

文章编号: 1000 - 582X(2006)03 - 0134 - 04

菜园坝长江大桥节段模型风洞试验*

张亮亮, 曾永平, 晏致涛, 王 睿

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400030)

摘 要:随着施工技术以及新材料的运用,拱桥正朝着刚度小、跨度大、重量轻的方向发展,由于拱桥在施工阶段的刚度显著小于成桥状态,因此研究大跨度拱桥的空气动力特性十分必要.通过菜园坝长江大桥的节段模型静力试验和动力试验获得了主梁及主拱的静力三分力系数随攻角的变化规律、主梁的颤振特性以及识别了主梁的 8 个颤振导数,并对试验获得的结果进行了详细的分析.最后,对该桥的主梁和拱肋的抗风性能进行了评价.其分析评价的结果直接用于指导该桥的设计与施工,也可为同类桥梁提供理论参考.

关键词:菜园坝长江大桥;静力三分力;风洞试验;节段模型;颤振

中图分类号: TU317

文献标识码: A

随着施工技术的发展和新材料的运用,拱桥正朝着刚度小、跨度大、重量轻的方向发展,对风的敏感程度逐渐增大而国内对于拱桥的抗风研究较少.因此,对大跨度拱桥进行节段模型风洞试验并研究其空气动力特性具有十分重要的意义.

重庆菜园坝长江大桥是一座刚构—桁架—系杆特大公轨两用无推力式钢箱系杆拱桥.主桥采用刚构与提篮式钢箱系杆拱、桁梁的组合结构.系杆拱桥主跨 420 m 居世界同类桥梁之首,对称布跨的边跨和侧跨分别为 102 m 及 88 m,主桥全长 800 m.该桥位于西部地区,又因为主桥采用桁架型主梁断面,迎风面积较大,提篮拱跨度达 320 m,中间只有 6 根横撑,侧向刚度较小.所以,必须对该拱桥进行风洞试验研究以确保主拱结构和组合体系桥梁在施工和建成运营阶段的抗风稳定性、安全性和适用性.

1 静力试验

通过静力试验获得三分系数以提供静力抗风设计参数,并判别有无发生驰振的可能.按风轴坐标系的阻力系数 C_D 、升力系数 C_L 、升力矩系数 C_M 表达分别见式 (1) - (3)^[1]:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} V^2 \cdot B l}, \quad (1)$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} V^2 \cdot H l}, \quad (2)$$

$$C_M = \frac{M_p}{\frac{1}{2} V^2 \cdot B^2 l}. \quad (3)$$

式 (1) - (3) 中: F_D 、 F_L 、 M_p 为风轴系下的空气阻力、升力和升力矩, B 、 H 为截面的宽度和高度 (m), l 为结构长度 (m), ρ 为空气质量密度, V 为来流平均速度, α 为来流攻角 (°);

按体轴坐标系的三分力系数可以图 1 所示的角度关系换算得到.

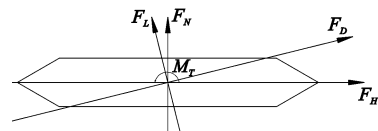


图 1 桥梁断面静力三分力

1.1 静力试验模型设计

菜园坝大桥的主梁采用桁架和正交异性桥面板组合体系,800 m 的连续钢桁梁在大跨拱内以吊杆索作弹性支承,其断面如图 2 所示.主拱结构为提篮式钢箱,拱肋内倾角为 10.67°.虽然两片拱肋间距沿跨径变化,但拱肋箱型截面尺寸均为 2.4 m × 4.0 m,仅板厚在 24 ~ 40 mm 之间变化,拱肋断面如图 3 所示.在进行以测量静力为目的的刚性节段模型试验时,通常

* 收稿日期: 2005 - 11 - 13

基金项目: 高等学校博士学科专项科研基金资助项目 (2005061102); 重庆大学创新基地基金资助项目 (200504Y1B0210128); 重庆市城市建设投资公司资助项目

作者简介: 张亮亮 (1956 -), 男, 湖南益阳人, 重庆大学教授, 主要从事桥梁及高层建筑结构抗风的研究.

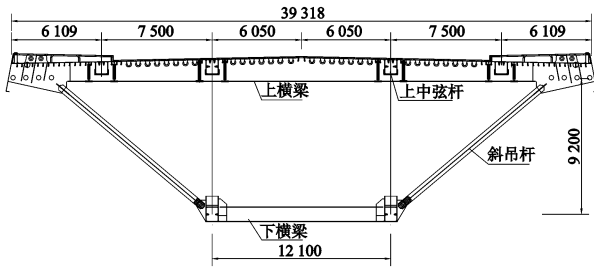


图 2 菜园坝大桥主梁断面示意图 (单位: mm)

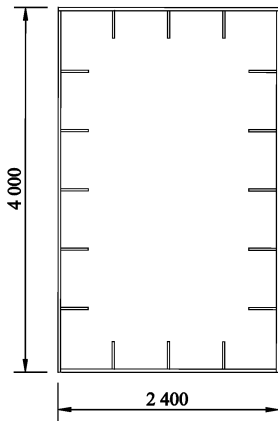


图 3 菜园坝大桥拱肋断面图 (单位: mm)

有如下要求^[2]:

- 1) 节段模型缩尺比不得小于 1/100.
- 2) 保持雷诺数相似,但对于非流线型构件截面,气流绕流的分离点比较固定,大多发生在棱角的边缘,很少随流速而变化,则可放松对雷诺数的相似要求.
- 3) 尽量消除模型端部的三元流效应,一种措施是在模型端部加端板,但是在试验中很难保证端板完全平行于来流,如果端板不平行于来流,会带来很大的系统误差;另一种措施是在节段模型两端加长模型但不测加长段的力.
- 4) 模型的刚性尽可能大,对质量和质量惯矩没有相似性要求.

按以上要求,在模型设计中,考虑到桁梁的各个杆件都具有棱角边,与其它主梁形式相比,雷诺数的影响非常小,且拱肋也具有类似钝体断面的较固定的分离点,故忽略雷诺数的相似要求.但严格模拟了棱角部分、桥上附属构件和暴露面的轮廓,以确保几何相似条件.为保证绕模型流动的二维特性,模型长度取为与风洞宽度相等,但模型与风洞壁之间不能发生碰擦,以避免微小间隙中的气流发生串动.

主梁节段测力模型模拟了中跨桁梁截面的成桥状态,采用几何相似比 $L = 1/70$,用 ABS 塑料板及优质木材组合而成.模型长 $L = 1.4$ m、宽 $B = 0.557$ m、高 $H = 0.157$ m,其长宽比 $L/B = 2.51 > 2$,符合文献对主梁节段模型的要求.

对于拱肋节段,为了简化模型设计和风洞试验,将风荷载作用下受力情况最不利的拱顶处拱肋按几何相

似比 $L = 1/70$,用优质木材制作模型,表面涂有油漆.模型水平投影长 $L = 1.4$ m、宽 $B = 0.12$ m、高 $H = 0.2$ m.

1.2 静力试验结果

此项试验在中国空气动力研究与发展中心低速所 HL-11 风洞中进行.模型采用双侧壁支撑方式^[3],即在试验段洞壁外侧设有侧壁支撑及测力天平系统.

在此条件下对以下 3 种工况进行试验,1)测试 $V = 10$ m/s 攻角 α 在 12 范围内, $\alpha = 4$ 时主梁和主拱的三分力系数;2)测试 $V = 14$ m/s 攻角 $\alpha = 0$ 时,主梁的三分力系数;3)测试 $V = 10$ m/s 攻角 $\alpha = 0^\circ$;主桥桁梁下横梁上有轻轨通行时,主梁的三分力系数;试验结果如图 4、图 5 和表 1 所示.

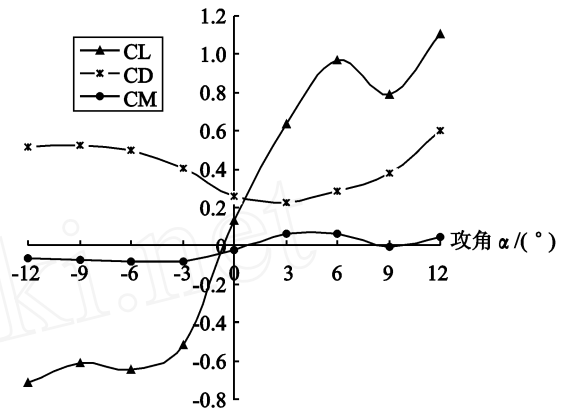


图 4 风轴系下的主梁静力三分力系数曲线

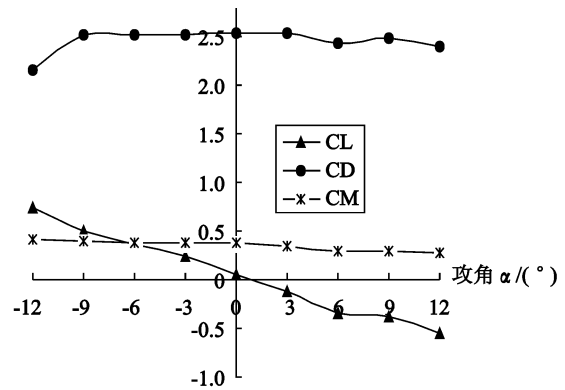


图 5 风轴系下的拱肋静力三分力系数曲线

表 1 工况 1、2、3 时主梁的三分力系数

工况	C_L	C_D	C_M
1且 $\alpha = 0$	0.141 000	0.259 000	-0.020 900
2	0.107 427	0.264 877	-0.024 541
3	0.045 448	0.101 454	-0.014 989

1.3 静力试验结果分析

从 1.2 的结果可以发现,1)攻角 α 在 ± 12 范围内,主梁 C_D 曲线关于 0 不对称,在负攻角处的 C_D 大于相应正攻角处的值.这说明,对于桁架断面,绝对值相同的正、负攻角下,断面的迎风面面积有较大差异,从而导致阻力系数曲线不对称.2)成桥状态下,在 α 在 ± 12 范围内,主梁断面的 C_M 和 C_L 曲线都基本关于 0°

对称. 虽然在 $-9^\circ < \alpha < -6^\circ$ 和 $6^\circ < \alpha < 9^\circ$ 攻角范围内, C_L 曲线的斜率 $\frac{dC_L}{d\alpha} < 0$ 和 C_M 曲线的斜率 $\frac{dC_M}{d\alpha} < 0$ 均为负值, 但整个试验过程中未观察到不稳定的挠曲振动和不稳定的扭转振动. 且在该负斜率区域内, 按 Glauert—Den Hartog 准则 $\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D > 0$, 即主梁满足不发生驰振的必要条件. 3) 当主桥桁梁下横梁上有轻轨通行时, 主梁的三分力系数均较无车时小. 4) $\alpha = 0^\circ$ 时, 风速增大时, 主梁三分力系数变化幅度均不大, 这验证了对于有固定气流分离点的钝体断面可以不考虑雷诺数相似的要求. 5) 拱肋具有良好的气动稳定性的条件, 其静力三分力系数对攻角的变化不敏感, 静风荷载主要表现为阻力, 且 $\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D > 0$ 不会发生驰振.

2 动力试验

2.1 动力试验模型

因为当结构发生弯扭耦合运动时, 其颤振临界风速比单自由度扭转时高, 试验时将桥梁主梁断面的三维风致振动近似简化为弯扭耦合的二维振动问题. 利用由 8 根拉伸弹簧把主梁节段模型悬挂在支架上所形成的可作竖向运动和绕模型转动的二自由度系统 (见图 6), 进行主梁节段模型的动力试验, 以进行颤振特性分析和颤振导数的识别. 模型与实桥之间下列 2 组无量纲量: 弹性参数 $\frac{V}{f_h B}, \frac{V}{f B}$; 惯性参数 $\frac{m}{B^2}, \frac{I_m}{B^4}$ 的一致性, 即相似律, 是通过悬挂模型的弹簧刚度以及在模型上设置配重来实现的.

f_h, f 为竖向振动及扭转振动的自振频率; m 及 I_m 为单位长度质量及质量惯性矩, 其它符号的意义如前. 模型的阻尼参数 h_i 低于实桥, 因而所得结果偏于安全. 在颤振测试中由于弯扭颤振临界风速与弯扭频率比有关, 又因为经动力特性计算得到该桥成桥状态的颤振以最低阶反对称模态起控制作用, 其第一阶反对称竖弯频率和第一阶反对称扭转频率分别为 0.537 Hz 和 1.286 Hz, 故还要满足弯扭频率比 $\omega = f/f_h = 2.39$ 与实桥相同的要求. 此外, 模型还应满足几何外形相似的要求, 缩尺比仍为 1/70 (见图 6).

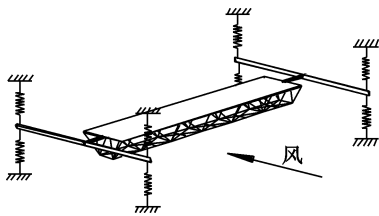


图 6 节段动力模型装置示意图

根据文献 [4] 菜园坝长江大桥成桥状态主梁的设计基准风速为 $V_d = 52.56 \text{ m/s}$ 按照文献 [1] 该桥的颤

振检验风速为 $[V_{cr}] = K\mu_f V_d = 1.2 \times 1.29 \times 52.65 = 81.36 \text{ m/s}$ 其中, K 为考虑风洞试验的误差及设计、施工中不确定因素的综合安全系数; μ_f 为考虑风的脉动特性以及空间相关特性影响的无量纲修正系数.

2.2 动力试验结果分析

试验在均匀流情况下, 风速 $V = 3.2 \sim 9.9 \text{ (m/s)}$ $U = 0.5 \text{ (m/s)}$, $\alpha = 0, \alpha = \pm 3^\circ$ 3 种风攻角时, 利用加速度传感器和天平测试了主梁节段模型在纯竖向、纯扭转和弯扭耦合运动 3 种试验工况下每一级试验风速下的振动响应, 并通过直接测量法测定了模型的颤振临界风速 [5].

通过试验发现模型均为发生大幅度振动, 仅当风速 $V = 9.9 \text{ (m/s)}$, $\alpha = +3^\circ$ 时, 模型发生了较大的转角, $\alpha = -3^\circ$ 时模型由于受到负升力作用有较大的竖向向下的位移. 因而可以得出结论, 该桥的主梁有较高的颤振临界风速, 在来流风速达到 9.9 m/s 时, 不会发生颤振. 按风速比 (23.5) 换算得, 实桥的颤振临界风速大于 232.65 m/s 远远高于设计风速.

此外试验得到颤振临界风速也大于文献 [1] 计算得到的结果, 这是由于拱桥的刚度与悬索桥、斜拉桥相比要大的多, 而文献 [1] 中对于颤振临界风速的研究与分析主要是针对后两者. 因此用其提供的方法来估算拱桥的颤振临界风速显得过于保守. 所以对于该类拱桥颤振临界风速的分析还需通风洞试验才能获得较为准确的结果.

对于桁架梁这类非流线型断面在均匀流下即有特征紊流参与作用, 在紊流场中时, 来流紊流与特征紊流共同作用, 来流紊流的加入作用就不会很明显. 因而非流线型断面在均匀流场下测得的颤振临界风速值将略低于紊流场下的值. 这使得该桥仅在均匀流场进行动力试验是偏于安全的.

2.3 颤振导数的识别

利用节段模型动力试验可测定桥梁颤振分析竖向和扭转运动的微分方程:

$$m(\ddot{h} + 2h_1\dot{h} + h_2h) = \frac{1}{2}V^2(2B) \left[KH_1^* \frac{\dot{h}}{V} + KH_2^* \frac{B}{V} + K^2 H_3^* + K^2 H^* \frac{h}{B} \right], \quad (4)$$

$$I_m(\ddot{\theta} + 2h_1\dot{\theta} + h_2\theta) = \frac{1}{2}V^2(2B^2) \left[KA_1^* \frac{\dot{h}}{V} + KA_2^* \frac{B}{V} + K^2 A_3^* + K^2 A^* \frac{h}{B} \right]. \quad (5)$$

式 (4) - (5) 中的 8 个颤振导数 H_i^*, A_i^* ($i=1, 2, 3, 4$). 其中 h_i 分别为竖向和扭转位移, h_i 为阻尼比, K 为固有频率, 其它符号意义同前. 由此可对实桥作三维颤振分析, 预测实桥的颤振临界风速约为 265.2 m/s (限于篇幅这里仅给出计算结果). 此外, 颤振导数也

是抖振分析中必不可少的气动力参数。

基于最小二乘理论^[6],将桥梁节段模型的自由衰减振动信号分解为竖向和扭转振动的信号,再分别对竖向和扭转振动信号进行非线性最小二乘拟合,一次识别主梁断面不同攻角下的 8 个颤振导数,并可得到各颤振导数随 V/Bn 的变化曲线。限于篇幅这里仅给出 A_2^* 随 V/Bn 的变化曲线(见图 7)。

由于在均匀流场下,桥梁颤振大都表现为扭转颤振或以扭转为主的弯扭耦合颤振,因此需重点分析与有关的气动阻尼项 A_2^* ,当 A_2^* 由负变正时,可能会导致结构的阻尼项由正变负,从而使结构从振动中吸收能量,出现发散振动。由图 7 可以看出,随着风速的增大, A_2^* 都一直为负值,且其绝对值有增大的趋势,即风速越高,空气对扭转振动的阻尼贡献也越大。

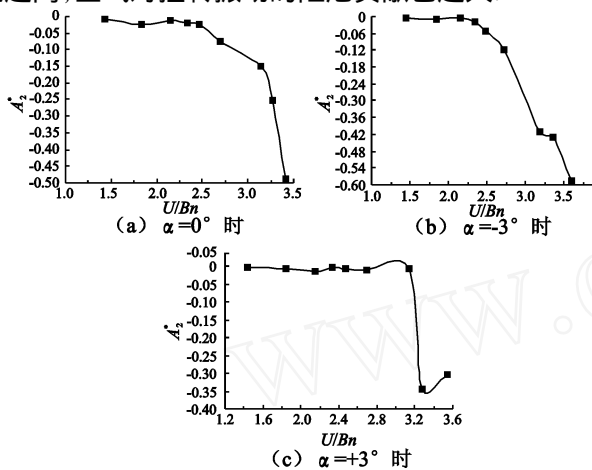


图 7 $\alpha = -3^\circ, 0^\circ, +3^\circ$ 时颤振导数曲线 A_2^*

3 结 论

通过节段模型试验发现重庆菜园坝长江大桥的主拱与主梁均具有良好的气动稳定性。全桥具有较高的刚度,因此主梁断面的颤振临界风速高于 232.65 m/s,远高于颤振检验风速。另外利用动力试验模型识别的 8 个颤振导数对实桥做三维分析所预测的颤振临界风速也远高于检验风速,这说明文献 [1] 中的分析方法对于该拱桥显得有些保守而不太适用。

此外,通过试验发现该类桁架梁的一些气动特性和型断面梁相似,桁架梁的扭转频率和竖向频率随风速都只发生了很小的变化;在均匀流场中, $\alpha = 0^\circ$ 时,低于临界风速范围内,结构的振幅随着风速增大,但幅度很小,不同的是攻角的变化对桁架梁响应值有较大的影响。

参考文献:

- [1] 《公路桥梁抗风设计指南》编写组. 公路桥梁抗风设计指南 [M]. 北京:人民交通出版社, 1996.
- [2] 李会知,李思堂,吴义章. 风洞在桥梁抗风研究中的应用 [J]. 郑州工业大学学报, 2001, 22(4): 22 - 24.
- [3] 叶镜明. 桥梁节段模型测力试验的模型支撑形式问题 [J]. 气动试验与测量控制, 1992, 6(2): 40 - 44.
- [4] JTG D60 - 2004. 公路桥涵设计通用规范 [S].
- [5] 潘颖. 大跨度拱桥空气动力试验研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2005.
- [6] 李永乐,廖海黎,强士中. 桥梁断面颤振导数识别的加权整体最小二乘法 [J]. 土木工程学报, 2004, 37(3): 80 - 84.

Wind Tunnel Test for Section Model of Caiyuanbai Bridge Over Yangtse River

ZHANG Liang-liang, ZENG Yong-ping, YAN Zhi-tao, WANG Rui
(School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: With the development of modern construction technique and the application of new material, arch bridges which progress towards small rigidity, long span and light weight, what's more is that long span bridge's rigidity under construction is much less than that in use stage. So it is very necessary to study the aerodynamic characteristics of long span bridge. The regularity of the three dimensional static component forces coefficient varying with attack angle and the girder's flutter properties of Caiyuanbai Bridge over Yangtse River are investigated with segmental molding's static wind-tunnel test and segmental molding's dynamic wind-tunnel test. Eight derivatives of the girder are also identified from the segmental molding's dynamic wind-tunnel test. Finally the assessment to wind resistant properties of the bridge is given based on detailed analysis of the test results. The conclusion which gets from analysis can provide an suggestion to design and construction this kind bridge.

Key words: Caiyuanbai Bridge over Yangtse River; three dimensional static component forces; wind tunnel test; section model; flutter

(编辑 姚 飞)