

基于人工表面等离激元的液位传感器设计

陈映竹 陈楠 刘茂德 侯梓越 吴婕萍*

成都工业学院 自动化与电气工程学院, 中国·四川 成都 611730

摘要: 在工业生产、能源管控、环境监测等诸多领域, 液位测量都发挥着不可或缺的作用, 它是保障系统稳定运行、优化资源配置、防范安全隐患的关键环节, 为各行业的精准决策与高效发展筑牢根基, 现有的液位测量方法在穿过容器进行测量时存在诸多局限。论文研究了一种基于人工表面等离激元 (SSPPs) 结构的传感器, 该传感器主要在 SSPPs 上加载 SRR 谐振结构。根据谐振结构产生的谐振频率偏移可以实现对液位的测量。仿真结果表明, 所提出的方法可以穿透非金属容器对液位进行检测, 验证了方法的可行性。该方法的提出对于保障生产过程的安全性和稳定性具有意义。

关键词: SRR; SSPPs; 液位测量; 无损检测

Plasmon Liquid Level Sensor Design based on Surface Plasmon Polaritons

Yingzhu Chen Nan Chen Maode Liu Ziyue Hou Jieping Wu*

School of Automation and Electrical Engineering, Chengdu University of Technology, Sichuan, Chengdu, 611730, China

Abstract: Liquid level measurement plays an indispensable role in many fields such as industrial production, energy control, and environmental monitoring. It is a key link to ensure stable system operation, optimize resource allocation, and prevent safety hazards, laying a solid foundation for accurate decision-making and efficient development in various industries. Existing liquid level measurement methods have many limitations when measuring through containers. The paper investigates a sensor based on artificial surface plasmon polaritons (SSPPs) structure, which is mainly loaded with SRR resonant structure on SSPPs. The resonance frequency shift generated by the resonant structure can be used to measure the liquid level. The simulation results show that the proposed method can penetrate non-metallic containers to detect liquid levels, verifying the feasibility of the method. The proposal of this method is significant for ensuring the safety and stability of the production process.

Keywords: SRR; SSPPs; liquid level measurement; non-destructive testing

0 前言

液位测量在众多领域具有至关重要的意义。在工业生产方面, 无论是石油化工中各类反应釜内液体原料的精确管控, 还是食品饮料加工过程中对储存罐液位的实时监测, 精准的液位测量能确保生产流程连续、稳定, 避免物料浪费, 极大提高生产效率与产品质量。于能源领域而言, 在水电站水库水位监测、储油罐油量统计中, 液位数据是合理调度能源、优化分配的关键依据, 关乎能源供应的稳定性与可持续性。在环境监测场景下, 像污水处理厂、水库等对水位变化的掌握, 既能助力防洪抗涝等灾害预警, 又能通过分析液位动态有效评估水资源利用情况, 维护生态平衡, 为人类社会平稳发展保驾护航。

目前已研制出来的几种用于液位测量的技术, 包括磁浮子式液位计、雷达液位计、超声波液位计以及压力变送器液位计。这些方法可以对液位进行检测, 然而这些检测方法各有优缺点, 适用于不同特点的检测。

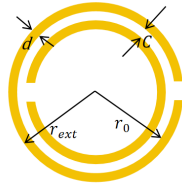
磁浮子式液位计结构简单, 可用于多种液体, 包括腐蚀性液体。但对于极高温或高压液体不太适用, 在液体含有杂

质存在测量误差^[1]。雷达液位计几乎不受液体的物理性质影响。它使用非接触式测量, 适用于高温、高压或腐蚀性液体, 可工作在极端工作环境, 不受液位表面状态或气体泡沫的干扰。但对安装位置和角度要求较高, 价格也较高^[2]。超声波液位计安装简单, 维护较方便, 适合危险环境。但对高压或极端高温液体适应性较差, 可能会受到液面杂质的干扰^[3]。光学液位计通常应用于高精度测量要求, 不受环境影响, 但对于浑浊、粘稠或腐蚀性液体, 可能需要特殊设计的传感器^[4]。

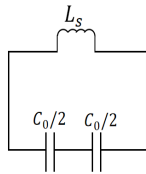
为了检测不同环境的液位, 设计了一种基于人工表面等离激元结构的传感器进行微波无损法检测。微波传感器能够基于液体的电磁特性进行检测, 液体的其他物理化学性质对其影响较小。微波无损检测技术无需与液体直接接触, 这对于在石油化工、制药等高危行业, 意义重大。无接触式的优点还在于减少了维护成本和潜在的安全隐患, 尤其是在高温、高压或有毒环境下。SSPPs 结构在设计上具有较好的适应性, 可以根据需要调节工作频率或结构设计, 适应不同的液位测量需求。具有高灵敏度、无接触、抗干扰、适应性强、快速响应等特点, 能够在恶劣环境下提供精确、可靠的液位监测方案。

1 理论

20 世纪 90 年代末, 英国皇家学院的 Pendry 等人第一次提出并设计了周期性排列的金属开口谐振环^[5]。如图 1 所示, SRR 结构包含两个同心的、带有开口的金属环, 它们被印制在厚度为 t 的微波介质基板。当 SRR 受到沿其轴线方向的外部时变磁场作用时, 内环与外环上相对位置的开口会促使电流以显著的位移电流形态, 通过两环间的缝隙从一环流向另一环。因此, 这两环间的缝隙展现出分布电容的特性。



(a) SRR 结构示意图, 黄色部分为金属, 白色部分为介质



(b) 等效电路图

图 1 SRR 结构及其等效电路模型

SRR 的整体等效电路模中, C_0 代表环间的总电容, 这个电容为:

$$C_0 = 2\pi r C_{pul} \quad (1)$$

其中, C_{pul} 环间单位长度等效电容。SRR 结构的谐振频率为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} \quad (2)$$

电感 L_s 可以由具有平均半径 r_0 和宽度 C 的单个环的电感来近似。 L_s 的表达式:

$$L_s = \frac{\mu_0 \pi^3}{4c^2} \int_0^\infty \frac{1}{k^2} [bB(kb) - aB(ka)]^2 dk \quad (3)$$

其中, $a = r - c/2$, $b = r + c/2$ 。 $B(x)$ 的表达式由公式 (3) 给出:

$$B(x) = S_0(x)J_1(x) - S_1(x)J_0(x) \quad (4)$$

上式中 S_n 是 n 阶 Struve 函数, J_n 是 n 阶 Bessel 函数。环间单位长度等效电容 C_{pul} 的表达式为:

$$C_{pul} = \epsilon_0 \epsilon_e F(k) \quad (5)$$

其中:

$$\epsilon_e = 1 + \frac{\epsilon - \epsilon_0 F(k)}{2\epsilon_0 F(k_1)} \quad (6)$$

上式中: $k = a/b$, $a = d/2$, $b = d/2 + c$ 。

$$k_1 = \frac{\sinh \frac{\pi a}{2t}}{\sinh \frac{\pi b}{2t}} \quad (7)$$

当 $0 < k < \sqrt{2}/2$ 时, 公式 (5) 中:

$$F(k) = \pi \left[\ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{k'}}{1 - \sqrt{k'}} \right) \right] \quad (8)$$

上式中 $k' = \sqrt{1 - k^2}$ 。当 $\sqrt{2}/2 < k < 1$ 时:

$$F(k) = \pi \left[\ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{k'}}{1 - \sqrt{k'}} \right) \right]^{-1} \quad (9)$$

就可以求得 SRR 结构的自谐振频率。

2 传感器设计与仿真分析

论文设计的 SSPPs 液位传感器由三部分组成, 如图 2 所示。第 I 部分是共面波导结构, 用于实现与传统微波器件或者微波信号源的阻抗匹配, 其尺寸为 $W=13.82\text{mm}$, $e=2\text{mm}$, $L_1=2\text{mm}$ 和 $g=0.18\text{mm}$ 。第 II 部分由渐变梯度方形结构和接地结构构成。其中, 渐变梯度方形结构和接地结构用于实现共面波导和 SSPPs 结构之间的阻抗匹配, 使得微波能高效转换成 SSPPs 波, 渐变梯度凹槽结构尺寸为 $b_1 \sim b_5 = 0.8\text{mm} \sim 4\text{mm}$ (间隔为 1.8mm)。接地结构采用曲线 $y = C_1 e^{\alpha x} + C_2$ 设计, 其中 $x_1 < x < x_2$, $C_1 = (y_2 - y_1)/(e^{\alpha x_2} - e^{\alpha x_1})$, $C_2 = (y_1 e^{\alpha x_2} - y_2 e^{\alpha x_1})/(e^{\alpha x_2} - e^{\alpha x_1})$, $\alpha = 0.1$, $P_1(x_1, y_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2)$ 为曲线的起止坐标, 其长度为 $L_2 = 25.42$ 。第 III 部分以 SRR 为单元结构构成, 如图 3 所示。图中橙色部分为 Rogers RT5880 (lossy) 介质基板, 其介电常数为 2.20, 损耗正切角为 0.0009, 厚度为 0.007mm ; 黄色部分为金属铜, 厚度为 0.035mm 。该谐振环具体结构尺寸为 $h_1=4\text{mm}$, $h_2=2\text{mm}$, $a_1=1.2\text{mm}$, $a_2=0.6\text{mm}$, $b_1=3\text{mm}$, $b_2=1.5\text{mm}$, $w_1=0.2\text{mm}$, $w_2=0.1\text{mm}$ 。该部分具备液位检测功能, 每当液位达到或超过一个谐振环的中心位置时, S 曲线就会发生偏移, 其变化周期为 $P=4.7\text{mm}$ 。可根据不同环境下需求对周期进行调整。

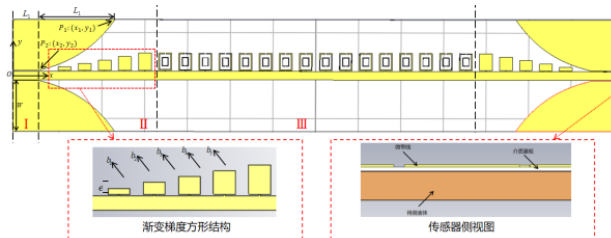


图 2 SSPPs 结构

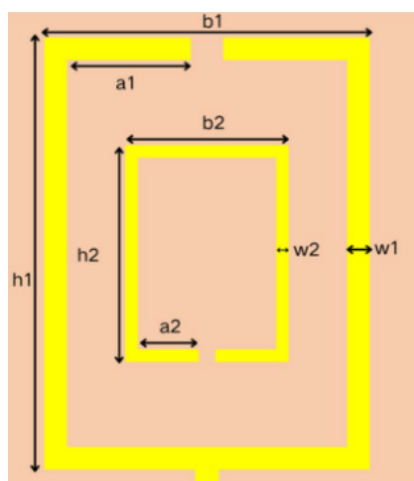


图3 SPPs 单元谐振环结构

为了检验传感器检测液位的能力，将六组不同液位的油放到传感器下方。

测量所得不同液位情况下的反射系数模拟结果如图4所示，该结果表明，随着六组油液位从 4.7mm 到 28.2mm 的逐渐增加，阻滞开始产生的谐振频率在 7.9GHz 至 8.3GHz 之间显著向较低频率方向迁移，并且其变化趋势相对单调。利用这一结果，可以测量不同液位。

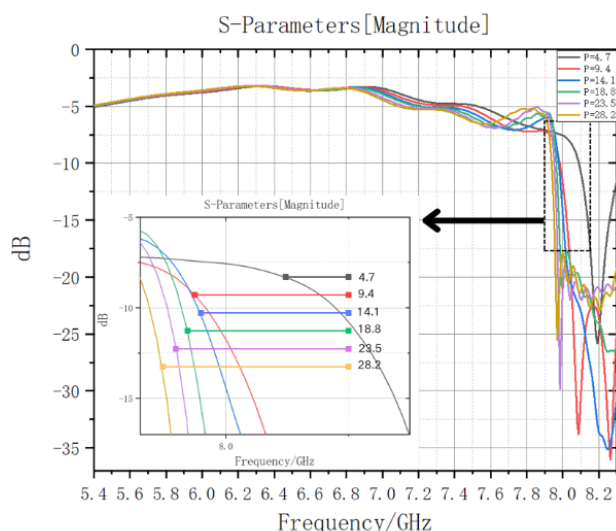


图4 不同液位下 S21 的模拟结果 (P 为液位高度)

3 结论

在当今工业与科研众多领域，微波无损法测量液位展现出非凡意义与关键作用。从工业生产角度，在化工、食品加工等流程式产业里，该技术可实时、精准监测反应储罐内液位，避免传统接触式测量带来的部件磨损、物料污染风险，保障产品质量稳定，降低设备维护成本。对于石油开采，在井下复杂且高危环境中，微波无损测量能穿透介质，远距离感知液位，为油井安全高效运行提供关键数据，预防溢油等事故；在科研范畴，如生物制药研发的微流体实验，微波测

量以其无损特性，不会干扰脆弱生物样本，助力精确调配试剂、掌控反应进程。其非侵入特质还适用于文物保护领域，监测展柜内湿度控制装置的液位，全方位守护珍贵文物免受损伤，推动多学科发展与实践进步。

论文设计了一种集成 SRR 与 SPPs 的传感器，采用微波无损检测方法，利用 S21 参数反映的结果推测液体的液位。通过在 CST 软件建模，对不同液位进行模拟检测研究，依据传感器探头反射参数随液位变化的特征响应。检测液位范围为 4.7mm 到 28.2mm，随着液位升高，阻滞开始产生的谐振频率显著向更低频率迁移，变化趋势相对单调。有效验证了该结构设计在液位检测应用中的适用性。实验数据表明，液位的变化与传感器所采集的测量数据之间存在着显著且稳定的相关性。借助深入的数据解析与精确的数学计算，能够精确地推导出液位的实际变动情况，这充分验证了该传感器在液位检测方面的可行性。该传感器可采用印刷电子技术进行制造，此技术具备以下显著优势：①实现高度集成化，有助于缩减传感器的体积并显著提升生产效率；②所用材料成本相对较低，加之高效的生产工艺流程，可进一步降低整体生产成本；③支持将电子元件直接打印于柔性基板上，使得传感器能够采用柔性化设计与制造，从而增强其适应性和可靠性。鉴于印刷电子技术的高效生产能力和低成本效益，大规模制造该传感器变得更为实际可行。此外，其小巧的体积设计，使得传感器在携带与使用方面展现出更高的便捷性。

参考文献：

- [1] 董振基,周祖力.一种新型的浓盐酸液位报警器[J].化工自动化及仪表,1990(6):73.
- [2] 周佳佳,赵嗣辉.磁浮子液位计的应用[J].山东化工,2024,53(13):205-207.
- [3] 马轩,许开城,董涛涛,等.油品储罐液位计测量设计与应用研究[J].油气田地面工程,2024,43(11):62-67.
- [4] 周晓东.一种直杆平衡罩式液位计的应用分析[J].化学工程与装备,2022(5):188-189+144.
- [5] 蔡晓阳.基于SRR/CSRR结构的平面天线研究[D].成都:电子科技大学,2017.

作者简介：陈映竹（2004-），女，本科。

通讯作者：吴婕萍（1991-），女，硕士，讲师，从事电子信息研究。

基金项目：校级大学生创新创业训练计划《基于微波无损检测技术对木材内部缺陷的定位检测》（项目编号：QM2024020）；校级大学生创新创业训练计划《基于微波技术的 SRRs 阵列多频谐振传感器的复合材料内部缺陷检测研究》（项目编号：QM2023036）；四川省大学生创新训练项目《基于人工表面等离子激元的非金属管道缺陷检测研究》（项目编号：S202411116055）。