

DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.02.020

单端固支铝合金结构应变监测与反演方法

刘苏州¹ 曾捷¹ 李钰² 马驰¹ 梁大开¹

(1. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京, 210016; 2. 上海卫星装备研究所, 上海, 200240)

摘要:针对直升机主承力结构,如桨叶关键区域应力应变场监测需求,研究相应分布式在线监测技术及其应变场反演方法,从而为直升机结构健康状态评估与结构变形实时辨识提供依据。借助 Patran/Nastran 仿真软件分别对单端固支铝合金梁与板结构进行有限元仿真,给出基于光纤光栅传感器与电阻应变式传感器的基本配置规则,提出了基于三次 B 样条函数插值算法的单端固支铝合金结构应变场反演方法。在此基础上,构建了基于光纤布拉格光栅和电阻应变片的分布式应变在线监测系统。研究表明,本文监测方法合理、可行。

关键词:光纤光栅传感器;电阻应变片;样条函数;应变

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2016)02-0274-06

Study on Strain Monitoring and Inversion Method for Single Ended Fixed Supported Aluminum Alloy Structure

Liu Suzhou¹, Zeng Jie¹, Li Jue², Ma Chi¹, Liang Dakai¹

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;
2. Shanghai Institute of Satellite Equipment, Shanghai, 200240, China)

Abstract: According to the demand of stress and strain field monitoring on the key area of main bearing structure of helicopter, it is necessary to study the corresponding distributed on-line monitoring technology and its strain field inversion method, so as to provide the assessment reference for structure health state and the real-time identification of the structure deformation of helicopter rotor blades. The finite element simulations of the single ended fixed supported aluminum alloy beam and plate structure are carried out by Patran/Nastran simulation software. The basic configuration rules of fiber Bragg grating sensor and resistance strain sensor are presented, and an inverse method is given for the strain field of a single ended fixed supported aluminum alloy structure based on the three-B-spline interpolation algorithm. On this basis, a distributed strain on-line monitoring system based on fiber Bragg grating sensor and resistance strain sensor is constructed. Research results show that the method is reliable and applicable.

Key words: fiber Bragg grating sensor; resistance strain gage; spline functions; strain

基金项目:国家自然科学基金(51275239,U1537102)资助项目;航空科学基金(20152852036)资助项目;江苏省产学研联合创新资金(BY2014003-01)资助项目;CAST 基金资助项目;上海航天科技创新基金(SAST2015062)资助项目;CAST-BISEE 创新基金资助项目。

收稿日期: 2015-10-01; **修订日期:** 2016-01-01

通信作者: 曾捷,男,副教授,E-mail: zj2007@nuaa.edu.cn。

引用格式: 刘苏州,曾捷,李钰,等. 单端固支铝合金结构应变监测与反演方法[J]. 南京航空航天大学学报,2016,48(2):274-279. Liu Suzhou, Zeng Jie, Li Jue, et al. Study on strain monitoring and inversion method for single ended fixed supported aluminum alloy structure[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016,48(2):274-279.

直升机在长期飞行的过程中,由于恶劣环境因素的影响其主承力结构如旋转桨叶的损伤不可避免,轻则产生故障、任务失败,严重的会造成机毁人亡的重大损失。及时获取直升机关键区域的应力应变信息是评估其健康状态的重要依据。实现针对飞行器关键区域应力应变场的实时准确监测尤为重要^[1],必须研究具备高性能、高可靠性特点的分布式结构应变监测与反演技术,为快速获得直升机桨叶应变场分布信息提供支持。

由于飞行器在不同服役状态下呈现出不同的应力应变分布规律^[2],需要分别对传感器类型、传感器布局以及如何根据实际测量所得少量离散应变数据反推出结构应变分布信息等进行研究。文献[3]应用基于最小位能原理的有限元方法对结构应变场进行重构。文献[4]通过假设应变场为协调应变和光滑应变的线性组合,讨论了插值无网格方法的收敛性、上下界特性及超收敛性。文献[5]将有限元法和基于节点的光滑点插值方法相结合,提出一种应变重构点插值无网格方法。文献[6]采用数字图像技术对非连续位移场和应变场进行了重构。以上研究主要侧重于从理论层面对反演重构方法进行探索。

光纤光栅传感器由于具有芯径细、重量轻、带宽宽、灵敏度高、抗电磁干扰和耐腐蚀等优点,从而成为航空航天结构健康监测领域最有前途的传感器之一^[7]。基于上述分析,本文选择类似直升机旋翼桨叶的单端固支铝合金梁、板结构作为对象,研究了基于光纤光栅传感器与电阻应变式传感器的分布式应变监测与反演技术。

1 应变监测原理

1.1 光纤光栅应变传感器原理

当一束宽带光传播至光纤布拉格光栅时,由于栅区折射率周期性作用使得特定波长光波信号沿来路返回,此反射光波信号的中心波长为 λ_B ,而其他透射光波信号继续沿光纤传播^[8]。

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中: λ_B 为布拉格波长; Λ 为相位掩膜光栅周期; n_{eff} 为有效折射率。反射光谱中心波长 λ_B 将会由于光栅栅区所受到温度和应变作用而发生偏移。光纤光栅传感器结构如图1所示。

当仅对光纤施加轴向应力时,光纤将产生轴向应变,应变一方面使得光栅周期变大,光纤芯层和

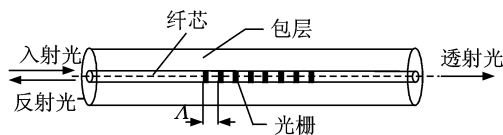


图1 光纤光栅传感器结构

Fig. 1 Structure of fiber Bragg grating sensor

包层半径变小^[8]。另一方面将通过光弹效应改变栅区折射率。若忽略光纤径向变形对折射率的影响,只考虑光纤轴向变形,则光纤光栅中心波长偏移量 $\Delta\lambda_B$ 为^[8]

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda + 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda \quad (2)$$

当环境温度恒定时,式(2)可进一步简化为^[8]

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - P_a)\Delta\epsilon \quad (3)$$

式中: P_a 为光纤弹光系数; $\Delta\epsilon$ 为光纤光栅传感器所测轴向应变^[8]。

1.2 电阻应变式传感器原理

电阻应变式传感器是将应变转换为电阻阻值变化的传感器^[9]。当被测结构发生局部应变时,粘贴在其上的电阻应变片阻值会随之发生改变。通过相应桥路可将其转换成电学量输出,电学量变化大小即反映了被测结构应变情况^[10]。电阻应变式传感器结构如图2所示。

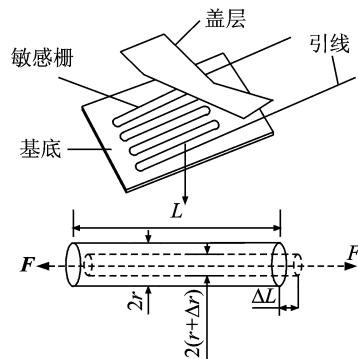


图2 电阻应变片结构

Fig. 2 Resistance strain gauge structure

当应变片阻值变化量为 ΔR 时,可由 ΔR 推导出被测对象应变值。电阻应变丝阻值 R 为^[11]

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (4)$$

式中: L 为电阻丝长度, S 为截面积, ρ 为电阻率。两边取对数并微分得^[11]

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dS}{S} \quad (5)$$

进一步化简得^[11]

$$\frac{dR}{R} = \left(1 + 2\mu + \frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta l/l}\right) \frac{\Delta l}{l} = K_s \varepsilon \quad (6)$$

式中: K_s 为金属丝应变灵敏系数; $\Delta\rho$ 为电阻丝电阻率变化量; Δl 为电阻丝长度变化量; l 为电阻丝长度; μ 为电阻丝泊松比。

2 插值原理

由于三次 B 样条函数能够根据少量离散测点值拟合出其他点的函数值, 因此只要测得目标结构若干离散位置应变, 就可以借助该插值拟合方法实现针对被测结构其他区域应变分布的反演。

三次样条插值多项式 $S_n(x)$ 作为一种分段定义公式, 其中 $S(x)$ 是不高于三次函数的多项式^[12], $S(x)$ 为待求测点的应变值。它在节点 x_i ($a = x_0 < x_1 < \dots < x_{n-1} < x_n < b$) 分成的每个小区间 $[x_{i-1}, x_i]$ 上是三次多项式, 其在此区间上的表达式为^[13]

$$S(x) = \frac{1}{6h_i} [(x - x_i)^2 M_{i-1} + (x - x_{i-1})^2 M_i] + (y_{i-1} - \frac{h_i^2}{6} M_{i-1}) \frac{x_i - x}{h_i} + (y_i - \frac{h_i^2}{6} M_i) \frac{x - x_{i-1}}{h_i} \quad (7)$$

式中: $x \in [x_{i-1}, x_i]$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$; x 为待求测点的横坐标值; y_i 为 x_i 处的应变值; $h_i = x_i - x_{i-1}$, 表示区间的长度; M_i 为 $S(x)$ 在 x_i 的二阶导数。

3 数值模拟

3.1 梁结构有限元仿真与拟合

梁结构属于一种较为典型的工程结构^[14]。采用 Patran/Nastran 对梁结构进行有限元仿真, 梁结构几何尺寸与材料属性如表 1 所示。沿梁结构轴向划分 20 个节点单元, 每个单元长度为 30 mm。

表 1 梁结构几何尺寸与材料属性

Tab. 1 Geometry and material properties of beam structure

长/mm	宽/mm	厚/mm	材料	泊松比	弹性模量/GPa
600	30	3	6061	0.3	70

在梁自由端模拟施加 30 N 垂直载荷。单边固支梁结构, 如图 3 所示。



图 3 单边固支梁结构

Fig. 3 Single ended clamped beam

以有限元仿真结果为依据, 选取梁单元中若干离散点作为测量值, 采用三次 B 样条函数可以反演出梁结构其他离散点的应变值。有限元仿真结果与基于不同数量传感器的拟合重构结果如图 4 所示。

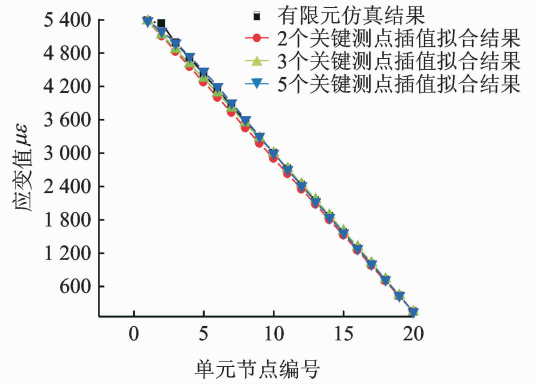


图 4 不同数量传感器对应的应变拟合结果

Fig. 4 Strain interpolation fitting results of different number of sensors

基于三次 B 样条函数的梁结构应变分布反演结果与有限元分析结果比较, 平均误差较小, 并且具有良好的线性度。通过增加传感器数量, 可以进一步减小平均误差。表 2 给出传感器数量分别为 2, 3, 5 时对应的插值拟合结果。

另一方面, 在相同加载条件和相同传感器数量下, 传感器位置的选取对于插值拟合结果也会产生一定影响。表 3 为不同传感器布局对应的插值拟合结果。

从表 3 中可以看出传感器布局位置不同对于插值拟合结果影响较大。应考虑选取选择靠近固

表 2 不同数量传感器对应的插值拟合误差

Tab. 2 Interpolation fitting error of different number of sensors

传感器数量	平均误差 $\mu\epsilon$
2	0.028 0
3	0.015 0
5	0.007 3

表 3 不同传感器布局对应的插值拟合误差

Tab. 3 Interpolation fitting error of different sensors layout

传感器数量	位置编号	平均误差 $\mu\epsilon$
3	1, 10, 20	0.015 0
3	4, 14, 17	0.244 7
5	1, 3, 10, 16, 20	0.007 3
5	3, 8, 11, 14, 18	0.531 9

支端区域、应变极值区域以及应变幅值变化较大区域布置传感器,最大限度减小平均误差。

3.2 板结构有限元仿真与拟合

针对二维板状结构应变分布监测需求,选取单边固支铝合金板作为对象,其尺寸为:600 mm×600 mm×3 mm,泊松比为 0.3,弹性模量为 70 GPa。采用 Patran/Nastran 有限元软件,对铝合金板进行有限元分析。将板面划分为 12×12 共 144 个单元网格,每个单元长宽各 50 mm。假设在铝合金板自由边施加一定大小垂直载荷。根据有限元分析结果选择传感器布局位置,如图 5 所示。

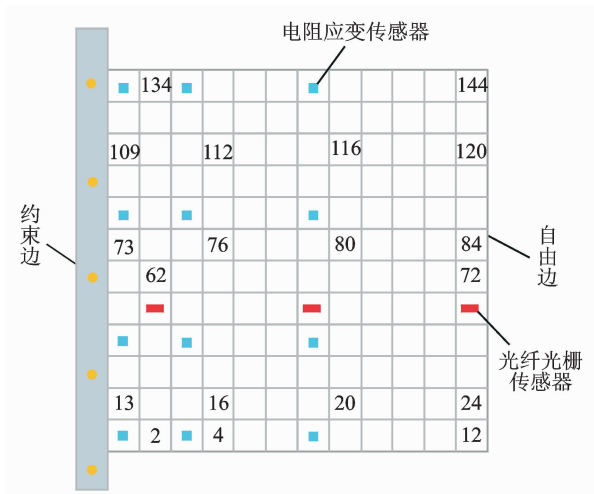


图 5 板结构光纤光栅与电阻应变传感器布局

Fig. 5 Fiber Bragg grating sensor and resistance strain sensor layout of plate structure

图 5 中按照从左到右,从下到上顺序对每个单元网格进行编号,顺序为 1~144。数值模拟结果表明,铝合金板在自由边受载条件下,应变幅值变化较大的区域主要集中在靠近板面约束边附近。因此需要在该区域配置相对较多的传感器,而在靠近板面自由边附近可以减少传感器数量。

选取有限元分析所得沿板面轴向分布的少量离散应变值用于模拟传感器测量数据,采用三次 B 样条插值算法对板面其他单元网格的轴向应变进行拟合。选择拟合所得靠近约束边的若干单元网格应变数据与相应有限元仿真结果进行对比,结果如图 6 所示。

4 实验

4.1 应变监测系统

单边固支板结构应变监测系统主要由铝合金板、光纤光栅传感器、电阻应变片、光纤光栅解调模

块、YJ-4501A 静态电阻应变仪以及计算机共同组成,如图 7 所示。

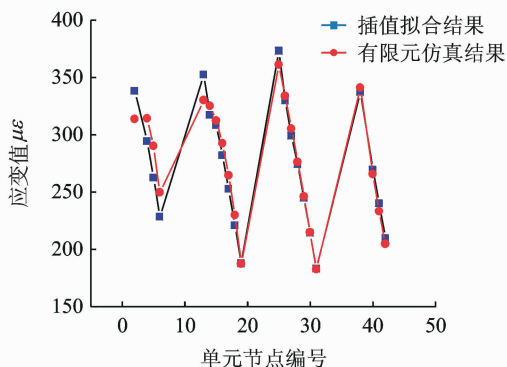


图 6 有限元仿真与插值拟合结果

Fig. 6 Comparison of finite element simulation and interpolation fitting results



图 7 板结构应变监测系统

Fig. 7 Monitoring system of plate structural strain

按照图 7 所示,在铝合金板下表面,且沿与约束边垂直方向布置电阻应变片。同样,在铝合金板上表面,且沿与约束边垂直方向的布置光纤光栅传感器。在单边固支铝合金板自由边施加一定大小垂直载荷,用于模拟直升机桨叶受载情况。分别记录在此条件下不同编号光纤光栅中心波长偏移量和静态应变仪所测应变值。

4.2 传感器配置方法

为最大限度降低监测系统复杂程度,同时保证应变测量精度以及应变场反演效果,需要对传感器进行优化配置。对于梁、板结构而言,传感器布局应考虑以下因素;一方面,靠近梁或板的固支端根部区域应配置相对较多的传感器;另一方面,应尽量选取梁或板结构应变梯度较大区域配置传感器,而在应变较小或变化缓慢的区域减少配置。此外,应尽量选择结构振动幅值较大或振动模式丰富的区域进行传感器配置。

5 结果与讨论

单边固支铝合金板面不同位置对应的电阻应变片和光纤光栅传感器测量值与插值拟合结果分别如图8,9所示。表4为不同编号位置传感器所测应变数据。

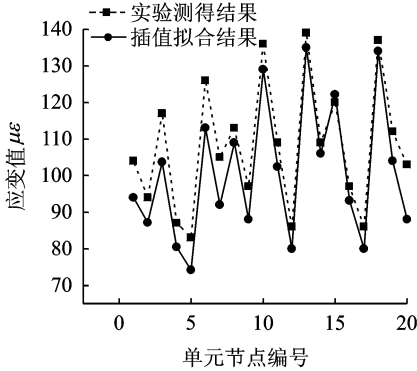


图8 应变片测量值与拟合值

Fig. 8 Strain gauge measurement and fitting values

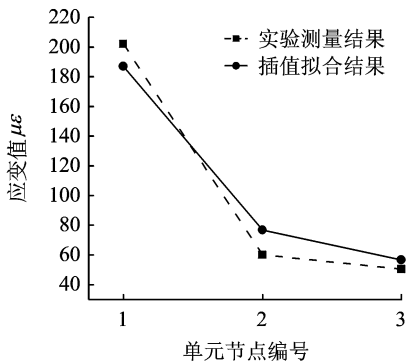


图9 光纤光栅传感器测量值与拟合值

Fig. 9 Measurement and fitting values of fiber Bragg grating sensor

表4 不同位置对应的应变值

Tab. 4 Strain values corresponding to different positions

编号	2	18	26	62	109	136
应变值 $\mu\epsilon$	104	87	110	117	122	97

结果表明,根据不同类型应变传感器测量值反演所得应变值与实测结果之间平均误差较小。此误差主要与所选取插值拟合函数类型、传感器个数、布局位置以及胶接工艺密切相关。

6 结束语

为评估直升机飞行过程健康状况,需要对直升机旋翼关键区域的应变场进行监测。文中采用三次B样条函数对类似直升机主承力结构的梁和板

结构应变分布进行反演。研究表明,该方法无需借助复杂力学推导,仅需根据少量结构关键区域应变数据,即可推导出该区域其他位置应变分布信息,具有方法简单,实时性较好等特点。

参考文献:

- [1] 李鹏飞, 万方义, 崔卫民, 等. FBG传感器在飞行器结构健康监测中的可行性研究[J]. 机械强度, 2011, 33(4): 624-628.
Li Pengfei, Wan Fangyi, Cui Weimin, et al. Feasibility study of FBG sensor in the structural health monitoring of aircraft [J]. Mechanical Strength, 2011, 33(4): 624-628.
- [2] Lang L Y, Gao F. Study on temperature compensation principle of fiber optic fabry perotst rain sensor [C] // Intelligent Information Technology Application, 2009, Third International Symposium on. [S. l.]: IEEE, 2009: 268-271.
- [3] Zienkiewicz O C, Taylor R L. The finite element method [M]. 5th ed. Oxford: Butterworth Heine-mann, 2000.
- [4] 周敏敏. 应变重构点插值无网格法的若干问题研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.
Zhou Minmin. Studies on the strain reconstruction point interpolation mesh free method (SCPIM) [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [5] 徐旭, 周敏敏, 于东元, 等. 一种应变重构点插值无网格方法 (SC-PIM) [J]. 吉林大学学报: 理学版, 2011, 49(6): 969-972.
Xu Xu, Zhou Minmin, Yu Dongyuan, et al. A strain constructed point interpolation method (SC-PIM) [J]. Journal of Jilin University: Science Edition, 2011, 49(6): 969-972.
- [6] Hassan G M, Macnish C, Dyskin A. Extending digital image correlation to reconstruct displacement and strain fields around discontinuities in geomechanical structures under deformation [C] // Applications of Computer Vision (WACV), 2015 IEEE Winter Conference on. [S. l.]: IEEE, 2015: 710-717.
- [7] Zhang Y L, Chen W M, Zhang P, et al. Study on the degeneration of FBG sensing system [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2009, 20(10): 1302-1306.
- [8] 王刚. 光纤低频振动传感器的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2011.
Wang Gang. Optical fiber low frequency vibration sensor research [D]. Changchun: Jilin University, 2011.

- [9] Lin X L, Bai B L, Yang X, et al. The development of resistance type sensor physical principle teaching instrument [J]. Physical Experiment of College, 2013,26(1):1-3.
- [10] 尹福炎. 电阻应变片与应变传递原理研究[J]. 衡器, 2010,39(2):1-8.
Yin Fuyan. The principle of resistance strain slice and the strain transfer research[J]. Weighing Apparatus, 2010,39(2):1-8.
- [11] Yang Y. Study of the resistance strain sensor [J]. Physics & Engineering, 2010,20(2):1-3.
- [12] Ni Zongtao, Yu Yinglin. Magnification of three dimensional Chinese fonts by using cubic B-Spline function[J]. Journal of South China University of Technology, 2000,28(11):2-4.
- [13] 马士玲. B样条曲线节点插入算法研究及应用[D]. 开封:河南大学, 2009.
Ma Shiling. Research and application of B-splines' knot insertion algorithm [D]. Kaifeng: Henan University, 2009.
- [14] 曾寿金, 江吉彬, 高诚辉. 基于 ANSYS 分析的悬臂梁结构优化设计[J]. 机电技术, 2006,29(4):20-22.
Zeng Shoujin, Jiang Jibin, Gao Chenghui. The cantilever beam structure optimization design based on ANSYS analysis [J]. Mechanics Electronics Technique, 2006,29(4):20-22.

本文已收编于 2015 年全国直升机年会内部交流论文集

