

doi: 10.7527/S1000-6893.2014.0106

基于 PVDF 的无线智能疲劳监测系统

白石¹, 周智², 申宇², 欧进萍^{1,*}

1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090

2. 大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024

摘要: 疲劳问题由于影响因素多、理论分析误差大、长期实时捕获疲劳信息困难等特点, 使得工程中难于对疲劳破坏实现及时的、可靠的预警, 这是一直以来困扰机械、土木、航空航天、能源装备等领域研究者们的一个重要课题。针对传统基于应变时程分析疲劳累积损伤的诸多问题, 提出了一种以PVDF (Polyvinylidene Fluoride) 为感知元件、方便用于结构疲劳监测的无线传感器系统。首先, 根据PVDF的感知特性, 对其灵敏度系数进行了标定; 然后, 通过对建筑结构领域中典型的6061-T6铝合金材料的疲劳性能试验研究, 验证了该系统的各方面工作性能; 最后, 通过将试验测点与该铝合金材料的S-N曲线进行对比, 验证了该测试方法在研究材料疲劳性能时的可行性。试验结果表明, 所开发的疲劳监测系统工作稳定性好、准确性高、实时性强, 具有良好的工程应用前景。

关键词: PVDF; 疲劳; 无线传感器; 铝合金; 疲劳试验

中图分类号: O346.2; TP212.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-6893 (2014) XX-XXXX-XX

材料在某点或某些点承受扰动应力, 且在足够的循环扰动作用后形成裂纹或完全断裂的局部、永久变化过程, 称为疲劳。疲劳破坏, 由于其普遍性和突发性, 往往造成灾难性的事故, 从而给人民带来严重的生命和财产损失。据统计, 工程实际中发生的疲劳断裂破坏, 占全部力学破坏的50%~90%, 是机械、结构失效的最常见形式^[1]。疲劳问题一直是困扰航空航天装备、机械工程 (如装备、吊车等)、土木工程结构 (桥梁、

高层建筑、大跨结构、路面结构等)、交通运输器械、能源装备 (海洋平台、风机叶片、发动机组、油气管道、钻井钻柱等) 等领域的关键科学与技术问题。

经过一百多年的研究历程与发展, 疲劳问题取得了十分丰硕的理论研究成果, 主要体现于疲劳设计方法、疲劳寿命预测方法、疲劳累积损伤理论等方面。但是由于疲劳问题具有影响因素较多、离散性大、单一参量无法准确表征等特点,

收稿日期: 2013-12-24; 退修日期: 2014-04-16; 录用日期: 2014-05-21; 网络出版时间: 2014-05-26 12:59

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.7527/S1000-6893.2014.0106.html>

基金项目: 973 计划 (基金号 2011CB013705); 国家科技支撑项目 (基金号 2011BAK02B01); 教育部新世纪优秀人才支持计划 (基金号 NCET-10-0290)

*通讯作者. Tel.: 0451-86282209 E-mail: oujinp@hit.edu.cn

引用格式: Bai S, Zhou Z, Shen Y, et al. A wireless intelligent fatigue monitoring system based on PVDF[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(x): xxx-xxx. 白石, 周智, 申宇, 等. 基于 PVDF 的无线智能疲劳监测系统[J]. 航空学报, 2014, 35(x): xxx-xxx.

使得绝大多数研究方法仅仅停留在设计阶段,或者基于阶段监测数据的统计分析,尚没有形成长期实时捕获疲劳信息、快速预警与可靠的基于荷载历程的寿命评估技术^[2]。因此,工程中对于结构和构件的疲劳寿命评估一直是一项充满了挑战的研究课题。随着结构健康监测的快速发展,实现了疲劳问题的在线监测,并且针对疲劳破坏的随机性,提供了可靠的解决办法。为此,学者们提出了多种疲劳监测与检测技术手段。其中,基于电阻变化机理的疲劳寿命计^[3]具有很高的疲劳响应及很好的重复性和稳定性,在工程中得到了一定的应用,但对于低应变周期较为乏力、耐久性不高、非线性效应较大、监测疲劳参数较少(仅为应力幅和循环次数);基于应变时程的分析方法^[4]需要长期的监测数据,实时滞后。在无损伤检测领域中,声发射技术^[5,6]具有灵敏度高、捕捉裂纹信息快等特点,但无法监测静态损伤和不能定量描述损伤信息,且易受环境噪声影响;超声检测技术^[7,8]虽精度高、抗干扰能力强,但存在表面“盲区”,且检测效率较低;基于电磁感应理论的电涡流检测技术^[9,10],能够灵敏地检测到由疲劳导致的材料的微小裂纹,但检测对象仅限于导体材料,并且仅能检测表面裂纹。综上所述,工程实践中迫切需要一种可靠性高、可行性好、实时性强的疲劳监测技术。

智能监测材料中,压电材料一直是结构健康监测的一个重要分支。PVDF(Polyvinylidene Fluoride, 聚偏二氟乙烯)作为一种高分子聚合材料,具有压电常数高、质量轻、化学性质稳定、动态灵敏度高、频响宽、声阻抗低、易加工安装、与机体兼容性良好、可制成大面积薄膜等特点。PVDF压电薄膜的电容比较小,在外力作用下所产生的电荷很快便会消失,在零频率时要求长时间保持微弱的静电荷比较困难,感知低频响应的性能比较差,常用于动态响应测量。而一般情况下,疲劳响应为动态响应,因此, PVDF可以满足疲劳监测的需要^[11]。同时,对比其他类型常用感知元件(如电阻应变片,光纤类传感器等), PVDF的解调电路设计也更加方便及容易实现。

本文设计并开发一种疲劳损伤与疲劳寿命预测的智能监测系统。该系统不仅能够表征疲劳荷

载历程的特征参数(应变幅值、循环次数和应力状态),同时能够准确的、实时的记录各应力水平下的循环次数。初步的实验表明,系统具有采样数据量大、循环计数准确、结果无线传输可靠等优点。为了验证所开发的无线智能疲劳监测系统工作的稳定性、耐久性、准确性及在工程中推广的可行性,并且考虑一般情况下的疲劳试验存在成本高、周期长等问题,本文对6061-T6铝合金构件进行了疲劳试验。试验结果不仅进一步验证和揭示了该系统的工作性能,并且为研究该铝合金材料的疲劳性能提供了借鉴和参考。

1 PVDF动态感知特性与灵敏度标定

1.1 PVDF动态感知特性机理

PVDF的力学行为和电学行为是相互耦合的,常采用压电方程对其电学参量和力学参量响应之间关系进行量化描述,且其输出结果为所有极化方向输出的总和。因此,其电信号与所监测结构形变之间的关系,常采用式(1)计算:

$$V_0 = \sum g_{3j} E_0 \varepsilon_j t \quad (1)$$

式中: V_0 为PVDF输出电压; g_{3j} 为PVDF压电电压常数; ε_j 为PVDF所受应变; t 为PVDF厚度; E_0 为PVDF弹性模量; $j=1 \sim 3$ 。

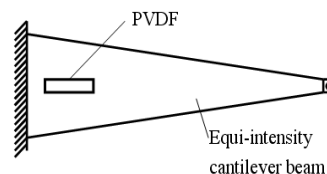


图1 PVDF工作模式

Fig. 1 Working mode of PVDF

一般情况下, PVDF的工作模式可分为拉伸模式和厚度模式两种。对于如图1所示的等强度梁,为柔性结构,此时认为PVDF仅在拉伸方向发生变形,其工作模式为拉伸模式。此时, PVDF的输出可按式(2)计算:

$$V_0 = (g_{31}\varepsilon_1 + g_{32}\varepsilon_2) E_0 t \quad (2)$$

1.2 PVDF灵敏度标定试验

图2为PVDF灵敏度标定试验示意图。通过在等强度梁上施加正弦激励,使梁发生受迫振动。再通过电荷放大器和动态应变放大器分别对

PVDF和电阻应变片的输出信号进行采集。采用A/D转换采集仪对两种传感器的信号进行A/D转换和存储，并通过式(3)计算得到PVDF灵敏度系数 K ：

$$K = \Delta V / \Delta \varepsilon \quad (3)$$

式中： ΔV 为PVDF输出电压变化量； $\Delta \varepsilon$ 为应变变化量。

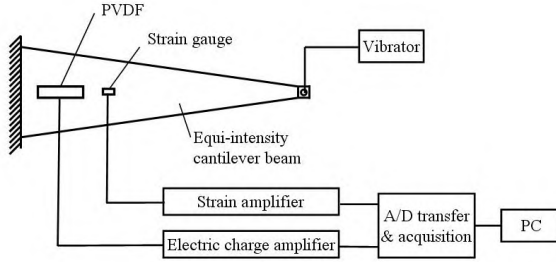


图 2 PVDF灵敏度标定试验示意图

Fig. 2 Scheme of sensitivity calibration test of PVDF

以5Hz激振频率为例，在不同的振幅下，分别记录PVDF的输出电压 ΔV 及电阻应变片的输出应变 $\Delta \varepsilon$ ，再按照式(3)计算得到 K ，结果如表1所示。将 K 值取平均值，可以得到PVDF在5Hz激振频率下的灵敏度系数。

表 1 PVDF与电阻应变片输出(5Hz)

Table 1 The output of PVDF and strain gauge (5Hz)

$\Delta V_{PVDF} / mv$	$\Delta \varepsilon_{strain} / \mu \varepsilon$	$K (\Delta V / \Delta \varepsilon)$
1510	226	6.68
1970	301	6.54
2570	399	6.44
2880	448	6.43
3160	501	6.31
3550	555	6.40

表 2 各激振频率下PVDF灵敏度系数(0.5~20Hz)

Table 2 K under different loading frequencies (0.5~20Hz)

Loading frequencies (Hz)	$K (\Delta V / \Delta \varepsilon)$
0.5	5.97
1	6.41
2	6.34
5	6.47
10	6.68
15	7.22
20	7.56

同理，可以得到各激振频率(0.5~20Hz)下的 K 值，结果如表2所示。图3为PVDF的幅频特性曲线。可以看出，不同激振频率下，PVDF的灵敏度系数相差不大，稳定性较高。

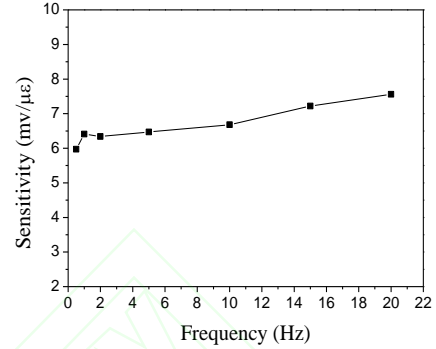


图 3 PVDF幅频特性曲线

Fig. 3 The amplitude-versus-frequency curve of PVDF

2 系统原理与构建

2.1 PVDF灵敏度标定试验

应变幅值、循环次数和应力状态是表征疲劳荷载历程的特征参数，应用适当的循环数统计方法对于这些参数进行统计是研究疲劳荷载效应的重要基础。目前，国内外已经发展了多种循环计数法，如峰值法、四峰值法、跨均峰法、幅值计数法、雨流法、穿级计数法等。其中，雨流计数法是国内外应用最为广泛的一种循环统计计数方法^[12]。该方法认为塑性的存在是疲劳损伤的必要条件，并且其塑性性质表现为应力—应变的迟滞回线。一般情况下，虽然名义应力处于弹性范围，但从局部的、微观的角度来看，塑性变形仍然存在。从疲劳观点上看它比较能够反映随机载荷的全过程，其计数结果与材料的“记忆”相一致。

本文系统采用雨流计数法将海量的监测应变时程数据处理为疲劳响应的特征参数，并采用疲劳累积损伤理论对结构或构件的疲劳损伤情况进行计算，结合电子与微处理器技术实现系统的硬件集成，并采用无线发射与接收技术实现结果的发送。

2.2 监测系统硬件集成

如图4所示, 本文系统采用模块化设计^[13], 包括: PVDF前端处理模块、DSP模块、无线采集与传输模块及电源模块等4个部分。

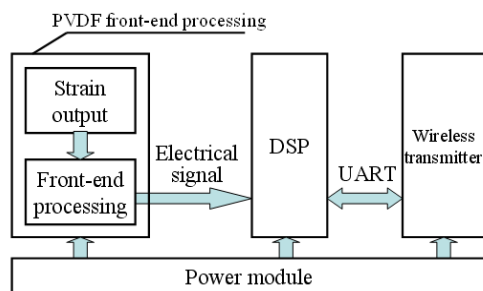


图 4 系统硬件组成

Fig. 4 Hardware integration of the system

PVDF输出信号较小, 经过实际测量一般在 $\pm 10 \sim 20 \text{ mV}$, 输出阻抗高、噪声大, 难以适应高精度数字采样。因此, 为了获得完整的监测信号, 必须对PVDF输出信号进行预处理。图5为预处理电路, 主要包括五个部分: 1) RC积分电路; 2)电压跟随器; 3)幅值增益电路; 4)均值增益电路; 5)加法器。其中, RC积分电路将PVDF输出的电荷信号转化为电压信号; 电压跟随器确保PVDF输出电压不受后续电路影响, 并提高后续增益电路带负载能力; 幅值增益电路提供1~100倍可调增益放大; 均值增益电路可满足本系统采样电路0~3V的范围要求。图6为PVDF解调电路模块实物图。实际操作时, 可通过滑动变阻器 R_8 调节幅值增益, 通过滑动变阻器 R_7 调节均值增益。PVDF的输入 V_{PVDF+} 与输出 V_0 之间关系可按式(4)计算:

$$V_0 = -\frac{R_8}{R_1} V_{PVDF+} + \frac{R_6}{R_6 + R_7} V_{+5V} \quad (4)$$

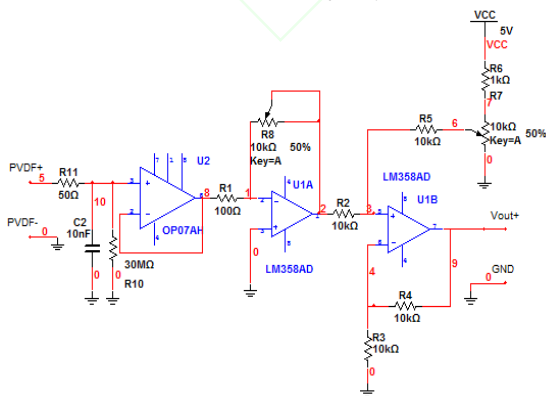


图 5 PVDF预处理电路

Fig. 5 Pre-processing unit of PVDF

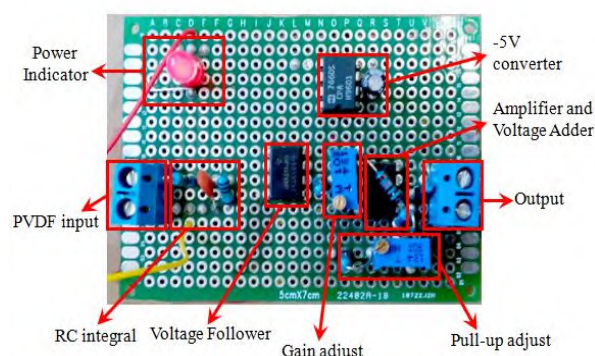


图 6 PVDF预处理模块实物图

Fig. 6 Physical product of the interface circuit

DSP处理模块选用TMS320F28335芯片, 它具有32位运算精度和150MHz的CPU频率, 内存储容量大, 片内外设模块功能扩展能力强, 并具备浮点运算功能^[14]。该芯片能够快速的执行雨流计数法, 而且还为此疲劳监测系统的进一步扩展提供研究基础。无线发送模块选用STR30型微功率无线数传模块, 其优点是发射功率极小、传输距离远(在视距情况下, 天线高度 $>1.5 \text{ m}$, 可靠传输距离 $>800 \text{ m}$)、误码率低, 体积小、重量轻。电源管理模块采用YSD-12-5锂电池提供稳定的5V电压输出, 并可充电实现循环使用。图7为系统实际模块图。

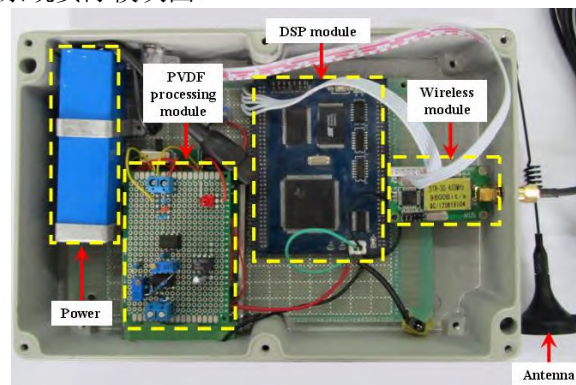


图 7 系统实物照片

Fig. 7 Photograph of the system

3 疲劳监测试验

3.1 材料选择及试验装备

铝合金材料由于强度高、密度小、耐腐蚀性好、低温韧性好、外形美观, 在航空航天、机械、土木、汽车制造、船舶、能源装备等领域得

到了广泛的应用。例如,在建筑幕墙材料中,幕墙金属杆件95%以上采用铝合金型材,如铝合金门窗外框、玻璃幕墙支撑体系、建筑物的铝合金外包层等^[15]。由于铝合金材料本身的特点,使其对应力集中、局部损伤、裂纹比较敏感,抗疲劳性能差,因此,研究铝合金材料的疲劳性能具有重要的意义。本试验所采用的材料为6061-T6铝合金,厚度为3mm,试件实测弹性模量为44.5GPa。图8为该材料的疲劳特征曲线(S-N曲线)。

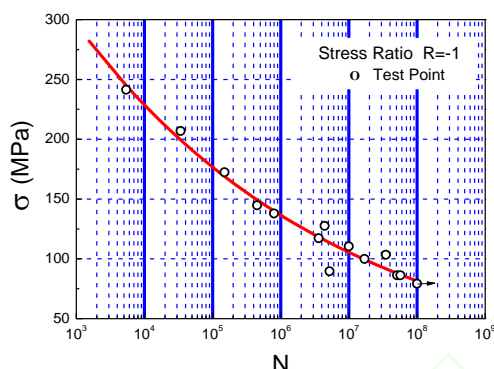


图 8 6061-T6铝合金材料S-N曲线

Fig. 8 S-N curve of 6061-T6 aluminum alloy

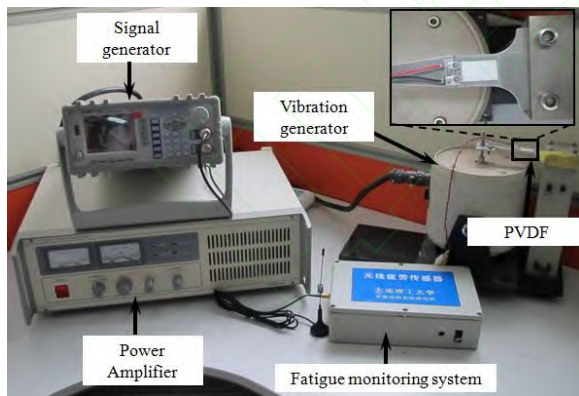


图 9 疲劳试验系统

Fig. 9 Experimental setups of fatigue test

本试验的加载系统如图9所示。在试验过程中，首先，在ATF20B信号发生器上设定加载波形及相应频率，并将加载信号传输给YE5872A功率放大器；其次，功率放大器将获得的加载信号放大，并将放大的信号输出给JZK-10型激振器，同时，可以通过调节功率放大器的输出增益

旋钮调节激振器的振幅；最后，由激振器实现对所设计构件的加载。

3.2 试件设计

考虑试验装备对疲劳试件的加载方式为悬臂梁式弯曲加载, 结合材料力学中悬臂梁计算方法, 可由式(5)得到试件最大应力值:

$$\sigma_{\max} = \frac{3E \cdot h \cdot \omega_{\max}}{2l^2} \quad (5)$$

式中: E 为材料的弹性模量; h 为截面高度; l 为加载点到梁端的距离; ω_{\max} 为加载最大位移。

当 ω_{\max} 按激振器输出位移 8mm 计算, 并且 σ_{\max} 按图 8 中应力范围 (75MPa ~ 250MPa) 计算, 假定当 $h=1\text{mm}$ 时, $l=46.2\text{mm} \sim 86.4\text{mm}$ 。因此, 本文设计的铝合金构件尺寸参数如图 10 所示。此方案可尽量减少应力集中的影响, 并保证了激振器端部位移加载能够稳定地传递到构件薄弱位置。在对构件进行加工时, 参考 GB/T 4337-2008 《金属材料疲劳试验旋转弯曲方法》^[16], 为了减小机械加工对试件产生的残余应力和加工硬化的影响, 在制作过程中尽量使试件表面质量尽可能均匀一致, 并采用磨削对试件进行精加工。

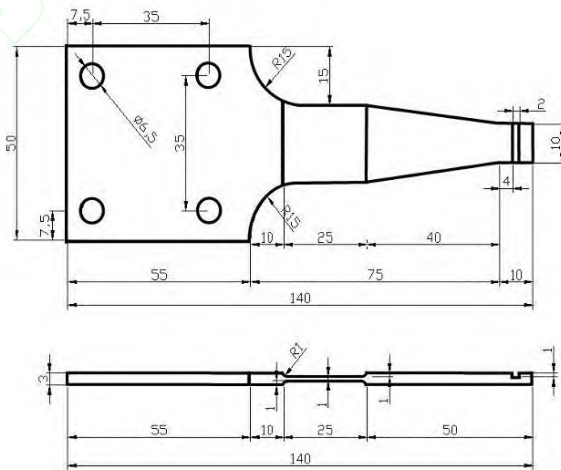


图 10 试件设计

Fig. 10 Design of the specimen

为考察本试件在位移加载情况下应变分布情况，对试件进行了ANSYS有限元分析。采用ANSYS中Solid45单元，对试件进行建模，并按位移加载方式进行分析，得到了的构件应力分布情况，如图11所示。可见，计算得到的最大正应力为222MPa，通过与图8中S-N曲线的对比，可

以看出,此构件尺寸参数设计方式能够满足疲劳试验最大应力的要求。从而,说明了这种设计方式的合理性和可行性。图12为构件的实物图。

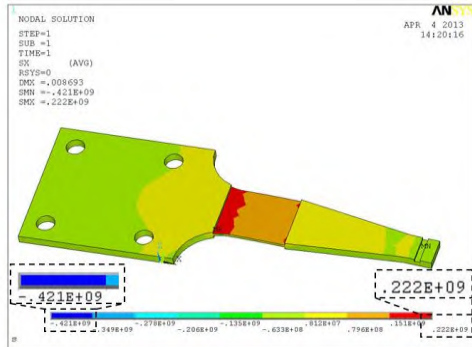


图 11 构件应力分布

Fig. 11 Stress distribution of the specimen



图 12 构件实物图

Fig. 12 Photograph of the specimen

3.3 试验结果与讨论

3.3.1 试验过程

本试验中,激振器为对称振幅加载,即应力比 $R=-1$,同时通过ATF20B信号发生器设定试验加载频率,并通过调节功率放大器来控制激振器加载的振幅。按常规疲劳试验方法进行试验,取9个试件,由最高应力水平开始,逐级降低应力水平。疲劳监测系统以PVDF为感知探头,通过内嵌的雨流计数法统计各级应力水平下试件达到破坏时的循环次数。同时,设定无线收发模块每16s发送一次循环数统计结果,并由PC端接收。

图13为试验中无线采集软件接受统计结果截图,为加载频率10Hz情况下连续两次循环数统计结果。其中,带红框标注并放大的数字分别为1742和1889,表示循环数递增了157。由于采集软件存储字长的限制,因此在本系统中设定,在循环数矩阵中某疲劳应力状态下每增加10000次

循环,附属矩阵相应位置增加1,即:图13中带绿框标注并放大的数字41,表示已累积了41万次。由此可见,该系统采集对循环数统计准确,误差小(小于5%)。由于试验中的加载幅值恒定,因此,在统计结果的矩阵中,只有一个位置的元素累计增加,其他位置均为0。

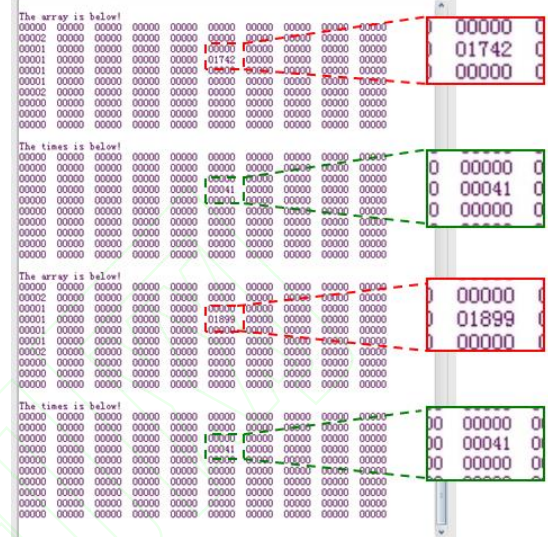


图 13 无线采集软件截图

Fig. 13 Screenshot of the wireless transceiver software

3.3.2 试验结果与讨论

根据无线传输结果中PVDF的输出电压,结合表2中PVDF在不同荷载频率下的灵敏度系数及材料的弹性模量,可以计算得出无线传输结果中循环数所对应的应力幅值及应力均值。

表 3 构件疲劳累积损伤实时监测

Table 3 Real-time monitoring of fatigue cumulative damage of the specimen

Time of loading /h	Cycles of loading	Cycles of system	Fatigue life of material	Fatigue cumulative damage	Error /%	Remark
0	0	0	432,000	0	0	Not broken
0.5	18,000	17,631	432,000	0.0408	2.05	Not broken
1	36,000	35,258	432,000	0.0816	2.06	Not broken
3	108,000	105,788	432,000	0.2449	2.05	Not broken
5	180,000	176,340	432,000	0.4082	2.03	Not broken
8	288,000	282,151	432,000	0.6531	2.03	Not broken
10	360,000	352,966	432,000	0.8164	2.03	Not broken
10.15	365,300	357,892	432,000	0.8284	2.03	Fracture

表3为应力幅值150MPa,应力均值为0情况下,在随机选取的若干个时间点上系统对试件进

行实时监测的试验结果。可以看出，系统工作的稳定性好。本试验中，结合6061-T6铝合金材料的S-N曲线，采用Miner线性累积损伤准则计算构件的疲劳累积损伤，从而实现对构件的劳损伤情况的实时监测，同时可以看出，系统工作误差小（2%左右）。

由表4中的疲劳试验结果可以看出，随着应力幅值的降低，疲劳寿命呈明显的增长趋势。图14为破坏后试件的断口照片。可以看出，断口呈不规则锯齿状，这很好的印证了金属材料在疲劳荷载作用下发生内部晶格重组的现象，也体现了该铝合金材料具有材料疲劳破坏的一般特性。图15为试件破坏后照片。

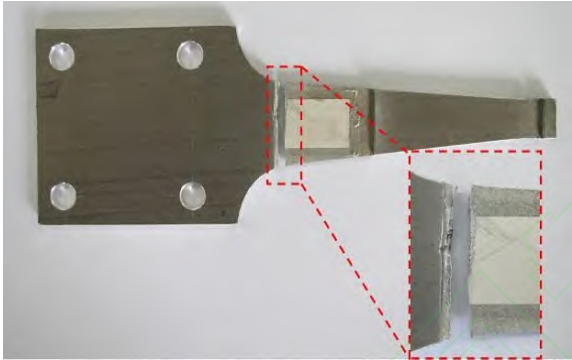


图 14 试件断口照片

Fig. 14 Photograph of fracture morphology

将本试验结果与材料的S-N曲线进行了比较，结果如图16所示。可以看出，由本试验测点所体现出的该铝合金材料的疲劳特性，同一般标准所研究的结果具有很好的一致性。表3中，在应力幅值为120MPa的级别下，构件的疲劳破坏次数超过了500万次，结合工程中在定义材料疲劳极限时的循环次数，可认为6061-T6铝合金材料的疲劳极限为120MPa。



图 15 试件破坏后照片

Fig. 15 Photograph of damaged specimen

试验结果说明了该系统在监测材料疲劳发生、发展直到破坏的整个过程中，具有很好的稳定性、准确性和实时性，同时也体现了该试验方法在研究材料疲劳特性时的可行性。将试验装备的加载循环数同该系统测得的循环数进行比较，可以发现，该系统的循环数统计误差在1~5%，这是由于系统自身在循环数统计时，出现“漏数”现象，属于系统误差，但能够满足工程要求。对于不同的加载级别，系统均可以稳定、准确、实时的监测构件的疲劳应变响应与分析构件的疲劳损伤。

表 4 铝合金构件疲劳试验结果

Table 4 Fatigue test results of aluminum alloy specimen

No.	Stress amplitude /MPa	Cycles of loading	Cycles of system	Error /%	Fatigue life	Remark
1	200	22,800	22,500	1.15	33,700	Fracture
2	185	54,300	53,236	2.00	65,700	Fracture
3	170	87,600	85,300	2.60	141,000	Fracture
4	160	258,000	245,800	4.72	243,000	Fracture
5	150	365,400	358,000	2.03	432,000	Fracture
6	140	688,200	671,700	2.40	799,000	Fracture
7	130	1,964,400	1,908,500	2.85	1,550,000	Fracture
8	120	5,485,200	5,390,300	1.73	3,100,000	Fracture
9	115	7,000,000	6,874,400	1.79	4,660,000	Not broken

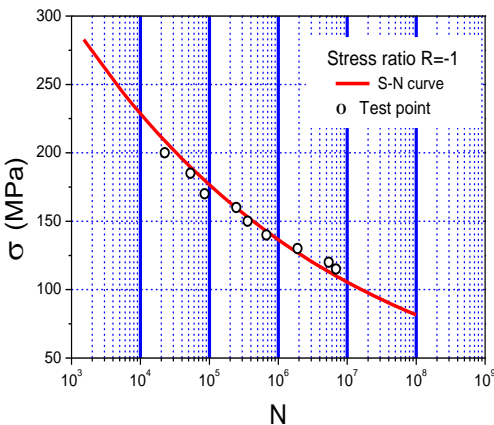


图 16 试验测点与材料S-N曲线对比结果

Fig. 16 Comparison of test results and the S-N curve

本文系统可以将海量的监测应变时程数据通过雨流计数处理为疲劳特征参数（应变幅值、应

力状态和循环次数)数据传输,大幅度地缩减了传输数据规模。表5列举了几种常用的疲劳监测与检测研究方法,并对比了它们的工作性能。可以看出,本文系统具有优良的工作性能,包括:实时性好、耐久性好、准确性高、可操作性强、成本低等,因此具有良好的工程应用前景。

表 5 几种疲劳监测与检测方法性能对比

Table 5 The comparisons of performance between fatigue monitoring methods and detection methods

Method	Real-time capability	durability	accuracy	operability	efficiency	cost
Fatigue life gauge	good	poor	normal	good	high	low
Strain history analyzing	poor	good	good	good	low	high
Acoustic emission	good	good	normal	poor	high	high
Ultrasonic detection	normal	—	normal	poor	low	high
Eddy-current detection	normal	—	normal	poor	low	high
Our system	good	good	good	good	high	low

4 结论

本文设计并开发了一种用于疲劳损伤与疲劳寿命预测的智能监测系统,为验证其工作性能,本文针对铝合金构件进行了疲劳试验研究,其主要结论如下:

(1) 在不同的应力幅值情况下,系统均能够实时地、稳定地监测构件的疲劳应变并分析构件的疲劳损伤,无线传输结果简单,系统工作误差小于5%;

(2) 所得的构件疲劳寿命与材料的S-N曲线吻合较好,说明了本文试验方法在研究材料疲劳性能时的可行性,并为6061-T6铝合金材料的疲劳性能研究提供了借鉴;

(3) 从以上试验及分析结果可以看出,系统可以将海量的监测应变时程数据通过雨流计数处理为疲劳特征参数(应变幅值、应力状态和循环次数)数据传输,大幅度地缩减了传输数据规模,同时系统运算精度高(32位)、工作误差小、传输速度快、体积小、造价低、操作简单,具有良好的工程应用前景。

参 考 文 献

- [1] Chen C X. Fatigue and fracture[M]. 1st ed. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2002: 1-5. (in Chinese)
陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 1-5.
- [2] Zhou Z, Duan Z D, Jia Z H, et al. New kind of structural fatigue life prediction smart sensor[C]// Proc. of SPIE, 2004, 5384: 324-331.
- [3] Hu M M, Chen J, Tao B Q. The performance test research of the fatigue life gauge[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1994, 15(3): 336-339. (in Chinese)
胡明敏, 陈杰, 陶宝祺. 疲劳寿命计性能研究[J]. 航空学报, 1994, 15(3): 336-339.
- [4] Guo T, Li A Q. Fatigue life assessment of welds in bridge decks using long term monitored data[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(6): 66-72. (in Chinese)
郭彤, 李爱群. 基于长期监测数据的桥面板焊接细节疲劳寿命评估[J]. 土木工程学报, 2009, 42(6): 66-72.
- [5] Antonaci P, Bocca P, Masera D. Fatigue crack propagation monitoring by acoustic emission signal analysis[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012, 81: 26-32.
- [6] Maslouhi A. Fatigue crack growth monitoring in aluminum using acoustic emission and acousto-ultrasonic methods[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2011, 18(7): 790-806.
- [7] Xu N, Zhou Z G, Liu W P, et al. Ultrasonic phased array inspection method for the corner of L-shaped components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(2): 419-425. (in Chinese)
徐娜, 周正干, 刘卫平等. L型构件R区的超声相控阵检测方法[J]. 航空学报, 2013, 34(2): 419-425.
- [8] Wagle S, Kato H. Real-time measurement of ultrasonic waves at bolted joints under fatigue testing[J]. Experimental Mechanics, 2011, 51: 1559-1564.
- [9] Zilberstein V, Walrath K, Grundy D. Mwm eddy-current arrays for crack initiation and growth monitoring[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25: 1147-1155.
- [10] Yusa N, Janousek L, Rebican M. Detection of embedded fatigue cracks in inconel weld overlay and the

- evaluation of the minimum thickness of the weld overlay using eddy current testing[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2006, 236: 1852–1859.
- [11] Chen R L, Wang B T. The use of polyvinylidene fluoride films as sensors for the experimental modal analysis of structures[J]. *Smart Materials and Structures*, 2004, 8(13): 791–799.
- [12] Klesnil M, Lukas P. *Fatigue of metallic materials*[M]. 2nd ed. Amsterdam: Material Science Monographs, 1992: 244–247.
- [13] Yu Y, Ou J P, Zhang J, et al. Development of wireless MEMS inclination sensor system for swing monitoring of large scale hook structures[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(4): 1072–1078.
- [14] Lei X Y, Cao G Z. Design of TMS320F28335 and its minimum application system[J]. *Electronic Design Engineering*, 2009, 1: 91–92. (in Chinese)
雷晓瑜, 曹广忠. TMS320F28335及其最小应用系统设计[J]. *电子设计工程*, 2009, 1: 91–92.
- [15] Shi Y J, He X P, Wang Y Q, et al. Test studies on fatigue performance of aluminum alloys used in construction[J]. *Journal Tsinghua University (Sci&Tech)*, 2009, 49(9): 5–8. (in Chinese)
- 石永久, 贺小平, 王元清等. 建筑用铝合金的疲劳性能试验研究[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2009, 49(9): 5–8.
- [16] Gao Y F, Dong L, Wang F S. GB/T 4337-2008 Metallic materials-fatigue testing-rotating bar bending method[S]. Beijing: China Standard Press, 2008: 4–18. (in Chinese)
高怡斐, 董莉, 王福生. GB/T 4337-2008 金属材料疲劳试验旋转弯曲方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 4–18.

作者简介:

白石 男, 博士研究生。主要研究方向: 结构构件疲劳监测与分析。

Tel: 0411-84707321

E-mail: stone3214@163.com

欧进萍 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 结构监测、控制与防灾减灾工程。

Tel: 0451-86282209

E-mail: oujinping@hit.edu.cn

A wireless intelligent fatigue monitoring system based on PVDF

BAI Shi¹, ZHOU Zhi², SHEN Yu², OU Jinping^{1, *}

1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China

2. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

Abstract: Due to the multi-factor influence, big errors in theoretical analysis and difficulties in chronically capturing fatigue datum in real time, it is difficult to give a timely and reliable warning for fatigue failure. This has been a critical problem for practical applications in engineering such as in mechanical engineering, civil infrastructures, aerospace engineering, and energy related structures. Considering the problems of analysis on fatigue damage cumulation based on conventional method of strain history, this paper proposed a wireless intelligent system based on PVDF sensor for fatigue damage monitoring of in-service structures with online structural health monitoring. Firstly, PVDF's sensitivity was calibrated according to its sensing characteristics. Secondly, from the experiment results of 6061-T6 aluminum alloy members, the performance of the system was verified. Finally, by comparison of the experiment re-

* Received: 2013-12-24; Revised: 2014-04-16; Accepted: 2014-05-21; Published online:
URL:

Foundation item: National Basic Research Program of China (No. 2011CB013705), National Scientific Support Project of China (No. 2011BAK02B01), Program for New Century Excellent Talents in University (No. NCET-10-0290).

*Corresponding author. Tel.: 0451-86282209 E-mail: oujinping@hit.edu.cn

sults and the S-N curve of 6061-T6 aluminum alloy, the method of study on fatigue of materials in the paper is feasible. The results show that the system has good working stability, high accuracy, nice instantaneity, and it can be further applied to practical applications.

Key words: PVDF; fatigue; wireless sensor; aluminum alloy; fatigue testing

