

文章编号: 1000-5862(2019)03-0231-06

风载荷作用下的塔群瞬态绕流及受力分析

汪文锋¹, 黄 思^{2*}, 郭晨光², 叶伟文¹, 李茂东¹

(1. 广州特种承压设备检测研究院, 广东 广州 510663; 2. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641)

摘要: 以某石化企业的 3 塔柱作为研究对象, 分别对塔群和 3 个塔柱单独建立计算模型. 运用 Fluent 流动软件, 模拟计算 3 种风速下的塔柱瞬态绕流问题. 3 个塔柱直径 D 分别为 2.8 m、3.3 m 和 2.5 m, 间距比 L/D 分别为 1.98、2.72 和 4.69; 雷诺数 $R_e = (1.50 \sim 6.65) \times 10^6$. 计算得到了塔柱和塔群的涡脱频率以及所受升力、阻力随时间的变化规律, 由此分析了单塔情况下受力和塔群合力的关系, 探讨了单塔和塔群的涡脱频率关系及其群体干涉效应, 为石化企业的安全运行提供技术支持.

关键词: 塔群风载; 瞬态绕流; 涡脱频率; 数值模拟

中图分类号: TE 962 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2019.03.03

0 引言

随着行业的快速发展, 石化企业中多个高塔的运行场合在不断增多, 引起了人们对高塔风载和群体干涉效应的极大关注^[1-2]. 当风吹向塔体时, 除产生与风向平行的阻力 F_d 外, 还在塔体下游两侧交替地释放出旋涡, 形成垂直于风向的升力 F_l , 使塔体产生横向振动. 旋涡的脱落频率 f_s 一旦与塔的自振频率 f 相近或相等, 塔设备将发生共振并引发安全问题.

塔群的风振问题, 从本质上说是多个柱体绕流的气动力学问题^[3-4]. M. M. Alam^[5] 测量了一对串联布置的圆柱体在不同间距比 L/D 下阻力系数的变化情况; 文献 [6-8] 分别研究了 4 圆柱绕流问题, 发现流态受雷诺数 R_e 和间距比 L/D 的综合影响; 贺然^[9] 模拟计算了 L/D 的不同比值及风向下阵列 4 圆柱绕流问题; 胡卫华^[10] 计算了不同排列下双圆柱、3 圆柱和 4 圆柱的 2 维绕流场, 发现流场与圆柱个数、排列方式有关; 田启龙^[11] 计算了不同 L/D 下的双圆柱串列和并列绕流问题, 得到了圆柱的升力系数、阻力系数、斯特哈罗数 S_f 以及尾涡结构的变化, 发现当间隔比较大时, 2 圆柱的干涉影响较小, 可近似看作 2 个单圆柱绕流.

综上所述, 国内外对多柱绕流的研究及其结论

仅限于各自的雷诺数 R_e 、间距比 L/D 和来流角度范围. 本文选取华南地区某石化企业的 3 塔柱作为研究对象, 分别对塔群和 3 个塔柱单独建立计算模型. 运用 Fluent 流动软件, 模拟计算 3 种风速下的塔柱瞬态绕流问题, 得到塔柱和塔群的涡脱频率以及受力随时间的变化规律, 分析单塔受力和塔群合力的关系及其群体干涉效应, 为石化企业的安全运行提供技术支持.

1 计算模型和方法

1.1 流动计算域和边界条件

图 1 是所研究的 3 塔柱组成的塔群设备, 其中塔 1(左一)、塔 2(中间)和塔 3(右一)的直径 D 分别为 2.8 m、3.3 m 和 2.5 m; 塔 1 和塔 2 的间距比 $L/D = 1.98$, 塔 2 和塔 3 的 $L/D = 2.72$, 塔 1 和塔 3 的 $L/D = 4.69$. 分别对塔群和 3 个塔柱单独建立 2 维流动计算模型. 作为示例, 图 2 给出了塔群的 2 维流动计算域. 针对当地的气候情况, 选取 3 种典型的来流风速 U (见表 1). 计算域的边界条件是左侧为速度入流, 右侧为恒定的出口流量, 上下边界和圆柱表面为无滑移条件. 采用剪切应力输运 SST $k-\omega$ 的湍流模型, 对瞬态流动控制方程的对流项采用 2 阶离散格式, 扩散项采用 2 阶中心分离离散格式, 压力

收稿日期: 2018-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(21878102)和广东省质监局科技(2017CT27)资助项目.

通信作者: 黄 思(1962-), 男, 广西南宁人, 教授, 博士生导师, 主要从事流体机械的教学与科研工作. E-mail: huangsi@scut.edu.cn

速度耦合迭代采用 SIMPLE 算法,对动量方程、标量输运方程采用欠松弛因子,计算收敛精度取 10^{-3} .

表 1 计算使用的风速

| 风速 $U/(m \cdot s^{-1})$ | 风力等级 | 雷诺数 $Re/\times 10^6$ |
|-------------------------|------|----------------------|
| 8 | 5 | 1.50 |
| 20 | 8 | 3.80 |
| 35 | 12 | 6.65 |

雷诺数 Re 定义为 $Re = \rho U D / \mu$, 其中 ρ 为流体密度 μ 为流体动力粘性系数.

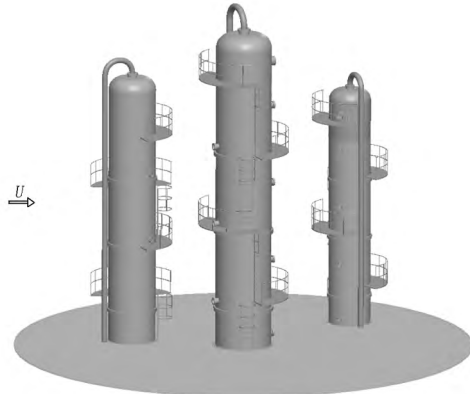


图 1 塔群设备模型

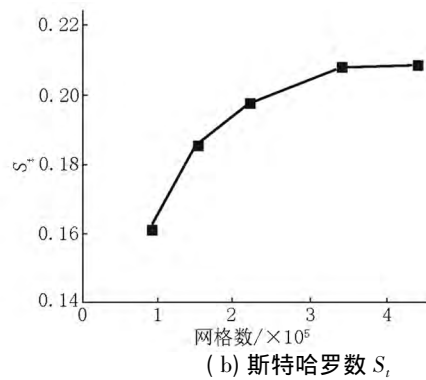
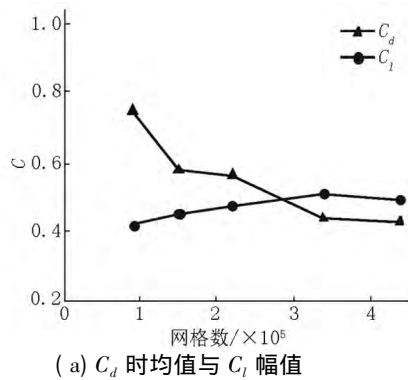


图 3 性能参数随网格数变化情况

由图 3 可见,当网格数量超过 3.4×10^5 时,计算结果变化很小. 因此选取该网格数作为模拟计算的网格单元数.

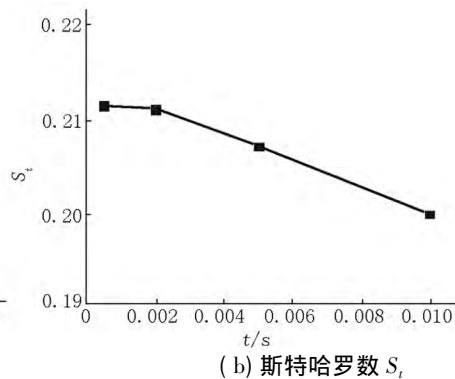
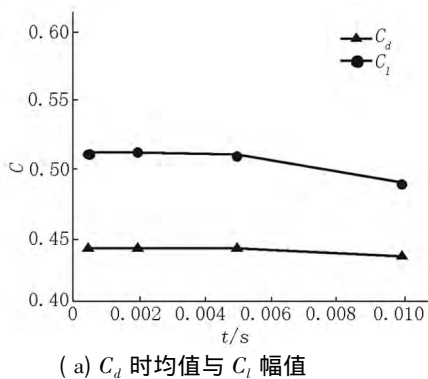


图 4 塔 1 的计算结果随 Δt 的变化情况($U=35 m \cdot s^{-1}$)

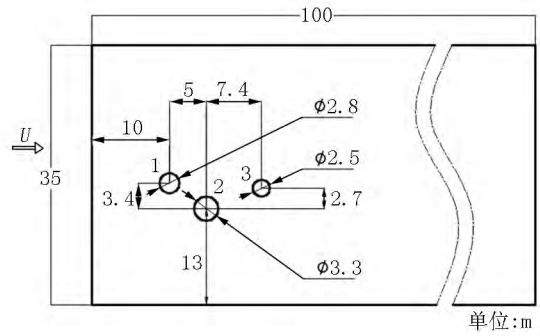


图 2 塔群计算域

1.2 计算域网格划分

对所建立的流动计算域采用混合网格划分. 为避免网格单元数目影响计算结果,需要考察计算域在几种网格数量下的计算结果. 图 3 给出了计算得到的塔 1 的升力系数 C_l 、阻力系数 C_d 、斯托罗哈数 S_t 随网格数的变化情况,其中 C_l 、 C_d 和 S_t 的定义如下^[12-14]:

$C_d = 2F_d / (\rho U^2 DL)$, $C_l = 2F_l / (\rho U^2 DL)$, $S_t = f_s D / U$, 其中 F_d 和 F_l 分别是塔体所受的阻力和升力, L 是柱体长度 f_s 是旋涡脱落频率.

1.3 时间步长设置

瞬态流场计算还需考察时间步长 Δt 设置对结果的影响. 图 4 为塔 1 的绕流参数随 Δt 的变化情况. 由图 4 可见,当 $\Delta t \leq 0.002 s$ 时计算结果的变化很小,因此在本文的模拟计算中采用该时间步长.

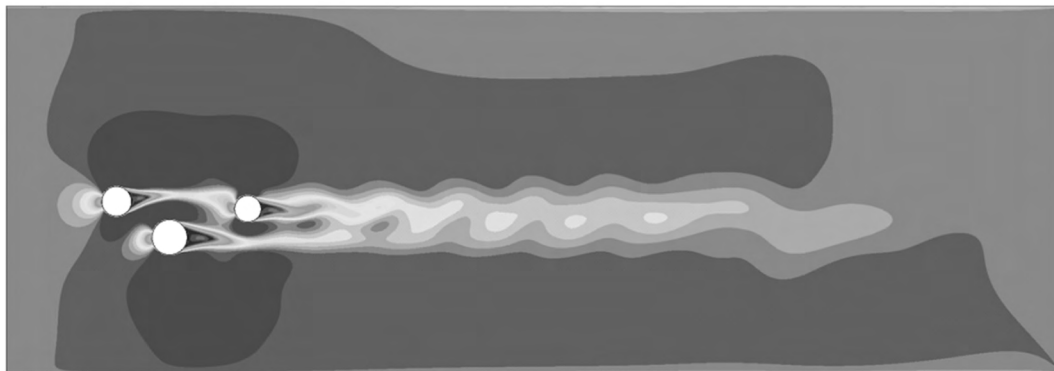
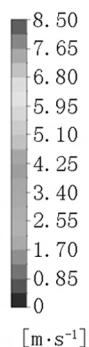
2 计算结果及分析

2.1 塔群流场

图5给出不同风速 U 下计算得到的塔群的代

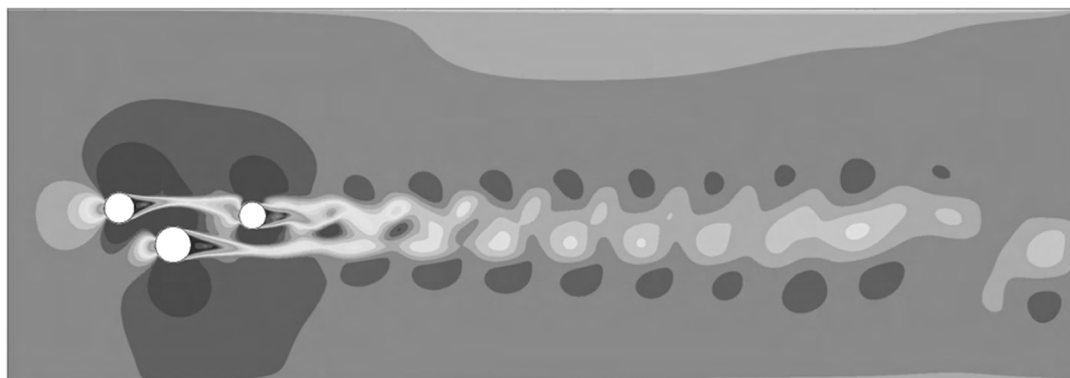
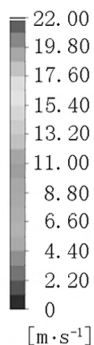
表性流速云图. 由图5可明显看到塔群在下游2侧周期性交替地释放出旋涡并形成“卡门涡街”. 塔柱上下游的压差产生纵向阻力 F_d , 而塔柱下游的周期性旋涡产生横向升力 F_l .

Velocity
Contour 1



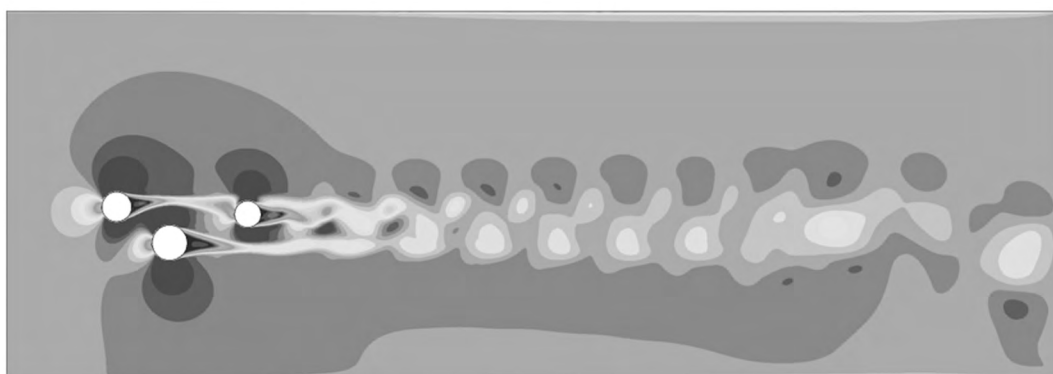
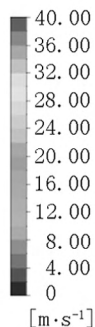
(a) $U=8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $t=16.0 \text{ s}$.

Velocity
Contour 1



(b) $U=20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $t=5.0 \text{ s}$.

Velocity
Contour 1



(c) $U=35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $t=2.5 \text{ s}$.

图5 不同风速 U 下塔群的流速云图

2.2 塔受力分析

图6给出不同风速 U 下计算得到的单塔参数 C_l 和 C_d 随时间 t 的变化情况. 由图6可看出, 在各个风速 U 下, 单塔的 C_d 经过一段时间过渡后都趋

近某个稳定值, C_l 则显示出有规则的谐波变化规律. 其中 $U=8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 条件下 C_l 的波幅随时间 t 有衰减趋势, 而 $U=20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $U=35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 条件下 C_l 的波幅没有衰减情况.

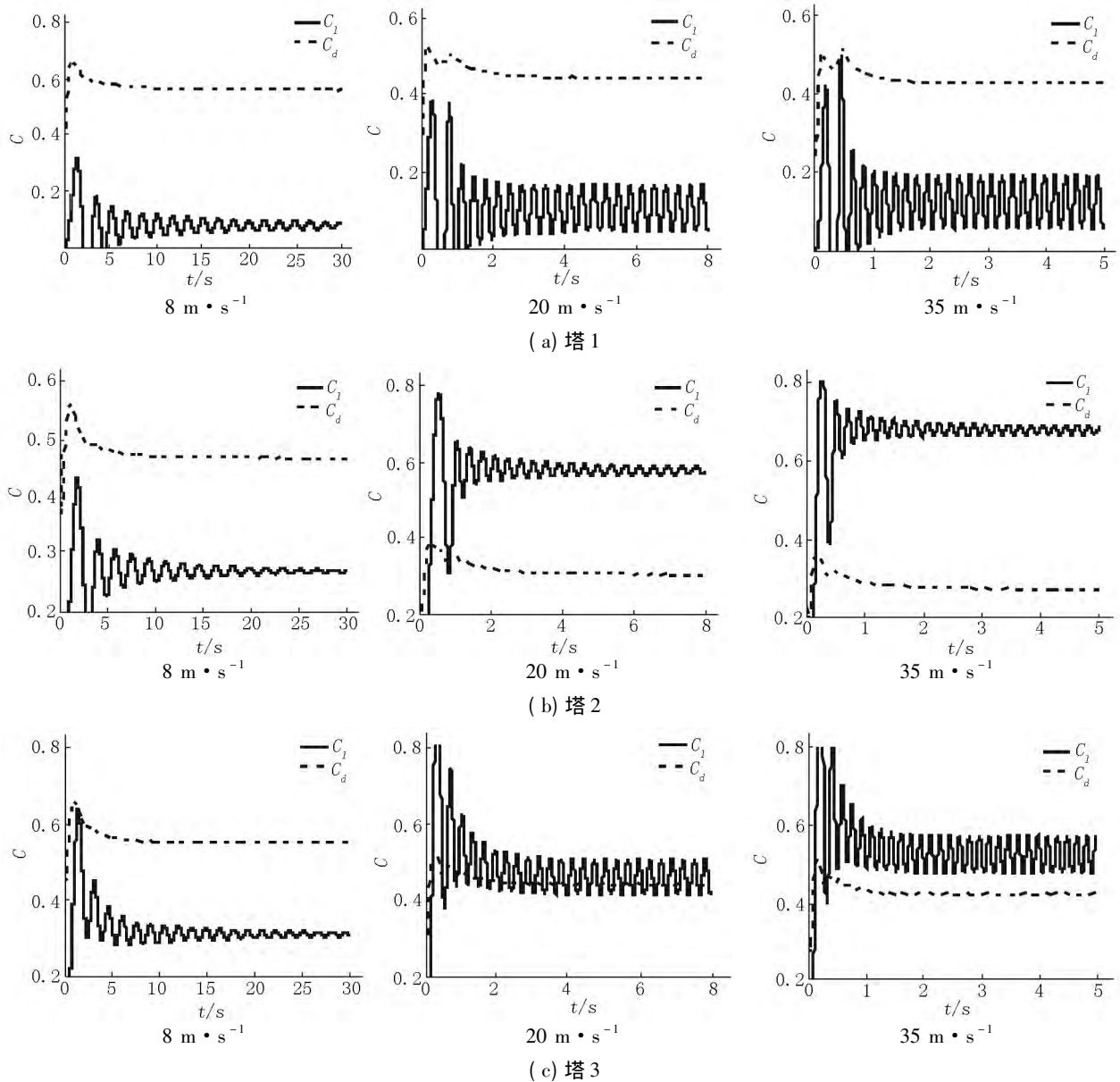
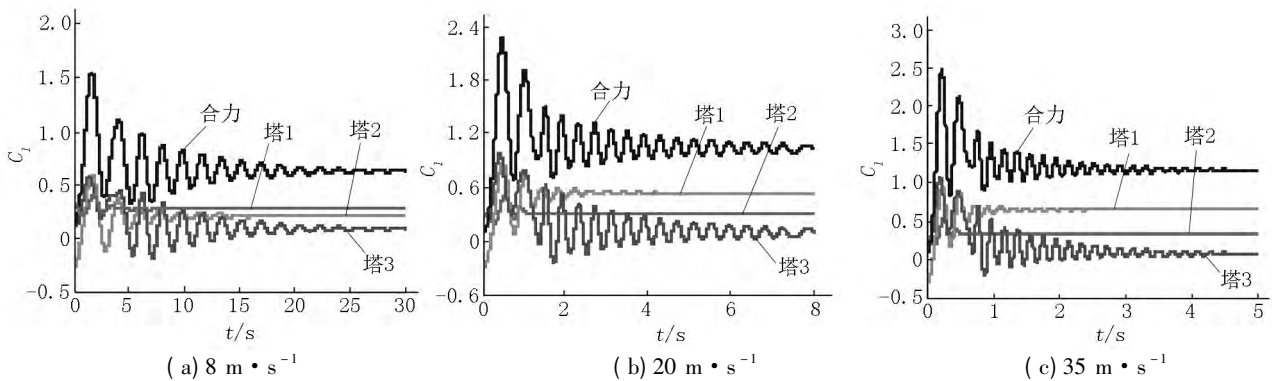
图6 单塔受力随时间 t 的变化情况

图7和图8分别给出不同风速 U 下计算得到的塔群的 C_l 和 C_d 随时间 t 的变化情况.由图7和图8可看出,经过一段过渡时间后各塔受力和塔群合力

做稳定的谐波变化,但波幅随时间 t 有明显的衰减趋势.由此还可发现,塔群中各塔的受力波动频率趋于一致,在数值上等于合力波动的频率值.

图7 塔群的 C_l 随时间 t 的变化

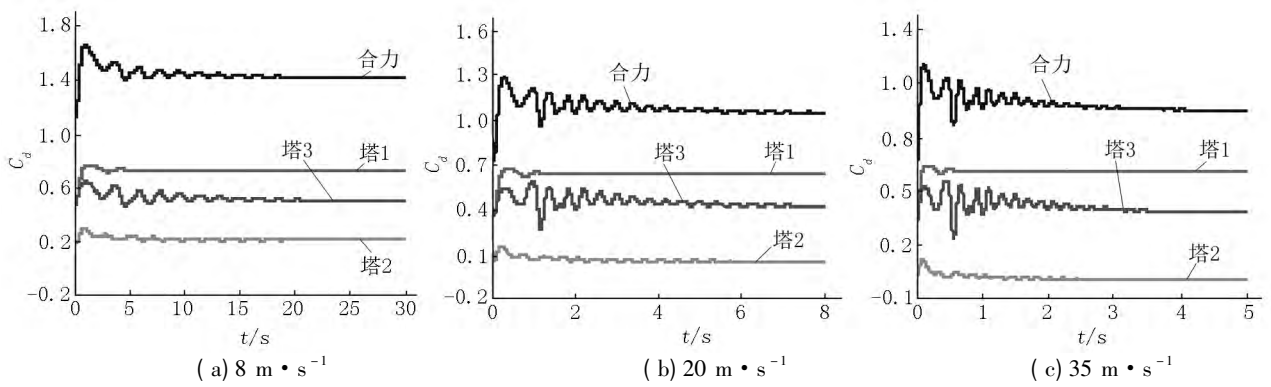


图 8 塔群的 C_d 随时间 t 的变化

根据图 6 ~ 图 8 的计算结果,得到单塔和塔群的总力,这表明所研究的塔群风载绕流模型存在群体干涉效应^[15-16].
根据图 6 ~ 图 8 的计算结果,得到单塔和塔群的总力,这表明所研究的塔群风载绕流模型存在群体干涉效应^[15-16].
还是阻力 C_d ,塔群的合力数值上均略小于 3 个单塔

表 2 不同风速下塔的受力情况

| 风速 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 参数 | 单塔 1 | 单塔 2 | 单塔 3 | 单塔总值 | 塔群合力 |
|---|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 8 | C_d | 0.561 5 | 0.469 0 | 0.549 0 | 1.579 5 | 1.433 5 |
| | C_l | 0.080 9 | 0.272 1 | 0.310 6 | 0.663 9 | 0.645 5 |
| 20 | C_d | 0.448 5 | 0.308 1 | 0.442 8 | 1.199 4 | 1.039 1 |
| | C_l | 0.115 3 | 0.579 6 | 0.462 5 | 1.157 4 | 1.043 5 |
| 35 | C_d | 0.433 5 | 0.275 5 | 0.426 9 | 1.135 9 | 0.953 3 |
| | C_l | 0.129 9 | 0.679 9 | 0.527 5 | 1.337 4 | 1.159 9 |

表 3 给出了单塔和塔群的涡脱频率 f_s . 由表 3 的涡脱频率 f_s . 此外因存在群体干涉效应,塔群的涡脱频率略小于单塔涡脱频率的平均值.

表 3 不同风速下塔的涡脱频率 f_s Hz

| 风速 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 塔 1 | 塔 2 | 塔 3 | 单塔平均值 | 塔群 |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|
| 8 | 0.612 0 | 0.568 0 | 0.688 0 | 0.616 0 | 0.564 0 |
| 20 | 3.000 0 | 2.666 7 | 3.250 0 | 2.972 2 | 2.351 0 |
| 35 | 5.500 0 | 5.200 0 | 5.850 0 | 5.516 7 | 5.000 0 |

3 结论

本文分别对塔群和塔柱单独建立计算模型,模拟计算了 3 种风速下的塔柱瞬态绕流问题,得到以下结论:

- 1) 塔群在各个风速 U 下,经过一段时间过渡后各塔受力和合力随时间做稳定的谐波变化,但波幅有明显的衰减趋势,塔群中各塔的受力波动频率趋于一致,在数值上等于合力波动的频率值;
- 2) 由于所研究的塔群风载绕流问题存在群体干涉效应,无论是升力还是阻力,塔群合力数值上均略小于单塔的总值,塔群的涡脱频率也略小于单塔涡脱频率的平均值.

4 参考文献

[1] 顾志福,孙天凤,陈强. 2 个相邻冷却塔风荷载的相互作用 [J]. 空气动力学学报,1992,10(4):519-524.
[2] 沈国辉,刘若斐,孙炳楠. 双塔情况下冷却塔风荷载的数值模拟 [J]. 浙江大学学报:工学版,2007,41(6):1017-1022.
[3] Williamson C H. Evolution of a single wake behind a pair of bluff bodies [J]. Journal of Fluid Mechanics,1985,159(1):1-18.
[4] 刘友宏. 光滑塔器烟囱诱导振动研究 [J]. 科学技术与工程,2015,15(13):1-6.
[5] Alam M M, Moriya M, Sakamoto H. Aerodynamic characteristics of two side-by-side circular cylinders and application of wavelet analysis on the switching phenomenon

- [J]. Journal of Fluids and Structures ,2003 ,18(3/4) : 325-346.
- [6] Lama K Zou L. Experimental and numerical study for the cross-flow around four cylinders in an in-line square configuration [J]. Journal of Mechanical Science and Technology 2007 21(9) : 1338-1343.
- [7] Sayers A T. Flow interference between four equispaced cylinders when subjected to a cross flow [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics ,1988 31(1) : 9-28.
- [8] Sayers A T. Vortex shedding from groups of three and four equispaced cylinders situated in a cross flow [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics ,1990 , 34(2) : 213-221.
- [9] 贺然. 高雷诺数下阵列 4 圆柱绕流流动形态数值模拟 [J]. 四川建材 2016 42(1) : 57-59.
- [10] 胡卫华. 基于 Fluent 的多圆柱体绕流场数值模拟 [J]. 科技导报 2010 28(24) : 75-78.
- [11] 田启龙, 王嘉松. 双圆柱绕流水动力分析的离散涡数值模拟 [J]. 中国海洋平台 2017 32(3) : 51-57.
- [12] Ian J Sobey. Oscillatory flows at intermediate Strouhal number in asymmetric channels [J]. Journal of Fluid Mechanics 2006 125(125) : 359-373.
- [13] Kim H J ,Durbin P A. Observations of the frequencies in a sphere wake and of drag increase by acoustic excitation [J]. Physics of Fluids ,1988 31(11) : 3260.
- [14] Sakamoto H H. A study on vortex shedding from spheres in a uniform flow [J]. Journal of Fluids Engineering , 1990 112(4) : 386-392.
- [15] 涂佳黄, 梁经群, 黄橙, 等. 多塔高层建筑风荷载互扰效应研究 [J]. 湘潭大学学报: 自然科学版 2015 37(2) : 38-44.
- [16] 王文焘. 石油化工塔型设备基础风荷载计算 [J]. 山西建筑 2016 42(23) : 51-52.

The Study on Transient Flow and Forces of Tower Group under Wind Loading

WANG Wenfeng¹, HUANG Si^{2*}, GUO Chenguang², YE Weiwen¹, LI Maodong¹

(1. Guangzhou Special Pressure Equipment Inspection and Research Institute ,Guangzhou Guangdong 510663 ,China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering ,South China University of Technology ,Guangzhou Guangdong 510641 ,China)

Abstract: In this work ,the three towers of a petrochemical enterprise are selected as the research object ,the computational models of the tower group and three towers are established separately. Fluent software is used to simulate the transient flow field around the towers and the group under three wind speeds. The three towers have respectively diameters of 2. 8 m 3. 3 m and 2. 5 m L/D ratios of 1. 98 2. 72 and 4. 69. And $Re = (1. 50 \sim 6. 65) \times 10^6$. The computations are performed for the vortex frequencies shedding from the towers and the group as well as the variations of lift and drag with time. The relationship between forces acting on a single tower and those on the group is analyzed. The relationship between the vortex frequencies of single tower and the group and the interference effects are discussed in order to provide technical support for the safety operation of petrochemical enterprises.

Key words: wind loads on towers; transient flow around towers; vortex shedding frequency; numerical simulation

(责任编辑: 王金莲)