

2.2.1 带水水管检测原理

针对墙体中的水管探测,设计了一种无源传感器,并设计了相关数据的处理方法来确定被检测水管的具体位置。根据水的介电常数大于墙体的介电常数,利用覆铜板制作了用于探测水管的电容极板,通过测量墙体中介电常数变化,得到输出信号随被测水管位置变化的规律。

1) 电容式传感器工作原理

利用平板电容 $C = \frac{\epsilon A}{d}$ 的关系,在 ϵ 、 A 、 d 的三个参数中,保证二个参数不变,其中一个参数改变,从而使电容的容量 C 发生变化,通过相应的测量电路,将电容的变化量转换成相应的电压量,则可以制作多种电容传感器,如:①改变 ϵ 的湿度电容传感器。②改变 d 的电容式压力传感器。③改变 A 的电容式位移传感器。本设计采用第③种电容传感器,是一种平铺差动变面积式电容传感器。

如下图 7 是平行板式差动变面积电容传感器的结构原理图。

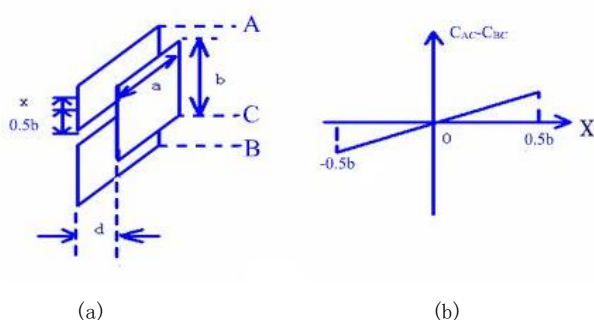


图 7 平行板式差动变面积式电容传感器及特性

使用两块互相绝缘的固定金属板 A、B,可动极板 C,C 即为设计中的目标水管,极板长为 a ,宽为 b ,极板相互距离为 d ,当可动极板 C 处在 A、B 固定极板中间位置时,设 $x=0$

$$C_{AC} = \frac{\epsilon a \frac{b}{2}}{d}$$

$$C_{BC} = \frac{\epsilon a \frac{b}{2}}{d}$$

$$C_{AC} - C_{BC} = 0$$

当可动极板 C 在两块固定极板中移动距离为 X 时:

$$C_{AC} = \frac{\epsilon a \frac{b}{2}}{d} + \frac{\epsilon a x}{d}$$

$$C_{BC} = \frac{\epsilon\alpha \frac{b}{2}}{d} - \frac{\epsilon\alpha x}{d}$$
$$C_{AC} - C_{BC} = 2\frac{\epsilon\alpha x}{d} = kx$$

可见，这种差动变面积式传感器的特点是两电容差值 $C_{AC} - C_{BC}$ 与位移 x 呈线性关系， k 为比例系数。

2) 电容极板设计

电容极板探测示意图见图 8 及各极板的长宽高及其间隔的表格见表 1

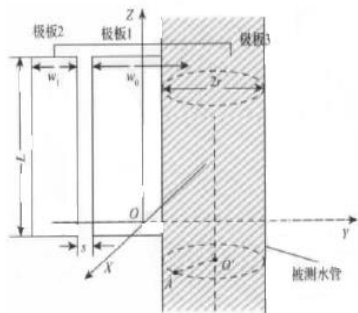


图 8 电容极板探测示意图

表 1

意义	符号	数值/mm	意义	符号	数值/mm
极板 1 宽度	ω_0	36	极板长度	L	56
极板 2、3 宽度	ω_1	12	空气介电常数	$\epsilon_{\text{空}}$	ϵ_0
极板间隙	S	4	水介电常数	$\epsilon_{\text{水}}$	$80\epsilon_0$

注： $\omega_0 = 8.854 \times 10^{-12}$

3 覆铜板分布于 YZ 平面，中间的覆铜板 1 为电容器的一极，覆铜板 2 和覆铜板 3 连在一起，构成电容器的另外一极。采用该传感器，检测半径为 r 的圆柱形水管。通过扫描水管，会产生两个电容值 C_{AC} ， C_{BC} 。

批注 [S1]: 表格

批注 [S2]: 后面呢？产生电容值以后呢？

3 墙体探测仪硬件电路的设计

3.1 探测仪的整体设计

信号处理框图如图 11 所示。将电容极板接入单稳态触发电路中，产生一路占空比随电容大小变化的脉冲信号，其均值与直流参考电平作差分放大，输出电压结果可以反映电容变化的大小。极板电容值变化越大，输出信号的变化越大。输出信号为直流电平，通过 A/D 采样获得数据。220V 电线用仪金属感应板感应变化的电场，通过接入一个高阻抗放大电路，A/D 采样获得信号峰值。差分线圈获得的信号经过放大和滤波电路进行处理，采用 A/D 转换获得电压信号进行分析。这里的控制芯片选用 STM32，因为它自带的 A/D 转换电路可以为设计节省一定的时间。

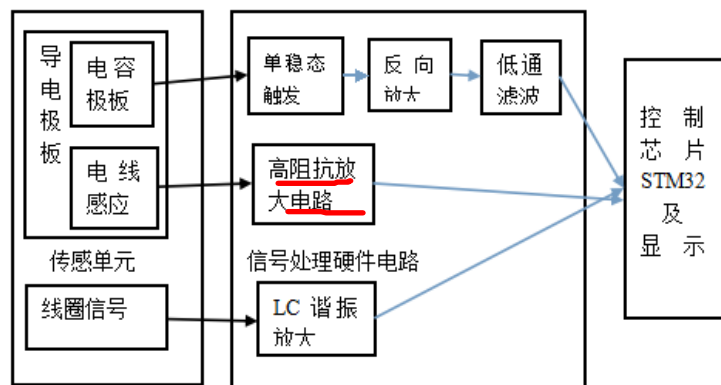


图 11 硬件电路图整体设计

3.2 水管探测模块硬件电路

在探测水管模块中，自制了电容式传感器，主要根据水管中水的电解质不同于墙体的电解质，从而测量墙体中介电常数的变化，得到输出信号随被测水管位置变化的规律。

3.2.1 电容变换器测量电路原理

要利用电容式传感器电容量的变化检测物理量，必须借助于测量电路，通过测量电路将电容的微小变化转换成与其成正比的电压，电流或频率，以便传输、显示或记录。电容变换器电路如图 12 所示。

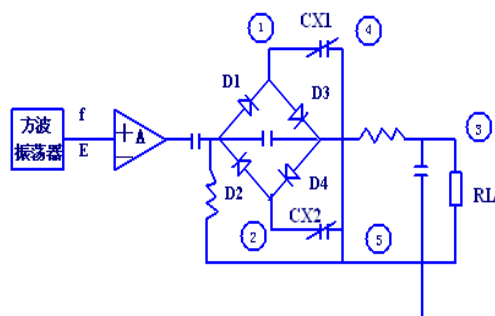


图 12 电容变换器电路

这是一种利用电容充放电原理的脉冲型测量电路，其中 E 、 f 为方波激励源的幅值和频率， $D_1 - D_4$ 为特性相同的二极管，本设计选用 IN4148，A 为放大器， C_{x1} 、 C_{x2} 即为差动变面积式电容传感器的两个差接电容 C_{AC} 、 C_{BC} ， RL 为负载电阻。

1) 方波振荡电路设计

这里的方波用于控制电容 C_{x1} 、 C_{x2} 的充放电。

产生方波的方法有以下几种：采用 555 时基电路实现、采用门电路及 RC 实现、采用单片机定时器实现、采用运算放大器和 RC 组容电路实现。但是采用门电路及 RC 组成的振荡电路中，占空比改变的同时，振荡频率也在改变，不符合本设计的要求；采用单片机定时器产生的方波频率不能太高；综上所述，本设计选用 NE555P 来生成所需的方波，因为 555 定时器可组成占空比可调的矩形波发生器。其主要特点是占空比与振荡频率之间彼此独立，互不影响、且占空比调节范围很宽。

NE555P 是一块通用时基电路，电路包含 2 个二极管、24 个晶体管和 17 个电阻，组成触发比较器、阈值比较器、复位输入、RS 触发器、放电和输出等 6 部分。采用 DIP8、SOP8 封装形式。其主要特点是：最大工作频率大于 500kHz，关闭时间小于 $2\mu s$ 。定时可从微秒级至小时级。可工作于振荡方式或单稳态方式。200mA 输出电流大可提供或灌入。占空比可调。可同 TTL 电路相接。

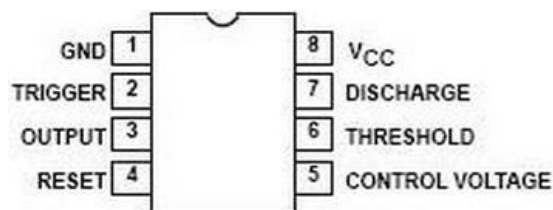
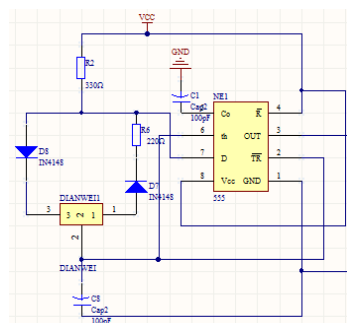


图 13 NE555P 管脚图

方波的产生电路：



批注 [S3]: 格式

图 14 方波产生电路

对电容 C_{x1} 、 C_{x2} 的充放电电路具体如下

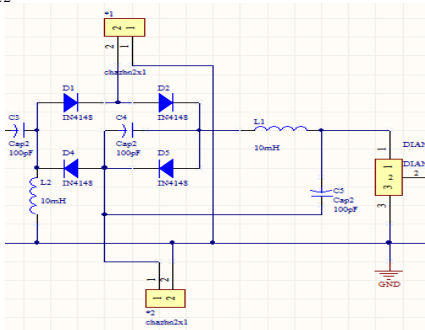


图 15 充放电电路

当电源 E 处于正半周时， D_1 导通， D_2 截止，电容 C_{x1} 经 D_1 迅速充电至电压 E ，电源经 D_3 向负载电阻 RL 供电，与此同时，电容 C_{x2} 经 D_4 和 RL 放电，流经 RL 的电流 i_1 为这两电流之和。当电源 E 处于负半周时， D_1 截止， D_2 导通，此时 C_{x2} 很快被充电至电压 E ，流经负载电阻的电流 i_L 也为这两电流之和。

为便于分析，设二极管的正向电阻为零，反向电阻为无穷大。电路的工作原理为：

当 $C_{x1} = C_{x2}$ (即没有差动) 时，则流经 RL 的电流 i_L 与 i_L 的平均值大小相等而极性相反，因此，在一个周期内流过 RL 的平均电流为零。 RL 上无信号输出。

当 $C_{x1} > C_{x2}$ (或 $C_{x2} > C_{x1}$) 时，则通过 RL 上的平均电流不为零，因此产生输出电压 u_0 。经分析计算可得：

$$i_L' = \frac{E}{R_L} \left[1 - e^{-\frac{t}{R_L C_{x1}}} \right] \quad (1)$$

批注 [S4]: 格式

$$i_L = \frac{E}{R_L} \left[1 - e^{-\frac{t}{R_L C_{x2}}} \right] \quad (2)$$

输出电流对时间的平均值可写为:

$$\overline{I_L} = \frac{1}{T} \int_0^T [i_L(t) - i_{L(t)}] dt \quad (3)$$

将(1)式代入(2)式得:

$$\overline{I_L} = \frac{1}{T} \cdot E \left[C_{x1} - C_{x2} + C_{x2} e^{-\frac{T}{R_L C_{x2}}} - C_{x1} e^{-\frac{T}{R_L C_{x1}}} \right] \quad (4)$$

$$f = \frac{1}{T}$$

适当选择线路中的元件参数及电源频率 f , 使 $\frac{T}{R_L C_{x1}} > 5$, $\frac{T}{R_L C_{x2}} > 5$, 则(4)式

中非线性项(指数项)在总输出中的比例将小于 1%, 如将其忽略则得:

$$\overline{I_L} = E \cdot f \cdot (C_{x1} - C_{x2})$$

于是输出电压的平均值 U_0 可写为:

$$U_0 = \overline{I_L} \cdot R_L = E \cdot f \cdot R_L (C_{x1} - C_{x2}) = E \cdot f \cdot R_L [C_{AC} - C_{BC}]$$

前面已证明:

$$C_{AC} - C_{BC} = kx$$

所以:

$$U_0 = E \cdot f \cdot R_L \cdot kx$$

x 为动片位移量(当动片处于两定片中间位置时, $x=0$, 此时 $U_0 = 0$ V)。

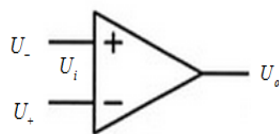
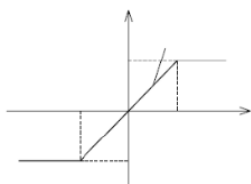
据此原理, 可用差动变面积式传感器测量直线位移, 以及可转化为位移测量的其它非电量。

2) 运算放大电路

后面接一个运算放大器放大电路, 用以放大所得电压 U_0 。

运算放大器, 根据名字可知, 它是做运算用的放大器, 在目前的器件中, 应用最广泛。运算放大器的功能主要是对讯号进行减法、加法、积分、微分等数学运算。但其用途并不限于此, 由于它具有高性能的直接耦合特点, 所以在测量技术、自动控制技术、仪器仪表等领域中均有十分广泛的应用。

运算放大器一般包含偏置电路, 输入级, 中间级, 输出级 4 个部分。



批注 [S5]: 字体

图 14 运算放大器的特性曲线 图 15 运算放大器输入输出端图示

图 14 是运算放大器的特性曲线，通常应用的是曲线中的线性部分。在图 15 中， U_- 对应的端子为“-”，当输入单独加在该端时，输出 U_o 与输入 U_i 反向，所以该端称为反向输入端。 U_+ 对应的端子为“+”，当输入单独加在该端子时，输出 U_o 与输入 U_i 方向相同，所以该端为正向输入端。输出： $U_o = A(U_+ - U_-)$ ；这里的 A 是开环电压放大倍数，称为运算放大器的开环增益。在实际的应用中，运算放大器经常被看做理想的运放，所谓的理想运放的条件是：开环电压增益 $A_{ud} = \infty$ ；输入阻抗 $r_i = \infty$ ；输出阻抗 $r_o = 0$ ；带宽 $f_{BW} = \infty$ ；失调与漂移均为零等理想化参数。

在运算放大器的应用中，最常用的是比例电路。比例电路能够将输入信号按比例放大，它主要分为反向比例电路、同相比例电路、差动比例电路。本设计中主要用到的是反向比例放大和同向比例放大，所以只对着两种放大电路进行解析。

(a) 反向比例电路

反向比例电路如图16所示，入反相输入端加输入信号 U_i ：

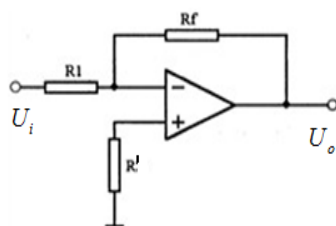


图 16 反相比例电路图

对于理想运算放大器，该电路的输出电压与输入电压之间的关系为：

$$U_o = -\frac{R_f}{R_1} U_i$$

由于输入级有偏执电流，易引起误差，为了减小该误差，在同相输入端应接入平衡电阻来缩小该误差：

$$R' = R_1 // R_f$$

输入电压 U_i 与输出电压 U_o 存在比例关系，方向相反，要想改变输出电压的值，可通过改变比例系数，即改变电阻 R_f 、 R_1 的阻值就可以了。但是反向比例电路对于输入信号的负载能力有一定的要求。

(b) 同向比例电路

同向比例电路如图17所示，跟反向比例电路相似，只是将输入信号 U_i 信号接在同向输入端，将反向输入端接地。可实现输入电压 U_i 与输出 U_o 的同向放大。

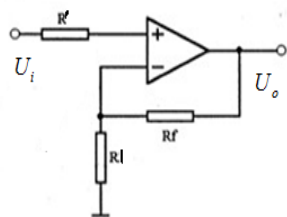


图17 同相比例放大器电路图

它的输入电压 U_i 与输出电压 U_o 之间的关系为：

$$U_o = (1 + \frac{R_f}{R_1}) U_i ;$$

$$R' = R_1 // R_f$$

同样可通改变电阻 R_f 、 R_1 的阻值来改变比例系数，从而改变输出电压。

本设计选用了反相比例放大电路，选用 HA17741 芯片，管脚图见图18。HA741 是高增益运算放大器，应用非常广泛，封装形式有两种，双列直插8脚或圆筒8脚。工作电压 $\pm 22V$ ，差分电压 $\pm 30V$ ，输入电压 $\pm 18V$ ，允许功耗500mW。其管脚与 OP07 完全一样，可以代换的其他运放有 uA741, uA709, LM301, LM308, OP07, 等，HA17741 虽然性能不是很好，但满足本设计的基本需求，相对其他运放芯片，性价比高。

批注 [S6]: 格式 图左下角

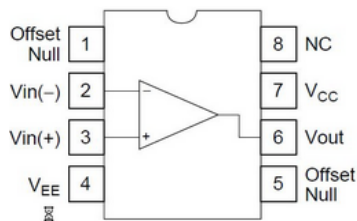


图 18 HA17741 管脚图

图 19 为运用 HA17741 设计的运放电路

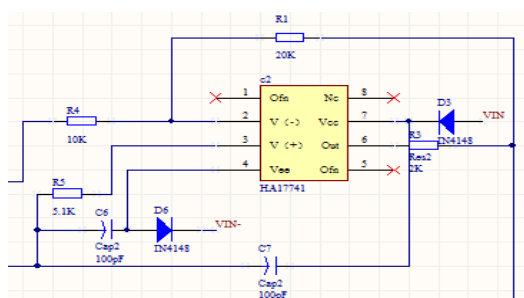


图 19 HA17741 运放电路

这里使用了 HA17741 芯片的 2、3、4、6、7、引脚，其他引脚悬空；其中第 2 引脚接电阻 R_4 ，第 3 引脚接电阻 R_5 ，第 4 引脚接去耦电容 C_6 ，并为外界向系统提供负电压的引脚，第 6 引脚接反馈电阻 R_1 作为反馈电路，同时外接数据传输电路，第 7 引脚接去耦电容 C_7 ，并为外界向系统提供正电压的引脚；双电源供电系统能使芯片更为稳定地工作，减小误差。其中 D_3 、 D_6 为二极管 IN4148，其单向导电性，起到了保护电路的作用。

该电路的放大倍数计算为：

$$A = -\frac{R_1}{R_4} = -\frac{20K}{10K} = -2$$

3) 滤波放大电路

在接下来的设计中，我们加入 RC 低通滤波电路，并对以上的信号进一步放大，这里依然选用 HA17741 芯片。

低通滤波器是滤波器的一种，可实现对信号的选择，容许低于截止频率的信号通过，但不允许高于截止频率的信号通过。经常应用于在仪器、音响、信号处理等电路中，可以实现按频率对信号进行选择，防止高频信号对电路的干扰。其电路见图 20：

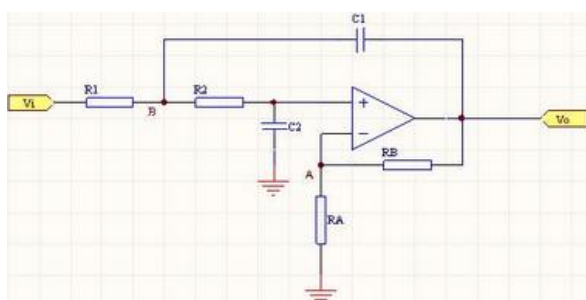


图 20 滤波放大电路

其截止频率计算公式是：

$$f_c = \frac{1}{6.28RC}$$

设计中运用 HA17741 画出的原理图见图 21 为：

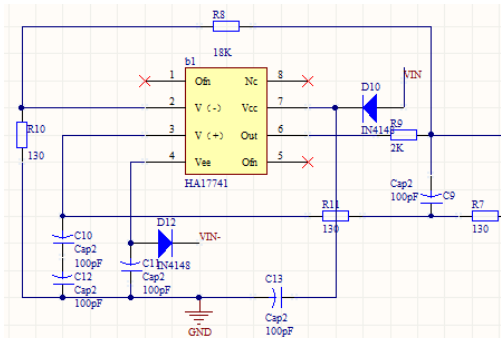


图 21 HA17741 滤波运放电路

由设计的原理得出这里的截止频率为：

这里放大倍数为：

$$A = 1 + \frac{R_f}{R_i} = 1 + \frac{18000}{130} = 139.5$$