文章编号:1000-8055(2024)07-20220422-09

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220422

# 低温风洞排气塔流致振动的理论及数值研究

张 伟<sup>1,2</sup>,高鑫鑫<sup>3</sup>,高 荣<sup>2</sup>,张小斌<sup>3</sup>,程 俊<sup>2</sup>
(1.国防科技大学 空天科学学院,长沙 410073;
2.中国空气动力研究与发展中心,四川 绵阳 621000;
3.浙江大学 制冷与低温工程研究所,杭州 310027)

**摘 要:**为分析排气塔在自然风载和内流共同作用下的结构安全性,采用理论和数值模拟方法分析了 排气塔的流致振动响应情况。理论分析获得了排气塔在自然风载作用下的顺流响应和均值响应。采用计算 流体力学方法, shear stress transport (SST)*k-ω* 湍流模型和动网格数值技术实现了排气塔的双向流固耦合数值 模拟,获得了排气塔在内外流动混合作用下的速度、压力和涡量分布。表明排气塔在特定风载下的旋涡脱 落频率接近1阶模态频率,塔体应力较小,在许用应力范围内。

**关 键 词:**排气塔;流致振动;低温风洞;涡量;流固耦合

中图分类号: V211 文献标志码: A

# Theoretical and numerical study on flow-induced vibration of exhaust tower in a cryogenic wind tunnel

ZHANG Wei<sup>1, 2</sup>, GAO Xinxin<sup>3</sup>, GAO Rong<sup>2</sup>, ZHANG Xiaobin<sup>3</sup>, CHENG Jun<sup>2</sup>

(1. College of Aero Space Science and Engineering,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

- 2. China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China;
- 3. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The flow-induced vibration response of the exhaust tower was analyzed by theoretical and numerical simulation methods to investigate the structural safety of the exhaust tower under the combined action of natural wind load and internal flow. The exhaust tower's co-current response and mean response under the action of wild wind load were achieved. Then, using the computational fluid dynamics approach, shear stress transport (SST) k- $\omega$  turbulence model and dynamic mesh numerical technology, the exhaust tower's two-way fluid-structure interaction numerical simulation was realized. The exhaust tower's velocity, pressure, and vorticity distribution under the action of internal and external flow mixing were also obtained. The vortex shedding frequency of the exhaust tower under a specific wind load was close to the first-order modal frequency of the structure. The gained stress was within the allowable stress range of stainless steel.

**Keywords:** exhaust tower; flow-induced vibration; cryogenic wind tunnel; vortex; fluid-structure interaction

收稿日期:2022-06-13

基金项目:中国空气动力研究与发展中心基础和前沿技术研究基金探索项目(PJD20200240)

作者简介:张伟(1988-),男,工程师,硕士,主要从事低温两相流及流固耦合研究。

通信作者:程俊(1984-),男,工程师,硕士,主要从事低温系统设计。E-mail: chengjun@cardc.cn

引用格式:张伟,高鑫鑫,高荣,等. 低温风洞排气塔流致振动的理论及数值研究[J]. 航空动力学报, 2024, 39(7): 20220422. ZHANG Wei, GAO Xinxin, GAO Rong, et al. Theoretical and numerical study on flow-induced vibration of exhaust tower in a cryogenic wind tunnel[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(7): 20220422.

风载荷作用下的绕流是典型的外流。圆柱绕 流在自然界是非常普遍的现象,是一种非定常流 动,包含着分离、旋涡脱落等许多复杂过程<sup>[1]</sup>。

自然风扭转模态为主的颤振导致的结构失稳 对桥梁安全性有着决定性影响。虎门大桥的振动 进一步加深了人们对涡激振动等为代表的流致振 动对桥梁的安全性和危害性认识。绕桥梁产生的 卡门涡街诱发了结构失稳,进一步导致虎门大桥 出现了波浪弯曲振动<sup>[2]</sup>。在风洞试验和数值模拟 中也观察到了四柱高桥塔的涡激振动及其对附近 吊杆的尾流效应,吊杆的空气动力具有与塔的旋 涡脱落频率相同的主频率。频率可能接近吊杆的 自然频率,从而产生振动<sup>[3-5]</sup>。

实际上,自然风的影响不仅仅局限于桥梁,高 层建筑<sup>[6]</sup>、塔器设备<sup>[7]</sup>、风力机及输电塔<sup>[8]</sup>都容易 产生诱导振动。塔设备作为石油化工等多个行业 的重要设备,具有十分广泛的应用。细长型塔器 结构在运行期间对风荷载尤其敏感,风诱导的塔 振动所引起的结构破坏时刻威胁塔设备的安全运 行,研究表明,塔设备在振动过程中会引发分离 位置动态变化、旋涡脱落频率改变,进而大幅度 改变横向力特性<sup>[1]</sup>。实际上,大兆瓦风电机组结 构的振动控制已成为当前风电产业亟待解决的关 键问题之一,严重时可能导致整个风力机组发生 损毁等恶性灾害事故<sup>[9-1]</sup>。因此,研究塔设备等细 长结构的振动对其气动特性和结构安全性有着十 分重要的工程应用意义。

风洞试验是开展流致振动的一个重要手段。 康友良<sup>[12]</sup>针对变截面钢桥塔涡激振动开展了风 洞试验和数值研究,在均匀流场下对气动弹性模 型钢桥塔进行不同风向角的涡激振动试验研究, 观察到了明显的涡激共振现象。陈文礼等<sup>[13]</sup>在 桥梁试验中发现了吊索在桥塔尾流区内的尾流致 振现象,吊索的振动特征与桥塔尾流风速特征密 切相关。圆柱形结构塔器产生的下游尾迹效应不 仅影响其他结构,也会引起自身的振动,锥形圆 柱体或不同阶梯圆柱成为潜在的解决方案以减小 尾迹宽度<sup>[14]</sup>。樊显涛等<sup>[15]</sup>在大气边界层风洞中 对并排塔器的流致振动特性开展了试验研究,获 得了其在不同间距和不同排布方式下的振动响应, 分析了尾迹干扰的影响范围,并提出了并排塔器 最大振幅的预测方法。

随数值计算成熟,计算流体力学模拟成为流 致振动研究的重要补充,以减少成本和时间。刘 友宏等<sup>[16]</sup>以光滑独立高塔或烟囱的诱导振动为 背景,针对不可压空气圆柱绕流流场,采用基于 切应力传输两方程湍流模型的分离涡湍流模型获 得了独立高塔或烟囱的绕流流场。

在风洞结构系统里,王元兴等[17]和聂旭涛等[18] 研究了风洞中高压气流管道、引射器瞬态开启时 对管道产生的非对称作用力,它带来的整个管网 系统振动严重制约了风洞正常运行。在大型低温 风洞中,大质量流量液氮调节阀内流场与结构相 互作用,不仅引起阀芯表面不对称的瞬态压力分 布,导致阀芯振动,而且会损坏密封装置、管路元 件,严重时甚至会造成低温风洞无法正常运行[19]。 两相流及液击[20] 对管路振动、安全运行同样有着 重要影响。Lee 等<sup>[21]</sup>针对低温管路开展了热声振 荡对超流氦管路的振动研究。大型低温风洞在试 验时,为维持总压平衡,会向外排出低温氮气,最 低温度 110 K,最大质量流量可达 300 kg/s。排气 塔可高达 50 m 以减少大质量流量低温氮气直接 排放到大气中,对周围环境造成潜在的低温、缺 氧危险<sup>[22]</sup>。

上述塔器流致振动研究多以常温为主,并且 未研究塔体内外流动混合作用下的流致振动效应。 本文针对大质量流量低温风洞排气塔,先采用理 论方法分析了排气塔在自然风载作用下的顺流响 应和均值响应。然后采用数值方法实现了排气塔 的双向流固耦合数值模拟,获得了和排气塔固有 频率接近的自然风速下排气塔振动情况和应力分 布,为塔结构安全运行提供了支撑。

### 1 理论分析

#### 1.1 自然风速

排气塔总高为 43 m, 内径为 3 m。根部外径 为 3.032 m, 并逐步过渡到顶部的 3.02 m。排气塔 底部为桁架支撑, 下有风机、引射器、加热装置等, 如图 1 所示。排气塔除了管内流动诱发的振动, 处于自然环境中还受到外部空气流动的影响, 因 此需要考察风载条件下由旋涡脱落引起的空气动 力学不稳定性的可能性, 以及顺风向振动时的位移。

将排气塔简化为下端固定的圆柱悬伸管道。 此外,空气流经地面时,在靠近表面处由于黏性 剪切作用流体速度接近于零,而远离地面处流动 速度接近于自由流的速度,地面与自由流之间的 流体层被称为边界层。在描述垂直地面方向风速 变化时通常使用指数规律的关系式。



图 1 排气塔三维模型(单位:m) Fig. 1 3D model of exhaust tower (unit:m)

排气塔所在地近 20 年最大风速约为 18 m/s (10 m 高度测量)计算中使用大气边界层模型如 式(1)所示:

$$\bar{U}(z) = \bar{U}_{g} \left(\frac{z}{z_{g}}\right)^{\alpha} = 18 \left(\frac{z}{10}\right)^{0.28}$$
 (1)

其中z是高度,  $\overline{U}$ 是速度,  $\overline{U}_{g}$ 是参考高度对应的速度,  $z_{g}$ 是参考高度,  $\alpha$  是指数常数, 根据排气塔所在地地貌, 取为 0.28。

#### 1.2 旋涡诱发振动

根据环境风速, 空气绕排气塔流动的雷诺数 Re 从底部的 3.1×10<sup>6</sup>逐渐增加到 5.39×10<sup>6</sup>。随 后根据圆柱体斯特罗哈数 St 与 Re 的关系, 确定 了排气塔 St 的范围为 0.25~0.28。根据式(2)可 以得到旋涡脱落频率f<sub>s</sub>为 1.34~2.61 Hz。

$$f_{\rm s} = \frac{StU}{D} \tag{2}$$

其中U是来流速度,D是排气塔直径。

不同高度处的风速不同,因此对应的旋涡脱 落频率也不同,随着高度的增加旋涡脱落频率增 大。当旋涡脱落频率逼近结构固有频率,旋涡脱 落频率会与结构频率连锁在一起,造成大幅振动。 基于有限元分析,得到了排气塔前6阶振动模态 的固有频率,如表1所示。

部分管段旋涡脱落频率(1.34~2.61 Hz)与第 一、第二阶振型的固有频率相近或重合。此时第 一、第二、第三阶振型对应的速度分别为 22.34、 22.45、205.12 m/s。三阶及三阶以上振型的共振 发生在极高风速下,自然条件下不可能发生。第

Table 1	Vibration	modal	frequency	of exhaust	tower	Hz
r able 1	vibration	mouai	rrequency	orexnaust	tower	пz

模态	频率	模态	频率
1	1.958 7	4	12.027
2	1.968 4	5	15.270
3	11.999	6	16.057

一、第二阶振型在高度大于 22.63 m 的管段并且 风速大于 14.85 m/s(10 m 高度)的情况下会发生 共振。因此有必要进一步分析排气塔在耦合工况 下的振动情况。

#### 1.3 顺流响应

首先采用理论方法,分析排气塔在风载作用 下顺流方向的振动,也即顺流响应。根据随机振 动理论<sup>[23]</sup>,结构在*j*振型相应的功率谱可由式(3) 计算:

$$S_{lij}(\omega) = \frac{S_{fij}(\omega)}{|Z(\omega)|^2}$$
(3)

$$|Z|^{2} = m^{2} \left[ \left( \omega_{j}^{2} - \omega^{2} \right)^{2} + \left( 2\zeta \omega \omega_{j} \right)^{2} \right]$$
(4)

其中*S*<sub>iij</sub>是结构件在*i*方向上对*j*振型响应的功率 谱,*S*<sub>fij</sub>是*j*振型在*i*方向上的广义力的功率谱,*Z* 是该振型的阻抗。ω是频率,ω<sub>j</sub>是*j*振型的固有 频率,*m*是单位长度的振型质量,ζ是由结构、材 料和流体引起的对该振型的阻尼系数。

在一段时间内平均得到的动态响应振幅的平 方值称为均方响应。*j*振型的均方响应*Y*<sub>ij</sub>等于在 整个频率范围内响应谱的积分。

$$\frac{\bar{Y}_{ij}^2}{\psi_j^2(z)} = 2 \int_0^\infty S_{lij}(\omega) \,\mathrm{d}\omega \tag{5}$$

其中 $\psi_j$ 是第j阶模态。式(5)中的积分可以分解 为三个部分:

$$\frac{\bar{Y}_{ij}^{2}}{\psi_{j}^{2}(z)} = 2 \int_{0}^{w_{a}} S_{lij}(\omega) d\omega + 2 \int_{\omega_{a}}^{\omega_{b}} S_{lij}(\omega) d\omega + 2 \int_{\omega_{b}}^{\infty} S_{lij}(\omega) d\omega = 2A_{a} + 2A_{b} + 2A_{c}$$

$$(6)$$

式(6)中积分的三个部分依次对应于均值响应、 非共振响应和共振响应。

## 1.4 均值响应

在指数规律的均值风速下,风作用在单位长度结构上的阻力 F<sub>v</sub>为:

$$F_{\rm y} = \frac{1}{2}\rho\bar{U}^2(z)DC_{\rm d} \tag{7}$$

其中ρ是空气密度, C<sub>d</sub>是阻力系数。结构的均值 位移等于作用在该振型上的广义力除以广义刚度, 如式(8)所示。

$$\bar{X}_{j} = \frac{\frac{1}{2}\rho\bar{U}^{2}(L)DC_{d}\psi_{j}(z)\int_{0}^{L}z^{2a}\psi_{j}(z)dz}{m\omega_{j}^{2}L^{2a}\int_{0}^{L}\psi_{j}^{2}(z)dz}$$
(8)

其中*x<sub>j</sub>*是具有单位长度广义质量 *m* 的 *j* 阶振型在 流动方向上的均值变形量, *L* 是排气塔的高度。 悬臂结构的基波振型通常可用式(9)近似,并忽略 其高阶振型,则均值位移为:

$$\psi(z) = (z/L)^{\beta} \tag{9}$$

$$\bar{X} = \frac{(2\beta+1)\rho\bar{U}^2(L)DC_{\rm d}}{\left[2(2\alpha+\beta+1)\right]m\omega_{\rm n}^2} \left(\frac{z}{L}\right)^{\beta}$$
(10)

其中β是折合频率, ω<sub>n</sub>是排气塔固有频率。相应 地, 在式(1)风速模型下的顺流向均值响应位移 如下:

$$\bar{X} = 2.2 \times 10^{-6} z^{1.83} (z+7)^{2\alpha}$$
(11)

可见排气塔顶面振幅最大,在 $\alpha$ =0.28时 $\bar{X}(43)$ =8.8 mm。

#### 2 数值模型

#### 2.1 几何模型

在理论分析中,对排气塔几何结构进行了简 化,假设为等直径,并且采用的是平均风速。下 一步采用数值计算方法分析真实工况下的振动情 况,排气塔简化模型如图2所示,并给出了排气塔 内流场和外流场混合流动的几何布置和边界条件。

左侧面为外部风进口面,内流场底面为内部



图 2 几何模型和流场布置 Fig. 2 Geometry model and flow field distribution

气体进口面,外流场底面为地面,右侧和上侧为 出口边界,前后两个面均设置为对称面,排气塔 外壁面、内壁面和上表面为双向流固耦合传递数 据的耦合面。在结构有限元模型中,底面设置为 固定支撑面,剩余面均与流体域接触,设置为计 算耦合面。

对于 Re 在 3.1×10<sup>6</sup>~5.39×10<sup>6</sup> 范围内的圆 柱绕流,圆柱壁面附近的网格对计算结果有着直 接影响。理论计算表明风载下旋涡诱发振动可能 与固有频率重叠从而引发共振。因此,数值模拟 中的圆柱绕流旋涡脱落频率对振动分析的准确性 有很大的影响。

首先划分排气塔直管处的外流场网格,在圆 柱附近气流绕流,其流动轨迹类似于环形流动, 因此首先在圆柱外一定区域划分绕流域,此区域 内网格采用六面体扫掠 Multizone 方法生成,使得 网格分布方向尽量与流动方向一致。此外,气流 在圆柱表面附近形成速度边界层,此处的网格直 接影响气流的分离。对应于边界层内速度沿法向 方向梯度较大,流向方向梯度小的特征,将圆柱 表面附近加密为多层的横纵比较大的六面体网格。 气流在流过圆柱后,会在其后方不断地周期性形 成旋涡,为了描述这些旋涡的发展,同样沿流向 方向将此处划分为较密的六面体网格。圆柱两侧 远离绕流及涡发展的区域内,气流流动相对稳定, 并且不会对旋涡脱落过程产生明显影响,因此将 此处划分为较粗的四面体网格,针对过渡部分, 网格疏密程度逐渐变化,减少数值误差。网格分 布如图3所示。



图 3 圆柱绕流区域网格分布 Fig. 3 Mesh distribution at zone around cylinder

不同疏密程度的网格对数值模拟结果有一定 影响,通过对排气塔外径和高度方向网格疏密程 度调整,形成了三套不同网格以验证网格独立性, 网格数量分别为1140476、1610795和2394660。 最终采用的流体域网格和固体域网格数量分别 为1567729和43066。当前数值计算中流体模块、 结构模块、系统耦合均在 Ansys Workbench 平台中实现。

#### 2.2 流体数值模型

采用不可压缩 Navier-Stokes(N-S)方程来描述排气塔内外流动,质量守恒方程和动量方程分别如式(12)和式(13)所示。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \tag{12}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}$$
(13)

其中 *t* 是时间, *v*是速度矢量, *p* 是压力, *g* 是重力 加速度, *F* 是外部作用力, <del>₹</del>是切应力。

*k-ω* 湍流模型对自由剪切流、附着边界层和 适度分离都有较高的计算精度。采用 SST *k-ω* 湍 流模型来描述气流在外壁的绕流分离过程,其运 输方程如式(14)~式(15)所示。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k + G_b$$
(14)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega + G_{\omega b}$$
(15)

其中 k 是湍动能,  $u_i$  是速度在 i 方向的分量,  $x_i$ 和  $x_j$  是空间位置在 i 方向和 j 方向的分量,  $Y_k$ 和  $Y_\omega$ 分 别是湍动能 k 和耗散率  $\omega$ 扩散产生的湍流,  $G_k$  表 示由于平均速度梯度产生的湍流动能,  $G_\omega$ 代表了 由  $\omega$  产生的湍流动能,  $\Gamma_k$ 和  $\Gamma_\omega$ 分别表示 k和  $\omega$ 的有效扩散系数,  $S_k$ 和  $S_\omega$ 表示 k和  $\omega$ 引起的耗散,  $G_b$ 和  $G_{\omega b}$  是源项。

外流场工质为常温空气。为简化计算,内流 场流体同样简化为空气。流场左侧采用速度进口 边界条件,并采用自然风速分布,如式(1)所示。

内流场底部同样为速度进口,根据排放的低 温氮气质量流量,折算速度为9.58 m/s,温度为 110 K。右侧面及顶面均设为自由出流。底面、 与固体接触的各个面均使用无滑移壁面边界条件。

在双向流固耦合中,固体的变形会反作用于 流场。理论计算得到的最大位移约为直径的 0.29%,变形幅度相对较小,采用光顺和铺陈的动 网格方法来使网格适应几何的变化。

压力速度的耦合选择 semi-implicit method for pressure linked equations(SIMPLE)算法,空间离散 压力项为二阶离散,动量方程、湍动能方程、耗散

方程均为二阶迎风格式,时间离散为二阶隐式格式。经过多次对比分析,计算监测点压力脉动频率约2Hz,因此时间步长取为0.01s。

## 2.3 结构数值模型

由流体诱发的结构振动、位移的控制方程为

$$\boldsymbol{M}_{\rm s}\frac{{\rm d}^2\boldsymbol{r}}{{\rm d}t^2} + \boldsymbol{C}_{\rm s}\frac{{\rm d}\boldsymbol{r}}{{\rm d}t} + \boldsymbol{K}_{\rm s}\boldsymbol{r} + \boldsymbol{\tau}_{\rm s} = 0 \qquad (16)$$

其中 *M*<sub>s</sub> 为质量矩阵, *C*<sub>s</sub> 为阻尼矩阵, *K*<sub>s</sub> 为刚度矩 阵, *r* 为结构的位移, *r*<sub>s</sub> 为结构受到的应力。结构 分析中首先添加排气塔底面为固定支撑面,并将 剩余面均设置为流体固体界面。时间步长设置 为 0.01 s。

## 3 结果讨论

#### 3.1 流场分析

图 4 展示了 t=4.42 s 时刻 z-y 平面的速度分布, 排气塔外风速随着高度增大而增大。在排气塔内 部,气流速度在由锥形管进入直管处速度迅速增 大,在排气塔出口处逐渐减速,在横向风的作用 下向右上方流动。图 4 中,流动速度并不均匀,呈 现出一条低速带(蓝色)夹在两条高速带区域(绿 色)之间。而在排气塔直管圆柱段后方的速度出 现了明显的波浪式分布,并且沿高度发生变化, 在靠近塔顶上方,波浪消失。





*x-y*平面*z*方向的涡量分布如图 5 所示,在圆 柱后方形成了两个方向相反的涡对,涡对从圆柱 表面脱离后在后方的流场中呈现依次交替排列。 圆管附近的流线如图 6 所示,气流在圆柱后方表 面约 120°处发生分离,并形成两个不对称的涡, 正是由于该涡对的不对称性引起了圆柱表面压力 的周期性的波动,从而发生涡振现象。

图7展示了由λ2准则描述的流场涡结构。



图 5 t=4.42 s 时 z=31 m 平面涡量分布 Fig. 5 Vorticity distribution at plane z=31 m at t=4.42 s



图 6 t=4.42 s 时 z=31 m 平面流线分布 Fig. 6 Streamline distribution at plane z=31 m at t=4.42 s

在排气塔后方形成了规律的竖直的长条形涡结构, 与前文中 z-y 截面速度、x-y 截面涡量展示的结果 相对应。并且随着高度的增加,涡结构的数量也 逐渐增加。在高雷诺数(Re>2.5×10<sup>6</sup>)下,St 与 Re 关系并不紧密,基本维持在 0.25 左右,因此旋涡 脱落频率与绕流速度近似成正比关系,这也是涡 结构沿高度发生变化的原因。此外,内部气流离 开排气塔与横向风相遇后,不断发展并形成了两 条近似平行的涡结构,如图 8(a)所示。由于涡结 构均分布在排气塔上方,因此不会对旋涡脱落频 率产生明显影响。在直管圆柱和圆锥交界处及圆 锥段后方形成了不一样的水平涡结构,如图 8(b) 所示。这是因为此处几何结构突变,且离地面近, 风速较小。







图 8 涡结构局部特征( $\lambda_2$ 等值面) Fig. 8 Local feature of vortex structure (isosurface of  $\lambda_2$ )

模拟中还获得了不同高度固定点的速度大小, 其随时间的波动如图 9 所示。在 z 为 20、30 m 和 40 m 高度,流动进入稳定状态后均显示速度以固 定的周期波动,并且随着高度增加,速度增加,波 动周期逐渐减小。

根据图 9 各测点的速度波动频率可以得到不同高度圆柱绕流过程的斯特罗哈数 St,结果如图 10 所示。可知三个高度 St 的模拟结果均约为0.32,即 St 不随速度(高度)变化而显著变化,并且





Fig. 10 St comparison between simulation and experiment

略大于均匀风下等截面圆柱试验值<sup>[23]</sup>。考虑到模 拟采用梯度风且排气塔存在变截面等因素影响, 可认为模拟结果轻微的偏离是可以接受的。

#### 3.2 排气塔振动

图 11 展示了排气塔顶部变形随时间的变化。 在 0~1 s 内,由于初始瞬态流动影响,变形位移 规律有所不同,而随着流动趋于稳定,位移曲线 均以稳定的频率波动。最大位移出现在 *t*=1.5 s, 此时的变形量为 12.7 mm,平均值为 3.3 mm。





同时计算表明, 排气塔在 x 方向也发生了偏转, 这是由于排气塔绕流形成了非对称涡对, 随着涡周期性脱落, 圆柱表面的压力也随之发生周期性变化引起的涡激变形。图 12 是排气塔顶部 在风载作用下沿 x 方向的最大变形和平均变形位移, 最大变形量为 12.2 mm, 在流动进入稳定状态后, 呈现频率为 2 Hz 的周期性变形。在 y 方向上, 排气塔沿着顺风方向发生偏移, 排气塔顶部变形 量最大。图 13 是沿 y 方向的最大变形和平均变 形位移, 最大变形发生在初始时刻, 位移量为







将图 2 中排气塔的入口速度设置为 0, 从而 可以获得在不排气状态下排气塔位移变化情况。 图 14 是沿 y 方向的最大变形和平均变形位移, 最 大变形为 5.2 mm。前述理论计算得到顺流均值 响应为 8.8 mm, 大于数值结果。这是由于理论模 型中将整个排气塔简化为一端固定的等截面圆柱, 而数值模拟中考虑了锥形底座, 增加了排气塔的 刚度, 减少了排气塔的顺流响应位移, 因此数值 解小于理论解。并且 y 方向变形, 即顺流响应不 受初始瞬态的影响, 变形频率始终保持在 2 Hz。

图 15 给出了风载作用下由平均位移得到的 变形轨迹。初始瞬态时,圆柱后方还没有旋涡脱 落,涡振作用极小,只在顺流响应作用下向y方向 移动。随着涡振作用增加,开始沿x方向发生变 形,并且由于涡振频率与顺流响应频率相同,位 移最终呈现出一个向右上方偏转的椭圆形轨迹。



图 13 排气塔顶部沿 y 方向变形随时间变化 Fig. 13 Variation of displacement at y direction of venting









Fig. 15 Deformation trajectory

图 16 是振动过程中等效应力的变化曲线, 最 大值出现在 1.5 s, 等效应力为 11.6 MPa, 远小于不 锈钢的许用应力。图 17 是 t=1.5 s 时刻排气塔下 部的等效应力分布, 最大值位于直管段与锥形管 段的连接处, 并且圆锥管段的等效应力要大于圆 柱管段。固定支撑面上不同位置的等效应力相对 较小, 总体在 1 MPa 以下。



图 16 等效应力随时间变化 Fig. 16 Variation of equivalent stress with time





## 4 结 论

针对大型低温风洞排气塔,采用理论和数值 模拟方法分析了排气塔的流致振动响应情况。

1)自然风速模型下,部分管段旋涡脱落频率 (1.34~2.61 Hz)与第一、第二阶振型的固有频率 相近或重合。在最大风速下排气塔顶部顺流响应 位移理论值为 8.8 mm。

2)瞬态双向流固耦合表明在排气塔后方形成了规律的竖直的长条形涡结构,由速度波动频率获得的 St 约为 0.32,因几何外形和速度梯度差异,略大于试验值 0.25~0.28。

3) 排气塔在内外流动的流致振动作用下, 排 气塔最大等效应力为 11.6 MPa, 位于直管段与锥 形管段的连接处, 在许用应力范围内。

4)开展的旋涡脱落频率与排气塔固有频率 重合工况下的流固耦合流致振动研究验证了排气 塔流致振动的安全性,为风洞正常运行提供了 支撑。

## 参考文献:

- [1] 邱雅柔, 唐迪, 包士毅, 等. 风诱导塔振动对塔气动特性影响研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(20): 106-114.
   QIU Yarou, TANG Di, BAO Shiyi, et al. Study of the wind-induced tower vibrations affect on aerodynamic characteristics[J].
   Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(20): 106-114. (in Chinese)
- [2] 张伟伟, 豆子皓, 李新涛, 等. 桥梁若干流致振动与卡门涡 街[J]. 空气动力学学报, 2020, 38(3): 405-412.
  ZHANG Weiwei, DOU Zihao, LI Xintao, et al. Various flow-induced vibrations of bridges and von Kármán vortex street[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2020, 38(3): 405-412. (in Chinese)
- [3] LUO Nan, LIANG Ai, LIAO Hai, et al. Wind tunnel investigations for the free standing tower of the Penang second bridge[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 256/257/258/259: 1577-1581.
- [4] MARRA A M, MANNINI C, BARTOLI G. Wind tunnel modeling for the vortex-induced vibrations of a yawed bridge tower[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(5): 04017006.
- [5] FANG Chen, WANG Zewen, TANG Haojun, et al. Vortex-induced vibration of a tall bridge tower with four columns and the wake effects on the nearby suspenders[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2020, 20(9): 2050105.
- [6] 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.
- [7] 陈旭,黄珑霆,丁福祥,等.超大型冷却塔龙卷风作用塔筒 内表面风荷载特性研究[J].振动与冲击,2021,40(21):31-38. CHEN Xu, HUANG Longting, DING Fuxiang, et al. Characteristics of wind load on inner surface of super large cooling tower under tornado action[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(21): 31-38. (in Chinese)

- [8] DENG H Z, JIANG Q, LI F, et al. Vortex-induced vibration tests of circular cylinders connected with typical joints in transmission towers[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2011, 99(10): 1069-1078.
- [9] 李杨,兰涌森,李强,等.风力机塔架结构振动控制研究及 方法综述[J].船舶工程,2020,42(增刊2):248-253.
  LI Yang, LAN Yongsen, LI Qiang, et al. Research and method summary on vibration control of wind turbine tower structure[J].
  Ship Engineering, 2020, 42(Suppl.2): 248-253. (in Chinese)
- [10] NGUYEN C U, LEE S Y, HUYNH T C, et al. Vibration characteristics of offshore wind turbine tower with gravity-based foundation under wave excitation[J]. Smart Structures and Systems, 2019, 23(5): 405-420.
- [11] 杨冬宝,高俊松,刘建平,等.基于 DEM-FEM 耦合方法的 海上风机结构冰激振动分析[J].力学学报,2021,53(3):682-692.

YANG Dongbao, GAO Junsong, LIU Jianping, et al. Analysis of ice-inducted structure vibration of offshore wind turbines based on dem-fem coupled method[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(3): 682-692. (in Chinese)

- [12] 康友良.变截面钢桥塔涡激振动风洞试验和数值模拟研究
  [D].长沙:长沙理工大学, 2019.
  KANG Youliang. Wind tunnel test and numerical simulation study on the vortex-induced vibration of steel bridge tower with variable section[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019. (in Chinese)
- [13] 陈文礼,黄业伟,孟昊,等.桥塔尾流风作用下吊索尾流致振动模型与参数分析[J].中国公路学报,2022,35(4):117-127.
   CHEN Wenli, HUANG Yewei, MENG Hao, et al. Motion model

and parameter analysis of flow-induced vibration of suspender in bridge tower wake[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(4): 117-127. (in Chinese)

- [14] BALAJI G, PILLAI S N, KUMAR C S. Wind tunnel investigation of downstream wake characteristics on circular cylinder with various taper ratios[J]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2017, 10 (SI): 69-77.
- [15] 樊显涛, 唐博文, 谭蔚. 并排塔器流致振动特性及预测模型

研究[C]//压力容器先进技术——第十届全国压力容器学术 会议论文集(上).杭州:中国机械工程学会压力容器分会, 2021:739-748.

- [16] 刘友宏,丁玉林,周开福,等.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.
  LIU Youhong, DING Yulin, ZHOU Kaifu, et al. Induced vibration of smooth chimney tower[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(13): 1-6. (in Chinese)
- [17] 王元兴, 聂旭涛, 麻越垠, 等. 高压气流管道瞬态冲击振动 分析及抑振研究[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(4): 812-817, 838.
  WANG Yuanxing, NIE Xutao, MA Yueyin, et al. Structural vibration analysis and suppression technique of high-pressure transient impact airflow pipeline system[J]. Journal of Vibration, Measure-
- [18] NIE Xutao, LIU Zongzheng, QIN Chaojin, et al. Numerical study on flow-induced vibration of ejector structure[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 36(5): 769-778.

ment & Diagnosis, 2021, 41(4): 812-817, 838. (in Chinese)

- [19] WEI A B, GAO R, ZHANG X B, et al. CFD analysis of the flowinduced vibration of a cryogenic poppet valve in consideration of the cavitation effect[J]. Journal of Zhejiang University: Science A (Applied Physics & Engineering), 2022, 23(2): 83-100.
- [20] 张伟,孙德文,陈万华,等.基于 AMESim 的液氮供给系统 液击仿真[J].航空动力学报, 2022, 37(2): 366-374.
  ZHANG Wei, SUN Dewen, CHEN Wanhua, et al. Simulation of water hammer in liquid nitrogen supplying system based on AMESim
  [J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(2): 366-374. (in Chinese)
- [21] LEE H J, OH S J, JOO J J, et al. Propagation of thermally induced oscillation in the KSTAR cryogenic loop[J]. Fusion Engineering and Design, 2016, 109/110/111: 942-946.
- [22] LI Jingfeng, WANG Kai, ZHANG Xiaobin, et al. A parametric sensitivity study by numerical simulations on plume dispersion of the exhaust from a cryogenic wind tunnel[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2018, 19(10): 746-757.
- [23] BLEVINS R D. 流动诱发振动[M]. 机械工业出版社出版, 1983.

(编辑:秦理曼)