

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.04.030

# 基于自适应 VMD 的超声导波断轨信号处理

许溢航,王平,杨元,景丽暄

(南京航空航天大学 自动化学院,江苏 南京 211106)

**摘 要:**针对超声导波检测技术用于钢轨断轨的长距离监测时,检测灵敏度低的问题,提出一种基于粒子群算法的变分模态分解的超声导波信号处理方法。以导波信号的最小包络熵为衡量指标,优化变分模态分解的参数选择,对采集到的导波信号进行滤波处理。为衡量基于粒子群算法的变分模态分解方法的去噪效果,引入小波变化方法与变分模态分解方法,将处理得到的缺陷信号进行频域分析,再将缺陷信号与背景噪声的峰峰值进行比较。实验结果表明:上述方法对断轨信号有明显的滤波作用,其效果优于小波变换和变分模态分解方法。

**关键词:**变分模态分解;粒子群算法;超声导波;钢轨探伤

**中图分类号:**U216.3      **文献标志码:**A      **文章编号:**1671-5276(2025)04-0165-05

## Ultrasonic Guide Wave Broken Track Signal Filtering Based on Adaptive VMD

XU Yihang, WANG Ping, YANG Yuan, JING Lixuan

(School of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:**To deal with the low detection sensitivity of ultrasonic guided wave detection technology adopted in the long-distance monitoring of rail broken rail, a variational mode decomposition method based on particle swarm optimization is proposed. The minimum envelope entropy of guided wave signal taken as the index, the parameter selection of variational mode decomposition is optimized, and the collected guided wave signal is filtered. To measure the denoising effect of the variational mode decomposition method based on particle swarm algorithm, wavelet change method and variational mode decomposition method are introduced, the processed defect signal is analyzed in frequency domain, and the peak value of the defect signal is compared with the background noise. The experimental results show that the proposed method plays an obvious filtering role in broken rail signal, and its effect is better than that of wavelet transform and variational mode decomposition method.

**Keywords:** variational mode decomposition; particle swarm optimization; ultrasonic guided wave; rail flaw detection

### 0 引言

铁路作为我国重要的基础建设,肩负着便民出行和货物运输等责任。为保证钢轨服役期间的安全性,目前国内外主要采用无损检测技术对钢轨进行定期探伤<sup>[1]</sup>。主要的无损检测技术有漏磁检测技术、机器视觉检测技术和超声检测技术等。漏磁检测技术用于可磁化对象,通过使用外加磁场对被检对象进行局部磁化,若被检对象无缺陷,磁力线会均匀分布;若存在缺陷,被检对象缺陷处将会形成漏磁场。通过分析漏磁信号可以实现缺陷的检测<sup>[2]</sup>,故通常使用漏磁检测技术检测钢轨的近表面缺陷。机器视觉检测技术是通过获取钢轨的图像信息,结合图像处理技术和机器学习算法分析采集图像,判断钢轨是否存在缺陷<sup>[3]</sup>。该检测技术对钢轨表面清洁度要求高,检测效率较低。超声检测技术利用声波的传输特性实现对物

体的检测,声波会沿着介质传播,当介质中存在缺陷时,介质内部不均匀,声波将会在缺陷处产生反射,通过分析反射波,能够判断被检对象内部情况<sup>[4]</sup>。超声检测技术因检测原理简单,检测设备造价低等优点,深受铁路维护人员喜爱。常见的超声探伤方式有大型自动化钢轨探伤车和人工手扶式巡检车两种。这两种检测方式只能在铁路线路空窗期使用,在超声检测技术的基础上,MOUSTAKIDIS 等<sup>[5]</sup>提出了采用超声导波技术对钢轨断轨情况进行在线监测,成功解决了检测工作受时间限制的问题。超声导波检测技术为断轨的长距离检测提供了有效手段。

钢轨发生断裂时,超声换能器接收到的超声导波信号往往存在大量干扰,噪声干扰主要来源于环境噪声、电噪声等,使得断轨缺陷信号难以识别,因此需要通过信号处理技术,对缺陷信号进行

**基金项目:**江苏省重点研发计划项目(BE2021621);江苏省工业和信息产业转型升级专项资金项目(苏工信综合[2022]115号)

**第一作者简介:**许溢航(2000—),男,江西抚州人,硕士研究生,研究方向为超声导波无损检测,xuyihang@nuaa.edu.cn。

降噪处理。周颖<sup>[6]</sup>针对超声导波的特性,提出采用小波阈值算法对超声导波进行信号处理。李淑裕<sup>[7]</sup>采用经验模态算法(EMD)和继承经验模态分解算法(EEMD)对导波信号进行滤波,发现其存在频谱混叠、分解效率低等问题,因此提出采用变分模态分解算法(VMD)对超声导波信号进行去噪处理,有效地滤除了信号中的部分噪声成分。为了更好地研究超声导波信号去噪方法,本文对基于VMD方法在滚动轴承故障信号处理领域的用法,进行了深入研究。钱林等<sup>[8]</sup>为监测轴承的健康状况提出了基于VMD的特征提取方法。唐贵基等<sup>[9]</sup>基于VMD方法,引入了粒子群优化算法,针对滚动轴承故障特征提取方法进行了改进。

目前,VMD方法在超声导波信号处理方面已取得了较好效果,但由于使用VMD方法需要设置参数,参数的选取将影响信号处理效果,本研究参考VMD方法在轴承领域的应用,引入粒子群算法,优化VMD方法的参数选择,对超声导波断轨信号进行分析处理。

## 1 基于自适应VMD的断轨信号处理

### 1.1 超声导波的检测原理

声波通过介质传播,当超声波以某一角度进入介质时,会在介质的边界处发生反射与折射,产生超声导波<sup>[10]</sup>。超声导波检测技术基于声波的传输特性,通过透射波法和反射波法来检测钢轨的断裂缺陷,检测原理如图1所示。001号设备为激励设备,002号设备和003号设备为接收设备。当发生断轨情况时,透射波法是通过分析003号设备所接收到的直达波进行判断,不同断轨程度下直达波的衰减情况不同,可以根据衰减指标来判断钢轨的内部情况。反射波法是通过分析002号设备所接收到的缺陷回波信号进行判断,当钢轨内部结构发生变化时,超声导波会产生反射与衰减,结合超声导波的传播速度,能够实现断轨缺陷的定位。

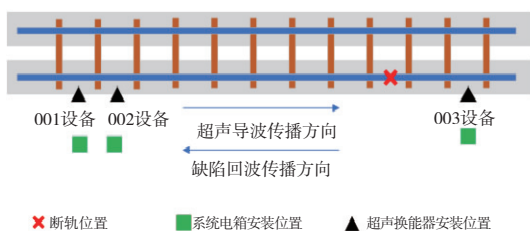


图1 超声导波设备安装示意图

### 1.2 自适应VMD算法

变分模态分解算法(VMD)是一种自适应信号处理方法,该算法将原始信号分解为若干个模态分量 $u_k(t)$ ,通过搜寻模型中的最优解来确定每个模态分量的中心频率及带宽,从而实现信号频域上的有效分离。区分出的所有模态分量之和等于原始信号,每一个模态分量被定义为调幅调频的分量模态函数(IMF)<sup>[11]</sup>,表达式为

$$u_k(t) = A_k(t) \cos(\varphi_k(t)) \quad (1)$$

式中: $A_k(t)$ 为 $u_k(t)$ 的瞬时幅值; $\varphi_k(t)$ 为信号 $u_k(t)$ 的瞬时相位; $k$ 为模态数量。

VMD算法通过计算约束变分模型的最优解来分解信号,根据信号的频域特性,得到各IMF分量<sup>[12-13]</sup>,约束变分模型如下:

$$\begin{cases} \min_{\{u_k, \omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[ \left( \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \times u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s.t.} \quad \sum_k u_k(t) = f \end{cases} \quad (2)$$

式中: $u_k$ 为分解得到的模态函数; $\omega_k$ 为模态函数的中心频率; $\delta(t)$ 为单位冲激函数; $\left( \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \times u_k(t)$ 表示借助希尔伯特变换得到的IMF分量频谱; $f$ 为原始信号。

### 1.3 参数优化的变分模态分解方法

#### 1) 粒子群优化算法(PSO)

粒子群优化算法在1995年由KENNEDY等<sup>[14]</sup>提出。通过研究鸟类的迁徙和捕食等生活习惯,构造了一种基于群体的智能算法。PSO算法求解优化问题时,首先会根据优化参数选取某一指标作为适应值,每次迭代过程寻找较优解<sup>[15]</sup>,并将其设置为局部最优解。此时判断是否到达最大迭代次数,如果未到达,则搜寻下一个较优解,直到迭代过程结束。如果到达,将该局部最优解设置为全局最优解。

#### 2) VMD参数优化

VMD算法使用前需设置惩罚因子 $\alpha$ 和分解层数 $k$ 两个参数。通过研究发现,惩罚因子 $\alpha$ 设置小,各个IMF分量的带宽越大,信息冗余。相反,惩罚因子 $\alpha$ 设置大,各个IMF分量的带宽越小,会造成频带丢失,并且随着分解层数 $k$ 的设置不同,最终得出的结果也有着较大区别。根据最小包络熵优化惩罚因子 $\alpha$ 和分解层数 $k$ ,更好地提取超声导波信号中的缺陷成分。

包络熵可以反映信号的稀疏特性<sup>[16]</sup>,通过运算得到的包络信号可以划分为一个序列 $p_j$ ,如果信号中缺陷信号成分较多,则包络熵值越小;反之,噪声成分较多,缺陷信号特征不明显,则包络熵值较大。包络熵可以表示为

$$\begin{cases} E_p = - \sum_{j=1}^N p_j \lg p_j \\ p_j = \frac{a(j)}{\sum_{j=1}^N a(j)} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $a(j)$ 为 $x(j)$ 经希尔伯特变换后得到的包络信号; $p_j$ 是包络信号 $a(j)$ 所对应的概率分布序列。

如图2所示,本次研究以包络熵值最小化为最终目标,对VMD算法中的惩罚因子 $\alpha$ 和分解层数 $k$ 进行优化,具体过程如下。

步骤一:初始化,确定粒子位置、粒子速度和粒子群的规模等各项参数,确定寻优过程中的适应度函数。

步骤二:运行VMD算法,计算适应度值,并将其设为初始值。

步骤三:更新粒子位置和速度等参数,再次计算当前情况下的适应度值,对比前后变化,进行数值更新,判断此时迭代次数是否到达最大迭代次数,如果未到达,则返回步骤二;如果到达,则输出全局最优位置的粒子,进入步骤四。

步骤四:得到优化后的惩罚因子 $\alpha$ 和分解层数 $k$ ,VMD算法自动更新,对导波信号进行处理。

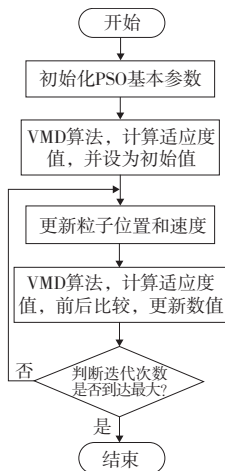


图2 VMD算法参数自适应寻优

## 2 实验验证

钢轨自然断裂情况较少,使用人工伤损模拟实际情况下的钢轨早期断裂情况。本次实验对象为长度为12.5m的60型号钢轨,在短距离检测中

端面回波会对钢轨断裂检测造成干扰,故将两台检测设备采取相邻的方式,安装在钢轨的端面,如图3所示。左侧设备为激励设备,右侧设备为接收设备。在钢轨中间位置制造35.2mm深度的人工缺陷,锯开的部分约占钢轨横截面的30%,达到了某集团所规定的最小程度断轨判断指标。人工伤损情况如图4所示。原始断轨信号时域图如图5所示。

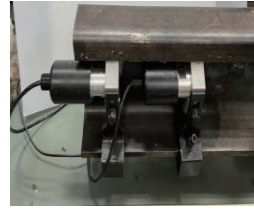


图3 设备安装方式



图4 人工缺陷图像

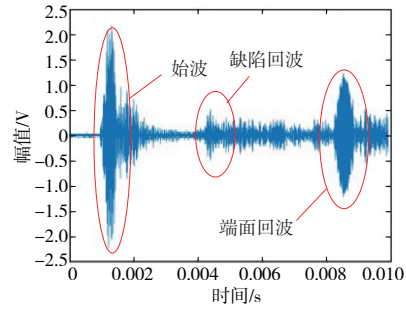


图5 原始断轨信号时域图

4种信号时频域对比图如图6所示。分别采用小波变换方法、变分模态分解算法和基于粒子群的变分模态分解算法对断轨信号进行处理,并分析原始信号与处理后信号的频域成分,如图6(a)所示。原始信号中含有低频噪声干扰,经小波变换处理得到的信号与原始信号差异较小,如图6(b)所示。经变分模态分解算法处理后的信号,低频噪声成分得到有效去除,高频缺陷信号成分仍存在部分干扰,如图6(c)所示。经基于粒子群的变分模态分解算法处理后的信号,频率成分单一,较好地保留了高频缺陷信号部分,有利于缺陷的定位识别,如图6(d)所示。

为了更好地研究针对超声导波信号的去噪算法,通过比较缺陷信号和背景噪声的峰峰值来衡量各算法的可行性和优劣性<sup>[17]</sup>,具体计算方式如下:

$$U_{SI} = \frac{V_d}{V_n} \quad (4)$$

式中: $U_{SI}$ (useful signal index, USI)为有用信号指数; $V_d$ 为缺陷信号的峰峰值; $V_n$ 为背景噪声的峰峰值。

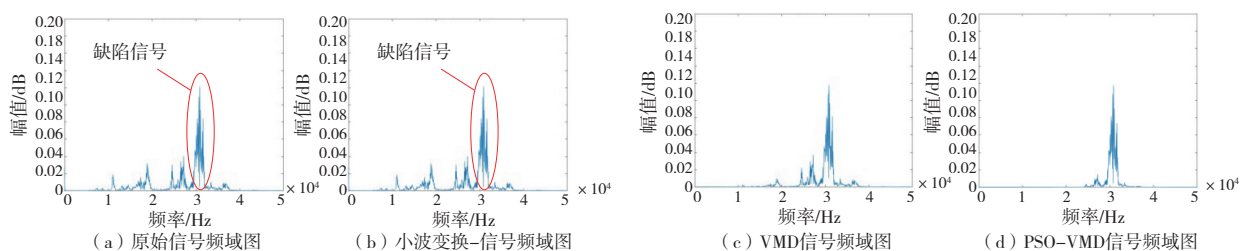


图6 4种信号时频域对比图

如图7所示,截取含有缺陷回波信号的部分区域,图中包含了8 000个采样点。分析该区域的信号成分,原始信号中缺陷信号峰峰值 $V_d = 1.005$  V,背景噪声峰峰值 $V_n = 0.284$  V,缺陷信号和背景噪声的峰峰值之比值 $U_{SI} = 3.57$ ,如图7(a)所示。

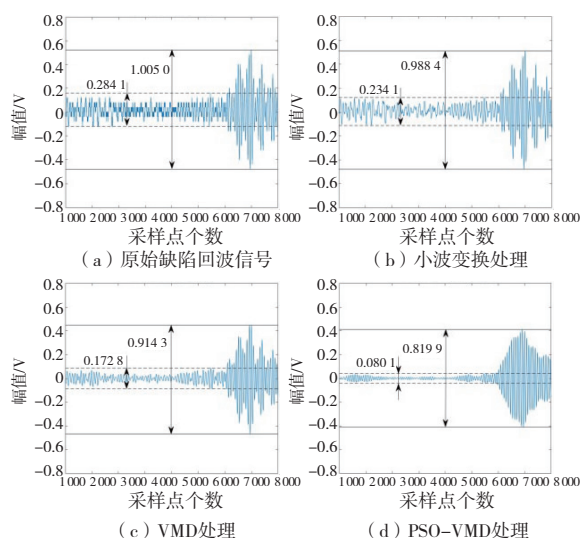


图7 信号时域图对比

小波变换处理方法(DWT)参数选取,小波基为sym3。采用软阈值方法,根据每一层小波分解的噪声水平进行调整,处理后的信号成分如图7(b)所示,缺陷信号峰峰值 $V_d = 0.9884$  V,背景噪声峰峰值 $V_n = 0.2341$  V,缺陷信号和背景噪声的峰峰值之比值 $U_{SI} = 4.22$ 。

变分模态分解方法(VMD)参数选取,惩罚因子 $\alpha = 1\ 000$ ,分解层数 $k = 3$ ,处理后的结果如图7(c)所示。缺陷信号峰峰值 $V_d = 0.9143$  V,背景噪声峰峰值 $V_n = 0.1728$  V,缺陷信号和背景噪声的峰峰值之比值 $U_{SI} = 5.29$ 。

基于粒子群算法的变分模态分解方法(PSO-VMD)以信号的最小包络熵为衡量参数,对VMD算法参数进行优化,处理后的结果如图7(d)所示。缺陷信号峰峰值 $V_d = 0.8199$  V,背景噪声峰峰值 $V_n = 0.0801$  V,缺陷信号和背景噪声的峰峰

值之比值 $U_{SI} = 10.24$ 。

表1列出了原始信号与处理后信号的缺陷信号峰峰值、背景噪声峰峰值,以及信号处理前后的缺陷信号与背景噪声的峰峰值之比。结合表中数据可以得到,小波变换、VMD与PSO-VMD方法对超声导波信号均有去噪效果,通过计算 $U_{SI}$ 指标,经小波变换处理后的信号 $U_{SI} = 4.22$ ,经VMD处理后的信号 $U_{SI} = 5.29$ ,经PSO-VMD处理后的信号 $U_{SI} = 10.24$ ,PSO-VMD算法相比于小波变换方法,效果提升了2.43倍,相比于改进前的VMD算法,效果提升了1.94倍。由此可以得出:PSO-VMD信号处理方法提取缺陷信号特征效果较优,在抑制噪声干扰的同时,极大地保留了缺陷信号的特征。

表1 信号处理前后效果对比

| 项目      | $V_d/V$ | $V_n/V$ | $U_{SI}$ |
|---------|---------|---------|----------|
| 原始信号    | 1.005 0 | 0.281 4 | 3.57     |
| DWT     | 0.988 4 | 0.234 1 | 4.22     |
| VMD     | 0.914 3 | 0.172 8 | 5.29     |
| PSO-VMD | 0.819 9 | 0.080 1 | 10.24    |

### 3 结语

采用超声导波断轨检测系统在线监测钢轨健康状况,接收信号存在大量噪声干扰。当钢轨断裂缺陷产生时,检测系统因噪声干扰将影响缺陷识别,因此需要对导波信号进行降噪处理。本文采用基于粒子群算法的变分模态分解方法,对变分模态分解方法的参数选择进行了优化。通过模拟实际断轨情况进行算法验证,采用改进后算法对超声导波信号进行分析。实验结果表明:PSO-VMD算法对缺陷信号特征识别有明显的提升,相比于小波变换算法,效果提升了2.43倍,相比于VMD算法,效果提升了1.94倍;并分析去噪前后信号的频域成分,可以得出,PSO-VMD算法能够提高超声导波检测系统的检测灵敏度,为实际钢轨断裂检测提供了参考。

### 参考文献:

[1] 田贵云,高斌,高运来,等. 铁路钢轨缺陷伤损巡检与

- 收稿日期:2023-10-11

simulation model for massively separated flows [J].  
International Journal of Aerospace Engineering, 2018,  
2018:5231798.

- 收稿日期:2024-01-15