

教 案

2025-2026 学年第二学期

课程名称 传感器与检测技术

专业班级 数字化设计与制造技术 241

总学时数 64 学时

任课教师 许跃锐

课程基本信息

课程名称	传感器与检测技术			
课程性质	专业必修课		学分	4
学 时	总学时： 64 学时。其中：课堂讲授 48 学时；实训/实验 16 学时；线上教学 0 学时			
开课部门	机电工程系		任课教师	许跃锐
授课专业、班级	数字化设计与制造技术 241		开课学期	2025-2026 第二学期
成绩评定	平时成绩占 50 %; 期末成绩占 50 %		考核方式	考试
选用教材	书 名	主 编	出版社	出版日期
	传感器技术与应用（第 3 版）	林若波	清华大学出版社	2025. 03
本课程在本专业人才培养方案中的地位和作用	传感器检测技术是现代科技领域的重要发展方向之一，涉及物理、化学、材料科学、电子信息等多个学科领域，是一门跨学科的综合性的技术学科。在人才培养方案中，传感器检测技术课程通常作为电气类、自动化类、电子信息类等相关专业的主干课程，是连接理论与实践、基础知识与专业技能的重要纽带。传感器检测技术课程为学生提供了关于传感器和检测技术的基础理论知识，包括传感器的工作原理、类型、特性等，以及检测系统的设计、校准和维护等方面的知识。这些知识是进一步学习和掌握相关技能的基础。			
本课程 教学目标	掌握传感器技术基础； 熟悉典型传感器； 理解检测系统设计； 具备相关的实操能力，能够正确采集、整理和分析实验数据，得出准确的实验结果。			
素质(思政) 内容与要求	该课程课程思政的目标是将国家对学生培养的素质要求分解成课程思政元素融入到课程教学中，在课程教学中倡导的课程思政元素包括爱国主义、科学态度、创新精神、工匠精神、服务精神（为国家、为社会，例如岗位服务）等。			
学生用主要 参考资料	《传感器与检测技术（第 5 版）》，戚玉强、于虹，北京航天航空大学出版社，2024 年 《现代传感器技术与应用》，陈文仪、王巧兰、吴安岚，清华大学出版社，2021 年 《传感器与检测技术（第 4 版）》，胡向东等，机械工业出版社，2021 年			

该课程课程思政的目标是将国家对学生培养的素质要求分解成课程思政元素融入到课程教学中，本人在课程教学中倡导的课程思政元素包括爱国主义、科学态度、创新精神、工匠精神、服务精神（为国家、为社会，例如岗位服务）等。

在教学实践过程中，认真分析当前学校思想政治教育的需求，明确思想政治教育的发展目标，注重开展思想政治教育的思路，用实践加深学生思想政治素养的培养。通过对名人故事、历史故事、现代科学、纪录片等的介绍，结合课堂互动，教学手段采用讲授与和微视频互动方式，结合学习通采用线上线下相结合手段，融教学、演讲、谈体会三位一体，用微视频的形式贯穿在课程教学中，实现课程思政元素的引入，共开发 9 个课程思政案例。

案例 1：名人故事——“中国光学之父”王大珩

通过向读者科普传感器领域学术泰斗人物“中国光学之父”王大珩院士的故事，阐述仪器仪表是工业生产的“倍增器”，科学研究的“先行官”，军事的“战斗力”，国民活动的“物化法官”，应用无所不在。

案例 2：名人故事——“中国天眼之父”南仁东

结合现代高精度传感检测技术，通过向读者科普“中国天眼之父”南仁东，介绍中国天眼 FAST，向读者科普一下传感检测技术的高精度和大国工匠，培养学生的工程师品质。

案例 3：名人故事——“中国核潜艇之父”黄旭华

结合传感技术，通过向读者科普“中国核潜艇之父”黄旭华，向读者科普一下中国在海洋探索的实力，培养学生的工程师品质。

案例 4：历史故事——张衡与地动仪

通过向读者科普中国古代发明地动仪，增进读者对中国传统文化以及古代科学的了解，向学生展示检测技术在古代科学中的应用，培养学生的爱国情怀。

案例 5：走近科学——北斗卫星定位系统

结合现代高精度传感检测技术，通过向读者科普北斗卫星定位系统，增进读者对中国当下的大国工匠，向学生展示传感检测技术在国民经济和军事上的应用，培养学生的爱国情怀和工程师品质。

案例 6：走近科学——蓝光 LED 技术

结合光电传感技术，通过向读者科普诺贝尔物理学奖蓝光 LED，介绍蓝光 LED 技术的广泛应用，增进学生对传感器的深入了解，培养学生的工程师品质。

案例 7：走近科学——感光元件 CCD

通过向读者科普诺贝尔物理学奖感光元件 CCD，结合图像传感器，介绍 CCD 在数码相机的广泛使用，增进学生对传感器的深入了解，培养学生的工程师品质。

案例 8：红色记忆——永不消逝的电波

通过向读者回忆一下红色故事《永不消逝的电波》，结合电磁波传感技术，展示通讯技术在新中国成立所做出的突出贡献，激发学生的爱国情怀，增进对革命先驱的了解，培养学生的工程师品质。

案例 9：工匠精神——《大国工匠》

通过向读者科普一下记录片《大国工匠》，结合大国工匠，展示传感检测技术在新中国建设中的突出地位，激发学生的爱国情怀，培养学生的工匠精神和工程师品质。

第 1 章 传感器基础知识

本章主要内容

本章重点讲述传感器的结构原理、外特性、主要参数及其物理意义，工作状态的分析。

首先介绍构成传感器的组成、特性、分类及命名、常用传感器主要参数；再介绍传感器工作特性及典型应用。

本章课时分配 本章分为 2 讲，共 4 学时。

1.1 概述

教学目标：

了解传感器的定义、组成、分类。

课程思政：

案例 1：名人故事——“中国光学之父”王大珩

通过向读者科普传感器领域学术泰斗人物“中国光学之父”王大珩院士的故事，阐述仪器仪表是工业生产的“倍增器”，科学研究的“先行官”，军事的“战斗力”，国民活动的“物化法官”，应用无所不在。

教学重点

1. 传感器的组成；
2. 传感器的分类。

教学难点

1. 传感器的性能及应用；
2. 传感器的应用技术；

教学手段：讲授

教学组织过程

课堂讲授。应用多媒体从传感器的定义入手，讲授传感器的基本组成，敏感元件和转换元件的关系，分析完成检测和转换两个基本功能的特性过程等，使学生对传感器有了一定的理解。

主要内容

知识点 1 传感器概述

传感器位于研究对象与测控系统之间的接口位置，是感知、获取与检测信息的窗口。一切科学实验和生产实践，特别是自动控制系统中要获取的信息，都要首先通过传感器获取并转换为容易传输和处理的电信号。

信息技术正在推动着人类社会快速地向发展，传感器是实现对物理环境或人类社会信息获取的基本工具，是检测系统的首要环节，是信息技术的源头；传感器在信息技术领域具有十分重要的基础性地位和作用。传感器在产品检验和质量控制、系统安全经济运行监测、自动化生产与控制系统的搭建和推动现代科学技术的进步等方面均有重要意义。

知识点 2 传感器的定义

根据我国国家标准（GB/T7665—2005），传感器（transducer/sensor）定义为：能够感受规定的被测量（stimulus/measurand）并按照一定规律转换成可用输出信号的器件和装置，通常由敏感元件和转换元件组成。其中，敏感元件是指传感器中能直接感受和响应被测

量的部分；转换元件是指传感器中能将敏感元件的感受或响应的被测量转换成适于传输和处理的电信号部分。

传感器的共性就是利用物理定律或物质的物理、化学或生物特性，将非电量（如位移、速度、加速度、力等）输入转换成电量（电压、电流、频率、电荷、电容、电阻等）输出。

根据传感器的定义，传感器的基本组成为敏感元件和转换元件两部分，分别完成检测和转换两个基本功能。

知识点 3 传感器的组成

传感器的典型组成如图 1.3 所示。

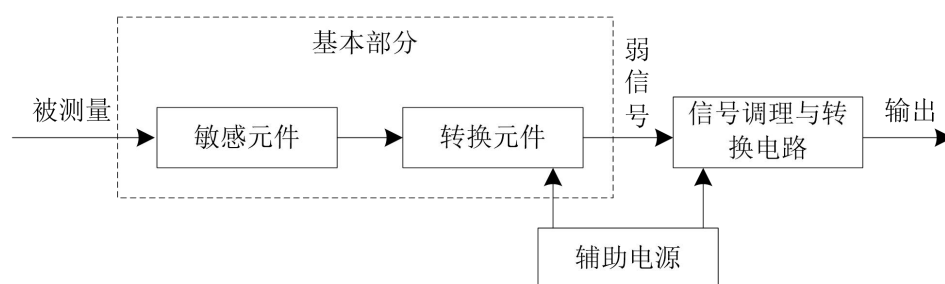


图 1.3 传感器的组成

知识点 4 传感器的分类

传感器可按输入量、输出量、工作原理、基本效应、能量变换关系以及所蕴含的技术特征等分类（如图 1.4 所示），其中按输入量和工作原理的分类方式应用较为普遍。

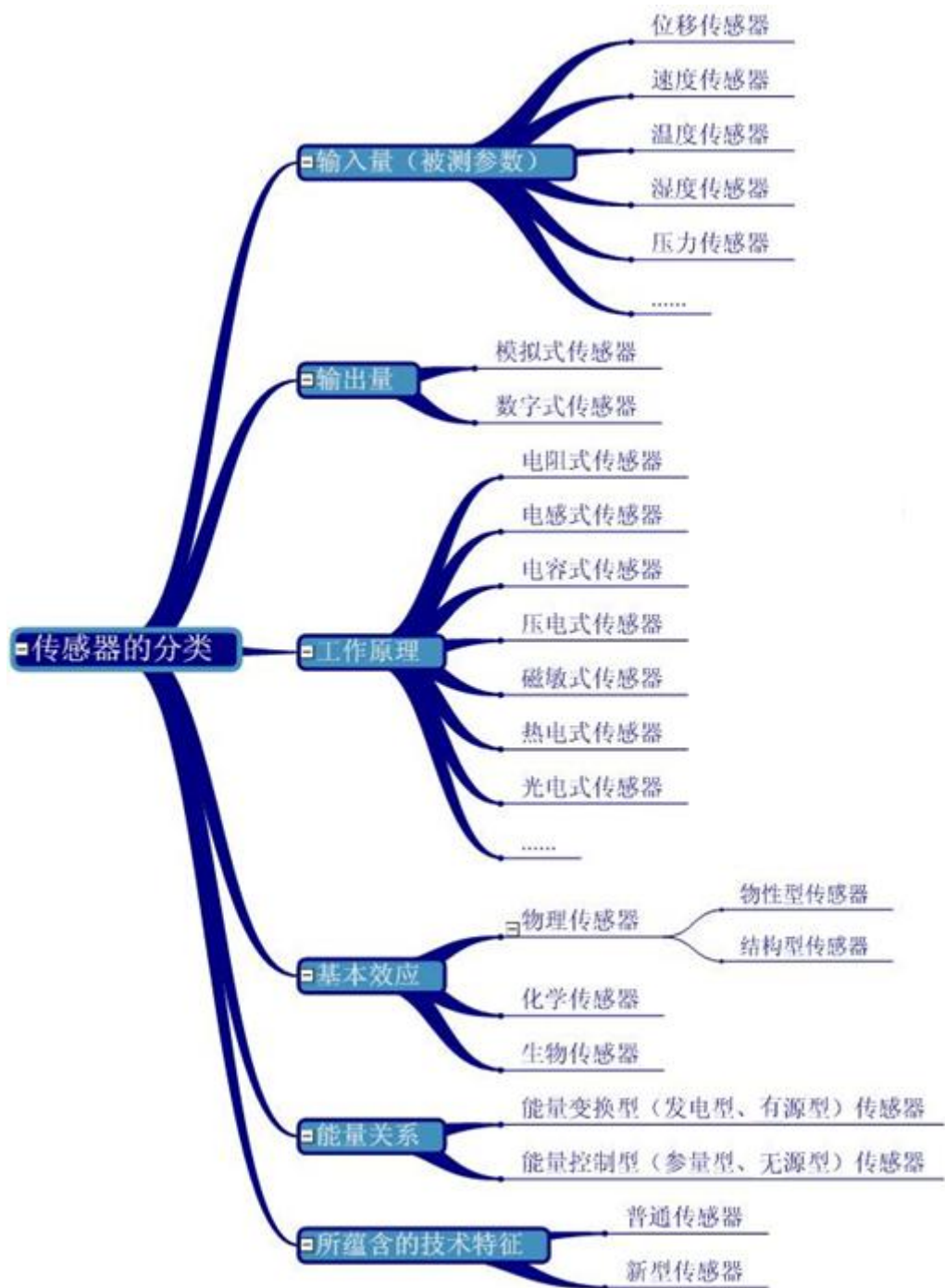


图 1.4 传感器的分类

知识点 5 传感器性能的改善

总体上说,传感器技术的发展趋势表现为六个方面:一是提高与改善传感器的技术性能;二是开展基础理论研究,寻找新原理、开发新材料、采用新工艺或探索新功能等;三是传感器的集成化;四是传感器的智能化;五是传感器的网络化;六是传感器的微型化。

1.2 传感器的基本特性

教学目标：

了解传感器的基本特性。

思政目标：

案例 2：名人故事——“中国核潜艇之父”黄旭华

结合传感技术，通过向读者科普“中国核潜艇之父”黄旭华，向读者科普一下中国在海洋探索的实力，培养学生的工程师品质。

教学重点

1. 传感器的基本特性；
2. 传感器的动态分析。

教学难点

1. 传感器的动态分析；
2. 传感器的应用技术；

教学手段：讲授

教学组织过程

课堂讲授。应用多媒体从传感器的定义入手，讲授传感器的动态特性，传感器对动态激励（输入）的响应（输出）特性，即其输出对随时间变化的输入量的响应特性。一个动态特性好的传感器，其输出随时间变化的规律（输出变化曲线），将能再现输入随时间变化的规律（输入变化曲线），即输出输入具有相同的时间函数。使学生对传感器有了较为全面的理解。

主要内容

知识点 1 传感器的基本特性

传感器的基本特性是指传感器的输入-输出关系特性，是传感器的内部结构参数作用关系的外部特性表现。不同的传感器有不同的内部结构参数，决定了它们具有不同的外部特性。

传感器所测量的物理量基本上有两种形式：稳态（静态或准静态）和动态（周期变化或瞬态）。前者的信号不随时间变化（或变化很缓慢）；后者的信号是随时间变化而变化的。传感器所表现出来的输入-输出特性存在静态特性和动态特性。

知识点 2 传感器的静态特性

传感器的静态特性是它在稳态信号作用下的输入-输出关系。静态特性所描述的传感器的输入-输出关系式中不含时间变量。

衡量传感器静态特性的主要指标是线性度、灵敏度、分辨率、迟滞、重复性和漂移。

2.1.1 线性度

线性度（Linearity）是指传感器的输出与输入间成线性关系的程度。传感器的实际输入-输出特性大都具有一定程度的非线性，在输入量变化范围不大的条件下，可以用切线或割线拟合、过零旋转拟合、端点平移拟合等来近似地代表实际曲线的一段，这就是传感器非线性特性的“线性化”。所采用的直线称为拟合直线，实际特性曲线与拟合直线间的偏差称

为传感器的非线性误差，取其最大值与输出满刻度值（Full Scale，即满量程）之比作为评价非线性误差（或线性度）的指标。

2.1.2 灵敏度

灵敏度(Sensitivity)是传感器在稳态下输出量变化对输入量变化的比值。

对于线性传感器，它的灵敏度就是它的静态特性曲线的斜率；非线性传感器的灵敏度为一变量。

2.1.3 分辨率

分辨率(Resolution)是指传感器能够感知或检测到的最小输入信号增量，反映传感器能够分辨被测量微小变化的能力。分辨率可以用增量的绝对值或增量与满量程的百分比来表示。

2.1.4 迟滞

迟滞(Hysteresis)，也叫回程误差，是指在相同测量条件下，对应于同一大小的输入信号，传感器正（输入量由小增大）、反（输入量由大减小）行程的输出信号大小不相等的现象。产生迟滞的原因：传感器机械部分存在不可避免的摩擦、间隙、松动、积尘等，引起能量吸收和消耗。

迟滞特性表明传感器正、反行程期间输出一输入特性曲线不重合的程度。迟滞的大小一般由实验方法来确定。用正反行程间的最大输出差值 $\Delta H_{\max}$ 对满量程输出 $Y_{F.S.}$ 的百分比来表示。

2.1.5 重复性

重复性(Repeatability)表示传感器在输入量按同一方向作全量程多次测试时所得输入一输出特性曲线一致的程度。实际特性曲线不重复的原因与迟滞的产生原因相同。重复性指标一般采用输出最大不重复误差 $\Delta R_{\max}$ 与满量程输出 $Y_{F.S.}$ 的百分比表示。

2.1.6 漂移

漂移(Drift or Shift)是指传感器在输入量不变的情况下，输出量随时间变化的现象；漂移将影响传感器的稳定性或可靠性(Stability or Reliability)。产生漂移的原因主要有两个：一是传感器自身结构参数发生老化，如零点漂移（简称零漂）。二是在测试过程中周围环境（如温度、湿度、压力等）发生变化。这种情况最常见的是温度漂移（简称温漂）。

知识点3 传感器的动态特性

传感器的动态特性是指传感器对动态激励（输入）的响应（输出）特性，即其输出对随时间变化的输入量的响应特性。一个动态特性好的传感器，其输出随时间变化的规律（输出变化曲线），将能再现输入随时间变化的规律（输入变化曲线），即输出输入具有相同的时间函数。但实际上由于制作传感器的敏感材料对不同的变化会表现出一定程度的惯性（如温

度测量中的热惯性)，因此输出信号与输入信号并不具有完全相同的时间函数，这种输入与输出间的差异称为动态误差，动态误差反映的是惯性延迟所引起的附加误差。

传感器的动态特性可以从时域和频域两个方面分别采用瞬态响应法和频率响应法来分析。在时域内研究传感器的响应特性时，一般采用阶跃函数；在频域内研究动态特性一般是采用正弦函数。对应的传感器动态特性指标分为两类，即与阶跃响应有关的指标和与频率响应特性有关的指标：（1）在采用阶跃输入研究传感器的时域动态特性时，常用延迟时间、上升时间、响应时间、超调量等来表征传感器的动态特性。（2）在采用正弦输入信号研究传感器的频域动态特性时，常用幅频特性和相频特性来描述传感器的动态特性。

2.2.1 传感器的数学模型

通常可以用线性时不变系统理论来描述传感器的动态特性。从数学上可以用常系数线性微分方程（线性定常系统）表示传感器输出量 $y(t)$ 与输入量 $x(t)$ 的关系：

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (2.6)$$

式中： $a_n, \dots, a_0$ 和 $b_m, \dots, b_0$ — 与系统结构参数有关的常数。

线性时不变系统有两个重要的性质：叠加性和频率保持特性。

2.2.2 传递函数

对式（2.6）作拉氏变换，并认为输入 $x(t)$ 和输出 $y(t)$ 及它们的各阶时间导数的初始值（ $t=0$ 时）为 0，则得：

$$H(s) = \frac{L[y(t)]}{L[x(t)]} = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (2.11)$$

其中： $s = \beta + j\omega$ 。

式（2.11）的右边是一个与输入 $x(t)$ 无关的表达式，它只与系统结构参数（ a, b ）有关，正如前文所言，传感器的输入-输出关系特性是传感器内部结构参数作用关系的外部特性表现。

2.2.3 频率响应函数

对于稳定的常系数线性系统，可用傅里叶变换代替拉氏变换，相应地有：

$$H(j\omega) = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)} \quad (2.13)$$

模（称为传感器的幅频特性）：

$$A(\omega) = |H(j\omega)| = \sqrt{[H_R(\omega)]^2 + [H_I(\omega)]^2} \quad (2.14)$$

相角（称为传感器的相频特性）：

$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{H_I(\omega)}{H_R(\omega)} \quad (2.15)$$

2.2.4 传感器的动态特性分析

一般可以将大多数传感器简化为一阶或二阶系统。

(1) 一阶传感器的频率响应

一阶传感器的微分方程为：

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad (2.16)$$

它可改写为：

$$\tau \cdot \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = S_n \cdot x(t) \quad (2.17)$$

式中：

τ — 传感器的时间常数（具有时间量纲）

这类传感器的幅频特性、相频特性分别为：

幅频特性：

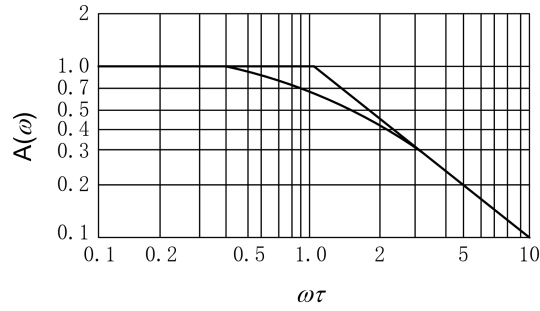
$$A(\omega) = 1 / \sqrt{1 + (\omega\tau)^2} \quad (2.20)$$

相频特性：

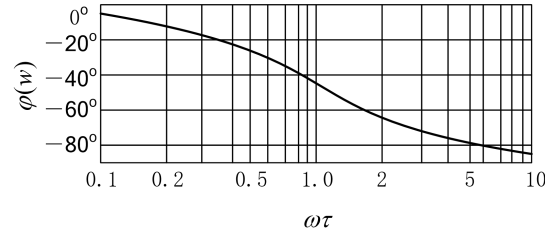
$$\varphi(\omega) = -\arctan(\omega\tau) \quad (2.21)$$

图 2.5 为一阶传感器的频率响应特性曲线。从式（2.20）、（2.21）和图 2.5 看出，时间常数 τ 越小，此时 $A(\omega)$ 越接近于常数 1， $\varphi(\omega)$ 越接近于 0，因此，频率响应特性越好。

当 $\omega\tau \ll 1$ 时： $A(\omega) \approx 1$ ，输出与输入的幅值几乎相等，它表明传感器输出与输入为线性关系。 $\varphi(\omega)$ 很小， $\tan(\varphi) \approx \varphi$ ， $\varphi(\omega) \approx -\omega\tau$ ，相位差与频率 ω 成线性关系。



(a)幅频特性



(b)相频特性

图 2.5 一阶传感器的频率特性

(2) 二阶传感器的频率响应

典型的二阶传感器的微分方程为：

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = a_0 x(t) \quad (2.22)$$

因此有：

幅频特性：

$$A(w) = \left\{ \left[1 - \left(\frac{w}{w_n} \right)^2 \right]^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{w}{w_n} \right)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (2.25)$$

相频特性：

$$\varphi(w) = -\arctan \frac{2\zeta \left(\frac{w}{w_n} \right)}{1 - \left(\frac{w}{w_n} \right)^2} \quad (2.26)$$

式中：

$w_n = \sqrt{a_0/a_2}$ (传感器的固有角频率)

$\zeta = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}}$ (传感器的阻尼系数)。

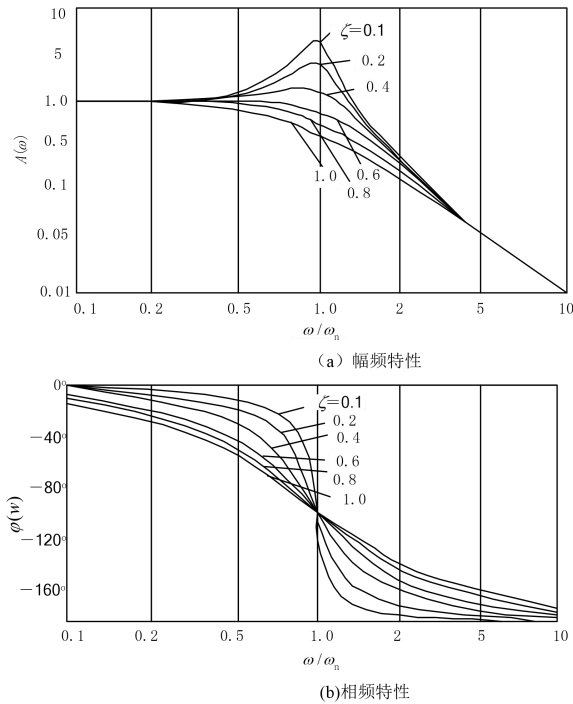


图 2.6 二阶传感器的频率特性

图 2.6 为二阶传感器的频率响应特性曲线。从式 (2.25)、式 (2.26) 和图 2.6 可见，传感器的频率响应特性好坏主要取决于传感器的固有角频率 ω_n 和阻尼系数 ζ 。当 $0 < \zeta < 1$ ， $\omega_n \gg \omega$ 时： $A(\omega) \approx 1$ （常数）， $\varphi(\omega)$ 很小， $\varphi(\omega) \approx -2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}$ ，即相位差与频率 ω 成线性关系，此时，系统的输出 $y(t)$ 真实准确地再现输入 $x(t)$ 的波形。

在 $\omega = \omega_n$ 附近，系统发生共振，幅频特性受阻尼系数影响极大，实际测量时应避免此情况。

通过上面的分析，可得出结论：为了使测试结果能精确地再现被测信号的波形，在传感器设计时，必须使其阻尼系数 $\zeta < 1$ ，固有角频率 ω_n 至少应大于被测信号频率 ω 的 (3~5) 倍，即 $\omega_n \geq (3 \sim 5)\omega$ 。在实际测试中，被测量为非周期信号时，选用和设计传感器时，保证传感器固有角频率 ω_n 不低于被测信号基频 ω 的 10 倍即可。

(3) 一阶或二阶传感器的动态特性参数

一阶或二阶传感器单位阶跃响应的时域动态特性分别如图 2.7、图 2.8 所示 ($S_n = 1$, $A_0 = 1$)。其时域动态特性参数描述如下。

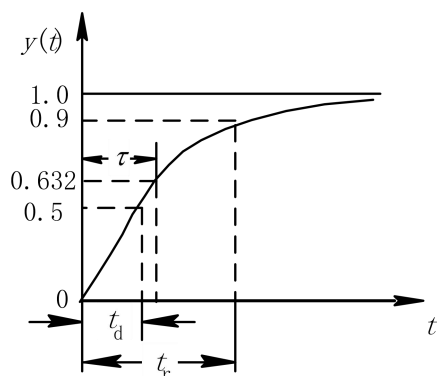


图 2.7 一阶传感器的时域动态特性

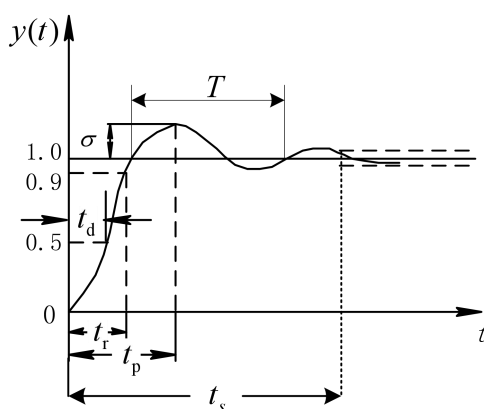


图 2.8 二阶传感器 ($\zeta < 1$) 的时域动态特性

时间常数 τ ：一阶传感器输出上升到稳态值的 63.2% 所需的时间。

延迟时间 t_d ：传感器输出达到稳态值的 50% 所需的时间。

上升时间 t_r ：传感器的输出达到稳态值的 90% 所需的时间。

峰值时间 t_p ：二阶传感器输出响应曲线达到第一个峰值所需的时间。

响应时间 t_s ：二阶传感器从输入量开始起作用到输出指示值进入稳态值所规定的范围内所需要的时间。

超调量 σ ：二阶传感器输出第一次达到稳定值后又超出稳定值而出现的最大偏差，即二阶传感器输出超过稳定值的最大值。

知识点 4 传感器的标定与校准

传感器的标定是利用某种标准仪器对新研制或生产的传感器进行技术检定和标度；它是通过实验建立传感器输入量与输出量间的关系，并确定出不同使用条件下的误差关系或测量精度。传感器的校准是指对使用或储存一段时间后的传感器性能进行再次测试和校正，校准

的方法和要求与标定相同。

传感器的标定分为静态标定和动态标定两种。静态标定的目的是确定传感器静态特性指标，包括线性度、灵敏度、分辨率、迟滞、重复性等。动态标定的目的是确定传感器的动态特性参数，如频率响应、时间常数、固有频率和阻尼比等。对传感器的标定是根据标准仪器与被标定传感器的测试数据进行的，即利用标准仪器产生已知的非电量并输入到待标定的传感器中，然后将传感器的输出量与输入的标准量进行比较，从而得到一系列标准数据或曲线。

在国内，标定的过程一般分为三级精度：国家计量院进行的标定是一级精度的标准传递。在此处标定出的传感器叫标准传感器，具有二级精度。用标准传感器对出厂的传感器和其他需要校准的传感器进行标定，得到的传感器具有三级精度，这就是我们在实际测试中使用的传感器。

第 2 章 现代传感技术

教学目标：

了解传感器的定义、组成、分类、识别及测试方法。

课程思政：案例 2：名人故事——“中国天眼之父”南仁东

结合现代高精度传感检测技术，通过向读者科普“中国天眼之父”南仁东，介绍中国天眼 FAST，向读者科普一下传感检测技术的高精度和大国工匠，培养学生的工程师品质。

教学重点

1. 常用传感器的种类、识别与测试

教学难点

1. 常用传感器的识别与测试；

教学手段：实验和讲授

教学组织过程

本讲教师在传感器实验室**一体化讲授**。探索理论知识和技能训练一体化的模式，把学生对理论知识的理解通过实践体验来印证和加深理解。

2.1 常用传感器的识别与测试

1. 讲述

本节课程是在《第 1 章》内容的基础上通过实验的方法巩固对理论知识的理解。通过实际测量操作，从感性上认识和体验常用传感器的识别与测试方法。我们将一起探讨新型传感技术和人工智能技术，但在开始之前，让我们先回顾一位科技巨匠的故事，他就是被誉为“中国天眼之父”的南仁东。

2. 实验

- (1) 把同学们带到实验室或项目室，安排大家坐下并保持安静；
- (2) 找课代表等几位同学到实验室仓库领元器件和电路板；
- (3) 分发焊锡丝、元器件等；
- (4) 按照 1.2 之<实验进程安排>操作
- (5) 现场指导同学们焊接、测试过程
- (6) 提示同学们如何计算**常用传感器的识别与测试**

3. 故障分析

在实验过程中，及时发现同学们在遇到的故障，并进行现场分析问题。这些问题有的是个别性，有的具有普遍性，都需要老师现场处理；然后，再指导其他同学避免。

课后，对这些的故障现象进行归纳，补充备课内容，在<点评实验报告>课上逐一评价。

4. 收缴实验报告

5. 点评实验报告

第3章 电阻式与热电式传感器的应用

本章主要内容

本章重点讲述电阻式传感器的结构原理、外特性、主要参数及其物理意义，工作状态的分析。

首先介绍电阻式构成传感器的组成、特性、分类及命名、常用电阻式传感器主要参数；再介绍电阻式传感器工作特性及典型应用。

本章课时分配 本章分为6讲，共12学时。

1、电阻式与热电式传感器的应用

教学目标：

了解电阻式与热电式传感器的定义、组成、分类，典型应用。

课程思政：

案例4：历史故事——张衡与地动仪

通过向读者科普中国古代发明地动仪，增进读者对中国传统文化以及古代科学的了解，向学生展示检测技术在古代科学中的应用，培养学生的爱国情怀。

教学重点

1. 电阻式与热电式传感器的组成；
2. 电阻式与热电式传感器的分类。

教学难点

1. 电阻式与热电式传感器的性能及应用；
2. 电阻式与热电式传感器的应用技术；

教学手段：讲授+实验

教学组织过程

课堂讲授。应用多媒体从传感器的定义入手，讲授电阻式与热电式传感器的基本组成，电阻式传感器的基本工作原理是将被测量的变化转化为传感器电阻值的变化，再经一定的测量电路实现对测量结果的输出。

主要内容

知识点1 电阻式与热电式概述

电阻式传感器的基本工作原理是将被测量的变化转化为传感器电阻值的变化，再经一定的测量电路实现对测量结果的输出。电阻式传感器应用广泛、种类繁多，如电位器式、应变式、热电阻和热敏电阻等；电位器式电阻传感器是一种把机械线位移或角位移输入量通过传感器电阻值的变化转换为电阻或电压输出的传感器；应变电阻式传感器是通过弹性元件的传递将被测量引起的形变转换为传感器敏感元件的电阻值变化。

知识点2 工作原理

应变（stress）是物体在外部压力或拉力作用下发生形变的现象。当外力去除后物体又能完全恢复其原来的尺寸和形状的应变称为**弹性应变**。具有弹性应变特性的物体称为**弹性元件**。

应变电阻式传感器是利用**电阻应变片**将应变转换为电阻变化的传感器。应变电阻式传感器在力、力矩、压力、加速度、重量等参数的测量中得到了广泛的应用。

应变电阻式传感器的基本工作原理：当被测物理量作用在弹性元件上，弹性元件在力、力矩或压力等的作用下发生形变，产生相应的应变或位移，然后传递给与之相连的电阻应变片，引起应变敏感元件的电阻值发生变化，通过测量电路变成电压等电量输出。输出的电压大小反映了被测物理量的大小。

知识点 3 应变效应

如图 3.1 所示。一根具有应变效应的金属电阻丝，在未受力时，原始电阻值为：

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A} \quad (3.1)$$

式中：

R — 电阻丝的电阻

ρ — 电阻丝的电阻率

L — 电阻丝的长度

A — 电阻丝的截面积。



图 3.1 应变效应

当电阻丝受到拉力 F 作用时将伸长，横截面积相应减小，电阻率也将因形变而改变（增加），故引起的电阻值相对变化量通过对式（3.1）进行全微分可得：

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - 2 \frac{\Delta r}{r} \quad (3.6)$$

其中：

$\frac{\Delta L}{L}$ — 电阻丝轴向（长度）相对变化量，即**轴向应变**，用 ε 表示。即：

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.7)$$

基于材料力学相关知识，径向应变与轴向应变的关系为：

$$\frac{\Delta r}{r} = -\mu \frac{\Delta L}{L} = -\mu \varepsilon \quad (3.8)$$

式中：

μ — 电阻丝材料的泊松比。

将（3.7）、（3.8）式代入（3.6）式可得：

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + (1 + 2\mu) \varepsilon \quad (3.9)$$

通常把单位应变引起的电阻值相对变化量称为**电阻丝的灵敏度系数**，表示为：

$$K = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = 1 + 2\mu + \frac{\Delta \rho}{\rho \varepsilon} \quad (3.10)$$

实验证明：在电阻丝拉伸极限内，电阻的相对变化与应变成正比，即 K 为常数。

知识点 4 电阻应变片种类

应力 (strain) 与应变的关系为：

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.11)$$

式中：

σ — 被测试件的应力

E — 被测试件的材料弹性模量。

应力 σ 与力 F 和受力面积 A 的关系可表示为：

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.12)$$

常用的电阻应变片有两种：金属电阻应变片和半导体电阻应变片。

(1) 金属电阻应变片（应变效应为主）

金属电阻应变片有丝式和箔式等结构形式。丝式电阻应变片如图 3.2 (a) 所示，它是用一根金属细丝按图示形状弯曲后用胶粘剂贴于衬底上，衬底用纸或有机聚合物等材料制成，电阻丝的两端焊有引出线，电阻丝直径为 0.012~0.050mm 之间。

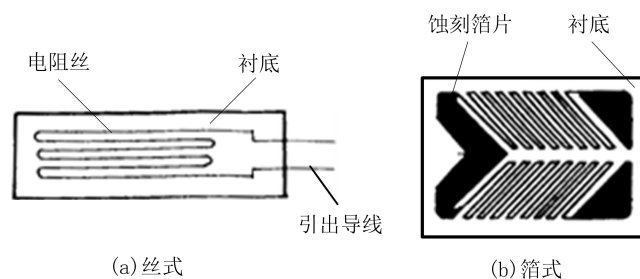


图 3.2 金属电阻应变片结构

箔式电阻应变片的结构如图 3.2 (b) 所示，它是用光刻、腐蚀等工艺方法制成的一种很薄的金属箔栅，其厚度一般在 0.003~0.010 mm。它的优点是表面积和截面积之比大，散热条件好，故允许通过较大的电流，并可做成任意的形状，便于大量生产。

金属电阻应变片的工作原理是主要基于应变效应导致其材料几何尺寸的变化，因此金属电阻应变片的灵敏度系数为：

$$K \approx 1 + 2\mu \quad (\text{常数})$$

(2) 半导体电阻应变片（压阻效应为主）

半导体电阻应变片的结构如图 3.3 所示。它的使用方法与丝式电阻应变片相同，即粘贴在被测物体上，随被测件的应变其电阻发生相应的变化。

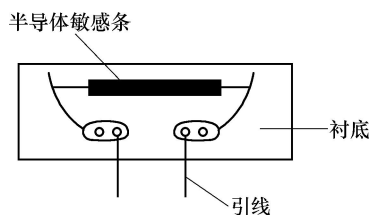


图 3.3 半导体电阻应变片结构

半导体电阻应变片的工作原理是主要基于半导体材料的**压阻效应**，即单晶半导体材料沿某一轴向受到外力作用时，其电阻率发生变化的现象。半导体敏感元件产生压阻效应时其电阻率的相对变化与应力间的关系为：

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi\sigma = \pi \cdot E \cdot \varepsilon \quad (3.13)$$

式中：

π —半导体材料的压阻系数。

因此，对于半导体电阻应变片来说，其灵敏度系数为：

$$K \approx \frac{\Delta\rho}{\rho\varepsilon} = \pi \cdot E \quad (\text{常数}) \quad (3.14)$$

知识点 5 电阻应变片温度误差及其补偿

(1) 电阻应变片的温度误差

电阻应变片的温度误差是由环境温度的改变给测量带来的附加误差。导致电阻应变片温度误差的主要因素有：

- 1) 电阻温度系数的影响
- 2) 试件材料和电阻丝材料的线膨胀系数的影响

由温度变化引起电阻应变片总电阻的相对变化量为：

$$\frac{\Delta R_t}{R_0} = \frac{\Delta R_\alpha + \Delta R_\beta}{R_0} = \left[\alpha_0 + K(\beta_g - \beta_s) \right] \Delta t \quad (3.22)$$

由此可见：因环境温度变化导致的附加电阻的相对变化量取决于：环境温度的变化量（ Δt ）；电阻应变片自身的性能参数（ K, α_0, β_s ）；被测试件的线膨胀系数（ β_g ）。

所以，对应的应变为：

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta R_t / R_0}{K} = \left[\frac{\alpha_0}{K} + (\beta_g - \beta_s) \right] \Delta t \quad (3.23)$$

(2) 电阻应变片温度误差补偿方法

最常用、最有效的电阻应变片温度误差补偿方法是**电桥补偿法**。其原理如图 3.4 所示。

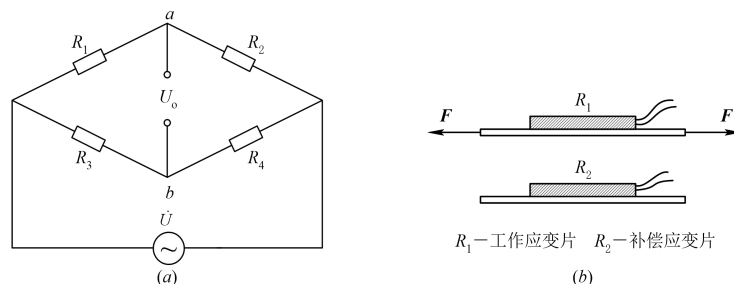


图 3.4 电桥补偿法

根据电路分析，可知电桥输出电压 $\dot{U}_o$ 与桥臂参数的关系为：

$$\dot{U}_o = U_a - U_b = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \dot{U} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \dot{U} = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \dot{U} \quad (3.24)$$

根据式 (3.24)，当 R_3 和 R_4 为常数时， R_1 和 R_2 对电桥输出电压 $\dot{U}_o$ 的作用效果相反。

电桥补偿法正是利用了这一基本关系实现对测试结果的补偿。

为了保证补偿效果，应注意以下几个问题：

- 在电阻应变片工作过程中，应保证 $R_3 = R_4$ 。
- R_1 和 R_2 两个电阻应变片应具有相同的电阻温度系数 α ，线膨胀系数 β ，应变灵敏度系数 K 和初始电阻值 R_0 。
- 粘贴补偿片的材料和粘贴工作片的被测试件材料必须一样，两者线膨胀系数相同。
- 工作片和补偿片应处于同一温度场中。

例：如图 3.4 所示的应变片电桥测量电路，其中 R_1 为应变片， R_2 、 R_3 和 R_4 为普通精密电阻。应变片在 0°C 时电阻值为 $100\ \Omega$ ， $R_2 = R_3 = R_4 = 100\ \Omega$ 。已知应变片的灵敏度为 2.0，电源电压为 10V。

(1) 如果将应变片 R_1 贴在弹性试件上，试件横截面积 $A = 0.4 \times 10^{-4} \text{m}^2$ ，弹性模量 $E = 3 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ ，若受到 $6 \times 10^4 \text{N}$ 拉力的作用，求测量电路的输出电压 U_o ；

(2) 在应变片不受力的情况下，假设该测量电路工作了 10 分钟，且应变片 R_1 消耗的功率全转化为温升（设每 1 焦耳能量导致应变片 0.1°C 的温升），不考虑 R_2 、 R_3 和 R_4 的温升，

应变片电阻温度特性为 $R_t = R_0(1 + \alpha t)$ ， $\alpha = 4.28 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$ 。试求此时测量电桥的输出电压 U_o ，并分析减小温度误差的方法。

解：（1）根据题意，应力为 $\sigma = F/A = 6 \times 10^4 \div (0.4 \times 10^{-4}) = 1.5 \times 10^9 \text{ (N/m}^2\text{)}$

$$\text{应变为 } \varepsilon = \sigma/E = 1.5 \times 10^9 \div (3 \times 10^{11}) = 0.005$$

$$\text{应变导致的电阻变化 } \Delta R = K \varepsilon R = 2.0 \times 0.005 \times 100 = 1(\Omega)$$

因此，输出电压为：

$$U_o = U_i \times \left(\frac{R_1 + \Delta R}{R_1 + \Delta R + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) = 10 \times \left(\frac{101}{201} - \frac{100}{200} \right) = 0.0249 \text{ V}$$

$$\text{（2）根据题意，通过 } R_1 \text{ 的电流为： } I = \frac{U_i}{R_1 + R_2} = \frac{10}{100 + 100} = 0.05 \text{ (A)}$$

$$\text{则 } R_1 \text{ 上消耗的功率 } P = I^2 R = 0.05^2 \times 100 = 0.25 \text{ (W)}$$

$$R_1 \text{ 上消耗的能量 } W = Pt = 0.25 \times 10 \times 60 = 150 \text{ (J)}$$

$$\text{那么，温升 } \Delta t = 150 \times 0.1 = 15(^\circ\text{C})$$

此时，电阻 R_1 将变化为：

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) = 100 \times (1 + 4.28 \times 10^{-3} \times 15) = 106.42(\Omega)$$

因此，对应的测量电桥输出电压为：

$$U_o = U_i \times \left(\frac{R_t}{R_t + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) = 10 \times \left(\frac{106.42}{206.42} - \frac{100}{200} \right) = 0.1555 \text{ (V)}$$

由于此时应变片并未承受应变，由此可见温度变化对测量结果的输出会带来较大的影响。要减小温度误差，可考虑采用的方法包括：不要长时间测量；对电阻 R_1 实施恒温措施；对电阻 R_2 做温度误差补偿，即采用补偿应变片。

知识点 6 测量电路

3.2.1 直流电桥

（1）平衡条件

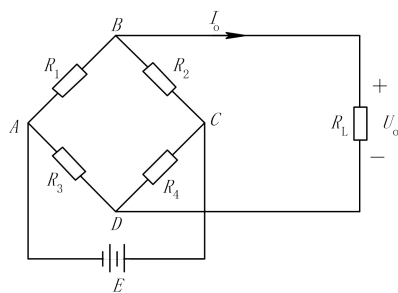


图 3.5 直流电桥的平衡条件

电桥平衡时 $U_o = 0$ ，即电桥无输出电压，则有：

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (3.29)$$

这就是电桥平衡的条件，即相邻两臂电阻的比值相等。

(2) 电压灵敏度

设桥臂比为： $\frac{R_2}{R_1} = n$ ，由于 $\Delta R_1 \ll R_1$ ，因此 $\Delta R_1 / R_1$ 可忽略，结合电桥平衡条件

$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ 可得电桥输出为：

$$U_o = E \frac{n}{(1+n)^2} \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (3.31)$$

定义电桥的**电压灵敏度**为：

$$K_U = \frac{U_o}{\Delta R_1 / R_1} = E \cdot \frac{n}{(1+n)^2} \quad (3.32)$$

电压灵敏度越大，说明电阻应变片电阻相对变化相同的情况下，电桥输出电压越大，电桥越灵敏。这就是电压灵敏度的物理意义。

由式 (3.32) 可知：

- 电桥的电压灵敏度正比于电桥的供电电压，要提高电桥的灵敏度，可以提高电源电压，但要受到电阻应变片允许的功耗限制。
- 电桥的电压灵敏度是桥臂电阻比值 n 的函数，恰当地选取 n 值有助于取得较高的灵敏度。

在 E 确定的情况下， $n=1$ （即 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ）时， K_U 的值最大，电桥的电压

灵敏度最高。此时有：

$$U_o = \frac{E}{4} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (3.34)$$

$$K_U = E/4 \quad (3.35)$$

由此可知：当电源的电压 E 和电阻相对变化量 $\Delta R_1 / R_1$ 不变时，电桥的输出电压及其灵敏度也不变，且与各桥臂电阻阻值大小无关。

(3) 非线性误差及其补偿

式 (3.31) 是在略去分母中的较小量 $\Delta R_1 / R_1$ 得到的理想值，实际值应为：

$$U'_o = E \cdot \frac{n \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1}}{(1 + \frac{\Delta R_1}{R_1} + n)(1 + n)} \quad (3.36)$$

非线性误差为：

$$\gamma_L = \frac{U_o - U'_o}{U_o} = \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1}}{1 + n + \frac{\Delta R_1}{R_1}} \quad (3.37)$$

如果是四等臂电桥，即 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ， $n = 1$ ，则：

$$\gamma_L = \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1}}{2 + \frac{\Delta R_1}{R_1}} \quad (3.38)$$

要减小或消除非线性误差，可采用的方法包括：

1) 提高桥臂比

由式 (3.37) 可知，提高桥臂比，非线性误差将减小。但根据式 (3.32) 可知，电桥的电压灵敏度将降低，为了保持灵敏度不降低，必须相应地提高供电电压。

2) 采用差动电桥

差动电桥分半桥差动和全桥差动两种情形。

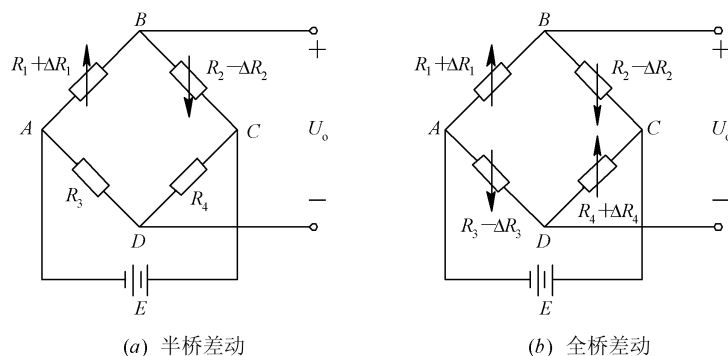


图 3.6 差动电桥

半桥差动如图 3.6 (a) 所示, 只有两个相邻桥臂接入电阻应变片。如果 $\Delta R_1 = \Delta R_2$,

$R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, 则得到该电桥的输出电压为:

$$U_o = \frac{E}{2} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (3.40)$$

$$K_U = E/2$$

可见: U_o 与 ΔR_1 呈线性关系, 即半桥差动测量电路无非线性误差, 且电桥电压灵敏度比单臂电阻应变片工作时提高了一倍。

若将电桥四臂都接入电阻应变片, 如图 3.6 (b) 所示, 构成**全桥差动**测量电路, 若 $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4$, 且 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, 则:

$$U_o = E \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (3.42)$$

$$K_U = E \quad (3.43)$$

可见, 全桥差动测量电路不仅没有非线性误差, 且电压灵敏度是单臂电阻应变片工作时的 4 倍。

3.2.2 交流电桥

根据前面的分析已知, 由于应变测量电桥的输出电压很小, 一般要加放大器, 但直流放大器容易产生零漂, 所以应变测量电桥多采用交流电桥。

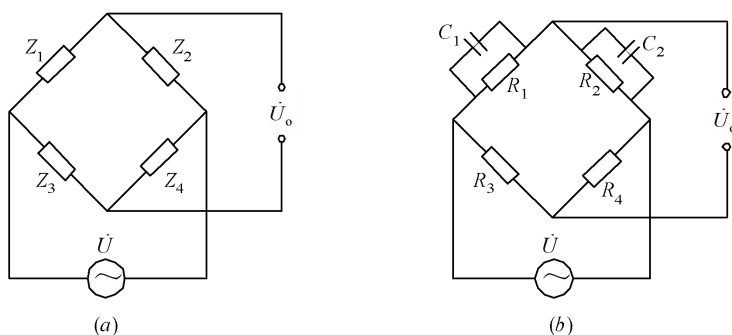


图 3.7 交流电桥

交流电桥如图 3.7 所示。工作电阻应变片和补偿电阻应变片分别加在桥臂 Z_1 和 Z_2 上。

由于电源为交流, 电阻应变片引线寄生电容使得桥臂呈现复阻抗特性, 相当于两只电阻应变片各并联了一个电容 (C_1, C_2)。

这样，得到每个桥臂的复阻抗为：

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= \frac{R_1}{1 + j\omega R_1 C_1} \\ Z_2 &= \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2} \\ Z_3 &= R_3 \\ Z_4 &= R_4 \end{aligned} \right\} \quad (3.45)$$

交流电桥的平衡条件：

$$\left. \begin{aligned} R_1 R_4 &= R_2 R_3 \text{ (电阻平衡条件)} \\ \frac{R_4}{R_3} &= \frac{C_1}{C_2} = \frac{R_2}{R_1} \text{ 或 } R_1 C_1 = R_2 C_2 \text{ (电容平衡条件)} \end{aligned} \right\} \quad (3.50)$$

为了满足交流电桥的两个平衡条件，需要在桥路上设电阻平衡调节和电容平衡调节，如图 3.8 所示。

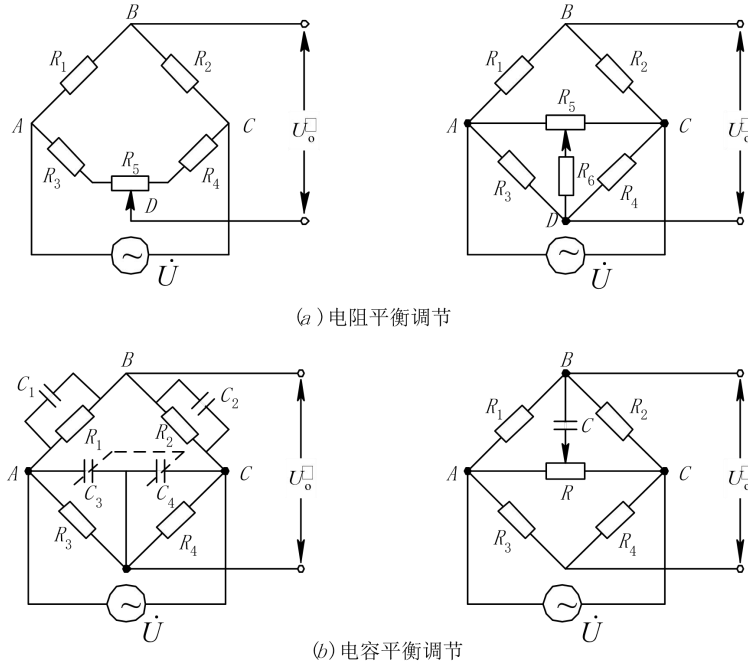


图 3.8 交流电桥平衡调节

电阻平衡调节也有助于解决电桥初始平衡问题。因为测量之初，电桥应处于初始平衡状态，即输出电压为零；但实际上，电桥各桥臂阻值不可能绝对相同，接触电阻及导线电阻也有差异，故必须设置电阻平衡调节，以满足上述要求。

如果采用半桥差动结构，考虑电桥的起始平衡条件，即 $R_3 = R_4$ 、 $R_1 = R_2$ 、 $Z_1 = Z_2$ 、 $C_1 = C_2$ ，以及差动条件，即 $\Delta R_1 = \Delta R_2$ 。将这些条件代入式 (3.59)，经整理可得：

$$\dot{U}_o = \frac{\dot{U}}{2} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (3.60)$$

与式 (3.40) 相对照可知：与直流差动电桥相似，交流差动电桥的输出电压也与 ΔR_1 成线性关系。

知识点 7 典型应用

3.3.1 电阻式力传感器

被测物理量为荷重或力的应变电阻式传感器统称为应变电阻式力传感器。对载荷和力的测量在工业测量中用得较多，其中采用电阻应变片测量的应变电阻式力传感器占有主导地位，传感器的量程一般从几克到几百吨。

应变电阻式力传感器的弹性元件有柱（筒）式、环式、悬臂式等数种。

(1) 柱（筒）式力传感器

如图 3.9 所示。柱式力传感器为实心的，筒式力传感器为空心的。电阻应变片粘贴在弹性体外壁应力分布均匀的中间部分，对称地粘贴多片，弹性元件上电阻应变片的粘贴和桥路的连接应尽可能消除载荷偏心 and 弯矩的影响， R_1 和 R_3 串接， R_2 和 R_4 串接，并置于桥路相对桥臂上以减小弯矩影响，横向贴片 (R_5, R_6, R_7 和 R_8) 主要作温度补偿用。

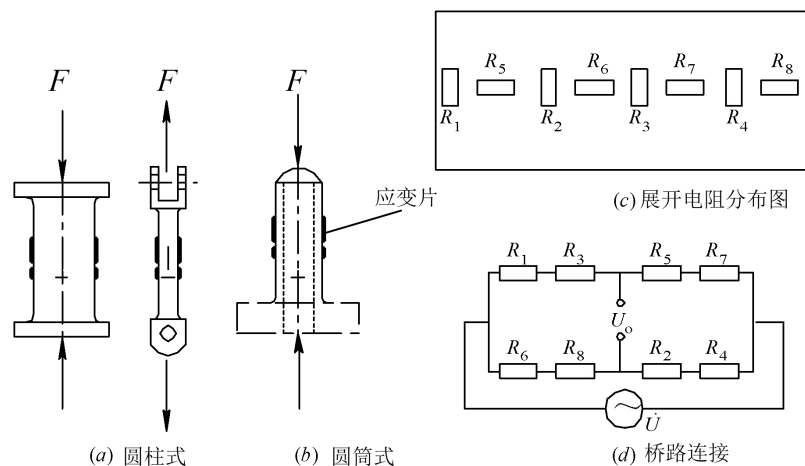


图 3.9 圆柱（筒）式力传感器

(2) 环式力传感器

环式力传感器的结构和应力分布如图 3.10 所示。与柱式相比，它的应力分布更复杂，变化较大，且有方向上的区分。由应力分布图还可看出，C 位置电阻应变片的应变为 0，即它起温度补偿作用。

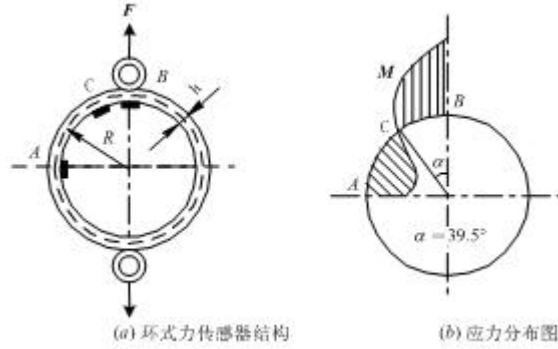


图 3.10 环式力传感器

A、B 两点处如果内、外均贴上电阻应变片，则其所在位置的应变为：

A 点：

$$\varepsilon_A = \pm \frac{3F[R - (h/2)]}{bh^2E} \left(1 - \frac{2}{\pi}\right) \quad (3.61)$$

式中：

h — 圆环的厚度

b — 圆环的宽度

E — 材料弹性模量

F — 载荷。

在如图所示方向的拉力作用下，内贴片取“+”，外贴片取“—”。

B 点：

$$\varepsilon_B = \pm \frac{3F[R - (h/2)]}{bh^2E} \frac{2}{\pi} \quad (3.62)$$

在如图所示方向的拉力作用下，内贴片取“—”，外贴片取“+”。对 $R/h > 5$ 的小曲率圆环，可以忽略上式中的 $h/2$ 。

(3) 悬臂梁式力传感器

悬臂梁是一端固定另一端自由的弹性敏感元件，其特点是结构简单、加工方便，在较小力的测量中应用普遍。根据梁的截面形状不同可分为变截面梁（等强度梁）和等截面梁。

图 3.11 所示为一种等强度梁式力传感器，图中 R_1 为电阻应变片，将其粘贴在一端固定的悬臂梁上，另一端的三角形顶点上（保证等应变性）如果受到载荷 F 的作用，梁内各断面产生的应力是相等的。等强度梁各点的应变值为：

$$\varepsilon = \frac{6Fl}{bh^2E} \quad (3.63)$$

式中， l — 梁的长度；

b — 梁的固定端宽度；

h — 梁的厚度；

E — 材料的弹性模量。

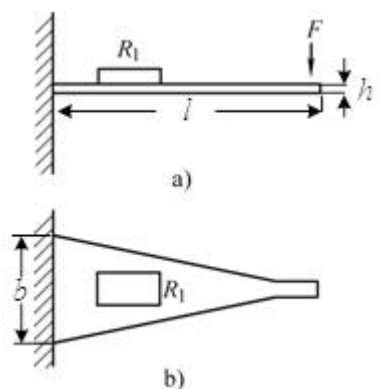
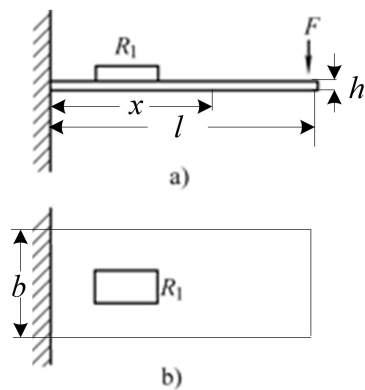


图 3.11 等强度梁式力传感器

(a) 正视图 (b) 俯视图



3.12 等截面梁式力传感器

(a) 正视图 (b) 俯视图

等截面矩形结构的悬臂梁如图 3.12 所示。等截面梁距梁固定端为 x 处的应变值为：

$$\varepsilon_x = \frac{6F(l-x)}{bh^2E} = \frac{6F(l-x)}{AhE} \quad (3.64)$$

式中， x — 距梁固定端的距离；

A — 梁的截面积。

3.3.2 电阻式压力传感器

电阻式压力传感器主要用于测量流动介质（如液体、气体）的动态或静态压力。这类传感器大多采用膜片式或筒式弹性元件。

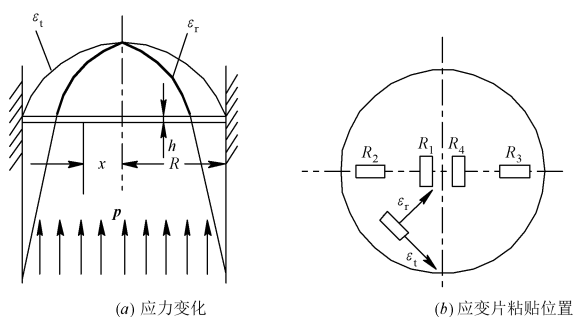


图 3.13 膜片式压力传感器

图 3.13 为膜片式压力传感器，电阻应变片贴于膜片内壁，在压力 P 作用下，膜片产生径向应变和切向应变，它们的大小可分别表示为：

$$\varepsilon_r = \frac{3P(1-\mu^2)(R^2-3x^2)}{8h^2E} \quad (3.65)$$

$$\varepsilon_t = \frac{3P(1-\mu^2)(R^2-x^2)}{8h^2E} \quad (3.66)$$

式中：

R 、 h —分别为膜的半径和厚度

x —离圆心的径向距离

P —膜片上均匀分布的压力

μ —材料的泊松比

E —材料弹性模量。

由式（3.65）、（3.6）可得出以下结论：

1) $x=0$ 时，即在膜片中心位置的应变为：

$$\varepsilon_r = \varepsilon_t = \frac{3P(1-\mu^2)R^2}{8h^2E} \quad (3.67)$$

2) $x=R$ 时，即在膜片边缘处的应变为：

$$\varepsilon_t = 0 \quad (3.68)$$

$$\varepsilon_r = -\frac{3P(1-\mu^2)R^2}{4h^2E} \quad (3.69)$$

可见径向应变的绝对值比在中心处高一倍。

3) $x=R/\sqrt{3}$ 时：

$$\varepsilon_r = 0 \quad (3.70)$$

它们分别如应变分布图 3.13 (a) 所示。由图还可知：切向应变始终为非负值，中心处最大；而径向应变有正有负，在中心处和切向应变相等，在边缘处最大，是中心处的两倍。在 $x=R/\sqrt{3}$ 处径向应变为 0，贴片时要避开此处，因为不能感受切向应变，且反映不出径向应变的最大或最小特征，实际意义不大。

根据上述特点，一般在膜片圆心处沿切向贴两片（ R_1, R_4 ）感受 ε_t ，因为圆心处切向应变最大；在边缘处沿径向贴两片（ R_2, R_3 ）感受 ε_r ，因为边缘处径向应变最大；然后接成全桥测量电路，以提高灵敏度和实现温度补偿。

3.3.3 电阻式液体重量传感器

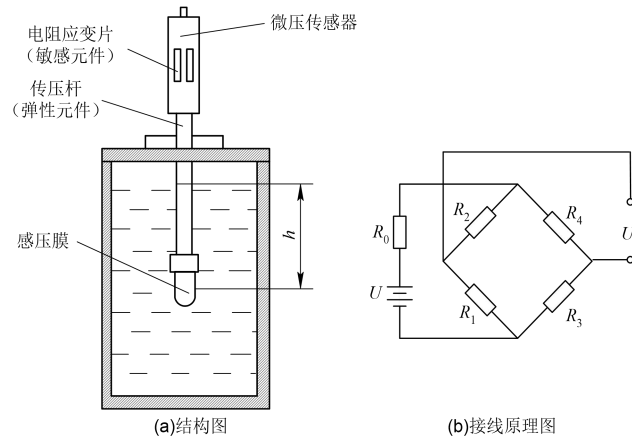


图 3.17 电阻式液体重量传感器

图 3.17 是测量容器内液体重量的插入式传感器示意图。该传感器有一根传压杆，上端安装微压传感器，下端安装感压膜，它用于感受液体的压力。当容器中溶液增多时，感压膜感受的压力就增大。将传感器接入电桥的一个桥臂，则输出电压为：

$$U_o = S \cdot h \rho g \quad (3.71)$$

式中：

S — 传感器的传输系数

ρ — 液体密度

g — 重力加速度

h — 位于感压膜上的液体高度。

$h \rho g$ 表征了感压膜上方的液体的重量。对于等截面的柱形容器，有：

$$h \rho g = \frac{Q}{A} \quad (3.72)$$

式中：

Q — 容器内感压膜上方液体的重量

A — 柱形容器的截面积。

由式 (3.71)、(3.72) 可得到容器内感压膜上方液体的重量与电桥输出电压间的关系：

$$U_o = \frac{S \cdot Q}{A} \quad (3.73)$$

式 (3.73) 表明：电桥输出电压与柱形容器内感压膜上方液体的重量呈正比关系。在已知液体密度的条件下，这种方式还可以实现容器内的液位高度测量。

3.3.4 电阻式加速度传感器

应变电阻式加速度传感器的结构如图 3.18 所示。等强度梁的自由端安装质量块，另一端固定在壳体上；等强度梁上粘贴四个电阻应变敏感元件；通常壳体内充满硅油以调节系统阻尼系数。

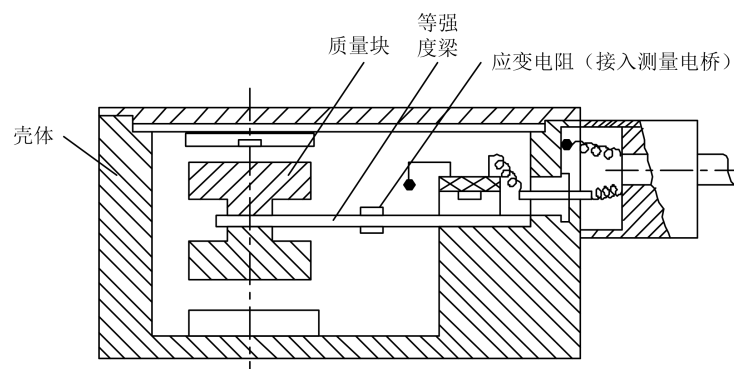


图 3.18 应变电阻式加速度传感器的结构

测量时，将传感器壳体与被测对象刚性连接，当被测物体以加速度 a 运动时，质量块受到一个与加速度方向相反的惯性力作用，使悬臂梁变形，导致其上的应变片感受到并随之产生应变，从而使应变片的电阻值发生变化，引起测量电桥不平衡而输出电压，即可得出加速度的大小。这种测量方法主要用于低频（10~60Hz）的振动和冲击测量。

第4章 电感式与电容式传感器的应用

本章主要内容

讲述电感式与电容式传感器的结构原理、外特性、主要参数及其物理意义，工作状态的分析。

介绍电感式与电容式传感器电阻式构成传感器的组成、特性、分类及命名、常用电感式与电容式传感器主要参数；再介绍电感式与电容式传感器工作特性及典型应用。

本章课时分配 本章分为6讲，共12学时。

4.1 基于电感式传感器的位移测量设计

教学目标：

了解电感式与电容式传感器的定义、组成、分类，典型应用。

课程思政：

案例5：走近科学——北斗卫星定位系统

结合现代高精度传感检测技术，通过向读者科普北斗卫星定位系统，增进读者对中国当下的大国工匠，向学生展示传感检测技术在国民经济和军事上的应用，培养学生的爱国情怀和工程师品质。

教学重点

1. 电感式与电容式传感器的组成；
2. 电感式与电容式传感器的分类。

教学难点

1. 电感式与电容式的性能及应用；
2. 电感式与电容式传感器的应用技术；
3. 基于电感式传感器的位移测量设计。

教学手段：讲授+实验

教学组织过程

课堂讲授。应用多媒体从电感式与电容式传感器的定义入手，讲授电容式传感器利用了将非电量的变化转换为电容量的变化来实现对物理量的测量。电容式传感器广泛用于位移、振动、角度、加速度，以及压力、差压、液面（料位或物位）、成份含量等的测量。

主要内容

知识点1 电容式传感器概述

电容式传感器利用了将非电量的变化转换为电容量的变化来实现对物理量的测量。电容式传感器广泛用于位移、振动、角度、加速度，以及压力、差压、液面（料位或物位）、成份含量等的测量。

知识点2 电容式传感器的结构

电容式传感器的常见结构包括平板状和圆筒状，简称平板电容器或圆筒电容器。

平板电容式传感器的结构如图5.1所示。在不考虑边缘效应的情况下，其电容量的计算公式为：

$$C = \frac{\varepsilon \cdot A}{d} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d} \quad (5.1)$$

式中：

A —两平行板所覆盖的面积

ε —电容极板间介质的介电常数

ε_0 —自由空间（真空）介电常数（等于 $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ）

ε_r —极板间介质相对介电常数

d —两平行板间的距离。

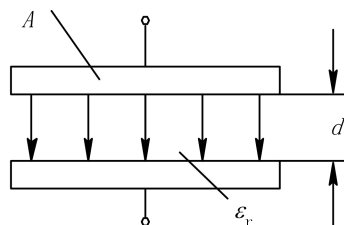


图 5.1 平板电容式传感器的结构

由式 (5.1) 可见，当被测参数变化引起 A 、 ε_r 或 d 变化时，将导致平板电容式传感器的电容量 C 随之发生变化。在实际使用中，通常保持其中两个参数不变，而只变其中一个参数，把该参数的变化转换成电容量的变化，通过测量电路转换为电量输出。因此，平板电容式传感器可分为三种：变极板覆盖面积的变面积型、变介质介电常数的变介质型和变极板间距离的变极距型。

圆筒电容式传感器的结构如图 5.2 所示。在不考虑边缘效应的情况下，其电容量的计算公式为：

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_rl}{\ln \frac{R}{r}} \quad (5.2)$$

式中：

l —内外极板所覆盖的高度

R —外极板的半径

r —内极板的半径

ε_0 —自由空间（真空）介电常数（等于 $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ）

ε_r —极板间介质的相对介电常数

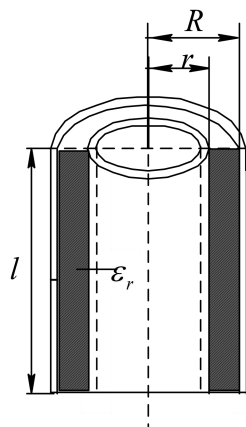


图 5.2 圆筒电容式传感器的结构

由式 (5.2) 可见，当被测参数变化引起 ϵ_r 或 l 变化时，将导致圆筒电容式传感器的电容量 C 随之发生变化。在实际使用中，通常保持其中一个参数不变，而改变另一个参数，把该参数的变化转换成电容量的变化，通过测量电路转换为电量输出。因此，圆筒电容式传感器可分为两种：变介质介电常数的变介质型和变极板间覆盖高度的变面积型。

知识点 3 电容式传感器的工作原理

5.1.1 变面积型

(1) 线位移变面积型

常用的线位移变面积型电容式传感器有平板状和圆筒状两种结构，分别如图 5.3 所示 (a) 和 (b) 所示。

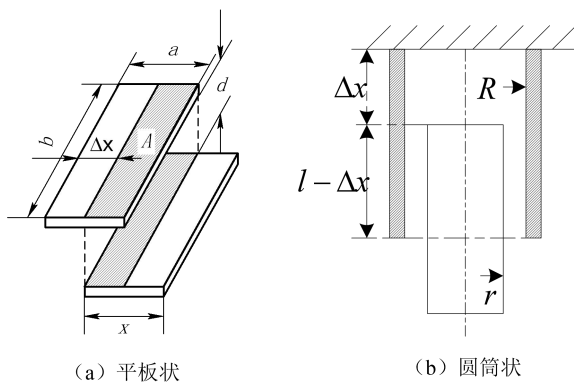


图 5.3 线位移变面积型电容式传感器原理图

对于平板状结构，当被测量通过移动极板引起两极板有效覆盖面积 A 发生变化时，将导致电容量变化。设动极板相对于定极板的平移距离为 Δx ，则电容的相对变化量为：

$$\frac{\Delta C}{C_0} = -\frac{\Delta x}{a} \quad (5.4)$$

由此可见：平板电容式传感器传感器的电容改变量 ΔC 与水平位移 Δx 成线性关系。

对于圆筒状结构，当动极板圆筒沿轴向移动 Δx 时，电容的相对变化量为：

$$\frac{\Delta C}{C_0} = -\frac{\Delta x}{l} \quad (5.6)$$

由此可见：圆筒电容式传感器的电容改变量 ΔC 与轴向位移 Δx 成线性关系。

(2) 角位移变面积型

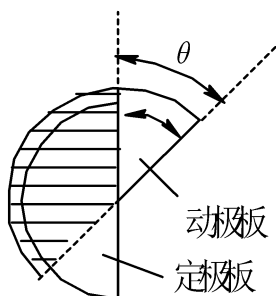


图 5.4 角位移变面积型电容式传感器原理图

角位移变面积型电容式传感器的原理如图 5.4 所示。当动极板有一个角位移 θ 时：

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\theta}{\pi} \quad (5.9)$$

式中：

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A_0}{d} \text{ — 初始电容量。}$$

由式 (5.9) 可见，传感器的电容改变量 ΔC 与角位移 θ 呈线性关系。

变面积型电容式传感器也可接成差动形式，灵敏度同样会加倍。

5.1.2 变介质型

变介质型电容式传感器就是利用不同介质的介电常数各不相同，通过介质的改变来实现对被测量的检测，并通过电容式传感器的电容量的变化反映出来。

(1) 平板结构

平板结构变介质型电容式传感器的原理如图 5.5 所示。由于在两极板间所加介质（其介电常数为 ϵ_1 ）的分布位置不同，可分为串联型和并联型两种情况。

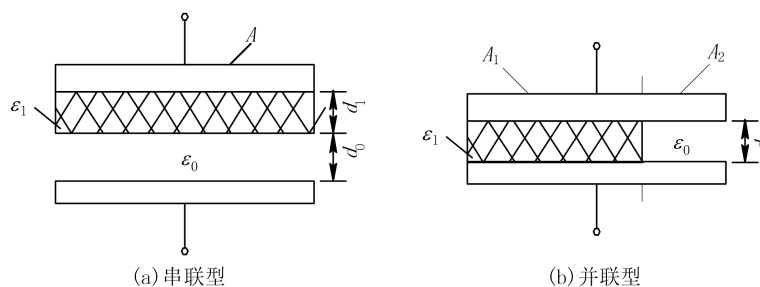


图 5.5 平板结构变介质型电容式传感器原理图

对于串联型结构，总的电容值为：

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 A}{\varepsilon_1 d_0 + d_1} \quad (5.12)$$

当未加入介质 ε_1 时的初始电容为：

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 A}{d_0 + d_1} \quad (5.13)$$

介质改变后的电容增量为：

$$\Delta C = C - C_0 = C_0 \cdot \frac{\varepsilon_1 - 1}{\varepsilon_1 \frac{d_0}{d_1} + 1} \quad (5.14)$$

可见，介质改变后的电容增量与所加介质的介电常数 ε_1 成非线性关系。

对于并联型结构，总的电容值为：

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 A_1 + \varepsilon_0 A_2}{d} \quad (5.17)$$

当未加入介质 ε_1 时的初始电容为：

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 (A_1 + A_2)}{d} \quad (5.18)$$

介质改变后的电容增量为：

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{\varepsilon_0 A_1 (\varepsilon_1 - 1)}{d} \quad (5.19)$$

可见，介质改变后的电容增量与所加介质的介电常数 ε_1 成线性关系。

(2) 圆筒结构

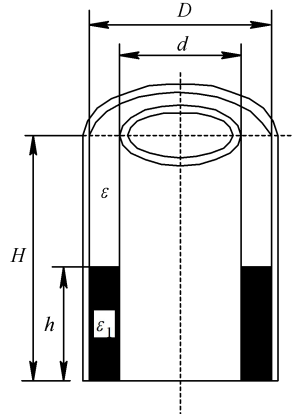


图 5.6 圆筒结构变介质型电容式传感器液位测量原理图

图 5.6 为圆筒结构变介质型电容式传感器用于测量液位高低的结构原理图。设被测介质的相对介电常数为 ε_1 ，液面高度为 h ，变换器总高度为 H ，内筒外径为 d ，外筒内径为 D ，此时相当于两个电容器的并联，对于筒式电容器，如果不考虑端部的边缘效应，当未注入液体时的初始电容为：

$$C_0 = \frac{2\pi\varepsilon_0 H}{\ln \frac{D}{d}} \quad (5.22)$$

总的电容值为：

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0 H}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi\varepsilon_0 h(\varepsilon_1 - 1)}{\ln \frac{D}{d}} = C_0 + \frac{2\pi h\varepsilon_0(\varepsilon_1 - 1)}{\ln \frac{D}{d}} \quad (5.23)$$

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{2\pi h\varepsilon_0(\varepsilon_1 - 1)}{\ln \frac{D}{d}} \quad (5.24)$$

由式 (5.24) 可见，电容增量 ΔC 与被测液位的高度 h 成线性关系。

5.1.3 变极距型

(1) 变极距型电容式传感器的工作原理分析

当平板电容式传感器的介电常数和面积为常数，初始极板间距为 d_0 时，其初始电容量为：

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d_0} \quad (5.25)$$

测量时，一般将平板电容器的一个极板固定（称为定极板）、另一个极板与被测体相连（称为动极板）。如果动极板因被测参数改变而位移，导致平板电容器极板间距缩小 Δd ，电容量增大 ΔC ，则有：

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta d}{d_0 - \Delta d} \quad (5.28)$$

如果极板间距改变很小， $\Delta d/d_0 \ll 1$ ，则式 (5.26) 可按泰勒级数展开为：

$$C = C_0 + \Delta C = C_0 \left[1 + \frac{\Delta d}{d_0} + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^3 + \dots \right] \quad (5.29)$$

对式 (5.29) 作线性化处理，忽略高次的非线性项，经整理可得：

$$\Delta C = \frac{C_0}{d_0} \cdot \Delta d \quad (5.30)$$

由此可见， ΔC 与 Δd 为近似线性关系。

由式 (5.30) 可知：对于同样的极板间距的变化 Δd ，较小的 d_0 可获得更大的电容量变化，从而提高传感器的灵敏度，但 d_0 过小，容易引起电容器击穿或短路，因此，可在极板间加入高介电常数的材料如云母。

知识点 4 变极距型电容式传感器的非线性

当 $\Delta d/d_0 \ll 1$ 时，可得变极距型电容式传感器的电容相对变化量为：

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta d}{d_0 - \Delta d} = \frac{\Delta d}{d_0} \left[1 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right) + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^3 + \dots \right] \quad (5.34)$$

很明显，电容的变化量与输入位移 Δd 间成非线性关系。略去高次项（即非线性项）得到近似线性关系：

$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx \frac{\Delta d}{d_0} \quad (5.35)$$

变极距型电容式传感器的灵敏度（即单位距离改变引起的电容量相对变化）为：

$$K = \frac{\Delta C/C_0}{\Delta d} = \frac{1}{d_0} \quad (5.36)$$

但根据式 (5.28) 可得：

$$K = \frac{\Delta C/C_0}{\Delta d} = \frac{1}{d_0 - \Delta d} \quad (5.37)$$

由式 (5.37) 可见，单位输入位移所引起的电容量相对变化（即灵敏度）与当前极板间距 $d_0 - \Delta d$ 成反比关系，但在 Δd 变化很小即 $\Delta d/d_0 \ll 1$ 时近似与极板的初始间距 d_0 成反比关系，即式 (5.36)。

如果保留式 (5.34) 中的线性项 $\frac{\Delta d}{d_0}$ 和二次项 $\left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2$ （即第一个非线性项，也是最大的非线性项），即：

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta d}{d_0} \left[1 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right) \right] = \frac{\Delta d}{d_0} + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 \quad (5.38)$$

式 (5.38) 中二次项被认为是线性化近似处理时的误差项，则传感器的相对非线性误差

为:

$$\delta = \frac{\left| \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 \right|}{\left| \frac{\Delta d}{d_0} \right|} \times 100\% = \left| \frac{\Delta d}{d_0} \right| \times 100\% \quad (5.39)$$

在实际应用中, 为了既提高灵敏度, 又减小非线性误差, 通常采用差动结构, 如图 5.9 所示。

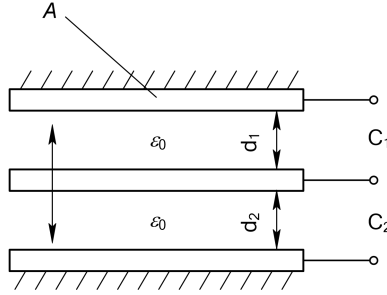


图 5.9 变极距型平板电容器的差动式结构

初始时两电容器极板间距均为 d_0 , 初始电容量为 C_0 。当中间的动极板向上位移 Δd 时, 电容器 C_1 的极板间距 d_1 变为 $d_0 - \Delta d$, 电容器 C_2 的极板间距 d_2 变为 $d_0 + \Delta d$ 。因此有:

$$C_1 = C_0 \frac{1}{1 - \frac{\Delta d}{d_0}} \quad (5.40)$$

$$C_2 = C_0 \frac{1}{1 + \frac{\Delta d}{d_0}} \quad (5.41)$$

在 $\Delta d/d_0 \ll 1$ 时, 按泰勒级数展开, 可取出两个电容量的差值, 得到:

$$\Delta C = C_1 - C_2 = C_0 \left[2 \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right) + 2 \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^3 + 2 \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^5 + \dots \right] \quad (5.44)$$

电容值的相对变化量为:

$$\frac{\Delta C}{C_0} = 2 \frac{\Delta d}{d_0} \left[1 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^4 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^6 + \dots \right] \quad (5.45)$$

略去式 (5.45) 中的高次项 (即非线性项), 可得到电容量的相对变化量与极板位移的相对变化量间近似的线性关系:

$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx 2 \frac{\Delta d}{d_0} \quad (5.46)$$

灵敏度为：

$$K = \frac{\Delta C / C_0}{\Delta d} = \frac{2}{d_0} \quad (5.47)$$

如果只考虑(5.45)式中的前两项：线性项和三次项（误差项），忽略更高次非线性项，则此时变极距型电容式传感器的相对非线性误差近似为：

$$\delta = \frac{\left| 2 \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^3 \right|}{\left| 2 \frac{\Delta d}{d_0} \right|} \times 100\% = \left| \frac{\Delta d}{d_0} \right|^2 \times 100\% \quad (5.48)$$

对比式(5.36)、(5.39)和式(5.47)、(5.48)可知：变极距型电容式传感器做成差动结构后，灵敏度提高了一倍，而非线性误差转化为平方关系而得以大大降低。

知识点 5 测量电路

5.2.1 调频电路

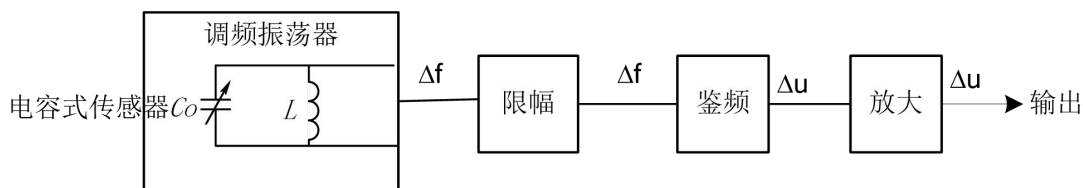


图 5.10 电容式传感器调频电路

调频电路原理如图 5.10 所示。电容式传感器作为振荡器谐振回路的一部分。

当没有被测信号时， $\Delta C = 0$ ，此时振荡器的固有频率为：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}} \quad (5.50)$$

当有被测信号（被测量改变）时， $\Delta C \neq 0$ ，此时振荡器的频率发生了变化，有一个相应的改变量 Δf ：

$$f'_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_0 \pm \Delta C)}} = f_0 \mp \Delta f \quad (5.51)$$

由此可见，当输入量导致传感器电容量发生变化时，振荡器的振荡频率发生变化（ Δf ），此时虽然频率可以作为测量系统的输出，但系统是非线性的，不易校正，解决的办法是加入鉴频器，将频率的变化转换为振幅的变化（ Δu ），经过放大后就可以用仪表指示或用记录仪进行记录。

5.2.2 运算放大器

运算放大器测量原理如图 5.11 所示。图中 C_x 代表传感器电容。

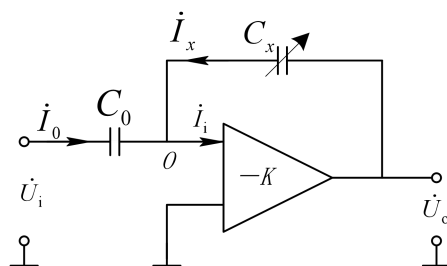


图 5.11 运算放大器电路

由于运算放大器的放大倍数非常高（假设 $K = \infty$ ），图中 O 点为“虚地”，且放大器的输入阻抗很高（假设 $Z_i = \infty$ ），因此： $\dot{I}_i = 0$ ，于是有：

$$\dot{U}_i = Z_{C_0} \cdot \dot{I}_0 = \frac{1}{j\omega C_0} \cdot \dot{I}_0 \quad (5.52)$$

$$\dot{U}_o = Z_{C_x} \cdot \dot{I}_x = \frac{1}{j\omega C_x} \cdot \dot{I}_x \quad (5.53)$$

$$\dot{I}_0 + \dot{I}_x = 0 \quad (5.54)$$

由以上三式联立解得：

$$\dot{U}_o = -\frac{C_0}{C_x} \dot{U}_i \quad (5.55)$$

式中的“—”号说明输出电压与输入电压反相。

如果传感器是变极距型平板电容器，则：

$$C_x = \frac{\varepsilon \cdot A}{d} \quad (5.56)$$

将其代入式（5.55），有：

$$\dot{U}_o = -\frac{\dot{U}_i \cdot C_0}{\varepsilon \cdot A} d \quad (5.57)$$

由此可见：输出电压与极板间距成线性关系。

5.2.2 变压器式交流电桥

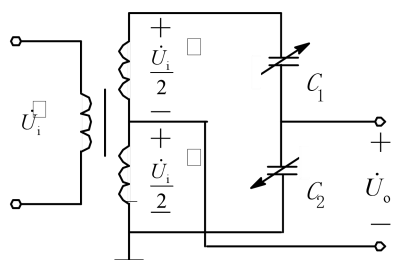


图 5.12 变压器式交流电桥

变压器式交流电桥测量电路如图 5.12 所示。电桥两臂 C_1 、 C_2 为差动电容式传感器，另外两臂为交流变压器次级线圈阻抗的一半。当负载阻抗（如放大器）为无穷大时，电桥的输出电压为：

$$\dot{U}_o = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \cdot \frac{\dot{U}_i}{2} \quad (5.59)$$

如果 C_1 、 C_2 为变极距型电容式传感器，则有：

$$\dot{U}_o = \pm \frac{\Delta d}{d_0} \cdot \frac{\dot{U}_i}{2} \quad (5.62)$$

式中， d_0 —初始时平板电容式传感器的极板间距。

由此可见，在放大器输入阻抗极大的情况下，输出电压与位移成线性关系。

5.2.4 二极管双 T 型交流电桥

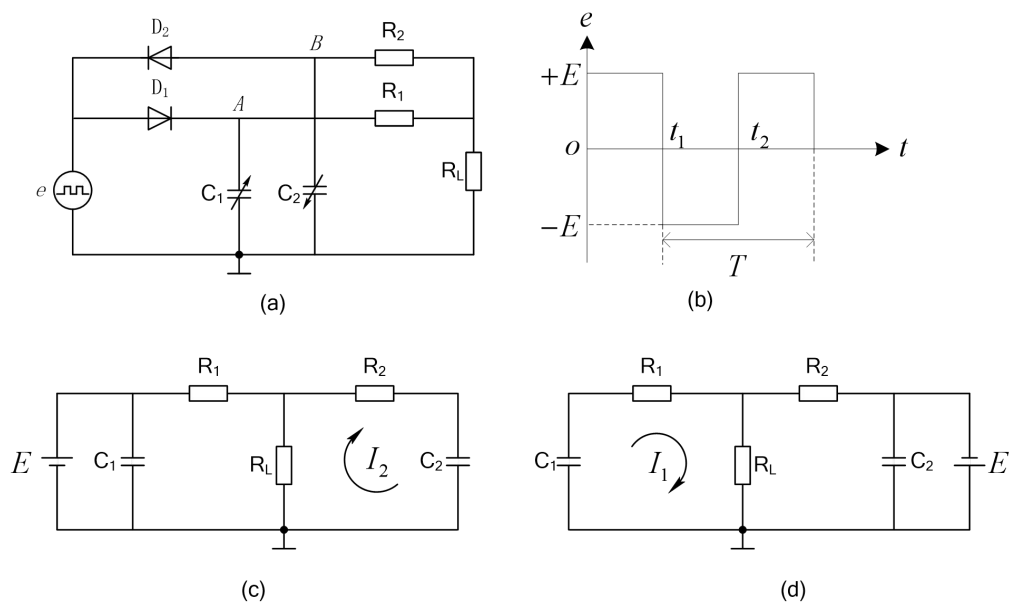


图 5.13 二极管双 T 型交流电桥

二极管双 T 型交流电桥如图 5.13 所示。高频电源 e 提供幅值为 E 的方波，如图 5.13(b) 所示， D_1 、 D_2 为两个特性完全相同的二极管， $R_1 = R_2 = R$ ， C_1 、 C_2 为两个差动电容式传

感器。

(1) 当传感器没有输入时 ($C_1 = C_2$)

电路工作原理：当电源 e 为正半周时， D_1 导通、 D_2 截止，即对电容 C_1 充电，其等效电路如图 5.13 (c) 所示。然后在负半周时，电容 C_1 上的电荷通过电阻 R_1 、负载电阻 R_L 放电，流过负载的电流为 I_1 。在负半周内， D_2 导通， D_1 截止，对电容 C_2 充电，其等效电路如图 5.13 (d) 所示。随后出现正半周时， C_2 通过电阻 R_2 、负载电阻 R_L 放电，流过 R_L 的电流为 I_2 。

根据上述条件，则电流 $I_1 = I_2$ ，且方向相反，在一个周期内流过 R_L 的平均电流为 0。

(2) 当传感器有输入时 ($C_1 \neq C_2$)

此时， $I_1 \neq I_2$ ， R_L 上必定有信号输出，其输出在一个周期内的平均值为(推导过程略)：

$$\begin{aligned} U_0 = I_L R_L &= \frac{1}{T} \int_0^T [I_1(t) - I_2(t)] dt \cdot R_L \\ &\approx \frac{R(R + 2R_L)}{(R + R_L)^2} \cdot R_L \cdot E \cdot f \cdot (C_1 - C_2) \quad (5.63) \end{aligned}$$

式中：

f — 电源频率。

可知：输出电压 U_0 不仅与电源电压的幅值和频率有关，也与 T 型网络中的电容 C_1 、 C_2 的差值有关。当电源确定后（即电压的幅值 E 和频率 f 确定），输出电压 U_0 就是电容 C_1 、 C_2 的函数。

5.2.5 脉冲宽度调制电路

脉冲宽度调制电路如图 5.14 所示。图中 C_1 、 C_2 为差动电容式传感器，电阻 $R_1 = R_2$ ， A_1 、 A_2 为比较器。双稳态触发器的两个输出 Q 、 $\bar{Q}$ 产生反相的方波脉冲电压。

双稳态触发器在某一状态有： $Q=1$ （高电平）、 $\bar{Q}=0$ （低电平），此时，A 点高电位， u_A （即触发器输出的高电平）经 R_1 对电容 C_1 充电，使 u_M 升高。充电过程可用下式描述：

$$u_M = u_A \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \quad (5.66)$$

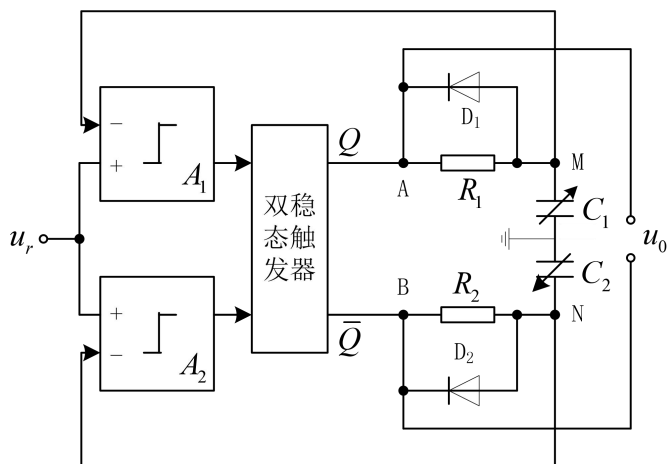


图 5.14 脉冲宽度调制电路原理图

当忽略双稳态触发器的输出电阻，并认为二极管 D_1 的反向电阻无穷大时，式 (5.66) 中的充电时间常数（即达到最终稳态值的 63.2% 所需的时间）为 $\tau_1 = R_1 C_1$ 。如果 $t \ll \tau_1$ ，则有：

$$u_M = \frac{u_A}{\tau_1} \cdot t \quad (5.67)$$

充电直到 M 点电位高于参比电位 u_r ，即 $u_M > u_r$ ，比较器 A_1 输出正跳变信号，激励触发器翻转，将使 $Q = 0$ （低电平）、 $\bar{Q} = 1$ （高电平），这时 A 点为低电位， C_1 通过 D_1 迅速放电至 0 电平；与此同时，B 点为高电位，通过 R_2 对 C_2 充电，充电过程类似如式 (5.66) 描述，但时间常数变为 $\tau_2 = R_2 C_2$ ，直至 N 点电位高于参比电位 u_r ，即 $u_N > u_r$ ，使比较器 A_2 输出正跳变信号，激励触发器发生翻转，重复前述过程。如此周而复始， Q 和 $\bar{Q}$ 端（即 A、B 两点间）输出方波。

由式 (5.66) 可得：

$$t = \tau_1 \ln \frac{u_A}{u_A - u_M} = R_1 C_1 \ln \frac{u_A}{u_A - u_M} \quad (5.68)$$

因此，对电容 C_1 、 C_2 分别充电至 u_r 时所需的时间分别为：

$$T_1 = R_1 C_1 \ln \frac{u_A}{u_A - u_r} \quad (5.69)$$

$$T_2 = R_2 C_2 \ln \frac{u_B}{u_B - u_r} = R_2 C_2 \ln \frac{u_A}{u_A - u_r} \quad (5.70)$$

当差动电容 $C_1 = C_2$ 时（初始平衡态），由于 $R_1 = R_2$ ，因此， $T_1 = T_2$ ，两个电容器的充电过程完全一样，A、B 间的电压 u_{AB} 为对称的方波，其直流分量（平均电压值）为 0（对应的各点波形如图 5.15（a）所示）。

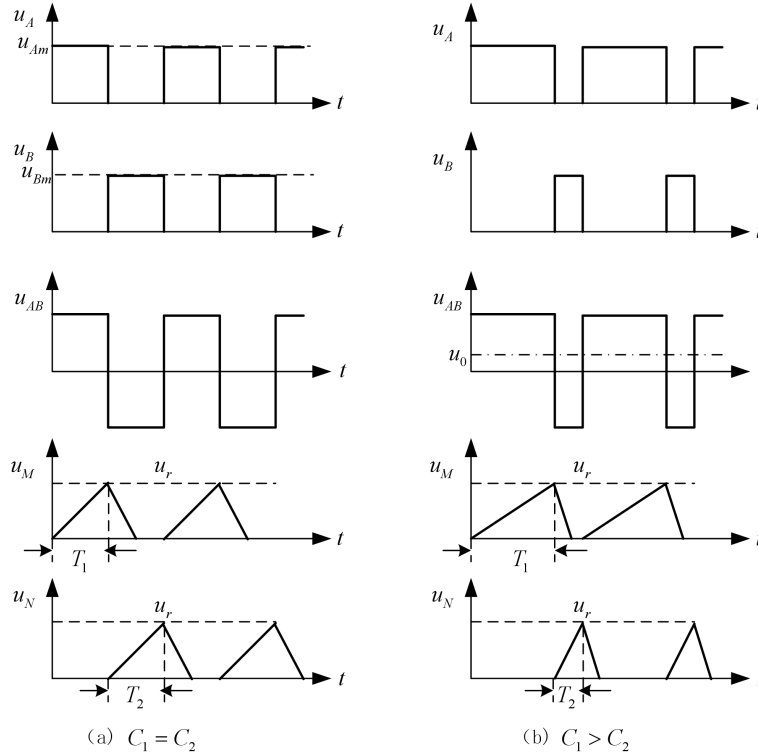


图 5.15 脉冲宽度调制波形

当差动电容 $C_1 \neq C_2$ 时，假设 $C_1 > C_2$ ，则 C_1 充电过程的时间要延长、 C_2 充电过程的时间要缩短，导致时间常数 $\tau_1 > \tau_2$ ，此时 u_{AB} 的方波不对称，各点的波形如图 5.15（b）所示。

当矩形电压波通过低通滤波器后，可得出 u_{AB} 的直流分量（平均电压值）不为 0，而应为：

$$u_0 = (u_{AB})_{DC} = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} u_m \quad (5.72)$$

下面分析对于平板电容的情形。

(1) 对于变极距型

如果采用差动电容，无输入时 $C_1 = C_2 = C_0$ ，即 $d_1 = d_2 = d_0$ ， $u_0 = 0$ ；有输入时，假

设 $C_1 > C_2$ ，即 $d_1 = d_0 - \Delta d$ ， $d_2 = d_0 + \Delta d$ ，则：

$$u_0 = +\frac{\Delta d}{d_0}u_m \quad (5.74)$$

对于 $C_1 < C_2$ ，即 $d_1 = d_0 + \Delta d$ ， $d_2 = d_0 - \Delta d$ ，则：

$$u_0 = -\frac{\Delta d}{d_0}u_m \quad (5.75)$$

可见： u_0 与 Δd 为线性关系（区别于前面分析变极距型电容式传感器得出的 ΔC 与 Δd 间的非线性关系）。

(2) 对于变面积型

如果 $C_1 > C_2$ ，即 $A_1 = A_0 + \Delta A$ ， $A_2 = A_0 - \Delta A$ ，则：

$$u_0 = +\frac{\Delta A}{A_0}u_m \quad (5.76)$$

同样地，对于 $C_1 < C_2$ ，即 $A_1 = A_0 - \Delta A$ ， $A_2 = A_0 + \Delta A$ ，则可推得：

$$u_0 = -\frac{\Delta A}{A_0}u_m \quad (5.77)$$

可见： u_0 与 ΔA 为线性关系。

综上所述，差动脉冲宽度调制电路适用于变极距型和变面积型差动电容式传感器，且为线性特性。

知识点 6 典型应用

电容式传感器广泛用于压力、位移、加速度、厚度、振动、液位等测量中。

5.3.1 电容式压力传感器

图 5.16 为差动电容式压力传感器结构图。它由一个膜片动电极和两个在凹形玻璃上电镀成的固定电极组成差动电容器。差动结构的好处在于灵敏度更高、非线性得到改善。

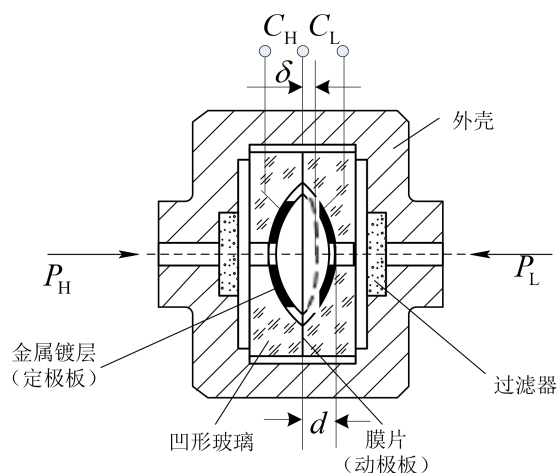


图 5.16 差动电容式压力传感器结构

当被测压力作用于膜片并使之产生位移时，使两个电容器的电容量一个增加、一个减小，该电容值的变化经测量电路转换成电压或电流输出，它反映了压力的大小。

可推导得出：

$$\frac{C_L - C_H}{C_L + C_H} = K \cdot (P_H - P_L) = K \cdot \Delta P \quad (5.82)$$

式中：\$K\$ — 与结构有关的常数。

式 (5.82) 表明 \$\frac{C_L - C_H}{C_L + C_H}\$ 与差压成正比，且与介电常数无关，从而实现了差压—电容

的转换。

5.3.2 电容式位移传感器

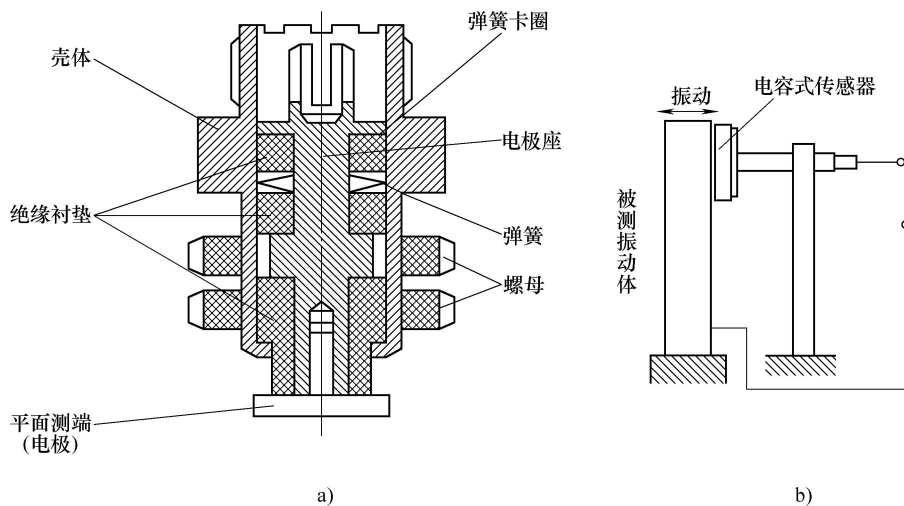


图 5.17 电容式振动位移传感器

(a) 结构

(b) 应用

图 5.17 (a) 是一种单电极的电容振动位移传感器。它的平面测端作为电容器的一个极板，通过电极座由引线接入电路，另一个极板由被测物表面构成。金属壳体与测端电极间有

绝缘衬垫使彼此绝缘。工作时壳体被夹持在标准台架或其他支承上，壳体接大地可起屏蔽作用。当被测物因振动发生位移时，将导致电容器的两个极板间距发生变化，从而转化为电容器的电容量的改变来实现测量。图 5.17 (b) 是电容振动位移传感器的一种应用示意图。

5.3.3 电容式加速度传感器

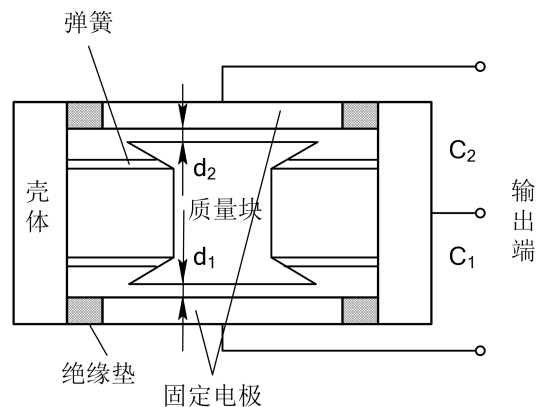


图 5.18 差动电容式加速度传感器结构

图 5.18 为差动电容式加速度传感器结构图。它有两个固定极板，中间的质量块的两个端面作为动极板。

当传感器壳体随被测对象在垂直方向作直线加速运动时，质量块因惯性相对静止，因此将导致固定电极与动极板间的距离发生变化，一个增加、另一个减小。经过推导可得到：

$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx 2 \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{at^2}{d_0} \quad (5.85)$$

由此可见，此电容增量正比于被测加速度。

5.3.4 电容式厚度传感器

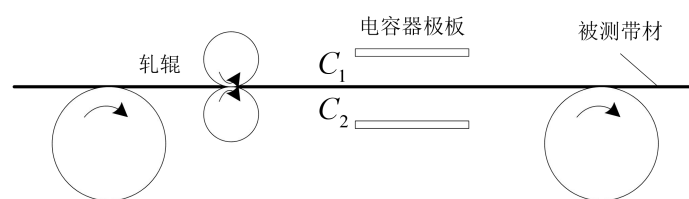


图 5.19 电容式传感器测量厚度原理图

电容式厚度传感器用于测量金属带材在轧制过程中的厚度，其原理如图 5.19 所示。在被测带材的上下两边各放一块面积相等、与带材中心等距离的极板，这样，极板与带材就构成两个电容器（带材也作为一个极板）。用导线将两个极板连接起来作为一个极板，带材作为电容器的另一极，此时，相当于两个电容并联，其总电容 $C = C_1 + C_2$ 。

金属带材在轧制过程中不断前行，如果带材厚度有变化，将导致它与上下两个极板间的距离发生变化，从而引起电容量的变化。将总电容量作为交流电桥的一个臂，电容的变化将

使得电桥产生不平衡输出，从而实现对带材厚度的检测。

第 5 章 磁敏式与压电式传感器

本章主要内容

本章重点讲述磁电感应式与压电式传感器的结构原理、外特性、主要参数及其物理意义，工作状态的分析。

首先介绍磁电感应式传感器的组成、特性、分类及命名、常用磁电感应式传感器主要参数；再介绍电容式传感器工作特性及典型应用。

本章课时分配 本章分为 6 讲，共 12 学时。

5.1 磁敏式与压电式传感器

教学目标：

了解磁电感应式与压电式传感器的定义、组成、分类，典型应用。

课程思政：

案例 6：走近科学——蓝光 LED 技术

结合光电传感技术，通过向读者科普诺贝尔物理学奖蓝光 LED，介绍蓝光 LED 技术的广泛应用，增进学生对传感器的深入了解，培养学生的工程师品质。

教学重点

1. 磁电感应式与压电式传感器的组成；
2. 磁电感应式与压电式传感器的分类。

教学难点

1. 磁电感应式与压电式传感器的性能及应用；
2. 磁电感应式与压电式传感器的应用技术；

教学手段：讲授

教学组织过程

课堂讲授。应用多媒体从传感器的定义入手，讲授磁电感应式传感器是利用导体和磁场发生相对运动而在导体两端输出感应电动势的原理进行工作的。它是一种机—电能量变换型传感器，属于有源传感器。

磁电感应式传感器适用于转速、振动、位移、扭矩等测量。

主要内容

知识点 1 磁敏式传感器概念

对磁场参量（如磁感应强度 B 、磁通 ϕ ）敏感、通过磁电作用将被测量（如振动、位移、转速等）转换为电信号的器件或装置称为磁敏式传感器。磁电作用主要分为电磁感应和霍尔效应两种情况，相应的磁敏式传感器主要有利用电磁感应的磁电感应式传感器和利用霍尔效应的霍尔式传感器两种。

知识点 2 磁电感应式传感器的概念

磁电感应式传感器是利用导体和磁场发生相对运动而在导体两端输出感应电动势的原理进行工作的。它是一种机—电能量变换型传感器，属于有源传感器。

磁电感应式传感器适用于转速、振动、位移、扭矩等测量。

知识点 3 电磁感应

当导体在稳定均匀的磁场中，沿着垂直于磁场方向作切割磁力线运动时，导体内将产生感应电动势。对于一个 N 匝的线圈，设穿过线圈的磁通为 ϕ ，则线圈内的感应电动势将与 ϕ 的变化速率成正比，即：

$$E = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (7.1)$$

式中的“—”表明感应电动势的方向。如果线圈相对于磁场的运动线速度为 v 或角速度 ω ，则式 (7.1) 可改写为：

$$E = -NBLv \quad (7.2)$$

或：

$$E = -NBS\omega \quad (7.3)$$

式中：

B — 线圈所在磁场的磁感应强度

L — 每匝线圈的平均长度

S — 每匝线圈的平均截面积。

知识点 4 磁电感应式传感器的分类

1) 恒磁通式传感器

恒磁通式传感器是指在测量过程中使导体（线圈）位置相对于恒定磁通 ϕ 变化而实现测量的一类磁电感应式传感器，如图 7.1 所示。分成动圈式和动铁式两种结构类型，分别如图 7.1 (a) 和图 7.1 (b) 所示。

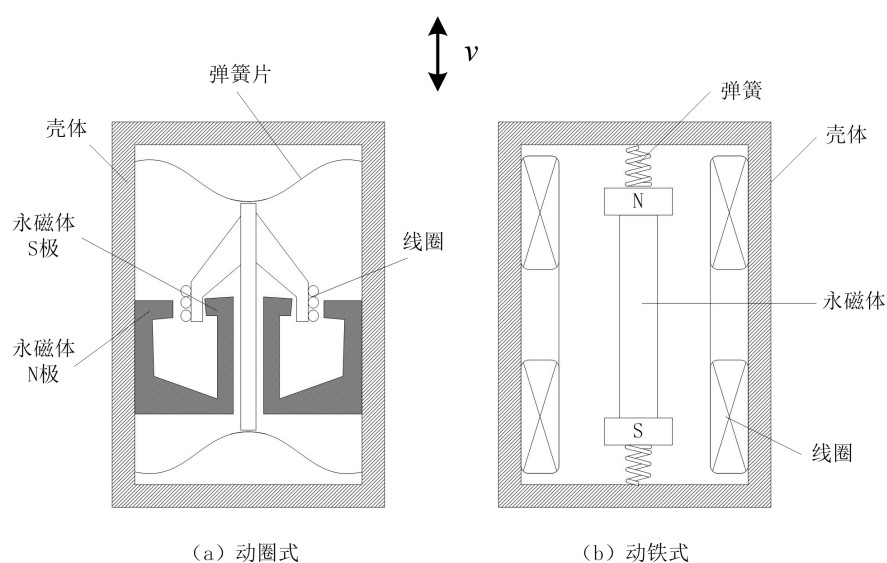


图 7.1 恒磁通磁电感应式传感器结构

2) 变磁通式传感器

变磁通式传感器主要是靠改变磁路的磁通 ϕ 大小来进行测量,即通过改变测量磁路中气隙的大小改变磁路的磁阻,从而改变磁路的磁通。变磁通磁电感应式传感器的结构原理如图7.2所示。

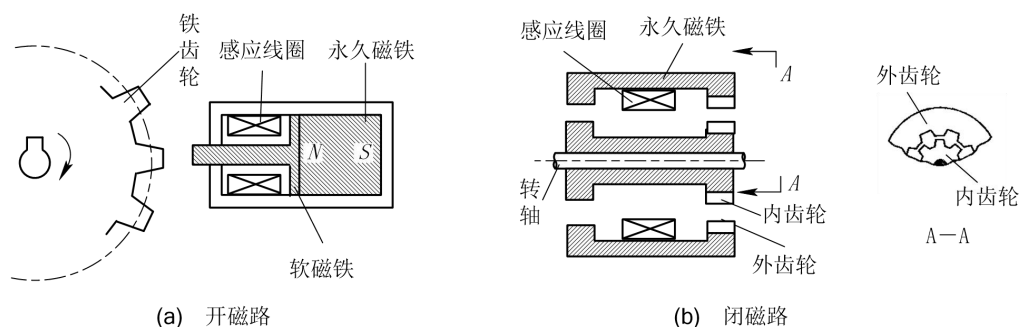


图 7.2 变磁通磁电感应式传感器结构

变磁通磁电感应式传感器可分为开磁路和闭磁路两种结构。

知识点 5 基本特性

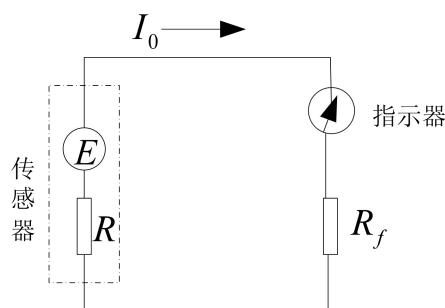


图 7.3 磁电感应式传感器测量等效电路

当磁电感应式传感器接入测量电路时(如图7.3所示),磁电感应式传感器的输出电流 I_o 为:

$$I_o = \frac{E}{R + R_f} = \frac{NBLv}{R + R_f} \quad (7.5)$$

式中:

R_f — 测量电路输入电阻

R — 线圈等效电阻。

传感器的电流灵敏度为:

$$S_i = \frac{I_o}{v} = \frac{NBL}{R + R_f} \quad (7.6)$$

传感器的输出电压和电压灵敏度分别为:

$$U_o = I_o R_f = \frac{NBLvR_f}{R + R_f} \quad (7.7)$$

$$S_U = \frac{U_o}{v} = \frac{NBLR_f}{R + R_f} \quad (7.8)$$

由电流和电压灵敏度公式可知： B 值大，灵敏度 S 也大，因此要选用 B 值大的永磁材料；线圈的平均长度 L 大也有助于提高灵敏度 S ，但这是有条件的（因为 L 增加使 R 也增加），要考虑两种情况：

- 1) 线圈电阻与指示器电阻匹配问题
- 2) 线圈的发热问题

知识点 6 测量电路

磁电感应式传感器可以直接输出感应电势信号，且磁电感应式传感器通常具有较高的灵敏度，所以不需要高增益放大器。但磁电感应式传感器只用于测量动态量，可以直接测量振动物体的线速度 $v = \frac{dx}{dt}$ 或旋转体的角速度。如果在其测量电路中接入积分电路或微分电路，那么还可以测量位移或加速度。图 7.5 是磁电感应式传感器的一般测量电路方框图。

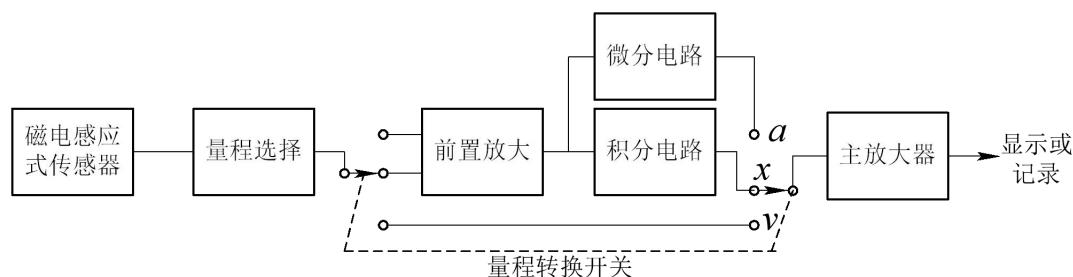


图 7.5 磁电感应式传感器一般测量电路

知识点 7 磁电感应式传感器的应用

(1) 磁电感应式振动速度传感器

图 7.6 是动圈式恒磁通振动速度传感器结构示意图，其结构主要由钢制圆形外壳制成，里面用铝支架将圆柱形永久磁铁与外壳固定成一体，永久磁铁中间有一个小孔，穿过小孔的芯轴两端架起线圈和阻尼环，芯轴两端通过圆形膜片支撑架空且与外壳相连。

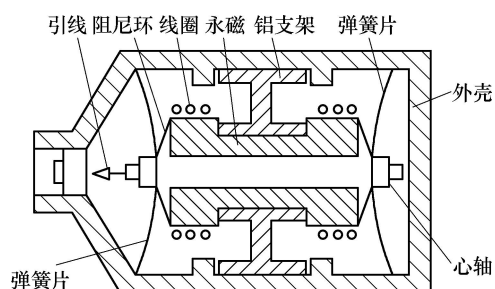


图 7.6 动圈式振动速度传感器结构

工作时，传感器与被测物体刚性连接，当物体振动时，传感器外壳和永久磁铁随之振动，而架空的芯轴、线圈和阻尼环因惯性而不随之振动。这样，磁路气隙中的线圈切割磁力线而产生正比于振动速度的感应电动势，线圈的输出通过引线送到测量电路。该传感器测量的是振动速度参数，如果在测量电路中接入积分电路，则输出电势与位移成正比；如果在测量电路中接入微分电路，则其输出与加速度成正比。

(2) 电磁流量计

电磁流量计是根据电磁感应原理制成的一种流量计，用来测量导电液体的流量，属于恒磁通式。电磁流量计的工作原理如 7.8 所示，它由产生均匀磁场的磁路系统、用不导磁材料制成的管道及在管道横截面上的导电电极组成。要求磁场方向、电极连线和管道轴线三者在空间上互相垂直。

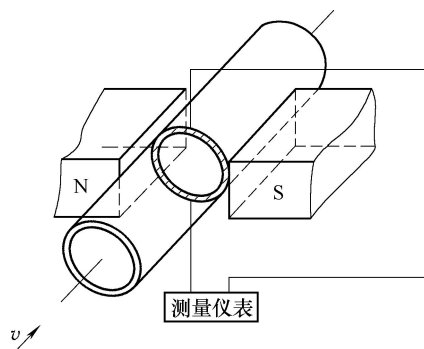


图 7.8 电磁流量计原理图

当被测导电液体流过管道时，切割磁力线，在和磁场及流动方向垂直的方向上产生感应电动势 E ，其值与被测流体的流速成正比，即：

$$E = BDv \quad (7.13)$$

式中：

B — 磁感应强度 (T)；

D — 管道内径 (m)；

v — 流体的平均流速 (m/s)。

相应地，流体的体积流量可表示为：

$$q_v = \frac{\pi D^2}{4} v = \frac{\pi D E}{4 B} = K \cdot E \quad (7.14)$$

式中：

$K = \frac{\pi D}{4 B}$ — 仪表常数，对于某一个确定的电磁流量计，该常数为定值。

知识点 7 霍尔效应

当载流导体或半导体处于与电流相垂直的磁场中时，在其两端将产生电位差，这一现象

被称为霍尔效应。霍尔效应产生的电动势被称为霍尔电势。霍尔效应的产生是由于运动电荷受磁场中洛伦兹力作用的结果。

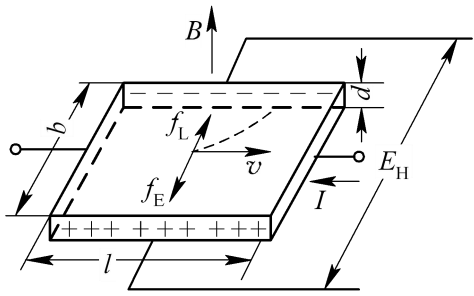


图 7.10 霍尔效应原理图

如图 7.10 所示，在一块长度为 l 、宽度为 b 、厚度为 d 的长方形导电板上，两对垂直侧面各装上电极，如果在长度方向通入控制电流 I ，在厚度方向施加磁感应强度为 B 的磁场时，那么导电板中的自由电子在电场作用下定向运动，此时，每个电子受到洛伦兹力 f_L 的作用， f_L 大小为：

$$f_L = eBv \quad (7.15)$$

式中：

e —单个电子的电荷量， $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ ；

B —磁场感应强度；

v —电子平均运动速度。

电子除了沿电流反方向作定向运动外，还在 f_L 作用下向里飘移，结果在导电板里底面积累了电子，而外表面积累了正电荷，将形成附加内电场 E_H ，称为**霍尔电场**。当在金属体内电子积累达到动态平衡时，电子所受洛伦兹力和电场力大小相等，即 $eE_H = eBv$ ，因此有：

$$E_H = vB \quad (7.16)$$

则相应的电动势就称为霍尔电势 U_H ，其大小可表示为：

$$U_H = E_H b \quad (7.17)$$

式中：

b —导电板宽度。

当电子浓度为 n ，电子定向运动平均速度为 v 时，对于不同的材料，可得出表 7-1 所示霍尔效应的特征量。

表 7-1 不同半导体材料霍尔效应的特征量

特征量 \ 半导体材料	N 型	P 型
电流 I	$-nevbd$	$nevbd$

霍尔电动势 U_H	$-\frac{IB}{ned}$	$\frac{IB}{ned}$
霍尔系数 R_H	$-\frac{1}{ne}$	$\frac{1}{ne}$
霍尔灵敏度 K_H	$-\frac{1}{ned}$	$\frac{1}{ned}$

霍尔电势与霍尔系数或霍尔灵敏度的关系可表示为：

$$U_H = R_H \frac{IB}{d} = K_H IB \quad (7.19)$$

霍尔灵敏度 K_H 表征了一个霍尔元件在单位控制电流和单位磁感应强度时产生的霍尔电动势的大小。

式 (7.19) 给出的霍尔电动势是用控制电流来表示的，在霍尔器件的使用中，电源是一常量 U_C ，由于 $U_C = E \cdot l$ ，而载流子在电场中的平均迁移速度为：

$$v = \mu E \quad (7.20)$$

式中：

μ —在单位电场强度下，载流子的迁移速率。

联立式 (7.18) 和式 (7.20)，得：

$$U_H = \frac{\mu b U_C B}{l} \quad (7.21)$$

由上面的推导可知，霍尔电势正比于激励电流、电压 U_C 及磁感应强度 B 外，还与材料的载流子迁移率及器件的宽度 b 成正比，与器件长度 l 成反比。其灵敏度与霍尔系数 R_H 成正比而与霍尔元件厚度 d 成反比。

为了提高霍尔式传感器的灵敏度，霍尔元件常制成薄片形状，一般来说霍尔元件的厚度 $d = 0.1 \sim 0.2\text{mm}$ （通常 $b = 4\text{mm}$ ， $l = 2\text{mm}$ ），薄膜型霍尔元件的厚度只有 $1\mu\text{m}$ 左右。根据表 7-1 的灵敏度定义可以知道霍尔元件的灵敏度与载流子浓度成反比，由于金属的自由电子浓度过高，所以不适于用来制作霍尔元件。制作霍尔元件一般采用 N 型半导体材料。

知识点 8 霍尔元件

1) 霍尔元件基本结构

霍尔元件的结构比较简单，它由霍尔元件、4 根引线和壳体三部分组成。霍尔元件是一块矩形半导体单晶薄片，在长度方向焊有两根控制电流端引线 a 和 b，它们在薄片上的焊点称为**激励电极**；在薄片另两侧端面的中央以点的形式对称地焊有 c 和 d 两根输出引线，它们在薄片上的焊点称为**霍尔电极**。霍尔元件的外形、结构和电路符号如图 7.11 所示。

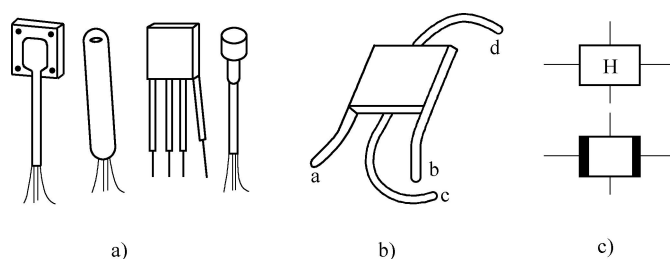


图 7.11 霍尔元件及符号

(a) 外形 (b) 结构 (c) 符号

2) 霍尔元件基本特性

①线性特性与开关特性

霍尔元件分为线性特性和开关特性两种。线性特性是指霍尔元件的输出电动势 U_H 分别和基本参数 I 、 B 成线性关系。开关特性是指霍尔元件的输出电动势 U_H 在一定区域随 B 的增加迅速增加的特性。

②不等位电阻 r_0

表示未加磁场时，不等位电动势与相应电流的比值。**产生不等位电阻的原因：**（a）霍尔电极安装位置不对称或不在同一等电位上；（b）半导体材料不均匀造成了电阻率不均匀或几何尺寸不对称；（c）激励电极接触不良造成激励电流不均匀分配。

③负载特性

当霍尔电极间接有负载时，由于要流过霍尔电流，故在其内阻上产生压降，实际的霍尔电动势比理论值略小。这就是霍尔元件的负载特性。

④温度特性

通常，温度对半导体材料有较大的影响，用半导体材料制作的霍尔元件也不例外。霍尔元件的温度特性包括霍尔电动势、灵敏度、输入阻抗和输出阻抗的温度特性，它们归结为霍尔系数和电阻率与温度的关系。

3) 霍尔元件的误差及其补偿

①霍尔元件的零位误差及补偿

霍尔元件的零位误差主要包括不等位电动势和寄生直流电动势。

• 不等位电动势及其补偿

不等位电动势误差是零位误差中最主要的一种，它与霍尔电势具有相同的数量级，有时候甚至会超过霍尔电势。但在霍尔式传感器实际使用过程中，其不等位电动势误差是很难消除的，一般采用的方法是利用补偿的原理来消除不等位电动势误差的影响。霍尔元件可以等效为一个四臂电桥，当存在不等位电阻时，说明电桥不平衡，四个电阻值不相等。为了使电桥平衡，可以采用两种补偿方法。第一，在电桥阻值较大的桥臂上并联电阻，这种补偿方式相对简单，被称为不对称补偿。第二，在两个桥臂上同时并联电阻，这种补偿方式被称为对称补偿，其补偿的温度稳定性较好。

- 寄生直流电动势及其补偿

当霍尔元件的电极的焊点不是完全的欧姆接触、霍尔电极的焊点大小不等、热容量不同时,就会产生寄生直流电动势。寄生直流电动势与工作电流有关,随工作电流减小而减小。因此要求在元件制作和安装时,应尽量使电极欧姆接触,并做到散热均匀。

②霍尔元件的温度误差及其补偿

一般半导体材料都具有较大的温度系数。所以当温度发生变化时,霍尔元件的载流子浓度、迁移率、电阻率以及霍尔系数都会发生变化。为了减小温度误差,除了使用温度系数小的半导体材料(如砷化镓)外,还可以采用适当的补偿电路来进行补偿。

知识点 9 测量电路

霍尔式传感器的基本测量电路如图 7.15 所示,电源 E 提供激励电流,可变电阻 R_p 用于调节激励电流 I 的大小, R_L 为输出霍尔电势 U_H 的负载电阻,一般用于表征显示仪表、记录装置或放大器的输入阻抗。

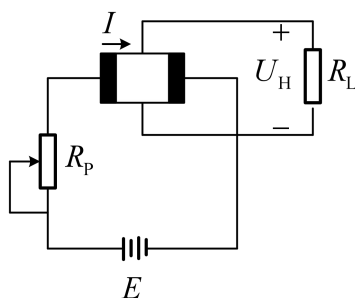


图 7.15 霍尔式传感器的基本测量电路

知识点 10 霍尔式传感器的应用

(1) 微位移的测量

如图 7.16 所示,在极性相反、磁场强度相同的两个磁钢气隙中放入一片霍尔元件,当霍尔元件处于中间位置时,霍尔元件同时受到大小相等、方向相反的磁通作用,则有 $B = 0$,此时霍尔电势 $U_H = 0$;当霍尔元件沿着 $\pm Z$ 方向移动时,有 $B \neq 0$,则霍尔电势发生变化,为:

$$U_H = K_H IB = K \Delta Z \quad (7.32)$$

式中:

K —霍尔式位移传感器的输出灵敏度。

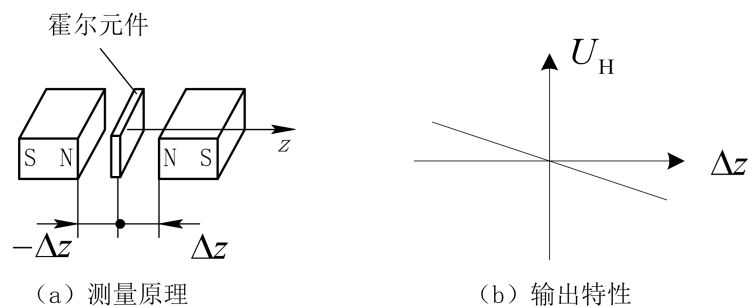


图 7.16 微位移测量原理及其输出特性

可见霍尔电势与位移量 ΔZ 成线性关系，并且霍尔电势的极性还会反映霍尔元件的移动方向。

(2) 转速的测量

利用霍尔元件的开关特性可以实现对转速的测量，如图 7.17 所示，将被测非磁性材料的旋转体上粘贴一对或多对永磁体，其中图 7.17(a) 是永磁体粘在旋转体盘面上，图 7.17(b) 是永磁体粘在旋转体盘侧。导磁体霍尔元件组成的测量头，置于永磁体附近，当被测物以角速度 ω 旋转，每个永磁体通过测量头时，霍尔器件上就会产生一个相应的脉冲，测量单位时间内的脉冲数目，就可以推出被测物的旋转速度。

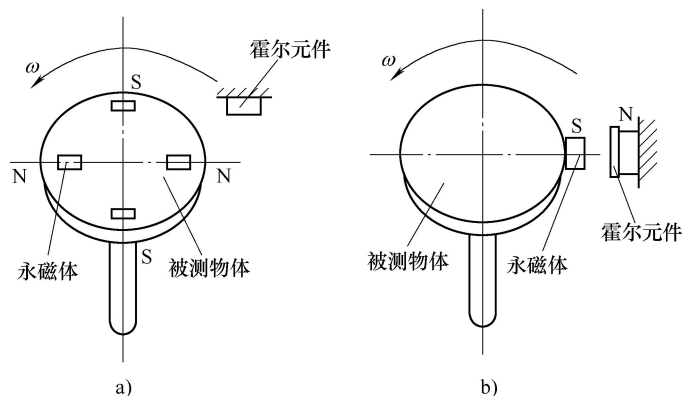


图 7.17 霍尔式传感器转速测量原理

(a) 永磁体位于旋转体盘面 (b) 永磁体位于旋转体侧

设旋转体上固定有 n 个永磁体，则采样时间 t (单位: s) 内霍尔元件送入数字频率计的脉冲数为 N 。则转速 (单位: 转每秒) 为:

$$r = \frac{N/n}{t} = \frac{N}{t \cdot n} \quad (\text{r/s}) \quad (7.33)$$

第6章 光电传感器的应用

本章主要内容

本章重点讲述光电式传感器的结构原理、外特性、主要参数及其物理意义，工作状态的分析。

首先介绍构成传感器的组成、特性、分类及命名、常用传感器主要参数；再介绍传感器工作特性及典型应用。

本章课时分配 本章分为5讲，共10学时。

6.1 基于光电式传感器的烟雾报警设计

教学目标：

了解光电式传感器的原理、选用、识别及测试方法。

课程思政：

案例7：走近科学——感光元件 CCD

通过向读者科普诺贝尔物理学奖感光元件 CCD，结合图像传感器，介绍 CCD 在数码相机的广泛使用，增进学生对传感器的深入了解，培养学生的工程师品质。

教学重点：

1. 光电式传感器的原理、识别与测试

教学难点

光电效应原理，光电式传感器的识别与测试；

教学手段：讲授+实验

教学组织过程

本讲教师在传感器实验室一体化讲授。探索理论知识和技能训练一体化的模式，把学生对理论知识的理解通过实践体验来印证和加深理解。

1. 讲述

本节课程主要讲授光电式传感器的原理及使用，和光纤式传感器的原理及使用，通过实际测量操作，从感性上认识和体验常用光电式传感器的识别与测试方法。

2. 实验

- (1) 把同学们带到实验室或项目室，安排大家坐下并保持安静；
- (2) 找课代表等几位同学到实验室仓库领元器件和电路板；
- (3) 分发光电传感器、单片机控制板等；
- (4) 按照<实验进程安排>操作
- (5) 现场指导同学们接线、测试过程
- (6) 提示同学们观察光电式传感器的工作原理、应用环境及使用效果。

3. 故障分析

在实验过程中，及时发现同学们在遇到的故障，并进行现场分析问题。这些问题有的是个性，有的具有普遍性，都需要老师现场处理；然后，再指导其他同学避免。

课后，对这些的故障现象进行归纳，补充备课内容，在<点评实验报告>课上逐一评价。

4. 收缴实验报告

5. 点评实验报告

6.2 基于光电式传感器的电机转速设计

教学目标：

了解光电式编码器原理、选用、识别及测试方法。

课程思政：

案例 8：红色记忆——永不消逝的电波

通过向读者回忆一下红色故事《永不消逝的电波》，结合电磁波传感技术，展示通讯技术在新中国成立所做出的突出贡献，激发学生的爱国情怀，增进对革命先驱的了解，培养学生的工程师品质。

教学重点：

1. 光电式编码器的原理、识别与测试

教学难点：

编码器的原理，选型及应用；

教学手段：讲授

教学组织过程：

知识点 1：

光电式编码器分类：码盘式和脉冲盘

编码器的工作原理及工作过程

编码器的选型及应用。

知识点 2：

光栅的工作原理及工作过程

光栅的组成及应用。