

# 基于应力波小波包能量的土壤含水率监测\*

冷志鹏<sup>1</sup> 何敬民<sup>2</sup> 侯爽<sup>2</sup>

(1. 宁波杉工智能安全科技股份有限公司, 浙江 宁波 315153

2. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 目前土壤含水率只能在一点或一条线上进行监测, 为在更大范围的空间区域进行土壤含水率监测, 提出基于应力波小波包能量的土壤含水率监测方法。采用压电型传感器分别激励和接收土壤中的应力波信号; 利用小波包总能量建立能量指标与土壤含水率的关系。试验结果显示: 能量指标幅值与土壤含水率呈正相关关系。基于小波包波动能量的土壤含水率监测方法可应用于滑坡预警。

**关键词:** 小波包能量; 土壤含水率; 滑坡监测; 压电材料

**中图分类号:** TP277

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-2605(2021)01-0006-05

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-2605.2021.01.006

## 0 引言

降雨引起的土壤含水率增加是造成山体滑坡的重要原因。目前, 工程上土壤含水率监测方法主要包括烘干法、频域反射计法 (frequency domain reflector, FDR) 和时域反射计法 (time domain reflector, TDR)。烘干法需从现场土体中取样烘干, 费时费力, 无法大面积实时连续测量<sup>[1]</sup>。FDR 利用电磁波频率变化来测量土壤含水率, 体积小、操作简单, 可实时连续测量, 但常用于单个位置的土壤含水率测量<sup>[2]</sup>。TDR 利用插在土壤中的电缆电学量变化监测线状区域土壤含水率, 测量设备昂贵, 无法实现空间区域的含水率监测。

压电陶瓷材料具有信号抗干扰、反应迅速、频带宽等特点, 且可实现驱动、传感一体化。基于压电陶瓷的主动传感技术已应用于土壤冻融过程的监测<sup>[3]</sup>, 然而环境噪声对监测结果的影响不容忽视。小波包分析理论基于信号的傅里叶变换发展, 具有可变分辨率、时频局部化、高频段时间分辨率高等特点, 可提高信号的抗噪性和损伤敏感性。目前小波包能量指标已经用于混凝土结构界面剥离状态监测<sup>[4]</sup>。

为实现较大范围的空间区域土壤含水率监测, 本文提出利用压电陶瓷传感器及应力波小波包能量的

土壤含水率监测方法。首先, 在试验土体中预埋压电传感器和 FDR 水分计; 其次, 利用喷淋方法改变土体含水率; 再次, 扫频信号作用于发射端压电传感器, 对接收端信号进行小波包分解并计算能量值; 最后, 建立能量指标与土壤含水率之间的关系。

## 1 小波包能量法

在小波包分析中, 传感器接收信号  $X$  可通过  $n$  阶波包分解成  $2^n$  个频带, 其能量谱可表示为<sup>[5]</sup>

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_{2^n}\} \quad (1)$$

对于第  $j$  ( $j=1, \dots, 2^n$ ) 个频带, 信号  $X_j$  计算公式为

$$X_j = [X_{j,1}, X_{j,2}, \dots, X_{j,m}] \quad (2)$$

式中  $m$  为采样数。

第  $j$  个频带能量  $E_j$  计算公式为

$$E_j = \|X_j\|^2 = X_{j,1}^2 + X_{j,2}^2 + \dots + X_{j,m}^2 \quad (3)$$

信号总能量  $E$  可由分解信号能量求和取得, 计算公式为

$$E = \sum_{j=1}^{2^n} E_j \quad (4)$$

\* 基金项目: 宁波市海曙区科技计划资助项目 (201804F027)

## 2 监测试验

本文选取沙土作为研究对象, 根据 GB50007—2011 建筑地基基础设计规范进行试验测定。本文采用一对压电传感器实现应力波的收发机制。为避免传感器在土壤振捣过程中移位, 用铁丝将传感器固定于同一条直线上, 且 2 个传感器间的距离为 1 m。

制作用于盛放试验土体的立方体容器, 尺寸为  $1.5\text{ m} \times 0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ 。将土壤分层加入容器中, 并振捣压实。当土壤高度达 20 cm 时, 放置事先固定的压电传感器, 同时将 3 个 FDR 水分计均匀埋置于压电传感器之间; 然后, 继续填入土壤, 并充分振捣压实; 最后, 试验土体高度为 0.4 m, 压电传感器置于土体纵向的中心位置。土壤试验体及传感器布置图如图 1 所示。

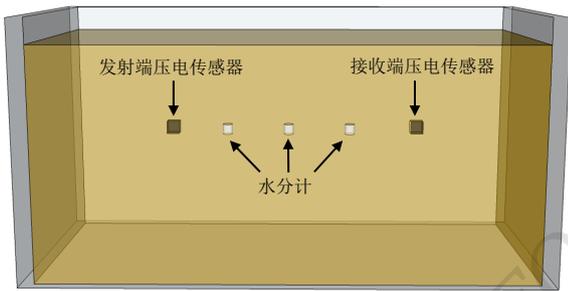


图 1 土壤试验体及传感器布置图

试验数据采集系统照片如图 2 所示, 详细内容参

考文献[6]。



图 2 数据采集系统照片

本试验设计的土壤含水率变化范围为 10%~30%。试验开始时, FDR 通过烘干将土壤含水率控制为 10%; 试验过程中, 通过喷淋装置调整土壤含水率, 使含水率变化梯度为 1%, 并通过 FDR 水分计实时观察土壤含水率。

## 3 试验结果及分析

激励信号是频率为 10 Hz~2000 Hz 的正弦扫频信号。当含水率从 24.1% 增大到 33.2% 时, 共采集 24 组数据, 结果如图 3 所示。如图 3 可见, 随着含水率的增加, 采集信号的幅值呈降低趋势。

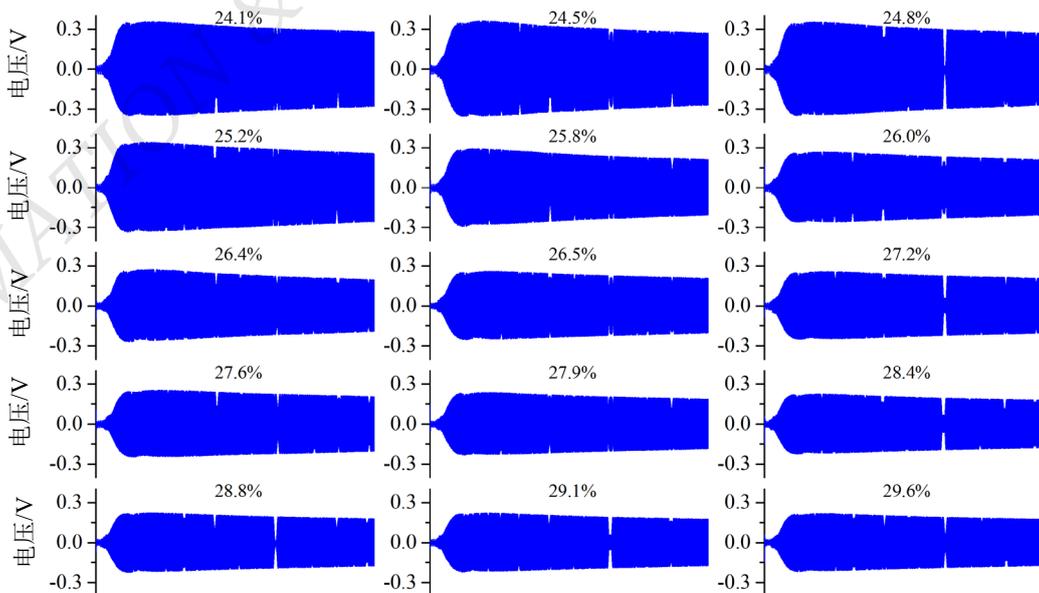


图 3 不同含水率下扫频信号结果

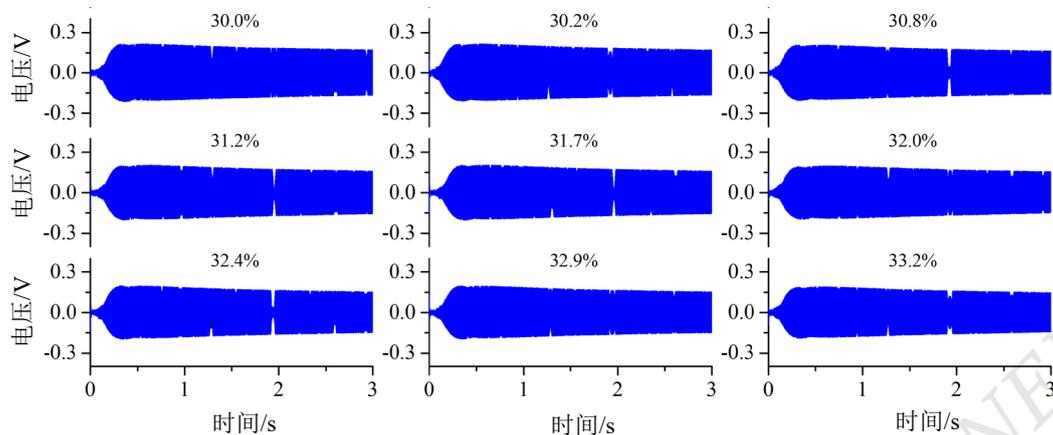


图3 不同含水率下扫频信号结果 (续)

本文采用 db9 (Daubechies 9) 小波基对信号进行分解, 分解阶数为 6, 即把信号分解为 64 (26) 个频带。信号采样率为 25600 Hz, 频带分辨率为 200 Hz。因为扫频信号频率范围为 50 Hz~2000 Hz, 所以只有前 10 个频带信号幅值较大, 本文只给出前 10 个频带

的各个频带分解信号。

以含水率为 24.1% 时的信号为例, 基于小波包分解法, 根据式(2)前 10 个频带的分解信号如图 4 所示。由图 4 可知, 在 0 Hz~2000 Hz 频带应力波能量分布大致均值。

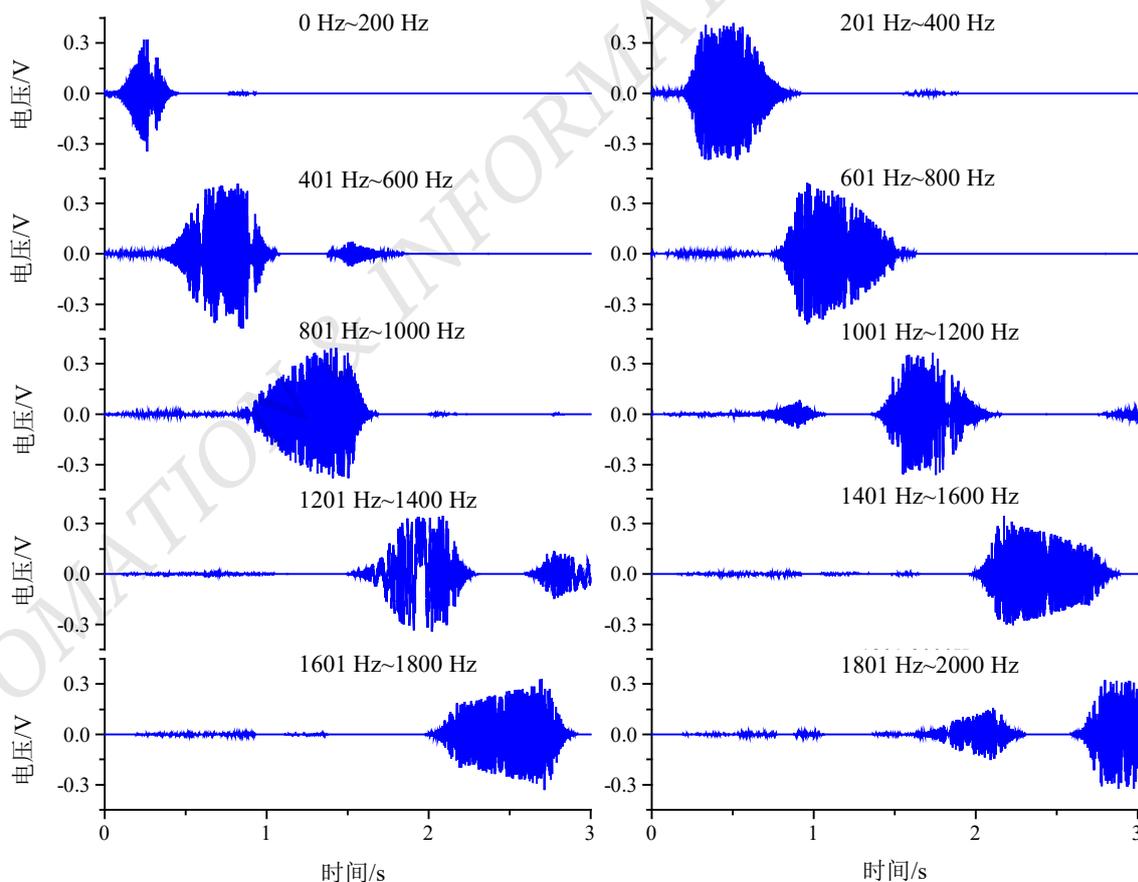


图4 频带 1~10 分解信号

通过式(3)可计算各个频带能量,由于第 11~64 个频带能量较小,此处只给出前 10 个频带能量,如表 1 所示。

表 1 前 10 个频带能量

频带/Hz	能量/v <sup>2</sup>	频带/Hz	能量/v <sup>2</sup>
0~200	95.85	201~400	490.47
401~600	433.06	601~800	432.10
801~1000	410.76	1001~1200	331.30
1201~1400	349.8	1401~1600	325.26
1601~1800	315.02	1801~2000	261.02

通过式(4),对 1~64 个频带能量进行叠加,可得含水率 24.1%时的小波包总能量为 3496 v<sup>2</sup>。以此类推,可计算出不同含水率时的小波包总能量,对应关系如图 5 所示。

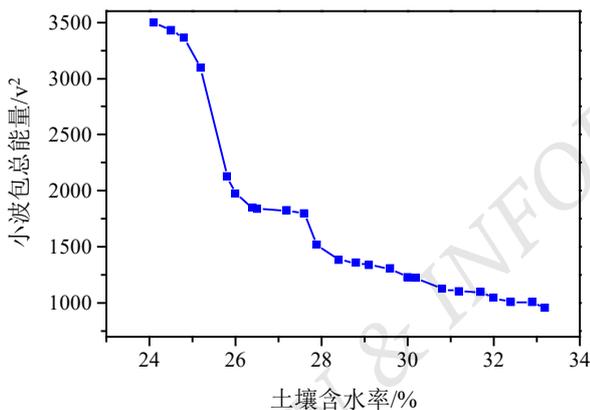


图 5 小波包总能量与含水率的关系

由图 5 可知:小波包总能量随土壤含水率的增大而减小。这是因为土壤含水率增大时,土壤孔隙中流

动水增多,流动水的扰动使土壤中孔隙变大,因此传播能量下降<sup>[7]</sup>。

## 4 结论

针对滑坡区土壤含水率难以进行区域性监测的问题,本文采用基于压电主动传感信号小波包分解法对土壤含水率监测方法进行试验研究。试验结果表明:1) 小波包能量值随着含水率的增大而减小,通过分析小波包能量值可以确定土壤的含水率状态;2) 小波包能量值对土壤含水率变化较为敏感,采用基于应力波小波包能量的土壤含水率监测在土壤区域性含水率监测方面具有很好的应用前景。

## 参考文献

- [1] 常丹,李旭,刘建坤,等.土体含水率测量方法研究进展及比较[J].工程勘察,2014,42(9):17-22,35.
- [2] 李玥,汪雅婷,黄致绮.土壤含水率测量方法分析及比较[J].仪表技术,2017(8):15-17.
- [3] KONG Q, WANG R, SONG G, et al. Monitoring the soil freeze-thaw process using piezoceramic-based smart aggregate[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2014, 28(2): 6014001.
- [4] 许斌,李冰,宋刚兵,等.基于压电陶瓷的钢管混凝土柱剥离损伤识别研究[J].土木工程学报,2012,45(7):86-96.
- [5] YEN G G, LIN K. Wavelet packet feature extraction for vibration monitoring[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2000, 47(3): 650-667.
- [6] 侯爽,何敬民.基于应力波时间反演法的土壤含水率监测[J].自动化与信息工程, 2020,41(6):32-36
- [7] 李君,徐岩,姜锐,等.超声波土壤含水量检测装置的模型建立与验证[J].农业工程学报,2017,33(13):127-133.

## Soil Moisture Monitoring Based on Wavelet Packet Energy of Stress Wave

Leng Zhipeng<sup>1</sup> He Jingmin<sup>2</sup> Hou Shuang<sup>2</sup>

(1. NingBo ShanGong Intelligent Security Technology Co., Ltd. Ningbo 315153, China

2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China )

(下转第 48 页)