

# 基于分布式光纤应变传感的位移检测方法研究

杨永成<sup>1</sup>, 张华勇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中化学交通建设集团有限公司, 山东 济南

<sup>2</sup>天津海德尔科技有限公司, 天津

收稿日期: 2021年11月15日; 录用日期: 2022年1月18日; 发布日期: 2022年1月25日

## 摘要

针对隧道施工过程中拱顶沉降监测, 提出了一种基于分布式光纤应变传感的位移检测方法。测量光纤采用三点折线方式部署, 研究表明中点的相对位移变化与平均应变呈现二次曲线关系。通过实验验证了位移与应变的曲线关系, 对比实验表明位移检测精度达到0.31 mm。本文提出的方法可用于隧道拱顶沉降的长期、连续和实时检测, 得益于分布式传感的优点可进一步实现隧道多个位置的同时检测。

## 关键词

位移检测, 隧道拱顶沉降, 分布式光纤应变传感

# Research on Displacement Detection Method Based on Distributed Optical Fiber Strain Sensing

Yongcheng Yang<sup>1</sup>, Huayong Zhang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Chinanational Chemical Communications Construction Group Co., LTD., Jinan Shandong

<sup>2</sup>Tianjin Highideal Technology Co., LTD., Tianjin

Received: Nov. 15<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jan. 18<sup>th</sup>, 2022; published: Jan. 25<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

A displacement detection method based on distributed optical fiber strain sensing is proposed for

the monitoring of dome settlement during tunnel construction. The measurement fiber is deployed in a three-point broken line method, and the study shows that the relative displacement change of the midpoint and the average strain present a quadratic curve relationship. The curve relationship between displacement and strain is verified through experiments. Comparative experiments show that the displacement detection accuracy reaches 0.31 mm. The method proposed in this paper can be used for long-term, continuous and real-time detection of tunnel vault settlement, benefiting from the advantages of distributed sensing, it can realize the simultaneous detection of multiple locations in the tunnel in one step.

## Keywords

Displacement Detection, Tunnel Vault Settlement, Distributed Optical Fiber Strain Sensing

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

沉降是表征隧道结构安全的重要指标,隧道的沉降监测是隧道工程监测的重要内容[1]。隧道沉降监测的传统技术包括精密水准测量技术、全站仪、静力水准仪三维激光扫描技术和电水平尺监测技术。这些监测技术存在人工操作繁琐、自动化程度低,或者难以兼顾低成本大规模布设和准确测量[2]。

近年来,分布式光纤应变传感技术广泛应用于岩建筑工程结构健康监测,具有传感距离远和稳定性好的优势。这些监测技术多采用光纤测量得到的应变数据进行结构安全评估,判断依据不够直观,难以对接现有的施工安全控制标准,对现场施工的指导性较差[3]。

为了实现隧道沉降的准确位移监测,本文针对三点式折线光缆部署方案,基于布里渊光时域分析应变/温度测量技术(BOTDA, Brillouin Optical Time Domain Analysis),提出了一种由光纤应变曲线反演隧道沉降位移的方法,并设计了对比实验对该方法的准确性进行了验证。

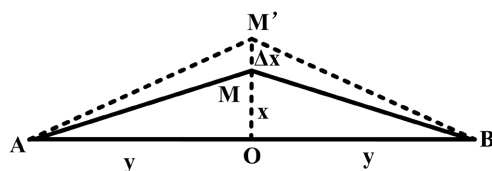
## 2. 原理

### 2.1. 分布式光纤应变监测技术简介

布里渊散射是光在光纤内传输引起的一种散射现象,布里渊散射光的中心频率变化与散射位置光纤的应变和温度成线性关系,因此可以用来进行应变或温度测量。基于受激布里渊散射机理的测量系统称为BOTDA。本文研究采用公司自研的一款分布式光纤应变解调仪,应变按测量精度为 $5\ \mu\epsilon$ ,空间分辨率为10 cm,数据采样间隔为5 cm。

### 2.2. 位移反演模型

本文提出的位移反演光纤部署方式如图1所示,借鉴了分布式光纤的锯齿状布设原理[4]。在初始状态A、B两个端点用于固定光纤,待测动点M位移在AB的中垂线上,位移反演的目的是通过AB段光纤上应变的变化得到M点位移的变化。当光纤初始状态为AMB时,文献[4]证明了这对位移检测具有增敏作用,并通过数值计算的方式得到了折线比例与位移的变化关系。本文在此基础上进一步讨论位移变化的一般规律。



**Figure 1.** Schematic diagram of fiber deployment for displacement inversion

**图 1.** 位移反演光纤部署示意图

不失一般性可以初始光纤状态 AOB 作为光纤应变变化的参考, 若 O 点发生位移且移动到 M 点, 分别记位移大小为  $x$ , 产生的应变为  $\varepsilon$ ,  $OA = OB = y$ 。通过应变的定义可得到如下等式,

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{x^2 + y^2} - y}{y} = \sqrt{\left(\frac{x}{y}\right)^2 + 1} - 1 \quad (1)$$

对于 BOTDA 技术, 解调仪测量得到的应变值  $\varepsilon'$  与实际应变值  $\varepsilon$  是一种线性关系, 即  $\varepsilon = k * \varepsilon' + t$ , 其中参数  $k$ 、 $t$  与激光器、调制参数和光纤本身参数等有关, 实际应用时一般需要校准。将  $\varepsilon = k * \varepsilon' + t$  带入上述公式, 展开可得到如下形式

$$Y = a\varepsilon'^2 + b\varepsilon' + c \quad (2)$$

其中,

$$Y = \left(\frac{x}{y}\right)^2, a = k^2, b = 2k(t+1), c = (t+1)^2 - 1 \quad (3)$$

由公式(2)可知, 与位移有关的参量  $Y$  和解调仪测量的应变值  $\varepsilon'$  是一种二次函数关系。在光纤部署后, 可通过加载多个位移变化点得到一组  $Y$  值和对应的应变值  $\varepsilon'$ 。可先通过曲线拟合的方式得到参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  的估计值, 从而可得到  $Y$  与应变值  $\varepsilon'$  的解析函数关系, 为了确定 3 个参数值则至少需要 3 组测量值。进一步可通过变换  $x = y\sqrt{Y}$  得到实际的位移值  $x$ 。此时的位移值  $x$  是相对初始光纤状态 AOB 的变化, 如果光纤初始状态为折线状态, 可通过作差得到位移的相对变化。

实际上, 通过上面方法计算位移并不要求初始状态为直线状态, 因为计算过程只是利用了位移变换值与测量应变值的二次曲线关系。可以选择折线状态作为光纤部署初始状态, 除了增敏作用, 还可以通过测量应变值的增大或减小进一步判断位移变化的方向, 即应变增加, 位移增加; 应变减小, 位移减小。曲线拟合的引入可以避免应变测量时针对光纤参数或调制参数的校准。

### 3. 实验

#### 3.1. 应变测量

首先对分布式光纤解调仪的测量准确性进行验证。测量光纤采用单模裸光纤, 应变变化通过调节光纤位移实现, 采用的调节装置是精密位移手动调节平台, 最大行程 200 mm, 如图 2 所示。调节手轮通过旋转带动滚珠丝杠的平移, 实现位移的精确控制。手轮上有刻度, 旋转一周共有 20 个大格, 对应行程 5 mm, 每个大格有 10 个小格, 每个小格对应的位移为 0.025 mm。

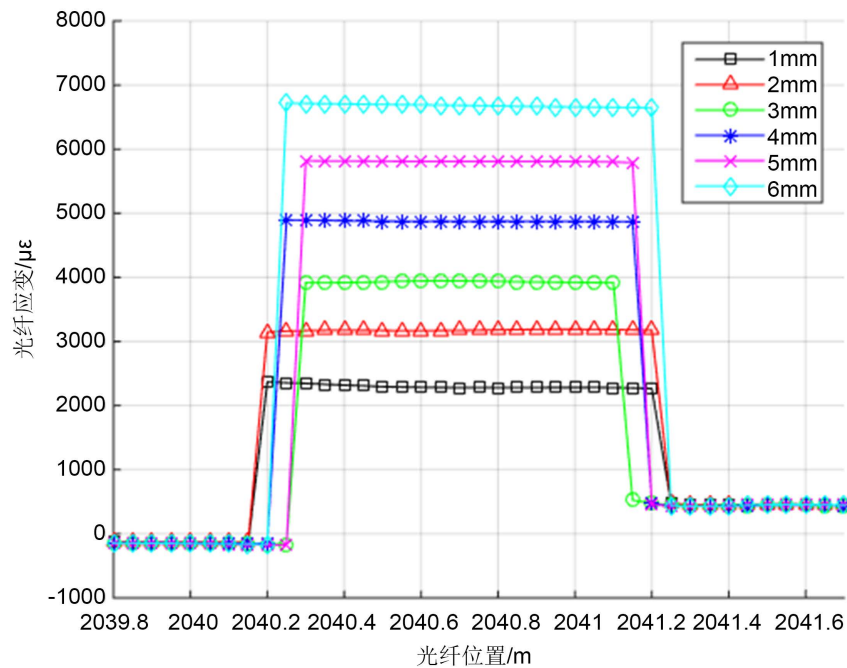
光纤固定采用胶带黏贴结合金属块压紧方式进行固定, 能够实现光纤的可靠固定并进行多次重复实验而不破坏光纤。光纤进行拉伸采用 2 个位移调节器, 固定在实验平台同一条轴线上, 保证两个调节器的中心轴在同一直线上。实验过程中, 将其中 1 个位移调节器的位移台固定, 通过调节另外一台位移调节器的手轮来调整光纤长度, 从而实现光纤应变的调整。



**Figure 2.** Displacement adjustment and fixation of bare fiber  
**图 2.** 裸光纤的位移调节和固定

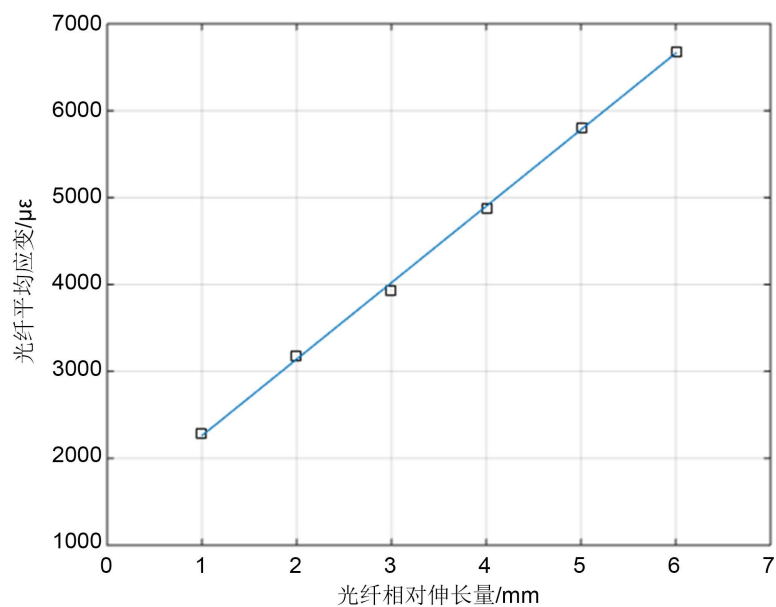
实验的初始状态将 2 个位移调节台的距离调到 1000 mm, 并使得光纤进行适度绷紧从而得到一个初始的预加应力。这样做的原因是因为在光纤处于松弛状态时, 很难找到应变为 0 的初始状态。通过光纤伸长量与应变的线性变化关系来验证应变测量的准确性。

通过调节光纤伸长量可得到对应的光纤应变分布曲线, 光纤伸长量分别为 1 mm、2 mm、3 mm、4 mm、5 mm 和 6 mm, 对应的光纤应变分布曲线如图 3 所示, 此处只截取了应变变化附近的测量数据。



**Figure 3.** Fiber strain corresponding to different fiber elongation  
**图 3.** 不同光纤伸长量对应的光纤应变

对应变区域靠近中间位置 0.6 m 范围内的点进行平均作为应变测量值, 对应的解调数据中每组数据有 13 个位置点。对光纤伸长量  $\Delta l$  与应变平均值  $\epsilon$  进行线性拟合, 得到的拟合曲线如图 4 所示, 由图可见, 应变测量具有比较好的线性度, 从而可进行准确的应变测量。



**Figure 4.** Curve fitting of fiber stretching experiment  
**图 4.** 光纤拉伸实验的曲线拟合

拟合得到的曲线如下:

$$\varepsilon = 880.3 * \Delta l + 1380.1 \quad (4)$$

其中应变  $\varepsilon$  的单位是为应变  $\mu\varepsilon$ , 光纤伸长量  $\Delta l$  的单位是 mm。

### 3.2. 位移反演实验

光纤折线拉伸位移反演实验装置如图 5 所示, 总共采用 3 个位移调节器, 有 2 个位移调节器的中心轴线固定在同一条直线上, 第 3 个位移调节器采用垂直固定, 其轴线位于前两个位移调节器的中垂线上。位于中垂线上的位移调节器用于调节光纤在垂直方向上的位移, 另外 2 个位移调节器固定不动, 仅起到固定两端光纤的作用。两端的光纤通过缠绕方式固定在图 3 中的圆柱体外螺纹上, 光纤固定的 2 个端点距离为 1000 mm。



**Figure 5.** Schematic diagram of the experimental device for the inversion of the tensile displacement of the optical fiber broken line  
**图 5.** 光纤折线拉伸位移反演实验装置示意图

在初始状态, 光纤上有一个比较小的预紧应力, 避免初始状态松弛影响实验过程中的应力对比。实验过程中, 调节的位移范围是 5~40 mm, 具体的位置值包括[5, 10, 15, 20, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40]。测量得到的实验数据如表 1 和表 2 所示:

**Table 1.** Displacement and strain distribution of optical fiber broken line, unit  $\mu\epsilon$

**表 1.** 光纤折线位移应变分布, 单位  $\mu\epsilon$

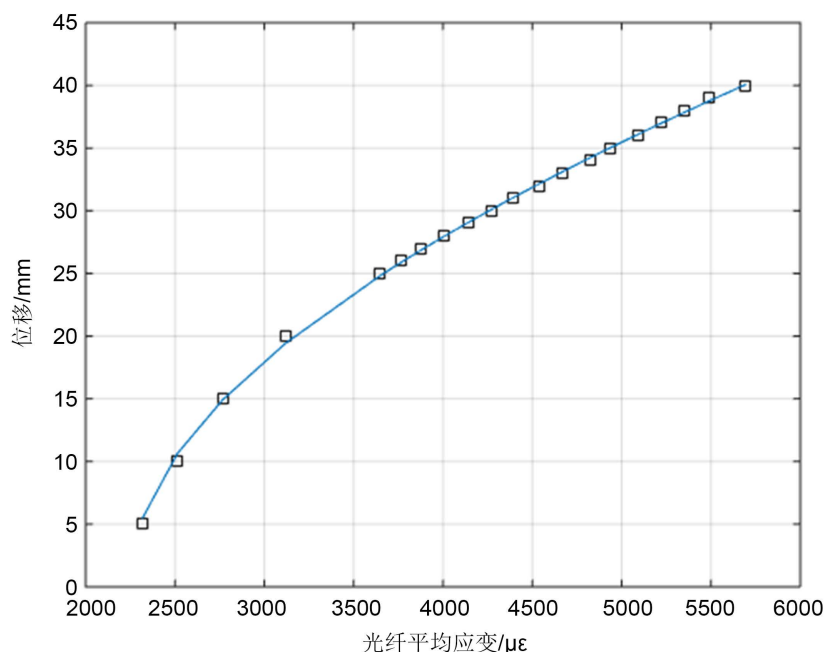
序号	光纤位置 /m	位移/mm									
		5	10	15	20	25	26	27	28	29	30
1	2041.60	2343.0	2533.8	2781.3	3091.9	3646.0	3759.7	3887.8	4002.9	4161.6	4278.5
2	2041.65	2340.8	2533.4	2777.9	3093.4	3643.8	3756.6	3881.3	4002.4	4153.4	4277.1
3	2041.70	2336.1	2532.0	2772.1	3093.1	3641.5	3755.9	3877.2	3998.7	4149.9	4275.3
4	2041.75	2332.8	2527.5	2767.5	3095.3	3641.1	3760.3	3875.7	4001.4	4146.0	4275.4
5	2041.80	2325.6	2521.2	2763.3	3099.5	3645.4	3763.3	3869.5	4004.3	4145.0	4278.5
6	2041.85	2319.0	2515.3	2761.4	3106.3	3646.2	3766.1	3870.6	4008.4	4142.0	4277.1
7	2041.90	2314.0	2507.8	2758.1	3113.4	3648.2	3769.9	3871.4	4011.8	4143.2	4283.3
8	2041.95	2311.7	2502.5	2761.8	3120.5	3648.3	3771.2	3873.0	4012.5	4144.9	4281.3
9	2042.00	2309.5	2500.0	2761.8	3129.4	3651.1	3774.7	3876.7	4011.7	4144.9	4280.5
10	2042.05	2306.8	2499.6	2760.7	3136.6	3653.3	3773.4	3876.9	4010.3	4145.1	4276.8
11	2042.10	2305.2	2501.7	2764.2	3143.8	3655.3	3772.6	3875.8	4005.9	4141.5	4275.6
12	2042.15	2305.4	2503.4	2769.5	3144.6	3656.5	3768.3	3874.2	4003.1	4139.5	4264.9
13	2042.20	2305.5	2507.0	2773.9	3147.1	3656.2	3763.6	3868.4	3998.8	4136.8	4264.2
应变平均值		2319.6	2514.2	2767.2	3116.5	3648.7	3765.8	3875.3	4005.6	4145.7	4276.0

**Table 2.** Displacement and strain distribution of optical fiber broken line, unit  $\mu\epsilon$

**表 2.** 光纤折线位移应变分布, 单位  $\mu\epsilon$

序号	光纤位置 /m	位移/mm									
		31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
1	2041.60	4394.7	4553.6	4677.2	4837.3	4945.2	5102.2	5214.3	5356.0	5485.4	5707.0
2	2041.65	4399.7	4548.1	4675.7	4833.8	4944.2	5101.1	5222.3	5356.4	5490.4	5705.1
3	2041.70	4391.1	4547.8	4675.6	4834.1	4942.8	5101.9	5223.1	5358.1	5491.2	5705.5
4	2041.75	4388.5	4544.8	4676.9	4833.2	4942.7	5101.6	5225.0	5355.1	5492.8	5703.2
5	2041.80	4392.1	4542.6	4678.5	4829.1	4940.1	5099.3	5224.9	5353.2	5491.7	5698.1
6	2041.85	4392.3	4541.6	4677.7	4828.0	4939.6	5096.8	5222.2	5352.0	5492.0	5695.1
7	2041.90	4392.9	4540.5	4676.6	4826.2	4937.0	5094.0	5218.7	5349.7	5488.7	5691.4
8	2041.95	4392.5	4537.7	4673.2	4822.8	4935.2	5089.5	5215.0	5344.9	5490.0	5689.6
9	2042.00	4391.4	4535.7	4669.7	4819.3	4933.2	5085.3	5213.3	5343.8	5489.4	5680.4
10	2042.05	4388.2	4531.0	4665.9	4815.4	4931.8	5082.6	5212.8	5344.8	5492.3	5680.9
11	2042.10	4385.9	4528.3	4662.9	4810.9	4930.1	5081.4	5214.8	5350.4	5494.7	5680.7
12	2042.15	4383.5	4525.3	4659.3	4807.7	4929.7	5079.6	5217.2	5356.3	5498.0	5682.1
13	2042.20	4383.1	4522.2	4656.2	4804.6	4929.2	5078.7	5220.0	5361.5	5504.4	5682.8
应变平均值		4390.5	4538.4	4671.2	4823.3	4937.0	5091.8	5218.7	5352.5	5492.4	5692.5

对位移值[5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40]及对应的应变进行曲线拟合, 用其余数据用作数据验证。拟合得到的曲线如图 6 所示, 拟合得到的参数分别为  $a = 3.2587 \times 10^{-11}$ ,  $b = 1.6000 \times 10^{-11}$ ,  $c = 3.7829 \times 10^{-3}$ 。



**Figure 6.** Curve fitting results of inversion of stretching displacement of optical fiber broken line

**图 6.** 光纤折线拉伸位移反演的曲线拟合结果

通过拟合得到的曲线对位移进行计算, 并与实际位移数据进行对比, 得到的结果如表 3 所示。分析验证数据可知, 位移计算值与实验位移调节值之差最大为 0.31 mm。

**Table 3.** Comparison of displacement inversion data

**表 3.** 位移反演数据对比

应变平均值/ $\mu\epsilon$	3768.9	3873.2	4007.2	4142.9	4389.2	4534.3	4669.1	4818.7	5087.9	5217.8	5350.9	5493.4
位移/mm	26.00	27.00	28.00	29.00	31.00	32.00	33.00	34.00	36.00	37.00	38.00	39.00
位移计算值/mm	26.00	26.96	28.06	29.20	31.11	32.21	33.17	34.25	36.09	36.93	37.80	38.69
计算误差/mm	0.00	-0.04	0.06	0.20	0.11	0.21	0.17	0.25	0.09	-0.07	-0.20	-0.31

测量过程中数据采集时间比较短, 忽略了温度变化的影响。在实际应用中可进一步采用温度补偿方式提高位移检测精度。

#### 4. 结论

本文提出了一种基于分布式光纤应变传感的位移反演方法, 采用三点折线方式部署, 建模表明相对位移变化与平均应变呈现二次曲线关系, 并通过实验分析进行了验证, 位移检测精度达到 0.31 mm。本文提出的方法可用于隧道拱顶沉降的长期、连续和实时检测, 并可实现多个位置同时检测。

## 致 谢

本文研究来自中化学交通建设集团有限公司 2020 年度科技开发项目“隧道绿色智能施工配套技术及装备研究”的支持, 特此表示感谢。

## 参考文献

- [1] 沈圣, 吴智深, 杨才千, 等. 基于分布式光纤应变传感技术的盾构隧道横截面收敛变形监测方法[J]. 土木工程学报, 2013, 46(9): 104-116.
- [2] 武建, 王涛, 李波, 等. 基于分布式光纤传感的盾构隧道沉降监测方法研究[J]. 河南科学, 2021, 39(6): 943-947.
- [3] 侯公羽, 李子祥, 胡涛, 等. 基于分布式光纤应变传感技术的隧道沉降监测研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(9): 3148-3158.
- [4] 侯公羽, 谢冰冰, 江玉生, 等. 用于巷道沉降变形监测的光纤锯齿状布设技术与原理[J]. 岩土力学, 2017, 38(S1): 96-102.