

电容数字转换器为诊断系统中的电平检测提供方便

作者：Jim Scarlett

在血液分析仪、体外诊断系统和其他很多化学分析应用中，液体必须从一个容器中转移到另一个，以便将样本从试管中、或者将试剂从瓶中吸取出来。这些实验室系统经常需要处理大量样本，因此尽可能缩短处理时间很重要。为了提高效率，用来吸取样本的探针必须快速移动，因此有必要精确地定位探针与所要吸取液体表面的相对位置。本文演示了电容数字转换器(CDC)的一种新颖使用方法，使用该方法可信心十足地完成这项工作。

CDC 技术

本质上， $\Sigma\text{-}\Delta$ 型 ADC 利用简单的电荷平衡电路，将数值已知的基准电压以及数值未知的输入电压施加于固定片内输入电容上。电荷平衡确定未知输入电压。 $\Sigma\text{-}\Delta$ 型 CDC 有所不同，其未知值为输入电容。将已知的激励电压施加于输入，且电荷平衡检测未知电容的变化，如图 1 所示。CDC 将保留 ADC 的分辨率和线性度。

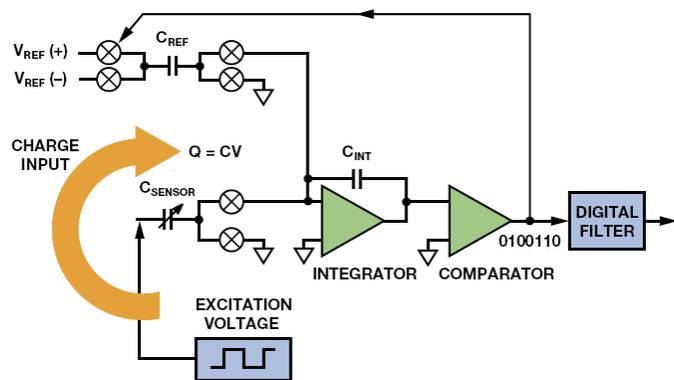


图 1. 基本 CDC 架构

集成式 CDC 通过两种方式部署。单通道 AD7745 和双通道 AD7746 24 位 CDC 与电容一同工作，该电容的一个电极连接激励输出，另一个连接 CDC 输入。单电极器件——如集成温度传感器的 24 位 CDC AD7747 或 16 位 CapTouch™ 可编程控制器 AD7147——可针对同一个电极施加激励并读取电容值。另一个接地的电极可以是真实电极，也可以是触摸屏上的用户手指。两种类型的 CDC 均可用作电平检测。

电容

在最简单的形式下，电容可以描述为两块平行板之间的电介质材料。电容值随平行板面积、两板距离和介电常数的变化而改变。利用这些变量，可以测量非常规电容的变化值，确定探针相对液体表面的位置。

在本应用中，电容由导电板组成，该板位于试管或移动探针的下方，如图 2 所示。激励信号施加于一个电极，另一个连接 CDC 输入。无论哪个电极连接激励信号、哪个电极连接 CDC 输入，测得的电容都相同。电容绝对值取决于板和探针的尺寸、电介质的组成成分、探针与板之间的距离以及其他环境因素。注意，电介质包括空气、试管和其中的液体。此应用利用探针接近板（更重要的是，接近液体表面）时混合电介质发生改变的特性。

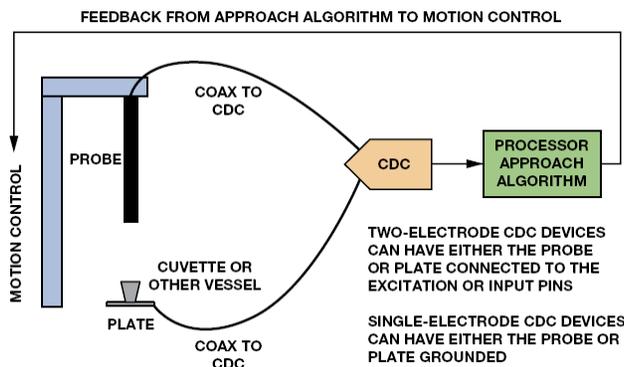


图 2. 电平检测系统框图

图 3 显示电容值随探针靠近干燥试管而增加。通过观察可知，该变化是幂级数函数（二次方程），但系数随液体而变化。相比空气，液体具有高得多的介电常数，因此液体占电介质的比例越高，电容就上升越快。

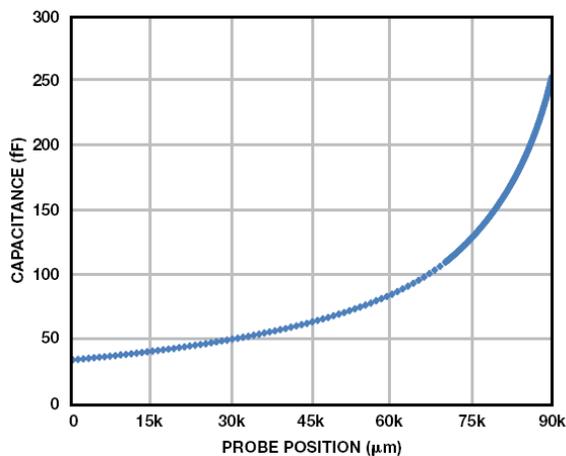


图 3. 干燥试管的电容测量

当探针非常接近液体表面时，测得的电容值加速上升，如图 4 所示。这一较大的变化可用来确定接近液体表面的程度。

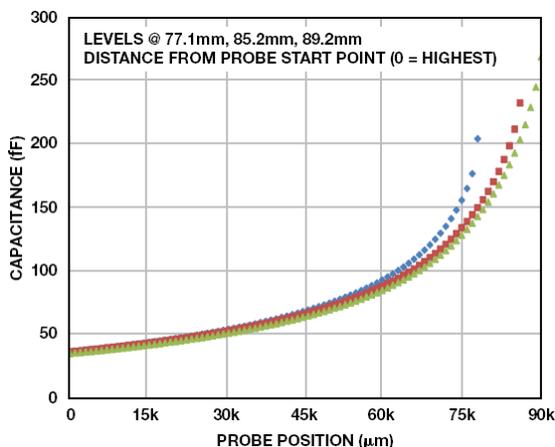


图 4. 充盈试管的电容测量

归一化数据

通过归一化数据，可更好地确定液位。若探针相对某些参照点的位置精确已知，则系统可在无液体存在的情况下，在多个位置进行特性描述。一旦系统完成特性描述，则靠近液体表面过程中收集的数据便可从接近数据中减去干燥数据进行归一化处理，如图 5 所示。

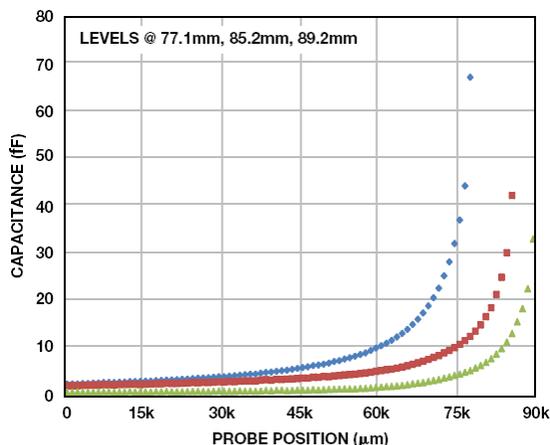


图 5. 归一化电容测量

除了温度、湿度和其他环境变化外，归一化还可移除电容测量的系统性因素。电极尺寸、探针与板之间的距离以及空气和试管的电介质效应均不影响测量。此时，数据表示向混合电介质中加入液体的效应，使接近控制变得更方便、更连贯。

然而，无法在所有情况下使用归一化数据。例如，运动控制系统可能不够精确，无法精准定位；又或者电机控制器的通信链路相对 CDC 输出速率而言较慢。就算归一化数据不可用，本文描述的方法依然可行。

使用斜率和断续

如图所示，随着探针靠近液体表面，测得的电容加速增加，但无法方便地使用此信息控制探针靠近表面时的速度。当充盈水平较低时，原始电容值将高于容器充盈水平较高时的电容值。

使用归一化数据，则情况相反。这为寻找阈值增加了难度——此阈值可在适当时机触发，改变探针速度。

斜率（或电容的变化率）与位置变化之间的关系可用于存在绝对电容的情况。以恒定速度移动探针时，斜率能通过下一个电容读数减去上一个而近似。如图 6 所示，斜率数据的表现形式与原始电容数据一致。

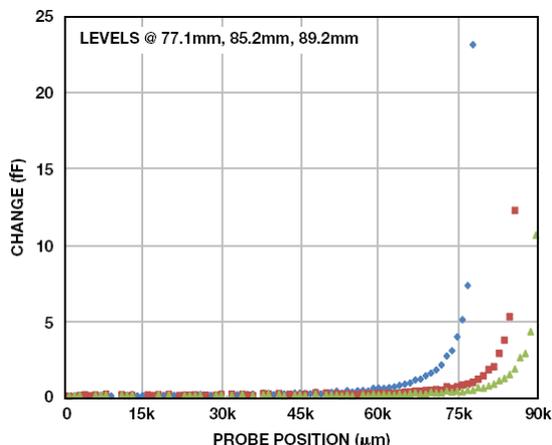


图 6. 使用归一化电容的斜率数据

原始或归一化电容读数的斜率在可变充盈水平下比读数本身要远为一致，且无论何种充盈水平下，找到斜率的阈值相对而言更为简单。斜率数据比电容数据略为嘈杂，因此对其求均值将很有用。当计算得到的斜率值上升至噪声以上时，探针十分接近液体表面。利用这种方法可以创建非常稳定的接近曲线。

目前为止涉及的数据都表明随着探针接近液体表面，系统的表现如何；但这种方法的一个重要特性将在探针接触液体时变得更明显。在该点处产生了大量的断续，如图 7 所示。这并非像接触后数据点所显示的那样为电容曲线正常加速的一部分。该点处的电容读数是接触前读数的两倍多。这种关系可能会随着系统配置而改变，但它是稳定而一致的。断续的尺寸大小使寻找电容阈值变得相对容易，通过该阈值便能可靠地指示突破液体表面的程度。本应用的目标之一便是将探针插入液体已知的短距离，因此这种特性很重要。

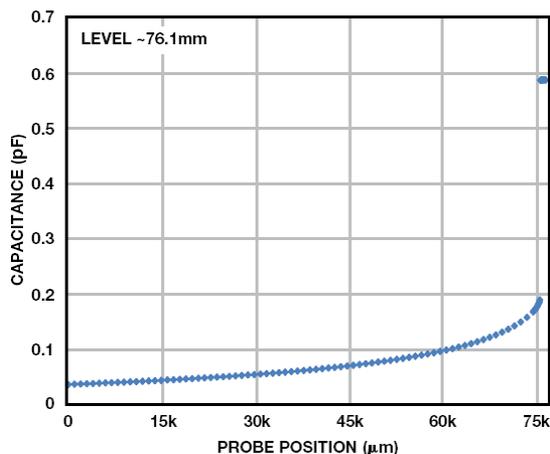


图 7. 液体表面的断续

若要使吞吐速率最大，探针应以可能的最高速度移动，同时尽量减少探针被推进的太远而造成损坏的危险。有时候可能不提供高精度电机控制系统，因此该解决方案必须要能在无法得知探针精确位置的情况下工作。目前为止，我们讨论的测量方法可以让您信心十足地完成这项工作。

方法

图 8 所示的流程图列出了接近液体时采用的技术。

探针以能达到的最高速度移动，直到极其接近液体表面。根据位置信息、现有的计算能力以及预先表征系统的能力，该点可通过幂级数计算、电容阈值或电容曲线的斜率确定，如本文所述。对数据求均值可更可靠地确定该点。对电容数据进行归一化也能增加系统的可靠性。

当探针足够接近表面时，探针速度大幅下降，以便最终接近液体表面。为使效率最大化，该点应尽量靠近表面，但在穿透液体表面之前接近速度必须下降，以确保探针停止移动之前对穿刺距离具有良好的控制。

与液体表面的接触可利用电容值并通过该点的断续程度加以确定（如本文所述），也可通过电容曲线斜率确定。求均值可降低噪声，但不执行该操作也能可靠地检测出较大的偏移。归一化电容数据可改善稳定性，但其影响不如接近阶段那么大。

随后，便可将探针驱至表面以下的预定距离。具有精密电机控制能力时，这很容易做到。若无精密电机控制，可估算速度，且探针可移动一段固定的时间。

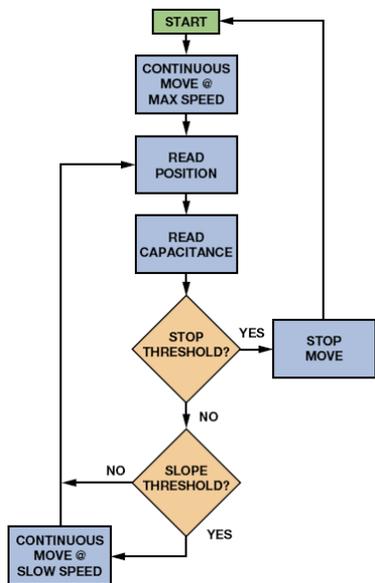


图 8. 简化控制流程图

穿透液体之后，会得到电容读数的两个特性数据。首先，随着探针在液体中移动，测量值的变化相对较小。虽然我们期望恒定变化速率有助于确定穿透深度，但并未观察到这样的现象。其次，不同液位下的测量值变化极小，如图 9 所示。穿透灌满的试管与穿透几乎为空的试管之后，测得的电容值基本相同。

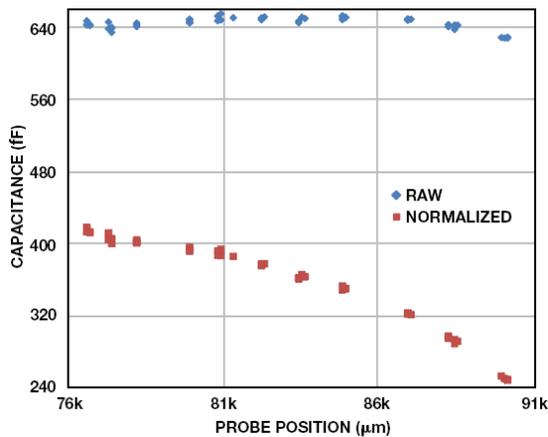


图 9. 电容与液位的关系

但是，归一化的数据却有所不同。随着液位的下降，归一化电容值也随之下降。若要在可靠的位置数据不可用的情况下确定液位是否降低，那么这种特性可能会有所帮助。

穿透液体表面之后，探针需要多少时间才能停止取决于包括电机控制系统本身在内的几个因素，但一条经过仔细研究的接近曲线可保证严格控制探针，并使探针速度最大化。实验室中，探针以最大速度在两个电容读数之间移动约 0.45 mm，可在穿透表面 0.25 mm 距离之内停止。若采样速率更高且探针在两个样本之间移动大约 0.085 mm，则它可在距离液体表面 0.05 mm 距离之内停止。无论何种情况，探针均以最大速度工作，直到距离液体表面大约 1 mm 至 3 mm 处，从而提供最高效率和吞吐速率。

结论

这种打破传统使用集成式电容数字转换器的方法提供了一种简单而稳定的电平检测解决方案。接近曲线同时利用电容和斜率测量控制探针的运动。备用部署方案具有更高的稳定性，或者提供更多信息。本解决方案可在穿透表面后快速可靠地使探针停止移动，同时尽可能以最高探针速度移动至最终位置。本文仅浅显地描述了 CDC 技术用于电平检测的情况。经验丰富的工程师可以本文的思路作为出发点，针对特定应用环境对本解决方案加以改进。

参考文献

电容数字转换器

电容数字转换器(CDC)技术

电路笔记 CN0095: [电容数字转换器\(CDC\) AD7150 用于近程传感应用](#)

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

作者简介

Jim Scarlett [jim.scarlett@analog.com] 于 2002 年加入 ADI 公司，职位是现场应用工程师。在此之前，他拥有 11 年的医疗保健行业从业经验。目前他是 ADI 医疗保健业务部的系统工程师。

