

文章编号: 0451-0712(2003)12-0010-03

中图分类号: U448.25

文献标识码: A

大跨径悬索桥颤振稳定性的参数研究

张新军, 彭 卫

(浙江工业大学建筑工程学院 杭州市 310032)

摘 要: 颤振稳定性已成为影响和控制大跨径悬索桥设计的一个重要问题。运用大跨径桥梁三维非线性颤振分析方法, 以润扬长江大桥为背景, 对一些设计参数, 如桥跨布置、矢跨比、边主跨比、加劲梁的高度和恒载集度等, 进行了颤振的参数分析, 并指出了影响大跨径悬索桥颤振稳定性的主要设计参数。

关键词: 大跨径悬索桥; 颤振稳定性; 设计参数; 三维非线性颤振分析

悬索桥是由加劲梁、主缆、吊杆、桥塔和锚碇等构成的一种重要的缆索承重桥梁, 具有力线明确、造型美观和跨越能力大等优点, 是跨径 1 000 m 以上最具有竞争力的桥梁结构型式。目前, 悬索桥的最大跨径已达到 1 990 m (日本的明石海峡大桥)。进入 21 世纪后, 为适应跨海联岛工程建设的需要将修建更多、更大跨径的悬索桥, 设计和规划中悬索桥的最大跨径分别达到了 3 300 m (墨西哥拿海峡) 和 5 000 m (直布罗陀海峡)。我国正在修建中的润扬长江大桥主跨也达到了 1 490 m。众所周知, 悬索桥由于结构比较轻柔, 对风的作用非常敏感, 风作用下的抗风稳定性 (主要指颤振) 已成为影响和控制大跨径特别是特大跨径悬索桥设计和建设的重要因素。随着跨海联岛工程建设中桥梁跨径的进一步增大, 悬索桥的抗风稳定性问题将更为突出, 因此需要深入研究大跨径悬索桥的抗风稳定性问题。

在以往的研究中, 对于一些设计参数, 如主缆的矢跨比、桥跨布置、边主跨比、加劲梁的高跨比和宽跨比、加劲梁的刚度和恒载集度、加劲梁的支承体系等, 对悬索桥静动力性能的影响研究得比较多, 但是关于这些参数对大跨径悬索桥颤振稳定性的影响则研究得比较少。因此, 需要研究这些设计参数对大跨径悬索桥颤振稳定性的影响, 在此基础上进一步探索具有良好抗风性能的大跨径悬索桥合理结构体系, 为跨海联岛工程中大跨径悬索桥的抗风设计提供理论依据。

1 悬索桥颤振稳定性的参数分析

润扬长江大桥是我国正在修建中的最大跨径悬索桥, 是一座单跨简支钢悬索桥, 跨径布置为 470 m + 1 490 m + 470 m。主缆的矢跨比为 1/10; 主梁采用扁平状流线型钢箱梁, 梁宽为 35.9 m, 梁高为 3.0 m; 桥塔采用混凝土门式框架结构, 塔高约 209 m。在有限元分析时, 主梁采用鱼骨式计算模型, 主梁、塔柱和塔横梁等简化为非线性空间梁单元, 主缆和吊杆则简化为非线性空间杆单元, 主梁和吊杆间采用刚性横梁联系, 该桥的三维有限元计算模型如图 1 所示。

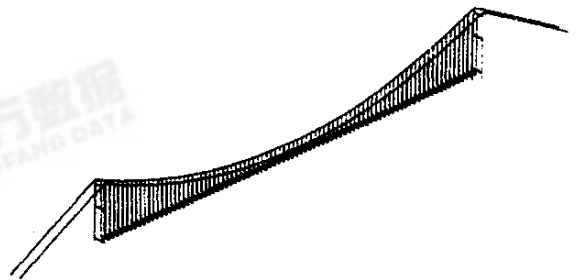


图 1 润扬长江大桥的三维有限元分析模型

在 0° 风攻角下, 运用大跨径桥梁三维非线性颤振分析程序^[1,2], 取用该桥节段模型试验测得的气动导数^[3]以及结构阻尼比为 0.5%, 进行了以下的颤振稳定性参数分析。

1.1 桥跨布置

悬索桥常见的桥跨布置有单跨式和三跨式两种型式, 一般多采用三跨式。从力学角度上考虑, 单跨悬索桥的刚度相对比较大。采用三跨时, 随着边跨长

度的加大,结构刚度会有所下降。

为了揭示桥跨布置对悬索桥颤振的影响,拟定了一座三跨连续的悬索桥作为比较方案进行分析,两座桥梁的边跨长度均相同,计算的颤振风速以及主要颤振参与模态的振动频率见表 1。

表 1 桥跨布置对颤振风速和主要颤振参与模态振动频率的影响

计算项目	颤振 风速 m/s	一阶对 称竖弯 Hz	二阶对 称竖弯 Hz	一阶对 称扭转 Hz
单跨悬索桥	61.8	0.126 2	0.172 1	0.241 1
三跨连续悬索桥	67.4	0.109 2	0.144 3	0.240 8

从表 1 可以看到,三跨连续悬索桥的颤振稳定性要比单跨悬索桥要好。与单跨悬索桥相比,三跨连续悬索桥的竖向弯曲振动频率显著减小,但扭转振动频率却变化不大,扭弯频率比增大,因而促使体系颤振风速的提高。因此,从抗风稳定性角度而言,采用三跨连续悬索桥是比较适宜的。

1.2 主缆矢跨比

主缆矢跨比是悬索桥设计中一个很重要的结构参数,矢跨比的大小决定着主缆拉力及其能给结构提供重力刚度的大小,因此它在很大程度上是影响结构受力、刚度和经济造价等方面的一个重要因素。悬索桥的矢跨比一般在 $1/9\sim 1/12$ 之间^[4],对于大跨悬索桥则通常在 $1/10$ 左右。

为了揭示主缆矢跨比 对大跨径悬索桥颤振稳定性的影响,在保持其他设计参数不变的情况下,通过改变主缆的矢跨比进行了颤振的参数分析,颤振风速和主要颤振参与模态的振动频率随矢跨比的变化情况如表 2 所示。

表 2 矢跨比对颤振风速和主要颤振参与模态振动频率的影响

矢跨比	1/9	1/10	1/11	1/12
颤振风速/(m/s)	67.9	61.8	58.5	56.3
一阶对称竖弯/Hz	0.123 5	0.126 2	0.126 7	0.124 9
二阶对称竖弯/Hz	0.179 4	0.172 1	0.168 1	0.167 3
一阶对称扭转/Hz	0.253 4	0.241 1	0.230 4	0.221 0

如表 2 所示,随着主缆矢跨比的增大,悬索桥的颤振稳定性逐步提高。同时,悬索桥的一阶扭转振动频率也随之增大,这正是悬索桥颤振风速得以提高的原因所在。虽然减小主缆的矢跨比可以增大悬索桥的竖向刚度,改善其静力性能,但是从抗风性能角度考虑是不利的。因此,悬索桥的矢跨比要综合结构

的静力性能和抗风性能要求确定。

1.3 边主跨比

悬索桥的边主跨比是一个影响全桥刚度和动力性能的重要参数。边跨越长,主缆的垂度越大,对中跨的固定效果就越弱,导致主跨较大的柔性,降低了悬索桥的结构刚度。悬索桥的边主跨比绝大多数在 $0.2\sim 0.4$ 之间,极少超过 $0.4^{[4]}$ 。一般来说,边主跨比越小越经济,对控制变形和改善振动特性有利。为了揭示边主跨比对悬索桥颤振稳定性的影响,在保持主跨跨径不变的情况下,通过调整边跨长度,进行了不同边主跨比的颤振分析,颤振临界风速和主要颤振参与模态的振动频率随边主跨比的变化趋势如表 3 所示。

表 3 边主跨比对颤振风速和主要颤振参与模态振动频率的影响

边主跨比	0.2	0.315	0.4
颤振风速/(m/s)	68.4	61.8	61.2
一阶对称竖弯/Hz	0.127 1	0.126 2	0.124 8
二阶对称竖弯/Hz	0.176 1	0.172 1	0.168 8
一阶对称扭转/Hz	0.244 3	0.241 1	0.237 9

可以看出,随着边主跨比的增加,悬索桥的颤振风速逐步降低,从而进一步证实了大跨径悬索桥采用短边跨的有利作用。

1.4 加劲梁高度

目前,大跨径悬索桥的加劲梁主要采用桁式和箱形 2 种类型,前者一般采用在双层桥面布置中,而后者在单层桥面的悬索桥中得到广泛的应用。加劲梁的高跨比越大,梁体越高,相应的竖向挠曲刚度越大,能在一定程度上控制主梁竖向位移。箱形加劲梁的梁高一般为 $3\sim 5$ m,高跨比一般小于 $1/300^{[4]}$,跨径越大比值越小。

为了研究加劲梁高度对悬索桥颤振稳定性的影响,分别对加劲梁高度为 3.0 m、 3.5 m、 4.0 m 和 4.5 m 的 4 个方案桥进行了分析,计算所得的颤振风速和主要颤振参与模态的振动频率随主梁高度的变化情况如表 4 所示。

表 4 主梁高度对颤振风速和主要颤振参与模态振动频率的影响

主梁高度/m	3.0	3.5	4.0	4.5
颤振风速/(m/s)	61.8	66.6	69.5	72.4
一阶对称竖弯/Hz	0.126 2	0.126 4	0.126 9	0.127 4
二阶对称竖弯/Hz	0.172 1	0.171 4	0.171 6	0.171 8
一阶对称扭转/Hz	0.241 1	0.253 4	0.261 4	0.268 8

从表 4 可以看到,悬索桥的颤振风速随着主梁高度的增加而明显提高。随着主梁高度的增加,悬索桥的竖向弯曲振动频率变化不大,但是扭转振动频率却显著增大,因而促使了悬索桥颤振风速的明显提高。因此,增大梁高对提高大跨度悬索桥的抗风稳定性是比较有利的。

1.5 加劲梁恒载集度

对于大跨径悬索桥,主缆提供的重力刚度对体系的结构刚度贡献很大,而这种重力刚度主要是由主缆和加劲梁的恒载产生。增大加劲梁的恒载集度,主缆拉力及其引起的重力刚度将增大,悬索桥的结构刚度也得到增强。为了揭示加劲梁恒载集度对悬索桥颤振稳定性的影响,通过增加和减少加劲梁的恒载集度进行了颤振分析,计算结果如表 5 所示。

表 5 加劲梁恒载集度对悬索桥颤振风速的影响

恒载集度	$0.5q_0$	q_0	$1.5q_0$	$2.0q_0$
颤振风速/(m/s)	55.6	61.8	63.7	63.1

注: q_0 为该桥恒载集度设计值。

从表 5 可以看到,颤振风速随着加劲梁恒载集度的增加而增大。但是,当恒载集度超过加劲梁的原有设计值以后,恒载集度的增加对提高颤振风速的作用不大,反而增加了材料用量,造成不经济。

2 结论

本文运用大跨径桥梁三维非线性颤振分析方

法,以润扬长江大桥为背景,对影响悬索桥颤振稳定性的一些设计参数进行了分析,并得到了以下一些主要结论:

- (1)从抗风稳定性角度考虑,采用三跨连续悬索桥是比较合适的;
- (2)减小主缆的矢跨比对悬索桥的颤振稳定性而言是不利的;
- (3)悬索桥采用短边跨,不仅可以提高全桥的刚度,而且有利于提高全桥的抗风稳定性;
- (4)增加主梁高度,可以显著提高大跨径悬索桥的抗风稳定性;
- (5)增大加劲梁的恒载集度,对提高悬索桥颤振稳定性的作用不大,反而增加了悬索桥的材料用量,造成不经济。

参考文献:

[1] Zhang Xinjun, Sun Bingnan, Xiang Haifan. Nonlinear Aerostatic and Aerodynamic Analysis of Long-span Suspension Bridges Considering Wind-structure Interactions. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(9).

[2] 张新军, 项海帆, 陈艾荣. 大跨度悬索桥三维颤振的非线性分析[J]. 土木工程学报, 2002, 35(5).

[3] 陈艾荣, 宋锦忠. 镇江扬州长江大桥抗风性能研究报告[R]. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 2000.

[4] 严国敏. 现代悬索桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.

Parametric Study on Flutter Stability of Long Span Suspension Bridges

Zhang Xin-jun, Peng Wei

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: Flutter stability is one of major factors governing the design of long span suspension bridges. Using the method of three-dimensional nonlinear flutter analysis, numerical flutter analyses for the Runyang Bridge over the Yangtze River are carried out including the arrangement of bridge spans, the cable sag to main span ratio, and the side span to main span ratio, and the height and dead load of the stiffening girder. Main design parameters that affect the flutter stability of long span suspension bridges are point out.

Key words: long span suspension bridge; flutter stability; design parameters; three-dimensional nonlinear flutter analysis

万方数据