

文章编号:1007-6735(2013)04-0391-06

单塔风诱导振动破坏分析

苏文献¹, 金玉龙¹, 韩超²

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 中国寰球工程公司 设备室, 北京 100028)

摘要: 采用基于流体仿真软件 Fluent 及有限元分析软件 Ansys 的数值模拟方法, 对某独立的 130 m 高的塔进行风振分析, 并针对该应力条件, 参照 JB4732 进行了疲劳分析. 结果表明: 对于细长结构, 横向风力的作用大于顺风向的作用; 空塔在临界风速下发生一阶共振时, 应力水平最苛刻的位置在塔体下封头与裙座连接处.

关键词: 塔; 风振分析; 数值模拟

中图分类号: TQ 053.5 **文献标志码:** A

Failure Analysis on Wind-induced Vibration of the Single Column

SU Wen-xian¹, JIN Yu-long¹, HAN Chao²

(1. College of Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Equipment Department, China HuanQiu Contracting and Engineering Corp, Beijing 100028, China)

Abstract: By numerical simulation based on the fluid field analysis software Fluent and the structure analysis software ANSYS, the wind induced vibration of a 130-meter high column was analysed and the fatigue endurance was calculated according to the code of JB4732 with the obtained stress distribution. The results show that the effect of cross-wind is greater than that of along-wind for slender structure, and when first-order resonance occurs on an empty tower under critical wind speed, the worst dangerous region of stress is in the joint of the lower header and the skirt. A feasible schedule of numerical simulation was offered, which is of practical Calue for academic study and engineering application.

Key words: column; wind-induced vibration; numerical simulation

塔设备在化工、石油化工、炼油等产业中都具有重要地位, 常见的单元操作如精馏、吸收、解吸和萃取等都离不开塔设备. 塔设备的投资巨大, 约占化工、石化项目总投资的 30%~40%, 其性能直接关系到生产装置的产能、质量、能耗及成本. 塔设备作

为一种大型露天放置的直立设备, 对风载荷较为敏感. 现有文献表明^[1-4], 近几十年由风载荷引起的塔振动事故频发, 引起了人们对这一问题的关注. 对塔设备而言, 由风载荷引起的结构应力占总的结构应力的 80%~90%^[5]. 在结构风工程领域, 通常将高

收稿日期: 2012-10-24

第一作者: 苏文献(1967-), 男, 副教授. 研究方向: 过程设备设计与有限元分析. E-mail: digestsu@163com

层结构风效应分为顺风向、横风向和扭转向来研究. 在顺风向承受风力作用时产生与风向相同的振动, 在横风向承受风力作用时产生横向振动. 由于风扭矩影响较小, 一般不考虑扭转向的作用. 随着大型化工企业的兴起与发展, 高度与直径比较大的塔器数量逐渐增多, 这增加了塔结构的风压负担, 提高了潜在的危险性. 风灾一旦发生, 后果将不堪设想. 目前, 中国 GB 150—1998《钢制压力容器》^[6]、美国《ASME 锅炉及压力容器规范》^[7]、欧盟《欧盟承压设备实用指南》^[8]及其他国际压力容器标准中都没有明确给出风诱导振动分析设计方法. JB/T 4710—2005《钢制塔式容器》^[9]规定, 当 $H/D > 15$ 且 $H > 30$ m 时应按附录 AC(规范性附录)计算横风向风振. H 为高度, D 为平均直径. 本文以锁定振动为对象, 即将涡街振动的频率锁定在塔的固有频率上. 对于横风向风振分析的方法为运用 Ansys 模态计算塔的固有频率, 得出流场分析所需的风速; 通过 CFD 得到平均风力, 计算作用于塔设备的水平风载荷; 将载荷施加到 Ansys 中进行塔设备的动力响应分析; 根据 JB 4732^[10]相关规定对塔进行疲劳分析. 并从塔设备风致诱导振动的机理出发, 总结已有的研究方法及其成果^[11-15], 探究基于大型有限元分析软件 Ansys 及专业 CFD 软件平台 Fluent 6 的动力响应分析, 旨在给出可供工程参考的塔设备风诱导振动的数值分析方法.

1 塔器参数

以某石化项目中的某塔作为分析对象, 基本设计参数见表 1. 该塔高度 $H > 30$ m 且与塔径比大于 15, 需对横风向的风振响应进行分析.

表 1 基本参数
Tab.1 Basic parameters

参数名称	数值	参数名称	数值
设计压力/MPa	1.39	焊接接头系数	1.0
设计温度/℃	323	基本风压/Pa	670
高度/mm	129 000	壳体厚度范围/mm	42~58
内径/mm	7 200	环境温度许用应力/MPa	157
腐蚀裕量/mm	3	设计温度许用应力/MPa	120.86

2 模态分析

运用 Ansys 分析出塔的固有频率. 模型选用更

为危险的空塔模型, 忽略接管, 采用 Shell63 单元, 前两阶的分析结果及运用式为

$$v_j = \frac{f_j D}{St}$$

式中, v_j 为临界风速; f_j 为固有频率; St 为斯托哈尔数, 计算出的临界风速见表 2.

表 2 模态分析结果
Tab.2 Results of modal analysis

振型	固有频率 f_j/Hz	固有周期 T_j/s	临界风速 $v_j/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	0.479	2.088	12.77
2	2.511	0.398	66.96

基本风压 670 Pa, 根据风压 p 、风速 v 的关系 $p = \frac{1}{2} \rho v^2$, 其中, ρ 为空气密度, 可得基本 v 为 33.07 m/s, 小于二阶临界风速. JB/T 4710—2005《钢制塔式容器》规定, 若 $v_1 \leq v < v_2$, 应考虑塔器的第一振型的振动, 其中 v_1 为一阶临界风速, v_2 为二阶临界风速, 故只需考虑一阶风振响应.

3 脉动风力的流场分析

3.1 流场设置

3.1.1 流场模型

为减少计算量要尽可能减少网格数目, 流场计算区域应在对计算结果没有影响的前提下尽可能小. 但必须确保其与实际情况相似, 且不受堵塞效果的影响. 塔结构的大小占计算区域的断面比例大时, 风路变窄会产生比实际情况更大的风速, 为防止这种现象, 塔结构投影面积与计算区域面积的比例应控制在 5% 以下.

计算对象塔至入流边界的距离至少大于 $5D$, 以防止迎流面停止点的高压与入流边界重合, 对压力分布造成不良影响; 至下游出流边界的距离至少大于 $10D$, 特别是对于高大且细长的结构, 更要确保有足够的长度; 两侧至少 $6.5D$. 流场模型的选取见图 1.

3.1.2 网格划分

流场变化较小的区域, 应减少网格以提高计算效率; 变化较大的区域, 需配置大量的网格节点以提高分辨率. 虽然 RANS 采用比 LES 精度低的网格, 但结构附近的计算结果也会随着网格分辨率的变化而变化. 为避免产生对网格的依赖性, 事先必须对几种不同分辨率的网格进行计算, 进而采用计算结果

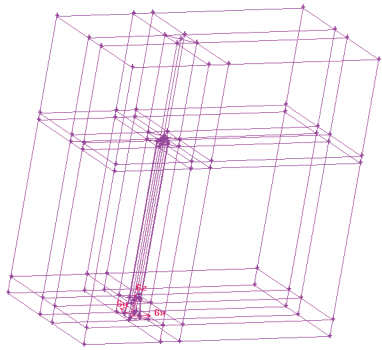


图 1 流场模型
Fig.1 Flow field model

不依赖网格分辨率的足够小的网格。
选用的 3 种网格节点数分别为 118×10^4 , 148×10^4 和 222×10^4 . 这 3 种网格的低阶统计计算结果几乎一样,高阶统计量略有不同,说明中等密度网格的结果可以采用. 网格的配置结果见图 2.

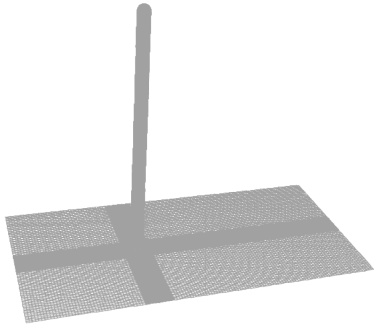


图 2 网格划分
Fig.2 Grid division

3. 1. 3 流体物性影响
实际气体都是可压缩流体,但是当流速比较低、一般马赫数小于 0.3 时,可将其视为不可压缩流体的流动,且误差很小^[16]. 流体的黏性对流动影响很大,不能忽视.
3. 1. 4 流场参数选择
使用改进的 $\text{RNG}k-\epsilon$ 模型,具体设置见表 3.

表 3 计算模型设置
Tab.3 Calculation model

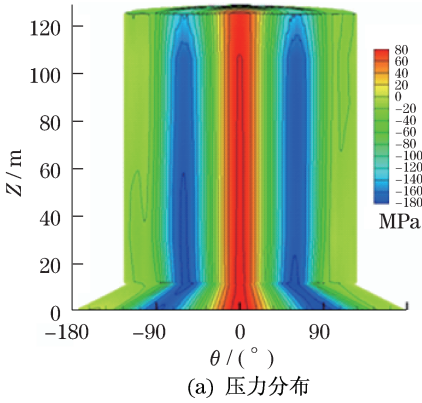
参数项	类型
湍流模型	$\text{RNG}k-\epsilon$
时间方案	定常
压力项	标准格式
压力-速度耦合	压力耦合方程的半隐式算法
其它项	一阶迎风格式
入流边界	平均风速 12.77 m/s
出流边界	压力出口
壁面	非平衡的壁面函数

3. 2 脉动风力的特性计算
3. 2. 1 风力特性计算结果

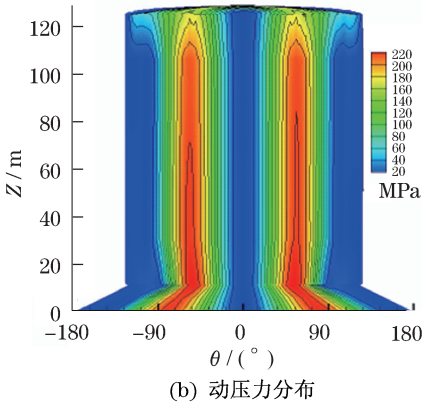
图 3~5(见下页)为计算得到的压力分布结果, Z 为高度, θ 为圆周角, K 为风压系数. 其中,风压系数定义为

$$C_p = \frac{p_1 - p_0}{\rho v^2 / 2} \tag{1}$$

式中, p_1 为监测点处的平均风压值; p_0 为无穷远处来流的静压力.



(a) 压力分布



(b) 动压力分布

图 3 表面风压分布

Fig.3 Surface wind pressure distributions

从图中可知压力分布的特点:每层最大风压系数均出现在圆周角为 0° 处,即迎风点,其值约等于 1,最小风压系数在 $\pm 90^\circ$ 附近,即塔体侧面,在塔顶封头和底座处绝对值小于中间圆柱部分;在背风侧 180° 周围系数向上突出,表明存在明显的边缘效应.

在 30~110 m 范围内,塔主体基本承圆柱结构,工程中常取 $Z/H = 0.4 \sim 0.8$ 高度之间的压力系数来研究,因此采用 100 m 高截面代表此范围的特征. 图 6(见下页)显示 10,100,125 m 高度处风速场,风速在背风区域存在大型湍流,风速分布紊乱且成回路,尤其塔顶和塔底分离点在更小的圆周角上出现,不如迎风面的分布光滑一致. 这就说明了压力分布

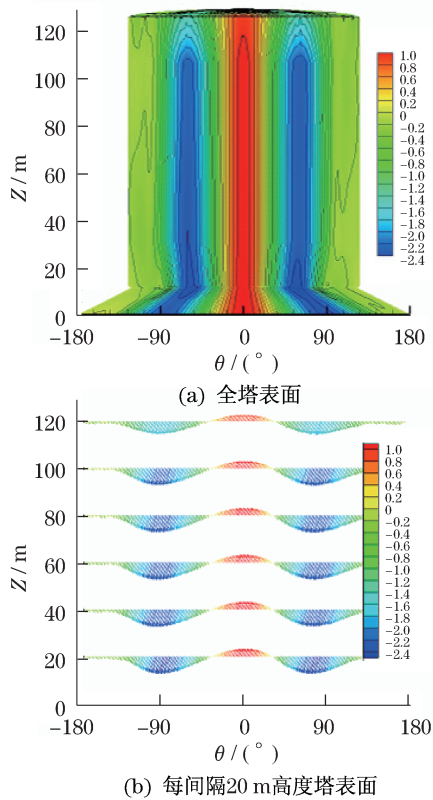


图 4 风压系数分布
Fig.4 Wind pressure coefficient distribution

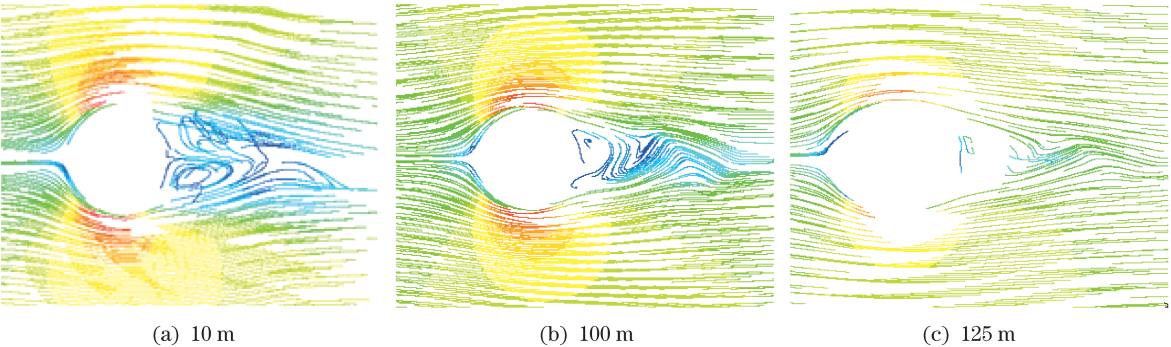


图 6 不同高度截面风速流线图
Fig.6 Velocity streamlines of Section height

文的风压系数是一致的,在 GB50009《建筑结构荷载规范》中给出了体型系数更为具体的值,对于石油化工塔设备,不同圆周角的体型系数按表 4 选取; K_{2i} 为风振系数,考虑来流风中湍流的影响,本文选择均匀来流风,没有考虑湍流作用,因此可以在后续计算设计风载荷时,用 Fluent 计算得到的平均风力乘以这个系数,以考虑湍流作用; q_0 为基本风压值; f_i 为风压高度变化系数,是考虑地面粗糙度对大气边界层风特性的影响,本文的处理方式是在地表使用壁面函数; l_i 为第 i 计算段长度; D_e 为塔式容器各计算段的有效直径.

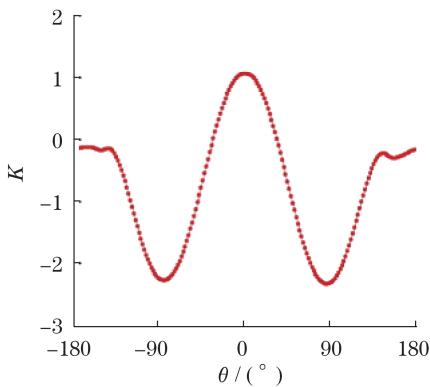


图 5 100 m 高度处风压系数沿圆周的分布
Fig.5 Wind pressure coefficient along the circumference of 100 m

图上背风面风力系数有较大范围的稳定区域,且顶部和底部的侧后方压力分布承三角形,压力较小.

3.2.2 计算结果分析

JB/T 4710—2005《钢制塔式容器》规定,将塔沿高度方向分成若干段,第 i 段顺风向水平风力计算式为

$$p_i = K_1 K_{2i} q_0 f_i l_i D_e \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中, K_1 为体型系数,在标准中为 0.7,其概念与本

表 4 体型系数值 Tab.4 Shape coefficient							
θ	0°	15°	30°	45°	60°	75°	
K_1	1	0.8	0.1	-0.9	-1.9	-2.5	
θ	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
K_{16}	-2.6	-1.9	-0.9	-0.7	-0.6	-0.6	-0.6

将塔表面 10~120 m 间每隔 10 m 处检测点的风压系数值以圆周角为坐标绘制成曲线,并与上述规定值进行比较,结果见图 7.

规范中认为体型系数分布沿高度不变,即沿轴

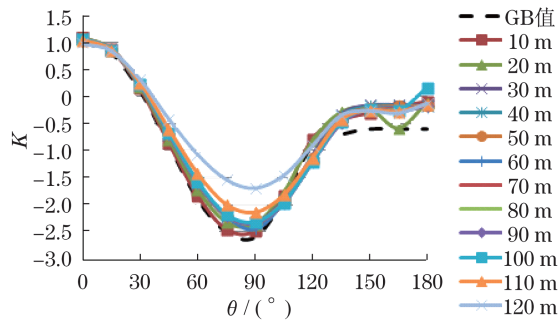


图7 风压系数

Fig.7 Wind pressure coefficient

向完全相关,表现为二维特性.从图7中风压系数沿高度的变化情况可知,在迎风点左右45°范围内,计算值与标准值吻合较好;侧面90°附近差别较大,塔顶封头的边界层分离是造成120 m高的曲线与其它3条曲线最大差别的主要原因,主体30~100 m的各曲线有较高的重合度.

规范中的体型系数仅考虑顺风向的风力作用,对于横向风振力单独验算,根据图3的动压力分布,两侧的脉动压力最大,是造成横向风振的主要因素.根据计算结果,最大脉动压力234.448 MPa,远大于迎风点处的最大静压力85.378 5 MPa,说明对这种细长结构,横向风力的作用大于顺风向的作用.

3.3 脉动风力的输出

流体计算是求得塔设备表面网格点上的压力,因此由网格精度对应空间精度,得到风压的分布.计算塔设备风振响应时,振动中一阶模态所占比例大,再加上多数情况下振动模态可以近似为直线模态,因此可得到结构对于指定中心位置作用的倾覆力矩系数.在本文的方案中,仅输出顺风向及横风向上的

倾覆力矩结果.

根据 Fluent 的计算结果,筒体与裙座连接面上的平均顺风向倾覆弯矩 $\overline{M_y} = 1\,711\,752.3\text{ N}\cdot\text{m}$,平均横风向倾覆弯矩 $\overline{M_x} = 1\,707\,231.6\text{ N}\cdot\text{m}$.

4 风载荷动力响应分析

运用 Ansys 软件进行风载荷动力响应分析,假定顺风向弯矩为恒定值,横风向弯矩呈正弦规律变化,采用模型为

$$M_x = \overline{M_x} \sin(\omega t) \quad (3)$$

式中, ω 为激励角速度; t 为时间.施加位移及载荷条件的模型如图8所示,计算结果见图9.

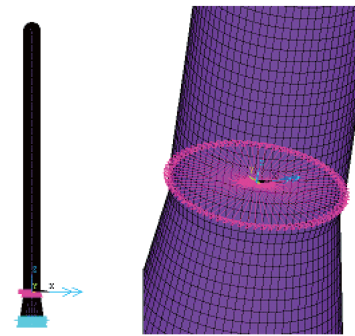


图8 载荷边界条件

Fig.8 Load boundary conditions

根据计算结果,最大应力出现在下封头与群座的连接处,对这个部位按文献[10]的应力强度评定准则进行应力强度评定,评定结果见下页表5,表中 S_{II} 为一次局部薄膜应力强度, S_{IV} 为一次加二次应力强度, S_m 为许用应力.

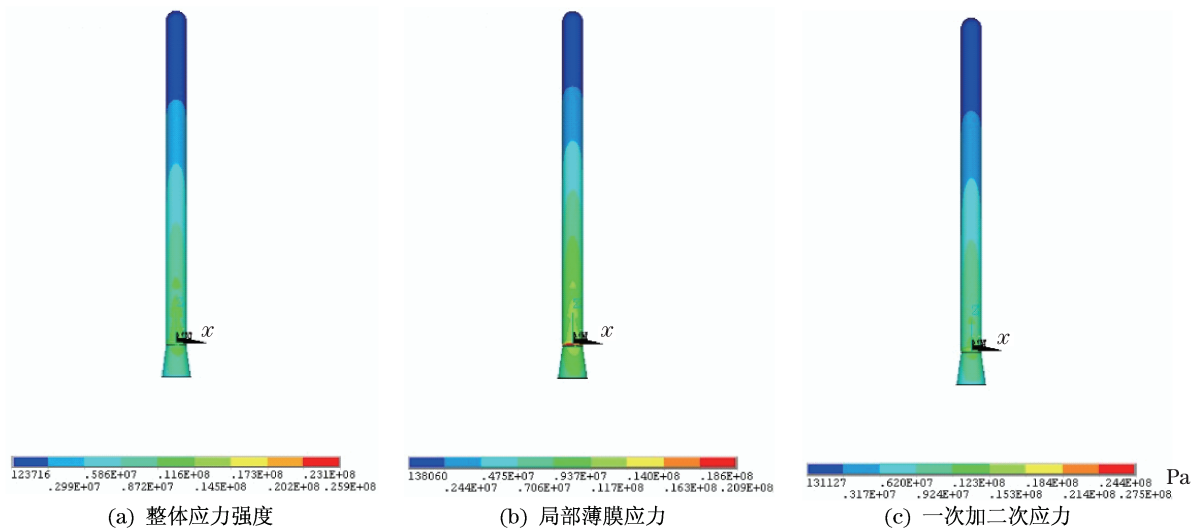


图9 应力强度分布

Fig.9 Distribution of stress intensity

表 5 应力评定结果
Tab.5 Assessment of stress intensity

应力分类	应力强度评定	评定结果
局部薄膜应力强度	$S_{II} = 20.9 \text{ MPa} < 1.5 S_m = 235.5 \text{ MPa}$	通过
一次加二次应力强度	$S_{IV} = 27.5 \text{ MPa} < 3.0 S_m = 471 \text{ MPa}$	通过

5 疲劳分析

对下封头与群座连接处的截面进行疲劳分析:

截面最大拉应力 $\sigma_1^{0-0} = 9.2 \text{ MPa}$

截面最大压应力 $\sigma_2^{0-0} = -23.8 \text{ MPa}$

应力组合

$$\sigma_{\max} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0 + \sigma_1^{0-0} = 9.2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\min} = \sigma_1 - \sigma_2 + \sigma_3 = 0 + \sigma_2^{0-0} = -23.8 \text{ MPa}$$

其中, σ_1 为由压力引起的轴向应力, 由于是空塔状态, $\sigma_1 = 0$; σ_2 为由重力引起的轴向应力; σ_3 为横向弯矩引起的应力; 交变应力幅

$$\sigma_{\text{alt}} = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2 = 16.5 \text{ MPa}$$

根据 JB 4732 的 C-1 疲劳曲线, 许用循环次数 $N > 10^6$.

对于细长结构, 横向风力的作用大于顺风向的作用; 空塔在临界风速下发生一阶共振时, 应力水平最苛刻的位置在塔体下封头与裙座连接处. 本文提供了一种分析风诱导振动的数值方法, 对于该算例中的塔而言, 不会在横向风振时发生疲劳破坏.

6 结 论

以单塔为研究对象, 对其进行了完整的风振分析. 得出以下一些结论:

a. 使用定常的 RNG 模型计算塔设备的风载荷是可行的, 本文采用 RNG $k - \epsilon$ 湍流模型结合非平衡的壁面函数, SIMPLEC 离散格式对设备承受的风载荷进行了模拟.

b. 在 Fluent 计算结果中提取顺风向、横风向弯矩, 作为 ANSYS 结构分析的输入载荷进行动力响应分析, 提供了一种新的、可行的风载荷输入方法.

c. 对于文中的塔而言, 一阶频率下的振动可以

通过疲劳强度分析.

参考文献:

- [1] 陈俊民. 一起罕见的高塔共振现象[J]. 压力容器, 1985, 2(6): 15-17.
- [2] 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.
- [3] 聂清德, 谭 蔚, 王玉军, 等. 乙烯精馏塔的振动分析[J]. 压力容器, 1999, 16(4): 30-35.
- [4] 吴运祥, 潘建华. 风诱导共振作用下高耸空塔局部结构的疲劳计算[J]. 压力容器, 2009, 26(12): 20-22.
- [5] 《压力容器实用技术丛书》编写委员会. 压力容器设计知识[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [6] 国家技术监督局. GB 150—1998, 钢制压力容器[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [7] ASME 锅炉及压力容器委员会压力容器分委员会. ASME 锅炉及压力容器规范 VIII[S]. 北京: 中国石化出版社, 2008.
- [8] (英)西蒙·厄兰, (英)戴维·纳什, (英)比尔·加登. 欧盟承压设备实用指南[M]. 郑津洋, 孙国有, 陈志伟, 等译. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [9] 全国锅炉压力容器标准技术委员会. JB/T 4710—2005, 钢制塔式容器[S]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [10] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. JB 4732—95, 钢制压力容器——分析设计标准[S]. 北京: 新华出版社, 2007.
- [11] 江楠. 塔设备受风诱导共振判定条件的分析与比较[J]. 石油化工设备技术, 1995, 16(6): 11-14.
- [12] 郝仕玲, 陈瑞金. 落地塔型设备横风向共振的塔径范围及内力分析[J]. 石油工程建设, 2006, 32(1): 22-25.
- [13] 徐海涛, 桑芝富, 王晓东. 风绕塔体流动的数值模拟[J]. 南京工业大学学报, 2002, 24(2): 56-60.
- [14] 李先彪, 金有海, 于勇斌, 等. 塔式容器风诱导振动计算新方法[J]. 石油化工设备, 2004, 33(4): 40-42.
- [15] 陈志伟, 吴德飞, 王为国, 等. 塔设备的风诱导振动分析研究[C]//压力容器先进技术——第七届全国压力容器学术会议论文集. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [16] 韩占忠. Fluent 流体工程仿真计算实例与分析[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.

(编辑: 金 虹)