

基于结构参数变化对结合梁自锚式悬索桥动力特性的分析

王 通¹, 贺国霄²

(1. 浙江杭绍甬高速公路有限公司, 浙江 杭州 311200; 2. 盐城工学院 土木工程学院, 江苏 盐城 224003)

摘要:借助 Midas/Civil 建立合理动力全桥模型, 结合梁自锚式悬索桥自振特性规律, 虚设一座相同参数的地锚式进行比较, 探讨恒载集度、主梁刚度、桥塔刚度、主缆抗拉刚度、吊索抗拉刚度等主要参数对结合梁自锚式悬索桥固有频率的影响。研究表明: 在狭窄的频率范围内, 振型较为集中, 且前几阶振型以主梁振动为主; 恒载倍率增加对一阶振型频率均有减小作用, 主梁竖向刚度增加对一阶竖弯振型影响较大, 桥塔纵向刚度增加使纵漂频率显著增加, 主缆抗拉刚度倍率增大使主梁扭转振型频率增加显著, 吊索抗拉刚度倍率增大对一阶振型频率影响很小。

关键词: 自锚式悬索桥; 参数变化; 固有频率; 动力特性; 刚度

中图分类号: U448.36

文献标识码: A

文章编号: 1671-5322(2019)01-0067-05

自锚式悬索桥凭借其造型新颖、经济适应性好、布置灵活、地质适应性强等优点, 近年来被广泛应用在城市桥梁建设中。由于其主缆锚固于梁端, 主梁承受巨大的轴力, 有别于传统的地锚式悬索桥, 且施工方法也有很大差别^[1]。自锚式悬索桥建造数量日益增加, 但动力研究方面却相对匮乏。本文以钢—混结合梁自锚式悬索桥为工程背景, 探讨主要参数变化对其动力特性的影响, 为该桥型抗震、抗风设计、车桥耦合研究提供借鉴^[2]。

1 工程概况

该桥跨径布置为 (30 + 60 + 150 + 60 + 30) m, 主梁采取钢—混结合梁形式, 主梁悬吊部分钢梁全长 270 m。桥面板标准宽度为 25.5 m, 支承在由钢纵梁和钢横梁组成的梁格系上, 纵向每 5 m 设置一吊点横梁。主缆间距 28.5 m, 矢跨比为 1/5.5, 主缆采用预制平行钢丝索股, 每根由 19 股 (每股 127φ5 mm 镀锌高强钢丝) 索股组成。全桥吊索共 92 根。主塔采用门型框架形式, 主塔位于水中, 均采用分离式基础, 见图 1、图 2。

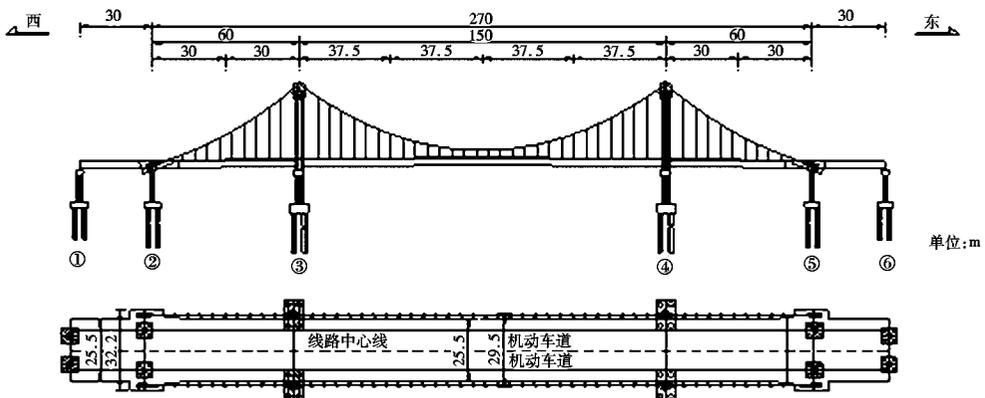


图 1 主桥总体布置图

Fig. 1 Overall layout of the main bridge

收稿日期: 2018-08-28

作者简介: 王通 (1992—), 男, 河南商丘人, 硕士, 主要研究方向为大跨径桥梁结构抗震。

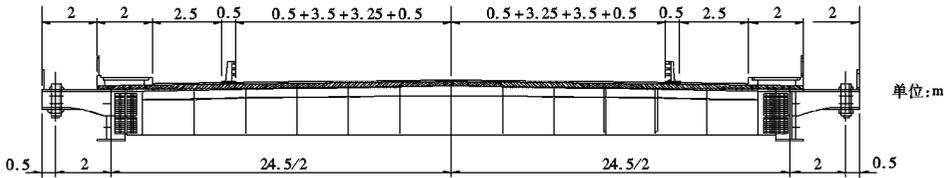


图 2 主梁标准横断面图

Fig.2 Main beam standard cross-sectional view

1.1 动力模型建立

采用 Midas/Civil 建立有限元模型,计算模型采用单梁模式,主缆简化为集中于中心索股的多段悬链线单元,以 IP 点、吊索点、锚固点为分割点建立全桥模型,全桥共 398 个节点、375 个单元。主梁、塔柱、桥墩均采用梁单元,主缆和吊索采用所单元模拟。主缆和塔顶刚性连接,加劲梁约束按实际支座布置考虑;主梁和吊点刚性连接处理,塔底固结考虑^[3]。图 3 为有限元模型图。



图 3 该桥有限元模型图

Fig.3 Finite element model of the bridge

1.2 动力特性计算

自锚式悬索桥主缆锚固于梁的两端,主梁受到轴压作用,这与传统的地锚式存在结构上的差异,使得结构的动力性能也有差异^[4]。为比较自锚式悬索桥与地锚式悬索桥的动力特性的差别,虚设了一座相同跨径的地锚式悬索桥。采用 Lanczos 法对上述两座悬索桥进行特征值分析^[5]。表 1 列出前 9 阶振型分析,图 4 列出了该桥前 9 阶振型图。

计算可知,钢—混结合梁自锚式悬索桥动力特性有如下特点^[6-7]:(1)1 阶振型为纵漂,体现了悬索桥柔性特点,该桥型减隔震设计应该引起重视。振型以主梁振动为主,主塔及主缆振型出现靠后。(2)振型较为密集。在狭窄的频率范围内,有多振型的存在,且很可能存在振型耦合现象。

2 结构参数敏感性分析

本文主要研究恒载集度、主梁刚度、桥塔刚度、主缆抗拉刚度、吊索抗拉刚参数变化对自振特

表 1 自锚式与地锚式自振特性对比

Table 1 Comparison of self-anchored and ground anchored natural vibration characteristics

阶数	频率/Hz	振型描述
1	0.454 3(0.371 4)	主梁纵漂
2	0.465 5(0.576 0)	主梁 1 阶反对称竖弯
3	0.565 9(0.656 3)	主梁 1 阶反对称竖弯
4	0.656 2(0.688 1)	主梁 1 阶对称侧弯
5	1.088 8(1.222 6)	主梁扭转振动
6	1.222 4(1.243 9)	主梁 2 阶对称竖弯
7	1.264 7(1.271 6)	主梁 2 阶反对称竖弯
8	1.284 2(1.304 8)	主塔横向正对称振动(主塔横向反对称振动)
9	1.387 3(1.390 4)	主塔横向反对称振动(主塔横向正对称振动)

注:括号内为相同参数的地锚式悬索桥振型频率。

性的影响^[8-9],下面以纵漂 f_1 、主梁 1 阶对称竖弯 f_2 、主梁 1 阶对称侧弯 f_3 、主梁 1 阶扭转振动 f_4 的频率变化来分析各个参数的敏感性。

2.1 恒载变化对自振特性的影响

当恒载集度从 0.8 ~ 2.0 倍率增加,从图 5 可以看出,主梁纵漂、竖弯、侧弯以及扭转的频率均减少,扭转频率减少幅度较大。

2.2 主梁刚度变化对自振特性的影响

2.2.1 竖向刚度的变化

主梁竖向刚度从 0.8 ~ 2.0 倍率增加,从图 6 可以看出,纵漂频率和扭转频率并不明显,主梁侧弯频率几乎保持不变,由基准倍率 1.0 增加到 2.0 时,1 阶竖弯频率增加了 8.2%。

2.2.2 横向刚度的变化

主梁横向刚度从 0.8 ~ 2.0 倍率增加,从图 7 可以看出,1 阶对称侧弯的频率、扭转频率两者增幅并不明显,由基准倍率 1.0 增加到 2.0,对称侧弯频率和扭转频率分别增加了 7.6% 和 4.3%,纵漂频率和竖向振动频率基本不变。

2.2.3 抗扭刚度的变化

主梁抗扭刚度从 0.8 ~ 2.0 倍率增加,从图 8 可看出,由基准倍率 1.0 增加到 2.0,对称侧弯频

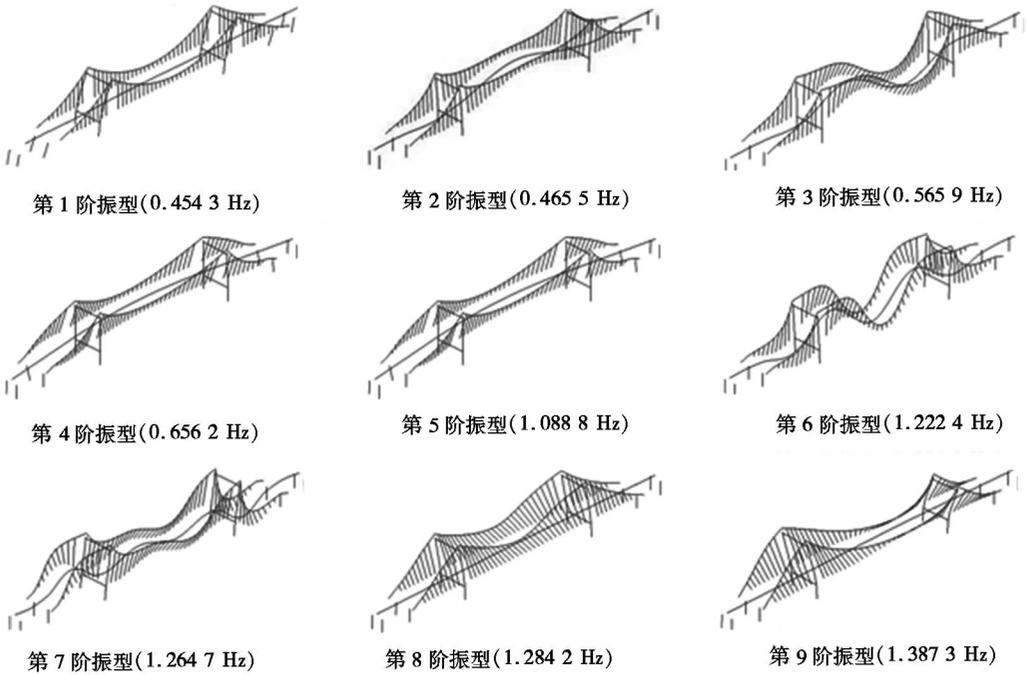


图 4 该桥前九阶振型图

Fig. 4 The ninth-order vibration pattern of the bridge

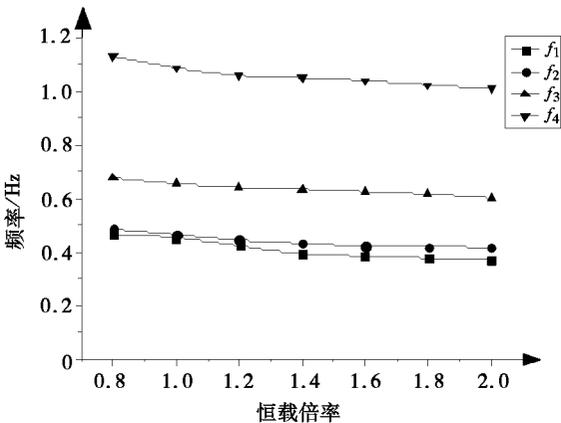


图 5 恒载集度对自振频率的影响

Fig. 5 Effect of dead load concentration on natural frequency

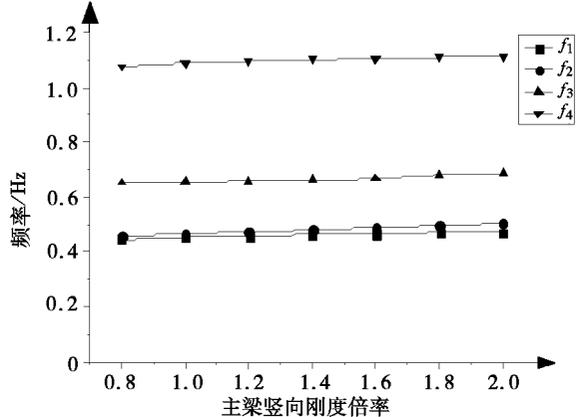


图 6 主梁竖向刚度变化对振动频率的影响

Fig. 6 Effect of vertical stiffness variation of main beam on vibration frequency

率和扭转频率分别增加了 6% 和 15% ,纵漂频率和竖向振动频率基本不变。

2.3 桥塔刚度变化对自振特性的影响

2.3.1 纵向刚度的变化

桥塔纵向刚度从 0.8 ~ 2.0 倍率增加,从图 9 可看出,1 阶对称侧弯频率和扭转频率基本保持不变,1 阶对称竖弯频率有微弱增加,由基准倍率 1.0 增加到 2.0,纵漂频率增加了 38%。表明桥塔纵向抗弯刚度对结合梁自锚式悬索桥的纵漂频率影响很大。

2.3.2 横向刚度的变化

桥塔横向刚度从 0.8 ~ 2.0 倍率增加,如图

10 所示,纵漂频率、1 阶对称侧弯的频率、扭转频率基本不变。主梁横向振动频率从 0.643 2 Hz 增加到 0.787 5 Hz,横向振动频率增加 20%。表明桥塔横向抗弯刚度对主梁侧弯频率影响很大。

2.4 主缆抗拉刚度变化对自振特性的影响

主缆抗拉刚度从 0.8 ~ 2.0 倍率增加,如图 11 所示,纵漂频率和 1 阶对称竖弯的频率基本保持不变。由基准倍率 1.0 增加到 2.0,横向振动频率和扭转频率分别增加了 5.2% 和 7%。

2.5 吊索抗拉刚度变化对自振特性的影响

吊索抗拉刚度从 0.8 ~ 2.0 倍率增加,如图 12 所示,各个振型频率都有所提高,但增幅并不

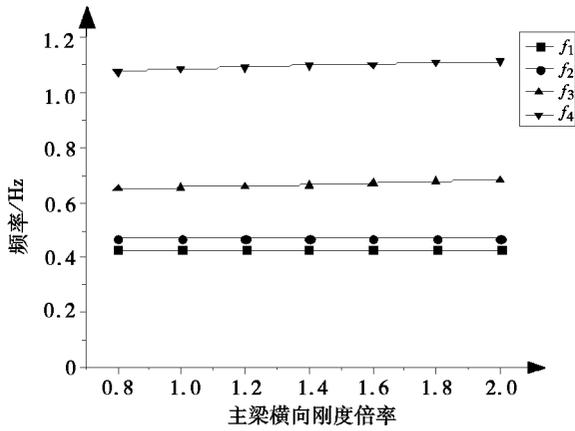


图 7 主梁横向刚度变化对振动频率的影响
Fig.7 Effect of lateral stiffness variation of main beam on vibration frequency

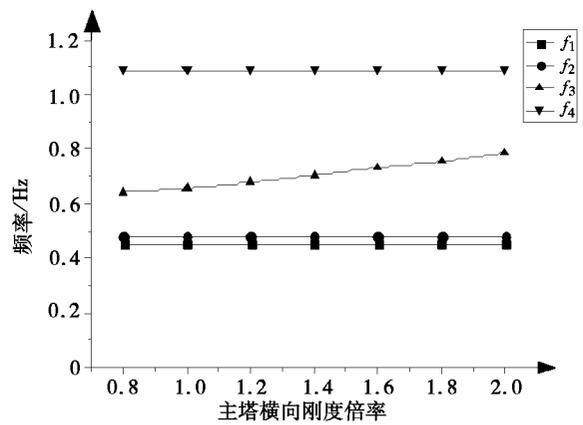


图 10 主塔横向刚度变化对振动频率的影响
Fig.10 Effect of lateral stiffness variation of main tower on vibration frequency

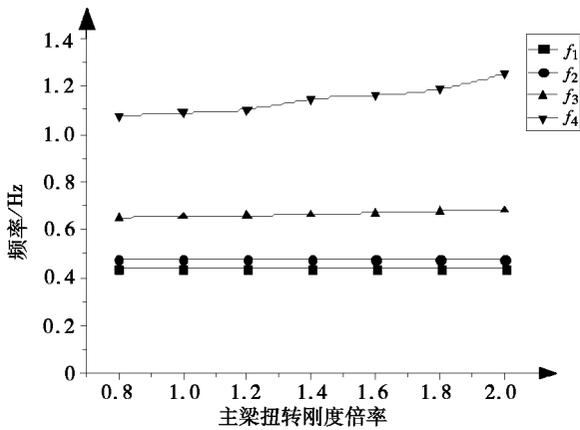


图 8 主梁抗扭刚度变化对振动频率的影响
Fig.8 Effect of torsional stiffness variation of main beam on vibration frequency

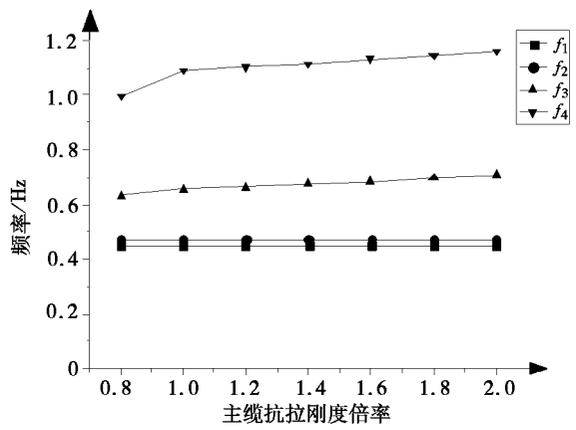


图 11 主缆抗拉刚度变化对振动频率的影响
Fig.11 Effect of tensile stiffness change of main cable on vibration frequency

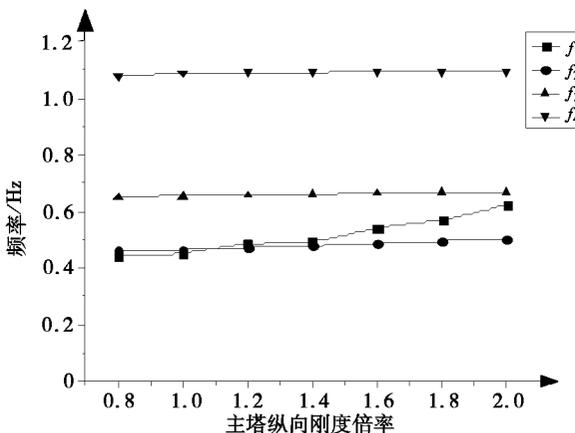


图 9 主塔纵向刚度变化对振动频率的影响
Fig.9 Effect of longitudinal stiffness variation of main tower on vibration frequency

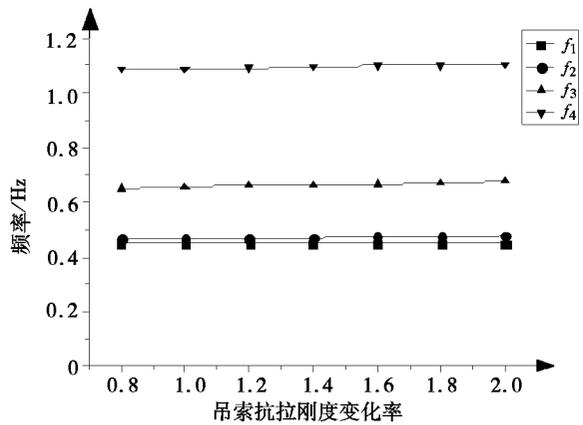


图 12 吊索抗拉刚度变化对振动频率的影响
Fig.12 Effect of sling tensile stiffness change on vibration frequency

明显。由基准倍率 1.0 增加到 2.0,各阶振型频率增加值均在 0.5% 以内,影响很小。可见,增大吊索的刚度对主梁竖向刚度的贡献并不大,在进

行缆索设计时,只考虑吊索对主梁的约束刚度即可。

3 结论

本文以某结合梁自锚式悬索桥为背景,较详细地分析了结构参数变化对结合梁自锚式悬索桥的动力特性影响。主要得到以下结论:

(1)结合梁自锚式悬索桥在狭窄的频率范围有多振型出现,且以主梁振动为主,主塔振型出现较晚。

(2)随着恒载倍率的增加,加劲梁纵漂、竖弯、侧弯以及扭转的频率均有所减少,而纵漂频率减少幅度较大。恒载倍率由1.0增加到2.0时,纵漂、竖弯、侧弯、扭转振动频率分别减少了17.6%、10.2%、8.3%、7.0%。

(3)主梁竖向刚度倍率从1.0到2.0,竖弯频率增加了8.2%;主梁横向刚度倍率从1.0到2.0,侧弯频率和扭转频率分别增加了7.6%和4.3%;主梁抗扭刚度倍率从1.0到2.0,扭转频率和侧弯频率分别增加了15%和6%。

(4)主塔纵向刚度倍率从1.0到2.0,纵漂频率从0.4256 Hz增加到0.6256 Hz,增幅为38%,影响显著;主塔横向刚度倍率从1.0到2.0,主梁横向振动频率增加了20%。

(5)主缆抗拉刚度倍率从1.0到2.0,主梁侧弯频率和扭转频率分别增加了5.2%和7%。吊索抗拉刚度增加对各阶振型频率影响很小。

参考文献:

- [1] 张哲. 混凝土自锚式悬索桥[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
- [2] 丰硕,项贻强,谢旭,等. 自锚式悬索桥动力特性及结构参数影响规律研究[J]. 世界桥梁,2004(4):50-53.
- [3] 赵卓,张哲,刘东旭. 自锚式悬索桥主桥动力特性分析[J]. 世界地震工程,2006,22(3):84-88.
- [4] 王玉田,马宗志,姜福香. 独塔空间缆索自锚式悬索桥动力特性研究[J]. 桥梁建设,2011(4):41-43.
- [5] 康俊涛,袁敏,王同民. 大跨径自锚式悬索桥成桥状态动力特性参数分析[J]. 桥梁建设,2013,43(6):64-70.
- [6] 张超,巫生平. 非一致激励对三塔自锚式悬索桥地震响应的影响[J]. 振动与冲击,2013,34(2):197-203.
- [7] 陈天亮. 独塔自锚式悬索桥动力特性分析与减震控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [8] 夏志远,李爱群,李建慧,等. 超宽加劲梁自锚式悬索桥动力特性敏感性分析[J]. 东南大学学报(自然科学版),2016,46(2):360-364.
- [9] 康俊涛,胡杰,董培东,等. 三塔自锚式悬索桥动力特性参数影响分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2017,41(4):543-548.

Analysis on Dynamic Characteristics of Self – anchored Suspension Bridges with Combined Beams Based on Structural Parameter Variations

WANG Tong¹, HE Guoxiao²

(1. Zhejiang Provincial Hangshaoyong Expressway Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang 311200, China;
2. Civil Engineering Department, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224003, China)

Abstract: With the help of Midas/Civil, a reasonable dynamic full bridge model is established to study the natural vibration characteristics of self-anchored suspension bridges with composite beams, and a ground anchor type with the same parameters is assumed to be compared. The effects of the main parameters such as dead load concentration, girder stiffness, tower stiffness, main cable tension stiffness and suspension cable tension stiffness on natural frequencies of self-anchored suspension bridges with composite beams are discussed. The results show that the vibration modes are concentrated in the narrow frequency range, and the main beam is the dominant vibration mode in the first few order. The frequency of the first-order mode decreases with the increase of constant load ratio. The increase of the vertical stiffness of the main girder has a great influence on the first-order vertical bending mode shapes. The frequency of longitudinal drift increases significantly with the increase of longitudinal stiffness of bridge towers. The torsional mode frequency of the main beam increases significantly with the increase of the tensile stiffness ratio of the main cable. The increase of the tension stiffness ratio of the suspension cable has little effect on the first mode frequency.

Keywords: self-anchored suspension bridge; parameter variation; natural frequency; dynamic characteristics; stiffness

(责任编辑:张英健)