

文章编号: 0451-0712(2005)11-0059-04

中图分类号: U441.3

文献标识码: A

# 龙潭河大桥风致抖振时域分析

李 黎<sup>1</sup>, 彭元诚<sup>1,2</sup>, 胡 亮<sup>1</sup>, 樊 剑<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学土木工程与力学学院 武汉市 430074; 2. 中交第二公路勘察设计研究院 武汉市 430074)

**摘 要:** 龙潭河大桥是一座最高墩高为 179 m, 总长为 812 m 的混凝土连续刚构桥, 为高柔的风敏感结构, 在分析抗风性能时, 使用大型通用有限元软件 ANSYS, 建立了龙潭河大桥成桥阶段和最高墩施工最大双悬臂阶段的有限元模型, 分析了模型的动力特性, 根据 Geodatis 改进型的谱表示法模拟了桥梁的随机脉动风速场并进行了检验, 然后基于准定常理论计算了作用在模型上的抖振力时程, 最后由时程分析分别求得了两阶段抖振时域分析的结果。分析结果为龙潭河大桥的抗风设计提供了依据, 可供同类桥梁设计参考。

**关键词:** 龙潭河大桥; 风场模拟; 抖振; 时域分析

## 1 龙潭河大桥概况

沪蓉国道湖北西段是目前世界上难度最大的高速公路之一, 其第 2 合同段中桥隧长度竟占到路线总长度的 81%, 龙潭河大桥右线桥即位于该段。它跨越龙潭河峡谷, 是一座预应力混凝土高墩大跨连续刚构桥。该桥总长为 812 m, 桥面宽为 13 m, 主梁采用 106 m+3×200 m+106 m 悬臂浇注连续变截面箱梁, 墩顶处箱梁高度为 12 m, 跨中箱梁高度 3.5 m, 箱梁高度和箱梁底板厚度按 1.8 次抛物线变

化; 主墩采用混凝土双空心薄壁墩, 壁厚为 70 cm, 墩柱纵桥向按 1:100 放大, 横桥向按 1:100、1:60、1:40 分 3 次放大, 墩柱间设有横梁。总体桥型布置见图 1。该桥的最大特点是墩高, 最高墩 5 号墩高达 179 m, 雄踞世界同类桥梁之首, 6 号墩亦高达 170 m。龙潭河大桥这类大跨桥梁结构属于高轻柔结构, 对脉动风荷载十分敏感, 因此有必要对其风致抖振问题进行分析, 以保证其抗风安全性。

目前, 在抖振响应的频域和时域两类计算方法

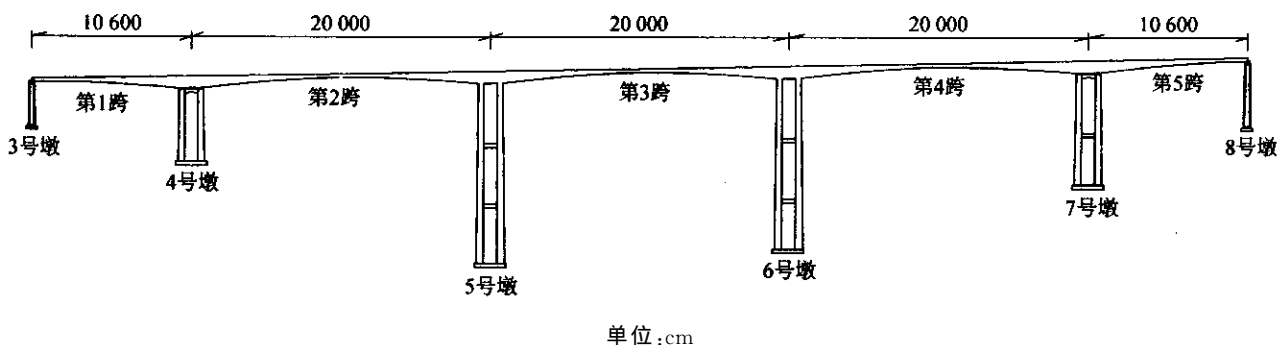


图 1 龙潭河大桥右线桥型布置

中, 时域方法由于可以得到响应时程结果, 能计入多振型耦合效应, 且便于考虑各种非线性因素的影响, 已成为抖振计算的发展方向<sup>[1]</sup>。本文使用 ANSYS 软件对龙潭河大桥的成桥阶段和 5 号墩最大施工双悬臂阶段(以下简称施工阶段)进行了时域抖振分析, 得到的结果供设计作为依据。

## 2 建模与动力特性分析

采用大型通用有限元分析程序 ANSYS, 建立了龙潭河大桥成桥阶段的有限元模型, 如图 2 所示。变截面箱梁和变截面墩采用自定义截面的空间梁单元 BEAM188 模拟; 主梁和墩采用的材料均为 C50 混凝土, 弹性模量为  $3.45 \times 10^4$  MPa, 泊松比为 0.167;

桥面铺装等二期恒载转化为集中质量附加在模型主梁的节点上。成桥阶段模型离散成 387 个单元, 386 个节点。模型的整体坐标系标示于图 2 中,  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴分别为顺桥向、竖直向(正方向竖直向上)和横桥向方向。边界上, 梁端采用铰支承, 仅约束竖向平动自由度, 所有墩底处理为固结。施工阶段模型为在主梁模型中截取的 5 号墩施工最大双悬臂的部分, 且去掉了附加二期恒载的质量, 共有 116 个单元, 116 个节点, 如图 3 所示, 图中显示了桥梁模型的实体形状。

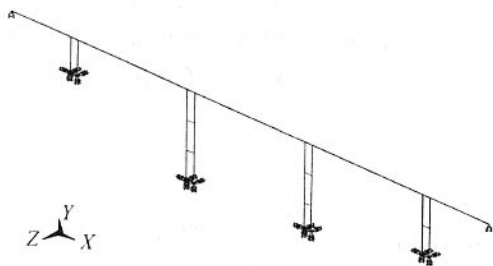


图 2 龙潭河大桥成桥阶段有限元模型

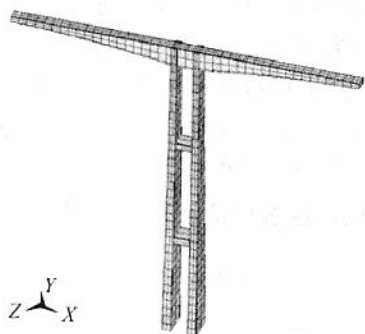


图 3 龙潭河大桥施工阶段有限元模型

为检验模型的准确性, 首先在 ANSYS 软件中使用块 Lanczos 方法对 2 种模型进行了动力特性分析, 其主要振型频率及振型特征可见表 1 和表 2。从表中可知, 成桥阶段的周期约为 5.92 s, 施工阶段周期约为 6.03 s, 均为长周期结构。因为脉动风荷载能量主要集中在低频、长周期段, 故本桥梁属于风敏感结构; 同时施工阶段周期略长于成桥阶段, 表明施工阶段桥梁结构更为轻柔, 抗风更为不利。

### 3 脉动风速场的模拟

抖振分析的关键在于脉动风荷载的模拟, 因此需要先模拟桥梁周围的脉动风速场, 即单独模拟顺风向脉动风速和竖直向脉动风速, 然后共同作用在结构上, 即可转换为抖振力荷载。顺风向和竖直向分

表 1 成桥阶段模型自振频率及振型特性

序号	自振频率 $f/\text{Hz}$	振型主要特性
1	0.168 92	体系一阶横弯
2	0.218 3	体系二阶横弯
3	0.233 5	主梁横弯
4	0.255 2	体系纵飘
5	0.323 0	梁横弯, 墩扭转
6	0.387 9	梁横弯, 墩扭转

表 2 施工阶段模型自振频率及振型特性

序号	自振频率 $f/\text{Hz}$	振型主要特性
1	0.165 6	体系一阶横弯
2	0.165 7	体系一致扭转
3	0.179 4	体系一致纵弯
4	0.534 8	梁反对称竖弯
5	0.815 3	梁对称横弯
6	0.827 0	梁对称竖弯

别对应有有限元模型整体坐标系的  $Z$  轴方向、 $Y$  轴方向。

按照 Geodatis 改进型的谱表示法<sup>[2]</sup>, 使用 FORTRAN 语言编制了风速模拟程序, 并引入了 FFT 算法以提高计算效率。选定的模拟点即风荷载加载节点为: 成桥阶段模型 189 点, 其中主梁上 89 点, 墩上 100 点; 施工阶段模型 57 点, 其中主梁上 23 点, 墩上 34 点; 墩上点仅模拟顺风向脉动。模拟的其他参数为:  $N$  类地貌; 成桥阶段 10 m 高风速  $U_{10} = 21.15 \text{ m/s}$ , 桥面高度处设计基准风速  $U_d = 33.54 \text{ m/s}$ , 其他高度处按照指数律换算; 施工阶段各项风速按成桥阶段值乘以风速重现期系数  $\eta = 0.84$  进行折减<sup>[4]</sup>。模拟目标谱: 顺风向脉动为 Kaimal 谱, 竖直向脉动为 Panofsky-McCormick 谱, 由 Davenport 相干系数考虑空间相关性; 谱频率范围为  $0 \sim 2\pi$ , 分割为 1 024 块, 使用 4 096 点 FFT; 模拟时间步长 0.25 s, 共 3 600 步, 总时长为 900 s。图 4 为主梁上某节点处模拟的风速时程示例。

每次使用该程序进行模拟时, 均对模拟风速波的均值、根方差和紊流强度进行了检验, 其中成桥阶段主梁上某节点处模拟风速的检验结果如表 3 所示。脉动风速是 0 均值平稳随机过程, 故均值目标值为 0; 表中根方差目标值由目标谱计算; 紊流强度目标值系在文献<sup>[4]</sup>中查得。从表 3 中可看出, 统计值和目标值的误差很小, 模拟的结果良好。

### 4 抖振时域分析

脉动风速模拟完成后, 便可按照准定常理论的

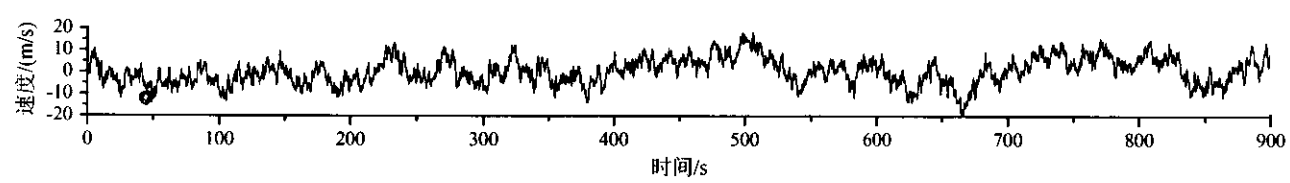


图 4 主梁上某点处模拟的顺风向脉动风风速时程

检验类别	顺风向脉动		竖向向脉动	
	目标值	统计值	目标值	统计值
均值	0.00	-2.17e-4	0.00	-7.19e-6
根方差	6.30	6.36	3.11	3.13
紊流强度	0.18	0.190	0.09	0.093

抖振力计算公式,将风速时程转换为作用在结构上的抖振力时程<sup>[5]</sup>,此过程在 ANSYS 软件中读入风

速时程和节点受风面积,通过 APDL<sup>[6]</sup>简单二次开发即可完成。主梁的气动力三分力系数由节段模型风洞试验给出,桥墩的阻力系数可从文献<sup>[4]</sup>中查得。计算中,原需考虑初始攻角+12°~−12°共25个工况;经过选择,此处仅对最为不利的+5°初始攻角情况进行计算。主梁上某点上作用的抖振力时程如图5所示。

将得到的抖振力时程作用在桥梁结构上,利用 ANSYS 进行时程分析,即得到抖振响应时域分析

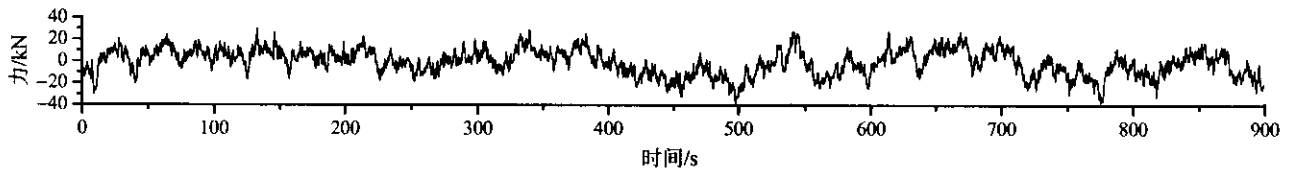


图 5 主梁上某点处模拟的横桥向(Z轴方向)抖振力时程

的结果,计算时长取为900 s。表4和表5分别示出了对该桥成桥阶段和施工阶段抖振响应计算的主要结果。其中,静风响应计算参照文献<sup>[4]</sup>进行;未计入非线性因素,故表中风致总响应为静风响应与抖振响应的线性叠加;脉动增大系数定义为总响应值与静

风响应之比;阵风响应系按照阵风系数为1.7<sup>[4]</sup>计算所得。图6和图7分别为成桥阶段和施工阶段某点抖振位移时程响应示例,图8为成桥阶段某墩底弯矩时程响应示例,图9为施工阶段某点抖振加速度时程响应示例。

表 4 龙潭河大桥成桥阶段抖振响应时域分析主要结果

响应类型	抖振响应峰值	静风响应	总风致响应	阵风响应	脉动增大系数
主梁中跨跨中横桥向位移/cm	12.3	9.16	21.46	26.47	2.342
主梁中跨跨中竖向向位移/cm	0.951	0.626	1.577	1.809	2.519
主梁中跨跨中扭转位移/(rad%)	0.105 1	0.078 6	0.183 7	0.227 1	2.337
墩底最大弯矩/(kN·m)	157 606	112 219	268 925	324 313	2.396
墩底最大拉应力/MPa	1.84	1.38	3.22	3.99	2.333

表 5 龙潭河大桥施工阶段抖振响应时域分析主要结果

响应类型	抖振响应峰值	静风响应	总风致响应	阵风响应	脉动增大系数
主梁悬臂端横桥向位移/cm	14.41	7.16	21.57	20.69	3.013
主梁悬臂端竖向向位移/cm	1.488	0.743	2.231	2.147	3.003
主梁悬臂端扭转位移/(rad%)	0.118 3	0.063 7	0.182 0	0.184 1	2.857
5号墩底弯矩/(kN·m)	155 575	88 480	244 055	255 707	2.758
5号墩底拉应力/MPa	1.79	1.00	2.79	2.89	2.790

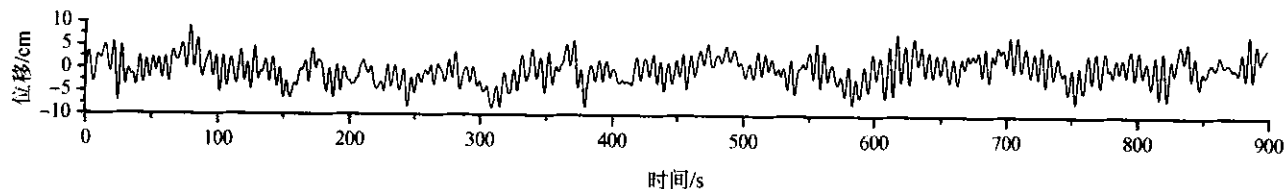


图 6 成桥阶段主梁跨中某点横桥向(Z轴方向)抖振位移时程

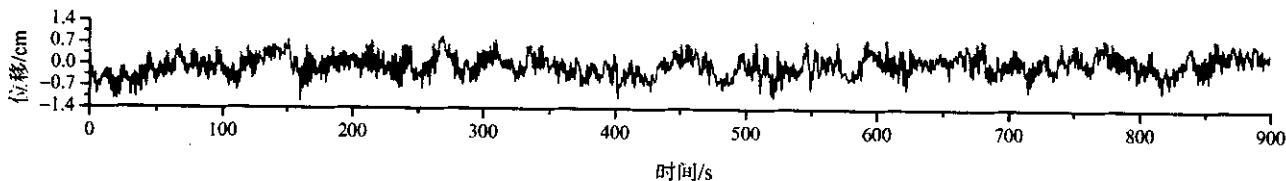


图 7 施工阶段主梁上某点竖直向(Y轴方向)抖振位移时程

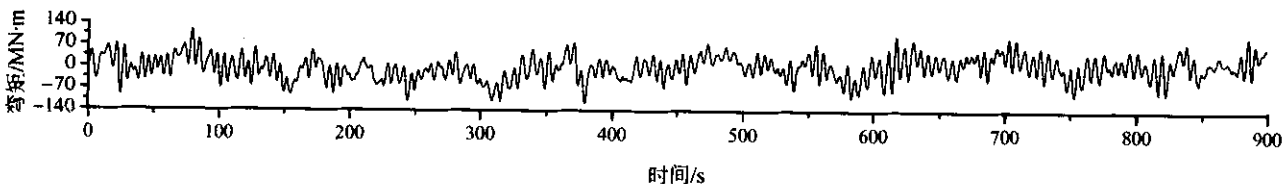


图 8 成桥阶段 5 号墩墩底主方向抖振弯矩时程

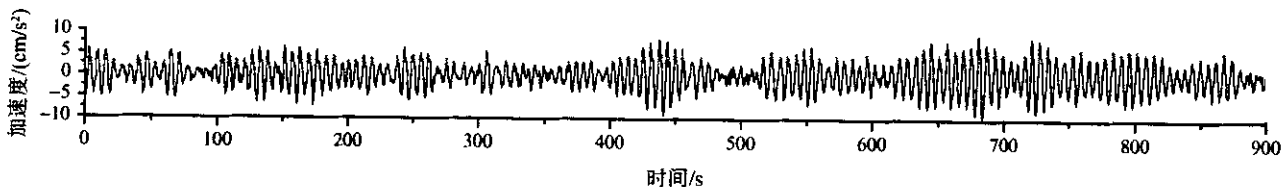


图 9 施工阶段主梁上某点横桥向抖振加速度时程

## 5 结论

使用 ANSYS 软件,对龙潭河大桥右线桥成桥阶段和施工阶段进行了风致抖振时域分析,得出了以下结论,供抗风设计参考。

(1)成桥阶段和施工阶段风致总位移最大值分别为 21.46 cm 和 21.57 cm,约为桥梁单跨跨径的 1/927;风荷载带来的墩底最大拉应力为 3.22 MPa。

(2)分析得到的成桥阶段脉动增大系数在 2.3~2.5 之间,取中间值为 2.4;施工阶段的脉动增大系数在 2.8~3.0 之间,取中间值为 2.9。施工阶段脉动增大系数大于成桥阶段,说明施工阶段桥梁对动风荷载更为敏感。

(3)成桥阶段阵风响应均大于时域方法分析结果,表明对本桥梁若按阵风方法进行抗风设计是偏于安全的;施工阶段参照该阵风方法计算所得的响应值则不一定大于时域方法分析的结果。

## 参考文献:

- [1] 项海帆,陈艾荣. 特大跨度桥梁抗风研究的新进展[J]. 土木工程学报, 2003, 36(4).
- [2] Deodatis G. Simulation of ergodic multivariate stochastic processes [J]. Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 1996, 122 (8).
- [3] 埃米尔·希缪, 罗伯特·H·斯坎伦, 著. 刘尚培, 项海帆, 谢黎明, 译. 风对结构的作用-风工程导论(第二版)[M]. 上海: 同济大学出版社, 1992.
- [4] 项海帆, 等. 公路桥梁抗风设计指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
- [5] Chen X Z, Kareem A. Advances in modeling of aerodynamic forces on bridge decks [J]. Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 2002, 28(11).
- [6] ANSYS, Inc. ANSYS, Inc. Theory Reference & ANSYS APDL Programmer's Guide[M].

文章编号: 0451-0712(2005)11-0063-06

中图分类号: U448.225.51

文献标识码: B

# 双层桥面系杆拱桥的施工控制

孙建渊<sup>1</sup>, 李志胜<sup>2</sup>

(1. 同济大学桥梁工程系 上海市 200092; 2. 浙江公路水运工程咨询监理公司 杭州市 310014)

**摘 要:** 介绍了国内第一座双层桥面城市桥梁——钱江四桥施工控制技术的应用及其成果,采用的施工控制技术及计算理论,不仅确保了大桥的施工期安全,而且结构内力状态与结构线性的监测结果与施工控制预测值符合较好,得到的结论可作为今后同类桥梁设计与施工的重要参考。

**关键词:** 系杆拱桥; 双层桥面; 施工控制

## 1 钱江四桥概况

钱江四桥为城市道路与轻轨交通结合方式的双层桥面越江桥梁,其中上层为6车道汽车快车道,下层为轻轨列车和公交车辆专用道。钱江四桥主桥跨径组合为:2×85 m+190 m+5×85 m+190 m+2×85 m;其中85 m跨径可看作下承式系杆拱桥与上承式拱桥的结合,190 m跨径可看作下承式系杆

拱桥与中承式拱桥的结合<sup>[3]</sup>。钱江四桥是复杂的拱梁组合结构桥梁,位于钱塘江,河床较深,涌潮及风浪影响较大,施工期不能影响通航,施工过程采用缆索搬运及吊装,拱圈采用斜拉索辅助节段拼装方法安装,施工工艺复杂,对施工的技术要求较高。拱肋、吊杆、下层结构纵梁、上层结构立柱、上下层桥面结构等的安装是本桥施工中的关键步骤,保证上述各

收稿日期:2005-04-29

# Time Domain Analysis of Wind-Induced Buffeting of Longtan River Bridge

LI Li<sup>1</sup>, PENG Yuan-cheng<sup>1,2</sup>, HU Liang<sup>1</sup>, FAN Jian<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China  
2. China Communications Second Highway Survey, Design and Research Institute, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Longtan River Bridge is a rigid frame concrete bridge with length 812 m. Its highest pier is as high as 179 m. The structure of the bridge is super flexible and wind-sensitive structure so that the analysis of wind-resistant capacity must be performed on the bridge. The finite element models of the bridge both in the post-construction stage and in the longest twin-cantilever construction stage are established respectively by using general finite element analysis (FEA) software ANSYS. The dynamic characteristic analysis of the two models is done. By introducing the Geodatis-innovated spectral representation method, the turbulent stochastic wind-velocity field of the bridge is simulated and checked. Then, the time history of buffeting force, which will be applied on both models, is computed according to the quasi-steady theory. Finally, the results of the time-domain buffeting analyses of the two stages are gotten by carrying out time history analysis. The wind-resistant design of the bridge can be based on that results.

**Key words:** Longtan River Bridge; wind field simulation; buffeting; time domain analysis