

文章编号: 1000-4750(2013)03-0476-05

随机激励作用下悬浮隧道锚索的振动响应

孙胜男, 苏志彬

(聊城大学建筑工程学院, 山东, 聊城 252059)

摘 要: 为了研究水下悬浮隧道锚索在随机激励作用下的响应, 考虑锚索的垂度效应, 建立水下悬浮隧道锚索非线性随机振动方程, 采用蒙特卡罗数值模拟法对随机激励作用下锚索的振动响应进行研究。研究表明: 在零均值高斯白噪声激励作用下锚索的位移和速度均方根响应经过一定时间后将趋于定值; 随着激励荷载均方根的增大, 锚索位移和速度均方根响应也随之增大; 由于水体阻尼力的作用, 锚索的位移和速度均方根响应比空气中的锚索大幅减小。

关键词: 海洋工程; 悬浮隧道; 水中锚索; 随机振动; 垂度; 蒙特卡罗法

中图分类号: U459.5 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.04.0234

VIBRATION RESPONSE OF SUBMERGED FLOATING TUNNEL TETHER SUBJECTED TO RANDOM EXCITATION

SUN Sheng-nan , SU Zhi-bin

(School of Architecture & Civil Engineering, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059, China)

Abstract: To study the vibration response of a submerged floating tunnel tether subjected to a random excitation, a non-linear random vibration equation of the tether is set up by taking the sag of the tether into account, which is analyzed by the Monte Carlo method. It may be concluded that, the displacement and velocity root mean square response of the tether subjected to a zero-mean Gaussian white noise excitation tends to be a fixed value after a certain period of time; the displacement and velocity root mean square response of the tether increases with the root mean square of excitation; due to the damping force of water, the displacement and velocity root mean square response of the tether decreases rapidly compared with that of a tether in air.

Key words: ocean engineering; submerged floating tunnel; submarine tenders; random vibration; sag; Monte Carlo methods

水下悬浮隧道(亦称作“阿基米德桥”)是一种跨越水域的新型结构形式。自从这种结构形式问世以来, 这种跨越水域的创新方案得到了国内外专家的广泛关注。1969年, 英国工程师 Alan Grant 提出将水下悬浮隧道作为跨越意大利 Messina 海峡的方案之一^[1]。随后, 挪威、意大利、日本、美国、瑞士等国开展了大量的可行性研究, 证实了在世界多个国家建造这种新型结构的可能性, 同时也指出了水下悬浮隧道结构形式的特殊性^[2-5]。中国也相继对水下悬浮隧道开展了研究, 李剑^[6]对悬浮隧道锚

索的涡激振动特性进行了研究; 麦继婷^[7]等对水流作用下悬浮隧道张力腿的横向涡激振动做了初步探讨; 葛斐^[8]等建立了悬浮隧道锚索在波流场中顺流向涡激振动的数学模型, 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。

水下悬浮隧道锚索阻尼小、质量轻、柔度大, 是一种极易发生振动的构件。作为悬浮隧道的关键构件, 锚索处于复杂的波流环境中, 因此研究锚索在波流随机环境荷载作用下的响应极为重要, 因

收稿日期: 2011-04-19; 修改日期: 2011-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108224); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2010HZ005)

通讯作者: 苏志彬(1980-), 男, 河北衡水人, 讲师, 硕士, 从事悬浮隧道动力响应研究(E-mail: suzhibin@126.com).

作者简介: 孙胜男(1982-), 女, 山东莱阳人, 讲师, 博士, 从事悬浮隧道动力响应研究(E-mail: sunshengnan1982@163.com).

此, 本文建立了考虑悬浮隧道锚索垂度效应的非线性随机振动模型, 并在此模型的基础上探讨了悬浮隧道锚索在随机环境荷载激励下的振动响应。选取图 1 所示的锚索式悬浮隧道为研究对象, 探讨随机环境荷载作用下悬浮隧道锚索的动力响应问题。

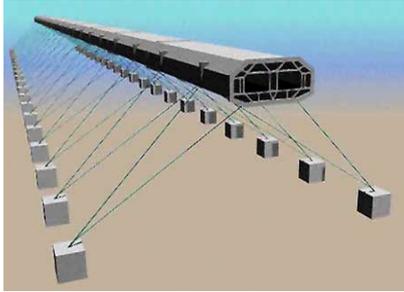


图 1 锚索式悬浮隧道

Fig.1 Submerged floating tunnel supported by anchors

1 运动方程的建立

建立图 2 所示的坐标系, 基本假定为: 1) 流为均匀定常流, 锚索受到环境均匀随机荷载 $F(t)$ 的作用; 2) 锚索的抗弯刚度很小, 忽略不计; 3) 锚索具有一定的垂度, 且锚索跨中垂度 f 与锚索无应力状态的长度 L 之比小于 $1/8$, 假定锚索的初始构形为抛物线, 则抛物线方程为: $x = 4f \frac{z}{L} \left(1 - \frac{z}{L}\right)$ 。

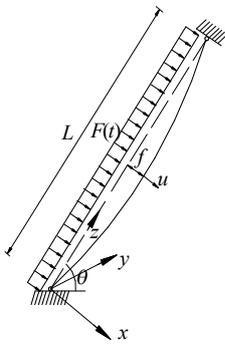


图 2 锚索振动模型

Fig.2 Vibration model of tether

令 L_E 、 θ 、 E 、 A 和 m 分别为静力作用下锚索的长度、倾角、弹性模量、横截面积和锚索无应力状态下的单位长度质量, $L_E = L[1 + 8(f/L)^2]$, 静力状态下锚索的张力为 $T_0 = T_0(s)$, s 为弧长坐标。动荷载作用下的动力构形由位移 u 表示, u 为沿锚索轴线的法线方向由静力平衡位置开始的位移。

由 Hamilton 原理最终得到锚索的振动方程为^[9]:

$$m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + C_S \frac{\partial u}{\partial t} - \Delta H \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} -$$

$$(H_0 + \Delta H) \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = F_D + F(t) \quad (1)$$

$$\Delta H = \frac{EA}{L_E} \left\{ \frac{8f}{L^2} \int_0^L u dz + \frac{1}{2} \int_0^L \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 dz \right\} \quad (2)$$

其中: C_S 为锚索的粘性阻尼系数; F_D 为锚索振动引起的水体对其产生的作用力; $F(t)$ 为均值为零的高斯白噪声激励荷载; 由小垂度假设可知, T_0 约等于沿 z 向的锚索初张力 H_0 , 即 $T_0 \approx H_0$, 且 $ds \approx dz$; ΔH 为锚索振动引起的附加张力。

由 Morison 公式, 锚索振动引起水体对其单位长度上的总作用力可以表示为附加惯性力和水体阻尼力之和^[10]:

$$F_D = -\frac{\pi D^2}{4} \rho_w C_m \ddot{u} - \frac{1}{2} \rho_w D C_D \dot{u} |\dot{u}| \quad (3)$$

式中: ρ_w 为水的密度; D 为锚索外直径; C_D 为拖拽力系数, 取 $C_D = 0.7$; C_m 为附加质量系数, 取 $C_m = 1$ 。对式(3)进行线性化, 得线性 Morison 公式^[10], 即:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_w D_t \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma_{\dot{u}} \dot{u} + C_m \frac{\pi D_t^2}{4} \rho_w \ddot{u} \quad (4)$$

式中, $\sigma_{\dot{u}}$ 为 \dot{u} 的标准差。

由于悬浮隧道锚索的垂跨比很小, 所以可以近似取索的振动模态为标准弦的振动模态^[11], 即:

$$u(z, t) = \sum_{n=1}^N u_n(t) \sin \frac{n\pi z}{L} \quad (5)$$

用伽辽金法化简式(1), 得:

$$\int_0^L R(z, t) \sin \frac{j\pi z}{L} dz = 0, \quad j = 1, 2, \dots, \infty \quad (6)$$

式中, $R(z, t)$ 称为留函数^[10]。

本文取一阶振动模态化简式(6), 整理得:

$$\ddot{u} + \left(2\omega_S \xi_S + \frac{\rho_w C_D \cdot D \sigma_{\dot{u}}}{2\bar{m}} \sqrt{\frac{8}{\pi}} \right) \dot{u} + \omega_S^2 u + \frac{24 f E A \pi}{\bar{m} L^3 L_E} u^2 + \frac{E A \pi^4}{4 \bar{m} L^3 L_E} u^3 = \frac{1}{\bar{m}} F(t) \quad (7)$$

其中: \bar{m} 为单位长度锚索质量和水体附加质量之和, $\bar{m} = m + 0.25\pi D^2 \rho_w C_m$; ω_S 为锚索一阶固有频率

$\omega_S^2 = \frac{T_0}{\bar{m}} \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 + \frac{512 f^2 E A}{\bar{m} L^3 L_E \pi^2}$; $C_S = 2\bar{m} \omega_S \xi_S$, ξ_S 为

锚索的阻尼比; 锚索的垂度为 $f = \frac{\gamma_f V_S L^2 \cos \theta}{8T_0}$, γ_f

为锚索的浮容重, V_S 为锚索单位长度的体积。

2 数值分析与结果

目前世界范围内尚无一座悬浮隧道建成,因此本文锚索基本参数的选取参考了国外拟建悬浮隧道的设计参数,具体设计参数:总水深为 170m,隧道放置在水下 30m 处,其他参数取值如表 1 所示^[4]。对于式(7)非线性随机振动微分方程,采用蒙特卡罗数值模拟法进行求解,得到拉索跨中横向振动位移和速度时程曲线,并对曲线取统计特性计算,得到模拟拉索振动位移和速度均方根响应曲线。

表 1 基本参数
Table 1 Basic parameters

锚索	长度/m	161.66
	直径/m	0.489
	单位长度质量/(kg/m)	1474.23
	单位长度附加质量/(kg/m)	193.06
	密度/(kg/m ³)	7850
	弹性模量/Pa	2.1×10^{11}
	初张力/N	2.572×10^7
	阻尼比	0.0018
	一阶频率/Hz	0.419
	倾角/(°)	60
水体	密度/(kg/m ³)	1028

2.1 锚索位移和速度均方根响应和功率谱密度

考虑水体阻尼力和水体附加惯性力的作用,图 3 为锚索跨中位移的均方根响应和功率谱密度曲线,激励白噪声的均方根为 1N/m,锚索的跨中位移均方根在经历了一定时间后趋于稳定值 0.25m,

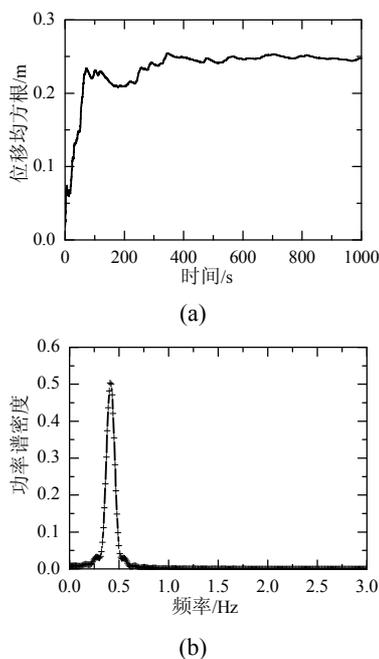


图 3 锚索位移均方根响应和功率谱密度曲线
Fig.3 Root mean square of displacement and its power spectral density curves of tether

功率谱密度在频率为 0.419Hz 时达到最大值,锚索的速度均方根响应趋于稳定值时为 0.65m/s,速度功率谱密度同样在 0.419Hz 时达到最大值如图 4 所示。位移和速度的功率谱密度都是在结构固有频率附近时达到最大值,其它频率范围段的功率谱密度很小。

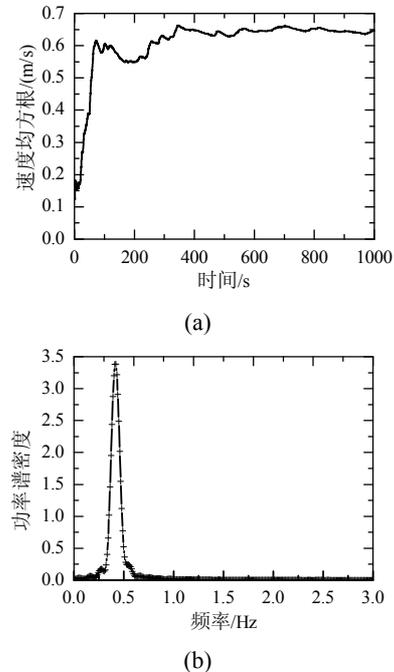


图 4 锚索速度均方根响应和功率谱密度曲线
Fig.4 Root mean square of velocity and its power spectral density curves of tether

2.2 水体阻尼力对水下悬浮隧道锚索随机振动效应的影响

水下悬浮隧道锚索受到水体阻尼力的作用,在随机激励均方根都为 1N/m 时,水下悬浮隧道锚索的位移和速度均方根响应如图 5 所示,不考虑水体阻尼力时锚索跨中位移均方根响应趋于稳定值时为 0.54m,速度均方根响应趋于定值时为 1.26m/s;考虑水体阻尼力作用时跨中位移均方根响应趋于稳定值时为 0.25m,速度均方根响应趋于定值时为 0.64m/s;因此,水体阻尼力的存在使得锚索的位移和速度均方根响应大幅减小。

2.3 水体附加惯性力对水下悬浮隧道锚索随机振动效应的影响

水下悬浮隧道锚索受到水体附加惯性力的作用,在随机激励均方根都为 1N/m 时,水下悬浮隧道锚索的位移和速度响应如图 6 所示,不考虑水体附加惯性力时锚索跨中位移均方根响应趋于稳定值时为 0.22m,速度均方根响应趋于定值时为

0.62m/s; 考虑水体附加惯性力作用时跨中位移均方根响应趋于稳定值时为 0.25m, 速度均方根响应趋于定值时为 0.64m/s; 因此, 水体附加惯性力的存在使得锚索位移和速度均方根响应在趋于稳定值时将有小幅度的增大。

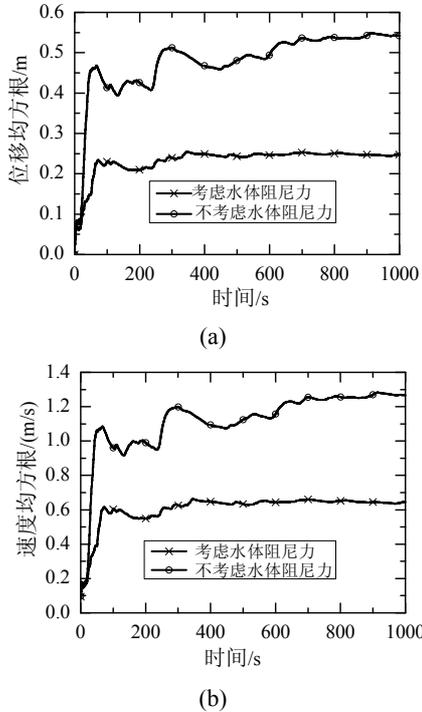


图 5 水体阻尼力对锚索位移和速度均方根响应的影响
Fig.5 Effect of water damping force on root mean square of displacement and velocity

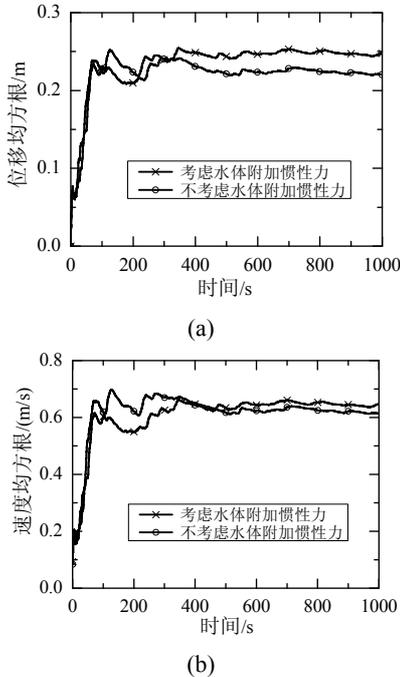


图 6 水体附加惯性力对锚索位移和速度均方根响应的影响
Fig.6 Effect of water additional inertial force on root mean square of displacement and velocity

2.4 不同随机激励工况下锚索位移和速度均方根响应

采用 3 种不同激励均方根的高斯白噪声激励荷载, 高斯白噪声的均方根分别取 1N/m、2.2N/m、3.2N/m, 在这 3 种工况下锚索的位移和速度均方根响应如图 7 所示, 各种工况下锚索的速度和位移均方根响应在达到一定时间后将趋于定值, 随着激励均方根的增大, 锚索的位移和速度均方根响应也随之增大。

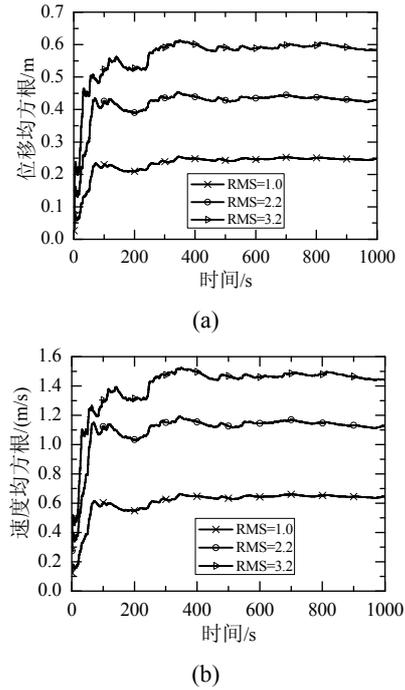


图 7 不同激励作用下锚索的位移和速度均方根响应
Fig.7 Tether root mean square of displacement and velocity response subjected to different excitation

3 结论

(1) 水下悬浮隧道锚索在零均值高斯白噪声激励下, 经历一定时间后, 锚索的位移和速度均方根响应将趋于稳定值, 位移和速度的功率谱密度在锚索的固有频率处达到峰值。

(2) 水下悬浮隧道锚索在零均值高斯白噪声激励下, 由于水体阻尼力的作用, 锚索的位移和速度均方根响应趋于稳定值时比空气中的锚索大幅减小, 所以水体阻尼力对锚索随机振动具有抑制作用。

(3) 随着零均值高斯白噪声激励均方根的增大, 锚索位移和速度均方根响应也随之增大。

参考文献:

[1] Mazzolani F M, Landolfo R, Faggiano B, et al. Structural

- analyses of the submerged floating tunnel prototype in Qiandao Lake (PR of China) [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2008, 11(4): 439–454.
- [2] Mazzolani F M, Landolfo R, Faggiano B, et al. A submerged floating tunnel (Archimedes bridge) prototype in the Qiandao lake (PR of China): research development and basic design [J]. *Costruzioni Metalliche*, 2007, 5: 45–63.
- [3] Haugerud S A, Olsen T O, Muttoni A. The Lugano crossing technical solution [C]// Krobeborg. *Strait Crossing 2001*. Swets & Zeitlinger Publishers Lisse, 2001: 563–568.
- [4] Faggiano B, Landolfo R, Mazzolani F M. Design and modelling aspects concerning the submerged floating tunnels: an application to the Messina strait crossing [C]// Krobeborg. *Strait Crossing 2001*. Swets & Zeitlinger Publishers Lisse, 2001: 511–519.
- [5] Felch J. The Seattle-Bellevue loop with still-water submerged floating tunnel [C]// Krobeborg. *Strait Crossing 2001*. Swets & Zeitlinger Publishers Lisse, 2001: 581–590.
- [6] 李剑. 水中悬浮隧道概念设计及其关键技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2003: 223–234.
Li Jian. Conceptual design and key problems for submerged floating tunnel [D]. Shanghai: Tongji University, 2003: 223–234. (in Chinese)
- [7] 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]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2004, 39(5): 600–604. (in Chinese)
- [8] 葛斐, 董满生, 惠磊, 洪友士. 水中悬浮隧道锚索在波浪场中的涡激动力响应[J]. *工程力学*, 2006, 23(增刊 I): 217–221.
Ge Fei, Dong Mansheng, Hui Lei, Hong Youshi. Vortex-induced vibration of submerged floating tunnel tethers under wave and current effects [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(Suppl I): 217–221. (in Chinese)
- [9] Sun Shengnan, Chen Jianyun, Li Jing. Non-linear response of tethers subjected to parametric excitation in submerged floating tunnels [J]. *China Ocean Engineering*, 2009, 23(1): 167–174.
- [10] 孙胜男. 悬浮隧道动力响应分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2008: 105–107.
Sun Shengnan. Dynamic response analysis of submerged floating tunnel [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008: 105–107. (in Chinese)
- [11] Irvine H M. Cable structures [M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Press, 1981: 98–132.

(上接第 475 页)

- [6] Xiong Y. An analytical method for failure prediction of multi-fastener composite joints [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1996, 33(29): 4395–4409.
- [7] Blong Siong. Fastener flexibility in composite joints for aerospace structures [D]. Bedford, UK: School of Engineering, Cranfield University, 1998.
- [8] 唐兆田. 紧固件柔度系数研究[J]. *民用飞机设计与研究*, 2011(1): 25–28.
Tang Zhaotian. Investigation of fastener flexibility [J]. *Civil Aircraft Design and Research*, 2011(1): 25–28. (in Chinese)
- [9] Engineering Sciences Data Unit, ESDU 98012. Flexibility of, and load distribution in multi-bolt lap joints subjected to in-plane axial loads [M]. Colorado USA: Information Handling Services Incorporated, 2001: 1–14.
- [10] Timoshenko S. *Strength of materials, part II, advanced theory and problems* [M]. 3rd ed. Princeton: Van Nostrand Company Incorporated, 1957: 1–23.
- [11] Harris H G, Ojalvo I U, Hooson R E. Stress and deflection analysis of mechanically fastened joints. AFFDL-TR-70-49 [R]. Ohio: Air Force Flight Dynamics Laboratory, 1970.