

方形超高层建筑风振轨迹及耦合效应试验研究

马文勇^{1,2,3}, 张璐¹, 黄铮汉¹, 林华⁴, 李玉学¹

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 河北省风工程和风能利用工程技术创新中心, 河北 石家庄 050043;

3. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043;

4. 上海市房地产科学研究院, 上海 200031)

摘要:方形超高层建筑在2个水平方向的自振特性接近, 强风作用下2个水平方向的风致振动会存在一定的耦合效应。为研究此耦合效应对超高层建筑风致振动的影响, 进行了方形超高层建筑气弹模型风洞试验, 分别测试了均匀流场和边界层风场下结构的风致振动响应。首先, 通过限制结构顺风向位移, 研究了结构顺风向振动对其横风向振动响应的影响; 然后, 分析了不同来流风向对结构顺、横风向风致振动的影响。结果表明, 方形超高层建筑以横风向振动为主, 结构顶部的振动轨迹为横风向占优的椭圆形; 在限制了顺风向位移后, 结构的横风向振动最大振幅并未相应减小; 来流湍流会增大结构的顺风向最大位移响应, 同时减小了结构的横风向最大位移响应。从振幅的概率分布来看, 当来流垂直于结构立面时, 方形超高层建筑的风致响应最大; 相比均匀来流情况, 边界层风场下的超高层建筑的最大风致响应更小。

关键词:超高层建筑; 气弹模型; 风洞试验; 振动轨迹; 耦合效应

中图分类号: TU973⁺.213 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2021)03-0008-07

0 引言

风荷载及风致振动是超高层建筑设计需要考虑的主要因素^[1-3]。过大的振动不仅会对结构的安全性造成潜在的威胁, 也会影响其适用性^[4-6]和耐久性。风致振动常常采用顺风向、横风向和扭转向来描述, 这种描述方法更容易区分诱发结构振动的机理。一般而言, 顺风向的振动以抖振为主; 横风向振动主要是涡激振动, 特定风速下也会诱发振动更为明显的涡激共振, 此时高层建筑的横风向振动往往更为显著^[7]。对方形、矩形、三角形、圆形、Y形、平行四边形等不同截面的高层建筑风荷载进行了大量的风洞试验, 发现方形高层建筑的横风向脉动基底弯矩系数均比其他截面大^[8-11], 故方形截面横风向响应更不容忽视。对于方形超高层建筑, 结构水平2个方向的一阶自振频率接近, 2个方向的振动存在耦合现象, 这种耦合效应对结构的最大振幅估计有显著的影响, 也是方形、圆形高层抗风设计需要关注的主要问题之一, 但目前很多研究较少涉及结构顺风向和横风向的耦合问题。

另外, 从钝体空气动力学的角度分析, 高层建筑可视为一端固定另一端自由的有限长钝体, 其来流风的湍流特性、尾流结构对其整体所受风荷载及运动情况影响极大。不同湍流边界层中方柱, 湍流度大的其两侧的脉动升力系数周期性反而减弱^[12]; 刘奕等^[13]研究9种不同长宽比的矩形截面高层建筑受湍流度影响, 结果发现长宽比在1到2的建筑物风压及气动力受湍流度的影响最大, 方形截面属于受湍流特性影响较大的截面类型; 风向角对风致振动特性是有影响的, Cui et al^[14]对0°、22.5°、45°3个风向角下振幅及漩涡脱落频率随风速的变化进行研究, 各风向角下的结果有一定区别, 目前风向角对气动力特性、风荷载及基底弯矩等的影响都有研究, 但并不全面。在采用风洞试验方法获得高层建筑的顶部响应方

收稿日期: 2021-05-23 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20210114

基金项目: 河北省自然科学基金(E2019210031); 中央引导地方科技发展资金项目(206Z5401G)

作者简介: 马文勇(1981—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为结构风荷载及风致振动。E-mail: ma@stdu.edu.cn

马文勇, 张璐, 黄铮汉, 等. 方形超高层建筑风振轨迹及耦合效应试验研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2021, 34(3): 8-14.

面,气弹模型风洞试验理论上可以更直接、更准确地测得结构的风致响应,更真实地反映高层建筑实际的振动以及流固耦合效应。为了明确方形超高层建筑(水平 2 方向自振频率相同)顺风向和横风向振动的耦合效应,利用气弹模型风洞试验,研究了方形超高层建筑顶部风致响应的特征,讨论了来流条件和振动方向对结构风致响应轨迹的影响,通过分析振幅的概率密度分布,给出了结构模型顶部各个方向的风致响应特征,可为类似超高层建筑风致响应的预测及抗风设计提供参考。

1 试验概况

气弹模型风洞试验在石家庄铁道大学 STDU-1 风洞实验室的低速试验段进行,该试验段高 3 m,宽 4.4 m,长 24 m,空风洞的风速在 1~30 m/s 范围内连续可调,23 m/s 风速对应的背景湍流度小于 1%,断面速度不均匀性小于 1%。

1.1 气弹模型的设计及制作

试验模型对应原型为 300 m 高、截面边长 50 m 的方形超高层建筑。试验几何缩尺比为 1 : 500,对应模型尺寸为 100 mm × 100 mm × 600 mm。模型的骨架由直径为 8 mm 钢立柱和 4 块边长 100 mm、厚 6 mm 铝板连接而成,铝板间距 130 mm,最顶层铝板距离模型顶部 80 mm。模型外部使用 1 mm 厚的巴沙木包裹,为尽量减少木板对模型整体振动刚度的贡献,木板之间设置 4 mm 左右的缝隙,并用柔性胶带密封。模型示意图见图 1,由结构动力学分析可得模型的理论一阶自振频率为 6.0 Hz。

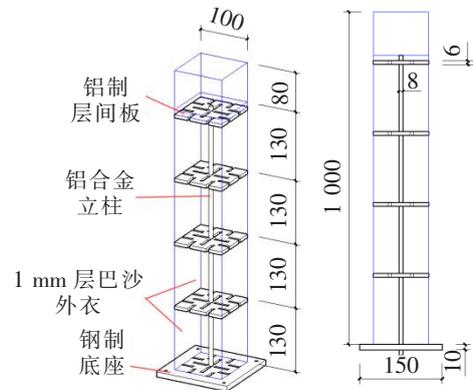


图 1 模型示意图(单位:mm)

1.2 模型的安装与自振特性

试验模型安装示意图见图 2,试验中阻塞比为 0.45%。来流风速采用眼镜蛇探头(Cobra Probe)测试,安装在模型上游侧 60 cm 高度处;采用 2 个 LS-H21 型号激光位移计对结构 250 m 高度处的位移进行测量。激光位移计和眼镜蛇探头的安装位置见图 2,图 2 还给出了风向角 α 和结构体轴的定义。

在模型顶部分别施加 x 方向和 y 方向的初始位移,由于模型的 2 个垂直方向的频率几乎接近,在一个方向施加初位移的过程中很可能导致 2 个方向均产生振动,出现振动能量传递的“拍”效应,根据全涌^[15]提出的方法,通过对模型 2 个方向振幅进行平方后开平方来消除“拍”现象,可得相应的结构位移自由衰减曲线如图 3。采用傅里叶变换分析,可得模型在 x 和 y 的自振频率 f 分别为 5.56 Hz 和 5.58 Hz,阻尼比 ξ 分别为 0.31% 和 0.32%,该自振频率略低于有限元模型分析的自振频率,这可能是模型制作中无法完全做到刚性连接所致。

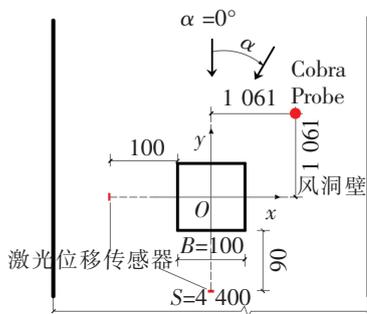


图 2 模型安装俯视图(单位:mm)

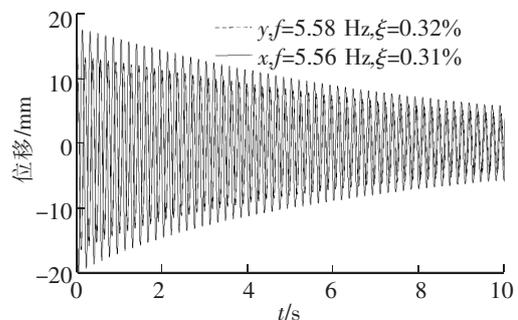


图 3 自由衰减曲线

1.3 试验风场及工况

试验分别采用了均匀流场和大气边界层风场(文献[16]中的 B 类风场)2 类风场,其中 B 风场的风剖面、湍流度剖面和 300 mm 高度处的风速谱见图 4 和图 5,图中 $S_u(n)$ 为风速谱, v 为风速均方根, n 为频率, Z_g 为模型顶部高度。

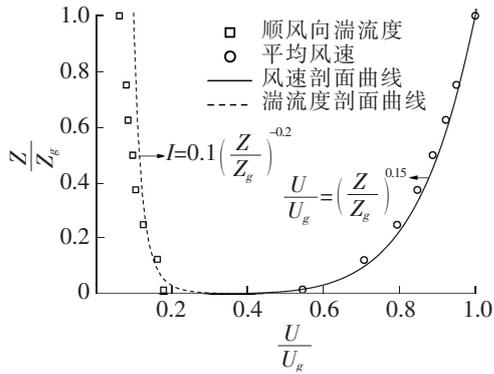


图 4 平均风速与湍流度剖面

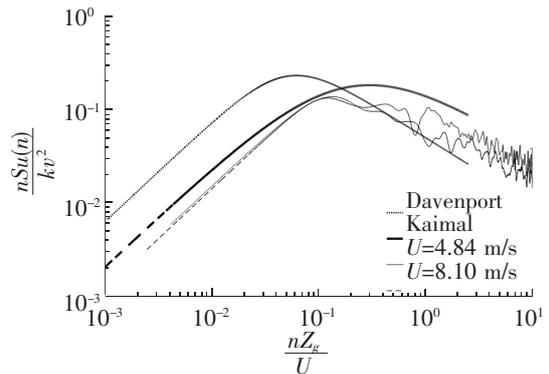


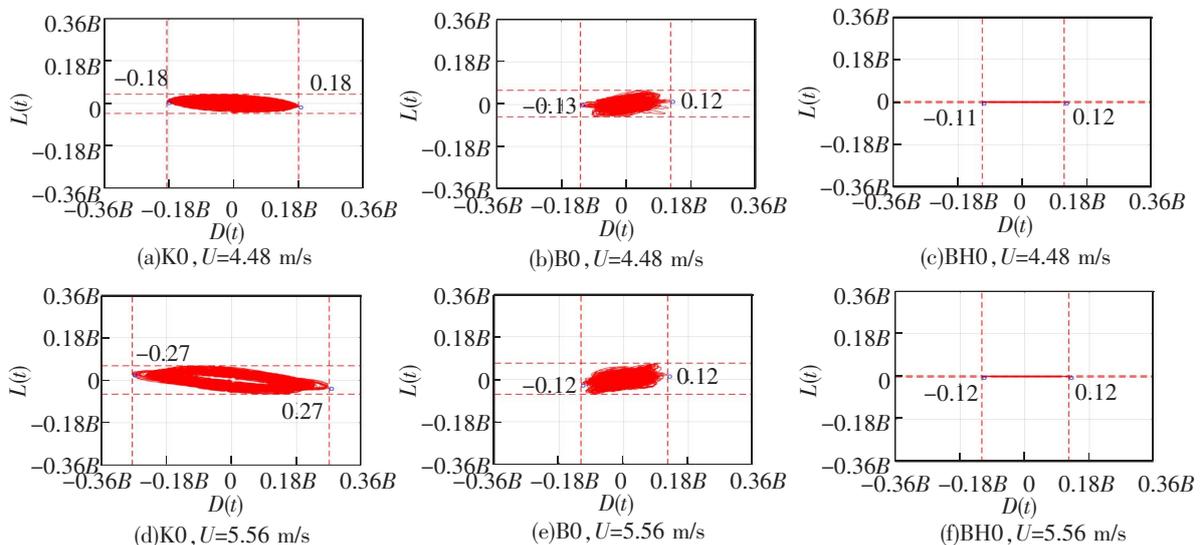
图 5 结构顶部顺风向脉动风速谱

试验来流平均风速 U 取 $2.44 \sim 8.1 \text{ m/s}$, 共 9 个风速; 风向角 α (定义见图 2) 取 $0^\circ \sim 45^\circ$, 间隔为 15° 。由于风洞在控制小风速下的风速测量误差较大, 因此主要选取风速 $4.84 \sim 8.10 \text{ m/s}$ 范围内的 5 个风速结果进行分析。为单独研究结构横风向的振动特性, 在 $\alpha = 0^\circ$ 风向角下, 试验中采用细长拉线限制了模型顶部的顺风向位移, 将拉线一端固定在模型顶部, 另一端固定在模型上游 5 m 处, 达到限制顺风向振动的同时, 减小拉绳对横风向振动的影响。为了方便描述, 用 $K0$ 表示均匀流工况, $B0$ 表示 B 类风场, $BH0$ 表示顺风向位移受限的工况 (B 类风场)。

2 实验结果

2.1 振动轨迹分析

图 6 给出了 $\alpha = 0^\circ$ 风向角时 4 个来流风速 ($4.84, 5.56, 6.42, 6.69 \text{ m/s}$) 在 3 种工况下结构顶部的振动轨迹, 采用基于模型宽度 B 的无量纲位移 $D(t)$ 和 $L(t)$, 其中 $D(t)$ 表示横风向位移时程 (当 $\alpha = 0^\circ$ 时, 横风向即为 x 方向), $L(t)$ 表示顺风向位移时程 (当 $\alpha = 0^\circ$ 时, 顺风向即为 y 方向)。2 个相互垂直且同方向的简谐振动合成的合振动轨迹会随着 2 个方向的频率比的变化而变化, 椭圆形的轨迹是典型的 2 个方向互相垂直、频率相同的运动轨迹。对于研究的方形超高层建筑, 横风向和顺风向的自振频率相同, 振动轨迹近似为椭圆的形状, 2 个方向的振幅决定了椭圆的长短轴之比, 相位差决定了椭圆的倾斜程度。对高层建筑, 当顺风向位移不受限时, 结构顶部的位移轨迹呈现近似椭圆形, 如图 6 所示, 这与文献 [18] 的研究结果相吻合。而 $B0$ 的 2 个方向的振动存在一定的随机性, 故其振动轨迹的方向也存在一定的随机性, 没有得到像 $K0$ 一样理想的椭圆形, 但轨迹的整体方向也反映了其振动规律。



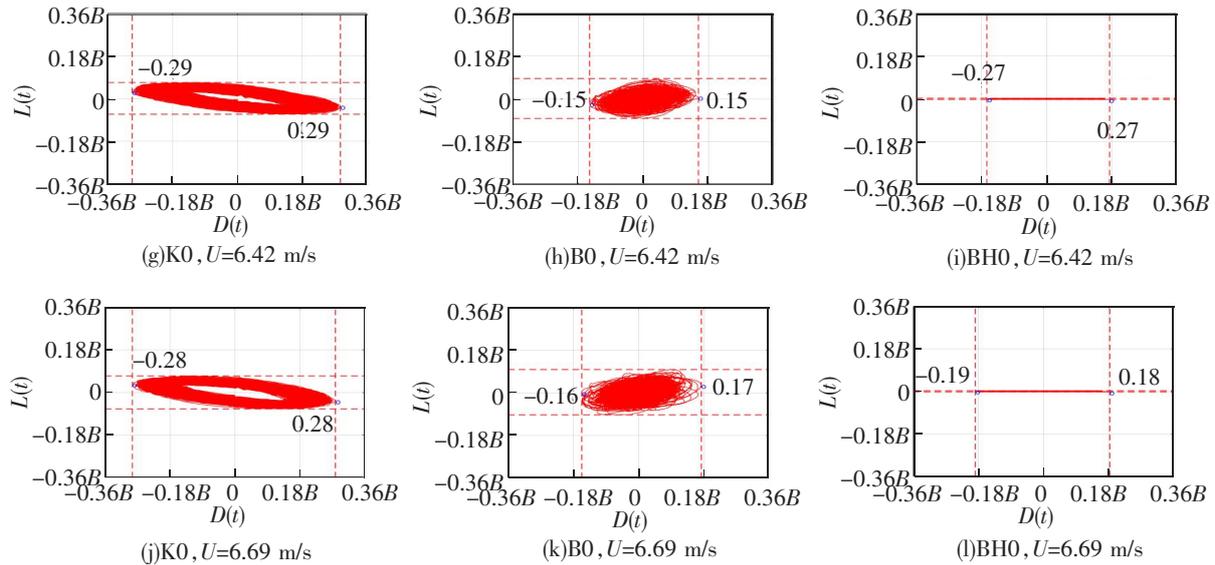


图 6 不同工况下模型顶部的振动轨迹

由图 6 可知,从振动的位移轨迹看,即使不限制顺风向位移,在大气边界层风场(B0)和均匀流场(K0)下顶部的位移仍然是以横风向为主,其中均匀流场下表现出更明显的横风向占优特性,这与文献[17]中随着超高层建筑高度的不断提高,横风向的响应逐渐超过顺风向响应的结论是吻合的。K0 振幅明显大于 B0 的响应主要是由于边界层风场下,风速随着高度下降而降低;且来流的湍流度比均匀流场高,来流湍流可以减弱漩涡脱落的强度,从而减小其横风向响应。从 B0 和 K0 工况下的轨迹来看,K0 工况下的椭圆长轴与短轴比更大,并且表现出更理想的椭圆轨迹。B0 工况下的顺风向振幅 $L(t)/B$ 稍大于 K0 工况下的对应值(如图 6 椭圆的外轮廓),虽然 B0 工况下顺风向振幅的增大相对于 K0 工况下的对应值有限,但考虑到 B0 工况的模型中下部顺风向的风速小于 K0 工况,由此说明顺风向湍流对顺风向振动的增大作用很明显。

值得说明的是,当顺风向位移受限时,BH0 工况下的横风向振幅与对应风速的 B0 工况下的振幅相当,即约束顺风向位移并不会影响结构的横风向振动。这充分说明,结构振动时以横风向涡激力激发的横风向振动为主,顺风向的振动主要由 2 个因素引起:①漩涡脱落引发的振动, K0 工况的顺风向振动可以说明该问题;②来流湍流引起的顺风向振动,该因素可以由 B0 顺风向振幅较 K0 的增大效应说明。

此外,相对 K0 和 BH0 2 种工况,B0 工况下的振动轨迹更混乱。虽然 3 种工况下,不是每个周期都能达到最大振幅,其振动轨迹还表现出了一定的随机性,但是 B0 工况下这种特征更为明显,此种更强的随机性可能是由于来流湍流引起,这对评价结构疲劳和舒适度等有重要意义,因此有必要对振幅的概率密度分布进行进一步分析。

2.2 振幅的概率密度分布

图 6 的振动轨迹表明,结构的风致振动幅值具有一定的随机性,即每个周期的振幅是不同的。为了反映结构在振动过程中振幅的概率分布,本节通过提取振动时程中每个周期的振幅,统计振幅的分布,得到振幅的概率密度分布。图 7 给出了 $\alpha=0^\circ$ 风向角、 $U=8.1 \text{ m/s}$ 时,K0,B0 和 BH0 3 种工况下,横风向无量纲振幅 A_d/B 、顺风向无量纲

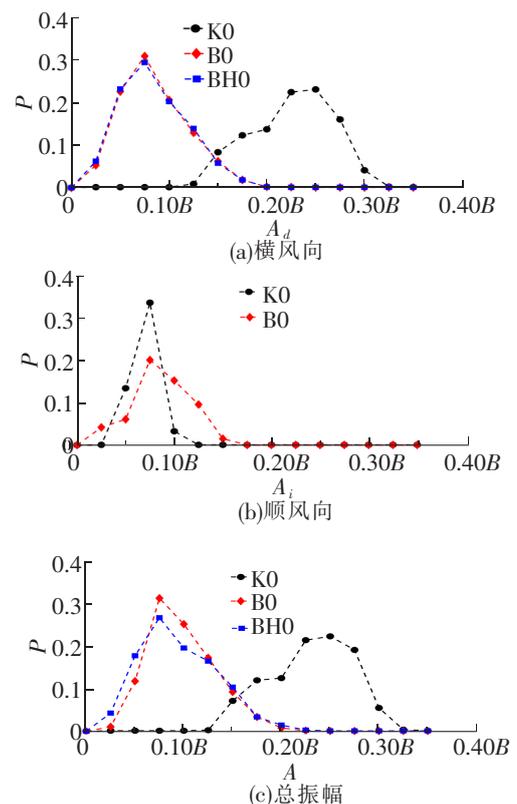


图 7 结构振幅概率密度分布

振幅 A_t/B 和总振幅 A/B 的概率分布 P 。由图 7 可见:

(1)对于 BH0、B0 和 K0 3 种工况的总振幅(图 7(c))来说,B0 和 K0 横风向和顺风向耦合效应使结构的和振幅变大。K0 工况不仅最大振幅(约为 $0.33B$)较其他 2 种工况大(其他 2 种工况下约为 $0.23B$),其振幅分布范围和对应的振幅也较大(在 $0.13B \sim 0.33B$ 之间),而 BH0 和 B0 工况对应的振幅范围则在 $0 \sim 0.23B$ 之间。以上分布情况表明,K0 工况的结构振动持续维持大振幅振动状态,而 BH0 和 B0 工况的结构振幅则时大时小。若以总振幅 $0.15B$ 作为基准,则 K0 工况的超越概率为 92.8% ,而 BH0 和 B0 工况则分别为 15.1% 和 13.6% 。

(2)BH0 和 B0 工况的总振幅概率分布差距较小,两者在横风向振幅的概率分布上也几乎没有差别(图 7(a)),这说明结构顺风向振动不仅对横风向振动没有影响,而且对总响应的影响也很小。由图 7(b)中结构顺风向振幅概率分布可知,相比于均匀流场下的分布,边界层风场下振幅分布在更宽的范围内,说明边界层风场下的顺风向最大振幅更大且振动随机性更强。

(3)从总振幅分布概率上看(图 7(c)),对于均匀流场 K0,出现频率最高的振幅为 $0.25B$,最大振幅为 $0.33B$,高概率振幅大约为最大振幅的 76% ;对于 B0 风场,出现频率最高的振幅约为 $0.075B$,最大振幅约为 $0.23B$,高概率振幅约为最大振幅的 33% 。可见,对于边界层风场下振幅的更强随机性可能对结构振动有利,因为其可以减小结构达到最大振幅的概率。

2.3 风向角对风致振动的影响

由上述讨论可知,方形超高层建筑的风致振动以横风向为主,这种振动主要是由于漩涡脱落引起的横风向周期性力引起的。由于方形截面在不同风向角下的漩涡脱落状态也不同,因此风向角对方形超高层建筑的风致振动会有较明显的影响。图 8 给出了 $U=8.1 \text{ m/s}$ 风速时, $\alpha=0^\circ、15^\circ、30^\circ$ 和 45° 风向角下,大气边界层风场(B 类地貌)结构的振动轨迹。为了进一步说明风向角对振幅的影响,图 9 给出了图 8 对应工况下的振幅概率分布。

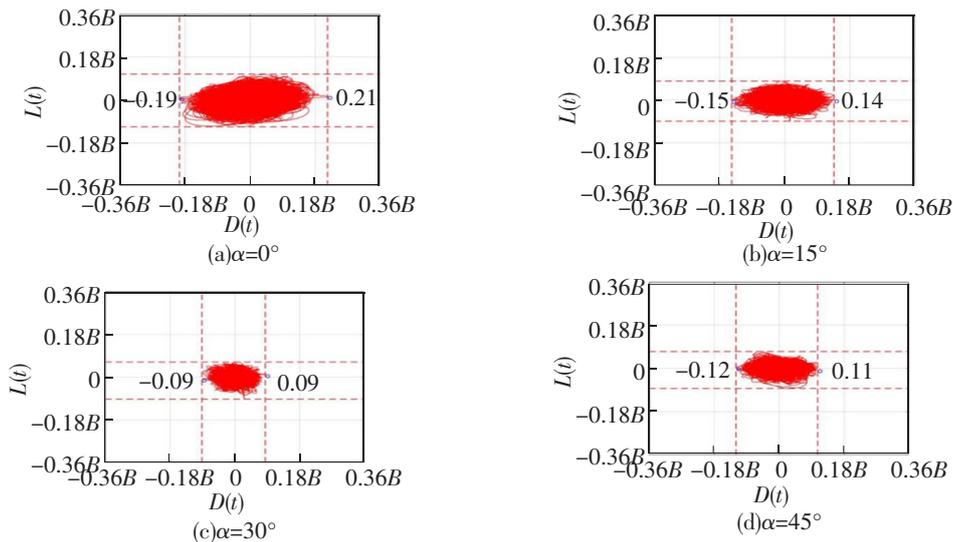


图 8 不同风向角下结构振动轨迹

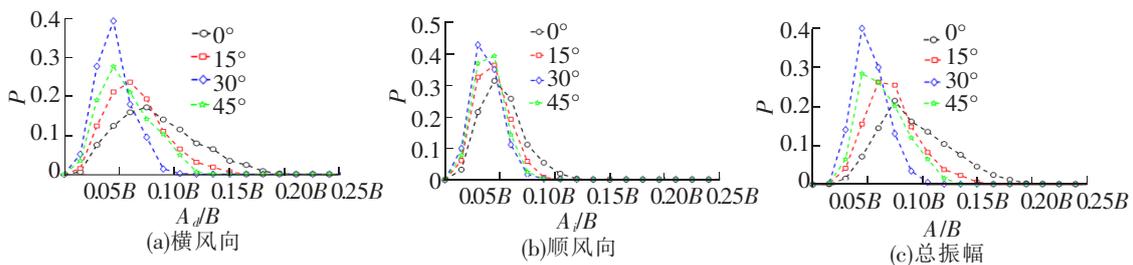


图 9 结构振幅概率密度分布

由图8可见,总体上,风向角对结构的振动轨迹最明显的影响主要体现在:随着风向角的变化,结构的最大振幅变化明显, $\alpha=0^\circ$ 时的最大横风向位移可以达到 $0.21B$;而同样风速下, $\alpha=30^\circ$ 对应的最大横风向位移仅为 $0.09B$ 。此外,不同风向角下横风向和顺风向最大位移的比值不同,在图8中反映为椭圆形轨迹的长轴和短轴比不同。

从总振幅的分布(图9(c))可以看出,风向角对振幅的概率密度分布有明显的影响; 0° 风向角最大振幅最大、 15° 风向角次之、 30° 风向角对应的最大振幅最小, 0° 风向角下振幅的分布范围更广。上述规律在横风向振幅(图9(a))和顺风向振幅分布(图9(b))中也有反映,其中风向角对横风向的振幅分布影响明显。

上述风向角对振幅的影响规律与方形断面气动特性随着风向角的变化规律完全吻合,即 $12^\circ\sim 15^\circ$ 风向角是方形断面的临界风向角;当风向角小于临界风向角时,漩涡脱落强,升力系数的脉动值大;当风向角大于该临界角度时,漩涡脱落弱。由于漩涡脱落是引起结构横风向振动的主要原因,也是顺风向振动的影响因素之一,因此当漩涡脱落频率比较强时,结构横风向的振动更剧烈(如 0° 风向角),顺风向振幅较大,总振幅也较大;当漩涡脱落频率比较弱时,结构的横风向和顺风向振动都较弱,结构总振幅较小。

此外,由于漩涡脱落强度对横风向振幅的影响更为明显,因此当漩涡脱落强度更小(如 $\alpha=30^\circ$)时,结构的振动并未表现出横风向占优,振动轨迹更接近圆形而非明显的椭圆形。上述分析也表明,由于湍流等因素的影响,方形超高层建筑的风振响应并不是理想的简谐振动,不同风向角下的漩涡脱落形态不同,当来流垂直于方形建筑立面时(0° 风向角),其取得较大振幅的概率更高,而斜风向下的风致振动的振幅更小。因此,以 0° 风向角的风致响应作为方形断面超高层建筑的设计控制工况是合理的。

3 结论

基于方形超高层建筑(2个水平方向的自振频率相同)的气弹模型风洞试验,通过对振动轨迹和振幅概率密度分布的分析,主要得到如下结论:

(1)当来流垂直于方形超高层建筑某立面时,风致振动主要以横风向为主,应重点考虑横风向振动;方形超高层建筑漩涡脱落不仅是横风向振动的主要诱因,也是顺风向振动的影响因素。相对于均匀流场,当来流为边界层风场时,虽然来流湍流会增加顺风向的振动响应,但增加幅度较横风向振动的降低幅度要小,这是由于来流湍流会明显降低漩涡脱落强度,因此边界层风场下的风致响应小于均匀流场下的响应。此外,来流湍流也增加了振动的随机性,使得振幅达到最大振幅的概率更小。

(2)风向角对方形超高层建筑的风致响应有明显的影响,其中当来流垂直结构立面时,振动是最剧烈的;当来流与迎风立面夹角为 30° 左右时,振动较小,该规律与方形断面漩涡脱落强度随着风向角的变化规律一致。从抗风设计角度看,考虑来流垂直方形超高层建筑立面作为控制工况是可行的。

(3)结构在横风向和顺风向均有振动时,2个方向的振动会产生耦合,耦合后的振幅变大;在均匀流场下振动轨迹形状为长轴沿风向逆时针转动一个锐角的椭圆,而湍流作用下则为长轴沿风向顺时针转动一个锐角后的椭圆。

参 考 文 献

- [1]魏德敏,朱凡. 高层建筑结构抗风分析的 Pushover 方法[J]. 工业建筑,2009,39(8):41-45.
- [2]黄彬辉. 超高层建筑结构抗风设计综述[J]. 上海建设科技,2019(2):4-9.
- [3]克拉夫 R W,彭津 J. 结构动力学[M]. 王光远,译. 北京:科学出版社,1981.
- [4]韩小雷,程炜. 风荷载作用下结构侧向变形限值的研究[J]. 建筑结构,2019,49(2):123-128.
- [5]龚敏锋,王轶翔. 苏州文博中心飘带结构 TMD 减振舒适度分析[J]. 建筑结构,2019,49(1):49-53.
- [6]陈诗学. 某超高层连体结构风响应分析[J]. 广东土木与建筑,2018,25(5):12-14.
- [7]孙业华,宋固全,廖伟盛,等. 矩形截面高层建筑横向激励时程模拟[J]. 应用力学学报,2018,35(6):1346-1352,1426.
- [8]顾明,王凤元. 超高层建筑风荷载的试验研究[J]. 建筑结构学报,2000,21(4):48-54.
- [9]Gu Ming, Quan Yong. Across-wind loads of typical tall buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aero-

- dynamics, 2004, 92(13):1147.
- [10]叶丰. 高层建筑顺、横风向和扭转方向风致响应及静力等效风荷载研究[D]. 上海:同济大学, 2004.
- [11]唐意. 弯扭耦合高层建筑风致振动及静力等效风荷载研究[D]. 上海:同济大学土木工程学院, 2006.
- [12]李石清, 王汉封, 罗元隆, 等. 不同湍流边界层中高层建筑模型气动力特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(6):1606-1614.
- [13]刘奕, 陈水福. 湍流特性对矩形高层建筑风荷载影响的研究[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(2):142-150.
- [14]Cui Zhengdong, Zhao Ming, Teng Bin, et al. Two-dimensional numerical study of vortex-induced vibration and galloping of square and rectangular cylinders in steady flow [J]. Ocean Engineering, 2015, 106(5): 189-206.
- [15]全涌. 超高层建筑横风向风荷载及响应研究[D]. 上海:同济大学, 2002.
- [16]中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
- [17]顾明. 土木工程抗风研究进展及基础科学问题-科学发展战略研究报告—建筑、环境与土木工程 II (土木工程卷)[M]. 北京:科学出版社, 2006.
- [18]刘会玲, 王小克, 牛海波, 等. Matlab 在绘制两相互垂直斜锯齿振动与简谐振动合成运动轨迹图形中的应用[J]. 物理与工程, 2019, 29(1):110-115.

Research on Wind-induced Vibration and the Coupling Effect of Super High-rise Buildings with Square Section

Ma Wenyong^{1,2,3}, Zhang Lu¹, Huang Zhenghan¹, Lin Hua⁴, Li Yuxue¹

- (1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. Innovation Center for Wind Engineering and Wind Energy Technology of Hebei Province, Shijiazhuang 050043, China;
3. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
4. Shanghai Real-estate Science Research Institute, Shanghai 200031, China)

Abstract: Wind-induced vibration at two in-plane directions interacts when the natural frequencies in two directions are same for a super high-rise building with square cylinder. To reveal an effect of the interaction to wind-induced vibration, an aero-elastic model of a super high-rise building was tested in wind tunnel at uniform and boundary layer approaching flow. Meanwhile, the along wind displacement was limited to observe the across wind vibration. The results show that the wind-induced vibration of a square super high-rise building is dominated by cross-wind vibration. Along wind vibration has inconsiderable influence to across wind vibration. Turbulence increases along wind vibration and decrease across-wind vibration. Turbulence is helpful on decreasing the total wind-induced vibration based on the probability density of the amplitude. The most unfavorable vibration occurs when flow is normal to a facade to the super high-rise building.

Key words: super high-rise building; aero-elastic model; wind tunnel test; wind-induced vibration; coupling effect