

猫耳形气膜孔的参数化设计与组合实验优化

钱小东^{1,2}, 鲍阿美¹, 魏双², 卢宇峰¹, 陈榴¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 杭州中能汽轮动力有限公司, 杭州 310018)

摘要: 孔型是提高气膜冷效的关键途径, 猫耳形气膜孔冷却效果好, 但是构型复杂。基于 Isight 软件, 采用参数化建模优化猫耳形气膜孔。通过敏感性分析减少设计变量并缩小变量的取值范围, 组合运用拉丁超立方方法和均匀设计法构建实验样本, 提高冷效预测代理模型的精度。结果表明: 代理模型的冷效预测值与数值模拟的偏差小于 1.0%。采用多岛遗传算法获得的优化孔的面平均冷效比参考孔提高了 85.7%。采用实验方法测量结果显示, 与参考孔相比, 优化孔的面平均冷效提高了 76%, 横向冷效与中心线冷效与数值计算结果一致。

关键词: 气膜冷却; 代理模型; 参数化建模; 敏感性分析; 组合实验设计

中图分类号: TK 472 文献标志码: A

Parametric design and combined experiment optimization of Nekomimi film hole

QIAN Xiaodong^{1,2}, BAO Amei¹, WEI Shuang², LU Yufeng¹, CHEN Liu¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Hangzhou Chinen Steam Turbine Power Co., Ltd., Hangzhou 310018, China)

Abstract: The hole type is the key way to improve the film cooling effectiveness. Nekomimi film hole has good cooling performance but complicated configuration. The Isight software was used to optimize Nekomimi film hole through parametric modeling. Variable sensitivity was conducted to reduce variable dimensions and potential value ranges. The Latin hypercubic and the uniform design methods were both used to construct design sample space to improve the prediction accuracy of the surrogate model. Results show that the deviation of cooling efficiency between the surrogate model and the simulated computation is within 1.0%. An optimal hole obtained via the multi-island genetic algorithm has significant 85.7% improvement of surface averaged film cooling efficiency over the reference hole. The surface averaged cooling efficiency of the optima hole is increased by 76% compared to the reference hole, and the laterally and the centerline cooling efficiency are consistent with numerical results.

Keywords: film cooling; surrogate model; parametric modeling; sensitivity analysis; combined experimental design

收稿日期: 2022-05-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52006147)

第一作者: 钱小东(1981-), 男, 高级工程师。研究方向: 热能动力工程。E-mail: qxd@chinen.cn

通信作者: 陈榴(1983-), 女, 副教授。研究方向: 燃气透平气动及传热研究。E-mail: chen_liu@usst.edu.cn

提高涡轮入口温度是提升燃气轮机热效率的主要途径。为防止涡轮热端部件过热, 在使用高温材料和热障涂层的基础上, 还需要应用先进的气膜冷却技术^[1]。气膜的覆盖范围与气膜孔出口的射流形态密切相关, 通过优化孔型提高气膜孔下游一定范围内的冷却有效度是气膜冷却技术研究的一个关键问题^[2]。

气膜孔的发展大致经历了早期简单的直圆孔、斜向圆孔、扩散孔(扇形孔或簸箕孔)以及复杂异形孔。Gritsch 等^[3]实验论证了最简单的异形孔(扇形孔)气膜冷却效果明显优于圆柱孔。Bunker^[4]总结了 2005 年之前, 各类孔型的实际效果, 认为扩散的扇形孔是最有实际应用价值的。结合斜向圆柱孔的冷却性能和工艺优势, Han 等^[5]提出了双向射流(double-jet film cooling, DJFC)孔, 它比扇形孔具有更大的覆盖范围。综合扇形孔与 DJFC 孔, Kusterer 等^[6]提出了猫耳(Nekomimi)孔, 实验显示其具有很大的冷却效果提升潜力。

气膜孔的优化多数是基于代理模型^[7-10]完成的。代理模型集合了实验设计和寻优算法的建模方法。例如, Liu 等^[9]在 Kriging 模型中采用拉丁超立方抽样(Latin hypercube sampling, LHS)方法进行样本设计, 采用多岛遗传算法搜索扇形孔最优参数。Zhang 等^[10]应用多保真度模型, 利用 LHS 方法抽取样本, 结合遗传算法和序列规划算法寻找扇形孔最优设计, 计算成本降低 64.5%, 面平均气膜冷却效率比基准孔的提高 39%。在代理模型中, 常见的实验设计方法有 LHS^[11-12]、均匀设计(niform design, UD)^[13]、正交设计^[14]等。选择合适的实验设计方法对优化过程至关重要, 好的实验设计方法可以使样本点分布更加合理, 能够用最少的实验样本量获得最好的试验目标值, 节约时间和成本。基于此, 笔者提出组合使用 LHS 方法和 UD 方法进行实验设计, 以减少样本量, 保证实验设计的“凸”性, 从而提高优化效率和收敛性。

1 物理模型及验证

1.1 物理模型和边界条件

参考文献[9]建立了物理模型并设定了边界条件, 其中物理模型由主流通道、气膜孔通道和供气室组成。边界条件如图 1 所示, D 为气膜孔直

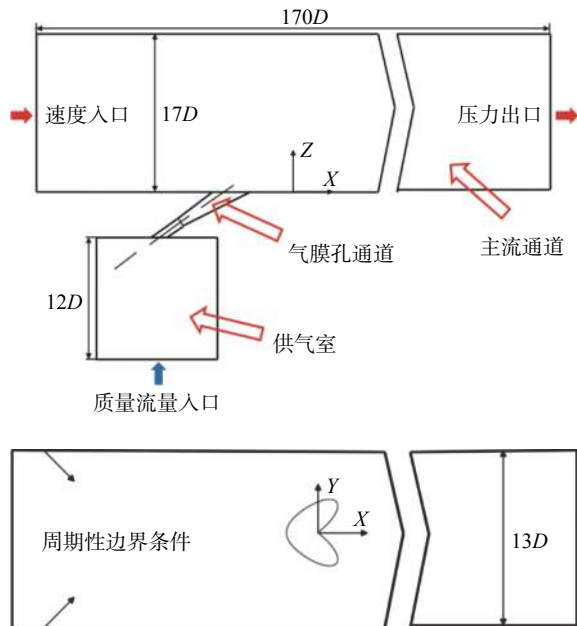


图 1 计算域及边界条件

Fig. 1 Calculation domain and boundary conditions

径。主流通道的出入口分别为压力出口和速度入口, 气膜孔入口为质量流量入口, 主流通道两侧面为周期性边界条件, 其余壁面为绝热无滑移壁面。主流进口速度 $u_{\infty}=20$ m/s, 主流进口温度 $T_{\infty}=314.95$ K, 冷气进口温度 $T_c=283.75$ K, 主流和冷气进口湍流度均为 1%。通过冷气入口的质量流量控制吹风比 M 。

$$M = \frac{\rho_c u_c}{\rho_{\infty} u_{\infty}} = \frac{m_c / A_c}{\rho_c u_{\infty}} \quad (1)$$

式中: ρ_c , m_c , u_c 分别为冷气射流的密度、质量流量、进口速度; A_c 为气膜孔入口圆柱段的横截面积; ρ_{∞} 为主流气体的密度。

优化目标是气膜孔下游沿 $10D$ 范围内的面平均绝热冷却效率 $\bar{\eta}_s$, 定义如下:

$$\bar{\eta}_s = \frac{1}{10D} \int_0^{10D} \int_{-6.5D}^{6.5D} \frac{\eta}{13D} dy dx \quad (2)$$

式中, η 为绝热冷却效率。

$$\eta = \frac{T_{\infty} - T_w}{T_{\infty} - T_c} \quad (3)$$

式中, T_w 为绝热壁面温度。

1.2 网格划分

选择 Pointwise 软件划分网格。在气膜孔出口周围拉伸 20 层结构网格, 第一层网格高度为 0.05 mm, 拉伸比为 1.0。在气膜孔下游的主要计算域 ($0 \sim 40D$) 中使用加密的结构网格进行填充, 其余位置使用非结构网格填充。以与气膜孔接触的主流通

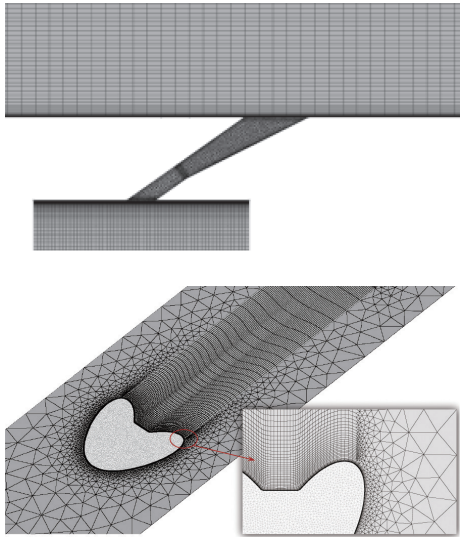


图2 模型网格拓扑结构
Fig.2 Model grid topology

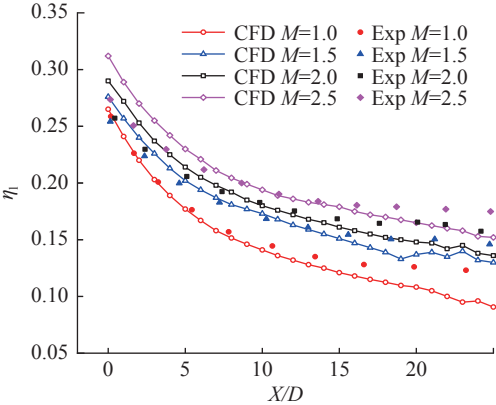


图3 基于 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型验证

Fig.3 Turbulence model verification based on Realizable $k-\varepsilon$

道表面和供气室表面作为第一层进行网格拉伸,边界层加密 20 层网格,第一层网格高度为 0.01 mm,拉伸比为 1.1,近壁面 $Y^+ < 1$,满足气动计算需求。分别使用 150 万、300 万、500 万的网格进行网格无关性验证,近壁面 $Y^+ < 1$ 。计算结果显示,气膜横向平均冷却效率在第一次加密后变化率为 2.3%,第二次加密后变化率小于 0.1%,气膜横向平均冷却效率几乎不受网格量影响,计算采用数量为 300 万的网格,如图 2 所示。

1.3 湍流模型验证

采用文献 [15] 的实验模型和条件,利用 Fluent 软件开展数值算法及湍流模型的验证。图 3 给出了基于 Realizable $k-\varepsilon$ 模型、吹风比 M 为 1.0~2.5 条件下的气膜横向平均冷却效率 $\bar{\eta}_t$ 沿流向的分布。由图 3 可知,在气膜的起始端 $X/D < 5$ 时,计算值 (CFD) 略高于实验值 (Exp); $5 < X/D < 10$ 时,计算值

和实验值基本一致; $10 < X/D < 15$ 时,计算值略低于实验值; $X/D < 15$ 时,计算值与实验值基本吻合。以 $X/D < 15$ 范围的面平均冷却效率来衡量气膜性能的变化,不同吹风比 ($M=1.0, 1.5, 2.0, 2.5$) 下的计算值与实验值的最大偏差分别是 7%, 5%, 8%, 13%, 结果可靠。优化计算时选择 $M=1.5$ 。

2 优化平台

2.1 优化流程

图 4 为优化流程图。首先,在 Unigraph (UG) 软件中利用表达式对猫耳孔参数化建模,确定变量和变量范围;其次,通过参数敏感性分析删选变量和缩小变量范围,利用实验设计方法 (design of experiment, DOE) 组合变量,得到样本参数;最后,在 Isight 平台上搭建代理模型,对 CFD 数值计算结果进行回归分析,利用多岛遗传算法寻优。对预测模型进行数值验证,当预测误差小于允许误差时,进行试验验证。

2.2 参数化建模

基于 UG 提供的二次开发功能实现气膜孔的参数化建模。通过表达式和约束条件可以控制一个零件特征之间的尺寸参数和位置关系,产生相关性。如图 5 所示,本文通过 8 个参数控制猫耳孔 [6] 的孔型。其中: $D=6$ mm; L_m 为气膜孔入口圆柱段长度; L 为气膜孔的总长度, $L=8.5D$; α 为入射角, $\alpha=35^\circ$; β 为扩散角; r_1 为出口短半径; r_2 为出口长半径; Q 为气膜孔前倾距离。

具体设计流程为:第一步,以基准坐标系 ① (见图 5) 为原点,建立气膜孔出口。首先构建式 (5) 的椭圆形规律曲线 s ,随后以原点为圆心,做半径为 R 的圆弧,利用 UG 的约束性功能,使圆弧 R 与规律曲线 s 相切,作猫耳孔前缘,与圆弧 R 中点 A 相距 Q 的位置作猫耳孔后缘。第二步,取圆弧 R 的中点 $A(x, y)$ 建立坐标系 ②,建立气膜孔通气段。设计气膜孔射流角度 α ,圆柱段长度 L_m 以及整个进气段长度 L 。气膜孔的几何参数可以表达为 $y=(L, L_m, \alpha)$,利用样条曲线扫描成型形成约束。

猫耳孔可由以下表达式控制:

$$\begin{aligned} L_m &= mD & (4) \\ \pi &= 360t \\ x_t &= r_1 \cos(\pi t) \end{aligned}$$

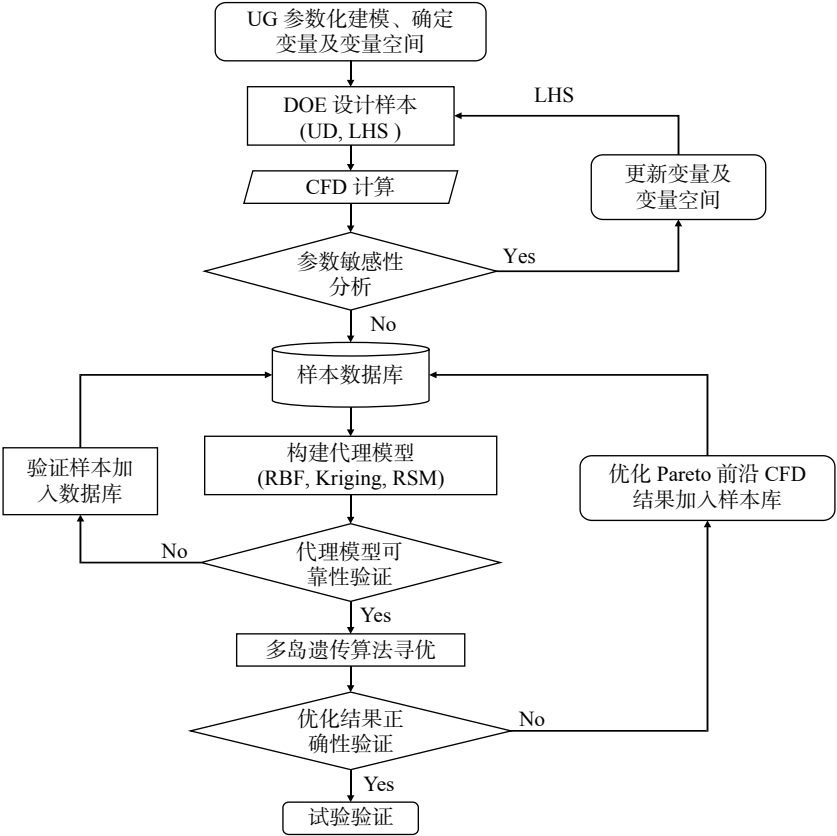


图 4 优化流程图

Fig.4 Optimized flow diagram

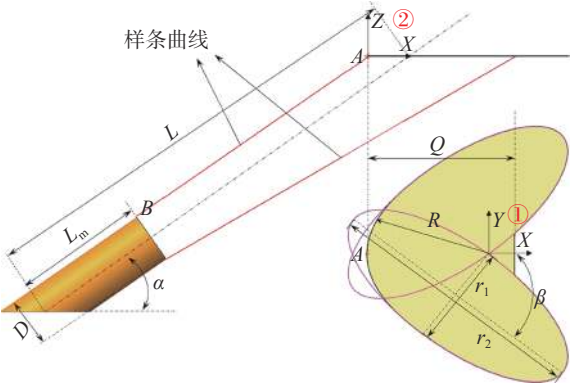


图 5 猫耳孔几何图

Fig.5 Nekomimi geometry

$$y_t = r_2 \sin(tt) \tag{5}$$

$$Q = qD \tag{6}$$

式中： t 为原点与椭圆上一点连线与 X 正半轴的夹角； tt 为椭圆上的点沿原点旋转一周的角度； x_t 为气膜孔出口旋面横向投影； y_t 为气膜孔出口旋面纵向投影； m 为气膜孔入口圆柱段的比例系数； q 为气膜孔前倾距离的比例系数。

2.3 参数敏感性

敏感度体现了变量自身的改变对系统的影响

程度。一般地，敏感度分析方法分为局部敏感度分析和全局敏感度分析。局部敏感度能体现输入空间一点附近的特性，全局敏感度还考虑了参数之间的相互影响，结果更合理可靠。表 1 给出了猫耳孔参数的初步变化范围。

表 1 气膜孔参数范围
Tab.1 Parameter range of film cooling hole

参数	范围
m	[1,6]
$\beta/(^{\circ})$	[30,70]
r_1/mm	[4,7]
r_2/mm	[10,13]
q	[1.5,2]

为了便于比较，对每个变量进行归一化处理，归一化公式如下：

$$N = \frac{N_i - N_{\min}}{N_{\max} - N_{\min}} \tag{7}$$

式中： N 代表归一化处理后的变量值， $N_{\max}$ 和 $N_{\min}$ 分别为变量的上限和下限， N_i 为第 i 个变量的值。

气膜孔各变量对面平均冷却效率的影响如图 6 所示。可以看出：气膜孔前倾距离的比例系数 q 产生了负效应， $\bar{\eta}_s$ 随着 q 的增加而降低；扩散角 β 和出口长半径 r_2 产生积极影响，提高它们的值有利于提高 $\bar{\eta}_s$ ；入口圆柱段的比例系数 m 呈抛物线形，在 $0.4 < X < 0.6$ 范围内， $\bar{\eta}_s$ 存在一个最大值；出口短半径 r_1 对 $\bar{\eta}_s$ 的影响不大，可以排除 r_1 对 $\bar{\eta}_s$ 的影响。

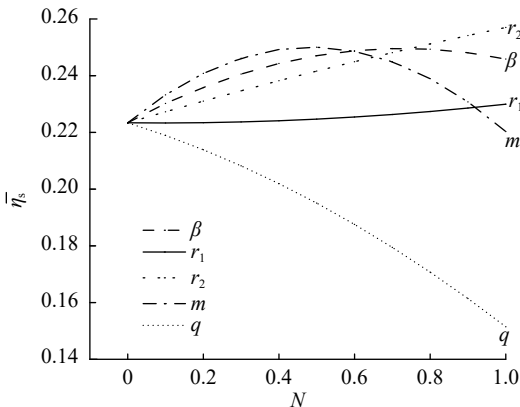


图 6 变量对面平均冷却效率的影响

Fig.6 Effect of variables on surface averaged cooling efficiency

为了进一步分析参数的相互影响，图 7 给出了每个变量对面平均冷却效率的全局灵敏度，体现了各变量相互作用对目标函数的贡献率。可以看出： q 对 $\bar{\eta}_s$ 的贡献率最大，灵敏度最高，为 36.4%；其次是 m 和 r_2 ，分别为 21.4% 和 13.0%。 r_1 的贡献率最小，仅为 0.5%；灵敏度也最小，因此 r_1 对 $\bar{\eta}_s$ 的影响可以忽略不计。这与图 6 的分析结果接近。

2.4 实验设计

基于对参数敏感性的分析，进一步缩小变量的变化范围，排除次要变量 r_1 的影响，对其余 4 个变量进行组合实验设计。LHS 方法具有自行调整样本数量的能力，为了减少样本数量，先利用 LHS 方法对 4 个变量设计 11 个样本量，保证其随机性和独立性，避免了变量之间的无关性。为了保证样本的均匀性和高精度，在这 11 个实验样本的基上利用 UD 方法再建立 11 个实验样本，变量 β , m , q , r_2 的变化范围分别为 $[50^\circ, 70^\circ]$ 、 $[1, 6]$ 、 $[1.75, 2]$ 、 $[10, 13]$ ，具体组合方法见表 2 和表 3。

图 8 是由 LHS 和 UD 组合的实验设计方法 (CED) 的空间分布图。可以看出，在样本数量相同的情况下，CED 方法使样点在空间分布上更均

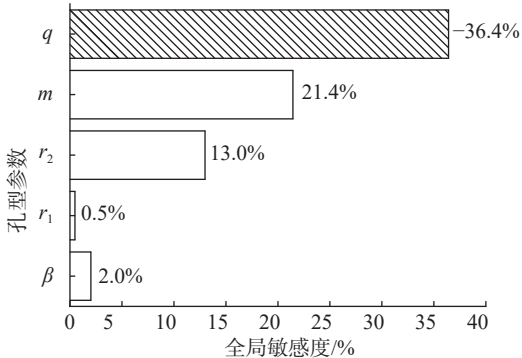


图 7 气膜孔各参数的全局灵敏度

Fig. 7 Global sensitivity of parameters of film cooling hole

表 2 基于 LHS 方法的样本分布

Tab.2 Samples distribution by LHS method

样本	$\beta/(^\circ)$	m	q	r_2/mm	$\bar{\eta}_s$
1	50	2.5	1.750	11.2	0.250 044
2	52	3.0	1.825	12.1	0.260 065
3	54	5.5	1.875	11.5	0.228 071
4	56	1.5	1.800	10.0	0.253 244
5	58	2.0	2	12.4	0.276 436
6	60	3.5	1.925	13.0	0.281 108
7	62	5.0	1.900	12.7	0.267 815
8	64	1.0	1.950	11.8	0.284 732
9	66	4.0	1.775	10.6	0.273 855
10	68	6.0	1.975	10.9	0.192 535
11	70	4.5	1.85	10.3	0.266 202

表 3 基于 UD 方法的样本分布

Tab.3 Samples distribution by UD method

样本	$\beta/(^\circ)$	m	q	r_2/mm	$\bar{\eta}_s$
12	70	6.0	1.875	11.8	0.240 000
13	68	1.5	2.000	12.1	0.293 408
14	66	1.0	1.850	13.0	0.295 555
15	50	2.0	1.800	11.5	0.252 831
16	54	3.5	1.925	11.2	0.258 781
17	56	5.5	1.775	12.4	0.240 089
18	52	2.5	1.750	10.9	0.250 635
19	60	4.0	1.975	10.0	0.250 127
20	64	4.5	1.950	12.7	0.276 105
21	62	3.0	1.900	10.3	0.263 977
22	58	5.0	1.825	10.6	0.247 169

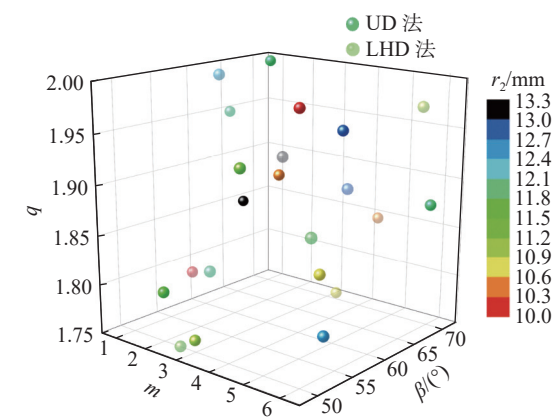


图 8 CED 样本空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of samples based on CED

匀, 填补了 LHS 和 UD 各自在空间上的短缺。

2.5 代理模型

表 4 是基于不同的代理模型预测结果的变量值及优化目标, 优化目标是 $M=1.5$ 时的 $\bar{\eta}_s$ 。其中: e 为 CFD 数值模拟与代理模型计算结果的偏差。选择的代理模型分别是 RBF 模型、Kriging 模型、RSM 模型。可以看出, 基于 Kriging 模型预测的面平均冷却效果最好, 精度最高。因此, 选择 Kriging 模型作为猫耳孔优化的代理模型。

表 4 各代理模型的寻优结果

Tab.4 Optimization results of surrogate models

变量	RBF	Kriging	RSM
$\beta/(^{\circ})$	67.883	69.92	69.461
m	1.805 0	1.138 4	1.092 2
q	1.904	1.978	1.896
r_1	12.781	12.879	12.932
r_2	4.5	4.5	4.5
$\bar{\eta}_{s,CFD}$	0.297 228	0.302 942	0.301 731
$\bar{\eta}_{s,Isight}$	0.300 19	0.300 73	0.305 46
e	1.00%	0.73%	1.24%

3 结果及分析

3.1 实验设计的影响

表 5 是 Kriging 模型下基于 3 种实验设计的优化结果的变量值和 CFD 计算的目标值。其中, 基于 LHS 的预测结果最大, 但其 CFD 数值结果却低于 CED 的数值结果。基于 UD 的 CFD 数值结果最大, 但其与 Kriging 模型预测结果的偏差高达 5.21%, 故将其排除。在偏差尽可能小、目标值尽

可能大的情况下, 选择 CED 的优化结果作为猫耳孔的优化孔。

表 5 不同实验设计方法的计算结果

Tab.5 Results of different experiment design methods

变量	UD	LHD	CED
q	1.850	1.986	1.978
m	2.387 0	1.007 3	1.138 4
r_1/mm	4.5	4.5	4.5
r_2/mm	12.963	12.765	12.879
$\beta/(^{\circ})$	69.839	69.810	69.920
$\bar{\eta}_{s,Isight}$	0.290 80	0.301 54	0.300 73
$\bar{\eta}_{s,CFD}$	0.306 790	0.294 860	0.302 942
e	5.21%	2.26%	0.73%

3.2 优化孔与基准孔的数值比较

表 6 是优化孔与基准孔的变量值和优化目标值 $\bar{\eta}_s$ 。由表中数值可知, 优化孔的 m 和 β 与基准孔的相差很大, 优化孔的面平均冷却效率比基准孔的提高 85.7%。

表 6 基准孔与优化孔计算结果比较

Tab.6 Results comparison between reference and optimized hole

变量	基准孔	优化孔
q	2.000	1.978
m	1.978 0	1.138 4
r_1/mm	4.3	4.5
r_2/mm	12.000	12.879
$\beta/(^{\circ})$	35.00	69.92
$\bar{\eta}_s$	0.163 154	0.302 942

图 9 为气膜孔在 X - Y 平面上的气膜冷却效率分布。相对于基准参考结构, 由于优化之后扩散角变大, 优化孔在展向上具有更好的气膜覆盖能力和冷却效果, 但流向方向的气膜覆盖距离略低于基准孔。由于猫耳孔出口形状呈“V”字形, 即使是优化孔, 在气膜孔出口前缘也是由类似于“V”字形的圆弧组成, 具有将冷气向中心聚拢的作用。可以看出, 在气膜孔下游, 两种气膜孔形在展向上的分布均呈现中央高、两侧低的特征。这一分布特征在优化的猫耳孔气膜上表现得尤为显著, 能够使猫耳孔在保留横向扩散能力的同时, 纵向冷却效果依然很好。

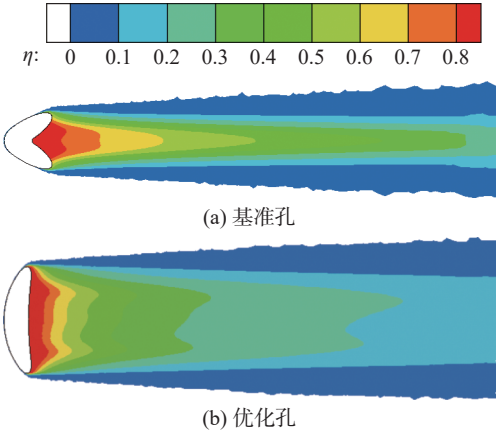


图 9 气膜冷却效率分布云图($M=1.5$)

Fig. 9 Distribution of film cooling efficiency ($M=1.5$)

图 10 为不同截面处的涡量云图和流线图。与基准孔相比,在 $X/D=2$ 的截面上,优化孔的肾型

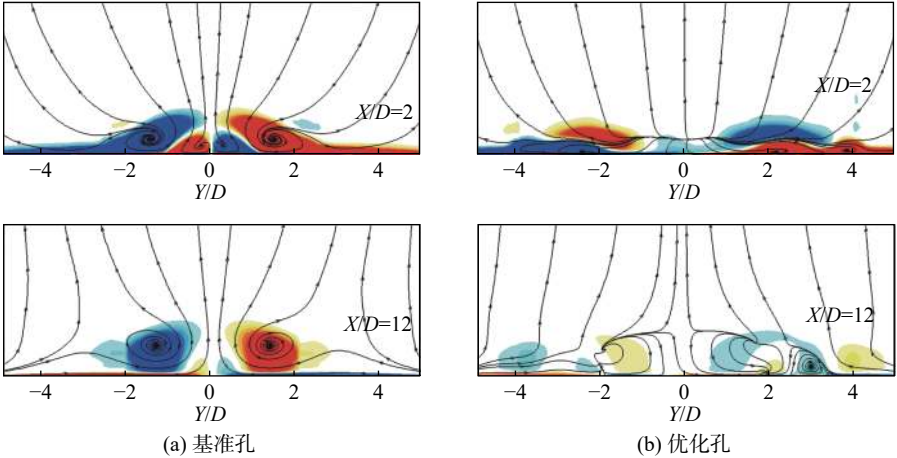


图 10 不同截面处的涡量和流线图($M=1.5$)

Fig.10 Vorticity and streamlines at different corss-sections ($M=1.5$)

3.3 试验验证

为了在真实工况下检验优化后的气膜孔冷却

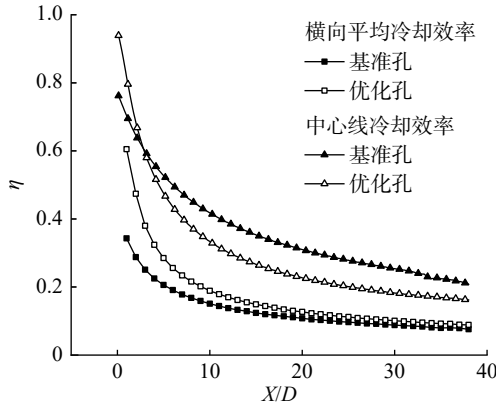


图 11 基准孔与优化孔的横向冷却效率和中心线冷却效率对比
Fig. 11 Comparison of lateral and centerline cooling efficiency between reference and optimized hole

涡与反肾型涡有明显分层现象,迹线旋转中心贴近冷却壁面,气膜的横向覆盖范围大而薄。在 $X/D=12$ 的截面上,基准孔有一对明显的旋转方向相反的涡,而优化孔没有。综上可见,优化孔的反肾型涡与肾型涡能够相互抵消,且冷气与主流的分层有利于减少冷气与主流的混合,使气膜能够更好地贴附于壁面。而基准孔的反肾型涡虽能降低肾型涡的影响,但不能与其相互抵消,在气膜的下游,反肾型涡可能还会不利于气膜冷却。

图 11 为优化孔与基准孔的横向平均冷却效率和中心线冷却效率对比。由图 11 可知,在吹风比 $M=1.5$ 的情况下,优化孔的横向平均冷却效率和中心线冷却效率在出口位置都远高于基准孔的。优化孔的横向平均冷却效率均高于基准孔,但其中心线冷却效率在气膜孔下游处($X/D>5$)低于基准孔。

效果,基于红外测温技术,在吹风比 $M=1.5$ 的工况下,对优化孔进行气膜冷却有效度测量实验,具体实验内容见笔者课题组发表的文献 [16]。本实验孔径的主流进口雷诺数约为 8 000,湍流度为 0.4%,主流温度 $T_{\infty}=315$ K,进口速度 $U_{\infty}=19\sim 20$ m/s,射流温度为 $T_c=292$ K。

图 12 为优化孔的气膜冷却效率数值模拟与实验测量结果的对比。在横向分布上,数值模拟获得的气膜宽度与实验值相近;在流向分布上,数值模拟获得的气膜分布长度要大于实验值,且二者在形态分布上略有不同。实验测量得到的面平均冷却效率为 0.27467,比数值计算结果低 9.3%。

图 13 给出了优化孔的横向平均冷却效率和中心线冷却效率的数值计算结果(CFD)与实验结果(Exp)对比。横向平均冷却效率在出口 $5D$ 范围

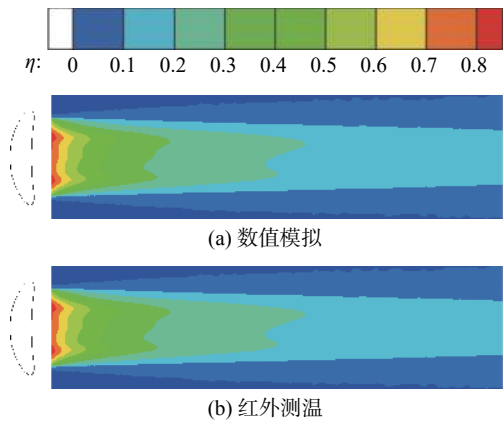


图 12 优化孔气膜冷却效率数值模拟结果与实验结果对比
Fig.12 Comparison of film cooling effectiveness of the optimized hole between numerical and experimental results

内, 其数值计算结果略高于实验结果; 在 $5D\sim 30D$ 的范围内, 其数值计算结果与实验结果接近。中心线冷却效率在 $3D\sim 30D$ 的范围内, 其数值计算结果略低于实验结果。考虑实验环境以及实验中气膜孔与气流存在摩擦阻力、换热等情况, 这个偏差可以忽略不计。从数值结果与实验结果的整体趋势来看, 两者吻合得很好。由实验验证结果可知, 优化孔仿真结果令人满意, 优化结果令人信服。

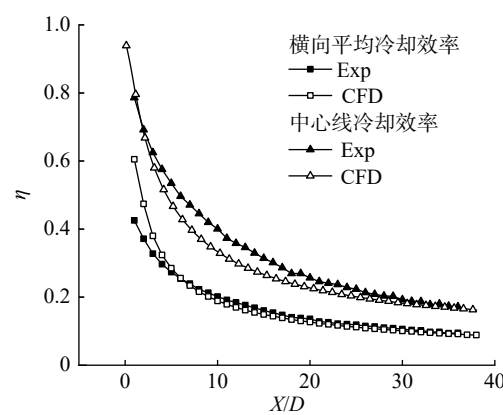


图 13 优化孔的横向平均冷却效率和中心线冷却效率数值结果与实验结果对比
Fig.13 Comparison of laterally averaged and centerline cooling efficiency of the optimized hole between numerical and experimental results

4 结 论

基于 UG/Isight 软件的二次开发功能, 建立了形状复杂的猫耳形气膜孔的参数化建模与优化方法, 获得了性能显著优于参考孔的优化孔型参

数, 并通过实验验证了优化结果。主要结论如下:

a. 变量的敏感性分析不仅说明入口圆柱段长度和扩散角是控制猫耳形气膜孔冷却效率的主要因素, 却而且能够提供各变量的影响规律和缩小变量的最佳取值范围。

b. 组合使用拉丁超立方和均匀设计构建复杂形体的实验样本, 提高了样本对设计空间的覆盖度, 有效提升了基于样本的代理模型的预测精度, 保证了优化方法的“凸”性, 也提高了优化效率与精度, 降低了气膜孔的优化成本。

c. 通过实验验证, 对于气膜孔的面平均冷却效率, 实验值与模拟值的差异约为 9.3%, 但针对气膜孔的横向冷却效率和中心线冷却效率, 实验值与模拟值吻合得很好。优化孔削弱了气膜射流的肾型涡, 与主流形成明显的分层, 使气膜更好地贴附于壁面, 从而显著提高了冷却效率。

参考文献:

[1] 张文武, 郭春海, 张天润, 等. 涡轮叶片先进气膜冷却与相关激光打孔技术进展 [J]. *航空制造技术*, 2016(22): 26–31.

[2] 朱志文, 王宏光. 管内振动壁面射流流场的数值模拟 [J]. *上海理工大学学报*, 2015, 37(2): 110–114.

[3] GRITSCH M, SCHULZ A, WITTIG S. Film-cooling holes with expanded exits: near-hole heat transfer coefficients[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2000, 21(2): 146–155.

[4] BUNKER R S. A review of shaped hole turbine film-cooling technology[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2005, 127(4): 441–453.

[5] HAN C, REN J, JIANG H D. Multi-parameter influence on combined-hole film cooling system[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(15/16): 4232–4240.

[6] KUSTERER K, ELYAS A, BOHN D, et al. The NEKOMIMI cooling technology: cooling holes with ears for high-efficient film cooling[C]//ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition. Vancouver: ASME, 2011: 303–313.

[7] FORRESTER A I J, KEANE A J. Recent advances in surrogate-based optimization[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2009, 45(1/3): 50–79.

[8] BHOSEKAR A, IERAPETRITOU M. Advances in surrogate based modeling, feasibility analysis, and optimization: a review[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2018, 108: 250–267.

DC converter[J]. [Journal of Energy Storage](#), 2020, 28: 101213.

[16] BOUCHHIMA N, SCHNIERLE M, SCHULTE S, et al. Optimal energy management strategy for self-reconfigurable batteries[J]. [Energy](#), 2017, 122: 560–569.

[17] ZHANG Y, HUANG M M, WU T Z, et al. Reconfigurable equilibrium circuit with additional power supply[J]. [International Journal of Low-Carbon Technologies](#), 2020, 15(1): 106–111.

[18] WANG Y, ZHANG C, CHEN Z, et al. A novel active equalization method for lithium-ion batteries in electric vehicles[J]. [Applied Energy](#), 2015, 145: 36–42.

[19] QU F, LUO Q, LIANG H, et al. Systematic overview of active battery equalization structures: mathematical modeling and performance evaluation[J]. [IEEE Transactions on Energy Conversion](#), 2022, 37(3): 1685–

1703.

[20] LI X Y, WANG Z P, ZHANG L. Co-estimation of capacity and state-of-charge for lithium-ion batteries in electric vehicles[J]. [Energy](#), 2019, 174: 33–44.

[21] JIANG F, MENG Z Q, LI H, et al. Consensus-based cell balancing of reconfigurable supercapacitors[J]. [IEEE Transactions on Industry Applications](#), 2020, 56(4): 4146–4154.

[22] QU Z H, WANG J, HULL R A. Cooperative control of dynamical systems with application to autonomous vehicles[J]. [IEEE Transactions on Automatic Control](#), 2008, 53(4): 894–911.

[23] 李志农, 覃章锋. 基于降低极化电压磷酸铁锂电池充电方法研究 [J]. [汽车技术](#), 2017(11): 24–29.

(编辑: 石 瑛)



[上接第 467 页]

[9] LIU C, AMEI B, YI Z, et al. Surrogate-based optimization and experiment validation of a fan-shaped film cooling hole with a large lateral space[J]. [Applied Thermal Engineering](#), 2022, 207: 118145.

[10] ZHANG H, LI Y F, CHEN Z Y, et al. Multi-fidelity model based optimization of shaped film cooling hole and experimental validation[J]. [International Journal of Heat and Mass Transfer](#), 2019, 132: 118–129.

[11] SUN Y B, MENG X Y, LONG T, et al. A fast optimal Latin hypercube design method using an improved translational propagation algorithm[J]. [Engineering Optimization](#), 2020, 52(7): 1244–1260.

[12] 管俊俊, 张祎, 张也平, 等. 基于代理模型与参数敏感性分析的扇形气膜孔优化 [J]. [动力工程学报](#), 2021, 41(9):

736–742, 757.

[13] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表 [M]. 北京: 科学出版社, 1994.

[14] 姜同川. 正交试验设计 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1985.

[15] BONANNI L, FACCHINI B, TARCHI L, et al. Heat transfer performance of fan-shaped film cooling holes: part I —experimental analysis[C]//ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air. Glasgow: ASME, 2010: 1561–1571.

[16] 管俊俊, 陈榴, 戴韧. 离散孔气膜冷却效果的红外热像测量方法 [J]. [热能动力工程](#), 2021, 36(3): 19–25, 54.

(编辑: 董 伟)