

文章编号: 1006—2106(2009)01—0077—05

张力腿型悬浮隧道涡激响应影响因素分析^{*}

秦银刚 周晓军^{**}

(西南交通大学, 成都 610031)

摘要: 研究目的: 将多跨悬浮隧道管段简化为作用在锚索端部的集中质量。根据舒适性要求, 假定悬浮隧道是小振幅运动。不考虑悬浮隧道张力腿自身的涡激振动对悬浮隧道管段的影响时, 在横流向涡激升力作用下建立悬浮隧道垂直于流向的振动方程。将倾斜式张力腿等效成水平张力腿和垂直张力腿。仅考虑悬浮隧道做垂直于流向振动, 对于作用于悬浮隧道上的张力腿作用力。将作用于悬浮隧道上的涡激作用力简化为简谐荷载。采用龙格—库塔积分法对振动方程进行了数值求解, 并利用 MATLAB程序对不同参数情况进行模拟。着重研究了张力腿结构性质的变化对悬浮隧道动力响应的影响。

研究结论: 研究结果表明, 张力腿与海底水平面的夹角对响应影响并不大, 张力腿的轴向刚度和初始张力对响应有相同的规律。

关键词: 悬浮隧道; 张力腿; 涡激; 响应; 数值

中图分类号: U45 **文献标识码:** A

Analysis of the Influencing Factors of Vortex—induced Vibration Response of the Submerged Floating Tunnel Supported by Tension Leg

QIN Yin—gang ZHOU Xiao—jun

(Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Research purposes: This paper studies the effect of property change of tension leg structure on the dynamic response of submerged floating tunnel with the following methods: It is to simplify the multi—span submerged floating tunnel into the concentrated mass which acts at the end of the anchor cable supposing the submerged floating tunnel has a little amplitude dynamic vibration for meeting the need of usage comfortableness. When the effect of the vortex—induced vibration of tension leg on submerged floating tunnel structure is not taken into account, the equation for submerged floating tunnel vibration is established under the effect of cross current vortex—induced vibration and the slope tension leg is equalized into horizontal tension leg and vertical tension leg. If it only considers the submerged floating tunnel vibration crosses the current and the load acts at the anchor cable, it is to simplify the fluid force into tune load. Using Runge—Kutta numerical method solves the vibration equation and the different cases are simulated with MATLAB Program.

Research conclusions: The study result shows that the angle between the anchor cable and the bottom of the ocean has little effect on the dynamic response, and the response law of the tension legs axis stiff is the same as initial tension.

Key words: submerged floating tunnel; tension leg; vortex—induced response; numerical

^{*} 收稿日期: 2008—07—04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10572121); 霍英东教育基金资助项目(94024)

^{**} 作者简介: 秦银刚, 1974年出生, 男, 博士研究生; 周晓军, 1969年出生, 男, 教授。

由管段和支撑系统组成的水中悬浮隧道为那些受环境限制的水域提供了穿越的可能性。以其在相比于传统的跨越水域的固定方式具有能有效地减小对景观的影响、良好抵御自然灾害的能力、跨度增加而工程造价不显著增加等优点而日益受到人们的重视。

在既有的研究文献中,对悬浮隧道张力腿的涡激振动问题研究得较多也较为深入,而对悬浮隧道本身的涡激振动问题研究得较少;在仅有的关于悬浮隧道管段本身的涡激振动研究中,无论是单跨悬浮隧道还是多跨悬浮隧道都简化成单跨的简支梁来研究;在研究悬浮隧道自身的振动中考虑锚索的影响则更少^[1-3]。

在洋流涡激作用下,悬浮隧道会发生横流向振动,采用张力腿固定的悬浮隧道的张力腿在管体振动下会沿轴向发生变形,由于考虑到悬浮隧道修建的昂贵性和破坏后的灾难性,悬浮隧道管体和张力腿的振动变形都是在材料弹性变形范围内进行。

根据 S Kanj 等对悬浮隧道锚索支撑系统试验研究,发现采用倾斜锚索固定的悬浮隧道在极限荷载条件下隧道锚索会出现突然的松弛和拉紧现象^[4]。而倾斜式对称布索是环境条件比较恶劣,洋流方向不确定的水域悬浮隧道固定的有效方式。因此,对于多跨悬浮隧道在涡激振动中锚索的作用是不可忽视的。

1 简化及计算模型

悬浮隧道管体尺寸的设计主要依据隧道的用途、交通能力而定,支撑系统由悬浮隧道所受到的浮力和自身重力的不同而不同。通常对于水域较窄、水流较小、波浪较小时可采用无支撑方式;当水域跨度较大且悬浮隧道管体重量大于浮力时可采用水面浮筒当或水下承压墩形式;当水道较宽且悬浮隧道受到的浮力大于重力时则采用张力腿(锚链)来固定悬浮隧道管体。对于张力腿形式的支撑,根据张力腿在横向、纵向布置的形式不同又有不同的支撑形式。当环境条件比较恶劣,且洋流方向不确定时,采用倾斜布索方式。倾斜的锚索可提供水平和竖直两个方向的分力,竖直分力抵抗浮力,水平分力抵抗环境作用产生的水平力。本文讨论纵向单索布置、横向为对称倾斜布置形式的锚索。

为方便讨论本文假定:(1)忽略悬浮隧道管体、锚索的几何尺寸、刚度和材料性质沿长度方向的改变,且隧道管体和张力腿的界面均为圆形;(2)假定悬浮隧道张力腿之间间距相等;(3)忽略锚索的重力影响,不考虑锚索的垂度效应;(4)不考虑锚索自身振动的影

响;(5)由于海流的速度随深度衰减很慢,水质点的运动近似水平,则假定海流为均匀水平流,方向垂直于悬浮隧道轴线;(6)根据线性波理论,波浪诱发的流体质点的速度和加速度随深度呈指数形式衰减,对于一般设置在水面下 30~50 m 悬浮隧道系统,相对于水流可以不考虑波浪的影响。

对于图 1 所示张力腿型悬浮隧道,将悬浮隧道管段简化为作用在张力腿位置处的质量 M 隧道刚度用弹簧 K 模拟,阻尼由阻尼器 C 模拟^[7]。

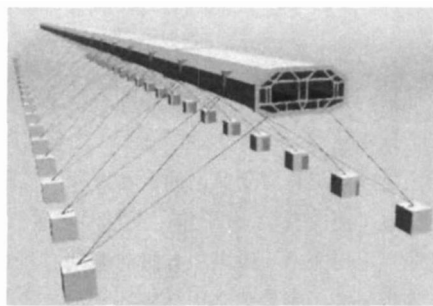


图 1 张力腿型悬浮隧道示意图

在上述假定下建立悬浮隧道质量块运动的方程为

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky + P(y, t) = F(y, t) \quad (1)$$

式中 $P(y, t)$ ——张力腿作用力;

$F(y, t)$ ——悬浮隧道受到的流体荷载;其余符号意义同前面假设。

悬浮隧道受到的流体荷载包括两部分:一是洋流经过悬浮隧道时发生漩涡泄放而产生的周期性的涡激振动力 $F_L(y, t)$;二是悬浮隧道振动时受到的流体阻尼力 $F_D(y, t)$ 即

$$F(y, t) = F_L(y, t) - F_D(y, t) \quad (2)$$

由于流体流经悬浮隧道时,会发生周期性的漩涡泄放,根据漩涡发放特征,可以简化成周期性的简谐荷载当锁频发生时,涡串在悬浮隧道管体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^[8]。

$$F_L(y, t) = f \cos(\omega_s t) \quad (3)$$

式中 f ——周期性荷载幅值;

ω_s ——漩涡释放频率。

式(3)中 ω_s 为涡激频率,即 Strouha 频率,其计算公式为^[9]

$$\omega_s = \frac{2\pi Su}{D} \quad (4)$$

式中 S —Strouha 数,根据 20℃ 时水的粘性系数计算出雷诺数 R ,再由 S 与 R 的关系取 $S=$

0.2

u ——洋流速度;

D ——悬浮隧道外直径。

根据等效质量法, 作用于质点处周期性荷载幅值 f 的计算公式为

$$f = \begin{cases} \frac{\rho D^3 C_L l}{2(n+1)} & \text{张力腿位置处} \\ \frac{\rho D^3 C_L l}{4(n+1)} & \text{承台位置处} \end{cases} \quad (5)$$

式中 C_L ——升力系数;

l ——悬浮隧道总长;

n ——张力腿数量;

ρ ——洋流密度; 其余符号意义同前。

悬浮隧道在振动过程中会受到水的阻尼力又包括两部分, 一部分是隧道截面所对应的水体对隧道的阻碍作用, 另一部分是隧道附近的水体由于粘性而随隧道截面水体一起做运动, 即附加质量力。对于流体阻尼力可以采用 Morison 方程计算, 单位长度上的流体阻尼力为:

$$F_D(\dot{y}) = \frac{1}{2} \rho C_D D |\dot{y}| \dot{y} + \frac{1}{4} C_A \rho \pi D^2 \ddot{y} \quad (6)$$

式中 C_D ——阻尼系数;

C_A ——附加质量系数; 其余符号意义同前。

根据等效原理, 作用于质量块的流体阻尼力为:

$$F_D(\dot{y}) = \begin{cases} \frac{F_D(\dot{y}) l}{1(n+1)} & \text{张力腿位置处} \\ \frac{F_D(\dot{y}) l}{4(n+1)} & \text{承台位置处} \end{cases} \quad (7)$$

由于承台支撑处的振动对悬浮隧道的振动研究的意义并不大, 对于悬浮隧道的振动响应更应集中在悬浮隧道中部, 因此, 在稍后的讨论中均仅讨论两承台之间部分, 而忽略对承台处的讨论。

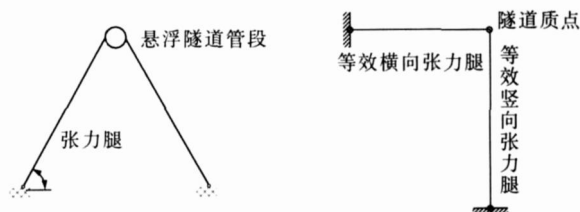


图 2 张力腿及简化形式

对于在横向对称布置的锚索, 根据力的等效原理, 可以将倾斜式锚索等效成水平作用和垂直作用的两根锚索, 如图 2 为计算上的简便, 假设等效锚索的截面形式与原锚索相同; 锚索的长度相等均为 l 且和海底夹角也相等, 均为 θ 。水平向和垂直向等效锚索的弹性模量分别为 E 和 E'' 。根据几何关系, 水平方向和

垂直方向等效锚索长度分别为:

$$l_h = l \cos \theta \quad (8)$$

$$l_v = l \sin \theta \quad (9)$$

式中 l ——锚索长度;

θ ——锚索和海底夹角。

作用于悬浮隧道上的锚索作用大小包括两部分, 一部分为竖直等效锚索产生的作用力另一部分为水平向锚索在隧道振动过程中产生的竖向作用力。即

$$F(\dot{y}) = F_{Hy} + F_{Vy} \quad (10)$$

考虑到行车的舒适型, 悬浮隧道在振动中的位移幅值不能太大。相对于锚索长度来说, 悬浮隧道的振动位移幅值为一小量。根据材料力学相关知识可以推得等效水平锚索作用于悬浮隧道质量块上的作用力的垂直分力为:

$$F_{Hv} = R'_0 \left(\frac{y}{l_h} \right) + \frac{AE'}{2} \left(\frac{y}{l_h} \right)^3 \quad (11)$$

式中 R'_0 ——等效水平初张力。

垂直锚索对悬浮隧道的作用力为:

$$F_v = \frac{AE'' y}{l_v} \quad (12)$$

将式(2)~式(13)带入式(1)中, 得张力腿作用下的悬浮隧道质量块振动方程:

$$\ddot{y} + c \dot{y} + k y \operatorname{sgn}(\dot{y}) + k_1 y + k_2 \dot{y} = f' \cos(\omega_s t) \quad (13)$$

$$\text{式中 } c = \frac{C}{m}, k = \frac{K}{m} + \frac{R'_0}{m l_h} + \frac{AE''}{m l_v}; k_1 = \frac{AE'}{2 m l_h}; k_2 = \frac{\rho C_D D l}{4(n+1)m}, f' = \frac{\rho D^3 C_L l}{2(n+1)m}, m = M + \frac{C_A \rho \pi D^2 l}{8(n+1)}$$

式(14)包含非线性项, 不能通过解析的方法求得其解, 采用四阶龙格—库塔法通过计算机求解。

2 数值算例及结果分析

在既定的水域修建悬浮隧道, 该区域的水文条件通过调查可以事先确定; 随着中间支撑数目的增加, 结构的刚度得到提高; 张力腿的性质对隧道的影响较为直接。因此, 着重讨论张力腿的参数变化对悬浮隧道涡激响应的影响。升力系数 C_L 和流体阻尼系数 C_D 与雷诺数 Re 和凯莱根—卡彭特数 (Keulegan—Carpenter 数) 有关; 附件质量系数 C_A 与结构振动频率有关, 其实质是惯性系数。考虑结构频率和涡泄频率接近的情况, 即谐振情况, 本文取 $C_L = 1$, $C_D = 1$, $C_A = 1$; 悬浮隧道总长 $l = 3000 \text{ m}$; 支撑张力腿的数目 $n = 5$; 其余基本参数的选取参考了国内外拟建悬浮隧道的设计参数, 具体取值如表 1 所示^[17]。

表 1 基本参数表

隧道	质量 /kg	1.5×10^7
	总长度 /m	2 900
	外直径 /m	23
	刚度 / (N·m ⁻¹)	1.59×10^8
张力腿	长度 /m	161.66
	弹性模量 /kPa	2.1×10^{11}
	数量	5
	初始张力 /kN	2.572×10^7
	截面积 /m ²	0.489
洋流	密度 / (Kg·m ⁻³)	1 028
	流速 / (m·s ⁻¹)	2.52

为分析张力腿锚索对悬浮隧道结构响应的影响,在分析中除讨论的因素外假定其他参数固定不变。

2 1 张力腿与海底夹角对响应的影响

根据前面约定,探讨夹角影响时取结构阻尼为 $C=0.001$ 。分别取夹角 θ 为 45° 、 60° 、 75° 3种情况进行计算。

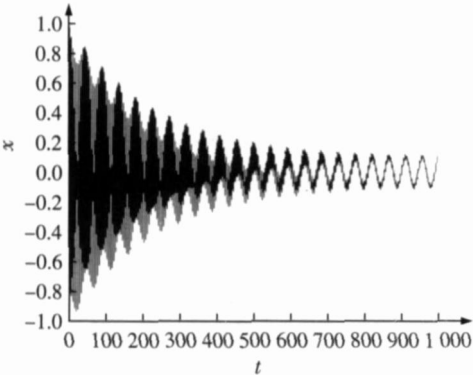


图 3 张力腿与海底夹角 $\theta=45^\circ$

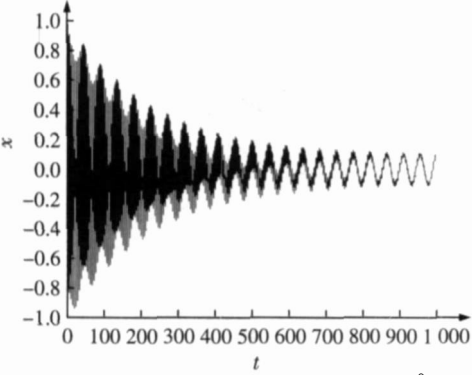


图 4 张力腿与海底夹角 $\theta=60^\circ$

通过计算发现,3种倾角的张力腿布置形式对悬浮隧道的动力响应影响基本相同,即张力腿和海底夹角大小对动力响应影响并不大。但在一定水域悬浮隧道埋深既定的情况下张力腿与海底倾角越大,张力腿的长度就越长,导致张力腿的柔性增加,在涡激作用下可能会引发张力腿失稳,进而引起悬浮隧道管体结构

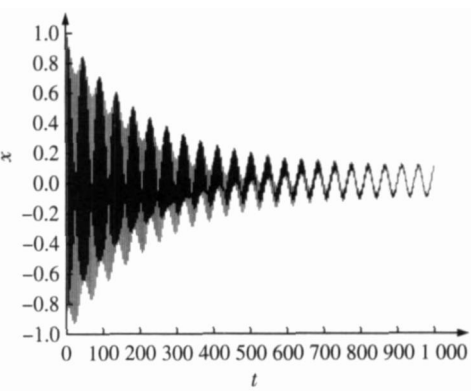


图 5 张力腿与海底夹角 $\theta=75^\circ$

失稳。因此,综合以上考虑在进行张力腿设置时可考虑张力腿与海底的夹角稍大一些。

2 2 张力腿的轴向刚度对响应的影响

为分析张力腿轴向刚度对悬浮隧道动力响应的影响,假定张力腿与海底平面之间的夹角固定为 60° 。分别计算刚度 AE 为 1.0269×10^{11} MPa·m⁴ 和 2.0538×10^{11} MPa·m⁴ 2种情况。

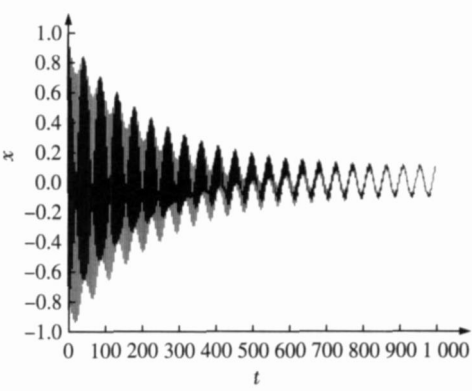


图 6 张力腿刚度 $AE=1.0269 \times 10^{11}$ MPa·m⁴

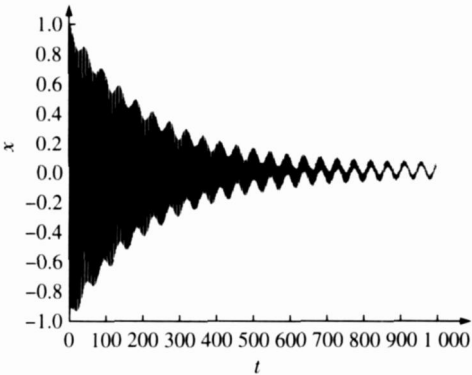


图 7 张力腿刚度 $AE=2.0538 \times 10^{11}$ MPa·m⁴

通过计算分析发现,在给定的计算条件下,随着时间的推移,悬浮隧道动力响应位移呈衰减趋势,随着时间的进一步推移,悬浮隧道的在涡激作用下呈拟周期运动。对比图 6和图 7可以发现,张力腿的刚度越大,

出现拟周期运动的时间越推后, 但振动位移衰减的幅度较大而且发生拟周期运动时的响应位移较小。为减小悬浮隧道动力响应, 可以通过增加张力腿的刚度的办法得到, 具体在实际操作中可以采用中空张力腿来进行处理。

2.3 初始张力 T 对响应的影响

初始张力对悬浮隧道的动力响应也有一定的影响, 本次分析计算了初始张力为 2.572×10^7 kN 和初始张力为 5.144×10^7 kN 2 种情况。

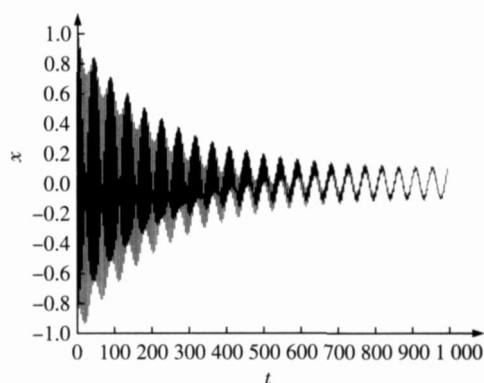


图 8 初始张力 $T = 2.572 \times 10^7$ kN

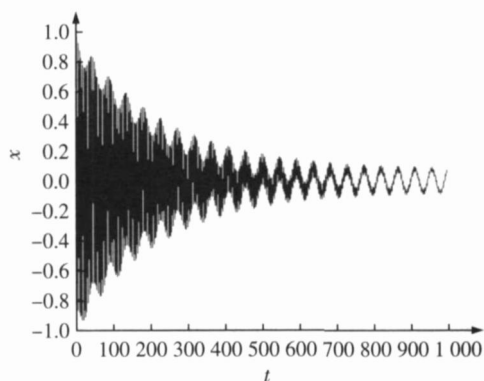


图 9 初始张力 $T = 5.144 \times 10^7$ kN

对比图 8 和图 9 可以认为张力腿的初始张力对悬浮隧道响应的影响与张力腿的刚度影响极为相似。但是初始张力变化的影响不如张力腿轴向刚度变化影响剧烈。增加张力腿的张力虽然可以增加悬浮隧道的涡激稳定性, 但是片面地增加初始张力会对张力腿材料的选择带来难度, 而且过大的初始张力也会提高对基础的要求, 因此, 在实际的工程中, 一定要综合考虑各方面的因素。

3 结论

本文在考虑张力腿作用下建立悬浮隧道涡激振动方程, 并对其进行了不同情况下的数值分析, 通过研究可以得到如下结论:

(1) 悬浮隧道张力腿与海底夹角对悬浮隧道的动力响应影响并不大, 考虑到悬浮隧道张力腿自身的稳定性, 悬浮隧道张力腿设置时的夹角应该尽可能大。

(2) 张力腿的刚度越大, 出现拟周期运动的时间越推后, 但是振动位移衰减的幅度较大而且发生拟周期运动时的响应位移较小。

(3) 张力腿的初始张力对悬浮隧道涡激动力响应与张力腿轴向刚度的影响趋势一致, 但张力腿的初始张力对悬浮隧道涡激振动响应的影响不如轴向刚度影响剧烈。

参考文献:

- [1] 麦继婷, 杨显成, 关宝树. 波流作用下悬浮隧道的动态响应分析[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2005 20(5): 616—623
- [2] 麦继婷, 罗忠贤, 关宝树. 波流作用下悬浮隧道的涡激动力响应[J]. 铁道学报, 2005 27(1): 102—105
- [3] 麦继婷, 杨显成, 关宝树. 悬浮隧道在波流作用下的响应分析[J]. 铁道学报, 2008 30(2): 118—123
- [4] Svein Rønseth, Bent J. Leira, Knut M. Øksa, Kjell M. Mathiesen, Terje Hauken. Dynamic response and fluid / structure interaction of submerged floating tunnels[J]. computer & structures, 72 (1999) 659—685
- [5] F. Brancatelli, A. Castellani, P. D'Asdà. The response of submerged tunnels to their environment[J]. Eng. Struct. 11 (1989): 47—56
- [6] Ş. Kanıç, T. Mikami, H. Horiguchi, et al. effect of non-linearity in restoring force on dynamic response of SFT[C] // Strait Crossing 2001. Krobokorg, Svets & Zeitlinger Publishers, Lisse, 2001: 529—534
- [7] 孙胜男, 陈健云, 苏志彬. 悬浮隧道锚索—隧道耦合非线性参数振动研究[J]. 振动与冲击, 2007 26(10): 104—108 & 191
- [8] C. A. Brebbia, S. Walker. dynamic analysis of offshore structures[M]. London: Newnes Butterworths, 1979