

文章编号: 1000-4750(2009)07-0147-08

斜拉桥斜拉索的风雨振动: 参数研究

*王凌云^{1,2}, 徐幼麟²

(1. 福州大学土木工程学院, 福建, 福州 350108; 2. 香港理工大学土木及结构工程系, 香港)

摘 要: 以往的大多数有关斜拉桥斜拉索风雨振动的研究都是在风洞内进行。虽然这些风洞/风雨洞试验展现出了在斜拉桥现场观测记录的原型斜拉索风雨振动一些重要性质, 可是在原型斜拉索和圆柱体节段模型之间确实存在着某些不同。该文旨在探索原型斜拉索发生风雨振动的机理, 以大量的参数分析研究系统各主要参数对原型斜拉索风雨振动的影响和作用。参数分析的结果表明: 变化的气动力阻尼系数和/或水线运动、索运动以及风这三者之间相互作用所产生的激励力导致系统的风雨振动; 索的结构阻尼的增加可以有效抑制索的风雨振动; 索内静张力对系统的振幅有一定影响; 平均风的风速剖面中的幂指数对系统的振幅也有一定影响, 特别对系统发生风雨振动的相对风速有一定影响。

关键词: 风雨振动; 斜拉桥; 原型索; 索的振动; 参数研究

中图分类号: TU973 文献标识码: A

WIND-RAIN-INDUCED VIBRATION OF PROTOTYPE STAY CABLE: PARAMETER STUDIES

*WANG Ling-yun^{1,2}, XU You-lin²

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

2. Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract: Most of previous studies on wind-rain-induced cable vibration were carried out in a wind tunnel. These wind tunnel or wind-rain tunnel tests do reveal some important features of wind-rain-induced vibration of prototype stay cables observed from site measurements. However, there are some differences between a rigid inclined cylinder and a prototype stay cable. This paper is aimed at exploring the mechanism of the wind-rain-induced vibration of the prototype stay cable. Extensive parametric studies are performed to investigate the effects of main parameters on the wind-rain-induced cable vibration. It is shown that the occurrence of the wind-rain-induced cable vibration is mainly because of the alternating aerodynamic damping ratio and/or the alternating excitation force due to the interaction between rivulet motion, cable motion and wind. The increase of the cable structural damping can effectively suppress the wind-rain-induced vibration of the cable. The static tension force in the cable influences the vibration response of the system moderately. The power exponent in the wind profile has some extent effects on the vibration response of the system, in particular on the critical mean wind speed.

Key words: wind-rain-induced vibration; cable-stayed bridge; prototype cable; cable vibration; parameter study

近年来, 斜拉桥斜拉索的风雨振动问题日益成为土木工程领域所关注的热点。为了保证斜拉桥的

安全性能和使用要求, 需要深入研究和探讨斜拉索发生风雨振动的机理。在这一方面, 许多研究者做

收稿日期: 2008-03-13; 修改日期: 2008-08-28

基金项目: 香港科学研究基金项目(CERG 5066/97E)

作者简介: *王凌云(1973—), 女, 福建莆田人, 副研究员, 博士, 从事结构工程研究(E-mail: wly@fzu.edu.cn);

徐幼麟(1952—), 男, 上海人, 讲座教授, 博士, 从事风工程和结构控制研究(E-mail: ceylxu@polyu.edu.hk).

了大量的风洞/风雨洞实验和现场观测。Hikami 和 Shiraishi^[1]通过对日本名古屋港区的名港西大桥上的受风吹或者风吹雨打的斜拉索进行现场观测,对斜拉桥斜拉索风雨振动进行了初步研究。Matsumoto 等^[2]的试验采用了一个与原型斜拉索同样尺寸的倾斜支撑的圆柱体研究斜拉桥斜拉索的风雨振动。为了研究斜拉桥斜拉索风雨振动,Phelan、Sarkar 和 Mehta^[3]对 Veterans' Memorial 大桥上的四根斜拉索进行全尺寸试验。

Yamaguchi 尝试建立双自由度驰振的计算模型探索斜拉桥斜拉索风雨振动的机理,在他的计算模型中同时考虑了水线圆周运动和索在竖直平面内运动以及上述两种运动的耦合^[4]。Verwiebe 和 Ruschewyh^[5]通过分析系统的单位时间能量,将斜拉桥斜拉索风雨振动的机理分为三个类型:第一个机理为水线在和风向相同的方向振动,此时存在一个最小风速将水线劈分成两条水线并使其对称居于索的两侧表面;第二个机理为水线在垂直风向方向振动所带来的索横截面气动力性质改变;第三个机理为水线主要在垂直风向方向振动所带来的系统气动力的在一个振动周期内的正负变化。Geurts 和 Staalduinen^[6]建立一个适用于斜拉桥设计阶段的、经过修正的驰振计算模型,以决定抑制斜拉桥斜拉索风雨振动所需的阻尼量。顾明、黄麟和王国砚^[7]所建立的计算模型可以分析水线震荡对斜拉桥斜拉索风雨激振稳定性的作用。李寿英、陈政清和顾明为斜拉桥斜拉索风雨激振建立了两质量三自由度理论模型,他们的研究考虑了准运动水线和三维连续弹性拉索^[8]。本文希望通过原型斜拉索的风雨振动运动方程获得斜拉索和水线的运动过程,然后通过斜拉索和水线的运动过程来了解该系统的振动模式,同时分析该系统的气动力阻尼、水线运动所致气动力等项的产生和变化过程,由此达到探索斜拉桥斜拉索风雨振动机理的目的。

1 斜拉桥斜拉索风雨振动的运动方程

本文采用如下假设:斜拉索表面的水线沿索纵向均匀分布并在斜拉索的表面绕纵轴作圆周运动;该水线的运动沿索长变化但是水线的质量以及水线和索表面的接触条件为一常量;紊流效应和沿索的纵轴的轴向气流的效应没有被考虑。考虑一根悬垂在两个固定支撑点之间均质的弹性斜拉索(见图 1)。斜拉索的倾角用 $\bar{\alpha}$ 表示,来风的攻角用 $\bar{\beta}$ 表

示。斜拉索沿索方向轴向的平面内运动位移和垂直于索的方向的平面内运动位移分别用 u 和 w 表示,而垂直于索的方向的平面外运动位移用 v 表示。 L 表示索的弦长。图 1 中,将斜拉索的低端定为原点, X 轴设为沿索的弦的方向, Y 轴位于 1-5-7 平面内,垂直于 X 轴的方向。

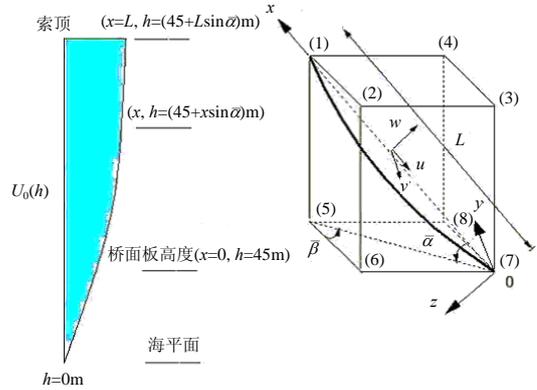


图 1 原型斜拉索的概况

Fig.1 Orientation of inclined prototype cable

对于图 1 所示的坐标系,索的第 n 阶横向振型运动的拉格朗日公式可以表达为^[9]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T_c}{\partial y_n} \right) + \frac{\partial U_c}{\partial y_n} = \int_0^L \bar{Y} \frac{\partial v}{\partial y_n} dx \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T_c}{\partial z_n} \right) + \frac{\partial U_c}{\partial z_n} = \int_0^L \bar{Z} \frac{\partial w}{\partial z_n} dx \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{aligned} T_c &= \int_0^L \frac{m}{2} \left[\left(\frac{\partial v}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right] dx, \\ U_c &= \frac{1}{2} EAL\Theta^2 + \int_0^L \frac{H_0}{2} \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] dx, \\ v(x,t) &= \sum_n \phi_n(x) y_n(t), \\ w(x,t) &= \sum_n \varphi_n(x) z_n(t), \\ \phi_n &= \varphi_n = \sin \left(\frac{n\pi x}{L} \right), \quad n=1,2,3,\dots \end{aligned}$$

其中: T_c 是整条索的动能; U_c 是整条索的势能; \bar{Y} 和 \bar{Z} 代表每单位长度索所受的风雨激励引起的外力在相应的横向方向上分量; Θ 代表索内动应变; E 是索的材料弹性模量; A 是索的断面面积; H_0 为索内的静张力。

由于斜拉索的风雨振动主要发生在索的竖直

平面内, 本文仅研究索的平面内的运动。忽略振型耦合, 原型索平面内横向运动的第 n 阶横向振型运动方程可以从式(1)的第二个方程获得:

$$M_{z_n}(\ddot{z}_n + 2\xi_{z_n}\omega_{z_n}\dot{z}_n + \omega_{z_n}^2 z_n) + v_n z_n^3 + 3\beta_n z_n^2 + \int_0^L \frac{\rho D U_0(x)}{2} [R\dot{\theta}(x,t)\Gamma_1(x,t) + \dot{w}(x,t)\Gamma_2(x,t) + U_0(x)\theta(x,t)\Gamma_3(x,t)] \sin \frac{n\pi x}{L} dx = 0 \quad (2)$$

其中: $M_{z_n} = \frac{mL}{2}$, z_n 代表相应的第 n 阶振型的最大广义位移; 参数 ξ_{z_n} 表示索的第 n 阶阻尼系数;

$$\omega_{z_n} = \sqrt{\frac{H_0 n^2 \pi^2}{mL^2} \left[1 + \frac{2\lambda^2}{n^4 \pi^4} (1 + (-1)^{n+1})^2 \right]},$$

$$\lambda^2 = \frac{EA}{H_0} \left(\frac{mgL \cos \bar{\alpha}}{H_0} \right)^2,$$

E 是索的材料的弹性模量, A 是索的断面面积, m 为单位长度索的质量, g 为重力加速度, H_0 为索的静张力;

$$v_n = \frac{EA\pi^4 n^4}{8L^3}; \quad \beta_n = \frac{EA\pi n^2 mg \cos \bar{\alpha}}{4H_0 L} \left(\frac{1 + (-1)^{n+1}}{n} \right);$$

积分号内的所有项均为索的气动力项, 其中的函数 $\Gamma_1(x,t)$ 、 $\Gamma_2(x,t)$ 和 $\Gamma_3(x,t)$ 是索倾角、风攻角、风停滞点、平均风速与水线在索上静止位置、以及索运动与水线运动之间关系的函数^[10]; $U_0(x)$ 是沿索的高度而变化的平均风速, 可由参考高度处风速(即高于桥面 2m 处风速)和 x 点高度坐标由风剖面对数公式计算而得; R 是索的半径; D 是索的直径; ρ 是空气密度; $\theta(x,t)$ 为水线相对于索的角位移; $\dot{\theta}(x,t)$ 为水线相对于索的角速度。

在上面的式(2)中, 二次项是由索的垂度引起的几何非线性产生的, 三次项是由动拉力和动位移间的非线性关系引起的动力非线性产生的。

四阶变步长的龙格-库塔法被用来计算所选的斜拉索的风雨振动。

2 风雨振动的位移响应

为了讨论原型斜拉索的风雨振动的机理, 首先讨论斜拉索的位移反应和参考高度风速(即高于桥面 2m 处平均风速)的关系、以及水线的位移反应和参考风速的关系。图 2 描述了日本名古屋的名港西大桥的 14 号斜拉索的最大位移反应的数值计算结果和参考高度平均风速的关系, 风的攻角为 45° 。

图 2 中, 横坐标为参考高度平均风速, 纵坐标为 14 号斜拉索跨中振幅。该斜拉索全长 75m, 直径为 14cm, 索内的静张力为 $1.147 \times 10^6 \text{N}$, 索的弹性模量和横截面面积的乘积为 $1.571 \times 10^9 \text{N}$, 单位长度索的质量为 51kg, 索第一阶阻尼系数为 0.0011, 索倾斜角为 0.83kg 。该 14 号索的最大位移反应在索的中点发生, 大小为 14cm, 发生最大位移反应的平均风速大约为 9m/s 和 9.5m/s 之间。14 号斜拉索上的水线最大角位移为 7° 。斜拉索沿其跨度的振幅接近索的第一振型, 索的最大位移反应发生在索的跨中。该结果与名港西大桥上的现场测量结果十分接近。

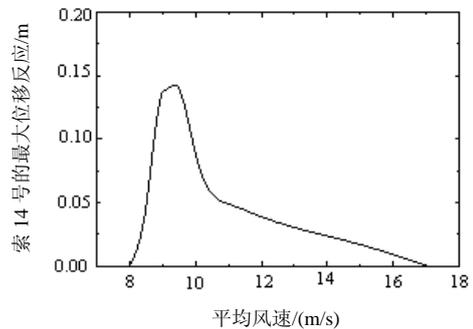


图 2 No.14 斜拉索跨中最大位移反应和风速的关系
Fig.2 Maximum displacement response at middle point of cable No.14

根据图 2 所示, 当风速超过 8m/s 的时候, 索的风雨振动发生了。然后, 索的振幅随风速的增加而增加。在风速 9m/s—9.5m/s 之间, 索的振动反应达到全局最大振幅。在这之后, 风速进一步增大, 索的振幅越来越小。当风速大于 15m/s 之时, 索的振幅已经变得非常小。在相关的风速之内, 水线的振幅和索振幅有着相同的倾向和变化趋势。本文的结论是, 原型索的风雨振动仅发生在某一段固定的风速范围内, 斜拉索和水线的振动均为振幅有限型的振动, 水线的振动模式和索振动模式相同。

3 风雨振动的机理

为了进一步探索原型索风雨振动背后的可能机理, 需要分析系统的气动力阻尼、水线运动所致气动力。为此, 需要事先定义系统的气动力阻尼系数 $\xi(t)$ 和水线运动所产生的气动力 $\tilde{F}(t)$ 。此处只考虑第一振型, 则系统等效气动力阻尼 $\xi(t)$ 可定义为:

$$\tilde{\xi}(t) = \frac{\rho D}{4M_{z_1} \omega_{z_1}} \int_0^L U_0(x) \Gamma_2(x,t) \sin \frac{\pi x}{L} \sin \frac{\pi x}{L} dx \quad (3)$$

同理，水线运动所产生的气动力 $\tilde{F}(t)$ 可定义为：

$$\tilde{F}(t) = \frac{\rho D}{2M_{z_1}} \int_0^L [RU_0(x) \dot{\theta}(x,t) \Gamma_1(x,t) + U_0^2(x) \theta(x,t) \Gamma_3(x,t)] \sin \frac{\pi x}{L} dx \quad (4)$$

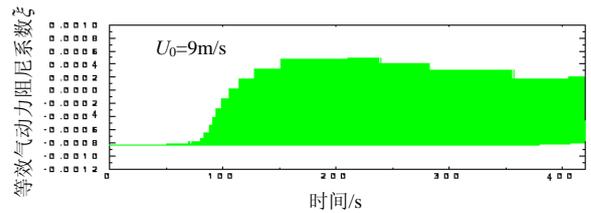
根据图 2 选取三个特殊的风速观察索和水线的位移反应时程、系统的等效气动力阻尼系数以及水线运动所产生气动力这些关键项的时程。这三个风速分别为索发生全局最大振幅时的风速 9m/s、索的振幅变得非常小之时的风速 12m/s 和风速 10m/s。

当风速为 9m/s 的时候，图 3(a)—图 3(d)显示了系统的等效气动力阻尼系数 $\tilde{\xi}$ 、水线运动所产生气动力 \tilde{F} 、索跨中位移反应 $w_{跨中}$ 和水线在索跨中角位移反应 $\theta_{跨中}$ 。图 3(a)—图 3(d)中，横坐标均代表时间；从图 3(a)—图 3(d)，纵坐标分别为系统等效气动力阻尼系数、水线运动所产生气动力、索跨中位移反应和水线在索跨中的角位移反应。从图 3(a)可以看出，计算所得的系统等效气动力阻尼系数 $\tilde{\xi}$ 的时程表明，在开头的 50s 内，系统的等效气动力阻尼系数 $\tilde{\xi}$ 为一负值常数。与此同时，由于水线运动所产生气动力 \tilde{F} 在增加，原型索跨中振幅持续增加(见图 3(b)和图 3(c))。从图 3(d)显示，水线跟随索的运动一起振动，且它的振幅也随索振幅的增加而增加。随着水线振幅的增加，水线运动所产生气动力 \tilde{F} 也随时间增加(见图 3(d)和图 3(b))。

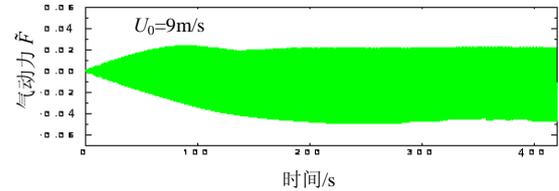
直至索的位移幅度和水线的角位移幅度增加到某一个水平的时候，系统的等效气动力阻尼系数不再保持为一个常数。从图 3(a)可以看出，系统的等效气动力阻尼系数 $\tilde{\xi}$ 在正负之间变化。此外，水线运动所产生气动力 \tilde{F} 的振幅变为非对称。结果是，当等效气动力阻尼系数为负的时候，索和水线的振幅在放大；当等效气动力阻尼系数 $\tilde{\xi}$ 变为正的时候，索和水线的振动被抑制。因为等效气动力阻尼系数 $\tilde{\xi}$ 的上下限的绝对值很小且水线运动所产生气动力 \tilde{F} 幅度比较大，在该阶段索的振幅很大(见图 3(c))。从而可以得出结论，在这种情况下，水线的存在是引起索风雨振动的主要原因。

当风速为 10m/s 的时候，图 4(a)—图 4(d)显示

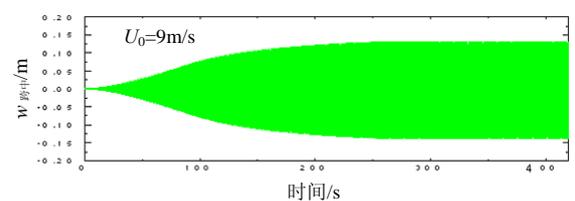
了系统的等效气动力阻尼系数 $\tilde{\xi}$ 、水线运动所产生气动力 \tilde{F} 、索跨中位移反应 $w_{跨中}$ 和水线在索跨中的角位移反应 $\theta_{跨中}$ 。图 4(a)—图 4(d)中，横坐标均代表时间；从图 4(a)—图 4(d)，纵坐标分别为系统等效气动力阻尼系数、水线运动所产生气动力、索跨中位移反应和水线在索跨中的角位移反应。从图 4(a)可以看出，系统的等效气动力阻尼系数为正值。所以，对比风速为 9m/s 的情况，水线的存在抑制了系统的振动。然而，水线运动导致的气动力 \tilde{F} 激励了原型斜拉索的振动。从图 4(b)可以看出，水线运动导致的气动力 \tilde{F} 为对称的。当水线运动导致的气动力 \tilde{F} 输入的能量相等于等效气动力阻尼和系统阻尼共同消耗的能量之时，系统展示了中等程度的振幅有限型的振动(见图 4(c)和图 4(d))。在这种情况下，索的风雨振动的机理有些类似旋涡脱落激励索振动。同时这种情况也表明，即使没有负的气动力阻尼，水线的运动也可以导致索的风雨振动。



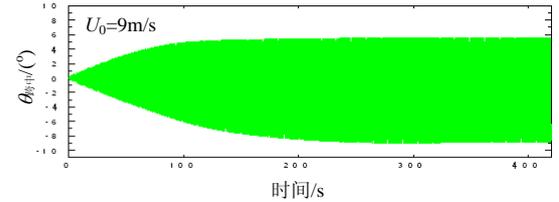
(a) 等效气动力阻尼系数时程图



(b) 水线运动所产生的气动力的时程图



(c) 索的跨中位移反应的时程图



(d) 水线的跨中角位移反应的时程图

图 3 风速为 9 m/s 时的系统振动的时程图

Fig.3 Time histories of system vibration ($U_0 = 9 \text{ m/s}$)

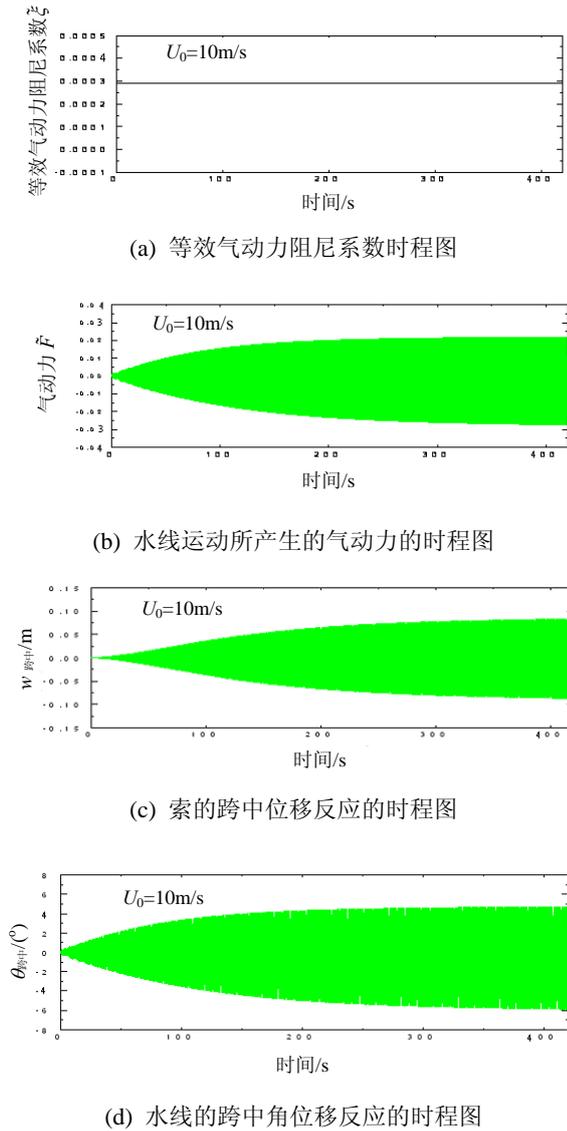


图 4 风速为 10 m/s 时的系统振动的时程图
Fig.4 Time histories of system vibration ($U_0=10$ m/s)

当风速为 12m/s 的时候，图 5(a)—图 5(c)显示了系统的等效气动力阻尼系数 $\tilde{\xi}$ 、水线运动所产生气动力 \tilde{F} 和索跨中位移反应 $w_{跨中}$ 的时程。图 5(a)—图 5(c)中，横坐标均代表时间；从图 5(a)—图 5(c)，纵坐标分别为系统等效气动力阻尼系数、水线运动所产生气动力和索跨中位移反应。从图 5(a)可以看出，系统的等效气动力阻尼系数 $\tilde{\xi}$ 为一正值常数。在这种情况下，水线的存在阻滞了系统的振动，仅有水线运动所产生气动力激励索的振动。由于等效气动力阻尼系数 $\tilde{\xi}$ 为正数且它的绝对值比较大，水线的振幅因而较小。从而水线运动所产生气动力 \tilde{F} 的振幅也较小，因为它依赖于水线的位移反应和速度反应(见图 5(b))。结果是，索的振动反应也处于较小的水平(见图 5(c))。在这种情况下索的风雨振

动表现为一种自激振动。因为在这种情况下，正等效气动力阻尼系数比风速为 10m/s 的时候大而水线运动所产生气动力 \tilde{F} 比风速为 10m/s 的时候小，所以索的振幅比上一种情况索的振幅小。水线的振幅也较小，原因是它随索的运动一起振动。可以得到结论，在这种情况下，水线的运动是引起索风雨振动的主要原因。

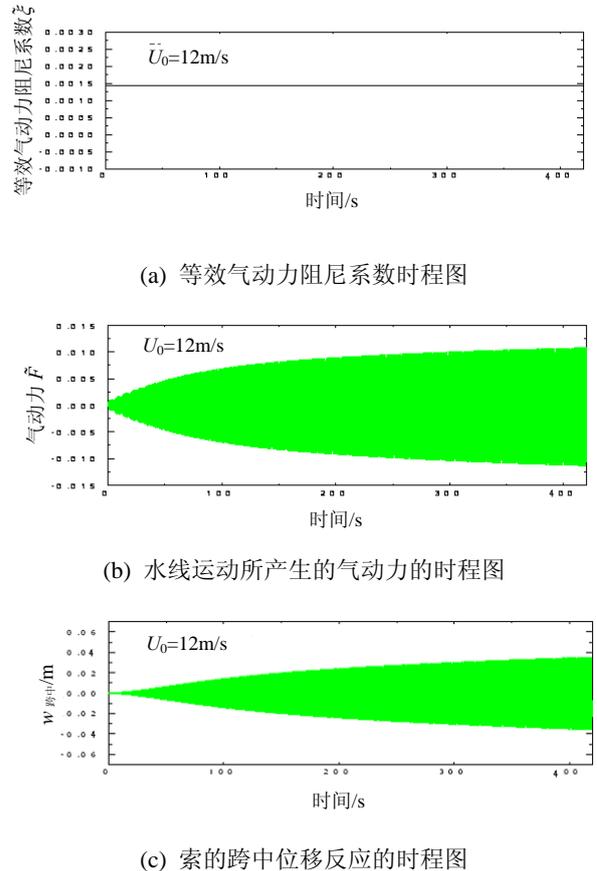


图 5 风速为 12 m/s 时的系统振动的时程图
Fig.5 Time histories of system vibration ($U_0=12$ m/s)

上文的分析表明，原型索的风雨振动为振幅有限型，且只发生某一段固定的风速范围内。随着风速从零开始增加，负的气动力阻尼出现了。当风速超过 9.5m/s 并继续增加的时候，负的气动力阻尼消失。结论是，水线的存在及/或运动引起的气动力效应引起系统的风雨振动反应。当风速到达引起系统全局最大位移反应的风速之后，随风速继续增加，系统的振动反应变的越来越小，原因是气动力阻尼为正，而且水线运动所产生气动力比较小。

4 参数分析

为了更加完全地探索原型索风雨振动的机理，该节采用本文的计算模型进行数值计算来研究索

的结构参数、风速剖面和水线有关参数的影响和作用。这里参加计算的斜拉索仍为名港西大桥上的 14 号斜拉索。

首先研究的是原型斜拉索的结构阻尼的影响，除了索的结构阻尼系数以外，其他结构参数保持不变。斜拉索的结构阻尼系数依次被选取为 0.24%、0.29% 和 0.33%。图 6 表示了在不同的索结构阻尼系数情况下，索在跨中的最大位移反应和参考高度平均风速的关系。图 6 中，横坐标代表参考高度平均风速，纵坐标为索全局最大位移反应。可以看出，在不同的索结构阻尼系数的情况下，索的风雨振动均为发生在某一段风速范围内。索的结构阻尼系数的增加并没有改变这一段平均风速的范围。对于不同的索的结构阻尼系数，令系统发生全局最大位移反应的平均风速也基本相同。索的结构阻尼系数越大，系统的振动反应越小。可以得出结论，索的结构阻尼的增加能够有效抑制索的风雨振动。本文给出的模型可以很好地捕捉到这一蕴涵在原型斜拉索的风雨振动中的重要性质。

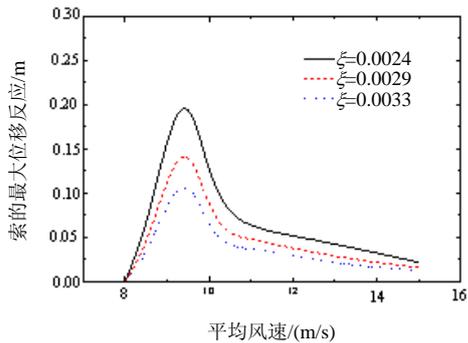


图 6 索的结构阻尼系数对索最大位移反应的作用
Fig.6 Effect of cable structural damping ratio

然后进行参数研究的是原型斜拉索内的静张力的影响，除了索内的静张力以外，系统其他结构参数保持不变。斜拉索内的静张力依次被取为 $1.0 \times 10^6 \text{N}$ 、 $1.1481 \times 10^6 \text{N}$ 和 $1.2 \times 10^6 \text{N}$ 。图 7 展示了在不同的索内的静张力情况下，索在跨中的最大位移反应和参考高度平均风速的关系。图 7 中，横坐标代表参考高度平均风速，纵坐标为索全局最大位移反应。可以看出，在不同的索内静张力的情况下，索的风雨振动均为发生在某一段风速范围内。索内的静张力的增加并没有改变这一段平均风速的范围。对于不同的索内静张力，使得系统发生全局最大位移反应的风速也基本相同。当索内的静张力增加的时候，系统的振幅平缓地减少。结论为，索内的静张力对系统振动反应具有一定的影响。

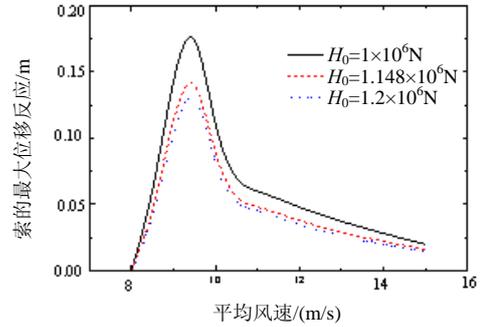


图 7 索内静张力对索的最大位移反应的作用
Fig.7 Effect of static cable tension force

随后的参数研究考虑的是平均风的风速剖面的影响。平均风的风速剖面用幂指数函数近似表示，函数中的幂指数 α 反映地形的改变。该幂指数 α 的增加，对应于地形从平滑变为粗糙。在系统的其他参数保持不变的情形下，反映地形粗糙度变化的幂指数 α 取为一个变量。它的值依次被选取为 0.16、0.28 和 0.40。图 8 表示了对于不同的幂指数 α ，索在跨中的最大位移反应和参考高度平均风速的关系。图 8 中，横坐标代表参考高度平均风速，纵坐标为索全局最大位移反应。可以看出，在不同的幂指数 α 的情况下，索的风雨振动均为发生在某一段风速范围内。然而，对应于系统发生全局最大位移反应的平均风速，却随幂指数 α 的增大而减小。而且，当幂指数 α 增加的时候，索的风雨振动的振幅减少。可以得出结论，平均风的风速剖面中的幂指数对原型索的风雨振动有影响。也就是说，随着地形粗糙度增加，索的风雨振动的振幅变小，对应于索发生全局最大位移反应的风速变得较低。

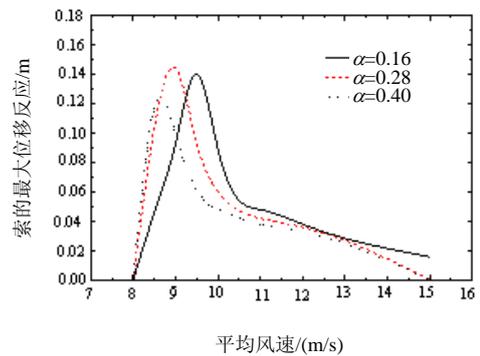


图 8 风速剖面的幂指数对索最大位移反应的作用
Fig.8 Effect of wind profile power exponent

本文的计算模型引入关于水线的三个参数，即气动力停滞点影响因数 ε 、以及水线的阻尼因数 ξ 和 α [10-11]。随后进行的参数研究考察这三个参数对

原型索的风雨振动的影响。

在系统的其他结构参数保持不变的情形下,水线的阻尼指数 a 被取为一个变量。图 9 显示了对于不同的水线阻尼指数 a , 索跨中最大位移反应和参考高度风速的关系。图 9 中, 横坐标代表参考高度平均风速, 纵坐标为索跨中最大位移反应。可以看出, 水线阻尼指数 a 的减小使索发生风雨振动的风速范围变小了。系统全局最大位移反应随水线阻尼指数 a 的减小而减小。同时由图 9 可以看出, 水线阻尼指数 a 对系统的作用在它本身数值较小时比较显著, 当它本身数值较大之时则并不显著。也就是说, 系统对水线阻尼指数 a 的敏感度随水线阻尼指数 a 增大而降低。

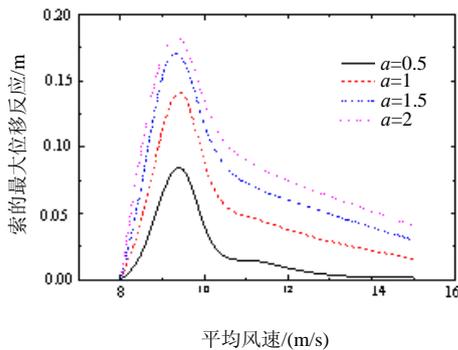


图 9 水线的阻尼指数对索的最大位移反应的作用
Fig.9 Effect of rivulet damping exponent

在系统的其他结构参数保持不变的情形下,水线的阻尼系数 ξ_r 被取为一个变量。图 10 显示了对于不同的水线阻尼系数 ξ_r , 索在跨中的最大位移反应和参考高度风速的关系。图 10 中, 横坐标代表参考高度平均风速, 纵坐标为索跨中最大位移反应。可以看出, 水线阻尼系数 ξ_r 的增加使得索发生风雨振动的风速范围变小了。系统的振幅随水线阻尼系数 ξ_r 的增加而减少。同时由图 10 可以看出,

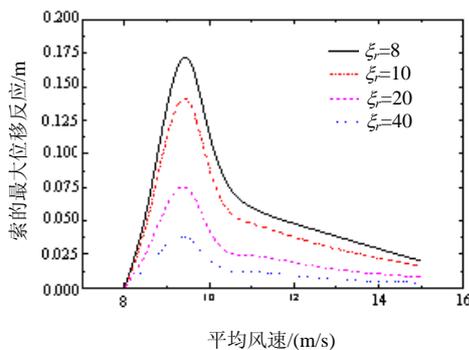


图 10 水线的阻尼系数对索的最大位移反应的作用
Fig.10 Effect of rivulet damping ratio

水线阻尼系数 ξ_r 对索和水线本身全局最大位移反应的作用在它本身数值较小时比较显著, 当它本身数值较大之时则并不显著。也就是说, 系统对水线阻尼系数 ξ_r 的敏感度随水线阻尼系数 ξ_r 的增大而降低。

在索和水线的所有其他参数保持不变的情形下, 气动力停滞点影响因数 ε 被取为一个变量。图 11 显示了对于三个不同的气动力停滞点影响因数 ε , 索在跨中的最大位移反应和参考高度风速的关系。图 11 中, 横坐标代表参考高度平均风速, 纵坐标为索跨中最大位移反应。对于三个不同的气动力停滞点影响因数 ε , 索的风雨振动均为发生在某一段风速范围内。当气动力停滞点影响因数增大的时候, 发生大幅索风雨振动的风速范围变得较低。从图 11 可以看出, 相应于系统发生全局最大位移振幅的平均风速随气动力停滞点影响因数 ε 的增大而变小。气动力停滞点影响因数 ε 的增大使得索和水线的振幅减小。结论是, 气动力停滞点影响因数 ε 对于水线-索系统的振动反应幅度具有一定的影响作用。

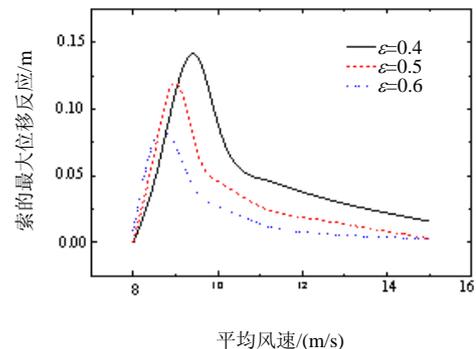


图 11 气动力停滞点影响系数对索的最大位移反应的作用
Fig.11 Effect of stagnation influence factor

5 结论

原型索风雨振动的机理: 原型索的风雨振动仅发生在某一段平均风速范围内。索和水线的振动为振幅有限型的振动。水线的振动模式和索振动模式相一致。水线的存在所产生的气动力效应和/或水线的运动导致系统的风雨振动反应。

参数分析的结果表明, 索的结构阻尼的增加可以有效抑制索的风雨振动。索内静张力对系统的振幅有一定影响。平均风的风速剖面中的幂指数对系统的振幅也有一定影响, 特别对系统发生风雨振动

的相对应风速有一定影响。本文的计算理论模型包含三个和水线有关的参数,即气动力停滞点影响因数和两个阻尼因数。水线阻尼因数对索和水线全局最大位移反应的影响在其本身数值较小的时候比较显著,当其本身数值较大之时则并不显著。也就是说,系统对水线阻尼因数的敏感度随着水线阻尼因数的增大而降低。水线的气动力停滞点影响因数对水线-索系统的反应幅度具有一定的影响作用。

参考文献:

- [1] Hikami Y, Shiraishi N. Wind-rain-induced vibrations of cables in cable stayed bridges [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1988, 29: 409—418.
- [2] Matsumoto M, Yagi T, Shirato H, Sakai S, Ohya J, Okada T. Field observations of wind-induced cable vibrations using large scale inclined cable model [C]. *Proceedings of 11th International Conference on Wind Engineering*, Lubbock, Texas, USA, 2003, 2: 2149—2156.
- [3] Phelan R, Sarkar Scott, Mehta Partha P, Kishor C. Full-scale measurements to investigate wind-rain-induced cable-stay vibration and its mitigation [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2006, 11: 293—304.
- [4] Yamaguchi H. Analytical study on growth mechanism of rain vibration of cables [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 33: 73—80.
- [5] Verwiebe C, Ruscheweyh H. Recent research results concerning the exciting mechanisms of wind-rain-induced vibrations [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998, 74-76: 1005—1013.
- [6] Geurts C P W, van Staalduin P C. Estimation of the effects of wind-rain-induced vibration in the design stage of inclined stay cable [C]. *Proceedings of Wind Engineering Into the 21st Century*, Rotterdam, Netherlands, 1999: 885—892.
- [7] 顾明, 黄麟, 王国砚. 水线震荡对斜拉桥拉索风雨激振稳定性的作用[J]. *振动工程学报*, 2004, 17(1): 96—101.
Gu Ming, Huang Lin, Wang Guoyan. Effects of motion of rivulet on stability of rain-wind induced vibration of cables of cable-stayed bridges [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2004, 17(1): 96—101. (in Chinese)
- [8] 李寿英, 陈政清, 顾明. 斜拉桥拉索风雨激振的两质量三自由度理论模型[J]. *土木工程学报*, 2007, 40(10): 60—66.
Li Shouying, Chen Zhengqing, Gu Ming. A theoretical model of rain-wind induced vibration of stay cables: a coupled two-mass oscillators with three degree-of-freedom [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(10): 60—66. (in Chinese)
- [9] Wang L Y, Xu Y L. Active stiffness control of wind-rain-induced vibration of prototype stay cable [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2008, 74(1): 80—100.
- [10] Xu Y L, Wang L Y. Analytical study of wind-rain-induced cable vibration: SDOF model [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91: 27—40.
- [11] Wang L Y, Xu Y L. Analytical study of wind-rain-induced cable vibration: 2DOF model [J]. *Wind and Structures*, 2003, 6: 291—306.