

# 鄱阳湖二桥结构动力特性分析

陈水生, 李帅

(华东交通大学 土木与建筑学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:**桥梁结构动力特性分析是进行车桥耦合分析、地震反应分析及风振分析的理论基础,系统而深入地认识桥梁结构动力特性十分重要。该文针对鄱阳湖二桥工程设计实例,采用 Ansys 和 Midas Civil 两种大型有限元分析程序,在考虑模型精细程度的影响下,建立了3种有限元模型。结合这3种模型的动力特性计算结果,对全桥动力特性进行了对比分析。结果表明:依据规范估算的竖向弯曲基频值较实际计算值偏小;采用 Ansys 建立的杆系斜拉桥模型计算速度快、模型简单且有效。

**关键词:**斜拉桥;鄱阳湖二桥;Ansys;动力特性

## 1 引言

大跨桥梁结构的动力特性如固有频率、振型、阻尼比等,是评价结构整体性能的重要依据之一,是进行结构损伤预警、状态评估以及抗风抗震等动力学研究的基础。而如何通过有限元分析程序建立符合实际结构的模型,准确掌握大跨桥梁结构的固有动力特性,则是研究动力学问题的关键。目前,斜拉桥是世界上广泛采用的大跨径桥型,在结构体系、材料受力性能等方面与其他一般梁式桥都有明显的差异,抗风、抗震性能以及车振性能均有其自身的特点。因此,对斜拉桥动力特性的准确分析显得十分重要。

1998年,朱宏平等建立了一种三维斜拉桥有限元模型,通过试验证明该模型几乎能够分析出斜拉桥所有重要的动力特性;同年,项海帆和朱乐东针对开口截面形式的斜拉桥,提出了三梁式动力分析模型;1999年,苏成等针对大跨度斜拉桥动力分析的现有桥面系模型的不足,提出了一种适用于叠合梁桥面系的新型双主梁模型,该模型既保证了桥面系刚度系统和质量系统的等效性,也使模型的节点数和单元数维持在一个较少的水平,提高了计算效率;2003年,夏品奇、James M W Brownjohn 研究了斜拉桥有限元建模技术和基于敏感度分析的有限元模型修正技术;2005年,杨素哲、陈艾荣等通过对不同有限元建模方式的比较,

提出将三主梁模型应用于开口截面双索面斜拉桥是适用的;2006年,宋雨等对已有建模方法进行了探讨、评述和分析,进一步验证了该模型的有效性。

针对鄱阳湖二桥的设计施工特点,该文采用 Ansys 和 Midas Civil 两大通用有限元分析程序对该桥进行动力特性分析。通过不同主梁形式、不同软件建立桥梁模型,并对各模型的频率和振型计算结果进行对比分析。

## 2 工程概况

鄱阳湖二桥位于江西省九江市都昌县、庐山市之间,是鄱阳湖上的第二座公路大桥,全桥横跨有中国内陆“百慕大”之称的鄱阳湖老爷庙水域。

其主桥采用跨径为 $(68.6+116.4+420+116.4+68.6)$  m=790 m 的五跨双塔空间双索面钢—混凝土组合梁斜拉桥,结构形式为梁、塔分离,并在主塔横梁上设置支座的半漂浮体系。主梁在每个索塔及辅助墩处各设两个双向滑动支座,在每个过渡墩处设置一个单向滑动支座和一个双向滑动支座。同时,在每个索塔处,主梁两侧均设置一个横向抗风支座。主梁采用分离工字钢纵梁、横梁、小纵梁、压重小纵梁通过节点板及 10.9 级摩擦型高强螺栓连接形成钢构架,构架上架设预制桥面板,现浇低收缩混凝土湿接缝,与钢梁上的焊钉形成整体,组成组合梁体系。两个纵梁间距为

收稿日期:2019-09-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51468018);江西省自然科学基金资助项目(编号:2018BAB206043,2018BAB206041)

作者简介:陈水生,男,教授。E-mail:Shschen@126.com

26.0 m,中间采用横梁连接,钢梁之间设置 3 道小纵梁,间距分别为 6、7、7、6 m。结构整体布置如图 1 所示,主梁截面如图 2 所示。桥塔为宝瓶形混凝土桥塔,塔高 137.91 m,其中桥面以上桥塔高 107.6 m,主塔有效高度与主跨跨径之比为 0.256。全桥共 72 对拉索,呈空间双索面扇形布置,最长斜拉索长度约 223 m,塔上索距为 2.3~3.0 m。斜拉索采用直径为  $\phi 7$  mm 的扭绞型环氧涂层平行钢丝,黑色内层彩色外层双层结构(C 形)。斜拉索在主梁上采用锚拉板形式在组合梁上进行锚固、在主塔上锚固采用两种方式,其中 28 对斜拉索在主塔上锚固采用钢锚梁方式进行锚固,

8 对斜拉索直接锚固于塔壁上设置预应力。

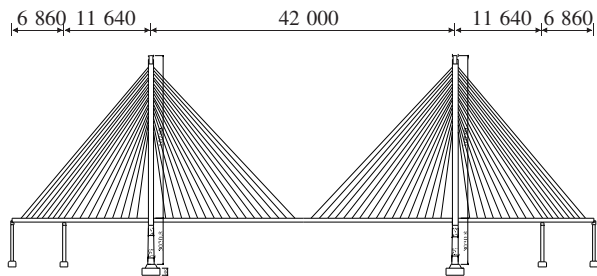


图 1 整体布置图(单位:cm)

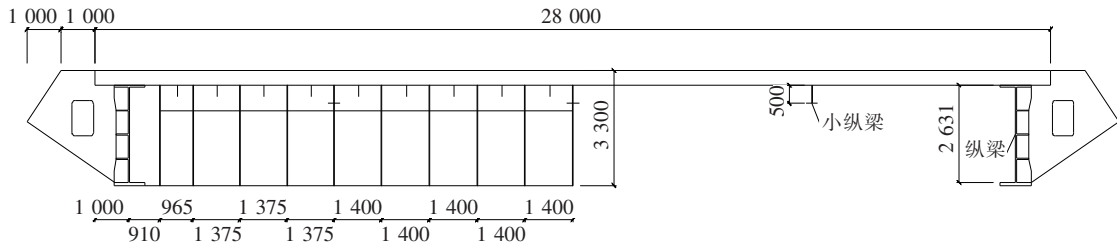


图 2 主梁横截面(单位:mm)

### 3 有限元模型的建立

使用 Ansys 建立有限元模型前必须进行模型规划,确定建立何种深度的模型能够更好地模拟工程实际并分析目标。按照有限元离散精细程度的不同,可以将模型分为 3 级,即杆系模型、板壳模型和实体模型。由于杆系模型可以快速获得结构的总体力学行为,故首先考虑采用该模型建立鄱阳湖二桥的三主梁式有限元模型。但考虑到工字形钢纵梁和钢横梁之间存在相对空间位置关系,且拉索在桥塔和主梁上的锚固位置也呈三维空间分布,这些因素都可能影响结构的整体力学行为,故加入实体模型,对结构进行准确离散。此外,考虑到不同有限元程序之间的差异,加入 Midas Civil 建立的杆系模型。

根据桥梁的结构特点,参考文献[11]和文献[12],分别采用 Ansys 和 Midas Civil 对鄱阳湖二桥全桥结构进行模拟,建立以下 3 个模型:

模型 1:采用 Ansys 建立杆系模型。主梁采用三梁式模型,钢主梁、钢横梁和桥塔采用 Beam4 单元,斜拉索采用 Link10 单元,桥面板及铺装层采用 Shell63 单元。三主梁依靠横梁联系,斜拉索和桥塔、主梁采用共节点的方式进行连接,在建立模型的过程中采用 Ernst 公式来修正拉索弹性模量以反映拉索垂度效应

的影响。全桥纵向不设约束,塔梁之间通过横桥向自由度耦合来模拟其边界条件,塔墩与基础按照固结等效处理。此外,在进行结构的动力特性分析时,首先进行结构在恒载作用下考虑几何非线性影响的静力分析,在此基础上,通过输入斜拉索的初始应变来模拟其初拉力对结构动力特性产生的影响。

模型 2:采用 Ansys 建立实体模型。较模型 1 不同的是,该模型中主梁采用壳单元模型,即钢主梁、钢横梁采用 Shell63 单元,而桥塔采用 Solid65 单元,并对其单元采取合适的方式进行网格划分。此外,根据设计资料准确模拟各构件的空间位置,如斜拉索两端在主塔和主梁上锚固的精确位置。

模型 3:采用 Midas Civil 建立杆系模型。主梁采用三梁式模型,钢主梁、钢横梁、主塔和桥墩均采用梁单元,桥面板和铺装层采用板单元,斜拉索采用桁架单元。全桥边界条件的处理与模型 1 相同,唯一不同在于该程序以添加弹性连接的方式来耦合塔墩和梁之间的自由度。同样,在静力分析基础上得到拉索的内力,通过添加拉索的初拉力,对模型进行线性分析,程序会自动考虑拉索的垂度效应对其弹性模量的影响。

特别指出,在采用 3 种模型进行计算的过程中,模型 1 的运算速度最快,仅用时 20 s,模型 3 用时 1 min,而模型 2 最为耗时,运算时间将近 1 h。

4 动力特性结果分析

4.1 对比规范

按照现行规范,有辅助墩的双塔斜拉桥的竖向弯曲基频按经验公式  $f_b=150/L$  进行估算,其中  $L$  为主跨跨径,则该桥竖弯基频为 0.357 Hz。将 3 个模型的基频计算结果与规范经验值进行比较,结果见表 1。

表 1 各模型基频计算值

模型	基频/Hz	
	纵漂	竖弯
模型 1	0.147	0.392
模型 2	0.160	0.415
模型 3	0.151	0.399
规范值	—	0.357

对比结果表明:各模型基频计算值比较接近,相差在 9%以内,且各模型竖弯基频均大于规范值。这也说明对于该类桥梁,由规范经验公式估算的竖弯基频值较实际计算值偏小。

4.2 频率结果对比分析

为了方便以后的结构动力响应分析,需对 3 个有限元模型的频率计算结果进行对比分析,从而在模型 1 和模型 2 中选取相对准确可靠的计算模型。那么,将模型 1 的频率计算结果作为基准值,分别与模型 2 和模型 3 的频率计算结果进行对比分析。如表 2 所示。

表 3 各模型前 20 阶振型计算结果

振型	各模型对应振型出现的阶次			振型	各模型对应振型出现的阶次		
	模型 1	模型 2	模型 3		模型 1	模型 2	模型 3
纵漂	1	1	1	主塔 2 阶反向侧弯	11	12	11
主梁 1 阶对称竖弯	2	2	2	主梁 4 阶对称竖弯	12	11	13
主梁 1 阶侧向弯曲	3	3	3	主梁 3 阶反对称竖弯	13	13	12
主梁 1 阶反对称竖弯	4	4	4	主梁 4 阶反对称竖弯	14	14	14
主塔反向侧弯	5	5	5	主塔 3 阶反向侧弯	15	16	15
主塔同向侧弯	6	7	6	主梁 5 阶对称竖弯	16	15	16
主梁 2 阶对称竖弯	7	6	7	主塔 2 阶同向侧弯	17	17	17
主梁 2 阶反对称竖弯	8	8	8	主塔 4 阶反向侧弯	18	19	18
主梁反对称扭转	9	9	9	主梁 5 阶反对称竖弯	19	18	19
主梁 3 阶对称竖弯	10	10	10	主塔 3 阶同向侧弯	20	22	20

由表 3 可知:前 10 阶振型中,模型 1 与模型 3 的振型计算结果完全吻合,而模型 2 的主塔同向侧弯振

表 2 模型 1 与模型 2、3 前 10 阶频率对比

阶次	频率/Hz			差值比/%	
	模型 1	模型 2	模型 3	①	②
1	0.146 6	0.150 1	0.150 8	2.39	2.86
2	0.391 5	0.414 9	0.398 6	5.98	1.81
3	0.437 5	0.476 1	0.415 5	8.82	5.03
4	0.526 8	0.531 0	0.526 2	0.79	0.11
5	0.683 7	0.679 3	0.745 2	0.64	8.99
6	0.694 4	0.707 8	0.749 1	1.92	7.88
7	0.796 0	0.835 0	0.800 2	4.90	0.52
8	0.959 1	1.036 7	0.933 9	8.09	2.62
9	0.978 9	1.017 3	0.973 0	3.92	0.60
10	1.081 9	1.113 6	1.009 2	2.93	6.72

注:①= $\frac{\text{模型 2}-\text{模型 1}}{\text{模型 1}}$ ;②= $\frac{\text{模型 3}-\text{模型 1}}{\text{模型 1}}$ 。

由表 2 可知:① 模型 2 与模型 1 的前 10 阶频率计算结果差值比最大为 8.82%,可见各构件相对空间位置关系以及斜拉索在空间内的精确锚固位置对结构的整体刚度影响较小。相比模型 2,用模型 1 来计算结构的频率更加高效;② 不同有限元分析程序计算得到的模型频率差值比最大不超过 9%。这也很好地验证了模型 1 频率计算结果的准确性,可以采用该模型来计算鄱阳湖二桥的频率。

4.3 振型结果对比分析

为了得到鄱阳湖二桥的振型,将各模型的前 20 阶振型计算结果进行了对比分析,如表 3 所示。

型在第 7 阶才出现。后 10 阶振型中,模型 2 的主塔侧弯振型较其他两个模型依旧延迟出现,而模型 1 与模

型 3 的振型计算结果基本吻合,两者只有主梁 4 阶对称竖弯振型出现阶次不同。综上可知,3 种模型的前 20 阶振型计算结果吻合度良好,且模型 1 与模型 3 计算结果几乎完全吻合。

#### 4.4 动力特性分析

经过对比分析,各模型的动力特性计算结果吻合

度良好,考虑到模型 1 计算速度快、模型简单且有效等优点,选取模型 1 为鄱阳湖二桥动力响应分析的计算模型。现列出由模型 1 计算得到的鄱阳湖二桥前 10 阶振型,如图 3 所示。

由表 4、图 3 可知:鄱阳湖二桥结构动力特性有如下特点:

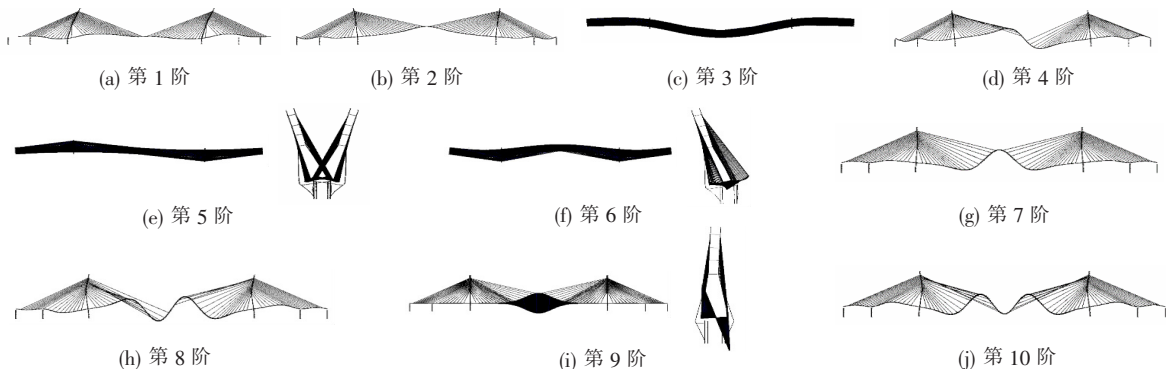


图 3 结构前 10 阶振型

(1) 该桥振型主要表现为主梁和桥塔的纵向漂浮、竖弯、侧弯和扭转 4 种形状。如图 3(a)所示,桥跨结构的第 1 阶振型为纵向漂浮,频率为 0.146 6 Hz,竖向、横向振动基频分别为 0.391 5 Hz 和 0.437 5 Hz,纯扭转基频为 0.978 9 Hz。

(2) 如图 3(b)所示,第 2 阶即出现主梁面内竖向振动,随后第 3 阶出现以主梁为主,并耦合索塔同时发生的横向面外振动,说明该桥的面外稳定性强于面内稳定性。

(3) 如图 3(f)、(g)所示,第 5、6 阶分别出现桥塔反向侧弯和同向侧弯情况,说明桥塔横向刚度较小,在对该桥进行抗震分析时应该充分考虑桥塔的影响。

## 5 结论

针对鄱阳湖二桥,采用 Ansys 和 Midas Civil 两种有限元分析程序分别建立其三维有限元模型,并对全桥动力特性进行对比分析。结果表明:

(1) 对于此类斜拉桥,依据规范中经验公式估算的结构竖弯基频值较实际计算值偏小。

(2) 采用 Ansys 建立的杆系斜拉桥模型计算速度快、模型简单且有效,可以为该类桥梁的结构动力响应分析提供可靠的计算模型。

#### 参考文献:

- [1] 胡世德,范立础. 江阴长江公路大桥纵向地震反应分析[J]. 同济大学学报,1994(4).
- [2] 李小珍,强士中. 大跨度公铁两用斜拉桥车桥动力分析[J]. 振动与冲击,2003(1).
- [3] 徐良,江见鲸,过静珺. 广州虎门悬索桥的模态分析[J]. 土木工程学报,2002(1).
- [4] 文坡. 金江金沙江大桥斜拉桥动力特性分析[D]. 西南交通大学硕士学位论文,2005.
- [5] 朱宏平,唐家祥. 斜拉桥动力分析的三维有限单元模型[J]. 振动工程学报,1998(1).
- [6] 项海帆,朱乐东. 考虑约束扭转刚度影响的斜拉桥动力分析模型[C]. 全国桥梁结构学术大会论文集(下册),1992.
- [7] 苏成,韩大建,王乐文. 大跨度斜拉桥三维有限元动力模型的建立[J]. 华南理工大学学报,1999(11).
- [8] 夏品奇,James M WBrownjohn. 斜拉桥有限元建模与模型修正[J]. 振动工程学报,2003(2).
- [9] 杨素哲,陈艾荣,等. 开口截面双索面斜拉桥动力特性研究[J]. 结构工程师,2005(4).
- [10] 宋雨,陈东霞. 斜拉桥动力特性分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版),2006(1).
- [11] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社,2007.
- [12] 葛俊颖. 桥梁工程软件 midas Civil 使用指南[M]. 北京:人民交通出版社,2015.
- [13] JTG/T 3360—01—2018 公路桥梁抗风设计规范[S].