

基于超声波测距传感器的自适应智能饮水机系统

余俊毅

一、系统组成

关键部分：超声波测距传感器模块，3d 打印饮水机结构模型，主控芯片及其电路板，直流水泵，电池。

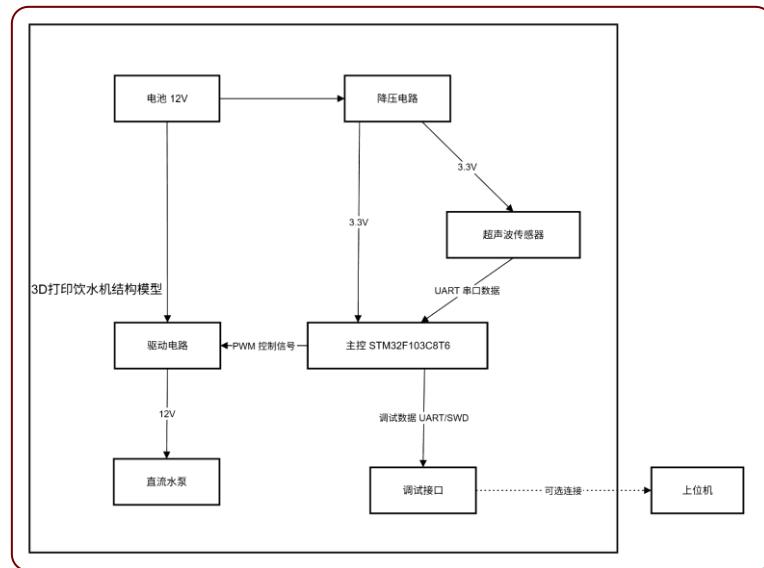


图 1-1 系统框图

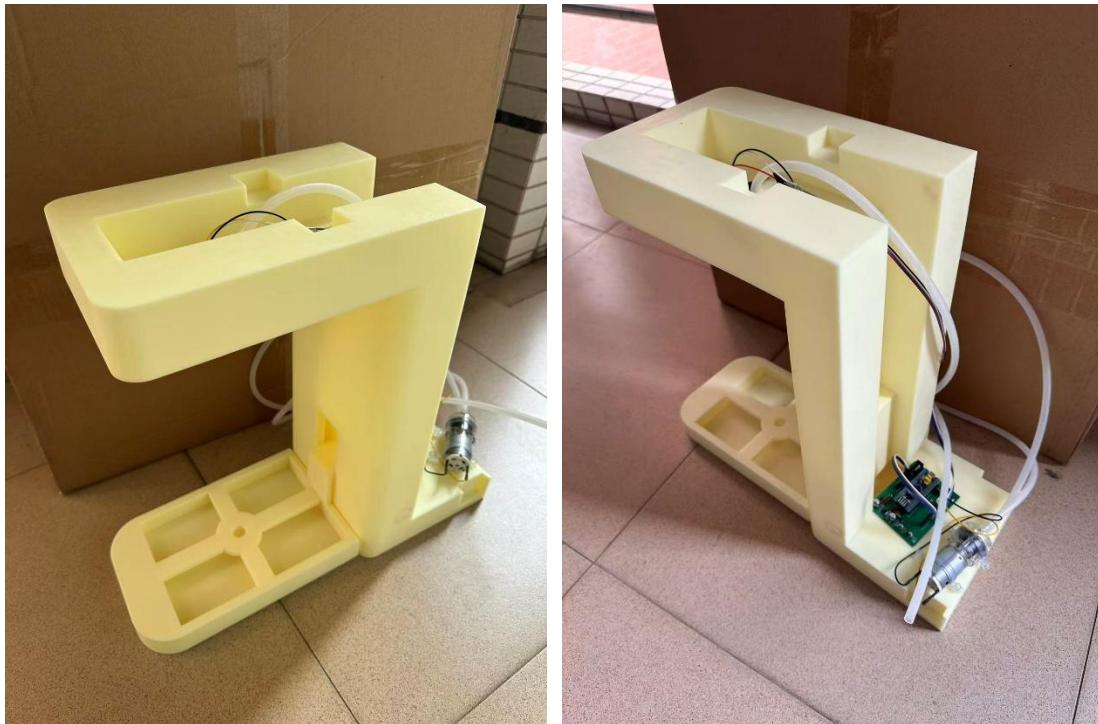


图 1-2 饮水机正面图

图 1-3 饮水机背面

1.超声波测距传感器模块

采用了深圳市优易特科技的 UETCH101DBB0900AT 型号的超声波测距传感器模块，该传感器模块采用了 TDK 公司的 CH101 超声波测距芯片进行测距。其独特优势在于可以通过 AT 指令配置传感器的阈值等参数，并且在调试模式下可以返回每个测距点的幅值数据，总共 225 个数据点，测距范围为 430mm，因此数据点与距离的换算公式为 $distance = \frac{430\text{mm}}{225} \times datapoint$ ，原始数据作图如下图所示。



图 1-4 超声波完整回波数据



图 1-5 传感器正面



图 1-6 传感器背面

2.3d 打印饮水机结构模型

为了得到一个稳定的测试与验证平台，我们通过 3d 建模软件搭建了一个满足我

们饮水机智能化要求的简单饮水机模型。

主要设计亮点：

- (1) 超声波测距传感器的测距孔与水泵的出水口紧密排列在水杯放置区的正上方，并且出水口实现了微小的倾斜，得以适配高的窄口水杯。
- (2) 从水杯放置区的底部到出水口的垂直高度达到 310mm，这个高度可以实现绝大多数常用的水杯的智能接水。
- (3) 水杯放置区底部采用了可拆卸的简易水槽，防止测试时过多液体流出至外部区域。

3. 主控芯片及其配套电路板

智能饮水机的主控芯片模块采用了 STM32F103C8T6 最小系统板，这款芯片简单常用。其外围电路主要包含电池降压模块，直流水泵驱动电路，超声波传感器通信接口以及几个 LED 指示灯。其中电池输出 12V 电压，直流水泵驱动也使用 12V 电压，而单片机 STM32 采用 3.3V 供电，通过降压模块实现 12V 到 3.3V 的转换。直流水泵驱动模块主要就是依靠单片机 GPIO 接口输出 3.3V 电平驱动 MOS 管开关控制直流水泵的 12V 通路，以实现单片机控制水泵工作的目的。

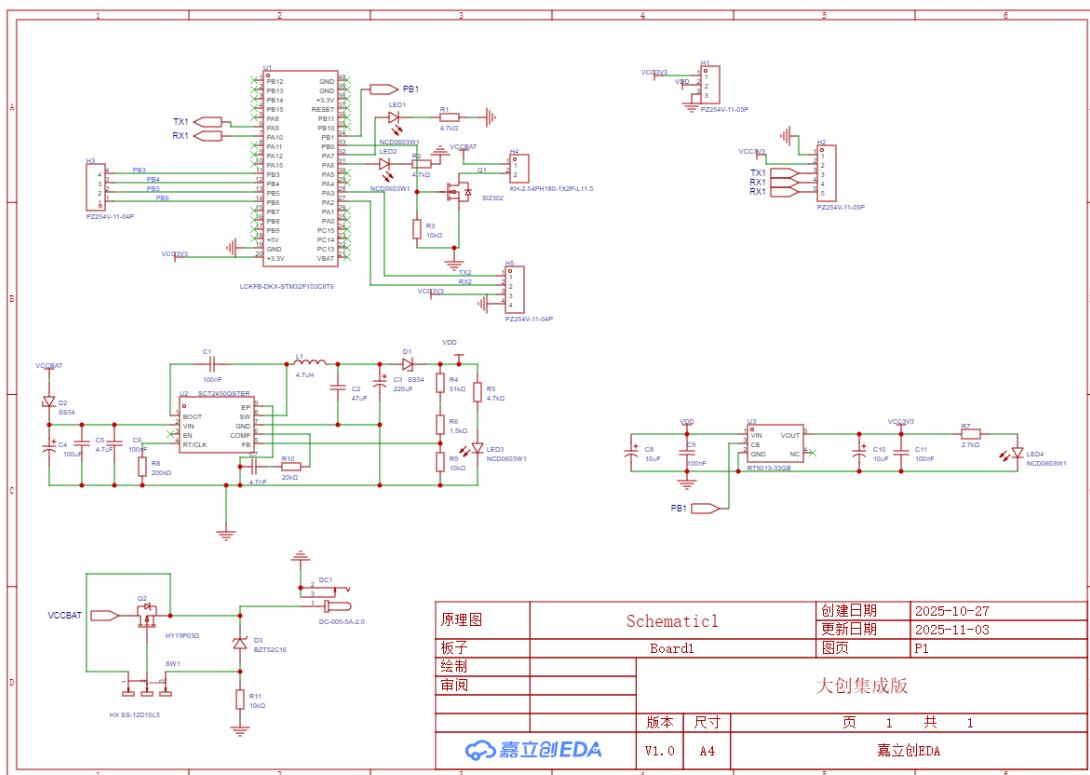


图 1-7 电路板原理图

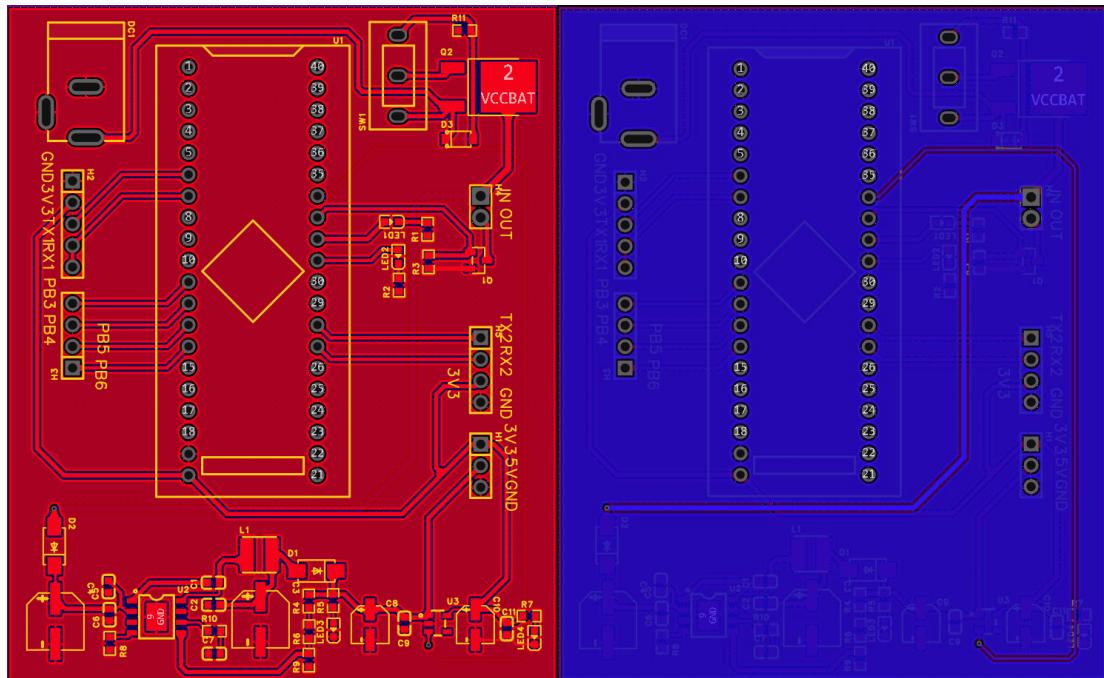


图 1-8 PCB 正反面图

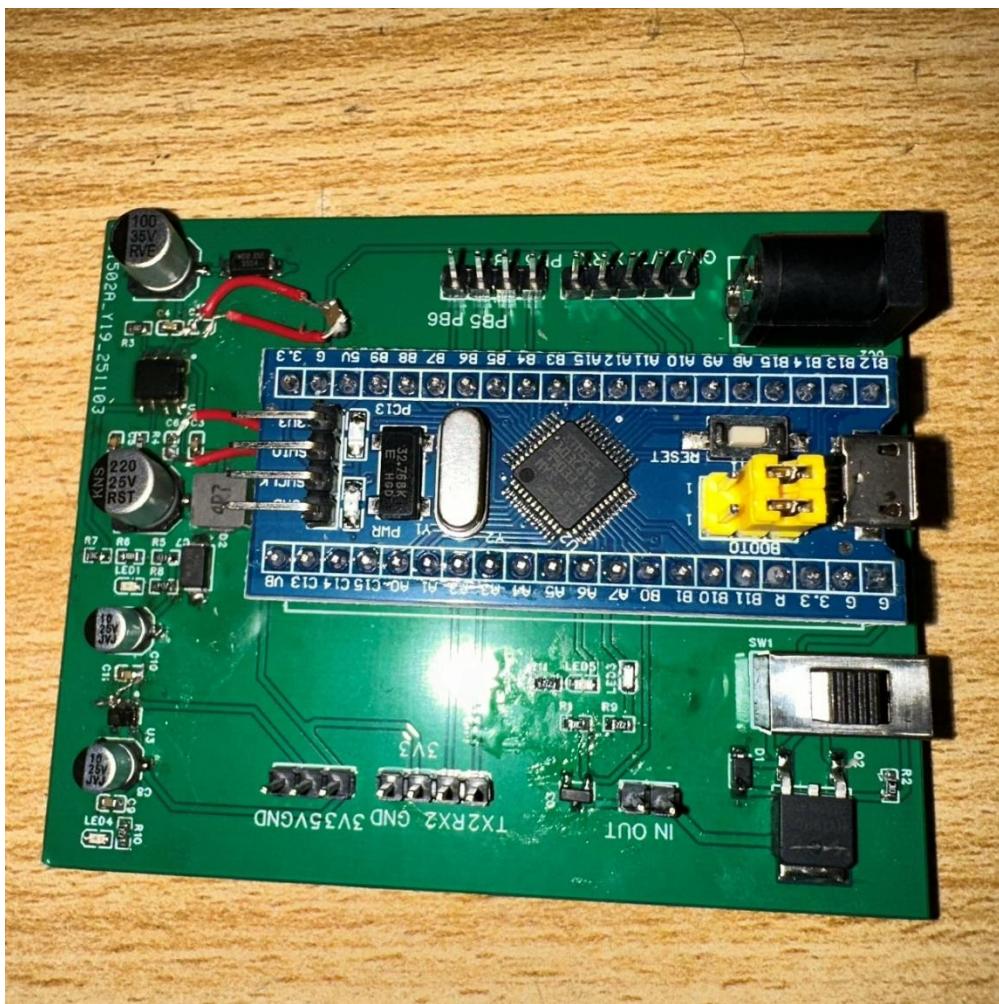


图 1-9 电路板实物图

二、系统功能

该智能饮水机能实现自动在感应到水杯后启动水泵给水杯接水，并且根据不同水杯的形状与高度自动计算停水距离，在水接满后自动停止接水并提醒使用者将杯子取走，能自动调整配置以适应各种不同的水杯。

三、项目创新点

当前市面上的智能饮水机自动化方案主要存在两类技术路径：

红外/光电感应方案：这是目前最主流的非接触式方案，通过红外传感器检测物体是否存在，进而触发水泵。但该类方案本质上属于“开环控制”，多采用定时或定流量的出水逻辑，无法感知容器的实际大小与实时液位，极易导致小容量杯具溢出或大容量杯具未满的问题。

机器视觉方案：部分前沿研究利用摄像头配合深度学习算法（如 YOLO 模型）识别杯型与水位。虽然识别精度较高，但该方案对硬件算力要求极高（通常需树莓派等級別处理器），且在家庭私密场景下存在显著的隐私安全隐患与成本劣势。

与之相比，本项目提出的基于单超声波传感器的自适应闭环控制方案，填补了低成本、高通用性液位控制的空白。尽管业内知名厂商 TDK InvenSense 曾推出基于 MEMS 超声波传感器（CH101）的液位检测演示套件，但其主要定位为传感器性能评估，仅能在特定实验环境下针对预设容器实现定点停水，缺乏对不同材质、口径及摆放位置容器的自适应算法支持^[1]。本系统通过创新的动态阈值算法，成功在低成本微控制器（STM32）上实现了对多变容器的泛化支持。

四、实现原理

1.超声波传感器数据处理

超声波传感器一次测距返回的数据格式如下：

a:132,b:1718,s:0,22,105,205,184,136,670,1995,3150,3302,2851,2310,1798,1401,115
6,978,810,703,696,1036,1891,2648,2645,2135,1696,1433,1191,961,798,663,564,526,
469,376,325,275,219,193,159,125,111,74,57,78,67,34,34,56,54,47,54,36,21,11,39,12,
24,23,39,41,17,13,33,30,17,69,181,354,601,872,1164,1476,1729,1849,1826,1694,147

5,1199,940,728,585,531,488,418,368,296,207,175,158,116,77,41,44,52,42,48,32,32,3
4,15,34,48,15,29,42,41,17,1,1,0,10,40,62,47,23,16,23,9,22,51,165,459,849,1316,18
36,2344,2841,3223,3404,3357,2990,2472,2028,1605,1214,942,754,612,507,382,240,
157,103,39,37,38,26,23,10,14,31,70,61,72,103,98,93,90,31,42,103,106,128,152,123,8
1,56,46,16,37,53,54,42,39,28,46,59,64,70,73,97,102,75,80,96,102,136,164,127,121,1
28,136,132,147,153,146,140,114,121,133,115,127,140,120,86,86,92,60,44,22,21,72,5
3,20,10,50,25,63,42,31,48,46,43,66,\r\n

其中 a:后面的数值代表本次测距的距离值，单位为 mm，其代表测量得到的距离传感器最近的物体的距离； b:后面的数值代表对应距离的回波强度； s:后面跟随 224 个数据点，其为传感器测量得到的原始数据。

数据接收与处理：

由于传感器返回的数据量大且速度快，波特率为 115200，在 STM32 中采用串口的 DMA 接收和环形缓冲区接收来自传感器的数据。并且每次接收都将 a 和 b 的数据转换为整型，将 s 的 224 个数据点都转换为整型并放入一个数组中。a 代表的距离数据会被送入平滑窗口滤波器中，以减少部分噪声干扰。

2. 单片机核心控制逻辑

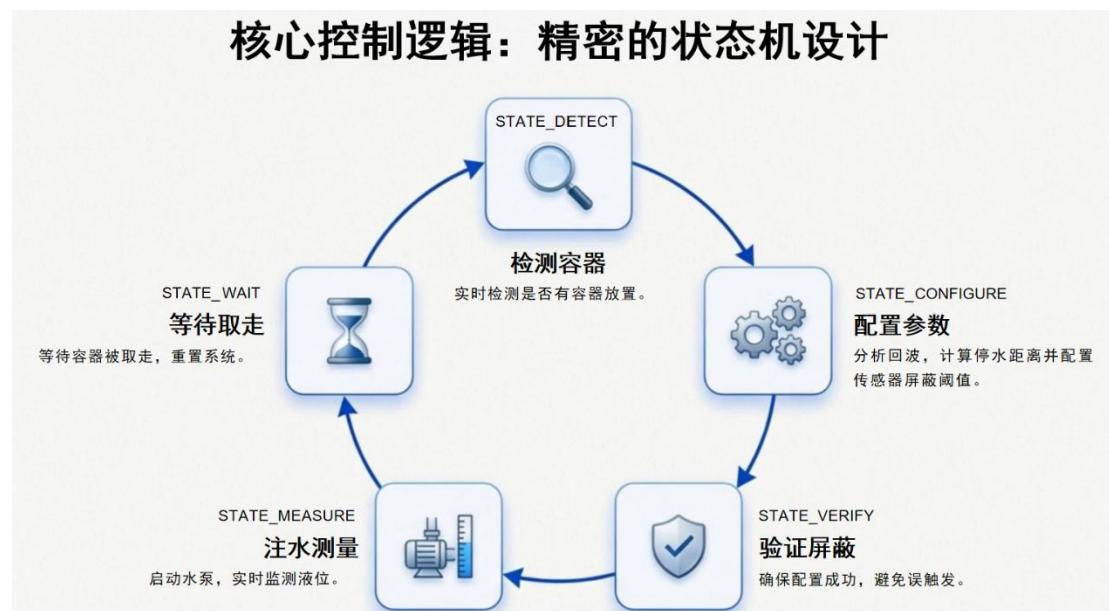


图 4-1 状态机流程图

系统的控制采用一个状态机来实现，具体分为五个状态，分别是：

STATE_DETECT(检测), STATE_CONFIGURE(配置), STATE_VERIFY(验证), STATE_MEASURE(测量), STATE_WAIT(等待)。

STATE_DETECT(检测): 这个状态的目的是实时检测是否有容器放置饮水机接水位置。通过比较滤波后的测距值(a_filtered)与设定的容器检测阈值，若测距值变得小于设定阈值，则认为有水杯放置，进入下一个状态，即 STATE_CONFIGURE。

STATE_CONFIGURE(配置): 这个状态的目的是计算得到容器的上边沿距离值以及对应的停水距离，同时计算得到合适的传感器屏蔽阈值，以屏蔽容器边沿的回波，使得传感器返回的测距值(a 值)代表液面真实距离。在这个状态，会将测量得到的传感器原始数据，即 s 数组，传入超声波阈值算法中（算法具体原理在下一节讲解），算法会自动进行计算，并返回容器边沿距离，液面距离，以及超声波传感器需要配置的参数值 x, y, t1, t2。得到这些数据后，单片机会通过串口发送 AT 指令给超声波传感器进行阈值配置，如 send_at("AT+S3=%d\r\n", x_param)。配置完成后进入下一个状态，即 STATE_VERIFY。

STATE_VERIFY(验证): 这个状态的目的是确保前一步配置的传感器阈值能够成功屏蔽容器边沿的回波，避免出现一放水就立刻停水的问题。其通过检测测距距离值(a 值)是否小于屏蔽距离值来验证是否成功屏蔽，只有连续多次返回值都大于屏蔽距离值，才能认为当前阈值参数配置成功屏蔽了容器边沿回波，否则的话提高屏蔽的回波强度值，重新进行配置，并重置验证流程。直到通过了屏蔽验证，才进入下一状态 STATE_MEASURE，并启动水泵开始接水。

STATE_MEASURE(测量): 这个状态的唯一目的就是检测水位是否达到了停水条件，若满足条件则停水。通过实时比较滤波后的测距值(a_filtered)和先前计算得到的停水阈值，若测距值小于停水阈值则关闭水泵，进入下一状态 STATE_WAIT。

STATE_WAIT(等待): 这个状态的目的是检测接水完成后容器是否移除，若测距值仍高于设定值，则认为容器尚未移除，则继续等待，若测距值低于设定值，则

认为容器已经移除，这时重新配置传感器为初始值，并回到状态 STATE_DETECT，继续检测是否有下一个容器被放置。

3.超声波阈值算法

主要功能：

超声波阈值算法的目的是处理来自传感器的原始数据，即 s 代表的 224 个数据点，分析出容器的边沿位置，以及适当的屏蔽容器边沿与杂波的超声波传感器配置参数。

具体逻辑：

(1) 对输入的原始数据进行平滑处理

即对每个数据点都与相邻的左右各两个数据点做平均值，得到新的数据点，进而得到更加平滑的去除了部分噪声的超声波回波数据。

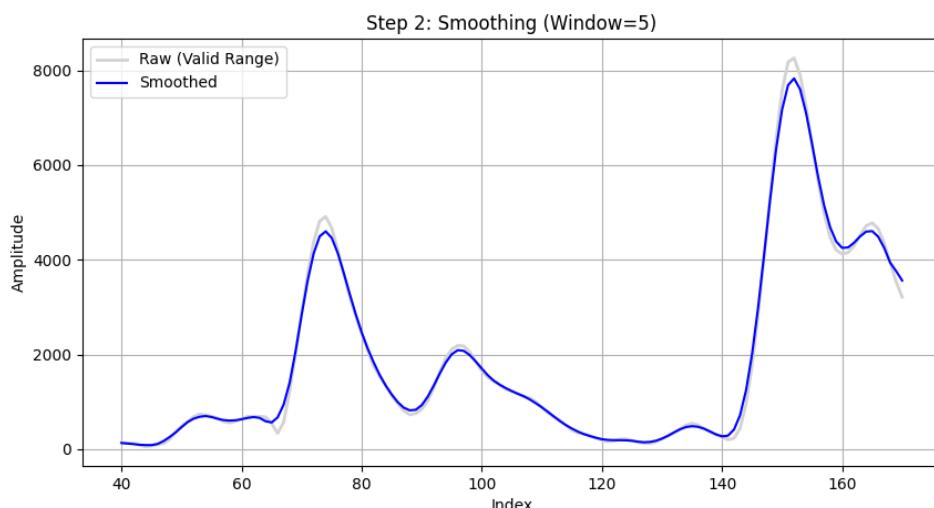


图 4-2 平滑处理

(2) 检测并标记回波数据的波峰

通过比较数据点与相邻数据点的值，若发现某个数据点比最近的两个数据点都大，则认为是一个波峰的顶端，并从这个波峰顶端的索引值往左往右找，找到这个波峰的边界并标记。

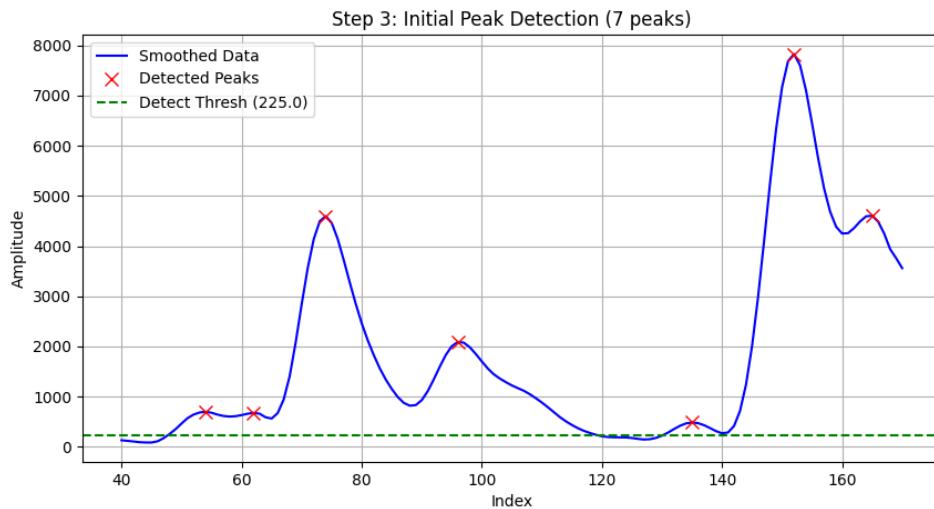


图 4-3 识别波峰

(3) 合并过近或过小的波峰

若发现两个波峰顶端相距过近且高度相差不大，则认为是同一个峰，将两个峰合并；若发现某个峰的顶端与边界相比突出太小，则不认为是一个真正的回波峰值。

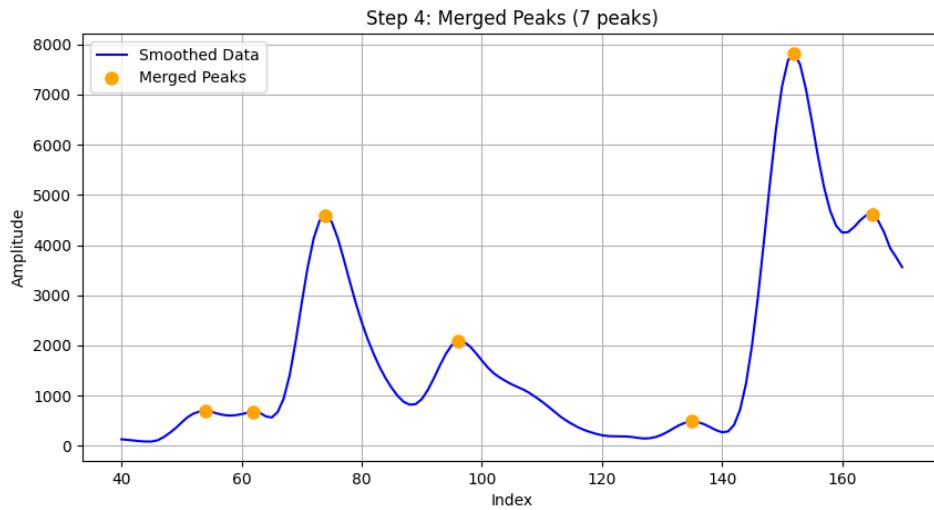


图 4-4 合并波峰

(4) 识别各个峰的类型

这里只将回波的峰值分为三个类别，分别是容器边沿回波峰，液面回波峰，与干扰回波峰。如果回波峰的数量小于等于一，通常认为不是有效的容器，不需要过多处理。如果回波峰大于等于两个，则认为最左边的波峰为容器边沿回波（实验经验），而液面回波峰则认为是从容器边沿回波到有效数据区的右侧 60% 区域的最高峰，其余的波峰统一认定为干扰回波峰。

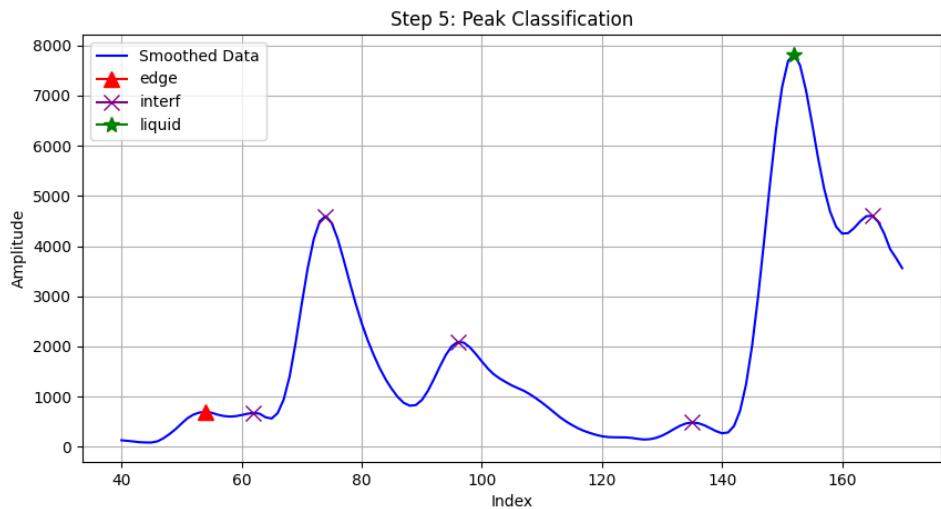


图 4-5 波峰分类

(5) 计算超声波传感器配置参数

此部分仍在持续实验与改进，但其基本原理与核心思想没有变。传感器配置可以对多段数据点的回波幅值阈值进行配置，若数据点幅值没有超过设定阈值，则传感器返回的最近测距值(即 a 值)不会计算此数据点。需要屏蔽掉的回波为容器边沿回波，以及容器边沿回波与液面回波之间的所有干扰波峰，这样得以确保传感器直接返回的测距值代表的是液面的距离。为了确保在液面移动时也能检测到液面的回波，这里采用两个矩形阈值区构成一个阶梯型的阈值区。阈值区如下图所示。

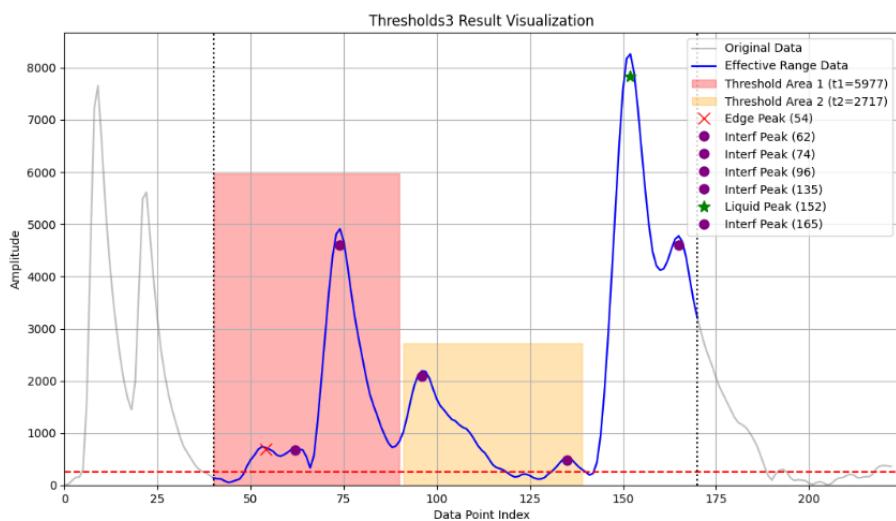


图 4-6 设置阈值

这个阈值区可以用传感器配置的四个参数来构建，分别是 x , $t1$, y , $t2$ 。其中 x 为图中第一个矩形阈值区的右边界对应的数据点索引； $t1$ 为第一个矩形阈值区的上边界对应的回波幅值； y 为图中第二个矩形阈值区的右边界对应的数据点索引； $t2$ 为第二个矩形阈值区的上边界对应的回波幅值。

(i) x 计算原理

若容器边沿回波与液面回波之间没有干扰回波，则 x 设置为容器边沿回波的右侧边沿；若容器边沿回波与液面回波之间存在干扰回波，则找到这里面幅值最大的干扰回波，若这个最大的干扰回波幅值大于容器边沿回波的幅值，则将 x 设置为此干扰回波的右侧边沿。

(ii) $t1$ 计算原理

若容器边沿回波与液面回波之间没有干扰回波，则 $t1$ 设置为容器边沿回波幅值的 1.3 倍（倍数可调整）；若容器边沿回波与液面回波之间存在干扰回波，且其中最大的干扰回波幅值大于容器边沿回波的幅值，则 $t1$ 设置为此最大干扰波幅值的 1.3 倍。

(iii) y 计算原理

若从 x 到液面回波之间不存在干扰回波，则不需要第二个矩形阈值区， y 设为默认值；若从 x 到液面回波之间存在干扰回波，则 y 设置为这些干扰回波中最右侧的回波的右边沿。

(iv) $t2$ 计算原理

若从 x 到液面回波之间不存在干扰回波，则不需要第二个矩形阈值区， $t2$ 设置为默认值；若从 x 到液面回波之间存在干扰回波，则 $t2$ 设置为这些干扰回波中幅值最大的波峰的 1.3 倍幅值（倍数可调整）。

五、系统局限性分析与优化方案

尽管本系统已实现了基于自适应阈值的多种容器自动接水功能，但在复杂动态环境下的鲁棒性仍有提升空间。经测试与分析，目前主要存在以下技术挑战及相应的改进思路：

1. 动态注水过程中的噪声干扰问题

问题描述：在水泵启动注水初期，水流冲击液面或水柱本身的物理形态可能会

对超声波信号路径产生干扰。实验中偶发出现水泵刚启动即触发停水阈值的现象，导致系统误判已满水（False Positive）。

原因分析：流动的水柱引入了瞬态的杂波信号，且由于距离极近，其回波强度可能瞬间突破了预设的动态阈值。

优化思路：

算法层：引入更高阶的滤波算法（如卡尔曼滤波或滑动加权平均），对注水启动阶段的突变数据进行平滑处理，或在启动瞬间增加“盲区时间窗口”，暂时屏蔽不稳定信号。

结构层：微调出水口角度，减少水流对超声波波束路径的直接遮挡或散射。

2. 液面湍流导致的回波信号衰减问题

问题描述：在持续注水过程中，偶发出现液面已达停水位但传感器漏检，导致溢出的情况。

原因分析：随着注水进行，液面剧烈波动（湍流）导致超声波反射面变得不规则，使得回波信号发生散射，接收到的回波幅值大幅下降。对于部分吸声材质或窄口容器，回波幅值甚至可能跌落至背景噪声屏蔽阈值以下，导致有效信号丢失。

优化思路：

动态增益控制：在检测到注水动作开始后，动态降低信号检测的置信度阈值，或根据历史数据预测液位趋势。

间歇式注水策略：虽然“加水-暂停-检测”的闭环控制（Pulse Mode）会牺牲一定的注水效率，但能确保在液面相对静止时获取高信噪比的回波信号。未来可研究如何在效率与精度之间取得更优的平衡。

六、项目总结与展望

1. 项目成果总结

本项目成功研制了一套具备自适应能力的智能饮水机系统。

系统集成度高：完成了从 STM32 主控电路板设计（PCB）、3D 打印机械结构建模到嵌入式软件开发的全流程工作，实现了软硬件的高度整合。

算法创新：提出的“超声波自适应阈值算法”有效解决了传统方案难以适配不同

高度、不同形状容器的痛点。通过对原始回波数据（Raw Data）的深入分析与特征提取，实现了对容器边缘与液面的智能识别。

功能实现：系统已达到项目预设的核心指标，能够自动识别容器并在大多数场景下完成自动接水与停水操作。

2. 结题心得

该项目不仅是一次工程实践，更是一次对传感器物理特性与信号处理算法的深度探索。在开发过程中，团队克服了小盲区测距精度低、复杂回波信号处理难等技术瓶颈。虽然目前的样机在极端工况下的稳定性仍需完善，但本项目验证了基于单超声波传感器实现低成本、通用型液位控制的可行性，为后续的家用电器智能化改造提供了有价值的参考方案。

七、参考文献

- [1] TDK InvenSense, "Application User Guide for Liquid Level Detection Demo Setup," Document AN-000332, Rev. 1.0, Jan. 2022. [Online]. Available: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2022/04/AN-000332-Application-User-Guide-for-Liquid-Level-Detection-Demo-Setup-v1.0-1.pdf>