光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021042601

布里渊温度和压力传感器增敏设计

李永倩[1,2,3]，王少康[1,2,3*]，华子明[1]，温芳芳[1]，范海军[1]

（华北电力大学 1. 电子与通信工程系；2. 河北省电力物联网技术重点实验室；
3. 保定市光纤传感与光通信技术重点实验室，河北 保定 071003）

摘　要： 设计了一种基于分布式传感技术的薄壁圆筒型液体温度和压力传感器。选取具有耐腐蚀、弹性性能好以及热膨胀系数大的不锈钢316L和铍青铜C17200分别对传感器进行封装。利用有限元仿真软件ANSYS Workbench对封装的传感器压力和温度特性进行仿真分析，得到器件的径向应变量，分析其布里渊频移随压力和温度的变化关系。仿真实验表明，使用铍青铜C17200封装的传感器压力灵敏度和温度灵敏度更高，在0～12 MPa、－5～40 ℃范围内压力灵敏度达11.1 MHz/MPa，温度灵敏度达2.56 MHz/℃，相较于普通单模光纤分别提升7.4倍和1.7倍。

关键词： 布里渊传感器；布里渊光时域分析；温度和压力测量

中图分类号： TP212　**文章编号：** 1001－5868(2021)05－0624－06

Sensitization Design of Brillouin Temperature and Pressure Sensor

LI Yongqian[1,2,3], WANG Shaokang[1,2,3], HUA Ziming[1], WEN Fangfang[1], FAN Haijun[1]

(1. Dept. of Electronic and Communication Engineering; 2. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology;
3. Baoding Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Optical Communication Technology,
North China Electric Power University, Baoding 071003, CHN)

Abstract: A thin-walled cylindrical liquid temperature and pressure sensor based on distributed sensing technology was designed. The sensors are packaged with stainless steel 316L and beryllium bronze C17200, which have corrosion resistance, good elasticity, and a large thermal expansion coefficient. The finite element simulation software ANSYS Workbench was used to simulate and analyze the pressure and temperature characteristics of the packaged sensor, and the radial strain of the device was obtained, and the relationship between the Brillouin frequency shift and the pressure and temperature was analyzed. The simulation experiment shows that the pressure sensitivity and temperature sensitivity of the sensor using the beryllium bronze C17200 package is higher. The pressure sensitivity can reach 11.1 MHz/MPa and the temperature sensitivity can reach 2.56 MHz/℃ in the range of 0～12 MPa and －5～40 ℃. Compared with ordinary single-mode fiber, it is increased by 7.4 times and 1.7 times respectively.

Key words: Brillouin sensor; BOTDA technology; temperature and pressure measurement

收稿日期：2021－04－26.

基金项目：国家自然科学基金项目(61775057)；河北省自然科学基金项目(F2019502112)；中央高校基本科研业务费专项基金项目(2019MS086).

* **通信作者：**王少康

0　引言

在工业应用中需要在复杂液体环境中测量温度和压力等参量[1]。传统的电学传感器不适合在这种恶劣的环境下工作，要在复杂流体中安放传感器，就要求传感器具有较强的环境适应能力，而基于光纤的传感器具有电绝缘性能高、化学稳定性好、抗电磁干扰能力强等特点，因此成为恶劣环境应用的首选方案[2-3]。光纤对液体压力的测量由压力作用下的光纤应变实现，若想得到液体压力的精确值就必须防止环境中的移动固体带动传感光纤产生非必要应变，因此，就需要对光纤进行封装保护[4]。

基于光纤传感器的不同工作原理，将马赫-曾德尔干涉仪（Mach-Zehnder Interferometer，MZI）[5]、长周期光栅（Long Period Grating，LPG）[6]和光纤布拉格光栅（Fiber Brig Grating，FBG）[7]用于液体压力的测量。相较于这三种传感器，基于布里渊散射的传感器可以实现长距离分布式测量。自 1989 年，Horiguchi 等提出非破坏性光纤损耗测量的布里渊光时域分析（Brillouin Optical Time Domain Analysis，BOTDA）应变传感技术后，基于受激布里渊散射（Stimulated Brillouin Scattering，SBS）增益谱测量的 BOTDA 技术迅速发展成一种用于温度和应变测量的光纤传感技术[8]。2011 年，Cui 等提出基于光纤瑞利散射的单端 BOTDA 系统，实现单端、单光源、非破坏性测量[9]。2020 年，Schenato 等对容纳光纤的电缆进行了工业设计，提出了一种使用标准单模光纤，压力分辨率为 5 Pa、精度为 10 hPa、空间分辨率为 8.5 cm 的分布式压力传感电缆[10]。2021 年，董永康等提出了一种基于 BOTDA 技术的双涂层光纤的高灵敏度传感器。得到 BFS 的压力灵敏度为 3.61 MHz/MPa，在 1.5 m 的空间分辨率下，最大测量误差小于 0.09 MPa[11]。

近年来对布里渊散射传感器的研究主要集中在光纤的涂覆层对温度和压力灵敏度的影响。本文将传感光纤缠绕在用耐腐蚀金属材料制成的薄壁圆筒上，液体通过进水孔进入传感器内筒挤压筒壁使筒壁发生变形，从而拉伸缠绕在传感器内筒的光纤实现压力传感。通过仿真实验测得，此传感器的压力灵敏度为 11.1 MHz/MPa，温度灵敏度为 2.56 MHz/℃。该传感器具有低成本、耐腐蚀、可重复性好以及寿命长等特点，在压力和温度测量方面具有应用价值。

1　传感原理

1.1　光纤中的布里渊散射

在 BOTDA 系统中，从光纤的两端分别输入泵浦脉冲光和连续探测光。当泵浦光和探测光的频率差与光纤中某一区域的布里渊频移相等时，在这一区域就会发生布里渊放大效应，泵浦脉冲光和连续探测光之间产生能量转移[12]。

布里渊频移（Brillouin Frequency Shift，BFS）为[13]

$$\nu_B = 2nV_A/\lambda_p \tag{1}$$

其中，ν_B 为布里渊频移，λ_p 为泵浦波长，n 为光纤纤芯折射率，V_A 为光纤中的声速。

当 $V_A = 5\ 960$ m/s，$n = 1.45$，泵浦光波长为 1 550 nm 时，$\nu_B \approx 11.1$ GHz。

1.2　布里渊频移与温度和应变的关系

布里渊频移与光纤中的声速有关，光纤中的声速受光纤热光效应和弹光效应的影响，光纤的温度或应变发生改变，都会引起布里渊频移的变化，因此通过检测布里渊频移值就可以得到当前光纤所处环境的温度和应变的信息。布里渊频移与温度/应变的关系可以表示为[14]

$$\nu_B(T,\varepsilon) = \nu_{B0} + C_{\nu T}\Delta T + C_{\nu\varepsilon}\Delta\varepsilon \tag{2}$$

式中，$\Delta T = T - T_0$，$\Delta\varepsilon = \varepsilon - \varepsilon_0$，$T_0$ 为初始温度，ε_0 为初始应变，$C_{\nu T}$ 为布里渊频移的温度系数，$C_{\nu\varepsilon}$ 为布里渊频移的应变系数。

由式(2)可知，在对其中一个参量进行解算时必定会受到另一个参量的影响，所以在布里渊频移测量时存在温度和应变的交叉敏感问题。

1.2.1　布里渊频移与温度的关系

光纤所处的环境温度变化会造成光纤的密度、折射率、杨氏模量以及泊松比等参数改变，进而引起布里渊频移的变化，因此通过检测布里渊频移的改变就可以得到光纤所处的环境温度[15]。

声速 V_A 的表达式为

$$V_A = \sqrt{\frac{(1-\mu_r)E}{(1+\mu_r)(1-2\mu_r)\rho}} \tag{3}$$

式中，E 为光纤的杨氏模量，μ_r 为光纤的泊松比，ρ 为材料密度。

由于在测量过程中存在温度和应变的交叉敏感问题，为了准确得到布里渊频移与温度的关系，假设应变 $\varepsilon = 0$，由式(1)，(3)得到布里渊频移和温度的关系：

$$\nu_B(T,0)=\frac{2n(T,0)}{\lambda_p}\times\sqrt{\frac{[1-\mu_r(T,0)]\cdot E(T,0)}{[1+\mu_r(T,0)][1-2\mu_r(T,0)]\cdot\rho(T,0)}} \tag{4}$$

根据对 n,E,μ_r,ρ 参数的理论和实验分析，得到这些参数与温度变化的关系：

$$\begin{cases} n(\Delta T,0)=n_0+2.12\times10^{-5}\Delta T \\ E(\Delta T,0)=E_0+1.35\times10^{7}\Delta T \\ \mu_r(\Delta T_0,0)=\mu_{r0}+4.515\times10^{-5}\Delta T \\ \rho(\Delta T_0,0)=\rho_0-4.04\times10^{-3}\Delta T \end{cases} \tag{5}$$

其中，n_0,E_0,μ_{r0},ρ_0 分别表示环境温度为 0 ℃，应变为 0 ε 时光纤的折射率、杨氏模量、泊松比和材料密度，如表 1。

表 1 光纤参量初始值

参量	n_0	$E_0/(\mathrm{N/m^2})$	μ_{r0}	$\rho_0/(\mathrm{kg/m^3})$	λ_p/nm
值	1.46	7.25×10^{10}	0.17	2 200	1 550

根据式(5)和表 1 中的参数，可以得到如图 1 所示布里渊频移与温度变化的关系曲线，通过线性拟合可以得到布里渊频移的温度系数为 1.5 MHz/℃。

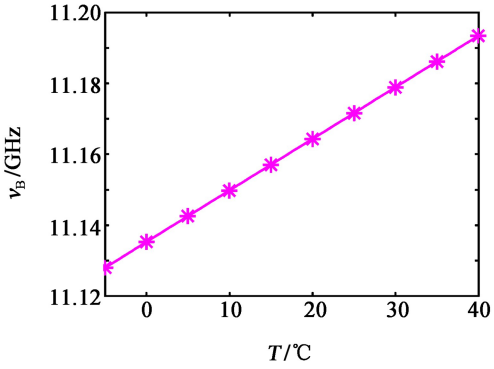


图 1 布里渊频移与温度变化的关系曲线

当传感光纤被粘贴在封装结构上时，温度发生变化，基底材料的应变会传递到传感光纤上，使其布里渊频移发生变化。这里布里渊频移不仅与传感光纤本身的热膨胀和热光效应有关，还与基底材料的应变有关。

设基底材料的热膨胀系数为 α_g，光纤材料的热膨胀系数为 α。传感光纤粘贴到基底材料，温度变化 ΔT 时传感光纤产生的应变为[16]

$$\varepsilon_T=(\alpha_g-\alpha)\Delta T \tag{6}$$

当传感光纤被粘贴在基底材料上时，布里渊频移为

$$\nu_B(T,\varepsilon_T)=\nu_{B0}+C_{\nu T}\Delta T+C_{\nu\varepsilon}(\alpha_g-\alpha)\Delta T \tag{7}$$

由式(7)可知，布里渊频移与基底材料膨胀系数有关。对布里渊传感器的温度增敏可以选用热膨胀系数较大的材料。由此可见，使用金属材料对传感器进行封装不仅可以对传感光纤进行保护，而且可以提高传感器的温度灵敏度，所以本研究使用薄壁圆筒结构对传感器进行封装。

1.2.2 布里渊频移与应变的关系

当光纤上的应变发生变化时，光纤的密度、折射率、杨氏模量以及泊松比等参数也会发生改变，进而引起布里渊频移的改变，因此通过检测布里渊频移的改变就可以得到光纤上的应变[15]。

为了准确分析布里渊频移与光纤上应变的关系，假设 $T=0$ ℃，根据公式(1)，(3)可以得到布里渊频移与应变的表达式：

$$\nu_B(0,\varepsilon)=\frac{2n(0,\varepsilon)}{\lambda_p}\times\sqrt{\frac{[1-\mu_r(0,\varepsilon)]\cdot E(0,\varepsilon)}{[1+\mu_r(0,\varepsilon)][1-2\mu_r(0,\varepsilon)]\cdot\rho(0,\varepsilon)}} \tag{8}$$

根据对 n,E,μ_r,ρ 参数的理论和实验分析，得到这些参数和应变变化的关系：

$$\begin{cases} n(0,\Delta\varepsilon)=n_0+0.317\Delta\varepsilon \\ E(0,\Delta\varepsilon)=E_0+5.75\times10^{11}\Delta\varepsilon \\ \mu_r(0,\Delta\varepsilon)=\mu_{r0}+3.07\Delta\varepsilon \\ \rho(0,\Delta\varepsilon)=\rho_0-1.38\times10^{-3}\Delta\varepsilon \end{cases} \tag{9}$$

根据式(9)和表 1 中的参数，可以得到如图 2 所示布里渊频移与应变变化关系的曲线，通过线性拟合可以得到布里渊频移的应变系数为 0.065 MHz/με。

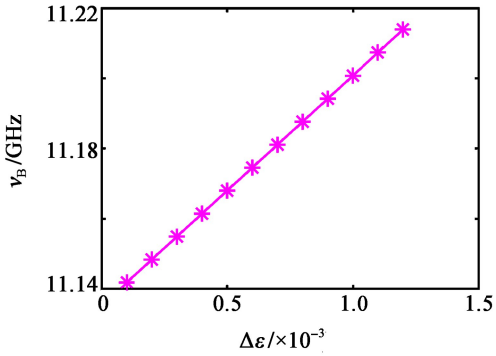


图 2 布里渊频移与应变变化量的关系

液体压力不同，转化为光纤应变就会不同，通过测量光纤应变可以得到当前液体压力值。对于本文所使用的薄壁圆筒结构，液体通过进水孔进入传感器内筒腔，形成压力差，使内筒发生形变，导致光纤的应变发生变化。由广义胡克定律推导，光纤的应变可以表示为[17]

$$\varepsilon=\frac{r}{2Ed}(2-\mu)p \tag{10}$$

式中，E 为材料的杨氏模量，μ 为泊松比，r 为内筒半径，d 为内筒的壁厚，p 为液体压力。

此时，设光纤的温度不发生变化，即 $\Delta T=0$，将式(10)代入式(2)得：

$$\nu_B(T,\varepsilon)=\nu_{B0}+C_{\nu\varepsilon}\frac{r}{2Ed}(2-\mu)p \tag{11}$$

该式得出布里渊频移与液体压力的关系，传感器半径越大、内筒厚度越小，传感器的压力灵敏度越大。

2　仿真实验

为了将液体的压力和温度有效地转化为光纤应变和温度，本文提出了一种薄壁圆筒型传感器，如图 3 所示，传感器由外壁和内筒两部分构成，外壁和内筒之间的密封腔内填充导热硅脂，内筒两端分别有进水孔，液体通过进水孔进入内筒腔使其发生形变，从而使缠绕在内筒壁外的光纤产生应变，进而将海水的压力转化为光纤的应变。同时，海水的温度也通过导热硅脂与内筒壁传递给光纤，实现压力和温度传感。本文以内筒的厚度、半径、材料以及环境温度为变量，在 ANSYS Workbench 仿真软件中使用静态力学分析模块对传感器结构进行仿真分析，研究上述变量对传感器应变和温度灵敏度的影响，从而确定传感器结构的各个参数。

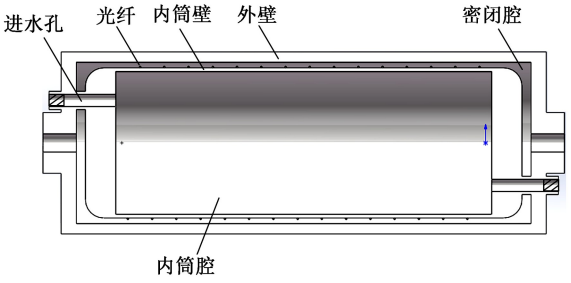
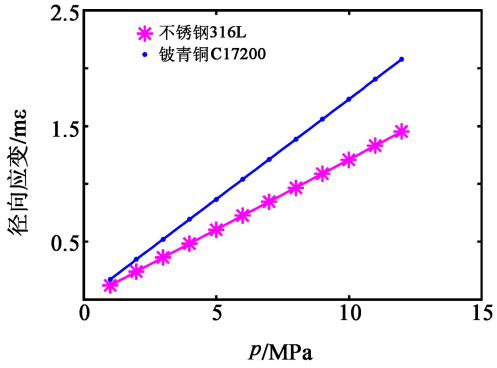


图 3　传感器结构剖面图

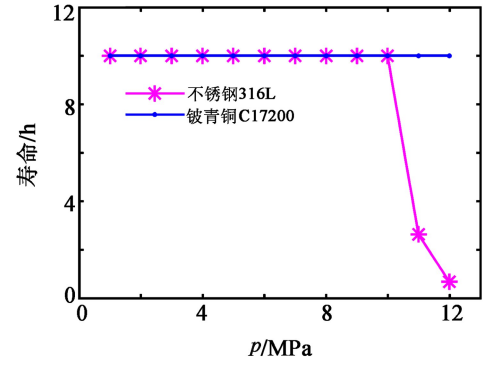
2.1　传感器内筒材料的选择

考虑到所设计的传感器的应用场景是液体环境，初步选取耐腐蚀性能良好的不锈钢 316L 以及铍青铜 C17200，二者的杨氏模量和泊松比分别为 195，134 GPa 和 0.265，0.275。对传感器内筒的厚度、使用寿命以及径向应变灵敏度进行仿真，对仿真数据进行线性拟合，得到图 4(a)所示压力与径向应变关系曲线和图 4(b)所示压力与寿命关系曲线。

从图 4(a)中可以看出，在相同厚度下，随着压力的不断增大，径向应变不断增大并呈现出线性趋势，且内筒材料为铍青铜 C17200 的径向应变灵敏度更高。从(b)中可以看出，在最小厚度(0.5 mm)、10 MPa 压力载荷(等效于水下 1 000 m)下，内筒材料为不锈钢 316L 的寿命开始有明显的下降。



(a)　压力与径向应变关系曲线



(b)　压力与寿命关系曲线

图 4　不同内筒材料(壁厚为 0.5 mm)传感器压力与性能关系曲线

2.2　传感器内筒半径的确定

将传感器内筒壁厚设置为 0.6 mm、环境温度设置为 40 ℃、内筒材料分别设置为不锈钢 316L 和铍青铜 C17200，仿真内筒半径与径向应变灵敏度的关系。考虑到在实际应用中传感器尺寸不宜过大、

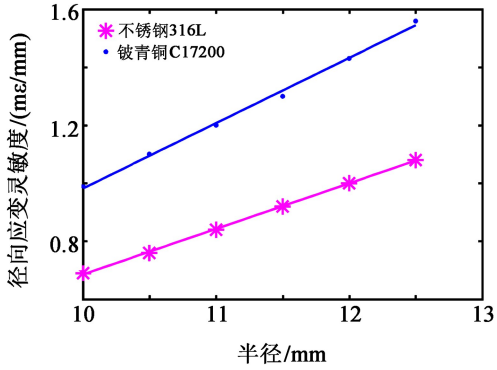


图 5　内筒半径与径向应变灵敏度的关系

内筒缠绕光纤长度应大于 1 m、光纤缠绕螺距不宜过密等问题，内筒半径从 10 mm 以 0.5 mm 步长增加到 12.5 mm，对仿真数据进行线性拟合可以得到如图 5 所示的曲线。从图 5 中可以看出，随着半径的不断增大，内筒的径向应变灵敏度也不断增大并呈现线性趋势。由于传感器尺寸主要取决于薄壁圆筒结构内筒半径，并且随着灵敏度的不断提升，在保证其他参量不变的情况下其量程会显著下降。综合考虑，传感器内筒半径选取 12.5 mm。

2.3 传感器内筒壁厚的确定

内筒壁太厚会导致灵敏度下降，太薄会导致量程变小、传感器寿命降低甚至内筒形状不可恢复。为了寻找厚度最优值，内筒半径设置为 12.5 mm、环境温度设置为 40 ℃、压力载荷设置为 12 MPa、内筒材料分别设置为不锈钢 316L 和铍青铜 C17200，对内筒厚度值从 0.5 mm 以 0.1 mm 为步长增加到 1 mm，分析内筒厚度与径向应变的关系。通过对仿真数据进行线性拟合可以得到如图 6 所示的曲线。

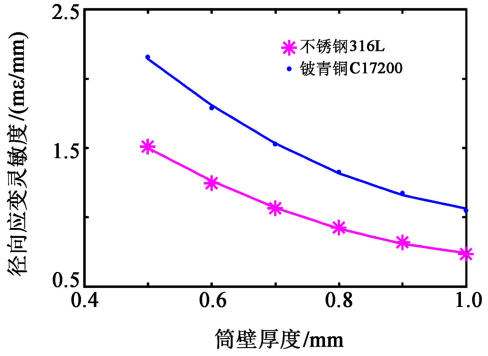


图 6 内筒壁厚与径向应变灵敏度的关系

从图中可以看出，随着筒壁厚度的不断增大，径向应变灵敏度与厚度呈负相关，随后下降趋势趋于平缓。从图 4(b)可以看出，在 0.5 mm 厚度、压力为 10 MPa 时内筒材料为 316L 的传感器寿命出现明显下降，所以当材料选取不锈钢 316L 时，筒壁厚度应为 0.6 mm；当材料选取铍青铜 C17200 时，筒壁厚度应为 0.5 mm。

2.4 仿真结果与误差分析

2.4.1 仿真结果

综合以上仿真结果，传感器内壁选取长度为 72 mm，半径为 12.5 mm，当材料选择不锈钢 316L 时，则壁厚为 0.6 mm，当材料选择铍青铜 C17200 时，则壁厚为 0.5 mm。

由表 2 可知，当传感器内筒材料选择 0.6 mm 不锈钢 316L 时，其杨氏模量 $E=195$ GPa，泊松比 $\mu=0.265$，根据式(11)可得其理论压力灵敏度为 6.02 MHz/MPa，当传感器内筒材料选择 0.5 mm 铍青铜 C17200 时，其杨氏模量 $E=134$ GPa，泊松比 $\mu=0.275$，根据式(11)可得其理论压力灵敏度为 10.41 MHz/MPa。

图 7 所示为布里渊频移与压力的关系曲线，从图中可以看出，布里渊频移与压力呈良好的线性关系。当内筒材料选择不锈钢 316L 时，仿真压力灵敏度为 6.37 MHz/MPa，当内筒材料选择铍青铜 C17200 时，仿真压力灵敏度为 11.1 MHz/MPa，二者相较于单模光纤布里渊压力灵敏度 1.5 MHz/MPa[18] 分别提升 4.25 倍和 7.4 倍。

不锈钢 316L 和铍青铜 C17200 在 0～50 ℃的热膨胀系数分别为 1.6×10^{-5}/℃和 1.7×10^{-5}/℃，根据式(7)可以得到两种材料制作的传感器的温度灵敏度分别为 2.5 和 2.57 MHz/℃，温度灵敏度分别为裸光纤的 1.67 倍和 1.7 倍。

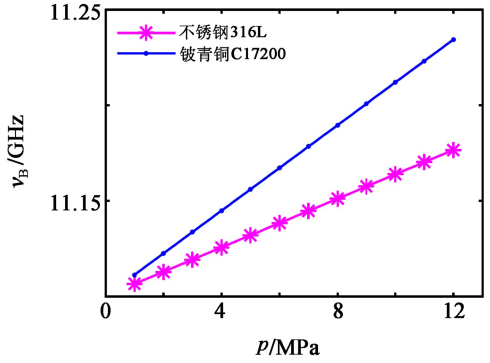


图 7 压力与布里渊频移的关系

图 8 所示为布里渊频移与温度的关系曲线，从图中可以看出，布里渊频移与温度呈现良好的线性关系，通过线性拟合，可以得到当内筒材料选取不锈钢 316L 与铍青铜 C17200 时的传感器温度灵敏度分别为 2.54 和 2.56 MHz/℃。

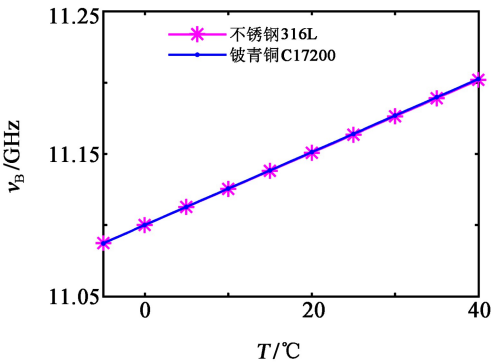


图 8 温度与布里渊频移的关系

2.4.2 误差分析

由仿真结果与理论值对比可知，当内筒材料为不锈钢 316L 时，压力灵敏度理论值与仿真值的相对误差为 5.4%；当内筒材料为铍青铜 C17200 时，压力灵敏度理论值与仿真值的相对误差为 6.2%。仿真值与理论值相差较大，在仿真过程中将网格大小进一步缩小至 1 mm，两种材料的相对误差为 4.3%和 4.9%。由此推断，误差的大小是由网格划分的大小决定的。

3 结论

为了解决现有布里渊散射传感器灵敏度低等问题，结合布里渊传感机理，以及布里渊频移与温度和压力的关系等理论，利用 Solidworks 软件对传感器模型进行设计，使用有限元仿真软件系统地分析了传感器内筒各个参数对传感特性的影响，为传感器的制备提供了理论基础。最后对仿真结果进行分析，使用铍青铜 C17200 材料封装的传感器压力灵敏度可以达到 11.1 MHz/MPa，温度灵敏度可以达到 2.56 MHz/℃，并对仿真结果存在的误差进行了评估。

参考文献：

[1] Li Chao, Zhang Chan, Li Jing, et al. Liquid level measurement based on a no-core fiber with temperature compensation using a fiber Bragg grating [J]. Sensors Actuators A: Phys., 2016, 245: 49-53.

[2] 张登攀，秦　钢，王永杰，等. 海洋双光纤光栅压力传感器的温度响应特性[J]. 传感器与微系统，2019，38(6)：9-11，15.
Zhang Dengpan, Qin Gang, Wang Yongjie, et al. Temperature response characteristics of ocean dual FBG pressure sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, 38(6): 9-11, 15.

[3] Li Chao, Zhang Chan, Li Jing, et al. Liquid level and temperature sensor based on an asymmetrical fiber Mach-Zehnder interferometer combined with a fiber Bragg grating [J]. Opt. Commun., 2016, 372: 196-200.

[4] Gu Haidong, Dong Huijuan, Zhang Guangyu, et al. Simultaneous measurement of pressure and temperature using dual-path distributed Brillouin sensor[J]. App. Opt., 2015, 54(11): 3231-3235.

[5] Camilo A, Moisés R, Anselmo F, et al, Envelope-based technique for liquid level sensors using an in-line fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. Appl. Opt., 2016, 55: 9803-9809.

[6] Lai C, Lo Y, Yur J. Application of fiber Bragg grating level sensor and Fabry-Pérot pressure sensor to simultaneous measurement of liquid level and specific gravity[J]. IEEE Sens. J., 2012, 12(4): 827-831.

[7] Díaz C, Leal-Junior A, André P, et al. Liquid level measurement based on FBG-embedded diaphragms with temperature compensation[J]. IEEE Sens. J., 2018, 18: 193-199.

[8] Horiguchi T, Kurashima T, Tateda M. Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fiber [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1989, 1(5): 107-108.

[9] Cui Q, Pamukcu S, Lin A, et al. Distributed temperature sensing system based on Rayleigh scattering BOTDA[J]. IEEE Sens. J., 2011, 11(2): 193-199.

[10] Schenato L, Pasuto A, Galtarossa A, et al. An optical fiber distributed pressure sensing cable with Pa-sensitivity and enhanced spatial resolution[J]. IEEE Sens. J., 2020, 11(20): 5900-5908.

[11] Dong Yongkang, Zhu Zongda, Li Tianfu, et al. High-sensitivity distributed temperature sensor based on Brillouin scattering with double-coated single-mode fibers[J]. IEEE Sens. J., 2021, 21: 6209-6216.

[12] Li Yongqian, Zhang Lixin, Fan Hanbai, et al. A self-heterodyne detection Rayleigh Brillouin optical time domain analysis system[J]. Opt. Commun., 2018, 427: 190-195.

[13] Agrawal P. Nonlinear Fiber Optics[M]. 3rd. New York: Academic Press, 2001.

[14] Xu Zhiniu, Zhao Lijuan. Investigation of Brillouin frequency shift error estimated by quadratic fitting and the improved algorithm[J]. Optic-Inter. J. for Light and Electron Optics, in press. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.166456.

[15] Li Yongqian, An Qi, Li Xiaojuan, et al. High-accuracy Brillouin frequency shift measurement system based on stimulated Brillouin scattering phase shift[J]. Opt. Eng., 2017, 56(5): 056102.

[16] Wu Hao, Lin Qijing, Jiang Zhuangde, et al. A temperature and strain sensor based on a cascade of double fiber Bragg grating[J]. Meas. Sci. Technol., 2019, 30(6).

[17] Huang H Y, Ayan M, Cho J S. Fabrication and evaluation of hybrid silica/polymer optical fiber sensors for large strain measurement[J]. TI Meas. Control, 2009, 31(3/4): 247-257.

[18] 赵丽娟，赵海英，徐志钮. 基于布里渊动态光栅的高灵敏度静压力传感器设计[J]. 光子学报，2021，50(2)：206001.
Zhao L J, Zhao H Y, Xu Zh N. Design of high-sensitivity hydrostatic pressure sensor based on Brillouin dynamic grating [J]. Acta Photon. Sin., 2021, 50(2): 206001.

作者简介：

李永倩(1958—)，男，河北定州人，工学博士，教授，主要研究方向为光通信与光传感技术；

王少康(1996—)，男，河北保定人，硕士研究生，主要研究方向为分布式光传感技术。