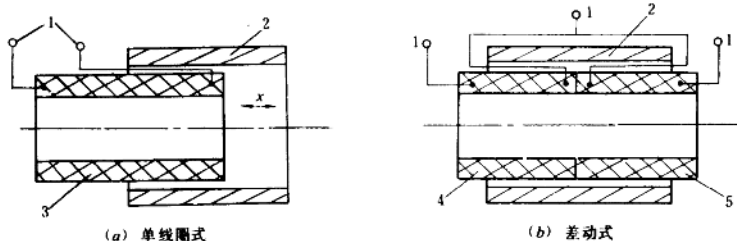


图 1-14 短路环式电感变换器

1—引线；2—短路套筒；3—线圈；4—线圈 I；5—线圈 II

两种结构方案，即单线圈式和差动式。其共同特点是利用线圈形成的磁场在短路套筒中产生涡流，当套筒在外力作用下移动时，因套筒中涡流发生变化，引起线圈电感量变化。若线圈电感量为 L ，则考虑涡流影响后的等效电感量 L' 为

$$L' = L(1 - k^2) \quad (1-27)$$

式中 k 为耦合系数，反映了线圈和短路环间耦合紧密的程度，其值与两者之间相互位置有关。

(二) 差动变压器

差动变压器的结构和电原理图如图 1-15 所示。由图知，当铁芯处于中间位置时，在输

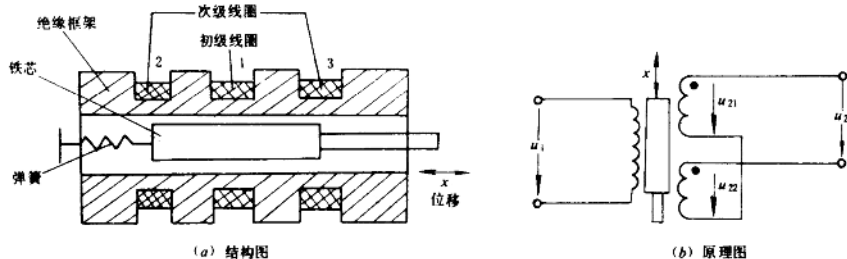


图 1-15 差动变压器

入交变电压 u_1 作用下，因 $u_{21} = u_{22}$ ，输出电压 $u_2 = 0$ 。当铁芯在外力作用下发生位移时，显然 $u_{21} \neq u_{22}$ ，故 $u_2 \neq 0$ ，即有电压信号输出，由此便可以检测到被测量的大小和变化方向。这种传感器的灵敏度一般在 50mV/mm/V 以上，线性范围是骨架长度的 $1/10$ 左右，使用温度