

基于人工表面等离激元相移特征的液位传感器

侯梓越 郑雅玲 钟谭浩 李茂 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: 液位监测是保障石油化工储罐平衡、食品制药工艺稳定的核心环节, 但传统液位检测技术存在不足。本文提出基于人工表面等离激元 (spoof surface plasmon polaritons, SSPPs) 的微波无损传感器, 利用 SSPPs 对周围介质介电常数变化的高度敏感性, 通过监测液位变化引起的相位角度偏移, 实现可穿透非金属容器的液位检测。仿真验证表明该传感器在油和异丙醇检测中均可有效捕捉液位变化, 为复杂工况下的液位监测提供了可行方案。

关键词: 液位检测; 人工表面等离激元; 微波无损检测

A liquid-level sensor based on phase shift characteristic of spoof surface plasmon polaritons

Hou Ziyue, Zheng Yaling, Zhong Tanhao, Li Mao, Wu Jieping*

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

Abstract: Liquid level monitoring is the core link to ensure the balance of petrochemical storage tanks and the stability of food and pharmaceutical processes, but the traditional liquid level detection technology is insufficient. This paper proposes a microwave non-destructive sensor based on spoof surface plasmon polaritons (SSPPs). Using the high sensitivity of SSPPs to changes in the dielectric constants of the surrounding medium, the liquid level detection that can penetrate non-metallic containers can be realized by monitoring the phase angle offset caused by liquid level changes. Simulation verification shows that the sensor can effectively capture liquid level changes in oil and isopropyl alcohol detection, which provides a feasible solution for liquid level monitoring under complex working conditions.

Keywords: Liquid level measurement; Spoof surface plasmon polaritons; Microwave non-destructive testing

0 引言

在工业自动化与智能化发展的背景下, 过程参数的精确检测对保障生产安全、提升产品质量至关重要。液位作为关键参数之一, 其准确可靠的监测在多个领域具有重要意义。在石油化工行业, 储罐与反应器的液位关乎整条产线的安全运行; 食品与制药领域中, 发酵罐、配液罐的液位直接影响工艺稳定与卫生安全; 水利环保方面, 水位监测是防洪调度与达标排放的重要依据; 而在航空航天领域, 燃油与推进剂的液位实时监测更是飞行安全的关键环节。因此, 发展高精度、非接触式液位测量技术, 对推动工业进步和保障关键系统安全运行具有重大意义。

液位传感器目前主要分为接触式液位计与非接触式液位计。接触式中, 电容式液位计通过测量电容值的变化来间接感知液位高度。魏等人^[1]通过对其结构进行优化设计, 实现了对焦炉煤气柜油沟密封油位的准确测量, 表现出良好的抗腐蚀性和较快的响应速度, 但仍不可避免地面临工艺复杂以及解调难度较大的问题。磁浮子式液位计则利用液位变化引起浮标位置的改变来实现测量, 周等人^[2]的研

究表明, 该方法在高温、高压及腐蚀性环境中依旧具有优异表现, 同时具备量程大、结构简单、成本低等优势, 但在低温或高黏度介质条件下容易出现测量偏差。光纤式液位计依靠力平衡原理实现液位检测, 祁等人^[3]指出其非常适合应用于易燃、易爆等恶劣环境中, 但其整体操作流程相对复杂。在非接触式方法中, 雷达液位计通过测量液面反射回波来确定液位高度。通过对探头结构进行改进, 有效降低了冷凝水对测量结果的影响, 但仍然存在因系统性偏差而导致的测量准确性下降问题^[4,5]。超声波液位计则根据超声波往返时间估算液位, 其在化工厂液位监测中具有耐腐蚀、不受介质湿度与粘度影响等优点, 但其测量精度仍容易受到温度与压力变化的影响^[6,7]。激光液位计依靠激光脉冲法实现液位测量, 奚等人^[8]证明其具有宽量程和高精度的特点, 但也容易受到气泡干扰且设备价格较高。综上所述, 尽管上述液位检测技术在实际应用中具有各自优势, 但均存在一定的局限性, 尤其是在复杂环境条件下难以兼顾精度、稳定性与成本。因此需研发一种微波检测传感器, 以非接触、高精度、可穿透等优势来应对复杂工

况下液位检测。

本文提出一种基于人工表面等离子激元 (spoof surface plasmon polaritons, SSPPs) 的微波透射法传感器, 利用 SSPPs 对介电环境的敏感性, 实现液位的非接触高精度检测。该传感器抗干扰强、响应迅速, 平面化设计适配危险或密闭容器等复杂场景, 仿真验证其对油和异丙醇的液位检测效果良好, 为液位传感与微波检测提供了新思路。

1 相关理论

SSPPs 是一种基于人工表面等离子激元, 其原理是在金属表面设计特定的周期性结构 (如矩形槽、锯齿形结构等), 使得电磁波能够在这些结构上传播, 形成类似于天然表面等离子激元的特性。2005 年, Pendry 等人^[9] 提出了一维凹槽阵列结构, 该结构可简化为二维结构, 称为薄波纹金属结构。对于该金属结构, 色散关系为:

$$\frac{\sqrt{k_{sspps}^2 - k_0^2}}{k_0} = \frac{a}{d} \tan(k_0 h) \tag{1}$$

其中 d 是周期长度, a 是凹槽宽度, h 为槽深, t 为厚度, 结构如图 1 所示。

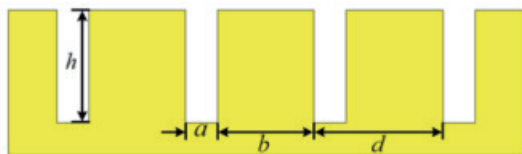


图1 基于SSPPs的一般传输线图

通过调整 SSPPs 单元的几何设计参数 (如槽深、周期尺寸以及金属线宽等), 其截止频率可实现有效调控。此外, SSPPs 结构对电磁场具有显著的局域约束能力, 尤其在工作频率接近截止点时, 这种场束缚效应最为明显。得益于此特性, 传感器能够对介电常数的微小变化产生敏锐响应, 从而在弱信号探测以及微细结构变化识别中展现出更高的测量灵敏度

本文通过对 SSPPs 的传输特性进行分析, 通过模拟不同液体在容器中的不同位置以及不同容器厚度, 对传感器的检测精度和穿透能力进行了探究。通过观测其传输过程中通带的相位变化实现液位的捕捉。实际操作过程中, 通过对比同一频率下预先测定的相位数据实现对液位的精确捕捉。

2 传感器设计与分析

本文基于表面等离子激元极化激元 (SSPPs) 原理, 设计了一款用于高灵敏度无损检测的传感器, 其整体结构

模型如图 2 所示, 其主要由两层构成: 上层为覆铜层, 铜层结构包含共面波导、过渡结构及 SSPPs 周期单元; 下层为起支撑和保护作用的柔性聚酰亚胺 (Polyimide) 介质基板, 相对介电常数为 3.5, 正切损耗为 0.0027, 厚度 h=0.07mm。馈电线与接地层均采用铜材料, 覆铜厚度 a=0.035mm。该传感器在结构上可划分为三个区域, 以确保信号的高效传输与模式转换。

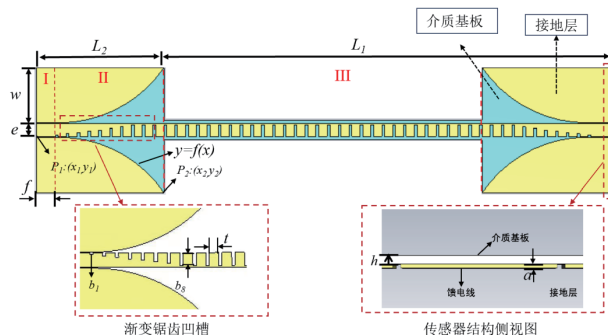


图2 传感器整体结构分布图

共面波导结构 (第 I 部分), 该段采用共面波导结构, 如图 2 左侧所示, 其对应尺寸参数为: $L_2=47\text{mm}$, $w=20\text{mm}$, $e=4.5\text{mm}$, $f=7\text{mm}$, 该部分的核心功能是实现传感器与接口之间的有效阻抗匹配, 确保微波能量能够高效地从馈源传输至传感器主体, 减少反射损耗。渐变锯齿凹槽结合接地层 (第 II 部分), 如图 2 主视图及局部放大图所示, 在馈电线的两侧, 锯齿凹槽的深度依次递增 (参数从 $b_1=0.55\text{mm}$ 渐变至 $b_8=4\text{mm}$)。这种深度的渐变相当于连续地改变 SSPPs 的传播常数, 从而实现波阻抗的缓慢变换, 极大地改善了模式转换效率。同时接地层采用特定曲线, 如公式 1:

$$y = C_1 e^{ax} + C_2 \tag{1}$$

其中 $x_1 < x < x_2$, $a=0.1$, $P_1(x_1, y_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2)$ 为曲线的起止坐标。该结构进一步增强了电磁场的束缚能力, 使能量集中沿传感器表面传播, 提升检测灵敏度。均匀带齿区域 (第 III 部分), 锯齿结构可以优化电场分布, 使信号在进入均匀传输段时更平稳, 降低传输损耗。

为验证该传感器对液位的检测能力, 建立了如图 3 所示的仿真示意图。在传感器背面紧贴一矩形, 用于模仿实际情况下的容器壁, 容器材料采用特氟龙, 相对介电常数为 2.10, 正切损耗为 0.0002。容器背后添加液体, 通过改变液体高度实现实际情况下的液位变化。

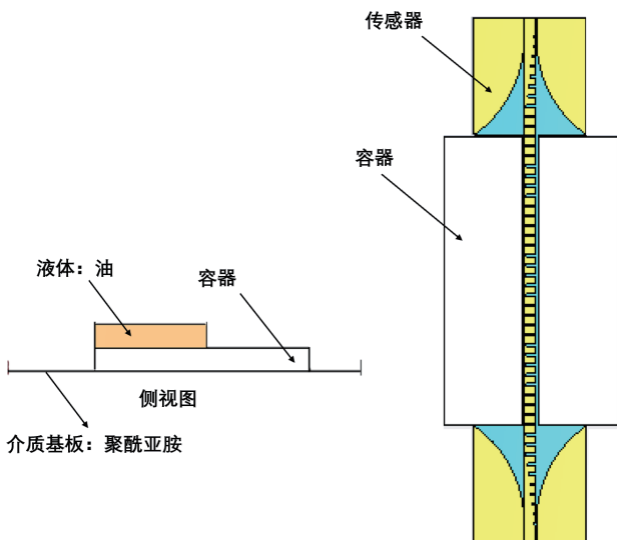


图3 传感器液位检测装置示意图

为验证该传感器对液位的捕捉能力，首先选取油（介电常数 2.5）作为待测液体，对液位变化 30mm 的进行了仿真测定，结果显示随着液位增加，与初始液位的相位相比，相位变化成现出明显的线性关系。在对仿真结果进行数据进行拟合以后，结果如图 4(a) 所示，可以看到拟合曲线斜率为 1.00737，说明油位增加 1mm，相位变化约 1.01°。同时拟合曲线 R² 接近 1，说明拟合效果良好，相位确实随液位增加呈现线性变化，验证了该传感器可以对油位变化实现精准检测。为进一步验证该传感器的适用性，将异丙醇（介电常数 17.8，正切损耗 0.0076）作为待测液体重复上述步骤，结果如图 4(b) 所示，拟合曲线 R² 也接近 1，斜率为 6.29142，这是因为异丙醇的介电常数大于油，在液位变化相同的情况下，异丙醇的等效介电常数变化更大，相位偏移更大。进一步说明了该传感器可以对不同液体的液位变化进行检测，同时可以根据相位变化率的不同判断液体介电常数的大小。

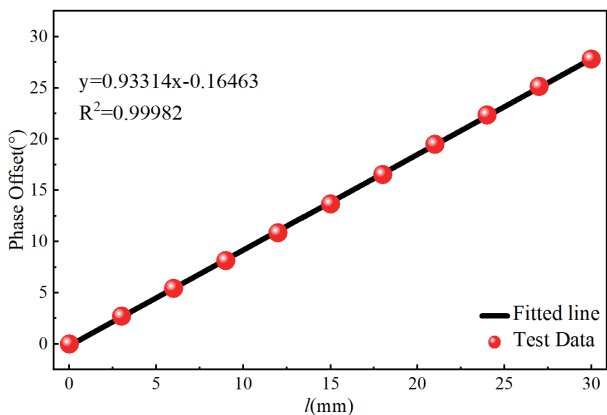


图4 (a)待测液体为油时的相移曲线图

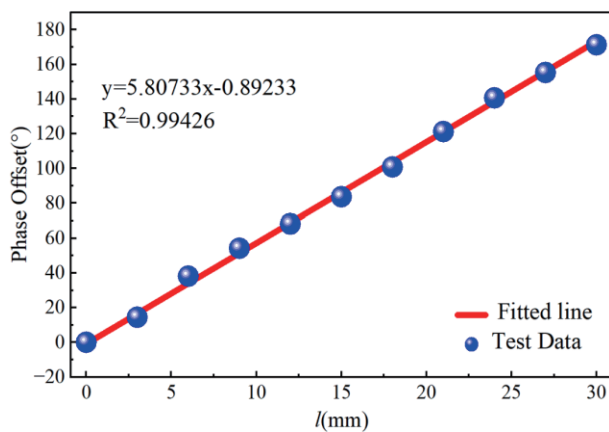


图4 (b)待测液体为异丙醇时的相移曲线图

该传感器的检测方式为微波近场检测，穿透能力有限，为此通过改变容器厚度对传感器的穿透能力进行了探究。仿真结果表 1 所示，随着容器厚度从 1mm 增加到 5mm，每毫米液位变成产生的相位偏移逐渐减小，但在厚度为 5mm 时仍有检测能力。说明了该传感器具有一定的穿透性。在液位检测中体现出了优良的检测性能，验证了本文所提传感器在液位检测中的有效性。

表1 不同容器厚度下液位变化1mm的相位角度偏移

容器厚度	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm
相位偏移 (°)	-1.1356	-0.8315	-0.6344	-0.5082	-0.4092

4 结语

本文基于人工表面等离子激元（SSPPs）传播特性，设计了一种微波透射式柔性液位传感器。通过金属表面的梯度过渡与均匀周期结构，强化电磁波场束缚效应与能量局域性，实现共面波导到 SSPPs 模式的高效转换，提升介电环境变化敏感度。仿真结果表明，在固定频率激励下，传感器对油、异丙醇等液体的相位响应明确，其输出相位随液位升高呈单调递减趋势。该传感器实现了液位非接触、高灵敏度检测，兼具响应迅速、结构平面化等优势，为微波液位测量提供了新型方案，也为 SSPPs 近场传感技术的跨领域应用奠定基础。

参考文献：

[1] 魏小雨, 张晓峰, 杨铮等. 电容式液位计在焦炉煤气柜中的应用[J]. 现代工业经济和信息化, 2025, 15 (04): 129-131.

[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] 祁耀斌, 张勇东, 童非. 光纤液位计及其在油罐监控中的应用 [J]. 国外建材科技, 2004, (02): 30-31.

[4] 李剑. 解决雷达液位计探头结冰的问题[J]. 流程工

业, 2025, (07): 72-73.

[5] 游建军, 万丽芬, 胡鹤鸣等. 雷达液位计检测方法研究[J]. 中国计量, 2025, (09): 92-94.

[6] 王靖. 超声波液位计的研发与实验[J]. 山西化工, 2023, 43 (03): 87-88.

[7] 孙德罡, 齐学鹏. 超声波液位计在化工生产应用中的常见故障分析[J]. 电子世界, 2014,(06):278.

[8] 奚宇哈, 张从鹏, 杨正富. 基于 TDC-GP22 的细长竖管内脉冲激光液位计设计 [J]. 机械工程师, 2022, (02): 16-18.

[9] Pendry J B, Mart í n-Moreno L, Garcia-Vidal F J. Mimicking Surface Plasmons with Structured Surfaces [J]. Science, 2004, 305(5685): 847 - 848.

基金项目: 成都工业学院省级大学生创新创业训练计划, “宽带贴片天线用于柔性 SSPPs 无线检测传感器设计”(202540116088)。

作者简介: 侯梓越(2004.12-), 男, 汉族, 本科在读, 研究方向: 主要从事微波无损检测和电力系统。

通讯作者: 吴婕萍(1991.09-), 女, 汉族, 硕士, 讲师, 研究方向: 主要从事微波无损检测。