

引用格式:邢洲,徒芸,王庆锋. 基于等效 PSD 的工业管道疲劳损伤寿命预测[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2026, 53 (4): 97-104.

XING Zhou, TU Yun, WANG QingFeng. Prediction of the fatigue damage life of industrial pipelines based on the equivalent power spectral density (PSD)[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2026, 53 (4): 97-104.

基于等效 PSD 的工业管道疲劳损伤寿命预测

邢 洲¹ 徒 芸² 王庆锋^{1*}

(1. 北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029; 2. 华东理工大学 机械与动力工程学院, 上海 200237)

摘 要: 针对典型工业管道流致振动监测与预防控制难的问题, 提出一种基于等效功率谱密度的管道疲劳损伤寿命预测方法。首先构建疲劳监测模型, 并通过仿真模拟搭建管道振动实验台。随后以实验结果为例, 分别计算出时域雨流计数法和频域法的寿命预测估值, 并对比时域与多种频域方法的优劣。结果表明, 基于等效加速度功率谱的频域方法有效减少了频谱泄漏问题, 对比传统的频域方法对管道寿命的预测效果较好, 预测精度平均提高了 3.53%, 且平均预测误差最小。研究工作实现了对工业管道的寿命预测, 较其他方法能够较准确地预测出工业管道的寿命, 为预测工业管道疲劳损伤提供了一种新方法。

关键词: 疲劳损伤; 等效功率谱密度(PSD); 寿命预测; 管路; 频域方法

中图分类号: TH17 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2026.04.011

引 言

随着工业化进程加快, 管道系统已广泛应用于石化、电力等领域, 其在复杂工况下易受流致振动影响产生疲劳损伤, 威胁系统安全。准确预测管道疲劳寿命对提升运行可靠性与事故预防具有重要意义。然而当前已有方法存在成本高、适应性差和预测精度不足等问题, 亟需一种高效、精准且可工程应用的寿命预测方法。

在工业管道振动疲劳损伤监测与寿命预测领域, 国内外学者开展了大量研究。Vieira 等^[1]开展了基于物理机理的损伤建模研究, 针对泡状流中的冲刷过程建立了预测模型, 为后续复杂流动环境下的疲劳或破坏机制研究提供了可借鉴的研究思路。Huang 等^[2]开展了基于应变监测的管道振动疲劳频域计算研究, 但缺乏管道流致振动宽频域监测技术且振动控制技术门槛高。尽管应力应变监测是常用的振动疲劳评估方法^[3-5], 但其面临在高低温等极

端工况下监测成本高、应用普及难度大、振动疲劳损伤时空分布预知难、应变监测防爆场所适应难等技术瓶颈。与此同时, 隋国浩等^[6]采用频域方法, 通过疲劳响应谱探究了管内流体流速与激励的部分相干性对于管路系统疲劳寿命的影响。频域方法计算效率高、适用于宽频激励情形, 在一定程度上可实现疲劳寿命的快速预测。近年来, 研究者在频域方法中逐步引入窗函数平滑、多阶谱矩建模、概率分布构建等改进策略, 以提升谱估计质量和预测精度, 代表性方法包括窄带近似法、Wirsching-Light 模型、Tovo-Benasciutti 法、Zhao-Baker 模型与 Dirlik 公式等^[7-11], 被广泛应用于电子焊点、轴承和叶片等部件的寿命评估。刘奥等^[12]研究分析了基于时域雨流计数法(rainflow counting, RFC)和频域谱密度函数的航空发动机外部管路的振动疲劳寿命估算方法, 结果表明频域方法在计算效率和预测精度间可取得良好平衡。

尽管频域方法在其他部件寿命预测中已有广泛应用, 但在工业管道这一结构中的研究仍较为稀缺, 尤其缺乏能够兼顾预测精度与可重复实验验证的系统化方案。基于此, 本文以典型工业管道为研究对象, 结合有限元分析与实验测试搭建了管道振动疲劳监测实验台, 提出了一种基于等效加速度功率谱密度(power spectral density, PSD)的疲劳损伤

收稿日期: 2025-02-25

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3010504)

第一作者: 男, 1999 年生, 硕士生

* 通信联系人

E-mail: wangqf2422@163.com

寿命预测方法,并将多种频域方法与时域雨流计数法进行系统对比分析。

1 管道振动疲劳监测方法

1.1 Miner 疲劳损伤

Miner 疲劳损伤法则是疲劳损伤累积理论的经典模型之一,用于预测材料或结构在变幅载荷作用下的疲劳失效情况,其核心思想如下:材料的疲劳损伤累积是一个线性过程,每个载荷循环都会消耗一定量的疲劳寿命,当累积损伤达到一个临界值时,材料或结构发生疲劳破坏。该法则简单实用,在工程领域广泛应用于疲劳寿命预测。

Miner 线性累积损伤准则基于循环次数和疲劳寿命的比值,计算疲劳损伤累积 D

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

式中, n_i 为应力范围内的循环次数, N_i 为对应应力范围的疲劳寿命, m 为应力幅值区间划分数。

Miner 疲劳损伤法则为疲劳寿命预测提供了一种简单有效的方法,特别适合处理工业管道振动、机械结构变幅载荷等疲劳问题。尽管其假设较为简化,但通过与其他方法如 Dirlik 模型、雨流计数法等的结合,可以在实际工程中实现快速、可靠的疲劳寿命评估。

1.2 S-N 曲线

S-N 曲线是疲劳寿命预测的基础,它表示材料在不同应力幅值下能够承受的循环次数,为疲劳寿命预测提供理论依据。在振动疲劳寿命分析中, S-N 曲线常用幂函数形式表征应力幅值与疲劳寿命之间的定量关系,其通常通过实验获得,如图 1 所示,其中横轴是循环次数,纵轴是应力幅值。

幂律关系公式为

$$S^m \cdot N = C \quad (2)$$

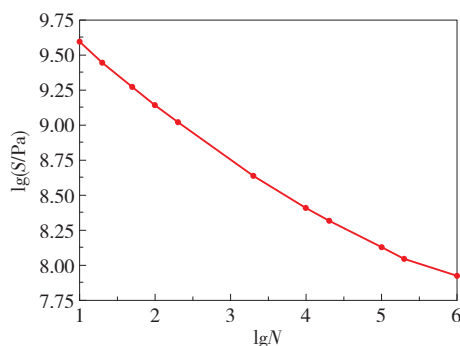


图 1 S-N 曲线

Fig. 1 S-N curve

式中, m 、 C 为常数,与材料性质相关; S 为应力; N 为循环数。

1.3 时域雨流计数法

采用时域方法计算管道的应力时间历史曲线,随后将雨流计数法和累积损伤理论相结合,获得振动引起的疲劳损伤。在时域法中,雨流计数法是处理随机载荷历程的核心工具,其通过提取非规则载荷中的等效循环块,为 Miner 线性累积损伤理论提供输入数据。

基于时域雨流计数法的疲劳振动监测需要用到应力幅值,可开展管道振动实验,通过三轴应变花组成一个半桥和一个全桥的接线方式来获取应变数据,接线方式如图 2 所示。 a 、 a' 、 b 、 b' 、 c 、 c' 为应变片编号, R 和 R' 为桥路中的固定电阻, E 为电桥激励电压, e_o 为电桥输出电压。其中,半桥由应变片 b 、 b' 与固定电阻 R 、 R' 组成,全桥由应变片 a 、 a' 、 c 、 c' 组成。再利用雨流计数法得到应力幅直方图,从而实现管道的疲劳损伤及寿命预测的计算。

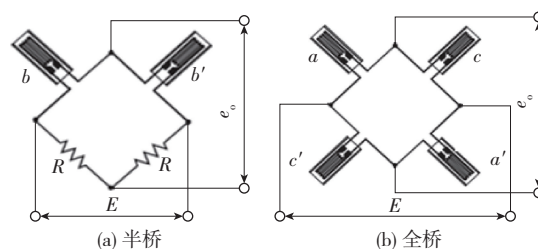


图 2 应变片接线方式

Fig. 2 Strain gauge wiring configurations

1.4 频域法振动疲劳监测

频域法疲劳振动的监测需要应力功率谱密度提供的应力水平来实现。通过管道振动实验获取工业管道测量点振动加速度数据,并使用改进窗函数对真实加速度数据进行过滤和优化处理,得到等效加速度 PSD,突出与疲劳损伤相关的振动特征,再利用有限元频响分析方法求得工业管道振动加速度功率谱向应力功率谱转换的传递函数^[13],将传递函数的平方与加速度功率谱信号相乘,得到应力功率谱信号。

$$S_y(\omega) = |H(\omega)|^2 G(\omega) \quad (3)$$

式中, $S_y(\omega)$ 为应力功率谱密度函数; $G(\omega)$ 为加速度功率谱密度函数; $H(\omega)$ 为传递函数。

再通过惯性矩为管道评价及寿命分析方法传递应力功率谱应力信息,应力功率谱的四阶谱矩表示为

$$m_i = \int_0^\infty f^i G(f) df \quad (4)$$

式中, f 为频率, i 为阶数。

2 管道振动寿命预测方法

2.1 等效加速度功率谱

2.1.1 窗函数优化

根据获取的工业管道测量点振动加速度数据,从时间历史直接计算 PSD 会由于时间序列中的干扰导致多个量级的误差。为了使结果独立于信号的长度和采样频率,需要对幅值平方进行归一化处理,更好地获得信号的能量在频域中的分布情况。PSD 表达式为

$$A(f) = \frac{|X(f)|^2}{N \cdot \Delta f} \quad (5)$$

式中, $X(f)$ 为快速傅里叶变换幅值; N 为信号的采样点数; Δf 为频率分辨率,即每个频率间隔。

在快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)计算中,由于时域信号通常是有限长的,信号并不会严格遵守周期性条件。这种情况下会产生频谱泄漏现象,即能量从一个频率扩散到相邻的频率,从而导致频谱不够精确。这种现象会导致高频成分的能量分布不准确,影响对振动特征的分析。为了解决频谱泄漏的问题,对频域信号进行窗函数平滑处理,以减小泄漏效应,得到更精确的功率谱密度。窗函数表达式为

$$\omega(n) = 0.5 \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi n}{N-1} \right) \right), 0 \leq n \leq N-1 \quad (6)$$

式中, $\omega(n)$ 为第 n 个窗函数值; N 为窗函数的长度(即信号样本点的数量); n 为当前的样本点索引。

汉恩窗的权重值从两端开始逐渐减小,中心部分的权重值较大,呈现出一个平滑的余弦曲线形状。采用汉恩窗对信号进行加窗处理的方式减少了截断带来的边界效应,降低了频谱泄漏,操作步骤如下:

1) 计算出每个样本点的窗函数值 $\omega(n)$;

2) 将汉恩窗 $\omega(n)$ 应用于信号的每个点,即将原始信号的每个样本乘以相应的窗函数值

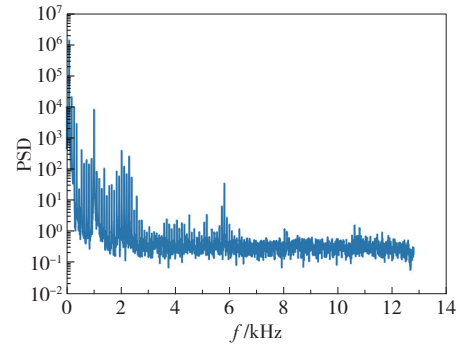
$$x_{\omega}(n) = x(n) \cdot \omega(n) \quad (7)$$

式中, $x_{\omega}(n)$ 为加窗后的信号; $x(n)$ 为原始信号。

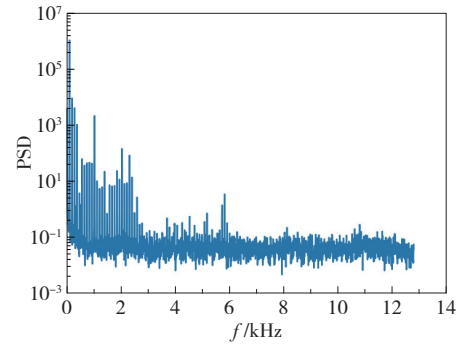
经过窗函数处理后,加速度信号的功率谱密度更为平滑,可减少低频部分的干扰,如图3所示。等效加速度 PSD 保留了振动信号的主要频率成分,并去除了不必要的频谱泄漏效应。

2.1.2 函数参数自适应调整

固定参数的窗函数难以有效抑制频谱泄漏,因



(a) 真实PSD



(b) 等效PSD

图3 加速度 PSD

Fig. 3 Acceleration power spectral density

此采用窗函数参数自适应调整方式,以最大限度保留时频转换信息,具体调整步骤如下。

1) 频段能量分布分析 将连续振动信号按固定时长分割为短时段,相邻帧之间可部分重叠,以减少边缘效应。对每帧信号进行傅里叶变换,生成短时能量谱,计算各频段的能量占比。

2) 窗长选择 根据信号频谱中低频与高频成分的能量占比,自适应选择合适的窗函数长度。在低频成分占主导的情况下,为保证频率分辨率,优先采用较长窗长;而当高频能量波动显著时,则采用较短窗长以增强对瞬时变化的响应能力。高频波动的识别通过滑动窗口内能量分布的统计特征判断:当高频段能量超过其历史均值的若干倍标准差(本研究中取3倍)时,视为瞬时高频突增。

3) 效率提升 为避免窗长切换导致计算延迟,采用滑动窗口缓存机制,预加载不同窗长配置。

2.2 管道振动疲劳损伤寿命预测模型

本文建立基于频域法的工业管道疲劳寿命预测模型。该模型首先通过分析管道振动应力功率谱信号,构建频域概率幅值密度函数模型;其次,基于该模型推导载荷信号的雨流范围概率密度函数;最后,结合管道材料的疲劳性能曲线(S-N曲线)建立疲劳损伤累积模型,实现载荷信号的疲劳寿命估

计,通过 PSD 的统计特征估算雨流载荷分布,雨流范围概率密度函数表示为

$$p(S) = \frac{\frac{A}{Q} e^{\frac{-Z}{Q}} + \frac{EZ}{R^2} e^{\frac{-Z^2}{2R^2}} + GZe^{\frac{-Z^2}{2}}}{2\sqrt{m_0}} \quad (8)$$

式中, A 、 E 、 G 、 Q 、 R 均为经验参数; m_0 为 0 阶谱矩; Z 为应力相关参数,有

$$Z = \frac{S}{2\sqrt{m_0}} \quad (9)$$

经验参数表示为

$$A = \frac{2(\chi_m - \gamma^2)}{1 + \gamma^2} \quad (10)$$

$$E = \frac{1 - \gamma - A + A^2}{1 - R} \quad (11)$$

$$G = 1 - A - E \quad (12)$$

$$Q = \frac{1.25(\gamma - G - ER)}{A} \quad (13)$$

$$R = \frac{\gamma - \chi_m - A^2}{1 - \gamma - A + E^2} \quad (14)$$

式中, γ 为谱型不规则因子; χ_m 为谱宽修正系数。 γ 与 χ_m 表达式为

$$\gamma = \frac{m_2}{\sqrt{m_0 m_4}} \quad (15)$$

$$\chi_m = \frac{m_1}{m_0} \sqrt{\frac{m_2}{m_4}} \quad (16)$$

获得应力循环幅值的概率密度函数后,便可确定式(1)中 n_i 的表达形式

$$n_i = E(P) \cdot T \cdot p(S) \cdot \Delta S_i \quad (17)$$

$$E(P) = \sqrt{\frac{m_4}{m_2}} \quad (18)$$

式中, $E(P)$ 为峰值应力的期望值; T 为寿命值; $p(S)$ 为概率密度函数; ΔS_i 为不同的应力幅值; m_1 为一阶谱矩; m_2 为二阶谱矩; m_4 为四阶谱矩。

结合 S-N 曲线,可以得到损伤的估计值为

$$D = E(P)TC^{-1} \sum_{i=1}^{+\infty} S_i^m p(S_i) \Delta S_i \quad (19)$$

当 ΔS_i 趋近于 0 时,可以改写成积分形式

$$D = E(P)TC^{-1} \int_0^{+\infty} S^m p(S) dS \quad (20)$$

在随机载荷作用下,载荷加载的顺序效应相对不明显,通常认为当结构累积疲劳损伤达到 $D = 1$ 时即发生疲劳破坏,可以推出寿命公式为

$$T = \frac{C}{E(P) \int_0^{+\infty} S^k p(S) dS} \quad (21)$$

式中, S 为不同的应力幅值; C 为材料疲劳特性参数。

之后开展时域雨流计数法与频域疲劳损伤评估方法的对比分析。基于同步采集的工业管道振动信号样本集,分别采用时域雨流计数法和频域方法进行疲劳损伤计算。误差计算公式为

$$Error = \frac{|L_{freq} - L_{time}|}{L_{time}} \times 100\% \quad (22)$$

式中, L_{freq} 和 L_{time} 分别表示根据频域和时域方法计算出的寿命值。

为更加客观地衡量各方法在寿命估算中的准确性,引入平均绝对误差(mean absolute error, MAE)指标,度量预测结果与时域雨流计数结果之间的偏差程度。该指标定义如下。

$$E_{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{method,i} - T_{sy,i}) \quad (23)$$

式中, n 为指标数量; $T_{method,i}$ 为各个频域方法寿命值; $T_{sy,i}$ 为时域方法寿命值。

2.3 管道振动疲劳损伤寿命预测方法

本文所提出的等效 PSD 方法基于动态窗长调整机制,自适应分析信号能量分布,在保留信号主频特征的同时有效抑制频谱泄漏。该等效 PSD 不再是简单加窗,而是一种能量守恒下的窗函数自适应滤波机制,具有保真度更高的应力谱估计能力。寿命预测流程图如图 4 所示。

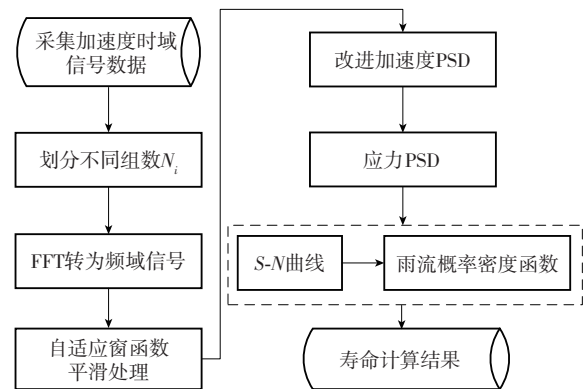


图4 寿命预测流程图

Fig. 4 Life prediction flowchart

具体预测步骤如下:

- 1) 采集管道振动加速度时域信号数据集;
- 2) 选取不同的组数 N , 计算不同组数预测寿命结果;
- 3) 将不同组数 N_i 时域信号通过傅里叶变换转换到频域;
- 4) 采用自适应窗函数平滑处理, 得出改进的加

- 速度 PSD 以减少频谱泄漏;
- 5)提取应力功率谱应力分布特征;
- 6)采用雨流概率密度函数表征随机振动信号的幅值分布特征;
- 7)基于应力幅值分布、材料疲劳特性 $S-N$ 曲线和雨流概率密度函数计算寿命。

3 实验与结果分析

3.1 管道振动实验台搭建

基于 Ansys 仿真平台构建管道振动实验台虚拟实验系统,如图 5 所示。基于模态叠加法开展谐响应分析,以确定结构在周期激励下的稳态振动特性及频率响应函数,依据模态分析获取前六阶固有频率^[14],施加幅值 9.8 m/s^2 的线性分布加速度载荷来表征材料衰减特性。在 Ansys 中,通过频率响应分析提取加速度-应力之间的传递函数,用于后续应力功率谱估算。根据仿真实验结果得出的断裂部位、寿命估计等参数搭建管道振动物理实验台,从而开展实验获取加速度振动信号来验证所提方法的精确性。

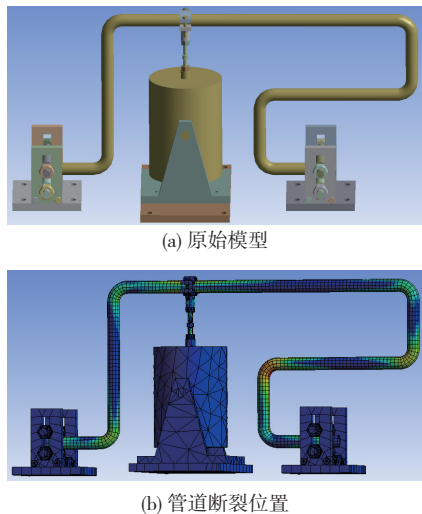


图 5 管道振动有限元模型

Fig. 5 Finite element model of pipeline vibration

该实验台由激振系统、信号发生系统和数据采集系统 3 部分组成,如图 6 所示。固定好激振器和管道,完成激振系统布置,再通过信号发生系统中的信号发生器、功率放大器提供激振动力,调节信号激振频率,最后利用数据采集卡和采集软件实现数据信号的采集、传输和存储。主要器材选用如表 1 所示。

3.2 数据验证

基于所构建的管道振动实验台开展管道振动

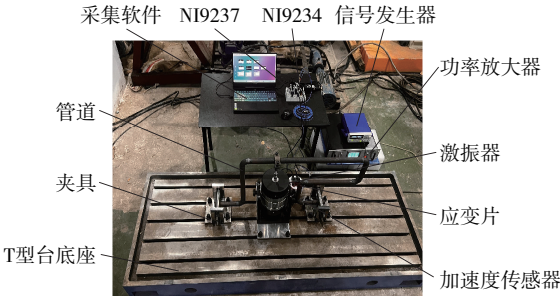


图 6 管道振动疲劳监测实验台

Fig. 6 Pipeline vibration fatigue monitoring test bench

表 1 实验台主要器材选用

Table1 Main equipment selection for the test bench

器材名称	型号	厂家
管道	20 号钢 $\varnothing 32 \times 1.5$ (单位 mm)	天津硕文
信号发生器	TFG1905B	数英
功率放大器	GF-2000W	宏远测振
激振器	JZ-50	宏远测振
数采装置	NI cDAQ	美国 NI 公司

全寿命周期实验,并完成数据采集和存储工作。本文在精度提升计算中主要选取 Dirlik 方法^[15]作为参考基准。一方面,Dirlik 模型因其封闭解析形式和工程适用性,已广泛应用于工业疲劳预测,是最具代表性的频域方法;另一方面,Dirlik 模型在多组实验中预测误差处于中上水平^[16-17],具备较强的对比代表性。因此,本文将其作为主要参考对象进行提升率计算。同时,针对文献[18]、[19]中的典型模型,也引入 MAE 误差分析进行横向评估。为验证所提方法在相同工况条件下的稳定性与重复性,开展了 3 组重复实验,均施加 100 N 激振力。

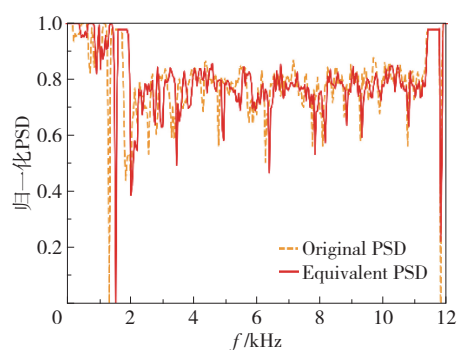
(1)第一组实验

第一组实验的频谱泄露减少分析如图 7 所示。图 7(a)为传统 PSD 与改进 PSD 对比,图 7(b)为各频率频谱泄露削减量。从图 7 中可以看出,等效 PSD 在多个频率点均表现出泄露消减效果。计算得出平均泄露减少率为 7.85%。最大消减峰出现在 1.6 kHz,说明该频率点附近泄露消减最为明显,其他频率位置也存在不同程度的消减。

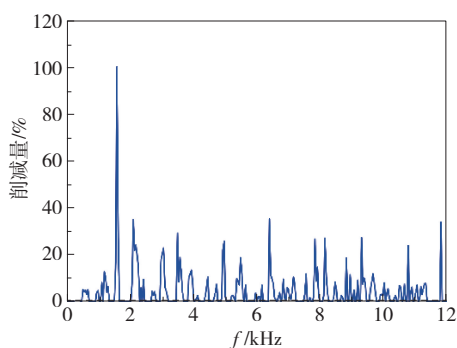
从表 2 可以看出,基于等效加速度 PSD 计算的方法与时域雨流计数法结果较为接近,体现出本文方法较好的预测结果。精度在各个阶段相对于 Dirlik 法均有所提升,最高提升了 10.42%。

(2)第二组实验

第二组实验的频谱泄露减少分析如图 8 所示。



(a) PSD对比



(b) 频谱泄露削减量

图7 第一组实验的频谱泄露

Fig. 7 Spectral leakage of the first group

表2 第一组实验的时频域方法寿命预测对比

Table 2 Comparison of life prediction using time-frequency domain methods for the first group

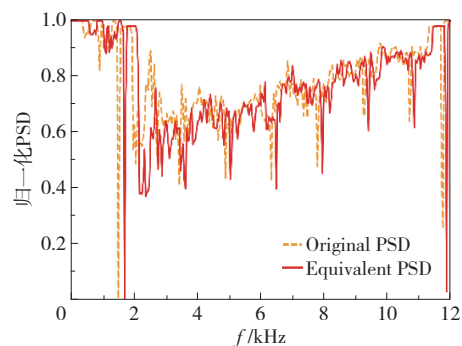
方法	寿命/s		
	$N=100$	$N=400$	$N=700$
Dirlik	27 307	27 051	26 944
[18]	27 303	27 070	26 893
[19]	27 390	27 388	27 384
本方法	27 250	26 964	26 832
时域	26 589	24 246	21 115
精度提升率/%	7.94	3.10	10.42

计算得出平均泄露削减率为 11.76%，主要削减峰出现在 1.7 kHz 和 12.0 kHz，其他频率位置也存在不同程度的削减。

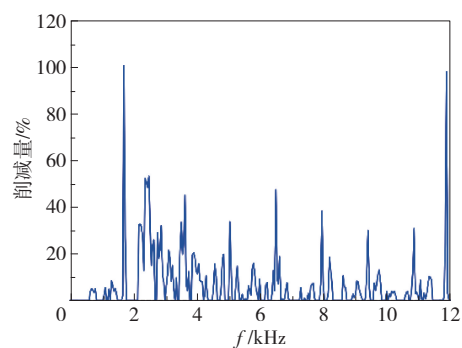
从表 3 可以看出，基于等效加速度 PSD 计算的方法与时域雨流计数法较为接近，体现出本文方法较好的预测结果。在各个阶段精度相对于 Dirlik 法均有所提升，最高提升了 2.30%。

(3) 第三组实验

第三组实验的频谱泄露减少分析如图 9 所示。计算得出平均泄露削减率为 6.84%，最大削减峰出



(a) PSD对比



(b) 频谱泄露削减量

图8 第二组实验的频谱泄露

Fig. 8 Spectral leakage of the second group

表3 第二组实验的时频域方法寿命预测对比

Table 3 Comparison of life prediction using time-frequency domain methods for the second group

方法	寿命/s		
	$N=100$	$N=300$	$N=500$
Dirlik	14 740	12 710	464
[18]	14 750	12 681	463
[19]	15 226	14 789	907
本方法	14 722	12 629	462
时域	12 403	9 186	260
精度提升率/%	0.77	2.30	0.98

现在 11.8~12.0 kHz, 1.5 kHz 处也存在较明显的削减峰，其他频率位置也存在不同程度的削减。

从表 4 可以看出，基于等效加速度 PSD 计算的方法与时域雨流计数法较为接近，体现出本文方法较好的预测结果。在各个阶段精度相对于 Dirlik 法均有所提升，最高提升了 5.17%。

剔除最小值 0.13% 与最大值 10.42% 后，其余 7 组数据的平均预测精度提升率为 3.53%。在本文 3 组实验中，各频域方法的平均相对误差分别为 Dirlik 方法的 893.78 s、文献 [18] 方法的 897.67 s、文献 [19] 方法的 2 553.00 s 以及本文方法的

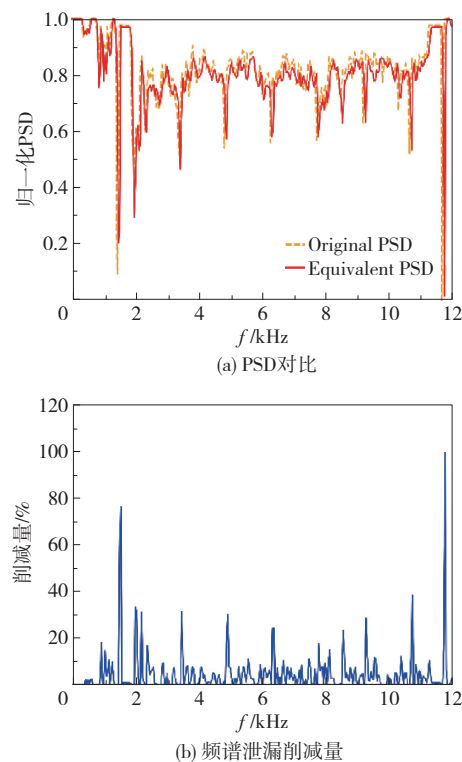


图9 第三组实验的频谱泄漏

Fig. 9 Spectral leakage of the third group

表4 第三组实验的时频域方法寿命预测对比
Table 4 Comparison of life prediction using time-frequency domain for the third group

方法	寿命/s		
	<i>N</i> =100	<i>N</i> =800	<i>N</i> =1 500
Dirlik	36 828	22 570	4 496
[18]	36 776	22 533	4 561
[19]	47 146	35 119	8 662
本方法	37 354	22 575	4 585
时域	48 567	26 557	6 219
精度提升率/%	4.48	0.13	5.17

850.89 s。可知本文方法在所有频域方法中具有最小的平均绝对误差,较Dirlik模型误差明显降低,体现出更优的拟合能力与预测稳定性。

目前针对工业管道疲劳预测尚缺少公开标准数据集作为多类方法对比依据,导致近年来深度学习方法虽广泛应用于轴承、焊点等场景,但尚未大规模用于非平稳振动下的工业管道寿命预测。鉴于此,本研究当前阶段专注于经典频域方法的优化验证,并已在3组实验中体现出预测精度的提升,后续将引入长短期记忆网络等方法开展系统性对比,拓展研究深度。

4 结论

(1)提出了一种结合窗函数自适应机制与频响传递函数的等效PSD计算方法,构建了工业管道振动加速度向应力谱的频域转换模型,旨在提高应力谱估算的保真度与抗干扰能力。

(2)通过动态窗长调整机制,提升了信号频谱的精度,有效抑制了频谱泄漏问题。与传统频域方法相比,在剔除异常点后,预测精度平均提升达3.53%;在3组实验的MAE误差评估中,本文方法的平均绝对误差最低,验证了其在工业管道寿命预测中的适用性。

参考文献:

[1] VIEIRA R E, SHIRAZI S A. A mechanistic model for predicting erosion in churn flow[J]. *Wear*, 2021, 476: 203654.

[2] HUANG J, ZHOU Z D, ZHANG L, et al. Strain modal analysis of small and light pipes using distributed fibre Bragg grating sensors[J]. *Sensors*, 2016, 16(10): 1583.

[3] ZIEGLER L, COSACK N, KOlios A, et al. Structural monitoring for lifetime extension of offshore wind mono-piles: verification of strain-based load extrapolation algo-rithm [J]. *Marine Structures*, 2019, 66: 154–163.

[4] KOYUNCU A, GÖKLER M I, BALKAN T. Develop-ment of a design verification methodology including strength and fatigue life prediction for agricultural tractors [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 60(5–8): 777–785.

[5] PALIN-LUC T, BANVILLET A, VITTORI J F. How to reduce the duration of multiaxial fatigue tests under pro-portional service loadings [J]. *International Journal of Fatigue*, 2006, 28(5–6): 554–563.

[6] 隋国浩,阎善腾,杨永博,等. 航空液压管路系统振动疲劳寿命评估的响应谱方法[J]. *装备环境工程*, 2024 (9):1–10.

SUI G H, YAN S T, YANG Y B, et al. Response spec-trum method for vibration fatigue life assessment of aero-hydraulic pipelines[J]. *Equipment Environmental Engi-neering*, 2024 (9): 1–10. (in Chinese)

[7] UBULOM I. Application of spectral method for vibration-induced high-cycle fatigue evaluation of an high-pressure turbine blade [J]. *Journal of Engineering for Gas Tur-bines and Power-Transactions of the ASME*, 2021, 143 (6): 061023.

[8] WIRSCHING P H, LIGHT M C. Fatigue under wide band random stresses[J]. *Journal of the Structural Divi-*

- sion, 1980, 106(7): 1593–1607.
- [9] BENASCIUTTI D, TOVO R. Spectral methods for life-time prediction under wide-band stationary random processes [J]. *International Journal of Fatigue*, 2005, 27(8): 867–877.
- [10] XIA J, SHEN Z H, PENG Q, et al. Frequency-domain lifetime prediction methods for the PoP under wide-band random vibration loading [C] // 2018 19th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). Shanghai, 2018: 648–651.
- [11] RYCHLIK I. Fatigue and stochastic loads[J]. *Scandinavian Journal of Statistics*, 1996, 23: 387–404.
- [12] 刘奥, 滕云楠. 航空发动机外部管路振动疲劳寿命估算方法研究综述[J]. *真空*, 2023, 60(1): 76–79.
- LIU A, TENG Y N. Review on vibration fatigue life estimation methods of aero-engine external pipelines [J]. *Vacuum*, 2023, 60(1): 76–79. (in Chinese)
- [13] GAO C H, WANG M Y, SIMA Y F, et al. Modeling and simulation analysis of double shaking table system [J]. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2025, 13: 70.
- [14] WU J, WAN L H, LIU H, et al. Fatigue life simulation of high-pressure injection-production pipeline based on nCode Designlife [J]. *Steel Research International*, 2025, 96(6): 2400624.
- [15] DIRLIK T. Application of computers in fatigue analysis [D]. Coventry: University of Warwick, 1985.
- [16] SANTHARAGURU N, ABDULLAH S, CHIN C H, et al. Failure behaviour of strain and acceleration signals using various fatigue life models in time and frequency domains [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 139: 106454.
- [17] NIESLONY A, RŮŽIČKA M, PAPUGA J, et al. Fatigue life prediction for broad-band multiaxial loading with various PSD curve shapes [J]. *International Journal of Fatigue*, 2012, 44: 74–88.
- [18] TOVO R. Cycle distribution and fatigue damage under broad-band random loading [J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, 24(11): 1137–1147.
- [19] ZHAO W W, BAKER M J. On the probability density function of rainflow stress range for stationary Gaussian processes [J]. *International Journal of Fatigue*, 1992, 14(2): 121–135.

Prediction of the fatigue damage life of industrial pipelines based on the equivalent power spectral density (PSD)

XING Zhou¹ TU Yun² WANG QingFeng^{1*}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2. School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: To address the challenges of flow-induced vibration monitoring and prevention in typical industrial pipelines, a method for predicting fatigue life based on the equivalent power spectral density is proposed. First, a fatigue monitoring model is established, and a pipeline vibration test bench is constructed through simulation. Using experimental results as examples, fatigue life estimates are calculated using both the time-domain rain-flow counting method and frequency-domain methods, and their performances are compared. The results show that the frequency-domain method based on equivalent acceleration power spectral density effectively reduces spectral leakage and provides better prediction of fatigue life for pipelines than traditional frequency-domain approaches. On average, the prediction accuracy improves by 3.53%, and the mean prediction error is the lowest. This study offers an effective approach for predicting the remaining fatigue life of industrial pipelines and offers a novel method for fatigue damage assessment.

Key words: fatigue damage; equivalent power spectral density (PSD); life prediction; pipeline; frequency-domain method

(责任编辑:吴万玲)