

张力腿悬浮隧道的动力学模型和自振特性

易壮鹏¹, 李小超², 曾有艺¹

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.长沙理工大学 水利工程学院)

摘要:建立了张力腿悬浮隧道在外荷载下的面内动力学方程并进行了结构自振特性的分析。将悬浮隧道沿跨径方向视为一系列支撑拉索和管体组成,其中拉索和管体分别在局部坐标系和整体坐标系中考虑,通过 Morison 方程考虑流体作用于构件上的升力和拖拽力。采用 Hamilton 原理建立各个构件的动力学方程,组合得到整体结构的动力学模型。由对应的线性无阻尼自由振动方程确定构件模态函数的形式,再结合各构件的边界条件和匹配条件可得用于求解频率和模态的特征方程。经有限元法对比验证,该方法可有效获取悬浮隧道各种振动形式的频率和模态;算例分析表明各阶次频率十分密集,索局部振动、结构整体振动同时依次存在于频率谱上。

关键词: 悬浮隧道; 动力学模型; 频率; 局部/整体模态; Morison 方程

悬浮隧道,又称“阿基米德”桥,是一种新型的跨越深海峡、长水道的潜在交通结构物,2018 年被中国科协列入 60 个重大科技工程技术难题之一。悬浮隧道的优势在于对所处位置环境破坏小、受恶劣天气海洋环境影响小、单位长度造价低,自从其概念提出后就引起了国内外研究者的广泛兴趣。悬浮隧道管体悬浮于水下 20~30 m 深的位置,一般通过水下拉索或水面浮体固定限制其管体的过大位移,采用拉索分别锚固海床和隧道管体底部的张力腿悬浮隧道是一种典型的结构形式,海流作用下这类结构的动力响应及混沌行为引起了研究者的广泛关注。

悬浮隧道作为一种新型结构,其结构参数的合理设置至关重要。秦银刚等以混沌运动为控制条件对悬浮隧道的支撑间距进行了专门的研究,发现流速和漩涡发放频率影响最明显;Long 等对悬浮隧道动力响应中的浮重比、支撑索刚度和隧道长度等关键参数进行了分析;Jiang 等对悬浮隧道中结构参数的风险敏感性进行了分析。对于悬浮隧道,理想的移动荷载或车辆荷载作用下结构的动力响应问题越来越受到重视,项贻强等、董满生等和 Jiang 等分别采用理论或数值分析的手段研究了动荷载下的动力响应;Lin 等则进一步考虑了流-车-隧道耦合作用下结构的动力响应。此外,悬浮隧道由于处于海洋环境,各种极端荷载必须面对,在这一方面,Xiang 等对悬浮隧道支撑索断裂情

况下结构的动力响应和结构行为进行了分析;罗刚等对水下爆炸时产生的非接触冲击作用下悬浮隧道的动力响应进行了研究,分析了相关参数的影响;Wu 等对洋流和地震同时作用下悬浮隧道支撑拉索的强迫振动、参数振动开展了研究;Dong 等设计了一种悬浮隧道极端情况下的逃生装置并进行了相关的参数研究。支撑索是悬浮隧道的重要组成部分,其动力安全是结构安全的重要保证,因此支撑索悬浮隧道在所处洋流、车辆、地震等环境下的横向动力特性、参数振动、地震响应和疲劳可靠度等引起了广泛的关注,这些研究均表明支撑拉索对隧道管体的力学性能有重要影响,二者之间存在动力耦合,从整体上对结构进行力学建模并开展研究十分必要。

以张力腿悬浮隧道为对象,将整体结构离散为索、管体节段构件,采用 Morison 方程考虑流体附着于结构的惯性、阻尼效应,通过 Hamilton 原理建立各构件方程,再组合得到整体动力学模型。通过构件的边界条件和匹配条件得到可获取结构频率、模态的特征方程。采用该文方法研究算例悬浮隧道的频率、模态特征,并用有限元法进行对比验证。

1 基本方程的建立

引入基本假定:① 考虑锚索在面内竖直布置,这

收稿日期:2018-12-20(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:11002030,51878073);湖南省自然科学基金资助项目(编号:2018JJ2436)

作者简介:易壮鹏,男,博士,副教授.E-mail:zpyi@csust.edu.cn

是由于张力腿型悬浮隧道中每一对锚索的几何特性和材料参数在横向是对称的,锚索横向力自相平衡,洋流横向拽力与其相比较小,竖向荷载下的位移以面内为主;② 管体为 Euler-Bernoulli 梁;③ 管体的纵向变形可以忽略;④ 不考虑索的纵向惯性、弯曲、扭转和剪切刚度。

如图 1 所示,张力腿型悬浮隧道管体考虑为 n 根索在面内竖向支撑,建模时将整个结构视为 $n+1$ 段管体和 n 根索组合。索和管体分别用局部坐标系 $o_{ci}-x_{ci}y_{ci}$ 和整体坐标系 $o_a-x_a y_a$ 描述, u_{ci}, v_{ci} 和 u_a, v_a 分别为每根索和管体节段的变形。 $d_i [i=0 \sim (n+1)]$ 为索与管体连接点及端点的水平坐标, $l_a = d_{n+1} - d_0$ 为隧道的总长度, l_{ci} 为索长。

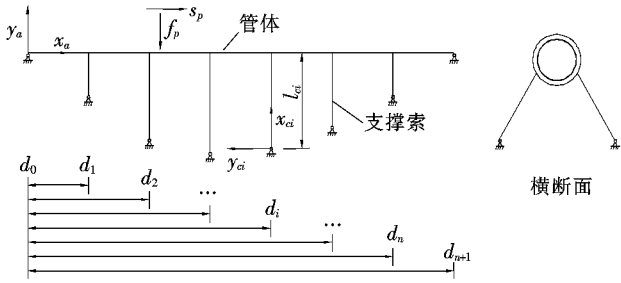


图 1 支撑式悬浮隧道的力学模型

结构体系的 Hamilton 变分具有如下形式:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(T - V) dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta W dt = 0 \quad (1)$$

其中系统的动能 T 、势能 V 和外力功 δW 为:

$$T = \sum_{i=1}^n \int_0^{l_{ci}} \frac{1}{2} m_{ci} (\dot{u}_{ci}^2 + \dot{v}_{ci}^2) dx_{ci} + \sum_{i=1}^{n+1} \int_{d_{i-1}^+}^{d_i^-} \frac{1}{2} m_a \dot{v}_a^2 dx_a \quad (2)$$

$$V = \sum_{i=1}^n \int_0^{l_{ci}} (H_i \epsilon_{ci} + \frac{1}{2} E_{ci} A_{ci} \epsilon_{ci}^2) dx_{ci} + \sum_{i=1}^{n+1} \int_{d_{i-1}^+}^{d_i^-} E_a I_a (u_a'')^2 dx_a \quad (3)$$

$$\delta W = \sum_{i=1}^n \int_0^{l_{ci}} [-c_{cu} \dot{u}_{ci} \delta u_{ci} - c_{cv} \dot{v}_{ci} \delta v_{ci} + (f_{iL} - f_{iD}) \delta v_{ci}] dx_{ci} + \sum_{i=1}^{n+1} \int_{d_{i-1}^+}^{d_i^-} [-c_{au} \dot{v}_a \delta v_a + N_i v_a' \delta v_a - f_{bD} \delta v_a - f_p \delta(s_p t - l_a) \delta v_a] dx_a \quad (4)$$

上述式中:上标点和撇分别为在定义区间内对时间 t 和水平坐标 x_{ci} 或 x_a 求导数; d_i 上标中正负号为左右截面; m_{ci}, m_a 为索、管体的单位质量; H_i 为索的初张力; N_i 为管体初始轴向压力; E_{ci}, A_{ci} 为索的弹性模量、截面面积; E_a, A_a, I_a 为管体的弹性模量、截面

积和惯性矩; c_{cv}, c_{cu} 为索阻尼系数; c_{au} 为管体阻尼系数; f_{iL}, f_{iD}, f_{bD} 为洋流作用于结构的升力和拖拽力; f_p 为作用于管体上速度 s_p 的移动荷载; ϵ_{ci} 为每根索的应变,其表达式为:

$$\epsilon_{ci} = u_{ci}' + \frac{1}{2} (v_{ci}')^2 \quad (5)$$

采用 Morison 考虑结构的升力和拖拽力:

$$f_L = \frac{1}{2} \rho_w D C_L s_0^2 \cos(2\pi \omega_s t + \theta) \quad (6)$$

$$f_D = \frac{1}{2} \rho_w D C_D \dot{w} |\dot{w}| + \frac{\pi}{4} D^2 \rho_w C_m \ddot{w} \quad (7)$$

式中: ρ_w 为流体密度; D 为直径; s_0 为波速; C_L 为升力系数; C_D 为拽力系数; C_m 为附加质量系数; w 为柱体相对水体的位移; ω_s 为旋涡释放频率。

将式(7)代入式(1)中可得系统的动力学方程:

$$\begin{cases} m_{ci} \ddot{u}_{ci} + c_{cu} \dot{u}_{ci} - \partial(E_{ci} A_{ci} \epsilon_{ci}) / \partial x_{ci} = 0 \\ m_{ci} \ddot{v}_{ci} + c_{cv} \dot{v}_{ci} - H_i v_{ci}'' - \partial(E_{ci} A_{ci} \epsilon_{ci} v_{ci}') / \partial x_{ci} = f_{iL} - f_{iD} \\ m_a \ddot{v}_a + c_{av} \dot{v}_a + E_a I_a v_a'''' + N_i v_a'' = f_{bD} + f_p \delta(s_p t - l_a) \end{cases} \quad (8)$$

每根索的固定端、连接端与管体两端的边界条件分别为:

$$u_{ci}(0, t) = v_{ci}(0, t) = 0 \quad (9)$$

$$v_{ci}(l_{ci}, t) = 0; u_{ci}(l_{ci}, t) = v_a(d_i, t) \quad (10)$$

$$v_a(d_i, t) = v_a'(d_i, t) = 0; \quad i = 0, n+1 \quad (11)$$

索与管体之间的连接位置具有如下连接和匹配条件:

$$\begin{cases} v_a(d_i^-, t) = v_a(d_i^+, t) \\ v_a'(d_i^-, t) = v_a'(d_i^+, t) \\ E_a I_{ayy} v_a''(d_i^-, t) = E_a I_{ayy} v_a''(d_i^+, t) \\ E_a I_{ayy} v_a'''(d_i^-, t) = E_a I_{ayy} v_a'''(d_i^+, t) - E_{ci} A_{ci} \epsilon_{ci} \end{cases} \quad (12)$$

利用假定③和边界条件式(9)、(10)可将应变进行化简,得到悬浮隧道管体和索的面内耦合动力学方程:

$$\begin{cases} m_{ci} \ddot{v}_{ci} + c_{cv} \dot{v}_{ci} - H_i v_{ci}'' - E_{ci} A_{ci} v_{ci}'' \cdot \left[\frac{v_b(d_i, t)}{l_{ci}} + \frac{1}{2l_{ci}} \int_0^{l_{ci}} (v_{ci}')^2 dx_{ci} \right] = f_{iL} - f_{iD} \\ m_a \ddot{v}_a + c_{av} \dot{v}_a + E_a I_a v_a'''' + N_i v_a'' = f_{bD} + f_p \delta(s_p t - l_a) \end{cases} \quad (13)$$

引入如下的无量纲变量:

$$\begin{cases} (\bar{x}_{ci}, \bar{y}_{ci}, \bar{v}_{ci}, \bar{x}_a, \bar{y}_a, \bar{v}_a, \bar{l}_{ci}, \bar{d}_i) = (x_{ci}, \\ y_{ci}, v_{ci}, x_a, y_a, v_a, l_{ci}, d_i) / l_a, \\ (\bar{q}_{ci}, \bar{q}_{ai}) = \sqrt{(m_{ci}, m_a) \omega_0^2 l_a^2 / H_i}, \\ \alpha_{ci} = E_{ci} A_{ci} l_a / (H_i l_{ci}), \beta_{vi} = E_a I_a / (N_i l_a^2), \\ \bar{c}_{cv} = c_{cv} \omega_0 c_a^2 / H_i, \bar{c}_{av} = c_{av} \omega_0 c_0^2 / N_i, \\ (\bar{f}_{iL}, \bar{f}_{iD}) = (f_{iL}, f_{iD}) l_a / H_i, \\ (\bar{f}_{bD}, \bar{f}_P) = (f_{bD}, f_P) l_a / N_i, \tau = \omega_0 t, \\ \bar{\chi}_{vi} = E_a I_a / (H_i l_a^2), \bar{s}_p = s_p / (\omega_0 l_a). \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\omega_0 = 1.0 \text{ rad/s}$ 。

可以将式(13)中索和管体的动力学控制方程分别写为如下的无量纲形式:

$$\begin{cases} \bar{q}_{ci}^2 \ddot{\bar{v}}_{ci} + \bar{c}_{cv} \dot{\bar{v}}_{ci} - \bar{v}_{ci}'' - \alpha_{ci} \bar{v}_{ci}'' \cdot [\bar{v}_b(\bar{d}_i, \tau) + \\ \frac{1}{2} \int_0^{\bar{l}_{ci}} (\bar{v}_{ci}')^2 d\bar{x}_{ci}] = \bar{f}_{iL} - \bar{f}_{iD} \\ \bar{q}_{ai}^2 \ddot{\bar{v}}_a + \bar{c}_{av} \dot{\bar{v}}_a + \beta_{vi} \bar{v}_a'' + \bar{v}_a'' = \bar{f}_P \delta(\bar{s}_p \tau - 1) - \bar{f}_{bD} \end{cases} \quad (15)$$

式中: \bar{x}_{ci} 的变化范围为 $0 \leq \bar{x}_{ci} \leq \bar{l}_{ci}$, \bar{x}_a 的变化范围为 $\bar{d}_{i-1}^+ \leq \bar{x}_a \leq \bar{d}_i^-$, 上标点和撇分别为在定义区间内对无量纲时间 τ 和水平坐标 \bar{x}_{ci} 或 \bar{x}_a 求导数, 将每一段索和管体节段的动力学方程组合起来即得到整体结构的内面控制方程, 对于索 i 取 $1 \sim n$, 对于管体 i 取 $1 \sim (n+1)$ 。

2 面内振动特性

与式(15)对应的线形无阻尼自由振动方程为:

$$\begin{cases} \bar{q}_{ci}^2 \ddot{\bar{v}}_{ci} - \bar{v}_{ci}'' = 0 \\ \bar{q}_{ai}^2 \ddot{\bar{v}}_a + \beta_{vi} \bar{v}_a'' + \bar{v}_a'' = 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\bar{q}_{ci}^2 = \bar{q}_{ci}^2 + \pi D^2 \rho_w C_m / (4m_{ci})$, $\bar{q}_{ai}^2 = \bar{q}_{ai}^2 + \pi D^2 \rho_w C_m / (4m_a)$ 为考虑等效质量之后的惯性参数。

对于由索和管体单元构成的悬浮隧道, 上式的一般解可以写为 $v_j = \{\phi_{ci}(\bar{x}_{ci}), \phi_{ai}(\bar{x}_a)\}^T \exp(i\omega_j \tau)$, 其中 $\phi_{ci}(\bar{x}_{ci})$ 和 $\phi_{ai}(\bar{x}_a)$ 分别为索、管体的振动函数; ω_j

为结构的第 j 阶振动频率, 上标 T 为转置符号, i 为虚数单位, 将其代入式(16)中可得 $\phi_{ci}(\bar{x}_{ci})$ 和 $\phi_{ai}(\bar{x}_a)$ 的求解方程如下:

$$\begin{cases} \phi_{ci}'' + \bar{q}_{ci}^2 \omega_j^2 \phi_{ci} = 0 \\ \beta_{vi} \phi_{ai}'' + \phi_{ai}'' + \bar{q}_{ai}^2 \omega_j^2 \phi_{ai} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\phi_{ci}(\bar{x}_{ci})$ 的解可以写为如下形式:

$$\phi_{ci}(\bar{x}_{ci}) = C_{i1} \cos(\bar{\zeta}_i \bar{x}_{ci}) + C_{i2} \sin(\bar{\zeta}_i \bar{x}_{ci}) \quad (18)$$

式中: $\bar{\zeta}_i = \bar{q}_{ci} \omega_j$; C_{i1} 、 C_{i2} 为系数。

管体节段的振动函数可以写为如下的形式:

$$\begin{aligned} \phi_{ai}(\bar{x}_a) = & A_{i1} \cos[\eta_{i1}(\bar{x}_a - \bar{d}_{i-1})] + A_{i2} \sin[\eta_{i1}(\bar{x}_a - \\ & \bar{d}_{i-1})] + A_{i3} \cosh[\eta_{i2}(\bar{x}_a - \bar{d}_{i-1})] + \\ & A_{i4} \sinh[\eta_{i2}(\bar{x}_a - \bar{d}_{i-1})] \end{aligned} \quad (19)$$

其中:

$$\begin{cases} \eta_{i1} \\ \eta_{i2} \end{cases} = \sqrt{\sqrt{\frac{1}{4\beta_{vi}^2} + \frac{\bar{q}_{ai}^2 \omega_j^2}{\beta_{vi}}} \pm \frac{1}{2\beta_{vi}}} \quad (20)$$

式中: $A_{i1} \sim A_{i4}$ 为系数。定义索的系数向量 $C_i = \{C_{i1}, C_{i2}\}$, 管体节段的系数向量 $A_i = \{A_{i1}, A_{i2}, A_{i3}, A_{i4}\}$ 。此外, 边界条件的无量纲形式可以写为:

$$\phi_{ci}(0) = 0; \phi_{ci}(\bar{l}_{ci}) = \phi_{ai}(\bar{d}_i) \quad (21)$$

$$\begin{cases} \phi_{a1}(\bar{d}_0) = \phi_{a1}'(\bar{d}_0) = 0 \\ \phi_{a(n+1)}(\bar{d}_{n+1}) = \phi_{a(n+1)}'(\bar{d}_{n+1}) = 0 \end{cases} \quad (22)$$

与式(4)对应的索、管体之间连接位置的无量纲匹配条件可以写为:

$$\begin{cases} \phi_{ai}(\bar{d}_i^-) = \phi_{a(i+1)}(\bar{d}_i^+) \\ \phi_{ai}'(\bar{d}_i^-) = \phi_{a(i+1)}'(\bar{d}_i^+) \\ \phi_{ai}''(\bar{d}_i^-) = \phi_{a(i+1)}''(\bar{d}_i^+) \\ \chi_{vi} \phi_{ai}'''(\bar{d}_i^-) = \chi_{vi} \phi_{a(i+1)}'''(\bar{d}_i^+) - \alpha_{ci} \phi_{ai}(\bar{d}_i) \end{cases} \quad (23)$$

将式(18)、(19)中的振动函数代入式(21)~(23)中, 可以得到整体结构的特征方程:

$$R \cdot \Psi = 0 \quad (24)$$

式中: $\Psi = \{C_1, C_2, \dots, C_n, A_1, A_2, \dots, A_{n+1}\}^T$ 为 $6n+4$ 阶模态系数向量, R 为 $6n+4$ 阶特征矩阵, 令 R 的行列式等于零所得超越方程的特征根即为各阶次频率 ω_j , 借助 Mathematica 软件完成。对应的特征向量 Ψ_j

为第 j 阶振动模态。

3 算例及参数研究

参照文献[16]中拟建悬浮隧道的参数进行算例分析, $n=4$, 等间距布置的 4 根索从左至右编号为 $c_1 \sim c_4$, 管体 5 个节段, 编号为 $a_1 \sim a_5$ 。结构的基本参数见

表 1 悬浮隧道结构基本参数

$E_c /$ Pa	$A_c /$ m^2	$m_c /$ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$	$E_a /$ Pa	$A_a /$ m^2	$I_a /$ m^4	$m_a /$ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$	$I_a /$ m	C_m	$\rho_w /$ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	管体直 径/m	泊松比
2.0×10^{11}	3.62×10^{-2}	2.86×10^2	3.2×10^{10}	57.64	1 200	1.16×10^6	500	1.0	1028	11.4, 14.26	0.3

表 2 为两种方法计算的频率。结果显示两种方法所得各阶频率接近、结果吻合良好, 该文方法的解析模型模拟了各构件的变形, 各种类型的振动能同时考虑。多索支撑的管体结构中索局部振动频率十分接近, 结构各阶次的频率十分密集, 构件局部频率、结构整体频率同时依次存在于频率谱。将两种方法所得模态先标准化, 即令:

$$\sum_{i=1}^5 \int_{d_{i-1}}^{\bar{d}_i} \phi_{ai}^2 dx_a + \sum_{i=1}^4 \int_0^{\bar{l}_{ci}} \phi_{ci}^2 dx_{ci} = 1$$

表 2 悬浮隧道各阶频率表

阶次	频率/(rad · s ⁻¹)		阶次	频率/(rad · s ⁻¹)	
	该文方法	有限元法		该文方法	有限元法
1	4.298 2	4.240 8	11	15.061 7	15.200 3
2	5.171 2	5.065 1	12	16.440 8	16.590 8
3	5.667 1	5.528 5	13	16.488 6	16.627 2
4	5.790 6	5.540 6	14	16.868 0	16.974 0
5	8.621 5	8.482 9	15	20.215 9	20.273 3
6	10.237 7	10.131 6	20	21.225 2	21.225 2
7	10.622 0	10.564 5	21	22.184 9	22.127 5
8	11.058 4	11.058 4	22	22.281 9	22.175 9
9	11.524 9	11.082 3	23	24.581 4	24.442 8
10	12.620 5	12.726 6	24	25.500 8	25.350 8

为了进一步从数值上定量描述悬浮隧道中锚索—管体系统的模态形式, 采用文献[26]中的局部化参数定义各阶模态中各构件的参与程度:

$$\lambda_k = \frac{\int_0^{\bar{l}_{ck}} m_c \phi_{ck}^2 dx_{ck}}{\sum_{i=1}^5 \int_{d_{i-1}}^{\bar{d}_i} m_a \phi_{ai}^2 dx_a + \sum_{i=1}^4 \int_0^{\bar{l}_{ci}} m_c \phi_{ci}^2 dx_{ci}} \quad (25)$$

表 1。对于结构的解析解, 采用文中式(24)的特征方程求解自振特性, 同时将所得各阶模态、频率与有限元结果进行对比验证, 采用 Ansys 软件建立对应的有限元模型, 其中管体、索、流体分别用 Link1、Beam3 和 Fluid29 单元模拟, 在流体与结构相邻节点上考虑流固耦合作用。

其中 k 指代构件, 图 2 为用百分数表示的振动模态中各个构件的参与程度。在选定的几何、物理参数条件下, 在跨度范围内给出的前 20 阶模态中, 第 7 阶和 19 阶振动模态中, 管体和索同时参与振动, 结构为整体振动; 另一方面其余模态以索的局部振动为主, 管体节段几乎不参与振动。因此, 索局部振动、结构整体振动以及介于二者之间的混合模态均存在结构中。图 2 显示各阶次模态中索的局部模态占多数, 管体、锚索耦合振动现象不明显, 其原因在于索为柔性结构, 模态十分密集, 同时管体刚度远大于拉索刚度。

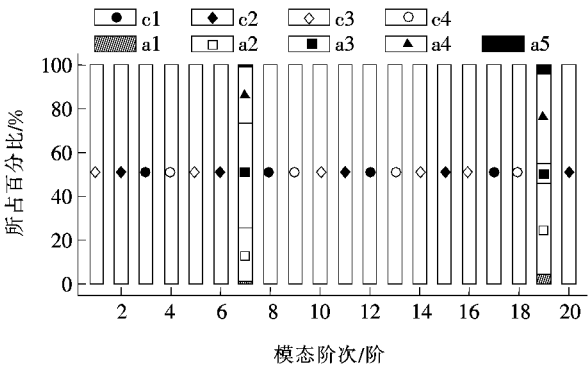


图 2 各构件占悬浮隧道各阶模态百分比

4 结论

将悬浮隧道视为一系列索和管体节段构成的结构, 采用变分原理建立每个构件的方程, 组合得到全结构的动力学模型。再将边界条件、匹配条件代入索、管体构件的模态方程中, 得到了悬浮隧道整体结构自振特性求解的特征方程。结论如下:

(1) 经有限元法验证, 该方法可有效获取并分析

结构各种振动形式的频率和模态。

(2) 悬浮隧道由多段索和管体组成,各阶次频率十分密集,索局部振动、结构整体振动对应的频率同时依次存在于频率谱上。

该文方法可考虑构件的局部振动和结构的整体振动,为研究构件之间的动力耦合提供了一种思路。管体、锚索耦合振动区间的参数敏感性分析、外荷载下结构响应、空间动力学模型、整体大幅振动机理等是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] Martire G, Faggiano B, Mazzolani F M. Compared Cost Evaluation Among Traditional Versus Innovative Strait Crossing Solutions[J]. *Procedia Engineering*, 2010, 4: 293—301.
- [2] 孙胜男. 悬浮隧道动力响应分析[D]. 大连理工大学博士学位论文, 2008.
- [3] 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(4).
- [4] 项贻强, 薛静平. 悬浮隧道在国内外的研究[J]. *中外公路*, 2002(6).
- [5] 项贻强, 陈政阳, 杨赢. 悬浮隧道动力响应分析方法及模拟的研究进展[J]. *中国公路学报*, 2017(1).
- [6] 麦继婷, 杨显成, 关宝树. 波浪作用下张力腿悬浮隧道的响应分析[J]. *中外公路*, 2008(1).
- [7] Yan H S, Luo Y Q, Yu J X. Dynamic Response of Submerged Floating Tunnel in the Flow Field[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 166: 107—117.
- [8] 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(4).
- [9] 秦银刚, 周生国, 周晓军. 多跨悬浮隧道合理支撑间距分析[J]. *铁道工程学报*, 2008(3).
- [10] Long X, Ge F, Wang L, et al. Effects of Fundamental Structure Parameters on Dynamic Responses of Submerged Floating Tunnel under Hydrodynamic Loads[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2009, 25(3): 335—344.
- [11] Long X, Ge F, Hong Y S. Feasibility Study on Buoyancy—Weight Ratios of a Submerged Floating Tunnel Prototype Subjected to Hydrodynamic Loads[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2015, 31(5): 750—761.
- [12] Jiang S P, Li Q X, Li J J, et al. Research on Risk Sensitivity of Submerged Floating Tunnel Based on Analytic Hierarchy Process[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 166: 255—265.
- [13] 项贻强, 林亨, 陈政阳. 移动荷载作用下悬浮隧道动力响应分析[J]. *振动与冲击*, 2018(4).
- [14] 董满生, 张嫻, 唐飞, 等. 等间距移动荷载作用下水中悬浮隧道管体的位移响应[J]. *应用力学学报*, 2016(5).
- [15] Jiang B L, Liang B. Study on the Main Influence Factors of Traffic Loads in Dynamic Response of Submerged Floating Tunnels [J]. *Procedia Engineering*, 2016, 166: 171—179.
- [16] Lin H, Xiang Y Q, Yang Y, et al. Dynamic Response Analysis for Submerged Floating Tunnel Due to Fluid—Vehicle—Tunnel Interaction [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 166: 290—301.
- [17] Xiang Y Q, Chen Z Y, Yang Y, et al. Dynamic Response Analysis for Submerged Floating Tunnel with Anchor—Cables Subjected to Sudden Cable Breakage [J]. *Marine Structures*, 2018, 59: 179—191.
- [18] 罗刚, 潘少康, 周晓军, 等. 水下非接触爆炸冲击作用下悬浮隧道动力响应[J]. *中国公路学报*, 2018(6).
- [19] Wu Z W, Ni P P, Mei G X. Vibration Response of Cable for Submerged Floating Tunnel under Simultaneous Hydrodynamic Force and Earthquake Excitations [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2018, 21(11): 1 761—1 773.
- [20] Wu Z W, Liu J K, Liu Z Q, et al. Parametrically Excited Vibrations of Marine Riser under Random Wave Forces and Earthquake [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2016, 19(3): 449—462.
- [21] Dong M S, Miao G P, Yong L C, et al. Effect of Escape Device for Submerged Floating Tunnel(SFT) on Hydrodynamic Loads Applied to SFT[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2012, 24(4): 609—616.
- [22] 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: 自然科学版*, 2012(3).
- [23] Sun S N, Su Z B. Parametric Vibration of Submerged Floating Tunnel Tether under Random Excitation [J]. *China Ocean Engineering*, 2011, 25(2): 349.
- [24] Su Z B, Sun S N. Seismic Response of Submerged Floating Tunnel Tether [J]. *China Ocean Engineering*, 2013, 27(1): 43—50.
- [25] Yan H S, Yuan Y, Yu J X. Fatigue Reliability Analysis of Cable Considering Corrosion [J]. *Procedia Engineering*, 2016, 166: 127—135.
- [26] Gattulli V, Lepidi M. Localization and Veering in the Dynamics of Cable—Stayed Bridges [J]. *Computers and Structures*, 2007, 85(21—22): 1 661—1 678.