

doi: 10.3724/SP.J.1201.2013.06171

南水北调丹江口加高工程施工栈桥结构模态分析

廖湘辉¹, 陈大伟¹, 余健², 韦仕龙¹

(1. 三峡大学机械与材料学院, 湖北宜昌 443002; 2. 内蒙古呼和浩特抽水蓄能发电有限责任公司, 呼和浩特 010051)

摘要: 振动模态分析是桥梁结构设计的重要步骤。利用大型有限元软件 ANSYS, 对南水北调丹江口大坝加高工程 38 号-25 号坝后架设的临时施工运输栈桥结构进行模态分析, 计算了栈桥结构的前八阶固有频率与主振型。研究认为, 当受到外部激励的频率与固有频率接近时, 有可能产生共振, 从而严重损害栈桥结构; 栈桥第 4、5、6、8 跨是其薄弱环节, 使用过程中应避免同频率的车辆在上面停留。研究结果为栈桥结构的动力学设计提供了重要依据, 也可作为其他同类型的结构设计提供参考。

关键词: 丹江口大坝; 施工栈桥; 模态分析; ANSYS; 建模; 模态振型

中图分类号: TV 68; TU 528 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)06-0171-03

Modal Analysis of Construction Trestle Structure of Danjiangkou Heightening Project in the South to North Water Diversion Project

LIAO Xiang hui¹, CHEN Da wei¹, YU Jian², WEI Shi long¹

(1. College of Mechanical & Material Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hohhot Pumped Storage Power Co., LTD, Hohhot 010051, China)

Abstract: Vibration modal analysis is essential for the design of construction trestle. The modal analysis was performed on the temporary construction transportation trestle behind the 38[#] ~ 25[#] dam of the Danjiangkou dam heightening project in the South to North Water Diversion Project using the finite element analysis software ANSYS, and the natural frequencies and principal vibration modes for the first 8 order modals were determined. The results showed that the construction trestle might resonate when the frequencies of external drive are close to the natural frequencies of the construction trestle, which can cause serious damage to the structure of construction trestle. Moreover, the fourth, fifth, sixth, and eighth strides were weaker than other strides, therefore the stay of the cars with similar frequencies should be avoided. The results can provide significant basis for the dynamic design of trestle structure and the design of other structures.

Key words: Danjiangkou dam; construction trestle; modal analysis; ANSYS; model; modal vibration pattern

根据整体施工进度计划的要求, 和坝顶 500 t 门机的安装需要, 南水北调中线工程丹江口大坝在坝顶加高时, 是从 33 号坝段开始的。工程开始后, 原坝顶 162.0 m 高程交通中断, 对后续的大坝加高工程中混凝土施工以及各种材料的运输都会造成非常大的阻碍。为了保证大坝加高工程施工的正常进行, 经多方研究讨论后决定在 25 号-38 号坝段坝后架设临时施工运输栈桥(运行时间为 2~3 a), 作为厂房及溢流坝段加高混凝土施工运输的主要通道。栈桥主要用于交通运输, 若发生破坏, 可能导致物料供给线中断, 甚至是生命、财产的巨大损失, 因此, 有必要对栈桥结构进行模态分

析, 为栈桥结构的强度、刚度设计以及其它动力学设计提供一定的依据。

1 施工栈桥的结构

栈桥主要由上部结构、下部结构和基础立柱三部分组成, 栈桥结构侧视图见图 1。上部结构由贝雷片、横梁、支撑架、桥面板、护栏等构件组成, 均为标准件; 下部结构由立柱桁架、支撑梁和盖梁等组成; 基础部分则是在坝后斜坡混凝土坡面上预留安装座, 基础的平面尺寸为 0.8 m(垂直坝轴线方向) × 1.0 m(平行坝轴线方向), 基础顶部设有预埋钢

收稿日期: 2013-03-14 修回日期: 2013-09-05 网络出版时间: 2013-10-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20131010.1029.029.html>

作者简介: 廖湘辉(1964), 男, 湖南涟源人, 教授, 主要从事水电工程施工技术的研究以及与之配套专用施工设备研制工作。E-mail: 380320975@qq.com

通讯作者: 陈大伟(1988), 男, 黑龙江兰西人, 硕士研究生, 主要从事特种装备与结构设计技术方面研究。E-mail: cdwei@foxmail.com

板, 布设有固定柱脚用的连接锚栓。

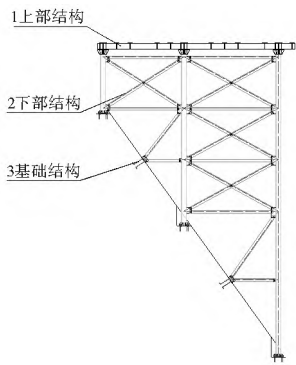


图 1 栈桥结构侧视图

Fig. 1 The side view of the construction trestle structure

施工钢栈桥按汽 20 设计, 挂 100 校核, 同时考虑栈桥在 27 号、28 号坝段起吊 6 m³ 混凝土吊灌。在 25 号- 26 号坝段需要设置回车平台, 平台宽度为 12 m, 平台长度在满足总体设计要求的前提下要控制在 15~ 20 m。标准行车道宽度为 4.5 m, 错车道宽度为 7.5 m, 长度为 25 m, 两边人行道宽度各为 0.75 m。

栈桥在 25 号- 31 号坝段处离大坝边线的最近距离为 2 m。30 号及 35 号坝段设置了搭板以满足前期施工的需要, 自卸汽车可以从 30 号、35 号坝段上下栈桥。

2 有限元模型的建立

本文利用大型有限元分析软件 ANSYS 对丹江口施工栈桥进行建模分析。对于栈桥的贝雷片、横梁、支撑架结构, 采用 Beam188 三维梁单元; 对于桥面板, 则采用 Shell63 三维壳单元。栈桥材料属性如下: Q235 钢弹性模量为 210 GPa, 钢密度为 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 钢的泊松比为 0.3。有限元模型见图 2。

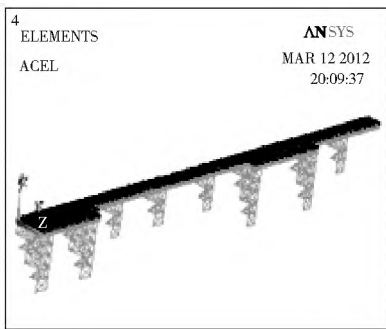


图 2 栈桥有限元模型

Fig. 2 The finite element model of the construction trestle

3 施工栈桥的模式分析

模型建立后, 可以通过 ANSYS 的模式求解器来计算栈桥在自由状态下的固有频率和各阶振型。模式求解时栈桥是不受任何载荷(除了本身自重)的, 没有任何边界条件和预应力。在桥墩锚栓连接处施加全约束(ALL DOF), 在电梯井左侧跨牛腿支撑处简化为沿桥轴线方向(UX)和垂直方向(UY)的约束。

为了方便观察任一阶模式振型下的结构应力和应变,

提取栈桥的前 8 阶固有频率, 并且对此 8 阶模态进行扩展求解, 计算结构的单元解。利用子空间法进行模态分析, 前 8 阶自振频率见表 1, 前 8 阶模态振型见图 3- 图 10。

表 1 前 8 阶自振频率及其相应振型

Table 1 The natural frequencies and modes of vibration for the first 8-order modals

振型序列	第 1 阶	第 2 阶	第 3 阶	第 4 阶
固有频率	1.233 8	1.891 9	2.806 6	3.300 5
振型序列	第 5 阶	第 6 阶	第 7 阶	第 8 阶
固有频率	3.981 6	4.401 5	5.080 9	5.480 6

表 1 中的数据表明, 当受到外部激励的频率与表中的数值接近时, 有可能产生共振, 从而可能严重损害施工栈桥的结构。所以, 有必要参考表 1 中数值, 合理设计施工栈桥的结构, 尽量避免整桥振动的频率范围靠近表 1 中数值。

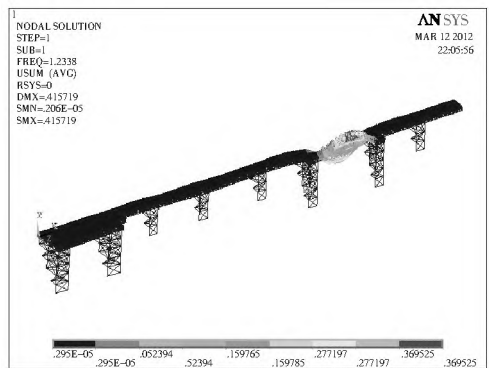


图 3 第 1 阶模式振型

Fig. 3 The vibration pattern of the first order modal

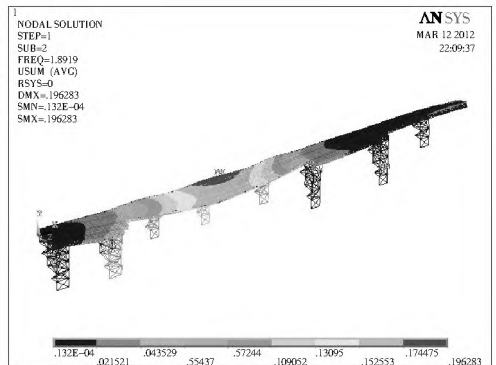


图 4 第 2 阶模式振型

Fig. 4 The vibration pattern of the second order modal

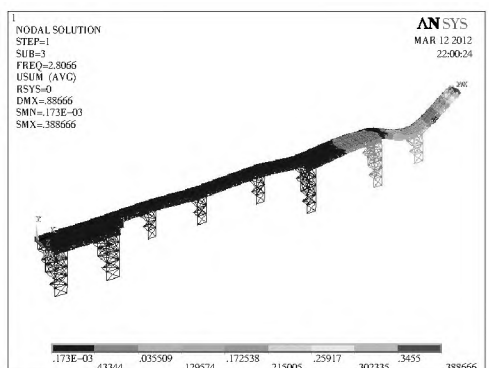


图 5 第 3 阶模式振型

Fig. 5 The vibration pattern of the third order modal

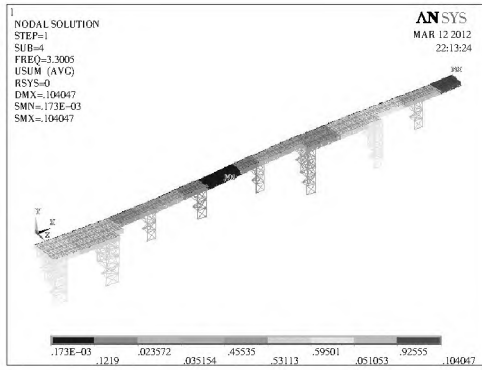


图6 第4阶模态振型

Fig. 6 The vibration pattern of the fourth order modal

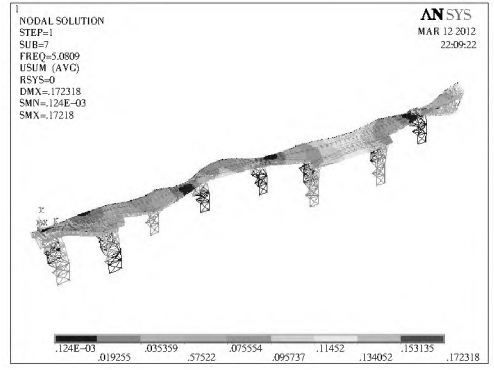


图10 第8阶模态振型

Fig. 10 The vibration pattern of the eighth order modal

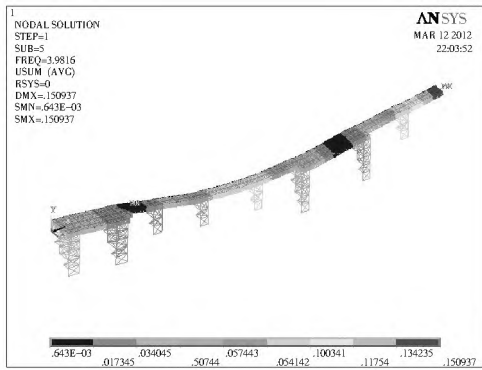


图7 第5阶模态振型

Fig. 7 The vibration pattern of the fifth order modal

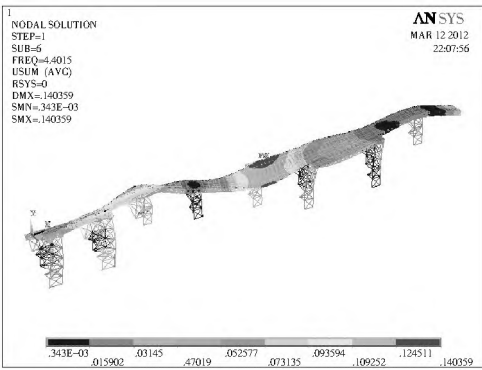


图8 第6阶模态振型

Fig. 8 The vibration pattern of the sixth order modal

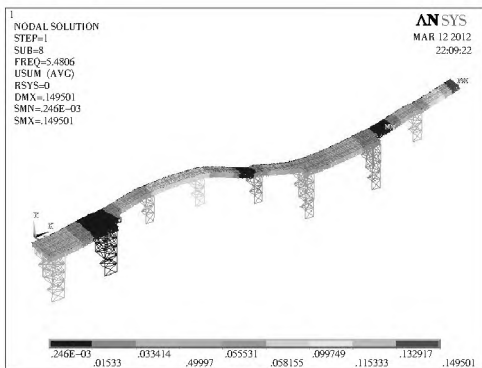


图9 第7阶模态振型

Fig. 9 The vibration pattern of the seventh order modal

从图3-图10施工栈桥的前8阶振型可知,振动较严重的部分是第4、5、6、8跨,也是施工栈桥振动的危险区域。第3、4、5、8阶模态振型表明施工栈桥的第8跨相对整个栈桥而言是最薄弱环节;第1阶和第7阶模态振型表明第6跨相对整个施工栈桥而言是最薄弱环节;第2阶和第6阶表明第4跨和第5跨相对而言是最薄弱环节,由此可见,在施工栈桥第4、5、6、8跨上,应尽量避免车辆与桥发生共振。

4 结语

求解钢栈桥的固有频率和各阶振型是研究其动态响应问题的基础,栈桥的固有频率和模态振型完全取决于栈桥本身的物理特性。通过栈桥固有频率和模态振型的求解可以避免其在使用过程中和行驶在其上的车辆发生共振,并且可以在很大程度上衡量了栈桥结构的刚度。固有频率和模态振型的求解也为后续分析钢栈桥在工程重载车辆作用下的动态响应问题提供了一定的参考。

参考文献(References):

- [1] 康子军,李方清,傅清潭,等.丹江口大坝加高工程施工与枢纽运行安全管理[J].南水北调与水利科技,2009,7(6):417-419. (KANG Zrjun, LI Fangqing, FU Qingtan, et al. Safety Management of the Construction and the Hydro Project Operation in the Danjiangkou Dam Heightening[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(6): 417-419. (in Chinese))
- [2] 宿艳彩.基于ANSYS软件的桥架结构参数化有限元分析[D].成都:西南交通大学,2006.(SU Yarcail. Bridge Structure Finite Element Analysis of Parameterized Based on ANSYS Software[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006. (in Chinese))
- [3] 章铁军,尤岭,闫海青.南水北调丹江口汉江大桥的设计[J].南水北调与水利科技,2008,6(1):240-243. (ZHANG Tiejun, YOU Ling, YAN Haiqing. Design of Danjiangkou Hanjiang Bridge in the South to North Water Diversion Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(1): 240-243. (in Chinese))
- [4] 周邢银,王璋奇.铁塔结构安全性评价的强度储备比汇总法[J].中国工程机械学报,2009,7(2):245-248. (ZHOU Xingyin, WANG Zhangqi. Synthesized Method of Strength Reservation Ratios for Tower Structure Safety Assessment[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2009, 7(2): 245-248. (in Chinese))

(下转第177页)

- Master Design of Shiplocks[S]. (in Chinese)
- [6] SL265 2001, 水闸设计规范[S]. (SL 265 2001, Design Specification for Sluice[S]. (in Chinese))
- [7] 江苏省革命委员会水利局水文总站. 江苏省水文手册[K]. 1976. (Revolutionary Committee of Jiangsu Province Bureau of Hydrology Station. Jiangsu Province Hydrology Manual[K]. 1976. (in Chinese))
- [8] 吴作平, 杨国录, 甘明辉. 河网水流数值模拟方法研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(3): 350-353. (WU Zuoping, YANG Guolu, GAN Minghui. Flow Numerical Model for River Systems[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(3): 350-353. (in Chinese))
- [9] 赵克玉. 天然河道一维非恒定流数学模型[J]. 水资源与水工程学报, 2004, 15(1): 38-41. (ZHAO Keyu. Numerical Model of Unsteady Low in Natural River[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2004, 15(1): 38-41. (in Chinese))
- [10] 贾西斌. 高淹没度开敞式水闸孔径计算公式探讨[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(3): 154-156. (JIA Xibin. Discussion of the Computational Formula for the Gate Size of Open Sluice with High Submergence Degree[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(3): 154-156. (in Chinese))
- [11] 张志昌, 李国栋, 李建中. 用边界层理论计算平底闸孔出流的流量[J]. 西安理工大学学报, 1998, 14(3): 79-84. (ZHANG Zhichang, LI Guodong, LI Jianzhong, et al. Calculating Discharge of Outflow under Sluice Gate by Using Boundary Layer Theory[J]. Calculating Discharge of Outflow under Sluice Gate by Using Boundary Layer Theory, 1998, 14(3): 79-84. (in Chinese))
- [12] 袁庚尧, 余伦创. 全国病险水闸除险加固专项规划综述[J]. 水利水电工程设计, 2003, 22(3): 6-9. (YUAN Gengyao, YU Lunchuang. The Summary of the Special Program of Countrywide Ill Conditioned and Dangerous Sluice[J]. Design of Water Resources & Hydroelectric, 2003, 22(3): 6-9. (in Chinese))
- [13] 齐清兰, 孟庆, 单长河, 等. WES 剖面实用堰流量系数的计算公式[J]. 河北工程技术高等专科学校学报, 2002, (4): 8-9. (QI Qinglan, MENG Qingcai, SHAN Changhe, et al. The Calculating Formula of Flow Coefficient of WES Weir[J]. Journal of Hebei Engineering and Technical College, 2002, (4): 8-9. (in Chinese))
- [14] 李晓庆, 唐新军. 新疆引水枢纽闸后消能防冲设计理念的演变[J]. 水电能源科学, 2012, 30(11): 77-80. (LI Xiaqing, TANG Xirun. Design Conception Evolution on Energy Dissipation and Erosion Prevention of Water Diversion Project in Xinjiang[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(11): 77-80. (in Chinese))
- [15] 赵忠文. 泄洪闸后防冲设计[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(2): 27-30. (ZHAO Zhongwen. Scour Prevention Design After Opening Flood Discharge Gate[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(2): 27-30. (in Chinese))
- [16] 梅海州. 闸后冲刷深度计算的探讨[J]. 水科学与工程技术, 2008, (增刊): 74-76. (MEI Haizhou. Discussion with Downstream Scour Depth Calculations[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2008, (Supp.): 15-20. (in Chinese))
- (上接第 173 页)
- [5] 沈荣胜, 王胜春, 王积永. 基于 ANSYS 的塔式起重机振动模态分析[J]. 起重运输机械, 2011, (9): 68-70. (SHEN Rongsheng, WANG Shengchun, WANG Jiyong. Vibration Modal Analysis of Tower Crane Based on ANSYS Software[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2011(9): 68-70. (in Chinese))
- [6] 徐可, 高德军, 徐港, 等. 基于 ANSYS 的预制混凝土 T 型梁裂缝成因分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(4): 44-47. (XU Ke, GAO Dejun, XU Gang, et al. Cause Analysis of Precast Concrete T-beam Crack Based on ANSYS[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(4): 44-47. (in Chinese))
- [7] 钟阳, 王哲人, 张肖宁. 不平整路面上行驶的车辆对路面随机动压力分析[J]. 中国公路学报, 1992, 5(2): 40-43. (ZHONG Yang, WANG Zheren, ZHANG Shaoning. Moving Vehicles Analysis of Random Dynamic Pressure on Uneven Pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 1992, 5(2): 40-43. (in Chinese))
- [8] 王丽, 张玉玲, 陶晓燕. 下承式钢桁梁旧桥净空改造设计[J]. 钢结构, 2009, 24(5): 47-49. (WANG Li, ZHANG Yuling, TAO Xiaoyan. Reconstruction Design of Through a Steel Truss Old Bridge[J]. Steel Construction, 2009, 24(5): 47-49. (in Chinese))
- [9] 许磊平, 刘伟庆, 徐秀丽, 等. TMD 抑制桥梁振动仿真分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(3): 272-276. (XU Leiping, LIU Weiqing, XU Xirun, et al. Simulation Analysis of Inhibiting Bridge Vibration Based on TMD[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(3): 272-276. (in Chinese))
- [10] 张大勇, 尤岭, 李亮. 南水北调中线跨渠桥梁若干问题的探讨[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 434-437. (ZHANG Dayong, YOU Ling, LI Liang. The Cross Ditch Bridge Investigation of the Middle Route in the South to North Water Transfer Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(6): 434-437. (in Chinese))
- [11] 李小珍, 张黎明, 张洁. 公路桥梁与车辆耦合振动研究现状与发展趋势[J]. 工程力学, 2008, 25(3): 230-237. (LI Xiaozhen, ZHANG Liming, ZHANG Jie. State of the art Review and Trend of Studies on Coupling Vibration for Vehicle and Highway Bridge System[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(3): 230-237. (in Chinese))
- [12] 袁安富, 陈俊. ANSYS 在模态分析中的应用[J]. 制造技术与机床, 2007, (8): 79-81. (YUAN Anfu, CHEN Jun. Application of ANSYS in Modal Analysis[J]. Manufacturing Technology & Machine Tools, 2007, (8): 79-81. (in Chinese))