

文章编号: 1002-1582(2026)03-0288-07

光机结构准静态形变信号鲁棒零相位联合提取法研究

朱张志, 李克凯, 雷新, 陶冶*
(四川大学 机械工程学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 超精密光学系统中, 光机结构组件将随环境温度变化发生微小形变, 此类形变极易导致系统性能衰退。这主要是材料的热膨胀形变与内部应力松弛等本征响应共同作用的结果。当叠加外界高频振动干扰时, 系统将形成更复杂的混合信号。因此, 从热膨胀和本征形变耦合形成的低频真实形变信号中, 有效滤除高频振动干扰信号, 是获得高精度真实形变信号的前提。文章以超精密应变监测仪光机结构为对象, 提出一种鲁棒局部加权回归与零相位四阶巴特沃斯滤波器协同作用下的准静态形变信号鲁棒零相位联合提取法, 精确还原其真实形变过程。方法相较于均值滤波和小波分析, 均方根误差分别降低45.8%和41.3%, 去噪声标准差分别降低20.7%和21.5%, 过滤振动信号效果优于传统滤波方法。此方法对超精密光学系统环境适应性和测量精度有重要意义和应用价值。

关 键 词: 振动干扰; 准静态形变; 光机结构; 真实形变

中图分类号: TH-39; TH744

文献标识码: A

A robust zero-phase joint extraction method for quasi-static deformation signals in optomechanical structures

ZHU Zhangzhi, LI Kekai, LEI Xin, TAO Ye*

(School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In ultra-precision optical systems, optomechanical structures undergo slight deformation with ambient temperature changes, which can degrade system performance. This deformation mainly results from the combined effects of thermal expansion and intrinsic stress relaxation. When external high-frequency vibration is superimposed, the measured signal becomes more complex. Therefore, effective removal of high-frequency vibration from the low-frequency true deformation signal is essential for accurate deformation measurement. Focusing on the optomechanical structure of an ultra-precision strain monitoring instrument, this study proposes a robust joint extraction method that combines locally weighted regression (LOWESS) with a zero-phase fourth-order Butterworth filter to recover the quasi-static deformation signal. Compared with mean filtering and wavelet analysis, the proposed method reduces the root-mean-square error by 45.8% and 41.3%, respectively, and lowers the standard deviation of denoised noise by 20.7% and 21.5%. It also shows better suppression of vibration components than conventional filtering methods. This method is of practical significance for improving the environmental adaptability and measurement accuracy of ultra-precision optical systems.

Keywords: vibration interference; quasi-static deformation; optical-mechanical structure; true deformation

0 引 言

光机结构作为超精密光学系统的核心组成部

分, 广泛应用于航空航天、空间遥感等高精尖领域^[1]。环境温度变化产生的热漂移信号可使光机结构组件引起微小形变^[2,3], 进而对系统的性能产生

收稿日期: 2026-03-27; 收到修改稿日期: 2026-04-09

基金项目: 工业和信息化部应变监测仪项目

作者简介: 朱张志 (2000—), 男, 硕士研究生, 从事复杂机电超精密测量技术。3073774265@qq.com

陶冶 (1984—), 男, 副教授, 博士, 从事复杂机电系统超精密测量与控制, 创新设计理论与方法等。

* 通讯作者: yetao@scu.edu.cn

影响^[4],而其性能直接决定了相关设备的竞争力^[5]。此类形变演化非常缓慢,呈现出准静态过程^[6],一方面是由于材料受到持续热膨胀导致^[7],另一方面是由于内应力的变化影响应力松弛导致^[8,9]。然而,在实际工作时,环境不可避免地会引发机械振动,当这种外界随机干扰信号叠加到低频热漂移信号中,混合的复杂信号将加剧系统性能衰退^[10,11]。获得准确的热漂移信号并有效滤除外界随机干扰信号,对实现系统性能的精准预测与控制至关重要。

近年来,研究人员在传统滤波方法上进行优化,均取得较好效果。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究人员结合均值滤波与基于泊松核改进的双边滤波图像降噪算法,有效提升图像的显示效果^[12]。太原理工大学陈龙老师团队提出一种小波阈值去噪和变分模态分解相结合的联合去噪方法,减振性能优异^[13]。但降噪精度较低,仍需严重依赖阈值函数的选择。针对此类低频准静态信号与高频振动干扰叠加的复合特征,传统均值滤波与小波分解及其改进联合去噪等方法虽能一定程度上抑制高频噪声,但在复合温振耦合环境下仍存在不足:其一,部分方法会引入相位滞后或边界失真,影响真实形变信号的时序判断;其二,滤波参数或阈值函数选择对人工经验依赖较强;其三,对于突发毛刺和离群点等非高斯异常扰动的抑制能力有限。

为打破现有局限性,进一步优化准静态形变提取精度,本文对超精密应变监测仪的光学机械铝合金结构为研究对象,基于位移传感器,对该结构在升温阶段的整体形变及稳定工作过程中的高频振动分别进行测量与分析,提出一种鲁棒局部加权回归与零相位四阶巴特沃斯滤波器协同作用下的准静态形变信号提取方法。该方法首先利用鲁棒局部加权回归对原始测量数据进行毛刺抑制,在此基础上结合零相位四阶巴特沃斯低通滤波实现高频振动干扰的有效消除,从而实现真实准静态形变信号的高保真提取。仿真与实验结果验证了所提方法在精度还原、噪声抑制及相位保持方面均优于传统均值滤波和小波分析等方法。

1 鲁棒零相位联合提取法

1.1 测量信号数学模型构建

对于处于高频振动与变温环境下的光机结构铝合金材料,位移传感器所获取的原始观测信号 X_t 是多种复合信号叠加形成,具体可表述为

$$X_t = S_t + T_t + N_t + O_t \quad (1)$$

式中, S_t 是材料内部应力松弛等本征响应引起的本

征形变信号; T_t 是由实验系统温度变化引起的热膨胀形变信号; N_t 是由外界环境引起的高频振动干扰信号; O_t 是由传感器瞬时失真、冲击振动引起的毛刺测量误差信号。在本研究中,铝合金在复合环境下的真实形变信号 X'_t 为本征形变信号 S_t 与热膨胀形变信号 T_t 共同作用结果,即为

$$X'_t = S_t + T_t \quad (2)$$

1.2 热膨胀形变信号分离与中心化

实验系统中的由温度缓慢变化在材料中带来的热膨胀效应,是导致测量信号产生系统性漂移的主要原因,在观测时间内通常表现为近似线性的趋势。为分离出可参数化的热膨胀形变信号,首先,采用全局线性模型对其进行参数化建模,得到

$$T_t = p_1 \cdot t + p_0 \quad (3)$$

参数 p_0 、 p_1 的最优估计通过线性最小二乘法求得,其目标函数定义为

$$\min_{p_0, p_1} J(P) = \min_{p_0, p_1} \sum_{n=0}^{N-1} (X_t - (p_1 \cdot n + p_0))^2 \quad (4)$$

求解该线性方程组得到估计参数 $\hat{p}_0$ 、 $\hat{p}_1$,估计热膨胀形变信号 $\hat{T}_t$,并得到去趋势信号 X_t^*

$$\hat{T}_t = \hat{p}_1 \cdot t + \hat{p}_0 \quad (5)$$

$$X_t^* = X_t - \hat{T}_t \quad (6)$$

为确保后续处理的数值稳定性并消除直流偏移,对 X_t^* 进行中心化处理,得到零均值信号 x_t^*

$$x_t^* = X_t^* - \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_t^* \quad (7)$$

1.3 抗差局部回归原理

针对数据集中的毛刺部分的非高斯、局部突变性特性,赋予零均值信号 x_t^* 中距离中心点近的数据点 t_i 极低的权重。

在其局部时间窗口 λ_i 内,进行二次多项式拟合。在每一次迭代中计算当前拟合残差 $r_j^{(k)}$,并根据双平方权重函数计算抗差权重 $\omega_j^{(k)}$

$$r_j^{(k)} = x_j^* - P_j^{(k)} j \in \lambda_i \quad (8)$$

$$\omega_j^{(k)} = \begin{cases} \left[1 - \left(\frac{r_j^{(k)}}{c \cdot \text{MAD}(r^{(k)})} \right)^2 \right], & |r_j^{(k)}| < c \cdot \text{MAD}(r^{(k)}) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中 k 为迭代次数 $P^{(k)}$ 为当前多项式, MAD是根据离散度进行鲁棒性估计的中位数绝对偏差; c 为协调常数,残差值大的异常值(O_t)将赋予0权重。

迭代至权重收敛后,取拟合多项式在 t_i 处的值作为平滑输出,对所有点进行局部加权回归以抑

制毛刺点, 得到中间信号 x'_t , 满足

$$x'_t \approx S_t + N_t \quad (10)$$

1.4 零相位四阶巴特沃斯原理

经上述处理后, 复合信号中主要为本征形变信号 S_t 和 高频振动干扰信号 N_t , 此时采取四阶巴特沃斯低通滤波器进行零相位滤波。由于处理的是离散采样的中间信号 x'_t , 需采用数字滤波器 H_z

$$H_z = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_M z^{-M}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_N z^{-N}} = \frac{\sum_{i=0}^M b_i z^{-i}}{1 + \sum_{j=1}^N a_j z^{-j}} \quad (11)$$

计算系数 a_j , b_i 由归一化截止频率 $\omega_n = 2f_c/f_s$ (f_c 为截止频率, f_s 为采样频率) 确定。

为消除输出信号相对输入信号产生偏移, 本研究采用零相位滤波通过“前向-后向”处理。先对中间信号 x'_t 进行正向滤波, 得到 y_{1t} , 再将 y_{1t} 反

转得到 y_{1-t} 进行第二次正向滤波得到 y_{2t} , 最后将 y_{2t} 反转, 最终得到零相位估计本征形变信号 $\hat{S}_t$ 。这种处理方法需要利用完整时间序列数据, 因此当前实现更适用于离线或准离线条件下的高保真形变提取, 而非严格意义上的在线实时处理。本文关注的是准静态真实形变的准确重构, 因此高频振动干扰的抑制重点在于提取精度而非瞬时响应。这不仅保证了信号中所有频率成分的相移为零, 也完整保留了本征形变信号 S_t 的时域特征与精确时序。

将滤波提取出的估计本征形变信号 $\hat{S}_t$ 与预处理阶段保存的热膨胀形变信号叠加, 即可得到完整、高保真的估计真实形变信号

$$\hat{X}'_t = \hat{S}_t + \hat{T}_t \quad (12)$$

由于整个鲁棒零相位联合提取法所涉及公式、参数、符号等较多, 故列出表格对关键信息做出解释, 如表 1 所示。

表 1 鲁棒零相位联合提取法关键公式、参数与符号说明

参数/符号类别	名称	符号	作用
数学模型构建	原始观测信号	$X_t = S_t + T_t + N_t + O_t$	测量信号组成模型
数学模型构建	真实形变信号	$X'_t = S_t + T_t$	提取目标信号
热漂移信号分离	估计热膨胀形变信号分离公式	$\hat{T}_t = \hat{p}_1 \cdot t + \hat{p}_0$	最小二乘估计结果
中心化	零均值信号	x_t^*	消除直流偏置
局部回归	局部时间窗口	λ_t	第 i 局部拟合窗口
局部回归	当前多项式	$P^{(k)}$	第 k 次迭代多项式
局部回归	当前拟合残差	$r_j^{(k)}$	第 j 点拟合残差
局部回归	抗差权重	$\omega_j^{(k)}$	第 j 点鲁棒权重
巴特沃斯滤波器	相位处理方式	前向-后向零相位滤波	消除相位延迟
巴特沃斯滤波器	估计本征形变信号	$\hat{S}_t$	滤波后的估计本征形变信号
巴特沃斯滤波器	真实形变信号重构方式	$\hat{X}'_t = \hat{S}_t + \hat{T}_t$	最终准静态真实形变信号

2 仿真对照

本研究使用 matlab R2025a 软件模拟 7075-T 铝合金从室温 22℃ 缓慢上升至 30℃ 过程中的形变特征。鲁棒零相位联合提取法的核心性能主要是利用两级联合去噪, 实现抑毛刺、去高频、提低频的优异效果。其具体程序流程如图 1 所示。

本次模拟仿真实验的三种方法基于统一信号, 观测信号由四个信号复合而成: 热膨胀形变信号、500~800Hz 高频振动干扰信号、毛刺测量误差信号、随机噪声信号。实验中其他关键参数依据 7075-T 铝合金物理特征设定, 总观测时长为 4 小时, 采样频率为 1Hz。其中, 均值滤波采用固定长度窗口内的算数平均方法抑制高频干扰信号; 小波分析选择 Symlet8 小波基函数, 进行 5 层分解, 阈值处理采用基于中值估计的固定阈值方法, 设定为: $\sigma \sqrt{2 \log N}$, 并应用软阈值函数。其具体模

拟仿真后的效果分析如下图所示。

图 2 是模拟实际环境中频谱图, 其中的图 2 (a) 与图 2 (b) 分别属于模拟自然环境中观测信号的原始频谱与高频振动干扰信号的原始频谱, 可以清晰看到观测信号的频率能量主要集中在 0~0.5Hz 范围内, 属于低频信号, 而高频振动干扰信号的频率能量主要集中在 550~800Hz 范围内, 属于高频信号, 两种信号交叉将会造成“混叠”现象, 满足鲁棒联合提取法的边界条件。

图 3 表明, 在极低信噪比条件下, 鲁棒联合提取法在全局及局部时域上均能较准确地重构真实形变, 输出曲线与真实值基本重合, 且无明显相位偏移。相比之下, 小波分析法在平缓区仍存在振荡, 均值滤波则表现出明显时序滞后。对于突发毛刺, 鲁棒联合提取法能够有效抑制异常值影响, 避免局部畸变; 而小波分析仍保留部分突变痕迹, 均值滤波会使毛刺影响向邻域扩散。对于

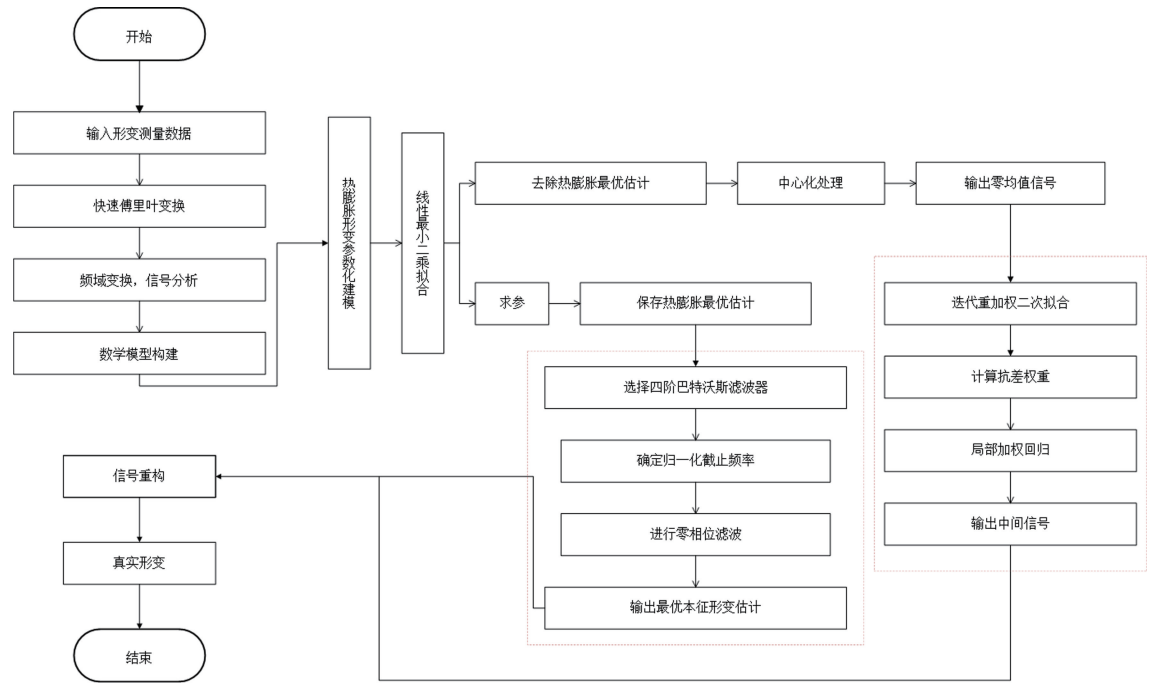


图1 鲁棒零相位联合提取法逻辑流程图

高频振动混叠形成的伪低频干扰，鲁棒联合提取法表现出更强的抑制能力，滤波结果更平滑、稳定。下表1是经过三种不同方法滤波后的结果比较。

其均方根误差和去除噪声标准差分别降低约41.3%和21.5%。说明所提方法在真实形变恢复精度、高频噪声抑制及毛刺剔除方面均具有更明显优势。

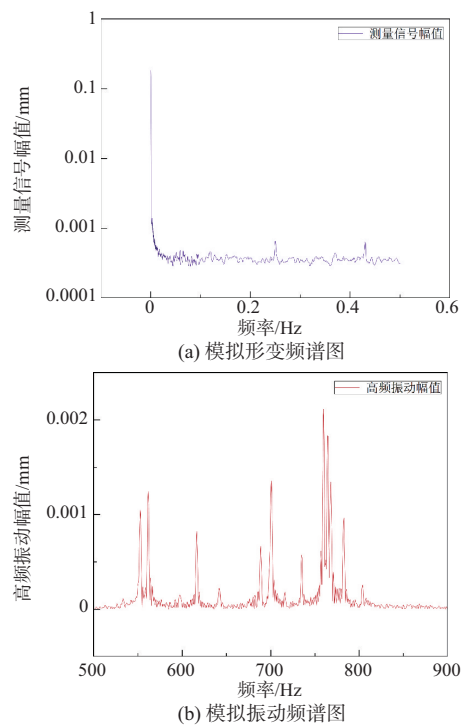


图2 模拟信号频谱图

由表2可知，鲁棒联合提取法在仿真对照中表现出更优的定量性能。与均值滤波相比，其均方根误差由 2.75×10^{-4} mm降至 1.49×10^{-4} mm，降低约45.8%；去除噪声标准差由 2.99×10^{-4} mm降至 2.37×10^{-4} mm，降低约20.7%。与小波分析相比，

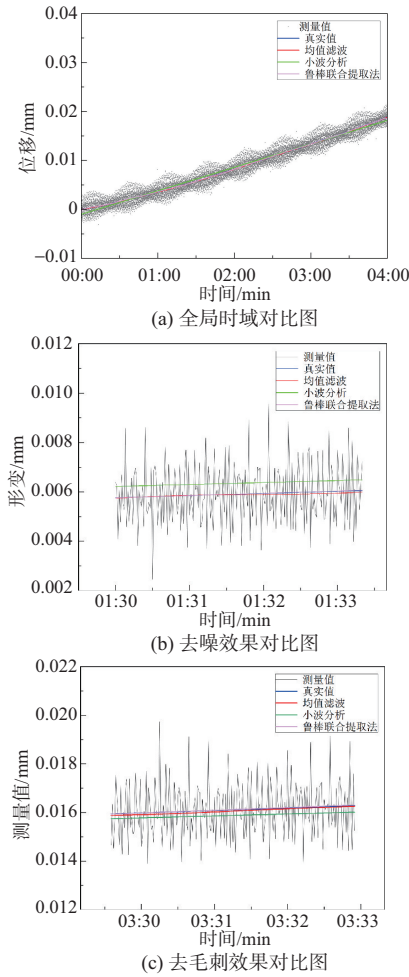


图3 鲁棒零相位联合提取对照仿真实验

表 2 三种滤波方法优劣比较

方法	均方根误差/mm	去除噪声 标准差/mm	相对 误差比
均值滤波	2.75×10^{-4}	2.99×10^{-4}	1.85
小波分析	2.54×10^{-4}	3.02×10^{-4}	1.70
鲁棒联合提取法	1.49×10^{-4}	2.37×10^{-4}	1.00

3 实验测试与结果分析

3.1 实验平台搭建与测试

为进一步验证本文方法的有效性，将其应用于绵阳光子技术研究院实验室测试。本次试验被测对象为超精密应变监测仪光学部分机械结构，材料为 7075-T 铝合金，用以固定光学镜片形成光路。本次测试检测其正常工作状态下温度由室温上升至最大温度过程中形变，如图 4 所示。



图 4 现场实验装置

实验测量系统主要由高精度激光位移传感系统、温度监测系统及数据采集单元组成。选择德国米铱 man-optoNCDT-1220 型号激光位移传感器获取测量信号，采样频率为 1Hz，man-optoNCDT-1900 型号激光位移传感器获取高频振动干扰信号，采样频率为 10KHz，多通道温度检测仪测量温度变化。数据采集单元为德国米铱研发的位移传感器控制采集软件，用以显示采集的测量数据。

3.2 测量信号与高频振动信号特征分析

对采集的 1Hz 测量数据与 10kHz 振动数据进行快速傅里叶变换（FFT），分析测量信号与高频振动干扰信号时域与频谱特征，明确高频振动对真实形变的影响效果，如图 5、6 所示。

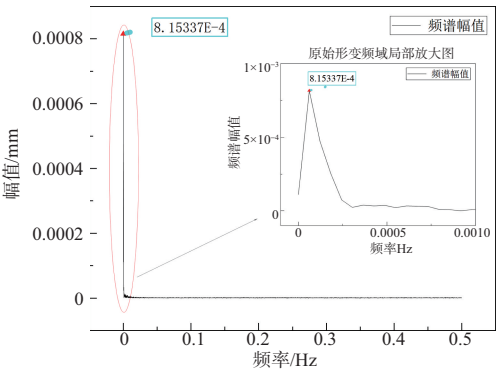


图 5 测量信号频谱特征图

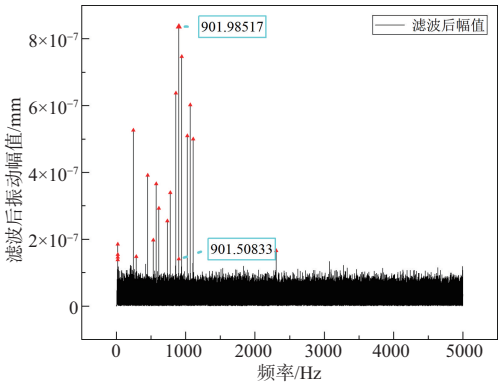


图 6 振动信号频谱特征图

图 5 是 1Hz 测量数据经过变换得到的频谱图，可以观察到影响形变的主要信号频谱范围在 0.00025Hz 内，说明测量信号主导成分为热膨胀信号。

图 6 是 10KHz 下振动数据经过变换后得到的频谱图，在获取原始振动位移信号后，对其直接进行快速傅里叶变换（FFT），但在 0.11444Hz 附近出现了极高幅值的低频峰。分析认为，该现象是由原始时域信号中存在的直流分量^[14]以及测试过程中传感器的低频基线漂移^[15,16]所致。由于时域信号的非零均值特性（基线围绕约 1.0096 mm 波动），其直流分量的幅值远大于实际的动态振动幅值，从而在频域内产生了此种效应^[17]。

为了准确提取系统的真实动态振动特征，本研究对原始时域信号进行了滤波与去均值预处理，消除了零频及极低频的趋势项干扰与基线漂移的影响，清晰地显现了系统的真实固有频率特征，如图 6 所示。图中高频区域特征明显，能量主要集中在 200Hz-1200Hz 范围内，呈现出多个清晰的峰值。

3.3 结果分析

将净化后的高频振动干扰信号作为主要振动来源，使用鲁棒零相位联合提取法剔除测量信号里面的高频混叠信号，得到的结果如下图 7 所示。

对测量数据进行均值滤波、小波分析与鲁棒联合提取法三种方进行比较，得到滤波后效果图。图 7（a）是超精密应变监测仪正常工作状态下从未启动至温度稳定过程中的测量信号滤波后全局对比图，可以看到，小波分析在阈值毛刺处理上存在不足，而均值滤波虽然与鲁棒联合提取法存在较大重叠，但是在开始与结束时呈现滞后现象，且会影响毛刺周围数据点。图 7（b）是全局对比图的局部放大图，可以看到，鲁棒联合提取法在毛刺处理与离群点上处理效果优秀，同时也能有效去除高频干扰信号，且无相位差。实测结果现象与仿真模拟一致。

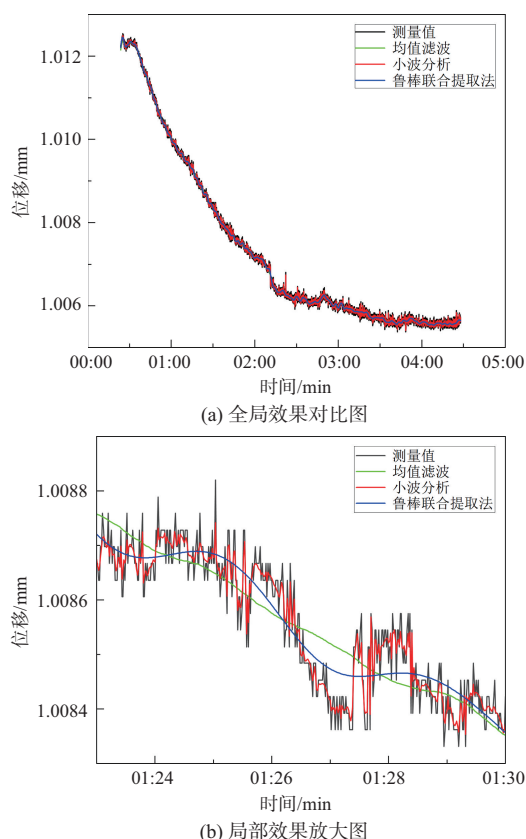


图7 结果提取图

使用本研究方法对测量信号进行处理,并建立起温度-时间-形变三者之间的关系,可以清楚地观察到某时刻下的温度与形变,如图8所示。

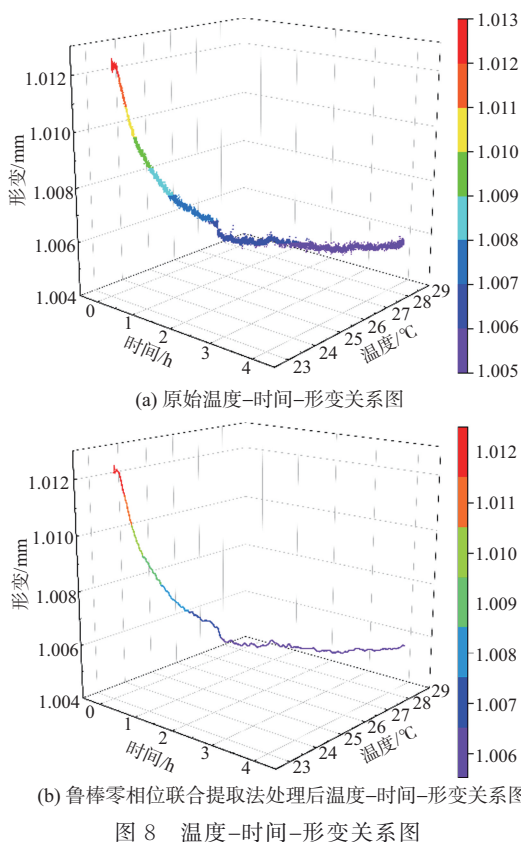


图8 温度-时间-形变关系图

从图8(a)、(b)对比可以看出,原始测量数据中的形变曲线随时间和温度演化虽总体呈下降趋势,但叠加了明显的高频波动和局部毛刺,导致数据点离散性较强,削弱了温度变化与准静态形变之间应有的对应关系。经鲁棒联合提取法处理后,形变曲面整体仍保持随时间和温度变化的单调演化趋势,局部高频起伏和异常突变被明显抑制,数据点分布更加收敛,表明该方法保留了原始低频准静态变化信息,主要去除了与目标形变无关的高频扰动和测量毛刺,而非对原始信号进行了简单平滑处理。

进一步结合图7的局部放大结果可知,所提方法在抑制高频振动干扰的同时,未出现均值滤波中存在的明显相位滞后现象,也优于小波分析在局部毛刺位置仍存在突变残留的问题。

4 结论

针对高频率振动对中低温场下铝合金准静态真实形变的研究,提出鲁棒联合提取法,得到以下结论:

(1) 鲁棒联合提取法通过两级联合去噪,利用鲁棒局部加权回归原理去毛刺、零相位四阶巴特沃斯低通滤波抑制高频信号的特点,实现低频准静态信号的高保真提取。

(2) 仿真对照实验建立热变形、高频振动混叠、随机毛刺及白噪声等信号混合模型,与传统的均值滤波、小波分析方法相比,其均方根误差为 $1.49 \times 10^{-4} \text{ mm}$,较均值滤波和小波分析分别降低45.8%和41.3%;去除噪声标准差为 $2.37 \times 10^{-4} \text{ mm}$,分别降低20.7%和21.5%;相对误差比由1.85和1.70降至1.00,说明本研究方法在精度还原、噪声与毛刺抑制方面效果更优。

(3) 现场测试实验进一步证实该方法能够有效克服实际高频振动的异常干扰,能够提取更为真实的形变,具有良好的工程实用性与可靠性。

参考文献:

- [1] 左志伟. 大型复杂光机系统虚实映射装配仿真技术研究[D]. 长春理工大学, 2025.
Zuo Zhiwei. Research on assembly simulation technology of large-scale complex optical machine system with virtual-reality mapping[D]. Changchun University of Science and Technology, 2025.
- [2] 王海鹏, 白素平, 于信, 等. 大视场空间相机的无热化光机结构设计[J/OL]. 光通信技术, 1—13[2026-03-05].
Wang Haipeng, Bai Suping, Yu Xin, et al. Design of athermalized optical-mechanical structure for wide-field space camera[J/OL]. Optical Communication Technology, 1—13[2026-03-05].
- [3] 唐晓, 杨宝玉, 吴亦农, 等. 基于对称布局激光位移传感器的

- 复杂光机结构低温形变测量方法[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(5): 219—227.
- Tang Xiao, Yang Baoyu, Wu Yinong, et al. Method for low-temperature displacement measurement of complex opto-mechanical structure based on symmetrical laser displacement sensors[J]. Infrared and Laser Engineering, 2025, 54(5): 219—227.
- [4] 彭红攀. 温度场对空间光通信望远镜系统性能影响研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2012.
- Peng Hongpan. Research on the performance effect of space optical communication telescope system caused by temperature field[D]. Harbin Institute of Technology, 2012.
- [5] Ai Y, Sun Q, Fan Z, et al. Prediction and control of pointing accuracy in precision opto-mechanical systems with uncertainty reduction[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2026, 157: 854—870.
- [6] 郑佳兴, 秦石乔, 王省书, 等. 考虑准静态缓变量的船体角形变测量[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(1): 6—10.
- Zheng Jiaying, Qin Shiqiao, Wang Xingshu, et al. Ship hull angular deformation measurement taking slow-varying quasi-static component into account[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(1): 6—10.
- [7] Cheng Y, Wang J, Zhang Y, et al. Anti-thermal buckling behavior of NiTi shape memory alloy thin plates: Experiment and modeling[J]. Thin-Walled Structures, 2026, 219(PA): 114239—114239.
- [8] 康文, 曹铁山, 程从前, 等. 一种修正双曲外推模型及其在应力松弛内应力预测中应用的研究[J]. 材料导报, 2026, 40(04): 170—175.
- Kang Wen, Cao Tieshan, Cheng Congqian, et al. Study on a modified hyperbolic extrapolation model for predicting internal stress in stress relaxation[J]. Materials Reports, 2026, 40(04): 170—175.
- [9] 熊亚军, 刘艳, 袁贤浦. 不同变形条件下锰铜合金的应力松弛特性及数值仿真[J]. 电子科技, 2024, 37(8): 47—53.
- Xiong Yajun, Liu Yan, Yuan Xianpu. Stress relaxation characteristics and numerical simulation of Mn-Cu alloy under different deformation conditions[J]. Electronic Sci. & Tech, 2024, 37(8): 47—53.
- [10] 徐登峰. 超精密系统中主被动隔振技术的应用及隔振性能测试分析[J]. 制造技术与机床, 2007, (01): 109—111.
- Xu Dengfeng. Application of positive and negative vibration isolation technology in ultra-precision system and its performance analysis[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2007 (01): 109—111.
- [11] Jia G, Zhang X, Shen Y, et al. Analysis and modeling of comprehensive thermal positioning error in closed-loop multi-axis drive systems: a study on thermal drift and thermal positioning error[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025, 140(3-4): 1—17.
- [12] 杨赞伟, 郑亮亮, 曲宏松, 等. 联合均值滤波与泊松核双边滤波降噪算法研究[J]. 计算机仿真, 2020, 37(9): 460—463, 468.
- Yang Zanwei, Zheng Liangliang, Qu Hongsong, et al. Research on noise reduction algorithm of combined mean filtering and poisson kernel bilateral filtering[J]. Computer Simulation, 2020, 37(9): 460—463, 468.
- [13] 陈龙, 史文库, 陈志勇, 等. 基于小波-VMD联合降噪的传动系扭振信号分析[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(4): 703—709.
- Chen Long, Shi Wenku, Chen Zhiyong, et al. Analysis of torsional vibration signal of transmission system based on wavelet-VMD joint denoising[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(4): 703—709.
- [14] 张子豪, 代煜, 姚斌, 等. 分段经验模态分解的直流漂移消除方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(04): 72—80.
- Zhang Zihao, Dai Yu, Yao Bin, et al. Direct drift elimination method based on segmented empirical mode decomposition[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(4): 72—78.
- [15] 孙会娇, 代煜, 张建勋, 等. 直流电源激励下的电路高分辨率应变信号处理[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(08): 184—190.
- Sun Huijiao, Dai Yu, Zhang Jianxun, et al. High resolution strain signal processing for the circuit under dc source excitation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(8): 184—190.
- [16] 杨腾, 赵岩. 基于傅里叶分解的隧道爆破振动信号趋势项与噪声去除方法[J]. 现代隧道技术, 2025, 62(06): 84—91.
- Yang Teng, Zhao Yan. Trend term and noise removal method for tunnel blasting vibration signals based on fourier decomposition[J]. Modern Tunnelling Technology, 2025, 62(6): 84—91.
- [17] Cui Y, He X, Wu Z, et al. Vibration Signal Denoising Method Based on ICFO-SVMD and Improved Wavelet Thresholding[J]. Sensors, 2026, 26(2): 750—750.