

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.022



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



张力腿基础设计参数对大跨度浮式悬索桥 行车动力响应的影响

白芷毓¹, 魏凯¹, 张枫², 张择端¹

(1. 西南交通大学桥梁智能与绿色建造全国重点实验室, 成都 611756; 2. 南昌市城市规划设计研究总院集团有限公司, 南昌 330038)

摘要:以张力腿平台为基础的大跨度浮式悬索桥建设方案在高水深、软土质的环境中具有较好的应用前景。由于其基础刚度较弱, 行车荷载可能会引发桥梁的剧烈振动, 可以通过张力腿基础设计参数的调整削弱其影响, 但目前对行车荷载作用下该新型大跨度浮式桥梁的研究较少, 此类方案可行性与适用性亟需得到验证。利用有限元软件计算行车荷载作用下的大跨度浮式悬索桥模型响应, 改变基础浮箱淹没深度、拉索倾角, 采用模态分析方法研究在行车荷载作用下张力腿基础设计参数变化对结构响应的影响。结果表明: 大跨度浮式悬索桥的淹没深度、拉索倾角参数调整主要改变前两阶振型, 且对横向响应影响较大; 加大浮式基础的淹没深度、增加倾斜布置的张力腿拉索均能有效减小其在行车荷载作用下的振动, 其中, 对拉索倾角在何种角度可以使行车荷载作用下的浮桥响应达到最小, 则需要通过具体分析得出; 在设计阶段需尽可能详尽考虑相关张力腿基础设计参数, 以增加整个浮桥方案在行车荷载作用下的应用可行性与适用性。

关键词:浮式悬索桥; 行车荷载; 张力腿基础; 设计参数; 动力响应特性

中图分类号: U44 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2025)03-0201-09

Influence of the tension leg platform's design parameters on the dynamic response of a long-span floating suspension bridge under vehicle loading

BAI Zhiyu¹, WEI Kai¹, ZHANG Feng², ZHANG Zeduan¹

(1. State Key Laboratory of Bridge Intelligent and Green Construction, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, P. R. China; 2. Nanchang Urban Planning and Design Research Institute Group Co., Ltd., Nanchang 330038, P. R. China)

Abstract: Construction schemes for long-span floating suspension bridges based on tension leg platforms have high application prospects in high water depth and soft soil environments. Due to their low foundation stiffness, vehicle loads may induce significant vibrations in bridges. This phenomenon can be mitigated by adjusting the parameters of the tension leg platform. So, there is limited research on this novel long-span floating bridge under

收稿日期: 2024-01-28

基金项目: 国家自然科学基金(52222804, 52221002)

作者简介: 白芷毓(1998-), 男, 主要从事大跨度浮式桥梁研究, E-mail: bzy916@my.swjtu.edu.cn。

魏凯(通信作者), 男, 博导, 教授, E-mail: kaiwei@home.swjtu.edu.cn。

Received: 2024-01-28

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 52222804, 52221002)

Author brief: BAI Zhiyu (1998-), main research interest: sea-crossing floating bridges, E-mail: bzy916@my.swjtu.edu.cn.

WEI Kai (corresponding author), PhD, professor, E-mail: kaiwei@home.swjtu.edu.cn.

vehicle loads. However, the feasibility and applicability of such schemes need validation. This paper utilized finite element software to compute the response of a floating suspension bridge model under the vehicle load. The effect of changes in the submerged depth and cable inclination angle on the response was investigated using methods such as modal analysis. The study revealed that adjusting the parameters of the submerged depth and cable inclination angle primarily alters the first two vibrational modes, significantly affecting the lateral responses. Increasing the submerged depth of the platform and adding inclined tension leg cables effectively reduced vibrations under the vehicle load. Additionally, the optimal modification of the cable inclination angle requires specific analysis. Therefore, during the design phase, the relevant tension leg platform design parameters are crucial for finding the most suitable configuration, which can enhance the overall feasibility and applicability of floating bridges under the vehicle load.

Keywords: long-span floating suspension bridge; vehicle load; tension leg platform; design parameters; dynamic response characteristics

随着沿海地区经济的高速发展,深水浮式桥梁设计开始在水深较深、海底土质较软的地理环境下展现出较大的应用优势,特别是以张力腿平台(TLP)以及 SPAR 平台等深水浮式平台为基础的大跨度浮式桥梁拥有了越来越广泛的应用前景^[1]。目前,其上部结构采用斜拉桥、悬索桥形式已被提出,此类结构依靠浮式平台中浮箱提供的浮力承载上部结构自重和活载,相比常规固定式桥梁基础,其同时具有适用大水深、造价低、施工难度小等优点,随着现代桥梁理论的进步,有关浮式桥梁的概念逐渐开始深入发展^[2-3]。

在大跨度浮式桥梁中,风、浪荷载作为主要的控制荷载考虑进大跨度浮桥的设计中。但在日常使用过程中,行车荷载才是其不可忽视的影响因素,在浮式桥梁上运行的车辆会引起桥梁的振动,过大的行车荷载可能会与桥梁自身的振动发生耦合作用,导致结构的损坏。Wang 等^[4]编写相应的计算程序求解了浮桥的位移响应,研究了浮桥中不同速度的移动荷载,对浮桥间应力分布的影响。针对一种新型海岸囊式浮桥,王欢欢等^[5]通过比较浮桥中部承重板的位移,研究了载重、速度及拼装间隙等因素对浮桥位移响应的影响。Fu 等^[6]对简易带式浮桥进行了移动荷载作用下的动力响应研究,验证了所采用数值方法的可行性。

以上研究发现浮式桥梁存在基础刚度较弱、响应较大等现象,为解决此类问题,研究者对于在设计与应用过程中更改其相关结构体系进行了研究。目前针对浮式桥梁的结构体系优化设计较多集中于小跨度结构,黄恒等^[7]通过试验发现,在浮桥前设置浮式平台,其屏蔽效应可以有效减弱布设于平台内侧的浮桥的运动响应。Wan 等^[8]提出了 3 个曲率半径不同的弯曲浮桥的概念,同时考虑了 3 种不同的梁截面,评估其对桥梁性能的影响,对进一步研

究的设计参数提出了建议。对于大跨度浮式桥梁结构体系的研究主要倾向于其所受到的不同环境荷载,Wei 等^[9]提出了一种将波浪荷载和风荷载的计算与通用软件和计算脚本相结合的大跨度浮式悬索桥动力分析方法,并研究了垂跨比对大跨度浮塔悬索桥在波浪和风作用下动力响应的影响,结果表明:浮桥的自振周期随着垂跨比的减小而减小,垂跨比对大跨度浮桥的动力响应有显著影响。Luan 等^[10]通过改变浮式桥梁跨度、梁宽、梁高以及各参数的比值探究了在自重、交通、环境荷载下的剪力滞效应对浮桥的影响。姜海西等^[11]提出,综合应用深水采油钻井的 TLP 平台和 Spar 平台的优点,采用同时包含张力腿锚索和悬链线锚索的系泊系统,可能进一步提高大跨度浮式桥梁的结构稳定性与安全性。

对于车辆作用下小跨径的浮式桥梁的结构体系研究主要向其细部构造的优化、附属结构的研究发展,而大跨度的浮式桥梁目前应用较少,其结构体系研究主要面向其上部结构与浮式基础的优化和讨论。由于结构的相似性,小跨径的结构体系研究经验值得大跨度浮式桥梁借鉴。大跨度浮式桥梁的相关研究主要考虑环境荷载,在行车荷载作用下增加大跨度浮式桥梁结构刚度与稳定性,特别是其张力腿基础设计方面的研究仍需深入开展。笔者通过已构建的浮桥-行车荷载动力分析方法,以 Bjørnafjorden 峡湾的跨海浮式悬索桥设计方案为工程背景,通过有限元模型时域分析,探明不同张力腿基础设计参数的浮桥方案在行车荷载作用下的响应规律与响应特性。

1 大跨度浮式悬索桥建模与分析方法

在欧洲 E39 号高速公路升级改造项目中,挪威公共道路管理局(NPRA)在 Bjørnafjorden 峡湾中提

出一种大跨度浮式悬索桥建设方案^[12]。该浮式悬索桥采用三主跨设计,跨径布置为(200+1 385+1 385+1 385+200)m。端部两桥塔为固定桥塔,中间两桥塔采用张力腿基础。两张力腿基础所处水深分别为550、450 m。上部结构与传统的悬索桥结构一致,其主梁、桥塔、张力腿基础等结构的具体参数见文献[9,12],其中浮式桥塔#1与浮式桥塔#2分别对应连接在张力腿基础#1与#2上,图1为整座大跨度浮式悬索桥方案示意图。

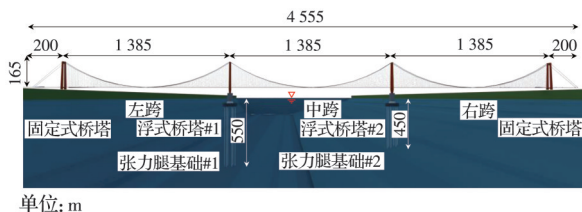


图1 大跨度浮式悬索桥设计方案

Fig.1 Bjornafjorden floating bridge scheme

1.1 大跨度浮式悬索桥设计方案建模

为了计算该大跨度浮式桥梁在行车荷载作用下的动力响应,在海洋工程软件USFOS中建立有限元模型进行动力分析。USFOS软件是挪威船级社(DNV)研发的有限元结构分析程序,可应用于大

型浮式结构的动力分析,其有效性已被证明^[9]。基于文献[12]中的详细数据,在USFOS中建立包含有车道的大跨度浮式悬索桥与固定式悬索桥模型,有限元模型中车道的模拟采用加入虚拟梁的方法进行,如图2所示。

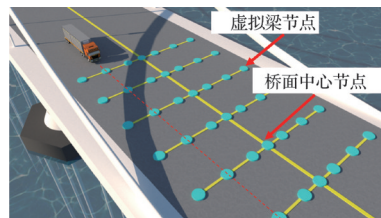


图2 虚拟梁示意图

Fig.2 Virtual beam diagram

虚拟梁为垂直于主梁,从主梁中心节点向最外侧车道中心延伸的“鱼刺”型结构。虚拟梁具有无穷大刚度和忽略不计的密度,对原模型几乎不产生任何影响^[13]。虚拟梁节点将力以集中力和力矩的方式传递到桥面中心节点,从而模拟车辆行车道的偏载效应。该设计为双向六车道设计,车道偏心距离分别为2.5、6.125、9.875 m,有限元模型整体如图3所示。

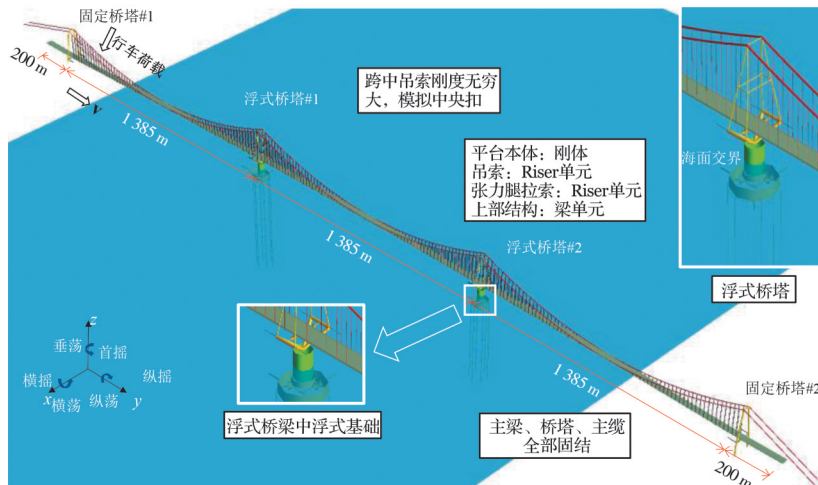


图3 大跨度浮式悬索桥方案有限元模型

Fig.3 Finite element model of the long-span floating bridges

模型中张力腿基础的相关水动力计算方法与设置见文献[12,14],其中浮力根据浮式基础的浮箱淹没在水下的体积进行计算。

模型建立后,通过USFOS对该大跨度悬索桥进行模态分析,以验证模型正确性并观察其基本结构特征,取前10阶振型的周期列于表1,通过与文献[12]结果的对比较验证了模型的正确性。由表1可见,该大跨度浮式悬索桥柔度较大,结构主要振型特点中,横向运动占主导地位。与相似的固定式悬索桥方案对比发现,该大跨度浮式桥梁设计横向柔度较大的

原因不只是因其TLP浮式基础不能提供较大的横向刚度,本身的超大跨度设计也会存在一定的影响。

1.2 行车荷载下结构运动响应分析方法

在无风无浪的使用环境中,行车荷载是影响浮桥安全性的首要因素,但因实际交通量较小^[15]、问题研究方法不清晰等因素,对车辆作用下大跨度浮式桥梁响应问题的研究较少,其具体响应参数鲜见于文献。在缺少车辆、车队响应数据参考下,如何合理设计相关参数成为制约大跨度浮式桥梁发展的关键问题之一。

表 1 大跨度浮式悬索桥自振特性及振型特点

Table 1 The period and characteristics of the floating bridge

模态阶数	自振频率/Hz	自振周期/s	主要振型特点
1	9.22×10^{-3}	108.42	浮式桥塔横向对称运动
2	1.11×10^{-2}	89.70	浮式桥塔横向反对称运动
3	3.63×10^{-2}	27.53	浮式桥塔#1纵向运动
4	3.86×10^{-2}	25.89	浮式桥塔#2纵向运动
5	4.03×10^{-2}	24.81	主梁横向运动
6	4.32×10^{-2}	23.17	主梁横向运动
7	4.49×10^{-2}	22.26	主梁横向运动
8	6.01×10^{-2}	16.63	浮式桥塔及主梁扭转运动
9	6.83×10^{-2}	14.64	浮式桥塔及主梁扭转运动
10	8.09×10^{-2}	12.36	主梁横向运动

关于汽车移动荷载的模拟有很多方法,根据不同的对象和研究问题,汽车移动荷载主要可模拟为移动集中力、移动分布力、移动简谐力、移动质量、移动质量—弹簧、移动车辆振动系统等。在所有模拟方法中,考虑车桥耦合作用的方法对于解决车辆过桥问题更为精确,但是,车桥耦合振动分析方法也更为复杂,耗时耗力。Fryba^[16]提出,如果移动荷载的质量远远小于桥梁自身质量,对于研究车桥系统中桥梁的振动响应问题,几种模拟车辆的方法结果差别不大,将车辆看作是移动的集中力即可获得较高的精度(图4)。由于研究的大跨度浮式悬索桥质量远大于车辆质量,故可采用移动集中力模拟行

$$y(x, \Delta t) = y_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2 [n^2 (n^2 - \alpha^2)^2 + 4\alpha^2 \mu^2]} \left\{ n^2 (n^2 - \alpha^2) \sin(n\bar{\omega}\Delta t) - \frac{n\alpha [n^2 (n^2 - \alpha^2)^2 - 2\mu^2]}{(n^4 - \mu^2)^{1/2}} e^{-\omega_b \Delta t} \sin(\omega_n^n \Delta t) - 2n\alpha\mu (\cos(n\bar{\omega}\Delta t) - e^{-\omega_b \Delta t} \cos(\omega_n^n \Delta t)) \right\} \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (2)$$

式中: ω_b 、 $\bar{\omega}_n$ 和 ω_n^n 分别对应梁的临界阻尼频率以及对应阶数的固有频率和阻尼固有频率; n 为对应振型的阶数; $\bar{\omega}$ 为移动集中力的频率; α 和 μ 分别为速度参数和阻尼参数两个无量纲参数,具体表示为

$$\alpha = \frac{\bar{\omega}}{\bar{\omega}_1} = \frac{cl}{\pi} \left(\frac{m}{EI} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$$\mu = \frac{\omega_b}{\bar{\omega}_1} = \frac{\omega_b l^2}{\pi} \left(\frac{m}{EI} \right)^{1/2} \quad (4)$$

式中: y_0 为集中力 F 作用于梁跨中时梁的跨中点竖向位移,其值为

$$y_0 = \frac{Fl^3}{48EI} \approx \frac{2Fl^3}{\pi^4 EI} = \frac{2F}{ml\bar{\omega}_1^2} \quad (5)$$

将式(5)代入式(2)可以发现,移动集中力作用下梁的振动主要取决于集中力 F 的大小和速度以及结构本身的特性。在车辆-浮桥相互作用的相关问题研究过程中,车辆的重量、速度和浮桥的结构特性是研究的关键参数。此外,可以观察到,在车辆

车荷载,研究不同基础设计参数的大跨度浮式桥梁的车致振动性能。其中大跨度浮式悬索桥在移动集中力作用下的解析解较复杂,为展示其响应特性与规律,以简支梁为例对该模型进行展示与说明,其中移动集中力 F 为车辆荷载,其数值大小等于车辆重量, l 为模型中梁单元长度, v 为车辆速度。当车辆移动到某一梁段时,设车辆某一时刻在该梁段移动的时间为 Δt 。

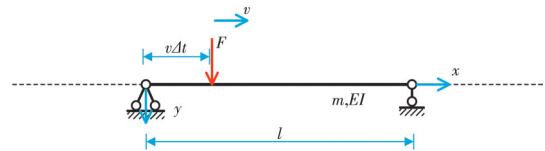


图 4 移动集中力模型

Fig. 4 Calculation diagram of the moving constant force model

其梁的振动微分方程为

$$EI \frac{\partial^4 y(x, \Delta t)}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 y(x, \Delta t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial y(x, \Delta t)}{\partial t} = \delta(x - v\Delta t) F \quad (1)$$

式中: c 为阻尼系数; δ 为狄拉克函数。可采用模态分解法和模态叠加法对式(1)求解数值解,具体步骤可参考文献[17]。梁的振动位移可表示为

离开梁后,梁仍继续以自由振动的形式进行振动,不同张力腿基础的大跨度浮式悬索桥的振动现象与此模型类似,以上移动集中力可以通过定义一系列作用在桥梁节点上的外力时程序列来进行模拟,以影响线的形式将其加载于对应的虚拟梁节点上即可获得结构在对应车辆下的动力响应。

2 张力腿基础浮箱淹没深度影响分析

在其他结构参数保持不变的情况下,不同的基础淹没深度将导致基础中张力腿所受的预拉力发生变化^[18]。预拉力的大小直接影响整个张力腿基础重力与浮力之间的平衡关系,并以此改变浮式基础刚度,从而对张力腿基础的运动响应产生显著影响。尽管已有许多学者对预拉力对张力腿基础结构的运动响应进行了研究,但对采用张力腿基础的大跨度浮式悬索桥的研究仍相对较为有限。

考虑现有的规范和相关道路交通法规,将汽车

近似简化为移动集中力荷载,重量大小为 $50 \text{ t}^{[19]}$ 。速度设置为 80 km/h ,以移动荷载的方式从桥梁靠近张力腿基础#1的一端出发,在USFOS中桥梁有限元模型的第3车道(偏心距离 9.875 m)进行加载。通过多次试验分析,选择在整个模型平衡后的 50 s 加载,计算时长为 600 s 。

2.1 工况设置

当调整张力腿基础的淹没深度时,设计方案应尽量确保主梁线形与桥下净空不发生改变。因此,该设计工况的要求是保持水深和基础未淹没部分的体积不变,仅改变张力腿基础淹没部分的淹没深度,调整结构参数的同时保持关键几何特征稳定,并确保设计的安全性和可行性。同时,改变不同淹没深度下平台本体的结构密度,从而使张力腿基础的自重保持不变。共设置7种不同淹没深度: -5 、 -2 、 -1 、 0 、 5 、 2 、 1 m ,其中负数为淹没深度减小, 0 m 为原设计方案,其余工况数据也以此确定,淹没深度如图5中的 Δh 所示(示意图中淹没深度增加,数值为正数)。另外,浮箱淹没深度的改变同样会引起张力腿基础的水动力附加质量变化,其取值参照文献[18]进行设置。

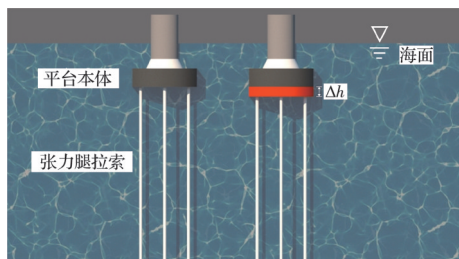


图5 浮式平台淹没深度设置示意图

Fig. 5 Submerged depth setting diagram of the floating platform

2.2 计算结果与分析

与桥梁面临的多种环境荷载相比,行车荷载激发的桥梁振动更多地被桥梁自身的低阶模态影响,在各工况模型建立后,不同淹没深度的大跨度浮式悬索桥自振特性及振型特点如图6所示。

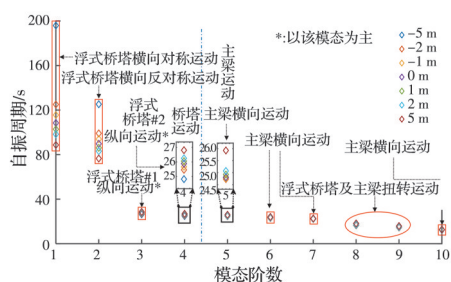


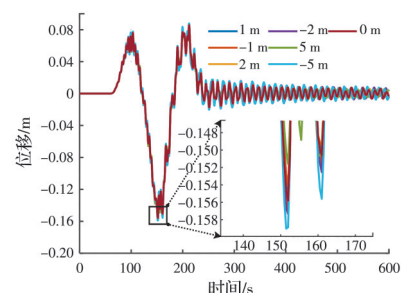
图6 不同淹没深度方案下前10阶模态自振特性

Fig. 6 Natural vibration characteristics of the bridges with different submerged depth

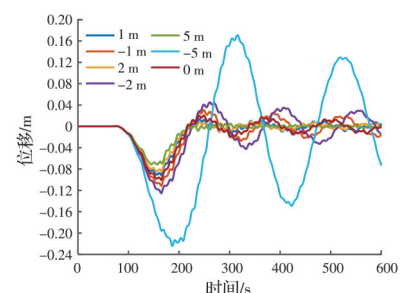
基于观察到的结构自振模态可知,对于不同淹没深度的设计方案,大跨度浮式悬索桥前4阶模态主要由浮式桥塔的运动引起,而对应的第5阶至第10阶模态则主要由主梁的运动引起。淹没深度的改变主要体现在浮桥的前两阶模态中,随着淹没深度的减小,从正数到负数减小的过程中,大跨度浮式悬索桥的自振周期有不同程度的增大。这是因为在该过程中,张力腿中的预拉力也不断减小,导致横向刚度不断减小。而在3阶以上的模态中,淹没深度的变化基本不改变自振周期的数值。因此可以看出:在整个过程中,淹没深度的改变主要改变了桥塔的横向刚度以及前两阶自振周期,过量减小淹没深度会导致前两阶周期的大幅放大,但过多地增加淹没深度不会对应地大幅增加桥梁的横向刚度。

值得一提的是,在淹没深度为 -5 m 时,其第5阶模态出现了浮式桥塔的纵向运动,一般情况下对浮桥的横向振动影响较小,但在一些外部荷载作用下可能会激发对应的运动。

基于以上工况设置,车辆通过不同方案浮桥模型跨中节点的竖向与横向位移如图7所示。



(a) 竖向运动位移



(a) 横向运动位移

图7 主梁中跨跨中点响应位移

Fig. 7 Girder displacement at the midpoint of the middle span

由图7可以发现,当单车通过大跨度浮桥时,改变浮式基础的淹没深度不会改变桥梁竖向的响应特性,但会对响应的数值产生放大和缩小。其中淹没深度为 -5 m 的工况响应最大,而 5 m 的工况响应最小,这说明淹没深度的变化同样会对桥梁的竖

向位移产生一定影响,这是因为淹没深度的改变会对结构的横向刚度产生影响,同时也伴随着对其结构转动的约束改变,而一小部分竖向位移则是由转动引起的(几种工况的转动位移极值约为 2×10^{-4} rad),结果也与其上高阶振型中的竖向模态周期随淹没深度的减小而增大相对应。

与桥梁的竖向响应相比,浮桥的横向响应会随淹没深度的变化产生更明显的响应特性变化,特别是当淹没深度为 -5 m时,桥梁的横向位移程度比竖向更为剧烈,且当车辆离开后桥梁也会产生更为明显的长时间大幅振动。这是因为在该情况下,浮式桥梁的一阶周期远大于其他情况,且横向刚度远弱于其他方案,行车荷载激发了浮桥的一阶振动,引发了更为剧烈的横向振动。而在其余情况下同样发现,加大浮式基础的淹没深度可以有效增加方案的横向刚度并抑制横向位移,淹没深度越大,振动剧烈程度越小,同时,车辆离开后的浮桥振动也可以被有效限制。

各工况响应曲线中极值的绝对值可以更明显地展示上述规律,如图8所示。

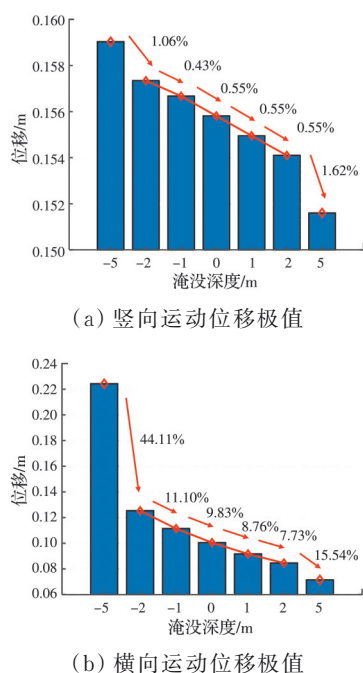


图8 主梁中跨中点响应位移极值

Fig. 8 Girder maximum displacement at the midpoint of the middle span

总的来说,淹没深度的改变对浮桥方案的横向响应的影响远大于竖向响应,淹没深度越大,浮桥结构刚度越大,振动幅度越小。当基础淹没深度从 -5 m增大到 -2 m时,跨中点横向响应位移极值可减少44.11%,但值得注意的是,淹没深度从 2 m增大到 5 m的过程中其极值仅减少15.54%,综合考虑

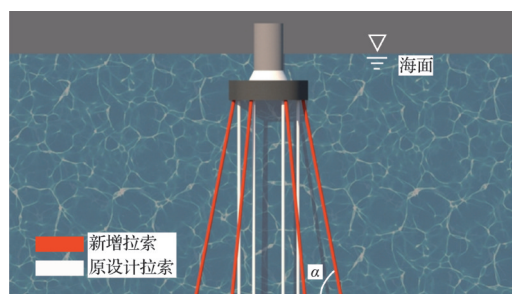
对应的施工难度与经济效益,在浮桥方案的设计与选择中也不能一味地增加基础的淹没深度,而更要关注避免选择过小的淹没深度,以防止在行车荷载作用下对应的浮桥结构产生比竖向更为显著的横向振动。

3 张力腿拉索倾角影响分析

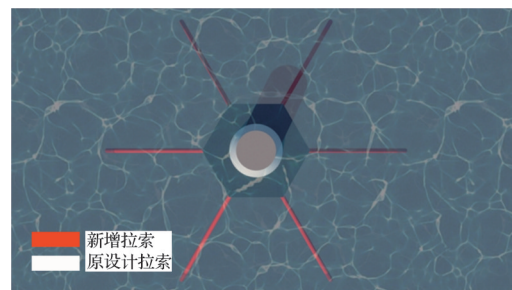
当前的大跨度浮桥方案中张力腿基础横向刚度较弱的主要原因是张力腿拉索与平台本体垂直布置,缺乏横向的约束刚度。为了提高其横向刚度,魏凯等^[18]提出了通过增加倾斜布置的张力腿拉索的设计方案,并对其在环境荷载作用的情况下进行分析,研究发现,该措施对大跨度浮式悬索桥的响应影响较大。基于这种设计方案,在原张力腿基础设计方案上增加了6根倾斜的张力腿拉索,这样可以在改变结构横向刚度的同时确保结构的稳定。

3.1 工况设置

对于6根新增的倾斜张力腿拉索,其上端结点位置与原有张力腿拉索上端结点保持一致;底端锚固点则位于平台本体水平轴线上。在不同的倾角下,张力腿拉索的布置形式各异,其具体布置形式如图9所示,其中 α 为不同工况下的张力腿拉索倾角。



(a) 张力腿拉索布置平面图



(b) 张力腿拉索布置俯视图

图9 张力腿拉索布置图

Fig. 9 Tension leg cable layout diagram

选取6种不同的张力腿拉索倾角,分别为 60° 、 65° 、 70° 、 75° 、 80° 、 85° ,并将其与原设计方案(90°)进行比较,以分析张力腿拉索倾角对大跨度浮式悬索桥在行车荷载下动力响应的影响。

3.2 计算结果与分析

不同拉索倾角下的大跨度浮式悬索桥方案自振特性及振型特点如图 10 所示。

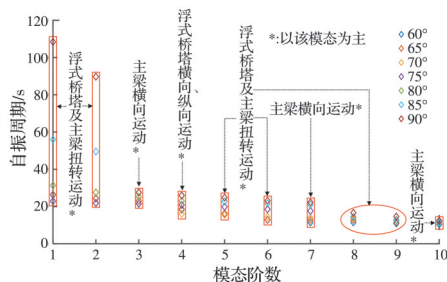


图 10 不同拉索倾角方案下前 10 阶模态自振特性
Fig. 10 Natural vibration characteristics of the bridges with different tension leg cables.

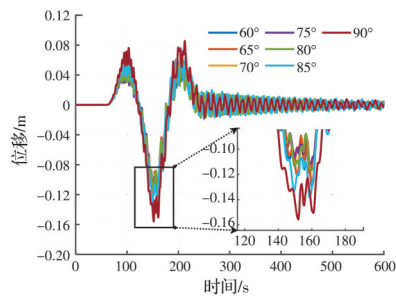
值得注意的是,不同拉索倾角对于不同浮桥方案模态特性的影响要比其他结构参数的影响复杂得多,图 10 仅展示了 7 种工况中的主要成分,其具体情况即对振动影响较大的前 5 阶模态如表 2 所示。

从表 2 可以看出,增加倾斜布置的张力腿拉索后,浮式桥塔及主梁扭转运动在各阶结构振型中频繁出现,倾角的小幅度变化不会改变结构的振型特点,仅从对应的各阶周期数值上去影响结构,拉索倾角的改变对方案的前两阶自振周期的改变最为显著,随着拉索倾角的不断增大,结构振型特点中更易出现结构的横向运动,而各方案相对应的各阶周期不呈现明显的规律性,但可以发现,增加倾斜布置的张力腿拉索可以有效降低方案的各阶周期,以增强结构的各方向刚度。

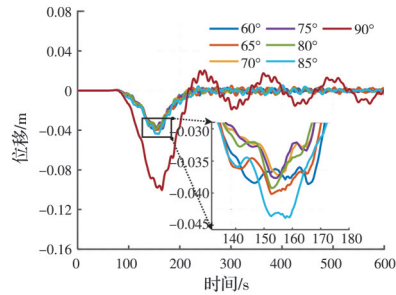
对应的车辆与车道参数保持不变,从靠近张力腿基础#1 的一端出发通向另一侧,计算时长也设置为 600 s,中跨跨中节点的竖向与横向位移如图 11 所示。

对应的各拉索倾角下浮桥方案响应极值的绝对值如图 12 所示。

从图 12 可以看出,增加倾斜布置的张力腿拉索可以有效降低行车荷载作用下的大跨度浮桥响应,特别是桥梁的横向响应,并可以有效限制车辆离开



(a) 竖向运动位移



(b) 横向运动位移

图 11 主梁中跨跨中点响应位移

Fig. 11 Girder displacement at the midpoint of the middle span

后桥梁的振动,但随着张力腿拉索倾角的增大,响应极值与响应特性不存在明显的规律性。这是因为,整个结构的刚度是综合在增加了张力腿拉索的结构重力、浮力以及张力腿中的张力中获得的,不同拉索倾角对应着不同的张力,同时,张力会根据倾角将其向不同方向分配,以此增强不同方向的刚度,导致了这一现象的发生。

对比不同拉索倾角下的极值可以发现,拉索倾角分别在 75°与 70°时达到竖向与横向运动的最值,对于竖向响应极值的改变比横向更为明显(横向最大下降 11.87%,竖向最大下降 18.33%),但倾斜拉索的从无到有对横向的影响更为突出(横向下降 128.97%,竖向下下降 12.67%)。因此,在增加了倾斜拉索的基础上,若要对桥梁的竖向响应进行调整而对横向响应影响较小,改变张力腿拉索倾角是较为有效的手段,但在何种角度达到最优,则需要通过试验与计算进行分析。

表 2 不同拉索倾角方案下前 5 阶振型特点

Table 2 The first five characteristics of the floating bridge schemes

阶数	振型特点			
	60°与 65°	70°与 75°	80°与 85°	90°(原方案)
1 阶	浮式桥塔及主梁扭转运动	浮式桥塔及主梁扭转运动	浮式桥塔#1 横向运动	浮式桥塔横向对称运动
2 阶	浮式桥塔及主梁扭转运动	浮式桥塔及主梁扭转运动	浮式桥塔#2 横向运动	浮式桥塔横向反对称运动
3 阶	主梁横向运动	主梁横向运动	浮式桥塔#1 纵向运动	浮式桥塔#1 纵向运动
4 阶	浮式桥塔及主梁扭转运动	浮式桥塔#1 横向运动	浮式桥塔#2 纵向运动	浮式桥塔#2 纵向运动
5 阶	浮式桥塔及主梁扭转运动	浮式桥塔#1 纵向运动	浮式桥塔及主梁扭转运动	主梁横向运动

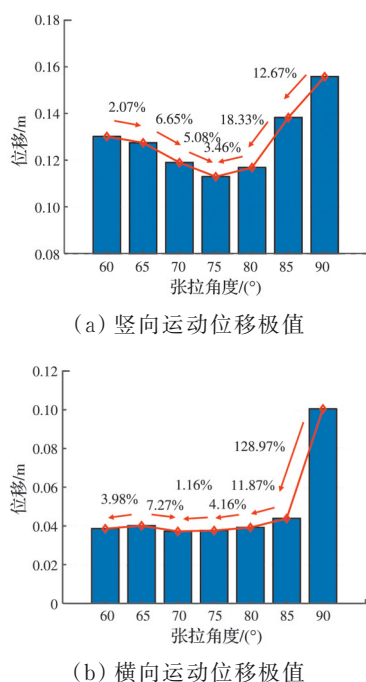


图 12 主梁中跨跨中点响应位移极值

Fig. 12 Girder maximum displacement at the midpoint of the middle span

4 结论

通过研究得到如下主要结论:

1)建立了带有车道的大跨度浮式悬索桥有限元模型,通过振型分析发现,该大跨度浮式悬索桥方案各阶周期较大,浮式基础的应用使得大跨度浮式悬索桥刚度较弱,同时,其本身跨度较大也有一定影响,应采取合适的结构体系设计限制其在行车荷载下的运动响应。

2)基础浮箱淹没深度的改变主要体现在浮桥方案的前两阶模态中,随着淹没深度的减小,大跨度浮式悬索桥的各阶自振周期随之增大。加大浮式基础的淹没深度可以有效增加方案的刚度并抑制桥梁位移,特别是横向位移。

3)张力腿拉索倾角的变化同样对方案的前两阶自振周期的改变最为显著,倾角的小幅度变化不会改变结构的振型特点,增加倾斜布置的张力腿拉索可以有效降低行车荷载作用下的大跨度浮桥响应,特别是横向响应,但在何种角度可以使行车荷载作用下的浮桥响应达到最小,则需要通过试验与计算进行分析得出。

行车荷载作用下,大跨度浮式悬索桥的张力腿基础设计参数调整对横向响应影响较大,相关参数结论与风、浪荷载作用下类似。需要说明的是,本文中行车荷载未考虑与结构之间的耦合关系,探究将风、浪等环境荷载与车辆和桥梁系统进行耦合分析

的方法,是未来研究的重点,同时,本文的模型均假设结构材料为线弹性,可在后续模拟分析中考虑其非线性的影响。

参考文献

- [1] 张枫,魏凯,洪杰,等. 船行波作用下桥梁浮式施工平台动力响应分析[J]. 水利水电技术, 2020, 51(8): 69-75. ZHANG F, WEI K, HONG J, et al. Dynamic response analysis on floating construction platform under effect of ship-generated wave [J]. Water Resources and Hydro-power Engineering, 2020, 51(8): 69-75. (in Chinese)
- [2] 程斌,向升. 深水浮式桥梁研究应用进展[J]. 土木工程学报, 2021, 54(2): 107-126. CHENG B, XIANG S. Advances in research and application of deep-water floating bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(2): 107-126. (in Chinese)
- [3] CHENG Z S, GAO Z, MOAN T. Extreme responses and associated uncertainties for a long end-anchored floating bridge [J]. Engineering Structures, 2020, 219: 110858.
- [4] WANG B, SUN Q, LI J X, et al. Study on the dynamic response of the floating bridge subjected to a single moving load [C]// International Conference on Material Engineering and Mechanical Engineering. Hangzhou, Zhejiang, China. October 23-25, 2016.
- [5] WANG H H, JIN X L. Dynamic analysis of maritime gasbag-type floating bridge subjected to moving loads [J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2016, 8(2): 137-152.
- [6] FU S X, CUI W C. Dynamic responses of a ribbon floating bridge under moving loads [J]. Marine Structures, 2012, 29(1): 246-256.
- [7] 黄恒,陈徐均,计淞,等. 浮式平台屏蔽效应影响下的浮桥动态响应特性研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(5): 793-799. HUANG H, CHEN X J, JI S, et al. Investigation of the dynamic responses of floating bridges under the shielding effect of floating platforms [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, 44(5): 793-799. (in Chinese)
- [8] WAN L, DAI J, JIANG D Q, et al. Parametric study and dynamic response analysis of three single curved discrete pontoon floating bridges [J]. Ships and Offshore Structures, 2022, 17(8): 1788-1801.
- [9] WEI K, ZHANG F, ZHANG M J, et al. Influence of the sag-to-span ratio on the dynamic response of a long-span bridge suspended from floating towers under wave and wind loads [J]. Ships and Offshore Structures, 2022, 17(5): 1023-1041.
- [10] LUAN C Y, MOAN T, KVÅLE K A, et al. Shear lag

- effects on global bending moments in a long-span pontoon bridge under self-weight, traffic and environmental loads [J]. *Marine Structures*, 2024, 93: 103518.
- [11] 姜海西,任红梅. 浮式深水基础跨海大桥结构体系研究初探[J]. *结构工程师*, 2017, 33(5): 162-169.
JIANG H X, REN H M. Preliminary study on structural systems in sea-crossing bridge of floating deep-water foundation [J]. *Structural Engineers*, 2017, 33(5): 162-169. (in Chinese)
- [12] OH. MOE. Analysis and design of Bjørnafjorden TLP supported suspension bridge subjected to large ship collisions and extreme environmental loads [D]. Trondheim, Torgarden, Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2016.
- [13] 冯冠杰,陈淮,王艳,等. 计算车桥耦合振动路面不平度影响的虚拟梁元法[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2019, 39(5): 59-67, 87.
FENG G J, CHEN H, WANG Y, et al. Virtual beam element method used to calculate the vehicle-bridge coupled vibration with road roughness [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2019, 39(5): 59-67, 87. (in Chinese)
- [14] TABESHPOUR M R, AHMADI A, MALAYJERDI E. Investigation of TLP behavior under tendon damage [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 156: 580-595.
- [15] EIDEM M E. Overview of floating bridge projects in Norway [C]//*Proceedings of ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, June 25-30, 2017, Trondheim, Norway. 2017
- [16] FRYBA L. Nonelastic behaviour of bridges under moving load [J]. *Stavebnicky Cas*, 1971, 19(1): 3-22.
- [17] GAO Q F, WANG Z L, GUO B Q, et al. Dynamic responses of simply supported girder bridges to moving vehicular loads based on mathematical methods [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 2014: 514872.
- [18] 魏凯,张枫,廖翔,等. 张力腿基础刚度对大跨浮式悬索桥风-浪动力响应的影响[J]. *土木工程学报*, 2022, 55(6): 47-61, 101.
WEI K, ZHANG F, LIAO X, et al. Effect of tension leg foundation stiffness on dynamic responses of a long-span floating suspension bridge under wind and wave loads [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2022, 55(6): 47-61, 101. (in Chinese)
- [19] 王松根,李松辉. 公路桥梁限载标准的可靠性分析方法[J]. *工程力学*, 2010, 27(10): 162-166, 181.
WANG S G, LI S H. Reliability-based analysis on the vehicle weight limit of highway bridges [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(10): 162-166, 181. (in Chinese)

(编辑 胡玲)