

# 千米级斜拉桥空气动力学问题

陈艾荣, 马如进, 王达磊

(同济大学土木工程学院桥梁工程系, 上海 200092)

[摘要] 以苏通大桥为背景,对超大跨径斜拉桥的空气动力学问题进行了研究,着重讨论了超大跨径斜拉桥的动力特性、风荷载、基于气弹模型的颤振导数识别、结构体系以及涡激振动特性等一系列问题。研究结果表明,考虑侧向风荷载作用下斜拉索的非线性效应之后,全桥结构的竖向刚度有折减现象。同时发现 Fixed - Fixed 体系是解决顺桥向风荷载的有效途径,还提出了基于气弹模型的颤振导数识别方法,并就斜拉桥的涡激振动和雷诺数效应进行了探讨。

[关键词] 苏通大桥斜拉桥;动力特性;合理体系;雷诺数效应;颤振导数

[中图分类号] U448.27 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)03-0031-07

## 1 前言

20 世纪末,桥梁设计和施工水平不断提升,世界桥梁建设取得了辉煌的成就。就斜拉桥而言,已经建成的最大跨度的斜拉桥是日本的多多罗桥 (Tatara Bridge, 1999 年完工),其主跨为 890 m。法国的诺曼底桥 (Normandy Bridge, 1995 年完工) 以 856 m 的主跨而

位居第二。在世界桥梁工程发展日新月异的同时,我国的桥梁建设也在阔步前行,20 世纪 80 年代迎来了桥梁建设的春天,短短 20 多年的成就令世人瞩目。苏通大桥以及香港的昂船洲大桥在桥梁建设成功经验的基础之上,又迈上了一个新台阶。2008 年刚刚通车的苏通大桥,设计主跨 1 088 m (图 1),成为目前世界上最大跨径的斜拉桥,也成为斜拉桥发展史上一个新的里程碑。

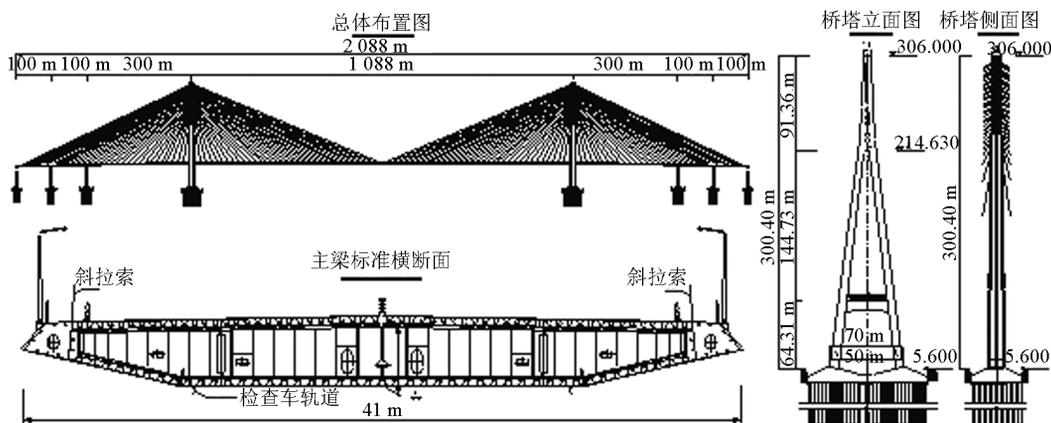


图 1 苏通大桥总体布置、主梁标准横断面及桥塔布置

Fig. 1 Layout, typical cross - section of girders and bridge tower arrangement of Sutong Bridge

[收稿日期] 2008 - 11 - 08

[基金项目] 国家科技支撑计划资助项目 (2006BAG04B01); 国家自然科学基金资助项目 (50708073)

[作者简介] 陈艾荣 (1963 - ), 男, 贵州遵义市人, 同济大学教授, 主要从事桥梁设计理论、抗风理论研究; E - mail: a. chen@tongji. edu. cn

对于跨度超越千米的超大跨径斜拉桥,桥梁自身结构特点和所处风环境特征使得风的作用问题变得更为敏感和重要,风荷载往往成为结构设计的控制荷载。与之相适应,桥梁的动力特性、桥塔、主梁和斜拉索等主要构件静态气动力系数的确定,都应进行精细化研究,以确保结构设计的经济性;同时,为确保超大跨径斜拉桥的结构安全性,避免结构疲劳破坏,还应针对桥梁结构整体的颤振稳定性,桥塔驰振稳定性,主梁涡激共振和抖振响应,超长斜拉索的振动与减振,尤其是斜拉索的风雨激振和参数共振,以及桥面行车安全等一系列问题开展深入细致的研究。

## 2 超大跨径斜拉桥动力特性分析研究<sup>[1]</sup>

众所周知,超大跨径斜拉桥的动力特性随着跨径增大逐渐降低。与此同时,在静风荷载作用下超大跨径斜拉桥动力特性也会发生显著变化。如图2所示,在静风作用下,斜拉索发生侧向变形并带来的几何非线性会引起斜拉桥拉索竖向支承刚度发生变化。

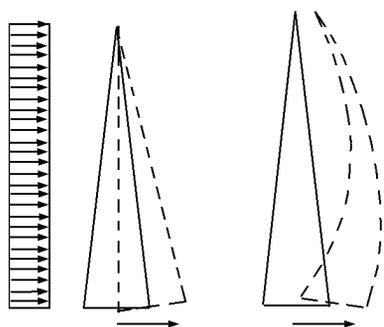


图2 拉索侧向变形非线性效应示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of nonlinear lateral deflection effect for stay cables

通过研究发现,斜拉索考虑静风作用后,弹性模量的折减随着风速的增大迅速降低,如果平均风速在 100 m/s 左右,那么,表观弹性模量对于最长索能够降低 50% 左右。因此侧风引起的弹性模量折减不容忽视。但是对于倾角较小的索,静风后拉索的弹性模量折减则不是十分明显。所以,表观弹性模量的折减随着斜拉索倾角的增大而增大,随着风速的增大而增大。图3为苏通大桥斜拉索在侧向静风荷载作用下弹性模量折减示意图。

在静风荷载作用下,结构动力特性随着风速增大也会发生相应的变化。因此,针对拉索的模拟方

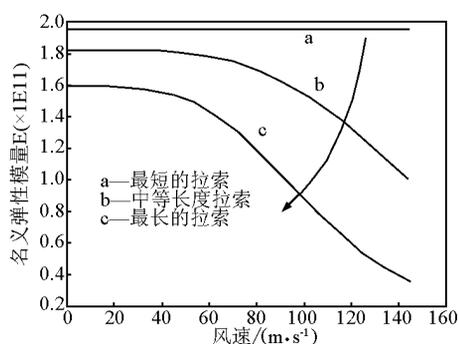


图3 苏通大桥斜拉索在侧向静风荷载作用下弹性模量折减示意图

Fig. 3 Schematic diagram of named elastic modulus of stayed cables for Sutong Bridge under lateral static wind loading

式需要改进。在苏通大桥的设计研究中,提出了 MECS 模型<sup>[2]</sup> (multi - element cable simulation),即多单元模拟斜拉索的方法,该方法相对于传统的斜拉索有限元模拟采用的 Enrst 公式修正下的单根单元的模拟 OECS (one element cable simulation),能够模拟拉索的多自由度振动的特征。

针对 OECS 和 MECS 两种模型进行了考虑静风作用下的动力特性分析比较,研究表明随着风速增大,MECS 方法得出的对称竖弯和反对称竖弯频率不断下降,而 OECS 方法得出的结果则不存在这种规律。很显然,这是由于 MECS 能够模拟拉索侧向风荷载作用下竖向刚度降低的几何非线性效应,如图4所示。同时,利用全桥气弹模型试验进行验证,结果表明,试验结果与 MECS 的结果趋势一致,如图5所示。

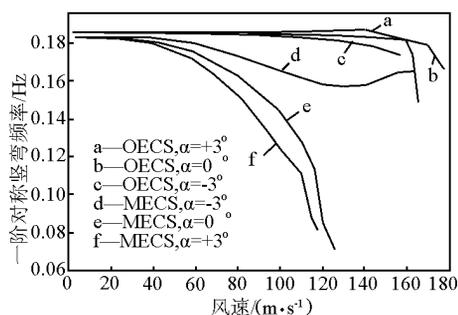


图4 一阶对称竖弯频率随风速变化曲线 (OECS vs MECS)

Fig. 4 Curve for first order frequency of symmetric vertical bending varying with the wind speed (OECS vs MECS)

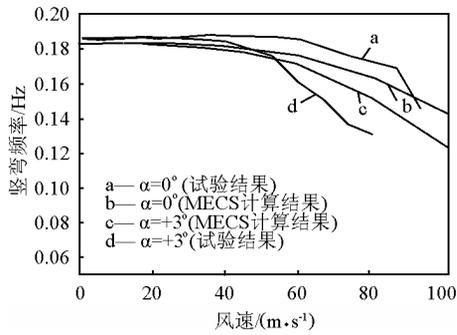


图5 气弹模型试验实测竖弯频率与MECS结果的比较

Fig. 5 Vertical bending frequency comparison of MECS result and field measurement from full bridge aeroelastic model test

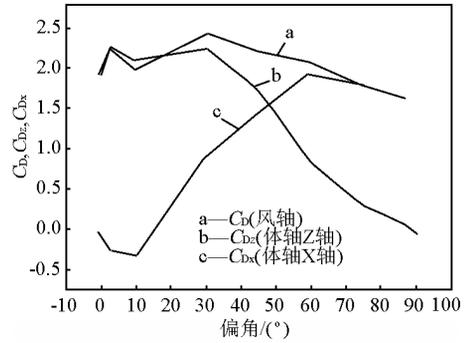


图7 苏通大桥上塔柱阻力系数模拟结果  
Fig. 7 Drag coefficients of upper tower column of Sutong Bridge

进行研究并且将其控制在最小的范围内,具有十分重要的意义。

对于斜拉索风荷载的研究,苏通大桥的设计过程主要通过风洞试验手段结合数值风洞技术进行。风洞试验手段主要利用风洞测力天平进行拉索横风向和顺风向的风荷载测量,如图8所示。通过针对不同类型的拉索进行了大量的测力试验,测出了拉索风荷载阻力系数随拉索倾角的关系,如图9所示。



图8 苏通大桥拉索1:1风洞测力模型试验  
Fig. 8 1:1 wind tunnel force measurement test for stay cables of Sutong Bridge

为了进一步验证风洞试验结果,采用了CFD数值模拟技术进行了一个试验工况的验证,结果表明CFD和试验结果吻合较好,同时CFD还得出很多试验所不能得到的现象和结论,如倾斜拉索的升力系数、拉索三维绕流现象。可见CFD和风洞试验相结合是确定超大跨径斜拉桥风荷载的有效手段。图10为CFD数值模拟斜拉索三维绕流流场图,图11为斜拉索风荷载试验和CFD结果的比较。

### 3 超大跨径斜拉桥风荷载研究

大跨径斜拉桥风荷载的研究,从结构部件划分,可以从桥塔、主梁和斜拉索几个角度出发。对于桥塔风荷载,苏通大桥采用了数值风洞模拟技术,即计算流体动力学(computation fluid dynamic, CFD)技术。该方法的计算原理是采用离散涡数值方法<sup>[3]</sup>求解桥梁断面在运动状态下的涡量场及速度场分布,并根据涡动力学理论获取作用在主梁断面上的气动力。通过数值模拟,可以得到桥塔迎风侧和背风侧塔柱的阻力系数、升力系数等。研究表明,桥塔上的风荷载并不是在风偏角0°或者90°时最大,而是在某一个风偏角,如45°或者60°左右出现最大值。图6和图7分别为苏通大桥塔柱流场分布图和塔柱阻力系数模拟结果。

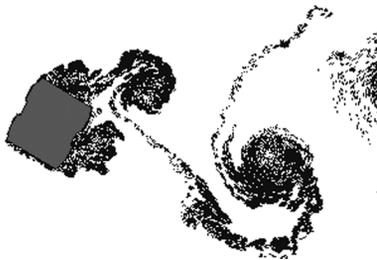


图6 苏通大桥上塔柱流场分布图  
Fig. 6 Flow around upper tower column of Sutong Bridge

大跨度的斜拉桥一般倾向于采用纤细的箱梁和密索体系。桥梁跨度越大,风荷载的影响也越大,对于大跨度的斜拉桥,斜拉索和主梁的风荷载所占比例的大小也逐渐增大。随着斜拉桥跨度的加大,作用在斜拉索上的风荷载可能超过作用于梁上的风荷载。因此在大跨度斜拉桥中,对斜拉索上的风荷载

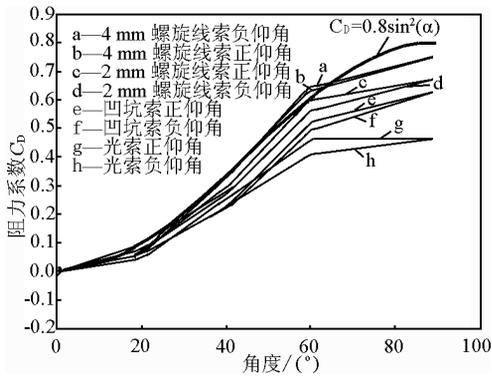


图9 斜拉索风荷载测力试验结果

Fig. 9 Wind load measurement on stay cables



图10 CFD数值模拟斜拉索三维绕流流场

Fig. 10 Flow field around stay cables obtained by CFD numerical simulation

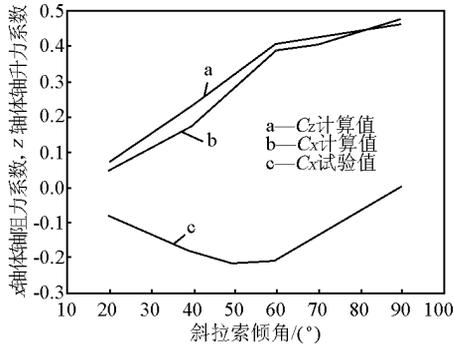


图11 斜拉索风荷载试验和CFD结果比较

Fig. 11 Comparison of wind load test and CFD result on stay cables

约束,Fixed表示限位约束。由于这3种体系,主要约束主梁和桥塔顺桥向之间的位移,因此也将主要影响主梁和桥塔顺桥向的内力和位移。

通过对不同风偏角风荷载作用下结构的内力和位移的比较发现,若考虑在全桥升温的情况下,Fixed-Fixed体系能够有效地约束主梁顺桥向位移,主梁传递给桥塔的荷载一部分通过拉索传递到塔顶,然后传递到地基,另一部分则通过塔梁连接体系传递给桥塔,不通过拉索,传递路径缩短,并且这种传递方式使得塔底的弯矩大大降低。在全桥温度不变的情况下,Fixed-Fixed也比Fixed-Free的效果稍好,但都比Free-Free体系的效果明显很多。另外,随着风偏角的增大,顺桥向约束机制发挥的作用也越来越明显,这主要是因为顺桥向约束,对于横桥向的风荷载不起约束作用,因此风偏角越大,效果越明显,如图12所示。

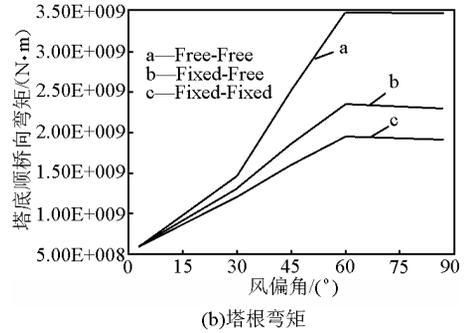
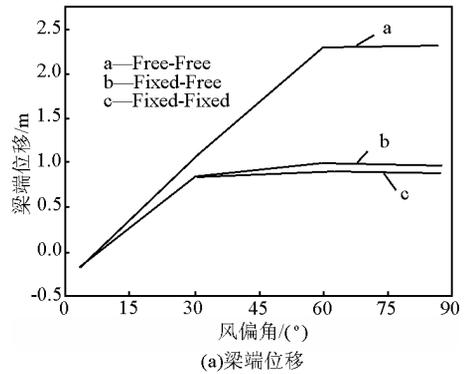


图12 不同风偏角作用下3种体系内力和位移比较

Fig. 12 Comparison of internal force and displacement under different yaw wind angle of three systems

研究发现,在这3种不同的塔梁连接体系中,Fixed-Fixed作用效果最为明显,能够有效地降低顺桥向的风荷载。因此推荐Fixed-Fixed这种顺桥向约束方式作为降低超大跨径斜拉桥桥塔风荷载的合理体系,并且在苏通大桥中得到了运用。

## 5 气弹模型气动参数识别

为了考察超大跨径斜拉桥在风作用下的非线性效应,在苏通大桥设计研究过程中,提出了基于全桥气弹模型识别颤振导数理论和方法。该方法的主要原理如下:

如果气弹模型结构有  $N$  阶模态,因此对于无阻尼情况下,结构的自由振动方程可以写成:

$$[M]\ddot{X} + [K]_s X = 0 \quad (1)$$

同样,运动方程也可以用模态坐标形式表示,即可以得到:

$$[m]\ddot{q} + [k]q = 0 \quad (2)$$

式(2)中  $[m] = \text{diag}(m_{ii}) (i = 1, 2, \dots, N)$ ,  $[k] = \text{diag}(k_{ii}) (i = 1, 2, \dots, N)$

考虑到阻尼存在的情况,并考虑一般情况,则有:

$$[m]\ddot{q} + [r]\dot{q} + [k]q = 0 \quad (3)$$

式(3)中  $[r] \in R^{N \times N}$ 。

同样,根据 18 个颤振导数的表达式建立自激力模型<sup>[4]</sup>,可以得到第  $j$  阶振型对第  $i$  阶振型的广义力为:

$$\begin{aligned} \overline{F_{ij}}(x) &= \int_0^L F_{ij}(x) \varphi_i(x) dx \\ &= \int_0^L (A_{ij}^{(1)} \dot{q}_j + A_{ij}^{(2)} q_j) \varphi_j(x) \varphi_i(x) dx \\ &= A_{ij}^{(1)} \dot{q}_j \int_0^L \varphi_j(x) \varphi_i(x) dx + A_{ij}^{(2)} q_j \int_0^L \varphi_j(x) \varphi_i(x) dx \quad (4) \end{aligned}$$

考虑到公式  $[m]\ddot{q} + [r]\dot{q} + [k]q = 0$ , 因此有:

$$\begin{aligned} [m]\{\ddot{q}\} + [r]\{\dot{q}\} + [k]\{q\} &= [\overline{F_{ij}}]_{N \times N} \\ &= [A_{ij}^{(1)}]_{N \times N} \{\dot{q}\} + [A_{ij}^{(2)}]_{N \times N} \{q\} \quad (5) \end{aligned}$$

将方程右式移到左边可以得到:

$$\begin{aligned} [m]\{\ddot{q}\} + ([r] - [A_{ij}^{(1)}])\{\dot{q}\} + \\ ([k] - [A_{ij}^{(2)}])\{q\} = 0 \quad (6) \end{aligned}$$

在颤振导数识别过程中,首先利用特征系统实现算法 ERA (eigenvalue realization algorithm) 得到结构的刚度和阻尼矩阵,然后可以进一步获得主梁断面的颤振导数。利用该方法可以进行气弹模型的颤振导数识别,图 13 给出了气弹模型识别、节段模型识别的颤振导数。

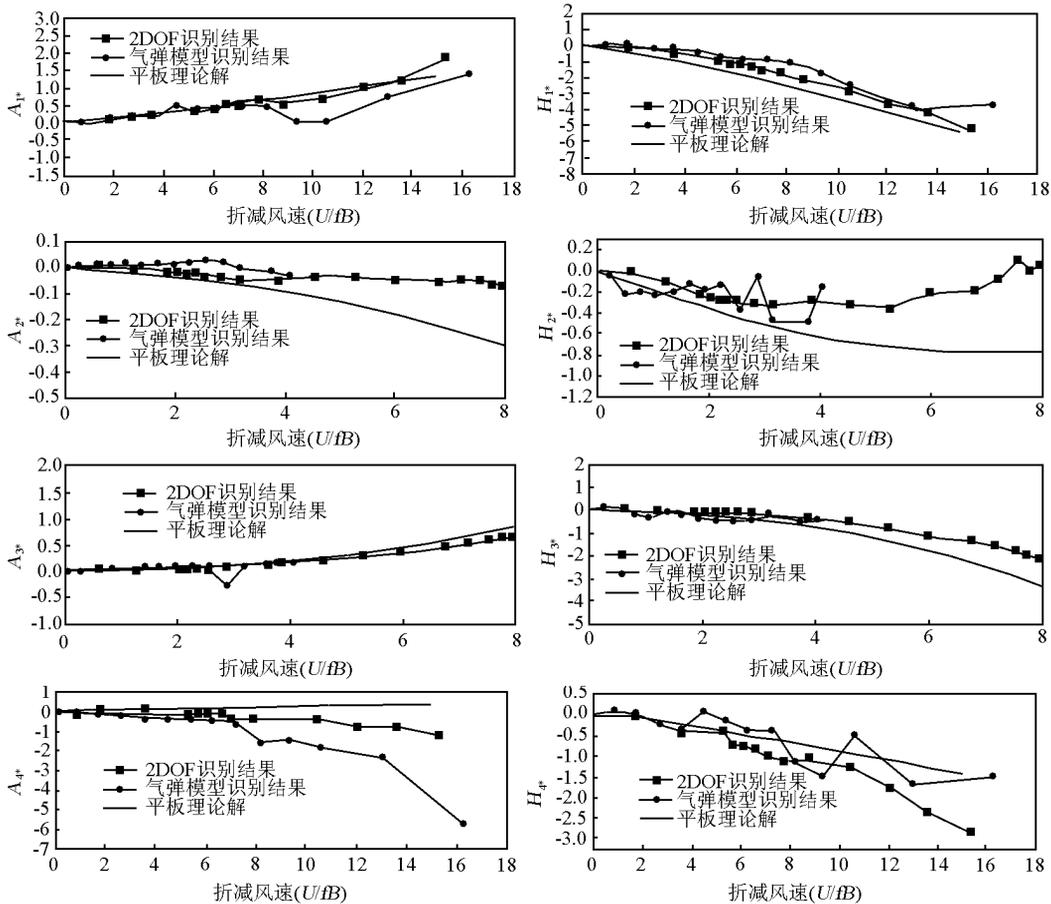


图 13 气弹模型、节段模型及平板理论解的比较 (颤振导数  $A_i^*$ ,  $H_i^*$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ )

Fig. 13 Comparison of aeroelastic model test result, section model test result and flat - plate theory solution (flutter derivative  $A_i^*$ ,  $H_i^*$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ )

## 6 高雷诺数对风荷载和风致振动影响研究

对于超大跨径斜拉桥而言,主梁的涡激振动会引起较大的拉索参数共振以及疲劳问题。为了避免或降低涡激振动发生的可能性,在设计阶段需要研究主梁的涡激振动及其高雷诺数效应。

针对涡激振动,原设计方案在进行节段模型试验时发现有较大的涡激振动振幅。虽然该振幅没有超过允许值,但是为了最大限度地降低涡激振动振幅,进行了一系列降低涡激振动的气动措施研究<sup>[5]</sup>,如图 14 所示。

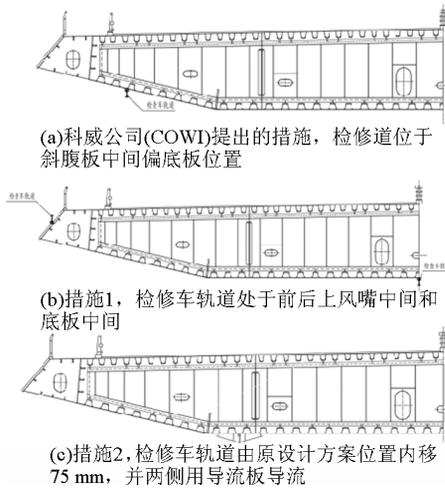


图 14 降低涡激振动的措施

Fig. 14 Measures for reducing vortex - excited oscillation

通过研究表明,将检修轨道移到主梁底部中点能够抑制涡激振动的发生,然而该方案对于检修车的设计带来了很多不便。措施 2 将检修轨道内移 75 cm 并增设导流板能够将涡激振动振幅抑制到 4 ~ 5 cm 左右。图 15 为苏通大桥涡激振动振幅。

雷诺数对主梁的风荷载也有较大的影响,如图 16 所示。试验结果表明,主梁的雷诺数效应非常明显,尤其是阻力系数,在不同雷诺数下具有很大的差别。

对于千米级斜拉桥而言,主梁的雷诺数效应需要进行充分研究,分析其发生涡激振动的可能性并且采取措施降低和抑制其振动振幅,是需要解决的一个关键的空气动力学问题。

## 7 结语

介绍了苏通大桥抗风设计过程中的几个关键空

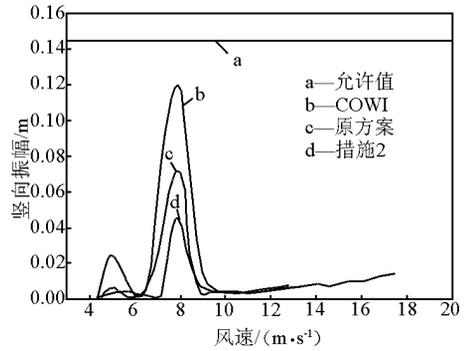
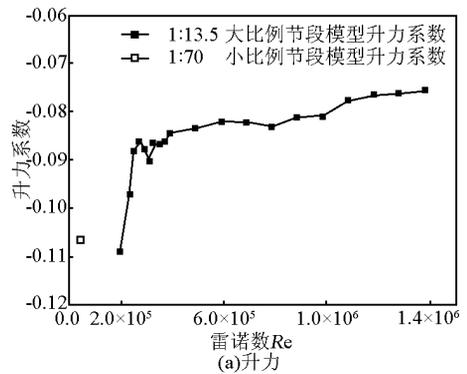
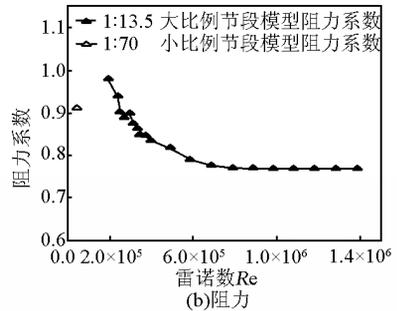


图 15 苏通大桥涡激振动振幅  
(0°风攻角,均匀流场)

Fig. 15 Vortex - excited oscillation amplitude of Sutong Bridge(0° wind attack angle, smooth flow)



(a)升力



(b)阻力

图 16 计方案成桥状态 0°攻角静  
三分力系数的雷诺数效应

Fig. 16 Reynolds number effect of three static force coefficient under 0° attack angle for the completed state of design scheme

气动力学问题。研究表明,对于超大跨径斜拉桥,其在动力特性、风荷载、雷诺数效应、塔梁连接体系等方面与中小跨径斜拉桥有着许多不同之处。笔者从这几个角度出发,提出了一些解决的方案和思路。然而,千米级斜拉桥还有一系列其他的空气动力学问题,比如拉索风雨振、气动失稳等,还有待进一步

详细研究。

- 584

#### 参考文献

- [1] Ma Rujin, Chen Xinzong, Chen Airong. Aerostatic and flutter response analysis of a long span cable-stayed bridge considering nonlinearity of stay cables[A]. The 12<sup>th</sup> International Conference on Wind Engineering (ICWE12)[C]. Australia: Cairns, 2007
- [2] 马如进,陈艾荣,刘志文. 超大跨度斜拉桥拉索分段模拟对动力特性计算结果的影响[J]. 同济大学学报,2005,33(5):580
- [3] 周志勇,陈艾荣,项海帆. 涡方法用于桥梁断面气动导数和颤振临界风速的数值计算[J]. 振动工程学报,2002,(15):327-331
- [4] 马如进. 基于气弹模型的颤振导数识别[D]. 上海:同济大学,2004
- [5] 苏通长江公路大桥主梁断面高雷诺数下涡激共振及三分力特性试验研究[R]. 上海:同济大学土木工程防灾国家重点实验室,2004

## Aerodynamic problems of cable-stayed bridges spanning over one thousand meters

Chen Airong, Ma Rujin, Wang Dalei

(Department of Bridge Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

[**Abstract**] Aerodynamic problems of super long span cable-stayed bridge are investigated based on Sutong Bridge. Dynamic properties, wind loading, identification of flutter derivatives based on full aeroelastic bridge model, longitudinal structural system and vortex excited vibration are mainly focused on. Researches show that vertical stiffness will decrease with wind speed if the nonlinearity of deformation of stay cables under later wind loading is considered. It is also found that Fixed-Fixed system is the most suitable for long span cable stayed bridge under longitudinal wind loading. Identification method of flutter derivatives through full aeroelastic bridge model is proposed. In the end, some discussions on vortex excited vibration and Reynolds number effect are introduced.

[**Key words**] Sutong cable-stayed bridge; dynamic properties; suitable system; Reynolds number effect; flutter derivatives