

# 基于 HFFB 试验的结构广义荷载与风振响应分析<sup>\*</sup>

邹良浩, 李峰, 汤怀强, 梁枢果

(武汉大学土木建筑工程学院 武汉, 430072)

**摘要** 采用高频测力天平风洞试验技术得到的结构基底弯矩和扭矩进行结构风振响应分析时, 只能考虑横向线性振型和扭转向常数型振型, 忽略了结构高阶振型对结构响应的贡献。在分析高频测力天平风洞试验测试数据的基础上, 以修正线性(常数型)振型广义荷载谱方法为依据, 推导得到了结构横向和扭转向各阶振型广义荷载谱。同时, 利用此各阶振型广义荷载谱进行了 3 种典型的格格式高耸结构气弹模型风振响应评估。通过比较气弹模型风洞试验结果和计算结果可知, 当考虑振型修正、高阶振型和气动阻尼比后, 计算结果与试验结果吻合较好, 验证了推导得到的高阶振型广义荷载谱的准确性。

**关键词** 风洞试验; 风效应; 广义力; 高频测力天平; 振型修正

**中图分类号** TU311.3; TH73

## 引言

为了准确进行高层及高耸结构的风致响应与等效风荷载的评估, 结构气动力的精确测量至关重要。目前, 应用于结构气动力测量的风洞试验方法主要有两种: 刚性模型表面测压<sup>[1-4]</sup>与高频测力天平(high-frequency force balance, 简称 HFFB)风洞试验方法<sup>[5-6]</sup>。刚性模型表面测压风洞试验方法要求模型为刚性, 只需要模拟结构外形。通过在一定缩尺比的刚性模型上布置有限的测压点, 采用压力扫描阀同步测量结构表面气动力时程。该方法可以直观地分析结构表面气动力特性、气动力空间分布与相关性。然而, 考虑到结构表面布置测压点的因素, 该风洞试验方法无法应用于一些特殊结构, 比如格格式高耸结构的测量。由于测点布置的限制, 对于结构轮廓变化较大的部位, 测压点布置的不合理容易忽略特定部位的气动力信息而引起测试误差。与表面测压风洞试验方法一样, HFFB 风洞试验只需模拟结构外形, 该方法要求模型具有轻质和高强的特性。由于该测试方法不需要在刚性模型上设置测点, 克服了表面测压风洞试验方法的缺点与不足, 因而被广泛应用在高层及高耸结构的抗风设计中。通过采用 HFFB 测试模型基底的弯矩与扭矩时程, 计算得到结构横向线性振型和扭转向常数型振型广义

荷载, 并以此为基础进行结构风振响应与等效风荷载评估。近年来, 随着高层及高耸结构的高度越来越高, 外形越来越新颖, 其结构振型与线性(常数型)振型差别越来越大, 而且振型耦合的结构也越来越多。因此, 如何将 HFFB 技术应用在这些新型结构的抗风设计中是风工程研究者一直关注的前沿课题。在振型修正方面, Holmes<sup>[7]</sup>通过假定结构气动力谱沿高不变推导得到了振型修正因子。文献[8]假定气动力完全相关且沿高为指数形式变化的基础上推导了振型修正因子。文献[9]将 Holmes 得到的振型修正因子延伸到计及不同荷载谱以及气动力沿高采用不同指数分布的情况。文献[10-11]进行了不同风效应的振型修正因子的研究, 分析了线性振型对不同风效应的影响。文献[12]通过假定一种经验气动力模型和荷载相干函数, 推导了风荷载的振型修正因子。在振型耦合方面, 基于 HFFB 测试的数据, 文献[13]提出了计及荷载相关性的振型耦合风振响应计算方法。Chen 等<sup>[14]</sup>研究了横向-扭转振型耦合的结构等效风荷载。Spence 等<sup>[15]</sup>研究了荷载相关性对三维振型耦合结构广义荷载的影响。Benadini 等<sup>[16]</sup>推导了高层建筑三维耦合风振响应评估的概率方法。Tse 等<sup>[17-18]</sup>采用线性振型法, 通过调节高层建筑转动中心的方式, 推导了可以精确进行振型修正的耦合风振响应计算方法, 并将此方法应用在实际建筑的抗风设计。上述方法提高了结

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(50278073, 51578434)  
收稿日期: 2016-11-20; 修回日期: 2017-03-20

构风振响应评估的精度,扩大了 HFFB 在复杂结构抗风设计中的应用,但是只考虑了一阶振型的贡献,无法进行高阶振型广义荷载及风致响应的分析。随着高层及高耸结构越来越高,其高阶振型特别是二阶振型对结构风振响应和等效风荷载的贡献越来越大,如何通过线性(常数型)振型广义荷载谱推导高阶振型广义荷载谱,进一步扩大 HFFB 技术的应用范围,是很有理论和实际应用价值的工作。

笔者针对各轴向不耦合的对称高层及高耸结构,以振型修正方法为基础,基于随机振动理论,以修正广义荷载谱的方式,利用线性(常数型)振型广义荷载谱推导了结构横向和扭转向高阶振型广义荷载谱。以3种典型的格构式高耸结构为例进行了结构顺风向和横风向风振响应评估。通过将计算结果与气弹模型风洞试验结果对照,分析了振型修正对结构风振响应的影响以及高阶振型对结构风振响应的贡献,同时也验证了推导的高阶振型广义荷载谱的准确性。

## 1 高阶振型广义荷载谱推导

由于采用振型修正因子方法进行振型修正时进行了一些必要的假定,因此带来了计算误差。文献

$$S_j^*(\omega) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{K=1}^N [V(z_i)^2 A(z_i)] [V(z_k)^2 A(z_k)] R(z_i, z_k, \omega) \varphi_j(z_i) \varphi_j(z_k)}{\sum_{i=1}^N \sum_{K=1}^N [V(z_i)^2 A(z_i)] [V(z_k)^2 A(z_k)] R(z_i, z_k, \omega) \frac{z_i}{H} \frac{z_k}{H}} S_L^*(\omega) \quad (3)$$

其中:  $H$  为结构总高度;  $S_L^*(\omega)$  为线性振型广义荷载谱,由文献[20]得到。

$$S_j^*(\omega) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{K=1}^N [V(z_i)^2 A(z_i) B(z_i)] [V(z_k)^2 A(z_k) B(z_k)] R(z_i, z_k, \omega) \varphi_j(z_i) \varphi_j(z_k)}{\sum_{i=1}^N \sum_{K=1}^N [V(z_i)^2 A(z_i) B(z_i)] [V(z_k)^2 A(z_k) B(z_k)] R(z_i, z_k, \omega)} S_C^*(\omega) \quad (4)$$

其中:  $S_C^*(\omega)$  为扭转向常数型振型广义荷载谱,由文献[20]得到。

## 2 格构式高耸结构气弹模型试验

本次试验以3种典型的格构式高耸结构(通讯塔、输电塔和电视塔)为原型,设计制作气弹模型,输电塔为典型的猫头塔,塔高为48.5 m,底部长边的长为8.95 m,短边的长为6.75 m,由角钢组成。通讯塔高为48 m,底部截面为正方形,边长为8 m,同样由角钢组成。电视塔高为127 m,其底部截面为六边形,边长为13 m,底部由圆钢管组成,上部截面为矩形结构,由角钢组成。本次试验输电塔和通讯

[19]通过采用表面测压风洞试验方法验证了此方法的计算误差很小,不超过5%。笔者以此方法为基础,利用线性(常数型)振型广义荷载谱,以修正荷载谱的方法推导了结构实际各阶振型广义荷载谱。

将高层及高耸结构简化为多质点模型,其结构不耦合,一共分为层  $i = N$ ,  $S_j^*(\omega)$  为第  $j$  阶振型广义荷载谱。计算如下

$$S_j^*(\omega) = \sum_{i=1}^N \sum_{K=1}^N [\sqrt{S(z_i, \omega) S(z_k, \omega)} * R(z_i, z_k, \omega) \varphi_j(z_i) \varphi_j(z_k)] \quad (1)$$

其中:  $S(z_i, \omega)$  为  $z_i$  高度荷载谱密度;  $R(z_i, z_k, \omega)$  为  $z_i$  和  $z_k$  高度的相干函数;  $\varphi_j(z_i)$  为  $z_i$  高度处  $j$  阶振型值。

假定归一化荷载谱  $S(\omega)$  不随结构高度  $z_i$  变化,  $S(z_i, \omega)$  可表示为

$$S(z_i, \omega) = [C \rho V(z_i)^2 A(z_i) / 2]^2 S(\omega) \quad (2)$$

其中:  $C$  为均方根力系数;  $\rho$  为空气密度;  $V(z_i)$  为  $z_i$  高度平均风速;  $A(z_i)$  为  $z_i$  高度的迎风面积(对于格构式高耸结构为实际面积)。

由 HFFB 得到的结果为横向线性振型广义荷载,将结构实际振型和线性振型带入式(1),由各阶振型广义荷载谱除以线性振型广义荷载谱,结合式(2),结构各阶振型广义荷载谱的计算为

采用同样的方法可由扭转向常数振型广义荷载谱推导得到结构扭转向各阶振型广义荷载谱。

塔缩尺比为1/50,电视塔为1/100。图1为气弹模型照片。在气弹模型设计中,在保证几何相似的情况下,最重要的相似参数是 Strouhal 数 ( $S_t = nD/V$ ),其次还有振型、阻尼比相似以及弹性参数、惯性参数(材料密度与空气密度的比值)相似。本次气弹模型忽略雷诺数和弗劳德数的模拟,模型采取在塔身适当位置配质量块的方法来调节模型的频率相似,并保证前二阶振型相似。气弹模型设计相似比如表1所示。结构原型和模型的频率如表2所示。阻尼比相似的模拟比较困难,因其为结构振动的重要参数,往往在模型制作后通过自由振动来测定,如表3所示。

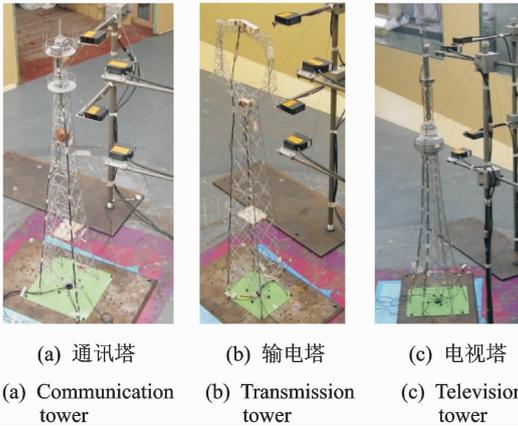


图 1 格构式塔架气动弹性模型

Fig. 1 The aeroelastic models of lattice towers

表 1 气弹模型相似参数

Tab. 1 The similarity parameters of the aeroelastic models

结构	几何相似比	面积相似比	频率相似比	风速相似比
通讯塔	1 : 50	1 : 2 500	7.071 : 1	1 : 7.071
输电塔	1 : 50	1 : 2 500	7.071 : 1	1 : 7.071
电视塔	1 : 100	1 : 10 000	20 : 1	1 : 5

表 2 结构原型与模型频率

Tab. 2 The frequencies of the prototypes and models

项目	通讯塔		输电塔				电视塔			
			x 轴向		y 轴向		x 轴向		y 轴向	
	一阶	二阶	一阶	二阶	一阶	二阶	一阶	二阶	一阶	二阶
模型 /Hz	19.53	60.0	12.21	36.86	21.63	61.5	9.57	32.03	11.32	30.85
原型 /Hz	2.74	8.55	1.83	5.44	2.87	7.42	0.50	1.71	0.55	1.86
误差 /%	0.8	-0.8	-6.0	-4.4	6.2	14.7	4.5	-6.8	2.8	20.6

表 3 模型结构阻尼比

Tab. 3 The structural damping ratios of the models %

模型	通讯塔		输电塔		电视塔	
	x 轴向	y 轴向	x 轴向	y 轴向	x 轴向	y 轴向
$\xi_s$	0.92	0.92	2.05	0.76	1.40	1.35

本次风洞试验是在同济大学 TJ-2 水平回流式边界层风洞试验室完成的。此风洞试验段高为 2.0 m, 宽为 3.0 m, 长为 15 m。试验风速范围为 2~65 m/s。本次风洞试验模拟了 B 类地貌。在模型放置中心测得的风速剖面 and 紊流度剖面如图 2 所示。其顺风向风速谱和 Karman 谱拟合较好, 如图 3 所示, 图中:  $n$  为频率;  $U_z$  为  $z$  高度处平均风速;  $S_u(n)$  为顺风向风速谱;  $\sigma^2$  为风速均方根; 横坐标为无量纲频率; 纵坐标为无量纲风速谱。

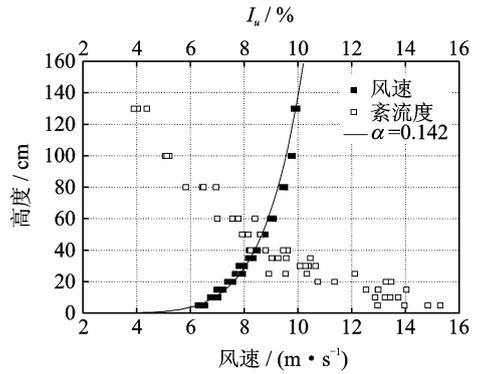


图 2 平均风速和紊流度剖面

Fig. 2 Mean wind speed and turbulence intensity profile

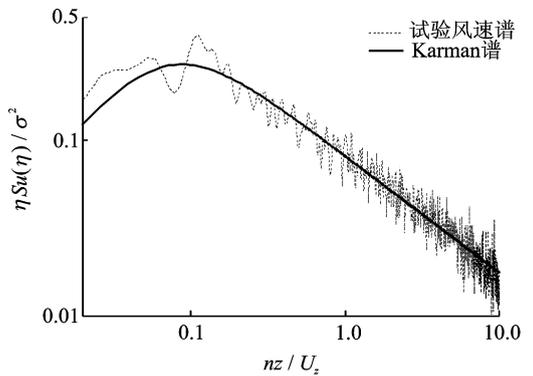


图 3 风洞中的风速谱

Fig. 3 The longitudinal velocity spectrum

本次试验采用微型加速度传感器和激光位移计测试结构  $x$  轴向和  $y$  轴向的加速度和位移时程。试验中的加速度传感器测点布置的位置如图 4 所示。电视塔的 2 个加速度传感器模型标高为 1.14 m。位移计布置在与加速度传感器相同高度测量相同方向的位移。采样时间为 90 s, 采样频率为 500 Hz。本次试验通过试验段工作转盘的旋转得到每个模型的 5 种试验风向角如图 5 所示。由于结构抗风设计主要考虑的是典型风向角下结构的极值风响应, 笔者只考虑通讯塔  $0^\circ$ 、输电塔  $0^\circ$  和  $90^\circ$ 、电视塔  $0^\circ$  和  $90^\circ$  风向角、顶部采样风速为 5, 10, 15 和 20 m/s 4 个风

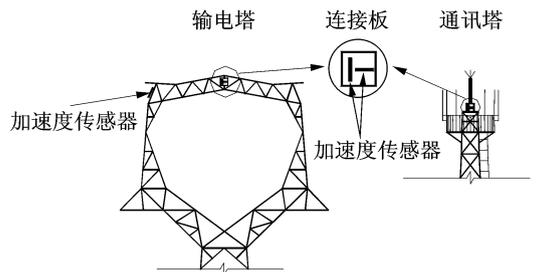


图 4 模型加速度传感器布置(输电塔与通讯塔)

Fig. 4 The contribution of acceleration sensors

速条件下格构式塔架顺风向加速度响应。

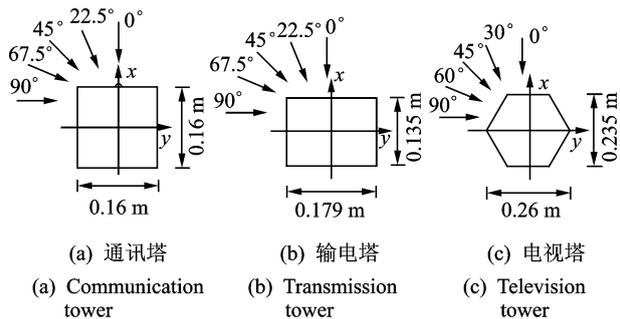


图 5 试验风向角图

Fig. 5 Definition of wind direction

### 3 气动阻尼比的评估

气动阻尼比是进行结构风振响应分析的重要参数,利用格构式高耸结构气弹模型风洞试验得到结构顶部加速度时程,联合采用经验模态分解法(empirical mode decomposition, 简称 EMD)、小波分析、随机减量方法(random decrement technology, 简称 RDT)和 Hilbert 变换进行结构总阻尼的识别<sup>[21-23]</sup>。具体识别过程如下:首先,对结构响应时程进行 EMD 分解,得到结构各阶振型频率对应的本征模函数(intrinsic mode function, 简称 IMF)分量,此时各个 IMF 分量的临近频率成分也被反映;其次,通过小波分析<sup>[24]</sup>对各个 IMF 进行处理,提取出更为理想的数据;最后,通过 RDT 得到自由衰减曲线,利用 Hilbert 变换进行结构气动阻尼比的识别。3 个典型格构式塔架的气动阻尼比如表 4 所示。

表 4 结构气动阻尼比

Tab. 4 The aero-dynamic damping ratios of the structures

风速/ (m · s <sup>-1</sup> )	顺风向气动阻尼比/%				
	通讯塔	输电塔		电视塔	
		0°	90°	0°	90°
5	0.35	0.15	0.89	0.15	0.45
10	0.98	1.75	1.19	0.30	1.25
15	1.28	2.15	1.64	1.40	1.60
20	1.60	2.55	1.79	1.90	2.10
风速/ (m · s <sup>-1</sup> )	横风向气动阻尼比/%				
	通讯塔	输电塔		电视塔	
		0°	90°	0°	90°
5	0.06	1.14	0.15	0.75	0.45
10	0.56	0.66	1.55	0.60	0.50
15	0.78	1.14	2.45	0.69	0.90
20	0.63	1.08	1.35	0.75	0.96

## 4 风振响应计算与比较

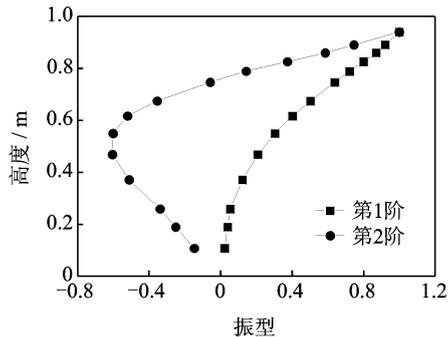
### 4.1 计算参数

本次计算以 3 个典型格构式高耸结构气弹模型的顺风向与横风向加速度响应为目标进行评估与比较。计算时振型由有限元计算得到,如图 6 所示,图中横坐标振型无量纲。其线性振型广义荷载谱由此 3 个模型的 HFFB 得到,拟合得到公式如文献[20]所示。

对于顺风向

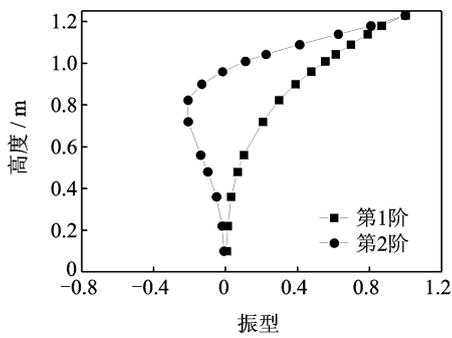
$$\frac{n S_F^*(n)}{\sigma^2} = \frac{a (nB / V_H)^{1.05}}{[1 + b (nB / V_H)^2]^{1.5}} \quad (5)$$

其中:  $S_F^*(n)$  为塔架一阶线性振型广义荷载谱;  $\sigma$  =



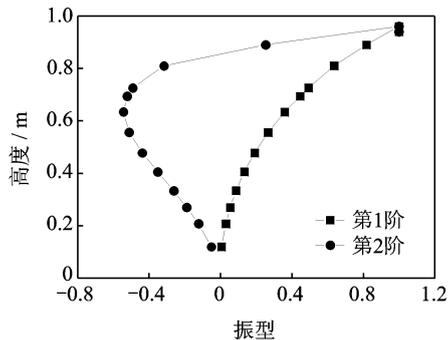
(a) 通讯塔

(a) Communication tower



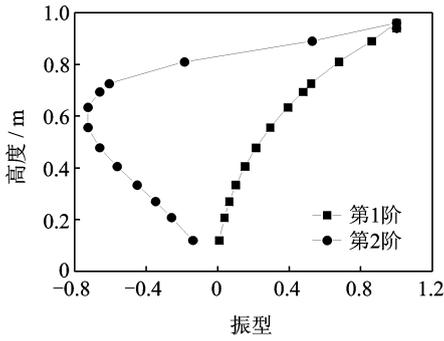
(b) 电视塔

(b) Television tower



(c) 输电塔弱轴

(c) Transmission tower of weak axis



(d) 输电塔强轴向  
(d) Transmission tower of strong axis

图 6 结构振型图

Fig. 6 The mode shape of the models

$C_{M\rho} V_H^2 A/2$  为塔架顺风向一阶广义荷载均方根;  
 $C_M$  为塔架顺风向一阶广义荷载均方根系数; $B$  为来流风方向底部宽度; $A$  为迎风面实际面积; $a$  和  $b$  为拟合参数。

对于横风向

$$\frac{n S_F^*(n)}{\sigma^2} = \frac{a (cnB / V_H)^{1.4}}{[1 + b (cnB / V_H)^4]^3} \quad (6)$$

其中: $\sigma = C_{C\rho} V_H^2 A/2$  为塔架横风向一阶广义荷载均方根, $C_C$  为塔架横风向一阶广义荷载均方根系数,

$a, b$  和  $c$  为拟合参数。

对于顺风向,相干函数为

$$R(z_1, z_2, \omega) = \exp\left(-\frac{\omega C_z |z_1 - z_2|}{\pi[V(z_1) + V(z_2)]}\right) \quad (7)$$

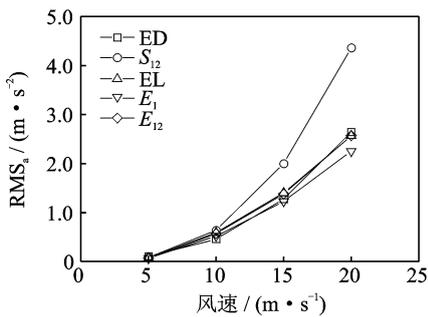
对于横风向<sup>[25]</sup>,相干函数为

$$R(z_1, z_2, \omega) = \cos\left(\alpha_1 \frac{|z_1 - z_2|}{B}\right) \exp\left\{-\left[\frac{|z_1 - z_2|}{\alpha_2 B}\right]^2\right\} \quad (8)$$

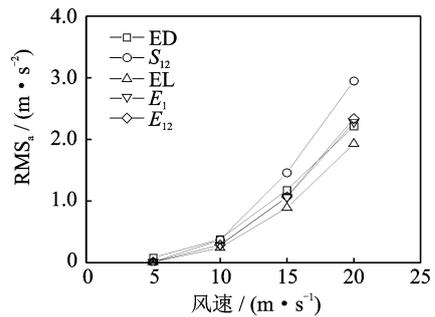
进行风振响应计算时,参数取为 10; $z_1, z_2$  为拟合参数,按照文献[25]取值。

#### 4.2 风振响应计算结果与分析

采用上述方法得到的各阶振型广义荷载谱等计算参数,对 3 个典型格构式高耸结构气弹模型进行了风振响应分析,结果如图 7~11 所示。图中:纵坐标 RMS 表示均方根,下标  $a$  为加速度;ED 为实验结果; $S_{12}$  为不考虑气动阻尼时,由第 1 阶振型和第 2 阶振型叠加计算得到的加速度均方根响应;EL 为考虑气动阻尼时,由线性振型计算得到的结果; $E_1$  为考虑气动阻尼时,由第 1 阶振型计算得到的结果; $E_{12}$  为考虑气动阻尼时,由第 1 阶振型和第 2 阶振型叠加计算得到的结果。



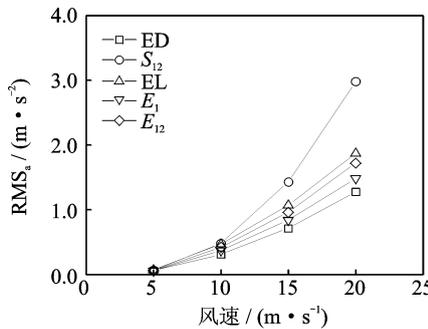
(a) 顺风向  
(a) Along-wind



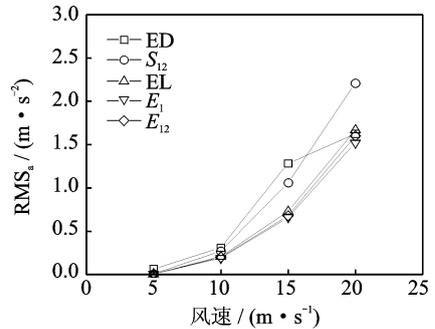
(b) 横风向  
(b) Across-wind

图 7 通讯塔顺风向加速度均方根响应

Fig. 7 Acceleration RMS response of communication tower



(a) 顺风向  
(a) Along-wind



(b) 横风向  
(b) Across-wind

图 8 0°风向角输电塔加速度均方根响应

Fig. 8 Acceleration RMS response of transmission tower without lines at attack angle of 0°

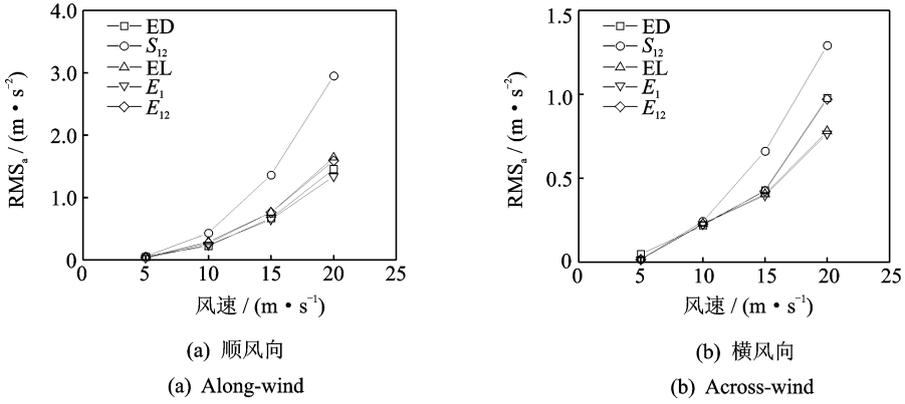


图9 90°风向角输电塔加速度均方根响应

Fig. 9 Acceleration RMS response of transmission tower without lines at attack angle of 90°

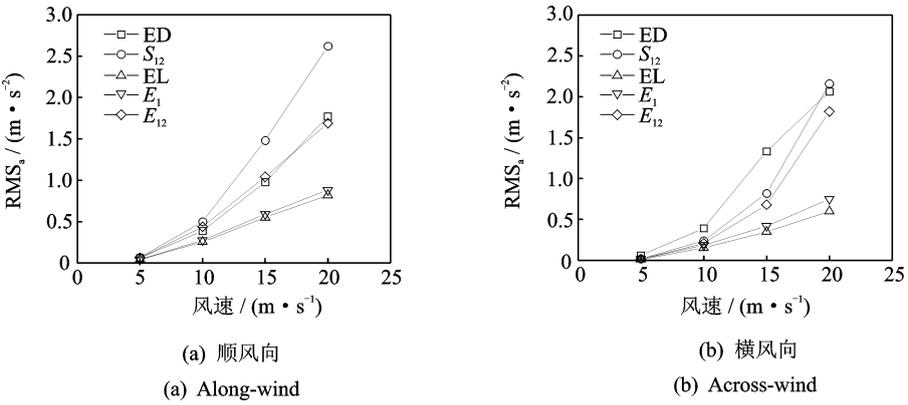


图10 0°风向角电视塔加速度均方根响应

Fig. 10 Acceleration RMS response of TV tower at attack angle of 0°

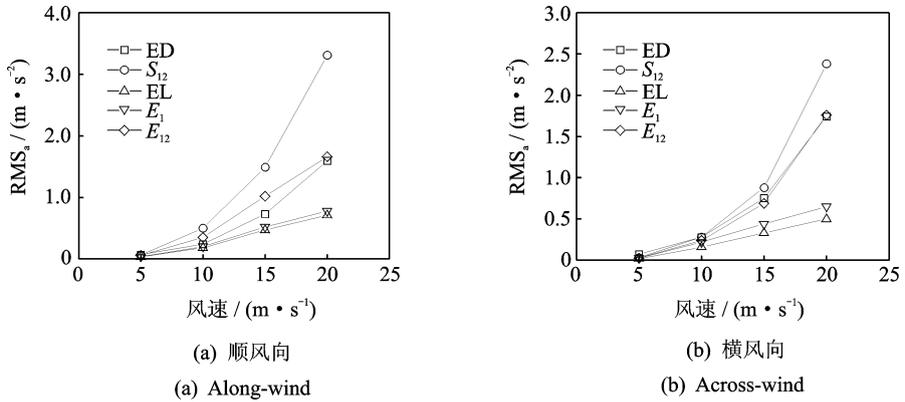


图11 90°风向角电视塔加速度均方根响应

Fig. 11 Acceleration RMS response of TV tower at attack angle of 90°

由图7~11可以看出以下几点。

1) 不管是顺风向还是横风向,当不考虑气动阻尼比时,其计算的加速度响应均方根比试验结果大。当考虑气动阻尼比,并同时考虑一阶和二阶振型的贡献后,计算结果和试验结果较接近,说明气动阻尼比对结构加速度风振响应贡献较大,不考虑气动阻

尼比的影响,结构设计趋于保守。同时,也间接验证了笔者推导的高阶振型广义荷载谱进行结构风致响应分析的方法准确性。

2) 对于通讯塔和输电塔来说,不管是顺风向还是横风向,修正后的一阶振型广义荷载计算得到的结果比线性振型计算的结果要小。对于电视塔,振

型修正后的计算结果比线性振型广义荷载计算结果要大。

3) 不管是顺风向还是横风向,二阶振型对通讯塔和输电塔顶部加速度均方根响应的贡献较小,约为10%。二阶振型对电视顶部加速度响应的贡献则大得多,随着风速的增加,二阶振型的贡献继续增大,这是由于电视塔的频率比较低且上部较柔,且随着风速的增加,结构的荷载谱峰值向高频方向移动所引起。

## 5 结 论

1) 当考虑气动阻尼比时,采用笔者提出的各阶振型广义荷载谱计算得到的结果与气弹模型风洞试验结果较接近,验证了本计算方法的准确性。

2) 气动阻尼比对格构式高耸结构风振响应的贡献十分显著,不考虑气动阻尼比的影响,会大大高估结构的风振响应,使结构设计趋于保守。

3) 当高耸结构较高、频率较低时,高阶振型对结构风振响应的贡献不可忽视。格构式电视塔的实际高度为127 m,且结构频率较低,其上部为细长的桅杆结构,其高阶振型引起的风振响应占总响应的比重非常大。

## 参 考 文 献

[1] Liang Shuguo, Zou Lianghao, Wang Dahai, et al. Analysis of three dimensional equivalent static wind loads of symmetric high-rise buildings based on wind tunnel tests[J]. Wind and Structures, 2014, 19(5): 565-583.

[2] 梁枢果,邹良浩,郭必武. 基于刚性模型测压风洞试验的武汉国际证券大厦三维风致响应分析[J]. 工程力学, 2009, 26(3): 118-127.

Liang Shuguo, Zou Lianghao, Guo Biwu. Investigation on wind-induced 3-D responses of Wuhan international stock building based on wind tunnel tests of rigid models[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(3): 118-127. (in Chinese)

[3] 金虎,楼文娟,沈国辉. X形超高层建筑扭转风荷载谱计算模型研究[J]. 空气动力学学报, 2009, 27(2): 147-153.

Jin Hu, Lou Wenjuan, Shen Guohui. Computational model investigation of torsional wind load on high-rise building with X-shape[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2009, 27(2): 147-153. (in Chinese)

[4] 王新荣,顾明,全涌. 圆角处理的断面宽厚比为2:1

的二维矩形柱体气动力系数的雷诺数效应研究[J]. 工程力学, 2016, 33(1): 64-71.

Wang Xinrong, Gu Ming, Quan Yong. Experimental study of reynolds number effects on aerodynamic forces for 2:1 rectangular prisms with various rounded corners[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(1): 64-71. (in Chinese)

[5] 顾明,张正维,全涌,等. 矩形截面高层建筑气动基底扭矩系数均方根值研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(10): 1-5.

Gu Ming, Zhang Zhengwei, Quan Yong, et al. RMS values of base torsional moment coefficients of tall buildings with square and rectangular cross-sections[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(10): 1-5. (in Chinese)

[6] Zou Lianghao, Liang Shuguo, Li Qiusheng, et al. Investigation of 3-D dynamic wind loads on lattice towers[J]. Wind and Structures, 2008, 11(4): 323-340.

[7] Holmes J. Mode shape corrections for dynamic response to wind[J]. Engineering Structures, 1987, 9(3): 210-212.

[8] Boggs D, Peterka J. Aerodynamic model tests of tall buildings[J]. Journal of Engineering Mechanics (ASCE), 1989, 115(3): 618-635.

[9] Xu Y, Kwok K. Mode shape corrections for wind tunnel tests of tall buildings[J]. Engineering Structures, 1993, 15: 387-392.

[10] Zhou Yin, Kareem A, Gu Ming. Mode shape corrections for wind load effects[J]. Journal of Engineering Mechanics (ASCE), 2002, 128(1): 15-23.

[11] 周印,顾明,江欢成,等. 高层建筑气动模型的模式形状修正[J]. 工程力学, 1999, 16(4): 33-41.

Zhou Yin, Gu Ming, Jiang Huancheng, et al. Mode shape corrections for aerodynamic model of tall buildings[J]. Engineering Mechanics, 1999, 16(4): 33-41. (in Chinese)

[12] Chen Xinzong, Kareem A. Equivalent static wind loads on buildings: new model[J]. Journal of Structure Engineering (ASCE), 2004, 130(10): 1425-1435.

[13] Chen Xinzong, Kareem A. Dynamic wind effects on buildings with 3D coupled modes: application of high frequency force balance measurements[J]. Journal of Engineering Mechanics (ASCE), 2005, 131(13): 1115-1125.

[14] Chen C, Huang Mingfeng, Kwok K. Integrated wind load analysis and stiffness optimization of tall buildings with 3D modes[J]. Engineering Structures, 2010, 32(5): 1252-1261.

- [15] Spence S, Bernardini E, Gioffre M. Influence of the wind load correlation on the estimation of the generalized forces for 3D coupled tall buildings[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011, 99(6-7): 757-766.
- [16] Bernardini E, Spence S, Gioffre M. Dynamic response estimation of tall buildings with 3D modes; a probabilistic approach to the high frequency force balance method[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2012, 104(S): 56-64.
- [17] Tse K, Hitchcock P, Kwok K. Mode shape linearization for HFBB analysis of wind-excited complex tall buildings[J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(3): 675-685.
- [18] Tse K, Yu X, Hitchcock P. Evaluation of mode-shape linearization for HFBB analysis of real tall buildings [J]. *Wind and Structures*, 2014, 18(4): 423-441.
- [19] Li A, Lam K. Correction factors for non-linear mode shapes in the base balance technique for the estimation of wind-induced dynamic responses[C] // *Proceedings of 12th International Conference on Wind Engineering*. Cairns: Australasian Wind Engineering Society, 2007: 1199-1206.
- [20] 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, Zhou 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)
- [21] 邹良浩, 梁枢果. 基于气弹模型风洞试验的输电塔气动阻尼研究[J]. *振动、测试与诊断*, 2015, 35(2): 268-275.  
Zou Lianghao, Liang Shuguo. Analysis of aerodynamic damping of transmission tower based on aero-elastic model wind tunnel[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2015, 35(2): 268-275. (in Chinese)
- [22] 王其昂, 吴子燕, 刘露. 基于 Hilbert-Huang 变换与理想带通滤波器的系统识别[J]. *振动、测试与诊断*, 2016, 36(6): 1065-1070.  
Wang Qi'ang, Wu Ziyang, Liu Lu. System identification based on HHT and ideal band-pass filter[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2016, 36(6): 1065-1070. (in Chinese)
- [23] 曹莹, 段玉波, 刘继承. Hilbert-Huang 变换中的模态混叠问题[J]. *振动、测试与诊断*, 2016, 36(3): 518-523.  
Cao Ying, Duan Yubo, Liu Jicheng. Research and application of mode-mixing in Hilbert-Huang transform [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2016, 36(3): 518-523. (in Chinese)
- [24] 张欣, 刘洋, 高丹盈. 基于第 2 代小波的有限元更新方法[J]. *振动、测试与诊断*, 2015, 35(4): 660-665.  
Zhang Xin, Liu Yang, Gao Danying. Finite element model updating and damage identification based on the second generation wavelet analysis[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2015, 35(4): 660-665. (in Chinese)
- [25] Vickery B, Clark A. Lift or across-wind response of tapered stacks[J]. *Journal of the Structural Division (ASCE)*, 1972, 98(ST1): 1-20.



**第一作者简介:** 邹良浩, 男, 1979 年 7 月生, 博士、副教授。主要研究方向为结构风工程。曾发表《Wind tunnel tests of 3D wind loads on tall buildings based on torsional motion-induced vibrations》(《Wind and Structures》2016, Vol. 23, No. 3) 等论文。

E-mail: lhzhou@whu.edu.cn

