



基于 2.5 维有限元方法模拟高速列车产生的地基振动

边学成*, 陈云敏, 胡婷

浙江大学建筑工程学院, 杭州 310027

* E-mail: xcbian@gmail.com

收稿日期: 2007-05-15; 接受日期: 2007-11-30

国家自然科学基金重点资助项目(批准号: 50538010)

摘要 为了研究高速列车运行产生的地基振动, 发展了分析移动荷载作用下轨道和地基动力相互作用的 2.5 维有限元数值方法. 通过对沿轨道方向坐标变量的傅里叶变换将三维问题降为二维平面应变问题, 进而在垂直轨道的平面内进行有限单元的离散和求解. 轨道及其下的道床层被简化成铺设在地基表面的复合欧拉梁, 而具有复杂物理力学性质的地基土层则用 2.5 维四边形等参单元来模拟, 两者通过共有节点进行集成. 同时开发了频率相关黏壶单元来吸收有限单元区域边界上的外射波, 从而模拟列车运行荷载产生的波动从近场有限元分析区域向地基无限远处的散射. 通过数值求解得到垂直轨道平面内的振动解, 再通过沿轨道方向的波数扩展得到轨道和地基振动的时域响应解. 为了验证本文方法的正确性和可靠性, 针对均匀半空间表面作用移动点荷载的情况与解析解结果进行了对比. 基于轨道-地基动力相互作用分析模型, 对低于或超过轨道-地基系统临界速度的列车运行情况进行了数值考察; 通过分析可知在软土地基上运行高速列车时有可能进入跨音速状态, 从而引起轨道结构和地基的共振. 这种共振现象危及高速列车的运行安全, 同时会加速轨道线路的破坏.

关键词

高速列车
移动荷载
地基振动
2.5 维有限元
透射边界

对高速列车运行产生的轨道和周围地基振动的研究业已成为当前土木工程和交通工程中的热点, 一方面是为了保证高速铁路的安全运行和轨道线路的工程耐久性; 另一方面是为了评价列车运行产生的环境振动对铁路沿线建筑和居民的影响. 前期研究工作主要是为了求得移动荷载作用下均匀地基振动的解析解或半解析解. Eason^[1]首先研究了移动点荷载作用下三维均匀半空间的稳态响应问题, 同时考虑了圆形和矩形等荷载分布形式. de Barros 等人^[2]得出

了分层黏弹性地基在内部或表面移动荷载作用下的位移和应力解. Lefeuve-Mesgouez 等人 [3] 给出了移动条形荷载作用下半无限空间地基动力响应的半解析方法. 而 Grundmann 等人 [4] 通过对分层半空间在单一轮轴移动荷载以及简化列车轮轴荷载作用下动响应问题的分析, 得到了移动荷载在地基上运行时的临界速度. Lefeuve-Mesgouez 等人 [5] 研究了超过地基 Rayleigh 波速的移动荷载作用下分层地基的三维振动特征. Andersen 等人 [6] 运用边界元结合有限元方法研究了移动荷载作用下弹性介质中稳态波的传播问题. Karlström 等人 [7] 部分考虑列车运行的荷载特征分析了地基振动. 对于实际列车运行荷载, 需要开发更为精确的物理模型来研究轨道和地基的动力相互作用问题. Sheng 等人 [8] 讨论了轨道结构对列车运行引起地基振动的影响, Dieterman 等人 [9] 通过计算弹性半空间上梁的稳态位移来模拟列车运行荷载作用下的轨道振动. 为了更加合理地模拟铁路的轨道结构, 在分析模型中还应该包括铁轨、轨道衬垫、轨枕和道床等各个组成部分. 以前的研究中发现用分层梁模型进行模拟可取得较好的效果 [10,11]; 而通过对轨枕作用的考虑, 可建立更精确的模型来研究钢轨的振动问题, 在这类模型中考虑了轨枕在上部列车轮轴移动荷载传递到地基过程中的作用 [12~14]. 在这些研究中, 为了得到移动荷载作用下地基振动的解析解或半解析解, 往往需要对地基的土层分布和材料参数做诸多的简化.

在列车荷载作用下轨道和地基振动的研究中, 采用有限单元方法对轨道结构、路堤和下卧层地基来进行模拟分析显得更为方便. 但是二维平面模型不能模拟移动荷载作用下周围地基中波动传播的马赫辐射效应, 而采用完全的三维有限元分析模型则存在计算量过大等问题 [15,16].

2.5 维有限元方法最初是 Hwang 等人 [17] 在研究地震行波作用下地下结构动响应时提出的, 而在近年开始被引入到交通荷载作用下地基振动的研究中 [18~21]. 本文拓展了 2.5 维有限元方法来求解移动荷载作用下轨道结构与地基振动的三维动力问题. 首先把轨道模拟为铺设在地基表面的欧拉梁. 假设轨道和地基在沿轨道方向上是连续均匀的, 通过沿轨道方向的波数变换将三维问题降维为平面应变问题. 在垂直轨道方向的平面上将轨道结构和地基进行有限单元离散, 用四边形等参单元模拟地基中的土单元, 其每个节点包含空间 3 个方向的位移自由度. 最后将该平面上求解得到的结果沿轨道方向进行波数扩展来求得三维空间中的时域解. 用频率相关的黏壶单元建立有限元分析区域的透射边界 [22] 来吸收从近场地基向无穷远地基的散射波能量. 本文首先用该方法分析了移动点荷载作用下均匀地基的动力响应来验证 2.5 维有限元理论和方法的正确性; 接着分析了轨道上作用单个移动轮轴荷载时轨道结构-地基的动力响应; 最后, 利用瑞典 X2000 高速铁路的相关参数和地质数据, 分析了不同速度列车荷载作用下软土地基的振动特征.

1 物理模型和相应公式

1.1 轨道和地基相互作用模型

图 1 中给出了轨道和地基相互作用的分析模型, 在模型中假定沿轨道方向的截面形状是连续不变的, 在每个截面上地基与轨道结构的材料都是连续一致的. 在此基础上采用沿轨道方向的积分变换将三维空间的动力问题简化为平面应变问题. 本文采用的沿 x 方向的傅里叶变换定义如下:

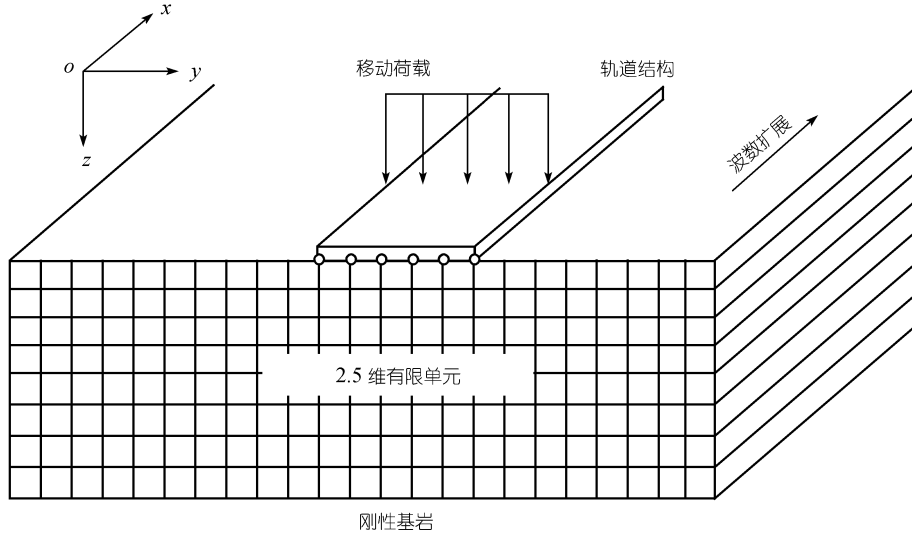


图 1 移动荷载作用下轨道-地基相互作用分析模型

$$u^x(\xi_x) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(x) \exp(i\xi_x x) dx, \quad (1)$$

相应的逆变换为

$$u(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} u^x(\xi_x) \exp(-i\xi_x x) d\xi_x, \quad (2)$$

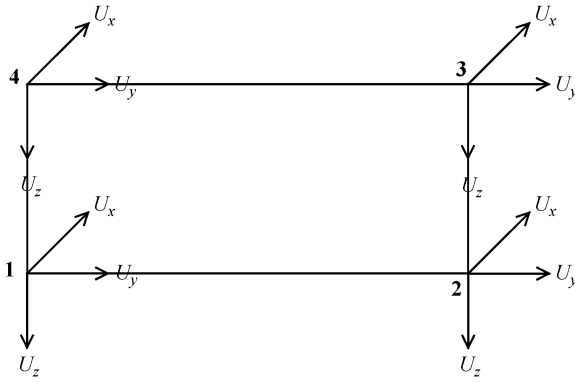


图 2 2.5 维四边形有限单元

上标 x 表示在波数领域中的变量， ξ_x 表示在 x 方向上的波数。

本文用四边形平面等参单元来模拟地基中的土单元，如图 2，每个节点包含 3 个自由度，其中沿轨道方向的位移用波数 ξ_x 表示，从而模拟波动在该方向上的传播。

1.2 地基波动方程的 2.5 维有限元表达式

根据 Navier 方程，在频域中三维弹性土体介质的波动方程可表示为

$$\mu^c u_{i,jj}^t + (\lambda^c + \mu^c) u_{j,ji}^t + \omega^2 \rho u_i^t + f_i^t = 0, \quad (3)$$

其中采用复系数的 Lamé 常数来考虑土体阻尼对波动传播的影响， $\lambda^c = (1 + 2i\beta)\lambda$ ， $\mu^c = (1 + 2i\beta)\mu$ ，其中 β 为土体的阻尼系数。

根据小变形假设，3 维土体单元的应变分量可分别表示为

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}, \\
\varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}, \\
\varepsilon_{zz} &= \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}.
\end{aligned} \quad (4)$$

对方程(4)中的应变和位移关系式引用对 x 方向坐标的傅里叶变换, 得到在波数领域中的表达式为

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{xx}^{xt} &= -i\xi_x u^{xt}, \quad \gamma_{xy}^{xt} = -i\xi_x v^{xt} + \frac{\partial u^{xt}}{\partial y}, \\
\varepsilon_{yy}^{xt} &= \frac{\partial v^{xt}}{\partial y}, \quad \gamma_{yz}^{xt} = \frac{\partial w^{xt}}{\partial y} + \frac{\partial v^{xt}}{\partial z}, \\
\varepsilon_{zz}^{xt} &= \frac{\partial w^{xt}}{\partial z}, \quad \gamma_{zx}^{xt} = \frac{\partial u^{xt}}{\partial z} - i\xi_x w^{xt}.
\end{aligned} \quad (5)$$

因此频域和波数变换领域中的应变-变形关系式为

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{xt} = \mathbf{B} \mathbf{u}^{xt}, \quad (6)$$

其中,

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{\varepsilon}^{xt} &= \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^{xt} & \varepsilon_{yy}^{xt} & \varepsilon_{zz}^{xt} & \gamma_{xy}^{xt} & \gamma_{yz}^{xt} & \gamma_{zx}^{xt} \end{bmatrix}^T, \\
\mathbf{u}^{xt} &= \begin{bmatrix} u^{xt} & v^{xt} & w^{xt} \end{bmatrix}^T, \\
\mathbf{B} &= \begin{bmatrix} -i\xi_x & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & -i\xi_x & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & -i\xi_x \end{bmatrix}^T,
\end{aligned}$$

同时根据应力-应变关系得到

$$\boldsymbol{\sigma}^{xt} = \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}^{xt}, \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\sigma}^{xt} = \begin{Bmatrix} \sigma_{xx}^{xt} \\ \sigma_{yy}^{xt} \\ \sigma_{zz}^{xt} \\ \tau_{xy}^{xt} \\ \tau_{yz}^{xt} \\ \tau_{zx}^{xt} \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \lambda^C + 2\mu^C & \lambda^C & \lambda^C & 0 & 0 & 0 \\ & \lambda^C + 2\mu^C & \lambda^C & 0 & 0 & 0 \\ & & \lambda^C + 2\mu^C & 0 & 0 & 0 \\ & & & \mu^C & 0 & 0 \\ & \text{对称} & & & \mu^C & 0 \\ & & & & & \mu^C \end{bmatrix}. \quad (8)$$

使用 4 节点等参单元对于垂直轨道截面上的土体进行离散, 采用的形函数如下式所示:

$$N_i(\eta, \zeta) = \frac{1}{4}(1 + \eta\eta_i)(1 + \zeta\zeta_i), \quad (i = 1, 2, 3, 4), \quad (9)$$

其中 η 和 ζ 为局部坐标系变量,

$$N_i(\eta_j, \zeta_j) = \begin{cases} 1 & (i = j), \\ 0 & (i \neq j), \end{cases}$$

则单元位移变形 u_i , $i = x, y, z$ 和单元节点位移 $(u_{xj}^e, u_{yj}^e, u_{zj}^e)$, $j = 1, 2, 3, 4$ 之间的关系可表示为

$$u_x = \sum_{j=1}^4 N_j(\eta, \zeta) u_{xj}^e, \quad u_y = \sum_{j=1}^4 N_j(\eta, \zeta) u_{yj}^e, \quad u_z = \sum_{j=1}^4 N_j(\eta, \zeta) u_{zj}^e.$$

引入形函数后, 即可得到在频域中的离散方程:

$$(\mathbf{K}^{xt} - \omega^2 \mathbf{M}) \mathbf{U}^{xt} = \mathbf{F}^{xt}, \quad (10)$$

在上式中 $\mathbf{M}$, $\mathbf{K}^{xt}$, $\mathbf{F}^{xt}$ 分别为质量矩阵、刚度矩阵和等效节点力矢量, 具体表达式如下:

$$\mathbf{M} = \sum_e \rho \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{N}^T \mathbf{N} |J| d\eta d\zeta, \quad (11a)$$

$$\mathbf{K}^{xt} = \sum_e \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 (\mathbf{B}^* \mathbf{N})^T \mathbf{D}(\mathbf{B} \mathbf{N}) |J| d\eta d\zeta, \quad (11b)$$

$$\mathbf{F}^{xt} = \sum_e \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{N}^T \mathbf{f} |J| d\eta d\zeta, \quad (11c)$$

下标 e 表示对所有有限单元进行集成, J 为 Jacobi 矩阵, 具体表达式如下:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^4 \frac{\partial N_i}{\partial \eta} y_i & \sum_{i=1}^4 \frac{\partial N_i}{\partial \eta} z_i \\ \sum_{i=1}^4 \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} y_i & \sum_{i=1}^4 \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} z_i \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$|J|$ 为所对应的行列式, 即 $|J| = \det J$.

1.3 基于频率相关黏壶建立透射边界

地基是一种典型的半无限弹性媒介. 对于静荷载情况, 在离荷载作用位置一定距离处设置人工边界条件就能得到比较合理的模拟结果; 而在动荷载作用下地基瞬态响应的分析中, 采用这种方法难以得到理想的结果. 同时在有限元方法中单元大小是有限的, 难以直接对无限地基进行模拟, 所以必须建立一种合适的人工边界来阻止外行波反射回有限元单元表示的近场区域中. 本文采用一种频率相关的黏壶单元来模拟无限地基, 如图 3. 尽管这种黏壶单元对外行波能量的吸收不但取决于地基土体的材料特性, 同时也与外行波的频率有关, 近来的研究表明这种吸收单元在实际运用中非常有效^[22]. 该吸收单元的系数由半无限区域的材料特性来决定, 单元节点上的外加集中力与变形速率之间的关系可以表示为

$$f_j = k_j \dot{u}_j, \quad j = x, y, z,$$

频域可表示为

$$f_j^t = -i\omega k_j u_j^t, \quad j = x, y, z, \quad (13)$$

其中,

$$k_x = k_y = \rho v_s, \quad k_z = \rho v_p. \quad (14)$$

1.4 列车荷载模型

实际列车荷载是由如图 4 所示的一系列轮重荷载组成. 设一列列车共有 M 节车厢, 每节车厢有 4 对车轮, 沿 x 正方向以速度 c 运行, 则列车产生的连续轴重荷载可用下式表示 [12]:

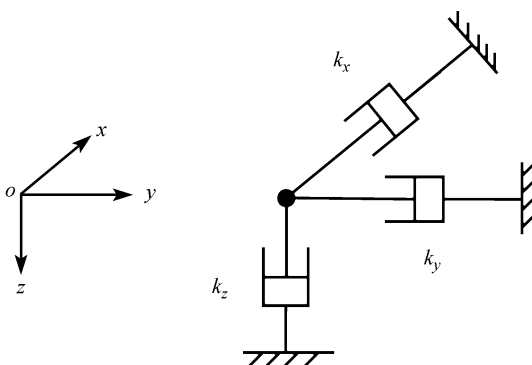


图 3 频率相关黏壶建构的透射边界

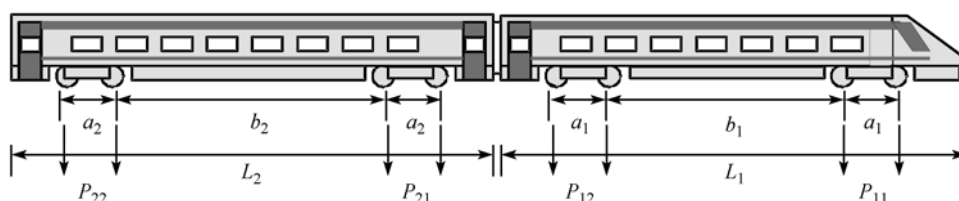


图 4 列车轮轴荷载分布

$$p_M(x, t) = \sum_{n=1}^M p_n(x - ct), \quad (15)$$

右边的求和符号表示第 n 节车厢荷载对轨道的竖向荷载, 其具体表达式如下:

$$\begin{aligned} p_n(x - ct) = & P_{n1} \delta \left(x - ct + \sum_{s=0}^{n-1} L_s + L_0 \right) + P_{n1} \delta \left(x - ct + a_n + \sum_{s=0}^{n-1} L_s + L_0 \right) \\ & + P_{n2} \delta \left(x - ct + a_n + b_n + \sum_{s=0}^{n-1} L_s + L_0 \right) + P_{n2} \delta \left(x - ct + 2a_n + b_n + \sum_{s=0}^{n-1} L_s + L_0 \right), \end{aligned} \quad (16)$$

其中 δ 为 Dirac 函数, P_{n1} 和 P_{n2} 分别表示车体前轮对和后轮对的轴重, L_n 为车厢的长度, L_0 是从第一节车厢前某一个设定参考点开始的距离. a_n 和 b_n 为轮轴之间的距离, 具体位置如图 4 所示. 在波数领域和频域中上述列车荷载表达式(15)可转化为

$$p_n^{xt}(\xi_x, \omega) = \frac{2\pi}{c} \delta \left(\xi_x - \frac{\omega}{c} \right) \chi_M(\xi_x), \quad (17)$$

其中,

$$\chi_M(\xi_x) = \sum_{n=1}^M \{ P_{n1} (1 + e^{-ia_n \xi_x}) + P_{n2} (e^{-i(a_n + b_n) \xi_x} + e^{-i(2a_n + b_n) \xi_x}) \} \exp \left(-i \left(\sum_{s=0}^{M-1} L_s + L_0 \right) \xi_x \right). \quad (18)$$

1.5 轨道和地基结合的整体方程

轨道由钢轨、轨枕以及道床组成, 如果钢轨垫层和下部道床的弯曲刚度较大, 整个轨道系统在竖向列车轮轴荷载作用下产生整体变形, 则轨道整体(包括钢轨、垫层、轨枕和道床)可被模拟成弯曲刚度为 EI 的复合梁, 其单位长度质量为 m ^[20]. 轮轴荷载作用下轨道的振动变形可以描述为

$$EI \frac{\partial^4 u_r}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} = f_{rr}(x, t) + \sum_{n=1}^M p_n(x - ct), \quad (19)$$

其中 $f_{rr}(x, t)$ 是轨道和地基的相互作用力. 在波数领域和频域中相应的方程为

$$(EI \xi_x^4 - m\omega^2) u_r^{xt} = f_{rr}^{xt}(\xi_x, \omega) + \sum_{n=1}^M p_n^{xt}(\xi_x, \omega), \quad (20)$$

表示成矩阵方式为

$$\mathbf{K}_{rr}^{xt} \mathbf{U}_{rr}^{xt} = \mathbf{F}_{rr}^{xt} + \mathbf{F}_T^{xt}, \quad (21)$$

其中 $\mathbf{F}_{rr}^{xt}$ 是轨道和地基的相互作用力, $\mathbf{K}_{rr}^{xt}$ 和 $\mathbf{F}_T^{xt}$ 分别表示梁的弯曲刚度和作用在其上的荷载大小, 具体表达式如下:

$$\mathbf{K}_{rr}^{xt} = EI \xi_x^4 - m\omega^2, \quad \mathbf{F}_T^{xt} = \sum_{n=1}^M p_n^{xt}(\xi_x, \omega). \quad (22)$$

设轨道与地基有 N 个共同节点, 在变换领域中列车荷载被均匀分布到轨道梁与地基的各个共有节点上, 因而每个节点上的集中竖向荷载为 $\mathbf{F}_T^{xt}/N$. 将轨道刚度和地基土体的刚度矩阵进行集成得到整体支配方程:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{rr}^{xt} + \mathbf{K}_{II}^{xt} & \mathbf{K}_{IS}^{xt} \\ \mathbf{K}_{SI}^{xt} & \mathbf{K}_{SS}^{xt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_{II} \\ \mathbf{U}_{SS} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_T^{xt} \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (23)$$

其中下标“ I ”表示地基与轨道的共有节点, 下标“ S ”表示地基内部节点. 对上述整体支配方程进行求解后得到轨道-地基在变换领域中的解, 而通过对沿轨道方向的波数扩展和对时间的傅里叶逆变换得到列车移动荷载作用下轨道和地基的振动解.

2 数值方法的验证

本文通过移动荷载作用下均匀半空间地基动力响应的分析模型来检验 2.5 维有限元方法的正确性和可靠性. 模型用刚性岩层上 20 m 厚的均匀土层来近似代表半空间地基, 如图 5 所示, 地基表面作用着沿 x 坐标轴方向运行的竖向点荷载. 地基材料参数包括密度 ρ 、剪切波速 V_s 、泊松比 ν 和阻尼系数 β 等均在图 5 中标明.

本文计算了速度为 70 m/s 的移动点荷载作用下地基表面以下 1 m 深处观察点的动力响应. 图 6 中给出了荷载移动方向上地基水平向响应和竖向响应的计算结果, 并乘以 $2\pi\rho V_s^2/P$ 进行归一化; 图 6 中同时给出了 Eason (1965) 得到的均匀弹性半空间地基的解析解结果^[11]. 可以看到两者结果非常吻合, 证实了本文计算理论和模型的可靠性和准确性.

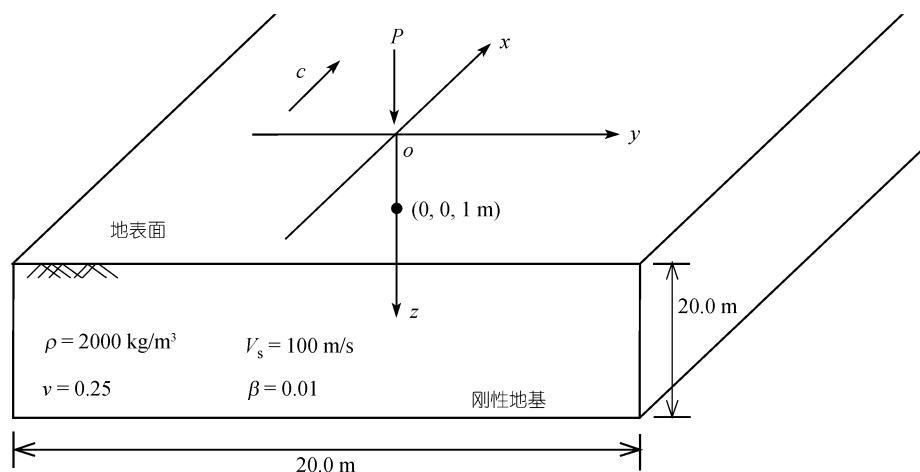


图 5 移动点荷载作用下的均匀半空间地基分析模型

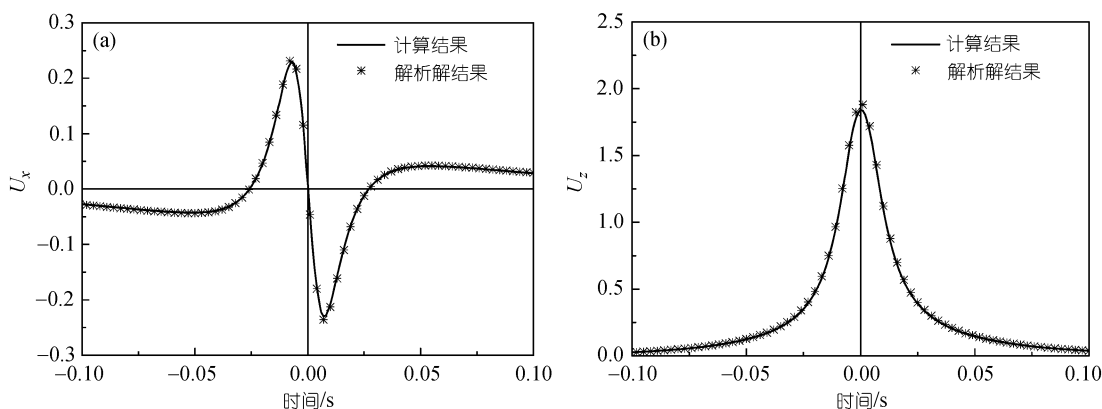


图 6 移动点荷载作用下地基中(0, 0, 1 m)处的地基振动

(a) 沿移动荷载方向的水平振动 U_x ; (b) 竖向振动 U_z

3 单一轮轴荷载作用下地基的振动

Hung (2001)根据地基中传播的 S 波波速 V_s 和 P 波波速 V_p 将速度为 c 的移动荷载作用于弹性介质的问题分为亚音速、跨音速和超音速等 3 种情况. 但是对于实际高速列车运行引起地基响应的研究, 常将瑞利波波速 V_R 作为分界值, 因而对地基振动问题作如下的分类更具有实际意义: (i) 亚音速: 荷载速度 c 远小于 V_R ; (ii) 跨音速: 荷载速度 c 接近或略超过 V_R ; (iii) 超音速: 荷载速度 c 远大于 V_R .

为了研究不同速度列车运行荷载作用下地基的动力响应, 采用如图 7 所示的刚性基岩上厚度为 20 m 的均匀土体来近似表示半空间地基. 轨道结构被简化为铺设在地基表面的梁, 宽度为 $2B$ ($2B=3.0$ m). 列车移动轮轴荷载作用于轨道上, 单一轮轴的竖向荷载取为 160 kN, 轨道弯曲刚度为 $200.0 \text{ MN}\cdot\text{m}^2$, 地基瑞利波速值 $V_R=92.2 \text{ m/s}$, 其他的地基土体参数如图 7 所示.

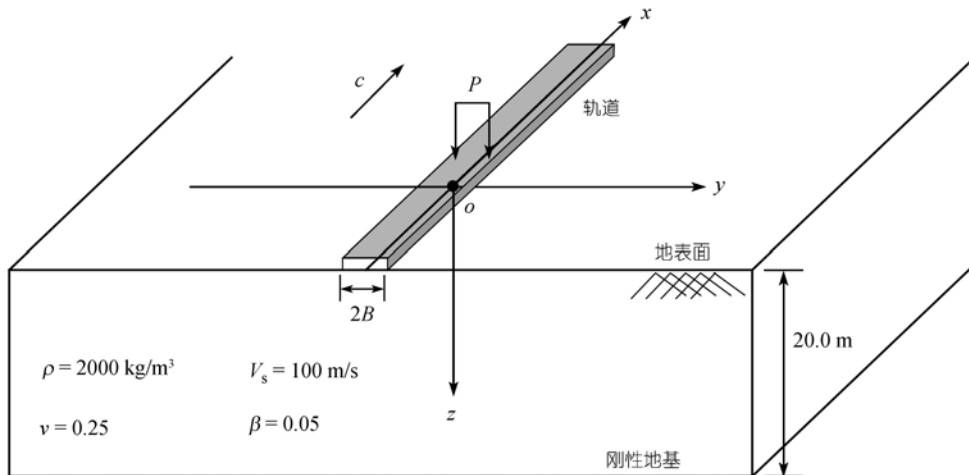


图 7 单一轮轴荷载作用下轨道-地基相互作用分析模型

在本算例中取 3 种不同的荷载速度 c , 为 60、92 和 120 m/s, 分别代表亚音速、跨音速和超音速 3 种情况进行计算分析。

图 8~10 中分别为 3 种不同速度的单列车轮轴荷载作用下地基表面振动的响应幅值分布图。可见, 在亚音速($c = 60$ m/s)情况下, 地基振动响应只发生在局部区域内, 地基中没有明显的波动传播现象, 并且地基表面振动幅值分布基本是关于荷载作用位置对称分布。当荷载移动速度($c = 92$ m/s)接近临界速度 V_R (92.2 m/s)时, 地基振动响应急剧增大, 荷载作用位置前方的地基变形很小, 而在荷载位置后方的地基变形很大, 出现明显的马赫效应。在超音速情况下, 地基振动响应影响范围增大, 地基波动传播中的马赫效应更加明显, 但是地基振动响应幅值反而有所减小。

4 列车运行荷载作用下地基的振动

4.1 计算模型和参数

在本节中以瑞典 X2000 高速列车在实际软土地基上运行产生的振动为例进行计算分析。瑞典国家铁路管理局(VANBERKET)于 1997~1998 年在 Ledsgard 地区进行了 X2000 高速列车运行时轨道和地基振动的现场测试 [23], 提供了大量重要的现场实测数据, 表 1 中给出了轨道结构的物理参数, 铁路轨道下的多层地基土体参数如图 11 所示。在以下的数值计算中, 各层土体的泊松比均取为 0.4。X2000 高速列车由 5 节车厢组成, 车头车尾各为一节动力机车, 图 12

表 1 轨道参数

轨道参数	数值
轨道宽度 $2B/m$	3.0
质量密度 $M/t \cdot m^{-1}$	10.8
弯曲刚度 $EI/MN \cdot m^2$	200
阻尼系数	0.10

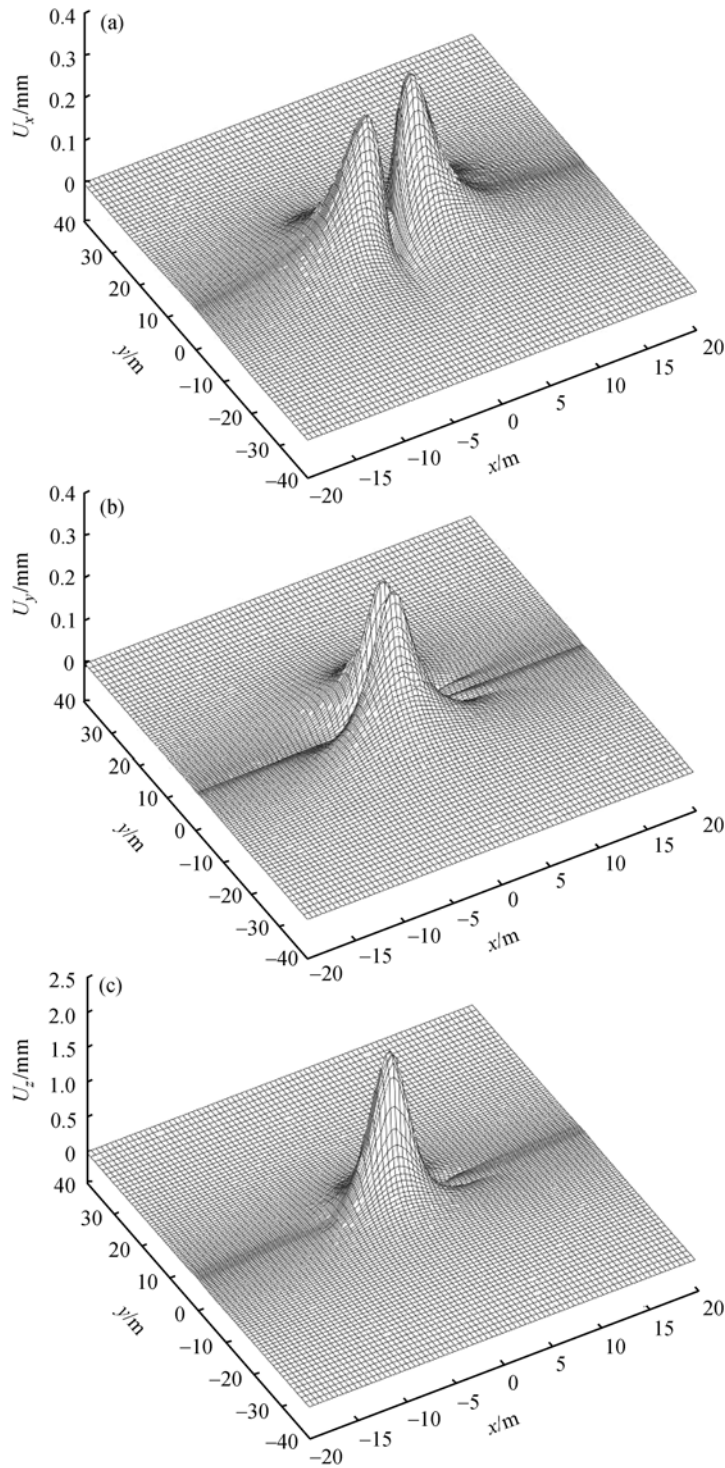


图 8 亚音速单一轮轴移动荷载作用下地基振动($c = 60 \text{ m/s}$)
(a) U_x , 轨道方向的水平位移; (b) U_y , 垂直轨道的水平位移; (c) U_z , 竖向位移

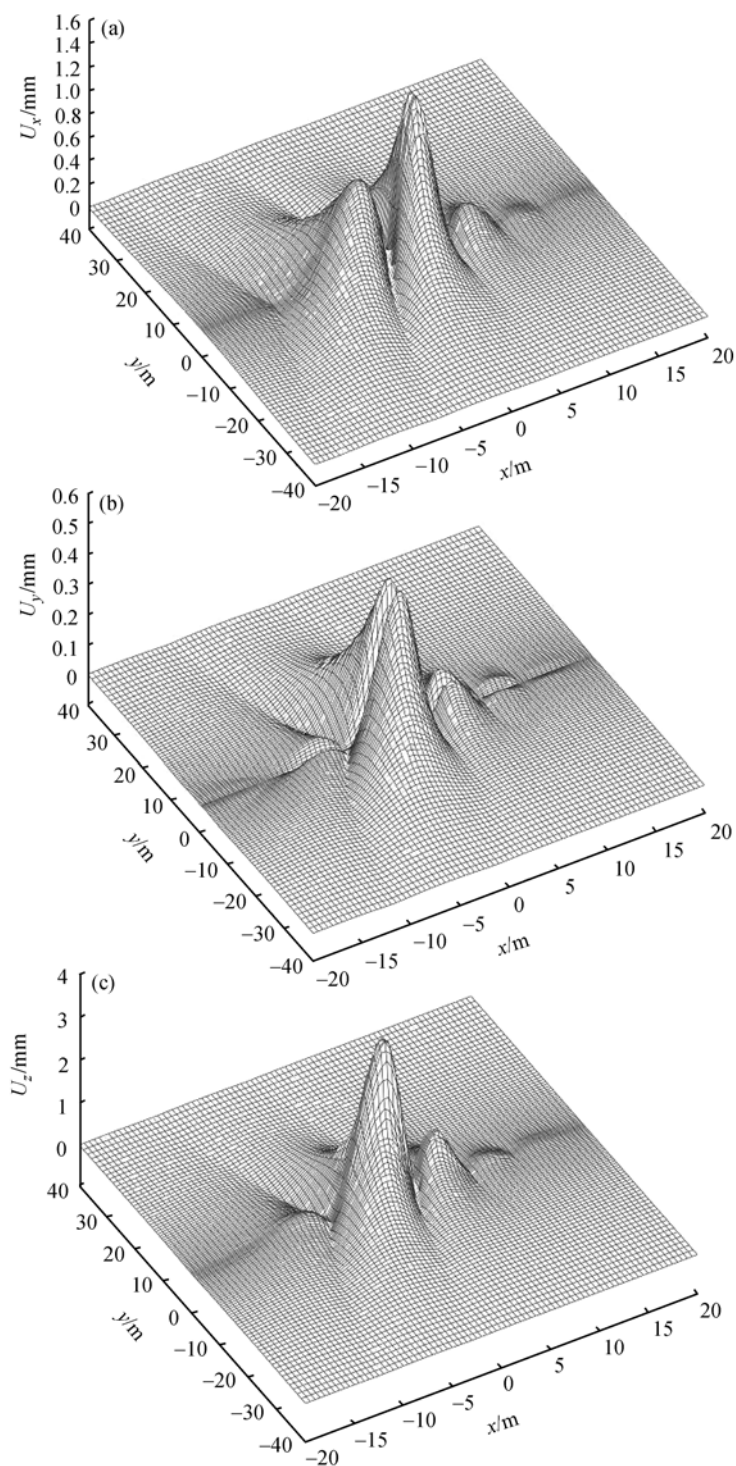


图 9 跨音速单一轮轴移动荷载作用下地基振动($c = 92 \text{ m/s}$)

(a) U_x , 轨道方向的水平位移; (b) U_y , 垂直轨道的水平位移; (c) U_z , 竖向位移

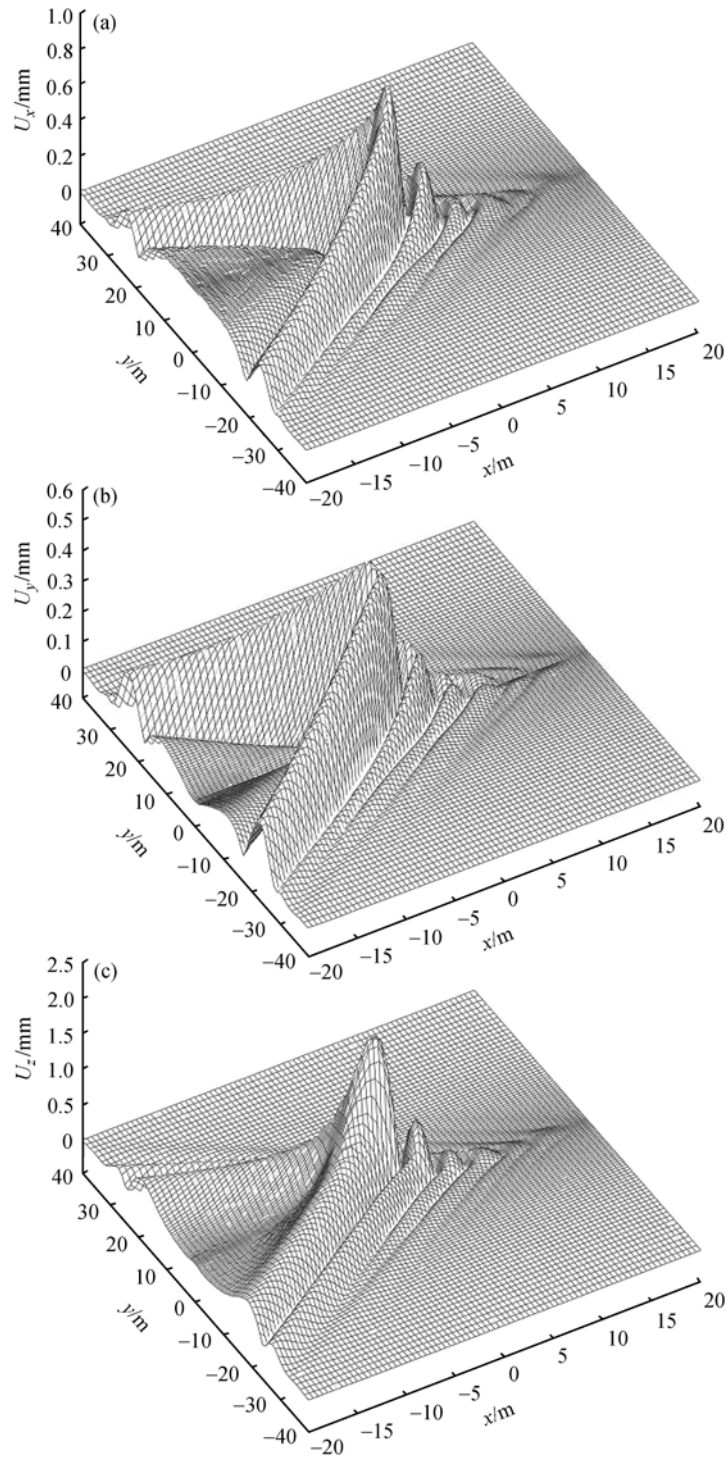
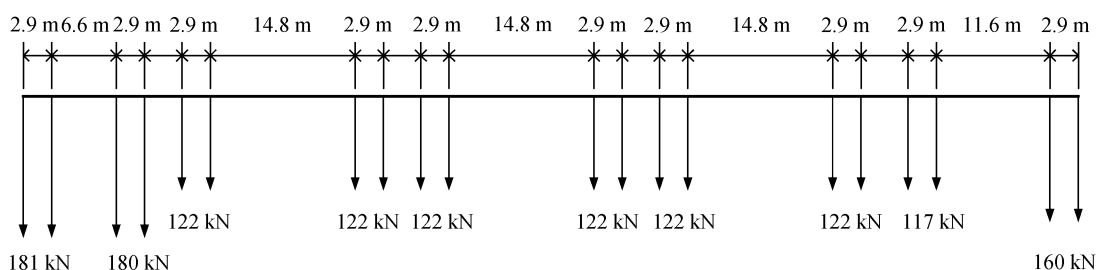
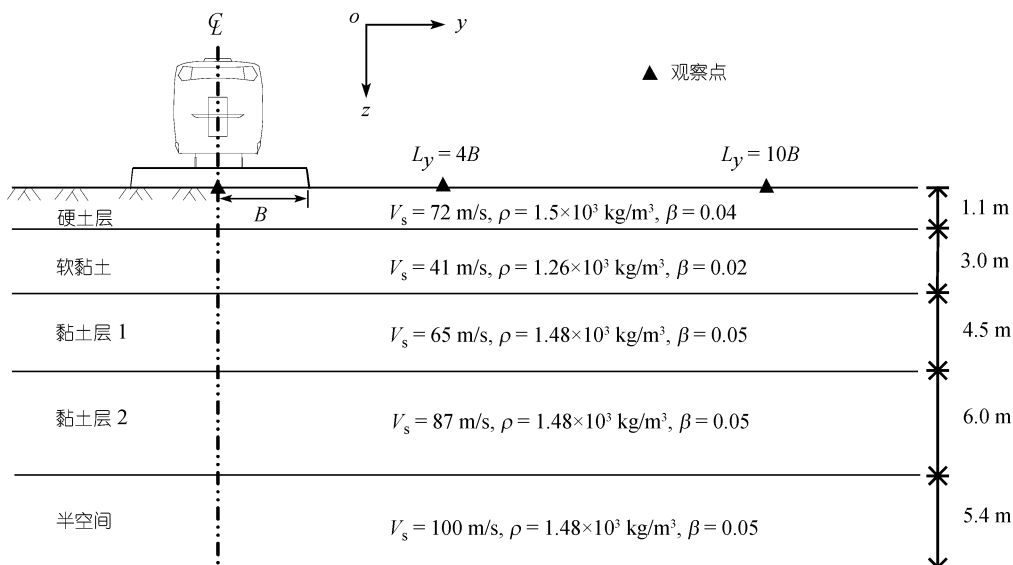


图 10 超音速单一轮轴移动荷载作用下地基振动($c = 120 \text{ m/s}$)
(a) U_x , 轨道方向的水平位移; (b) U_y , 垂直轨道的水平位移; (c) U_z , 竖向位移



中给出了具体的车厢位置和轮轴荷载分布. 本文取地基表面的3个观察点来研究列车经过时产生的地基波动.

4.2 列车经过产生的地基波动

分层地基中波动传播时存在着弥散现象,本文首先根据轨道-地基系统的动力特性来分析高速与低速列车运行产生的轨道和地基振动特性.图 13 中给出了在主要波数响应范围内轨道中心位置处地基振动的频率-波数响应谱图,轨道-地基系统动力相互作用使得响应谱中呈现出一些峰值区域.响应峰值在较小频率范围内延伸,而相应的波数范围相对来说比较大,说明列车运行荷载产生的地基波动传播存在着明显的弥散性.图 13 中同时给出了表示列车运行速度的斜线,分别表示列车速度为 100, 200 和 300 km/h (相当于 $c=27.8, 55.6$ 和 83.3 m/s).从图 13 中可以发现列车速度为 $c=100$ km/h 时,速度斜线远离动力响应峰值区域,表明轨道-地基系统在速度为 100 km/h 的运行列车荷载作用下不会产生共振现象;而当列车的运行速度达到 200 km/h 时,表示荷载速度的斜线恰好通过动力响应峰值,表明引发了共振现象,从而带来轨

道和地基过大的振动变形. 但是当列车在更高速度(300 km/h)运行时, 响应谱图中荷载速度斜线远离动力响应峰值, 因而轨道和地基的动力响应幅值反而较列车速度为 200 km/h 时小.

图 14 中给出了地基表面不同观察点处(分别为轨道中心、距轨道中心 4B 和 10B 远处)的振动响应, 为了对不同速度下地基同一点处的地基振动进行对比, 横坐标采用时间 t 与列车速度 c 的乘积来表示. 当列车低速运行时, 只有轨道中心及较近的地基出现明显的变形, 在离轨道较远的地基中振动衰减很快. 当列车高速运行时, 轨道-地基产生的共振使得动力响应影响范围剧增, 周围地基波动出现明显的马赫效应. 列车低速运行引起的轨道变形与列车静止荷载引起的轨道变形非常相似的, 主要表现为轴重荷载产生的静态弹性变形; 而高速列车运行引起轨道明显的向上和向下往复变形. 同时当列车高速运行时, 不论是 200 还是 300 km/h, 离轨道中心较远距离处的地基上仍然存在明显的动力响应.

为了研究振动位移响应中的频率成分, 图 15 中给出了经过傅里叶变换后得到的频率谱. 可以发现振动响应波峰在频率域中分成几个集中区, 除了列车整体静力荷载作用在低频区域产生变形响应外, 振动峰值出现的集中区是与列车几何尺寸、车厢长度、轮轴中心跨度以及列车运行速度等直接相关的. 随着运行速度的提高, 列车运行产生的地基响应向高频区域迁移. 相比于低速运行情况, 高速列车运行产生的地基振动峰值会被极大地提高, 这种放大作用是波动在轨道和地基中传播时产生的共振引起的, 因此高速列车运行在波动传播速度较低的软土地基中运行时有可能引发强烈的动力响应.

4.3 波动在周围地基中的传播

研究列车运行引起振动的一个重要方面是考察轨道周围地基中波动的传播, 用等高线图可以清楚地表现出列车运行时地基表面的瞬态响应分布. 图 16 给出了列车在 3 种典型速度下运行时地基表面的位移响应分布. 在列车低速(100 km/h)运行时, 地基位移响应表现为圆形分布的静态弹性变形, 而在列车运行在临界速度(200 km/h)时, 由于共振作用引起强烈的表面波传播, 地基表面振动响应的影响范围也随之扩大. 当列车高速运行时(200 或 300 km/h), 荷载后方的地基振动响应分布中出现狭长的两翼, 这种现象表明列车速度已经接近或超过了地基临界波速, 进入跨音速或超音速状态, 地基振动变形出现了明显的多普勒效应.

图 17 给出了自轨道中心到周围地基竖向振动位移的衰减图. 当列车在亚音速(100 km/h)或超音速(300 km/h)运行时, 地基响应明显小于列车速度接近临界速度时的地基振动响应; 亚音速情况下动力响应在周围地基衰减很快, 而在跨音速和超音速情况下振动在周围地基中衰

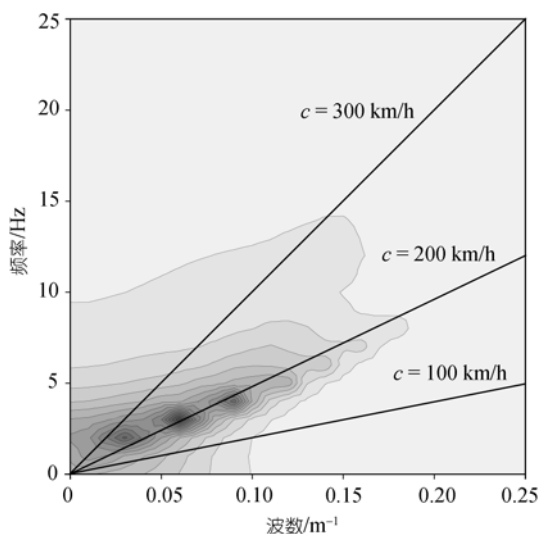


图 13 列车运行荷载产生轨道中心地基振动的频率-波数响应谱

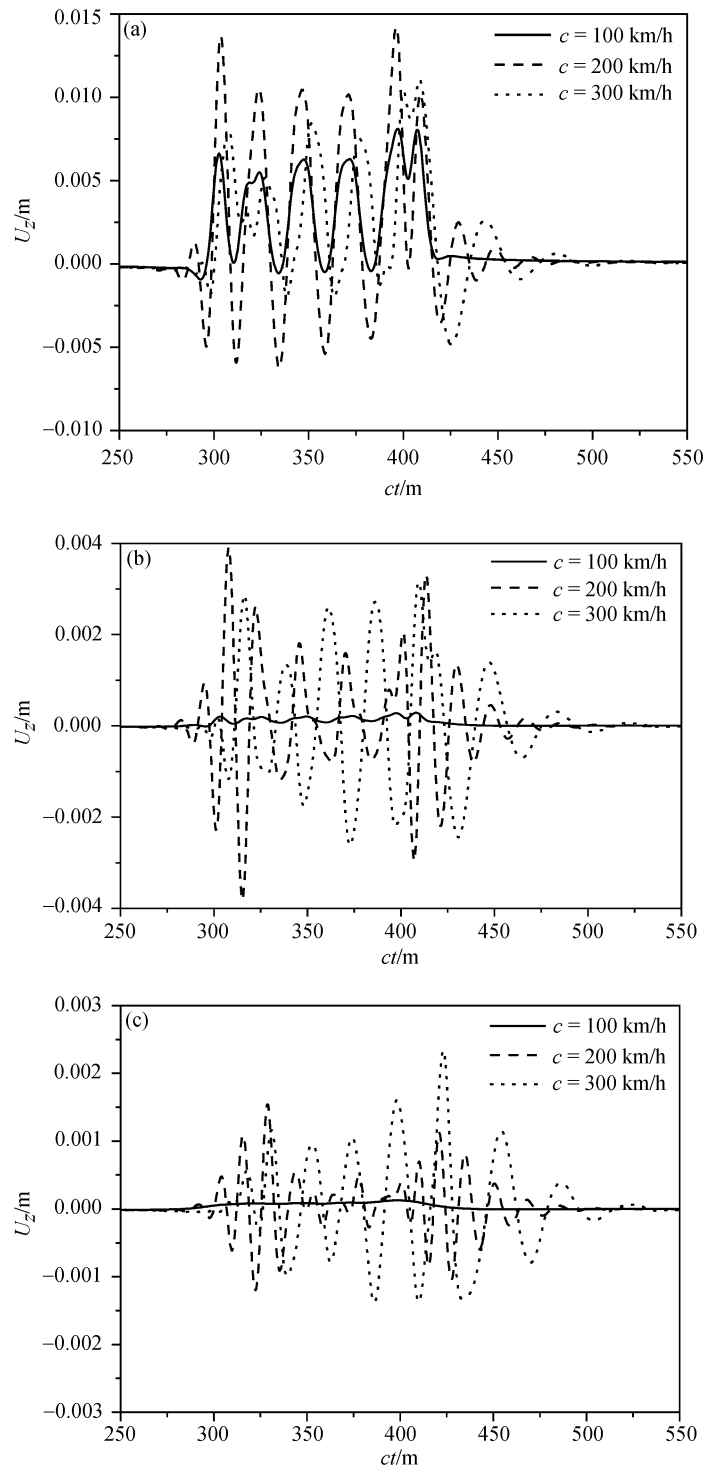


图 14 列车经过时地基观察点的竖向波动时程

(a) 轨道中心; (b) 地基上 4B 距离处; (c) 地基上 10B 距离处

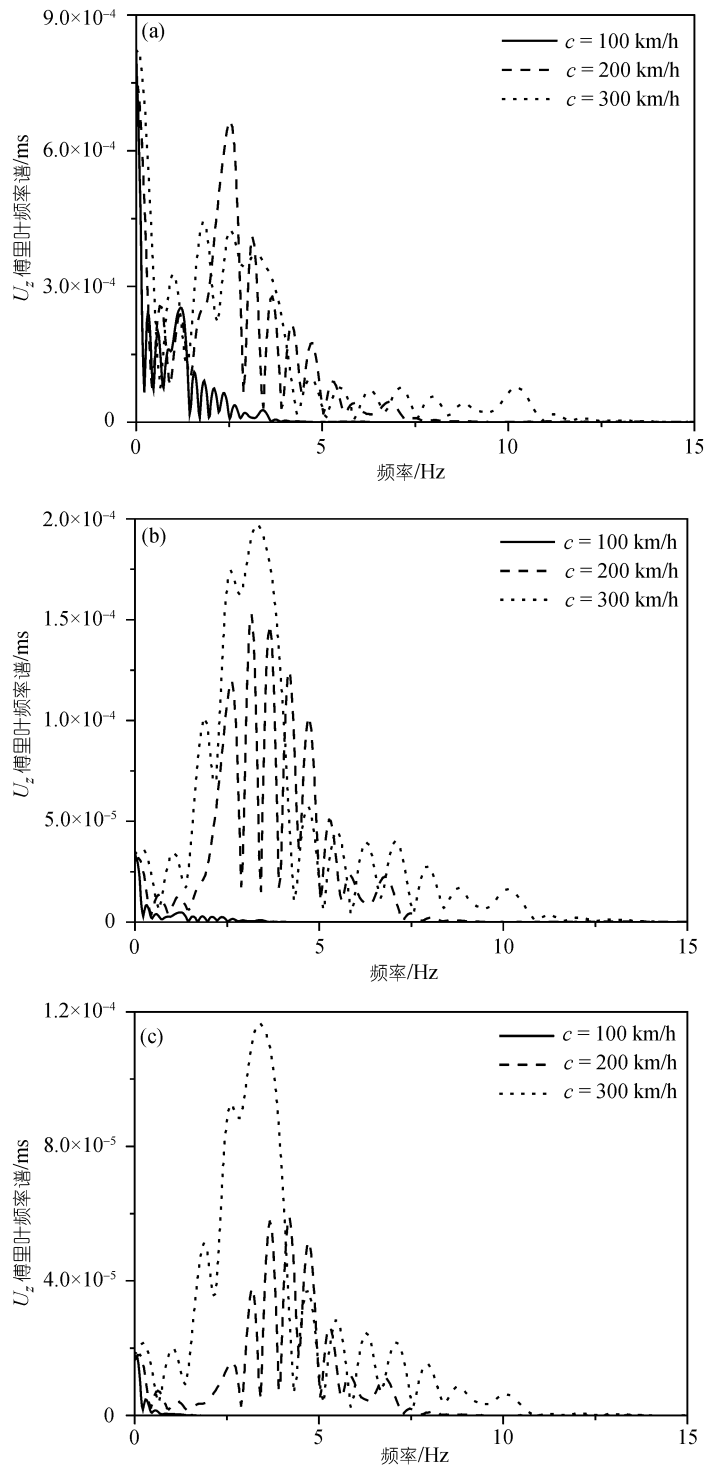


图 15 列车经过时地基观察点处竖向振动位移的响应频谱
(a) 轨道中心; (b) 地基上 $4B$ 距离处; (c) 地基上 $10B$ 距离处

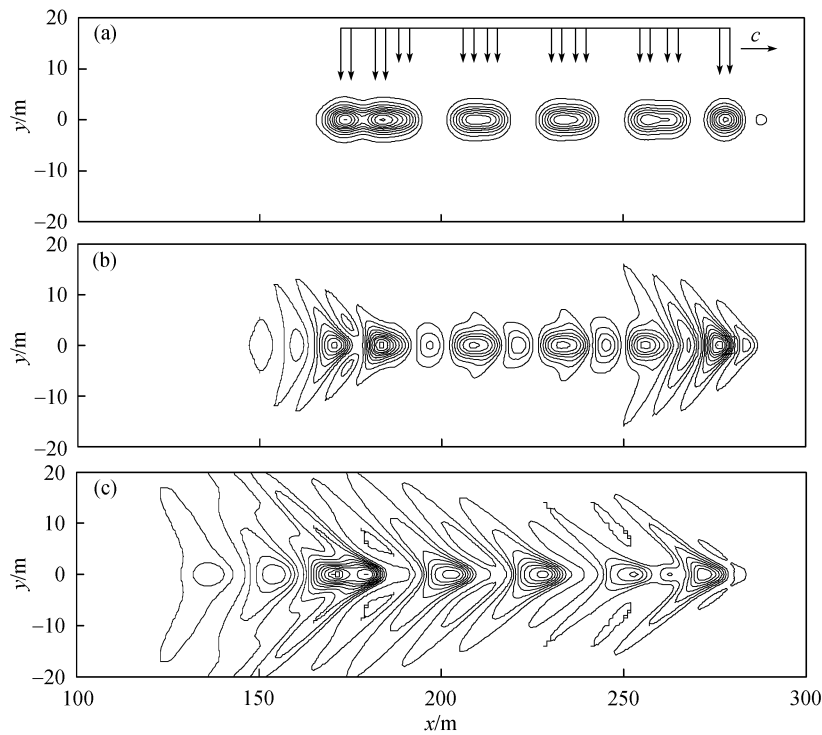


图 16 列车不同速度运行时产生的地基竖向波动场

(a) $c = 100 \text{ km/h}$; (b) $c = 200 \text{ km/h}$; (c) $c = 300 \text{ km/h}$

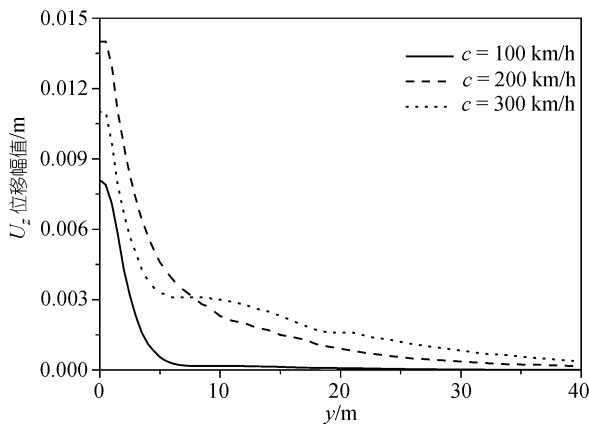


图 17 列车运行引起的振动竖向位移幅值在周围地基中的衰减

或者超过轨道-地基系统的临界速度时, 地基振动幅值和影响区域急剧增大. 低速运行下的列车主要使轨道产生静态的弯曲变形, 而高速运行列车使得轨道产生强烈的振动, 并且在地基中引起明显的波动传播.

减较慢, 传播距离更远.

5 结论

本文利用 2.5 维有限元方法研究了铁路轨道和地基在列车运行荷载作用下的动力响应, 构建了简单有效的透射边界来模拟波动在有限元近场边界上的散射, 并通过与理论解析解的对比验证了本文方法和计算结果的正确性. 通过数值计算发现列车的运行速度和地基波动传播速度的相互关系是地基波动的决定因素. 当列车低速运行时, 周围地基的振动响应只局限于轨道周围的有限范围内, 而当列车速度接近

参考文献

- 1 Eason G. The stresses produced in a semi-infinite solid by a moving surface force. *Int J Eng Sci*, 1965, 2: 581—609[DOI]
- 2 de Barros F, Luco J E. Response of a layered viscoelastic half-space to a moving point load. *Wave Motion*, 1994, 19: 189—210[DOI]
- 3 Lefeuvre-Mesgouez G, Le Houédec D, Peplow A T. Ground vibration in the vicinity of a high-speed moving harmonic strip load. *J Sound Vibrat*, 2000, 231(5): 1289—1309[DOI]
- 4 Grundmann H, Lieb M, Trommer E. The response of a layered half-space to traffic loads moving along its surface. *Arch Appl Mech*, 1999, 69: 55—67
- 5 Lefeuvre-Mesgouez G, Peplow A T, Le Houédec D. Surface vibration due to a sequence of high speed moving harmonic rectangular loads. *Soil Dyn Earthq Eng*, 2002, 22(6): 459—473[DOI]
- 6 Andersen L, Nielsen S R K. Boundary element analysis of the steady-state response of an elastic half-space to a moving force on its surface. *Eng Anal Bound Elem*, 2002, 27(1): 23—38[DOI]
- 7 Karlström A, Boström A. An analytical model for train-induced ground vibrations from railways. *J Sound Vib*, 2006, 292(1-2): 221—241[DOI]
- 8 Sheng X, Jones C J C, Thompson D J. A theoretical study on the influence of the track on train-induced ground vibration. *J Sound Vib*, 2004, 272(3-5): 909—936[DOI]
- 9 Dieterman H A, Metrikine A V. Steady-state displacements of a beam on an elastic half-space due to a uniformly moving constant load. *Eur J Mech A/ Solids*, 1997, 6(2): 295—306
- 10 Sheng X, Jones C J C, Petyt M. Ground vibration generated by a load moving on a railway track. *J Sound Vib*, 1999, 228: 129—156[DOI]
- 11 Jones C J C, Sheng X, Petyt M. Simulations of ground vibration from a moving harmonic load on a railway track. *J Sound Vib*, 2000, 231(3): 739—751[DOI]
- 12 Takemiya H, Bian X C. Substructure simulation of inhomogeneous track and layered ground dynamic interaction under train passage. *J Eng Mech ASCE*, 2005, 131(7): 699—711[DOI]
- 13 O'Brien J, Rizos D C. A 3D BEM-FEM methodology for simulation of high speed train induced vibrations. *Soil Dyn Earthq Eng*, 2005, 25(4): 289—301
- 14 Nielsen J C O, Oscarsson J. Simulation of dynamic train-track interaction with state-dependent track properties. *J Sound Vib*, 2004, 275(3-5): 515—532[DOI]
- 15 Hall L. Simulations and analyses of train-induced ground vibrations in finite element models. *Soil Dyn Earthq Eng*, 2003, 23(5): 403—413
- 16 Ju S H, Lin H T. Analysis of train-induced vibrations and vibration reduction schemes above and below critical Rayleigh speeds by finite element method. *Soil Dyn Earthq Eng*, 2004, 24(12): 993—1002[DOI]
- 17 Hwang R N, Lysmer J. Response of buried structures to traveling waves. *J Geotech Eng ASCE*, 1981, 107(GT2): 183—200
- 18 Hanazato T, Ugai K, Mori M, et al. Three-dimensional analysis of train-induced ground vibrations. *J Geotech Eng ASCE*, 1991, 117(8): 1133—1151[DOI]
- 19 Yang Y B, Hung H H, Chang D W. Train-induced wave propagation in layered soils using finite/infinite element simulation. *Soil Dyn Earthq Eng*, 2003, 23(4): 263—278[DOI]
- 20 Takemiya H. Simulation of track-ground vibrations due to a high-speed train: The case of X-2000 at Ledsgard. *J Sound Vib*, 2003, 261(3): 503—526[DOI]
- 21 Bian X C. Ground vibration due to moving load at critical velocity. *J Zhejiang Univ Eng Sci*, 2006, 40(4): 672—675
- 22 Lysmer J, Kuhlemeyer R L. Finite dynamic model for infinite media. *J Eng Mech ASCE*, 1969, 95(EM4): 859—877
- 23 Banverket. Dynamic Soil-Track Interaction and Ground Borne Vibration. Technical Report. Sweden: The Swedish National Railway Authority, 2000