

准确测量液位的反射式螺旋塑料光纤传感器

陈俊琰^{1,2}, 李林洋^{1,2}, 辛鑫^{1,2}, 彭飞^{1,2}, 余秋会^{1,2}, 钟年丙^{1,2,3*}, 赵明富^{1,2}¹重庆理工大学电气与电子工程学院光纤传感与光电检测重庆市重点实验室, 重庆 400054;²重庆理工大学电气与电子工程学院智能光纤感知技术重庆市高校工程研究中心, 重庆 400054;³重庆理工大学两江国际学院, 重庆 401135

摘要 为消除工质成分和折射率(RI)对液位测量准确性的影响,利用低包层 RI 侧发光塑料光纤、反射镜、光纤固定杆和空气密封装置构建了反射式液位光纤传感器。首先,从理论及实验角度研究了光纤包层折射率对不同工质及不同折射率的同种工质液位测量的影响。然后,为了提高传感器灵敏度,研究了光纤螺旋直径和螺距对传感器灵敏度的影响。最后,研究了液位变化速率和工质温度对传感器响应特性的影响。研究表明,当工质 RI 大于光纤包层 RI、液位变化速率为 10~100 cm/min、工质温度变化范围为 10~70 °C 时,传感器的输出与液位间具有线性关系。此外,测量结果不受工质成分、RI 及工质液位变化速率的影响,传感器灵敏度可达 0.0101 cm⁻¹,最大相对误差小于 6.85%。

关键词 光纤光学; 塑料光纤传感器; 液位; 反射式; 螺旋结构; 准确测量; 灵敏度

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0106005

Reflective Spiral Plastic Fiber-Optic Sensor for Accurate Detection of Liquid Level

Chen Junlian^{1,2}, Li Linyang^{1,2}, Xin xin^{1,2}, Peng Fei^{1,2}, Yu Qihui^{1,2},
Zhong Nianbing^{1,2,3*}, Zhao Mingfu^{1,2}¹Chongqing Key Laboratory of Optical Fiber Sensor and Photoelectric Detection,

School of Electrical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

²Chongqing Engineering Research Center of Intelligent Optical Fiber Sensing Technology,

School of Electrical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

³Liangjiang International College, Chongqing University of Technology, Chongqing 401135, China

Abstract To immune the influence of compositions and refractive indexes (RIs) of working media on the accuracy of liquid level measurement, a reflective fiber-optic liquid level sensor is prepared. The sensor is composed of a side-emitting plastic optical fiber with a low cladding RI, reflector, optical fiber support rod, and air sealing device. First, the effect of the RI of the optical fiber cladding on the liquid level measurement of different working media and the same working medium with different RIs is studied theoretically and experimentally. Then, in order to improve the sensitivity of the sensor, the effects of fiber spiral diameter and pitch on the sensitivity of the sensor are studied. Finally, the effects of liquid level change velocity and working medium temperature on the response characteristics of the sensor are studied. The results show that there is a linear relationship between the output of the sensor and the liquid level when the RI of the working medium is larger than the RI of the optical fiber cladding, the change velocity of the liquid level is 10–100 cm/min, and the temperature range of the working medium is 10–70 °C. Moreover, the measurement results are not affected by the composition, RI and liquid level change

收稿日期: 2021-06-28; 修回日期: 2021-07-18; 录用日期: 2021-08-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51876018)、重庆市高校创新研究群体项目(CXQT21035)、重庆市教委科技项目(KJQN201801117)、重庆理工大学研究生创新项目(clgycx20202041)

通信作者: *zhongnianbing@163.com

velocity of the working medium, the sensitivity of the sensor can reach 0.0101 cm^{-1} , and the maximum relative error is less than 6.85%.

Key words fiber optics; plastic fiber-optic sensor; liquid level; reflection type; spiral structure; accurate measurement; sensitivity

1 引言

液位实时在线准确监测是保障水、油、燃料及化学品储存装置及系统正常与安全运行的关键。目前关于液位实时监测的传感器主要包括电容式传感器^[1-2]、超声波式传感器^[3-4]、磁致伸缩式传感器^[5-6]和光纤式传感器^[7-14]。其中,光纤液位传感器具有抗电磁干扰、耐酸碱腐蚀、电绝缘、可连续测量、几何尺寸小和使用寿命长等优点^[15],故其成为了强电磁干扰、强腐蚀性、易燃易爆等恶劣环境下在线实时监测液位变化信息的最佳传感器之一^[16]。

当前,国内外已报道的光纤液位传感器主要有尖端反射型传感器^[9]、侧面耦合型传感器^[10]、光纤光栅型传感器^[11-12]和光泄露型传感器^[13-14]。其中,光泄露型液位光纤传感器具有结构简单、检测范围大、可实现强度解调和性价比高的优点,故其是最有潜力被应用到工程实践中的连续式光纤液位传感器^[13-14]。虽然光泄露式光纤液位传感器具有上述的诸多优势,但是在对不同工质的液位进行测量时,检测灵敏度和准确性会受到光纤包层折射率的影响。当光纤包层折射率大于工质折射率时,传感器对液位高度的测量结果远低于实际高度,此时测量误差较大^[17]。因此,同一光泄露式光纤液位传感器难以实现对不同工质液位的准确测量。此外,光泄露式光纤液位传感器往往需要将光纤包层或部分纤芯去除以提升传感器的检测灵敏度,但这会降低光纤的机械性能与使用寿命^[13]。更为重要的是,将光纤包层或部分纤芯去除会导致溶液分子直接粘附在光纤纤芯表面,甚至扩散进光纤纤芯内部,引起光纤的光传输特性发生变化,这会导致传感器测量结果重复性差、准确性低,且传感器的使用寿命也会降低^[18]。对于泄漏型塑料光纤液位传感器,其测量结果还会受到工质温度的影响^[14,18]。因此,研制一种结构简单、灵敏度高、准确性高且适用于多种工质和变温环境液位检测的光纤传感器是十分必要的。

本文构建了一种新型的反射式螺旋塑料光纤液位传感器。从理论和实验角度研究了光纤包层折射率对不同工质和同种工质液位的响应特性。从实验角度研究了光纤螺旋直径和螺距对传感器灵敏度的影响以及液位变化速度和温度对传感器测量结果的影响。

2 实验

2.1 实验材料及仪器

低包层折射率侧发光塑料光纤的数值孔径为 0.72,甲基丙烯酸甲酯纤芯折射率为 1.49,疏水型氟树脂包层折射率为 1.30,工作温度为 $-10 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$ 。红外激光器的中心波长为 648 nm,功率为 0.3 mW。光功率计的分辨率为 100 pW,检测波长范围为 200~1100 nm。光反射镜为保护银凹面反射镜,直径和焦距均为 25.4 mm。阿贝折射仪可测量的折射率范围为 1.3000~1.7000。被测工质为去离子水和不同折射率的葡萄糖溶液、NaCl 溶液以及 0# 车用柴油。

2.2 反射式螺旋塑料光纤液位传感器的制备

首先,将两段直径均为 5 mm,长度为 1 m 和 0.8 m 的侧发光塑料光纤分别作为入射光纤和接收光纤,采用粒度为 $1 \mu\text{m}$ 的光纤研磨纸将光纤的两个端面研磨至光滑。其次,将入射光纤和接收光纤分别缠绕在直径为 8 mm 和 12 mm 的光纤固定杆表面,光纤的螺距分别为 6,8,10,12 cm。然后,为了避免工质进入光纤端面与凹面反射镜间对液位测量结果造成负面影响,利用两端密封的聚甲基丙烯酸甲酯空心管将凹面反射镜和光纤封装成整体,其中聚甲基丙烯酸甲酯空心管的内径为 26 mm、长度为 30 mm。装置的上端面开有直径和间距分别为 5.5 mm 和 1.5 mm 的小孔用于固定入射/接收光纤,光纤端面与凹面反射镜的距离为 18 mm。反射镜/光纤与密封装置间采用 UV 无影胶粘附。凹面反射镜的作用是将入射光纤端部发出的光反射至接收光纤。反射式光纤传感器中封装装置示意图和光传输示意图如图 1 所示。

2.3 液位检测实验系统

反射式光纤液位检测实验系统由容器、蠕动泵、传感器、光源、光探测器和温度传感器等构成,如图 2 所示。容器的底部容积为 43.9 L、顶部容积为 4.4 L,传感器直接插在容器的顶部,液位变化速率由蠕动泵控制。利用加热纤维棒控制工质温度,温度范围为 $0 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$,控温误差为 $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在实验过程中,读取光功率计的接收光功率变化信息即可得到液位高度变化信息。

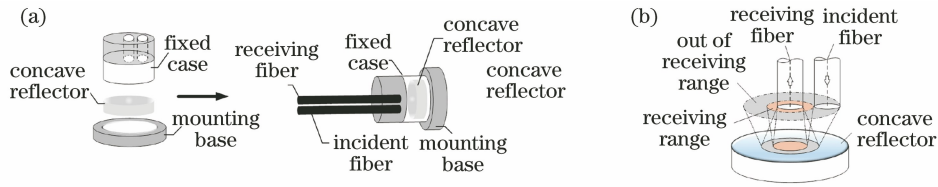


图 1 反射式光纤传感器中封装装置示意图和光传输示意图。(a)封装装置示意图;(b)光传输示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of encapsulation device and light transmission in reflective fiber-optic sensor.

(a) Schematic diagram of encapsulation device; (b) schematic diagram of light transmission

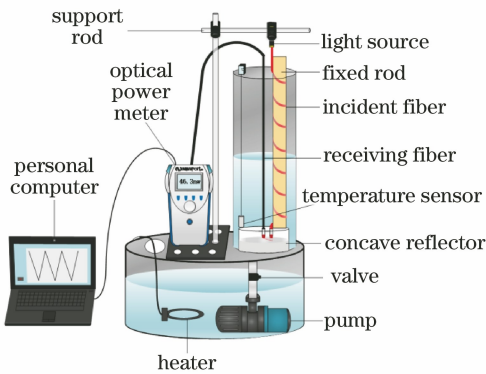


图 2 反射式光纤液位检测实验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of reflective fiber-optic liquid level detection experimental system

3 传感器理论分析

光在侧发光光纤内的光路传输示意图如图 3 所示。当光束由直行区域进入弯曲区域时,在光纤包层-外部介质界面发生的全反射的临界角为 $\angle OPQ = \arcsin(n_m/n_2)$, 其中 n_2 为光纤包层折射率, n_m 为外部介质折射率。在 $\triangle OPQ$ 中,应用正弦定理可得

$$\frac{OQ}{\sin(\angle OPQ)} = \frac{OP}{\sin(\angle OQP)} \Rightarrow \frac{R+r}{\sin(\angle OPQ)} = \frac{R+r+d}{\sin(\angle OQP)}, \quad (1)$$

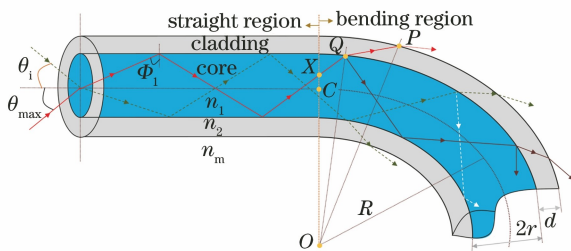


图 3 弯曲侧发光光纤中的光传输示意图

Fig. 3 Schematic diagram of light transmission in bending side-emitting optical fiber

式中: R 为曲率半径; r 为纤芯半径; d 为光纤包层厚度。由(1)式可知, $\sin(\angle OQP) = (R+r+d) \times \sin[\arcsin(n_m/n_2)] / (R+r)$ 。此外,光束在纤芯-包层界面满足 $n_1 \sin(\angle OQX) = n_2 \sin(\angle OQP)$, 可知 $\sin(\angle OQX) = n_2 (R+r+d) \sin[\arcsin(n_m/n_2)] / [n_1 (R+r)]$, 其中 n_1 为光纤纤芯折射率。设 X 点离 C 点的垂距为 x ($-r \leq x \leq r$), 在 $\triangle OQX$ 中,应用正弦定理可得

$$\frac{OX}{\sin(\angle OQX)} = \frac{OQ}{\sin(\angle OXQ)} \Rightarrow \frac{R+x}{\sin(\angle OQX)} = \frac{R+r}{\sin(\angle OXQ)}. \quad (2)$$

当 $0 < x \leq r$ 时, $\pi/2 < \angle OXQ < \pi$ 。由(2)式可知, $\angle OXQ = \pi - \arcsin\{n_2 (R+r+d) \sin[\arcsin(n_m/n_2)] / [n_1 (R+x)]\}$ 。当光从光纤端面传输到弯曲光纤的 Q 点时,入射角度满足 $\theta_i < \theta_\infty$ 的光束会在弯曲光纤纤芯-包层界面发生全反射,进而继续在纤芯内部传输,其中 θ_∞ 为光束在弯曲区域光纤纤芯-包层界面发生全反射时的最大入射角, $\theta_\infty = \arcsin\{n_1 \sin[\pi/2 - \arcsin\{n_2 (R+r) / [n_1 (R+x)]\}]\}$ 。入射角在 $0 < \theta_i \leq \theta_\infty$ 范围内的光会在光纤纤芯内传播,相应的模式即为纤芯模。入射角在 $\theta_\infty < \theta_i$ 范围内的部分光束会被耦合进光纤包层,当耦合进包层部分的光满足 $\sin \theta_{\max} \leq n_1 \sin(\pi/2 - \Phi_1)$ 时,这部分光束将继续被限制在光纤包层内部传输,相应的模式即为包层模。其中, θ_{\max} 为光束在弯曲区域光纤包层-外部介质界面发生全反射时的最大入射角,且 $\theta_{\max} \leq \theta_{NA}$, θ_{NA} 为直行光纤可接受外界入射光的最大角度, $\theta_{NA} = \arcsin[(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}]$ 。入射角在 $\theta_{\max} < \theta_i \leq \theta_{NA}$ 范围内的光则会辐射出光纤,相应的模式即为辐射模。此外,从图 3 中还可以看出, $\Phi_1 = \pi - \angle OXQ$, 且光纤曲率半径 R 与螺距 c 和螺旋半径 a 满足 $R = (c^2/4a\pi) + a$, 则 θ_{\max} 可以表示为

$$\theta_{\max} = \arcsin \left\{ n_1 \sin \left[\pi/2 - \arcsin \left(\frac{n_2 (c^2/4a\pi^2 + a + r + d) \sin[\arcsin(n_m/n_2)]}{n_1 (c^2/4a\pi^2 + a + x)} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

在螺旋传感器中,假定光纤内部光束后向传输及光纤材料本征吸收过程的总光强为定值,则传感器输出光强的衰减只受光纤表面光辐射强度的影响。若进一步假设入射光在光纤内部的分布近似为轴对称分布且各个方向的光强相等,则入射角在 $0 \leq \theta_i \leq \theta_{\text{NA}}$ 范围内的输入光束经过光纤(包括直行区和弯曲区域)传输后,输出光强由三部分组成:1) 入射角在 $0 < \theta_i \leq \theta_{\text{co}}$ 范围内的光会在光纤纤芯内传播,将这一部分光的光强定义为 $I_{\text{in},1}$, $I_{\text{in},1} = (\theta_{\text{co}}/\theta_{\text{NA}})I_{\text{in}}$,其中 I_{in} 为输入光强;2) 入射角在 $\theta_{\text{co}} < \theta_i \leq \theta_{\max}$ 范围内的光会在光纤包层内传播,将这一部分

光的光强定义为 $I_{\text{in},2}$, $I_{\text{in},2} = [(\theta_{\max} - \theta_{\text{co}})/\theta_{\text{NA}}]I_{\text{in}}$;3) 入射角在 $\theta_{\max} < \theta_i \leq \theta_{\text{NA}}$ 范围内的光则会辐射出光纤,将这部分光的光强定义为 $I_{\text{in},3}$, $I_{\text{in},3} = (1 - \theta_{\max}/\theta_{\text{NA}})I_{\text{in}}$ 。在液位测量中 $I_{\text{in},1}$ 对外界环境变化信息(包括液位高度、工质成分及折射率变化信息)不敏感, $I_{\text{in},2}$ 会在光纤包层-外部介质界面发生吸收衰减, $I_{\text{in},3}$ 则会在传感器与外部介质接触时辐射到外部介质中。因此,在光纤内部传输的光经过外部工质后,输入光强 ($I_{\text{in},1}$, $I_{\text{in},2}$, $I_{\text{in},3}$) 和输出光强 ($I_{\text{out},1}$, $I_{\text{out},2}$, $I_{\text{out},3}$) 满足

$$\begin{cases} I_{\text{out},1} = I_{\text{in},1} = (\theta_{\text{co}}/\theta_{\text{NA}})I_{\text{in}} \\ I_{\text{out},2} = I_{\text{in},2} \exp[-\alpha_m kh - \alpha_a k(H-h)] = [(\theta_{\max} - \theta_{\text{co}})/\theta_{\text{NA}}]I_{\text{in}} \exp[-\alpha_m kh - \alpha_a k(H-h)] \\ I_{\text{out},3} = I_{\text{in},3} (1-h/H) \exp[-\alpha_a k(H-h)] = (1 - \theta_{\max}/\theta_{\text{NA}})(1-h/H)I_{\text{in}} \exp[-\alpha_a k(H-h)] \end{cases} \quad (4)$$

式中: α_m 与 α_a 分别表示外部介质和空气对光的衰减系数; k 表示螺旋结构中被浸没的光纤的长度 L 与液位高度 h 的比值, $k=L/h$; H 表示传感器总高度。若进一步假设被测工质对光的衰减系数 α_m 与折射率 n_m 满足线性关系 $\alpha_m = An_m + B$, 其中 A 和 B 为常数,则 $I_{\text{out},m}$ 可以表示为

$$I_{\text{out},m} = I_{\text{out},1} + I_{\text{out},2} + I_{\text{out},3} = (1 - \theta_{\max}/\theta_{\text{NA}})(1-h/H)I_{\text{in}} \exp[-\alpha_a k(H-h)] + [(\theta_{\max} - \theta_{\text{co}})/\theta_{\text{NA}}]I_{\text{in}} \exp[-(An_m + B)kh - \alpha_a k(H-h)] + (\theta_{\text{co}}/\theta_{\text{NA}})I_{\text{in}} \quad (5)$$

当传感器被测工质为空气时,即 $n_m=1$, $h=0$ 时,输出初始光强 $I_{\text{out},a}$ 为

$$I_{\text{out},a} = (1 - \theta_{\text{co}}/\theta_{\text{NA}})I_{\text{in}} \exp(-\alpha_a kH) + (\theta_{\text{co}}/\theta_{\text{NA}})I_{\text{in}} \quad (6)$$

为了消除光源波动对传感器测量结果的影响,以相对输出光强变化量 (RCTLI , M_{RCTLI}) 来表征传感器的检测性能,其表达式为

$$M_{\text{RCTLI}} = \frac{I_{\text{out},m} - I_{\text{out},a}}{I_{\text{out},a}} \quad (7)$$

由(5)~(7)式知,当 $n_m < n_2$ 时, RCTLI 的表达式为

$$M_{\text{RCTLI},1} = \frac{(1 - \theta_{\max}/\theta_{\text{NA}})(1-h/H) \exp[-\alpha_a k(H-h)]}{(1 - \theta_{\text{co}}/\theta_{\text{NA}}) \exp(-\alpha_a kH) + \theta_{\text{co}}/\theta_{\text{NA}}} + \frac{[(\theta_{\max} - \theta_{\text{co}})/\theta_{\text{NA}}] \exp[-(An_m + B)kh - \alpha_a k(H-h)] + \theta_{\text{co}}/\theta_{\text{NA}}}{(1 - \theta_{\text{co}}/\theta_{\text{NA}}) \exp(-\alpha_a kH) + \theta_{\text{co}}/\theta_{\text{NA}}} - 1, \quad (8)$$

当 $n_m \geq n_2$ 时,光纤包层内传输的光在包层与外界环境分界面处不再满足全反射,光会全部折射进待测工质中,此时 $I_{\text{out},m}$ 可以表示为 $I_{\text{out},m} = I_{\text{out},1} + (I_{\text{in}} - I_{\text{out},1})(1-h/H) \exp[-\alpha_a k(H-h)] = (1 - \theta_{\text{co}}/\theta_{\text{NA}})I_{\text{in}} \times (1-h/H) \exp[-\alpha_a k(H-h)] + \theta_{\text{co}}/\theta_{\text{NA}}$, 则 RCTLI 的表达式为

$$M_{\text{RCTLI},2} = \frac{(1 - \theta_{\text{co}}/\theta_{\text{NA}})(1-h/H) \exp[-\alpha_a k(H-h)] + \theta_{\text{co}}/\theta_{\text{NA}}}{(1 - \theta_{\text{co}}/\theta_{\text{NA}}) \exp(-\alpha_a kH) + \theta_{\text{co}}/\theta_{\text{NA}}} - 1. \quad (9)$$

由(8)式和(9)式可知,在光纤纤芯折射率 n_1 、传感器螺旋半径 a 、螺距 c 以及光源入射角度 θ_i 确定后, RCTLI 仅与光纤包层折射率 n_2 、外部介质折射率 n_m 以及液位高度 h 有关。为了直观描述 n_2

和 n_m 对传感器测量液位的影响,根据(8)式和(9)式,采用数值仿真的方式研究了 n_2 及 n_m 对传感器测量液位的影响。数值仿真参数如表 1 所示,仿真结果如图 4 所示。

表 1 数值仿真参数

Table 1 Numerical simulation parameters

Parameter	n_1	k	A	B	α_a	c/m	H/m	a/m	r/m	d/m	x/m
Value	1.49	1.3	0.3	0.1	0.005	0.06	0.5	0.004	0.0025	0.0001	0.001

从图 4 中可以发现,随着液位高度的增加, RCTLI 在线性减小。当被测工质折射率 n_m 小于光纤包层折射率 n_2 时,传感器灵敏度随着 n_m 的增大而增大。当 n_m 增大至 n_2 时,传感器检测灵敏度达到最大,这与 (8) 式的推论一致。当 $n_m \geq n_2$ 时,传感器输出信号不受被测工质折射率 n_m 的影响,出现该现象的原因是当 $n_m > n_2$ 时,光在传感器光纤包层-外部介质界面处将不再满足全反射条件,即光纤包层被介质浸没时其内部传输的光

($I_{in,2}$ 和 $I_{in,3}$) 被全部折射进入工质。此时, $I_{out,m} = I_{out,1} + (I_{in} - I_{out,1})(1 - h/H) \exp[-\alpha_a k(H - h)] = (1 - \theta_{co}/\theta_{NA}) I_{in} (1 - h/H) \exp[-\alpha_a k(H - h)] + \theta_{co}/\theta_{NA}$, 即 $I_{out,m}$ 仅与工质的液位高度 h 有关,与工质成分和折射率无关。上述理论与仿真研究表明,当 $n_m \geq n_2$ 时,传感器测量结果不受工质成分及其折射率的影响;当 $n_m < n_2$ 时,传感器测量结果不仅受液位高度 h 的影响,还受工质成分及其折射率的影响。

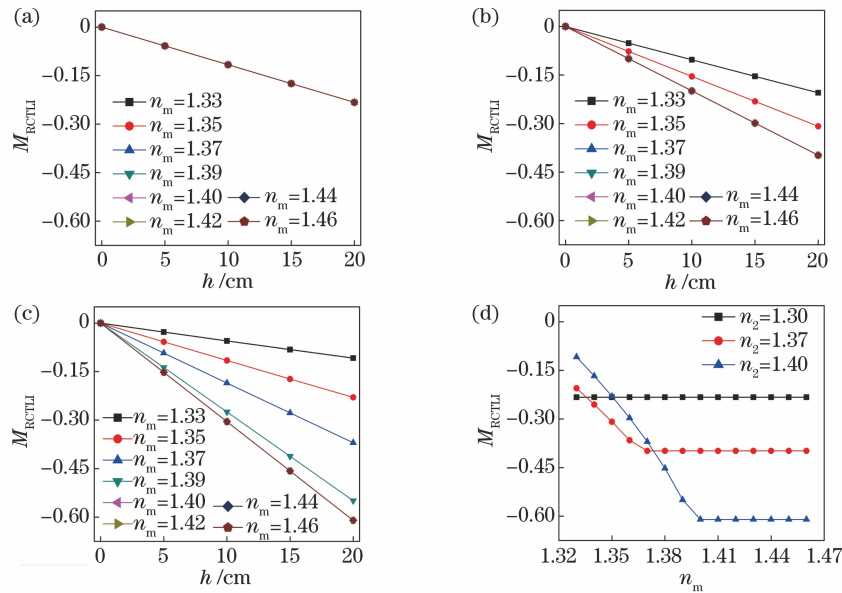


图 4 在仿真中,具有不同光纤包层折射率的传感器对不同工质的动态响应特性。(a)当 $n_2 = 1.30$ 时, h 与 M_{RCTLI} 的关系; (b)当 $n_2 = 1.37$ 时, h 与 M_{RCTLI} 的关系; (c)当 $n_2 = 1.40$ 时, h 与 M_{RCTLI} 的关系; (d) 当 $h = 20$ cm 时, n_m 与 M_{RCTLI} 的关系
Fig. 4 Dynamic response characteristics of sensors with different optical fiber cladding refractive indexes to different working media in simulation. (a) Relationship between h and M_{RCTLI} when $n_2 = 1.30$; (b) relationship between h and M_{RCTLI} when $n_2 = 1.37$; (c) relationship between h and M_{RCTLI} when $n_2 = 1.40$; (d) relationship between n_2 and M_{RCTLI} when $h = 20$ cm

4 实验结果与讨论

4.1 传感器对不同折射率待测介质的响应

为了探究光纤包层折射率对不同工质液位测量结果的影响,在温度为 20°C 、液位变化速率为 40 cm/min 时,实验研究了传感器光纤包层折射率 ($n_2 = 1.30, 1.37, 1.40$) 对折射率为 1.33 的去离子水、折射率为 $1.34 \sim 1.37$ 的葡萄糖溶液、折射率为 $1.38 \sim 1.41$ 的 NaCl 溶液、折射率为 $1.42 \sim 1.46$ 的柴油-正己烷混合溶液的响应特性,如图 5 所示。

从图 5(a)、(b)中可以看出,当工质的折射率 n_m 从 1.33 增大至 1.46 时,光纤包层折射率 n_2 为 1.30 的传感器对不同折射率的去离子水、葡萄糖溶液、NaCl 溶液以及柴油-正己烷混合溶液的响应灵敏度保持一致, RCTLI 与液位的关系可表示为 $M_{RCTLI} = -0.0126h - 0.0097$, 此时检测线性度 $R^2 = 0.9909$, 最大相对误差小于 6.85% 。然而,当 n_2 为 1.37 和 1.40 时,传感器灵敏度会随着 n_m 的升高而升高,且当 $n_m = n_2$ 时灵敏度最高,该实验结果与图 4 所示的理论分析结果一致。从图 5 中可以

看出, n_2 越大, n_m 对传感器输出结果的影响越大, 测量结果越不准确。当 $n_2 = 1.40$, n_m 在 1.33~1.46 范围内变化, 液位高度为 20 cm 时, 最大测量误差达到 28.5%。

图 5 表明当 $n_2 < n_m$ 时, 传感器输出结果不受

工质成分及工质折射率的影响。因此, 在后续分析中, 选定光纤包层折射率为 1.30, 工质为去离子水, 以进一步对光纤螺旋直径和螺距对传感器灵敏度的影响、液位变化速率对传感器响应特性的影响、工质温度对传感器测量结果的影响进行研究。

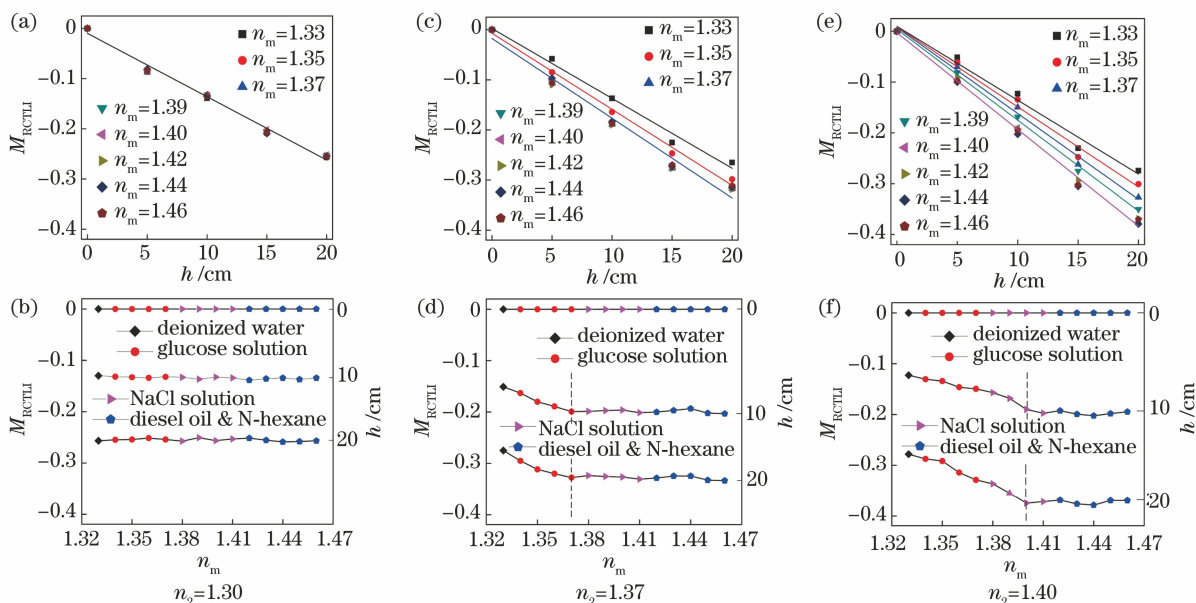


图 5 在实验中, 具有不同光纤包层折射率的传感器对不同工质的动态响应特性。(a)~(c) h 与 M_{RCTL} 的关系; (d)~(f) n_m 与 M_{RCTL} 的关系

Fig. 5 Dynamic response characteristics of sensors with different optical fiber cladding refractive indexes to different working media in experiment. (a)–(c) Relationship between h and M_{RCTL} ; (d)–(f) relationship between n_m and M_{RCTL}

4.2 不同螺旋直径和螺距对传感器性能的影响

为获得高灵敏度光纤液位传感器, 实验研究了光纤螺旋直径和螺距对液位响应灵敏度的影响, 如图 6 所示。此时, 工质温度、液位上升速率和液位下降速率分别为 20 °C、50 cm/min 和 25 cm/min。可以看出, 在同一螺旋直径条件下, 传感器灵敏度随着螺距的减小而提高。在同一螺距条件下, 传感器灵敏度随着螺旋直径的减小而提高。虽然传感器灵敏

度会随着光纤螺距和螺旋直径的减少而提高, 但是随着螺距和螺旋直径的减小, 光纤输出光强将迅速降低至 nW 级。输出光强的降低会提高后续光探测器对弱光响应的要求并增强环境光对测量结果的干扰, 造成传感器信噪比的降低, 进而导致线性度和重复性降低^[19]。此外, 当传感器的螺旋直径为 8 mm、螺距为 6 cm、液位在 0~50 cm 变化时, 传感器输出光强变化量与初始光强的比值达到 50.39%、灵敏度达

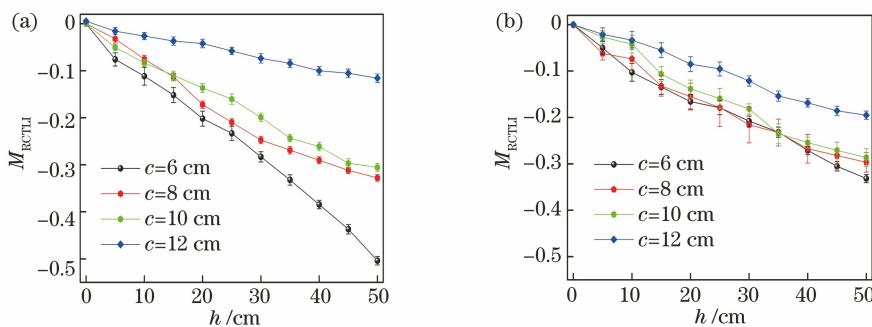


图 6 不同螺旋直径下, 螺距对传感器性能的影响。(a)螺旋直径为 8 mm; (b)螺旋直径为 12 mm

Fig. 6 Effect of pitch on sensor performance under different screw diameters. (a) screw diameter is 8 mm; (b) screw diameter is 12 mm

到 0.0101 cm^{-1} 。因此,综合考虑传感器灵敏度、稳定性、重复性及经济性,本文选用螺旋直径为 8 mm、螺距为 6 cm 的光纤传感器进行后续的实验研究。

4.3 传感器对液位的动态响应特性

从图 7(a)中可以看出,当液位上升和下降速率

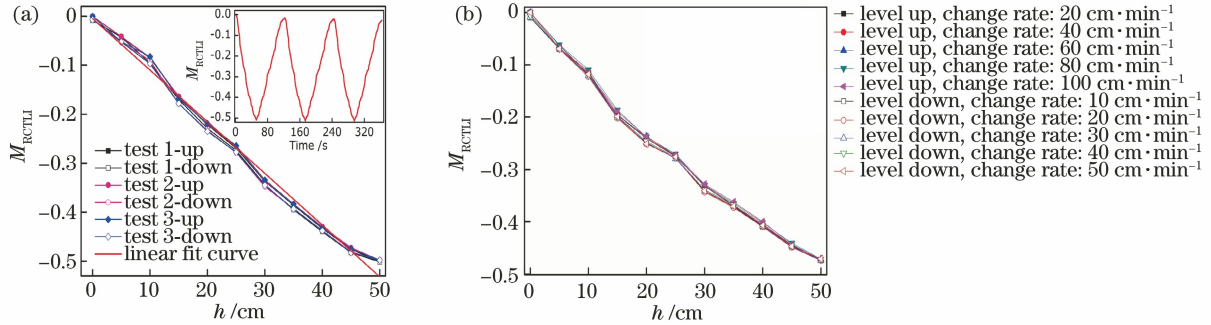


图 7 传感器对液位的动态响应特性。(a)液位上升及下降情况下传感器的响应特性;(b)传感器动态响应稳定性

Fig. 7 Dynamic response characteristics of sensor to liquid level. (a) Response characteristics of sensor in case of liquid level rising and falling; (b) dynamic response stability of sensor

从图 7(b)中可以看出,在不同液位变化速率(10~100 cm/min)下,传感器对液位响应具有高重复性和线性度,出现该现象的原因是传感器光纤具有完整的包层结构,同时氟树脂光纤包层具有高疏水性,在液位上升和下降过程中不会有残余的液滴黏附在光纤表面造成虚假液位^[20]。

上述实验研究表明,在恒定温度和液位变化速率下,本文构建的传感器可实现对不同工质、同一工质不同折射率的液位进行准确地测量。

4.4 温度对传感器性能的影响

为了分析液相温度对传感器测量结果的影响,在液位上升与下降速率分别为 50 cm/min 与 25 cm/min 的条件下,实验研究了工质温度对传感器响应特性的影响。从图 8(a)中可以看出,当被测液体温度在 10~70 °C 范围内变化时,传感器对液位的响应灵敏度先升高后降低,且传感器对液位的响应特性在 10~70 °C 温度变化范围内发生了较大变化,最大测量误差可达到 25%(工质温度为 70 °C),故传感器难以实现对液位的准确测量。传感器灵敏度随温度变化的原因是塑料光纤的光传输性能会受到温度变化的影响。文献[21-22]中的研究表明,塑料光纤光传输性能随着温度的升高先提高后降低。光传输性能提高是纤芯中聚合物残留单体(乙烯基芳香族和烯键式不饱和单体)的热分解速度随温度升高而提高,进而引起瑞利散射损耗减小造成的。光传输性能降低是随着温度的持续升高,光纤内部形成的不均匀结晶和共轭碳基含量增加造成

分别为 50 cm/min 和 25 cm/min,温度为 20 °C 时,传感器呈现出较好的重复性,检测线性度达到 $R^2 = 0.9905$ 。液位下降与液位上升间的最大相对测量误差为 4.48%,表明该传感器可在恒定液位变化速率下实现对液位的动态准确测量。

的^[22-23]。塑料光纤光传输性能会随温度的升高先提高后降低会导致光纤包层与工质界面透射的光能先增加后减少(光纤表面光与工质作用的强度先增加后减少),进而造成传感器灵敏度先提高后降低。此外,工质折射率 n_m 随着温度的升高在不断减小,由(9)式可知,此时传感器灵敏度也在不断降低。综上所述,当采用塑料光纤对工质液位进行测量时,由于塑料光纤的本征光传输性能及工质的折射率会受到温度的影响,故为了实现其对工质液位的准确测量,必须对其进行温度补偿。

从图 8(a)中还可以看出,在 10~30 °C 和 30~70 °C 温度范围内,传感器灵敏度与被测工质温度具有线性关系,相应表达式分别为 $S_1 = 0.0005T + 1.1265$,此时 $R^2 = 0.9453$; $S_2 = -0.0046T + 1.2907$,此时 $R^2 = 0.9876$ 。其中, S_1 和 S_2 表示灵敏度, T 表示温度。因此,当被测液体的温度在 15~30 °C 和 30~70 °C 范围内变化时,可采用 S_1 和 S_2 分别对传感器输出结果进行温度补偿。当液相温度在 30~70 °C 范围内时,采用 S_2 对传感器的输出结果进行温度补偿后,不同温度下传感器对液位的响应特性如图 8(b)所示。

从图 8(b)中可以看出,在 30~70 °C 温度范围内,传感器在 15~50 cm 液位高度范围内的测量结果具有较好的重复性,最大相对误差为 6.04%,满足了液位测量的实际需求。传感器的相对输出光强变化量与液位间具有线性关系,即 $M_{RCTLI} = -0.0112h - 0.0617$,此时 $R^2 = 0.9618$ 。

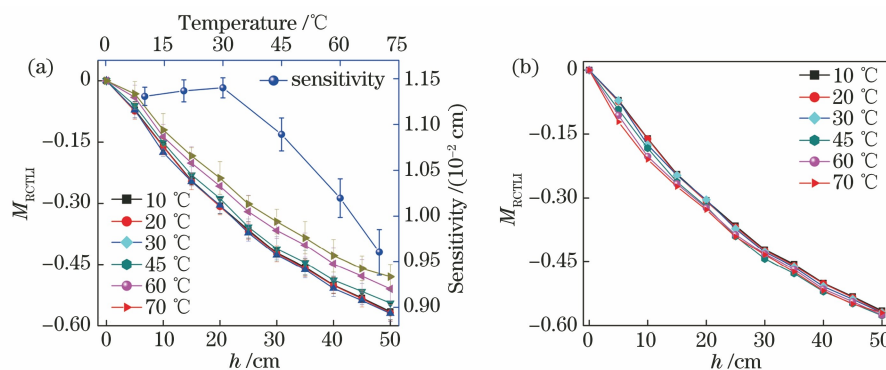


图 8 温度补偿前后的传感器动态响应特性。(a)温度补偿前;(b)温度补偿后

Fig. 8 Dynamic response characteristics of sensor before and after temperature compensation.

(a) Before temperature compensation; (b) after temperature compensation

5 结 论

构建了一种新型反射式螺旋侧发光塑料光纤液位传感器。研究表明,当被测工质折射率大于光纤包层折射率(1.30)时,传感器对液位的测量结果不受工质成分及工质折射率的影响。传感器的灵敏度随着光纤螺旋直径及螺距的减小在提高,而此时传感器的输出光强在减小。由于过低的光强难以检测且易受外界环境光的干扰,因此选取螺旋直径为 8 mm、螺距为 6 cm 的光纤传感器用于液位测量。当液位变化速率在 10~100 cm/min 范围内时,传感器测量结果不受液位变化速率的影响。在 10~70 °C 温度范围内,采用 $S_2 = -0.0046T + 1.2907$, $R^2 = 0.9876$ 对传感器测量结果进行温度补偿,此时可实现传感器对液位的准确测量,其输出结果与液位间具有较好的线性关系和重复性,测量结果的最大相对误差为 6.04%,满足了实际的工程测量要求。该研究成果不仅有助于推动光纤液位传感器技术的发展及工程化应用,还有助于推动塑料光纤产业及智能光纤感知技术的发展。

参 考 文 献

- [1] Hanni J R, Venkata S K. A novel helical electrode type capacitance level sensor for liquid level measurement[J]. Sensors and Actuators A, 2020, 315: 112283.
- [2] Bera S C, Mandal H, Saha S, et al. Study of a modified capacitance-type level transducer for any type of liquid [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63 (3): 641-649.
- [3] Sakharov V E, Kuznetsov S A, Zaitsev B D, et al. Liquid level sensor using ultrasonic Lamb waves[J]. Ultrasonics, 2003, 41(4): 319-322.
- [4] Terzic J, Nagarajah C R, Alamgir M. Fluid level measurement in dynamic environments using a single ultrasonic sensor and Support Vector Machine (SVM)[J]. Sensors and Actuators A, 2010, 161(1/2): 278-287.
- [5] Yan R J, Li H X, Li L Q, et al. The design of magnetostrictive liquid level sensor based on DSP[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2008, 39(3): 289-291.
闫瑞杰, 李海香, 李利权, 等. 基于 DSP 的磁致伸缩液位传感器的设计[J]. 太原理工大学学报, 2008, 39(3): 289-291.
- [6] Yang X H, Huang J, Lu X C, et al. Design of intelligent magnetostrictive liquid level gauge [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35 (3): 118-120, 123.
杨星红, 黄皎, 陆晓春, 等. 智能磁致伸缩液位测量仪设计[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(3): 118-120, 123.
- [7] Shao M, Han L, Zhao X, et al. Liquid level sensor based on in-fiber Michelson interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328021.
邵敏, 韩亮, 兆雪, 等. 基于在线型光纤迈克耳孙干涉仪的液位传感器[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328021.
- [8] Bai L, Zheng G, Zhang X X, et al. Optical fiber frequency-modulation continuous-wave laser interference liquid level sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 0714009.
白浪, 郑刚, 张雄星, 等. 一种光纤调频连续波激光干涉液位传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0714009.
- [9] Ge J F, Cheng X, Gui K, et al. Oblique end face coupling optical fiber sensor for point fuel level measurement[J]. Sensors and Actuators A, 2019, 297: 111505.

- [10] Zhang Y Z, Hou Y L, Zhang Y J, et al. Enhancement of a continuous liquid level sensor based on a macro-bend polymer optical fiber coupler [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(1): 6800806.
- [11] Wang Y, Yan G F, Lian Z G, et al. Liquid-level sensing based on a hollow core Bragg fiber[J]. Optics Express, 2018, 26(17): 21656-21663.
- [12] Zhao J T, Tong Z R, Yang X F, et al. Experimental research of liquid-level sensor using LPPG [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2010, 21(12): 1777-1779.
赵金婷, 童峥嵘, 杨秀峰, 等. 基于长周期光纤光栅液位传感器的实验研究[J]. 光电子 • 激光, 2010, 21(12): 1777-1779.
- [13] Rajamani A S, M D, Sai V V R. Plastic fiber optic sensor for continuous liquid level monitoring [J]. Sensors and Actuators A, 2019, 296: 192-199.
- [14] Xue P, Bao H Y, Wu B C, et al. Fabrication of a screw-shaped plastic optical fiber for liquid level measurement[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 57: 102237.
- [15] Xin X, Wu Y W, Liu H M, et al. A new fabrication method of fiber Bragg grating hydrogen sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(4): 0406002.
辛鑫, 吴永武, 刘慧敏, 等. 一种新的光纤 Bragg 光栅氢气传感器制作方法 [J]. 光学学报, 2021, 41(4): 0406002.
- [16] Hao J Q, Han B C. Ultrasensitive refractive index sensor based on optical fiber couplers assisted with vernier effect[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(2): 0206002.
郝晋青, 韩丙辰. 基于游标效应的高灵敏度光纤耦合器折射率传感器 [J]. 光学学报, 2020, 40(2): 0206002.
- [17] Zhao C R, Ye L, Ge J F, et al. Novel light-leaking optical fiber liquid-level sensor for aircraft fuel gauging [J]. Optical Engineering, 2013, 52(1): 014402.
- [18] Zhong N B, Li C N, Liu Y, et al. Effects of ageing treatment on light transmission and sensitivity of plastic optical fiber sensors[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(5): 971-978.
钟年丙, 李超楠, 刘洋, 等. 老化处理对塑料光纤传感器光传输及灵敏度的影响 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(5): 971-978.
- [19] Zhao C R. Research on fiber-optic aircraft fuel level measurement based on light leakage in optical fiber [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
赵呈锐. 基于光泄漏原理的光纤式飞机燃油液位测量方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [20] Zhang H X, Hou Y L, Feng L S, et al. Polymer optical fiber continuous liquid level sensor for dynamic measurement [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(9): 5238-5242.
- [21] Zhong N B, Zhao M F, Liao Q, et al. Effect of heat treatments on the performance of polymer optical fiber sensor [J]. Optics Express, 2016, 24(12): 13394-13409.
- [22] Chu C S, Lo Y L. A plastic optical fiber sensor for the dual sensing of temperature and oxygen[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 20(1): 63-65.
- [23] Zhong N, Liao Q, Zhu X, et al. Temperature-independent polymer optical fiber evanescent wave sensor[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 11508.