# 第3章 常用传感器的工作原理

本章内容：

* 电阻应变式传感器
* 电感式传感器
* 电容式传感器
* 磁敏式传感器
* 其它新型传感器

在上一章中，主要介绍了传感器的性能指标和性能改善。本章将重点介绍常见传感器的工作原理、测量电路和应用。我们将详细探讨电阻应变式传感器、电感式传感器、电容式传感器、磁敏式传感器等常见传感器，并简要介绍一些新型传感器，为后续全面介绍智能传感器做好准备。通过对这些传感器的学习，我们可以更好地理解它们的工作原理和应用，并在实际应用中更好地运用这些技术。

# §3.1 电阻应变式传感器

电阻应变式传感器（Resistance strain sensor）是一种利用电阻应变片将被测非电量的应变转变为电阻变化的传感器。

任何非电量只要能转化为应变量就可以利用电阻应变式传感器进行测量。电阻应变式传感器以其简单的结构、较高的线性度和良好的稳定性，可以与相应的测量电路配合，形成用于测量压力、质量、位移、加速度和扭矩等多种物理量的检测系统。电阻应变式传感器的种类多样，应用范围广泛，已经成功地被应用于航空、机械、电力、化工、建筑以及医疗等多个领域。

## 3.1.1 应变片与应变效应

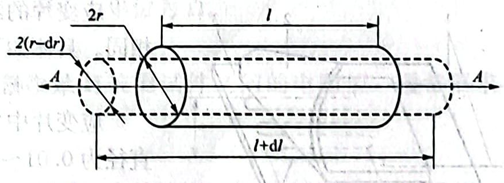
### 3.1.1.1 金属电阻的应变效应

任何在线性范围内变形的弹性体，当其受力发生变形时，长度都会发生改变。这种引起长度改变的现象，我们称之为应变效应。我们将长度的相对变化称为应变，用表示。在这里，，其中是原始长度，是变化量。

电阻应变式传感器是一种将应变转化为电阻变化的传感器，其核心部件为电阻应变片。

应变式传感器的工作原理是：当机械弹性结构体受到力的作用而发生变形时，会产生应变效应。通过粘贴在机械弹性结构体上的电阻应变片来检测这种应变效应，然后由电桥完成信号的转换，并最终输出与弹性体受力成对应关系的电信号。

为了理解电阻应变片的工作原理，我们首先考察单根金属电阻丝受力变形后的电阻变化，如图3-1所示。图中实线表示拉伸前的状态，而虚线表示拉伸后的状态。

  
图3-1 金属丝的圆截图

在未受力前，原始电阻值为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.1） |

式中：—金属丝的电阻；

—金属丝电阻率；

—长度；

—截面积。

当电阻丝受到拉力的影响时，它会伸长，其截面积会相应地减小。同时，电阻率也会因为形状的变化而改变。因此，可通过对公式（3.1）进行全微分，来计算这种变化引起的电阻值的相对变化量为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.2） |

结合式（3.1）可得相对变化量为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.3） |

为分析方便，假设电阻丝是圆截面，即 （为电阻丝的半径），微分后可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.4） |

则圆形电阻丝的截面积相对变化量转换成半径的相对变化量应为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.5） |

将式（3.5）代入（3.3）可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.6） |

因变化量小，、、可分别用、、代替，于是可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.7） |

杆件在轴向受拉或受压时，其纵向应变与横向应变的关系为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.8） |

式中：—金属丝材料的泊松系数，负号表示应变方向相反。

令电阻丝的轴向应变为，将式（3.8）带入式（3.7）可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.9） |

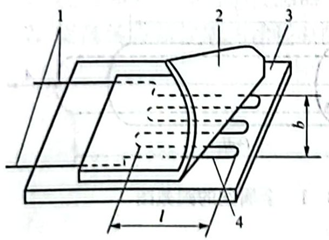
通常把单位应变所引起的电阻值变化称为金属丝的灵敏度系数，其表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.10） |

由式（3.10）可以看出，金属丝的灵敏度系数由两部分组成。第一项是由于金属丝受到力的影响后，材料的几何尺寸发生变形引起的；第二项是由于材料发生变形后，其自由电子的活动能力和数量均发生变化而导致材料电阻率发生变化所引起的。对于金属材料，的值要比小很多，可以忽略。然而，对于半导体材料，要比大很多。大量实验表明，在金属丝拉伸比例极限内，电阻的相对变化与应变成正比，即为常数，其值在1.7到3.6之间。

### 3.1.1.2 应变片的结构

在实际应用中，使用的电阻应变片通常是将金属导体（如丝或箔片）制成栅状结构并放置在绝缘基底上。金属应变片的结构如图3-2所示。

  
图3-2 金属应变片的结构  
1-引线；2-覆盖层；3-基片；4-电阻丝式磁敏栅

尽管应变片的结构形式多样，但其主要组成部分基本一致。具体如下：

1. 敏感栅

应变片中实现应变-电阻转换的元件。通常由直径为0.01～0.05mm的金属丝绕成栅状，或用金属箔腐蚀成栅状。

2．基底

为保持敏感栅固定的形状、尺寸和位置，通常用黏结剂将其固定在纸质或胶质的基底上。工作时，基底起着把试件应变准确地传递给敏感栅的作用。因此，基底必须很薄，一般为0.02～0.04mm。

3．引线

它起着敏感栅与测量电路之间的过渡连接和引导作用。通常取直径约0.1～0.15mm的低阻镀锡铜线，并用钎焊与敏感栅端连接。

4．盖层

它是由纸、胶制成的保护层，覆盖在敏感栅上，起到防潮、防腐蚀等作用。

5．黏结剂

在制造应变片时，用于将盖层和敏感栅粘贴于基底上；在使用应变片时，用于将应变片基底粘贴在试件表面的被测部位，因此，它也起到传递应变的作用。

### 3.1.1.3 应变片类型

应变片主要分为金属应变片和半导体应变片两大类。其中，金属应变片包括丝式、箔式等多种形式，如图3-3所示。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| （a）金属丝式应变片 | （b）金属箔式应变片 | （c）半导体应变片 |

图3-3 应变片的结构

金属丝式应变片是最早使用的，主要有纸质型和胶基型两种。这种应变片的制造技术和设备相对较简单，价格低廉，通常在短期的室内实验中使用。它的缺点是其端部弧形段会产生横向效应。

金属箔式应变片是通过光刻和腐蚀等工艺在绝缘基片上制成各种图案的电阻箔片，其厚度通常在0.001～0.1mm之间。与丝式相比，它的面积大得多，散热效果好、通过电流大、横向效应小、柔性好、寿命长、工艺成熟且适于大批量生产，因而得到广泛使用。

半导体应变片是由半导体材料制成的敏感栅，其工作原理基于半导体材料的压阻效应。相较于金属丝式、箔式应变片，半导体应变片的灵敏度一般高出几十倍，而且横向效应较小，因此其应用日趋广泛。

### 3.1.1.4 应变片的参数

应变片的参数主要有以下几项：

1．标准电阻值（）

标准电阻值指的是在无应变的情况下的电阻值，单位为。

2．绝缘电阻（）

应变片绝缘电阻是指已粘贴的应变片的引线与被测试件之间的电阻值，通常要求在以上。

3．灵敏度系数（）

灵敏度系数是指应变片安装到被测物体表面后，在其轴线方向上的单向应力作用下，应变片阻值的相对变化与被测物表面上安装应变片区域的轴向应变之比。

4．应变极限（）

在恒温条件下，使非线性达到10％时的真实应变值，称为应变极限。应变极限是衡量应变片测量范围和过载能力的指标。

5．允许电流（）

允许电流是指应变片允许通过的最大电流。

## 3.1.2 应变片的温度误差及补偿

### 3.1.2.1 应变片的温度误差

由于测量现场环境温度的改变而给测量带来的附加误差，称为应变片的温度误差。产生应变片温度误差的主要因素有以下两个方面：

1. 电阻温度系数的影响

当温度变化时，金属电阻丝的电阻也将改变。敏感栅的电阻丝阻值随温度变化的关系可表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.11） |

式中：—温度为时的电阻值；

—温度为时的电阻值；

—温度为时的金属丝的电阻温度系数；

—温度变化值，。

当温度变化时，电阻丝电阻的变化值为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.12） |

2．试件材料和电阻丝材料的线膨胀系数不同的影响

当试件材料和电阻丝材料的线膨胀系数相同时，环境温度的变化不会产生附加形变，也就不会带来附加误差。但当它们的线膨胀系数不同时，就会带来附加误差。

设电阻丝和试件在温度为0℃时的长度均为，它们的线膨胀系数分别为和，若两者不粘贴，则它们的长度分别为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.13） |
|  |  | （3.14） |

当两者粘贴在一起时，电阻丝产生的附加变形、附加应变和附加电阻变化分别为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.15） |
|  |  | （3.16） |
|  |  | （3.17） |

由式（3.12）和式（3.17），可得由于温度变化而引起的应变片总电阻相对变化量为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.18） |

由式（3.18）可知，因环境温度变化而引起的附加电阻的相对变化量，除了与环境温度有关外，还与应变片自身的性能参数（，，）以及被测试件线膨胀系数有关。

### 3.1.2.2 电阻应变片的温度补偿方法

电阻应变片的温度补偿方法通常有线路补偿法和应变片自补偿法两大类。

1．线路补偿法

电桥补偿是一种常用且效果良好的线路补偿方法。电桥补偿法的原理如图3-4所示。

  
图3-4 电桥补偿原理

电桥输出电压与桥臂参数的关系为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.19） |

式中：—由桥臂电阻和电源电压决定的常数。

由式（3.19）可知，当和为常数时，工作应变片和补偿应变片对电桥输出电压的作用方向相反。利用这种关系，可实现电阻应变片的温度补偿。

在测量应变时，工作应变片粘贴在被测试件表面上，补偿应变片粘贴在与被测试件材料完全相同的补偿块上，且仅工作应变片承受应变，如图3-5所示。

  
图3-5 电桥补偿应变片粘贴

当被测试件不承受应变时，和又处于同一环境温度为的温度场中，调整电桥参数使之达到平衡，此时有：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.20） |

工程上，一般按选取桥臂电阻。

当温度升高或降低时，两个应变片因温度而引起的电阻变化量相等，电桥仍处于平衡状态，即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.21） |

如果被测试件受到应变的影响，工作应变片电阻会有新的增量。由于补偿片不承受应变，所以不会产生新的增量。此时，电桥的输出电压为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.22） |

由式（3.22）可知，电桥的输出电压仅与被测试件的应变有关，而与环境温度无关。值得注意的是，如果要实现完全补偿，上述分析过程必须满足以下四个条件：

（1）在应变片工作过程中，保证。

（2）和两个应变片应具有相同的电阻温度系数、线膨胀系数、应变灵敏度系数和初始电阻值。

（3）粘贴补偿片的补偿块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。

（4）两应变片应处于同一温度场。

2．应变片的自补偿法

这种温度补偿法是利用自身具有温度补偿作用的应变片（称为温度自补偿应变片）来补偿的。根据温度自补偿应变片的工作原理，可由式（3.18）得出，要实现温度自补偿，必须有：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.23） |

式（3.23）表明，当被测试件的线膨胀系数已知时，如果合理选择敏感栅材料，即其电阻温度系数、灵敏系数以及线膨胀系数，满足式（3.23），则不论温度如何变化，均有，从而达到温度自补偿的目的。

## 3.1.3 电阻应变式传感器的应用

电阻应变片除直接用以测量机械、仪器及工程结构等的应力、应变外，还常与某种形式的弹性敏感元件相结合，专门制成各种应变式传感器，用来测量力、压力、扭矩、位移和加速度等物理量。下面以膜片式压力传感器为例介绍电阻应变式传感器的应用。

膜片式压力传感器测量容器内液体重量的示意图如图3-6所示。

  
图3-6 膜片式压力传感器测量容器内液体重量的示意图

传感器下端的感压膜感受液体压力。传压杆将该压力传递到上端的微压传感器进行检测。当容器中的溶液增多时，感压膜感受到的压力会增大，从而导致微压传感器的输出增大。

微压传感器可以等效为一个感压的电桥电路，如图3-7所示，此时输出电压为：

  
图3-7 微压传感器等效电桥电路

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.24） |

式中：—传感器传输系数；

—感压膜距液面的深度；

—液体的密度；

—重力加速度，。

由于表征感压膜上面液体的重量，因此：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.25） |

式中：Q—容器内感压膜上面溶液的重量；

A—柱形容器的截面积。

式（3-25）表明，电桥输出电压与柱式容器内感压膜上面溶液的重量呈线性关系。因此，这种方法可以用来测量容器内储存的溶液重量。

# §3.2 电感式传感器

电感式传感器（Inductance Sensor）是一种利用电磁感应原理，将被测的非电量转换成电磁线圈的自感或互感量变化的测量装置，可以用来测量位移、压力和振动等参数。电感式传感器具有结构简单、灵敏度高、分辨力高和线性度好的特点。然而，由于这种传感器频率响应低，因此其不适于快速动态测量。

电感式传感器的种类很多，根据转换原理不同，可分为变磁阻式（自感式）、变压器式（互感式）、电涡流式（互感式）传感器等。

## 3.2.1 变磁阻式传感器

### 3.2.1.1 变磁阻式传感器工作原理

变磁阻式传感器的结构如图3-8所示。它由线圈、铁芯和衔铁三部分组成。铁芯和衔铁之间有气隙，气隙厚度为。传感器的运动部分与衔铁相连。当衔铁移动时，气隙厚度发生改变，引起磁路中磁阻变化，从而导致电感线圈的电感值变化。因此，只要能测出这种电感量的变化，就能确定衔铁位移量的大小和方向。

  
图3-8 变磁阻式传感器的结构

线圈的电感值由下式确定：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.26） |

式中：—回路内的磁链数；

—每匝线圈的磁通量；

—线圈中所通电流的有效值；

—线圈匝数；

—磁路的总磁阻。

若忽略磁路铁损，则磁路总磁阻为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.27） |

式中：—铁芯的磁导长度；

—衔铁的磁导长度；

—铁芯的磁导率；

—衔铁的磁导率；

—空气的磁导率，；

—铁芯磁导截面积；

—衔铁磁导截面积；

—空气磁导截面积；

—空气隙的长度。

气隙磁阻远大于铁芯和衔铁的磁阻。因此，磁路总磁阻可近似为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.28） |

联立式（3.26）和式（3.28）可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.29） |

由此可以看出，当线圈匝数确定后，只要改变和，即可导致电感的变化。

如果保持空气隙的长度不变，而使空气磁导截面积随位移变化，则可构成变截面式自感传感器。如果保持不变，则为的单值函数，从而可构成变气隙式自感传感器。

### 3.2.1.2 变截面式自感传感器

保持气隙不变，令截面积随被测电量变化，即构成变面积式自感传感器。在图3-8中，令气隙面积。初始时，衔铁与铁芯覆盖的长度为a，此时电感为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.30） |

如果衔铁沿水平方向左移，则其电感值变化为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.31） |

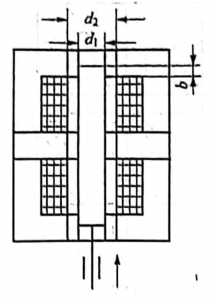
则电感值的变化量为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.32） |

通常把单位位移所引起的电感值变化称为变截面式自感传感器的灵敏度系数，其表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.33） |

可见电感值的变化与重叠长度的变化（即与重叠面积的变化）呈线性关系。但是单元件结构灵敏度比较低，故在实际应用中常采用差动式结构，如图3-9所示。

  
图3-9差动变面积式自感传感器

初始时，铁芯置于两个线圈之间，且两个线圈绕向方向相反。因此，上下线圈在中段气隙部分产生的磁通方向相反，进而抵消。故此时线圈电感值为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.34） |

式中：—衔铁与铁芯的起始重叠长度；

—衔铁外径；

—线圈圆柱的内径。

工作时，衔铁上移Δb，则上气隙电感变化为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.35） |

下气隙电感变化为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.36） |

由于两线圈方向相反、故总的电感变化为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.37） |

类似地，把单位位移所引起的电感值变化称为差动变面积式自感传感器的灵敏度，可表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.38） |

通过分析可见，差动式结构的灵敏度提高了一倍。此外，这种结构不但具有抗外界干扰的能力，而且具有消除环境温度变化、电源波动和电磁吸力等影响因素的作用。

### 3.2.1.3 变气隙式自感传感器

图3-8中，若传感器的气隙面积不变，当气隙厚度减少时，电感值将增加。根据式（3.29）可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.39） |

当时，利用幂级数展开式，得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.40） |

忽略高次项，做线性化处理，得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.41） |

变气隙自感式传感器的灵敏度系数定义为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.42） |

可见，欲提高变气隙自感式传感器的灵敏度，需减小气隙的长度。但是，这又会受到工艺和结构的限制。因此，在实际测量中，我们通常会采用差动变气隙式电感传感器来提高灵敏度。这种传感器的结构如图3-10所示。

  
图3-10差动变气限式自感传感器

当衔铁从平衡位置变动时，上气隙变为，使得上线圈电感增加了，而下气隙变为，导致下线圈电感减少了。电感总变化量可表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.43） |

忽略高次项，对式（3.43）进行线性化处理可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.44） |

差动变气隙式自感传感器的灵敏系数可以表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.45） |

比较式（3.42）和式（3.45）可以看出，差动变气隙式自感传感器的灵敏度提高了一倍。

## 3.2.2 差动变压器式传感器

把被测的非电量变化转换为线圈互感变化的传感器称为互感式传感器。这种传感器是根据变压器的基本原理制成的，并且次级绕组以差动方式连接，故也称差动变压器式传感器。

差动变压器有多种结构形式，有变隙式、变面积式和螺线管式等，但其工作原理基本相同。在非电量测量中，应用最多的是螺线管式差动变压器，它可以测量1～100mm机械位移，并具有测量精度高、灵敏度高、结构简单、性能可靠等优点。

### 3.2.2.1 螺线管式差动变压器

1．螺线管式差动变压器的工作原理

螺线管式差动变压器的结构如图3-11所示。

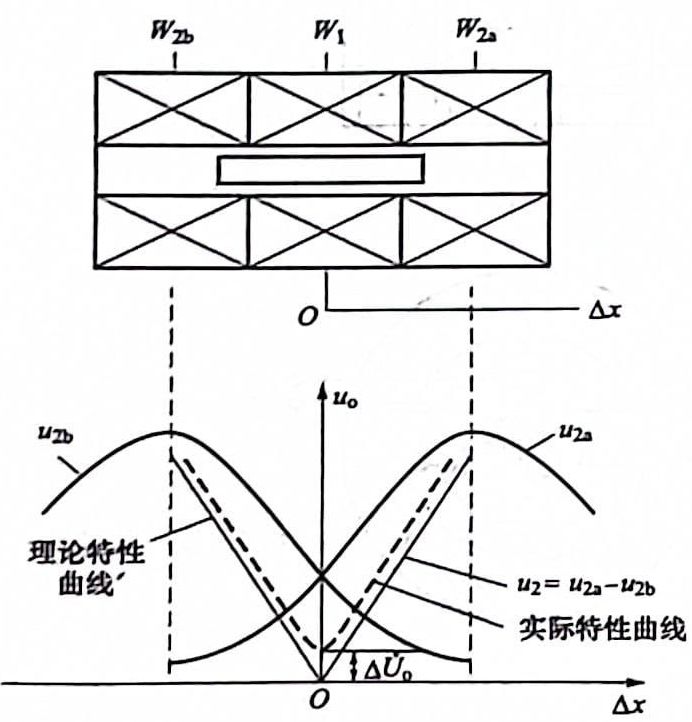
  
图3-11 螺线管式差动变压器的结构

在螺线管式差动变压器中，将其两个次级绕组反相串联，并且忽略铁损、导磁体磁阻和线圈分布电容，等效电路如图3-12所示。

  
图3-12 螺线管式差动变压器的等效电路

当初级绕组施加激励电压时，根据变压器的工作原理，在两个次级绕组和中便会产生感应电势和。如果工艺上保证变压器结构完全对称，则当活动衔铁处于初始平衡位置时，必然会使两互感系数，根据电磁感应原理，将有 。由于变压器两次级绕组反相串联，因而，即差动变压器输出电压为零。

当活动衔铁向上移动时，由于磁阻的影响，中磁通将大于，使，因而增加，而减小；反之，增加，减小。因为，所以当、随着衔铁位移x变化时，也必将随变化。图3-13所示为差动变压器输出电压与活动衔铁位移的关系曲线，实线为理论特性曲线，虚线为实际特性曲线。可以看出，当衔铁位于中心位置时，差动变压器输出电压并不等于零，我们把差动变压器在零位移时的输出电压称为零点残余电压，记作，它的存在会使传感器的输出特性不经过零点，造成实际特性与理论特性不完全一致。

  
图3-13 差动变压器输出电压与活动衔铁位移的关系曲线

零点残余电压主要是由传感器的两次级绕组的电气参数、几何尺寸不对称或磁性材料的非线性等引起的。零点残余电压的波形十分复杂，主要由基波和高次谐波组成。基波产生的主要原因是传感器的两次级绕组的电气参数和几何尺寸不对称。这导致它们产生的感应电动势幅值不等、相位不同。因此，无论怎样调整衔铁位置，两线圈中的感应电动势都不能完全抵消。高次谐波中起主要作用的是三次谐波。其产生的原因是磁性材料磁化曲线的非线性（磁饱和、磁滞）。零点残余电压一般在几十毫伏以下。在实际使用时，应设法减小，否则将会影响传感器的测量结果。

2．螺线管式差动变压器的基本特性

差动变压器等效电路如图3-12所示。当次级开路时：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.46） |

式中：—初级绕组激励电压；

—激励电压的角频率；

—初级绕组激励电流；

—初级绕组直流电阻；

—初级绕组直流电感。

根据电磁感应定律，次级绕组中感应电势的表达式分别为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.47） |
|  |  | （3.48） |

式中：、—初级绕组与两次级绕组的互感。

由于次级两绕组反相串联，且考虑到次级开路，则由以上关系可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.49） |

输出电压的有效值为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.50） |

上式说明：当励磁电压的幅值、角频率、初级绕组的直流电阻和电感为定值时，差动变压器输出电压仅仅是初级绕组与两个次级绕组之间互感之差的函数。因此，只要求出互感和对活动衔铁位移的关系式，再代入式（3.50）即可得到螺线管式差动变压器的基本特性表达式。

（1）活动衔铁处于中间位置时：

故输出电压为：

（2）活动衔铁向上移动时：

故输出电压为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.51） |

与同相。

（3）活动衔铁向下移动时：

故输出电压为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.52） |

与同相。

### 3.2.2.2 差动变压器的测量电路

差动变压器式传感器的输出电压是调幅波。如果用交流电压表测量，它只能反映衔铁位移的大小，而不能反映移动的方向。为了判别衔铁的移动方向和消除零点残余电压，需要进行解调。实际测量时，常采用差动整流电路和相敏检波电路进行解调。

1. 差动整流电路

全波差动整流电路如图3-14所示。

  
图3-14 全波差动整流电路

图3-14所示的全波差动整流电路将差动变压器的两个次级电压分别整流，然后将其整流的电压或电流的差值作为输出。由电路结构可知，不论两个次级线圈的输出瞬时电压极性如何，流经电容C1的电流方向总是从2到4，流经电容C2的电流方向总是从6到8，故整流电路的输出电压为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.53） |

当衔铁在中间位置时，。然而，当衔铁在零位以上或以下时，输出电压的极性相反，这使得零点残余电压能够自动抵消。可见，这种电路结构简单，不需要参考电压，无需考虑相位调整和零点残余电压的影响。它对感应和分布电容不敏感，并且经差动整流后变成直流输出，便于远距离输送。因此，这种电路得到了广泛的应用。

2. 相敏检波电路

相敏检波电路具有鉴别信号相位和选频的能力。差动相敏检波电路的形式较多，其中二极管全波相敏检波电路如图3-15所示。为差动变压器的输入电压。为的同频参考电压，且。为了提高检波效率，常取。在相敏检波电路中，作用于变压器，作用于变压器。

|  |  |
| --- | --- |
| （a）电路中电流极性 | （b）电路中电压极性 |

图3-15 二极管全波相敏检波电路

（1）当时，在的作用下，正半周二极管D3、D4导通，电流、从反方向流过电表。只要，且D3、D4性能相同，通过电表的电流就等于零，故输出为零。负半周时，D1、D2导通，、反相，输出仍为零，如图3-15（a）所示。

（2）当时，有以下两种情况：

1)当和同相时，有两种可能情况。正半周时，电路中电压极性如图3-15（b）所示。由于，D3、D4导通，但作用于D4两端的信号是，增加，而作用D3两端的电压为，减小，则（为正）。负半周时，D1、D2导通，在和作用下，增加，减小，，输出仍为正。

2)当和反相时，亦有两种情况。负半周时，D3和D4导通，但增加，减小，，输出为负。正半周时，，同样输出为负。

因此，上述相敏检波电路，可以通过电表的平均电流的大小和方向来判别差动变压器的位移大小和方向。

## 3.2.3 电涡流式传感器

电涡流式传感器是根据涡流效应制作而成的一种测量装置。所谓涡流效应，指的是当金属导体处于交变磁场中时，导体内部会产生呈旋涡状的闭合回线的感应电流（称为电涡流）。

电涡流式传感器可以非接触地连续测量位移、厚度、表面温度、速度、压力和材料损伤等。同时，它具有体积小、灵敏度高、测量线性范围大和频率响应宽等特点。

### 3.2.3.1 电涡流式传感器的工作原理

根据法拉第定律，当传感器线圈通以正弦交变电流时，线圈周围空间必然产生正弦交变磁场。这会使置于此磁场中的金属导体感应电涡流，而又会产生新的交变磁场。的存在将抵消原磁场的变化。由于磁场的作用，涡流要消耗一部分能量。这会导致传感器线圈的等效阻抗发生变化，如图3-16所示。

  
图3-16 电涡流式传感器的原理结构

由此可知，线圈阻抗的变化完全取决于被测金属导体的电涡流效应。电涡流效应与被测体的电阻率、磁导率、几何形状、线圈的几何参数、线圈中励磁电流频率以及线圈与导体间的距离有关。因此，传感器线圈受电涡流影响时的等效阻抗的函数关系式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.54） |

式中：—线圈与被测体的尺寸因子。

如果保持上式中其他参数不变，而只改变其中一个参数，传感器线圈阻抗就仅仅是这个参数的单值函数。可以通过与传感器配用的测量电路测出阻抗Z的变化量，从而实现对该参数的测量。

### 3.2.3.2 电涡流式传感器的等效电路

电涡流式传感器与被测金属导体的等效电路如图3-17所示。

  
图3-17 电涡流式传感器与被测金属导体的等效电路

金属导体被抽象为一短路线圈，它与传感器线圈磁性耦合。两者之间定义一个互感系数表示耦合程度，该系数随间距的增大而减小。为电涡流短路环等效电阻，其表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.55） |

式中：—电涡流短路环等效电阻；

—电涡流的深度（，可见频率越高，电涡流渗透的深度就越浅，趋肤效应越明显）；

、—短路环的外径和内径。

根据基尔霍夫第二定律，可列出如下方程：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.56） |

式中：—电涡流短路环等效电阻；

、—线圈电阻和电感；

—短路环等效电感；

—短路环等效电阻；

—互感系数。

由式（3.56）解得等效阻抗Z的表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.57） |

式中：—线圈受电涡流影响后的等效电阻；

—线圈受电涡流影响后的等效电感。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.58） |
|  |  | （3.59） |

线圈的等效品质因数Q值为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.60） |

综上所述，根据电涡流式传感器的简化模型和等效电路，运用电路分析的基本方法得到的式（3.58）～式（3.60），为电涡流传感器基本特性表示式。

### 3.2.3.3 电涡流式传感器的测量电路

用于电涡流传感器的测量电路主要有调频式电路和调幅式电路两种。

1. 调频式电路

将传感器线圈接入振荡回路中。当传感器与被测导体的距离发生变化时，传感器的电感会在涡流的影响下发生变化。这将导致振荡频率的变化。因此，这个变化的频率是距离的函数，可以表示为。可以使用数字频率计直接测量振荡频率。另外，也可以通过变换，使用数字电压表来测量相应的电压。调频式电路的示意图如附图3-18所示。

  
图3-18 调频式电路

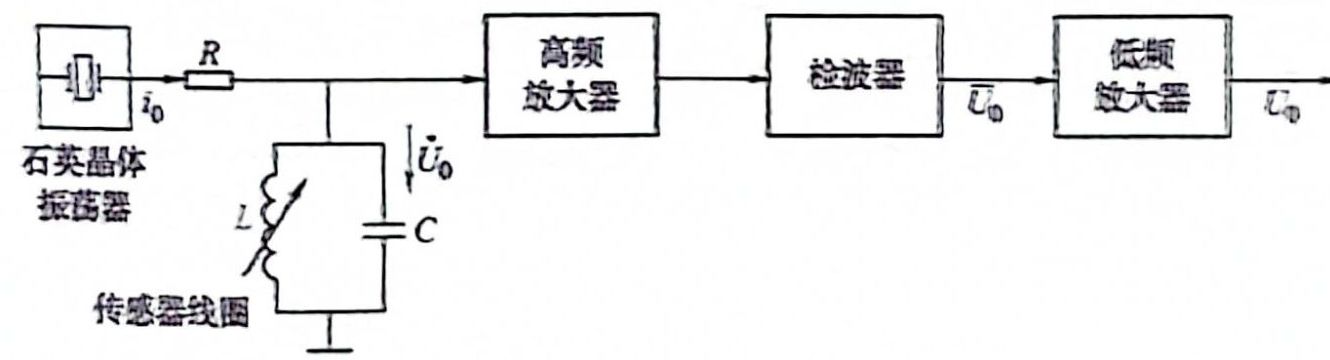
振荡器的频率为:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.61） |

为了避免输出电缆的分布电容的影响，通常将、装在传感器内。

2. 调幅式电路

由传感器线圈、电容器和石英晶体组成的石英晶体振荡电路如图3-19所示。

  
图3-19 调幅式电路

石英晶体振荡器起恒流源的作用，给谐振回路提供一个频率（）稳定的激励电流，回路输出电压为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.62） |

式中：—回路的阻抗。

当金属导体远离或去掉时，并联谐振回路的谐振频率即为石英振荡频率。此时，回路呈现的阻抗最大，谐振回路上的输出电压也最大。然而，当金属导体靠近传感器线圈时，线圈的等效电感会发生变化。这会导致回路失谐，从而使输出电压降低。值得注意的是，是随距离的变化而变化的。因此，输出电压也会随的变化而变化。最后，输出电压经过放大和检波后，由指示仪表直接显示出的大小。

## 3.2.4 电感式传感器的应用

电感式传感器具有结构简单、灵敏度高、分辨率高、线性度好的特点，被广泛用于测量位移、压力、振动等物理量。下面以涡流式测温传感器为例，介绍电感式传感器的应用。

由电工技术可知，在较小的温度范围内，导体的电阻率与温度的关系为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.62） |

式中：—温度为时的电阻率；

—温度为时的电阻率；

—导体的电阻温度系数。

图3-20所示为涡流式测温传感器。

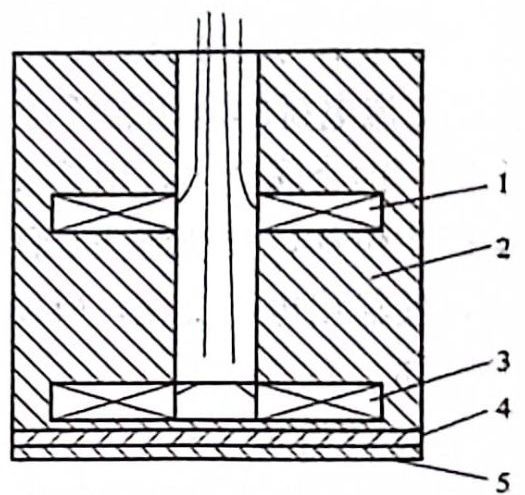
  
图3-20 涡流式测温传感器

图3-20 所示的涡流式测温传感器由补偿线圈1、管架2、测量线圈3、隔热衬垫4及温度敏感元件5组成，用来测量气体或液体的温度。根据式（3.62），被测物的温度变化将引起其电阻率的变化。若保持电涡流式传感器的各参数不变，当导体的电阻率随温度发生变化时，涡流传感器的输出亦将发生变化，其变化量正比于温度变化值，从而实现对被测物温度的测量。

# §3.3 电容式传感器

电容式传感器（Capacitance sensor）采用电容器作为传感元件，将各种物理量的变化转换为电容量的变化。电容式传感器具有低功率、高阻抗、小的静电引力和良好的动态特性，可进行非接触测量。电容式传感器广泛用于压力、位移、厚度、加速度、液位、物位、湿度和成分含量等物理量的测量。

## 3.3.1 电容式传感器的工作原理与结构形式

电容式传感器由敏感元件与转换元件为一体的电容量可变的电容器和测量电路组成，其工作原理如图3-21所示。

  
图3-21 电容式传感器工作原理

由物理学可知，对平行极板电容器，当忽略电容器边缘效应时，其电容量为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.63） |

式中：—电容极板间介质的介电常数；

—真空介电常数；

—极板间介质的相对介电常数；

—两平行板所覆盖的面积；

—两平行板之间的距离。

可见，在、、三个参量中，改变其中任意一个量，均可使电容量改变。换句话说，如果被检测参数（如位移、压力、液位等）的变化引起、、三个参量之一发生变化，就可利用相应的电容量的改变实现该参数的测量。基于这个原理，电容式传感器可分为以下三大类：

（1）极距变化型电容式传感器；

（2）面积变化型电容式传感器；

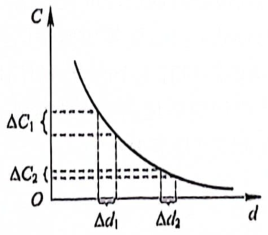
（3）介质变化型电容式传感器。

### 3.3.1.1 变极距型电容式传感器

变极距型电容式传感器的原理图如图3-22所示。

  
图3-22 变极距型电容式传感器的原理图

由式（3.63）可知，电容量与极极间距的关系曲线为一双曲线，如图3-23所示。

  
图3-23 电容量与极极间距的关系曲线

当传感器的和为常数，初始极距为时，可计算出其初始电容量为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.64） |

当间隙减小时，电容量将增大，因此：

电容的相对变化为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.65） |

当时，将上式按泰勒级数展开，得：

可见，电容的相对变化与位移之间呈现的是一种非线性关系。在误差允许范围内通过略去高次项得到其近似的线性关系：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.66） |

故电容传感器的灵敏度为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.67） |

如果只考虑二次非线性项，忽略其他高次项，则非线性误差为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.68） |

根据以上分析，变极距型电容式传感器只有在很小时，才有近似的线性输出。另外，在较小时，对于同样的变化所引起的可以增大，从而使传感器灵敏度提高。但过小，容易引起电容器击穿或短路。为此，极板间可采用高介电常数的材料（云母、塑料膜等）作介质，其原理图如图3-24所示，此时电容变为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.69） |

式中：—云母的相对介电常数，；

—空气的介电常数，；

—空气隙厚度；

—云母片的厚度。

  
图3-24 变极距型电容式传感器原理图

云母片的相对介电常数是空气的7倍，其击穿电压不小于，而空气仅为。因此有了云母片，极板间起始距离可大大减小。同时，式（3. 69）中的项是恒定值，它能使传感器的输出特性的线性度得到改善。

一般变极距型电容式传感器的起始电容在之间，极板间距离在的范围内，最大位移应小于间距的，故在微位移测量中应用最广。

### 3.3.1.2 变面积型电容式传感器

变面积型电容式传感器通常分为线位移型和角位移型两大类。

1. 线位移变面积型电容式传感器

线位移变面积型电容式传感器的原理图如图3-25所示。

  
图3-25 线位移变面积型电容式传感器原理图

被测量的变化会引发动极板的移动，这种移动进而会改变两极板的有效覆盖面积，最终导致电容量的变化。当动极板相对于定极板沿长度方向平移时，电容变化量为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.70） |

式中：—初始电容，。

电容相对变化量为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.71） |

很明显，这种形式的传感器的电容相对变化量与水平位移呈线性关系。

2. 角位移变面积型电容式传感器

角位移变面积型电容式传感器原理图如图3-26所示。

  
图3-26 角位移变面积型电容式传感器原理图

当动极板发生角位移时，其与定极板间的有效覆盖面积将变为图3-26中阴影部分的面积，从而改变了两极板间的电容量。当时，初始电容量为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.72） |

式中：—介质相对介电常数；

—两极板间距离；

—两极板间初始覆盖面积，。

当时，电容量改变为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.73） |

电容改变量为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.74） |

电容相对变化量为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.75） |

从式（3.75）可以看出，传感器的电容相对变化量与角位移呈线性关系。

### 3.3.1.3 变介质型电容式传感器

变介质型电容式传感器原理图如图3-27所示。

  
图3-27变介质型电容式传感器原理图

设被测介质的介电常数为、液面高度为、变换器总高度为、内简外径为、外筒内径为，此时变换器电容值为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.76） |

式中：—空气介电常数；

—由变换器的基本尺寸决定的初始电容值，。

电容改变量：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.77） |

由式（3.77）可知，变介质型电容式传感器的电容改变量正比于被测液位高度。

## 3.3.2 电容式传感器的测量电路

### 3.3.2.1调频电路

在调频电路中，电容式传感器被作为振荡器谐振回路的一部分。当输入量导致电容量发生变化时，振荡器的振荡频率就会相应地发生变化。频率可以直接作为测量系统的输出量，用以判断被测非电量的大小。然而，此时的系统是非线性的，因此不易校正。因此，必须加入鉴频器，将频率的变化转换为电压振幅的变化，从而可以经过放大后用仪器指示或记录仪记录下来。调频式测量电路原理如图3-28所示。

  
图3-28 调频式测量电路原理

在图3-28中，调频振荡器的振荡频率为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.78） |

式中：—振荡回路的电感；

—振荡回路的总电容，，其中为振荡回路固有电容，为传感器引线分布电容，为传感器的电容。

当被测信号为时，，则，所以振荡器有一个固有频率，其表示式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.79） |

当被测信号不为时，，这会导致振荡器的频率发生相应的变化。此时频率为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.80） |

调频电容传感器测量电路具有较高的灵敏度，可以测量高至级的位移变化量。信号的输出频率易用于数字仪器测量，并与计算机通信，抗干扰能力强，可以发送、接收信号，以达到遥测遥控的目的。

### 3.3.2.2 运算放大器式电路

运算放大器的放大倍数非常大，输入阻抗也很高。因此，它非常适合用作电容式传感器的测量电路，其原理如图3-29所示。

  
图3-29 运算放大器式电路原理

在图3-29中，为电容式传感器电容；是交流电源电压；是输出信号电压；是虚地点。根据运算放大器的工作原理可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.81） |

如果传感器是一只平板电容，则，代入式（3.82），可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.82） |

式中：“”号表示输出电压的相位与电源电压反相。

式（3.82）说明运算放大器的输出电压与极板间距离d呈线性关系。

运算放大器式电路虽解决了单个变极距型电容式传感器的非线性问题，但要求输入阻抗和放大倍数足够大。为保证仪器精度，还要求电源电压的幅值和固定电容值稳定。

### 3.3.2.3 二极管双T形交流电桥

二极管双T形交流电桥电路原理图如图3-30所示。

  
图3-30二极管双T形交流电桥电路原理图

在图3-30中，是高频电源，它提供了幅值为的对称方波。VD1、VD2为特性完全相同的两只二极管、固定电阻。、为传感器的两个差动电容。为负载电阻。

当传感器没有输入时，。其电路工作原理如下：当为正半周时，二极管VD1导通，而VD2截止。在此时，电容开始充电。随后，当负半周出现时，电容上的电荷通过电阻和负载电阻放电。在此时，流过的电流为。当为负半周时，VD2导通、而VD1截止。在此时，电容开始充电。其等效电路如图3-31（b）所示。随后，当正半周出现时，通过电阻和负载电阻放电。在此时，流过的电流为。根据上述条件，电流，但方向相反。因此，在一个周期内，流过的平均电流为零。

|  |  |
| --- | --- |
| （a） | （b） |

图3-31二极管双T形交流电桥等效电路

若传感器输入不为0，则，。此时在一个周期内通过上的平均电流不为零，因此产生输出电压。输出电压在一个周期内平均值为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.83） |

式中：—电源频率。

当已知，式（3.83）中

这里是一个常数。因此有：

由此可见，传感器的输出电压不仅与电源电压的频率和幅值有关，而且与T形网络中的电容和的差值有关。当电源参数确定后，输出电压只是电容和的函数。

该电路输出电压较高。当电源频率为，电源电压时，电容在pF变化，可以在负载上得到的直流输出电压。电路的灵敏度与电源电压幅值和频率有关，因此输入电源需要保持稳定。当幅值较高，使二极管VD1、VD2工作在线性区域时，测量的非线性误差很小。电路的输出阻抗与电容无关，而仅与及有关，约为。输出信号的上升沿时间取决于负载电阻，对于的负载电阻上升时间为左右，故可用来测量高速的机械运动。

## 3.3.3 电容式传感器的应用

电容式传感器具有结构简单、耐高温、耐辐射、分辨率高和动态响应特性好等优点，广泛用于压力、位移、加速度、厚度、振动、液位等物理量的测量中。下面以电容式压力传感器为例介绍电容式传感器的应用。

差动电容式压力传感器的结构图如图3-32所示。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3-32 差动电容式压力传感器结构

在图3-32中，压力传感器的两个膜片室中充满了硅油。当左右两室分别承受压力和时，由于硅油的不可压缩性和流动性，差压将被传递到膜片上。当左右两侧相等，即差压时，膜片两侧的电容器的电容量完全相等。然而，当压力差大于零时，膜片会发生变形，动极板会向低压侧移动，导致一个电容器的电容量增加，另一个电容器的电容量减小。这种变化可以转化为电容的改变，从而实现了压力到电容的转换。这种转换与介电常数无关，只与压力差成正比。如果采用脉冲宽度调制电路，测量电路的输出电压将与压力差成线性关系。这种传感器的结构简单，灵敏度高，响应速度快，能够测量微小的压力差(0~0.75Pa)。

# §3.4 磁敏式传感器

磁敏式传感器（Magnetic Sensor）是通过磁电作用将被测量（如振动、位移、转速等）转换为电信号的传感器。磁电作用主要分为磁电感应和霍尔效应两种。因此，相应的磁敏式传感器可分为磁电感应式传感器和霍尔式传感器两种。磁电感应式传感器是根据电磁感应原理，利用导体和磁场的相对运动产生感应电动势的传感器；霍尔式传感器是根据霍尔效应，利用载流半导体在磁场中产生的电动势的传感器。

## 3.4.1 磁电感应式传感器

磁电感应式传感器也被称为电动式传感器或感应式传感器。它是根据电磁感应原理，利用导体和磁场的相对运动在导体两端产生感应电动势而制成的。它是一种有源传感器，即不需要辅助电源就能将被测对象的机械量直接转换为电信号。

磁电感应式传感器电路简单、性能稳定、输出阻抗小、输出功率大，具有一定的工作带宽（），适用于振动、转速、扭矩等测量。特别是，由于这种传感器具有“双向”性质，它可以作为“逆变器”应用于近年来发展起来的“反馈式”（也称力平衡式）传感器。然而，这种传感器的尺寸和重量都比较大。

### 3.4.1.1 磁电感应式传感器的工作原理及结构类型

磁电感应式传感器基于电磁感应原理。根据电磁感应定律，当导体在稳恒均匀磁场中沿垂直磁场方向运动时，导体内会产生感应电动势：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.84） |

式中：—线圈包围的磁通量；

—稳恒均匀磁场的磁感应强度；

—导体的有效长度；

—导体相对磁场的运动速度。

当一个匝线圈在磁场中旋转作切割磁力线运动时，如果设穿过线圈的磁通为，那么线圈内的感应电动势与磁通变化率有如下关系：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.85） |

式中：—线圈的面积；

—线圈在工作气隙磁场中的匝数；

—线圈的转速。

当传感器的结构参数（即、、）确定后，感应电动势与线圈相对磁场的运动速度（或）成正比。

磁通量的变化可以通过多种方式实现，例如磁铁与线圈之间的相对运动、磁路中磁阻的变化、恒定磁场中线圈面积的变化等。根据磁通量的变化方式，磁电感应式传感器通常分为恒磁通式和变磁通式两类。

1. 变磁通式磁电感应传感器

变磁通式磁电感应传感器通常设计为转速传感器，其输出为感应电动势的频率，该频率取决于磁通的变化频率。变磁通式转速传感器的结构分为开磁路和闭磁路两种。

开磁路变磁通式传感器结构图如图3-33所示。

  
图3-33 开磁路变磁通式传感器结构图

如图3-33所示，线圈和磁铁保持静止，而测量齿轮则安装在被测旋转体上，并随其一起转动。每当齿轮转动一个齿，它与软铁之间构成的磁路的磁阻就会变化一次，从而使磁通也变化一次。这种变化使线圈中产生感应电势，其变化频率等于被测转速与测量齿轮上齿数的乘积。这种传感器适用于需要简单结构、小输出信号，并且由于加装齿轮较危险而不适合测量高转速的场合。

闭磁路变磁通式传感器结构图如图3-34所示。

  
图3-34 闭磁路变磁通式传感器结构图

如图3-34所示，闭磁路变磁通式传感器由装在转轴上的内齿轮、装在外壳上的外齿轮、永久磁铁和感应线圈组成。这里，内齿轮和外齿轮的齿数是相同的。当转轴连接到被测转轴上时，外齿轮保持静止，而内齿轮则随被测轴转动。这种内外齿轮的相对转动导致气隙磁阻产生周期性变化，进而引起磁路中磁通的变化，从而在线圈内产生周期性变化的感应电动势。显然，感应电动势与被测转速成正比。

2. 恒磁通式磁电感应传感器

恒磁通式磁电感应传感器的磁路系统产生恒定的直流磁场。由于磁路中的工作气隙保持固定，气隙中的磁通也保持恒定。它的运动部件可以是线圈（动圈式），如图3-35（a）所示，也可以是磁铁（动铁式），如图3-35（b）所示。这两种恒磁通式磁电感应传感器的工作原理是完全相同的。

  
图3-35 恒磁通式磁电传感器结构图

当被测振动体振动时，壳体会随之一起振动。由于运动部件质量大且弹簧柔软，振动频率高时（远大于传感器固有频率），运动部件惯性大，无法及时跟随振动，几乎静止。永久磁铁与线圈之间的相对运动速度接近于振动体的振动速度。这种相对运动切割磁力线，从而产生感应电动势，其值为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.86） |

式中：—工作气隙磁感应强度；

—每匝线圈平均长度；

—线圈在工作气隙磁场中的匝数；

—相对运动速度。

因此，一旦确定了传感器的结构参数，感应电动势就会与相对运动速度成正比。通过测量感应电动势的大小，就可以确定被测速度的大小。

### 3.4.1.2 磁电感应式传感器的测量电路

磁电感应式传感器可以直接输出感应电动势信号，且通常具有较高的灵敏度，所以其测量电路不需要高增益放大器。然而，磁电感应式传感器仅用于测量动态量，可以直接测量振动物体的线速度或旋转体的角速度。如果在其测量电路中接入积分电路（）或微分电路，那么就可以测量位移或加速度。图3-36所示为磁电感应式传感器的测量电路。

  
图3-36 磁电感应式传感器的测量电路

## 3.4.2 霍尔式传感器

霍尔元件是利用霍尔效应制成的磁传感器。这种器件以霍尔效应为工作基础，可以检测磁场及其变化，被广泛应用在各种与磁场有关的场合中。

霍尔器件具有许多优点，比如结构牢固、体积小、重量轻、寿命长、安装方便、功耗低、频率高、耐振动，不怕灰尘、油污、水汽及盐雾等的污染或腐蚀。

### 3.4.2.1 霍尔效应

霍尔效应是物质在磁场中表现的一种特性，由运动电荷在磁场中受到洛伦兹力的影响产生。简单来说，当电流通过放置在磁场中的导体或半导体时，会在电流和磁场方向垂直的地方产生一个电动势。这种现象称霍尔效应，而产生的电动势被称为霍尔电动势，如图3-37所示。

  
图3-37 霍尔效应原理图

在电场的作用下，电流使金属中的自由电子或半导体中的载流子（电子）做定向运动。此时，每个电子受洛伦兹力的作用，的大小为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.87） |

式中：—电子电荷；

—磁场的磁感应强度；

—电子运动平均速度。

如图3-37所示，的方向是向内的。此时，电子不仅沿电流反方向做定向运动，而且在的作用下发生偏转。这导致金属导电板内侧积累电子，外侧则失去电子而带正电。这样，就形成了一个附加的内电场，也称为霍尔电场，其电场强度为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.88） |

式中：—霍尔电动势。

由于霍尔电场的存在，定向运动的电子不仅受洛伦兹力作用，同时也受到霍尔电场力的影响。霍尔电场力的大小为，这种力阻碍了进一步的电荷积累。由于内、外侧电荷的累积增加，霍尔电场及其对电子的影响力随之增大。当霍尔电场力与洛伦兹力的大小相等但方向相反时，即满足：

有：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.89） |

这样一来，电荷不再向两侧面积累，达到平衡状态。

若金属导电板单位体积内电子数为，电子定向运动平均速度为，则激励电流，即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.90） |

将式（3.90）代入式（3.89）得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.91） |

将上式代入式（3.88）得：

令，称之为霍尔常数，其大小取决于导体载流子密度，则：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.92） |

式中：称为霍尔片的灵敏度。

由式（3.92）可见，霍尔电势正比于激励电流和磁感应强度，其灵敏度与霍尔系数成正比而与霍尔片厚度成反比。为了提高灵敏度，霍尔元件常制成薄片形状。

如果磁场与薄片法线有夹角，那么：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.93） |

由于材料的电阻率，因此，霍尔系数与载流体材料的电阻率和载流子迁移率的关系为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.94） |

由式（3.94）可知，霍尔常数等于霍尔片材料的电阻率与电子迁移率的乘积。若要霍尔效应强，则希望有较大的霍尔系数，因此要求霍尔片材料有较大的电阻率和载流子迁移率。一般金属材料载流子迁移率很高，但电阻率很小；而绝缘材料电阻率极高，但载流子迁移率极低。因此，只有半导体材料才适合制造霍尔片。

目前，常用的霍尔元件材料有锗、硅、砷化铟、锑化铟等半导体材料。其中，N型锗容易加工制造，其霍尔系数、温度性能和线性度都较好。N型硅的线性度最好，其霍尔系数和温度性能与N型锗相同。锑化铟对温度最敏感，尤其在低温范围内，其温度系数大，但在室温时，其霍尔系数较大。砷化铟的霍尔系数较小，温度系数也较小，但其输出特性线性度好。

### 3.4.2.2 霍尔元件的基本结构

霍尔元件由霍尔片、四根引线和壳体构成，如图3-38（a）所示。霍尔片是一块矩形半导体单晶薄片，其四根引线分别为：1、1＇引线（激励电极或控制电极），用于加激励电压或电流； 2、2＇引线霍尔电极），用于霍尔输出。霍尔元件的壳体由非导磁金属、陶瓷或环氧树脂制成。在电路中，霍尔元件一般可用两种符号表示，如图3-38（b）所示。

|  |  |
| --- | --- |
| （a）外形结构示意图 | （b）图形符号 |

图3-38 霍尔元件

### 3.4.2.3 霍尔元件的基本特性

1. 额定激励电流和最大允许激励电流

当霍尔元件自身温升时，所流过的激励电流称为额定激励电流；以元件允许最大温升为限制所对应的激励电流称为最大允许激励电流。霍尔电势与激励电流之间存在线性关系，即激励电流增加时，霍尔电势同样也会增加。因此，在使用霍尔元件的过程中，需要特别关注其散热条件的改善，以允许更大的激励电流通过，进而提高霍尔电势。

2. 输入电阻和输出电阻

激励电极之间的电阻值称为输入电阻。霍尔电极的输出电势可以视为一个电压源，而该电压源的内阻就是输出电阻。这些电阻值都是在磁感应强度为零且环境温度为时所确定的。

3. 不等位电势和不等位电阻

当霍尔元件的激励电流为I且所处位置的磁感应强度为零时，理论上其霍尔电势应为零。然而，实际测量中，我们发现霍尔电势并非为零，这种情况下测得的空载霍尔电势被称为不等位电势，如图3-39所示。不等位电势的产生可能有以下几个原因：

（1）霍尔电极安装位置不对称或不在同一等电位面上。

（2）半导体材料不均匀造成了电阻率不均匀或几何尺寸不均匀。

（3）激励电极接触不良造成激励电流不均匀分布等。

|  |  |
| --- | --- |
| （a）位置不对称 | （b）等位面倾斜 |

图3-39 不等位电势示意图

不等位电势也可用不等位电阻表示，即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.95） |

式中：—不等位电势；

—不等位电阻；

—激励电流。

由式（3.95）可以看出，不等位电势就是激励电流流经不等位电阻所产生的电压。

4. 寄生直流电势

在外加磁场为零的条件下，用交流激励霍尔元件，霍尔电极的输出除了交流不等位电势外，还有直流电势，称为寄生直流电势。寄生直流电势的产生可能有以下几个原因：

（1）激励电极与霍尔电极接触不良，形成非欧姆接触，造成整流效果。

（2）两个霍尔电极大小不对称，则两个电极点的热容不同，散热状态不同而形成极间温差电势。

寄生直流电势的值通常低于，它是影响霍尔片温度漂移的主要因素之一。

5. 霍尔电势温度系数

在一定的磁感应强度和激励电流下，当温度每变化时，霍尔电势变化的百分比被定义为霍尔电势温度系数。这个系数也可以被视为霍尔系数的温度系数。

### 3.4.2.4 霍尔式传感器的测量电路

霍尔式传感器的基本测量电路如图3-40所示。

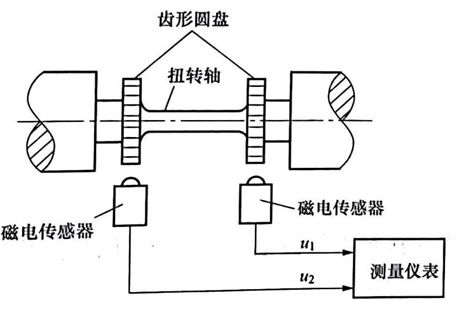
  
图3-40霍尔式传感器的基本测量电路

如图3-40所示，电源提供激励电流；可变电阻用于调节激励电流的大小；为输出霍尔电动势的负载电阻，通常用于表征显示仪表、记录装置或放大器的输入阻抗。

## 3.4.3 磁敏式传感器的应用

### 3.4.3.1磁电式扭矩传感器

磁电式扭矩传感器的工作原理图如图3-41所示。

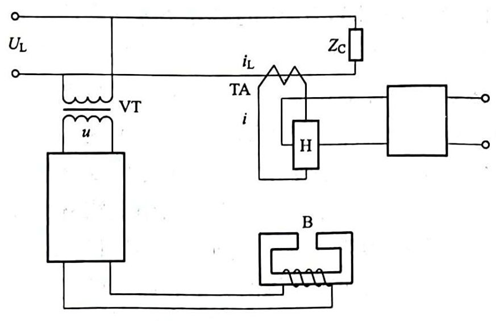
  
图3-41 磁电式扭矩传感器的工作原理图

如图3-41所示，驱动源和负载之间的扭转轴两侧各装有一个齿形圆盘。每个齿形圆盘旁边都配有一个相应的磁电传感器。

当齿形圆盘旋转时，圆盘齿凸凹会引起磁路气隙的变化，从而使磁通量发生变化。这种变化在线圈中感应出交流电压，其频率等于圆盘上齿数与转速的乘积。当扭矩作用在扭转轴上时，两个磁电传感器输出的感应电压和会存在相位差。这个相位差与扭转轴的扭转角成正比，因此传感器可以将扭矩引起的扭转角转换成相位差的电信号。

### 3.4.3.2霍尔功率传感器

霍尔功率传感器的工作原理图如图3-42所示。

  
图3-42 霍尔功率传感器的工作原理图

在图3-42中，负载电流经电流互感器变换后送到霍尔元件的控制端，则控制电流正比于负载电流。负载电压通过电压互感器变换后，被接到霍尔元件的励磁电路上。励磁线圈被绕在有开口间隙的铁芯上，而霍尔元件则被放置在开口间隙处。这样，铁芯中的磁感应强度就会与负载电压成正比。与之间的相位差可以通过阻容相位补偿网络进行消除。这样就可以保证与电压互感器的副边电压保持同相位。

当负载电压及电流都是交流量时，霍尔输出电压中也包含交流成分。设电压互感器及电流互感器的输出分别为，，其中、是两互感器的变比，是负载功率因数角，则霍尔输出电压的瞬时值为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.96） |

可见，中的直流分量即为有功功率。因此，必须将输出电压中的二次谐波分量滤掉，才能得到准确的有功功率。

从以上分析可知，用霍尔元件组成功率传感器，其技术难点在于：如何确保霍尔元件的磁感应强度与负载电压同相位以及如何滤掉输出电压中的交流分量而不损失直流成分。

# §3.5 其它新型传感器

## 3.5.1 半导体传感器

半导体传感器（Semiconductor Sensor）是利用半导体材料的各种物理特性、化学特性和生物特性，把力、热、光、磁、气、湿度、射线、离子等一些物理量、化学量和生物量的变化转换为便于处理的电信号的传感器。随着材料科学和固体物理效应的不断发现，目前已陆续制成了热敏、光敏、力敏、磁敏、气敏、湿敏等多种类型的传感器，并在工业控制领域和人们的日常生活中得到越来越广泛的应用。

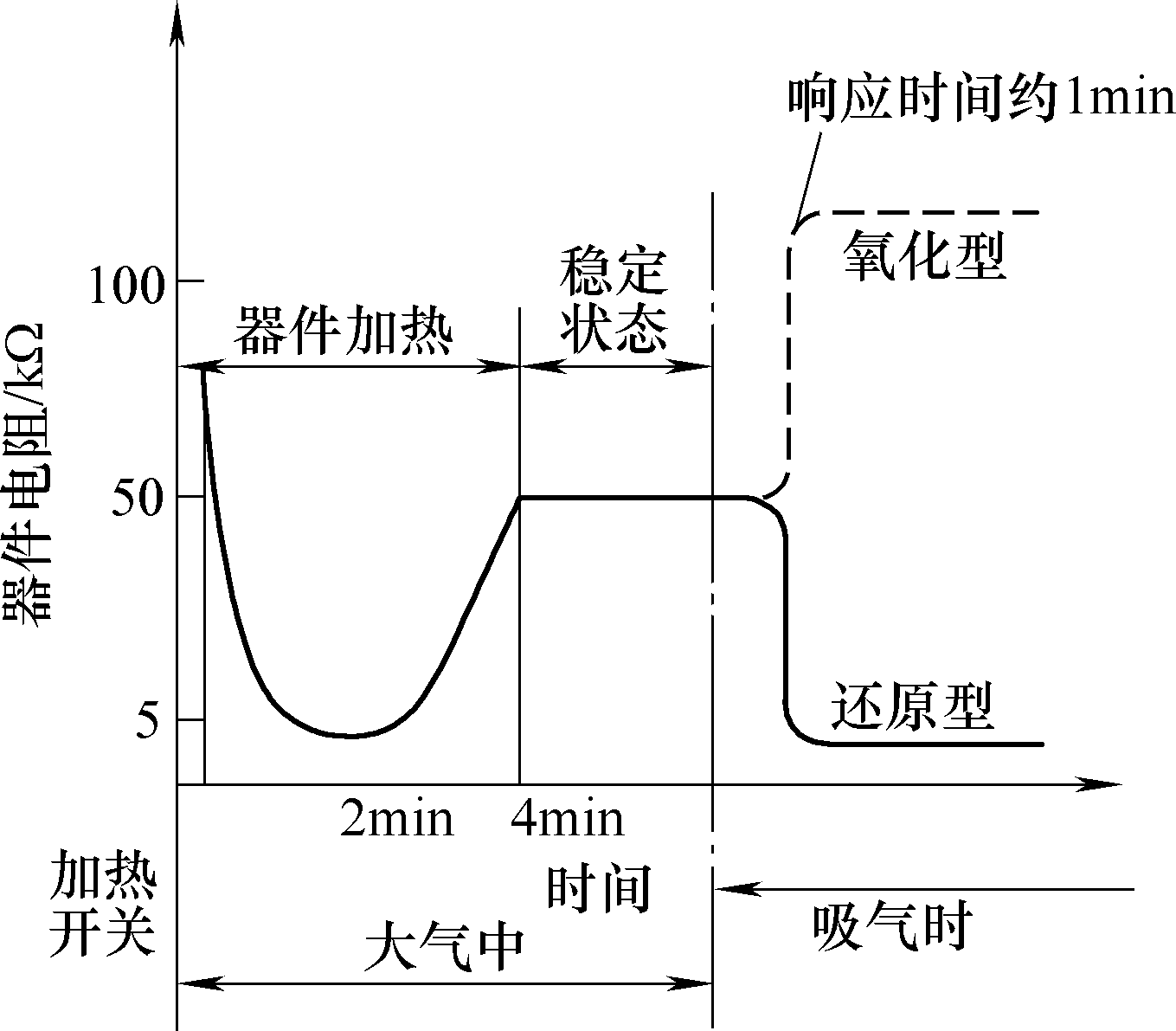
半导体传感器以半导体敏感元件为核心，具有灵敏度高、响应速度快、结构简单、体积小、质量轻、成本低、便于集成化和智能化等优点。然而，在某些情况下，由于其特性分散性、温度不稳定性以及易受干扰性，半导体传感器的应用受到了很大的限制。

接下来，我们将以常用的电阻半导体式气体传感器为例，简要介绍半导体传感器的工作原理与应用。

### 3.5.1.1 工作原理

电阻半导体式气体传感器是由如氧化锡、氧化锌等金属氧化物材料制作的敏感元件。这种传感器依赖于敏感材料接触气体时电阻值的变化，以检测气体的成分或浓度。传感器的核心部分是由金属材料制成的气敏电阻，其通常根据化学计量比和杂质缺陷合成。为了提高气敏元件对某些气体成份的选择性和灵敏度，可以在合成材料时添加其他一些金属元素催化剂。例如，可以添加钯、铂、银等。

当N型半导体吸附气体时，元件的阻值会发生变化，如图3-43所示。

  
图3-43 N型半导体吸附气体时元件阻值变化

如图3-43所示，当半导体气敏元件被加热至稳定状态并接触到气体时，气体分子会在器件表面进行物理吸附并自由扩散，从而失去运动能量。同时，部分分子会蒸发，而剩余的分子则会通过热分解在器件表面形成化学吸附。若元件的功函数小于吸附分子的电子亲和力，吸附分子将从元件中夺取电子并转化为负离子吸附。这类气体，如和等，被称为氧化型或电子接收型气体。相反，若元件的功函数大于吸附分子的离解能，吸附分子将向器件释放电子并转化为正离子吸附。这类气体，如、CO、碳氢化合物和醇类等，被称为还原型或电子供给型气体。

由半导体表面态理论可知，当氧化型气体吸附到N型半导体（如、、或还原型气体吸附到P型半导体（如、）上时，将使多数载流子（价带空穴）减少、电阻增大。相反，当还原型气体吸附到N型半导体上，或氧化型气体吸附到P型半导体上时，将使多数载流子（导带电子）增多，电阻下降。图3-43为气体接触到N型半导体时所产生的元件阻值的变化。规则总结如下：

* 氧化型气体+N型半导体：多数载流子数下降，电阻增加；
* 还原型气体+N型半导体：多数载流子数增加，电阻减小；
* 氧化型气体+P型半导体：多数载流子数增加、电阻减小；
* 还原型气体+P型半导体：多数载流子数下降，电阻增加。

空气中的氧成分大体上是恒定的，因此氧的吸附量也是恒定的，气敏元件的阻值大致保持不变。如果被测气体进入到这种气氛中，元件表面将产生吸附作用，元件的阻值将随气体浓度变化。通过观察浓度与电阻值的变化关系即可得知气体的浓度。

气敏元件的灵敏度特性如图3-44所示。

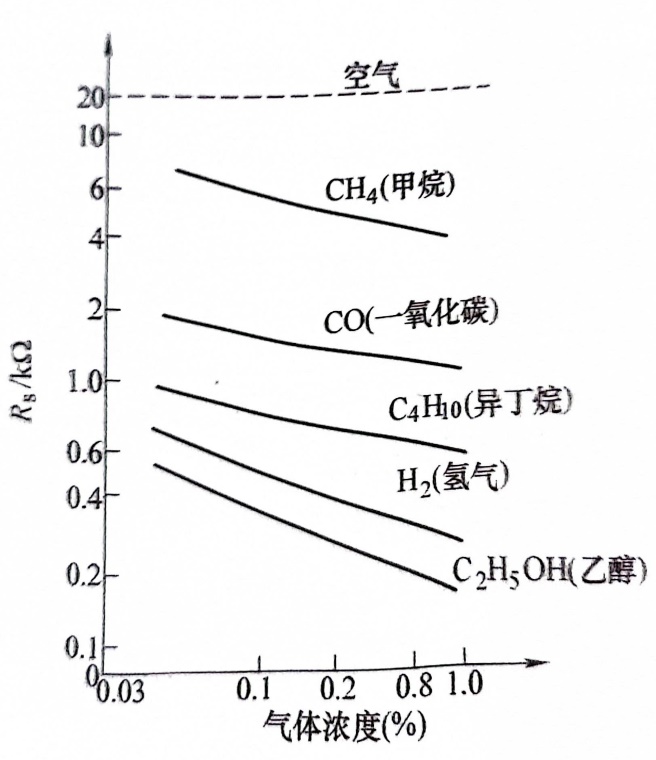
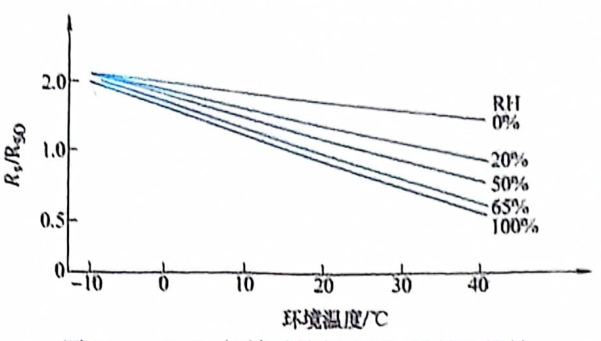
  
图3-44 气敏元件的灵敏度特性

图3-44表示不同气体浓度下气敏元件的电阻值。由图可见， “喝”白酒后也会“飘”（电阻值下降）。薄膜对多种气体敏感，因此如何提高气敏器件的选择性和灵敏度一直是研究的重点。主要的改进措施包括在基体材料中加入不同的贵金属或金属氧化物催化剂，设置合适的工作温度，利用过滤设备或透气膜外过滤敏感气体等。

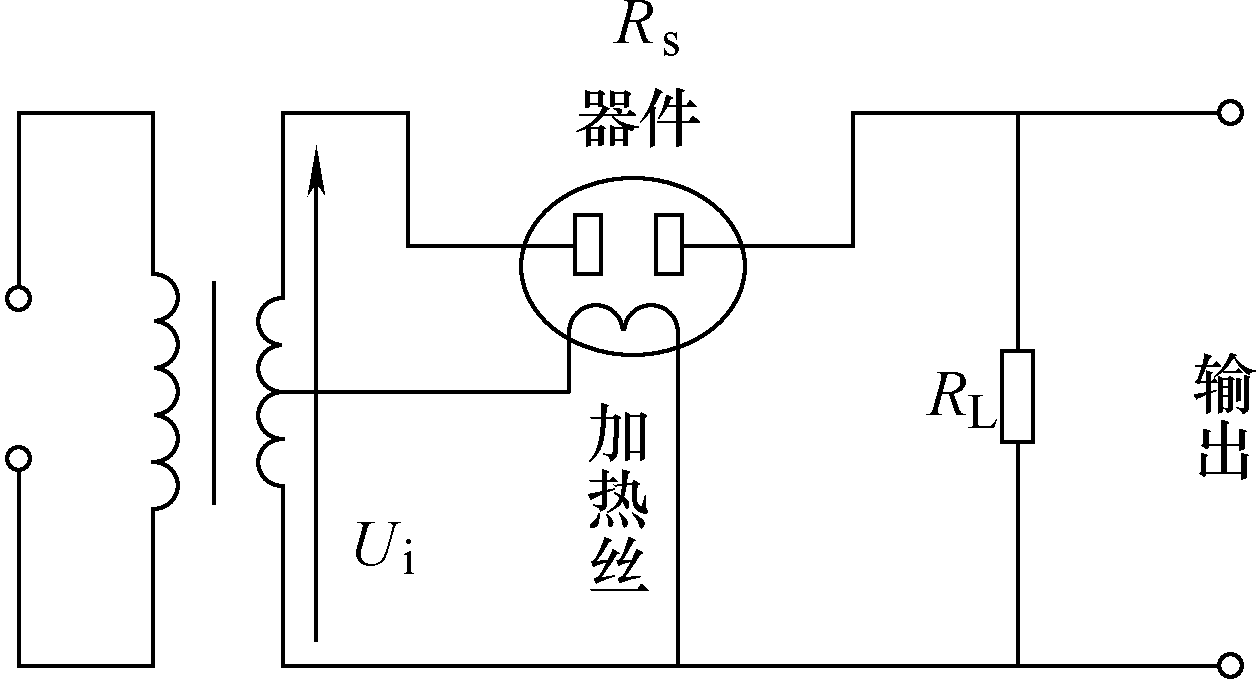
气敏元件的电阻-温湿度特性如图3-45所示。

  
图3-45 气敏元件的电阻-温湿度特性

在图3-45中，代表其在一般温湿度条件下（、）的电阻值。由此可见，它的电阻值易受环境温湿度的影响。因此，这类器件在标定之前，通常需要1～2周的老化时间。也就是说，在不通电的状态下放置一段时间，使其阻值趋于稳定。另外，在使用时通常需要加入湿度补偿，以提高仪器的检测精度和可靠性。

气敏电阻通常工作在高温状态下，其工作温度一般在至之间。这种高温环境可以去除气敏电阻上附着的油、雾、尘埃等有害物质，并加速气体与金属氧化物的氧化还原反应，从而提高气敏电阻的灵敏度和响应速度。因此，气敏元件结构上包含电阻丝加热器。

气敏电阻被分为加热支路和测试支路分别接入所用的测量电路，如图3-46所示。

  
图3-46 气敏电阻的基本测量电路

当所测气体浓度变化时，气敏电阻值会发生变化。由于气敏电阻与负载电阻是串联的，输出电压也将随之发生变化。输出电压的大小可表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.97） |

式中：—气敏电阻测试支路的电阻；

—负载电阻（兼作取样电阻）。

由上式可知，当减小时，输出电压增大；反之，当增大时，输出电压减小。因此，可以通过测量输出电压来测得气敏元件的阻值，进而确定被测气体的成分和浓度。

### 3.5.1.2 电阻式半导体气体传感器的特点

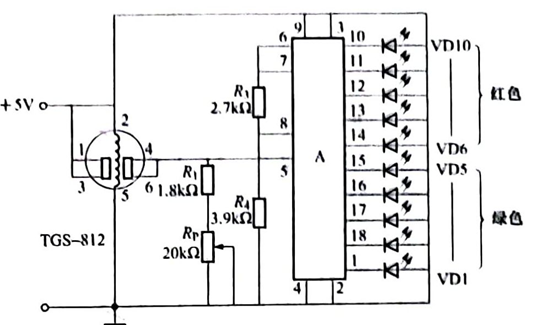
电阻式半导体气体传感器的优点在于工艺简单、价格便宜、使用方便。当气体浓度发生变化时，它的响应速度较快。即使在低浓度下，它的灵敏度也较高。然而，它也存在一些缺点，例如老化速度较快、气体识别能力较弱以及各器件之间的特性差异较大等。

目前电阻式气体传感器已广泛应用于液化石油气、管道煤气等可燃性气体的泄漏检测和（浓度）定限报警等领域。

### 3.5.1.3半导体传感器应用

半导体传感器的主要应用领域包括工业自动化、遥测、工业机器人、家用电器、环境污染监测、医疗保健、医药工程和生物工程等。下面以酒精测试仪为例介绍半导体传感器的应用。

酒精测试仪电路如图3-47所示。

  
图3-47 酒精测试仪电路

在图3-47的酒精测试仪电路中，选用TGS-812作为其气体传感器。显示驱动电路A共有10个输出端，每个输出端都可以驱动一个发光二极管。根据第5脚的电压高低，可以确定依次点亮发光二极管的级数，酒精含量越高，点亮的二极管级数就越大。上面5个发光二极管为红色，表示酒精含量超过安全水平，而下面5个为绿色的发光二极管则代表酒精含量在安全水平内，即不超过0.05％。当TGS-812气体传感器探测不到酒精时，其1、4间的电阻较大。这会使A的第5脚电平为低电平，导致A不工作，发光二极管不亮。然而，当气体传感器探测到酒精时，其1、4间的电阻会变低。这会使A的第5脚电平变高，从而推动A工作，驱动发光二极管点亮。酒精含量越高，TGS-S12的内阻阻值就越小，A脚的电平就越高，从而依次点亮更多的发光二极管。TGS-812的2和5脚是加热丝，用于加热以去除附着在敏感元件表面的尘垢和油污，从而加速气体的吸附，提高器件的灵敏度和响应速度。同时，的作用是调节第5脚的电压，使其在进行气体探测前处于低电平状态。

## 3.5.2光纤传感器

光纤传感器(Optical Fiber Sensor)是近年来随着光导纤维技术的发展而出现的一种以光作为信息载体的新型传感器。与以电作为信息载休的传感器相比，光纤传感器具有许多固有的优点。例如：

（1）传输光的媒体光纤是由石英玻璃等绝缘材料制作的，具有良好的电绝缘性和抗电磁干扰性，适用于强电系统的测试；

（2）光纤信息传输损耗低、具有极高的灵敏度，适用于精密测量和遥测技术。

（3）光纤可以任意弯曲，柔性极好，适用于探测其他传感器无法测试的地方。

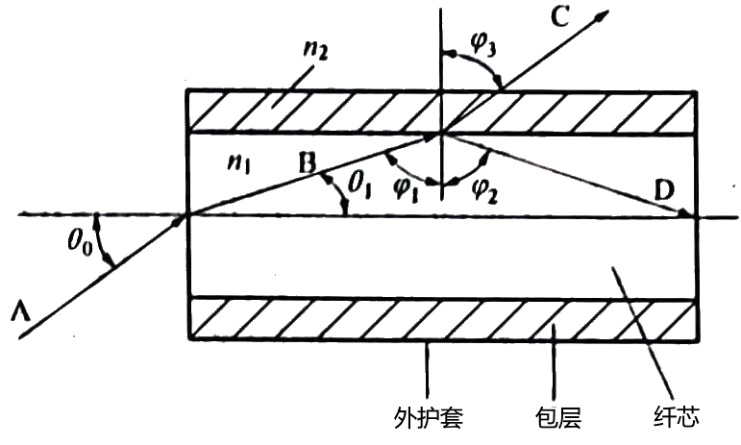
（4）光纤耐水浸、耐腐蚀、耐高温等，环境适应性好，有利于在核电业、航天机械、医疗器械、石油化工等特殊环境下使用。

目前已研制出多种光纤传感器，可用于位移、速度、加速度、液位、压力、流量、振动、水声、温度、电压、电流、磁场、核辐射等方面的测量。

### 3.5.2.1光纤结构及导光原理

1. 光纤结构

光纤的结构示意图如图3-48所示。

  
图3-48 光纤的结构示意图

光纤呈圆柱形，通常由玻璃纤维芯（纤芯）、玻璃包皮（包层）两个向心圆柱的双层结构组成。

纤芯位于光纤的中心部位，光主要在这里传输，其折射率比包层折射率略大一些，因此两层之间形成了良好的光学界面，使得光线能在这个界面上反射传播。

2. 光纤导光原理及数值孔径

在开放空间中，光是直线传播的。然而，在光纤中，由于全内反射的特性，光被限制在光纤内部，可以走很远的距离。

设纤芯的折射率为，包层的折射率为（其典型值是，），且。当光线从空气（折射率为）中射入光纤的一个端面，并与其轴线的夹角为，则在光纤内折射成角的光线B。然后，光线B以（）角入射到纤芯与包层的交界面上。由于纤芯与包层的折射率不等（即），光线B的一部分光被反射，成为反射光D；而另一部分光则折射成为折射光C。在这种情况下，入射光线与折射光线应满足：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.98） |

由于，当入射角达到某一特定值时，折射角将等于。在这种情况下，折射光沿界面传播，此现象称为全反射。将使等于的值定义为临界角，记作。由式（3.98）可知，其临界角为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.99） |

若继续加大入射角，（即），光不再产生折射，而形成了光的全反射，光线被限制在纤芯中传播，即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.100） |

为满足光在光纤内的全反射，光入射到光纤端面的临界入射角应满足：

所以：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.101） |

在实际应用中，光纤需要弯曲。只要满足全反射条件，光线仍然可以继续前进。这里的光线“转弯”实际上是由光的全反射形成的。

一般光纤所处环境为空气，则，由式（3.101）得

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.102） |

这样在界面上产生全反射，在光纤端面上的光线入射角为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.103） |

纤维光学中把式（3.103）中的定义为“数值孔径”（NA）。数值孔径反映了纤芯接收光的入射角范围。无论光源的发射功率有多大，只有当入射光处于的光锥内时，光纤才能导光。纤芯与包层的折射率差值越大，数值孔径就越大，光纤的集光能力越强。

在之前的讨论中，我们忽略了光在传播过程中的各项损耗。实际上，入射于光纤中的光存在有各种损耗，如费涅耳反射损耗、光吸收损耗、全反射损耗、弯曲损耗等。因此，光纤不可能百分之百地将入射光的能量传播出去，因为其中一部分光在传播途中就会损失。

### 3.5.2.2 光纤传感器的工作原理

我们之前讲到的以电为基础的传统传感器是一种把被测量的状态转变为可测的电信号的装置。然而，光纤传感器则是一种把被测量的状态转变为可测的光信号的装置。光纤传感器由光发送器、敏感元件（光纤或非光纤的）、光接收器、信号处理系统以及光纤构成。光发送器发出的光通过光纤引导至敏感元件，其中光的某一性质受到被测量的调制。然后，已调制的光通过接收光纤耦合到光接收器，将光信号转换为电信号。最后，信号处理系统将这些电信号转化为实用的测量结果。

从基本原理上看，光就是一种电磁波，其波长范围从极远红外的1nm到极远紫外线的10nm。电磁波的物理作用和生物化学作用主要因其中的电场引起的。因此，在讨论光的敏感测量时必须考虑电矢量的振动。通常用下式表示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.104） |

式中：—电场的振幅矢量；

—光波的振动频率；

—光相位；

—光的传播时间。

可见，只要使光的强度、偏振态、频率和相位等参量之一随被测量状态的变化而变化，或者说受被测量调制，那么就有可能获得所需要的被测量的信息。这可以通过对光的强度调制、偏振调制和相位调制等进行解调来实现。

### 3.5.2.3光纤传感器的应用

光纤传感器具有许多固有的优点，这使得它在许多方面都优于以电作为信息载体的传感器。因此，光纤传感器被广泛应用于位移、速度、加速度、液位、压力、流量、振动、水声、温度、电压、电流、磁场、核辐射等方面的测量。接下来，我们将通过光纤电流传感器的例子来介绍光纤传感器的应用。

法拉第磁光效应如图3-49所示。

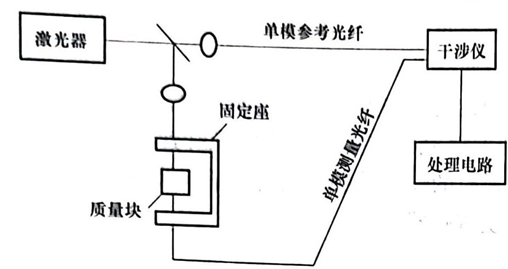
  
图3-49 法拉第磁光效应

图3-49所示的法拉第磁光效应表明，在磁场作用下，偏振光的振动面发生旋转，旋转的角度与光在物质中传播的距离以及磁场强度成正比，即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.105） |

式中：—物质的费尔德常数。

法拉第磁光效应可以用来测量高压大电流。当高压输电线上的电流为时，如果在高压输电线上绕有N圈光纤，那么光纤中传输的线偏振光在高压输电线形成的磁场作用下，偏振面的旋转角度将为。利用式（3.106）可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.106） |

如果这个磁场是由长直载流导线产生的，根据安培环路定律可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.107） |

式中：—载流导线中的电流强度；

—光纤缠绕半径；

根据法拉第磁光效应，引起光纤中线偏振光的偏转角为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.108） |

由检测及信号处理后得输出信号为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3.109） |

式中：—受磁场作用光纤长度；

—光纤圈数。

由于光纤材料的费尔德常数非常小，因此使用这种方法测量的电流值可以在几十到几十万安之间。

# 习题3

1. 应变片的种类有哪些？各有什么特点？

2. 应变片产生温度误差的原因及减小或补偿温度误差的方法是什么？

3. 电感式传感器的工作原理是什么？根据转换原理，其可以分为哪几类？

4. 引起零点残余电压的原因是什么？如何消除零点残余电压？

5. 根据电容式传感器工作时变换参数的不同，可以将电容式传感器分为哪几种类型？各有何特点？

6. 试讨论变极距型电容式传感器的非线性及其补偿方法。

7. 简述变磁通式和恒磁通式磁电感应传感器的工作原理。

8. 磁电式传感器与电感式传感器有哪些不同？

9. 什么是霍尔效应？霍尔电动势与哪些因素有关？

10. 如何提高霍尔传感器的灵敏度？

11. 试简述电阻式气体传感器的工作原理。

12. 试简述光纤传感器的工作原理。