

文章编号: 1000-4750(2006)Sup.I-0217-05

水中悬浮隧道锚索在波流场中的涡激动力响应

*葛 斐, 董满生, 惠 磊, 洪友士

(中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室, 北京 100080)

摘 要: 建立了水中悬浮隧道的锚索在波流场中顺流向涡激振动的数学模型, 并考虑了波浪作用下, 悬浮隧道的运动引起的强迫激励和参数激励对锚索顺流向涡激振动的影响。应用 Galerkin 方法和数值积分法, 计算分析外激励频率对锚索顺流向涡激振动的影响。计算结果表明, 外激励作用下锚索顺流向涡激振动的振幅明显增大, 且当外激励频率接近锚索一阶自振频率时, 振幅达到最大值。

关键词: 水中悬浮隧道; 涡激动力响应; Galerkin 法; 锚索; 波浪; 流

中图分类号: O35; U459.9 **文献标识码:** A

VORTEX-INDUCED VIBRATION OF SUBMERGED FLOATING TUNNEL TETHERS UNDER WAVE AND CURRENT EFFECTS

*GE Fei, DONG Man-sheng, HUI Lei, HONG You-shi

(State Key Lab. of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080, China)

Abstract: A vortex-induced in-line vibration model is formulated for the calculation of nonlinear dynamic response of submerged floating tunnel (SFT) tethers due to wave and current effects. The effect of tunnel surge motion on the dynamic response of a tether is investigated by considering the forcing and parametric excitations. Galerkin method and numerical integration were used in the study. Numerical relationship between the excitation frequency and the maximum amplitude of vortex-induced in-line vibration was obtained. The calculated results show that the amplitude of vortex-induced in-line vibration increased when considering the effects of forcing and parametric excitations and the amplitude approached its maximum when the excitation frequency approached the first-order natural frequency of the tether.

Key words: submerged floating tunnel (SFT); vortex-induced vibration; Galerkin method; tether; wave; current

水中悬浮隧道, 即 SFT(Submerged Floating Tunnel), 亦称“阿基米德桥”, 是一种新型的跨越海峡、湖泊、河流等水域的交通结构。其基本结构包括四部分: 悬浮在水面以下一定深度的管状结构; 锚固在水下基础的锚索(或水上的浮箱)装置; 桥体管节之间的连接装置; 隧道与两岸相连的构筑物。

图 1 和图 2 为一种水中悬浮隧道的示意图。与传统的桥梁和隧道方案相比, 水中悬浮隧道对周围的环境影响小, 受天气、水深、跨度的影响小, 而且水中悬浮隧道一般的坡度可以较桥梁和隧道方案平缓, 汽车能量的消耗较小, 具有环保作用。上个世纪八十年代以来, 水中悬浮隧道逐渐为欧洲、美国、

收稿日期: 2005-9-30; 修改日期: 2005-11-25

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(10532070)

作者简介: *葛 斐(1980), 男, 安徽人, 博士生, 从事水中悬浮隧道研究(E-mail: gefei@imech.ac.cn);

董满生(1973), 男, 安徽人, 博士生, 从事水中悬浮隧道研究;

惠 磊(1984), 男, 安徽人, 硕士生, 从事水中悬浮隧道研究;

洪友士(1951), 男, 福建人, 研究员, 博士, 中科院力学所所长, 从事水中悬浮隧道及材料力学性能研究。

日本的科技界和政府所关注,但是迄今世界上还没有建成一座水中悬浮隧道,而人们对其动力响应规律认识还不是很清楚,成为阻碍它早日实现的关键问题之一^[1-3]。

水中悬浮隧道通过重力、浮力以及支撑系统之间的平衡悬浮在水下一定深度,且利用支撑系统维持悬浮隧道的稳定性。当悬浮隧道所受浮力大于重力时,则可采用锚索将其与水下的基础连接起来,并平衡悬浮隧道的剩余浮力。作为悬浮隧道的支撑结构,锚索处于波浪和流的环境中,其自身的稳定直接影响到悬浮隧道的稳定性。因此,研究锚索在波浪和流作用下的动力响应,特别是由于涡串脱落引起的振动问题尤为重要。

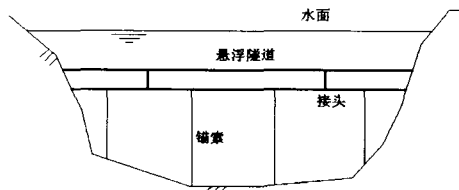


图1 一种水中悬浮隧道

Fig.1 Schematic diagram of SFT

Brancaleoni 等^[4]提出了悬浮隧道在波浪或地震载荷下的工程分析程序。Remseth 等^[5]分析了风浪作用下悬浮隧道的动态响应,用基于 Navier-Stokes 方程的有限元方法计算规则波作用下二维模型的水动力。Kunisu 等^[6]针对北海道的波浪环境通过二维模型试验研究了悬浮隧道的动态特性。国内麦继婷等对水流作用下悬浮隧道锚索的横向涡激振动做了初步探讨,考虑了张力变化对锚索横向涡激振动的影响^[7]。已有研究中,没有考虑外激励影响,认为顺流向涡激振动的振幅比横向涡激振动的振幅小一个量级,相比可忽略。本文探讨在波流场中外激励作用下锚索的顺流向涡激振动问题,考虑了悬浮隧道的运动对锚索顺流向涡激振动的影响,包括横向的强迫激励和纵向的参数激励。

1 运动方程与求解

悬浮隧道的锚索一般由钢管构成,本身的刚度较小,但受到的张力却很大,这种结构可以简化为受张力的简支梁,引进如下假设:

- (1) 由于预张力远大于锚索自身重力,故可忽略张力沿长度方向的变化;
- (2) 假定波、流沿同一方向,流为均匀流;
- (3) 锚索的几何尺寸、刚度和材料性质沿长度

方向不变。

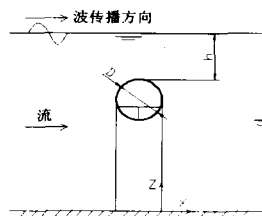


图2 水中悬浮隧道的截面图

Fig.2 Cross section of SFT

系统的坐标系和波、流分布情况如图2所示。坐标原点设在海底端, z 轴向上为正,波、流都沿 x 轴正方向传播。

在上述假设下,锚索顺流向的运动方程可以表示为^[8]

$$M \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + C \frac{\partial x}{\partial t} + EI \frac{\partial^4 x}{\partial z^4} - (T_0 - T \cos \omega t) \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} = F_x(z, t) \quad (1)$$

式中, EI 为锚索的抗弯刚度, T_0 为预张力, ω 为张力变化的频率(参数激励频率), T 为张力变化的幅值, C 为结构粘性阻尼系数, M 为单位长度的质量,包括附加质量, $F_x(z, t)$ 为沿 x 方向单位长度上流体总作用力。

x 方向的流体力包括两个部分,一是由于波、流联合作用产生的流体阻尼力 F_D ,另一个是由于涡旋串作用产生的脉动拖曳力 F'_D ,即

$$F_x(z, t) = F'_D(z, t) - F_D(z, t) \quad (2)$$

当锁频发生时,涡串在锚索上间隔的周期性泄放,单位长度的脉动拖曳力可近似表示为涡串频率的简谐函数,这种近似在涡串有定义的雷诺数范围内成立。根据线性波理论,波浪诱发的流体质点的速度和加速度随深度呈指数形式衰减,因此相对于水流可以忽略波浪对锚索的作用力。脉动拖曳力可以表示为^[9]:

$$F'_D = \frac{1}{2} \rho D V_c^2 C'_D \cos 2\omega_s t \quad (3)$$

式中, ρ 为水的密度, D 为锚索直径, V_c 为流速, C'_D 为脉动的拖曳力系数,取为0.2, ω_s 为涡串频率。顺流向的流体阻尼力可用 Morison 公式计算,即

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho D \left(\frac{\partial x}{\partial t} - V_c \right) \left| \frac{\partial x}{\partial t} - V_c \right| \quad (4)$$

阻力系数 C_D 与雷诺数 Re 和凯来根-卡蓬特(Keulegan-Carpenter)数 K 有关,本文考虑顺流向涡激振动的情况,取 $C_D = 0.6$ 。

采用分离变量法可以将运动方程(1)化为非线性常微分方程, 考虑到锚索两端都是简支, 在外激励作用下其运动模态可以表示为刚体的运动模态和简支梁振动模态的迭加^[10], 即

$$x(z,t) = h(t) \frac{z}{l} + \sum_{n=1}^{\infty} u_n(t) \sin \frac{n\pi z}{l} \quad (5)$$

式中, l 是锚索长度, $h(t)$ 是描述波浪力作用下悬浮隧道在 x 方向振动的函数, 可以表示为 $-x_0 \sin \omega t$, 同时锚索中的拉力也会发生周期性改变, $-T \cos \omega t$, 即反映了锚索中拉力的变化。由于这两种外激励都是由波浪引起的, 因此两种激励的频率相同都等于波频, 但是相位相差 90° 。

把式(2)~式(5)带入运动方程(1), 利用 Galerkin 方法可得:

$$\int_0^l R(z,t) \sin \frac{n\pi z}{l} dz = 0, \quad m=1,2,\dots \quad (6)$$

$R(z,t)$ 称为留函数, 由下式表示:

$$\begin{aligned} R(z,t) = & \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ M \ddot{u}_n + C \dot{u}_n + \right. \\ & \left[EI \left(\frac{n\pi}{l} \right)^4 + (T_0 - T \cos \omega t) \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 \right] u_n \left. \right\} \cdot \sin \frac{n\pi z}{l} + \\ & \frac{1}{2} C_D \rho D \left(-\omega \frac{x_0}{l} z \cos \omega t + \sum_{n=1}^{\infty} \dot{u}_n \sin \frac{n\pi z}{l} - V_c \right) \cdot \\ & \left| -\omega \frac{x_0}{l} z \cos \omega t + \sum_{n=1}^{\infty} \dot{u}_n \sin \frac{n\pi z}{l} - V_c \right| + \\ & M \omega^2 \frac{x_0}{l} z \sin \omega t - C \omega \frac{x_0}{l} z \cos \omega t - \\ & \frac{1}{2} C_D \rho D V_c^2 \cos 2\omega_s t \end{aligned} \quad (7)$$

非线性阻尼力项处理起来比较麻烦, 所以 n 不宜太大, 同时又要保证计算的精度, 文中只取前 3 阶模态参与计算。非线性阻尼力通过沿锚索的数值积分近似的表示。于是常微分方程组可写为:

$$\begin{aligned} & \ddot{u}_m + 2\omega_m \zeta_s \dot{u}_m + (\omega_m^2 - C_m \cos \omega t) u_m + \\ & \frac{C_D \rho D}{Ml} \int_0^l \left(-\omega \frac{x_0}{l} z \cos \omega t + \sum_{n=1}^{\infty} \dot{u}_n \sin \frac{n\pi z}{l} - V_c \right) \cdot \\ & \left| -\omega \frac{x_0}{l} z \cos \omega t + \sum_{n=1}^{\infty} \dot{u}_n \sin \frac{n\pi z}{l} - V_c \right| \sin \frac{m\pi z}{l} dz = \\ & \frac{C_D \rho D}{Ml} \cos 2\omega_s t \int_0^l V_c^2 \sin \frac{m\pi z}{l} dz + (-1)^m \frac{2x_0 \omega^2}{m\pi} \\ & \sin \omega t - (-1)^m \frac{4\omega_m \zeta_s x_0 \omega}{m\pi} \cos \omega t \quad m=1,2,3 \end{aligned} \quad (8)$$

式中

$$\omega_m^2 = \frac{EI}{M} \left(\frac{m\pi}{l} \right)^4 + \frac{T_0}{M} \left(\frac{m\pi}{l} \right)^2, \quad C_m = \frac{T}{M} \left(\frac{m\pi}{l} \right)^2 \quad (9)$$

引入无量纲变量

$$U_m = \frac{u_m}{D}, \quad X_0 = \frac{x_0}{D}, \quad Z = \frac{z}{l}, \quad \tau = \omega t \quad (10)$$

方程组(8)变为:

$$\begin{aligned} & \ddot{U}_m + 2\zeta_s \alpha^{1/2} \dot{U}_m + (\alpha - \beta \cos \tau) U_m + K_D D_m = \\ & A_s \cos 2\omega_s t + A_1 \sin \tau - A_2 \cos \tau \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{式中 } \alpha = & \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^2, \quad \beta = \frac{T}{EI(m\pi/l)^2 + T_0} \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^2, \quad K_D = \\ & \frac{C_D \rho D^2}{M}, \quad K'_D = \frac{C'_D \rho D^2}{M}, \quad A_s = K'_D \int_0^1 \frac{V_c^2}{\omega D} \sin m\pi Z dZ, \end{aligned}$$

$$A_1 = (-1)^m \frac{2X_0}{m\pi}, \quad A_2 = (-1)^m \frac{4\zeta_s X_0 \alpha^{1/2}}{m\pi}, \quad D_m \text{ 为非线}$$

性阻尼力项。• 代表对变量 τ 求导。方程右端第一项代表涡激力, 第二项和第三项是悬浮隧道振动引起的强迫激励项, 由于 $A_2 \ll A_s, A_1$ 成立, 第三项的影响可忽略不计。于是运动方程最终写为:

$$\begin{aligned} & \ddot{U}_m + 2\zeta_s \alpha^{1/2} \dot{U}_m + (\alpha - \beta \cos \tau) U_m + K_D D_m = \\ & A_s \cos 2\omega_s t + A_1 \sin \tau \end{aligned} \quad (12)$$

此方程即为悬浮隧道锚索在强迫激励和参数激励作用下顺流向涡激振动方程, 称 X_0 和 β/α 分别为强迫激励和参数激励的强度因子。若不考虑两种外激励的作用, 即 $X_0=0, \beta=0$, 方程即为锚索的顺流向涡激振动方程; 若不考虑参数激励的影响, 即 $\beta=0$, 方程变为强迫激励作用下锚索的涡激振动方程; 若不考虑强迫激励项的影响, 即 $X_0=0$, 方程变为带有参数激励的涡激振动方程。

2 结果和讨论

目前全球范围内还没有建成一座悬浮隧道, 因此, 计算实例只能参考国外拟建悬浮隧道的设计参数^[11], 具体物理参数如表 1。在悬浮隧道的设计中, 考虑在极限环境条件下结构的响应情况是非常重要的, 在此条件下, 锚索中动张力的幅值与初始张力的比值, $T/T_0 (\approx \beta/\alpha)$, 最大不超过 1; 当极限波高达到 18m 时, 悬浮隧道在水平方向的振幅小于 5m^[12]。波浪周期(外激励频率)在海洋波浪的周期范围 8s~20s 内取值。本文采用四阶 Runge-Kutta 法求解锚索的顺流向涡激振动方程(12)。以下分析中, 涡激动力响应的结果是在锚索跨中点处获得。

图 3 显示了两种外激励单独作用、同时作用以

及不考虑外激励的四种条件下, 锚索顺流向涡激动力响应的对比。从图中可以看出, 两种外激励单独作用下锚索的顺流向涡激振动振幅明显增大, 说明两种外激励都会与锚索的涡激振动发生相互作用, 从而提高了振动的振幅; 当两种外激励同时作用时, 涡激振动的振幅要明显大于单独作用时的振幅, 说明两种外激励之间也会发生相互作用从而使振动的振幅增加。图中, 由于锚索受到水流的拖曳力作用, 其四条振动曲线的平衡位置均偏离了锚索的初始平衡位置。

表 1 数值计算实例的物理参数

Table 1 Physical data for the example structures

悬浮隧道	淹没深度	h/m	40
	重浮比(重力/浮力)	γ	0.7
锚索的参数	长度	l/m	252, 760
	直径	D/m	1.1176
	壁厚	t/m	0.038
	单位长度质量	$m/(kg/m)$	1000
	单位长度附加质量	$m/(kg/m)$	1006
	弯曲刚度	$EI/(N \cdot m^2)$	3.854×10^9
	预张力	T_0/kN	14186

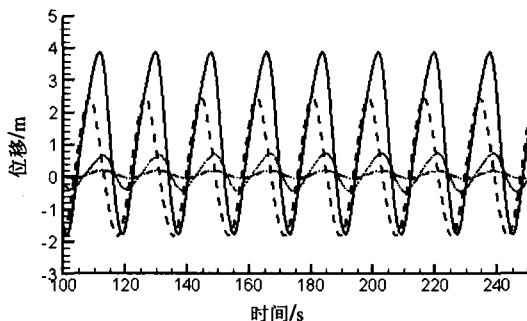


图 3 $\alpha=1$ 时不同外激励作用下锚索顺流向涡激振动的对比。 $X_0=0.895$, $\beta/\alpha=0.8$

——两种激励同时作用; ---强迫激励;参数激励;
- · - · - 不考虑外激励的作用

Fig.3 Comparisons of in-line displacements of an example cable under combined, forcing, parametric or none excitations for $\alpha=1$, $X_0=0.895$, $\beta/\alpha=0.8$.

——combined excitation; ---forcing excitation;
.....parametric excitation; - · - · - none excitation

为了更深入的考察外激励对锚索顺流向涡激振动的影响, 选取一系列的外激励频率(波频), 并保持强迫激励和参数激励的强度不变, 得到图 4 所示的结果, 图中纵坐标代表涡激振动的最大振幅。当考虑外激励作用时, 涡激振动的振幅远远大于未考虑外激励作用时的振幅, 特别是在 $\alpha=1$ 附近, 此

时外激励的频率接近锚索的一阶固有频率。当 α 增大时, 外激励作用下涡激振动振幅逐渐减小趋于平稳, 无外激励作用时振幅不受 α 的影响。

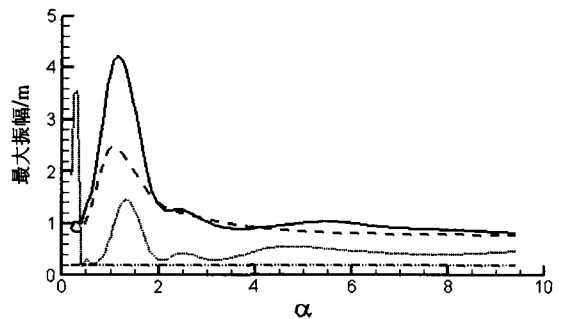


图 4 $X_0=0.895$, $\beta/\alpha=0.8$ 时不同频率的外激励作用下顺流向涡激振动振幅的对比。(图线说明如图 3)

Fig.4 Comparisons between frequency response curves of combined, forcing, parametric and none excitations for $X_0=0.895$ and $\beta/\alpha=0.8$. (Legends as in Fig.3)

只考虑强迫激励的影响, 即令 $\beta=0$, 从图 4 中看到, 当 $\alpha=1$ 时, 强迫激励作用下锚索顺流向涡激振动的振幅达到最大值。分析锚索运动方程(12)的共振条件可以得到, 当锚索的自振频率满足 $\omega_m = \omega$ 即 $\alpha=1$ 的条件时, 锚索会发生共振, 对应图 4 中强迫激励的曲线出现峰值。

当只考虑参数激励的作用时, 即令 $X_0=0$, 运动方程(12)具有非线性 Mathieu 方程的性质, 顺流向涡激振动的振幅曲线出现多个峰值, 分别对应 Mathieu 方程不同的不稳定区域, 且随着 α 的增大, 峰值逐渐减小^[13]。当 $\alpha=1/4$ 时, 即参数激励频率是锚索一阶自振频率的两倍时, 参数激励下顺流向涡激振动的振幅出现极大值, 发生了主参数共振^[14]。

图 4 中, 当 $\alpha=1/4$ 时, 强迫激励和参数激励的相互作用, 抑制了参数激励的影响, 此时锚索涡激振动的振幅主要受强迫激励的影响。如果改变两种外激励的相对强度大小, 计算发现, 当强迫激励的强度减小到 $X_0=0.134$ 时, 锚索涡激振动的振幅变为主要受参数激励的影响。

进一步考察两种外激励的强度大小对锚索顺流向涡激振动的影响。首先保持强迫激励的强度不变, 参数激励的强度 β/α 从 0.7 增加到 0.9, 顺流向涡激振动的振幅随之增加, 如图 5 所示。其次保持参数激励的强度不变, 强迫激励的强度从 0.447 增加到 1.790, 顺流向涡激振动的振幅也明显增大, 如图 6 所示。因此, 如果外激励的强度增加, 锚索顺流向涡激振动的振幅也会随之增加。

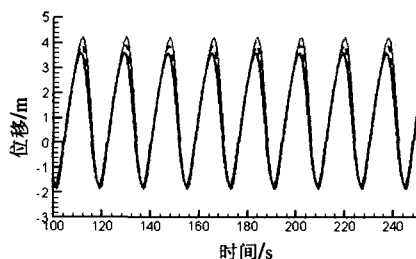


图5 $\alpha=1$, $X_0=0.895$ 时, 不同强度的参数激励对涡激振动的影

响。
—— $\beta/\alpha=0.7$; --- $\beta/\alpha=0.8$; $\beta/\alpha=0.9$

Fig.5 Comparisons of in-line displacements of an example cable under combined excitation for three different ratios of β/α . Here $\alpha=1$ and $X_0=0.895$ are used.

—— $\beta/\alpha=0.7$; --- $\beta/\alpha=0.8$; $\beta/\alpha=0.9$

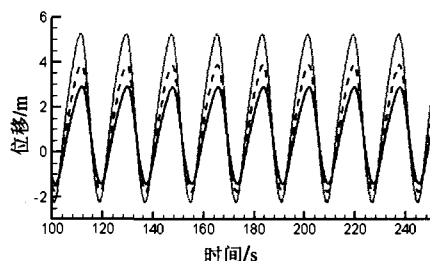


图6 $\alpha=1$, $\beta/\alpha=0.8$ 时, 不同强度的强迫激励对涡激振动的影

响。
—— $X_0=0.447$; --- $X_0=0.895$; $X_0=1.790$

Fig.6 Comparisons of in-line displacements of an example cable under combined excitation for three different X_0 's. Here $\alpha=1$ and $\beta/\alpha=0.8$ are used.

—— $X_0=0.447$; --- $X_0=0.895$; $X_0=1.790$.

3 结论

建立了水中悬浮隧道的锚索在波流场中顺流向涡激振动的数学模型, 并考虑了悬浮隧道的运动引起的强迫激励和参数激励对锚索顺流向涡激振动的影响, 通过实例分析得到以下结论:

(1) 外激励作用下锚索顺流向涡激振动的振幅明显大于不考虑外激励影响时的振幅, 而且当强迫激励和参数激励同时存在时, 两种激励之间的相互作用使振动的振幅明显增大。因此锚索顺流向涡激振动对水中悬浮隧道稳定性的影响不能忽略。

(2) 在 $\alpha=1$ 附近, 两种外激励同时作用下锚索顺流向涡激振动的振幅出现极大值。当 α 大于 6 时, 振幅逐渐趋于常数。

(3) 外激励的强度增加, 锚索顺流向涡激振动的振幅随之增加。

参考文献:

- Ahrens D. Submerged floating tunnels- A concept whose time has arrived [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1997, 12(2): 317~336.
- 项贻强, 薛静平. 水中悬浮隧道在国内外的研究 [J]. 中外公路, 2002, 22(6): 49~52.
Xiang Yiqiang, Xue Jingping. Research on submerged floating tunnel [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2002, 22(6): 49~52. (in Chinese)
- 黄国君, 吴应湘, 洪友士. 跨域水域交通的阿基米德桥 [J]. 中国造船, 2002, 43(增): 13~18.
Huang Guojun, Wu Yingxiang, Hong Youshi. Transportation of crossing waterways via Archimedes bridges [J]. Ship Building of China, 2002, 43(supplement): 13~18. (in Chinese)
- Brancaleoni F, Castellani A, D'Asdia P. The response of submerged tunnels to their environment [J]. Engineering Structures, 1989, 11: 47~56.
- Remseth S, Leira B J, Okstad K M, Mathisen, K M. Dynamic response and fluid/structure interaction of submerged floating tunnels [J]. Computers and Structures, 1999, 72(4): 659~685.
- Kunisu H, Mizuno S, Mizuno Y and Saeki H. Study on submerged floating tunnel characteristics under the wave condition [A]. Proc. of the international offshore and polar engineering conference [C]. Osaka: ISOPE, 1994. 27~32.
- 麦继婷, 罗忠贤, 关宝树. 流作用下悬浮隧道张力腿的涡激动力响应 [J]. 西南交通大学学报, 2004, 39(5): 600~604.
Mai Jiting, Luo Zhongxian, Guan Baoshu. Vortex-induced dynamic response of tension legs for submerged floating tunnel under current effect [J]. J. of Southwest Jiaotong University, 2004, 39(5): 600~604. (in Chinese)
- 董艳秋. 波流联合作用下海洋平台张力腿的涡激非线性振动 [J]. 海洋学报, 1994, 16(3): 121~129.
Dong Yanqiu. Nonlinear vortex-induced vibration of tension legs for platforms under wave and current effects [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1994, 16(3): 121~129. (in Chinese)
- Roger King. A review of vortex shedding research and its application [J]. Ocean Engineering, 1977, 4: 141~171.
- Patel M H, Park H I. Combined axial and lateral responses of tensioned buoyant platform tethers [J]. Engineering Structures, 1995, 17(10): 687~695.
- Pigorini B. Submerged tunnels for a fixed link across the strait of Messina [A]. Proc. of the International Congress on Tunnels and Water [C]. Madrid: Rotterdam, 1988. 13~31.
- Kanie S, Kokubun H, Mizutani Y, Mikami T, Kakuta Y. Analytical study on dynamic response of submerged floating tunnels due to wave force [A]. Proc. 3rd Symposium on Strait Crossings, Symposium on Strait Crossings [C]. Alesund: Rotterdam, 1994. 659~666.
- Hsu C S. The response of a parametrically excited hanging string in fluid [J]. Journal of Sound and Vibration, 1975, 39(3): 305~316.
- Nayfeh A H, Mook D T. Nonlinear oscillations [M]. New York: John Wiley Press, 1979.