

吸附式压气机转子叶片气动优化设计

赵振国¹, 周正贵¹, 陶 胜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 机场供电教研室, 南京 210016)

摘 要: 进行吸附式压气机转子叶片气动设计方法研究, 提出通过迭代设计, 应用三维流场计算结果提供 S_2 流面通流计算损失模型, 提高了 S_2 流面流场计算精度; 将最优化方法与正问题流场数值模拟技术相结合, 建立吸气与型面耦合的回转面二维叶型优化设计和三维叶片优化设计软件; 应用所构建的设计软件, 进行吸附式压气机转子设计, 数值模拟结果表明: 该转子在 0.86 的叶尖载荷下, 设计点总压比为 1.631、等熵效率为 0.965, 实现了高气动性能。

关 键 词: 吸附式压气机; 转子; 优化设计; 损失模型; 气动性能

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Aerodynamic optimization design of an aspirated compressor rotor blade

ZHAO Zhen-guo¹, ZHOU Zheng-gui¹, TAO Sheng²

(1. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power Systems,

College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Airport Power Supply Teaching and Research Group,

Unit 95874, the Chinese People's Liberation Army, Nanjing 210016, China)

Abstract: The aerodynamic design method of aspirated compressor rotor blade was investigated. An iterated design method was adopted by using the results of three dimensional (3-D) calculations to provide loss model of S_2 flow surface calculation, thus improving S_2 flow surface calculation precision. The optimization design software in which the suction parameters and profile parameters are related to the design of two dimensional random rotating surface profiles and three dimensional blades was developed, by combining the optimization method and numerical simulation method. An aspirated compressor rotor was designed by this software, and the numerical simulation results show that its pressure ratio is 1.631 and isentropic efficiency is 0.965 at design point under the condition of 0.86 tip blades loading, and high aerodynamic performance is achieve.

Key words: aspirated compressor; rotor; optimization design; loss model; aerodynamic performance

压气机是现代航空发动机的关键部件之一, 它的性能好坏直接影响发动机的整体性能。由于压气机的扩压流动特点, 叶片吸力面附面层在强

逆压力梯度作用下容易分离, 带来较大的流动损失, 增加了高性能压气机叶片的设计难度。研究表明, 在易发生分离区域将附面层内低能气体移除,

可以有效地控制附面层发展,延缓或消除气流分离^[1-2],这为压气机设计技术的改进提供了思路。1997年,美国麻省理工学院(MIT)的 Kerrebrock 等^[3-5]首次提出吸附式压气机的概念,并开展了一系列的机理研究、设计技术研究以及应用研究。Merchant^[6]设计两个不同转速的吸附式压气机级,其叶片吸力面沿展向开槽吸除附面层。数值模拟结果显示,在低速转子的叶尖速度为 228.6 m/s 下,总压比为 1.65,等熵效率为 0.96;在高速转子的叶尖速度为 457.2 m/s 下,总压比为 3.68,等熵效率为 0.94。由此可见,叶片表面抽吸气对于抑制附面层分离,提高叶片载荷和效率方面有独特的优势。

国内也有很多学者对吸附式压气机技术进行研究,周海等^[7]对 ATS-2 跨声速风扇级进行了抽吸气数值模拟;宋彦萍等^[8]数值模拟了低速条件下吸除附面层对大转角压气机叶栅气动性能的影响,并指出吸气导致的栅内扩压能力恢复和通道涡三维分离效应是确定最佳吸气位置及吸气量的判定原则;刘波等^[9-10]深入研究了抽吸气对转子激波结构和分离流动的影响,并将计算机优化算法与流场数值模拟技术相结合,形成了吸附式压气机叶型优化设计软件;随着研究的深入,吸附式叶型的试验研究也在逐步展开^[11-13]。但总的来说,国内学者大多是在现有叶片的基础上研究最佳吸气参数的选取方法,鲜有文献表明已建立起完整的吸附式压气机叶片设计体系,需要对此进行更多的研究。

本文首先建立适应于吸附式压气机转子叶片气动设计的 S_2 流面通流设计、回转面二维叶型(简称二维叶型)优化设计和三维叶片优化设计的软件平台,并通过设计例对软件平台各模块进行验证。

1 吸附式叶片优化设计方法

吸附式叶片优化设计主要包括二维叶型优化设计和三维叶片优化设计,设计流程如图 1。

二维叶型优化设计基于准三维方法^[14-17],在数值计算中加入了吸气模块,使之适应吸附式任意回转面叶栅流场计算,并采用优化方法控制叶型参数和吸气参数的修改,实现叶型参数与吸气参数的耦合设计。同时,考虑到通流设计精度对损失模型的依赖,增加了损失反馈环节,提取三维流场计算转子总压损失系数沿径向分布,反馈到通流设计模块,进行迭代设计。通过迭代设计考虑了

环壁附面层、二次流、叶尖间隙泄漏流、径向掺混等三维流动效应的影响,提高了通流计算精度。

三维叶片优化设计采用并行遗传算法,同样在流场计算中加入吸气处理,使之能够进行叶片吸力面开槽的流场计算。对得到的叶片进行三维优化,实现三维叶片弯、掠、扭、型面、弦长、子午面流道的组合优化。

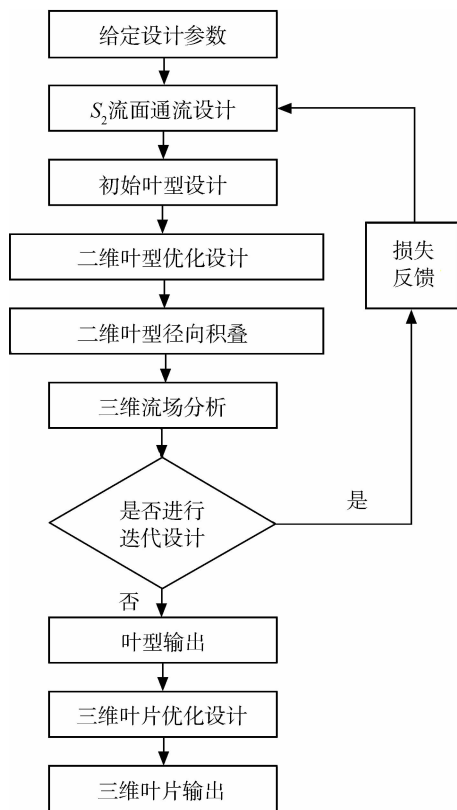


图 1 吸附式叶片优化设计流程

Fig. 1 Flow chart of aspirated blade optimization design

1.1 S_2 流面通流设计

在 S_2 流面通流设计模块,采用流线曲率法求解 S_2 流面流场,得出叶片进出口气动参数和速度三角形沿径向的分布。通流设计结果用于构造 S_1 流面初始叶型,并给出 S_1 流面流场计算的初边值条件和叶型优化的目标。由于吸附式叶型的损失相对于常规叶型较小,且没有试验数据作为参考,本文采用优化方法构造出几个不同扩散因子的叶栅,由此确定初始叶型损失模型;再通过设计迭代,由三维流场计算结果返回损失替代损失模型。

图 2 为由此得到的吸附式叶型损失-扩散因子关系曲线,以及与常规无吸气叶型经验损失模型的比较。本文优化得到了扩散因子大于 0.3 的叶型,叶型损失用组合参数 $\omega \frac{\sin \beta_2}{2\tau}$ 表示。图中可

以看出,在一定范围内,随着扩散因子的增大,吸附式叶型比无吸气叶型损失减小幅度的显著增加;同时可以预测,当扩散因子低于 0.3 时,抽吸效果不明显,反而可能会引起损失增加。

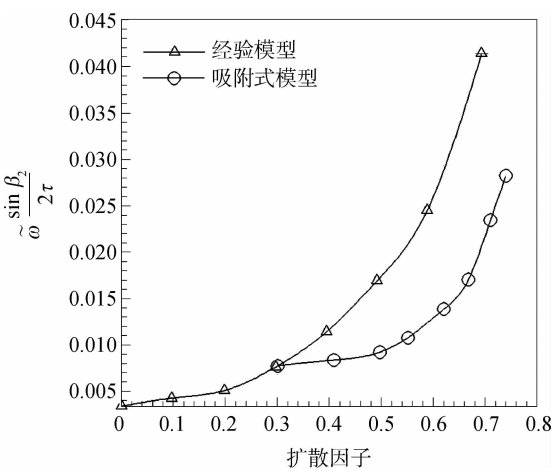


图 2 吸附式叶型损失模型与经验损失模型比较
Fig. 2 Comparison of aspirated loss model and experience loss model

1.2 二维叶型优化设计

回转面即 S_1 流面. 同平面流动相比,回转面流动具有流面弯曲、流面厚度变化、沿流程叶栅栅距变化等特点;对于转子,回转面流动可以考虑旋转产生的离心力的影响. 因此采用回转面流动叶型设计方法,可以减小二维设计与真实流动的差别。

二维叶型优化设计软件主要由数值最优化、正问题流场计算、叶型参数化和目标函数设定 4 个模块构成,其设计流程如图 3 所示。

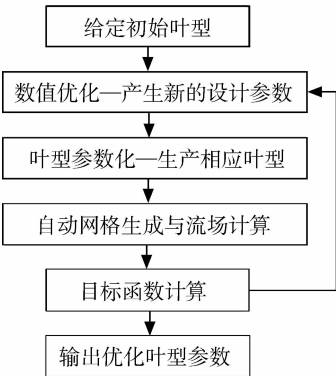


图 3 自动优化设计流程
Fig. 3 Automatic optimization design process

数值最优化模块采用并行遗传算法^[15]. 利用遗传算法的全局寻优能力和并行特性,将局域网

计算机或服务器节点分为主、从处理器,主处理器执行遗传算法进化,并将代表每一代群体个体的设计变量分组发送给从处理器;从处理器将设计变量转化为对应叶型,进行流场计算,并计算目标函数值,将其返回主处理器. 遗传算法并行数值寻优的实现,大幅度减少了优化耗时。

正问题流场计算模块包括网格生成和流场计算^[16]. 网格为 H 型,流场计算采用空间中心差分 and 四步龙格-库塔时间推进法求解,并将上下两个回转面处理成滑移边界,紊流模型采用 Baldwin-Lomax 模型。

叶型参数化模块中,考虑到吸气与叶片型面的相互关联性,将叶型参数和吸气参数作为设计变量. 叶型参数包括弦长、安装角、吸/压力面型线,采用基于修改量的参数化方法,在初始叶型上叠加修改量,修改量用 B 样条曲线描述. 吸气槽用叶型吸力面的一段曲面模拟,主要吸气参数为吸气位置、吸气系数. 吸气位置用吸气槽中心与叶型前缘点的轴向距离同轴向弦长的比值表示,吸气系数用吸气槽流出流量与进口流量的比值表示. 这两个参数均采用直接参数化的方法,给定两者的数值变化范围,优化算法能够比较方便地在此范围内寻优。

二维叶型优化设计需要在设计点满足给定的总/静压比,流动损失最小,因此属于多目标优化. 通过引入权重系数,可以将其转化为单目标优化,目标函数 f 如下所示:

$$f = C_1 (1 - \bar{\omega}) + C_2 \left(1 - \left| \frac{\pi_{c, \text{obj}}^* - \pi_{c, \text{obj}}}{\pi_{c, \text{obj}}^*} \right| \right) + C_3 \left(1 - \left| \frac{\pi_c - \pi_{c, \text{obj}}}{\pi_{c, \text{obj}}} \right| \right) \tag{1}$$

式中 $\bar{\omega}$ 为总压损失系数; $\pi_{c, \text{obj}}^*$, $\pi_{c, \text{obj}}$, π_c , $\pi_{c, \text{obj}}$ 分别为总/静压比的计算值和目標值; C_1, C_2, C_3 为权重系数,由于损失降低的实现难度大,通常 C_1 取值大一些,但要保证目标函数的 3 个部分基本在同一量级水平. 根据式 (1),当目标函数取得最大值时,即可得到最优叶型。

初次设计完成以后,将各叶高最优叶型径向积叠,进行三维流场分析,并提取三维流场计算中转子总压损失系数沿叶高的分布,反馈到通流设计模块,替代原有的损失模型,进行迭代设计. 转子总压损失系数 $\bar{\omega}$ 的计算方法如式 (2) 所示

$$\bar{\omega} = \frac{p_{w2, \text{ad}}^* - p_{w2}^*}{p_{w1}^* - p_1} \tag{2}$$

式中 p_1, p_{w1}^*, p_{w2}^* 分别为实际流动中的进口静压、

进口相对总压及出口相对总压; $p_{w2,ad}^*$ 为等熵假设下出口相对总压.取若干个径向位置的流场参数代入式(2),即可求得转子总压损失系数沿叶高的分布.

通过损失反馈考虑了压气机转子内气体的三维流动效应,以此通流设计结果作为二维叶型优化的初边值条件 and 设计目标,得到的叶型在一定程度上也考虑了三维流动效应,所积叠的叶片具有较好的气动性能.

1.3 三维叶片优化设计

二维叶型优化设计仅作简单的叶型径向积叠,无法进行弯掠设计.可以通过三维叶片优化设计,进一步提高叶片性能.研究表明^[18],叶片弯掠变化带来的径向分力可以影响径向二次流的发展,改变叶片载荷分布,改善端壁区和角区流动,降低流动损失.利用吸附式三维叶片优化设计软件平台,可以进一步进行吸附式转子的子午面流道、积叠线和叶型型面设计.

三维叶片优化设计软件以二维叶型优化设计为基础,数值最优化仍采用并行遗传算法,叶片通道内三维流场计算采用 Denton 提出的基于黏性体积力方法,如文献^[16]所示.叶片参数化采用在二维叶型优化设计径向积叠叶片上叠加修改量的方法.子午面流道、叶型型线、弦长、安装角均为二维曲线;叶型积叠线为三维曲线,可以将其分解为切向弯、前后掠两个二维曲线.这样,三维叶片的参数化便可看作若干个二维曲线的参数化.转子吸气位置、吸气系数的参数化与二维叶型优化设计保持一致,只是优化中不修改吸气参数.

三维叶片优化设计的目标是设计点达到给定的流量、总压比,效率最高.目标函数 f 构造如下所示:

$$f = C_1(\eta^* - 0.5) + C_2\left(1 - \left|\frac{\dot{m} - \dot{m}_{obj}}{\dot{m}_{obj}}\right|\right) + C_3\left|\frac{\pi_c^* - \pi_{c,obj}^*}{\pi_{c,obj}^*}\right| \quad (3)$$

式中 η^* 为转子设计点等熵效率; $\dot{m}, \dot{m}_{obj}$ 为设计点流量的计算值和目标值.优化过程中寻找目标函数的最大值,以得到符合要求的高效率吸附式转子.

2 高负荷低转速压气机转子设计应用

为验证软件平台的有效性,本文以高负荷低转速压气机转子为例,进行吸附式二维叶型优化

设计及三维叶片优化设计研究.转子通流设计所需主要设计参数如表 1 所示.

表 1 转子主要设计参数
Table 1 Main design parameters of rotor

参数	数值
叶片数	29
总压比	1.65
质量流量/(kg/s)	28.68
转速/(r/min)	8 002
叶尖稠度	1.4
叶根稠度	1.9
进口轮毂比	0.63
出口轮毂比	0.71
进口叶尖直径/m	0.545 6
出口叶尖直径/m	0.545 6
叶尖载荷 $\Delta H/U_{tip}^2$	0.86

针对 5%叶高~95%叶高进行 7 个型面的叶型设计,得到系列低损失、高效率的二维叶型.表 2 为优化叶型吸气参数沿径向的分布.由于吸气参数沿径向存在突变,考虑实际实施的可行性,本文对吸气系数作算术平均处理,并将吸气位置调整为优化位置的线性拟合值.图 4 显示,调整以后各叶高二维叶型总压损失没有明显的变化.

表 2 优化叶型吸气参数
Table 2 Suction parameters of optimized profiles

径向位置	调整前吸气位置	调整前吸气系数	调整后吸气位置	调整后吸气系数
5%叶高	0.521	0.0081	0.582	0.011
15%叶高	0.573	0.011	0.592	0.011
30%叶高	0.688	0.012	0.605	0.011
50%叶高	0.674	0.011	0.625	0.011
70%叶高	0.612	0.013	0.644	0.011
85%叶高	0.672	0.010	0.657	0.011
95%叶高	0.633	0.012	0.667	0.011

图 5 为优化前后各叶高二维叶型主要气动参数变化情况,其中优化目标值是由 S_2 流面通流设计提供.从图中可以看出,优化以后各叶高二维叶型总压损失系数有大幅下降,效率也有明显提高.图 5(c)、图 5(d)显示,经过优化,总/静压比均能与设计目标较好吻合,较之原始叶型改善明显.

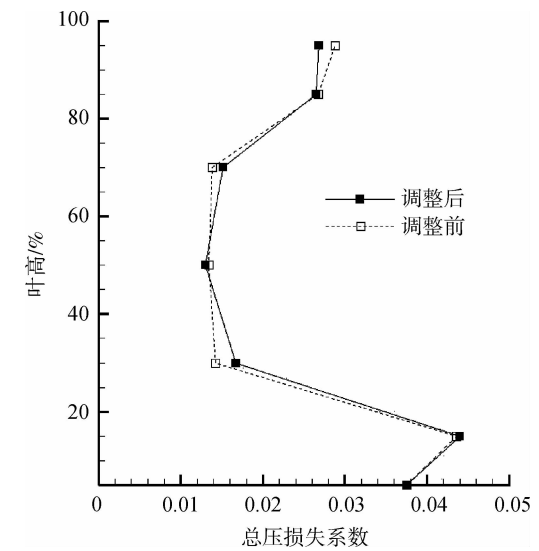
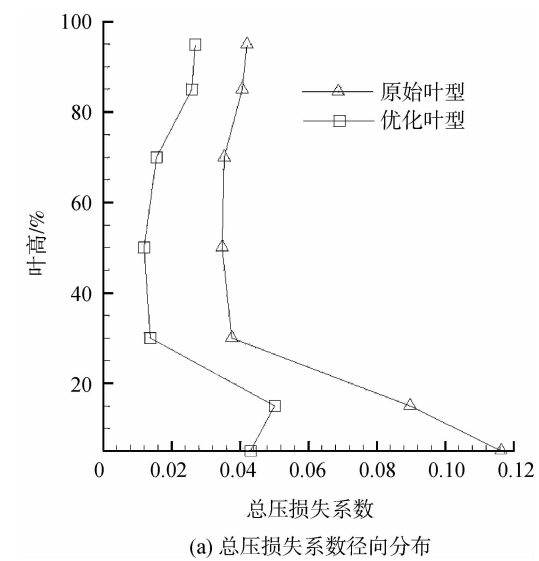
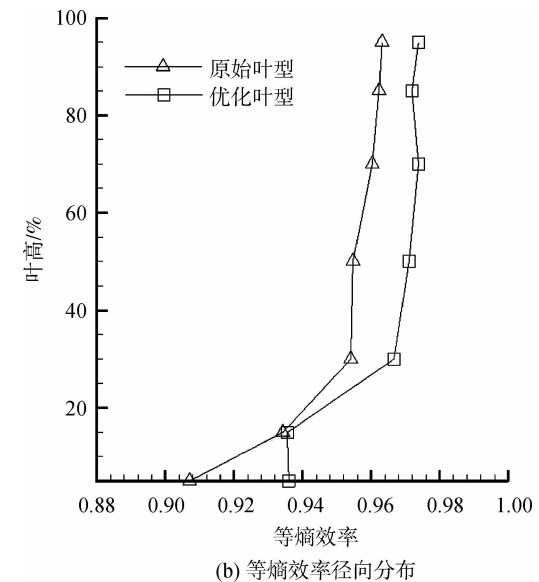


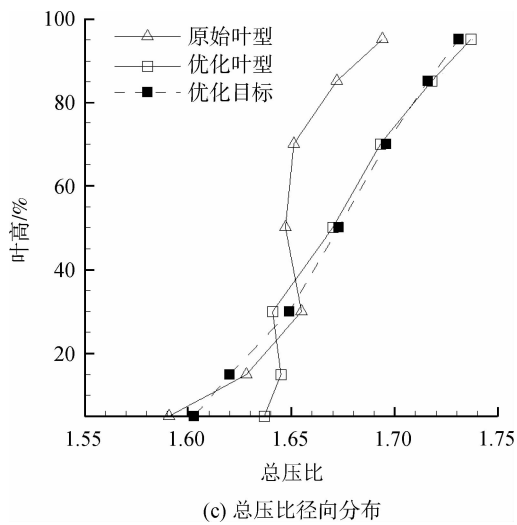
图 4 吸气参数调整前后总压损失系数沿径向分布
Fig. 4 Distribution of loss before and after the adjustment of blade profiles



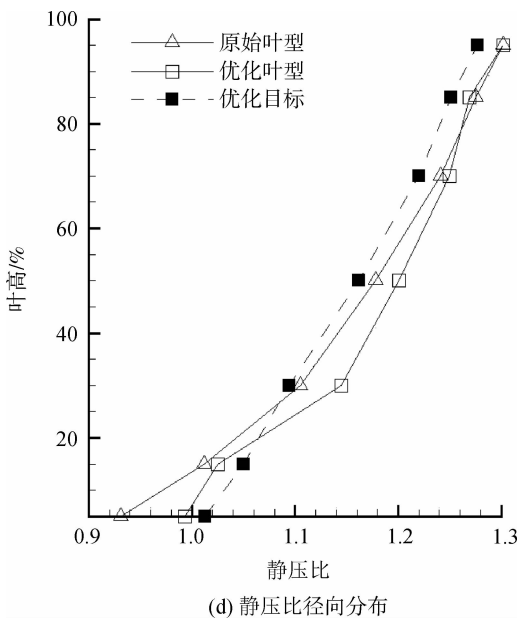
(a) 总压损失系数径向分布



(b) 等熵效率径向分布



(c) 总压比径向分布



(d) 静压比径向分布

图 5 优化前后各叶高二维叶型气动参数分布
Fig. 5 Distribution of profile aerodynamic parameters before and after optimization

将优化叶型沿型心径向积叠,进行 Numeca 三维流场计算.叶片主流区采用 HOH 型网格,叶尖间隙采用蝶形网格,并在吸力面进行开槽处理,网格总量约为 52 万.三维流场计算结果如表 3 所示.可见,初次设计转子流量、总压比、等熵效率均略低于设计目标,但差别不大.

提取 Numeca 三维流场计算总压损失系数沿径向分布,进行反馈设计.以初次设计转子各叶高二维叶型为初始叶型,以新的通流设计结果为设计目标,重新进行二维叶型优化设计和三维流场分析.从表 3 可以看出,经过反馈设计,转子通流能力有所增强,总压比比初次设计提升了 0.6%;等熵效率也超出了设计目标.图 6 为反馈设计前

后转子出口总压比、等熵效率切向平均值沿径向分布。可以看出,经过反馈设计,通流计算精度提高,优化所得吸附式转子总压比、等熵效率与设计目标更为吻合。由于端壁附近流动呈强三维性,存在较大的三维损失,初次设计转子在叶根、叶尖等位置计算值与目标值有较大误差,经过损失反馈,误差得到改善。

表 3 优化转子性能参数			
Table 3 Performance parameters of optimized blade			
参数	流量/(kg/s)	总压比	等熵效率
设计目标	28.68	1.650	0.9600
初次设计	28.31	1.629	0.9583
反馈设计	28.84	1.638	0.9614

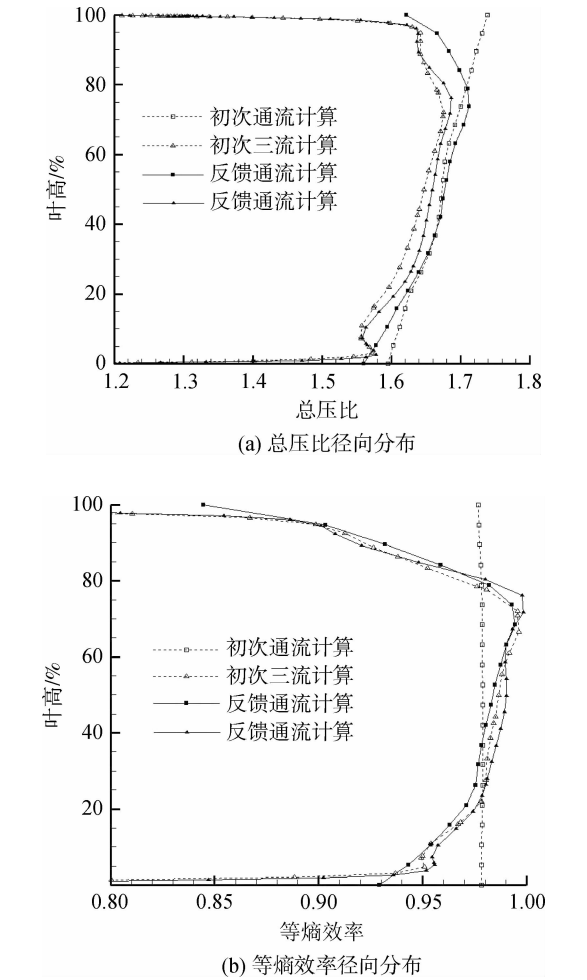


图 6 转子出口总压比、等熵效率切向平均值沿径向分布

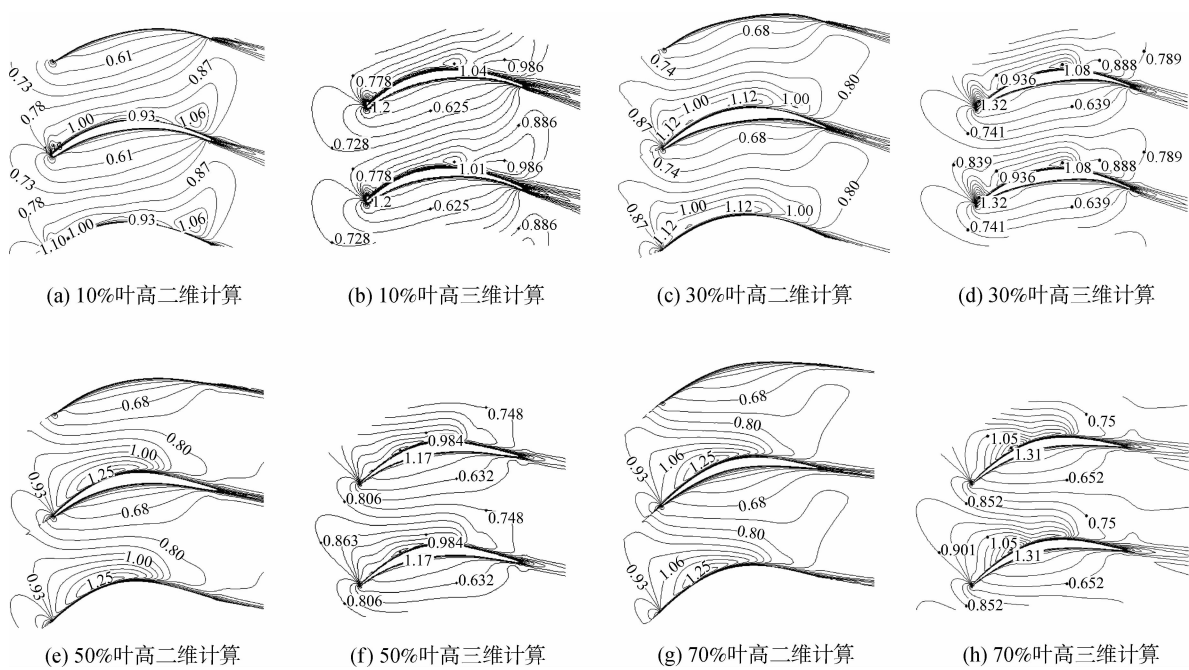
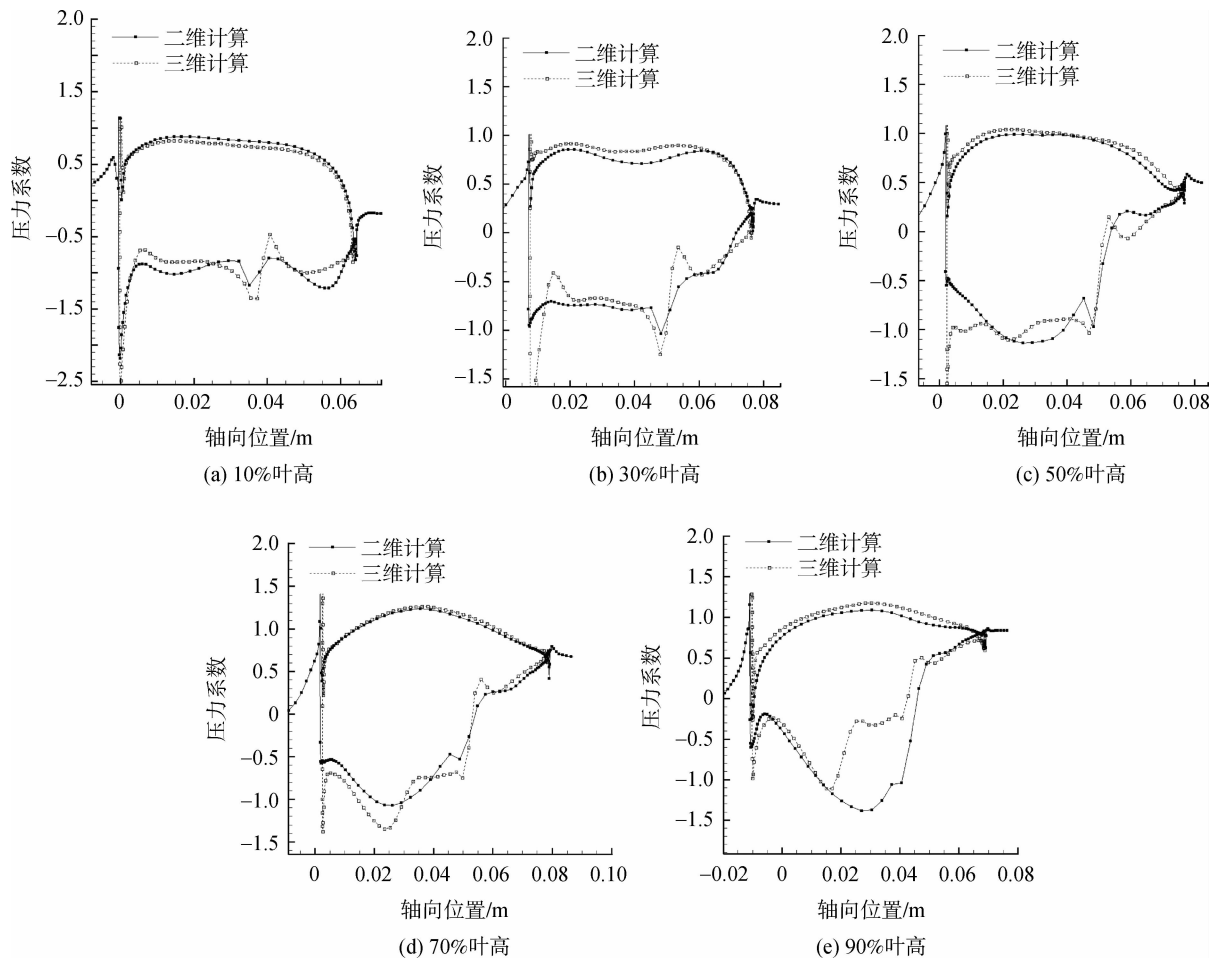
Fig. 6 Distribution of tangential average pressure ratio and isentropic efficiency along the radius of rotor

图 7 为反馈设计吸附式转子二维叶型流场计算(以下简称二维计算)与三维叶片流场计算(以下简称三维计算)叶片表面压力系数在 10%叶高、30%叶高、50%叶高、70%叶高、90%叶高处的分布。本文压力系数 C_p 的定义为 $C_p = (p - p_1) / (p_1^* - p_1)$, p, p_1, p_1^* 分别为当地静压、进口静压和进口总压。图 8 为采用两种方法计算得到的 S_1 流面相对马赫数等值线分布。图中可以看出,在 10%叶高~70%叶高范围两种计算方法吻合较好,载荷分布和流场结构基本一致。叶尖附近二维计算与三维计算差别较大,受叶尖间隙泄漏流影响,三维计算斜激波角减小,激波位置前移,吸力面静压回升提前。同时,受端壁附面层阻滞作用,三维计算气流速度减慢,超声速区较之二维计算小。可见,吸附式转子叶片通道内三维流动在势流区符合任意回转面二维特征。

对准三维方法设计的吸附式转子进行三维叶片优化设计,可以进一步提升叶片性能。本文主要对积叠线弯掠、子午面流道进行设计,得到三维优化叶片。图 9 为三维优化前后叶片子午面流道变化图。可以看出,优化叶片子午面流道在进口段略有扩张,流通面积有所增大,但变化不大;出口段子午面流道稍有收缩,促使出口气流加速,抑制角区分离,减小掺混损失。

图 10、图 11 分别为三维优化叶片视图及积叠线弯掠变化图。弯掠均取变化的相对值,即与叶高的比值。三维优化叶片在叶根处略有反弯,相对值约为 0.004 3,而在其他叶高均为正弯,约在 75%叶高处取得 0.006 5 的最大相对正弯。总体来说,三维优化叶片弯量变化很小,大致呈拱形,有助于降低叶片端壁区载荷,减小叶尖间隙泄漏流,抑制角区分离。积叠线掠沿叶高变化明显,在 15%叶高以下表现为前掠,叶根处相对变化量为 0.036;在其余叶高均表现为后掠,叶尖相对变化量为 0.028。叶根前掠促使下端壁面叶片载荷由前缘向尾缘移动,叶尖后掠则与之相反。

表 4 为三维优化叶片设计点性能参数。可以看出,优化后流量更加贴近设计目标,总压比略有降低,等熵效率有了进一步提升。图 12 为三维优化叶片设计点出口总压比、等熵效率切向平均值沿径向分布。相比于反馈设计积叠叶片,三维优化叶片叶尖压比增加,在叶片中下部压比有所降低;叶片叶尖间隙泄漏流受到抑制,叶尖处效率分布得到改善。



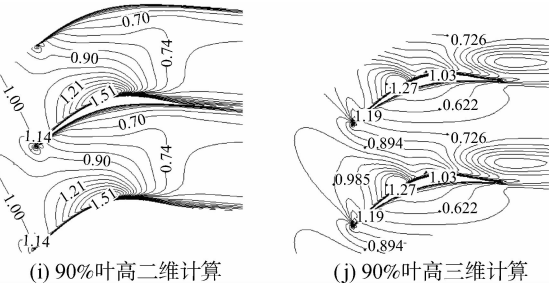


图 8 吸附式转子 S_1 流面相对马赫数等值线分布
Fig. 8 Relative mach number contour lines distribution on S_1 surface of aspirated rotor blade

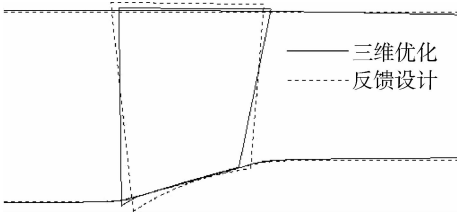


图 9 三维优化前后子午面流道变化
Fig. 9 Change of meridional flow passage before and after 3-D optimization

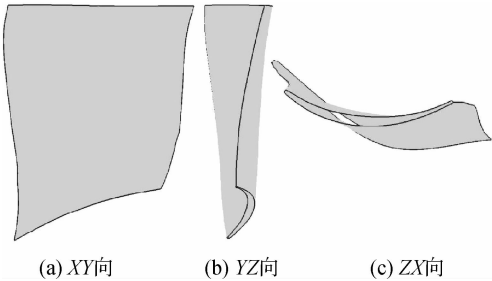


图 10 三维优化叶片视图
Fig. 10 View of 3-D optimized blade

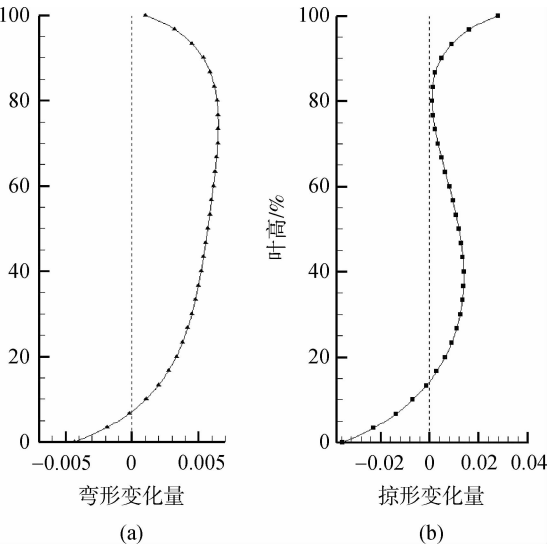
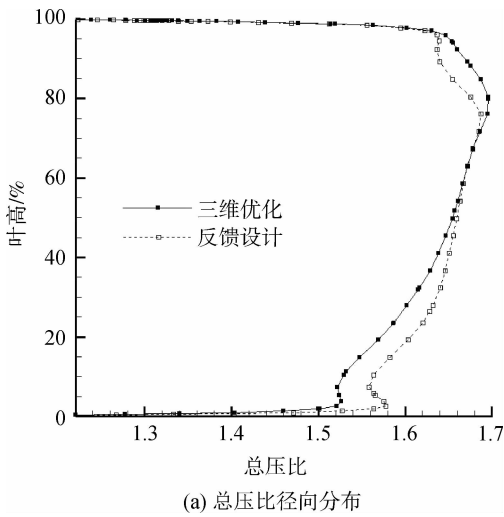


图 11 积叠线弯掠变化
Fig. 11 Change of bow and sweep for stacking curve

表 4 三维优化叶片性能参数

Table 4 Performance parameters of 3-D optimized blade

叶片状态	流量/(kg/s)	总压比	等熵效率
设计目标	28.68	1.650	0.9600
三维优化	28.58	1.631	0.9650

图 13 显示三维优化前后吸附式压气机转子叶片在非设计点的性能. 可以看到, 三维优化以后, 叶片在全工况下压比有所下降; 效率在小流量工况下有小幅下降, 但随着流量的增加, 三维优化叶片效率较之优化前有明显提升, 稳定工作范围也有小幅增加. 但由于优化之前该转子叶片气动性能已经较好, 而三维优化没有对叶片型面进行

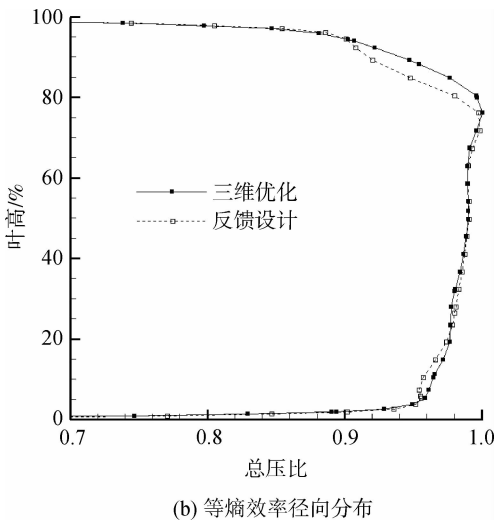


图 12 三维优化前后叶片出口总压比、等熵效率切向平均值沿径向分布
Fig. 12 Distribution of tangential average pressure ratio and isentropic efficiency along the radius of blade before and after 3-D optimization

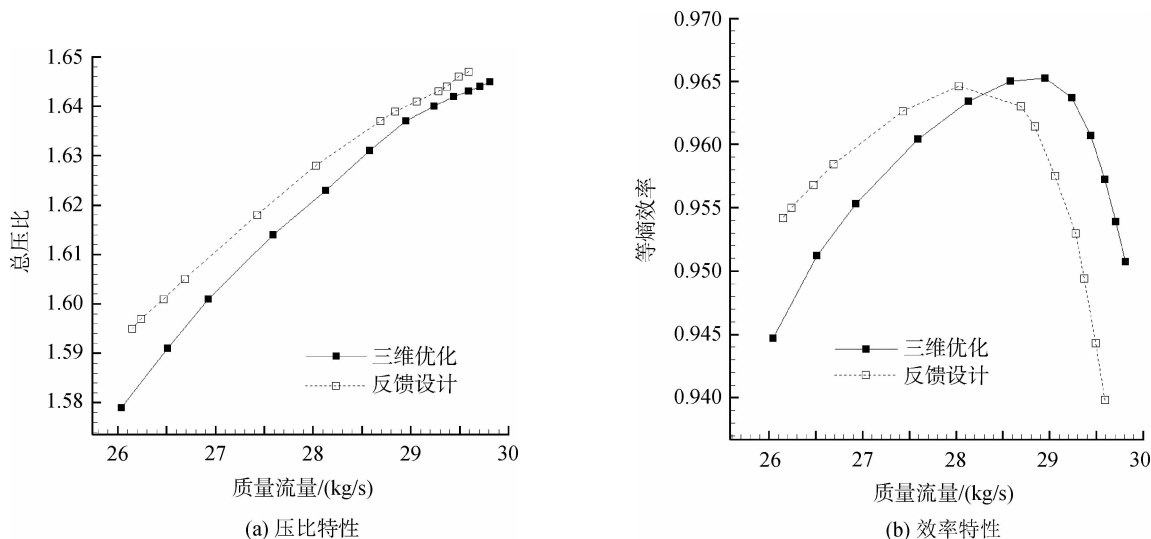


图13 三维优化前后叶片压比、效率特性曲线

Fig. 13 Pressure ratio and efficiency performance map of aspirated blade before and after 3-D optimization

修改,因此得到的收益不够明显。

3 结 论

本文以低转速压气机转子为对象,进行吸附式叶片气动设计方法的研究,得出以下结论:

1) 二维计算与三维计算流场一致性较好,表明吸附式转子叶片通道内三维流动在势流区符合任意回转面二维特征。

2) 通过迭代设计,引入损失反馈环节,应用三维计算结果提供 S_2 流面通流计算损失模型,可以提高 S_2 流面流场计算精度。

3) 将最优化方法与正问题流场数值模拟技术相结合,建立吸气与型面耦合的二维叶型优化设计和三维叶片优化设计软件平台。

4) 应用所构建的设计软件平台,进行吸附式压气机转子设计,实现了高气动性能。

参考文献:

[1] 方昌德. 流动控制技术在航空涡轮推进系统上的应用[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2003, 16(2): 1-6.
FANG Changde. Application of flow control technology in aero turbine propulsion system[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2003, 16(2): 1-6. (in Chinese)

[2] 刘波, 南向谊, 王掩刚, 等. 吸附式风扇/压气机技术的进展与展望[J]. 航空动力学报, 2007, 22(6): 945-954.
LIU Bo, NAN Xiangyi, WANG Yangang, et al. Development and prospect of aspirated fan/compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(6): 945-954. (in Chinese)

[3] Kerrebrock J L, Reijnen D P, Ziminsky W S, et al. Aspirated compressors[R]. ASME Paper 97-GT-525, 1997.

[4] Kerrebrock J L, Drela M, Merchant A A, et al. A family of design for aspirated compressors[R]. ASME Paper 98-GT-196,

1998.

[5] Kerrebrock J L. The prospects for aspirated compressors [R]. AIAA-2000-2472, 2000.

[6] Merchant A A. Design and analysis of axial aspirated compressor stages[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1999.

[7] 周海, 李秋实, 陆亚钧. 跨音风扇转子叶片抽吸气数值实验探索[J]. 航空动力学报, 2004, 19(3): 408-412.
ZHOU Hai, LI Qiushi, LU Yajun. Prospects of numerical analysis of an aspirated transonic fan rotor[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(3): 408-412. (in Chinese)

[8] 宋彦萍, 陈浮, 赵桂杰, 等. 附面层吸除对大转角压气机叶栅气动性能影响的数值研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(4): 561-566.
SONG Yanping, CHEN Fu, ZHAO Guijie, et al. Numerical investigation of boundary layer suction in compressor cascade with large turning angles[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(4): 561-566. (in Chinese)

[9] 刘波, 南向谊, 陈云永. 附面层抽吸对转子激波结构和分离流动的影响[J]. 航空学报, 2008, 29(2): 315-320.
LIU Bo, NAN Xiangyi, CHEN Yunyong. Effects of BLS on the shock wave structure and separation flow of fan rotor [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(2): 315-320. (in Chinese)

[10] 刘波, 李俊. 吸附式压气机叶型优化设计[J]. 航空发动机, 2012, 38(6): 1-4.
LIU Bo, LI Jun. Optimization for aspirated compressor airfoil[J]. Aeroengine, 2012, 38(6): 1-4. (in Chinese)

[11] 牛玉川, 朱俊强, 聂超群, 等. 吸附式亚声速压气机叶栅气动性能实验及分析[J]. 航空动力学报, 2008, 23(3): 483-489.
NIU Yuchuan, ZHU Junqiang, NIE Chaoqun, et al. Experimental investigations of aerodynamics performance of aspirate subsonic compressor cascade[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(3): 483-489. (in Chinese)

[12] 陈绍文, 郭爽, 陈浮, 等. 高负荷吸附式压气机叶栅开槽方案实验研究[J]. 实验流体力学, 2010, 24(5): 26-30.

CHEN Shaowen, GUO Shuang, CHEN Fu, et al. Investigation on slot schemes of highly-loaded aspirated compressor cascade[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanich, 2010, 24(5): 26-30. (in Chinese)

[13] 王掩刚, 国睿, 任思源, 等. 跨声速叶栅叶表附面层抽吸试验[J]. 航空动力学报, 2011, 26(9): 2068-2074.

WANG Yangang, GUO Rui, REN Siyuan, et al. Experimental investigation of boundary layer suction effects on a transonic cascade[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(9): 2068-2074. (in Chinese)

[14] 汪光文, 周正贵, 胡骏. 基于并行遗传算法压气机叶片自动优化设计[J]. 航空动力学报, 2006, 21(5): 923-929.

WANG Guangwen, ZHOU Zhenggui, HU Jun. Design optimization of compressor blades using parallel genetic algorithms[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(5): 923-929. (in Chinese)

[15] 周正贵, 邱名, 徐夏, 等. 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, QIU Ming, XU Xia, et al. Automatic optimization design of compressor/fan 2D blade profiles[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(11): 1987-1997. (in Chinese)

[16] 邱名, 周正贵. 优化方法在轴流压气机转子叶片气动设计中的应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(1): 75-81.

QIU Ming, ZHOU Zhenggui. Application of numerical optimization method in aerodynamic design of axial compressor rotor[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 45(1): 75-81. (in Chinese)

[17] 安志强. 基于准三维方法的轴流压气机/风扇叶片气动优化设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.

AN Zhiqiang. Axial compressor/fan blade aerodynamic optimization design based on a quasi three-dimenslonal approach[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)

[18] 汪光文, 周正贵, 胡骏. 基于优化算法的压气机叶片气动设计[J]. 航空动力学报, 2008, 23(7): 1218-1224.

WANG Guangwen, ZHOU Zhenggui, HU Jun. Aerodynamic design of compressor blade using optimization algorithm[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(7): 1218-1224. (in Chinese)