

3.3 电容式传感器的特点及设计中存在的问题

3.3.1 电容式传感器的特点

1. 电容式传感器的优点

与电阻式、电感式等传感器相比，电容式传感器具有以下一些优点。

(1) 温度稳定性好

电容式传感器的电容值一般与电极材料无关，仅取决于电极的几何尺寸，且空气等介质损耗很小，其他因素影响甚微（因本身发热极小）；而电阻式传感器有电阻，工作时会产生大量热量，不仅损失能量，而且造成元件发热，缩短了使用寿命。

(2) 结构简单，适应性强

电容式传感器结构简单，易于制造，能在高低温、强辐射及强磁场等各种恶劣的环境条件下工作，适应能力强，尤其可以承受很大的温度变化，在高压、高冲击、过载等情况下都能正常工作，能测超大量的高压和低压差，能对带磁工件进行测量。此外，为实现某些特殊要求的测量还可以把传感器的体积做得很小。

(3) 动态响应好

电容式传感器由于极板间的静电引力很小（约 10^{-5}N ），需要的作用能量极小，又由于它的可动部分可以做得很小很薄，即质量很轻，因此其固有频率很高，动态响应时间短，能在几兆赫的频率下工作，特别适合动态测量。又由于其介质损耗小，可以用较高频率供电，因此系统工作频率高，可用于测量高速变化的参数，如测量振动、瞬时压力等。

(4) 可以实现非接触测量, 具有平均效应

当被测件不允许接触测量时, 电容式传感器可以进行非接触测量。这种情况下, 电容式传感器具有平均效应, 可以减小工件表面粗糙度等对测量的影响。

电容式传感器除上述优点之外, 还因带电极板间的静电引力极小, 因此所需输入能量极小, 特别适宜低能量输入的测量, 例如测量极低的压力、力和很小的加速度、位移等, 可以做得很灵敏, 分辨力非常高, 能感受 $0.01\mu\text{m}$ 甚至更小的位移。

2. 电容式传感器的缺点

(1) 输出阻抗高, 负载能力差

电容式传感器的容量受其电极几何尺寸等限制一般做得不大 (为几十到几百皮法), 使传感器的输出阻抗很高 (可高达 $10^6 \sim 10^8 \Omega$)。因此电容式传感器负载能力差, 易受外界干扰影响而产生不稳定现象, 严重时甚至无法工作, 必须采取屏蔽措施。容抗大还要求传感器绝缘部分的电阻值极高 (几十兆欧以上), 否则绝缘部分将作为旁路电阻而影响传感器的性能 (如灵敏度降低), 为此还要特别注意周围环境 (如温湿度、清洁度等) 对绝缘性能的影响。高频供电虽然可降低传感器的输出阻抗, 但放大、传输远比低频时复杂, 且寄生电容影响加大, 难以保证工作稳定。

(2) 寄生电容影响大

电容式传感器的初始电容量很小, 而其引线电缆电容、测量电路的杂散电容以及传感器极板与其周围导体构成的电容等“寄生电容”却较大, 这不仅降低了传感器的灵敏度, 而且这些电容 (如电缆电容) 常常是随机变化的, 将使传感器的工作很不稳定, 影响测量精度, 其变化量甚至超过被测量引起的电容变化量, 致使传感器无法工作。因此对电缆的选择、安装、接法等都有严格的要求。

(3) 输出特性非线性

变极距型电容传感器的输出特性是非线性的, 虽可采用差动结构来改善, 但不可能完全消除。其他类型的电容传感器只有忽略了电场的边缘效应时, 输出特性才呈线性; 否则边缘效应所产生的附加电容量将与传感器电容量直接叠加, 使输出特性非线性。

随着材料、工艺、电子技术, 特别是集成电路的高速发展, 电容式传感器的优点将得到发扬而缺点会不断得到克服。电容式传感器正逐渐成为一种高灵敏度、高精度, 在动态、低压及一些特殊测量方面大有发展前途的传感器。

3.3.2 设计与应用中存在的问题

电容式传感器所具有的高灵敏度、高精度等独特的优点是与其正确设计、选材以及精细的加工工艺分不开的。在设计传感器的过程中, 在所要求的量程、温度和压力等范围内, 应尽量使它具有低成本、高精度、高分辨力、稳定可靠和高的频率响应等。

1. 绝缘材料的绝缘性能

温度变化会使传感器内各零件的几何尺寸和相互位置及某些介质的介电常数发生改变, 从而使传感器的电容量发生改变, 产生温度误差。湿度也影响某些介质的介电常数和绝缘电阻值。因此在选材、结构、加工工艺等方面必须注意, 尽可能减小温度、湿度等造成的误

差,以保证绝缘材料具有高的绝缘性能。

电容式传感器的金属电极的材料以选用温度系数低的铁镍合金为好,但铁镍合金加工较难。也可采用在陶瓷或石英上喷镀金或银的工艺,这样电极可以做得极薄,对减小边缘效应极为有利。

传感器内电极表面不便经常清洗,应加以密封,以防尘、防潮。若在电极表面镀以极薄的惰性金属(如铱等)层,则可代替密封件起保护作用,可防尘、防湿、防腐蚀,并在高温下可减少表面损耗、降低温度系数,但成本较高。

传感器内,电极的支架除要有一定的机械强度外,还要有稳定的性能。因此要选用温度系数小、几何尺寸稳定性好、具有高绝缘电阻、低吸潮性和高表面电阻的材料,例如石英、云母、人造宝石及各种陶瓷等。虽然这些材料较难加工,但性能远高于塑料、有机玻璃等。在温度不太高的环境下,聚四氟乙烯具有良好的绝缘性能,也可以选用。

尽量采用介电常数的温度系数近似为零,同时也不受湿度变化影响的电介质作为电容式传感器的电介质,如空气或云母等。

在可能的情况下,传感器内尽量采用差动对称结构,这样可以通过某些类型的测量电路来减小温度等误差。

选用 50kHz 至几兆赫作为电容传感器的电源频率,以降低对传感器绝缘部分的绝缘要求。

传感器内所有的零件应先进行清洗、烘干后再装配。传感器要密封,以防止水分侵入内部而引起电容值的变化和绝缘性能的下降。传感器的壳体刚性要好,以免安装时变形。

2. 边缘效应

对于电容式传感器,当极板厚度与极板距离可比时,两极板边缘处电力线出现分布不均匀的现象,即边缘效应,如图 3-19 所示。此时,边缘电场的影响就不能忽略了。

边缘效应的存在将使电容式传感器的灵敏度降低,非线性增加。

适当减小极间距,使电极直径或边长与间距比增大,可减小边缘效应的影响,但易产生击穿并有可能限制测量范围。电极应做得极薄,使之与极间距相比减小,这样也可减小边缘电场的影响。此外,可在结构上增设等位环来消除边缘效应。如图 3-20 所示,等位环 3 与电极 2 在同一平面上并将电极 2 包围,且与电极 2 电绝缘但等电位,这就能使电极 2 的边缘电力线平直,电极 1 和电极 2 之间的电场基本均匀,而发散的边缘电场发生在等位环 3 外周,不会影响传感器两极板间的电场。等位环与电极的间隙越小越好。

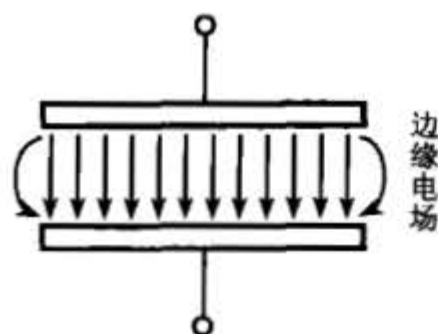


图 3-19 边缘效应

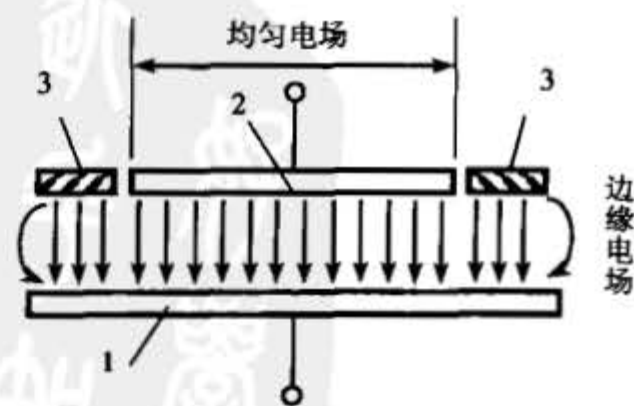


图 3-20 带有等位环的平板式电容传感器结构

边缘效应引起的非线性与变极距型电容传感器原理上的非线性恰好相反，在一定程度上起到了补偿作用。

3. 寄生电容

电容式传感器属于小功率、高阻抗器件，极易受外界干扰，尤其是电缆的寄生电容，不仅数值大且具有随机性，又与传感器电容相并联，严重影响传感器的输出特性，甚至会淹没传感器的有用信号，使传感器无法使用。因此必须消除或减小它。可采用的方法主要有以下几种。

(1) 增加传感器原始电容值

增加传感器原始电容值可减小寄生电容的影响。可采用减小极片或极板间的间距（平板式间距可小至 0.2~0.5mm，圆筒式间距可小至 0.15mm）、增加工作面积或工作长度的方法来增加原始电容值。但这种方法要受加工及装配工艺、精度、示值范围、击穿电压、结构等因素的限制。

(2) 集成化技术

集成化技术是将测量电路或其前置级装在传感器的壳体内，省去传感器的电缆引线。这将大大减小寄生电容，使仪器工作稳定。但这种传感器因电子元件的特点而不能在高、低温或环境差的场合使用。

(3) “驱动电缆”技术

“驱动电缆”技术是一种双层屏蔽等位传输技术，如图 3-21 所示。

当电容式传感器的电容值很小，而因某些原因（如环境温度较高）测量电路只能与传感器分开时，可采用“驱动电缆”技术。传感器与测量电路前置级间的引线为双屏蔽层电缆，其内屏蔽层与信号传输线（即电缆芯线）通过增益为 1 的放大器成为等电位，从而消除了芯线与内屏蔽层之间的电容。由于屏蔽线上有随传感器输出信号变化而变化的电压，因此称为“驱动电缆”。采用这种技术可使电缆线长达 10m 之远也不影响仪器的性能。

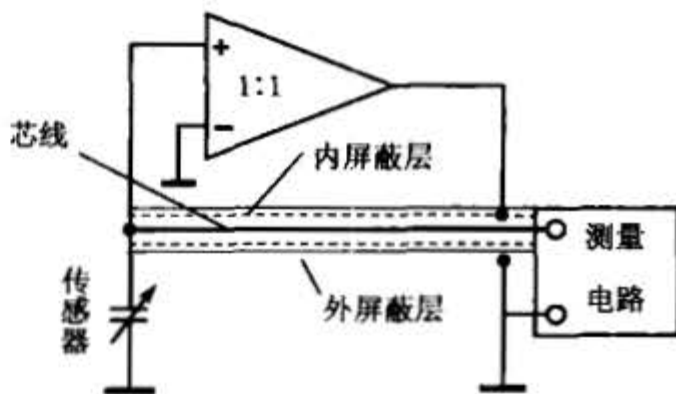


图 3-21 “驱动电缆”技术原理图

外屏蔽层接大地或接仪器地，以防止外界电场的干扰。内外屏蔽层之间的电容是放大器的负载。放大器是一个输入阻抗要求很高、具有容性负载、放大倍数为 1（准确度要求达 1/10000）的同相（要求相移为零）放大器。因此“驱动电缆”技术对放大器要求很高，电路复杂，但能保证电容式传感器的电容值小于 1pF 时也能正常工作。

当电容式传感器的初始电容值很大（几百微法）时，只要选择适当的接地点仍可采用一般的同轴屏蔽电缆，电缆可以长达 10m，仪器仍能正常工作。

(4) 运算放大器法

图 3-22 所示是利用运算放大器的虚地来减小引线电缆寄生电容 C_p 的原理图。图中电容传感器的一个电极经电缆芯线接运算放大器的虚地 Σ 点，电缆的屏蔽层接仪器地，这时与传感器电容相并联的为等效电缆电容 $\frac{C_p}{1+A}$ ，因而大大地减小了电缆电容的影响。外界干扰因屏蔽层接仪器地，对芯线不起作用。

传感器的另一电极接大地, 用来防止外电场的干扰。若采用双屏蔽层电缆, 其外屏蔽层接大地, 干扰影响就更小。实际上, 这是一种不完全的电缆“驱动技术”, 结构较简单。开环放大倍数 A 越大, 精度越高。选择足够大的 A 值可保证所需的测量精度。

(5) 整体屏蔽法

所谓整体屏蔽法就是将电容式传感器和所采用的转换电路、传输电缆等用同一个屏蔽壳屏蔽起来。图 3-23 所示是差动电容式传感器交流电桥所采用的整体屏蔽系统, C_1 和 C_2 构成差动电容传感器, 与平衡电阻 Z_1 和 Z_2 组成测量电桥, C_{P1} 和 C_{P2} 为寄生电容。

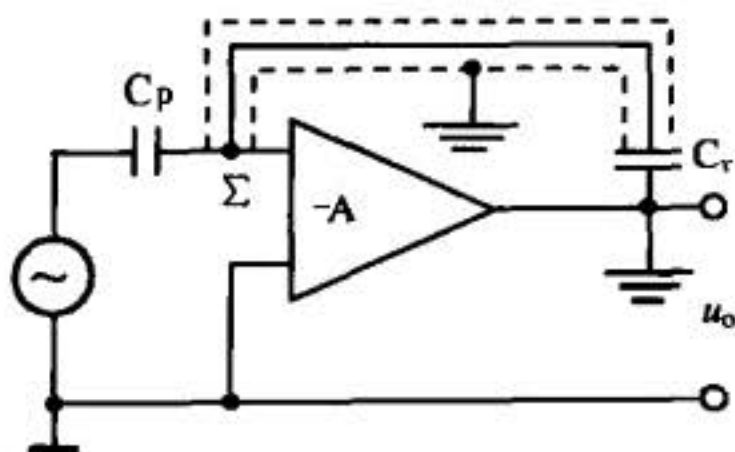


图 3-22 运算放大器法电原理图

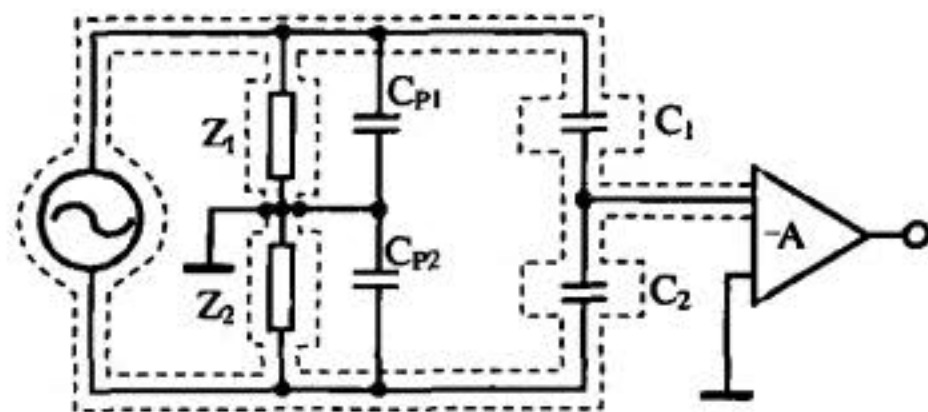


图 3-23 交流电桥的整体屏蔽

正确选取接地点可减小寄生电容的影响和防止外界的干扰。图 3-23 中屏蔽层接地点选择在两平衡电阻阻抗臂 Z_1 和 Z_2 中间, 使电缆芯线与其屏蔽层之间的寄生电容 C_{P1} 和 C_{P2} 分别与 Z_1 和 Z_2 相并联。如果 Z_1 和 Z_2 比 C_{P1} 和 C_{P2} 的容抗小得多, 则寄生电容 C_{P1} 和 C_{P2} 对电桥平衡状态的影响就很小。

最易满足上述要求的是变压器电桥, 这时 Z_1 和 Z_2 是具有中心抽头并相互紧密耦合的两个电感线圈, 流过 Z_1 和 Z_2 的电流大小基本相等但方向相反。因 Z_1 和 Z_2 在结构上完全对称, 所以线圈中的合成磁通近似为零, Z_1 和 Z_2 仅为其绕组的铜电阻及漏感抗, 它们都很小。结果寄生电容 C_{P1} 和 C_{P2} 对 Z_1 和 Z_2 的分路作用即可被削弱到很低的程度而不致影响交流电桥的平衡。