

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202005044

## 脱硝钢架表面体型系数及风致响应分析\*

劳俊<sup>1</sup>, 王希慧<sup>2,3</sup>, 宋波<sup>2,3</sup>, 李陈阳<sup>2,3</sup>

(1. 国能龙源环保有限公司, 北京 100039; 2. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083;  
3. 强震区轨道交通工程抗震研究北京市国际科技合作基地, 北京 100083)

**摘要:** 火电厂中的脱硝钢架由于其高度较高、外形不规则, 风荷载是其承受的主要荷载之一。为确保该类结构风荷载的正确评估, 以某典型脱硝钢架为研究对象, 基于流固耦合理论, 利用数值风洞方法对脱硝钢架结构表面体型系数及风致响应进行了研究。根据刚度与质量等效的原则, 提出了复杂脱硝钢架结构连续体模型的简化方法, 模型简化前后的1阶自振周期与振型接近, 可近似模拟原结构的平动情况。风向角的变化对迎风面及变截面处体型系数的影响较大, 可以忽略风向角对侧面及顶面体型系数的影响。在0°风向角工况下, 结构的位移与应力极值均显著大于90°风向角工况。因此, 0°风向对于结构而言为相对较不利风向, 在脱硝钢架整体结构方向布置时应予以避免。

**关键词:** 脱硝钢架; 风向角; 数值风洞; 体型系数; 风致响应

**中图分类号:** TU312<sup>+</sup>.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)03-0534-08

## Analysis of Superficial Shape Coefficient and Wind-induced Response of Denitrification Steel Frame

LAO Jun<sup>1</sup>, WANG Xihui<sup>2,3</sup>, SONG Bo<sup>2,3</sup>, LI Chenyang<sup>2,3</sup>

(1. China Energy Longyuan Environmental Protection Co., Ltd., Beijing 100039, China; 2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. Beijing International Cooperation Base for Science and Technology-Aseismic Research of the Rail Transit Engineering in the Strong Motion Area, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In thermal power plants, the height of the denitration steel frame is high and the shape is irregular, and wind load is one of the main loads on the denitration steel frame. In order to ensure the correct assessment of the wind load of the structure, a typical denitration steel frame structure was taken as a study subject. Based on the fluid-solid coupling theory, the shape coefficient and wind-induced response of the denitration steel frame structure were studied using the numerical wind tunnel method. According to the principle of equivalence of stiffness and mass, a simplified method for the continuum model of complex denitration steel frame structure is proposed. The first-order natural period of the simplified model is close to that of the original model. The simplified model can be used to simulate the translation of the original structure. The change in wind direction angle has a great influence on the

\* 收稿日期: 2020-05-20; 修回日期: 2020-08-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078038)资助

作者简介: 劳俊(1972—), 男, 高级工程师。主要从事构筑物结构设计方面的研究。

E-mail: 12095501@chnenergy.com.cn

shape coefficient of the windward face and the variable cross-section. The influence of wind direction angle on the shape coefficient of the side and the top can be ignored. The maximum displacement and stress of the structure under the condition of  $0^\circ$  wind direction angle are significantly greater than those under the condition of  $90^\circ$  wind direction angle. Therefore,  $0^\circ$  is a relatively unfavorable wind direction for the structure. When the denitration steel frame is arranged in the direction of the overall structure,  $0^\circ$  should be avoided.

**Keywords:** denitration steel frame; wind direction; numerical wind tunnel; shape coefficient; wind-induced response

## 引言

火电厂中的脱硝钢架高度较高,受风荷载影响较大,同时结构较为复杂,如果风荷载体型系数选取不当,抗风计算就可能产生较大误差,容易产生安全问题,如果一味地提高计算参数,又造成材料的浪费。此类工程结构在风荷载作用下的响应特性尚无规律可循,《建筑结构荷载规范》<sup>[1]</sup>中给出了规则结构体型系数,但一些体型复杂的建筑结构表面体型系数无法准确获得,所以有必要分析大型复杂钢架工业结构在风荷载作用下的体型系数分布及风致响应,对该类结构抗风设计具有重要的意义。

随着计算流体力学的快速发展,数值方法被广泛用于风工程计算领域,数值风洞试验具有成本低、参数易于修改、足尺模拟等优点<sup>[2]</sup>,并通过与风洞试验对比,不断得到改进<sup>[3]</sup>。李正良等<sup>[4]</sup>采用风洞试验与数值模拟相结合的方法研究了某复杂屋盖在不同风向角作用下结构的风压系数,并验证了计算流体动力学方法的有效性。M.Liu等<sup>[5]</sup>利用大涡模拟来评估可伸缩屋盖体育场的风致效应,既能考虑雷诺数效应,又能克服风洞试验的模型空间限制。Y.L.Li等<sup>[6]</sup>采用计算流体力学方法对不同风向下桥塔尾流场进行了数值模拟,并编制了不同风速和风向吊杆风致振动的风洞试验程序。牛建刚等<sup>[7]</sup>以某电厂的风力发电机为研究对象,采用CFD数值模拟的方法对风力发电厂流场特性进行了分析,得出了表面风压系数随塔架高度的变化规律以及地形对风力发电机周围风场和风压分布的影响。宋波等<sup>[8]</sup>以某脱硫塔结构为对象,通过数值风洞的方法研究了塔体的风振响应,并提出最不利风向角。脱硝钢架的特点是荷载种类复杂,结构设计时应注意荷载取值合理的合理性<sup>[9]</sup>。目前对于脱硝钢架风荷载的计算,主要依据设计规范来确定体型系

数,然后将计算的风荷载分别施加在每根钢架上<sup>[10]</sup>,同时在计算中也应考虑风振的影响<sup>[11]</sup>,由于烟道与烟道、烟道与反应器及反应器与反应器间距离较小,风荷载体型系数取值时挡风系数也不容忽视。

综上所述,国内外对于脱硝钢架的体型系数的研究较少,本文通过对复杂脱硝钢架进行等效计算,将结构简化为连续体模型,继而通过数值风洞的方法,对脱硝钢架的在不同风向角工况下的表面体型系数分布及风致动力响应进行分析,明确其影响规律,为该类复杂钢架结构的抗风设计提供参考。

## 1 脱硝钢架结构模型的简化

### 1.1 等效连续体结构模型简化计算

选取贵州省毕节地区某电厂脱硝钢架结构作为研究背景,如图1所示。该地区地面粗糙度属于B类,50年重现期基本风压为 $0.3 \text{ kN/m}^2$ ,当地10m高度处10min内平均风速为 $22.4 \text{ m/s}$ ,地面粗糙度系数取0.16。钢支架长25m,宽20m,高53.4m,为框架支撑结构。钢柱与梁均采用H型截面,局部采用槽钢。钢材为Q235,弹性模量为 $2.06 \times 10^{11} \text{ Pa}$ ,泊



图1 脱硝钢架结构

Fig.1 Structure of the denitration steel frame

松比为0.3,密度为7 850 kg/m<sup>3</sup>。

为了便于进行数值风洞流固耦合的计算,将实际复杂结构简化为连续体模型,主要基于以下两条假设<sup>[12]</sup>:一是总的质量与刚度的分布要与原结构等效;二是风荷载对结构的作用效应要与原结构一致,即保证简化模型的外形尺寸要与原结构近似,模型简化前后如图2所示。根据截面惯性矩平行移轴公式,坐标系如图3所示,刚架柱截面对刚架形心轴的惯性矩为:

$$I_y = h_1 b_1^3 / 12 + b_1 h_1 L_1^2 + h_2 b_2^3 / 12 + b_2 h_2 L_2^2$$

$$= \sum_{i=1}^2 [h_i b_i^3 / 12 + A_i L_i^2] \quad (1)$$

$$I_x = b_1 h_1^3 / 12 + b_2 h_2^3 / 12 = \sum_{i=2}^2 b_i h_i^3 / 12 \quad (2)$$

推出单跨抗弯刚度为:

$$EI_{yep} = E \sum_{i=1}^2 [h_i b_i^3 / 12 + A_i L_i^2] \quad (3)$$

$$EI_{xep} = E \sum_{i=2}^2 b_i h_i^3 / 12 \quad (4)$$

同理,可得多榀桁架等效抗弯刚度为:

$$EI_{yep} = E \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n [h_{ij} b_{ij}^3 / 12 + A_{ij} L_{ij}^2] \quad (5)$$

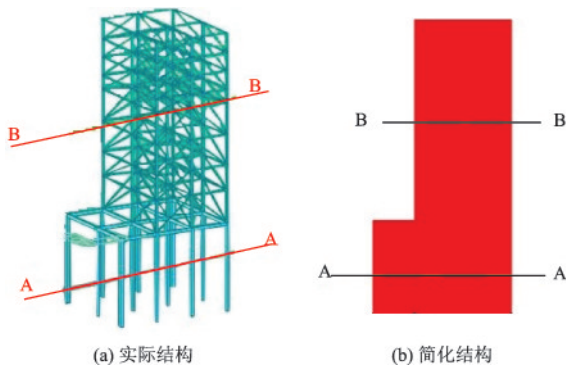


图2 结构模型简化

Fig.2 Simplification of the calculation model

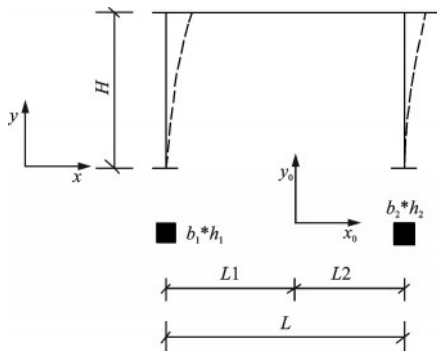


图3 框架弯曲变形坐标系

Fig.3 Coordinate system of frame bending

$$EI_{xep} = E \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n b_{ij} h_{ij}^3 / 12 \quad (6)$$

假定简化后的A-A截面为空心截面,矩形空心截面的惯性矩公式:

$$I'_{yep} = \frac{HB^3}{12} - \frac{hb^3}{12} \quad (7)$$

根据刚度等效原则:

$$I'_{yep} = I_{yep} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n [h_{ij} b_{ij}^3 / 12 + A_{ij} L_{ij}^2] = 327.153 6 \text{ m}^4 \quad (8)$$

由式(8)可解得:H=20 m,B=25 m,h=19.8 m,b=24.8 m,A-A截面刚度等效示意图4所示。

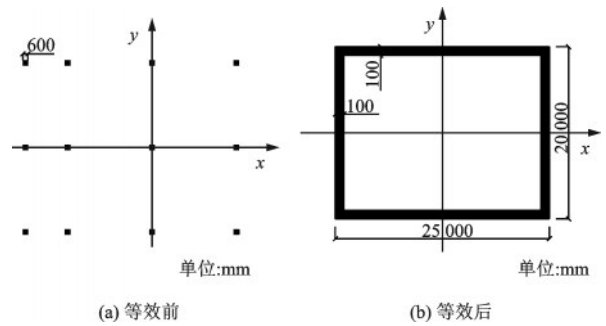


图4 A-A截面刚度等效

Fig.4 Rigidity equivalent of section A-A (unit: mm)

对于截面B-B,由于17 m以上高度的构件比较密集,可以近似考虑为均质实体,保持总体质量和刚度相等,尺寸为20 m×20 m,简化后的截面形式如图5所示。为了尽量保证结构动力特性的相似性,根据刚度和质量等效的原则,简化后1~17 m的结构密度为3 784.82 kg/m<sup>3</sup>,17~53.4 m的结构密度为25.01 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量为6.5×10<sup>6</sup> Pa,泊松比为0.3。

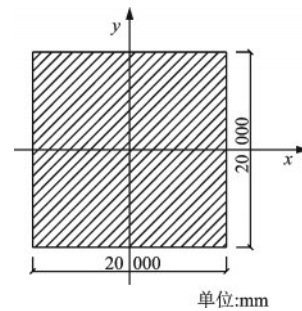


图5 B-B截面示意

Fig.5 Diagram of B-B Section

## 1.2 模型简化前后自振特性对比

利用MIDAS NFX的模态分析模块对简化前

后的模型进行自振分析,原模型与简化模型前3阶振型如图6~7所示。

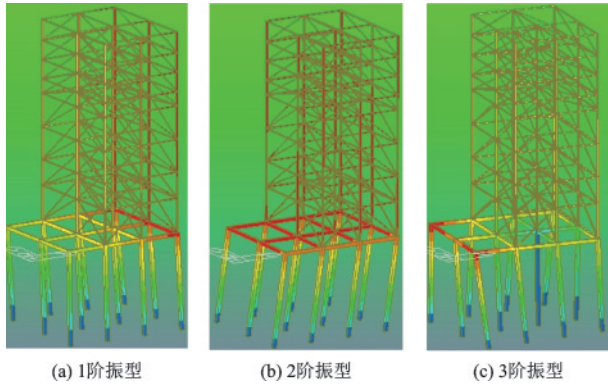


图6 原模型振型

Fig.6 Mode shapes of the original model

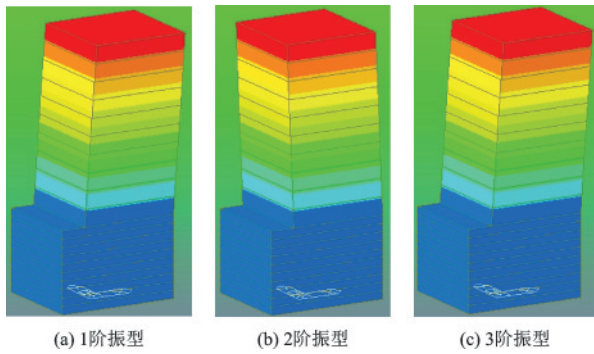


图7 简化模型振型

Fig.7 Mode shapes of the simplified model

简化模型的第1阶自振周期为1.355 s,原模型第1阶自振周期为1.298 s,误差仅为4%。从图6、7可以看出,简化模型前两阶振型分别是两个方向的平动,只有第三阶振型不同于原结构的扭转。风荷载作用下结构一般以第1阶振型为主<sup>[13]</sup>,低阶振型相似,即可达到工程需求,因此简化结构可近似模拟原结构的平动情况。

## 2 脱硝钢架稳态数值风洞的建立

基于MIDAS NFX平台,联合使用CFD瞬态分析模块以及流场分析模块,建立结构场与风场计算模型,实现风场压力与结构变形的耦合计算。

### 2.1 边界条件及求解方法

风场模型采用不可压缩性流体,基于流固耦合理论<sup>[14]</sup>,建立包含结构场与风场的数值风洞。为了

满足阻塞率要求<sup>[15]</sup>,风场尺寸定为500 m×300 m×200 m,结构背风面离出口距离应使湍流充分发展,所以出口应距离建筑物较远,数值风洞如图8所示。

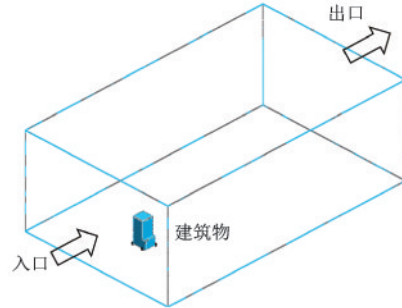


图8 数值风洞示意

Fig.8 Schematic diagram of the numerical wind tunnel

风洞入口采用inlet边界条件,出口采用开放式出口边界条件(opening),风场的侧面和顶壁面采用对称边界条件(symmetry),建筑物壁面和地面采用无滑移壁面边界条件(wall)。将风场与结构场的接触面设置为流固耦合界面,结构采用实体单元,底部固结。在数值风洞进口处,指定等效的大气边界层,平均风速通过指数率剖面定义:

$$\frac{\bar{\mu}(z)}{\mu_b} = \left(\frac{z}{z_b}\right)^a \quad (9)$$

式中, $z_b$ 、 $\mu_b$ 分别为标准参考高度和标准参考高度处的平均风速; $z$ 和 $\bar{\mu}(z)$ 为任一高度和任一高度处的平均速度; $a$ 为地面粗糙度系数,取B类地面 $a=0.16$ 。

本文采用的是稳态计算方法,选取SST  $k-\omega$ 湍流模型进行模拟求解<sup>[16]</sup>,求解格式选用混合模式,此种算法收敛性好,可较好的模拟钝体绕流,也能满足工程精度要求。入口处湍流强度的边界条件用湍动能 $k$ 与耗散率 $\omega$ 来定义:

$$k(z) = 1.2 \left[ I(z) \bar{\mu}(z) \right]^2 \quad (10)$$

$$\omega_z = \frac{k(z)^{0.5}}{C_\mu^{0.25} \times (0.4L_N)} \quad (11)$$

式中,湍流强度 $I(z) = \left(\frac{z}{10}\right)^{-0.16}$ ;湍流常数 $C_\mu = 0.09$ ;

入口湍流积分尺度 $L_N = 100 \times \left(\frac{z}{10}\right)^{0.5}$ 。

## 2.2 脱硝钢架体型系数区域划分

风荷载体型系数 $\mu_s$ 是计算风荷载的主要参数,在实际的建筑物抗风设计中,风荷载体型系数一般都选取规定的参考高度的平均风压系数。对于任一测点,风压系数定义如下:

$$P_i = C_{pi} \omega_0 = \beta_{zi} \mu_{si} \mu_{zi} \omega_0 \quad (12)$$

式中, $P_i$ 为测点*i*处的风压值; $C_{pi}$ 为该点的风压系数。《建筑结构荷载规范》<sup>[1]</sup>中对 $\mu_z$ 的规定如下:

$$\mu_z^B = 1.000 \left( \frac{z}{10} \right)^{0.30} \quad (13)$$

将式(13)代入式(12),则得到某个测点的体型系数表达式:

$$\mu_{si} = \frac{C_{pi}}{\beta_{zi} \mu_{zi}} = \frac{C_{pi}}{\beta_{zi} \left( \frac{z}{10} \right)^{0.30}} \quad (14)$$

对于某个区域的风荷载体型系数,可以通过该区域有关测点的体型系数与其面积的加权平均求和得到:

$$\mu_s = \frac{\sum \mu_{si} A_i}{\sum A_i} \quad (15)$$

在实际的工程中数值模拟得到的结果并不能直接用于结构设计,为了给实际工程提供参考,将结构进行分区,然后把每个区域的平均风压系数计算结果换算成规范中的体型系数 $\mu_s$ 。

为了便于分析,将结构进行分区,如图9所示,将脱硝刚架结构整体分为A、B、C、D四个区域,A、C区域进行二次分区,分别为A1、A2、A3、A4、C1、C2、C3、C4区,B区域和D区域是变截面与顶面,由于面积较小,作为单独区域计算,总共分为10个区域,计算该10个区域的体型系数并分析其变化规律。

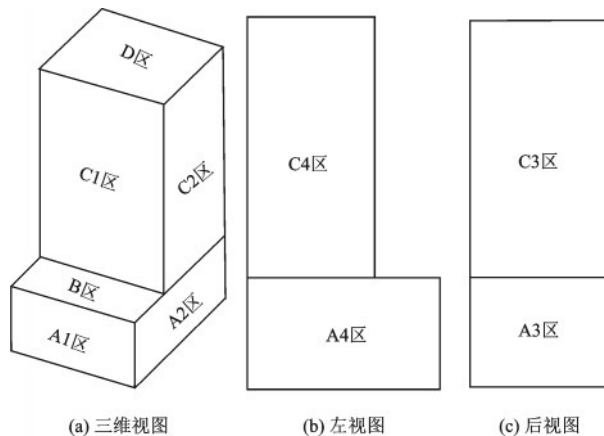


图9 脱硝钢架结构分区

Fig.9 Division of denitration steel structure

## 3 表面体型系数及风致响应分析

### 3.1 不同风向角下结构表面体型系数分布

贵州毕节地区50年重现期的基本风速为22.4 m/s,以此风速分别从0°风向角(该地实际频率最高的风向)和90°风向角输入,风向角定义如图10所示。

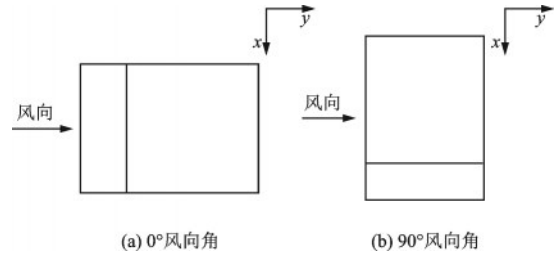


图10 风向角示意

Fig.10 Schematic diagram of the wind direction angle

风向角对脱硝钢架结构体型系数的影响不可忽视,通过对两种风向角工况下结构迎风面、侧面及背风面体型系数,分析风向角对体型系数的影响。计算A、B、C、D区域的体型系数,风向角为0°时各分区的体型系数如表1和图11所示。

表1 风向角0°时体型系数

Table 1 Shape coefficients with 0° wind direction angle

区域	体型系数			
A	A1	A2	A3	A4
	0.96	-0.84	-0.59	-0.92
B	-1.6			
C	C1	C2	C3	C4
	1.36	-1.32	-1.26	-1.33
D	-1.21			

注:A1区和C1区是迎风面,A2、C2、A4和C4区是侧面,A3区、C3区是背风面

由图11可以看出,迎风面的体型系数的绝对值大于其他面,而在背风面与侧面基本一致。两个顶面的体型系数一致,A1、A2区的变化起伏较大,背风面及侧面变化比较平缓;背风面体型系数与规范基本一致,而在脱硝钢架中上部体型系数与规范有所差别,主要是由于风在流经结构后在脱硝钢架后产生的涡流所致。风向角为90°时各分区的体型系数如表2和图12所示。

在风向角为90°时,脱硝钢架结构4区是正风压

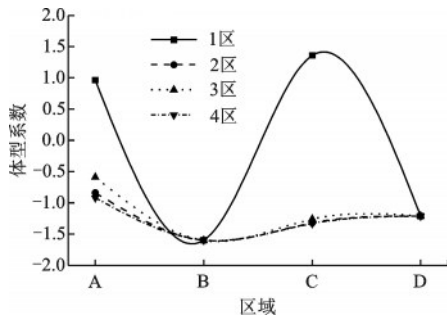


图 11 体型系数分布(风向角 $0^\circ$ )

Fig.11 Distribution of shape coefficients (with  $0^\circ$  wind direction angle)

表 2 风向角 $90^\circ$ 时体型系数

Table 2 Shape coefficients with $90^\circ$ wind direction angle				
区域	体型系数			
A	A1	A2	A3	A4
	-0.68	-0.66	-0.74	0.68
	B			
	-1.25			
C	C1	C2	C3	C4
	-1.33	-1.32	-1.37	1.32
	D			
	-1.23			

注:A4和C4区是迎风面,A1、A3、C1和C3区是侧面

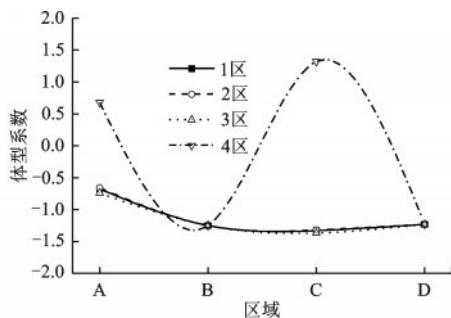


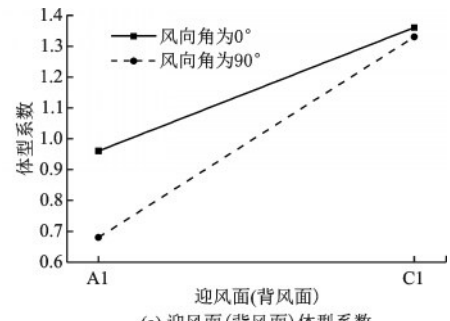
图 12 体型系数分布(风向角 $90^\circ$ )

Fig.12 Distribution of shape coefficients (with  $90^\circ$  wind direction angle)

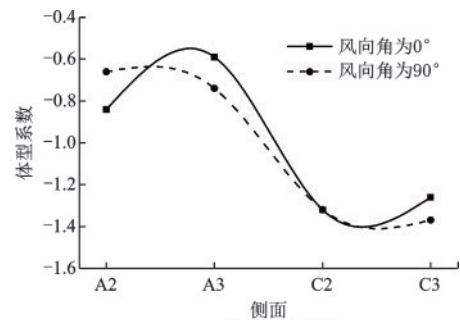
区,1、2、3区是负风压区。由图 12 可以看出,在侧面脱硝钢架的体型系数绝对值普遍大于迎风面体型系数值,B、D区是顶面,是负风压区,并且B区的绝对值大于D区。

为了明确风向角对结构体型系数的影响,分别对比两种风向角工况下脱硝钢架结构迎风面、背风面、侧面体型系数的不同,得出风向角的变化对体型系数的影响规律,如图 13 所示。

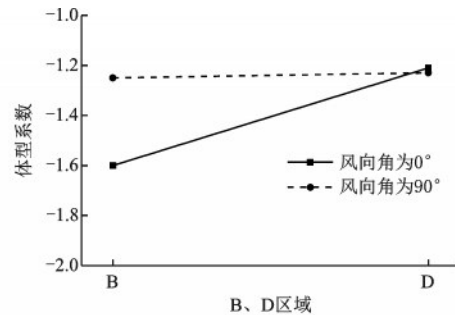
由图 13(a)可以看出, $0^\circ$ 风向角时脱硝钢架结构迎风面 A1 区域体型系数明显大于 $90^\circ$ 时的体型系数,而迎风面 C1 区域体型系数变化不大,说明风向



(a) 迎风面(背风面)体型系数



(b) 侧面体型系数



(c) 变截面及顶面体型系数

图 13 不同风向角下体型系数对比

Fig.13 Comparison of shape coefficients with different wind directions

角的变动主要引起脱硝钢架结构迎风面 A1 区域体型系数的变化。由图 13(b)可知,侧面体型系数随着风向角的变动发生变化,风向角为 $0^\circ$ 时,背风面 A1 区域的体型系数比 $90^\circ$ 时大,但是风向角的变化引起的体型系数变化较小,影响不是很大。

由图 13(c)可以看出,在变截面 B 区域,风向角的变化引起的体型系数变动较大, $0^\circ$ 风向角时变截面的体型系数大于 $90^\circ$ 的情况,风向角的变化对脱硝钢架结构的顶面 D 区域的体型系数影响较小,几乎相等。

综上所述,风向角的变化对迎风面及变截面处体型系数的影响较大,可以忽略风向角对侧面及顶面体型系数的影响。

### 3.2 不同风向角下结构风致响应

为了便于对比,将不同风向角工况下结构的响

应汇总,如表3所示。

表3 不同风向角下结构的响应极值

Table 3 Extreme values of structural response with different wind directions

风向角	位移/cm	应力/Pa
0°	2.01	676.57
90°	1.35	177.34

由表3可以看出,在风向角为0°时,结构的最大位移为2.01 cm,出现结构的迎风面顶端,小于《高耸结构设计规范》<sup>[17]</sup>中规定的位移限值,结构是安全的。同时结构的最大应力为676.57 Pa,出现在结构迎风面底端,该值远小于材料的许用应力113 MPa,结构处于弹性状态,未产生塑性破坏。在风向角为90°时,结构的最大位移为1.35 cm,出现结构的迎风面顶端,小于规范允许值,结构是安全的,同时结构的最大应力为177.34 Pa,出现在结构迎风面底端,未超过材料的许用应力113 MPa,结构未产生塑性破坏。

在0°风向角工况下,结构的最大位移与最大应力均显著大于在90°风向角工况,因此可以判断,0°风向角对于该类脱硝钢架结构而言为相对较不利风向角,90°风向角时结构相对较安全。

## 4 结 论

(1)根据总刚度与质量等效的原则,提出了复杂脱硝钢架结构连续体模型的简化方法,模型简化前后的第1阶自振周期与振型接近,可近似模拟原结构的平动情况。简化连续体模型便于流固耦合的计算,为该类复杂结构数值风洞的建模提供了参考。

(2)明确了不同风向角下,脱硝钢架结构表面的体型系数分布规律。风向角的变化对迎风面及变截面处体型系数的影响较大,可以忽略风向角对侧面及顶面体型系数的影响。在脱硝钢架中上部体型系数与规范有所差别,主要是由于风在流经结构后产生的涡流所致。

(3)从结构风致响应可以看出,在0°风向角工况下,结构的最大位移与最大应力均显著大于在90°风向角工况。因此,0°风向对于结构而言为相对较不利风向,在脱硝钢架整体结构方向布置时应予以避免,以减轻结构的风致响应。

## 参考文献:

- [1] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [2] 季俊. 基于流固耦合的屋盖空间结构气弹模型数值风洞模拟[J]. 建筑结构, 2019, 49(增2): 367-372.  
Ji J. Numerical wind tunnel simulation of aeroelastic model of a roof spacial structure based on fluid-solid coupling technology [J]. Building Structure, 2019, 49 (Sup2): 367-372. (in Chinese)
- [3] 彪仿俊. 建筑物表面风荷载的数值模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.  
Biao F J. Study on numerical simulation of wind-load on structures [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)
- [4] 李正良, 刘堃, 薛冀桥. 大跨度多肢屋盖风荷载特性试验与模拟研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(1): 30-38.  
Li Z L, Liu K, Xue J Q. Experimental study and numerical simulation of wind load characteristics on a long-span multiple roof structure [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(1): 30-38. (in Chinese)
- [5] Liu M, Li Q S, Huang S H, et al. Evaluation of wind effects on a large span retractable roof stadium by wind tunnel experiment and numerical simulation [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 179: 39-57.
- [6] Li Y L, Tang H J, Lin Q M, et al. Vortex-induced vibration of suspenders in the wake of bridge tower by numerical simulation and wind tunnel test [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 164: 164-173.
- [7] 牛建刚, 陈旭, 闫梁. 风力发电机塔筒结构在坡地上的风压数值模拟[J]. 土木工程与管理学报, 2016, 33(6): 6-11.  
Niu J G, Chen X, Yan L. Numerical simulation of wind pressure on the wind turbine tower structure on the sloping field [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2016, 33(6): 6-11. (in Chinese)
- [8] 宋波, 殷炳帅, 曹谦. 最不利风向作用下吸收塔风致动力响应[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(3): 19-27.  
Song B, Yin B S, Cao Q. Wind-induced dynamic response of desulfurizing towers under most unfavorable wind direction [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(3): 19-27. (in Chinese)
- [9] 徐亚平. 火力发电厂烟气脱硝钢架结构支架设计概要 [J]. 中国建筑金属结构, 2013(3): 73-76.  
Xu Y B. Design outline of steel structure support for flue

