

# 桥建合一站房结构列车振动舒适度分析

汤兵

中铁第四勘察设计院集团有限公司

**摘要:**根据AISC-11标准,对某桥梁上的建筑物在列车行驶时的振动舒适度进行计算分析。本文利用有限元结构模型模拟列车通过时受到的振动激励力时程,计算了站房承轨层、站台层和候车层等位置对列车振动的响应。分析了楼面竖向振动加速度的最大值,据此结果可得知,该站房在列车运行时符合舒适度要求。

**关键词:**列车振动;桥建合一;站房结构;舒适度

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.10.103

## 一、引言

随着中国高速铁路的飞速发展,第三、四代铁路客站的建设中采用了桥建合一的站房结构形式,展现出鲜明的时代特征和中国特色。

桥建合一结构形式突破了“列车荷载由桥梁结构承受”的传统设计思维,完全由站房建筑结构的构件来承受列车荷载。该结构形式具有统筹建筑总体布置、优化车站功能、结构整体性优及良好抗震性能等优点,目前被越来越多的特大型车站采用<sup>[1~2]</sup>。但是相对于桥建分离的结构,桥建合一站房结构因列车荷载直接作用于承轨层,因列车振动引起的结构响应问题比较严重。因此,有必要进行站房结构在列车荷载作用下的振动分析研究,以及研究站房结构对人员舒适性的影响。

本文利用有限元计算模型和现有的车辆与桥梁结构耦合仿真方法<sup>[3~5]</sup>,通过分析车辆-桥梁-站房系统的动力学相互作用,并基于美国钢结构协会标准AISC-11<sup>[7]</sup>提供的舒适度评价方法,对列车通过及进出站时引起的振动带来一系列的安全及舒适性进行分析及评判。

## 二、振动评价标准

桥建合一结构的列车振动传到建筑物内或建筑物内的各种振源振动均会影响旅客的正常候车、休息,使他们感到不适,可能引起紧张、烦躁或恐慌情绪。因此,有必须根据特定标准控制桥建合一结构内的振动。

AISC-11<sup>[7]</sup>旨在为人类活动引起的钢框架楼面系统和人行天桥的振动舒适性问题提供基本设计原则和方法。该标准综合考虑了人在不同环境下对振动的舒适度要求,提出了适用于办公环境、商业环境、室外环境等不同场景下评估动力响应的方法。

该标准的加速度限值是根据ISO2631-2(1989)为基准。ISO标准以平方根加速度形式提供基准曲线,文献<sup>[7]</sup>在ISO提出标准的基础上,放大n倍作为不同振动环境的峰值加速度限值,办公室环境下, n=10;运营商业环境和室内人行桥环境下, n=30;室外人行桥环境下, n=100。设计中,该倍数可以根据振动持时和振动频率调整为0.8~1.5倍,如图1所示。

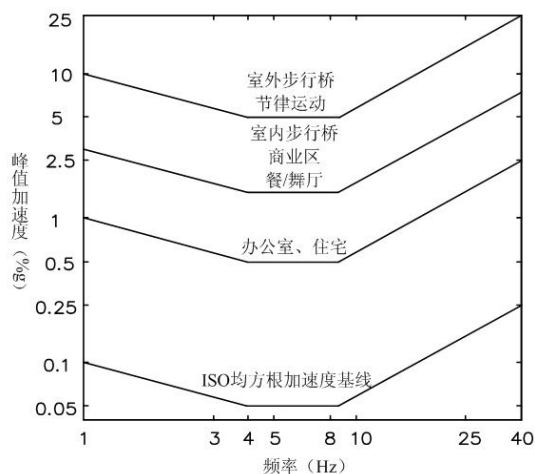


图1 AISC舒适度评价标准曲线

对于该桥建合一站房结构列车运行导致的振动舒适度的评判,基于工程计算得到的加速度反应来进行,采用同时AISC-11<sup>[7]</sup>的评判标准应用较为简便,故将其作为舒适度评价的参考,竖向振动加速度限值为1.5%g。

## 三、列车振动有限元分析

某桥建合一站房结构承轨层,横轨向柱距22m,顺轨向柱距21.5m,采用钢骨混凝土梁柱结构体系。本文采用ANSYS软件进行建模分析,模型中,线型构件如梁、柱等,分别按实际截面建模,采用BEAM188模拟;面构件如楼板等,按照板壳实际厚度,采用SHELL63单元模拟。所有构件均采用弹性材料类型。站房结构模型如图2所示。

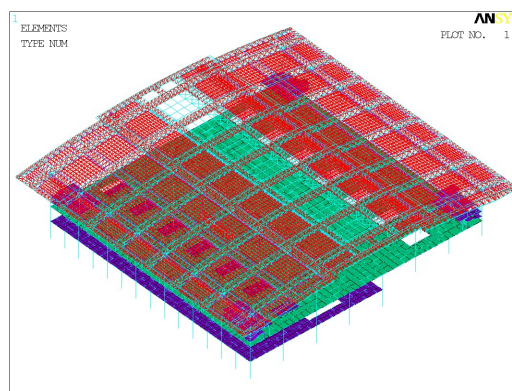


图2 桥建合一结构有限元模型

### (一) 计算假定

#### 1. 机车车辆

根据站房所在站场的线路列车特点,本研究中仅考虑国产CRH和谐号动车组,其正线通过站房速度为140km/h,列车的外形见图3。



图3 CRH 列车

本研究中将采用由轨道检查列车实际测量得到的轨道不平顺时域样本模拟不平顺谱。由于该站房尚未建成，暂无实测轨道不平顺样本。

因本站暂未开通，综合考虑轨道形式、列车时速、结构形式等因素，本计算中列车通过的线路均采用代表性较高的轨道不平顺样本-秦沈客运专线实测轨道不平顺时域样本<sup>[8]</sup>。

2. 计算工况

计算工况如表1所示。计算工况包括各区内列车过站、进站和出站情况。参照以往站房的计算结论，双线同时进、出站，一线进站同时一线出站等工况造成的影响与单线进出站差别不大，且发生的概率不高，所以不再考虑<sup>[9]</sup>。

表1 计算工况列表

| 线路  | 工况 | 工况描述            |
|-----|----|-----------------|
| 正线  | 1  | 过站 140km/h      |
| 到发线 | 2  | 进站 200 km/h → 0 |
|     | 3  | 出站 0 → 200 km/h |

3. 时间与空间间隔设定

为使在桥梁一站房结构中输入的节点激励方便应用于结构计算，在综合考虑了模型大小、计算时间、存储空间与精度要求后，采用的激励数据时间间隔为0.02s，轨道梁上各节点之间的空间间隔为3~3.6m。

4. 时间与空间间隔设定

为使在桥梁一站房结构中输入的节点激励便于开展计算，在综合考虑了计算模型节点数量、计算效率、内存利用率与计算精度后，采用的激励数据时间间隔为0.02s，轨道梁上各节点之间的空间间隔为3~3.6m。

5. 阻尼比设置

在进行时程分析时需要考虑阻尼项，在开展时程分析时，采用瑞利阻尼。根据相关规范，阻尼对于混凝土结构取0.05，对于钢结构取0.02。本研究偏于安全考虑，本项目计算时统一取阻尼比为0.02。采用候车层第一阶模态和振动影响较大的竖向模态所对应的频率来进行计算。

6. 材料设置

钢材、混凝土的重度、强度等参数均按照规范取值，动力分析中，混凝土的弹性模量放大1.2倍。

7. 质量源设定

按照中国规范<sup>[10]</sup>，质量源取1倍的恒荷载和0.5倍的

活荷载。

四、桥梁-站房结构的动力学计算

(一) 计算理论

本文将整个列车通过桥梁及站房时的系统模型动力学相互作用分析分解成两部分工作：建立列车与桥梁结构相互作用模型，通过等效荷载分析，进行动力相互作用计算，得到列车对轨道梁的振动荷载时程曲线；建立桥梁和站房相互作用模型，在轨道梁各节点输入列车车辆对各节点的振动力时程，进行桥梁一站房结构的动力时程计算，得到桥梁一站房结构各部分的响应<sup>[9]</sup>。

式(1)给出了一个多自由度系统的动力平衡方程，它是一个关于时间的函数<sup>[6]</sup>。

$$M\ddot{u}_t + C\dot{u}_t + Ku_t = F_t \tag{1}$$

式中M—质量矩阵；

C—阻尼矩阵；

K—结构单元系统的静力刚度矩阵；

F<sub>t</sub>—外力激励的时程向量；

$u_t$ 、 $\dot{u}_t$ 、 $\ddot{u}_t$ —节点的绝对位移、速度和加速度。

通过式(1)的时程分析求解，可得到结构在动力荷载作用下结构的基本响应。

(二) 列车激励结果

经过列车-等效桥梁的计算生成了列车激励作用下结构各节点的振动荷载时程。因篇幅原因，仅给出列车140km/h通过时节点激励的典型时程如图4、图5所示。

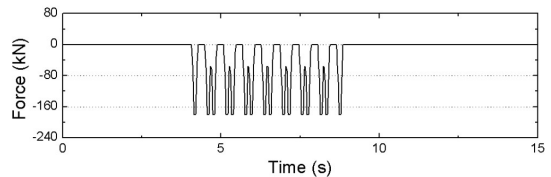


图4 全速过站典型节点Z向激励时程

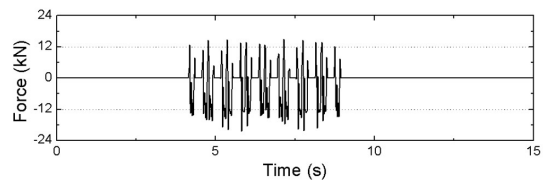


图5 全速过站典型节点横轨向激励时程

通过频谱分析可知，过站工况中典型竖向激励力频谱以低频分量为主，主要频率分量集中在1~5Hz之间，较大的频率分量依次为1.7Hz和5.0Hz。1.7Hz正好和单节列车通过节点的频率接近。Y向激励频率稍高，主要频率分量集中在1~25Hz之间，较大的频率分量依次为5.0Hz、11.8Hz和1.7Hz。

(三) 各楼层响应

各工况下站房的最大位移与加速度响应如表2所示。最大位移在2mm以下，最大加速度为站台层竖向加速度，极值为85.02mm/s<sup>2</sup>，小于1.5%g (150mm/s<sup>2</sup>)的限值，故不会引起不舒适。候车层的反应均较小。

列车在正线过站时，基本站台层的典型竖向位移分

表2 主站房区域结构最大反应

| 位置  | 工况 | 位移 (mm) |       |       | 加速度 (mm/s <sup>2</sup> ) |      |      |
|-----|----|---------|-------|-------|--------------------------|------|------|
|     |    | 竖向      | 横轨向   | 顺轨向   | 竖向                       | 横轨向  | 顺轨向  |
| 候车层 | 过站 | 0.072   | 0.026 | 0.016 | 14.42                    | 1.45 | 1.48 |
|     | 进站 | 0.065   | 0.028 | 0.032 | 16.21                    | 5.93 | 4.34 |
|     | 出站 | 0.067   | 0.028 | 0.061 | 18.44                    | 5.92 | 6.90 |
| 站台层 | 过站 | 1.572   | 0.015 | 0.016 | 85.02                    | 6.33 | 2.02 |
|     | 进站 | 1.384   | 0.016 | 0.014 | 68.63                    | 3.57 | 1.72 |
|     | 出站 | 1.381   | 0.018 | 0.014 | 63.11                    | 5.80 | 1.64 |

布如图6所示, 竖向位移响应主要集中在行车轴所在的跨中位置, 跨中挠度明显大于周边。

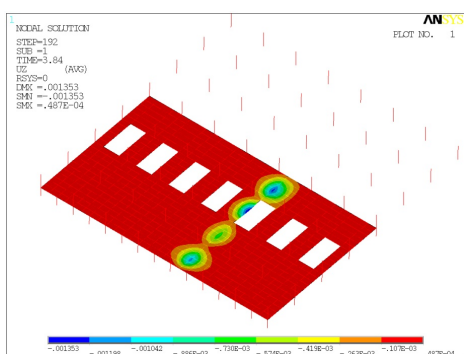


图6 L轴过站基本站台层竖向位移 (m)

车辆在正线越行通过时, 候车层的典型竖向位移分布如图7所示。竖向位移响应主要在行车轴上方对应的跨中位置, 其他位置变形较小。

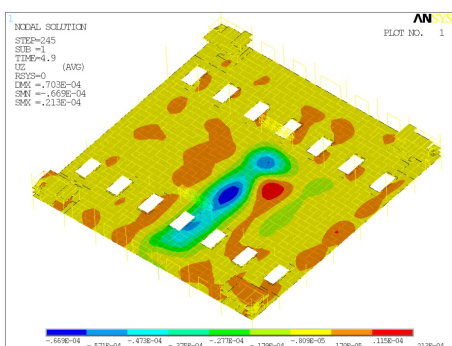


图7 L轴过站时候车层竖向位移 (m)

#### (四) 楼层主要内力

根据站房区域构件内力的计算结果, 站房区域构件的内力值均较小, 由列车产生的梁柱构件应力值均不足1MPa。由于杆件数量和截面类型繁多, 本文不再详细列出。经计算, 满足现行规范的疲劳验算要求。

### 五、结论

(1) 本文基于美国钢结构协会标准AISC-11舒适度评价方法, 通过对某桥建合一站房在车辆越行通过时的振动舒适度进行研究分析。采用有限元模拟并输入列车振动激励时程, 计算出列车在高速通过对站房承轨层、站台层、候车层等位置的振动响应, 从楼面竖向振动加

速度最大值方面对计算结果进行分析, 相关计算方法可以为类似的项目分析提供指导意义。

(2) 列车运行时, 由列车引起的站台层及候车层等区域的加速度最大值为85.02mm/s<sup>2</sup>, 小于AISC-11中规定的舒适度限值1.5%g (150 mm/s<sup>2</sup>)。说明该站房区域满足舒适性要求, 不会引起候车旅客的不适。

(3) 列车运行时, 由列车引起的站台层最大竖向变形为1.98mm, 站台层竖向位移响应主要集中在行车所在的跨中位置, 跨中挠度明显大于周边, 随着列车轮对通过各节点, 竖向位移做从负向最大到接近零的循环, 循环周期与车速有关。候车层竖向响应较小, 主要集中在行车对应上方跨中位置。

(4) 列车在各个线路上运行时, 结构构件的均不会出现应力突然增大现象, 满足现行规范的疲劳验算要求。

### 参考文献

- [1] 郑健. 中国当代铁路客站设计理论探索 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [2] 郑健. 2011中国铁路客站技术交流会议论文集 [C]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
- [3] 曹雪琴. 列车通过时桥梁结构竖向振动分析 [J]. 上海铁道学院学报, 1981, 2 (3): 1-15
- [4] 曹雪琴. 钢桁梁桥横向振动 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991
- [5] 夏禾, 陈英俊. 车-梁-墩体系动力相互作用分析 [J]. 土木工程学报, 1992, 25 (2): 4-12
- [6] 夏禾. 列车过桥时高桥墩的动力响应及其对车辆运行稳定性的影响 [D]. 北京: 北方交通大学, 1984
- [7] American National Standard: SteelDesignGuideSeries11-FloorVibrationsDuet oHumanActivity [S]. America Institute of Steel Construction
- [8] 吴旺青. 秦沈客运专线300km/h综合试验段轨道不平顺管理标准值建议研究 [J]. 铁道标准设计, 2003 (4): 1-4.
- [9] 张高明. 火车站站房结构在人行和列车激励作用下的振动舒适度问题研究 [D] 北京: 中国建筑科学研究院, 2010.
- [10] GB50011-2010 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.