

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2022.03.020

# 两相流工况下板翅式换热器进料封头结构优化设计

韩明刚

(咸阳职业技术学院 机电(技师)学院, 陕西 西安 712000)

**摘要:**板翅式换热器具有结构紧凑、体积小、传热效率高等特点,广泛应用于石油化工、航空航天和低温工程领域。但此类换热器入口处物流分配的不均匀会加剧其内部温度场分布不均匀和纵向传热,导致换热器整体性能下降。基于过渡段和S弯设计,通过CFD数值模拟计算原始封头和改进型封头的出口流速分布,比较两种封头结构的物料进料分配特性。模拟结果显示,改进型封头相较于原始封头使入口空气流速的相对不均匀度、水流速的相对不均匀度明显降低,有效改善了换热器物料进料的分配不均匀度,从而提高了换热器的整体性能。

**关键词:**板翅式换热器;两相流;CFD;结构优化

**中图分类号:**TH122 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)03-0076-05

## Optimization Design of Feed Head Structure of Plate-fin Heat Exchanger under Two-phase Flow Condition

HAN Minggang

(Mechanical and Electrical (Technician) Department, Xianyang Vocational Technical College, Xi'an 712000, China)

**Abstract:** The plate-fin heat exchanger characterized with compact structure, small volume and high heat transfer efficiency has been widely used in petrochemical, aerospace and cryoengineering fields. The uneven distribution of logistics at the entrance of the heat exchanger, however, will aggravate the uneven distribution of internal temperature field and longitudinal heat transfer, leading to overall performance degradation of the heat exchanger. In regard to this, based on the transition section and S-bend design, the outlet velocity distribution of the original head and the improved head is calculated by CFD numerical simulation, and the material feed distribution characteristics of the two head structures are compared. The simulation results show that the relative inhomogeneity of inlet air velocity and water velocity of the improved head is reduced obviously in comparison with the original head, and the inhomogeneity of material feed distribution is effectively improved, which improves the overall performance of the heat exchanger.

**Keywords:** plate-fin heat exchanger; two phase flow; CFD; structure optimization

## 0 引言

板翅式换热器是一种结构紧凑、换热高效、工况适应性强的间壁式换热器,广泛应用于空气分离、石油化工、航空航天和低温工程等工业领域。研究表明板翅式换热器内部的温度场、流场的分布不均和纵向传热是引起小温差、高传热单元数(NTU)以及微通道换热器整体效能下降的主要原因<sup>[1-2]</sup>。而事实上这三者之间具有耦合关系,其中物流的分配不均会加剧温度场的分布不均和纵向传热,所以物流的分配不均对换热器整体效能的影响最为显著<sup>[3]</sup>。因此,国内外学者广泛研究换热器的物流分配特性,从而改善换热器的整体效能。

吴裕远等<sup>[4]</sup>研究表明,气液分配不均能使低温两相流板翅式换热器的效能下降20%~40%。焦安军等<sup>[5]</sup>建立了物流分配不均匀性对换热器效能影响的理论分析模型,计算发现对于设计NTU>100的板翅式换热器,物流分配的不均匀性引起换热器效能的下降量在10%以上。

由于物流的分配不均严重影响板翅式换热器的整体性能,国内外学者提出多种不同的改善换热器入口物料分配不均的措施<sup>[6]</sup>,主要集中于封头和导流片结构的改进,另外还有针对两相流体分配的改进研究,还有针对海上晃荡工况下封头内两相流分配特性的模拟研究<sup>[7]</sup>。

关于封头,焦安军等<sup>[8]</sup>、王江等<sup>[9]</sup>将原来的一次封头分配改为二次封头分配,提出了二次封头的结构形式。沈素萍等<sup>[10]</sup>在此基础上改进二次封头的型线,研究指出正切形封头的效果最佳。虽然二次封头使物流分配特性有所改善,但在工程实际中由于其结构复杂而不便安装。

上述研究均针对换热器进料封头结构开展了相应的研究,但是不同领域的板翅式换热器所需的性能要求各不相同,运行工况也有差异,此外还需考虑设计、加工、制造安装的难度和成本,因此目前也暂未有一种通用、有效的改进措施,有关板翅式换热器物流分配特性仍需要进一步的研究与完善。本文将针对两相流工况下板翅式换热器的进料物流分配问题展开研究,提出一种新型改进型封头,并通过模拟分析改进型封头的物料分配特性。

作者简介:韩明刚(1984—),陕西咸阳市人,讲师,从事机械设计制造及自动化专业教学和研究工作。

## 1 研究模型

本文研究对象来源于某空分装置,由一个水平半圆柱流道和一个竖直圆柱流道相贯而成。模型的尺寸即为实际构建尺寸,其主要的结构尺寸为入口管径 200 mm、长 176 mm;封头为瓜皮式结构,直径 308 mm、长 905 mm。出口通道尺寸为 9.5 mm×285 mm,数目为 15 个,呈对称分布。封头结构见图 1。

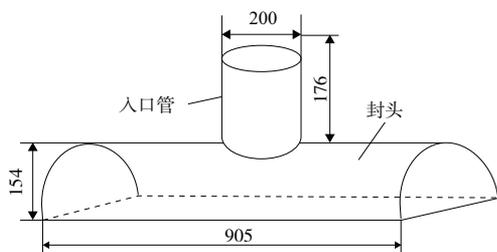


图 1 原型封头结构示意图

## 2 原始模型的 CFD 模拟

### 2.1 模型建立

使用 SolidWorks 建模软件参照图 1 对封头进行建模。

### 2.2 网格划分

#### 1) 整体网格处理

本文对原始封头进行非结构化网格划分,也就是基于八叉树算法的四面体网格。其中网格的最大尺寸为 10 mm,在壁面处进行边界层处理。

#### 2) 边界层网格处理

在近壁区,流动情况变化很大,特别是在黏性底层,流动几乎是层流流动,湍流应力几乎不起作用,因此湍流模型在此处的模拟精度很低。对此本文对边界层的处理利用了壁面函数法,边界层网格的层数为 3,第 1 层网格的高度为 1.5 mm,增长率为 1.2。

#### 3) 局部网格加密处理

由于封头出口的微型通道的宽度为 9.5 mm,稍微小于最大网格尺寸,所以在微型通道处的网格显得十分稀疏,这样不能真实地反映出口处的流场情况。本文采用调整网格密度方法对 15 个微型通道处网格进行加密,加密策略为 pure refinement,迭代次数为 2 次。最终网格划分效果参见图 2。

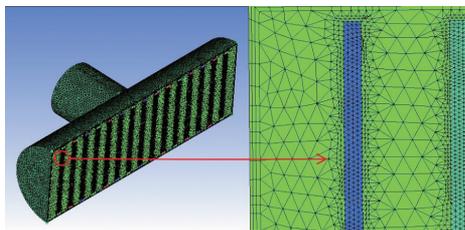


图 2 原型封头网格划分效果图

### 2.3 求解条件

依据 CFD 边界条件选用准测和实际换热器的工作情况,设置计算模型的边界条件为:进口面为速度入口条件;出口面为压力出口条件;其余面为壁面。

工作介质选择标准状态下空气和水的混合物,空气密度为 1.225 kg/m<sup>3</sup>,黏度为 1.789 4×10<sup>-5</sup> kg/(m·s),水密度为 998.2 kg/m<sup>3</sup>,黏度为 1.003×10<sup>-3</sup> kg/(m·s),湍流模型选用 *k-ε* 模型,多相流模型为欧拉模型,壁面函数为标准壁面函数;进口速度为 6 m/s,出口压力是 0.1 kPa。

分离求解算法采用的是 SIMPLE 算法,离散化方法通量采用二阶迎风格式。

由于多相流模拟难度大,故设置收敛残差为 10<sup>-3</sup>,迭代步数 2500。

### 2.4 网格无关性验证

本节分析网格的疏密程度对数值计算结果的影响,而在计算精度和计算耗时之间寻求最佳的平衡点。网格无关性验证采用本节介绍的原始封头的计算模型。表 1 列出了在不同网格数量下的数值计算结果。

表 1 不同网格数目下原始封头计算结果

网格参数		计算结果		
最大网格尺寸/mm	网格数	出口平均速度/(m/s)	出口质量流率/(kg/s)	进口平均压力/Pa
15	195 697	6.42	0.229	29.434
10	684 399	6.68	0.230	27.805
8	1 130 588	6.69	0.230	27.770

分析表 1 中的结果可以发现,随着网格数的增加,各个计算结果均发生了变化,但是当网格数目从 684 399 增加到 1 130 588 时,结果的变化幅度要远小于网格数从 195 697 增加到 684 399 时结果的变化幅度。所以认为当网格数达到 684 399 时,已经满足计算要求,再增加网格数对计算精度没有较大的提升。同时考虑到计算时间,最终选择网格数为 684 399,与之对应的网格最大尺寸为 10 mm。

### 2.5 计算结果

在上文指定的入口工况下,对建好的模型进行 CFD 模拟,通过改变气液比和入口流速可以得到多组数据,下面通过一组数据来描述原始封头物料分配情况。

图 3 为气体所占体积分数为 0.2,两相入口流速均为 6 m/s 条件下,水和空气的速度云图及组分分布图。

由图 3,得到以下几个结论。

1) 从空气和水的组分图中不难看出,两相流体集中区域相同,稀少区域也相同,水和空气有着极其相似的流动特性,不会因为两相混合而有所区别。

2) 水速度云图所示的截面流动情况和单相流流动相似。从图中可得,在正对入口管的地方,流速较大,流体在入口管中没有速度差异,而流体从入口管进入封头后有着很明显的速度下降,并且速度分布沿中轴线对称分布,封头内部两侧流体流速与中轴处流体速度有着明显的界线,

这样速度差异的产生根本原因就在于流体从入口管进入封头的过程中,流场的当量直径发生突变,流动截面从圆形突变到矩形,从而使流体主要集中在圆形小范围内,封头内两侧流体分布较少。

3) 观察两相速度云图的出口状况,可以发现一个共同点,流体在中心处存在一定的空洞区域,即速度急剧下降,分析原因可能是在中部出口处存在一定的漩涡,导致大流量出口处形成小范围的死区,影响了流动。

4) 观察 15 个出口通道,流体在中部通道较为集中,从中间向两边逐渐减少,以至于在云图上显示两边近 6 个通道流速极低。这说明在原型封头中,流体流动在逐渐均匀化,由于封头的轴向尺寸过短,流体无法进一步扩散,影响整体流动均匀性。

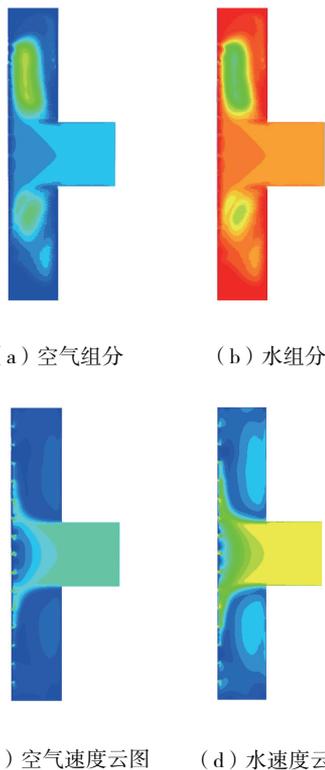


图 3 空气和水的速度云图及组分分布图

为了进一步研究流动的均匀性,在观察云图的基础上,文献[11]中的实验通过 15 个通道的出口流速直观地显示出原型封头的两相流流动情况。图 4 为与图 3 相同工况下的出口流速图。纵坐标为流速,横坐标从左到右分别对应 15 个通道。

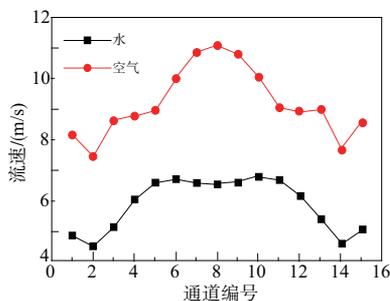


图 4 气体体积分数 0.2 时两相出口速度

由图 4 可得如下结论。

1) 对于原型封头,其出口流速呈对称分布,且变化非常大。以空气而言,从 1 号通道到 2 号通道,流速下降。从 2 号通道到 8 号通道,流速总体呈现上升趋势,上升的趋势先减小后增大。在 8 号通道流速到达最大值。水与空气的变化趋势相似,只是在 5 号通道到 11 号通道没有空气变化的幅度大。图中流速的变化明确地表明了原始封头结构中,中心区域的流量分配要远远大于两侧的流量分配,进一步说明了原始封头结构的不合理性。

2) 对同一通道而言,空气的流速要远远高于水的流速。同样的进口速度,同样的流动特性,但在出口处有着明显的速度差异。图中两相的速度差异不仅仅是因为水和空气的速度滑移,同时是空气相对于水更好的可压缩性从而使空气在受压缩时通过通道产生较高的流速,进一步说明了两相流的物流分配比单相流更复杂。

## 2.6 结果验证

为验证模型的正确性,本文重建了文献[11]中的原型封头模型,并利用本文的计算模型进行了 CFD 计算。通过将计算结果和文献[11]中的实验结果进行对比,验证了本文所使用的计算模型的正确性。图 5 是 CFD 计算结果和实验值的对比情况。

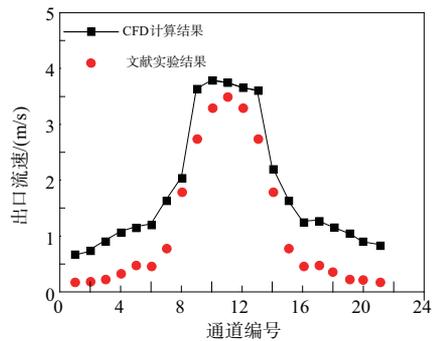


图 5 计算结果与实验结果的对比

## 3 改进模型的 CFD 模拟

### 3.1 封头结构优化设计

#### a) 改进型封头的 S 弯设计

通过对原型封头的数值模拟,得出以下特点:1) 原型封头的结构是由一个小圆柱和一大半圆柱相贯而成,在相贯的地方存在几何突变,容易加剧流体的湍流和引起漩涡;2) 原型封头促使流体直接从小圆形截面进入到矩形截面,其中不存在任何过渡,所以流场的当量直径存在突变;3) 对于原型封头,中心流道流体的水力路径很短,也就是封头的轴向尺寸,即 330 mm,如此短的距离流体很难及时地向两侧通道分散,必然造成分配的不均匀。

通过总结原型封头的一些特点,本文提出了改进型封头结构。改进型封头主要有以下结构特点:①摒弃了小圆柱入口段,采用圆面向矩形面的过渡结构,不仅有效地减少了几何突变,而且采用过渡形式有利于引导流体向两侧流动,理论上可以减轻分配不均匀;②相对于原始封头的瓜皮式结构,改进型封头采用 S 弯形式的流道设计,其流

线型的结构特点不仅可以减少流体的分离和漩涡现象,而且S弯较大幅度上延长了水力路径,使得流体能更充分的向封头两侧发展,从而减轻分配不均匀。③在改进型封头中,进出口结构尺寸和封头轴向长度保持与原始封头相同;S弯的设计依靠径向长度的增加。

b) 改进型封头的描述

本文依据上述的设计理念提出改进型封头,以下为详细的描述。

封头结构形式见图6。在该封头中,S弯采用圆弧加直线的组合方式。起始段是半径为  $R1 = 85\text{mm}$  的1/4圆弧,中间段是一段长为  $200\text{mm}$  的竖直直线段,结束段是半径为  $R2 = 155\text{mm}$  的1/4圆弧,如图7所示。该封头的设计较为简单,但是原弧段对于流体的流动有较好的引导作用。S弯的方程如下。

上圆弧+直线段组合曲线:

$$\begin{cases} x^2 + (y-85)^2 = 85^2 \\ x \in [0, 85], y \in [0, 85] \\ x = 85 \\ y \in [85, 285] \\ (x-240)^2 + (y-285)^2 = 155^2 \\ x \in [85, 240], y \in [285, 440] \end{cases} \quad (1)$$

下圆弧及直线段组合曲线是通过上圆弧及直线段组合曲线平移及旋转得来,这里不再列方程组。

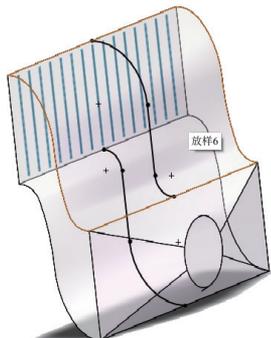


图6 改进型封头结构图

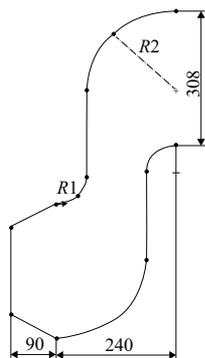


图7 改进型封头轴向截面

### 3.2 改进型封头 CFD 计算

由于改进型封头存在过渡段和S弯段,总体来说其结构是较为不规则的,所以选择四面体网格来对场进行离散处理。网格最大尺寸为  $10\text{mm}$ ;网格数为  $1512380$ ;边

界层的处理同原始封头。整体和局部的网格示意图见图8。

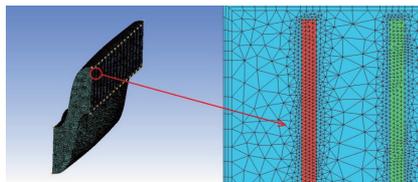


图8 改进型封头网格划分

改进型封头的求解条件和原始封头一致,此处不再赘述。

### 3.3 同工况下改进型封头与原始封头比较

图9给出了在进口速度为  $6\text{m/s}$ 、气体所占体积为  $0.2\%$  的条件下,原型封头和改进型封头的出口流量分布。

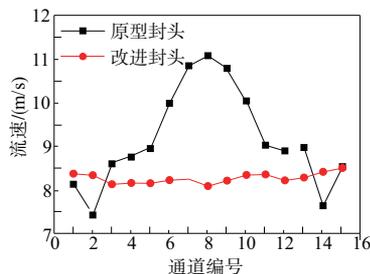


图9 空气速度分布

从图9中可以看出,原型封头出口流速分布极不均匀,中部出口流速高达  $11\text{m/s}$ ,两侧最低达到  $7.5\text{m/s}$ ,整体波动极大。改进型封头在改善物流分配均匀性方面起到了明显的作用,在图中曲线,波动明显减少许多,各个通道流速基本稳定在  $8.2\text{m/s}$ 。如采用15个通道速度的总体标准差与它们平均流速的比值(定义为相对不均匀度)来表征物料分配不均匀性,则改进型封头对空气的分配相对不均匀度降低了  $88.66\%$ ,这表明改进型封头确实要优于原型封头。

图10显示原型封头和改进型封头水的出口速度分布。相比于空气的速度分布,水的速度波动为  $4.5 \sim 6.75\text{m/s}$ ,整体在中部流动均匀,但两侧通道流速落差极大。改进型封头速度稳定在  $4.75\text{m/s}$ ,对各个通道都有着很好的物流分配。定量来看,改进型封头对水的分配相对不均匀度降低了  $90.82\%$ 。但同时改进型封头也有一定的缺点:在一定程度上减少了出口水动能,由于弯道阻力损失,水出口平均速度比原型封头出口平均速度较低。

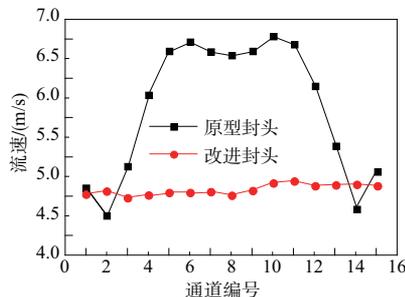


图10 水速度分布

## 4 结语

本文通过对板翅式换热器原始封头内部流场进行 CFD 计算和分析,发现物料在其出口处的流速分布极不均匀,因此采用过渡段与 S 弯设计对原型封头进行了结构优化,并对改进型封头再次进行 CFD 计算。计算结果表明:改进型封头对空气的分配相对不均匀度降低了 88.66%,改进型封头对水的分配相对不均匀度降低了 90.82%。因此改进型封头可显著改善物料的出口分配不均匀度。

### 参考文献:

- [1] RANGANAYAKULU C, SEETHARAMU K N, SREEVATSAN K V. The effects of inlet fluid flow nonuniformity on thermal performance and pressure drops in crossflow plate-fin compact heat exchangers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1996, 40(1): 27-38.
- [2] RANGANAYAKULU C, SEETHARAMU K N. The combined effects of longitudinal heat conduction, flow nonuniformity and temperature nonuniformity in crossflow plate-fin heat exchangers [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 1999, 26(5): 669-678.
- [3] PUTNAM G R, ROHSENOW W M. Viscosity induced non-uniform flow in laminar flow heat exchangers [J]. International

Journal of Heat and Mass Transfer, 1985, 28(5): 1031-1038.

- [4] 吴裕远, 吴铁晖, 陈流芳. 双相变换热器气液均匀分配特性及典型结构研究的新进展 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(4): 383-388.
- [5] 焦安军. 换热器入口物流分配特性研究与优化设计 [D]. 西安: 西安交通大学, 2002.
- [6] 章晓龙. 板翅式换热器物流分配特性的研究进展 [J]. 深冷技术, 2016(7): 22-30.
- [7] 吴静玮, 张弛, 胡鸣鹤, 等. 晃荡工况下板翅式换热器封头内两相流分配模拟 [J]. 制冷技术, 2020, 40(5): 16-21, 28.
- [8] 焦安军, 厉彦忠, 张瑞, 等. 封头结构对板翅式换热器物流分配不均匀性的影响 [J]. 化工学报, 2003, 54(7): 907-912.
- [9] 王江, 厉彦忠, 周爱民, 等. 二次封头结构板翅式换热器出口温度分布的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(7): 706-709.
- [10] 沈素萍, 蒲亮, 厉彦忠. 封头形状对板翅式换热器入口段流场影响的数值研究 [J]. 低温工程, 2013(3): 26-34.
- [11] 文键. 基于 PIV 技术的换热器内部场分布特性研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2006.
- [12] 芦娅妮, 周鸿宇, 韩明虎, 等. 开孔形状对大小孔折流板换热器性能能影响的研究 [J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(2): 31-33, 68.

收稿日期: 2021-11-23

### (上接第 71 页)

- [5] BEN-HAIM Y. A non-probabilistic concept of reliability [J]. Structural Safety, 1994, 14(4): 227-245.
- [6] 赵恩康, 李洪双. 结构动态可靠性分析的最大熵方法 [J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(2): 137-141.
- [7] QIUZ P, WANG J. The interval estimation of reliability for probabilistic and non-probabilistic hybrid structural system [J]. Engineering Failure Analysis, 2010, 17(5): 1142-1154.
- [8] 杨茂, 董昊. 基于数值天气预报风速和蒙特卡洛法的短期风电功率区间预测 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 79-85.
- [9] 郑宇宁. 多源不确定性条件下气动弹性系统颤振可靠性分析方法 [J]. 振动与冲击, 2021, 40(3): 54-62.
- [10] 陈建军. 机械与结构系统可靠性 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994.
- [11] GUERRAICHE K, CHATELET E, DEKHICI L, et al. Reliability optimization of wind farm power systems using bat algorithm with generalized flight [J]. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, 2021, 28(3): 2150019.
- [12] 郭书祥, 吕震宙. 结构的非概率可靠性和概率可靠性方法的比较 [J]. 应用力学学报, 2003, 20(3): 107-110, 164.
- [13] 方永锋, 陈建军. 结构的区间-随机动态可靠性模型 [J]. 华南理工大学学报, 2013, 41(11): 91-95.
- [14] 方永锋, 陈建军, 曹鸿钧. 可修复的  $k/n$  表决系统的可靠性

分析 [J]. 西安电子科技大学学报, 2014, 41(5): 180-184, 206.

- [15] FADDOUL R, RAPHAEL W, CHATEAUNEUF A. Maintenance optimization of series systems subject to reliability constraints [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2018, 180: 179-188.
- [16] 王威, 尹东亮, 陈童. 考虑修理工多重休假的并联系统可靠性模型分析 [J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(11): 2631-2636.
- [17] DAVIES K, DEMBIŃSKA A. On the number of failed components in a  $k$ -out-of- $n$  system upon system failure when the lifetimes are discretely distributed [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 188: 47-61.
- [18] 刘琼, 代建华, 陈蛟龙. 区间值数据的代价敏感特征选择 [J]. 南京大学学报(自然科学), 2021, 57(1): 121-129.
- [19] LIAO S J, ZHANG X Y, MO Z W. Three-level and three-way uncertainty measurements for interval-valued decision systems [J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2021, 12(5): 1459-1481.
- [20] YANG X F, LIU Y S, GAO Y, et al. An active learning kriging model for hybrid reliability analysis with both random and interval variables [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2015, 51(5): 1003-1016.

收稿日期: 2021-09-10