

教 案

2025-2026 学年第一学期

课程名称 传感器技术与应用

专业班级 电气自动化 241、241 (3+)

总学时数 72 学时

任课教师 陈炳文

课程基本信息

课程名称	传感器技术与应用			
课程性质	专业课	学分	4	
学 时	总学时：72 学时 其中：课堂讲授 36 学时； 课内实验 36 学时			
开课部门	机电工程系	任课教师	陈炳文	
授课专业、班级	电气自动化 241、241（3+）	开课学期	2025-2026 第一学期	
成绩评定	平时成绩占 <u>30</u> %；期末成绩占 <u>70</u> %	考核方式	考试	
选用教材	书 名	主 编	出版社	出版日期
	传感器技术及应用	林若波	清华大学出版社	2022. 09
本课程在本专业人才培养方案中的地位和作用	《传感器技术及应用》课程是电气自动化专业的一门必修专业课，是学生学习和掌握传感器技术、电气传动与控制知识的主要途径。			
本课程教学目标	通过本课程的教学，使学生了解传感器技术的一般原理和基础知识，掌握分析、设计和使用传感器技术系统和装置、器件的基本技能，获得工程师必备的知识储备和技能训练。			
课程思政参考资料	案例 1、案例 2、案例 3、案例 4			

课程思政案例 1

勤奋与创新成就高铁工人卓越梦想

——记中国北车长春轨道客车股份有限公司维修电工罗昭强

对话罗昭强时，他从容谈笑间总有惊人之语——

“不论你做什么工作，都要往前多看几步。”

“只有做和别人不一样的人，才能成就和别人不一样的事。”

“耐不住寂寞不行，人生就是修炼自己的过程，很多事要看开。”

“坚持住你的兴趣爱好，做一个虔诚的追梦者，就是一种素养”……

和这样的智者交流，是一次愉悦的心灵之旅。有如此见识与胸襟，难怪他会从一名普通的维修电工，成长为中国北车集团资深专家、长春轨道客车股份有限公司首席操作师。

“其实，当时我也背负着很大压力。别人都可以说‘我修不了’，唯独我不能说，我没有后路，因为我也修不了的话，设备就要瘫痪。无论如何都要想办法给修上，这是我对自己的要求，是底线。”41岁的罗昭强，摸着一头早生的华发，笑容欣慰，“好在，目前还没遇到我修不了的设备！”

“一个人想要做成点事儿，就必须对自己狠一点”，这是罗昭强的信条。他暗下决心：“要对公司各类设备的故障手到病除，光懂电远远不够，电子、液压、机械、计算机……10多门学科必须全都通晓！”

“坚持住你的兴趣爱好，做一个虔诚的追梦者，是一种素养”，从某种意义上说，罗昭强“天生”就是干维修电工这一行的——孩提时代，他就喜欢把玩具拆了再装；小学5年级时，他修好了家中损坏的台灯；念中学时，他修好了家里的电风扇和老式滚筒洗衣机，他甚至还自己买书、买零件，组装出了几台晶体管收音机。

“我从内心里喜欢、热爱这个行业，做一个出色的职业维修人员，可能是我儿时就有的梦想吧！”罗昭强说，为实现这个梦想，他一直在做一件事——坚持。这种坚持，包括对学习的坚持。无论念书期间，还是参加工作后，当同学们、工友们在业余时间尽情玩乐时，罗昭强却独自泡在书店、图书馆。时至今日，虽早已被奉为“电气大师”，可每逢休息日，他仍要去图书馆，即使是带孩子去参加培训班，他也会在家长休息室里打开随身携带的平板电脑，沉浸于查阅其中各种专业资料，片刻不肯松懈。

2010年6月，长客股份成立了由罗昭强领衔担纲维修电工首席操作师的工作站。为满足公司对高技能人才的迫切需求，罗昭强以该工作站为平台，破除门户，广收弟子，开设了“西门子可编程控制器技术”“变频器原理与维修”“液压技术接力培训”等多个特色培训班，并针对学员队伍的实际情况，设置了普及班、提高班和精英班，因材施教、分层教学。

“罗师傅主持的这个工作站，是人社部命名的‘国家级技能大师工作室’，能在这里得到罗大师的亲自指点，真是太幸运了！”从其他车间慕名而来拜师学艺的刘涛，笑逐颜开：“最近，罗师傅正在全公司范围内选拔‘高徒班’学员，我已经考试入围，马上就能‘更上一层楼’了！”

在罗昭强案头，摆着他集毕生经验编写的《维修电工技能进阶培训教程》，这本厚达470多页的教材，已帮助70余人顺利考取了中国北车高级技师。为实现接力培训，让更多青年工人受益，罗昭强还培养了一个工人讲师团，保证了培训的人才支撑和质量。

课程思政案例 2

德国电机专家斯坦门茨的故事（选编）

20 世纪初期，美国最大的公司——福特公司的一台电动机出现故障，很多人修理了三个月都修不好。在束手无策的情况下，有人向公司推荐了当时已经移居美国的德国科技企业管理专家斯坦门茨。斯坦门茨在电动机旁边仔细观察，并经过两天的计算后，用粉笔在电动机的外壳上画了一条线，说：“打开电动机，将记号所示位置的线圈减少 16 圈。”人们半信半疑地照他的话去做，结果，毛病果真出在那里。电动机修好后，有关人员问他要多少酬金，他说：“一万美元！”啊？一万美元！那人还以为自己听错了呢！于是，他便要求斯坦门茨列一张账单来说明费用的支出明细。斯坦门茨写道：“用粉笔画一条线 1 美元，知道在哪里画这条线 9 999 美元。”账单送到了福特公司老板那里，老板看了后连连点头，很快照付了一万美元，并用重金聘用了他。

课程思政案例 3

埋头做学问的电机专家——高泗玉

2004 年的“海创周”，他作为一个从海外归来的学子，忙碌着参加各场展会，不停地做着记录，认真地考察大连高新区的产业现状和投资环境。通过这一次大连之行，早就对祖国的发展有所耳闻的他，亲眼目睹了国内翻天覆地的变化。“海创周”结束时，他做出了一生中最重要的决定——到大连高新区创业。他，就是曾留学日本的现大连进丰机电有限公司董事长高泗玉。

高泗玉，1987 年 7 月毕业于上海交通大学材料科学与工程专业。毕业后，他到大连起重厂从事技术工作。1994 年 7 月赴日本名古屋大学材料科学与工程专业进修。取得博士学位后，高泗玉先后在国外著名的跨国公司 TRW 及日本的著名电机生产公司从事技术及管理工作。在日本学习期间，他在国际著名杂志发表了十几篇学术论文，获得了日本金属协会杰出论文奖。

2005 年 5 月，高泗玉向公司递交了辞呈。公司多次提出更优厚的条件来挽留他，都被他婉言谢绝。他带着自己的研究成果和创业梦想举家回到大连，在高新区创办了大连进丰机电有限公司（以下简称进丰）。

只顾埋头钻研技术的高泗玉，从不宣传自己和自己的企业，但一讲起他的产品来却滔滔不绝，如数家珍。2006 年，进丰开发了一款无刷微型电机，它采用素子减小集成电路的占空比，在电机原有体积小、能耗低、噪声低、耐用环保等优点的基础上，使能量消耗更低、动作控制更准确，并且能够完成复杂的指令要求。产品一上市就受到客户的喜爱。凭借先进的技术、丰富的生产经验及完善的质量监控体系，公司的产品完全达到国外同类产品的水平，在国内外市场享有盛誉。因此，公司所有产品全部销往国外。

凭借着对科研的执著追求，高泗玉瞄准国际前沿领域的最新研究进展，结合自己的研究特点，走出了一条引进消化吸收再创新的创业之路，使自己的科研水平能始终处于世界前列。他本人也收获了一项项荣誉，2006 年、2007 年连续两年被海外学子创业园评为十佳优秀企业，2007 年被高新园区管委会评为最佳海外学子创业企业，他本人被大连市政府评为归国留学人员创业英才。

如今，当有人问起当年是什么使他放弃在日本的优厚待遇和优越的生活条件时，他说：“回想自己的成长历程，在上大学时就拿国家奖学金，而人要懂得感恩。我能有今天的成就，离不开国家的培养，在国外生活 10 年，想的就是要多学点本领，回国后能做点实事。”

课程思政案例 4

从机械迷到汽车大王——亨利·福特

亨利·福特虽然生长在偏远的密执安农场，但他对农事知之甚少——他很早便显露出新一代美国人的特点，比起农业来，他们对工业更感兴趣。他的父亲威廉姆，如同大多数早期的农场主一样，希望长子能随他务农，扩展农场并继承他的衣钵。而亨利令他感到失望，亨利厌恶农活并想方设法去逃避农场的劳动。这并不是说他懒惰，倘若让他干点机械活，从修门的合叶到磨农具，他都干得很带劲。农场的日常生活和单调重复的劳动使他倍感沮丧。后来他在回忆他的这段农庄生活时写道：“一个人整天跟在一群慢悠悠的马后面，这是对时间多么大的浪费呀。”

亨利对技术发展可能开创的未来兴奋不已，这能使像他父亲一样的农夫从费时和枯燥的辛劳中解脱出来。但在亨利的童年，新型机械的发展几乎根本触及不到农业，而农民们一直延续着由来已久的务农方式。收益低、变化无常的天气和农民们对改变现状的本能抵触都妨碍农民们（有远见者除外）充分利用新型机械。

因此亨利将注意力转向其他方面。他在 12 岁时就对钟表异常着迷。与大多数孩子一样，他痴迷于研究计时器的工作方式及观察棘轮、车轮、弹簧和钟摆的运动。不久他就能在卧室里自己做的长凳上给朋友们修理钟表了。1876 年，蒸汽发动机已成为继钟表后亨利的又一痴迷物。

亨利第一次见到蒸汽驱动的机车是在 1877 年的一天，他和父亲坐在农用马车上。机车司机停下来给他们让路，亨利跳下马车，跑过去问了一连串有关发动机性能的问题。从那天起，亨利便开始对蒸汽发动机如痴如醉。当他 16 岁在底特律的车间干活时，制造和安装发动机就成了他的工作。

由于一次偶然的机，亨利遇到了一位原来的同事，这得以使他在爱迪生底特律电力公司谋到一份工程师的工作，该公司属于电气业——这一新兴行业的中坚。电气时代已经到来，美国的主要城市都在兴建电厂，铺设缆线。尽管亨利很快就学会了新工作中的各种技能，使得他不出四年便成为底特律电厂的总工程师，然而他在生活中仍保持着对燃油发动机的浓厚兴趣。他用晚上的业余时间试图制造出一台他自己设计的发动机。

亨利懂得了靠手工白手起家去制造发动机是一项缓慢、辛苦、困难重重的任务。每种部件的每个部分都要分别制作、检查及调试。制造者要操心和解决每个问题。为了减轻负担，亨利与另一位机械师吉姆·毕晓普一起分工合作。即便如此，他们也是花了两年的时间才造出一辆工作车。这辆车外形笨拙，架在自行车轮子上并靠一根胶皮带将发动机与后车轮相连。亨利戏称它为“四轮驱动脚踏车”。

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：（教学 2 学时）

了解传感器的定义、组成、分类。

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。

课程思政

勤奋与创新成就高铁工人卓越梦想

——记中国北车长春轨道客车股份有限公司维修电工罗昭强

对话罗昭强时，他从容谈笑间总有惊人之语——

“不论你做什么工作，都要往前多看几步。”

“只有做和别人不一样的人，才能成就和别人不一样的事。”

“耐不住寂寞不行，人生就是修炼自己的过程，很多事要看开。”

“坚持住你的兴趣爱好，做一个虔诚的追梦者，就是一种素养”……

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，传感器的基本组成分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。

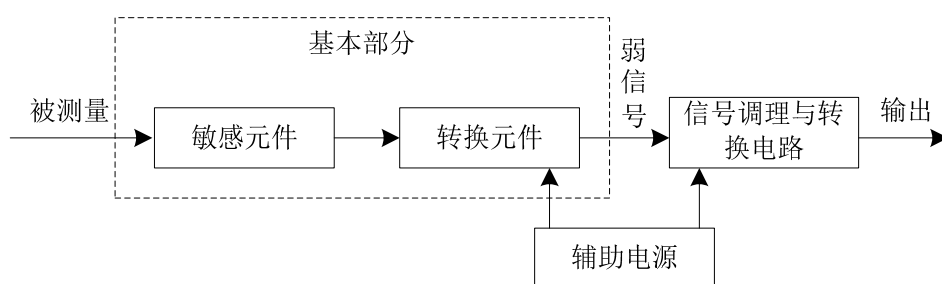


图 1.3 传感器的组成

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。

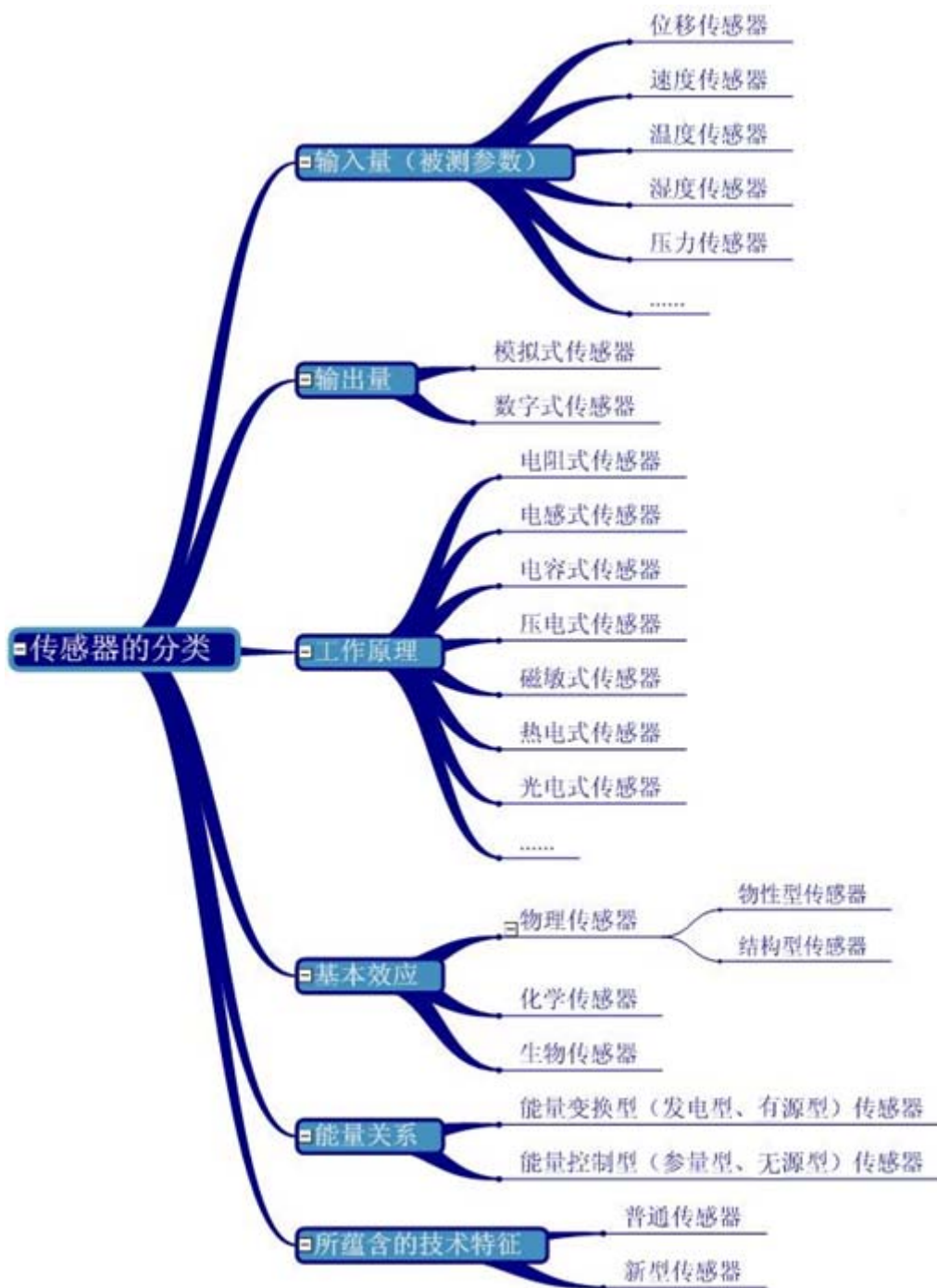


图 1.4 传感器的分类

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：（教学 2 学时）

了解传感器的基本特性。

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—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 ΔH_{\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—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 ΔR_{\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 一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： $s = \beta + jw$ 。

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：

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

模（称为传感器的幅频特性）：

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

相角（称为传感器的相频特性）：

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

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:

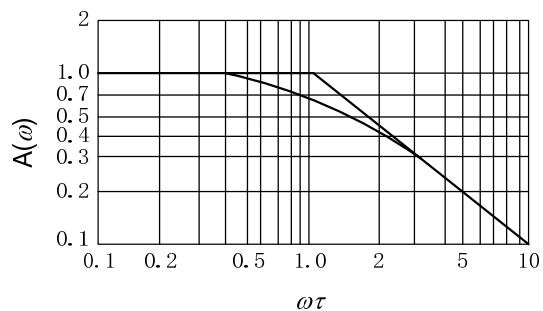
幅频特性:

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

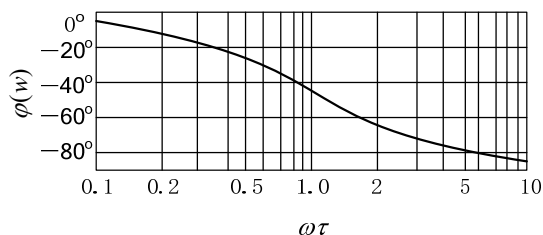
相频特性:

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

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:

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

相频特性:

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

式中:

$$\omega_n = \sqrt{a_0/a_2} \quad (\text{传感器的固有角频率})$$

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

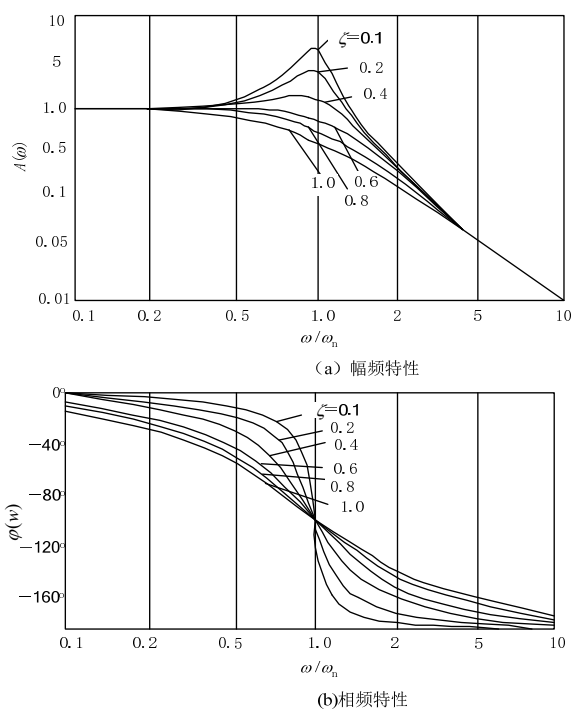


图 2.6 二阶传感器的频率特性

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。

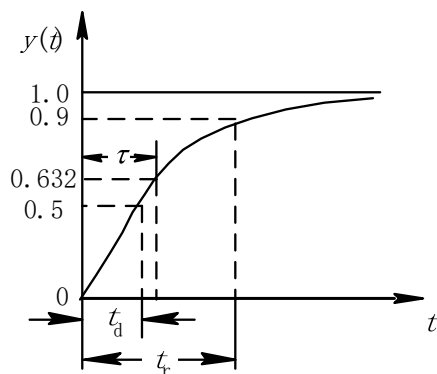


图 2.7 一阶传感器的时域动态特性

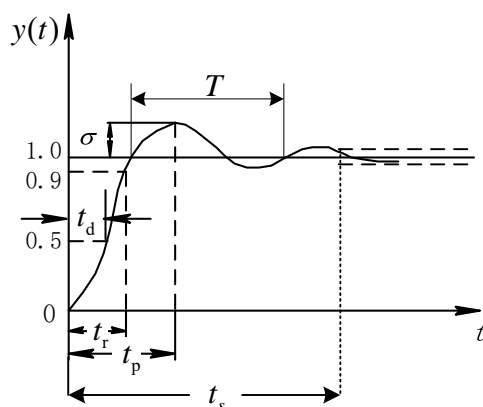


图 2.8 二阶传感器 ($\zeta < 1$) 的时域动态特性

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。

第二章 现代传感技术

教学目标：（教学 2 学时）

了解传感器的定义、组成、分类、识别及测试方法。

教学重点（实验 2 学时）

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

课程思政

德国电机专家斯坦门茨的故事（选编）

20 世纪初期，美国最大的公司——福特公司的一台电动机出现故障，很多人修理了两个月都修不好。在束手无策的情况下，有人向公司推荐了当时已经移居美国的德国科技企业管理专家斯坦门茨。斯坦门茨在电动机旁边仔细观察，并经过两天的计算后，用粉笔在电动机的外壳上画了一条线，说：“打开电动机，将记号所示位置的线圈减少 16 圈。”人们半信半疑地照他的话去做，结果，毛病果真出在那里。电动机修好后，有关人员问他要多少酬金，他说：“一万美元！”啊？一万美元！那人还以为自己听错了呢！于是，他便要求斯坦门茨列一张账单来说明费用的支出明细。斯坦门茨写道：“用粉笔画一条线 1 美元，知道在哪里画这条线 9 999 美元。”账单送到了福特公司老板那里，老板看了后连连点头，很快照付了一万美元，并用重金聘用了他。

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。

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<实验进程按排>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 2 讲，共 4 学时。

1、电阻式与热电式传感器的应用

教学目标：（教学 4 学时）

了解电阻式与热电式传感器的定义、组成、分类，典型应用。

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。

课程思政案例 3

埋头做学问的电机专家——高泗玉

2004 年的“海创周”，他作为一个从海外归来的学子，忙碌着参加各场展会，不停地做着记录，认真地考察大连高新区的产业现状和投资环境。通过这一次大连之行，早就对祖国的发展有所耳闻的他，亲眼目睹了国内翻天覆地的变化。“海创周”结束时，他做出了一生中最重要的决定——到大连高新区创业。他，就是曾留学日本的现大连进丰机电有限公司董事长高泗玉。

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。

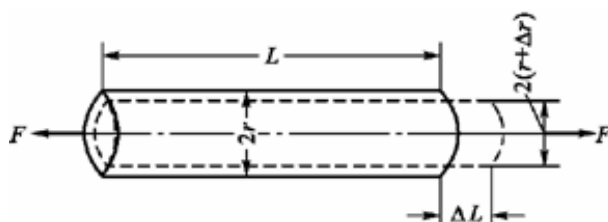


图 3.1 应变效应

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。

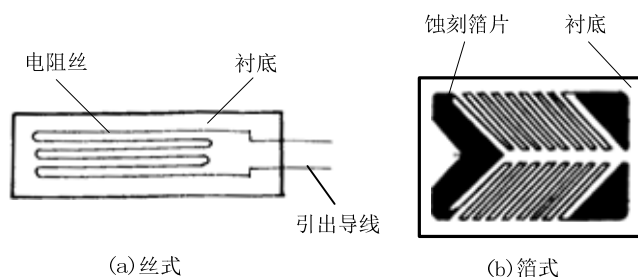


图 3.2 金属电阻应变片结构

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 0.003~0.010mm。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。

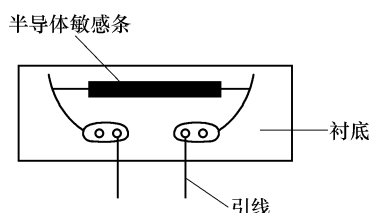


图 3.3 半导体电阻应变片结构

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:

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

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。

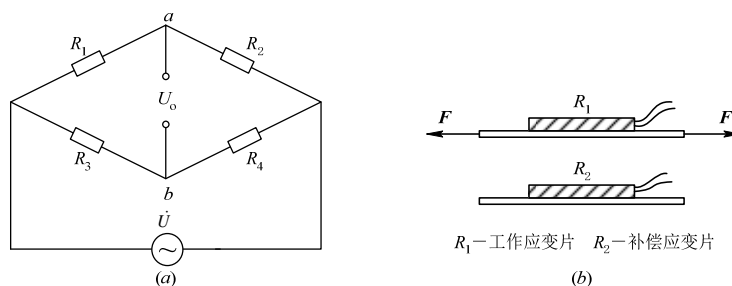


图 3.4 电桥补偿法

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 $\sigma = F/A = 6 \times 10^4 \div (0.4 \times 10^{-4}) = 1.5 \times 10^9 (\text{N/m}^2)$

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

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

因此，输出电压为：

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

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

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

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

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

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

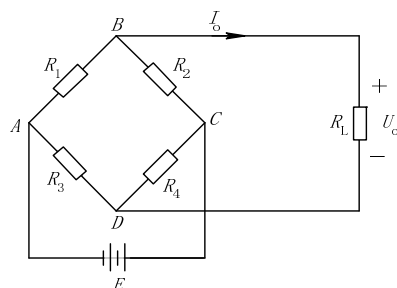


图 3.5 直流电桥的平衡条件

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：

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

$$\boxed{K_U = E/4} \quad (3.35)$$

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：

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

非线性误差为：

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

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。

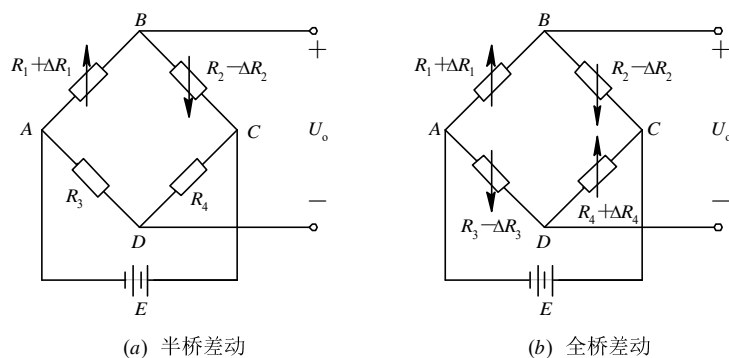


图 3.6 差动电桥

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。

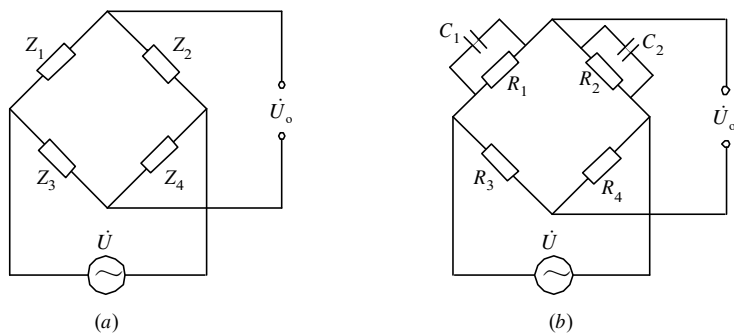


图 3.7 交流电桥

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。

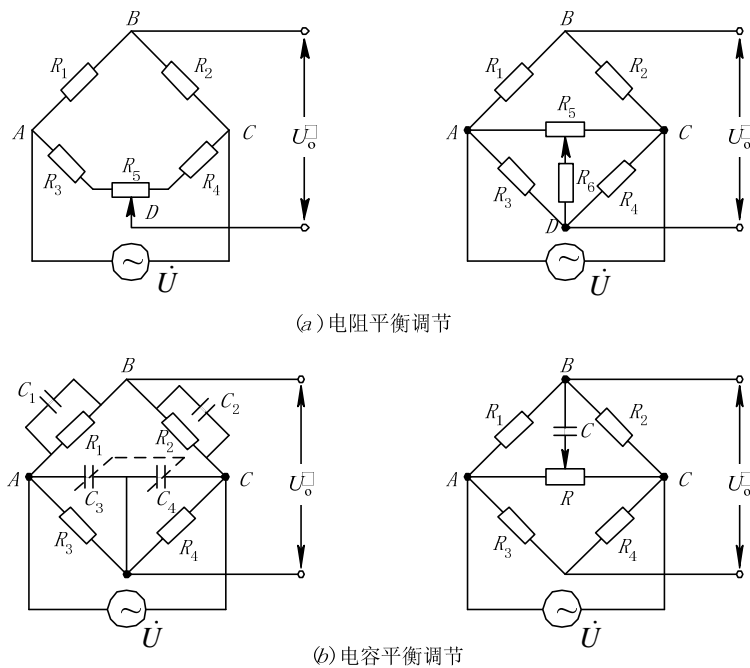


图 3.8 交流电桥平衡调节

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和弯矩的影响， 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。

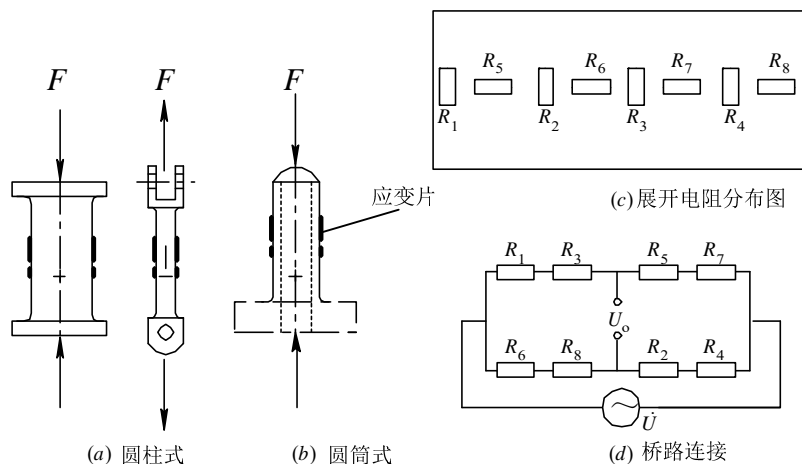


图 3.9 圆柱（筒）式力传感器

(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。

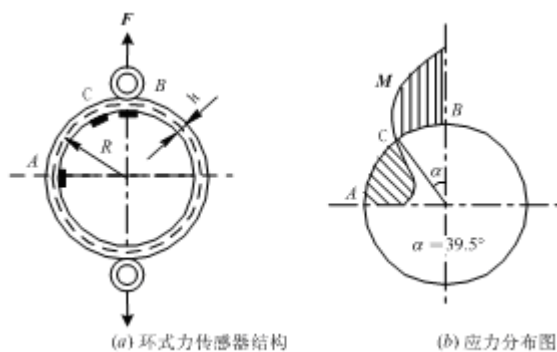


图 3.10 环式力传感器

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。

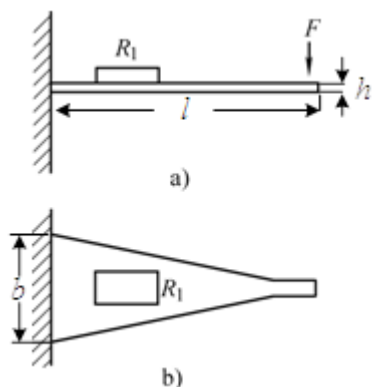
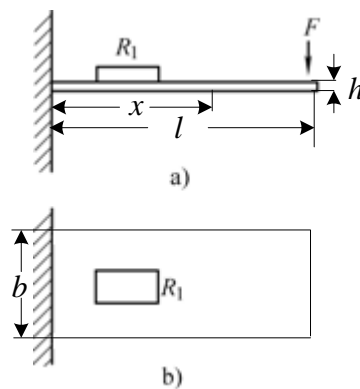


图 3.11 等强度梁式力传感器

(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。

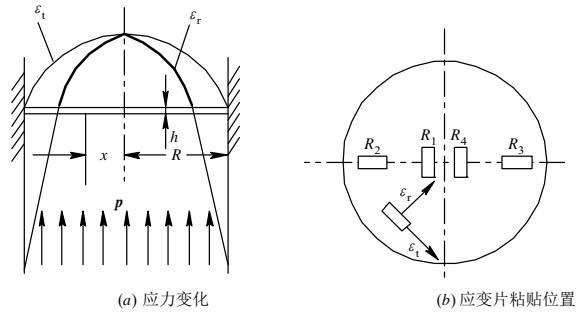


图 3.13 膜片式压力传感器

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

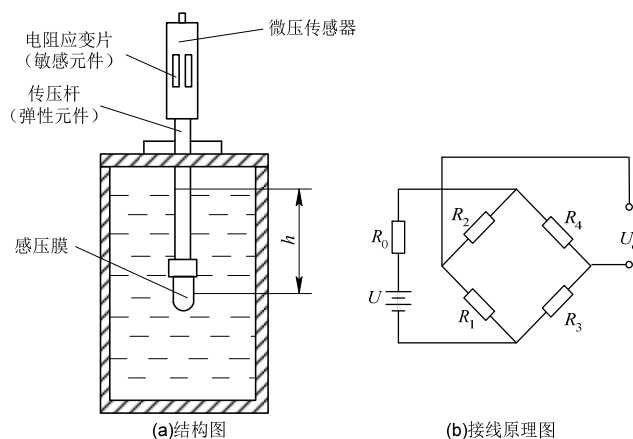


图 3.17 电阻式液体重量传感器

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。

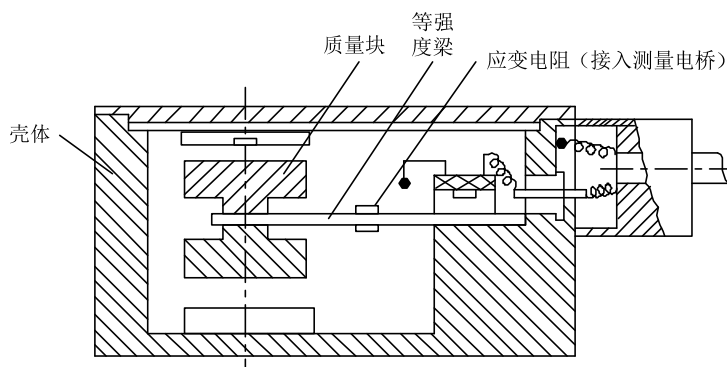


图 3.18 应变电阻式加速度传感器的结构

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 2 讲，共 4 学时。

4.1 基于电感式传感器的位移测量设计

教学目标：（教学 4 学时）

了解电感式与电容式传感器的定义、组成、分类，典型应用。

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。

课程思政

埋头做学问的电机专家——罗昭强

“一个人想要做成点事儿，就必须对自己狠一点”，这是罗昭强的信条。他暗下决心：“要对公司各类设备的故障手到病除，光懂电远远不够，电子、液压、机械、计算机……10 多门学科必须全都通晓！”

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：

$$(5.1)$$

式中：

— 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。

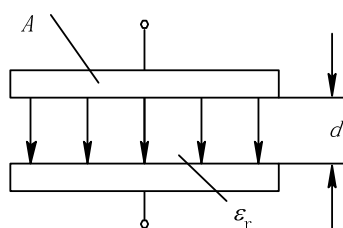


图 5.1 平板电容式传感器的结构

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，将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

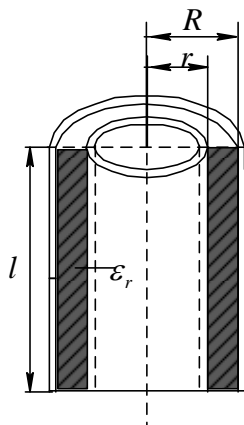


图 5.2 圆筒电容式传感器的结构

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, 将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。

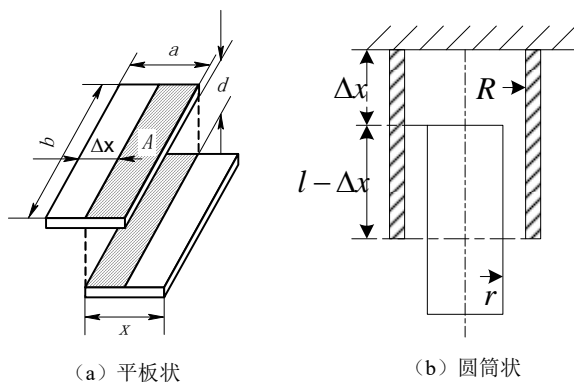


图 5.3 线位移变面积型电容式传感器原理图

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

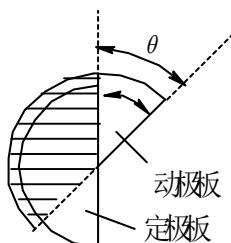


图 5.4 角位移变面积型电容式传感器原理图

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。

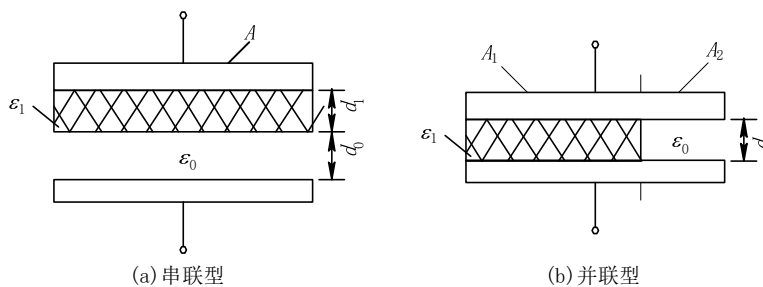


图 5.5 平板结构变介质型电容式传感器原理图

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

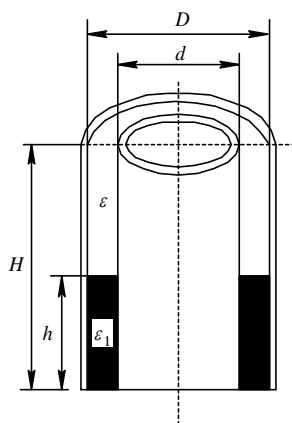


图 5.6 圆筒结构变介质型电容式传感器液位测量原理图

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。

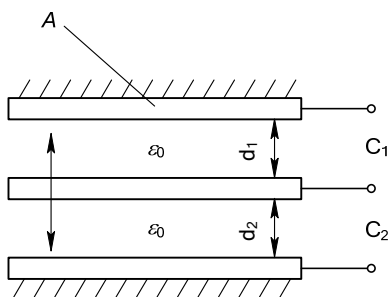


图 5.9 变极距型平板电容器的差动式结构

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

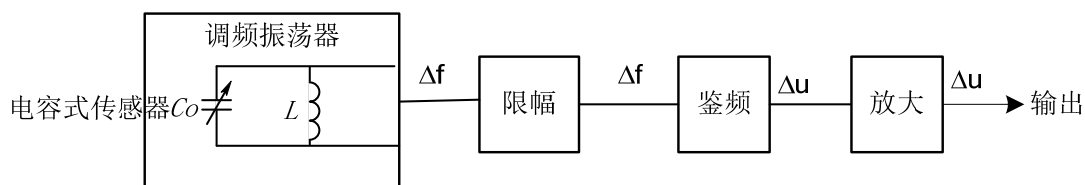


图 5.10 电容式传感器调频电路

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。

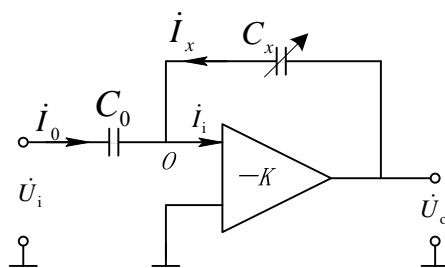


图 5.11 运算放大器电路

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

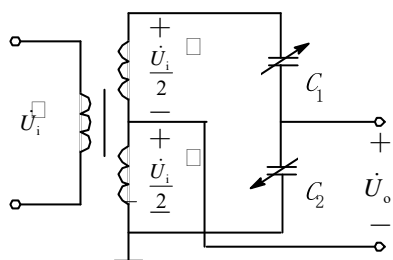


图 5.12 变压器式交流电桥

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

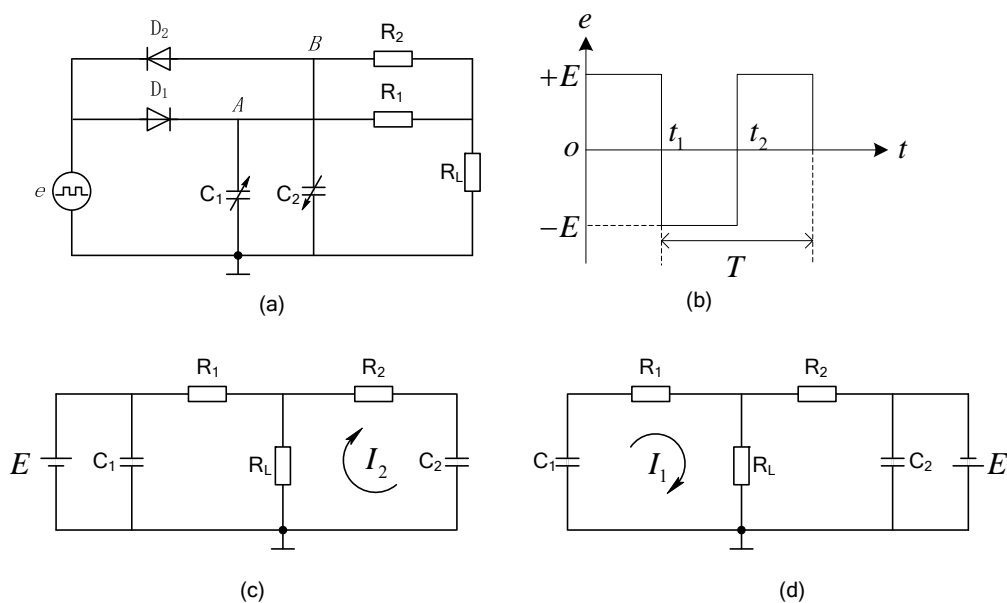


图 5.13 二极管双 T 型交流电桥

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):

$$U_0 = I_L R_L = \frac{1}{T} \int_0^T [I_1(t) - I_2(t)] dt \cdot R_L$$

$$\approx \frac{R(R + 2R_L)}{(R + R_L)^2} \cdot R_L \cdot E \cdot f \cdot (C_1 - C_2) \quad (5.63)$$

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:

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

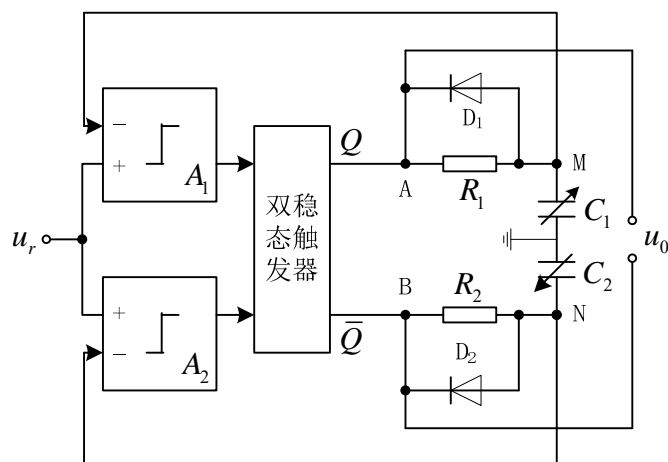


图 5.14 脉冲宽度调制电路原理图

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)。

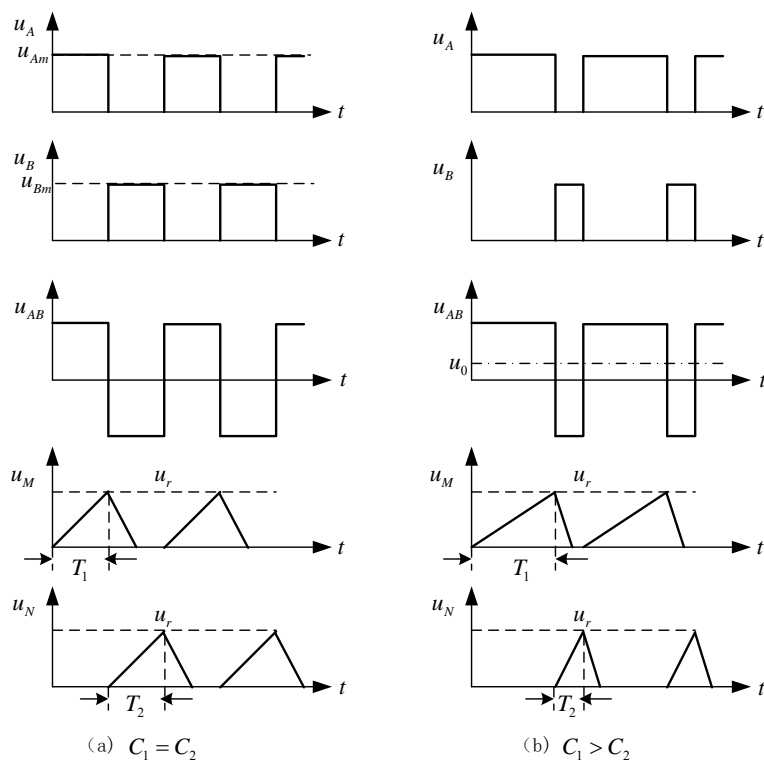


图 5.15 脉冲宽度调制波形

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

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

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。

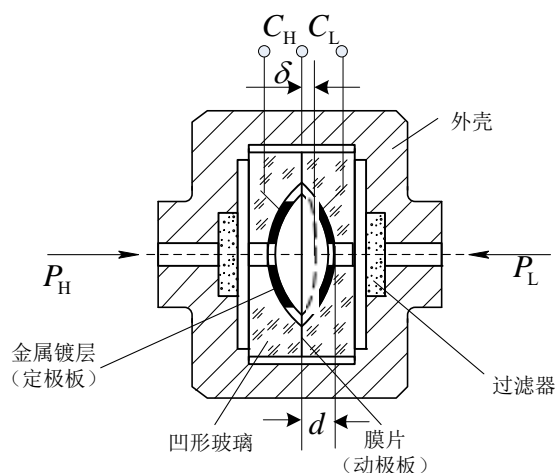


图 5.16 差动电容式压力传感器结构

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

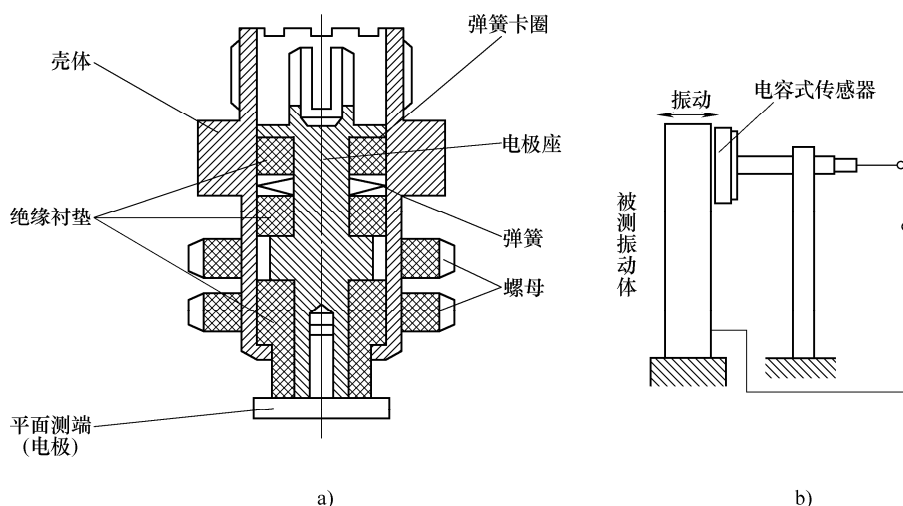


图 5.17 电容式振动位移传感器

(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

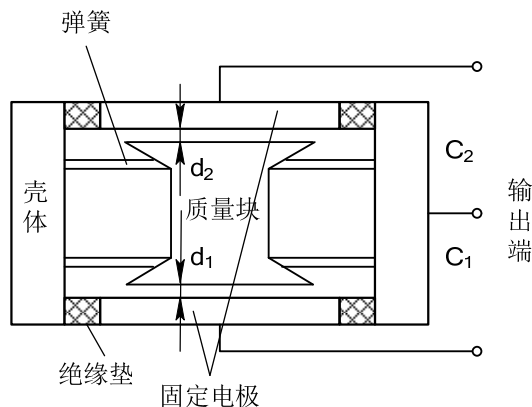


图 5.18 差动电容式加速度传感器结构

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

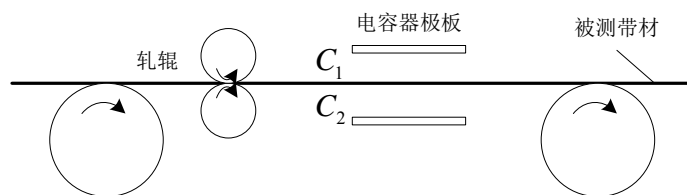


图 5.19 电容式传感器测量厚度原理图

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 2 讲，共 4 学时。

5.1 磁敏式与压电式传感器

教学目标：（教学 4 学时）

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。

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。

课程思政

从机械迷到汽车大王——亨利·福特

亨利·福特虽然生长在偏远的密执安农场，但他对农事知之甚少——他很早便显露出新一代美国人的特点，比起农业来，他们对工业更感兴趣。他的父亲威廉姆，如同大多数早期的农场主一样，希望长子能随他务农，扩展农场并继承他的衣钵。而亨利令他感到失望，亨利厌恶农活并想方设法去逃避农场的劳动。这并不是说他懒惰，倘若让他干点机械活，从修门的合叶到磨农具，他都干得很带劲。农场的日常生活和单调重复的劳动使他倍感沮丧。后来他在回忆他的这段农庄生活时写道：“一个人整天跟在一群慢悠悠的马后面，这是对时间多么大的浪费呀。”

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、磁通）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 w ，则式 (7.1) 可改写为：

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

或：

$$E = -NBSw \quad (7.3)$$

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。

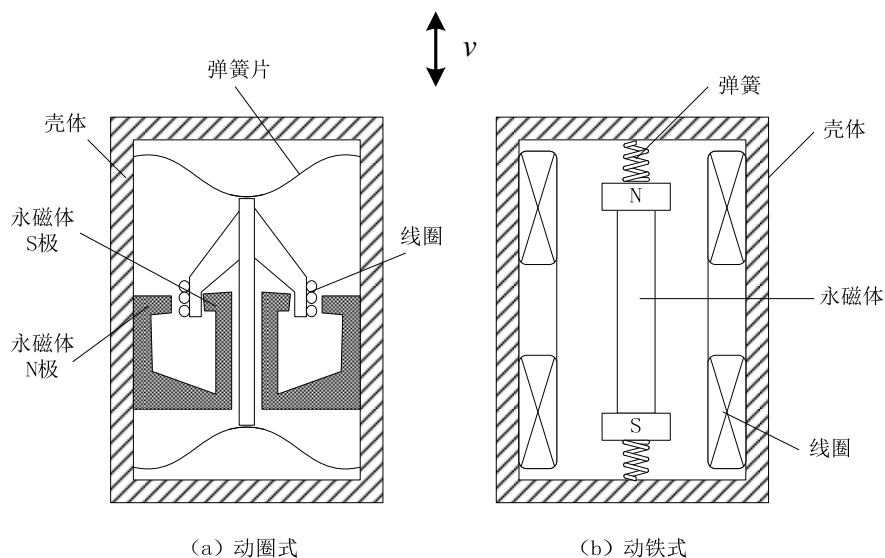


图 7.1 恒磁通磁电感应式传感器结构

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。

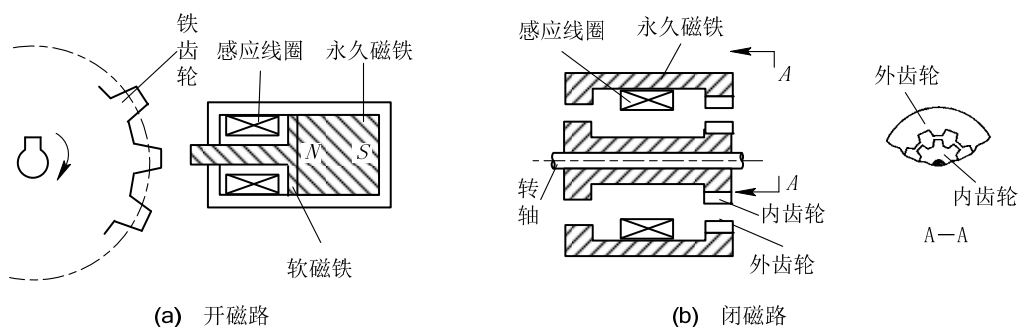


图 7.2 变磁通磁电感应式传感器结构

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

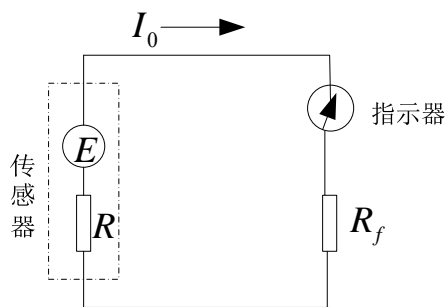


图 7.3 磁电感应式传感器测量等效电路

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。

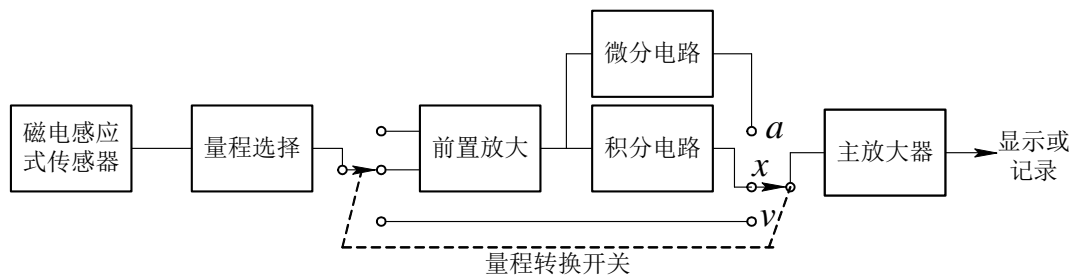


图 7.5 磁电感应式传感器一般测量电路

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。

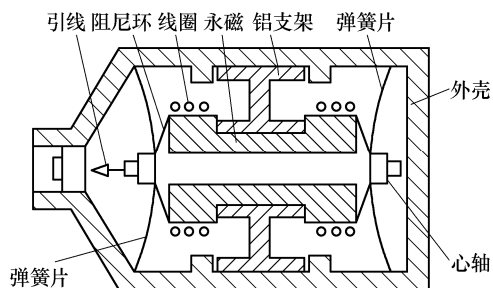


图 7.6 动圈式振动速度传感器结构

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。

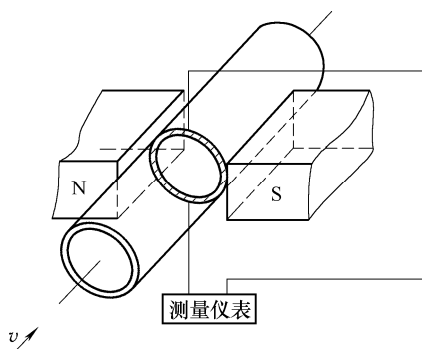


图 7.8 电磁流量计原理图

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。

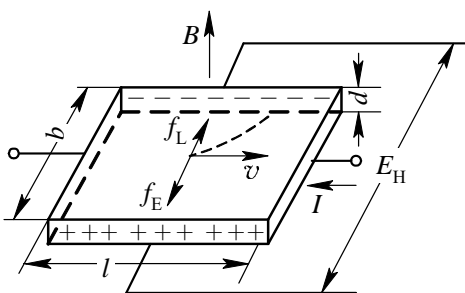


图 7.10 霍尔效应原理图

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。

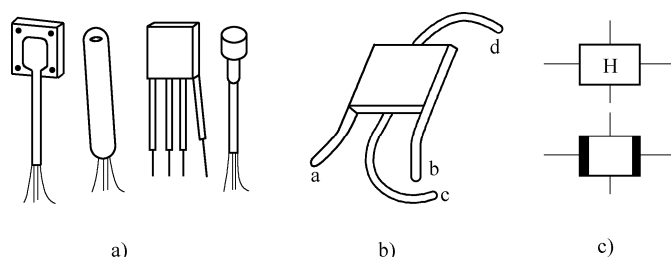


图 7.11 霍尔元件及符号

(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

当霍尔电极间串接有负载时, 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。

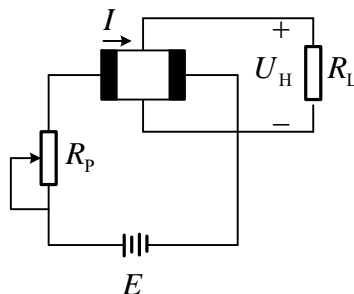


图 7.15 霍尔式传感器的基本测量电路

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。

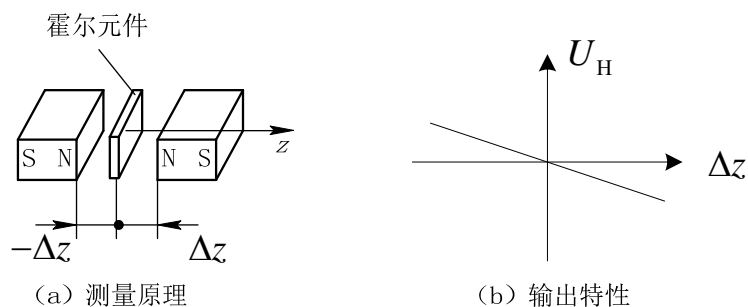


图 7.16 微位移测量原理及其输出特性

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。

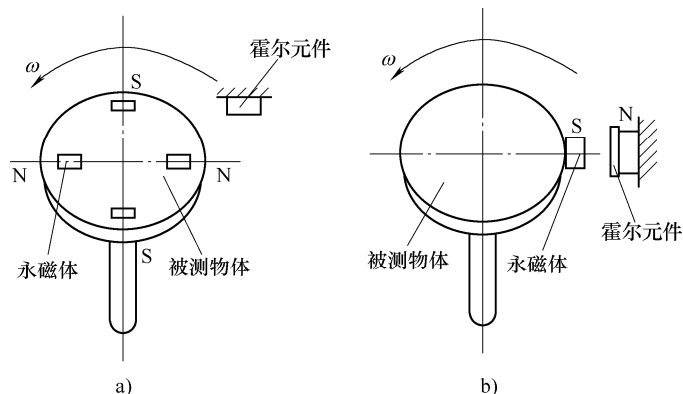


图 7.17 霍尔式传感器转速测量原理

(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：

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