

透平叶栅非轴对称端壁优化目标比较

朱能杰,竺晓程,沈 昕,杜朝辉

(上海交通大学 机械与动力工程学院,上海 200240)

摘 要:基于双控制曲线和改进的 Kriging 代理模型建立了非轴对称端壁优化设计系统。以 Durham 叶栅的端壁优化为例,研究不同优化目标对优化结果的影响。研究表明:在通道涡形成段减小横向压力梯度可以有效抑制通道涡强度,进而减小流动损失;在通道涡发展段减小横向压力梯度有助于降低主流区二次流损失,但端区损失明显增大;增加横向压力梯度有助于减小流向涡量强度;从优化成本考虑,总压损失方案具有最佳的收敛性,与角度相关的优化目标则优化成本较高。

关 键 词:透平叶栅;非轴对称端壁;代理模型;优化设计;优化目标

中图分类号:TK262

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2022.01.006

[引用本文格式]朱能杰,竺晓程,沈 昕,等.透平叶栅非轴对称端壁优化目标比较[J].热能动力工程,2022,37(1):41-48. ZHU Neng-jie, ZHU Xiao-cheng, SHEN Xin, et al. Comparison of non-axisymmetric endwall optimization objective for turbine cascade [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(1):41-48.

Comparison of Non-axisymmetric Endwall Optimization Objective for Turbine Cascade

ZHU Neng-jie, ZHU Xiao-cheng, SHEN Xin, DU Zhao-hui

(School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code:200240)

Abstract: A non-axisymmetric endwall optimization design system was established based on dual control curves and modified Kriging surrogate model. Taking the endwall optimization of Durham cascade as an example, the influence of different optimization objectives on the optimization results was studied. The research results show that decreasing the transverse pressure gradient in the passage vortex formation section can effectively suppress the passage vortex intensity and thereby reduce the flow loss. Reducing the transverse pressure gradient in the passage vortex development section is helpful to reduce the secondary flow loss in the mainstream zone, but the end zone loss will increase significantly; Increasing the transverse pressure gradient will help reduce the intensity of the streamwise vorticity. Considering the optimization cost, the total pressure loss scheme has the best convergence, but the optimization objectives related to the angle are more costly.

Key words: turbine cascade, non-axisymmetric endwall, surrogate model, optimization design, optimization objective

收稿日期:2021-03-18; 修订日期:2021-04-15

基金项目:国家重点研发计划资助(2018YFB0604404)

Fund-supported Project: National Key R&D Program of China(2018YFB0604404)

作者简介:朱能杰(1997-),男,江苏南通人,上海交通大学硕士研究生。

通讯作者:竺晓程(1975-),男,浙江宁波人,上海交通大学副教授。

引 言

透平叶栅中由端部二次流引起的损失占总损失的 30% 以上^[1]。目前,透平叶栅的设计向高载荷、高效率的方向发展,二次流损失的比重进一步增大^[2]。ROSE^[3]为解决喷嘴导向叶栅出口处压力分布不均的问题,提出了非轴对称端壁造型方法。该方法通过改变端壁造型,控制流道内压力梯度,以减少二次流损失。其可行性被 Hartland 等人^[4]证明并被广泛应用于透平等叶轮机机械的研究与设计^[5]。Snedden 等人^[6]通过实验验证了非轴对称端壁在工况下改善透平级等熵效率的效果。陶志等人^[7]将非轴对称端壁设计方法应用于大转折角高压透平,研究了非轴对称端壁造型对叶片端壁气热性能的影响。陆泽帆等人^[8]重点研究了动叶轮缘泄漏对采用非轴对称端壁的叶栅流动与冷却特性的影响。

近年来,越来越多的研究者将优化设计方法应用于非轴对称端壁的研究中。Harvey 等人^[9]对比数值模拟与实验结果后指出,CFD 泄漏对损失的预测敏感性不足,因此研究者转而采用可表征泄漏损失的其他性能指标作为优化目标。在早期的研究中 ROSE^[3]采用端部静压分布。MacPherson 等人^[10]选择二次流动能系数,Brennan 等人^[11]使用流向旋度与二次流动能的点积,以分离出只与二次流涡旋结构相关的动能。也有研究者如 McIntosh 等人^[12]和 Miyoshi 等人^[13]基于损失来源的角度,将熵产和涡量拟能或总压损失作为优化目标^[14]。除了以上单一变量,还有研究者将多个变量赋以不同的权系数作为组合变量,如 Hilfer 等人^[15]和 MacPherson 等人^[16]将质量流量和流动偏离角加入优化目标中,以获得综合的优化效果。

现有文献对于各优化目标效果的对比较少,为更准确实现研究者设计的目的,并控制优化成本,优化目标的选择起到了关键的作用。因此,本文选取了几类常用的叶栅性能优化目标,基于自主开发的非轴对称端壁优化系统,重点研究了优化目标设置对于端壁优化的几何结果、流场特点及优化成本的影响,为基于非轴对称端壁的优化设计方法的改进提供了建议与方向。

1 非轴对称端壁优化系统设计

本文自主开发了一种透平叶栅优化系统,由几何参数化模块、优化设计模块与数值计算模块构成。各模块通过 MATLAB 平台实现数据的自动传递,图 1 为系统流程图。采用双控制曲线的参数化方法,基于均匀设计方法确定不同样本的几何参数取值,使用 NUMECA 与 ANSYS CFX 软件分别进行网格划分与数值求解。采用改进的 Kriging 代理模型^[17]建立几何参数与性能指标对应关系并迭代寻优,得到最优设计。

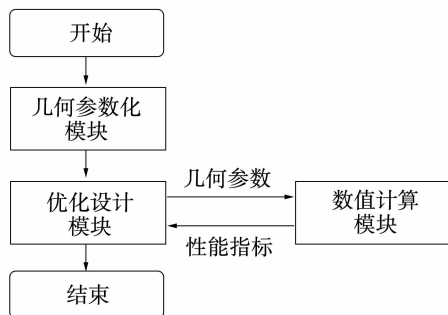


图 1 非轴对称端壁优化设计流程

Fig. 1 Flowchart of optimal design of non-axisymmetric endwall

1.1 几何参数化方法

采用双控制曲线的参数化方法,即在周向和轴向分别定义曲线,将展向变化值叠加在端壁区域上即可得到几何造型,表达式为

$$\delta r(z) = \delta r(x) \cdot \delta r(y) \quad (1)$$

式中: $\delta r(z)$ —端壁展向变化值; $\delta r(x)$, $\delta r(y)$ —轴向与周向曲线的展向变化值。

在轴向综合考虑寻优空间与寻优效率,采用 10 个控制点的三次 B 样条曲线,其与中弧线的走势保持一致,表达式为:

$$\delta r(x) = \sum_{i=0}^{10} N_{i,3}(x) P_i, x \in [0,1] \quad (2)$$

式中: $N_{i,3}(x)$ —三次 B 样条基函数; P_i —各控制点的集合。为保证端壁设计区域与其余部分交接处的平滑过渡,固定前后两个端点不变,故轴向有 6 个几何参数。

在周向考虑流道面积尽量保持不变,采用带相位变化的正弦函数,表达式为:

$\delta r(y) = \sin(2\pi y + \theta)$ (3)

式中： θ —周向几何参数。由公式(3)共得 7 个几何参数,通过设定各参数值得到对应的几何造型。图 2 为端壁造型示意图,设计区域的周向以相邻叶型中弧线为界,轴向以叶片前缘到尾缘的轴向位置为界。

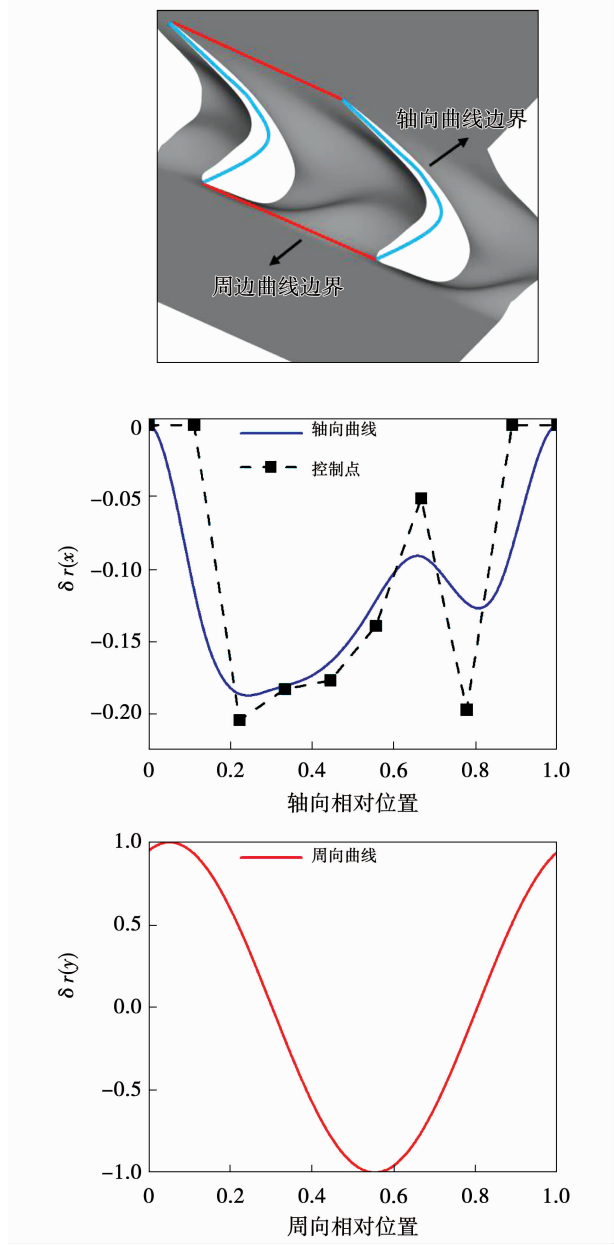


图 2 非轴对称端壁造型示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of non-axisymmetric endwall modelling

1.2 数值计算方法

选取 Durham 叶栅^[9]作为研究对象,表 1 给出了该叶栅设计参数。对单流道进行计算,使用 NU-

MECA 的 Autogrid 模块进行网格划分,采用“O4H”型拓扑结构,并对壁面进行加密,控制 $y^+ < 3$ 。经验证,当网格数大于 70 万时计算结果趋于稳定,考虑优化效率与计算精度的平衡,最终优化网格数取为 97 万,计算网格示意如图 3 所示。使用 ANSYS CFX 软件进行数值计算,由于该型叶栅边界层转捩效应显著,故湍流模型选用 SST $k-\omega$ 模型并在边界层求解中添加了 $\gamma-\theta$ 转捩模型,进出口条件基于文献[18]对该型叶栅实验测量数据进行设定。

表 1 叶栅几何参数

Tab. 1 Cascade geometric parameters

参 数	数 值
入口角/(°)	42.75
出口角/(°)	-68.7
弦长/mm	224
轴向弦长/mm	181
栅距/mm	191
叶片高度/mm	300

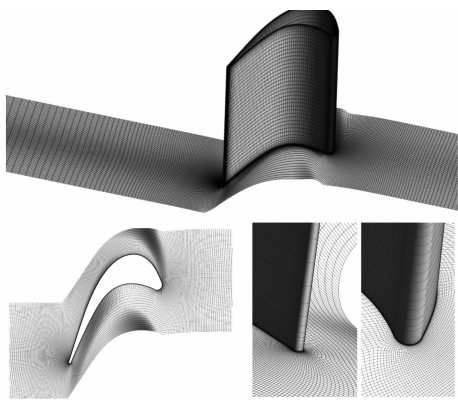


图 3 计算网格示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of computational meshes

图 4 中将数值结果与文献[18]对该型叶栅出口截面处测得的实验结果进行对比,可见数值计算能够较准确捕捉到流动参数沿展向的分布。

1.3 优化算法建立方法

采用改进的自适应 Kriging 代理模型^[17],该模型采用微种群遗传算法取代模式搜索算法对相关参数向量进行寻优,以解决原方法受初值影响过大的问题。基于均匀设计方法建立初始几何参数集,根据几何参数数目,选用 $U_{18}(18^7)$ 均匀设计表。初步

建立几何参数与性能指标的对应关系后,采用期望提高函数^[19] (Expected Improvement, EI)来确认校正点,该方法兼顾了预测最优值与预测标准差,平衡了局部和全局寻优能力。将校正点加入样本集中不断更新模型,得到最优设计方案。

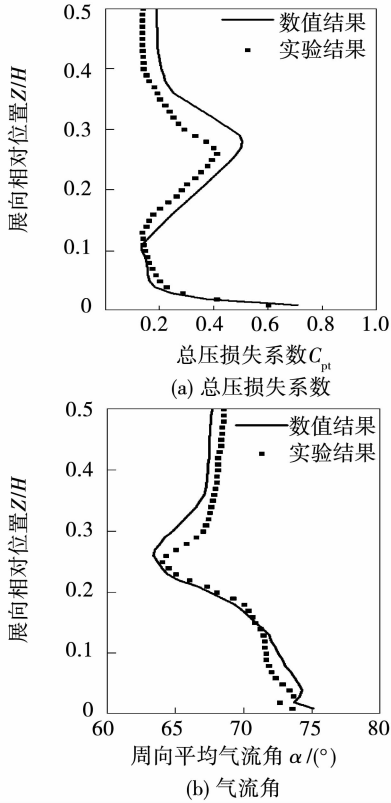


图 4 流动参数沿展向分布对比

Fig.4 Comparison of spanwise distributions of flow parameters

1.4 优化目标设置

为研究优化目标对结果的影响,选取常见的 5 种叶栅流动性能指标作为优化目标。

第 1 种:总压损失系数 C_{pt}

$$C_{pt} = \frac{p_{t,0} - p_{t,1}}{p_{t,0} - p_0} \quad (4)$$

式中: $p_{t,0}$ —叶栅进口总压; p_0 —叶栅进口静压; $p_{t,1}$ —叶栅出口总压。

第 2 种:二次流动能系数 C_{ske}

$$C_{ske} = \frac{V_{sec}^2 + V_{rad}^2}{V_0^2} \quad (5)$$

式中: V_0 —进口速度矢量; V_{rad} —速度矢量的径向分量; V_{sec} —二次流矢量在设计流动平面 $x-y$ 平面

内的分量,其定义式为:

$$V_{sec} = V \sin(\alpha - \alpha_{mid}) \quad (6)$$

式中: α — $x-y$ 平面内实际流动角; α_{mid} —叶栅 50% 叶高处流动角。

第 3 种:流动偏离角 α_{dev}

$$\alpha_{dev} = |\alpha - \alpha_{mid}| \quad (7)$$

式中: α_{dev} —实际流动角 α 与叶栅 50% 叶高流动角 α_{mid} 之间的差值绝对值。

第 4 种:流向涡量拟能系数 C_{Ω}^2

$$C_{\Omega}^2 = \frac{\Omega_s^2 C_{ax}^2}{V_0^2} \quad (8)$$

式中: C_{ax} —轴向弦长; Ω_s —流向涡量,其定义如下。

$$\Omega_s = \Omega_x \cos \alpha_{mid} + \Omega_y \sin \alpha_{mid} \quad (9)$$

式中: Ω_x — x 方向上的涡量; Ω_y — y 方向上的涡量。

第 5 种:复合目标 $C_{pt} + \alpha_{dev}$

$$C_{pt} + \alpha_{dev} = C_{pt}/C_{pt,0} + \alpha_{dev}/\alpha_{dev,0} \quad (10)$$

式中: $C_{pt,0}$ —原型叶栅出口 C_{pt} 的质量平均值; $\alpha_{dev,0}$ —原型叶栅出口 α_{dev} 的质量平均值。

2 结果分析

采用优化设计系统,基于 Durham 叶栅进行 300 个优化步的单侧端壁优化设计。以 C_{pt} , C_{ske} , α_{dev} , C_{Ω}^2 , $C_{pt} + \alpha_{dev}$ 为目标的各方案优化结果分别为 OPT1 ~ OPT5,图 5 为各优化方案端壁几何示意图, $\delta r(z)$ 正值表示上凸。端壁的凹凸改变流线曲率以改变压力分布。可见优化端壁由两个特征区域组成:0 ~ 60% C_{ax} 的区域 1 及 60% ~ 100% C_{ax} 的区域 2。在区域 1 内,各方案较为一致,吸力面侧端壁下凹,压力面侧端壁上凸,横向压力梯度降低。区域 2 内 OPT1 几乎不存在幅值变化;OPT2, OPT3 及 OPT5 的区域 2 特征与区域 1 保持一致;而 OPT4 则恰好相反,其吸力面侧上凸,压力面侧下凹,横向压力梯度升高。

表 2 给出了 117% C_{ax} 叶栅出口截面上,各方案的流动参数对比。由于周向采用正弦函数,各优化方案质量流量变化在 0.015% 以内,流道面积变化很小。以 C_{pt} , C_{ske} 与 α_{dev} 为优化目标的 OPT1, OPT2 与 OPT3 对应的性能指标均获得了改善,证明了本

文优化系统的有效性。但 OPT2 与 OPT3 对应的 C_{pt} 反而恶化。OPT4 对应的 C_{ske} 与 α_{dev} 的优化幅度最小。复合方案 OPT5 的各指标结果介于 OPT1 与 OPT3 之间。

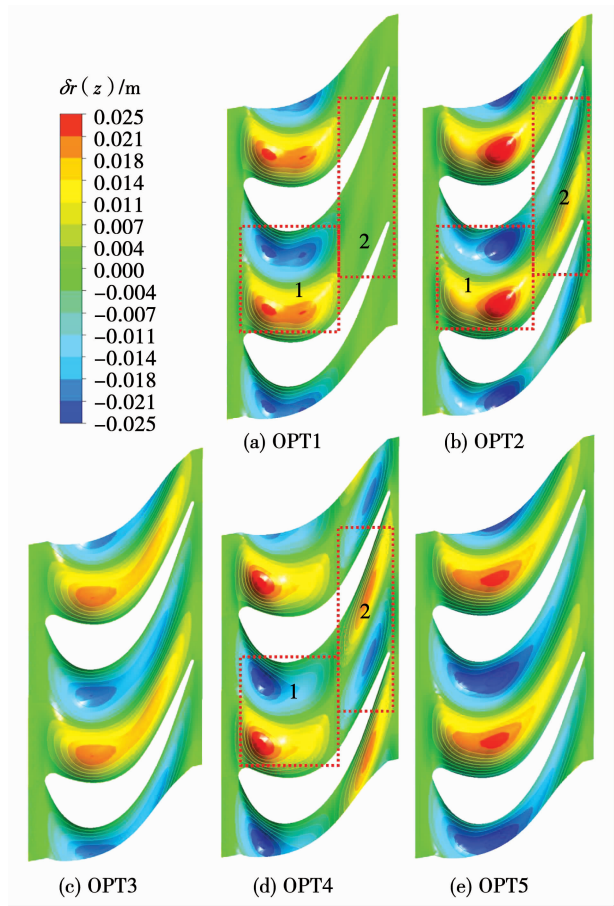


图 5 优化结果几何示意图

Fig. 5 Schematic diagrams of geometry of optimization results

表 2 各方案流动参数对比

方案	$\dot{m}/\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	C_{pt}	C_{ske}	α_{dev}
原型	0.881 38	0.073 9	0.048 7	2.975 8
OPT1	0.881 36	0.071 6	0.036 4	2.480 1
OPT2	0.881 31	0.075 6	0.032 6	2.253 1
OPT3	0.881 24	0.074 1	0.033 6	2.227 1
OPT4	0.881 50	0.073 0	0.040 9	2.792 8
OPT5	0.881 29	0.073 6	0.033 2	2.287 2

图 6 为各方案 117% C_{ax} 截面 α, C_{ske}, C_{pt} 周向平

均值沿展向分布。由图 6(a) 和 6(b) 可知,优化后 5% ~ 50% 叶高内 α 的分布更加均匀, C_{ske} 显著降低,但 5% 叶高以下 α 偏离加大, C_{ske} 略有增大。图 6(c) 中可见原型位于 35% 与 2% 叶高位置有两处损失峰值。优化后第一处峰值明显减小且向端壁处移动,第二处峰值略有上升。除 OPT4 以外,各方案在 5% 叶高处出现了第三处损失峰值。

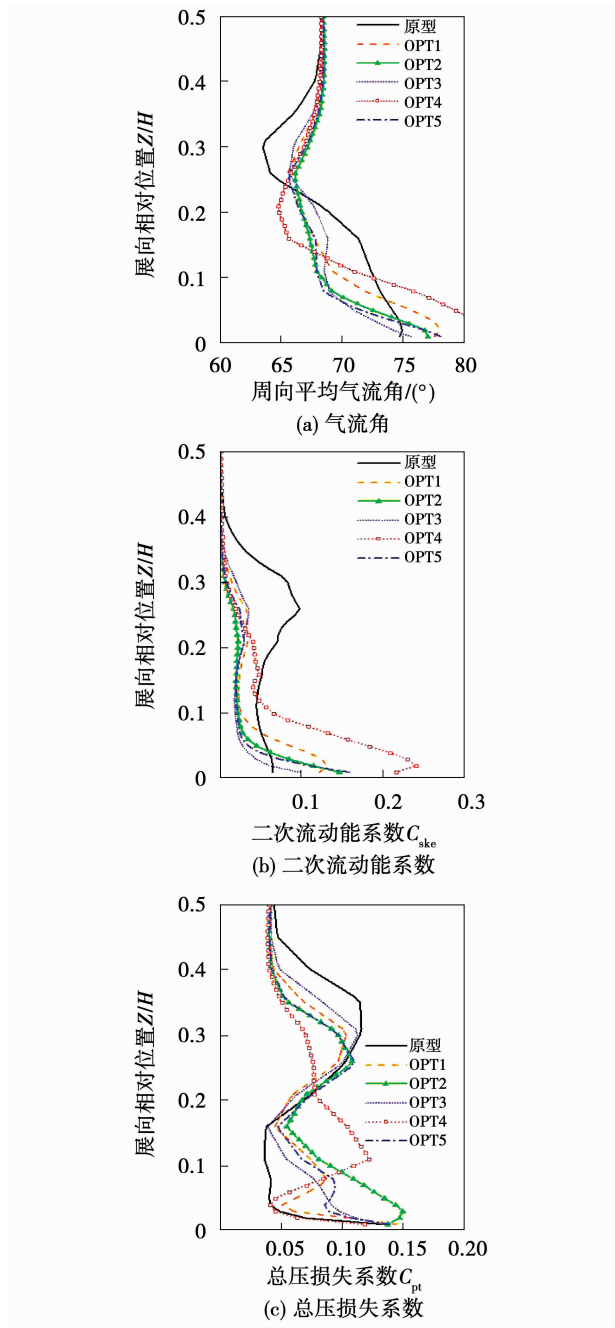


图 6 117% C_{ax} 截面周向平均的流动参数分布
Fig. 6 Circumferential average flow parameter distributions at 117% of C_{ax} section

图 7 给出了 117% C_{ax} 截面上流向涡量系数 C_Ω 的分布云图,其中沿来流方向逆时针旋转涡量为正,左侧为近压力面侧。可见 B 处的通道涡及 A 处的壁面感应涡构成了第一处 C_{pt} 峰值,C 处的角涡对应于第二处 C_{pt} 峰值。优化后 C_Ω 变化趋势与 C_{pt} 一致,通道涡强度显著降低且向端壁移动,角涡损失略有增强。同时,除 OPT4 外其他方案明显可见部分低能流体未进入通道涡内,停留在端壁附近的 D 处,形成第三处 C_{pt} 峰值。

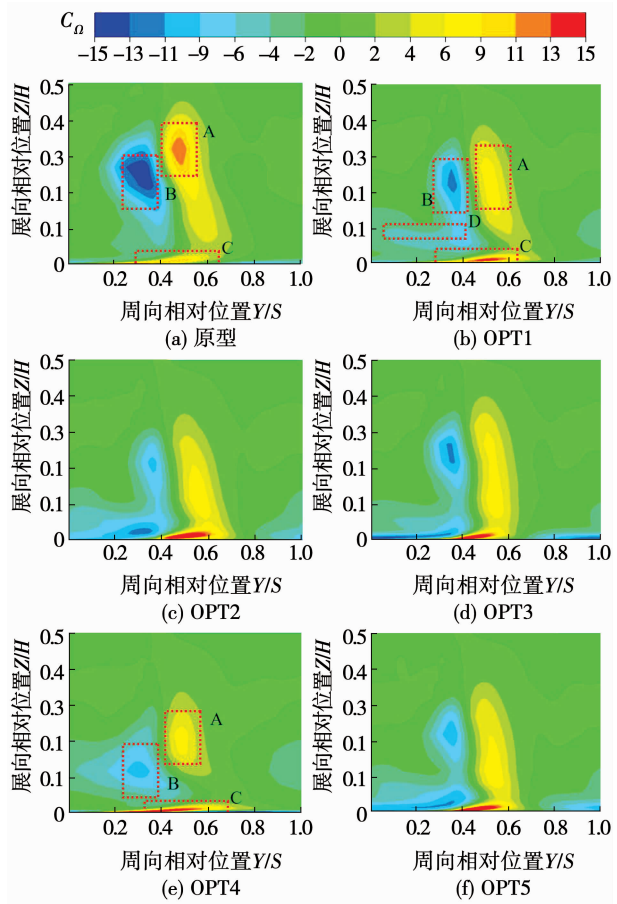


图 7 117% C_{ax} 截面流向涡量系数分布

Fig. 7 Contour maps of streamwise vorticity coefficient at 117% of C_{ax} section

图 8 沿轴向等距给出了 11 个截面上的流向涡量系数云图。由图 8 可知,来流边界层在前缘分离卷起马蹄涡后,分为吸力面分支 HV_{ss} 与压力面分支 HV_{ps} 进入叶栅通道内。在横向压力梯度的驱动下,压力面马蹄涡向吸力面侧迁移,边界层内流体随之移动至吸力面附近最终离开端壁形成通道涡 PV。

可以观察到图 5 中划分的两个区域分别对应了通道涡的形成段与发展段。对于区域 1,各方案均降低了通道内横向压力梯度,压力面马蹄涡发展受阻,通道涡的强度降低。对于区域 2,OPT2,OPT3 及 OPT5 继续减小横向压力梯度,相比未进行端壁变化的 OPT1,更少的低能流体进入通道涡区域,主流区受二次流影响更小,但近端壁区域气动损失显著提升;而 OPT4 在区域 2 的横向压力梯度加强,低能流体的迁移增强,保持了单核的通道涡结构,整体的流向涡量降低。

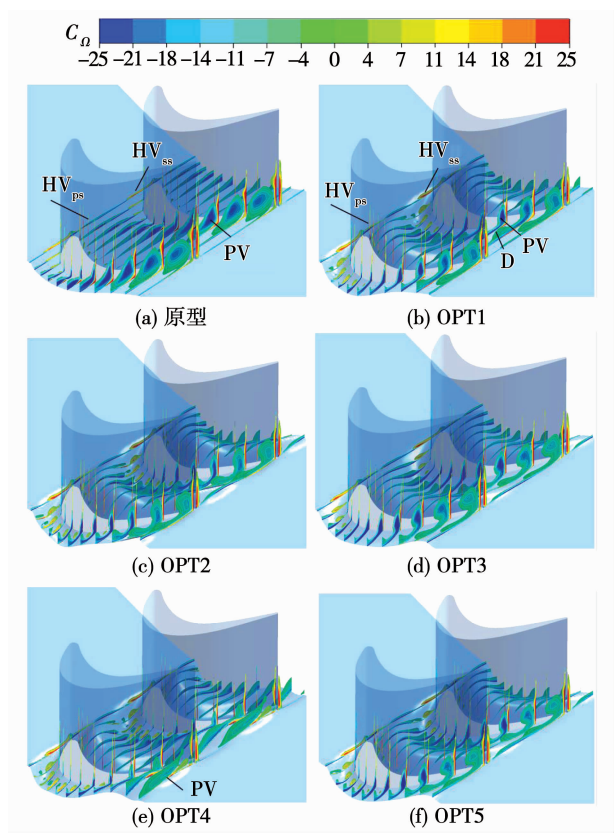


图 8 不同截面流向涡量系数

Fig. 8 Contour maps of streamwise vorticity coefficient at different sections

较好的设计流程应在优化进行的早期优化目标即出现明显的下降,并在后期得到明确的收敛值。表 3 对比了各方案收敛特性,图 9 给出了当前优化步数最优值的变化图。不同优化目标的优化成本差异很大。OPT1 具有最佳的收敛特性,其用最少的优化步数得到了最优解且其 EI 值非常小,证明其基本得到了全局最优设计。而与角度相关的 3 个方案

OPT2,OPT3 及 OPT5 则体现出较差的全局收敛性与较高的优化成本。

表 3 各方案收敛特性

Tab. 3 Convergence characteristics of each scheme

方 案	优化比例	最优步数	EI
OPT1	0.952 3	101	0.000 6
OPT2	0.668 5	208	0.015 3
OPT3	0.735 5	224	0.081 3
OPT4	0.791 3	174	0.001 8
OPT5	0.873 2	213	0.039 7

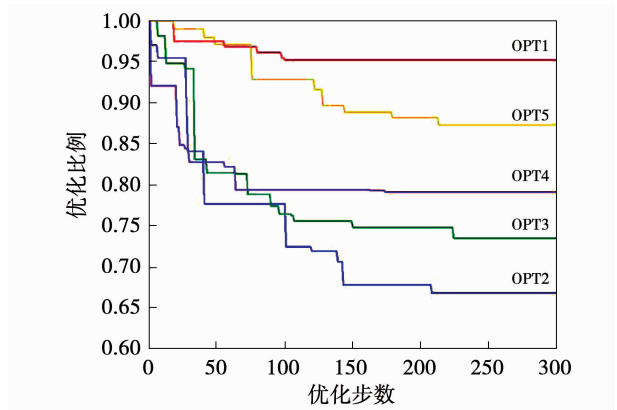


图 9 各方案优化进程

Fig. 9 Optimization process of each scheme

3 结 论

(1) 各优化设计方案均能达到各自优化目的,不同程度上改善了叶栅流动状况。

(2) 在通道涡的形成段,各优化方案减小横向压力梯度,抑制压力面马蹄涡的发展,削弱了通道涡的强度。

(3) 在通道涡的发展段,OPT1 未进行端壁修正,具有最低的总压损失;OPT2,OPT3 及 OPT5 继续减小横向压力梯度,主流区二次流更小,但近端壁的损失更大;OPT4 提升了横向压力梯度,出口流向涡量强度最低。

(4) 基于相同的研究对象,优化空间与优化步数,比较后可知,以 C_{pt} 为优化目标具有最佳的收敛特性,而与角度相关的方案则表现出较高的优化成本。

参考文献:

[1] DENTON J D. Loss mechanisms in turbomachines[J]. Trans Asme Journal of Turbomachinery,1993,115(4).

[2] SMITH G D G,INGRAM G,JAYARAMAN P,et al. Non-axisymmetric turbine end wall profiling [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2001,215(6): 721-734.

[3] ROSE M G. Non-axisymmetric endwall profiling in the HP NGV's of an axial flow gas turbine [C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air. American Society of Mechanical Engineers, 1994, 78835; V001T01A090.

[4] HARTLAND J C,GREGORY-SMITHD G,HARVEY N W,et al. Nonaxisymmetric turbine end wall design,part II:experimental validation[J]. Journal of Turbomachinery, 2000,122(2).

[5] 卢家玲,楚武利,朱俊强,等. 端壁造型在叶轮机械中的应用与发展[J]. 热能动力工程,2009,24(6):687-691.
LU Jia-ling,CHU Wu-li,ZHU Jun-qiang,et al. Application and development of end wall modeling in impeller machinery [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2009,24(6):687-691.

[6] SNEDDEN G C,DUNN D I,INGRAM G. On-and off-design performance of a model rotating turbine with non-axisymmetric endwall contouring and a comparison to cascade data [J]. The Aeronautical Journal,2018,122(1250): 646-665.

[7] 陶志,武晓龙,祝培源,等. 非轴对称端壁造型对叶片端壁气热性能影响的研究[J]. 推进技术,2019,40(8):60-68.
TAO Zhi,WU Xiao-long,ZHU Pei-yuan,et al. Research on effects of nonaxisymmetric endwall contouring on blade endwall aerothermal performance [J]. Journal of Propulsion Technology,2019,40(8):60-68.

[8] 陆泽帆,陈榴,张发生,等. 动叶轮缘泄漏对非轴对称端壁端部损失及冷却的作用[J]. 热能动力工程,2020,35(1):47-53.
LU Ze-fan,CHEN Liu,ZHANG Fa-sheng,et al. Effect of rotor purge flow on non-axisymmetric endwall aerodynamic losses and cooling effectiveness [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2020,35(1): 47-53.

[9] HARVEY N W,ROSE M G,TAYLORM D,et al. Nonaxisymmetric turbine end wall design, part I: three-dimensional linear design system[J]. J. Turbomach. ,2000,122(2):278-285.

[10] MACPHERSON R,INGRAM G. Endwall profile design for the Durham cascade using genetic algorithms [C]//Seventh South African Conference on Computational and Applied Mechanics, SACAM10 Pretoria,2010.

- [11] BRENNAN G, HARVEY N W, ROSE M G, et al. Improving the efficiency of the Trent 500 HP turbine using non-axisymmetric end walls, part I: turbine design [C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2001, 78507: V001T03A066.
- [12] MCINTOSH J, MACPHERSON R, INGRAM G, et al. Profiled endwall design using genetic algorithms with different objective functions [C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air, 2011, 54679: 2393–2405.
- [13] MIYOSHI I, HIGUCHI S, KISHIBE T. Improving the performance of a high pressure gas turbine stage using a profiled endwall [C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2013, 55225: V06AT36A027.
- [14] 唐慧敏, 刘帅强, 罗华玲. 涡轮平面叶栅非轴对称端壁优化设计[J]. 航空动力学报, 2015, 30(3): 707–713.
TANG Hui-min, LIU Shuai-qiang, LUO Hua-ling. Optimal design of profiled endwall for turbine cascade [J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(3): 707–713.
- [15] HILFER M, INGRAM G, HOGG S. Endwall profiling with tip clearance flows [C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2012, 44748: 1099–1108.
- [16] MACPHERSON R, INGRAM G. Endwall profile design for the Durham cascade using genetic algorithms [C]//Seventh South African Conference on Computational and Applied Mechanics, SACAM10 Pretoria, 2010.
- [17] 王红涛, 竺晓程, 杜朝辉. 基于 Kriging 代理模型的自适应序贯优化方法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(26): 193–195.
WANG Hong-tao, ZHU Xiao-cheng, DU Zhao-hui. Adaptive sequential optimization method based on Kriging surrogate model [J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(26): 193–195.
- [18] LIU H, HU C, SHEN X, et al. The aerodynamic optimization design of turbine cascade nonaxisymmetric endwall and the midgap influence assessment [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2018, 232(15): 2760–2774.
- [19] 高铁梅. 计量经济分析方法与建模: EVIEWS 应用及实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
GAO Tie-mei. Econometric analysis methods and modeling: eviews applications and examples [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.

(姜雪梅 编辑)

(上接第 40 页)

- [15] 樊羊羊, 何平, 张众志. 基于粒子群算法的二次再热机组过热度利用研究[J]. 能源研究与利用, 2018(1): 24–27, 40.
FAN Yang-yang, HE Ping, ZHANG Zhong-zhi. Research on the utilization of secondary reheat unit superheat based on particle swarm optimization [J]. Energy Research & Utilization, 2018: 24–27, 40.
- [16] 阚伟民, 宋景慧, 周璐瑶, 等. 超超临界机组采用 MC 系统的变工况性能研究[J]. 热力发电, 2014(7): 41–44.
KAN Wei-min, SONG Jing-hui, ZHOU Lu-yao, et al. Off-design performance of an ultra-supercritical power unit applying MC system [J]. Thermal Power Generation, 2014(7): 41–44.
- [17] 朱朝阳. BEST 热力系统焓升分配和再热蒸汽压力优化[J]. 热力发电, 2017(4): 88–92.
ZHU Chao-yang. Enthalpy rise distribution and optimization of reheat steam pressure for BEST system [J]. Thermal Power Generation, 2017(4): 88–92.
- [18] 高昊天, 范浩杰, 董建聪, 等. 超超临界二次再热机组的发展[J]. 锅炉技术, 2014(4): 1–3, 33.
GAO Hao-tian, FAN Hao-jie, DONG Jian-cong, et al. Development of ultra-supercritical unit with double reheat cycle, 2014(4): 1–3, 33.
- [19] 赵永明. 1 350 MW 二次再热超超临界双轴机组热力系统设计研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
ZHAO Yong-ming. Design research of the thermal system of a 1 350 MW double repeat ultra-supercritical cross-compound unit [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [20] 邓攀, 王亚军. BEST 技术用于超超临界二次再热机组的可行性分析[J]. 中国电力, 2018(7): 84–89.
DENG Pan, WANG Ya-jun. Feasibility analysis on BEST technology for ultra-supercritical units with double-reheat cycle [J]. Electric Power, 2018(7): 84–89.

(丛敏 编辑)