

文章编号: 1000-4750(2014)07-0054-07

# 风雨激振时水膜形态与拉索振动间的双向耦合

毕继红<sup>1,2</sup>, 王 剑<sup>1</sup>, 邵 倩<sup>3</sup>, 逯 鹏<sup>1</sup>

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072;

3. 西门子机械传动(天津)有限公司, 天津 300400)

**摘 要:** 风雨激振是指斜拉索在特定风雨条件下的一种低频大幅度振动。该文应用滑移理论并结合单自由度振动理论建立耦合的水膜运动方程和拉索运动方程, 应用计算流体力学软件 *Fluent* 求解水膜运动方程中的风压力系数和摩擦系数, 通过数值求解方程组来研究水膜形态变化、拉索升力及其振动响应之间的联系, 以揭示风雨激振的产生机理。结果表明: 拉索表面水膜形态的周期性变化导致拉索升力的周期性变化, 从而引起拉索的大幅度振动; 水线与拉索间的共振是产生风雨激振现象的主要原因。

**关键词:** 风雨激振; 斜拉索; 双向耦合; 滑移理论; 水膜

中图分类号: U443.38 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.11.0909

## TWO-WAY COUPLING BETWEEN WATER FILM MORPHOLOGY AND RAIN-WIND INDUCED VIBRATION OF CABLE

BI Ji-hong<sup>1,2</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>, SHAO Qian<sup>3</sup>, LU Peng<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety, Ministry of Education, Tianjin 300072, China;

3. Siemens Mechanical Drive System (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300400, China)

**Abstract:** Rain-wind induced vibration (RWIV) is the phenomenon that a stay cable may vibrate with a large amplitude and a low frequency under the special conditions of wind and rain. According to lubrication theory and vibration theory of a single-mode system, the coupled equations of water film evolution and cable vibration are presented. The wind pressure and friction coefficients in water film evolution equations are obtained by computational fluid dynamics (CFD) software-*Fluent*. To reveal the mechanism of RWIV, the relationships between the water film morphology, the lift and vibration of a cable are discussed by numerical solving the coupled equations. The results show that cable lift oscillates periodically due to the periodical variation of water film morphology, which causes the large amplitude vibration of a cable. This confirms the conclusion that the main reason for RWIV is the resonance between rivulets and a cable.

**Key words:** rain-wind induced vibration; stay cable; two-way coupling; lubrication theory; water film

风雨激振是指斜拉桥拉索在风雨条件下发生的一种低频大幅度振动。自1984年日本学者 Hikami 和 Shiraishi 首次在 Meikonishi 桥上详细观察到了拉索的风雨激振现象以来<sup>[1]</sup>, 各国研究人员又多次在野外观测到同一现象<sup>[2-5]</sup>并通过一系列风洞试验再

现了风雨激振现象<sup>[6-14]</sup>。自1990年 Yamaguchi 在风洞试验基础上建立理论模型以来<sup>[15]</sup>, 各国科研人员创建了多种理论模型试图揭示风雨激振的产生机理。斜拉索表面水线的形成和振荡是产生风雨激振现象的关键因素, 依据模拟水线的不同方法, 理

收稿日期: 2012-11-29; 修改日期: 2013-05-15

通讯作者: 毕继红(1965—), 女, 江苏人, 教授, 博士, 博导, 从事大跨桥梁及柔性结构的动力响应分析研究(E-mail: jhbi@sohu.com).

作者简介: 王 剑(1981—), 男, 天津人, 讲师, 博士, 从事斜拉桥拉索风雨激振机理与减振研究(E-mail: avonlea@163.com);

邵 倩(1982—), 女, 天津人, 助理工程师, 学士, 从事斜拉桥拉索减振研究(E-mail: shao.qian@siemens.com);

逯 鹏(1985—), 男, 河北人, 博士, 从事斜拉桥拉索风雨激振机理研究(E-mail: lu\_peng1985@126.com).

论模型大致可以分为以下3类:

1) 将水线模拟为斜拉索表面的运动质点, 通过对一定空间姿态下带人工水线拉索节段模型在风洞中测力或测压试验获得拉索气动系数, 并将其作为已知参数代入拉索运动方程和水线质点运动方程<sup>[15-18]</sup>。

2) 不建立水线运动方程, 通过假设水线的运动规律来确定水线运动对斜拉索的作用力, 并将其作为已知参数代入拉索运动方程<sup>[19-22]</sup>。

3) 假设拉索表面存在一层连续的水膜, 应用滑移理论研究拉索表面的水膜变化, 模拟水线的形成和振荡<sup>[14,23-24]</sup>。

目前应用滑移理论建立的理论模型只是拉索与水线的单向耦合模型, 而斜拉索的风雨激振是拉索与水线的双向耦合运动, 因此有必要建立气、液、固三相耦合计算模型。本文在 Lemaitre 模型<sup>[23]</sup>基础上, 将滑移理论与单自由度振动理论相结合, 建立耦合的水膜运动方程和拉索运动方程, 应用计算流体力学软件 Fluent 求解不同水膜形态下的风压力系数  $C_p(q, t)$  和摩擦系数  $C_f(q, t)$ , 通过数值求解方程组得到水膜形态变化规律、拉索升力及振动规律, 研究三者间的联系, 揭示风雨激振现象的产生机理。

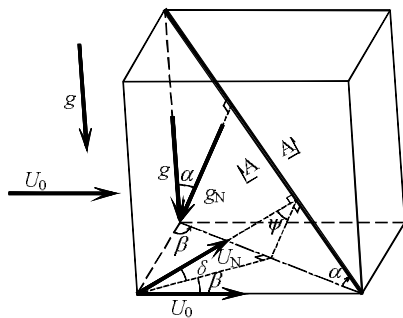
## 1 模型

### 1.1 基于滑移理论的水膜运动方程

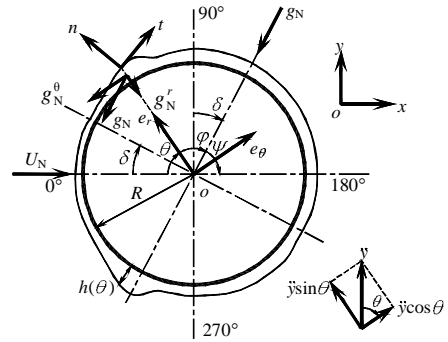
考虑半径为  $R$ 、水平倾角为  $a(0^\circ \leq a \leq 90^\circ)$  的静止的拉索受水平方向风力和重力的共同作用, 如图 1(a)所示, 风速为  $U_0$ , 风偏角为  $b(0^\circ \leq a \leq 90^\circ)$ , 风攻角为  $0^\circ$ 。

取图 1(a)中的斜拉索 A-A 断面为研究对象, 如图 1(b)所示。忽略重力沿拉索轴向的分量, 则作用在拉索断面内的重力分量  $g_N$ :

$$g_N = g \cos a \quad (1)$$



(a) 斜拉索空间位置



(b) 斜拉索表面水膜受力

图 1 斜拉索模型图

Fig.1 Model of stay cable and water film

采用准定常假设, 忽略轴向流的影响, 只考虑垂直于斜拉索的气流作用, 则拉索断面内的风速  $U_N$ :

$$U_N = \frac{U_0 \cos b}{\cos d} \quad (2)$$

重力分量  $g_N$  与风速  $U_N$  之间的夹角为  $d + \frac{\pi}{2}$ ,

其中:

$$d = \arctan(\sin a \cdot \tan b) \quad (3)$$

根据滑移理论, 假设拉索表面存在一层连续的水膜, 极坐标系  $(e_r, e_\theta)$  下水膜内任一点的坐标为  $(r, q)$ ,  $R \leq r \leq R + h$ , 水膜厚度为  $h(q, t)$ ,  $h > 0$ , 水膜内的流场速度  $u$  可表示为分量形式  $u = u_r e_r + u_\theta e_\theta$ , 则无量纲化的流场速度分布为:

$$U = -\int_0^H \partial_q V dx \quad (4a)$$

$$V = \frac{3}{2} [G \cos(q-d) - \rho \cos q - S(\partial_q H + \partial_q^3 H) + P \partial_q C_p] (x^2 - 2Hx) + \frac{3PC_f}{e} x \quad (4b)$$

无量纲化的水膜运动方程可表示为:

$$\partial_T H + \partial_q \left\{ [-G \cos(q-d) + \rho \cos q + S(\partial_q H + \partial_q^3 H) - P \partial_q C_p] H^3 + \frac{3PC_f}{2e} H^2 \right\} = 0 \quad (5)$$

式中:

$$U = \frac{R}{n} u_r, \quad V = \frac{R}{n} u_\theta, \quad T = \frac{n}{Rh_0} t, \quad G = \frac{h_0^3}{3n^2} g_N, \quad \rho = \frac{h_0^3}{3n^2} \rho, \quad x = r - R, \quad P = \frac{r_g U_N^2 h_0^3}{6rn^2 R}, \quad S = e^3 \frac{h_0 g}{3rn^2}, \quad H = \frac{h}{h_0}, \quad e = \frac{h_0}{R}, \quad C_p = \frac{p_g}{\frac{1}{2} r_g U_N^2}, \quad C_f = \frac{t \cdot \sigma_g \cdot n}{\frac{1}{2} r_g U_N^2} \quad (6)$$

其中:  $n$  和  $t$  分别为水膜表面的法向量和切向量;

$\sigma_g$  为空气应力张量;  $g$  为水在空气中的表面张力系数( $g$  与  $q$  无关);  $r_g$  为空气密度;  $p_g$  为水膜表面所受的空气压力;  $r$  为水膜的密度;  $p$  为水膜内的压强;  $n$  为水的运动粘度系数。

推导过程详见文献[23]。

## 1.2 拉索运动方程

图2为斜拉索 A-A 断面受力图, 设拉索质量为  $M$ , 刚度为  $K$ , 阻尼为  $c$ , 阻尼比为  $x_0$ , 自振圆频率为  $w_0 = 2\pi f_0$ ,  $f_0$  为拉索自振频率。在横风向( $y$  轴方向)建立拉索运动方程:

$$M\ddot{y} + c\dot{y} + Ky - F_y = 0 \quad (7)$$

将  $w_0 = \sqrt{K/M}$  和  $c = 2Mw_0x_0$  代入式(7)并化简得:

$$\ddot{y} + 2w_0x_0\dot{y} + w_0^2y - \frac{1}{M}F_y = 0 \quad (8)$$

式中:  $F_y$  为横风向的拉索升力,  $F_y = \int_0^{2\pi} [F_r(q)\sin q + F_q(q)\cos q]dq$ 。  $F_r(q)$  和  $F_q(q)$  分别为水膜底面 ( $r=R$ ) 处的法向力和切向力, 如图2所示。在二维模型中, 拉索质量  $M$  可以用其线密度  $r_s$  代替。

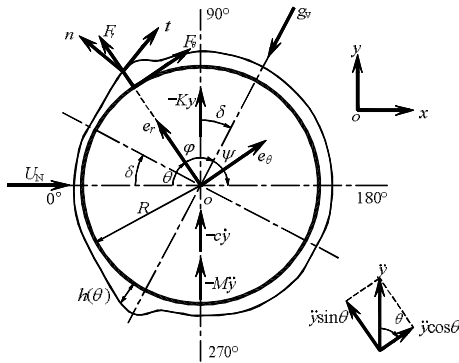


图2 斜拉索断面受力

Fig.2 Force of stay cable section

水膜底面的应力张量为:

$$\sigma_0 = \{-p\mathbf{I} + m[\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T]\}_{|_{r=R}} = \begin{bmatrix} -p + 2m\partial_r u_r & m\left(\partial_r u_q + \frac{\partial_q u_r}{r} - \frac{u_q}{r}\right) \\ m\left(\partial_r u_q + \frac{\partial_q u_r}{r} - \frac{u_q}{r}\right) & -p + 2m\left(\frac{\partial_q u_q}{r} + \frac{u_r}{r}\right) \end{bmatrix}_{|_{r=R}} \quad (9)$$

式中  $\mathbf{I}$  为单位向量, 则:

$$F_r(q) = \mathbf{n} \cdot \sigma_0 \cdot \mathbf{n} = \left[ -p + \frac{2m}{N^2 r} \left( (u_r + \partial_q u_q) \left[ \left( \frac{1}{r} \partial_q h \right)^2 - 1 \right] - \right. \right.$$

$$\left. \left. \partial_q h \left[ r \partial_q \left( \frac{u_q}{r} \right) + \frac{1}{r} \partial_q u_r \right] \right] \right]_{|_{r=R}} \quad (10a)$$

$$F_q(q) = \mathbf{t} \cdot \sigma_0 \cdot \mathbf{n} =$$

$$\left[ \frac{m}{N^2} \left\{ -\frac{4}{r^2} \partial_q h (u_r + \partial_q u_q) + \left[ 1 - \left( \frac{1}{r} \partial_q h \right)^2 \right] \right\} \left[ r \partial_q \left( \frac{u_q}{r} \right) + \frac{1}{r} \partial_q u_r \right] \right]_{|_{r=R}} \quad (10b)$$

将式(6)定义的无量纲参数及式(4a)和式(4b)分别代入式(10a)和式(10b)即可得到升力  $F_y$ 。

## 2 数值求解

### 2.1 风压力系数 $C_p$ 和风摩擦力系数 $C_f$

水膜运动方程中的风压力系数  $C_p$  和风摩擦力系数  $C_f$  是影响水膜运动的关键参数。Lemaitre<sup>[23]</sup>在求解方程时采用由 Achenbach<sup>[25]</sup>通过试验确定的表面光滑、干燥的圆柱体的风压力系数  $C_p$  和风摩擦力系数  $C_f$ , 由于  $C_p$  和  $C_f$  是固定不变的, 导致迭代求解方程只能得到上、下水线的初始形成位置, 而不能模拟水线在斜拉索表面的运动。水膜在重力、表面张力、风压力和风摩擦力作用下会发生形状改变, 而水膜形状的改变必然会导致风压力系数  $C_p$  和风摩擦力系数  $C_f$  发生变化。由于风雨激振中的水线位置和形状千变万化, 不可能通过试验来确定每一时刻的风压力系数  $C_p$  和风摩擦力系数  $C_f$ , 只有应用计算流体力学才能求得不同形状水膜的  $C_p$  和  $C_f$ 。

本文仍采用 Lemaitre 的假设<sup>[23]</sup>, 即假设作用在水膜上的风荷载与作用在干燥拉索表面的风荷载相等。采用 Fluent 软件, 将水膜考虑为固体(柱体)置于定常流场中进行数值模拟。设拉索直径为  $d$ , 计算区域取边长为  $18d \times 12d$  的矩形加上半径  $6d$  为半圆, 将柱体中心置于坐标原点, 柱体中心距离入口  $6d$ , 距离出口  $18d$ , 距离上下边界  $6d$ , 采用 Gambit 软件划分网格如图3所示。

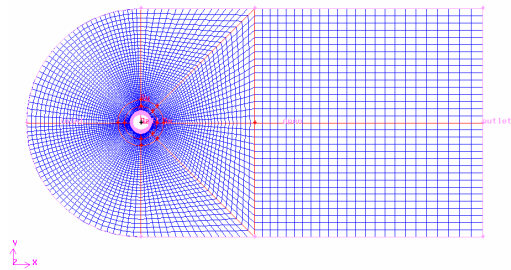


图3 流场网格图

Fig.3 Numerical grids of flow field

计算区域的边界条件如下:

- 1) 来流面(入口)和上下边界均采用速度入口边界条件(velocity-inlet):  $u = U_N, v = 0$ ;
- 2) 出流面(出口)采用压力出口边界条件(pressure-outlet):  $p = 0$ ;
- 3) 柱体表面采用壁面(wall), 即无滑移边界条件:  $u = 0, v = 0$ 。

应用准定常假设采用定常流计算, 采用  $k-w$  SST 过渡流模型和压力求解器(Pressure Based Solver), 压力梯度的计算采用基于单元的最小二乘法(Least Squares Cell-Based), 控制方程使用基于单元中心的有限体积法离散, 速度-压力耦合使用 Coupled 算法, 对流项应用二阶迎风差分格式, 扩散项应用二阶中心差分格式, 湍动能  $k$  输运方程和耗散率  $w$  输运方程均采用二阶迎风差分格式。

将应用 Fluent 软件计算的结果与 Achenbach 的实验数据<sup>[25]</sup>、Fage 和 Flanker 的实验数据<sup>[26]</sup>及 Celik 和 Shaffer 的数值计算结果<sup>[27]</sup>进行对比。考虑圆柱直径  $d = 0.16\text{m}$ 、风速  $U_N = 10\text{m/s}$  的情况, 此时的雷诺数  $Re_g = \frac{d \cdot U_N}{\nu_g} \approx 1.0 \times 10^5$ 。图 4 为  $Re_g = 10^5$  时

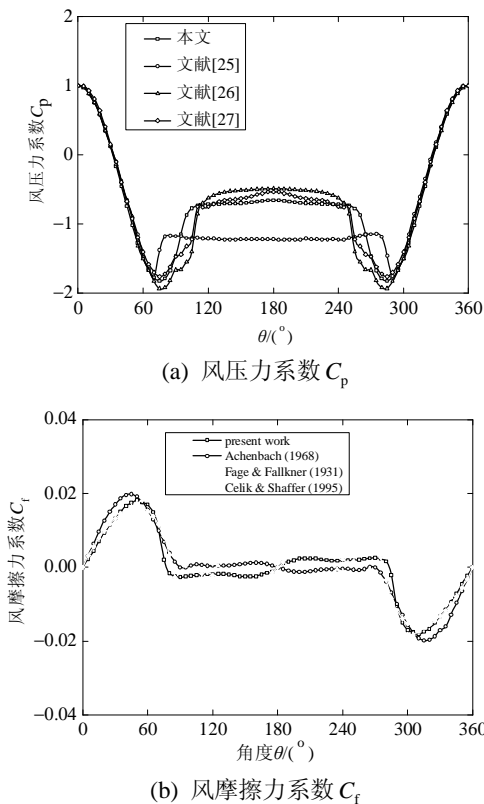


图 4  $Re_g = 10^5$  时的圆柱表面风压力系数  $C_p$  和风摩擦力系数  $C_f$  分布图

Fig.4 Distribution of wind pressure coefficient  $C_p$  and friction coefficient  $C_f$  around cylinder with  $Re_g = 10^5$

的圆柱表面风压力系数  $C_p$  和风摩擦力系数  $C_f$  分布图。可以看出, 应用 Fluent 软件计算得到的  $C_p$  和  $C_f$  与前人的实验及数值计算结果比较接近。

## 2.2 基本参数及数值求解流程

图 5 显示了用 Matlab 软件数值求解水膜运动方程式(5)和拉索运动方程式(8)及用 Fluent 软件计算风压力系数  $C_p$  和风摩擦力系数  $C_f$  基本流程。水膜运动方程式(5)与拉索运动方程式(8)通过拉索升力和加速度相耦合。水膜运动方程式(5)为四阶非线性偏微分方程, 采用拟谱法进行数值求解, 即在空间上采用 Fourier 谱方法, 在时间上采用四阶 Runge-Kutta 法<sup>[28]</sup>; 拉索运动方程式(8)为二阶微分方程, 采用四阶 Runge-Kutta 法求解。在使用 Gambit 软件建模时需考虑拉索在横风向的速度, 采用相对风速建立流场。将水膜在圆周空间上离散为  $N = 128$  个点, 并选取无量纲化的时间步长  $dT = 5 \times 10^{-6}$  ( $dt = 5 \times 10^{-5}\text{s}$ )。初始条件为  $h(0, q) = h_0$ , 即  $H(0, q) = 1$ 。计算中假设水膜质量守恒并保证其连续性; 根据文献[13]的试验设定水膜初始厚度  $h_0 = 0.2\text{mm}$ 。由于研究对象是静止的斜拉索在初始时刻是静止的,  $y|_{t=0} = \dot{y}|_{t=0} = \ddot{y}|_{t=0} = 0$ 。其他基本参数详见表 1。

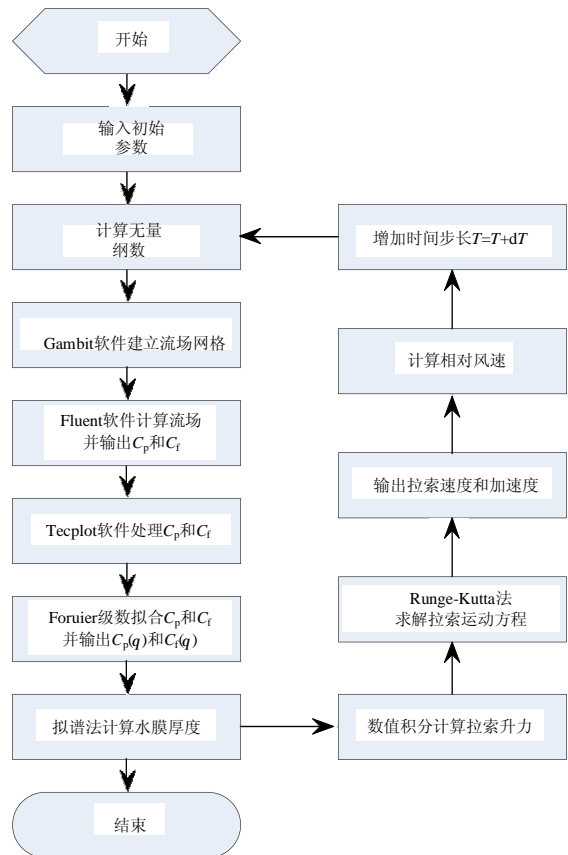


图 5 数值计算流程图

Fig.5 Flowchart of numerical calculation

表 1 基本参数

Table 1 Parameters for numerical calculations

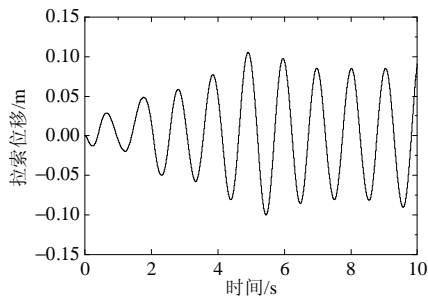
参数	数值
拉索半径 $R/m$	0.05
拉索线密度 $r_s/(kg\ m^{-1})$	8.57
拉索自振频率 $f_0/Hz$	0.952
拉索阻尼比 $x_0$	0.17
拉索倾角 $a/(^\circ)$	30
风偏角 $b/(^\circ)$	22.5
水膜初始厚度 $h_0/mm$	0.2
重力加速度 $g/(m\ s^{-2})$	9.8
水密度 $r/(kg\ m^3)$	$1.0 \times 10^3$
水的运动粘性系数 $n/(m^2\ s^{-1})$	$1.0 \times 10^{-6}$
水在空气中的表面张力系数 $g/(N\ m^{-1})$	0.072
空气密度 $r_g/(kg\ m^3)$	1.225
空气的运动粘性系数 $n_g/(m^2\ s^{-1})$	$1.51 \times 10^{-5}$

### 3 数值计算结果

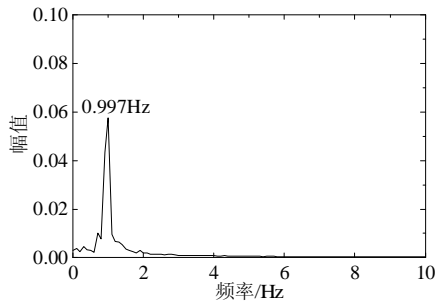
根据文献[13]的试验,当风速  $U_0=6.76m/s \sim 8.04m/s$  时会发生风雨激振现象,在风速  $U_0=7.72\ m/s$  时拉索振动尤为明显。对此,本文选取  $U_0=7.72\ m/s$  作为计算风速,分析不同风速条件下的拉索振动响应、气动升力及水膜形态变化规律,研究三者间的内在联系,揭示风雨激振的机理。

#### 3.1 拉索振动响应

图 6 显示了  $t=0 \sim 10s$  内的拉索振动响应。从图 6(a)所示的时程曲线可以看出,拉索振幅在  $t \approx 4.5s$



(a) 时程曲线



(b) 频谱分析

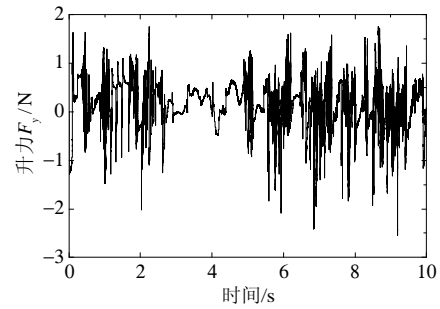
图 6 拉索振动响应

Fig.6 Vibration response of cable

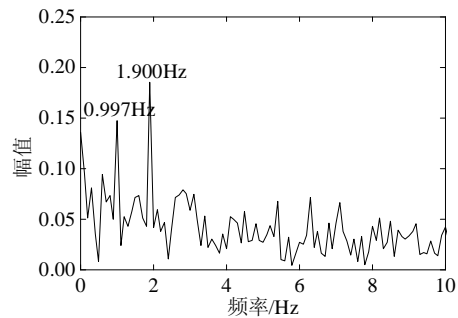
前不断增大,而后基本稳定在  $0.10m$  左右,与实验观测结果<sup>[13]</sup>非常近似。对其进行频谱分析,发现拉索的振动频率接近其自振频率 ( $f_0 = 0.952Hz$ )。

#### 3.2 拉索升力

图 7 显示了  $t=0 \sim 10s$  内由于水膜形态变化而导致的拉索升力变化。升力的幅值约为  $2.0N$ , 频谱分析显示两个主频  $f_1=0.997Hz$  和  $f_2=1.900Hz$  分别接近拉索的一阶和二阶自振频率。



(a) 时程曲线



(b) 频谱分析

图 7 拉索升力

Fig.7 Lift of cable

#### 3.3 拉索表面水膜形态变化

图 8 显示了  $t = 0 \sim 10s$  内的拉索表面水膜形态变化。下水线最初在  $t \approx 0.10s$  形成于  $q = 278.4^\circ$  附近,随后在  $q \approx 274.5^\circ \sim 284.5^\circ$  范围内震荡,其高度和宽度分别为  $h_l = 1.0mm$  和  $b_l \approx 5.2mm$ 。从  $t \approx 0.40s$  开始,不断有水线在拉索上表面形成并

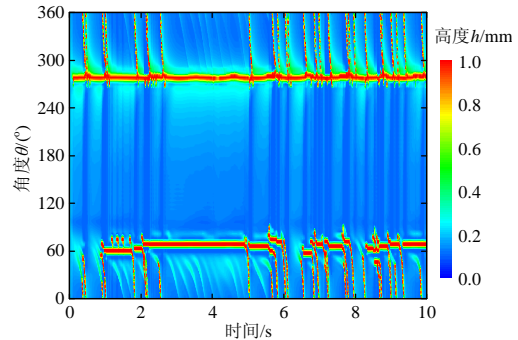


图 8 水膜形态变化

Fig.8 Evolution of water film around cable

从迎风侧滑落至下水线处。上水线最初在  $t \approx 0.85s$  形成与  $q = 54.5^\circ$ ，随后在  $q \approx 55.3^\circ \sim 82.1^\circ$  范围内震荡，其高度和宽度分别为  $h_u = 1.0mm$  和  $b_u \approx 4.3mm$ 。

由于水膜形态复杂多变，为研究拉索表面水膜形态变化规律及其对拉索升力的影响，现分别选取上、下水线附近的固定位置水膜厚度作为研究对象。图9和图10分别显示了  $t = 0 \sim 10s$  内  $q = 64.7^\circ$  (上水线)处和  $q = 275.6^\circ$  (下水线)处的水膜厚度变化。 $q = 64.7^\circ$  处的水膜厚度变化幅值大于  $q = 275.6^\circ$  处的幅值；频谱分析显示前者的某一主频 ( $f_u = 0.901Hz$ ) 与后者的主频相近 ( $f_l = 0.999Hz$ )，均近似于拉索的自振频率 ( $f_0 = 0.952Hz$ )，表明上水线附近的水膜形态变化要比下水线附近复杂得多(如图8所示)。将上述现象与拉索的升力及振动响应相结合，可以确定风雨激振现象的形成过程：由于风荷载的作用大于重力及表面张力的作用，拉索表面会形成上水线和下水线；在风和拉索振动的共同影响下，水膜形态不断变化，且具有明显的周期性，其主频与拉索的自振频率相近；随着水膜形态的周期性改变，拉索升力也呈现周期性变化，其频率同样接近拉索自振频率；且由于升力的作用明显大于阻尼效应，使得拉索的振动呈现共振

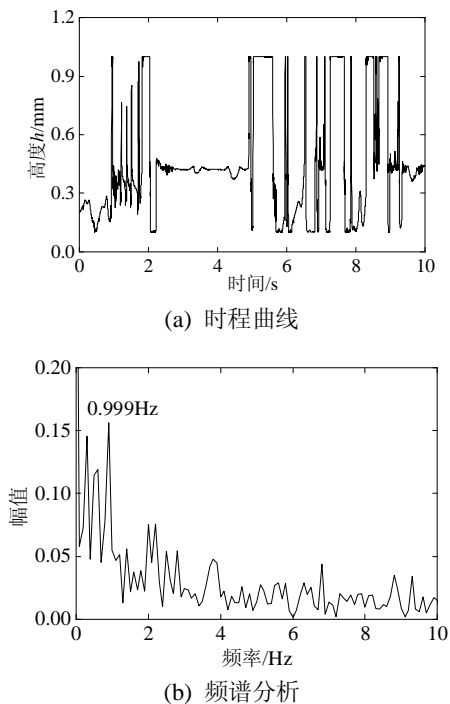


图9  $q = 64.7^\circ$  (上水线)处水膜厚度  
Fig.9 Thickness of water film at the position of  $q = 64.7^\circ$  (upper rivulet)

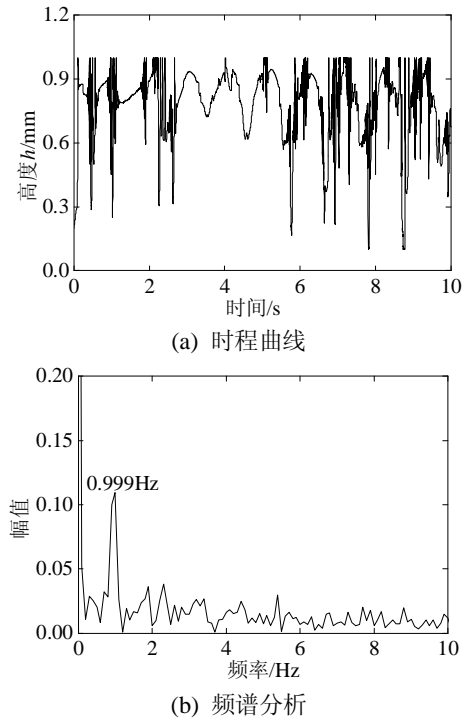


图10  $q = 275.6^\circ$  (下水线)处水膜厚度  
Fig.10 Thickness of water film at the position of  $q = 275.6^\circ$  (lower rivulet)

的特征，既拉索振幅在  $t \approx 4.5s$  不断增大，而后基本保持稳定；反过来，拉索的大幅度振动又使水膜形态的周期性变化等到增强。由以上分析可知，水线与拉索间的共振是导致风雨激振现象的主要原因。

### 4 结论

为揭示风雨激振现象的产生机理，本文以滑移理论为基础，结合单自由度振动理论建立耦合的水膜运动方程和拉索运动方程；应用 Fluent 软件获取水膜运动方程中的风压力系数  $C_p$  和风摩擦力系数  $C_f$ ；通过数值求解耦合方程组来研究水膜形态、拉索升力及振动响应间的相互联系，得出以下结论：

- (1) 通过数值方法求解水膜运动方程和拉索运动方程可以得到水膜形态变化规律、拉索升力及振动响应变化规律。
- (2) 发生风雨激振现象时拉索表面会产生明显的上水线和下水线；拉索的振动具有明显的共振特征，且振幅与主频均与风洞实验结果相一致。
- (3) 水线与拉索间的共振是产生风雨激振现象的主要原因。拉索表面水膜形态的周期性变化导致拉索升力的周期性变化，且二者的频率均接近与拉索的自振频率，使得拉索发生大幅振动。



## 参考文献:

- [1] Hikami Y, Shiraishi N. Rain-wind-induced vibrations of cables in cable stayed bridges [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1988, 29(1): 409—418.
- [2] Costa J A, Martins J A C, Branco F, Lilien J L. Oscillation of bridge stay cables induced by periodic motions of deck and/or towers [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 1996, 122(7): 613—621.
- [3] 王修勇, 陈政清, 倪一清, 高赞明. 斜拉桥拉索磁流变阻尼器减振技术研究[J]. *中国公路学报*, 2003, 16(2): 52—56.  
Wang Xiuyong, Chen Zhengqing, Ni Yiqing, Gao Zanming. Study of mitigating cables vibration on the cable-stayed bridges using magnetorheological (MR) dampers [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2003, 16(2): 52—56. (in Chinese)
- [4] Ni Y Q, Wang X Y, Chen Z Q, Ko J M. Field Observations of rain wind induced cable vibration in cable stayed Dongting Lake Bridge [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007, 95(5): 303—328.
- [5] Zuo D, Jones N P, Main J A. Field observation of vortex and rain wind induced stay-cable vibrations in a three-dimensional environment [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(6/7): 1124—1133.
- [6] Matsumoto M, Shiraishi N, Kitazawa M, Knisely C, Shirato H, Kim Y, Tsujii M. Aerodynamic behavior of inclined circular cylinders-cable aerodynamics [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 33(1): 63—72.
- [7] Matsumoto M, Shiraishi N, Shirato H. Rain wind induced vibration of cables of cable-stayed bridges [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1992, 43(1): 2011—2022.
- [8] Flamand O. Rain-wind induced vibration of cables [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1995, 57(2): 353—362.
- [9] 顾明, 刘慈军, 徐幼麟, 项海帆. 带人工雨线的拉索在风激励下的响应[J]. *应用数学和力学*, 2002, 23(10): 1047—1054.  
Gu Ming, Liu Cijun, Xu Youlin, Xiang Haifan. Response characteristics of wind excited cables with artificial rivulet [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2002, 23(10): 1047—1054. (in Chinese)
- [10] Cosentino N, Flamand O, Ceccoli C. Rain wind-induced vibration of inclined stay cables Part I: Experimental investigation and physical explanation [J]. *Wind and Structures*, 2003, 6(6): 471—484.
- [11] Gu M, Du X Q. Experimental investigation of rain-wind-induced vibration of cables in cable-stayed bridges and its mitigation [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2005, 93(1): 79—95.
- [12] Gu M. On wind-rain induced vibration of cables of cable-stayed bridges based on quasi-steady assumption [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2009, 97(7/8): 381—391.
- [13] Li F C, Chen W L, Li H, Zhang R. An ultrasonic transmission thickness measurement system for study of water rivulets characteristics of stay cables suffering from wind-rain-induced vibration [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, 159(1): 12—23.
- [14] 许林汕, 赵林, 葛耀君. 发生风雨激振拉索表面水膜形态数值分析和实测初探[J]. *空气动力学学报*, 2011, 29(1): 91—96.  
Xu Linshan, Zhao Lin, Ge Yaojun. Numerical analysis and real-time measurement of water-film on rain-wind induced vibration cable [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2011, 29(1): 91—96. (in Chinese)
- [15] Yamaguchi H. Analytical study on growth mechanism of rain vibration of cable [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 33(1/2): 73—80.
- [16] Peil U, Nahrath N. Modelling rain-wind induced oscillations: Basis, model development and calculation methods [J]. *VDI Berichte*, 2003, 6(1): 271—285.
- [17] Seidel C, Dinkler D. Rain-wind induced vibrations-phenomenology, mechanical modelling and numerical analysis [J]. *Computers and Structures*, 2006, 84(24/25): 1584—1595.
- [18] 李寿英, 顾明, 陈政清. 运动水线三维连续弹性拉索风雨激振理论模型[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2009, 36(2): 1—7.  
Li Shouying, Gu Ming, Chen Zhengqing. An analytical model of rain-wind-induced vibration of three-dimensional continuous stay cable with actual moving rivulet [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2009, 36(2): 1—7. (in Chinese)
- [19] 李寿英, 顾明, 陈政清. 准运动水线三维连续弹性拉索风雨激振理论模型[J]. *工程力学*, 2007, 24(6): 7—14.  
Li Shouying, Gu Ming, Chen Zhengqing. Analytical model for rain-wind-induced vibration of three-dimensional continuous stay cable with quasi-moving rivulet [J]. *Engineering mechanics*, 2007, 24(6): 7—14. (in Chinese)
- [20] 王凌云, 徐幼麟. 斜拉桥斜拉索的风雨振动: 参数研究[J]. *工程力学*, 2009, 26(7): 147—154.  
Wang Lingyun, Xu Youlin. Wind-rain-induced vibration of prototype stay cable: Parameter studies [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(7): 147—154. (in Chinese)
- [21] 毕继红, 王青太, 尹元彪. 拉索风雨激振机理及减振措施的研究[J]. *工程力学*, 2010, 27(12): 229—237.  
Bi Jihong, Wang Qingtai, Yin Yuanbiao. The analysis of the mechanism of rain-wind-induced vibration and displacement-restriction device [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(12): 229—237. (in Chinese)
- [22] 张二辉, 刘习军, 张素侠. 三维运动水线斜拉索风雨激振影响因素探究[J]. *工程力学*, 2012, 29(12): 241—247.  
Zhang Erhui, Liu Xijun, Zhang Suxia. Research on the factors of 3-D Model of the rain-wind induced vibration of cable [J]. *Engineering mechanics*, 2012, 29(12): 241—247. (in Chinese)

(参考文献[23]—[28]转第 77 页)

- monitoring and fatigue life analysis of steel box girder of Jiangyin Suspension Bridge [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2009, 26(6): 69—73. (in Chinese)
- [10] European Committee for Standardization. Eurocode3: Design of steel structures, part1-9: Fatigue [S]. BS EN1993-1-9: 2005.
- [11] Deng Yang, Ding Youliang, Li Aiqun, et al. Fatigue reliability assessment for bridge welded details using long-term monitoring data [J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, 54(12): 3371—3381.
- [12] 郭健, 顾正维, 孙炳楠, 等. 基于小波分析的桥梁健康监测方法[J]. *工程力学*, 2006, 23(12): 129—135.  
Guo Jian, Gu Zhengwei, Sun Bingnan, et al. Method of bridge health monitoring based on wavelet analysis [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(12): 129—135. (in Chinese)
- [13] AdamNiesony. Determination of fragments of multiaxial service loading strongly influencing the fatigue of machine components [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, 23(8): 2712—2721.
- [14] 邓扬, 丁幼亮, 李爱群. 钢箱梁焊接细节基于长期监测数据的疲劳可靠性评估:疲劳可靠度指标[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(3): 86—92.  
Deng Yang, Ding Youliang, Li Aiqun. Fatigue reliability assessment for welded details of steel box girders using long-term monitoring data: fatigue reliability indices [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(3): 86—92. (in Chinese)
- [15] 邓扬, 丁幼亮, 李爱群, 林日长. 钢箱梁桥焊接细节的疲劳断裂可靠性分析[J]. *工程力学*, 2012, 29(10): 122—128.  
Deng Yang, Ding Youliang, Li Aiqun, Lin Richang. Fracture fatigue reliability of welded details in bridge steel box girder [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(10): 122—128. (in Chinese)

---

(上接第 60 页)

- [23] Lemaitre C, Hémon C, Langre E. Thin water film around a cable subject to Wind [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2007, 95(9): 1259—1271.
- [24] Taylor I J, Robertson A C. Numerical simulation of the airflow-rivulet interaction associated with the rain-wind induced vibration phenomenon [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011, 99(9): 931—944.
- [25] Achenbach, E. Distribution of local pressure and skin friction around a circular cylinder in a cross-flow up to  $Re=5\times 10^{-6}$  [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1968, 34(4): 625—639.
- [26] Fage A, Falkner V M. Further experiments on the flow around a circular cylinder [M]. London: Aeronautical Research Committee, Reports and Memoranda, 1931.
- [27] Celika I, Shaffer F D. Long time-averaged solutions of turbulent flow past a circular cylinder [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1995, 56(2): 185—212.
- [28] Trefethen L N. finite difference and spectral methods for ordinary and partial differential equations [M]. Department of Computer Science and Center for Applied Mathematics, Cornell University, 1996: 232—259.