

基于电润湿（EWOD）技术的微流体控制系统

杨子凡

Jul 04, 2025

微流控技术正推动生物医学检测的范式变革，其核心价值在于微型化带来的高通量处理能力与纳升级试剂消耗。在众多操控技术中，电润湿（Electro-Wetting on Dielectric, EWOD）凭借无机械运动部件实现液滴精准操控的特性脱颖而出。这种数字化控制方式不仅支持自动化流程，更在即时诊断（POCT）和可穿戴设备领域展现出独特潜力。本文将系统解析 EWOD 系统设计全流程，涵盖物理机制、电路实现、芯片制造及前沿挑战。

1 电润湿（EWOD）技术核心原理解析

基础物理机制的本质是固-液-气三相接触面的能量平衡。杨氏方程描述静态接触角 θ_0 与界面张力的关系：

$\gamma_{sv} - \gamma_{sl} = \gamma_{lv} \cos \theta_0$ 。而 EWOD 的核心 Lippmann-Young 方程揭示电压对接触角的调控规律：

$$\cos \theta_V = \cos \theta_0 + \frac{\epsilon_0 \epsilon_d}{2d\gamma_{lv}} V^2$$

其中 ϵ_d 为介电常数， d 是介电层厚度。当施加电压 V 时，接触角 θ_V 减小，液滴向通电电极铺展。值得注意的是，接触角滞后现象（前进角与后退角差值）会形成能垒，实际驱动电压需达到阈值 $V_{th} = \sqrt{\frac{\gamma_{lv}(1+\cos \theta_0)}{\epsilon_0 \epsilon_d d}}$ 才能触发液滴移动。

典型 **EWOD** 器件结构主要分为共面电极型与上下板电极型。前者所有电极位于同一平面，后者则通过顶部接地板形成垂直电场。关键功能层包含三层：底层的氧化铟锡（ITO）或金薄膜驱动电极；中层的二氧化硅（SiO₂）或聚对二甲苯（Parylene）介电层（厚度通常 1-10μm）；顶层的特氟龙（Teflon AF）疏水涂层（约 100nm）。液滴操作环境需在绝缘油相中，以防止电解并降低粘滞阻力。

2 EWOD 微流体系统设计全流程

系统架构设计采用三级控制体系。用户交互层通过 PC 或触摸屏输入指令；逻辑控制层由 FPGA 或 STM32 微控制器解析路径规划；高压驱动层则通过 H 桥电路输出 60-300V 交流信号。电极阵列拓扑设计需权衡操控精度与系统复杂度：棋盘格布局支持二维运动但布线复杂，线型阵列简化布线却限制移动自由度。电极尺寸 w 与液滴体积 V_d 需满足 $V_d \approx w^3$ 以保持球形形态。多路复用技术可显著减少 I/O 数量，例如 16×16 阵列通过行列扫描仅需 32 个控制通道。

高压驱动电路设计的核心是 DC-AC 逆变模块。以下 Python 伪代码展示 H 桥的相位控制逻辑：

```
1 def h_bridge_control(electrode_A, electrode_B, phase): # phase: 0° or 180°
2     if phase == 0:
3         set_high(electrode_A) # 施加高压
4         set_low(electrode_B) # 接地
```

```
5     else:
        set_low(electrode_A)
7     set_high(electrode_B)
```

该代码通过切换两路电极的相位差产生电场梯度。实际电路需加入光耦隔离防止高压窜扰，并选用 HV260 等专用驱动芯片。波形参数优化至关重要：方波驱动效率高但易引发电解，1-10kHz 正弦波可减少焦耳热效应。

控制算法开发需解决路径冲突问题。采用改进 A* 算法进行液滴路由规划：

```
1 def a_star_path(grid, start, target):
    open_set = PriorityQueue()
3    open_set.put((0, start)) # (f_score, position)
    came_from = {}
5    g_score = {pos: float('inf') for pos in grid}
    g_score[start] = 0
7
    while not open_set.empty():
9        current = open_set.get()[1]
        if current == target:
11           return reconstruct_path(came_from, target)

13        for neighbor in get_neighbors(current):
            tentative_g = g_score[current] + 1
15            if tentative_g < g_score[neighbor]:
                came_from[neighbor] = current
17                g_score[neighbor] = tentative_g
                f_score = tentative_g + heuristic(neighbor, target)
19                open_set.put((f_score, neighbor))
```

此算法通过启发函数 `heuristic()` 优先选择最短路径。为防止交叉污染，需设置虚拟电极作为隔离区，并保持液滴间距大于电极尺寸的 1.5 倍。进阶方案可集成阻抗传感器实时反馈液滴位置。

3 芯片制造与封装工艺实战

微加工工艺首选光刻技术。以 ITO 玻璃基板为例：旋涂光刻胶后曝光显影，用盐酸/硝酸混合液湿法刻蚀电极图形；接着用等离子体增强化学气相沉积（PECVD）生长 2μm 厚 SiO₂ 介电层；最后旋涂 Teflon AF 1600（3000rpm×30s）并 180℃ 退火 1 小时形成疏水层。低成本替代方案可采用 FR4 PCB 基板制作铜电极，激光直写技术可在聚酰亚胺薄膜上制备柔性电极，或直接使用商用 PET-ITO 膜（表面电阻 <15 Ω/sq）快速制样。封装关键挑战集中在密封性控制。上盖板需设计亲水通道引导液滴，常用氧等离子体处理载玻片形成亲水条纹。封装时采用 UV 固化胶（如 Norland NOA81）沿芯片边缘点胶，紫外光照 60 秒固化。特别注意进样口需设计毛细管结构，利用 $P = \frac{2\gamma_{lv}\cos\theta}{r}$ 的毛细力自动吸入样品。

4 系统集成与性能验证

实验平台搭建以 STM32F407 为主控，通过 SPI 接口控制高压驱动板。高速相机（1000fps）捕捉液滴运动，OpenCV 库实现实时轨迹跟踪：

```
1 import cv2
2 cap = cv2.VideoCapture(0)
3 while True:
4     ret, frame = cap.read()
5     gray = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
6     circles = cv2.HoughCircles(gray, cv2.HOUGH_GRADIENT, 1, 20,
7                               param1=50, param2=30, minRadius=10, maxRadius=50)
8     if circles is not None:
9         for (x, y, r) in circles[0]:
10             cv2.circle(frame, (x, y), r, (0,255,0), 2)
```

此代码通过霍夫变换识别圆形液滴轮廓。核心性能测试数据显示：当驱动电压从 60V μm 增至 200V μm 时，直径 1mm 水滴在硅油中的移动速度从 5mm/s 提升至 40mm/s；超过 220V μm 后因接触角饱和效应速度增长停滞。可靠性测试中，Teflon 涂层在连续 1000 次操作后接触角从 112° 退化至 98°，需定期再生处理。

5 挑战与前沿优化方向

当前技术瓶颈突出表现在介电层击穿（局部场强 $>20\text{V}/\mu\text{m}$ ）和高离子强度溶液（如 PBS 缓冲液）的驱动失效。创新解决方案包括：采用 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 纳米复合介电层将电容提升至 $0.5\mu\text{F}/\text{cm}^2$ ；脉冲驱动模式（占空比 $<30\%$ ）使峰值功率下降 60%；自修复疏水涂层通过微胶囊释放氟硅烷修复划痕。未来趋势指向人工智能驱动的自适应控制，例如卷积神经网络（CNN）实时识别液滴状态并调整电压：

```
1 model = Sequential()
2 model.add(Conv2D(32, (3,3), activation='relu', input_shape=(128,128,3)))
3 model.add(MaxPooling2D((2,2)))
4 model.add(Flatten())
5 model.add(Dense(64, activation='relu'))
6 model.add(Dense(3, activation='softmax')) # 输出：加速/减速/停止
```

此类模型可融合阻抗传感数据实现闭环控制。柔性 EWOD 贴片则通过聚二甲基硅氧烷（PDMS）基底与蛇形金电极结合，弯曲半径可达 5mm。

EWOD 技术正突破实验室边界，在床边诊断、环境毒素监测、合成生物学等领域展现颠覆性潜力。为推动技术发展，建议遵循开放科学原则共享设计文件（如 GitHub 仓库包含 Gerber 文件与控制代码）。期待与读者共同探讨如介电层优化、驱动波形设计等工程挑战，让微流控技术真正走向产业应用。