

DOI: 10.7652/xjtuxb201901013

叶栅叶型正反设计的伴随优化方法

朱玉杰, 琚亚平, 张楚华

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对基于流场 Navier-Stokes 方程求解的叶栅叶型正反问题设计优化中, 计算量随设计变量数目急剧增加的问题, 采用伴随方法建立了集叶片几何参数化、网格生成、流场求解、伴随场求解与优化求解于一体的优化求解方法。针对反问题设计中目标控制参数分布难以给定的问题, 通过分析叶栅叶型正问题优化求解结果, 给出了反问题优化求解所需的较优目标压力分布。利用自主程序完成了以减弱或消除流动分离、提高叶栅气动性能为目的的叶栅叶型正、反问题自动优化求解, 优化后的叶型叶栅总压损失系数分别降低了 5.69%、4.50%。研究表明, 叶栅叶型吸力面曲率的减小、叶片前加载和中后部逆压梯度的减小, 可有效抑制叶片尾缘附近的流动分离。该研究工作对发展高效宽工况叶栅叶型设计技术具有一定的参考价值。

关键词: 叶栅叶型; 伴随方法; 正问题; 反问题; 优化

中图分类号: V2313 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)01-0100-06

Adjoint Optimization for Direct and Inverse Design of Cascade Blade Profiles

ZHU Yujie, JU Yaping, ZHANG Chuhua

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To overcome the problem that the calculation cost drastically increases with the design variable number in Navier-Stokes equations based design optimization for direct and inverse design of cascade blade profiles, an optimization system, including blade geometry parameterization, grid generation, flow solving, adjoint field solving and optimization, is established by means of the adjoint method. In view of the problem that the target control parameter distribution in the design of inverse problem is difficult to be defined, the target pressure distribution of the present inverse design is given by analyzing the optimization result of the direct design. An in-house code is used to solve both direct and inverse problems of the cascade blade profile design for the purposes of reducing or eliminating the flow separation and improving the aerodynamic performance. After optimization, the total pressure loss coefficients of the cascades for the direct and inverse problems are reduced by 5.69% and 4.50%, respectively. The results show that the curvature of the blade suction surface profile is reduced, the blade is front-loaded and the pressure gradient after the blade middle chord is reduced, which effectively inhibits the flow separation near the blade trailing edge. This work provides a reference for the design of cascade blade profiles with high efficiency.

Keywords: cascade blade profile; adjoint method; direct problem; inverse problem; optimization

提高压气机叶栅气动性能、扩大其稳定高效运行范围,始终是流体机械及工程、空气动力学等学科,以及风机、航空等工业领域的关注重点。发展先进的叶栅叶型设计优化方法是其重要基础,一般而言,叶栅叶型优化设计可以分为正问题设计和反问题设计两大类^[1]。

正问题优化设计方法是预先给定叶片几何尺寸和来流条件,根据流场分析或性能试验结果修正原始几何尺寸,直到获得性能最优的叶型几何,这种方法可以直接得到对应性能的叶型,但一般耗时较大。尽管近似模型和随机性优化方法的发展极大提高了正问题优化求解的效率^[2-4],但其大多局限于处理维数较低的压气机叶栅气动优化问题。当维数较高时,所需计算成本会急剧增大,面临“维数灾难”问题^[5]。而因为伴随变量的引入,基于最优控制理论的伴随方法,具有计算量与设计变量数目基本无关的优点^[6-10],为压气机叶栅高维气动的正问题优化设计提供了新的有效途径。

反问题优化设计通过预先给定叶片表面马赫数或者压力的分布规律等气动控制参数,定制出满足特定气动需求的先进叶型。反问题优化求解可以实现叶栅叶型精细化设计,精确控制叶栅内部和叶片表面气动参数分布。通常的反问题设计是采用虚位移概念将目标控制参数与边界条件联系起来修改叶型^[11-14],这种方法的边界更新方式一般比较复杂,且易因更新过程中的过修改引起计算的不稳定。相比而言,通过引入伴随变量将反问题设计转化成优化问题的伴随方法,因为设计变量的更新与目标函数的梯度方向相关而使得计算收敛更加稳定。然而,由于目标气动参数的给定往往与设计者的经验相关,现有研究中,关于目标气动参数的给定形式仍较为模糊,没有简单的规律可循^[15],这从一定程度上限制了反问题的优化求解方法在流体机械设计中的应用发展。

因此,本文基于连续型伴随方法理论,分别建立了集叶片几何参数化、网格生成、流场求解、伴随场求解与优化求解于一体的叶栅叶型正、反问题设计优化求解方法。基于对叶栅正问题优化求解所得叶片表面压力分布的分析,给出在更大进口气流角情况下的叶栅反问题优化求解所需目标压力分布,旨在对叶栅内部流动分离进行进一步控制,进而提高叶栅气动性能。

1 流动方程及数值方法

在二维笛卡尔坐标系下,非定常可压缩 Navier-

Stokes 方程可写成如下形式

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial x_i} - \frac{\partial \mathbf{f}_{vi}}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

式中: $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{f}_i$ 、 $\mathbf{f}_{vi}$ 分别为守恒变量、对流通量、黏性通量; x_i 为笛卡尔坐标分量, $i=1,2,t$ 为时间。为使方程组封闭,采用 S-A 方程湍流模型。数值模拟通过已验证有效的自编程序^[7]来实现,其中时间项采用五步 Runge-Kutta 法离散,对流项采用二阶中心格式结合人工黏性方法离散,黏性项采用二阶中心格式离散,同时采用多重网格、当地时间步长和隐式残差光滑技术加速收敛。

2 正问题设计伴随方程

根据伴随方程推导过程及最终形式的不同,伴随方法分为离散型伴随方法和连续型伴随方法。考虑到连续型伴随方法具有物理意义明确、表达形式简洁直观等特点^[16],本文基于该方法,建立与平面叶栅叶型正问题和反问题设计优化目标相对应的伴随方程及其边界条件。

在平面叶栅叶型正问题优化求解中,以出口总压损失最小作为优化目标,即

$$\min F = \frac{p_0 - (\Delta S)^{-1} \int_{s_{out}} p_t ds}{p_0} \quad (2)$$

式中: p_0 为给定进口总压; p_t 为总压; ΔS 为叶栅出口面积; ds 为面积微元。在优化循环中,忽略湍流黏性系数的改变。引入伴随变量 $\boldsymbol{\psi} = \{\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_t\}^T$,在流动区域内各点计算其与流动方程变分的内积,将结果代入目标函数在设计变量发生微小改变时的变分表达式,可得

$$\delta F = \frac{\delta \Delta S}{p_0 \Delta S^2} \int_{s_{out}} p_t ds - \frac{1}{p_0 \Delta S} \int_{s_{out}} \delta p_t ds - \frac{1}{p_0 \Delta S} \int_{s_{out}} p_t \delta ds + \int_D \boldsymbol{\psi}^T \delta \left(\frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial x_i} - \frac{\partial \mathbf{f}_{vi}}{\partial x_i} \right) dv \quad (3)$$

式中: D 为计算区域; dv 为体积微元。为将式(3)中流动变量变分有关项和设计变量变分有关项分离,引入流动变量空间导数的变分关系式^[7],并结合高斯积分公式,式(3)中右端第4项转换为

$$\begin{aligned} \int_D \boldsymbol{\psi}^T \delta \left(\frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial x_i} - \frac{\partial \mathbf{f}_{vi}}{\partial x_i} \right) dv = & \int_{\partial D} \boldsymbol{\psi}^T \delta (f_i - f_{vi}) n_i ds - \int_D \frac{\partial \boldsymbol{\psi}^T}{\partial x_i} \delta (f_i - f_{vi}) dv - \\ & \int_{\partial D} \boldsymbol{\psi}^T \frac{\partial (f_i - f_{vi})}{\partial x_k} \delta x_k n_i ds + \\ & \int_D \frac{\partial \boldsymbol{\psi}^T}{\partial x_i} \frac{\partial (f_i - f_{vi})}{\partial x_k} \delta x_k dv \end{aligned} \quad (4)$$

式中: ∂D 为计算区域边界; N_i 为壁面单位法向量在 i 方向的分量。因为对流量 f_i 可表达为守恒向量 Q 的函数, 黏性通量 f_{vi} 可表达为守恒向量及其空间导数 $Q'_j = \frac{\partial Q}{\partial x_j}$ 的函数, 定义雅克比矩阵 $A_i = \frac{\partial f_i}{\partial Q}, A_{vi} = \frac{\partial f_{vi}}{\partial Q}, B_{vij} = \frac{\partial f_{vi}}{\partial Q'_j}$ 。式(4)中右端第2项转换为

$$\begin{aligned} & - \int_D \frac{\partial \Psi^T}{\partial x_i} \delta(f_i - f_{vi}) dv = \\ & - \int_D \frac{\partial \Psi^T}{\partial x_i} (A_i - A_{vi}) \delta Q dv + \\ & \int_{\partial D} \frac{\partial \Psi^T}{\partial x_i} B_{vij} \left(\delta Q - \frac{\partial Q}{\partial x_k} \delta x_k \right) n_j ds + \\ & \int_D \frac{\partial \Psi^T}{\partial x_i} B_{vij} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial Q}{\partial x_k} \right) \delta x_k dv - \\ & \int_D \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \Psi^T}{\partial x_i} B_{vij} \right) \left(\delta Q - \frac{\partial Q}{\partial x_k} \delta x_k \right) dv \end{aligned} \quad (5)$$

式(4)中右端第4项转换为

$$\begin{aligned} & \int_D \frac{\partial \Psi^T}{\partial x_i} \frac{\partial (f_i - f_{vi})}{\partial x_k} \delta x_k dv = \\ & \int_D \frac{\partial \Psi^T}{\partial x_i} (A_i - A_{vi}) \frac{\partial Q}{\partial x_k} \delta x_k dv - \\ & \int_D \frac{\partial \Psi^T}{\partial x_i} B_{vij} \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\partial Q}{\partial x_j} \right) \delta x_k dv \end{aligned} \quad (6)$$

在计算区域 D 内, 将式(5)、(6)代入式(3)即可实现目标函数变分表达式中流动变量变分项和几何变量变分项的分离。为消除目标函数变分对流动变量变分项的依赖, 并引入虚拟时间导数项以便数值求解, 可得如下伴随方程

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} - \frac{\partial \Psi^T}{\partial x_i} (A_i - A_{vi}) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \Psi^T}{\partial x_i} B_{vij} \right) = 0 \quad (7)$$

同时, 由式(3)(4)(5)可知, 在计算区域边界, 影响目标函数变分的流动变量变分项为

$$\begin{aligned} & \frac{1}{p_0 \Delta S} \int_{s_{out}} \delta p_t ds + \int_{\partial D} \frac{\partial \Psi^T}{\partial x_i} B_{vij} \delta Q n_j ds + \\ & \int_{\partial D} \Psi^T \delta(f_i - f_{vi}) n_i ds \end{aligned}$$

该式在周期性边界处积分为零。定义 $H = [H_1 \ H_2 \ H_3 \ H_4]^T$, 其中 $H_1 = \frac{\gamma}{\gamma-1} R \left(\frac{T_t}{T} \right)^{1/(\gamma-1)} \frac{u_i u_i}{2c_p}, H_{i+1} =$

$$\begin{aligned} & \frac{\gamma}{\gamma-1} p \left(\frac{T_t}{T} \right)^{1/(\gamma-1)} \frac{u_i}{c_p T}, H_4 = \left(\frac{T_t}{T} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} - \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{u_i u_i}{2c_p T} \\ & \cdot \left(\frac{T_t}{T} \right)^{1/(\gamma-1)}, M = \frac{\partial Q}{\partial W}, W \text{ 为原始变量, } \gamma, R, T_t, T, \\ & u_i, c_p, p \text{ 分别为绝热系数、气体常数、总温、静温、速度分量、比定压热容、静压。对于计算区域进出口边界, 根据理想气体热力学方程, 忽略黏性影响, 即} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{p_0 \Delta S} \int_{s_{out}} \delta p_t ds + \int_{\partial D} \frac{\partial \Psi^T}{\partial x_i} B_{vij} \delta Q n_j ds + \\ & \int_{\partial D} \Psi^T \delta(f_i - f_{vi}) n_i ds = \frac{1}{p_0 \Delta S} \int_{s_{out}} H^T \delta W ds + \\ & \int_{s_{out}} \Psi^T M \delta W n_i ds + \int_{s_{in}} \Psi^T M \delta W n_i ds \end{aligned} \quad (8)$$

由式(8)可得伴随方程的进出口边界条件

$$\left. \begin{aligned} & \Psi^T A_{i,n_i} M \delta W = 0 \\ & \left(\frac{1}{p_0 \Delta S} H^T + \Psi^T A_{i,n_i} M \right) \delta W = 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

在固壁边界, 采用绝对无滑移绝热边界条件, 则

$$\begin{aligned} & \int_{\partial D} \frac{\partial \Psi^T}{\partial x_i} B_{vij} \delta Q n_j ds + \int_{\partial D} \Psi^T \delta(f_i - f_{vi}) n_i ds = \\ & \int_{s_{wall}} \frac{\partial \phi_i}{\partial x_i} n_i k \delta T ds + \int_{s_{wall}} \phi_{i+1} (n_i \delta p - \delta \tau_{ij} n_j) ds \end{aligned} \quad (10)$$

由式(2)可得伴随方程的固壁边界条件

$$\phi_{i+1} = 0, \frac{\partial \phi_i}{\partial x_i} n_i = 0, i = 1, 2 \quad (11)$$

式(7)(9)(11)加之周期边界共同组成了以出口总压损失最小为目标的叶栅叶型气动优化伴随方程及其边界条件。在此基础上, 考虑进出口网格节点固定以及出口面积不变的特点, 即 $\delta x_i = \delta \Delta S = 0$, 目标函数变分的最终表达式为

$$\begin{aligned} \delta F = & - \int_{s_{wall}} \frac{\partial \Psi^T}{\partial x_i} B_{vij} \frac{\partial Q}{\partial x_k} \delta x_k n_j ds - \\ & \int_{s_{wall}} \Psi^T \frac{\partial (f_i - f_{vi})}{\partial x_k} \delta x_k n_i ds \end{aligned} \quad (12)$$

3 反问题设计伴随方程

在平面叶栅叶型反问题优化求解中, 以叶片表面与目标压力分布差值最小为目标函数, 即

$$\min F = \frac{1}{2} \int (p - p_{tar})^2 ds \quad (13)$$

式中: p_{tar} 为目标压力。类似上述推导^[7], 可得伴随方程

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} - A_i^T \frac{\partial \Psi}{\partial x_i} - M^T K = 0 \quad (14)$$

进出口及固壁边界条件

$$\left. \begin{aligned} & \Psi^T A_{i,n_i} M \delta W = 0 \\ & (p - p_{tar}) + \phi_{i+1} n_i = 0, \frac{\partial \phi_i}{\partial x_i} n_i = 0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

目标函数变分的最终表达式

$$\begin{aligned} \delta F = & \int_{s_{wall}} \frac{\phi_{i+1}}{n_i} \tau_{ij} \delta (n_i n_j) ds - \int_{s_{wall}} \Psi^T \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \delta x_j n_i ds + \\ & \int_{s_{wall}} \phi_i k \frac{\partial T}{\partial x_j} \delta (n_j ds) + \int_{s_{wall}} \Psi^T \frac{\partial f_{vi}}{\partial x_j} \delta x_j n_i ds - \end{aligned}$$

$$\int_{s_{\text{wall}}} \left[\left(\frac{\partial \psi_{j+1}}{\partial x_i} + \frac{\partial \psi_{i+1}}{\partial x_j} \right) \mu + \frac{\partial \psi_{k+1}}{\partial x_k} \lambda \delta_{ij} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_l} \delta x_l n_j \, ds +$$
$$\frac{1}{2} \int_{s_{\text{wall}}} (p - p_{\text{tar}})^2 \delta(ds) + \int_{s_{\text{wall}}} (\phi_{i+1} p - \boldsymbol{\psi}^T \mathbf{f}_i) \delta(n_i \, ds)$$

(16)

式中: $\mathbf{K}=[K_1 \ K_2 \ K_3 \ K_4]^T$,其中 $K_1=-\frac{T}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot$
 $\left(k \frac{\partial \phi_4}{\partial x_i}\right), K_{i+1}=\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\partial \psi_{j+1}}{\partial x_i} + \frac{\partial \phi_4}{\partial x_i} u_j + \frac{\partial \psi_{i+1}}{\partial x_j} + \frac{\partial \phi_4}{\partial x_j} \cdot\right.\right.$
 $\left.\left. u_i\right) \mu + \left(\frac{\partial \psi_{k+1}}{\partial x_k} + \frac{\partial \phi_4}{\partial x_k} u_k\right) \lambda \delta_{ij}\right] - \frac{\partial \phi_4}{\partial x_j} \tau_{ij}, K_4=\frac{T}{p} \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot$
 $\left(k \frac{\partial \phi_4}{\partial x_i}\right), \tau_{ij}, k, \mu, \lambda$ 分别为黏性应力张量、导热系
数、动力黏性系数、第二黏性系数。

4 叶栅叶型设计优化算例

基于流场和伴随场数值求解方法,完成流场和伴随场数值求解并获取目标函数梯度,最后采用BFGS拟牛顿法、一维寻优法确定寻优方向和寻优步长^[7]。

4.1 正问题设计算例

选取 NACA 65-(12)10 叶型为原始叶型,流场计算条件是:进口总温为 300 K,进口总压为 101 325 Pa,出口静压为 92 563 Pa,叶片安装角为 25.9°,进口气流角为 42.0°,弦长 l 为 0.127 m,相对栅距为 1.0。对叶栅叶型进行正问题设计优化求解,以期减少叶栅总压损失。

分别采用 6 次 Bezier 曲线对原始叶型压力面和吸力面进行拟合,选取 Bezier 曲线控制顶点的 10 个纵坐标为设计变量。在优化过程中,为避免叶片几何型线不合理现象并约束叶片厚度,控制吸力面和压力面的第 2、第 6 个 Bezier 控制点的变化范围在 ±5% 以内,其他控制点的变化范围在 ±15% 以内;为保证叶栅做功能力以及叶型几何在前缘的一阶连续,固定叶片前尾缘不动,吸力面的第 2 个和第 6 个 Bezier 控制点分别限制在 $S_1 S_2$ 及 $S_6 S_7$ 两条线上移动,压力面的第 2 个和第 6 个 Bezier 控制点分别限制在 $P_1 P_2$ 及 $P_6 P_7$ 两条线上移动,如图 1 所示。经过 9 个优化迭代步之后,计算收敛。为评估正问题优化设计结果,分别通过表 1 和图 2 给出了优化前后叶栅总压损失系数和叶栅流场叶片尾缘速度矢量的局部放大图。由表 1 可知,叶栅总压损失系数下降至 0.002 32,相比于优化前的 0.002 46,下降约 5.69%。由图 2 可知,优化前叶栅流道在叶片尾缘附近存在着明显的流动分离,而优化后流动分离得

到有效抑制,流动损失降低,叶栅气动性能得到改善。

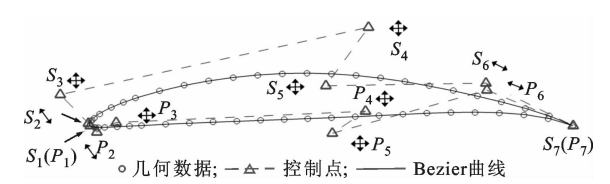
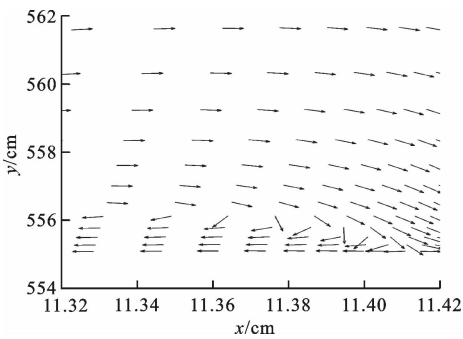


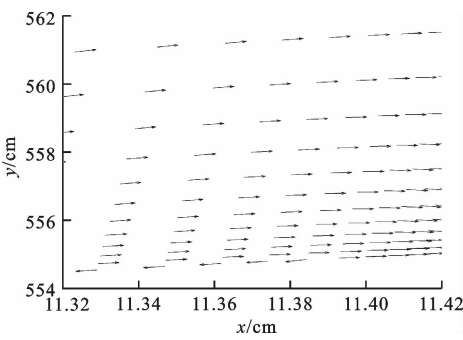
图 1 Bezier 曲线及其控制点

表 1 原始叶型与正问题解的叶栅气动性能比较

叶栅	总压损失系数	静压比
原始叶型	0.002 46	1.069 6
正问题解	0.002 32	1.071 0
变化量/%	-5.69	0.13



(a) 优化前



(b) 优化后

图 2 正问题设计的叶片尾缘速度矢量分布

为进一步了解叶型对叶栅气动性能的影响,对比了正问题设计伴随方法优化前、后的叶型,如图 3 所示。由图 3 可知,优化所得叶型尤其是吸力面叶型曲线较初始叶型沿弦线方向变化平缓,曲率减小,对应叶型弯度变小。由气动角度看,这一几何特征有利于降低叶片中后部逆压梯度,减小流动分离,与

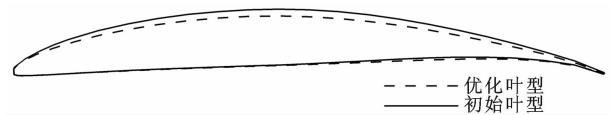


图 3 正问题设计优化前后叶型对比

优化结果一致,如图4所示。本文以叶栅出口总压损失最小为目标的正问题设计优化方法,可以有效降低叶栅流道损失,提高叶栅效率。

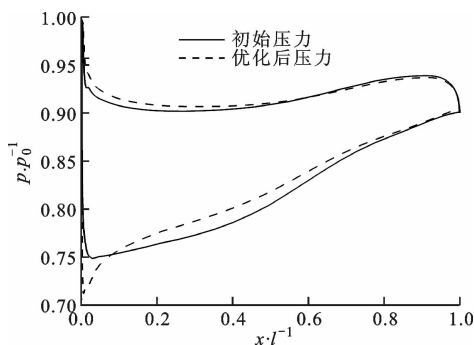


图4 正问题设计的叶片表面压力

4.2 反问题设计算例

文献[7]中验证了本文反问题优化求解方法可以有效获得表面压力分布逼近目标压力分布的叶型。本算例拟开展更大进口气流角条件下的叶栅叶型反问题优化求解设计,初始叶型采用 NACA 65-(12)10 翼型,改变流场进口气流角为 43.5° ,其他计算条件均与 4.1 节算例相同。初始叶栅叶片尾缘速度矢量图如图 5 所示,可知在叶片尾缘附近存在明显的流动分离现象。

本算例拟从减弱流动分离的角度出发,通过给定合适的叶片表面目标压力分布,实现对叶栅叶型反问题设计的优化求解。由载荷分布角度可知,优化后为前加载,优化后的叶片载荷较优化前在前缘附近有明显的增加,在叶片 20%~80% 弦长范围内有所减小;由压力梯度的角度可知,优化后从叶片中前部开始,逆压梯度减小,具体表现为优化前吸力面压力在 2%~30% 弦长范围内,上升趋势平缓,在 30%~80% 弦长范围内,上升趋势陡峭,而优化后,在 30%~80% 弦长范围内吸力面压力上升曲线平缓。基于上述流场分析,为减小 43.5° 进口气流角下的流动分离,根据分析所得正问题优化后相对于优化前的叶片表面压力分布变化趋势,对反问题初始叶型表面的压力分布做相应修正,从而给出该进口气流角条件下的理想目标压力分布,如图 6 所示。

经过 9 步迭代,计算收敛。为了便于对比分析,图 6 同时给出了反问题设计优化求解后的压力分布。由图 6 可知:反问题设计优化求解所得压力分布很好地逼近了目标压力分布;相比初始压力分布,优化后压力分布为前加载,在吸力面 30%~80% 弦长范围内逆压梯度减小,压力上升较为平缓。

为评估反问题优化设计结果,验证所给目标压

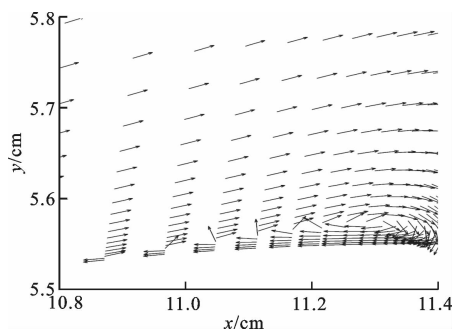


图5 43.5° 进口气流角下叶片尾缘速度矢量分布

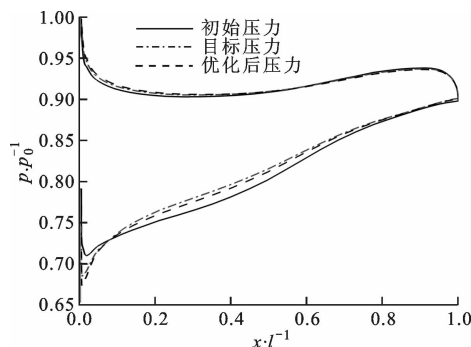


图6 反问题设计的叶片表面压力

力分布有效性,优化后叶栅流场叶片尾缘速度矢量的局部放大图如图 7 所示,优化前后叶栅总压损失系数和静压比对比如表 2 所示。相比于图 5,图 7 所示的叶片尾缘附近的流动分离得到明显减弱。由表 2 可知,优化后静压比基本不变,而总压损失系数减小了 4.50%,叶栅气动性能得到提升,高效稳定运行范围有所拓宽,从而验证了所给定的目标压力分布是合理有效的。为进一步了解叶片表面压力分布对叶型的控制,对比了优化前、后的叶型几何,如图 8 所示。由图 8 可知,优化后叶片吸力面型线较优化前更为平缓,变化趋势与图 3 中正问题优化求

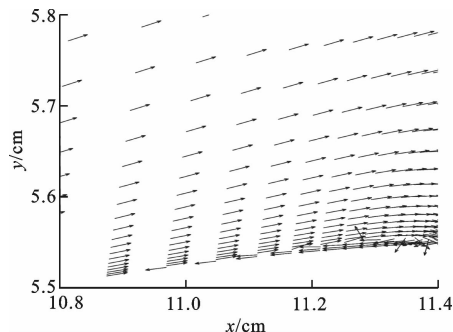


图7 反问题设计的叶片尾缘速度矢量分布

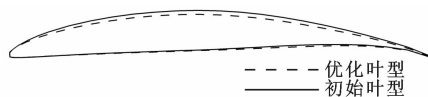


图8 反问题设计优化前后叶型对比

解结果类似,说明所给定的目标压力分布能够有效控制叶型。

表 2 原始叶型和反问题解的叶栅气动性能比较

叶栅	总压损失系数	静压比
原始叶型	0.002 89	1.074 0
反问题解	0.002 76	1.074 4
变化量/%	-4.50	0.04

5 结 论

(1)发展了针对叶栅叶型正反问题设计的伴随优化方法和数值模型,实现了对叶栅叶型正问题和反问题设计的优化求解。新设计出的叶型叶栅气动性能均优于原始叶栅,验证了该优化求解方法和模型的有效性,展示了该方法和模型在提高叶栅叶型气动性能方面的优化能力。

(2)对叶栅叶型正问题设计优化求解所得叶片表面压力分布进行分析,可以给出较优的叶栅叶型反问题设计目标压力分布,较好地解决反问题中难以给定气动控制参数的问题。

(3)对 NACA 65-(12)10 叶型的优化结果表明,在所研究的进气条件下,叶栅叶型吸力面曲率减小、叶片弯度降低的几何特征以及叶片前加载方案、吸力面中后部逆压梯度减小的气动特征,有利于抑制或消除叶栅叶片尾缘流动分离现象,提高叶栅叶型气动性能。

参考文献:

[1] 张楚华, 琚亚平. 流体机械内流理论与计算 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 48-60.

[2] JU Yaping, ZHANG Chuhua. Robust design optimization method for centrifugal impellers under surface roughness uncertainties due to blade fouling [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(2): 301-314.

[3] 琚亚平, 张楚华. 基于人工神经网络与遗传算法的风力机翼型优化设计方法 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(20): 106-111.

JU Yaping, ZHANG Chuhua. Optimal design method for wind turbine airfoil based on artificial neural network model and genetic algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(20): 106-111.

[4] JU Yaping, ZHANG Chuhua. Multi-point robust design optimization of wind turbine airfoil under geometric uncertainty [J]. Proceedings of the Institution of

Mechanical Engineer: Part A Journal of Power and Energy, 2012, 226(2): 245-261.

[5] JU Yaping, PARKS G, ZHANG Chuhua. A bisection-sampling-based support vector regression-high-dimensional model representation metamodeling technique for high-dimensional problems [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineer: Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2017, 231(12): 2173-2186.

[6] PAPADIMITRIOU D I, GIANNAKOGLU K C. A continuous adjoint method with objective function derivatives based on boundary integrals, for inviscid and viscous flows [J]. Computers and Fluids, 2007, 36: 325-341.

[7] 朱玉杰, 琚亚平, 戴韧, 等. 叶栅气动反问题的伴随优化解法及应用 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(9): 138-144.

ZHU Yujie, JU Yaping, DAI Ren, et al. Adjoint optimization method for aerodynamic inverse problem of cascades [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(9): 138-144.

[8] TANG Xiao, LUO Jiaqi, LIU Feng. Adjoint aerodynamic optimization of a transonic fan rotor blade with a localized two-level mesh deformation method [J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 72: 267-277.

[9] DHERT T, ASHURI T, MARTINS J R A. Aerodynamic shape optimization of wind turbine blades using a Reynolds-averaged Navier-Stokes model and an adjoint method [J]. Wind Energy, 2017, 20(5): 909-926.

[10] 卢娟, 张朝磊, 丰镇平. 离散伴随气动优化设计方法的紊流扩展 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 49(1): 37-42.

LU Juan, ZHANG Chaolei, FENG Zhenping. Extension to turbulent flow and numerical verification for aerodynamic optimization design method based on discrete adjoint theory [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 49(1): 37-42.

[11] DANESHKHAH K, GHALY W S. An inverse blade design method for subsonic and transonic viscous flow in compressors and turbines. [J]. Inverse Problem in Science & Engineering, 2006, 14(5): 211-231.

[12] ROIDL B, GHALY W S. Redesign of a low speed turbine stage using a new viscous inverse design method [J]. Journal of Turbomachinery, 2011, 133(1): 011009.

(下转第 174 页)