

文章编号:1005-9865(2015)01-0119-06

水下悬浮隧道锚索稳定性分析

苏志彬,孙胜男

(聊城大学 建筑工程学院,山东 聊城 252059)

摘 要:为研究水下悬浮隧道锚索的稳定性,建立锚索在涡街激励作用下振动的数学方程,采用伽辽金法对其进行化简,锚索振动的稳定性通过 Lyapunov 指数法进行判断,分析了锚索动静张力比的大小、悬浮隧道系统的阻尼比和锚索参数激励频率对锚索振动稳定性的影响。计算结果表明,锚索振动失稳的范围取决于锚索的动静张力比、锚索的阻尼比和频率比(锚索参数激励频率与锚索 1 阶模态固有频率的比值);当频率比为 1 和 2 左右时,随着锚索动静张力比的增大和阻尼比的减小,锚索逐渐从稳定状态转变为不稳定状态,且锚索的不稳定区域逐渐增大。

关键词:海洋工程;悬浮隧道;锚索;振动;稳定性

中图分类号:U459.5

文献标志码:A

DOI:10.16483/j.issn.1005-9865.2015.01.015

Stability analysis of submerged floating tunnel tether

SU Zhibin, SUN Shengnan

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

Abstract: To study the stability of submerged floating tunnel tether, the vortex-induced vibration equation of tether is set up, which is simplified by Galerkin method. The stability of tether vibration is judged by Lyapunov exponent method. Effects of dynamic and static tension ratio, damping ratio and parametric excitation frequency of tether on its vibration stability are analyzed. The results show that the stability of submerged floating tunnel tether depends on dynamic and static tension ratio, damping ratio of tether and frequency ratio (the ratio of parametric excitation frequency and the first order modal frequency of tether); when the frequency ratio is around 1 and 2, with the increasing of dynamic and static tension ratio and decreasing of damping ratio, the tether changes gradually from stable state to instable state and the instable region of tether increases gradually.

Keywords: ocean engineering; submerged floating tunnel; tether; vibration; stability

一种合适的跨越深水水域的系统,能够给水域两岸带来极大的经济效益。在我国,以何种方式跨越琼州海峡、渤海海峡一直是研究人员关注的焦点问题,专家学者们都在寻找一种更安全、更有效、与环境更为协调的跨越系统^[1-2]。水下悬浮隧道(亦称作“阿基米德桥”)就是这样一种跨越水域的新型结构形式。这种结构形式可跨越不同类型的水域,如湖泊、海峡、河流、海湾等,且在改善交通状况的同时,对周围环境的影响十分有限,不会破坏建造地点的自然景观及产生视觉上的污染。此外,悬浮隧道还可全天候运营,并与航道互不干扰。因此,自从这种结构形式出现以来,这种跨越水域的创新方式引起了国内外专家的广泛关注^[3-5]。

水下悬浮隧道锚索作为悬浮隧道的关键受荷构件,具有柔度大、质量轻、阻尼小等特点,在外激励作用下

收稿日期:2013-10-31

基金项目:国家自然科学基金资助(51108224);山东省自然科学基金资助项目(ZR2013EEL006)

作者简介:苏志彬(1980-),男,河北景县人,硕士,讲师,从事悬浮隧道动力响应研究。E-mail: suzhibin@126.com

通讯作者:孙胜男(1982-),女,山东莱阳人,博士,副教授,硕士生导师,从事悬浮隧道动力响应研究。

E-mail: sunshengnan1982@163.com

极易产生振动,因此许多专家对锚索的振动问题进行了研究。项贻强等^[6]利用哈密顿原理,考虑悬浮隧道管体和锚索的耦合作用,建立管体-锚索耦合系统的振动方程,对五种典型工况的管体跨中和锚索跨中位移时程曲线进行了分析比较。葛斐等^[7]建立了水下悬浮隧道锚索在波流场中顺流向涡激振动的数学方程。罗刚等^[8]考虑流体-结构耦合作用和锚索的几何非线性特性,建立了锚索的非线性振动方程,并通过软件的二次开发,分析了悬浮隧道锚索在横向升力作用下的动力特点。葛斐等^[9]通过哈密顿原理推导出了水下悬浮隧道锚索和管体的运动控制方程,方程中引入了锚索横向和轴向变形间的耦合效应,并在时域内对运动控制方程进行求解分析。孙胜男等^[10]建立了悬浮隧道锚索非线性随机振动方程,通过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了计算分析。

为研究锚索在海流作用下的稳定性问题,将隧道管体对锚索的作用简化为轴向参数激励,建立了索端参数激励作用下悬浮隧道锚索的非线性振动方程,采用 Lyapunov 指数意义下的振动稳定性分析方法,通过对系统最大 Lyapunov 指数的求解,对锚索的振动稳定性进行了分析。

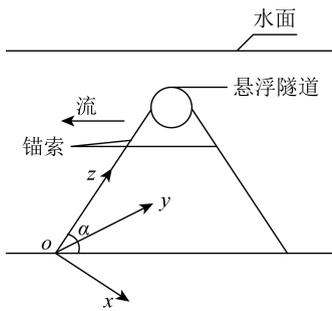


图 1 悬浮隧道结构示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of submerged floating tunnel

1 锚索振动方程的建立

建立如图 1 所示坐标系,其中 oz 轴与水底平面的夹角是 α , z 向沿锚索长度方向, x 向在 oxz 平面内垂直于 z 向, oxz 平面垂直于隧道管体长度方向, y 向垂直于 oxz 平面。为简化模型便于计算,引入如下假设:

1) 锚索位于水面 30 m 深度以下,可忽略波浪的影响,只考虑流的作用,且流为均匀流^[11]。

2) 锚索初始张拉力远远大于其自身重力,忽略拉力沿长度方向的改变。

3) 隧道管体振动对锚索的影响简化为参数激励。

根据哈密顿原理可得锚索横向振动微分方程为^[11]:

$$E_{eq}I \frac{\partial^4 u}{\partial z^4} - T_0(1 + \lambda \cos \omega_s t) \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + C \frac{\partial u}{\partial t} + m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -F_D + F_L \quad (1)$$

$$E_{eq} = E / (1 + E/E_f) \quad (2)$$

$$E_f = 12\sigma^3 / \gamma_1^2 L^2 \quad (3)$$

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

$$F_L = \frac{1}{2} \rho_w D C_L (V \sin \alpha)^2 \cos \omega_s t \quad (5)$$

式中: E_{eq} 为锚索等效弹性模量; I 为锚索惯性矩; u 为锚索横向振动偏离静力平衡位置的位移; T_0 为锚索静力平衡时的张力; λ 为锚索的动静张力比; ω_s 为隧道管体振动引起的参数激励频率; C 为锚索的粘滞阻尼系数; m 为单位长度锚索的质量; F_D 为锚索横向振动引起的单位长度附加惯性力和水体阻尼力; F_L 为锚索单位长度升力; E 为锚索的弹性模量; E_f 锚索计算垂度效应的当量弹性模量; $\sigma = T_0/A$ 为锚索应力; A 为锚索的横截面积; γ_1 为锚索的浮容重; L 为锚索在水平面上的投影长度; D 为锚索外径; ρ_w 为海水密度, $\rho_w = 1028 \text{ kg/m}^3$; C_m 为附加质量系数,取 $C_m = 1$; σ_i 为 \dot{u} 的标准差; C_D 为拖拽力系数,取 $C_D = 0.7$; C_L 为升力系数,取 $C_L = 0.7$; ω_v 为尾流漩渦泄放频率,计算时取 $\omega_v = \omega_s$; V 为海流的速度,取 1.0273 m/s ^[11]。

将锚索视为两端简支的结构,采用分离变量法,可得锚索横向位移 $u(z, t)$ 的级数形式:

$$u(z, t) = \sum_{n=1}^N u_n(t) \sin \frac{n\pi z}{l} \quad (6)$$

式中: l 为锚索长度; N 为阶数。

将式(2)~(6)代入运动方程(1),用伽辽金法化简并取一阶模态整理得:

$$\ddot{u} + [\omega_M^2 + \omega_\lambda^2(1 + \lambda \cos\omega_s t)]u + \left(2\omega_1 \xi + \frac{\rho_w C_D \cdot D \sigma_u}{2\bar{m}} \sqrt{\frac{8}{\pi}}\right) \dot{u} = \frac{2\rho_w DC_L}{\pi\bar{m}} (V \sin\alpha)^2 \cos(\omega_s t) \quad (7)$$

锚索 1 阶固有频率 $\omega_1 = (\omega_M^2 + \omega_\lambda^2)^{1/2}$; 其中, $\omega_M^2 = (\frac{\pi}{l})^4 \frac{E_{eq} I}{\bar{m}}$; $\omega_\lambda^2 = (\frac{\pi}{l})^2 \frac{T_0}{\bar{m}}$; C_1 为对应 1 阶模态的粘

性阻尼系数, $C_1 = 2\bar{m}\omega_1 \xi$; ξ 为锚索无量纲阻尼比; \bar{m} 为单位长度水体附加质量和锚索质量之和。

2 锚索的稳定性分析

振动系统的稳定性可以采用求解平稳状态的奇点特性来判断,这种方法为确定性非线性系统稳定性分析的标准方法;另一种方法为在原平衡微分方程上施加微小摄动来分析,此种方法结合 Lyapunov 指数特性,可以求解确定性系统,也可以求解随机振动系统的稳定性^[12]。采用在原平衡微分方程上施加微小摄动来分析系统的稳定性,结合 Lyapunov 指数特性,对一微小的摄动若无摄动运动与摄动运动非常接近,则运动是稳定的;否则,运动为不稳定。Lyapunov 指数是相空间相邻轨迹发散或收敛的平均指数度量,它们表示任意动态过程的稳定特性。最大的 Lyapunov 指数 LE_1 决定了过程的稳定性,当 $LE_1 < 0$ 时过程稳定,否则为不稳定^[13]。

3 数值分析与结果

锚索基本参数参考国外拟建悬浮隧道^[14]的设计参数,具体取值如表 1 所示。

表 1 基本参数

Tab. 1 Basic parameters

长度/m	横截面积/m ²	单位长度质量 /(kg · m ⁻¹)	密度 /(kg · m ⁻³)	弹性模量/Pa
161.66	0.187 8	1 474.23	7 850	2.1×10 ¹¹
初张力/N	倾角/(°)	水中固有频率 /(rad · s ⁻¹)	阻尼比	初始速度 /(m · s ⁻¹)
2.572×10 ⁷	60	2.41	0.001 8	0

根据 Wolf^[15]关于 LE_1 的数学求解方法,采用 MATLAB 编制程序对 Lyapunov 指数进行求解,为消除瞬态振动对求解结果的影响,前 100 s 的数据不予考虑,其求解迭代图见图 2 所示。

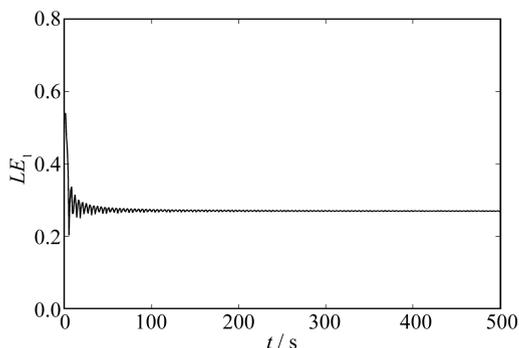


图 2 Lyapunov 指数求解图

Fig. 2 Lyapunov exponent solving graph

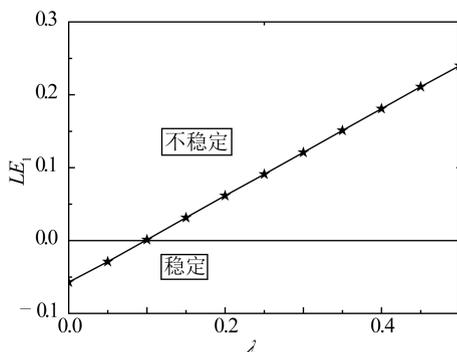


图 3 锚索动静张力比和锚索稳定性的关系

Fig. 3 Relationship between dynamic and static tension ratio and stability of tether

3.1 动静张力比 λ 对锚索稳定性的影响

计算时取锚索参数激励频率与锚索 1 阶模态固有频率的比值(即频率比,下同)为 2,则动静张力比对锚

索稳定性的影响如图 3 所示。

由图 3 可见,随着锚索动静张力比的增大,锚索的振动状态逐渐从稳定转变为不稳定。锚索从稳定状态转变为不稳定状态对应的锚索动静张力比为 0.1。因此,锚索的动静张力比对锚索的稳定性影响较大,且随着锚索动静张力比的增大,锚索逐渐趋于不稳定状态。

3.2 锚索阻尼比对锚索振动稳定性的影响

计算时取频率比为 2,计算了锚索动静张力比分别为 0.25、0.30 和 0.35 三种情况下阻尼比的变化对锚索振动稳定性的影响,如图 4 所示。

由图 4 可见,随着锚索阻尼比的增大,锚索逐渐从不稳定状态转变为稳定状态。随着锚索动静张力比逐渐增大,若要使锚索处于稳定状态,系统需要具有更大的阻尼比。

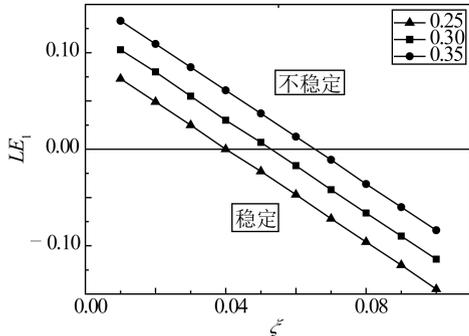


图 4 阻尼比和锚索稳定性的关系

Fig. 4 Relationship between damping ratio and stability of tether

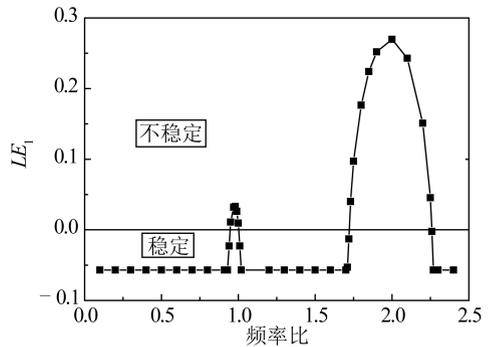


图 5 频率比对 Lyapunov 指数的影响

Fig. 5 Effect of frequency ratio on Lyapunov exponent

3.3 锚索参数激励频率对其振动稳定性的影响

取锚索的动静张力比为 0.55,得到锚索参数激励频率对锚索振动稳定性的影响如图 5 所示。

由图 5 可见,当锚索参数激励频率 ω 在 $0.95\omega_1 \sim 1.0\omega_1$ 区间和 $1.73\omega_1 \sim 2.25\omega_1$ 区间范围内时, LE_1 均大于零,此时锚索处于不稳定状态。由此可见,锚索振动失稳状态与频率比有关。当频率比为 1 和 2 左右时,锚索极易发生失稳。

3.4 锚索的稳定区域和不稳定区域

不同动静张力比和频率比情况下,锚索的稳定区域和不稳定区域如图 6 所示。

由图 6 可见,频率比在 1 和 2 附近时,随着锚索动静张力比的增加,锚索振动的不稳定区域逐渐增大。

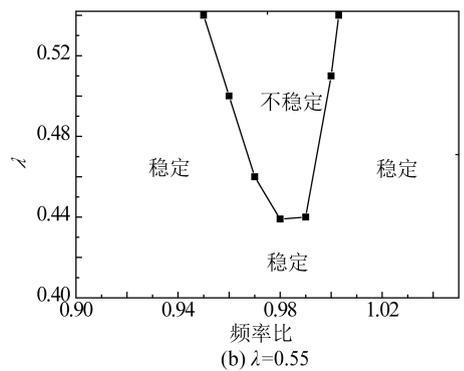
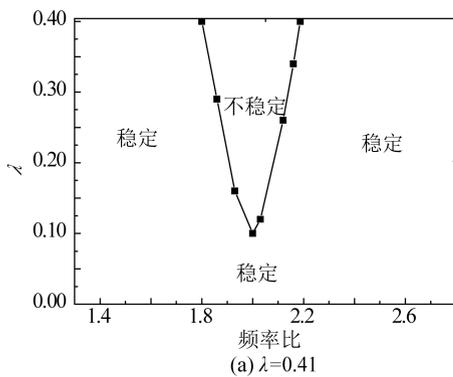


图 6 不同动静张力比和频率比的稳定区域和不稳定区域

Fig. 6 Stable region and unstable region of different dynamic and static tension ratios and frequency ratios

不同阻尼比和频率比情况下,锚索的稳定区域和不稳定区域如图 7 所示。其中,图 7(a)中锚索的动静张力比取为 0.41,图 7(b)中锚索的动静张力比取为 0.55。由图 7 可见,锚索在频率比为 1 和 2 附近时,随着锚索阻尼比的减小,锚索振动的不稳定区域逐渐增大。

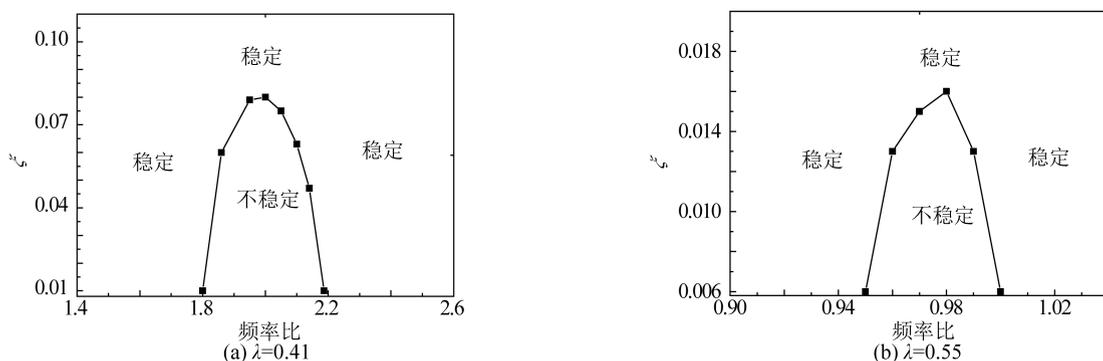


图 7 不同阻尼比和频率比的稳定区和不稳定区

Fig. 7 Stable region and unstable region of different damping ratios and frequency ratios

4 结 语

锚索振动失稳的范围取决于锚索的动静张力比、阻尼比和频率比。当频率比为 1 和 2 左右时,随着锚索动静张力比的增大和阻尼比的减小,锚索逐渐从稳定状态转变为不稳定状态,且锚索的不稳定区域逐渐增大。

参考文献:

- [1] 麦继婷, 关宝树. 琼州海峡悬浮隧道的可行性研究 [J]. 铁道工程学报, 2003, 12(4): 93-96. (MAI Jiting, GUAN Baoshu. A feasibility study on Qiongzhou Strait submerged floating tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2003, 12(4): 93-96. (in Chinese))
- [2] 宋克志, 王梦恕. 烟大渤海海峡隧道的可行性研究探讨 [J]. 现代隧道技术, 2006, 43(6): 1-8. (SONG Kezhi, WANG Mengshu. Feasibility study on Bohai Channel tunnel connecting Yantai and Dalian [J]. Modern Tunnelling Technology, 2006, 43(6): 1-8. (in Chinese))
- [3] LU Wei, GE Fei, WANG Lei, et al. On the slack phenomena and snap force in tethers of submerged floating tunnels [J]. Marine Structures, 2011, 24: 358-376.
- [4] WU Xiaodong, GE Fei, HONG Youshi. Effect of traveling wave on vortex-induced vibrations of submerged floating tunnel tethers [J]. Procedia Engineering, 2010(4): 153-160.
- [5] FELCH J. The seattle-bellevue loop with still-water submerged floating tunnel [C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Strant Crossing. 2001: 581-590.
- [6] 项贻强, 晁春峰. 悬浮隧道管体及锚索耦合作用的涡激动力响应 [J]. 浙江大学学报, 2012, 46(3): 409-415. (XIANG Yiqiang, CHAO Chunfeng. Vortex-induced dynamic response for combined action of tube and cable of submerged floating tunnel [J]. Journal of Zhejiang University, 2012, 46(3): 409-415. (in Chinese))
- [7] 葛斐, 董满生, 惠磊, 等. 水中悬浮隧道锚索在波流场中的涡激动力响应 [J]. 工程力学, 2006, 23(S1): 217-221. (GE Fei, DONG Mansheng, HUI Lei, et al. Vortex-induced vibration of submerged floating tunnel tethers under wave and current effects [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(S1): 217-221. (in Chinese))
- [8] 罗刚, 石研玉, 申奇, 等. 水中悬浮隧道锚索横向动力特性分析 [J]. 长安大学学报, 2012, 32(3): 73-78. (LUO Gang, SHI Yanyu, SHEN Qi, et al. Lateral dynamic characteristics analysis for cable of submerged floating tunnel in water [J]. Journal of Chang'an University, 2012, 32(3): 73-78. (in Chinese))
- [9] 葛斐, 龙旭, 王雷, 等. 水中悬浮隧道管段锚索耦合模型涡激振动研究 [J]. 中国公路学报, 2009, 22(3): 83-88. (GE Fei, LONG Xu, WANG Lei, et al. Study of vortex-induced vibration of submerged floating tunnel tube-tether coupled model [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(3): 83-88. (in Chinese))
- [10] 孙胜男, 苏志彬. 随机激励作用下悬浮隧道锚索的振动响应 [J]. 工程力学, 2013, 30(3): 476-480. (SUN Shengnan, SU Zhibin. Vibration response of submerged floating tunnel tether subjected to random excitation [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(3): 476-480. (in Chinese))
- [11] 陈健云, 王变革, 孙胜男. 悬浮隧道锚索的涡激动力响应分析 [J]. 工程力学, 2007, 24(10): 186-192. (CHEN Jianyun, WANG Biange, SUN Shengnan. Analysis of vortex-induced dynamic response for the cable of submerged floating tunnel [J].

Engineering Mechanics, 2007, 24(10): 186-192. (in Chinese))

- [12] XIA Yong, FUJION Y. Auto-parametric vibration of a cable stayed-beam structure under random excitation [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2006(5): 279-286.
- [13] 宋军伟, 方坤河. 应用 Lyapunov 指数研究混凝土阶段特征的稳定判据 [J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(3): 129-133. (SONG Junwei, FANG Kunhe. Research on stability criterion of concrete feature in different stress stage with Lyapunov Exponent [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(3): 129-133. (in Chinese))
- [14] FAGGIANO B, LANDOLFO R, MAZZOLANI F M. Design and modelling aspects concerning the submerged floating tunnels: an application to the Messina strait crossing [C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Strait Crossing, 2001:1-5.
- [15] WOLF A, SWIFT J B, SWINNEY H L, et al. Determining Lyapunov exponents from a time series[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 1985, 16(3): 285-317.

(上接第 99 页)

- [15] FINGERSH L J, SIMMS D, HAND M, et al. Wind tunnel testing of NREL's unsteady aerodynamics experiment[J]. AIAA paper, 2001:35-46.
- [16] HAND M M, SIMMS D, FINGERSH L, et al. Unsteady aerodynamics experiment phase v: test configuration and available data campaigns[R]. National Renewable Energy Laboratory, 2001.
- [17] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA Journal, 2012, 32(8): 76-82.
- [18] JASAK H. Error analysis and estimation for the finite volume method with applications to fluid flows[D]. London: University of London, 1996.
- [19] 贺德馨. 风工程与工业空气动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006. (HE Dexin. Wind engineering and industrial aerodynamics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese))
- [20] GB. 建筑结构荷载规范[S]. 2002. (GB. Load code for the design of building structures[S]. 2002. (in Chinese))
- [21] JASAK H, BEAUDOIN M. OpenFOAM TURBO TOOLS: from general purpose CFD to turbomachinery simulations [C]// Proceedings of ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineer-ing Conference (AJK2011-FED). 2011.
- [22] JEONG J, HUSSAIN F. On the identification of a vortex[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1995, 285(69): 69-94.

(上接第 118 页)

- [14] 吴喆莹, 李扬, 江龙克, 等. 新型海洋勘探拖缆位置控制器的设计研究[C]//第八届军事海洋战略与发展论坛. 2011. (WU Zheyang, LI Yang, JIANG Longke, et al. Design and study of a new type of marine exploration towing position controller [C]//The Eighth Military Strategy and Development Forum. 2011. (in Chinese))
- [15] PABON J, TEIGEN O. Marine seismic streamers: U.S. Patent Application 13/004,419[P]. 2011-01-11.
- [16] 李日东, 鞠文斌, 皮桂英. 动态海浪、水深综合压力传感器的研究[J]. 今日科苑, 2010 (10): 21-21. (LI Ridong, JU Wenbin, PI Guiying. Research on dynamic waves, water depth integrated pressure sensor[J]. Modern Science, 2010 (10): 21-21. (in Chinese))
- [17] 刘涛, 张维竞, 马捷. 基于 Lyapunov 函数方法的海洋资源勘探拖缆水平振动的控制[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44 (10): 1460-1464. (LIU Tao, ZHANG Weijing, MA Jie. Control strategy for horizontal vibration of towed seismic cables via lyapunov method[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2010, 44(10): 1460-1464. (in Chinese))
- [18] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. (ZHOU Ming, SUN Shudong. Genetic algorithms: theory and applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999. (in Chinese))
- [19] 李扬, 张维竞. 基于 MATLAB 遗传算法工具箱的水鸟水翼控制研究[J]. 信息技术, 2013 (5): 24-27. (LI Yang, ZHANG Weijing. Study on the control of embedded bird's wings based on GA toolbox of MATLAB[J]. Information Technology, 2013 (5): 24-27. (in Chinese))
- [20] 雷英杰, 张善文, 李续武. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005. (LEI Yingjie, ZHANG Shanwen, LI Xuwu. MATLAB genetic algorithm toolbox and its application [M]. Xi'an: The Press of Xidian University, 2005. (in Chinese))