

工业物联网驱动的高精度超声波液位监测系统研究

杨宇 刘琦

江西科技师范大学 江西南昌

DOI: 10.12238/ems.v7i4.12752

[摘要] 为解决传统超声波液位传感器在复杂工业环境下精准不足与智能化的短板等问题,本文提出将物联网云平台与多传感器协同融合的工业级液位监测系统。通过优化超声波发射电路、接收电路设计,结合温度补偿、滤波算法,实现液位测量精度提升至 $\pm 0.5\%$ FS。并且系统采用 MQTT 协议构建物联传输通信,实时上传数据至云平台进行大数据分析,支持液位趋势预测与多级预警功能,适用于复杂工业场景的液位监测与自动化控制。

[关键词] 超声波; 传感器; 液位监测; 物联网; MQTT 协议

1. 绪论

1.1 引言

在工业生产中,液位检测与控制问题广泛存在于各个领域。由于液位变量具有显著的滞后特性,且受复杂参数影响易发生动态变化,因此建立高精度的自动化监控系统显得尤为关键。传统液位控制系统普遍存在检测精度不足、响应速度迟缓等问题,难以满足现代工业对安全生产、高效作业和节能降耗的要求。实践证明,稳定可靠的液位控制系统不仅能保障生产过程的连续性,还能通过优化能源利用实现经济效益与生态效益的协调发展。在当前竞争日益激烈的市场环境下,构建智能化、集成化的液位自动化控制体系已成为工业技术升级的必然趋势。

1.2 设计需求分析

液位测量是确保生产安全、提高效率和保障产品质量的关键环节,然而传统的液位测量方法多为接触式,如浮球式、电容式等。这些方法虽然在某些场景中仍被使用,但存在易磨损、受介质影响大、维护困难等问题,难以满足现代工业

对高精度、高可靠性和低维护的需求。在这种背景下,非接触式测量技术应运而生并迅速成为主流。其中,超声波、雷达、激光等技术因其独特的优势在液位测量中得到了广泛应用。超声波液位传感器作为非接触式测量技术的典型代表,因其非接触式测量、高灵敏度、快速响应和安全可靠等特点,逐渐成为工业液位监测的首选方案^[1]。

2. 硬件设计

2.1 系统架构设计

整个系统的硬件电路可以细分为三个主要部分:单片机最小系统、超声波发射电路以及接收电路、采集单元模块、电源模块、实时显示单元模块,由单片机发射脉冲串,通过场效应管高频电子开关控制,发射正弦波或者脉冲波,在经过运放对其进行放大处理,最终发射信号到超声波换能器,通过发射使超声波换能器接收到回波信号,对回波信号做滤波处理,处理后的模拟量经 A/D 芯片转换为数字量并通过上位机显示^[2]。硬件电路设计原理框图如图 1 所示。

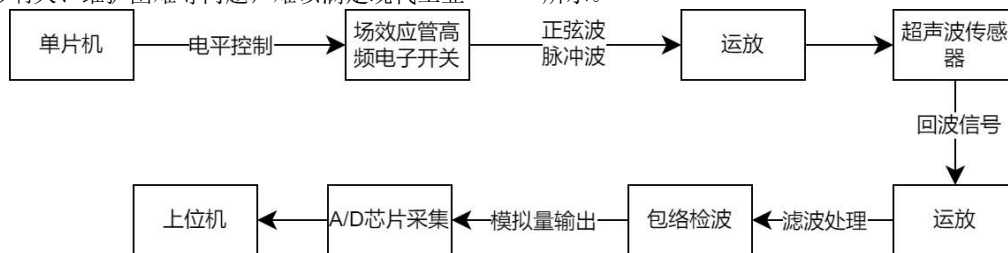


图1 硬件电路设计原理框图

2.2 超声波液位测距原理

超声波作为一种振动频率高于 20kHz 的机械波,在工业版超声波液位传感器的工作机制中扮演着核心角色。其产生主要依赖于压电效应,当在压电材料(如压电陶瓷、石英晶体等)两端施加交变电压时,材料会依据电压的频率进行伸缩振动,进而将电能转化为机械能,产生超声波^[4]。

当传感器探头接收到电信号激励后,会发射出高频超声波脉冲,这些声波以特定速度在空气等介质中传播,直至遇到被测液体表面。由于液体与空气的声阻抗存在明显差异,大部分声波能量会在液面处反射回来,形成回波信号^[3]。传感器通过精确计算超声波发射到接收的时间差,结合已知的介质声速,就能算出探头到液面的距离。具体公式为:

$$S = C \times \frac{T}{2}$$

(S 为传感器到液面的距离, C 为超声波在传播介质中的速度, T 为超声波往返时间)

$$D = L - S$$

(L 为安装位置到容器底部的总高度, D 为液位高度)

2.3 超声波发射电路及接收电路设计

在实际应用中, 由于声波在传播过程中会受到介质杂质、环境噪声等干扰, 导致信号变弱或波形失真。为了准确识别回波, 对回波信号的处理技术至关重要。传感器内部集成了多重信号处理技术, 通过滤波技术滤除噪声, 放大电路增强信号强度, 再用阈值比较来精准捕捉回波信号^[5]。通过这些技术的协同作用, 确保了液位测量的高精度和稳定性。

2.4 WIFI 通信单元电路设计

普通的单片机不具备 WIFI 通信功能, 一般在芯片外连接专门的 WIFI 通信模块实现物联网功能。本系统采用 ESP8266 模块, 模块出厂时默认烧写具有 AT 命令集的程序固件, 单片机连接 TXD 和 RXD 引脚, 即可实现单片机模块间全双工通信。WIFI 节点连接单片机普通 IO 口, 高电平时 ESP8266 模块正常工作, 低电平时模块进入低功耗模式^[6]。

3. 软件设计

3.1 数据采集与处理流程

单片机液位仪的软件功能是控制超声波的发射和接收对超声波的传输时间进行测量结合超声波的传播速度计算出距离并把数字滤波后的结果显示出来。要实现上述功能软件包含初始化、参数读入、超声波发射、超声波传输计时、声速计算、超声波传输距离计算、数字滤波、计算结果显示等功能模块^[10]。

3.2 物联网搭建实时监测与预警功能

MQTT 是一种轻量级的消息传输协议, 广泛应用于物联网领域。它基于发布订阅模式, 支持多个客户端同时连接到一个服务器, 并可以通过主题 (Topic) 的方式进行消息的订阅和发布。本系统中使用 MQTT 协议实现传感器数据的上传和远程控制指令的下发, 同时利用 MQTT 客户端订阅消息, 实现对设备状态的实时监控^[7]。

4. 液位测量精度的提高和误差分析

4.1 温度测量及分析

由于超声波也是一种声波其声速与温度有关。在使用时如果温度变化不大则可认为声速是基本不变的可通过标准距离校准后使用。如果温度变化较大且精度要求高则应通过温度补偿的方法加以校正。

温度补偿是通过实时测量环境温度, 并根据温度与声速

之间的关系计算出实际声速, 从而对超声波测量结果进行校正。这可以消除温度对超声波传播速度的影响, 提高测量的准确性^[8]。声速公式代入到距离计算公式中, 通过环境温度和计时时间确定距离。具体实现时, 可以在超声波测距系统中加入温度传感器, 测量环境的温度变化, 并将测得的环境温度传入单片机。单片机中的程序可以根据温度和声速之间的关系计算出实际声速, 进而根据距离公式计算出修正后的距离

$$V = 331.45(1 + \frac{T}{273.1})^{\frac{1}{2}} (\text{mm/ms})$$

其泰勒级数展开式 (仅保留到一次项) 为:

$$V = 331.4 + 0.607T$$

由于温度每变化 1℃, 声波的速度变化 0.6 (mm/ms)。若时间达到 9ms, 就会产生 5mm 的误差。温度变化 2℃时, 则产生约 1cm 误差。采用温度补偿的方法, 可以提高了距离检测精度, 有利于获得精确的数据。单片机系统的时钟频率为 12MHz 每个机器周期包括 12 个时钟周期, 定时器每接收一个输入脉冲的时间为 1us。故定时器的精度只能达到 1us。在超声波液位仪系统中, 1us 内超声波传播的距离约为: $340\text{m/s} \times 10^{-6} = 0.34\text{mm}$, 在液位仪计算过程中可取距离的有效数字达到 0.1mm。为了能够清楚地显示出在不同液面有温度补偿和无温度补偿的差别做了, 对比图如图 2 所示。

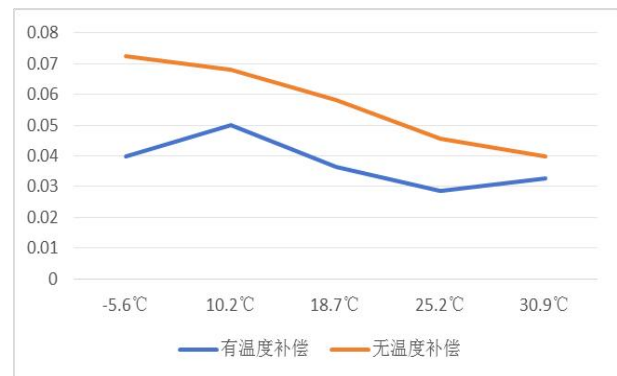


图2 实际距离为5米情况下有温度补偿和无温度补偿的测量对比图

可以得出结论在温度的影响下, 会对超声波传感器测量数据会产生一定的影响, 在通过温度补偿的作用下可以一定程度上减少这种影响。

4.2 数据滤波处理与分析

在超声波液位仪的实际应用中, 无法完全达到静止状态。对于一次测量的结果其受到外部干扰的影响几率比较大可能造成测量结果有较大的误差。在系统数据采集的过程中, 滤波处理是必要的, 它能够去除采集数据中的噪声和干扰, 提

高数据的可靠性和准确性。本文通过随机采集 5 个点位，每个点位测量 3 组数据，来分别评判均值滤波法、中值滤波法、卡尔曼滤波法 3 种滤波算法在液位监测场景中的适用程度^[9]。

数字平均滤波法就是对同一采样点连续取次采样值进行算术平均以其算术平均值作为有效采样值，其数学表达式为：

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$$

式中， y 为 N 个采样值的算术平均值，为第 i 个采样值。算术平均滤波适用于对一般具有随机干扰的信号进行滤波。这种信号的特点是有一个平均值，信号在某一个数值附近上下波动，此时若取一个采样值作依据显然是不准确的。算术平均滤波对信号的平滑程度完全取决于 N 。当 N 较大时，平滑度高，但灵敏度低，当 N 较小时，平滑度低，但灵敏度高。而且 N 越大，表明采样值的个数越多这样进行一次运算获得一个有效数据的时间就越长，所以应视具体情况选取 N 。既要少占用计算时间，又要达到最好的效果。

表 1 3 种滤波算法的统计结果

滤波算法	偏差	方差	标准差	偏差	峰度
均值滤波	1.48	3.38	1.84	0.73	-0.27
卡尔曼滤波	-1.37	6.76	2.6	0.53	-0.32
中值滤波	0	0	0	0	-1.2

根据表 1 测定结果，利用统计学的方法，分别计算了各个滤波算法与实测值之间的偏差、方差、标准差、偏度和峰度，并进行了对比分析，计算结果如表 3 所示。从表 3 中可以看到，中值滤波的偏差和标准差都为 0，表明该算法适应性最好。同时，它的偏度为 0，峰度为-1.2，符合正态分布的特征。因此，本系统选择将中值滤波算法嵌入到 ESP8266 固件程序中，进行滤波处理。

5. 结论与展望

本研究成功开发了工业物联网驱动的高精度超声波液位监测系统。硬件设计采用模块化架构，重点优化了超声波发射/接收电路，确保信号传输稳定性和接收精度。系统基于压电效应的超声波测距技术，结合多种信号处理手段，高效提升了复杂环境下的抗干扰能力。在软件层面通过 MQTT 协议实现数据实时上传与远程控制，通过云平台可以进行数据深度分析，提供液位趋势预测及多级预警功能。同时为进一步提升测量精度，系统集成了温度补偿模块和数据滤波算法。

经过实验表明，温度补偿技术可有效降低环境温度对测量结果的影响；经过对比测试，中值滤波算法在滤除噪声和干扰方面表现最优。最终系统在高温、高压等极端工况下仍保持稳定运行，测量精度达到±0.5%FS，达到预期设计目标，具有显著的工程应用价值。在未来优化方向，主要包括硬件方面探索新型高性能传感器，优化超声波换能器设计以提升精度并降低成本；软件算法引入机器学习模型，如接入人工智能 AI 大模型等，优化液位预测模型和增强故障诊断能力；

功能拓展方面加强与工业自动化系统的集成，实现液位闭环控制。进一步提高系统的稳定性和可靠性的同时，并将其应用到更多的实际应用场景中。

【参考文献】

[1]王浩，曾璐. 基于 Labview 的单容水箱液位控制系统设计[J]. 科学技术创新，2021，（29）：151-153.

[2]孙超，吴修广. 基于 STM32 单片机的高精度超声波液位计设计[J]. 浙江水利科技，2020，48（02）：39-41. DOI: 10.13641/j.cnki.33-1162/tv.2020.02.012.

[3]康建洲. 非接触式超声波液位检测系统设计与实现[D]. 中北大学，2024. DOI: 10.27470/d.cnki.ghbgc.2024.000908.

[4]杨建华，翟青，梁晓章. 具有语音播报功能的超声波液位测量系统设计[J]. 电子产品世界，2014，21（08）：43-46.

[5]李启亮，符影杰. 基于虚拟仪器平台的超声测距系统设计[J]. 工业控制计算机，2024，37（11）：89-90+93.

[6]曹振民，陈年生，马强，等. 基于 ESP8266 的无线控制电路设计[J]. 工业控制计算机，2017，30（01）：68-69.

[7]张嘉诚. 基于 LabVIEW 的双容水箱控制系统研究[D]. 吉林化工学院，2021. DOI: 10.27911/d.cnki.ghjgx.2021.00025.

[8]王建莉，田成元，张总. 一种简易多功能液体容器测量装置的设计[J]. 电子世界，2019，（20）：139-140. DOI: 10.19353/j.cnki.dzs.j.2019.20.075.

[9]戈文祺，张坤，刘财智. 基于小波阈值算法的气体超声波流量计信号预处理[J]. 计量学报，2024，45（10）：1502-1511.

[10]罗家毅，刘一帆. 工业润滑油罐分布式液位监控系统设计[J]. 通化师范学院学报，2023，44（06）：1-7. DOI: 10.13877/j.cnki.cn22-1284.2023.06.001.