

DOI: 10.11779/CJGE201509005

季节冻土区铁路路基振动加速度现场监测

王子玉^{1, 2}, 凌贤长¹, 惠舒清^{1, 3}

(1. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 琼州学院, 海南 三亚 572022,

3. 神华包神铁路集团公司, 内蒙古 包头 014014)

摘 要: 为研究季节冻土区铁路路基在不同冻结时期振动特性, 针对典型深季节冻土区大庆分别在冻结期、春融期和正常期进行列车行驶路基振动加速度的现场监测。研究表明: ①季节冻区路基振动加速度有效值衰减曲线可用负指数函数拟合; ②路基振动强度受列车类型、行驶速度、列车编组、列车载重等因素共同影响; ③受环境温度变化的影响, 在冻结期自路基基床表层向下冻结, 这部分冻结层使路基强度和刚度增加, 阻尼比减小, 因而导致加速度幅值在纵向和竖向被放大而在水平方向被抑制; ④在春融期自基床表层向下开始解冻, 由于其下部土体仍处于冻结状态, 融化产生的水分无法及时从底部排出, 于是形成饱水层使结构层强度大大降低, 此时在上部列车荷载作用下, 加速度幅值在纵向和竖向被抑制而在水平略有增加。

关键词: 季节冻土区; 现场监测; 铁路路基; 振动反应; 加速度幅值

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)09-1591-08

作者简介: 王子玉(1979-), 女, 博士研究生, 主要从事交通荷载下冻土路基振动特性研究。E-mail: iamwziyu@163.com。

Field monitoring of vibration response of subgrade in a seasonally frozen region

WANG Zi-yu^{1, 2}, LING Xian-zhang¹, HUI Su-qing^{1, 3}

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Qiongzhou University, Sanya 572022, China;

3. Shenhua Baoshen Railway Group Corporation, Baotou 014014, China)

Abstract: To investigate the dynamic characteristics of ground vibrations induced by moving vehicles in a seasonally frozen region, three field experiments are carried out in the Daqing area of China in various periods throughout the year, in spring, summer and winter, respectively. The results show that: (1) The negative exponent function is employed to fit the vibration attenuation laws of subgrade, and the fitting parameters are provided. (2) The acceleration response amplitudes are influenced by train types, train formation, travel speed and train load together. (3) In the frozen period, owing to the fact that the frozen embankment surface layer increases the rigidity of the system and reduces the energy dissipation capacity, the vibration responses in vertical and longitudinal directions are amplified rather than those in the unfrozen and thawing period. In the same reason, the frozen embankment surface layer certainly restricts the lateral vibration role and reduces its response. (4) In the spring melting period, the permafrost melts in two ways, and there is still a certain thickness of the frozen layer in the middle of the embankment, which will prevent the water content in the embankment surface from penetrating and will melt in spring. So the strength and stiffness greatly decrease, and under the train load, the acceleration amplitudes are reduced in the vertical and longitudinal directions and enhanced in the lateral direction.

Key words: seasonally frozen region; field monitoring; railway subgrade; vibration response; acceleration amplitude

0 引 言

由于季节冻土区铁路路基经受周期性冻融循环作用,加之列车行驶振动双重作用是路基病害根本原因。现场监测作为一种基本手段,较早应用于轨道路基动力学特性研究。这些研究工作主要包括动应力、加速度等动力响应指标的时域幅值分布规律研究以及频谱分析。Auersch 研究表明,当列车行驶速度接近瑞利波速时,轨道和地基中会产生共振现象,从而带来过

大的振动^[1-2]。1998 年,瑞典国家铁路局测试了 X2000 高速列车在软土地基上运行时的振动,发现了临界速度的存在^[3]。Takemiya^[4]分析了日本东海道新干线上的测试数据,发现高速列车对路基所产生脉冲振动与轮

基金项目: 国家自然科学基金项目(41430634); 神华巴准重载铁路路基稳定性评价与病害控制技术项目(201212240384); 国家重点基础研究发展计划第四课题项目(2012CB026104)

收稿日期: 2014-07-12

对间距相对应, 提出可根据轮对间距和车辆数目预测路基振动特性。夏禾等^[5-6]针对列车行驶引起环境振动进行测试, 研究了交通荷载引起的周围建筑物振动及环境噪声问题, 获得动应力、加速度等动力响应指标时域幅值的分布规律。高广运等^[7]、翟婉明等^[8]、孙雨明等^[9]、聂志红等^[10]对秦沈客运专线路基不同时速下路基振动加速度进行了现场监测, 给出了高速轮轨列车产生的地面振动的基本规律及加速度衰减规律。屈畅姿等^[11]对武广高速铁路路基振动进行现场测试, 获得试验段路基动力响应的分布规律, 及试验段路基的固有频率。郑大为等^[12]对合宁快速客运专线膨胀土不同刚度路堤振动特性进行研究。陈斌等^[13]通过对南京某地进行列车振动监测研究了列车车型与车速对地面振动速度的影响, 给出了地面振动速度的频谱特性和衰减规律。孙志忠等^[14]青藏铁路某试验段块石路基与普通路基的地温特征进行监测对比分析。牛富俊等^[15]通过对冻土路基现场监测, 对青藏铁路冻土路基 2002 年以来的地温发展过程、热学稳定性及次生冻融灾害进行了分析, 总结出暖季和寒季路基振动衰减差异。田亚护等^[16]针对季节冻土区铁路路基进行变形监测并分析冻害原因。刘华等^[17]针对季节性冻土区高速铁路路基填料及防冻层设置进行研究, 分析防冻层厚度及设置深度对保温效果的影响。

可见, 针对季节冻土区铁路路基在不同季节进行路基振动监测, 以兹对比季节变化对季冻区铁路路基振动响应的影响罕见报道。鉴于此, 课题组对哈尔滨—满洲里铁路安达路段做了冻结期、春融期和正常期一个完整冻融循环的列车行驶路基振动反应的现场监测。通过分析比较不同列车类型、行驶速度、列车编组、振动方向、路堤冻融状态对加速度振动响应特性进行深入详细分析。旨在为我国寒区铁路路基设计、病害防治、灾害评估等提供客观依据。

1 现场监测概况

本次监测断面位于哈尔滨—满洲里铁路 K124+118 m 处, 为正常行驶双线平直路段。路堤及场地测点位于同一监测断面上, 以研究振动沿横断面的传播与衰减特性。监测断面位于东北典型的季节冻土区, 每年 3 月中旬至 5 月中旬为春融期, 10 月中旬至次年 3 月为冻结期, 其余时间为非冻结期。夏季最高气温 37℃, 冬季最低气温低于 -35℃, 地下水位埋深为 1.0~1.5 m, 最大冻深为 1.8~2.0 m, 属于我国季节冻土区路基冻融病害多发区之一。冬季监测时间为 2005 年 2 月 3 日, 路基表层下 1.8 m 内为冻结层; 春季监测时间为 2007 年 5 月 15 日, 路基表层下 1.0 m 内为融土层, 1.0~1.8 m 为冻结层; 夏季监测时间为 2007 年 9 月 4 日, 路基无冻土层。现场监测路基地层及测点布置见图 1^[18-19]。

监测仪器采用中国国家地震局工程力学研究所研制开发的 891-2 型测振仪, 加速度分辨率 1×10^{-5} , 通频带 0.5~80 Hz。采集设备应用中国东方振动和噪声技术研究所研制的 INV306 信号采集与分析系统。

监测点 C1 布置于路肩 (距上行轨道中心 2.5 m), C2 布置于基床表层 (距上行轨道中心 4.5 m), C3 布置于基床底层 (距上行轨道中心 6.8 m), C4 布置于路基场地 (距上行轨道中心 8.9 m)。各测点均同时监测竖向、平行于轨道方向和垂直轨道方向振动加速度, 路堤断面形状、地层结构和测点布置见图 2。每一组数据监测结果包括四个监测点在水平方向 (Y)、沿铁轨方向 (X) 和竖向 (Z) 的振动加速度时程。

2 加速度时程响应

以冬季 (冻结期) 典型快速客车 T507 ($v=140$ km/h, 列车编组: 1 节机车+10 节客车车厢) 和货车 ($v=60$ km/h, 列车编组: 1 节机车+56 节载物车厢)

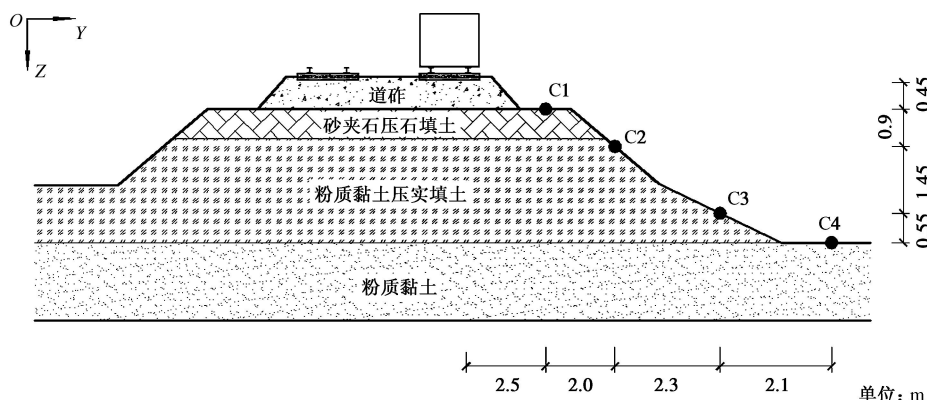


图 1 路基地层结构与测点布置

Fig. 1 Geometry of monitoring section and layout of sensors in Daqing-Harbin railway

为例, 路肩测点 C1 和路基场地测点 C4 在水平向、纵向和竖向的加速度时程曲线见图 2。由图可见, 各点振动上下基本对称, 在路肩测点 C1, 3 个方向加速度时程可以清晰分辨出每一组轮对通过时引起的加速度峰值循环; 而在路基测点 C4, 振动加速度时程曲线形状趋于纺锤形, 轮对引起的加速度峰值循环不明显。

由图 2 (f) ~ 2 (g) 可见, 列车 T507 机车在 C1 点沿水平向和竖向加速度幅值分别为 0.8 m/s^2 和 1.9 m/s^2 , 明显大于列车车厢通过时幅值 (约 0.4 m/s^2 和 1.1 m/s^2), 这是由于该次列车机车轴重较车厢大。由图 2 (c)、2 (d) 可见, 由于货车车厢载重量大, 货车机车加速度幅值未较车厢明显增加。

对比图 2 (c)、2 (d) 和 (g) ~ (h), 从测点 C1 到 C4, 客车 T507 竖向加速度幅值由 1.8 m/s^2 降至 0.15 m/s^2 , 货车竖向加速度幅值由 2.9 m/s^2 降至 0.2 m/s^2 。表明加速度幅值在路基表层点最大, 随距线路中心水平距离增加而快速衰减。

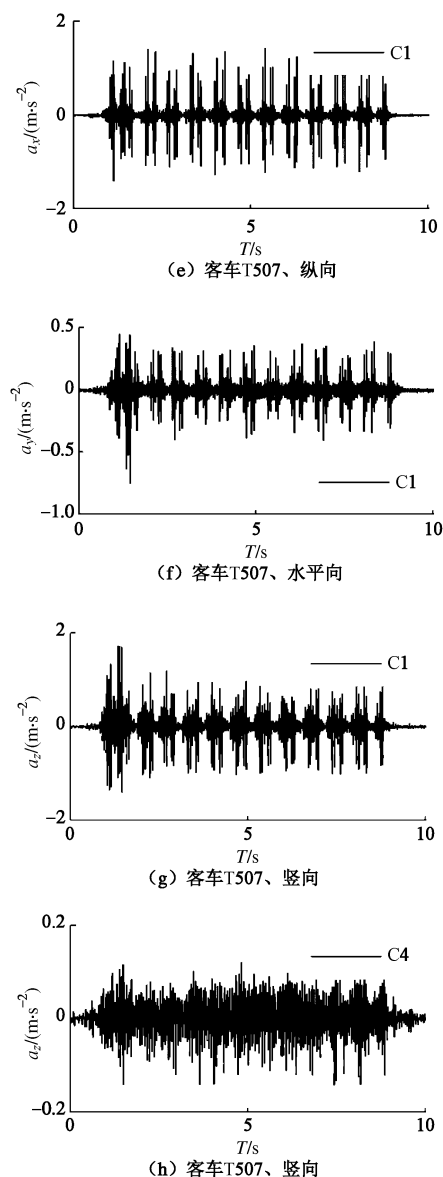
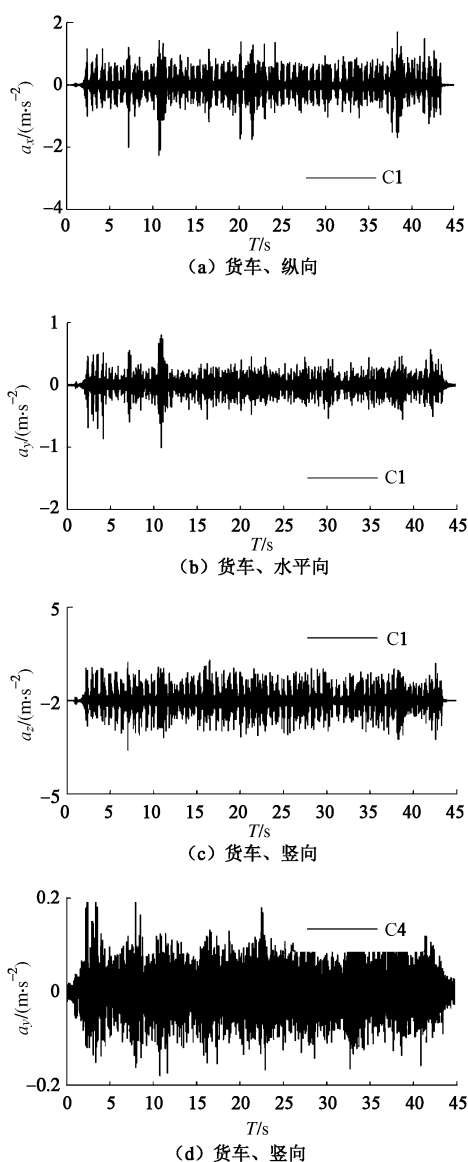


图 2 测点 C1 和 C4 加速度时程曲线

Fig. 2 Time histories of acceleration at points C1 and C4

由以上分析可见, 货车与客车在 3 个方向加速度时程在距轨道较近的路肩处峰值循环清晰可见, 加速度幅值均随着距钢轨距离的增大而迅速衰减, 可见, 路基阻尼对高频率衰减作用比较大。由于客车机车轴重大于车厢, 其机车引起的竖向与水平向加速度幅值大于车厢引起的加速度幅值, 而货车车厢载重较大, 故机车与车厢引起的加速度幅值相近, 由此可见列车重量对加速度幅值影响较明显。

3 加速度衰减规律

3.1 定义加速度有效值

根据加速度传感器的布置定义空间坐标方向: 平行于轨道延伸方向为纵向 (X 向), 垂直于轨道延伸的水平向为横向 (Y 向), 垂直于轨道延伸的铅垂向为竖向 (Z 向)。列车行驶铁路路基振动响应为频率

与振幅均相当复杂的随机复合振动，现场加速度监测结果为每次列车通过时测点振动加速度时程曲线。为研究振动加速度反应的变化规律与衰减特性，定义振动反应加速度有效值的大小， X, Y, Z 方向分别记为 $|a_x|_{\text{val}}, |a_y|_{\text{val}}, |a_z|_{\text{val}}$ ，见下式：

$$|a_i|_{\text{val}} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{j=1}^N |a_{ij}|^2} \quad (i = X, Y, Z; j = 1, 2, 3 \cdots, N), \quad (1)$$

式中， $i = X, Y, Z$ 代表空间坐标方向， a_{ij} 为某列车通过时采集的 i 方向第 j 个加速度记录， N 为本次列车通过时采集加速度记录个数。

3.2 加速度衰减规律

本文应用加速度有效值反应加速度变化规律与衰减特性。表 1 为 3 个季节现场监测加速度有效值统计表。由表中统计数据分析表明，振动加速度有效值及衰减曲线受季节、振动方向、列车类型、行驶速度、列车编组等因素共同影响。随距轨道距离的增加，各次列车幅值在 3 个方向均衰减，且衰减速率不同，至路基表面 C4 点时各次列车振动加速度有效值均减小至 $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 以下。

以夏季（非冻结期）为例，对 8 辆典型列车在 C1 至 C4 点在 3 个振动方向的加速度有效值分布，及随距轨道距离增加而衰减的规律进行详细分析。图 3 为路基各测点在 3 个振动方向的加速度有效值及衰减拟合曲线。由图可见，衰减曲线可由负指数函数 $|a|_{\text{val}} = Ae^{-Bx}$ 拟合，式中 A 越大代表有效值最值越大， B 越大代表衰减越快。3 个方向拟合公式分别为：纵向为 $|a_x|_{\text{val}} = 0.1748e^{-0.2286x}$ ，横向为 $|a_y|_{\text{val}} = 0.1214e^{-0.1338x}$ ，竖向为 $|a_z|_{\text{val}} = 0.3529e^{-0.3388x}$ 。分析可见，在夏季以竖向振动为主，纵向振动次之，横向振动最小，且各方向加速度衰减速度不同，由 C1 至 C4 点加速度有效值竖向衰减最快约 77%~89%，纵向衰减其次约 70%~78%，而横向衰减最小约 56%~64%。

4 振动加速度影响因素

4.1 列车类型、车辆编组及行车速度影响

以非冻结期为例，分析加速度有效值在距轨道不同水平距离点的分布。由图 4 可见，布置于路肩的 C1 点各次列车在 3 个方向的加速度有效值关系为：T507>货车>1815>4071>k129。

表 1 哈大铁路 K124+118 列车行驶路基振动加速度有效值统计表

Table 1 Amplitude statistics of subgrade vibration acceleration from trains at section K124+118 of Harbin-Daqing railway

季节	车型 车次	速度 (km·h ⁻¹)	车辆 编组	路基(C1 点)			路基(C2 点)			路基(C3 点)			路基(C4 点)		
				$ a_x _{\text{val}}$	$ a_y _{\text{val}}$	$ a_z _{\text{val}}$	$ a_x _{\text{val}}$	$ a_y _{\text{val}}$	$ a_z _{\text{val}}$	$ a_x _{\text{val}}$	$ a_y _{\text{val}}$	$ a_z _{\text{val}}$	$ a_x _{\text{val}}$	$ a_y _{\text{val}}$	$ a_z _{\text{val}}$
春季	货车	60	1+61	0.1037	0.2281	0.1754	0.1188	0.1027	0.1243	0.0152	0.0653	0.0571	0.0307	0.0001	0.0384
	普客 1	65	2+15	0.0708	0.1343	0.1082	0.0889	0.0673	0.0739	0.0129	0.0347	0.0315	0.0194	0.0001	0.0243
	普客 2	68	1+07	0.1109	0.2183	0.2033	0.1583	0.1141	0.1298	0.0126	0.0319	0.0295	0.0184	0.0001	0.0227
	普客 2509	68	1+08	0.062	0.1389	0.1245	0.0918	0.0689	0.0831	0.0136	0.0393	0.0384	0.0201	0.0001	0.0276
	普客 k39	70	1+18	0.0619	0.1215	0.1156	0.0888	0.0622	0.0734	0.0128	0.0342	0.0353	0.0189	0.0001	0.0249
	普客 3	72	1+17	0.0587	0.1171	0.1121	0.0851	0.0611	0.0709	0.0128	0.035	0.0336	0.0184	0.0001	0.0242
	普客 4	73	1+11	0.054	0.1181	0.0998	0.0853	0.0571	0.0714	0.0135	0.035	0.0352	0.0194	0.0000	0.0245
	特快 T507	140	1+10	0.0949	0.1672	0.154	0.1139	0.1023	0.0975	0.0143	0.064	0.0503	0.0315	0.0001	0.0375
夏季	货车	60	1+56	0.1061	0.1021	0.1578	0.0768	0.0851	0.0816	0.0487	0.0648	0.0547	0.0293	0.0408	0.0317
	特快 T507	140	1+10	0.1541	0.1224	0.1958	0.1119	0.1119	0.0863	0.0614	0.0903	0.0569	0.0341	0.054	0.0442
	快客 k129	68	1+11	0.0646	0.0595	0.1336	0.0448	0.057	0.0503	0.0276	0.0341	0.0268	0.0153	0.0214	0.0149
	普客 4071	69	1+17	0.0904	0.0709	0.1476	0.054	0.0648	0.0588	0.0287	0.0362	0.0367	0.0176	0.027	0.0197
	普客 2509	69	1+18	0.0894	0.0716	0.1509	0.0545	0.0657	0.0595	0.0289	0.0367	0.0374	0.0179	0.0285	0.02
	动车 N45	69	1+8	0.0827	0.07	0.134	0.0579	0.0673	0.0606	0.0295	0.0375	0.0377	0.019	0.0281	0.0204
	普客 1815	69	2+15	0.1029	0.0869	0.1637	0.0597	0.0768	0.0637	0.0321	0.0435	0.04	0.0204	0.0323	0.0243
	快客 k39	84	1+19	0.0926	0.0786	0.155	0.0577	0.0681	0.0633	0.0324	0.0417	0.0402	0.021	0.032	0.0229
冬季	货车	60	1+60	0.2283	0.0966	0.3624	0.1351	0.0545	0.1101	—	—	—	0.0202	0.0264	0.0428
	普客 1	78	1+8	0.1627	0.0721	0.232	0.0986	0.0413	0.0771	—	—	—	0.0183	0.0481	0.0232
	普客 2	122	—	0.1463	0.0671	0.2489	0.0972	0.0381	0.0735	—	—	—	0.0137	0.0194	0.0262
	快客 T507	140	1+10	0.2233	0.0799	0.2583	0.1259	0.0526	0.1014	—	—	—	0.019	0.0243	0.0357

注：加速度单位（m·s⁻²）。

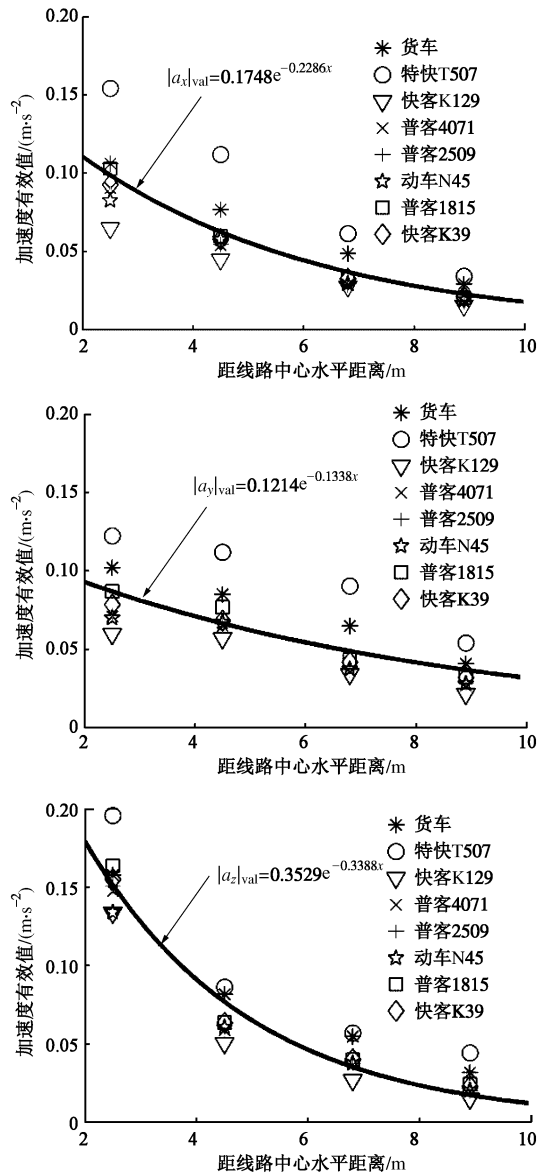


图3 路基振动加速度有效值衰减规律(夏季)

Fig. 3 Attenuation rules of subgrade vibration acceleration in summer

比较各次客车车型、车速和编组可见: T507 加速度有效值最大, 这是由于仅管其载客车厢数量最小, 但其行驶速度为 140 km/h, 是其它车辆行驶速度的 2 倍以上; 1815 (2+15) 和 4071 (1+17) 车厢数量相近, 且行驶速度均为 69 km/h, 但 1815 含 2 辆机车, 其有效值大于 4071; 而对于 k129, 该次列车行驶速度 (68 km/h) 小于其它客车, 且客车车厢数量亦小于其它客车, 因此, 加速度有效值最小。货车载重量大且载物车厢数为 56 节远大于其它车辆, 其加速度有效值仅次于 T507。

综上所述, 列车行驶振动加速度幅值受列车类型、行驶速度、列车编组等因素共同影响。由于货车载重量大且载物车厢数较大, 因此, 货车加速度幅值大于客车; 列车编组相近, 列车行驶速度越快, 其加速度

幅值越大; 行驶速度相近的车辆, 列车车厢数越多载重量越大, 其加速度幅值越大。

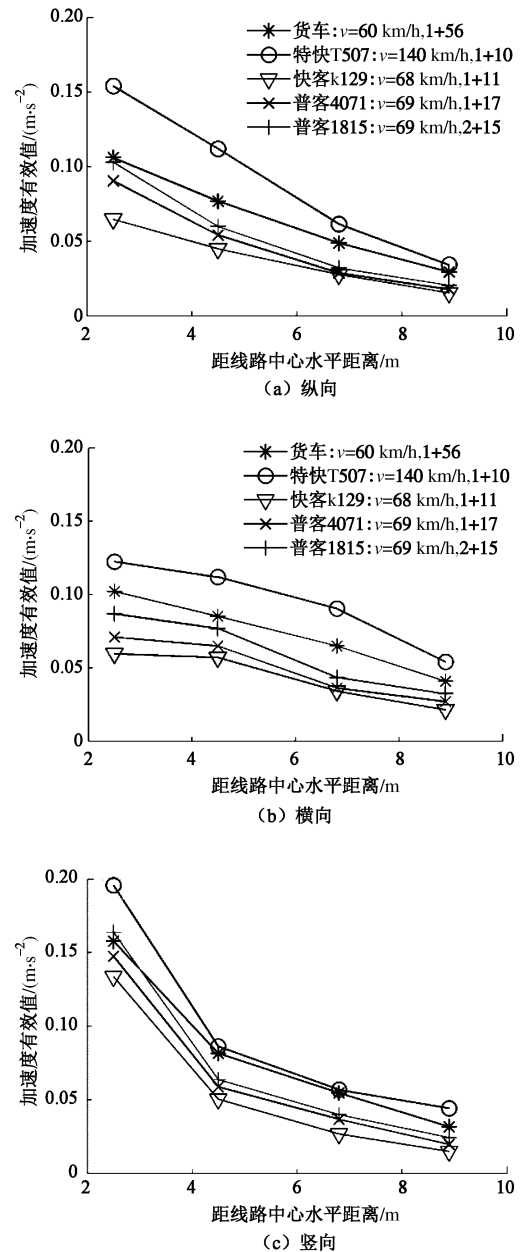


图4 加速度有效值随距轨道距离增加的衰减规律

Fig. 4 Attenuation of characteristic acceleration with distance to railway track

4.2 振动方向的影响

对春季 (春融期)、夏季 (非冻结期) 和冬季 (冻结期) 3 个典型时期现场监测列车振动加速度有效值分别进行统计分析, 并对每一个季节在 X, Y 和 Z 三个方向的衰减规律分别应用负指数函数 $|a|_{\text{val}} = Ae^{-Bx}$ 进行拟合, 衰减曲线和拟合公式见图 5。

由图 5 (a)、(b) 可见, 在冬季和夏季, 在路肩测点 C1 均为竖向振动最大, 纵向次之, 水平横向加速度振动有效值最小。而由图 5 (c) 可见, 在春融期

测点 C1 水平向加速度有效值最大, 竖向次之, 纵向最小。

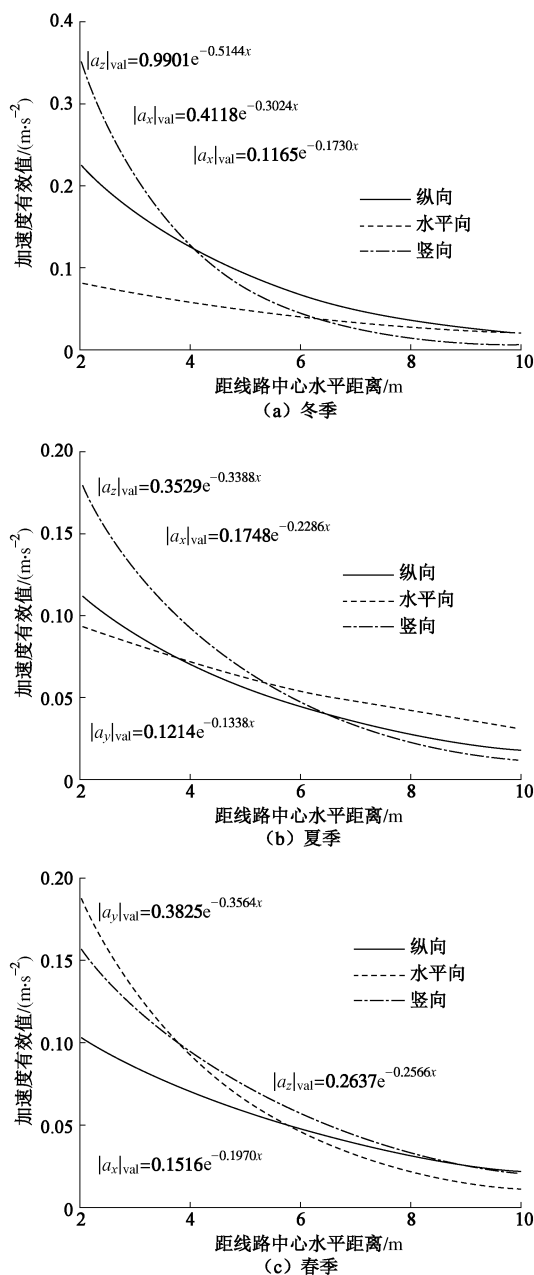


图 5 不同振动方向加速度幅值衰减拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves of acceleration amplitude attenuation in different directions

这是由于在冻结期, 冻土层刚度增大, 阻尼减小, 使得冻土层对竖向和纵向振动有扩大作用, 而对横向振动有一定约束作用。因此, 与非冻结期相比, 冻结期横向振动减小, 竖向和纵向增大。至春融期, 冻土层开始双向融化, 而路基中间仍存在一定厚度冻结层, 它将阻止路基表层融土中水分向下渗透, 而使路基表层的含水量增大, 同时强度和刚度亦下降, 因此对横向振动的约束能力也降至最低。因此, 与非冻结期相比, 在春融期横向振动增加, 竖向和纵向振动降低。

4.3 季节影响

以客运列车 T507 (列车编组 1+10, $v=140$ km/h) 为例, 比较同一列车在春季、夏季和冬季在 3 个方向的振动加速度幅值及其衰减规律。由图 6 (a) 和 (c) 可见, 对于纵向和竖向振动方向, C1 测点加速度幅值在冻结期最大, 分别为 1.4 m/s^2 和 1.8 m/s^2 ; 在非冻结期加速度幅值低于冻结期, 且分别为 0.8 m/s^2 和 1.1 m/s^2 ; 在春融期其加速度幅值最低, 分别为 0.5 m/s^2 和 0.7 m/s^2 。但是对于水平横向, C1 侧点加速度幅值在非冻结期和春融期相近 (约为 1.0 m/s^2), 且均大于冻结期加速度幅值 (约 0.7 m/s^2)。

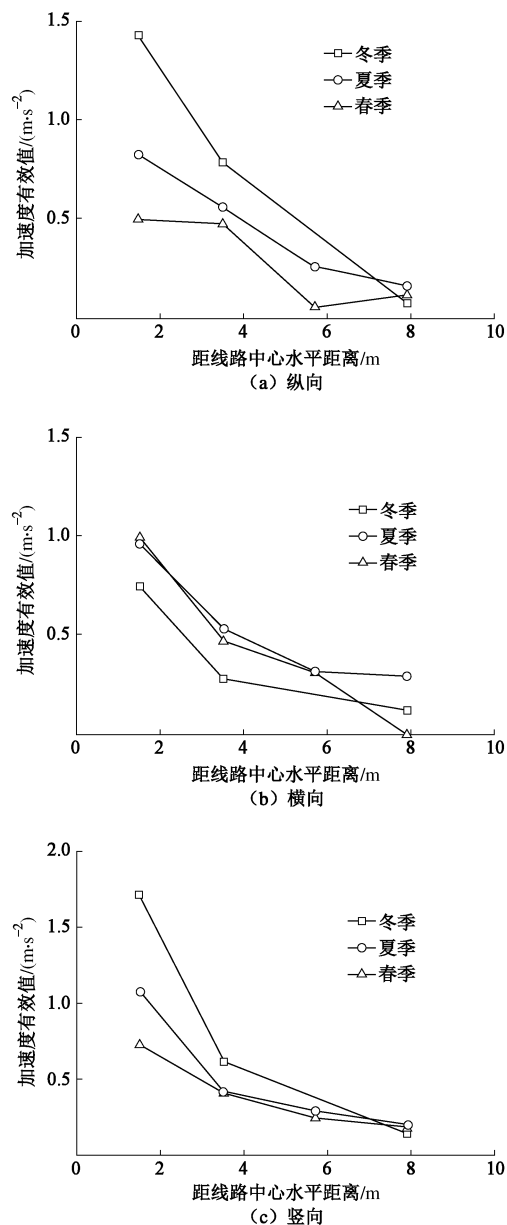


图 6 客车 T507 在不同冻结时期加速度幅值衰减规律

Fig. 6 Attenuation of acceleration amplitudes in different seasons

以非冻结期路基振动加速度为基准, 冻结期加速度幅值在纵向和竖向放大, 在水平向加速度幅值缩小; 而在春融期加速度幅值在纵向和竖向缩小, 而在水平方向有较小提高。这是由于受环境温度变化的影响,

在冻结期自基床表层向下冻结, 在这个冻结过程中, 基床下部水分不断地向上迁移, 在冻结锋面附近聚结成冰, 这部分冻结层使路基强度和刚度增加^[20], 因而导致加速度幅值在纵向和竖向被放大而在水平方向被抑制。在春融期, 气温逐渐回暖, 自基床表层向下开始解冻, 由于其下部土体仍处于冻结状态, 融化产生的水分无法及时从底部排出, 于是形成饱水层使结构层强度大大降低, 此时在上部列车荷载作用下, 加速度幅值在纵向和竖向被抑制而在水平向略有增加。

由以上分析可见, 在冻结期路基表面冻结层厚度越大, 列车行驶引起振动加速度幅值在纵向和竖向被放大而在水平方向被抑制越明显。而对于春融期, 由于受融土与冻结夹层共同影响, 加之融化产生的水分无法及时从底部排出而形成饱水层, 使路基结构层强度显著降低, 不同融化阶段加速度振动响应较复杂, 此部分内部将在后续工作中深入进行研究。

5 结 论

通过对哈尔滨—满洲里铁路安达路段现场加速度监测数据进行分析, 比较春季、夏季和冬季 3 个季节在水平方向、沿铁轨方向和竖向振动方向, 不同车次列车(包括列车类型、行驶速度、列车编组)通过时, 各典型监测点(路肩测点 C1、基床表层测点 C2、基床底层测点 C3 和路基地点 C4)的加速度时程曲线、加速度幅值衰减规律, 得到在深季节冻土区路基冻融状态、振动方向、车辆行驶特性等因素的影响下列车振动加速度特性, 结论如下:

(1) 列车运行过程中在距轨道近处, 振动主要是由列车周期性的轮轨作用力直接作用激发, 加速度时程可以清晰分辨出每一组轮对通过时引起的加速度峰值循环; 在距轨道远处, 受振动叠加作用, 多激励共同作用的振动加速度时程曲线形状趋于纺锤形。

(2) 加速度有效值衰减曲线可由负指数函数 $|a|_{\text{val}} = Ae^{-Bx}$ 拟合, 拟合值 A 越大加速度有效值极值越大, B 越大, 其衰减越快。

(3) 列车行驶振动加速度幅值由列车类型、行驶速度、列车编组等因素共同影响。列车编组相近, 列车行驶速度越快, 其加速度幅值越大; 行驶速度相近的车辆, 列车车厢数越多载重量越大, 其加速度幅值越大。

(4) 在季节冻土区, 不同时期列车引起的 X 、 Y 和 Z 三个方向路基振动加速度幅值及其衰减速率不同。在冻结期与非冻结期, Z 向加速度幅值最大, X 向次之, Y 向最小; 而在春融期 Y 向加速度幅值被放大明显。

(5) 受环境温度变化的影响, 在冻结期加速度幅值在纵向和竖向被放大, 在水平向减小; 而在春融期, 加速度幅值在纵向和竖向被抑制而在水平向略有提高。

参考文献:

- [1] AUERSCH L. The effect of critically moving loads on the vibrations of soft soils and isolated railway tracks[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, **310**(3): 587 - 607.
- [2] AUERSCH L. Wave propagation in the elastic half-space due to an interior load and its application to ground vibration problems and buildings on pile foundations[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, **30**(10): 925 - 936.
- [3] MADSHUS C, KAYNIA A M. High-speed railway lines on soft ground: dynamic behavior at critical train speed[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, **231**(3): 689 - 701.
- [4] TAKEMIYA H. Substructure simulation of inhomogeneous track and layered ground dynamic interaction under train passage[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005, **131**(7): 699 - 711.
- [5] XIA H, ZHANG N, CAO Y M. Experimental study of train-induced vibrations of environments and buildings[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, **280**: 1017 - 1029.
- [6] 夏 禾. 交通环境振动工程[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (XIA He. Traffic induced environmental vibrations and controls[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))
- [7] 高广运, 李志毅, 冯世进, 等. 秦沈铁路列车运行引起的地面振动实测与分析[J]. 岩土力学, 2007, **28**(9): 1817 - 1822, 1827. (GAO Guang-yun, LI Zhi-yi, FENG Shi-jin, et al. Experimental results and numerical predictions of ground vibration induced by high-speed train running on Qinghuangdao-Shengyang railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(9): 1817 - 1822, 1827. (in Chinese))
- [8] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2007. (ZHAI Wan-ming. Vehicle-Track coupling dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [9] 孙雨明. 铁路交通产生的地面振动与排桩隔振[D]. 上海: 同济大学, 2003. (SUN Yu-ming. Ground vibration due to railway traffic and vibration isolation by piles in row[D]. Shanghai: Tongji University, 2003. (in Chinese))
- [10] 聂志红, 李 亮, 刘宝琛, 等. 秦沈客运专线路基振动测试分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(6): 1067 - 1071. (NIE Zhi-hong, LI Liang, LIU Bao-chen, et al. Testing and

- analysis on vibration of subgrade for Qinghuangdao-Shenyang railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(6): 1067 - 1071. (in Chinese))
- [11] 屈畅姿, 王永和, 魏丽敏, 等. 武广高速铁路路基振动现场测试与分析[J]. 岩土力学, 2012, **33**(5): 1451 - 1456. (QU Chang-zi, WANG Yong-he, WEI Li-min, et al. In-situ test and analysis of vibration of subgrade for Wuhan-Guangzhou high-speed railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(5): 1451 - 1456. (in Chinese))
- [12] 郑大为, 王炳龙, 周顺华, 等. 合宁快速客运专线膨胀土不同刚度路堤振动特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(增刊 2): 4204 - 4208. (ZHENG Da-wei, WANG Bing-long, ZHOU Shun-hua, et al. Study on vibration character of expansive soil embankments with different rigidities along Hefei-Nanjing rapid railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S2): 4204 - 4208. (in Chinese))
- [13] 陈 斌, 陈国兴, 朱定华, 等. 轨道交通运行引起的场地振动试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, **27**(3): 312 - 317. (CHEN Bin, CHEN Guo-xing, ZHU Ding-hua, et al. Experimental study of ground vibration caused by rail transit[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007, **27**(3): 312 - 317. (in Chinese))
- [14] 孙志忠, 马 巍, 李东庆. 青藏铁路北麓河试验段块石路基与普通路基的地温特征[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(2): 303 - 308. (SUN Zhi-zhong, MA Wei, LI Dong-qing. Ground temperature characteristics of block stone embankment and traditional embankment at Beiluhe along Qinghai-Tibet railway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(2): 303 - 308. (in Chinese))
- [15] 牛富俊, 马 巍, 吴青柏. 青藏铁路主要冻土路基工程热稳定性及主要冻融灾害[J]. 地球科学与环境学报, 2011, **33**(2): 196 - 206. (NIU Fu-jun, MA Wei, WU Qing-bai. Thermal stability of roadbeds of the Qinghai-Tibet Railway in permafrost regions and the main freezing-thawing hazards[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, **33**(2): 196 - 206. (in Chinese))
- [16] 田亚护, 温立光, 刘建坤. 季节冻土区铁路路基变形监测及冻害原因分析[J]. 铁道建筑, 2010(7): 104 - 107. (TIAN Ya-hu, WEN Li-guang, LIU Jian-kun. Monitoring of roadbed deformation of railway and freezing hazard analysis in seasonal frozen ground[J]. Railway Engineering, 2010(7): 104 - 107. (in Chinese))
- [17] 刘 华, 牛富俊, 牛永红, 等. 季节性冻土区高速铁路路基填料及防冻层设置研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011(12): 2549 - 2557. (LIU Hua, NIU Fu-jun, NIU Yong-hong, et al. Study of design of filling material and setting anti-frost layer for high-speed railway roadbed in seasonally frozen regions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011(12): 2549 - 2557. (in Chinese))
- [18] 朱占元. 青藏铁路列车行驶多年冻土地路基振动反应与振陷预测[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009. (ZHU Zhan-yuan. Train-induced vibration response and subsidence prediction of permafrost subgrade along Qinghai-Tibet railway[D]. Harbin: Harbin Institute of University, 2009. (in Chinese))
- [19] 朱占元, 凌贤长, 张 锋, 等. 大庆季节冻区轨道结构振动反应夏季现场监测研究[J]. 哈尔滨工业大学, 2009, **41**(12): 41 - 45. (ZHU Zhan-yuan, LING Xian-zhang, ZHANG Feng, et al. Field monitoring on vibration response of railway structure in the seasonally frozen region in summer[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, **41**(12): 41 - 45. (in Chinese))
- [20] 徐学燕, 仲丛利, 陈亚明, 等. 冻土的动力特性研究及其参数确定[J]. 岩土工程学报, 1998(5): 77 - 91. (XU Xue-yan, ZHONG Cong-li, CHEN Ya-ming, et al. Research on dynamic characters of frozen soil and determination of it's parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998(5): 77 - 91. (in Chinese))