

文章编号:1671-4229(2023)02-0025-10

珠海中心台风风效应现场实测及风洞试验研究

吴朝源, 刘宇杰, 何运成, 贺映候, 傅继阳*

(广州大学 风工程与工程振动研究中心, 广东 广州 510006)

摘要: 高层建筑具有柔度大、基频低的特点,对风的作用十分敏感,台风影响下高层建筑风效应一直以来是结构风工程领域的热点问题。文章基于高度330 m的珠海中心大厦健康监测系统及风洞试验平台开展了高层建筑风效应的系列研究,重点考察了中高幅振动下的高层建筑模态参数随振幅的变化、建筑周边来流风场反演及大量级范围内雷诺数(Re)效应对异形截面超高层建筑风效应的影响等业内现有研究依然薄弱的几个方面。结果表明,大厦的结构模态参数处于统计模型的可靠性区间内。基于风压数据的风场预测模型具有较高的预测精度,为超高层建筑台风风效应精细化研究提供了重要的研究基础,而风洞试验结果也表明了风压的 Re 依赖性与其截面复杂的整体特征及其局部细节密切相关。

关键词: 结构动力特性; 模态参数; 来流风场反演; 风洞试验; Re 效应

中图分类号: TU 973⁺.17 **文献标志码:** A

Field measurement and wind tunnel test of typhoon wind effect in Zhuhai Center Tower

WU Chao-yuan, LIU Yu-jie, HE Yun-cheng, HE Ying-hou, FU Ji-yang*

(Research Center for Wind Engineering and Engineering Vibration, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: High-rise buildings have the characteristics of large flexibility and low fundamental frequency, which are very sensitive to the effect of wind. Wind effect on high-rise buildings under the influence of typhoons has been a hot issue in the field of structural wind engineering. In this paper, based on the health monitoring system and wind tunnel test of the 300 m Zhuhai Center Tower, a series of studies on wind effects on high-rise buildings were carried out, focusing on the changes of modal parameters of high-rise buildings with amplitude under medium and high amplitude vibration, the inversion of the wind field around the building and the influence of Reynolds number (Re) effect on wind effects of super high-rise buildings with shaped cross-section in a large range of levels, which are still the weakest existing studies in the industry. The results show that the structural modalities of the building are not well understood. The results show that the structural modal parameters of the building are within the reliability range of the statistical model. The wind field prediction model based on wind pressure data has a high prediction accuracy, which provides an important research basis for the refined study of typhoon wind effects in supertall buildings, while the wind tunnel test results also show that the Re dependence on wind pressure is closely related to the complex overall characteristics of the cross-section and its local details.

Key words: structural dynamic characteristics; modal parameters; wind field inversion; wind tunnel testing; Re effect

收稿日期: 2023-01-20; 修回日期: 2023-02-16

作者简介: 吴朝源(1998—),男,硕士研究生. E-mail:2112016228@e.gzhu.edu.cn

*通信作者. E-mail: jiyangfu@gzhu.edu.cn

引文格式: 吴朝源, 刘宇杰, 何运成, 等. 珠海中心台风风效应现场实测及风洞试验研究[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2023, 22(2): 25-34.

高层建筑具有柔度大、基频低的特点,对风的作用十分敏感,台风影响下高层建筑风效应一直以来是结构风工程领域的热点环节。风引起的振动对高层建筑的使用性和居住者的舒适度均有影响,这虽是主观问题,但 Kwok 等^[1]的研究表明长时间暴露于大振幅振动会让居住在高层建筑中的住户头痛和恶心。除舒适度外,风荷载引起的共振动态响应甚至可能导致灾难性的结构破坏。针对高层建筑风效应课题,已经进行了大量研究。

高层建筑风效应研究一般可分为风洞试验和现场实测两类。风洞试验因其能够再现高层建筑激励条件而被广泛使用。风洞试验广泛采用 3 种方法,包括:①阵风荷载系数(GLF)法;②高频力平衡(HFFB)法;③气动弹性模型试验。通过风洞试验,可以通过测量不同缩尺比例模型的风荷载或响应估计风致振动,但是风洞试验存在不可避免的 Re 效应^[2-4]。与风洞试验相比,现场实测能够直接获得风致响应,克服了风洞试验的局限性,通过分析满量程测量数据,可提取模态参数。模态参数是建筑风效应评估的关键因素,相关研究已表明建筑的固有频率及阻尼比对振动幅度具有相关性^[5-8],忽略该关联将会对结构抗风设计带来非常不利的影响。同时,关注高层建筑风效应是实现和促进城市可持续发展的必然问题。目前已发现高层建筑在风荷载和风场方面对周围建筑物有重大影响^[9]。全面了解建筑风效应可以通

过研究高层建筑周围的风场,为城市韧性设计提供参考^[10]。本文回顾了运用现有技术研究高层建筑风效应的方法,将有助于土木、建筑工程师优化建筑抗风设计,提高城市运作的韧性。

本文的组织结构如下:第 1 节中介绍了珠海中心大厦现有实测和试验的依托平台。2.1 节重点介绍了台风影响下珠海中心大厦动力特征分析,更新了可靠的模态参数统计模型。2.2 节回顾了基于风压结果的来流风场反演,获得实测建筑周边准确的来流风场信息。2.3 节着重讨论了 Re 效应对风洞试验影响。最后,第 3 节得出结论。

1 平台方法介绍

1.1 平台介绍

1.1.1 实测平台

珠海中心大厦位于广东省珠海市前山水道河畔,临近南海,周边地貌以丘陵和平原为主(图 1)。该建筑高约 320 m,整体由下至上为渐变弧形截面结构,侧面由 6 个变化半径的弧面围成。建筑底部和顶部截面近似两个方向相反的正三角形,作为过渡区的中部截面则近似圆形。此外,因其特殊的地理位置和周边环境,该建筑经常遭受夏季台风影响,在 2021 年夏季,该建筑经历了查帕卡等多个台风的正面袭击,具有丰富的原型实测资料。

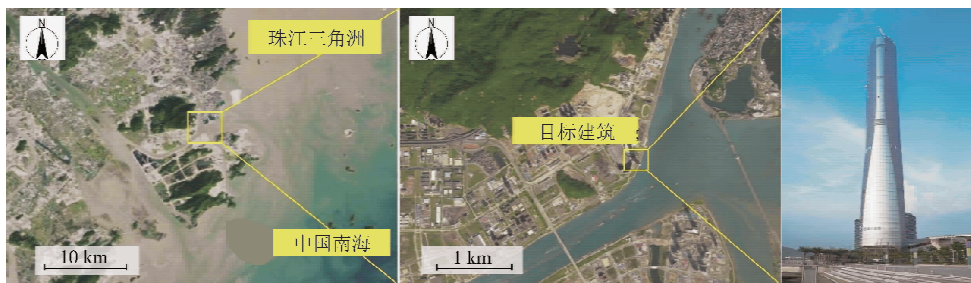


图 1 珠海中心大厦位置

Fig. 1 Location of the Zhuhai Center Tower

结构健康监测系统(SHMS)最初于 2018 年在珠海中心大厦建立,主要由安装在顶层的低频定向双轴加速度计组成,用于测量结构响应。在 2021 年,对健康监测系统进行改造,增加了另一个双轴加速度计和 10 个风压传感器,分散布置在 51 层(离地面 234 m),如图 2(a) 所示。加速度计能够在 0.05 ~ 100 Hz 的频率范围内提供检测,分辨率为 $\pm 0.005\%$ FS (全范围: ± 2 g),误差不大

于 3 dB。平台还使用了两种类型的压力传感器,测点 9 的分辨率($\pm 0.07\%$ FS)比其他的风压传感器($\pm 0.25\%$ FS, $\pm 7\,000$ Pa)有更精细的量程范围($\pm 2\,500$ Pa),为左侧传感器测量结果的验证和校准提供参考信息。上述传感器的输出信号由数据采集系统以 50 Hz 同步采样和本地记录存储,并可通过 4G 移动网络进行传输。

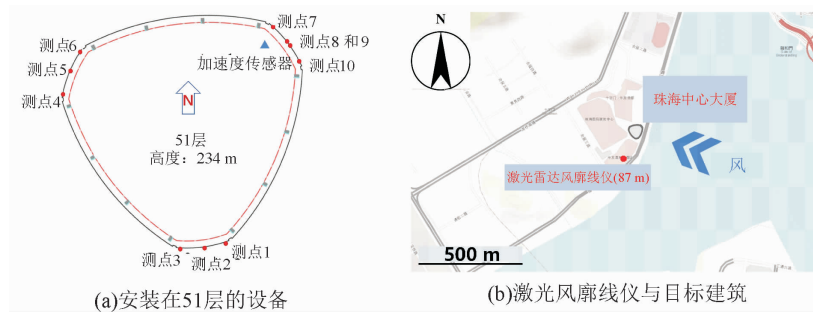


图 2 结构健康监测系统典型设备的布置
Fig. 2 Arrangement of typical SHMS devices

注:图 2(a)的实心圆为风压传感器,三角形为双轴加速度计;图 2(b)的实心圆代表激光雷达风廓线仪。

另外,在楼层安装精密设备的同时,裙楼顶部(距地面 87 m)安装了便携式激光雷达风廓线仪,对珠海中心大厦周围的风场进行遥感探测。其探测范围在设备上方 30 m 到最上方 2 000 m,栅极间距 14.5 m,风速的 3 个分量在 1 Hz 左右连续检测和记录。图 2(b)描述了激光雷达风廓线仪与珠海中心大厦的相对位置。

1.1.2 试验平台

刚性模型测压风洞试验在回流式大气边界层风洞实验室进行,风洞试验段宽约 5.4 m,高约 3.0 m,实验段长约 24 m。由图 3(a)所示,试验过程中参考静压及参考风速由安置在风洞顶部的皮托管实时测量。对于大气边界层风场,除了要额外安装粗糙元进行模拟外,还要借助位移架对沿高度变化的风场特征进行测定。

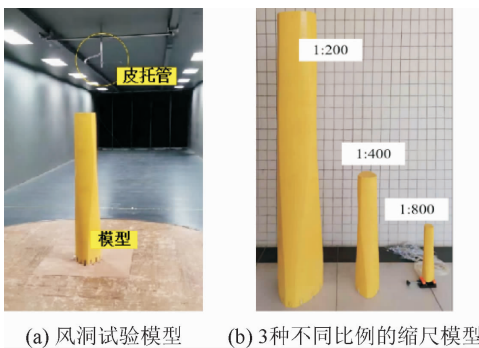


图 3 测压模型
Fig. 3 Pressure models

风洞试验所采用模型为图 3(b)中珠海中心大厦 3 种不同比例的缩尺模型,缩尺比分别为 1:200、1:400 和 1:800。该模型是通过绘制各层平面图,将各层截面顶点以样条曲线连接作为结构形状边缘进行建模,进而采用钢化玻璃加工制成,模型表面进行喷漆和打磨使其达到精确的计

算粗糙度($Ra < = 10 \mu m$)。采用孔径约 1 mm 的测压管,将模型表面风压传递给安置在模型底部的测压扫描阀进行数据采集。

为了模拟台风期间建筑周边的向岸风风场,选用空风洞风场,表 1 给出的是各缩尺比例模型的工况参数,且选用的阻塞比为 2.47%,小于 5%。

表 1 每个试验工况的描述和参数

Table 1 Description and parameters of each working condition

试验工况	模型缩尺比	风速/($m \cdot s^{-1}$)	雷诺数
T200-L	1:200	5.20	1.0E5
T200-N	1:200	10.34	2.0E5
T200-H	1:200	13.50	2.6E5
T400-L	1:400	5.20	5.1E4
T400-N	1:400	10.34	1.1E5
T400-H	1:400	13.50	1.3E5
T800-L	1:800	5.20	2.5E4
T800-N	1:800	10.34	5.0E4
T800-H	1:800	13.50	6.6E4

注:工况中,200、400 和 800 为模型尺度,L、N 和 H 分别为 $5.2 m \cdot s^{-1}$ 、 $10.3 m \cdot s^{-1}$ 和 $13.5 m \cdot s^{-1}$ 的风速。

1.2 方法介绍

1.2.1 实测分析方法

(1) 随机子空间法

随机子空间法 (SSI) 通过使用离散随机状态空间模型来执行 OMA^[11]。该算法的关键步骤是根据测量的响应计算输出协方差,并将获得的协方差 R_i 组装成 Toeplitz 矩阵,然后通过对 Toeplitz 矩阵进行奇异值分解 (SVD) 来获得系统矩阵。最后对状态矩阵进行特征值分解来估计固有频率和阻尼比。

(2) 随机减量技术

随机减量技术 (RDT) 是 Cole 在 1973 年提

出的一种有效地评估模态参数的幅度依赖性时域方法^[12]。它假定单自由系统在时刻的响应由响应初始位移、响应初始速度及在 t 时刻的外激励 3 个部分组成。在相同的初始条件下,通过将具有指定时间长度 τ 的响应的多个时间段平均,形成随机衰减信号,最终可以通过拟合衰减曲线的包络线来获得阻尼比。

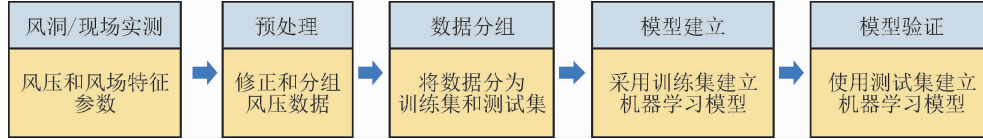


图 4 机器学习模型的工作流程

Fig. 4 Workflow for the machine learning models

(2) 建筑风效应评估指标

建筑周围风场的尾流区漩涡通常用一个无量纲参数来表示,即斯托罗哈数(St):

$$St = fL/U, \quad (1)$$

其中, f 为可由风压谱确定的脱落旋流频率, L 为崖体的特征长度, U 为平均风速。

雷诺数效应导致建筑表面分压系数分布差异,影响建筑各层荷载的分布特征与其风致振动特性,故而对建筑模型不同工况下各层平均阻力系数进行对比。建筑表面的平均阻力系数,定义如下:

$$C_D(j) = \frac{\overline{F_D(j)}}{0.5 \times A(j) \rho V_{ref}^2}, \quad (2)$$

其中, $A(j)$ 为 j 层承载面积; $\overline{F_D(j)}$ 为该层平均升力和平均阻力; V_{ref}^2 为参考风速。

获得风荷载后,基于一阶平动模态主导响应的假设,利用随机振动理论可以估计结构的风致响应。

$$X_{max} = \overline{X} + g\sigma_{x1}, \quad \overline{X} = F_1/K_1, \quad (3)$$

$$g = \sqrt{2\ln(v_x T) + 0.577} / \sqrt{2\ln(v_x T)}, \quad (4)$$

其中, \overline{X} 和 X_{max} 分别代表建筑顶部的静态位移及最大位移。 g 是峰值因子, σ_{x1} 是位移的标准差。 K_1 ($= (2\pi n_0) 2M_1$) 表示根据实测固有频率 n_0 结合有限元模型确定的广义质量 M_1 计算出的广义刚度。据此, F_1 表示广义力:

$$F_1(t) = \int_0^H f(z, t) \mu_1(z) dz. \quad (5)$$

建筑物的加速度响应用标准差和表示最大值,即 σ_a 和 A_{max} , 可以近似为

1.2.2 试验分析方法

(1) 机器学习(ML)模型

基于 8 种 ML 模型,即 Ada Boost、Bagging、Decision Tree、Extra Tree、Gradient Boosting、KNN、Random forest 和 SVR,从风压时间序列或统计参数中推导响应风场信息(以速度和方向的平均值和速度的湍流强度为依据)。其流程如图 4 所示。

$$\sigma_a = \sigma_{x,R} \cdot (2\pi n_0)^2, \quad A_{max} = g \cdot \sigma_a \quad (6)$$

此外,建筑物第 j 层的等效静风荷载(ESWL)即 $ESWL_j$ 可计算为平均风荷载 \overline{P}_j 与最大惯性力之和:

$$ESWL_j = \overline{P}_j + m_j A_{max,j}, \quad (7)$$

其中, m_j 表示楼层质量, $A_{max,j}$ 表示最大加速度响应。

2 结果与讨论

2.1 台风影响下珠海中心大厦动力特征分析

模态参数(固有频率、阻尼比)是影响超高层建筑风效应评估的关键因素。在大多数结构抗风设计时,模态参数通常被假设为与结构的振幅无关,然而,一些实测研究已表明建筑的固有频率及阻尼比对振动幅度具有相关性,忽略该关联将会对结构抗风设计带来非常不利的影响。因此,本文对台风影响下的珠海中心大厦进行实测研究并准确获得结构的动力特征参数,对超高层建筑的抗风设计和风致振动控制具有重要意义。

如图 5 所示,大厦在测量高度处的最大加速度响应达到 20 gal。图 6 利用随机子空间识别 (SSI) 和随机减量技术 (RDT) 对目标模态参数的幅值相关性进行比较和分析,其变化趋势基本一致。此外,值得注意的是,结构在台风荷载作用下的变形通常被认为是弹性变形,因此台风消散后结构刚度应恢复到台风前水平。但从图 7 中可以看出,台风作用前后,结构频率存在明显的偏差 Δf 。在相关的研究工作中也发现了这种现象^[13-14]。

这种差异可能与结构的建筑场地有关。当振动较强时,结构底部会产生较大的剪力和弯矩,并通过结构基础传播到周围的土壤,进而可能导致土体

变形,相对松软的土体通常需要较长的时间方能恢复至初始状态^[15]。

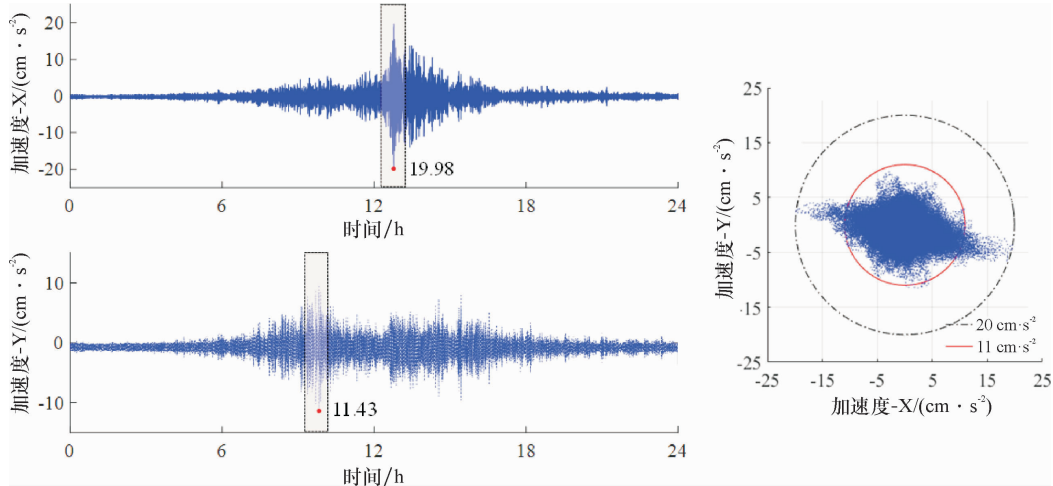


图 5 珠海中心大厦的风致加速度响应

Fig. 5 Wind-induced acceleration response of ZHCT

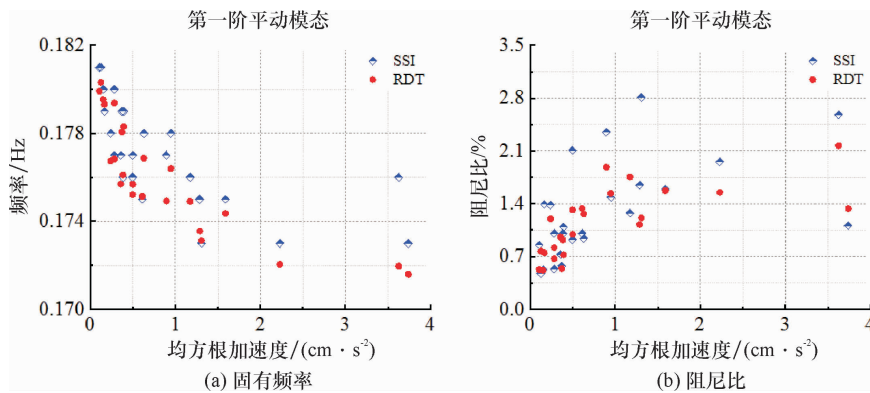


图 6 RDT 及 SSI 的模态参数结果对比

Fig. 6 Comparison of RDT and SSI modal parameter results

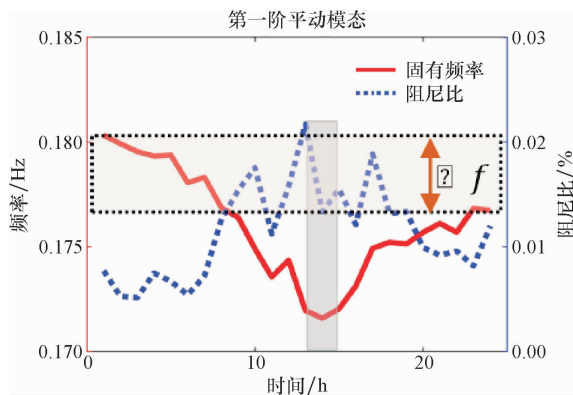


图 7 模态参数时变结果

Fig. 7 Time-varying results of modal parameters

将珠海中心大厦两个方向的测量峰值加速度响应与 5 个经典舒适度规范进行比较,如图 8 所

示,建筑物顶部的峰值加速度处于规范建议的范围内。

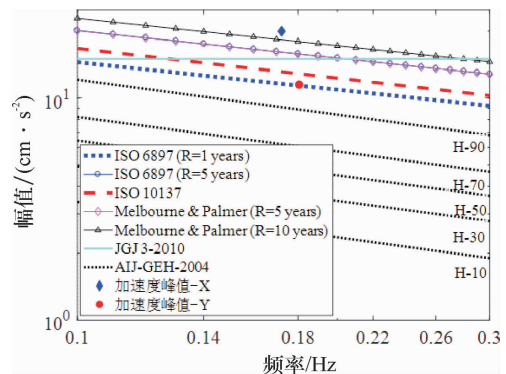


图 8 结构舒适度评估

Fig. 8 Structural comfort assessment

此外,本小节对比了台风影响下附加 ATMD 的上海金融中心和珠海中心大厦模态参数幅值依赖性结果。从图 9 的研究发现,随着结构响应的增大,基频总体上先减小,后趋于平稳。这可以用 Wyatt^[16] 提出的摩擦机理和 Jeary^[17] 提出的三阶段模型来解释。注意,与其他建筑相比,配置 ATMD 的高层建筑模态参数随振幅的变化很特殊。随着

振幅的增加,ATMD 在很短的时间内提供了很大的阻尼力,导致建筑的整体刚度急剧增加,如图 9 (a) 所示。随后,ATMD 系统和建筑协同运动,抵抗增加的振幅。此外与现有参数统计模型进行了比较,实测所得结果均落在统计可靠性区间内,得出的差异表明超高层建筑动力特性的复杂性,如图 10 所示。

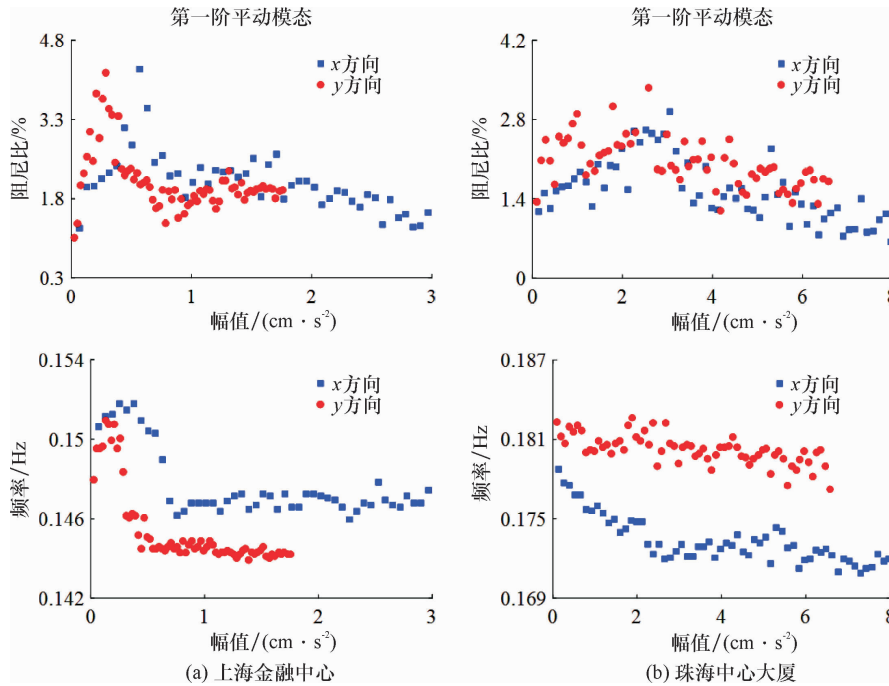


图 9 附加/无减振装置超高层建筑模态参数随振幅的变化

Fig. 9 Variation of modal parameters with amplitude of super tall buildings with/without damping device

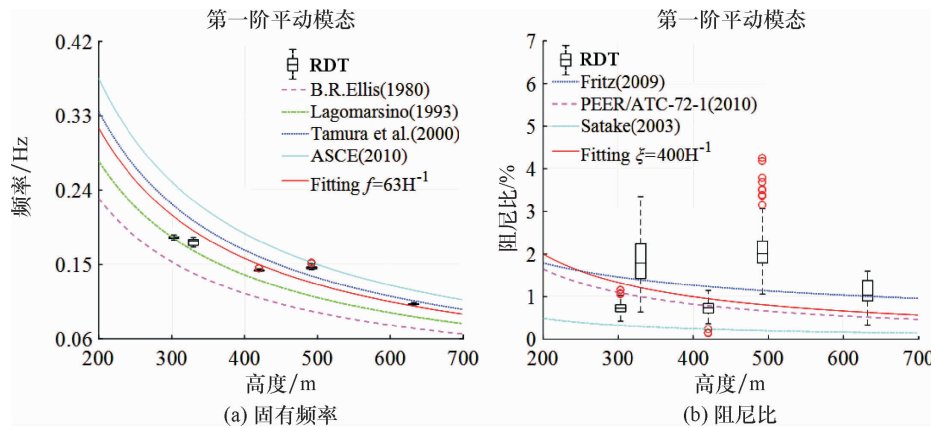


图 10 固有频率与阻尼比结果与现有预测模型的比较

Fig. 10 Comparison of natural frequency and damping ratio with predictors

2.2 基于风压结果的来流风场反演

许多在役建筑物和桥梁的事故表明,聚焦来流风场信息可以更好地了解结构风效应,进而采取适当的抗风措施。然而,直接测量大型建筑物

上或周围的无扰动风流通常存在困难,一方面,出于安全考虑,不允许在一些高层建筑物的顶部安装风速仪;另一方面,大多数安装在大型建筑物上的风速仪容易受到目标建筑物或周围建筑物的干

扰,使观测到的风信息存在严重的偏差,缺乏代表性。事实上,当获得来流风场信息时,可以通过综合使用风洞试验,或者可以通过有限的设备进行数值模拟和现场实测,以可接受的精度估计结构的整体风致效应。因此,如何方便、准确地量化风场特征,特别是基于 SHMS 实测信号,是本小节着重考察的核心问题。本小节采用 8 个 ML 模型对建筑来流风场进行反演,通过风洞试验结果对模型进行了训练和验证,并通过原型建筑的现场测量进行了验证。

ML 模型首先通过风洞试验的风压时间序列进行训练验证,同时采用风压数据单一统计学参量,及风压数据平均值、脉动值、功率谱、峰度及偏度等多统计学参量进行 ML 模型的风洞来流风场反演。图 11 及图 12 的对比说明了多个输入变量驱动 ML 模型比单一输入变量的情况更佳。

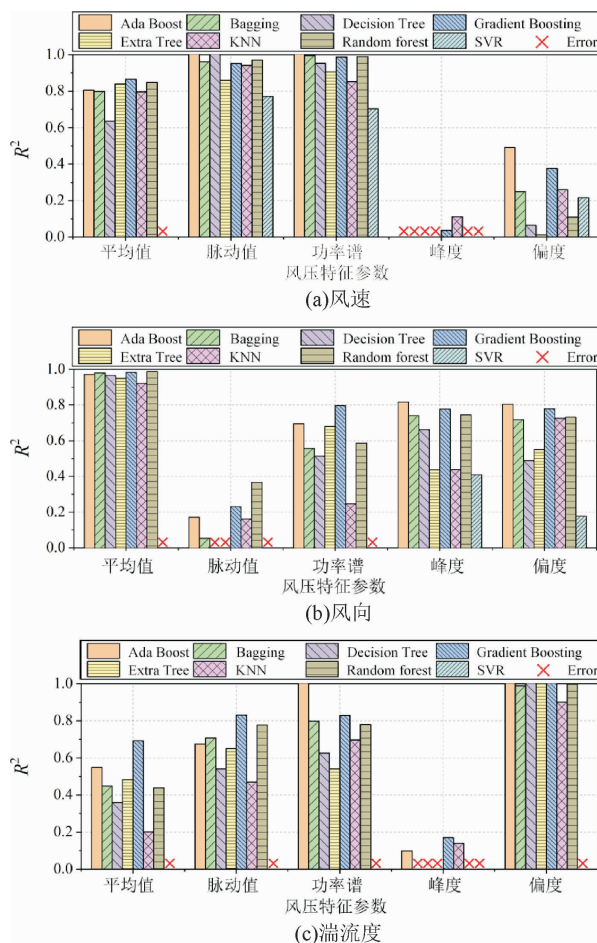


图 11 基于单一统计参量驱动的数据下的模型性能
Fig. 11 Model performance driven by a single statistical parameter

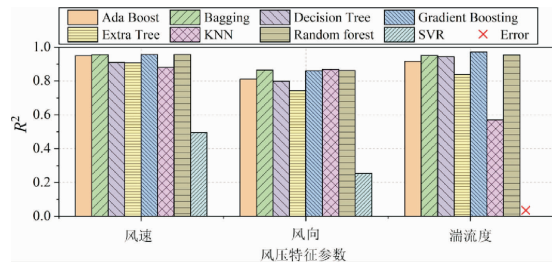


图 12 基于风洞试验结果中多个统计参量数据驱动下的模型性能

Fig. 12 Model performance in the scenario based on multiple input variables based on wind tunnel testing results

图 11 及图 13 的对比验证了选择适当的输入统计参量驱动的 ML 模型比时域 ML 模型预测效果更好。一系列研究结果表明,由“统计参数”相关数据驱动的模型提供了将风压信息精准映射至珠海中心大厦周围风场信息的可行性。

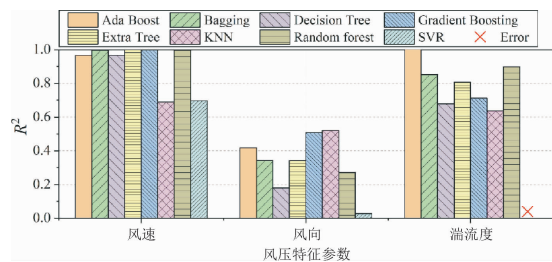


图 13 基于风洞试验时间序列数据驱动下的模型性能
Fig. 13 Model performance in time-series based scenario based on wind tunnel tests

最后,图 14 给出的部分 ML 模型具有较好的鲁棒性,即使基于 3 个风压测点的现场实测数据,也可以准确推断来流风场信息。

2.3 Re 效应对风洞试验的影响

风洞试验是目前最常用的超高层建筑风效应评估手段,相较于现场实测,风洞试验具有的先验性可以为结构抗风设计提供指导,同时具备成本低、周期短等优势。然而,由于风洞试验风速的限制和缩尺比的存在,Re 效应成为钝体结构风洞试验中不可忽视的干扰因素。尽管人们在 Re 效应的研究上做了大量的努力,但大多数研究中涉及的 Re 范围过于有限,无法涵盖与实际测试相关的 Re。

本小节在综合运用风洞试验和现场实测的基础上,研究了 Re 变化对具有空间变化曲线截面的超高层建筑风效应的影响,并分析了 Re 区间为 $[2.5 \times 10^4, 3.8 \times 10^7]$ 时,三角形截面和圆形圆柱体的 St 数、压力、层间力、结构响应和等效静风荷载的变化^[18]。

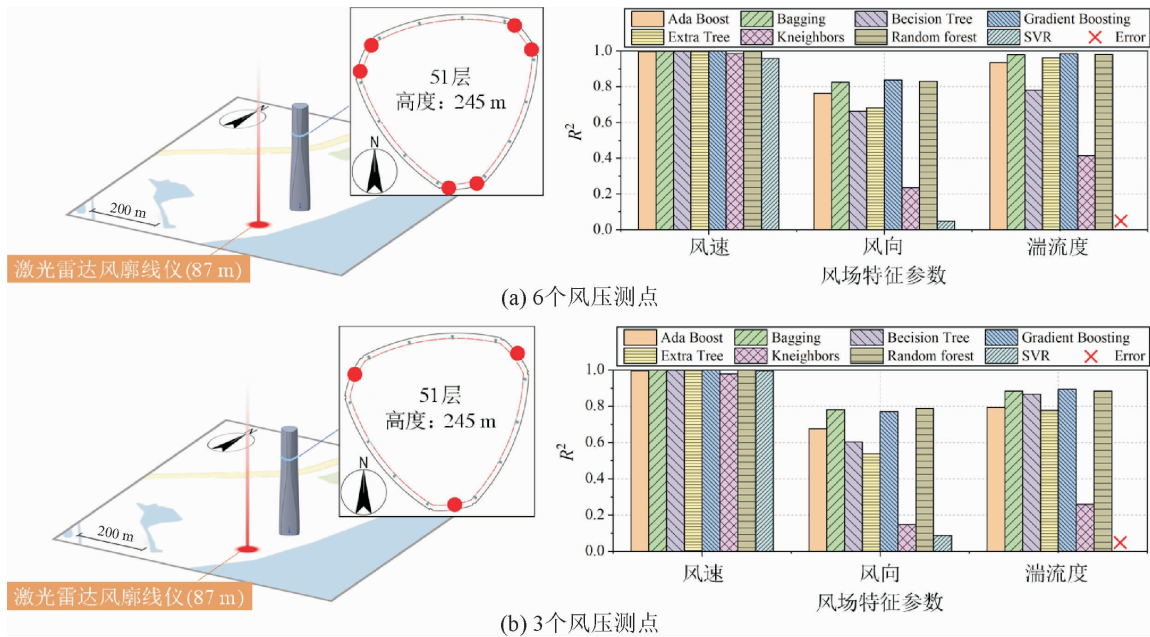


图 14 由 6 个风压测点和 3 个风压测点的现场实测数据驱动的性能

Fig. 14 Model performance driven by field records from 6 taps and 3 taps

图 15 分析了 Re 区间为 $[2.5 \times 10^4, 3.8 \times 10^7]$ 时, 三角形截面和正圆柱体的 St 数变化。可以看到, 曲线截面的 St 值在 0.15 ~ 0.17 之间, 与圆形截面的 St 值(0.20)和正三角形截面的 St 值

(0.23) 相当, 比反三角形截面的 St 值(0.15)略大。上述结果表明, 大厦截面近似于圆形和反三角形的组合, St 随 Re 的增加呈现先增加后稳定的趋势, 这与圆柱的情况不同(即先稳定后增加)。

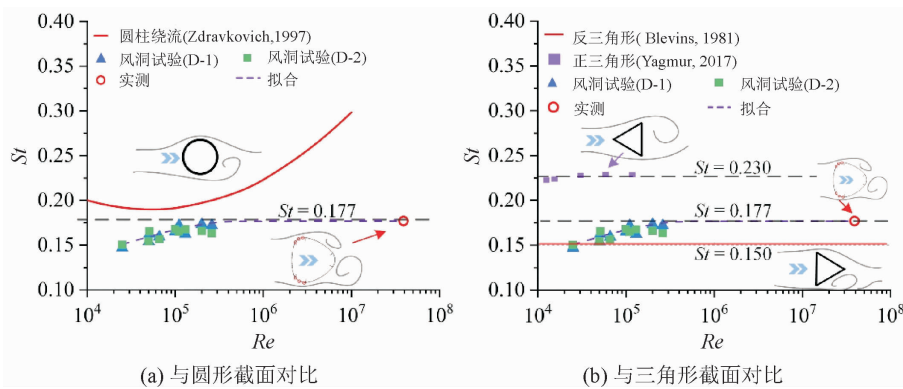


图 15 大厦斯托罗哈数与圆形和三角形截面的雷诺数依赖性

Fig. 15 Re -dependence of Strouhal number of Zhuhai Center Tower compared to those for bluff bodies with circular and triangle cross-sections

注: D-1 和 D-2 分别表示方向 -1 和方向 -2。

图 16 给出的是平均阻力系数 C_d 随高度和 Re 的变化。随着高度的增加, 方向 1 在相应截面相对位置处的平均吸气压强基本增强, 在方向 2 上先减弱后加强, 而正压在两个方向上变化不显著, 主要归因于建筑物背风侧吸入压力的垂直变化。

图 16(c) 中 C_d 随 Re 的变化较小。这与正圆柱体的情况不同, 在 $Re \in [1.0 \times 10^5, 5.5 \times 10^5]$ 范围内, C_d 随 Re 的变化明显减小。而方向 1 和方向 2 的实验结果分别与反三角形(方向 -1)和正三角形(方向 -2)的结果基本一致。

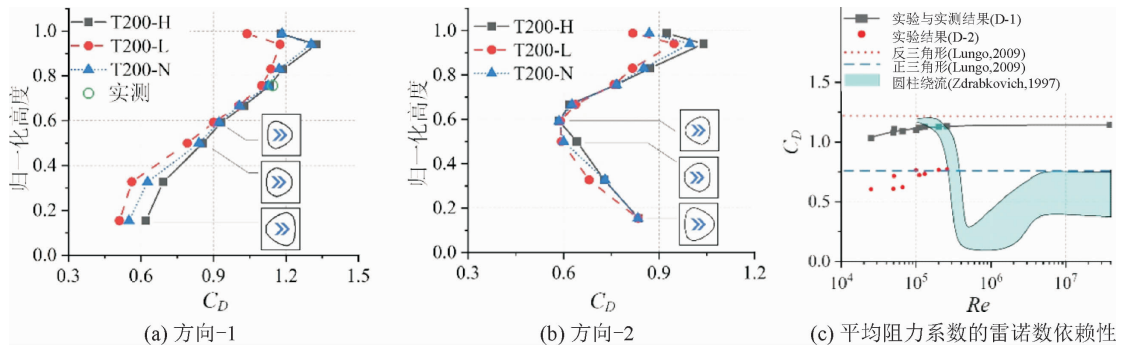


图 16 平均阻力系数 C_D 随高度和 Re 的变化

Fig. 16 Variations of mean drag coefficient C_D with height and Re

图 17 与图 18 分别给出了 Re 与沿建筑顶部两个水平方向的响应、基底力与基底力矩的相关性。结果表明,该建筑的典型风效应与圆形截面柱体的明显不同。截面的整体几何特征及其局部细节(特别是钝的前缘)都可能在形成建筑周围的流动结构,从而导致相应的风效应方面发挥重要作用。

基本上,在截面随高度变化不显著的部分,其结果与三角形截面的结果非常相似,对 Re 不太敏感;而在截面随高度变化较大的部分,部分结果对 Re 的依赖性较大。总体而言,随着 Re 的增加,该建筑的结构响应先增大后趋于平稳,当 Re 超过 1.3×10^5 左右时,风洞试验结果与现场实测基本一致。

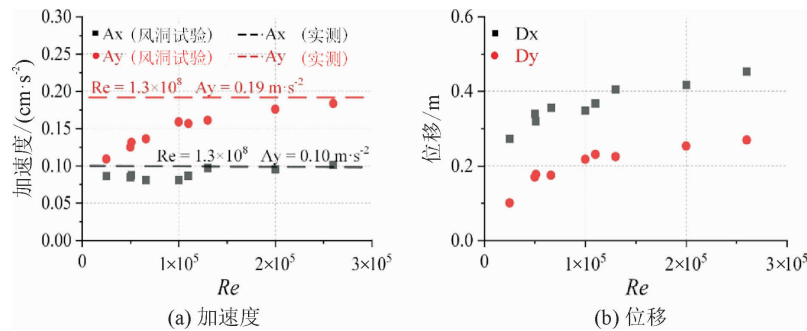


图 17 最大结构响应沿建筑物顶部两个正交方向的 Re 依赖性

Fig. 17 Re -dependence of maximum structural responses along two orthogonal directions at the top of the building

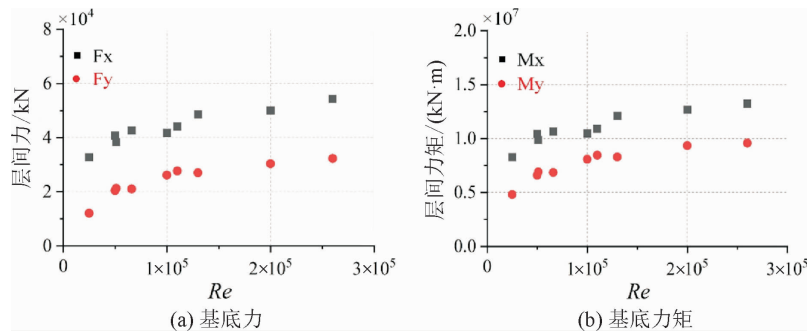


图 18 基于风洞试验不同雷诺数工况下的建筑物顶部最大位移及等效静风荷载

Fig. 18 Maximum displacement at the top of building and equivalent static wind load in terms of base moment based on wind tunnel tests with varied Re -scenarios

3 结 论

本文采用现场实测和风洞试验手段,对台风

作用下珠海中心大厦的动力特征及风效应开展研究,结论总结如下:

(1) 对于目标建筑的基频和阻尼比,SSI 和 RDT 的识别结果一致。模态参数的时变结果和幅

值依赖性结果基本一致。文中针对模态参数变化的细节进行了机理层面的分析,并且基于宝贵的实测数据,提出更为合理的结构频率和阻尼比的预测模型。

(2)尽管实测测点有限,由“统计参数”相关数据驱动模型也能把风压信息精准映射出珠海中心大厦周围风场信息。但仍需要更细致的研究

以进一步阐明使用机器学习技术来反演来流风场的可行性和性能,确保来流风场信息准确。

(3)风洞试验中,大厦的结构响应随 Re 的增大先增大后趋于平稳,当 Re 超过 1.3×10^5 左右时,风洞试验结果与现场实测基本一致。由于 Re 效应受建筑截面空间变化和近风方向的影响较为复杂,需要进一步探索。

参考文献:

- [1] Kwok K C S, Hitchcock P A, Burton M D. Perception of vibration and occupant comfort in wind-excited tall buildings[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2009, 97(7/8): 368-380.
- [2] Kovaszny L S G. Hot-wire investigation of the wake behind cylinders at low Reynolds numbers[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1949, 198: 174-190.
- [3] Achenbach E, Heinecke E. On vortex shedding from smooth and rough cylinders in the range of Reynolds numbers 6×10^3 to 5×10^6 [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1981, 109: 239-251.
- [4] Norberg C. Fluctuating lift on a circular cylinder: Review and new measurements[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2003, 17(1): 57-96.
- [5] 胡佳星,李正农,王澈泉,等.台风激励下海口市某高层建筑模态参数识别[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(2): 71-82.
- [6] 段静,谢壮宁,张乐乐,等.超强台风“山竹”过境期间珠三角地区超高层建筑的风效应实测研究[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(10): 85-94.
- [7] Ge Y, Zhao L, Cao J. Case study of vortex-induced vibration and mitigation mechanism for a long-span suspension bridge [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2022, 220: 104866.
- [8] 杨易,麻福贤,谭健成,等.赛格大厦振动事件中的大气边界层风场实测与分析[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(10): 122-129.
- [9] Elshaer A, Gairola A, Adamek K, et al. Variations in wind load on tall buildings due to urban development[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 34: 264-277.
- [10] Wang F. Design and low energy ventilation solutions for atria in the tropics[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2012, 2(1): 8-28.
- [11] Sun M, Li Q. Evaluation of modal properties of high-rise buildings under severe typhoon conditions using correlation function-based modal identification methods [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2022, 229: 105140.
- [12] Li Z, Fu J, Liang Q, et al. Modal identification of civil structures via covariance-driven stochastic subspace method[J]. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 2019, 16(5): 5709-5728.
- [13] Zhou K, Li Q S, Li X. Dynamic behavior of supertall building with active control system during Super Typhoon Mangkhut [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(5): 04020077.
- [14] Liu C, Xie Z, Zhang L, et al. Field measurements of wind effects on a super high-rise building during typhoons[J]. *Wind and Structures*, 2021, 33(5): 383-395.
- [15] Sarkar G, Roy P. Generalised analytical solution for determining natural frequency of free span offshore pipelines considering non-homogeneity of seabed soil[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 113171.
- [16] Wyatt T A. Mechanisms of damping[C]//Symposium on Dynamic Behavior of Bridges. Workingham: Transport and Road Research Laboratory, 1977:10-21.
- [17] Jeary A P. Damping in structures[J]. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 1997, 72: 345-355.
- [18] Liu Y J, Fu J Y, He Y C. Effects of Reynolds number on wind effects toward a super-tall building with curved cross-section [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 64: 105660.

【责任编辑:孙向荣】