

文章编号: 1000-8055(2005)06-0920-05

燕尾榫联接结构微动疲劳裂纹的检测技术

夏青元, 崔海涛, 温卫东

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 自行研制了燕尾榫联接结构微动疲劳裂纹检测系统, 利用应变片感知将要产生疲劳裂纹处周围的应变变化, 把该应变信号经过A/D转换后送到PC机进行实时分析。该系统能比较准确捕获到疲劳裂纹出现的时间, 有效地观测到疲劳裂纹的萌生和扩展过程。微动疲劳试验结果表明该方法简单实用、检测准确、效果明显, 解决了疲劳裂纹观测难、捕获裂纹时刻延迟、工作强度大等问题。

关键词: 航空、航天推进系统; 裂纹检测; 微动疲劳; 燕尾榫

中图分类号: V 231.9

文献标识码: A

Fretting Fatigue Crack Detection Technique for Dovetail Attachment

XIA Qing-yuan, CUI Hai-tao, WEN Wei-dong

(College of Energy and Power,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The fretting fatigue crack detection system was developed. In the system, the areas where the fretting fatigue cracks would happen were predicted at first, the strain gauges were used to collect the strain signals around those areas. The signals were transmitted to the computer after A/D converters. Then the data could be analyzed to acquire the accurate time of the initiation of fretting fatigue crack, and observe the crack's expanding process. The result of fretting fatigue experiment shows that the fretting fatigue crack detection system is easy to use and accurate to find out fatigue-crack. The system solves the problems during fatigue experiment, such as hard to observe the crack, difficult to get the right time that the crack happens, etc.

Key words: aerospace propulsion system; crack detection; fatigue; dovetail attachment

疲劳裂纹检测一直是比较困难的问题,许多疲劳试验的工作者都希望寻求一种简单有效的方法检测疲劳裂纹的萌生和扩展。目前用于检测裂纹萌生及扩展的方法有柔度法^[1]、电位法^[2]、声发射技术^[3]和显微镜直接观测法等。以上几种方法都有各自的优点和局限性,它们共同的特点是操作烦琐,需要相应的精密仪器支持,有时测量精度也不是很理想,而且成本比较高。本文研制了一种

低成本并且检测疲劳裂纹准确有效的微动疲劳裂纹检测系统,该系统具有实时采集、裂纹出现告警及数据处理等功能。

由疲劳理论可知,零部件在循环载荷作用下,先在局部的最高应力处或最薄弱的晶粒上形成微观裂纹,然后发展成宏观裂纹,继续扩展并最终导致疲劳断裂。正常材料的疲劳裂纹源一般出现在

收稿日期: 2004-12-16; 修订日期: 2005-04-04

作者简介: 夏青元(1980-),男,江苏盐城人,南京航空航天大学能源与动力学院硕士生,主要从事结构强度方面的研究

高应力集中区域,在裂纹扩展过程中,裂纹附近的应变场会发生变化。基于这种思路,本文设计了一种新的疲劳裂纹检测方法:应变检测法。

1 裂纹检测原理

在裂纹形成初期,在疲劳源的四周应变会发生变化,随循环数的增加,应变逐渐增大,裂纹进一步扩展,由此构成一个变化的应变场,一旦出现宏观裂纹,裂纹周围将出现很大的应变变化。若在该裂纹产生处周围附近贴上应变片,实时采集应变信号,把应变信号调理后经过A/D转换送到PC机,通过软件分析对裂纹的形成和裂纹扩展过程进行检测。

通常情况下,裂纹萌生于结构的局部高应力区,该区域可以通过结构应力分析得到。对微动疲劳而言,裂纹萌生位置的判断通常采用综合参数F_{FD}的判断方法。文献[4]中给出了具体的计算方法和裂纹萌生位置的判别技术。综合参数为: $F_{FD} = \mu \alpha \delta \sigma_r$, 其中 μ 是摩擦系数; δ 是相对滑动距离; α 是法向应力,一般取压力的绝对值; σ_r 是切向应力。

2 检测系统的组成

2.1 硬件设计

硬件部分主要由单片机MCU、逻辑控制部分、测量电桥、电桥恒压电路、信号调理电路、

ADC 电路、存储电路、键盘和显示电路、电源监控看门狗和通信部分等组成,如图 1 所示。

硬件电路的MCU 采用ATMEL 公司的 8 位单片机AT89S52,这种单片机性价比很高,8Kb 片内EPROM 可多次擦写,使用简单稳定,是比较理想的单片机之一。通过对AT89S52 的编程主要实现两方面的功能:一方面是由于实时采集各通道的数据,保存数据,另一方面是实现数据采集系统与PC 机进行通信。MCU 的主程序包括系统初始化、系统自检、故障代码设置、键盘和指示灯驱动等程序。自检结束后保存结果、设置故障代码并打开中断即进入正常工作状态,循环驱动指示灯以显示系统状态,同时等待中断发生。数据采集与控制程序主要负责实时数据采集与触发判断。

测量电桥:由金属电阻应变片的基片以一定的方式沿某一方向粘贴在被测件表面上,被测件受力后,其纵向应变 ϵ 通过基片传递到应变片的电阻丝上,使其阻值发生变化 $\Delta R/R$,这种关系通常是呈线性的,即: $\Delta R/R = k \cdot \epsilon$ 式中: k 为应变灵敏系数, ϵ 是与被测件的受力大小、几何尺寸及材料的性质等有关的参数。通过对电阻应变片阻值变化 $\Delta R/R$ 的测量,即可得到被测处的应变值。 R_1, R_2, R_3, R_4 既可以组成测量全桥式,也可以组成半桥式。全桥时输出电压 U_{out} 与 $\Delta R/R$ [5] 的关系为:

$$U_{out} = \frac{U}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) = \frac{U}{4} (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) K_c$$

(1)

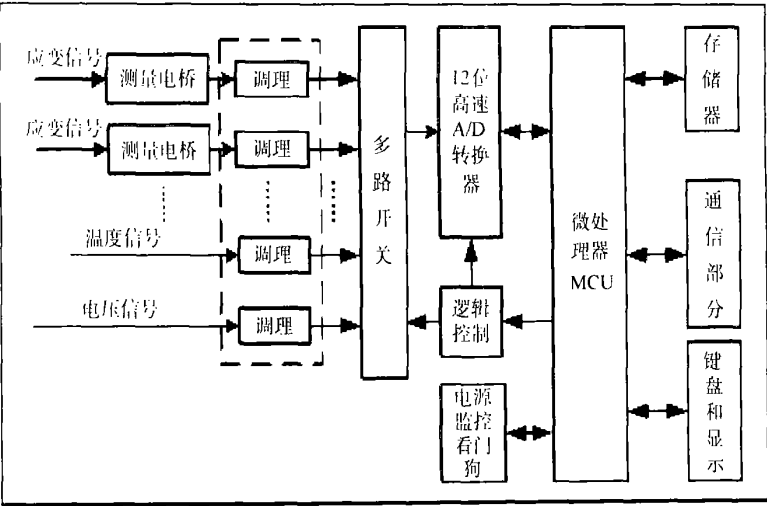


图 1 检测系统硬件部分功能图
Fig 1 Block diagram of hardware in system

其中: U 为电桥输入电压, U_{out} 为应变电压信号输出。

信号调理: 图 2 为信号调理原理图。图中, 左端为测量电桥电路, 输出信号为被测处的应变信号, 信号调理电路采用具有低功耗、低漂移、高精度的放大器。第一级为仪表差分放大器 AD620, 第二级为运算放大器 OP07, 两级放大器具有端到端的输出能力。通过对应变信号的偏置和放大后输出的信号的动态范围可放大 50~3 000 倍, 可实现很宽的应变测量范围。

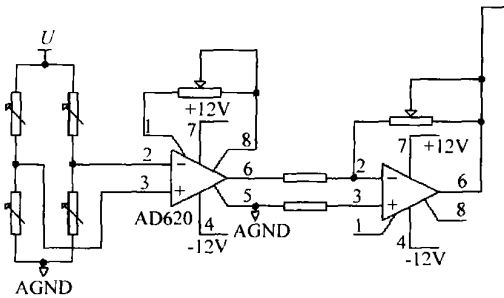


图 2 信号调理电路

Fig 2 Signal regulating circuit

AD 转换电路: 图 3 为 A/D 转换电路。A/D 转换器的数据采集的核心, 此板设计中选择了 MAXM 公司的 12 位高速 A/D 转换芯片 MAX120, 它具有双极性 $\pm 5\text{ V}$ 的电压输入范围, 完成一次转换的时间为 1.6 s, 采样率是 500

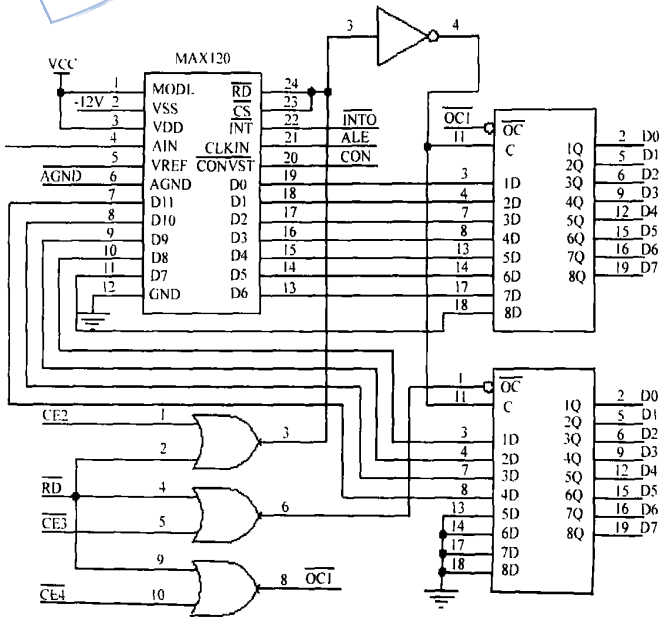


图 3 MAX120 的 AD 转换原理图

Fig 3 Principle diagram of MAX120 A/D conversion

Ksp s, 内外采样模式可选, 连续转换模式可选, 全温度下无丢失码, 内部具有采样保持电路和低漂移的电压基准, 具有标准微处理器接口, 满足高速、高精度数据处理的要求。为了实现多路应变信号实时采集, 在 A/D 输入前选用 MAXM 公司的多路开关 MAX308, 它具有低导通电阻 (小于 100 Ω)、低泄漏电路特点, 典型开关切换速度 85 ns。

通信部分: 为了能把采集到的数据能够准确传输到上位机 PC 机, 必须要有良好的通信电路。本系统设计了两种通信模式可供选择。如果是近距离通信采用串口 RS232 标准通信模式; 如果传输距离比较远, 而且传输数量也比较大, 采用 TCP/IP 网络传输。选用 MOXA 公司的 NE-4000T 嵌入式模块把单片机的 TTL 电平串口信号转换到以太网传输网络中, 可实现远程多服务功能。

2 2 检测系统软件设计

燕尾榫联接结构微动疲劳裂纹检测系统 FFS-W (V1.0), 采用面向对象的可视化编程软件 VC++ 开发, 主要实现 3 大功能: (1) 实时与采集板通信, 完成 PC 机命令的下达和采集板数据的接收与保存; (2) 数据的处理和显示, 将接收到的数据进行实时分析, 得到试验的加载曲线和频率等。显示信息包括: 各通道的图形显示、试验循环数, 加载频率、试验件的温度测量显示、裂纹产生提醒、裂纹扩展情况显示、出现宏观裂纹报警等;

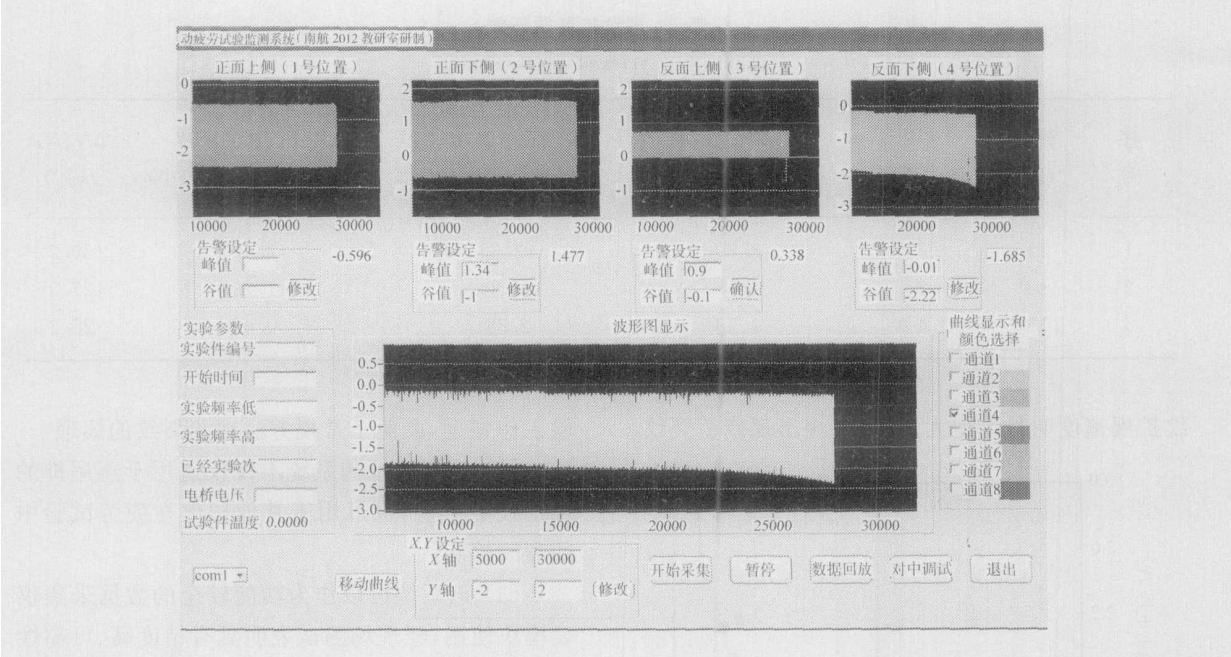


图 4 裂纹检测系统软件界面

Fig 4 Interface of crack-detection Software

(3)实现对历史记试验录数据进行调用,自动生成相应图形和数据文档,供查阅和打印用。图 4 为裂纹检测系统软件界面。

3 裂纹检测系统在燕尾榫联接结构微动疲劳试验中的应用

3.1 燕尾榫单向低周微动疲劳试验

燕尾榫头和榫槽试验件材料均为钛合金 TC11; $\sigma_{0.2} = 941 \text{ MPa}$; $\sigma_b = 1\,046 \text{ MPa}$; $E = 120 \text{ GPa}$, 载荷施加方式为最大载荷幅值不变的拉-拉加载,最大载荷分别取 15 kN, 13 kN 和 11 kN, $R = 0.1$, 加载频率为 3.4 Hz, 加载设备为南京航空航天大学研制的微动疲劳实验器 FFS- 1.0, 试验件为图 5 所示的燕尾榫联接结构。因燕尾榫模型件的结构对称性,利用综合参数 FFD 法预测疲劳裂纹可能出现的位置共有 4 个,如图 5 所示,编号分别为 1~ 4。将这 4 个应变片用半桥方式连接,直接与微动疲劳裂纹检测系统的其中 4 个通道相连接。

3.2 检测结果

分别取 3 个不同的载荷: 11 kN, 13 kN 和 15 kN 加载,通过裂纹检测系统得到各载荷下的应变变化,经过对试验数据的处理,得到输出电压的峰值变化曲线,如图 6~ 图 8 所示。从图中可以看出,A 处应变峰值开始增大,可以认为是裂纹萌生

时刻,B 处是肉眼观测到宏观裂纹时所对应的循环数。

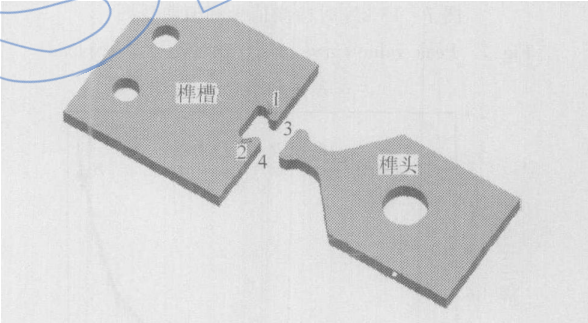


图 5 燕尾榫模型图

Fig 5 Model draft of dovetail join

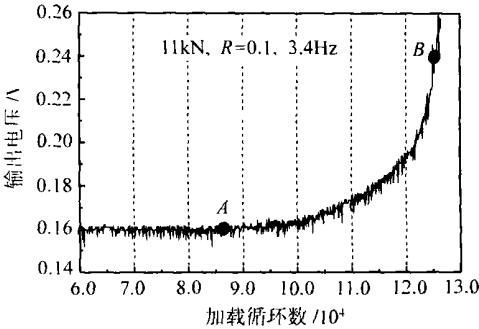


图 6 11 kN 时检测信号峰值曲线图

Fig 6 Peak value curve of signal under 11 kN load

由上 3 个峰值曲线图可以观察到疲劳裂纹开始萌生时扩展比较慢,但接近出现宏观裂纹时,裂

表 1 裂纹扩展循环数
Table 1 Cycles of crack-expand

序号	载荷 /kN	出现裂纹的位置号	裂纹萌生时的循环数 $N_A (\times 10^4)$	出现宏观裂纹时循环数 $N_B (\times 10^4)$	裂纹扩展循环数 $\Delta N = N_B - N_A (\times 10^4)$	$\Delta N / N_B$ / (%)
1	11	3	8.80	12.60	3.80	30.2
2	13	2	4.58	6.30	1.72	27.3
3	15	4	1.78	2.38	0.60	25.2

纹扩展速度明显的变大, 然后很快出现疲劳裂纹。

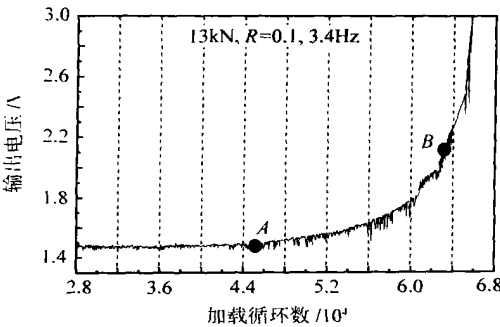


图 7 13 kN 时检测信号峰值曲线图

Fig 7 Peak value curve of signal under 13 kN load

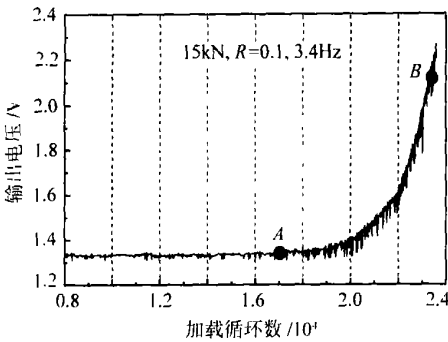


图 8 15 kN 时检测信号峰值曲线图

Fig 8 Peak value curve of signal under 15 kN load

表 1 给出了 3 种不同载荷时裂纹扩展循环数, 从表中可以看出载荷越大, 疲劳裂纹扩展所用的时间越短, 即裂纹扩展速率越高。

4 结 论

(1) 所开发的裂纹监控系统, 能比较准确地判断裂纹的萌生时刻和裂纹扩展趋势。该裂纹监控系统价格低廉、准确有效、操作简单, 具有很高的实用价值。利用该系统检测裂纹大大降低了试

验工作强度, 避免了常规方法观测裂纹的烦琐。

(2) 该裂纹检测系统不仅仅适用于燕尾棒的微动疲劳试验, 也可用于其他构件在疲劳试验中的裂纹检测。

(3) 该系统可以作为功能较全的数据采集仪表模块使用, 经现场测试表明具有精度高、可靠性强、速度高, 完全适合于工业现场及实验室老式应变仪的更新换代。

参考文献

[1] 方钦志, 张石山, 赵明晖, 等. 疲劳裂纹扩展柔度法测量系统研究[J]. 实验力学, 2000, 15(1): 110~114
FANG Q in-zhi, ZHANG Shi-shan, ZHAO Ming-hao, et al. Research on the Measuring System for Fatigue Crack Growth Investigation by Compliance Method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2000, 15(1): 110~114

[2] 王宇林, 杨文彬. 用电位法测量表面裂纹理论与实验研究[J]. 金陵石油化工, 1990, 1: 10~13
Wang Yu-L in, Yang Wen-B in. Theoretical and experimental Research on the Measurement for the crack with Electrical Potential Technology[J]. Jinling Petroleum Chemistry Industry, 1990, 1: 10~13

[3] Gong Z, Duquesnay D L, McBride S L. Measurement and Interpretation of Fatigue Crack Growth in 7 075 Aluminum Alloy by Using Acoustic Emission Monitoring[J]. Journal of Testing and Evaluation, 1988, 26(6): 567~574

[4] 何明鉴. 微动磨损疲劳- 燕尾联结应力分布及裂纹位置预测[J]. 航空动力学报, 1989, 4(3): 205~208
He Ming-Jian. Fretting Wear Fatigue-Coupling stress distribution and the Location Prediction of the crack for Dovetail Joint[J]. Journal of Aerospace Power, 1989, 4(3): 205~208

[5] 陈颖. 数字化多功能电阻应变仪[J]. 自动化与仪表, 2002(2): 9~12
Chen Ying. Digital Multifunctional Resistance Strain Gauge [J]. Automation & Instrumentation, 2002(2): 9~12