文章编号:1674-2869(2025)06-0664-06

基于灵敏度分析的抽油机支座轻量化设计

宋永军,张 刚*
武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430205

摘 要:抽油机减重在工程设计中具有重要的经济意义,直接关系到运营成本和能效提升,针对12-8CYJ-00型抽油机的支座结构进行尺寸优化,以实现轻量化设计。首先,利用ABAQUS软件平台对整体结构进行强度分析,以获取不同工况下支座的载荷情况,并选取对应最大Mises应力的工况作为优化边界条件。结合Python编程语言与ABAQUS的数据交互能力,构建Python-ABAQUS优化框架,并通过灵敏度分析实现参数的自动寻优。建立参数化模型并进行有限元计算,明确了结构参数与最大Mises应力之间的函数关系,经过多次优化迭代,最终实现支座结构的轻量化设计。结果表明:支座结构重量减少了12.44%,尽管最大Mises应力增加了10.01%,但仍满足结构强度要求。这一优化设计不仅降低了材料使用成本,为抽油机的高效运行奠定基础,也为后续相关研究提供了有价值的参考,展示了未来在其他机型减重设计中的应用潜力。

关键词:轻量化设计;参数优化;灵敏度分析;有限元分析
中图分类号:TH122 **文献标志码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202410013

A lightweight design of oil pumping support based on sensitivity analysis

*SONG Yongjun, ZHANG Gang**
School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: Reducing the weight of the oil pumping rig is of economic significance because it is directly related to cost and energy efficiency. We carried out dimensional optimization for the support structure of the 12-8CYJ-00 oil pumping rig to achieve lightweight design. First, we utilized the ABAQUS software platform to conduct strength analysis on this structure, so as to obtain its load situation under different working conditions, and took the working condition corresponding to the maximum Mises stress as the optimization boundary condition. Then, a Python programming language was used to interact with the ABAQUS data, and a Python-ABAQUS optimization framework was built. The parameters were automatically optimized through sensitivity analysis. A parameterized model was established and finite-element calculation was carried out to clarify the functional relationship between the structural parameters and the maximum Mises stress. After several optimization iterations, the lightweight design of the support structure was finally achieved. The results showed that the weight of this support structure is reduced by 12.44%, and although the maximum Mises stress has increased by 10.01%, it still meets its structural strength requirements. This optimized design not only reduces the material cost and ensures the efficiency of the oil pumping rig, but also demonstrates its application potential in other pumping unit models, providing a valuable reference for future related researches.

Keywords: lightweight design; parametric optimization; sensitivity analysis; finite element analysis

收稿日期:2024-10-27
基金项目:国家自然科学基金(12002246)
作者简介:宋永军,硕士研究生。Email: 15294741272@163.com
***通信作者**:张 刚,博士,副教授。Email: gang_zhang@wit.edu.cn
引文格式:宋永军,张刚.基于灵敏度分析的抽油机支座轻量化设计[J].武汉工程大学学报,2025,47(6):664-669.

抽油机是开采石油的一种机器设备，俗称“磕头机”，在石油开采行业被广泛应用，是有杆抽油系统最主要的举升设备，根据其是否有游梁，可分为游梁式抽油机和无游梁式抽油机[1]。一台抽油机设备通常有几十吨甚至上百吨的重量，其支座结构占据其较大比重，是抽油机的重要受载结构，为整个设备运转以及各零件组合运动提供支撑作用。因此，对抽油机支座结构进行优化设计至关重要。

现代设计中，轻量化设计已经成为优化设计的主要工作，可在实际生产与工程作业中降本增效。马天宇等[2]在渭河大桥设计参数优化问题中，提出加劲钢桁架桥梁设计参数化优化方法，借助有限元软件Midas/Civil建立模型，使主跨用钢量降低2.14%。张明康等[3]在中低速磁悬浮列车悬浮架纵梁结构优化问题中，分别基于多项式响应面法、Kriging法构造目标参数关于设计变量的代理模型，利用多目标优化算法进行寻优，最终得到满足强度可靠性要求下，减重16.9%的纵梁结构。方志凌等[4]在汽车前机舱一体化压铸设计问题中，通过固体各向同性材料惩罚模型法（solid isotropic material with penalization，SIMP）对前舱进行拓扑优化，再经过仿真分析，最终成功使产品减重13.9%。可见，轻量化设计可以大幅减少材料用量，节约成本。

本文以最新设计的12-8CYJ-00型抽油机为研究对象，在已有的设计基础上对其支座部分进行轻量化设计。广泛使用的结构优化方法有结构拓扑优化、结构参数优化以及结构形状优化。结构拓扑优化方法会使现有的几何拓扑结构发生较大变化，将增加切割、冲孔等减材制造工艺，反而增加生产成本，而结构形状优化在早期设计中已经被充分考虑，因此本次轻量化设计采用结构参数优化的方式实现。

本文利用ABAQUS有限元软件平台搭建一套结构优化框架，并完成轻量化设计工作。通过有限元软件建立参数化模型，再基于模型的有限元计算结果与结构设计参数之间的关系，采用灵敏度分析对支座结构进行优化，要求优化后的抽油机支座在任意工况下满足强度条件的同时，结构整体质量也更轻量化。

1　强度分析及参数化建模

1.1　工程背景

12-8CYJ-00型抽油机结构如图1所示。其中，工作臂采用四连杆结构，由电动机驱动，工作臂前端部负载12 t，尾部为了平衡负载，挂有12 t的配重块。结构总重量（包含负载与配重块）为58 t，其中支座部分（包含前架、后架、加强板）的重量为16.6 t。支座结构的材料为Q235R碳素结构钢，材料的弹性模量E、泊松比ν、密度ρ、屈服强度σ_s以及许用应力$[\sigma]$如表1所示，支座结构整体由3种型号的矩形空心钢构成主要支座部分，截面如图2所示。在后架处设计有20 mm厚的加强板。设备用于两种工况，具有不同的运转速度，工况1和工况2下设备运转一圈的运动周期分别为30、15 min。要求对支座结构进行减重设计，同时保证其强度要求，采用Mises应力准则作为强度准则。

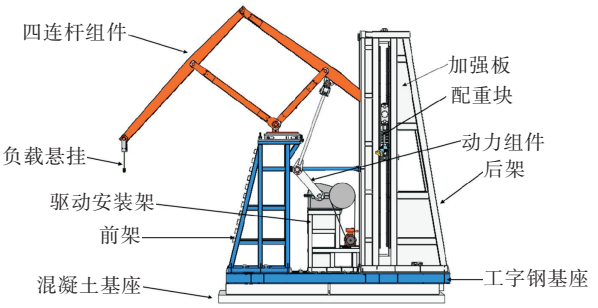

图1　抽油机结构

Fig. 1　Structure of oil pumping rig

表1　Q235R材料参数

Table 1　Material properties of Q235R

E / MPa	ν	ρ / (kg·m^{-3})	σ_s / MPa	$[\sigma]$ / MPa
210 000	0.3	7.9×10^3	235	200

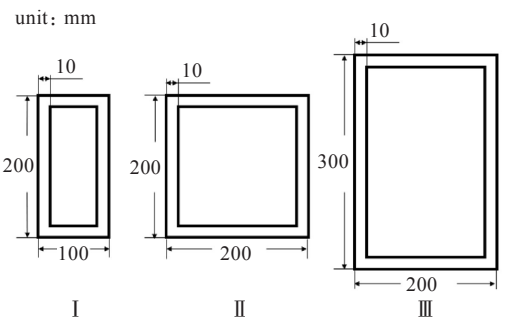

图2　各型号矩形空心钢截面

Fig. 2　Rectangular hollow steel sections of each type

1.2　支座荷载提取与边界条件建立

1.2.1　支座荷载提取　在设备运转过程中，连杆组件与支座上的反力保持动力学平衡，使用ABAQUS软件平台完成有限元计算，得到连杆机构对支座的反力。将模型分为连杆组件和支座两大部分，先对连杆组件进行计算，其关节转动副采用ABAQUS软件的铰接连接器单元替代，底部与尾部设定参考点耦合，对两个位置施加对应的位

移约束，如图3所示。

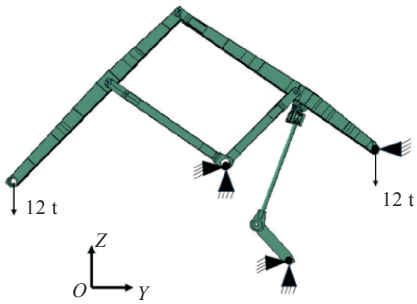

图3 连杆组件的边界条件

Fig. 3 Boundary conditions for the connecting rod assembly

对上述两种工况下的一个运动周期进行仿真计算，从计算结果中对连杆组件底部的反力进行提取，将两种工况的运动周期归一化，得到两种工况下前架反力在一个运动周期的变化，如图4所示。提取两种工况下连杆组件尾部反力作用位置的Z坐标及两种工况下的后架反力，在归一化后的运动周期内的变化如图5所示。

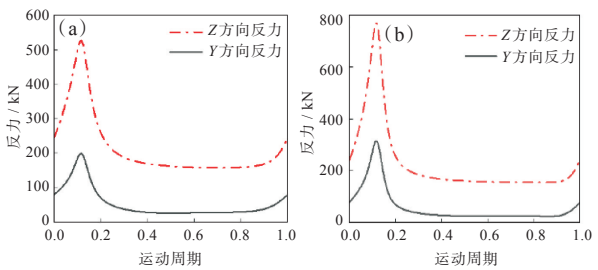

图4 前架反力运动周期变化：(a) 工况1，(b) 工况2

Fig. 4 Periodic change of the reaction force of the front support: (a) case1, (b) case2

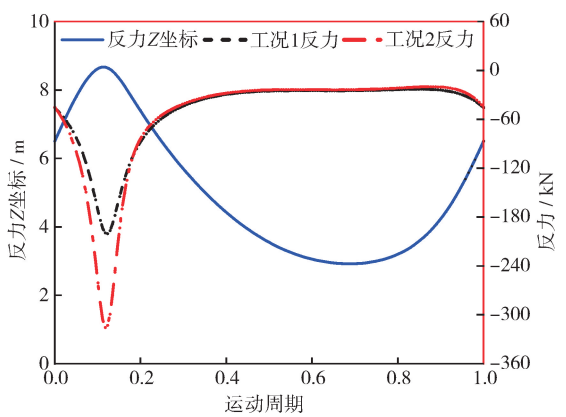

图5 后架反力及连杆尾部Z坐标随运动周期变化

Fig. 5 Periodic change of the reaction force of the rear support and the Z coordinate of the tail

1.2.2 支座边界条件建立 在ABAQUS软件中建立模型，其主要结构由梁单元与壳单元组成。根据得到的各工况下的连杆组件反力变动情况，对支座模型施加如图6所示的边界条件，前架载荷幅值取决于连杆组件底部对前架顶部的反力，而后架上的载荷幅值以及作用位置都取决于连杆组件尾端对后架的反力。支座底部采用固定的位移边界条件。

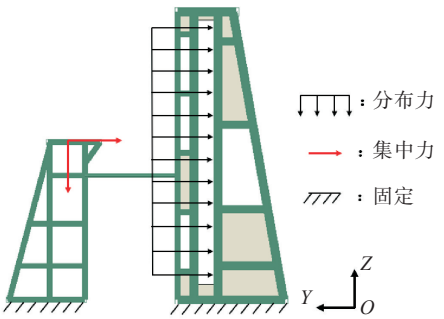

图6 支座边界条件

Fig. 6 Boundary conditions for the support

对于后架上的载荷变动情况，需要通过ABAQUS软件提供的Dload子程序[5]定义。用Fortran编程语言编写Dload子程序需要有相应变量的解析式，由于后架载荷既有幅值上的变动，又有位置上的变动，二者都是时间t的函数，因此对后架上的载荷变动采用分段线性插值的方式模拟，其结果如图7所示，得到的载荷变动表达式如式(1−3)所示，其中$P(t)$是反力Z坐标随运动时间变动的函数，$F_1(t)$、$F_2(t)$分别是工况1和工况2下载荷幅值随时间变动的函数。

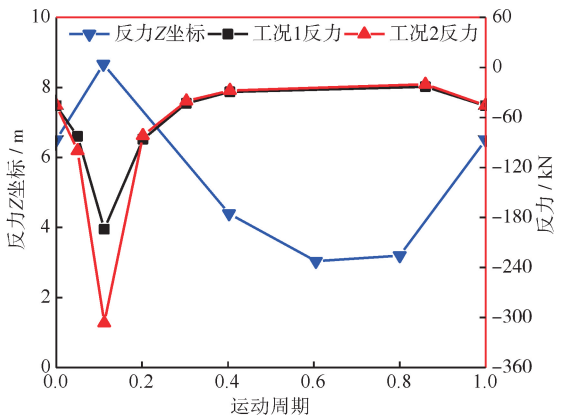

图7 后架荷载与位移多段线性插值

Fig. 7 Multi-segment linear interpolation of rear support load and displacement

$$P(t)=\begin{cases}19\,655t+6\,505.5, & 0\leqslant t\leqslant 0.11\\ -14\,601.4(t-0.11)+8\,667.5, & 0.11<t\leqslant 0.40\\ -6\,692.5(t-0.40)+4\,396.6, & 0.40<t\leqslant 0.60\\ 795.9(t-0.6)+2\,041.5, & 0.60<t\leqslant 0.80\\ 16\,527.2(t-0.8)+3\,200.5, & 0.80<t\leqslant 1\end{cases} \quad (1)$$

$$F_1(t)=\begin{cases}-735\,591t-45\,914.5, & 0\leqslant t\leqslant 0.05\\ -1\,800\,096(t-0.05)-82\,496, & 0.05<t\leqslant 0.11\\ 1\,198\,572.2(t-0.11)-194\,075, & 0.11<t\leqslant 0.20\\ 432\,774(t-0.2)-86\,203, & 0.20<t\leqslant 0.30\\ 136\,957(t-0.3)-42\,926, & 0.30<t\leqslant 0.40\\ 13\,298.6(t-0.4)-29\,230.4, & 0.40<t\leqslant 0.86\\ -162\,865.7(t-0.86)-23\,113, & 0.86<t\leqslant 1\end{cases} \tag{2}$$

$$F_2(t)=\begin{cases}-1\,090\,880t-45\,286.7, & 0\leqslant t\leqslant 0.05\\ -3\,445\,266.7(t-0.05)-99\,830, & 0.05<t\leqslant 0.11\\ 2\,497\,844(t-0.11)-306\,546, & 0.11<t\leqslant 0.20\\ 413\,950(t-0.2)-81\,740, & 0.20<t\leqslant 0.30\\ 127\,970(t-0.3)-40\,345, & 0.30<t\leqslant 0.40\\ 16\,080.4(t-0.4)-27\,548, & 0.40<t\leqslant 0.86\\ -3\,090\,827(t-0.86)-20\,151.1, & 0.86<t\leqslant 1\end{cases} \tag{3}$$

1.3　支座参数化模型建立

两种工况在ABAQUS中进行有限元分析，得到Mises应力云图，如图8所示，工况1下最大Mises应力为68.558 MPa，位于后架处，工况2下最大Mises应力为181.461 MPa，同样位于后架。

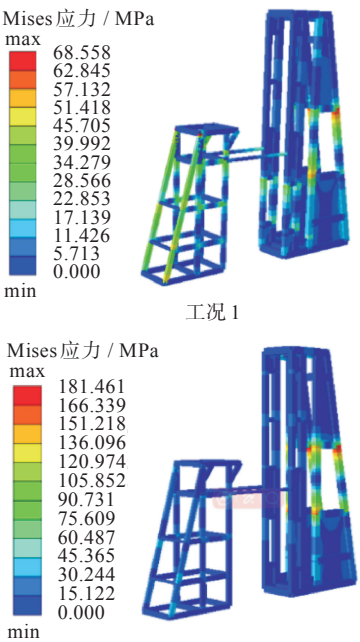

图8　优化前支座Mises应力云图

Fig. 8　Optimized the Mises stress contour diagram of the front support

根据两种工况下边界条件以及计算结果的对比可知，工况2对结构强度的要求高于工况1。因此选择工况2的边界条件作为参数优化模型的边界条件。

支座部分设计以板与桁架结构为主，其中加强板的设计变量主要由加强板厚度d_1决定。支座主结构由3种型号的矩形空心梁通过焊接形成，主要设计参数有矩形截面的宽度、高度与截面壁厚，前架部分使用Ⅰ型截面梁，后架部分使用Ⅱ型截面梁与Ⅲ型截面梁，3种型号截面梁的截面及加强板的结构参数与取值范围见表2。

表2　结构参数表

Table 2　Structural parameters

截面参数	设计变量	取值范围 / mm
加强板厚度	d_1	8~20
Ⅰ型截面宽度	b_1	60~100
Ⅰ型截面高度	h_1	100~200
Ⅱ型截面宽度	b_2	150~200
Ⅱ型截面高度	h_2	150~200
Ⅲ型截面宽度	b_3	150~200
Ⅲ型截面宽度	h_3	250~300
截面壁厚	d_2	6~10

在ABAQUS软件中，采用梁单元建立支座部分桁架结构，采用壳单元建立加强板。二者使用绑定约束关系，该模型包含8个设计变量，即8个截面参数，这些变量通过在ABAQUS的inp文件中使用*Parameter关键字实现参数化[6]，成为参数化设计变量。

2　基于灵敏度分析的参数优化

2.1　优化目标函数与约束条件

结构的整体质量m取决于8个设计变量，因此采用单目标优化，优化目标函数如下：

$$\min m = 2\rho d_2\sum_{i=1}^{3}A_i\,(b_i+h_i)+\rho A_4 d_1 \tag{4}$$

式中：A_i为结构固定参数，i取1~4，A_1、A_2、A_3分别为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ型截面梁使用长度，A_4为加强板的面积，A_1、A_2、A_3分别为73 015、25 900和94 948 mm，A_4为24 749 891 mm^2。

式(4)两边同时除以密度ρ，则新的优化目标函数为体积V，如式(5)所示。

$$\min V = 2d_2\sum_{i=1}^{3}A_i\,(b_i+h_i)+A_4 d_1 \tag{5}$$

当边界条件确定，通过有限元计算得到的最大Mises应力$\sigma_{\max}$可以看作是上述设计变量的函数$f(\boldsymbol{X})$，其中$\boldsymbol{X}$为支座结构的设计变量所组成的向量，$\boldsymbol{X}=[d_1,b_1,h_1,b_2,h_3,b_3,h_4,b_4]$，其形式如式(6)所示：

$$\sigma_{\max}=f(\boldsymbol{X}) \tag{6}$$

$$\sigma_{\max}<[\sigma]=200\ \text{MPa} \tag{7}$$

2.2 Python-ABAQUS优化求解框架

灵敏度分析是分析输出响应对设计变量变化的敏感性，灵敏度的数值可反映出各设计变量对输出响应变化的贡献率[7]。灵敏度分析在工程设计和概率安全评价中有着广泛的应用，其目的是探究系统或模型输出不确定性向输入不确定性的分配问题[8]。

灵敏度分析在优化设计问题中被广泛运用。在结构动态响应优化[9]、几何优化、参数优化以及系统优化[10-12]等工程问题中效果显著。

本次研究搭建了一个Python-ABAQUS优化求解框架[13]，适用于板壳、桁架结构减重设计。通过Python实现优化算法，调动ABAQUS隐式求解器，解算inp文件，通过有限元模型计算最大Mises应力来获取输出响应σ_{max}。对函数$f(\boldsymbol{X})$的每一个变量求偏导数，即可获得8个设计变量对结构强度的灵敏度，如式(8)所示。

$$S_j = \frac{\partial f(\boldsymbol{X})}{\partial X_j} \tag{8}$$

式中：X_j为向量$\boldsymbol{X}$的第j个分量，S_j是第j个分量的灵敏度，j取1~8。

整个优化流程是先求出结构强度对各个设计变量的灵敏度，用于衡量设计变量对结构强度的贡献率，对于贡献率低的设计变量，优先进行优化，再取一定的步长h，让该设计变量按此步长进行搜索，搜索方向为该设计变量负增长方向，步长h取值越小，越接近最优解。每优化一次，都会计算当前结构中最大Mises应力对设计参数的灵敏度，用来重新确定优化参数的优先级。灵敏度的数值求解方法是对各参数取一个微小扰动值δ，计算结构最大Mises应力变化与扰动值δ之间的比值。微小扰动值的选取依据为：当扰动值取2δ时的灵敏度与取值δ时的灵敏度之间相对误差小于2%即可认为扰动取值选取足够小。优化流程如图9所示。

2.3 参数优化与结果

将抽油机支座结构的初始设计变量输入优化程序中，Python主程序自动将参数代入ABAQUS的inp文件计算参数中，通过os. system()函数调用ABAQUS的standard.exe求解器与Dload子程序进行模型计算，主程序再得出结构最大Mises应力并计算对相关参数的灵敏度，通过灵敏度来确定参数优化的优先级。步长h的选取要求是当某一设计变量减小h，结构最大Mises应力的变化不超过10%，经过调试，取合适步长$h=5$对优化参数

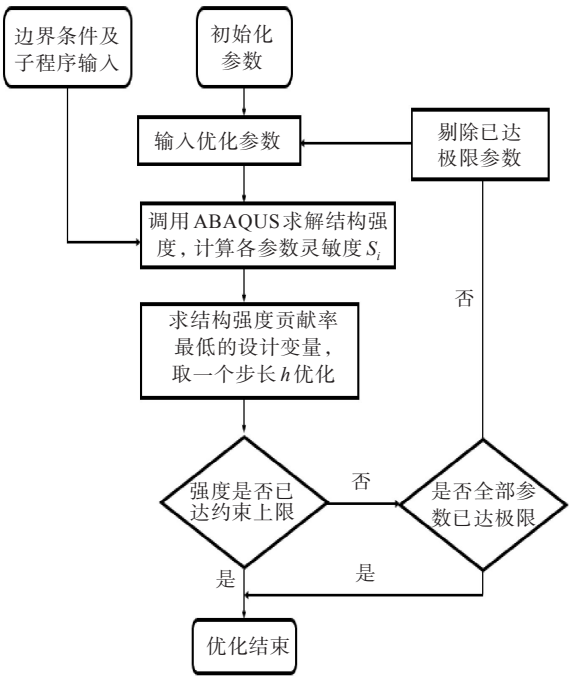

图9 优化流程图

Fig. 9 Optimizing flowcharts

进行搜索，反复进行迭代计算。每次计算完成，都要通过强度约束条件与参数边界约束条件判断，若强度达到结构许用应力200 MPa，则程序停止迭代并输出优化结果。若某一参数达到其边界值，则在下一次迭代中将其剔除，对其余变量进行优化，当全部变量都已达到边界约束时，程序停止运行并输出优化结果。

经过优化后，目标函数的结果为1.83 m^3，为优化前的87.56%，即优化使得结构质量减少12.44%，总重量由原来的16.511 t减少到14.457 t，减重2.054 t。目标函数与最大Mises应力随优化迭代次数的变化见图10，优化后的参数如表3所示。

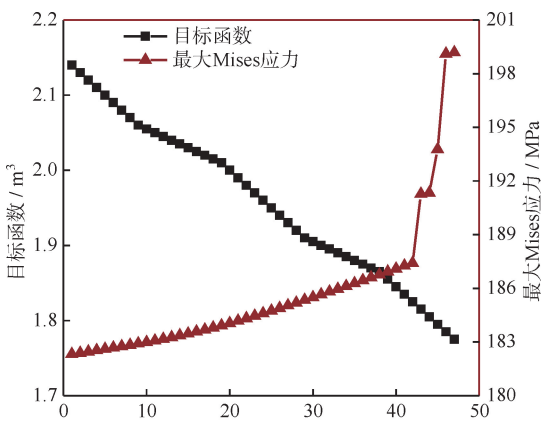

图10 目标函数与最大Mises应力随迭代次数的变化

Fig. 10 Changes in the objective function and the maximum Mises stress with the number of iterations

表3　优化前后参数对比

Table 3　Parameters before and after optimization　mm

设计参数	优化前	优化后
b_1	100	60
h_1	200	125
b_2	200	150
h_2	200	150
b_3	200	180
h_3	300	300
t_1	20	20
t_2	10	10

对优化后的结构进行强度校核，结果如图11所示。在ABAQUS软件中计算得到其最大Mises应力为199.629 MPa，位于支座结构的后架处，相较于优化前增长10.01 %，已经达到许用应力极限。

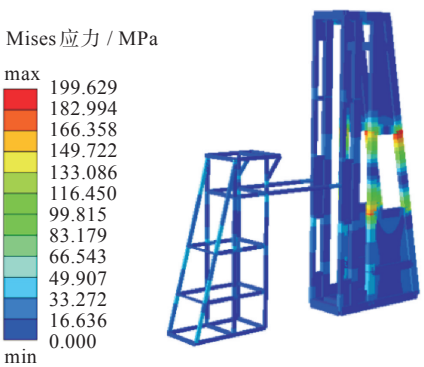

图11　优化后的Mises应力云图

Fig. 11　Optimized Mises stress contour

3　结　论

（1）优化前后结构参数对比得出，8个结构参数中，有3个未被优化，其余5个参量均已被优化。被优化的结构参数分别是Ⅰ型截面参数b_1、h_1，Ⅱ型截面参数b_2、h_2及Ⅲ型截面参数b_3；未被优化的结构参数分别是矩形空心梁截面的厚度t_2、加强板厚度t_1及Ⅲ型截面参数h_3。结果表明未被优化的参数，对最大Mises应力非常敏感。

（2）通过计算结构强度对设计参数的灵敏度，得出了在即时构型下各设计参数对结构强度的贡献率，对贡献率低的参数进行优化，并搭建一套Python-ABAQUS的优化框架，该框架便捷高效，适用于板壳、桁架结构的参数优化。经过优化的支座结构相较于优化前减重12.44%，减重2.054 t，优化效果显著。

（3）在对支座载荷的分析工作中，支座结构的前架与后架的距离对载荷有显著影响，若对其进行调控，有望减小载荷变动的峰值，改善抽油机的负载强度从而进一步对整个抽油机进行优化。

参考文献

[1] 中国石油学会，石油大学. 石油技术辞典[M]. 北京：石油工业出版社，1996.

[2] 马天宇，康佐，刘永健，等. 基于正交试验的加劲钢桁梁桥设计参数优化研究[J]. 公路，2024，69(8)：191-198.

[3] 张明康，肖乾，雷成，等. 中低速磁浮列车悬浮架纵梁结构优化[J]. 振动与冲击，2024，43(14)：180-188.

[4] 方志凌，宋燕利，康洁，等. 一体化压铸铝合金前机舱轻量化设计与优化[J]. 汽车工程，2024，46(7)：1314-1322，1333.

[5] 王涛，黄广炎，柳占立，等. 基于ABAQUS的有限元子程序开发及应用[M]. 北京：北京理工大学出版社，2019.

[6] 庄茁，张帆，岑松，等. ABAQUS非线性有限元分析与实例[M]. 北京：科学出版社，2005.

[7] 陈龙，朱颖，徐力，等. 基于权重灵敏度分析的结构形状等几何优化方法[J]. 中国机械工程，2020，31(11)：1306-1314.

[8] 程洪鑫，李璐祎，周长聪. 基于Kriging模型和代理抽样的分布参数不确定性灵敏度分析方法[J]. 机械工程学报，2024，60(8)：370-383.

[9] 周明刚，张露，陈源，等. 基于灵敏度分析的船式拖拉机机架结构优化设计[J]. 农业工程学报，2016，32(12)：54-60.

[10] CASCINO A，MELI E，RINDI A. A new strategy for railway bogie frame designing combining structural-topological optimization and sensitivity analysis[J]. Vehicles，2024，6(2)：651-665.

[11] 刘广宇，宫岛，周劲松，等. 基于Sobol'法的动车组车体弹性异常振动全局灵敏度分析与优化[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2024，55(5)：1940-1952.

[12] 夏添，沈欣炜，尚宇炜. 基于混合整数规划的配电网检修多目标优化决策及其灵敏度分析[J]. 电网技术，2024，48(11)：4680-4689.

[13] 曹金凤，王旭春，孔亮. Python语言在Abaqus中的应用[M]. 北京：机械工业出版社.2011.

本文编辑：霍淑利