

# 缆索风荷载对悬索桥风效应的影响研究

张新军, 张 丹

(浙江工业大学建筑工程学院 杭州市 310014)

**摘 要:** 随着悬索桥跨径的增大, 缆索直径和作用在缆索上的风荷载都将相应增加, 对悬索桥静风效应和动力风效应(主要是指空气动力稳定性)的影响将可能不容忽视。通过推导, 建立了作用于缆索上风荷载的计算模型。以润扬长江大桥为背景, 分析了缆索风荷载对悬索桥静风效应和空气动力稳定性的影响。结果表明: 缆索风荷载对悬索桥静风效应的影响比较显著, 但对于空气动力稳定性则没有影响。

**关键词:** 悬索桥; 缆索风荷载; 静风效应; 空气动力稳定性

## 1 缆索风荷载计算模型<sup>[1]</sup>

如图 1 所示的缆索受到一平均速度为  $U$  的来风作用, 缆索将在顺风向( $Z$  方向)和横风向( $Y$  方向)上产生振动, 相应的振动速度为  $\dot{z}$  和  $\dot{y}$ , 且  $|\dot{y}| \ll U, |\dot{z}| \ll U$ , 由此形成的有效攻角  $\alpha_e$  和相对风速  $U_r$  为:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_e &= \frac{-\dot{y}}{U - \dot{z}} \\ U_r &= \sqrt{(U - \dot{z})^2 + (-\dot{y})^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

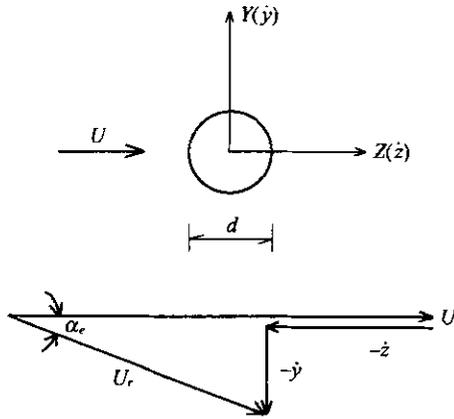


图 1 缆索振动

作用在振动着缆索上的风荷载, 可以分解为如图 2 所示的横风向升力  $F_L$  和顺风向阻力  $F_D$ 。

$$\begin{aligned} F_L &= \frac{1}{2} \rho U_r^2 d \left( C_L + \frac{dC_L}{d\alpha} \alpha_e \right) \\ &= \frac{1}{2} \rho U^2 d C_L + \frac{1}{2} \rho U^2 d \left( -2C_L \frac{\dot{z}}{U} - \frac{dC_L}{d\alpha} \frac{\dot{y}}{U} \right) \quad (2) \end{aligned}$$

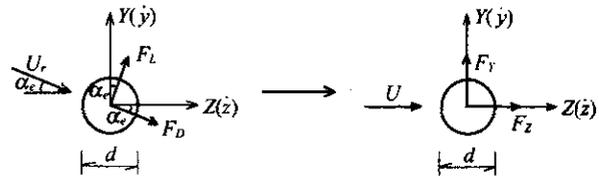


图 2 作用在振动着缆索上的风荷载

$$\begin{aligned} F_D &= \frac{1}{2} \rho U_r^2 d \left( C_D + \frac{dC_D}{d\alpha} \alpha_e \right) \\ &= \frac{1}{2} \rho U^2 d \left( C_D - 2C_D \frac{\dot{z}}{U} - \frac{dC_D}{d\alpha} \frac{\dot{y}}{U} \right) \quad (3) \end{aligned}$$

式中:  $\rho$  为空气密度;  $d$  为缆索直径;  $C_L$  为升力系数;  $C_D$  为阻力系数。

将  $F_D$  和  $F_L$  分别投影在结构坐标系的  $Z$  轴和  $Y$  轴上则可以得到:

$$F_Z = F_L \sin \alpha_e + F_D \cos \alpha_e \quad (4)$$

$$F_Y = F_L \cos \alpha_e - F_D \sin \alpha_e \quad (5)$$

考虑到振动幅值以及相应的振动速度  $\dot{z}$  和  $\dot{y}$  都很小, 因此:

$$\alpha_e \approx 0, \sin \alpha_e \approx \alpha_e \approx -\frac{\dot{y}}{U}, \cos \alpha_e \approx 1 \quad (6)$$

因此, 式(4)可以变为:

$$\begin{aligned} F_Z &= F_L \alpha_e + F_D \\ &= \frac{1}{2} \rho U^2 d \left[ \left( C_L - 2C_L \frac{\dot{z}}{U} - \frac{dC_L}{d\alpha} \frac{\dot{y}}{U} \right) \left( -\frac{\dot{y}}{U} \right) + \left( C_D - 2C_D \frac{\dot{z}}{U} - \frac{dC_D}{d\alpha} \frac{\dot{y}}{U} \right) \right] \\ &\approx \frac{1}{2} \rho U^2 d C_D + \frac{1}{2} \rho U^2 d \left[ -2C_D \frac{\dot{z}}{U} - \left( C_L + \frac{dC_L}{d\alpha} \right) \frac{\dot{y}}{U} \right] \\ &= F_{Zs} + F_{Zse} \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_Y &= F_L - F_D \alpha_e \\
 &\approx \frac{1}{2} \rho U^2 d C_L + \frac{1}{2} \rho U^2 d \cdot \\
 &\quad \left[ -2C_L \frac{\dot{z}}{U} + \left( C_D - \frac{dC_L}{d\alpha} \right) \frac{\dot{y}}{U} \right] \quad (8) \\
 &= F_{Y_{st}} + F_{Y_{se}}
 \end{aligned}$$

式中： $F_{Z_{st}}$ 为 $F_Z$ 的静力分量； $F_{Z_{se}}$ 为 $F_Z$ 的自激气动分量； $F_{Y_{st}}$ 为 $F_Y$ 的静力分量； $F_{Y_{se}}$ 为 $F_Y$ 的自激气动分量。

### 2 桥梁简介

润扬长江大桥是我国已建成的最大跨径悬索桥，是一座单跨简支钢悬索桥，桥跨布置为470 m + 1 490 m + 470 m，见图3所示。主缆的矢跨比为1/10，主梁采用扁平状流线型钢箱梁，梁宽35.9 m，梁高3.0 m；桥塔采用混凝土门式框架结构，塔高约209 m。在有限元分析时，主梁、塔柱和塔横梁等简化为非线性空间梁单元，主缆和吊杆则简化为非线性空间杆单元，主梁和吊杆间采用刚性横梁联系，该桥的三维有限元计算模型如图4所示。

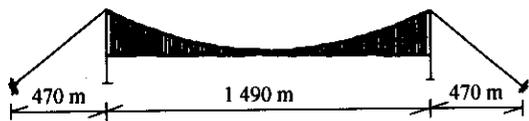


图3 润扬长江大桥总体布置

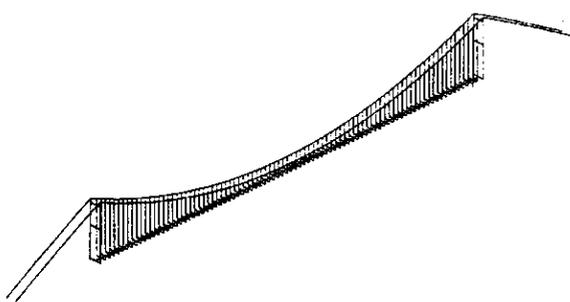


图4 润扬长江大桥的三维有限元分析模型

### 3 静风效应

采用作者开发的桥梁结构非线性空气静力分析程序BSNAA<sup>[2]</sup>，在0°初始风攻角下，对考虑和不考虑缆索风荷载的非线性空气静力进行了分析。分析中，桥面主梁考虑静力三分力作用，其静力三分力系数取之该桥节段模型风洞试验结果<sup>[3]</sup>，桥塔、主缆和吊杆仅考虑阻力作用，主缆和吊杆的阻力系数均为0.7<sup>[4]</sup>。图5显示了跨中位置处主梁的竖向、横向以及扭转位移随风速增加的变化情况。

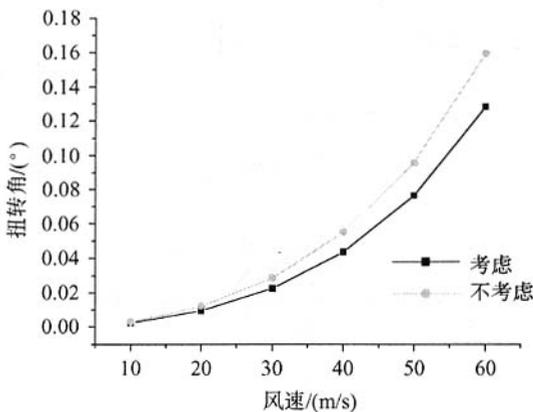
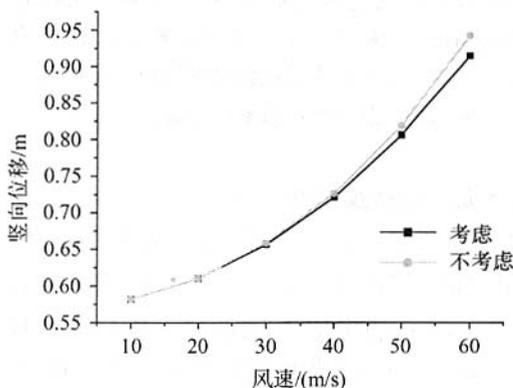
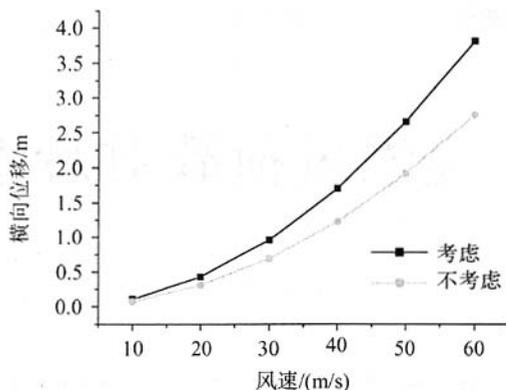


图5 跨中位置处主梁位移随风速增加的变化情况

从图5可以看到，缆索风荷载对横向位移影响比较显著，其次为扭转位移，但是对竖向位移影响不大。润扬长江大桥的主缆直径为0.776 5 m，作用于主缆上的顺风向风荷载约为主梁顺风向风荷载的0.24倍，忽略主缆风荷载作用得到的横向位移因而明显偏小。由于两种分析工况都没有考虑主缆的升力作用，因此两者的主梁竖向位移相差不大。当不考虑主缆风荷载作用时，主梁的横向位移将大于主缆的横向位移，因而形成较大的主梁扭转角。当考虑主缆风荷载作用后，两者的横向位移差减小，主梁的扭转角减小。随着风速的增加，扭转位移的差距逐渐增

大。因此,在大跨径悬索桥的静风效应分析中,必须考虑缆索风荷载的作用。

#### 4 空气动力稳定性

悬索桥的空气动力稳定性主要是指颤振稳定性。为了与主梁的自激气动力计算模型相一致,在此采用Scanlan提出的自激气动力表达式,将作用于主缆上的自激气动力表达为:

$$\left. \begin{aligned} F_{Y_{se}} &= \frac{1}{2} \rho U^2 d \left[ KH_{1c}^* \frac{\dot{y}}{U} + KH_{5c}^* \frac{\dot{z}}{U} \right] \\ F_{Z_{se}} &= \frac{1}{2} \rho U^2 d \left[ KP_{1c}^* \frac{\dot{z}}{U} + KP_{5c}^* \frac{\dot{y}}{U} \right] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中:  $K$  为换算频率,  $K = \frac{d\omega}{U}$ ,  $\omega$  为振动圆频率;  $H_{1c}^*$ ,  $H_{5c}^*$ ,  $P_{1c}^*$ ,  $P_{5c}^*$  为主缆的气动导数,都是换算频率的函数,分别为:

$$\left. \begin{aligned} H_{1c}^* &= \frac{1}{K} \left( C_D - \frac{dC_L}{d\alpha} \right) \\ H_{5c}^* &= -\frac{2}{K} C_L \\ P_{1c}^* &= -\frac{2}{K} C_D \\ P_{5c}^* &= -\frac{1}{K} \left( C_L + \frac{dC_D}{d\alpha} \right) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

在有限元分析中,可以将作用于主缆单元上的分布自激气动力集聚到单元的两端节点上,单元的自激气动力向量可以表达为:

$$\{F\}^e = \frac{1}{2} \rho U [A_d^e] \{ \dot{\delta} \}^e \quad (11)$$

式中:  $\{F\}^e = [F_{xi}, F_{yi}, F_{zi}, F_{xj}, F_{yj}, F_{zj}]^T$ ;  $\{ \dot{\delta} \}^e$  为单元两端节点振动的速度向量;  $[A_d^e]$  为缆索单元的气动阻尼矩阵:

$$[A_d^e] = dLK \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & H_{1c}^* & H_{5c}^* & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_{5c}^* & P_{1c}^* & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H_{1c}^* & H_{5c}^* \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{5c}^* & P_{1c}^* \end{bmatrix}$$

运用作者开发的桥梁结构颤振分析程序BSNFA<sup>[2]</sup>,对该桥进行了如表1所示各种工况的颤振分析。分析中,主梁的气动导数取自节段模型试验

结果<sup>[3]</sup>,结构的阻尼比取为0.005。主缆的气动导数只考虑阻力系数项作用。

表1 缆索自激气动力对颤振临界风速的影响

m/s			
初始风攻角	-3°	0°	+3°
考虑缆索自激气动力	76.2	61.8	52.6
不考虑缆索自激气动力	76.2	61.8	52.6

从表1中可以看到,主缆的自激气动力对颤振临界风速没有影响。这是由于考虑主缆风荷载作用后,结构各阶模态的频率以及形状都基本没有改变,而且主缆上的自激气动力同主梁的自激气动力相比非常小,导致对颤振临界风速不构成影响。因此,悬索桥的空气动力稳定性分析时,可以忽略缆索自激气动力的作用。

#### 5 结论

通过理论推导,建立了作用于缆索上风荷载的计算模型,以润扬大桥为例,进行了缆索风荷载对悬索桥静风效应和空气动力稳定性的影响分析,并得到了以下两点主要结论:

- (1) 缆索风荷载对悬索桥静风效应的影响比较显著,特别是横向位移,因此在静风效应分析时,必须考虑缆索风荷载的作用;
- (2) 缆索风荷载对悬索桥的空气动力稳定性没有影响,因此分析时可以忽略此项作用。

#### 参考文献:

- [1] Cheng Shaohong. Structural and aerodynamic stability analysis of long-span cable-stayed bridges [D]. University of Ottawa, 1999.
- [2] Zhang Xinjun, Sun Bingnan, Xiang Haifan. Nonlinear Aerostatic and Aerodynamic Analysis of Long-span Suspension Bridges Considering Wind-structure Interactions [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(9)1065-1080.
- [3] 陈艾荣, 宋锦忠. 润扬长江大桥抗风性能研究报告[R]. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 2000.
- [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.

文章编号: 0451-0712(2005)12-0004-05

中图分类号: U445.72

文献标识码: A

# 碳纤维加固钢筋混凝土 T 梁设计研究

赵志刚, 谭云亮

(山东科技大学资源与环境工程学院 青岛市 266510)

**摘要:** 使用碳纤维对现有旧桥进行加固是一种高效、经济、安全的方法, 本文分析了 T 形梁的 6 种破坏形态, 提出了新的临界状态判别依据、碳纤维界限用量和混凝土受压区高度界限系数, 提出了换算截面的计算方法, 建立了基于现行规范的设计方法, 并应用于实际工程, 取得了满意效果。

**关键词:** 碳纤维; 钢筋混凝土 T 梁; 抗弯承载力; 加固

碳纤维增强塑料(CFRP)是一种性能优良的混凝土构件加固材料, 它具有强度高、密度小、耐腐蚀、抗疲劳、施工方便等优点。目前, 国际上在 CFRP 加固钢筋混凝土结构方面的研究已经达到相当的水平, 广泛应用于屋架、桥梁的维修加固, 取得了可观的经济效益。在这方面我国起步较晚, 1997 年才开始研究和应用。研究主要集中在两个方面: (1) 碳纤维加固混凝土梁的破坏特征, 开裂承载力和极限承载力; (2) 碳纤维加固混凝土梁的承载力计算方法。目前已有的计算方法, 其共同的问题在于对于梁正截面承载能力极限状态的界定未达成共识, 主要表现在碳纤维参与受力后梁的临界状态不明确, 从而

导致所提出的计算方法不尽合理或与工程实际不符。同时, 对于构件加固后的裂缝和挠度计算涉及较少。为此, 本文在前人研究的基础上, 分析和探讨了碳纤维加固钢筋混凝土 T 形梁正截面破坏的临界状态和破坏形式, 提出了裂缝计算和变形计算的实用公式。

## 1 加固后钢筋混凝土梁变形与破坏特征分析

### 1.1 基本假定

根据文献[1]和国内外 CFRP 加固混凝土抗弯构件的试验结果, 正截面承载能力计算, 采用如下基本假定。

收稿日期: 2005-06-06

## Research on Influence of Cable Wind Load on Wind Action of Suspension Bridges

ZHANG Xin-jun, ZHANG Dan

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** With an increase in span length of suspension bridges, the diameter of cables and the wind load acting on them increase consequently, which may has an unnegligible influence on the static and the dynamic wind action (mainly refers to the aerodynamic stability) of suspension bridges. In this paper, the model of wind load acting on the cables is established. By taking Runyang Bridge over the Yangtze River as example, influence of the cable wind load on the aerostatic effect and the aerodynamic stability of the bridge is analyzed. It is shown that the cable wind load affects remarkably the aerostatics of long-span suspension bridges, but its effect on the aerodynamic stability becomes negligible.

**Key words:** suspension bridge; cable wind load; aerostatic effect; aerodynamic stability