

文章编号:1005-0523(2011)03-0035-06

山西中南部铁路通道对红旗渠的振动评估研究

刘林芽¹, 吕 锐¹, 王林安²

(1. 华东交通大学铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心, 江西南昌 330013; 2. 中国文化遗产研究院, 北京 100029)

摘要:山西中南部铁路通道将从全国重点文物保护单位红旗渠下穿越, 为了评估铁路建成后列车运营行驶时对红旗渠所产生的振动是否满足古建筑结构的容许振动标准, 采用 Universal Mechanism 软件建立列车—轨道三维动力模型, 求得行驶列车作用于轨道上的轮轨作用力, 将轮轨力作用于轨道—隧道—山体—红旗渠结构有限元模型上, 计算出红旗渠结构的动力响应。研究结果表明, 列车通过时引起红旗渠的最大振动速度点出现在红旗渠渠顶外侧, 振动最大速度为 $1.1 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 满足《古建筑防工业振动技术规范》规定要求。

关键词:红旗渠; 振动评估; 有限元模型; 动力响应

中图分类号:U451

文献标识码:A

我国古建筑是中华文明珍贵遗产, 这些古建筑物都蕴藏着丰富的历史文化, 由于历史久远, 其结构的耐久性和抗振性日渐衰退。随着我国铁路事业的飞速发展和铁路振源数量的增加, 列车振动荷载对古建筑引起的环境问题变得尤为显著, 因此如何分析评价列车振动对古建筑的影响成为现在保护中华文化遗产的重要内容。目前, 国外关于列车振动对古建筑的研究较少^[1], 国内的潘复兰、俞茂宏等^[2-6]则是从古建筑的结构特征和力学性能方面进行研究, 而由列车动荷载引起的对古建筑振动影响的研究尚缺乏完善资料。本项目以《古建筑防工业振动技术规范》^[7]为标准, 采用数值仿真法, 运用大型有限元软件 Universal Mechanism 建立了列车—轨道三维模型和轨道—隧道—山体—红旗渠结构有限元模型, 分别模拟出了列车通过轨道时的动态轮轨作用力和路基、山体、红旗渠结构的动力响应, 对隧道中列车振动对红旗渠的影响进行预测和分析, 得到了很好的结果, 从而为采取适当的减振措施来减弱铁路运营对红旗渠结构的振动影响、保护红旗渠结构提供依据。

1 山西中南部铁路通道与红旗渠简况

1.1 山西中南部铁路通道

新建山西中南部铁路通道西起山西吕梁, 东至山东日照港, 横贯晋豫鲁3省, 线路等级为 I 级, $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ 无缝线路, 有碴轨道, 弹条 III 型扣件, III 型轨枕。新线的建成对于保障国家能源运输, 完善区域路网布局, 促进晋豫鲁地区经济社会协调发展具有重要作用。

1.2 红旗渠

红旗渠, 位于河南省林州市, 是 20 世纪 60 年代林县人民在太行山上建成的大型“引漳入林”灌溉工程。红旗渠以浊漳河为源, 渠首位于山西省平顺县石城镇侯壁断下。总干渠长 70.6 km, 渠底宽 8 m, 渠墙高 4.3 m, 设计最大流量 $23 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 全部开凿在峰峦迭嶂的太行山腰, 工程艰险, 总干渠从分水岭分为 3 条干渠, 红旗渠是新中国成立初期建设成就的标志性工程, 2006 年 5 月 25 日, 红旗渠被国务院列为第 6 批全国重点文物保护单位。

收稿日期: 2011-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51068007); 新世纪优秀人才支持计划项目(NECT-09-0167)

作者简介: 刘林芽(1973—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为轨道交通振动与噪声。

1.3 山西中南部铁路通道与红旗渠位置关系

规划新建中的山西中南部铁路通道将4次穿越红旗渠,包括穿越主干渠2次,一干渠和二干渠各1次。铁路的开通运营将不可避免地对红旗渠的保护产生有害影响,为了保护红旗渠这个历史文化遗产,评估列车运行对红旗渠的影响程度,把有害影响降到最低,特立此课题进行专项研究。

2 三维动力有限元计算模型

预测评估列车运营对红旗渠的影响,涉及因素众多,包含列车、轨道、隧道、土体和红旗渠结构,所以预测评估非常复杂,传统试验监测方法难以实行。除试验方法外,另一种通用的方法为数值仿真法,如有限元法,数值仿真方便、快捷,且只要相关参数准确,就能获得较好的模拟结果。

分析隧道内列车运营对红旗渠的影响,就必须解决列车、轨道、隧道、土体和红旗渠结构之间复杂的动态耦合问题,需建列车—轨道—隧道—土体—红旗渠结构系统三维有限元计算模型,直接建立此模型将使问题复杂化,为此文章将此模型分成两个子模型进行简化:

1) 列车—轨道三维子模型:利用此模型可计算出在考虑轮轨随机不平顺的情况下,列车通过隧道时作用于轨道的动态轮轨竖向力和横向力;

2) 轨道—隧道—山体—红旗渠结构子模型:将列车—轨道三维子模型模拟出来的轮轨力作用于轨道—隧道—山体—红旗渠结构子模型上,最后可计算出路基、山体和红旗渠结构的动力响应。

2.1 列车—轨道三维动力模型

采用 Universal Mechanism(UM)软件建立列车—轨道三维动力模型,如图1所示。Universal Mechanism 是俄罗斯新一代多体运动学和动力学仿真软件,可以用来仿真任何机械和机电系统,求解迅速,计算精确。UM既能分析庞大的多刚体系统,也能分析复杂的刚柔耦合体系统,广泛应用于机械、汽车、铁路、航空航天、海洋和国防工程等领域。

2.2 轨道—隧道—山体—红旗渠结构有限元模型

通过对新建的山西中南部铁路通道穿越红旗渠点的地质进行踏勘,并结合各点埋深、列车通过速度和地质等参数进行分析,决定选择最不利工况—太行山一号隧道穿越主干渠点(里程CK578+350,隧道埋深13.07 m)进行三维有限元动力仿真分析。

隧道—山体—红旗渠三维有限元模型根据隧道、太行山山体和红旗渠结构的几何形状,利用ANSYS有限元仿真软件建立。模型几何尺寸为45 m(红旗渠纵向)×39 m(横向)×61 m(竖向)。在ANSYS软件中,有限元模型中采用3D结构实体单元SOLID45划分网格,有限元模型如图2所示。

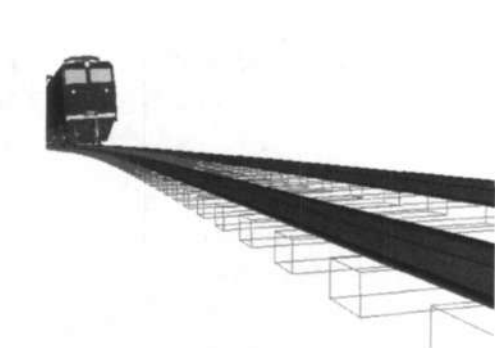


图1 列车—轨道整体模型
Fig.1 Overall model of the train-track

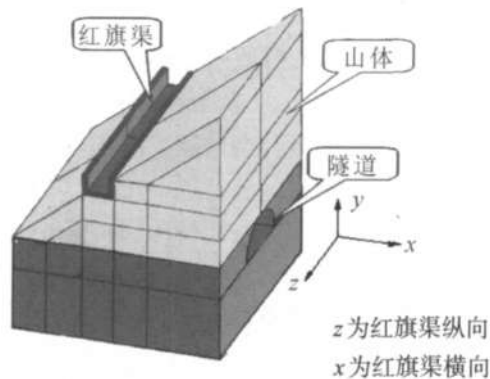


图2 隧道—山体—红旗渠有限元模型
Fig.2 Finite element model of the tunnel, mountain and Red Flag Canal

3 仿真结果

3.1 列车-轨道三维动力模型仿真结果

3.1.1 轮轨随机不平顺模拟结果

轨道不平顺实际上是一个随机过程,在轨道结构仿真中将其处理呈平稳的各态历经的随机过程,它是机车车辆-轨道系统随机振动的激励源^[8]。根据既有的轨道不平顺功率谱密度函数采用三角级数法来构造轨道不平顺空间样本,其基本原理如下。首先轨道不平顺的空间样本可以表示为

$$\eta_i = \eta(x_i) \quad (1)$$

设不平顺 $\eta(x_i)$ 为平均值为0的平稳高斯过程,其功率谱密度函数为 $S_x(\omega)$, $\eta(x_i)$ 的抽样函数可以用三角级数法表示为

$$\eta^d(x) = \sum_{k=1}^N a_k \sin(\omega_k x + \phi_k) \quad (2)$$

式中: a_k 是平均值为0、标准差为 σ_k 的高斯随机变数,对于 $k=1,2,\dots,N$ 来说,是互相独立的; ϕ_k 是与 a_k 相互独立的, $0 \sim 2\pi$ 范围内的同一随机变数。

轨道随机不平顺的统计特征只能依靠线路实地测量获得,国外很多国家很早就开始了实地测试工作,其轨道谱的研究已经相当完善。我国也在这方面做了一些研究工作,文献[9]认为我国三大干线的方向不平顺与美国5级谱相当,高低不平顺在美国6级谱和5级谱中间;同济大学练松良教授通过分析沪昆线与金温线轨道不平顺谱后,认为沪昆线路轨道不平顺功率谱要明显好于美国6级铁路的不平顺谱,而金温线轨道谱接近于美国5级铁路的不平顺谱^[10]。根据新建山西中南部铁路通道的设计标准,文章就以美国6级谱来模拟轨道随机不平顺,最后模拟得到的美国6级谱的轨道高低与轨道方向不平顺样本曲线,如图3所示。

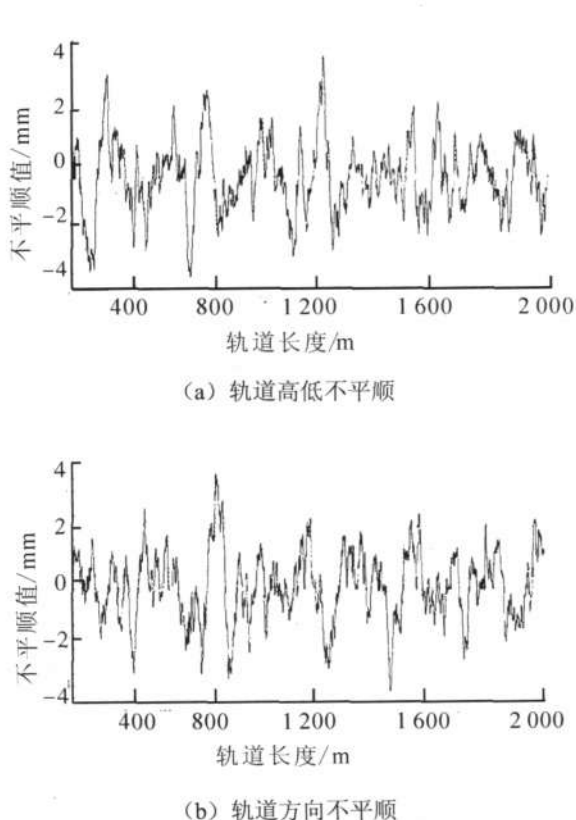


图3 美国6级谱轨道不平顺样本曲线

Fig.3 Six track irregularity sample curve in the U.S.

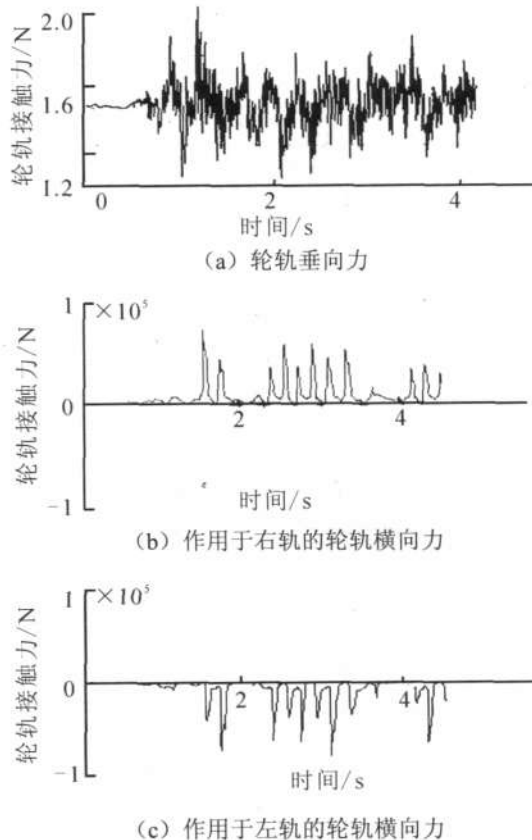


图4 动态轮轨力时程曲线

Fig.4 Curves of dynamic track force

3.1.2 轮轨力模拟结果

根据轨道不平顺样本,进行列车—轨道三维动态仿真,可得到动态轮轨力,见图4。由于该线路上主要运营货车,且货车重量大于客车重量,客车和货车的速度目标值都为 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,故货车运行对红旗渠振动的影响大于客车运行的影响,则只需要分析铁路货车对红旗渠振动的影响。货车采用SS4型,牵引质量为 $10\,000 \text{ t}$ 。

3.2 轨道—隧道—山体—红旗渠结构模型计算结果

利用轨道—隧道—山体—红旗渠三维有限元模型,分析红旗渠在列车动荷载作用下的变形和速度,得到红旗渠渠顶外侧(观测点1)、渠底(观测点2)和红旗渠渠顶内侧(观测点3)位移、速度响应,观测点位置图如图5。由于篇幅有限这里只把三个观测点 x 方向(红旗渠横向)的速度时程曲线图列出,如图6、图7、图8,三个观测点各方向位移与速度响应具体大小参见表1。

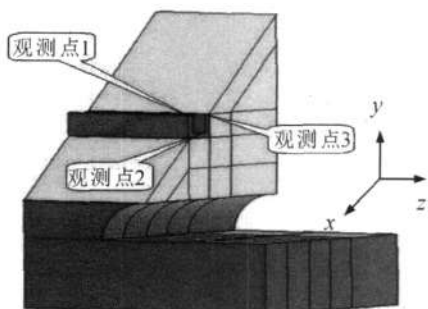


图5 观测点位置图
Fig.5 Observing location

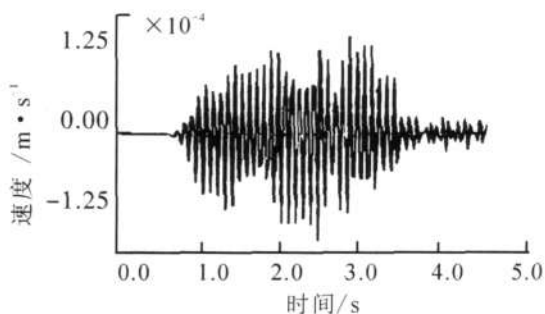


图6 1号观测点 x 方向速度响应
Fig.6 Speed response of direction x in NO.1 observing point

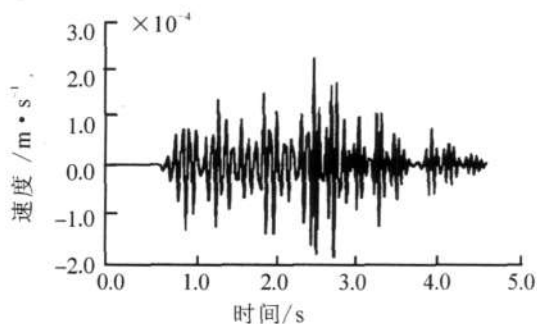


图7 2号观测点 x 方向速度响应
Fig.7 Speed response of direction x in NO.2 observing point

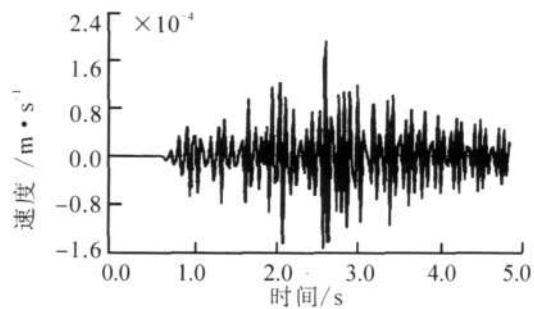


图8 3号观测点 x 方向速度响应
Fig.8 Speed response of direction x in NO.3 observing point

表1 主干渠有限元仿真结果

Tab.1 Finite element simulating results of the main canal

观测点编号	项目	x 方向	y 方向	z 方向
观测点1	最大位移/m	0.97×10^{-6}	7.18×10^{-7}	5.64×10^{-7}
	最大速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1.1×10^{-4}	0.7×10^{-4}	2.8×10^{-5}
观测点2	最大位移/m	2.3×10^{-7}	5.5×10^{-7}	3.4×10^{-7}
	最大速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	2.13×10^{-5}	2.8×10^{-5}	1.7×10^{-5}
观测点3	最大位移/m	1.8×10^{-7}	6.9×10^{-7}	4.3×10^{-7}
	最大速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1.8×10^{-5}	2.4×10^{-5}	1.1×10^{-5}

4 结论

通过建立列车—轨道三维动力模型和轨道—隧道—山体—红旗渠三维有限元动力分析模型,分析了新建山西中南部铁路通道对红旗渠的影响,得出如下结论:

1) 通过动力分析仿真可知,列车通过时引起红旗渠的最大振动速度点出现在观测点1的 x 方向,为 $1.1 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,但满足《古建筑防工业振动技术规范》规定的 $(2.0 \sim 2.5) \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 要求^[7]。考虑到路基、土体参数的不确定性,仿真分析结果可能会与实际情况有一定差别,建议相关单位在隧道施工或线路运行阶段,密切观察其对红旗渠的影响,必要时可采用一些相应措施对(例如减速慢行等),以保护红旗渠的安全。

2) 直接通过建立列车—轨道—隧道—山体—红旗渠动态耦合模型来求解将非常困难,而把模型分成两个子模型来处理就会把问题大大简单化。即通过列车—轨道子模型求出轮轨作用力,随后将此轮轨作用力作用在轨道—隧道—山体—红旗渠子模型上就可求出红旗渠结构的各处响应。

3) 通过数值仿真的方法来模拟或者预测振源对一些既有结构物造成的影响,是今后进行振动评估最有效,最直观和最简便的方法。

参考文献:

- [1] LUC SCHILLEMANS. Impact of sound and vibration of the north-south high-speed railway connection through the city of Antwerp Belgium[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 267: 637-649.
- [2] 周云,王柏生.行驶列车引起的周边建筑物振动分析[J].振动与冲击, 2006, 25(1): 36-41.
- [3] 潘复兰.古建筑防工业振动的研究[J].文物保护与考古科学, 2008, 20(1): 104-108.
- [4] 俞茂宏,方东平.中国古建筑结构力学研究进展[J].力学进展, 2006, 36(1): 43-64.
- [5] 贾颖绚,郭猛,刘维宁,等.列车振动荷载对古建筑的动力影响[J].北京交通大学学报, 2009, 33(1): 118-122.
- [6] 赵均海,杨松岩,俞茂宏,等.西安东门城墙有限元动力分析[J].西北建筑工程学院学报, 1999, 16(4): 1-5.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50452-2008, 古建筑防工业振动技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社, 2008.
- [8] 雷晓燕,圣小珍.现代轨道理论研究[M].北京:中国铁道出版社, 2008.
- [9] 陈果,翟婉明,左洪福.仿真计算比较我国干线谱与国外典型轨道谱[J].铁道学报, 2001, 23(3): 82-87.
- [10] 练松良,李建斌,杨文忠.沪昆线与金温线轨道不平顺谱的分析[J].同济大学学报, 2010, 38(2): 257-261.

Assessment of Vibration Made by Central and Southern Shanxi Railway to the Red Flag Canal

Liu Linya¹, Lv Rui¹, Wang Linan²

(1. Engineering Research Center of Railway Environment Vibration and Noise, Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Chinese Academy of Culture Heritage, Beijing 100029, China)

Abstract: The newly-built south central railway of Shanxi will cross under Red Flag Canal which is a national key unit of cultural relics protection. We will assess whether the vibration of the train meets the allowed vibration standards of the ancient building when the operational train is in motion after the completion of the railway. In this paper, the Universal Mechanism software is used to establish a three-dimensional dynamic model of train-track, so as to get the wheel-rail force when the driving train crosses the track. Then we load the wheel-rail force on the finite element model of track, tunnel, mountain, and Red Flag Canal to calculate the dynamic response of the Red Flag Canal. The results of the study show that when the train crosses, the maximum point of vibration velocity in the canal is in the top of the external canal. The maximum speed of vibration is $1.1 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, which can meet the requirements of anti-industrial vibration specification of ancient architecture.

Key words: Red Flag Canal; vibration assessment; finite element model; dynamic response