

文章编号:1002-1175(2007)03-0351-06

简报

水中悬浮隧道锚索在剪切流中的涡激响应^{*}

葛 斐[†] 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)

(2006 年 7 月 26 日收稿; 2006 年 11 月 30 日收修改稿)

Ge F, Hui L, Hong YS. Vortex-induced vibration of submerged floating tunnel tethers in shear current. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2007, 24(3): 351 ~ 356

摘 要 以 Iwan 改进的尾流振子模型为基础,给出了剪切流中水中悬浮隧道锚索横向涡激振动的工程分析方法,分析了悬浮隧道重浮比以及剪切流特性对锚索涡激响应的影响.计算结果表明,悬浮隧道重浮比的改变,使锚索各阶模态的频锁区域分布发生变化,从而改变了结构的涡激振动响应;剪切流陡度参数的增大会使锚索涡激响应的幅值减小,若使用均匀流场代替剪切流场计算悬浮隧道锚索的涡激振动,会过高估计其响应幅值.

关键词 水中悬浮隧道, 涡激响应, 尾流振子模型, 锚索, 阿基米德桥

中图分类号 U459.9

1 引言

水中悬浮隧道(Submerged Floating Tunnel, SFT),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 4 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 为一种水中悬浮隧道的示意图.20 世纪 80 年代以来,水中悬浮隧道逐渐为欧洲、美国、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^[1,2].

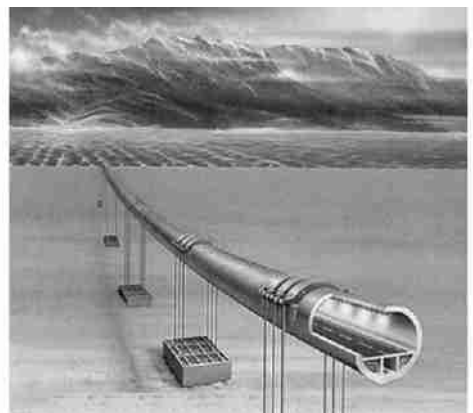


图 1 一种水中悬浮隧道

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.

^{*}国家自然科学基金重点资助项目(10532070)

[†]E-mail: gefei @imech. an. cn

涡激振动问题早已受到重视,也有丰富的研究成果^[3,4],但仍有许多机理性问题尚不完全清楚,也未理想的预测方法.目前应用较广泛的数学模型为尾流振子模型. Iwan^[5]将该模型推广到预测结构非均匀或流动非均匀的涡激振动问题.在此基础上, Lyons 和 Patel^[6]提出用时域分析法预测钻杆及拉索的涡激响应,其理论预测结果与模型试验符合的很好. 麦继婷等对均匀流作用下悬浮隧道锚索的横向涡激振动做了初步探讨^[7],海洋工程中的流动通常不是均匀流,而是具有剪切流的性质,处于非均匀流中的柱体绕流、旋涡脱落及结构与流动的耦合振动都更为复杂,其旋涡脱落频率沿管线的轴向是变化的. 本文以 Iwan 改进的尾流振子模型为基础,给出了剪切流中 SFT 锚索横向涡激振动的工程分析方法,分析了悬浮隧道重浮比以及剪切流特性对锚索涡激响应的影响,为锚索的疲劳分析及设计提供了参考.

2 数学模型

Stansby^[8]关于剪切流的实验结果表明,尽管水流速度沿圆柱体轴线连续变化,但旋涡是以单元的形式脱落的.其泄放频率从一个单元到另一个单元是跳跃式变化的.因此物体可以被分成若干个单元,在每个单元上,旋涡脱落频率是常数,并且锁定在结构的一个固有频率上.单元的数目取决于物体的长细比和有限长物体的端部效应.由于各个单元的旋涡泄放频率可以不同,结构的不止一个振动模态可以被激发,对每一个模态,有一个锁定区,称为主动单元,结构通过这个单元从流体获得能量.其余单元称为被动单元,在这些单元上,结构能量要被流体阻尼所消耗.

涡激横向振动的频锁范围及共振幅值主要由约化速度 U_r 和约化阻尼 K_s 决定^[9],定义如下:

$$U_r = \frac{U}{f_n D}, \quad K_s = \frac{2\bar{m}}{D^2}, \quad (1)$$

式中, U 为水流速度, f_n 是锚索第 n 阶自振频率, \bar{m} 为单位长度锚索的质量(包括附加质量), γ 为振幅

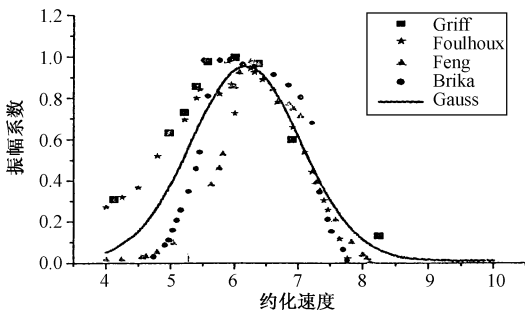


图 2 相对振幅近似曲线

衰减系数 $\gamma = 2$, μ 为阻尼比, ρ 为流体密度, D 为锚索直径. Griffin 等^[10]的研究证实,对柔性或柔性支撑的刚性柱的横向涡激振动,其可能的最大振幅与约化阻尼相关,

$$\frac{\gamma}{D} = \frac{1}{1 + 9.6(K_s/\mu)^{1.8}}, \quad (2)$$

式中, γ 为振幅, μ 为振型因子. 约化速度 U_r 则用来确定涡激振动的存在与程度. 对于横向涡激振动, 振动约从 $U_r = 4.0$ 发生, 在 $6.0 \sim 7.2$ 处达到峰值, 在 $U_r = 10$ 以后消失, 如图 2 所示^[11].

在此基础上, Iwan 发展了分析结构或流动不均匀的情况下涡激振动的算法, 结构锁频共振幅值为

$$\bar{y}_j = D F_j I_j^{-1/2}, \quad (3)$$

其中, 形状因子

$$I_j = \frac{\int_0^l \bar{m}(z) \phi_j^4(z) dz}{\int_0^l \bar{m}(z) \phi_j^2(z) dz}, \quad (4)$$

ϕ_j 为振型函数, SFT 锚索两端可视为简支, 振型函数 $\phi_j(z) = \sin(jz/l)$, l 是锚索长度.

放大因子

$$F_j = \frac{1}{1 + 9.6(\mu_r^j)^{1.8}}, \quad (5)$$

式中

$$\mu_r^j = \frac{\int_0^l \bar{m}(z) \phi_j^2(z) dz}{D^2/4 \int_0^l s(z) \phi_j^2(z) dz}, \quad (6)$$

$s(z)$ 是位置因子,在频锁段取为 1,非频锁段取为 0. 总阻尼为

$$j^s = j^l + F_j j, \quad (7)$$

$$j = \frac{2D}{3} \frac{C_D D [1 - s(z)] \int_0^l |\phi_j(z)|^3 dz}{\left[\int_0^l \bar{m} \phi_j^4 dz \right]^{1/2} \left[\int_0^l \bar{m} \phi_j^2 dz \right]^{1/2}}, \quad (8)$$

其中, j^l 是锚索第 j 阶模态的结构阻尼, C_D 是流体阻力系数.

由式(3)知,得到放大因子 F_j 即可得到振幅 \bar{y}_j , 而 F_j 与 j^s 是耦合的,可对式(5)和式(7)迭代求解. 此时所得振幅 \bar{y}_j 为频锁共振峰值处的值,还须以图 2 的相对幅值近似曲线做修正,通过对图中试验结果的平均值进行 Gauss 拟合,得到振幅系数的表达式为

$$\text{coe} = y_0 + \frac{A}{w \sqrt{1/2}} e^{-2(U_r - x_c)^2/w^2}, \quad (9)$$

式中, $y_0 = 0.014, A = 2.040, x_c = 6.172, w = 1.723$.

3 结果分析

图 3 是计算过程的流程框图,通常不同模态的频锁域会有重叠,本文中,我们将重叠区归于较高模态的频锁域. 锚索的阻力系数 C_D 取为常值 0.6. 目前世界上还没有建成一座水中悬浮隧道,因此,计算实例只能参考拟建悬浮隧道的设计参数^[12],具体物理参数见表 1. 剪切流的分布可以表示为 $U(z) = a + bz$,式中 $a = 0.4\text{m/s}, b = 8 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$.

在 SFT 的设计中,重浮比 (重力/浮力) 是一个重要的设计参数,其大小决定了锚索中预张力的水平. 本文的计算结果表明,当 SFT 具有不同的重浮比时,各阶模态具有不同的频锁范围,如图 4 所示. 重浮比的不同导致锚索模态频率的改变,从而使各阶模态的频锁区域发生了变化. 随着重浮比增加,锚索中的预张力减小,模态频率降低. 重浮比等于 0.6 时,锚索的总响应振幅和一阶模态的振幅很接近,此时一阶模态对锚索的涡激振动贡献最大. 随着重浮比的增大,锚索一阶模态的频锁区域减小,模态振幅也减小;二阶模态的频锁区域增大,模态振幅增大,此时对锚索涡激振动贡献最大的变为二阶模态,锚索的总响应振幅也随着二阶模态振幅的增大而增大. 当重浮比大于 0.8 时,第三阶模态也被激发,锚索的响应振幅继续增大,如图 5 所示.

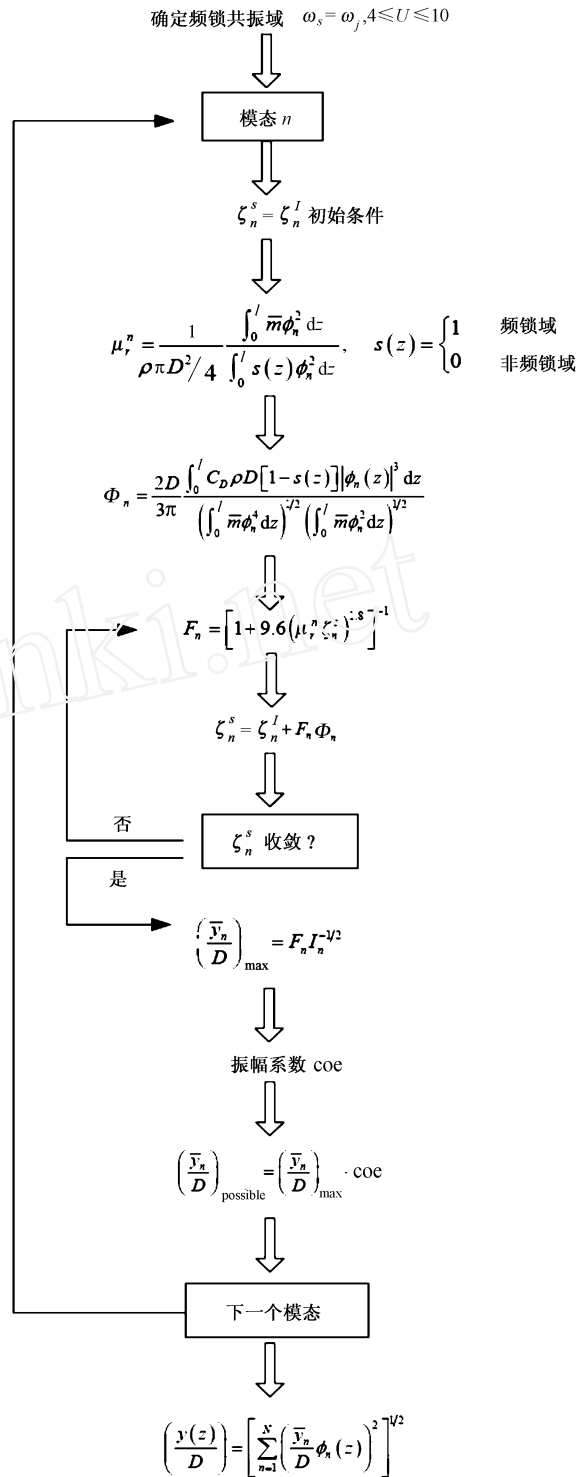


图 3 计算框图

$$\left(\frac{y(z)}{D} \right) = \left[\sum_{n=1}^N \left(\frac{\bar{y}_n}{D} \phi_n(z) \right)^2 \right]^{1/2}$$

引入一个陡度参数 (steepness parameter) 表征剪切流的特性^[13], 其形式为

$$= \frac{D}{V_{ref}} \frac{dV}{dz}, \tag{10}$$

其中, D 是锚索直径, V_{ref} 是流体参考速度, 可取锚索展向中点处的值, dV/dz 是剪切流速度梯度.

表 1 数值计算实例的物理参数

| SFT | | 锚索的参数 | | | | | | | | |
|-------|------------|-------|--------|-------|------------|--------------|---------------------|----------|----------------------|--|
| 淹没深度 | 重浮比(重力/浮力) | 长度 | 直径 | 壁厚 | 单位长度质量 | 单位长度附加质量 | 弯曲刚度 | 预张力 | 结构阻尼比 | |
| h/m | | l/m | D/m | t/m | $m/(kg/m)$ | $m_a/(kg/m)$ | $E_I/(N \cdot m^2)$ | T_0/kN | s | |
| 40 | 0.7 | 252 | 1.1176 | 0.038 | 1000 | 1006 | 3.854×10^9 | 14186 | 1.8×10^{-3} | |

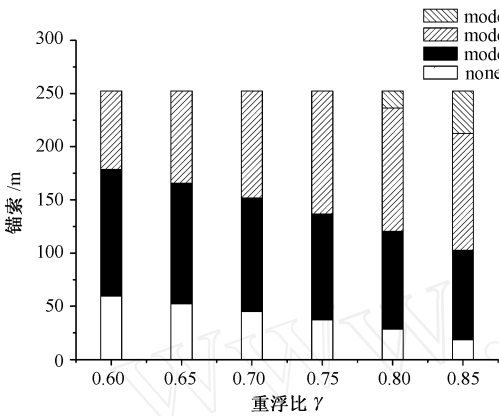


图 4 不同重浮比下各阶模态的频锁范围

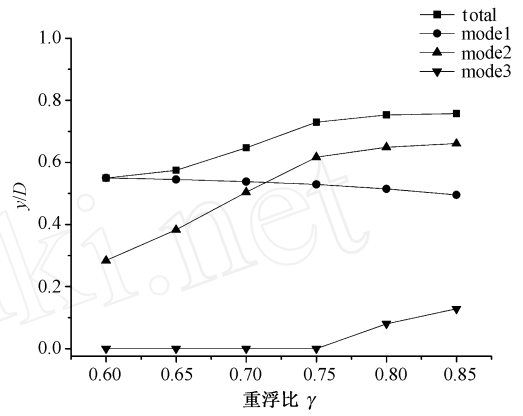


图 5 模态响应与 SFT 重浮比的关系

采用表 2 中的剪切流参数, SFT 的重浮比为 0.7, 计算得到同一根锚索前两阶模态的频锁区域和振动模态如图 6 和图 7 所示. 从图中可以看到, 剪切流的陡度参数 增大, 锚索前两阶模态的频锁区域减小, 相应地振动振幅也减小.

表 2 剪切流参数

| $U(z) = a + bz$ | a | b | V_{ref} | |
|-----------------|-----|--------------------|-----------|------------------------|
| case 1 | 0 | 9×10^{-3} | 1.140 | 8.823×10^{-3} |
| case 2 | 0.4 | 8×10^{-3} | 1.408 | 6.350×10^{-3} |

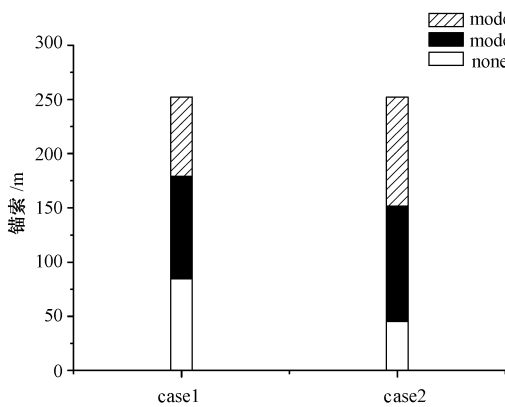


图 6 模态频锁区域随陡度参数的变化

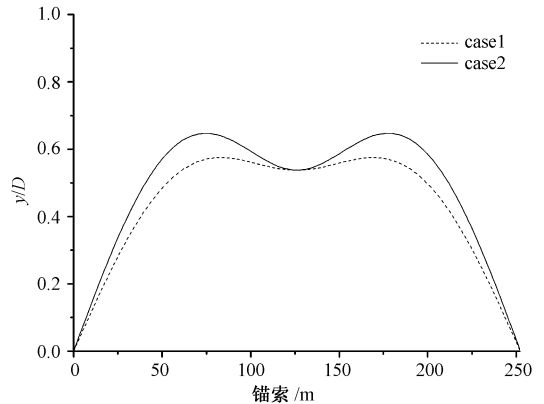


图 7 锚索响应随陡度参数的变化

若假设锚索处于均匀流中, 模态 n 被激发, 其振型函数 $\phi_n = \sin(n \cdot z/l)$, 形状因子 $I_n = 3/4$. 此时整

个锚索都处于模态 n 的频锁区域中,参数 $\beta_n = 0$,由式(3)锚索的频锁共振幅值为

$$\bar{y}_n = \frac{2}{\sqrt{3}} F_n D, \tag{11}$$

放大因子为

$$F_n = \frac{1}{1 + 9.6 \left(\frac{4m}{D^2} \right)^{1.8}} = \frac{1}{1 + 0.156 K_s^{1.8}}. \tag{12}$$

该模态的振幅系数 coe 可以根据式(9)以及相应的约化速度 U_r 值求得.此时锚索的振幅函数可以表示为

$$\frac{y(z)}{D} = \frac{2}{\sqrt{3}} \text{coe} \cdot F_n \cdot \sin\left(\frac{n \cdot z}{l}\right). \tag{13}$$

选取 case 1 中沿锚索轴向的平均流速作为均匀流场的速度大小,即 $U = 1.14\text{m/s}$,计算得锚索总响应如图 8 所示.均匀流作用下,锚索的一阶模态被激发,锚索的响应振幅大于剪切流中的振幅,意味着如果把剪切流场视为均匀流场,会过高估计锚索的横向涡激响应振幅.

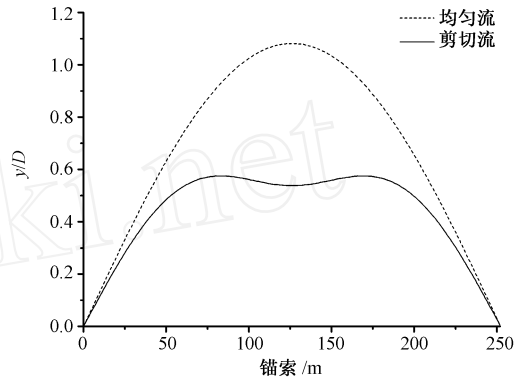


图 8 均匀流和剪切流中锚索涡激响应的对比

4 结论

本文以尾流振子模型为基础,给出了剪切流中悬浮隧道锚索涡激振动的工程分析方法,通过实例分析,得到以下结论:

- (1) 重浮比是 SFT 的一个重要设计参数,重浮比不同, SFT 锚索的模态频率不同,涡激振动中激发的模态数目及相应的频锁区域也不同.随着重浮比的增大,更多的振动模态被激发,锚索的响应幅值也随之增大.因此在 SFT 的设计中,通过降低悬浮隧道的重浮比,可以减小涡激振动对锚索安全性的影响.
 - (2) 剪切流陡度参数的增大会使锚索涡激响应的幅值减小.
 - (3) 若使用均匀流场代替剪切流场计算 SFT 锚索的涡激振动,会过高估计其响应幅值.
- 本文方法可以方便地分析 SFT 锚索横向涡激振动的可能幅值,但没有考虑悬浮隧道的运动对锚索涡激振动的影响,这是下一步的研究工作.

参考文献

[1] Ahrens D. Submerged floating tunnels ——A concept whose time has arrived. *Tunneling and Underground Space Technology*, 1997, 12(2): 317 ~ 336

[2] Huang G, Wu YX, Hong YS. Transportation of crossing waterways via Archimedes bridge. *Ship Building of China*, 2002, 43(supplement): 13 ~ 18 (in Chinese)
黄国君,吴应湘,洪友士. 跨域水域交通的阿基米德桥. *中国造船*, 2002, 43(增刊): 13 ~ 18

[3] Sarpkaya T. Vortex-induced oscillations: a selective review. *Journal of Applied Mechanics*, 1979, 46: 241 ~ 258

[4] Sarpkaya T. A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations. *Journal of Fluids and Structures*, 2004, 19: 389 ~ 447

[5] Iwan WD. The vortex-induced oscillation of non-uniform structural systems. *Journal of Sound and Vibration*, 1981, 79(2): 291 ~ 301

[6] Lyons G, Patel MH. A prediction technique for vortex induced transverse response of marine risers and tethers. *Journal of Sound and Vibration*, 1986, 111(3): 467 ~ 487

[7] Mai JT, Luo ZX, Guan BS. Vortex-induced dynamic response of tension legs for submerged floating tunnel under current effect. *J of Southwest Jiaotong University*, 2004, 39(5): 600 ~ 604 (in Chinese)
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. *西南交通大学学报*, 2004, 39(5): 600 ~ 604

[8] Stansby PK. The locking-on of vortex shedding due to the cross-stream vibration of circular cylinders in uniform and shear flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 1976, 74: 641 ~ 665

- [9] Wang DY, Ling GC. Vortex-induced nonlinear vibrations of TLP tethers under circumstances of platform oscillation. *Acta Oceanologica Sinica*, 1998, 20(3) : 119 ~ 128 (in Chinese)
王东耀, 凌国灿. 在平台振荡条件下 TLP 张力腿的涡激非线性响应. *海洋学报*, 1998, 20(3) : 119 ~ 128
- [10] Griffin OM, Ramberg SE. Some recent studies of vortex shedding with application to marine tubules and risers. *Transactions of ASME*, 1982, 104 : 2 ~ 13
- [11] Chen WM, Wang Y. Effects of tension and fluid distribution on the vortex-induced vibrations of TLP tethers. *Shipbuilding of China*, 2004, 45 (supplement) : 226 ~ 231 (in Chinese)
陈伟民, 王 艺. 张力和流场分布对张力腿涡激振动响应的影响分析. *中国造船*, 2004, 45(增刊) : 226 ~ 231
- [12] Pignoni B. Submerged tunnels for a fixed link across the strait of Messina. In: Serrano JM (ed.) *Proc of the International Congress on Tunnels and Water*. Rotterdam: A. A. Balkema, 1988. 13 ~ 31
- [13] Bokaian A. Lock-in prediction of marine risers and tethers. *Journal of Sound and Vibration*, 1994, 175(5) : 607 ~ 623

Vortex-induced vibration of submerged floating tunnel tethers in shear current

GE Fei HUI Lei HONG You-Shi

(State Key Lab. of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The engineering analysis method for vortex-induced transverse vibration of submerged floating tunnel (SFT) tether is presented, based on the modified wake oscillator model. The effects of specific gravity ratio and the shear current's characteristics on the vortex-induced vibration of tether are investigated. The calculated results show that the distribution of lock-in regions and the vortex-induced vibration of tether vary with the specific gravity ratios of SFT. The increase of the shear parameter makes the amplitude of vortex-induced vibration decrease. Furthermore, if the shear current is replaced by the uniform current to calculate the vortex-induced vibration of tether, its response amplitude may be overestimated.

Key words submerged floating tunnel, vortex-induced vibration, wake oscillator model, tether, Archimedes bridge