文章编号:1673-9469(2021)01-0009-04 DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.01.002

基于代理模型的储煤仓三心圆柱面屋盖气动外形优化研究

李剑鸿,邱 冶*,伞冰冰

(河海大学 土木与交通学院,南京 210098)

摘要:以储煤仓三心圆柱面屋盖为研究对象,采用kriging代理模型对屋盖结构的气动外形进行优化研究。首先,选用标准$k-\varepsilon$、RNG $k-\varepsilon$和SST $k-\omega$三种湍流模型对三心圆柱面屋盖的绕流特性进行数值模拟,并与风洞试验数据进行对比。其次,分别以屋盖表面负压峰值最小以及竖向位移绝对值最小为优化目标,对三心圆柱面屋盖中间圆弧的半径与屋盖跨度之比(R/S)和圆心角(θ)进行优化。研究结果表明:当$R/S=1.26$,$\theta=45.8°$时,屋盖表面负压峰值最小;当$R/S=0.56$,$\theta=14.1°$时,在平均风荷载作用下屋盖的竖向位移绝对值达到最小值。

关键词:三心圆柱面屋盖;数值模拟;代理模型;气动优化

中图分类号:TU18;TU22 **文献标识码**:A

Aerodynamic Shape Optimization Study of a Three-centered Cylindrical Roof of Coal Bunker Based on Surrogate Model

LI Jianhong, QIU Ye*, SAN Bingbing

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: This research focused on a three-centered cylindrical roof of coal bunker. Kriging surrogate model was adopted to optimize the aerodynamic shape of the roof structure. First of all, the flow characteristics of a three-centered cylindrical roof were numerically simulated by using standard $k-\varepsilon$, RNG $k-\varepsilon$ and SST $k-\omega$ turbulence models, and compared with the wind tunnel data. Secondly, radius-to-span ratio (R/S) and central angle (θ) of middle arc of the three-center cylindrical roof were optimized with the minimum peak negative pressure on roof surface and the minimum absolute value of vertical displacement as the optimization objectives. The results show that when $R/S=1.26$ and $\theta=45.8°$, the peak negative pressure on the roof surface is lowest. When $R/S=0.56$ and $\theta=14.1°$, the absolute value of vertical displacement of the roof under mean wind loads reaches the minimum value.

Key words: three-centered cylindrical roof; CFD simulation; surrogate model; aerodynamic optimization

三心圆柱面屋盖是大型储煤仓常见的一种结构形式,具有净空高、跨度大、经济性好等优点[1]。随着我国国民经济的迅速发展,为满足存储和作业空间的需求,大型储煤仓的高度和跨度日趋增加,风荷载已成为结构设计人员不可忽视的问题。柱面屋盖是大跨度储煤仓的主要结构形式。迄今,诸多学者对柱面屋盖的抗风性能及其影响因素进行了研究。Qiu等[2]通过风洞试验研究了矢跨比和雷诺数对柱面屋盖气动特性的影响,并提出了一种基于改进势流理论的平均风压模型。Johnson等[3]对矢跨比为0.27~0.5的柱面屋盖风荷载特性进行了雷诺数效应研究,发现屋盖的雷诺数敏感性随矢跨比的增加而增大。Li和Ding等[4-5]通过刚性模型测压试验获得了矢跨比为1/3和1/5的柱面屋盖表面的压力分布,研究发现屋盖迎风面的压力随着矢跨比的增大而显著减小。基

收稿日期:2020-09-24

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51808194);江苏省自然科学基金资助项目(BK20170880);中央高校基本科研项目(B200202075)

作者简介:李剑鸿(1996-),男,浙江温州人,硕士研究生,主要从事结构风工程研究。

*通讯作者:邱冶(1985-),男,黑龙江哈尔滨人,博士,副教授,主要从事结构风工程研究。

于风洞试验数据,单鲁阳[6]和齐月芹等[7]分别采用0.618法、穷举法和数学规划法中的复形法对双层柱面网壳的矢高、网格尺寸和网壳厚度进行了结构优化分析。三心圆柱面屋盖的气动特性与其几何外形密切相关,但针对这类结构的气动外形优化研究甚少。本文将基于代理模型和数值模拟技术,对三心圆柱面屋盖结构进行气动外形优化研究,以获得最优的形状设计参数,为大跨度储煤仓的抗风设计提供参考。

1 CFD 数值模拟

以张雷[8]风洞试验的三心圆柱面屋盖作为数值模拟的 Benchmark 模型,该模型的矢高和跨度分别为 $H=200$ mm、$S=540$ mm,中间圆弧的半径为350.6 mm、圆心角为61.32°,两端圆弧的半径为187.3 mm、圆心角为54.34°,缩尺比为1∶200。选用标准 $k-\varepsilon$、RNG $k-\varepsilon$ 和 SST $k-\omega$ 三种湍流模型对柱面屋盖周围的绕流流场进行数值模拟,并与风洞试验数据进行对比验证。计算域的长度和高度为10 800 mm×2 000 mm,模型位于距来流入口约1/3计算域长度处,图1为计算域示意图。采用非结构化网格进行网格划分,网格总数量约为15万,屋盖近壁面处网格尺寸为 $\Delta x=S/80$、$\Delta z=H/20$,其表面 y^+ 值约为30~60。图2为屋盖附近的网格划分情况。边界条件具体设置见表1。

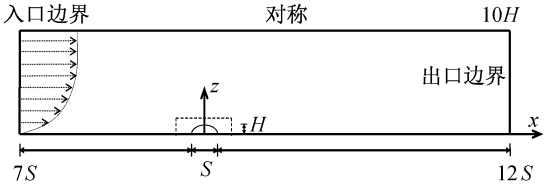


图1 计算域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of computational domain

通过数值模拟获得的屋面平均风压分布与风洞试验结果对比如图3所示。由图可知,标准 $k-\varepsilon$ 和 SST $k-\omega$ 湍流模型在屋盖尾流区的模拟结果与试验数据偏差较大,而 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型则具有较高的模拟精度,故选用该湍流模型进行三心圆柱面屋盖的气动外形优化研究。

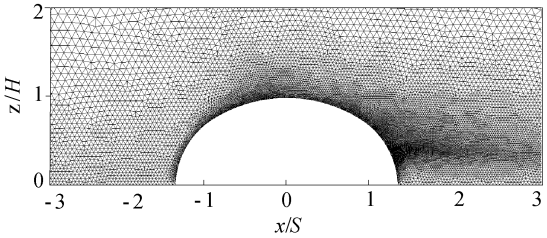


图2 屋盖周围网格划分

Fig. 2 Grid system near the roof

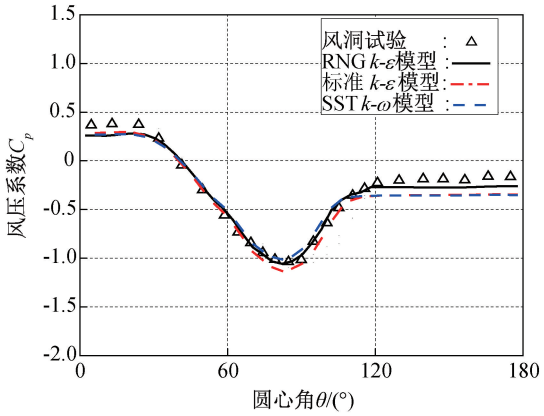


图3 屋面平均风压分布的数值模拟与风洞试验结果对比

Fig. 3 Comparison of the mean pressure coefficients on the roof surface between numerical simulation and wind tunnel test

2 屋盖气动优化模型

图4为三心圆柱面屋盖几何模型示意图。屋面由半径为 R、圆心角为 q 的中间圆弧,和半径为 R_1、圆心角为 q_1 的两端圆弧组成。假定中间圆弧与两端圆弧在其交点处的切线重合,则三心圆柱面屋盖的几何参数满足如下关系式:

$$R_1=-\frac{(C_1^2+C_2^2)\tan^2(\theta/2)}{2C_1\tan(\theta/2)+2C_2\tan^2(\theta/2)} \tag{1}$$

$$\theta_1=\frac{\pi}{2}-\frac{\theta}{2}-\arctan\left(\frac{C_1+R_1\cot(\theta/2)}{C_2+R_1}\right) \tag{2}$$

其中,参数 C_1 和 C_2 可由下式计算得到:

$$C_1=\frac{R-H-R\cos(\theta/2)}{\sin(\theta/2)} \tag{3}$$

$$C_2=\frac{S/2-R\sin(\theta/2)}{\sin(\theta/2)} \tag{4}$$

表1 计算域边界条件

Tab. 1 Boundary conditions of the computational domain

计算域边界	边界条件
入口边界	指数风剖面:$u_z/u_{ref}=(z/z_{ref})^a$,其中:$a=0.15$,参考高度 $z_{ref}=0.2$ m 处的平均风速 $u_{ref}=10$ m/s
出口边界	自由出流(Outflow)
壁面边界	计算域顶部与两侧采用对称边界(Symmetry),计算域地面、屋盖表面为无滑移边界(Wall)

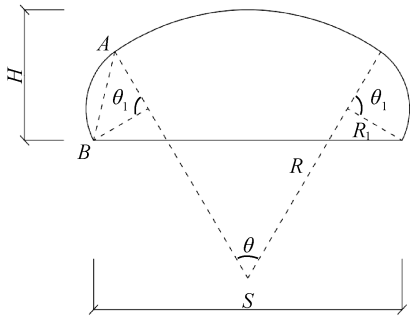


图 4　三心圆柱面屋盖几何模型示意图

Fig. 4　Schematic diagram of geometry model of the three-centered cylindrical roof

强风作用下柱面屋盖顶部可能会产生较大的风吸力,致使其发生风致破坏。本文分别以三心圆柱面屋盖的负压峰值最小、竖向位移绝对值最小为优化目标,以屋盖中间圆弧的半径与跨度之比(R/S)和圆心角(θ)作为优化变量,对其进行气动外形优化,以获得最优的形状设计参数。所以,三心圆柱面屋盖的气动外形优化是一个单目标、多变量的优化问题,优化模型表达如下:

$$\min F_1(R/S,\theta)=\max\{|C_{pi}|\},\quad \text{s.t.}\begin{cases} l_R \leqslant R/S \leqslant u_R, \\ l_\theta \leqslant \theta \leqslant u_\theta, \end{cases} \tag{5}$$

$$\min F_2(R/S,\theta)=\max\{|W_i|\},\quad \text{s.t.}\begin{cases} l_R \leqslant R/S \leqslant u_R, \\ l_\theta \leqslant \theta \leqslant u_\theta. \end{cases} \tag{6}$$

式中:$F_1(R/S,\theta)$ 和 $F_2(R/S,\theta)$ 为目标函数;C_{pi} 为屋面第 i 个点的平均风压系数;W_i 为屋面第 i 个点的竖向位移值。优化变量 R/S 的上下限分别为 $l_R=0.52$ 和 $u_R=1.48$,其中 $R/S=0.52$ 时,为单心圆柱面屋盖,而当 $R/S>1.48$ 时,屋盖几何外形变化较小;圆心角 θ 的上下限分别为 $l_\theta=0°$ 和 $u_\theta=2\arcsin(0.5/(R/S))$,其中 $\theta=2\arcsin(0.5/(R/S))$时,两侧小圆弧起点和终点连线 AB 垂直于地面。有限元模型采用双层网壳结构形式,基本参数如下:网壳跨度和高度分别为 108、40.26 m,厚度为 3.5 m。采用圆钢管杆件,其长度为 4 m,杆件截面尺寸为 159 mm×10 mm。

3　优化结果

三心圆柱面屋盖负压峰值的预测曲面如图 5 所示,由图可知,目标函数 F_1 与设计变量之间存在着复杂的非线性关系。如图 6 所示,研究结果表明,kriging 代理模型的预测值与目标函数真实值(CFD 模拟)的最大误差为 4%,该代理模型可以构建较为精确的预测曲面。图 5 中 $C1$ 点为最优解,得到 $R/S=1.26$,$\theta=45.8°$,相应的屋面负压峰值 $|C_p|_{\max}=0.84$(位移值 $|W|=4.665$ mm),与初始形状相比,屋盖负压峰值降低了约 17%。图 7 为最优解 $C1$ 对应的屋盖表面平均风压分布,与其附近参照点 $C2$($R/S=1.26$,$\theta=20°$)和 $C3$($R/S=0.93$,$\theta=45.8°$)工况的对比图。由图可见,优化后的屋盖顶部风吸力值明显减小,而尾流区的变化不显著。

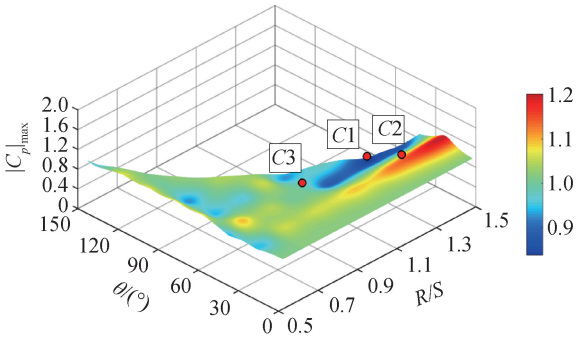


图 5　负压峰值的 kriging 模型预测曲面

Fig. 5　kriging model prediction surface of negative pressure peak

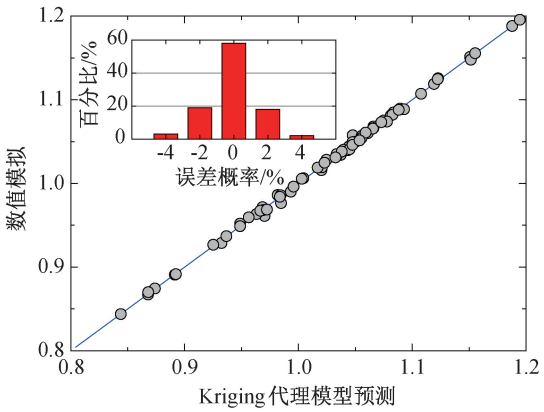


图 6　负压峰值优化的 kriging 代理模型的预测值与目标函数真实值的对比图

Fig. 6　A comparison diagram of the predicted value of the Kriging agent model optimized by peak of negative pressure and the real value of the objective function

图 8 为双层柱面网壳竖向位移极值的预测曲面。图中 $W1$ 点为最优解,得到 $R/S=0.56$,$\theta=14.1°$,相应的网壳竖向位移值 $|W|_{\max}=0.293$ mm(负压绝对值 $|C_p|=0.95$),与初始形状相比减小了近 55 %。最优解 $W1$ 与参照点 $W2$($R/S=1.3$,$\theta=20°$)和 $W3$($R/S=0.56$,$\theta=120°$)对应的屋盖竖向位移分布如图 9 所示,由图可见位移极值位于网壳顶部区域,具有最优外形的三心圆屋盖能够明显减小其竖向位移极值。

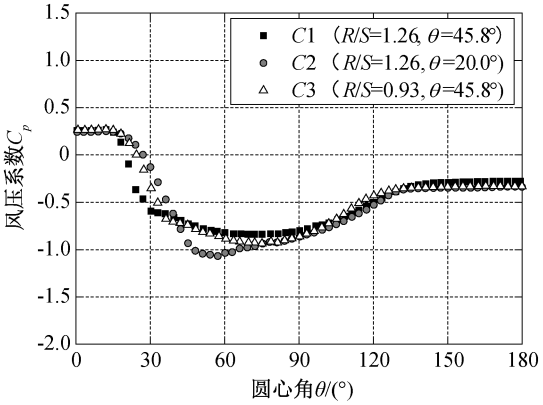


图7 最优解 $C1$ 与参照点 $C2$、$C3$ 对应的屋盖表面平均风压分布图

Fig. 7 Mean pressure distributions on the roof surface with optimal ($C1$) and near optimal ($C2$ & $C3$) shapes

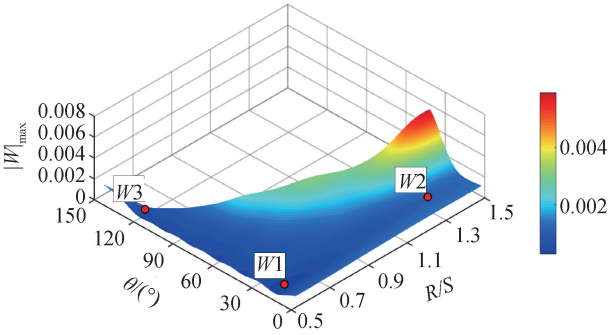
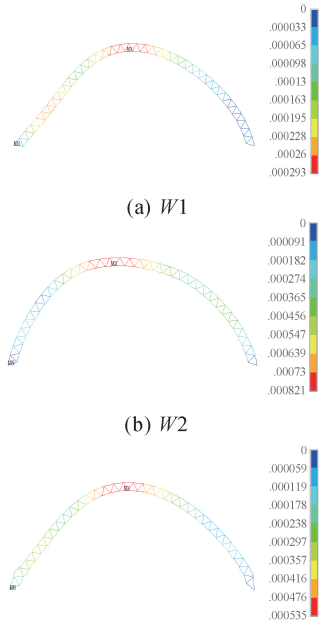


图8 竖向位移极值的 kriging 模型预测曲面

Fig. 8 kriging model prediction surface of vertical displacement extremum



(a) $W1$

(b) $W2$

(c) $W3$

图9 最优解 $W1$ 与参照点 $W2$、$W3$ 对应的屋盖竖向位移图

Fig. 9 Vertical displacement distributions of roof with optimal solution ($W1$) and reference points ($W2$ & $W3$)

4 结论

1)通过风洞试验数据对数值模拟算例进行了验证,研究发现 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型具有较好的模拟精度。

2)基于 kriging 模型建立了三心圆柱面屋盖气动外形优化的代理模型。结果表明,当 $R/S=1.26$,$\theta=45.8°$ 时,屋面的负压峰值为 $|C_p|_{max}=0.84$;当 $R/S=0.56$,$\theta=14.1°$ 时,双层柱面网壳的竖向位移极值为 $|W|_{max}=0.293$ mm。

参考文献:

[1]罗尧治. 108米跨度干煤棚三心圆柱面网壳研究与设计[J]. 工业建筑增刊,2002:171-177.

[2]QIU Y, SUN Y, WU Y, et al. Modeling the Mean Wind Loads on Cylindrical Roofs with Consideration of the Reynolds Number Effect in Uniform Flow with Low Turbulence[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 129: 11-21.

[3]JOHNSON G L, SURRY D, NG W K. Turbulent Wind Loads on Arch-roof Structures: A Review of Model and Full-scale Results and the Effect of Reynolds Number[C]//In: 5th US National Conference on Wind Engineering. 1985.

[4]DING Z, TAMURA Y. Contributions of Wind-induced Overall and Local Behaviors for Internal Forces in Cladding Support Components of Large-span Roof Structure[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 115: 162-172.

[5]LI Y Q, TAMURA Y, YOSHIDA A, et al. Wind Loading and Its Effects on Single-layer Reticulated Cylindrical shells[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 94(12): 949-973.

[6]单鲁阳,严 慧. 大跨度双层圆柱面网壳结构的优化分析[J]. 建筑结构学报,1999(06):3-5.

[7]齐月芹,张 婷,徐步青. 基于风洞试验成果的大跨度网壳结构优化[J]. 空间结构,2011,17(02):30-34.

[8]张 雷. 储煤仓三心圆柱面屋盖风荷载及风振特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.

(责任编辑 王利君)