China Journal of Highway and Transport

报

文章编号:1001-7372(2009)03-0083-06

# 水中悬浮隧道管段锚索耦合模型涡激振动研究

## 葛 斐,龙 旭,王 雷,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 100190)

摘要:为了分析水中悬浮隧道在水流作用下的动力响应,通过 Hamilton 原理推导得到了悬浮隧道 管段和锚索的运动控制方程;同时引入锚索横向和轴向变形之间的耦合作用,建立了悬浮隧道的动 力响应模型,并考虑锚索发生顺流向涡激振动的影响,在时间域内求解运动控制方程。计算结果表 明:若锚索长细比很大,则锚索横向和轴向变形之间的耦合作用不可忽略;锚索发生顺流向涡激振 动时,结构的横荡和横摇响应幅值增大,但垂荡响应基本不受其影响。 关键词:隧道工程;水中悬浮隧道;Hamilton 原理;动力响应;涡激振动 中图分类号:U459.5 文献标志码:A

## Study of Vortex-induced Vibration of Submerged Floating Tunnel Tube-tether Coupled Model

GE Fei, LONG Xu, WANG Lei, HONG You-shi (State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract : In order to analyze dynamic response of submerged floating tunnel (SFT) in flow field under vortex-induced vibration, equations of motion control of submerged floating tunnel tubetether were derived by Hamilton variation principle. Considering nonlinear coupling effect between the axial and transverse vibrations of tether, the dynamic response model of submerged floating tunnel was presented. Considering the influence of in-line vortex-induced vibration of tether, equations of motion control in time domain were solved. The calculated results show that if the tether slenderness ratio is large enough, the coupling effect between axial and transversal vibrations of tether can not be ignored. When the in-line vortex-induced vibration of tether occurs, the responses of SFT in surge and roll directions increase obviously, but the heave response is almost invariant.

**Key words :** tunnel engineering ; submerged floating tunnel ; Hamilton variation principle ; dynamic response ; vortex-induced vibration

0 引 言

水中悬浮隧道(Submerged Floating Tunnel, SFT),是一种悬浮在水面以下一定深度的管状结 构,通过重力、浮力以及支撑系统达到平衡,且利用 支撑系统维持悬浮隧道的稳定性<sup>[1]</sup>。当悬浮隧道所 受浮力大于重力时,则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。

收稿日期:2008-08-11

基金项目:国家自然科学基金重点项目(10532070);中国科学院知识创新工程重要方向项目(NJCX2-YW-L07); 非线性力学国家重点实验室青年基金项目 作者简介:葛 斐(1980),男,安徽宿州人,助理研究员,理学博士,E-mail:gefei@imech.ac.cn。

由于悬浮在水中,SFT 有一定的运动自由度, 在波浪水流等环境载荷的作用下,SFT 的动力行为 必须重点考虑<sup>[2]</sup>。Brancaleoni 等<sup>[3]</sup>最早提出环境 载荷下的 SFT 工程计算程序,并分析了不同锚固方 式下 SFT 的动力响应。Remseth 等<sup>[4]</sup>分析风浪作 用下 SFT 的全局动态响应,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。Kanie 等<sup>[5]</sup>计算分析了悬浮隧道在规则波作 用下的动力响应,研究不同的波浪要素对 SFT 动力 响应的影响。已有的这些研究中,把锚索对 SFT 运 动的约束用无质量的线性弹簧替代,不考虑锚索上 的流体力作用,锚索的运动和变形被忽略。这种假 设在锚索不发生涡激振动时近似成立,而涡激振动 是锚索发生疲劳破坏的主要原因之一,研究 SFT 在 流场中的动力响应时需要考虑锚索的运动和变形。 麦继婷<sup>[6]</sup>、葛斐等<sup>[7]</sup>的研究中,把锚索简化为两端简 支的伯努利-欧拉梁,并把隧道管段的运动作为外激 励引入到锚索模型的边界条件中,计算分析了锚索 的涡激动力响应。本文中通过 Hamilton 原理推导 得到了 SFT 管段和锚索耦合的运动控制方程,并考 虑当锚索的长细比很大时(不小于 10<sup>2</sup> 量级),锚索 横向和轴向运动之间的耦合作用,建立了锚索2个 方向运动的耦合模型。

### 1 运动方程

7

84

SFT的跨度可达十几千米,由很多相同的管段 连接而成,为了研究管段与锚索之间的耦合作用,本 文中取其中一节管段,建立二维模型。SFT的锚索 和海洋平台张力腿很相似,锚索顶端受到 SFT 管段 的拉力,类似于张力腿,SFT 锚索也可由空心圆截 面钢管构成,因此在本文中把锚索简化为受张力的 空心圆截面梁,梁的下端与地基弹性连接,上端与 SFT 管段铰接。SFT 管段的弯曲刚度比锚索的弯 曲刚度大 2 个量级以上,因此把 SFT 管段简化为轴 对称的刚体,如图 1 所示。考虑结构在平面内的二 维运动,重点分析锚索发生顺流向涡激振动对 SFT 动力响应的影响。

建立结构的 Lagrange 坐标,坐标原点固定在锚 索底端。在锚索的运动过程中,相比于转动来讲,变 形是个小量<sup>[8]</sup>,如图 2 所示,由此可写出锚索的位移 场表达式

$$\begin{array}{c} u_{1}(z,t) = v(z,t) \\ u_{2}(z,t) = 0 \\ u_{3}(x,z,t) = u(z,t) - X \frac{\partial v(z,t)}{\partial z} \end{array} \}$$
(1)





式中: $u_1$ 、 $u_2$ 、 $u_3$ 分别为x、y、z方向上的位移;u、v分 别为锚索轴线上的点在z、x方向上的位移;X为锚 索任意截面上一点和轴线之间的垂直距离。由于锚 索简化为一根轴对称的梁,锚索轴线上点的位移u、 v只和坐标z以及时间t有关。

SFT 管段 x、y、z 方向上的位移 uu、u2、u3 由 2 个部分构成[式(2)]:一部分为由于锚索顶端的运动 而引起的平动位移 u(L,t)、v(L,t);另一部分为 SFT 管段绕 C点发生转动的位移,如图 3 所示。

$$u_{t1} = v(L, t) + \frac{D}{2}\sin u_{t2} = 0$$

$$u_{t3} = u(L, t) + \frac{D}{2}(\cos - 1)$$
(2)

式中:D为SFT管段的截面直径。

图 3 中 *L* 为锚索未变形前的长度,所有质点的 位移都是相对于初始构型时的位移。

根据结构的位移场,可以得到结构的势能及动 能表达式。锚索的势能包括锚索的应变能以及重力





Fig.3 Displacements of Tunnel Tube 势能,在锚索的运动过程中,锚索的变形采用 Green

$$xx = \frac{\partial u_1}{\partial x}, \quad yy = 0, \quad zz = \frac{\partial u_3}{\partial z} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_1}{\partial z} \right)^2$$

$$xy = 0, \quad yz = 0, \quad xz = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_1}{\partial z} + \frac{\partial u_3}{\partial x} \right)$$
(3)

将式(3)代入锚索的位移场式(1),并忽略泊松 比的影响,得到锚索的应变能为

$$E_{\text{strain}} = \frac{1}{2} \sum_{V_0} ij \, ij \, dV_0 = \frac{E}{2} \sum_{z A_0} (u - Xv + \frac{1}{2}v^2)^2 \, dA_0 \, dz = \frac{E}{2} \sum_{0 A_0}^{L} (u^2 - 2uv X + v^2 u + X^2 v^2 - v^2 Xv + \frac{1}{4}v^4) \, dA_0 \, dz$$
(4)

式中:*V*<sup>0</sup>为锚索在初始构型时的体积;*A*<sup>0</sup>为锚索截 面积;*E*为锚索弹性模量。

由于锚索截面具有轴对称性质,被积函数中关 于 x的奇次项对  $A_0$  积分后都等于 0,只剩下 x 的 偶次项,而  $x^2$  对截面  $A_0$  的积分等于截面惯性矩  $h_0$ 。锚索的重力势能为

$$E_{\text{gra}} = -\sum_{z} (f_{Af} gu - gu_{3} dA_{0}) dz =$$

$$- \int_{0}^{L} [f_{Af} gu - g(u - Xv) dA_{0}] dz =$$

$$- \int_{0}^{L} [(f_{Af} g - A_{0} g) u] dz$$
(5)

式中:为锚索的密度; f为流体密度;  $A_f$ 为单位长度的锚索排开液体的体积,  $A_f = r_{outer}^2$ ,  $r_{outer}$ 为锚索 截面的外半径。

锚索与地基之间的连接弹簧在锚索运动过程中 的变形能为

$$E_{\rm spring} = \frac{1}{2} k^2 \tag{6}$$

式中:k为弹簧常数; 为弹簧的扭转角。由于锚索 的小变形假设,扭转角 可以近似为 v (0, t) 。

SFT 管段受到浮力和重力的作用,其势能可以 表示为

$$E_{\text{tunnelP}} = -N_0 [u(L, t) + \frac{D}{2} (\cos - 1)] \quad (7)$$

式中:N<sub>0</sub>为作用于管段的剩余浮力,其值为浮力与 重力之差。

锚索的动能为

F

$$\begin{aligned} & \text{fether} = \frac{1}{2} \int_{0}^{L} \int_{A_0} \left[ (\dot{u}_1^2 + \dot{u}_3^2) \right] dA_0 dz = \\ & = \frac{1}{2} \int_{0}^{L} \int_{A_0} \left[ \dot{v}^2 + (\dot{u} - X\dot{v})^2 \right] dA_0 dz = \\ & = \frac{1}{2} \int_{0}^{L} \int_{A_0} (\dot{v}^2 + \dot{u}^2 - 2\dot{u}X\dot{v} + X^2\dot{v}^2) dA_0 dz = \frac{1}{2} \int_{0}^{L} \int_{0} \int_{0} \int_{0} \dot{v}^2 + A_0 (\dot{v}^2 + \dot{u}^2) \int_{0} dz \end{aligned}$$

$$(8)$$

SFT 管段的动能包括平动动能和转动动能,可以表示为

$$E_{\text{tunnel K}} = \frac{1}{2} M_{\text{tunnel }} \{ [\dot{v}(L, t) + \frac{D}{2} \cos J^2 + [\dot{u}(L, t) - \frac{D}{2} \sin J^2 ] + \frac{1}{2} J_{\text{CM}}^{2} \}$$
(9)

式中: M<sub>tunnel</sub>为 SFT 管段的质量; J<sub>CM</sub>为 SFT 管段关于质心的质量惯性矩。

结构的模型有 3 个广义自由度,分别是 x、z 和 ,对应的广义力分别是 f<sub>x</sub>(z,t)、f<sub>z</sub>(z,t)和 f (, t),因此外力虚功 W 的表达式为

$$W = \int_{0}^{L} \left[ \int_{x}^{\text{tether}} (z, t) v + \int_{z}^{\text{tether}} (z, t) u \right] dz + \int_{x}^{\text{tunnel}} (t) u(L, t) + \int_{z}^{\text{tunnel}} (t) v(L, t) + \int_{z}^{t} (-, t) (10)$$

对于完整系统, Hamilton 原理的表达式为

$$\int_{t_1}^{t_2} (T + W) \, \mathrm{d}t = 0 \tag{11}$$

式中: *T* 为系统的动能; W 为外力(包含有势力)做的虚功。运用分部积分法可以得到 SFT 管段和锚 索的耦合运动方程为

$$A_{0} \ddot{v} - (I_{0} \ddot{v}) - [EA_{0} (u + \frac{1}{2} v^{2}) v] + (EI_{0} v) = \int_{x}^{tether} A_{0} \ddot{u} - [EA_{0} (u + \frac{1}{2} v^{2})] - (fA_{f} g - A_{0} g) = \int_{z}^{tether} J_{c} + \frac{1}{2} M_{tunnel} D[\ddot{v}(L, t) \cos s - \ddot{u}(L, t) \sin s] + \frac{D}{2} N_{0} \sin s = f$$

$$(12)$$

85

边界条件为

86

$$u(0, t) = 0$$

$$v(0, t) = 0$$

$$- I_0 \vec{v} (L, t) - EA_0 [u (L, t) + \frac{1}{2} v^2 (L, t)] \cdot$$

$$v (L, t) + [EI_0 v (L, t)] -$$

$$M_{\text{tunnel}} \vec{v} (L, t) - \frac{1}{2} M_{\text{tunnel}} D(\ddot{\text{cos}} -$$

$$\overset{\cdot}{}^2 \sin ) + f_x^{\text{tunnel}} = 0$$
(13)

$$- EA_0 \left[ u (L, t) + \frac{1}{2} v^2 (L, t) \right] - M_{\text{tunnel}} \cdot \\ \ddot{u}(L, t) + \frac{1}{2} M_{\text{tunnel}} D(\ddot{\sin} + \dot{2}\cos) + \\ N_0 + f_z^{\text{tunnel}} = 0$$

$$EI_0 v (0, t) - kv (0, t) = 0$$
  

$$EI_0 v (L, t) = 0$$

式中: $J_c$  为管段关于 c 点的惯性矩; 变量右上方的 撇号代表对坐标 z 求导, 变量上方的点号代表对时 间 t 求导。式(13)中第 1 和第 2 个边界条件说明锚 索底端(x=0, z=0)的横向和轴向位移都被约束; 第 3 和第 4 个边界条件反映了锚索顶端(锚索与 SFT 管段的连接点)处力的平衡条件; 第 5 个边界 条件是锚索底端的弯矩平衡条件; 最后 1 个边界条 件说明锚索顶端不能承受弯矩的作用。

引入量纲一的变量 *珔*= w/L, *珔*= w/L, *ফ*= z/L, *珋*= t,其中 为锚索的特征圆频率。则锚索的动力 学方程可用量纲一的量表示为

$$\begin{array}{c}
\overline{H} \frac{\partial \overline{H}}{\partial \overline{H}} - \frac{\partial}{\partial \overline{H}} J \frac{\partial^3 \overline{H}}{\partial^2 t \partial \overline{H}} - \frac{\partial}{\partial \overline{H}} s^2 l \frac{\partial \overline{H}}{\partial \overline{H}} + \\
\frac{1}{2} (\frac{\partial \overline{H}}{\partial \overline{H}} 2 J \frac{\partial \overline{H}}{\partial \overline{H}} + \frac{\partial^2 \overline{H}}{\partial \overline{H}} = \overline{H} \\
\overline{H} & \overline{H} & \overline{H} & \overline{H} \\
\overline{H} & \overline{H} & \overline{H} & \overline{H} & \overline{H} \\
\end{array}$$
(14)

$$\overline{m} - \overline{m}^{s'} - \overline{m}^{s''} - \overline{m}^{s''} - 2 (\overline{m}^{s''}) = \underline{m}$$
  
从式(14)可以看到,方程中耦合项的系数相同,

从式(14)可以看到,力程中稱言项的系数相同都是 s<sup>2</sup>,其表达式为

$$s^{2} = \frac{L^{2}}{I_{0}/A_{0}}$$
(15)

式中:s为锚索长度与其截面回转半径的比值,即锚 索的长细比。由此可知,锚索运动过程中,耦合项对 其运动的影响程度与锚索的长细比有关,当锚索长 细比 s很大时,方程中耦合项的作用不可忽略,当锚 索的长细比 s很小时,耦合项的影响可以忽略。

### 2 流体作用力

作用于单位长度锚索上的流体力可以用 Morison 方程计算<sup>(9)</sup>

$$F(z, t) = -C_{A f}A_{f}\dot{R}^{n} + C_{M f}A_{f}\dot{U}^{n} + C_{D f}r_{outer}V_{rel}^{n}|V_{rel}^{n}|$$
(16)

式中:上标 n 代表变量对应于锚索法向的分量;  $\vec{R}$  为 锚索的加速度;  $\vec{U}$  为流体质点的加速度;  $V_{rel}$  为流体 和锚索之间的相对速度;  $C_A$  为附加质量系数;  $C_M$  为 质量系数;  $C_b$  为拖曳系数。式(16) 中等号右端第 1 项是附加质量的作用力, 第 2 项是流体的惯性力, 最 后 1 项代表流体的拖曳力。锚索的速度和加速度向 量为

$$\dot{\mathbf{R}} = \dot{v}\mathbf{i} + \dot{u}\mathbf{k}$$
,  $\ddot{\mathbf{R}} = \dot{v}\mathbf{i} + \ddot{u}\mathbf{k}$  (17)

式中:i、k分别为x、z方向上的单位向量。

$$V_{rel} = (U_C - v) i - uk$$
 (18)

式中 : Uc 为水流速度。向量在锚索法向的分量可以 用向量与锚索切向量 1 的 2 次叉乘得到,即

$$\vec{R}^{n} = |1 \times \vec{R} \times l| , V_{rel}^{n} = |1 \times V_{rel} \times l|$$
(19)

在锚索的变形过程中,假定锚索的小倾角假设 始终满足,即有 v ≪1 始终成立,则其切向量可以表 示为

$$l = v i + k \tag{20}$$

把式(17)~(20)代入式(16),得到作用于单位 长度锚索上的流体力为

$$\begin{cases}
f_{x}^{\text{tether}}(z,t) = -C_{A} f A_{f}(\vec{v} - \vec{u}\vec{v}) + \\
C_{D} f r_{\text{outer}}(U_{C} - \vec{v} + \vec{u}\vec{v}) | U_{C} - \vec{v} + \vec{u}\vec{v} | \\
f_{z}^{\text{tether}}(z,t) = 0
\end{cases}$$
(21)

将 SFT 管段的位移式(2) 对时间求导得到管段 的速度和加速度表达式,代入 Morison 方程式(16), 得到作用在管段上的流体力表达式为

$$f_{x}^{\text{tunnel}} = f_{x}^{\text{tunnel}} = -\frac{1}{4} C_{A \text{ f}} D^{2} [\vec{v}(L, t) + \frac{D}{2} \cos s - \frac{D}{2} c_{s} \sin s + \frac{1}{2} C_{D \text{ f}} D[U_{C} - \frac{D}{2} \cos s - \frac{D}{2} c_{s} \sin s - \frac{D}{2} c_{s} \cos s - \frac{D}{2} c_{s} \sin s - \frac{D}{2} c_{s} \cos s - \frac{D}{2} c_{s} \sin s - \frac{D}{2} c_{s} \cos s - \frac{D}{$$

#### 3 算例分析

时域内求解 SFT 管段和锚索耦合动力学方程 组式(12),采用具有二阶精度的中心差分法。目前 世界上还没有建成一座 SFT,因此计算实例只能参考国外拟建 SFT 的设计参数<sup>[10]</sup>,具体物理参数如表1所示。对锚索进行离散,单元长度 z=0.1 m,此时经检验,当时间步长 t小于10<sup>-5</sup> s时,计算结果是收敛的。

表1 数值计算实例的物理参数

 Tab. 1
 Physical Parameters for Numerical Example

SFT 外径 Do/m	23.0
SFT 内径 D <sub>i</sub> / m	21.0
SFT 管段长度 Lt/m	93.2
淹没深度 h/m	30.0
管段重力 G/N	2.631 ×10 <sup>8</sup>
锚索外径 do/m	1.117 6
锚索壁厚 tw/m	0.038
锚索长度 L/m	260
锚索质量密度 /(kg ·m <sup>-3</sup> )	7 800
锚索弹性模量 E/ Pa	2.04 ×10 <sup>11</sup>
 地基弹簧常数 ㎏ [kN ⋅m ⋅( ) <sup>- 1</sup> ]	100

SFT 每段管段长 93.2 m,有 4 对锚索对称约 束,每对锚索有 2 根,管段剩余浮力 1.134 ×10<sup>5</sup> kN,平均分配到各根锚索,每根锚索中的预张力为 14 175 kN。为了在本文模型中保持锚索中的预张 力与设计值相同,管段的质量和浮力只取其设计值 的 1/8。模型中仅考虑了1 根锚索对 SFT 管段的约 束作用,实际上由于锚索的对称约束作用,SFT 管 段的转动角要小于本文的计算值。

随着来流速度的不同,锚索可能会发生顺流向 的涡激振动或者横向的涡激振动,而涡激振动使锚 索在原有受力基础上叠加周期性载荷,有可能形成 高平均应力的疲劳过程,对结构的安全性有重要的 影响。在已有的研究中,主要针对横向涡激振动,而 忽略顺流向涡激振动对结构安全的影响。根据文献 [7],由于 SFT 和锚索振动之间的耦合作用,顺流向 涡激振动的影响在 SFT 的设计中必须考虑。

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。作用于锚索上的脉动拖曳力可以表示为

$$F_{\rm D} = \frac{1}{2} d_{\rm o} U_{\rm C}^2 C_{\rm D} \cos(2 s t)$$
(22)

式中:  $C_0$  为脉动拖曳力系数,可以取为 0.2; 。为涡 串频率。当减缩速度  $V_r = U_c/(f d_o) = 3.2$  时(f )锚索一阶横荡自振频率),顺流向涡激振动的振幅达 到最大值,此时 SFT 管段和锚索的动力响应时间历 程曲线如图 4 所示。





Fig. 4 Dynamic Responses of SFT Under Occurrence of In-line Vortex-induced Vibration of Tether

均匀流作用下,SFT的锚索发生了顺流向的涡 激振动,锚索跨中点处的横荡频率等于其自振频率, 横荡位移最大值为0.185 m。由于有高阶振动模态 的激发,锚索的横荡振动曲线变得不光滑,出现了不 规则的"拍",见图4(b)。锚索跨中点的横荡功率谱 曲线[图5(a)]中,除了一阶自振频率附近的峰值 外,频率为0.385 Hz的模态也被激发,振动频率等 于垂荡一阶自振频率,说明锚索的横荡和垂荡运动 之间存在着耦合作用。图4(c)中锚索的垂荡具有 良好的周期性,振动频率等于其一阶自振频率,垂荡 位移最大值为0.279 m。在锚索涡激振动的影响 下,SFT 管段的横摇高阶模态被激发,振动曲线变 得不光滑。

若不考虑顺流向涡激振动的影响,SFT 管段和 锚索的动力响应如图 6 所示。由于水的阻尼力作 用,结构的横荡振幅逐渐减小,趋于一个稳定值,锚





索跨中点的横荡时间历程[图 6(b)]和功率谱曲线 [图 6(d)]显示出,锚索的一阶横荡自振模态被激 发,但是由于水的阻尼作用,衰减很快。横荡和垂荡 之间的耦合作用,使频率为0.385 Hz 的振动模态被 激发,该模态的振幅很小,衰减很慢。与图 4(b) 对 比可知,锚索的顺流向涡激振动对其横荡振幅影响 较大。锚索的垂荡仍然呈现出良好的周期性,振动 频率等于其自振频率,最大垂荡振幅与图 4(c)基本 一致,说明顺流向涡激振动对锚索的轴向振动基本 没有影响。对比图 4(a)和图 6(a)可见,SFT 管段的 横摇振动曲线变得光滑,高阶模态消失,说明锚索的 顺流向涡激振动会激发 SFT 管段的横摇高阶振动 模态,使得管段的横摇响应幅值增加。

#### 4 结 语

2

(1) 在锚索动力响应过程中,轴向和横向振动的 耦合作用对其运动的影响与锚索长细比。有关,若 长细比很大(不小于 10<sup>2</sup> 的量级),需要考虑耦合项 的影响。

(2) 锚索的顺流向涡激振动对结构的横荡和横 摇响应有明显的影响,对结构的垂荡基本没有影响, 若不考虑锚索的顺流向涡激振动,会低估结构的横 荡及横摇响应幅值。

(3) 本文中仅考虑了锚索发生顺流向涡激振动







的情况,锚索的横向涡激振动对结构动力响应的影 响是有待进一步研究的问题。

## 参考文献:

#### **References :**

[1] 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.

(下转第100页)

- [3] KILPELAINEN M, SUMMALA H. Effects of Weather and Weather Forecasts on Driver Behaviour [J]. Transportation Research Part F, 2007, 10 (4): 288-299.
- [4] ERKEA, SACBERGF, HAGMAN R. Effects of Route Guidance Variable Message Signs (VMS) on Driver Behavior[J]. Transportation Research Part F, 2007, 10(6):447-457.
- [5] 干宏程,孙立军,陈建阳.提供交通信息条件下的途中 改道行为研究[J].同济大学学报:自然科学版,2006, 34(11):1484-1488.

GAN Hong-cheng, SUN Li-jun, CHEN Jian-yang. Study on Traveler Behavior Under Influence of Advanced Traveler Information System [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34 (11): 1484-1488.

[6] 张存保,杨晓光,严新平.交通信息对驾驶员选择行为的影响研究[J].交通与计算机,2004,22(5):31-34.
ZHANG Currbao, YANG Xiao-guang, YAN Xirrping. Study on Traveler Choice Behavior Under Information [J]. Transportation and Computer, 2004,22

#### (上接第 88 页)

HUANG Guo-jun, WU Ying-xiang, HONG You-shi. Transportation of Crossing Waterways via Archimedes Bridge[J]. Ship Building of China, 2002, 43 (S) : 13-18.

- [2] 董满生,葛 斐,惠 磊,等.水中悬浮隧道研究进展
  [J].中国公路学报,2007,20(4):101-107.
  DONG Marrsheng, GE Fei, HUI Lei, et al. Research
  Progress in Submerged Floating Tunnels [J]. China
  Journal of Highway and Transport,2007,20(4):101-107.
- [3] BRANCAL EONI F, CASTELLANI A, DASDIA P. The Response of Submerged Tunnels to Their Environment[J]. Engineering Structures, 1989, 11 (1):47-56.
- [4] REMSETH S,LEIRA B J, OKSTAD K M, et al. Dynamic Response and Fluid/Structure Interaction of Submerged Floating Tunnels[J]. Computers & Structures, 1999, 72 (4/5):659-685.
- [5] KANIE S, KOKUBUN H, MIZUTANI Y, et al. Analytical Study on Dynamic Response of Submerged Floating Tunnels Due to Wave Force [C]// KROKE-BORGJ. Proceedings of the 3rd Symposium on Strait Crossings. Rotterdam: BAL KEMA A A, 1994: 659-666.
- [6] 麦继婷,罗忠贤,关宝树.流作用下悬浮隧道张力腿的

(5):31-34.

- [7] ARSLAN T, KHISTY C J. A Rational Approach to Handling Fuzzy Perceptions in Route Choice [J].
   European Journal of Operational Research ,2006 ,168
   (2) :571-583.
- [8] ARSLAN T, KHISTY C J. A Rational Reasoning Method from Fuzzy Perceptions in Route Choice [J].
   Fuzzy Sets and Systems ,2005 ,150 (3) :419-435.
- [9] PEETA S, YU J W. A Hybrid Model for Driver Route Choice Incorporating En-route Attributes and Real-time Information Effects[J]. Networks and Spatial Economics, 2005, 5(1):21-40.
- [10] SRINIVASAN K K. Dynamic Decision and Adjustment Processes in Commuter Behavior Under Realtime Information[D]. Austin: The University of Texas ,2000.
- [11] RAO A S. AgentSpeak (L) :BDI Agents Speak Out in a Logical Computable Language [C]//VAN HOE R. Proceedings of the 7th European Workshop on Modeling Autonomous Agents in a Multi-agent World. Berlin:Springer Verlag, 1996:42-55.

涡激动力响应[J]. 西南交通大学学报, 2004, 39(5): 600-604.

MAIJi-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.

[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(增): 217-221.

> GE Fei ,DON G Man sheng ,HUILei ,et al. Vortex-induced Vibration of Submerged Floating Tunnel Tethers Under Wave and Current Effects[J]. Engineering Mechanics , 2006 ,23(S) :217-221.

- [8] ADREZIN R, BENAROYA H. Non-linear Stochastic Dynamics of Tension Leg Platforms [J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 220(1):27-65.
- [9] HAN S M, BENAROYA H. Non-linear Coupled Transverse and Axial Vibration of a Compliant Structure, Part 1: Formulation and Free Vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 237 (5):837-873.
- [10] KUNISU H, MIZUNO S, MIZUNO Y, et al. Study on Submerged Floating Tunnel Characteristics Under the Wave Condition [C]//ISOPE. Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Comference. Osaka: ISOPE, 1994:27-32.