

大跨度结合梁斜拉桥非线性动力特性研究

王 伟^{1,2}

(1. 重庆中设工程设计股份有限公司, 重庆 400025; 2. 重庆市中检建筑工程质量检测有限公司, 重庆 400025)

摘 要:以大跨度半漂浮体系组合梁斜拉桥为例,首先运用有限元理论,并考虑结构几何刚度与非线性的影响,建立了三维空间动力分析模型,然后采用分块兰索斯法对桥梁进行动力特性研究。结果表明:几何刚度与非线性对结构动力特性影响明显,结构基本周期长,自振频率低,模态振型密集,空间性与耦合性显著。对大跨度组合梁斜拉桥进行动力特性研究时应考虑结构的几何刚度与非线性以及空间性,同时为研究抗震与抗风性能奠定了基础。

关键词:斜拉桥;结合梁;动力特性;几何刚度;非线性

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

引 言

斜拉桥因其结构轻盈、外形美观、受力明显、跨越能力大等特点,已成为设计大跨度桥梁的首选结构,越来越受到工程师的青睐。目前世界上最大跨度的斜拉桥是位于俄罗斯主跨达 1104 m 的 Russky Island Bridge^[1],我国也有 2 座超千米级的斜拉桥,即 Stonecutters Bridge^[2](主跨 1018 m)和苏通长江大桥(主跨 1088 m)。然而,随着斜拉桥跨度的不断增大,其结构越来越柔,结构几何刚度与非线性的影响越来越明显,且斜拉桥属于超静定高耸空间结构,三维空间效应显著,对大跨度斜拉桥动力特性研究时应考虑结构的几何刚度与非线性以及空间性的影响。同时结构的动力特性(自振频率与模态振型)是其固有特性,只与自身结构特点有关,与外界因素无关,是研究抗震与抗风性能的基础^[3-6]。

1 工程概况

某大桥主桥初步设计方案为跨径组合(54+114+400+114+54)m 大跨度半漂浮体系双塔双索面结合梁斜拉桥,全长 736 m,如图 1 所示。主梁采用钢主梁和混

凝土板共同受力的结合梁,钢主梁采用 Q345qD 钢材,桥面板采用 C50 混凝土,桥面全宽 29.2 m,斜拉索采用 $\phi 7.0$ mm 高强平行钢丝,空间双索面扇形布置,全桥共布置 84 对,花瓶型钢筋混凝土桥塔,桥面铺装为 10 cm 厚沥青混凝土。设计荷载等级为公路 -I 级,双向 6 车道,人群荷载 2.5 kPa。

2 基本原理

2.1 几何非线性分析基本理论

一般地,斜拉桥在正常使用状态下材料很难进入非线性,斜拉桥的非线性主要指的是几何非线性。

在建立大跨度斜拉桥几何非线性分析平衡方程时一般考虑 3 个方面的几何非线性效应:梁柱效应(即弯矩与轴向力组合效应)、大位移效应和斜拉索自重引起的垂度效应。

对于任何几何非线性问题均可由虚功原理推导得到杆系单元的平衡方程^[7-9]:

$$\iiint_V [\bar{B}]^T \{ \sigma \}^e dv - \{ F \}^e = 0 \quad (1)$$

式中: $[\bar{B}]$ 称为大位移情况下的增量应变矩阵,代表了

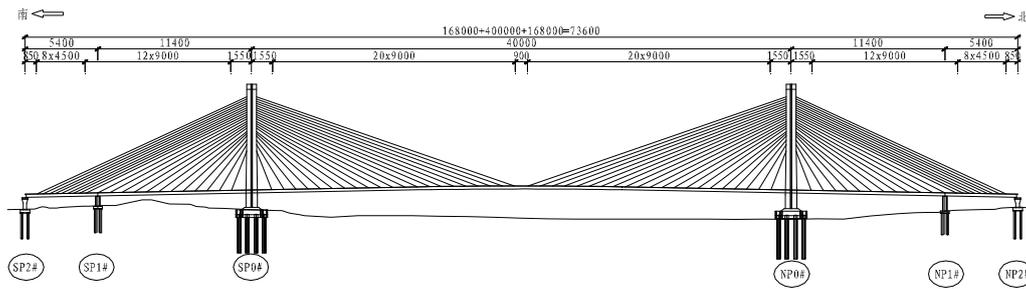


图 1 主桥桥型布置图

单元应变增量与节点位移增量之间的关系, $\{F\}$ 为单元节点力向量。

由于在非线形分析时大多采用增量列式法,则将式(1)写成微分形式:

$$\iint_V d[\bar{B}]^T \{ \sigma \}^e dv + \iint_V [\bar{B}]^T d\{ \sigma \}^e dv = d\{ F \}^e \quad (2)$$

式中: $d\{ \delta \}^e$ 表示单元节点位移 $\{ \delta \}^e$ 的微分。

对于线弹性材料,有:

$$\begin{aligned} &({}^0[k]_0 + {}^0[k]_\sigma + {}^0[k]_L) d\{ \delta \}^e = \\ &{}^0[k]_r d\{ \delta \}^e = d\{ F \}^e \end{aligned} \quad (3)$$

式中: ${}^0[k]_r$ 为单元切线刚度矩阵,是三个刚度阵之和,它表示荷载增量与位移增量之间的关系; ${}^0[k]_0$ 是单元弹性刚度矩阵,与单元节点位移无关; ${}^0[k]_\sigma$ 称为初应力刚度矩阵,它表示初应力对结构刚度的影响; ${}^0[k]_L$ 为单元初位移刚度矩阵或单元大位移刚度矩阵,是由大位移引起的结构刚度变化,是 $d\{ \delta \}$ 的函数。

式(3)即为增量形式 T. L 列式(总体拉格朗日列式法)的单元平衡方程,可以考虑斜拉桥的梁柱效应。若式(3)在建立平衡方程时选择参照构形为最后一个已知平衡状态,即以本增量步起始时的 t 时刻构形为参照构形,则式(2)的微分平衡方程须在 t 时刻单元体积内进行,即 ${}^t[k]_L$ 的积分式是 ${}^t[k]_0$ 的一阶或二阶小量,可以略去,则式(3)可写成:

$$({}^t[k]_0 + {}^t[k]_\sigma) d\{ \delta \} = d\{ F \} \quad (4)$$

式(4)被称为 U. L 列式(更新的拉格朗日列式法),它的优点是在考虑斜拉桥的梁柱效应的同时也可以考虑大位移效应。

斜拉索的垂度效应用等效弹性模量考虑,即 Ernst 公式^[10-11]:

$$E_{eq} = \frac{E_0}{1 + \frac{(\gamma L)^2 E_0}{12\sigma^3}} \quad (5)$$

式中: E_{eq} 为换算弹性模量; E_0 为缆索的原始弹性模量; γ 为缆索的容重; L 为斜拉索水平投影长度; σ 为斜拉索初始应力。

2.2 动力特性分析基本方程

结构的动力特性分析为研究抗震与抗风性能的基础,它反映了结构整体的质量和刚度分布。

根据有限元理论知识,结构的动力平衡方程^[12-13]为:

$$[M](\ddot{u}) + [C](\dot{u}) + [K](u) = \{F\} \quad (6)$$

式中: $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别表示结构的刚度矩阵、质量矩阵和阻尼矩阵, (u) 表示节点位移向量。

由于阻尼对结构自振特性的影响很小,因此在求结构的自振频率和振型时通常忽略阻尼的影响,则结构的自由振动方程表示为:

$$[M](\ddot{u}) + [K](u) = 0 \quad (7)$$

与式(7)相对应的特征方程可表示为:

$$([K] - \omega^2[M])(u) = 0 \quad (8)$$

由于位移是任意的,则式(8)应满足:

$$|[K] - \omega^2[M]| = 0 \quad (9)$$

式(9)特征值采用分块兰索斯法(Block Lanczos)求解,所求得的 n 个实根即表示结构的 n 个自振频率 $\omega_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$, 将 ω_i 代入式(8)即可得到相应的模态振型。

3 动力特性分析

3.1 空间动力模型建立

大跨度斜拉桥动力特性分析模型关键在于结构刚度、质量与边界条件的模拟^[12],使其能够真实反映实际结构的受力特点,且由于斜拉桥索-塔-梁的三维空间性,须建立空间动力模型。

目前斜拉桥上部结构的模拟主要有单主梁、双主梁和三主梁 3 种,各有优缺点,该桥采用动力特性分析中

使用最为广泛的单主梁中的“脊骨模型”模拟,即将全桥主梁用3D梁单元模拟为桥梁纵轴线上单根主梁,主梁与斜拉索通过横向刚性脊骨梁(单元刚度相对主梁很大)连接,按照拉索位置划分单元;桥塔及墩柱用3D梁单元模拟,按照截面变化划分单元;斜拉索用只受拉3D杆单元模拟,不考虑拉索局部振动影响,每根拉索划分为一个单元。斜拉索与主梁及索塔之间均用“刚臂单元”连接;斜拉桥的几何非线性效应根据上述理论,通过程序相应操作考虑^[14];二期恒载以均布荷载形式施加在纵梁上;该桥为半飘浮体系,主桥处设置竖向承压的多向活动球型钢支座,并在桥塔处增设纵向与横向阻尼器,在交界墩处增设横向阻尼器,通过约束和耦合相应自由度模拟。运用桥梁结构专用有限元分析软件midas Civil,并按照上述方法处理后建立的有限元模型共有990个节点,1149个单元(含677个梁单元、168个只受拉杆单元与304个刚臂单元),整体有限元模型如图2所示。

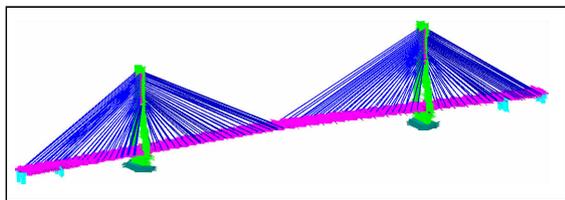


图2 主桥整体空间有限元模型

3.2 计算结果分析

需要指出的是,在对大跨度斜拉桥进行动力特性分析时,应先进行恒载状态下的非线性静力分析,再进行空间非线性动力特性分析^[15]。对于斜拉桥模态振型,一阶纵飘振型、一阶对称竖弯振型和一阶对称扭转振型3个模态振型最为重要,其中,前2个振型是影响结构抗震性能的关键因素,后2个振型对抗风分析至关重要^[16]。

利用上述建立的有限元模型计算得到该桥前500阶自振频率与模态振型,限于篇幅仅列出主要模态。前12阶桥梁自振频率及模态振型见表1,主要模态振型图如图3~图6所示。

从表1和图3~图6可以得出大跨度结合梁斜拉桥非线性动力特性具有以下5个特点:

(1)考虑几何刚度与非线性后结构的整体刚度降低,自振频率减小,且随着阶次的增加,二者误差也随之增大,同时对以主梁竖弯的振型(误差在4%以上)的影

表1 桥梁自振频率及模态振型

阶次	不计几何刚度 与非线性	计几何刚度 与非线性	模态振型
	自振频率/Hz	自振频率/Hz	
1	0.1843	0.1810	主梁纵飘 + 索塔同向纵弯
2	0.3605	0.3474	主梁一阶对称竖弯 + 索塔反向纵弯
3	0.4016	0.3966	主梁一阶对称侧弯
4	0.4633	0.4460	主梁一阶反对称竖弯 + 索塔同向纵弯
5	0.6923	0.6643	主梁二阶对称竖弯 + 索塔反向纵弯
6	0.8628	0.8250	主梁二阶反对称竖弯 + 索塔同向纵弯
7	0.9625	0.9199	主梁三阶对称竖弯 + 索塔反向纵弯
8	0.9890	0.9445	主梁三阶反对称竖弯 + 索塔同向纵弯
9	1.0346	0.9795	主梁四阶对称竖弯 + 索塔反向纵弯
10	1.0734	1.0146	主梁一阶反对称侧弯 + 索塔反向侧弯
11	1.1034	1.0794	北塔侧弯 + 主梁弱扭转
12	1.1091	1.0843	南塔侧弯 + 主梁弱扭转

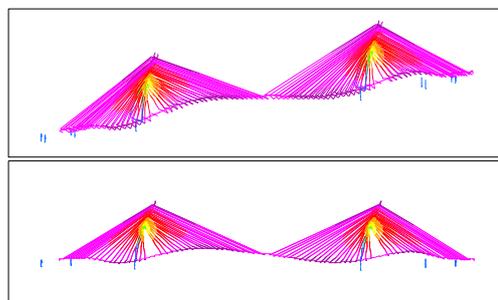


图3 一阶纵飘振型图 ($f_1 = 0.1810$)

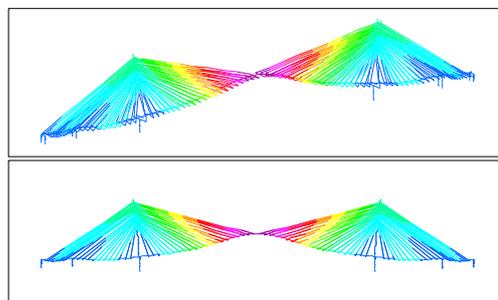
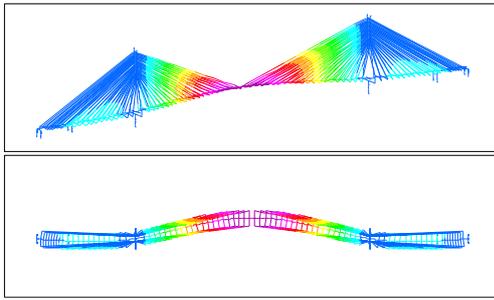
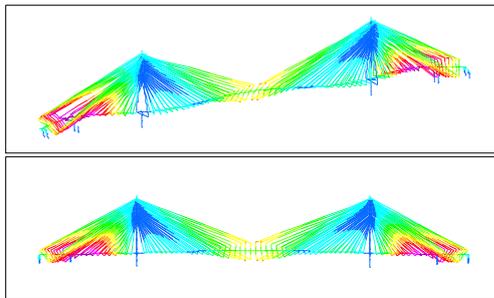


图4 一阶对称竖弯振型图 ($f_2 = 0.3474$)

响要比以主塔侧弯为主的振型(误差在2%左右)大。

(2)结构的一阶模态振型为纵飘,符合大跨度半飘浮体系斜拉桥的振型特征,且基本周期长,该桥基本周期为5.43 s,比一般土木工程结构(2 s以内)长,同时一阶纵飘将引起主梁纵向较大位移,在进行地震反应分析时需引起注意。

图 5 一阶对称侧弯振型图 ($f_3 = 0.3966$)图 6 一阶对称扭转振型图 ($f_{16} = 1.2565$)

(3) 结构前 10 阶振型中主梁侧弯只有 2 阶,且一阶侧弯较一阶竖弯出现晚,说明主梁横向弯曲刚度相对竖向较大,应多关注结构竖向的抗震性能。

(4) 结构一阶扭转振型出现较晚(第 16 阶),自振频率较高($f_{16} = 1.2565$),一阶扭转频率比为 3.62,有利于结构的抗风稳定性。

(5) 结构自振频率低,前 12 阶自振频率均在 1.2 Hz 以内,模态振型密集,在较小频率范围内就有多阶振型激发,且由于斜拉桥索-塔-梁相互作用的影响,结构几乎不存在单一方向与单一构件的振动,结构振型空间性与耦合性显著,故当采用反应谱法进行地震分析时应考虑多阶振型的影响,同时应选用 CQC 振型组合方法(完全二次振型组合)考虑振型之间的相互耦合。

4 结论

以大跨度半漂浮体系组合梁斜拉桥为例,考虑结构非线性的影响,对该类型结构进行了动力特性分析,得出以下主要结论:

(1) 结构的几何刚度与非线性对结构动力特性影响明显,考虑后结构的整体刚度降低,自振频率减小,且随着阶次的增加,二者误差也随之增大,同时对以主梁竖弯的振型的影响要比以主塔侧弯为主的振型大。

(2) 结构的基本周期比一般土木工程结构长,一阶

模态振型为纵飘,符合大跨度半漂浮体系斜拉桥的振型特征,同时一阶纵飘将引起主梁纵向较大位移,在进行地震反应分析时需引起注意。

(3) 结构一阶侧弯较一阶竖弯出现晚,且前 10 阶振型中以主梁竖弯为主,说明主梁横向弯曲刚度相对竖向较大,应多关注结构竖向的抗震性能。

(4) 结构一阶扭转振型出现较晚,自振频率较高,一阶扭转频率比为 3.62,有利于结构的抗风稳定性。

(5) 结构自振频率低,模态振型密集,在较小频率范围内就有多阶振型激发,而且斜拉桥受到索-塔-梁相互作用的影响使得结构几乎不存在单一方向与单一构件的振动,结构振型空间性与耦合性显著,在采用反应谱法进行地震分析时应考虑多阶振型的影响,同时应选用 CQC 振型组合方法(完全二次振型组合)考虑振型之间的相互耦合。

参考文献:

- [1] Virola J, Ing F E. The Russky Island Bridge-world-record cable-stayed bridge in Russia[J]. Tierakennusmestari TIRA, 2011(2):64-65.
- [2] Falbe H K, Hauge L, Kite S. Stonecutters Bridge-Detailed design[C]//IABSE Symposium Report. International Association for Bridge and Structural Engineering, 2004, 88(6):19-24.
- [3] 李文静, 张坤. 斜拉桥动力特性分析[J]. 四川理工学院学报:自然科学版, 2008, 21(5):105-107.
- [4] 王伟, 黄永福, 周聪, 等. 辅助墩对无上横梁双直立塔柱斜拉桥的影响[J]. 中外公路, 2012, 32(5):119-123.
- [5] Chen B B, Feng Z R, Wang X J. Analysis for Influence of Structural System on Nonlinear Seismic Response of Cable-Stayed Bridge[J]. Advanced Materials Research, 2015, 1065:856-859.
- [6] 钱国伟, 曹丰产, 葛耀君. II 型叠合梁斜拉桥涡振性能及气动控制措施研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(2):176-181.
- [7] Liu M Y, Wang F. Geometrically nonlinear analysis of long span composite girder cable-stayed bridge with three towers under live load[J]. Applied Mechanics and materials, 2010, 34:371-375.

- [8] Zhou Z G, Wang F, Deng L H. Geometrically Nonlinear Analysis of Composite Girder Cable-Stayed Bridge with Three Towers in Completion Stage[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 166:2761-2764.
- [9] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 2版. 北京:人民交通出版社, 2013.
- [10] 林元培. 斜拉桥[M]. 北京:人民交通出版社, 2004.
- [11] Gimsing N J, Georgakis C T. Cable supported bridges: concept and design[M]. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- [12] 范立础, 胡世德, 叶爱君. 大跨度桥梁抗震设计[M]. 北京:人民交通出版社, 2001.
- [13] Chopra A K. Dynamics of Structures[M]. 4th ed. London: Prentice Hall, 2011.
- [14] 黄侨, 吴红林, 刘绍云, 等. 大跨度斜拉桥几何非线性分析及程序实现[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(11):1520-1523.
- [15] 韩振峰, 叶爱君, 范立础. 千米级斜拉桥的动力几何非线性分析[J]. 土木工程学报, 2010, 43(6):67-73.
- [16] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 修订版. 北京:中国铁道出版社, 2002.

Study on Nonlinear Dynamic Characteristics of Long-Span Composite Girder Cable-Stayed Bridge

WANG Wei^{1,2}

(1. Chongqing Zhongshe Engineering Design Co., Ltd., Chongqing 400025, China;

2. Chongqing Zhongjian Construction Engineering Quality Testing Co., Ltd., Chongqing 400025, China)

Abstract: Taking a long-span semi-floating system composite girder cable-stayed bridge as the example, firstly the finite element theory is used to establish the three-dimensional space dynamic analysis model with considering the impacts of geometric stiffness and nonlinear, then the Block Lanczos method is adopted to study the dynamic characteristics of the bridge. The results show that, the effects of geometric stiffness and nonlinear on dynamic characteristics are obvious, the structure has a long basic cycle, a low natural frequency, mode shapes are intensive, spatiality and coupling are extraordinary as well. Geometric stiffness, nonlinear and spatiality of the structure should be considered when study dynamic characteristics of long-span composite girder cable-stayed bridge, at the same time, it makes a foundation for studying the anti-seismic and wind-resistant capabilities of the structure.

Key words: cable-stayed bridge; composite girder; dynamic characteristics; geometric stiffness; nonlinear