

轮轨撞击振源参数的虚拟反演

郑鑫^{1,2}, 陶夏新¹, 王福彤^{1,3}

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090, zx07@yahoo.cn;

2. 黑龙江八一农垦大学 工程学院, 黑龙江 大庆 163319; 3. 黑龙江大学 建筑工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 为了论证利用台阵观测反演城市轨道交通中由轮轨撞击产生的振源参数的可行性, 采用了虚拟反演的方法, 首先预设车轮与轨道接头撞击振源参数, 利用已有精确解计算得到了当列车以一定速度通过弹性半空间表面时, 在振源附近布设的一密集台阵测得的竖向振动位移时程曲线, 并对该位移时程曲线进行谱分析. 利用功率谱作为目标函数, 采用微遗传算法, 反演得到了脉冲振源的强度及列车运行速度. 计算结果表明, 利用两个点的功率谱作目标进行振源参数反演的结果误差较小. 遗传算法在振源特性研究领域的应用是可靠的, 为进一步采用遗传算法反演随机振源函数的研究提供了理论支持.

关键词: 轮轨撞击; 振源参数; 虚拟反演; 微遗传算法

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)08-1232-05

Virtual inversion of vibration source parameters of wheel-rail impact

ZHENG Xin^{1,2}, TAO Xia-xin¹, WANG Fu-tong^{1,3}

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, zx07@yahoo.cn; 2. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Heilongjiang University, Harbin 150001, China)

Abstract: To demonstrate the feasibility of inverting wheel-rail impact source based on observation data, the method of virtual inversion is adopted. Firstly, a setting function was given to describe the source, and the corresponding vertical displacement time histories of the observation array were obtained by means of an existing analytical solution. Spectrum analysis was performed on the displacement time histories. Then taking the power spectrum as the objective function, the intensity of the source function and the velocity of the train were inverted by means of the micro-genetic algorithm. Test results show that the error is very small by using the power spectrum of two points as the objective function to inverse the vibration source parameters. Genetic algorithm is reliable in the research of vibration source characteristic, which provides a theoretical foundation for further application of genetic algorithm in the research of the random vibration source function.

Key words: wheel-rail impact; vibration source parameters; virtual inversion; micro-genetic algorithm

城市轨道交通引发的环境振动主要是由轮轨的撞击产生的. 传统研究采用二维的分析方法, 认为振源是由与接收点最近的轨道处轮轨撞击产生的, 据此计算其在建筑物及人体上产生的作用^[1]. 考虑到轨道的长度与宽度的比值很大, 这种简化的计算方法存在一定的合理性. 但从三维

分析的观点出发, 这一点的所产生的振动并不是唯一的振源. 当列车快速通过一段轨道时, 多个轨道接头都与车轮撞击形成振源, 线路附近一点振动并非仅从横切线路剖面上邻近路基点的振动传过来的, 而是由一排间距固定的移动点源传来的振动叠加合成的, 这种叠加的振动很难通过常规观测方法得到. 为获得城市轨道交通振源参数, 可以借助台阵观测的方法. 台阵观测方法具有简便、不破坏环境、造价低、适合在城市中进行等特点. 其优势还在于可通过台阵各测点所接收到的信号

收稿日期: 2009-11-30.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50538030).

作者简介: 郑鑫(1974—), 男, 博士研究生;

陶夏新(1949—), 男, 教授, 博士生导师.

进行各种组合分析以压低背景干扰、突出和加强振源信号,从而可获取振源的信息. 作为第一步研究,本文将场地简化为弹性半空间,车轮与轨道的撞击模拟为顺序展开的振源. 通过预设车轮与轨道接头撞击振源参数,利用已有精确解合成一系列脉冲在台阵各接收点产生的竖向位移振动时程,并对该时程进行功率谱分析. 然后,给出了通过观测记录反演脉冲强度及列车速度的虚拟反演方法^[2]:假定对振源参数未知,利用微遗传算法,采用两点自功率谱联合作目标反演振源脉冲强度及列车速度,将反演得到的参数与预设参数进行比较,论证利用台阵反演轮轨撞击振源参数这一思路的可行性.

1 振源参数预设

翟婉明^[3]利用其建立的车辆-轨道竖向系统对轨道接头处的轮轨冲击力进行了现场实测,

实测时车辆轴重 $p_0 = 107 \text{ kN}$, 车速 $v = 54 \text{ km/h}$, 从其测试结果可以看出轨道接头处的轮轨冲击力近似于一个三角脉冲. 由此本文将车轮与轨道接头撞击形成的脉冲模拟为三角形脉冲,其数学表达式设定为振源函数:

$$F(t) = \begin{cases} 1\ 666.67 \cdot t, & (0 \text{ s} < t < 0.006 \text{ s}) \\ 200 - 16\ 666.67 \cdot t, & (0.006 \text{ s} < t < 0.012 \text{ s}) \\ 0, & (t < 0 \text{ 或 } t > 0.012 \text{ s}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: t 为时间, $F(t)$ 为 t 时刻车轮与轨道接头冲击力相对值.

列车采用 YZ25G 型空调硬座客车,假定全车共有 25 节车厢,每节车厢长度、轴距等参数如图 1 所示^[4],暂不考虑车头的影响. 计算 400 m 轨道,每节轨道长度为 25 m,共计 16 节.

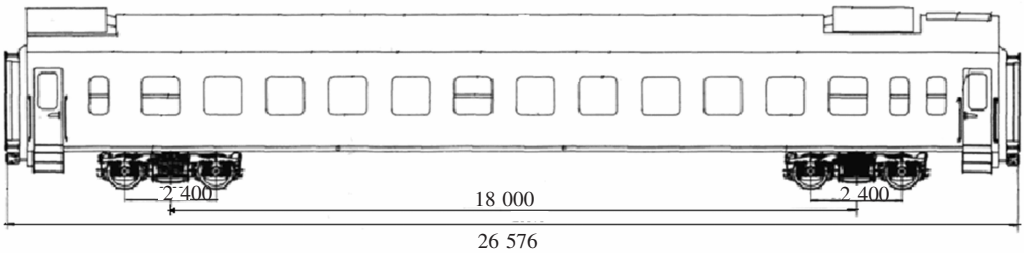


图 1 YZ25G 型空调硬座客车长度、轴距等参数(单位:mm)

2 弹性半空间表面作用三角形脉冲点源问题的数值解

文献^[5]利用 Cagniard-Hoop 方法求解了方

波脉冲荷载作用于弹性半空间表面的垂直点源问题的一个代数形式的精确解.

$$u_z(r, 0, \tau) = \begin{cases} 0, & (\tau < b) \\ \frac{p_0}{32(1-b^2)\pi\mu r} \left\{ -4 + a_1 \sqrt{\frac{b^2-\gamma^2}{\tau^2-\gamma^2}} + a_2 \sqrt{\frac{b^2-p}{\tau^2-p}} + a_3 \sqrt{\frac{b^2-q}{\tau^2-q}} \right\}, & (b \leq \tau < 1); \\ \frac{p_0}{16(1-b^2)\pi\mu r} \left\{ -4 + a_1 \sqrt{\frac{b^2-\gamma^2}{\tau^2-\gamma^2}} H(\gamma-\tau) \right\}, & (1 \leq \tau < b + \tau_0); \\ \frac{p_0}{32(1-b^2)\pi\mu r} \left\{ -4 + 2a_1 \sqrt{\frac{b^2-\gamma^2}{\tau^2-\gamma^2}} H(\gamma-\tau) - a_1 \sqrt{\frac{b^2-\gamma^2}{(\tau-\tau_0)^2-\gamma^2}} - \right. \\ \left. a_2 \sqrt{\frac{b^2-p}{(\tau-\tau_0)^2-p}} - a_3 \sqrt{\frac{b^2-q}{(\tau-\tau_0)^2-q}} \right\}, & (b + \tau_0 \leq \tau < 1 + \tau_0); \\ \frac{p_0 a_1}{16(1-b^2)\pi\mu r} \left\{ \sqrt{\frac{b^2-\gamma^2}{\tau^2-\gamma^2}} H(\gamma-\tau) - \sqrt{\frac{b^2-\gamma^2}{(\tau-\tau_0)^2-\gamma^2}} H(\gamma-\tau+\tau_0) \right\}, & (1 + \tau_0 < \tau). \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$$p = \frac{1}{32(b^2-1)\gamma^4} [8\gamma^4 - 1 + \sqrt{(8\gamma^4 - 1)^2 + 64(b^2 - 1)\gamma^6}],$$

$$q = \frac{1}{32(b^2-1)\gamma^4} [8\gamma^4 - 1 - \sqrt{(8\gamma^4 - 1)^2 + 64(b^2 - 1)\gamma^6}]; \quad (3)$$

$$a_1 = \frac{(2\gamma^2 - 1)^2}{(\gamma^2 - p)(\gamma^2 - q)}, a_2 = \frac{(2p - 1)^2}{(p - \gamma^2)(p - q)}, a_3 = \frac{(2q - 1)^2}{(q - \gamma^2)(q - p)}; \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{c_s}{c_R}, \quad (5)$$

$$c_R = \sqrt{-z_1 c_s}, \quad (6)$$

$$\tau = \frac{c_s t}{r}; \quad \tau_0 = \frac{c_s t_0}{r}. \quad (7)$$

其中： c_s 为剪切波波速， c_R 为瑞利波波速， z_1 是瑞利方程的一个根。 t_0 表示方波脉冲持续时间。

将三角形脉冲展开成方形脉冲，利用以上精确解进行叠加以获得三角形脉冲作用下的数值解。

3 半空间表面观测台阵设计

台阵的形状和测点的间距是反演的一个重要

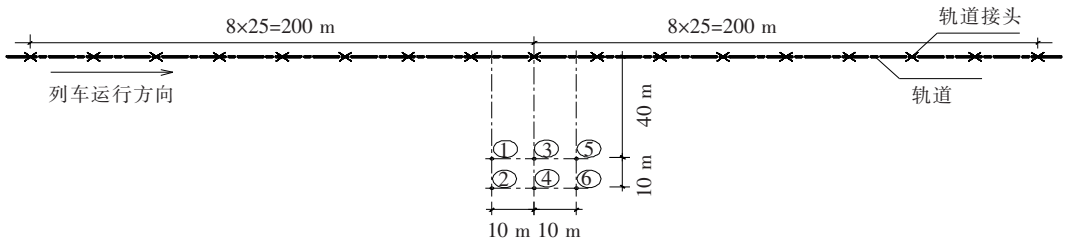


图 2 台阵布置图

4 结果与讨论

4.1 微遗传算法

本文采用微遗传算法^[8] (Micro-GA) 反演振源参数. Micro-GA 与传统的遗传算法的进化策略在某些方面是一致的. 在 Micro-GA 中选择和交叉仍然是基本的 GA 操作, 但取消了变异操作, 同时加入了另外一些 GA 操作, 如最优个体保存策略、重新初始化种群策略等.

最优个体保存策略就是把当代最优个体完整保留到下一代中, 保证了进化过程中不会丢失最好的信息. Micro-GA 使用重新初始化种群策略代替一般遗传算法中的变异操作, 当某一代收敛于一个局部最优解时, 算法把上代最优个体及随机产生的另外几个个体构成新一代种群 (新种群与原种群个体数量相同), 进入遗传操作, 从而保证了基因的多样性.

4.2 线性顺序展开振源在弹性半空间表面台阵上产生的振动

取半空间的剪切波速 $v_s = 250.0 \text{ m/s}$ 、车速为 14.4 m/s , 根据前述的计算方法编制程序对线性顺序展开振源在弹性半空间表面台阵上产生的振动进行计算, 台阵各点的竖向位移 u_z 时程曲线如图 3 所示. 从图 3 中可以看出, 列车运动过程中, 车轮与轨道接头碰撞产生的脉冲荷载组合后, 在特定的时间段内具有一定的周期性. 在列车进入计算区域初的振动振幅很小, 逐渐增加, 退出计算

环节. 台阵中测点的间距要能够覆盖所考虑的面波波长的范围. 一般来讲, 台阵的直径至少要与感兴趣的最长的波长一致, 以对长波长有足够的分辨率; 最小的测点间距应取所感兴趣的最短波长的一半, 以避免波数域中的混频^[6].

实际观测中, 一般会根据列车的行驶速度、场地的条件和仪器设备, 选择不同形状、不同尺寸的台阵^[7]. 城市轨道交通的振源十分复杂, 兼顾捕获更多振源信息和经济、便捷两个方面, 采用了 6 点的矩形台阵观测反演. 本文所采用的台阵布置及台阵与振源的关系, 如图 2 所示.

区域的过程中振幅是在逐渐减小.

本文采用直接法^[9] 对竖向振动时程进行功率谱估计, 即直接对数据序列进行加窗处理, 并利用 FFT 来计算功率谱. 记第 i 接收点的数据的 Fourier 变换为 $R_i(f)$, 则该点自功率谱

$$S_{ii}(f) = R_i^*(f) \times R_i(f). \quad (8)$$

式中: $R_i^*(f)$ 为 $R_i(f)$ 的共轭复数

6 个接收点振动时程的自功率谱如图 4 所示. 从图中可看出, 车轮对有缝钢轨撞击产生的地面响应具有隐含的周期性. 经分析, 竖向振动位移时程所包含的频率分量与振源频率有关.

4.3 反演结果与预设值的比较

本文采用的遗传算法反演策略如下:

1) 目标函数

$$\phi_j = \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^n [q_0(i, k) - q_{ij}(i, k)]^2. \quad (9)$$

式中: $q_0(i, k)$ 和 $q_{ij}(i, k)$ 分别为第 k 个目标功率谱曲线与根据第 j 个模型参数计算的第 k 个理论曲线, 取功率谱频率从 0 到 120 所有离散点作为目标值.

2) 适合度函数

$$F_j = \exp(-5 \times \phi_j). \quad (10)$$

3) 遗传算子

遗传算子包括选择算子、交换算子、最优保护策略及重新初始化算子等. 选择算子选用锦标赛选择法. 交换算子选用均匀交换. 采取了最优保护策略, 先选出父代群体中适合度最大的个体, 保护

起来,对群体进行遗传操作,再用保护起来的最优个体代替子代中的最差个体.重新初始化算子策略是当新产生的子代群体中的相同个体的数量超过某一范围就认为过早收敛,在保留群体中一个

最优个体的基础上,随机产生其他个体,保持群体规模不变,新形成的群体进入下一轮遗传运算.

4) 运行参数

通过试算确定遗传算法的参数.种群数 $n = 5$,

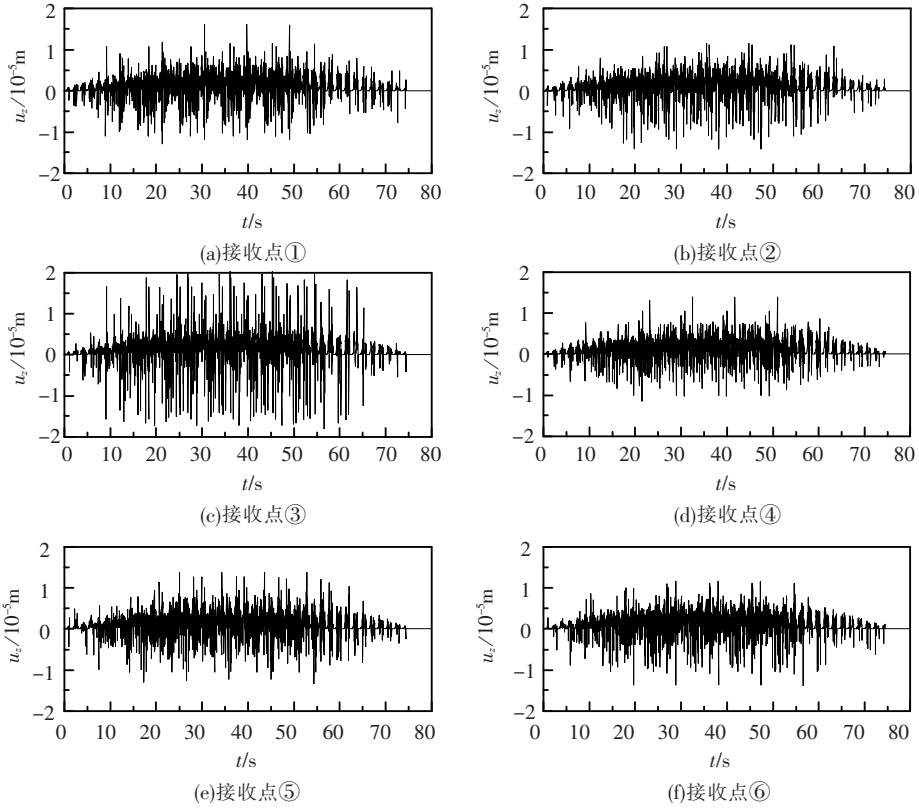


图3 台阵各点竖向位移时程曲线

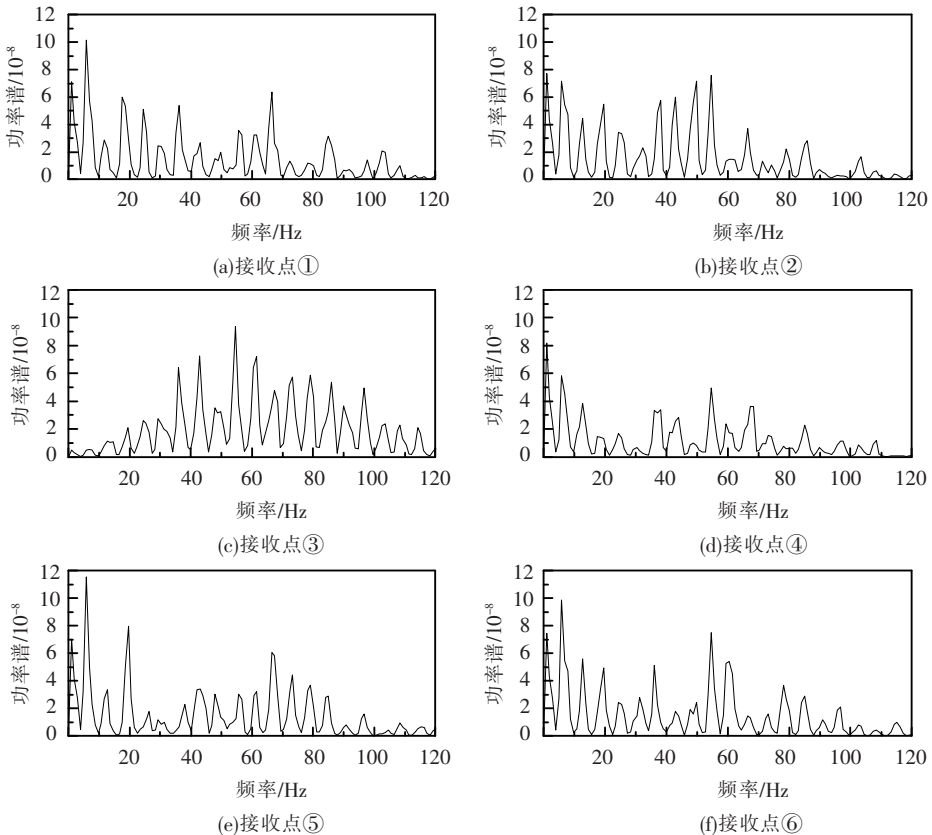


图4 台阵各点竖向位移的自功率谱

交换概率 $P_c = 0.5$, 变异概率 $P_m = 0$, 最大遗传代数 $G_{\max} = 2\ 000$, 当目标函数小于 10^{-6} 时, 认为算法收敛, 如果不收敛, 当遗传代数大于最大遗传代数时, 算法停止.

5) 搜索范围

根据我国城市轨道交通的实际情况, 直接取 $1\ 000\ \text{kN}$ 为脉冲振源高度的搜索上限、 $10\ \text{kN}$ 作为三角脉冲振源宽度的搜索下限, 是有足够冗余度

的. 取 $50\ \text{m/s}$ 为列车运行速度搜索上限、 $10\ \text{m/s}$ 为列车运行速度搜索下限, 也是足够大的范围.

根据以上反演策略编制了 Fortran 程序, 以 $p = 100\ \text{kN}$, $v = 14.4\ \text{m/s}$ 为目标参数时计算得到的结果见表 1. 从表中可以看出, 利用两个点的功率谱作目标进行振源参数反演的结果比较稳定, 这表明遗传算法在振源特性研究领域是可靠的.

表 1 本文反演的结果与给定值的比较

两接收点编号	脉冲强度/ kN		列车速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$		相对误差/%	
	反演结果	给定值	反演结果	给定值	脉冲强度	列车速度
①, ②	99.897	100	14.337	14.4	0.103	0.438
①, ③	104.15	100	14.313	14.4	4.15	0.604
①, ④	100.19	100	14.393	14.4	0.19	0.049
①, ⑤	100.88	100	14.310	14.4	0.88	0.625
①, ⑥	100.32	100	14.334	14.4	0.32	0.458
②, ③	98.71	100	14.368	14.4	1.29	0.222
②, ④	102.84	100	14.404	14.4	2.84	0.028
②, ⑤	101.94	100	14.392	14.4	1.94	0.056
②, ⑥	103.42	100	14.408	14.4	3.42	0.056
③, ④	101.25	100	14.389	14.4	1.25	0.076
③, ⑤	99.38	100	14.390	14.4	0.62	0.069
③, ⑥	100.27	100	14.408	14.4	0.27	0.056
④, ⑤	100.25	100	14.410	14.4	0.25	0.069
④, ⑥	101.13	100	14.277	14.4	1.13	0.854
⑤, ⑥	100.07	100	14.410	14.4	0.07	0.069

5 结 论

1) 通过计算得到列车通过时由于轮轨撞击产生的弹性半空间上一密集台阵各点的竖向位移时程, 并对其进行谱分析, 利用功率谱作为目标函数, 采用微遗传算法, 反演得到了脉冲振源的强度及列车运行速度.

2) 计算结果表明, 振源参数反演方法具有一定的精度, 为进一步采用遗传算法反演随机振源函数的方法提供了理论支持. 论证了根据台阵各点的竖向位移时程构造适当的目标函数, 反演准确的振源参数的思路是可行的.

参考文献:

[1] BAHREKAZEMI M. Train-induced ground vibration and its prediction[D]. Sweden: Royal Institute of Technology, 2004.

[2] 陶夏新, 师黎静. 利用地脉动台阵观测推断场地速度结构的虚拟反演[C]//新世纪地震工程与防灾减灾——庆贺胡聿贤院士八十寿辰论文集. 北京: 地

震出版社, 2002: 443–452.

- [3] 翟婉明. 铁路轮轨冲击振动模拟与试验[J]. 计算力学学报, 1999, 6(1): 93–99.
- [4] 严隽彗. 车辆工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
- [5] 刘凯欣, 刘广裕. 垂直点源的一个精确解[J]. 科学通报, 2004, 49(5): 419–423.
- [6] YAMANAKA H, ISHIDA H. Application of genetic algorithms to an inversion of surface-wave dispersion data [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1996, 86(2): 436–444.
- [7] KATZ. Micro tremor analysis of local geological conditions[J]. Bulletin of Seismological Society of America, 1976, 66: 45–60.
- [8] ABU-LEBDEH G, BENEKOHAL R F. Convergence variability and population sizing in micro-genetic algorithms [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 1999, 14: 321–334.
- [9] 杨位钦, 顾岚. 时间序列分析与动态数据建模[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988: 20–225.

(编辑 魏希柱)