文章编号：1006-1355(2014)06-0144-04

高速列车引起的车站大跨度钢结构的振动分析

刘元志

(武汉理工大学 设计研究院有限公司， 武汉 430070)

摘 要：大跨度钢结构能为高铁车站带来较大的站内空间，但在长期高速列车振动荷载作用下，较柔的大跨度焊接钢结构的振动疲劳问题却不容忽视。则针对某客运专线“桥建合一”火车站，建立其整体有限元模型，计算分析了大跨度钢结构主拱V撑、网壳、下弦节点、柱角铸钢点以及主拱的动力响应，得到了不同部位最大Mises等效应力。计算分析表明：高速列车振动荷载对大跨度钢结构强度的影响可忽略不计，但长期疲劳问题不容忽视。

关键词：振动与波；高速列车；等效应力；大跨度钢结构

中图分类号：U238　　**文献标识码：**A　　**DOI编码：**10.3969/j.issn.1006-1335.2014.06.032

Analysis of High-speed Train Induced Vibration of Large-span Steel Structure of Railway Stations

LIU Yuan-zhi

(Design & Research Institute Co. Ltd., Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract :Large-span steel structure can provide large internal space for railway station. But the long-term vibration induced fatigue problem cannot be neglected for welded flexible large-span steel structure. In this paper, the finite element model for a passenger-line railway station of large-span steel structure is established. The dynamic responses of the components of the structure, such as V-support, lattice shell, the joint of lower chords, cast steel joint at the corner of column and main arch, are analyzed. The maximum equivalent stress of each component is obtained. The computation results show that the vibration load induced by high speed train has little influence on the strength of large-span steel structure. But the long-term fatigue problem must be considered.

Key words : vibration and wave ; high-speed train ; equivalent stress ; large-span steel structure

随着我国高铁建设的快速发展，“桥建合一”的新型结构形式由于其能提供较大的站内空间，以及具有强烈的视觉冲击效应，因而得到了广泛的应用。如武汉火车站、郑州火车站、南昌火车站等。但随之而来的问题是高速列车引起的振动荷载直接传递给了上部的大跨度钢结构，而钢结构大多是采用焊接的方式连接在一起。因此，焊接钢结构在长期振动荷载下的疲劳特性及其疲劳寿命值得关注。

目前关于大跨度钢结构、网壳结构等空间结构在风荷载以及地震荷载作用下动力响应的研究颇多，也有少量关于该类结构在简单竖向动荷载(如周期荷载)下动力响应方面的研究，而在高速列车作用下动力响应的研究较少[1—3]。本文则针对某客运专线火车站结构，采用大型通用软件ANSYS建立其整体有限元模型，计算分析大跨度钢结构各部位在高速列车振动荷载作用下的动力响应，为后续的振动疲劳分析提供基础。

1 工程概况

某客运专线火车站的站房采用了上部大型建筑与下部桥梁共同组成的“站桥合一”的新型结构型式(图1)，图2为细节示意图。上部大跨度钢结构的重量通过V撑支承于主拱上，而主拱则通过桥墩顶部的预埋构件直接支撑在高架桥的桥墩上，同时，列车引起的振动通过主拱和V撑也直接传递给上部大跨度钢结构。在长期的列车振动荷载作用下，上部大跨度钢结构，特别是关键的焊接节点处的疲劳问题值得关注。

收稿日期：2014-03-24

作者简介：刘元志（1963- ），男，湖北大冶人，高级工程师，研究方向为工程结构的监测与检测。
E-mail: liucivil@126.com.

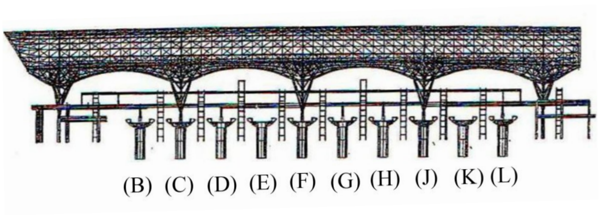

图 1 顺轨方向剖面图

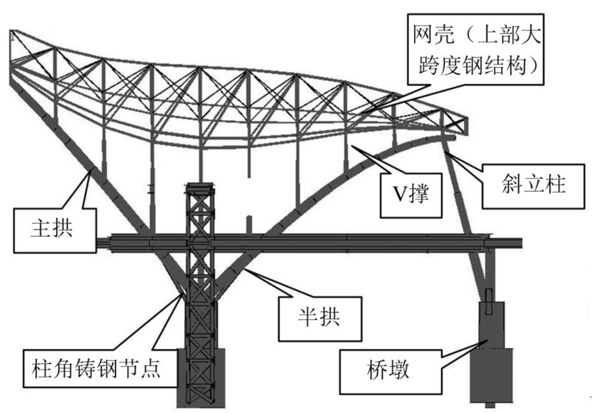

图 2 结构细部示意图

2　计算模型

武汉站站房上部建筑主要为由拱（主拱和半拱）、V 型支撑、网壳等组合而成的空间结构体系。主拱最大跨度达116 m，高56 m（F 轴），拱结构上有树枝状的 V 型支撑，用来支撑整个屋面结构，其下端固定在高架桥桥墩上，图3为上部大跨度钢结构计算模型。

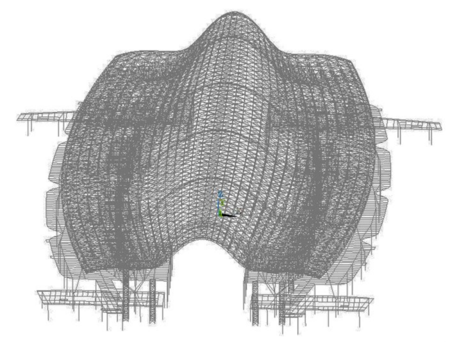

图 3 上部大跨度钢结构计算模型

钢材主要为Q 345级钢，模型中采用了link 10单元和beam 188单元，其中，拉杆采用link 10单元模拟，其余采用beam 188单元模拟，模型共34 307个单元，14 594个节点。

阻尼采用瑞利阻尼

$$[C]=\alpha[M]+\beta[K]$$

对于大多数的实际工程，α 阻尼（或称作质量阻尼）可忽略不计，β 阻尼（或称作刚度阻尼）的系数 β 可按下式计算

$$\beta=\frac{2\xi_i}{\omega_i}=\frac{\xi_i}{\pi f_i}$$

对于大跨度钢结构而言，仅考虑对结构影响最大的1阶振型，其阻尼比 ξ 一般可取为0.035，由模态分析可知结构的1阶自振频率为0.94 Hz，则可求得 β =0.011 9。

3　计算方法

对于“桥建合一”的新型结构型式，本文借用子结构模型的分析方法，即将整体结构划分为列车荷载—简支梁模型和桥墩-上部大宽度钢结构模型，由前者计算得到简支梁支座处的反力，再将该反力作为后者的输入荷载。限于篇幅，本文主要针对第二个子模型，对于第一个子模型计算得到支座反力可参考文献 [4]。这里仅给出得到的支座反力时程曲线，即本文的输入荷载。文献 [5]的研究表明，对于双线简支梁，当双线同向同时加载时（两列列车同时同向驶入简支梁上）为最不利荷载模式，因此本文给出双线加载情况下桥墩处的支座反力时程曲线，如图4—5所示，单列车通过时支座反力仅是在幅值上有所差异，故未给出，其中 y 向为竖向方向，x 向为顺轨方向，z 向为垂直轨道方向（未给出）。

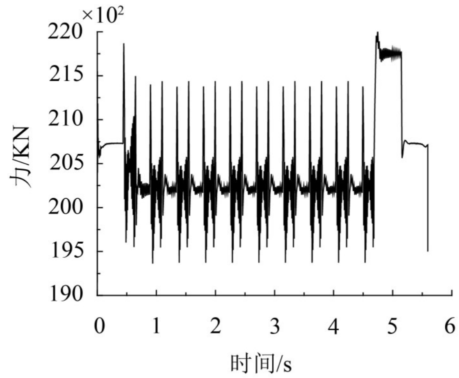

图 4 两列列车同向通过时桥墩竖向反力时程曲线（y 向）

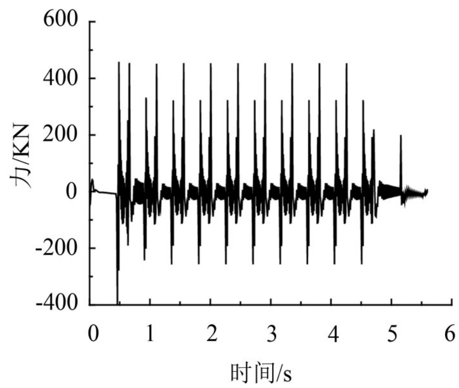

图 5 两列列车同向通过时桥墩顺轨反力时程曲线（x 向）

4 工况分析

参照图1、图2可见，上部大跨度钢结构仅在C、F、J轴处与桥墩相连，因此，本文的分析工况主要针对列车在CFJ轴上运行的情况，具体工况如下：

（1）仅在C轴施加桥墩反力；

（2）仅在F轴施加桥墩反力；

（3）在C、F轴施加桥墩反力；

（4）在C、J轴施加桥墩反力；

（5）在C、F、J轴同时施加桥墩反力。

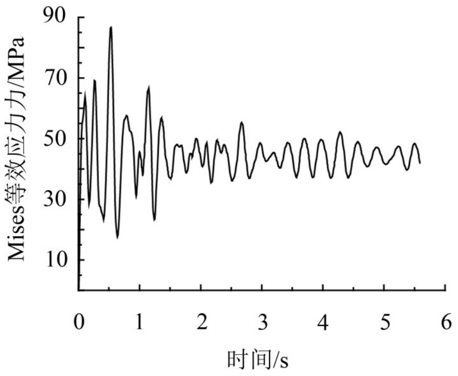

图7 网壳最大等效应力时程曲线

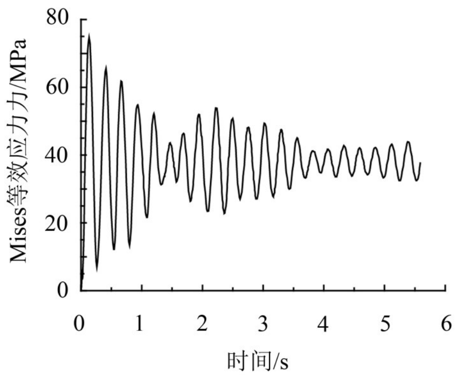

图8 下弦节点最大等效应力时程曲线

5 计算结果

中国建筑科学研究院的赵鹏飞[6]等对武汉火车站的结构体系等进行了研究，研究表明：武汉站中央站房屋面结构竖向荷载的传力路径为：网壳—V撑—主拱或半拱（斜立柱）—墩台—桥墩。受振动影响较大的几个部位有：主拱上V撑、网壳、下弦节点、铸钢点和主拱等。而其中，下弦节点和柱角铸钢节点为传力路径上两类关键性的节点。

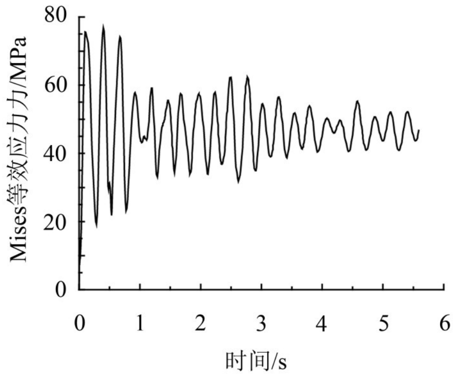

图9 主拱最大等效应力时程曲线

利用自编程序对上述每个部位所包含的单元在整个动力时程内搜索，找出Mises等效应力最大的单元编号（具体部位）、出现时间和应力值，再利用自编程序提取该单元端节点处的Mises应力时程曲线。

表1为不同工况下V撑等各个部位最大等效应力值信息：出现最大值的时间、单元号码即出现部位以及最大应力值。由于各工况下V撑等各个部位等效应力相差不大，本文仅给出CFJ轴加载时应力最大值处节点的时程曲线。图6—图9分别为最大值出现部位的等效应力市城区线。

6 分析与结论

由上述表格及时程曲线可得如下结论：

1）不同工况下结构各构件应力最大值出现的部位几乎一致：均出现在结构纵向中部的F轴上，主要是因为该轴的跨度最大，柔度最大；

2）由于桥墩刚度大，由结构力学基本原理可知，刚度大分配的力也就大，上部大跨度钢结构相对柔很多（1阶自振频率仅0.94 Hz），桥墩吸收了绝大

表1 不同工况下各个部位最大等效应力值信息

加载工况	基本信息	V撑	网壳	下弦节点	柱角铸钢节点	主拱
CFJ轴加载	时间（s）	0.122	0.525	0.11	0.109	0.096 6
	部位	F轴	F轴	F轴	F轴	F轴
	最大等效应力值/MPa	75.1	83.5	71.6	63.3	74.8

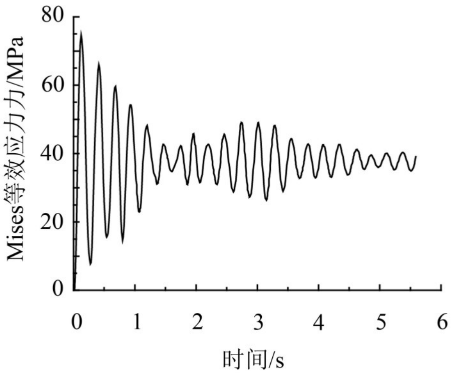

图6 V撑最大等效应力时程曲线

多数的振动能量，仅小部分的振动能量传给了上部大跨度钢结构，因而，各工况下上部大跨度钢结构的动力响应相差不大；

3）从应力时程曲线看，除网壳部分外，其余各构件的应力峰值出现均出现在最开始的0.1 s左右，随后由于结构阻尼，衰减较快，最后均在静力作用时结构应力值附近波动；

4）结构各构件的最大应力仅86.6 MPa，对于Q 345钢而言，远小于其屈服强度值（345 MPa），即列车振动荷载对结构的强度影响不大，因而，更多的注意应放在焊接钢结构的长期振动疲劳方面。

参考文献：

[1] 贺玉龙，向 怡. 郑西高速铁路渭南北高架车站环境振动测试分析[J]. **噪声与振动控制**，2012，(3)：152-155.

[2] 邓世海,郭向荣，王慧慧，等. 高速列车对建筑结构的振动影响 [J]. **噪声与振动控制**，2010，(2)：72-76.

[3] 颜 锋，钱基宏，赵鹏飞，等. 武汉火车站高速列车对建筑结构的振动影响研究 [J]. **建筑结构**，2009,39(1)：25-28.

[4] 胡小勇，张光辉，谢伟平. 高速列车作用下简支梁的动力响应分析[J]. **武汉理工大学学报**，2010，32(7)：125-128.

[5] 张 弥，夏 禾，冯爱军. 轻轨列车和高架桥梁系统的动力响应分析[J]. **北方交通大学学报**，1994，18(1)：1-8.

[6] 赵鹏飞，潘国华，汤荣伟，等. 武汉火车站复杂大型钢结构体系研究[J]. **建筑结构**，2009，39(1)：1-4.

（上接第143页）

[3] Peter R. T. Munro, Konstantin Ignatyev, Robert D. Speller, et al. The relationship between wave and geometrical optics models of coded aperture type X-ray phase contrast imaging systems[M]. Optics Express,2012, 18(5): 4103-4117.

[4] P. Chevret, J. Chatillon. Implementation of diffraction in a ray-tracing model for the prediction of noise in open-plan offices [J]. **Acoustical Society of Americ**a, 2012, 132: 3125.

[5] 陈永光，袁启慧，蔡伟明，等. 声屏障声学设计与计算机仿真应用[J]. **噪声与振动控制**，2013，33(4)：182-184.

[6] Born M, Wolf E. Principles of optics, electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. Seventh (Expanded) Edition[M]. Oxford: Pergamon Press; 1999.

[7] J B Keller, A Blank. Diffraction and reflections of pulses by wedges and corners[J]. **Communications on Pure and Applied Mathematics**, 1951, 4: 75-94.

[8] David J Oldham, Christopher A Egan. A parametric investigation of the performance of T- profiled highway noise barriers and the identification of a potential predictive approach [J]. **Applied Acoustic**s, 2011, 72(11): 803-813.

[9] D Ouis. Noise attenuation by a hard wedge-shaped barrier [J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2003, 262: 347-364.

[10] H S Kim, J S Kim, H J Kang, B K Kim , et al. Sound diffraction by multiple wedges and thin screens[J]. **Applied Acoustics**, 2005, 66: 1102-1119.

[11] Michael I. Mishchenko, Victor P. Tishkovets, Electromagnetic scattering by a morphologically complex object: Fundamental concepts and common misconceptions[J]. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer,** 2011, 112(4): 671-691.

[12] Van Renterghem T, Botteldooren D. Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs [J]. **Building and Environment**, 2009, 44: 1081-1087.

[13] Alexander Pohl, Dirk Schröder, Uwe M. Stephenson, et al. Influence of reflecting walls on edge diffraction simulation in geometrical acoustics[J]. **Acoustical Society of America,** 2013, 19 (1): 45-66.