

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.01.020

空间曲塔大跨斜拉桥抗风性能研究

聂斌¹,王定全¹,具鑫兰²,孙丽明²

[1.成都交通投资集团有限公司,四川 成都 610041; 2.同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要: 跨江大桥跨径较大,桥位风速较高,抗风问题至关重要。随着桥梁造型逐渐复杂,规范中一般公式无法适用其抗风计算,因此针对某主跨为238 m的跨江空间曲塔斜拉桥的抗风性能进行了研究。研究内容包括:利用虚拟风洞试验技术获取了主梁的静气动力系数、气动导数以及桥塔分段的模拟风荷载;利用三维颤振稳定性分析方法检验了主梁颤振性能;对主梁的涡激共振进行了数值模拟,得到了不同风攻角下的振幅-风速曲线;分析了结构静风荷载下的位移响应。结果表明,该桥主体结构结构的抗风性能均满足规范要求。

关键词: 空间曲塔;斜拉桥;抗风性能;数值模拟

中图分类号: U448.27

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)01-0085-04

0 引言

跨江大桥主体结构因其跨径较大常采用钢结构,结构阻尼较低,对风的作用较为敏感。而随着桥梁造型逐渐独特化,一般的规范计算方法难以适应特殊结构。因此,有必要对其专门开展抗风性能研究。

本文依托于某主跨为238 m的空间曲塔大跨钢斜拉桥进行实例分析:首先对主梁的颤振稳定性和涡激共振性能进行了分析,然后对全桥结构进行了静风荷载的响应分析。考虑到桥塔的非对称性及断面的复杂性,通过数值模拟的方法得出其各段风荷载。此外,主梁宽度较大,衔接慢行道系统,结构形式复杂,故通过虚拟风洞计算得到三分力系数。

1 工程概况

某跨江大桥采用扭索面空间曲塔斜拉桥结构形式,跨径布置为45 m+185 m+238 m+45 m=513 m,斜拉索倒排布置形成空间曲面,桥梁总体布置见图1。

结构体系采用塔梁墩全固接体系,索塔为钢结构空间曲塔,基准轴线为向边跨倾斜18°后的椭圆,其与梁底连接两条相切空间曲线即为V腿基准轴线。索塔断面为变截面六边形,标准截面采用外筒加内筒的形式,内筒为“井”字形,塔柱外壁板均为空间扭曲板件。索塔总高度约173.3 m,桥面以上约140 m,桥面以下约33.3 m。

收稿日期: 2023-01-16

作者简介: 聂斌(1970—),男,硕士,高级工程师,从事交通行业管理和研究工作。

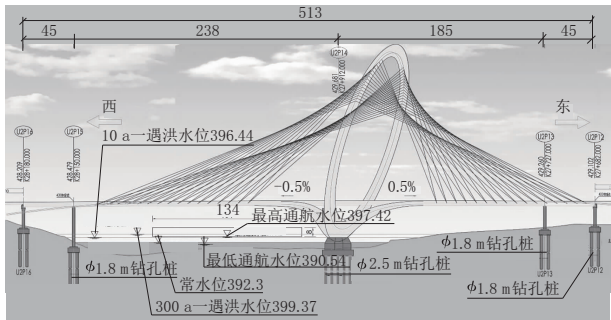


图1 主桥总体布置图(单位:m)

主梁采用半封闭双边钢箱截面,标准断面全宽64 m、高3.7 m,主梁标准断面见图2。横隔板由箱内、箱外共三块板组成,均采用整体式横隔板,横隔板标准间距为3 m。

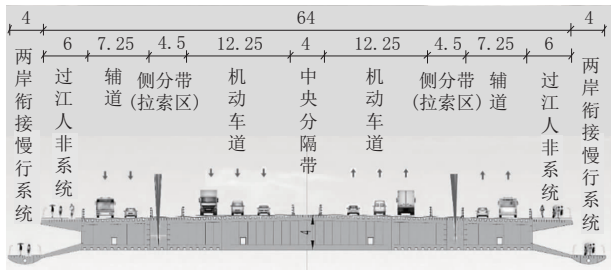


图2 主梁标准断面布置图(单位:m)

2 主梁颤振稳定性分析

主梁发生微小振动时引起周围气流的变化,引发气动力作用于结构,进而可能导致振动增大。振动的主梁从气流反馈中不断吸收能量,在某一临界风速下发生气动弹性失稳,即颤振。

颤振主要表现为竖弯和扭转模态的耦合。作用在结构上的气动力通过气动导数表达,颤振检验首先需要识别气动导数。气动导数通过强迫振动法确定。通

过大涡模拟^[1]得到瞬时的气流流动,令主梁断面作强迫纯竖向振动及纯扭转振动。

首先计算出气动力的时程变化,然后用最小二乘法^[2]拟合计算得到不同折减风速下的气动导数^[3]。数值模拟结果见图3。

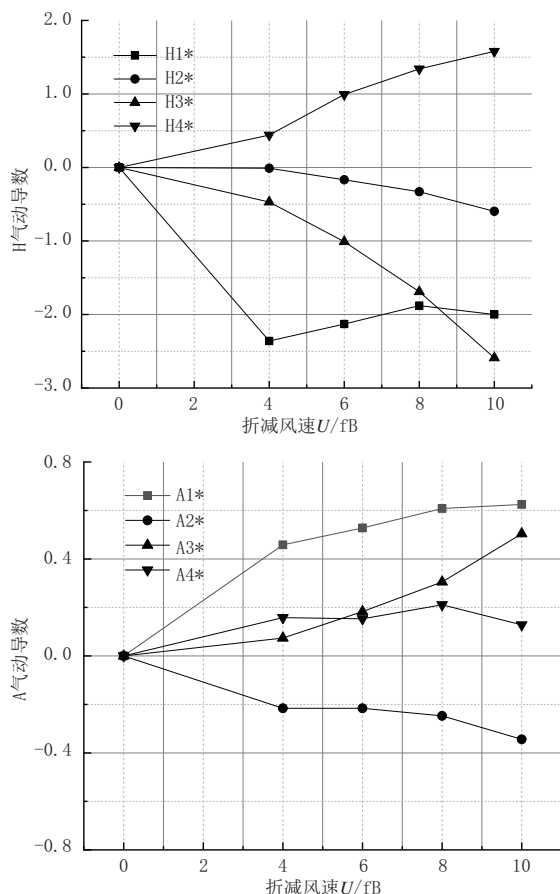


图3 成桥状态0°攻角气动导数曲线

为考虑不利风攻角的影响,颤振稳定性检验选择 $\pm 3^\circ$ 、 0° 三个风攻角工况。选取结构的一阶竖弯与一阶扭转模态进行颤振分析,图4为模态频率及阻尼随风速变化曲线,可以看出 0° 风攻角下颤振临界风速大于150 m/s。

考虑攻角效应时 $\pm 3^\circ$ 风攻角下颤振临界风速可取为 0° 风攻角下的0.7倍,因此 $\pm 3^\circ$ 风攻角下颤振临界风速大于105 m/s。各风攻角下颤振临界风速均大于检验风速53.2 m/s的要求。

3 主梁涡激共振性能分析

风经过结构在尾流产生漩涡脱落,当涡脱的频率接近或等于结构自振频率时会发生涡激共振,是一种自激限幅振动。钢主梁的结构阻尼较小,存在不足以克服气动阻尼而发生涡激共振的可能,对结构刚度、疲劳、耐久性以及行车行人的安全性、舒适性产生影响。对于主跨跨径大于200 m的主梁需进行

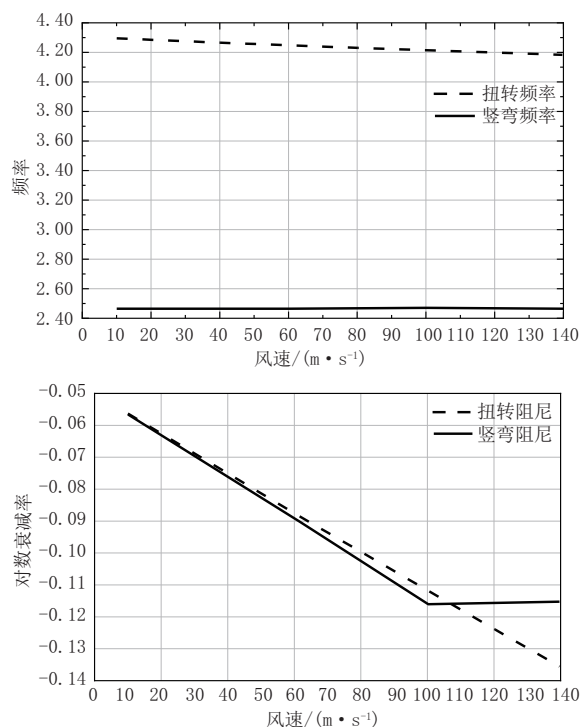


图4 模态频率及阻尼随风速变化曲线(0° 风攻角)

涡激共振检验,竖向及扭转涡激共振的振幅应分别满足以下两式:

$$h_v < \gamma_v \frac{0.04}{f_v}, \quad \theta_t < \gamma_v \frac{4.56}{B f_v}$$

式中: f_v 、 f_t 为竖向及扭转振动频率; γ_v 为为涡激共振分项系数,当采用风洞试验获取时取1; B 为主梁的特征宽度。

选取 $\pm 3^\circ$ 、 0° 不同风攻角,在不同风速下,利用数值计算的方法模拟主梁断面的风致振动过程。其中动力参数取值通过动力特性计算得到:一阶竖弯频率0.392 9 Hz,竖弯等效质量73.4 t/m;一阶扭转频率0.685 0 Hz,等效质量矩14 234.3 t·m²/m,结构阻尼比0.3%。

通过数值计算得到 $+3^\circ$ 、 0° 、 -3° 下主梁竖弯涡激共振幅值分别为0.001 6 m、0.015 m、0.034 m,主梁扭转涡激共振幅值分别为 0.005° 、 0.011° 、 0.036° ,均未超出允许值要求($h_v=0.1$ m、 $\theta_t=0.1^\circ$)。其中,不同风速下主梁断面振动振幅曲线(-3° 攻角)的数值模拟结果见图5。

4 异形桥塔风荷载模拟

本桥桥塔断面形状复杂,无法简单利用规范计算风荷载,因此通过虚拟风洞试验模拟其风荷载^[4]。以Navier-Stokes方程(绕流风的连续性方程及动量守恒方程)为基本控制方程,采用Realizable $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型对风场进行数值模拟。相对于直接求

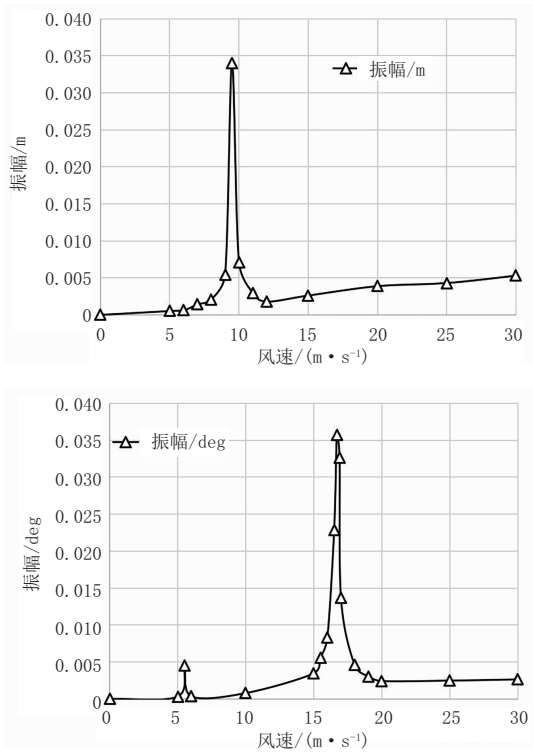


图5 不同风速下主梁断面振动振幅曲线(-3°攻角)

解,湍流模型对小尺度涡均值化以简化计算量,更适用于工程计算。风场的边界条件设置为入口边界:均匀来流 10 m/s 的速度进口;出口边界:压力出口边界条件;桥塔结构构件:采用无滑移固壁条件,见图 6。

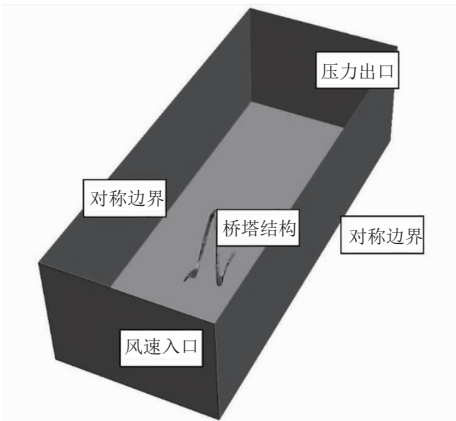


图6 边界条件设置示意图

根据三维建筑结构模型,建立虚拟数值风洞模拟桥塔的分块风荷载,设置结构体轴方向: X 方向为顺桥向, Z 方向为横桥向, Y 方向为竖向。结构风荷载单位为: N 。考虑到桥塔的特殊结构形式为便于计算风荷载,以每 20 m 高度分块,将该结构划分为 22 块。桥塔分为左右两个部分,其中左塔柱编号为 L1~L11,右塔柱编号为 R1~R11,见图 7。

此外,考虑到桥塔结构的不对称性,将风向角范围扩大到 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$,按每 30° 划为 1 个工况,共计 12 种工况,其中顺桥向为 0° 及 180° 风向角,见图 8。

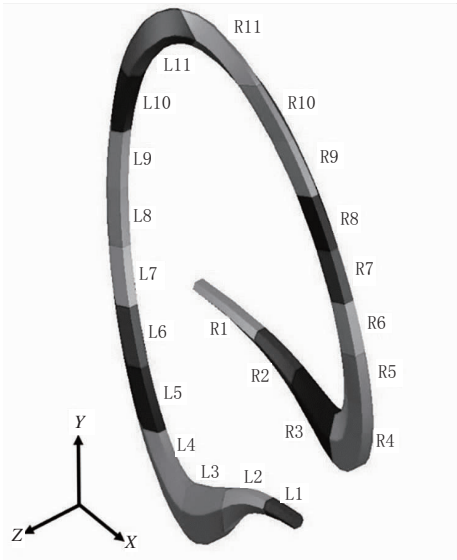


图7 桥塔分块示意图

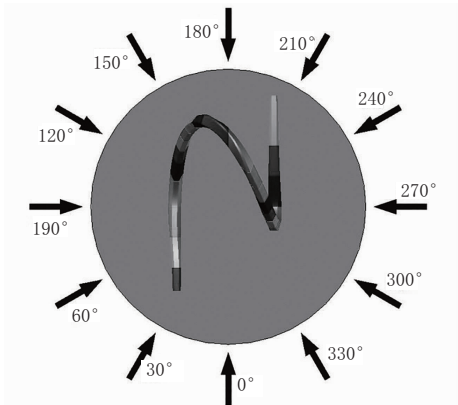


图8 桥塔风向角示意图

表 1、表 2 示出了 0° 、 30° 、 60° 、 90° 风向角下桥塔部分分块风荷载的计算值。可以看出: 0° 风向角顺桥向荷载最大,随着风向角越接近 90° 顺桥向荷载越小; 90° 风向角下桥塔横桥向荷载最大,风向角越接近 0° 横桥向荷载越小。图 9、图 10 给出了 90° 风向角下桥塔的风压云图和流迹图。

表 1 0° 风向角和 30° 风向角下桥塔部分分块的风荷载值

0° 风向角	0° 风向角			30° 风向角	30° 风向角		
	F_x / N	F_y / N	F_z / N		F_x / N	F_y / N	F_z / N
L7	-9 489	-2 859	1 442	L7	-6 549	-2 762	-5 199
L8	-9 547	-2 296	584	L8	-6 899	-2 571	-5 406
L9	-8 731	-1 455	-60	L9	-6 350	-2 236	-5 627
R7	-8 678	-2 306	-519	R7	-8 042	-1 779	-4 001
R8	-9 431	-3 156	-963	R8	-6 811	-1 577	-5 749
R9	-9 125	-3 320	-3 295	R9	-5 714	-918	-8 357

5 结构风荷载响应

为保证结构在静风荷载下的安全,需分别对横桥向风和顺桥向风两种工况下结构的位移响应进行计算。考虑设计风荷载为设计基准风速下的等效静

表2 60°风向角和90°风向角下桥塔部分分块的风荷载值

60°风向角	F_x /N	F_y /N	F_z /N	90°风向角	F_x /N	F_y /N	F_z /N
L7	-4 029	-2 249	-7 634	L7	410	-1 181	-10 650
L8	-5 813	-2 519	-6 968	L8	519	-1 430	-9 973
L9	-5 863	-2 123	-5 632	L9	493	-1 886	-9 488
R7	-4 638	-269	-9 287	R7	-2 766	396	-10 639
R8	-5 630	-671	-9 491	R8	-101	1 384	-10 225
R9	-3 065	632	-10 421	R9	830	2 266	-9 936

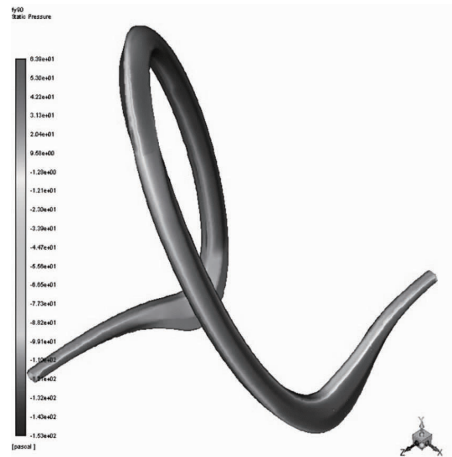


图9 桥塔90°风向角风压云图(单位:Pa)

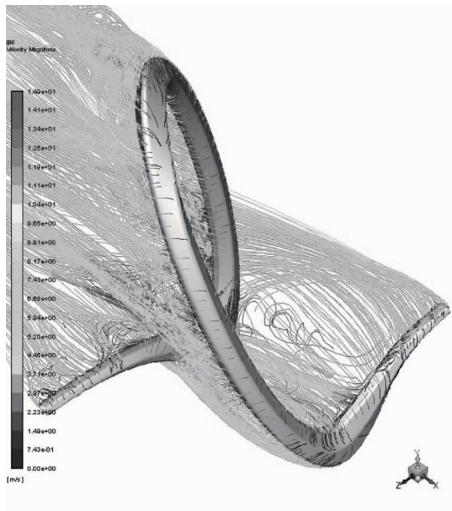


图10 桥塔90°风向角流迹图(单位:m/s)

阵风荷载,首先要获取三分力系数。本桥主跨大于200 m,且主梁为复杂的双主梁含慢行道结构,因此需要通过虚拟风洞模拟计算得到其三分力系数。模拟时除考虑结构主体外,不可忽略附属设施的影响,

应按实际成桥时断面布置模拟,见图11。计算结果见表3。可以看出,+3°风攻角下,阻力系数和扭矩系数最大,分别为1.80和-2.50;-3°风攻角下,升力系数最大,为-0.36。



图11 成桥状态断面布置示意图

表3 不同风攻角下主梁三分力系数(风轴坐标系)

风攻角 $\beta(^{\circ})$	阻力系数 C_D	升力系数 C_L	扭矩系数 C_M
-3	1.67	-0.36	2.39
0	1.48	-0.01	-0.47
+3	1.80	0.32	-2.50

由三分力系数计算得到作用在主梁上的横向力、竖向力及扭矩,通过有限元建立全桥模型加载得到风荷载响应。在横桥向风作用下,主梁最大横桥向位移为-0.06 m,最大竖向位移-0.08 m,塔顶最大横桥向位移为-0.21 m;在顺桥向风作用下,主梁最大顺桥向位移-0.001 3 m,最大竖向位移0.014 m;索塔柱最大顺桥向位移为-0.021 9 m。

6 结 语

(1)本文针对某跨江空间曲塔大跨径斜拉桥主体结构进行了抗风性能研究,结果表明:主梁的颤振稳定性、涡激共振性能满足规范要求;静风荷载下桥塔及主梁的位移响应均在合理范围内。

(2)空间曲塔断面复杂,规范中的抗风计算无法适用。本文采用虚拟风洞模拟的方法将异形桥塔分段以研究其风荷载,对于其他造型特殊的桥梁结构抗风计算具有借鉴意义。

参考文献:

[1] 陈艾荣,艾辉林.计算桥梁空气动力学[M].北京:人民交通出版社,2010.
[2] 许福友,陈艾荣,马如进.桥梁断面颤振导数识别的随机搜索方法[J].土木工程学报,2006,39(7):63-68.
[3] 曹丰产,项海帆,陈艾荣.桥梁断面的气动导数和颤振临界风速的数值计算[J].空气动力学学报,2000(1):26-33.
[4] JTG/T 3360-01—2018,公路桥梁抗风设计规范[S].