

一种压力传感器单故障实时诊断方法研究

那文波, 刘巍, 何宁, 刘甜甜

(中国计量学院 机电工程学院, 杭州 310018)

摘要: 研究对象为容式变极距型液位压力传感器, 分析了传感器测量电路的工作原理与特性; 故障诊断首先用压力变化率判断测量电路故障存在性; 再得到额定输入信号下电路电桥输出信号和运算放大器输出这两个检测信号的表达式, 各表达式均以电路相关元件为自变量, 因不同元件发生数值漂移故障时, 对检测信号的影响趋势各不相同, 使得精确到元件的故障定位得以实现; 确定故障位置后将正常元件值代入检测信号表达式联立方程组求解, 以实现精确到元件的故障定值; 仿真显示该故障诊断方法所求得故障值非常接近真实故障值。

关键词: 压力传感器; 压力变化率; 单元件漂移故障; 可区分性; 故障定位; 故障定值

Method Research of a kind of Pressure Sensor's Real Time Single Fault Diagnosis

Na Wenbo, Liu Wei, He Ning, Liu Tiantian

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Chinese Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The capacitor style and electrode distance variance liquid level pressure sensor is talked about. Analyze the operation principle and the features of the sensor's measuring circuit. Fault diagnosis uses the change rate of the pressure to judge the existence of the measure circuit fault at first. Make the bridge output signal and the operational amplifier output signal as the two detection signals. Then two detection signals' expressions in rated input are acquired. The expressions' arguments are all circuit elements. Since different elements can influence the detection signals differently in their numerical drift fault severally, the fault location accurate to single element can be realized. Substitute the value of the normal elements value into the detection signals' expressions to simultaneous and solve the equations. Thus realize the fault evaluation accurate to single element. The simulation shows the value of the fault diagnosis is very close to the true value.

Keywords: pressure sensor; pressure change rate; single element drift failure; distinguishing ability; fault location; fault evaluation

0 引言

现代系统正朝着大规模、复杂化的方向发展, 这类系统一旦发生事故就有可能造成人员和财产的巨大损失。现代生活、生产要求提高现代系统的可靠性与安全性。故障诊断对系统运行状态和异常情况作出判断, 并根据诊断结果为系统故障恢复提供依据^[1-3]。

近年来国内外对传感器控制系统故障诊断有较多研究, 其中液位传感器又占相当大的比例^[4]。如 Ali Abudullah 与 Mohamed Zribi 采用传感器故障估计法和自适应阈值设计了故障决策器实现双容液位控制系统的故障诊断^[5]; Mohideen, K. Asan 等设计了改进的“模糊改进模型参考自适应控制器”方案应用于混合水箱过程控制与故障诊断^[6]; 杨青等使用提升小波和概率神经网络集合方法实现了对三容水箱液位系统的故障诊断^[7]。

文章通过研究控制系统的压力传感器测量电路与输入、输出信号的关系, 可以得到传感器测量电路发生单元件故障时的输出信号与故障值的变化规律, 将测量电路输出信号的幅值、相位和其中运算放大器输出信号幅值相位作为变量, 论证了不同元件不同故障对上述变量影响的可区分性, 从而实现了对故障位置的判定并得到故障值, 通过仿真验证了理论分析的

可行性, 实现了测量电路单个元件发生 1% 以上数值漂移后能检测到这种故障, 发生故障后能将故障位置精确到单个元件, 故障诊断值误差控制在 10% 以内 (绝大多数 5% 以内) 的功能。这是文献 [5-7] 没有实现的。

1 压力传感器的工作原理与测量电路

压力传感器为变极距型单电容式传感器, 其电极呈圆形, 上面的固定电极被绝缘体固定, 下方为可变电极, 可变电极下面的膜片受到压力 (一般是液体) 时产生挠度变形, 可变电极与固定电极的距离发生变化导致电容的值发生变化^[8], 产生电信号以表示压力大小。

设计压力传感器组成的测量电路如图 1, 据文献 [8] 知, 传感器膜片由圆形的工作电极和环形的参考电极组成, 工作电极和公共电极组成敏感电容 C_2 , 其无压力时值为 C_{20} ; 参考电极和公共电极组成参考电容 C_1 。压力通过导管均匀作用在膜片上引起膜片变化, 从而导致敏感电容 C_2 变化, 而参考电容 C_1 变化微小。因运算放大器内部阻抗很大, 近似计算时认为运放处是开路, 故 C_1 、 C_2 和另外两个辅助电容 C_3 、 C_4 组成了电桥的 4 个桥臂, 其对角电势差 (即 C_3 、 C_4 连接点与 C_1 、 C_2 连接点之差) 便是电桥输出 U_a , 作为测量电路与单片机相连的输出信号。而图 1 中 U_o 为运算放大器输出。

根据运放的“虚短”和“虚断”特性, 在 $U_e(t) = \sin 100\pi t$ 时, 且以电桥输出 $U_a(t)$ 初始值都为 0, 得到式 (1):

$$U_a(t) = Me^{\frac{-1}{R_2(C_3+C_4)t}} + Ne^{\frac{-1}{C_2k_1t}} + \frac{A}{K} \cos \omega t + \frac{B}{K} \sin \omega t \quad (1)$$

收稿日期: 2015-11-24; 修回日期: 2015-12-22。

作者简介: 那文波 (1963-), 男, 辽宁抚顺人, 硕士, 教授, 硕士生导师, 主要从事故障诊断、控制算法等方向的研究。

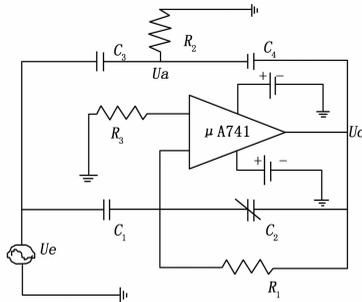


图 1 传感器测量电路

其中:

$$\begin{aligned}
 A &= \omega^3 C_2^2 C_3 R_1^2 R_2 - \omega^3 C_1 C_2 C_4 R_1^2 R_2 - \\
 &\omega^2 C_1 C_3 C_4 R_1 R_2^2 - \omega^3 C_1 C_4^2 R_1 R_2^2 + \omega C_3 R_2 \\
 B &= \omega^4 C_2^2 C_3^2 R_1^2 R_2^2 + \omega^4 C_2^2 C_3 C_4 R_1^2 R_2^2 - \\
 &\omega^4 C_1 C_2 C_3 C_4 R_1^2 R_2^2 - \omega^4 C_1 C_2 C_4^2 R_1^2 R_2^2 + \\
 &\omega^2 C_3^2 R_2^2 + \omega^2 C_3 C_4 R_2^2 + \omega^2 C_1 C_4 R_1 R_2 \\
 K &= (\omega^2 C_2^2 R_1^2 + 1)[1 + \omega^2 R_2^2 (C_3 + C_4)^2] \\
 N &= \frac{-\omega C_1 C_4 R_1 R_2}{(\omega^2 C_2^2 R_1^2 + 1)(R_1 C_2 - R_2 C_3 - R_2 C_4)} \\
 M &= -N - \frac{A}{K}
 \end{aligned}$$

表 1 压力传感器电容材料参数和电路元件参数

参数 大类	参数名称	参数值	参数 大类	参数名称	参数值
测量 电路 元器 件参 数	静态敏感电容 C_{20}	1nF	电容 参数	弹性材料	陶瓷
	参考电容 C_1	1nF		弹性材料杨氏模量	280GPa
	辅助电容 C_3, C_4	1nF		弹性材料泊松比	0.23
	积分电阻 R_1	2MΩ		受压弹性膜片厚度	1mm
	电桥输出电阻 R_2	10MΩ		电极间距	6.1μm
	输入信号 U_e	$\sin 100\pi t$		电极半径	1.48 cm
	运放	μA741			

图 1 中变极距型单电容相关参数及测量电路元器件参数如表 1 所示。 $C_{20} = 1$ nF, 测量电路工作时, C_2 的变化范围为 1 nF 到 1.067 nF, 对应着 0 到 40 kPa 的压力。由表 2 可知, 敏感电容 C_2 不到 1% 的微小变化即对应压力 5 kPa (水位超过 50 cm) 以上的变化。其他元件也有类似特征, 因当元件发生故障漂移时, 系统显示的压力将会发生剧烈变化, 超过了正常状态下液位控制系统允许的液位变化率, 这一特点可用于判断测量电路元件是否发生故障。

表 2 部分压力对应的敏感电容值及输出信号值

P /kPa	C_2 /nF	U_o 幅值/mV	U_a 相角/度
5	1.008 313 9	417.13	-23.014
10	1.016 628	416.16	-22.927
15	1.024 942	415.2	-22.84
20	1.033 256	414.25	-22.752
25	1.041 57	413.31	-22.663
30	1.049 883	412.38	-22.573
35	1.058 197	411.47	-22.462
40	1.066 851	410.56	-22.39

运算放大器输出 U_o 是判断故障的另一个检测信号, 在 $U_e(t) = \sin 100 \pi t$ 时, 有:

$$U_o(t) = \frac{\omega C_1 R_1}{\omega^2 C_2^2 R_1^2 + 1} e^{-\frac{1}{\omega C_2 R_1} t} - \frac{\omega C_1 R_1}{\omega^2 C_2^2 R_1^2 + 1} \cos \omega t - \frac{\omega^2 C_1 C_2 R_1^2}{\omega^2 C_2^2 R_1^2 + 1} \sin \omega t \quad (2)$$

可见, 电桥输出 U_a 和运放输出 U_o 表达式分为指数项和三角函数项。指数项为负指数幂, 由于 $C_{20} = C_3 = C_4 = 1$ nF, $R_1 = 2$ MΩ, $R_2 = 10$ MΩ, 故信号在时间 $t \geq 500$ ms 后, 指数项可以忽略, 两个输出信号近似称为正弦波信号, 因此, 为避免采样初期的幅值误差, 单片机采样周期应大于 500 ms。

通过变压将工作交流电压降压成为测量电路输入电压; 单片机采集测量电桥输出 U_a 、运放输出 U_o 的幅值与相角并转化为标准信号与上位机相连; 上位机可显示正常状态下压力, 组成数据驱动压力传感器。系统还应具有在线故障诊断并显示故障点与故障值的功能。测量电路正常工作时, 电桥输出 U_a 、运放输出 U_o 的幅值与相角必须都位于额定范围内 (如 U_o 必须位于 410.56~417.13 mV 之间), 电路才能无故障。

2 压力传感器的故障诊断方法

压力传感器的故障诊断需要首先判断测量电路是否存在故障, 若存在故障, 继续判断是哪个元器件故障 (故障定位) 及故障程度 (故障定值), 所研究的故障类型都是单元件漂移故障 (元件值偏离了理论值), 通过对电桥输出 U_a 和运放输出 U_o 的幅值、相位特性研究可以实现故障诊断。

2.1 故障存在的判定

利用液位控制系统液位和压力不会过于剧烈变化的特征。液位变化公式为:

$$Q_1 - Q_2 = S \frac{dh}{dt} \quad (3)$$

其中: Q_1 、 Q_2 分别是水箱进入、流出流量, 水箱横截面积为 S , h 为液位, 则有:

$$\left(\frac{dh}{dt} \right)_{\max} = \frac{\Delta Q_{\max}}{S} \quad (4)$$

$\left(\frac{dh}{dt} \right)_{\max}$ 称为液位允许最大变化率, 当液位的变化率超过该值时, 说明系统一定存在故障, 此时上位机显示故障存在且不显示压力数值。

对于流量的计算, 有^[9]:

$$Q = \sqrt{\frac{P}{\rho g M L}} \quad (5)$$

其中: P 为压差, ρ 为液体密度, g 为重力加速度; M 为管道摩阻; L 为导管长度。

2.2 故障定位

若已知测量电路存在故障, 可根据运放输出和电桥输出的相位与幅值是否超出额定范围实现故障定位。

根据式 (1)、(2), 我们可以得到敏感电容 C_2 、参考电容 C_1 和电容 C_3 、 C_4 以及积分并联电阻 R_1 、电桥输出处电阻 R_2 分别发生漂移故障而其他元件为正常时, 以运放输出和电桥输出的相位与幅值为变量的函数表达式。

由式 (2) 有, 运放输出信号 U_o 的相角为:

$$\arctan \angle U_o = \frac{1}{\omega C_2 R_1} \quad (6)$$

由式 (6) 知, 当参考电容 C_1 发生故障漂移时, U_o 的相

角不会随 C_1 变化而变化。因此，若检测到 U_a 的幅值相角与 U_o 的幅值超过额定范围但 U_o 的相角仍在额定范围内，可判定故障位置在参考电容 C_1 处。

当敏感电容 C_2 和积分并联电阻 R_1 发生故障漂移时，电桥输出信号 U_a 及运放输出信号 U_o 的幅值相角均会发生变化超过额定范围。

由表 3 可知， C_2 增加时与 R_1 增加时电桥输出、运放输出的幅值相角变化趋势不同，根据 C_2 、 R_1 对 U_o 幅值单调性的不同引起 U_o 、 U_a 范围不同，可以区分故障位置。

表 3 C_2 、 R_1 增加时各检测信号的变化趋势

信号	C_2	R_1
U_a 幅值	↓	↓
U_a 相角	↑	↓
U_o 幅值	↓	↑
U_o 相角	↓	↓

当辅助电容 C_3 、 C_4 和电桥输出电阻 R_2 发生故障漂移时，则只会引起电桥输出信号 U_a 的幅值平方与相角的变化，而 U_o 的幅值与相角仍在额定范围内。对于 C_3 与 R_2 、 C_4 与 R_2 的故障定位，可根据其变化所得 U_a 与相角的变化范围不同而确定。如图 2 所示， C_3 变化时 U_a 幅值变化范围和 R_2 变化引起的 U_a 幅值范围只在 C_3 处于 0.5 nF 到 1 nF 间相近，但此时两者引起的 U_a 相角有明显差距，据此可以区分故障点是 C_3 还是 R_2 ，对 C_4 和 R_2 的故障地点区分同理。

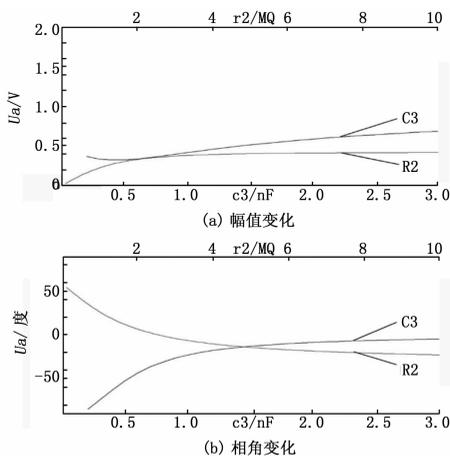


图 2 C_2 和 R_1 与运放输出幅值相角变化曲线

对于辅助电容 C_3 和 C_4 ，这两个元器件都位于传感器电路运放上方，起到构成电桥的作用。可能存在某个 C_3 值与另一个 C_4 值下电桥输出 U_a 的幅值与相角相同的情况。对此，需要添加附加判定。设通过电容 C_3 和 C_4 的电流分别为 I_{C3} 和 I_{C4} ，则有：

$$I_{C3} = C_3 \frac{d(U_e - U_a)}{dt} \quad (7)$$

$$I_{C4} = C_4 \frac{d(U_a - U_o)}{dt} \quad (8)$$

得到 I_{C3} 和 I_{C4} 的特性，再根据已得到电桥输出信号 U_a ，完成附加判定，断定故障在 C_3 还是 C_4 。

2.3 故障定值

对于元器件的故障定值，需要在式 (1)、(2) 的基础上，

将其他元件设为正常值 (见表 1)，故障元件作为未知数，将得到的运放输出信号与电桥输出信号代入，得到方程求解，所得的解即故障值。由表 2 知，系统运行时，不管压力在额定范围内如何变化， C_2 变化率均不超过 6.7%，由于故障诊断时压力不显示，不能得到实时精确的 C_2 值，因此取 $C_2 \approx C_{20} = 1$ nF。各方程中，电容单位为 F，电阻单位为 Ω ，电压幅值单位为 V。根据 2.2 的分析知不同处故障时，检测信号幅值、相位受影响个数不同，故联立的方程个数也不同，情况如表 4 所示。

表 4 不同故障处对检测信号的影响

故障位置	U_a		U_o		方程个数
	幅值	相位	幅值	相位	
C_1	√	√	√	×	3
C_2	√	√	√	√	4
R_1	√	√	√	√	4
R_2	√	√	×	×	2
C_3	√	√	×	×	3(2+1)
C_4	√	√	×	×	3(2+1)

表 4 中，√表示故障位于相应元件时有影响，×表示无影响 (该值仍在额定范围内)。

因此，如确定故障位置为参考电容 C_1 时，以 C_1 为未知数，将 $\omega = 100 \pi$ 、 $C_2 \approx C_{20} = 1$ nF、 $C_3 = C_4 = 1$ nF、 $R_1 = 2$ M Ω 、 $R_2 = 10$ M Ω 代入，得到以下 3 个方程组并联立：

$$|U_o|^2 = \frac{(-6.283185307 \times 10^8 C_1)^2 + (3.94784176 \times 10^8 C_1)^2}{1.945422898} \quad (9)$$

$$|U_a|^2 = \left(\frac{-1.364276174 \times 10^{10} C_1 + 4.381843721}{56.45865634} \right)^2 + \left(\frac{-5.818806403 \times 10^9 C_1 + 27.53193609}{56.45865634} \right)^2 \quad (10)$$

$$\text{atan}(\angle U_a) = \frac{-1.364276174 \times 10^{10} C_1 + 4.381843721}{-5.818806403 \times 10^9 C_1 + 27.53193609} \quad (11)$$

又如确定故障位置为电桥输出链接电阻 R_2 时，以 R_2 为未知数，将 $\omega = 100 \pi$ 、 $C_1 = C_3 = C_4 = 1$ nF、 $C_2 \approx C_{20} = 1$ nF、 $R_1 = 2$ M Ω 代入，得到以下两个方程组并联立：

$$|U_a|^2 = \left(\frac{-1.24025 \times 10^{-13} R_2^2 + 3.14159 \times 10^{-7} R_2}{5.50639 \times 10^{-13} R_2^2 + 1.39478} \right)^2 + \left(\frac{1.97392 \times 10^{-13} R_2^2 + 1.97392 \times 10^{-7} R_2}{5.50639 \times 10^{-13} R_2^2 + 1.39478} \right)^2 \quad (12)$$

$$\text{atan}(\angle U_a) = \frac{-1.24025 \times 10^{-13} R_2 + 3.14159 \times 10^{-7}}{1.97392 \times 10^{-13} R_2 + 1.97392 \times 10^{-7}} \quad (13)$$

确定故障位置为其他元件时，故障定值方法类似，即根据受影响因子个数联立方程，代入正常元件值和检测信号值，将故障值作为未知数求解。其中 C_3 或 C_4 故障时，联立方程为电桥输出 U_a 的幅值、相角表达式再加式 (7) 或 (8)。

2.4 故障诊断流程

通过 2.2 和 2.3 分析，所确定的压力传感器故障诊断法能够实现 6 个元件的单一漂移型故障定位和故障定值。诊断流程图如图 3。

3 故障诊断结果及分析

第二章的分析证明了所确定的压力传感器故障诊断能够实

5239 - 5251.

[6] Mohideen, K. Asan, Valarmathi, K. Fuzzy Modified Model Reference Adaptive Controller for Improved Transient response [A]. 2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC) [C]. 2013: 454 - 457.

[7] 杨青, 宋英俊. 基于提升小波和 PNN 的三容水箱故障诊断 [J].

工业仪表与自动化装置, 2011 (2): 3 - 6.

[8] 李利华, 高晓清, 潘传芳, 等. 电容应变式压力传感器原理及检测电路设计 [J]. 物理实验, 2002, 22 (5): 10 - 12.

[9] 胡雷. 液体循环加热与冷却系统中流量、压差与温度测量的实现 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.

(上接第 43 页)

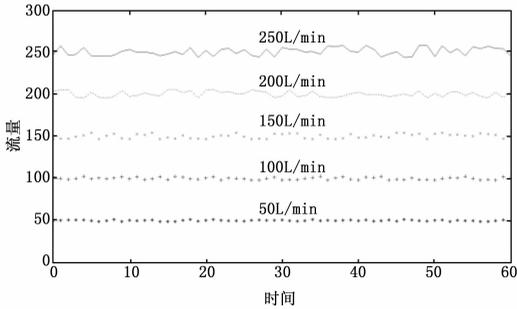


图 6 改进前流量曲线

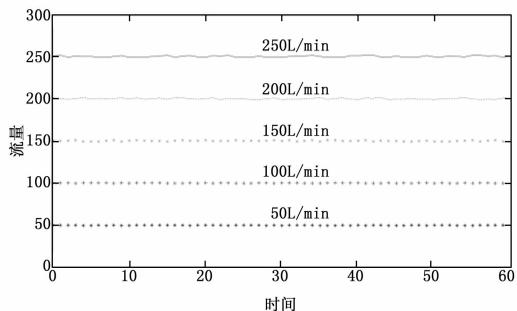


图 7 改进后流量曲线

分布式光纤传感器具有抗干扰性强、监测距离长、空间分辨率高等特点，特别是他分布式测量的特点非常适合监控堤坝，提供灾害预警。

由于布里渊频移的变化量不仅与应变有关，还和温度有关。因此，采用 BOTDA 测量水流量对堤坝影响时，需要排除温度的影响。在堤坝相邻的位置，平行布置两根光纤，其中一根光纤保持裸露，用于测量堤坝形变，另外一根光纤作为温度补偿，在光纤外部套入硬管，使光纤不随堤坝发生形变。由此，BOTDA 可以测出堤坝的形变。图 8 中，白色实线代表裸露的光纤，白色虚线代表外部带有硬管的光纤。实验中，使用两根长度为 2 km 的光纤，将光纤中的 210~215 m 埋于堤坝中，一根作为测量光纤，另外一根作为温度补偿。

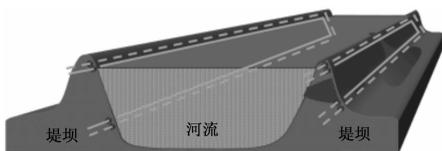


图 8 光纤传感器布置图

实验中，使用 DiTeSt STA-R (分布式光纤温度应变检测系统) 测量光纤形变，由于实验用的光纤短，可将空间分辨率设置的高一点，此时仍有保证较高的信噪比。设置空间分辨

率为 0.5 m，采样间隔为 0.1 m。控制调节阀的大小，给堤坝分别提供 100 L/min 和 200 L/min 的水流量，监控光纤的布里渊频移。

实验结果如图 9 所示，随着水流量的增大，堤坝受到的压力也随着增加。由于受力，光纤会随着堤坝的变形而被拉伸，光纤的布里渊频移也随着增加。当水流量从 100 L/min 增大到 200 L/min 时，光纤的布里渊频移也随之增加。由此可见，光纤布里渊频移能正确反映出堤坝形变，及时提供预警。

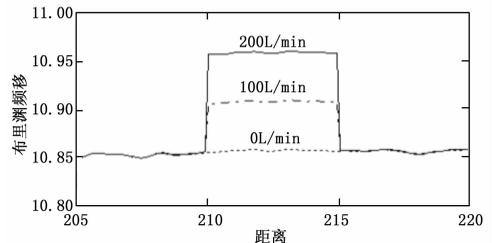


图 9 不同流量下布里渊频移曲线

4 结束语

经过堤坝模型的搭建和实验，分布式光纤传感器对堤坝具有良好的监控预警效果，即在堤坝坍塌前洞悉前兆，及时提供预警，从而保护人民群众的生命财产安全。

参考文献:

[1] 朱勇辉, Visser P J, Vrijling J K, 王光谦. 堤坝溃决试验研究 [J]. 中国科学: 技术科学, 2011 (2): 150 - 157.

[2] 任健美, 胡彩虹. 1998 年长江流域特大洪水的思考 [J]. 太原师范学院学报, 2001 (3): 42 - 44.

[3] 黄志萍. 激光光散射仪及应用 [J]. 现代仪器, 2006, 06: 49 - 53, 44.

[4] Boyd R W. Nonlinear Optics [M]. New York: Academic Press, 2003.

[5] Parker T R, Farhadiroushan M, Handerek V A, et al. A fully distributed simultaneous strain and temperature sensor using spontaneous Brillouin backscatter [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9 (7): 979 - 981.

[6] Garus D, Krebber K, Schliep F, et al. Distributed sensing technique based on Brillouin optical - fiber Frequency Domain analysis [J]. Optics Letters, 1996, 21 (17): 1402 - 1404.

[7] Horiguchi T, Tateda M. BOTDA nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characters using Brillouin interaction [J]. Journal of Lightwave Technology, 1989, 7 (8): 1170 - 1176.

[8] Box X, Webb D J, Jackson D. 32km distributed temperature sensor based on Brillouin loss in an optical fiber [J]. Optics Letters, 1993, 18 (18): 1561 - 1563.