

基于压电信号的复合材料疲劳寿命评估方法

肖玉善 吴振 任晓辉

Fatigue assessment for composites by using piezoelectric signal

XIAO Yushan, WU Zhen, REN Xiaohui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240019.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于频率变化预测玻璃纤维增强树脂复合材料层合板的剩余疲劳寿命

Prediction of remaining fatigue life of glass fiber reinforced polymer laminates based on frequency change

复合材料学报. 2021, 38(10): 3323–3337 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201215.010>

一种基于复合材料剩余强度的衍生疲劳损伤模型

A derivative fatigue damage model based on residual strength of composites

复合材料学报. 2020, 37(10): 2473–2481 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191224.002>

单向碳/碳复合材料拉-拉疲劳寿命及剩余强度预测模型

Model for predicting tension–tension fatigue life and residual strength of unidirectional carbon/carbon composites

复合材料学报. 2018, 35(8): 2293–2301 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20171115.004>

芳纶纤维对炭黑/丁苯橡胶复合材料疲劳行为的影响

Influence of aramid fiber on the fatigue performance of carbon black/styrene butadiene rubber composites

复合材料学报. 2018, 35(8): 2177–2184 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20171023.001>

基于应力强度因子评估WC_p形状对WC_p/Fe复合材料热疲劳裂纹扩展行为的影响

Effect of WC_p shape of WC_p/Fe composites on thermal fatigue crack propagation behavior based on stress intensity factor

复合材料学报. 2020, 37(2): 408–414 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190426.001>

复合材料高周弯曲疲劳试验与寿命预测

High-cycle bending fatigue and life prediction of composite materials

复合材料学报. 2018, 35(12): 3407–3414 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180319.007>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

基于压电信号的复合材料疲劳寿命评估方法



分享本文

肖玉善¹, 吴振^{*1}, 任晓辉²

(1. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072; 2. 西安航空学院 机械工程学院, 西安 710077)

摘要: 复合材料结构应变特征随着疲劳加载发生变化, 因此本文尝试实时监测疲劳周期内复合材料结构的应变特征信号, 通过应变信号评估结构疲劳寿命。然而已有研究表明, 电阻式应变片在长时间动态测试中经常出现提前疲劳失效, 不适合疲劳全周期内应变信号采集。为此, 具有高耐疲劳性的新型聚偏氟乙烯压电薄膜 (Polyvinylidene difluoride piezoelectric film, PVDF) 被用于采集复合材料结构疲劳特征信号。通过在碳纤维增强树脂基复合材料 (T700/9A16) 层合板表面粘贴 PVDF 薄膜, 获取层合板疲劳过程中的压电信号。基于压电效应, 将表征疲劳损伤状态的应变信息转化为 PVDF 压电信号输出。基于试验生成的压电信号数据库, 采用随机森林回归算法高效地建立压电信号与复合材料层合板疲劳循环次数之间的关联。通过不同循环次数下的 PVDF 压电信号可以准确预测试验件的实际疲劳加载次数, 实现了对复合材料结构疲劳状态的有效评估。

关键词: 复合材料; 剩余刚度; 疲劳; PVDF 压电薄膜; 疲劳评估; 随机森林回归

中图分类号: TB333

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2024)09-4897-12

Fatigue assessment for composites by using piezoelectric signal

XIAO Yushan¹, WU Zhen^{*1}, REN Xiaohui²

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Considering the strain characteristics of the composite structures changing with fatigue loading, so that this paper attempts to monitor the strain characteristics in real time during the fatigue cycle and assesses the fatigue life through the strain signals. However, from the published literatures, resistance strain gauge often suffered from early fatigue failure in the long-time dynamic testing, which is not suitable for strain signal acquisition during the full fatigue cycle. Therefore, the novel polyvinylidene difluoride piezoelectric film (PVDF) with high fatigue resistance is used to acquire fatigue characteristic signals of composite structures. The piezoelectric signals during the fatigue process of the composite laminates are obtained by pasting PVDF on the surface of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) plates (T700/9A16). Based on the piezoelectric effect, the strain information during the fatigue process is converted into the piezoelectric signal from PVDF. Then, a Random Forest Regression (RFR) algorithm is trained based on the database generated from the experimental tests to efficiently establish the correlation between the piezoelectric signals and fatigue cycles of composite laminates. Through the trained RFR network, the actual fatigue cycles of the test pieces can be accurately predicted based on the piezoelectric signals, in which the maximum percentage error of logarithms of fatigue cycles is controlled within 5%. This paper provides a new research idea and technical support for the fatigue life assessment of composite materials.

Keywords: composite plate; residual stiffness; fatigue; PVDF; fatigue assessment; Random Forest Regression

在复杂载荷作用下, 航空复合材料结构可能出现疲劳损伤, 影响结构安全, 因此需要对复合

材料结构疲劳过程中的应变状态开展实时监测^[1-2]。目前, 监测疲劳过程中应变状态的主要方法包括:

收稿日期: 2023-10-30; 修回日期: 2023-12-31; 录用日期: 2024-01-11; 网络首发时间: 2024-01-22 08:22:00

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240019.003>

基金项目: 国家自然科学基金 (12172295)

National Natural Science Foundation of China (12172295)

通信作者: 吴振, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为复合材料结构力学 E-mail: wuzhenhk@nwpu.edu.cn

引用格式: 肖玉善, 吴振, 任晓辉. 基于压电信号的复合材料疲劳寿命评估方法 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(9): 4897-4908.

XIAO Yushan, WU Zhen, REN Xiaohui. Fatigue assessment for composites by using piezoelectric signal[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(9): 4897-4908(in Chinese).

应变片方法、引伸计方法、数字图像相关方法(DIC方法)及压电片方法。

Peng等^[3]采用机械引伸计测试了Zylon/epoxy单向试验件疲劳过程的平均应变状态,测试精度较高。但是,机械引伸计需要传感器与被测试件直接接触,将影响结构的疲劳性能。Jebri等^[4]利用DIC方法分析碳/聚苯硫醚复合材料疲劳过程中的应变场演化,测试方便且灵敏度高,但是DIC方法用于动态测试时需要高速成像系统,难以对实际结构疲劳性能开展实时监测。王瑞金^[5]开展了应变片疲劳失效试验,指出虽然应变片质量小,对复合材料疲劳动态测试影响较小,但是应变片疲劳失效通常早于复合材料结构。Shin等^[6]开展了聚偏氟乙烯压电薄膜(Polyvinylidene fluoride piezoelectric film, PVDF)拉伸/压缩疲劳试验,证明了PVDF压电片具有更好的耐疲劳性,千万数量级疲劳循环下依旧保持稳定的电压信号输出,而且其刚度较小,对结构的疲劳性能影响小,适用于复合材料结构的高周疲劳健康监测。为此,本文尝试采用PVDF压电片开展复合材料疲劳寿命评估方法研究。

目前,已有较多关于复合材料实时损伤监测技术的研究,如光纤传感监测技术^[7]、电阻响应法^[8]及压电陶瓷监测技术^[9]等。Akay等^[10]通过在复合材料结构中嵌入光纤光栅监测疲劳载荷作用下结构泊松比的退化情况。Buggisch等^[11]将单壁碳纳米管作为压阻传感器嵌入玻璃纤维复合材料实现了对结构的局部监测。Masmoudi等^[12]将压电陶瓷传感器嵌入复合材料层合板用于实时损伤监测。但是,光纤传感器容易导致树脂富集^[13]、电阻传感器需要持续供电、压电陶瓷传感器对结构本身机械性能影响较大^[14]。

PVDF传感器作为一种嵌入式传感器,与压电陶瓷传感器相比,对复合材料结构的机械性能影响较小,已广泛应用于复合材料损伤监测^[15-16]。Garcia等^[17]使用PVDF传感器来预测复合结构受冲击载荷后的完整性。德国学者Knapp等^[18]研究了不同种类的传感器性能,将电阻式应变片、PVDF压电传感器和加速度传感器进行对比,测试结果表明PVDF压电薄膜具有良好的灵敏度,更适用于低应变测量情况。同时,PVDF压电片输出灵敏度明显高于普通电阻应变片^[19]。

随着机器学习算法的不断发展,数据驱动技

术能够为复合材料结构的疲劳损伤监测提供更加便利的实现方案。近年来,机器学习算法被广泛用于金属结构的健康监测分析,包括神经网络算法^[20]、支持向量机^[21]及集成算法等。其中,集成算法实现简单,训练速度快,已被证明能够有效地预测结构行为^[22]。本文将采用集成学习算法高效地建立传感器电压信号与复合材料当前疲劳循环周次之间的关联。

文献综述表明,现有文献罕见报道基于PVDF的复合材料疲劳寿命评估方法。为此,本文首先开展了碳纤维复合材料标准件拉-拉疲劳试验及剩余刚度测试试验。进而,在碳纤维复合材料标准件表面粘贴PVDF压电薄膜并布置数据采集系统,获取疲劳循环加载全寿命周期中的电压信号。利用随机森林回归算法建立电压信号与当前疲劳寿命之间的关联。基于不同疲劳加载次数下输出的压电信号预测当前疲劳循环次数,对比试验件的真实加载次数,验证基于PVDF压电薄膜的随机森林疲劳寿命评估方法的可靠性。

1 基本原理

1.1 刚度退化模型

碳纤维复合材料疲劳过程中的损伤演化可以明显地划分为“快-慢-快”3个阶段^[23]。为此,廉伟和姚卫星^[24]提出了如下的复合材料剩余刚度退化模型:

$$\frac{E_r}{E_0} = 1 - \left(1 - \frac{E_{rc}}{E_0}\right) \left(1 - \frac{1 - (n/N)^u}{(1 - n/N)^v}\right) \quad (1)$$

式中: E_0 代表初始刚度; E_r 代表剩余刚度; E_{rc} 为失效临界剩余刚度; u 、 v 分别为试验参数; n 代表当前试验件的疲劳循环周次; N 代表当前试验件的最终疲劳寿命。

上式表明,复合材料结构的刚度退化与当前疲劳循环次数存在关联,在给定的疲劳载荷作用下,结构刚度退化区域复合材料应变逐渐增大。为此,通过适当的传感监测手段获取复合材料的实时应变信号特征,即可实现对复合材料结构当前疲劳循环周次的可靠预测。

1.2 PVDF压电薄膜动态感知机制

本文采用PVDF压电薄膜传感器获取碳纤维复合材料层合板表面的实时应变特征。PVDF的力学行为与电学行为相互耦合,通常采用压电方程描述其压电响应,电压输出表示为3个极化方向的输出总和。因此,其输出电压信号与监测结

构表面应变之间的关系表示为^[25]

$$V_0 = \sum_{i=1}^3 e_i \varepsilon_i h \tag{2}$$

式中： V_0 代表输出电压； e_i 代表 3 个极化方向的应变电压常数； ε_i 为 PVDF 3 个主方向应变； h 表示 PVDF 厚度。

由于压电薄膜相较于复合材料主结构的刚度较低，PVDF 处的应变近似等于粘贴处复合材料的应变。为此，公式 (2) 可以将复合材料疲劳全过程中的应变信号转化为 PVDF 的压电信号。进而建立压电信号与疲劳加载周次之间的关联，实现对复合材料当前疲劳寿命的评估。

1.3 随机森林回归算法

本文依托试验数据，利用随机森林算法建立压电特征信号与当前疲劳循环周次的关联。随机森林算法是以决策树为基础的集成学习算法，实现简单，无需大量数据集也可拥有较优的输出，降低了算法过拟合风险。随机森林算法是建立在 Bagging 方法^[26] 之上，此算法核心步骤是对数据的自采样及对个体决策树模型的集成。

随机森林算法的主要计算特点包含样本的随机抽取及特征属性的随机选取。在训练每棵决策树时，不使用样本数据的所有特征进行计算，而是随机选取原特征空间的子空间作为训练模型时计算的特征空间。随机森林算法通过特征的随机选取，在训练过程中加入了随机扰动，提高了集成模型的泛化能力。针对当前疲劳循环次数预测的需求，生成算法流程如下所示。

算法1. 随机森林回归算法

输入：训练数据集 D_{Num} ，由当前压电信号 V_i 及对应循环次数 n_i 构成。

输出：预测的当前循环周次 $n_{predict}$ 。

Step1: For $i = 1$ to N_{tree}

- (a) 从初始训练集 D_{Num} 中随机且有放回地抽取训练样本 $\mathbf{z}^*$;
- (b) 基于抽取样本 $\mathbf{z}^*$ 开展决策树训练。训练决策树模型节点时，在所有样本特征中随机选取部分特征，确定最优切分变量与切分点^[26]，完成最优决策树训练。

Step2: 基于Step1，完成所有最优决策树训练 $\{T_{best}\}^{N_{tree}}$ 。

Step3: 输入任意的电压信号 V_I ，输出疲劳循环周次预测结果 $n_{predict}(V_I) = \sum_{i=1}^{N_{tree}} T_{best}(V_I) / N_{tree}$ 。

其中： N_{tree} 代表算法中决策树个数；Num 表示训练集数据总数。

最终，基于试验获取了多组碳纤维复合材料

层合板疲劳加载全寿命周期中的压电特征信号，利用随机森林算法建立了压电信号与当前疲劳循环次数之间的关联。

2 试验测试

2.1 疲劳试验

本文首先参照标准 ASTM D3479^[27]，利用 T700 碳纤维增强树脂基复合材料预浸料 (T700/9A16，威海光威复合材料股份有限公司) 制备了 6 件 $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$ 拉-拉疲劳试验件，试验件尺寸如图 1 所示。

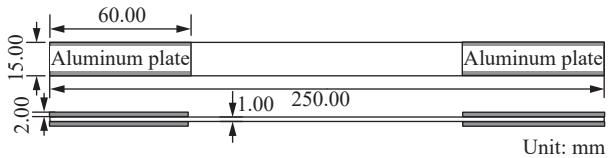


图 1 碳纤维复合材料 (CFRP) 疲劳试验件 (T700/9A16) 尺寸
Fig. 1 Geometry of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) fatigue test piece (T700/9A16)

通过前期的试验测试，本文采用的碳纤维复合材料基本材料参数如表 1 所示。

表 1 T700/9A16 的基本材料参数
Table 1 Material properties of the T700/9A16

Material properties	Value
E_{11} /GPa	126.97
E_{22} /GPa	8.52
G_{12} /GPa	3.41
X_T /MPa	2 433.05
X_C /MPa	1 063.25
Y_T /MPa	37.85
Y_C /MPa	118.30
S_{12} /MPa	61.30

Notes: E_{11} and E_{22} represent the tensile moduli in the fiber and matrix directions, respectively; G_{12} denotes the shear modulus; X_T and Y_T represent tensile strength in the fiber and matrix directions; X_C and Y_C represent compression strength in the fiber and matrix directions; S_{12} denotes the shear strength.

采用电液伺服疲劳试验机 (HDT 系列 A 型，深圳万测试验设备有限公司) 开展疲劳试验，选取 72% 应力水平，应力比 $R = 0.1$ 及 5.0 Hz 加载频率进行疲劳加载。表 2 给出了 6 件试验件拉伸疲劳寿命 (共包含 5 组有效试验数据)。

图 2 给出了疲劳试验件最终破坏模式。疲劳试验破坏形式统一，疲劳寿命数据稳定，为后续的剩余刚度试验及疲劳寿命监测奠定了基础。

2.2 剩余刚度试验

基于 2.1 节的试验，试件的平均疲劳寿命 $N^* =$

18 231, 进而开展碳纤维增强复合材料层合板剩余刚度测试试验。选取循环次数 $n=0$ 、 $n=2\ 000$ 、 $n=5\ 000$ 、 $n=10\ 000$ 及 $n=15\ 000$ 的疲劳试验件, 共计 10 件, 采用电子万能试验机 (DDL 系列, 中机试验装备股份有限公司), 参照标准 ASTM D3039^[28] 进行拉伸试验, 在试验件正反表面工作段中心位置粘贴应变片, 如图 3 所示。其中, a_1 表示试验件有效工作长度。

表 2 碳纤维复合材料 (T700/9A16) 疲劳试验件疲劳寿命
Table 2 Fatigue life of the carbon fiber reinforced plastic laminates (T700/9A16)

Test piece number	Fatigue life/cycle	Logarithmic fatigue life
PL-1	9 302	3.97
PL-2	25 642	4.41
PL-3	26 324	4.42
PL-4	-	-
PL-5	20 175	4.30
PL-6	9 715	3.99
Mean	18 231.6	4.22
SD	8 313.36	0.22
CoV	0.46	0.05

Notes: SD—Standard deviation; CoV—Coefficient of variation; PL—Plant.

表 3 给出了剩余刚度测试试验中, 试验机采集的载荷数据及应变片获取的应变数据, 进而计算了试验件的剩余刚度及剩余强度 (由于第二件循环周次 $n=15\ 000$ 次的试验件加载过程出现偏轴加载, 不计入有效数据)。剩余刚度的计算公式如下所示:

$$E_n = \frac{\Delta P}{A \Delta \bar{\varepsilon}}, \quad \Delta \bar{\varepsilon} = \frac{\Delta \varepsilon_1 + \Delta \varepsilon_2}{2} \tag{3}$$

其中: E_n 表示 n 次疲劳循环下的剩余刚度; $\Delta \varepsilon_1$

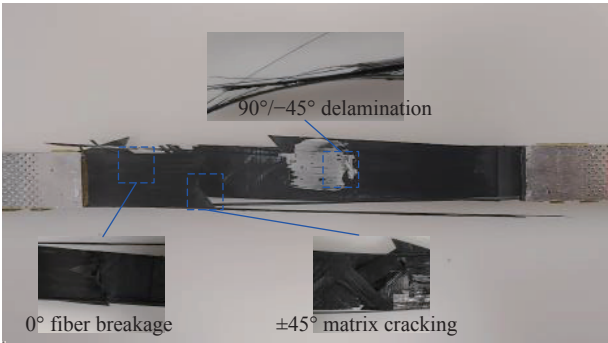


图 2 碳纤维复合材料 (T700/9A16) 试验件破坏模式示意图
Fig. 2 Schematic diagram of damage mode of CFRP test piece subjected to fatigue loading (T700/9A16)

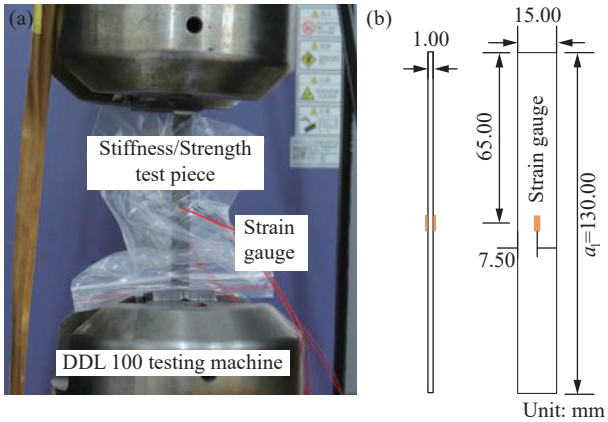


图 3 加载 n 次疲劳载荷后的碳纤维复合材料 (T700/9A16) 试验件静力拉伸试验
Fig. 3 Static tensile test of CFRP (T700/9A16) testing pieces after n number cycles of fatigue loading

和 $\Delta \varepsilon_2$ 分别表示载荷增量对应的试验件正反两面测得的应变增量; $\Delta \bar{\varepsilon}$ 表示载荷增量对应的平均应变增量; A 表示试验件横截面积; ΔP 为试验件载荷增量。

表 3 加载 n 次疲劳载荷后的碳纤维复合材料 (T700/9A16) 试验件剩余刚度及剩余强度
Table 3 Residual stiffness and residual strength of CFRP (T700/9A16) test pieces after n number cycles of fatigue loading

Test piece number	Cyclic number (n)	Ultimate load/N	Residual strength/MPa	Residual stiffness/GPa
PLE-0-1	0	9 646.8	643.1	34.48
PLE-0-2	0	10 461.7	697.4	33.45
PLE-2000-1	2 000	8 806.4	587.1	21.77
PLE-2000-2	2 000	9 750.8	650.1	19.26
PLE-5000-1	5 000	8 773.8	584.9	21.77
PLE-5000-2	5 000	9 807.1	653.8	20.41
PLE-10000-1	10 000	8 336	555.7	19.08
PLE-10000-2	10 000	9 253.3	616.9	16.28
PLE-15000-1	15 000	8 964	597.6	11.29

Note: The test piece number is defined as PLE-X-Y, in which PLE represents the residual properties of fatigue test pieces, X denotes the number cycles of fatigue loading and Y denotes the test number.

图 4 给出了碳纤维复合材料试验件疲劳加载过程中的拟合刚度退化曲线。

通过图 4 中的刚度退化曲线, 可以发现剩余刚度在初始阶段存在一个明显的下降, 随后在循环过

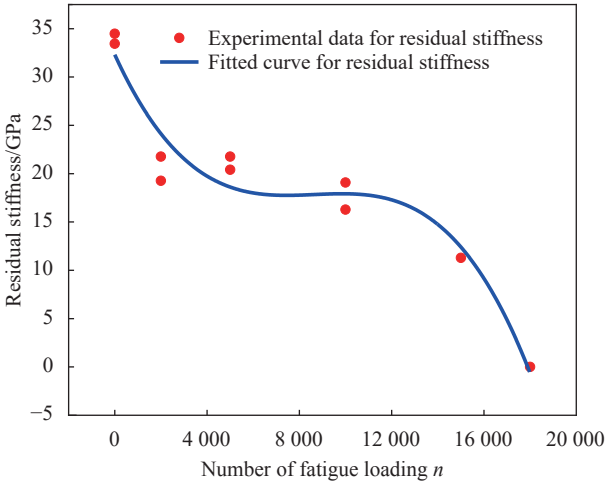


图4 碳纤维复合材料 (T700/9A16) 试验件刚度退化曲线

Fig. 4 Stiffness degradation curves of CFRP test pieces (T700/9A16)

程中保持微幅下降，最后突然破坏，呈现突然死亡状态。剩余刚度与疲劳加载次数之间存在明显关联关系，进而结合应力应变关系，利用试验件表面的应变信号变化可以表征结构的当前疲劳状态。

2.3 含 PVDF 薄膜疲劳试验

基于公式 (2)，可以将试验件表面的应变信号转化为更易测量的压电信号。为此，本文进一步制备了 14 件 $[0^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}]_s$ 碳纤维复合材料疲劳试验件，并在试验件表面中心处粘贴美国 MEAS 公司生产的 PVDF 压电薄膜，产品型号为 LDT0-028 K，如图 5 所示。

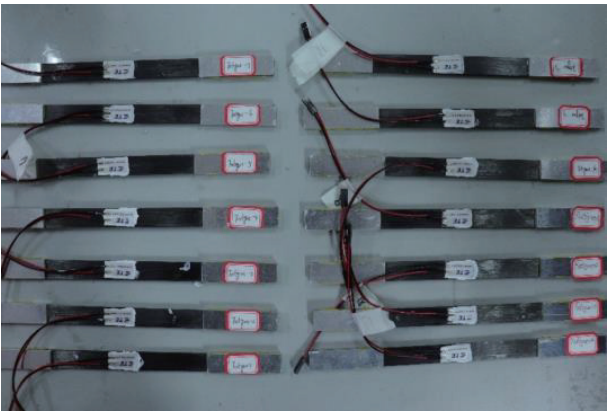
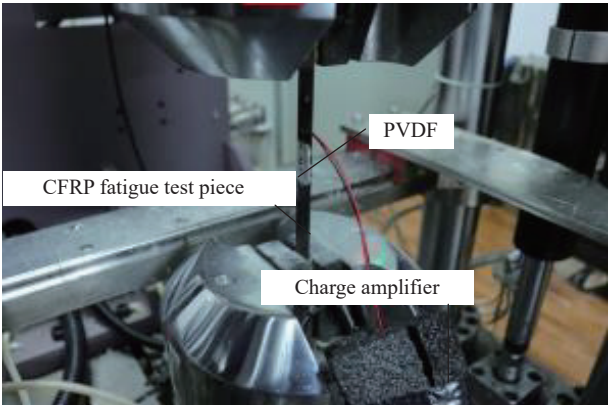


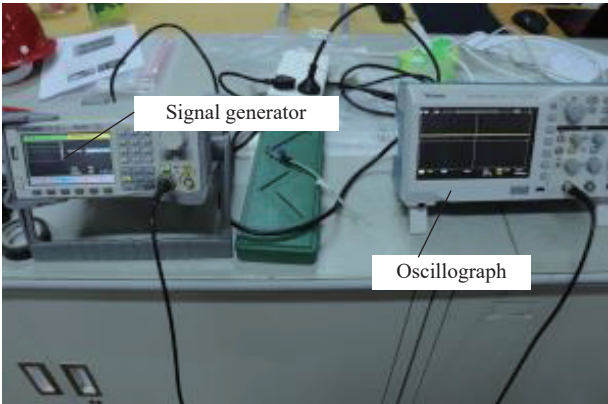
图5 含聚偏氟乙烯压电薄膜 (PVDF) 的碳纤维复合材料 (T700/9A16) 疲劳试验件

Fig. 5 CFRP (T700/9A16) test pieces with polyvinylidene fluoride piezoelectric film (PVDF) for fatigue test

同样选取 72% 应力水平、应力比 $R=0.1$ 及 5.0 Hz 加载频率进行疲劳加载。通过将 PVDF 压电薄膜连接电荷放大器、示波器记录疲劳全过程中的压电信号变化，如图 6 所示。



(a) Fatigue test piece with PVDF



(b) Piezoelectric signal from oscillograph

图6 含聚偏氟乙烯压电薄膜 (PVDF) 的碳纤维复合材料 (T700/9A16) 疲劳试验

Fig. 6 Fatigue test of the CFRP (T700/9A16) pieces with polyvinylidene difluoride piezoelectric film (PVDF)

试验获取了 14 件碳纤维复合材料试验件疲劳加载过程中的全寿命 PVDF 压电信号。图 7 给出了 4 件试验件 PL-PVDF-1、PL-PVDF-2、PL-PVDF-3 及 PL-PVDF-4 开始阶段压电信号及结束阶段压电信号的对比。同时考虑到环境白噪声的存在，图 7 同样给出了基于傅里叶变换滤波之后的压电信号用于后续的研究分析。14 件含 PVDF 的试验件开始阶段的压电信号及结束阶段的压电信号平均波峰值，如表 4 所示。

通过图 7 及表 4 可以发现，随着疲劳载荷的不断加载，压电信号逐渐增大。对比试验开始阶段及结束阶段压电信号数据，压电平均波峰值出现明显的提高，验证了基于 PVDF 压电信号进行疲劳监测的可行性。

为了进一步探究碳纤维复合材料层合板疲劳加载过程中压电信号的变化规律，图 8 给出了 4 件试验件 PL-PVDF-1、PL-PVDF-2、PL-PVDF-3 及

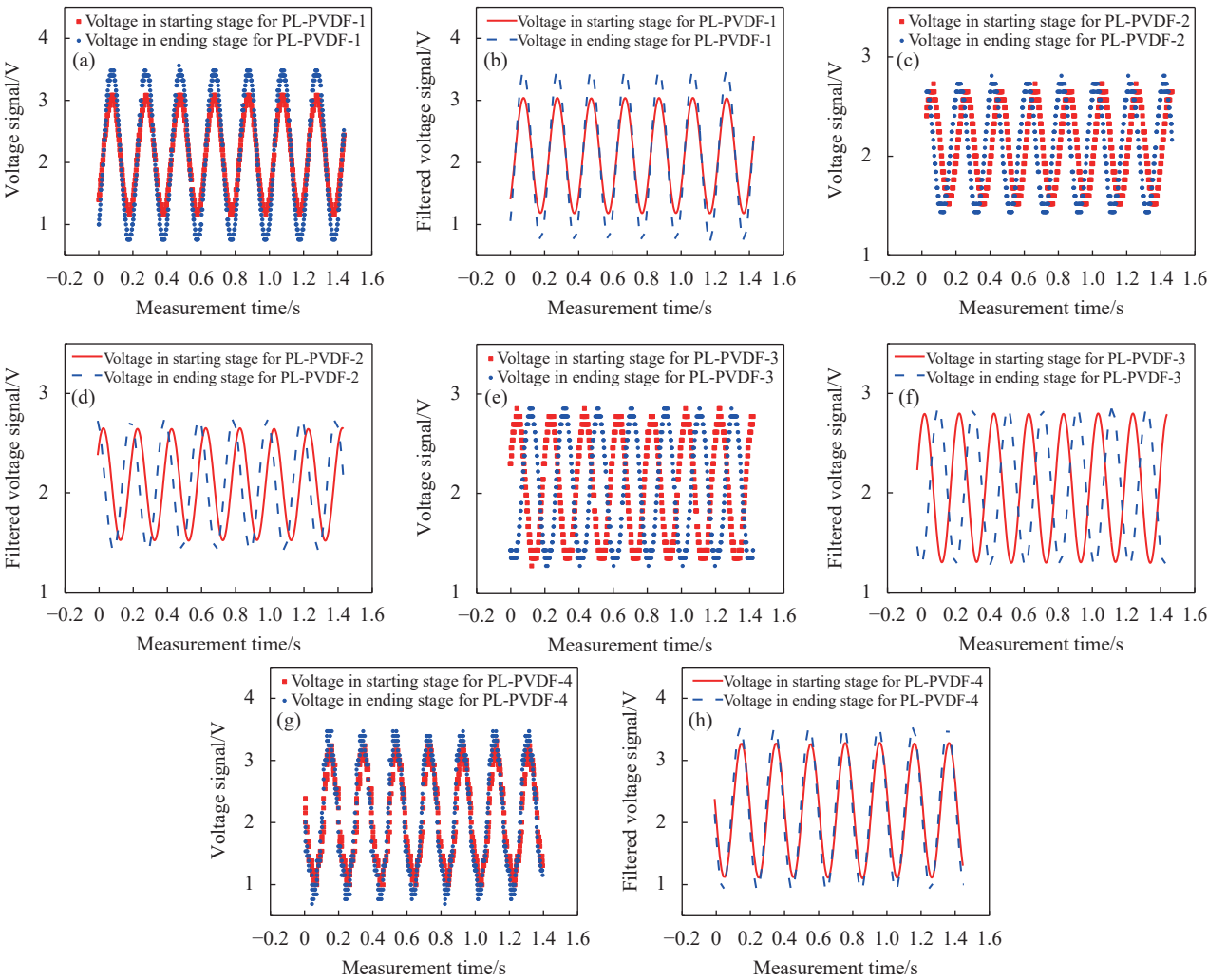


图7 含PVDF的碳纤维复合材料(T700/9A16)试验件疲劳试验输出的压电信号

Fig. 7 Piezoelectric signals from PVDF during fatigue test on CFRP test pieces (T700/9A16)

表4 含PVDF碳纤维复合材料(T700/9A16)试验件疲劳开始阶段与结束阶段输出的压电信号峰值平均值

Table 4 Average peak value of piezoelectric signals at starting/ending stage for CFRP (T700/9A16) test pieces with PVDF

Test piece number	Average peak voltage at starting stage/V	Average peak voltage at ending stage/V
PL-PVDF-1	3.02	3.49
PL-PVDF-2	2.63	2.76
PL-PVDF-3	3.09	3.23
PL-PVDF-4	3.63	3.80
PL-PVDF-5	3.05	3.42
PL-PVDF-6	3.17	3.52
PL-PVDF-7	3.07	3.56
PL-PVDF-8	3.08	3.48
PL-PVDF-9	2.68	2.84
PL-PVDF-10	2.84	3.12
PL-PVDF-11	3.08	3.47
PL-PVDF-12	3.56	3.88
PL-PVDF-13	3.11	3.52
PL-PVDF-14	3.04	3.48

Note: The test piece number is defined as PL-PVDF-NN, in which PL represents fatigue test pieces, PVDF denotes the polyvinylidene fluoride piezoelectric film and NN denotes the test number.

PL-PVDF-4全寿命周期中的归一化压电信号随着归一化疲劳加载次数的变化曲线。

电压与疲劳加载周期数据的归一化公式如下所示：

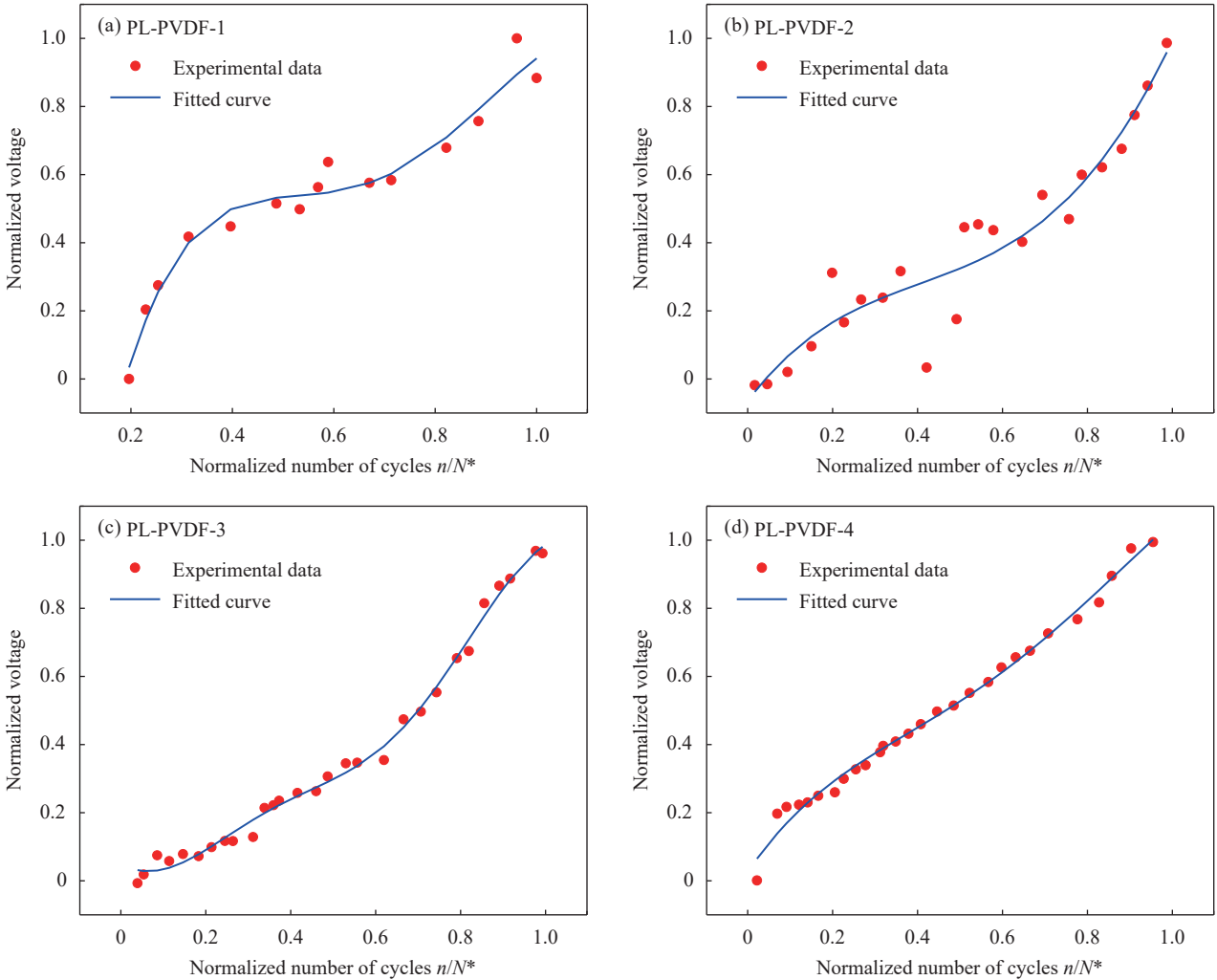


图8 疲劳周期内 PVDF 输出的归一化压电信号变化
Fig. 8 Change of normalized piezoelectric signals from PVDF during fatigue test

$$V_{\text{normal}} = \frac{V - V_{\text{ini}}}{V_{\text{fin}} - V_{\text{ini}}}; \quad n_{\text{normal}} = \frac{n}{N} \tag{4}$$

其中： V_{normal} 和 n_{normal} 分别表示原始数据库中归一化的电压与加载周期数据； V_{fin} 表示当前试验件对应的疲劳试验最终破坏阶段 20 个循环周期内 PVDF 输出的正弦压电信号波峰的算数平均值； V_{ini} 表示当前试验件对应的疲劳试验初始阶段 20 个循环周期内 PVDF 输出的正弦压电信号波峰的算数平均值； V 表示试验件在当前循环周期内 PVDF 输出的正弦压电信号峰值。

通过对比图 4 和图 8，可以发现疲劳全周期中压电信号增大同样处于“快-慢-快”的变化规律，压电信号变化规律与刚度退化曲线存在明显的关联关系。因此，基于压电信号能够很好地描述碳纤维复合材料疲劳加载全过程，实现对复合材料当前疲劳循环次数的可靠监测。

3 疲劳寿命评估

3.1 随机森林疲劳循环周次评估

基于 2.3 节的试验分析，发现 PVDF 输出的压电信号与碳纤维复合材料层合板疲劳性能之间存在明显的对应关系。为此本文将通过随机森林机器学习算法，建立压电信号与碳纤维复合材料当前疲劳循环周次之间的关联，输入当前压电信号幅值 V_t ，评估复合材料层合板当前疲劳加载次数 n_{predict} ，算法流程如图 9 所示。考虑到复合材料真实疲劳寿命存在一定的分散性，本文中随机森林算法建立的模型趋近于表征电压信号和试验加载周期均值之间的关系，但是对疲劳加载周期均值的可靠估计对工程实际应用同样具有参考价值。

基于 2.3 节开展的 14 组含 PVDF 压电薄膜的碳纤维复合材料疲劳试验，共获取了 400 组不同疲劳循环次数对应的 PVDF 电压信号幅值。其中，

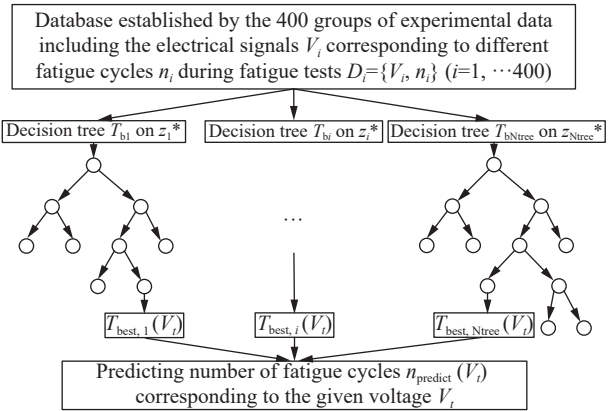


图9 基于随机森林(RFR)的含PVDF碳纤维复合材料(T700/9A16)试验件疲劳加载次数估计方法

Fig. 9 Random forest regression (RFR) for predicting the number of fatigue cycles of CFRP (T700/9A16) pieces with PVDF

随机选取 360 组作为训练集完成随机森林算法的训练, 利用剩余 40 组数据作为测试集, 验证训练完成的随机森林算法的可信度。

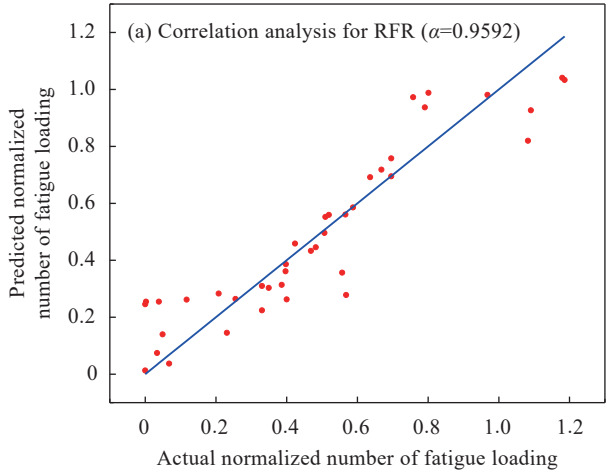
通过优化 Out-of-Bag 误差确定了随机森林算法中的超参数取值, 如表 5 所示。

表 5 随机森林算法中超参数选取值

Table 5 Selected values for hyperparameters in RFR

Number of trees	Method	Min leaf size/times	Surrogate
300	Regression	5	On

本文分别选用了 SVM 支持向量机算法^[21]、XGBoost 算法^[29]及 BP 神经网络算法^[20]3 种数据驱动算法进行了对比验证。其中, SVM 算法中惩罚系数 C 为 2, gamma 参数为 4; XGBoost 算法中树的数量为 300, 树的最大深度为 10; BP 算法中隐藏层节点数为 5, 隐藏层数为 3, 其余参数均采用 MATLAB 默认设置。训练完成后, 表 6 分别给出了 RFR 算法、SVM 支持向量机算法、XGBoost 算法及 BP 神经网络算法针对测试集的误差指标,



主要包括: 平均绝对误差 (MAE)、均方误差 (MSE) 及决定系数 (R^2)。

表 6 数据驱动算法误差指标对比

Table 6 Comparison of error indicators for different models

Data-driven algorithm	MAE	MSE	R^2
RFR	0.0946	0.0200	0.9201
SVM	0.1315	0.0292	0.8845
XGBoost	0.0761	0.0065	0.9461
BPNN	0.3347	0.0672	0.8281

Note: MAE, MSE and R^2 denote the mean absolute error, mean square error and coefficient of determination, respectively.

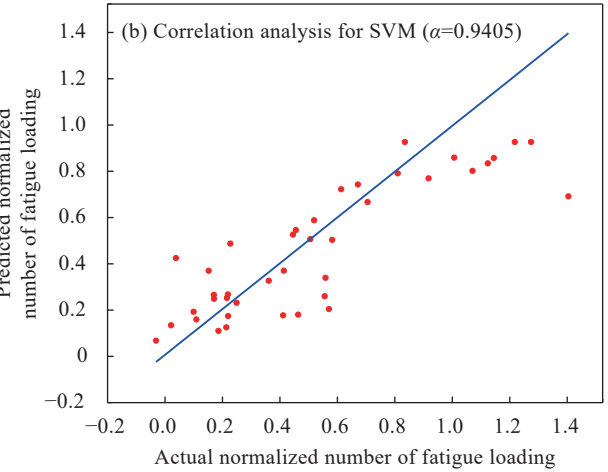
同时, 图 10 给出了不同模型预测的归一化疲劳加载次数与测试集原始数据相关性分析曲线及皮尔森相关性系数 α 。误差分析结果表明, 采取的随机森林回归算法可以基于试验获取的压电信号数据较好地估计复合材料试验件实时疲劳循环次数。

对比其他选取的数据驱动模型, RFR 算法在预测精度略低于 XGBoost 算法。但是 RFR 算法相较于 XGBoost 算法, 在 MATLAB 软件中实现更简单、训练速度快, 便于应用。综合考虑计算精度及效率, 最终选用了 RFR 算法。

3.2 随机森林评估结果可靠性分析

本文为了进一步验证基于 PVDF 压电薄膜的复合材料疲劳寿命评估算法的可靠性, 首先通过含 PVDF 碳纤维复合材料层合板疲劳试验, 获取了不同疲劳加载次数下的压电信号。以不同疲劳循环周次下的碳纤维复合材料层合板归一化压电信号为输入变量, 代入 3.1 节中训练完成的随机森林回归模型, 预测压电信号对应的疲劳循环周次, 与试验值对比验证算法的可靠性。

为此, 图 11 分别给出了 2 000 次加载、5 000 次



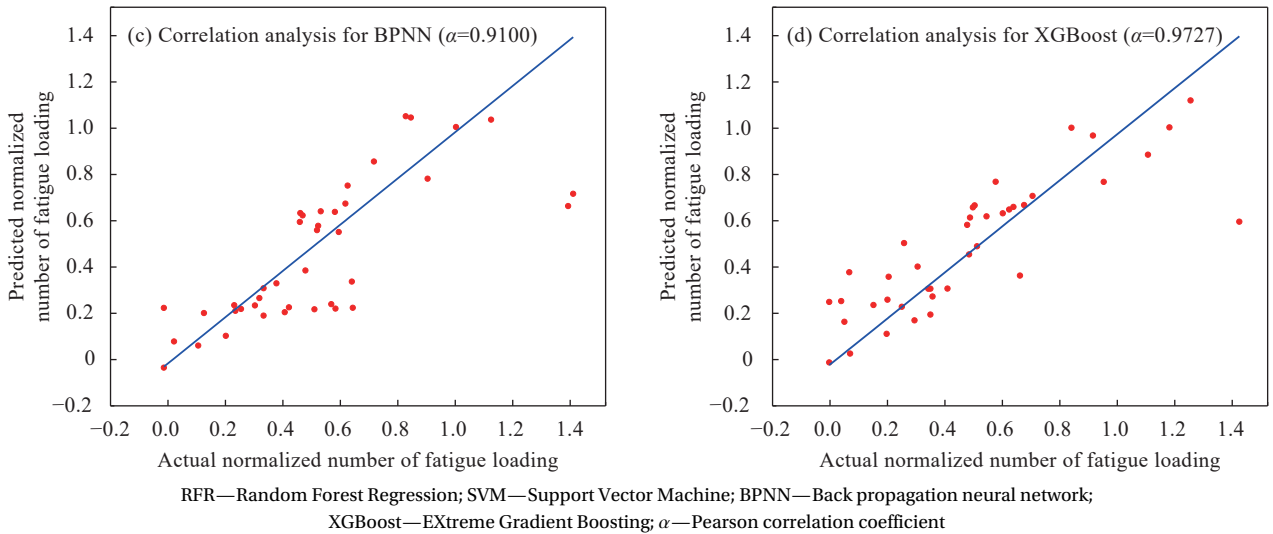
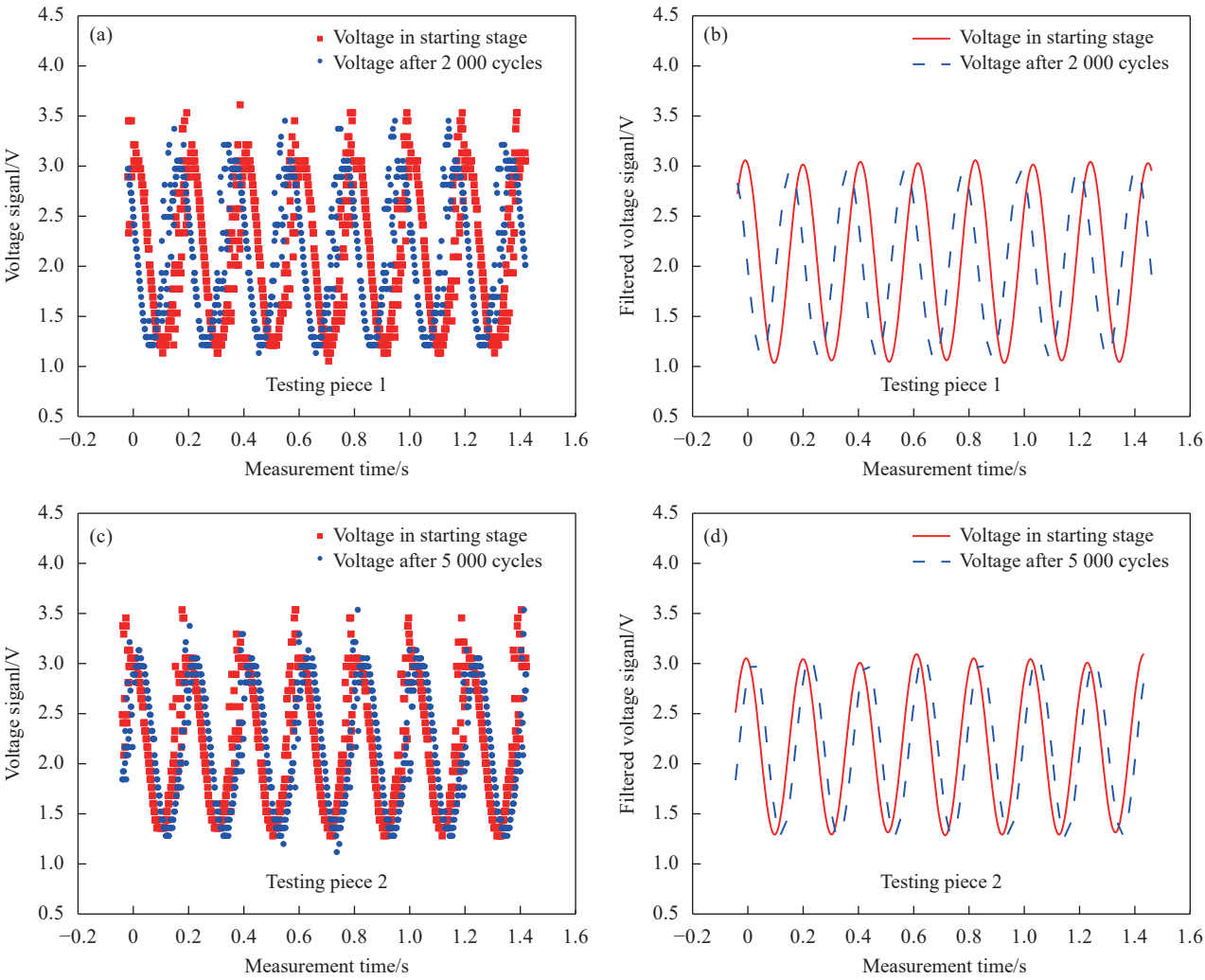


图 10 预测疲劳循环次数与测试集原始数据相关性分析

Fig. 10 Correlation between number of the predicted fatigue cycles and original data in testing set

加载及 10 000 次加载下的压电信号曲线。
同时，考虑到最终用于测试 RFR 算法准确性

的疲劳试验件并未进行疲劳全周期试验，为此利
用原始数据库中 14 组含 PVDF 压电薄膜的碳纤维



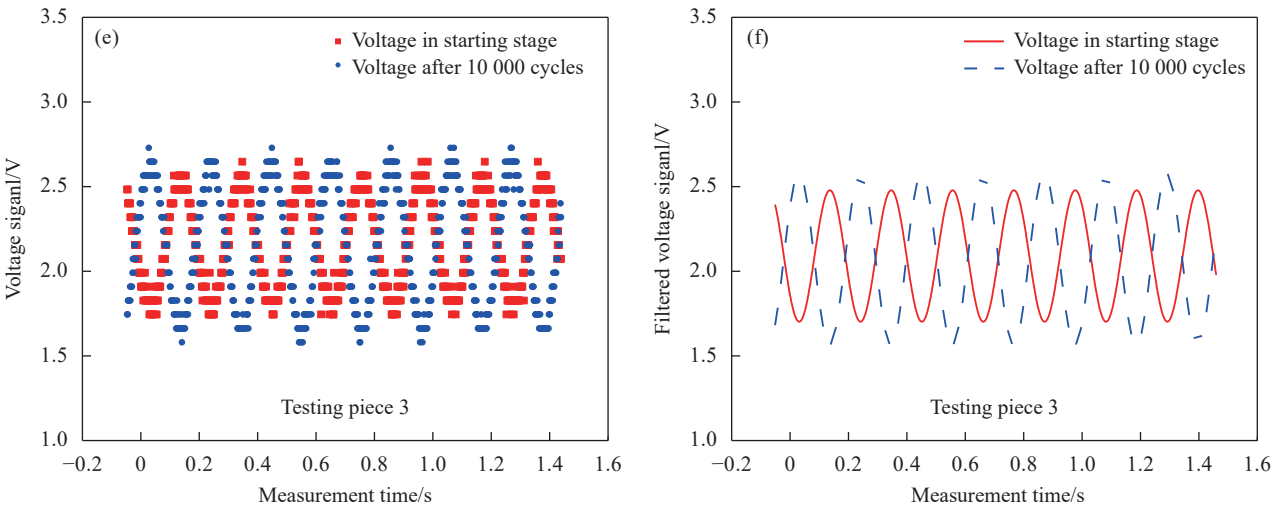


图 11 不同疲劳加载次数下含 PVDF 的碳纤维复合材料 (T700/9A16) 试验件输出的压电信号

Fig. 11 Piezoelectric signals from PVDF during fatigue test on CFRP test pieces (T700/9A16) under different fatigue cycles

复合材料疲劳试验数据，对测试试验件对应的电压与加载周期进行归一化及反归一化处理，公式如下所示：

$$V_{normal}^{test} = \frac{V - \sum_{i=1}^{n_{train}} V_{ini,i}/n_{train}}{\sum_{i=1}^{n_{train}} V_{fin,i}/n_{train} - \sum_{i=1}^{n_{train}} V_{ini,i}/n_{train}}; n_{normal}^{test} = \frac{n}{N^*}$$
 (5)

其中： $n_{train} = 14$ ； $N^* = 18231$ 。

进而，将归一化的压电信号输入训练完成的随机森林回归模型，计算不同电压信号下对应的

当前试验件疲劳加载次数对数及剩余疲劳对数寿命，如表 7 所示。

通过表 7，可以发现建立的基于 PVDF 压电薄膜的碳纤维复合材料疲劳寿命评估方法可以基于试验获取的压电信号，利用随机森林回归算法很好地估计层合板当前实际疲劳循环次数，计算的对数疲劳循环加载次数误差控制在 5.0% 以内。同时，疲劳剩余对数寿命估计结果与试验件真实剩余对数寿命误差控制在 7.0% 以下。通过 PVDF 压电信号可以有效地对复合材料结构当前剩余寿命进行估计，判断结构是否具有继续承载能力。

表 7 基于压电信号的碳纤维复合材料试验件 (T700/9A16) 疲劳循环周次及剩余寿命估计结果
Table 7 Fatigue cycles and remaining life of CFRP test pieces (T700/9A16) predicted by using RFR

Test piece number	n_{test}	n_{pre}	Error	$\tilde{n}_{test}$	$\tilde{n}_{pre}$	Error
Piece 1	3.30	3.24	1.93%	4.39	4.21	4.10%
Piece 2	3.70	3.86	4.48%	4.18	4.03	3.59%
Piece 3	4.00	4.13	3.27%	3.92	3.65	6.89%

Notes: n_{test} denotes the logarithms of tested cycling number; n_{pre} denotes the logarithms of predicted cycling number by using trained RFR; $\tilde{n}_{test}$ represents the tested remaining logarithmic fatigue life; $\tilde{n}_{pre}$ represents the predicted remaining logarithmic fatigue life.

4 结论

为了实现对复合材料结构服役过程中的实时疲劳状态评估，本文发展了基于数据驱动算法的复合材料实时疲劳循环次数估计方法。融合含聚偏氟乙烯压电薄膜 (PVDF) 复合材料结构疲劳全周期的试验数据，建立了压电信号与复合材料结构疲劳状态之间关联的数据驱动模型。相比显式疲劳渐进损伤模型，数据驱动模型降低了模型构造的难度，加速了复合材料疲劳寿命的评估，便于

工程应用。同时，利用 PVDF 的优点，克服了应变片不能有效监测复合材料全周期高周疲劳应变的问题。通过开展含 PVDF 复合材料结构疲劳试验与寿命评估方法研究，得到了以下结论：

- (1) 含有 PVDF 压电薄膜的复合材料层合板在疲劳加载过程中，刚度退化曲线与压电信号变化曲线均表现出“快-慢-快”的演变规律；
- (2) 通过在复合材料表面粘贴 PVDF 压电薄膜，能够实时准确地将疲劳加载过程中复合材料结构

刚度退化导致的应变特征信号转化为压电信号输出;

(3) 利用机器学习算法, 能够准确高效地建立压电特征信号与当前疲劳状态之间的关联, 进而实现复合材料层合板较准确的疲劳寿命评估。

参考文献:

[1] AHMED O, WANG X, TRAN M V, et al. Advancements in fiber-reinforced polymer composite materials damage detection methods: Towards achieving energy-efficient SHM systems[J]. *Composite Part B: Engineering*, 2021, 223: 109136.

[2] STASZEWSKI W J, MAHZAN S, TRAYNOR R. Health monitoring of aerospace composite structures active and passive approach[J]. *Composite Science & Technology*, 2009, 69: 1678-1685.

[3] PENG T, WANG S, HUANG Y D, et al. Study of the fatigue behavior of the unidirectional Zylon/epoxy composite used in pulsed magnets[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2020, 30(4): 4300705.

[4] JEBRI L, ABBASSI F, DEMIRAL M, et al. Experimental and numerical analysis of progressive damage and failure behavior of carbon Woven-PPS[J]. *Composite Structures*, 2020, 243: 112234.

[5] 王瑞金. 应变片在动态测试中疲劳规律的研究 [J]. *机电工程*, 2000(4): 66-68.

WANG Ruijin. The study of the fatigue law in dynamic test[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2000(4): 66-68(in Chinese).

[6] SHIN Y H, JUNG I, PARK H, et al. Mechanical fatigue resistance of piezoelectric PVDF polymers[J]. *Micromachines*, 2018, 9: 503-513.

[7] DI SANTE R. Fiber optic sensors for structural health monitoring of aircraft composite structures: Recent advances and applications[J]. *Sensors*, 2015, 15: 18666-18713.

[8] DU X, ZHOU H, SUN W, et al. Graphene/epoxy interleaves for delamination toughening and monitoring of crack damage in carbon fibre/epoxy composite laminates[J]. *Composite Science & Technology*, 2017, 140: 123-133.

[9] ANDREADES C, MAHMOODI P, CIAMPA F. Characterization of smart CFRP composites with embedded PZT transducers for nonlinear ultrasonic applications[J]. *Composite Structures*, 2018, 206: 456-466.

[10] AKAY E, YILMAZ C, KOCAMAN S E, et al. Monitoring Poisson's ratio degradation of FRP composites under fatigue loading using biaxially embedded FBG sensors[J]. *Materials*, 2016, 9: 781-796.

[11] BUGGISCH C, GIBHARDT D, FELMET N, et al. Strain sensing in GFRP via fully integrated carbon nanotube epoxy film sensors[J]. *Composites Part C: Open Access*, 2021, 6: 100191.

[12] MASMOUDI S, EL MAHI A, TURKI S. Fatigue behaviour and structural health monitoring by acoustic emission of E-glass/epoxy laminates with piezoelectric implant[J]. *Applied Acoustics*, 2016, 108: 50-58.

[13] RAMAKRISHNAN M, RAJAN G, SEMENOVA Y, et al. Overview of fiber optic sensor technologies for strain/temperature sensing applications in composite materials[J]. *Sensors*, 2016, 16(1): 99-126.

[14] FENG T, FERRI ALIABADI M H. Structural integrity assessment of composites plates with embedded PZT transducers for structural health monitoring[J]. *Materials*, 2021, 14(20): 6148.

[15] GHAFARI E, LU N. Self-polarized electro spun polyvinylidene fluoride (PVDF) nanofiber for sensing applications[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 160: 1-9.

[16] YU H, HUANG T, LU M, et al. Enhanced power output of an electro spun PVDF/MWCNTs-based nanogenerator by tuning its conductivity[J]. *Nanotechnology*, 2013, 24: 405401.

[17] GARCIA C, TRENDAFILOVA I. Triboelectric sensor as a dual system for impact monitoring and prediction of the damage in composite structures[J]. *Nano Energy*, 2019, 60: 527-535.

[18] KNAPP J, ALTMANN E, NIEMANN J, et al. Measurement of shock events by means of strain gauges and accelerometer[J]. *Measurement*, 1998, 24(2): 87-96.

[19] 李焰, 钟方平, 刘乾, 等. PVDF 在动态应变测量中的应用 [J]. *爆炸与冲击*, 2003(3): 230-234.

LI Yan, ZHONG Fangping, LIU Qian, et al. Application of PVDF in dynamic strain measurement[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003(3): 230-234(in Chinese).

[20] GLOWACZ G A. Fault diagnosis of electric impact drills using thermal imaging[J]. *Measurement*, 2021, 171: 108815.

[21] KOUZIOKAS G N. A method for multi-class sentiment classification based on an improved one-vs-one (OVO) strategy and the support vector machine (SVM) algorithm[J]. *Information Sciences*, 2017, 394: 38-52.

[22] LI J K, LIN M. Ensemble learning with diversified base models for fault diagnosis in nuclear power plants[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2021, 158: 108265.

[23] 翟洪军, 姚卫星. 纤维增强树脂基复合材料的疲劳剩余刚度研究进展 [J]. *力学进展*, 2022, 32(1): 69-80.

ZHAI Hongjun, YAO Weixing. A survey on stiffness reduction of fiber reinforced plastic under cyclic loading[J]. *Advance in Mechanics*, 2022, 32(1): 69-80(in Chinese).

[24] 廉伟, 姚卫星. 复合材料层合板剩余刚度-剩余强度关联模型 [J]. *复合材料学报*, 2008, 25(5): 151-156.

LIAN Wei, YAO Weixing. Residual stiffness residual strength coupled model of composite laminates[J]. *Acta Materialia Compositae Sinica*, 2008, 25(5): 151-156(in

Chinese).

[25] 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(8): 2190-2198.

BAI Shi, ZHOU Zhi, SHEN Yu, et al. A wireless intelligent fatigue monitoring system based on PVDF [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(8): 2190-2198(in Chinese).

[26] PRADEEP K, DARPE A K, KULKARNI M S. An ensemble decision tree methodology for remaining useful life prediction of spur gears under natural pitting progression[J]. Structural Health Monitoring, 2019, 9(3): 854-872.

[27] ASTM. Standard test method for tension-tension fatigue of polymer matrix composite materials: ASTM D3479/D3479M-19 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2019.

[28] ASTM. Standard test method for tension properties of polymer matrix composite materials: ASTM D3039/D3039M-17 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2017.

[29] KUMAR R, KUMAR A, KUMAR D R. Buckling response of CNT based hybrid FG plates using finite element method and machine learning method [J]. [Composite Structures](#), 2023, 319: 117204.