

三边形桅杆杆身风荷载特性风洞试验研究^{*}

孙远[†], 马人乐, 邱旭

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要:应用高频测力天平技术,分别对有附属结构和无附属结构的三边形桅杆杆身进行了均匀流和两种紊流下的风洞试验,得到了桅杆的平均风力系数、均方根力系数和顺风向、横风向及扭转向风荷载谱.分析了雷诺数、紊流度、风向角、附属结构等对风荷载系数的影响,对比了试验体型系数和不同国家规范关于桅杆及其附属结构体型系数的规定.谱分析结果表明,顺风向风荷载谱和脉动风速谱的基本特征相同,横风向、扭转向风荷载谱主要由低频部分的紊流激励谱和高频部分的旋涡脱落激励谱组成,无附属结构模型旋涡脱落谱有一个峰,峰值折减频率在1.8左右,带附属结构模型在90°风向角下出现两个明显的旋涡脱落谱峰,峰值折减频率分别在0.9和2.2左右,探讨了格构式塔架旋涡脱落谱的特性以及附属结构对其的影响机理.

关键词:桅杆;高频测力天平;风洞试验;风荷载特性

中图分类号:TU312.1

文献标志码:A

Wind Tunnel Investigation on Wind Load Characteristics of Triangular Guyed Mast

SUN Yuan[†], MA Renle, QIU Xu

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Two models of triangular guyed mast were tested by high frequency force balance (HFFB) technique under uniform and turbulent flow with different turbulent intensities, respectively. The mean and RMS force coefficients and the force spectra in along-wind, across-wind and torsion direction were obtained from wind tunnel test. Some existing codes and standards for the mean drag coefficients for guyed mast and ancillaries were employed and compared with test results, with emphasis on the influence of Reynolds number, turbulent intensity, wind incidence angle and ancillaries on wind force coefficients. The force spectra in along-wind direction are similar to the spectra of fluctuating wind velocity, while the force spectra in across-wind and torsion direction consist of the wind turbulence spectra in low frequency range and vortex shedding spectra in high frequency range. The vortex shedding spectra of the guyed mast without ancillaries have one peak, and the reduced frequency of the peak is close to 1.8. When the attack angle reaches 90°, the vortex shedding spectra of the guyed mast with ancillaries have two distinct peaks with the reduced peak frequencies closed to 0.9 and 2.2, respectively. The characteristics of the vortex shedding spectra for lattice mast and the influence mechanism of the ancillaries were discussed.

^{*} 收稿日期:2016-03-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51378381), National Natural Science Foundation of China(51378381)

作者简介:孙远(1990-),女,河北承德人,同济大学博士研究生

[†] 通讯联系人, E-mail:2012sunyuan@tongji.edu.cn

Key words: guyed mast; high frequency force balance; wind tunnel tests; wind load characteristics

桅杆结构是由矗立的细长杆身和数层斜拉的纤绳组成的一种高柔结构,在横向荷载作用下存在大变形,具有强非线性^[1].通常每层纤绳于空间相交于一点,且各层交点连成一线,整体结构是一个瞬变体系,初始抗扭刚度为零.桅杆结构的这些特点使其在风荷载作用下易产生各种复杂的风效应,除顺风向风振响应外,横风向和扭转风振响应同样不可忽视.由于桅杆结构对风荷载非常敏感,在风振响应分析中,应尽量精确地考虑外加风荷载.顺风向风荷载通常基于准定常假定计算,而横风向和扭转风荷载的形成机理非常复杂,同紊流和尾流激励都有关系,且受结构形式的影响很大,很难找到统一的表达式和计算方法,一般需要通过风洞试验测得.桅杆杆身通常为等截面的格构式塔架结构,杆件多、截面小,广泛应用于高层建筑、大屋盖结构风荷载测试的多点测压方法^[2]并不适用,因此,高频天平测力是确定格构式塔架风荷载的主要风洞试验手段. Carril^[3]等对不同挡风系数的塔架模型的平均风力系数和均方根力系数进行了试验研究,考虑了微波天线盘的影响.张庆华、顾明等^[4]对格构式输电塔进行了不同紊流度下的风洞试验,对测得的顺风向、横风向和扭转风荷载进行了谱分析和相干性分析.梁枢果等^[5]基于高频天平测力风洞试验,分析了3种格构式塔架的风荷载特征,并建立了广义荷载谱解析模型.

目前,对格构式塔架横风向和扭转向风荷载的研究主要集中在对风荷载谱的认识上,研究对象多为四边形塔架结构,对三边塔架风荷载特性的研究还很不足.本文通过高频动态天平试验得到了三边桅杆杆身模型的平均风力系数、均方根力系数以及风荷载谱,分析了风荷载的构成机理和影响因素.

1 风洞试验简介

1.1 试验模型

刚性模型测力试验在同济大学 TJ-2 水平回流式边界层风洞中进行,风洞试验段尺寸为 3 m 宽、2.5 m 高、15 m 长.试验原型取自典型的三边桅杆杆身结构,如图 1 所示,杆身边宽 1 m,且沿高度不变.为满足使用功能要求,此类结构通常带有天

线、馈线和爬梯等附属结构,其中天线通常安装在指定高度,而馈线和爬梯沿桅杆高度分布.因此,试验时考虑馈线和爬梯分别制作无附属结构(模型 A)和有附属结构(模型 B)的两种模型(图 2).

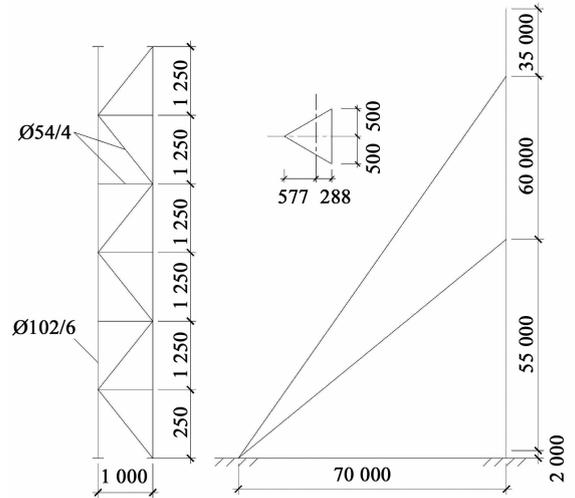
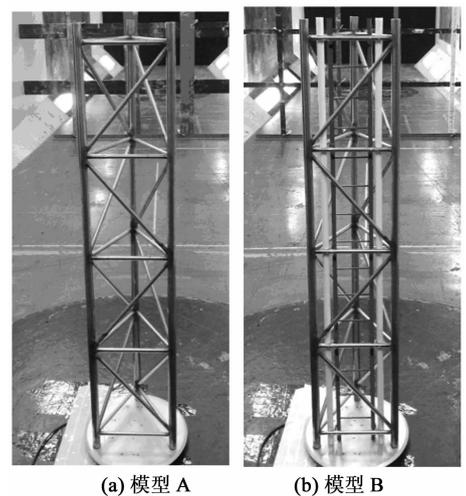


图 1 两层三方纤绳桅杆

Fig. 1 A two layer and three direction guyed mast



(a) 模型 A

(b) 模型 B

图 2 风洞中的试验模型

Fig. 2 Test models in wind tunnel

桅杆杆身节段刚性测力模型采用钢管制作,几何缩放比 1:4,模型弦杆直径为 25 mm,横斜杆直径均为 14 mm,模型取 4 个节段,高 1.35 m,挡风系数为 0.277.风洞阻塞率小于 3%,满足要求故不需要考虑风洞堵塞修正.测力天平坐标系和风向角定义如图 3 所示, X, Y 为结构主轴,顺风向为 X' 轴,横风向为 Y' 轴.

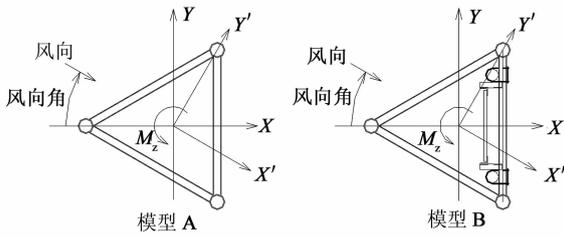


图 3 坐标系和风向定义

Fig. 3 Reference system and wind direction

1.2 风场模拟

试验采用的桅杆杆身节段原型高度不大, 可以认为在高度范围内平均风速和紊流度基本不变. 作为一般性研究, 试验在均匀流场和紊流度分别为 8%, 15% 的两种均匀紊流场中进行, 通过格栅被动紊流发生装置建立均匀紊流场. 采用眼镜蛇脉动风速测试仪对风场环境进行了测试, 表 1 给出了不同流场的平均风速和紊流度. 模拟紊流场脉动风谱如图 4 所示, 图中, f 为频率, $S_u(f)$ 为脉动风速谱, σ^2 为方差, L_u^x 为紊流积分尺度, U 为平均风速. 从图 4 可以看出, Von-Karman 谱和欧洲规范谱因隐含了紊流积分尺度, 和试验风速谱拟合较好, 相比来说, Karman 谱在低频区拟合效果更好, 而欧规范谱在惯性子区更接近样本谱.

表 1 平均风速和紊流度

Tab. 1 Mean velocity and turbulence intensity

流场	U /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	I_u /%	I_w /%
均匀流场	10.50	0.42	0.37
8%紊流场	10.23	7.51	6.61
15%紊流场	8.79	15.37	13.40

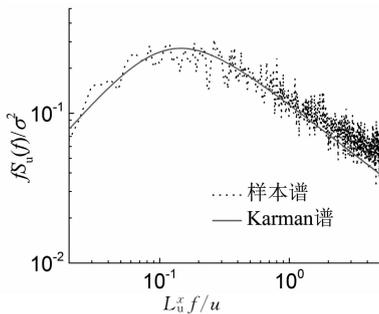


图 4 风洞中的脉动风速谱

Fig. 4 Spectra of fluctuating wind velocity in wind tunnel

1.3 试验方法及数据处理

作用在模型上的风荷载采用应变型六分量高频动态测力天平测得, 天平采样频率为 300 Hz, 3 种流场采样长度均为 30 s, 采样点数 9 000. 试验时桅杆模型放置在转盘上, 通过转动转盘模拟不同风向角, 根据截面对称性, 模型 A 和模型 B 的试验风向角范

围分别取 $0^\circ \sim 60^\circ$ 和 $0^\circ \sim 180^\circ$, 间隔 5° .

对测得的模型 X, Y 向水平风力和绕 Z 轴扭矩进行坐标变换得到顺风向阻力 F_D , 横风向升力 F_L 以及扭矩 M_z 时程, FFT 变换得到三维风荷载谱. 由于试验模型刚度不够大, 在风荷载激励下一阶振型共振比较明显, 对所测基底力的影响不可忽视, 采用传递函数方法^[6]对荷载功率谱进行修正, 消除半刚性模型一阶共振的影响:

$$S(\omega) = \frac{S^*(\omega)}{1 + |H_1(i\omega)|^2 (\omega^4 + 4\xi_1^2 \omega_1^2 \omega^2)} \quad (1)$$

$$H_1(i\omega) = (\omega_1^2 - \omega^2 + i\omega 2\xi_1 \omega_1)^{-1} \quad (2)$$

式中: $S^*(\omega)$ 为试验荷载谱; $H_1(i\omega)$ 为一阶复频响应函数; ω_1 为一阶圆频率; ξ_1 为一阶阻尼比. 典型阻力系数功率谱消除一阶共振的结果见图 5.

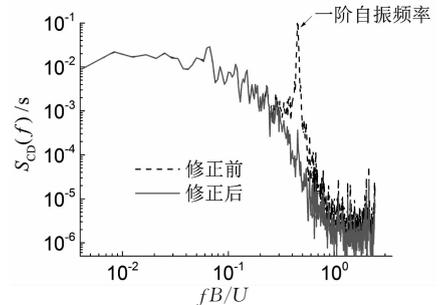


图 5 阻力系数谱消除共振影响

Fig. 5 Elimination of resonance effect on a drag coefficient spectrum

采用消除共振影响后的数据计算得到风力系数时间平均值和均方根值, 即阻力系数、升力系数和扭矩系数 (C_D, C_L, C_T) 以及相应的均方根力系数 ($\sigma_{CD}, \sigma_{CL}, \sigma_{CT}$):

$$C_D = \frac{2 \overline{F_D}}{\rho U^2 A} \quad (3)$$

$$C_L = \frac{2 \overline{F_L}}{\rho U^2 A} \quad (4)$$

$$C_T = \frac{2 \overline{M_z}}{\rho U^2 AB} \quad (5)$$

式中: ρ 为空气密度; A 为挡风面积, 取一个塔面的投影面积; B 为塔架边宽. 塔架模型的 $A = 0.103 \text{ m}^2$, $B = 0.25 \text{ m}$.

2 主要试验结果分析

2.1 平均风力系数

光滑圆柱阻力系数同雷诺数相关, 试验桅杆杆身为钢管塔架结构, 需要考虑雷诺数的影响. 作为一个整体讨论包围给定物体的流动时, 雷诺数计算中的特征尺度可取该结构的总体代表性尺寸^[7], 本试验中取塔架边宽. 对三角形塔架阻力系数的研究表

明^[7],在 $Re = 10^5 \sim 2.5 \times 10^5$ 时,表面边界层从层流过度到紊流,阻力系数急剧下降,当 $Re > 2.5 \times 10^5$ 时,随雷诺数的增大,阻力系数再次缓慢增大. 试验塔架雷诺数在 1.8×10^5 左右,在临界范围内,一般认为增大紊流度可以达到较高雷诺数的效果. 图 6 给出了不同流场下阻力系数随风向角的变化,从图中可以看出,均匀流场、8%和 15%紊流场下桅杆杆身模型阻力系数基本一致,随紊流度的增大,阻力系数也略有增大,与现有研究结论一致;模型 B 在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 风向角区间时,风来流先流经带附属结构的塔面,附属结构形态不规则,包含圆截面、角钢等多种截面,尾流干扰效应明显,因此阻力系数受紊流度影响的规律并不显著;由于模型截面具有对称性,模型 A 和模型 B 阻力系数在风向沿截面对称轴时最大,并随风向角变化逐渐减小,分别在 30° 和 90° 风向角时达到最小值.

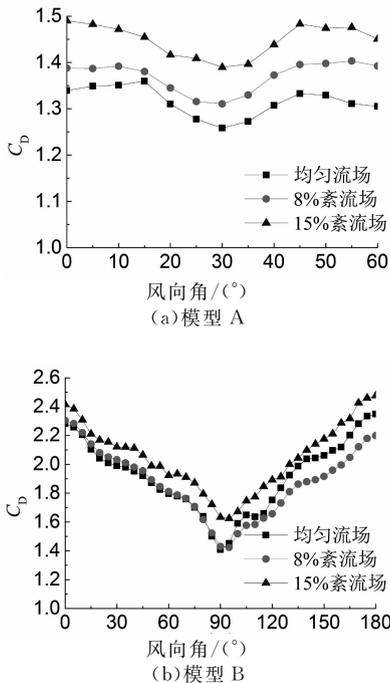


图 6 阻力系数随风向角的变化
Fig. 6 Variation of drag coefficients with wind direction

升力系数与扭矩系数曲线见图 7. 从图中可以看出,随风向角的改变升力与扭矩系数的变化也呈现一定的规律,风向沿截面对称轴时系数值接近零,模型 A 升力系数最大值小于 0.1,扭矩系数最大值小于 0.05,增加附属结构后,模型 B 的升力系数和扭矩系数均有明显增大,在 $35^\circ, 75^\circ$ 和 135° 风向角附近升力系数达到极值,并在 135° 风向角时达到最大值 0.35.

试验得到的体型系数和中国《建筑结构荷载规

范》(GB50009-2012)^[8]、日本规范(AIJ2004)^[9]、美国规范(ASCE/SEI7-10)^[10]以及欧洲规范(Eurocode 3)^[11]规定的体型系数对比见表 2,试验体型系数取 3 种流场下测得的阻力系数最大值. 从表 2 可以看出,模型 A 试验体型系数和美国规范值比较接近,略大于欧洲规范值,中国规范和日本规范体型系数数值偏大,模型 B 试验体型系数和欧洲规范值接近,小于其他规范值,总体来看,欧洲规范体型系数取值最小,日本规范取值最保守.

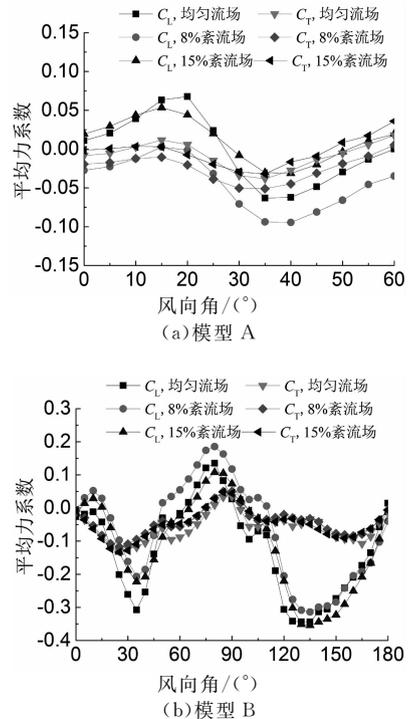


图 7 升力系数和扭矩系数随风向角的变化
Fig. 7 Variation of lift and torque coefficients with wind direction

上述各国规范中,中国规范和日本规范规定的塔架体型系数可根据挡风系数查表得到;美国规范对包含圆截面构件的三边塔架体型系数取值为 $(0.51\epsilon^2 + 0.57)(3.4\epsilon^2 - 4.7\epsilon + 3.4)$, 式中 ϵ 为挡风系数;根据欧洲规范得到的塔架体型系数为 $C_1(1 - C_2\epsilon) + (C_1 + 0.875)\epsilon^2$, 对于三边塔架,取 $C_1 = 1.9, C_2 = 1.4$. 对于带附属结构的桅杆,欧洲规范给出了计算附属结构风荷载时考虑遮挡效应的折减系数,其他规范没有明确的规定,设计中通常先单独考虑塔架和附属结构的风荷载,再进行简单的线性叠加得到整体结构的风荷载. 欧洲规范还给出了不同风向角的修正系数 K_0 , 对圆截面构件 $K_0 = 1$, 其他规范没有区分不同风向角的工况.

表 2 体型系数
Tab. 2 Shape coefficients

试验或规范	体型系数	
	模型 A	模型 B
试验	1.49	2.41
GB50009-2012	1.63	2.68
AIJ2004	1.80	3.03
ASCE7-10	1.44	2.70
Eurocode 3	1.38	2.39

2.2 均方根力系数

不同紊流度风场下的均方根力系数见图 8 和图 9。从图中可以看出, 均方根力系数的大小与紊流度

有直接关系, 紊流度增大时, 均方根力系数随之增大。模型 A 的阻力系数和均方根力系数(图 8(a), 图 9(a))受风向角影响较小; 模型 B 在 15% 紊流场下的阻力系数均方根(图 8(b))随风向角的变化规律同阻力系数相同, 在 0° 和 180° 风向角时最大, 90° 风向角附近时最小; 模型 B 在 15% 紊流场下的升力系数均方根(图 9(b))随风向角变化波动相对较大。对比模型 A 和 B 的均方根力系数可以看出, 增加附属结构后阻力系数和升力系数均方根增大, 扭矩系数均方根受附属结构的影响则不明显。

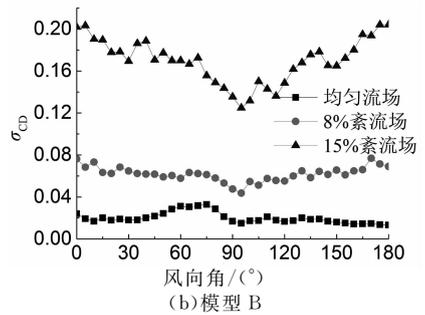
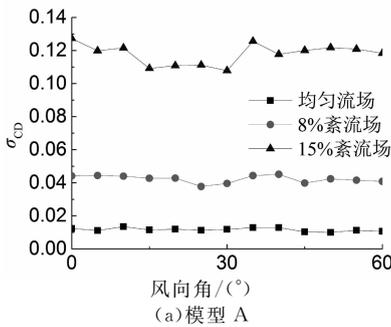


图 8 阻力系数均方根随风向角的变化
Fig. 8 Variation of RMS drag coefficients with wind direction

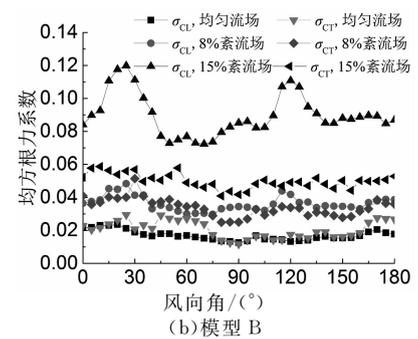
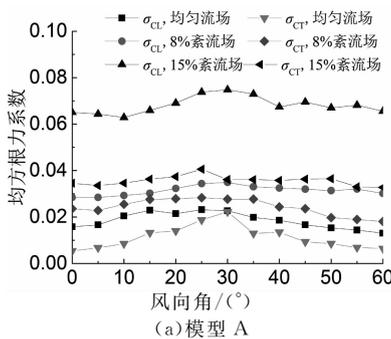


图 9 升力系数和扭矩系数均方根随风向角的变化
Fig. 9 Variation of RMS lift and torque coefficients with wind direction

2.3 顺风向风荷载谱

塔架结构顺风向风荷载谱是一种典型的顺风向风湍流谱^[4], 图 10 给出了不同紊流度下的典型阻力系数功率谱曲线。从图中可以看出, 功率谱值随紊流度增大而增大, 作用于桅杆杆身上的顺风向风荷载主要由顺风向紊流引起。顺风向风荷载谱主要关心的频带范围取 0~25 Hz, 图 11 给出了模型 A 在 0°, 30° 风向角下和模型 B 在 0°, 90° 风向角下的顺风向风荷载归一化谱。从图中可以看出, 不同风向角下的谱曲线形状相似, 同顺风向脉动风速谱的基本特征相同, 为单峰谱, 峰值对应的折减频率在 0.1 附近, 8% 和 15% 紊流度下的顺风向风荷载归一化谱

曲线比较接近, 谱峰值明显大于均匀流场下的峰值。

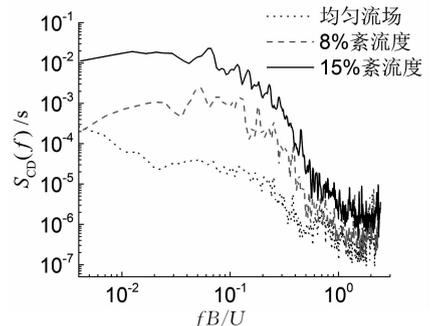


图 10 不同紊流度下阻力系数功率谱
Fig. 10 Power spectra of drag coefficient for different turbulent intensities

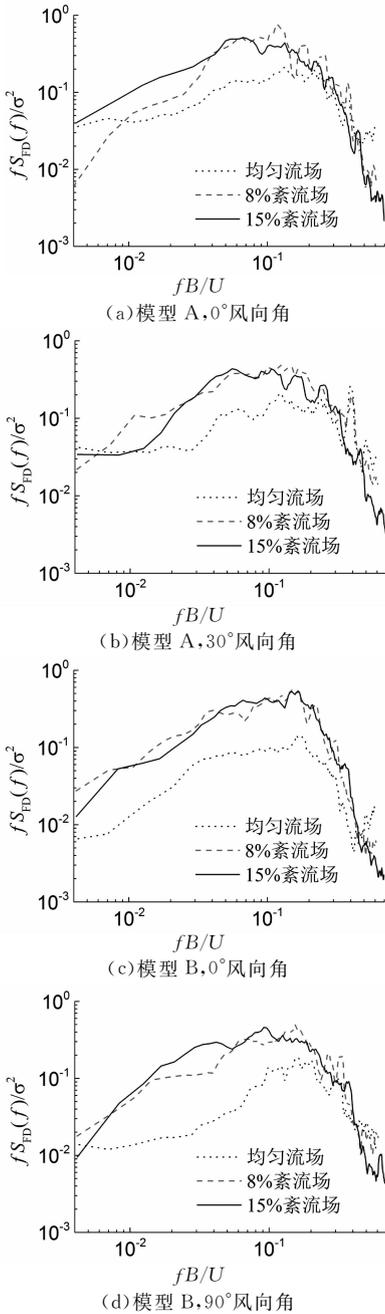


图 11 归一化顺风向风荷载谱
Fig. 11 Normalized force spectra in along-wind direction

2.4 横风向风荷载谱

横风向风荷载谱由紊流作用和旋涡脱落激励两部分构成^[12].图 12 给出了模型 A 在不同紊流度下的典型升力系数功率谱.从图中可以看出,升力系数谱主要有两个谱峰,低频(折减频率小于 1)部分谱形状同阻力系数谱相似,谱峰值折减频率 0.1,谱值随紊流度增大而增大,均匀流场下的谱值很小,可以认为该谱峰主要由紊流激励引起.高频(折减频率大于 1)部分的功率谱值受紊流度的影响较小,不同紊流度下谱峰折减频率 f^* 基本不变,在 1.8 左右.

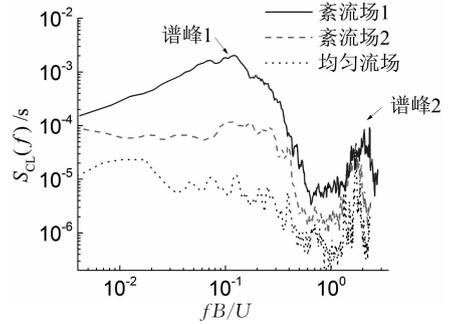


图 12 不同紊流度下升力系数功率谱
Fig. 12 Power spectra of lift coefficient for different turbulent intensities

钝体绕流旋涡脱落频率同风速成正比,图 13 给出了不同风速下的升力系数功率谱谱峰折减频率.从图中可以看出,风速改变时第二个谱峰的峰值折减频率不变,符合旋涡脱落谱的特点.

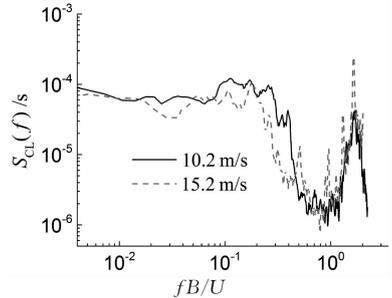


图 13 不同风速下升力系数功率谱
Fig. 13 Power spectra of lift coefficient for different velocities

模型 A,B 的横风向风荷载归一化谱见图 14.从图中可以看出,随着紊流度的增大,紊流激励谱逐渐增大,旋涡脱落谱逐渐减小,说明在横风向风荷载中紊流的贡献随紊流度的增大而增大,而旋涡脱落激励的贡献则相应减小.

模型 A 在不同风向角下的旋涡脱落谱峰值不变(图 14(a),(b)),无附属结构的模型构件布置规则,构件尺寸、间距相差不大,旋涡脱落频率集中在一个频段范围内,可以认为结构整体只有一个旋涡脱落主频率,表现为一个整体的旋涡脱落谱峰.

模型 B 在 0° 风向角下的横风向风荷载谱同模型 A 相近(图 14(c)),附属结构对旋涡脱落谱的影响很小,90° 风向角时(图 14(d)),横风向风荷载谱出现两个明显的旋涡脱落谱峰,峰值折减频率分别在 0.9 和 2.2 左右.同单一截面绕流不同,格格式结构各构件尾流互相干扰,90° 风向角时风来流方向平行于爬梯、馈线平面,附属结构及其附近构件沿来流方向的前后间距减小很多,尾流干扰效应最为明显,旋涡脱落频率改变,在功率谱上同其他构件旋涡脱落频率明显区分开,出现两个旋涡脱落主频率,从而形成两个旋涡脱落谱峰.

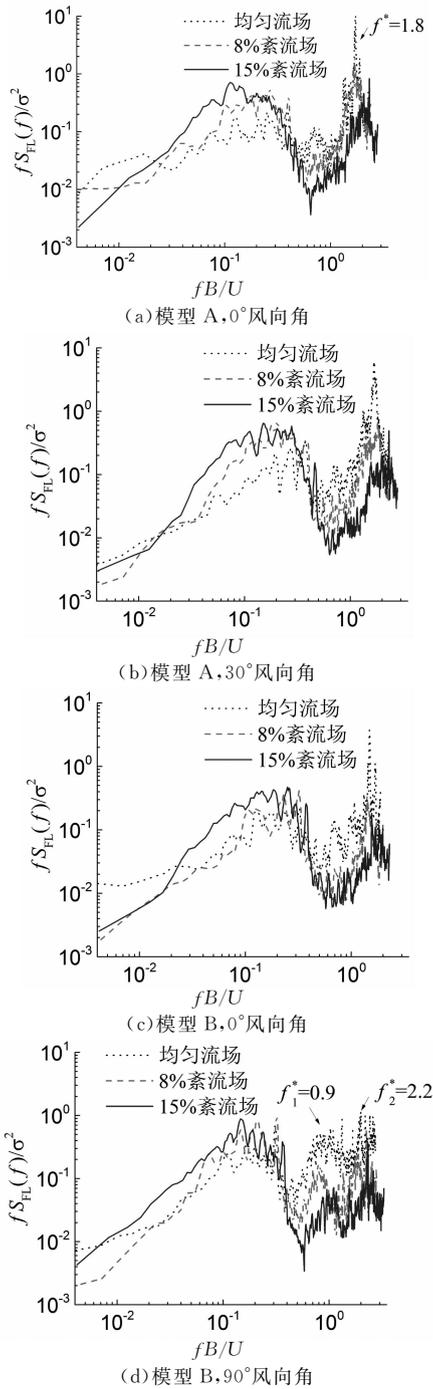


图 14 归一化横风向风荷载谱

风荷载功率谱拟合得到的 Strouhal 数范围相符. 对于圆形或近圆形的截面的结构物, $St \approx 0.18 \sim 0.20$; 对管阵, $St \approx 0.20 \sim 0.50$, U 采用管间风速值^[14], 本试验模型为格构式结构, 计算时 U 采用了来流风速, 因此得到的 Strouhal 数较文献[14]中的略小.

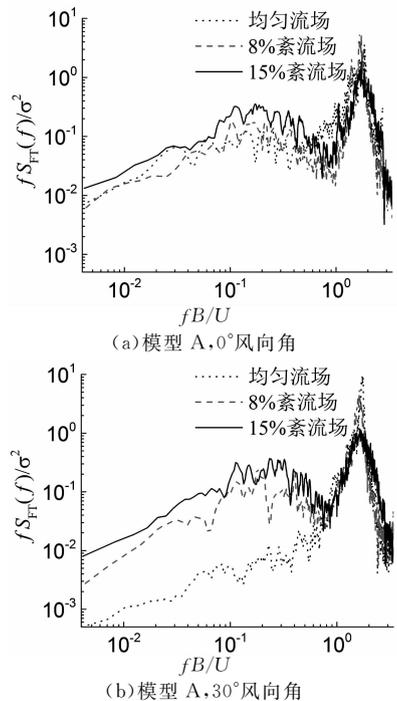
表 3 Strouhal 数
Tab. 3 Strouhal number

流场	模型 A		模型 B	
	0°	30°	0°	90°
均匀流场	0.15	0.15	0.12	0.06, 0.13
8%紊流场	0.13	0.13	0.09	0.05, 0.11
15%紊流场	0.13	0.13	0.11	0.05, 0.12

2.5 扭转向风荷载谱

扭转风荷载主要是由结构表面风压的不对称分布造成的, 与顺风、横风向紊流和尾流激励等因素有关, 模型 A, B 的扭转向风荷载归一化谱见图 15. 从图中可以看出, 同横风向风荷载谱相比, 扭转向风荷载谱也由紊流激励和旋涡脱落激励两部分组成, 随着紊流度的增大, 紊流激励谱峰值逐渐增大, 而旋涡脱落谱峰值则略有减小, 对于扭转向风荷载谱, 旋涡脱落激励能量贡献所占比例较横风向风荷载中旋涡脱落激励所占比例有明显增大.

模型 A(图 15(a), (b))和 0°风向角下模型 B(图 15(c))的扭转风荷载谱有一个旋涡脱落谱峰, 90°风向角下模型 B(图 15(d))的扭转风荷载谱存在两个旋涡脱落谱峰, 谱峰值折减频率同横风向风荷载谱的相同.



Strouhal 数是描述旋涡脱落现象的无量纲数:

$$St = f_s D / U \quad (6)$$

式中: f_s 为旋涡脱落频率; D 为特征尺度. 模型 A 结构布置规则, 风荷载谱有一个旋涡脱落主频率, 特征尺度取构件直径的平均值; 模型 B 增加了附属结构, 构件尺寸、截面形式差异很大, 特征尺寸很难确定, 在计算中取模型 A 的值. 不同风向角下的 Strouhal 数见表 3, 模型 A 的 Strouhal 数在 0.13 到 0.15 之间, 同文献[13]中对椭圆形高耸结构横风向

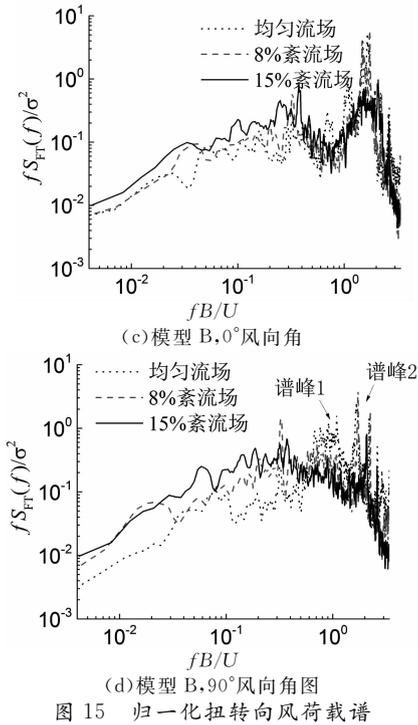


图 15 归一化扭转风向荷载谱

Fig. 15 Normalized force spectra in torsion direction

格构式结构旋涡脱落谱受构件尺寸、间距等多种因素影响,构件布置越不规则,旋涡脱落谱越复杂,不同结构形式甚至不同风向角的旋涡脱落谱都可能存在较大差异。

3 结论

通过高频动态天平测力试验,对三边形桅杆杆身平均风力系数、均方根力系数和风荷载谱特性进行了研究,得到如下结论:

1) 试验模型雷诺数在临界范围内,增大紊流度可以达到较高雷诺数的效果,阻力系数随紊流度增大略有增大,无附属结构模型升力系数和扭矩系数很小,增加附属结构后,升力系数明显增大. 试验所得两种模型的体型系数和我国规范 GB50009—2012 相比略小,比欧洲规范略大,日本规范取值最大,表明按 GB50009—2012 取值可以保证三边形桅杆结构的安全性。

2) 均方根力系数随紊流度的增大而增大,增加附属结构后阻力系数和升力系数均方根值有明显增大,扭矩系数均方根值受附属结构的影响则不明显。

3) 桅杆杆身顺风向风荷载谱是一种典型的顺风向风湍流谱,横风向和扭转向风荷载谱由紊流作用和旋涡脱落激励两部分构成. 无附属结构模型旋涡脱落折减频率在 1.8 左右,90°风向角下带附属结构模型有两个旋涡脱落谱峰,峰值折减频率分别在 0.9 和 2.2 左右. 旋涡脱落激励受构件尺寸、间距等多种

因素影响,规则的无附属结构模型旋涡脱落频率集中在一个频段范围内,形成一个整体谱峰,附属结构的干扰使得特定风向角下结构的旋涡脱落激励存在两个主频率,从而形成两个谱峰,对格构式桅杆结构,构件布置越不规则,旋涡脱落谱越复杂。

参考文献

- [1] 王肇民,王之宏,颜明忠. 桅杆结构[M]. 北京:科学出版社,2001: 362—363.
WANG Zhaomin, WANG Zhihong, YAN Mingzhong. Guyed mast [M]. Beijing: Science Press, 2001: 362—363. (In Chinese)
- [2] 李正农,郝艳峰,刘申会. 不同风场下高层建筑风效应的风洞试验研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2013,40(7): 9—15.
LI Zhengnong, HAO Yanfeng, LIU Shenhui. Wind tunnel test of tall building wind effect in different geomorphologic terrain categories [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2013, 40(7): 9—15. (In Chinese)
- [3] CARRIL C F, ISYUMOV N, BRASIL R M L R F. Experimental study of the wind forces on rectangular latticed communication towers with antennas [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(8): 1007—1022.
- [4] 张庆华,顾明,黄鹏. 格构式塔架风力特性试验研究[J]. 振动与冲击,2009, 28(2): 1—4.
ZHANG Qinghua, GU Ming, HUANG Peng. Experimental study of wind force on latticed tower [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(2): 1—4. (In Chinese)
- [5] 梁枢果,邹良浩,赵林,等. 格构式塔架动力风荷载解析模型[J]. 同济大学学报:自然科学版,2008, 36(2): 166—171.
LIANG Shuguo, ZOU Lianghao, ZHAO Lin, et al. Analytical model of dynamic wind loads on lattice towers [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(2): 166—171. (In Chinese)
- [6] 邹梁浩,梁枢果. 半刚性模型风洞试验荷载谱的处理方法[J]. 实验流体力学,2007, 21(3): 76—81.
ZOU Lianghao, LIANG Shuguo. A method to evaluate wind force spectra of semi-rigid model in wind tunnel tests [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2007, 21(3): 76—81. (In Chinese)
- [7] 埃米尔·希缪,罗伯特·H·斯坎伦. 风对结构的作用:风工程导论[M]. 刘尚培,项海帆,谢霁明译. 上海:同济大学出版社,1992: 100—305.
SIMIU E, SCANLAN R H. Wind effects on structures: an introduction to wind engineering [M]. Translated by LIU S P, XIANG H F, XIE J M. Shanghai: Tongji University Press, 1992: 100—305. (In Chinese)
- [8] GB50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012: 33—53.
GB 50009—2012 Load code for the design of building structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012: 33—53. (In Chinese)
- [9] AIJ2004 Recommendations for loads on buildings[S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2004: 628—631.
- [10] ASCE/SEI7-10 Minimum design loads for buildings and other structures[S]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2010: 307—314.
- [11] BS EN 1993-3-1: 2006. Eurocode 3: design of steel structures, part 3—1: Towers, masts and chimneys [S]. Brussels: British Standards Institution, 2006: 28—40.
- [12] 顾明,叶丰. 高层建筑的横风向激励特性和计算模型的研究[J]. 土木工程学报,2006, 39(2): 1—5.
GU Ming, YE Feng. Characteristics and computational model of across wind load of tall buildings [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(2): 1—5. (In Chinese)
- [13] 李秋胜,李慧真,李毅. 椭圆形高耸结构风荷载特性的试验研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2015, 42(1): 1—8.
LI Qiu-sheng, LI Hui-zhen, LI Yi. Experimental study of the characteristics of wind loads on an oval-shaped high-rise structure [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42(1): 1—8. (In Chinese)
- [14] 黄本才. 结构抗风分析原理及应用[M]. 上海:同济大学出版社, 2001: 66—68.
HUANG Bencai. Structural analysis theory and application of wind resistance [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2001: 66—68. (In Chinese)