

车辆引起的地面振动衰减计算方法

赵 锐¹, 张毅刚²

(1. 新疆大学建筑工程学院 乌鲁木齐, 830047) (2. 北京工业大学空间结构研究中心 北京, 100124)

摘要 首先, 利用 MATLAB 求解考虑路面不平度影响的车辆振动微分方程; 然后, 利用文克尔弹性地基梁模型模拟路面土体, 建立车辆及所在地面的振动计算模型; 最后, 借助动力机械振动沿地面传播的衰减公式提出车辆通行引起构筑物基础加速度的计算公式, 最终建立车辆引起地面振动衰减的计算方法, 并用实测数据进行了验证, 用算例对该方法的应用进行了说明。该方法物理意义明确, 原理清晰, 实用合理, 简单方便, 只要输入车辆和道路的基本信息利用 MATLAB 程序求解即可。

关键词 车辆; 振动响应; 计算方法; 振动衰减; 路面不平度

中图分类号 TU435; U461.1; X593

引 言

随着我国交通事业的快速发展, 道路交通振动对周围环境的影响越来越引起人们的关注。当车辆在路面行驶时, 因路面的不平整、车速、发动机、汽车轮胎表面的花纹与路面的摩擦及汽车加减速等因素都会引发车辆产生振动, 这种振动通过路面结构传递到四周的土层中, 再由土介质向周围构筑物的基础传播, 进而引发构筑物上部结构的二次振动^[1]。这种振动直接影响到人们的生活、工作及构筑物的结构特性, 而且经研究表明, 路面不平整是产生车辆振动的主要因素^[2]。目前对这方面的研究大多都是用现场实测的方法, 对其理论方法的研究还在不断探索。如茅玉泉^[3]在监测数据基础上得出振幅与速度关系的地面振动衰减经验公式, 并用此公式研究公路车辆对精密仪器的影响。袁新敏等^[4]研究交通荷载产生的地面振动时, 将实测数据与日本铁路规范线性拟合得出地面振级与测点到道路中线的距离间的计算公式。盛晔等^[5]通过对交通干线两侧的实测, 得到了振动衰减量与距离的函数方程。韩舟轮^[6]研究车辆通过减速带时跳车情况下带来的路面振动问题, 经过实测得出其产生的振动影响很大。常乐等^[7]通过实测研究了高架路交通诱发地面振动在土层中的振动特性与传播规律。甘泉等^[8]就高架交通系统诱发地面环境振动进行了实测分析, 得出考虑局部振动放大的环境振动振级经验衰减公式。

周云^[9]根据国外已有监测数据及振动能量的传播规律提出了一种经验预测模型, 该模型参数较少, 应用较简便, 但只考虑了瑞利波对地面振动的贡献, 在分析振动频率成分方面存在着明显的不足, 所以只能对地面振动进行粗略的预测。杨先健^[10]基于理论同时考虑瑞利波和体波的影响, 提出了动力机械的振动衰减公式, 并将该公式应用到《动力机械基础设计规范 GB50040-96》和移动的车辆中。高广远等^[11]经过实测得出该公式仅适用于 1 000 m 远的长距离地面振动衰减中, 近距离时该公式误差较大。

在此基础上, 笔者首先将路面位移功率谱密度函数用傅里叶逆变换得到的路面不平度数据作为输入激励加到 1/2 车辆模型上, 用 MATLAB 求解考虑路面不平度的车辆振动微分方程; 然后利用文克尔弹性地基梁模型模拟路面土体, 根据动力学原理建立车辆及所在位置地面共同作用的振动计算模型, 借助动力机械的振动衰减公式提出车辆通行引起构筑物基础加速度的计算公式; 最终建立车辆引起地面振动衰减的计算方法, 并通过现场实测进行验证, 用算例说明其计算步骤。利用文中计算方法可直接计算构筑物输入激励, 然后对结构进行振动响应分析。

1 路面不平度

路面不平整是引起车辆振动的主要因素。大量研究表明, 路面不平度是具有零均值、各态历经的平稳 Gauss 随机过程^[12], 故可用功率谱密度来描述路

面的统计特性,文中采用 GB/T 7031-2005^[13] 建议的公路路面位移功率谱密度拟合表达式,即

$$G_d(n) = G_d(n_0) \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-w} \quad (1)$$

其中: n_0 为参考空间频率($=0.1 \text{ m}^{-1}$); $G_d(n_0)$ 为参考空间频率 n_0 下的路面位移功率谱密度值,称为路面不平度系数/ $[\text{m}^2 \cdot (\text{m}^{-1})^{-1}]$,取决于公路的路面等级,其值见表 1; w 为拟合功率谱密度的指数,取为 2; n 为空间频率/ m^{-1} ,其上限 $n_h = 2.83$,下限 $n_l = 0.011$,车速 $v = 10 \sim 30 \text{ m/s}$ 时适用^[14]。

表 1 路面不平度系数

Tab. 1 Coefficients of pavement roughness			
道路等级	$G_d(n_0)/10^{-6} \text{ m}^3$		
	下限	几何平均值	上限
A		16	32
B	32	64	128
C	128	256	512
D	512	1 024	2 048
E	2 048	4 096	8 192
F	8 192	16 384	32 768
G	32 768	65 536	131 072
H	131 072	262 144	

时间频率与空间频率间的关系为

$$n = f/v \quad (2)$$

其中: f 为车辆振动的固有频率,范围为 (f_l, f_h) 。

令路面不平度的采样数据为 $x_m (m=0, 1, \dots, N-1)$, 其离散傅里叶变换为

$$X_k = \sum_{m=0}^{N-1} x_m e^{-\frac{2\pi km}{N}} \quad (k=0, 1, \dots, N-1) \quad (3)$$

根据文献[15]得出 X_k 与路面不平度 $G_d(n_k)$ 的关系:

$$X_k = |X_k| e^{j\varphi_k} = \sqrt{\frac{N}{2\Delta L} G_d(n_k)} \cdot e^{j\varphi_k} \quad (k=0, 1, \dots, N/2) \quad (4)$$

其中: $n_k = kB_e'$;复数 X_k 的相角 φ_k 在 $[0, 2\pi]$ 内随机选取。

在统计前需有两个设定:采样空间频率 n_s 和采样点数 N ,由此确定下列相关参数:为避免频率混淆, $n_h \leq n_s/2$;采样间隔 $\Delta L = 1/n_s$;总采样距离 $L' = N/n_s$;空间频率分辨率 $B_e' = 1/L'$ 。

由式(3)和(4)可知,路面不平度的采样数据是 N 个,而计算其功率谱密度时只需其离散傅里叶变换的前 $N/2+1$ 个,所以要得到离散数据 x_m ,必须将离散傅里叶变换的后半部分补齐。由式(3)可知, X_k 是 N 个复数,当 $k=0$ 时, $X_0 = \sum_{m=0}^{N-1} x_m$,是实数,若离散数据经过零均值化处理, $X_0 = 0$, X_1 与 X_{N-1} ,

X_2 与 $X_{N-2}, \dots, X_{N/2-1}$ 与 $X_{N/2+1}$ 分别互成共轭,离散傅里叶变换对应的最大频率为 $N/2\Delta f$ (Δf 为时间频率分辨率)为不发生频率混淆现象,常使 $f_h = n_h v \leq \frac{n_s}{2} v = \frac{1}{2} \frac{N}{L} v = \frac{N}{2} \Delta f$, 所以有 $X_{N/2} = 0$ 。由此特性,可将式(4)进行补齐,得到 $X_k (k=0, 1, \dots, N/2, N/2+1, \dots, N-1)$, 对其进行傅里叶逆变换,最终得到路面不平度 x_m , 公式为

$$x_m = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{j2\pi km}{N}} \quad (m=0, 1, \dots, N-1) \quad (5)$$

该方法是计算其功率谱密度的逆过程,所以理论上保证结果的准确性。现将这种方法基于 MATLAB 平台编写了一个程序,只要输入采样频率、采样点数和由路面等级得到的路面不平度系数,即可绘制出路面不平度曲线。

2 车辆的振动响应

2.1 建立微分方程

沿车长方向取 1/2 车辆模型,将其简化为四自由度的弹簧-阻尼-质量系统,如图 1 所示。

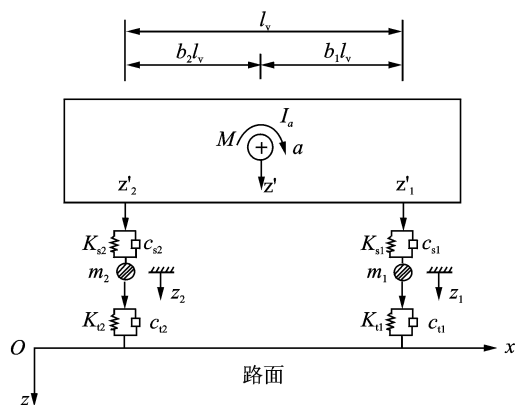


图 1 1/2 车辆振动模型

Fig. 1 1/2 vehicle vibration model

图 1 中: M 为车体质量; m_1, m_2 分别为前后轮胎及悬架质量; k_{s1}, c_{s1} 分别为前悬装置的弹簧刚度和减振阻尼系数; k_{t1}, c_{t1} 分别为前轮轮胎刚度和阻尼系数; k_{s2}, c_{s2} 分别为后悬装置的弹簧刚度和减振阻尼系数; k_{t2}, c_{t2} 分别为后轮轮胎刚度和阻尼系数; I_a 为车体点头刚度; b_1, b_2 为比例常数; l_v 为车体长度; z_1', z_2' 分别为前后悬架竖向位移; z_1, z_2 分别为前后轮胎竖向位移^[16]。

文献[16]根据广义虚功原理,得到考虑路面不平度的车辆振动系统微分方程,如式(6)所示

$$\begin{cases} m_1 \ddot{z}_1 + (c_{s1} + c_{t1}) \dot{z}_1 - c_{s1} \dot{z}'_1 + (k_{s1} + k_{t1}) z_1 - k_{s1} z'_1 = \\ m_1 g + k_{t1} x_1 + c_{t1} \dot{x}_1 \\ m_2 \ddot{z}_2 + (c_{s2} + c_{t2}) \dot{z}_2 - c_{s2} \dot{z}'_2 + (k_{s2} + k_{t2}) z_2 - k_{s2} z'_2 = \\ m_2 g + k_{t2} x_2 + c_{t2} \dot{x}_2 \\ (Mb_2^2 + I_a/l_v^2) \ddot{z}'_1 + (Mb_1 b_2 - I_a/l_v^2) \ddot{z}'_2 - c_{s1} \dot{z}_1 + \\ c_{s1} \dot{z}'_1 - k_{s1} z_1 + k_{s1} z'_1 = Mgb_2 \\ (Mb_1 b_2 - I_a/l_v^2) \ddot{z}'_1 + (Mb_1^2 + I_a/l_v^2) \ddot{z}'_2 - c_{s2} \dot{z}_2 + \\ c_{s2} \dot{z}'_2 - k_{s2} z_2 + k_{s2} z'_2 = Mgb_1 \end{cases} \quad (6)$$

矩阵化后,得

$$\begin{cases} \mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{Z}}_v + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{Z}}_v + \mathbf{K}_v \mathbf{Z}_v = \mathbf{G}_v + \mathbf{F}_{bv} \\ x_1 = x(l_1) \\ x_2 = x(l_2) \end{cases} \quad (7)$$

其中: x_1, x_2 分别为车辆前后轮胎处的路面不平度值; \mathbf{M}_v 为质量矩阵; \mathbf{C}_v 为阻尼矩阵; \mathbf{K}_v 为刚度矩阵; \mathbf{Z}_v 为位移列向量; \mathbf{G}_v 为重力列向量; \mathbf{F}_{bv} 为路面与轮胎相互作用力列向量; $\dot{z}_i, \dot{z}'_i, \dot{y}_i (i=1,2)$ 分别为相应的速度; \ddot{z}_i, \ddot{z}'_i 为相应的加速度; g 为重力加速度。

2.2 求解微分方程组

当车辆行驶时,各轮对的位置不断变化,微分方程中的系数也不断变化,使得整个系统成为一个时变系数的二阶线性微分方程,求解这种微分方程最常用的方法是逐步积分法,文中采用其中的一种 Wilson- θ 法来进行求解,取 $\theta = 1.4$ 。利用 MATLAB 软件编写车辆振动系统微分方程的求解程序。

3 振源地面处的振动响应

以车辆作为振源,通过悬架和轮胎减震后,将振动传给地面土体。由于欲得到车辆正下方地面的振动响应,而且路面最上层一般为沥青混凝土路面,所以可以不考虑土体的变形连续性,将其简化为文克尔地基梁模型,即把土体模拟为刚性底座上一系列独立的弹簧。其振动计算模型如图 2 所示。

图 2 中: M, M_d 分别为车体和沥青混凝土的质量, M_d 的表面积一般取 M 的 100 倍; k_1, c_1 分别为车辆轮胎的刚度和阻尼系数,其中 $k_1 = k_{t1} = k_{t2}$, $c_1 = c_{t1} = c_{t2}$; k_2 为弹性地基梁的弹簧刚度系数, $k_2 = kbl$, k 为地基反力系数, b 为地基梁宽度,一般取车体宽度的 10 倍, l 为地基梁跨度,一般取车体长度的 10 倍。

利用 ANSYS 对该振动计算模型进行建模求

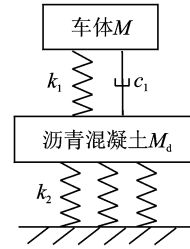


图 2 振动计算模型

Fig. 1 Vibration calculation model

解。其中车体和沥青混凝土采用 MASS21 二维质量单元,弹簧采用 COMBIN14 单自由度弹簧单元,地面固接。将 2.2 节得到的车辆前后悬装置的振动响应平均值加到车体的质量单元上,对结构进行瞬态分析,即可得到振源地面处的振动响应。

4 构筑物基础加速度计算公式

文献[10]中建立了以车辆为振源的地面振动衰减公式,如式(8)所示

$$a_r = a_0 \sqrt{\frac{r_0}{r}} \left[1 - \xi_0 \left(1 - \frac{r_0}{r} \right) \right] e^{-\beta_i f_0 \langle r - r_0 \rangle} \quad (8)$$

其中: a_r 为距振源中心 r 处的地面加速度 (m/s^2); a_0 为振源加速度 (m/s^2); r 为距振源中心的距离 (m); r_0 为波源当量半径,道路柔性路面 $r_0 = 3.25$ (m),道路刚性路面 $r_0 = 3 \text{ m}$ [17]; f_0 为波源扰动频率 (Hz); ξ_0 为与波源状态有关的无量纲系数,铁路 $\xi_0 = 0.35$,道路 $\xi_0 = 0.3$ [17]; β_i 为土壤衰减系数, (s/m) [10],见表 2。

表 2 土壤衰减系数 β_i

Tab. 2 Soil attenuation coefficient β_i	
土壤类别	$\beta_i / (10^{-3} \text{ s/m})$
强风化硬质岩	0.875~1.150
硬塑的粘土和中密的碎石	0.375~0.625
可塑的粘土粉土和中密的粗砂、砾石	1.00~1.25
软塑的粘土和稍密的中砂、粗砂	1.15~1.45
淤泥质粘土和饱和松散细砂	1.50~1.75
新近沉积的粘土和非饱和松散砂	1.85~2.15

文献[10]利用该公式计算了距一辆大型载重货车 80 m 远处地面的加速度值,其中波源当量半径为 2.5 m,车辆的扰动频率为 20 Hz,车辆的振源加速度为 0.085 m/s^2 ,计算后与实测值进行了对比,部分点吻合较好。文献[11]对该公式进行了验证,得出结论是该公式仅对于 1 000 m 的长距离情况是适用的。对于本文测点就在路边,而且是车辆随机行驶的近距离情况,主要以高频振动为主,衰减速度

较远处快,各时刻车辆振动在计算点的衰减值会相互叠加,式(8)此时已不再适用。试验面对的是同一辆车行走不同点引起的振动,相当于多台同样的机器在不同时刻、不同距离产生的影响,将随机非稳态问题可近似用随机稳态的分析方法来理解。所以依据随机理论,文中将这一振源加速度用平方和开方方法表示,得到的加速度称为振源叠加加速度,用 a_s 表示,公式如下

$$a_s = \begin{cases} \sqrt{\sum_{i=-5}^5 (a_{t+i\Delta t})^2} & (a_t \geq 0) \\ -\sqrt{\sum_{i=-5}^5 (a_{t+i\Delta t})^2} & (a_t < 0) \end{cases} \quad (9)$$

其中: a_t 为振源地面处在 t 时刻的加速度; Δt 为计算时间间隔,一般取为 0.1 s。

即叠加范围为 $[t - 5\Delta t, t + 5\Delta t]$ 时间段内的振动加速度,在范围之外认为在计算点处的振动衰减值较小,忽略不计。

将由式(9)得到的考虑车辆近距离影响的振源叠加加速度 a_s 作为 a_0 代入到式(8)中,即可得到车辆通行引起构筑物基础加速度的计算公式,即

$$a_r = a_s \sqrt{\frac{r_0}{r(t)} \left[1 - \xi_0 \left(1 - \frac{r_0}{r(t)} \right) \right]} e^{-\beta_t f_0 < r(t) - r_0 >} \quad (10)$$

由于车辆是移动的,所以式(10)中的 $r(t)$ (距振源中心的距离)应该是随时间变化的一个变量,式中其他参数的意义同式(8)。由此即可得到车辆通行引起构筑物基础加速度的时程曲线。

图 3 汇出了车辆引起地面振动衰减计算方法的具体实施步骤。

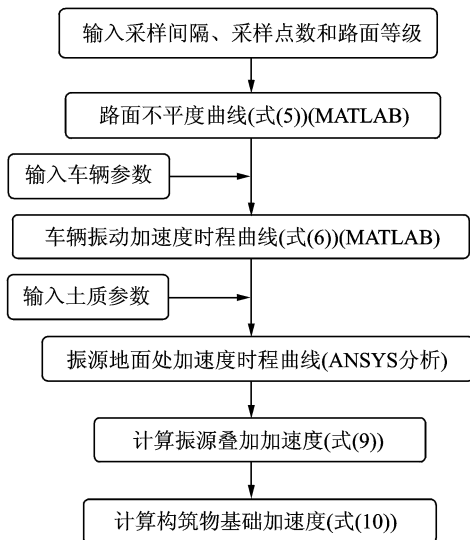


图 3 车辆引起地面振动衰减计算步骤
Fig. 3 Calculation steps of vehicle-induced ground vibration attenuation



图 4 北京工业大学西门人行天桥
Fig. 4 Footbridge at the west gate of Beijing University of Technology

5 验证

为验证这一方法的实用性,笔者进行了现场实测,以北京工业大学西门人行天桥为构筑物,主梁共 4 个墩柱(如图 4),分别在人行天桥 2# 墩柱底端 A 点处和距离 A 点向西 12 m 远的院内地面 B 点处布置两个测点(见图 5),得到车辆激励下两点的竖向振动情况;以 A 点为振源点, B 点为衰减后的点,由此来验证车辆通行引起地面振动衰减计算方法的实用性。

利用中国兵器工业第二零六研究所研制的 CS-8A 雷达测速仪测量车速,北京东方振动和噪声技术研究所的动态数据采集系统和工程力学研究所的 891 速度传感器进行数据采集,用 DASP 分析软件对数据进行处理,采样频率为 51.2 Hz。

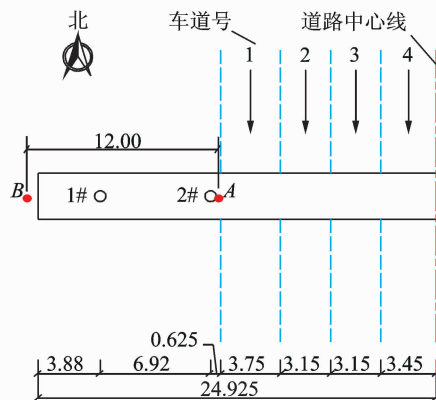


图 5 测点布置(单位: m)
Fig. 5 Arrangement of measuring points (unit: m)

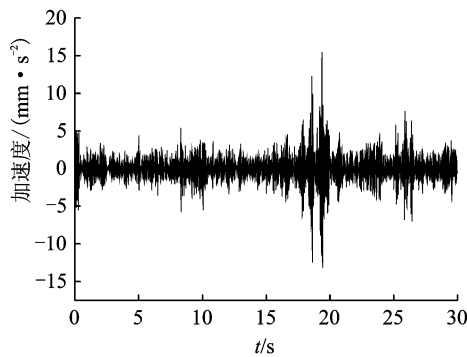
截取两个测点 30 min 的采样数据,每 30 s 作

为一个样本,共 60 个样本记录。经分析可得到测点 A 各个样本的峰值频率,将其作为各个样本的波源扰动频率 f_0 ;取各个样本 A 点的峰值加速度为 a_i , 因为有车辆从测点附近通过时加速度值会明显变大,尤其是大型车,而其他位置处加速度取值的不定因素较多,如噪声及本底振动等,所以测点 B 的加速度响应不能完全由振动衰减公式得到。但两个测点的峰值加速度完全可以认为是由车辆振动激起的,所以仅利用每个样本的峰值加速度来进行验证。

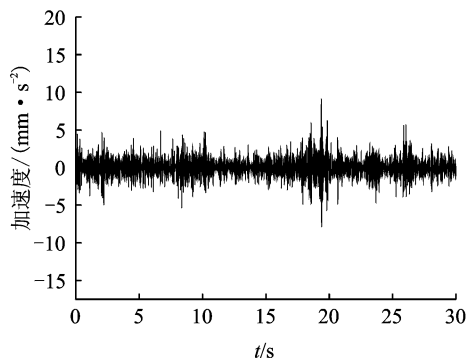
由于样本记录太多,这里仅对第 40 个样本进行验证。两测点在 30 s 内的加速度响应曲线如图 6 所示。取图 6(a)的峰值加速度作为 a_i ,时间间隔为 $5/51.2 \approx 0.098$ s,计算 a_0 的数据见表 3。

表 3 中 $a_i = 15.472 4 \text{ mm/s}^2$, $t = 19.37$ s,由式(9)可计算出振源叠加加速度 $a_s = 19.793 1 \text{ mm/s}^2$ 。

用 DASP 软件对图 6(a)进行处理,得到对应的频谱曲线,如图 7 所示。



(a) A点加速度响应曲线
(a) Acceleration response curve of point A



(b) B点加速度响应曲线
(b) Acceleration response curve of point B

图 6 地面两点的实测结果

Fig. 6 Measured results of two points at the ground

从图 7 中可提取出峰值频率,即 $f_0 = 11.45$ Hz。根据地勘资料取 $\beta_s = 0.001 2$,将所有值代入公式(10),即可计算出 B 点的振动加速度衰减值 $a_r = 9.184 2 \text{ mm/s}^2$ 。与表 3 中测点 B 在 19.37 s 时的实测值间的误差为 0.39%。

表 3 a_0 的计算数据

Tab. 3 Calculation data of a_0 mm/s^2		
t/s	测点 A	测点 B
18.88	0.820 83	3.017 83
18.98	5.414 64	2.454 76
19.08	2.396 54	0.702 10
19.17	0.691 81	0.837 92
19.27	6.649 11	2.147 34
19.37	15.472 40	9.148 13
19.47	4.548 03	3.429 98
19.57	-4.550 69	-0.492 74
19.66	-2.044 96	0.944 51
19.76	0.553 79	3.150 96
19.86	5.105 47	6.259 43

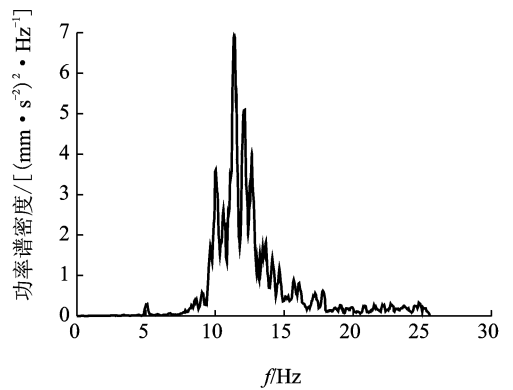


图 7 A 点频谱曲线

Fig. 7 Frequency spectrum curve of point A

图 8 为 60 个样本记录中测点 B 的计算值与实测值的误差图。由图 8 可看出误差均在 15% 以内,可以接受。由此证明笔者建立的车辆通行引起地面振动衰减计算方法是实用可行的。

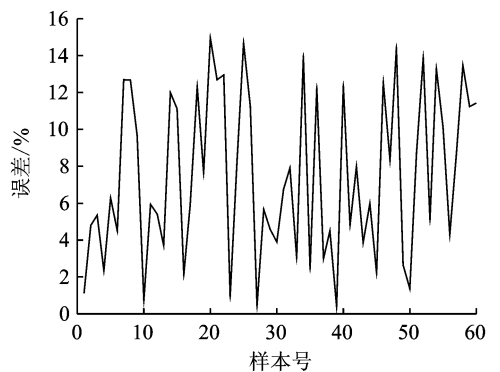


图 8 测点 B 计算值与实测值的误差图

Fig. 8 Errors figure between calculated value and measured value of point B

6 算 例

路面数据:采样空间频率 n_s 为 10 m^{-1} ,采样点

数 N 为 10 000 个, B 级沥青路面, 土壤衰减系数为 0.001, 软塑粉质粘土, 地基反力系数取为 15 000, 沥青混凝土厚 15 cm, 密度为 2 500 kg/m³。

车辆数据^[11]: M 为 5×10^3 kg; I_a 为 2.446×10^6 kg · m²; l_v 车长为 8.4 m; 车宽 2.5 m; 车高 3.5 m; b_1 与 b_2 为 0.5; m_1 与 m_2 为 4 330 kg; k_{s1} 与 k_{s2} 为 2.535×10^6 N/m; k_{t1} 与 k_{t2} 为 4.28×10^6 N/m; c_{s1} 与 c_{s2} 为 1.96×10^5 kg/s; c_{t1} 与 c_{t2} 为 9.8×10^4 kg/s; 车速 v 为 20 m/s; 扰动频率为 20 Hz。

以车辆重心位置为坐标原点, 车的宽度方向为 x 向, 道路中心线为 y 向, 驾驶员的右前方为第一象限, 建立直角坐标系。地面计算点坐标为 (20, 400 m), 采样频率为 100 Hz, 绘制该点 40 s 内振动响应时程曲线。

将路面数据输入到路面不平度的 MATLAB 程序中, 得出该条路段的路面不平度曲线如图 9 所示。图 9 中采样数据的时间间隔为 0.005 s, 而所要求的振动加速度的时间间隔为 0.01 s, 为了使两者相对应, 图 9 中的数据每 2 个点采集一个作为路面不平度序列 x_1 和 x_2 。将其与车辆数据共同输入到车辆振动系统微分方程的 MATLAB 求解程序中, 得到车辆以 20 m/s 的速度匀速行驶 40 s 内车辆前悬架的振动加速度响应曲线, 如图 10 所示。然后利用 ANSYS12.0 建立图 2 所示的有限元模型, 以其作为激励, 对结构进行瞬态分析, 将得到沥青混凝土的竖向振动加速度值代入式(9)计算, 得到振源叠加加速度时程曲线, 如图 11 所示。

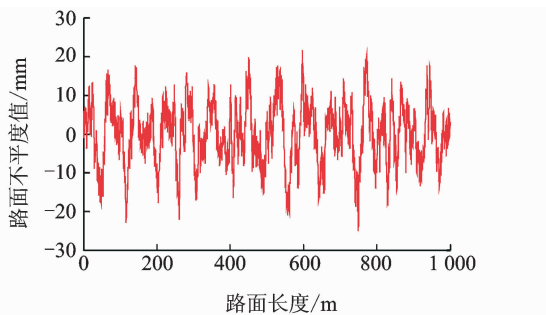


图 9 B 级路面的不平度曲线

Fig. 9 Roughness curve of road grade B

该算例中车辆的行驶距离为 $20(\text{m/s}) \times 40(\text{s}) = 800(\text{m})$, 车辆与计算点 (20, 400 m) 间的距离函数 $r(t)$ 为

$$r(t) = \sqrt{20^2 + (400 - 20t)^2} \quad (11)$$

将式(11)及图 11 的数据代入式(10)中, 即可得到车辆引起周围地面任一点(可引申为构筑物基础)的振动响应曲线, 如图 12 所示。

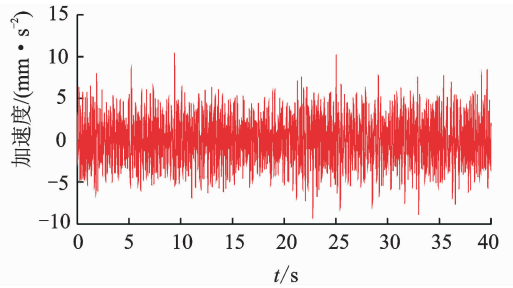


图 10 振动加速度响应曲线

Fig. 10 Vibration acceleration response curve

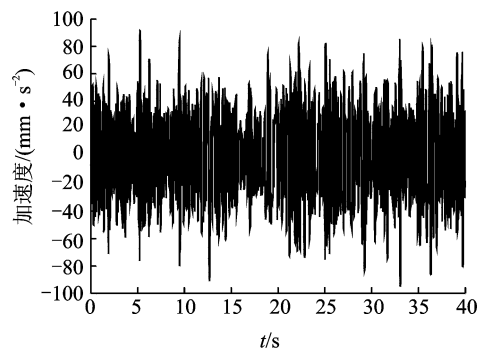


图 11 振源叠加加速度时程曲线

Fig. 11 Superposition acceleration time history curve

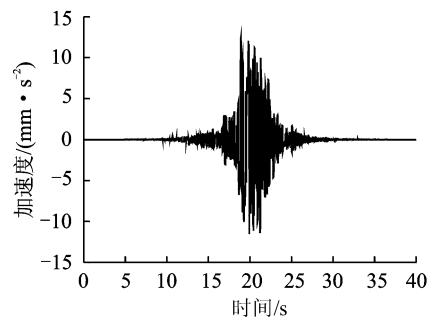


图 12 计算点的振动响应曲线

Fig. 12 Vibration response curve of calculation point

对于多车相继行驶和并排行驶的情况, 只需将得到的计算点的振动响应曲线在对应时刻相叠加即可, 在此不再赘述。

7 结束语

引起车辆振动的原因有很多, 其中路面不平整被认为是最主要的因素。基于 GB/T7031-2005 建议的公路路面位移功率谱密度的拟合表达式, 笔者对其离散数据进行傅里叶逆变换, 得到路面不平度值, 将其作为激励加到车辆模型上; 利用 MATLAB 求解建立的车辆振动微分方程得到车辆的振动响

应,再将其作为激励加到采用文克尔地基梁模型模拟的地面上,得到地面的振动响应;最后,将得到的地面振动响应作为振源代入文中提出的车辆通行引起构筑物基础加速度的计算公式中,得到计算点处的地面振动衰减加速度值。该方法利用实测数据验证其实用性,并用一个算例说明了其应用过程,思路明确,便于操作,对环境振动的影响分析带来了很大方便。

参 考 文 献

- [1] 付一小. 车辆及人行荷载激励下钢结构人行桥的动力响应分析及舒适度评价[D]. 合肥:合肥工业大学, 2010.
- [2] 郑薇. 列车经过对周边建筑的振动影响分析[D]. 杭州:浙江大学, 2006.
- [3] 茅玉泉. 交通运输车辆引起的地面振动特性和衰减[J]. 建筑结构学报, 1987, 8(1):67-77.
Mao Yuquan. Characteristics and attenuation of ground vibration caused by traffic vehicle [J]. Journal of Building Structures, 1987, 8(1): 67-77. (in Chinese)
- [4] 袁新敏, 张玉华, 左鹏飞, 等. 公路交通引起振动的现场测试与分析[J]. 土工基础, 2007, 21(2):73-75.
Yuan Xinmin, Zhang Yuhua, Zuo Pengfei, et al. Field test and analysis of vibration induced by traffic [J]. Soil Engineer and Foundation, 2007, 21(2):73-75. (in Chinese)
- [5] 盛晔, 周玉强, 徐杰, 等. 道路交通两侧振动传播的研究[J]. 浙江师大学报:自然科学版, 2000, 23(4): 358-360.
Sheng Ye, Zhou Yuqiang, Xu Jie, et al. A study of the vibration by the two sides of the traffic road [J]. Journal of Zhejiang Normal University; Natural Science Edition, 2000, 23(4): 358-360. (in Chinese)
- [6] 韩舟轮. 车辆通过减速带引起周边环境振动的分析[D]. 杭州:浙江大学, 2006.
- [7] 常乐, 闫维明, 任珉, 等. 高架路交通诱发的地面振动测试与分析[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(2): 175-178.
Chang Le, Yan Weiming, Ren Min, et al. Test and analysis of ground vibration induced by elevated road traffic [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(2): 175-178. (in Chinese)
- [8] 甘泉, 叶茂, 任珉. 高架交通沿线地面环境振动测试频域分析[J]. 广州大学学报:自然科学版, 2010, 9(2): 77-81.
Gan Quan, Ye Mao, Ren Min. In situmeasurement and analysis for environmental vibration induced by urban traffic in time domain [J]. Journal of Guangzhou University: Natural Science Edition, 2010, 9(2): 77-81. (in Chinese)
- [9] 周云. 交通荷载对周边建筑的振动影响分析[D]. 杭州:浙江大学, 2005.
- [10] 杨先健. 动力机械引起的地面振动衰减[J]. 湖南大学学报, 1982, 9(3): 12-18.
Yang Xianjian. Attenuation of ground vibration induced by dynamical machinery [J]. Journal of Hunan University, 1982, 9(3): 12-18. (in Chinese)
- [11] 高广运, 何俊锋, 李志毅, 等. 列车运行引起的地面振动衰减分析[J]. 交通科学与工程, 2010, 26(1): 74-78.
Gao Guangyuan, He Junfeng, Li Zhiyi, et al. Analysis on attenuation of ground vibration induced by moving train [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2010, 26(1): 74-78. (in Chinese)
- [12] Schiehlen W, Hu B. Spectral simulation and shock absorber identification [J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2003, 38(2): 161-171.
- [13] 中华人民共和国国家标准. GB/T 7031-2005 机械振动 道路路面谱测量数据报告[S]. 北京:中国标准出版社, 2005.
- [14] 余志生. 汽车理论[M]. 3版. 北京:机械工业出版社, 2002: 176.
- [15] 刘献栋, 邓志党, 高峰. 公路路面不平度的数值模拟方法研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(9): 843-846.
Liu Xiandong, Deng Zhidang, Gao Feng. Research on the method of simulating road roughness numerically [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(9): 843-846. (in Chinese)
- [16] 宋一凡, 陈榕峰. 基于路面不平整度的车辆振动响应分析方法[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(4): 39-43.
Song Yifan, Chen Rongfeng. Analysis method of vehicle vibration response caused by pavement roughness [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(4): 39-43. (in Chinese)
- [17] 杨先健, 卢力. 铁路道路引起的地面振动传播[C]//第四届全国建筑振动学术会议论文集. 南昌:中国振动工程学会, 2004: 418-422.



第一作者简介:赵锐,女,1979年12月生,博士、讲师。主要研究方向为大跨度结构振动理论与设计技术。曾发表《人行天桥在追风效应下的振动激励研究》(《空间结构》2013年第19卷第4期)等论文。

E-mail:zhaor1999@163.com

