

飞机结构健康监控模拟加载试验系统的设计

魏东, 黄旌, 韩斐

(空军第一航空学院, 河南 信阳 464000)

摘要: 设计了飞机结构健康监控模拟加载试验系统, 包括加载平台系统、大应变测试精度试验验证模块和关键部位模拟试验模块, 用于研究传感器敷设方法对测试精度的影响, 为光纤传感技术在飞机结构监测中的应用研究提供技术基础和理论依据。

关键词: 飞机结构; 健康监控; 模拟加载; 试验系统

中图分类号: V216.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2012)06-0128-03

Design of Simulated Loading Test System for Aircraft Structure Health Monitoring

WEI Dong, HUANG Jing, HAN Fei

(The First Air Force College of Technology, Xinyang 464000, China)

Abstract: The simulated loading test system for aircraft structure health monitoring was designed. The system consists of loading terrace system, large strain testing accuracy verification module, and key part simulated test module. The system can be used in studying influence of laying method of sensor on test accuracy. The purpose was to provide technique basis, theory and technique for application of fiber-optical sensor techniques in aircraft structure health monitoring.

Key words: aircraft structure; health monitoring; simulating loading; experiment system

飞机使用过程中, 由于各种载荷的作用以及自然条件的影响, 机体结构的强度和刚度会逐渐降低, 以致出现变形、裂纹等故障。飞机主承力结构发生的严重损伤若不能被及时发现并得以修复, 往往导致结构断裂, 甚至发生空中解体的严重后果。为及时发现机体结构的损伤情况, 实现单机寿命的有效控制和管理, 美国空军在F-22和F-35战斗机上均装备了用于飞机结构监测的光纤系统, 也就是将光纤传感器按照一定的分布形式敷设于飞机结构的关键、危险部位, 准确记录各部位的疲劳损伤程度。

在光纤传感技术研究中, 为模拟飞机关键、危险部位应力的产生与测试, 笔者设计了“飞机结构健康监控模拟加载试验系统”。通过模拟加载与测试, 研究了应力与中心波长的对应关系、传感器敷设方法对测试精度的影响, 为光纤传感技术在飞机结构监测中的应用研究提供了技术基础和理论依据。

1 模拟加载试验系统的设计思路

飞机结构健康监控模拟加载试验系统采用“一

收稿日期: 2012-07-29

作者简介: 魏东(1964—), 男, 河南驻马店人, 硕士, 副教授, 主要研究方向为飞机发动机维修工程。

套平台系统,两个试验模块”的设计思路,即设计一套加载平台系统,在此基础上采用模块化的思想建立两套试验验证模块;使用时在加载试验平台上施加所需额定的静载荷、动载荷,分别传递到两套试验验证模块上,实现两种功能的试验及测试。

2 加载试验平台

加载试验平台组成部分为等强度悬臂梁、静态加载模块、动态加载模块各一套。

2.1 等强度悬臂梁

1) 组成:悬臂梁1个、底座1个、支架1个、固定配件若干。效果如图1所示。



图1 加载试验平台效果

Fig. 1 Effect picture of loading test terrace

2) 结构及功用。等强度梁结构的核心是悬臂梁,材料采用45号钢,其弹性模量 $E=200.1 \text{ GPa}$ (温度为 $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时),密度 $\rho=7.890 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,泊松比 $\mu=0.269$, $\sigma_{0.2}>315 \text{ MPa}$, $\sigma_b>450 \text{ MPa}$ 。

悬臂梁的形式为梯形加矩形,具体尺寸如图2所示,一端通过多个螺栓固定在底座、支架上,另一端为自由端,也为加载端。底座采用普通结构钢,在

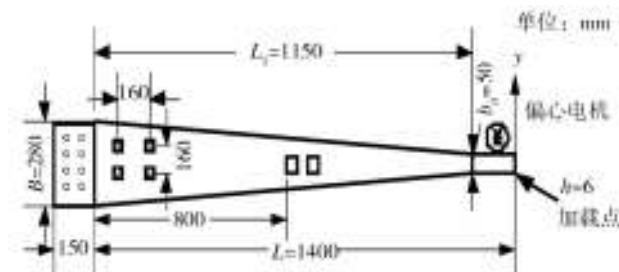


图2 悬臂梁结构

Fig. 2 Cantilever structure

4个角各自使用可调节高度的螺丝作为支撑。支柱也采用普通结构钢,与底座的一端焊接,另一端加工安装孔,便于悬臂梁的固定、安装及更换。

2.2 静态加载模块

1) 组成:加载砝码(1000 g)5个,挂钩及托盘1套,效果如图1所示。

2) 结构及功用。加载砝码材料为不锈钢,通过带挂钩的托盘悬吊在加载点的下部对悬臂梁加载,通过增减砝码对悬臂梁逐级施加静态载荷。悬臂梁左端固定,右端自由并加载力 F ,其剪切力 Q 、弯矩 M 如图3所示。

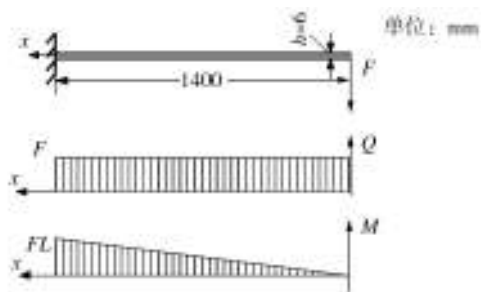


图3 悬臂梁剪切力 Q_x 、弯矩 M_x

Fig. 3 Shear force Q_x , moment M_x of the cantilever

在载荷作用下,悬臂梁中性层的上、下部分各自产生拉应力、压应力,其最大应力分别在上、下表面,且在上、下表面的应力状态为单向应力状态。如果对任意测量点取横截面,截面上任一点的正应力为:

$$\sigma = \frac{Md}{I_z} \quad (1)$$

式中: M 为测量点截面的弯矩, $M=Fl$; I_z 为测量点截面惯性矩, $I_z = \frac{bh^3}{12}$; b 为测量点截面宽度, $b = \frac{Bl}{L}$; d 为测量点截面上任一点距中性层的距离。截面上任一点的应力分布如图4所示。

悬臂梁上产生的最大正应力 $\sigma_{\max}$ 和 $\sigma_{\min}$ 大小相等,方向相反,分别在梁的上、下表面。此时 $d=h/2$,所以有:

$$\sigma_{\max} = \frac{Md}{I_z} = \frac{M}{I_z} \frac{h}{2} = \frac{l2L}{h^3 Bl} Fl \frac{h}{2} = \frac{l2L}{h^3 B} F \frac{h}{2} = \frac{6L}{h^2 B} F \quad (2)$$

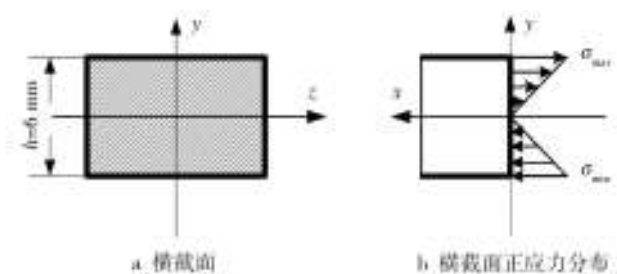


图4 横截面正应力分布

Fig. 4 Normal stress distribution on cross section

将 $h=0.008$ m, $B=0.28$ m, $L=1.4$ m, 单个砝码质量 1 kg, 梁的弹性模量 $E=200.1$ GPa 代入式(2)可得梁上表面最大拉应变为:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{E} = \frac{6L}{Eh^2B} F = \frac{6 \times 1.4}{200.1 \times 10^9 \times 0.006^2 \times 0.28} \times 1.0 \times 9.8 = 40.81 \mu \varepsilon$$

依此类推, 每个砝码对悬臂梁上表面产生的轴向正应力 $\sigma=8.17$ MPa, $\varepsilon=40.8129 \mu \varepsilon$, 5个砝码共产生应力 $\sigma=40.83$ MPa, $\varepsilon=204.0645 \mu \varepsilon$ 。

2.3 动态加载模块

1) 组成: 带离心振子的电机1台、电机调速器1个、安装固定配件若干。

2) 结构及功用。带离心振子的电机通过固定配件安装在悬臂梁的加载点上部, 并通过电机调速器实现对电机开关和速度的控制。当离心振子电机旋转时, 由于离心振子的作用, 会对梁产生与电机转动速度相等频率的周期性动态载荷。动态载荷的大小由离心振子电机决定, 频率由控制器控制决定, 并且在施加动态载荷时, 还可配合静态加载砝码实现不同形式的载荷。

3 大应变测试精度试验验证模块

基于传感器粘贴对测试精度影响的试验验证模块, 主要验证粘贴及敷设工艺对光纤光栅传感器测试精度的影响。

模块的设计难点主要是如何对大应变进行有效验证。常用的航空承载关键材料如 30CrMnSiNi2A

高强度合金钢、7050 高强度铝合金、TA-15 钛合金等, 在 $5000 \mu \varepsilon$ 的载荷下早已进入屈服状态, 结构已破坏。前述试验加载平台悬臂梁采用的 45 号钢也无法产生如此大的应变值, 所以设计思路是在载荷不变, 悬臂梁应力、应变不变的情况下, 将加载平台产生的应变有效放大。

根据式(1)可知, 当外载荷产生的 M 不变化、悬臂梁不改变, 即 I_z 不改变的前提下, 只能提高 d 。对于悬臂梁来讲, d 的最大值为 $d_{\max}$, $d_{\max}=h/2$, 这里将 d' 取大于 $d_{\max}$ 的值, 即在悬臂梁上通过焊接等工艺增加一部分结构(如图 5a, 5b 所示), 从而加大 d 的值, 使每个砝码 $\varepsilon'=1000 \mu \varepsilon$, 5个砝码共计 $5000 \mu \varepsilon$ 。

$$\begin{aligned} \varepsilon' &= \frac{\sigma'}{E} = \frac{12L}{Eh^3B} Fd' \\ \Rightarrow d' &= \frac{Eh^3B}{12LF} \varepsilon' = \frac{2.001 \times 10^9 \times 0.006^3 \times 0.14}{12 \times 0.8 \times 1.0 \times 9.8} \times 1000 \times 10^{-6} = 0.064 \text{ m} \\ d_2' &= d' - d_{\max} = 0.064 - 0.003 = 0.061 \text{ m} \end{aligned}$$

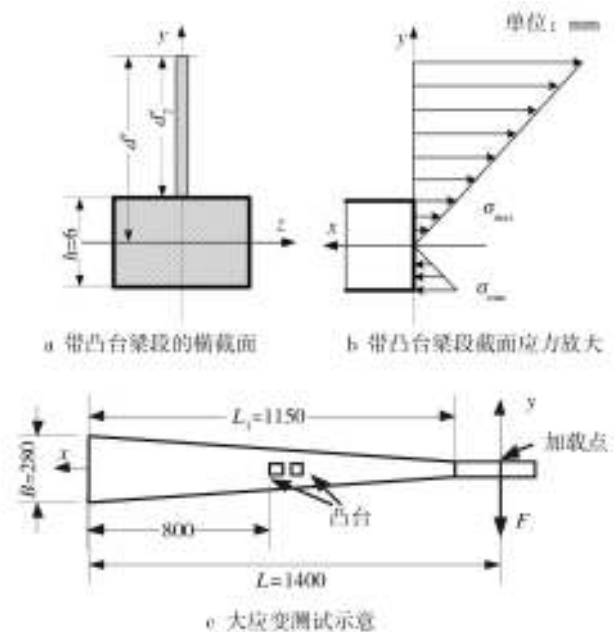


图5 应变放大及模块设计原理

Fig. 5 Principle of strain enlargement and module design

由计算结果得出, 在悬臂梁上沿轴向焊接两个高度为 0.061 m 的凸台, 两凸台间距为 5 mm, 如图 5c 所示。后续对大应变光纤传感器测试、验证时, 可通过粘接、锡焊、螺栓压片式固定或其它方式将光纤传

(下转第 139 页)

参考文献:

- [1] 胡志强. 随机振动试验应用技术[M]. 北京:中国计量出版社, 1996:195—200.
- [2] 李蓓蓓. 振动分析的有效工具——功率谱密度[J]. 包装工程, 2004, 25(3):46—47.
- [3] 于君, 王洋, 焦新泉, 等. 基于冲击振动信号的响应谱分析研究[J]. 包装工程, 2008, 29(9):1—3.
- [4] 戴诗亮. 随机振动实验技术[M]. 北京:清华大学出版社, 1984:51—64.
- [5] 张阿舟. 振动环境工程[M]. 北京:航空工业出版社, 1986:86—102.

(上接第 130 页)

感器两端固定。当加载 1 个砝码时, 两凸台之间产生应力 $1000 \mu \varepsilon$, 依次叠加砝码可达到 $5000 \mu \varepsilon$ 。

4 关键部位模拟试验模块

关键部位模拟试验模块在设计时, 主要考虑便于更换模拟材料和模拟常见航空材料的应力状态, 这包括两个因素。

1) 根据材料不同、监测点位置不同, 更换模拟材料, 研究光纤监测的相容性、适应性。

在飞机结构的健康监测过程中, 根据被监测的机种不同、部位不同, 被监测点的材料也不同。因此建立的模拟试验模块需要根据实际情况, 便于更换材料, 以研究关键点各种常见航空材料模拟粘贴及传感器的相容性等问题。

2) 便于模拟关键部位的应力、应变状态。

一般情况下, 在结构健康监测中各材料、各部位的最大应变不超过 $2000 \mu \varepsilon$, 由于载荷的形式不同、约束不同, 导致被监测点的应力状态不同。然而, 需要贴片监测的位置总是在结构的表面, 因此其应力-应变状态只会有两种: 单向应力-应变状态、平面应力-应变状态。所以建立的关键部位模拟试验模块需要能够产生 $2000 \mu \varepsilon$ 以下的单向应力-应变状态和平面应力-应变状态。

鉴于以上两个需求, 设计的模拟模块采用模块化的思想, 在前述试验加载平台的基础上, 通过放大应力得到最大 $2000 \mu \varepsilon$ 的应力-应变模块。在此基础上采用可更换的结构, 并变换粘贴固定方向得到两种不同的应力-应变状态, 最终得到关键部位模拟试验模块, 其结构如图 6 所示。

根据应力放大原理, 5 个砝码共同加载时应变需要达到 $2000 \mu \varepsilon$, 因此单个砝码需要达到 $400 \mu \varepsilon$ 。

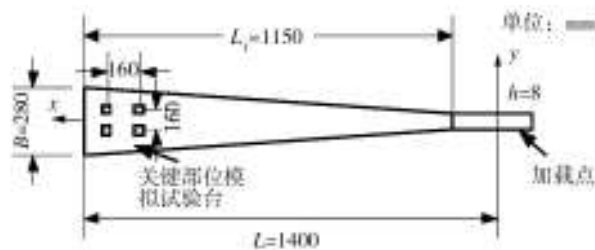


图6 关键部位模拟试验模块

Fig. 6 The simulated test module of key part

$$d'' = \frac{Eh^3B}{12LF}\varepsilon' = \frac{2.001 \times 10^9 \times 0.006^3 \times 0.14}{12 \times 0.8 \times 1.0 \times 9.8} \times 400 \times 10^{-6} = 0.026 \text{ m}$$

$$d_2'' = d_2' - d_{\max} = 0.026 - 0.003 = 0.023 \text{ m}$$

在悬臂梁上靠近根部处, 沿轴向焊接两对高度为 0.023 m 的 4 个凸台, 凸台的位置如图 6 所示, 在凸台的中心预置安装螺孔。在需要对某种材料模拟测试时, 将材料通过螺栓、垫片即可固定在凸台上。考虑到被测材料本身的厚度, d_2'' 可取 0.023 m 。

在使用中, 如果需要进行单向应力-应变测试, 只需沿着悬臂梁的轴线方向敷设光纤传感器。如果光纤传感器的敷设方向不是沿平行梁的轴线方向, 通过变换夹角可以得到不同的应力-应变状态。这样可以根据被模拟的关键点的应力-应变状态, 分析计算得到合适的模拟夹角, 从而得到与被模拟状态一致的应力-应变状态。

5 结论

经过相关试验验证, 该试验系统可以产生 $5000 \mu \varepsilon$ 应变, 测试系统能够测得相应的大应变, 且传感器不失效; 应变与载荷线性度好, 加载系统具有可重复性, 达到预期效果, 能够为光纤传感技术研究提供良好的试验平台。