

液位与厚度测量



知识目标

- 理解光的传输原理和光导纤维传感器的类型
- 掌握光纤传感器的工作原理、分类和应用
- 掌握电容传感器的测量电路与应用
- 理解电容传感器差动结构的优点和测量中存在的问题及解决办法
- 了解微波传感器的工作原理



技能目标

- 能利用光纤传感器进行相应物理量的测量
- 能利用电容传感器实现位移、压力、液位等信号的检测

任务 1 光纤传感器测量液位

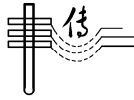
知识链接

ZHISHIJIANKA

光纤传感器（Fibre optical sensor）是 20 世纪 70 年代中期迅速发展起来的一种新型传感器，是光纤和光通信技术迅速发展的产物。它以光学测量为基础，把被测量的变量状态转换为可测的光信号，可广泛应用于位移、速度、加速度、压力、温度、液位、流量、水声、电声、磁场、放射性射线等的测量。

6.1.1 光纤的结构及种类

光导纤维简称光纤，是一种经过特别工艺拉制的、能传输光信息的导光纤维，它主要由高强度石英玻璃、常规玻璃和塑料制成。光纤透明、纤细，具有把光封闭其中，并沿轴向进



行传播的特征。光纤的基本结构如图 6.1 所示, 它的结构很简单, 由导光的芯体玻璃 (简称纤芯)、包层及外护套组成, 纤芯位于光纤的中心部位, 其直径为 $5\sim 100\ \mu\text{m}$, 包层可用玻璃或塑料制成, 两层之间形成良好的光学界面, 包层外面常有 PVC 外套, 可保护纤芯和包层并使光纤具有一定的机械强度。

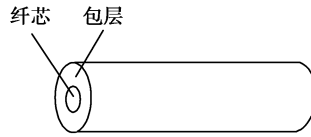


图 6.1 光纤的基本结构

光主要在纤芯中传输, 光纤的导光能力主要取决于纤芯和包层的性质, 即它们的折射率。纤芯的折射率大于包层的折射率, 而且纤芯和包层构成一个同心圆双层结构, 所以, 可以保证入射到光纤内的光波集中在纤芯内传输。

如图 6.2 所示, 按折射率的分布分类, 光纤主要有三种类型。

(1) 阶跃型

如图 6.2 (a) 所示, 阶跃型多模光纤的折射率不随半径变化, 各点分布均匀一致。

(2) 梯度型

如图 6.2 (b) 所示, 梯度型多模光纤的纤芯折射率近似呈平方分布, 在轴线上折射率最大, 离开轴线则逐步降低, 又称自聚焦光纤。

(3) 单孔型

如图 6.2 (c) 所示, 由于单孔型光纤的纤芯直径较小, 光以电磁场模的原理传导, 能量损失小, 适宜于远距离传输, 又称单模光纤。

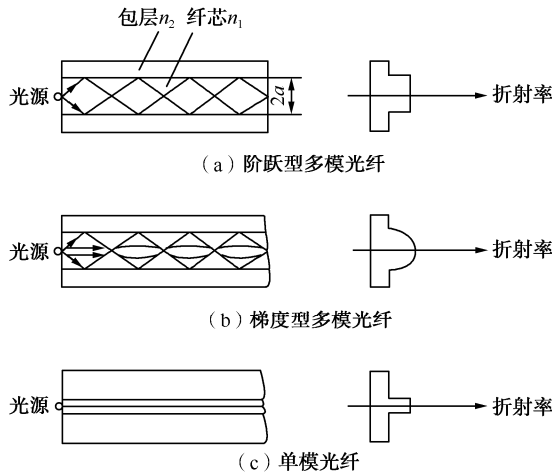


图 6.2 光纤的种类

此外, 光纤按纤芯和包层材料性质分类, 有玻璃光纤和塑料光纤两类; 光纤还可按传输模式分类, 有单模光纤和多模光纤两类。



6.1.2 光纤的传输原理

1. 光的全反射定律

光的全反射现象是研究光纤传光原理的基础。在几何光学中，大家知道，当光线以较小的入射角 φ_1 ($\varphi_1 < \varphi_c$, φ_c 为临界角)由光密媒质(折射率为 n_1)射入光疏媒质(折射率为 n_2)时，一部分光线被反射，另一部分光线折射入光疏媒质，如图6.3(a)所示。折射角满足斯乃尔法则，即

$$n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2 \quad (6.1)$$

根据能量守恒定律，反射光与折射光的能量之和等于入射光的能量。

当逐渐加大入射角 φ_1 ，一直到 φ_c 时，折射光就会沿着界面传播，此时折射角 $\varphi_2 = 90^\circ$ ，如图6.3(b)所示，这时的入射角 $\varphi_1 = \varphi_c$ ，称为临界角，由式(6.2)决定。

$$\sin \varphi_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (6.2)$$

当继续加大入射角 φ_1 (即 $\varphi_1 > \varphi_c$)时，光不再产生折射，只有反射，形成光的全反射现象，如图6.3(c)所示。

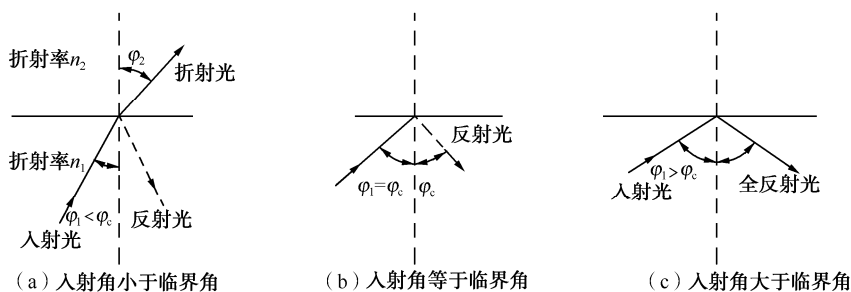


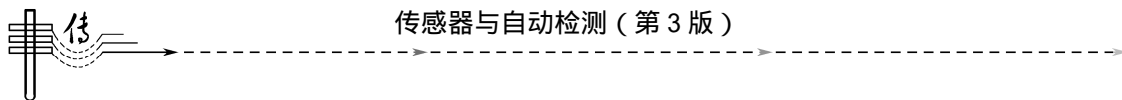
图 6.3 光线在临界面上发生的内反射示意图

2. 光纤的传光原理

下面以阶跃型多模光纤为例来说明光纤的传光原理。

阶跃型多模光纤中子午光线的传播如图6.4所示。设纤芯的折射率为 n_1 ，包层的折射率为 n_2 ($n_1 > n_2$)。当光线从空气(折射率 n_0)中射入光纤的一个端面，并与其轴线的夹角为 θ_0 时，如图6.4(a)所示，在光纤内折成 θ_1 角，然后以 φ_1 ($\varphi_1 = 90^\circ - \theta_1$)角入射到纤芯与包层的界面上。若入射角 φ_1 大于临界角 φ_c ，则入射的光线就能在界面上产生全反射，并在光纤内部以同样的角度反复逐次全反射地向前传播，直至从光纤的另一端射出。因光纤两端都处于同一媒质(空气)之中，所以出射角也为 θ_0 。光纤即便弯曲，光也能沿着光纤传播，但是光纤过分弯曲，以致使光射至界面的入射角小于临界角时，则大部分光将透过包层损失掉，从而不能在纤芯内部传播，如图6.4(b)所示。

从空气中射入光纤的光并不一定都在光纤中产生全反射。图6.4(a)中所示的虚线表示入射角 θ'_0 过大，光线不能满足临界角要求(即 $\varphi_1 < \varphi_c$)，这部分光线将穿透包层而逸出，称为漏光。即使有少量光被反射回光纤内部，但经过多次这样的反射后，能量已基本上损耗掉，



以致几乎没有光通过光纤传播出去。因此，只有在光纤端面一定入射角范围内的光线才能在光纤内部产生全反射而传播出去，能产生全反射的最大入射角可以通过临界角定义求得。

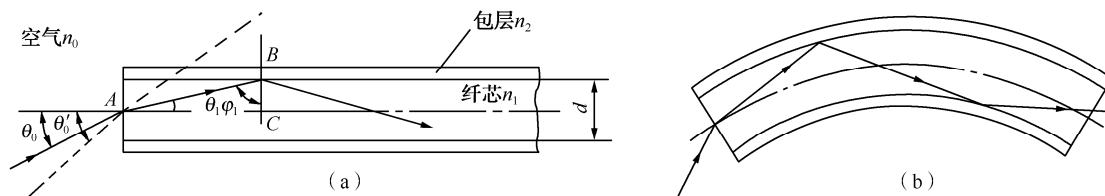


图 6.4 阶跃型多模光纤中子午光线的传播

引入光纤的数值孔径 (N_A) 这个概念，则

$$\sin \theta_c = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = N_A \quad (6.3)$$

数值孔径是衡量光纤集光性能的一个主要参数，它决定了能被传播的光束的半孔径角的最大值 θ_c ，反映了光纤的集光能力。它表示无论光源发射功率多大，只有 $2\theta_c$ 张角的光才能被光纤接收和传播（全反射）。 N_A 数值越大，光纤的集光能力越强。光纤产品通常不给出折射率，而只给出 N_A 的值。石英光纤的 N_A 值为 $0.2 \sim 0.4$ 。

6.1.3 光纤传感器的结构、特点及种类

1. 光纤传感器的结构与特点

光纤传感器的构成示意图如图 6.5 所示，主要由光发送器、敏感元件、光接收器、信号处理系统及光导纤维等主要部分组成。由光发送器发出的光，经光纤引导到调制区，被测参数通过敏感元件的作用，使光学性质（如光强、波长、频率、相位、偏振态等）发生变化而成为被调制光，再经光纤送到光接收器，经过信号处理系统处理而获得测量结果。在检测过程中，用光作为敏感信息的载体，用光导纤维作为传输光信息的媒质，通过检测光纤中光波参数的变化以达到检测外界被测物理量的目的。

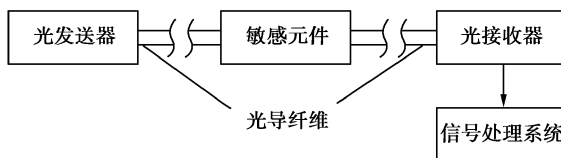


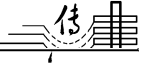
图 6.5 光纤传感器的构成示意图

光纤传感器与常规的传感器相比，具有以下特点。

① 抗电磁干扰能力强。当光信息在光纤中传输时，它不会与电磁场产生作用，因而信息在传输过程中抗电磁干扰能力很强，特别适用于电力系统。

② 电绝缘性能好。光纤一般用石英玻璃制作，是不导电的非金属材料，其外层的涂覆材料硅胶也不导电，因而光纤的绝缘性能高，便于测量带高压电设备的各种参数。

③ 防爆性能好，耐腐蚀，耐高温。由于在光纤内部传输的是能量很小的光信息，不会



产生火花、高温、漏电等不安全现象，因此安全性能好。光纤传感器适合于有强腐蚀性对象的参数测量。

④ 光纤细且柔软，直径仅有几十微米至几百微米，可制成非常小巧的光纤传感器，用于测量特殊对象及场合的参数。例如可深入机器内部或人体弯曲的内脏进行检测，也能使光沿需要的路径传输。

⑤ 可利用现有的光能技术组成遥测网。

2. 光纤传感器的分类

光纤传感器种类繁多，应用范围极广，发展也极为迅速。从广义上讲，凡是采用光导纤维的传感器均可称为光纤传感器，其分类方法如下。

(1) 按测量对象分类

按测量对象的不同，光纤传感器可以分为光纤温度传感器、光纤浓度传感器、光纤电流传感器、光纤流速传感器等。

(2) 按光纤在传感器中的作用分类

按光纤在传感器中所起的作用不同，可分为 FF 型（Function Fiber，功能型光纤传感器）和 NFF 型（Non Function Fider，非功能型光纤传感器）两类。

(3) 按光纤中光波调制的原理分类

光波在光纤中传输光信息，把被测物理量的变化转变为调制的光波，即可检测出被测物理量的变化。光波在本质上是一种电磁波，因此它具有光的强度、频率、相位、波长和偏振态 5 个参数。相应地，根据被调制参数的不同，光纤传感器可分为 5 类，即强度调制型光纤传感器、相位调制型光纤传感器、偏振调制型光纤传感器、频率调制型光纤传感器和波长调制型光纤传感器。下面主要介绍强度调制型光纤传感器和相位调制型光纤传感器。

3. 光纤传感器的功能

(1) 强度调制型光纤传感器

强度调制型光纤传感器是应用较多的光纤传感器，它的结构比较简单，可靠性高，但灵敏度稍低。强度调制型光纤传感器的几种形式如图 6.6 所示。

① 反射式。如图 6.6 (a) 所示，当被测表面前后移动时引起反射光强发生变化，利用该原理可进行位移、振动、压力等参数的测量。

② 遮光式。如图 6.6 (b) 所示，不透光的被测物部分遮挡在两根传感臂光纤的聚焦透镜之间，当被测物上下移动时，引起另一根传感臂光纤接收到的光强发生变化。利用该原理可进行位移、振动、压力等参数的测量。

③ 吸收式。如图 6.6 (c) 所示，透光的吸收体遮挡在两根光纤之间，当被测物理量引起吸收体对光的吸收量改变时，引起光纤接收到的光强发生变化。利用该原理可进行温度等参数的测量。

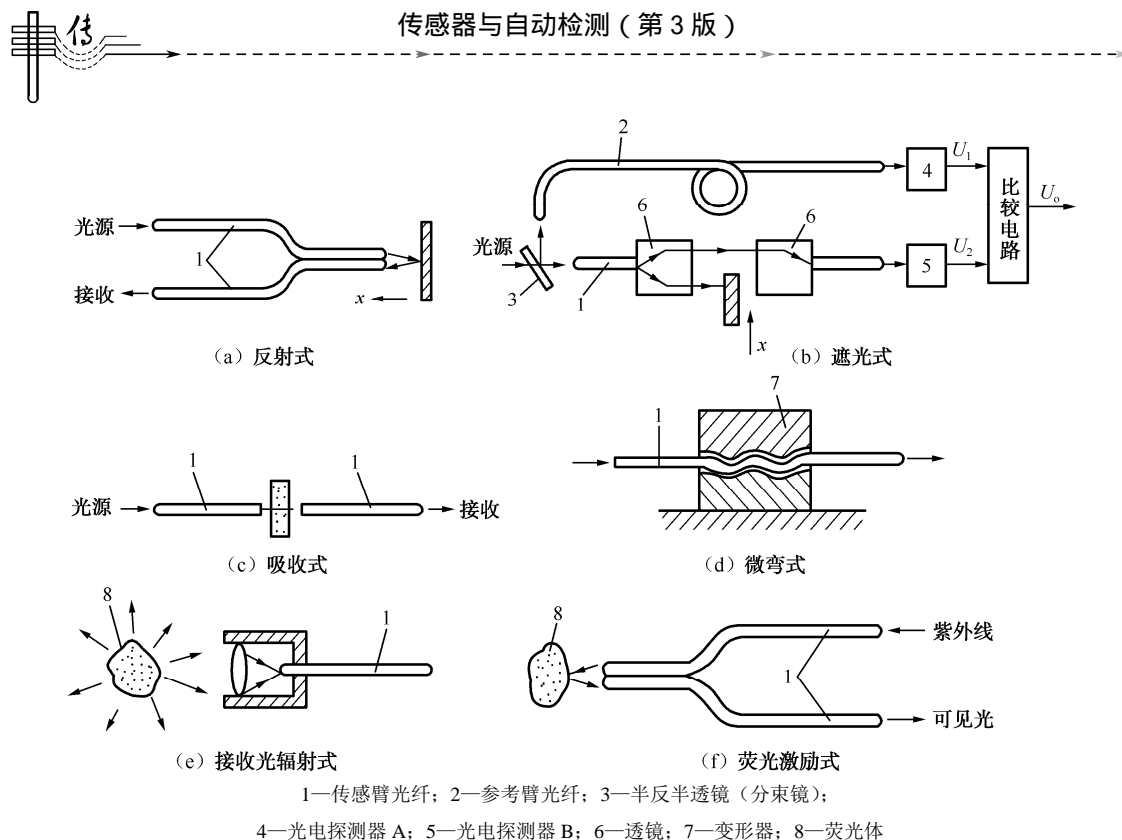


图 6.6 强度调制型光纤传感器的形式

④ 微弯式。如图 6.6 (d) 所示, 将光纤放在两块齿形变形器之间, 当变形器受力时, 将引起光纤发生弯曲变形, 使光纤损耗增大, 光电检测器接收到的光强变小。利用该原理可进行压力、力、质量、振动等参数的测量。

⑤ 接收光辐射式。如图 6.6 (e) 所示, 被测体本身为光源, 传感器本身不设置光源。根据光纤接收到的光辐射强度来检测与辐射有关的被测量。其典型应用是利用黑体受热发出红外辐射来检测温度, 还可用于检测放射线等。

⑥ 荧光激励式。如图 6.6 (f) 所示, 传感器的光源为紫外线, 紫外线照射到某些荧光物质上时, 就会激励出荧光, 荧光的强度与材料自身的各种参数有关。利用这种原理可进行温度、化学成分等参数的测量。

大部分强度调制型光纤传感器都属于传光型, 对光纤的要求不高, 但希望耦合进入光纤的光强尽量大些, 所以一般选用较粗芯径的多模光纤, 甚至可以使用塑料光纤。另外, 强度调制型光纤传感器的信号检测电路比较简单。

(2) 相位调制型光纤传感器

某些被测量作用于光纤时, 将引起光纤中光的相位发生变化。由于光的相位变化难以用光电元件直接检测出来, 因此通常要利用光的干涉效应, 将光相位的变化量转换成光干涉条纹的变化来检测, 所以相位调制型光纤传感器有时又称为干涉型光纤传感器。

相位调制型光纤传感器的灵敏度极高, 并具有大的动态范围。一个好的光纤干涉系统可以检测出 10^{-4} 弧度的微小相位变化。例如在相位调制型光纤温度传感器中, 温度每变化 1°C , 就可使 1 m 长的光纤中光的相位变化 100 弧度, 所以该系统理论上可以达到 10^{-6}°C 的



分辨力, 这样的分辨力是其他传感器所难以达到的。当然, 环境参数的变化也必然对这样灵敏的系统造成干扰, 因此系统必须考虑适当的补偿措施, 如采用差动结构。相位调制型光纤传感器的结构比较复杂, 且需要使用激光 (ILD) 及单模光纤。如图 6.7 所示给出了双路光纤干涉仪的原理图。

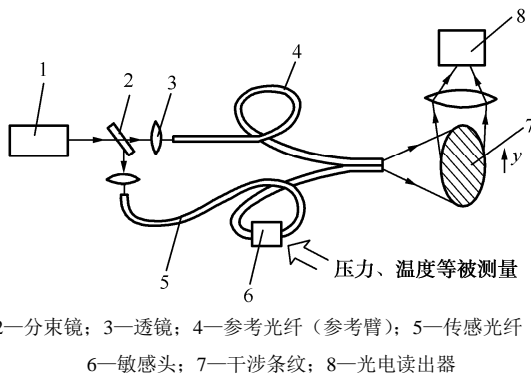


图 6.7 双路光纤干涉仪的原理图

将光纤测量臂输出的光与不受被测量影响的另一根光纤 (也称作参考臂) 的参考光做比较, 根据比较结果可以计算出被测量。

双路光纤干涉仪必须设置两条光路, 一束光通过敏感头感受被测量影响, 另一束光通过参考光纤, 它的光程是固定的。在两束光的汇合投影处, 测量臂传输的光与参考臂传输的光将因相位不同而产生明暗相间的干涉条纹。当外界因素使传感光纤中的光产生光程差 Δl 时, 干涉条纹将发生移动, 移动的数目 $m = \Delta l / \lambda$ (λ 为光的波长)。外界因素可以是被测的压力、温度、磁致伸缩、应变等物理量。根据干涉条纹的变化量, 就可检测出被测量的变化, 常见的检测方法有条纹计数法等。

任务与实施

RENWUYUSHISHI

【任务 1】 在工厂车间里, 有许多大功率电动机、交流接触器、晶闸管调压设备和感应电炉等, 在防爆场合采用电气测量时, 就会遇到电磁感应引起的噪声问题, 在可能产生化学泄漏或可燃性气体溢出的场合, 就会遇到腐蚀和防爆的问题。在这些环境恶劣的场合, 要求对高压变压器冷却油液位进行检测, 采用何种传感器较合适? 如何测量?

【实施方案】 光纤液位传感器利用强度调制型光纤反射式原理制成, 其工作原理图如图 6.8 所示。LED 发出的红光被聚焦射入到入射光纤中, 经在光纤中长距离全反射到达球形端部。一部分光线透出端面; 另一部分经端面反射回到出射光纤, 被另一根接收光纤末端的光敏二极管 VD 接收 (图中未画出)。

液体的折射率比空气大, 当球形端面与液体接触时, 通过球形端面的光透射量增加而反射量减少, 由后续电路判断反光量是否小于阈值, 就可判断传感器是否与液体接触。该液位传感器的缺点是液体在透明球形端面的黏附现象会造成误判; 另外, 不同液体的折射率不同, 对反射光的衰减量也不同。因此, 必须根据不同的被测液体调整相应的阈值。

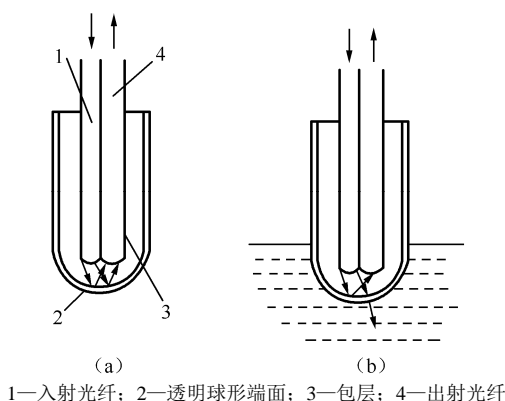


图 6.8 光纤液位传感器的工作原理图

光纤液位传感器用于高压变压器冷却油的液位检测报警电路如图 6.9 所示。

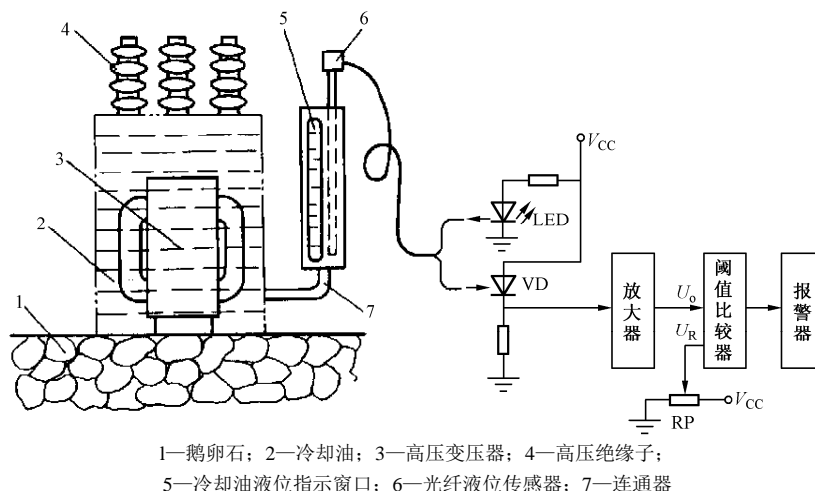


图 6.9 光纤液位传感器用于高压变压器冷却油的液位检测报警电路

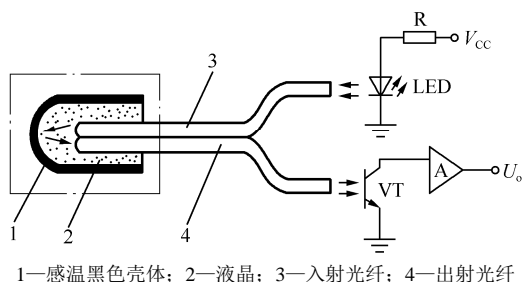
当变压器冷却油液位低于光纤液位传感器的球形端面时，出射光纤的接收光敏二极管接收到的光量减少。当 U_o 小于阈值 U_R 时，报警器报警。因为光纤传感器不会将高电压引入到计算机控制系统，所以绝缘问题较易解决。

如果要检测上、下限油位，可设置两个光纤液位传感器。

【任务 2】 在一些易燃、易爆的化工车间进行温度测量时，就会遇到防爆问题。选用何种传感器适合于远距离防爆场所的温度检测呢？

【实施方案】 光纤温度传感器是一种适合于远距离防爆场所的环境温度检测的传感器。光纤温度传感器是利用了强度调制型光纤荧光激励式原理制成的，如图 6.10 所示。

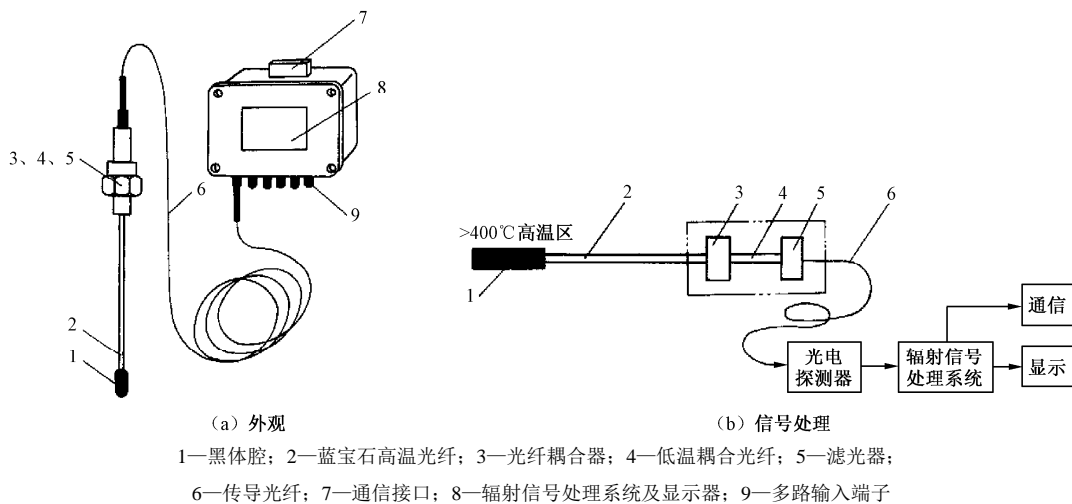
LED 将 $0.64 \mu\text{m}$ 的可见光耦合投射到入射光纤中，感温壳体左端的空腔中充满彩色液晶，入射光经液晶散射后耦合到出射光纤中。当被测温度 t 升高时，液晶的颜色变暗，出射光纤得到的光强变弱，经光敏三极管和放大器后得到的输出电压 U_o 与被测温度 t 呈某一函数关系。



1—感温黑色壳体；2—液晶；3—入射光纤；4—出射光纤

图 6.10 光纤温度传感器

对于被测温度较高的情况可利用光纤高温传感器测量。光纤高温传感器包括端部掺杂质的高温蓝宝石单晶光纤探头、光电探测器和辐射信号处理系统，如图 6.11 所示。



(a) 外观
 1—黑体腔；2—蓝宝石高温光纤；3—光纤耦合器；4—低温耦合光纤；5—滤光器；
 6—传导光纤；7—通信接口；8—辐射信号处理系统及显示器；9—多路输入端子

图 6.11 光纤高温传感器

当光纤温度传感器端部达到 400°C 以上时，由于黑体腔被加热而引起热辐射（红外光），蓝宝石高温光纤收集黑体腔的红外热辐射，红外线经蓝宝石高温光纤传输并耦合进入低温光纤，然后射入末端的光敏二极管（两者轴线对准）。光电二极管接收到的红外信号经过光电转换、信号放大、线性化处理、A/D 转换、计算机处理后给出待测温度。为实现多点测量，加入多路开关，通过微机控制选择测点顺序。

该光纤高温传感器的测温上限可达 1800°C 。在 800°C 以上时，灵敏度优于 1°C ；在 1000°C 以上时，可分辨温度优于 0.1°C 。因此，在现代的质量控制及工艺过程控制中具有广泛的应用。

【任务 3】 在工业生产的某些过程中，经常需要检查系统内部结构状况，而这种结构由于各种原因不能打开或靠近观察。在这种情况下，采用何种仪器和原理来检查系统内部结构情况呢？

【实施方案】 采用光纤图像传感器可解决这一难题。将探头事先放入系统内部，通过传像束的传输可以在系统外部观察并监视系统内部情况，工业用内窥镜的工作原理图如图 6.12 所示。

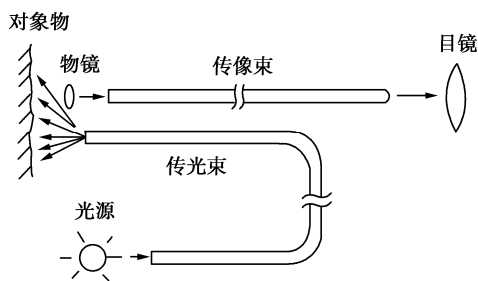


图 6.12 工业用内窥镜的工作原理图

该传感器主要由物镜、传像束、传光束、目镜或图像显示器等组成，光源发出的光通过传光束照射到待测物体上，照明视场，再由物镜成像，经传像束把待测物体的各像素传送到目镜或图像显示设备上，观察者便可对该图像进行分析处理。

另一种结构形式如图 6.13 所示。被测物体内部结构的图像通过传像束送到 CCD 器件，这样把图像信号转换成电信号，送入计算机进行处理，计算机输出可以控制一伺服装置，实现跟踪扫描，其结果也可以在屏幕上显示和打印。

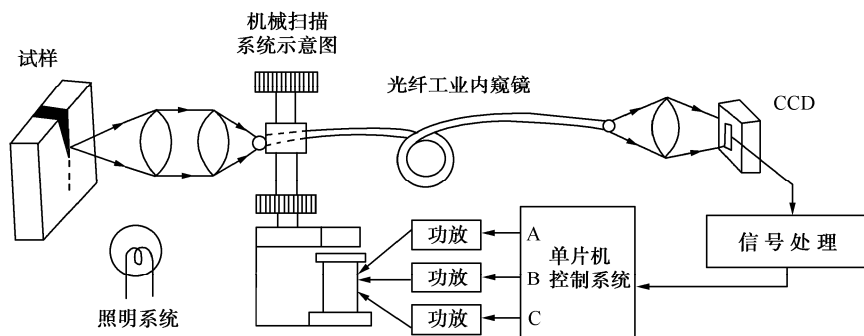


图 6.13 计算机控制的工业内窥镜

任务 2 电容传感器测量液位和厚度

知识链接

ZHISHUOJIANLI

电容式传感器 (Capacitance-type sensor) 是利用各种电容器将被测物理量转换成电容量的变化，再经测量转换电路转换为电压、电流或频率信号。它具有结构简单、分辨率高、动态响应快、工作可靠等特点，能在高温、辐射和强烈震动等恶劣条件下实现对液位、物位、厚度、加速度、湿度、压力、位移等多种参数的检测。



6.2.1 变间隙式电容传感器

如图 6.14 所示, 平行板电容器是由绝缘介质分开的两个平行金属板组成的, 当忽略边缘效应影响时, 其电容量为

$$C = \frac{\varepsilon S}{d} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d} \quad (6.4)$$

式中, S 是极板的有效面积, d 是两极板间的距离 (又称极距), ε 是绝缘介质的介电常数, ε_r 是绝缘介质的相对介电常数, ε_0 是真空的介电常数 ($\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$)。

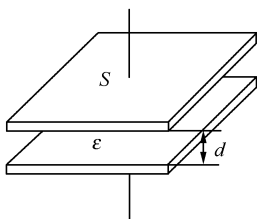


图 6.14 平行板电容器

若被测量的变化使电容的 d 、 S 、 ε 三个参量中的一个参量改变, 则电容量就将发生变化。如果变化的参量与被测量之间存在一定的函数关系, 那么被测量的变化就可以直接由电容量的变化反映出来。所以, 电容式传感器可以分为改变极板面积的变面积式、改变极板距离的变间隙式和改变介电常数的变介电常数式三种类型。

1. 工作原理

基本的变间隙式电容传感器有一个定极板和一个动极板, 如图 6.15 所示, 当动极板随被测量变化而移动时, 两极板的间距 d 就发生了变化, 从而也就改变了两极板间的电容量 C 。

设动极板在初始位置时与定极板的间距为 d_0 , 此时的初始电容量为 $C_0 = \frac{\varepsilon S}{d_0}$, 当可动极板向上移动 Δd 时, 电容的增加量为

$$\Delta C = \frac{\varepsilon S}{d_0 - \Delta d} - \frac{\varepsilon S}{d_0} = \frac{\varepsilon S}{d_0} \cdot \frac{\Delta d}{d_0 - \Delta d} = C_0 \cdot \frac{\Delta d}{d_0 - \Delta d} \quad (6.5)$$

式 (6.5) 说明, ΔC 与 Δd 不是线性关系。但当 $\Delta d \ll d_0$ (即量程远小于极板间初始距离) 时, 可以认为 ΔC 与 Δd 是线性的。即

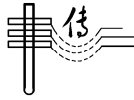
$$\Delta C = \frac{\Delta d}{d_0} C_0 \quad (6.6)$$

则有

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta d}{d_0} \quad (6.7)$$

传感器被近似看作是线性时, 其灵敏度为

$$K = \frac{\Delta C}{\Delta d} = \frac{C_0}{d_0} = \frac{\varepsilon S}{d_0^2} \quad (6.8)$$



由式(6.8)可见,增大 S 和减小 d_0 均可提高传感器的灵敏度,但要受到传感器体积和击穿电压的限制。此外,对于同样大小的 Δd , d_0 越小,则 $\Delta d/d_0$ 越大,由此造成的非线性误差也越大。因此,这种类型的传感器一般用于测量微小的变化量。

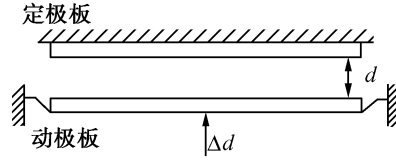


图 6.15 基本的变间隙式电容传感器

在实际应用中,为了改善非线性、提高灵敏度及减少电源电压、环境温度等外界因素的影响,电容传感器也常做成差动形式,如图 6.16 所示。当动极板向上移动 Δd 时,上电容 C_1 电容量增加,下电容 C_2 电容量减少,其电容值分别为

$$C_1 = C_0 + \Delta C_1 = \frac{\epsilon S}{d_0 - \Delta d} = \frac{\epsilon S}{d_0} \times \frac{1}{1 - \frac{\Delta d}{d_0}} = \frac{C_0}{1 - \frac{\Delta d}{d_0}} \quad (6.9)$$

$$C_2 = C_0 - \Delta C_2 = \frac{\epsilon S}{d_0 + \Delta d} = \frac{\epsilon S}{d_0} \times \frac{1}{1 + \frac{\Delta d}{d_0}} = \frac{C_0}{1 + \frac{\Delta d}{d_0}} \quad (6.10)$$

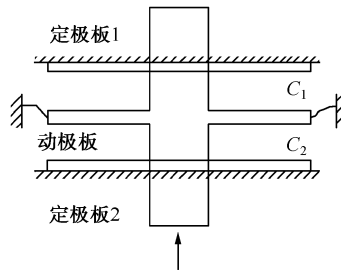


图 6.16 差动结构的变间隙式电容传感器

把式(6.9)、式(6.10)用级数展开,可得

$$C_1 = C_0 \left[1 + \frac{\Delta d}{d_0} + \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^3 + \dots \right] \quad (6.11)$$

$$C_2 = C_0 \left[1 - \frac{\Delta d}{d_0} + \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^2 - \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^3 + \dots \right] \quad (6.12)$$

用式(6.11)减去式(6.12),可得

$$\Delta C = C_1 - C_2 = C_0 \left[2\frac{\Delta d}{d_0} + 2\left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^3 + \dots \right] \quad (6.13)$$

当 $\Delta d \ll d_0$ 时, ΔC 与 Δd 近似呈线性,即



$$\frac{\Delta C}{C_0} = 2 \frac{\Delta d}{d_0} \quad (6.14)$$

此时传感器的灵敏度为

$$K = \frac{\Delta C}{\Delta d} = 2 \frac{C_0}{d_0} = \frac{2\varepsilon S}{d_0^2} \quad (6.15)$$

与基本的变间隙式传感器相比，差动式传感器的非线性误差减少了一个数量级，而且提高了测量灵敏度，所以在实际应用中被较多采用。

2. 测量电路

电容传感器的输出电容值一般十分微小，几乎都在几皮法至几十皮法之间，如此小的电容量不便于直接测量和显示，因而必须借助于一些测量电路，将微小的电容值成比例地换算为电压、电流或频率信号。

根据电路输出量的不同，可分为调幅型电路、差动脉宽调制型电路和调频型电路。

(1) 调幅型电路

这种测量电路输出的是幅值正比于或近似正比于被测信号的电压信号，以下两种是常见的电路形式。

① 差动交流电桥电路。差动接法的变压器交流电桥电路如图 6.17 所示，其中相邻两臂接入差动结构的电容传感器。

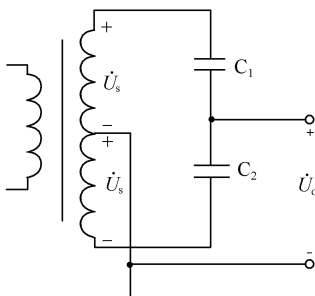


图 6.17 差动接法的变压器交流电桥电路

电容传感器未工作时， $C_1 = C_2 = C_0$ ，电路输出 $\dot{U}_o = 0$ 。

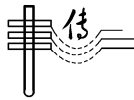
当被测参数变化时，电容传感器 C_1 变大， C_2 变小，即 $C_1 = C_0 + \Delta C$ ， $C_2 = C_0 - \Delta C$ ，则输出电压 \dot{U}_o 与 ΔC 之间的关系可表示为

$$\frac{\dot{U}_s - \dot{U}_o}{j\omega(C_0 + \Delta C)} = \frac{\dot{U}_s + \dot{U}_o}{j\omega(C_0 - \Delta C)}$$

整理可得

$$\dot{U}_o = \frac{(C_0 + \Delta C) - (C_0 - \Delta C)}{(C_0 + \Delta C) + (C_0 - \Delta C)} \dot{U}_s = \frac{\Delta C}{C_0} \dot{U}_s \quad (6.16)$$

式 (6.16) 表明，差动接法的交流电桥电路的输出电压 \dot{U}_o 与被测电容 ΔC 之间呈线性关系。



② 运算放大器式测量电路。电路如图 6.18 所示, 图中运放为理想运算放大器, 其输出电压与输入电压之间的关系为

$$u_o = -u_i \frac{C_0}{C_x} \quad (6.17)$$

式中, C_0 为固定电容, C_x 为电容传感器。

将 $C_x = \frac{\epsilon S}{d}$ 代入式 (6.17) 中, 可得

$$u_o = -u_i \frac{C_0}{\epsilon S} \cdot d \quad (6.18)$$

由式 (6.18) 可见, 采用基本运算放大器的最大特点是电路输出电压与电容传感器的极距成正比, 使基本变间隙式电容传感器的输出特性具有线性特性。

在该运算放大电路中, 选择输入阻抗和放大增益足够大的运算放大器, 以及具有一定精度的输入电源、固定电容, 则可使用基本变间隙式电容传感器测出 $0.1 \mu\text{m}$ 的微小位移。该运算放大器电路在初始状态时, 有时输出电压不为零, 这是电路存在的缺点。因此, 在测量中常用如图 6.19 所示的调零电路。

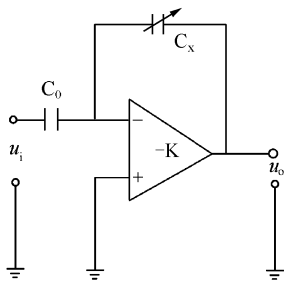


图 6.18 运算放大器式测量电路

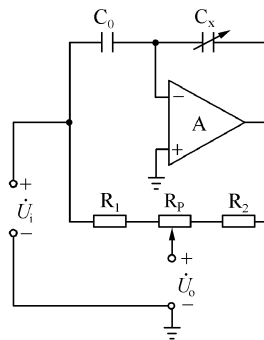


图 6.19 调零电路

在上述运算放大器式测量电路中, 固定电容 C_0 在电容传感器 C_x 的检测过程中还起到了参比测量的作用。因而当 C_0 和 C_x 结构参数及材料完全相同时, 环境温度对测量的影响可以得到补偿。

(2) 差动脉宽调制型电路

如图 6.20 所示, 图中 A_1 、 A_2 为理想运算放大器, F 为双稳态基本 RS 触发器, 电阻与电容 R_1 、 C_1 和 R_2 、 C_2 分别构成充电回路。VD₁、 C_1 和 VD₂、 C_2 分别构成放电回路, u_r 为标准输入电源, 而将双稳态触发器的输出作为电路脉冲输出。

电路的工作原理是, 通过传感器电容充放电, 使电路输出脉冲的占空比随电容传感器的电容量变化而变化, 再通过低频滤波器得到对应于被测量变化的直流信号。过程分析如下所述。

$Q = 1, \bar{Q} = 0$ 时, A 点通过 R_1 对 C_1 充电, 同时电容 C_2 通过 VD₂ 迅速放电, 使 N 点电压钳位在低电平。A₂ 输出为 “+”, 即 $\bar{S}_D = 1$ 。R₁、C₁ 回路充电, 在充电过程中, M 点对地电位不断升高, 当 $u_M < u_r$ (u_r 为标准参考电压) 时, A₁ 输出为 “+”, 即 $\bar{R}_D = 1, Q = 1, \bar{Q} = 0$ 的状态保持。当 $u_M > u_r$ 时, A₁ 输出为 “-”, 即 $\bar{R}_D = 0$, 此时, 双稳态触发器翻转, 使 $Q = 0, \bar{Q} = 1$ 。

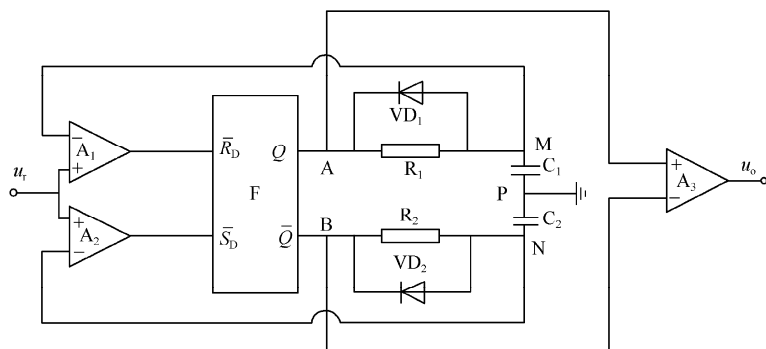


图 6.20 差动脉宽调制型电路

$Q=0, \bar{Q}=1$ 时, N 点通过 R_2 对 C_2 充电, 同时电容 C_1 通过 VD_1 迅速放电, 使 M 点电压钳位在低电平。 A_1 输出为 “+”, 即 $\bar{R}_D=1$ 。 $R_2、C_2$ 回路充电, 在充电过程中, N 点对地电位不断升高, 当 $u_N < u_T$ 时, A_2 输出为 “+”, 即 $\bar{S}_D=1, Q=0, \bar{Q}=1$ 的状态保持。当 $u_N > u_T$ 时, A_2 输出为 “-”, 即 $\bar{S}_D=0$, 此时, 双稳态触发器翻转, 使 $Q=1, \bar{Q}=0$ 。此过程周而复始。

电路输出脉冲由 A、B 两点电平决定, 高电平电压为 U_H , 低电平为 0。波形如图 6.21 所示。

当 $C_1=C_2, R_1=R_2$ 时, A 点脉冲与 B 点脉冲宽度相同, 方向相反, 波形如图 6.21 (a) 所示。

当 C_1 增大, C_2 减小时, $R_1、C_1$ 充电时间变长, $Q=1$ 的时间延长, u_A 的脉宽变宽; 而 $R_2、C_2$ 充电时间变短, $Q=0$ 的时间缩短, u_B 的脉宽变窄。把 A、B 接到低通滤波器, 得到与电容变化相应的电压输出, 即 u_o 脉冲变宽。波形如图 6.21 (b) 所示。

当 C_1 减小, C_2 增大时, $R_1、C_1$ 充电时间变短, $Q=1$ 的时间缩短, u_A 的脉宽变窄; 而 $R_2、C_2$ 充电时间变长, $Q=0$ 的时间延长, u_B 的脉宽变宽。同样, 把 A、B 接到低通滤波器, 得到与电容变化相应的电压输出, 即 u_o 脉冲变窄。

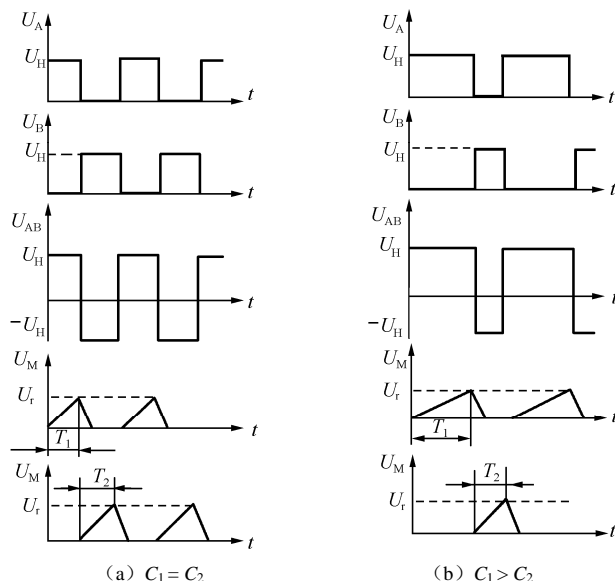
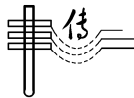


图 6.21 电路各点的充放电波形



由以上分析可知,当 $C_1=C_2$ 时,两个电容充电时间常数相等,两个输出脉冲宽度相等,输出电压的平均值为零。当差动电容传感器处于工作状态,即 $C_1 \neq C_2$ 时,两个电容的充电时间常数发生变化, R_1 、 C_1 充电时间 T_1 正比于 C_1 ,而 R_2 、 C_2 充电时间 T_2 正比于 C_2 ,这时输出电压的平均值不等于零。输出电压为

$$U_o = \frac{T_1}{T_1 + T_2} U_H - \frac{T_2}{T_1 + T_2} U_H = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} U_H \quad (6.19)$$

当电阻 $R_1 = R_2 = R$ 时,则有

$$U_o = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} U_H \quad (6.20)$$

由此可知,差动脉宽调制型电路的输出电压与电容变化呈线性关系。

(3) 调频型电路

如图 6.22 所示为调频—鉴频电路的原理图。振荡器谐振电路由电容式传感器与电感元件构成,当传感器工作时,电容量发生变化,导致振荡频率产生相应的变化,再经过鉴频电路将频率的变化转换为振幅的变化,经放大器放大后即可显示,这种方法称为调频法。调频振荡器的振荡频率由下式决定

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (6.21)$$

式中, L 为振荡回路电感, C 为振荡回路总电容。

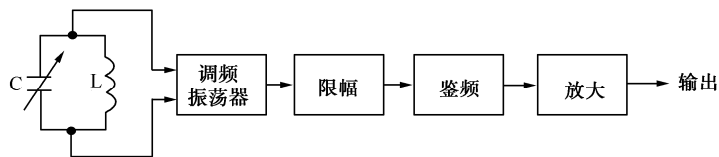


图 6.22 调频—鉴频电路原理图

调频型测量电路的主要优点是抗外来干扰能力强,特性稳定,且能取得较高的直流输出信号。

3. 测量中存在的问题及解决办法

前面对各类电容传感器的原理分析,均是在理想条件下进行的。实际上,由于温度、电场边缘效应、寄生电容等因素的存在,可能使电容传感器的特性不稳定,严重时甚至使其无法工作。下面对这些因素做简单的介绍。

(1) 温度影响

温度变化主要影响传感器的结构尺寸。当温度上升时,具有一定温度系数的电容器极板尺寸增大,使极板的有效面积增大而致使电容增加;极板厚度的增加导致极间距离减小,同样使电容增加。为了减小这种误差,应尽量选择温度系数小且稳定的金属材料做电容器极板,如铁镍合金。此外,应采用差动对称结构,在测量电路中加以补偿。

除了空气介质和云母介质,温度对电容器极板间介质的介电常数也有一定的影响。其中



硅油、煤油等液体介质的介电常数是随温度的升高而近似呈线性减小的，这种变化引入的误差只能在测量电路中加以补偿。

温度还可能影响到电容器极板支承架的电绝缘性能。电容传感器的容抗都很高，特别是当激励频率较低时，极板支承架的绝缘电阻的阻值因温度升高而下降，若该电阻值下降至与容抗相接近时，其漏电流的影响将使电容传感器灵敏度下降，为此极板支承架应选择绝缘性能良好的材料，如陶瓷、石英等高绝缘电阻，低吸湿性材料。也可以适当增加激励源频率以减小容抗，从而降低支承架漏电流的影响。

(2) 电场的边缘效应

在电容器极板的周边，极间电场分布并不均匀，这种现象被称为边缘效应。边缘效应使电容传感器测量精度下降，非线性上升。增加极板面积和减小极间距离可减小边缘效应的影响，当检测精度要求很高时，可考虑加装等位环，如图 6.23 所示，即在极板周边外围的同一平面上加装一个同心圆环，从而使得极板周边极间电场分布均匀，以消除边缘效应的影响。

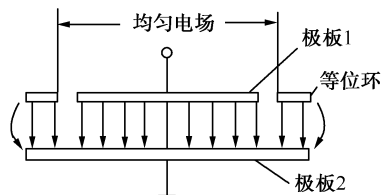


图 6.23 极板周边加装同心圆环示意图

(3) 寄生电容的影响

电容传感器的电容值通常很小，若测量电路处理不当，其寄生电容有可能大于传感器电容，使电容传感器无法工作。目前，消除或减小寄生电容有以下两种基本方法。

① 减小引线长度。尽量减小电容器极板引出线的长度，且不要平行布线；在可能的情况下，将电容传感器与测量电路集成为一体，这样既可以减小寄生电容，又可以使寄生电容基本保持不变。

② 屏蔽。电容器极板有可能与周围构件、仪器甚至人体之间产生寄生电容，尤其是裸露的高压侧电极，很容易产生放电现象而引起寄生电容的变化。为了减小这种寄生电容的影响，可对电容器及测量电路实行整体屏蔽法，即将电容器、电路（包括供电电源和传输线）装在同一个屏蔽壳体中，并保持屏蔽体有效接地。

电容传感器的特性不稳定问题曾经长期阻碍了电容传感器的应用和发展。目前，上述问题已逐步得到解决。

4. 应用

变间隙式电容传感器的应用非常广泛，可用于测量位移、加速度、压力等多种物理量。

如图 6.24 所示为电容式差压传感器原理图。将左右对称的不锈钢基座的外侧加工成环状波纹沟槽，并焊上波纹状的测量膜片 1 和 2。基座内侧有玻璃层的绝缘体，基座和玻璃层中央有孔，玻璃层内侧磨成凹球面，球面除边缘部分外镀上金属镀层作为电容的两固定电极 1 和 2，并由导线通往外部。在两个电极板中间焊接一感压膜片（中央可动电极板），用于感受



外界的压力。在中央感压膜片左右两室之间填充硅油, 无压力时, 动膜片位于电极中间, 左右两电容值完全相等。当感压膜片分别承受高压 p_H 和低压 p_L 时, 硅油的不可压缩性和流动性便能将差压 $\Delta p = p_H - p_L$ 传递到测量膜片的左右面上, 于是测量膜片发生变形, 也就是动极板向低压侧定极板靠近, 同时远离高压侧定极板, 使得电容 $C_L > C_H$ 。这就是差动电容传感器测量压力或差压的过程。

如图 6.25 所示是一种电容式荷重传感器的结构原理图。因为镍铬钼钢浇铸性好, 弹性极限高, 常被用作这种传感器的材料。在镍铬钼钢块的同一高度上加工出一排尺寸相等且等距离的一些圆孔, 在圆孔的内壁上以特殊的黏结剂固定两个截面为 T 形的绝缘体, 保持其平行并留有一定间隙, 在相对面上粘贴铜箔, 从而形成一排平板电容。当钢块端面承受荷重 F 时, 圆孔将产生变形, 从而使每个电容器的极板间距变小, 电容值将增大。在电路上各电容并联, 因此, 总电容增量将正比于平均荷重 F 。这种传感器的主要优点是受接触面的影响小, 因此测量精度较高。另外, 电容器放置在钢块的圆孔中, 提高了抗干扰能力, 工作稳定性好。电容式荷重传感器在地球物理、表面状态检测及自动检测和控制系统中也得到了广泛的应用。

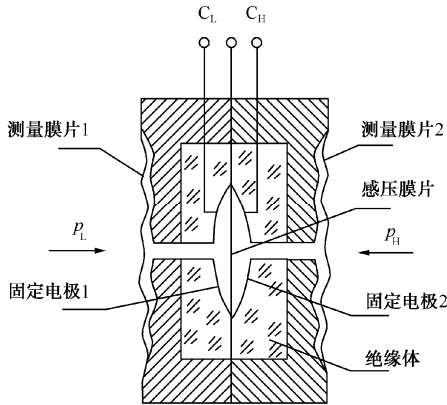


图 6.24 差动电容式压力传感器原理图

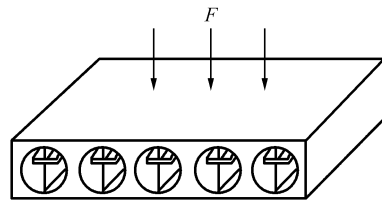


图 6.25 电容式荷重传感器原理图

6.2.2 变面积式电容传感器

变面积式电容传感器的两个极板中, 一个是固定不动的, 称为定极板; 另一个是可移动的, 称为动极板。根据动极板相对定极板的移动情况, 变面积式电容传感器又分为直线位移式和角位移式两种。

1. 直线位移式

变面积式电容传感器的原理图如图 6.26 所示, 被测量通过使动极板移动, 引起两极板有效覆盖面积 S 改变, 从而使电容量发生变化。设动极板相对定极板沿极板长度 a 的方向平移 Δx , 则电容为

$$C = \frac{\varepsilon(a - \Delta x)b}{d} = \frac{\varepsilon ab}{d} - \frac{\varepsilon \Delta x b}{d} = C_0 - \Delta C \quad (6.22)$$

式中, $C_0 = \frac{\varepsilon ab}{d}$ 为电容初始值; $\Delta C = \frac{\varepsilon b}{d} \Delta x$ 为电容变化量。