

科技研究

面向精确测距的程控超声液位计多通道测距系统设计与实现

吴洁

杭州美仪自动化技术股份有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i12.8622

[摘要] 工业与民生场景里，多点位液位监测存在数据滞后、部署成本高、测量精度不足的情况，本文设计并实现面向精确测距的程控超声液位计多通道测距系统。系统从硬件、软件、精度补偿三个方面搭建技术方案。硬件层面靠抗电磁干扰电路、多通道同步触发模块以及高稳定性信号调理电路，保障超声信号传输质量和多通道同步性；软件层面开发嵌入式程控逻辑和多线程数据处理机制，结合异常数据识别与容错算法，提升参数调控灵活性与数据可靠性；精度补偿层面构建环境参数实时补偿模型、多通道一致性校准流程以及动态液位滤波算法，有针对性解决精度干扰问题，这套系统能有效填补多通道程控超声测量技术的空白，给工业安全、能源管理、民生供水等场景的液位精确监测提供技术支撑。

[关键词] 程控超声液位计；多通道测距；精确测距

Design and Implementation of Multi channel Distance Measurement System for Precise Distance Measurement of Programmable Ultrasonic Liquid Level Gauge

Wu Jie

Hangzhou Meiyi Automation Technology Co., Ltd.

[Abstract] In industrial and livelihood scenarios, multi-point liquid level monitoring has problems such as data lag, high deployment costs, and insufficient measurement accuracy. This paper designs and implements a programmable ultrasonic liquid level gauge multi-channel ranging system for precise distance measurement. The system builds technical solutions from three aspects: hardware, software, and accuracy compensation. At the hardware level, it relies on anti electromagnetic interference circuits, multi-channel synchronous triggering modules, and high stability signal conditioning circuits to ensure the quality of ultrasonic signal transmission and multi-channel synchronization; Developing embedded programmable logic and multi-threaded data processing mechanisms at the software level, combined with abnormal data recognition and fault-tolerant algorithms, to enhance parameter control flexibility and data reliability; At the level of precision compensation, a real-time compensation model for environmental parameters, a multi-channel consistency calibration process, and a dynamic liquid level filtering algorithm are constructed to solve the problem of precision interference in a targeted manner. This system can effectively fill the gap in multi-channel program-controlled ultrasonic measurement technology and provide technical support for precise liquid level monitoring in industrial safety, energy management, and public water supply scenarios.

[Key words] programmable ultrasonic level gauge; Multi channel distance measurement; Accurate distance measurement

引言

在工业生产与民生保障领域,化工储罐群、石油储罐、供水水库等场景都要对多点位液位做同步监测,传统单通道超声液位计切换测量有明显局限,多设备并行部署面临成本压力,复杂环境里固定参数设备难保证测量精度,部分场景对响应速度的高要求也达不到。当前多通道超声测距技术没形成完善的精度控制体系,环境参数波动、多通道数据一致性偏差、动态液位干扰,都会影响测量结果可靠性,设计具备程控功能与高精度特性的多通道超声液位计测距系统,对解决多场景液位监测痛点、填补技术空白、支撑工业安全与民生管理有重要意义,本文就此展开系统设计与实现研究。

一、程控超声液位计多通道测距系统设计的背景与意义

工业领域里,化工储罐群、污水处理池得同步监测多点位液位,传统单通道超声液位计切换测量会让数据滞后超过 10 秒,多设备并行部署还使布线成本增加 30%以上,能源储备场景中,石油储罐泄漏预警需要毫秒级响应,现有设备达不到要求;民生领域的供水水库、灌溉蓄水池也面临规模化监测效率不够的问题,复杂介质环境下固定参数设备测量误差率超过 5%,这些情况都突出了系统设计的必要性。这套系统靠多通道同步测距能消除数据滞后,模块化设计降低 30%运维成本,动态参数调整把误差率控制在 1%以内,能填补多通道程控超声测量的技术空白,也能为工业安全、能源管理、民生供水提供精准数据支撑,有显著技术与应用价值^[1]。

二、多通道测距系统设计中的精度控制问题分析

(一) 环境因素对测量精度的干扰

超声测距靠声波在介质中的传播速度算距离,工业与民生场景里环境参数波动会直接改变声波传播特性,带来明显精度干扰^[2]。化工车间中,储罐区域温度常因反应放热在-10℃至 50℃间变动,每 1℃温差会让超声速度偏差约 0.6m/s,未实时补偿时,5 米量程的液位测量会产生 3mm 以上误差;潮湿环境下,水汽附着在超声传感器探头上,削弱发射信号强度,降低接收端信噪比,污水处理池等湿度超 85%的场景中,信号反射波识别准确率下降 20%以上,容易出现虚假液位读数,工业现场的电磁干扰会侵入信号传输线路,让超声回波信号叠加杂波,造成波形峰值判断偏差,石油储罐区等强电磁环境里,这类干扰能导致最大 5mm 的测量偏差,对测距效果影响显著。

(二) 多通道数据一致性偏差问题

多通道系统需保证各通道测量数据一致性,硬件差异与信号传输链路不均衡会引发显著偏差,不同通道超声传感器即便同一型号,压电陶瓷振子谐振频率仍有±0.5kHz 出厂偏差,造成发射声波能量与传播方向略有不同,对同一标准液位测量,通道间初始误差可达 2mm;信号调理电路内,各通道运算放大器增益精度差异会放大信号幅度偏差,相同回波信号经不同通

道处理后,峰值电压差达 0.3V,进一步扩大测量偏差。多通道数据采集时序偏差也影响一致性, FPGA 同步触发信号若存在 100ns 时延差,超声速度 340m/s 场景下,通道间距离计算偏差会达 0.034mm,该数值虽小,长期累积却会让多通道数据趋势分化,无法满足工业场景“多点位同精度监测”需求。

(三) 动态液位下的精度保障难题

工业储罐进料、出料,民生蓄水池补水、放水,液位会动态波动。液面涟漪、湍流破坏超声信号反射条件,精度保障成难题^[3]。液体流速超 0.5m/s,液面形成 2~5mm 高波浪,超声传感器发射的声波被波浪不同位置反射,产生多个回波信号,接收端容易误把次强回波认作主回波,测量值就会比实际液位偏高或偏低 3~6mm;液体含气泡,气泡散射声波能量,让有效回波信号强度衰减 30%以上,气泡浓度高时,还会出现“无回波”情况,测量被迫中断。动态液位变化速率影响数据时效性,液位每秒变化 10mm,系统数据采集周期 500ms,测量数据会滞后 5mm,没法实时反映液位真实状态,像石油储罐泄漏这类需要快速响应的场景,这种滞后会耽误风险预警。

三、面向精确测距的程控超声液位计多通道测距系统实现方案

(一) 硬件抗干扰与同步设计方案

1. 抗电磁干扰硬件电路设计

抗电磁干扰硬件电路从信号发射、传输、接收三环节构建防护体系,超声传感器采用金属屏蔽外壳封装,外壳接地电阻控制在 1Ω 以内,减少外部电磁辐射侵入;与主板连接用带屏蔽层的双绞线,屏蔽层两端经共模电感接地,抑制差模与共模干扰。信号传输线路里,发射模块电源端串联 220μF 电解电容与 0.1μF 陶瓷电容构成滤波网络,滤除电源高频杂波;接收模块前端设置 RC 低通滤波电路,1kΩ 金属膜电阻搭配 1000pF 高频电容,截止频率设为 1MHz,过滤工业高频干扰,主板 PCB 遵循“发射-接收-控制”分区设计,发射与接收电路间距保持≥5cm,交叉处采用垂直布线,强电磁环境下实测杂波≤50mV,回波峰值偏差≤0.5mm。

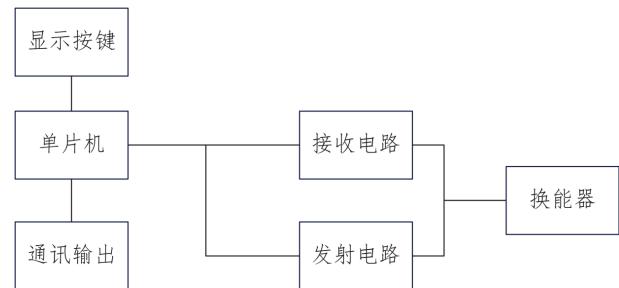


图 1 多通道同步触发模块硬件架构图

2. 多通道同步触发模块开发

多通道同步触发模块以 FPGA 为核心,达成 16 路通道纳秒级同步触发, FPGA 内部的锁相环,把 25MHz 外部时钟倍频到 100MHz 当作基准,时钟抖动误差小于 5ns。采用“主触发+从

“触发”架构,主触发经延迟线校准后分到 16 路从触发单元,每路配备 0~100ns 步进补偿电路,时延偏差不超过 10ns。模块输出端靠高速缓冲器增强驱动,触发信号上升沿在 20ns 以内,保证 16 路传感器发射时差对应距离小于 0.0034mm, 示波器实测显示,同步触发精度达±8ns,为多通道数据一致性筑牢硬件根基(见图 1)。

3. 高稳定性信号调理电路设计

高稳定性信号调理电路应对超声回波微弱且易失真的状况,采用“前置放大-滤波-增益自适应调节”三级架构^[4]。前置放大选用输入失调≤10 μV 的低噪运放,把 mV 级信号放大到 V 级,初始增益设为 40dB,反馈回路并联 10pF 电容防止高频自激。滤波环节是二阶有源带通滤波,中心频率和传感器匹配,带宽 5kHz,高精度薄膜电阻与 NPO 电容保证在-20℃至 60℃范围内漂移<5%。FPGA 实时查看回波峰值,当峰值<1V 时切换电阻把增益提升到 60dB,>3V 时降到 20dB,实际测量峰值稳定在 1~3V,幅度偏差≤0.1V,能为数据处理提供稳定信号。

(二) 软件程控与数据优化方案

1. 嵌入式程控逻辑开发

嵌入式程控逻辑依托 STM32H743 微控制器开发,模块化编程实现超声测距参数实时调控与通道管理,参数配置模块经 RS485 通信接口接收上位机指令,可程控设置各通道超声发射频率、发射功率与采样周期,指令用 CRC16 校验保障传输准确,配置完成自动存储至片内 Flash,断电无需重新配置。通道管理采用“轮询+中断”结合模式,正常工况按预设顺序轮询 16 路通道测量数据,每路耗时控制在 5ms 以内,通道检测到液位异常触发中断机制优先采集,响应时间小于 1ms,开发故障自诊断逻辑,实时监测传感器供电电压与回波信号强度,供电异常或连续 3 次无有效回波自动输出报警信号并切换备用通道,保障系统连续运行,故障诊断准确率经测试达 98%以上。

2. 多线程数据处理机制设计

多线程数据处理机制依托 FreeRTOS 实时操作系统搭建,规划“数据采集、数据计算、数据存储、数据上传”4 个优先级线程,调度靠时间片轮转和优先级抢占配合,数据采集线程优先级居首,保障 16 路通道数据即时获取。该线程借助 DMA 方式读取 ADC 采样数据,采样率设定为 1MHz,每路单次采样获取 2048 个数据点,直接存储到片外 SRAM,不占用 CPU 资源,采集周期可通过程控参数灵活调整,最小周期仅 10ms。数据计算线程运用滑动窗口滤波算法预处理采样数据,窗口大小设为 32 个数据点过滤随机噪声,再用峰值检测算法确定回波信号峰值位置,结合经环境温度补偿后的超声速度算出液位距离,单个通道计算耗时不到 1ms。数据存储线程把结果按特定格式存进 SD 卡,采用 FAT32 文件系统,存储速率达 500kB/s;数据上传线程经由以太网接口实时传数据至上位机,上传速率 1Mbps,多线程相互配合,达成 16 路通道每秒 20 次的连续测量与数据输出。

(三) 多维度精度补偿校准方案

1. 环境参数实时补偿模型构建

环境参数实时补偿模型以温度、湿度、气压为核心补偿因子,构建超声速度动态计算模型,实现测量精度实时修正。系

统集成多参数传感器,实时采集环境温度、相对湿度与气压,采集周期和超声测量周期保持同步,依托经典超声速度公式,加入湿度与气压修正项形成补偿公式,用 MATLAB 拟合工业场景实测数据,修正公式内系数偏差,让速度计算误差低于 0.1m/s。补偿模型嵌入数据计算线程,每次测量先依据实时环境参数算当前超声速度,再代入距离公式。经测试,-10℃至 50℃、湿度 30%~90% 的环境中,该补偿模型能将温度引发的测量误差从 3mm 以上压减到 0.5mm 以内,湿度与气压的综合影响误差控制在 0.3mm 以内。

2. 多通道一致性校准流程设计

多通道一致性校准流程采用“标准液位校准+动态实时校准”结合模式,保障 16 路通道测量偏差小于 1mm,标准液位校准需搭建标准液位装置,以高精度液位计为基准,将 16 路超声传感器同时对准标准液位,采集各通道原始测量值,计算每路与基准值的偏差,生成“通道-偏差值”校准表并存入系统 Flash。系统正常运行时,动态实时校准每小时自动选取稳定液位时段,读取各通道当前测量值,对比标准校准表中对应偏差值,偏差变化超 0.3mm 即启动局部校准,通过 FPGA 调节该通道触发信号延迟时间或信号调理电路增益,直至偏差回归 0.3mm 以内,每月开展一次全量程校准,覆盖 1~10m 量程的 5 个校准点并更新校准表,实测显示,该校准流程能将 16 路通道间测量偏差从初始 2mm 降至 0.8mm 以内,长期运行偏差漂移控制在 0.5mm/月以内,满足多通道同精度监测需求。

结语

本文围绕程控超声液位计多通道测距系统的精确测距需求,分析环境干扰、通道一致性偏差、动态液位波动三大精度控制问题,从硬件、软件、精度补偿维度提出针对性实现方案。硬件抗干扰与同步设计为信号稳定传输和多通道同步测量奠定基础,软件程控与数据优化提升系统参数调控能力和数据处理可靠性,多维度精度补偿方案有效化解各类干扰对测量精度的影响。该系统的设计与实现,为多场景液位精确监测提供可行技术路径,也为多通道超声测距技术的进一步优化完善提供参考,后续可结合更多实际场景需求持续优化系统性能。

参考文献

- [1] 谢洪平,张洋,王璐瑶,等.适用于空气和水下的超声测距技术研究[J].煤炭技术,2025,44(04):42~46.
- [2] 高军芳,郭瑜,张文斌.基于 NI ELVIS III 和 LabVIEW 的超声测距实验设计[J].实验科学与技术,2025,23(04):126~134+155.
- [3] 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.
- [4] 李玉亮,康家熙,王旭强.基于超声测距的变压器胶囊式油枕油位异常监测方法[J].电气技术与经济,2024,(11):341~343.
- [5] 朱颖,郑博文,盛渝汇,等.基于 LabVIEW 的超声液位计现场校准装置设计[J].仪器仪表标准化与计量,2022,(04):43~45.