

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220413002

两类不同结构高层建筑风振安全特性数值模拟*

胡涛¹, 阳富强¹, 张一夫²

(1. 福州大学环境与安全工程学院, 福建 福州 350116; 2. 湖南工学院安全与管理工程学院, 湖南 衡阳 421200)

摘要:为揭示不同高层建筑在多种风场作业下的涡激振动规律,开展了圆柱形与矩形两类高层建筑的风振安全特性模拟。通过结合高层建筑的参数,运用数值模拟方法,获取涡激共振的锁定区间及旋涡脱落频率等参数的变化规律,拟合出不同结构建筑物的尾涡脱落频率随雷诺数变化的函数方程,进一步剖析影响高层建筑安全性的风险因素。研究表明:(1)高雷诺数下的风场模拟选择剪切应力运输(Shear Stress Transport, SST) $k-\omega$ 湍流模型可取得较为准确的结果;(2)涡激振动存在发展、共振、逃逸三个阶段;(3)经常处于中强风袭扰的环境下,矩形建筑较圆柱形建筑更为安全。

关键词:高层建筑; 涡激共振; 卡门涡街; 风振安全; 锁定现象

中图分类号: TU973 文献标识码: A 文章编号: 1672-2132(2023)05-1067-09

Numerical Simulation of Wind-induced Vibration Safety Characteristics of Two High-rise Buildings with Different Structures

HU Tao¹, YANG Fuqiang¹, ZHANG Yifu²

(1. College of Environment and Safety Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. College of Safety and Management Engineering, Hunan Institute of Technology, Hengyang 421200, China)

Abstract: In order to reveal the vortex-induced vibration of different high-rise buildings in different wind fields, the safety characteristics of cylindrical and rectangular high-rise buildings were simulated. By combining the actual parameters of high-rise buildings and using numerical simulation method, the variation rules of parameters such as the locking interval of vortex-induced resonance and vortex shedding frequency were obtained. The function equation of the variation of trailing vortex shedding frequency with Reynolds number of buildings of different structures was also fitted, so as to further analyze the risk factors affecting the safety of high-rise buildings. The results show that: (1) The SST $k-\omega$ turbulence model for wind field simulation at high Reynolds number can yield more accurate results. (2) Vortex-induced vibration exhibits three stages: development, resonance and escape. (3) Rectangular buildings are safer than cylindrical ones.

Keywords: high-rise buildings; vortex induced resonance; Carmen vortex; wind-induced safety; lock-in

* 收稿日期: 2022-04-13; 修回日期: 2022-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51874100)、湖南省自然科学基金面上项目(2021JJ30206)资助

作者简介: 胡涛(1998—), 男, 硕士研究生。主要从事机器学习与数值模拟方面的研究。E-mail: taohu668@163.com

通讯作者: 阳富强(1982—), 男, 教授, 博士。主要从事安全科学与工程方面的研究。E-mail: fqouyang82@163.com

0 引言

随着城市化快速发展,人口规模日益增长,各大一线城市都以兴建高层建筑作为治理此类问题的利刃^[1-2]。近几年,国内多次出现由于涡激共振导致安全隐患或事故的具体案例,如2020年5月广东东莞虎门大桥晃动事件^[3-4]、2021年5月广东深圳赛格大厦晃动事件等^[5]。由此可见,风荷载也已成为影响高层建筑安全、高舒适性以及高经济性的重要因素之一^[6-7]。当高层建筑或细长圆形截面等构筑物承受风荷载作用时,其尾涡由一侧向另一侧交替脱落,形成卡门涡街,在一定条件下,尾涡脱落频率近似于建筑固有频率时,便会发生涡激共振,造成建筑疲劳性损伤。

为研究此类安全问题,计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)成为预测流场中流体流动特性的有效方法之一。国内外学者围绕圆柱、三棱柱等截面建筑物的流动特性、流固耦合作用进行了数值模拟,并取得一系列成果。例如, J.Zhang等^[8]借助数值模拟方法研究均匀流中二维单圆柱的涡激振动($Re=13\ 000$),结果显示升力系数、阻力系数与风洞实验结果有比较良好的贴合性。F.Oviedo-Tolentino等^[9]在低雷诺数流域下,以底部固定的直圆柱结构为研究对象,开展涡激振动试验,发现圆柱体的振动响应由不同的频率决定。任彤煜等^[10]研究不同雷诺数区域的振动响应特性发现顺流向振幅先增大后减小。

目前,虽然许多学者从不同研究视角出发,深入剖析绕流、涡激振动以及不同形状截面建筑物风振的内外因素及联系,但未综合对比不同结构高层建筑的安全特性,细致划分涡激振动各个阶段的现象,以及完整准确地表明卡门涡街发生机理及过程。鉴于此,笔者试图将不同形状的高层建筑结合起来,对比研究其安全特性;以我国既有高层建筑为研究对象,构建出通用的建筑模型,采用数值模拟方法研究其风荷载特性以及风场绕流特性,以促进高层建筑健康发展。

1 数值模拟方法

Fluent是目前常用的CFD软件,可模拟风场、热流场等多种流域,该软件可以选择自带的流体力

学公式,也可以选用用户定义函数(User Defined Function, UFD)的方法,根据实际需求编辑公式,进行理论和数值计算研究。CFD工作流程包括前处理、流场计算与后处理,在进行数值模拟计算前,首先应进行物理建模,同时将计算域离散为计算网格,选择与流场相匹配的控制方程,且需选用恰当的湍流模型,并设定计算域的边界条件。

1.1 物理模型与网格划分

本文研究对象均为真实存在的高层建筑,为使研究结果更具有通用性,在参照建筑的基础上,删繁就简,抽象出简化模型。为确保模拟计算的准确性与对照性,以致两类数值模拟仅由于建筑结构的不同而存在特异性,不受简化模型尺寸的影响或影响效果较小,因此,两类不同高层建筑理当缩减成尺寸相同或相近的模型。

在模拟计算过程中,为减少计算量,需对不同部位设置不同的网格尺寸,建筑物附近计算域加密过程中,会不可避免的出现非结构化网格。从诸多文献的数值模拟研究来看,非结构化网格比结构化网格在划分效率上更具有优势,而在计算量上,结构化网格比非结构化网格更省计算量,即四边形网格比三角形网格计算量小。从精确度上来看,结构化网格的计算结果通常更为精确,即四边形网格计算结果较三角形网格更为精准^[11]。鉴于此,本文采用混合网格进行划分,以结构化网格为主,部分计算域使用非结构化网格。

1.2 求解方程

综合多种因素,将高层建筑周围湍流流动预设为具有常温、低速以及黏性等多种特性的牛顿流体,其运动遵守三大基本物理定律,并以此三大基本物理定律作为风场流动、能量传递等机理的控制方程^[12-13]。研究各类流体的流动问题时,可以将流体看作是一个具备连续性的介质,其主要作用是在整个高层建筑计算域网格划分后,在计算时将各个网格的数据关联起来进行传导,其微分方程可表示为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中, u, v, w 分别为速度矢量 V 在 x, y, z 三个方向的风量, m^3/s ; ρ 为密度, kg/m^3 ; t 为时间, s 。

动量守恒方程的内在本质是牛顿第二定律,该

定律是流体在流动时必须满足的一个基本物理定律,在 x 、 y 和 z 三个坐标轴方向的动量方程表达式可分别表示为:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \quad (4)$$

式中, \mathbf{V} 为速度矢量, m/s ; p 为流体微元体上的压力, Pa ; F_x 、 F_y 和 F_z 为不同方向的质量力, m/s^2 ; τ_{xx} 、 τ_{xy} 和 τ_{xz} 分别为黏性应力 τ 的分量, N/m^2 。

能量守恒定律的内在本质是热力学第一定律,其表达式可表示为:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho u T) = \text{div}\left(\frac{k}{C_p} \text{grad } T\right) + S_T \quad (5)$$

式中, C_p 为比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; T 为温度, $^\circ\text{C}$; k 为导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$; S_T 为流体的内热源, W/m^3 。

参考众多钝体绕流数值模拟文献,结合本文研究实际分析,由于模拟中流体的不可压缩性,流体在计算域流动时,壁面会对其造成一定的作用,再者高层建筑绕流问题均为高雷诺数模型,为修正此类情况带来的不良影响,确保计算的稳定性,选用 SST $k-\omega$ 模型效果较佳^[14-15],可更好地处理近壁面附近风场的分离与旋涡脱落等复杂情况。SST $k-\omega$ 湍流模型的流场输运方程如下:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \quad (7)$$

式中, k 为湍动能; ω 为比耗散率; u_i 、 u_i 为湍流速度平均量; G_k 、 G_ω 为由速度梯度引起的湍动能生成项; Γ_k 、 Γ_ω 分别为 k 、 ω 的对流项; Y_k 、 Y_ω 为由湍流引起的耗散项; D_ω 为交叉扩散项。

为优化计算结果,选用 SIMPLE 算法作为本模型的求解方法,采用二阶离散方式,每一个残值设

为 1×10^{-6} , 以此所获取结果的误差不会太高,计算结果通常较一阶迎风格式的误差更低,缺点是在运用二阶迎风格式进行求解时,浮点发散概率增加,但可以通过降低松弛因子来解决此情况。

1.3 边界条件

入口处采用速度入口边界条件,入口风速取 10 组数据,湍流模式为强度和黏度比,湍流强度运用公式(8)根据实际情况算得,湍流黏度参照相关风洞实验及 CFD 模拟取 $10^{[16]}$ 。

$$I = \frac{0.16}{Re^{0.125}} \quad (8)$$

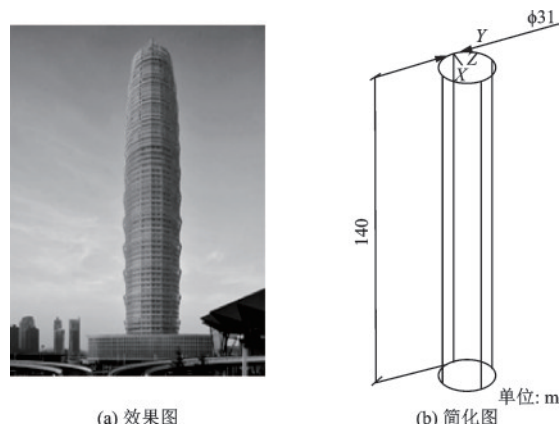
式中, I 为湍流强度; Re 为雷诺数。

出口处边界选用压力出口边界条件,压力设置为 0,湍流模式为强度和黏度比,湍流强度借助公式(8)按照实际情况得出,湍流黏度依据相关风洞测试及 CFD 模拟设为 10。因本文研究对象为单体建筑,上下边界速度梯度为 0,选用对称边界条件,而建筑物表面都是用无滑移静止壁面,从而便于在后处理过程中获得质量更高的图形结果^[17]。

2 圆柱形高层建筑数值模拟

2.1 模型概述

为验证前文数值算法的准确性,以河南省郑州市某广场主楼为例,构建圆柱建筑模型,其主楼是一座 280 m 高的塔楼,每层面积约 3 023 m^2 ,取其半径约为 31 m,原主楼效果如图 1(a)所示。考虑其对照性和通用性,将上述主楼抽象为圆柱形建筑并按照 1:2 的比例尺建立三维及二维圆形截面建筑模



(a) 效果图

(b) 简化图

图 1 圆柱形建筑三维示意图

Fig.1 Three-dimensional sketch of cylindrical building

型,并且在进行二维圆形截面模拟时,建筑的高度忽略不计。最后建立的三维模型几何尺寸为: $D=31\text{ m}$, $h_1=140\text{ m}$,简化后模型如图1(b)所示。

根据风洞实验确定计算域尺寸的原则,应使阻塞率不超过3%^[12],因此取计算域的宽度 $B=5D$,上游到建筑物的边界距离 $L_1=5D$,下游到建筑物的边界距离 $L_2=15D$, $H_1=10h_1$,其中 D 是建筑物的特征尺寸,满足计算风工程的要求。

为排除网格数量对模拟结果的影响,运用网格收敛指数法(Grid Convergence Index, GCI)选定近壁面区域网格,按照近壁面区域疏密程度可划分为稀疏网格、基础网格、加密网格三种类型,以高层建筑迎风面处的风压为变量观测点,分析其不同网格类型情况下所出现的误差,网格无关性分析结果见表1。

表1 圆柱形建筑网格无关性分析

Table 1 Grid-convergence analysis of cylindrical building

网格类型	网格数量/个	风压/Pa	相对误差	GCI
稀疏网格	32 816	6.25	0.36	0.085
基础网格	45 502	8.48	0.20	0.052
加密网格	56 845	10.20	0.39	0.037

其中基础网格与加密网格之间的相对误差符合3%以内的标准^[18-19],再充分考虑数值模拟的时间步长,经过Fluent检查,证明网格质量合格,综合多种因素,因此最终选用基础网格进行后续数值模拟研究,圆柱形建筑计算域基础网格如图2所示。

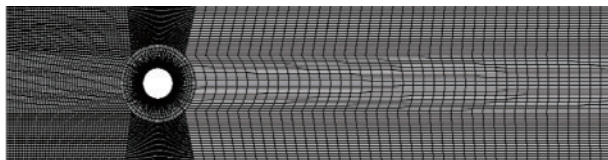


图2 圆柱形建筑计算域基础网格平面图

Fig.2 Basic grid plan of cylindrical architecture computing domain

风场中的绕流不同于水流域,当风速过小时,比如 0.1 m/s 的风场流过高层建筑时,产生的风振对建筑物可忽略不计。因此需在高雷诺数下进行研究,而且存在观测卡门涡街及其旋涡脱落的必要性,故借助圆柱体涡激振动的超临界范围($Re > 3.5 \times 10^6$)进行分析研判。

2.2 计算结果与分析

随着 Re 逐渐增大,来流速度 U 逐渐增加,从图3可看出,旋涡尾部轨迹流动越来越长,能量损耗

也越来越大,被建筑物自身固有频率“锁定”所呈现的现象愈加明显,具体表征为建筑物摆动剧烈,且可明显观察到涡对现象,涡的大小相等,方向相反,由涡运动学理论可知,涡对有向下游运动的趋势。与此之外,流场瞬间产生卡门涡街,伴随着距离的变远,初代旋涡涡量慢慢变小。与文献[17]模拟一致,风场流经建筑物后,超临界范围的尾涡是交错排列的模式,压力云图呈现出建筑物前方处于正压状态,左右两侧及后侧均处于负压状态,且后侧压力场随着尾涡的脱落,也呈周期性变化。

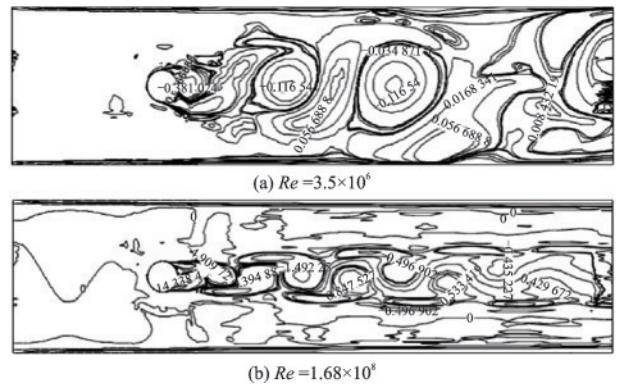


图3 不同 Re 下圆柱形建筑涡量等值线图(稳态)

Fig.3 Vorticity contour maps of cylindrical building under different Re (steady state)

从图4可看出,随着 Re 逐渐增大,尾涡脱落加快,升力、阻力系数波动越来越早,当 $Re=3.5 \times 10^7$ 时明显观察到阻力系数的周期约为升力系数的一半,同时阻力系数脉动力幅值小于升力系数脉动力幅值,对建筑物扰动的影响远小于升力系数。

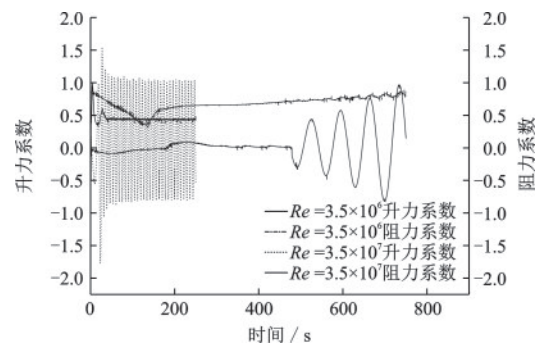


图4 圆柱形建筑部分升力、阻力系数时程图

Fig.4 Time history diagram of lift and drag coefficients of cylindrical building

将阻力系数以及升力系数曲线作快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT),获得阻力、升

力系数的频谱曲线。两组数据进行比对,可验证阻力系数周期是升力系数周期一半的猜想。如图5所示,在升力系数频谱图像中,幅值对应的横坐标为升力变化的频率,根据尾涡脱落的原理,也为旋涡脱落的频率,其他组数据均是如此。

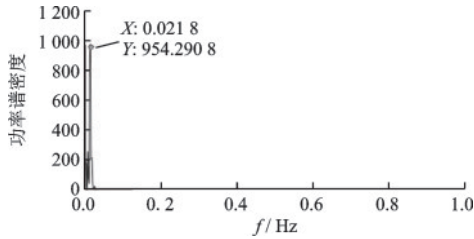


图5 $Re=3.5 \times 10^6$ 时升力系数频谱

Fig.5 Spectrum of lift coefficients under $Re=3.5 \times 10^6$

可借助计算流体力学软件ANSYS中模态分析功能获取建筑固有频率 f_{n1} 。首先按照模拟的尺寸重新构造出一个没有计算域,只有该建筑物的模块,并且设定该建筑物材料为混凝土材质,选取圆柱建筑底面为地基进行固定,当圆柱受到风振作用而沿着X轴方向左右两侧偏离平衡位置,会自动摆动回原来位置,形成周期性运动。据此,假设圆柱的边界条件在竖直方向位移为0,在顺流向自由移动。进行模态分析后得到该尺寸圆柱形建筑的一阶顺流向固有频率 f_{n1} 为0.781 23 Hz。

涡激共振指当圆柱尾涡脱落频率 f 与建筑固有频率 f_n 接近时,可认定发生“锁定现象”,如图6所示。此时结构固有频率捕获旋涡脱落频率,建筑物发生剧烈抖动。本文中未采用动网格方式进行模拟,所以不能准确获取建筑物摆幅数据,但与文献[19]对比便能推测此时会发生“拍频”现象,“锁定”状态下的圆柱形建筑物的振动与正常下的状态相比会呈现出多模态性和随机性,同时也可推测出该建筑物的“锁定”区间为 $44 \text{ m/s} \leq U \leq 59 \text{ m/s}$ 。

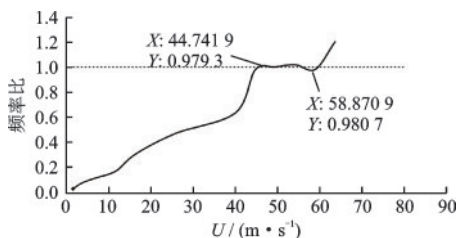


图6 圆柱形建筑频率比随来流速度的变化趋势

Fig.6 The variation trend of frequency ratio with incoming flow velocity of cylindrical building

利用公式(9)以及公式(10)计算 St ,将圆柱体绕流相关文献[19]中的 St 随 Re 的变化趋势与本节进行比较,从图7可看出曲线规律基本一致,但是个别数据存在些许差异。误差的产生主要由于分析数据集都是建立在二维模拟的基础上,忽视旋涡脱落的三维效应,即竖直方向风场及压力场的变化。但是本文所计算的结果还是基本表明斯特劳哈尔数在超临界区内的变化特性。鉴于涡量图以及验证结果与文献[19]相吻合,可以大致验证该数值模拟方法及程序的可靠性,运用其进行模拟能取得合理的结果。

$$St = \frac{fL}{U} \quad (9)$$

$$L = \frac{4S}{C} \quad (10)$$

式中, St 为斯特劳哈尔数,无量纲; f 为旋涡脱落频率,Hz; L 为结构垂直于来流方向的水力直径,m; U 为风速,m/s; S 为模型横截面的面积, m^2 ; C 为模型横截面的周长,m。

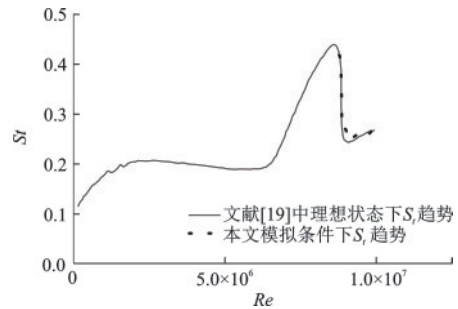


图7 St 和 Re 变化趋势对比

Fig.7 Comparison of St and Re trends

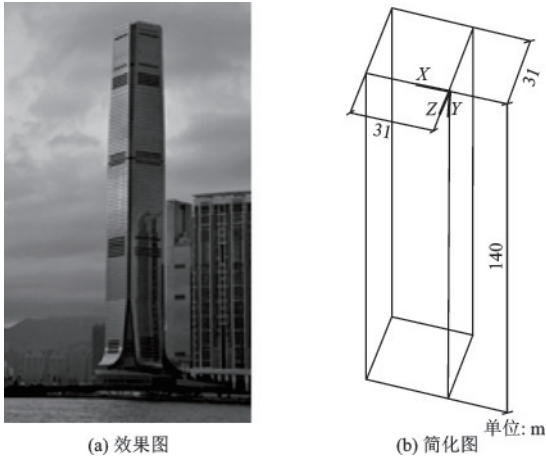
3 矩形高层建筑数值模拟

3.1 模型概述

以中国香港某建筑为例,构建矩形建筑模型,其为118层、484 m高的矩形建筑,总建筑面积约 $233\ 644.86 \text{ m}^2$,每层面积约 $3\ 271.03 \text{ m}^2$,原建筑整体外观如图8(a)所示。

为与前文中的圆柱形建筑分析结果进行对比并寻找二者之间结构的联系,将上述某建筑抽象为矩形建筑并按照1:2.5的比例尺建立三维及二维圆形截面建筑模型,并且在高度上进行适当调整。同理,在进行二维矩形截面模拟时,建筑高度对结果产生的影响忽略不计,三维结构建模时,忽略其在

建造时所增加的阻尼器等防止涡激共振的装置,对其整体结构进行简化处理,以使本文模拟更具有参考性。最后建立的三维模型几何尺寸为: $L=31\text{ m}$, $h_2=140\text{ m}$,简化后模型如图8(b)所示。



(a) 效果图

(b) 简化图

图8 矩形建筑三维示意图

Fig.8 Three-dimensional sketch of rectangular building

矩形建筑计算区域的设定与圆柱建筑物绕流相似,其计算域尺寸:宽度 $B_2=5L$,上游边界距离建筑物 $L_3=5L$,下游边界距离建筑物 $L_4=15D$, $H_2=10h_2$,其中 L 为建筑物的特征尺寸,矩形建筑即为其边长, h_2 就是矩形建筑的高度。其尺寸及边界条件都与圆柱形建筑一样,因此该计算域阻塞率同为 $2\% < 3\%$,同时二维模型建筑与两边壁面距离之比也小于 3% ,满足建模要求。矩形建筑模型网格划分原则与圆柱形建筑模型基本一致,经过网格无关性验证,选定20 094个面网格的基础网格类型,矩形建筑计算域基础网格如图9所示。

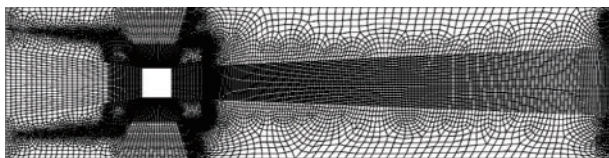


图9 矩形建筑计算域基础网格平面图

Fig.9 Basic grid plan of rectangular architecture computing domain

最关键的研究内容是不同形状建筑物的绕流特性,差异性体现在建筑物外形,因此,为确保模拟结果论证的准确性,矩形建筑物计算域与圆柱形建筑物模拟验证程序基本一致。

3.2 计算结果与分析

矩形建筑方面的绕流研究现阶段各学者侧重点不同,故无可参考的不同 Re 下尾涡是层流还是湍流及其旋涡所呈现的形态。但为对照两者之间形状对建筑绕流产生的影响,参照上节圆柱形建筑模拟所选 Re 进行研究,观察旋涡形态及层流与湍流的转换。

图10(a)表征,当 $Re=3.5\times 10^6$ 时,风场经过建筑后,尾部风场不发生分离,无旋涡产生,但分层流动,互不混合,呈层流状态。对比图10(a)与图10(b)可发现,在出现尾涡后,呈现出交错排列的模式,顺时针转动的旋涡与逆时针转动的旋涡形成涡对,一起裹挟着向下游流动,其原因是在形成尾部旋涡的过程中,其是持续地通过固壁面粘性剪切层来摄取自由来流 U 的转换能量,当尾涡旋涡脱落后,其能量通过旋涡在流场中向下流动的流动过程中逐渐的耗散。并且两边壁面有些位置存在二次卡门涡街的产生,其为矩形建筑尾部主旋涡能量耗散引发的现象之一,计算域的宽度 $B=5D=155\text{ m}$,可知矩形建筑发生绕流时,对距矩形建筑大约100 m周围的建筑都有产生涡激共振的倾向,国家相关部门和企业在进行土地规划时,切不可忽视此建筑绕流的因素,考虑此建筑对周围建筑物的干扰或遮挡效应。

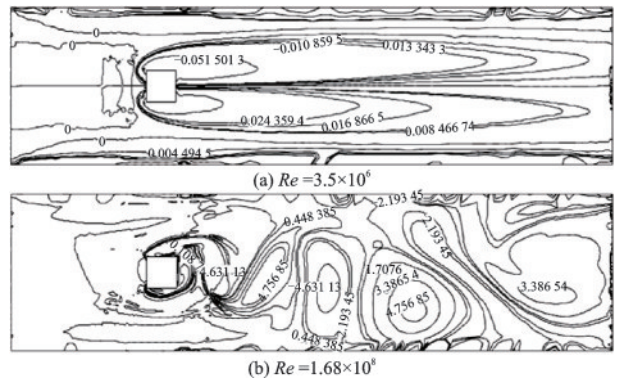


图10 不同 Re 下矩形建筑涡量等值线图(稳态)

Fig.10 Vorticity contour maps of rectangle building under different Re (steady state)

任何结构建筑物绕流过程中所产生的尾涡,从近流场到远流场都存在稳定规则的、涡量逐渐衰减的、正负依次交替的卡门涡街形态,且当 $Re\geq 1.25\times 10^8$,负涡量分布不再集中,旋涡形态不再明显,涡列慢慢地出现显著的离散、吞噬等过程,使得涡量在远流场扩散。

从图 11 可看出,当 $Re=3.5\times 10^6$ 时,所监测到的阻力随着流场中的风速趋于稳定后,也处于平稳值,升力虽然有波动,但未形成正、负升力,旋涡形成条件不充分,与其涡量线图相互验证,在此雷诺数下尾涡是处于层流状态,倘若在流场后方有比此建筑尺寸小的建筑物,在恰当的雷诺数下,流场绕流后可能形成二次卡门涡街。

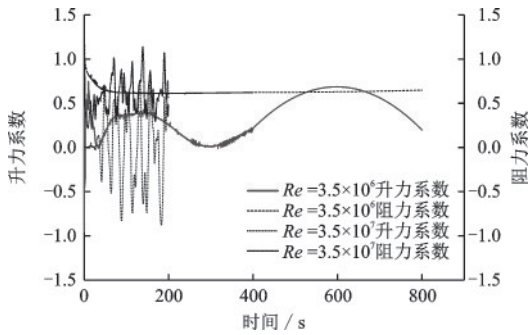


图 11 矩形建筑部分升力、阻力系数时程

Fig.11 Time history diagram of lift and drag coefficient of rectangular building

对比圆柱形建筑的升力、阻力系数时程图,虽然矩形建筑升力、阻力系数时程图也存在规律性,但圆柱形建筑的升力系数展现为正弦曲线,而矩形建筑的升力、阻力系数有多个极值,是复合的周期性曲线。所以圆柱形建筑的尾涡对周围建筑影响不大,主要是其后方建筑的绕流影响,矩形建筑固壁黏性剪切层明显,顺时针的旋涡脱落时,还有一部分涡量附着在建筑一侧,而此时另一侧逆时针的旋涡已经产生,由此直接阻隔少部分涡量,部分涡量慢慢跟随着在大涡之后,因此升力系数出现两或多个极值,并且由于这部分能量的存在,会加快旋涡间的离散、吞噬和合并等过程,在一定范围内形成二次卡门涡街,导致尾流区域展向幅度增大,阻碍尾流恢复自由来流状态。

矩形建筑尾涡的旋涡脱落频率 f_2 及其固有频率 f_{n2} 的获取与圆柱形建筑一样,进行模态分析,得到该尺寸下矩形建筑的一阶顺流向固有频率 f_{n2} 为 0.784 97 Hz。

结合图 12 可观察到当来流速度 $U\approx 80$ m/s 时,进入“锁定频率”现象的预兆阶段,其振幅会迅速增大,当 $U=91.84$ m/s 时,因为频率比不再随来流速度 U 出现大幅波动,此时完全被“锁定”,同性质的旋涡彼此融合以增加其强度,因此,其“锁定”区间的起始来流速度 U 为 91.84 m/s。

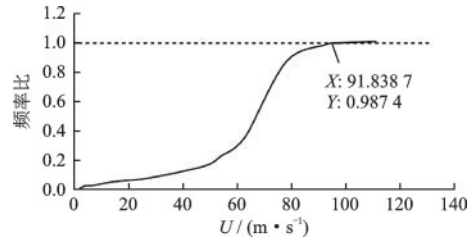


图 12 矩形建筑频率比随来流速度的变化趋势

Fig.12 The change trend of frequency ratio with incoming flow velocity of rectangular building

矩形建筑无可参考的 St 与 Re 关系图,但可知出现涡激共振时, St 会出现显著的变化,图 13 中当 $Re=1.65\times 10^8$ 表征此特点。

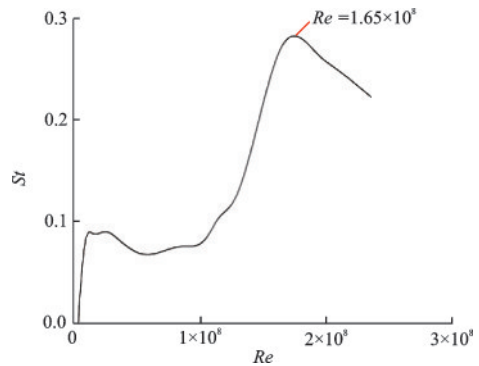


图 13 矩形建筑数值模拟的 St 和 Re 变化

Fig.13 St and Re diagram of numerical simulation of rectangular building

4 两类建筑物数值模拟数据对比分析

由前文模态分析可知圆柱形建筑固有频率 f_{n1} 与矩形建筑固有频率 f_{n2} 比较相近, $f_{n1}=0.781\ 23$ Hz, $f_{n2}=0.784\ 97$ Hz, 则两种相同尺寸的圆柱形建筑、矩形建筑发生涡激共振固有频率可以近似相等, 两种类型建筑物安全性的高低主要是二者尾涡脱落形态及其频率的差异引起的。圆柱形建筑与矩形建筑的频率随 Re 变化趋势如图 14 所示, 整体来看, 任何建筑的旋涡脱落频率都是随着 Re 增大而增大, 并且圆柱形建筑最易出现涡激共振的现象, 但其“锁定”区间比矩形建筑较短, 其绕流更易发生并且很快形成周期性的卡门涡街, 而对于矩形建筑, 当 $Re\leq 3.5\times 10^8$, 旋涡脱落频率变化较小, 其固壁黏性剪切层明显, 尾涡携带能量较大, 并且随着时程的增加, 旋涡能量逐渐损耗逸散, 涡量足够时, 在周围流场会产生二次卡门涡街, 对周围建筑造成影响。

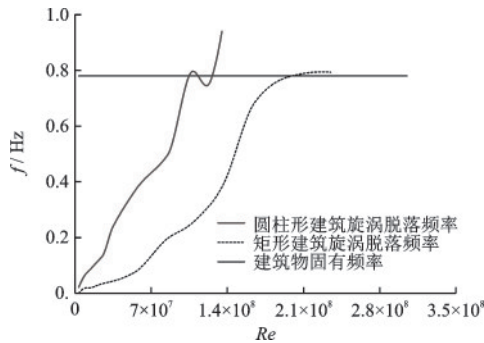


图 14 频率随 Re 变化趋势

Fig.14 Frequency trends with Re

由数值模拟结果拟合出两类不同形状尾涡脱落频率 f 随 Re 变化趋势的方程, 圆柱形建筑拟合方程: $f_1 = 4 \times 10^{-18} Re^2 + 6 \times 10^{-9} Re + 6 \times 10^{-5}$, $R^2 = 0.9823$; 矩形建筑拟合方程: $f_2 = 7 \times 10^{-18} Re^2 + 2 \times 10^{-9} Re - 3.07 \times 10^{-2}$, $R^2 = 0.9613$ 。其拟合方程相关系数 R^2 均满足大于 0.9 的标准^[20], 且比较接近于 1, 说明两个方程拟合效果较好, 基于该两个方程预测后续状况具有一定可靠性。

本文中矩形建筑 St 随 Re 变化趋势与圆柱体建筑基本一致, 但其 $Re = 3.5 \times 10^6$ 是层流状态, $Re = 8.0 \times 10^6$ 是湍流状态, 由此可知 $3.5 \times 10^6 < Re < 8.0 \times 10^6$ 存在一个过渡流状态, 即绕流后近流场区域为层流, 远流场区域为湍流。从升力系数、阻力系数时程图可观察圆柱形建筑尾涡形态比较规律, 涡量分布均匀, 而矩形建筑的升力、阻力出现“幅值交替”现象, 存在多个极值, 涡量分布随机。

鉴于此, 为防止矩形建筑尾涡产生二次卡门涡街, 同时考虑节约土地资源, 使建筑密度适宜, 结合相关角部修正对建筑周围流场及表面风荷载的影响机理, 得出圆角能有效降低风荷载, 尾涡脱落更加规律, 因此在设计时, 矩形建筑可进行倒圆角处理。

5 结 论

利用计算流体力学软件 ANSYS 及后处理软件 Tecplot, 以河南省郑州市某广场主楼与中国香港某建筑为例, 选取圆柱体超临界范围的雷诺数对圆柱形建筑、矩形建筑的绕流特性进行二维、三维数值模拟, 主要结论如下:

(1) 层流与湍流转换状态的数值模拟运用 SST $k-\omega$ 湍流模型效果较好。对比圆柱形建筑模拟结果可发现, 与相关学者们总结的超临界区出现的湍流

形态一致, 并且旋涡脱落频率的有关参数, 如 St 也能获得准确的数值。同时, 无论任何形状的建筑, 只要出现卡门涡街现象, 其升力系数振荡频率便为阻力系数振荡频率的 2 倍, 固壁的粘性剪切层越明显, 流场越复杂, 湍流“幅值交替”现象更明显。

(2) 建筑物的涡激振动随来流速度的变化分为发展、共振、逃逸三个阶段。圆柱形建筑物: 发展期, 当 $1.6492 \text{ m/s} \leq U \leq 44 \text{ m/s}$ 时, 建筑物的涡激振动不明显, 临近 44 m/s 时, 其摆幅会大幅增长; 共振期, 当 $44 \text{ m/s} \leq U \leq 58 \text{ m/s}$ 时, 建筑物的固有频率会捕获旋涡脱落频率, 随后旋涡脱落频率不再随流速度的增加而增加, 从而出现涡激共振现象; 逃逸期, 当 $U > 58 \text{ m/s}$ 时, 建筑物的涡激振动将不再发生锁定, 旋涡脱落频率逃逸, 其升力逐渐变得稳定, 升力系数变化频率即旋涡脱落频率的改变再次呈正相关, 建筑的顺流向振幅有降低趋势。矩形建筑物亦然, 不同的是, 二者的各阶段所处的来流速度 U 稍有不同。

(3) 矩形建筑比圆柱形建筑更加安全。尽管矩形建筑涡激共振锁定范围较大, 但自然环境下还是比较难达到这一条件。假如为追求美观而选择圆柱形建筑, 可以从两方面下手, 其一是增大建筑的固有频率, 加固建筑物的刚性, 选择优质的建筑材料, 如采用钢筋混凝土等复合材料或者增大其尺寸, 其二是改变建筑物后的流场, 破坏尾涡的周期性泄放, 如间隔相应数量楼层设置透空层、附加阻尼装置等。

参考文献:

- [1] 邵韦平, 马泷, 解立婕. 高层建筑的现状与未来[J]. 建筑学报, 2019(3):1-5.
Shao W P, Ma L, Xie L J. The present situation and future of high-rise buildings [J]. Architectural Journal, 2019(3): 1-5. (in Chinese)
- [2] 贾进章, 陈怡诺. 基于网络层次分析-灰色聚类法的高层建筑火灾风险分析[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(4): 1228-1235.
Jia J Z, Chen Y N. Based on network analytic hierarchy process-Fire risk analysis of high-rise building based on grey clustering method [J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(4): 1228-1235. (in Chinese)
- [3] 赵慧明, 张伟伟, 赵玉成, 等. 简议塔科马大桥坍塌的原因与启示[J]. 力学与实践, 2021, 43(6):1012-1018.
Zhao H M, Zhang W W, Zhao Y C, et al. A brief discussion on the causes and enlightenment of the Tacoma

- Bridge collapse[J]. *Mechanics in Engineering*, 2021, 43(6):1012-1018. (in Chinese)
- [4] 颜大椿. 湍流、风工程和虎门大桥的风振[J]. *力学与实践*, 2020, 42(4):523-525.
Yan D C. Turbulence, wind engineering and wind vibration of humen bridge[J]. *Mechanics in Engineering*, 2020, 42(4):523-525. (in Chinese)
- [5] 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.
Yang Y, Ma F X, Tan J C, et al. Measurement and analysis of atmospheric boundary layer wind field in vibration event of Seger Tower[J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(10): 122-129. (in Chinese)
- [6] 卢莹, 赵海坤, 赵丹, 等. 1984-2017年影响中国热带气旋灾害的时空特征分析[J]. *海洋学报*, 2021, 43(6): 45-61.
Lu Y, Zhao H K, Zhao D, et al. Spatio-temporal characteristics of tropical cyclone disasters affecting China from 1984 to 2017[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(6): 45-61. (in Chinese)
- [7] 刘钢, 李永贵, 肖翊翔, 等. 风场类型对高层建筑风致响应的影响研究[J]. *自然灾害学报*, 2021, 30(1): 124-131.
Liu G, Li Y G, Xiao C C, et al. Influence of wind field types on wind-induced response of high-rise buildings [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2021, 30(1): 124-131. (in Chinese)
- [8] Zhang J, Dalton C. Interactions of vortex-induced vibrations of a circular cylinder and a steady approach flow at a Reynolds number of 13, 000[J]. *Computers & Fluids*, 1996, 25(3): 283-294.
- [9] Oviedo-Tolentino F, Pérez-Gutierrez F G, Romero-Méndez R, et al. Vortex-induced vibration of a bottom fixed flexible circular beam [J]. *Ocean Engineering*, 2014, 88: 463-471.
- [10] 任彤煜, 王秋波, 张筱璐, 等. 不同雷诺数下圆柱结构涡激振动的数值模拟[J]. *应用科技*, 2021, 48(4): 8-13.
Ren T Y, Wang Q B, Zhang Y L, et al. Numerical simulation of vortex-induced vibration of cylindrical structures at different Reynolds numbers [J]. *Applied Science and Technology*, 2021, 48(4): 8-13. (in Chinese)
- [11] 桂洪斌, 卢腾超. 海洋立管涡激振动的数值模拟研究[J]. *船舶力学*, 2016, 20(1): 93-98.
Gui H B, Lu T C. Numerical simulation of vortex-induced vibration of Marine riser[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2016, 20(1): 93-98. (in Chinese)
- [12] 曹坤. 天津双街镇半湾大厦项目高层建筑CFD数值模拟[D]. 吉林: 东北电力大学, 2020.
Cao K. CFD Numerical simulation of high-rise building in Banwan Building Project, Shuangjie Town, Tianjin [D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2020. (in Chinese)
- [13] 涂佳黄, 曹波, 洪荣华, 等. 某带钢塔高层建筑结构风致动力特性分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2017, 37(1):169-176.
Tu J H, Cao B, Hong R H, et al. Analysis of wind-induced dynamic characteristics of a high-rise building with steel tower[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2017, 37(1):169-176. (in Chinese)
- [14] Zdravkovich M M. *Flow around circular cylinders*[M]. Oxford: Oxford University Press, 1997.
- [15] 赵国智, 孔凡让, 占惊春, 等. 基于SIMPLE算法的湍流场数值模拟[J]. *水电能源科学*, 2007(3): 100-102.
Zhao G Z, Kong F R, Zhan J C, et al. Numerical simulation of turbulent field based on SIMPLE algorithm [J]. *Water Resources and Power*, 2007(3): 100-102. (in Chinese)
- [16] 苏万林. 湍流对高层建筑风效应影响的风洞试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
Su W L. Wind tunnel test study on wind effect of turbulence on high-rise building [D]. Changsha: Hunan university, 2017. (in Chinese)
- [17] 卢旦. 基于FFD变换的高层建筑风致流固耦合数值模拟研究[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(7):17-23.
Lu D. Numerical simulation of wind-induced fluid-structure interaction in high-rise buildings based on FFD transform[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(7):17-23. (in Chinese)
- [18] 唐卫国, 陈威, 吴轶钢, 等. 不同流动状态下旋转圆柱扰流数值模拟研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2021, 2(2): 247-253.
Tang W G, Chen W, Wu Y G, et al. Numerical simulation of rotating cylinder turbulence under different flow states[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2021, 2(2): 247-253. (in Chinese)
- [19] 王晓凯, 娄敏. 尾流干涉下串联圆柱涡激振动数值模拟研究[J]. *石油机械*, 2021, 49(1): 72-79.
Wang X K, Lou M. Numerical simulation of vortex-induced vibration of a series cylinder under wake interference [J]. *China Petroleum Machinery*, 2021, 49(1): 72-79. (in Chinese)
- [20] 门向南, 吕秀文, 徐勇, 等. 铝合金盒形零件充液拉深工艺参数优化研究[J]. *航空制造技术*, 2021, 64(17): 41-52.
Men X N, Lyu X W, Xu Y, et al. Optimization of parameters of liquid - filled deep drawing process for aluminum alloy box parts [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2021, 64(17): 41-52. (in Chinese)

(本文编辑:赵霞)