

空间主缆悬索桥非线性静风稳定分析

欧阳克俭¹, 陈政清¹, 李红利¹, 韩艳^{1,2}

(1. 湖南大学 风工程试验研究中心, 长沙, 410082; 2. 长沙理工大学 土木与建筑学院, 长沙 410076)

摘要:通过五分量天平测试得到了右汊桥节段模型的三分力系数。借助大型有限元分析软件 ANSYS, 采用修正的增量与内外两重迭代的方法, 对右汊空间主缆悬索桥进行了三维静风荷载数值计算。数值计算结果表明采用空间主缆的右汊悬索桥相对于平行双主缆的悬索桥具有更为优秀的静风稳定性能。设计并加工了缩尺比为 1:90.35 的右汊桥全桥气弹模型, 均匀流中全桥气弹模型的静风稳定性试验结果表明, 静风失稳临界风速明显高于设计风速。

关键词:悬索桥; ANSYS; 静风稳定; 五分量天平; 三分力系数

中图分类号: U446.1; U441.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2010)03-0083-05

Nonlinear Aerostatic Stability of Suspension Bridge with Spatial Main Cables

OUYANG Ke-jian¹, CHEN Zheng-qing¹, LI Hong-li¹, HAN Yan^{1,2}

(1. Wind Engineering Research Center, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, P. R. China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha 410076, Hunan, P. R. China)

Abstract: The three-component coefficients of section model of You-Cha Bridge were obtained by using two five-component balances. And the three-dimensional aerostatic stability of You-Cha Bridge was analyzed based on the modified increment and inner-outer iteration method implemented in ANSYS. It is indicated that the aerostatic stability of You-Cha Bridge with spatial main cables is more excellent compared with those of suspension bridges which have two parallel main cables. A full aero-elastic model with geometrical scale of 1:90.35 was designed and used to experimentally determine the wind velocity inducing aerostatic divergence in smooth wind. And it is found that the critical wind velocity for attendant bridge is higher than the design wind velocity.

Key words: suspension bridge; ANSYS; aerostatic stability; five-component balance; three-component coefficient

随着桥梁跨径的不断增大, 新型轻质高强复合材料的日益运用以及对桥梁美学的追求, 桥梁结构变得更加轻柔, 由风荷载的增大导致的桥梁静风稳定问题日益突出^[1-2]。大跨度缆索承重桥梁的静风失稳, 一般表现为加劲梁在静力风荷载作用下发生的扭转发散现象, 具有突发性特点。日本东京大学 Hirai 教授于 1967 年在悬索桥的全桥气弹模型风洞试验中观察到了静力

扭转发散的现象, 同济大学在对汕头海湾二桥的风洞试验中, 也发现了斜拉桥由静风引起的弯扭失稳现象^[3]。以往人们普遍认为大跨径桥梁的颤振临界风速一般都低于静力失稳的发散风速, 许多科研工作者对动力失稳的关注程度往往高于静风失稳, 但是宋等通过气弹模型试验观察到了鄂东长江大桥的静风失稳先于颤振发生^[4], 也有研究表明随着跨径的增大, 结构静

收稿日期: 2009-11-27

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50738002); 湖南省研究生科研创新项目(CX2009B075)

作者简介: 欧阳克俭(1981-), 男, 博士, 主要从事桥梁抗风与抗震研究, (E-mail) ouykj@yahoo.com.cn。

陈政清(联系人), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事桥梁抗风与抗震研究, (E-mail) zqchen@hnu.cn。

风失稳风速随跨径下降的速度明显快于动力失稳风速下降的速度^[5]。

Boonyapinyo^[6]、Miyata^[7]、谢旭^[8]、方明山^[9]、程进^[3]等学者对桥梁静风稳定问题进行不断的探讨和改进,使得静力失稳的理论研究不断得到完善。在这些研究者的基础上,Zhang 考虑了多种因素对大跨悬索桥的静风稳定的影响^[10]。张用正交异性壳单元模拟主梁来分析静风稳定性^[11]。以往的静风稳定研究往往偏重于理论分析和风洞试验中的某一方面,鉴于数值模拟和全桥气弹试验的双重重要性,因此非常有必要从理论数值计算和三维气弹模型风洞试验对一些典型桥梁进行静风稳定研究。与此同时桥梁断面三分力系数的精准识别关系到静风稳定数值分析的准确性,但是以往风洞试验在进行三分力测量时都是基于一端固支节段模型的六分量天平,这种方式在进行三分力测试时,模型有可能发生小幅的振动,影响天平测力的精度和准确性。

该文首先采用新开发的两端固支节段模型的五分量天平测力装置,精确测量了右汉桥节段模型模型的三分力;然后在数值分析中基于通用的 ANSYS 软件,引入松弛因子加快收敛速度,便于工程推广应用;最后结合全桥气弹模型试验,验证数值计算静风稳定的可靠性。

1 研究背景

南京长江隧道工程右汉桥(简称右汉桥)是 1 座独塔自锚式空间索面的悬索桥,主跨 248 m,边跨 137 m,桥面采用中央开口形式,桥面宽 40.6 m,中央口宽 8.2 m,有限元模型如图 1 所示。主跨侧主缆采用空间布置,锚固于加劲梁横桥向两端,形成空间索面;边跨侧主缆采用平行布置,锚固于横梁中部^[12]。由于加劲梁断面新颖独特,空间主缆和平行主缆同时存在,因此有必要进行静风稳定计算和全桥气弹模型静风性能试验。桥梁在静风荷载作用下的失稳模式因桥型不同会表现出较大的差异。右汉桥是空间缆索承重结构,可能的静风失稳模式有扭

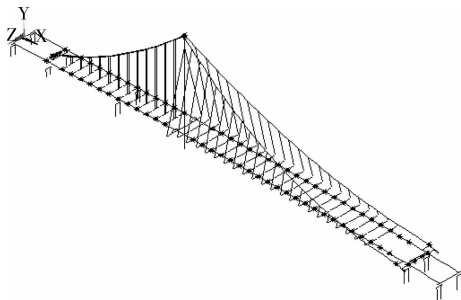


图 1 南京右汉桥有限元模型

转发散与侧向弯扭屈曲,前者升力矩是主因,后者阻力是主因。

右汉桥桥面处设计基准风速为^[13]

$$U_d = 35.4 \text{ (m/s)} \quad (1)$$

100 年重现期成桥状态颤振检验风速为

$$U_{cr} = 55.9 \text{ (m/s)} \quad (2)$$

2 三分力测试试验

对于桥梁结构静风失稳而言,主梁竖弯和扭转失稳形态始终耦合在一起,谁占主要成分与升力系数、升力矩系数、阻力系数和结构体系有着密切关系,因此,三分力系数的精确测量对于静风稳定的分析显得尤为重要。除了节段模型的细部构件(栏杆、检修轨道等)做到精细模拟之外,不再利用常规的采用悬臂式的六分量天平测力,而是利用湖南大学风工程试验研究中心开发的两端固支节段模型的五分量天平来测量三分力,该装置两端通过五分量天平、薄片铰式消扰构件与节段模型刚性连接,一端置于风洞外,置于风洞内的一端外包流线形的整流罩。通过采用该装置的扭转功能来改变节段模型的攻角,就可以测量单个攻角下的三分力。当模型做低频的单自由度扭转运动时,分别采集零风速与某一恒定风速下模型随攻角变化的气动力信号,就可以得到随攻角连续变化的静三分力曲线^[14],测试过程方便快捷。采用单个攻角独立测量的方式来测量节段模型的三分力。五分量天平装置测力原理如图 2;节段模型两端固支的悬挂装置如图 3、4 所示;主跨钢箱梁和边跨混凝土箱梁的三分力系数曲线分别如图 5、6 所示。

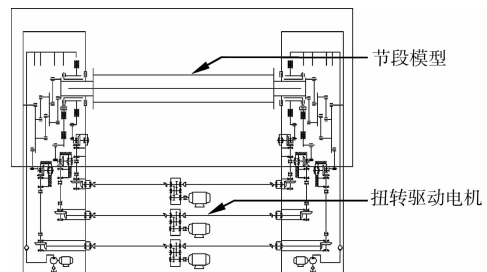


图 2 五分量天平测力原理图



图 3 两端固结于五分量天平装置的节段模型

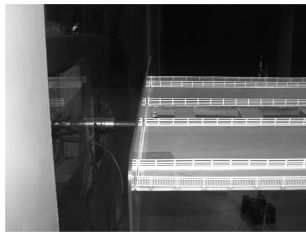


图4 模型一端的消扰构件和五分量天平

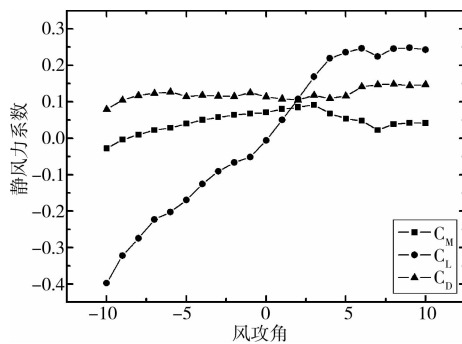


图5 主跨钢箱梁三分力系数

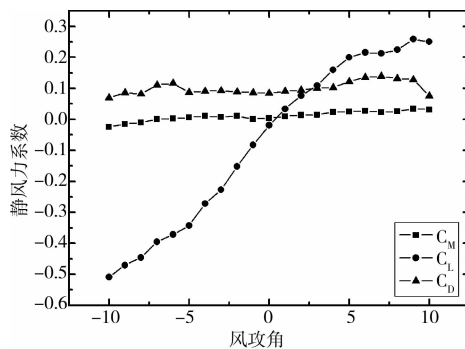


图6 边跨混凝土箱梁三分力系数

由三分力曲线可以看出,中央开口断面主梁的升力矩系数并非类似于一般的闭口箱梁断面:闭口箱梁断面的升力矩系数随着攻角由负变正,升力矩系数一般逐渐变大,也正是由于这种特性而导致闭口箱梁悬索桥静风扭转发散出现。右汉桥由于采用的是中央开口断面形式,在 $-10^{\circ}\sim+3^{\circ}$ 攻角范围内,主跨钢箱梁的升力矩系数随着攻角由负变正,升力矩系数缓慢增大,然后在接近 $+3^{\circ}$ 攻角往后有逐渐下降的趋势。边跨混凝土箱梁的升力矩系数随着攻角由负变正,升力矩系数变化非常平缓,近似为一水平线,这在一定程度上说明中央开口形式的主梁,其静风稳定性能对攻角的敏感性没有闭口箱型梁或其他钝体断面主梁敏感。

3 数值分析

该文的静风稳定性数值分析考虑加劲梁所受的静力三分力以及主缆所受的阻力,主缆为圆形截面,按经验取阻力系数为0.8。随着风速的增加,主梁

发生扭转,从而使作用其上的三分力系数发生改变,最终导致作用在主梁上的静风荷载发生改变。计算时,考虑这一非线性因素影响的方法是将主梁受到的空气静力定义为主梁变形的函数:

横向风荷载(阻力):

$$P_y = \frac{1}{2} \rho v^2 C_y(\alpha) D \quad (3)$$

竖向风荷载(升力):

$$P_z = \frac{1}{2} \rho v^2 C_z(\alpha) B \quad (4)$$

扭转力矩(升力矩):

$$M = \frac{1}{2} \rho v^2 C_M(\alpha) B^2 \quad (5)$$

对于全桥结构而言,主梁在静力三分力作用下会产生扭转变形,因此在静力三分力系数确定后,根据加劲梁沿轴线方向的扭转变形分布就可以确定全桥的静风荷载分布。

悬索桥静风稳定分析过程受几何非线性和静风荷载非线性的双重非线性影响,材料非线性通常可忽略^[15],但是必须进行风速加载的全过程分析才能获得结构真实的静风失稳临界风速。现有的非线性静风稳定性分析方法是增量与内外两重迭代相结合的方法,可以用如下的有限元平衡方程描述:

$$[K(\delta)] \{\Delta\delta\} = \{\Delta P(\delta)\} \quad (6)$$

式中 $[K(\delta)]$ 为结构的切线刚度矩阵; $\{\Delta\delta\}$ 为结构位移增量向量; $\{\Delta P(\delta)\}$ 为结构所受外荷载增量向量。

增量法将风速按一定比例增加,每级风速下的内层迭代是指考虑几何非线性和材料非线性的结构计算,外层迭代是指寻找该级风速下的结构平衡状态。该文引入超松弛迭代法^[10,15],减少了外层迭代的计算次数,有助快速得到收敛解。其中数值计算过程中三分力修正的扭转角向量按下式取值:

$$\{\theta\}_n = \{\theta\}_n + \psi \{\Delta\theta_n\} \quad (7)$$

式中 ψ 为松弛因子,可根据具体情况取值,通常在0到1之间。

基于以上理论和ANSYS软件,编制了非线性静风稳定分析程序,实现了桥梁从稳定到失稳的全过程分析,对右汉桥进行了三维静风荷载研究。

图7是有限元模型加载了静风荷载的示意图,图8是 0° 攻角静风失稳时的变形图,可以看出,右汉桥 0° 攻角静风失稳时是侧向、竖向、扭转3个方向耦合的失稳形式,而且各个自由度的参与程度都比较明显,这相对于一般的平行主缆悬索桥来说,不再是单纯的扭转发散或者竖弯扭转耦合发散,侧向自由度的参与提高了右汉桥静风失稳的临界风速。

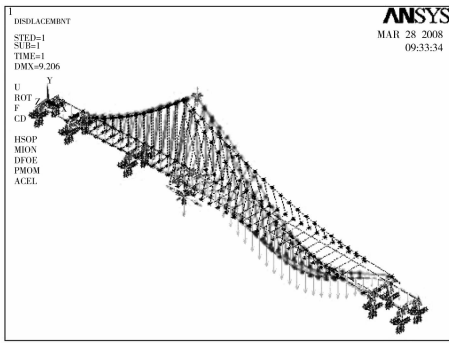


图 7 静风荷载有限元加载

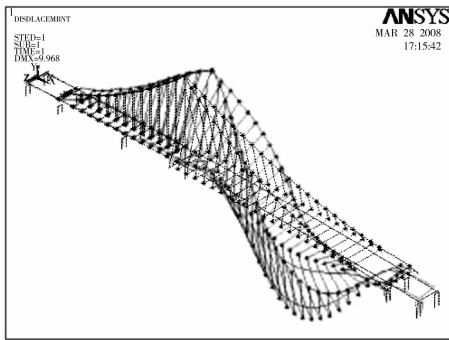


图 8 0°攻角下静风失稳变形 (变形比例放大)

从图 9-11 可以看出,与其他两个攻角相比,0°攻角的扭转、竖向、横向变形都发展的比较慢,整体发展比较均匀且平缓。在风速达到 280 m/s 时才出现静风失稳。扭转、竖向、横向变形在+3°攻角中变化最为明显,而且是在风速达到 155 m/s 时突然发散,以至于很难跟踪下一个风速点的 3 个方向的变形值。-3°攻角在高风速时其整体扭转、竖向、横向变形比 0°攻角时的偏大,但是其发散过程没有 0°攻角剧烈,在高风速区间变化比较平缓,在风速达到 285 m/s 时突然发散。对比可知+3°攻角为右汉桥的最不利攻角。图 12 为主缆在 3 个不同攻角下的水平位移随风速变化的情况。主缆水平位移的变化趋势类似于加劲梁在静风荷载下的变化趋势。

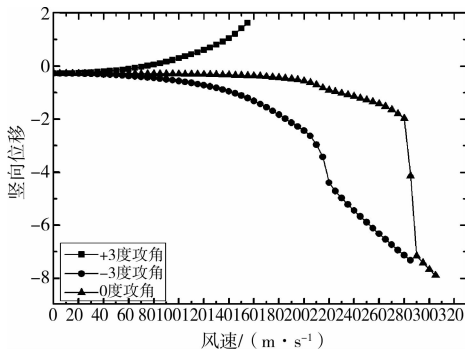


图 9 加劲梁跨中竖向位移—风速曲线

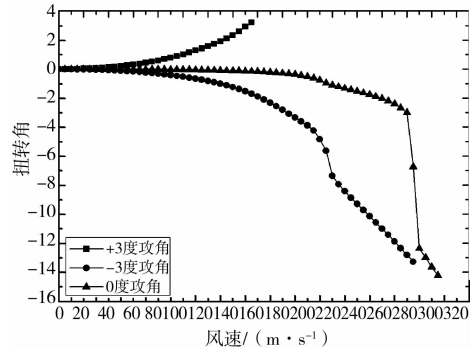


图 10 加劲梁跨中扭转角位移—风速曲线

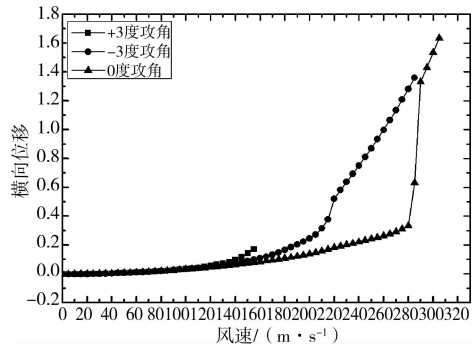


图 11 加劲梁跨中横向位移—风速曲线

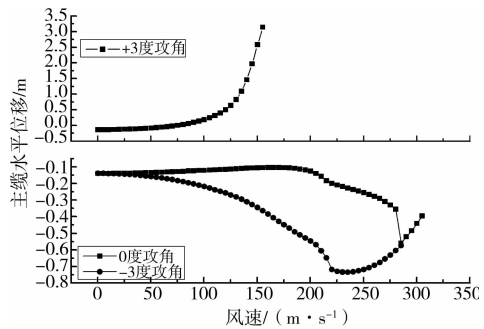


图 12 主缆跨中竖向位移—风速曲线

4 全桥气弹模型试验

为了验证静风稳定数值计算的可靠性,需要进行全桥气弹模型试验。右汉桥的全桥气弹模型的主梁采用单芯梁来模拟刚度,根据湖南大学 2 号风洞低速段实际尺寸,选定缩尺比为 90.35。为了同时满足加劲梁横向、竖向弯曲刚度以及扭转刚度的相似要求,选用开槽的“U”形脊骨梁,通过尺寸参数的调整可以精确地满足加劲梁横向、竖向以及扭转刚度的相似要求。模型安装完成后,首先对成桥状态进行了动力特性检验,给出主梁前两阶竖弯、第一阶扭转频率以及相应的 3 个基本振型的阻尼,检验结果及计算值见表 1。在 3 个攻角状态下,风洞风速达到 10 m/s,对应实桥风速达到了 95.14 m/s,在该风速状态下,右汉桥未出现静风失稳和颤振发散现

象,该风速表明右汉桥具有足够的静风稳定性能。考虑到风洞运行安全,故没有再增加风速。

表1 全桥气弹模型成桥状态结构动力特性测试

振型描述	实桥 频率/ Hz	模型理 论频率/ Hz	模型实 测频率/ Hz	误差/ %	阻尼比 δ /%
主梁一阶对称竖弯	0.275 4	3.735 3	3.71	0.6	0.75
主梁二阶对称竖弯	0.415 1	5.798 8	5.66	2.4	0.85
主梁一阶对称扭转	1.154 2	10.359	9.80	4.7	1.10

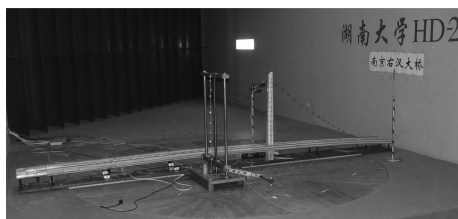


图13 右汉桥全桥气弹模型

5 结论

通过基于 ANSYS 软件的静风稳定数值分析和全桥气弹模型静风稳定试验,得出了如下结论:

1) 右汉空间主缆悬索桥具有足够的抵抗静风荷载的能力,该桥静风稳定性能优越。

2) 若统一以 0° 攻角作为静风失稳标准,由于侧向、竖弯、扭转 3 个自由度的强烈耦合,空间主缆的悬索桥相对于一般的平行主缆悬索桥,其抗静风荷载能力更加优越。

3) 采用空间主缆和桥面中央开口的设计方式是使得右汉桥静风稳定性能优越的两个主要因素。

参考文献:

- [1] 陈政清,欧阳克俭,等. 中央稳定板提高桁架梁悬索桥颤振稳定性的气动机理[J]. 中国公路学报,2009,22(6):53-59.
CHEN ZHENG-QING, OUYANG KE-JIAN, etc. Aerodynamic mechanism of improvement of flutter stability of truss-girder suspension bridge using central stabilizer [J]. China Journal of Highway and Transport,2009,22(6):53-59.
- [2] CHEN ZHENG-QING, HAN YAN, etc. Investigation on influence factors of buffing response of bridge and its aroelastic model verification for xiaoguan bridge [J]. Engineering Structures,2009,31:417-431
- [3] JIN CHENG, JIANG-JING JIANG, etc. Nonlinear aerostatic stability analysis of jiangjin suspension bridge[J]. Engineering Structure,2002,24:773-781.
- [4] 宋锦忠,曹丰产,等. 鄂东长江公路大桥主桥抗风稳定性试验研究[C]// 第十三届全国结构风工程学术会议论文集,2007:534-539.
- [5] 胡晓伦. 大跨斜拉桥颤抖振响应及静风稳定性分析[D]. 上海:同济大学,2006.
- [6] BOONYAPINYO V H, YAMADA, T MIYATA. Wind-induced nonlinear lateral-torsional buckling of cable-stayed bridges [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1994,120(2): 486-506.
- [7] T. MIYATA, H. YAMADA. On a application of the direct flutter FEM analysis for long-span bridges[C]// Proc. 9th Int. Conf. On Wind Engineering, New Delhi, India, 1995, 1033-1041.
- [8] XIE XU, YAMAGUCHI. H. Static behaviors of self-anchored and partially earth-achored long span cable stayed bridge [J]. Structural Engineering and Mechanics,1997,5(6):767-774.
- [9] 方明山. 超大跨度缆索承重桥梁非线性空气静力稳定理论研究[D]. 上海:同济大学,1997.
- [10] XIN-JUN ZHANG. Influence of some factors on the aerodynamic behavior of long-span suspension bridges [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007,95(3): 149-164.
- [11] 张志田,葛耀君. 考虑抖振影响的大跨度桥梁静风稳定性分析[J]. 工程力学,2006,23(8):96-101.
ZHANG ZHI-TIAN, GE YAO-JUN. Aerostatic instability of long span bridges including buffing effect [J]. Engineering Mechanics, 2006,23(8):96-101.
- [12] 欧阳克俭,陈政清,等. 桥面中央开口悬索桥涡激共振与制涡试验研究[J]. 振动与冲击,2009,28(7):199-202.
OUYANG KE-JIAN, CHEN ZHENG-QING etc. Vortex induced vibrations and the controlling experiment research of Central-slotted Box Section for suspension bridge[J]. Journal of Vibraion and Shock, 2009,28(7):199-202.
- [13] G DIANA, F RESTA, etc. Forced motion and free motion aeroelastic tests on a new concept dynamometric section model of the Messina suspension bridge [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004,92:441-462.
- [14] 陈政清, 欧阳克俭. 南京右汉大桥抗风性能试验研究总结报告[R]. 长沙:湖南大学风工程试验研究中心, 2008.
- [15] 陈政清. 桥梁风工程[M]. 北京:人民交通出版社, 2005.

(编辑 胡玲)