高铁地震波场中的多普勒效应及应用

蒋一然¹, 宁杰远^{1,2*}, 温景充¹, 石永祥¹

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;

2. 河北红山地球物理国家野外科学观测研究站, 北京 100871

* 通讯作者, E-mail: njy@pku.edu.cn

收稿日期: 2021-03-01; 收修改稿日期: 2021-07-24; 接受日期: 2021-09-08; 网络版发表日期: 2022-01-07

河北省地震科技星火计划项目(编号: DZ20200827054)资助

摘要 通过理论分析, 提出铁路高架桥桥墩的周期性分布将会在高铁地震波场的特殊频率中产生多普勒效应, 同时还分析了这种多普勒效应对波场频谱特征的影响, 分析结果在河北省容城县实际高铁地震波场记录中得到了验证. 研究还发现, 具有显著多普勒效应的波场成分沿传播方向振动, 且传播速度单一, 显示这部分波场以P波震相为主. 进一步地, 提出了一种基于多普勒效应的测速方法, 并对该地区沿铁轨的介质波速进行了尝试性测量, 测量结果显示出高度的一致性和稳定性.

关键词 高铁地震波场, 频谱特征, 多普勒效应, 多普勒测速

1 引言

十多年来, 中国进行了大规模的高速铁路建设. 研究高铁上运行的动车组所产生的道路振动及其传播特征, 不仅有助于将道路噪声转化为有用的地震信号, 而且提供了探索铁路基础安全监测方法的新途径.

自2018年以来, 中国科学家采集了大量观测数据, 对高铁地震波场的震源、波场、频谱等方面进行了密集研究, 取得了一系列重要研究进展(如, 刘磊和蒋一然, 2019; 王晓凯等, 2019a, 2019b, 2019c; 包乾宗等, 2019; 曹健和陈景波, 2019; 张唤兰等, 2019; 张固澜等, 2019; 胡光辉等, 2019; 温景充等, 2019a, 2019b; 温景充和宁杰远, 2019; 鲍铁钊等, 2019; 蒋一然等, 2019a, 2019b; Wang等, 2021; Liu等, 2021).

当观察者和源之间有相对运动时, 由于多普勒效

应(王正清, 1990)的存在, 波场的频率发生变化, 被广泛应用在与物体运动速度测量相关的领域.

高铁可以视为移动组合震源. 由于源的位置随高铁位置的移动而改变, 波场中可能有多普勒效应. 本文通过理论分析提出, 对于运行在高架桥上的高速列车, 高架桥墩的周期性分布将会在其地震波场的相关频率处产生多普勒效应, 并阐释了这种多普勒效应对波场频谱特征的影响.

高铁地震波场中有多普勒效应的理论分析还需要实际观测资料的支持. Chen等(2004)、Quiros等(2016)、鲍铁钊等(2019)、Lavoué等(2021)都声明在列车地震记录中观察到了多普勒现象. 但Chen等(2011)、刘磊和蒋一然(2019)、王晓凯等(2019b)以及蒋一然等(2019a)的研究显示, 高铁地震频谱在3~100Hz频率范围内呈现等间距分立峰的模式, 分立

中文引用格式: 蒋一然, 宁杰远, 温景充, 石永祥. 2022. 高铁地震波场中的多普勒效应及应用. 中国科学: 地球科学, 52(3): 438–449, doi: 10.1360/SSTe-2021-0053

英文引用格式: Jiang Y, Ning J, Wen J, Shi Y. 2022. Doppler effect in high-speed rail seismic wavefield and its application. Science China Earth Sciences, 65(3): 414–425, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9843-0>

峰频率的高低由车厢长度和列车运行速度决定。因此, 要确认列车到来前后的多普勒频移, 必须排除列车速度变化的影响。Fuchs和Bokelmann(2018)的研究认为在实际资料中发现的频率移动多为速度变化引起的, 没有发现明显的多普勒效应。Lavoué等(2021)使用数值模拟的方式研究了重载列车的情况, 认为其中可能存在多普勒效应。但在他们与实际资料进行对比时, 仍未控制列车运行速度对频谱的影响。去除车速变化的影响后, 这种等间距分立峰的频谱是否会表现出多普勒效应是一个需要研究的问题。本文基于河北省容城县实际高铁地震记录, 去除列车运行速度的影响之后, 确认存在多普勒效应, 印证了理论分析的结果。

在高铁地震波场中, 高铁的速度可以由铁路系统提供, 也可以根据其频谱进行估计(蒋一然等, 2019a)。因此, 可以通过测量高铁地震波场中的多普勒效应计算介质波速。本文最后提出了基于高铁地震波场多普勒效应的介质波速测量方法, 并在容城县高铁实际数

据中进行了尝试性应用。

2 高铁地震观测资料

从2018-04-22至2018-05-26, 北京大学在河北省容城县附近的京广高铁沿线进行前后两期共一个月左右时间的高铁地震观测(温景充等, 2019a); 从2019-08-29至2019-09-04, 北京大学又在该地区进行了第3期观测。本文选取来源于第3期观测中靠近高铁线路的RD002(最北)、RD006、RD011、RD016等17个台站(图1)作为验证和应用多普勒效应的实际资料, 观测仪器为QS-5B便携式数字地震仪。该期观测中, 仪器放置在现场挖掘的坑位中, 并在上面覆盖土层, 以减少空气中震动能量对记录的直接影响。

3 高架桥情形下的多普勒效应

匀速运行的高铁地震波场的频谱主要由等间距的

图1 台站和线路分布图

(a) 底图为地形, 黑色线条为铁路交通图, 蓝色小方框为研究区域; (b) 为(a)中蓝色矩形框的放大图, 黑色线条为铁路线路, 蓝色三角形为铁路近旁的台站。这一段是高架桥式的高速铁路, 桥墩的间距约为32m

分立峰构成(Chen等, 2011; 刘磊和蒋一然, 2019; 王晓凯等, 2019b, 2019c; 蒋一然等, 2019a)。这些峰的间距主要由车速和单节车厢的长度共同决定。考虑匀速行驶的动车组, 假设不同车厢激发的波场一致, 只有先后顺序引起的时间延迟, 则其地震波场可以表示为

$$r(t, \mathbf{x}) = \sum_{n=0}^{N-1} r_0\left(t - n \frac{L_c}{v}, \mathbf{x}\right), \quad (1)$$

其中, $r_0(t, \mathbf{x})$ 表示单节车厢激发的波场, $r(t, \mathbf{x})$ 为列车所有车厢共同激发的波场, t 表示时间, $\mathbf{x}$ 表示位置, n 为车厢序号(从0开始), L_c 为单节车厢的长度, v 为动车组的运行速度。

对式(1)做傅里叶变换:

$$\begin{aligned} R(f; \mathbf{x}) &= \sum_{n=0}^{N-1} R_0(f, \mathbf{x}) e^{\frac{2\pi i n L_c}{v}} \\ &= R_0(f, \mathbf{x}) \frac{e^{N \frac{2\pi i L_c}{v}} - 1}{e^{\frac{2\pi i L_c}{v}} - 1}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $R_0(f, \mathbf{x})$ 表示 $r_0(t, \mathbf{x})$ 的频谱, $R(f, \mathbf{x})$ 表示 $r(t, \mathbf{x})$ 的频谱。当 $f = m \frac{v}{L_c}$, $m=0, 1, 2, \dots$ 时, $\frac{e^{N \frac{2\pi i L_c}{v}} - 1}{e^{\frac{2\pi i L_c}{v}} - 1}$ 取得极值 N 。

这些具有极值的等间距峰共同构成了高铁地震波场频谱的主要形态, 对应的最小间隔被称为“车频”, 即

$$f_c = \frac{v}{L_c}. \quad (3)$$

图2展示一个真实的高铁记录及其时频图与振幅谱。

这种等间距峰的频谱模式来自于不同车厢的延迟激发, 与式(1)~(3)预期的结果一致。式(2)的 $\frac{e^{N \frac{2\pi i L_c}{v}} - 1}{e^{\frac{2\pi i L_c}{v}} - 1}$ 部分仅取决于不同车厢经过同一位置的时间延迟, 并不涉及震源位置变动的效应。因此, f_c 及其倍频不会体现如频移等的多普勒效应。

中国大多数的高速铁路都建设在高架桥上, 其大部分桥墩都是等间距的。假设桥墩结构一样, 桥墩间距不变时, 匀速运行的车厢经过每个桥墩时, 施加在桥墩上的力应该是相同的。如果我们在和车一起运动的参考系中考察, 单节车厢实际上是周期性地施加力, 其主要频率称为“桥频”, 可以表达为

$$f_p = \frac{v}{L_p}, \quad (4)$$

其中, L_p 为桥墩间距。在地面参考系中, 车厢周期性地

图2 高铁地震波场记录(a)及其时频图(b)和振幅谱(c)

(a) 蓝色为车到前的记录, 黑色为车到时的记录, 红色为车到后的记录

施加力, 且施力的位置随车厢运动而变化, 则会产生多普勒效应, 使得 f_p 发生移动: 靠近台站时, f_p 升高; 远离台站时, f_p 降低。

在高架桥的情况下, 可以认为高铁地震波场是每个桥墩为固定源所激发地震波场的总和。假设单节车厢在每个桥墩处的震源时间函数相同, 其波场可以表示为

$$\begin{aligned} r_0(t, \mathbf{x}) &= \sum_j G(t, \mathbf{x}; \tau_j, \mathbf{x}'_j) * s(t) \\ &= \sum_j G(t - \tau_j, \mathbf{x}; 0, \mathbf{x}'_j) * s(t), \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $G(t, \mathbf{x}; \tau, \mathbf{x}')$ 表示地震波场响应的格林函数, $s(t)$ 表示单个车厢在单个桥墩处的震源时间函数, $\mathbf{x}'_j$ 表示 j 号桥墩所在的位置; 当车厢在 T_0 时刻经过0号桥墩, 则经过 j 号桥墩的时间为 $\tau_j = T_0 + j \frac{L_p}{v}$ 。

对于格林函数中传播速度为 u 的震相, 不失一般

性, 假设它可以表达为一个有时间延迟的 δ 函数:

$$G_u(t, \mathbf{x}; 0, \mathbf{x}') = A_u(\mathbf{x}, \mathbf{x}')\delta(t - \tau'), \quad (6)$$

其中, $A_u(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$ 表示振幅响应, $\tau' = \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|}{u}$ 表示走时. 将式(6)代入式(5):

$$r_0(t, \mathbf{x}) = \sum_j \sum_u A_u(\mathbf{x}, \mathbf{x}'_j) \delta(t - \tau_j - \tau'_{j'}) * s(t). \quad (7)$$

波速为 u 的震相的波场为

$$r_{0,u}(t, \mathbf{x}) = \sum_j A_u(\mathbf{x}, \mathbf{x}'_j) \delta(t - \tau_j - \tau'_{j'}) * s(t). \quad (8)$$

选取距台站较远的 M 个连续桥墩(记为 $j' \in J'$, 其中车辆最早到的桥墩为 j'_0), 则单节车厢在这些桥墩上激发的波场为

$$r_{0,u,J'}(t, \mathbf{x}) = \sum_{j' \in J'} A_u(\mathbf{x}, \mathbf{x}'_{j'}) \delta(t - \tau_{j'} - \tau'_{j'}) * s(t). \quad (9)$$

在远场下, 考虑震中距变化不大时, 幅值响应基本一致, 下式成立:

$$\begin{aligned} r_{0,u,J'}(t, \mathbf{x}) &= A_u(\mathbf{x}, \mathbf{x}'_{j'_0}) \sum_{j' \in J'} \delta\left(t - \left(T_0 + j' \frac{L_p}{v}\right) - \frac{1}{u} \left(|\mathbf{x} - \mathbf{x}'_{j'_0}| - (j' - j'_0)L_p \cos\theta\right)\right) * s(t) \\ &= A_u(\mathbf{x}, \mathbf{x}'_{j'_0}) \sum_{j' \in J'} \delta\left(t - j' L_p \left(\frac{1}{v} - \frac{\cos\theta}{u}\right) - t_{j'_0}\right) * s(t), \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $t_{j'_0} = T_0 + \frac{1}{u} \left(|\mathbf{x} - \mathbf{x}'_{j'_0}| + j'_0 L_p \cos\theta\right)$. 对式(12)做傅里叶变换:

$$\begin{aligned} R_{0,u,J'}(f, \mathbf{x}) &= A_u(\mathbf{x}, \mathbf{x}'_{j'_0}) \sum_{j' \in J'} e^{-\left[j' L_p \left(\frac{1}{v} - \frac{\cos\theta}{u}\right) + t_{j'_0}\right] 2\pi f i} S(f) \\ &= A_u(\mathbf{x}, \mathbf{x}'_{j'_0}) S(f) e^{-2\pi f i t_{j'_0}} \frac{e^{-\left(j'_0 + M\right) L_p \left(\frac{1}{v} - \frac{\cos\theta}{u}\right) 2\pi f i} - e^{-j'_0 L_p \left(\frac{1}{v} - \frac{\cos\theta}{u}\right) 2\pi f i}}{e^{-L_p \left(\frac{1}{v} - \frac{\cos\theta}{u}\right) 2\pi f i} - 1} \\ &= A_u(\mathbf{x}, \mathbf{x}'_{j'_0}) S(f) e^{-\left(t_{j'_0} + j'_0 L_p \left(\frac{1}{v} - \frac{\cos\theta}{u}\right)\right) 2\pi f i} \frac{e^{-M L_p \left(\frac{1}{v} - \frac{\cos\theta}{u}\right) 2\pi f i} - 1}{e^{-L_p \left(\frac{1}{v} - \frac{\cos\theta}{u}\right) 2\pi f i} - 1}, \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $S(f)$ 表示 $s(t)$ 的频谱. 在 $f = m \frac{1}{1 - \frac{v}{u} \cos\theta} \frac{v}{L_p} = m \frac{1}{1 - \frac{v}{u} \cos\theta} f_p$, $m = 0, 1, 2, \dots$ 时, $\frac{e^{-M L_p \left(\frac{1}{v} - \frac{\cos\theta}{u}\right) 2\pi f i} - 1}{e^{-L_p \left(\frac{1}{v} - \frac{\cos\theta}{u}\right) 2\pi f i} - 1}$ 取得极值 M . 和式(2)相似地, 单节车厢的频谱因为有周期性分布的桥墩存在, 频谱也会呈

$$A_u(\mathbf{x}, \mathbf{x}'_{j'}) \approx A_u(\mathbf{x}, \mathbf{x}'_{j'_0}), \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \tau_{j'} &= \frac{|\mathbf{x} - (\mathbf{x}'_{j'_0} + \hat{\mathbf{n}} L_p (j' - j'_0))|}{u} \\ &= \frac{|(\mathbf{x} - \mathbf{x}'_{j'_0}) - \hat{\mathbf{n}} L_p (j' - j'_0)|}{u} \\ &= \frac{1}{u} \left(|\mathbf{x} - \mathbf{x}'_{j'_0}|^2 - 2(j' - j'_0) L_p (\mathbf{x} - \mathbf{x}'_{j'_0}) \cdot \hat{\mathbf{n}} \right. \\ &\quad \left. + (j' - j'_0)^2 L_p^2 \right)^{\frac{1}{2}} \\ &\approx \frac{1}{u} \left(|\mathbf{x} - \mathbf{x}'_{j'_0}| - \frac{(j' - j'_0) L_p (\mathbf{x} - \mathbf{x}'_{j'_0}) \cdot \hat{\mathbf{n}}}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'_{j'_0}|} \right) \\ &\approx \frac{1}{u} \left(|\mathbf{x} - \mathbf{x}'_{j'_0}| - (j' - j'_0) L_p \cos\theta \right), \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $\hat{\mathbf{n}}$ 是铁路延伸方向的单位向量, 指向动车组前进的方向; θ 为轨-墩-台夹角, 即 $\mathbf{x} - \mathbf{x}'_{j'_0}$ 与 $\hat{\mathbf{n}}$ 的夹角. 震相走时的变化取决于路径长短的变化. 将式(10)和(11)代入式(9):

现等间距分立峰的模式, 最小间距为

$$f_{p,\theta} = \frac{1}{\left(1 - \frac{v}{u} \cos\theta\right)} f_p.$$

$f_{p,\theta}$ 相对于 f_p 有一个移动, 这个移动的程度取决于波速和车速的比值 u/v 以及轨-墩-台夹角 θ . 车来之前, θ 为锐角, $f_{p,\theta}$ 比 f_p 大, 接收到的频率变高;

车来之后, θ 为钝角, $f_{p,\theta}$ 比 f_p 小, 接收到的频率变低. 形成典型的多普勒效应.

高架桥的桥墩间距多为32m, 车速在80m s⁻¹左右, 则对应的 f_p 为2.5Hz; 类似地, 车厢长度通常为25m, 对应的 f_c 为3.2Hz. 根据前面的分析, f_p 会发生频率移动, 而 f_c 不会. 因而实际资料频谱中的多普勒效应, 应该发生在 f_p 及其倍频的成分, 而非 f_c 及其倍频的成分.

由于 f_c 及其倍频成分不发生多普勒频移, 仅与车速和车长的比值相关, 可用于车速测量. 本文使用蒋一然等(2019a)提出的一种基于 f_c 及其倍频精细估计高铁运行速度的方法, 测量了实际记录中车到前后的行驶速度, 选取其中列车速度差别较小的记录观测多普勒效应, 以避免车速变化对频谱形态的影响.

4 线路附近台站记录的多普勒效应

当台站位于线路附近时, 轨-墩-台夹角 θ 在车到前($\theta \approx 0$)或车到后($\theta \approx \pi$)几乎不发生变化, 多普勒效应产生的频率移动较为稳定, 使得对其多普勒效应的分析更为简单. 这种情况下有

$$\begin{aligned} f_{p,0} &= \frac{1}{1-\frac{v}{u}} f_p, \\ f_{p,\pi} &= \frac{1}{1+\frac{v}{u}} f_p, \end{aligned} \quad (14)$$

其中, $f_{p,0}$ 和 $f_{p,\pi}$ 分别为车厢到达台站前和经过台站后经多普勒效应发生移动的桥频, 简称为“车前桥频”和“车后桥频”.

更为细节的情况是, 动车组的单节车厢一般设有多个轮子. 设每节车厢上第 k 组车轮与所在车厢前端的距离为 d_k , 则其经过桥墩的时间与车厢前端存在 d_k/v 的延迟. 因此, 对于具有 K 组轮子的单节车厢, 将其在单个桥墩的震源时间函数设置为 K 个有时间延迟的 δ 函数. 进一步地, 根据式(8), 假设速度为 u 的震相的幅值随距离-1次方衰减(具体衰减方式并不影响结论), 对于高铁线路附近的台站有

$$r_{0,u}(t, \mathbf{x}) = \sum_{j,k} \frac{D_0 L_0}{|L_0 - jL_p|} \delta\left(t - \tau_j - \tau'_j - \frac{d_k}{v}\right), \quad (15)$$

其中, $L_0(=|\mathbf{x} - \mathbf{x}'_0|)$ 是0号桥墩与台站的距离,

$|L_0 - jL_p|$ 为 j 号桥墩与台站的距离, D_0 为一组轮子在0号

桥墩激发波场在台站处的振幅, $\frac{D_0 L_0}{|L_0 - jL_p|}$ 为一组轮子

在 j 号桥墩激发波场在台站处的振幅, $\tau_j = T_0 + \frac{jL_p}{v}$ 为

列车经过 j 号桥墩的时刻, $\tau'_j = \frac{|L_0 - jL_p|}{u}$ 表示 j 号桥墩

激发的波场到台站的走时, d_k/v 为第 k 组轮子相对于所在车厢前端经过相同桥墩的时间延迟.

根据动车组的典型轮组模式(王晓凯等, 2019c), 设置每节车厢有与车厢前端距离4、6.5、18.5和21m的四组轮子, 合成了单节车厢激发的单个震相的波场(图3a), 并对该波形进行了时频分析(图3b), 其中 $u=3000\text{m s}^{-1}$, $v=80\text{m s}^{-1}$, $L_p=32\text{m}$. 从时频图中可以很明显地看到, 在车经过台站后, f_p 及其倍频由高变低; 当车靠近台站时, 不同频率成分混合在一起, 频谱变得复杂. 这也就是前面提到的多普勒效应. 这里的波速是基于多普勒效应对实际资料测速结果进行设置的, 具体的测量方法在下一节中介绍. 图4是靠近铁轨的台站上记录到的高铁信号及其时频图. 在实际数据的时频图(图4b)中, $2f_p$ 处发现了具有显著普勒效应的信号, 其在列车通过后有明显的频率移动. 鲍铁钊等(2019)也在台站记录间的互相关中发现了在 $2f_p$ 附近存在这一现象.

与单节车厢单组轮子对应的振幅谱(图5a)中分立峰值基本相等不同, 单节车厢四组轮子(图5b)分立峰的振幅被调制, 不同峰的振幅差异大, 其中5Hz附近的振幅最大. 在实际情况中, 还需要考虑多节车厢的影响. 根据式(2), 从单节车厢四组轮子的合成记录振幅谱(图5b)得到多节车厢的振幅谱(图5c). 在多节车厢合成记录的振幅谱中, $2f_{p,0}$ (车到前)、 $2f_{p,\pi}$ (车到后)、 $4f_{p,\pi}$ (车到后)、 $5f_{p,0}$ (车到前)处有明显的峰值. 对于车到前的信号, $5f_{p,0}$ 和 $4f_c$ 在12.8Hz附近发生耦合, 频谱能量变高; 对于车到后的信号, $4f_{p,\pi}$ 和 $3f_c$ 在9.5Hz左右发生耦合, 频谱能量变高. 实际观测(图5d和5e)与理论预测有较好的一致性: $2f_{p,0}$ (车到前)、 $2f_{p,\pi}$ (车到后)、 $4f_{p,\pi}$ (车到后)、 $5f_{p,0}$ (车到前)处都有显著的能量.

由于 $2f_{p,0}$ 和 $2f_{p,\pi}$ 的能量和频移最明显且未被 f_c 干扰, 我们选取 $2f_{p,0}$ 和 $2f_{p,\pi}$ 进行 $f_{p,0}$ 和 $f_{p,\pi}$ 的测量.

图3 高架桥模型下单节车厢四组轮子的合成高铁地震记录(a)及其时频图(b)

(a) 蓝色为车到前的记录, 黑色为车到时的记录, 红色为车到后的记录. 横轴是时间, (b)的纵轴是频率, 颜色表示时频幅值的对数. 用蓝青色虚线标出 f_p 及其倍频所在频率(2.5、5、7.5、10、12.5Hz)

5 时空结合的多普勒测速

多普勒效应可以用于对速度的测量. 在一般的应用中, 都是已知介质中的波速对物体的移动速度进行计算. 根据式(14), 不同波速的震相在同一车速下应具有不同的频率移动. 由于可以通过频谱中的 f_c 及其倍频来相对容易地获得高铁的速度, 我们想要反过来对介质波速进行计算.

从实际记录(图5c)中观察到, $2f_{p,0}$ 或 $2f_{p,\pi}$ 附近的信号十分明显. 对该成分在三分量上的能量分布及其随与台站距离的变化进行了分析: 将三分量波形以车到时刻为零时刻, 截为多段, 相邻段间有重叠; 对于截取后的一段三分量波形, 以每个分量的振幅谱中, $2f_{p,0}$ (车到前)或 $2f_{p,\pi}$ (车到后)处峰值的平方作为该分量的能量, 然后计算每个分量能量与三分量能量总和的比例. 能量比例分布随截取时间段不同而变化的统计结果表明(图6b~6d), 这部分能量主要集中在R方向, 即沿铁轨的

图4 实际的高铁地震记录(a)及其时频图(b)

(a) 蓝色为车到前的记录, 黑色为车到时的记录, 红色为车到后的记录. 横轴是时间, (b)的纵轴是频率, 颜色表示时频幅值的对数. 用蓝青色虚线标出 f_p 及其倍频所在频率(2.5、5、7.5、10、12.5Hz)

方向. 从射线路径(图6a)分析, 对于高架桥旁的台站, 沿R方向(铁轨方向)传播, 且主要在R方向上的震动的波场应以近水平传播的P波为主. 所以具有多普勒效应的波场成分应以P波为主.

这种单一震相带来的好处是, 可以方便地对该震相对应波速进行测量. 根据式(14), 在桥墩间距相等、车速一样的情况下有

$$u = \frac{f_{p,0} + f_{p,\pi}}{f_{p,0} - f_{p,\pi}} v. \quad (16)$$

这样就可以根据 $f_{p,0}$ 、 $f_{p,\pi}$ 和 v 利用式(16)对波速进行计算. 根据图5d的观测结果, $f_{p,0}$ 为2.545Hz(2倍频, 5.09Hz), $f_{p,\pi}$ 为2.405Hz(2倍频, 4.81Hz), v 为80.1m s⁻¹, 估算的 u 为2830m s⁻¹. 根据图5e的观测结果, $f_{p,0}$ 为2.60Hz(2倍频, 5.20Hz), $f_{p,\pi}$ 为2.455Hz(2倍频, 4.91Hz), v 为81.7m s⁻¹, 估算的 u 为2848m s⁻¹. 实际情况中, 桥墩的间距会有一定变化的, 会使 $f_{p,0}$ 和 $f_{p,\pi}$ 变化, 进而影响

图5 3个合成记录和2个实际记录的振幅谱

(a) 单节车厢单组轮子; (b) 单节车厢4组轮子; (c) 多节车厢4组轮子; (d)和(e) 两个实际记录. 横轴是频率, 纵轴是振幅谱的幅值. 蓝色, 车到前; 红色, 车到后. (d)和(e)中蓝色和红色箭头分别标明拾取到的 $2f_{p,0}$ (车到前)和 $2f_{p,\pi}$ (车到后)的位置

对波速的测量. 如果得到的 $f_{p,0}$ 和 $f_{p,\pi}$ 对应的是同一段桥墩, 就能够避免这种影响.

对于每一段波形, 由于多普勒效应成分的波速远大于车速, 其相对于车到时刻的时间主要为列车由相应桥墩段行驶到台站的时间. 因此, 可以根据这种相对时间大致估计出桥墩段的位置(图7), 并使用两个方向来的列车分别计算其 $f_{p,0}$ 和 $f_{p,\pi}$, 从而进一步估计其介质波速.

这里, 不同车次的行驶速度不一样, 同一车次在不同路段的速度也不一样. 需要考虑相应的列车行驶速度才能比较不同方向的记录中 f_p 的频移. 同时, 一个高铁地震记录得到的频谱受噪声、车速变化等因素影响可能会有一些不稳定, 叠加不同记录的频谱可以减少这种不稳定, 使得其模式更加准确. 考虑到高铁会有不同的车速, 叠加的时候需要对齐不同记录的频谱.

具体地, 我们以 80m s^{-1} 作为参考速度, 将不同车速下的 $f_{p,0}$ 、 $f_{p,\pi}$ 和 f_c 修正到这个速度下的桥频和车频上以对齐频谱. 在车速为 v 时, 这些频率可以分别表示为

$$f_c^v = \frac{v}{L_c} = \frac{v}{v_0} \frac{v_0}{L_c} = \frac{v}{v_0} f_c^{v_0}, \quad (17)$$

$$\begin{aligned} f_{p,0}^v &= \frac{1}{1 - \frac{v}{u}} \frac{v}{L_p} = \frac{1}{1 - \frac{v}{u}} \frac{v}{v_0} f_p^{v_0} \\ &= \left(1 - \frac{v_0 - v}{u - v}\right) \frac{v}{v_0} f_{p,0}^{v_0}, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} f_{p,\pi}^v &= \frac{1}{1 + \frac{v}{u}} \frac{v}{L_p} = \frac{1}{1 + \frac{v}{u}} \frac{v}{v_0} f_p^{v_0} \\ &= \left(1 + \frac{v_0 - v}{u + v}\right) \frac{v}{v_0} f_{p,\pi}^{v_0}, \end{aligned} \quad (19)$$

其中, $f_c^{v_0} \left(= \frac{v_0}{L_c} \right)$ 和 $f_p^{v_0} \left(= \frac{v_0}{L_p} \right)$ 分别表示参考车速 v_0

(80m s^{-1})下的车频和桥频, $f_{p,0}^{v_0} \left(= \frac{1}{1 - \frac{v_0}{u}} \frac{v_0}{L_p} \right)$ 和

$f_{p,\pi}^{v_0} \left(= \frac{1}{1 + \frac{v_0}{u}} \frac{v_0}{L_p} \right)$ 表示参考车速 v_0 下的车前桥频和车后

桥频. $f_{p,0}^v$ 和 $f_{p,\pi}^v$ 相对于 $f_{p,0}^{v_0}$ 和 $f_{p,\pi}^{v_0}$ 的变化可以分解为两部分: 反映桥频 f_p 变化的 $\frac{v}{v_0} \left(= 1 + \frac{v - v_0}{v_0} \right)$, 反映多普勒

效应程度变化的 $1 - \frac{v_0 - v}{u - v}$ 和 $1 + \frac{v_0 - v}{u + v}$. 考虑到估算的介质波速远大于车速(30~40倍), 当车速与参考车速相差

图 6 高铁地震波场射线路径(a)及 $2f_p$ 处三分量(R/T/Z)的能量占比(b)~(d))

(b)~(d) 纵轴分别是在 $2f_{p,0}$ (车到前)或 $2f_{p,\pi}$ (车到后)附近每个分量能量与三分量能量总和的比值; 横坐标以车到时刻为原点, 表示波形截取时间段中点的时刻

不大时, 多普勒频移程度的变化可近似为

$$1 - \frac{v_0 - v}{u - v} \approx 1 - \frac{v}{u} \cdot \frac{v_0 - v}{v}, \quad (20)$$

$$1 + \frac{v_0 - v}{u + v} \approx 1 + \frac{v}{u} \cdot \frac{v_0 - v}{v}. \quad (21)$$

由于 $\frac{v}{u} \cdot \frac{v_0 - v}{v} \ll \frac{v - v_0}{v_0}$, 即多普勒频移程度的变化远小于桥频 f_p 的变化, 式(18)和(19)可近似为

$$f_{p,0}^v \approx \frac{v}{v_0} f_{p,0}^{v_0}, \quad (22)$$

$$f_{p,\pi}^v \approx \frac{v}{v_0} f_{p,\pi}^{v_0}. \quad (23)$$

由式(17)、(22)和(23)可知, 当车速较参考速度变化不大时, 对应成分($f_{p,0}$ 、 $f_{p,\pi}$ 和 f_c)的频率变为参考速度下的 v/v_0 倍. 为了将不同速度记录中同种频率处的能量

图 7 波形桥墩对应示意图

(a) 黑色三角形表示台站, 黑色横线表示高铁线路, 横坐标是距离台站的距离, 以向右为正; (b)和(c)分别是向右和向左运行的高铁地震记录, 纵坐标是根据三分量最大值归一化后的幅值, 横坐标是以车到时刻为原点的时间轴, 对(c)中的时间轴做了反转. 我们将(b)和(c)中部分波形对应到(a)中激发波场的桥墩段, 用相同线型的框标识

叠加起来, 需要以 v/v_0 的比例进行频谱的对齐. 则 f^{v_0} 频率的叠加结果 $S(f^{v_0}, \mathbf{x})$ 可以表示为

$$S(f^{v_0}, \mathbf{x}) = \sum_{k=1}^K \left| R_k \left(\frac{v_k}{v_0} f^{v_0}, \mathbf{x} \right) \right|, \quad (24)$$

其中, v_k 表示第 k 个记录中的车速, $\frac{v_k}{v_0} f^{v_0}$ 是对 f^{v_0} 根据车速 v_k 的修正, K 表示记录的总数, $R_k(f, \mathbf{x})$ 表示第 k 个记录的频谱.

进一步地, 为了衡量测量的误差和计算的稳定性, 将记录按时序划分为6组进行分别叠加, 并比较不同组间的测量结果. 由于观测总时长约为7天, 所以每一组包含一天左右的高铁地震记录.

另外, 合成记录(图3)和实际资料(图4)显示车到时, $f_{p,0}$ 和 $f_{p,\pi}$ 混在一起, 使测量更为困难, 所以不测量台站附近的波速.

综合以上考虑, 对单台记录的波速测量方案如下.

(1) 将每个高铁记录以8s为时间窗, 每次滑动4s, 略过到达台站的时间段, 截为多段, 将每一段根据车速对应到相应的桥墩段.

(2) 将每一个桥墩段的同向记录按时序分为6组, 并根据式(24), 以 80 m s^{-1} 为参考速度进行对齐叠加.

(3) 在同一桥墩段, 由两个行驶方向的叠加频谱分别得到6组 $f_{p,0}$ 和 $f_{p,\pi}$, 剔除信噪比偏低的结果.

(4) 根据每组的 $f_{p,0}$ 和 $f_{p,\pi}$, 由式(16)估计相应桥墩段的波速, 剔除异常波速.

图8是频谱对齐叠加后的例子. 叠加后频谱的 $2f_{p,0}$ 和 $2f_{p,\pi}$ 振幅更加明显, 测量也更加准确. 图9a展示的是RD002台上, 利用叠加频谱测量得到的不同桥墩段的 $2f_{p,0}$ 和 $2f_{p,\pi}$ (黑色: $2f_{p,0}$; 灰色: $2f_{p,\pi}$), 每个点及纵向线段分别表示多组测量结果的均值和标准差, 横坐标为激发对应波场的桥墩与该台站的相对距离. 由此计算得到的介质波速(图9c)基本在 3000 m s^{-1} 附近, 其中大部分测量结果的标准差较小. 在靠近台站的部分, 测量误差很小, 部分桥墩段的误差在 100 m s^{-1} (约3%)以内. 在南边有一个波速的连续下降; 最南端和北侧 2500 m 以北的测量结果由于距离较远, 测量误差较大, 可信度较低.

根据台站间的位置关系, 将每个台测量结果中的桥墩段位置换算成相对RD002台站的位置(图9b、9d). 从图9b可以看出, 在距离台站 $-2500\sim 2500\text{ m}$ 的路段, 不同台站在相同路段的 $f_{p,0}$ 和 $f_{p,\pi}$ 的测量结果都有较好的一致性; 其他地方, 部分 $f_{p,0}$ 和 $f_{p,\pi}$ 的测量误差较大. 为了使得图像更加清晰, 在图9d中剔除了波速测量标准差大于 300 m s^{-1} 的小部分测量结果. 图9d中, 在波速的测量误差范围内, 不同台站的结果有很好的一致性, 且北侧的一致性更好. 整个波速随高架桥位置不同的变化, 对应于地下结构的变化.

作为比较, 还给出了不叠加频谱的情况下, 仅使用单记录的测量结果及其标准差(图10). 比较图9和图10可以看出, 单个记录测量的标准差明显高于叠加后的结果, 速度随位置变化的趋势也更为模糊. 这说明叠加可以获得比单记录更加稳定的频谱, 显著提高了 $f_{p,0}$ 和 $f_{p,\pi}$ 测量的稳定性和精度. 这里, 每组叠加的记录并不多(约为一天的高铁记录). 在大规模、日常化监控的情况下, 可以叠加更多的数据, 从而获得更加准确的测量结果. 同时, 本文展示的是以从频谱估计的车速对齐频谱后波速测量的精度. 如果使用动车组提供的运行速度记录, 选取速度波动小的高铁地震事件, 并根据这个速度更为精准地对齐频谱, 从而得到更为

图8 频谱对齐叠加后的两个例子

横轴是频率, 纵轴是幅值. 蓝色、红色分别表示车来前、车到后记录频谱叠加的结果, 右上角标识出记录对应桥墩段相对于台站的方位和截取的时间段(可以转换为相对于台站的位置). 其中, 蓝色线条在 $3.2\text{ Hz}(f_c)$ 、 $5.2\text{ Hz}(2f_{p,0})$ 、 $6.4\text{ Hz}(2f_c)$ 、 $9.6\text{ Hz}(3f_c)$ 、 $12.8\text{ Hz}(4f_c)$ 和 $5f_{p,0}$ 处有峰值; 红色线条在 $3.2\text{ Hz}(f_c)$ 、 $4.8\text{ Hz}(2f_{p,\pi})$ 、 $6.4\text{ Hz}(2f_c)$ 、 $9.6\text{ Hz}(3f_c)$ 和 $4f_{p,\pi}$ 处有峰值

稳定的叠加结果, $f_{p,0}$ 、 $f_{p,\pi}$ 和P波波速的测量精度将会有大幅提高.

高速铁路面临沉降、地下水位变化等地下结构变化带来的安全问题, 它们会造成波速的明显变化(如, 张全胜等, 2003; 黄克超和张永辉, 2004; 陈颖平等, 2005; 黄茂松等, 2020), 可能被我们的方法探测到. 建立长期的观测台站, 并对波速进行长期的监测, 将有可能提前发现地下结构的变化. 我们认为这种多普勒测速的方法有成为高速铁路地基安全监测手段的潜力, 和其他方法一起, 对高铁路基安全进行有效的连续监测.

6 讨论

根据多普勒测定的介质波速结果显示(图9), P波

图 9 利用叠加频谱测量得到 $2f_{p,0}$ 和 $2f_{p,\pi}$ ((a)、(b))及其对应的波速((c)、(d))

(a)和(c)的结果来自于RD002台站; (b)和(d)的结果来自于所有台站. 横坐标表示桥墩段与RD002台的距离, 以北向为正; 每个点及纵向线段分别表示对应6组记录测量结果的平均值和标准差. (a)和(b)中黑点为 $2f_{p,0}$ 的测量结果, 灰色点为 $2f_{p,\pi}$ 的测量结果; (d)中为了图像清晰, 剔除了标准差大于 300 m s^{-1} 的测速结果

图 10 利用单个记录测量得到 $2f_{p,0}$ 和 $2f_{p,\pi}$ ((a)、(b))及其对应的波速((c)、(d))

由于标准差小于 300 m s^{-1} 的结果过少, (d)中仅剔除了标准差大于 1000 m s^{-1} 的测速结果, 其他同图9

速度沿铁路线有明显的变化. 这种速度的起伏会引起车前、车后桥频的变化, 从而影响不同桥墩激发波场

的叠加. 根据式(14), 考虑波速 u 变化对 $f_{p,0}$ 和 $f_{p,\pi}$ 的影响, 有

$$\begin{aligned}\frac{df_{p,0}}{d(\ln u)} &= \frac{-\frac{v}{u^2}u}{\left(1 - \frac{v}{u}\right)} f_{p,0} = -\frac{v}{(u-v)} f_{p,0}, \\ \frac{df_{p,\pi}}{d(\ln u)} &= \frac{\frac{v}{u^2}u}{\left(1 + \frac{v}{u}\right)} f_{p,\pi} = \frac{v}{(u+v)} f_{p,\pi}.\end{aligned}\quad (25)$$

式(25)是 $f_{p,0}$ 和 $f_{p,\pi}$ 对 $\ln u$ 的导数, 反映 u 发生相对变化(du/u)时, $f_{p,0}$ 和 $f_{p,\pi}$ 变化的快慢. u 越小, $f_{p,0}$ 和 $f_{p,\pi}$ 的变化越大. 松散沉积中S波波速显著小于P波波速, $f_{p,0}$ 和 $f_{p,\pi}$ 波动大, 不同桥墩的能量不易叠加起来. 同时, 松散沉积中S波的衰减也更快. 因而S波波场对应的 f_p 及其倍频的能量不如P波显著.

与S波类似, 面波速度偏小, 使得其发生变化时不同桥墩的波场不易叠加. 同时, 面波还存在频散, 波速随频率变化, 导致不同频率的 $f_{p,0}$ 和 $f_{p,\pi}$ 不同, 使得不同频率的能量无法有效叠加起来, 进一步导致面波的桥频成分不明显.

与S波和面波不同, P波具有波速较大、介质衰减较小、频散不显著等特点, 其对应的2倍 $f_{p,0}$ 和 $f_{p,\pi}$ 能量十分稳定. 本文仅使用一天左右的高铁数据就获得了较好的速度测量精度, 相比于噪声成像等方法需要长时间数据的叠加, 本文提出的方法具有很好的时间分辨率, 不过测量精度还不够高. 今后, 基于台阵技术, 可望进一步提高测量精度.

在人口密集区, 地震信号的信噪比极低, 传统方法中只有背景噪声方法更有优势. 但是, 即使是背景噪声方法, 因为有道路噪声的影响, 不满足噪声源均布条件, 给结果带来了不确定性. 相比之下, 本文提出的方法则是利用了高铁地震波场中 $2f_{p,0}$ 和 $2f_{p,\pi}$ 处的稳定能量, 测量结果稳定, 适合于地下结构监测研究.

本文获得的是P波主要传播路径上的波速, 在 3000 m s^{-1} 左右. 初步推测是高铁建设时(李国和等, 2009), 高架桥为了减少沉降, 将桥桩打得比较深, 观测到的P波可能主要在比浅层具有更高波速的层中传播. 结合其他研究结果, 将来可以更好地确定P波主要传播路径, 测算P波波速的敏感深度.

7 结论

从理论上分析了与高架桥模式下高铁地震波场的

频率特征, 讨论了由桥墩周期性造成的“桥频”与由车厢周期性造成的“车频”的频谱耦合效应, 提出桥频及其倍频成分存在多普勒效应, 并在实际地震资料中印证了理论分析的结果.

进一步地, 分析了桥频成分的能量分布, 发现其主要在波场传播的方向振动, 应以P波为主.

基于波场桥频的多普勒效应, 我们提出了一种完全基于波形信息测量不同高架桥段介质波速的方法. 在实际数据上的应用表现出很好的一致性和稳定性, 基于本文方法的波速随时间变化测量可以用于监测高铁路基安全.

致谢 感谢中国科学院地质与地球物理研究所李幼铭研究员及高铁地震学联合研究组对高铁地震学观测和研究的大力支持和推动. 感谢南方科技大学陈永顺教授研究组、云南省地震局为高铁地震学研究提供部分观测仪器. 感谢长安大学包乾宗教授在数据采集过程中提供的大力帮助. 匿名审稿人提出了许多宝贵的建设性意见, 极大地提高了本文的质量, 深表感谢.

参考文献

- 包乾宗, 许杰, 许明瑞. 2019. 高铁地震信号时频特征对比分析. 北京大学学报(自然科学版), 55: 805–812
- 鲍铁钊, 宁杰远, 张献兵. 2019. 高架桥下方高铁地震波场的特征量提取. 北京大学学报(自然科学版), 55: 839–849
- 曹健, 陈景波. 2019. 移动线源的Green函数求解及辐射能量分析: 高铁地震信号简化建模. 地球物理学报, 62: 2303–2312
- 陈颖平, 黄博, 陈云敏. 2005. 循环荷载作用下结构性软粘土的变形和强度特性. 岩土工程学报, 27: 1065–1071
- 胡光辉, 张固澜, 孙思宇, 李勇, 杨金龙, 段景, 何红兵, 詹熠宗. 2019. 高铁地震信号直达波波形反演建模. 地球物理学报, 62: 4817–4824
- 黄克超, 张永辉. 2004. 用瑞利波波速检测粗粒土路基压实度方法的研究. 公路, (04): 116–120
- 黄茂松, 边学成, 陈育民, 王睿, 顾晓强, 周燕国. 2020. 土动力学与岩土地震工程. 土木工程学报, 53: 64–86
- 蒋一然, 鲍铁钊, 宁杰远, 张献兵. 2019a. 高架桥下方高铁地震信号频谱特征研究. 北京大学学报(自然科学版), 55: 829–838
- 蒋一然, 梁萱, 宁杰远, 鲍铁钊, 张献兵. 2019b. 高铁地震4D地频图及其可用性研究. 北京大学学报(自然科学版), 55: 850–858
- 李国和, 张建民, 许再良, 孙树礼. 2009. 华北平原地面沉降对高速铁路桥梁工程的影响研究. 岩土工程学报, 31: 346–352
- 刘磊, 蒋一然. 2019. 大量高铁地震事件的属性体提取与特性分析.

- 地球物理学报, 62: 2313–2320
- 王晓凯, 陈建友, 陈文超, 蒋一然, 鲍铁钊, 宁杰远. 2019a. 高铁震源地震信号的稀疏化建模. 地球物理学报, 62: 2336–2343
- 王晓凯, 陈文超, 温景充, 宁杰远, 李嘉琪. 2019b. 高铁震源地震信号的挤压时频分析应用. 地球物理学报, 62: 2328–2335
- 王晓凯, 王保利, 陈文超, 李嘉琪. 2019c. 利用单检波器数据估计高铁列车运行速度. 北京大学学报(自然科学版), 55: 798–804
- 王正清. 1990. 普通物理·力学. 北京: 高等教育出版社
- 温景充, 鲍铁钊, 冯永革, 宁杰远. 2019a. 北京大学道路地震学观测台阵设计及数据特点. 北京大学学报(自然科学版), 55: 791–797
- 温景充, 宁杰远. 2019. 高铁波场等效震源时间函数反演方法研究. 北京大学学报(自然科学版), 55: 823–828
- 温景充, 宁杰远, 张献兵. 2019b. 高铁地震波场特点的理论分析. 北京大学学报(自然科学版), 55: 813–822
- 张固澜, 何承杰, 李勇, 段景, 王婷一, 詹熠宗, 杜皓, 罗帆. 2019. 高铁地震震源子波时间函数及验证. 地球物理学报, 62: 2344–2354
- 张唤兰, 王保利, 宁杰远, 李幼铭. 2019. 高铁地震数据干涉成像技术初探. 地球物理学报, 62: 2321–2327
- 张全胜, 杨更社, 任建喜. 2003. 岩石损伤变量及本构方程的新探讨. 岩石力学与工程学报, 22: 30–34
- Chen F, Takemiya H, Huang M. 2011. Prediction and mitigation analyses of ground vibrations induced by high speed train with 3-dimensional finite element method and substructure method. *J Vib Control*, 17: 1703–1720
- Chen Q F, Li L, Li G, Chen L, Peng W T, Tang Y, Chen Y, Wang F Y. 2004. Seismic features of vibration induced by train. *Acta Seimol Sin*, 17: 715–724
- Fuchs F, Bokelmann G. 2018. Equidistant spectral lines in train vibrations. *Seismol Res Lett*, 89: 56–66
- Lavoué F, Coutant O, Boué P, Pinzon-Rincon L, Brenguier F, Brossier R, Dales P, Rezaeifar M, Bean C J. 2021. Understanding seismic waves generated by train traffic via modeling: Implications for seismic imaging and monitoring. *Seismol Res Lett*, 92: 287–300
- Liu Y, Yue Y, Li Y, Luo Y. 2021. On the retrievability of seismic waves from high-speed-train-induced vibrations using seismic interferometry. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, doi: 10.1109/LGRS.2021.3050205
- Quiros D A, Brown L D, Kim D. 2016. Seismic interferometry of railroad induced ground motions: Body and surface wave imaging. *Geophys J Int*, 205: 301–313
- Wang X K, Wang B L, Chen W C. 2021. The second-order synchrosqueezing continuous wavelet transform and its application in the high-speed-train induced seismic signal. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 18: 1109–1113

(责任编辑: 郑勇)