

船舶燃气轮机进气系统惯性级滤清器叶片优化设计

付宇¹, 阳仕柏², 刘艳明², 王建华¹

(1. 中国船舶集团有限公司 系统工程研究院, 北京 100094; 2. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081)

摘要: 惯性级滤清器性能是影响船舶燃气轮机进气系统出口流场品质的重要因素, 也在一定程度上决定了船舶的动力水平。本文采用气-液两相流数值模拟方法, 以低总压损失和高过滤效率为共同目标, 结合试验设计方法, 分别构建了总压损失、过滤效率与叶片几何参数间的响应面方程, 并采用多目标遗传优化算法对惯性级滤清器叶片参数进行优化设计。结果表明: 优化后的惯性级滤清器在所研究速度条件下均以更小的总压损失实现了更高的过滤效率。2 m/s 的速度方案下, 优化后的总压损失减少了 16.98%, 过滤效率提升 37.61%; 7 m/s 的速度方案下, 优化后的总压损失减少 16.7%, 而过滤效率提升 20.83%; 流速高时应选用叶片间距更小、坡度更低、叶片越长的滤清器; 而低流速应该改用间距更大、长度更短、坡度更高的惯性级滤清器叶片。优化后的滤清器叶片结构既减小了叶片背风区的分离, 使总压损失减小, 也增加了液体颗粒与叶片的接触而提升了过滤效率, 从而提高了滤清器的整体性能。

关键词: 惯性级滤清器; 多目标遗传算法; 优化设计; 总压损失; 过滤效率

中图分类号: V231.3 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.04.005

[引用本文格式] 付宇, 阳仕柏, 刘艳明, 等. 船舶燃气轮机进气系统惯性级滤清器叶片优化设计[J]. 热能动力工程, 2023, 38(4): 33-38. FU Yu, YANG Shi-bo, LIU Yan-ming, et al. Optimal design of inertia stage filter blade for marine gas turbine air intake system [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(4): 33-38.

Optimal Design of Inertia Stage Filter Blade for Marine Gas Turbine Air Intake System

FU Yu¹, YANG Shi-bo², LIU Yan-ming², WANG Jian-hua¹

(1. Systems Engineering Research Institute of CSSC, Beijing, China, Post Code: 100094;

2. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing, China, Post Code: 100081)

Abstract: The performance of inertia stage filter is an important factor affecting the quality of the flow field at the outlet of marine gas turbine air intake system, and also determines the power level of the ship to a certain extent. With low total pressure loss and high filtration efficiency as the common goal, the numerical simulation method of gas-liquid two phase flow combined with experimental design method are adopted to construct the response surface equations among total pressure loss, filtration efficiency and blade geometric parameters respectively in this paper, and a multi-objective non-dominated sorting genetic algorithm is used to optimize and design the parameters of inertia stage filter blades. The results show that the optimized inertia stage filter achieves higher filtration efficiency with less total pressure loss in the full speed range. At the speed of 2 m/s, the optimized total pressure loss is reduced by 16.98% and the filtration efficiency is increased by 37.61%. At the speed of 7 m/s, the optimized total pressure loss is reduced by 16.7%, and the filtration efficiency is increased by 20.83%; in inertia stage filters, for high flow speed, longer blade with smaller spacing and lower slope should be selected; for low flow speed, shorter blade with larger spacing and higher slope should be used; the optimized filter blade structure not

only reduces the separation in the leeward area of the blade to reduce the total pressure loss, but also increases the contact between liquid particles and the blade to improve the filtration efficiency, so as to improve the whole performance of filter.

Key words: inertia stage filters, multi-objective genetic algorithm, optimized design, total pressure loss, filtration efficiency

引言

进气系统作为船舶上层建筑的重要组成部分,其体积庞大、重量占比突出,担负着为船舶燃气轮机提供清洁进气的任务。由于船舶航行所面临的复杂海洋环境条件,进气系统的进气口始终存在含盐海水液滴及其他杂质颗粒,这些污染物如果随气流进入燃气轮机,将对零部件特别是叶片造成严重损坏和腐蚀^[1-3]。因此,进气系统内常设有滤清器等过滤部件,以避免或减少污染物进入燃气轮机。但进气气流被过滤部件过滤的同时会产生总压损失,并且在常规的设计中,一般都是过滤效果越好,总压损失越大。如果总压损失过大,燃气轮机高进气量就无法得到保障,可见,进气系统惯性级滤清器设计面临的技术挑战就是在较高的过滤效率与较小的总压损失之间的平衡。

为进一步提升滤清器性能,许多学者对惯性级滤清器进行了优化设计,Zhao 等人^[4]利用响应面方法研究滤清器结构参数与过滤效率的关系,研究发现,过滤效率随着叶片间距和叶片转向角的增加而减小,随着气流速度增加而增大。Zamora 等人^[5]研究了波板分离器惯性级通道长径比以及湍流扩散率对过滤效率的影响。Narimani 等人^[6]研究气流速度、叶片间距和叶片转角对叶片式除雾器过滤效果的影响,结果表明,对分离效率叶片的气流速度和几何参数有明显的依赖性。Venkatesan 等人^[7]采用田口法对 25 种不同形状的滤清器形状进行了数值模拟,得到了其中最优的叶片模型,在此计算结果的基础上,利用最小二乘法对海水淡化用弯叶片除雾器的摩擦系数和液滴分离效率作为目标函数进行回归分析^[8],结果发现叶片间距和疏水槽高度对除雾器摩擦系数和液滴分离效率的影响最大。

现有关于惯性级滤清器叶片的研究主要分为两个方向:一是研究某具体几何参数对气动性能的影响;二是通过优化设计提升滤清器的气动性能。同

样是优化设计,文献[7]中采用的田口法计算方案多、耗时长,计算样本对于叶片结构参数的取值范围较少,容易陷入局部最优解中。文献[4]中使用的响应面算法可以有效解决这个问题,但由于在研究中设计变量选取较少,最终的优化仅关注了过滤效率却忽略了对总压损失的影响。

综上,现有的优化设计研究虽得到了部分叶片参数对滤清器性能的影响规律,但其优化参数较少且优化目标单一,没有综合考虑总压损失与过滤效率的影响。本文将以提高过滤效率和低总压损失为共同优化目标,结合试验设计和敏感性分析方法设计研究方案,对一定来流速度和粒子直径条件下的进气系统惯性级滤清器主要几何参数(叶片间距等参数)进行优化,以实现船舶进气系统滤清器气动性能的全面提升。

1 计算模型与方法

1.1 研究对象

研究对象为某典型船舶进气系统惯性级滤清器。考虑到惯性级滤清器是相同尺寸滤清器叶片的等间距布置,计算模型因此采用单通道模型。由于滤清器厚度方向远远超过滤清器叶片展向尺度,所以采用二维计算模型替代三维模型计算,以减小计算网格、缩短计算周期,本文计算模型如图 1 所示。该滤清器模型采用 1:1 建模方式。滤清器叶片主要参数有:叶片长度 w 、叶片间距 h 、叶片夹角 α 和尾缘长度 l ,如图 1 所示。

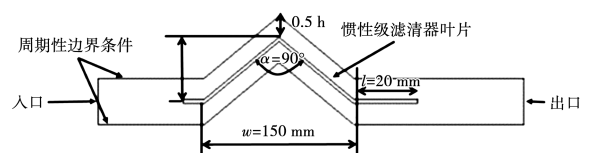


图 1 惯性级滤清器模型

Fig. 1 Inertia stage filter model

1.2 数值计算方法

基于 Fluent 软件计算平台进行气-液两相流研

究,求解二维、定常、粘性流动的控制方程,采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型。得益于计算机技术的快速发展,针对本文生成网格而不影响计算速度,本文生成网格总数为 50 万左右,并在近壁面处铺设边界加密网格,与同等模型相比,此网格足够密,可认为已达到网格无关。入口选用速度入口,出口压力为 101 325 Pa,上下边界选取周期性边界,具体设置如图 1。

气相流场计算收敛后,加入液滴颗粒,进行单相耦合。液滴设置为圆球状,材料属性为 Water-liquid,粒子从入口面以与气相相同的速度均匀射入。设置颗粒与模型边界碰撞的 DPM 边界条件,出入口颗粒的 DPM 边界条件为(颗粒逃逸)Escape,粒子从此面流过即逃出滤清器;惯性级叶片的 DPM 边界条件按其功能特性取为(颗粒完全捕集)Trap,即当颗粒碰到壁面就会被捕捉。这与实际流动中颗粒碰到叶片壁面后汇集成液膜,沿壁面流下直至排出的情况相吻合。

1.3 滤清器评价指标

衡量惯性级滤清器性能的重要指标是总压损失 Δp 与过滤效率 ζ 。具体定义如式(1)与式(2):

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad (1)$$

$$\zeta = \frac{q_1 - q_2}{q_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中: p_1, p_2 一惯性级过滤装置入口与出口的总压, Pa; q_1, q_2 一惯性级过滤装置入口与出口处的粒子总数。

2 试验设计与数值计算

惯性级滤清器的性能主要受到 6 个因素的影响,分别为叶片间距 h ,叶片长度 w ,叶片夹角 α ,尾缘长度 l ,流速 v ,粒子直径 d 。如果采用全面计算的方法考虑这 6 种因素对惯性级滤清器性能的影响,计算方案数将达到 $6^5 = 7\,776$ 种,对此本文采用 Box-Behnken 试验设计方法挑选典型试验方案,可在减少试验次数的同时也能够保证函数拟合的准确性。因素水平设计如表 1 所示,最终共得到 54 个试验方案,部分方案如表 2 所示。随后,将所得试验方案采用 1.2 节中所述数值模拟方法进行计算,可得总压损失和过滤效率等参数分布,为优化设计奠定基础。

表 1 试验因素水平表

Tab. 1 Response surface experimental factor level

因素	水平		
	-1	0	1
叶片间距 h/mm	20	40	60
叶片宽度 w/mm	80	140	200
叶片夹角 $\alpha/(\circ)$	80	100	120
尾缘长度 l/mm	10	25	40
流速 $v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	2	4.5	7
粒子直径 $d/\mu\text{m}$	5	15	25

表 2 部分试验设计方案

Tab. 2 Partial test design schemes

方案	叶间距 h/mm	叶宽 w/mm	叶片夹 角 $\alpha/(\circ)$	尾缘长度 l/mm	流速 v $/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	粒子直 径 $d/\mu\text{m}$
1	40	80	100	25	2	5
2	20	200	100	10	4.5	15
3	40	140	120	40	4.5	25
4	60	140	100	40	7	15
5	20	140	120	25	4.5	5
6	40	200	100	25	7	5
7	40	200	100	25	2	25

3 滤清器结构参数优化设计

对滤清器结构参数的优化分为以下内容:首先构建性能参数与影响因素间的响应面方程,其次采用多目标遗传算法寻求响应面方程的最优解,并对优化方法进行可靠性验证,最后对比分析优化前后的滤清器性能参数与流场细节。

3.1 优化方法

总压损失 Δp 与几何参数间的响应面方程采用二次多项式进行拟合,而过滤效率 ζ 与几何参数间则需要二次多项式与线性耦合方程拟合。最终分别得到的总压损失的响应面方程和过滤效率的响应面方程,如式(3)、式(4)所示。将叶片间距、叶片长度、片夹角、尾缘长度、流速和粒子直径 6 个变量的值分别代入方程 $x_1 - x_6$ 中。

$$\begin{aligned} \Delta p = & 255.1295 + 0.765992x_1 - 0.102174x_2 - \\ & 6.43262x_3 - 0.009512x_4 + 74.97193x_5 - 0.207008x_6 \\ & + 0.001216x_1x_2 + 0.004906x_1x_3 + 0.001702x_1x_4 - \\ & 0.1423x_1x_5 + 0.003427x_3x_2 + 0.000215x_4x_2 - \\ & 0.012688x_5x_2 - 0.000056x_6x_2 - 0.004875x_3x_4 - \end{aligned}$$

$$0.6378x_3x_5 + 0.125267x_4x_5 - 0.00135x_6x_5 - 0.015084x_1^2 - 0.00088x_2^2 + 0.034610x_3^2 + 0.002251x_4^2 + 0.742044x_5^2 + 0.007403x_6^2 \quad (3)$$

$$\zeta = 2.0241 + 0.009644x_1 - 0.003409x_2 - 0.038518x_3 - 0.026086x_4 + 0.286642x_5 + 0.015318x_6 - 0.000027x_1x_2 - 0.000111x_1x_3 - 0.00003x_1x_4 - 0.002756x_1x_5 + 0.00001x_3x_2 + 0.000097x_5x_2 - 0.000109x_3x_4 - 0.001566x_3x_5 - 0.0000217x_3x_6 + 0.000038x_4x_5 + 0.000257x_4x_6 + 0.003828x_6x_5 + 0.000139x_1^2 + 0.0000013x_2^2 + 0.000206x_3^2 + 0.000269x_4^2 - 0.0011107x_5^2 + 0.000565x_6^2 \quad (4)$$

在得到目标参数与优化变量的响应面方程后,就需要通过优化算法对目标函数进行寻优。传统遗传算法采用全局搜索的方法求解某单个非线性函数的最优解,或多个同向函数(即均为求解最大值或最小值问题)的最优解,这些目标函数不存在求解冲突,只需要选择适当的权重系数就能找到最优结果。但本文的总压损失与过滤效率两个目标函数对滤清器叶片尺寸提出了冲突要求,总压损失要求最小值,即要求流道尽量平滑、通道宽、气流易流过;而过滤效率求最大值,即要求流道尽量曲折狭小,使得液滴难以改变运动方向被拦截在通道内部,这就需要利用带有精英策略的多目标遗传算法求解帕雷托解(Pareto)。

遗传算法在寻优的过程中以适应度函数作为是否选取该数据的判断依据,故需对目标函数设定合适的目标变量,以惯性级滤清器的叶片尺寸为优化对象,其中总压损失优化目标为:总压损失最小(式5);过滤效率优化目标为:过滤效率最大(式6);约束条件为:下一次优化结果(下标 new)相较于上一次结果(下标 original)总压损失更小,过滤效率更高(式7-式10),其中,Obj为优化目标;Cons为约束条件。

$$Obj1: \min(\Delta p) \quad (5)$$

$$Obj2: \max(\zeta) \quad (6)$$

$$Cons1: \Delta p_{\text{new}} - \Delta p_{\text{original}} \leq 0 \quad (7)$$

$$Cons2: \zeta_{\text{new}} - \zeta_{\text{original}} \geq 0 \quad (8)$$

$$Cons3: \zeta_{\text{new}} \leq 1 \quad (9)$$

$$Cons4: \Delta p_{\text{new}} \geq 0 \quad (10)$$

3.2 优化结果分析与验证

通过上述优化算法对滤清器结构参数进行寻优后,得到了不同流速方案下最优的滤清器结构方案。表3给出了优化后不同流速下的滤清器结构方案,此方案可保持惯性级滤清器在相应来流速度条件下具有较低的总压损失与较高的过滤效率。一般来说,流速越高,叶片间距越小,而叶片宽度越大,同时夹角变大,而尾缘长度基本保持不变,这表明尾缘长度并不是影响滤清器性能的主要因素。

表3 优化后的滤清器结构

Tab.3 Optimized structure of filter

流速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	叶片间 距/mm	叶片宽 度/mm	叶片夹 角/ $^{\circ}$	尾缘长 度/mm
2	59.58	80.001	92.77	10.00
3	59.91	83.68	95.08	12.14
4	20.31	110.39	116.96	10.01
5	22.27	109.48	106.67	11.31
6	21.62	141.40	102.20	11.75
7	22.01	108.46	112.72	10.72

同时,此优化结果也为惯性级滤清器在不同工况下实际工程应用的选择和设计提供了参考:流速越高,应该选用更加密集、坡度更小(夹角越大),长度越长的叶片;而低流速应该改用间距更大、长度更短,坡度更大(夹角更小)的惯性级滤清器叶片。

为验证优化方法和结果的可靠性,将表3中所列的优化后的滤清器方案,采用1.2节中所述数值模拟方法进行计算研究,所得结果如表4所示。从表4可以看出,在不同流速下最优方案响应面方程得到的结果与数值模拟结果吻合较好,这就证明了本文用于优化的响应面方程对总压损失与过滤效率的拟合程度较好,即优化结果具有较高可信度。

表4 优化方法可靠性验证

Tab.4 Reliability verification of optimization method

流速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	最优方案的 总压损失	数值模拟的 总压损失	最优方案的 过滤效率/%	数值模拟的 过滤效率/%
2	6.35	5.67	26.43	25.33
3	14.84	15.19	18.05	22.05
4	16.94	16.21	24.68	25.16
5	36.33	36.33	29.87	29.57
6	59.45	59.94	35.98	36.07
7	44.08	48.72	46.91	48.26

图2和图3分别给出了优化前后的惯性级滤清器性能参数对比情况。由图中可知,优化后的惯性级滤清器在各个流速下方案总压损失均减小,而过滤效率明显提高,优化后得到的滤清器结构方案大幅度提升了滤清器的性能。2 m/s 的速度方案下,优化后的总压损失相对减少了 16.98%,而过滤效率相对提升了 37.61%;7 m/s 的速度方案下,优化后的总压损失相对减少了 16.7%,而过滤效率相对提升了 20.83%。

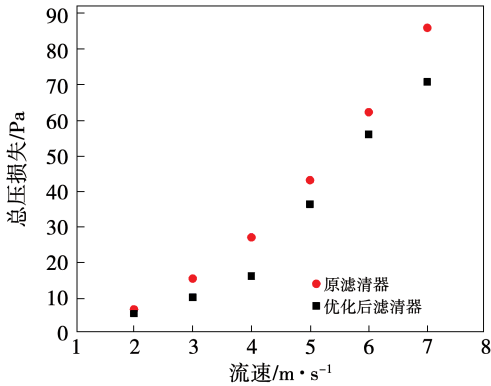


图2 优化前后总压损失

Fig.2 Comparison of total pressure loss before and after optimization

优化前后的流场总压和速度情况。

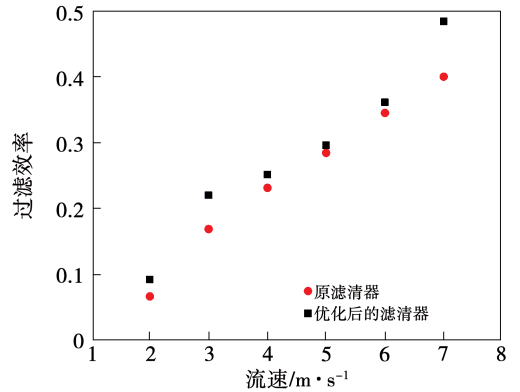


图3 优化前后过滤效率

Fig.3 Comparison of filtration efficiency before and after optimization

首先对原始惯性级滤清器的流动特点进行分析:由图4(a)的总压云图与图4(c)的速度云图可以看出,滤清器模型由于存在叶片坡面,上坡面与下坡面的背风区存在细长的回流区域,上坡面的背风区覆盖整个下坡面并堵塞滤清器上层流道,致使区域内流速降低形成凝滞气流,该凝滞气流区域也阻挡了携带液滴的其他气流与叶片下坡面接触,导致叶片凝聚液滴能力变弱,是原滤清器模型性能差的主要原因。

图4给出了流速为7 m/s 时惯性级滤清器

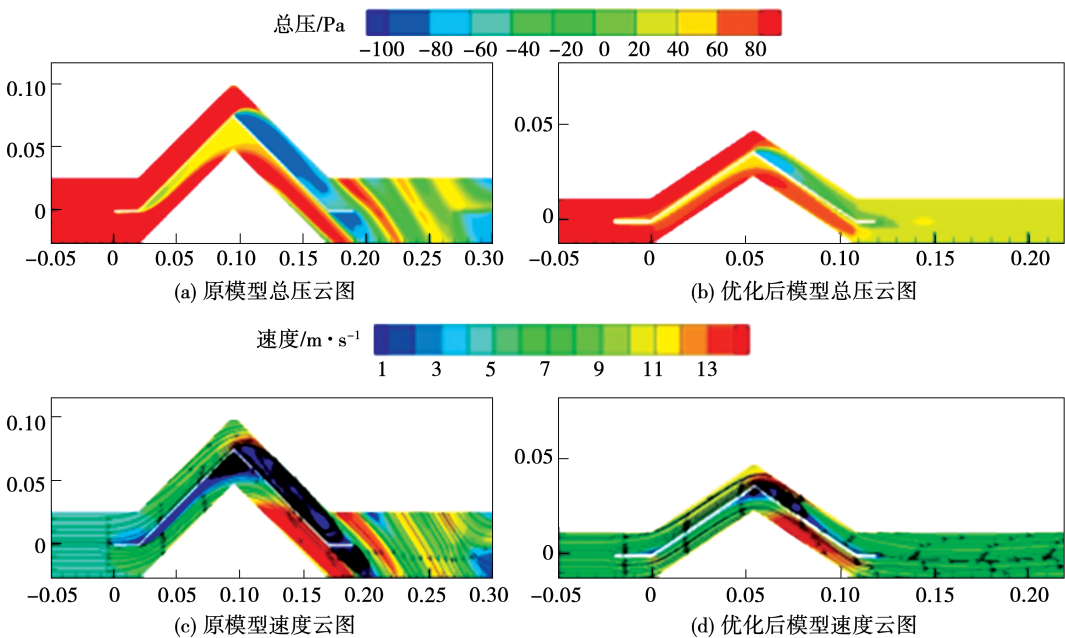


图4 流速7 m/s 时优化前后滤清器流动对比

Fig.4 Comparison of filter performance at flow rate of 7 m/s before and after optimization

由图4(b)、图4(d)可以看出优化后的滤清器有着更大的叶片夹角(叶片的坡度更低),气流容易改角度,从而使气流在叶片上、下坡面流动更平缓。同时可以看出气流只在转折角附近产生小面积二次流,有效的减少了总压损失。优化后的滤清器折角处的二次流在垂直于叶片方向高度也小于流道宽度,改善了原滤清器模型的弊端,优化后滤清器模型的液体粒子更易与叶片表面接触,使过滤效率大幅提升。

4 结 论

采用气-液两相流数值模拟方法并结合试验设计与优化方法对不同流速下的惯性级滤清器几何参数进行了优化,主要结论如下:

(1) 优化后的惯性级滤清器在所有速度方案下实现了更小的总压损失与更高的过滤效率。其中2 m/s的速度方案下,优化后的总压损失相对减少了16.98%,而过滤效率相对提升了37.61%;7 m/s的速度方案下,优化后的总压损失相对减少了16.7%,而过滤效率相对提升了20.83%。

(2) 优化后的滤清器方案性能提升的原因在于:滤清器叶片坡度减小,上坡面与下坡面背风区的分离得到有效控制,同时也保证了液体颗粒与滤清器表面的充分接触,实现了总压损失的减小及过滤效率的提升。

(3) 本文研究结果为惯性级滤清器在实际工程下的应用提供了选用建议:流速越高,应该选用更加

密集、坡度更低(叶片夹角越大)、叶片长度越长的叶片;而低流速应该改用间距更大、叶片长度更短,坡度更大(叶片夹角越小)的惯性级滤清器叶片。

参考文献:

- [1] KIMM M H P, LANGLANDS D. Gas turbine intake filter systems related to offshore platform installations [C]//ASME International Gas Turbine Conference & Exhibit, 1985: V002T07A005.
- [2] GREEN B L, LITSKY W, SLADEK K J. Evaluation of membrane filter methods for enumeration of faecal coliforms from marine water [J]. Marine Environmental Research, 1980, 3(4): 267 - 276.
- [3] MIHALEK E W, SHEN C N. Real-time test techniques for sea-salt aerosol-separator evaluation [J]. Journal of Engineering for Power, 1977, 99(4): 580 - 586.
- [4] ZHAO J, JIN B, ZHONG Z. Study of the separation efficiency of a demister vane with response surface methodology [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 147(1/2): 363 - 369.
- [5] ZAMORA B, KAISER A S. Comparative efficiency evaluations of four types of cooling tower drift eliminator by numerical investigation [J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(6): 1232 - 1245.
- [6] NARIMANI E, SHAHMOSEINI S. Optimization of vane mist eliminators [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(2/3): 188 - 193.
- [7] VENKATESAN G, NKULASEKHARAN N, INIYAN S. Design and selection of curved vane demisters using Taguchi based CFD analysis [J]. Desalination, 2014, 354: 39 - 52.
- [8] VENKATESAN G, NKULASEKHARAN N, MUTHUKUMAR V, et al. Regression analysis of a curved vane demister with Taguchi based optimization [J]. Desalination, 2015, 370: 33 - 43.

(金圣迪 编辑)