

# 机器学习去噪技术在低信噪比地震资料处理中的应用研究

汤连盟

(安徽省煤田地质局物探测量队, 安徽 宿州 234000)

**摘要** 低信噪比地震资料的有效处理, 是地球物理勘探的核心技术难题。本文针对传统去噪方法应对复杂噪声环境的局限性, 系统研究了基于深度学习地震资料去噪技术。通过构建整合卷积神经网络和残差学习的去噪模型, 实现对随机噪声、相干噪声的智能识别及分离。测试结果证明, 该方法在信噪比提升、有效信号保真度等方面显著优于传统滤波技术, 为低信噪比地震资料的高质量处理提供了新的技术路径。

**关键词** 地震资料去噪; 低信噪比; 卷积神经网络; 残差学习; 信噪比提升

中图分类号: P631.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.042

## 0 引言

复杂地质条件下获取的地震数据多受环境噪声、仪器干扰等多种因素影响, 显现低信噪比特性, 严重制约后续处理和解释工作的精度。针对特定类型噪声, 传统去噪方法能发挥一定处理效果, 但面对非平稳、非线性的复杂噪声环境, 难以实现信号和噪声的精准分离。机器学习技术在图像处理、信号分析等方面展现出极强的特征学习能力, 为地震资料去噪提供了全新的解决方向。

## 1 机器学习去噪技术基础与地震资料特征分析

### 1.1 机器学习去噪技术原理

机器学习去噪的核心在于通过大量训练样本学习噪声与有效信号的内在分布特征, 建立从含噪数据到纯净数据的非线性映射关系。深度卷积神经网络通过多层特征提取与抽象, 能够捕捉地震信号在时间-空间域的复杂模式。

残差学习框架将去噪任务转化为噪声残差的估计问题, 网络学习目标函数可表示为:

$$L(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|R(X_i; \theta) - N_i\|^2 \quad (1)$$

式(1)中,  $X_i$  为含噪地震数据,  $N_i$  为噪声分量,  $R(X_i; \theta)$  为网络预测的噪声残差,  $\theta$  代表网络参数,  $N$  为训练样本数量。

这种学习策略使网络专注于噪声特征的刻画, 避免了直接预测纯净信号可能导致的细节丢失问题。相

比于直接回归方式, 在地震去噪上, 残差学习方式在地震去噪任务中具有明显优势: 网络输出近似零均值, 参数优化更稳定; 跳跃连接可以保证信号低频部分不受损失地传递到下一层, 从而使网络能够有效去除噪声的同时维持波形整体形态。

### 1.2 低信噪比地震资料噪声类型与特征

低信噪比地震资料中的噪声呈现多源性 with 复杂性特征。随机噪声表现为宽频谱、无规律的振幅扰动, 在时频域均匀分布, 与有效反射信号在频率域存在部分重叠<sup>[1]</sup>。相干噪声(面波、声波等)具有特定的频散特性和视速度, 在共炮点道集中呈现规律性线性同相轴。工业电噪声则表现为特定频率的周期性干扰, 在频谱上形成尖锐的能量峰值<sup>[2]</sup>。这些噪声类型在实际资料中往往交织出现, 单一噪声模型难以全面描述其统计特性, 这对去噪算法的自适应能力提出了更高要求。

### 1.3 传统去噪方法及其局限性

传统滤波技术基于信号与噪声在特定变换域的可分性假设开展去噪处理。频率域滤波通过设计带通滤波器抑制特定频段噪声, 但在信噪频谱重叠区域容易造成有效信号损伤<sup>[3]</sup>。小波变换利用多尺度分解实现时频局部化分析, 通过阈值处理去除小波系数中的噪声成分, 然而阈值选取缺乏自适应性, 难以兼顾不同地质目标的保护需求。预测滤波方法假设有效信号具有可预测性而噪声为随机分量, 但在低信噪比条件下预测算子容易受噪声污染导致性能退化。

作者简介: 汤连盟(1997-), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 地球物理勘探。

## 2 机器学习去噪技术在地震资料处理中的应用设计

### 2.1 地震数据预处理与训练样本构建

高质量训练样本是机器学习去噪模型性能的基础保障。针对地震资料的特殊性,采用合成数据与实测数据相结合的样本构建策略。合成样本通过褶积模型生成理论地震记录作为纯净标签,叠加不同类型、不同强度的噪声形成含噪输入,确保样本覆盖多种噪声场景。为了提高合成样本与实际地质情况的一致性,在添加噪声时要根据实际情况给定信噪比取值范围并且加入随机噪声相关长度、相干噪声视速度等物理限制,使得合成样本具有尽可能符合实际采集环境统计性质的特点。实测样本的构建则利用高信噪比叠加剖面作为近似纯净标签,从原始单炮记录中提取对应位置数据作为含噪样本,这种配对方式虽然标签存在一定误差,但能够反映真实噪声的统计特性。数据预处理阶段对地震道进行归一化处理,将振幅映射至 $[-1, 1]$ 区间,消除不同测线间的幅度差异对模型训练的干扰。考虑到地震数据的时空连续性,将相邻若干道组合成二维数据块作为网络输入,既保留了横向相干信息,又控制了计算复杂度。

### 2.2 针对地震噪声特征的机器学习模型设计

模型架构设计充分考虑地震信号的时空耦合特性与噪声多尺度分布规律。采用编码器—解码器结构实现特征的渐进抽象与重构,编码路径借卷积层和池化层逐步挖掘深层语义特征,解码路径借反卷积恢复空间分辨率。在编码器各层引入残差连接单元,改善深层网络的梯度消失问题,提升特征传播效率。注意力机制融入编解码器跳跃连接路中,在通道注意力以及空间注意力相互配合下,对有效反射信号所在频率范围及位置进行加权,降低噪声占据优势位置对于解码器的影响,从而在特征级别实现更精细的信噪分离。为捕捉不同尺度的噪声成分,设计多分支并行卷积模块,各分支搭配不同感受野尺寸的卷积核,提取局部细节噪声特征及大尺度相干噪声特征,通过特征融合层整合多尺度信息<sup>[4]</sup>。网络输出层依托线性激活函数直接输出噪声残差估计值,去噪结果由输入数据减去预测残差获得。损失函数在均方误差基础上引入感知损失项:

$$L_{total} = L_{MSE} + \lambda L_{perceptual} \quad (2)$$

式(2)中, $L_{perceptual}$ 度量去噪结果与标签在特征空间的差异, $\lambda$ 为权重系数。这种设计促使模型在降低噪声的同时保持地震信号的相位连续性与振幅特征。

### 2.3 模型训练、优化与调参流程

训练阶段用 Adam 优化器更新网络参数,初始学习率设为 $10^{-3}$ ,每间隔 20 个 epoch,依据指数衰减策略

把数值降到原值的 0.5 倍,保障模型训练后期稳定收敛。为防范过拟合出现,在全连接层引入 Dropout 正则化,丢弃率设为 0.3。数据增强策略包括随机水平翻转、时间轴微小延迟、振幅随机缩放,增加训练样本多样性,提高模型匹配不同采集条件的能力。验证集管控训练环节,连续 10 个 epoch 验证损失未下降即触发早停机制,防止无效训练浪费。超参数调优采取网格搜索与贝叶斯优化结合的方式,重点优化网络深度、卷积核数量、感知损失权重等关键参数,通过交叉验证研判不同配置的去噪性能,最终确定使网络兼顾信噪比提升和细节保真的最优参数组合。

### 2.4 去噪处理系统集成与结果输出

实际应用中将训练好的模型加入地震资料处理流程,搭建端到端去噪处理系统。系统接入 SEG-Y 格式地震数据,自动完成数据格式转换、分块处理及结果拼接等操作。针对大规模三维地震数据体,采用滑动窗口策略做分块处理,各窗口设重叠区域,消除边界效应,加权平均融合重叠部分的去噪结果<sup>[5]</sup>。处理完成后输出三类内容:去噪后地震剖面、噪声残差剖面、定量评价指标。定量评价用信噪比增益、均方根误差以及结构相似性指数等多维度指标开展,全面检验去噪效果。系统设计了可视化交互界面,可实时调整参数并对比显示结果,方便处理人员结合实际地质目标调整处理参数(见图 1)。

## 3 实验验证与案例分析

### 3.1 实验资料来源与工区概况

实验选取西部某盆地三维地震勘探资料开展验证分析。该工区地表条件复杂,戈壁覆盖区与山前带交替分布,地震波激发接收条件差异显著,导致采集资料信噪比普遍偏低。目的层为中生界碎屑岩储层,埋藏深度 3 500 ~ 4 200 m,有效反射信号频率主要集中在 15 ~ 45 Hz 频段,而环境噪声频谱范围宽达 5 ~ 80 Hz,信噪频带严重重叠。选取代表性测线原始单炮记录 200 炮用于训练集构建,叠加剖面 20 km 作为测试数据,评估模型在实际复杂条件下的去噪能力。

### 3.2 去噪处理效果分析

机器学习去噪处理后的单炮记录显示,原始资料中淹没于强背景噪声的弱反射同相轴得到有效恢复,信号连续性明显改善。定量统计表明,处理后单炮记录的平均信噪比从原始的 -2.3 dB 提升至 8.7 dB,信噪比增益达到 11 dB。叠加剖面对比更加直观地展现了去噪效果,深层反射界面的成像清晰度显著提高,原本模糊不清的断层特征在去噪剖面上呈现出清晰的错

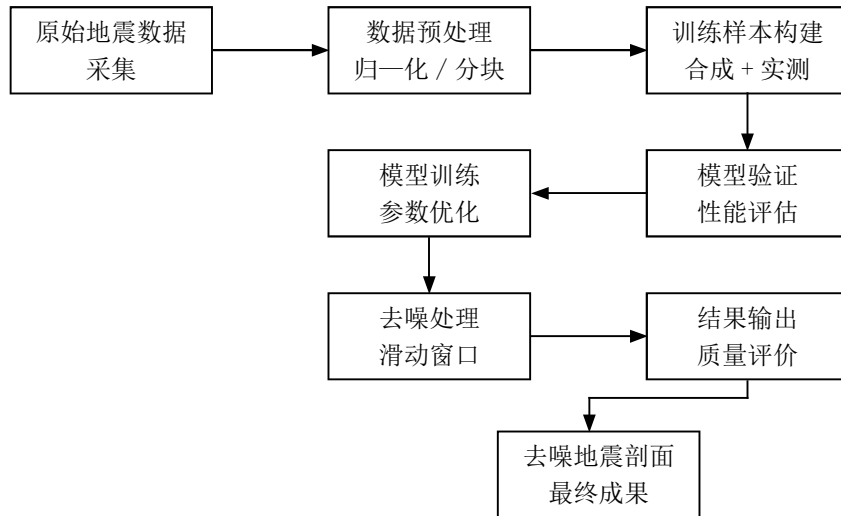


图1 机器学习去噪处理流程图

断关系。频谱分析显示,有效信号频段能量得到保留,而噪声主导的低频与高频成分被有效压制,频谱结构更加合理。振幅保真度检验通过对比去噪前后相同界面的反射振幅,统计误差控制在5%以内,说明模型在噪声抑制的同时较好地保持了地震信号的动力学特征,为后续振幅类属性解释提供了可靠的数据基础。

### 3.3 不同去噪方法处理效果的对比分析

为客观评价机器学习方法的优势,对比了带通滤波、小波阈值去噪以及传统预测滤波的处理效果。表1汇总了不同方法的定量评价指标。

表1 不同去噪方法性能对比

去噪方法	信噪比增益 (dB)	均方根误差	结构相似性指数	处理时间 (min/km)
带通滤波	4.2	0.183	0.726	0.8
小波阈值去噪	6.5	0.157	0.801	2.3
预测滤波	7.8	0.142	0.835	3.1
机器学习方法	11	0.098	0.912	1.5

从对比结果看,带通滤波由于频谱重叠导致去噪能力受限,虽然处理效率最高但信噪比提升仅4.2 dB,且对有效信号造成了明显损伤,结构相似性指数较低。小波阈值方法通过多尺度分解改善了去噪效果,但固定阈值策略在不同噪声水平区域适应性差,部分强能量噪声残留明显。预测滤波在相干噪声压制方面表现较好,但计算复杂度高,处理效率偏低。机器学习方法在各项指标上均显著优于传统方法,特别是在结构相似性指数上达到0.912,表明其在强力去噪的同时最

大程度保持了地震信号的原始特征,这得益于深度网络从大量样本中学习到的信噪分离规律,具备更强的自适应能力与泛化性能。

## 4 结束语

本文系统探究了机器学习去噪技术在低信噪比地震资料处理中的实际运用,构建基于残差学习的深度去噪网络,通过实际资料验证了方法的有效性。测试结果证明,该技术在信噪比提升、信号保真度等方面均优于传统方法,信噪比增益达到11 dB,为复杂条件下地震资料的高质量处理提供了新的技术手段。随着训练样本持续扩充和网络结构不断优化,机器学习去噪技术将在地震勘探工作领域发挥更加重要的作用,推动地震资料处理技术向智能化发展。

## 参考文献:

- [1] 赵玉星,李月,杨宝俊,等.基于深度学习的分布式声学传感垂直地震剖面数据耦合噪声压制技术[J].地球物理学报,2025,68(05):1922-1933.
- [2] 刘威,徐振旺,未晁,等.基于DnCNN与多尺度特征提取的地震数据去噪方法[J].西安石油大学学报(自然科学版),2025,40(01):18-31.
- [3] 高磊,乔昊炜,梁东升,等.融合梯度预测和无参注意力的高效地震去噪Transformer[J].计算机科学与探索,2025,19(05):1342-1352.
- [4] 王若雯,宁媛丽,赵威,等.松辽盆地西南部低信噪比地震资料精细处理技术研究及应用[J].中国矿业,2025,34(S1):613-619.
- [5] 邹少峰.黄土塬探区低信噪比资料振幅补偿方法应用研究[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(19):159-161.