

# 结构关键参数对三塔悬索桥动力特性的影响<sup>\*</sup>

王 浩, 程怀宇, 陶天友, 邓稳平, 李爱群

(东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室 南京, 210096)

**摘要** 以世界第一大跨度三塔悬索桥——泰州长江公路大桥为研究对象, 基于 ANSYS 建立了该桥的三维有限元模型, 并采用子空间迭代法对其进行了模态分析, 得到了该桥的相关动力特性参数并对其进行了分析。在此基础上根据该桥的结构型式和受力特点, 重点研究了矢跨比、中塔刚度、中塔形式以及土-桩-结构作用等关键参数对结构动力特性的影响, 深入分析了该桥动力特性随上述结构关键参数的变化趋势。结果表明, 增大主缆矢跨比、提高中塔纵向刚度有利于改善大桥的颤振性能。所得结论可为大跨度三塔悬索桥的动力设计和研究工作提供参考。

**关键词** 三塔悬索桥; 动力特性; 矢跨比; 中塔刚度; 中塔型式; 土-桩-结构作用

**中图分类号** U442; U448.25

## 引 言

近年来, 随着全球交通建设和桥梁建造技术的不断创新, 桥梁工程已经由跨越江河时代迈向跨海时代, 涌现出一系列跨海大桥, 如日本明石海峡大桥、杭州湾跨海大桥、青岛跨海大桥等。对于跨越宽阔水域的大型通道工程, 采用大跨度悬索桥结构将是一种首选桥式。除了经典的两塔悬索桥结构以外, 在水域既深又宽阔的地段, 还可以采用多塔等跨的布置形式以延伸其跨越功能, 从而获得在技术上的可行性和经济上的合理性<sup>[1]</sup>。

就大跨度悬索桥而言, 目前研究主要集中在两塔单跨悬索桥方面<sup>[2-3]</sup>, 对于大跨度多塔悬索桥的研究尚处于起步阶段。梁鹏等<sup>[4]</sup>对两塔和三塔悬索桥的动力特性进行了分析对比, 并探讨了中塔结构的选型。钟建驰<sup>[5]</sup>研究了矢跨比、加劲梁高度、中塔高度等三塔悬索桥关键参数对其结构行为的影响, 然而未见有文献对土-桩-结构相互作用等复杂因素对多塔悬索桥结构动力特性的影响进行专门分析。多塔悬索桥属细长柔性结构, 在地震、风荷载等动力荷载的作用下的受力特性及其机理较为复杂, 因此必须研究其动力特性, 以进一步掌握结构在各类动荷载作用下的动力行为, 保障结构的安全性。

泰州长江公路大桥(泰州大桥)主跨跨径为 1 080 m 的三塔悬索桥, 为同类型桥梁跨径世界第一<sup>[5]</sup>。现以该桥为研究对象, 分析了矢跨比、中塔刚度、中塔形式等结构关键参数以及土-桩-结构作用对三塔悬索桥动力特性的影响。对于恒载集度、中央扣等因素, 已有文献进行过相关的研究<sup>[6]</sup>。鉴于未来跨江跨海工程的不断新建, 大跨度三塔悬索桥将得到广泛应用, 研究结论可为其抗风抗震设计提供参考依据。

## 1 工程背景

泰州大桥工程位于江苏省境内长江中段, 桥位处江面宽约 2.4 km, 河床呈“W”形。综合考虑桥位处河势水文、航道状况以及深水岸线的充分利用, 设计时主桥桥跨结构布置为(390+1 080+1 080+390)m 的两主跨三塔悬索桥, 见图 1。加劲梁采用封闭式流线型扁平钢箱梁, 加劲梁设上斜腹板及下斜腹板构成导风嘴。钢箱梁节段标准长度为 16 m, 中心线处梁高 3.5 m。主缆在设计成桥状态矢跨比为 1/9, 两根主缆横向间距为 35.8 m。桥塔采用门式框架结构, 两边塔为混凝土塔, 中塔为钢塔, 边塔高 178 m, 中塔高 182.50 m。两个边塔在顺桥向为

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(51378111, 51278104); 教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目(NCET-13-0128); 江苏省交通科学研究计划资助项目(2011Y03); 亚热带建筑科学国家重点实验室开放研究基金重点资助项目(2014KA04); 中央高校基本科研业务费优秀青年教师专项资金资助项目(2242012R30002)

收稿日期: 2012-11-05; 修回日期: 2013-03-18

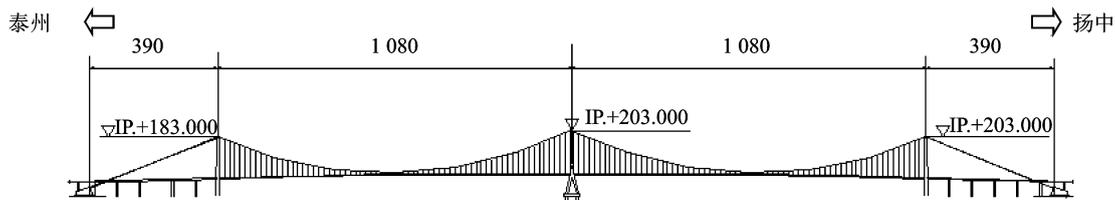


图 1 泰州长江大桥结构布置图(单位:m)

Fig. 1 Configuration of Taizhou bridge(unit:m)

单柱形结构,而中间桥塔在顺桥向则采用人字形结构,以增强其纵向抗弯刚度。

该桥边跨无吊杆,中塔下横梁上不设竖向支座,也不设 0 号索,在中塔横梁与主梁间设横向抗风支座,限制主梁的横向位移,设上下游竖向阻尼器。中塔处设弹性索,以适当限制主梁的纵向位移。下塔柱底部与沉井上盖板相连。边塔处设置竖向拉压支座、侧向抗风支座和纵向阻尼支座。

## 2 三塔悬索桥有限元模拟及动力特性分析

基于 ANSYS 建立了该桥的三维有限元计算模型,其中:加劲梁和桥塔等构件简化为空间梁单元,加劲梁采用鱼骨梁模式;主缆、吊杆则简化为空间杆单元,并设定只受拉不受压特性,主缆按吊杆的吊点

进行离散;主梁与吊杆之间采用刚性横梁模拟,采用弹簧单元模拟中塔与加劲梁间的纵桥向弹性约束;边缆的弹性模量采用 Ernst 公式<sup>[7]</sup>修正。边塔与加劲梁间在横桥向、竖向及绕纵桥向轴设置约束方程,中塔与加劲梁间仅在横桥向设置约束方程。

子空间迭代法<sup>[8]</sup>是求解大型矩阵特征值问题的最常用且有效的方法之一,被广泛应用于各类工程结构的动力特征值求解。文中采用子空间迭代法(subspace method)<sup>[9]</sup>分析了大桥成桥状态结构的前 100 阶振型,其结构主要振型见图 2,主要振型和频率值如表 1 所示。

由表 1 和图 2 可知,与传统两塔悬索桥两端采用巨大的重力式锚碇结构不同,三塔悬索桥中塔结构的存在使得其动力特性与传统两塔悬索桥既有相似性,又存在一些差别。其一阶频率值与等跨径两塔悬索桥接近。中塔的存在使得三塔悬索桥的一阶

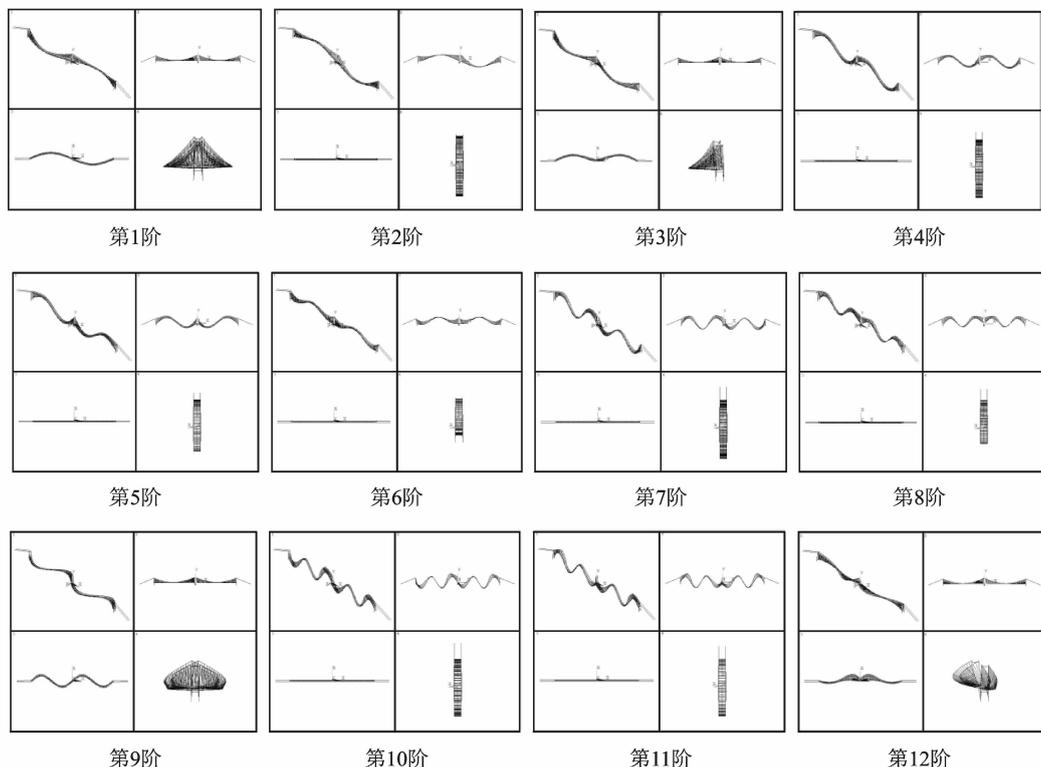


图 2 大桥前 12 阶振型图

Fig. 2 The first 12 modal shapes of the bridge

表 1 泰州大桥前 20 阶自振特性  
Tab. 1 The first 20 vibration characteristics of Taizhou bridge

不考虑土-桩-结构相互作用			考虑土-桩-结构相互作用		
阶次	$f/\text{Hz}$	振型描述	阶次	$f/\text{Hz}$	振型描述
1	0.071 58	主梁 1 阶反对称侧弯	1	0.071 62	主梁 1 阶反对称侧弯
2	0.076 27	主梁 1 阶反对称竖弯+纵飘	2	0.080 23	主梁 1 阶反对称竖弯+纵飘
3	0.094 92	主梁 1 阶正对称侧弯	3	0.095 12	主梁 1 阶正对称侧弯
4	0.114 2	主梁 1 阶正对称竖弯	4	0.114 9	主梁 1 阶正对称竖弯
5	0.116 7	主梁 2 阶反对称竖弯	5	0.117 6	主梁 2 阶反对称竖弯
6	0.133 0	主梁 2 阶正对称竖弯	6	0.137 1	主梁 2 阶正对称竖弯
7	0.174 8	主梁 3 阶反对称竖弯	7	0.170 9	主梁 3 阶反对称竖弯
8	0.185 9	主梁 3 阶正对称竖弯	8	0.185 1	主梁 3 阶正对称竖弯
9	0.230 3	中塔侧弯加主缆对称侧向振动	9	0.230 5	主梁 2 阶反对称侧弯
10	0.231 4	主缆振动	10	0.237 9	主梁高阶反对称竖弯
11	0.231 4	主缆振动	11	0.239 8	主梁高阶正对称竖弯
12	0.231 8	主梁 2 阶反对称侧弯	12	0.245 1	中塔侧弯加主缆对称侧向振动
13	0.243 4	主梁高阶反对称竖弯	13	0.272 9	1 阶主梁、中、边塔反对称扭转
14	0.245 4	主梁高阶正对称竖弯	14	0.273 7	主缆振动(正对称)
15	0.247 0	主缆振动	15	0.273 7	主缆振动(正对称)
16	0.260 5	主缆振动	16	0.289 5	主缆振动(正对称)
17	0.266 5	1 阶主梁、中、边塔反对称扭转	17	0.289 5	主缆振动(正对称)
18	0.281 4	主缆振动	18	0.290 2	主缆反对称侧向振动
19	0.281 4	主缆振动	19	0.290 6	中塔侧弯加主缆对称侧向振动
20	0.291 1	主缆振动	20	0.302 6	主缆反对称侧向振动

振型为反对称侧弯,不同于两塔悬索桥的对称侧弯。一阶扭转振型的变化情况类似。

### 3 结构关键参数对三塔悬索桥动力特性的影响分析

#### 3.1 矢跨比

悬索桥矢跨比的改变将导致主缆内力的变化,从而改变悬索桥的几何刚度。因此,确定合理的矢跨比是三塔悬索桥结构动力设计的必要内容。保持桥跨布置、加劲梁刚度、桥面标高、桥塔高度不变,通过改变主缆标高来调整矢跨比。调整过程中,桥塔作为塔底固结悬臂梁来考虑,以塔顶顺桥向位移不变为原则来确定各桥塔的顺桥向刚度,其横桥向刚度和扭转刚度保持不变。通常情况下,大跨径悬索桥的矢跨比在  $1/9 \sim 1/12$  之间<sup>[10]</sup>,分析中取值分别为  $1/8, 1/9, 1/10, 1/11$  和  $1/12$ 。主要振型的自振频率变化如图 3 所示。

由图 3 可知,随着主缆矢跨比的减小,主梁的各阶竖弯频率变化不一致,有增大也有减小的情况。其中主梁一阶反对称竖弯频率由  $0.080\ 23\ \text{Hz}$  减小到  $0.074\ 46\ \text{Hz}$ ,下降幅度为  $7.75\%$ ;二阶反对称竖

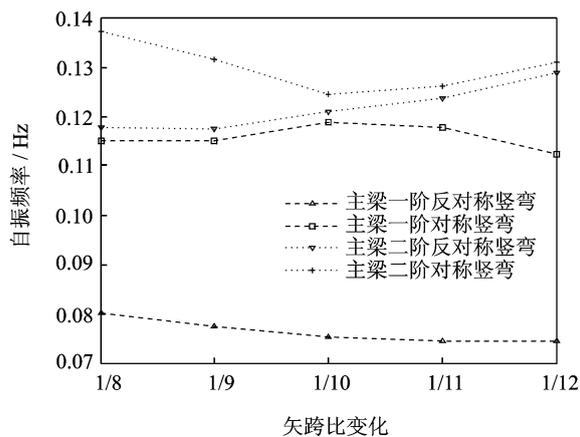
弯频率又表现出明显的增加趋势。就主梁侧弯频率而言,其变化幅度很小,基本保持不变,略有增加。中塔的纵桥向弯曲振动频率总体上呈现出下降趋势,中塔一阶纵桥向弯曲频率由  $0.245\ 1\ \text{Hz}$  降低到  $0.195\ 7\ \text{Hz}$ ,下降幅度为  $25.27\%$ 。

悬索桥的一阶扭频直接关系到其抗风性能,因而至关重要。随着主缆矢跨比的减小,主梁一阶反对称扭转和对称扭转自振频率分别下降  $7.7\%$  和  $20.2\%$ ,这将导致大桥颤振临界风速降低。因此,提高主缆矢跨比有利于改善大桥的抗风性能。

#### 3.2 中塔刚度

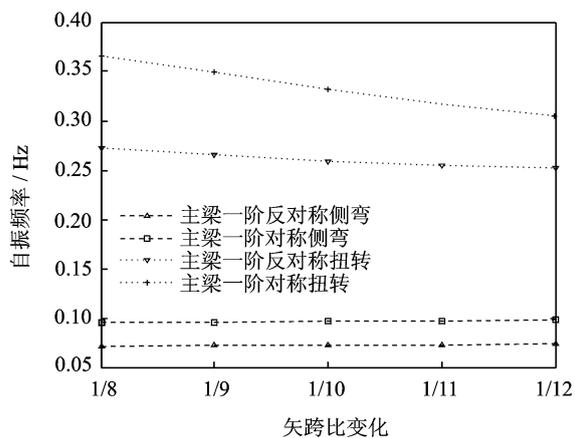
与传统两塔悬索桥相比,三塔悬索桥的特别之处在于引入了中间塔。中塔的边界约束、控制性工况以及结构型式等与传统两塔悬索桥的主塔差别很大。已有研究表明<sup>[11]</sup>,中塔自身刚度的选取至关重要,合理选择中塔结构型式,对于中塔本身受力、桥跨总体结构刚度、主缆与中主鞍座间的抗滑移稳定性等都具有重要意义。

为揭示中塔刚度对结构振动特性的影响规律,作以下分析:a. 将大桥钢质中塔改为混凝土塔,使其材料、截面形状与截面特性与边塔保持一致;b. 在第 1 步的基础上依次改变中塔的纵向刚度,使其与



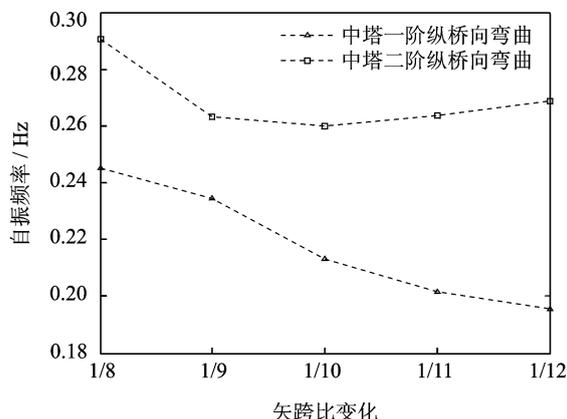
(a) 主梁竖弯振型

(a) Vertical bending mode of the main girder



(b) 主梁侧弯、扭转振型

(b) Lateral and torsional bending mode of the main girder

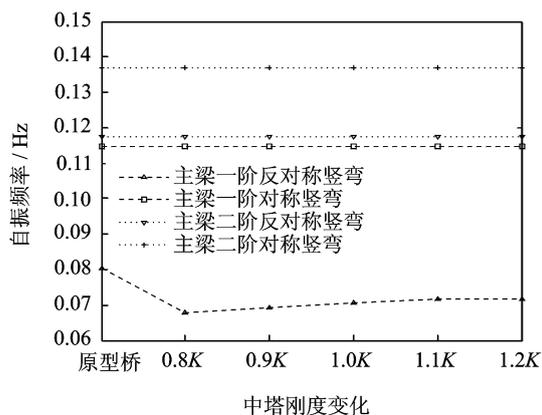


(c) 中塔纵弯振型

(c) Longitudinal bending mode of the middle tower

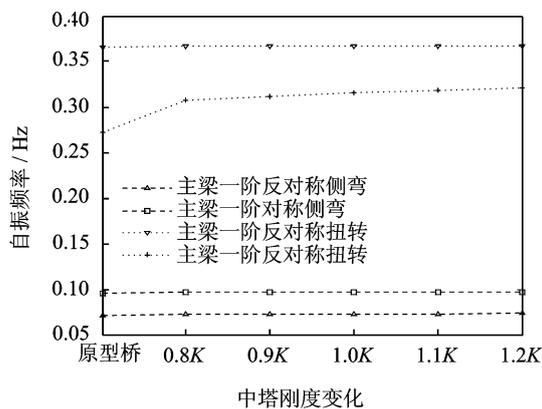
图 3 矢跨比对自振特性的影响

Fig. 3 Influence of rise-span ratio on the structural vibration behavior



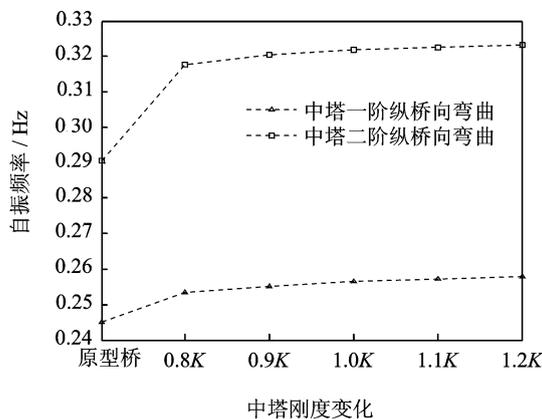
(a) 主梁竖弯振型

(a) Vertical bending mode of the main girder



(b) 主梁侧弯、扭转振型

(b) Lateral and torsional bending mode of the main girder



(c) 中塔纵弯振型

(c) Longitudinal bending mode of the middle tower

图 4 中塔刚度对自振特性的影响

Fig. 4 Influence of mid-tower's stiffness on the structural vibration behavior

边塔纵向刚度之比分别为 0.8, 0.9, 1.0, 1.1 及 1.2。其自振频率变化如图 4 所示。

由图 4 可知,中塔采用混凝土塔后具有以下优

点: a. 塔柱的截面刚度得到很大的提高,就主梁扭转振动而言,一阶反对称扭转频率显著提高,因此,采用混凝土中塔可以提高该桥的颤振临界风速,从这

点上来讲是可以改善大桥抗风性能的;b. 由于中塔未参与到主梁的前几阶对称振型当中, 仅起到一个支承作用, 中塔刚度的提高对于主梁的对称振型, 包括侧弯、竖弯和扭转对称振型的影响都很小;c. 由于中塔顺桥向刚度的提高, 其一阶和二阶纵桥向弯曲振型频率显著提高;d. 中塔与边塔纵向刚度之比在 0.8~1.2 变化时, 对应的频率值逐步提升, 使得以上结论得到了进一步的验证。但是主梁一阶反对称竖弯振型出现了一个突变值, 这点值得在动力分析中引起注意。

### 3.3 中塔形式

为了研究中塔构造型式和材质对结构自振特性的影响, 保持该桥缆索体系、边塔型式、塔高、加劲梁特性及约束条件不变, 中间桥塔的型式分别采用顺桥向 A 形和人字形进行分析, 如图 5 所示。A 形桥塔设计如下: 塔柱顺桥向宽度取为同高程处边塔的 1/2, 塔底顺桥向间距为 36 m, 横桥向距离不变; 塔柱的壁厚、材料类型与原桥保持一致, 并在下横梁处设置顺桥向横梁加强塔柱的稳定性。人字形桥塔设计如下: 桥塔的形状、纵横向间距与原桥中塔一致, 其材料改为混凝土, 与边塔一致; 塔柱横梁以上部分截面特性与边塔相同, 横梁以下的顺桥向宽度为同高程处边塔的一半, 横桥向宽度及壁厚与边塔一致。

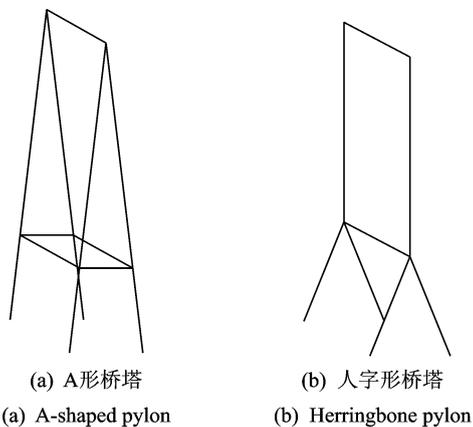
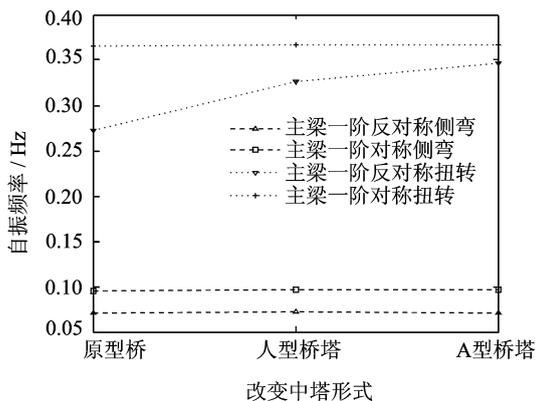


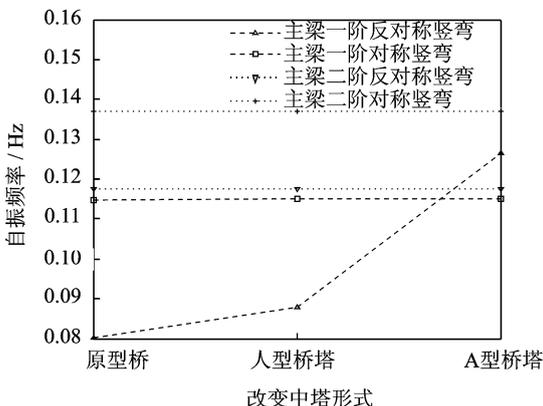
图 5 顺桥向 A 形桥塔和人字形桥塔示意图  
Fig. 5 A-shaped and herringbone pylon in along-bridge direction

图 6 表明:a. 相对于人型中塔而言, 采用 A 型中塔后, 加劲梁的一阶反对称竖弯和一阶反对称扭转振型频率都有了大的提高。这主要是由于中塔采用顺桥向 A 型塔后, 加劲梁在中塔处增加了一个竖向位约束所致;b. 相对于人型钢中塔而言, 人型混凝土中塔由于刚度更大, 使得对应的反对称振型频



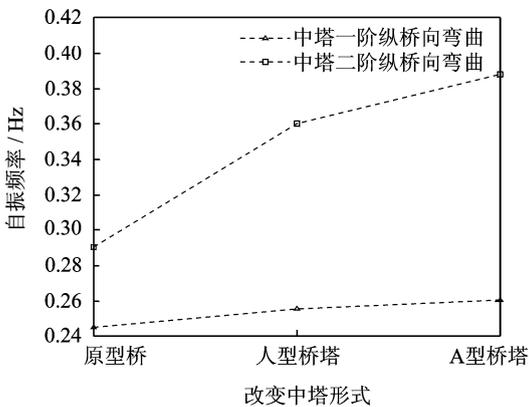
(a) 主梁竖弯振型

(a) Vertical bending mode of the main girder



(b) 主梁侧弯、扭转振型

(b) Lateral and torsional bending mode of the main girder



(c) 中塔纵弯振型

(c) Longitudinal bending mode of the middle tower

图 6 中塔形式对自振特性的影响

Fig. 6 Influence of mid-tower's type on structural vibration behavior

率值明显增加。主梁对称振型受中塔刚度改变影响相对较小的原因, 主要是由于在主梁对称振型中, 中塔只起一个支承点的作用;c. 中塔结构型式的改变对中塔自身振动特性的影响非常明显, 随着中塔顺

桥向刚度的提高,其一阶和二阶纵桥向弯曲振型频率显著提高;d. 此处主塔的分析工作只针对结构动力特性而进行,实际上中塔选型过程还涉及到结构的其他性能,包括主缆抗滑移安全系数、主塔截面受力以及经济因素等,需综合考虑上述各种因素。

### 3.4 土-桩-结构作用

大量研究表明<sup>[12]</sup>,考虑土-桩-结构相互作用使得体系的动力特性与刚性基础上有所不同,主要表现为自振频率降低、阻尼增加、内力及位移反应改变等。考虑土-桩-结构动力相互作用影响的理论方法主要包括有限元法、边界元法以及集中质量模型等。其中 J. Penzien 集中质量模型(见图 7)建模简便,计算工作量小,在结构分析中得到了广泛应用。目前,考虑土-桩-结构作用的梁桥、拱桥、两塔悬索桥结构动力特性已有研究<sup>[12]</sup>,而对于三塔悬索桥考虑土-桩-结构相互作用的影响还鲜见报道。

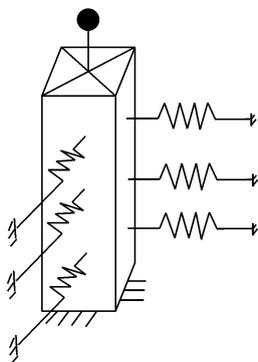


图 7 J. Penzien 质量弹簧模型

Fig. 7 J. Penzien mass-spring model

在原有限元模型基础上,基于 ANSYS 建立了该桥考虑土-桩-结构相互作用的有限元模型,见图 8。其中采用 J. Penzien 模型模拟土-桩-结构相互作用,根据实际情况,承台和塔座的质量用 Mass21 单元模拟,将整个承台区域设定为刚性区域。桩基础用空间梁元模拟。土介质用 Combin14 单元模拟。相关参数的确定严格按照桥址区的场地土情况和桥梁设计图纸,计算方法及流程参见文献<sup>[13]</sup>。

对比表 1 中考虑土-桩-结构相互作用和不考虑土-桩-结构相互作用时泰州大桥主要振型及频率可知:a. 考虑土-桩-结构作用后,由于三塔悬索桥的整体刚度有所减小,因此相应的各阶频率减小,这点与已有不同桥型的研究结论一致;b. 考虑土-桩-结构作用之后,主梁一阶侧弯频率基本维持不变,一阶竖弯频率下降 4.94%,一阶扭转频率下降 2.4%;c. 大桥的前八阶振型在考虑土-桩-结构相互作用之后完

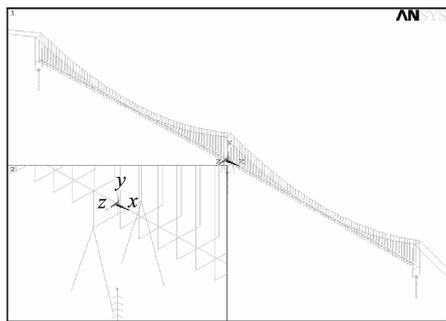


图 8 考虑土-桩-结构作用的泰州大桥有限元模型

Fig. 8 FE model of Taizhou bridge considering soil-pile-structure interaction

全维持不变,从第九阶开始进入了振型密集区域,振型出现的秩序开始不吻合,但是对应振型的频率值仍然很接近;d. 当基础的刚度得到保证后,大跨度三塔悬索桥采用塔底固结模式进行结构分析是可行的。这样可以大大简化计算,并保证计算结果可靠。

## 4 结 论

1) 随着主缆矢跨比的减小,主梁的各阶竖弯频率变化不一致,主梁侧弯频率变化幅度很小,中塔纵弯频率总体上呈现下降趋势,主梁的一阶反对称扭转和对称扭转自振频率均下降。因此,增大主缆矢跨比有利于提高大桥的颤振临界风速。

2) 提高中塔的纵向刚度,可以显著提高三塔悬索桥结构的一阶反对称扭转振型频率,但对主梁其他各阶振型尤其是对称振型的频率无明显影响。

3) 与采用顺桥向人字型中塔相比,采用顺桥向 A 型中塔使结构刚度增大,能提高三塔悬索桥的反对称竖弯和扭转振型频率,以及中塔的侧弯频率,因而有助于改善大桥抗风性能。

4) 考虑土-桩-结构相互作用后,悬索桥整体刚度有所减小,各阶振型频率有所降低。然而,当基础结构的刚度得到保证后,采用塔底固结模式进行结构分析也是可行的。

## 参 考 文 献

- [1] 杨进. 多塔多跨悬索桥应用海峡长桥建设的可行性与技术优势[J]. 桥梁建设, 2009(2): 36-39.  
Yang Jin. Technical feasibility and advantages of applying multi-tower and multi-span suspension bridge to construction of long bridge across straits[J]. Bridge Construction, 2009(2): 36-39. (in Chinese)

- [2] Wang Hao, Li Aiqun, Hu Ruomei. Comparison of ambient vibration response of the runyang suspension bridge under skew winds with time-domain numerical predictions[J]. *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 2011, 16(4): 513-526.
- [3] Almutairi N B, Hassan M F, Abdel-Rohman M, et al. Control of suspension bridge nonlinear vibrations due to moving loads[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 2006, 132(6): 659-670.
- [4] 梁鹏, 吴向男, 李万恒, 等. 三塔悬索桥的动静特性与中塔选型[J]. *交通运输工程学报*, 2011, 11(4): 29-35.  
Liang Peng, Wu Xiangnan, Li Wanheng, et al. Static and dynamic properties of three-tower suspension bridge and structural type selection of mid-tower[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2011, 11(4): 29-35. (in Chinese)
- [5] 钟建驰. 泰州大桥——世界首座千米级三塔悬索桥[J]. *中国工程科学*, 2010, 12(4): 4-8.  
Zhong Jianchi. Taizhou Bridge—the first kilometer level three-tower two-span suspension bridge in the world[J]. *Engineering Science*, 2010, 12(4): 4-8. (in Chinese)
- [6] Wang Hao, Zou Keguan, Li Aiqun, et al. Parameter effects on the dynamic characteristics of a super-long-span triple-tower suspension bridge [J]. *Journal of Zhejiang University—Science A: Applied Physics & Engineering*, 2010, 11(5): 305-316.
- [7] Ernst H J. Der e-modul von seilen unter berücksichtigung des durchhanges [J]. *Der Bauingenieur*, 1965, 40(2): 52-55. (in German).
- [8] 王勛成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 500-504.
- [9] 刘涛, 杨凤鹏. 精通 ANSYS[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 303-307.
- [10] 周孟波. 悬索桥手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 142.
- [11] 张新军, 赵孝平. 三塔悬索桥的抗风稳定性研究[J]. *公路*, 2008(11): 67-72.  
Zhang Xinjun, Zhao Xiaoping. A study on wind stability of three-tower suspension bridges[J]. *Highway*, 2008(11): 67-72. (in Chinese)
- [12] 范立础. 桥梁抗震[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997: 91-93.
- [13] 屈爱萍, 高淑英. 梁墩桩基的动力特性研究[J]. *西南交通大学学报*, 2001, 36(6): 641-645.  
Qu Aiping, Gao Shuying. Vibration characteristics of a 3-dimentional beam-pier-pile system[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2001, 36(6): 641-645. (in Chinese)



**第一作者简介:**王浩,男,1980年9月生,博士、副研究员、博士生导师。主要研究方向为桥梁健康监测、抗风抗震。曾发表《Comparison of ambient vibration response of the Runyang suspension bridge under skew winds with time-domain numerical predictions》(《Journal of Bridge Engineering》(ASCE) 2011, Vol. 16, No. 4)等论著。

E-mail: wanghao1980@seu.edu.cn