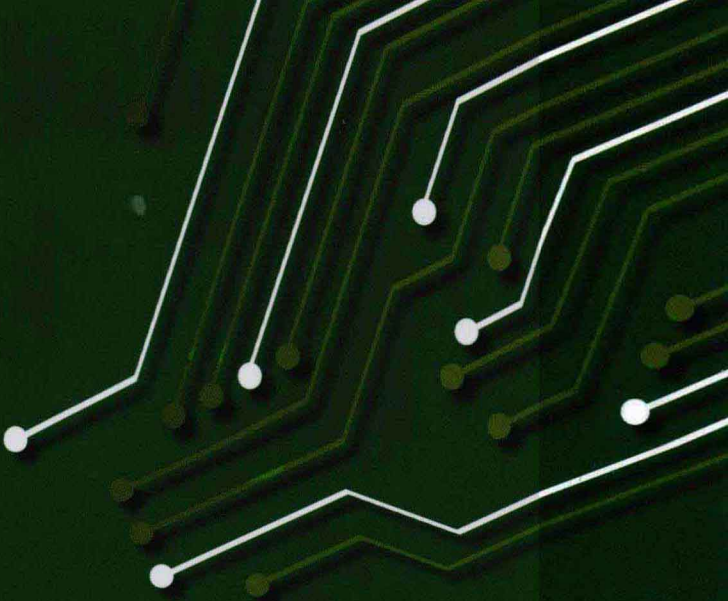




传感器与 检测技术

耿瑞辰 郝敏钊 主编

CGJCS

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

传感器与检测技术

Chuanganganqi

Yu Jiance Jishu

郝娜	刘瑞涛	耿瑞辰	郝敏钗	主 编
		卢建青	刘琳锋	副主编
		王金斗	王 薇	主 审
梁娜		李英辉	郑建红	参 编

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

传感器与检测技术 / 耿瑞辰, 郝敏钗主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2012.8
ISBN 978-7-5640-6548-5

I. ①传... II. ①耿... ②郝... III. ①传感器—检测—高等学校—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 186682 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (办公室) 68944990 (批销中心) 68911084 (读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市文通印刷包装有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 13

字 数 / 294 千字

版 次 / 2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

印 数 / 1~2 000 册

定 价 / 40.00 元

责任校对 / 杨 露

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 本社负责调换

本书是编者在多年的教学实践基础上,结合自己的教学经验,在力求通俗、简明的指导思想下编写而成。以培养学生实践动手能力为主线,主要介绍了各种传感器的类型及应用。本书包含6个项目,每个项目的知识点随着实际工作的需要引入,项目内容包括“任务描述”“任务目标”“知识链接”“任务实施”“拓展知识”“任务练习题”等环节。此外,本书中还提供了电路原理图、电路制作技巧及电路制作注意事项等内容。

作为人体感觉器官的延伸,传感器已应用于生活、生产、航空航天、科研等各个领域,是各种信息检测系统、自动测量系统、自动报警系统和自动控制系统必不可少的信息采集的“感觉器官”,在现代科学技术和工程领域中起着极其重要的作用。随着传感技术的飞速发展,其应用领域更为广泛,由于传感器相关知识和技术成为相关技术人员的必备知识,所以本书还可以作为相关技术人员自学用书。

本书主要介绍了常见物理量的检测用传感器,包括力及压力的检测、温度和环境量的检测、位移和转速的检测、光信号的检测、其他量的检测及传感器信号处理。此外,本书还对传感器的相关检测知识、电路转换及信息处理技术等进行了阐述,每个项目选材力求通俗、简明、实用、可操作性强,每一个任务后边均有思考练习题。

本书编写特点如下:

(1) 本书以任务驱动为目的,让学生学习相关的知识点来实施任务,既增加了学生学习传感器的目的性,同时也能有效地提高学生对于传感器的实际应用能力。任务的设计上力求以少的元器件数目、以简单的电路设计,实现传感器的功能,体现传感器的应用价值。

(2) 书中选取的任务具有很强的可扩展性,在原有电路的基础上进行功能扩展之后就能实现其他应用。

本书可作为电子信息类、工业自动化、自动控制、机电一体化、计算机应用等专业的教材。而且使用本书的学校可以根据专业要求、实验条件和其他实际情况,可对相应章节的内容进行取舍。

本书的编审工作得到了许多同行的热情帮助,并提出了宝贵意见,也得到了编者所在院校领导的关心和支持,在此一并表示衷心感谢!本书由耿瑞辰、郝敏钗担任主编,郝娜、刘瑞涛、卢建青、刘琳锋担任副主编,其中项目一、项目三、项目四由郝敏钗、耿瑞辰编写,绪论、前言由郝敏钗编写,项目二、项目五由郝娜和卢建青编写,项目六由刘瑞涛编写;本书所有图稿由刘瑞涛和刘琳锋绘制。在该书的编辑过程和文字的校对过程中,梁娜、李英辉、郑建红也参与了工作。全书由郝敏钗、耿瑞辰统稿,由王金斗、王薇主审。

由于编者水平有限,疏漏之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

Contents 目录

Contents

绪论	1
项目一 力和压力的检测	9
任务一 电子秤的设计与制作	9
任务二 汽车燃油表显示电路设计与制作	23
任务三 电子血压计的设计与制作	28
任务四 振动报警电路的设计与制作	39
项目二 温度和环境量的检测	48
任务一 电热水器温度控制器的设计与制作	48
任务二 锅炉炉膛温度计的设计	60
任务三 婴儿尿湿报警电路的设计	71
任务四 酒精测试仪的设计	75
任务五 培养箱恒温恒湿控制器的设计	80
项目三 位移和转速的检测	87
任务一 自行车车速表的设计与制作	87
任务二 直流电机转速的测量	96
任务三 超声波检测系统倒车雷达的设计	102
项目四 光信号的检测	114
任务一 光控节能路灯电路的设计与制作	114
任务二 红外自动干手器电路设计与制作	129
任务三 自动生产线的零件打包系统设计	141
任务四 光电编码器鉴相计数电路	153
项目五 其他量的检测	159
任务一 电感式接近开关的制作	159
任务二 门控自动照明灯电路的设计与制作	178
项目六 传感器信号处理	189
附录 A 热电偶分度表	193
附录 B 热电阻分度表	196
参考文献	198

绪 论

随着社会的进步、科学技术的发展,特别是近 20 年来,电子技术日新月异,计算机的普及和应用把人类带入了信息时代,各种电气设备充满了人们生产和生活的各个领域,相当大一部分的电气设备都用到了传感器件,传感器技术是现代信息技术中主要技术之一,在国民经济建设中占有极其重要的地位。

人们为了从外界获取信息,必须借助于感觉器官。而单靠人们自身的感觉器官,在研究自然现象和规律以及生产活动中其功能就远远不够了。为了适应这种情况,就需要传感器。因此可以说,传感器是人类五官的延长,又称为电五官。

新技术革命的到来,世界开始步入信息时代。在利用信息的过程中,首先要解决的就是要获取准确、可靠的信息,而传感器是获取自然和生产领域中信息的主要途径与手段。

在现代工业生产尤其是自动化生产过程中,要用各种传感器来监视和控制生产过程中的各个参数,使设备工作在正常状态或最佳状态,并使产品达到最好的质量。因此可以说,没有众多优良的传感器,现代化生产也就失去了基础。

在基础学科研究中,传感器更具有突出的地位。现代科学技术的发展,进入了许多新领域。例如,在宏观上要观察上千光年的茫茫宇宙,微观上要观察小到纳米量级的粒子世界,纵向上要观察长达数十万年的天体演化,短到秒的瞬间反应。此外,还出现了对深化物质认识、开拓新能源、新材料等具有重要作用的各种极端技术研究,如超高温、超低温、超高压、超高真空、超强磁场、超弱磁场等。显然,要获取大量人类感官无法直接获取的信息,没有相适应的传感器是不可能的。许多基础科学研究的障碍,首先就在于对象信息的获取存在困难,而一些新机理和高灵敏度检测传感器的出现,往往会导致该领域内的突破。一些传感器的发展,往往是一些边缘学科开发的先驱。

传感器早已渗透到诸如工业生产、宇宙开发、海洋探测、环境保护、资源调查、医学诊断、生物工程,甚至文物保护等极其广泛的领域。可以毫不夸张地说,从茫茫的太空到浩瀚的海洋,以至各种复杂的工程系统,几乎每一个现代化项目,都离不开各种各样的传感器。世界各国都十分重视这一领域的发展。相信不久的将来,传感器技术将会出现一个飞跃,达到与其重要地位相称的新水平。

一、传感器概述

传感器是一种物理装置或生物器官,能够探测、感受外界的信号、物理条件(如光、热、湿度)或化学组成(如烟雾),并将探知的信息传递给其他装置或器官。因此,传感器是能感受规定的被测量,并转换为与之有确定对应关系的有用输出信号(一般为电量)的器件或装置,以满足信息的传输、记录、显示和控制要求,如图 0-1 所示。

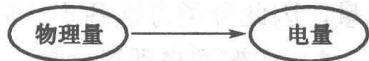


图 0-1 传感器转换

人通过五官（视、听、嗅、味、触）接收外界的信息，经过大脑的思维（信息处理），做出相应的动作。而用计算机控制的自动化装置来代替人的劳动，则可以说电子计算机相当于人类的大脑（一般俗称电脑），而传感器则相当于人的五官部分（“电五官”）。传感器是获取自然领域中信息的主要途径与手段。“没有传感器就没有现代科学技术”的观点已被全世界所公认。以传感器为核心的检测系统就像神经和感官一样，源源不断地向人类提供宏观与微观世界的种种信息，成为人们认识自然、改造自然的有利工具。

二、传感器的组成

传感器是一种能把非电量输入信息转换成电信号输出的器件或装置。传感器又叫变换器、换能器或探测器。传感器一般是由物理、化学和生物等学科的某些效应或原理按照一定的制造工艺研制出来的，它能“感知”被控量或被测量的大小不等与变化，并进行处理。

传感器由敏感元件、传感元件、信号调节与转换电路和其他辅助元件组成，如图 0-2 所示。

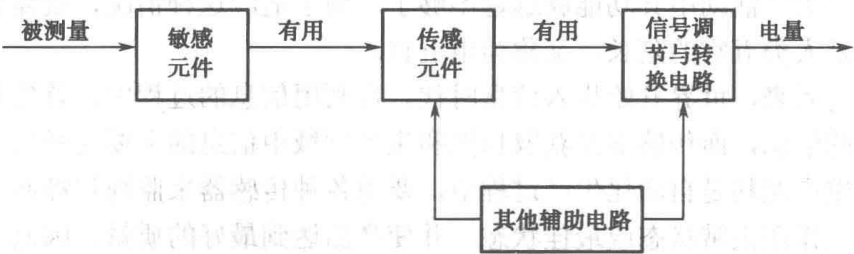


图 0-2 传感器的组成原理框图

敏感元件是直接感受非电量，并按照一定规律转换成与被测量有确定关系的其他量（一般仍为非电量）。例如，应变式压力传感器的弹性膜片就是敏感元件，它的作用是将压力转换成膜片的变形。

传感元件又称变换器，一般情况下，它不直接感受被测量，而是将敏感元件输出的量转换成电量输出的元件。例如，应力式压力传感器的应变片，它的作用是将弹性膜片的变形转换成电阻值的变化，电阻应变片就是传感元件。

信号调节与转换电路是把转换元件输出的电信号转换为便于现实、记录、处理和控制的电信号的电路。常用的电路有弱信号放大器、电桥、振荡器、阻抗变换器等。

其他辅助元件通常指电源电路（交、直流）及其外围电路。

在实际应用中，传感器的具体构成视被测对象、转换原理、使用环境及性能要求等具体情况的不同而有很大差异。

三、传感器的分类

虽然传感器种类繁多，但都是根据物理学、化学、生物学等学科规律、特性和效应设计而成的。一种被测量对象可以用不同传感器来测量，而同一原理的传感器通常又可测量多种非电量，因此分类方法各不相同。一般常用的分类方法有以下几种。

1. 按被测物理量分类

传感器的输入非电量大致可分为热工量、机械量、物性和成分量及状态量 4 大类。具体分类如表 0-1 所示。

表 0-1 被测非电量的分类

输入非电量	测量参数
热工量	温度、热量、比热容、热流、热分布、压力、压差、真空度、流量、流速、风速、物位、液位、界面
机械量	位移（角位移）、长度（尺寸、厚度、角度等）、力、应力、力矩、质量、流速、线速度、角速度、振动、加速度、噪声
物性和成分量	气体化学成分、液体化学成分、酸碱度、盐度、浓度、黏度、湿度、密度
状态量	颜色、透明度、颗粒度、硬度、磨损度、裂纹、缺陷、泄漏、表面质量

2. 按工作原理分类

按工作原理来分，可将传感器分为振动传感器、湿敏传感器、磁敏传感器、气敏传感器、真空度传感器和生物传感器等。

3. 按信号变换特征分类

从能量的观点来分，可将传感器分为有源传感器和无源传感器。

有源传感器将非电量转换为电量，称为能量转换型传感器，也叫换能器，如压电式、热电式、电磁式等。通常和测量电路、放大电路配合使用，如热电偶温度计、压电式加速度计。

无源传感器又称为能量控制型传感器。它本身不是一个换能器，被测非电量仅对传感器的能量起控制或调节作用，所以必须具有辅助电源。此类传感器有电阻式、电容式和电感式等，常用于电桥和谐振电路的测量，如电阻应变片。

四、传感器的命名

传感器的命名由主题词加 4 级修饰语构成。

- (1) 主题词——传感器。
- (2) 第一级修饰语——被测量，包括修饰被测量的定语。
- (3) 第二级修饰语——转换原理，一般可后续以“式”字。
- (4) 第三级修饰语——特征描述，指必须强调的传感器结构、性能、材料特征、敏感元件及其他必要的性能特征，一般可后续以“型”字。
- (5) 第四级修饰语——主要技术指标（量程、精确度、灵敏度等）。

五、传感器的静态特性

静态特性表示传感器在被测量各个值处于稳定状态时的输入输出关系。即当输入量为常量或变化极慢时，这一关系就称为静态特性。

1. 非线性度

标定曲线与拟合直线的偏离程度就是非线性度，如图 0-3 所示。它们之间的最大偏差称为非线性误差。可用式 (0-1) 表示，即

$$\text{非线性度} = B/A \times 100\%$$

式中 A ——输出满量程值；

B ——实际曲线与拟合曲线之间的最大偏差。

(0-1)

2. 灵敏度

灵敏度 (S) 是指传感器输出的变化量 Δy 与引起该变化量的输入变化量 Δx 之比, 即

$$S=\Delta y/\Delta x \tag{0-2}$$

灵敏度示意图如图 0-4 所示。

3. 迟滞现象 (回程误差)

测试装置在输入量由小增大和由大减小的测试过程中, 对于同一个输入量所得到的两个数值不同的输出量之间差值最大者为 $h_{\max}$, 则定义回程误差为

$$\text{回程误差}=(h_{\max}/A)\times 100\% \tag{0-3}$$

回程误差曲线如图 0-5 所示。

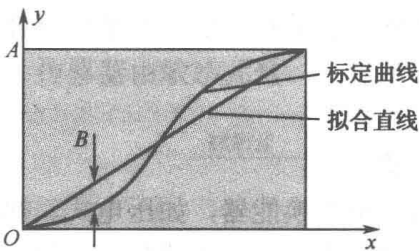


图 0-3 非线性度

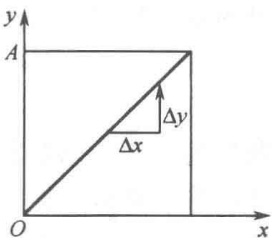


图 0-4 灵敏度曲线

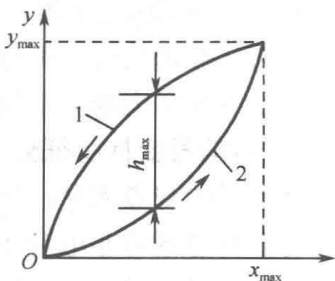


图 0-5 回程误差曲线

4. 其他指标

精度主要有 3 个指标, 即精密度、准确度、精确度。如图 0-6 所示。

准确度就是测量值对于真值的偏离程度。

精密度就是测量相同对象, 每次测量得到不同的测量值, 即为离散偏差。

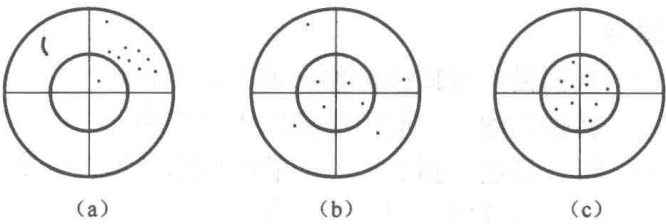


图 0-6 精度

(a) 准确度低而精密度高; (b) 准确度高而精密度低; (c) 精确度高

5. 分辨率和分辨力

分辨率和分辨力含义相同, 均是指在规定测量范围内所能检测的输入量的最小变化量。显然分辨率 (力) 越高, 那么它对于最小变化量的检测值就越小。

六、传感器动态特性及动态特性指标

传感器的动态响应即为传感器对输入的动态信号 (周期信号、瞬变信号、随机信号) 所产生的输出。因此, 传感器的动态响应与输入类型有关。对系统响应测试时, 常采用正弦和阶跃两种输入信号。这是由于任何周期函数都可以用傅里叶级数分解为各次谐波分量, 并把它近似地表示为这些正弦量之和。而阶跃信号则是最基本的瞬变信号。通常描述传感器动态特性指标

的方法是给传感器输入一个阶跃信号，并给定初始条件。求出传感器微分方程的特解，以此作为动态特性指标的描述和表示法。

下面分析传感器在单位阶跃输入下的响应情况，即

$$\begin{cases} X=0 & t<0 \\ X=1 & t\geq 0 \end{cases} \quad (0-4)$$

1. 零阶传感器的响应

如图 0-7 所示，零阶传感器单位阶跃响应和输入成正比。

2. 一阶传感器的响应

$$Y(t)=1-e^{-t/\tau} \quad (0-5)$$

式 (0-5) 所对应的曲线如图 0-8 所示，由图 0-8 可知，随着时间的推移， $Y(t)$ 越来越接近 1。当 $t=\tau$ 时， $Y(t)=0.63$ ，时间常数 τ 是决定一阶传感器响应速度的重要参数。

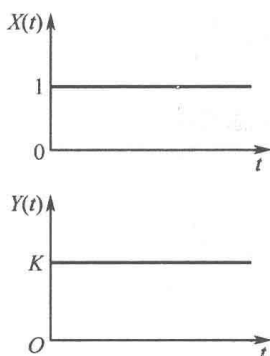


图 0-7 零阶传感器的单位阶跃响应

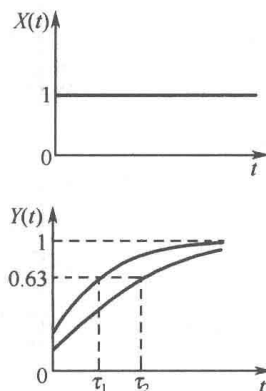


图 0-8 一阶传感器的单位阶跃响应

3. 二阶传感器的响应

按阻尼比 ξ 不同，单位阶跃响应可分为 3 种情况。

(1) 欠阻尼 ($0<\xi<1$):

$$Y(t) = -\frac{e^{-\xi\omega_0 t}}{\sqrt{1-\xi^2}} K \sin(\sqrt{1-\xi^2} \omega_0 t + \varphi) + K \quad (0-6)$$

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

(2) 过阻尼 ($\xi>1$):

$$Y(t) = -\frac{\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} K e^{(-\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_0 t} + \frac{\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} K e^{(-\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_0 t} + K \quad (0-7)$$

(3) 临界阻尼 ($\xi=1$):

$$Y(t) = -(1 + \omega_0 t) K e^{-\omega_0 t} + K \quad (0-8)$$

以上 3 种阶跃响应曲线示于图 0-9 中。由图 0-9 可知，只有 $0<\xi<1$ 时，阶跃响应才出现过冲，即超过了稳态值。由式 (0-6) 表明欠阻尼情况下的振荡频率为 ω_0 ， ω_0 为存在阻尼时的固有频率。在实际应用中，为了兼顾有短的上升时间和小的过冲量，阻尼比 ξ 一般取 0.7 左右。二阶传感器阶跃响应的典型性能指标可由图 0-10 表示。

上升时间 t_r : 输出由稳态值的 10% 变化到稳态值的 90% 所用的时间。当 $\xi=0.7$ 时, $t_r = \frac{2}{\omega_0}$ 。

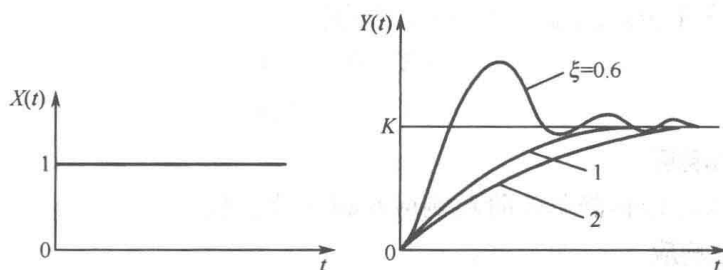


图 0-9 二阶传感器的单位阶跃响应

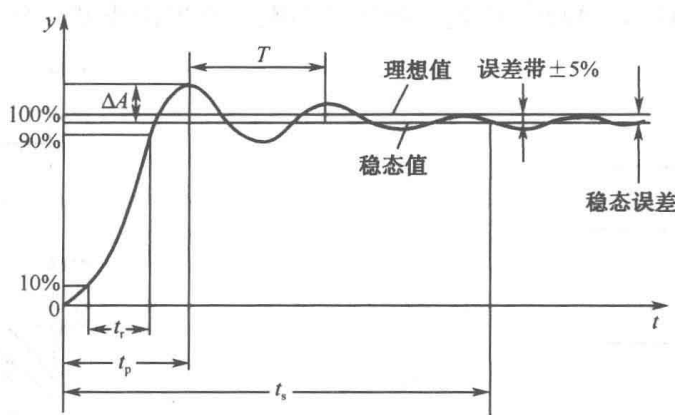


图 0-10 二阶传感器表示动态性能指标的阶跃响应曲线

稳定时间 t_s : 系统从阶跃输入开始到系统稳态在稳态值的始定百分比时所需的最小时间。对稳态值给定百分比为 $\pm 5\%$ 的二阶传感器系统, 在 $\xi=0.7$ 时, t_s 最小 (为 $3/\omega_0$)。 t_r 和 t_s 都是反映系统响应速度的参数。

峰值时间 t_p : 阶跃响应曲线达到第一个峰值所需时间。

超调量 $\sigma\%$: 通常用过渡过程中超过稳态值的最大值 ΔA (过冲) 与稳态值之比的百分数表示。它与 ξ 有关, ξ 越大, $\sigma\%$ 越小, 其关系可表示为

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\pi}{\ln \frac{\sigma}{100}}\right)^2 + 1}} \quad (0-9)$$

通常二阶传感器的动态参数由实验方法测定, 即输入阶跃信号, 记录传感器的响应曲线, 由此测过冲量 ΔA 。利用式 (0-9) 可算出传感器阻尼比 ξ , 测出衰减振荡周期 T , 即可由 $T_0 = T\sqrt{1-\xi^2}$ 算出传感器的固有周期或固有频率。上升时间 t_r 、稳定时间 t_s 及峰值时间 t_p 均可在相应曲线上求得。

由上可知, 频域分析和时域分析均可以描述传感器的动态特性。实际上, 它们之间有一定的内在联系。实践和理论分析表明, 传感器的频率上限 f_n 和上升时间 t_r 的乘积是一个常数 $f_n t_r = 0.35 \sim 0.45$ 。当超调量 $\sigma\% < 5\%$ 时, $f_n t_r$ 用 0.35 计算比较准确, 当 $\sigma\% > 5\%$ 时用 0.45 计算比较合适。

传感器还具有很多静态和动态特性，它们将广泛地应用到各个领域，特别是现在刚开始研究的物联网，将大量地、广泛地使用各类传感器。我们将在以后学习和工作中，会更加深入细致的研究。

七、检测技术的概念与作用

检测技术是产品检验和质量控制的重要阶段。借助于检测工具对产品进行质量评价是人们十分熟悉的。这是检测技术重要的应用领域。但传统的检测方法只能将产品区分为合格品和废品，起到产品验收和废品剔除的作用。这种被动检测方法，对废品的出现并没有预先防止的能力。在传统检测技术基础上发展起来的主动检测技术（或称之为在线检测技术），使检测和生产加工同时进行，及时地用检测结果对生产过程主动地进行控制，使之适应生产条件的变化或自动地调整到最佳状态。这样检测的作用已经不只是单纯的检查产品的最终结果，而且要过问和干预造成这些结果的原因，从而进入质量控制的领域。

检测技术在大型设备安全经济运行监测中得到广泛应用。电力、石油、化工、机械等行业的一些大型设备通常在高温、高压、高速和大功率状态下运行，保证这些关键设备安全运行在国民经济中具有重大意义。为此，通常设置故障监测系统以对温度、压力、流量、转速、振动和噪声等多种参数进行长期动态监测，以便及时发现异常情况，加强故障预防，达到早期诊断的目的。这样做可以避免严重的突发事件，保证设备和人员安全，提高经济效益。另外，在日常运行中，这种连续监测可以及时发现设备故障前兆，采取预防性检修。随着计算机技术的发展，这类监测系统已经发展到故障自诊断系统。可以采用计算机来处理检测信息，进行分析、判断，及时诊断出设备故障并自动报警或采取相应的对策。

检测技术和装置是自动化系统中不可缺少的组成部分。任何生产过程都可以看做“物流”和“信息流”组合而成，反映物流的数量、状态和趋向的信息流则是人们管理和控制物流的依据。人们为了有目的地进行控制，首先必须通过检测获取有关信息，然后才能进行分析判断，以便实现自动控制。自动化就是用各种技术工具与方法代替人来完成检测、分析、判断和控制工作。一个自动化系统通常由多个环节组成，分别完成信息获取、信息转换、信息处理、信息传送及信息执行等功能。在实现自动化的过程中，信息的获取与转换是极其重要的组成环节，只有精确、及时地将被控对象的各项参数检测出来并转换成易于传送和处理的信号，整个系统才能正常地工作。因此，自动检测与转换是自动化技术中不可缺少的组成部分。

检测技术的完善和发展推动着现代科学技术的进步。人们在自然科学各个领域内从事的研究工作，一般是利用已知的规律对观测、试验的结果进行概括、推理。从而对所研究的对象取得定量的概念，并发现它的规律性，然后提升到理论高度。因此，现代化检测手段所能达到的水平在很大程度上决定了科学研究的深度和广度。检测技术达到的水平越高，提供的信息越丰富、越可靠，科学研究取得突破性进展的可能性就越大。此外，理论研究的一些成果，也必须通过实验或观测来加以验证，这同样离不开必要的检测手段。

从另一方面看，现代化生产和科学技术的发展也不断地对检测技术提出新的要求和课题，成为促进检测技术向前发展的动力。科学技术的新发现和新成果不断应用于检测技术中，也有力地促进了检测技术自身的现代化。

检测技术与现代化生产和科学技术密切关系，使它成为一门十分活跃的技术学科，几乎渗透到人类的一切活动领域，并发挥着越来越大的作用。

八、检测系统的基本组成

一个完整的检测系统或检测装置通常是由传感器、测量电路和显示记录装置等部分组成，分别完成信息获取、转换、显示和处理等功能。当然其中还包括电源和传输通道等不可缺少的部分。图 0-11 给出了检测系统的组成框图。

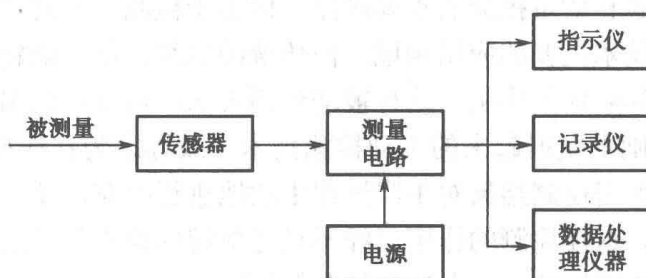


图 0-11 检测系统的组成框图

项目一

力和压力的检测

任务一 电子秤的设计与制作

一、任务描述

利用电阻应变式传感器进行电子秤的设计和制作,如图 1-1 所示,要求测量范围为 2 kg,其分辨力为 1 g,测量精度为 $0.5\%RD\pm 1$ 字,并能够利用数码管显示测量值。

二、任务目标

- (1) 掌握电阻应变式传感器的结构和工作原理。
- (2) 掌握电阻应变式传感器的测量电路。
- (3) 能够利用电阻应变式传感器进行力的测量。

三、知识链接

1. 电阻式传感器

电阻式传感器就是利用一定的方式将被测量的变化转化为敏感元件电阻值的变化,进而通过电路变成电压或电流信号输出的一类传感器。可用于各种机械量和热工量的检测。它结构简单,性能稳定,成本低廉,因此,在许多行业得到了广泛应用。

目前,常用的电阻传感器主要有电阻应变片、热电阻、光敏电阻、气敏电阻和湿敏电阻等几大类。

2. 电阻应变式传感器

1) 金属的应变效应

根据电阻定律,金属丝的电阻随着它所受的机械变形(拉伸或压缩)的大小而发生相应的变化,这种现象称为金属的电阻应变效应。电阻应变片的工作原理就是基于金属的应变效应设计而成的。

金属丝的电阻会随应变而发生变化是因为金属丝的电阻($R = \rho L / A$)与材料的电阻率(ρ)及其几何尺寸(长度 L 和截面积 A)有关,而金属丝在承受机械变形的过程中,这 3 种指标都要发生变化,因而引起金属丝的电阻变化。

2) 电阻应变片的结构和工作原理

(1) 电阻应变片的结构。

电阻应变片(简称应变片或应变计)种类繁多,根据需要可设计成各种形式、各种类型的电阻应变片,但其基本结构都大体相同。基本结构如图 1-2 所示。



图 1-1 电子秤

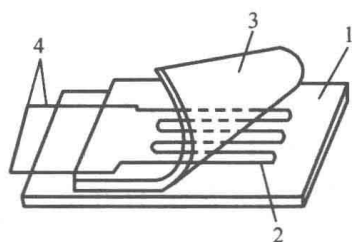


图 1-2 电阻应变片的基本结构

- 1—基底；2—电阻丝；
3—覆盖面；4—引出线

图 1-2 所示为丝绕式应变片的构造示意图。它以直径为 0.025 mm 左右的、高电阻率的合金电阻丝 2，绕成形如栅栏的敏感栅。敏感栅为应变片的敏感元件，它的作用是感应应变片变化的大小。敏感栅黏结在基底 1 上，基底除能固定敏感栅外，还有绝缘作用；敏感栅上面粘贴有覆盖面 3，敏感栅电阻丝两端焊接引出线 4，用以和外接导线相连。

(2) 电阻应变片的分类。

① 按照制作材料的不同，可将电阻应变片分为以下两类：

- 金属式体型——丝式、箔式、薄膜型。
- 半导体式体型——薄膜型、扩散型、外延型、PN 结型。

② 按结构分为单片、双片、特殊形状。

③ 按使用环境分为高温、低温、高压、磁场、水下。

(3) 电阻应变式传感器的工作原理。

根据电阻定律，取一根金属丝，如图 1-3 所示，其初始的电阻为

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1-1)$$

式中 R ——金属丝的电阻， Ω ；

ρ ——金属丝的电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ；

L ——金属丝的长度， m ；

A ——金属丝的截面积， m^2 。

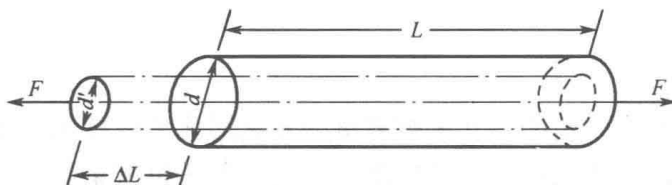


图 1-3 金属导线受力变形情况

当金属丝受拉而伸长 dL 时，其截面积将相应减小 dA ，电阻率则因金属晶格发生变形等因素的影响也将改变 $d\rho$ 这些量的变化，必然引起金属丝电阻改变 dR 。

$$dR = \frac{\rho}{A} dL - \frac{\rho L}{A^2} dA + \frac{L}{A} d\rho \quad (1-2)$$

电阻的相对变化量为

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (1-3)$$

若电阻丝为圆形的，则 $A = \pi r^2$ ， r 为金属丝的半径，则

$$\frac{dA}{A} = 2 \frac{dr}{r} \quad (1-4)$$

令：

$\epsilon_x = dL/L$ ——金属丝的轴向应变；

$\epsilon_y = dr/r$ ——金属丝的径向应变。

金属丝受拉时,沿轴向伸长,而沿径向缩短,则二者之间的关系为

$$\varepsilon_y = -\mu\varepsilon_x \quad (1-5)$$

式中 μ ——金属丝材料的泊松系数。

将式(1-4)、式(1-5)代入式(1-3)中得

$$\frac{dR}{R} = (1+2\mu)\varepsilon_x + \frac{d\rho}{\rho} \quad (1-6)$$

或

$$\frac{dR/R}{\varepsilon_x} = (1+2\mu) + \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon_x} \quad (1-7)$$

令

$$K_s = \frac{dR/R}{\varepsilon_x} = (1+2\mu) + \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon_x} \quad (1-8)$$

式中 K_s ——金属丝的灵敏系数。

K_s 表示金属丝产生单位变形时,电阻相对变化的大小。显然, K_s 越大,单位变形引起的电阻相对变化越大,则越灵敏。

从式(1-8)中可以看出,金属丝的灵敏系数 K_s 受以下两个因数影响:

① $(1+2\mu)$: 由于金属丝受拉伸后,材料的几何尺寸发生变化而引起的。

② $\frac{d\rho/\rho}{\varepsilon_x}$: 由于材料发生形变时,其自由电子的活动能力和数量均发生了变化,此值可能

是正值,也可能为负值,但作为应变片材料都选为正值,否则会降低灵敏度。

实验表明,应变片的 $\Delta R/R$ 与 ε_x 的关系在很大范围内仍然有很好的线性关系,即

$$\frac{\Delta R}{R} = K_s \varepsilon_x \quad \text{或} \quad K_s = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon_x} \quad (1-9)$$

(4) 应变片测试原理。

用应变片测量应变或应力时,是将应变片粘贴于被测对象上。在外力作用下,被测对象表面产生微小机械变形,粘贴在其表面上的应变片亦随其发生相同的变化,因此应变片的电阻也发生相应的变化。如果应用仪器测出应变片的电阻值变化 ΔR , 则根据式(1-9)可以得到被测量对象的应变值 ε_x 。而应力、应变的关系为

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1-10)$$

式中 σ ——试件的应力;

ε ——试件的应变。

3. 电阻应变式传感器的测量电路

电阻应变片是可以把应变的变化转换为电阻的变化,通常为显示与记录应变的大小,还要把电阻的变化再转换为电压或电流的变化,完成上述作用的电路称为电阻应变式传感器的测量电路,最常用的测量电路主要有直流电桥电路和交流电桥电路。

1) 直流电桥电路

直流电桥电路的特点是信号不会受各元件和导线的分布电感和电容的影响,抗干扰能力强,但因机械应变的输出信号小,要求用高增益和高稳定性的放大器放大。图 1-4 所示为直流电桥电路。

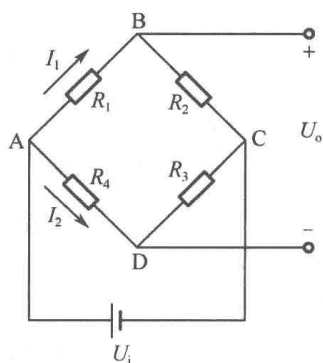


图 1-4 直流电桥电路

由分压原理得

$$U_o = U_{AB} - U_{AD} = I_1 R_1 - I_2 R_4$$

$$= \frac{U R_1}{R_1 + R_2} - \frac{U R_4}{R_3 + R_4} \quad (1-11)$$

$$U_o = U \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) = U \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (1-12)$$

根据电桥平衡条件，相邻桥臂电阻的比值应相等或相对桥臂电阻的乘积相等，则当电桥平衡时， $U_o = 0$ ，即

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \text{ 或 } R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (1-13)$$

2) 直流电桥的工作方式

在实际应用中为提高输出的灵敏度，常将多片应变片接入电桥，根据接入电桥应变片的不同，将直流电桥的工作方式分为半桥单臂工作方式 [图 1-5 (a)]、半桥双臂工作方式 [图 1-5 (b)] 和全桥四臂工作方式 [图 1-5 (c)]。

半桥单臂工作是电桥中只有一个臂接入被测量，其他 3 个臂采用固定电阻；半桥双臂工作是如果电桥两个臂接入被测量，另两个为固定电阻，就称为半桥双臂工作电桥，又称为半桥形式；全桥方式是指如果 4 个桥臂都接入被测量，则称为全桥四臂形式。

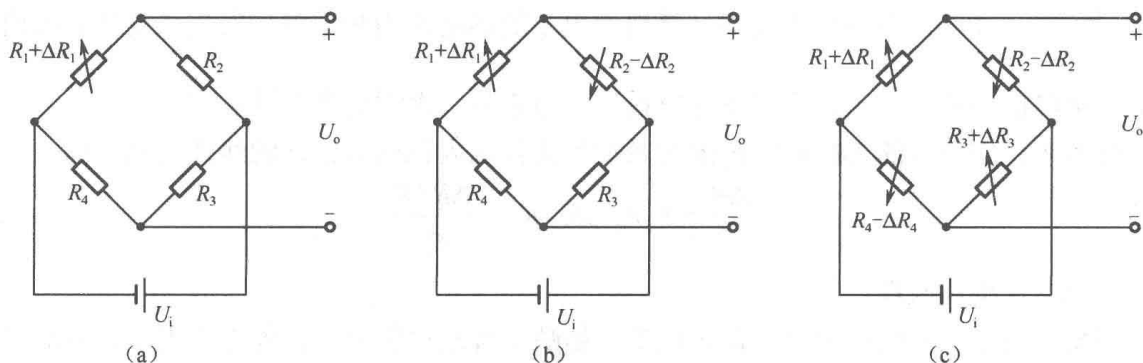


图 1-5 直流电桥工作方式

(a) 半桥单臂；(b) 半桥双臂；(c) 全桥四臂

当电桥输出端接有放大器时，由于放大器的输入阻抗很高，所以可以认为电桥的负载电阻为无穷大，这时电桥以电压的形式输出。输出电压即为电桥输出端的开路电压，其表达式为式 (1-12)。

设电桥为单臂工作状态，即 R_1 为应变片，其余桥臂均为固定电阻。当 R_1 感受被测量产生电阻增量 ΔR_1 时，由初始平衡条件 $R_1 R_3 = R_2 R_4$ ，得 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$ ，则电桥由于 ΔR_1 产生不平衡引起的输出电压为

$$U_o = \frac{R_2}{(R_1 + R_2)^2} \Delta R_1 U = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} \right) U \quad (1-14)$$

对于输出对称电桥，此时 $R_1 = R_2 = R$ ， $R_3 = R_4 = R'$ ，当 R_1 臂的电阻产生变化 $\Delta R_1 = \Delta R$ ，根据式 (1-14) 可得到输出电压为