DOI: 10.11883/bzycj-2017-0178
文章编号: 1001-1455(2018)01-0028-09

爆破地震波中 S 波识别方法及其应用*

杨招伟[1,2],卢文波[1,2],高启栋[1,2],陈 明[1,2],胡浩然[1,2],严 鹏[1,2],王高辉[1,2]
(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北 武汉 430072;
2. 武汉大学水工岩石力学教育部重点实验室,湖北 武汉 430072)

摘要: S 波震相初至时刻的精确识别是岩石动力学参数反演的关键环节。其拾取的精度和速度直接影响到岩石动力学参数反演的精度和效率。对 S 波的识别研究大多都集中在地震领域,现有方法难以有效的识别工程尺度下的爆破地震波 S 波的到时。本文中拟提出一种适用于工程尺度下 S 波的识别方法。该方法不对振动信号进行滤波处理,采用短时平均过零率、偏转角、偏振度和横向能量与总能量比值等 4 个识别参数对 S 波进行识别。结合丰宁抽水蓄能电站地质勘探洞爆破实验实测数据识别效果与数值模拟结果表明:该方法在工程尺度下的识别误差小于 3%。该算法能较好地适用于工程尺度下 S 波初至时刻进行识别。

关键词: S 波识别;岩石力学参数;偏转角;偏振度
中图分类号: O389 **国标学科代码**: 1303599 **文献标志码**: A

近年来,我国正在兴建的一批大型水电工程都处在西南、西北地区的崇山峻岭之中,均需进行高陡边坡和地下洞室的爆破开挖,由此导致一系列的岩石工程安全问题,特别是在爆炸荷载、地震荷载等动荷载作用下的变形和稳定问题[1-4]。因此,对岩石各种动力学参数的研究就显得更加重要,如何准确地确定现场岩石动力学参数是工程施工过程中需着重考虑的一个方面。现阶段工程中常用的岩石参数获取方法有室内实验法和原位实验法,但由于室内实验针对小尺度岩样进行研究,因而得到的也是小尺度岩样的动力学参数,由于岩体具有较为明显的尺度效应,为了将室内实验测试的小尺度岩样动力学参数的研究过渡到现场大尺度岩体,因此,现场原位实验具有不可替代的作用,然而原位实验也有周期长,费用高等缺点[5]。而通过测定爆破地震波(P、S 波)在岩石中的传播速度反演岩石动力学参数的方法较为简单快捷。如何精确的判别 P、S 波震相初至时刻对岩石动力学参数反演工作的效率和精度有着不可忽视的影响,因此根据实测振动波形进行 S 波的初至时刻识别值得开展深入研究。

迄今为止,水利工程中的爆破地震波的识别研究的方法和技术直接来自于对天然地震活动的研究。对于天然地震,针对 P、S 波初至时刻判别方面进行了大量的研究。Baer 等[6]指出 P 波初至时刻的自动拾取算法主要是基于监测振动信号和噪声的不同特征作为 P 波震相识别的判据。Stevenson 等[7]首次提出利用长短时窗平均比来自动拾取 P 波震相初至时刻。如今发展出的 P 波到时自动识别方法主要有:自回归模型、AIC 法、波形变化增长法、偏振分析法及长短时间平均方法等[8-10]。但在 S 波自动识别方面,由于 P 波尾波以及各种反射波相的相互干扰,以上的方法用于 S 波震相自动识别的效果较差。Diehl 等[11]提出了用于地震层析成像的 S 波自动识别方法,该方法需要对振动信号做 STA/LTA 判定、偏振分析等处理,计算量较大,比较适合做后续分析;Baillard 等[12]利用峰态特征函数和特征向量的分解拾取三分像地震信号的 P、S 波震相。刘希强等[13-14]提出利用振动信号在不同尺度的小波变换中偏振信息的不同来确定 S 波震相的小波变换方法;何先龙等[15]提出一种二次自回归模型拾取 P、S 波的初至时间;张楚旋等[16]采用短时平均过零率、短时能量等 4 个指标作为 S 波自动拾取的指标。

虽然学者们在天然地震领域上 S 波的拾取上取得了丰富的研究成果,但是与天然地震信号相比,水利工程爆破开挖产生的微震信号持续时间较短、背景噪音复杂、分布范围较小,受结构面等地质的不均

* **收稿日期**: 2017-05-18; **修回日期**: 2017-10-31
基金项目: 国家自然科学基金项目(51779190);国家杰出青年科学基金项目(51125037)
第一作者: 杨招伟(1960—),男,博士研究生; **通信作者**: 卢文波,wblu@whu.edu.cn。

匀性影响很大，导致 P、S 波分离不明显，致使适用于地震领域的 S 波识别算法在水利工程尺度下识别效果不明显。因此，对水利工程爆破开挖产生的微震信号的 S 波自动识别进行更深入的研究具有较为重大的意义。

本文中旨在研究根据实测爆破开挖产生的振动波形进行 S 波震相的快速识别，在满足安全生产精度要求的前提下，秉承信号处理上“滤波越少，算法越好”的原则[17]，对原始振动数据不进行任何的滤波处理。基于其他方法已经得到的 P 波震相到时，在此基础上，对前人识别方法进行改进，根据 P 波、S 波在频率、偏振方向和水平能量与总能量上的差异对 S 波进行精确识别。对于爆破地震波中 P 波震相的初至时刻识别，推荐采用 Baer 等[6]提出的自动识别算法。

1　识别方法及特征函数

水利水电工程开挖爆破过程中，炸药能量的很大一部分以地震波的形式向四周传播，引起地面振动。爆破地震波在传播过程中可被分为体波和面波，其中根据传播过程中质点运动和传播方向关系，可以将体波进一步分为 P 波和 S 波，相较于 P 波，S 波具有传播速度仅次于 P 波，并且其周期较长、振幅较大的特点。Diehl 等[11]指出，振动信号监测仪器会最先监测到 P 波到达引起的振动信号，而相对于较为容易的识别出 P 波初至震相时刻，在 S 波震相识别方面，由于 P 波尾波信号以及各种转换波信号，如 PS 波的强干扰导致 S 波淹没在 P 波中难以识别。可根据 P、S 波周期及偏振特性的差异，对与周期差异相关的短时平均过零率及偏振特性差异相关的偏转角、偏振度及横向能量与总能量差异等参数进行分析，现分别讨论。

1.1　确定计算窗长

在对上述识别参数进行计算时，当计算窗长选取过长，上述特征参数的值变化不明显；计算窗长选取过短，则导致识别参数值的不稳定。Cichowicz 等[18]提出根据 P 波的卓越频率确定时窗长度的方法。计算时窗长度与 P 波卓越频率成反比关系，具体表达式如下：

$$l=\frac{1}{f_{\mathrm{p}}\Delta t} \tag{1}$$

式中：l 为计算窗长，Δt 为仪器采样间隔时间，f_{p} 为 P 波的卓越频率。

Boore 等[19]提出 P 波的卓越频率与振动波形的速度功率谱密度和相应的位移功率谱密度存在如下式所列关系：

$$f_{\mathrm{p}}=\frac{\sqrt{m_0/m_1}}{2\pi} \tag{2}$$

式中：$m_0=2\int D^2(f)\mathrm{d}f$，$m_1=2\int v^2(f)\mathrm{d}f$，$D^2(f)$、$v^2(f)$ 分别为位移功率谱密度和速度功率谱密度。

1.2　短时平均过零率

由于 P 波的周期小于 S 波周期，在监测信号上就表现出如图 1 所示的波形前后疏密不同的变化，为了更好地识别 S 波震相初至时刻，需对这种疏密变化进行量化。对于平稳信号来说，可以直接用周期或频率直接衡量。而对于地震信号、爆破产生的振动信号、噪声信号等非平稳信号而言，由于其周期的不稳定，则用短时平均过零率来进行度量。

振动信号单位时间内过零的次数可以定义为短时平均过零率 K_1，其值可以作为 S 波初至震相时刻拾取的指标。其定义式为：

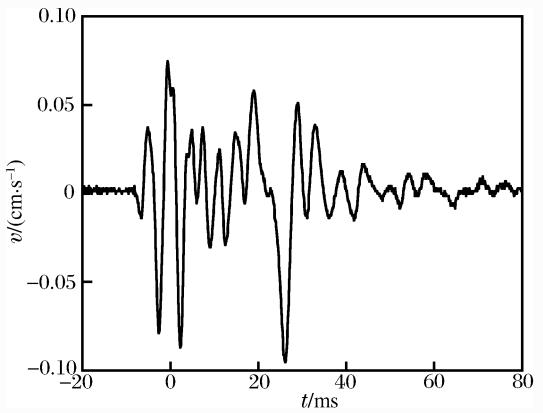


图 1　S 波初至时刻前后波形变化图

Fig. 1　Change of waveforms before and after S-wave arrival

$$K_1=\frac{\sum_{i=m}^{n}\mathrm{sgn}[x_{i+1}]-\mathrm{sgn}[x_i]}{(n-m)\Delta t} \tag{3}$$

式中：$\mathrm{sgn}[x]=\begin{cases}1 & x\geqslant 0\\ 0 & x<0\end{cases}$。$\Delta t=1/f$，$f$ 为信号的采样频率；m、n 为信号的点序号。

由式(3)可知，短时平均过零率 K_1 的值与选取的时窗长短有关。关于 S 波的初至时刻震相，因此主要研究 S 波到达前后振动信号周期变化的差异。将 P 波初至时刻到 S 波初至时刻这一区间称为 S-P 区间，将 S 波震相初至时刻后 $(n_s-n_p)\Delta t$ 时窗内的区间，称为 S′-S 区间。定义公式为：

$$K_2=\frac{\sum_{i=n_P}^{n_s}\mathrm{sgn}[x_{i+1}]-\mathrm{sgn}[x_i]}{(n_s-n_p)\Delta t} \tag{4}$$

$$K_3=\frac{\sum_{i=n_s}^{n_{s'}}\mathrm{sgn}[x_{i+1}]-\mathrm{sgn}[x_i]}{(n_{s'}-n_s)\Delta t} \tag{5}$$

式中：K_2 为 S-P 区间内的短时平均过零率，K_3 为 S′-S 区间内的短时平均过零率，$n_{s'}=n_s+(n_s-n_p)$，n_p、n_s 分别为 P 波初至时间和 S 波初至时间对应的信号点序号。

根据张楚旋等[16]对建立的微震数据库的信号研究可知，短时平均过零率与振动信号的 S 波震相的初至时刻存在着对应关系，定义 S 波初至时刻震相前后的短时平均过零率之比 $C_1=K_2/K_3$，计算发现，C_1 的取值范围大于 1.2。

1.3 偏转角

确定 P 波初至到时后，结合 Kanasewich[20]提出的偏振特性概念，选取 P 波到时后 l 长度的计算其协方差矩阵最大特征值所对应的特征向量，即 P 波的偏振方向。计算式如下：

$$\boldsymbol{M}=\begin{pmatrix}\mathrm{cov}(x,x) & \mathrm{cov}(x,y) & \mathrm{cov}(x,z)\\ \mathrm{cov}(y,x) & \mathrm{cov}(y,y) & \mathrm{cov}(y,z)\\ \mathrm{cov}(z,x) & \mathrm{cov}(z,y) & \mathrm{cov}(z,z)\end{pmatrix} \tag{6}$$

式中：$\mathrm{cov}(n,m)=\dfrac{\sum_{i=1}^{l}(n_i-\bar{n})(m_i-\bar{m})}{l}$，$n,m=x,y,z$；$\bar{n}$、$\bar{m}$ 为 l 长度所对应的数据的均值。

P 波初至时刻点为计算起点，取时窗长度为 l 个采样点往后开始进行逐点进行滑动，求得各个计算窗口最大特征值所对应的特征向量，并计算其与 P 波偏振方向的夹角即偏转角 α。对偏转角 α 进行归一化处理得：

$$F_2=\frac{\alpha}{\pi/2} \tag{7}$$

1.4 偏振度

P、S 波具有较高的线性偏振度，而 P 波尾波则更多的表现为椭圆偏振的特性。Cichowicz 等[18]提出直接根据实测地震振动数据求取偏振度的方法。计算公式为：

$$F_3=\frac{(\lambda_1-\lambda_2)^2+(\lambda_2-\lambda_3)^2+(\lambda_1-\lambda_3)^2}{(\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3)^2} \tag{8}$$

式中：λ_1、λ_2、λ_3 为各个数据窗对应的协方差矩阵的特征值。

1.5 横向能量与总能量比值

确定 P 波偏振方向 L 后，结合地震波的偏振特性和传播方向间的关系把原有 X(水平径向)、Y(水平切向)、Z(竖直向)坐标系旋转为 L(P 波偏振方向)及 Q、T(S 波偏正方向)坐标系，转换式为：

$$\begin{pmatrix}L\\ Q\\ T\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}u_{11} & u_{12} & u_{13}\\ u_{21} & u_{22} & u_{23}\\ u_{31} & u_{32} & u_{33}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}X\\ Y\\ Z\end{pmatrix} \tag{9}$$

式中：u_{ij} $(j=1,2,3)$为第 i 个主方向与坐标轴 X、Y、Z 夹角的余弦值。

水平能量与总能量的比值，即计算窗长内 2 个横向方向能量与 3 个方向总能量的比值：

$$F_4=\frac{\sum_{i=1}^{l}(Q_i^2+T_i^2)}{\sum_{i=1}^{l}(L_i^2+Q_i^2+T_i^2)} \tag{10}$$

通过对实测波形的偏振转换，参数 F_4 受震动波形中噪声影响较小，因此参数 F_4 可以用来提高 S 波震相识别的精度。P 波初至时刻、P 波尾波及 S 波初至时刻所对应的识别参数 F_2、F_3、F_4 的理论统计平均值如表 1 所示。

表 1 统计平均值

Table 1 Statistical averages

P 波震相初至	P 波尾波	S 波震相初至
$F_2=0$	$0<F_2<1$	$F_2=1$
$F_3=1$	$0<F_3<1$	$F_3=1$
$F_4=0$	$0<F_4<1$	$F_4=1$

对于实测振动数据而言，由于受 P 波尾波及 P-S 转换波的影响，特征参数 F_2、F_3、F_4 的统计平均值难以精确计算。因此对于 S 波初至时刻判定，选取特征参数偏转角 F_2、偏振度 F_3 和横向能量与总能量比值 F_4 三者的平方积作为其判定的特征函数，即

$$C_2=F_2^2F_3^2F_4^2 \tag{11}$$

特征函数 C_2 对识别参数 F_2、F_3、F_4 进行平方处理，扩大了 S 波与 P 波尾波及转换波对应特征值的数值差异。由表 1 可知，识别特征函数 C_2 值为 1 时所对应的时刻为 S 波震相初至到时。但一般来说，由于受 P 波尾波以及 P 波识别精度等因素影响，S 波初至时刻对应的特征函数 C_2 值往往不等于 1。为了能够定量识别 S 波初至时刻，将短时横向能量值作为权重系数，S 波初至时刻加权识别特征函数为：

$$C_w=C_2\sqrt{Q^2(t)+T^2(t)} \tag{12}$$

S 波初至时刻会使特征函数 C_2 与横向能量 $Q^2(t)+T^2(t)$ 急剧增大，因此加权识别特征函数值最大对应时刻即为 S 波震相初至时刻。对加权识别特征函数进行归一化处理得：

$$N=\frac{C_w}{\max(C_w)} \tag{13}$$

1.6　S 波初至时刻识别流程

按式(4)、(5)分别计算 P-S 区间(1～l)、S-S′区间($l\sim l+(l-1)$)内的短时平均过零率，然后再按照 $C_1=K_2/K_3$ 计算特征函数 C_1 值。对 S 波初至时刻进行初步判定，缩小加权识别特征函数 C_w 的计算空间，提升此方法计算效率。根据式(7)、(8)、(10)分别计算出识别参数 F_2、F_3、F_4 的值并按式(12)计算加权特征函数 C_w 的值，最终确定 S 波震相初至时间。

2　数值模拟及对比分析

为了进一步验证上述 S 波识别方法的正确性，基于 LS-DYNA 动力有限元软件，模拟半无限岩体中柱状药包爆破诱发的振动传播规律。计算中岩石物理力学参数及拉压损伤模型参数取值见表 2[21]。因模型具有对称性，采取 1/4 模型模拟岩体中单孔爆破特性。模型尺寸为 10 m×9 m×20 m，单元 240 304个，节点 260 012 个，由于炮孔直径较小，网格划分采用从炮孔到边界渐变方式剖分，炮孔附近单元最小尺寸为 0.003 6 m，边界最大尺寸 0.8 m，岩体采用 solid 164 单元模拟。炮孔直径 90 mm，装药直径 70 mm，孔深 3 m，堵塞 0.9 m，在模型顶面布置振动监测点，有限元计算模型如图 2 所示。

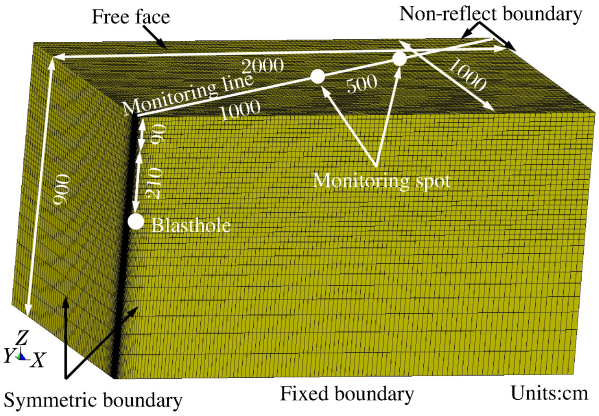


图 2 计算模型示意图

Fig. 2 Sketch of calculation model

表 2 岩体物理参数

Table 2 Physical parameters of rock mass

ρ/(kg·m^{-3})	E/GPa	ν	σ_b/MPa	损伤参数		K_I/(MN·m$^{-3/2}$)	λ/(kg·J^{-1})
				k	m		
2 530	40	0.22	2	2.33×10^{24}	7	0.92	0.000 1

图 3 分别给出了爆心距为 10、15 m 处三向爆破振动速度时程变化曲线。由表 2 所给出的岩石动力学参数,根据理论公式:

$$v_p=\sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}\qquad v_s=\sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \tag{14}$$

式中:E 为岩体动弹性模量,kPa;ν 为岩体动泊松比,ρ 为岩体密度,g/cm^3。

可以计算出 P 波的传播速度为 4 248 m/s,S 波的传播速度为 2 545 m/s。由此可以估算出不同爆心距 S 波的准确初至时间,如表 3 所示。应用上述 S 波到时识别方法对以上测点进行 S 波初至时刻识别,将识别结果与理论到时进行对比分析。根据表 3 结果,采用该方法拾取与理论初至时间相比,二者拾取 S 初至时刻相差不大,拾取误差小于 3%,可见该方法具有较高的识别率,可以满足工程尺度的实际要求。

表 3 实验数据与理论模型结果对比

Table 3 Comparison between experimental and theoretical data

R/m	t/ms		ε/%
	实验	理论	
10	3.85	3.92	1.3
15	5.90	5.89	0.3

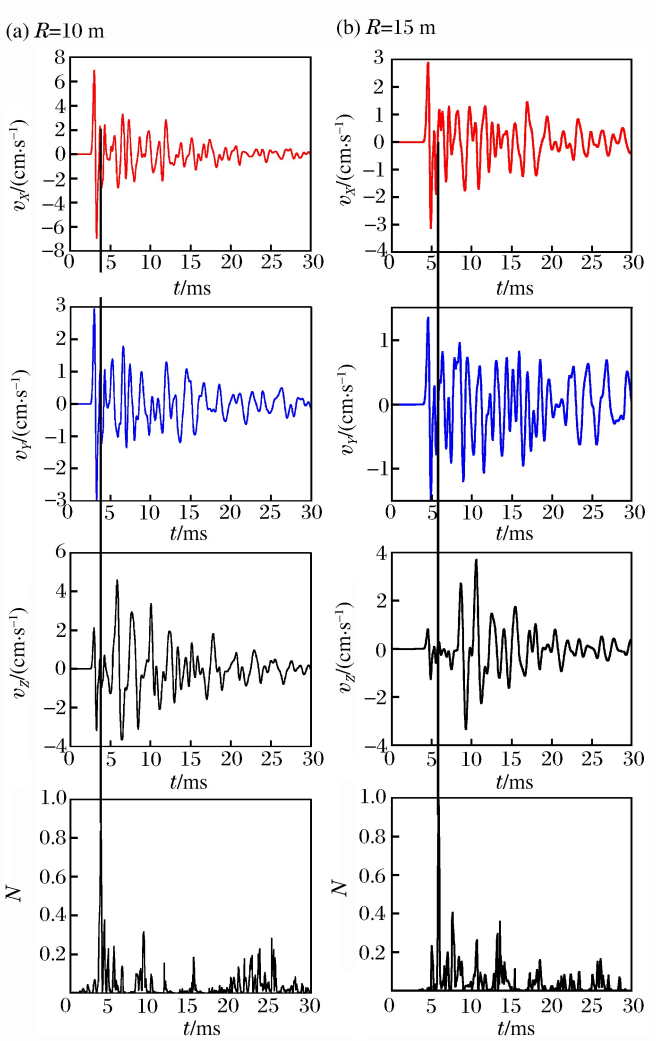


图 3 不同爆心距下 S 波识别效果图

Fig. 3 S-wave identification at different distances from explosion center

3 工程应用研究

3.1 工程概况

丰宁抽水蓄能电站位于中国河北省丰宁满族自治县境内,电站工程分两期开发建设,一期工程和二期工程装机容量分别为 1 800 MW,装机 6 台,单机容量 300 MW,在电网系统中承担调峰、调频、调相和事故备用任务。利用二期工程地下厂房地质勘探洞开挖的时机和条件,进行竖直钻孔爆破实验。实测资料表明该地质勘探洞以花岗岩为主,总体质量较好,因此可以认为在本次实验范围内岩体为均质、各向同性的弹性体,实验过程中炮孔及振动监测点布置如图 4 所示,采用半秒微差延期爆破,逐孔起爆。爆破设计参数见表 4,表 4 中 D 为孔径,h 为孔深,d 为药卷直径,L 装药长度,L_b 堵塞长度,m 单响药量。利用振动监测仪器得到了各个测点的振动时程曲线,利用上述方法分析实测振动波形图对 S 波的初至时刻进行精确识别。

基于《爆破安全规程》、《水电水利工程爆破安全监测规程》等规范标准开展爆破振动测试,爆破振动测试系统由三向速度检波器、信号采集与记录设备、数据处理系统 3 个部分组成。主要测试设备为

TC-4850爆破振动智能监测仪。在实验过程中，TC-4850 爆破振动智能监测仪用于监测爆破振动速度，其采样频率为 8 000 Hz。结合爆破实验进行爆破振动监测，在探洞中布置爆破振动测试线，如图 4，每个测点相对于爆源具有水平径向、水平切向及垂直向 3 个方向，以获得水平钻孔爆破不同工况的爆破振动的传播规律。实验中，TC-4850 仪器布置在图 4 所示的 1#、2#、4#、6#、8# 及 10# 测点位置。

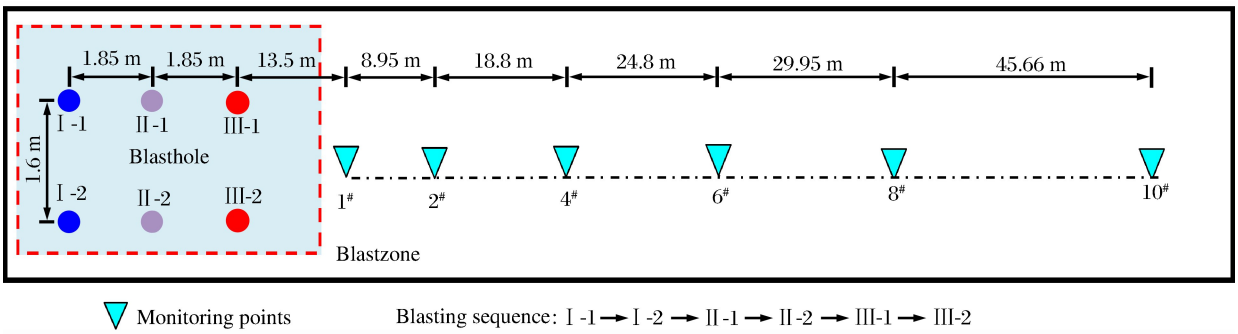


图 4　竖直孔爆破实验设计示意图

Fig. 4　Schematic diagram of the site blasting experiment

表 4　竖直钻孔爆破实验参数

Table 4　Parameters of blasting experiment

炮孔编号	起爆位置	D/mm	h/cm	d/mm	L/cm	L_b/cm	m/kg
Ⅰ-1	上、底部	76	800	50	600	200	12.0
Ⅰ-2	底部	76	800	50	600	200	12.0
Ⅱ-1	中部	76	600	50	420	180	8.4
Ⅱ-2	底部	76	600	50	420	180	8.4
Ⅲ-1	中部	76	450	50	270	180	5.4
Ⅲ-2	底部	76	450	50	270	180	5.4

注：∅50 mm 药卷由 2 节∅32 mm 炸药捆绑而成。

3.2　S 波初至时刻识别效果

应用上述 S 波震相加权识别特征函数结合前文所述的识别流程对丰宁二期工程地下厂房探洞开挖实测振动数据进行 S 波初至时刻识别，识别结果见表 5。限于篇幅，只给出典型测点（10# 测点）实测振动波形 S 波初至时刻的识别效果，如图 5 所示。

表 5　实验 S 波震相初至时刻识别结果

Table 5　S-wave arrival identification in experiment

炮孔编号	t/ms					
	1#	2#	3#	4#	5#	6#
Ⅰ-1	431.63	3.25	5.50	8.75	12.13	11.25
Ⅰ-2	899.50	471.13	473.13	476.50	479.88	478.63
Ⅱ-1	1 533.63	1 105.13	1 107.00	1 110.25	1 113.38	1 112.50
Ⅱ-2	1 630.88	1 202.50	1 204.25	1 207.50	1 210.13	1 209.88
Ⅲ-1	2 585.00	2 156.50	2 158.50	2 161.88	2 164.00	2 164.13
Ⅲ-2	3 054.88	2 626.38	2 628.25	2 631.63	2 634.00	633.75

从以上数值模拟分析及丰宁水电站实测波形的应用效果可知，本文中所述方法对 S 波震相初至时刻的识别率较高，且具有简单、快捷等优点，可以满足实际水利工程的要求。由于该方法是建立在 P 波已经被识别的基础上的，下面对其识别参数做进一步论述。

（1）从操作简单快速来看，根据周期差异作为识别函数 C_1 对 S 波进行初步识别速率最快，但由于 P 波尾波及转换波对频率的影响导致该特征函数的识别准确率较低，可用于缩小加权识别特征函数 C_w 计算空间，提升计算效率。

(2)根据横向能量与总能量比值识别参数对 S 波震相的识别效果最优。造成该现象的主要原因是因为经过坐标系变换,把 P 波旋转到垂直分量(L 轴),S 波分别旋转到横向坐标轴 Q、T 方向,能够有效压制 P 波尾波及其他干扰信,并且特征函数 C_2 计算取各参数平方的乘积结果作为识别判据,扩大了 P 波、P 波尾波与 S 波的差异,使之更加易于识别。

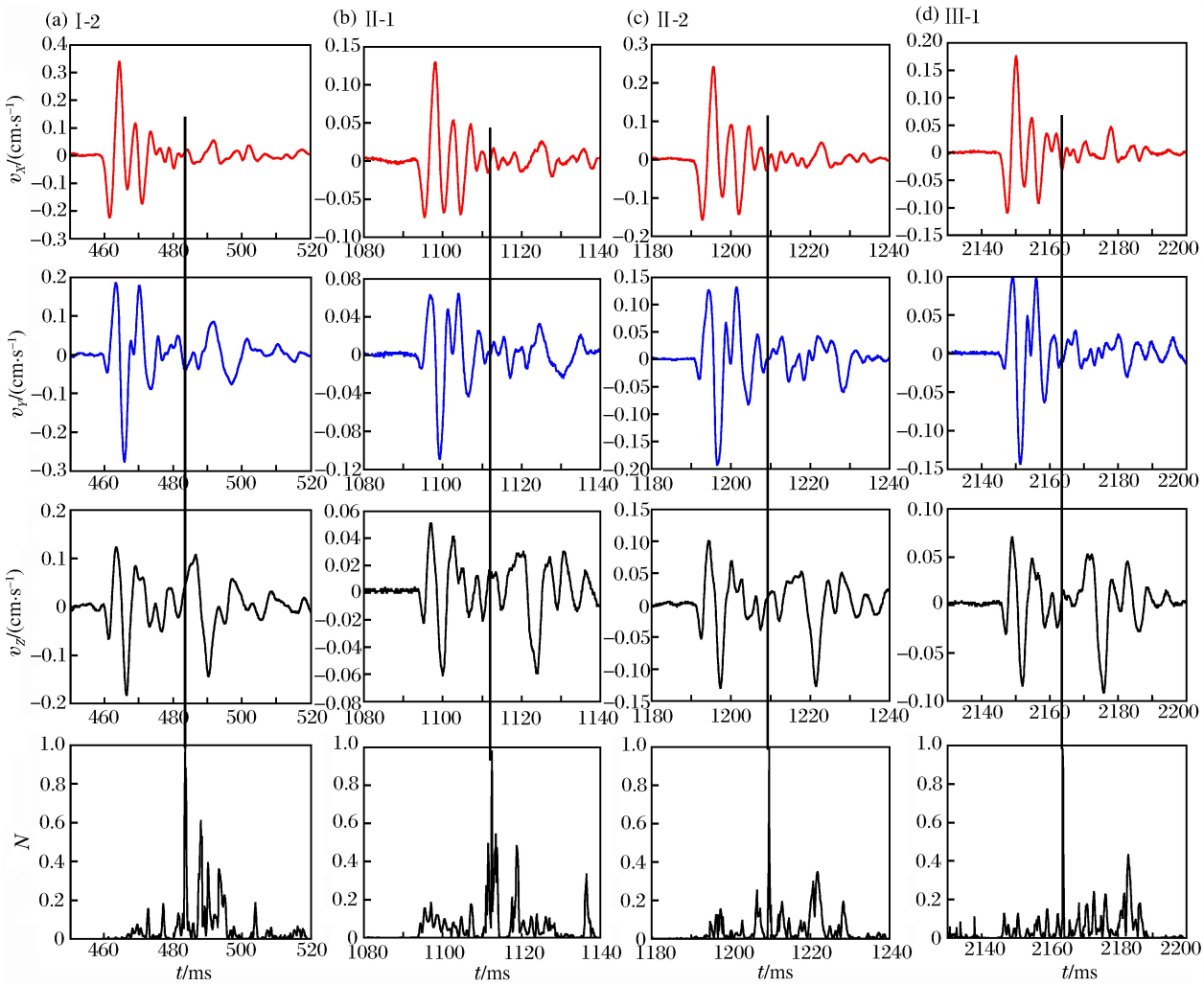


图 5 典型测点 S 波识别效果图

Fig. 5 S-wave identification for typical measuring point in experiment

4 结 论

提出一种针对实测爆破地震波 S 波震相初至时刻识别方法。通过对丰宁抽水蓄能电站地质勘探洞开挖现场实验实测爆破振动数据分析,可以得到以下结论:

(1)该方法不对爆破振动信号进行任何滤波处理秉承“滤波越少,算法越好”的思想,直接利用 P、S 波在频率、偏转角、偏振度和横向能量与总能量比值之间的差异对实测爆破地震波 S 波震相初至到时进行判断,最终确定 S 波初至时刻。分析理论数值模拟结果表明,该方法在工程尺度下 S 波初至时刻识别与理论到时相差不大,误差小于 3%,验证了该方法工程应用的合理性。

(2)应用的 4 个判别参数能够正确的反映波形振动的特点,同时也能正确反映 S 波初至时刻前后振动波形的频率,偏振特性及运动方向和能量的变化。

(3)对 S 波震相初至时刻识别是建立在 P 波到时已经被拾取的基础上,其拾取精度受 P 波拾别精度的影响;同时在研究过程中忽略了 R 波的传播及结构面等因素对 S 波初至时刻识别精度的影响。后期研究中需要更多的结合实例工程实测数据建立综合考虑 R 波等影响因素的 S 波初至时刻识别模型。

参考文献：

[1] 金李，卢文波，陈明，等. 节理岩体的爆破松动机理[J]. 爆炸与冲击，2009，29(5)：474-480.
JIN Li，LU Wenbo，CHEN Ming，et al. Mechanism of jointed rock loosing under blasting load[J]. Explosion and Shock Waves，2009，29(5)：474-480.

[2] 钟冬望，吴亮，余刚. 邻近隧道掘进爆破对既有隧道的影响[J]. 爆炸与冲击，2010，30(5)：456-462.
ZHONG Dongwang，WU Liang，YU Gang. Effect of tunneling blasting on an existing adjacent tunnel[J]. Explosion and Shock Waves，2010，30(5)：456-462.

[3] 罗忆，卢文波，周创兵，等. 高地应力条件下地下厂房开挖动态卸荷引起的变形突变机制研究[J]. 岩土力学，2011，32(5)：1553-1560.
LUO Yi，LU Wenbo，ZHOU Chuangbing，et al. Mechanism study of abrupt deformation of underground powerhouse induced by excavation unloading under high in-situ stress[J]. Rock and Soil Mechanics，2011，32(5)：1553-1560.

[4] 朱俊，杨建华，卢文波，等. 地应力影响下隧洞边墙的爆破振动安全[J]. 爆炸与冲击，2014，34(2)：153-160.
ZHU Jun，YANG Jianhua，LU Wenbo，et al. Influences of blasting vibration on the sidewall of underground tunnel [J]. Explosion and Shock Waves，2014，34(2)：153-160.

[5] 宋彦辉，巨广宏，孙苗. 岩体波速与坝基岩体变形模量关系[J]. 岩土力学，2011，32(5)：1507-1513.
SONG Yanhui，JU Guanghong，SUN Miao. Relationship between wave velocity and deformation modulus of rock masses[J]. Rock and Soil Mechanics，2011，32(5)，1507-1513.

[6] BAER M，KRADOLFER U. An automatic phase picker for local and tele-seismic events[J]. Bulletin of the Seismological Society of America，1987，77(4)：1437-1445.

[7] STEVENSON P R. Micro-earthquakes at flathead lake，montana：A study using automatic earthquake processing [J]. Bulletin of the Seismological Society of America，1976，66(1)：61-80.

[8] PARK J，VERNON F V，LINDBERG C R. Frequency dependent polarization analysis of high-frequency seismograms[J]. Journal of Geophysical Research，1987，92(B12)：12664-12674.

[9] ALLEN R. Automatic earthquake recognition and timing from single trace[J]. Bulletin of the Seismological Society of America，1978，68(5)：1521-1532.

[10] 田优平. 近震 P 波震相自动识别方法研究[D]. 北京：中国地震局地球物理研究所，2015.
TIAN Youping. Study on the automatic identification of local seismic P-phases[D]. Beijing：Institute of Geophysics China Earthquake Administration，2015.

[11] DIEHL T，DEICHMANN N，KISSLING E，et al. Automatic S-wave picker for local earthquake to mography [J]. Bulletin of the Seismological Society of America，2009，99(3)：1906-1920.

[12] BAILLARD C，CRAWFORD W C，BALLU V，et al. An automatic kurtosis-based P-and S-phase picker designed for local seismic networks[J]. Bulletin of the Seismological Society of America，2014，104(1)：394-409.

[13] 周彦江，潘一山. 基于小波变换的矿震波的 P 波和 S 波的识别[J]. 煤矿开采，2007，12(6)：1-4.
ZHOU Yanjiang，PAN Yishan. P and S wave identification of rock-burst wave based on wavelet transform[J]. Coal Mining Technology，2007，12(6)：1-4.

[14] 刘希强，周惠兰，沈萍，等. 用于三分向记录震相识别的小波变换方法[J]. 地震学报，2000，22(2)：125-131.
LIU Xiqiang，ZHOU Huilan，SHEN Ping，et al. The method of wavelet transformation for 3-component record wave phase identification[J]. Acta Seismologica Sinica，2000，22(2)：125-131.

[15] 何先龙，佘天莉，高峰. 一种地震 P 波和 S 波初至时间自动拾取的新方法[J]. 地球物理学报，2016，59(7)：2519-2527.
HE Xianlong，SHE Tianli，GAO Feng. A new method for picking up arrival times of seismic P and S waves automatically[J]. Chinese Journal of Geophysics，2016，59(7)：2519-2527.

[16] 张楚旋，李夕兵，董陇军，等. 三函数四指标矿震信号 S 波到时拾取方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报，2015，34(8)：1650-1659.
ZHANG Chuxuan，LI Xibing，DONG Longjun，et al. A S-wave phase picking method with four indicators of

three functions for micro-seismic signal in mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(8):1650-1659.

[17] 曲保安,刘希强,蔡寅,等.近震 S 波震相实时自动识别方法研究[J].地震学报,2014,36(2):200-208.
QU Baoan, LIU Xiqiang, CAI Yin, et al. Method for real-time automatic identification of S-phase: Application to local seismicity[J]. ACTA Seismologica Sinica, 2014,36(2):200-208.

[18] CICHOWICZ A, GREEN R W E, BRINK A V Z. Coda polarization properties of high-frequency micro-seismic events[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1988,78(3):1297-1318.

[19] BOORE D M. Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1983,73(6):1865-1894.

[20] KANASEWICH E R. Time sequence analysis in geophysics[M]. 3rd ed. Alberta: The university of Alberta press, 1981:80-112.

[21] 杨建华,卢文波,严鹏,等.全断面开挖爆破产生的自由面对振动频率的影响研究[J].振动与冲击,2016,35(7):192-197.
YANG Jianhua, LU Wenbo, YAN Peng, et al. Influences of blast-created free surfaces on blasting vibration frequencies during full-face excavation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016,35(7):192-197.

[22] AMOROSO O, MAERCKLIN N, ZOLLO A. S-wave identification by polarization filtering and waveform coherence analyses[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2012,102(2):854-861. DOI:10.1785/0120110140.

A S-wave phase picking method for blasting seismic waves and its application in engineering

YANG Zhaowei[1,2], LU Wenbo[1,2], GAO Qidong[1,2], CHEN Ming[1,2], HU Haoran[1,2], YAN Peng[1,2], WANG Gaohui[1,2]

(1. *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan* 430072, *Hubei, China*;
2. *Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan* 430072, *Hubei, China*)

Abstract: The initial and precise identification of the S-wave phase is a crucial step in the inverse analysis of dynamical mechanical parameters of rock mass. The efficiency and precision in this identification is directly linked with those of the dynamical parameters' inversion. Currently, the S-wave identification focuses mostly on the earthquake science and it is still difficult to effectively identify the S-wave phase on an engineering scale. This paper proposes a method that can be effectively used in engineering. Here, by using the four characteristic functions including the short time average cross zero ratio, the deflection angle, the degree of polarization and the ratio of the transversal to the total energy, this method identified the S-wave phase, without having to go through the filtering processes. Combining the identification result of some data from the blasting field experiments in the Fengning hydro power station with our numerical simulation, we validated this method, showing that its relative error is below 3% and that the method is effective, simple and suitable for the S-wave phase identification on the engineering scale.

Keywords: S-wave identification; mechanical parameters of rock mass; deflection angel; degree of polarization

(责任编辑 王易难)