

利用电容-数字转换器检测液位

作者: Jiayuan Wang

简介

输液和输血等程序要求监控液体的确切数量,因此这些应用需要采用精确、易于实施的方法来实现液位的检测。本文描述 24 位电容-数字转换器和液位检测技术,可通过测量电容对液位进行高性能检测。

电容测量基础知识

电容是物体存储电荷的能力。电容 C 定义如下:

$$C = \frac{Q}{V}$$

其中, Q 是电容上的电荷, V 是电容上的电压。

在图 1 所示电容中,两个面积为 A 的平行金属板间距为 d 。电容 C 为:

$$C = \epsilon_0 \times \epsilon_R \frac{A}{d}$$

其中

- C 是电容,单位为 F
- A 是两块板的重叠面积, $A = a \times b$
- d 是两块板之间的距离
- ϵ_R 是相对介电常数
- ϵ_0 是自由空间的介电常数 ($\epsilon_0 \approx 8.854 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$)

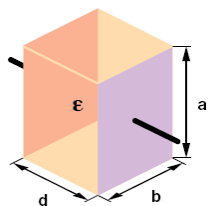


图 1. 两块平行板的电容

电容数字转换器(CDC)

单通道 AD7745 和双通道 AD7746 均为高分辨率 Σ - Δ 型电容-数字转换器,可测量直接连接输入端的电容。这些器件具有高分辨率(21 位有效分辨率和 24 位无失码)、高线性度($\pm 0.01\%$)和高精度(出厂校准至 $\pm 4 \text{ fF}$),非常适合检测液位、位置、压力和其他物理参数。

这些器件具有完整的功能,电容输入端集成多路复用器、激励源、用于电容 DAC、温度传感器、基准电压源、时钟发生器、控制和校准逻辑、I²C 兼容型串行接口以及高精度转换器内核,该内核集成二阶 Σ - Δ 型电荷平衡调制器和三阶数字滤波器。转换器用作电容输入的 CDC 和电压输入的 ADC。

所测电容 C_x 连接在激励源和 Σ - Δ 型调制器输入端之间。转换期间在 C_x 上施加方波激励信号。调制器会不间断地对流过 C_x 的电荷进行采样,并将其转换为 0 和 1 的流。调制器输出 1 的密度经数字滤波器处理,确定电容值。滤波器输出通过校准系数缩放调节。然后,外部主机便可通过串行接口读取最终值。

图 2 中的四个配置显示了单端、差分、接地和浮动式传感器应用中 CDC 如何检测电容。

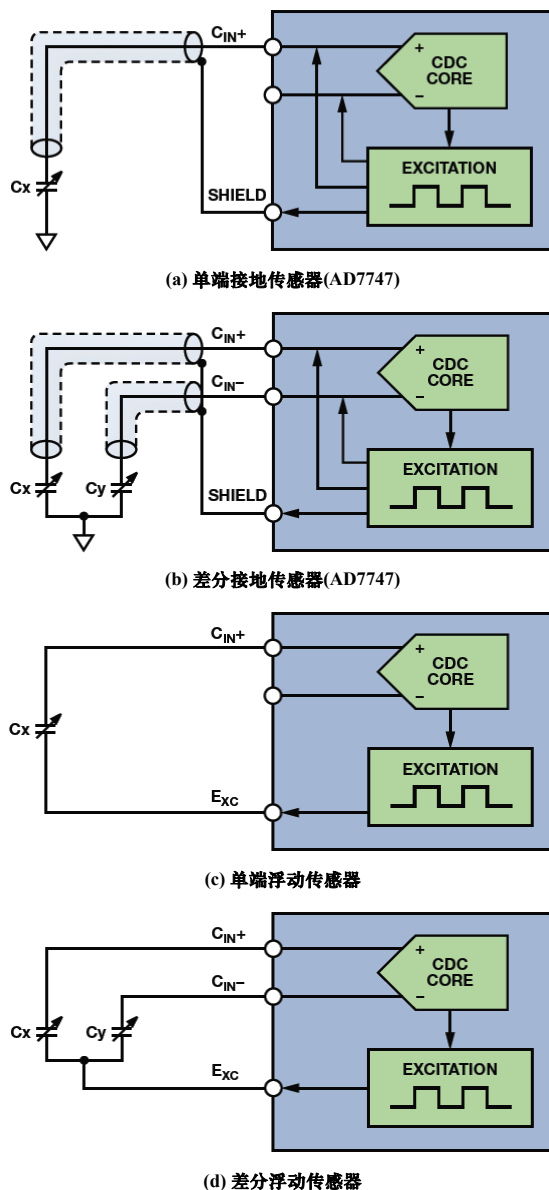


图 2. 单端、差分、接地和浮动式传感器应用中的配置

电容式液位检测技术

一种简单的液位监控技术是将平行板电容器浸入液体中，如图 3 所示。随着液位变化，板之间的电介质材料数量发生改变，导致电容也随之改变。同时第二对电容传感器（图中为 C_2 ）用作基准。

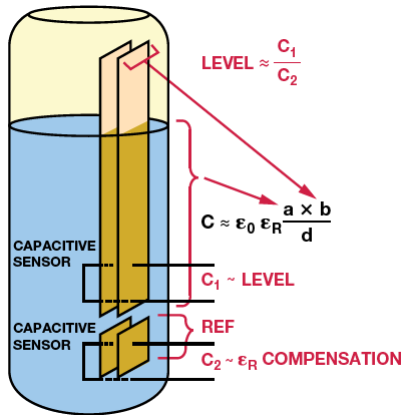


图 3. 电容式液位检测

由于 $\epsilon_R(\text{水}) \gg \epsilon_R(\text{空气})$ ，传感器电容可由浸没部分的电容近似表示。因此，液位为 C_1/C_2 ：

$$C_1 \approx \epsilon_0 \epsilon_R \frac{\text{Level} \times b}{d}$$

$$C_2 \approx \epsilon_0 \epsilon_R \frac{\text{Ref} \times b}{d}$$

$$\text{Level} \approx \frac{C_1}{C_2}$$

其中

- Level 是浸入液体的长度
- Ref 是基准传感器的长度

电容式液位检测系统硬件

24 位 AD7746 具有两条电容测量通道，非常适合液位检测应用。图 4 显示了系统功能框图。传感器和基准电容信号转换为数字信号，数据通过 I²C 端口传输至主机 PC 或微控制器。

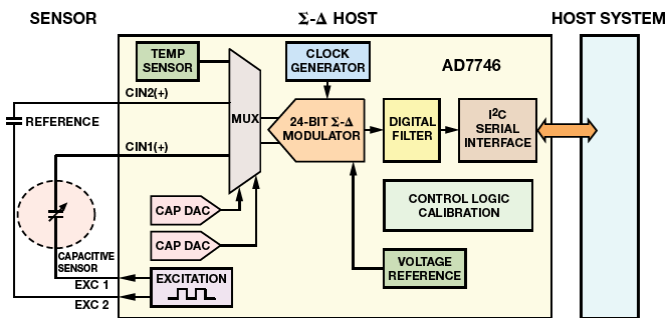


图 4. 电容式液位检测系统

要实现精确测量，PCB 设计很关键。图 5 显示了传感器板和 CDC 连接。为了保证精度，AD7746 安装在 4 层 PCB 表面尽可能靠近传感器的地方。接地层暴露在 PCB 背面。该应用使用了转换器全部的两个输入通道。传感器板如图 6 所示。

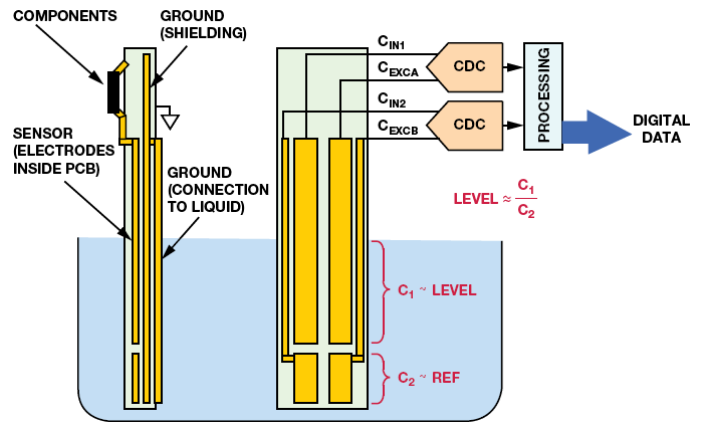


图 5. 传感器板和 CDC 连接

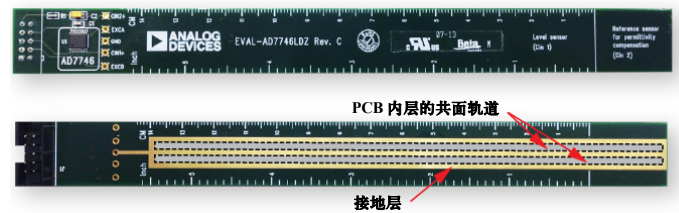


图 6. PCB 正面和反面照片

传感器板设计为在一块 PCB 上的两个共面金属板，而非两个平行板。共面极板在 4 层 PCB 内无需直接接触液体。共面极板电容的电介质由 PCB 材料、空气和液体组成，轨道每一单位长度的电容值约为：

$$\frac{C}{l} = \frac{\pi \epsilon_R(\text{eff}) \epsilon_0}{\ln \left(\frac{\pi(d-w)}{w+t} + 1 \right)}$$

其中

- d 是两个平行轨道中点之间的距离
- l 是轨道长度
- w 是每一条轨道的宽度（假定宽度相等）
- t 是轨道的厚度
- 有效 ϵ_R 由 d 与 h 的比值决定（ h 是 PCB 板的厚度）
 - 若 $d/h \gg 1$ ，则 $\epsilon_{R(\text{eff})} \approx 1$
 - 若 $d/h \approx 1$ ，则 $\epsilon_{R(\text{eff})} = (1 + \epsilon_R)/2$

就该等式而言，测得的电容值与浸入液体的长度成比例，而共面传感器每一单位轨道长度的电容近似值不变。使用 LabVIEW[®] 软件执行系统校准有助于实现更高的精度。

LabVIEW 软件

PC 上运行的 LabVIEW 程序通过 I²C 串行接口获取 CDC 数据。图 7 是 PC 监视器上显示的图形用户界面(GUI)。启动液面演示系统后，会实时显示液面数据、环境温度和电源电压。

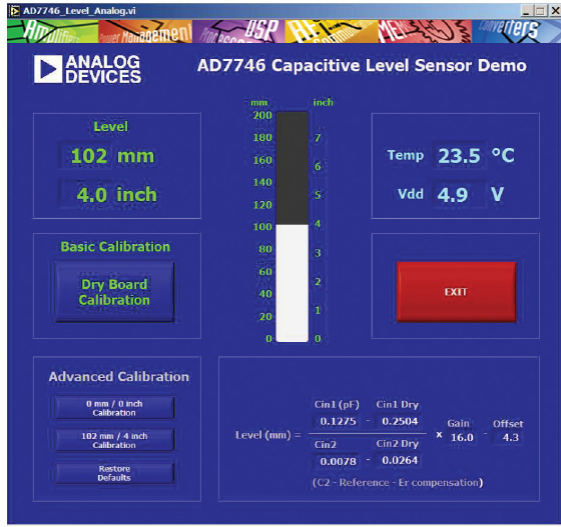


图7. PC 监视器上显示的系统 GUI

液面推导公式为：

$$Level = \frac{C_1 - C_{1DRY}}{C_2 - C_{2DRY}} \times Gain - Offset$$

LabVIEW 程序包括基本校准和高级校准，可实现更精确的测量。在浸入液体时进行干（基本）校准用来确定 C_{1DRY} 和 C_{2DRY} 。湿(高级)校准则用来确定一阶方程中增益和失调两个未知量，通过在液位 0 英寸和 4 英寸先后进行校准测量可以得到两个方程联立推导出增益和失调。湿校准和测量过程中，基准电容必须完全浸入液体中。

结论

本文介绍了电容式液位检测演示系统。

参考文献

[AD7746 评估套件](#)

[AD7746 评估板技术文档](#)

Ning Jia, [医疗保健应用中的 ADI 电容数字转换器技术](#)。《模拟对话》，第 46 卷第 2 期，2012 年。

Jim Scarlett, [电容数字转换器为诊断系统中的电平检测提供方便](#)。《模拟对话》，第 48 卷第 2 期，2014 年。

Charles S. Walker, [电容、电感和串扰分析](#)。Artech House, 1990, ISBN:



Jiayuan Wang [jiayuan.wang@analog.com]于 2013 年加入 ADI 公司，任客户解决方案支持部门的应用工程师，工作地点在马萨诸塞州威明顿。Jiayuan 于 2013 年获得康奈尔大学硕士学位。



Jiayuan Wang