

积分尺度和风速谱对桥梁抖振响应影响分析

李利孝, 肖仪清, 胡 钢, 焦丽娜

(哈尔滨工业大学深圳研究生院 土木与环境工程学院, 518055 广东 深圳)

摘 要: 为研究目前被动湍流风洞试验中无法准确模拟的湍流积分尺度对桥梁结构抖振响应的影响并合理评价风洞试验结果, 本文采用抖振频域的计算方法, 以典型的一座斜拉桥和一座悬索桥为例, 结合主梁节段模型气动力参数风洞试验结果研究了积分尺度对节段模型抖振响应的影响. 结果表明: 当在小风速时, 抖振响应随着积分尺度的增加而减小, 而当风速超过一定限值后, 抖振响应随着积分尺度的增加先增大后减小; 通过对比风洞试验模拟与规范推荐积分尺度的差异, 发现风洞试验在小风速时高估了抖振响应, 而在大风速时则低估了抖振响应. 本文还分析了各国规范中采用的几种水平和竖向风速谱对抖振响应的影响, 结果表明几种水平向风速谱对抖振响应的影响可忽略不计, 而不同竖向风速谱计算的抖振响应则存在一定差别.

关键词: 湍流积分尺度; 脉动风速谱; 抖振; 大跨度桥梁

中图分类号: TU352.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)12-0018-07

Influences of integral scale and wind spectrum on buffeting response of long-span bridge

LI Li-xiao, XIAO Yi-qing, HU Gang, JIAO Li-na

(School of Civil and Environment Engineering, Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, 518055 Shenzhen, Guangdong, China)

Abstract: To study the influence of integral scale on buffeting response of long-span bridge which cannot be taken into account in the passive turbulence wind tunnel test and to provide a reasonable evaluation of wind tunnel test result, taking a typical cable-stay bridge and a suspension bridge as samples and combining aerodynamic parameters of the section model in wind-tunnel test, the influence of turbulence integral scale and wind spectra on buffeting responses were studied in frequency domain. The results show that buffeting responses decrease with increase of integral scale at lower wind speed; while at higher wind speed, buffeting responses increase first and then decrease. After comparing the integral scales in wind tunnel test and in wind standard, the result shows that buffeting response in wind tunnel were overestimated at lower wind speed, but underestimated at higher wind speed. After comparing the influences of several frequently-adopted horizontal and vertical wind spectra on buffeting response, the result shows that the influence of different horizontal wind spectra can be neglected, but the influence of different vertical wind spectra should be taken into account.

Key words: turbulence integral scale; wind speed spectrum; buffeting response; long-span bridge

随着桥梁跨度的增加, 结构刚度和阻尼逐渐减小, 使得结构对风的敏感性增加. 桥梁结构风效应主要包括静力扭转、涡激振动、颤振和抖振. 脉

动风引起的结构振动主要表现为抖振, 其中以自然风脉动成份引起的抖振占主要地位^[1]. 频域内的抖振分析主要基于 Scanlan 准定常分析框架, 并考虑 Davenport 提出的气动导纳进行修正^[2-4], 在时域内分析则可考虑结构几何非线性和气动力非线性的影响^[5-7].

目前对大跨度桥梁的抗风设计主要基于节段

收稿日期: 2012-02-07.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(90715031).

作者简介: 李利孝(1984—), 男, 博士;

肖仪清(1973—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 李利孝, lilixiao1984@gmail.com.

模型或全桥气弹模型风洞实验结果,但风洞实验中对脉动风特性参数确定和模拟却存在误差,尤其是对积分尺度的模拟,通常不满足模型与原型相似比要求,也无法模拟其随高度的变化关系。Simiu 等^[8]研究了湍流风场参数不确定性对张力平台结构风振响应的影响,发现当积分尺度变化 2.4 倍时,抖振响应根方差变化达 80%;华旭刚等^[9]通过输电塔气弹模型风洞实验指出大缩尺比气弹模型实验将造成积分尺度严重偏离实际;Lee 等^[10]通过主动湍流发生装置研究了湍流强度和积分尺度对抖振响应的影响,发现在相同湍流强度下随着积分尺度增加,抖振响应逐渐减小。

湍流积分尺度表征了流场中湍流涡旋的平均尺度,风速谱则表征了湍动能在不同尺度上的分布特征。我国《公路桥梁抗风设计规范》建议湍流积分尺度在特定高度取为一固定值,风速谱则在水平向选取了 Simiu 谱,竖向选取了 Panofsky 谱。而在台风影响区,流场中对流湍流和中尺度运动较为显著,使得风特性参数在一定程度上偏离规范规定值;风速谱也与规范推荐经验谱在特定频率区段存在一定差异^[11-12]。所以准确刻画脉动风特性对结构抖振响应的影响,量化二者之间的关系对于桥梁结构抖振响应控制具有重要现实意义。

本文选取具有代表性的一座斜拉桥和一座悬索桥节段模型作为研究对象,基于抖振频域计算方法,分析了积分尺度和风速谱对节段模型抖振响应的影响,为风洞实验结果评价提供参考。

1 二维抖振频域计算方法

在自激力和抖振力共同作用下,具有竖弯和扭转两个自由度节段模型的运动方程可表示为

$$m(\ddot{h} + 2\xi_h\omega_h\dot{h} + \omega_h^2 h) = L = L_b + L_{se},$$

$$I(\ddot{\alpha} + 2\xi_\alpha\omega_\alpha\dot{\alpha} + \omega_\alpha^2 \alpha) = M = M_b + M_{se}.$$

式中: m 、 I 分别表示模型单位长度的质量和惯性矩; h 、 α 表示模型的竖向位移和扭转角; L_b 、 M_b 为采用 Davenport 准定常理论计算的抖振升力和升力矩; L_{se} 、 M_{se} 表示结构运动与气流耦合作用产生的自激升力和自激扭矩。其中:

$$L_b = \frac{1}{2}\rho U^2 B \left[2C_L \chi_L \frac{u}{U} + (C'_L + C_D) \chi'_L \frac{w}{U} \right],$$

$$M_b = \frac{1}{2}\rho U^2 B \left[2C_M \chi_M \frac{u}{U} + C'_M \chi'_M + \frac{w}{U} \right],$$

$$L_{se} = \frac{1}{2}\rho U^2 (2B) \left[KH_1 \frac{\dot{h}}{U} + KH_2 \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3 \alpha + K^2 H_4 \frac{h}{B} \right],$$

$$M_{se} = \frac{1}{2}\rho U^2 (2B^2) \left[KA_1 \frac{\dot{h}}{U} + KA_2 \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3 \alpha + K^2 A_4 \frac{h}{B} \right].$$

式中: C_L 、 C_D 、 C_M 分别为升力、阻力和升力矩系数; C'_L 、 C'_D 、 C'_M 分别为升力、阻力和升力矩系数对攻角 α 的导数; χ_L 、 χ'_L 、 χ_M 、 χ'_M 为气动导纳; H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4 、 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 为加劲梁断面颤振导数; K 为折算频率, $K = \omega B/U$ 。

取 $Y = [h \quad a]^T$, $X(t) = [L \quad M]^T$, 则模型运动方程可写为

$$\ddot{M}Y + \dot{C}Y + KY = X(t).$$

式中

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 2\xi_h m \omega_h & -\rho B^2 \omega_h H_1(K) & -\rho B^3 \omega_\alpha H_2(K) \\ -\rho B^3 \omega_h A_1(K) & 2\xi_\alpha I \omega_\alpha & -\rho B^4 \omega_\alpha A_2(K) \end{bmatrix},$$

$$K = \begin{bmatrix} m \omega_h^2 & -\rho B^2 \omega_h^2 H_4(K) & -\rho B^3 \omega_\alpha^2 H_3(K) \\ -\rho B^3 \omega_h^2 A_4(K) & I \omega_\alpha^2 & -\rho B^4 \omega_\alpha^2 A_3(K) \end{bmatrix}.$$

系统的频率响应函数为

$$H(\omega) = (-\omega^2 M + i\omega C + K)^{-1}.$$

系统激励 $X(t)$ 和响应 $Y(t)$ 的谱密度函数矩阵表示为

$$S_{YY}(\omega) = H(\omega)^* S_{XX}(\omega) H(\omega)^T = [(-\omega^2 M - i\omega C + K)^{-1}]^* S_{XX}(\omega) [(-\omega^2 M - i\omega C + K)^{-1}]^T,$$

$$S_{XX}(\omega) = \begin{bmatrix} S_{LL}(\omega) & S_{LM}(\omega) \\ S_{ML}(\omega) & S_{MM}(\omega) \end{bmatrix}.$$

式中: $H(\omega)^*$ 和 $H(\omega)^T$ 为 $H(\omega)$ 的共轭矩阵和转置矩阵; $S_{XX}(\omega)$ 表示系统激励的谱密度函数矩阵; $S_{LL}(\omega)$ 、 $S_{MM}(\omega)$ 表示抖振升力和扭矩自谱函数矩阵; $S_{LM}(\omega)$ 、 $S_{ML}(\omega)$ 表示抖振升力和扭矩的互谱密度函数矩阵。

由于抖振力互谱对抖振响应的影响很小,故忽略抖振力互谱的影响;通常认为大气湍流为各向同性,则两方向风速互谱密度为零,忽略风速互谱的影响,则抖振升力和扭矩谱可表示为

$$S_{LL}(\omega) = \rho^2 U^2 B^2 \left\{ C_L^2(\alpha) S_{uu}(\omega) |\chi_L(\omega)|^2 + \frac{1}{4} [C'_L(\alpha) + C_D(\alpha)]^2 S_{ww}(\omega) |\chi'_L(\omega)|^2 \right\}, \quad (1a)$$

$$S_{MM}(\omega) = \rho^2 U^2 B^2 \left[C_M^2(\alpha) S_{uu}(\omega) |\chi_M(\omega)|^2 + \frac{1}{4} C'_M(\alpha)^2 S_{ww}(\omega) |\chi'_M(\omega)|^2 \right]. \quad (1b)$$

对抖振响应谱在频域上进行积分可以得到抖

振响应的方差

$$\sigma_Y^2 = R_Y(0) = \int_0^\infty S_Y(\omega) d\omega.$$

2 积分尺度对抖振响应影响分析

2.1 基本参数

选取典型的一座斜拉桥 A 和一座悬索桥 B 桥面板节段模型作为研究对象,分析脉动风特性对其结构抖振响应的影响.斜拉桥 A 主桥结构形

式为双塔双斜索面结合梁斜拉桥,边孔设置辅助墩和锚固墩,主跨跨度达 602 m,桥宽 32.5 m,高 3.02 m.悬索桥 B 主桥为跨度 1 490 m 的单跨钢箱梁加劲梁悬索桥,桥面主梁截面宽 38.7 m,高 3 m.斜拉桥 A 和悬索桥 B 的主梁断面详细设计参数见表 1,选取一阶竖弯和一阶对称扭转模态作为节段模型的参考模态,研究脉动风对其抖振响应的影响.表 2 给出了斜拉桥 A 和悬索桥 B 风洞实验测试的静力三分力系数.

表 1 主梁断面参数

类型	截面宽度/ m	空气密度/ (kg·m ⁻³)	单位长度质量/ (kg·m ⁻¹)	单位长度质量惯性矩/ ((kg·m ²)·m ⁻¹)	一阶竖弯 频率/Hz	一阶扭转 频率/Hz	竖弯模态 阻尼比	扭转模态 阻尼比
斜拉桥 A	32.5	1.225	4.4×10 ⁴	2.879×10 ⁶	0.274 1	0.514 6	0.010	0.010
悬索桥 B	38.7	1.225	3.063 1×10 ⁴	6.642 2×10 ⁶	0.124 0	0.230 2	0.005	0.005

表 2 主梁断面 0°攻角静力三分力系数及导数

类型	$C_D(0)$	$C_D'(0)$	$C_L(0)$	$C_L'(0)$	$C_M(0)$	$C_M'(0)$
斜拉桥 A	0.098 6	0.132 2	-0.091 2	-7.246 4	0.013 2	0.935 2
悬索桥 B	1.275 4	1.086 0	-0.005 9	-3.322 6	-0.003 3	0.988 2

2.2 积分尺度对抖振响应影响分析

目前采用粗糙元和格栅的被动式紊流发生装置能够产生的顺风向湍流积分尺度约为 0.30~0.50 m,而一般跨海大桥桥面到海面的距离约为 30~70 m,则实际积分尺度介于 100~400 m,所以风洞实验缩尺比需达到 1/300~1/800 时才能模拟积分尺度的影响,这为模型设计和制作带来较大困难.因此采用频域计算方法,研究积分尺度对桥梁抖振响应影响,为风洞实验结果评价提供一定借鉴.本文选取纵向积分尺度 L_u^x 范围为 25~450 m,横向和竖向积分尺度分别取为纵向的 1/3 和 1/2,即 $L_v^x = 0.33L_u^x$ 和 $L_w^x = 0.5L_u^x$.

抖振频域分析中,只在风速谱表达式中间接引入了积分尺度,在这里选取直接包含积分尺度的 von Karman 谱分析积分尺度对桥梁主梁断面抖振响应的影响,顺风向风速谱表达式为

$$\frac{nS_u(n)}{\sigma_u^2} = \frac{4 \frac{nL_u}{U}}{\left[1 + 70.8 \left(\frac{nL_u}{U}\right)^2\right]^{5/6}}, \quad (2a)$$

由各向同性湍流推得竖向风速谱为

$$\frac{nS_w(n)}{\sigma_w^2} = \frac{4 \frac{nL_w}{U} \left[1 + 755.2 \left(\frac{nL_w}{U}\right)^2\right]}{\left[1 + 283.2 \left(\frac{nL_w}{U}\right)^2\right]^{11/6}}. \quad (2b)$$

计算竖向和扭转抖振响应时,斜拉桥 A 和悬索桥 B 桥计算高度取为 $z = 60$ m,风速计算范围

为 $U = 10 \sim 80$ m/s,下垫面粗糙度长度取为 $z_0 = 0.01$ m.忽略静风影响、结构非线性和攻角效应等因素的影响,断面颤振导数见图 1、2,气动导纳采用 Sears 函数.采用二维抖振频域计算得位移响应均方值随积分尺度和风速的变化关系见图 3、4.由图可见,悬索桥 B 在风速为 70~80 m/s 时发生明显颤振发散.斜拉桥 A 和悬索桥 B 竖向和扭转抖振响应均方根值在较低风速时均随着湍流积分尺度增大而减小,而当风速超过一定限值后,抖振响应随积分尺度的增大先增大后减小.于是需解决两问题:1)为什么积分尺度对抖振响应影响呈现这样的规律;2)在多大风速时,积分尺度对抖振响应开始呈现先增大后减小趋势.

由于积分尺度只能在风速谱表达式中引入,所以积分尺度对抖振响应的影响只能反映在与风速谱相关的因素,即抖振力谱.采用式 1(a)和(b)所给出的抖振升力谱和扭矩谱表达式,其中顺风向和竖向脉动风速谱分别采用式 2(a)和(b)的表达式,气动导纳采用 Sears 函数,斜拉桥 A 和悬索桥 B 在不同风速下抖振力谱随积分尺度的变化关系见图 5、6.由图 5 可见,当风速较小($U = 40$ m/s)时,斜拉桥 A 一阶竖弯和一阶对称扭转频率对应的抖振力谱值随着积分尺度的增大而减小,而当风速较大($U = 70$ m/s)时,斜拉桥 A 一阶竖弯频率对应的抖振力谱值随着积分尺度的增大先增大后减小,而一阶对称扭转频率对应

的抖振力谱值随着积分尺度的增大而逐渐减小, 与抖振响应的变化规律完全一致;图 6 中悬索桥 B 抖振力谱随积分尺度的变化规律也与抖振响应均方根值随积分尺度的变化规律完全一致.

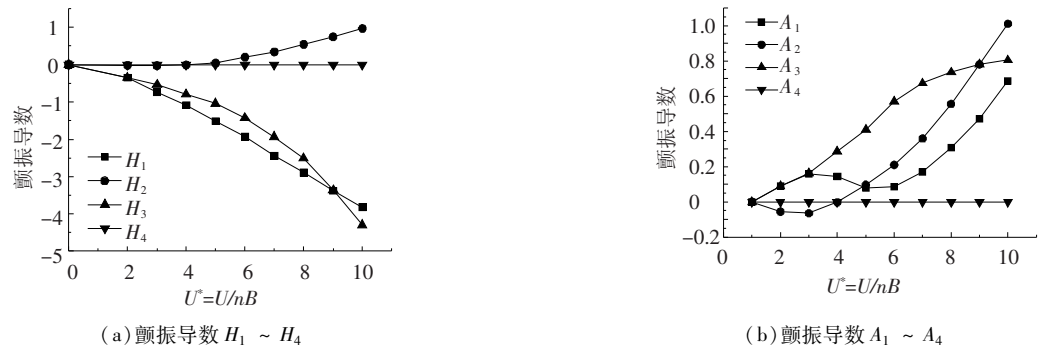


图 1 斜拉桥 A 颤振导数

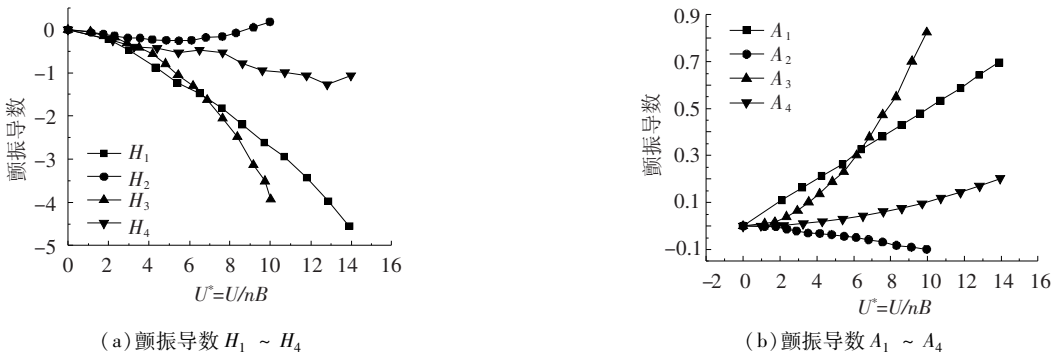


图 2 悬索桥 B 颤振导数

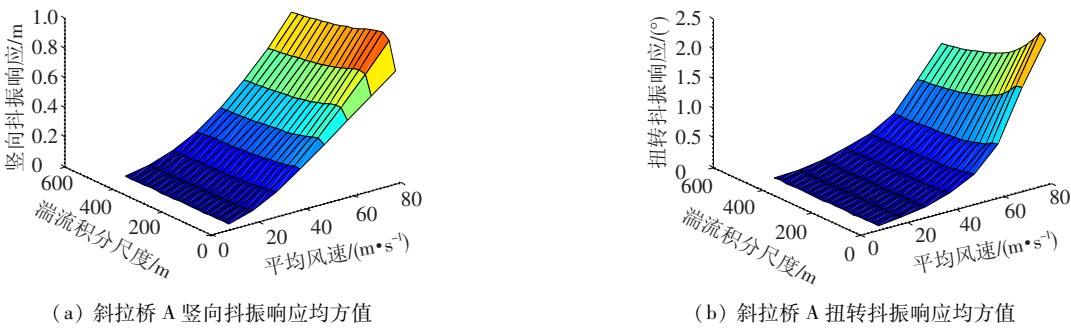


图 3 斜拉桥 A 抖振响应 RMS 值

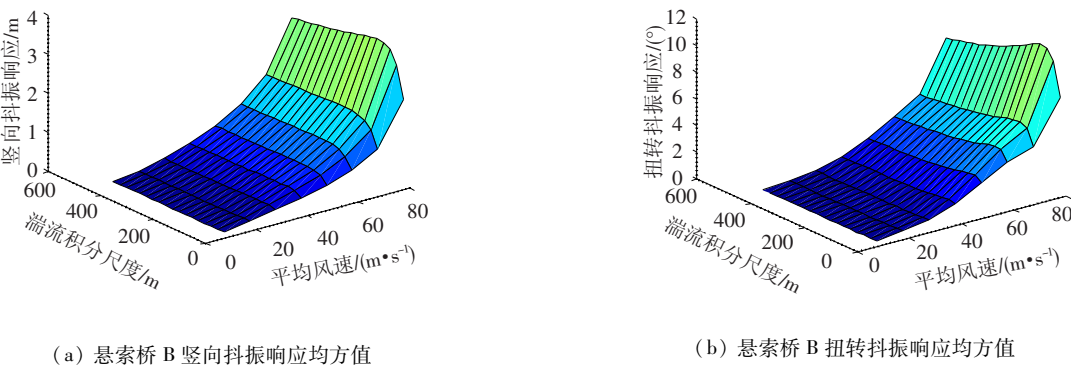


图 4 悬索桥 B 抖振响应 RMS 值

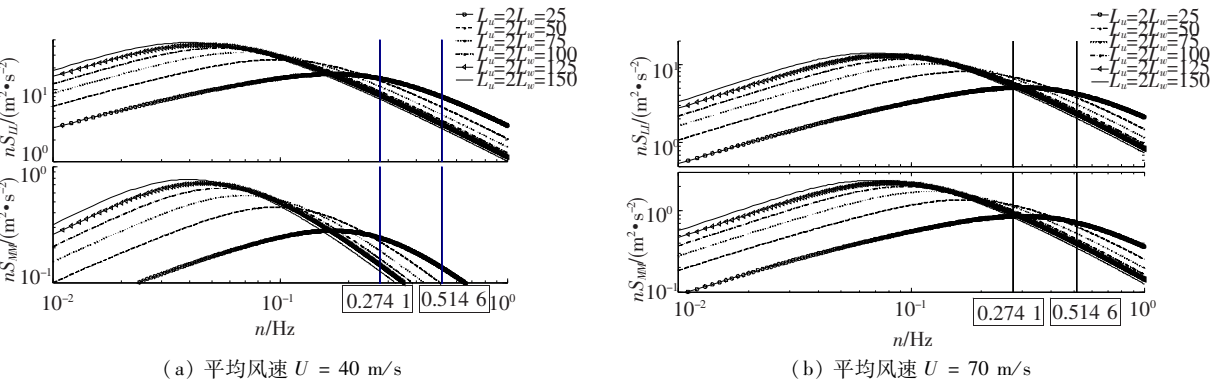


图 5 斜拉桥 A 抖振力谱随积分尺度的变化关系

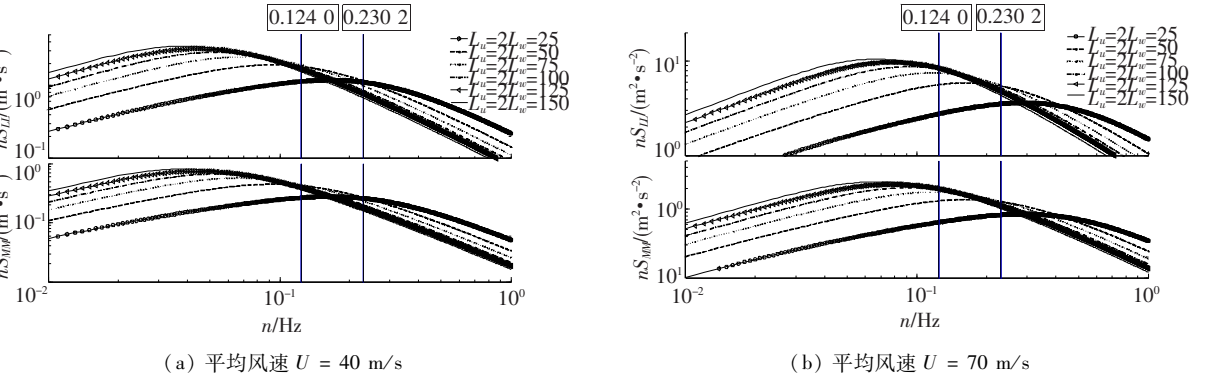


图 6 悬索桥 B 抖振力谱随积分尺度的变化关系

我国《公路桥梁抗风设计规范》规定,离地 60 m 高度处积分尺度为 120 m,假定风洞实验中尺度放大之后积分尺度为 25 m,则风洞试验与规范中对应积分尺度的风谱能量值比较见表 3,表 4 则列出了风洞试验和规范中建议的不同积分尺度下计算得抖振力谱能量值比较.对比表 3、4 可见,抖振力谱的变化规律与竖向风速谱能量变化规律基本一致.由于在抖振力谱表达式 1(a)和(b)中, $C_L^2 \ll [C_L' + C_D]^2/4$,同时 $C_M^2 \ll C_M'^2/4$,所以抖振力谱表达式主要由竖向风速谱控制,由风速谱

表达式 2(b)可得,当风速与积分尺度比值满足下式时,将发生上述变换趋势的临界转换

$$\frac{L_u}{U} \approx \frac{0.423\ 6}{n}.$$

(3)

即当积分尺度与风速比值小于上值时,抖振力谱值随积分尺度增大而增加;当大于上值时,抖振力谱值随积分尺度的增大而减小.式(3)同时还受静力三分力系数及其对风攻角的导数以及气动导纳函数影响.

表 3 风洞试验与规范中不同积分尺度下风速谱能量差别对比

类型	平均风速/ (m·s ⁻¹)	竖弯基 频/Hz	水平向风速谱/(m ² ·s ⁻¹)		竖向风速谱/(m ² ·s ⁻¹)		扭转基 频/Hz	水平向风速谱/(m ² ·s ⁻¹)		竖向风速谱/(m ² ·s ⁻¹)	
			风洞	规范	风洞	规范		风洞	规范	风洞	规范
斜 拉 桥 A	10		0.526 5	0.184 2	0.689 5	0.245 9		0.187 3	0.064 5	0.248 7	0.086 1
	20		0.778 9	0.291 9	0.969 7	0.388 2		0.291 3	0.102 4	0.380 3	0.136 2
	30		0.919 0	0.380 5	1.062 8	0.504 2		0.369 0	0.133 9	0.470 7	0.178 4
	40	0.274 1	0.979 6	0.457 5	1.041 6	0.603 4	0.514 6	0.427 3	0.161 9	0.527 6	0.215 3
	50		0.988 3	0.526 5	0.964 6	0.689 5		0.469 7	0.187 3	0.557 9	0.248 7
	60		0.966 1	0.588 1	0.869 8	0.764 3		0.498 4	0.210 8	0.567 6	0.279 4
	70		0.927 8	0.643 6	0.776 4	0.829 3		0.516 3	0.232 8	0.562 0	0.307 6
悬 索 桥 B	10		1.804 8	0.688 7	2.215 3	0.915 3		0.697 2	0.246 7	0.906 6	0.328 8
	20		2.184 7	1.077 4	2.240 3	1.416 9		1.004 8	0.389 7	1.218 5	0.517 8
	30		2.084 7	1.379 0	1.791 1	1.791 1		1.145 1	0.507 0	1.262 8	0.670 3
	40	0.124 0	1.860 5	1.617 7	1.393 5	2.042 7	0.230 2	1.178 5	0.608 2	1.173 3	0.798 4
	50		1.636 3	1.804 8	1.110 5	2.215 3		1.152 0	0.697 2	1.040 8	0.906 6
	60		1.442 7	1.946 8	0.912 9	2.314 5		1.096 9	0.775 8	0.908 8	0.997 8
	70		1.282 3	2.050 0	0.771 0	2.353 2		1.030 8	0.844 9	0.793 2	1.073 0

表 4 风洞试验与规范中不同积分尺度下抖振力谱能量差别对比

类型	平均风速/ (m·s ⁻¹)	竖弯基 频/Hz	升力谱/(m ² ·s ⁻¹)		扭矩谱/(m ² ·s ⁻¹)		扭转基 频/Hz	升力谱/(m ² ·s ⁻¹)		扭矩谱/(m ² ·s ⁻¹)	
			风洞	规范	风洞	规范		风洞	规范	风洞	规范
斜拉桥 A	10		0.627 1	0.223 5	0.010 7	0.003 8		0.123 3	0.042 7	0.002 1	0.000 1
	20		6.694 0	2.679 4	0.114 6	0.045 9		1.466 7	0.525 6	0.025 1	0.009 0
	30		23.559 4	11.176 2	0.403 3	0.191 3		5.948 7	2.254 5	0.101 8	0.038 6
	40	0.274 1	52.188 5	30.237 4	0.893 3	0.517 6	0.514 6	15.383 0	6.277 2	0.263 3	0.107 4
	50		90.231 1	64.495 8	1.544 5	1.103 9		30.939 5	13.791 3	0.529 6	0.236 1
	60		134.648 2	118.301 9	2.304 8	2.024 9		52.991 4	26.080 6	0.097 0	0.446 4
	70		183.101 9	195.462 4	3.134 2	3.345 6		81.241 0	44.467 6	1.390 6	0.761 1
悬索桥 B	10		0.292 9	0.121 1	0.068 2	0.028 2		0.067 7	0.024 5	0.015 8	0.005 7
	20		2.162 8	1.368 2	0.503 8	0.318 7		0.690 3	0.293 4	0.160 8	0.068 3
	30		5.368 7	5.341 8	1.250 7	1.244 5		2.296 6	1.219 3	0.535 0	0.284 1
	40	0.124 0	9.164 7	13.436 3	2.135 1	3.130 2	0.230 2	4.824 1	3.282 5	1.123 9	0.764 7
	50		13.276 1	26.493 7	3.092 9	6.172 1		7.987 8	6.958 2	1.860 9	1.621 0
	60		17.639 6	44.733 2	4.109 5	10.421 3		11.543 3	12.669 8	2.689 2	2.951 6
	70		22.235 2	67.851 1	5.180 1	15.807 0		15.347 7	20.759 6	3.575 5	4.836 3

图 7 给出了风洞试验抖振响应均方值误差与平均风速的关系(误差为负表示风洞试验高估了实际响应,误差为正表示风洞试验结果低估了实际响应).由图可见,基本上在小风速时,风洞实验高估了桥梁阶段模型抖振响应均方值,而随着风速增大,风洞试验结果又逐渐低估了抖振响应均方值.误差大小与结构振动频率以及风速有较大关系,当风速处在式(3)计算值附近时,风洞试验估计的抖振响应均方值与规范计算值较为接近.

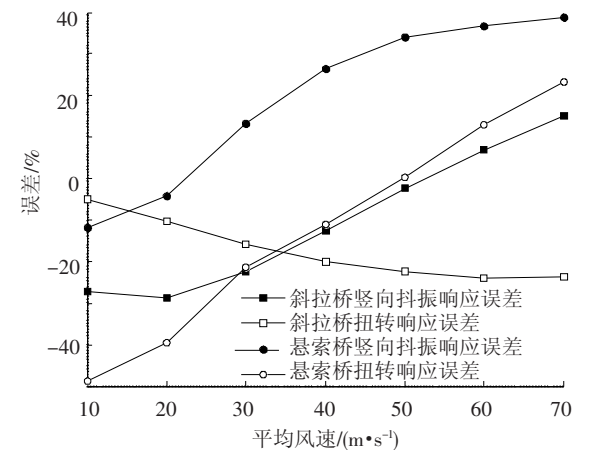


图 7 抖振响应均方差误差与平均风速的关系

3 风速谱对抖振响应的影响分析

3.1 脉动风速谱的选取

由积分尺度和风速对抖振响应影响分析可知,风速谱在结构特征频率处的差异对抖振响应产生较大影响.为了比较各国规范采用的不同风速谱对抖振响应的影响,水平向选取 von Karman 谱、Davenport 谱、Simiu 谱和 Harris 谱,竖向选取 Panofsky 谱和 Lumley-Panofsky 谱进行分析,各风速谱表达式如下.

1) von Karman 谱,采用式 2(a)的表达式.

2) Davenport 谱

$$\frac{nS_u(z,n)}{u_*^2} = \frac{4f^2}{(1+f^2)^{4/3}},$$

式中: $f = 1\,200n/U(10)$; $U(10)$ 是 10 m 处风速.

3) Simiu 谱

$$\frac{nS_u(z,n)}{u_*^2} = \frac{200f}{(1+50f)^{5/3}},$$

式中 $f = nz/U(z)$.

4) Harris 谱

$$\frac{nS(n)}{u_*^2} = \frac{4f}{(2+f^2)^{5/6}},$$

式中 $f = 1\,800n/U(10)$.

5) Panofsky 谱

$$\frac{nS_w(z,n)}{u_*^2} = \frac{6f}{(1+4f)^2},$$

式中 $f = nz/U(z)$.

6) Lumley-Panofsky 谱

$$\frac{nS_w(z,n)}{u_*^2} = \frac{3.36f}{1+10f^{5/3}},$$

式中 $f = nz/U(z)$.

3.2 风速谱对大跨度桥梁抖振响应的影响

计算抖振响应时平均风速 U 取为 20 m/s,当采用 von Karman 谱时,积分尺度选为 $L_u^x = 120$ m.采用前述二维抖振频域计算方法,计算得桥梁断面抖振响应均方值 RMS 列于表 5.由表 5 可见,水平向不同脉动风速谱所引起的抖振响应差别可忽略不计;而竖向两种风速谱对抖振响应的计算结果影响较大.对于斜拉桥 A,水平向采用相同的风速谱,竖向采用 Lumley-Panofsky 风速谱计算得竖弯位移抖振响应均方差比采用 Panofsky 计算的结果大 8.27%,扭转响应均方差则增大 5.95%;对于悬索桥 B,竖向

采用 Lumley-Panofsky 风速谱计算得抖振响应均方差比采用 Panofsky 计算的结果大 6.83%,扭转响应均方差则增大 10.24%. 主要原因是竖向风速谱在高频区对能量估计存在较大差别(见图 8),同时竖向风速谱对抖振响应的贡献远大于水平向风速谱.

表 5 桥梁断面抖振位移响应 RMS 值

水平向不同风速谱	竖向不同风速谱	斜拉桥		悬索桥	
		竖向位移/m	扭转角/(°)	竖向位移/m	扭转角/(°)
von Karman	Panofsky	0.061 7	0.033 6	0.153 8	0.370 1
Davenport	Panofsky	0.061 7	0.033 6	0.1539	0.370 1
Simiu	Panofsky	0.061 7	0.033 6	0.153 8	0.370 1
Harris	Panofsky	0.061 7	0.033 6	0.153 9	0.370 1
Simiu	Lumley-Panofsky	0.066 8	0.035 6	0.164 3	0.408 0

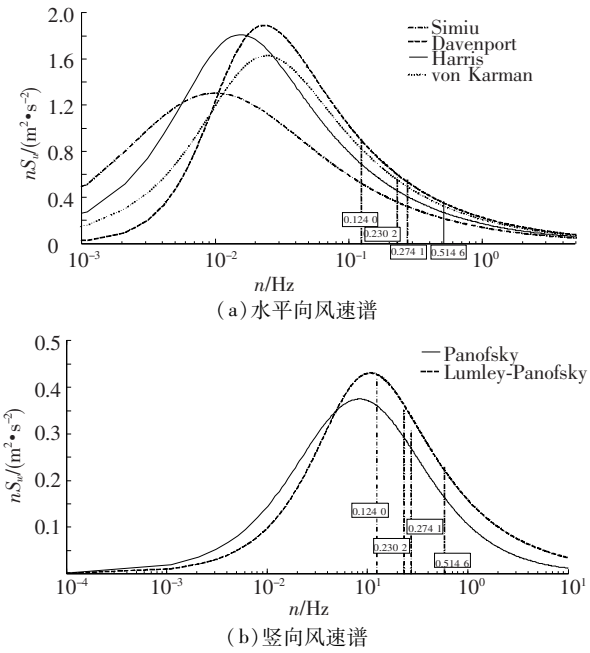


图 8 脉动风速谱比较

4 结 论

用二维抖振频域分析方法,对一座斜拉桥和一座悬索桥主梁节段模型定性研究了积分尺度和风速谱对风洞中节段模型抖振响应的影响.文中气动导纳采用 Sears 函数,所以结论有一定程度的近似,目前只能定性的参考,后续将结合风洞试验对气动导纳识别,并扩展至三维全桥模型进行湍流参数影响性分析,得到如下主要结论:

- 1) 当风速较小时,抖振响应均方根值随积分尺度的增大而减小,当风速较大时,抖振响应均方根值随积分尺度的增大先增大后减小.
- 2) 对比风洞试验和规范中规定的积分尺度导致的抖振响应差异,发现风洞试验在低风速时高估了抖振响应,而在高风速时低估了抖振响应.
- 3) 不同水平向脉动风速谱对桥梁抖振响应均方值的影响差别可忽略不计,而不同竖向风速谱对桥梁的抖振响应均方值影响存在一定差别.所以在台风影响区竖向风速谱特征需进一步研究.

Panofsky 谱在高频区满足 n^{-1} 次律,Lumley-Panofsky 谱则在高频区符合 $n^{-2/3}$ 次律,在台风过程中,竖向湍流输运加强,这两个竖向风速谱是否可用来描述台风过程风场竖向湍流脉动特征,哪一个更优需进一步研究.

参考文献:

[1] 陈政清. 桥梁风工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.

[2] 赵林,葛耀君,李鹏飞. 桥梁断面气动导纳互谱识别方法注记[J]. 振动与冲击, 2010(1): 81-87.

[3] 文水兵,朱乐东,丁泉顺. 扁平双边肋主梁桥梁断面抖振力及气动导纳频谱特性研究[J]. 结构工程师, 2008(3): 96-101.

[4] 李明水,贺德馨,王卫华. 大跨度桥梁抖振响应的频域分析[J]. 空气动力学学报, 2000(1): 74-80.

[5] CHEN Z Q, HAN Y, HUA X G, *et al.* Investigation on influence factors of buffeting response of bridges and its aeroelastic model verification for Xiaoguan Bridge [J]. Engineering Structures, 2009, 31(2): 417-431.

[6] 韩艳,陈政清,王建辉,等. 贵阳小关桥双臂薄壁墩抖振响应试验与影响因素分析[J]. 土木工程学报, 2009(1): 41-48.

[7] 胡亮,李黎,彭元诚,等. 大跨桥梁抖振时域分析的程序化方法[J]. 中国公路学报, 2006(6): 59-64.

[8] SIMIU E, LEIGH S D. Turbulent wind effects on tension leg platform surge[R]. Final Report National Bureau of Standards. Washington, DC: Center for Building Technology, 1983.

[9] 华旭刚,陈政清,杨靖波,等. 大缩尺比气弹模型风洞试验紊流积分尺度修正[J]. 建筑结构学报, 2010(10): 55-61.

[10] LEE S, KWON S D. Effect of turbulence properties on bridge aerodynamics[C]//Proceedings of the 13th International Conference on Wind Engineering. Amsterdam: [s. n.], 2011.

[11] YU B, GAN CHOWDHURY A, MASTERS F. Hurricane wind power spectra, cospectra, and integral length scales [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2008, 129(3): 411-430.

[12] CAO S, TAMURA Y, KIKUCHI N, *et al.* Wind characteristics of a strong typhoon[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2009, 97(1): 11-21.

(编辑 赵丽莹)