

光纤应变传感技术在结构变形测量中的应用

陈金池^{1,2}, 刘南^{1,2}, 黄研昕^{1,2}, 杨希明^{1,2}, 刘昱^{1,2}, 侯良学^{1,2}

(1. 航空工业空气动力研究院 气动研究与试验二部, 沈阳 110034)

(2. 沈阳市飞行器非定常气动力及流固耦合气动力重点实验室, 沈阳 110034)

摘要: 结构变形测量是静气弹、颤振和阵风载荷减缓等风洞试验的关键环节。近年来, 激光位移测量与数字图像相关技术已被广泛应用于结构变形测量, 其高精度测量结果可作为位移测量的参考基准, 然而, 在存在流场干扰、视场遮挡或需满足实时控制反馈的复杂试验环境下, 上述方法仍存在一定局限性。为此, 提出一种基于光纤应变数据的结构变形实时预测方法, 通过静态加载试验获取结构应变与位移的样本数据, 并建立数据驱动的应变—位移映射关系, 以实现结构变形的预测; 通过地面试验与阵风风洞试验, 验证所提方法对结构静变形和瞬态响应变形的预测精度。结果表明: 该方法对静变形的预测误差可达到 0.01 mm, 对结构瞬态响应的误差低于测点响应幅值的 0.5%。本文所提方法可应用于风洞试验及飞行试验, 为大展弦比机翼等柔性结构的气动弹性响应分析提供测量手段与数据支持。

关键词: 光纤应变; 实时预测; 风洞试验; 应变—位移映射; 阵风响应

中图分类号: V211.74

文献标识码: A

Application of optical fiber strain sensing technology in structural deformation measurement

CHEN Jinchi^{1,2}, LIU Nan^{1,2}, HUANG Yanxin^{1,2}, YANG Ximing^{1,2}, LIU Yu^{1,2}, HOU Liangxue^{1,2}

(1. Aerodynamics Research and Test Section II, AVIC Aerodynamics Research Institute, Shenyang 110034, China)

(2. Shenyang Key Laboratory of Unsteady Aerodynamics and Fluid-Structure
Coupling for Aircraft, Shenyang 110034, China)

Abstract: Structural deformation measurement is a critical component in wind tunnel tests concerning static aeroelasticity, flutter, and gust load alleviation. In recent years, high-precision optical methods like laser displacement measurement and Digital Image Correlation (DIC) have been widely used as reference benchmarks in structural deformation measurement. However, these optical methods face limitations in complex environments characterized by flow field interference, field-of-view occlusion, or the need for real-time feedback. To overcome these constraints, this paper proposes a real-time structural deformation prediction method based on fiber optic strain data. The method obtains strain-displacement sample data through static loading tests, and establishes a data-driven mapping for deformation prediction. Ground tests and gust wind tunnel tests were carried out to verify the prediction accuracy for both static deformation and transient vibrations. The results demonstrate that the method achieves a prediction error of 0.01 mm for static deformation, while keeping the transient response error below 0.5% of the response amplitude. The proposed method is applicable to both wind tunnel and flight tests, providing an effective measurement approach for the aeroelastic response analysis of flexible structures, such as high-aspect-ratio wings.

Key words: fiber optic strain; real-time prediction; wind tunnel test; strain-displacement mapping; gust response

收稿日期: 2026-03-11; 修回日期: 2026-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(U25A6007)

通信作者: 黄研昕(1988—), 男, 博士, 高级工程师。E-mail: yhuang76@126.com

引用格式: 陈金池, 刘南, 黄研昕, 等. 光纤应变传感技术在结构变形测量中的应用[J]. 航空工程进展.

CHEN Jinchi, LIU Nan, HUANG Yanxin, et al. Application of optical fiber strain sensing technology in structural deformation measurement[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering. (in Chinese)

0 引言

结构变形测量是气动弹性风洞试验的关键环节^[1]。在静气动弹性试验中,变形量是表征结构刚度特性的直接体现,可用于评估气动载弹性效应及其对载荷分布的影响。对于颤振试验,结构在接近颤振边界时的动力学行为,如振幅增长与相位演变,均需通过变形测量来捕捉,该数据是分析颤振机理与判定稳定边界的关键^[2];在阵风载荷减缓试验中,模型瞬态变形响应的测量,可以为闭环控制系统提供反馈信号,是验证各类控制策略的核心环节^[3]。

近年来,风洞试验中的结构变形测量以非接触测量技术为主,其中以激光位移传感与数字图像相关法(Digital Image Correlation, DIC)最具代表性^[4]。激光位移传感技术具有灵敏度高、响应快、精度良好等特点^[5-6],在标定或准静态测量场景下可提供高置信度的“位移真值基准”^[7-8]。DIC技术则凭借其全场测量和高空间分辨率的优势,能够重构完整的位移与应变场,在机理分析中作用显著^[9-10]。然而,面对强流场干扰、模型大变形导致的测点偏离,激光位移传感器数据质量易受影响,测量可靠性下降。而DIC技术则存在相机布设与系统标定流程复杂、图像数据处理量大、结果输出滞后等问题,难以直接应用于需要进行实时反馈的控制回路。

光纤应变传感器凭借其抗电磁干扰、耐恶劣环境、测量精度高以及对光照不敏感等优势,在结构变形测量领域受到广泛关注,尤其适用于长距离分布式监测^[11]。目前,常通过模态叠加、直接积分或共轭梁算法构建光纤应变信号与结构变形的映射关系。在模态叠加方面,Li H N等^[12]以结构模型的模态振型函数为基底,通过求解广义模态坐标实现从分布式离散应变信号到结构连续变形信息的重构。在几何积分方面,Kim等^[13]、Matta等^[14]利用光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器测得钢梁的纵向应变分布,通过二次积分实现了应变向梁架结构竖向变形的映射。在共轭梁算法方面,沈圣等^[15]推导了分布式应变与结构变形的映射关系,并进行了试验验证。上述方法大多在梁单元结构上得到了验证,其映射关系主要依赖于模态线性叠加与理想挠曲线方程。然而,在面对复杂结构时,这些方法往往难以精确反映结构特性,容易引发较大的预测误差。

随着研究的深入,人们逐渐将目光转向数据驱动方法。Yan J等^[16]利用卷积神经网络实现了机翼位移场的高精度重构。该方法虽然实现了高精度的应变—位移映射,但通常需要大量的数据标定成本,且泛化能力与实时响应速度难以满足工程试验需求。针对这一问题,本文提出一种基于光纤应变与数据驱动的结构变形实时预测方法。首先,在地面环境下开展静载试验以采集数据驱动所需的样本数据,利用激光位移传感器获取精确的结构位移信息;然后,利用线性回归模型建立光纤应变与结构位移之间的映射关系;最后,利用标定后的映射关系实现对结构变形的快速、精确预测。

1 预测模型理论基础

1.1 布拉格光纤光栅传感器测量原理

本文采用FBG应变传感器,如图1所示,这种传感器能对满足布拉格条件($\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$)的特定波长产生选择性反射,并可以将应变和温度的影响转换为波长变化的线性漂移,从而通过对漂移量的监测实现应变测量。布拉格波长漂移量与应变的转化关系可表达为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_B} = k \cdot Stn \quad (1)$$

式中: $\Delta\lambda$ 为施受应变影响产生的波长变化; Stn 为总应变量; k 为传感器灵敏度比例系数。

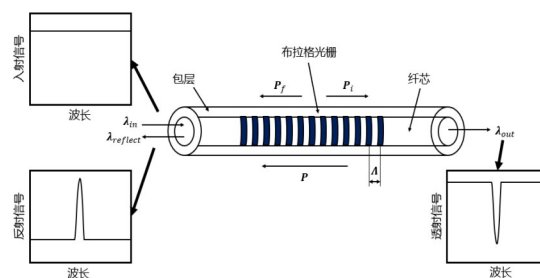


图1 光纤布拉格光栅原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fiber bragg grating principle

当应变导致光栅传感器波长变化时,解调仪测定的波长峰值与应变成正比。FBG应变传感器在考虑温度补偿后的实际应变^[17]为

$$Stn_{load} = Stn - (Stn_{FBG} + CTE_{str})\Delta T \quad (2)$$

式中: Stn_{load} 为结构模型由机械变形产生的应变量; Stn_{FBG} 为温度对应变传感器的影响系数; CTE_{str} 为温度对材料的影响系数; ΔT 代表温度变化量。

1.2 线性回归方程

本文聚焦于线弹性变形范围内的应变-位移转换问题。在此范围内,结构的力学响应遵循线性弹性理论,应变与位移之间呈现出确定的线性映射特征。若采用神经网络等复杂的非线性模型处理此类线性映射,不仅会导致计算冗余,还会在训练样本不足时引发过拟合问题,削弱模型的泛化能力。鉴于此,本文基于物理规律与数据特征,采用更为简洁高效的线性回归方法^[18],建立从应变测点信号到预测点位移的映射模型。

该线性回归模型的基本形式可表示为

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \cdots + \beta_n X_n \quad (3)$$

式中: Y 为基于映射模型得到的预测点位移; $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 为测点的应变测量值; β_0 为截距项,表示当所有自变量均为零时的理论位移基准; $\beta_1, \cdots, \beta_n$ 为回归系数,其绝对值反映了模型对相应应变的敏感性,即该应变单位变化所引起的位移变化量。

$\beta_0, \beta_1, \cdots, \beta_n$ 等回归系数采用最小二乘法进行估计^[19],旨在最小化所有加载工况下位移实测值与预测值之间的残差平方和,定义如下:

$$\min_{\beta_0, \beta_1, \cdots, \beta_n} \sum_{i=1}^m (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (4)$$

2 预测模型的构建

2.1 试验模型与传感器布置

本文以根部固支的矩形铝板为研究对象,用于构建位移预测模型并开展试验验证。铝板弦长 350 mm,展长 1 000 mm,厚 8 mm。材料的弹性模量为 71 GPa,泊松比 0.30,密度 2 700 kg/m³,热膨胀系数 $2.3 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。

模型表面的光纤应变传感器布置如图 2 所示。光纤应变传感器分布于 7 个展向测点(蓝色方块)和 3 个弦向测点(橙色方块)。为消除温度波动对测量结果的影响,在模型中部设置有温度补偿传感器(红色圆点)。选取模型弹性轴上距自由端 10 mm 处(绿色圆点)为位移预测点,激光位移传感器也布置于此,用于获取位移参考值。

加载点沿弹性轴布置,分别位于距自由端 150、300、450 及 600 mm 处,共计 4 个。静态加载试验采用砝码逐级加载方式。以最靠近自由端的加载点(距自由端 150 mm 处)为例,每级载荷增量为

5 N,总载荷范围为 0~120 N,共 25 个加载级次。每级载荷施加后,待结构响应稳定,同步采集光纤应变与激光位移数据。其余加载点采用相同的加载制度,以获取涵盖不同弯扭耦合状态的应变-位移映射数据集,总样本量为 100 组。铝板的静加载试验现场布置如图 3 所示。

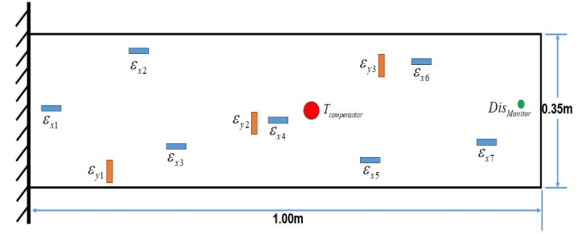


图 2 铝板模型传感器分布示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sensor distribution on the aluminum plate model

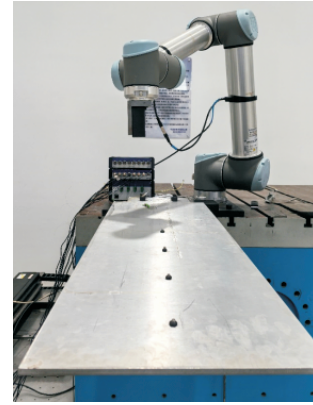


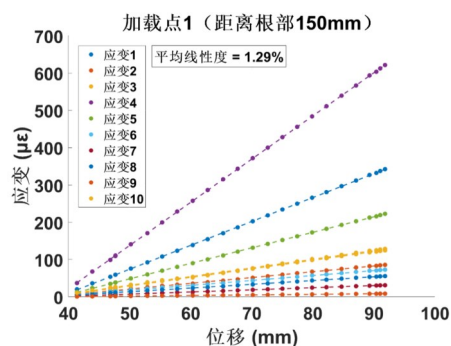
图 3 铝板应变及位移地面标定现场

Fig. 3 Static loading test of aluminum plate model

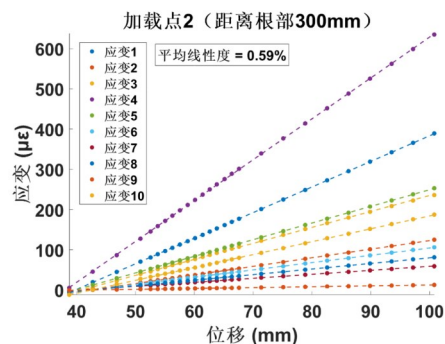
2.2 应变-位移关系的线性度检验

在构建数据驱动的应变-位移映射模型时,首要步骤是对样本数据进行线性度检验。这一检验的核心作用在于确保应变与位移关系符合线性规律,排除采用复杂非线性模型的必要性,支撑位移预测模型基于线性回归方法建立。

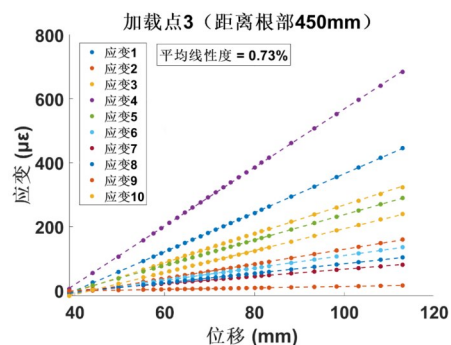
本文检验 10 个 FBG 应变测点在 4 组加载点作用下的应变-位移线性度情况,应变测点分布如图 2 所示,检验结果如图 4 所示,在上述 4 组加载点作用线,各工况下所有测点的应变-位移线性度平均值分别为 1.29%、0.59%、0.73% 和 1.40%,且单条曲线的最大线性度均未超过 1.85%。该结果表明应变与位移之间具有显著的线性特征,验证了本文采用线性回归方法构建映射关系的合理性。



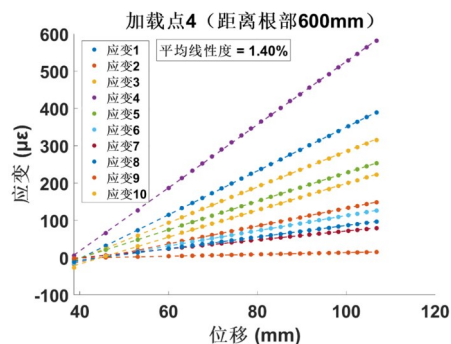
(a) 加载点1下的应变一位移线性度关系



(b) 加载点2下的应变一位移线性度关系



(c) 加载点3下的应变一位移线性度关系



(d) 加载点4下的应变一位移线性度关系

图4 不同加载点下的应变一位移线性度关系

Fig. 4 Strain-displacement linearity at various loading points

2.3 建模流程与测试

为建立合理的映射关系,首先需筛选合适的应变数据采集方案。本文基于应变测点数量、方向与空间分布的不同,设计6种传感器组合方案,构建位移预测模型,并通过验证比较选取预测精度最高的采集方案。

模型一~三分别采用3、5、7个展向均布应变测点,模型四选用4个展向应变测点和3个弦向均布应变测点,模型五和六分别选用在铝板根部和梢部集中布置的3个展向应变测点,如表1所示。

表1 基于不同应变分布的预测模型

Table 1 Prediction models based on varying strain distributions

模型	测点数量	分布方式	应变方向
一	3	均布	$\epsilon_{x1} \epsilon_{x4} \epsilon_{x7}$
二	5	均布	$\epsilon_{x1} \epsilon_{x3} \epsilon_{x4} \epsilon_{x5} \epsilon_{x7}$
三	7	均布	$\epsilon_{x1} \epsilon_{x2} \epsilon_{x3} \epsilon_{x4} \epsilon_{x5} \epsilon_{x6} \epsilon_{x7}$
四	7	均布	$\epsilon_{x1} \epsilon_{x3} \epsilon_{x5} \epsilon_{x7} \epsilon_{y1} \epsilon_{y2} \epsilon_{y3}$
五	3	根部	$\epsilon_{x1} \epsilon_{x2} \epsilon_{x3}$
六	3	梢部	$\epsilon_{x5} \epsilon_{x6} \epsilon_{x7}$

预测模型的构建流程如图5所示。

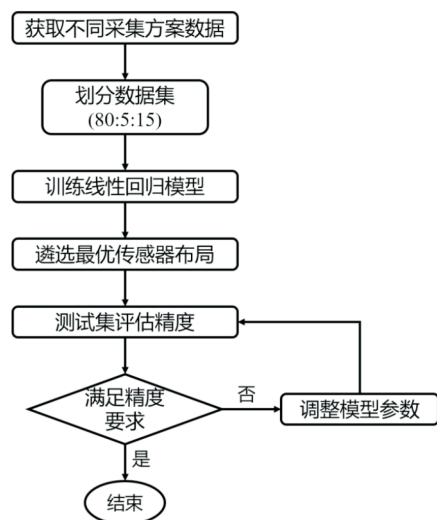


图5 应变一位移预测模型的建立流程图

Fig. 5 Procedure for establishing the strain-displacement prediction model

首先,将全部样本按80%、5%和15%的比例随机划分为训练集、验证集与测试集。其中,训练集用于拟合不同采集方案下的线性回归模型参数;验证集用于评估各采集方案的预测误差,并据

此遴选最优传感器布局;测试集则用于独立评估该最优布局下映射关系的预测精度。若测试集上误差满足精度要求,则认为模型有效,可用于后续瞬态响应预测与风洞试验验证。否则,需重新调整样本空间或模型参数,直至精度达标。

在验证集和测试集中,通过平均误差 ϵ 评估模型的预测精度:

$$\epsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (5)$$

式中: n 为验证集样本数量;选取激光位移传感器实测结果作为评估基准 y_i ; $\hat{y}_i$ 为基于应变数据的位移预测值。

模型一至模型六在验证集上的预测结果如表2~表4所示,平均相对误差对比如图6所示。可以看出:所有模型的预测误差均远小于加载过程中结构最大响应幅值(62 mm)的0.5%。并且,增加展向应变测点位置,可以更全面地捕获应变场信息,将位移预测平均误差从0.07 mm降低至0.02 mm。相比于在翼根或翼梢集中布置,沿展向均部应变测点可获得更好的预测精度。在此基础上,增加弦向应变测点(模型四),可进一步将平均预测误差调整至0.01 mm。因此,选择模型四的应变数据采集方案。

表2 模型一~模型三预测与实测结果对比
Table 2 Comparison between predicted and measured results of Model 1 to 3

实际变形/mm	预测变形/mm		
	(模型一)	(模型二)	(模型三)
1.14	1.28	1.17	1.15
7.66	7.60	7.70	7.65
20.68	20.64	20.73	20.74
31.38	31.35	31.36	31.36
51.07	51.14	51.03	51.07

表3 模型四预测与实测结果对比
Table 3 Comparison between predicted and measured results of Model 4

实际变形/mm	预测变形/mm	误差/mm
1.14	1.16	0.02
7.66	7.67	0.01
20.68	20.68	0.00
31.38	31.36	0.02
51.07	51.05	0.02

表4 模型五~模型六预测与实测结果对比
Table 4 Comparison between predicted and measured results of Model 5 to 6

实际变形/mm	预测变形/mm (模型五)	预测变形/mm (模型六)
1.14	1.01	1.27
7.66	7.72	7.52
20.68	20.79	20.83
31.38	31.30	31.46
51.07	51.00	50.08

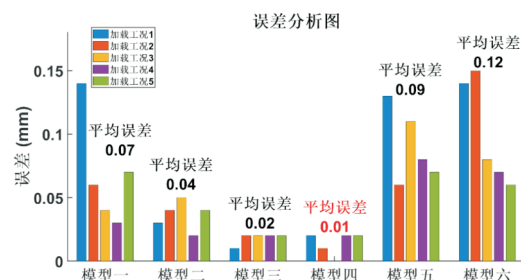


图6 模型一~模型六静变形预测误差对比
Fig. 6 Comparison of prediction error under static loading for Models 1~6

基于模型四的应变数据采集方案及其对应的线性回归方程,在未参与训练与方案筛选的测试集(占总样本的15%)上进行了最终的模型精度评估。结果表明,模型四在测试集上的平均误差为0.01 mm,与验证集结果高度一致。这证实了该模型具备良好的泛化能力,可作为后续地面振动试验与风洞试验的位移预测模型。

3 试验验证

在基于静加载数据确立了应变一位移预测模型及最优测点布置方案后,本文进一步通过地面振动试验与风洞试验,验证了该模型对结构瞬态响应变形的预测能力。具体而言,试验直接移植了上述模型四的静态标定参数,以及应变一位移映射关系,该方法旨在验证静态标定模型在动态激励与风洞环境下的外推适用性。

3.1 地面振动验证

地面振动试验中,将1.1节所述的铝板模型以固支方式安装于试验台,并依次使用激振器施加正弦振动、衰减振动及随机振动激励。试验过程中,将采集到的应变时程信号输入预测模型中,并将位移预测值与激光位移传感器的实测结果进行

对比。试验的数据采集时长为 30 s,所有传感器的采样频率均设置为 2 000 Hz。预测模型最优应变布置方案如图 7 所示。

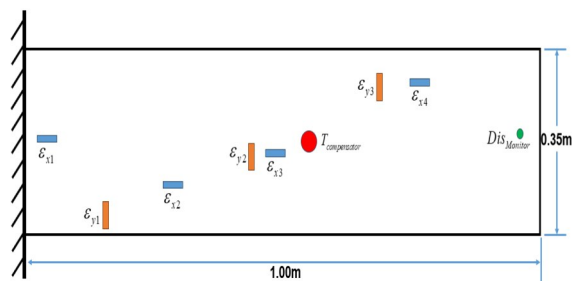


图7 预测模型最优应变布置方案示意图
Fig. 7 Schematic of the optimal strain gauge configuration for the prediction model

3.1.1 正弦激励验证

本文进行频率分别为 2、4 和 6 Hz 的正弦激励。试验中,激光位移测点的变形幅值约为 4~6 mm。

3 种频率下变形预测值与实测值的对比情况如表 5 所示,时程曲线对比及局部对比如图 8~图 10 所示。数据分析表明,在 3 种频率的激励下,瞬态变形预测的平均误差均为 0.01 mm,低于结构最大响应幅值的 0.5%。进一步对预测与实测数据开展频谱分析,结果显示其主频成分与激励频率几乎一致。通过时域与频域的双重验证,充分证明了预测模型具备良好的位移预测精度。

表5 正弦振动下位移预测与实测结果对比
Table 5 Comparison of predicted and measured displacement under sinusoidal vibrations

激励频率	变形最大误差/mm	变形平均误差/mm
2Hz	0.08	0.01
4Hz	0.08	0.01
6Hz	0.09	0.01

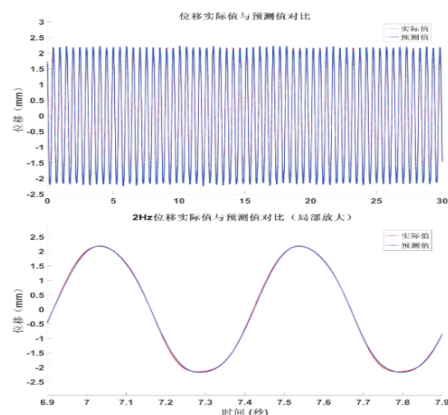


图8 2 Hz激励实际值与预测值对比结果
Fig. 8 Comparison between actual and predicted values under 2 Hz excitation

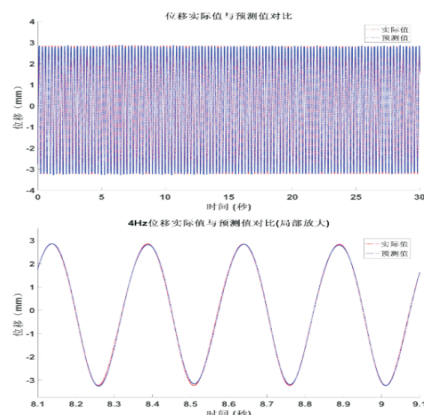


图9 4 Hz激励实际值与预测值对比结果
Fig. 9 Comparison between actual and predicted values under 4 Hz excitation

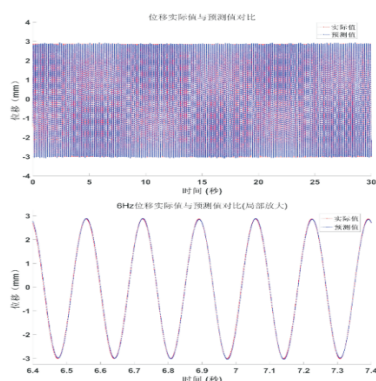


图10 6 Hz激励实际值与预测值对比结果

Fig. 10 Comparison between actual and predicted values under 6 Hz excitation

3.1.2 衰减振动验证

在输入衰减振动试验中,激光位移测点的最大变形幅值约为40 mm。整个振动过程中预测变形与实测变形的对比结果以及随机选取2 s区间内

的局部放大图如图11所示,可以看出:预测变形与实测变形之间的平均误差为0.03 mm,相当于结构最大响应幅值的0.15%。二者在时域曲线中吻合良好,表明所提出的预测模型具有较高的精度。

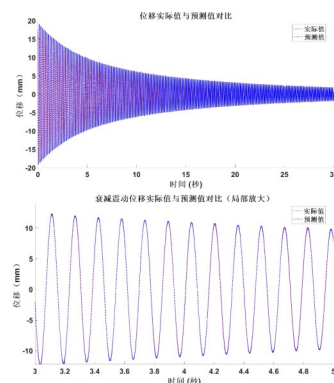


图11 衰减振动实际值与预测值对比结果

Fig. 11 Comparison of actual and predicted attenuation vibration value

3.1.3 随机振动变形预测与验证

在输入随机激励的振动试验中,激光位移传感器实测最大振幅可达60 mm。振动过程中预测变形与实测变形的对比如图12所示,可以看出:

预测值与实测值之间的平均误差为0.08 mm,相当于结构最大响应幅值的0.16%,最大误差为0.28 mm。两者在时域内吻合良好,进一步验证了所建模型在随机动态条件下的有效性。

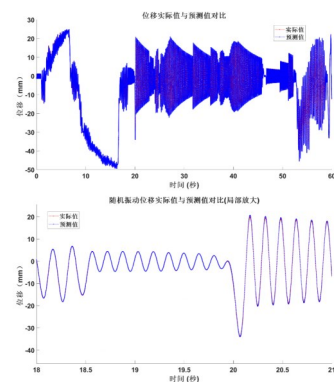


图12 随机振动实际值与预测值对比结果

Fig. 12 Comparison results between actual and predicted values of random vibration

地面振动试验结果表明,利用本文提出的位移预测方法进行瞬态响应预测,能够满足平均误差小于结构最大响应幅值0.5%的精度要求。在多种形式的外部激励作用下,该模型均表现出良好的预测精度,平均误差绝对值不超过0.1 mm。鉴于预测模型参数完全源自静态标定,且所有动态工况下的结构变形均保持在线弹性范围内(模型展长的10%以内)。这一结果充分表明,所建立的应变—位移映射关系在线弹性范围内具备优异的泛化能力,可应用于非正常载荷作用下的结构变形测量。

3.2 风洞试验验证

为验证本文方法在真实气流环境下的适用性,在航空工业空气动力研究院的FL-5风洞开展验证试验。模型和风洞试验现场如图13所示。

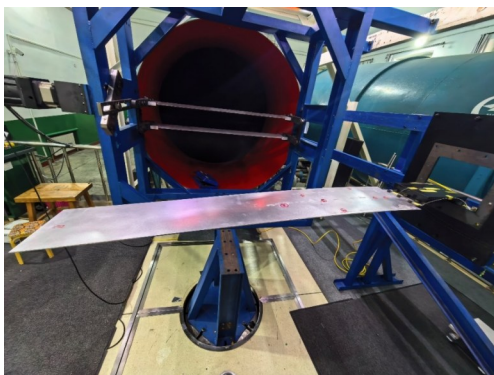


图13 模型和风洞试验现场
Fig. 13 Model in wind tunnel

利用风洞试验对模型四的阵风响应预测精度进行验证。在风洞试验中,通过应变—位移映射关系获取翼尖动态变形的预测值,利用激光位移传感器获取翼尖变形的参考值,通过计算预测值和参考值的平均误差,验证位移预测的精度。试验设定风速为18 m/s,模型按照攻角为 1° ,阵风扰动频率0.5 Hz、幅值 9° ,FBG及激光位移传感器的采集时间为15 s,采样率为2 000 Hz。

试验结果如图14所示,该工况下位移预测值与实测值的平均误差为0.23 mm,远小于测点响应幅值的0.5%。这表明在复杂真实的风洞气流环境中,本文方法仍具备可靠的实时变形监测能力。

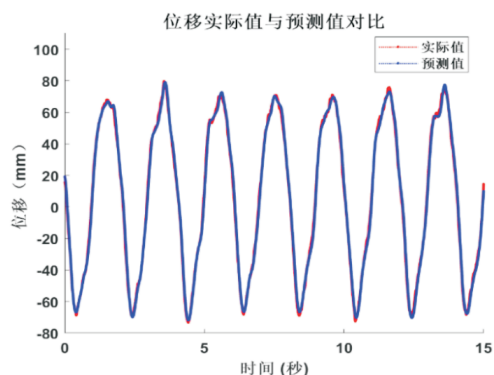


图14 阵风风洞试验中预测结果对比
Fig. 14 Comparison of predicted and measured results in gust wind tunnel tests

风洞试验结果表明,本文构建的“静载—地面振动—风洞试验”逐级验证框架,系统性地验证了基于光纤应变传感的结构变形测量方法。该方法不仅能够高精度预测静态与动态变形,且在复杂风洞气流环境下具备良好的稳定性。值得注意的是,试验数据证实,仅通过静态标定建立的映射模型,即可在线弹性范围内有效预测结构的瞬态动力响应。这一发现为解决真实气动载荷下结构模型的弹性变形实时监测难题,提供了一条极具潜力的技术路径。

4 结 论

1) 基于静态加载数据可有效构建应变与位移之间的映射模型,实现静态变形的高精度预测。在多种加载工况下,模型预测的平均误差约为0.01 mm,验证了其在静态条件下的准确性与可靠性。

2) 静态标定所得的位移预测模型可拓展至动态响应预测中,在不同形式的地面振动激励下,动态位移预测的平均误差均小于测点响应幅值的0.5%,表明该方法具备动态外推预测能力。

3) 在风洞试验环境中,该方法成功实现了非正常气动载荷作用下结构弹性变形的实时监测,预测误差满足试验需求,为气动弹性试验提供了有效的变形监测手段。

4) 本文方法在保证测量精度的同时,降低了对传感器数量的依赖,提升了变形计算的效率,为复杂环境下结构形变的实时感知与健康监测提供了一种可行的技术路径。

参考文献

- [1] 马艳峰, 贺尔铭, 李俊杰, 等. 大展弦比机翼的静气动弹性分析[J]. 航空计算技术, 2014, 44(3): 53-57.
Ma Yanfeng, He Erming, Li Junjie, et al. Static aeroelastic analysis for high-aspect-ratio wing[J]. Aeronautical Computing Technique, 2014, 44(3): 53-57. (in Chinese)
- [2] 张忠源, 段静波, 路平, 等. 大展弦比柔性机翼非线性颤振研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(6): 215-221.
Zhang Zhongyuan, Duan Jingbo, Lu Ping, et al. Research on aerodynamic nonlinearity of high-aspect-ratio flexible wings [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(6): 215-221. (in Chinese)
- [3] Wang Y, Inman D J. Experimental validation for a multi-functional wing spar with sensing, harvesting, and gust alleviation capabilities [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(4): 1289-1299.
- [4] 罗胜彬, 宋春华, 韦兴平, 等. 非接触测量技术发展研究综述[J]. 机床与液压, 2013, 41(23): 150-153.
Luo Shengbin, Song Chunhua, Wei Xingping, et al. Review for the development and research of non-contact measurement technology [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013, 41(23): 150-153. (in Chinese)
- [5] 袁道成, 王洋. 适于在线测量的激光位移传感器[J]. 计量技术, 2002, 46(5): 3-6.
Yuan Daocheng, Wang Yang. A laser displacement transducer applicable to on-line measurement [J]. Measurement Technique, 2002, 46(5): 3-6. (in Chinese)
- [6] 朱万彬. 激光位移传感器在物体表面形状测量中的应用[J]. 光机电信息, 2010, 27(10): 70-72.
Zhu Wanbin. Laser displacement sensor using in shape measurement [J]. OME Information, 2010, 27(10): 70-72. (in Chinese)
- [7] Uchiyama T, Shinohara K. System identification of myoelectric signals detected with an acceleration sensor and a laser displacement meter [C]// 2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Boston, MA: IEEE, 2011: 7131-7134.
- [8] Tezuka A. Validation study of pressure-measurement system with laser displacement sensor and film [C] // 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada: AIAA, 2008: 272-285.
- [9] Hammer J T, Liutkus T J, Seidt J D, et al. DIC in dynamic punch testing [C]// Dynamic Behavior of Materials (Vol. I). Cham: Springer International Publishing, 2015: 27-33.
- [10] Baraniello V R, Cicala M, Cicala L. An algorithm for real time estimation of the flexible UAV structural motions using a video-based system [C]// 14th International Conference on Information Fusion. Chicago, IL, USA: IEEE, 2011: 1-8.
- [11] 张雪华, 魏子亮. 光纤应变传感器测试系统在桥梁检测中的应用[J]. 交通世界, 2021(1): 201-202, 226.
Zhang Xuehua, Wei Ziliang. Application of optical fiber strain sensor testing system in bridge detection [J]. Transport-world, 2021(1): 201-202, 226. (in Chinese)
- [12] Li H N, Li D S, Song G B. Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering [J]. Engineering Structures, 2004, 26(11): 1647-1657.
- [13] Kim S H, Lee J J, Kwon I B. Monitoring of beam deflection subjected to bending load using Brillouin distributed optical fiber sensors [C]// Smart Structures and Materials 2001: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials. Newport Beach, CA, USA: SPIE, 2001: 63-69.
- [14] Matta F, Galati N, Bastianini F, et al. Distributed strain and non-contact deflection measurement in multi-span highway bridge [C]// Proceedings of Structural Faults & Repair. Edinburgh, UK: ECS Publications, 2006: 11-18.
- [15] 沈圣, 吴智深, 杨才千, 等. 基于分布式光纤应变传感技术的改进共轭梁法监测结构变形分布研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(7): 63-70.
Shen Sheng, Wu Zhishen, Yang Caiqian, et al. An improved conjugated beam method for structural deformation monitoring based on distributed optical fiber strain sensing technique [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(7): 63-70. (in Chinese)
- [16] Yan J, Du H Z, Bu Y F, et al. Data-driven method for real-time reconstruction of the structural displacement field [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2024, 37(3): 04024028.
- [17] Hill K O, Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview [J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1263-1276.
- [18] 刘锋, 谭祥勇, 何卓. 函数性线性回归模型分析方法及其应用[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2015, 29(11): 135-138.
Liu Feng, Tan Xiangyong, He Zhuo. Methods of functional linear regression model and its applications [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2015, 29(11): 135-138. (in Chinese)
- [19] 陶为俊, 浣石, 蒋国平. 基于最小二乘法的 Lagrange 分析方法研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(21): 98-101, 142.
Tao Weijun, Huan Shi, Jiang Guoping. Lagrangian analysis method based on least square [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(21): 98-101, 142. (in Chinese)

(编辑:马文静)