

沥青路面智能压实加速度信号降噪方法

庞佳宇

交科(天津)智能交通发展有限公司 天津 300000

摘要: 沥青路面智能压实过程中, 加速度信号质量直接影响压实质量评估精度。由于信号兼具时域非平稳、频域复杂、非线性等特性, 且易受机械振动、环境因素干扰, 有效降噪成为关键。小波变换、经验模态分解、自适应滤波及深度学习等方法, 通过不同信号处理机制实现噪声抑制, 在改善信号质量、提升压实质量评价准确性方面发挥重要作用, 为沥青路面智能化压实技术的发展提供有力支撑。

关键词: 沥青路面; 智能压实; 加速度信号; 降噪方法

引言

随着公路建设智能化发展, 沥青路面智能压实技术广泛应用, 加速度信号作为压实质量评价的核心依据, 其准确获取至关重要。实际工程中, 该信号存在非线性、非平稳特性, 易受多种噪声干扰, 严重影响信号分析与压实质量判断。为此, 亟需有效的降噪方法保障信号可靠性。本文围绕沥青路面智能压实加速度信号, 系统分析其特性, 深入探讨现有降噪方法的原理与应用, 为优化压实质量控制提供理论与技术参考。

1 沥青路面智能压实概述

沥青路面智能压实技术是融合传感器、通信、控制与数据分析等多领域前沿技术的系统性工程, 旨在突破传统压实作业的效率与质量瓶颈。在沥青路面施工过程中, 压路机的压实效果直接影响路面的承载能力、平整度及使用寿命, 而智能压实技术通过在压路机与被压路面间构建动态感知网络, 实现对压实过程的精准调控。车载智能终端搭载高精度惯性导航、加速度传感器与温度传感器, 可实时采集压路机的振动频率、振幅、行驶速度、碾压遍数以及沥青混合料温度场分布等关键参数。这些数据借助无线通信模块传输至中央处理平台, 经大数据分析 with 机器学习算法处理后, 生成可视化压实质量云图, 直观呈现路面压实度的空间分布特征。施工人员据此可快速识别欠压、过压区域, 避免传统作业中因经验判断造成的压实不均问题, 显著提升压实作业的精细化程度。智能压实系统还具备闭环控制功能, 能依据实时监测数据自动调整压路机的振动参数与行驶轨迹。当检测到某区域压实度未达标时, 系统会触发警报并引导压路机进行针对性补压; 当压实度接近目标阈值时, 则自动降低振动强度, 防止过度压实导致的集料破碎与沥青老化。系统通过建立压实参数与路面性能指标的关联模型, 可对压实效果进行预测性分析, 提前优化

施工工艺参数, 有效减少返工成本与材料浪费。随着5G通信与边缘计算技术的深度应用, 沥青路面智能压实正朝着实时协同作业与全生命周期管理方向演进。未来, 多机协同压实系统将实现多台压路机之间的信息交互与作业协同, 进一步提升施工效率与质量稳定性, 推动沥青路面施工向智能化、数字化、绿色化转型。

2 沥青路面智能压实加速度信号特性分析

2.1 时域特性

沥青路面智能压实过程中, 加速度信号在时域内呈现出丰富且具有特定规律的特征。压实机械在碾压作业时, 与路面相互作用产生的加速度信号直接反映了压实过程的动态行为。随着压路机滚轮的滚动, 信号幅值会发生周期性变化, 这种周期性与滚轮的转动频率、路面材料的特性以及压实遍数密切相关。在初始压实阶段, 由于路面材料松散, 信号幅值波动较大且无明显稳定趋势, 这是因为材料颗粒间存在较大空隙, 滚轮作用时受力不均。随着压实作业的推进, 路面逐渐密实, 材料刚度增加, 加速度信号幅值逐渐趋于稳定, 波形也更加规则, 反映出路面压实状态的逐步改善。通过对时域信号的均值、方差、峰值等统计参数分析, 能够直观地了解压实过程中加速度的变化趋势和波动程度, 进而判断路面压实的均匀性和密实度发展情况。例如, 方差值的减小意味着信号离散程度降低, 表明路面压实效果趋于一致, 为工程人员实时调整压实参数提供了重要依据^[1]。

2.2 频域特性

从频域角度分析沥青路面智能压实加速度信号, 能够挖掘出时域分析难以获取的信息。加速度信号包含多种频率成分, 这些频率成分与压实机械的振动特性、路面材料的力学性能以及施工工艺密切相关。通过傅里叶变换等频域分析方法, 可将时域信号转换为频域信号, 从而清晰地展现各频率成分的分布情况。低频成分主要

与压路机的整体运动以及路面的宏观变形相关,反映了路面结构在较大尺度上的响应;高频成分则与材料颗粒的局部相互作用、滚轮与路面的高频振动等因素有关,对路面微观结构的变化更为敏感。在压实过程中,随着路面材料密实度的提高,其弹性模量和阻尼特性发生变化,导致信号的频率成分分布也相应改变。例如,高频成分的能量占比逐渐降低,而低频成分的相对强度可能增加,这种频率特性的变化可以作为评估路面压实质量的有效指标。不同类型的压路机,因其振动系统设计的差异,在频域上会产生不同的信号特征,通过对频域信号的分析,还可用于区分和优化压路机的工作模式,提高压实效率和质量。

2.3 非线性与非平稳性

沥青路面智能压实加速度信号具有显著的非线性与非平稳性特征。非线性体现在信号的产生过程中,路面材料在压实过程中的力学行为并非简单的线性关系,其应力-应变特性会随着压实程度、材料含水量等因素的变化而呈现复杂的非线性变化。压路机与路面之间的相互作用也是非线性的,滚轮的振动、滚动以及与路面的摩擦等过程都无法用线性模型准确描述。非平稳性则表现为信号的统计特性随时间不断变化,在整个压实过程中,从初始的松散状态到最终的密实状态,路面材料的物理性质持续改变,导致加速度信号的均值、方差、频率成分等特征都随时间发生动态变化。这种非线性和非平稳性使得传统基于线性和平稳假设的信号分析方法不再适用,需要采用如经验模态分解(EMD)、希尔伯特-黄变换(HHT)等非线性非平稳信号处理技术,将复杂的加速度信号分解为多个固有模态函数(IMF),从而更准确地提取信号特征,深入理解压实过程的内在机制,为压实质量的精确评估和控制提供有力支持^[2]。

2.4 噪声干扰特性

在沥青路面智能压实加速度信号采集过程中,不可避免地会受到各种噪声的干扰,这些噪声严重影响信号的质量和后续分析结果的准确性。噪声来源较为复杂,主要包括环境噪声、设备自身噪声以及信号传输过程中的干扰等。环境噪声涵盖施工现场的机械振动、车辆行驶产生的震动、自然风的扰动等,这些随机噪声会叠加在真实的加速度信号上,导致信号失真。设备自身噪声则源于压路机振动系统的机械磨损、传感器的零点漂移和热噪声等,这些噪声会使信号产生偏差,降低信号的信噪比。信号在传输过程中,由于电缆的电磁干扰、接地不良等问题,也会引入额外的噪声。噪声的存在使得加速度信号中的有用特征被掩盖,增加了信号分析和特

征提取的难度。为了获取准确可靠的加速度信号,需要采用有效的噪声抑制方法,如数字滤波技术,通过设计合适的低通、高通、带通或带阻滤波器,去除特定频率范围内的噪声;也可利用小波变换等时频分析方法,在时频域内对噪声进行识别和去除,从而提高信号质量,确保基于加速度信号的路面压实质量评估结果的可靠性。

3 沥青路面智能压实加速度信号降噪方法

3.1 小波变换降噪法

(1)小波变换降噪法基于多分辨率分析理论,将沥青路面智能压实加速度信号分解至不同尺度的频域空间,利用信号与噪声在小波域内的特征差异实现有效分离。该方法通过选择合适的小波基函数,对信号进行多层分解,将原始信号分解为低频近似分量和高频细节分量,其中低频分量包含信号的主要特征,高频分量则主要涵盖噪声及局部细节信息。(2)在降噪处理过程中,依据设定的阈值规则对高频细节分量中的小波系数进行处理。常用的阈值处理方式包括硬阈值和软阈值法,硬阈值法直接将小于阈值的系数置零,保留大于阈值的系数,能较好保留信号特征;软阈值法则对大于阈值的系数进行收缩处理,降噪后的信号更加平滑。处理后的系数经小波逆变换重构信号,完成降噪过程。(3)小波变换降噪法具有时频局部化特性,可有效处理非平稳信号,对不同频率成分的噪声抑制能力强。其降噪效果依赖于小波基函数和阈值的选择,不当选择可能导致信号特征丢失或降噪不彻底,且在处理复杂噪声环境下的信号时,需反复调试参数以达到最佳效果。

3.2 经验模态分解(EMD)降噪法

(1)经验模态分解(EMD)降噪法是一种自适应的信号处理方法,专门针对非线性、非平稳的沥青路面智能压实加速度信号设计。它基于信号的局部特征尺度,通过三次样条插值对原始信号进行包络线拟合,进而分解出一系列具有不同频率特征的本征模态函数(IMF)分量和一个残余分量。每个IMF分量都满足特定的极值条件和过零点条件,能够从不同尺度反映原始信号的变化特征。(2)在降噪环节,通过分析各IMF分量的频谱特征和能量分布,识别出包含噪声的IMF分量。通常,高频的IMF分量更多地包含噪声成分,可采用直接去除、加权平均或阈值处理等方式对这些分量进行处理,然后将处理后的IMF分量与残余分量进行重构,得到降噪后的信号。(3)EMD降噪法无需预先设定基函数,能够自适应地适应信号的变化,在处理复杂信号时具有独特优势。该方法存在模态混叠问题,即同一IMF分量中可能包含不同特征尺度的信号成分,这会导致信号特征难以准确分离,

严重影响降噪效果和信号分析的准确性。分解过程的计算复杂度较高,处理大量数据时效率较低^[3]。

3.3 自适应滤波降噪法

(1) 自适应滤波降噪法通过构建自适应滤波器,根据沥青路面智能压实加速度信号的统计特性动态调整滤波器参数,实现对噪声的有效抑制。其核心原理是利用原始含噪信号与期望信号(或参考信号)之间的误差来驱动自适应算法,不断优化滤波器的权系数,使滤波器输出尽可能接近真实信号。在实际应用中,若能获取与噪声相关的参考信号,可直接将其作为自适应滤波器的输入,通过调整滤波器参数使输出信号与原始含噪信号中的噪声成分相抵消。(2) 常用的自适应滤波算法如最小均方(LMS)算法和递归最小二乘(RLS)算法。LMS算法基于最速下降法,计算复杂度低,易于实现,但收敛速度较慢;RLS算法利用最小二乘准则,收敛速度快,能更好地跟踪信号的时变特性,但计算量较大。通过自适应调整滤波器参数,自适应滤波降噪法能够在未知噪声统计特性的情况下,有效抑制与参考信号相关的噪声成分。(3) 自适应滤波降噪法具有良好的自适应性和实时性,能够在噪声环境变化时自动调整滤波性能。其降噪效果依赖于参考信号的选取和自适应算法的性能。若参考信号与噪声相关性不佳,或算法收敛速度慢,将影响降噪效果,且在复杂噪声环境下,准确获取合适的参考信号存在一定难度。

3.4 深度学习降噪法

(1) 深度学习降噪法借助深度神经网络强大的特征学习和非线性映射能力,对沥青路面智能压实加速度信号中的噪声进行建模和去除。以卷积神经网络(CNN)为例,通过构建多层卷积层、池化层和全连接层,能够自动提取信号在不同层次的特征表示。网络在训练过程中,以大量含噪信号及其对应的纯净信号作为训练样本,通过反向传播算法不断调整网络参数,使网络能够

学习到含噪信号到纯净信号的映射关系。(2) 在降噪应用时,将采集到的含噪加速度信号输入训练好的深度学习模型,模型通过多层网络结构对信号进行特征提取和变换,输出预测的纯净信号。除CNN外,递归神经网络(RNN)及其变体长短期记忆网络(LSTM)也常用于信号降噪,RNN能够处理具有时间序列特性的信号,LSTM则通过门控机制有效解决了RNN中的梯度消失和梯度爆炸问题,更好地捕捉信号的长期依赖关系。(3) 深度学习降噪法具有强大的特征学习能力,能够处理复杂的非线性信号,在大规模数据训练下可取得优异的降噪效果。该方法需要大量的标注数据进行训练,数据获取和标注成本较高。深度学习模型结构复杂,训练时间长,计算资源需求大,且模型的可解释性较差,难以直观理解其降噪过程和决策依据^[4]。

结束语

综上所述,沥青路面智能压实加速度信号降噪是保障压实质量的重要环节。通过对信号时域、频域等特性的分析,明确了信号噪声来源与特征。小波变换、经验模态分解等多种降噪方法各有优劣,在不同场景下展现出独特的适用性。未来研究可进一步探索多方法融合策略,结合工程实际需求优化算法,同时加强深度学习在该领域的应用研究,以实现更高效、精准的加速度信号降噪,推动沥青路面智能压实技术的持续发展。

参考文献

- [1] 许家璐,薛斌,阙云.沥青路面智能压实加速度信号降噪方法[J].福州大学学报(自然科学版),2024,52(6):698-707.
- [2] 朱海滨,周宇鹏,郑建艳.沥青路面压路机振动加速度信号降噪方法研究[J].水利与建筑工程学报,2025,23(1):80-85.
- [3] 谢胜加,张德,程志强.沥青路面智能压实技术研究动态[J].城市道桥与防洪,2023(5):228-231.
- [4] 朱慧芳,王亮.沥青路面智能压实及其关键影响因素研究[J].中外公路,2024,44(4):47-55.