

光纤FBG传感器实施大应变标定方法的探讨

黄旌, 刘成武, 魏东, 李猛

(空军第一航空学院, 河南 信阳 464000)

摘要: 针对钢管封装的大应变光纤光栅布拉格传感器的标定问题, 设计了大应变试验加载平台, 通过光纤光栅布拉格传感器对试验平台标定, 确定了平台载荷与应变的比例系数 K , 按照等比加载实现了对光纤光栅布拉格传感器大于 $5000 \mu\epsilon$ 的大应变标定。

关键词: 光纤光栅布拉格传感器; 大应变; 标定

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2013.04.020

中图分类号: V214.3*2 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)04-0086-04

Discussion on Large Strain Calibration Method Using FBG Sensor

HUANG Jing, LIU Cheng-wu, WEI Dong, LI Meng

(The First Aeronautical Institute of Air Force, Xinyang 464000, China)

Abstract: A large strain experimental loading platform was designed to solve the calibration problem of large strain FBG sensor encapsulated with steel tube. The proportional coefficient K between platform loading and strain was determined through calibration of experimental platform equaling with the FBG sensor. According to geometric proportion loading, the calibration of large strain FBG sensor larger than $5000 \mu\epsilon$ was realized.

Key words: FBG sensor; large strain; calibration

在航空工业中需要采用光纤光栅布拉格传感器(FBG传感器)对飞机结构关键部位的应力、应变实时监测, 以便实现对飞机结构的健康监控^[1]。相对于传统电测法, FBG传感器具有无源、质量小、抗电磁干扰、稳定性好等优点^[2], 因此在飞机结构单机寿命监控发展中具有非常好的应用前景^[3]。在应用过程中某些极端情况下, 被监测应变需要达到 $5000 \mu\epsilon$ 以上, 采用减敏法制作FBG传感器后, 需

要对其标定^[4]。文中设计了大应变等强度梁, 制定了标定试验方法, 对FBG传感器实现了大应变的标定。

整个测试标定的思路及路线分为三步: 1) 设计能产生大应变的试验加载平台; 2) 对试验加载平台产生的大应变标定, 保证其能够产生足够大(大于 $5000 \mu\epsilon$)且准确的应变; 3) 使用试验加载平台对FBG传感器标定, 分析其特性指标。

收稿日期: 2013-02-07

作者简介: 黄旌(1975—), 男, 河南信阳人, 硕士, 讲师, 主要从事航空机械测试教学与研究工作。

1 试验加载平台设计及实现

1.1 试验加载平台理论设计

试验加载平台采用准确、简单的等强度梁作为基本结构,如图1所示。梁根部固定支撑,在悬臂端加载砝码时,梁中性层上部沿梁长度方向产生拉应力,相应的应力 σ 及应变 ε 大小与该点距中性层的距离成正比^[5]。对于一般金属材料(试验用梁为45号钢)其应变远达不到要求,可在不改变梁主体结构的情况下,在梁上表面焊接两个相对的凸台(截面为正方形,边长8 mm),如图1a所示;凸台顶部到中性层的距离与应变同样满足比例关系,如图1b所示。根据力学分析,当凸台高度为61 mm,两凸台间距6 mm(FBG传感器采用钢管封装,标距7 mm),悬臂端加载1 kg砝码即产生应变 $1000 \mu\varepsilon$,依次叠加5个砝码可达到 $5000 \mu\varepsilon$ 。

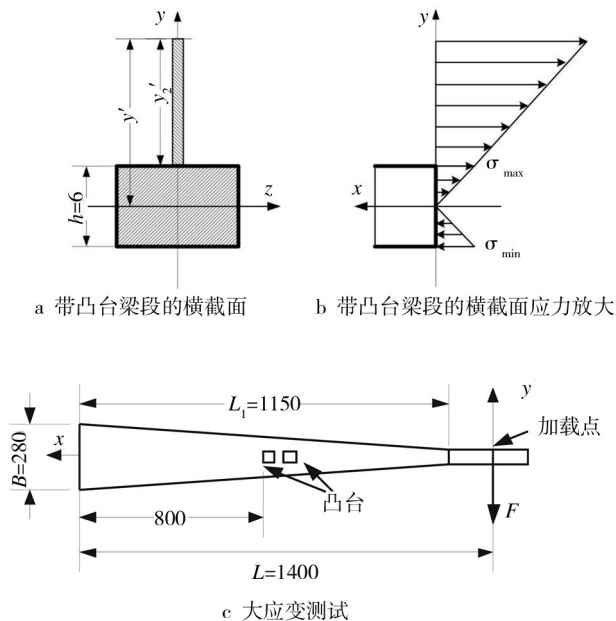


图1 试验加载平台及凸台应变

Fig. 1 Strain of the experimental loading platform and boss

1.2 有限元及误差分析

理论设计后应用有限元法建立模型,对大应变测试进行验证,如图2所示。有限元分析结果表明,两凸台顶部之间的应变大于理论设计结果,达到2.2

倍以上。分析其误差可归纳为“1个原因,3个方面”。一个原因是指理论设计时未考虑等强度梁上焊接凸台会对等强度梁的局部刚度产生较大影响,体现在3个方面:1)凸台本身具有一定的截面尺寸,并具有较高的刚度,这样在焊接部位会增加梁的刚度;2)为了有效传递变形及应变,且保证焊接的相容性,凸台同梁采用同样的材料,具有较大的弹性模量,对梁刚度影响较大;3)两凸台间距小,共同相互作用,对梁局部影响较大。

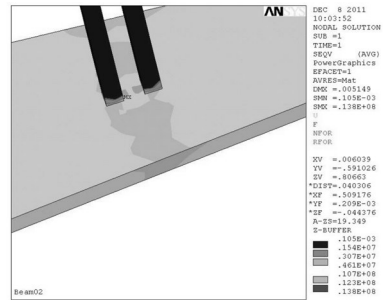


图2 带凸台梁段有限元分析

Fig. 2 Finite element analysis of the beam section with boss

1.3 凸台优化

根据以上误差原因及影响分析,对凸台优化。

1) 降低凸台整体高度,可有效降低对梁刚度的影响。

2) 减小凸台根部与梁焊接部位的尺寸,顶部尺寸对梁整体刚度影响较小,可不变或适当加大,便于敷设传感器。

3) 在保证两凸台顶部相对位置为6 mm以便传感器粘贴的前提下,增加凸台根部间距,可有效降低两凸台间的共同相互作用,降低对梁刚度的影响;凸台顶部位置应变和凸台根部的相对距离相关,因此增加根部间距可进一步放大顶部应变^[6]。

4) 凸台修改为可调结构,即凸台为两部分,通过螺栓固定,可小幅调整两凸台间距,这样在试验时可以调节FBG传感器初始时的松紧,避免因粘贴引起预应力。凸台结构如图3所示,系统实体如图4所示。

通过理论分析及有限元分析可得到以下结论:

1) 等强度梁上两个相对的凸台之间可产生大应变; 2) 凸台间应变大小和悬臂端载荷 F 成正比; 3) 因影响因素较多,通过理论计算及有限元分析无法得到

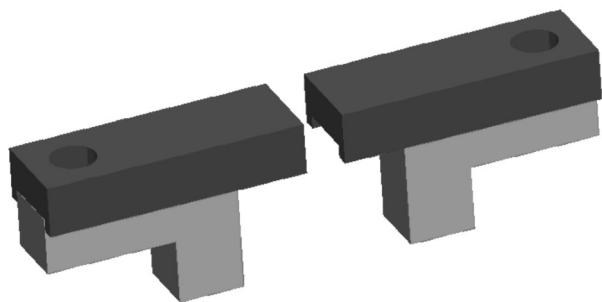
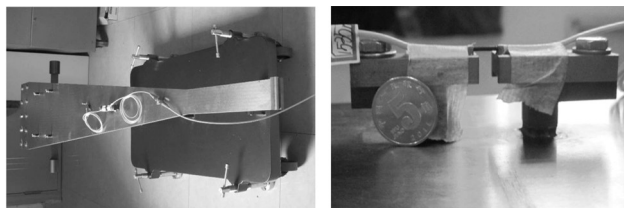


图3 试验加载平台凸台优化设计

Fig. 3 Optimal design of experimental loading platform's boss



a 试验加载平台

b 试验加载平台局部图

图4 试验加载平台实物

Fig. 4 Entity of the experimental loading platform

准确应变值。因此,需要标定试验加载平台产生的大应变,即找到加载平台所受到的载荷和凸台间的应变之间的准确对应关系。

2 试验加载平台的标定

理论上采用标准传感器即可实现对试验加载平台的标定,但存在一个问题,标准传感器(标准应变片或 Micron Optics 公司的 OS3100, OS3200 等 FBG 传感器)需要充分粘贴在被测结构上,而两凸台之间悬空无法粘贴标准传感器,因此采用标准传感器直接对两凸台之间的应变进行标定不可行,只能使用文中钢管封装的 FBG 传感器,依照以下方法标定试验加载平台:1)找到 FBG 传感器受到小应变时中心波长随应变改变的变化率(FBG 传感器的应变灵敏度系数为 α);2)以 α 为标准,标定出试验加载平台所受到的载荷 F 和凸台间的应变 ε 之间比例系数 K ,根据试验加载平台载荷与应变成正比的关系,就可以实现加载大于 $5000 \mu\varepsilon$ 的应变。

2.1 标定 α

对 FBG 传感器小应变下灵敏系数标定采用北戴河电气自动化研究所 BZ8002 等强度梁实验台,在该梁上表面沿纵向粘贴标准应变片,采用砝码施加静载。

力学理论分析和标准电阻应变传感器应变值测量见表1。对数据分析可知,BZ8002 梁的载荷与轴向拉应变成线性,其关系为 10 N 载荷在梁上表面产生应变 $134 \mu\varepsilon$,可用 BZ8002 梁对 FBG 传感器小应变进行标定。在该梁上表面沿纵向敷设 FBG 传感器,按照 10 N 逐级多次重复加载,使用 Micron Optics 公司的光纤光栅传感解调仪 SM125 对 FBG 传感器的中心波长变化解调,其反射的中心波长表达式见式(1)。

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

式中: λ 为中心波长; n_{eff} 为导模的有效折射率; Λ 为光栅的周期。

表1 小等强度梁载荷与应变关系

Table 1 The relationship between small equal strength beam's load and strain

载荷/N	电阻应变片实测值/ $\mu\varepsilon$	理论计算值/ $\mu\varepsilon$
0	0.00	0.00
10	134.08	133.93
20	267.95	267.87
30	402.42	401.80
40	537.01	535.73
50	669.94	669.67

当 FBG 传感器受到外界的作用(如应力),将引起光栅周期的变化和弹光效应,因而反射的中心波长随之发生变化。记录其中心波长随载荷的变化,见表2。FBG 传感器中心波长随小应变变化关系拟合后如图5所示。

对数据分析并拟合,在小应变状态下,FBG 传感器中心波长相应变为线性变化, $\alpha = 2.4776 \times 10^{-4} \text{ nm}/\mu\varepsilon$ 。由此可标定试验加载平台受到的载荷和凸台间应变之间的关系。

2.2 标定 K

将该 FBG 传感器敷设粘贴在试验加载平台两凸

表2 FGB传感器中心波长随小应变变化关系

Table 2 The relationship between FBG sensor central wavelength and small strain

载荷/N	应变/ $\mu\epsilon$	中心波长/nm				
		第1次	第2次	第3次	第4次	第5次
0	0	1 562.429	1 562.424	1 562.428	1 562.417	1 562.412
10	134	1 562.462	1 562.457	1 562.463	1 562.451	1 562.448
20	268	1 562.496	1 562.491	1 562.494	1 562.484	1 562.481
30	402	1 562.532	1 562.522	1 562.527	1 562.518	1 562.515
40	536	1 562.565	1 562.553	1 562.559	1 562.55	1 562.547
50	670	1 562.597	1 562.587	1 562.594	1 562.584	1 562.578

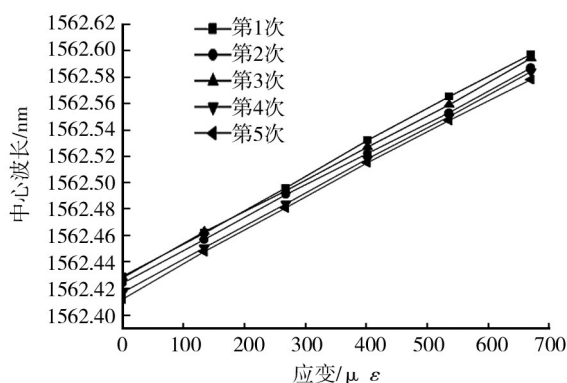


图5 FGB传感器中心波长随小应变变化关系

Fig. 5 The relationship between FBG sensor central wavelength and small strain

台上,根据 α ,标定试验加载平台载荷与凸台间应变之间的关系,其试验方法如图4b所示。在标定前的敷设时,应注意调节凸台间距离,使FGB传感器在未加载情况下不承受应力及应变,即FGB传感器中心波长仍在1562.41~1562.43 nm之间。采用砝码加载,载荷为5 N,加载3次,记录其中心波长随载荷的变化,见表3。

在试验加载平台施加载荷为5 N时,FGB传感器中心波长平均变化量为0.2337 nm。已求得 $\alpha = 2.4776 \times 10^{-4} \text{ nm}/\mu\epsilon$,可知5 N外载时,凸台间产生应变量 $\epsilon = 939.1 \mu\epsilon$,由此标定出试验加载平台载荷与应变之间的灵敏度 $K = 939.1/5 = 187.8 \mu\epsilon/\text{N}$ 。

3 FBG传感器标定及特性分析

根据试验加载平台凸台间应变与载荷成正比的关系,就可以等比施加载荷,实现大于5000 $\mu\epsilon$ 的

表3 凸台间FGB传感器中心波长随载荷变化

Table 3 The relationship between FBG sensor central wavelength and load

载荷/N	应变/ $\mu\epsilon$	中心波长/nm		
		第1次	第2次	第3次
0	0	1 562.414	1 562.431	1 562.421
5	939.1	1 562.649	1 562.665	1 562.653
10	1 878.2	1 562.878	1 562.892	1 562.898
15	2 817.3	1 563.123	1 563.135	1 563.139
20	3 756.4	1 563.359	1 563.379	1 563.362
25	4 695.5	1 563.591	1 563.607	1 563.591
30	5 634.6	1 563.815	1 563.839	1 563.824

应变。

试验加载平台5 N外载可产生应变939.1 $\mu\epsilon$,因此按照5 N逐级加载(共6级),载荷至30 N,凸台间的应变即超过5000 $\mu\epsilon$ 。重复三次,见表3。

数据拟合如图6所示,分析可以得到以下结论。

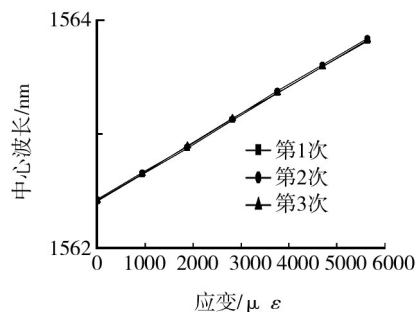


图6 FGB传感器中心波长随大应变变化关系

Fig. 6 The relationship between FBG sensor central wavelength and large strain

(下转第125页)

- York: John Wiley & Sons, 1994: 56—84.
- [3] 李丽霞. 插入扰流元件换热器换热特性数值模拟研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2009: 6—7.
- [4] WATSON R N, PROULX G F. A New Thermal Vacuum Facility for Hughes Space and Communications at El Segundo California[C]// The 20th Space Simulation Conference of the Changing Testing Paradigm. 1998: 113—130. (余不详)
- [5] GOVINDAN P, SATYANARAYANA M, DEVIPRASAD Karnik, et al. Design and Performance of Φ 0.6 m Thermal Vacuum Chamber[C]// Proceedings of the 18th International Cryogenic Engineering Conference. 2000: 679—682. (余不详)
- [6] 杨建斌, 张文瑞, 柏树, 等. ZM4300 光学遥感器空间环境模拟试验设备新技术[J]. 真空与低温, 2010, 16(1): 25—29.
- [7] 张磊, 刘敏, 刘波涛. 流速及进出液口形式对板式热沉换热性能影响[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(5): 566—570.
- [8] 姬长发, 王跃勇, 刘晓兵. 酒窝状换热板强化换热效果分析[J]. 西安科技大学学报, 2010, 30(3): 330—335.
- [9] 袁修干, 刘国青, 刘敏, 等. 大型液氮热沉中流动与传热均匀性数学模拟与分析[J]. 低温工程, 2008(2): 18—21.
- [10] 丁文静, 单巍巍, 刘敏, 等. 大型空间环境模拟设备热沉管网系统仿真计算[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(6): 584—586.

(上接第89页)

1) FGB传感器中心波长随应变增加而增加, 其拟合结果见式(2)。

$$\lambda = \lambda_0 + \alpha \varepsilon = 1562.415 + 2.497 \times 10^{-4} \varepsilon \quad (2)$$

式中: λ_0 为初始中心波长, nm。

2) FGB传感器测量范围超过 5000 $\mu\varepsilon$ 。

3) FGB传感器在其测量范围内, 线性度很好, 标准偏差 $S=0.005\ 56$, 复相关系数 $R=0.999\ 95$ 。

4 结语

通过设计大应变试验加载平台, 并通过FBG传感器对大应变试验加载平台标定, 求得了平台的载荷与应变之间的比例系数 K , 最终等比加载实现了对FBG传感器超过 5000 $\mu\varepsilon$ 的大应变标定。通过设计、有限元分析、试验分析, 得到以下结论。

1) 文中设计的大应变试验加载平台可有效产生线性大应变。

2) 通过试验、标定, FGB传感器测量范围可达到 5000 $\mu\varepsilon$, 且线性度较好。

3) 文中设计的试验、标定方法合理、可行。

4) 由于文中大应变试验加载平台的加载方式与飞机实际使用时的加载方式相似, 因此FBG传感器由钢管封装、等强度梁加载所引起的误差^[7]可有效地补偿抵消。

参考文献:

- [1] 常飞, 韩庆, 尚柏林. 光纤技术在军用飞机结构健康监测中的研究[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(10): 2641—2646.
- [2] 尚柏林, 宋笔锋, 万方义. 光纤传感器在飞行器结构健康监测中的应用[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2008(3): 7—10.
- [3] 张泰峰, 孙文胜, 杨晓华, 等. 飞机结构单机寿命监控的几个关键问题的研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(6): 6—9.
- [4] 李宏男, 任亮. 结构健康监测光纤光栅传感技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 56—64.
- [5] 高绍武. 一种新型位移传感器的研究[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2001(3): 264—268.
- [6] 刘钦朋, 乔学光, 贾振安, 等. 光纤 Bragg 光栅传感原理及增敏技术[J]. 光电子技术与信息, 2006, 19(3): 18—22.
- [7] 孙丽. 光纤光栅传感应用问题解析[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 72—76.

(上接第116页)

- [K]. 北京: 航空工业出版社, 2003: 18—21.
- [4] 高峰, 杨宝宁, 马海全, 等. 航天器复合材料结构的渐进损伤分析[J]. 航天器工程, 2009, 5: 12.
- [5] 赵伶丰, 白光明. 复合材料胶接接头分析研究[J]. 航空器

环境工程, 2007, 24(6): 393—396.

- [6] 王宝忠. 飞机设计手册: 结构设计 第10册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000: 1028—1030.
- [7] 童靖宇, 向树红. 临近空间环境及环境试验[J]. 装备环境工程, 2012, 9(3): 1—4.