

# 海洋内波和洋流联合作用下 水中悬浮隧道的动力响应\*

田雪飞<sup>1,2</sup>, 董满生<sup>1,2</sup>, 逢焕平<sup>1</sup>, 林志<sup>2</sup>, 牛忠荣<sup>3</sup>

- (1. 合肥工业大学 交通运输工程学院, 合肥 230009;  
2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067;  
3. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009)

**摘要:** 基于势流函数理论建立层化海洋内波流场,采用 Morison 方法考虑内波和洋流联合作用力,建立悬浮隧道-流体相互作用非线性振动数学物理模型,运用 Galerkin(伽辽金)法数值求解振动微分方程,研究海洋内波和洋流共同作用下水中悬浮隧道的多模态动力响应行为.通过对拟建隧道实例的计算分析,结果表明:第一阶模态对位移响应贡献最大,在内波、洋流联合作用下,海洋内波的作用不可忽视,使第一、三阶模态的幅值都有大幅度增加,且反映出强非线性.研究成果为悬浮隧道结构荷载分析及复杂环境下海洋工程结构物所受环境荷载的研究提供有益探讨.

**关键词:** 水中悬浮隧道; 海洋内波; 洋流; 势流理论; Morison 公式

**中图分类号:** O327; O352      **文献标志码:** A

doi: 10.3879/j.issn.1000-0887.2014.01.008

## 引 言

继海底隧道、沉管隧道和大跨度桥梁后,水中悬浮隧道作为一种跨越被深水分隔的两岸之间交通运输的新型构筑物,以其能有效解决环境问题、降低工程造价和优越的抗震特性越来越受到工程界的关注.针对复杂多变海洋环境下隧道受力理论和试验研究,目前国内外已经取得了一定的研究成果.早在上个世纪,Remseth 等<sup>[1]</sup>和 Venkataramana 等<sup>[2]</sup>就采取数值模拟方法研究了隧道与流体相互作用下隧道的动力响应情况,并通过试验研究了洋流作用下悬浮隧道的振动行为.近年来,麦继婷等<sup>[3]</sup>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,得出了位移响应、动弯矩、动剪力与参数激励频率的关系.葛斐等<sup>[4]</sup>采用 Hamilton 原理推导得到了悬浮隧道管段和锚索的运动控制方程,在时间域内采用逐步积分法迭代求解,并采用 Airy 线性波理论和 Morison 方程计算悬浮隧道上的波浪力.另外,考虑到复杂的海洋环境 Perotti 等<sup>[5]</sup>研究了表面波浪和洋流对结构产生的动力响应,对隧道结构在高 Reynolds 数流体中流-

\* 收稿日期: 2013-09-26; 修订日期: 2013-11-07

**基金项目:** 交通运输部建设科技项目(2013318740050); 中国博士后科学基金特别项目(201003274); 中国博士后科学基金(20110490833)

**作者简介:** 田雪飞(1989—),女,湖北人,硕士生(E-mail: 1606602737@qq.com);  
董满生(1973—),男,安徽人,副教授,博士,硕士生导师(通讯作者. E-mail: dongmans@sina.com).

固耦合作用、锚固单元由于涡激响应发生大幅度摆动而发生危险的时间进行了相关探索。Jakobsen<sup>[6]</sup>也讨论了复杂海洋环境下水下悬浮隧道所面临的结构设计挑战,并对比分析了各种可行技术方案的优缺点。Kunisu<sup>[7]</sup>基于波浪衍射理论,采用边界元方法研究了悬浮隧道断面尺寸及形状变化时结构所受的波浪效应。基于大量理论研究,Zhang(张双寅)等<sup>[8]</sup>对千岛湖原型桥设计做了结构强度校核。基于现场波流和地震数据,并考虑沉船撞击等偶发荷载的作用,在不同工况下对原型桥的概念设计方案做结构强度分析和安全性校核,指导原型桥的细化设计。Kazeminezhad等<sup>[9]</sup>针对海洋波浪对海洋结构物的破坏机理,基于流体和沉积物耦合控制方程采用 Euler(欧拉)两相流模型研究海洋管道波浪冲刷,通过考虑阻力、升力以及附加质量力来研究相位之间动量交换。就其它荷载作用而言,Wahyuni等<sup>[10]</sup>研究了地震荷载下水中悬浮隧道的动力响应,考虑多点激励进行响应谱分析以及不同锚索配置研究,通过静态和动态分析得到了结构系统最优配置。Shahmardani等<sup>[11]</sup>通过评估移动荷载速率对跨中位移动态放大因子的影响研究了移动荷载下悬浮隧道动力响应,提出流体的惯性效应减小到临界状态时,增加速率可控制移动荷载效应对悬浮隧道的影响。

海洋内波是一种常见的海洋流态,以其巨大的剪切破坏力可能使海洋结构物发生整体推移或扭转。潮汐运动及海水大规模流动形成的洋流作用也会使悬浮隧道受涡激动力的影响发生垂直于来流方向的横向振动,其稳定性关系到悬浮隧道结构安全。由上可知,有关水中悬浮隧道在海洋内波、洋流联合作用下的响应特性的研究较少,本文将同时考虑内波荷载和洋流流场联合作用力,对悬浮隧道的运动特性和力学行为展开研究。

## 1 隧道-流体相互作用非线性振动数学物理模型

本文研究内波和洋流联合作用下悬浮隧道管体的动力响应,取一节管体为研究对象进行分析。为方便研究,现做以下假定:1) 悬浮隧道管段两端为锚索支撑,将隧道管体简化为简支梁结构,且其几何尺寸、刚度和材料性质沿长度方向不变;2) 内波、洋流沿同一方向传播,均垂直于悬浮隧道轴线,流体为不可压缩的理想流体,运动是无旋的;3) 洋流为均匀水平恒定流,且隧道振动对周围流场不产生影响。

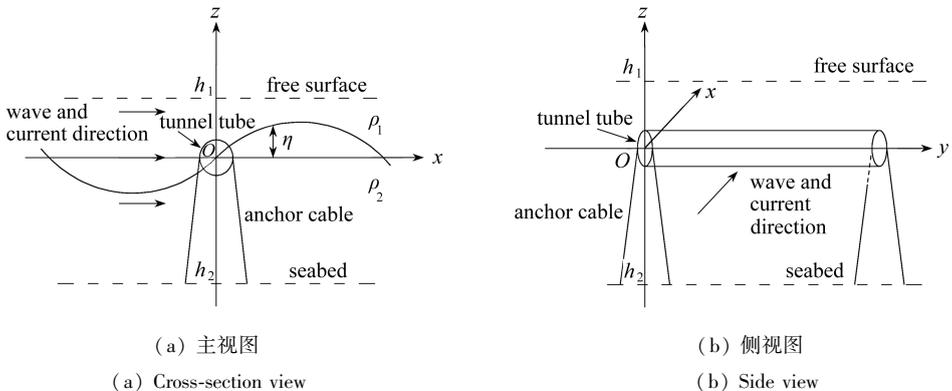


图1 简化模型

Fig.1 Simplified model of the submerged floating tunnel

由以上假定建立悬浮隧道受内波、洋流作用模型,系统坐标原点取于静水位,内波、洋流分布情况如图1,传播方向沿  $x$  轴正向, $y$  轴与隧道轴线重合, $z$  轴竖直向上且与隧道轴线在同一

竖直面内。

### 1.1 内波流场

相比于表面波,海洋内波是发生在密度稳定层化的海水内部的一种波动,且振幅一般要比表面波高大得多,从几十米甚至达到上百米;波长范围可从几百米至上百公里。波幅、流体质点的速度等相对水深、波长等其他特征尺度均为小量,运用微幅波理论使非线性边界条件线性化。尽管实际海水是连续分层的,但由于海水密度跃层位置及梯度千变万化,连续分层结构模型的应用将受到限制,本文采用代表海水密度分层强跃层的两层分层理论模型。

对于稳定层化的海水,上下层海水密度分别为  $\rho_1, \rho_2$ , 相对静水位水深分别为  $h_1, h_2$ , 如图 1. 引进上下层流体的流速势函数  $\phi_i(x, z, t)$  ( $i = 1, 2$ ), 由内波产生的流速场满足的不可压缩流体的连续性方程为

$$\frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_i}{\partial z^2} = 0. \quad (1)$$

自由界面方程  $z = \eta(x, t)$  边界条件为

1) 自由界面上

① 运动学条件

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial \phi_i}{\partial z} = 0 \quad (z = 0), \quad (2)$$

② 动力学条件

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial t} + g\eta = 0 \quad (z = 0); \quad (3)$$

2) 底面(包括海床和水面)

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial z} = 0 \quad (z = h_i). \quad (4)$$

对于正  $x$  方向传播的波,由 Airy 线性波理论选择流速势函数  $\phi$  为

$$\phi_i(x, z, t) = G(C_i e^{kz} + D_i e^{-kz}) e^{i(kx - \omega t)}, \quad (5)$$

式中,  $G$  为常数。 $\phi$  在  $x$  轴上具有周期性可知  $k = 2\pi/\lambda$ , 其中  $\lambda$  表示波长,下同。

利用底面边界条件,将式(5)化简得

$$\phi_i = G \operatorname{ch}(kz - kh_i) e^{i(kx - \omega t)}. \quad (6)$$

由自由界面的动力学条件式(3)可求得波面  $\eta$ , 即

$$\eta = - \frac{1}{g} \frac{\partial \phi_i}{\partial t} \Big|_{z=0} = i \frac{\omega}{g} G \operatorname{ch}(-kh_i) e^{i(kx - \omega t)} = i \frac{H}{2} e^{i(kx - \omega t)}, \quad (7)$$

式中,  $H$  为波高。从而得常数  $G$  为

$$G = \frac{Hg}{2\omega \operatorname{ch}(-kh_i)}. \quad (8)$$

将  $G$  值代入式(6)可得流速势函数  $\phi_i$  为

$$\phi_i = \frac{Hg \operatorname{ch}(kz - kh_i)}{2\omega \operatorname{ch}(-kh_i)} e^{i(kx - \omega t)}. \quad (9)$$

由此式可见流速势函数  $\phi_i$  表示为  $x, z, t$  的函数,其数值与波高  $H$ 、波数  $k$ 、水深  $h_i$ 、频率  $\omega$  等因素有关。

进而求得波浪运动中的速度场,设流体质点的速度分量为  $(u_i, w_i)$ , 则

$$u_i = \frac{\partial \phi_i}{\partial x} = -k \frac{Hgch(kz - kh_i)}{2\omega ch(-kh_i)} \sin(kx - \omega t), \quad (10)$$

$$w_i = \frac{\partial \phi_i}{\partial z} = k \frac{Hgsh(kz - kh_i)}{2\omega ch(-kh_i)} \cos(kx - \omega t). \quad (11)$$

由式(10)与式(11)得到加速度分量  $(a_{xi}, a_{zi})$  如下:

$$a_{xi} = \frac{\partial u_i}{\partial t} = gk \frac{Hch(kz - kh_i)}{2ch(-kh_i)} \cos(kx - \omega t), \quad (12)$$

$$a_{zi} = \frac{\partial w_i}{\partial t} = gk \frac{Hsh(kz - kh_i)}{2ch(-kh_i)} \sin(kx - \omega t). \quad (13)$$

在式(9)求解的基础上,式(10)~(13)确定了海洋二维周期内波流场。

## 1.2 洋流作用

海洋中的海水沿一定路径大规模流动形成的洋流,其大小与方向的分布影响着海洋工程结构物的受力与稳定安全,尤其是对细长构件,海流的运动将可能引起涡激振动,导致结构的共振响应,产生极大的动态作用力。

由于洋流运动相对缓慢和稳定,因而在考虑其作用时,将其视为定常流,当 Reynolds 数处于很大的一个范围内时,分离后的洋流形成紊动面在管体两侧交替地、周期性地产生漩涡,形成垂直于来流方向周期性地改变大小和方向的横向脉动力,悬浮隧道管体在洋流的作用下产生位移和振动。假定不考虑悬浮隧道振动对流场产生的影响,悬浮隧道在漩涡升力作用下发生横向振动,从管段主体两侧交替泄放漩涡的频率可用 Strouhal 数(通常取  $0.2^{[12]}$ )来确定,即

$$Sr = fD/V, \quad (14)$$

$$f = \omega_s/2\pi, \quad (15)$$

$$\omega_s = \frac{2\pi SrV}{D}, \quad (16)$$

其中,  $V$  为作用在管段上洋流相对流速,  $m/s$ ;  $D$  为隧道管段外直径,  $m$ ;  $f$  为泄放一对漩涡的频率,  $Hz$ ;  $\omega_s$  为尾流漩涡泄放角频率,  $rad/s$ 。

## 1.3 内波、洋流联合作用下悬浮隧道管体运动微分方程

悬浮隧道管体在内波、洋流联合作用下做顺流向和垂直于流向方向振动,根据上述条件建立悬浮隧道管段垂直流向的横向振动微分方程为

$$EI \frac{\partial^4 z}{\partial y^4} + C \frac{\partial z}{\partial t} + N_y \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} + m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = F_z(y, t), \quad (17)$$

式中,  $E$  为隧道管段材料弹性模量,  $MPa$ ;  $I$  为截面惯性矩,  $m^4$ ;  $C$  为粘滞阻尼系数,  $N \cdot s/m$ ;  $N_y$  为悬浮隧道轴力,  $N$ ;  $m$  为单位长度隧道管段的质量,  $kg/m$ ;  $F_z(y, t)$  为  $z$  方向单位长度悬浮隧道所受流体总作用力,  $N$ 。

悬浮隧道的轴力  $N_y$  为

$$N_y = \frac{EA}{2l} \int_0^l \left| \frac{\partial z}{\partial y} \right|^2 dy, \quad (18)$$

式中,  $l$  为悬浮隧道相邻支撑间的管段长度,  $m$ ;  $A$  为截面面积,  $m^2$ 。

## 2 数值求解

### 2.1 内波-洋流联合作用力

垂直于水流方向的流体联合作用力可分为两部分,一个是漩涡串泄放过程中产生的升力  $F_L(y,t)$ ,另一个是悬浮隧道在  $z$  方向运动所受流体阻尼力  $F_D(y,t)$ ,即

$$F_z(y,t) = F_L(y,t) - F_D(y,t), \quad (19)$$

其中单位长度的升力  $F_L(y,t)$  可近似表示为漩涡串频率的简谐函数:

$$F_L(y,t) = \frac{1}{2} \rho_i D (V + u_i)^2 C_L \cos \omega_s t \quad (i = 1, 2), \quad (20)$$

式中,  $C_L$  为升力系数,取  $C_L = 1.8^{[13]}$ 。

悬浮隧道管体直径  $D$  与内波波长比值远小于 0.15,则悬浮隧道在  $z$  方向运动受到的流体阻尼力可用 Morison 公式计算:

$$F_D(y,t) = \frac{1}{2} \rho_i C_D D w_i |w_i| + \rho_i C_M \frac{\pi D^2}{4} a_{zi} \quad (i = 1, 2), \quad (21)$$

式中,  $w_i$  为内波作用中上、下层流体质点速度竖直分量;  $a_{zi}$  为内波作用中上、下层流体质点加速度竖直分量;  $C_D$  和  $C_M$  分别为拖曳力系数和附加质量系数,取  $C_D = 0.6, C_M = 1.0^{[13]}$ 。

### 2.2 Galerkin 法

Tagata<sup>[14]</sup>由试验指出激励振动中其基本模态占主要地位,所以采用 Galerkin 法对前三阶振动模态化简,将上述偏微分方程(17)化成一组非线性常微分方程.首先用分离变量法将悬浮隧道横向振动位移  $z(y,t)$  表示成振型的级数形式,即

$$z(y,t) = \sum_{n=1}^3 z_n(t) \sin \frac{n\pi y}{l}. \quad (22)$$

将式(20)~(22)代入式(17),由 Galerkin 法得

$$\int_0^l R(y,t) \sin \frac{n\pi y}{l} dy = 0 \quad (n = 1, 2, 3), \quad (23)$$

式中,  $R(y,t)$  由下式表示:

$$R(y,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[ EI \left( \frac{n\pi}{l} \right)^4 z_n(t) + C \dot{z}_n(t) - \frac{EA}{4} \left( \frac{n\pi}{l} \right)^4 z_n^3(t) + m \ddot{z}_n(t) \right] \sin \frac{n\pi y}{l} + \frac{1}{2} \rho_i C_D D w_i |w_i| + \rho_i C_M \frac{\pi D^2}{4} a_{zi} - \frac{1}{2} \rho_i D (V + u_i)^2 C_L \cos \omega_s t. \quad (24)$$

式(23)代表悬浮隧道非线性振动常微分方程,化简整理得

$$\ddot{z}_n + \omega_n^2 z_n + \frac{C_n}{m} \dot{z}_n - \frac{EA}{4m} \left( \frac{n\pi}{l} \right)^4 z_n^3 = \frac{1}{lm} \left[ \rho_i D (V + u_i)^2 C_L \cos \omega_s t - \rho_i C_D D w_i |w_i| - \rho_i C_M \frac{\pi D^2}{2} a_{zi} \right] \int_0^l \sin \frac{n\pi y}{l} dy \quad (n = 1, 2, 3), \quad (25)$$

式中,  $\omega_n$  为悬浮隧道弯曲振动的第  $n$  阶固有频率,由结构动力学可知,  $\omega_n^2 = (n\pi/l)^4 (EI/m)$ ;  $C_n$  为对应  $n$  阶振型的粘滞阻尼系数,  $C_n = 2m\omega_n \xi_n$ ,其中  $\xi_n$  为结构无因次阻尼比。

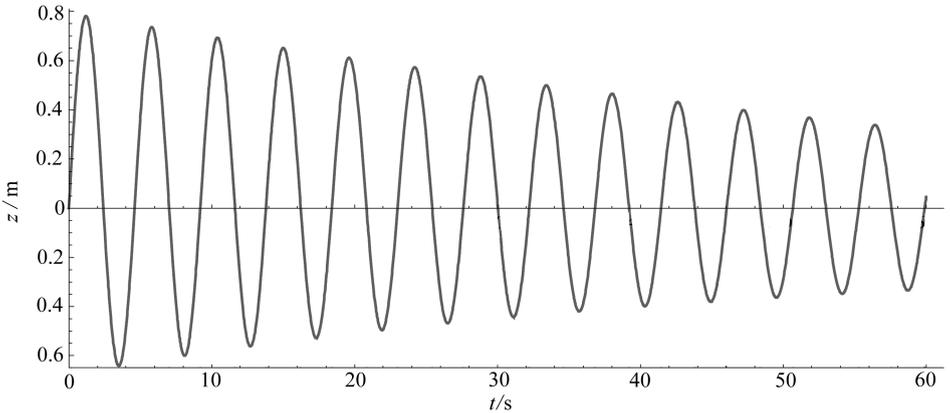
式(25)等号右边为内波和洋流联合作用产生的作用力,其大小主要取决于洋流的流速分布和内波运动要素,由此确定悬浮隧道非线性振动微分方程。

## 3 实例分析

鉴于目前世界上尚未有悬浮隧道的工程实例,数值模拟参数的选取参考相关文献[13],

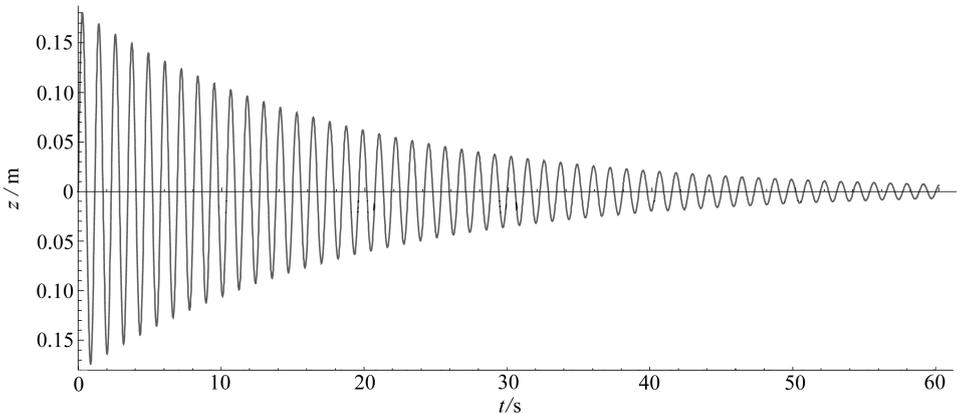
悬浮隧道相邻支撑间管段长度  $l = 500 \text{ m}$ , 悬浮隧道外直径  $D = 23 \text{ m}$ , 内直径  $d = 22 \text{ m}$ , 隧道管段结构弹性模量  $E = 3.6 \times 10^4 \text{ MPa}$ ; 隧道管段密度  $\rho_c = 1900 \text{ kg/m}^3$ ;  $\xi_n = 0.01$ ;  $V = 0.52 \text{ m/s}$ . 在此基础上给出较为符合实际海况的分层密度, 上层流体密度  $\rho_1 = 1021.9 \text{ kg/m}^3$ , 下层流体密度  $\rho_2 = 1025.0 \text{ kg/m}^3$ ,  $h_1 = 50 \text{ m}$ ,  $h_2 = -3000 \text{ m}$ .  $\lambda = 1000 \text{ m}$ ;  $T = 1200 \text{ s}$ ;  $H = 50 \text{ m}$ . 从理论上计算海洋内波流场, 分析内波和洋流作用下隧道响应特性, 得到不同工况下悬浮隧道管段跨中位移响应时程曲线, 图 2 和图 3 分别为洋流单独作用以及内波与洋流联合作用下悬浮隧道各模态位移响应时程曲线.

由图 2 和图 3 可以看出, 洋流单独作用与内波和洋流联合作用中, 隧道的一阶模态振动幅值均最大. 前者一阶模态最大振幅能达到  $0.784 \text{ m}$ , 约为二阶模态最大幅值的 4 倍; 后者一阶模态最大振幅能达到  $1.511 \text{ m}$ , 约为二阶模态最大幅值的 8 倍. 同时, 两者一阶、二阶模态的幅值均比三阶模态高出一个数量级以上, 这表明对悬浮隧道的位移响应起决定作用的是一、二阶模态, 其中以一阶模态对位移响应贡献最大, 所以从动位移角度分析, 三阶模态影响不大, 可以忽略不计.



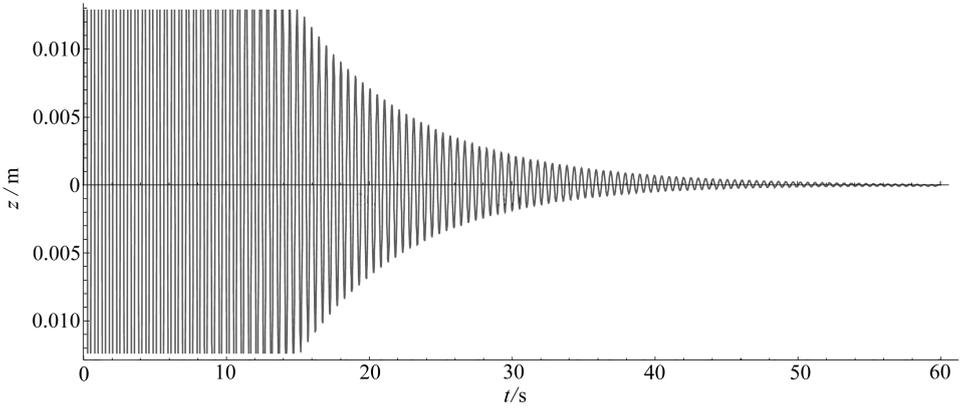
(a) 第一阶模态

(a) The first order mode



(b) 第二阶模态

(b) The second order mode

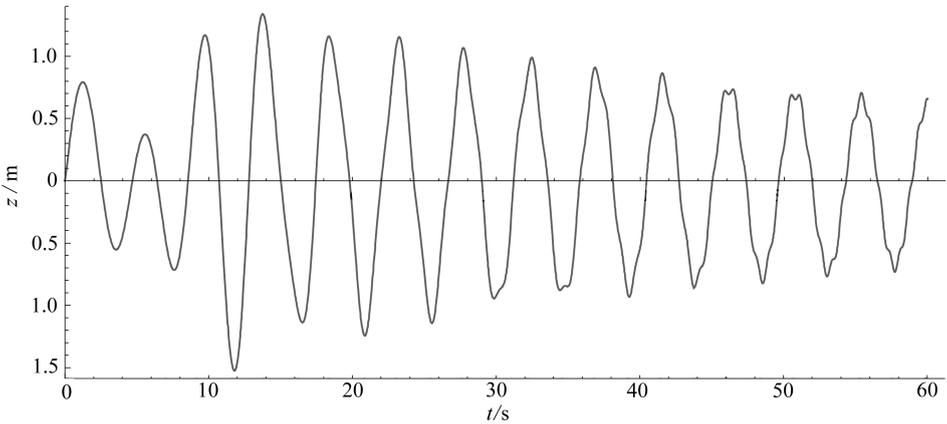


(c) 第三阶模态

(c) The third order mode

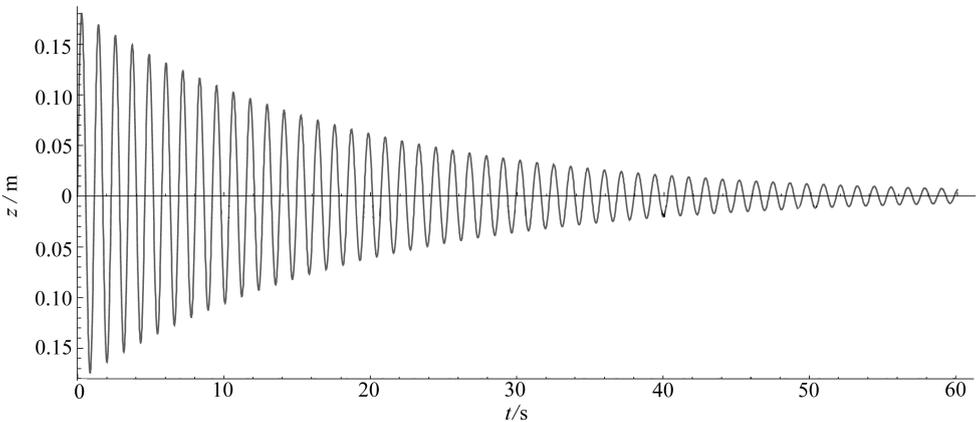
图2 洋流作用下各模态响应

Fig.2 Displacement response of each mode under the sea current effect



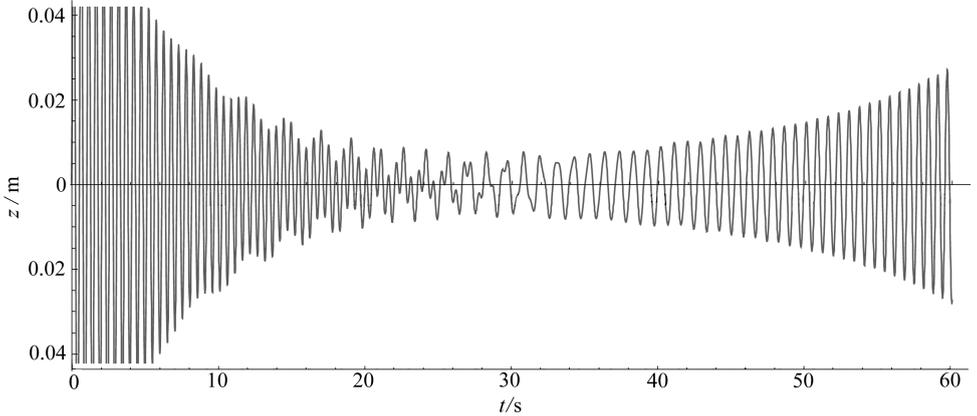
(a) 第一阶模态

(a) The first order mode



(b) 第二阶模态

(b) The second order mode



(c) 第三阶模态

(c) The third order mode

图3 内波、洋流联合作用下各模态响应

Fig.3 Displacement response of each mode under the combined internal wave and sea current effect

从图2(a)与图3(a)及图2(c)与图3(c)的比较可看出,相比于洋流单独作用,内波、洋流联合作用使第一、三阶模态的幅值都有所增加,其中三阶模态的幅值增加更为明显,最大增幅能达到三倍以上,一阶模态最大增幅能达到两倍以上,且使悬浮隧道振动响应值高达1.511 m。另外,图3(a)、3(c)中的响应曲线相对于图2(a)、2(c)呈现明显的不规律性,甚至出现复杂的混沌行为,如:图3(a)中0~7 s时间段内,曲线趋于递减,而7~14 s内反而出现递增的趋势,14 s以后总体呈现递减的趋势,但局部有不规则微幅振动;图3(c)中0~20 s内大致呈递减趋势,20~30 s时间段内出现不规则微幅波动,30 s以后反而规律性地递增。这表明内波的作用使悬浮隧道动力响应的非线性特征变得更为显著。

## 4 结 论

通过对内波和洋流流场特性的分析,建立了水中悬浮隧道在二者联合作用力下的非线性振动数学模型,利用Morison公式计算内波、洋流联合作用力,通过Galerkin法实现了数值求解,并以拟建隧道参考数据为实例进行了计算分析,得到如下结论:

1) 基于势流函数的线性波浪理论计算海洋内波流场,使内波呈现出层化海水内部区别于表面波及其他形式波的特性,更客观真实地模拟了海洋内波对水下悬浮隧道作用形式和特性,对复杂环境下实际海洋内波对海洋工程结构物的作用机理分析具有重要参考价值。

2) 采用Galerkin法对多个振动模态的响应值分析可以看出,在内波、洋流联合作用下,海洋内波的作用不可忽视,影响隧道在外荷载作用下的振动特性,显著改变了振动响应的幅值,同时使响应呈现强非线性。

3) 海洋内波、洋流作用下,一阶模态对位移响应贡献最大。与洋流单独作用相比,内波、洋流联合作用使第一、三阶模态的幅值都有所增加,反映出强非线性特性。

## 参考文献(References):

- [1] Remseth S, Leira B J, Okstad K M, Mathisen K M, Haukaas T. Dynamic response and fluid/

- structure interaction of submerged floating tunnels[J]. *Computer & Structures*, 1999, **72**(4/5): 659-685.
- [2] Venkataramana K, Yoshihara S, Toyoda S, Aikou Y. Current-induced vibrations of submerged floating tunnels[C]//*The 6th International Offshore and Polar Engineering Conference*. Vol 2. Los Angeles, 1996: 111-118.
- [3] 麦继婷, 罗忠贤, 关宝树. 波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 Ji-ting, LUO Zhong-xian, GUAN Bao-shu. 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))
- [4] 葛斐, 惠磊, 洪友士. 波浪场中水中悬浮隧道动力响应的研究[J]. 工程力学, 2008, **25**(6): 188-194.(GE Fei, HUI Lei, HONG You-shi. Research on dynamic response of submerged floating tunnel to regular wave forces[J]. *Engineering Mechanics*, 2008, **25**(6): 188-194.(in Chinese))
- [5] Perotti F, Barbella G, Pilato M D. The dynamic behaviour of Archimede's Bridges: numerical simulation and design implications[J]. *Procedia Engineering*, 2010, **4**: 91-98.
- [6] Jakobsen B. Design of the submerged floating tunnel operating under various conditions[J]. *Procedia Engineering*, 2010, **4**: 71-79.
- [7] Kunisu H. Evaluation of wave force acting on submerged floating tunnels[J]. *Procedia Engineering*, 2010, **4**: 99-105.
- [8] ZHANG Shuang-yin, WANG Lei, HONG You-shi. Vibration behaviour and response to an accidental collision of SFT prototype in Qiandao lake(China)[J]. *Procedia Engineering*, 2010, **4**: 189-197.
- [9] Kazeminezhad M H, Yeganeh-Bakhtiary A, Etemad-Shahidi A, Baas J H. Two-phase simulation of wave-induced tunnel scour beneath marine pipelines[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, **138**(6): 517-529.
- [10] Wahyuni E, Budiman E, Raka I G P. Dynamic behaviour of submerged floating tunnels under seismic loadings with different cable configurations[J]. *IPTEK, The Journal for Technology and Science*, 2012, **23**(2): 82-86.
- [11] Shahmardani M, Mirzapour J, Gheytratmand C, Tariverdilo S. Moving load analysis of submerged floating tunnels[J]. *International Journal of Engineering*, 2012, **25**(1): 17-24.
- [12] 秦银刚, 周晓军. 洋流作用下悬浮隧道的混沌行为分析[J]. 铁道学报, 2010, **32**(4): 146-150.(QIN Yin-gang, ZHOU Xiao-jun. Analysis on chaotic behavior of submerged floating tunnel under ocean currents effect[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2010, **32**(4): 146-150.(in Chinese))
- [13] 麦继婷. 波流作用下悬浮隧道的响应研究[D]. 硕士学位论文. 成都: 西南交通大学, 2005.(MAI Ji-ting. The study on responses of a submerged floating tunnel subjected to the wave and current[D]. Master Thesis. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.(in Chinese))
- [14] Tagata G. Harmonically forced, finite amplitude vibration of a string[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1977, **51**(4): 483-492.

# Dynamic Responses of the Submerged Floating Tunnel Under Combined Internal Wave and Sea Current Effect

TIAN Xue-fei<sup>1,2</sup>, DONG Man-sheng<sup>1,2</sup>, PANG Huan-ping<sup>1</sup>,  
LIN Zhi<sup>2</sup>, NIU Zhong-rong<sup>3</sup>

(1. *School of Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, P.R.China;*

2. *China Merchants Chongqing Communications Research & Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, P.R.China;*

3. *School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, P.R.China)*

**Abstract:** The stratified ocean internal wave flow field was established based on the potential flow function theory. The joint force by internal wave and sea current was considered with the Morison method to establish a nonlinear vibration mathematical-physical model of tunnel-fluid interaction. The corresponding vibration differential equations were solved numerically with the Galerkin method to study the multimodal dynamic response behaviors of the submerged floating tunnel under combined internal wave and sea current effect. According to the calculation and analysis of a practical example on the proposed tunnel, the first order mode contributed most of the displacement response. The effect of internal wave on the the joint force by internal wave and sea current could not be ignored, it resulted in a substantial increase of the response amplitudes of the first and third order modes and made the responses strongly nonlinear. The research results provide helpful discussions for the structural load analysis of submerged floating tunnels and for the study on environmental loads upon ocean engineering structures in a complex environment.

**Key words:** submerged floating tunnel; ocean internal wave; sea current; potential flow theory; Morison formula

**Foundation item:** China Postdoctoral Science Foundation(20110490833)