

高架铁路车站隔振技术研究*

孙玉华, 董大伟, 闫兵

(西南交通大学机械工程学院 成都, 610031)

摘要 针对动车组高速通过典型高架铁路车站时引起车站本身的结构振动问题,采用现场实测和仿真分析的方法。根据动车组及车站的结构参数,分别建立动车组动力学模型和车站的有限元模型。通过动力学仿真获取施加在车站轨道上的激振力,定义瞬态分析类型,通过强迫振动计算得到振动响应频谱,并与实测频谱对比,验证模型的正确性。在此基础上分析动车组高速过站时振动的传播规律和影响因素,并进行仿真研究。研究结果可为类似结构高架铁路车站的隔振问题提供参考。

关键词 高架铁路车站; 结构振动; 动力学模型; 有限元模型; 频谱; 隔振

中图分类号 TB535; TH115

引言

高速铁路以其速度快、运载量大,安全可靠等优点成为现代重要交通工具。高速铁路运行时产生的振动对沿线居民的生活和工作环境的影响引起了社会的广泛关注,国际上已将振动列为7大环境公害之一^[1]。对列车运营产生的振动问题的分析已经是高架铁路车站规划和建设中的重要环节。Kraemer研究了地铁产生振动的机理^[2]。Chua建立了轨道和轨道支撑的有限元模型,对轨道交通产生的振动进行了理论分析,得出的结论与实验结果吻合^[3]。文献[4-5]利用车桥系统模型研究了高架铁路的振动情况。

笔者在此工作的基础上,采用实测和仿真分析的方法建立动车组的动力学模型和高架铁路车站的有限元模型,分析振动的传播规律和影响因素并进

行仿真研究,提出了相应的隔振措施。

1 高架车站结构形式

如图1所示,高架铁路车站类型主要有3种^[6]: 框架结构体系;桥梁结构体系;组合结构体系。框架结构体系整体性好,刚度较高,质量分布比较均匀,因此抵抗地震的力比较强;其缺点是在不规则的荷载或桥上列车荷载的振动影响下会产生基础的不均匀沉降。桥梁结构体系因其重心在结构的上部,抗震能力较差,设计时要求有较高的刚度和良好的稳定性。组合结构体系由两个独立的部分组成:框架和桥梁。框架作为建筑物主体,桥梁支撑铁路线路。由于列车荷载仅仅由桥梁负担,在这种结构中列车引起的振动较前两种要小。笔者研究的高架铁路车站为组合结构体系类型。

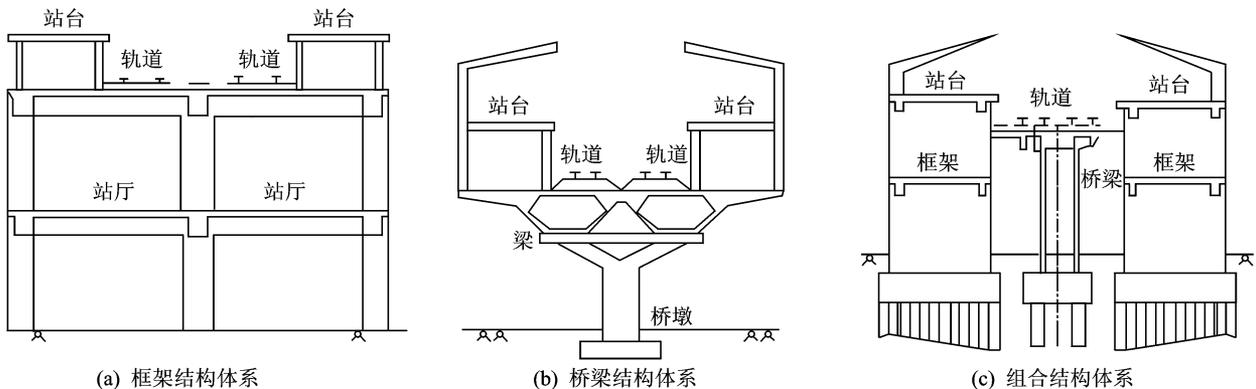


图1 高架铁路车站结构类型

2 振动模型的建立

笔者研究的振动模型包括车辆,桥梁和高架车站模型。为了简化计算,采用子结构法。这里采用车辆模型和桥梁高架车站模型两个子模型,分两步进行分析计算。

2.1 载荷的模拟

使用ADAMS/Rail 模块^[7],根据某型动车组的结构尺寸参数建立动车组的仿真模型,设置仿真车速为动车过站车速 320 km/h。

由于高架铁路轨道不平顺度的测量复杂,而且只测该站内的一段轨道不平顺度也并非十分有必要,所以在仿真时轨道的不平顺度参考某高速铁路段实测不平顺度的规律,这必然会导致振动响应分析中激振力成分的不同,造成实测频谱和仿真频谱有所差异。

仿真计算完成后,提取轮轨的垂向力和侧向力,作为施加在桥梁高架车站有限元模型上的激振力。

2.2 振动响应分析

使用有限元软件Ansys 根据组合结构体系的高架车站结构类型以及典型的承台桩基结构建立高架车站的有限元模型。桥梁模型包括钢轨、轨枕、道床、桥梁、橡胶支座、桥墩,承台以及桩基等。其中,桥墩,承台和桩基与地面之间采用桩-土模型,采用3D接触单元^[8]。在Ansys 中使用已经建立好的车站有限元模型(包含桥梁、站台和地面),定义瞬态分析类型。定义好代表各个车轮轮轨力的一维数组,通过编制循环和选择语句来模拟列车通过车站时的情况。另外,还分析了侧向力对地面候车厅和站台振动的影响。通过瞬态分析分别把轮轨侧向力和垂向力施加在轨道上,计算结果显示候车厅和站台的振动幅值相对垂向力作用下的振动小1个数量级,所以轮轨侧向力对地面候车厅和站台的振动影响相对较小,这里不作重点研究,以下的仿真计算也都暂不考虑侧向力的影响。

为了对动车高速通过高架车站的主要振动源针对性地采取减振措施,必须掌握振动源的频谱特性,以便为振动控制设计提供基础数据。仿真计算完成后提取地面候车厅和站台处的位移,二次求导后得到振动的加速度,通过傅里叶变换得到地面候车厅和站台中央的振动频域响应曲线如图2和图3所示。某典型高架铁路车站地面候车厅和站台实测的频谱

图如图4和图5所示。

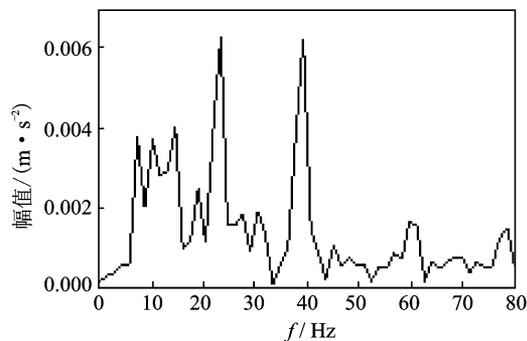


图2 候车厅仿真的振动频谱图

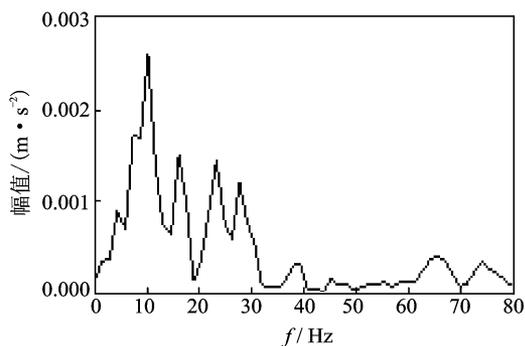


图3 站台仿真的振动频谱图

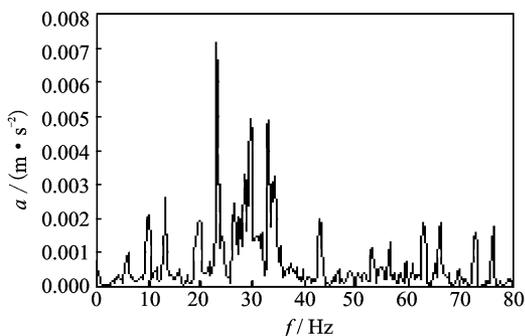


图4 候车室测试的振动频谱图

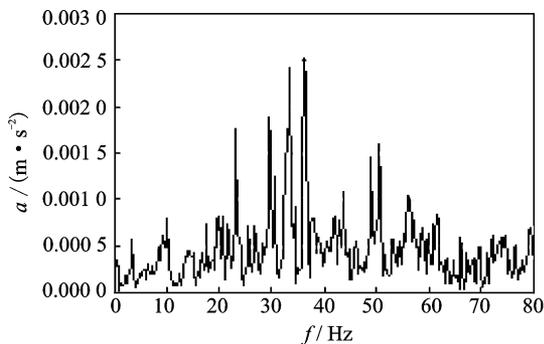


图5 站台测试的振动频谱图

表1和表2分别为候车室和站台的仿真和实测峰值频率对比值。通过候车厅和站台的仿真振动加

速度和参考某典型高架车站实测振动加速度的对比可以看出,仿真计算的候车厅和站台振动加速度和实测的频率范围一致,幅值基本和实测值相同,各频率成分的大小也不一致,但是绝大部分频率峰值成分和实测结果相吻合。说明参考某实测的高速铁路段轨道不平顺度虽然与该车站轨道的不平顺度有差异,导致激振力及其响应各频率成分的不同,但是绝大部分频率峰值成分和参考某典型高架车站实测结果相对应,说明所建模型基本正确,可以用来研究高架铁路车站的振动影响因素和改进措施。

表1 候车厅仿真和实测峰值频率对比 Hz

仿真	实测	仿真	实测	仿真	实测	仿真	实测
11.58	10.98	30.68	30.52	43.88	43.95	58.27	58.59
14.50	14.65	33.60	32.95	46.37	46.39	62.55	62.26
15.85	15.87	34.9	34.18	51.08	51.27	67.04	67.14
23.26	23.19	37.82	37.84	55.57	56.15	68.61	68.36
27.75	28.08	39.39	39.06	56.92	57.37	75.75	75.68

表2 站台仿真和实测峰值频率对比 Hz

仿真	实测	仿真	实测	仿真	实测	仿真	实测
11.58	10.98	26.62	26.86	37.82	37.84	52.21	52.49
14.50	14.65	30.89	30.52	39.17	39.06	55.35	54.93
16.07	15.87	31.98	31.74	43.67	43.95	61.2	61.03
20.56	20.75	34.90	34.18	46.37	46.39	66.99	67.14
23.26	23.19	36.47	36.62	50.16	50.05	69.91	69.58

3 高架铁路车站振动影响因素

根据高架铁路车站的结构特点、车站振动激振来源,从图6中可以看出,振动可以通过桥梁和站台之间的连接板以及通过桥梁、桥墩、地面两条途径传递到站台。为了对振动进行有效的隔离,利用有限元模型分析了轨道不平顺度、隔振沟、桥梁和站台接触与否以及地砖隔振垫减振措施对地面候车厅和站台振动的影响。

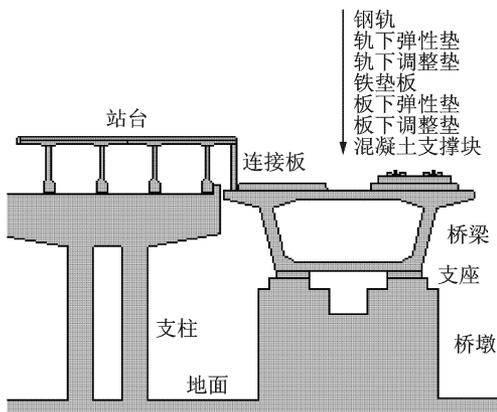


图6 高架铁路车站结构简图

3.1 轨道不平顺度对地面候车厅和站台振动的影响

在列车行进时,由于轮重移动以及轨道不平顺的激励产生振动。轨道的不平顺是产生振动的主要来源。在此,以实测高速铁路段轨道不平顺度的50%,实测的轨道不平顺度以及实测轨道不平顺度的200%作为输入,来比较轨道不平顺度对站房候车厅和站台振动的影响。图7和图8分别是3种不平顺度下地面候车厅和站台振动的响应。

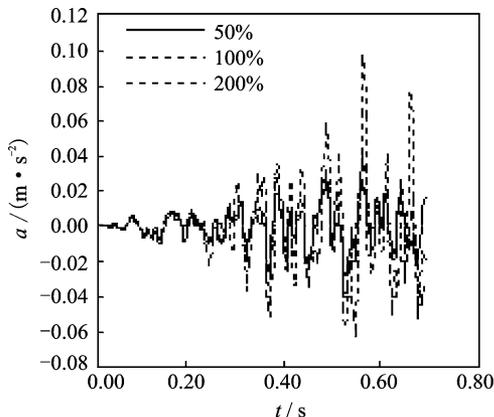


图7 候车室仿真的垂向振动加速度曲线

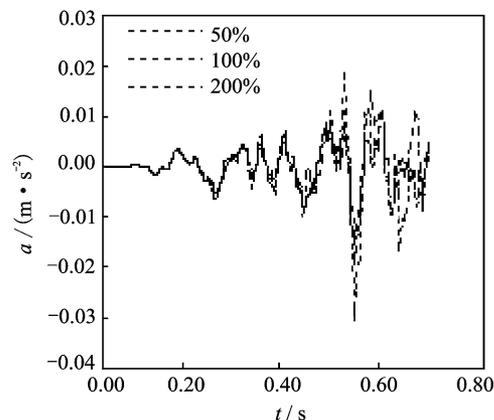


图8 站台仿真的垂向振动加速度曲线

经计算得到3种不平顺度下地面候车厅振动加速度的有效值分别为0.010 5, 0.013 3和0.024 9 m/s^2 ;从图中可以看出,3种不平顺度下地面候车厅振动的峰值分别为0.031 2, 0.05 2和0.096 7 m/s^2 。计算结果表明,降低轨道的不平顺度能明显减小地面候车厅的振动。同理,经过计算可得3种不平顺度下站台振动加速度的有效值分别为0.003 77, 0.004 44和0.006 52 m/s^2 ;从图中可以看出,3种不平顺度下站台振动的峰值分别为0.015, 0.019和0.030 4 m/s^2 。因此,降低轨道的不平顺度能较明显减小站台的振动。

轨道的不平顺包括横向不平顺和垂向不平顺,其对地面候车厅和站台的振动影响也有很大差别,表3为只有横向不平顺度、只有垂向不平顺度和两种不平顺度均有时候车厅和站台振动加速度的峰值和有效值的对比数据。通过表3数据的比较可得出如下结论:减小横向不平顺也有利减小地面候车厅和站台的振动,但是效果不如减小垂向不平顺度明显。要减小不平顺对地面候车厅和站台振动的影响,重点在减小垂向不平顺度。

表3 仿真分析结果 m/s^2

不平顺	候车厅		站台	
	峰值	有效值	峰值	有效值
横向垂向	0.031 2	0.010 5	0.015 0	0.003 77
只有横向	0.022 7	0.007 73	0.010 3	0.003 55
只有垂向	0.029 2	0.009 23	0.012 5	0.003 67

3.2 隔振沟对站台振动的影响

为了有效减小振动通过地面传递到站台,可以在桥墩和站台立柱之间设置一条隔振沟,隔振沟的深度直接影响振动的传递,如图9所示。笔者通过无隔振沟和隔振沟的深度分别为2.21,5.21和6.41 m来比较隔振沟对隔振的效果。图10为有了不同深度隔振沟后站台的振动情况。

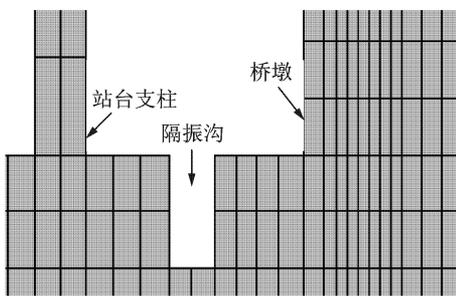


图9 隔振沟示意图

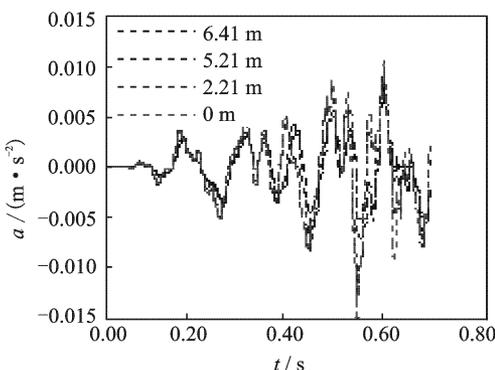


图10 站台仿真的垂向振动加速度曲线

经过计算得到在4种不同深度隔振沟下站台振动加速度的有效值分别为0.003 77,0.003 57,0.003 和0.002 57 m/s^2 。从图10可以看出,4种不同深度隔振沟下站台振动的峰值分别为0.015,0.013 9,0.009 47和0.008 58 m/s^2 。计算结果表明,在桥墩和站台立柱之间设置隔振沟,隔振沟的深度对隔振效果影响并不是很明显。结合仿真结果,建议该车站隔振沟的深度在4~6 m,能起到一定的隔振效果。

3.3 箱形桥梁和站台接触对站台振动的影响

如果箱形桥梁和站台之间刚性连接,这种连接必然会导致振动直接从箱形桥梁传递到站台。图11为通过仿真比较箱形桥梁和站台是否刚性接触的计算结果。经过计算得到桥梁和站台在是否接触两种情况下站台振动加速度的有效值分别为0.807 34和0.003 774 m/s^2 。从图11可以看出,两种情况下站台振动的峰值分别为3.036和0.015 m/s^2 。因此,站台和桥梁之间不能直接连接。如图12所示,如果采取声锁结构既可以起到隔振作用,又能起到隔声的效果。

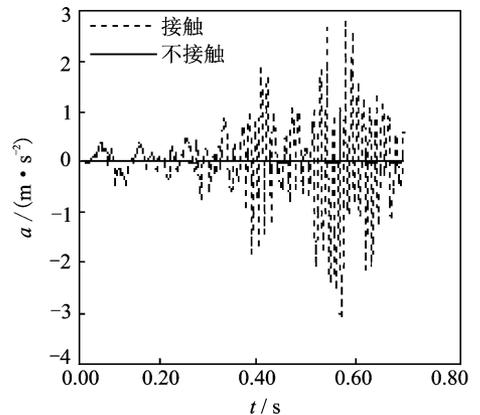


图11 站台仿真的垂向振动加速度曲线

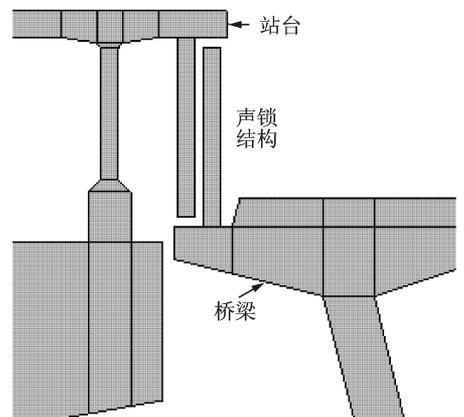


图12 声锁结构

3.4 地砖隔振垫对候车厅振动的影响

为分析地砖隔振垫的影响,在仿真计算中采用弹簧阻尼单元(COMBIN14,通过设置单元的刚度和阻尼实常数)来模拟地砖隔振垫的隔振作用。从图13可以看出,在铺设地砖隔振垫的情况下地面候车厅的振动有所减小。

经计算可得在是否铺设地砖隔振垫两种情况下,地面候车厅振动加速度的有效值分别为0.008 82和0.010 5 m/s^2 。从图13可以看出,两种情况下站台振动的峰值分别为0.027 4和0.031 2 m/s^2 。通过仿真计算结果可知,在铺设地砖隔振垫的情况下地面候车厅振动较明显减小,建议在实际工程施工中铺设地砖隔振垫。

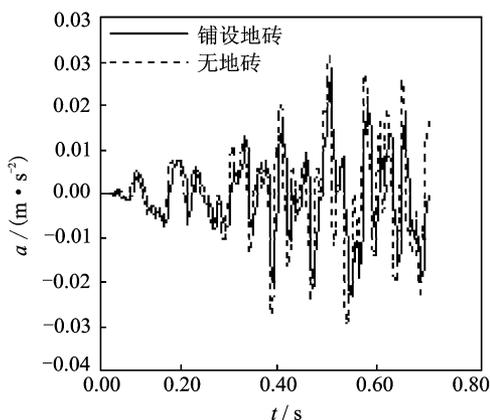


图13 候车室仿真的垂向振动加速度曲线

4 结论

1) 轨道不平顺度对地面候车厅和站台振动影响明显,降低轨道的不平顺度能明显减小地面候车厅的振动;减小横向不平顺有利减小地面候车厅和站台的振动,但是效果不如减小垂向不平顺度明显。要减小不平顺对地面候车厅和站台振动的影响,重点在于减小垂向不平顺度。

2) 为了有效地减小振动通过地面传递到站台,可以在桥墩和站台立柱之间设置隔振沟。隔振沟的深度对隔振效果影响并是很不明显。结合仿真结果,建议该车站隔振沟的深度在4~6 m,能起到一定的隔振效果。

3) 如果箱形桥梁和站台之间刚性连接,这种连

接必然会导致振动直接从箱形桥梁传递到站台。经过计算可知桥梁和站台在是否接触两种情况下,站台振动加速度值相差二个数量级;因此,站台和桥梁两者之间不能直接刚性连接,可采用声锁结构,既可以起到隔声效果,又能避免两者刚性接触。

4) 通过仿真计算结果可知,在铺设地砖隔振垫的情况下地面候车厅振动可较明显减小,建议在实际工程施工中铺设地砖隔振垫。

参 考 文 献

- [1] 守田荣. 振动篇-公害防止管理者国家实验讲座[R]. 东京:日本工业新闻出版社, 1988.
- [2] Kraemer S. Noise and vibration in buildings from underground railway lines[D]. London: University of London, 1984.
- [3] Chua K H, Lo K W, Koh C G. Performance of urban rail transit system; vibration and noise study[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 1997 (5):67-75.
- [4] 王英杰. 考虑车体柔性的车-桥动力响应分析及行车舒适性影响因素研究[D]. 北京:北京交通大学, 2011.
- [5] 赵俊. 铁路高架车站车桥动力响应分析[D]. 北京:北京交通大学, 2008.
- [6] 吴萱,高日. 列车引起的高架铁路车站的振动与噪声[J]. 都市轨道交通, 2004, 17(3):24-28.
Wu Xuan, Gao Ri. Train-included structural vibrations and noise of elevated railway station[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2004, 17(3):24-28. (in Chinese)
- [7] 郑凯,胡仁喜,陈鹿民. ADAMS 2005 机械设计高级应用实例[M]. 北京:机械工业出版社, 2006:270-274.
- [8] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社, 2007:495-496.



第一作者简介:孙玉华,男,1983年5月生,博士。主要研究方向为隔振降噪技术。曾发表《Research on riding quality of high speed train based on the rigid-flexible coupling model》(《2010 International Conference on Computer Engineering and Technology V5 Mechanical and Aerospace Engineering》)等论文。
E-mail:syh240@163.com