

三塔双跨悬索桥动力特性分析

阮 静¹, 马如进²

(1. 江苏省长江公路大桥建设指挥部, 江苏泰州 225321; 2. 同济大学, 上海 200092)

[摘要] 桥梁结构的动力特性对进行桥梁的动力性能设计、健康检测和维护具有十分重要的意义, 而三塔双跨悬索桥具有和传统的大跨径悬桥不完全相同的静、动力性能。针对泰州大桥工程实例, 通过 ANSYS 有限元分析软件研究了三塔双跨悬索桥在成桥阶段和施工阶段的动力特性, 并与传统的悬索桥作比较, 得出了一些有意义的结论, 供工程设计人员参考。

[关键词] 三塔双跨悬索桥; 动力特性; 自振频率; 振型

[中图分类号] U448.25 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2010)08-0083-05

1 前言

随着大跨径桥梁的大规模建设, 其抗震能力、抗风能力和车桥振动问题往往是设计中的主要控制因素之一。而桥梁的动力特性是研究抗震、抗风设计和车桥振动分析的基础, 亦是桥梁自身的“指纹”特征。因此, 桥梁结构的动力特性对进行桥梁的动力性能设计、健康检测和维护具有十分重要的意义, 可以为桥梁在设计、施工和运营中的管理提供依据。

为了跨越更宽的水域和获得更好的经济效益, 近几年国内外进行了多塔悬索桥的研究, 但还没有超大跨径的工程建设实例。与传统的两塔悬索桥相比, 三塔双跨悬索桥由于中间塔的参与受力与边塔显然不同, 具有和传统的大跨径悬桥不完全相同的静、动力性能, 因此对其动力特性进行研究具有重要的理论意义和工程价值。文章以泰州大桥为工程实例, 运用有限元法分析了三塔双跨悬索桥在成桥阶段和施工阶段的动力特性, 为该桥的动力性能研究奠定了基础, 亦可为同类桥型的设计作指导。

2 工程概况

泰州大桥位于长江江苏段中部, 上游距润扬大

桥 66 km, 下游距江阴大桥 57 km, 北接泰州市, 南连镇江市和常州市。桥梁设计方案为一座桥跨布置为 (390 + 1 080 + 1 080 + 390) m 的两主跨三塔悬索桥。主梁采用扁平流线型钢箱梁, 单箱三室, 梁高 3.5 m, 梁宽 39.1 m (含风嘴), 标准节段长 16 m, 如图 1 所示。

中塔和边塔采用门式结构, 其中中塔侧面为人字型布置, 中塔高 194 m, 边塔高 172.7 m。主缆矢高 120 m, 矢跨比 1/9。

3 计算模型

3.1 有限元模型的建立

对悬索桥进行动力特性分析一般采用以下三种方法^[1]: 古典解析法、近似法、数值方法。古典解析法容易得到参数对动力特性的影响, 但是是一些细节问题难以处理并且微分方程有时难以求解。近似计算是在古典解析法的基础上发展的, 计算速度快, 但结果近似。数值计算法, 即有限元法。由于悬索桥结构、边界条件、材料性质较复杂, 前两种方法很难得到精确的解, 而有限元法为解决这一问题提供了有效的途径。

[收稿日期] 2010-01-05

[基金项目] 国家科技支持计划资助项目(2009BAG15B01)

[作者简介] 阮 静(1975-), 女, 江苏扬州市人, 高级工程师; 研究方向为桥梁工程; E-mail: ruanjing@yahoo.com

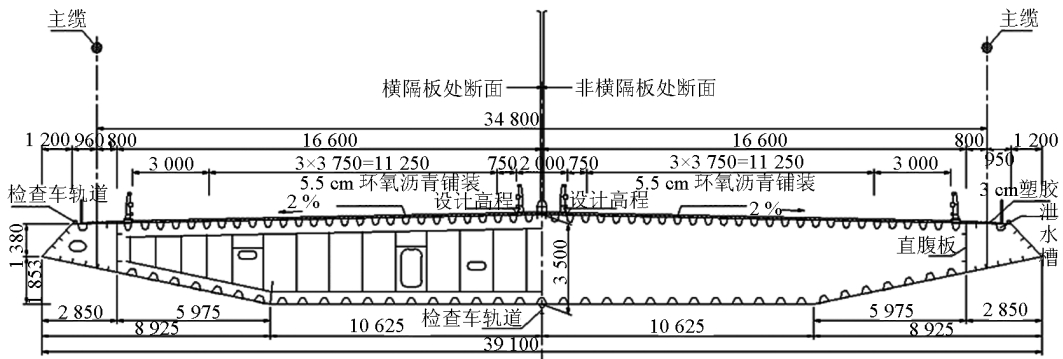


图1 加劲梁标准断面布置图(单位:mm)

Fig. 1 Standard cross section layout of stiffness girder (unit: mm)

在有限元模型的建立时,一般都把加劲梁简化为脊梁式模型,并可根据截面形式的不同分别采用“单梁式”、“双梁式”和“三梁式”^[2],这些模式都存在各自的优点和不足。目前,悬索桥动力计算多采用单梁式。它把桥面系的竖向刚度、横向刚度、扭转刚度以及平动质量、转动惯量都集中在中间节点上,所以主梁的刚度系统和质量系统是正确的,但横梁的刚度和主梁的翘曲刚度不能充分考虑。但对闭口箱形截面,截面翘曲刚度相对于自由扭转可以不计,所以可采用单梁式建立泰州大桥的有限元计算模型。

根据设计参数,对该桥的成桥状态和施工过程中加劲梁不同拼装率共5种施工阶段分别进行了结构动力特性有限元分析^[3]。动力特性分析采用ANSYS公司授权的结构分析软件对该模型进行结构动力特性分析。其中两个边塔及中塔采用空间梁单元模拟(BEAM188);主梁采用空间梁单元模拟(BEAM4);主缆与吊杆采用空间拉杆单元模拟(LINK10)。

在进行动力特性计算之前,首先要进行非线性静力分析,以确定主缆和吊杆的索力,以保证结果的正确性,然后在静力分析的基础之上,计入重力刚度的影响进行动力特性分析,即将结构的应力刚度矩阵[S]计入结构的动力平衡方程中:

$$([\mathbf{K}_0] + [\mathbf{S}]) \{\varphi_i\} = \lambda_i [\mathbf{M}] \{\varphi_i\} \quad (1)$$

式(1)中:[S]为由结构自重引起的结构初始应力刚度矩阵;[K₀]为结构初始刚度矩阵;[M]为结构质量矩阵;{φ_i}为整体节点位移向量。

3.2 分析结果

采用Block Lanczos方法求解动力特性,该方法经典Lanczos的改进,采用稀疏矩阵方程求解器,

用一组向量来实现Lanczos递归,适用于求解大型系统的特征值问题^[4]。其类似于子空间法,但具有求解速度快、可以指定特征值范围等特点。由于采用该桥的三维空间有限元模型,可以提供该桥所有可能的振型模式(横向、垂直、扭转及其耦合振型)。表1列出了具有代表性的自振频率和振型特点,相应的典型振型如图2所示。

表1 成桥状态动力特性分析结果
Table 1 Analysis results of operation stage dynamic property

序号	频率/Hz	振型特点
1	0.077 3	正对称侧弯(两跨反对称)
2	0.078 5	正对称竖弯(两跨反对称)
3	0.093 9	正对称侧弯(两跨正对称)
4	0.113 9	反对称竖弯(两跨反对称)
5	0.116 5	反对称竖弯(两跨正对称)
6	0.150 7	正对称侧弯(两跨正对称)
7	0.166 6	正对称竖弯(两跨反对称)
8	0.220 6	正对称竖弯(两跨正对称)
9	0.227 8	反对称侧弯(两跨反对称)
10	0.230 2	反对称竖弯(两跨正对称)
11	0.236 4	反对称侧弯(两跨反对称)
12	0.239 0	反对称侧弯(两跨正对称)
13	0.266 1	正对称扭转(两跨反对称)
32	0.356 5	正对称扭转(两跨正对称)
35	0.362 8	正对称扭转(两跨正对称)
38	0.388 9	反对称扭转(两跨反对称)

施工过程的动力特性计算时,为了简化工作量,将施工过程简化成 5 个主要施工状态,施工状态根据拼装率定义,相应的拼装率分别为 20 % ,40 % ,60 % ,80 % 以及 100 % ,如图 3 所示。施工 100 %

的拼装率表示在二期恒载铺装之前的一个临时状态。通过分析可以得出该状态各阶振型及频率如表 2 所示。

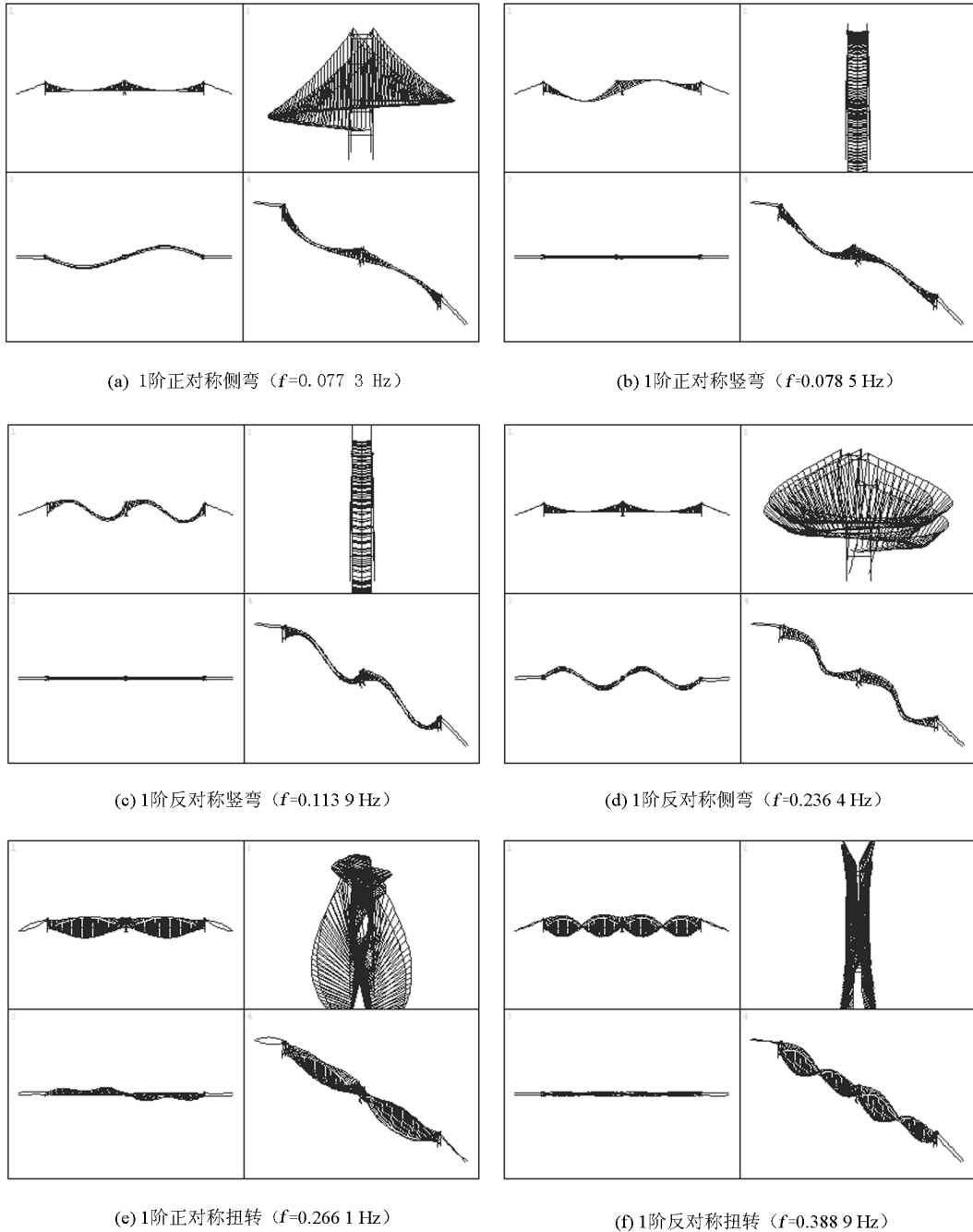


图 2 泰州大桥成桥状态典型振型

Fig. 2 Typical mode shapes at the operation stage of Taizhou Bridge

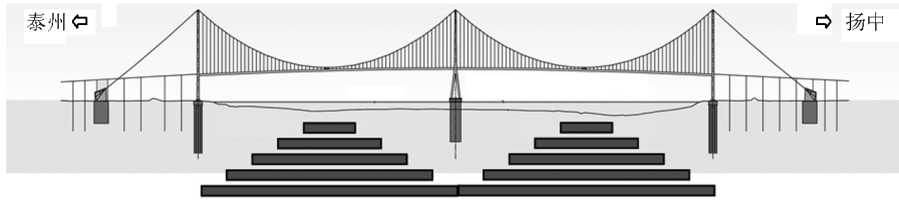


图3 对称拼装情况下施工状态定义

Fig. 3 Definition of construction stages under symmetric assembly

表2 施工状态动力特性分析结果

Table 2 Dynamic results at different construction stages

振型描述	拼装率 20 %		拼装率 40 %		拼装率 60 %		拼装率 80 %		拼装率 100 %	
	振型号	频率/Hz	振型号	频率/Hz	振型号	频率/Hz	振型号	频率/Hz	振型号	频率/Hz
正对称侧弯	2	0.047 8	2	0.046 3	2	0.045 9	2	0.045 6	2	0.076 5
正对称竖弯	3	0.088 8	3	0.078 1	5	0.074 1	5	0.072 1	1	0.071 2
反对称竖弯	5	0.123 3	7	0.114 2	7	0.102 4	7	0.098 2	6	0.139 3
反对称侧弯	7	0.128 8	5	0.095 3	4	0.072 1	4	0.059 8	12	0.233 8
正对称扭转	19	0.185 6	16	0.202 5	12	0.204 9	14	0.224 1	16	0.245 4
反对称扭转	30	0.219 9	28	0.252 1					33	0.339 4

4 结语

通过对上述结果的分析,可知泰州大桥的动力特性具有以下特点:

1) 泰州大桥的第一阶频率 $f_1 = 0.077 3 \text{ Hz}$, 与传统的双塔悬索桥第一阶振动频率接近;相应的振型为主梁一阶正对称侧弯(两跨反对称),与传统的双塔单跨悬索桥常规出现的正对称侧弯振型类似,所不同的是泰州大桥的一阶正对称侧弯振型在两跨内呈反对称形式出现。

2) 泰州大桥的面内外基频之比为 1.016:1 ($f_1 = 0.077 3 \text{ Hz}$, $f_2 = 0.078 5 \text{ Hz}$),比传统的双塔单跨悬索桥略小,表明泰州大桥的面内刚度与面外刚度非常接近。

3) 加劲梁一阶对称竖弯频率为 0.078 5 Hz,加劲梁一阶对称扭转频率为 0.266 1 Hz,扭转频率比

为 3.67。

4) 随着施工拼装率的增加,一阶对称扭转频率和一阶反对称扭转频率单调增加;一阶竖弯频率和一阶侧弯频率总体趋势均为先略有下降,后上升。值得注意的是,一阶反对称侧弯频率在拼装率为 100 % 时较拼装率为 80 % 时有较大变化。分析原因是由于各阶振型的阶次调整。在主梁完全拼装好后,结构的体系发生了转变,对侧向的约束加强,导致二阶竖弯振型在反对称侧弯振型之前出现。

参考文献

- [1] 范立础. 桥梁抗震[M]. 上海:同济大学出版社,1997
- [2] 中华人民共和国推荐性行业标准. 公路桥梁抗风设计规范[S]. TJG/T D60-01-2004,2004
- [3] 同济大学土木工程防灾国家重点实验室. 泰州长江公路大桥全桥气弹模型试验研究[R]. 同济大学,2009
- [4] ANSYS, Inc. Theory Reference [R]. ANSYS Release 9.0. 002114, SASIP, Inc., November, 2004

Dynamic behavior analysis of Taizhou Bridge

Ruan Jing¹, Ma Rujin²

(1. Jiangsu Provincial Yangtze River Highway Bridge Construction Commanding Department, Taizhou, Jiangsu 225321, China; 2. Tongji University, Shanghai 200092, China)

[**Abstract**] The dynamic behaviors have critical influences on the design of structure dynamics, health monitoring and maintenances. The three-pylon two-span suspension bridge does have different static and dynamic behaviors comparing with traditional one-span suspension bridge. This paper analyzes the dynamic behavior of Taizhou Bridge under construction stage and operation stage based on ANSYS. Some meaningful results have been obtained and can provide references for engineers in the further.

[**Key words**] three-pylon two-span suspension bridge; dynamic property; self-vibration frequency; vibration shape

(上接 55 页)

System integration of CCS, CCUS, CCRS, CMC

Jin Yong, Zhu Bing, Hu Shanying, Hong Liyun

(Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

[**Abstract**] Carbon Capture Storage (CCS), energy conservation and emission reduction in production and life, and the development of renewable energy are the three core issues in developing low-carbon economy. Carbon Capture Use and Storage (CCUS) and Carbon Capture Reuse and Storage (CCRS), as the two concepts emerged recently, may be viewed as more active policy responding to CO₂ emission reduction. In the long run, as a valuable resource and energy carrier the element should be recycled, which give rise to a new concept of Comprehensive Management of Carbon (CMC) as we suggested in the paper.

[**Key words**] low carbon economy; Carbon Capture and Storage; Carbon Capture Use and Storage; Carbon Capture Reuse and Storage; Comprehensive Management of Carbon