

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.02.08

金属结构件周期性疲劳试验数据峰值检测与修正方法

郭蔡果荟, 于翀*, 刘宇恒, 李博, 张鹤宇

(中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 在金属结构件周期性疲劳试验领域, 现有数据峰值检测与修正方法进行大量数据处理时存在效率低、适应性差等不足。针对此问题, 使用光纤光栅应变传感器对某金属结构件进行健康监测, 以疲劳试验过程中的数据为基础, 首先解决了因光谱畸变导致的数据错误问题, 随后提出一种周期性疲劳试验数据峰值检测与修正方法。此方法利用数据周期性进行峰值预测, 结合频域分析与统计判据实现对试验数据峰值、谷值的快速检测与修正。试验结果显示: 相较滑动窗口极值法、小波变换峰值检测法、K近邻(K-Nearest Neighbors, KNN)密度峰值检测法, 本文提出的方法检测准确性更高、用时更短, 能够更有效地实现数据修正。该方法为实现飞机结构健康监测、疲劳寿命评估等领域的高效数据峰值检测与修正提供了有力支撑。

关键词: 结构健康监测; 疲劳试验; 数据处理; 峰值检测; 小波分解; 周期性; 大数据量; 光谱畸变

中图分类号: V21; TG115; TB9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2026) 02-0101-08

Peak data detection and correction method for periodic fatigue test of metal structural components

GUO Caiguohui, YU Chong*, LIU Yuheng, LI Bo, ZHANG Heyu

(AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: In the field of periodic fatigue tests on metal structural components, existing data peak detection and correction methods suffer from low efficiency and poor adaptability in massive data processing. To address this issue, this study employs fiber Bragg grating strain sensors for the health monitoring of a metal structural component. Based on the data collected during fatigue tests, the problem of data errors caused by spectral distortion is resolved first. Subsequently, a peak data detection and correction method tailored for periodic fatigue test is proposed, which predicts peaks by utilizing the periodicity of data and achieves rapid detection and correction of peaks and valleys from the test data by combining frequency-domain analysis with statistical criteria. Comparative experimental results demonstrate that, compared with the sliding window extremum method, wavelet transform peak detection method, and K-nearest neighbors (KNN) density peak detection method, the method proposed in this paper exhibits higher detection accuracy and shorter processing time, enabling more effective data correction. This method provides strong support for efficient peak data detection and correction in the areas such as aircraft structural health monitoring and fatigue life evaluation.

Key words: structural health monitoring; fatigue test; data processing; peak detection; wavelet decomposition; periodicity; massive data; spectral distortion

收稿日期: 2025-11-13; 修回日期: 2026-01-07; 录用日期: 2025-01-14; 发表日期: 2026-04-28

基金项目: 航空科学基金项目(2023Z061044001)

引用格式: 郭蔡果荟, 于翀, 刘宇恒, 等. 金属结构件周期性疲劳试验数据峰值检测与修正方法[J]. 计测技术, 2026, 46(2): 101-108.

Citation: GUO C G H, YU C, LIU Y H, et al. Peak data detection and correction method for periodic fatigue test of metal structural components[J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(2): 101-108.



0 引言

飞机结构在服役中会承受交变载荷,飞机起降、高速机动、外部气流扰动等都会导致疲劳损伤积累。全机疲劳试验是“积木式”验证试验体系的顶层,通过在实验室模拟这些载荷,来验证结构的疲劳强度和耐久性,发现潜在的设计薄弱环节,并为维修大纲制定提供依据^[1]。航空结构件的周期疲劳载荷数据是这些试验的基础,其峰值/谷值的准确性直接影响疲劳寿命预测和损伤评估的可靠性。在疲劳试验中,疲劳载荷的施加方式往往为循环加载。当航空结构的设计使用寿命较长时,其疲劳试验持续时间也较长、加载循环次数增多,导致由试验产生的数据量也较大^[2]。疲劳试验过程中,计算结构应变、载荷的常用方法之一,是在进行疲劳试验数据分析时对试验数据的峰值与谷值进行检测,计算峰值与谷值之差以换算应变、载荷等参数,该方法已应用于基于应变的结构健康监测、温度补偿等领域^[3]。

YU M G 等人^[4]采用希尔伯特包络检测法结合基于微分器的并行峰值检测器,实现了对超声波流量计测试数据的峰值检测。TOUATI D E 等人^[5]针对片上系统的热可靠性问题,提出一种用于检测温度传感器热峰数据的算法,通过监测热峰值与位置判断片上系统的安全状态。师伟展等人^[6]先对原始数据进行分段处理,并将分段数据中大于两倍分段数据标准差的数据确定为分段数据对应的待判断数据;随后对待判断数据进行曲线拟合,得到分段数据对应的曲线函数,提取曲线函数的极大值点作为分段数据对应的峰值点;最后根据各分段数据对应的峰值点,确定原始数据的峰值。魏烈祥等人^[7]通过对原始数据进行双重模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)交替采样、 $\text{Sinc} \sim x$ 滤波器滤波、数据校准寄存器校准、模拟看门狗检测等处理,得到一至四级采样数据,最后通过极值寄存器对处理得到的数据进行极值检测。刘旋等人^[8]基于K最近邻算法,实现了基于逆K最近邻的密度峰值异常检测方法,该方法能够排除噪声点、降低连带错误效应,可自适应得到最终的异常点集即峰值点集。李肃义等人^[9]提出一种光电容积脉搏

信号的峰值点自动识别方法,基于小波多分辨率分析原理校正影响脉搏波峰幅值的基线干扰,再利用二次样条小波模极大算法自动识别峰值点。钟慧婷等人^[10]研究了采样频率、多项式拟合与指数拟合对峰值检测及修正的误差影响,但未提出准确的峰值检测及修正方法。姚予木等人^[11]针对奇偶拐点高斯分解法在全波形数据处理中存在的精度不足的问题,提出一种基于有效峰值修正的全波形数据处理算法,根据峰值信息修正高斯分量参数,实现对高斯分量幅值信息的有效判别。

上述方法实现了对多种实验设备、系统的峰值检测及状态判断,并通过算法实现了误差修正,但是未考虑疲劳试验中由周期性导致的相关问题。当疲劳试验数据具有明显的周期性特征时,部分方法进行数据处理时缺乏显式建模,易将正常周期性峰值误判为异常点,导致峰值丢失^[12]。在自动化要求较高的航空结构试验中,上述方法缺乏普适性且计算资源消耗大,难以实时处理大规模数据。同时,由于疲劳试验中振动干扰、电缆异常连接等问题的存在,试验数据中会存在毛刺、突变等异常数据,现有的峰值检测方法对大量数据进行峰值提取时准确性较低,甚至需要人工手动筛选部分数据,以保证峰值、谷值不丢失。

针对现有方法处理航空结构试验领域大量数据时存在的效率低、适应性差等问题,本研究团队提出一种金属结构件周期性疲劳试验数据峰值检测与修正方法。基于数据周期性进行峰值预测,采用前序峰值均值与标准差作为判据,结合二次曲线拟合局部优化,高效区分真实峰值与毛刺噪声。分别利用滑动窗口极值法、小波变换峰值检测法、K近邻(K-Nearest Neighbors, KNN)密度峰值检测法、本文提出的方法开展试验,并对比实验结果,验证本文方法的有效性。

1 疲劳试验数据预处理

1.1 疲劳试验系统搭建

以含单孔的铝合金板模拟飞机结构中机翼蒙皮或机身壁板等结构,试验件材料为2A12铝合金,厚度为3 mm,其几何尺寸如图1所示。所用应变传感器为光纤光栅传感器,光纤光栅传感器布设

示意图如图2所示。

疲劳加载试验系统包括光纤光栅应变传感器、LFV-100 kN 疲劳试验机、光纤光栅解调仪、计算机、光纤光栅应变采集软件，载荷形式为等幅疲劳载荷。试验系统如图3所示。

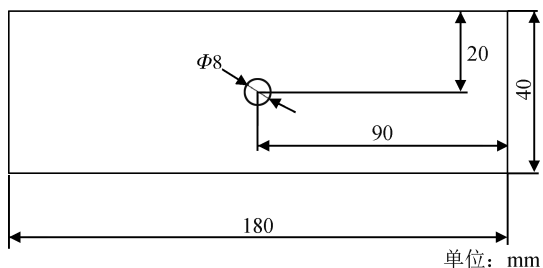


图1 试验件几何模型

Fig.1 Geometric model of the test piece

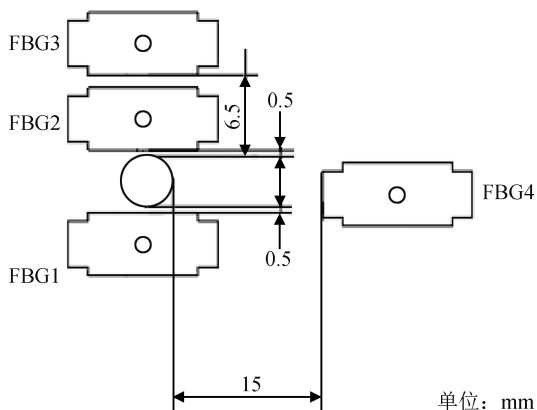


图2 光纤光栅传感器布设示意图

Fig.2 Schematic diagram of fiber Bragg grating sensor layout



图3 疲劳加载试验系统

Fig.3 Fatigue loading test system

1.2 数据预处理

在疲劳加载试验过程中，光纤光栅应变传感器FBG3采集的数据如图4所示。本文重点介绍周期性疲劳试验数据峰值、谷值检测及修正方法，所以对疲劳试验数据变化形式及相关的力学机理不再赘述。疲劳加载试验中施加的疲劳载荷为等

幅正弦载荷，图4中的试验数据内部为图5所示的正弦曲线。

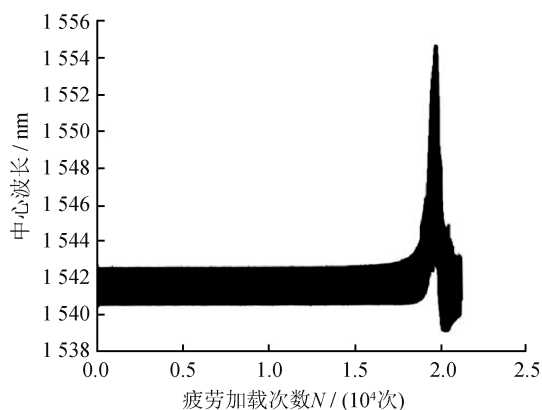


图4 FBG3采集的数据

Fig.4 Data collected by FBG3

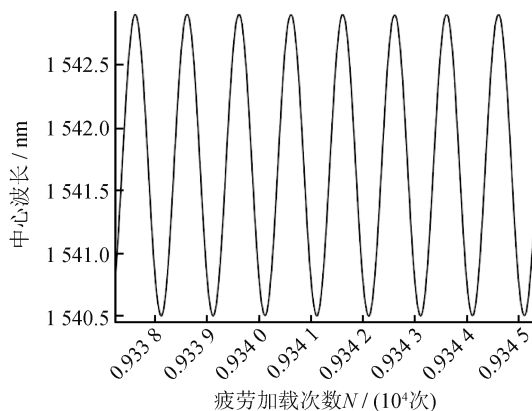


图5 试验数据内部曲线

Fig.5 Internal curve of experimental data

利用光纤光栅传感器进行结构健康监测时，光纤光栅传感器的光栅在疲劳载荷的作用下会产生微裂纹，进而使其光谱发生畸变^[13-14]。光谱畸变主要导致光谱的主瓣宽度增加、主瓣幅值变小及旁瓣幅值变大。当旁瓣幅值增大到与主瓣幅值接近时，解调仪对中心波长的解调会发生错误，导致数据错误^[15]。试验数据内部数据错误如图6所示。

数据错误问题主要由光栅自身疲劳引起，所以主要发生在试验中后期阶段。若不对数据错误问题进行预处理，会影响应变数据整体变化趋势，导致峰值/谷值提取出现异常。针对这一问题，结合光纤光栅传感器采集的中心波长数据特点，本文提出一种基于小波分解与峰度检测的数据错误恢复算法，具体步骤为：

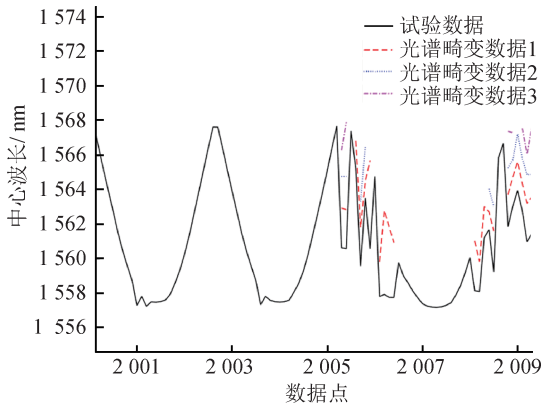


图6 试验数据内部数据错误

Fig.6 Internal data misalignment in experimental data

1) 对疲劳试验数据整体进行小波分解, 提取其高频分量。数据错误的判断主要依赖于对高频分量统计特征的量化分析, 即峰度检测法。首先计算高频分量在滑动窗口内的峰度值, 以表征信号分布的尖锐程度, 进而识别毛刺; 再基于大量历史试验数据在不同信噪比条件下的统计分布特征确定阈值。对于一个给定的滑动窗口, 计算高频系数序列的峰度值, 当峰度值超过由历史数据确定的阈值时, 则判定该窗口内出现了由光谱畸变引起的明显毛刺, 发生了数据错误。

2) 通过傅里叶变换获取试验数据的频率 f , 根据式(1)计算试验数据的周期 T 。

$$T = \frac{1}{f} \quad (1)$$

3) 以当前周期内数据的最大值作为此周期内的峰值, 以当前周期内数据的最小值作为此周期内的谷值(根据光纤光栅传感理论, 旁瓣幅值一般小于主瓣幅值)。

4) 将前一周期内无数据错误且剔除最大值、最小值后的有效数据, 移植到出现数据错误的周期内, 重构发生错误的周期内数据。

通过算法将由于光栅疲劳所引起的错误数据进行还原, 以恢复图5所示的曲线, 完成数据预处理。

2 周期性疲劳试验数据峰值检测与修正

周期性疲劳试验数据峰值检测与修正方法如图7所示, 主要包括试验数据傅里叶变换^[16]、周期计算、曲线拟合、误差判断及修正等步骤, 具体

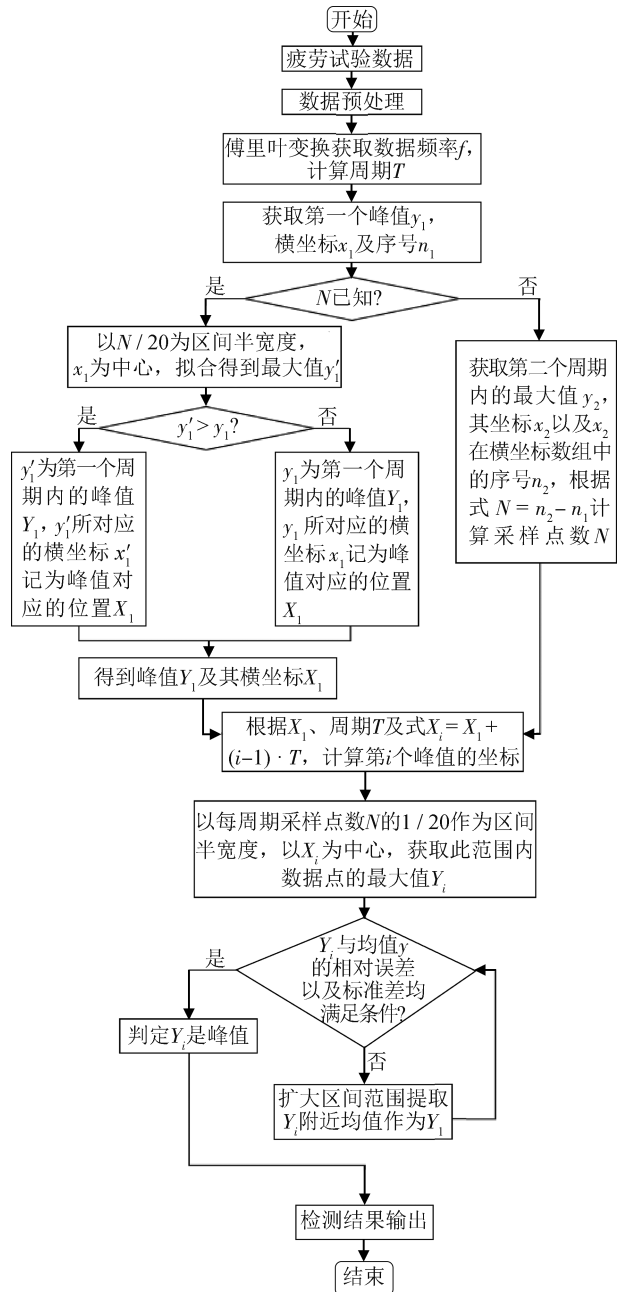


图7 峰值检测与修正方法流程图

Fig.7 Flow chart of peak detection and correction method

流程如下:

1) 根据周期 T 及数值比较, 获取试验数据第一个周期内的数据最大值 y_1 , 以及横坐标 x_1 及 x_1 在横坐标数组中的序号 n_1 。

2) 当采样点数 N 已知时, 以 $N/20$ 作为区间半宽度($N/20$ 为经验公式, 通过对疲劳试验数据的分析得出, 以 $N/20$ 为区间半宽度可包含波形波峰附近的大部分数据点), 横坐标 x_1 为中心, 利用式(2)进行曲线拟合。

$$y = ax^2 + bx + c \quad (2)$$

式中： a 、 b 、 c 为待定参数，由对区间内的数据进行拟合得到。

3) 根据 a 、 b 、 c 的具体数值及式(2)计算拟合曲线的最大值，得到此范围内数据点的拟合最大值 y_1' 。

4) 当拟合最大值 y_1' 大于数据最大值 y_1 时，以 y_1' 作为第一个周期内的峰值 Y_1 ，将 y_1' 所对应的横坐标 x_1' 记为峰值对应的位置 X_1 ；当 $y_1' \leq y_1$ 时，以 y_1 作为第一个周期内的峰值 Y_1 ， y_1 所对应的横坐标 x_1 为峰值对应的位置 X_1 ，实现对 y_1 的判断与修正。

5) 当采样点数 N 未知时，获取第二个周期内的最大值 y_2 ，以及横坐标 x_2 及 x_2 在横坐标数组中的序号 n_2 ，根据 $N = n_2 - n_1$ 计算采样点数 N 。

6) 根据第一个峰值的横坐标 X_1 、周期 T 及 $X_i = X_1 + (i - 1) \cdot T (i \geq 2)$ ，计算得到第 i 个峰值的坐标。

7) 以每周期的采样点数 N 的 $1/20$ 作为区间半宽度， X_i 为中心，利用二次曲线拟合获取此范围内数据点的最大值 Y_i 。

8) 计算前 $i - 1$ 个峰值的均值 y ，以及前 $i - 1$ 个峰值与 Y_i 的标准差 σ 。

9) 根据判断条件对有效峰值进行判断，即有效峰值 Y_i 与前 $i - 1$ 个峰值均值的相对误差 δ 需小于预设的相对误差阈值 δ_{th} ，同时，其与均值的绝对误差值需小于 k 倍的前 $i - 1$ 个峰值的标准差 σ ，其中， k 为根据工程精度要求设定的统计容差系数。当 Y_i 同时满足以上条件时，判定 Y_i 为有效峰值。相对误差阈值 δ_{th} 和统计容差系数 k 的取值，根据具体试验的精度要求(如载荷控制精度、应变测量分辨力)确定。

10) 当 Y_i 不满足上述任一判断条件时，则认为该峰值可能受毛刺或波形畸变影响。计算 Y_i 两侧数据点的均值作为 Y_i ，并重新根据流程9)进行判断。若满足判断条件，则 Y_i 为第 i 个峰值；若依然不满足判断条件，继续扩大区间范围(如以 $N/15$ 、 $N/10$ 、 \dots 作为区间半宽度，直至 $N/2$ 即半个周期时截止)，重新计算。若存在满足判断条件的最大值 Y_i ，将其记为峰值，实现峰值的修正；若均不满足判断条件，则选取以 $N/2$ 为区间半宽度时数据点

的最大值作为峰值，并记录此时的峰值及其横坐标，标记在此周期内试验数据异常，判定试验件可能出现损伤，导致应变数据出现较大峰值。

截取FBG3采集的部分数据，并以数据点(即数据所在行数)为横坐标，以中心波长为纵坐标绘制曲线，如图8所示。

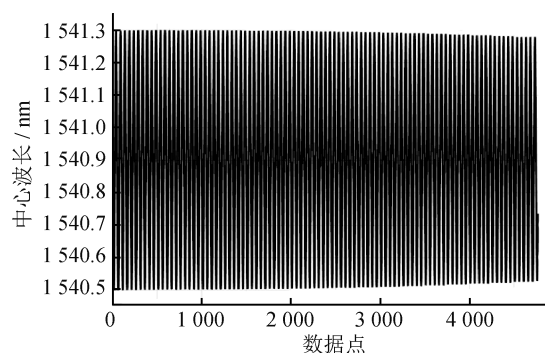


图8 FBG3截取数据

Fig.8 FBG3 intercepts data

以此方法检测并修正得到的峰值、谷值如图9所示，局部放大图如图10所示，图9和图10中红色部分为数据峰值，绿色部分为数据谷值。部分峰值、谷值数据经过修正处理，所以存在部分峰值点、谷值点不在曲线上。

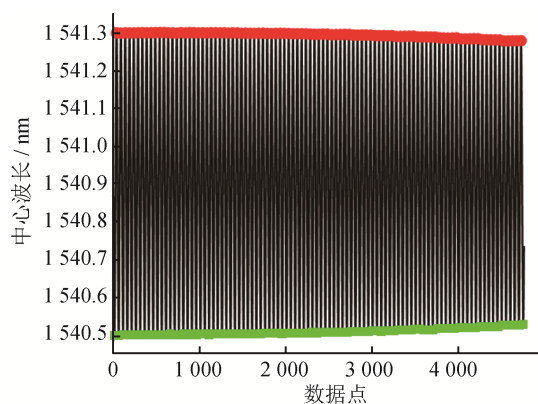


图9 检测并修正得到的峰值、谷值

Fig.9 Peak and valley values detected and corrected

随机选取由此方法检测得到的5组峰值、谷值数据，与试验数据中曲线对应的峰值、谷值进行对比，以相对误差为指标进行评估，结果如表1所示。

表1中，部分检测得到的峰值、谷值与曲线中原来的峰值、谷值存在差异，主要是由于曲线拟合再修正所导致，但表1中数据的相对误差不大，因

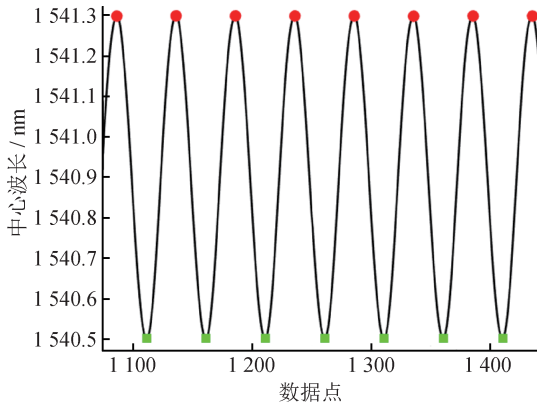


图10 局部放大图

Fig.10 Partial enlarged view

此在实际工程应用中可忽略不计。

以截取的FBG3数据为基础，分别使用目前较

常用的滑动窗口极值法、小波变换峰值检测法、KNN密度峰值检测法及本文提出的峰值检测方法进行峰值、谷值检测，并以峰值误差率、谷值误差率、检测时间以及加权计算评分为指标，对4种检测方法进行对比，结果如表2所示。

滑动窗口极值法、小波变换峰值检测法与KNN密度峰值检测法的检测效果不理想，主要是因为这3种方法缺乏对数据周期性的显式建模，对噪声(尤其是毛刺这种高频噪声)的抗干扰能力不足。本文提出的峰值检测与修正方法在检测具有周期性数据的峰值与谷值时，通过傅里叶变换估计周期，并基于周期提取极值，更能抵抗毛刺干扰，在检测准确性、效率方面具有一定的优势，进一步证明了此方法在峰值、谷值检测方面的有效性。

表1 评估结果

Tab.1 Evaluation results

原始峰值/nm	检测峰值/nm	峰值相对误差/%	原始谷值/nm	检测谷值/nm	谷值相对误差/%
1 541.299 1	1 541.299 0	-0.000 006 49	1 540.500 3	1 540.500 4	0.000 006 49
1 541.298 4	1 541.298 3	-0.000 006 49	1 540.500 5	1 540.500 4	-0.000 006 49
1 541.298 9	1 541.298 9	0	1 540.501 0	1 540.501 0	0
1 541.298 8	1 541.298 8	0	1 540.501 5	1 540.501 5	0
1 541.298 7	1 541.298 7	0	1 540.501 1	1 540.501 0	-0.000 006 49

表2 对比结果

Tab.2 Comparison results

方法	峰值误差率/%	谷值误差率/%	检测时间/s	加权计算评分
滑动窗口极值法	2.7	0	0.12	84
小波变换峰值检测法	0	0	0.02	70
KNN密度峰值检测法	9.4	0.8	0.008	62
周期性疲劳试验数据峰值检测与修正方法	0	0	0.000 9	98

3 结论

本文针对飞机整机疲劳试验、金属结构件疲劳试验中的大数据量、周期性疲劳试验数据的峰值与谷值检测及修正问题开展研究，以光纤光栅传感器采集的疲劳试验数据为基础，提出了适用于周期性疲劳试验数据的峰值检测与修正方法，

有效识别了光纤光栅传感器光谱畸变导致的数据错误，并实现了试验数据峰值、谷值的检测与修正。本文周期性疲劳试验数据峰值检测与修正方法的主要优势如下：

- 1) 无需进行分段与滤波，可保持数据的完整性。此方法直接基于原始数据进行处理，避免了因分段导致的边界效应和滤波引起的信号失真，

适用于航空试验中高精度要求的应变与载荷数据分析。

2) 利用周期特性进行峰值预测, 效率较高。通过傅里叶变换提取基频与周期, 利用周期一致性进行峰值位置检测, 大幅减小搜索范围, 提升大规模数据处理的效率。

3) 结合统计判据与曲线拟合, 抗干扰能力强。采用前序峰值均值与标准差作为判据, 结合二次曲线拟合局部优化, 能够有效区分真实峰值与毛刺噪声。

4) 修正方式灵活, 适用于复杂航空数据环境。通过动态调整拟合区间结合均值替换策略, 实现对异常峰值的逐步修正, 无需人工干预, 适用于振动、电磁干扰等典型航空试验环境下的数据分析与修正。

参考文献

- [1] 张海英, 陈先民, 董登科. 全尺寸飞机结构疲劳试验数字孪生技术思考与探索[J]. 航空科学技术, 2025, 36(1): 46-55.
ZHANG H Y, CHEN X M, DONG D K. Thinking and exploration of digital twin technology in full-scale fatigue test of aircraft structure [J]. Aeronautical Science and Technology, 2025, 36(1): 46-55. (in Chinese)
- [2] 于翀, 宋昊. 航空结构件孔边裂纹监测技术研究综述[J]. 航空科学技术, 2021, 32(12): 1-17.
YU C, SONG H. Summary of research on hole edge crack monitoring of aviation structures [J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(12): 1-17. (in Chinese)
- [3] 王亚鹏. 面向结构健康监测的光纤应变传感技术研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2025.
WANG Y P. Research on fiber optic strain sensing technology for structural health monitoring [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2025. (in Chinese)
- [4] YU M G, KIM D S, YU M G, et al. Low-complexity ultrasonic flowmeter signal processor using peak detector-based envelope detection [J]. Journal of Sensor and Actuator Networks, 2025, 14(1): 12.
- [5] TOUATI D E, OUKAIRA A, HASSAN A, et al. Accurate on-chip thermal peak detection based on heuristic algorithms and embedded temperature sensors [J]. Electronics, 2023, 12(13): 2978.
- [6] 师伟展, 陈俊璘, 徐秀莉, 等. 波形峰值检测方法及装置: 201710117066.2 [P]. 2019-11-08.
SHI W Z, CHEN J L, XU X L, et al. Method and device for waveform peak detection: 201710117066.2 [P]. 2019-11-08. (in Chinese)
- [7] 魏烈祥, 汪天照, 张晶, 等. 一种低成本高速脉冲信号数据采样和峰值检测方法: CN114614825A [P]. 2022-06-10.
WEI L X, WANG T Z, ZHANG J, et al. A low-cost high-speed pulse signal data sampling and peak detection method: CN114614825A [P]. 2022-06-10. (in Chinese)
- [8] 刘旋, 马文鹏, 杨雨晴. 基于逆K最近邻的密度峰值异常检测方法[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2021, 34(2): 308-315.
LIU X, MA W P, YANG Y Q. Density peak anomaly detection method based on RKNN [J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2021, 34(2): 308-315. (in Chinese)
- [9] 李肃义, 徐壮, 熊文激, 等. 一种光电容积脉搏信号的峰值点自动识别方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(10): 3145-3149.
LI S Y, XU Z, XIONG W J, et al. An automatic peak identification method for photoplethysmography signals [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(10): 3145-3149. (in Chinese)
- [10] 钟慧婷, 廖俊必, 廖世鹏. 冲击信号峰值检测及修正的研究[J]. 机械, 2006, 33(11): 6-7.
ZHONG H T, LIAO J B, LIAO S P. Study on peak value measurement and its correction [J]. Machinery, 2006, 33(11): 6-7. (in Chinese)
- [11] 姚予木, 刘俊, 刘陕南. 基于有效峰值修正算法的全波形数据研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(14): 1410018.
YAO Y M, LIU J, LIU S N. Study on full waveform data based on effective peak correction algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(14): 1410018. (in Chinese)
- [12] 涂逸唯, 王国华, 崔健敏, 等. 基于ISSA-SVM的露点测量系统电路故障诊断方法研究[J]. 计测技术, 2023, 43(5): 7-14.
TU Y W, WANG G H, CUI J M, et al. Circuit fault diagnosis methods of dewpoint measurement system based on ISSA-SVM [J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(5): 7-14. (in Chinese)

[13] 唐才杰, 高红春, 王学锋, 等. 低温管路动应变光纤光栅测量的光谱畸变抑制[J]. 火箭推进, 2024(6): 154-160.

TANG C J, GAO H C, WANG X F, et al. Fiber Bragg grating spectral distortion suppression in low-temperature pipeline's dynamic strain measurement [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2024(6): 154-160. (in Chinese)

[14] 程欣, 王晶, 张葆, 等. 光纤成像光谱仪中谱线畸变对调制传递函数的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(10): 2861.

CHENG X, WANG J, ZHANG B, et al. Effect of spectrum distortion on modulation transfer function in imaging fiber-optic spectrometer [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(10): 2861. (in Chinese)

[15] ZHANG K, GAO G J, ZHANG J, et al. Mitigation of non-linear fiber distortion using optical phase conjugation for mode-division multiplexed transmission[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 43: 169-174.

[16] 马罗文, 刘宁, 胡心语, 等. FFT幅相联合的快速高精度频率估计方法[J]. 计测技术, 2022, 42(6): 34-39.

MA L W, LIU N, HU X Y, et al. Fast and high-precision frequency estimation via the combination of FFT ampli-

tude and phase information [J]. Metrology & Measurement Technology, 2022, 42(6): 34-39. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨 刘宇轩)



第一作者: 郭蔡果(1998—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事动态力学计量校准技术等研究。



通信作者: 于翀(1997—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事航空结构健康监测、智能算法设计、控制系统开发等研究。