中国科学: 技术科学 2012 年 第 42 卷 第 10 期: 1148 ~ 1156
www.scichina.com tech.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

自然科学基金项目进展专栏

高速列车运行于软土地基线路引起的地面振动研究

翟婉明*, 韩海燕

西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 成都 610031
* E-mail: wmzhai@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2012-06-04; 接受日期: 2012-07-11
国家自然科学基金(批准号: 50823004, 50838006)资助项目

摘要 基于车辆-轨道耦合动力学理论和有限元方法, 建立了高速列车-轨道垂向耦合模型和轨道-土体有限元模型, 提出了一种研究列车作用下地面振动问题的数值模拟方法. 以高速铁路软土地基线路为例, 分析了高速列车运行引起的地面振动特性, 并探讨了采用水泥土搅拌桩加固软土地基对地面振动水平的影响. 结果表明: 当移动荷载速度达到土体表面的 Rayleigh 波波速时, 匀质土体会产生类似于结构物共振的现象, 而土体阻尼的存在能有效地降低地面振动水平, 同时抑制临界车速下振动的突增; 随着高速列车运行速度的增加, 地面振动水平会不断提高, 车速对地面振动的影响主要体现在近轨道区域内; 软土地基加固后, 地面振动位移和加速度均有不同程度的降低, 距离地基加固区越近, 水泥土搅拌桩的加固和减振效果越明显.

关键词
高速铁路
软土
地面振动
车辆-轨道耦合动力学
有限元法

1 引言

随着高速铁路和城市轨道交通的迅猛发展, 列车运行引起的环境振动问题日益突出. 列车运行产生的微振动一般不会直接造成建筑物的坍塌和破坏, 但可能对建筑物内仪器设备的精度以及居民的日常生活产生很大影响. 因此, 在发展轨道交通的同时, 也急需把环境振动问题列为必须解决的关键问题之一.

许多研究表明, 列车运行时存在某一临界车速, 在该速度下地面振动响应会急剧增加. 1995 年, Krylov[1]通过理论计算发现, 当列车速度达到土体表面的Rayleigh波波速时, 地面振动响应就会发生突增. 1997 年, 瑞典国家铁路局在 Ledsgård 西海岸开展了软土振动试验, 结果表明列车运营速度达 200 km/h 时十分接近该场地列车运行的临界速度[2]. 目前, 高速铁路的运营速度通常在 200~350 km/h, 法国的 TGV 更是在 2007 年创下了有轨列车最高试验速度 574.8 km/h 的世界记录, 列车速度超过临界速度的情况很有可能发生. 特别是, 我国很多地区的土体很软(如上海、杭州、广州、天津等), 该临界状态就更容易达到. 因此, 针对软土地基线路, 开展高速列车引起的地面振动研究具有非常重要的理论和现实意义.

2 列车运行引起地面振动的分析方法

列车运行引起的地面振动问题涉及因素众多, 包括车辆、轨道结构及周围土体等. 为综合考虑各项因素的影响, 一些学者建立了整体系统模型研究列车引起的地面振动问题. 例如, 和振兴与翟婉明等人[3, 4]建立了列车-轨道-地基耦合模型, 分析高速铁路板式无砟轨道线路引起的地面振动; Xia 等人[5]建立了列车-轨道-地基动态相互作用模型, 分析移动列车

中文版发表信息: 翟婉明, 韩海燕. 高速列车运行于软土地基线路引起的地面振动研究. 中国科学: 技术科学, 2012, 42: 1148–1156, doi: 10.1360/092012-611

作用下的地面振动响应. 本文在充分考虑了各子系统之间的关联性以及数值计算的高效性前提下, 将列车引起的地面振动问题拆分成了两个子问题进行研究: 首先, 基于车辆-轨道耦合动力学理论[6], 建立列车-轨道垂向耦合模型, 分析车辆与轨道之间的动态相互作用, 获得作用于轨道结构上的激振力; 然后, 借助于 ANSYS 有限元软件建立轨道-土体有限元模型, 分析列车动荷载作用下土体的振动特性.

2.1　列车-轨道垂向耦合模型

车辆-轨道垂向耦合动力学理论[6]是研究车辆与轨道动态相互作用, 特别是研究列车对线路动力作用的有效方法, 它能够方便地模拟各种形式的轮轨几何缺陷以及轨道随机不平顺所导致的列车对线路的动态作用力, 即线路激振源. 本文基于该理论建立了高速列车-轨道垂向耦合模型, 如图 1 所示. 其中, 各节车辆被模拟成以速度 v 运行于轨道结构上的多刚体系统, 考虑车体的沉浮与点头运动, 转向架的沉浮与点头运动, 轮对的沉浮运动, 共 10 个自由度. 钢轨采用连续离散点支承的 Euler 梁模拟, 轨下基础的建模因轨道结构形式的不同而有所区别. 下面重点介绍高速铁路常用的板式无砟轨道的建模.

通常在建立板式轨道振动分析模型时, CA 砂浆层以下的基础结构不再考虑, 而是直接进行固支. 由于本文所研究的地基土很软, 土体弹性可能会对轨道结构的振动产生较大影响, 因此为更真实地模拟软土线路上的行车条件, 轨道建模时考虑了底座参振及软土弹性的影响. 其中, 轨道板被简化成弹性-阻尼基础上的两端自由梁, 其振动微分方程的具体形式参见文献[6]. 底座的建模与轨道板类似, 它被简化为弹性-阻尼地基上的两端自由梁, 其垂向振动微分方程为

$$E_{\mathrm{d}}I_{\mathrm{d}}\frac{\partial^4 Z_{\mathrm{d}}(x,t)}{\partial x^4}+\frac{M_{\mathrm{d}}}{L_{\mathrm{d}}}\frac{\partial^2 Z_{\mathrm{d}}(x,t)}{\partial t^2}+c_{\mathrm{d}}\frac{\partial Z_{\mathrm{d}}(x,t)}{\partial t}+k_{\mathrm{d}}Z_{\mathrm{d}}(x,t)$$
$$=c_{\mathrm{s}}\left(\frac{\partial Z_{\mathrm{s}}(x,t)}{\partial t}-\frac{\partial Z_{\mathrm{d}}(x,t)}{\partial t}\right)+k_{\mathrm{s}}\left(Z_{\mathrm{s}}(x,t)-Z_{\mathrm{d}}(x,t)\right),\quad(1)$$

式中, $E_{\mathrm{d}}I_{\mathrm{d}}$ 为底座板的抗弯刚度(N m^2); Z_{d} 为底座的振动位移(m); M_{d} 为底座板质量(kg); L_{d} 为底座板长度(m); k_{s} 和 c_{s} 分别是轨道板下 CA 砂浆层沿长度方向的分布刚度(N/m/m)和分布阻尼(N s/m/m); k_{d} 和 c_{d} 分别为土体等效分布刚度(N/m/m)和分布阻尼(N s/m/m). 由于土体结构十分复杂, 很难直接利用土体参数确定其等效刚度和阻尼, 因此文中先建立了分层土体的有限元模型, 然后对其进行静态和动态加载, 利用激励与响应的关系间接地确定土体等效刚度和阻尼.

底座梁的振动方程(1)为四阶偏微分方程. 为了进行数值分析, 可采用 Ritz 法将其降阶为二阶常微分方程组. 选取 NMS 个广义坐标 $B_n(t)$, 同时引入自由梁正交函数系 $\{X_n\}$ $(n=1\sim NMS)$, 其中

$$\begin{cases}X_1=1,\\ X_2=\sqrt{3}\left(1-\dfrac{2x}{L_{\mathrm{d}}}\right),\\ X_m=(\mathrm{ch}\beta_m x+\cos\beta_m x)-C_m(\mathrm{sh}\beta_m x+\sin\beta_m x),\end{cases}\quad(2)$$

式中, C_m 和 β_m 为常数. C_m 和 $\beta_m L_{\mathrm{d}}$ 的取值见表 1.

于是底座振动方程的解可写成如下形式:

$$Z_{\mathrm{d}}(x,t)=\sum_{n=1}^{NMS}X_n(x)B_n(t).\quad(3)$$

将(3)式代入(1)式, 并在等式两边同乘以 $X_p(x)$ $(p=1\sim NMS)$, 然后在底座板全长范围内对 x 积分, 利用模态正交性和 δ 函数性质, 最终可得到底座振型坐标的二阶常微分方程组:

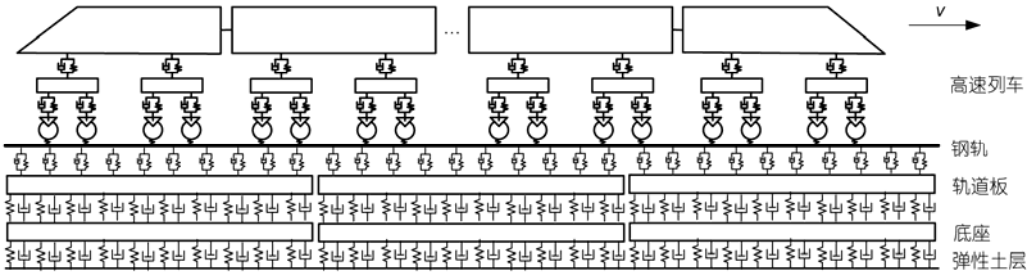

图 1　高速列车-板式无砟轨道垂向耦合模型

表 1　自由梁函数系数

m	C_m	$\beta_m L_d$
1	–	0
2	–	0
3	0.982502	4.72004
4	1.000777	7.85320
5	0.999966	10.9956
≥6	1.000000	$(2m-3)\pi/2$

$$\ddot{B}_n(t)+\frac{c_d L_d}{M_d}\dot{B}_n(t)+\frac{k_d+E_d I_d \beta_n^4}{M_d}L_d B_n(t)$$
$$=c_s\left(\frac{L_s}{M_s}\dot{T}_n(t)-\frac{L_d}{M_d}\dot{B}_n(t)\right)+k_s\left(\frac{L_s}{M_s}T_n(t)-\frac{L_d}{M_d}B_n(t)\right),\ (n=1\sim NMS), \quad (4)$$

式中，$T_n(t)$ 为轨道板的振型坐标.

在建立了列车和轨道子模型后，列车与轨道之间的耦合通过轮轨相互作用关系实现. 这里采用经典的 Hertz 非线性弹性接触理论，确定轮轨间的垂向作用力 $P(t)$:

$$P(t)=\left[\frac{1}{G}\delta Z(t)\right]^{3/2}, \quad (5)$$

式中，G 为轮轨接触常数，对于磨耗型踏面 $G=3.86R^{-0.115}\times10^{-8}$，其中 R 为车轮半径；$\delta Z(t)$ 为轮轨间的弹性压缩量，由轮轨接触点处车轮和钢轨的位移以及轮轨界面的位移不平顺确定:

$$\delta Z(t)=Z_{wj}(t)-Z_r(x_{wj},t)-Z_0(t)\ \ (j=1\sim4), \quad (6)$$

其中，$Z_{wj}(t)$ 为 t 时刻第 j 位车轮的位移；$Z_r(x_{wj},t)$ 为 t 时刻第 j 位车轮正下方 x_{wj} 处钢轨的位移；$Z_0(t)$ 为轮轨界面的位移不平顺. 特别地，当 $\delta Z(t)<0$ 时，表明轮轨已相互脱离，此时轮轨垂向力 $P(t)=0$.

列车-轨道垂向耦合系统的振动方程最终可表示成如下的统一形式:

$$[M]\{A\}+[C]\{V\}+[K]\{X\}=\{F\}, \quad (7)$$

式中，$[M]$，$[C]$，$[K]$ 分别为耦合系统的质量、阻尼和刚度矩阵；$\{A\}$，$\{V\}$，$\{X\}$ 分别为系统的广义加速度、速度和位移矢量；$\{F\}$ 为系统的广义荷载矢量.

为了求解该大型非线性运动微分方程组，采用作者早先提出的一种新型显式积分法[7]，其积分格式为

$$\begin{cases}\{X\}_{n+1}=\{X\}_n+\{V\}_n\Delta t+(1/2+\psi)\{A\}_n\Delta t^2-\psi\{A\}_{n-1}\Delta t^2,\\ \{V\}_{n+1}=\{V\}_n+(1+\phi)\{A\}_n\Delta t-\phi\{A\}_{n-1}\Delta t,\\ \{A\}_{n+1}=[M]^{-1}\left(\{F\}_{n+1}-[K]_{n+1}\{X\}_{n+1}-[C]_{n+1}\{V\}_{n+1}\right),\end{cases} \quad (8)$$

式中，ψ和ϕ为积分常数，研究表明当$\psi=\phi=1/2$，显式法具有良好的稳定性和较高的精度; Δt 为积分时间步长，对于本问题通常取 0.1 ms；下标 $n-1$, n 和 $n+1$ 分别代表第 $n-1$，n 和 $n+1$ 个子步. 初始条件设为 $\{X\}_0=\{V\}_0=\{A\}_0=\{0\}$.

2.2　轨道-土体有限元模型

有限元法是数值模拟中最主要的理论工具之一，它对于复杂的几何构形具有很强的适应性，若能建立适当的分析模型和取用适当的参数，此法能够处理较为复杂的问题. 但有限元法在处理无限延伸的物理问题时有困难，在动力相互作用问题中，须引入人工边界条件，使地面应力波的传播满足远场辐射条件[8].

本文利用有限元软件 ANSYS 建立轨道-土体有限元模型，如图 2 所示. 模型中假设轨道结构及其受力相对于轨道中心轴对称，土体为水平层状弹性介质. 考虑到土体的无限性，模型的边界上引入了等效三维一致粘弹性边界单元[9]. 由于列车引起的地面振动问题属于连续体中的波动传播问题，采用有限元法求解实际上是将波动问题在物理上进行了离散. 这种离散化会引起两种不利的效应: “低通效应”和“频散效应”. 文献[10]指出，当有限元模型的单元尺寸取得足够小时，这些效应将大大削弱而不会影响波的传播性质. 本文在划分单元网格时，考虑到计算的高效性，轨道附近划分得较细，距离轨道越远网格划分得越粗.

2.3　有限元模型中激振力施加方式的选择

列车-轨道垂向耦合模型计算的激振力可通过两种方式施加到轨道-土体有限元模型上: 一种是在钢轨上施加移动的轮轨垂向力，见图 3(a); 另一种是在轨道结构的各固定位置处施加激振荷载，如钢轨或轨枕支点反力，见图 3(b).

通过前期的计算[11]发现，这两种施力方式得到的地面振动位移和加速度的时程曲线基本吻合，频率分布大致相同，主频范围一致. 因此，对于列车引起的地面振动问题，这两种施力方式都是可取的. 但

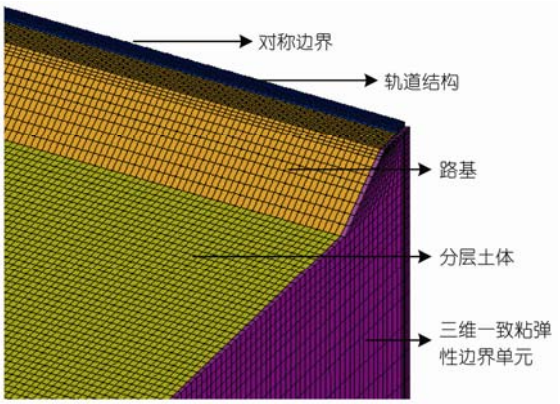

图 2　轨道-土体有限元分析模型

它们在处理方法上有所不同: 施加移动的轮轨垂向力的方式, 简单易懂, 但荷载进出模型的处理较为复杂; 施加钢轨支点反力的定点激振方式可以避免荷载的移动, 且加载时间不受有限元模型尺寸的限制, 对于处理多节车通过的问题更为方便. 因此, 在本文的分析中采用了施加钢轨支点反力的定点激振的方式.

2.4　列车-轨道耦合模型中软土弹性的影响

由于本文主要研究列车运行于软土地基线路时的地面振动响应, 因此列车-轨道耦合模型中考虑了软土弹性的影响; 而通常所建的列车-轨道耦合模型不考虑轨道下方的地基结构. 下面以高速铁路常用的 CRTS II 型板式无砟轨道为例, 对比分析这两种建模方式下(考虑与不考虑软土弹性)地面振动响应的差异. 相关计算参数的取值详见 3.2 小节.

由于列车-轨道垂向耦合模型与轨道-土体有限元模型中均考虑了轨道结构, 因此尽可能地保证两个模型中轨道结构的变形协调, 可以提高整个系统的求解精度. 图 4(a)和(b)对比了列车-轨道耦合模型

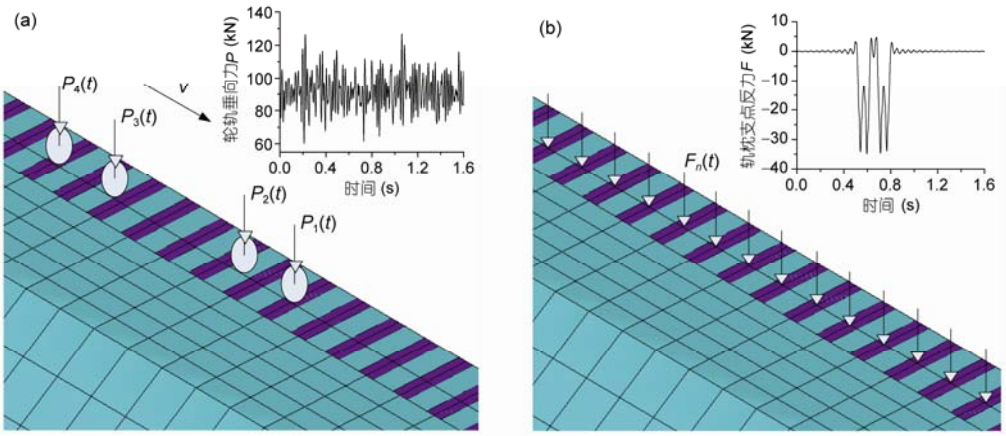

图 3　两种激振荷载施加方式

(a) 施加动态轮轨垂向力; (b) 施加钢轨或轨枕支点反力

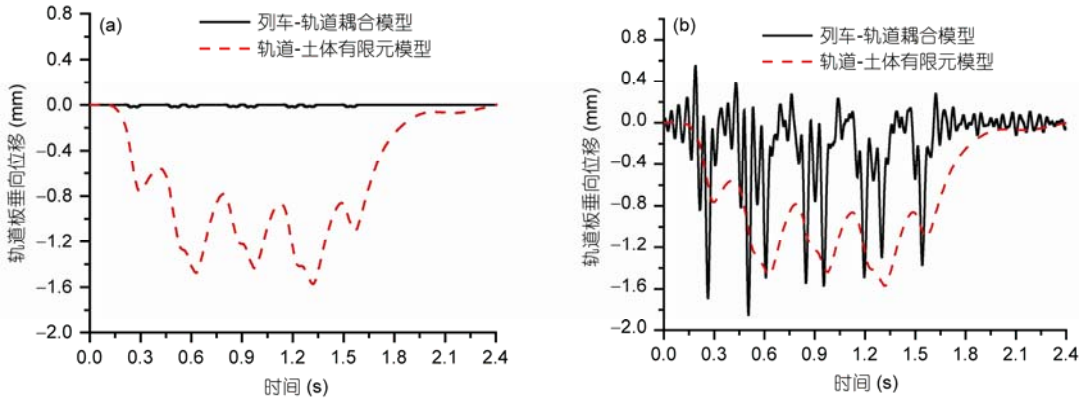

图 4　两个子模型中轨道板位移计算结果对比

(a) 未考虑软土弹性; (b) 考虑软土弹性

中考虑软土弹性前后, 两个子模型计算的轨道板位移. 当未考虑软土弹性影响时, 列车-轨道垂向耦合动力学计算的轨道板位移远小于有限元计算的结果; 而考虑了软土弹性影响后, 两个子模型计算的轨道板位移十分接近, 这也反映了车轨耦合模型中所取的土体等效刚度是基本合理的.

考虑到对多节车问题处理的方便性, 这里采用施加钢轨支点反力的方式对轨道-土体有限元模型进行激振. 图 5 给出了考虑软土弹性前后, 利用列车-轨道垂向耦合动力学计算的某钢轨支点处的支点反力. 从图中可以看出, 考虑软土弹性后, 钢轨支点反力的幅值增加, 中高频振动成分增多. 将各钢轨处的支点反力同时施加到轨道-土体有限元模型上, 进行瞬态分析即可求得地面振动响应.

图 6 给出了路基表面某处的振动位移和加速度响应. 从图 6 中可以看出, 车轨耦合模型中是否考虑软

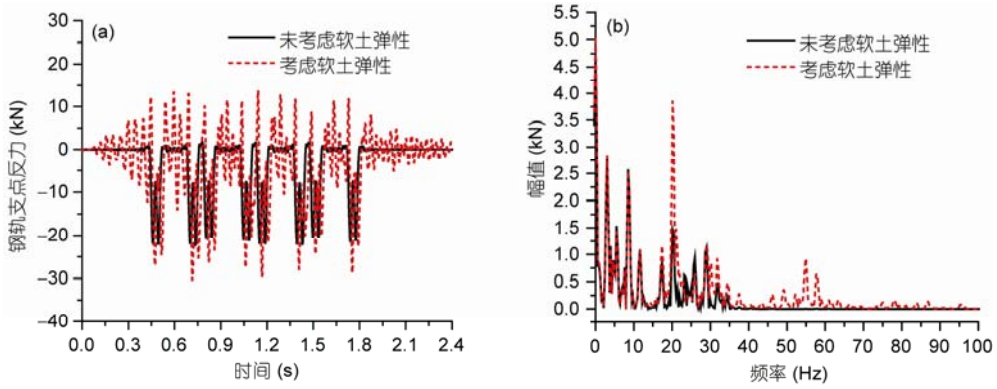

图 5　轨道板边缘处的钢轨支点反力(车速 260 km/h)

(a) 时程图; (b) 幅频图

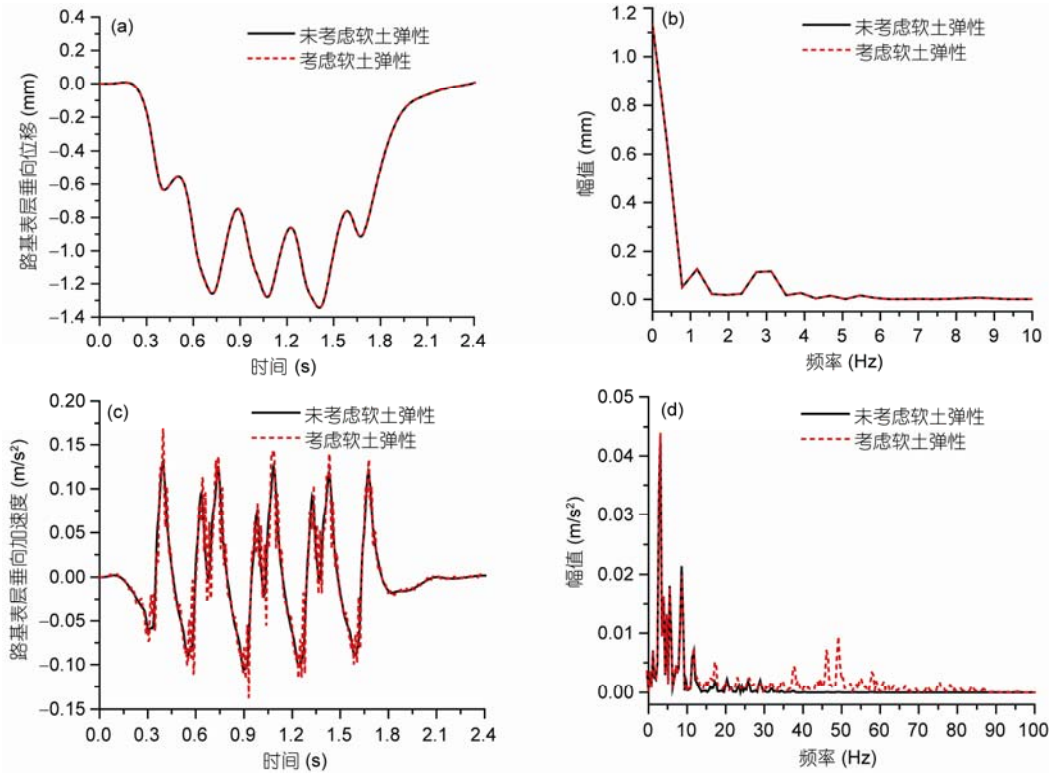

图 6　路基表面的振动响应(车速 260 km/h)

(a) 位移时程图; (b) 位移幅频图; (c) 加速度时程图; (d) 加速度幅频图

土弹性对地面振动响应的影响较弱, 其差别主要表现在振动加速度的中高频频段上. 随着距轨道中心距离的增加, 高频成分很快衰减, 软土弹性的影响将更小.

综上所述, 对于软土线路而言, 若要真实地模拟车轨耦合振动, 列车-轨道耦合模型中应考虑软土弹性; 但当仅关注距轨道较远处的地面振动响应时, 即使不考虑软土弹性也能得到较为理想的计算结果. 为保证整个系统的求解精度, 在分析软土线路的地面振动响应时, 建议列车-轨道耦合模型中考虑软土弹性.

3　高速列车引起的地面振动特性分析

采用上述分析方法, 本节研究不同车速下的地面振动响应. 为了探寻振动在土体中传播的基本特性, 首先从匀质土体入手, 分析单个移动点荷载作用下地面振动响应随荷载速度的变化规律; 然后再推广至分层土体, 研究高速列车作用下典型无砟轨道-软土系统的地面振动特性.

3.1　移动点荷载作用下匀质土体的振动特性

利用有限元软件 ANSYS, 建立了匀质土体的有限元模型. 模型纵向(X)取 200 m, 横向(Y)取 100 m, 垂向(Z)取 38 m, 最小单元尺寸为 2 m. 移动的点荷载直接作用在土体表面的纵向中心线上, 大小为 160 kN. 土体边界上同样采用了等效三维一致粘弹性边界单元. 表 2 给出了计算中所取的土体参数, 其中土体的 Rayleigh 波波速 v_R 为 81 m/s.

表 2　土体参数

动弹性模量(MPa)	泊松比	密度 (kg/m^3)	阻尼比	v_R (m/s)
39.48	0.3	1900	0.04	81

图 7(a)和(b)给出了荷载正下方的地面振动位移和加速度幅值随点荷载速度的变化规律. 为了能够更清楚地观察地面振动的临界状态, 分析中考虑了有、无土体阻尼两种情况. 可以看出, 当不考虑土体阻尼时, 地面振动位移幅值随荷载速度的增加先增大后减小, 在接近 Rayleigh 波波速时达到最大; 地面振动加速度幅值则随着荷载速度的增加不断增大, 在 Rayleigh 波波速附近增长幅度迅速变缓. 由此可见, 土体表面的 Rayleigh 波波速可以看作点荷载移动的临界速度, 此时土体会产生类似于结构物共振的现象. 当土体阻尼比取实际值 0.04 时, 地面振动位移和加速度幅值较无阻尼情况均显著降低, 且随着荷载速度的增加, 振动位移基本上呈线性减小, 振动加速度则线性增加. 可见, 土体阻尼的存在能够有效降低地面振动水平, 同时抑制临界车速下地面振动的突增现象.

下面观察点荷载移动速度接近地表 Rayleigh 波波速时土体的变形云图. 图 8(a)为点荷载移动速度为 80 m/s, 土体阻尼比取 0.04 时, 表层土体的变形云图. 可以看出, 此时土体的振动能量仅限于荷载作用点后方的区域. 由于阻尼对振动能量的衰减作用, 点荷载的作用范围很小, 不易观察到明显的土体变形特点. 图 8(b)为不考虑土体阻尼时表层土体的变形云图. 从图中可以清楚地看到, 在该荷载速度下土体的振动能量被局限在荷载作用点后方的锥形域内, 这与超音速飞机在突破音障时产生的马赫锥十分相似.

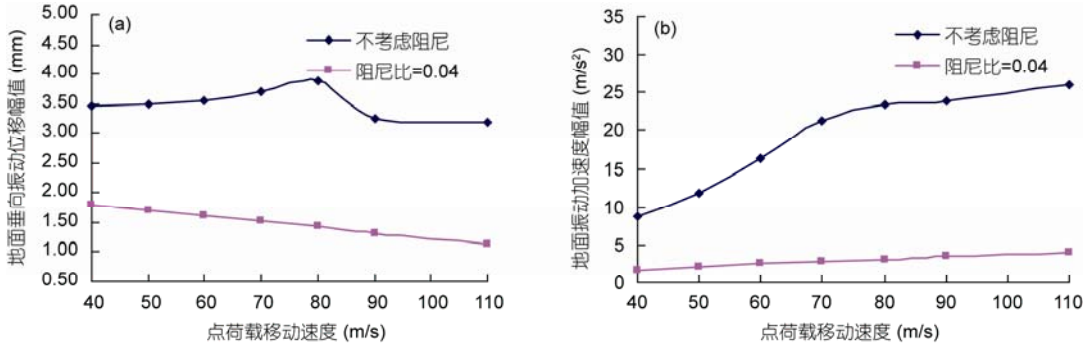

图 7　地面振动响应随荷载速度的变化规律

(a) 垂向振动位移; (b) 垂向振动加速度

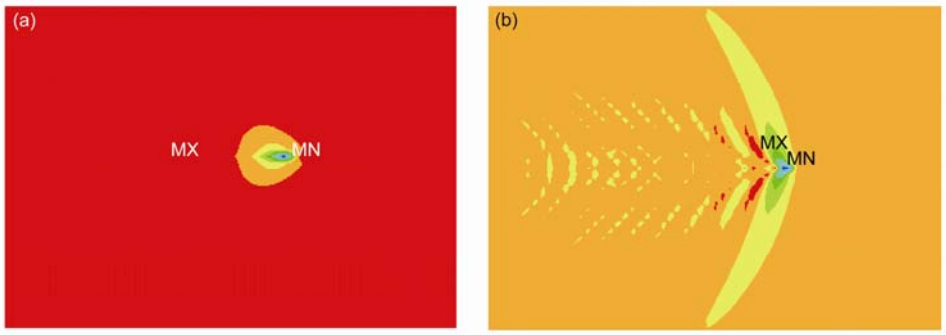

图 8　表层土体的变形云图(点荷载移动速度 80 m/s)

(a) 土体阻尼比=0.04; (b) 不考虑土体阻尼

3.2　高速列车作用下分层软土的振动特性

针对分层软土线路, 本节建立了高速列车-无砟轨道垂向耦合模型和无砟轨道-土体有限元模型, 研究高速列车作用下典型无砟轨道-分层软土系统的地面振动特性. 其中, 高速列车选择的是 4 节车编组的 CRH_2-300 高速列车; 轨道结构为 CRTS II 型板式无砟轨道; 路基下方的土体选择的是上海某软土地区具有代表性的三层土体. 路基和各层土体参数依据已有文献资料及部分实测结果选取, 详见表 3. 研究中主要选取了以下几个车速等级: 150, 200, 260, 300, 400 和 500 km/h, 其中 260 km/h 接近地基表层土体的 Rayleigh 波波速.

图 9 以 200, 260, 500 km/h 三个车速等级为代表, 从时域和频域对比分析了路基表面的振动位移和加速度响应. 为便于比较, 时程图中时间坐标轴统一乘以车速变换成了列车位置坐标. 从位移响应可以看出, 三个车速下位移幅值变化不大, 当车速接近地基表层土体的 Rayleigh 波波速时, 位移幅值略大于其他工况. 随着车速的增加, 位移逐渐向较高频移动, 其相位越来越滞后于轮轴激振力. 相比位移响应, 振动加速度响应对车速变化要敏感得多. 随着车速的增加, 加速度幅值迅速增加, 且更快地向高频区移动.

图 10 给出了不同车速下, 距轨道中心不同距离处地面振动的垂向 Z 振级 VLz. 可以看出, 在距轨道较近的地方(距轨道中心 2.45 m), 地面振动水平随着车速的增加不断提高, 当车速为 150 km/h 时, 地面振动的垂向 Z 振级为 82.6 dB; 当车速为 500 km/h 时, 振级达 100.5 dB. 而在距轨道中心 30 m 处, 各速度级下的振动水平均降至 65 dB 左右. 由此可见, 车速对地面振动水平的影响主要体现在近轨道区域内.

4　高速铁路软土地基加固实例分析

当天然地基过软而不能满足高速铁路构筑物的承载力和变形控制要求时, 就要进行加固处理. 常用的软土地基加固处理方法有排水固结法、换填垫层法、水泥粉煤灰碎石桩(CFG 桩)法、水泥土搅拌桩法等. 本节拟以水泥土搅拌桩加固基础为例, 以 3.2 节建立的高速列车-无砟轨道及无砟轨道-分层软土模型为研究对象, 分析软土地基加固对地面振动响应的影响.

图 11 为软土地基经水泥土搅拌桩加固形成的复合地基示意图. 由于搅拌桩的数量众多, 且桩与土交替出现, 若分别建立桩、土单元进行计算, 不仅计算速度慢, 而且极易出现刚度矩阵奇异, 从而导致计算

表 3　路基及分层土体的计算参数

名称	厚度 (m)	动弹性模量 (MPa)	泊松比	密度 (kg/m^3)	粘聚力 (Pa)	内摩擦角 (°)	阻尼比
基床表层	0.7	120	0.3	2184	7×10^4	27	0.045
基床底层	2.3	70	0.3	1939	5×10^4	23	0.039
路基本体	3.0	50	0.35	1837	4×10^4	20	0.035
粉质粘土	6	30	0.29	1898	–	–	0.02
淤泥质粘土	8	14	0.3	1704	–	–	0.02
砂质粉土	24	74	0.31	1847	–	–	0.01

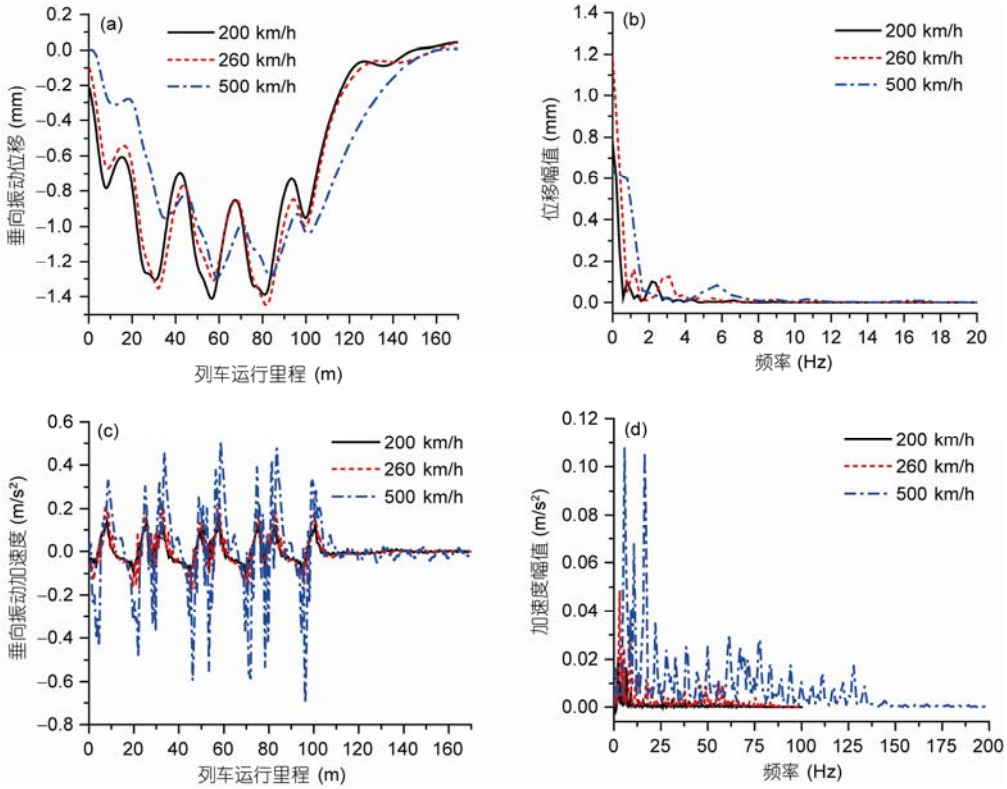

图 9　不同车速下路基表面观察点的振动响应

(a) 位移时程图; (b) 位移幅频图; (c) 加速度时程图; (d) 加速度幅频图

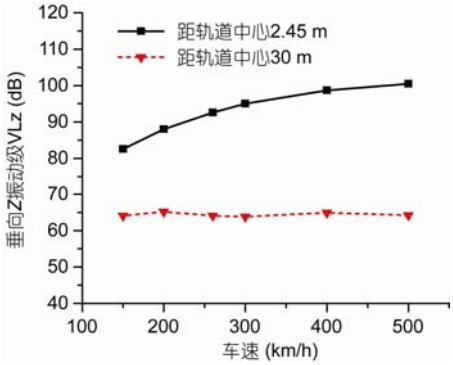

图 10　不同车速下距轨道不同距离的垂向 Z 振级

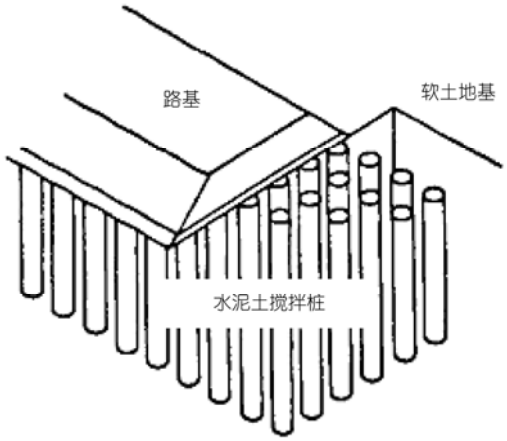

图 11　搅拌桩复合地基示意图

结果不收敛, 因此本节在进行数值分析时忽略了桩土相互作用, 将搅拌桩地基局部简化为匀质的复合土层(见图 12). 计算中, 水泥土搅拌桩的动弹性模量取 500 MPa, 泊松比取 0.35, 面积置换率取 0.2, 桩长取到下卧层以下 2 m 深, 即总桩长为 16 m. 表 4 列出了水泥土搅拌桩加固后的等效复合土层参数.

图 13(a)和(b)给出了地基加固前后, 距轨道中心不同距离处的地面振动位移和加速度响应. 从图中可以看出, 地基加固后地面振动位移和加速度都有不同程度的降低, 且距离地基加固区越近, 振动位移和加速度幅值下降得越多, 表明水泥土搅拌桩的加固和减振效果越显著.

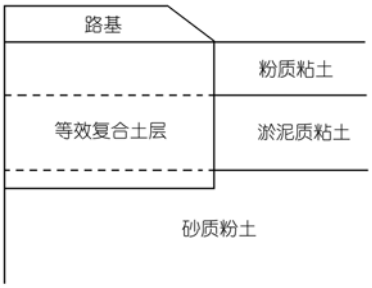

图 12　搅拌桩加固简化计算模型

表 4　桩加固后复合土层的计算参数

名称	厚度 (m)	动弹性模量 (MPa)	泊松比
粉质粘土	6	124	0.302
淤泥质黏土	8	111.2	0.310
砂质粉土	2	159.2	0.318

5　结论

本文基于车辆-轨道耦合动力学理论和有限元方法, 建立了列车-轨道垂向耦合模型和轨道-土体有限元模型, 提出了一套分析列车作用下地面振动问题的数值方法. 得出主要结论如下.

1) 对于软土线路而言, 若要真实地模拟车轨耦合振动, 车轨耦合模型中应考虑软土弹性的影响; 而当仅关注距轨道较远处的地面振动响应时, 不考虑软土弹性也可得到较为理想的计算结果.

2) 对于单个移动点荷载作用下的匀质土体而言, 当荷载速度达到土体表面的Rayleigh波波速时, 土体会产生类似于结构物共振的现象; 而土体阻尼的存在能有效地降低地面振动水平, 同时抑制临界车速下振动的突增.

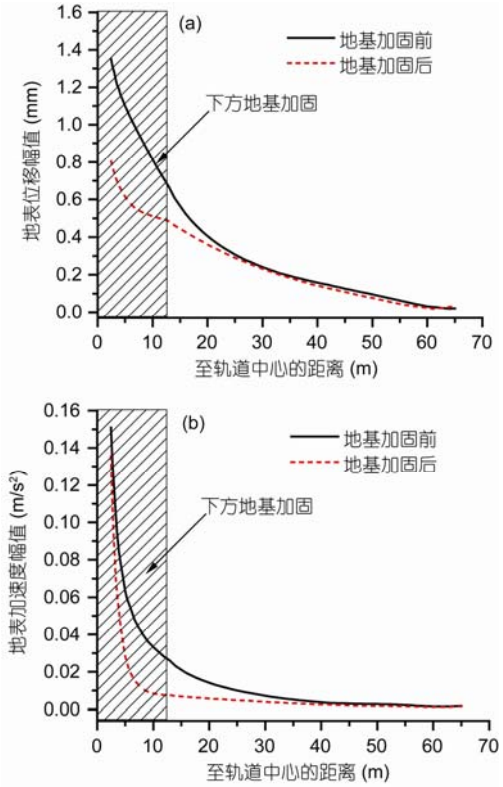

图 13　地面振动响应随至轨道距离的衰减

(a) 振动位移; (b) 振动加速度

3) 对于高速列车作用下的分层土体而言, 随着车速的增加, 地面振动水平会不断提高; 车速对地面振动的影响主要体现在近轨道区域内.

4) 地基加固后地面振动位移和加速度均有不同程度的降低; 距离地基加固区越近, 水泥土搅拌桩的加固和减振效果越显著.

参考文献

1 Krylov V V. Generation of ground vibrations by superfast trains. Appl Acoust, 1995, 44: 149–164
2 Madshus C, Kaynia A M. High-speed railway lines on soft ground: Dynamic behaviour at critical train speed. J Sound Vibr, 2000, 231(3): 689–701
3 和振兴, 翟婉明, 杨吉忠, 等. 铁路交通地面振动的列车-轨道-地基耦合数值方法研究. 振动工程学报, 2008, 21(5): 488–492
4 Zhai W M, He Z X, Song X L. Prediction of high-speed train induced ground vibration based on train-track-ground system model. Earthq Eng Eng Vibr, 2010, 9(4): 545–554
5 Xia H, Cao Y M, De Roeck G. Theoretical modeling and characteristic analysis of moving-train induced ground vibrations. J Sound Vibr, 2010, 329: 819–832
6 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学. 第三版. 北京: 科学出版社, 2007
7 Zhai W M. Two simple fast integration methods for large-scale dynamic problems in engineering. Int J Numer Methods Eng, 1996, 39(24): 4199–4214
8 刘兴业. 土、结构相互作用问题的边界元、有限元耦合法. 振动工程学报, 1994, 7(1): 45–58
9 刘晶波, 谷音, 杜义欣. 一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1070–1075
10 宗福开. 波传播问题中有限元分析的频散特性及离散化准则. 爆炸与冲击, 1984, 4(1): 16–23
11 Han H Y, Zhai W M. Numerical simulation of soft ground vibration caused by high-speed trains. Advances in Environmental Vibration. Beijing: Science Press, 2011. 142–150