

基于分布式光纤传感的热网膨胀节膨胀量测量方法

杨汉瑞¹ 李勇勇¹ 徐士博¹ 张经纬¹ 栾宁¹

摘要 在热力管网中, 膨胀节作为缓冲管道的关键部分, 极易因变形扭曲引发泄漏故障, 进而致使热网瘫痪. 实时准确测量膨胀节的膨胀是评估管网健康状态的有效途径. 对此, 本文提出一种基于分布式光纤传感技术的膨胀节膨胀量的新型检测方法, 建立了膨胀量检测模型, 并通过实验验证了方法的有效性. 研究表明, 测量误差随着光纤绕制圈数增大而减小, 通过调节绕制圈数, 可以将误差范围控制在 3% 以内. 这不仅为热网膨胀节的膨胀量检测提出了一种新思路, 同时也为分布式光纤传感技术在热网健康状态检测领域的应用奠定了一定的理论基础.

关键词 分布式, 光纤传感, 供热管网, 膨胀量检测

引用格式 杨汉瑞, 李勇勇, 徐士博, 张经纬, 栾宁. 基于分布式光纤传感的热网膨胀节膨胀量测量方法. 自动化学报, 2019, 45(11): 2171–2177

DOI 10.16383/j.aas.c180465

Measurement Method of Expansion in the Expansion Joint of Heat Supply Network Based on Distributed Optical Fiber Sensing

YANG Han-Rui¹ LI Yong-Yong¹ XU Shi-Bo¹ ZHANG Jing-Wei¹ LUAN Ning¹

Abstract As a key part of the buffer pipeline in the thermal network, the expansion joint can easily cause leakage failure due to its deformation and distortion, causing the thermal network to collapse. It is an important way to assess the health status of the pipeline network effectively by accurate measuring the expansion value of the expansion joint in real-time. Therefore, this paper presents a new detection method for expansion based on the distributed optical fiber sensing technology and establishes the expansion measurement model. The effectiveness of this method is verified by experiments. The research results show that the measurement error decreases as the number of optical fiber loops increases, and the measurement error can be controlled within 3% by adjusting the number of optical fiber loops. It not only provides a new idea for the expansion value detection of the expansion joint in heating network but also lays a theoretical basis for the application of distributed optical fiber sensing technology in the field of heating network.

Key words Distributed, optical fiber sensing, heating network, expansion measurement

Citation Yang Han-Rui, Li Yong-Yong, Xu Shi-Bo, Zhang Jing-Wei, Luan Ning. Measurement method of expansion in the expansion joint of heat supply network based on distributed optical fiber sensing. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(11): 2171–2177

随着我国供热面积不断扩大以及供热管道运行时限逐年增加, 管道老化变形等问题日益加剧, 泄漏问题时有发生, 这对城市交通以及居民的生命财产安全造成了极大的威胁, 大量人力物力的投入更加剧了资源的浪费. 其中热力管道中膨胀节作为一种能根据外力或温差而发生弹性伸缩的补偿元件, 极易因形变过大而致使管道产生泄漏甚至炸裂等安全

事故. 然而目前对于膨胀节健康状态检测的相关研究也仅局限于实验检验. 而对于膨胀节疲劳实验前后的波距变化率检测更是处于起步甚至空白状态, 膨胀节膨胀量等状态参数的准确测量问题亟待解决.

膨胀节结构复杂, 其检测较为困难, 相关研究成果尚少. 文献 [1] 从理论上系统地分析了波纹管补偿器在供热管网中的选择方法, 并给出选择依据取得了良好的效果. Chugunov 等在文献 [2] 中利用 SolidWorks 软件依据相关标准进行波纹管优化设计, 提高了设计效率. Zhang 等在文献 [3–5] 中分别对波纹管的稳定性进行了评估, 分别对管道不同部件进行力学分析, 为膨胀量大小进行了限定. 以上文献中主要是就波纹管设计和材料力学性能等方面展开的研究. 文献 [6] 中崔亚飞等提到的膨胀节波距测量方法采用的是人工在波纹管上划线标记, 完成疲劳测试后利用游标卡尺对膨胀节内波纹管的波距变

收稿日期 2018-07-05 录用日期 2018-09-10
Manuscript received July 5, 2018; accepted September 10, 2018
国家自然科学基金 (61703090), 分布式光纤热网泄露监测技术研发项目 (CDT-WHCP-F-16160) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61703090) and Research and Development of Distributed Optical Fiber Technology for Monitoring Network Leakage (CDT-WHCP-F-16160)
本文责任编辑 孟凡利
Recommended by Associate Editor MENG Fan-Li
1. 东北电力大学自动化工程学院 吉林 132000
1. College of Automation Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132000

化进行测量,进而得出膨胀量.这种方法效率低下,检测误差较大,对测量人员的专业技能要求较高.另外文献[7]中王晓嘉提到利用三坐标测量机进行波距测量,但是针对大型膨胀节的测量,由于三坐标测量机价格昂贵就需要付出更高的成本.此外,还有人提到利用激光器对波距进行检测的方法,这种方法虽然在一定意义上弥补了之前膨胀节检测方法的不足,但是复杂环境下设备的安装以及造价等问题也是需要面临的现实问题.为此,亟待提出新的检测方法.

分布式光纤温度传感技术是利用传感光纤中光强大小与温度变化之间的关系进行温度测量的一种先进技术^[8-11].光纤既作为光传输介质又作为温度传感介质,具有体积小,质量轻,抗干扰能力强等优点,另外光纤还能够适应不同的复杂环境^[12-13].目前依据研究机理主要有三种系统,分别为基于瑞利散射、基于布里渊散射以及基于拉曼散射的分布式光纤温度传感系统.相较而言,基于拉曼散射的分布式光纤传感系统测量精度较高,造价较低并且有长距离测量的相关研究成果.近年来,分布式光纤传感技术在桥梁、管道、高架线等领域的应用在不断增加^[14-15].而其在供热管道上的应用还较少,因此利用其分布式连续测温的优点将该系统应用于供热管网来检测膨胀节及各个管段的健康运行状态具有很高的潜在价值.同时,温度信息对于电厂热力管道的运行以及参数调节有指导性的意义.因此,为推进分布式光纤测温技术在热网健康状态中的应用,本文提出了一种基于分布式光纤传感技术的膨胀节膨胀量检测的新方法,通过实验验证了方法的可行性,并对实验数据进行了分析给出了利用分布式光纤温度传感系统检测膨胀节膨胀量准确性的量化指标.

1 理论基础

1.1 基于拉曼散射的分布式光纤测温原理

拉曼分布式测温系统基本组成如图1所示,主要包括:电源模块,光源模块,分光模块,传感模块,光电转换模块,数据采集模块^[16].光源在控制单元发出指令后发出光脉冲,通过耦合器进入传感光纤.光在光纤中传播时会发生散射,携带有温度信息的后向散射光经波分复用器(Wavelength division multiplexer, WDM)后,产生两束波长不同的光,即斯托克斯光和反斯托克斯光,这两束光通过雪崩光电二极管(Avalanche photodiode, APD)进行光电转换,进而被高速采集卡所采集,将采集到的数据经过处理后得到不同位置的温度信息^[17].

1.2 温度解调理论

本部分主要分析系统的温度解调方法以及位置

信息的获取理论,为后续推导并建立膨胀节膨胀量检测模型提供必要的依据.

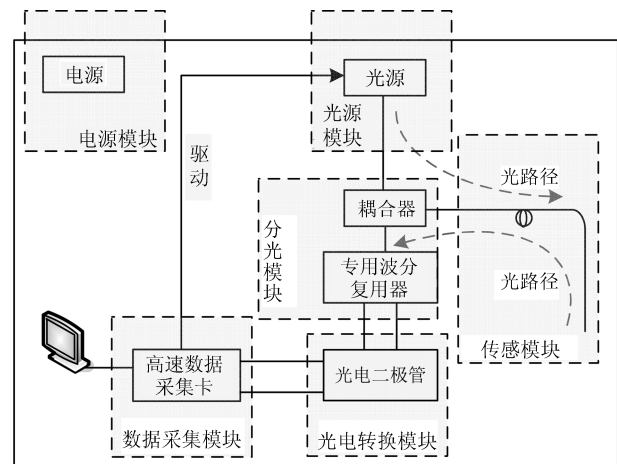


图1 系统组成图

Fig. 1 System composition diagram

设注入光纤中的光脉冲峰值功率为 P_0 , 光脉冲沿光纤传输到距离 L 处产生 Raman 散射(包括斯托克斯光和反斯托克斯光), 在光脉冲注入端可以探测到后向斯托克斯光与反斯托克斯光, 其光功率可表示为:

$$P_s(L) = P_0 K_s \nu_s^4 R_s(T) \exp[-(\alpha_0 + \alpha_s)L] \quad (1)$$

$$P_{as}(L) = P_0 K_{as} \nu_{as}^4 R_{as}(T) \exp[-(\alpha_0 + \alpha_{as})L] \quad (2)$$

式中: ν_s 、 ν_{as} 分别为斯托克斯光和反斯托克斯光在光纤中传播的频率, P_0 、 $P_s(L)$ 、 $P_{as}(L)$ 分别为入射光、斯托克斯和反斯托克斯信号光功率, K_s 、 K_{as} 为与两种散射有关的系数, L 为传感光纤的轴向距离, α_0 、 α_s 、 α_{as} 分别为光纤中入射光、斯托克斯光、反斯托克斯光的衰减系数, $R_s(T)$ 、 $R_{as}(T)$ 分别为斯托克斯和反斯托克斯的玻尔兹曼因子, 表达式如下^[14-15]:

$$R_s = \frac{1}{1 - \exp\left[\frac{-h\Delta\nu}{kT(L)}\right]} \quad (3)$$

$$R_{as} = \frac{\exp\left[\frac{-h\Delta\nu}{kT(L)}\right]}{1 - \exp\left[\frac{-h\Delta\nu}{kT(L)}\right]} \quad (4)$$

其中: $\Delta\nu$ 为光纤分子振动频率, h 是 *planck* 常数, k 为 *boltzman* 常数, $T(L)$ 为距离 L 处的温度值. 斯托克斯光信号与反斯托克斯光信号的功率之比为:

$$R(L) = \frac{K_{as}}{K_s} \left(\frac{\nu_{as}}{\nu_s}\right)^4 \exp\left[\frac{-h\Delta\nu}{kT}\right] \times \exp[-(\alpha_{as} - \alpha_s)L] \quad (5)$$

为消除光源振动、微弯损耗、光纤接头损耗等引起的光功率波动对温度测量精度的影响, 需要利用斯托克斯光对反斯托克斯光进行解调, 因此传感系统通常使用双光路探测. 计算方法如下.

将光纤移至参考温度为 T_0 的情况再次测定, 此时得到的比值是:

$$R(T_0) = \frac{K_{as}}{K_s} \left(\frac{\nu_{as}}{\nu_s} \right)^4 \exp \left[\frac{-h\Delta\nu}{kT_0} \right] \times \exp[-(\alpha_{as} - \alpha_s)L] \quad (6)$$

当参考温度变为 T 时, 得到的比值为:

$$R(T) = \frac{K_{as}}{K_s} \left(\frac{\nu_{as}}{\nu_s} \right)^4 \exp \left[\frac{-h\Delta\nu}{kT} \right] \times \exp[-(\alpha_{as} - \alpha_s)L] \quad (7)$$

从而将式 (6) 和式 (7) 作比之后导出温度解调表达式:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{k}{h\Delta\nu} \left[\ln \frac{R(T)}{R(T_0)} \right] \quad (8)$$

由光时域反射原理可知, 测量出光纤轴向距离 Z 处的温度值后, 利用 Z 与时间 t 以及激光在光纤中的传播速度 v 的关系, 得出测量点的位置信息:

$$Z = \frac{vt}{2} \quad (9)$$

2 膨胀节膨胀量检测方法

2.1 膨胀节组成和工作原理

图 2 为膨胀节半剖图, 由图可以看出膨胀节主要由波纹管、接管、内衬管、垫环、耳板、双头螺柱以及螺母组成. 其作用是缓冲热力管道因膨胀或收缩而发生的形变^[4], 其膨胀量计算的理论公式是:

$$X = \alpha \times L \times \Delta T \quad (10)$$

其中, α 为线膨胀系数 (钢铁一般为 $(12 \sim 18) \times (10^{-6} \text{m})/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$), L 为所需补偿管道两个支架之间的距离, 单位是 m. ΔT 为注水时的水温与环境温度的差值, 单位是 $^\circ\text{C}$.

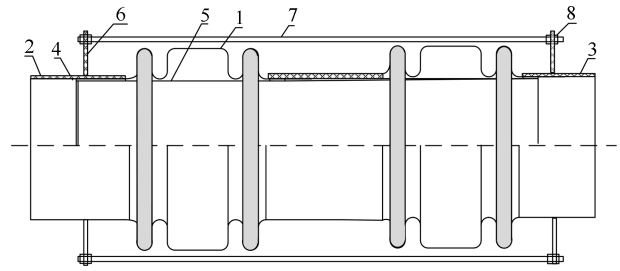
与之对应的, 管道在受热时产生的热应力为:

$$\sigma = \alpha \times \Delta T \times E_{100} \quad (11)$$

式中, σ 的单位是 MPa, E_{100} 为 100°C 时钢的弹性模量. 管道因膨胀产生的应力为:

$$P = \sigma \times F \quad (12)$$

式中, F 为流体所在管道的横截面积, 单位是 cm^2 .



1 波纹管, 2, 3 接管, 4 垫环, 5 内衬筒 (导流筒), 6 耳板,

7 双头螺柱, 8 螺母

图 2 膨胀节半剖图

Fig. 2 Semi caesarean section of expansion joint

由上述理论公式可以看出, 由于管道内温度的变化会使得在热应力与膨胀应力的作用下产生一个膨胀量, 同时对支架也产生一个轴向应力, 严重时会使管道畸形^[5]. 通常情况下膨胀量的大小受水温与环境温度差值变化影响较大, 因此有必要对膨胀节的膨胀量进行检测, 提前预判防止事故的发生.

2.2 检测方法

结合前面的分析, 论文提出依据分布式光纤温度传感系统测量温度突变点与光纤线缆位置的对应关系来建立膨胀量检测模型的方法, 测量方法示意图如图 3 所示. 对光纤线缆上某两点加热, 通过分布式光纤温度传感系统对信号采集解调处理后, 便可以在上位机显示界面温度分布曲线上看出这两点的温度突变点间的实际距离. 而膨胀节发生伸长或者收缩时, 会带动膨胀节环板 10 前后移动, 环板的温度与管道 6 中水温相当. 基于这个温度信息, 焊接金属导热体 4 至感温光纤线缆 2. 一方面, 由于膨胀节本身伸缩量较小, 另一方面受到分布式传感系统空间分辨率的影响, 需要对光纤线缆的长度进行“放大”——即利用柱形绝热体 3 绕制光纤线缆 2, 以此来对微小的膨胀进行几十倍甚至上百倍的放大. 这样, 给定膨胀节环板所导出温度的初始位置, 当膨胀节产生伸长量或者收缩量时, 便可以从上位机 1 上读出末端位置. 这样膨胀量的变化距离就转化为光纤线缆的温度变化点之间距离, 只要知道温度变化点之间的距离就能计算得到膨胀量值^[18], 两者具体关系见第 2.3 节模型建立.

2.3 模型建立

图 4 所示为膨胀量检测原理图, 根据图中标定的物理量可以对分布式光纤温度传感系统解调后的温度变化信息及位置信息建立膨胀量检测数学模型. 通过 1.2 温度解调理论可知, 温度变化信息反映于斯托克斯光强与反斯托克斯光强之中, 利用式 (8) 即可实现对温度变化点的温度进行解调. 位置信息能够利用光时域反射原理进行测定, 由于光纤线缆

长度 Z 与温度变化点间的距离 L 相对应, 因此利用式 (9) 即可得到温度变化点间的距离 L .

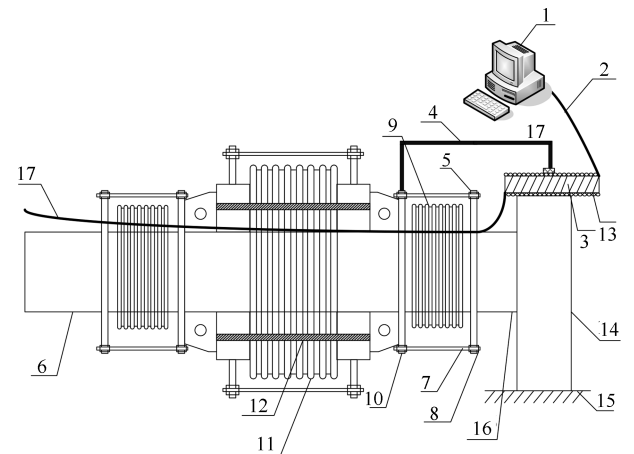
设定膨胀量为 K , 柱形绝热体的直径为 D , 光纤线缆的宽度为 Q , 环绕在柱形绝热体上的感温光缆圈数为 N , 由图 4 可知, 温度突变点间的距离 L 与柱形绝热体直径 D 之间存在线性关系:

$$L = N\pi D \quad (13)$$

当膨胀节的膨胀量发生变化时, 金属导热体触头便会产生位移, 如图 3 所示. 由图 4 可知, 膨胀量 K 与绕制于柱形绝热体上的光纤线缆的宽度 Q 及圈数 N 存在着如下关系:

$$K = NQ = \frac{LQ}{\pi D} \quad (14)$$

从式 (14) 可知, 当光纤线缆固定即光纤线缆的宽度 Q 固定, 只需知道温度突变点间的距离 L 以及柱形绝热体的直径 D 便可得到膨胀量 K 的值. 该方法的可行性以及各参数之间的联系详见下方实验分析.



1 分布式光纤传感系统, 2 光纤线缆, 3 柱形绝热体, 4 导热体, 5 端板, 6 管道, 7 双头螺柱, 8 螺母, 9 小波纹管, 10 膨胀节环板, 11 大波纹管, 12 钢筋, 13 光纤线缆切面, 14 支撑架, 15 地面, 16 右侧管道, 17 光纤的尾端

图 3 测试系统示意图

3 实验与结果分析

3.1 实验

采用分布式光纤温度传感系统作为测量媒介, 温度突变采用抽取恒温水浴箱中温度恒定的水进行模拟, 将水泵一端系入恒温水浴箱, 出水端口压制为 2 mm 宽的水缝, 延长至柱形光纤信号采集器 (绕有光纤线缆的柱形绝热体) 表面. 将恒温水浴箱中水加热至一定温度, 利用水泵沿柱形光纤信号采集器自左至右缓慢移动, 观察上位机界面温度曲线

显示情况, 并选取特定点进行计算验证. 分布式光纤温度传感系统, 型号为 DTS-10, 空间分辨率为 1 m, 温度分辨率为 1°C, 温度范围为 -20°C ~ 100°C. 具体实验器材如表 1 所示.

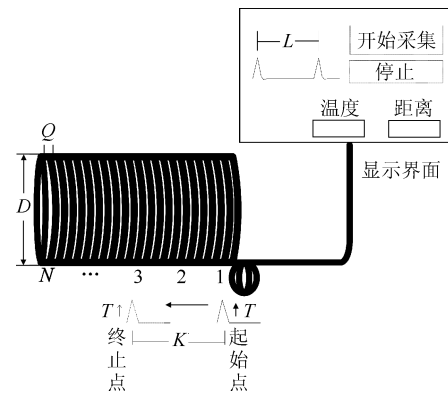


图 4 检测原理图

Fig. 4 The detection schematic diagram

表 1 实验器材表

Table 1 Experimental equipment table

名称	型号	直径 (mm)	长度 (mm)	温度范围 (°C)
光纤线缆	GJFJKZH-1A1B	3.3	62 800	-40 ~ 120
柱形绝缘体	PVC	250	600	\
水泵	RS-2688	2	700	\
恒温水浴箱	HH600	\	\	0 ~ 100

将分布式光纤温度传感系统标定校准后, 选定柱形光纤信号采集器一端光纤线缆作为起点, 利用水泵对选定的不同刻度依次加热, 观察温度分布曲线显示结果. 而后, 依据本文第 3 节所给出的模型进行理论值计算, 得出的结果与实际膨胀量作对比, 验证方法的可行性与准确性.

3.2 实验数据分析

根据第 4.1 节中实验思路进行实验, 由柱形光纤信号采集器一端前 1 m 绕制成环作为 0 起始点, 每隔 5 圈选取一个位置进行模拟膨胀节移动, 直至第 75 圈处的温度变化情况, 实验结果如表 2 所示.

表中圈数代表绕至于柱形缠绕体的光纤线缆圈数; 光纤线缆长度表示实验中所用光纤线缆的实际长度; 显示距离表示光纤线缆绕制的温度变化点于上位机界面的显示距离; 实际膨胀量表示水泵在柱形光纤采集器上移动的实际距离; 计算膨胀量表示利用第 3.2 节所推出数学模型计算出的理论值.

3.3 误差分析

实验过程中膨胀量的计算值与实际值会存着一定的误差. 对于不同大小的被测量, 需采用相对误差形式来表示测量的精确度. 针对本实验, 实际相对

表 2 实验数据表
Table 2 Experimental data table

圈数	光纤线缆长度 (mm)	显示距离 (mm)	实际膨胀量 (mm)	计算膨胀量 (mm)	相对误差
0	0	0	0	0	0
1	785	1000	3.3	4.2	0.27
5	3925	4000	16.5	16.82	0.0194
10	7850	8000	33.0	33.63	0.0191
15	11775	12000	49.5	50.45	0.0192
20	15700	16000	66.0	67.26	0.0191
25	19625	20000	82.5	84.08	0.0192
30	23550	24000	99.0	96.69	0.0233
35	27475	27000	115.5	113.50	0.0173
40	31400	31000	132.0	130.32	0.0127
45	35325	35000	148.5	147.13	0.0092
50	39250	39000	165.0	163.95	0.0064
55	43175	43000	181.5	180.76	0.0041
60	47100	47000	198.0	197.57	0.0022
65	51025	51000	214.5	214.39	0.0005
70	54950	55000	231.0	231.2	0.0008
75	58875	59000	247.5	248.02	0.0021

误差指的是膨胀量的绝对误差 Δ 与被测量的约定真值 (膨胀量实际值) A_0 之比, 即

$$\delta_A = \frac{\Delta}{A_0} = \frac{x - A_0}{A_0} \times 100\% \quad (15)$$

其中, x 为膨胀量计算值. 根据表 2 中实验数据以及上述误差分析式 (15), 计算得到相应的相对误差列于表 2 第 6 列.

图 5 为膨胀量测量相对误差分布图, 给出的是以 40°C 时为例的光纤线缆绕制圈数与膨胀量测量相对误差之间的关系. 在柱形绝热体直径一定的条件下, 由于所绕制的圈数与光纤长度有对应线性关系, 且读数便捷, 因此给出了圈数与膨胀量测量误差之间的关系, 即代表所用光纤线缆长度与膨胀量测量误差之间的关系. 从图中可以看出, 除第 1 圈外, 其他圈数点对应的膨胀节测量误差均在 3% 以内. 由于受系统空间分辨率的影响即本系统分辨率为 1 米, 上位机界面显示的只有 1 的整数倍. 故本实验测得的如表 2 实验数据中第 1 圈实际光纤线缆长度 785 毫米, 与上位机界面显示距离 1000 毫米之差为 215 毫米, 造成了如图 5 膨胀量测量相对误差分布图中第 1 圈误差变化达 27%. 为此, 在实际分析过程中, 我们不考虑对第 1 圈进行误差分析.

随后对表 2 中相对误差值进行了数据拟合, 得到图 5 中膨胀量测量相对误差趋势曲线. 由拟合曲线可以看出, 相对误差的整体趋势随着圈数的增加而减小. 此外, 论文还对膨胀节膨胀量大小与光纤线缆圈数之间的关系进行了分析, 综合表 2 中数据以

及图 5 中膨胀量测量相对误差趋势曲线, 可以得到以下分析结果: 当柱形绝热体的直径为 250 mm 时, 膨胀量长度大于 3.3 mm 时, 利用本文中提到的方法检测膨胀节的膨胀量, 测量结果均可以控制在 3% 以内; 实验结果表明, 随着光纤线缆圈数的增加即绕制光纤线缆长度的增加, 膨胀量测量值与实际值之间的相对误差呈递减的趋势.

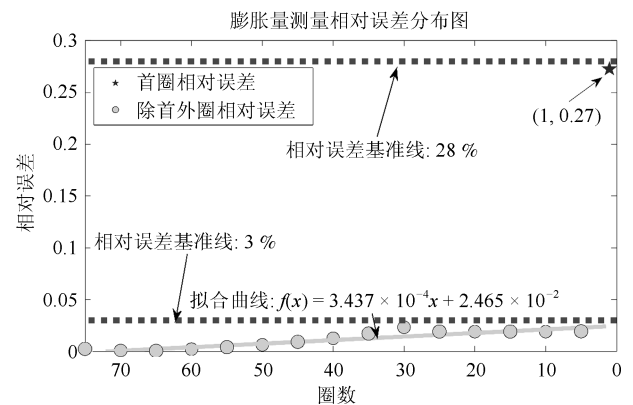


图 5 膨胀量测量相对误差分布图
Fig. 5 Distribution of relative error in measurement of expansion

为进一步证实结果的规律性并增强实验的说服力, 分别采用了直径为 300 mm 与 350 mm 两种型号的柱形绝缘体进行光纤线缆绕制. 在同一温度下, 依照第 4.1 节实验中的步骤进行对比实验. 得到以直径分别为 250 mm、300 mm 以及 350 mm 的柱形绝缘体作为载体绕制光纤线缆的情况下, 如图 6 所示的不同载体膨胀量测量相对误差分布图.

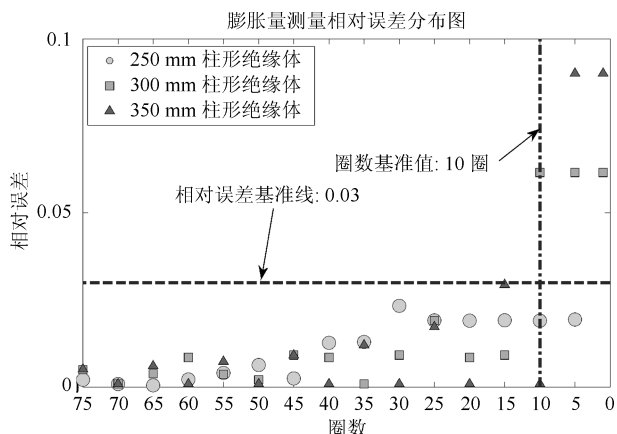


图 6 不同载体膨胀量测量相对误差分布图

Fig. 6 Distribution diagram of the expansion relative error in different carriers

从图 6 中可以得出以下分析结果: 实验中采用三种不同型号的柱形绝缘体测得的膨胀量相对误差, 均有随圈数增加而减小的趋势, 再次印证了前述规律; 三种不同直径的柱形绝缘体在绕制圈数大于 10 圈时, 相同圈数下得到的膨胀量相对误差大小与柱形绝缘体的直径长短近似成反比; 光纤线缆绕制圈数大于 10 圈时, 其测量误差均在 3% 以内. 这为膨胀量的高精度测量提供了一种新思路, 即按要求的精度事先绕制一定圈数光纤线缆并以绕制结束点定为触头起点, 而后运用本文提出的方法进行膨胀量测量从而达到更高的测量精度.

4 结论

论文根据拉曼分布式光纤测温系统的温度及位置的解调原理, 综合热力管网中膨胀节膨胀量检测难点, 提出了一种利用分布式光纤温度传感技术的膨胀量测量方法, 很好地解决了热网状态实时检测中的关键问题, 并通过膨胀量与上位机显示之间的关系推导出了膨胀量数学模型; 实验结果表明, 实际应用中, 当柱形绝缘体的直径为确定值 250 mm 且膨胀量 ≥ 3.3 mm 时, 该模型的测量误差可控制在 3% 以内, 随着膨胀量的增大其测量误差呈近似线性减小趋势; 不同柱形绝缘体直径下, 膨胀量测量相对误差随其直径的增大而减小, 且总能找到能够接受范围内的误差值. 进一步证明了利用此方法的可行性与准确性.

基于拉曼分布式光纤温度监测系统的膨胀节膨胀量检测方法具有检测方便, 读数便捷, 以及实时检测的优点. 对于热力管网中膨胀节部分的健康状态检测有很大的利用价值, 能够有效准确地给出膨胀量随温度变化位置的关系, 对危险情况起到提前预判的作用.

References

- Li Yan-Zhen, Deng Zhi-Dan. Application of bellows compensator in engineering design of heating pipe network. *Chemical Engineering Design Communications*, 2017, **43**(02): 139–140
(李艳珍, 邓志丹. 波纹管补偿器在供热管网工程设计中的应用. 化工设计通讯, 2017, **43**(02): 139–140)
- Chugunov M V, Polunina I N. Optimum design of the metal bellows on the SolidWorks platform. *Mordovia University Bulletin*, 2017, **27**(2): 169–177
- Zhang X, Ma Y, Zou H Y, Tao S, Zhang Q C, Zhang E Q. Experimental study: correcting the calculation formula for a welded metal bellows' effective diameter. *Sealing Technology*, 2016, **2016**(10): 7–12
- Snedden N W. Analysis and design guidance for the lateral stiffness of bellows expansion joints. *Thin-Walled Structures*, 1985, **3**(2): 145–162
- Park D J, Yu J M, Han S Y, Yoon K B, Ji Y K. A study on system stress analysis of high temperature plant piping with expansion joints and load hangers. *Journal of Energy Engineering*, 2014, **23**(3): 116–124
- Cui Ya-Fei, Liu Ying, Zhu Qing-Nan, Wang Yi-Ning, Yang Yu-Tu, Gou Bin-Li. Research on the algorithm for fitting wave curve and calculating wave distance of bellows expansion joints. *Journal of Beijing University of Chemical Technology*, 2018, **45**(01): 84–90
(崔亚飞, 刘英, 朱庆南, 王一宁, 杨雨图, 郭斌丽. 波纹管膨胀节波形曲线拟合及波距检测算法研究. 北京化工大学学报(自然科学版), 2018, **45**(01): 84–90)
- Wang Xiao-Jia, Gao Jun, Wang Lei. Survey on the laser triangulation. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, **s2**(8): 601–604, 60
(王晓嘉, 高隽, 王磊. 激光三角法综述. 仪器仪表学报, 2004, **s2**(8): 601–604, 60)
- Chen Xi-Feng, Wang Guo-Li, Guo Xue-Mei. A fiber sensor network and its optimization design for target tracking. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(7): 1348–1354
(陈喜锋, 王国利, 郭雪梅. 实现目标跟踪的光纤传感网络及其优化设计. 自动化学报, 2014, **40**(7): 1348–1354)
- Liu Tie-Gen, Yu Zhe, Jiang Jun-Feng, et al. Advances of some critical technologies in discrete and distributed optical fiber sensing research. *Acta Physica Sinica*, 2017, **66**(07): 60–76
(刘铁根, 于哲, 江俊峰, 等. 分立式与分布式光纤传感关键技术研究进展. 物理学报, 2017, **66**(07): 60–76)
- Kuznetsov A G, Kharenko D S, Babin S A, Tsydenzhapov I B, Shelemba I S. Ultralong fibre-optic distributed Raman temperature sensor. *Quantum Electronics*, 2017, **47**(10): 976–970
- Saxena M K, Raju S D V S J, Arya R, et al. Raman optical fiber distributed temperature sensor using wavelet transform based simplified signal processing of Raman backscattered signals. *Optics & Laser Technology*, 2015, **65**(1): 14–24
- Zhang Ming-Jiang, Li Jian, Liu Yi, et al. Temperature demodulation method for distributed fiber raman temperature measurement. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, **44**(03):

219–226

(张明江, 李健, 刘毅, 等. 面向分布式光纤拉曼测温的新型温度解调方法. *中国激光*, 2017, **44**(03): 219–226)

- 13 Cangialosi C, Ouerdane Y, Girard S, et al. Development of a temperature distributed monitoring system based on Raman scattering in harsh environment. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2014, **61**(6): 3315–3322
- 14 Kashyap R, Loranger S, Iezzi V L. High sensitivity distributed temperature fiber sensor using stimulated Brillouin scattering. *Optics Express*, 2017, **25**(26): 32591
- 15 Ding Z, Yang D, Liu K, et al. Long-range OFDR-based distributed vibration optical fiber sensor by multicharacteristics of rayleigh scattering. *Procedia Engineering*, 2017, **9**(5): 1–10
- 16 Amira Z, Mohamed B, Tahar E. Monitoring of temperature in distributed optical sensor: Raman and Brillouin spectrum. *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, **127**(8): 4162–4166
- 17 Tong Jing-Kuo, Jin Bao-Quan, Wang Dong, Wang Yu, Yu Hui, Bai Liang. Distributed optical fiber temperature measurement system for pipeline safety monitoring based on R-OTDR. *Chinese Journal of Sensors & Actuators*, 2018, **31**(01): 158–162
(佟敬阔, 靳宝全, 王东, 王宇, 余辉, 白亮. 面向管道安全监测的 R-OTDR 分布式光纤测温系统. *传感技术学报*, 2018, **31**(01): 158–162)
- 18 Yang Han-Rui, Li Yong-Yong, Yan Ai-Jun, Sun Bai-Zhong, Ge-Yue, Ji Ke-Liang, et al. The Monitoring Device And Method for the Expansion Joint of Heating Pipeline Based on Distributed Optical Fiber Temperature Sensing System. China Patent CN108896203A, issued November 27, 2018
(杨汉瑞, 李勇勇, 闫爱军, 孙佰仲, 葛粤, 纪克亮, 等. 一种基于分布式光纤温度传感系统的供热管道膨胀节的状态监测装置及其方法. 中国专利: CN108896203A, 2018 年 11 月 27 日)



杨汉瑞 东北电力大学自动化工程学院副教授. 2013 获哈尔滨工程大学自动化学院博士学位. 主要研究方向为光纤传感技术和光电检测技术, 特种光纤及器件. 本文通信作者.

E-mail: yanghanrui1208@163.com

(**YANG Han-Rui** Associate professor at the College of Automation Engineering, Northeast Electric Power University. She received

her Ph.D. degree from Harbin Engineering University in

2013. Her research interest covers optical fiber sensing technology and photoelectric detection technology, special optical fiber and devices. Corresponding author of this paper.)



李勇勇 东北电力大学自动化工程学院硕士研究生. 主要研究方向为光纤传感技术及其应用.

E-mail: liyongyong1103@163.com

(**LI Yong-Yong** Master student at the College of Automation Engineering, Northeast Electric Power University. His research interest covers optical

fiber sensing technology and its application.)



徐士博 博士, 东北电力大学自动化工程学院讲师. 主要研究方向为光纤传感及光电检测技术.

E-mail: 4685133@163.com

(**XU Shi-Bo** Ph.D., lecturer at the College of Automation Engineering, Northeast Electric Power University. His research interest covers optical fiber

sensing and photoelectric detection technology.)



张经纬 东北电力大学自动化工程学院硕士研究生. 主要研究方向为分布式光纤温度传感器技术.

E-mail: jwzhang0515@163.com

(**ZHANG Jing-Wei** Master student at the College of Automation Engineering, Northeast Electric Power University. His main research interest is distributed

optical fiber temperature sensor technology.)



栾宁 东北电力大学自动化工程学院硕士研究生. 主要研究方向为分布式光纤温度传感器技术.

E-mail: 18604328657@163.com

(**LUAN Ning** Master student at the College of Automation Engineering, Northeast Electric Power University. His main research interest is distributed

optical fiber temperature sensor technology.)