

轴流压气机叶片优化设计

伊卫林, 黄鸿雁, 韩万金

(哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 开发了基于梯度法的数值优化程序, 并与三维粘性流场求解程序相结合对跨音压气机叶片进行了以绝热效率最大为目标的三维气动优化设计。先对其进行了沿弦长方向掠设计, 绝热效率可提高约 0.65%。再对所得掠叶片进行叶型中弧线优化设计得到最终叶片, 与初始叶片相比绝热效率提高达 1.05%。优化结果表明, 动叶片的单纯掠型叶片改进气动性能有限, 而弦向掠与中弧线的联合优化设计可以显著改善叶片排内流动状况, 并具有良好的变工况性能。

关 键 词: 压气机; 掠动叶; 中弧线; $N-S$ 方程; 优化设计

中图分类号: TK474.8 文献标识码: A

1 引 言

叶轮机械内部流动包含有边界层分离、二次流、旋涡以及激波与边界层相互干扰等复杂现象。跨音压气机中的三维激波结构是流动损失的主要根源, 因此如何控制激波的位置与强度是提高压气机性能的主要因素之一。Wadia 和 Denton 等人都曾对掠叶片进行过深入研究^[1~4], 并证明采用掠叶片可以改变跨音压气机叶片中的三维激波结构。叶型中弧线对压气机叶片气动性能也有显著影响, 与叶片流道内激波产生的强度与分布以及附面层的分离状态都密切相关。可以推测, 积叠线形状的空间变化只能在一定程度上改善内部流动状况, 再配以合适的叶型必定能进一步提高压气机工作性能。

随着计算速度的提高及 CFD 三维流场求解精度的完善, 基于 $N-S$ 方程的全三维流场数值模拟用于叶轮机械气动设计成为可能。近年来, 梯度法、遗传算法、模拟退火算法和响应面法等数值优化算法广泛应用于叶轮机械优化^[3~9]。但是由于遗传算法和模拟退火算法的耗时性, 使其无法应用于工程实际, 响应面方法虽然简单、省时, 但需要较多的人工操作, 尤其是前期的样本如果选取不好, 将在很大程度上破坏其寻优能力。因此, 在叶轮机械优化设计

中梯度法的应用仍最为广泛。

为了研究掠及相应叶型变化对压气机气动性能的影响, 本文采用常规 H 型网格生成程序、基于雷诺平均 $N-S$ 方程的全三维流场模拟程序和基于梯度法的数值优化程序, 对某跨音压气机叶片进行优化设计。

2 控制方程及数值方法

采用有限体积法求解圆柱坐标系下的雷诺平均 $N-S$ 方程。空间求解采用二阶精度的中心差分格式加二阶、四阶人工粘性项, 时间方向求解采用四步 Ronger-Kutta 格式。湍流模型为壁面函数修正的 $B-L$ 模型, 采用隐式残差光滑、局部时间步及多重网格等加速收敛技术, 计算中采用两重网格, 使程序具有较快的收敛速度, 尤其适用于数值优化设计。网格采用常规 H 型网格, 网格数为 $41 \times 145 \times 41$ 。此种网格生成方法简单, 在数值优化过程中, 由于其参数为随机选择过程, 如果网格生成质量不高, 极易出现畸形网格, 从而导致优化过程无法继续。本文采用的网格生成程序则没有出现这一情况。

3 叶型参数化表达

在叶型的气动优化设计中, 需要对其进行参数化表达, 以便采用尽可能少的设计变量来控制叶片形状。另外还必须保证叶片型线曲率的光滑分布。控制点类曲线可以很好地解决这些问题。本文采用 5 个控制点的 3 次 B 样条曲线分别对 25%、50%、75% 叶高的叶型中弧线进行参数化表达, 图 1 为 25% 叶高示意图。对于每个叶型以中弧线的首末端点为两控制点, 并保证其在设计过程中不变, 其余 3 个控制点为设计变量沿叶型型线垂直方向变化, 这样既可以有

效地减少设计变量的数量, 还能保证其寻优范围。

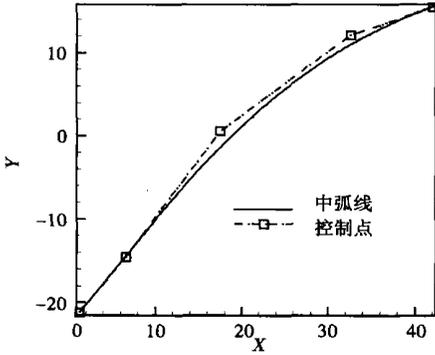


图 1 中弧线和控制点示意图

4 优化方法及设计

尽管遗传算法、模拟退火算法等在叶轮机械优化设计中有所应用, 但由于其理论尚待完善及气动设计本身的长时间性, 其在现阶段仍无法应用于工程实际。如 Ernesto 对跨音压气机叶选取 3 个截面叶型^[4], 考虑叶型及积叠线变化, 共 23 个设计变量, 采用遗传算法进行优化设计, 需要高达 2 000 h 的工作时间, 显然这是不可行的。为了降低优化设计时间, 本文开发了可在单机上运行的基于梯度法的优化程序。

本文的基本想法是定义目标函数 $F(X)$, 在有限制 $g_j(x) \leq 0$ 情况下使其达到最小化, 其中 X 为设计变量矢量, 其分量 $X_i^l \leq X_i \leq X_i^u$ 具有上下界限制。优化过程中的梯度信息采用有限差分方法获得。

定义最大绝热效率为目标函数 $f = 1 - \eta$, 其中效率的定义为:

$$\eta = \left[\left(P_{0out} / P_{0in} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] / \left[T_{0out} / T_{0in} - 1 \right]$$

初始叶片由五个叶型构成, 分别为根部、25%叶高、50%叶高和 75%叶高、顶部叶型。在此基础上进行网格生成并进行计算。先对初始叶片进行积叠线掠优化设计, 以叶片前缘曲线为积叠线, 以根部为积叠点并保持不动, 其余截面从根部到顶部依次沿前后缘弦向在各自弦长的 5%、10%、25%和 50%范围内变化, 共计 4 个设计变量。优化过程中被优化的前缘线采用 B 样条曲线连接, 以确保其光滑性, 得到了最优掠形叶片。然后再对得出的优化掠叶片进行了中弧线优化设计, 以 25%、50%、75%叶高的经过参数化的 3 个叶型的控制点为设计变量, 共计 9 个。每个叶型的厚度分布不变, 在新中弧线上叠加生成新叶型。结果表明气动性能可进一步提高, 具体的性能参数与气动分析将在下文进行。在优化过程中分别对总压比与质量流量加以限制:

$$0.97 \times P_{ori} \leq P_{opti} \leq 1.05 \times P_{ori}$$

$$\left| \frac{m_{opti} - m_{origin}}{m_{origin}} \right| < 0.5\%$$

这是为了尽可能地保证其工作点不变, 图 2 为初始叶片与各优化叶片对比。在本算例中为了保证优化过程能够自动进行, 叶型控制点的变化范围相对较小, 以确保不会计算中止, 因此最终叶型变化也较小, 效率提高较小。但这并不是说中弧线的变化对流动性能的影响不显著, 这需要对其进行专门的分析研究。

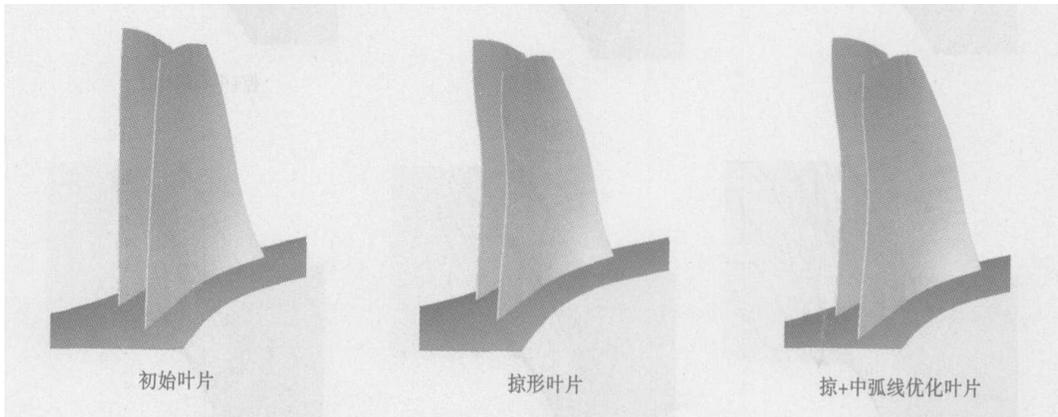


图 2 初始叶片与各优化叶片

5 结果分析

初始叶型与优化叶型设计结果的气动参数对比见表 1。仅做掠型优化设计后效率可提高约 0.65%, 再对其进行中弧线优化设计后效率还可进

一步提高，最终绝热效率提高约 1.05%。由于在优化过程中适当地加入了限制，其它的两个重要参数压比与质量流量未发生明显变化。可以看出，压比基本未变，质量流量随着效率的增大而略有增加，最终优化结果的质量流量已经接近给定限制的上限，这是气动参数之间相互平衡的结果。

表 1 初始叶型与优化叶型参数对比

	初始叶片	掠形叶片	掠+中弧线优化叶片
总压比	2.141 04	2.142 00	2.146 40
绝热效率/ %	86.273 3	86.924 0	87.327 9
质量流量/ $\text{kg}^\circ\text{s}^{-1}$	20.45	20.51	20.54

图 3 为优化设计后叶片与初始叶片气动参数沿叶高分布的对比图。从中可以看出，绝热效率在下半叶展有所降低，整体效率提高主要发生在 60% 以上叶高。压比沿叶高的分布未减小，而是略有增加，这是由于质量流量增大，通流能力有所增强造成的。对于绝热效率沿展向有升有降，是各个截面负荷分配的结果，也是由于根部积叠点的限制导致了其附近的性能提高。因此，积叠点与积叠线的选取是非常重要的。在掠叶片之后再对中弧线进行优化设计，虽然未能完全抵消此处的流动恶化情况，但仍一定程度上有所改善，效率有所提高。优化后叶型更适合于此处的工作状况。

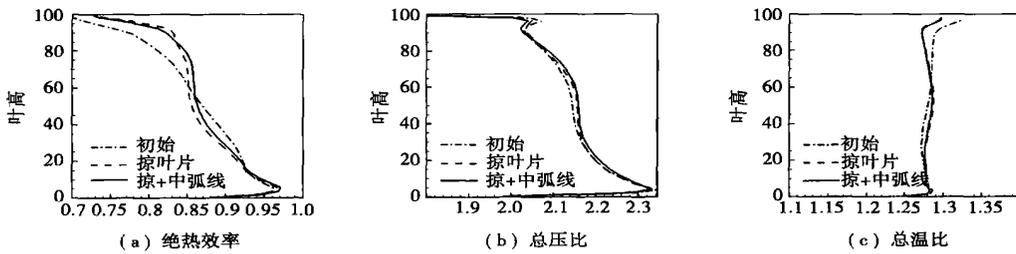


图 3 优化与初始型出口参数展向分布

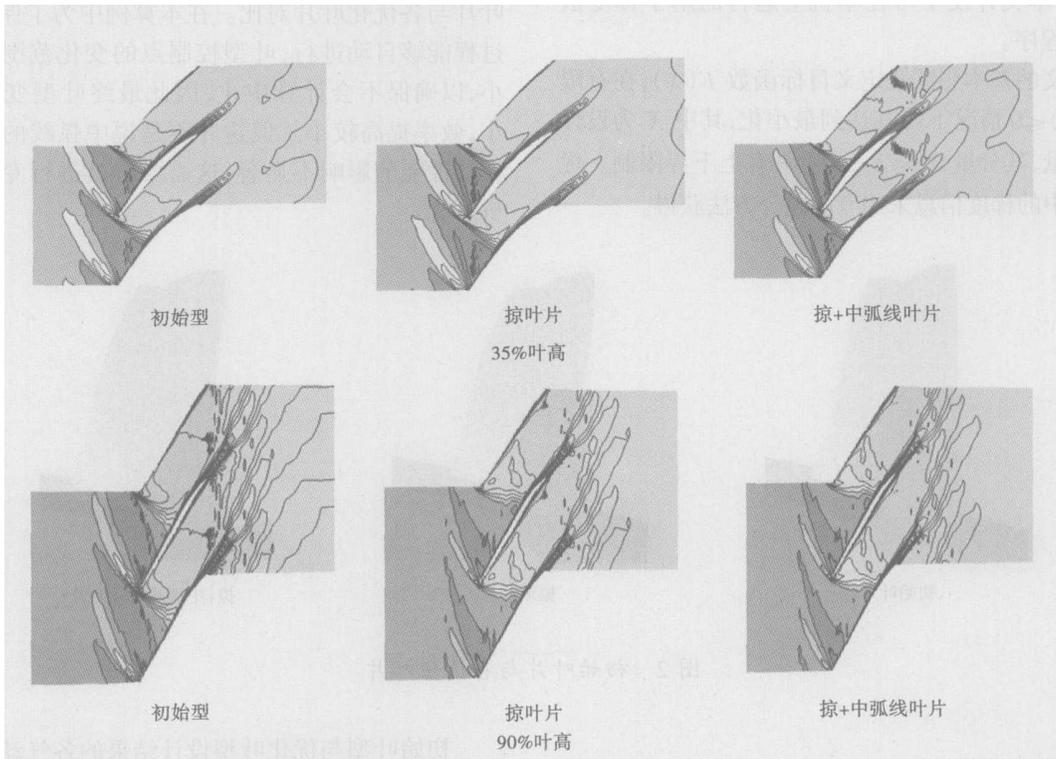


图 4 不同截面马赫数等值线对比

由不同截面马赫数等值线对比(见图 4)也可以看到, 绝热效率的提高主要发生在上半叶展。在 90% 叶高相对马赫数对比图中, 可以看出掠型叶片与原型相比, 前缘激波无论在强度还是在波形上都发生了明显变化。由强正激波变为弱斜激波, 因此效率有较明显提高。由此可见, 叶片前掠对前缘激

波结构强度的影响是十分明显的。而再经过中弧线优化之后, 前缘激波进一步后掠, 激波边界层干扰位置明显移向下游而且强度减弱。与仅经过掠优化的叶片相比, 相应位置的叶型更适合其工况, 因此也具有更高的效率。

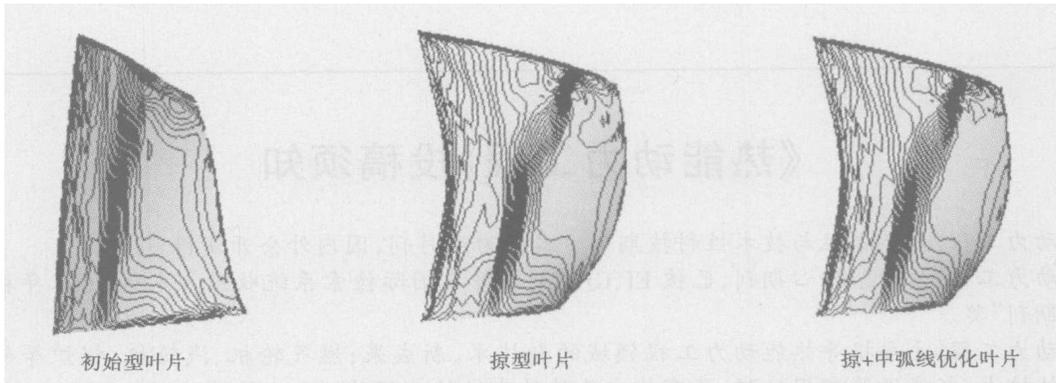


图 5 吸力面附近马赫数等值线对比

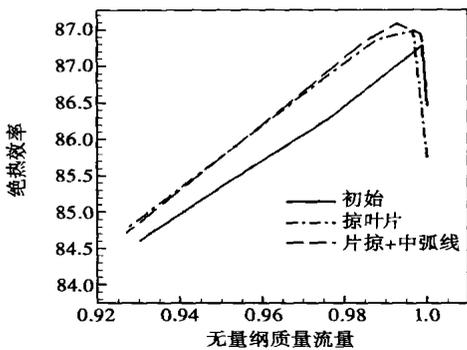


图 6 特性线对比

从图 5 吸力面附近马赫数等值线可以看出, 在初始叶片中, 激波强度很强且为正激波, 这正是高损失的来源。而前掠叶片明显地改善了三维激波结构, 通道内激波形状不再为正激波, 而是弱强度的斜激波, 因此有效地降低了通道内的流动损失。而中弧线优化叶片与掠叶片相比, 激波结构变化就不明显, 可见中弧线对空间三维激波结构的改变影响是较小的。

单一工作点下进行的优化设计, 必须考虑其变工况性能。图 6 为 3 套动叶片的变工况特性对比。从图中可以看出, 掠叶片及最终叶片都具有良好的变工况性能, 工作范围相对宽些。最终经过中弧线优化的叶片具有最高的尖峰效率及最大的工作范围, 只是在近失速工况附近效率有所降低。

6 结 论

本文采用雷诺平均 $N-S$ 方程的全三维数值模拟程序及梯度法的数值优化程序对某型跨音压气机动叶进行了叶片掠及中弧线形状的有限制优化设计, 得到了最优叶片, 并对其进行了详细的流场分析。

从优化结果看, 前掠动叶能显著改善叶片前缘激波结构, 削弱激波强度, 降低激波损失, 并能改善其变工况性能。再对其进行中弧线优化设计, 能进一步改善动叶片排内的流动。由此可见, 叶片单纯发生掠型变化以后, 相应叶型已不处于最佳工作点, 可以通过对中弧线形状的重新设计, 得到更加适合的叶型。掠型叶片的设计可能会造成局部位置流动恶化, 最终性能的改进是各部分相互抵消的结果。相比较而言, 最终优化叶片具有最宽的工作范围及最高的尖峰效率, 只是在近失速点附近绝热效率有所降低。

三维空间的积叠线形状与二维叶型的中弧线形状如何合理的搭配以提高压气机性能是一个值得深入研究的方向。

参考文献:

- [1] WADIA A R, SZUCS P N, CRALL D W. Inner working of aerodynamic sweep [R]. ASME Paper, 1997-GT-401.
- [2] DENTON J D, XU L. The effects of lean and sweep on transonic fan

- performance[R]. ASME Paper: 2002-GT-30327.
- [3] JUNE CHUNG, LEE KI D. Shape optimization of transonic compressor blades using quasi-3D flow physics[R]. ASME Paper, 2000-GT-489.
- [4] ERNESTO BENINI. Three-dimensional multi-objective design optimization of a transonic compressor rotor[J]. **Journal of Propulsion and Power**, 2004, 20(3): 559-565.
- [5] SHAHROKH SHAHPAR DR. A comparative study of optimisation methods for aerodynamic of turbomachinery blades[R]. ASME Paper, 2000-GT-523.
- [6] AHN CHAN SOL, KIM KWANG YONG. Aerodynamic design optimization of an axial flow compressor rotor[R]. ASME Paper: 2002-GT-30445.

(丹 编辑)

《热能动力工程》投稿须知

《热能动力工程》是学术性与技术性科技期刊。本刊为双月刊,国内外公开发刊。

《热能动力工程》为国家核心期刊,已被 EI、CJ、CA 等著名国际检索系统收录。本刊 2003 年被国家评为“百种重点期刊”奖。

《热能动力工程》主要报导热能动力工程领域的新技术、新成果;燃气轮机、汽轮机、锅炉等领域科研成果;传动元件技术、新能源等实用性强,具有推广价值的先进技改经验。

1 投稿简约

1.1 来稿必须有创新性、科学性、准确性。

凡属国家省、部级各类科学研究基金资助项目学术论文,本刊将优先发表。

1.2 初投稿可以采取两种方式:一是一式两份寄本刊;二是电子信箱投稿(Word 文本),本刊电子信箱:rndlgch703@163.com。

1.3 来稿请勿一稿二投。投稿三个月后,无审稿意见,文稿可自行处理。来稿不退,请自留底稿。

1.4 来稿文责自负(学术、保密、署名),编辑部有权对拟用稿件做必要的修改、删节,但实质性内容修改要征得作者同意。

1.5 本刊已入《中国学术期刊(光盘版)》、《万方数据——数字化期刊群》、《中文科技期刊数据库》,作者如不同意将文章编入该数据库,请来稿时声明。

1.6 本刊对录用稿件收取一定的发表费。论文发表后,按其学术水平、质量、字数付给作者稿酬,赠杂志 2 本。

2 要求和注意事项

2.1 稿件论点明确、逻辑严密、数据可靠、文字精炼、图表清晰,并作解密处理。

综述性论文字数不宜超 6000 字;

研究性论文字数不宜超 4000 字。

2.2 题目:不宜超过 20 字;作者署名:保留到第 4 位,其他作者可文后标注或致谢。第一作者应介绍自然简介:性别、出生年月、民族、籍贯(市(县)人)、职称、单位的二级部门、邮编;电子信箱,电话(手机)。

中文摘要:具体、清楚、全面的将论文主要内容反映出来。并将研究目的、试验方法、结果和结论介绍给读者,以 200 字为宜。对背景材料、评论性语言和公式不宜写入摘要中。必须将中文摘要译成英文。摘要中的英文缩略语在第一次出现时,应标注全称。

关键词:所选的关键词应反映文章主题内容(3~8 个为宜)。

中图分类号:请按“中国图书分类法”第 4 版要求标注。

2.3 文、图、表中的物理计量单位必须符合国家标准。物理量符号一律斜体,包括上、下角标。

易混各种符号、希文、拉 字母、大小写、正斜体、上、下角标应用铅笔标注。

2.4 图表随文排版,全文图要统一编号。坐标轴要有名称和单位。每篇文章插图 5 幅为宜。表格用三线表(表中无斜线和竖线)。

2.5 参考文献必须是公开出版物,按文中前后顺序编号。外文作者采用姓前名后格式。名用缩写,不加缩写点。

words: combustion optimization, positive equilibrium, self-optimization, optimal air/coal ratio

锅炉沸腾液体膨胀蒸汽爆炸 (BLEVE) 的小尺寸模拟试验 = **The Small-scale Simulation Test of the Boiling Liquid Expanding-vapor Explosion (BLEVE) of a Boiler** [刊, 汉] / CHEN Si-ning, SUN Jin-hua, CHU Guan-quan, et al (State Key Laboratory of Fire Science under the China National University of Science & Technology, Hefei, China, Post Code: 230026) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 132 ~ 135

During the operation of a boiler there may emerge due to various causes fine and small cracks on the main body of the boiler. With the progress of equipment material aging and in case of abnormal operation the cracks will rapidly expand, leading in extreme circumstances to boiling liquid expanding-vapor explosion (BLEVE). The latter is a kind of physical explosion with a serious destructive force. To study the generation mechanism of BLEVE a small-scale experimental device has been set up to conduct simulation tests. Through the measurement of the changes in temperature and pressure in a vessel at the very moment of explosion the movement of gas-liquid two-phase medium in the vessel can be analyzed for a further study of the cause of the integral rupture of the vessel. It has been found through tests that in the BLEVE process there exist two pressure peaks due to different causes. In this connection, the intense boiling of a superheated liquid can lead to the formation on the liquid surface of a rapidly expanding two-phase flow layer. In the vessel the gas and liquid phase being squeezed there may emerge the first pressure peak. The second pressure peak is mainly sparked by a phenomenon of "liquid hammer", which impacts violently on the vessel. The open hole located at the vessel wall surface may be subjected to a most intense shock force. **Key words:** boiler, boiling liquid expanding-vapor explosion, explosion pressure, two-phase flow

余热锅炉构架护板结构的有限元分析 = **Finite Element Analysis of the Frame-casing Structure of a Waste Heat Recovery Boiler** [刊, 汉] / XIA Yong-jun, LU Nian-li, (College of Mechanical & Electrical Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), ZHAO Xin-zhe, DING Zhao-shun (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 136 ~ 139

The frame-casing structure of a waste heat recovery boiler represents a typical and complicated shell-beam composite structure. In engineering practice a finite element method is mainly used to perform the mechanics analysis of the above-mentioned structure. The problems to be addressed and methods used to deal with them during finite element model-building are discussed, and some modeling techniques of highly practical value presented. The authors have performed a finite element analysis for the frame-casing structure of the waste heat recovery boiler (installed in tandem with model PG917E gas turbine) during its design stage. On the basis of displacement and stress distribution conditions the initial design has been progressively modified and then finalized. The methods employed by the authors may serve as a valuable reference for finite element modeling and mechanics analysis of analogous structures. **Key words:** waste heat recovery boiler, frame-casing structure, shell-beam composite structure finite element method

轴流压气机叶片优化设计 = **Optimized Design of Axial Compressor Blades** [刊, 汉] / YI Wei-lin, HUANG Hong-yan, HAN Wan-jin (College of Energy Science & Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China,

Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 140 ~ 144

A numerical optimization program based on a gradient method has been developed. Furthermore, in conjunction with a program for solving three-dimensional viscous flow fields a three-dimensional aerodynamic optimized design was conducted of transonic compressor rotating blades with the aim of maximizing the adiabatic efficiency. First, a chord-wise sweep optimization design was performed with an increase in adiabatic efficiency amounting to about 0.65% being achieved. Then, an optimization design was conducted to the camber line of the blade profile, thus obtaining the final blade. As compared with a prototype blade, the adiabatic efficiency can be enhanced by as high as 1.05%. It has been found that a swept blade alone can bring about only a rather limited improvement in aerodynamic performance. A combined optimization design involving both a chord-wise sweep and a camber line can lead to a significant improvement in flow conditions in a blade row and also a fine off-design performance. **Key words:** compressor, swept rotating blade, camber line, Navier-Stokes equation, optimization design

某轴流式压气机气动不稳定的相关积分分析 = Correlation-integral Analysis of the Aerodynamic Instability of an Axial-flow Compressor [刊, 汉] / WU Yun, LI Ying-hong, ZHANG Pu, SONG Hui-min (Engineering College under the Air Force Engineering University, Xi'an, China, Post Code: 710038) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 145 ~ 149

Investigated was the aerodynamic instability problem of an axial-flow compressor during throttling tests. A nonlinear correlation-integral method was employed to analyze static pressure signals along the compressor casing-wall surface. The results of the analysis indicate that correlation-integral values of the static pressure signals at a given point of the compressor stator passage casing-wall surface will undergo regular changes, depending on the engine operating conditions, and reflect the flow separation conditions at corresponding locations. The correlation-integral values of static pressure at various-stage stator channel casing-wall surface along the compressor flow passage can reflect the flow matching status at the blade tip of the various compressor stages under different operating conditions. The correlation-integral values of the static pressure of the compressor first stage stator casing-wall surface reflect the impact of the bleed valve's switching state on the rotor end-wall flow regime at intermediate and low-speed operating conditions. The study conducted by the authors indicates that the correlation-integral analysis regarding the above-mentioned static pressure signals can serve as a kind of effective means for monitoring and diagnosing the compressor aerodynamic stability. **Key words:** compressor, aerodynamic instability, correlation integral, experimental investigation

基于基元叶栅法的轴流式压气机变工况性能计算模型 = Calculation Model for the Off-design Performance of an Axial-flow Compressor Based on an Elementary Cascade Method [刊, 汉] / ZHANG Xue-lei, WANG Song-ling, CHEN Hai-ping, et al (Education Ministry Key Laboratory of Power Plant Equipment Condition Monitoring and Control under the North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 150 ~ 155

On the basis of an elementary cascade method a calculation model for the off-design performance of an axial-flow compressor has been set up. Through the use of a variable specific-heat equation the thermodynamic parameters of air were calculated with the general characteristic curves showing pressure ratios, isentropic efficiency, corrected consumed power and