

涡轮叶片厚壁带肋通道流动与传热性能的预测和优化

席雷, 高建民, 徐亮, 赵振, 李云龙

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为提高燃气轮机涡轮叶片中弦区带肋通道的传热效果,基于已有实验数据开展了雷诺数为 10 000~60 000、宽高比为 0.25~4.00 和肋角度为 30°~90°的涡轮叶片厚壁带肋通道流动与传热性能的优化研究。利用 Sobol 方法分析了厚壁带肋通道流动及传热性能对雷诺数、宽高比、肋角度的全局敏感性;采用 BP 神经网络对 60 组实验数据进行了多输入、多输出的非线性拟合,得到了可以准确预测厚壁带肋通道平均努塞尔数、摩擦系数和综合热力系数的神经网络模型,并结合遗传算法对厚壁带肋通道在研究范围内的不同工况下进行结构优化。结果表明:厚壁带肋通道的传热性能对进口雷诺数变化的敏感性很高,而对通道宽高比和肋角度变化的敏感性较低;流动性能对通道宽高比变化的敏感性非常高,对肋角度变化的敏感性较低,而对进口雷诺数变化的不敏感。训练得到的 BP 神经网络模型对平均努塞尔数、摩擦系数和综合热力系数的最大预测偏差分别为 3.9%、2.8%和 4.6%。最优宽高比和最优肋角度都随着雷诺数的增大而增大。不同雷诺数时,基于平均努塞尔数优化得到的最优宽高比和肋角度分别在 2.23~2.75 和 41.12°~55.16°;基于综合热力性能优化得到的最优宽高比和肋角度分别在 1.75~2.11 和 56.68°~65.2°。该研究可为未来重型燃气轮机叶片冷却结构设计提供参考。

关键词: 带肋通道;冷却性能;神经网络;遗传算法;预测和优化

中图分类号: TK47 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202112004 **文章编号:** 0253-987X(2021)12-0025-10



OSID 码

Prediction and Optimization on Flow and Heat Transfer Performance of Ribbed Thick-Wall Channel in Turbine Blade

XI Lei, GAO Jianmin, XU Liang, ZHAO Zhen, LI Yunlong

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To improve heat transfer effect of internal cooling channel in the mid-chord region of gas turbine blade, the optimization of flow and heat transfer performance of ribbed thick-wall channel in a turbine blade with Reynolds number ranging from 10 000 to 60 000, aspect ratio ranging from 0.25 to 4.00 and rib angle ranging from 30° to 90° is investigated based on the existing experimental data. Sobol method is used to analyze the global sensitivity of flow and heat transfer performance of the ribbed thick-wall channel to Reynolds number, aspect ratio and rib angle. A BP (back propagation) neural network is used to perform multi-input and multi-output nonlinear fitting for 60 groups of experimental data, and a multi-input and multi-output neural

收稿日期: 2021-07-19。 作者简介: 席雷(1990—),男,助理教授;徐亮(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51876157);陕西省自然科学基金资助项目(2019JM-096);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(xjj2018044)。

网络出版时间: 2021-08-25 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20210825.0916.002.html>

network model is obtained which can accurately predict average Nusselt number, friction factor and comprehensive thermal coefficient of the ribbed thick-wall channel. Then structural parameters of the ribbed thick-wall channel are optimized by using a genetic algorithm under different working conditions. Results show that the heat transfer performance of the ribbed thick-wall channel is highly sensitive to the change of inlet Reynolds number, but is less sensitive to the change of channel aspect ratio and rib angle. The flow performance is highly sensitive to the change of channel aspect ratio, but is less sensitive to the change of rib angle, and insensitive to the change of inlet Reynolds number. The maximum prediction deviations of the trained BP neural network model for average Nusselt number, friction factor and comprehensive thermal coefficient are 3.9%, 2.8% and 4.6% respectively. The optimal values of aspect ratio and rib angle increase with the increase of Reynolds number. At different Reynolds numbers, the optimal aspect ratio and rib angle based on the optimization of average Nusselt number are from 2.23 to 2.75 and 41.12° to 55.16°, respectively, while the optimal aspect ratio and rib angle based on the optimization of comprehensive thermal performance are from 1.75 to 2.11 and 56.68° to 65.2°, respectively. This research may provide reference for the design of blade cooling structure of heavy duty gas turbine in future.

Keywords: ribbed channel; cooling performance; neural network; genetic algorithm; prediction and optimization

高效的叶片冷却技术是提高燃气轮机循环热效率和输出功率的重要手段之一。肋片扰流冷却是燃气轮机涡轮叶片中弦区域最常用的高效冷却技术之一^[1]。Han 发展了不同结构参数下空气冷却带肋通道的流动和传热关联式^[2]。Mohammadi 等研究指出肋顶和肋后区域的当地传热系数对操作和几何不确定性更为敏感^[3]。Dritselis 采用大涡模拟方法对带有方形、圆形和三角形组合肋片的冷却通道内的流动特性进行了详细的研究,并分析了通道内细微流动结构^[4]。Kaewchoothong 等研究了倾斜肋、V 型肋和倒 V 型肋对静止方形通道传热系数的影响,指出 60°V 型肋的传热性能最优,其平均努塞尔数比直肋提高了 30%^[5]。Wang 等对带波纹肋直通通道内冷气的流动和传热特性进行了数值模拟研究,指出优化后的波纹肋的传热性能优于 45°V 型肋^[6-7]。Jang 等实验研究指出凹窝或凸起增强了带肋通道的传热性能^[8]。Moon 等对 16 种不同形状肋片的传热性能进行了研究,指出靴型肋片的传热性能最优^[9]。刘聪等研究了截面形状为三角形的 V 肋和反向 V 肋的传热性能,指出三角形反向 V 肋的传热效果较好^[10]。但是,带肋通道的结构越来越复杂,使得叶片加工困难,制造成本昂贵。

针对空气冷却结构复杂的问题,可以通过对简单带肋通道结构进行优化来解决。目前,许多学者将神经网络和遗传算法应用到冷却通道流动和传热

性能的建模、预测和优化等研究中,指出该方法具有很高的预测效率和寻优能力^[11]。Seo 等采用遗传算法和近似模型对冷却通道中的靴型肋进行了多目标优化^[12]。Kim 等通过数值模拟方法分析了带 V 型肋冷却通道的流动和传热特性,之后基于数值结果采用多项式响应面模型和 NSGA-II(带精英策略的非支配排序遗传算法)对 V 型肋片的结构参数进行了优化^[13]。Darvish 等使用神经网络和遗传算法对冷却通道中的 V 型肋进行多目标优化,获得了良好的结果^[14]。Xi 等采用神经网络和遗传算法相结合对蒸汽冷却厚壁带肋通道传热性能进行了预测和优化^[15]。Haasenritter 等指出遗传算法是一种整体性能良好的可用于涡轮叶片内冷通道肋片结构优化的好方法^[16]。阮有钢等采用 Kriging 模型和多目标遗传算法开展了涡轮叶片 U 型通道内部流动与传热的多目标优化研究^[17]。龚建英等基于代理模型和遗传算法优化得到了 U 型通道的最佳肋片角度、肋片方向和肋片距离^[18]。可见,神经网络结合遗传算法是一种可用于对冷却通道传热性能的建模、预测和寻优的合适的、可靠的方法。

综上,尽管一些学者采用神经网络结合遗传算法对带肋通道开展了优化研究,然而针对涡轮叶片厚壁带肋通道的冷却性能预测和结构参数优化的研究还鲜见。因此本文基于已有实验数据开展了雷诺数为 10 000~60 000、宽高比为 0.25~4 和肋角度

为 $30^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 的涡轮叶片厚壁带肋通道冷却性能研究。利用 Sobol 方法分析了厚壁带肋通道流动及传热性能对雷诺数、宽高比、肋角度的全局敏感性;采用 BP 神经网络对 60 组实验数据进行了多输入、多输出的非线性拟合,得到了可以准确预测厚壁带肋通道摩擦系数、平均努塞尔数和综合热力系数的神经网络模型,并结合遗传算法对厚壁带肋通道在研究范围内的不同工况下进行结构优化。研究结果可为未来重型燃机叶片冷却结构设计提供参考。

1 研究对象

本文研究对象为模化自某涡轮叶片内冷通道的厚壁带肋通道。针对模化的厚壁带肋通道,本课题组曾开展了 10 种典型厚壁带肋通道流动及传热性能的实验测量工作^[19],相关实验平台、测量过程及实验数据分析参见文献^[20]。

1.1 厚壁带肋通道

图 1 给出了厚壁带肋通道的结构示意图,通道的材质为 304 不锈钢(0Cr18Ni9),长度 L 为 1 000 mm,壁面厚度为 3 mm。在通道的两个尺寸较宽的壁面上等间距布置了方形截面的扰流肋片。实验测量了通道宽高比和肋角度对带肋通道流动和传热性能的影响规律,通道宽高比 W/H 变化范围为 0.25~4.00,肋角度 α 变化范围为 $30^{\circ}\sim 90^{\circ}$,肋高比 e/D 恒定为 0.047,肋间距比 P/e 恒定为 10。

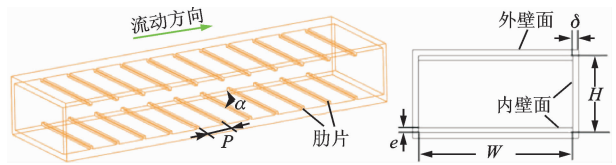


图 1 厚壁带肋通道
Fig. 1 Ribbed thick-wall channel

1.2 实验数据集

实验测量在本课题组所在的涡轮叶片双工质冷却实验室内的单元带肋通道冷却测试平台完成,实验数据的特性分析可参见文献^[20]。

实验工况如下:通道进口空气的压力和温度分别为 0.3 MPa 和 445 K,进口 Re 为 10 000~60 000,壁面热流密度 q 为 5 000 W/m²。实验前采用热线风速仪测量了带肋通道的进口湍流度,在本实验条件下,进口湍流度约为 5%,详见文献^[15]。实验总共测量了 60 组数据,实验数据集见表 1,包括 Re 、 W/H 和 α 等输入参数, $\overline{Nu}$ 、 f 和 G 等输出参数,相关参数的定义如下。

雷诺数 Re

$$Re = \rho u D / \mu \tag{1}$$

式中: ρ 为空气密度; u 为进口空气速度; D 为通道当量直径; μ 为空气动力黏度。

当地努塞尔数 Nu

$$Nu = q D / [(T_w - T_f) \lambda] \tag{2}$$

式中: q 为壁面热流密度; T_w 为壁面温度; T_f 为根据进出口空气温度线性插值得到的参考温度; λ 为空气导热系数。

摩擦系数 f

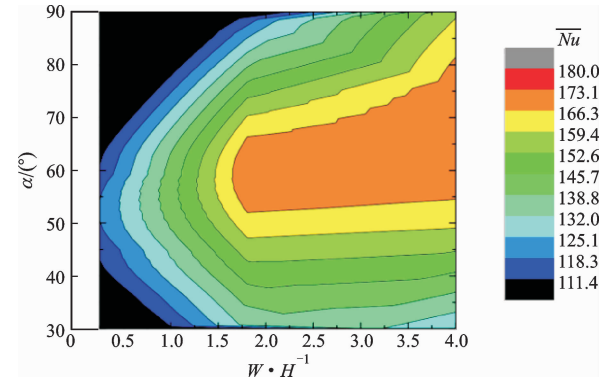
$$f = \Delta p D / (2 \rho L u^2) \tag{3}$$

式中: Δp 为通道进出口的压差。

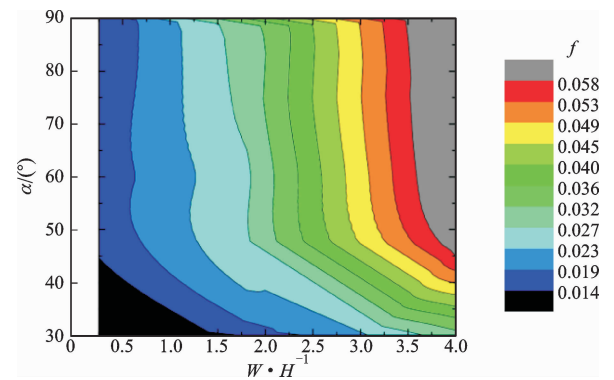
综合热力系数 G

$$G = \overline{Nu} / f^{1/3} \tag{4}$$

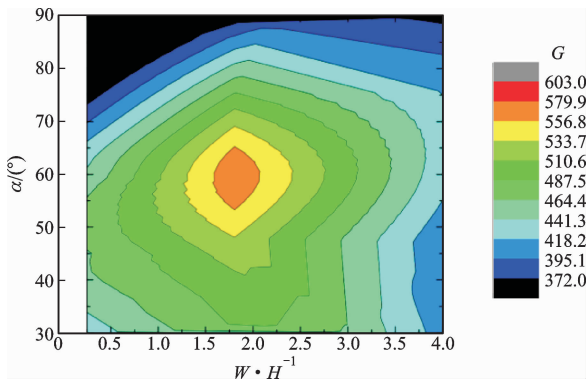
实验测得的 $\overline{Nu}$ 、 f 、 G 随 W/H 和 α 的变化规律如图 2 所示。限于篇幅且由于不同雷诺数时通道宽高比和肋角度对厚壁带肋通道流动和传热性能的影响规律相似,图 2 中只给出了 $Re=30\ 000$ 时实验数据的分布规律。从图 2 可以看出,带肋通道的平均努塞尔数在肋角度较大时随着通道宽高比的增大而逐渐升高,在肋角度较小时随着宽高比的增大而先升高后略微降低,在不同通道宽高比时均随着肋角度的增大而先升高后降低;摩擦系数随着通道宽高



(a) 努塞尔数



(b) 摩擦系数



(c)综合热力系数

图 2 实验测量得到的 $\overline{Nu}$ 、 f 、 G 随 W/H 和 α 的变化规律
($Re=30\ 000$)

Fig. 2 Distribution law of experimentally measured $\overline{Nu}$, f and G versus W/H and α ($Re=30\ 000$)

比和肋角度的增大均表现出逐渐增大的趋势;综合热力系数则随着通道宽高比和肋角度的增大均表现出先增大后减小的分布规律。

2 结果分析与讨论

2.1 参数敏感性分析

敏感性分析是研究输入参数的变化对输出参数的影响程度的方法。通过敏感性分析可以获得各输入参数对输出参数的重要程度,敏感性系数越大,输入参数越重要。本文采用目前文献中应用广泛的基于方差分解的 Sobol 全局敏感性分析方法开展厚壁带肋通道流动及传热性能的敏感性分析。Sobol 方法的原理是通过计算得到每个输入参数对输出参数方差的贡献度,从而确定各输入参数对输出参数的

表 1 实验测量得到的 $\overline{Nu}$ 、 f 和 G

Table 1 Data of $\overline{Nu}$, f and G measured by experiment

序号	Re	$W \cdot H^{-1}$	α	$\overline{Nu}$	f	G	序号	Re	$W \cdot H^{-1}$	α	$\overline{Nu}$	f	G
1	10 406	1.00	60	58.2	0.028 5	190.7	31	10 464	0.25	45	45.2	0.014 2	186.3
2	21 562	1.00	60	98.9	0.028 8	322.7	32	20 469	0.25	45	86.3	0.014 4	355.2
3	29 553	1.00	60	142.9	0.029 1	464.7	33	30 006	0.25	45	112.2	0.014 4	461.4
4	39 951	1.00	60	169.1	0.029 6	547.0	34	39 670	0.25	45	149.2	0.014 8	607.4
5	49 803	1.00	60	202.6	0.027 2	673.9	35	49 484	0.25	45	183.4	0.014 4	754.3
6	59 241	1.00	60	251.6	0.028 2	826.6	36	59 974	0.25	45	217.8	0.013 9	905.4
7	10 452	1.00	45	72.4	0.026 0	244.4	37	10 228	2.00	60	80.0	0.031 8	252.4
8	19 487	1.00	45	113.3	0.024 3	391.0	38	20 021	2.00	60	128.9	0.029 1	419.3
9	30 122	1.00	45	144.7	0.024 4	498.6	39	30 486	2.00	60	179.9	0.026 6	602.7
10	40 361	1.00	45	189.1	0.025 8	640.0	40	40 350	2.00	60	216.9	0.026 7	725.6
11	49 272	1.00	45	219.1	0.026 0	739.9	41	49 131	2.00	60	263.9	0.026 6	883.6
12	60 274	1.00	45	247.3	0.025 5	840.0	42	59 393	2.00	60	310.4	0.026 2	1045.5
13	11 662	4.00	45	64.3	0.058 7	165.4	43	10 117	0.50	60	55.8	0.020 2	204.9
14	21 367	4.00	45	101.4	0.058 6	261.1	44	20 004	0.50	60	99.7	0.022 0	355.4
15	29 904	4.00	45	153.1	0.057 8	396.0	45	30 088	0.50	60	149.2	0.022 0	532.1
16	40 428	4.00	45	197.1	0.057 2	511.5	46	40 410	0.50	60	191.9	0.021 3	692.3
17	50 321	4.00	45	230.4	0.057 2	597.9	47	50 602	0.50	60	233.1	0.020 8	846.9
18	59 372	4.00	45	274.4	0.058 4	707.1	48	59 340	0.50	60	277.8	0.020 2	1019.4
19	9 569	4.00	30	50.5	0.030 3	162.1	49	10 650	0.50	45	56.0	0.019 8	207.2
20	20 110	4.00	30	83.1	0.029 4	269.4	50	20 835	0.50	45	103.6	0.019 9	382.2
21	30 377	4.00	30	126.7	0.029 8	408.4	51	30 506	0.50	45	147.1	0.018 7	553.6
22	40 715	4.00	30	155.8	0.029 6	503.7	52	40 051	0.50	45	190.2	0.019 6	704.8
23	49 986	4.00	30	184.9	0.029 3	599.9	53	49 884	0.50	45	232.7	0.019 6	862.4
24	58 976	4.00	30	210.8	0.028 6	689.0	54	59 901	0.50	45	273.6	0.019 6	1014.2
25	10 708	0.25	60	45.1	0.016 6	176.6	55	9 831	2.00	90	43.0	0.032 4	134.8
26	20 743	0.25	60	79.1	0.015 6	316.5	56	19 960	2.00	90	78.7	0.032 7	246.0
27	30 181	0.25	60	111.5	0.015 9	443.3	57	31 124	2.00	90	118.6	0.032 3	372.5
28	40 304	0.25	60	141.9	0.015 9	564.1	58	40 565	2.00	90	156.7	0.032 9	489.3
29	49 578	0.25	60	174.8	0.015 5	701.2	59	50 574	2.00	90	188.7	0.032 1	593.8
30	59 314	0.25	60	207.6	0.015 8	827.7	60	60 621	2.00	90	221.1	0.033 2	688.1

相对影响程度。因此该方法可以稳健、可靠地计算出高度非线性模型中各输入参数之间相互作用所产生的敏感性^[21]。Sobol 方法可以计算得到各输入参数的一阶、二阶和总敏感性系数,本文关注厚壁带肋通道各输入参数的总体影响程度,因此只进行各输入参数的总敏感性分析,其计算公式为^[22]

$$S_{Ti} = \frac{\sum_{n=1}^{N'} [f(\mathbf{A}_n) - f(\mathbf{A}_{B,n}^i)]^2 / (2N')}{\sigma_y^2} \quad (5)$$

式中: S_{Ti} 为第 i 个输入参数的总敏感性系数; N' 为样本点数; $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 均为 $N' \times D$ 的矩阵,由 Python 编程通过 Sobol 方法生成, D 为输入参数的个数, n 表示矩阵中的第 n 行; σ_y^2 为输出参数的方差。

在文献[20]中拟合得到了厚壁带肋通道壁面平均努塞尔数和摩擦系数有关于宽高比、肋角度和进口雷诺数的经验关联式,具体如下

$$\overline{Nu} = 0.001Re^{0.86} [0.049(W/H)^2 - 0.243(W/H) - 0.61] (0.0073\alpha^2 - 0.82\alpha - 4.19) \quad (6)$$

$$f = 0.0125Re^{-0.012}(W/H)^{0.41}\alpha^{0.21} \quad (7)$$

基于式(6)和(7)开展了厚壁带肋通道的流动与传热性能对通道宽高比、肋角度和进口雷诺数的敏感性分析,结果如图 3 所示。

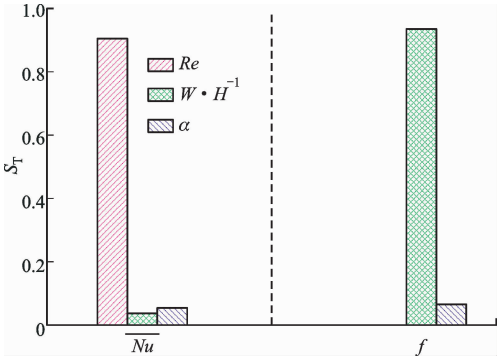


图 3 敏感性系数分布

Fig. 3 Distribution of sensitivity coefficient

从图 3 中可以看出,厚壁带肋通道的壁面平均努塞尔数对进口雷诺数变化的敏感性很高,而对通道宽高比和肋角度的变化的敏感性较低且较为接近。通道摩擦系数对通道宽高比变化的敏感性最高,其次为肋角度,而对进口雷诺数变化的敏感性非常低(为 0.004),这是因为雷诺数增大时通道进出口的压差和通道进口冷气的速度平方同时增大,导致了摩擦系数随雷诺数的变化很小。从图 3 中还可以看出,通道壁面平均努塞尔数对雷诺数的敏感性远高于摩擦系数对雷诺数的敏感性,说明雷诺数的

变化对厚壁带肋通道传热性能的影响远大于对通道流动性能的影响。通道壁面平均努塞尔数对通道宽高比的敏感性明显小于摩擦系数对通道宽高比的敏感性,说明宽高比的变化对厚壁带肋通道传热性能的影响明显小于对通道流动性能的影响。通道壁面平均努塞尔数和摩擦系数对肋角度的敏感性较为接近,说明肋角度的变化对厚壁带肋通道传热和流动性能的影响大致相同。综上,当希望强化厚壁带肋通道的传热性能时,通道宽高比和肋角度这两个参数同样重要;当希望降低厚壁带肋通道的流动损失时,应该重点关注通道的宽高比。

2.2 神经网络模型构建

人工神经网络是一种模仿生物神经网络结构和功能的计算模型,通过调整内部大量节点之间相互连接的关系来处理输入输出的对应关系,被广泛应用于复杂非线性模型的拟合。

在众多神经网络中,BP 神经网络是一种按误差反向传播(BP)算法训练的多层前馈网络^[23],具有很强的非线性拟合能力,且精度高,非常适合处理非线性回归问题。因此,BP 神经网络在各研究领域中得到了广泛的应用。BP 神经网络的非线性回归过程如图 4 所示。本文使用 Python 完成了神经网络的非线性拟合和预测。

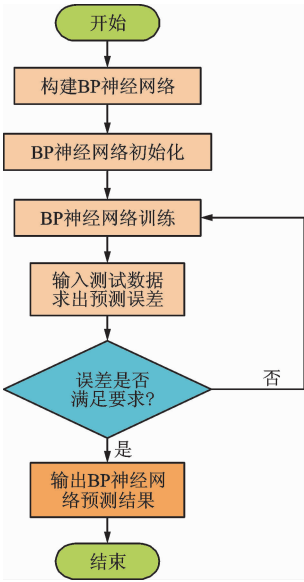


图 4 神经网络拟合和预测流程图

Fig. 4 Flow chart of fitting and prediction of the neural network

为了提高神经网络模型的训练速度和拟合精度,对样本数据进行了归一化处理,采用归一化处理之后的数据进行神经网络模型的训练。由于本文数

据量较小,因此选择最大-最小标准化方法来实现数据的归一化处理。最大-最小标准化的原理是对原始数据进行线性变换,并映射到 $[0,1]$ 区间。这种方法鲁棒性较差,最大值与最小值非常容易受异常点影响,因此只适合传统精确的小数据场景。其计算式如下

$$x' = (x - \min X) / (\max X - \min X) \quad (8)$$

式中: x 表示原始数据; x' 表示归一化之后的数据; X 表示数据样本集。

在训练神经网络模型时,将实验数据样本点划分为两部分,即训练集和测试集,一般情况下,训练集占比75%~90%,测试集占比10%~25%。本文选取10个通道的60组实验数据,其中54组用于网络训练,6组用于预测。BP神经网络由3层神经元组成,即输入层、隐藏层和输出层。本文中有3个输入参数,分别为进口 Re 、通道宽高比 W/H 和肋角度 α ,3个非线性函数的输出参数,即平均努塞尔数、摩擦系数和综合热力系数。因此,本文BP神经网络的结构为3-5-3,即输入层3个节点,隐藏层5个节点,输出层3个节点,具体的神经网络模型如图5所示。本文选择的隐含层节点转移函数为Logsig函数,输出层节点转移函数为Purelin函数;训练函数为Trainlm,学习函数为Learnngdm,最大训练次数设为10 000,训练目标偏差设为0.02,学习速率设为0.1,为防止神经网络模型过拟合,使用L2正则化方法,其他参数均取默认值。

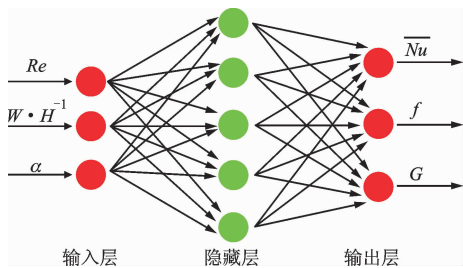


图5 神经网络模型

Fig. 5 Neural network model

图6给出了BP神经网络的预测偏差分布。可以看出,BP神经网络对平均努塞尔数预测的最大偏差为3.9%,对摩擦系数 f 预测的最大偏差为2.8%,对于综合热力系数 G 预测的最大偏差为4.6%。BP神经网络对平均努塞尔数、摩擦系数和综合热力系数预测偏差的平均值均小于2%,表明预测偏差分布较为合理。因此,训练后的BP神经网络模型可以较为准确地预测厚壁带肋通道平均努塞尔数、摩擦系数和综合热力系数,可以用来考察和研究厚

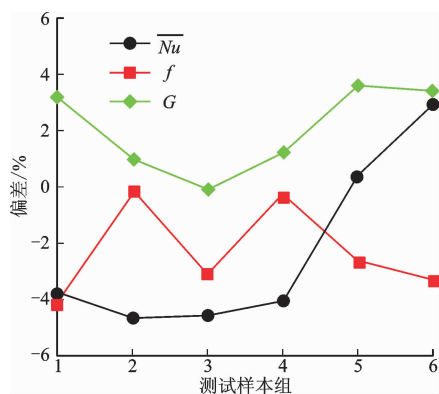


图6 BP神经网络预测偏差

Fig. 6 Prediction deviation of BP neural network

壁带肋通道的流动、传热以及综合热力性能。本文获得的BP神经网络模型可为燃气轮机涡轮叶片内部带肋通道的结构设计提供高效、便利的工具。

2.3 结构参数优化

本节采用遗传算法对厚壁带肋通道的结构参数进行优化研究,并以文献[20]中传热性能和综合热力性能最优的实验通道7为参考通道进行优化结果的对比分析,参考通道的结构参数为: $W/H=2.00$, $\alpha=60^\circ$ 。

遗传算法是基于自然选择和基因遗传机理的全局搜索优化方法,由于其具有很强的全局寻优能力,被广泛地应用于各学科、领域之中,近年来,也被不断地应用于传热领域的优化问题之中^[24]。遗传算法的原理是在每一次迭代中都按照一定的适应度函数并通过遗传中的选择、交叉和变异对个体进行筛选,将适应度高的个体保留并组成新群体,经过多次迭代,新群体“演变”为最佳解决方案。由于是随机搜索过程,因此遗传算法寻优时不易陷入局部最优值,且收敛速度快,具有较强的鲁棒性。遗传算法优化流程图如图7所示。

遗传算法主要包括物种初始化、计算适应度函数、选择、交叉和变异等操作。根据本文数据样本的特点,其参数设置为:种群个体数量为10,交叉概率为0.4,变异概率为0.2,最大迭代次数为1 000。

由文献[20]可知,在不同雷诺数下,通道摩擦系数随着宽高比和肋角度的减小均大致呈现出降低的趋势,即 $W/H=0.25$ 、 $\alpha=30^\circ$ 时通道的摩擦系数最低,故不需要针对通道宽高比和肋角度进行摩擦系数最小化的优化设计。

2.3.1 基于平均努塞尔数的优化 根据文献[20]中对带肋通道传热性能的分析可知,在不同的雷诺数下,均存在着最优的宽高比 W/H 和肋角度 α ,使

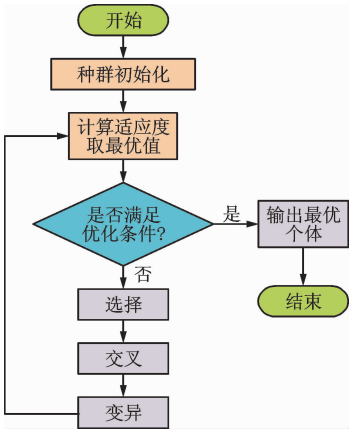


图 7 遗传算法的优化流程

Fig. 7 Optimization process of the genetic algorithm

得带肋通道的传热性能达到最优。因此,需要对 W/H 和 α 进行以平均努塞尔数最大化为目标函数的参数优化。首先在不同雷诺数时基于平均努塞尔数最大化对宽高比和肋角度进行了寻优,建立了如下的单目标优化问题。

最大化
$$f(x)=\overline{Nu}$$

约束条件
$$0.25\leq W/H\leq 4.00$$
$$30^\circ\leq\alpha\leq 90^\circ$$
$$Re=10\,000\sim 60\,000$$

图 8 给出了雷诺数为 30 000 和 60 000 时基于平均努塞尔数最大化的遗传算法寻优的收敛曲线,可以看出,迭代步数为 200 步时已经大致达到了收敛,200 步以后平均努塞尔数的值不再变化。

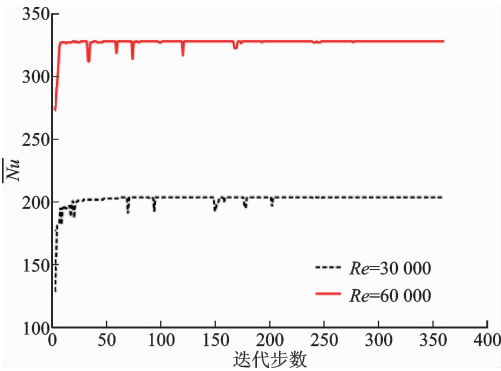


图 8 基于平均努塞尔数优化的遗传算法收敛曲线

Fig. 8 Convergence curves of the genetic algorithm for optimization based on average Nusselt number

图 9 给出了不同雷诺数时基于平均努塞尔数最大化得到的最优宽高比和肋角度、相应的壁面平均努塞尔数以及相同雷诺数下优化后通道的平均努塞尔数值较参考通道的平均努塞尔数值提高的百分比

η_{Nu} 。从图 9 可见,雷诺数为 10 000~60 000 时,基于平均努塞尔数最大化的最优宽高比和肋角度分别在 $2.23\sim 2.75$ 和 $41.12^\circ\sim 55.16^\circ$ 。以实验中传热性能最优的参考通道为参考,不同雷诺数时基于平均努塞尔数最大化的优化通道的传热性能较参考通道提高了 $5.67\%\sim 50.21\%$ 。

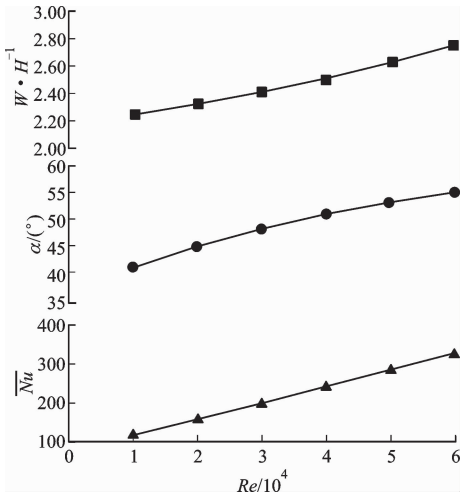


图 9 不同雷诺数时基于平均努塞尔数最大化的优化结果

Fig. 9 Optimization results based on maximizing average Nusselt number at different Reynolds numbers

从图 9 中还可以看出,雷诺数对基于平均努塞尔数最大化得出的带肋通道最优宽高比和肋角度有较大的影响。随着雷诺数的增大,最优宽高比呈指数形式增大,而最优肋角度呈对数形式增大,相应的平均努塞尔数几乎呈线性增大。这一结果的指导意义在于当以强化传热为设计目标时,在通道进口雷诺数较大的情况下,应选择本文得出的最优宽高比 ($2.23\sim 2.75$) 和肋角度 ($41.12^\circ\sim 55.16^\circ$) 范围内相对较大的宽高比和肋角度。此外,在燃气轮机涡轮叶片内部冷却通道的设计中,当冷气的流量或流量范围确定时,可以通过本文训练得到的 BP 神经网络模型,采用遗传算法进行优化设计,获得传热性能最优所对应的宽高比和肋角度。

一般来讲,在燃气轮机涡轮叶片冷却结构的设计中,由于叶型已经确定,而前缘需要设计复杂的冲击、气膜或其复合冷却方式,尾缘需要设置尾缘槽等,因此留给中弦区的空间较小。对于特定的叶片,中弦区带肋通道的宽高比已经大致确定。这就需要得到特定宽高比时的最优肋角度,研究清楚宽高比对最优肋角度的影响规律。通过本文训练得到的 BP 神经网络模型,采用遗传算法对特定 Re 和特定宽高比时的肋角度进行寻优,即可实现此目标。本

小节下文将以雷诺数60 000为例,基于平均努塞尔数最大化对不同宽高比时($W/H=0.25,0.5,1,2,4$)的肋角度进行优化。遗传算法的设置与前文相同。优化的目标函数同样为平均努塞尔数最大化,约束条件改写如下。

约束条件

$$\begin{aligned}30^\circ &\leq \alpha \leq 90^\circ \\ W/H &= 0.25 \sim 4.00 \\ Re &= 60\,000\end{aligned}$$

为更加直观地分析,图10给出了 Re 为60 000时基于平均努塞尔数最大化的带肋通道最优肋角度随宽高比的变化规律。从图10中可以看出,厚壁带肋通道最优的肋角度随着宽高比的增大而增大。这意味着在以强化传热为目标设计燃气轮机涡轮叶片内部冷却通道时,如果选择的通道宽高比较小(在0.25~4范围内),则应选择最优肋角度范围内($48.82^\circ\sim55.13^\circ$)相对较小的肋角度,而宽高比较大时,应选择相对较大的肋角度。

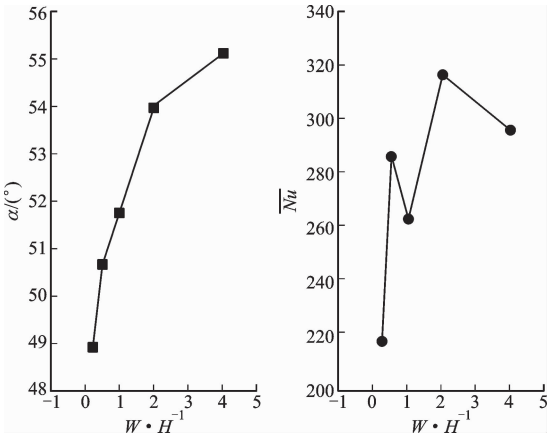


图10 不同宽高比时基于平均努塞尔数最大化的最优肋角度

Fig.10 Optimal rib angle based on maximizing average Nusselt number at different aspect ratios

2.3.2 基于综合热力系数的优化 根据文献[20]中对带肋通道综合热力性能的分析可知,在不同的雷诺数下,也存在着最优的宽高比 W/H 和肋角度 α ,使得带肋通道获得最佳的综合热力性能。因此,还需要对 W/H 和 α 进行以综合热力系数最大化为目标函数的参数优化。

首先在不同雷诺数时基于综合热力系数最大化对宽高比和肋角度进行寻优,约束条件与基于平均努塞尔数最大化的优化相同。表2给出了不同雷诺数时基于综合热力系数最大化的最优宽高比和肋角度、相应的最优综合热力系数,以及相同雷诺数下优

化后通道的综合热力系数值较参考通道的综合热力系数值提高的百分比 η_G 。从表2中可以发现,雷诺数为10 000~60 000时,基于综合热力性能最大化得到的最优宽高比和肋角度分别在1.75~2.11和 $56.68^\circ\sim65.2^\circ$,且最优宽高比和最优肋角度随雷诺数的变化趋势与基于平均努塞尔数最大化的优化结果相同。不同雷诺数时优化后的通道综合热力性能较参考通道提高了12.46%~67.03%。

表2 不同雷诺数时基于综合热力系数最大化的优化结果

Table 2 Optimization results based on G maximization at different Reynolds numbers

Re	$W \cdot H^{-1}$	$\alpha / (^\circ)$	G	$\eta_G / \%$
10 000	1.75	56.68	421.49	67.03
20 000	1.83	57.96	523.33	24.82
30 000	1.89	59.62	713.18	18.33
40 000	1.94	62.23	855.41	17.90
50 000	1.99	63.44	990.93	12.15
60 000	2.11	65.20	1 175.83	12.46

同样地,本小节也以雷诺数为60 000为例,基于综合热力系数最大化对不同宽高比时的肋角度进行优化,约束条件与基于平均努塞尔数最大化的优化相同。表3给出了 Re 为60 000时的优化结果,与基于平均努塞尔数的优化结果相类似,基于综合热力系数优化得到的厚壁带肋通道的最优肋角度也随着宽高比的增大而增大,最优肋角度的范围为 $59.14^\circ\sim66.06^\circ$ 。

表3 不同宽高比时基于 G 最大化的最优肋角度

Table 3 Optimal rib angles based on G maximization at different aspect ratios

Re	$W \cdot H^{-1}$	$\alpha / (^\circ)$	G
60 000	0.25	59.14	762.56
60 000	0.50	60.37	862.24
60 000	1.00	62.14	974.76
60 000	2.00	65.29	1 167.95
60 000	4.00	66.06	780.26

3 结 论

本文基于Sobol方法、BP神经网络和遗传算法进行了厚壁带肋通道流动及传热性能的敏感性分析、预测模型构建以及结构参数优化研究,得到如下主要结论。

(1)厚壁带肋通道的传热性能对进口雷诺数变化的敏感性很高,而对通道宽高比和肋角度变化的敏感性较低且较为接近;流动性能对通道宽高比变化的敏感性非常高,对肋角度变化的敏感性较低,而对进口雷诺数变化不敏感。

(2)训练得到的 BP 神经网络模型对平均努塞尔数预测的最大偏差为 3.9%,对摩擦系数预测的最大偏差为 2.8%,对于综合热力系数预测的最大偏差为 4.6%,可以用来考察和研究厚壁带肋通道的流动、传热以及综合热力性能。

(3)最优宽高比和最优肋角度都随着雷诺数的增大而增大。不同雷诺数时,基于平均努塞尔数优化的最优宽高比和肋角度分别在 $2.23 \sim 2.75$ 和 $41.12^\circ \sim 55.16^\circ$,优化通道的传热性能较参考通道提高了 $5.67\% \sim 50.21\%$ 。

(4)基于综合热力系数优化得到的最优宽高比和肋角度分别在 $1.75 \sim 2.11$ 和 $56.68^\circ \sim 65.2^\circ$,优化后的通道综合热力性能较参考通道提高了 $12.46\% \sim 67.03\%$ 。

参考文献:

- [1] XU Liang, XI Lei, ZHAO Zhen, et al. Numerical prediction of heat loss from a test ribbed rectangular channel using the conjugate calculations [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2018, 96: 98-108.
- [2] HAN J C. Advanced cooling in gas turbines 2016 Max Jakob Memorial Award Paper [J]. Journal of Heat Transfer, 2018, 140(11): 113001.
- [3] MOHAMMADI A, RAISEE M. Effects of operational and geometrical uncertainties on heat transfer and pressure drop of ribbed passages [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 125: 686-701.
- [4] DRITSELIS C D. Large eddy simulation of turbulent channel flow with transverse roughness elements on one wall [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2014, 50: 225-239.
- [5] KAEWCHOTHONG N, MALIWAN K, TAKEISHI K, et al. Effect of inclined ribs on heat transfer coefficient in stationary square channel [J]. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2017, 7(6): 344-350.
- [6] WANG Longfei, WANG Songtao, LIU Wei, et al. Numerical predictions on heat transfer and flow characteristics in a straight channel with different geometric parameters wavy ribs [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 140: 245-265.

- [7] WANG Longfei, WANG Songtao, WEN Fengbo, et al. Effects of continuous wavy ribs on heat transfer and cooling air flow in a square single-pass channel of turbine blade [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 121: 514-533.
- [8] JANG H N, PARK J S, KWAK J S. Experimental study on heat transfer characteristics in a ribbed channel with dimples, semi-spherical protrusions, or oval protrusions [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 131: 734-742.
- [9] MOON M A, PARK M J, KIM K Y. Evaluation of heat transfer performances of various rib shapes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 71: 275-284.
- [10] 刘聪,王钊,张宗卫.带三角形 V 肋和反向 V 肋内冷通道强化换热机理研究 [J]. 推进技术, 2019, 40(9): 2040-2049.
LIU Cong, WANG Zhao, ZHANG Zongwei. Investigation on heat transfer augmentation in a inner-cooling passage with triangular V-shaped and inverse V-shaped ribs [J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(9): 2040-2049.
- [11] JADHAV R S, BALAJI C. Fluid flow and heat transfer characteristics of a vertical channel with detached pin-fin arrays arranged in staggered manner on two opposite endwalls [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2016, 105: 57-74.
- [12] SEO J W, AFZAL A, KIM K Y. Efficient multi-objective optimization of a boot-shaped rib in a cooling channel [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2016, 106: 122-133.
- [13] KIM K Y, LEE Y M. Design optimization of internal cooling passage with V-shaped ribs [J]. Numerical Heat Transfer: Part A Applications, 2007, 51(11): 1103-1118.
- [14] DARVISH D M, SAFIKHANI H, YAHYAABADI M. Multi-objective optimization of asymmetric V-shaped ribs in a cooling channel using CFD, artificial neural networks and genetic algorithms [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2017, 39(6): 2319-2329.
- [15] XI Lei, GAO Jianmin, XU Liang, et al. Study on heat transfer performance of steam-cooled ribbed channel using neural networks and genetic algorithms [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 127: 1110-1123.
- [16] HAASENRITTER A, WEIGAND B. Optimization of the rib structure inside cooling channels with genetic

- algorithms [J]. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 2006, 1(2): 116-134.
- [17] 阮有钢, 刘战胜, 高春, 等. 燃气透平 U 型通道内部流动换热多目标优化 [J]. *工程热物理学报*, 2019, 40(8): 1751-1757.
- RUAN Yougang, LIU Zhansheng, GAO Chun, et al. Multi-objective optimization of flow and heat transfer in U bend of internal cooling channels for gas turbine blade [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2019, 40(8): 1751-1757.
- [18] 龚建英, 高铁瑜, 吴伟烽, 等. 燃机叶片 U 带肋冷却通道的结构优化 [J]. *压缩机技术*, 2019(3): 11-16.
- GONG Jianying, GAO Tieyu, WU Weifeng, et al. Structural optimization in U-shaped ribbed cooling channel for gas turbine [J]. *Compressor Technology*, 2019(3): 11-16.
- [19] LIU Jiazeng, GAO Jianmin, GAO Tieyu, et al. Heat transfer characteristics in steam-cooled rectangular channels with two opposite rib-roughened walls [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 50(1): 104-111.
- [20] 席雷, 徐亮, 高建民, 等. 涡轮叶片厚壁带肋通道冷却性能的实验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(3): 29-36.
- XI Lei, XU Liang, GAO Jianmin, et al. Experimental study on the cooling performance of thick-wall ribbed channels in turbine blade [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(3): 29-36.
- [21] CADINI F, LOMBARDO S S, GIGLIO M. Global reliability sensitivity analysis by Sobol-based dynamic adaptive Kriging importance sampling [J]. *Structural Safety*, 2020, 87: 101998.
- [22] 徐志昊, 李良星, 张拯政. 竖直通道内流动沸腾气泡脱离行为的数据驱动分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(11): 175-184.
- XU Zhihao, LI Liangxing, ZHANG Zhengzheng. Data driven analysis for departure behavior characteristics of flow boiling bubbles in the vertical channel [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(11): 175-184.
- [23] 艾波, 胡军, 张早校, 等. 含缺陷蒸汽发生器管道爆破压力预测的遗传-神经网络算法 [J]. *西安交通大学学报*, 2011, 45(9): 84-89.
- AI Bo, HU Jun, ZHANG Zaoxiao, et al. GA-BP algorithm based on burst pressure prediction of steam generator tubing [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2011, 45(9): 84-89.
- [24] RAHIMI M, BEIGZADEH R, PARVIZI M, et al. GMDH-type neural network modeling and genetic algorithm-based multi-objective optimization of thermal and friction characteristics in heat exchanger tubes with wire-rod bundles [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2016, 52(8): 1585-1593.

(编辑 亢列梅)