文章编号:1674-2974(2025)07-0132-09 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025073

纵向衰减系数对大跨径悬索桥抖振响应的影响

卢斌[1,2],蔡松[1,2],裘程辉[3],李加武[1,2†],谢泽恩[1,2],王佳盈[1,2]
(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064;
2. 长安大学 风洞实验室,陕西 西安 710064;
3. 浙江数智交院科技股份有限公司,浙江 杭州 310000)

摘 要:为研究传统指数衰减系数C_y设定的模拟脉动风场对大跨径悬索桥抖振响应的影响,首先以三座1 000~2 000 m级的大跨径悬索桥为背景进行频域法和时域法的抖振响应分析.结果表明,考虑风荷载非线性等因素的时域法抖振响应结果更加安全;在此基础上,基于时域法,分析了不同C_y取值时悬索桥各展向位置处的抖振响应,并与Davenport推荐的C_y=16时的抖振响应进行对比.研究表明,悬索桥抖振响应并非单纯随C_y的改变而线性变化,在不同C_y取值下三座悬索桥跨中位置处的抖振位移响应RMS值始终最大.C_y为14时的主梁竖向位移、侧向位移及扭转角RMS最大值比C_y=16时的值大,分别大1.5%、14.6%和26.3%.用Davenport的建议值进行大跨度悬索桥抖振响应分析结果偏危险,在进行抖振响应最不利分析时,建议选取多组C_y值进行计算.

关键词:大跨径悬索桥;指数衰减系数;时域法;频域法;抖振响应
中图分类号:U441.3 **文献标志码**:A

Effect of Longitudinal Decay Coefficient on Buffeting Response of Long-span Suspension Bridge

LU Bin[1,2], CAI Song[1,2], QIU Chenghui[3], LI Jiawu[1,2†], XIE Zeen[1,2], WANG Jiaying[1,2]
(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
2. Wind Tunnel Laboratory, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
3. Zhejiang Provincial Institute of Communications Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: In order to study the influence of the simulated pulsating wind field with the traditional exponential decay coefficient C_y on the buffeting response of long-span suspension bridges, frequency and time domain methods were first applied for buffeting response analysis taking three long-span suspension bridges ranging from 1 000 m to 2 000 m as the background. The results indicate that the buffet response from the time domain method, considering factors like wind load nonlinearity, is safer. Based on the time domain method, reponsesat the different spanwise position of the suspension bridge under different C_y values was analyzed. The buffet response was compared with the buffet response when C_y=16 recommended by Davenport. The results show that the buffet response of the suspension bridge does not simply change linearly with the change of C_y. The buffet displacement RMS value of the three

* **收稿日期**:2024-03-09
基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(51978077), National Natural Science Foundation of China(51978077)
作者简介:卢斌(1971—),女,江苏宿迁人,长安大学副教授,博士
† 通信联系人,E-mail:ljw@gl.chd.edu.cn

suspension bridges at the mid-span position always remains the largest under different values of C_y; When C_y is 14, the maximum values of the vertical, lateral and torsional angular displacement response RMS values of the suspension bridge are larger than those when C_y=16, which are 1.5%, 14.6% and 26.3%, respectively. The results of the buffeting response analysis of large-span suspension bridges using Davenport's recommended values are dangerous. When performing the most unfavorable buffeting response analysis, it is recommended to select multiple groups of C_y values for calculation.

Key words: long-span suspension bridge; exponential decay coefficient; time domain method; frequency domain method; buffeting response

大跨径桥梁因其自身结构轻柔、阻尼低的特点,在自然风环境中容易出现抖振现象.抖振是一种限幅随机强迫振动,虽不会给桥梁结构带来毁灭性破坏,但会引起桥梁构件的局部疲劳,合理的评估脉动风荷载及其产生的效应是完善桥梁建设理论的必经之路.

早在20世纪,Davenport[1]基于概率统计的方法创建了一套用于分析桥梁抖振的理论框架,为后来科学家改进和完善桥梁抖振理论提供了新的思路.多年后的今天获取桥梁抖振响应的方法逐渐多元化,国内外众多学者分别进行了多种方法的尝试并取得了较好的结果[2-8].在我国现行规范中推荐获取桥梁抖振响应的方法主要有频域分析法、时域分析法、风洞试验法或虚拟风洞试验法[9].频域法和时域法都是分析桥梁抖振响应的常用计算方法,频域法侧重分析桥梁结构的频率响应特性,时域法侧重分析桥梁结构响应随时间的变化,在考虑计算时间和计算精确度等因素时可根据情况进行选择.相比数值计算方法,风洞试验得出的桥梁抖振响应较为准确,但同时也面临试验成本过高和前期模型制作时间较长等问题.采用数值计算方法获取桥梁抖振位移响应需要模拟桥梁所在环境的实际脉动风场,而脉动风场特性的模拟与相干函数和风功率谱的选取密切相关.Davenport[10]在1961年提出相干函数指数衰减计算模型,用来表征空间两点风速的统计相关性.在此基础上,Mann等对基于Davenport的相干函数指数衰减计算模型进行改进,被Hui等[11]验证能更好地拟合实测相干函数值.桥梁抗风领域更加注重桥梁水平方向的指数衰减系数的取值,一般采用指数衰减系数C_y表示主梁展向位置处脉动风场的变化情况.C_y是计算相干函数时的无量纲量,它与地面粗糙度、离地高度、风速及湍流强度因子等因素有关[12].我国《公路桥梁抗风设计规范》(JTC/T 3360-01—2018)中,没有针对特定桥梁及地形对指数衰减系数进行规范,现阶段桥梁结构抖振响应计算中指数衰减系数的取值还停留在经验值,不同跨径桥梁使用相同指数衰减系数得出的风场进行抖振响应计算存在一定风险.黄鹏等[13]基于实测台风和季风数据进行分析,指出台风实测出的指数衰减系数相比季风偏小.胡尚瑜等[14]对多个台风脉动风数据进行实测分析,发现竖向相干函数指数衰减系数相比Simiu等[15]的建议值偏大.王旭等[16]通过分析实测脉动风数据,发现所测空间两点函数指数衰减相干系数与Davenport的经验公式相吻合.希缪等[17]对顺风向响应计算中指数衰减系数的不确定性所导致的误差进行了研究,发现指数衰减系数的波动对于高层建筑的加速度响应有着显著的影响.张红星等[18]通过风洞试验,研究了顺风向指数衰减系数的取值问题,发现顺风向指数衰减系数取值与Davenport建议值接近.裴慧坤等[19]用三组指数衰减系数及两组相干函数拟合得出不同的风速时程,分析了沿海某地输电线塔的内力及位移响应值,发现竖向指数衰减系数对输电塔的空间相关性影响最大.

综上所述,以往对桥梁进行抖振响应计算时所选取的脉动风速空间相干函数指数衰减系数基于经验值,而忽略了桥型、地形等因素.为探究传统指数衰减系数C_y设定的模拟脉动风场对大跨径悬索桥抖振响应计算的适用性,首先明确频域法与时域法对大跨径悬索桥抖振响应计算的差异,在此基础上选定时域法作为后续抖振响应分析的方法,并选定不同风场环境下可能出现的指数衰减系数C_y取值作为本文对大跨径悬索桥的抖振响应计算的分析因素,

为后续大跨径悬索桥进行抖振响应分析选定指数衰减系数时提供参考.

1 背景

1.1 脉动风荷载空间相关性

1.1.1 相干函数

脉动风荷载的模拟对桥梁抖振位移响应结果至关重要,常用相干函数表征脉动风速在频域内的相关程度,需要考虑脉动风场在横向、纵向和竖向的空间相关性.通常将Davenport相干函数当作模拟脉动风荷载中的第一类不确定性参数,其表达形式如式(1):

$$\mathrm{coh}(r)=\exp\left\{-\frac{\omega}{2\pi}\frac{\left[C_x^2\left(x_1-x_2\right)^2+C_y^2\left(y_1-y_2\right)^2+C_z^2\left(z_1-z_2\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}}{\frac{1}{2}\left[v\left(z_1\right)+v\left(z_2\right)\right]}\right\} \tag{1}$$

式中:ω为圆频率;x_1、x_2,y_1、y_2,z_1、z_2分别表示所测空间中两点的横向、纵向及竖向坐标;$v(z_1)$、$v(z_2)$分别为z_1、z_2高度处的平均风速;C_x、C_y、C_z分别表示空间位置中横向、纵向和竖直方向的指数衰减系数.

1.1.2 指数衰减系数

通常认为指数衰减系数在Davenport相干函数中被视为脉动风荷载模拟的第二类不确定性参数,Shiotani等[12]曾指出指数衰减系数的取值与多种因素有关,地形的粗糙度、所测点距离地面的高度以及风速的大小都会影响指数衰减系数的取值,现阶段对指数衰减系数的获取主要基于现场实测和专家经验值.Davenport对多组实测数据进行分析后,建议C_x取8,C_y取16,C_z取10,至今一直沿用.因桥梁结构在跨径方向的特殊性,本文主要考虑桥梁主跨方向的指数衰减系数C_y取值对桥梁抖振响应的影响.

1.1.3 脉动风谱

纵向脉动风速u的风谱函数可表示为:

$$S_u(z,\omega)=\frac{200fu_*^2}{\omega(1+50f)^{5/3}} \tag{2}$$

横向脉动风速w的风谱函数可表示为:

$$S_w(z,\omega)=\frac{3.36fu_*^2}{\omega(1+10f)^{5/3}} \tag{3}$$

式中:ω为脉动风的圆频率;f为无量纲频率表达,$f=\omega z/(2\pi U)$,z为竖向高度,U为平均风速;u_*为摩阻速度,其中$u_*^2=6\sigma_u^2$,$u_*^2=1.7\sigma_w^2$,σ_u、σ_w分别表示纵向、横向的脉动风速分量的标准差.

脉动风速u与w的互谱密度函数$S_{uw}(z,\omega)$可表示为:

$$S_{uw}(z,\omega)=C_{uw}(z,\omega)+\mathrm{i}Q_{uw}(z,\omega) \tag{4}$$

式中:$\mathrm{i}=\sqrt{-1}$;$Q_{uw}(z,\omega)$为正交谱密度函数;$C_{uw}(z,\omega)$为共谱密度函数,影响较小,这里不做考虑.

s_i和s_j两点的纵向脉动风速u的互谱密度函数$S_{uu}(s_i,s_j,\omega)$可表示为:

$$S_{uu}(s_i,s_j,\omega)=S_u(z,\omega)\exp(-\hat{f}_u) \tag{5}$$

s_i和s_j两点的横向脉动风速w的互谱密度函数$S_{ww}(s_i,s_j,\omega)$可表示为:

$$S_{ww}(s_i,s_j,\omega)=S_w(z,\omega)\exp(-\hat{f}_w) \tag{6}$$

式中:

$$\hat{f}_u=\frac{\omega}{2\pi U}C_y\left|y_i-y_j\right| \tag{7}$$

$$\hat{f}_w=\frac{\omega}{2\pi U}C_y\left|y_i-y_j\right| \tag{8}$$

式中:C_y为纵向脉动风展向一致性的指数衰减系数;y_i、y_j为所测两点的坐标.

1.2 三座大跨径悬索桥动力特性分析

选取三座大跨径悬索桥作为实例进行后续抖振响应分析,三座悬索桥命名及基本参数如表1所示,其中A桥和B桥为2 000 m级悬索桥,C桥为1 000 m级悬索桥.三座悬索桥主梁断面均为钢箱速闭口断面,其立面简图及主梁横断面简图分别如图1和图2所示.

表1 三座大跨径悬索桥基本参数

Tab.1 Basic parameters of three long-span suspension bridges

名称	桥全长/m	主跨长/m	桥面宽/m	主梁高/m	主梁宽高比	桥塔高度/m	主缆面积/m²	吊索面积/m²	主缆垂跨比
A桥	3 360	2 100	69.8	4.2	16.6	308	0.96	0.004 3	1∶9.5
B桥	4 180	2 300	49.7	4.5	11.0	341	0.83	0.006 0	1∶9.2
C桥	1 600	1 098	38.6	3.2	12.1	172	0.35	0.004 1	1∶10



图 1　三座悬索桥整体立面简图

Fig.1　Schematic diagram of the overall elevation of the three suspension bridges

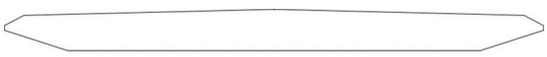


图 2　三座悬索桥主梁横断面简图

Fig.2　Simplified cross-sections of the main beams of the three suspension bridges

动力特性分析是进行桥梁抖振响应计算的基础,采用通用有限元分析软件分别对三座悬索桥进行建模,使用 Beam4 单元分别模拟三座悬索桥的主梁、桥塔和刚臂,使用 Ernst 公式修正后的 Link10 单元分别模拟三座悬索桥的吊索,采用 Mass21 单元分别模拟索夹、护栏、桥面铺装等二期恒载的质量及质量惯性矩.三座悬索桥的关键振型分析结果如表 2 所示,可以看出 1 000 m 级的 C 桥各阶主要频率显著大于 A 桥和 B 桥.

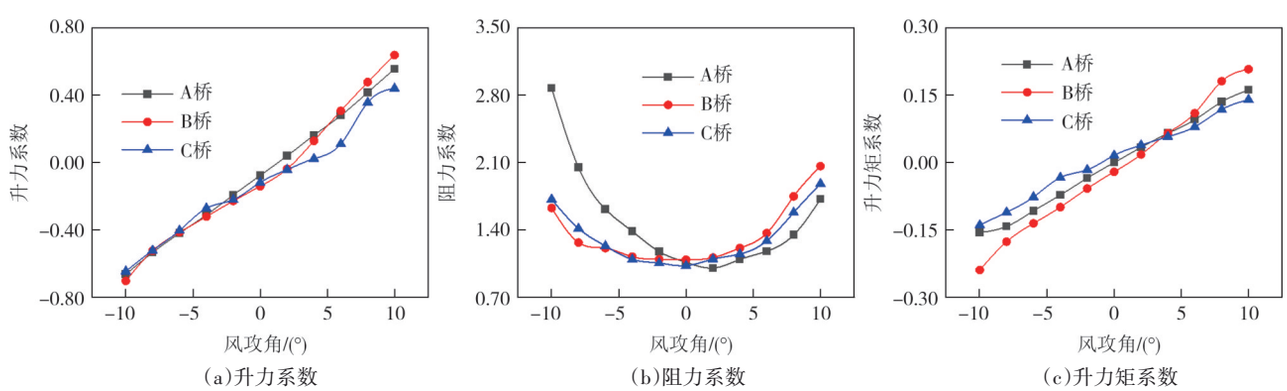
表 2　三座大跨径悬索桥关键振型及频率

Tab.2　Key mode shapes and frequencies of three long-span suspension bridges

振型	频率/Hz		
	A 桥	B 桥	C 桥
一阶正对称竖弯	0.100	0.083	0.146
一阶反对称竖弯	0.069	0.089	0.148
一阶正对称扭转	0.165	0.160	0.302
一阶反对称扭转	0.142	0.168	0.335
一阶正对称侧弯	0.042	0.037	0.061
一阶反对称侧弯	0.102	0.079	0.167

1.3　气动力参数

节段模型测力和测振试验是常用的获取桥梁静三分力及气动导数的手段,三座悬索桥测振及测力试验在长安大学 CA-1 大气边界层风洞中进行.测力试验中使用天平测量主梁的升力、阻力和升力矩系数.图 3 所示为三座悬索桥节段模型在均匀流场中得到的静三分力系数随风攻角的变化图,三座悬索桥的静三分力系数在变化趋势上一致.从图 3(b)中可以看到,A 桥在负攻角下的阻力系数相比 B 桥和 C 桥偏大,节段模型长宽比及桥梁断面的差异是导致该现象的主要原因.白桦等[20]基于多组长宽比不同的节段模型进行测力试验发现,随着节段模型长宽比的增大,试验测得的静三分力系数会逐渐趋于稳定,较小的长宽比测得的静三分力系数偏差偏大.



(a)升力系数　(b)阻力系数　(c)升力矩系数

图 3　三座悬索桥的静三分力系数

Fig.3　Aerostatic coefficients of three suspension bridges

三座悬索桥的节段模型测振试验在-3°、0°和+3°风攻角下的均匀流场中进行,试验采用初始位移激励下竖向弯曲和扭转两自由度耦合振动法,并且根据丁泉顺[21]提出的修正最小二乘法(MLS)来识别气动导数.由于篇幅有限,仅展示 A 桥的部分气动导数如图 4 所示.

根据拟静力理论,采用式(9)~式(11)计算三座悬索桥剩余的十个气动导数,计算所得气动导数将用于后续分析三座悬索桥抖振响应.

$$P_1^* = -\frac{2}{K}C_D,\ P_2^* = \frac{1}{2K}(C_D' - C_L),\ P_3^* = \frac{1}{2K^2}C_D',$$

$$P_5^* = \frac{1}{K}(C_D' - C_L) \tag{9}$$

$$H_5^* = \frac{2}{K}C_L,\ A_5^* = -\frac{4}{K}C_M \tag{10}$$

$$P_4^* = P_6^* = H_6^* = A_6^* = 0 \tag{11}$$

式中:C_L、C_D、C_M 分别为主梁升力系数、阻力系数和升力矩系数;C_D' 为阻力系数的导数;K 为折减频率,

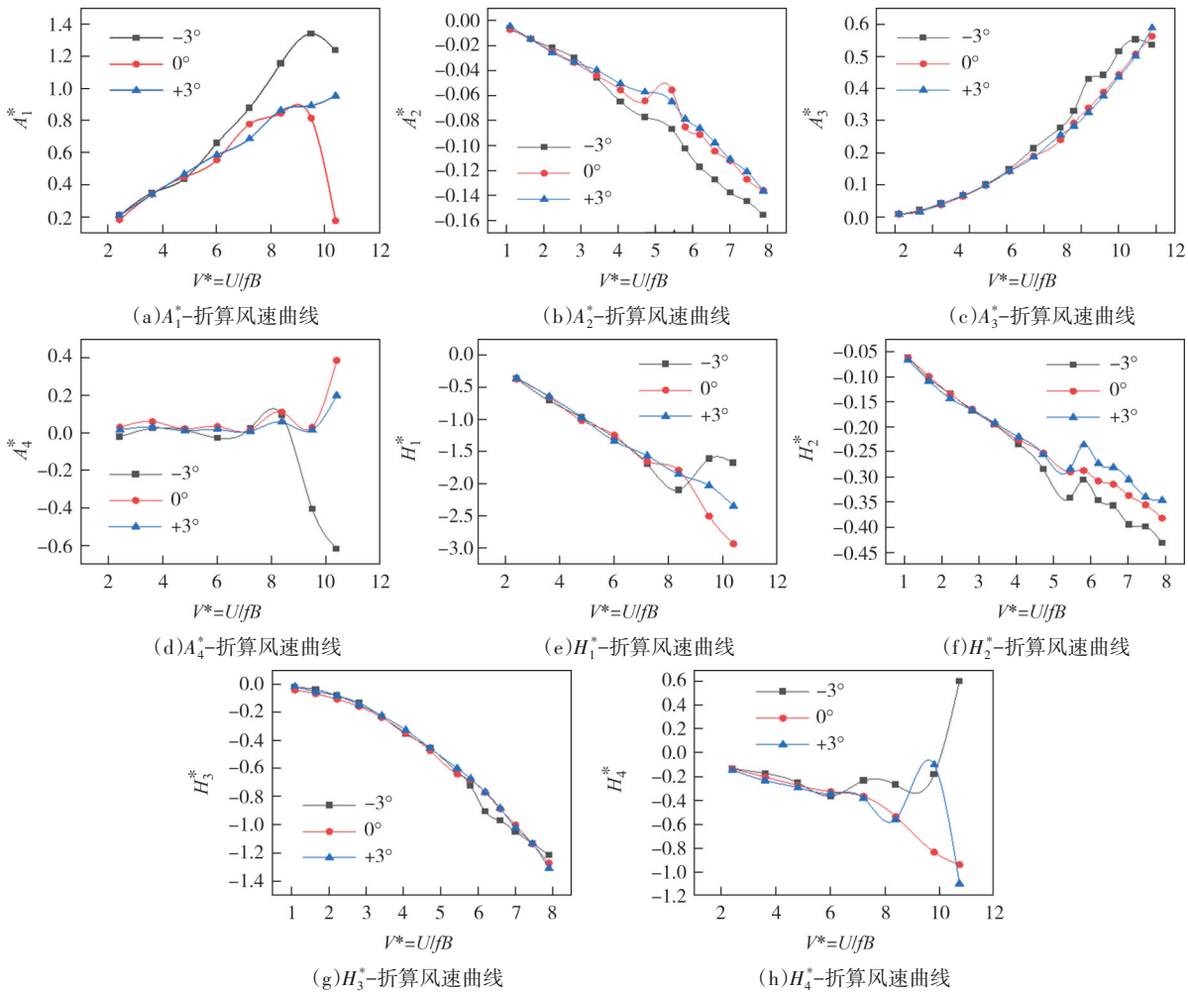


图 4 A桥气动导数

Fig.4 Flutter derivatives of A-bridge

等于图4中折减风速的倒数.

2 频域法与时域法对抖振响应计算的衰减系数影响

2.1 频域法抖振分析

频域法有限元程序假设脉动风荷载激励为平稳随机过程,进而建立脉动风荷载激励与输出结构抖振响应之间的关系,但频域法忽视结构的非线性,通常对计算结果会有一定的影响.以Kaimal谱为目标谱,选定Davenport推荐的C_y=16,借助MATLAB程序和有限元程序对三座大跨径悬索桥进行三维多模态耦合抖振计算,最终获取抖振位移RMS值随主梁展向位置的变化情况.

2.2 时域法抖振分析

时域法可通过模拟随机荷载的统计特性,将脉动风荷载激励随时间的变化完全展现出来,可以考虑气动弹性力及结构的非线性等因素.脉动风荷载的模拟需要考虑时间和空间位置的变化,可通过建立平滑高斯随机过程模型来模拟脉动风场.以Kaimal谱为目标谱,选定Davenport推荐的C_y=16,模拟三座悬索桥主梁、主塔等构件的三维脉动风场,三座悬索桥风场模拟的基本参数如表3所示.借助MATLAB程序和有限元程序对三座悬索桥进行三维非线性抖振时域计算,抖振力使用Davenport准定常模型,自激力使用Scanlan模型,并考虑三座悬索桥自重、静风荷载的非线性以及Raileigh阻尼等因素的影响,最终获取抖振位移RMS值随主梁展向位置的变化情况.

2.3 频域法与时域法抖振响应结果

提取三座悬索桥的频域法和时域法抖振位移RMS值随主梁展向不同位置处的结果,以桥梁两端处、l/8处、l/4处、3l/8处、5l/8处、3l/4处、7l/8处和桥梁跨中l/2处共计9个不同位置作为参考点,绘制三座

表 3　三座悬索桥风场模拟基本参数表

Tab.3　Basic parameters of wind field simulation for three suspension bridge

名称	地表类别	基准高度/m	基准风速/($m\cdot s^{-1}$)	粗糙度	空间点数
A 桥	A 类	82.9	46.2	0.12	165
B 桥	A 类	76.0	47.5	0.12	187
C 桥	A 类	63.7	50.5	0.12	189

悬索桥 9 个位置的竖向、侧向以及扭转角的 RMS 值图,如图 5~图 7 所示.图 5 中,B 桥竖向位移 RMS 值明显大于同为 2 000 m 跨径级别的 A 桥,在桥型与主梁断面形式等一致、跨径接近的情况下,主梁断面的宽高比会对抖振响应造成较大影响.肖嘤[22]基于同一座悬索桥,选取了三种宽高比分别为 7.5、9.3 和 12.7 的流线型闭口断面进行抖振响应分析,发现 7.5 及 9.3 宽高比的主梁竖向抖振响应分别是 12.7 宽高比的近 6 倍和 3 倍.

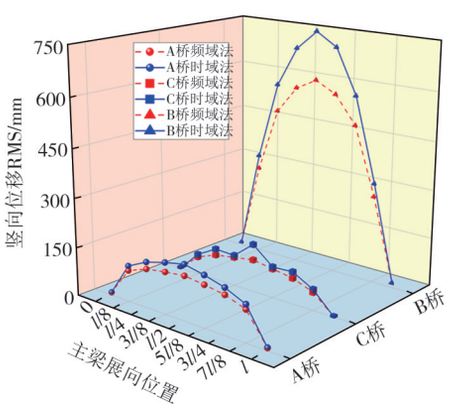


图 5　三座悬索桥各展向位置处频域法与时域法竖向位移 RMS 值对比

Fig.5　Comparison of the vertical displacement RMS values of the frequency domain method and the time domain method at each span direction position of the three suspension bridges

由图 5~图 7 可以看出,三座悬索桥采用频域法和时域法得出的竖向、侧向位移及扭转角 RMS 值的折线走向规律基本一致,基于两种分析方法的三座悬索桥的抖振响应位移 RMS 值折线图整体上呈现抛物线形状.时域法的折线图整体包络在频域法折线图上,时域法结果比频域法偏安全,由于时域法考虑了桥梁结构几何非线性及气动非线性等因素,不难理解时域法相比频域法得出的抖振响应在三座悬索桥的相同位置处基本保持了一定的差值,该差值随桥梁端部位置向跨中逐渐增大,且在跨中达到极值.利用时域法得出的 A、B、C 三桥的跨中竖向位移 RMS 值相比频域法得出的分别偏大 25.0%、48.6%、

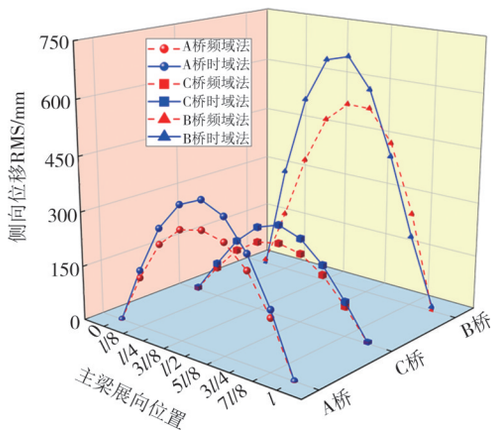


图 6　三座悬索桥各展向位置处频域法与时域法侧向位移 RMS 值对比

Fig.6　Comparison of RMS values of lateral displacements between the frequency domain method and the time domain method at each spanwise position of the three suspension bridges

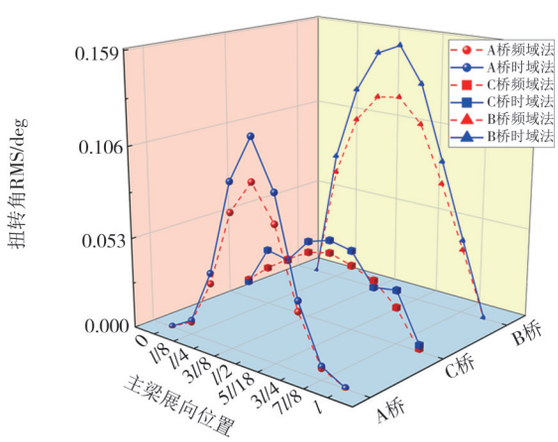


图 7　三座悬索桥各展向位置处频域法与时域法扭转角 RMS 值对比

Fig.7　Comparison of the torsion angle RMS values of the frequency domain method and the time domain method at each span direction position of the three suspension bridges

25.0%,跨中侧向位移 RMS 值分别偏大 25.0%、25.0%、25.0%,跨中扭转角 RMS 值分别偏大 25.0%、25.0%、17.7%,可见两种方法在分析悬索桥跨中抖振响应的差异之大.

综上所述,时域法得出的位移 RMS 值相比频域法偏安全,故可考虑使用时域法对桥梁抖振响应展开分析.

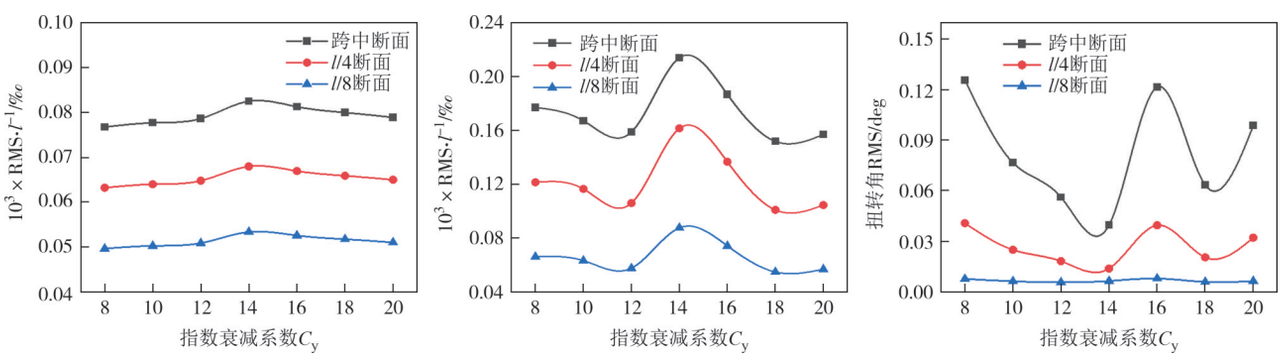
3　指数衰减系数对抖振计算响应的影响

3.1　悬索桥不同展向位置的抖振响应

选取 A 桥作为研究对象分析不同 C_y 取值时桥梁

展向抖振响应情况.选取指数衰减系数为8~20、每次递增间隔为2时的取值对A桥进行时域法抖振响应分析,进而得到A桥在不同指数衰减系数下的抖振响应RMS值.规定1 000×RMS值与悬索桥跨径长度l的比值作为位移跨径千分比,图8展示了A桥在不同C_y取值下桥梁跨中、l/4处和l/8处的竖向、侧向的位移跨径千分比与扭转角响应RMS值.从图8可以看出,三个不同展向位置的竖向位移跨径千分比呈现倒"V"字形,其抖振响应先是随着C_y的增大而增大,在C_y=14时达到极大值,跨中部位的抖振响应RMS值最大可达跨径的0.082‰,当C_y大于14时抖振响应又随之减小.三个不同展向位置的侧向位移跨径千分比及扭转角RMS值折线图均呈现"W"字形,三个不同展向位置的侧向位移跨径千分比在C_y为14时均取得最大值,其中跨中部位的侧向响应RMS值最大可达跨径的0.214‰,其扭转角RMS值在C_y为16时取得极大值.

综上所述,对A桥进行时域法抖振响应分析时,三个不同展向位置处的抖振响应均随着C_y的变化而变化,当C_y取14时的竖向及侧向抖振响应计算结果偏安全,当C_y取16时的扭转角计算结果偏安全,说明在同一C_y取值下桥梁的扭转角RMS最大值与其他两个位移RMS最大值不同步.除此之外,悬索桥跨中断面的抖振响应在各C_y取值下均达到最大.



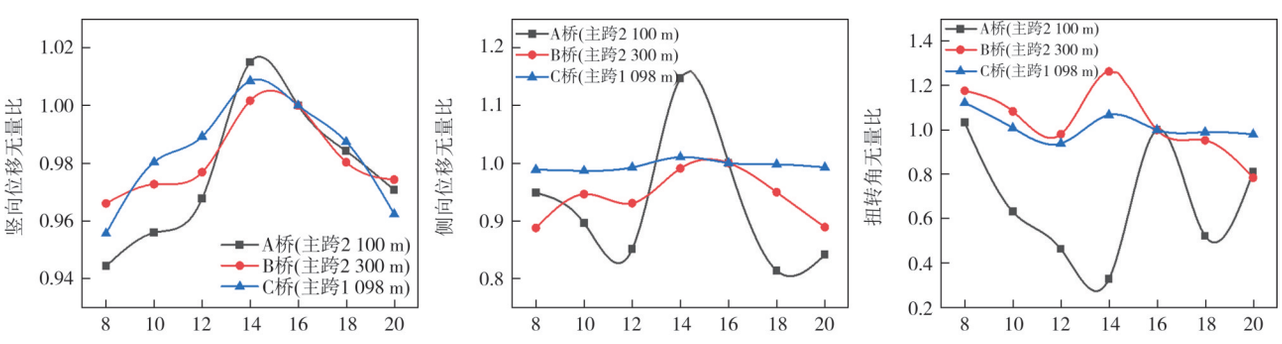
(a)竖向位移跨径千分比 (b)侧向位移跨径千分比 (c)扭转角RMS值

图8 不同衰减系数下主梁展向不同位置抖振响应

Fig.8 Buffeting response of the main beam at different positions in the span direction under different decay coefficients

3.2 悬索桥跨中抖振响应的衰减系数影响

规定三座悬索桥在不同C_y取值时桥梁跨中抖振响应RMS值与Davenport建议的指数衰减系数C_y=16时得出的比值为对应的无量比.图9所示是三座悬索桥主梁跨中不同衰减系数的抖振响应无量比.从图9(a)可以看出三座悬索桥的跨中抖振响应竖向位移无量比均呈现先增大后减小的趋势,无量比取值在0.944~1.015区间内,三座悬索桥在C_y为14时都达到极大值,此时的竖向位移响应最大,其中A桥在C_y为14时的竖向位移抖振响应无量比达到最大值1.015,相较于C_y为16时的响应大了1.5%.从图9(b)和(c)可以看出三座悬索桥跨中的侧向位移及扭转角无量比并没有随着C_y的变化出现如图9(a)中统一增大或减小的走势,三座悬索桥的跨中侧向位移及扭转角无量比变化无规则,无量比取值在0.813~1.146区间内.其中A桥在C_y为14时的侧向位



(a)跨中竖向位移无量比 (b)跨中侧向位移无量比 (c)跨中扭转角无量比

图9 三座悬索桥主梁跨中衰减系数的抖振响应无量比

Fig.9 Buffeting response of three suspension bridge main girder mid-span decay coefficients

移无量比取得最大值1.146,相较于C_y为16时的响应大了14.6%;在C_y为14时的扭转角无量比取得最大值1.263,相较于C_y为16时的响应大了26.3%.

综上所述,以不同C_y取值对三座大跨径悬索桥跨中抖振响应展开分析,可以发现在C_y为14时三座大跨径悬索桥跨中抖振响应较敏感,相比Davenport建议的C_y=16时的抖振响应差距显著,此时使用Davenport建议值计算得出抖振响应偏危险.

4 结 语

以三座大跨径悬索桥为例,采用时域分析法和频域分析法分别分析了三座悬索桥的抖振响应,在此基础上基于时域分析法探讨了指数衰减系数C_y对悬索桥抖振响应的影响,得到以下结论:

1)时域法与频域法计算分析得出的悬索桥抖振响应有差异,时域法计算结果偏安全.

2)悬索桥跨中抖振响应比其他位置处均较敏感,跨中抖振响应剧烈变化程度最大,应重点关注悬索桥跨中部位的响应幅值.

3)综合考虑竖向、侧向位移及扭转角的响应RMS值,采用C_y=14计算得出的悬索桥跨中抖振响应相比Davenport建议的C_y=16时偏大,单纯选取经验值C_y=16并不合理,建议选取多组C_y取值进行分析.

4)对于1 000~2 000 m级的大跨径悬索桥,有必要考虑指数衰减系数C_y取值对抖振响应计算的影响.

参考文献

[1] DAVENPORT A G. Buffetting of a suspension bridge by storm winds[J]. Journal of the Structural Division, 1962, 88(3): 233-270.

[2] 王俊, 李加武, 王峰, 等. 简化U形峡谷风速分布及其对悬索桥抖振响应的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(6):1658-1668.
WANG J, LI J W, WANG F, et al. Wind speed distribution in simplified U-shaped valley and its effect on buffeting response of long-span suspension bridge [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(6):1658-1668. (in Chinese)

[3] 陶天友,邓鹏,王浩,等. 雷暴风作用下大跨度桥梁抖振响应智能预测研究[J]. 中国公路学报,2023,36(8):87-95.
TAO T Y, DENG P, WANG H, et al. Intelligent prediction of buffeting responses of long-span bridge under the action of thunderstorm winds[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(8):87-95. (in Chinese)

[4] 苏益,狄谨,李志国,等. 基于节段模型测振试验的大跨度桥梁抖振响应预测[J]. 工程力学, 2023, 40(6):182-192.
SU Y, DI J, LI Z G, et al. Prediction of buffeting response of long-span bridges based on sectional model vibration test [J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(6):182-192. (in Chinese)

[5] BARNI N, ØISETH O A, MANNINI C. Nonlinear buffeting response of long suspension bridges considering parametric excitation due to large-scale turbulence [R]//IABSE Reports. Istanbul, Turkey: International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 2023: 351-358.

[6] BARNI N, MANNINI C. Parametric effects of turbulence on the flutter stability of suspension bridges [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2024, 245: 105615.

[7] SU Y, LI M S, YANG Y, et al. Prediction method for bridge buffeting responses based on the integrated transfer function identified *via* segmental model vibration test[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2023, 242: 105578.

[8] 罗颖, 任达程, 韩艳, 等. 非高斯风场作用下桥梁抖振响应研究[J]. 空气动力学学报,2023,41(8):107-116.
LUO Y, REN D C, HAN Y, et al. Study on buffeting response of bridge under non-Gaussian wind field[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2023, 41(8):107-116. (in Chinese)

[9] 公路桥梁抗风设计规范: JTG/T 3360-01—2018[S]. 北京:人民交通出版社,2018.
Wind-resistant design specification for highway bridges: JTG/T 3360-01—2018 [S]. Beijing: China Communications Press, 2018. (in Chinese)

[10] DAVENPORT A G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1961, 87(372): 194-211.

[11] HUI M C H, LARSEN A, XIANG H F. Wind turbulence characteristics study at the Stonecutters Bridge site: part Ⅱ: Wind power spectra, integral length scales and coherences [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2009, 97(1): 48-59.

[12] SHIOTANI M, IWATANI Y. Correlations of wind velocities in relation to the gust loadings [C]//In Proceedings of the Third International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures. Tokyo: Saikon Co., 1971: 57-67.

[13] 黄鹏,戴银桃,王旭,等. 上海沿海地区近地风脉动风速谱及相干性研究[J]. 工程力学,2014,31(4):126-133.
HUANG P, DAI Y T, WANG X, et al. Field measurement on power spectra and coherence characteristics of near-ground wind in Shanghai coastal area [J]. Engineering Mechanics, 2014,

31(4):126-133.(in Chinese)

[14] 胡尚瑜,李秋胜. 低矮房屋风荷载实测研究(Ⅰ):登陆台风近地边界层风特性[J]. 土木工程学报,2012,45(2):77-84.
HU S Y,LI Q S. Field measurements of wind loads on a low-rise building:Part Ⅰ: Near-surface boundary layer wind characteristics of landfall typhoons[J]. China Civil Engineering Journal,2012,45(2):77-84.(in Chinese)

[15] SIMIU E, SCANLAN R H. Wind effects on structures : fundamentals and applications to design[M]. 3rd Edition. New York: John Wiley& Sons Inc,1996: 52-53.

[16] 王旭,黄鹏,顾明. 基于台风"梅花"的近地层脉动风速功率谱及相干性研究[J]. 空气动力学学报,2013,31(6):776-782.
WANG X,HUANG P,GU M. Field measurements for the power spectral densities and spatial coherence of fluctuating wind speed near ground during typhoon 'Muifa' [J]. Acta Aerodynamica Sinica,2013,31(6):776-782.(in Chinese)

[17] 希缪,斯坎伦. 风对结构的作用[M].2版.刘尚培,项海帆,谢霁明.译.上海:同济大学出版社,1992.
SIMIU E,SCANLAN R H. Effects of wind on structures[M]. 2ed.Translated by LIU S P, XIANG H F, XIE J M.Shanghai: Tongji University Press,1992.(in Chinese)

[18] 张红星,叶丰,顾明.顺风向脉动风速及风压相干性的试验研究[C]//第八届全国振动理论及应用学术会议论文集摘要.上海:中国振动工程学会等,2003:11.
ZHANG H X, YE F, GU M. Experimental investigation on coherence characteristics of along-wind fluctuating wind velocity and wind pressure[C]//Abstracts of the Proceedings of the 8th National Academic Conference on Vibration Theory and Applications. Shanghai: Chinese Society for Vibration Engineering, etc, 2003: 11.(in Chinese)

[19] 裴慧坤,樊银平,杨兴. 空间相关性的不确定性对输电塔动力风荷载的影响[J]. 工业建筑,2019,49(12):19-24.
PEI H K, FAN Y P, YANG X. Influence of spatial correlative uncertainty on dynamic wind load of transmission tower[J]. Industrial Construction,2019,49(12):19-24.(in Chinese)

[20] 白桦,王涵,姬乃川,等. 节段模型长宽比对风洞测力试验及计算分析的影响[J]. 中国公路学报,2022,35(8):202-212.
BAI H,WANG H,JI N C,et al. Influence of length-width ratio of section model on wind tunnel test and calculation analysis[J]. China Journal of Highway and Transport,2022,35(8): 202-212.(in Chinese)

[21] 丁泉顺.大跨度桥梁耦合颤抖振响应的精细化分析[D].上海:同济大学, 2001.
DING Q S. Refinement of coupled flutter and buffeting analysis for long-span bridges[D]. Shanghai: Tongji University, 2001.(in Chinese)

[22] 肖嚣.湍流作用下不同宽高比流线型箱梁的气动力特性与抖振响应研究[D].重庆:重庆大学,2022.
XIAO Z. Investigations on the aerodynamic characteristics and buffeting response of the streamlined box girders with different aspect ratios in turbulent flows [D]. Chongqing: Chongqing University,2022.(in Chinese)