光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021082502

# 基于 FBG 的飞机起落架载荷测试技术研究

褚园园[1,2]，吴　越[2]，黄鹏宇[1,2]，陈　诗[1,2]，闫　光[2*]

（北京信息科技大学 1. 光电测试技术及仪器教育部重点实验室，北京 100192；
2. 光纤传感与系统北京实验室，北京 100016）

**摘　要：** 针对某型飞机起落架三向载荷的监测需求，提出了一种采用光纤光栅（Fiber Bragg Grating，FBG）传感和多元线性回归相结合的起落架载荷测试方法。通过对起落架进行有限元仿真分析，得到了不同载荷作用下起落架的应变分布，根据应变分布特征确定 FBG 应变传感器的布片位置，形成应变传感网络。在此基础上，进行了主起落架地面静态载荷标定试验，并通过多元线性回归的方法形成应变-载荷计算方程组，最后对载荷计算方程组进行了验证性试验。研究结果表明，基于 FBG 的起落架载荷测试方法能有效反算起落架的三向载荷，反算得到的载荷与施加载荷的相对误差在 5％以内，满足实际工程应用需求。

**关键词：** 飞机起落架；光纤光栅传感器；载荷测试；标定方程

**中图分类号：** TH741　**文章编号：** 1001－5868(2022)01－0182－06

## Research on Load Testing Technology of Aircraft Landing Gear Based on FBG

CHU Yuanyuan[1,2], WU Yue[2], HUANG Pengyu[1,2], CHEN Shi[1,2], YAN Guang[2]

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Measurement Technology and Instrument of the Ministry of Education, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, CHN; 2. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, CHN)

**Abstract:** In order to meet the monitoring requirements of three-way load of a certain aircraft landing gear, a landing gear load test method was proposed based on fiber Bragg grating (FBG) sensing and multiple linear regression. The strain distribution of the landing gear under different loads was obtained with finite element analysis software. According to the characteristics of strain distribution, the position of the FBG strain sensor was determined, and the strain sensing network was formed. On this basis, the ground static load calibration experiment of the main landing gear was carried out, and the strain-load calculation equations were formed by multiple linear regression method. Finally, the load calculation equations were verified by experiments. The research results show that the method based on fiber Bragg grating can effectively back-calculate the three-way load of landing gear, and the relative error between the back-calculated load and the applied load is within 5％, which meets the actual engineering requirements.

**Key words:** aircraft landing gear; fiber Bragg grating sensor; load test; calibration equations

**收稿日期：**2021－08－25.

**基金项目：**国家自然科学基金项目(51675053).

* **通信作者：**闫　光　**E-mail：** 584851848@qq.com

## 0　引言

起落架是飞机在起飞和着陆阶段的重要受载结构，起落架的结构健康直接影响飞机的安全与性能[1]。目前，基于电阻应变片的应变测量法广泛用于飞行载荷的实测，但存在信噪比低、不耐腐蚀和不抗电磁干扰等缺点，极大地限制了应变片在舰载机起落架应变载荷测量中的应用。

光纤布拉格光栅（Fiber Bragg Grating，FBG）传感器作为一种无源器件，具有抗电磁干扰、精度高、环境适应性好、可复用等特点，因此被广泛应用于飞机结构健康监测领域[2-3]。Daichi 等[4]开发了基于光纤频域反射法的光纤分布式传感系统，成功应用于中型客机的飞行实测，获得了客机起飞、降落和滑行等阶段的结构应变响应。Iele 等[5]将 FBG 传感器以传感网络的形式集成于飞机起落架上，实现了起落架远程实时载荷监控，且与电阻应变仪测量的结果一致。Agostino 等[6]研究将 FBG 应变传感网络应用于起落架复合材料结构的健康监测，结果表明光纤光栅在复合材料的结构健康监测中具有很大的潜力。鲁明宇等[7]利用 FBG 传感器的低温稳定性，提出并验证了基于光纤光栅传感的飞机作动器连杆载荷反演方法。

国内外已经有科研人员将 FBG 传感器应用于飞机关键结构的载荷测量，但基于 FBG 的起落架结构载荷测试，大多停留在结构单一方向载荷的研究，缺少基于 FBG 的起落架三向载荷研究。本文以某型飞机主起落架为对象，利用 FBG 传感网络获取起落架结构的应变响应，采用多元线性回归的方法形成载荷计算方程组，实现起落架三向载荷的测量。

## 1　FBG 应变传感原理

FBG 传感器是一种典型的波长调制型传感器，当入射光到达栅区后，符合特定波长的光反射，不符合的光透射，该特定波长称为布拉格波长 $\lambda_B$[8]。

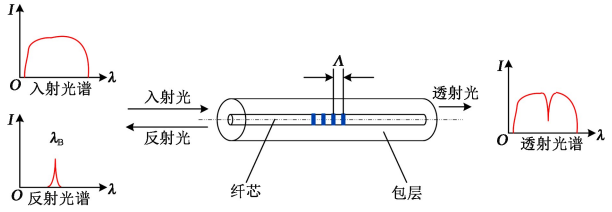



图 1　FBG 传感原理示意图

其折射率与光栅周期的关系为[9]

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \tag{1}$$

式中，$n_{eff}$ 为纤芯的有效折射率，$\Lambda$ 为光栅周期。纤芯的有效折射率和光栅周期都受到应变 $\varepsilon$ 和温度 $T$ 的影响，应变影响中心波长是由于弹光效应和光栅周期的伸缩，温度影响中心波长是由于热光效应和热膨胀效应，综上所述，在应变和温度影响下，FBG 中心波长可表示为[10]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\Delta\varepsilon + (\alpha + \xi)\Delta T \tag{2}$$

式中，$\Delta\lambda_B$ 是反射光中心波长的漂移量，$\Delta\varepsilon$ 为光纤光栅轴向应变，$\Delta T$ 为温度变化，$P_e$ 为有效弹光系数，$\alpha$ 为热膨胀系数，$\xi$ 为热光系数。由式(2)可知，当外界应变和温度发生变化时，FBG 中心波长会发生漂移。在实际应用中，为获取应变值，需要增加温度补偿来解耦出应变[11]。

## 2　起落架仿真及 FBG 传感器组网分析

### 2.1　起落架受载和仿真

起落架在飞机着陆和地面操作阶段承受的主要载荷是着舰阶段的撞击载荷、滑跑过程中的制动载荷和转弯的侧向载荷等，各截面上产生的应变是作用在起落架机轮上三向载荷分量共同产生的复合应变[12]。图 2 所示为地面静态加载示意图，主起落架的主支柱、缓冲器和斜撑杆倒装垂直固定在与机翼连接的夹具上，加载状态与实际工作状态基本一致，逆航向定义为 $x$，垂向为 $y$，$z$ 通过右手坐标系定义。加载时，液压缸通过钢索作用于假轮上，中间安装有力传感器，可测量施加到主起落架上的三向载荷。

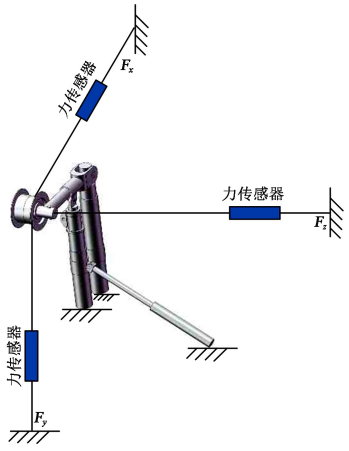
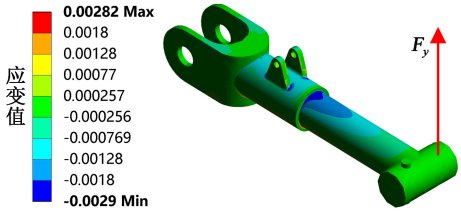


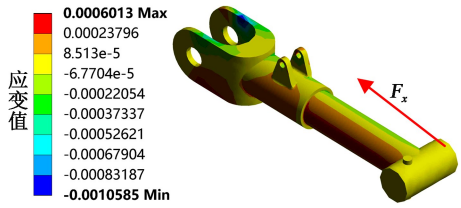

图 2　地面静态加载示意图

摇臂结构承受和传递施加到假轮结构的三向载

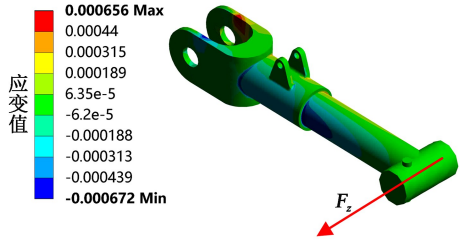
荷，根据实际起飞和降落过程中的受力情况，利用 Ansys Workbench 的静力学仿真功能对起落架摇臂结构分别施加航向载荷（$F_x$）24 kN、垂向载荷（$F_y$）69 kN 和侧向载荷（$F_z$）12 kN，其轴向应变如图 3 所示。




（a） 垂向加载应变云图




（b） 航向加载应变云图

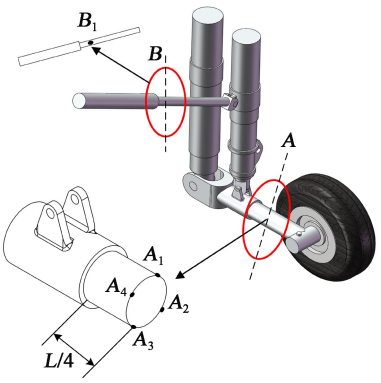



（c） 侧向加载应变云图

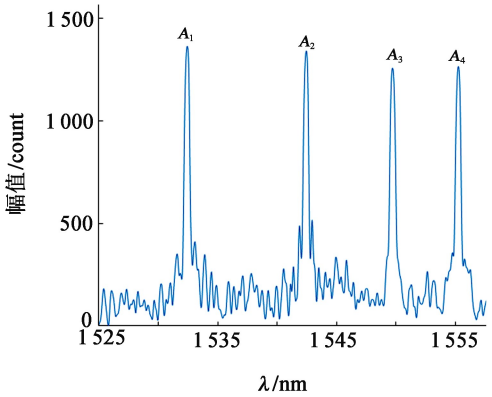
图 3 起落架摇臂有限元仿真应变云图

## 2.2 FBG 传感器布局及封装

针对摇臂结构上的轴向应变分布形式，选择摇臂上靠近缓冲器的区域布置光纤光栅传感器，如图 4(a)所示，在离摇臂总长 1/4 处的横截面 $A$ 上呈圆周阵列分布的粘贴有 4 个 $A_1$，$A_2$，$A_3$ 和 $A_4$ 点光纤光栅应变传感器，其中心波长分别为 1 533，1 543，1 550 和 1 556 nm，光谱如图4(b)所示。根据经验




（a） FBG 传感器的组网方式

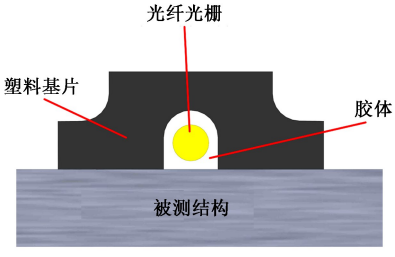



（b） 截面 $A$ 传感器的光谱

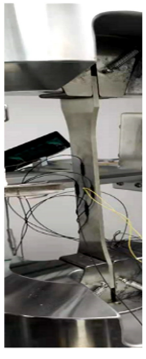
图 4 传感器布局设计

可知，主起落架受侧向载荷作用时，斜撑杆上的应变响应较大，因此在斜撑杆上靠近作动筒的 $B$ 截面上 $B_1$ 点单独布置一个传感器，用于监测较小的侧向载荷。

FBG 传感器采用基片式预拉伸的封装方法，通过环氧树脂胶粘贴到被测结构上，应变测量模型如图 5(a)所示，该工装方式保证了封装的一致性，使应变传递系数更加稳定[13]。图 5(b)为 FBG 应变传感器与电阻应变片的标定试验装置，试验得到基片式预拉伸 FBG 传感器的灵敏度系数为 1.2 pm/με。




（a） 测量模型



（b） 标定装置

图 5 FBG 应变传感器标定及封装

# 3 地面静态载荷试验

根据材料力学的叠加原理，主起落架上测量点的应变可看作是三方向载荷单独作用结果的线性叠加，因此要建立载荷与应变的关系，首先标定三方向载荷 $F_x$，$F_y$ 和 $F_z$ 的应变响应系数。静态加载分为三大类，分别为单向加载、双向加载和组合加载，地面加载试验现场和贴片形式如图 6 所示，加载状态与实际工作状态基本一致，用于测量力大小的传感器误差在±1%以内。

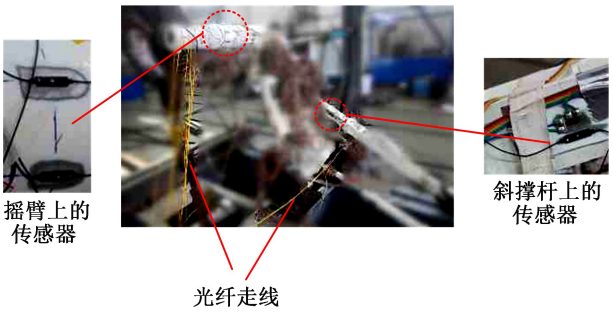



图 6　地面静态载荷标定装置

为减小加载过程中的系统误差，需要对加载系统进行预加载，消除零部件之间的机械间隙。以垂向单独加载工况为例，先预加载，然后清零，再以步进 6.9 kN 加载到满级 69 kN，然后逐级卸载到 0 级，各级停留 10 s 用于数据采集。在 10 级垂向载荷作用下，测量点 $A_3$ 传感器的 10 个光谱响应如图 7 所示。从图中看出，随着载荷的逐渐增大，测量点 $A_3$ 传感器的中心波长逐渐增大。

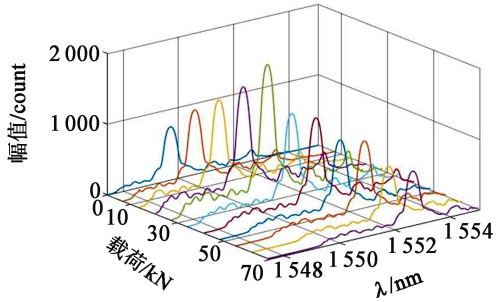



图 7　测量点 $A_3$ 传感器的光谱响应

FBG 的光谱通过寻峰算法得到中心波长，根据灵敏度系数将中心波长转换为测量点的应变。图 8 为垂向单独加载工况下 5 个测量点的应变采集曲线，在每一级的加载和卸载过程中，传感器所测应变的波动不超过加载系统的误差：±1%。同时，从图中可以看出，在垂向单独加载时，测量点 $A_1$ 压缩、$A_3$ 和 $B_1$ 拉伸；测量点 $A_2$ 和 $A_4$ 位于摇臂中性轴偏下的位置，均受到拉伸，与仿真趋势一致。

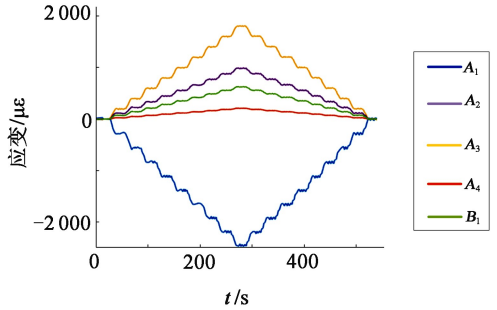



图 8　垂向单独加载的应变响应曲线

## 4　载荷标定方程的求解和验证

主起落架的载荷标定采用多元线性回归方法，将结构件受到的外载荷简化成集中的三向载荷矢量，载荷作为系统输入的自变量，测量点的应变作为系统输出的因变量，得到线性方程组如下：

$$\begin{cases} \varepsilon_{A_1} = K_{1x}F_x + K_{1y}F_y + K_{1z}F_z \\ \vdots \\ \varepsilon_{A_4} = K_{4x}F_x + K_{4y}F_y + K_{4z}F_z \\ \varepsilon_B = K_{Bx}F_x + K_{By}F_y + K_{Bz}F_z \end{cases} \tag{3}$$

式(3)可简写为 $\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{KF}$，式中 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为 5 个测量点的应变矢量，通过对图 8 中应变平台求均值得到，维数为 5×1；$\boldsymbol{F}$ 为标定试验所施加的 3 个方向的载荷矢量，数值为应变平台对应的三方向载荷大小，维数为 3×1；$\boldsymbol{K}$ 为载荷应变响应系数矢量，维数为 5×3。系数 $\boldsymbol{K}$ 采用式(4)最小二乘法进行线性拟合，式中 $F_i$ 为单一方向载荷，$\varepsilon_i$ 为对应载荷下测量点的应变值，$n$ 为载荷加载级数，$\bar{F}$ 为载荷平均值，$\bar{\varepsilon}$ 为应变平均值。以垂向加载为例，自变量为施加的垂向 10 级载荷，因变量为测量点 $A_1$ 的应变响应，拟合直线的斜率为所求的应变载荷响应系数。测量点 $A_1$ 的应变载荷响应系数 $K$ 拟合如图 9 所示，拟合直线的线性相关系数在 0.999 以上，这表明标定的单方向载荷与应变响应呈线性关系。

$$\hat{K} = \frac{\sum_{i=1}^{n} F_i\varepsilon_i - n\bar{F}\bar{\varepsilon}}{\sum_{i=1}^{n} F_i^2 - n\bar{F}^2} \tag{4}$$

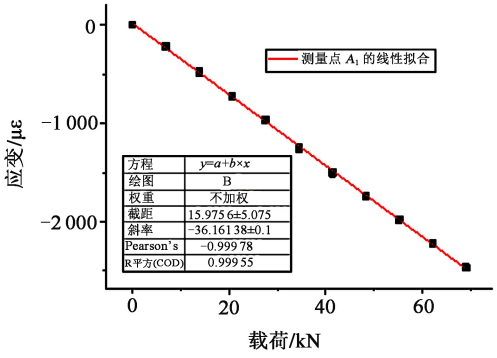



图 9　应变载荷响应系数的拟合曲线

根据测点 $A_1$ 的计算方法，通过单独航向加载、单独垂向加载和单独侧向加载的载荷-应变数据可标定出该单向载荷作用下 5 个测量点的应变载荷响应系数 $K_x$，$K_y$ 和 $K_z$，计算系数 $K$ 如表 1 所示。

考虑载荷作为系统输入的自变量，应变作为系

统输出的因变量，载荷的计算矩阵方程组采用反向回归法，符合对标定过程的描述[14]。通过式(3)变换为式(5)来估算载荷，式中 $\hat{\boldsymbol{K}}$ 为估算的载荷系数矩阵，$\boldsymbol{\varepsilon}$ 为测量点的应变矩阵。

$$\hat{\boldsymbol{F}}=\hat{\boldsymbol{K}}\cdot\boldsymbol{\varepsilon} \tag{5}$$

由表 1 可知，5 个测量点的系数矢量之间不存在线性相关，且独立应变的个数大于载荷参数，因此可以通过矩阵式(3)中的系数矩阵 $\boldsymbol{K}$ 求逆来估算 $\hat{\boldsymbol{K}}$，估算公式为

$$\hat{\boldsymbol{K}}=[\boldsymbol{K}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}]^{-1}\boldsymbol{K}^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

得到的系数矩阵 $\hat{\boldsymbol{K}}$ 为

$$\hat{\boldsymbol{K}}=\begin{bmatrix}0.016\,2 & -0.047\,0 & -0.012\,2 & -0.044\,7 & -0.016\,4\\ 0.004\,0 & 0.002\,5 & 0.011\,2 & 0.002\,3 & -0.017\,6\\ -0.001\,6 & -0.008\,9 & -0.007\,8 & -0.028\,2 & -0.013\,4\end{bmatrix} \tag{7}$$

**表 1 应变载荷响应系数**

| 测量点 | $K_x/(\mu\varepsilon\cdot\mathrm{kN}^{-1})$ | $K_y/(\mu\varepsilon\cdot\mathrm{kN}^{-1})$ | $K_z/(\mu\varepsilon\cdot\mathrm{kN}^{-1})$ |
|---|---|---|---|
| $A_1$ | 2.48 | −36.16 | −14.57 |
| $A_2$ | −21.78 | 1.64 | 30.25 |
| $A_3$ | 2.90 | 25.64 | −13.30 |
| $A_4$ | 14.39 | 12.08 | −27.27 |
| $B_1$ | 4.10 | 8.91 | −32.75 |

为了验证载荷预测方程组的准确性，将载荷计算方程组代入组合加载和双向加载的工况中，通过测量的应变来计算载荷，计算结果及相对误差如表 2 所示。

**表 2 载荷验证工况误差及分析**

| 验证试验 | | 施加载荷/kN | 反算载荷/kN | 反算相对误差/% |
|---|---|---|---|---|
| 工况 1 | $F_x$ | 24 | 23.70 | 1.25 |
| | $F_y$ | 69 | 67.05 | 2.83 |
| | $F_z$ | 8 | 7.69 | 3.87 |
| 工况 2 | $F_x$ | 12 | 12.56 | 4.67 |
| | $F_y$ | 54 | 53.25 | 1.39 |
| | $F_z$ | 8 | 7.61 | 4.86 |
| 工况 3 | $F_x$ | 24 | 23.04 | 4.00 |
| | $F_y$ | 69 | 66.84 | 3.13 |
| | $F_z$ | 0 | 0.33 | — |

由表 2 可知，在三次验证工况下，反算的起落架三向载荷和实际施加的载荷在最大值时的相对误差为：航向载荷 1.25%，垂向载荷 2.83%，侧向载荷 3.87%，总体上满足实际工作需求。验证工况中，对于载荷值偏小的计算存在一定误差，除加载系统本身的误差外，其可能原因是 FBG 应变传感器不是以圆周阵列分布的形式布置到摇臂上，比如垂向载荷单独作用时，横截面 $A$ 上的传感器 $A_2$ 和 $A_4$ 均受到拉伸作用，是由于传感器 $A_2$ 和 $A_4$ 整体分布在摇臂往下接近传感器 $A_3$ 的位置，从而使计算结果出现偏差。

## 5 结论

本文研究了 FBG 传感器在起落架结构应变和载荷测试中的应用，根据起落架的结构和受载情况，构建了基于 FBG 的起落架摇臂结构和斜撑杆结构的应变测量网络。通过静态加载试验，构建了应变-载荷测量模型，能有效监测结构的应变和载荷，并且反算载荷的相对误差在 5%以内，满足实际工程需求。本文的研究成果为 FBG 传感器在飞机起落架结构应变和载荷监测中的应用提供了参考，为基于 FBG 传感的起落架结构载荷实时远程监测打下了基础。

**参考文献：**


[1] 闫楚良，苏开鑫. 飞机起落架安全寿命与损伤容限设计[M]. 北京：航空工业出版社，2011：1-8.
Yan Chuliang, Su Kaixin. Design of Safety Life and Damage Tolerance of Aircraft Landing Gear[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2011: 1-8.

[2] Łukasz Święch. Calibration of a load measurement system for an unmanned aircraft composite wing based on fibre Bragg gratings and electrical strain gauges[J]. Aerospace, 2020, 7(3): 7030027.

[3] Raffaella D S. Fiber optic sensors for structural health monitoring of aircraft composite structures: Recent advances and applications[J]. Sensors, 2015, 15(8): 18666-18713.

[4] Daichi W, Hirotaka I, Masato T, et al. Flight demonstration of aircraft fuselage and bulkhead monitoring using optical fiber distributed sensing system [J]. Smart Materials and Structures, 2018, 27(2): 055007.

[5] Iele M, Leone M, Consales G V, et al. Load monitoring of aircraft landing gears using fiber optic sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 281: 31-41.

[6] Iadicicco A, Natale D, Di P P, et al. Strain monitoring of a composite drag strut in aircraft landing gear by fiber Bragg grating sensors[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019, 19(10): 31096575.

[7] 鲁明宇，马 超，李翔宇，等. 飞机作动器连杆光纤光栅载荷校准方法[J]. 数据采集与处理，2020，35(2)：270-277.
Lu Mingyu, Ma Chao, Li Xiangyu, et al. Load calibration method of actuator connecting panels for aircraft based on fiber Bragg grating sensors [J]. J. of Data Acquisition and

Processing，2020，35(2)：270-277.

[8] 姜勐栋，张发祥，李淑娟，等. 光纤光栅应变传感系统在船舶结构监测中的应用[J]. 半导体光电，2017，38(2)：268-270.
Jiang Shaodong，Zhang Faxiang，Li Shujuan，et al. Application of FBG strain sensing system in ship structure monitoring[J]. Semiconductor Optoelectronics，2017，38(2)：268-270.

[9] Goossens S，Pauw B D，Geernaert T，et al. Aerospace grade surface mounted optical fiber strain sensor for structural health monitoring on composite structures evaluated against inflight conditions[J]. Smart Materials and Structures，2019，28：065008.

[10] 周祖德，姚碧涛，谭跃刚，等. 光纤传感在制造领域应用的分析与思考[JB/OL]. 机械工程学报：1-24[2021-06-28].
Zhou Zude，Yao Bitao，Tan Yuegang，et al. Analysis and thoughts on application of optical fibre sensing in manufacturing [JB/OL]. J. of Mechanical Engineering：1-24[2021-06-28].

[11] 闫　光，卢建中，张开宇，等. 温度解耦大量程光纤光栅应变传感器[J]. 吉林大学学报(工学版)，2019，49(5)：1682-1688.
Yan Guang，Lu Jianzhong，Zhang Kaiyu，et al. Temperature decoupling large range fiber Bragg grating strain sensor[J]. J. of Jilin University (Engineering and Technology Edition)，2019，49(5)：1682-1688.

[12] 闫楚良. 飞机载荷谱实测技术与编制原理[M]. 北京：航空工业出版社，2011：86-88，121-125.
Yan Chuliang. Aircraft Load Spectrum Measurement Technique and Compilation Principle[M]. Beijing：Aviation Industry Press，2011：86-88，121-125.

[13] 李俊鑫，郎向伟. 基于光纤 Bragg 光栅的测斜仪设计与试验[J]. 传感器与微系统，2020，39(4)：86-88.
Li Junxin，Lang Xiangwei. Design and experiment of inclinometer based on FBG[J]. Transducer and Microsystem Technologies，2020，39(4)：86-88.

[14] 黄岷丰，裘进浩，刘克格. 支柱式起落架载荷标定数据工程处理方法[J]. 振动，测试与诊断，2020，40(2)：248-254，416.
Huang Wanfeng，Qiu Jinhao，Liu Kege. Engineering treatment method of load calibration data of telescopic landing gear[J]. J. of Vibration，Measurement & Diagnosis，2020，40(2)：248-254，416.

## 作者简介：

**褚园园**(1997－)，男，硕士生，主要研究方向为光纤传感及其在结构健康监测领域的应用；

**闫　光**(1979－)，男，博士，副教授，硕士生导师，研究方向为光纤传感与光电器件。