

文章编号: 1000-5862(2020)04-0335-06

双塔设备在流动载荷作用下的振动测量和分析

郭晨光¹, 黄思^{1*}, 危逸枫¹, 汪文锋², 叶伟文², 李茂东²

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

摘要: 选取某石化企业的双塔设备作为研究对象, 将现场实测与流固耦合计算相结合进行振动分析, 其中稳定塔高 33 m, 分馏塔高 24 m, 塔内气相介质为天然气, 液相为烯烃。采用风速风向仪对塔设备上游的风速风向进行测量, 用电阻式应变片测量稳定塔的轴向应变, 用电磁式振动传感器测量塔设备振动速度和位移, 得到了在内、外流动载荷作用下双塔设备的动态响应和固有频率。结果表明: 该文所采用的流固耦合计算方法可有效评估塔设备的振动情况, 为多塔设备的安全运行提供参考。

关键词: 双塔设备; 现场实测; 应变位移; 流固耦合

中图分类号: TE 962 文献标志码: A DOI: 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2020.04.02

0 引言

塔设备一般以群体形式建造且布置较为密集。在工作状态下, 塔内流体的流动会冲击塔板, 带动塔设备的振动^[1-2]; 塔外风载荷的作用会使塔设备产生顺风和横风 2 个方向的振动^[3-4]。这些振动轻则影响产品质量、降低生产效率, 重则损害设备, 危害生产安全^[5-6]。

近年来国内外学者相继开展了关于塔设备振动的研究。文献[7]对风荷载作用下细长高塔的动力学响应进行了数值计算, 发现高塔在临界风速下发生共振时应力的最大位置位于塔体下封头与裙座的连接处; 文献[8-10]分别通过实验探究了气液在相互作用时产生的周期性气泡鼓动现象, 发现它是诱发塔设备振动的主要因素之一, 并给出了鼓动频率的经验公式; 文献[11-13]分别运用数值方法分析了塔设备在风载荷作用下的诱导共振响应, 研究了在不同风速下塔设备的振动规律; 徐乐等^[14]采用现场测试与理论计算相结合的分析方法, 评估了检修状态下空塔横风向振动所引起的疲劳破坏。

上述研究主要考虑了在外流或内部流体载荷单独作用下单塔设备的振动情况, 而且以数值计算为主, 缺乏现场实测数据的检验。因此, 本文选取某石

化企业的双塔设备作为研究对象, 考虑内外流场的共同作用, 采用现场实测与流固耦合数值计算相结合进行振动分析, 为多塔设备的安全运行提供参考。

1 研究对象

图 1(a) 为本次研究的双塔设备, 其中高塔为稳定塔, 低塔为分馏塔, 气相介质为天然气, 液相为烯烃。设计参数如表 1 所示, 2 塔之间的距离 $L = 3.2$ m。材料为 Q345R 钢, 密度为 $7\,850\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 弹性模量为 2.09×10^5 MPa, 泊松比为 0.3, 最大屈服极限为 460 MPa。

表 1 基本设计参数

参数	高塔	低塔
直径/m	1.8	1.4
高度/m	33.2	23.9
壁厚/mm	16	10
塔板厚/mm	20	10
气相进料量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	4 320	7 776
液相进料量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	6.53	11.76

现场实测包括风速风向、应变和振动的测量, 采用测得的风速风向来流数据, 分别建立如图 1(b)、图 1(c) 所示的内、外部计算域进行流固耦合计算, 计算方法参见文献[15-16]。

收稿日期: 2020-02-25

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, 博士生导师, 主要从事流体机械及工程的研究。E-mail: huangsi@scut.edu.cn

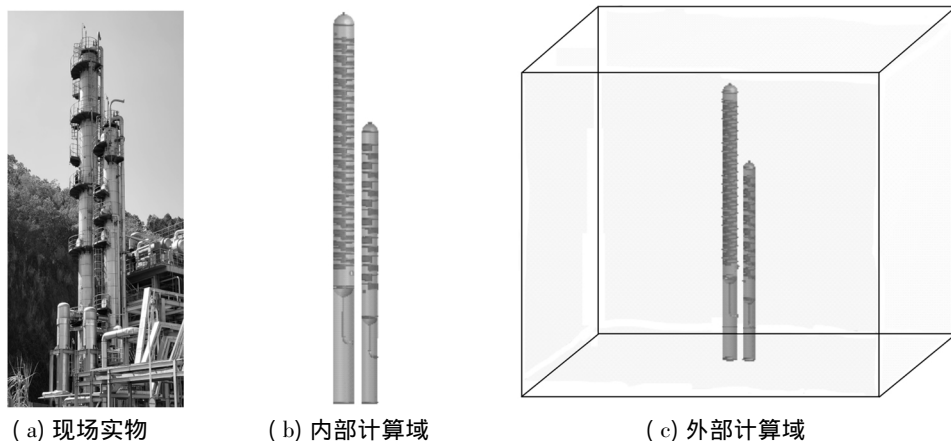


图1 双塔模型

2 现场实测

2.1 风速风向

双塔设备上游的风速风向采用如图 2(a) 所示的 DEM6 风速风向仪进行测量,采样频率 20 Hz,量程为 $0 \sim 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风速测量精度为 $\pm 0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风向测量精度为 $\pm 3^\circ$ 。如图 2(b) 所示,在 O 点处获取双塔来流方向的风速 $\vec{U}(t)$ 和风向 $\theta(t)$, $\vec{W}$ 、 $\vec{S}$ 分别代表正西和正南方向。

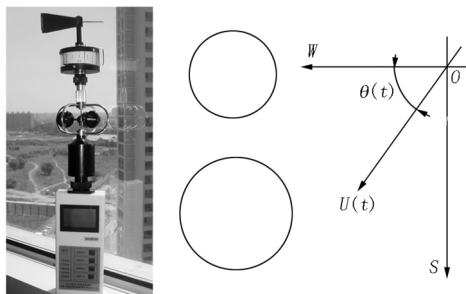
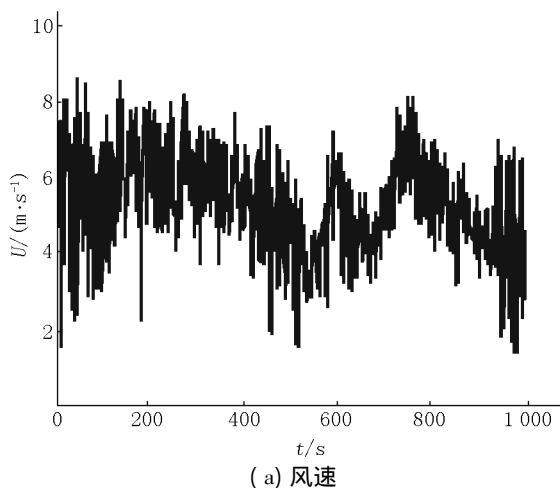
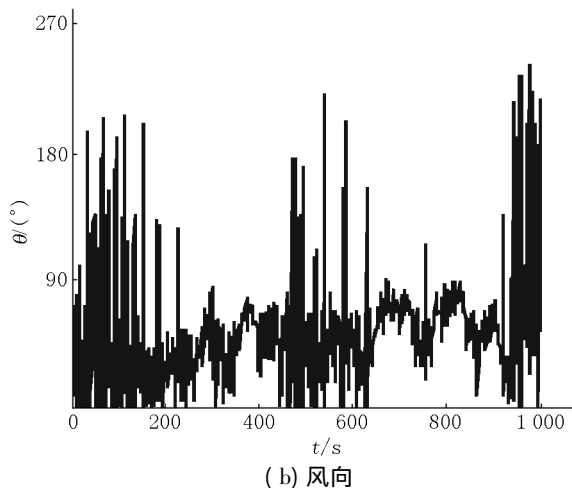


图2 风速风向测量



(a) 风速



(b) 风向

图3 风速风向时程曲线

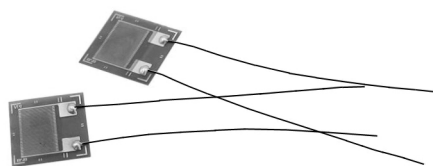
现场实测结果如图 3 所示,由此得到在测量时长 $T=1\,000 \text{ s}$ 时的平均风速 $\bar{U}=5.38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均风向角 $\bar{\theta}=46.22^\circ$ 。因此对应的雷诺数 $Re=6.26 \times 10^5$,通过文献 [17-19] 查得对应的斯塔哈罗数 $S_r=0.22$ 。由文献 [20] 得到风致振动频率 f_s 为

$$f_s = S_r \bar{U} / D, \quad (1)$$

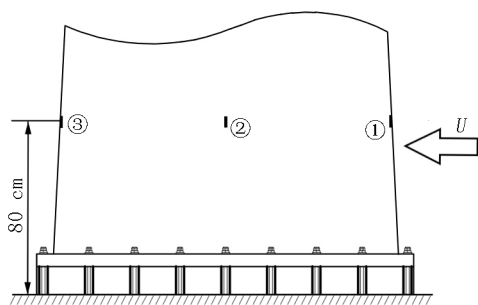
由 (1) 式求得高塔的风致振动频率 $f_{s1}=0.66 \text{ Hz}$,低塔的风致振动频率 $f_{s2}=0.85 \text{ Hz}$ 。

2.2 应变

塔的应变采用如图 4(a) 所示的 DHDAS 电阻式表面应变片进行测量,其应变 μ_ε 的测量量程为 $\pm 3\,000$ 桥路电阻阻值为 $120 \, \Omega$,测量时长为 $1\,000 \text{ s}$,应变采样频率为 50 Hz 。选取高塔作为测量对象,在距地面 80 cm 高度处沿塔身周向均布 4 个应变片如图 4(b) 所示,应变片①放置的位置为迎风面,应变片③放置的位置为背风面,④在②的对面并与②成中心对称。



(a) 电阻式表面应变片



(b) 应变测点的位置

图4 应变测量

图5是上述测点应变 μ_ε 随时间 t 的变化情况,其中正值代表拉应变,负值代表压应变.由图5可知,稳定塔在测点②处受拉应力作用,而位置①、③和④则受不同程度的压应力,其中位置④位于受拉点②的正对面,故受压变形最大.在该测量时间段内,稳定塔在距地面80 cm高度处朝④方向倾斜.

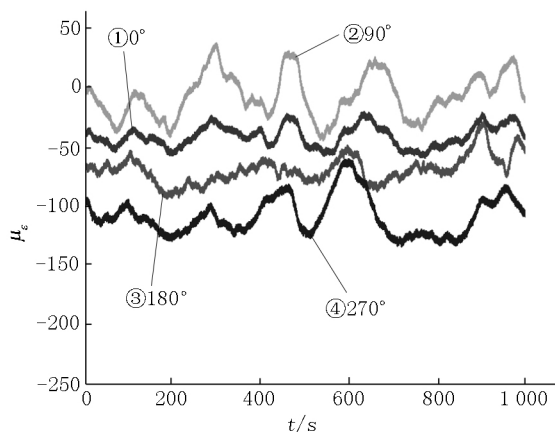


图5 应变时程曲线

2.3 振动

采用如图6(a)所示的DHDAS磁电式振动传感



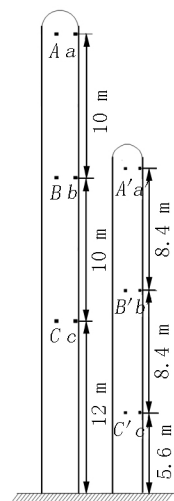
(a) 磁电式振动传感器

器来进行双塔设备的振动测量,其灵敏度为 $0.32 \text{ mV}/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$,可同时监测振动速度和振动位移,速度量程为 $\pm 275 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,位移量程为 $\pm 300 \text{ mm}$.如图6(b)所示,在塔的迎风侧和垂直迎风侧各设置3个传感器,图中字母为传感器的序号,测量时长1 000 s,振动采样频率50 Hz.

图7、图8分别为振动速度 v 和位移 s 的时程曲线,为能清晰地掌握测量的结果,在表2、表3中给出测量得到的数据范围.

由图7、图8和表2、表3可知,作为底端固定、顶端自由的设备,双塔的振幅随着高度的增加而逐渐加大.在塔的较高位置,垂直迎风侧的振幅高于迎风侧的振幅,这是因为塔顶在风载荷作用下产生了显著的横向振动^[5].此外,由表1可知,低塔内的流动载荷比高塔大,因此低塔在不同高度下所测得的位移值和平均振幅值普遍高于高塔的对值.

双塔设备振动速度的最大值为 $3.67 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,小于国家标准^[21-22]中的控制上限 $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,因此该双塔设备运行稳定.



(b) 振动测点的位置

图6 振动测量

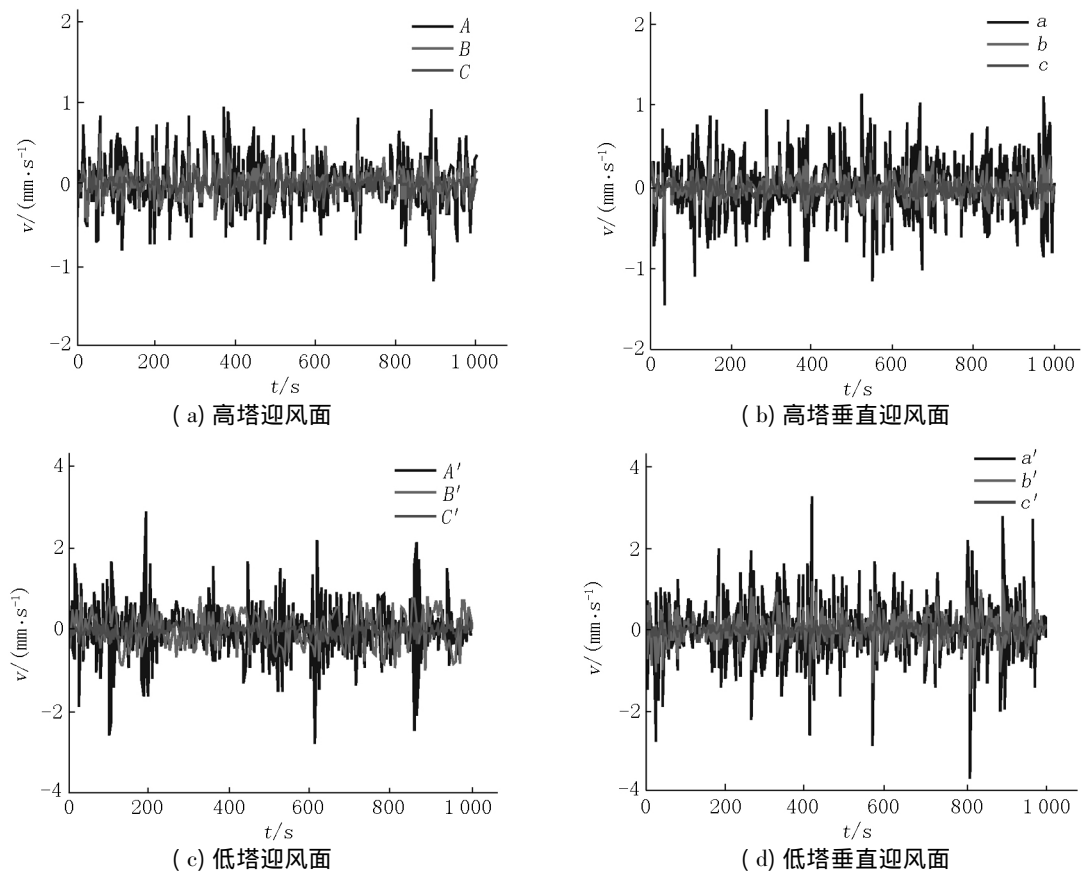


图7 速度时程曲线

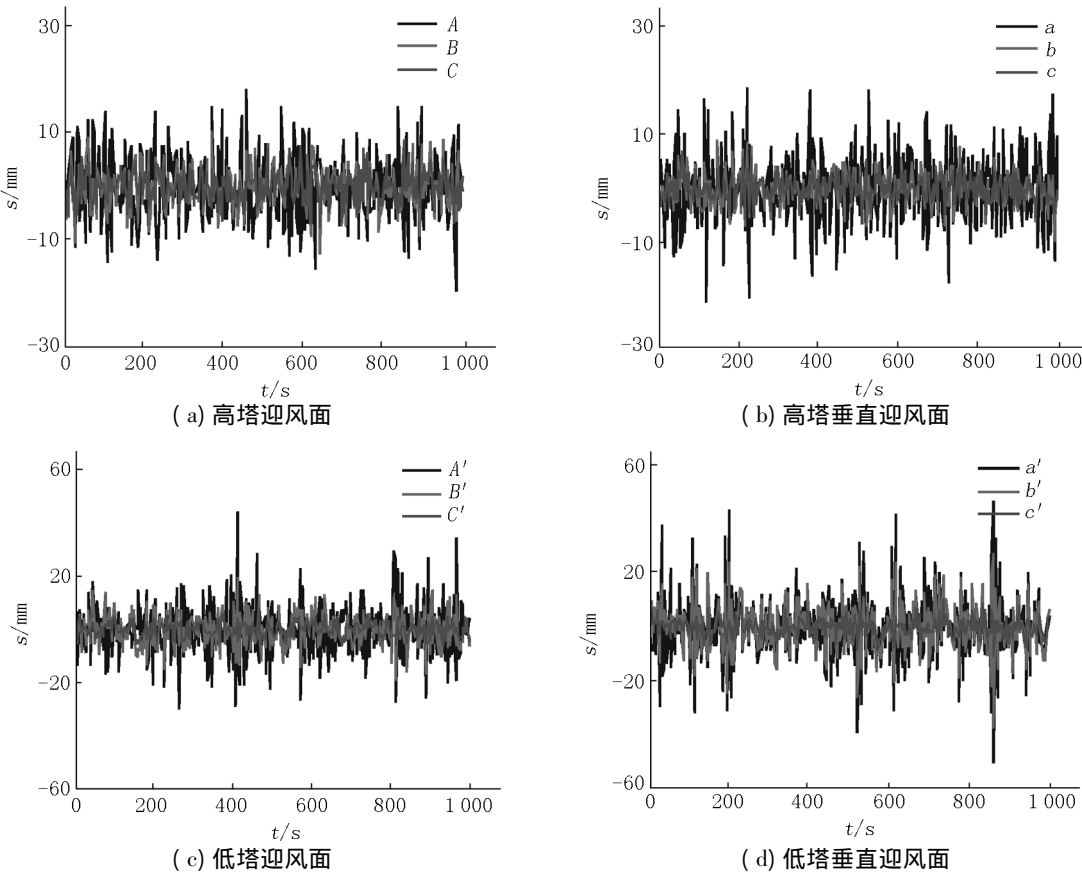


图8 位移时程曲线

表 2 高塔测点的速度和位移

测点编号	速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	位移 s/mm	测点编号	速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	位移 s/mm
A	-1.18 ~ 0.96	-19.48 ~ 18.32	a	-1.45 ~ 1.14	-21.28 ~ 18.77
B	-0.77 ~ 0.65	-13.78 ~ 10.73	b	-0.67 ~ 0.51	-10.14 ~ 8.96
C	-0.29 ~ 0.34	-8.81 ~ 8.52	c	-0.34 ~ 0.18	-6.61 ~ 7.25

表 3 低塔测点的速度和位移

测点编号	速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	位移 s/mm	测点编号	速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	位移 s/mm
A'	-2.77 ~ 2.88	-29.45 ~ 44.50	a'	-3.67 ~ 3.27	-50.33 ~ 47.30
B'	-1.06 ~ 0.92	-18.99 ~ 19.73	b'	-1.49 ~ 1.25	-38.04 ~ 27.66
C'	-0.37 ~ 0.41	-6.38 ~ 8.58	c'	-0.34 ~ 0.40	-11.06 ~ 10.70

3 测量与计算结果的对比

3.1 应变对比

在高塔计算模型中选取与实测布点同一高度的位置,并输出应变如图 9 所示.从实测数据中选取 250、500、750、1 000 s 时刻的应变,将实测与计算结果对比如图 10 所示,其中横坐标为沿顺时针方向角度的变化(以应变片①为 0°).由图 9 可知,不同时刻实测与模拟值的走势基本一致,应变最大的位置为④所在的 270°处,与图 5 的结果相吻合.高塔应变量的最大值为 -124.18,与数值模拟结果 -118.81 的误差为 4.52%.

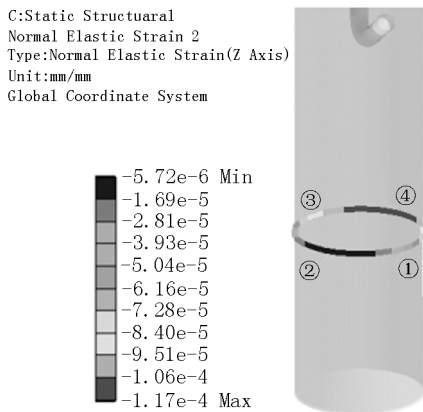


图 9 高塔模型应力计算云图

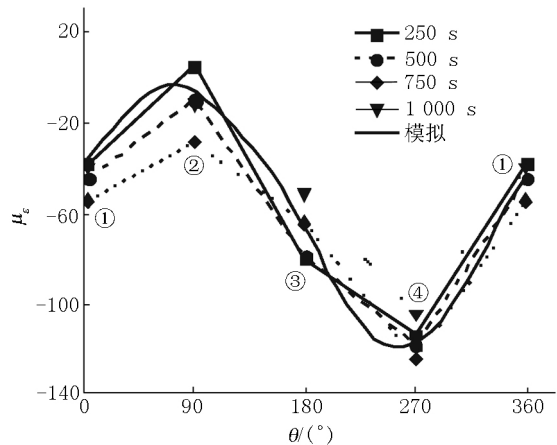


图 10 高塔底部应变周向分布

3.2 振动对比

数值模拟的响应分析采用模态叠加法^[23],扫描间隔 0.1 Hz.现场实测的响应分析是通过对垂直迎风侧 b 和 b 的速度采集结果进行傅里叶变换得到^[14].

图 11 为结构速度响应对比,由图 11(a)可知,高塔实测的 1 阶和 2 阶峰值分别为 0.26 mm · s⁻¹ 和 0.08 mm · s⁻¹,计算对应的峰值分别为 0.14 mm · s⁻¹ 和 0.08 mm · s⁻¹;由图 11(b)可知,低塔的 1 阶和 2 阶峰值分别为 0.51 mm · s⁻¹ 和 0.07 mm · s⁻¹,计算对应的峰值分别为 0.41 mm · s⁻¹ 和 0.09 mm · s⁻¹.表 4 为固有频率实测值与计算值的对比,由此可见该双塔设备固有频率实测值与计算值的误差在 16.48% 以内.

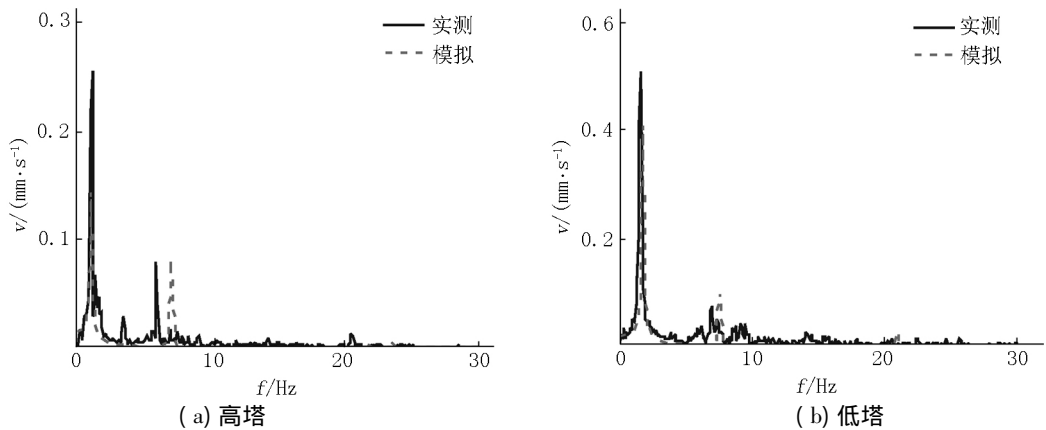


图 11 结构速度响应对比

由图 11 和表 4 可知,虽然计算和实测的部分数值有一定偏差,但 2 者的趋势和规律基本相同,这说明计算方法是可行的。

表 4 固有频率计算和实测对比

固有频率 f/Hz	高塔			低塔		
	实测	计算	误差/%	实测	计算	误差/%
1 阶	1.17	1.12	5.02	1.66	1.85	10.07
2 阶	5.96	7.13	16.48	7.03	7.60	7.46

(1) 式算得的风致振动频率低于在表 4 中任何阶的固有频率,所以在测量期间内双塔设备未发生共振。

4 结论

本文对某双塔设备在正常运行条件下进行了现场测试和振动分析,并与模拟结果相对比,得到如下结论:

1) 在来流风载荷的作用下,塔体会产生交变应力,在高塔发生横向振动时所受的最大应力小于塔身的最大屈服极限,可以抵抗外部风场引发的破坏;

2) 塔顶在风载荷作用下产生的横向振动使得垂直迎风侧的塔振幅高于迎风侧的振幅,塔内的流动载荷对设备的振动有显著影响;

3) 高塔和低塔速度响应的实测值与流固耦合计算值接近,趋势和规律一致,这说明本文所采用的流固耦合模拟计算方法切实可行。

5 参考文献

- [1] 胡正明. 化工设备机械基础 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1994: 117-121.
- [2] Lū Shuxiang, Mi Zhentao, Wang Yaquan et al. Experimental investigation and simulation of a gas-agitated sieve plate column [J]. Chemical Engineering and Technology, 2004, 27(8): 903-908.
- [3] 牛伟建. 高耸板式塔的风振响应分析 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- [4] 李庆炎. 塔设备的风诱导振动 [J]. 石油化工设备技术, 1991, 12(1): 3-8.
- [5] 苏文献, 金玉龙, 韩超. 单塔风诱导振动破坏分析 [J]. 上海理工大学学报, 2013, 35(4): 391-396.
- [6] 韩瑜. 流体流动对筛板稳定性影响的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [7] Belloli M, Rosa L, Zasso A. Wind loads and vortex shedding analysis on the effects of the porosity on a high slender tower [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 126: 75-86.

- [8] Waddington W. Vibration excitation of sieve tray columns by bubbling [D]. Sheffield: University of Sheffield, 1974.
- [9] Waddington W, Kohler H K, Brown D J. Vibration excitation of sieve plate columns by bubbling [J]. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 1974, 52(4): 381-383.
- [10] Priestman G H, Brown D J. Flow-induced vibration and damage in sieve-tray columns [J]. Chemical Engineering Communications, 1988, 63(1): 181-192.
- [11] 陈俊民, 范秀昌. 高塔受风诱导共振工程计算 [J]. 化工设备与管道, 1992(1): 14-17.
- [12] 王春义, 范而奎, 赵子明, 等. 焦化装置分馏塔振动故障分析及处理措施 [J]. 中外能源, 2009, 14(1): 84-86.
- [13] 刘东. 大高径比塔设备的结构强度和诱导振动分析 [D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
- [14] 徐乐, 谭蔚, 贾占斌, 等. 高耸塔器风致振动的现场实测与疲劳分析 [J]. 化工机械, 2017, 44(6): 686-689, 704.
- [15] 汪文锋, 黄思, 郭晨光, 等. 风载荷作用下的塔群瞬态绕流及受力分析 [J]. 江西师范大学学报: 自然科学版, 2019, 43(3): 231-236.
- [16] 汪文锋, 黄思, 郭晨光, 等. 塔设备在内部流动载荷作用下的振动分析 [J]. 压力容器, 2019, 36(11): 19-24, 5.
- [17] 中国机械工业联合会. 钢制压力容器: 分析设计标准: JB 4732—1995(2005 年确认) [S]. 北京: 机械工业出版社, 1995: 13-57.
- [18] Schlichting H, Gersten K. Boundary-layer theory [M]. New York: McGraw-Hill, 1979: 16-24.
- [19] Roshko A. On the development of turbulent wakes from vortex streets [J]. Naca Tr, 1954, 1191: 34-39.
- [20] 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): 3260-3265.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 石油化工钢制设备抗震设计标准: GB/T 50761—2018 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2018: 25-89.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 化学工业建(构)筑物抗震设防分类标准: GB 50914—2013 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2013: 59-92.
- [23] 李东旭. 高等结构动力学 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2010: 56-58.

(下转第 344 页)

- 方法:第5部分 静态蒸发率测量:GB/T 18443.5—2010 [S]. 北京:中国标准出版社 2010.
- [11] Yaws C L. Physical properties [M]//Yaws C L. Handbook of Chemical Compound Data for Process Safety. Oxford: Gulf Professional Publishing ,1997: 1-26.
- [12] Calvert J R ,Farrar R A. An engineering data book [M]. 2nd ed. London: Macmillan Publishers Limited ,1999.
- [13] 李倩,曹璇,李晨玉,等. 玻璃纤维保温纸导热系数的理论计算与实验研究 [J]. 中国造纸 2013 ,32(1): 35-41.
- [14] 符锡理. 真空多层绝热理论研究和传热计算 [J]. 低温工程 ,1989(2): 1-11.
- [15] Technical Committee CEN/TC. Cryogenic vessels-methods for performance evaluation of thermal insulation: BS EN 12213—1999 [S]. London: BSI ,1999.
- [16] Shih T M. Numerical heat transfer [M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation ,1984.
- [17] 甘在华. 低温容器蒸发率的实验研究 [J]. 广州化工 , 2013 ,41(2): 48-49 ,72.
- [18] 刘晓超. LNG 气瓶传热性能的实验研究及分析 [D]. 镇江: 江苏科技大学 2015.
- [19] 夏莉,劳英杰,李蔚,等. 车用 LNG 气瓶升压规律的研究 [J]. 制冷与空调 2015 ,29(6): 741-743 ,748.

The Calculation Method and Experimental Verification of LNG Cylinder Heat Transfer

YANG Gang¹, HUANG Si^{2*}, XIA Li¹, YI Tiankun², ZHENG Renzhong¹

(1. Guangdong Institute of Special Equipment Inspection and Research ,Foshan Guangdong 528000 ,China;

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

Abstract: Liquid nitrogen is used as the working medium in this study ,and three specifications of LNG cylinders (150 L ,330 L and 450 L) are selected for heat transfer calculation. According to the thermodynamic relationship in the saturated state ,a saturated homogeneous model is adopted to fit the relations between the temperature and the physical parameters of liquid nitrogen and make program. A code is made to get the change law of the medium pressure in the cylinder with time. The validity of the calculation method is verified by comparison with experimental data of liquid nitrogen pressure boost in related literatures.

Key words: LNG cylinder; liquid nitrogen; saturated homogeneous model; pressure increasing rules

(责任编辑:王金莲)

(上接第 340 页)

The Vibration Measurement and Analysis of Twin-Tower under Flow Loads

GUO Chenguang¹, HUANG Si^{1*}, WEI Yifeng¹, WANG Wenfeng², YE Weiwen², LI Maodong²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering ,South China University of Technology ,Guangzhou Guangdong 510641 ,China;

2. Guangzhou Special Pressure Equipment Inspection and Research Institute ,Guangzhou Guangdong 510663 ,China)

Abstract: In this study ,the on-site measurement and fluid-solid coupling calculation are performed for a chemical twin-tower with heights of 33 m and 24 m in a petrochemical company to analysis its vibration. The gas phase medium is natural gas and the liquid phase medium is olefin. The anemometer is used to measure the wind speed and direction upstream of the equipment ,the resistance strain gauges are used to measure the axial strain of the stabilizing tower ,the magnetoelectric vibration sensors are used to measure the vibrating speed and displacement of the twin-tower. Dynamic response and natural frequency of twin-tower under internal and external flow loads are obtained. The result shows that the fluid-structure coupling calculation method used in this paper can effectively evaluate the vibration and provide a reference for the safe operation of the multi-tower equipment.

Key words: twin-tower; on-site measurement; strain and displacement; fluid-solid coupling

(责任编辑:王金莲)