

# 基于 STFT 的钻柱振动信号分析与应用

金朝娣<sup>1</sup>, 能昌信<sup>2</sup>, 王振翀<sup>1</sup>, 董 路<sup>2</sup>, 陈亚宇<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 (北京) 机电与信息工程学院, 北京 100083; 2. 中国环境科学研究院 固体废物污染控制技术研究所, 北京 100012)

**[摘 要]** 钻头在旋转钻井过程中, 钻头与井底岩面之间的相互作用引起钻柱强烈的振动, 钻进不同硬度介质层产生的钻柱振动信号不同。采用短时傅里叶 (STFT) 时频分析方法在牙钻条件下对 3 种介质模型中的钻柱振动信号进行时频分析, 提取不同介质层信号时频特征差异, 并利用统计分析结合相应高频带的能量累积值实时地预测钻头钻进情况并获取地层信息。实验结果表明 STFT 能有效区分不同介质层, 具有很强的实时性和准确率, 在现场钻探实验中有一定的应用价值。

**[关键词]** STFT; 振动信号; 实时预测

**[中图分类号]** P585 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-6225 (2011) 02-0029-04

## Vibration Signal Analysis and Application of Drill Stem Based on STFT

JIN Zhao-di<sup>1</sup>, NENG Chang-xin<sup>2</sup>, WANG Zhen-chong<sup>1</sup>, DONG Lu<sup>2</sup>, CHEN Ya-yu<sup>1</sup>

(1. Electromechanical & Information School China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Institute of Solid Waste Pollution Control China Environment Science Research Institute Beijing 100012, China)

**Abstract** Mutual action of auger and rock face would result in strong vibration of drill string during rotary drilling and vibration signals of drill string varied with different hardness medium. Applying short-term Fourier transformation (STFT) time-frequency method to analyzing vibration signals of drill string in 3 medium models. Time-frequency characteristic difference of different medium was collected. Statistical analysis combined with energy accumulation value of high frequency band was used to predict drilling state and obtain strata information. Test result showed that STFT could effectively distinguish different medium and was practicable.

**Key words** STFT; vibration signal; real-time prediction

钻探技术在石油天然气勘探、煤田地质勘探等发挥着重要的作用, 并已在其他各个领域得到广泛的应用。钻井作业中常用的钻头是牙轮钻头, 通过牙齿对井底岩石的冲击作用和钻头旋转切削作用, 完成破碎岩石<sup>[1]</sup>。钻头与岩石的相互作用会引起钻柱的轴向、横向和扭转振动<sup>[2]</sup>。通过对钻柱振动的研究以获得特征信息, 能识别所钻地层岩性、钻头工作状态、钻具故障等, 对减少钻井事故, 提高钻井效率具有重要意义<sup>[3-4]</sup>。通过分析钻柱振动的频谱特征并总结 2kHz 以上的高频段主要反映钻头与地层相互作用的信息, 从而为地层分层提供依据<sup>[5]</sup>。韩继勇提出可研究钻柱信号的统计特征 (均值、方差等数字特征), 将井底岩石划分成具有不同硬度的地层模式, 可以诊断、识别井底的岩性<sup>[6]</sup>, 并结合相关技术和反褶积来处理随钻地震数据, 进而获得丰富的地层信息<sup>[7]</sup>, 但这些处理都具有滞后性, 不能实时地诊断井底岩性。黄建林等引入小波理论来进行钻柱振动谱分析, 能够将钻柱振动状况的特征突出出来, 得到清晰的谱图, 但

对小波基的选取有严格要求, 且在现场试验中也很难做到实时性<sup>[8]</sup>。

钻头在不同介质层破岩钻进时, 引起的钻柱信号是一种非平稳时变信号, 本文根据此类信号特征基于 STFT (短时傅里叶变换) 灵活的时频分析能力将其应用于不同介质层钻柱信号的时频特征提取中, 揭示不同介质层的钻柱信号时频特征, 进而实时预测钻头钻进不同地层的时刻, 最后将统计特性应用到 STFT 谱分析中, 能进一步解释地层参数, 为现场工作人员提供实时预警, 减少停钻次数, 提高了钻探效率。

## 1 短时傅里叶变换基本理论

### 1.1 短时傅里叶变换

短时傅立叶变换基本思想是将信号加滑动时间窗, 并对窗内信号做局部傅立叶变换, 得到信号的时变频谱<sup>[9]</sup>。STFT 直观地反映了频谱随时间的变化关系, 既突出了信号的局部性, 又不丢失信号的时域和频域的信息, 从不同时刻的局部频谱差异上

**[收稿日期]** 2010-11-13

**[基金项目]** 国家高技术研究发展 (863 计划) 重点资助项目: 危险废物安全填埋关键技术与示范 (2007AA061303); 中央级公益性科研项目: 重金属 (铬) 污染场地污染特性快速识别技术研究 (2009KYYW04)

**[作者简介]** 金朝娣 (1984-), 女, 安徽安庆人, 博士研究生, 研究方向为信号处理与算法研究。

来显示信号的时变特征。传统的短时傅里叶变换可由式 (1) 表示:

$$\text{STFT}(b, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} \cdot \overline{w(t-b)} dt \quad (1)$$

令  $W_b \omega(t) = e^{j\omega t} \cdot w(t-b)$  (2)

$$\text{STFT}(b, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{W_b \omega(t)} dt \quad (3)$$

信号  $f(t)$  在时间  $t$  的短时傅里叶变换就是信号  $f(t)$  乘上一个以  $b$  为中心的“分析窗”  $w(t-b)$  所作的傅里叶变换。随着  $b, \omega$  的变换, 窗口在相空间不断平移。短时傅里叶变换就是通过这些移动的窗口来提取被变换函数的局部信息<sup>[10-11]</sup>。实际信号处理时需离散化, 离散 STFT 的定义为:

$$\begin{aligned} \text{STFT}(n, \omega) &= \sum_{r=-\infty}^{+\infty} w(r) x(n-r) e^{-j\omega(n-r)} = e^{-j\omega n} \\ &\sum_{r=-\infty}^{+\infty} w(r) x(n-r) e^{j\omega r} = e^{-j\omega n} [x(n) \cdot w(n) e^{j\omega r}] \quad (4) \end{aligned}$$

## 2 试验过程

试验设备采用总长 (包括钻头高度) 为 2000mm 的钻柱; 传感器采用最大值为 20g, 最小值为 -20g, 灵敏度为 250mv/g 加速度传感器, 采用纵向向采集信号; NI-PXI-1042 型号数据采集仪内置 DAQ 数据采集卡, 采集卡的采样频率为 20kHz, 秒表 2 块。采用的介质模型从上到下分别为厚度为 300mm 的软土层, 厚度大约为 600mm 的 70% 水泥固化土壤层, 厚度为 500mm 的砾石层。

现场试验时, 对钻柱进行均匀刻度, 根据钻柱钻进介质层的位移来判断钻头进入不同介质层的时刻, 并用 2 块秒表分别记录试验采集信号总时间、钻头进入软土层、固化土壤层和砾石层的时刻。

选用试验中某组数据, 具体信息为: 采集的振动信号持续总时间为 125s。根据钻柱钻进位移和秒表记录判断, 钻头在软土层中钻进 12s 后进入固化土层, 第 67s 左右钻头从固化土层进入砾石层。第 12s, 第 67s 分别是钻头钻进介质层发生改变的时间点。

## 3 钻柱信号 STFT 分析

### 3.1 STFT 时频分析

不同介质层的钻柱振动信号时域波形如图 1。

13s 以前加速度幅值绝对值主要集中在 2g (1g = 9.8ms<sup>-2</sup>) 以下且包络比较平稳; 大约从第 13s 开始幅值绝对值增大集中在 2g 左右, 且有幅值略大的脉冲存在; 第 68s 左右幅值再次改变, 比前段时间的幅值都大且大幅度的脉冲出现的频率增大。

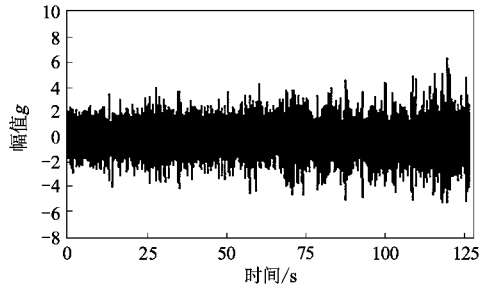


图 1 不同介质层钻柱振动信号时域波形

时域波形突变的时间点分别是第 13s 和 68s, 与试验过程中记录的介质层突变的时间点几乎一致。钻头在软土层中旋转钻进, 由于介质比较松软均匀, 各方向外界力使钻头平稳钻进, 钻柱产生的振动信号幅值最小; 钻头在固化土壤中旋转钻进时, 由于固化过的土壤硬度较大且存在不均匀性, 钻头主要靠旋转剪切钻进, 切削土壤时受到的边界应力较大, 幅值较软土层提高; 钻头遇砾石地层后, 由于钻头与砾岩之间的相互作用是无规律的、随机的, 且砾石对钻头的随机支承作用, 所造成的钻柱振动会相当大, 且产生幅值较大的瞬间高频脉冲信号。

时域波形虽能大概反映钻柱振动信号随钻头进入不同介质层的变化趋势, 但其只能反映钻柱振动信号的时域信息, 不能体现信号的频域信息, 对后期地质参数的综合获取存在明显的局限性, 传统傅里叶变换只能分析平稳信号, 且丢失时域信息。基于钻头在软硬不同的介质层中钻进产生的钻柱振动信号特征, 利用 STFT 的时频分析能力, 能同时有效提取此类信号的时域和频域特征, 并描述信号的能量。根据时频特征, 判断钻头进入不同介质层的时刻, 实时地预测钻头钻进的位置, 有利于根据钻进情况及其他需要及时做出决策。

图 2 所示的是 3 种介质层振动信号的 STFT 时频图, 左侧为归一化能量大小标示图。经大量试验验证, 选用窗长为 128 点的汉宁窗处理的误差最小。STFT 时频图准确地描述了此信号频率组成及能量大小, 并能刻画频率和能量随时间的变换规律, 从图中可明显地看出信号具有 2 种主要时频特征: 13s 之前高频信号能量较弱, 能量大约为 0.3, 第 13s 开始高频能量间歇性的增强, 第 68s 左右高频信号能量达到最大, 且频带也有所变宽。图 2 所示的能量值变化点和试验过程记录的钻头钻进的介质层发生改变的时间点一致。

钻柱信号能量的大小与所钻地层的硬度有关。现场试验表明: 地层越硬, 能量越强<sup>[4]</sup>。钻头钻进

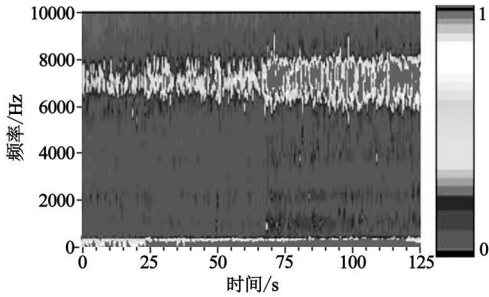


图 2 不同介质层钻柱振动信号 STFT 时频

较软的地层如土壤层，钻头旋转时受到的边界应力和底部应力比较均衡，信号的能量变化趋势比较平稳，没有突变情况发生；当钻头钻进较硬的需要钻头破碎的地层时，例如砾石层，钻头在钻柱压力和旋转的作用下，不断地冲击岩层，破岩钻进，钻头与砾岩之间相互作用时，产生一系列瞬间脉冲，通过大量试验测量分析，这些脉冲信号是高频突发脉冲信号，频率一般在 6kHz 以上。钻头在钻进不同硬度的介质层过程均含有频率大约在 800Hz 以下的噪声信号，因此，可以认为钻头在软硬不同的介质层产生钻柱振动信号是由准平稳噪声信号和高频突发脉冲信号组成。

### 3.2 STFT 实时预测分析

以上钻柱振动信号 STFT 分析是针对整个时间段的数据进行分析，虽能准确判断钻头进入不同介质层的时刻，但已存在滞后性。根据现场试验观察，钻头钻进软土层引起的振动较小和后面 2 种介质引起的钻柱振动有明显区别，但钻头撞击水泥固化土壤和撞击砾石层时引起的钻柱振动现象没有明显区别，操作人员在判断钻头是撞击水泥固化土壤还是已经进入砾石层存在一定的困难，一般情况需要停止打钻，通过钻孔取样才能判断，这一过程需要耗费大量时间。本文进一步将统计特性引用到 STFT 时频分析中，能在不停止打钻的情况下实时准确预测钻头进入不同介质层。

要实时预测钻头钻入地层状况，在保证钻机钻速的情况下，经大量试验测定 1s 内实时预测，已有很高的准确度。钻头旋转钻进撞击砾石时会产生高频脉冲，且产生高频脉冲概率和撞击砾石的次数成正比，对高频信号分析是区分介质层的关键。随机抽取某 1s 内水泥固化土中和砾石中钻柱振动信号 STFT 分析，如图 3 所示：(a)，(b) 图显示因钻头撞击较硬地层产生的高频信号集中在 6000~8000Hz，砾石中高频信号略微丰富且频带略宽但两者没有显著的差异，不能作为实时判断的依据。

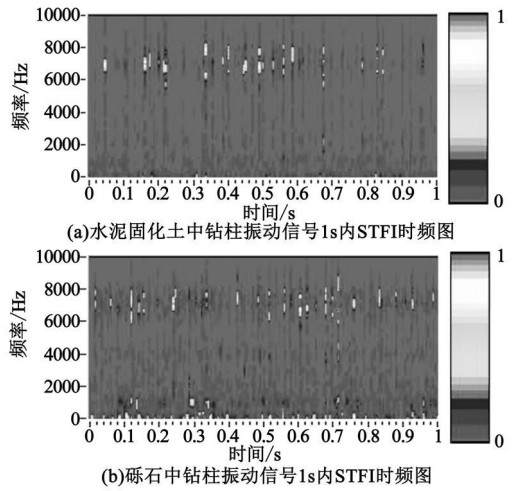


图 3 不同介质层 1s 内 STFT 时频

基于以上分析，本文采用新的方法，分别将经水泥固化土壤中和砾石中的钻柱振动信号 6000~8000Hz 范围内的高频信号成分进行 5ms (高频脉冲信号平均持续时间) 内的能量叠加，并对 1s 内的能量累加值进行统计分析进行阈值判断。

整段数据能量累加结果如图 4 所示。图中显示能量累加值有明显的差异，(a) 图中能量值集中在  $0.2g^2$  左右，最大值为  $0.8g^2$ ；而 (b) 图中显示能量值集中在  $0.5g^2$  左右，且最大值约为  $3.4g^2$ 。对每 1s 内的 200 个能量累加值进行统计分析，设立合理的参考值进行分层判断。钻头在水泥固化土壤中钻进持续时间大约为 55s，剔除钻头刚从空气层进入土层的 1s 截取后 54s 数据进行 STFT 和统计分析，同样对钻头进入砾石层时后 56s 数据进行分析。以 1s 内 200 个能量累加值为一个样本。得出固化土壤中的能量样本共有 54 个，砾石中共有 56 个，按一定规律分别从这两组样本中随机抽取 30 个样本，对每个样本进行能量值统计分析。具体统计结果见表 1。

表 1 1s 内能量统计值 (总数 200 个)

介质层	能量		累加值 / $g^2$ (总数 200 个)	
	<0.5 的个数	>0.5 的个数	>0.8 的个数 (平均值)	大于 1 的个数 (平均值)
固化土层	$\geq 197$	$\leq 3$	0	0
砾石层	$\leq 195$	$\geq 5$	4	2

1s 内共有 200 个能量累积值，在对经过水泥固化土壤中 30 个样本分析发现：1s 内 5ms 高频能量累积值大于  $0.5g^2$  的个数最多为 3；对砾石中的 30 个样本分析得出 1s 内 5ms 高频能量累积值大于  $0.5g^2$  的最少为 5，平均值为 9。后对其他 13 组采

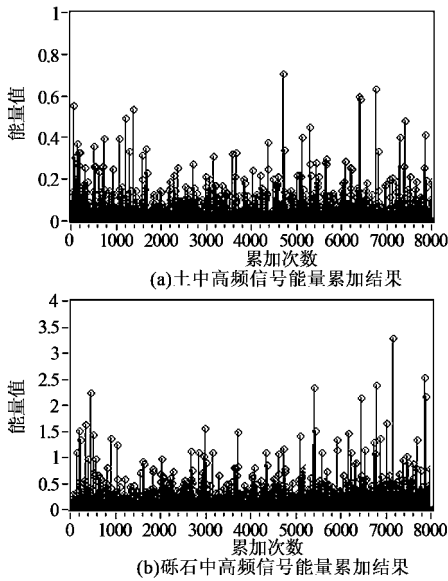


图 4 能量累加结果

集的数据进行同样地分析也得出同样的规律。基于以上分析，将  $1s$  内 200 个高频能量累积值大于  $0.5g^2$  的个数作为判断钻头进入不同地层的依据，在本次实验中，个数小于 3 的为钻头撞击水泥固化土层，个数大于 5 的为钻头进入砾石层。

#### 4 结论与展望

(1) 钻头钻进不同介质层时会引起钻柱振动响应不同，利用 STFT 分析对钻柱振动信号进行处理分析提取不同介质层的钻柱振动信号时频特征，能准确判断钻头钻进不同介质层的时刻。

(2) 基于高频信号能量特征结合统计分析，实时预测钻头钻进过程，实时显示井下岩性变化，

在地层分层识别上具有很强的可操作性，同时减少现场操作误判，大大提高了钻探效率。在钻探工程应用中具有一定的的实际应用价值。

(3) 本文现场试验所用钻头为牙钻，且钻探深度约为 1400mm，对于其他类型钻头和更深钻进深度，该方法是否有效有待于进一步研究。

#### [参考文献]

[1] 韩继勇, 王 瑞, 单联瑜, 等. 钻井过程中实时检测裂缝的方法 [J]. 钻采工艺, 2010, 30 (2): 5—7.  
 [2] 李子丰, 张永贵, 侯绪田, 等. 钻柱纵向和扭转振动分析 [J]. 工程力学, 2004, 21 (6): 203—209.  
 [3] 曲 展, 刘得铸. 钻柱振动问题及其理论研究进展 [J]. 石油机械, 1996, 24 (2): 54—57.  
 [4] Macpherson J.D, Jogi P.N, Kingnan J.E.E. Application and analysis of simultaneous near bit and surface dynamics measurements [J]. SPE Drilling and Completion, 2001, 16 (4): 230—238.  
 [5] 高 岩. 三牙轮钻头钻进时钻柱轴向振动的特征 [J]. 石油学报, 2000, 21 (6): 93—96.  
 [6] 韩继勇. 钻进中钻柱系统的辨识 [J]. 西南石油学院学报, 1999, 21 (2): 57—60.  
 [7] 张绍槐, 韩继勇. 随钻地震技术的理论及工程应用 [J]. 石油学报, 1999, 20 (2): 176—179.  
 [8] 黄建林, 罗 飞, 付建红, 等. 小波理论在钻柱振动谱分析中的应用 [J]. 钻采工艺, 2008, 31 (2): 7—9.  
 [9] 廖传军, 李学军, 等. STFT 在 AE 信号特征提取中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2008, 9 (29): 1862—1867.  
 [10] 石海杰. 基于 STFT 与 WVD 的时频分析方法 [J]. 电子科学, 2008 (23): 9—24.  
 [11] 胡明顺, 潘冬明, 等. 几种时频分析方法对比及在煤田地震勘探中的应用 [J]. 物探与化探, 2009, 6 (33): 691—709.

[责任编辑: 李宏艳]

(上接 55 页)

交通一体化开发是一个鲜明特征，与此相对应，矿区的社会、经济、环境均将发生深刻变化，传统的单纯针对某一环境要素或某一开发行为的环境管理模式已经难以适应形势的要求。从实现矿区可持续发展的角度出发，需要将环境问题放在社会经济大系统中通盘考虑。在具体实践中，除了制定更有针对性地环境管理政策和标准外，部门联动综合治理机制和规范的煤炭行业生态补偿机制尤其重要。

#### [参考文献]

[1] 王 颖, 郭惟嘉. 煤炭开采对环境的影响及对策 [J]. 煤炭技术, 2007, 26 (5): 2—4.

[2] 才庆祥, 徐志远. 我国煤炭资源开发存在的若干问题及对策 [J]. 露天采矿技术, 2005, (5): 1—4.  
 [3] 耿海清, 陈 帆, 马铭锋. 以战略环评缓解重化工业时代的资源环境压力 [J]. 三峡环境与生态, 2009, 2 (5).  
 [4] 鲍 超, 方创琳. 我国矿业城市资源可持续开发利用的战略思路与模式——东营、焦作、克拉玛依市资源开发利用的启示 [J]. 自然资源学报, 2006, 21 (6): 900—909.  
 [5] 董霁红, 卞正富, 宋 冰, 等. 矿业城市景观生态规划的研究——以徐州市为例 [J]. 矿业研究与开发, 2006, 26 (4): 105—108.  
 [6] 孙庆先, 胡振琪. 中国矿业的环境影响与可持续发展 [J]. 中国矿业, 2003, 12 (7): 23—26.  
 [7] 中国生态补偿机制与政策研究课题组. 中国生态补偿机制与政策研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
 [8] 耿海清. 基于资源与环境保护的煤炭开发功能区划 [J]. 生态学杂志, 2007, 26 (5): 732—736.

[责任编辑: 施红霞]