

三维环境下离心/斜流压气机二维叶型 优化设计

陶 胜^{1,2}, 周正贵¹, 严 欣², 杨利明², 张 敏²

- (1. 南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016;
2. 中国人民解放军 95874 部队, 南京 210016)

摘 要: 考虑离心/斜流压气机转子叶片通道内流动的强三维性, 提出在三维环境下进行二维叶型优化设计. 通过对能量方程中黏性耗散项改进, 解决了 Denton 黏性体积力方法模拟离心/斜流叶轮三维流场效率偏高的不足. 将改进流场计算模块与并行遗传算法寻优模块相结合, 构成离心/斜流压气机二维叶型优化设计软件. 采用所研制的软件, 分别对离心叶轮和斜流叶轮叶尖处叶型进行优化设计. 优化叶片基本达到目标流量和压比, 在整个工作范围内效率都提高明显: 在设计点离心叶轮效率由 0.938 提高到 0.947, 斜流叶轮效率由 0.899 提高到 0.918.

关 键 词: 数值优化; 离心压气机; 斜流压气机; 三维流动; 遗传算法

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Optimization design of centrifugal/oblique flow compressor two-dimensional blade profiles in three-dimensional environment

TAO Sheng^{1,2}, ZHOU Zheng-gui¹, YAN Xin²,
YANG Li-ming², ZHANG Min²

- (1. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,
College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Unit 95874, the Chinese People's Liberation Army, Nanjing 210016, China)

Abstract: As for strong three-dimensional flow in centrifugal/oblique flow compressor rotor blade passages, the two-dimensional blade profiles were optimally designed in three-dimensional environment. The efficiency of centrifugal/oblique flow compressor calculated by the Denton viscous volume force method was obviously higher, and the problem was solved by modifying the viscous dissipation in the energy equation. Then, optimization design software of two-dimensional blade profiles was built by combining the modified flow field calculation module with the parallel genetic algorithm. The software was used for designing tip profiles of centrifugal impeller and oblique flow impeller. The mass flow and pressure ratio of these two optimized impellers are very close to objective values, and the efficiency in whole working range is significantly improved. At the design point, the efficiency of centrifugal impeller is improved from 0.938 to 0.947, and the efficiency of oblique flow impeller is improved from 0.899 to 0.918.

Key words: numerical optimization; centrifugal compressor; oblique flow compressor; three-dimensional flow; genetic algorithm

目前,压气机叶片设计主要有正问题方法和反问题方法^[1-4].近些年,随着计算机技术的不断进步,自动优化设计方法得到了重视和发展.

自动优化设计方法是将数值优化技术与正问题方法流场计算相结合,由若干个设计参数确定叶片形状,用数学过程替代设计人员经验,控制设计参数修改方向^[5-6].自动优化设计方法是设计人员在确定设计目标 and 设计参数后,软件通过寻优自动找到最优叶型,因此设计过程中较少依赖设计人员经验.

压气机叶片气动设计过程中,采用基于 S_1/S_2 两类流面假设进行二维叶型优化设计,由若干个二维叶型沿叶高方向叠加构成三维叶片^[7-12],最后采用三维气动设计方法修改叶片.二维叶型优化设计是叶片气动设计中的重要步骤,对于轴流压气机,二维叶型的气动设计方法已发展成熟;但是对于离心/斜流压气机,由于子午面流道沿流向显著变化造成流动强三维性,较大程度影响基于两类流面假设的二维设计效果.

本文针对离心/斜流压气机,提出在三维环境下进行二维叶型优化设计,以实现在二维叶型优化设计阶段考虑流动的三维性;并将三维流场数值计算与优化技术相结合,构造出三维环境下二维叶型优化设计软件;通过算例证明该方法的可行性.

1 离心/斜流叶轮内流动三维性分析

轴流压气机势流区流动近似符合任意回转面二维特点.如图1,对一个压比为2.0的轴流压气机转子,由三维流场计算结果在叶中区域取回转面二维流面,可看出进口在此流面上流线随着向下游流动基本都是处于此流面上.为了明确离心/斜流叶轮内流动是否也呈回转面二维特征,对Krain离心叶轮^[13]和将该叶轮后部分截除形成的斜流叶轮,分别进行回转面二维和三维流场计算.回转面二维和三维流场计算都采用商用软件Numeca.图2为该离心叶轮三维叶片和近叶中位置流面.图3表明回转面二维和三维方法计算离心/斜流叶轮叶片表面压力分布一致性尚好;但表1表明两种计算方法所得性能参数有较大差别(离心叶轮压比差别大、斜流叶轮效率差别大).为了

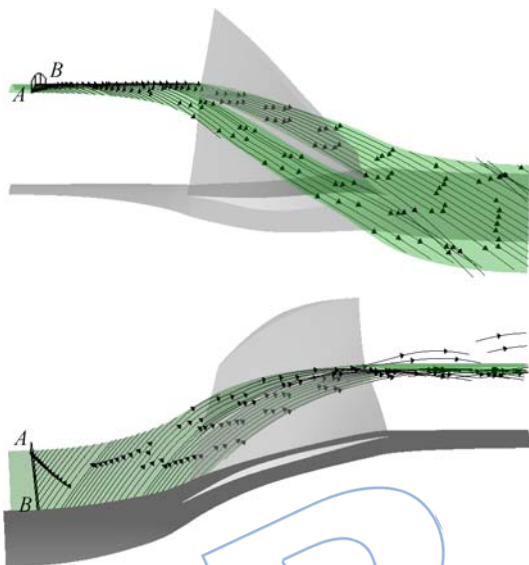


图1 轴流压气机转子50%叶高三维流线
Fig. 1 Three-dimensional streamlines at 50% blade height of axial flow compressor rotor

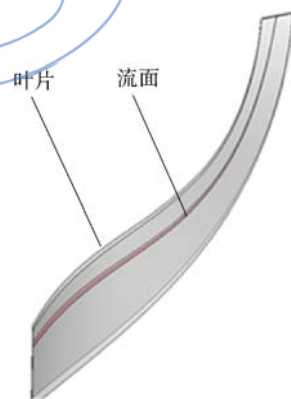
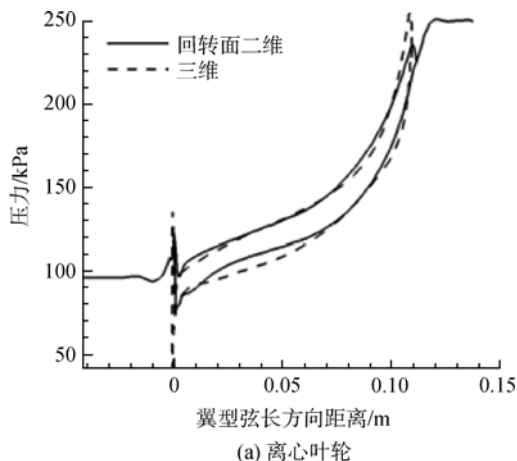


图2 离心叶轮叶片和流面
Fig. 2 Blade and flow surface of centrifugal impeller



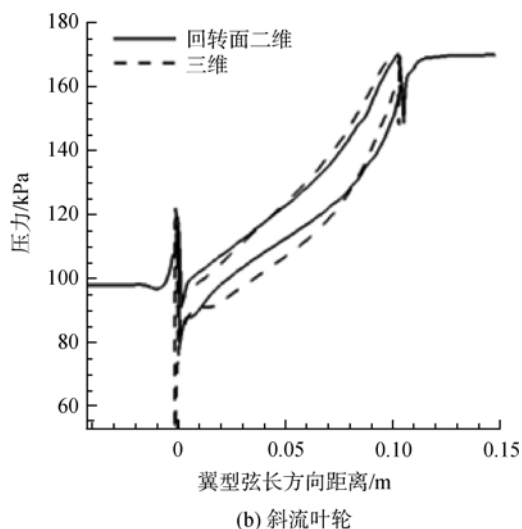


图 3 叶片表面压力分布

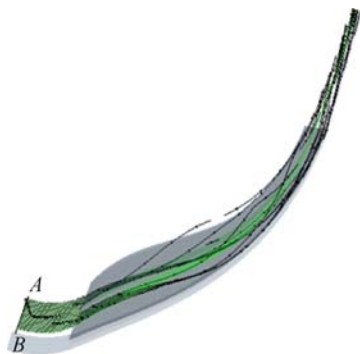
Fig. 3 Pressure distribution on blade surfaces

表 1 三维与回转面二维计算的性能参数

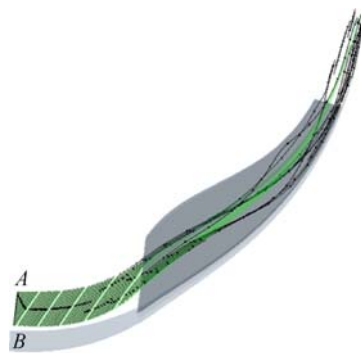
Table 1 Performance parameters by three-dimensional and surface of revolution two-dimensional calculation

计算方法	离心叶轮		斜流叶轮	
	效率	压比	效率	压比
回转面二维	0.924	3.48	0.905	2.55
三维	0.931	4.32	0.971	2.58

分析原因,采用与轴流叶轮相同的方法,在离心/斜流叶轮 50%叶高处取回转面二维流面,流面进口处流线不再沿流面运动,特别是在流道的后半段,因此呈强三维特征(见图 4). 离心/斜流叶轮由于流道半径沿流向变化大,叶轮内流动不再呈回转面二维特征.



(a) 离心叶轮50%叶高



(b) 斜流叶轮50%叶高

图 4 转子叶片通道三维流线

Fig. 4 Three-dimensional streamlines in rotor blade passage

2 离心/斜流压气机二维叶型自动优化设计软件研制

离心/斜流压气机二维叶型自动优化设计软件是在课题组已有轴流压气机二维叶型自动优化设计软件的基础上改进而成的. 软件包括数值最优化、流场计算、叶型参数化、目标函数设定等模块^[14];软件中数值最优化采用具有全局寻优能力的并行遗传算法;为了缩短优化耗时,应用并行技术实现多计算机局域网/服务器多 CPU 优化^[10,15];叶片造型采用基于修改量的参数化方法;通过权重系数将多目标变成单目标^[16].

由于离心/斜流压气机转子叶片通道内流动的强三维特征,二维叶型优化设计中流场计算不能采用回转面二维计算方法,而采用三维流场计算方法. 优化目标为达到给定压比、流量时效率最高,因此二维叶型优劣是由三维流场表征的压气机性能指标确定;由此实现三维环境下的二维叶型设计. 考虑到 Denton 提出的黏性体积力方法计算速度快且具有较高的计算精度,适合用作优化软件中流场计算模块.

在该方法应用于离心/斜流叶轮流场计算中发现计算压比合理,但效率偏高. 为此进行如下改进:

1) 能量方程修改,采用能量方程

$$\rho V \frac{\partial H}{\partial s} = \omega r F_\theta + \frac{\partial}{\partial n} \left(\mu V \frac{\partial V}{\partial n} + \lambda \frac{\partial \tau}{\partial n} \right) \quad (1)$$

式中 ρ 为密度, V 为绝对速度, H 为总焓, s 为流线方向, ω 为旋转角速度, r 为旋转半径, F_θ 为 θ 方向对应的黏性体积力, μ 为层流黏度, λ 为导热系数, $\frac{\partial \tau}{\partial n}$ 为黏性切应力. 即不假设附面层中黏性

耗散与热传导平衡(Denton 程序中忽略式(1)等号右边后两项)。

2) 将转动坐标系下静止壁面附面层黏性应力做功置零, 进行修改后, 计算结果有较大改进。图5为程序改进前后及商用软件 Numeca 计算 Krian 离心叶轮出口截面切向平均压比和效率沿相对叶高分布比较。图5(a)表明, 改进前在半叶高以上效率计算过高(由于叶尖间隙影响, 在靠叶尖较近处效率应有明显下降), 而改进后计算结果与商用软件计算结果一致性较好, 且更合理; 图5(b)表明, 改进后压比沿径向分布与商用软件一致性也变好。图6为自编软件、商用软件计算及实验值^[17]比较, 结果表明自编软件计算结果与实验值一致性不低于商用软件。

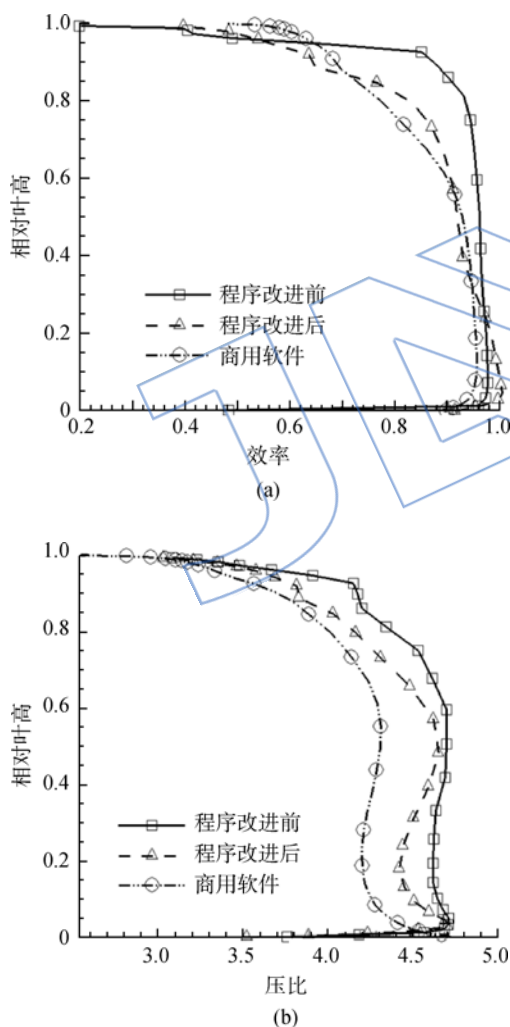


图5 Krian 离心叶轮出口截面切向平均参数沿相对叶高分布

Fig. 5 Tangential averaged parameters distribution along relative blade height at outlet section for Krian centrifugal impeller

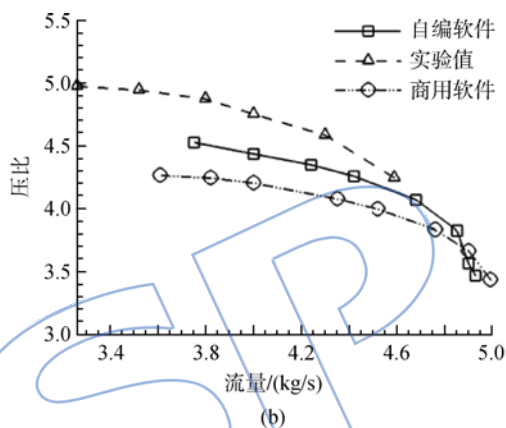
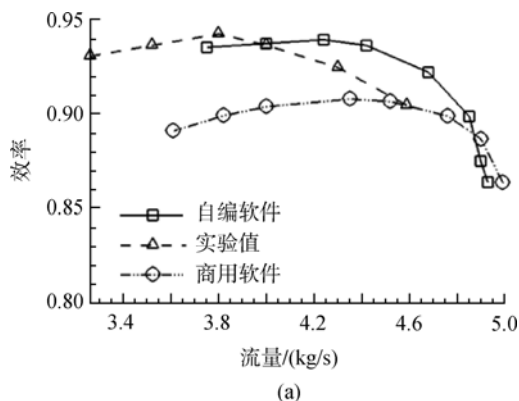


图6 Krian 离心叶轮性能

Fig. 6 Performance of Krian centrifugal impeller

3 优化实例分析

首先应用所研制的自动优化设计软件对 Krian 离心叶轮进行优化设计。该离心叶轮设计流量为 4.0 kg/s , 设计压比为 4.5; 优化目标为保持流量、压比不变, 效率最高。因此构造目标函数如下:

$$f = c_1 \left[1 - \left| \frac{\dot{m} - \dot{m}_0}{\dot{m}_0} \right| \right] + c_2 \left[1 - \left| \frac{\pi_k^* - \pi_{k0}^*}{\pi_{k0}^*} \right| \right] + c_3 (\eta_k^* - 0.5) \quad (2)$$

式中 $\dot{m}_0$ 为目标流量, 取 4.0 kg/s ; π_{k0}^* 为目标压比, 取 4.5; $\dot{m}$ 为计算流量; π_k^* 为计算压比; η_k^* 为计算效率; c_1, c_2, c_3 为目标函数权重系数; 取 $c_1 = 1.0, c_2 = 1.0, c_3 = 10.0$ 。由于提高效率是主要目标, 并且效率提高比较困难, 因此系数 c_3 取值较大。由图5(a), 该离心叶轮在叶尖处损失较大、效率较低; 因而在此对叶尖叶型进行优化设计。由于该离心叶轮是等厚度叶片, 只需对一个叶型进行优化设计。采用基于修改量的参数化方法, 修改量采用贝塞尔曲线拟合; 沿叶型弧长方向均布 6 个设计参数。

优化前后性能比较(表2)表明, 优化叶片流

量与压比和设计值基本相同,效率较原始叶片提高 1.1%(Krain 离心叶轮效率较高,进一步提高难度较大).图 7 表明优化叶片呈更大程度的 S 型弯曲;因此增加了叶片通道前部扩压度、减小了叶片通道后部扩压度,使压比近于不变、损失下降、效率提高.

表 2 优化前后离心叶轮性能

Table 2 Performance of centrifugal impeller before and after optimization

叶片	流量/(kg/s)	效率	压比
原始	4.00	0.937 7	4.44
优化	4.05	0.946 7	4.43

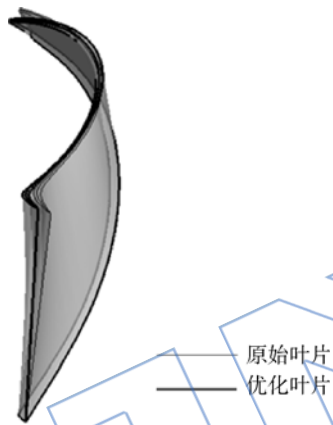


图 7 优化前后叶片(离心叶轮)

Fig. 7 Blades before and after optimization (centrifugal impeller)

图 8 表明,整个工作流量范围内优化叶片效率提高幅度与设计点相近,压比近于不变;稳定工作流量范围相近.图 9 表明,优化叶片的效率提高主要是在 50%以上叶高.图 8、图 9 中给出商用软

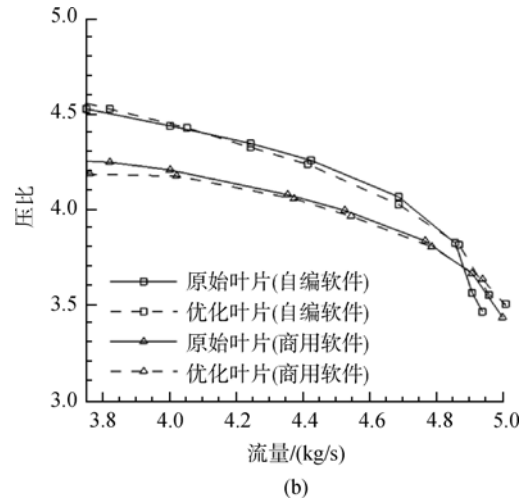
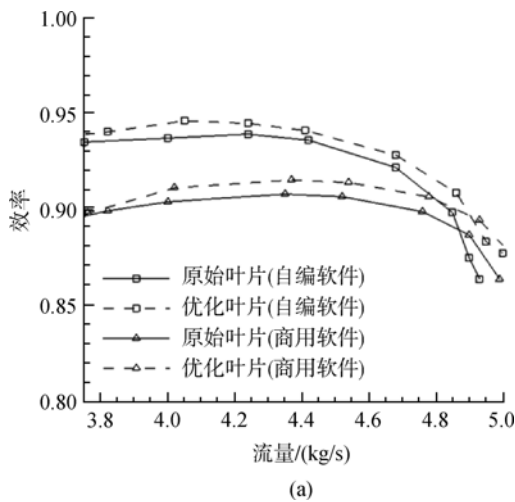


图 8 优化前后离心叶轮性能

Fig. 8 Performances of centrifugal impeller before and after optimization

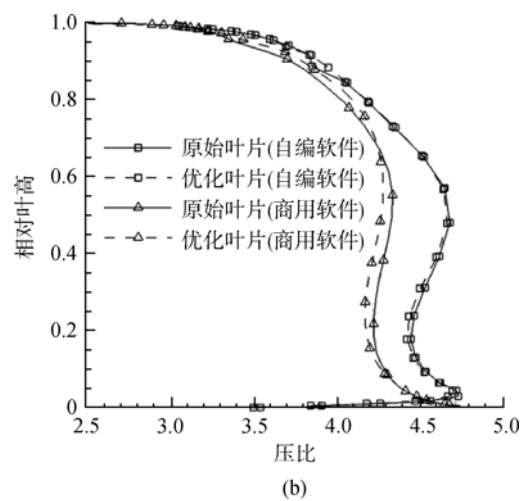
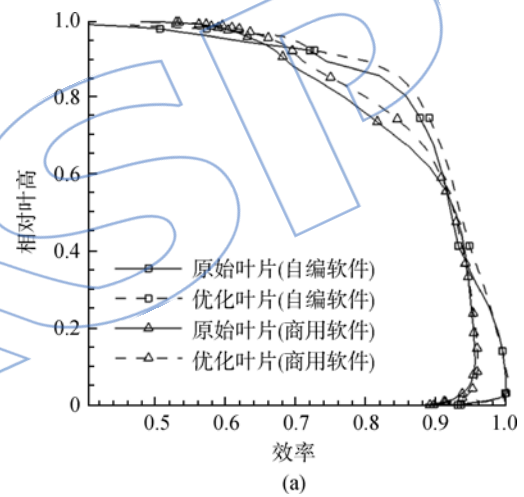


图 9 优化前后出口截面切向平均参数沿相对叶高分布(离心叶轮)

Fig. 9 Tangential average parameters distribution along relative blade height at outlet section before and after optimization (centrifugal impeller)

件计算结果,商用软件流场计算采用中心差分格式、S-A(Spalart-Allmaras)紊流模型、HOH 型网格、节点数约为 50 万,近壁网格距壁面距离达到 y^+ 小于 10. 为考察计算结果对网格节点数的依赖性,进行了 4 种网格节点数对计算压比、效率、流量影响的比较,表 3 中给出影响最大的效率数值. 进口边界给定绝对总压、总温及气流方向,出口截面给定反压,并采用径向平衡. 结果表明虽然两个软件计算结果绝对值有差异,但相对值一致性较好. 实际上采用不同软件,由于网格生成和紊流模型等差异,计算结果通常会有一定差异,但从优化角度考虑最重要的是要有较高的相对精度.

表 3 计算结果与网格节点数关系

Table 3 Relation of results calculated with grid number

节点数	效率
30 万	0.9352
40 万	0.9410
50 万	0.9377
60 万	0.9392

采用与上述离心叶轮相同的优化方法对设计流量为 2.227 kg/s,设计压比为 3.54 的斜流叶轮叶尖的叶型进行优化设计. 表 4 结果表明:优化叶片较原始叶片,流量基本一致,压比稍低,效率提高约 2%. 图 10 也表明优化叶片呈更大程度的 S 型弯曲. 图 11 表明优化叶片堵点流量增大程度较大、喘点流量近于不变,稳定工作流量范围明显增大;在整个流量范围内效率都提高约 2%,由图 12

可知优化叶片效率提高主要在 40% 以上叶高.

图 13 表明,相对原始叶片而言,优化叶片在前缘附近没有负载荷出现,载荷分布更合理. 由图 14 可知,原始叶片流体在靠近叶片出口处的叶尖部位出现了较大的分离,而优化叶片流场得到了很大的改善.

表 4 优化前后斜流叶轮性能

Table 4 Performance of oblique flow impeller before and after optimization

叶片	流量/(kg/s)	效率	压比
原始	2.227	0.8990	3.54
优化	2.222	0.9181	3.48

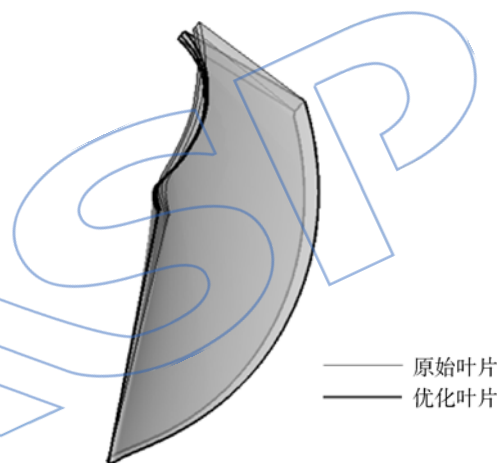


图 10 优化前后叶片(斜流叶轮)

Fig. 10 Blades before and after optimization (oblique flow impeller)

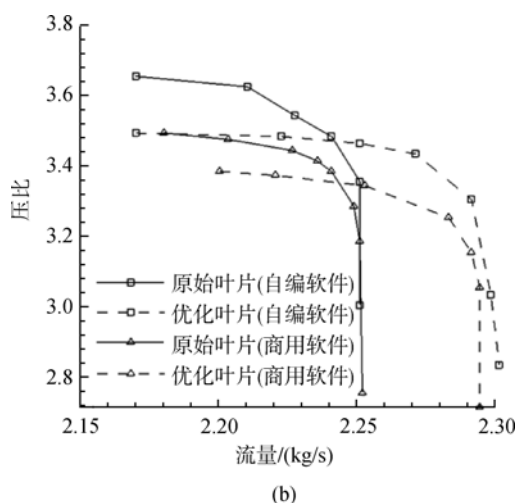
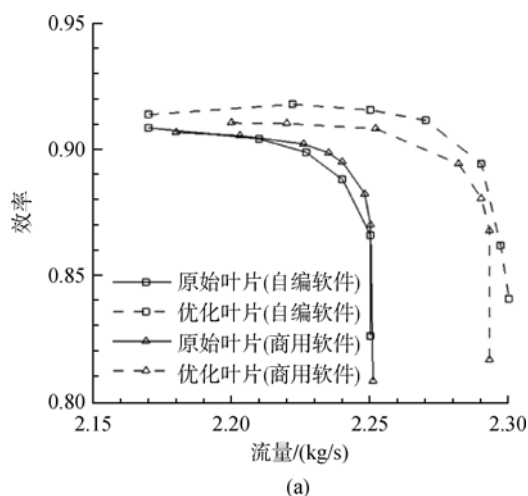


图 11 优化前后斜流叶轮性能

Fig. 11 Performances of oblique flow impeller before and after optimization

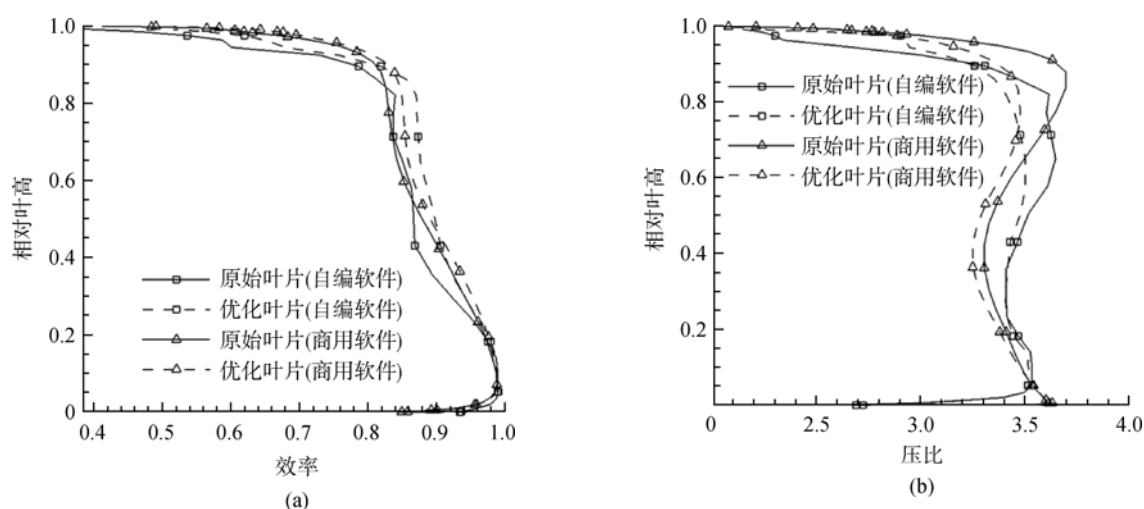


图 12 优化前后出口截面切向平均参数沿相对叶高分布(斜流叶轮)

Fig. 12 Tangential average parameters distribution along relative blade height at outlet section before and after optimization (oblique flow impeller)

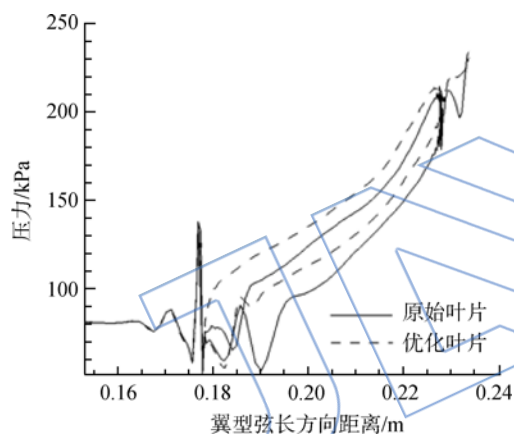
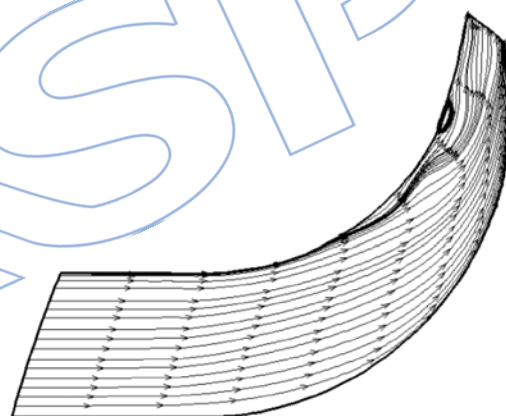


图 13 90%叶高处叶片表面压力分布

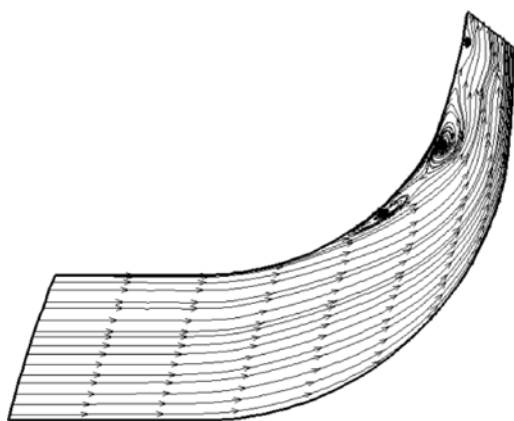
Fig. 13 Pressure distribution on blade surfaces at 90% blade height



(b) 优化叶片

图 14 转子叶片通道中间 S_2 流面流线

Fig. 14 Streamlines on S_2 stream surface in rotor blade passages



(a) 原始叶片

4 结 论

1) 通过流场计算分析表明,离心/斜流压气机转子叶片通道内流动呈强三维流动特点。

2) 对 Denton 黏性体积力方法中能量方程黏性耗散项进行改进,解决了其在离心/斜流叶轮三维流场计算中效率偏高的不足。

3) 研制出离心/斜流压气机二维叶型优化设计软件,实现在三维环境下二维叶型优化设计;优化设计实例表明该方法是可行的。

参考文献:

[1] 朱方元,周新海.轴流跨音速压气机级的气动设计方法

- [J]. 西北工业大学学报, 1979(1): 5-25.
- ZHU Fangyuan, ZHOU Xinhai. An aerodynamic design method for transonic axial-flow compressor stage[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1979(1): 5-25. (in Chinese)
- [2] 程荣辉. 轴流压气机设计技术的发展[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2004, 17(2): 1-8.
- CHENG Ronghui. Development of design technology for axial compressor[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004, 17(2): 1-8. (in Chinese)
- [3] Pitigala D B A, Zangeneh M, Li Y. Redesign of a transonic compressor rotor by means of a three-dimensional inverse design method: a parametric study [R]. ASME Paper GT2007-27486, 2007.
- [4] Ashihara K, Goto A. Turbomachinery blade design using 3-D inverse method, CFD and optimization algorithm[R]. ASME Paper GT2001-358, 2001.
- [5] Sanger N L. The use of optimization techniques to design controlled diffusion compressor blading[J]. Journal of Engineering for Power, 1983, 105(2): 256-264.
- [6] 周正贵. 压气机/风扇叶片自动优化设计的研究现状和关键技术[J]. 航空学报, 2008, 29(2): 257-266.
- ZHOU Zhenggui. Current situations and key techniques of automatic aerodynamic design of compressor/fan blades [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(2): 257-266. (in Chinese)
- [7] Frank S, Beat R. Design of industrial axial compressor blade sections for optimal range and performance[J]. Journal of Turbomachinery, 2004, 126(2): 323-331.
- [8] Benini E, Toffolo A. Development of high-performance airfoils for axial flow compressors using evolutionary computation[J]. Journal of Propulsion and Power, 2002, 18(3): 544-554.
- [9] 周正贵. 高亚音速压气机叶片优化设计[J]. 推进技术, 2004, 25(1): 58-61.
- ZHOU Zhenggui. Optimization of high subsonic axial compressor blades [J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(1): 58-61. (in Chinese)
- [10] Oyama A, Liou M S. High-fidelity swept and leaned rotor blade design optimization using evolutionary algorithm [R]. AIAA-2003-4091, 2003.
- [11] Benini E. Three-dimensional multi-objective design optimization of a transonic compressor rotor[R]. AIAA-2003-4090, 2003.
- [12] 徐夏. 叶轮机械流场计算与任意回转面叶型设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- XU Xia. Calculation of turbomachinery flow fields and design of blade profile on arbitrary rotational surfaces[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [13] Krain H, Hoffman W. Verification of an impeller design by laser measurements and 3D-viscous flow calculations[R]. Toronto, Canada: ASME Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, 1989.
- [14] 周正贵. 压气机/风扇二维叶型自动优化设计[J]. 航空学报, 2011, 32(11): 1987-1997.
- ZHOU Zhenggui. Automatic optimization design of compressor/fan 2D blade profiles[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(11): 1987-1997. (in Chinese)
- [15] 汪光文. 基于并行遗传算法的风扇/压气机叶片气动优化[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- WANG Guangwen. Research on aerodynamic optimization design of fan/compressor blade using parallel genetic algorithm[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
- [16] 周旭. 民用大涵道风扇叶片气动优化设计研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [17] Krain H, Karpinski G, Beversdorff M. Flow analysis in a transonic centrifugal compressor rotor using 3-component laser velocimetry[R]. ASME Paper 2001-GT-0315, 2001.