

地铁隧道洞壁振动时频特性分析*

刘必灯 宋瑞祥 邬玉斌 张 斌**

(北京市科学技术研究院北京市劳动保护科学研究所, 100054, 北京//第一作者, 副研究员、在站博士后)

摘要 源强的合理确定是地铁环境振动预测及振动控制措施设计的关键因素。采用已通车线路的实测数据作为源强取值的参考是常用做法,但鉴于地铁振动的随机特征及各种线路的差异性,实测源强的统计学结果更具参考价值。基于国内某地铁隧道洞壁多次连续过车加速度时程数据,得出了具有统计学意义的洞壁振动时频特性:振动峰值加速度均值约 2.5 m/s^2 , 强振持时约 5.8 s , 平均最大 Z 振级为 64.7 dB ; 洞壁振动主要集中在中高频段,但高频振动经土层传播后迅速衰减而对结构反应影响小。振动加速度反应谱均值、峰值加速度均值、持时均值及振动波形包络参数均可用于人工合成具有统计意义的源强振动加速度时程。

关键词 地铁; 隧道洞壁; 振动; 时频特性

中图分类号 U451+.3

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.03.022

Analysis of Time-frequency Characteristics for Subway Tunnel Wall Vibration

LIU Bideng, SONG Ruixiang, WU Yubin, ZHANG Bin

Abstract Reasonable vibration source strength is a key factor in the prediction of subway environmental vibration and the design of vibration control method. The common practices use the measured data from the operation subway lines as the reference of source strength value. However, because of the random characteristics of subway tunnel vibration and the difference of various subway lines, the statistical results of measured vibration data prove to have more reference value. By analyzing the acceleration data measured in a subway tunnel where trains continuously passing for many times, the time-frequency statistical characteristics of the tunnel wall vibration are obtained. The peak acceleration is about 2.5 m/s^2 with the duration of 5.8 s , and the average maximum Z VL (vibration level) is about 64.7 dB . The frequency of the tunnel vibration is mainly concentrated in the medium and high frequency bands, but it attenuates quickly in the soil and has less impact on the structural response. The acceleration response spec-

trum, peak acceleration, duration of strong vibration and waveform parameters can be used in synthesize vibration acceleration time history with statistical significance.

Key words subway; tunnel wall; vibration; time-frequency characteristics

Author's address Beijing Municipal Institute of Labour Protection, Beijing Academy of Science and Technology, 100054, Beijing, China

地铁为人们带来便利的同时,对城市住宅及敏感建筑物造成的环境振动与噪声影响^[2-3]也不容忽视,处理失当将影响城市舒适性建设。北京西直门附近距地铁线路 150 m 处某五层居民楼内的振动能明显被人感知,且已致室内家具移位^[4];北京地铁 9 号线运行致使沿线某单位宿舍楼长期实测振动超过 80 dB ,也引起了市政府的高度关注。如果地铁运行对建筑物的振动影响问题在规划阶段未得到关注,而是在线路交付使用且问题凸显后才进行处置,其处理成本将会大大增加。因此,明智的做法是前期对地铁运行所致建筑物振动影响进行评价,然后实施有针对性的振动控制措施。

现阶段地铁振动影响的预测方法有经验法和数值法。经验法是综合以往多次测试结果,获得标准源强取值并对轨道-隧道特征、运行工况及场地条件等方面进行修正后得到的预测结果;数值法是利用有限元等数值分析法对建筑物、岩土体及隧道结构建立数值分析模型,在轨道或隧道处加载实测源强数据,获得预测结果^[5-7]。无论是哪种预测方法,合理的源强都是准确预测的首要条件,且源强取值直接关系到振动控制措施的设计。现场实测是获取源强的可靠手段,但是对于未运营线路,源强实测并不具备条件;对于已运营线路,受制于现实条

* 中国博士后科学基金项目 (2019M660541); 北京市博士后工作经费资助项目 (ZZ2019-112); 北京市自然科学基金项目 (8202019, 8192013); 北京市财政课题 (PXM2019_178304_000003)

** 通信作者

件,源强实测也较难实施或实施成本较高。另外,地铁所致环境振动的随机特征使得单次实测数据针对其他工程的普适性一般。随机振动研究表明,通过大量测试样本可获取振动的幅值、持时和频谱的统计特征^[8],进而为科学地进行源强选择提供统计学上的依据。

本研究通过统计分析国内某地铁隧道洞壁的123次测试样本,得到了隧道洞壁振动时频特征,并给出了具有统计意义的振动反应谱,可用于人工合成振动时程。

1 测试工况及测试仪器

北京市劳动保护科学研究所于2016年对国内某地铁道床和轨道、洞壁、场地土和周围建筑物进行了测试,以了解地铁所致环境的振动特点。本研究统计分析了其中一个正线隧道断面123次连续过车加速度记录情况。该测试断面所在节段为整体道床,未采用橡胶道床垫、钢弹簧浮置板等特殊减振措施;轨道系统采用1 435 mm标准轨距和60 kg/m钢轨;车辆为B型车6节编组、轴重14 t,列车平均通过速度约75 km/h。测试断面隧道埋深为21.4 m,隧道位于岗阜状平原内粉质黏土层中。同一断面布置3个测点,钢轨测点位于钢轨正下方两扣件间,道床测点位于两轨间道床上,洞壁测点位于距轨面高约1.9 m处。洞壁加速度计通过底座强力磁铁吸附在采用AB胶粘贴于洞壁的L型铁支架上,如图1所示。

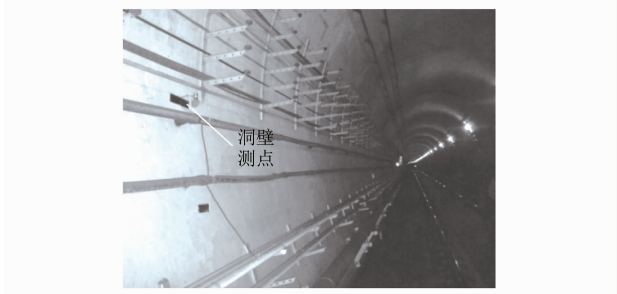


图1 地铁隧道洞壁测点示意图

测试中采用了丹麦B&K公司研制的8344型压电加速度计^[9]和北京东方振动与噪声研究所研制的INV 3062T型采集仪^[10]。传感器经PCB公司的TMS 9110D便携式振动校准器现场校准^[11],各仪器外观见图2所示。8344型加速度计具有测量范围大、灵敏度高且噪声小等特点,其技术特点见表1。3062T型采集仪具有4个24位高精度AD采集

通道,动态范围保证值达110 dB,采样率可达51.2 kHz且频率分辨率误差小于0.01%,量程可选10 V/1 V/0.1 V,当量程为10 V时有效值误差小于0.05 mV,总谐波失真为-70 dB。9110D型振动校准器可实现5~10 000 Hz、幅值最大为20 g的调频式校准,5~10 Hz和10~10 000 Hz加速度校准精度分别可达到5%和3%。加速度计现场校准结果与其出厂标定值一致,偏差小于±0.01 dB,试验中其参数采用出厂值。



图2 测试仪器

表1 B&K 8344型压电晶体加速度传感器技术指标

技术指标	取值
量程范围/g	±2.6
频域范围/Hz	0.2~3 000.0
灵敏度/(mV/g)	2 500(1±20%)
带宽噪声/μg	45
谱点噪声/(μg/Hz ^{1/2})	11.000,0.780,0.078,0.035
供电电流/mA	2~20
供电电压/V	24~30

注:灵敏度参量值对应的频域范围为159.2 Hz,供电电流为0.04 mA;带宽噪声参量值对应的频率范围为0.2~3 000 Hz;谱点噪声参量值对应的频率范围分别为1 Hz,10 Hz,100 Hz,1 000 Hz

2 地铁隧道洞壁振动时频特性指标

地铁运行诱发隧道洞壁振动,隧道洞壁振动特性分时域特性和频域特性。时域特性主要包括振动强度和持时,频域特性主要用频谱描述。三者共同描述了振动的基本动力特性。

加速度直接和惯性力有关,所以采用常用峰值加速度来评价城市轨道交通振动强度,记为 A_{\max} ,单位为 m/s^2 或 g 。振动基本评价指标也可采用最大Z计权振动加速度级 $V_{L,Z,\max}$,其含义是规定测量时间 T 内,Z计权振动加速度级 $V_{L,Z}$ 的最大值,单位为dB。其中, $V_{L,Z}$ 是按GB/T 13441.1规定的计权因子修正后得到的振动加速度级 V_{AL} ; V_{AL} 是指加速度与基准加速度之比的以10为底的对数乘以20,基准加速度取 10^{-6} m/s^2 。与振动输入能量成正比的均方根加速度 a_{rms} 是描述随机振动特征的重要方式,

其实是随机振动标准差,如式(1)所示:

$$a_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} a^2(t) dt} \quad (1)$$

式中:

$a(t)$ ——加速度;

T_d ——振动的有效持时;

t ——时间。

振动时程中只有一定强度的节段才有工程意义,一般称为有效持时,常用能量指标来截取有效能量持时。本研究采用胡西德(Husid)能量持时,其表达式如下:

$$E_n(t) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} a^2(t) dt}{\int_0^{T_d} a^2(t) dt} \quad (2)$$

式(2)的物理意义为 t 时刻能量与总能量之比。一般比值下限 t_1 和上限 t_2 对应的 Husid 能量分别取 5% 和 95%。 t_1 时刻和 t_2 时刻的时间间隔定义为“90%能量持时”,记为 $T_{d90\%}$ 。图 3 给出了对某信号能量持时的 Husid 积分图描述。另一种描述有效持时的方式是以加速度时程第一次和最后一次达到其峰值百分比的间隔来定义,称为阈值持时;当阈值持时峰值百分比取 50% 时记为 $T_{50\%}$,如图 4 所示。

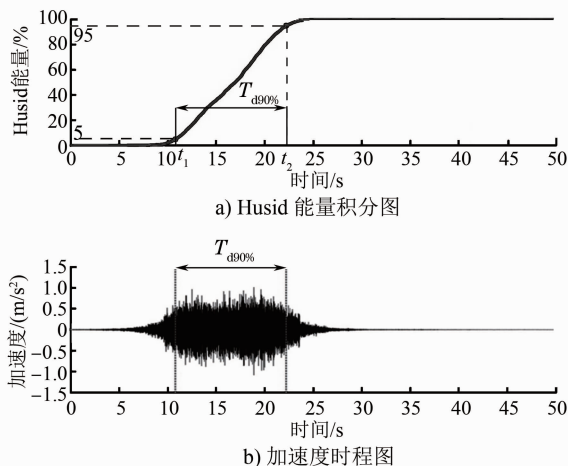


图 3 “90%能量持时”示意图

除了常用的傅立叶谱,1940 年由 Biot 提出的反应谱也是一种常用频谱分析方案。它的物理意义是经一系列移动窗滤波后的平滑频谱。不同周期结构在给定地面输入后的振动反应可能放大也可能缩小,这取决于其自振特性与输入振动频谱关系,即是否具备共振条件。反应谱曲线正好反映了这种特性且给出了共振反应上限^[12]。

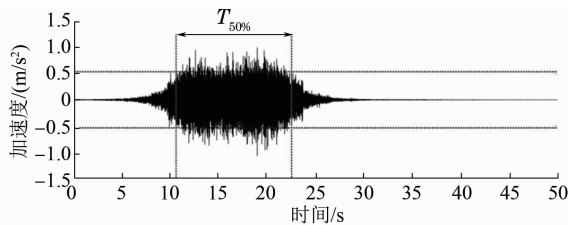


图 4 阈值持时示意图

3 地铁隧道洞壁振动测试结果分析

图 5 给出了隧道洞壁某一振动加速度的原始及滤波记录。加速度原始记录峰值约 1 m/s^2 , 经 200 Hz 低通滤波和 1~80 Hz 带通滤波过滤后加速度振幅大幅减小,原始信号、0~200 Hz 信号与 1~80 Hz 信号的幅值比约为 32:2:1。洞壁与距离隧道中线 50 m 处地表测点加速度记录,如图 6 所示。由图 6

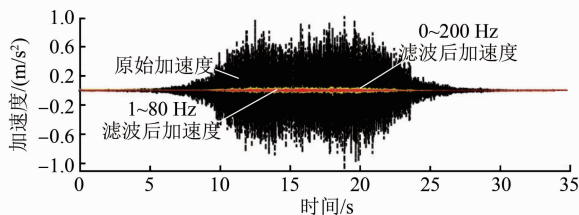


图 5 典型隧道壁振动加速度时程及不同频域幅值结果

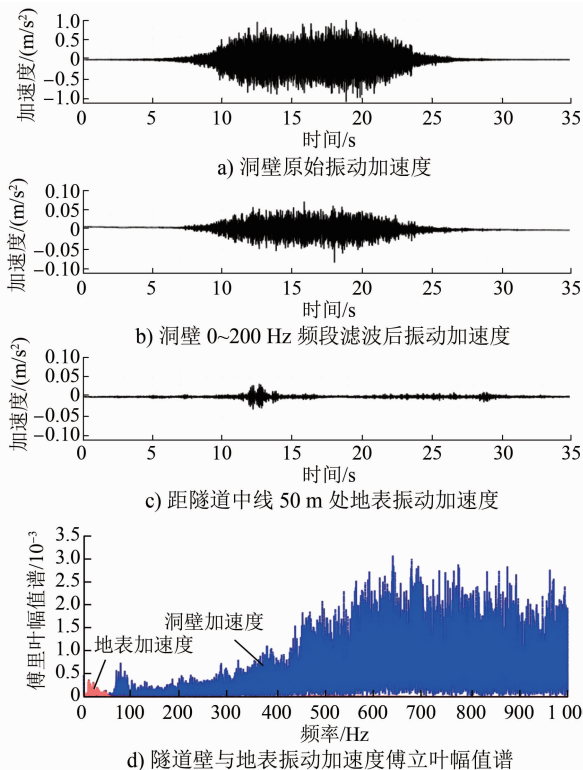


图 6 典型隧道壁及地表振动加速度纪录

a)可知,以高频为主的洞壁加速度经岩土衰减后大幅减小,洞壁与地表振动幅值比达33:1,地表测点信号量级与洞壁测点1~80 Hz带通滤波信号相当。傅立叶谱分析结果(见图6 d))表明,洞壁振动集中在50 Hz以上,而地表测点振动集中在50 Hz以内,这说明经土层传播,洞壁高频振动衰减快,低频振动经土层放大向外辐射造成场地振动。

表2列出了隧道洞壁测点123次加速度样本的时频结果,包括 A_{\max} 、 a_{rms} 、 $V_{\text{L,Z,max}}$ 、 $T_{\text{d90\%}}$ 、 $T_{50\%}$ 和

加速度反应谱峰值 $S_{\text{a,max}}$ 。结果表明: \bar{A}_{\max} 为2.55 m/s^2 ; \bar{a}_{rms} 为0.21 m/s^2 ; $\bar{T}_{\text{d90\%}}$ 为5.77 s, $\bar{T}_{50\%}$ 为5.87 s,这两种参考持时非常接近; $\bar{S}_{\text{a,max}}$ 为7.92 m/s^2 ,其对 \bar{A}_{\max} 的平均放大倍数约为3.2; $\bar{V}_{\text{L,Z,max}}$ 为64.7 dB。图7所示统计特征表明,峰值加速度主导值为2~3 m/s^2 ,均方根加速度主导值为0.15~0.25 m/s^2 ,50%阈值持时主导值为6 s;加速度反应谱峰值主导值为8 m/s^2 。

表2 各工况时域特征统计

工况 编号	$A_{\max}/$ (m/s^2)	$a_{\text{rms}}/$ (m/s^2)	$V_{\text{L,Z,max}}/$ dB	$T_{\text{d90\%}}/$ s	$T_{50\%}/$ s	$S_{\text{a,max}}/$ (m/s^2)	工况 编号	$A_{\max}/$ (m/s^2)	$a_{\text{rms}}/$ (m/s^2)	$V_{\text{L,Z,max}}/$ dB	$T_{\text{d90\%}}/$ s	$T_{50\%}/$ s	$S_{\text{a,max}}/$ (m/s^2)
1	1.08	0.12	63.7	11.42	11.92	3.47	63	4.38	0.27	79.5	5.21	2.09	16.63
2	1.94	0.19	63.0	6.25	6.67	5.79	64	3.18	0.22	64.4	5.46	5.00	9.61
3	3.79	0.27	77.3	5.55	4.82	13.07	65	2.06	0.17	64.0	5.58	6.41	6.36
4	2.82	0.23	66.3	5.38	5.51	9.51	66	1.74	0.16	64.3	7.14	6.94	7.51
5	2.24	0.18	63.3	5.72	5.86	5.95	67	2.61	0.24	60.4	5.86	6.12	7.58
6	2.17	0.19	65.3	6.01	6.25	6.22	68	2.17	0.19	64.7	5.21	6.18	7.45
7	2.66	0.25	59.7	5.54	6.22	7.95	69	2.51	0.20	62.4	5.38	5.44	8.83
8	2.36	0.19	63.5	5.42	5.04	7.47	70	2.41	0.20	62.3	6.31	7.00	7.79
9	2.37	0.21	63.4	5.50	5.79	7.20	71	2.57	0.20	62.2	5.54	5.46	6.43
10	2.66	0.22	62.2	5.97	5.92	8.89	72	2.60	0.22	65.0	5.66	5.90	7.86
11	2.04	0.19	62.2	5.83	6.46	6.17	73	4.04	0.26	78.0	5.60	3.64	12.28
12	2.71	0.22	63.2	5.81	6.23	6.67	74	2.28	0.21	65.8	5.95	6.14	8.96
13	4.33	0.26	78.8	5.35	3.27	16.08	75	1.86	0.17	63.6	5.56	6.16	6.89
14	2.81	0.22	64.2	5.36	5.41	8.17	76	2.12	0.19	66.5	5.76	6.25	8.01
15	2.06	0.17	62.6	5.74	5.96	6.01	77	2.71	0.24	59.9	5.52	6.09	8.09
16	2.29	0.19	64.1	5.57	5.80	6.42	78	2.33	0.19	64.9	5.17	6.13	8.71
17	2.63	0.23	60.9	6.13	6.54	7.09	79	2.41	0.20	62.5	5.90	6.19	6.29
18	2.32	0.18	62.8	5.42	6.26	6.62	80	2.86	0.22	62.5	5.48	5.32	9.20
19	2.44	0.20	64.0	5.82	5.89	7.54	81	2.62	0.20	62.3	5.50	5.33	6.93
20	2.33	0.21	62.3	6.14	6.92	7.41	82	2.40	0.22	66.0	5.65	6.06	7.64
21	2.10	0.19	62.6	5.92	6.44	6.46	83	4.56	0.27	79.3	5.19	3.11	11.71
22	2.25	0.22	65.0	6.00	6.71	7.46	84	2.81	0.22	64.8	5.33	4.96	9.24
23	4.17	0.26	79.2	5.31	3.33	12.56	85	1.93	0.17	63.9	5.62	6.46	5.77
24	3.05	0.23	63.9	5.31	5.14	9.34	86	2.05	0.18	65.5	5.52	5.96	7.01
25	1.98	0.18	63.4	5.67	5.98	6.09	87	2.98	0.23	60.0	5.54	5.52	8.15
26	2.34	0.19	65.8	5.55	5.79	8.38	88	2.47	0.18	63.5	5.52	6.22	7.08
27	2.55	0.24	60.4	5.51	5.99	8.27	89	2.25	0.21	63.3	5.51	6.48	7.37
28	2.14	0.18	62.8	5.58	5.85	8.88	90	2.58	0.22	62.0	5.60	5.89	9.05
29	2.26	0.20	63.6	5.93	6.39	6.69	91	3.07	0.20	62.0	5.58	4.71	6.85
30	2.65	0.22	61.2	5.71	5.93	6.61	92	2.44	0.22	63.5	5.59	6.04	8.14
31	2.60	0.20	61.9	5.53	5.38	6.72	93	3.66	0.26	78.0	5.33	4.47	14.89
32	2.62	0.23	64.4	5.55	5.95	7.79	94	2.69	0.21	64.3	5.22	5.26	8.62
33	5.02	0.27	78.9	5.39	1.72	16.67	95	1.92	0.17	62.9	5.77	6.78	6.43
34	2.49	0.21	66.1	5.95	5.80	7.61	96	2.03	0.18	65.0	5.66	6.42	7.37
35	1.83	0.17	63.2	5.84	6.31	6.47	97	2.48	0.22	59.9	6.74	6.78	7.03
36	2.25	0.19	63.3	5.57	6.29	7.35	98	2.39	0.18	63.0	5.47	5.96	6.09
37	2.76	0.24	60.3	5.66	6.11	7.02	99	2.43	0.21	66.1	5.59	5.83	8.03
38	2.25	0.19	63.8	5.63	5.83	6.74	100	2.52	0.22	62.2	5.51	5.55	8.20
39	2.50	0.20	63.8	6.01	6.02	7.41	101	2.49	0.20	62.9	5.46	5.48	7.86
40	2.30	0.20	62.6	6.29	7.03	6.86	102	2.93	0.23	65.1	5.59	5.63	7.86

表 2 各工况时域特征统计(续)

工况 编号	$A_{\max}/$ (m/s^2)	$a_{\text{rms}}/$ (m/s^2)	$V_{\text{L,Z,max}}/$ dB	$T_{\text{d90\%}}/$ s	$T_{50\%}/$ s	$S_{\text{a,max}}/$ (m/s^2)
41	2.43	0.19	62.3	5.73	5.70	6.58
42	2.34	0.21	63.5	6.17	6.85	8.65
43	4.54	0.26	77.3	5.64	4.06	12.16
44	2.49	0.21	65.5	5.73	6.10	8.16
45	2.12	0.17	63.5	6.27	6.13	5.55
46	2.54	0.19	67.4	5.73	5.40	7.14
47	2.50	0.24	60.4	5.54	6.17	8.18
48	2.09	0.18	62.9	5.39	5.99	6.96
49	2.43	0.20	63.5	5.81	5.73	7.42
50	1.94	0.19	67.7	6.89	7.32	6.32
51	2.26	0.19	62.6	5.34	5.61	6.52
52	2.38	0.22	64.9	5.61	5.93	8.79
53	4.53	0.27	78.1	5.35	2.19	14.10
54	2.48	0.21	66.1	5.83	6.05	7.24
55	2.01	0.18	62.8	5.63	6.52	5.88
56	2.32	0.19	63.8	5.57	5.56	6.94
57	2.46	0.24	60.3	5.57	6.36	8.64
58	2.33	0.18	62.9	5.55	5.11	6.34
59	2.00	0.20	62.7	5.76	6.77	7.86
60	2.41	0.22	62.3	5.76	6.45	8.12
61	2.46	0.20	62.3	5.52	5.66	6.73
62	2.64	0.22	64.2	5.93	6.36	6.84

工况 编号	$A_{\max}/$ (m/s^2)	$a_{\text{rms}}/$ (m/s^2)	$V_{\text{L,Z,max}}/$ dB	$T_{\text{d90\%}}/$ s	$T_{50\%}/$ s	$S_{\text{a,max}}/$ (m/s^2)
103	4.35	0.26	78.9	5.45	2.61	15.30
104	3.00	0.22	63.9	5.38	5.02	10.26
105	2.03	0.17	62.8	5.63	6.50	6.19
106	2.24	0.18	63.4	5.70	5.94	6.55
107	2.60	0.24	60.5	5.45	5.81	7.86
108	2.30	0.19	63.8	5.50	6.32	6.47
109	2.27	0.20	63.2	5.54	5.87	7.03
110	2.33	0.19	62.1	5.39	5.73	6.34
111	2.72	0.22	65.3	5.75	6.17	8.47
112	2.89	0.22	65.3	5.34	5.15	8.41
113	1.92	0.17	62.8	5.60	6.37	5.98
114	2.10	0.19	65.1	5.63	6.42	7.65
115	2.66	0.24	60.0	5.55	6.06	8.11
116	2.57	0.19	63.2	5.46	5.52	6.52
117	2.30	0.20	64.7	5.59	6.19	6.56
118	2.42	0.19	62.5	5.41	5.20	7.00
119	2.77	0.22	64.0	5.74	5.91	9.00
120	1.00	0.11	64.3	11.38	11.65	2.77
121	1.23	0.13	60.5	7.99	9.43	5.16
122	2.34	0.19	65.2	5.65	5.86	6.05
123	2.71	0.24	60.4	5.62	6.01	8.59

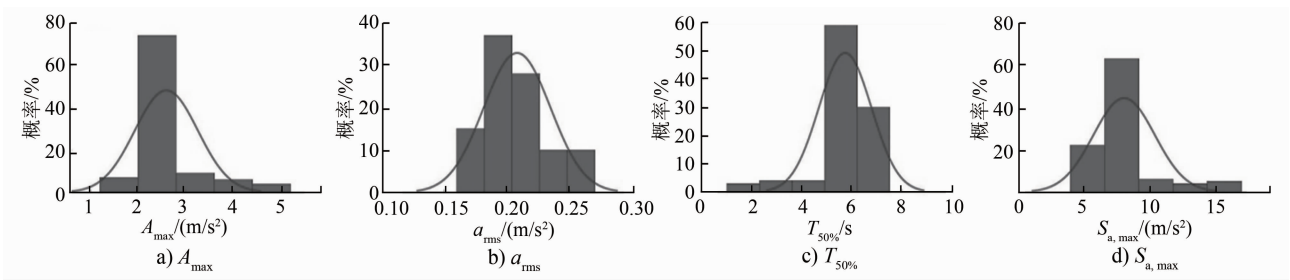


图 7 典型时频参数统计特征分布图

图 8 计算了 123 次随机样本的加速度反应谱,并给出了其算术平均值。计算反应谱时,阻尼比取 5%,起始周期取 0.000 2 s。从图 8 可以看出,反应谱呈先增大后减小的特征,50 Hz 以上反应较大,10 Hz 以下基本趋于常数,100 Hz 左右有一个典型的峰值。利用平均加速度反应谱、平均加速度峰值和持时,以及三角级数法人工合成具有统计意义的加速度时程。图 9 给出了一条人工合成的加速度时程曲线。由图 9 可知,此加速度合成时程峰值为 2.5 m/s²,持时为 6 s。这一算法^[13]的技术路线基于随机振动理论,认为合成时程 $a(t)$ 是非平稳强度包络线 $f(t)$ 和平稳随机振动过程 $x(t)$ 的乘积,如式(3):

$$a(t)=f(t) \cdot x(t)$$

(3)

$x(t)$ 可通过设计用反应谱 $S_a(\omega, \xi)$ 转化而成的

功率谱 $S(\omega_k)$ 得到,如式(4):

$$x(t)=\sum_{k=1}^N b_k \cos (\omega_k+\varphi_k)$$

(4)

$$b_k=\sqrt{4 S\left(\omega_k\right) \Delta \omega}$$

其中: $S(\omega_k)$ 为第 k 个频率分量的双侧功率谱值; $\omega_k=k \Delta \omega, \Delta \omega$ 为频率间隔;相位 φ_k 为 $[0, 2 \pi]$ 间的随机数。利用功率谱和反应谱间的关系,以及 $S_a(\omega, \xi)$ 换算出功率谱 $S(\omega)$,见式(5):

$$S(\omega)=\left[\frac{2 \xi}{\omega \pi} S_a^2(\omega, \xi)\right] /\left[-2 \ln \left(-\frac{\pi \ln p}{\omega t}\right)\right]$$

(5)

其中: ω 为频率; ξ 为反应谱计算时的阻尼比; t 为振动持时; p 为合成振动的谱值不超过目标谱值的概率,一般取 0.85 ~ 0.95,取值越高代表拟合精度越高。

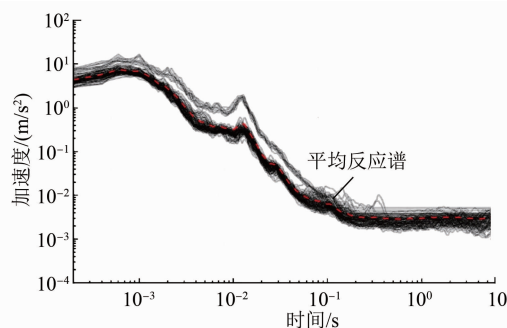


图8 加速度反应谱分布及平均反应谱曲线

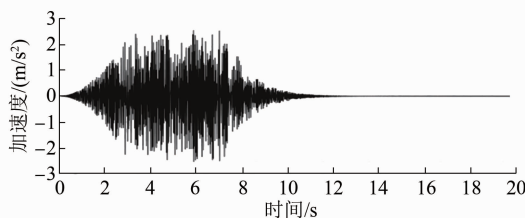


图9 时频参数可调的设计用人工合成振动时程曲线

经大量样本时域分析可以看出,地铁加速度时程呈明显的非平稳特性。但都具备共同的3阶段特性,即开始阶段,随着列车车头开始靠近测点,振动迅速从小增大;接着随着多辆编组的列车通过测点,振动保持平均强度不变;然后随着列车车尾驶离测点,振动进入衰减阶段,振动逐渐减小。本研究采用的强度包络线 $f(t)$ 采用如式(6)所示的三段式:

$$f(t) = \begin{cases} (t/t_1)^2, & t \leq t_1 \\ 1, & t_1 \leq t \leq t_2 \\ e^{-(t_2-t)}, & t > t_2 \end{cases} \quad (6)$$

其中: t_1 和 t_2 分别为强振开始和结束的时间,二者差值可取50%阈值持时。

4 结语

基于国内某地铁隧道断面123次连续过车时(车速为75 km/h)洞壁加速度振动数据分析,得到具有统计学意义的振动时频特性,具体结论如下:

1) \bar{A}_{\max} 为2.5 m/s², $V_{L,Z,\max}$ 为64.7 dB。

2) $T_{90\%}$ 为5.77 s, $\bar{T}_{50\%}$ 为5.87 s,两种持时均可在实际工作中采用,具有工程意义的加速度持时可取6 s。

3) $\bar{S}_{a,\max}$ 约为8 m/s²,对 \bar{A}_{\max} 的平均放大倍数约为3.2。

4) 频谱分析结果表明,隧道洞壁振动加速度以50 Hz以上中高频为主,但经土层传播后,50 Hz以上的振动衰减快,而50 Hz以下振动经土层放大并向外辐射造成振动。分析地铁周边建筑结构和人员反应时按文献[14]取1~80 Hz是有保证的。

5) 通过计算获取平均加速度反应谱,结合振动峰值和持时等参数,可用于人工合成具有统计特征意义、多参数可调节等特点的设计用源强振动时程。

参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会.城市轨道交通2018年度统计与分析报告[R].北京:中国城市轨道交通协会,2019.
- [2] 郭玉斌,宋瑞祥,曾钦娥,等.地铁所致某音乐排练厅室内二次结构噪声测试与仿真[J].噪声与振动控制,2017(6):120.
- [3] 陈国兴,苏晓梅,陈斌.地铁列车运行引起的环境振动评价[J].防灾减灾工程学报,2008(1):70.
- [4] 夏禾,吴萱,于大明.城市轨道交通系统引起的环境振动问题[J].北方交通大学学报,1999(4):7.
- [5] 闫维明,聂晗,任珉,等.地铁交通引起的环境振动的实测与分析[J].地震工程与工程振动,2006(4):187.
- [6] 黄强,姚湘静,黄宏伟,等.地铁运行时轨道-隧道-地层振动实测与分析[J].振动·测试与诊断,2018(2):260.
- [7] 郭玉斌,张斌,刘应华,等.地铁车辆段库上建筑环境振动影响规律研究[J].铁道学报,2015(8):98.
- [8] THOMSON W T. Theory of Vibration with Applications[M]. 5th edition. U.K., London: Prentice Hall, 1997.
- [9] Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement. Product data of piezoelectric accelerometer-DeltaTron Accelerometer Type 8344[Z]. Skodsborg, Denmark: Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S(HQ), 2015.
- [10] 北京东方振动与噪声研究所. INV3062T型云智慧采集仪详细信息[Z]. 北京:北京东方振动与噪声研究所,2015.
- [11] Modal Shop Inc. Overview of 9110D Portable Shaker Vibration Calibrator[Z]. Cincinnati: Modal Shop Inc., 2014.
- [12] 刘恢先.论地震力[J].土木工程学报,1958(2):86.
- [13] 袁一凡,田启文.工程地震学[M].北京:地震出版社,2012.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准:GB/T 50355—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.

(收稿日期:2019-04-13)

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www.umat1998.com