

基于 Kriging 模型的楔形闸阀结构优化及密封性能分析

张立强^{1a} 齐长鑫^{1a} 陈高鹏^{1a} 张延斌² 王章章² 林 男^{1b}

(1.兰州理工大学 a.能源与动力工程学院; b.温州泵阀工程研究院; 2.凯喜姆阀门有限公司)

摘 要 以 NPS12—Class150 楔形闸阀为研究对象,对闸阀阀体中腔加强筋结构与位置进行正交试验设计,通过 Kriging 代理模型对正交设计结果进行曲面插值后,利用遗传算法对 Kriging 代理模型求取最优值,实现闸阀阀体强度及其密封性能优化。数值模拟验证结果表明:与优化前相比,优化后的闸阀最大等效应力减小了 29.97%,最大位移量减小了 44.31%,最小密封比压从 0MPa 增加到 16.243MPa,且密封间隙为 0mm。

关键词 楔形闸阀 密封 结构优化 Kriging 代理模型 数值模拟

中图分类号 TQ055.8⁺1

文献标识码 A

文章编号 0254-6094(2021)03-0390-07

闸阀因其结构简单、密封性好及容易操作等优点,广泛应用于管路系统中。其工作原理是在外力的作用下,闸阀闸板在阀体内腔体做垂直运动,从而达到关或开的工作状态。闸阀按其形状的差异可分为平行闸阀和楔形闸阀两大类,其中楔形闸阀闸板密封面加工精度要求较低,把闸板设计成楔形就可以和阀座密封面进行强制密封,从而保证密封效果。

工程应用中发现,除了公称压力与密封面宽度,闸阀阀体中腔结构强度对闸阀密封性能亦有影响,但相关研究较少。车强等从工作压力、介质条件、低压自封性、密封面材料及工艺等方面阐述了水下平板闸阀密封结构的设计要点^[1]。刘平等对核级闸阀密封组件结构进行优化,并通过试验验证了可行性^[2]。孙殿玉和刘志新利用有限元法和板壳理论相结合的方法,计算了阀体刚度和闸板刚度^[3]。王宇峰等对楔形双闸板闸阀进行热力耦合分析,找出了双板闸阀失效的原因,并进行了优化^[4]。俞树荣等应用 ANSYS 软件对楔形闸阀进行应力分析,找出应力集中点,以应力集中处的最大等效应力作为目标函数对楔形闸阀进行优化设计^[5]。

鉴于此,笔者应用 Solid Works 建立闸阀三维模型,通过 ANSYS Workbench 进行有限元分析,并应用 Kriging 代理模型预测,遗传算法优化,合理设置闸阀阀体中腔加强筋,增加了闸阀阀体刚度的同时也提高了其密封性能。

1 楔形闸阀模型建立与理论基础

1.1 闸阀模型建立

对楔形闸阀阀体模型的建立要根据实际情况,应考虑其实际形状、边界条件及安装配合等因素。将阀体上对数值模拟影响不大的特征(例如倒角等)进行简化^[5],方便建立三维模型。另外,因楔形闸阀为对称结构,为了节约计算成本,取模型的一半进行研究。闸阀简化模型如图 1 所示。

阀体、闸板与阀座的材料相同,均为不锈钢,材料的物理性能如下:

密度 7 930kg/m³

抗拉/压屈服强度 205MPa

抗拉极限强度 520MPa

体积弹性模量 194 020MPa

泊松比 0.31

许用应力值 138MPa

基金项目:甘肃省自然科学基金项目(17JR5RA120)。

作者简介:张立强(1977-),副教授,从事流体、测控技术方面的教学和科研工作,zhanglut@163.com。

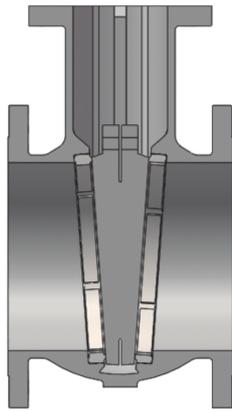


图 1 闸阀简化模型

1.2 阀体材料的强度理论基础

在 ANSYS Workbench 中,根据形状改变比能理论,由该理论可知在复杂应力状态下,当一点的形状改变比能达到了材料在单向拉伸发生屈服破坏的形状改变比能时,材料发生屈服破坏。可用等效应力(Equivalent Stress)来表征其强度条件,即:

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2]} \leq [\sigma] \quad (1)$$

式(1)中, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别是第一、第二和第三主应力, $[\sigma]$ 为材料的许用应力。

1.3 阀门密封理论基础

密封比压的合理设计是保证阀门密封的关键。当密封面上超过某比例的局部密封比压小于密封必须比压时阀门开始泄漏;但密封比压过大则有可能加剧密封面的磨损,甚至局部压溃密封面,影响阀门使用寿命。因此,密封比压须满足的条件为:

$$q_b < q < [q] \quad (2)$$

式中 q_b ——密封必须比压,MPa;

q ——实际密封比压,MPa;

$[q]$ ——密封面材料的许用密封比压,MPa。

密封必须比压 q_b 可根据实用阀门设计手册查得:

$$q_b = (3.5 + \frac{PN}{10}) \sqrt{\frac{b_M}{10}} \quad (3)$$

式中 b_M ——密封面宽度,mm;

PN ——公称压力,MPa。

由式(3)可知,影响阀门密封面上密封比压的主要因素是公称压力和密封面宽度。

2 数值模拟

笔者探究闸阀公称压力一定时,阀体中空结构对其密封性能的影响。算例模型公称压力 $PN=2.5\text{MPa}$,材料许用密封比压为 150MPa ,密封面宽度 $b_M=6\text{mm}$,由式(3)计算得密封必须比压为 4.84MPa 。

2.1 边界条件设置

闸阀实际工作时,其两端法兰上连接管道;阀体试验在进/出口法兰上加盲板,中法兰上加阀盖,即对闸阀进/出口法兰一端施加固定约束,中法兰处施加轴向约束。闸板与阀座接触且有摩擦,故设置其接触形式为摩擦接触,摩擦系数取 0.2 。按照试验工况,在阀体内部面上施加 2.5MPa 压力。对其剖分面添加无摩擦滑动约束。约束情况如图 2 所示。

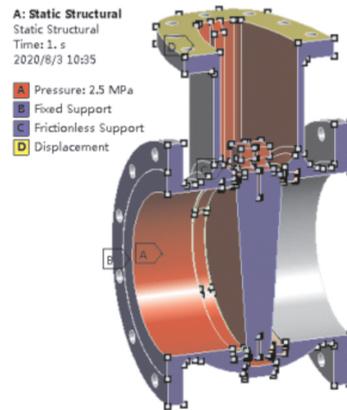


图 2 优化前边界条件设置

2.2 仿真结果

由图 3 所示等效应力图可知,在闸阀上最大等效应力为 182.46MPa ,大于闸阀材料许用应力值 138MPa ,且应力集中在闸阀拐角处,此处有因变形导致阀门失效的风险。

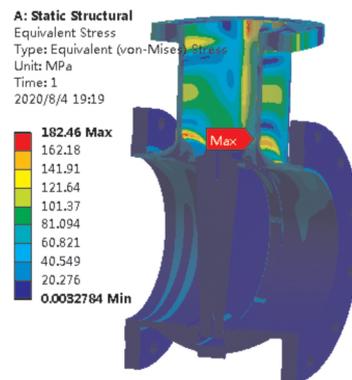


图 3 优化前等效应力图

由图 4 可知,在 2.5MPa 压力下,最大位移在

靠近中法兰的腔体上, 为 0.349 12mm, 大于 0.3mm, 不满足材料刚度要求。

由图 5 可知在工作压力 2.5MPa 时, 密封比压最大为 79.194MPa, 小于密封面材料许用密封比压值 150MPa, 满足阀门使用要求。中间位置密封比压为 21.86MPa, 大于 2.5MPa 工作压力时的密封必须比压, 所以满足闸阀密封要求, 但最小密封比压为 0MPa, 且最小密封比压 0MPa 分布区域较大, 结合图 6 所示的密封间隙可知, 此处密封间隙为 0.000 718 1mm, 有泄漏风险。

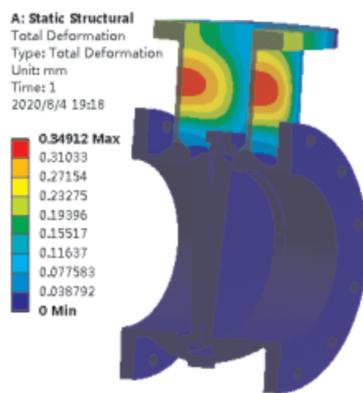


图 4 优化前变形分析云图

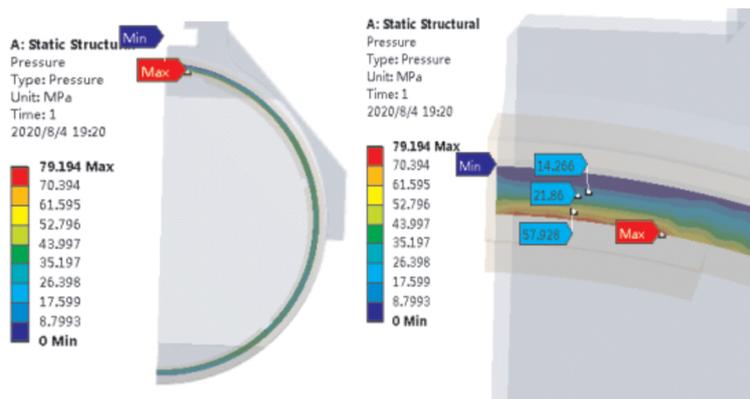


图 5 优化前 2.5MPa 时的密封比压

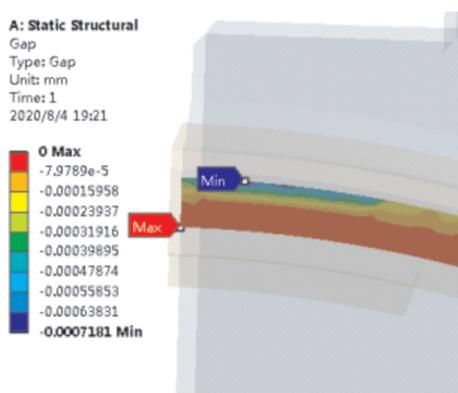


图 6 优化前 2.5MPa 时的密封间隙

3 优化设计

通过对阀体的等效力分析与位移分析, 发现应力畸变部位为阀体中腔。以阀体位移为优化目标, 以中腔加强筋结构与位置为设计变量。由 SolidWorks 建模后与 ANSYS Workbench 建立接口, 对闸阀阀体进行多参数优化^[6,7]。

取加强筋的长度 L_1 为第 1 个参数, 加强筋的厚度 L_2 为第 2 个参数, 两加强筋间距离 L_3 为第 3

个参数, 对阀体中腔做增加 4 条加强筋处理。并在中腔变形最大处加一条竖直加强筋。加筋之后的闸阀模型如图 7 所示。

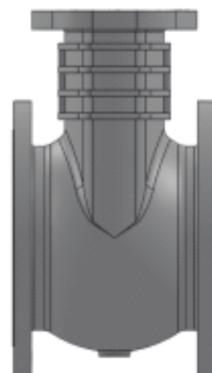


图 7 加筋之后的闸阀模型

3.1 正交试验设计

相比于全因子法把全部因子(或因素)与水平都组合一遍的复杂试验设计, 部分因子法只需挑出其中具有代表性的点, 对试验结果进行准确

性分析。其中具有代表性的就是正交试验设计,正交试验设计的特点是“均匀分散,整齐可比”,其意义在于,所有的水平出现的机会相等,所有的因子组合数目相等。应用 SPSS 软件设计正交表和相互作用表^[8,9],表 1 为正交试验结果分析表。由表 1 最优的方案 24 可知,加强筋长度 $L_1=10\text{mm}$,加强筋厚度 $L_2=11\text{mm}$,两加强筋间距离 $L_3=35\text{mm}$ 时,闸阀最大变形量为 $0.197\ 30\text{mm}$ 。

表 1 正交试验结果分析表 mm

试验方案	L_1	L_2	L_3	变形量
1	6	9	40	0.216 18
2	6	8	35	0.214 35
3	6	10	45	0.214 28
4	6	11	50	0.214 94
5	6	7	30	0.215 93
6	7	9	30	0.210 10
7	7	10	35	0.208 50
8	7	11	40	0.208 04
9	7	8	50	0.216 96
10	7	7	45	0.216 38
11	8	7	35	0.213 13
12	8	11	30	0.202 89
13	8	9	45	0.211 84
14	8	10	50	0.213 54
15	8	8	40	0.211 39
16	9	9	35	0.205 68
17	9	10	40	0.204 71
18	9	7	50	0.215 23
19	9	11	45	0.206 72
20	9	8	30	0.207 08
21	10	10	30	0.198 71
22	10	8	45	0.209 19
23	10	9	50	0.209 89
24	10	11	35	0.197 30
25	10	7	40	0.209 50

3.2 曲面插值

Kriging 插值法又称为空间自协方差最佳插值法,广泛应用在地质统计学中,是对空间分布的数据求型线最优,无偏内插估计的一种方法^[10]。Kriging 模型表达式如下:

$$y(x)=f^T(x)\beta+z(x) \quad (4)$$

式中 $f^T(x)\beta$ ——回归项;

$y(x)$ ——Kriging 未知模型;

$z(x)$ ——一个零均值的高斯过程。

以 Gauss 函数为相关函数,即:

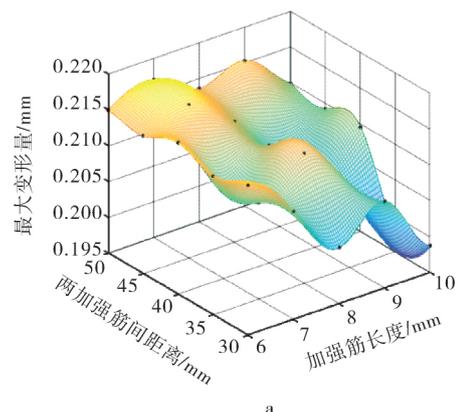
$$R(\theta, w, x)=\exp\left[-\sum_{k=1}^n \theta_k (w_k-x_k)^2\right] \quad (5)$$

Kriging 模型在实验采样点的估计值为:

$$\begin{cases} \hat{y}=\hat{\beta}+r^T R^{-1}(y-\hat{\beta}f) \\ r^T=[R(x, x_1), R(x, x_2), \dots, R(x, x_n)]^T \end{cases} \quad (6)$$

式(5)、(6)中, n 为采样点数; θ_k 为第 k 变量的正交相关系数; β 为回归常数; $\hat{\beta}$ 为 β 的估计值; r^T 为相关向量。

利用 Kriging 模型对表 1 的正交试验结果做插值,可得 Kriging 代理模型结果如图 8 所示。图 8a 为加强筋长度和两加强筋间距离与闸阀最大变形量的插值图,由图 8a 可知随着加强筋长度的增加和两加强筋间距离的减小,闸阀最大变形量也减小;图 8b 为加强筋厚度和两加强筋间距离与闸阀最大变形量的插值图,由图 8b 可知随着加强筋厚度的增加和两加强筋间距离的减小,闸阀的最大变形量减小。图 9 为 Kriging 代理模型精度曲面。由图 9 可看出,代理模型精度较高,两代理模型精度最大分别约为 4.5×10^{-6} 、 1.6×10^{-5} ,说明两 Kriging 代理模型满足精度要求。



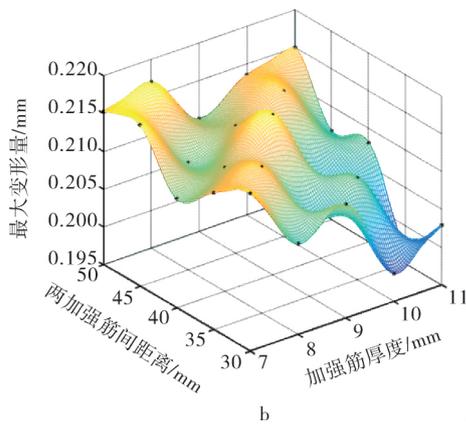


图8 Kriging 代理模型结果

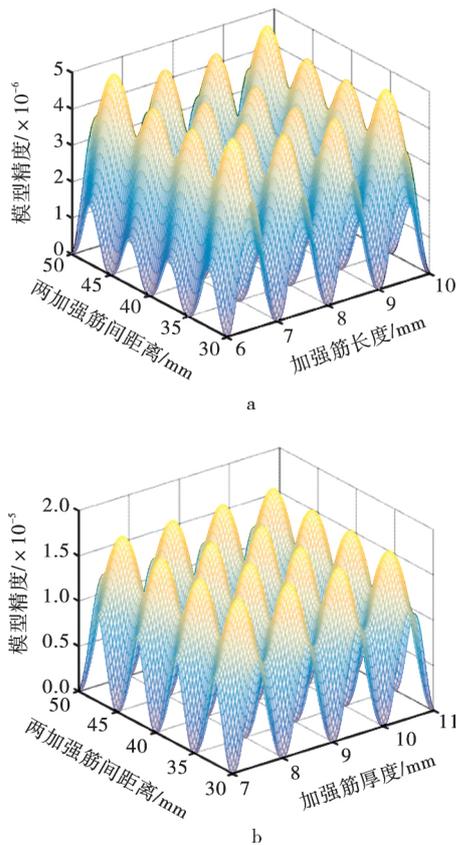


图9 Kriging 代理模型精度

3.3 遗传算法

遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 起源于对生物系统所进行的计算机模拟研究。借鉴了达尔文学说的“物竞天择, 适者生存”理论。其过程主要分为 4 步: 染色体变异、染色体交叉、计算适应度、优胜劣汰。因具有很强的鲁棒性被广泛应用于优化设计过程中^[11]。

利用 GA 算法对 Kriging 模型进行优化设计。

设群体大小为 50, 迭代次数为 100, 图 10 为迭代 100 次后种群目标函数均值和最优解的变化。得出 Kriging 模型最优解为加强筋长度 10mm, 加强筋厚度 11mm, 两加强筋间距离 30.919 9mm, 此时闸阀最大变形量为 0.167mm。

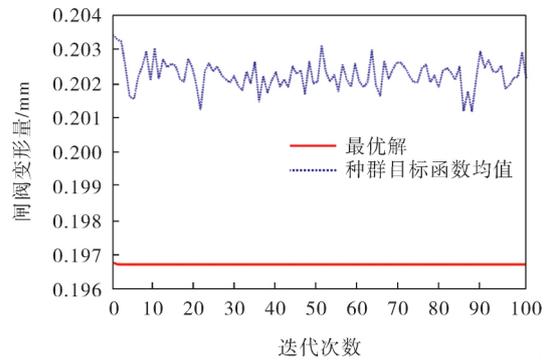


图10 迭代 100次后种群目标函数均值和最优解的变化

综上, 对闸阀进行重新设计, 优化后闸阀的三维模型如图 11 所示。

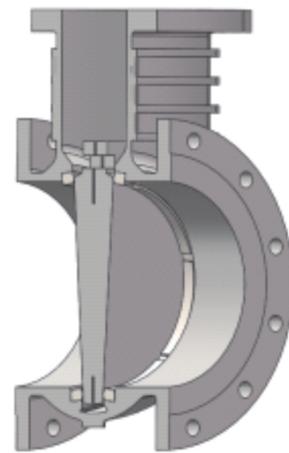


图11 优化后闸阀的三维模型

4 数值模拟验证

将优化后的三维模型导入 ANSYS Workbench 中进行数值模拟验证, 边界条件的设置与优化前的设置相同。

仿真结果如图 12a 所示, 其最大等效应力为 127.76MPa, 小于材料许用压力, 满足阀门材料的使用要求, 与优化前最大等效应力 182.46MPa 相比减小了 29.97%。由图 12b 可知, 优化后最大变形量为 0.194 41mm, 满足阀门材料的刚度要求。正交试验设计的最优方案 24 的变形量

0.197 30mm 与之相比, 增大了 1.48%;Kriging 代理模型预测结果与之相比, 增大了 1.18%;而与优

化前的闸阀最大位移 0.349 12mm 相比, 减少了 44.31%。

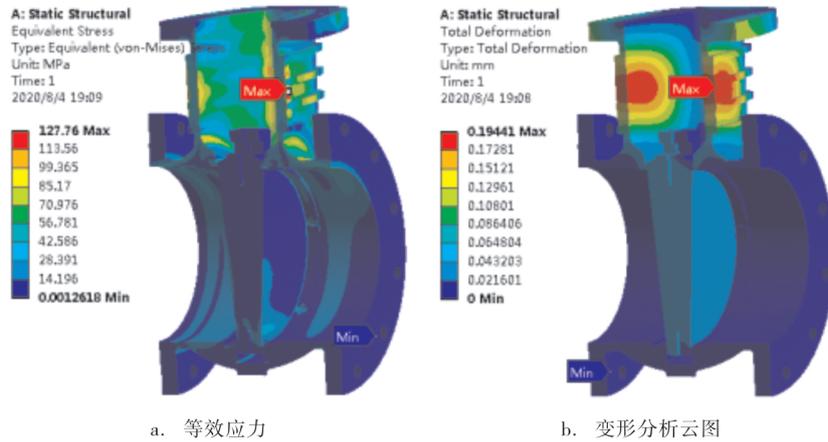


图 12 优化后等效应力和变形分析云图

由图 13a 可知优化后最大密封比压为 42.424MPa, 小于其许用密封比压, 由图 13b 可知, 密封带中部密封比压约为 20.232MPa, 最小密封比压为 16.243MPa, 大于其密封必须比压 4.848MPa。

图 14 为闸阀优化后的密封间隙, 由图 14 可知, 闸板与阀座间的密封间隙为 0mm, 对比图 6, 密封间隙趋于 0mm 且更加均匀, 结合阀门密封比压, 经加筋优化后闸阀可有效密封。

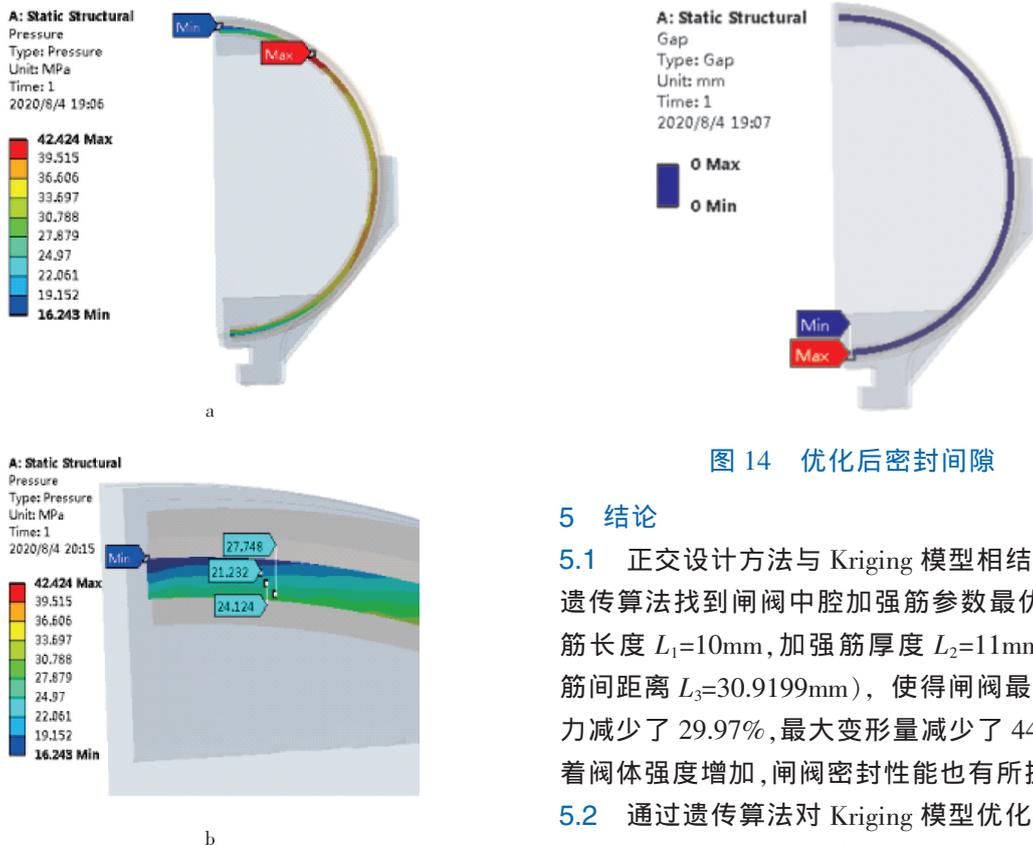


图 13 优化后密封比压

图 14 优化后密封间隙

5 结论

5.1 正交设计方法与 Kriging 模型相结合, 通过遗传算法找到闸阀中腔加强筋参数最优值(加强筋长度 $L_1=10\text{mm}$, 加强筋厚度 $L_2=11\text{mm}$, 两加强筋间距离 $L_3=30.9199\text{mm}$), 使得闸阀最大等效应力减少了 29.97%, 最大变形量减少了 44.31%。随着阀体强度增加, 闸阀密封性能也有所提高。

5.2 通过遗传算法对 Kriging 模型优化求解得闸阀阀体加强筋长度 L_1 、加强筋厚度 L_2 , 两加强筋间距离 L_3 的最优组合参数, 经 ANSYS

Workbench 数值模拟验证知闸阀最大变形量为 0.194 41mm, 而正交试验设计得到闸阀最大变形量的最小值为 0.197 30mm, 误差为 1.48%, Kriging 模型预测闸阀最大变形量的最小值为 0.196 70mm, 误差为 1.18%。验证了 Kriging 代理模型对闸阀加强筋模拟的准确性, 即在有足够实验数据时, 可通过 Kriging 代理模型分析获得优化结构参数。

参 考 文 献

- [1] 车强, 池胜高, 潘灵永, 等. 水下平板闸阀阀座密封技术探讨[J]. 石油机械, 2015, 43(12): 59~63.
- [2] 刘平, 胡金辉, 王保平, 等. 核级高温高压闸阀密封组件结构设计[J]. 阀门, 2018, (1): 8~9, 46.
- [3] 孙殿玉, 刘志新. 主闸阀强度与刚度分析[J]. 阀门, 2003, (1): 14~16.
- [4] 王宇峰, 何庆中, 陈雪峰, 等. 楔形双闸板闸阀密封失效与结构优化[J]. 油气储运, 2019, 38(6): 709~715.
- [5] 俞树荣, 宋伟, 霍炬, 等. 大口径闸阀阀体强度分析与结构优化[J]. 兰州理工大学学报, 2007, 33(5): 64~66.
- [6] 张希恒, 俞树荣, 杜兆年, 等. 楔式闸阀阀体变形对密封性能影响分析[J]. 阀门, 2011, (3): 37~39.
- [7] 景鹏飞. 大口径闸阀阀体加筋结构优化及疲劳分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.
- [8] 崔栋利. 计算机试验的最优线型无偏预测和正交设计[D]. 北京: 北京建筑大学, 2017.
- [9] 白云飞. 节流槽结构参数对阀口流量特性的影响研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
- [10] 夏斌. 基于 Kriging 模型的开关磁阻电机优化设计[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012.
- [11] 孙泽刚, 肖世德, 王德华, 等. 液压滑阀 V 型节流槽气穴流仿真分析及结构优化研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(2): 346~354.

(收稿日期: 2020-08-07, 修回日期: 2021-05-07)

Sealing Performance Analysis and Structure Optimization of Wedge Gate Valve Based on Kriging Model

ZHANG Li-qiang^{1a}, QI Chang-xin^{1a}, CHEN Gao-peng^{1a},
ZHANG Yan-bin², WANG Zhang-zhang², LIN Nan^{1b}

(1a. School of Energy and Power Engineering ; 1b. Wenzhou Institute of Pump and Valve Engineering, Lanzhou University of Technology ; 2.KCM Valve Co., Ltd.)

Abstract Through taking NPS12—Class150 wedge gate valve as the research object, the orthogonal experiment on both structure and position of the ribs in the gate valve body was designed. After making use of Kriging proxy model to interpolate the orthogonal design results, the Kriging proxy model's optimal value was obtained by the genetic algorithm to realize optimization of the strength of the gate valve body and its sealing performance. Simulation results showed that, compared with pre-optimization, the maximum equivalent stress of the gate valve optimized is reduced by 29.97% along with the maximum displacement reduced by 44.31%, and the minimum seal specific pressure is increased form 0MPa to 16.243MPa together with 0mm sealing gap.

Key words wedge gate valve, sealing, structural optimization, Kriging proxy model, numerical simulation

广告价格 (元/期)	彩 色							
	封面	封面连页	封二	封三	封底	目录前页	前插	后插
	18000	12000	10000	8000	10000	6500	6000	2500