

基于晶振谐振驱动的电容式液面探测系统研究*

张桢阳^{1,2},江星宇¹,黄鹤²,李向坤²,田良飞¹

(1. 浙江大学生物医学工程与仪器科学学院 杭州 310027; 2. 嘉兴凯实生物科技股份有限公司 嘉兴 314000)

摘要:液面探测是全自动体外诊断设备中的关键环节,其准确性直接关系到试剂吸取安全与检测结果可靠性。面向接触式液面探测的精度与稳定性需求,设计了一种基于晶振法的电容式液面探测系统。该系统采用晶体振荡器产生高稳定度的正弦激励信号,驱动电容分压电路工作;当探测探针接触液面时,其寄生电容的变化将调制激励信号的幅值。通过同步选频峰值检测与自稳定脉冲转换机制,实现对液面位置的高灵敏度、高稳定性探测。基于所建立的等效电容模型及传递函数分析,对系统中关键元器件参数进行了优化配置。在Simulink仿真中,验证了前端电路具备150 μ s的响应延迟特性,并确认自稳定电路在输入电压变化量 $\Delta V > 15$ mV或变化斜率 > 1 V/ms时呈现出脉冲饱和特性,从而保证系统在复杂工况下的稳定性。结果表明去离子水因具有较高阻抗,导致输出脉冲幅值相较于生理盐水有所下降;而当盐水浓度超过0.9%后,脉冲幅值随浓度增加呈现非线性饱和趋势。系统在100~5 000 μ L液位范围,测量标准差 ≤ 50 μ m,变异系数(CV) $\leq 0.75\%$;在连续10 000次测试中,相邻两次测量偏差稳定在 ± 0.15 mm范围。液位高度的微小线性下降主要由液体蒸发及探针壁面残留引起。通过晶体振荡器在谐振点的工作模式与关键参数的协同优化,实现了医疗设备级的检测精度与长期运行可靠性,为生化分析仪、免疫分析仪、尿液分析仪等体外诊断设备提供了切实可行的工程化解决方案。

关键词:液面探测;晶振法;电容;稳定性

中图分类号: TH77 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.1010

Design of a crystal oscillation-based capacitive liquid level detection system

Zhang Zhenyang^{1,2}, Jiang Xingyu¹, Huang He², Li Xiangkun², Tian Liangfei¹

(1. College of Biomedical Engineering & Instrument Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. Quaero Life Science Co., Ltd., Jiaxing 314000, China)

Abstract: Liquid-level detection is a critical function in fully automated in vitro diagnostic devices, as its accuracy is directly related to reagent aspiration safety and the reliability of test results. Targeting the requirements for precision and stability in contact-based liquid-level detection, this study designs a crystal-oscillator-based capacitive liquid-level detection system. A crystal oscillator is used to generate a highly stable sinusoidal excitation signal that drives a capacitive voltage divider. When the sensing probe contacts the liquid surface, variations in its parasitic capacitance modulate the amplitude of the excitation signal. By combining synchronous band-selective peak detection with a self-stabilizing pulse conversion mechanism, the system achieves highly sensitive and stable detection of the liquid level. Based on an equivalent capacitance model and transfer function analysis, the key component parameters in the system are optimally configured. Simulink simulations verify that the front-end circuit exhibits a response delay of 150 μ s and confirm that the self-stabilizing circuit enters a pulse saturation state when the input voltage variation $\Delta V > 15$ mV or the slew rate > 1 V/ms, thereby ensuring system stability under complex operating conditions. Experimental results show that, due to its higher impedance, deionized water produces a lower output pulse amplitude than physiological saline. When the saline concentration exceeds 0.9%, the pulse amplitude exhibits a nonlinear saturation trend with increasing concentration. Within a liquid volume range of 100~5 000 μ L, the system achieves a measurement standard deviation ≤ 50 μ m and a coefficient of variation (CV) $\leq 0.75\%$. Over 10 000 consecutive tests, the deviation between two adjacent measurements remains within ± 0.15 mm. The slight linear decrease in liquid level is mainly attributed to

liquid evaporation and residual adhesion on the probe wall. By operating the crystal oscillator at its resonant point and jointly optimizing the key parameters, the proposed design achieves medical-device-grade detection accuracy and long-term operational reliability, providing a practical and engineering-ready solution for liquid handling in biochemical analyzers, immunoassay analyzers, urinalysis analyzers, and other in vitro diagnostic instruments.

Keywords: liquid level detection; crystal-based sensing; capacitive; stability

0 引言

液面探测技术是移液系统实现自动化操作的核心环节,其核心功能在于确保探针快速下行过程中精准识别与液体的接触点^[1-3]。该技术一方面可判断试剂瓶中样品量的充足性,另一方面能精确控制探针浸入液体的深度,从而有效降低试剂交叉污染与空吸现象的发生概率。因此,液面探测的精度直接决定了移液系统的流体计量误差变异系数(coefficient of variation, CV)及整个分析系统的不确定度^[4-6]。当前液面探测技术主要分为接触式与非接触式两类。以超声波法^[7-9]和光学法^[10-16]为代表的非接触式技术虽可避免探针接触带来的污染,但通常需要复杂的设备结构,且易受液体粘度和折射率变化的影响。接触式技术则包含电阻式^[14-15]与电容式^[16-25]等方法;其中电阻式探测要求电极与液体直接导通,显著增加了交叉污染风险。电容式方法则通过检测探针接触液面产生的电容变化来检测液面位置,然而,传统的电容探测系统通常采用电阻-电容(resistor capacitor, RC)振荡电路作为信号源,受温度和电源波动等因素干扰较大。有研究通过晶振代替振荡电路,并通过锁相环进行液面检测,成功检测到了 200 μL 液体的液面^[17],然而并未对系统的适用性和精度进行进一步验证。并且采用锁相环的方法受电源波动影响较大。

在实现高精度电容式液面探测时,会面临 3 方面挑战:1)信号源的稳定性,当液面较低时,即使是 10 mV 的微小的信号漂移都可能被判定为液面接触导致空吸;2)被探测液体导致的鲁棒性问题,不同被测液体的电导率差异会改变探针与液体间的等效阻抗,进而影响 C_t 的实际变化幅度,若系统对信号强度变化的适应性不足,会导致低电导率液体探测时信号信噪比下降,易产生误触发或触发时间波动,最终引发精度和稳定性下降;3)微弱信号的可靠触发,探针接触液体时,电容变化很小(1~3 pF),因此分压电路输出的信号幅度变化量较小(约 10~30 mV),而实际背景噪声约为 5~10 mV,易因噪声干扰导致触发抖动,如何将微小的电容变化量从背景噪声中提取转化为无抖动的脉冲信号十分关键。因此,开发具有高鲁棒性的液面探测系统已成为精准医疗设备领域亟待解决的关键技术瓶颈。

本文提出了一种基于晶振法的电容式液面探测系统设计方案。该方案利用晶体振荡器产生稳定的方波信

号,用以驱动探针构成的电容分压检测电路。系统通过检测探针接触液面瞬间,其寄生电容变化所引致的分压信号幅值变化,实现液面位置的精确判定。结合理论建模与实验分析,确定了晶体振荡器的最优工作频率。进一步地,通过对关键电容与电阻参数的小信号模型分析,优化其取值以确保信号增益满足强度与灵敏度要求。同时对关键电容和电阻进行公差分析,保证其对输出信号的精度。最终,通过测量不同电导率液体及变化液面高度的实验,验证了该方法在多样化应用场景中的有效性,充分证明了其测量精度与系统可靠性。

1 液面探测系统的研究与设计

1.1 整体结构与电路设计

为实现液面的高精度探测,建立了液面检测系统的等效电容模型(图 1)。该模型包含电路板自身的寄生电容 C_B 、电路板至移液针连接线引入的寄生电容 C_L 、移液针与其固定结构之间的电容 C_A 、液路及其相关寄生电容 C_F 、其他杂散电容,以及反映液面位置变化的待测电容 C_t 。当移液针进入或离开置于标准试管或者反应杯等容器的待测液体的液面时, C_t 值将发生显著变化,系统通过精确检测该电容变化量实现液面位置的判定。

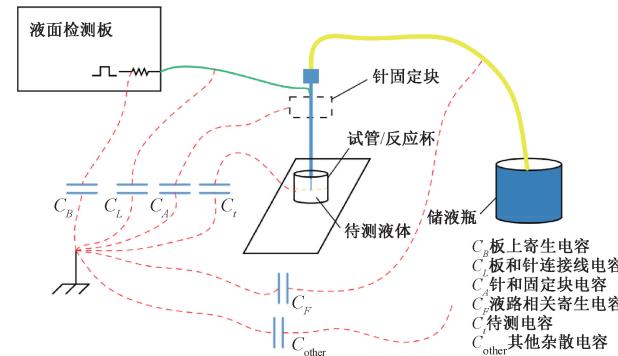


图 1 等效电容模型示意图

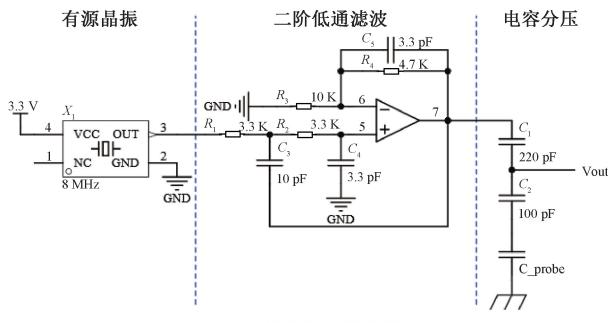
Fig. 1 Schematic of equivalent capacitance model

基于上述模型,设计了液面探测核心电路。该电路由电容分压电路,峰值检测电路和自稳定电路 3 个功能模块级联构成。电容分压检测电路作为系统的前端传感单元,负责提供驱动信号。移液针探头的等效电容(含 C_t)作为分压元件之一接入电路。当 C_t 因接

触液面而改变时,将调制驱动信号的幅值,此幅值变化是液面检测的核心依据。峰值检测电路作为信号调理环节,对电容分压电路输出的交流驱动信号进行峰值捕获与保持,将其转换为表征信号幅值的直流电平,从而精确提取探针接触液面瞬间的驱动信号幅值变化量。自稳定电路作为后端处理与输出级,负责对峰值检测输出的直流信号进行进一步处理(如放大、滤波)。其核心作用是确保在不同的输入信号变化率(dV/dt)和强度下,输出信号均能稳定在后续处理电路的有效输入范围内,实现可靠读取。

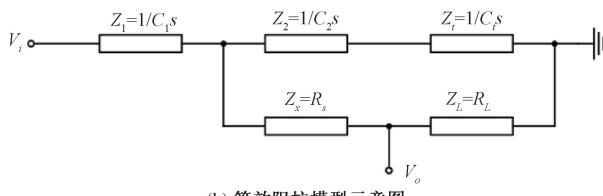
1.2 电容分压电路设计与分析

电容分压电路是实现液面探测的核心传感单元,其功能结构可划分为3个主要部分:信号发生、低通滤波(波形整形)及电容分压(图2(a))。为了保证信号源的稳定性,系统采用有源晶体振荡器 X_1 产生固定频率(f)的方波信号作为激励核心。晶振能够提供稳定的频率和幅值,保证信号基线的稳定性。该方波信号经由二阶低通滤波器进行频谱整形,滤除高次谐波,输出纯净的正弦波信号(V_i),用以驱动探针构成的电容分压检测电路。



(a) 电容分压电路原理

(a) Principle diagram of capacitor voltage divider circuit



(b) 等效阻抗模型示意图

(b) Diagram of equivalent impedance model

图2 电容分压电路

Fig. 2 Capacitor voltage divider circuit

为优化系统性能(灵敏度、稳定性),需精确确定晶体振荡器的工作频率(f)以及分压电路中关键无源元件(电容、电阻)的取值。为此,建立了电容分压电路的等效阻抗模型(图2b)进行理论分析。分析表明,晶体振荡器应工作在其串联谐振频率点,此时其等效阻抗呈现为纯电阻特性。基于此阻抗模型,可推导出输入电压(V_i)与输出电压(V_o)之间的传递函数关系:

$$V_o = \frac{(Z_2 + Z_t) \parallel (Z_x + Z_L)}{Z_1 + (Z_2 + Z_t) \parallel (Z_x + Z_L)} \cdot \frac{Z_L}{Z_x + Z_L} \cdot V_i = G(C_t) \cdot V_i \quad (1)$$

式中: Z_1 、 Z_2 、 Z_t 、 Z_x 、 Z_L 分别为对应元件 C_1 、 C_2 、 C_t 、 C_x 、 R_L 的阻抗。

在液面探测过程中,探针寄生电容 C_t 随探针接触或离开液面而发生显著变化(ΔC_t)。值得注意的是, C_t 的变化不仅引起增益 $G(C_t)$ 变化,也可能间接影响输入电压 V_i 。为定量表征 C_t 变化对输出电压 V_o 的影响程度,定义电路灵敏度 S 为输出电压变化量 ΔV_o 与探针寄生电容变化量 ΔC_t 的比值,即:

$$S = \frac{\Delta V_o}{\Delta C_t} = \frac{\Delta G}{\Delta C_t} \cdot V_i \quad (2)$$

式中: C_t 是探针的寄生电容,探针接触或离开液面时将导致 C_t 发生变化; G 为电路增益; V_i 为输入电压; V_o 为分压电路输出电压。

为了揭示关键参数对灵敏度 S 的影响规律,通过式(1)和(2)进行了理论分析及参数扫描仿真(图3),结果表明,工作频率低时电容支路阻抗过大,分压值主要由 R_L 支路决定,几乎不受 C_t 变化影响,此时工作频率(f)的提升可显著增加灵敏度 S ,但其提升效果在频率超过4 MHz后趋于饱和(图3(a))。负载电阻(R_L)的增大同样有利于提升灵敏度 S ,当 R_L 超过 $1.5\text{ k}\Omega$ 时,电路增益 G 趋于稳定,灵敏度 S 的增长也接近饱和(图3(b)),这是由于随着 R_L 的增大,分压值将主要由阻抗更小的 C_2 和 C_t 所在支路决定。分压电容 C_2 容值的增大持续提高灵敏度 S ,但在 C_2 容值 $>400\text{ pF}$ 后, C_2 和 C_t 的串联电容将主要由 C_t 决定,因此继续增大 C_2 对灵敏度的提升效果逐渐平缓(图3(d))。分压电容 C_1 对灵敏度 S 的影响呈现非单调特性,当 C_1 很小时, C_2 和 C_t 分的电压接近0 V,当 C_1 很大时, C_2 和 C_t 分得电压接近电源电压,因此,必然存在一个值使得灵敏度 S 最大。在 C_1 容值约为 20 pF 处存在一个使 S 达到最大的最优值点(图3(c))。因此,综合考虑高灵敏度、系统稳定性及工程可实现性的要求,最终优化选定晶体振荡器工作频率为8 MHz,确保高灵敏度且工作于增益稳定区,负载电阻 R_L 定为略高于 $1.5\text{ k}\Omega$ 的增益稳定阈值 $1.8\text{ k}\Omega$,在保证增益稳定的前提下提供良好灵敏度,分压电容 C_2 为 100 pF ,以降低对元件容值精度的敏感度,分压电容 C_1 定为接近其灵敏度峰值点标准容值 22 pF 。

1.3 同步选频峰值检测电路设计与分析

为适配后续自稳定电路的信号处理要求,需对电容分压电路的输出信号进行同步选频峰值检测(图4)。为了保证探测系统的鲁棒性和对微弱信号的有效采集,本设计采用中心频率与激励信号严格同步的无源晶体谐振器 X_2 构成选频电路。基于无源晶体的等效电路模型,其

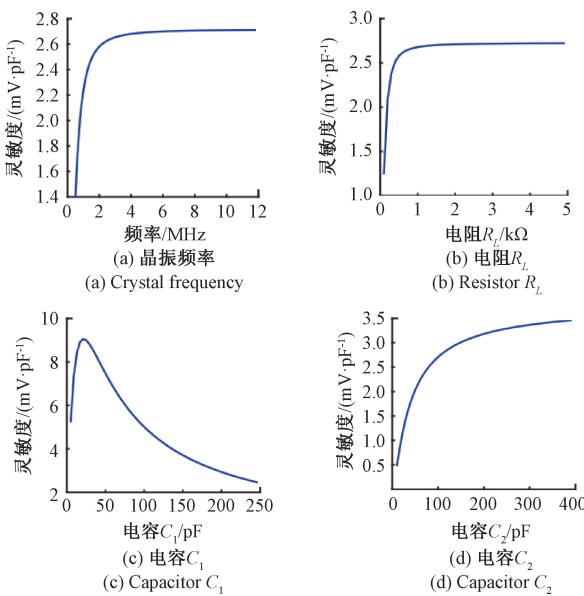


图 3 关键元件参数对灵敏度的影响

Fig. 3 Influence of key component parameters on sensitivity

在串联谐振频率点呈现最低阻抗, 而当信号频率偏离此谐振点时阻抗显著增大。这一特性使其能够对由探针寄生电容与电路板固定电容分压产生的信号进行带通滤波, 仅允许与激励信号同频率($f=8$ MHz)的分量通过, 从而有效滤除环境噪声及谐波干扰, 显著提升探测系统的抗干扰能力。选频电路输出的纯净正弦波随后进入由二极管构成的直流偏置电路, 将信号整体直流电平抬升至适合于后续整流处理的范围。最后, 信号经由二极管 D_1 与滤波电容 C_7 组成的精密半波整流滤波电路, 将交流正弦信号的峰值捕获并转换为稳定的直流电平信号, 输出至自稳定电路进行后续处理。

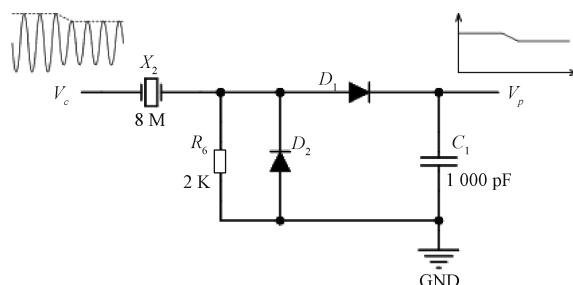


图 4 峰值检测电路原理

Fig. 4 Principle diagram of peak detection circuit

1.4 前端电路仿真与分析

电容分压电路与峰值检测电路共同构成了系统的前端信号采集与调理单元。为验证该联合电路设计的可行性, 采用 Simulink 平台建立了电路仿真模型(图 5)。在模型中, 探针寄生电容 C_t 的动态变化采用一个可变电容元件

进行模拟。为模拟移液针进出液面时的典型电容变化过程, 设定在仿真时间 $t=0.6$ ms, C_t 值从 20 pF 阶跃变化至 22 pF。仿真结果表明: 电容变化发生后, 电容分压电路输出节点(b 点)的信号幅值立即响应, 表现出近乎无延迟的特性(图 6)。而峰值检测电路的关键节点(c 点: 整流前信号, d 点: 峰值保持输出)则存在约 150 μ s 的响应延迟, 该延迟主要由峰值检测电路中滤波电容(C_7)的充放电时间常数决定。最终, d 点输出稳定且能准确反映输入信号峰值的直流电平, 这有效验证了前端电路电容分压检测与交流峰值转换两个核心功能均按设计要求正确实现。

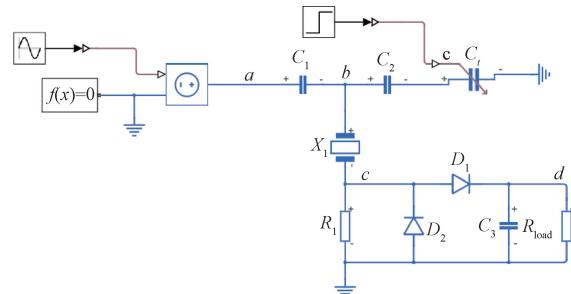


图 5 前端电路仿真模型

Fig. 5 Front-end circuit simulation model

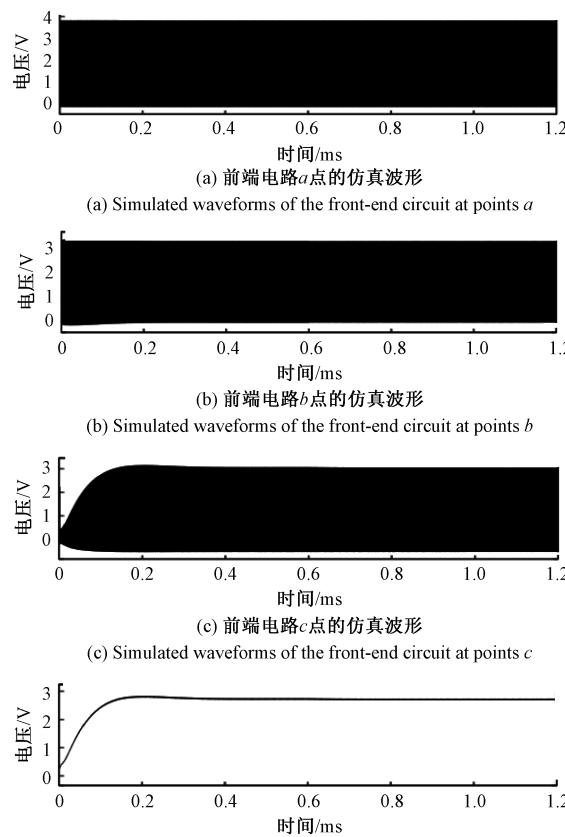


图 6 前端电路 a、b、c、d 点的仿真波形

Fig. 6 Simulated waveforms of the front-end circuit at points a, b, c, d

1.5 自稳定脉冲转换电路设计与仿真分析

为评估器件参数对前端电路的影响,通过蒙特卡洛仿真对模型进行了敏感性分析,以电容 C_1 变化前后的 d 点电压变化幅度 ΔV_d 作为输出,分析不同器件参数对该输出的影响。分析结果表明:电容 C_1 和电阻 R_1 对输出的影响最大,且为正相关(图 7(a))。按照常规器件容差,电容器容值公差为 $\pm 10\%$,电阻器阻值公差为 $\pm 1\%$,进行蒙特卡洛仿真,仿真结果表明:在 C_1 和 R_1 公差范围内,输出电压变化幅度均 > 16 mV(图 7),在电阻器和电容器的公差范围内对前端电路输出电压的影响不超过 6%。

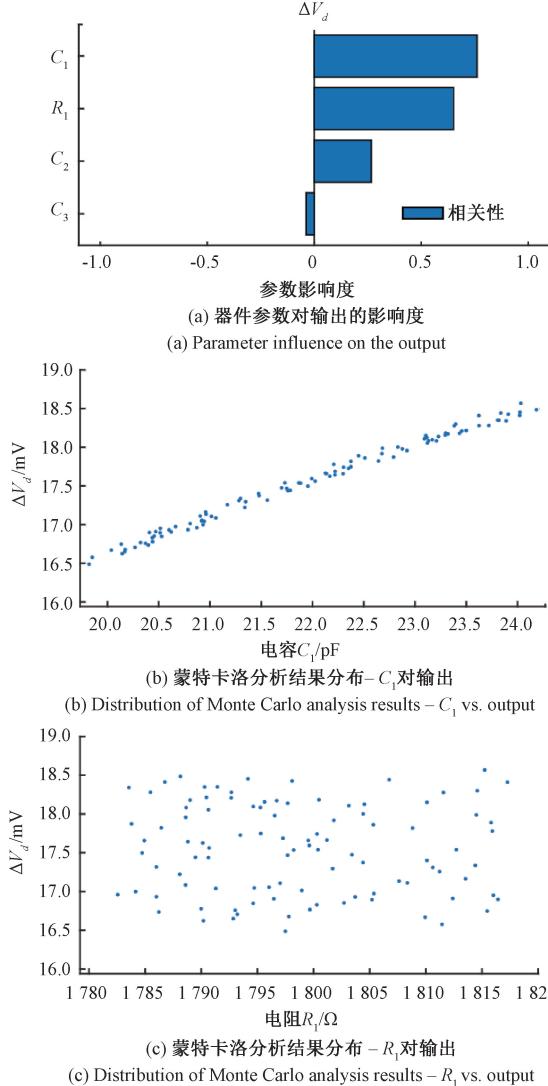


图 7 关键器件参数容差分析

Fig. 7 Key component parameter tolerance analysis

自稳定电路的核心功能是自稳定脉冲转换,即将峰值检测电路输出的直流电平信号(表征液面接触引起的电容变化)转换为易于微处理器识别的数字脉冲信

号(图 8)。其核心转换机制在于:当输入信号突然降低时,运放负输入端被拉低,正输入端由于存在较大电容 C_4 ,不能马上跟随变化,由此破坏了电路平衡状态,导致运放输出电压升高,场效应管 Q_2 导通电流增大,输出电压降低(图 9)。随着电容 C_4 逐渐放电,电路又重新回到平衡状态,输出电压回复。当输入端的直流峰值信号因探针电容变化而发生微小阶跃(ΔV)时,该阶跃信号的瞬态变化率(斜率)定义为:

$$Slope = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (3)$$

式中: ΔV 为阶跃幅值; Δt 为信号完成该阶跃变化所需的时间。

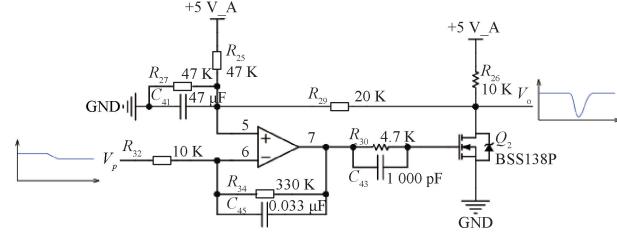


图 8 自稳定电路原理

Fig. 8 Principal diagram of a self-stabilizing circuit

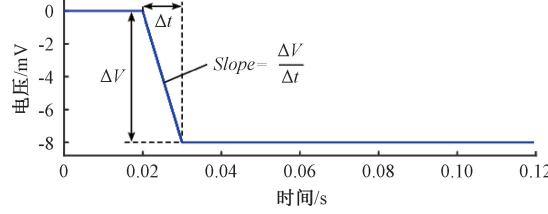


图 9 信号阶跃示意图

Fig. 9 Schematic of the signal step

为验证自稳定脉冲转换电路的有效性,对其进行了仿真分析。仿真结果表明:输出脉冲的幅值(H)在输入信号斜率(Slope)小于某个临界值(约 1 V/ms)时,随斜率的增大而显著增加。但当斜率超过此临界值后,输出脉冲幅值(H)达到饱和,不再明显增大。同样,当输入峰值信号的阶跃变化幅度(ΔV)小于约 15 mV 时,输出脉冲的完整性(如边沿陡峭度)或幅值可能受到影响;然而,当 $\Delta V > 15$ mV 时,输出脉冲幅值(H)同样达到饱和状态,不再随 ΔV 的进一步增大而变化(图 10)。这表明当自稳定电路的设计能够在输入信号变化(ΔV 和 Slope)达到一定阈值后,能够提供稳定且满幅度的数字脉冲输出。这种特性对于确保微处理器在不同溶液环境(具有不同电导率和体积,导致 C_t 变化率和 ΔV 不同)下都能可靠地检测到脉冲信号至关重要。输出脉冲幅值 H 的稳定性直接决定了微处理器对液面探测事件判断的可靠性,进而影响整个系统的测量精度。由于对前端电路的

分析表明,电容器和电阻器常用的公差对前端电路的输出电压即自稳定脉冲转换电路的输入电压均能够超过16 mV,因此两种电子元件的公差不会显著影响最终的信号。

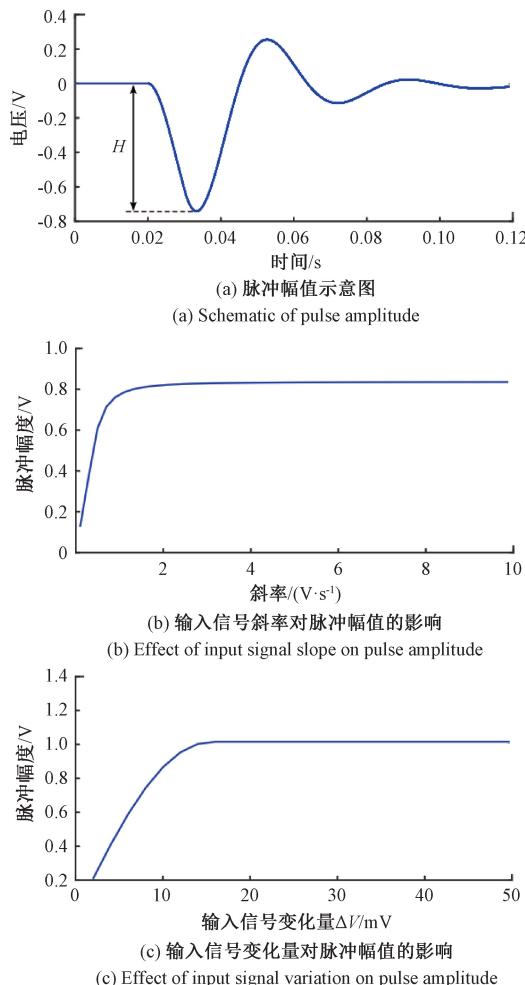


图 10 自稳定电路的有效性仿真分析

Fig. 10 Simulation analysis of the effectiveness of self-stabilizing circuits

2 实验与结果分析

2.1 液面探测有效性分析

为了验证所提出液面探测系统的实际工作的有效性,对装有生理盐水的标准试管进行了实测,并同步监测自稳定电路的关键节点电压 V_d (峰值检测输出)与 V_o (自稳定电路输出脉冲)。实验数据清晰地揭示了吸液针进入液面瞬间 V_d 电压波形的非单调特性:其下降过程并非平滑曲线,而是呈现出特征鲜明的两阶段模式(图 11)。第 1 阶段电压在极短时间内(约占整个下降过程时长的 1%)发生急剧下降,其下降幅度约占整

体下降幅度的 20%。第 2 阶段电压随后进入相对平缓的下降过程,直至达到新的稳态。值得注意的是,当探针退出液面时, V_d 电压的上升过程也表现出类似的两阶段特性,初始快速上升阶段紧随其后的是平缓上升阶段(图 12)。这种突变的原因可能是自稳定电路的输入电压 V_i 由稳定状态转变为不稳定态造成的。这种状态的变化与前端自稳定电路息息相关。为了探究溶液体积对 V_d 电压变化的影响,对 100~5 000 μ L(100、150、200、500、1 000、2 000 和 5 000 μ L)的溶液分别进行了探测,结果显示液面高度与 V_d 电压呈正相关(图 13),当液体量极少时,电压幅度仅 10 mV,证明了信号源的幅度稳定性的重要性以及自稳定电路设计的必要性。

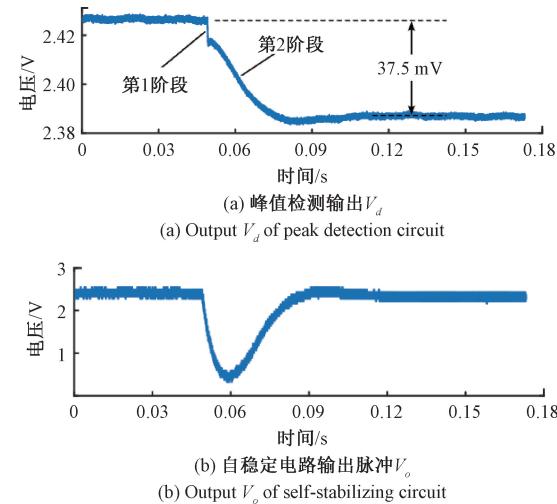


图 11 探针进入液面时的输出波形

Fig. 11 Output waveforms when the probe enters the liquid level

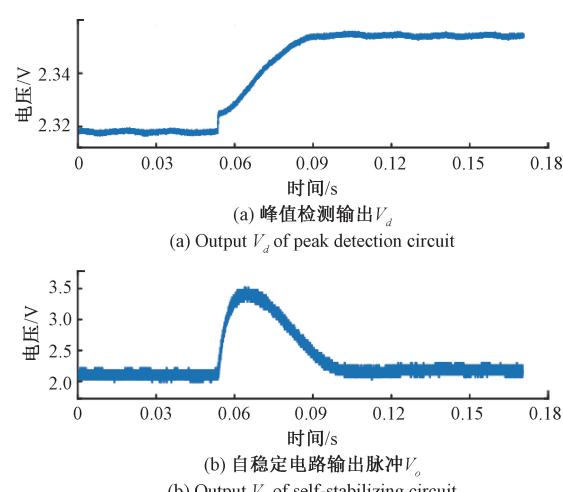
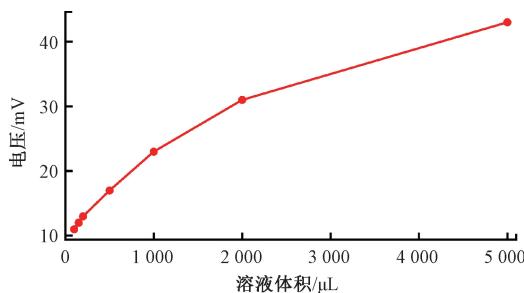


图 12 探针离开液面时的输出波形

Fig. 12 Output waveforms when the probe leaves the liquid level

图 13 溶液体积对 V_d 电压幅度的影响Fig. 13 Effect of solution volume on amplitude of V_d

2.2 液面探测精度影响因素分析

为了验证溶液导电性和溶液体积液面探测精度的影响,配置了浓度为 0.45%、0.9%、1.8%、5% 和 10% 的盐水,并用纯水作为对照,对比在溶液体积不同时,液面探测过程中的脉冲幅度。结果显示,去离子水(极低电导率)对应的液面探测脉冲信号幅度显著低于各浓度盐水溶液(图 14(a))。值得注意的是,在盐水溶液组内,尽管脉冲幅度随离子浓度(电导率)升高呈现上升趋势,但其变化幅度相对于去离子水与盐水之间的差异而言相对较小,表明在达到一定基础电导率后,浓度变化对脉冲幅度的提升存在非线性饱和效应(图 14(b))。这一现象的主要

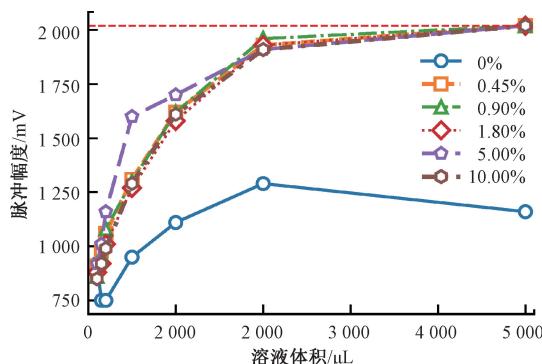
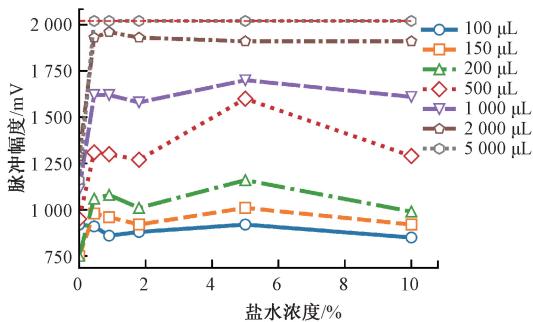
(a) 溶液体积与脉冲幅度的关系
(a) Plot of solution volume against pulse amplitude(b) 溶液盐浓度与脉冲幅度的关系
(b) Plot of solution salt concentration against pulse amplitude

图 14 溶液体积和含盐量对脉冲幅度的影响

Fig. 14 Effect of solution volume and salt content on pulse amplitude

要原因在于:去离子水中可自由移动的离子载流子浓度极低,导致其具有较高的电阻率,对探测回路中的交流电流产生显著的阻碍作用(即阻抗较大),进而削弱了液面电容变化引起的充放电电流幅度,最终反映为较低的脉冲信号幅度输出。

为了明确在较低盐浓度的溶液中的脉冲幅度,分别对 200 μL 体积的含盐量为 0、0.01%、0.02%、0.05%、0.1% 和 0.2% 的盐水进行了检测。结果显示,当盐浓度达到 0.2% 时,脉冲幅度就接近饱和(图 15)。

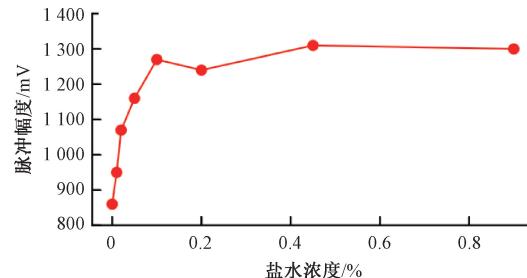


图 15 低含盐量溶液对脉冲幅度的影响

Fig. 15 Effect of low-salt solution on pulse amplitude

进一步地,对 5% 以内的盐浓度的溶液的检测 CV 进行评估,发现,随着盐浓度的增加,液面高度的检测标准差基本稳定在 20 ~ 50 μm ,相对应的 CV 在 0.3% ~ 0.46%,并没有呈现明显的与盐浓度变化趋势的相关性(图 16)。因此,溶液的含盐量与脉冲幅度有直接关系,但是不会直接影响检测的精度。

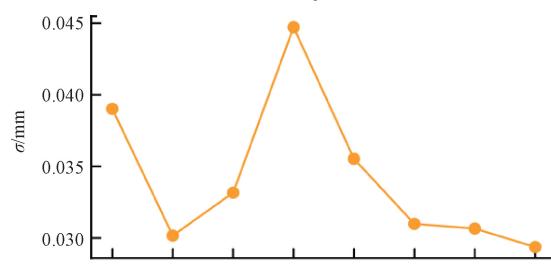
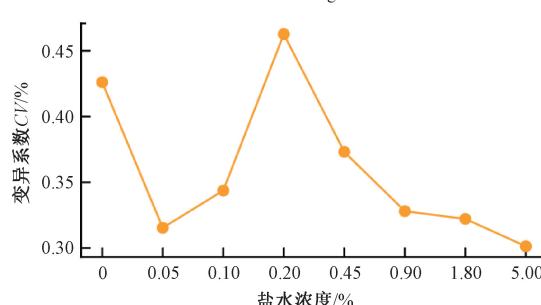
(a) 盐浓度与检测标准差的关系
(a) Plot of solution salt concentration against detection level height(b) 盐浓度与检测CV的关系
(b) Plot of solution salt concentration against CV of detection

图 16 溶液盐浓度对检测精度的影响

Fig. 16 Effect of salt concentration on detection accuracy

为了定量评估溶液体积对脉冲信号质量及最终液面定位精度的影响, 测量并计算了不同液面高度下的 CV 。实验结果表明, 随着溶液体积的增加, 液面高度探测结果的 CV 呈现下降趋势, 整体均稳定控制在 $\leq 0.75\%$ (图 17)。

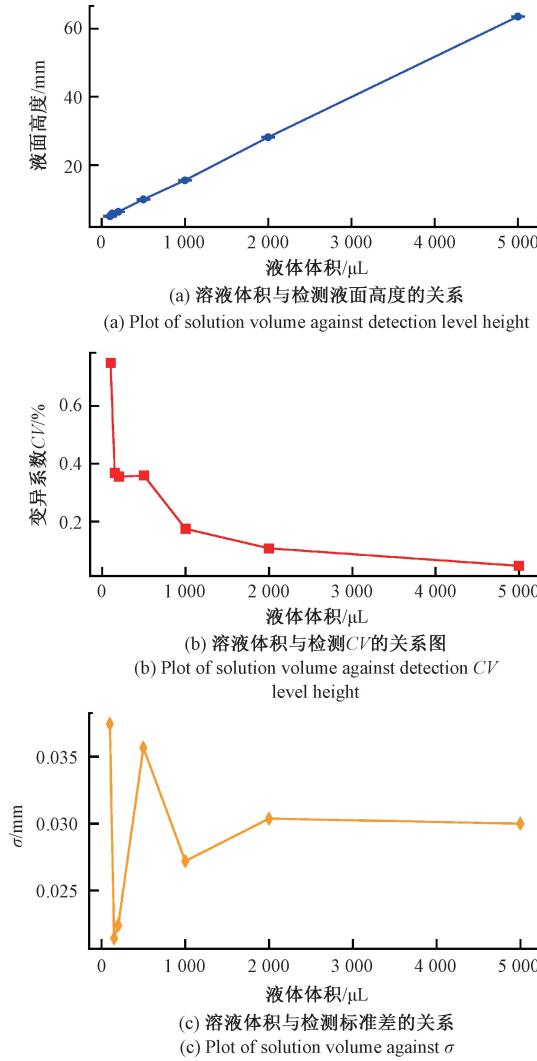


图 17 溶液体积对液面高度 CV 的影响

Fig. 17 Effect of solution volume on the CV of the liquid level height

不同初始液面高度下液面探测值的标准差基本稳定在 $20\sim40\ \mu\text{m}$ 的范围。可以推测导致低液面体积条件下检测 CV 升高的核心原因在于探测方法学的限制, 液位探测通常依赖于吸液针(或探针)尖端与液面接触时电容/电阻的突变, 这需要探针深入液面下方一定距离才能确保可靠的接触信号触发, 使得初始液面高度的微小绝对偏差在该预设距离下所占的相对比例增大, 从而显著放大测量结果的相对离散度。

2.3 液面探测稳定性测试

为评估液面探测系统在持续工作模式下的可靠性, 本研究对 $500\ \mu\text{L}$ 生理盐水(0.9% NaCl 溶液)进行了 10 000 次连续探测实验。通过实时记录每次探测的液面高度数据, 发现液面高度随测试次数增加呈现稳定线性下降趋势。在整个测试序列中, 系统未出现脉冲信号中断或液面高度数据突变现象(相邻测量值最大偏差 $<\pm 0.15\ \text{mm}$), 证实了系统在长期连续运行中具有稳定的探测能力(图 18)。液面高度性下降可能主要由于开放液面在室温环境下的溶剂蒸发效应, 以及吸液针反复侵入-提离操作过程中针壁表面携带的液体残留损失两个因素导致。

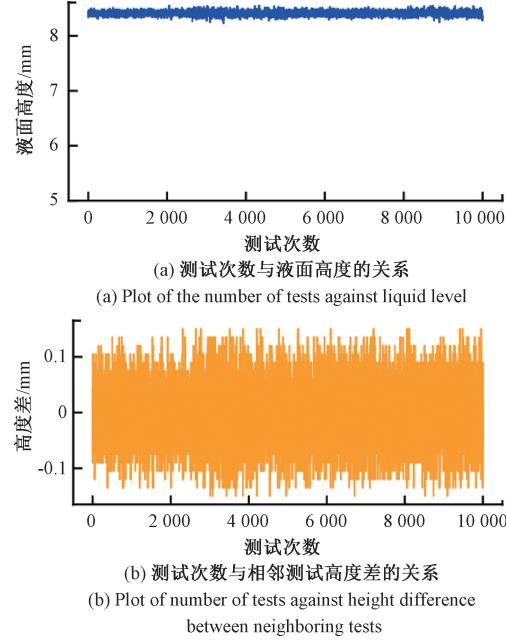


图 18 稳定性测试

Fig. 18 Stability testing

3 结 论

综上所述, 针对高精度液面探测中信号稳定性、跨工况鲁棒性以及微弱信号可靠触发这 3 类关键技术挑战, 设计了一种基于晶振法的电容式液位探测系统, 并通过创新性的信号处理架构实现了高精度液位检测。系统采用晶体振荡器作为信号源, 产生高稳定度的周期性激励信号, 从根本上保证了测量基线的长期稳定性; 该激励信号加在电容分压电路上, 待测电容作为分压环节的一部分, 其容量变化被转换为分压节点处交流信号幅度的变化, 经峰值检波后转化为表征幅值的直流电平, 再由自稳定处理电路进一步转化为具有明确逻辑电平的数字脉冲输出, 从而在数字域完成对液位变化的精确判读, 有效削

弱了不同液体电导率和体积条件下信号幅度差异带来的影响。

通过理论分析与电路仿真建立了系统等效阻抗模型,并据此优化了晶体振荡频率、分压电阻阻值及参考电容容量等关键参数,对激励信号、分压节点、检波输出及最终脉冲等多个关键节点的波形进行了验证,结果表明各功能模块(晶振驱动、分压检测、峰值检波、阈值比较及自稳定处理)之间的信号传递关系与设计预期高度一致。

实验结果显示,在100~5 000 μL 生理盐水条件下,系统液位测量的标准差控制在50 μm 以内,变异系数(CV)低于0.5%,连续10 000次检测过程中运行稳定且未见异常,表明该系统具备优良的精度与工程可靠性。与传统RC振荡式液面探测电路相比,本系统利用频率漂移 $\leq \pm 0.001\%$ 的有源晶振替代频率波动约 $\pm 2\%$ 的RC振荡源,从源头显著提升了信号稳定性;通过基于幅值变化量及变化斜率的自稳定脉冲转换机制,在低电导率(如去离子水)等苛刻工况下仍能保持可靠触发,而传统RC振荡方案往往难以获得足够振荡幅度;同时,得益于品质因数可达1 000~10 000的晶振滤波环节,相比 Q 值仅约50~200的传统带通滤波器,本系统在目标频率选择性和抗噪声能力方面具有明显优势,可实现对微弱信号的稳定检测。总体而言,该电容式液位探测系统结构简洁、性能可靠、适用范围广,可为生化分析仪、免疫分析仪、尿液分析仪等多种体外诊断设备提供高精度液面检测方案,但在极低液量($<100 \mu\text{L}$)条件下测量重复性与稳定性仍有进一步优化空间。

参考文献

- [1] WEBSTER J G. Medical instrumentation: Application and design [M]. 4th ed. New York: Wiley Publisher, 2010.
- [2] SCHUSTER J, KAMUJU V, ZHOU J, et al. Piston-driven automated liquid handlers [J]. SLAS Technology, 2024, 29(3): 100128.
- [3] 严荣国, 邵泓燃, 程清源. 临床检验仪器中常用的液面检测技术 [J]. 实用检验医师杂志, 2021, 13(3): 188-192.
- [4] YAN R G, SHAO H R, CHENG Q Y. Liquid surface detection technologies commonly used in clinical laboratory instruments [J]. Chinese Journal of Clinical Pathologist, 2021, 13(3): 188-192.
- [5] 王停, 刘小晓. 全自动生化分析仪的常见故障与处理 [J]. 实用检验医师杂志, 2023, 15(4): 446-448.
- [6] WANG T, LIU X X. Common faults and solutions of fully automatic biochemical analyzers [J]. Chinese Journal of Clinical Pathologist, 2023, 15(4): 446-448.
- [7] 朱险峰, 张阔, 曾思思, 等. 全自动临床检验仪器中液面探测技术的进展 [J]. 生物医学工程学杂志, 2010, 27(4): 949-952.
- [8] ZHU X F, ZHANG K, ZENG S S, et al. Advances in liquid surface detection technology for automated clinical laboratory instruments [J]. Journal of Biomedical Engineering, 2010, 27(4): 949-952.
- [9] 张晓亮, 王溯陡, 罗刚银. 一种具监测功能的高精度微量移液器的设计 [J]. 北京生物医学工程, 2019, 38(4): 407-416.
- [10] ZHANG X L, WANG B D, LUO G Y. Design of a high-precision micro-pipette with monitoring function [J]. Beijing Biomedical Engineering, 2019, 38(4): 407-416.
- [11] 张跳跳, 贺西平, 刘昱. 基于容器内壁反射能量变化的液位超声检测方法 [J]. 振动与冲击, 2024, 43(8): 257-262.
- [12] ZHANG T T, HE X P, LIU Y. Ultrasonic liquid level detection method based on energy reflection changes from container inner wall [J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(8): 257-262.
- [13] HONG X B, ZHANG B, LI Y, et al. Liquid level detection in porcelain bushing type terminals using piezoelectric transducers based on auto-encoder networks [J]. Measurement, 2019, 141: 12-23.
- [14] LIU B, WANG D Y, WANG A N B. Liquid-surface-level sensing based on transverse pulse train technique [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(8): 2317-2321.
- [15] 曾柏杞, 欧阳红林, 苏深广, 等. 基于自适应算法的液面检测系统 [J]. 传感器与微系统, 2012, 31(8): 94-96.
- [16] ZENG B Q, OUYANG H L, SU SH G, et al. Liquid level detection system based on adaptive algorithm [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2012, 31(8): 94-96.
- [17] MIAO Y, WANG SH P. Small amplitude liquid surface sloshing process detected by optical method [J]. Optics Communications, 2014, 315: 91-96.
- [18] 王典雄. 全自动加样系统液面探测的研究 [J]. 数字技术与应用, 2015(1): 59-60.
- [19] WANG D X. Research on liquid surface detection in automated sampling systems [J]. Digital Technology & Application, 2015(1): 59-60.
- [20] BOBOVNIK G, MUŠIĆ T, KUTIN J. Liquid level detection in standard capacity measures with machine vision [J]. Sensors, 2021, 21(8): 2676.
- [21] 刘昕宇, 王雪梅, 倪文波. 基于机器视觉的连通管液位测量方法研究 [J]. 电子测量技术, 2021, 44(16): 116-122.

- LIU X Y, WANG X M, NI W B. Research on liquid level measurement method of communicating pipe based on machine vision [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(16): 116-122.
- [15] 朱美强, 汤力凡, 王鸿璞, 等. 机械臂倒液任务中透明容器的液位高度视觉检测与控制 [J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(10): 283-293.
- ZHU M Q, TANG L F, WANG H P, et al. Visual detection and control for liquid level height of transparent containers in robotic pouring [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(10): 283-293.
- [16] 李曦婷, 高云鹏, 谢琴, 等. 基于 TV-KF 的矿浆液位电阻抗成像方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2025, 46(2): 141-151.
- LI X T, GAO Y P, XIE Q, et al. Research on electrical impedance tomography method for slurry level based on TV-KF [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2025, 46(2): 141-151.
- [17] 刘昕宇, 欧源斌, 张树鑫, 等. 基于 STM32 的液面探测与精确加样控制系统设计 [J]. *传感器与微系统*, 2020, 39(11): 67-70.
- LIU X Y, OU Y B, ZHANG SH X, et al. Design of liquid level detection and precision sampling control system based on STM32 [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2020, 39(11): 67-70.
- [18] 周侃, 侯雨伸, 孙思博, 等. 阵列式铂电阻液位传感器研究 [J]. *传感器与微系统*, 2009, 28(8): 73-75, 78.
- ZHOU K, HOU Y SH, SUN S B, et al. Research on array platinum resistance liquid level sensor [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2009, 28(8): 73-75, 78.
- [19] 张星原, 龙伟, 卢斌, 等. 一种高灵敏度液面探测系统的设计及其临床应用 [J]. *传感器与微系统*, 2014, 33(6): 72-75, 79.
- ZHANG X Y, LONG W, LU B, et al. Design of a high-sensitivity liquid surface detection system and its clinical application [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2014, 33(6): 72-75, 79.
- [20] DING Z Y, GONG W. Design of liquid level detection circuit based on sampling probe structure capacitance [J]. *PLOS One*, 2024, 19(4): 0298282.
- [21] 张智河, 黄菊英. 基于电容探测的智能液面探测技术 [J]. *中国医疗设备*, 2013, 28(11): 131-132, 142.
- ZHANG ZH H, HUANG J Y. Intelligent liquid level detection technology based on capacitance sensing [J]. *China Medical Devices*, 2013, 28(11): 131-132, 142.
- [22] 钟道鸿, 倪屹, 郭硕, 等. 全自动生化仪液面探测系统的设计与应用 [J]. *传感器与微系统*, 2020, 39(10): 70-72, 76.
- ZHONG D H, NI Y, GUO SH, et al. Design and application of liquid level detection system for fully automatic biochemical analyzer [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2020, 39(10): 70-72, 76.
- [23] ZHANG CH M, WANG Y Q, CHEN ZH, et al. The liquid level detection system based on capacitance sensor [J]. *Nanoscience and Nanotechnology Letters*, 2017, 9(3): 353-358.
- [24] REN Y, LUO B, FENG X Y, et al. Capacitive and non-contact liquid level detection sensor based on interdigitated electrodes with flexible substrate [J]. *Electronics*, 2024, 13(11): 2228.
- [25] 梁豪杰, 赵翠莲. 基于标准金属量器建模的液位控制方法 [J]. *电子测量技术*, 2021, 44(16): 31-36.
- LIANG H J, ZHAO C L. Liquid level control method based on modeling of standard metal gauge [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(16): 31-36.

作者简介



张桢阳, 2006 年于福州大学获得学士学位, 2011 年于东华大学获得硕士学位。现为嘉兴凯实生物科技股份有限公司工程师。主要研究方向为体外诊断仪器的关键检测模块与核心技术开发。

E-mail: zhangzy@quaerolife.com

Zhang Zhenyang received his B. Sc. degree from Fuzhou University in 2006, and his M. Sc. degree from Donghua University in 2011. He is currently an engineer in Quaero Life Science Co., Ltd. His main research interests include the development of key detection modules and core technologies for in vitro diagnostic instruments.



田良飞(通信作者), 2005 年于兰州大学获得学士学位, 2008 年于南京大学获得硕士学位, 2013 年于苏黎世联邦理工学院获得博士学位, 现为浙江大学研究员, 主要研究方向为分子诊断和基于超声的生物医学新技术。

E-mail: liangfei.tian@zju.edu.cn

Tian Liangfei (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Lanzhou University in 2005, his M. Sc. degree from Nanjing University in 2008, and his Ph. D. from ETH Zurich in 2013. He is currently a research fellow at Zhejiang University. His main research interests include molecular diagnostics and ultrasound-based biomedical technologies.