

基于强迫振动的高层建筑扭转向气弹效应

施天翼, 邹良浩[†], 梁枢果

(武汉大学 土木建筑工程学院 湖北省城市综合防灾与消防救援工程技术研究中心, 湖北 武汉 430072)

摘要: 基于可设定振动频率和振幅的扭转强迫振动装置, 采用同步测试风洞试验方法, 测试了不同试验风速和扭转振幅情况下高层建筑模型表面各测点的风压时程与结构扭转位移时程. 推导了结构扭转气弹效应识别方法, 并进行不同风速、不同振幅和不同刚度偏心情况下的矩形高层建筑扭转向气弹效应的评估. 结果表明: 高层建筑扭转向气动刚度可以忽略不计; 扭转向气动阻尼对高层建筑响应的影响应予以考虑, 尤其是当风速达到临界值时, 气动阻尼迅速下降, 产生负气动阻尼.

关键词: 高层建筑; 风洞试验; 强迫振动; 气弹效应

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

Torsional Aero-elastic Effects of High-rise Buildings Based on Forced Vibration

SHI Tianyi, ZOU Lianghao[†], LIANG Shuguo

(Engineering Research Center of Urban Disasters Prevention and Fire Rescue Technology of Hubei Province, School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Based on torsional motion-induced device with programmable vibration frequency and amplitude, the time history of wind pressure and displacement for each measurement point on the high-rise building model surface was measured by synchronous multi-pressure sensing system in wind tunnel test. The identification method of structure torsional aero-elastic effect was derived. The torsional aero-elastic effects of rectangular high-rise buildings with different wind speeds, amplitudes and stiffness eccentricities were evaluated. The test results show that the torsional aerodynamic stiffness is negligible, but the torsional aerodynamic damping should be taken into consideration. Especially, when the wind speed reaches the critical wind speed, aerodynamic damping decreases rapidly and comes into negative aerodynamic damping.

Key words: high-rise building; wind tunnel test; forced vibration; aero-elastic effect

大量研究表明, 对于超高层建筑, 其结构设计的控制因素往往为其上部居住者的舒适度^[1-2], 即风致加速度响应的准确评估是进行结构抗风设计的前提. 随着高层建筑向千米级发展, 其基阶频率更接近风

荷载, 响应随之增大, 风与结构的耦合作用更为显著. 对于高层建筑这种小阻尼结构体系, 其风致响应对阻尼十分敏感^[3-4]. 为准确进行结构风致响应的计算, 其气弹效应的准确评估至关重要. 结构气弹效应包

* 收稿日期: 2019-02-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478369, 51008240), National Natural Science Foundation of China(51478369, 51008240)

作者简介: 施天翼(1994—), 男, 江苏苏州人, 武汉大学博士研究生

[†] 通讯联系人, E-mail: lhzhou@whu.edu.cn

括气动刚度和气动阻尼^[5],气动阻尼不仅有正气动阻尼还有负气动阻尼,忽略正气动阻尼会使得计算结果偏于保守,而负气动阻尼使得结构风致响应显著增加,忽略此部分会使得结构偏于危险.结构气动刚度直接影响结构的振动频率,尤其是负的气动刚度,使得结构振动频率降低,并使得结构对风荷载更为敏感^[6].

目前,常用于结构气弹效应,特别是气动阻尼评估的风洞试验方法主要有气弹模型和强迫振动风洞试验方法.气弹模型风洞试验方法基于气弹模型试验测试得到的结构风致响应,采用参数识别方法进行气弹效应评估.该方法模型制作复杂,各参数识别方法评估结果较离散^[7-9].强迫振动风洞试验方法通过设定结构的振动频率与振幅,可以得到稳定可靠的气弹效应评估结果,因而被广泛应用.

超高层建筑在脉动风作用下产生顺风向、横风向和扭转向三维振动,各轴向均存在气弹效应.基于气弹模型和强迫振动风洞试验方法,国内外学者对结构顺风向和横风向气弹效应进行了大量研究^[10-14],并进入工程实用阶段,但是,对扭转气弹效应的研究却较少.已有研究表明,扭转响应对高层建筑角点加速度响应的贡献不可忽视^[2,15].特别是对于刚度中心与结构质心不重合的高层建筑,扭转向风致响应与顺风向、横风向风致响应相互耦合,扭转向响应对总响应的贡献更为显著^[16-17].Katsumura和Katagiri等^[18-19]根据气弹模型风洞试验进行了长宽比为2:1的矩形建筑横风向和扭转向气弹效应评估.在此基础上,设计制作了一种扭转强迫振动装置进行相同长宽比模型扭转气弹效应评估,通过比较两者结果,证实了该强迫振动方法的可靠性,但上述研究中结构体型较少,无法得到详细的结构扭转气弹效应信息.邹良浩等^[12]基于随机减量技术对长宽比为1:2和2:1的高层建筑的横风向、顺风向和扭转向气动阻尼进行评估,但试验风速不够全面.此后,汤怀强等^[20]基于扭转强迫振动装置分析了矩形截面高层建筑三维风荷载的定性变化规律.以上分析表明,扭转气弹效应方面的研究成果并不全面,因此有必要系统地不同长宽比和偏心情况的结构扭转气弹效应研究.

本文采用汤怀强等^[20]设计制作的扭转强迫振动试验装置,基于同步测试风洞试验方法得到不同长宽比、偏心率的模型表面风压时程与结构位移时程,进行结构扭转向气动刚度和气动阻尼的评估,并

分析了不同风速、不同振幅、不同刚度偏心 and 不同长宽比的矩形高层建筑扭转向气动刚度和气动阻尼的变化规律.

1 风洞试验

本次风洞试验在武汉大学WD-1边界层风洞(3.2 m宽×2.1 m高×16 m长)完成,地面粗糙度为C类,其平均风速剖面、湍流度剖面和风速谱分别如图1和图2所示.风洞试验模型共有9种,均为矩形截面模型,模型尺寸及偏心情况见表1,偏心及风向角如图3所示.强迫振动装置与模型相连接的杆件即为转动的刚度中心,通过改变杆件的位置改变刚度中心,偏心距 e 为几何中心与刚度中心之间的距离,偏心率为偏心距与偏心方向边长之比.模型几何缩尺比均为1/400,模拟360 m高的矩形截面高层建筑.模型表面布置6层测点,每层32个测点,共192个测点,风洞试验模型如图4所示.

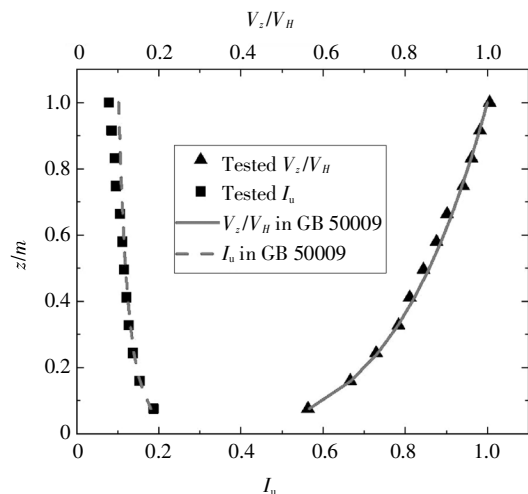


图1 平均风速和湍流度剖面

Fig.1 Profile of mean wind velocity and turbulence intensity

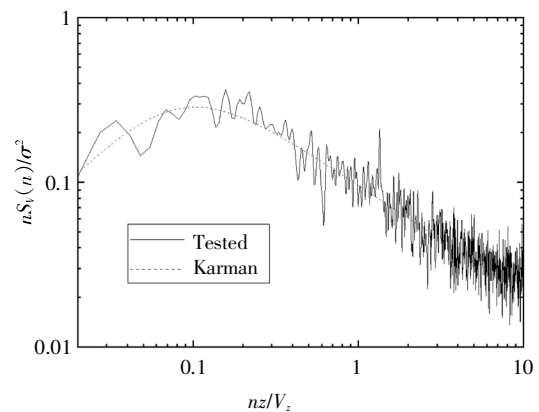


图2 归一化风速功率谱

Fig.2 Normalized wind speed spectrum

表 1 试验模型参数

Tab.1 Parameters of test models

| 模型 | 高度 H/m | 宽度 $B \times$ 长度 $D/(m \times m)$ | 长宽比 | 偏心率/% | |
|----|----------|-----------------------------------|-------|-------|-----|
| | | | | 顺风向 | 横风向 |
| 1 | 0.9 | 0.150×0.150 | 1 : 1 | 0 | 0 |
| 2 | 0.9 | 0.212×0.106 | 1 : 2 | 0 | 0 |
| 3 | 0.9 | 0.106×0.212 | 2 : 1 | 0 | 0 |
| 4 | 0.9 | 0.212×0.106 | 1 : 2 | 0 | 10 |
| 5 | 0.9 | 0.212×0.106 | 1 : 2 | 0 | 20 |
| 6 | 0.9 | 0.106×0.212 | 2 : 1 | -20 | 0 |
| 7 | 0.9 | 0.106×0.212 | 2 : 1 | -10 | 0 |
| 8 | 0.9 | 0.106×0.212 | 2 : 1 | 10 | 0 |
| 9 | 0.9 | 0.106×0.212 | 2 : 1 | 20 | 0 |

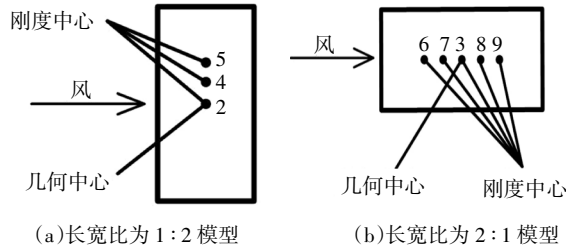


图 3 偏心模型示意图
Fig.3 Eccentricity models

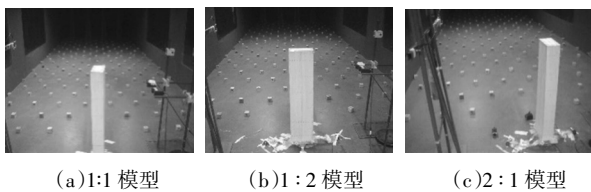


图 4 风洞试验模型
Fig.4 Wind tunnel test models

模型扭转振动频率和振幅通过强迫振动装置来实现,其基本思路是采用电机带动偏心轮转动,通过调节偏心轮的偏心距离与转速来实现结构按固定的振幅与频率进行正弦振动,图 5 所示为强迫振动装置。

表面风压测试采用美国 PSI 公司 DTCnet 电子式压力扫描阀系统,采样频率为 331 Hz,采样时间为 120 s。模型振动位移采用日本 Keyence 公司生产的 LK-G400 激光位移计测量,通过两个激光位移计测试模型边缘位移,可以计算得到模型绕刚心的转角:

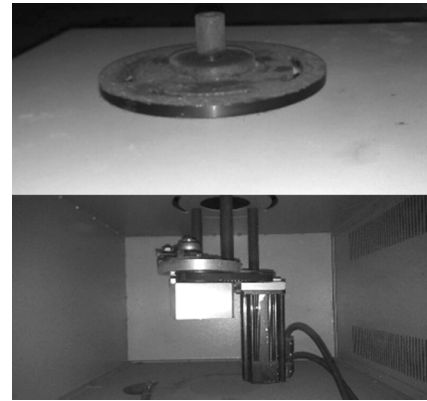


图 5 扭转强迫振动装置
Fig.5 Torsional forced vibration device

$$\varphi = \frac{x_1 - x_2}{D_{12}} \cdot \frac{180}{\pi} \quad (1)$$

式中: x_1, x_2 分别为激光位移计测得的位移; D_{12} 为测点之间的距离.图 6 所示为风速为 9 m/s 时模型 2 扭转角度时程曲线.试验时模型扭转振动频率 f 定为 6 Hz,扭转振幅分别采用 $2^\circ, 4^\circ, 6^\circ$ 和 8° .模型顶部试验风速范围为 3~15 m/s,由澳大利亚 TFI 公司生产的 Cobra Probe 100 眼镜蛇三维脉动风速探头测得.需要指出的是,在进行强迫振动风洞试验识别气动弹性参数时,必须保证风压和位移同时采样.考虑到多通道压力传感器的采集模块与激光位移计采集模块硬件上不兼容,不能同步采集,本次风洞试验采用“吹气法”^[13]进行风压与位移的同步测试.气流经过三通分流成两股气流,分别与扫描阀的一个通道和单点压力传感器连接,单点压力传感器与位移计连接在同一个数采板卡上,吹气后两套采集系统分别有一个通道采集的数据会出现脉冲峰,由脉冲点的位置可以确定风压时程和位移时程的同时采样点,设计方案如图 7 所示。

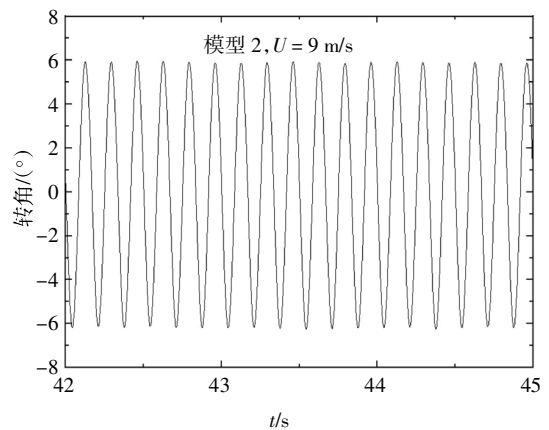


图 6 扭转强迫振动时程曲线
Fig.6 Torsional forced vibration time history curve

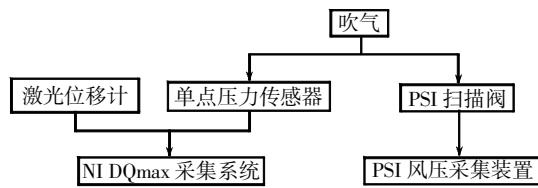


图7 同步采集设计方案

Fig.7 Design scheme of synchronous measurements

2 气弹效应分析方法

与结构水平方向运动类似，风荷载作用下扭转向运动方程可表示为：

$$I\ddot{\varphi}(t) + 2I\omega\xi_s\dot{\varphi}(t) + I\omega^2\varphi(t) = T(t). \quad (2)$$

式中： $I = \frac{\rho_s BDH(B^2 + D^2 + e^2)}{12}$ 为转动惯量， ρ_s 为高层建筑平均质量密度，钢筋混凝土结构和复合结构的质量密度一般为 180~280 kg/m³，本文的建筑质量密度取 200 kg/m³； $\omega = 2\pi f$ 和 ξ_s 分别为结构扭转圆频率和阻尼比； $T(t)$ 为由同步风压计算得到的扭矩； $\varphi(t)$ 、 $\dot{\varphi}(t)$ 和 $\ddot{\varphi}(t)$ 分别为转角、角速度和角加速度。

假设测得的扭矩由两部分组成：一部分是不稳定的随机风荷载，另一部分是由于结构振动导致风场改变而附加到结构上的荷载，即扭转向自激力。其中扭转向自激力由两部分组成，一部分是与转角同相位的刚度扭矩，另一部分是与角速度同相位的阻尼扭矩，结构受到的扭矩可以表示为：

$$T(t) = T_1(t) + T_k(t) + T_d(t) = pB^2H \left(C_1(t) + C_k \frac{\varphi(t)}{\varphi_0} + C_d \frac{\dot{\varphi}(t)}{\omega\varphi_0} \right). \quad (3)$$

式中： $T_1(t)$ 、 $T_k(t)$ 和 $T_d(t)$ 分别为风荷载扭矩、刚度扭矩和阻尼扭矩； $C_1(t)$ 、 C_k 和 C_d 分别为风荷载扭矩系数、扭转向气动刚度力系数和扭转向气动阻尼力系数； $p = \frac{1}{2}\rho_a U^2$ 为参考风压， ρ_a 为空气密度， U 为模型顶部参考风速。

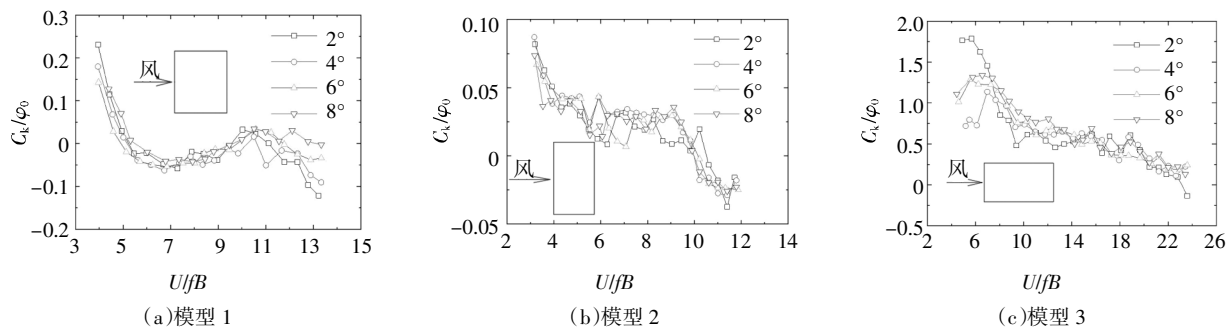


图8 扭转向气动刚度力系数随折算风速和振幅的变化

Fig.8 Variation in torsional motion-induced stiffness coefficients with regard to reduced wind speeds and amplitudes

由于强迫振动的转角 $\varphi(t) = \varphi_0 \sin(\omega t)$ ，刚度扭矩和阻尼扭矩可以从总的扭矩中分离出来，扭转向气动刚度力系数和扭转向气动阻尼力系数分别为：

$$C_k = \frac{2}{TpB^2H} \int_0^T T(t) \frac{\varphi(t)}{\varphi_0} dt, \quad (4)$$

$$C_d = \frac{2}{TpB^2H} \int_0^T T(t) \frac{\dot{\varphi}(t)}{\omega\varphi_0} dt. \quad (5)$$

式中： T 为采样时间。

将运动方程右边的刚度扭矩和阻尼扭矩移到方程左边写成扭转向气动刚度比和扭转向气动阻尼比的形式，运动方程可以改写为：

$$I\ddot{\varphi}(t) + 2I\omega(\xi_s + \xi_a)\dot{\varphi}(t) + I\omega^2(1 + \frac{K_a}{K_s})\varphi(t) = pB^2HC_1(t). \quad (6)$$

其中气动刚度比和气动阻尼比分别为：

$$\frac{K_a}{K_s} = -\frac{3}{2\pi^2} \frac{B^2}{B^2 + D^2 + e^2} \frac{\rho_a}{\rho_s} \frac{U^2}{f^2 BD} \frac{C_k}{\varphi_0}, \quad (7)$$

$$\xi_a = -\frac{3}{4\pi^2} \frac{B^2}{B^2 + D^2 + e^2} \frac{\rho_a}{\rho_s} \frac{U^2}{f^2 BD} \frac{C_d}{\varphi_0}. \quad (8)$$

式中： ξ_s 为扭转向气动阻尼比； $\frac{K_a}{K_s}$ 为扭转向气动刚度比， K_a 和 K_s 分别为扭转向气动刚度和扭转向结构刚度。

3 试验结果与分析

3.1 气动刚度

由式(4)计算得到扭转向气动刚度力系数，模型1、2和3的扭转向气动刚度力系数随折算风速和振幅的变化规律如图8所示，其纵轴为气动刚度力系数与振幅的比值。由式(7)计算得到扭转向气动刚度比，模型1、2和3的扭转向气动刚度比随折算风速和振幅的变化规律如图9所示。由图8和图9得到：

1) 扭转向气动刚度力系数与振幅的比值随折算风速的变化趋势是一致的。

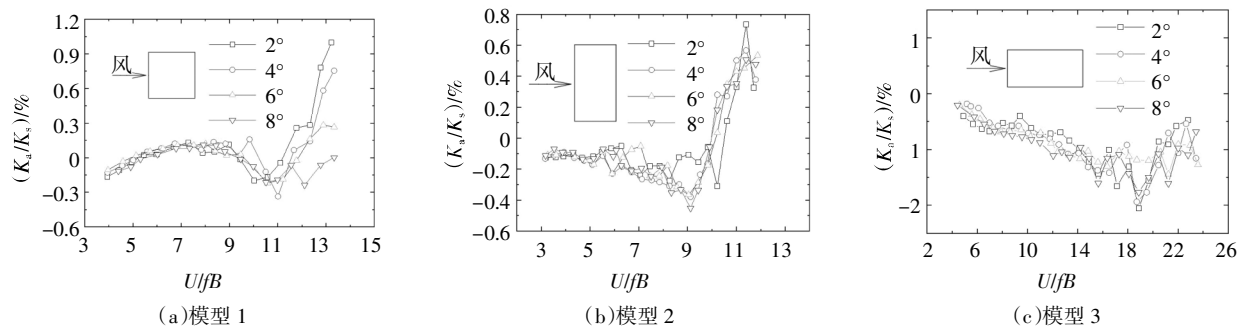


图 9 扭转向气动刚度比随折算风速和振幅的变化

Fig.9 Variation in torsional aerodynamic stiffness ratios with regard to reduced wind speeds and amplitudes

2)临界风速为扭转共振风速,文献[20]与本文工况相同,分析了模型 1、2 和 3 的三维风荷载特性,模型 1、2 和 3 的临界风速分别为 10 m/s、9.4 m/s 和 14.2 m/s. 扭转向气动刚度力系数随着折算风速的增大呈现减小的趋势,当风速达到临界风速时气动刚度力系数略微增大。

3)低风速情况下,结构的扭转向气动刚度比随风速变化基本一致,随着风速的增大,不同振幅情况下气动刚度比略显离散,但总体上是趋于一致的,因此,扭转向的气动刚度比受振幅的影响小。

4)当风速小于折算风速时,扭转向气动刚度比随折算风速增大呈下降趋势,当风速达到临界风速

时,扭转向气动刚度比迅速增大.窄边迎风情况下结构扭转气动刚度比相对要大一些,但是,对于 3 种长宽比的模型,不同风速、不同振幅下模型的气动刚度比均小于 3%,对结构振动频率的影响较小,可忽略不计。

3.2 气动阻尼

由式(5)计算得到扭转向气动阻尼力系数,模型 1、2 和 3 的扭转向气动阻尼力系数随折算风速和振幅的变化规律如图 10 所示,其纵轴为气动阻尼力系数与振幅的比值.由式(8)计算得到扭转向气动阻尼比,模型 1、2 和 3 的扭转向气动阻尼比随折算风速和振幅的变化规律如图 11 所示.由图 10 和图 11 得到:

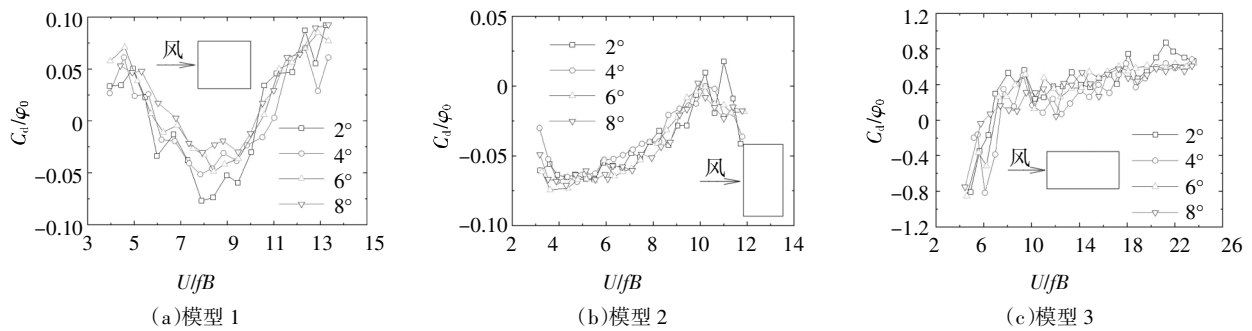


图 10 扭转向气动阻尼力系数随折算风速和振幅的变化

Fig.10 Variation in torsional motion-induced damping coefficients with regard to reduced wind speeds and amplitudes

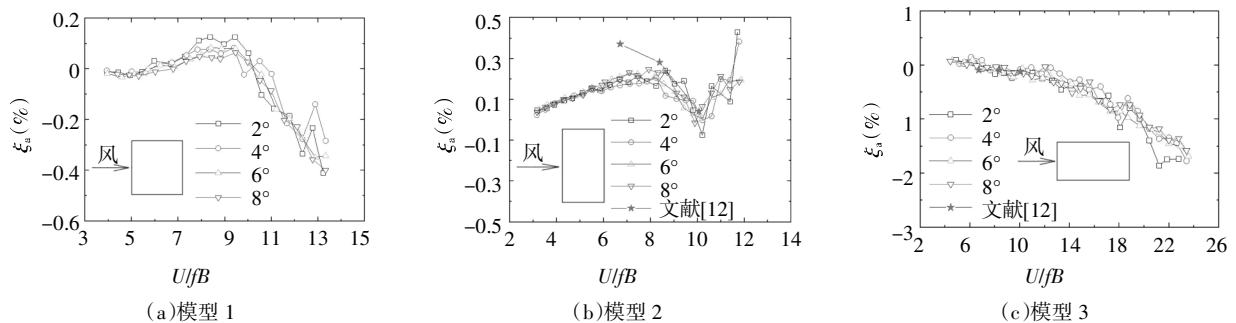


图 11 扭转向气动阻尼比随折算风速和振幅的变化

Fig.11 Variation in torsional aerodynamic damping ratios with regard to reduced wind speeds and amplitudes

1)扭转向气动阻尼力系数与振幅的比值随折算风速的变化趋势是一致的。

2)模型1的气动阻尼力系数在低风速情况下呈下降趋势,风速达到临界风速后开始上升.模型2和3的气动阻尼力系数随风速增大呈上升趋势。

3)扭转向气动阻尼在低折算风速时十分接近,随着风速升高略微发散,但总体变化趋势还是一致的,说明扭转向气动阻尼比受振幅影响小。

4)模型1和2的气动阻尼比较小且在低风速均为正值,但当风速达到临界风速时,气动阻尼比迅速下降,变为负气动阻尼,模型1的气动阻尼比最大约为0.2%,最小约为-0.4%,模型2的气动阻尼比最大约为0.5%,最小约为-0.2%,气动阻尼比对结构响应影响不大.对于长宽比为2:1的模型,随着风速的增大,气动阻尼比逐渐减小,最小可接近-2%,大大减小了结构的总阻尼比,在响应分析时有必要考虑扭转向气动阻尼的影响.这说明,在窄边迎风时,结构扭转向气动阻尼比应引起足够的重视。

5)对于模型1、2和3,气动阻尼比的变化规律有很大差异,长宽比对扭转向的气动阻尼比影响很大.这可能是由于模型长宽比不同,分离与再附发生与否及发生的折减风速不同造成的,模型3的分离再附效应显著,而模型1和2在结构上不发生再附。

6)文献[12]的结果为气弹模型测得的扭转向气动阻尼比,由于风场不同以及模型参数略有不同使得结果略有差异,但总体上与本文强迫振动测得的结果是一致的,验证了强迫振动方法的有效性。

3.3 刚度偏心对气弹效应的影响

对于偏心情况,以表1和图3所示的左右偏心和前后偏心两种情况进行分析.长宽比为1:2的模型2、4和5的气动刚度比和气动阻尼比随折算风速的变化规律如图12所示,其振幅为6°.当偏心率为10%时,气动刚度比和气动阻尼比变化不大;当偏心距为20%时,气动刚度比显著减小,气动阻尼比显著增大。

长宽比为2:1的模型3、6、7、8和9的气动刚度比和气动阻尼比随折算风速的变化规律如图13所示,其振幅为6°.在低风速情况下,偏心对气动阻尼比影响不大,随着风速的增大,偏心对气动阻尼比的影响逐渐增大.随着刚度中心从前向后移动,负阻尼比和负刚度比均有明显增加,需要重视结构向后偏心引起的负气动刚度比和负气动阻尼比增加,负气动刚度比最大达到-6%,而负气动阻尼比最大达到-3%。

刚度偏心对气弹效应影响很大,可能是由于偏

心振动改变了旋涡脱落与再附,因而随刚度偏心的增大,气弹效应的改变也相应增大。

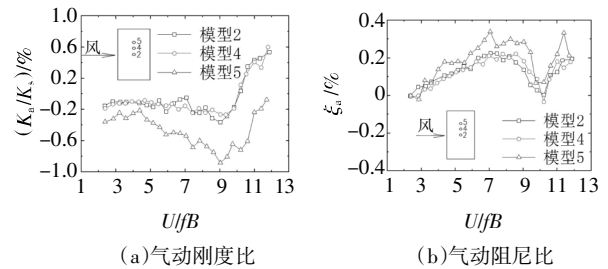


图12 扭转向气弹效应随刚度偏心和风速的变化(长宽比1:2)

Fig.12 Variation in torsional aerodynamic effects with regard to stiffness eccentricities and wind speed (side ratio 1:2)

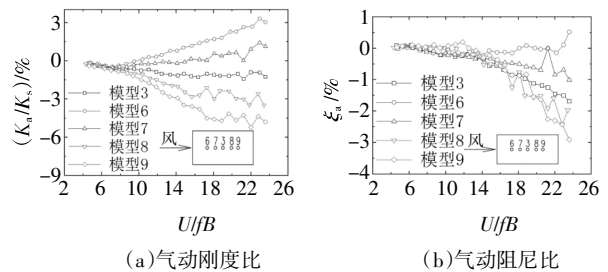


图13 扭转向气弹效应随刚度偏心和风速的变化(长宽比2:1)

Fig.13 Variation in torsional aerodynamic effects with regard to stiffness eccentricities and wind speed (side ratio 2:1)

4 结论

本文基于扭转强迫振动风洞试验对不同长宽比的矩形高层建筑气弹效应进行了系统的研究,分析不同风速、不同振幅、不同刚度偏心和不同长宽比矩形高层建筑扭转向气动刚度力系数、扭转向气动阻尼力系数、扭转向气动刚度比和扭转向气动阻尼比的变化情况,由此得出了矩形高层建筑扭转向气弹效应随风速、振幅和刚度偏心的变化规律.得出了以下结论:

- 1)给出了不同长宽比的高层建筑扭转向气弹效应随风速的变化规律,不同长宽比的高层建筑气弹效应差异显著。
- 2)不同振幅情况下扭转向气动刚度比和气动阻尼比随风速变化的趋势是一致的,气动刚度比和气动阻尼比受高层建筑响应的影响小。
- 3)高层建筑的扭转向气动刚度比较小,基本可忽略其影响,但扭转向气动阻尼比不同:对于长边迎风情况,其扭转气动阻尼比较小,其绝对值最大不超

过0.5%,而在窄边迎风情况以及偏心结构在后偏心情况下,气动阻尼比较大,对结构响应的贡献不可忽视,尤其是当风速接近和达到临界风速时,将产生负气动阻尼。

4)结构刚度偏心对扭转向气弹效应有显著影响,在进行结构设计和响应计算时应当充分考虑偏心对结构气弹效应的影响。

参考文献

- [1] JOHANN F A, CARLOS M E N, RICARDO F L S. Wind-induced motion on tall buildings: a comfort criteria overview [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, 142: 26—42.
- [2] 汪梦甫,梁晓婷. 带伸臂桁架减振层高层结构抗风效果分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(3): 1—7.
WANG M F, LIANG X T. Analysis on wind resistance effect of high rise building with damped outrigger storeys [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2018, 45(3): 1—7. (In Chinese)
- [3] SATAKE N, SUDA K, ARAKAWA T, *et al.* Damping evaluation using full-scale data of buildings in Japan [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(4): 470—477.
- [4] 黄东梅,何世青,朱学,等. 表面粗糙度对超高层建筑风荷载与风振响应的影响 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(9): 41—51.
HUANG D M, HE S Q, ZHU X, *et al.* Influence of surface roughness on wind load and wind-induced response of super-tall building [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2017, 44(9): 41—51. (In Chinese)
- [5] STECKLEY A, VICKERY B J, ISYUMOV N. On the measurement of motion induced forces on models in turbulent shear flow [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 36: 339—350.
- [6] WANG L, LIANG S, HUANG G, *et al.* Investigation on the instability of vortex induced resonance of high-rise buildings [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 175: 17—31.
- [7] 王磊,梁枢果,邹良浩,等. 超高层建筑多自由度气弹模型的优势及制作方法 [J]. *振动与冲击*, 2014, 33(17): 24—29.
WANG L, LIANG S G, ZOU L H, *et al.* Advantages and making method of a super high-rise building's multi-DOF aero-elastic model [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(17): 24—29. (In Chinese)
- [8] 全涌,顾明. 方形断面高层建筑的气动阻尼研究 [J]. *工程力学*, 2004, 21(1): 26—30.
QUAN Y, GU M. Wind tunnel test study of aerodynamic damping of super highrise buildings [J]. *Engineering Mechanics*, 2004, 21(1): 26—30. (In Chinese)
- [9] 吴海洋,梁枢果,邹良浩. 基于小波分析的高层建筑气动阻尼评估方法 [J]. *振动与冲击*, 2008, 27(8): 93—96.
WU H Y, LIANG S G, ZOU L H. Method of evaluating aerodynamic damping of tall buildings based on wavelet analysis [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(8): 93—96. (In Chinese)
- [10] VICKERY B J, STECKLEY A. Aerodynamic damping and vortex excitation on an oscillating prism in turbulent shear flow [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1993, 49(1): 121—140.
- [11] COOPER K R, NAKAYAMA M, SASAKI Y, *et al.* Unsteady aerodynamic force measurements on a super-tall building with a tapered cross section [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 72(SC): 199—212.
- [12] 邹良浩,梁枢果,顾明. 高层建筑气动阻尼评估的随机减量技术 [J]. *华中科技大学学报(城市科学版)*, 2003, 20(1): 30—33.
ZOU L H, LIANG S G, GU M, *et al.* Evaluation of aerodynamic damping in wind-induced vibration of tall buildings by random decrement technology [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition)*, 2003, 20(1): 30—33. (In Chinese)
- [13] 宋微微,梁枢果,邹良浩,等. 超高层建筑气动弹性效应双向受迫振动风洞试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(11): 84—91.
SONG W W, LIANG S G, ZOU L H, *et al.* Investigation on wind-induced aero-elastic effects of super high-rise building by bi-axial forced vibration wind tunnel test [J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(11): 84—91. (In Chinese)
- [14] CHEN Z S, TSE K T, KWOK K C S. Unsteady pressure measurements on an oscillating slender prism using a forced vibration technique [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2017, 170: 81—93.
- [15] 宋微微,梁枢果,毛家雄. 矩形截面高层建筑三维耦合风振响应的风洞实验研究 [J]. *武汉理工大学学报*, 2014, 36(4): 106—111.
SONG W W, LIANG S G, MAO J X. Wind tunnel test study on 3-D coupled wind-induced response of rectangular tall buildings [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2014, 36(4): 106—111. (In Chinese)
- [16] 吴鹏,邹良浩,梁枢果,等. 矩形超高层建筑扭转风振响应的风洞试验研究 [J]. *武汉理工大学学报*, 2014, 36(10): 89—93.
WU P, ZOU L H, LIANG S G, *et al.* Wind tunnel test on torsional wind-induced dynamic responses of rectangular super-high-rise building [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2014, 36(10): 89—93. (In Chinese)
- [17] 唐意,顾明,金新阳. 偏心超高层建筑的风振研究 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(2): 178—182.
TANG Y, GU M, JIN X Y. Research on wind-induced response of structurally asymmetric tall buildings [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2010, 38(2): 178—182. (In Chinese)
- [18] KATSUMURA A, KATAGIRI J, MARUKAWA H, *et al.* Effects of side ratio on characteristics of across-wind and torsional responses of high-rise buildings [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, 89(14): 1433—1444.
- [19] KATAGIRI J, OHKUMA T, MARIKAWA H. Motion-induced wind forces acting on rectangular high-rise buildings with side ratio of 2 [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, 89(14): 1421—1432.
- [20] 汤怀强,邹良浩,梁枢果,等. 基于扭转强迫振动风洞试验的矩形截面高层建筑三维风荷载研究 [J]. *振动与冲击*, 2016, 35(7): 116—123.
TANG H Q, ZOU L H, LIANG S G, *et al.* Three-dimensional wind loads of rectangular tall buildings based on torsional forced vibration wind tunnel tests [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(7): 116—123. (In Chinese)