

电容式传感器和电容的测量

上海芸生微电子有限公司, 上海 201108)

摘要: 本文介绍部分电容式传感器的构造和测量方法, 并对此进行了讨论。内容涉及位移测量、平板电容式压力测量、液位测量和物质含水量测量等。介绍了专用集成电路 CAV444 对电容式传感器的电容电压线性转换的应用。

关键词: 电容式传感器; 电容测量; 线性转换

中图分类号: TP212.1

文献标识码: B

文章编号:

施林生

一、引言

由于工业自动化程度的不断提高, 对物体的探测的手段也不断提出新的要求。作为电子领域里的一个最基本的物理量-电容量的检测也愈来愈受到电子工程师的重视和推广。电容量通常是指一组导体(二个或以上)相互影响所形成的带电荷的能力, 我们把这组相互影响的导体所构成的导体称为电容器。比较常见的有平板电容器和圆柱型电容器。形成电容器的这种导体所构成的结构和形状, 让大家设计出种种通过探测电容的大小从而获得其他物理量的大小的电容式传感器, 比如平板式电容传感器用于测量位移或平板式电容压力传感器用于测量压力, 圆柱型电容传感器用来测量液体的液位或物质的含水量等等。本文就相关的电容传感器的原理和电容的测量作一些介绍。

二、电容式传感器

1、平板电容传感器

常用平板电容器计算公式为:

$$C = \frac{\varepsilon A}{d} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d} \quad (1)$$

其中, ε_0 —真空介电常数, $\varepsilon_0=8.85 \times 10^{-12}$ (F/m); ε_r —材料介电常数;

A —平板电容器的平板面积; d —二平行极板之间的距离。

该公式的成立条件是平板面积尺寸远大于平板之间的距离, 否则, 由于极板的边缘效应, 平板电容器的实际电容应该小于公式计算的值。

实际应用中通常采用圆板电极 A , 直径为 r , 与之对应的是一个相近的平板电极, 当二者距离很近时, 可以按平板电容器的公式计算。当二者距离有限远时 ($r \sim d$), 二者之间的电容近似为:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d} + \varepsilon_0 \varepsilon_r r \left(\ln \frac{16\pi r}{d} - 1 \right) \quad (2)$$

电容测量中的一个非常重要的条件往往被忽略, 就是电容传感器的电场屏蔽问题。由于电容传感器的构造使得传感器非常容易受到外界电磁场的干扰, 包括外界物体的感应干扰, 特别是平板电容式传感器等。使用平板电容传感器要注意电磁场的屏蔽和使用场合。

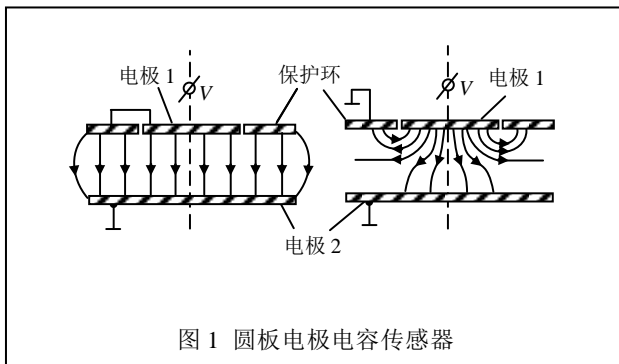


图1 圆板电极电容传感器

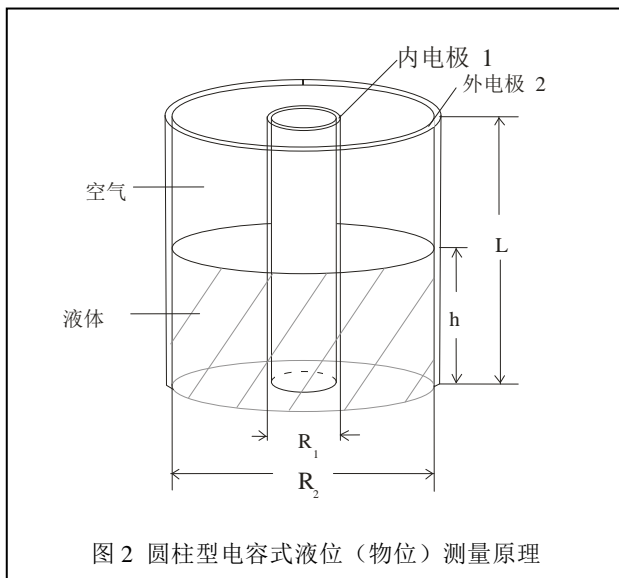


图2 圆柱型电容式液位（物位）测量原理

为了减少外界的干扰和圆极板的边缘效应，通常在圆板电极（见图1中的电极1）外面加一个圆环（保护环），该圆环有二种接法。当圆环与圆板电极1连接时，仅当圆板电极1上下移动时，可以减少动极板（电极1）的边缘效应，使移动的圆板电极处于相对均匀的电场中，以改善非线性，但是保护环外面的边缘效应仍然对电容值有干扰；当圆环与电极2连接时，它有较好的电场屏蔽功能。同时需要指出的是，二种连接的方法所得到的电容值却是相同的。

如果动极板（电极1）的距离变化 Δd ，并且 d 远大于 Δd ，那么电容 C 与位移 Δd 的近似关系为：

$$\begin{aligned} C_0 + \Delta C &= \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d - \Delta d} \approx \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \left(1 + \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta d^2}{d^2}\right) \\ &= C_0 \left(1 + \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta d^2}{d^2}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

式子中的平方项是非线性项。

电容变化的一级近似表达式为：

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta d}{d} \quad (4)$$

电容传感器的相对非线性误差为：

$$\epsilon = \left| \frac{\Delta d}{d} \right| \times 100\% \quad (5)$$

2、膜片式电容压力传感器

膜片式电容压力传感器，膜片四周是固定的，圆半径为 R ，极板间距离为 d ，在压力 P 的作用下，膜片只能作小挠度移动。假如中心点的最大挠曲位移为 Δy ，在 $\Delta y \ll d$ 的情况下，电容变化的一级近似表达式为：

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta y}{3d} = \frac{3(1-\mu^2) R^4}{16E\delta^3} \cdot \frac{P}{d} \quad (6)$$

其中， μ -泊松比；

δ -膜片厚度；

E -膜片弹性模量。

与平板电容器相比，膜片式电容压力传感器的电容变化量是它的三分之一。道理很简单，因为膜片只能作一个挠曲位移的移动，中心点的最大位移是 Δy ，膜片的平均位移大致是平板位移的三分之一。

3、圆柱型电容传感器

圆柱型电容器的公式是：

$$C = 2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{L}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \quad (7)$$

其中， L =圆柱体的高度；

R_1 =内电极的外径；

R_2 =外电极的内径。

该公式成立的条件是圆柱体的高度 L 应该远大于外电极的内径 R_2 。

圆柱型电容传感器有很好的电磁场屏蔽功能，尽管如此，在圆柱体二端仍然有一些边缘效应存在，会有一点点非线性。圆柱型电容传感器的好处就是解决了电磁场的屏蔽问题，所测量的电容受外界的影响极小，只限于圆柱体内的电容变化。

图2为圆柱型电容式液位（物位）的测量原理图。在电容式液位仪中，通常是由二个导电的同心管构成的圆柱型电容器组成，内电极也常用实心圆柱体，在测量导电物体时内电极需要绝缘。如果在圆柱型电容器的中间有液体或物体（粉末）存在，则有：

$$C = \frac{2\pi}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \cdot (\epsilon_0 \cdot L + \epsilon_0 \cdot (\epsilon_r - 1) \cdot h) = C_0 + C(h) \quad (4)$$

式中, ϵ_r —液体或物体的介电常数;

h —所测量的液位(物位)高度。

如果圆柱型电容传感器内的液位高度 h 发生变化, 那么传感器的电容值也发生了变化, 测量此时的电容值就可以推算出物质的液位高度。由上式可以看出, 液位的高度 h 与电容值之间是线性关系。

三、电容的测量

电容传感器的基本测量原理, 通常是由其中的某一项物理量发生变化, 比如极板面积 A 、物质的介电常数 ϵ_r 、物质的液位高度 h 等变化, 从而引起电容值的变化, 只要测出该电容的值就可以计算出所要测量的相应物理量的变化情况。

如果在电容传感器内的物质发生改变, 也就是介电常数 ϵ_r 发生了变化(水 80, 酒精 25, 油 2, 空气 1), 那么只要测出电容的变化值也就可以推断出在电容传感器内的物质的变化情况, 可以区分出不同的物质。

水是一种介电常数很大的物质, 一方面由于材料的吸湿性, 会影响到材料的区分, 但由此可以测量物质的含水量; 另一方面, 材料的吸湿性可以用来作湿度传感器(电容式高聚物薄膜湿度传感器)。

如果是物体的大小、形状发生了变化, 也就是电容传感器的面积 A 发生变化, 那么测出传感器的电容值就可以识别不同的物体或区别物体的形状。

通常物质的介电常数是温度和振荡频率的函数, 对有些导电介质材料来说, 比如水, 振荡频率的变化对介电常数的影响不是很大, 频率范围可以从几十千赫兹到 10MHz; 而对有些非导电介质材料, 比如油, 振荡频率的变化对介电常数影响极大; 频率上升时, 介电常数变小较为明显, 通常振荡频率取较小变化范围(几十赫兹到 1MHz 的范围内), 或者振荡频率相对不变, 介电常数随频率的变化就可以忽略(图 3)。此时温度对介电常数的影响是最大的, 测量的电容值通常都需要进行温度修正。

四、CAV444 简介

在电容式液位物位的测量、湿度传感器、物质的含水量等应用中, 通常要将电容值转换成工业上常用的电压信号或者电流信号。德国 AMG 公司(Analog Microelectronics GmbH)开发的电容电压线性转换集成电路 CAV444(见图 4)^[1], 可以简单地将电容值转换成电压输出。

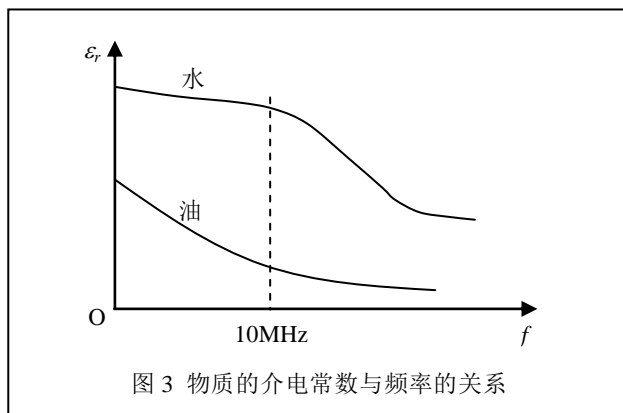


图 3 物质的介电常数与频率的关系

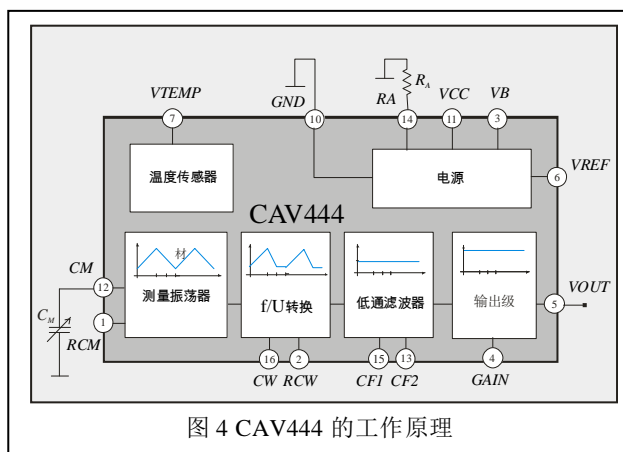


图 4 CAV444 的工作原理

CAV444 的最大特点是可以直接测量电容传感器的电容变化, 并将之转换成与之成线性关系的电压信号输出。CAV444 测量电容时, 不需要参考电容, 而是直接测量传感器的电容值。CAV444 输出的电压信号是差分电压信号, 该差分电压信号的零点和满度可以简单地用二个外接电阻进行调准。这样的信号对后级信号再处理电路, 比如 A/D 转换或单片机采集, 或者直接变流 4-20mA 输出非常合适。CAV444 的测量电容范围在 10pF~10000pF 之间。

CAV444 的工作原理为: 测量电容(传感器 C_M)作为内置测量振荡器的电容器, 通过对它充放电产生振荡信号, 其振荡周期与测量电容大小成线性关系。通过频率—电压 ($f-U$) 转换电路和低通滤波器, 最后输出一个直流电压信号。经过一个零点和满度可调的输出级得到所希望的电压信号输出值。输出电压与内置的参考电压 V_{REF} (2.5V) 组成差分电压输出。CAV444 的电容—电压传递函数如下:

$$\begin{aligned}
 V_{OUT} &= V_{DIFF} + V_{REF} = G_{LP} \cdot V_{IPAS} + V_{REF} \\
 &= \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot \left(\frac{3 \cdot C_M \cdot \Delta V_{CM} \cdot R_{CM}}{8 \cdot C_W \cdot R_{CW}}\right) + V_{REF} \\
 &= K_1 \cdot C_M + K_2
 \end{aligned} \tag{9}$$

式中, K_1 和 K_2 是常数。

由上式可知，通过 CAV444 测量的电容值 C_M 与输出电压成线性关系。通常测量电容 C_M 是一个与温度有关的函数。

如果把 CAV444 用来测量圆柱型电容器液位仪，可以得到输出电压与液位高度 h 的关系式如下：

$$V_{OUT} = K(T) * h \quad (10)$$

式中，常数 $K(T)$ 是包含介电常数的与温度有关的一个系数。当液位高度不变时，测量出温度与输出电压的关系，就可以知道常数 $K(T)$ 变化情况，可以对液位高度进行温度修正。

还有一个方法就是双电路同时测量，一个测量液位高度 h ，另一个测量 $K(T)$ ，也就是将较短的已知长度为 h_0 的电容传感器全部放在液体中，通过 CAV444 测量出 $K(T)$ 。将二个电压信号相除，消去与温度有关的常数 $K(T)$ ，就可以更准确地测量不同温度下的液位高度。

上述测量电容液位的方法也可以利用来测量一些物质的含水量。与通常的一些物质相比，水分子有很大的介电常数。有很多物质的含水量的测量，是利用物质的介电常数 ϵ_r 受到所含水分子极化的影响而发生较大的改变，通过测量介电常数 ϵ_r （物质和水分的混合介电常数）的改变来推算出物质的含水量的多少。物质的混合介电常数 ϵ_r 是含水量的函数，一般情况下，它们的关系是成正比的。通过电容电压的转换，可以得到输出电压与含水量的关系：

$$V_{OUT} = K(T) * H \quad (7)$$

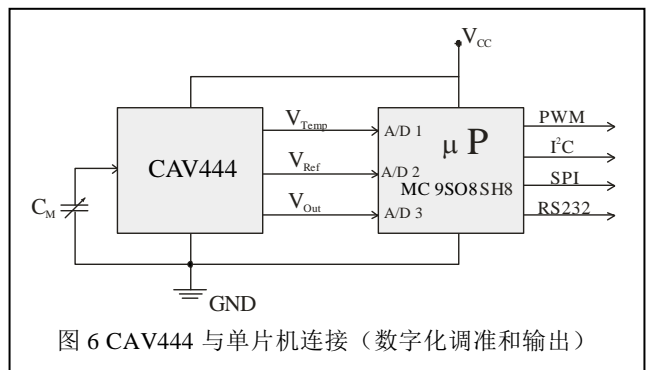
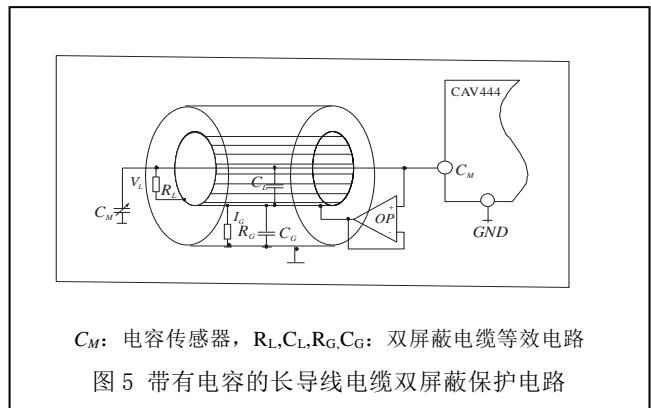
式中， H 为含水量，常数 $K(T)$ 是包含混合介电常数的与温度有关的一个系数。

电容传感器与测量电路的连接应该尽可能的短，通常测量电路可以直接放在电容传感器的屏蔽容器内或其边上屏蔽盒内，在电容信号转换成电压信号后再进行一定距离的传输。通常将电容传感器、引线和测量电路放入金属盒内进行整体屏蔽，使电容传感器和测量电路不受外界电磁场的干扰和外界物体的影响。有时电容传感器需要较长的电缆连接，而长导线电缆在传递信号时由于导线的寄生电容存在而受到各种干扰。寄生电容的大小是与导线的形状和长度相关的。对此推荐一种双屏蔽层电路，也称为等电位屏蔽法，它通过一个附加的运算放大器来达到对长导线电缆的屏蔽功能。

图 5 中所描绘的元器件 R_L 、 C_L 、 R_G 、 C_G 都是带有电容电阻的长导线电缆的等效示意图，只需要一个运算放大器 OP 作为射极跟随器就够了。作为射极跟随器 ($v=1$ ，放大倍数为 1) 的运算放大器，OP 将导线电缆的内外电势保

持一致，消除了信号电缆间的容抗，使信号导线与内屏蔽导线之间的电缆电容不起作用，也就消除了寄生电容的影响。运算放大器 OP 应该有足够高的变化速率，能够对内屏蔽层电缆迅速充放电。因此，在信号频率最大时它应有足够大的负载电流输出。变化速率和负载电流是与信号频率、振幅、电缆长度和形状有关。可以推荐的有双运算放大器 AD8602 ($Sr=5V/\mu s$, $I_{max}=30mA$, 可做射极跟随器)。备注：AD8602 的 $Sr=5V/\mu s$ 太小，要 TL081 $Sr=13V/\mu s$, OPA350, $Sr=22V/\mu s$)

CAV444 测量电容的输出信号可以直接送往后级的 A/D 转换电路或单片机采集电路（见图 6），可以进行补偿、寻址、线性化和数字输出。集成电路上的温度传感器



可以监测周边的温度并送往单片机，用来做温度补偿和监控。当然 CAV444 的输出可以直接与变送电路相连输出二线或三线的工业标准的 4-20mA 电流输出。

五、结束语

电容传感器的构造和测量在实际应用中比较复杂，不但涉及到寄生电容和外界电磁场的影响，也涉及到温度、湿度、测量介质和环境介质的影响。测量电路的复杂化常使得电容的测量误差较大且不知是哪一方面所引起。

本文介绍了有关电容测量的一些方法和注意要点。同时介绍了专用电容测量集成电路 CAV444SO，利用 CAV444 的电容电压线性转换的良好特性以及测量范围大（10-10000pF），转换精度高（0.1%），温度漂移低（ $<150\text{ppm}/^\circ\text{C}$ ， $-40\sim 105^\circ\text{C}$ ），可以在很多需要通过电容方式（电容式传感器）实现测量、检测、监控的地方得到应用。

参考文献：

- [1] Analog Microelectronics GmbH, CAV444 产品说明书[EB/OL]: www.sym-china.com
- [2] 董永贵编著, 传感技术与系统[M], 北京: 清华大学出版社, 2006
- [3] 李科杰主编, 新编传感器技术手册[M], 北京: 国防工业出版社, 2002
- [4] 陈敏, 杨欣荣, 测量油品含水量的电容式传感器机理[J], 传感器技术, 2002, (7): 15-17

Capacitive sensor and Capacitance/Voltage Transmitter IC with Linear Transfer Function

SHI Lin-sheng

(.Shanghai yunsheng microelectronics Ltd, shanghai 201108)

Abstract: This article describes the structure of a number of capacitive sensors and measuring some of the ways, and this was some discussion. Covering some such as displacement measurement, plate capacitive sensors, capacitive level and material moisture measurement, introduces the ASIC CAV444 capacitive sensors on the linear capacitor voltage conversion applications

作者简介：

施林生, 留德物理硕士, 从事传感器和信号处理技术
通讯地址: 上海市金都路 3000 号 1422 室 邮编: 201108
E-mail: zzhyyun@126.com
电话: 021-22816948