

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107564

基于分布式光纤传感技术的结构变形估计方法研究^{*}

单一男¹, 马智锦¹, 曾旭¹, 徐新生², 武湛君²

(1. 大连交通大学 机车车辆工程学院 大连 116028; 2. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室 大连 116024)

摘要:悬臂板是广泛应用于工程实践的常见结构形式,在航空航天、轨道交通、土木工程等领域均有重要应用,其变形监测问题一直是此类领域重要的研究内容之一。本文将矩形弹性悬臂薄板纯弯曲的一般问题作为研究对象,讨论求解该问题的方法,建立应变与位移的联系,并在线弹性小变形理论框架下,得到结构横向位移的有限差分表达式;采用具有高密度应变测量能力的分布式光纤传感器获取表达式所需的应变输入量,并提出了一种变形测量数据的误差修正策略;在金属悬臂梁弯曲试验中采用百分表进行对比,验证基于分布式光纤传感技术进行结构变形估计的技术可行性与测量的准确性。结果表明,结构变形估计值与百分表测量值的偏差最大为2.0 mm,占百分表示数的9.22%,分布式光纤传感技术可以实现结构变形估计,具有潜在的应用前景。

关键词: 分布式光纤传感器;高密度应变;变形估计;误差修正

中图分类号: TH17 TB121 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.20

Research on structural deformation estimation based on distributed optical fiber sensing technology

Shan Yi'nan¹, Ma Zhijin¹, Zeng Xu¹, Xu Xinsheng², Wu Zhanjun²

(1. College of Locomotive and Rolling Stock Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China;

2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Cantilever plates are common structures, which have been widely utilized in engineering practice, including aerospace, rail transportation, civil engineering and other fields. The deformation estimation is always one of the important research contents. This paper aims to solve the problem of bending of rectangular elastic cantilever plates and proposes a method to solve it by establishing the relationship between strain and deformation. The finite difference expression of structural transverse deformation is achieved under the framework of linearly elastic small deflection theory. The distributed optical fiber sensor with the ability of high-density strain measuring is used to obtain the strain input required for the expression, and a method of error correction for deformation measurement is proposed. The technical feasibility and measurement accuracy of structural deformation estimation based on distributed optical fiber sensing technology are evaluated. Some dial indicators are used in the metal cantilever bending tests. Experimental results show that the maximum deviation between results from the estimation and the dial indicators is 2.0 mm, which accounts 9.22% of the indication from dial indicators. The distributed optical fiber sensing technology is competent to perform deformation estimation, which has the potential application prospect.

Keywords: distributed optical fiber sensor; high-density strain; deformation estimation; error correction

收稿日期: 2021-03-06 Received Date: 2021-03-06

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划(2018YFA0702800)、基础科研经费(DUT16ZD214, DUT19ZD101)、国家自然科学基金(11602048, 51805068)项目资助

0 引 言

飞机的机翼和卫星的太阳能电池板等都是典型的悬臂板结构,当这些结构受到热载荷、太阳风、空间碎片撞击等作用时,会发生长时间无法恢复稳定的变形或振动,这将极大影响设备的正常运行,甚至威胁舱内人员以及邻近飞行器的安全^[1-3]。2003年,美国的“太阳神”原型高空长航时无人机在试飞过程中突然空中解体,其事故分析报告指出^[4-5]:在飞行过程中,高度变形的机翼在不稳定俯仰振荡过程中出现的结构失效,是其解体的直接原因,而根本原因在于缺乏足够的分析方法对飞行过程中的结构变形开展监测,从而导致地面飞行员无法及时采取应对措施。因此,有必要发展能够分析此类结构变形的监测方法,保障飞行器等结构的正常运行和结构安全。

近年来,各个行业根据测量对象和测量需求的特点,逐步发展出了适用于各类特定场景或具备一定通用性的变形测量方法,按传感器是否与结构接触可分为非接触式和接触式测量方法。在非接触式测量方法中,基于数字图像相关方法是较常见的,即通过不同方位放置的摄像机获取同一物体的数字图像,经过复杂的数学计算,获得被测结构各点在空间中的三维坐标^[6-10]。然而,由于这些方法很多无法平衡好测量精度、实时性和环境适应性等要求,实际工程应用受限。在结构变形的接触式测量方法中,基于应变信息的变形计算方法是较常见的。其中,分布式光纤传感器在应变信息采集方面具有较突出的优势。所谓分布式光纤传感器,指的是整根光纤上的任意点,既是光波的传输介质,又是能够感知附近物理场变化的测点,它可在整个光纤长度上以距离的连续函数的形式传感出被测参数随光纤长度方向的变化情况。分布式光纤传感器与传统的应变测量方法相比,其优点是:测点连续且数量众多,测点数量不受激光带宽及应变量程的限制等。近年来发展迅速的具有代表性的是一种基于背向瑞利散射的分布式光纤传感器。

国内外很多学者开展了基于光纤传感器结合位移反演的变形估计方法研究。孙俊康等^[11]研究了基于应变的曲率计算方法,在此基础上给出了曲面拟合的三维形状重建算法,并采用光纤光栅传感器及数字摄影测量系统对变形机翼三维重构效果进行了对比验证。Ko等^[12-13]基于应变-位移理论发展出了一种位移计算理论,在一根碳纤维空心管上布置了若干根弱反射光纤光栅传感器,并将这根具有形状传感功能的空心管作为承力结构,安装在无人机的机翼中,计算弯扭组合状态下的机翼变形,获得了比较好的效果。

这些方法在一定程度上能够做到全天候实时测量,

且具有一定的测量精度,推进了基于光纤传感器的结构变形测量方法研究。然而,结合悬臂板的应变-位移本构方程及高密度应变测量方法的结构变形估计方法,还比较少见。本文从矩形弹性薄板弯曲的一般问题入手,讨论一种求解弹性薄板弯曲问题的方法。以纯弯曲变形结构为研究对象,在线弹性小变形理论框架下,利用应变、曲率和结构尺寸之间的关系,得到结构横向位移的有限差分表达式。针对悬臂梁,分别使用有限元计算数据和试验数据,发展分布式光纤传感器位移测量精度的修正策略。通过将试验结果与百分表示数进行对比,证明基于分布式光纤传感技术的变形估计方法在结构的弯曲变形问题中,具有较好的适用性和精度。

1 基于背向瑞利散射的分布式光纤传感器

光纤中分子的随机性和杂质等因素会造成光纤局部折射率的不均匀,而且这种折射率不均匀的现象在不同光纤中表现不同^[14]。由于光纤折射率的随机变化,造成了背向瑞利散射光的波长也具有随机变化的特点^[15]。但是对同一根光纤而言,这种随机的背向瑞利散射光是稳定不变的,只要光纤的状态不发生变化,便总是产生同样的瑞利散射光信号,因此这种背向瑞利散射光信号被称为此根光纤的固有纹理信息。如果光纤的某位置发生变形或温度发生改变,导致光纤被拉伸或者被压缩,则仅在该位置及其附近的背向瑞利散射光产生偏差,通过比较光纤受激前后的背向瑞利散射光信息,就能够对这种光纤状态的变化进行精确的定位和量化^[16-17]。

为了获取更高的空间分辨率,背向瑞利散射光信号需要使用光频域反射技术(optical frequency domain reflectometry, OFDR)进行解调^[18],解调原理如图1所示^[19]。在OFDR系统中,变频激光器的光路耦合到Mach-Zehnder干涉仪中,其中一路长度恒定的光纤段作为参考臂,另一路光纤段则作为测量段。从测量段反射回来的光信号和参考臂的光信号在输出耦合器中发生干涉。由于探测器同时接收到所有背向散射信号,因此需要利用傅里叶变换将时域上的耦合信号变为频域信号,通过这样的操作,光频率信号就能与其在光纤中的空间位置建立联系^[20]。

应变和温度是背向瑞利散射光产生响应的主要因素,局部背向瑞利散射光的变化会导致局部反射光谱的漂移。测试光纤进行首次测量并存储瑞利散射信号之后,便形成了一个应变或温度传感器,而所存储的数据成为基准测量数据。由应变 ε 或者温度 T 响应得到的光谱漂移类似于共振波的漂移 $\Delta\lambda$ 或者光栅的光谱漂移 $\Delta\nu$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = -\frac{\Delta\nu}{\nu} = K_T\Delta T + K_\varepsilon\varepsilon \quad (1)$$

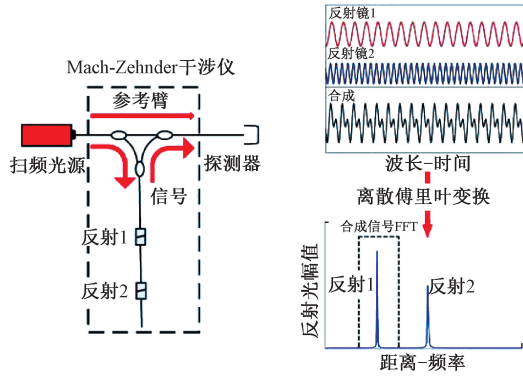


图1 基于 OFDR 的解调原理

Fig. 1 Demodulation principle based on OFDR

其中, λ 和 ν 分别是平均光波波长和频率, K_T 和 K_ε 分别是温度和应变标准常数。

不考虑应变, 温度变化可写为如下形式:

$$\Delta T = -\frac{\bar{\lambda}}{cK_T} \Delta \nu \quad (2)$$

其中, $\bar{\lambda}$ 是扫描的中心波长, c 是光速。

类似地, 不考虑温度变化, 应变可以写为:

$$\varepsilon = -\frac{\bar{\lambda}}{cK_\varepsilon} \Delta \nu \quad (3)$$

2 基于高密度应变信息的位移求解方法

根据定义, 当板的厚度远小于中面最小尺寸的 $\frac{1}{5}$ 时, 这个板就称为薄板, 本文仅考虑薄板的弹性力学问题^[21]。设直角坐标系 (x, y, z) 中有长、宽、厚度分别为 $a, 2b$ 和 h 的矩形薄板, 其 Oxy 平面与薄板中面重合, 如图2所示。设其弹性模量为 E , 泊松比为 ν , 板的边界在 $x=0$ 处为固支边界, 而其他三边为自由边界。

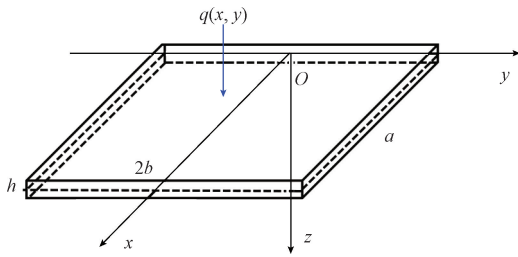


图2 矩形薄板

Fig. 2 Rectangular plate

在拉格朗日体系下, 矩形薄板的基本方程可以表述为:

$$\begin{cases} \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} = Q_x \\ \frac{\partial M_y}{\partial y} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} = Q_y \\ \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = q(x, y) \end{cases} \quad (4)$$

其中, M_x, M_y 和 M_{xy} 为弯矩和扭矩; Q_x 和 Q_y 为剪力; $q(x, y)$ 为板法向外部分布载荷, 这里,

$$\begin{cases} M_x = D(\kappa_x + \nu \kappa_y) \\ M_y = D(\kappa_y + \nu \kappa_x) \\ M_{xy} = D(1 - \nu) \kappa_{xy} \end{cases} \quad (5)$$

其中, 弯曲刚度 $D = Eh^3/12(1 - \nu^2)$, 板曲率为:

$$\kappa_x = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \kappa_y = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \kappa_{xy} = -\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (6)$$

式(4)可由位移表示为:

$$D \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) + q(x, y) = 0 \quad (7)$$

对于悬臂板, 其侧边弯矩和剪力为0, 固支端位移及转角为0, 自由端弯矩及剪力为已知, 不妨令

侧边条件:

$$\begin{cases} V_y|_{y=-b} = 0, & M_y|_{y=-b} = 0 \\ V_y|_{y=b} = 0, & M_y|_{y=b} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

端部边界条件:

$$\begin{cases} w|_{x=0} = 0, & \partial_x w|_{x=0} = 0 \\ V_x|_{x=a} = \bar{V}_x^{(a)}(y), & M_x|_{x=a} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

假定光纤布设位置为 $z = h/2$, 此处应变为 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ 和 ε_{xy} 。设板中面应变为 e_x, e_y 和 e_{xy} 。根据三维弹性力学理论和板壳理论, 在薄板 $z = h/2$ 处的应变可以表示为:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{h}{2} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

由式(4)和(5), 得

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{h_0}{2D(1 - \nu^2)} \begin{Bmatrix} M_x - \nu M_y \\ M_y - \nu M_x \\ (1 + \nu) M_{xy} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

如果一个线段的应变为已知, 不妨设 $\varepsilon_x = \bar{\varepsilon}_x(y = y_0, x_1 \leq x \leq x_2)$ 。由式(10)可知

$$\bar{\varepsilon}_x = \varepsilon_x(x, y_0) = -\frac{h}{2} \frac{\partial^2 w(x, y_0)}{\partial x^2} \quad (x_1 \leq x \leq x_2) \quad (12)$$

由于 $y = y_0$ 为常数, 上式即为常微分方程。对方程求解, 可得:

$$w(x, y_0) = c_1 + c_2(x - x_1) - \frac{2}{h} \int_{x_1}^x \int_{x_1}^v \bar{\varepsilon}_x(u) du dv$$

$$(x_1 \leq x \leq x_2) \quad (13)$$

其中, $c_1 = w(x_1, y_0)$, $c_2 = \partial_x w(x, y_0)_{x=x_1}$ 。

由于悬臂板固支端的位移和转角为 0, 因此求得待定常数 $c_1 = 0$ 和 $c_2 = 0$, 即:

$$w(x, y_0) = -\frac{2}{h} \int_{x_1}^x \int_{x_1}^v \tilde{\varepsilon}_x(u) du dv \quad (x_1 \leq x \leq x_2) \quad (14)$$

其二阶导数表示为:

$$\frac{\partial^2 w(x)}{\partial x^2} = \frac{2}{h} \tilde{\varepsilon}_x(x) \quad (15)$$

令

$$\frac{\partial w(x)}{\partial x} = \varphi(x) \quad (16)$$

其中, $\varphi(x)$ 为转角, 则可计算曲率:

$$\frac{\partial \varphi(x)}{\partial x} = \frac{2}{h} \tilde{\varepsilon}_x(x) \quad (17)$$

事实上, 曲率 κ_x 应该写成:

$$\kappa_x = \frac{\frac{\partial^2 w(x)}{\partial x^2}}{\left[1 + \left(\frac{\partial w(x)}{\partial x}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (18)$$

根据式 (15) ~ (17), 可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 w(x)}{\partial x^2} &= \frac{2}{h} \tilde{\varepsilon}_x(x) \left[1 + \left(\frac{\partial w(x)}{\partial x}\right)^2\right]^{3/2} = \\ &\frac{2}{h} \tilde{\varepsilon}_x(x) \left[1 + \frac{3}{2} \left(\frac{\partial w(x)}{\partial x}\right)^2\right] \end{aligned} \quad (19)$$

根据有限差分法基本原理, 式 (19) 中的二阶导数 $\frac{\partial^2 w(x)}{\partial x^2}$ 写作中心差分形式, 一阶导数 $\frac{\partial w(x)}{\partial x}$ 写作前差分形式, 即:

$$\frac{\partial^2 w(x)}{\partial x^2} = \frac{w(x + \Delta x) - 2w(x) + w(x - \Delta x)}{(\Delta x)^2} \quad (20)$$

$$\frac{\partial w(x)}{\partial x} = \frac{w(x + \Delta x) - w(x)}{\Delta x} \quad (21)$$

将有限长的光纤布设路径等分为 N 个微段, 每个微段长度为 Δx , 任取其中的第 i 、 $i+1$ 和 $i+2$ 点为研究对象, 有:

$$\frac{\partial^2 w(x_{i+1})}{\partial x^2} = \frac{w_{i+2} - 2w_{i+1} + w_i}{(\Delta x)^2} \quad (22)$$

当 Δx 极小时, 有:

$$\varphi(x_i) \equiv \varphi_i = \frac{\partial w(x_i)}{\partial x} = \frac{w_{i+1} - w_i}{\Delta x} \quad (23)$$

将式 (19) 代入式 (23), 整理得:

$$\tilde{\varepsilon}_x(x_i) [2 + 3(\varphi_i)^2] (\Delta x)^2 = h [w_{i+2} - 2w_{i+1} + w_i] \quad (24)$$

由端部条件可知, $w_0 = 0$, $w'_0 = 0$ 。因此, 就有

$$\begin{cases} \tilde{\varepsilon}_x(x_i) [2 + 3(\varphi_i)^2] (\Delta x)^2 = h [w_{i+2} - 2w_{i+1} + w_i] \\ \varphi_i \Delta x = w_{i+1} - w_i \\ w_0 = 0 \\ \varphi_0 = 0 \end{cases} \quad (25)$$

其中, $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。或将上式归结为:

$$\begin{cases} w_{i+2} = \tilde{\varepsilon}_x(x_i) h^{-1} [2(\Delta x)^2 + 3w_{i+1}^2 + 3w_i^2 - 6w_i w_{i+1}] + 2w_{i+1} - w_i \\ w_0 = 0 \\ w_1 = 0 \end{cases} \quad (26)$$

其中, $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

3 结构变形估计方法的试验验证

使用双组份环氧树脂在尺寸为 $500 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的铝合金悬臂梁结构试件上表面沿轴线粘贴长度约为 400 mm 的分布式光纤传感器。在分布式光纤传感器两侧各粘贴 10 片电阻式应变片, 应变片之间间距为 40 mm 。两侧应变片组有 20 mm 的错位, 因此所有应变片在光纤上的投影间距为 20 mm 。在光纤所在位置布置 5 个测量分辨率为 0.01 mm 、公差为 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 的百分表, 用于测量悬臂梁的变形, 试件如图 3 所示。百分表与试件固支端的距离如表 1 所示。

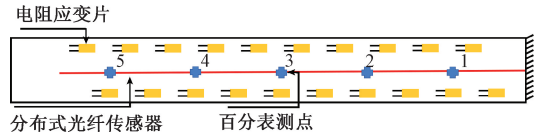


图3 悬臂梁结构试件

Fig. 3 The cantilever beam

表1 百分表坐标

Table 1 Coordinates of dial gauge

百分表编号	1	2	3	4	5
坐标/mm	9	91	191	294	383

自由端使用托盘悬挂砝码的方式施加静力载荷, 每个砝码的重量为 250 g 。分布式光纤传感器使用 ODiSI A50 进行解调, 标距长度设置为 10 mm , 测点中心距离设置为 1 mm 。应变片的数据采集使用江苏东华测试设计并制造的 DH3816 静态应变仪。

试验过程如下:

1) 试件受载前的静止状态设为测试系统的基准状态, 将分布式光纤传感器、应变片和百分表调零;

2) 在托盘上悬挂 250 g 砝码,待悬臂梁稳定后,测量并记录此时的分布式光纤传感器、应变片及百分表测量数据;

3) 重复步骤 2),至悬挂砝码总重量达到 1 000 g;

4) 取下所有砝码及托盘,试验结束。

试验过程如图 4 所示。

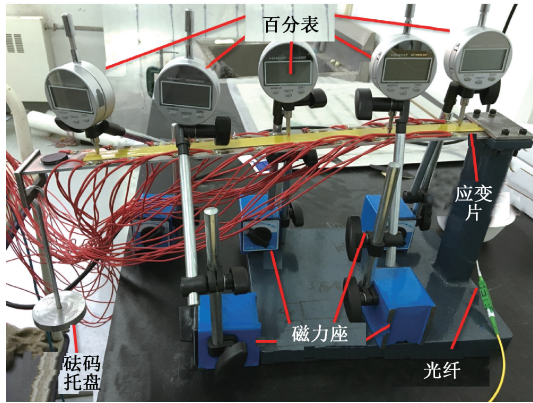


图 4 试验过程

Fig. 4 Experiment process

试验得到的分布式光纤传感器与电阻应变片的应变测量数据对比如图 5 所示。

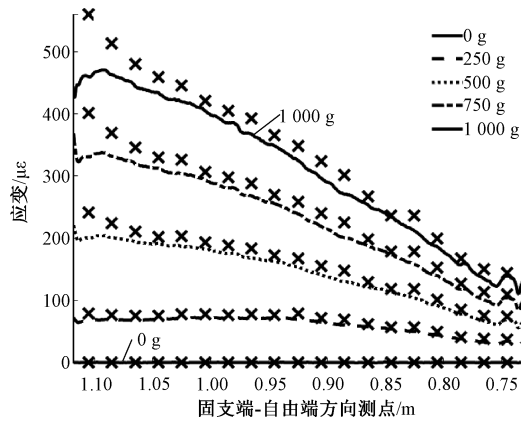


图 5 分布式光纤传感器与应变片的应变测试数据对比

Fig. 5 Comparison of strain between distributed optical fiber sensor and strain gauges

从图 5 中可以看出,分布式光纤传感器和应变片的应变测量数据在试件固支端出现比较大的偏差,且光纤测量数据两端均有不同程度的应变幅值下降,主要原因是^[22-23]:分布式光纤传感器测量段的应变传递效率与粘接剂的厚度、粘贴长度和弹性模量等因素相关,粘接剂厚度不均匀导致应变测量数据有小幅波动,且靠近光纤终端附近的应变传递效率有非线性下降的趋势,导致应变测量值偏小。两种传感器测量数据的绝对误差及相对误

差分析如表 2 所示。

表 2 应变测量误差分析

Table 2 Error analysis of strain measurement

应变片	绝对误差/ $\mu\epsilon$				相对误差/%			
	250 g	500 g	750 g	1 000 g	250 g	500 g	750 g	1 000 g
1	12.08	40.32	70.74	101.08	15.30	16.73	17.60	18.02
2	6.56	23.35	38.12	49.89	8.63	10.42	10.30	9.73
3	5.55	15.70	26.86	35.98	7.41	7.48	7.76	7.50
4	4.92	10.24	17.21	24.54	6.56	5.07	5.22	5.35
5	5.63	16.36	22.75	26.21	7.31	8.06	6.98	5.88
6	6.64	10.81	13.34	15.86	8.51	5.60	4.34	3.77
7	4.01	12.18	17.07	19.61	5.28	6.48	5.73	4.84
8	7.31	14.84	19.81	25.41	9.37	8.11	6.88	6.47
9	4.63	8.90	14.56	17.54	6.10	5.17	5.39	4.79
10	9.57	14.49	20.12	24.11	12.12	8.63	7.77	6.91
11	6.01	13.57	20.87	27.15	8.46	8.76	8.70	8.38
12	8.48	18.06	24.35	31.27	12.28	12.2	10.82	10.35
13	3.69	6.05	9.46	12.83	6.05	4.69	4.78	4.81
14	3.50	4.61	4.45	1.58	6.14	3.91	2.49	0.67
15	7.31	14.17	20.03	23.88	12.83	12.01	11.26	10.12
16	5.04	9.26	13.48	14.00	10.29	9.17	8.81	7.00
17	3.43	7.29	9.80	11.30	8.37	8.58	7.72	6.73
18	4.86	8.10	12.35	14.93	12.79	10.80	10.93	9.95
19	3.26	4.55	4.51	4.50	8.80	6.15	4.14	3.12

根据式 (26) 计算得到的悬臂梁变形量与百分表测量值对比结果如图 6 所示。

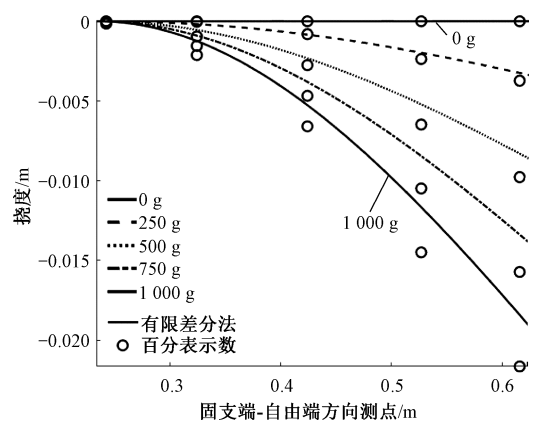


图 6 位移变化计算值与百分表测量值对比

Fig. 6 Comparison of deformation between calculated and measured value

百分表的测量值如表 3 所示,分布式光纤传感器对应测点的变形计算值如表 4 所示,它们之间的测量偏差

如表 5 所示,其中的负号“-”表示根据式(26)计算得到的变形量小于百分表的测量值。

表 3 百分表的测量值

Table 3 Measurement data of the dialgauge

百分表编号	1	2	3	4	5
250 g	-0.02	-0.03	-0.81	-2.37	-3.73
测量值 500 g	-0.06	-0.95	-2.75	-6.48	-9.78
/mm 750 g	-0.11	-1.54	-4.68	-10.49	-15.73
1 000 g	-0.15	-2.12	-6.59	-14.5	-21.66

表 4 分布式光纤传感器的测量值

Table 4 Measurement data of the distributed optical fiber sensor

与百分表对应点	1	2	3	4	5
250 g	0.00	-0.19	-0.84	-1.98	-3.24
测量值 500 g	0.00	-0.54	-2.32	-5.21	-8.30
/mm 750 g	-0.01	-0.90	-3.81	-8.46	-13.39
1 000 g	-0.01	-1.24	-5.26	-11.67	-18.42

表 5 百分表测量值与光纤计算值偏差

Table 5 Deviation between measurement data of the dialgauge and the calculated data of optical fiber

百分表所在位置	1	2	3	4	5
250 g	-0.02	0.15	0.03	-0.39	-0.49
偏差 500 g	-0.06	-0.41	-0.43	-1.27	-1.48
/mm 750 g	-0.10	-0.64	-0.87	-2.03	-2.34
1 000 g	-0.14	-0.88	-1.33	-2.83	-3.24

结果显示,利用分布式光纤传感器测量得到的高密度应变信息和结构变形算法,最终计算出的悬臂梁横向位移变化量比百分表实测值略小,而且从误差分析结果中也能发现:同一个监测点的变形量越大,其误差越大;同一个载荷工况下,距离固支端越远的监测点,误差越大。此次试验中最大的偏离误差出现在载荷为 1 000 g 砝码加载工况下,距离悬臂梁固支端最远的 5 号百分表附近测点,其偏离绝对误差为 3.24 mm,占百分表示数的 14.94%。

根据分析,造成悬臂梁位移估计试验误差的原因主要包括:1) 该形状估计方法本身的误差,即在获得式(26)的过程中,存在忽略不计的高阶量,它们会沿着结构长度方向造成误差累积;2) 百分表的测量误差,即结构的弯曲使百分表测头杆并非与其保持垂直,使百分表示数大于真实变形量,该误差与结构变形量成正相关;3) 由应变传递率影响造成的分布式光纤传感器应变测量

误差引入了变形计算过程。由于 1) 和 2) 中存在大量未知因素,因此考虑通过减小分布式光纤传感器应变测量误差的角度建立结构变形估计结果的修正策略。

4 结构变形估计结果的修正策略

分布式光纤传感器的应变测量值按如下式进行计算。

$$\varepsilon = -\frac{\bar{\lambda}}{cK_s} \Delta\nu \quad (27)$$

其中, $\bar{\lambda}$ 是扫描的中心波长; $\Delta\nu$ 是光波频率变化; c 是光速; K_s 是应变标准常数。而应变标准常数是通过对多根光纤试验测得的平均值,对于特定光纤而言,其应变标准常数会在给定的 K_s 附近波动。因此,分布式光纤传感器应变测量误差修正的核心是应变标准常数的修正。

采用如下策略对分布式光纤传感器的应变测量数据进行修正:

1) 建立与真实结构相同的有限元模型,施加相同的边界条件和载荷,并赋予初始弹性模量 E ;

2) 将有限元计算出的横向位移利用 3 次多项式进行拟合,获得 $w_e(x)$ [24-25];

3) 以百分表示数的拟合函数 $w_d(x)$ 为基准,利用最小二乘法确定有限元位移数据拟合函数的修正系数 K_E ,并将该修正系数应用于有限元模型弹性模量的修正值 $\tilde{E}$;

4) 使用修正的有限元模型重新计算,并输出与分布式光纤传感器相同路径的应变数据,利用多项式拟合,获得 $\tilde{\varepsilon}_e(x)$;

5) 以 $\tilde{\varepsilon}_e(x)$ 为基准,利用最小二乘法,获取分布式光纤传感器应变数据拟合多项式 $\varepsilon_f(x)$ 的修正系数 K_F ,进而获得修正后的分布式光纤传感器应变数据 $\tilde{\varepsilon}_f(x)$;

6) 将 $\tilde{\varepsilon}_f(x)$ 代入式(26) 计算位移。

流程如图 7 所示。

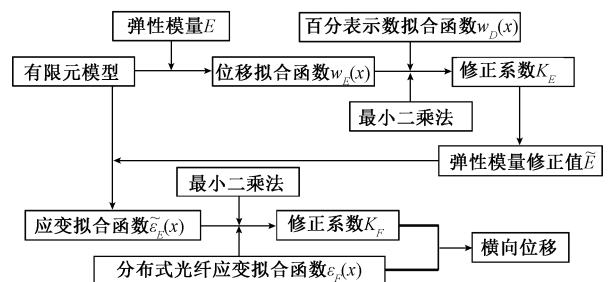


图 7 分布式光纤传感器数据修正流程

Fig. 7 Data correction process of the distributed optical fiber sensor

在本算例中,初始弹性模量 $E=73.1\text{ GPa}$,通过上述数据修正流程获取的修正系数 $K_E=1.672$, $K_F=1.067$ 。修正后的分布式光纤传感器与电阻应变片的应变测量数据对比如图8所示,两种传感器的绝对误差及相对误差分析如表6所示。

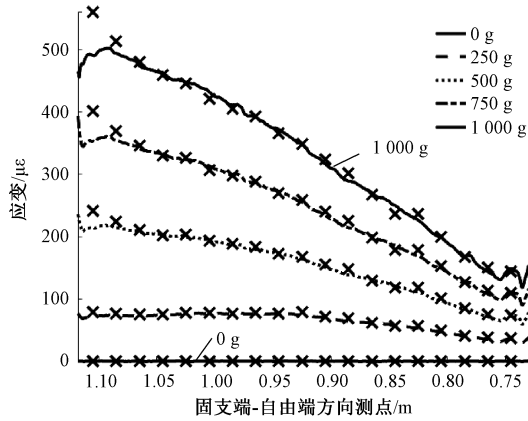


图8 修正后分布式光纤传感器与应变片的应变数据对比

Fig. 8 Comparison of modified strain between optical fiber sensor and strain gauges

表6 修正后应变测量误差分析

Table 6 Error analysis of the modified strain measurement

应变片	绝对误差/ $\mu\epsilon$				相对误差/%			
	250 g	500 g	750 g	1 000 g	250 g	500 g	750 g	1 000 g
1	-7.60	-26.88	-48.54	-70.26	-9.62	-11.15	-12.08	-12.52
2	-1.91	-9.90	-15.88	-18.86	-2.51	-4.42	-4.29	-3.68
3	-0.90	-2.68	-5.48	-6.23	-1.20	-1.28	-1.58	-1.30
4	-0.22	2.60	3.74	4.57	-0.29	1.29	1.13	0.99
5	-0.85	-3.86	-2.44	1.92	-1.10	-1.90	-0.75	0.43
6	-1.86	1.39	6.34	11.29	-2.38	0.72	2.06	2.68
7	0.81	-0.40	1.75	6.21	1.07	-0.21	0.59	1.53
8	-2.57	-3.57	-1.84	-0.78	-3.30	-1.95	-0.64	-0.20
9	0.15	2.03	2.55	5.80	0.20	1.18	0.94	1.59
10	0.08	-4.21	-4.12	-2.34	0.10	-2.50	-1.59	-0.67
11	-1.65	-4.10	-6.19	-7.26	-2.33	-2.64	-2.58	-2.24
12	-2.40	-2.67	-9.52	-11.07	-3.59	-1.88	-4.23	-3.67
13	0.15	2.19	3.17	4.20	0.25	1.70	1.60	1.57
14	0.08	2.99	7.25	10.08	0.15	2.53	4.05	4.27
15	0.02	0.79	3.55	8.34	0.03	0.72	2.15	3.82
16	-2.10	-3.12	-4.13	-1.53	-4.28	-3.08	-2.70	-0.77
17	-0.92	-2.08	-1.95	-0.80	-2.23	-2.45	-1.54	-0.48
18	-1.29	-1.59	-2.23	-1.83	-3.39	-2.13	-1.97	-1.22
19	-1.00	0.10	2.49	4.85	-2.69	0.14	2.29	3.37

从结果中可见,除了在试件固支端附近的应变奇异造成的测量偏差,其余各处的应变片测量数据与分布式光纤传感器的测量数据吻合良好,其相对误差最大值为4.28%,根据中华人民共和国国家标准 GB/T 13283—2008^[26],满足工程测试精度的需要,该修正策略能够明显降低分布式光纤传感器网络的应变测量误差。

利用修正后的分布式光纤传感器应变测量数据,根据式(26)计算得到的悬臂梁横向位移变化量与百分表测量值对比结果如图9所示。

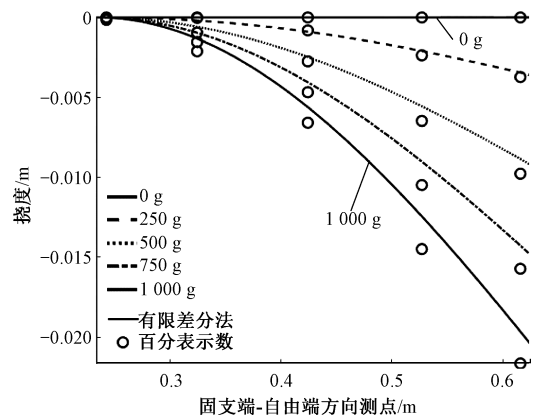


图9 修正后的位移变化计算值与百分表测量值对比

Fig. 9 Comparison of modified deformation between the calculated data and measurement data of the dial gauge

此时,分布式光纤传感器对应测点的位移计算值如表7所示,它们之间的测量偏差,如表8所示,其中的负号“-”表示根据式(26)计算得到的位移幅值小于百分表的测量示数。

表7 分布式光纤传感器的测量值

Table 7 Measurement data of the distributed optical fiber sensor

与百分表对应点	1	2	3	4	5
250 g	0.00	-0.20	-0.89	-2.11	-3.46
500 g	-0.01	-0.58	-2.48	-5.56	-8.86
750 g	-0.01	-0.96	-4.06	-9.03	-14.28
1 000 g	-0.01	-1.33	-5.62	-12.45	-19.66

在载荷为1 000 g砝码加载工况下,距离悬臂梁固支端最远的5号百分表附近测点,其偏离误差占百分表示数由14.94%降至了9.22%。由此可见,通过这一数据修正策略,能够明显降低分布式光纤传感器网络的变形估计误差。

表8 百分表测量值与光纤计算值偏差
Table 8 Deviation between measurement data
and calculated data of optical fiber

百分表所在位置		1	2	3	4	5
	250 g	-0.02	0.17	0.08	-0.26	-0.27
偏差	500 g	-0.05	-0.37	-0.27	-0.92	-0.92
/mm	750 g	-0.10	-0.58	-0.62	-1.46	-1.45
	1 000 g	-0.14	-0.79	-0.97	-2.05	-2.00

5 结 论

本文以悬臂结构为研究对象,推导了以高密度应变信息作为输入量的结构变形计算式的有限差分格式,提出了结合有限元分析和百分表测量结果的分布式光纤传感器测量数据修正策略,并在悬臂梁弯曲试验中进行了验证。通过对数据的分析,得到了以下结论:

1) 分布式光纤传感器的应变测量精度经过修正后的最大相对误差为4.28%,能够满足工程实践对于应变测量精度的需要;

2) 经过误差修正后的分布式光纤传感器对悬臂梁弯曲变形的测量结果,与百分表示数的最大绝对误差为2.05 mm,最大相对误差为9.22%,表明分布式光纤传感器对悬臂梁弯曲变形的估计具有一定精度。

使用分布式光纤传感器进行结构变形估计的方法克服了部分现有测量方式的缺点,目前所获得的位移估计方法和误差修正策略等对于结构变形估计问题有现实意义,未来还将针对算法精度的其他方面做出进一步的改进。

参考文献

- [1] HAN H. Deformation mechanisms and abrasive machining of nanoscale thin film multilayered solar panels: A focused review [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 325:42-47.
- [2] KO W L, FLEISCHER V T. Methods for in-flight wing shape predictions of highly flexible unmanned aerial vehicles; Formulation of KO displacement theory: 20100031454 [R]. United States: NASA Dryden Flight Research Center, 2010.
- [3] SONG F, NI Y, TAN Z. Optimization design, modeling and dynamic analysis for composite wind turbine blade[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 16 (1): 369-375.
- [4] DELFRATE J H. Helios prototype vehicle mishap: Technical findings, recommendations, and lessons learned: 20080041594 [R]. United States: NASA Dryden Flight Research Center, 2008.
- [5] WILLIAM L K, RICHARDS W L, VAN T T. Displacement theories for in-flight deformed shape predictions of aerospace structures: 20070032936 [R]. United States: NASA Dryden Flight Research Center, 2019.
- [6] 吴荣,刘依,周建民. 数字图像相关用于测量风电叶片全场变形[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(11): 258-264.
- [7] DEANGELIS V M. In-flight deflection measurement of the HiMAT aeroelastically tailored wing[J]. *Journal of Aircraft*, 1983, 19(12):1088-1094.
- [8] GU G, WANG K, ZHOU K, et al. Accurate measurement of composite laminates deflection using digital speckle pattern interferometry [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(20):4117-4119.
- [9] CUI F, WANG Y F. A new system for measuring bridge deflections based on laser imaging process[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2012, 143-144:211-215.
- [10] TIAN L, PAN B. Remote bridge deflection measurement using an advanced video deflectometer and actively illuminated LED targets [J]. *Sensors*, 2016, 16(9): 1344.
- [11] 张俊康,孙广开,李红,等. 变形机翼薄膜蒙皮形状监测光纤传感方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(2):66-72.
- [12] ZHANG J K, SUN G K, LI H, et al. Optical fiber shape sensing of polyimide skin for flexible morphing wing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(2): 66-72.
- [13] KO W L, RICHARDS W, TRAN V T. Displacement theories for in-flight deformed shape predictions of aerospace structures: 20070032936 [R]. United States: NASA Dryden Flight Research Center, 2007.
- [14] KO W L, FLEISCHER V T. Extension of KO straight-beam displacement theory to deformed shape predictions of slender curved structures: 20110011037 [R]. United States: NASA Dryden Flight Research Center, 2011.
- [15] GIFFORD D K, SOLLER B J, WOLFE M S, et al. 31st European conference on optical communication [C]. Glasgow: IEEE, 2005.
- [16] KREGER S T, SANG A K, GARG N, et al. Defense, security, and sensing[C]. Baltimore: SPIE, 2013.

- [16] DUNCAN R G, SOLLER B J, GIFFORD D K, et al. Joint conference on aging aircraft [C]. CA: Springs, 2007.
- [17] KREGER S T, SANG A K, GIFFORD D K, et al. Distributed strain and temperature sensing in plastic optical fiber using Rayleigh scatter[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2009, 7316(5):73160A-73160A-8.
- [18] FROGGATT M E, GIFFORD D K, KREGER S, et al. 32nd european conference on optical communications, september 24-28 2006[C]. Cannes:IEEE, 2006.
- [19] SAMIEC D. Distributed fibre-optic temperature and strain measurement with extremely high spatial resolution[J]. Photonik International, 2012(1):10-13.
- [20] SOLLER B J, GIFFORD D K, WOLFE M S, et al. High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies [J]. Optics Express, 2005, 13(2):666-674.
- [21] 铁摩辛柯,沃诺斯基. 板壳理论[M]. 北京: 科学出版社, 1977.
TIMOSHENKO S P, WOINOWSKY K S. Theory of Plates and Shells [M]. Beijing: Science Press, 1977.
- [22] 李洁. 基于分布式光纤的应变传递理论及实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
LI J. Theoretical and experimental studies on strain transfer based on distributed optical fiber [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018
- [23] 吴入军,付昆昆,郑百林,等. 粘贴于薄板表面的光纤布拉格光栅应变传感器误差修正[J]. 光学精密工程, 2016, 24(4):747-755.
WU R J, FU K K, ZHENG B L, et al. Error modification of FBG strain sensors bonded on plates [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24 (4): 747-755.
- [24] 张福范. 悬臂矩形板的不对称弯曲[J]. 固体力学学报, 1980(2):29-41.
ZHANG F F. Asymmetric bending of a rectangular cantilever plate [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 1980 (2):29-41.
- [25] 张福范. 悬臂矩形板的弯曲[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1979(2):43-51.
ZHANG F F. The bending of a rectangular cantilever plate [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1979(2):43-51.
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 工业过程测量和控制用检测仪表和显示仪表精确度等级:GB/T 13283—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008:1.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China & Standardization Administration. Accuracy class of measuring instruments and display instruments for industrial process measurement and control: GB/T 13283- 2008 [S]. Beijing: China Standards Press, 2008:1.

作者简介



单一男(通信作者),2010年于大连理工大学获得学士学位,2013年于大连理工大学获得硕士学位,2020年于大连理工大学获得博士学位,现为大连交通大学讲师,主要研究方向为结构健康监测。

E-mail: shanyan@djtu.edu.cn

Shan Yi'nan (Corresponding author) received his B. Sc. degree, M. Sc. degree, and Ph. D. degree all from Dalian University of Technology in 2010, 2013 and 2020, respectively. He is currently a lecturer at Dalian Jiaotong University. His main research interest is the structural health monitoring.