

某氦气压气机三维优化设计

陈莹¹, 邹积国¹, 王松涛²

(1. 中国船舶重工集团公司第七〇三研究所 压气机设计室, 黑龙江 哈尔滨 150036;
2. 哈尔滨工业大学 能源科学与动力工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 对某氦气压气机设计方案三维数值模拟计算结果特点进行分析, 指出了三维优化改型设计方向和指导原则, 通过调整叶片厚度分布、叶片尾缘型线曲率和采用端弯技术等方法, 对原型氦气压气机气动设计方案进行了全三维优化设计, 对比分析三维优化设计前后数值模拟计算结果, 三维优化设计后压气机效率提高 2 个百分点, 有效控制了二次流动进一步发展。

关 键 词: 氦气压气机; 叶片造型; 三维优化; 可控扩散叶型

中图分类号: TK474 文献标识码: A

引 言

随着计算机技术和 CFD 的快速发展, 人们可以利用数值模拟方法针对流场直接求解 Euler 方程和 $N-S$ 方程。数值模拟技术在现代叶轮机械中的应

用已经进入了一个快速发展时期, 在多级轴流压气机设计方面, 依靠 CFD 技术对压气机叶片进行三维优化设计, 从而得到高性能的压气机是现代压气机设计体系中重要环节。在这个背景下, 一些新的设计思想被应用到压气机设计中, 如端弯设计、弯扭和弯掠设计的叶片, 以及具有抽吸面设计形式的吸气式压气机研究逐渐成为研究的热点。

在某项目氦气压气机设计中, 作者借助于 CFD 软件 (NUMECA) 对原设计方案整机三维流场进行数值模拟, 并对原型方案三维流场特点进行分析, 找出压气机叶片三维优化改型设计方向, 并给出较为合理的优化设计方案。

1 原型设计方案三维气动特点

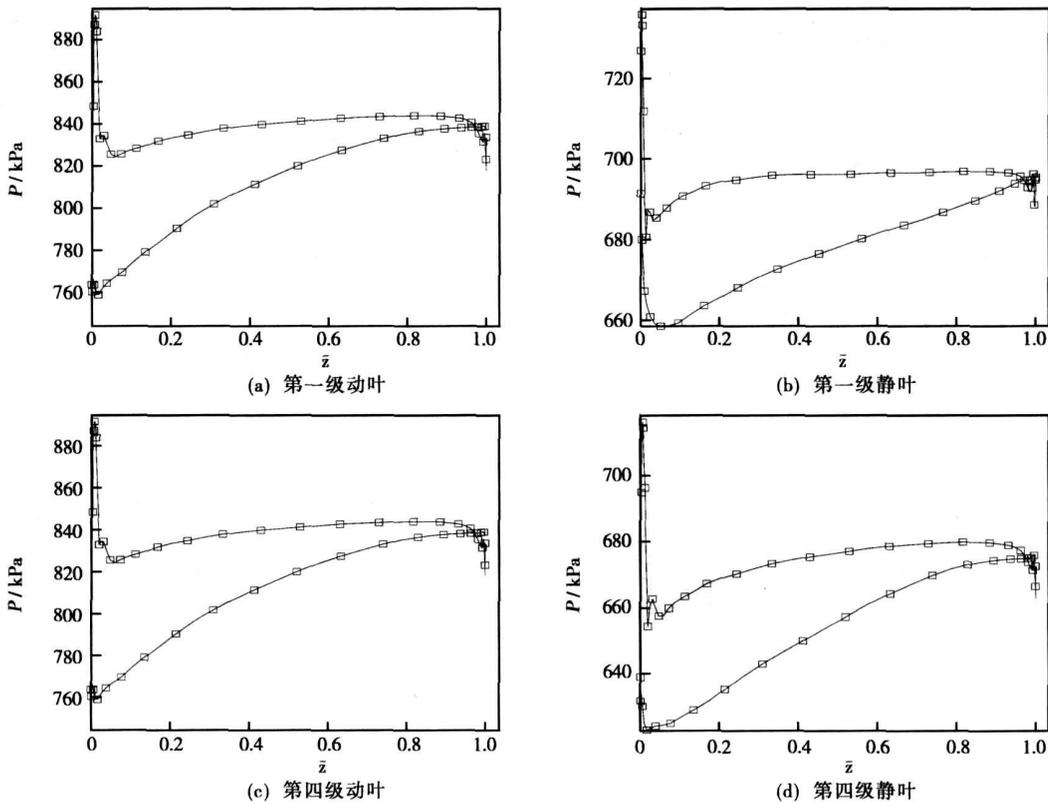


图 1 动(静)叶 50%型面压力分布

收稿日期: 2007-04-12; 修订日期: 2007-05-25

作者简介: 陈莹 (1964), 男, 吉林扶余人, 中国船舶重工集团公司第七〇三研究所高级工程师, 博士。 reserved. <http://www.cnki.net>

原型压气机三维数值模拟计算显示压气机总体性能为压比 1.594、效率 79.4%。原型压气机还具有如下一些特点: 每一级的动叶采用了相同的叶型与安装角度, 每一级静叶也具有相同的几何特点; 在压气机安装时采用了顶切处理方法。虽然通过调整叶片高度使各级平均轴向速度接近一致, 但是各级所处的轴向位置不同, 附面层沿流程发展的程度也存在差异, 越是在后面级中这种差异越小。一维设计所预期的在相同半径处速度三角形一致的说法只是对理想流动情况的一种假设, 实际情况是每一级流动情况不尽相同, 因此具有相同几何参数的叶片所展现出来的气动性能还是略有不同。

为便于分析, 选择第一级与中间第四级进行流动特点分析。图 1 分别给出第一级与第四级的动叶

和静叶中间(50%)截面压力分布图。从图中可以看出, 各级叶片压力最低点都位于前缘附近, 因此动叶的逆压梯度段相对较长。

图 2 给出了第一级和第四级动叶和静叶吸力面极限流线图, 对于第一级动叶而言, 分离线延伸到整个叶高, 分离区的尺度相对较大。分离出现在端壁的起始位置位于 40% 轴向弦长附近。第四级动叶的分离线沿展向方向并没有贯穿整个叶高, 吸力面分离线的位置起始于 20% 轴向弦长附近, 角区内失速的范围也相对较大。静叶中极限流线显示分离区只局限在叶片顶部很小范围内, 由于静叶采用悬臂设计, 根部间隙中气流串流(从压力面到吸力面)起到抑制低能流体堆积和减少分离作用。

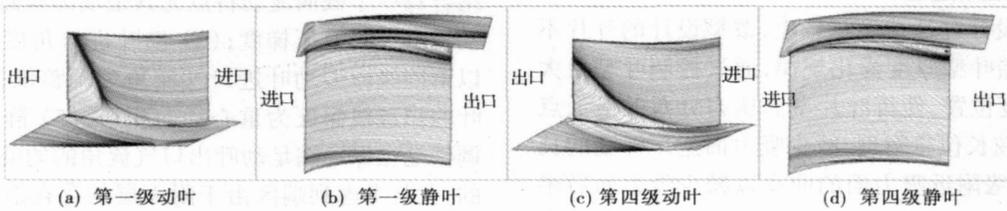


图 2 动(静)叶吸力面极限流线

图 3~图 6 给出了第一级和第四级动静叶进口气流角分布图, 并与叶片几何角相对照。除第一级动叶外, 后面各级叶片无论是动叶还是静叶, 在靠近两端部区都存在较大的正冲角。这是在一维设计思想指导下, 假设轴向速度沿径向是不变的, 实际情况是在附面层内轴向速度要低于设计假定的轴向速度, 中径处要高于假定的轴向速度。因此叶片造型不可能完全照顾每一处的气流角使之与叶片几何角完全匹配(较小冲角)。

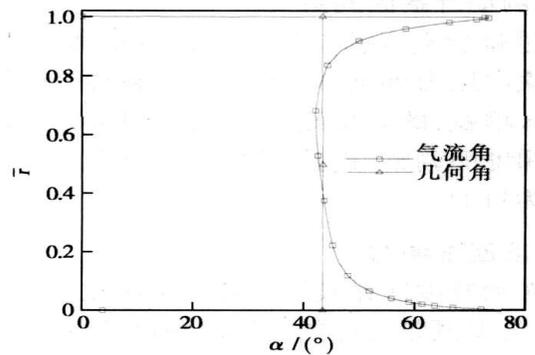


图 4 第一级静叶进口气流角

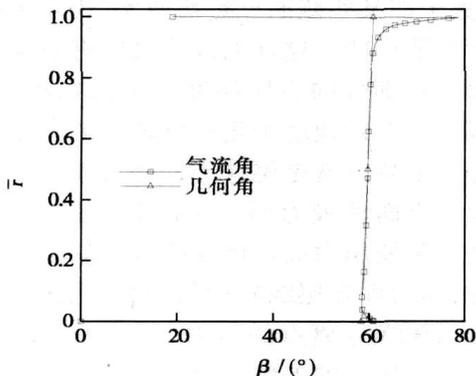


图 3 第一级动叶进口气流角

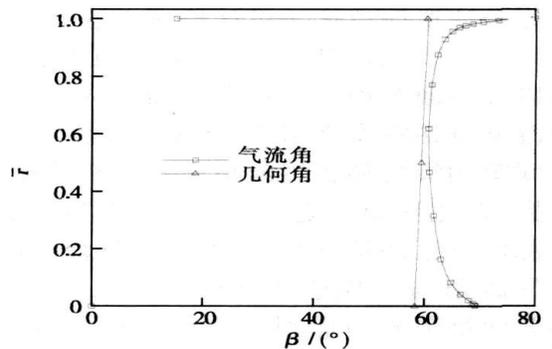


图 5 第四级动叶进口气流角

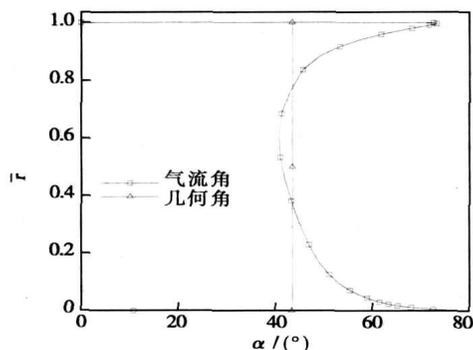


图 6 第四级静叶进口气流角

2 三维优化设计原则

2.1 叶片重新造型

在原设计叶片造型基础上, 改型设计的叶片不再遵循原始叶型厚度变化规律, 通过控制叶型最大厚度与挠度位置, 使得叶片型面压力分布的最低点位于 20% 弦长位置附近, 减少吸力面逆压梯度的长度; 控制尾缘附近吸力面的曲率以减少吸力面后半部分的逆压梯度, 避免叶型损失的增加与分离的出现。

2.2 控制动叶端区的负荷

通过减少端区的叶型几何折转角和加功量, 以及降低横向压力梯度, 从而达到控制端区低能流体的向角区堆积; 此外要结合端区叶型吸力面后半部分逆压梯度的调整, 以达到控制吸力面的分离与角区失速为目的。

2.3 角度匹配调整

针对动叶端区尤其是后几级端区攻角较大的流动特点, 需要调整动叶的进口攻角以减少攻角损失。由于原型设计方案采用同型级设计方法, 向同半径处各级动叶片几何参数完全一样, 因此在改型设计中需要充分注意保留这一设计特点。这就要求在对原型方案进行改型设计时, 兼顾到前几级附面层相对较薄以及后面级顶切的特点, 因此, 选用中间第四级作为改型设计的参考基准, 也就是说在改型设计中以中间第四级的端区气流角作为调整叶片端区冲角的依据, 在此基础上优化设计叶片造型参数, 适当降低端部区内正冲角(由于附面层内气流速度较低, 完全使气流角与叶片造型几何角相匹配是不现实的。如要使每个截面达到零冲角, 则叶片造型和加工是非常困难的)。这样确定, 后边几级动叶的端区冲角不至于很大, 可以在一定程度上控制气流的分

离。

3 优化方案确定

基于上述 3 点优化改型原则, 同时为避免结构设计上的大调整, 在不改变叶片根部的轴向弦长与安装位置情况下, 采取下面几项措施: (1) 调整加功量的径向分布, 在保证总压比不变的前提下, 减少动叶根部的气流折转角, 在一定程度上增加动叶中部的加功量。这样调整的目的是减少端区的横向压力梯度, 减少吸力面角区低能流体的堆积, 控制角区失速; (2) 调整叶片的最大厚度与挠度位置, 控制型面最低压力点的位置在 20% 轴向弦长位置附近。此外分别调整每一个截面吸力面后半部分的曲率, 以结合每一个截面流动特点尤其是端部截面的分离流动特点控制逆压梯度; (3) 动叶进口角度的调整是以第四级原型动叶进口气流角为调整依据; (4) 动叶的积迭线保证为重心径向积迭; (5) 静叶叶型的调整是在保证满足动叶出口气流角的前提下进行的, 尤其考虑到端区由于附面层的存在造成气流角增大的因素, 主要采用端弯技术来改型。

4 优化设计结果讨论

4.1 优化造型结果

由图 7 中可以看出, 本改型的设计特点是动叶在根部与顶部的几何折转角明显减少, 这是为了减少端区的负荷(加功量), 降低横向压力梯度所作的调整。此外动叶叶型还有一个明显的特点, 该叶型具备了可控扩散(CDA)叶型的几何特点, 最大厚度位于 40% 轴向弦长位置附近(原叶型相应位置), 吸力面后半部分的曲率进行主动控制, 基本上保持为平直段, 甚至在某些截面上是负曲率(相对于原型吸力面形状是凹形的), 这样的改变可以有效地控制叶型吸力面后半部分的逆压梯度。不仅如此, 叶型设计在端区可以有效地减少角区分离区的大小。本叶型的另外一个特点就是尾缘半径相对较大。较大的尾缘半径一方面使吸力面后半部分保持平直的, 另一方面也是为了使压力面在尾缘附近的局部加速而进行的考虑; 压力面在尾缘附近的局部加速, 可有效地降低压力面尾缘分离点的压力, 以减少该处与吸力面相对位置上压力的差值, 减少尾迹损失, 同时减少落后角, 有效增大气流折转角, 提高加功能力。

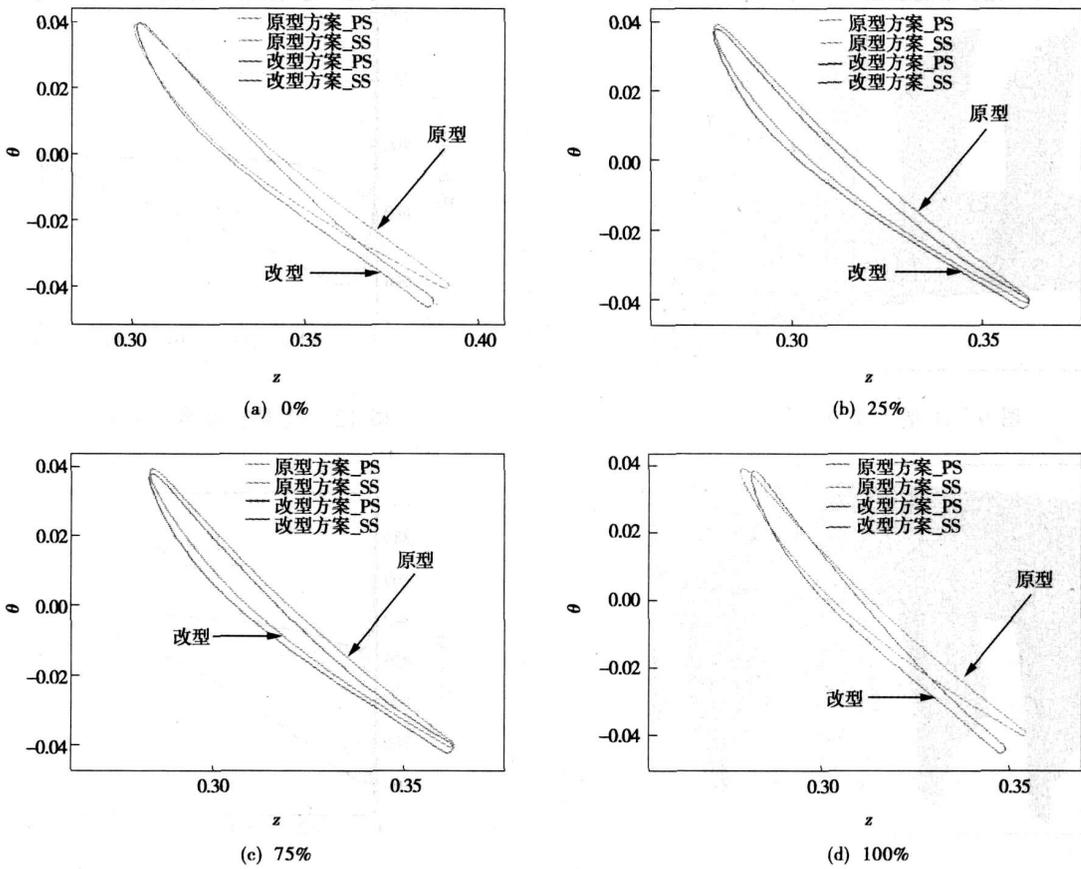


图 7 第一级动叶改型前后对比

从图 8 中看到静叶改型明显特点是叶片背部隆起, 这是适应进口几何角变化所作的必要调整。尾缘附近叶片基本上与原型设计方案相同。由于改型设计方案保留了原型设计方案同型级这一特点, 后面级通过顶切方式得到, 所以此三维优化设计方案可能不是最优设计方案, 不可能照顾到每级设计处

于最佳状态。这也是该改型方案气动性能降低的一个主要原因, 但是这种设计得到压气机叶片加工制造成本是最低的。

图 9 和图 10 给出了优化改型方案设计动叶的不同角度三维效果。

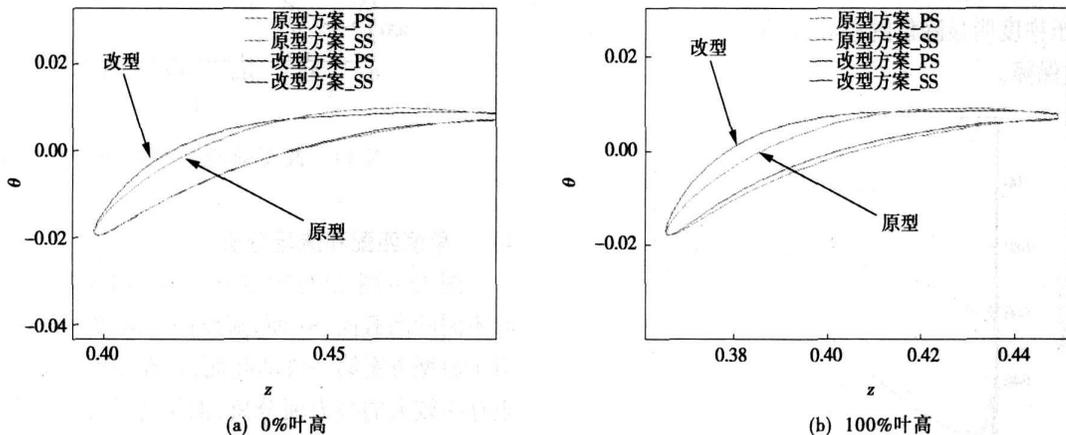


图 8 第一级静叶改型前后对比

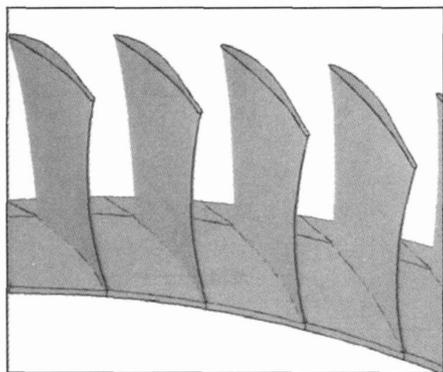


图 9 改型方案动叶三维图

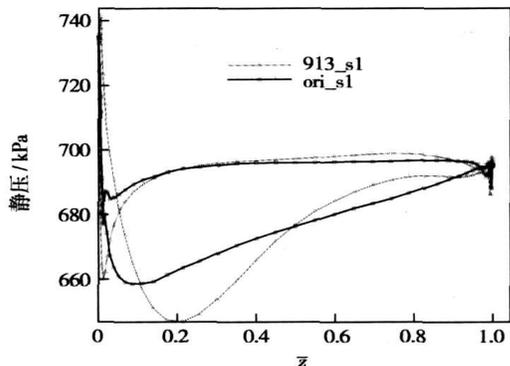


图 12 改型前后第一级静叶

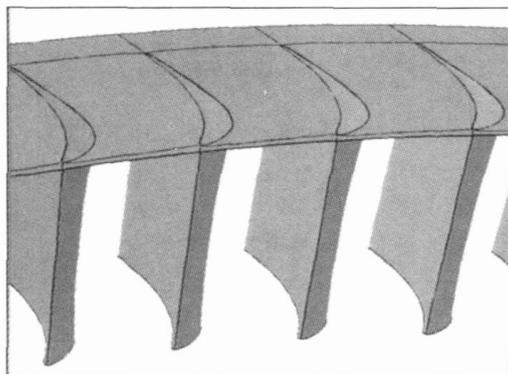


图 10 改型方案静叶三维图

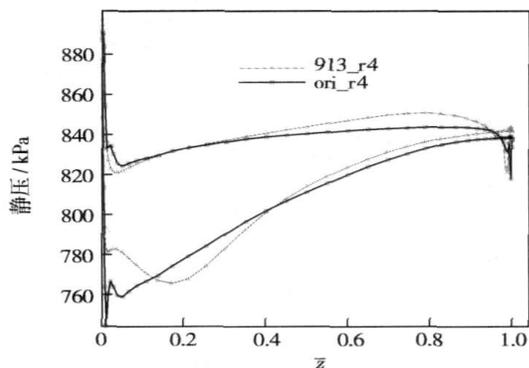


图 13 改型前后第四级动叶

4.2 型面压力分布

图 11 ~ 图 14 给出了优化改型方案(913)与原型方案(ori)在 50% 叶高处的型面压力分布。从图中可以看出, 无论是动叶还是静叶, 改型后的型面压力最低点基本在 20% 轴向弦长位置附近, 这有效地控制了吸力面逆压梯度短的长度, 对于减少叶展中部叶型损失是有利的。与原型相比, 在叶型的后半部分还呈现出急剧扩压, 在 60% 轴向弦长位置以后, 逆压梯度明显降低的趋势, 这是控制吸力面分离的有效保障。

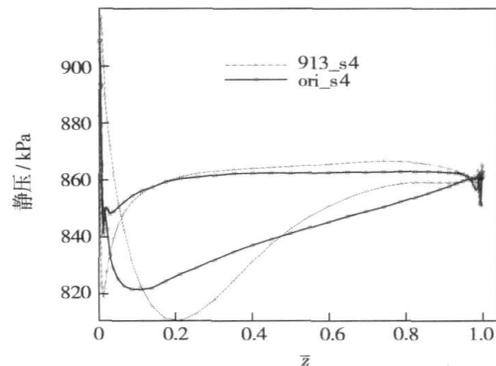


图 14 改型前后第四级静叶

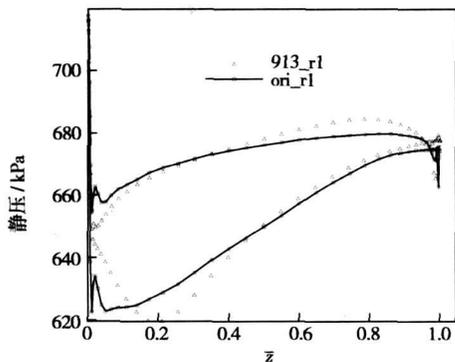


图 11 改型前后第一级动叶

4.3 角度匹配和流场分析

图 15 ~ 图 22 分别给出了第一级和第四级动静叶不同叶高截面(S1 面) 流线图。从图中可以看出, 对于原型方案第一级动叶而言, 在 10% 叶高位置附近存在较大的吸力面分离, 而优化改型方案的流场计算结果显示在相同的位置上吸力面的分离得到了明显控制, 动叶改型成功。但有一点值得注意, 由于尾缘加厚, 尾迹损失会略有增加。

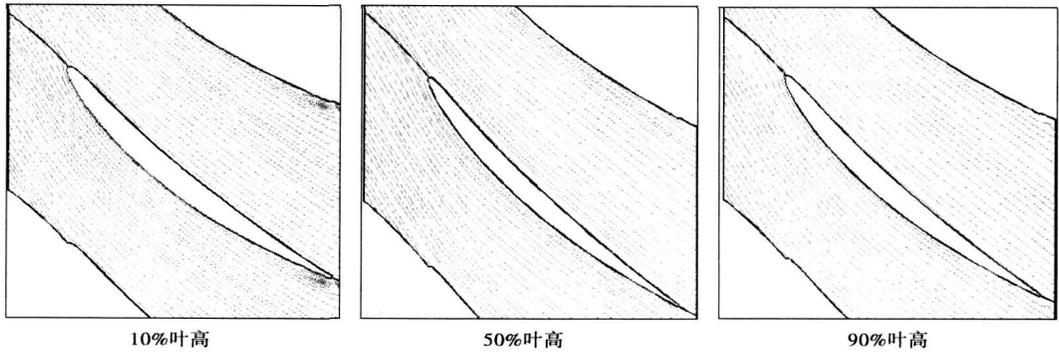


图 15 原型第一级动叶各截面

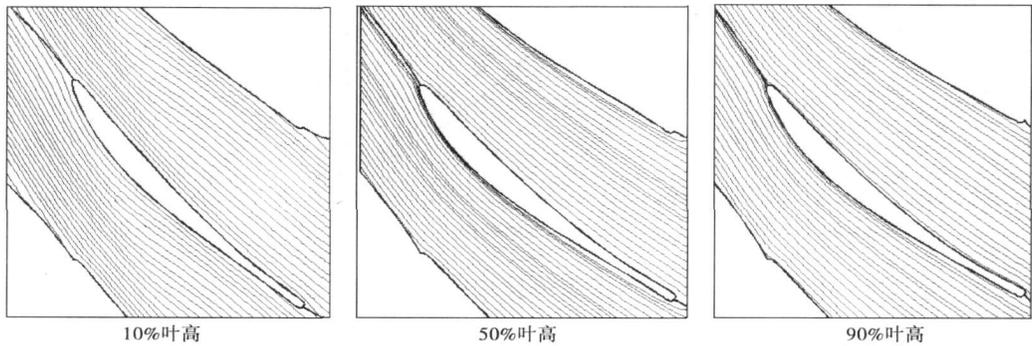


图 16 改型第一级动叶各截面

对第四级动叶而言, 原型方案上下端区 (5%叶高处) 进口正攻角的数值在 15° 左右, 采用改型设计后明显地降低了正攻角数值, 使其落在 10° 范围内。由于此处气流轴向速度过低 (主要是附面层影响),

不能过分追求气流角与几何角匹配, 只能以降低冲角量值为目标。从总体性能计算结果看, 三维优化设计方案达到了减少分离、提高效率的主要目的。

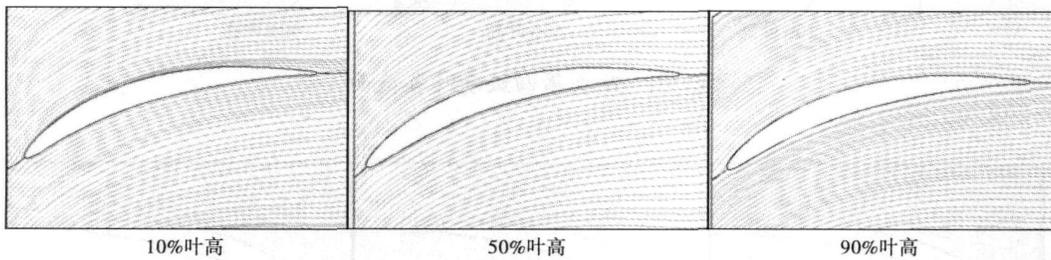


图 17 原型第一级静叶各截面

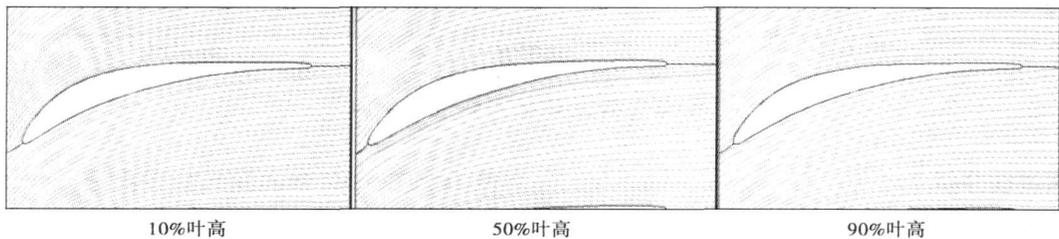


图 18 改型第一级静叶各截面

对静叶而言,原型方案第一级静叶在端部存在着一定的正攻角,但对于第四级静叶,其攻角的数值在下端壁附近较大(接近 20°),在上端壁附近更大。三维优化改型设计叶片采用了端弯技术,通过调整端部叶片进口几何角,从而合理控制叶片在该区域内的冲角,改善该处流场组织。优化改型设计方案计算结果显示,改型后静叶内总压损失减少了

2 kPa。但是值得注意的是:改型后的静叶在中部正冲角有增加的趋势。由于优化设计保留了原设计中同型级的特点,各级间的匹配依然以原型设计方案确定的叶片几何参数(几何进气角)为参照,优化改型方案或多或少地会改变压气机级间气动参数,所以才会有这种情况。

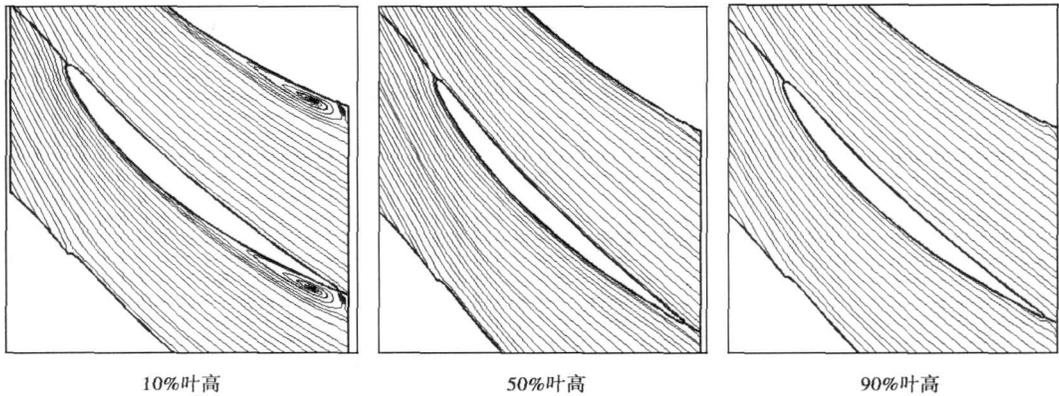


图 19 原型第四级动叶各截面

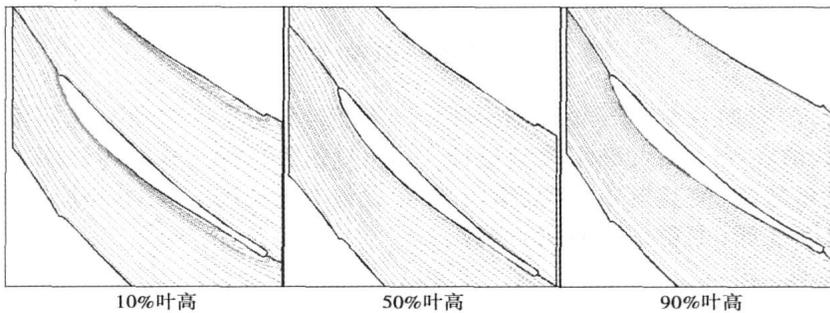


图 20 改型第四级动叶各截面

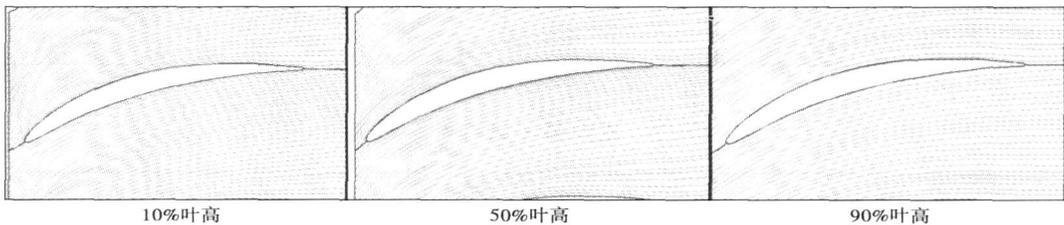


图 21 原型第四级静叶各截面

4.4 壁面流线分析

图 23 给出了各级动、静叶吸力面的极限流线。从动叶极限流线图中可以清楚地看出来,改型后的角区失速的起始分离点位置与原型相比明显地后

移,大约在 60%轴向弦长位置附近;同时吸力面的分离线在叶高的方向上也明显的缩短。这说明改型方案有效地控制了动叶的分离区,这对于控制压气机近失速区的流动有明显的好处。

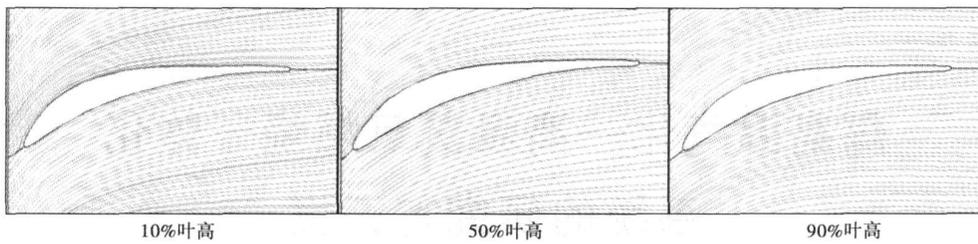
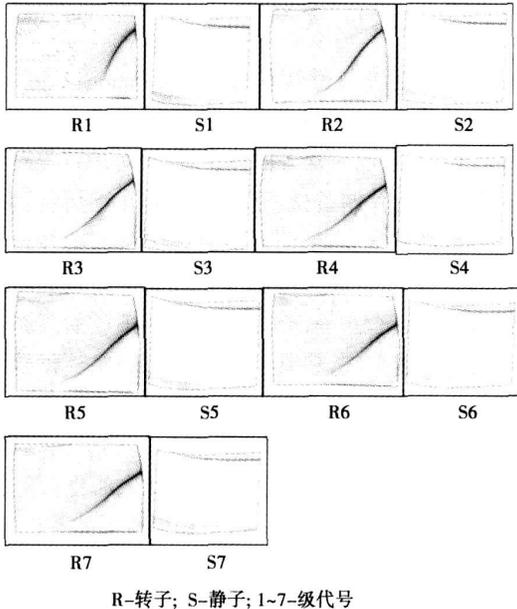


图22 改型第四级静叶各截面



R-转子; S-静子; 1~7-级代号

图23 改型后各级动、静叶的吸力面极限流线图

从静叶吸力面极限流线图可以看出,上面靠近出口边的角区内的回流得到很好的控制,分离线还存在,但却明显消除了局部回流流线。

5 结 论

通过三维优化设计,对叶片的截面重新造型,同时尽量保留了原设计方案中的一些典型特点(等内径、同型级)。从对三维数值模拟计算结果分析中,得到以下结论:

(1) 优化改型设计方案基本上实现了对压气机动、静叶片吸力面局部角区失速的有效控制。

(2) 通过三维优化设计,与原型设计方案相比,效率提高近2个百分点,压比达到预期设计指标:1.604,效率:0.812,但该方案的叶片空间形状较为复杂,加工成本很高。

参考文献:

- [1] FANJOY D W, CROSSLEY W A. Aerodynamic shape design for rotor airfoil via genetic algorithm[J]. Journal of American Helicopter Society, 1998(7): 263-270.
- [2] 赖宇阳,袁新. 基于遗传算法和逐次序列二次规划的叶栅基迭优化[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(1): 52-54.
- [3] 尉涵,袁新. 轴流压气机多叶片排的气动优化设计[J]. 热能动力工程, 2005, 20(6): 603-606.

(编辑 渠源)

船舶燃气轮机

美国海军采购 24 台 ETF40B 船舶燃气轮机

据《Gas Turbine World》2007年3~4月号报道,美国NSSC(海军海洋系统司令部)最近把一个3000万美元的合同授予 Vericor Power Systems 公司,用于制造、试验并交付 24 台 ETF40B 船舶燃气轮机。

该采购是针对 LCAC(气垫登陆艇)使用寿命延长计划 2007 年度财政要求而实行的。

该型气垫登陆艇由 4 台 TF40B 燃气轮机驱动,二台用于推进,二台用于垫升。

ETF40B 是额定输出功率为 2 941 kW 的 TF40 的功率增强型船舶燃气轮机,TF40 燃气轮机原来是由 Avco Lycoming 在 20 世纪 70 年代研制的。

于 2001 年推出的最新型的 ETF40B 在 ISO 条件下额定连续输出功率为 3 647 kW,额定最大输出功率为 4 014 kW。

(吉桂明 供稿)

By using SMPISO algorithm and high Reynolds $k-\epsilon$ turbulent models, a numerical calculation and analysis was performed of the flow fields in the head portion of a steam turbine destined for power-plant feedwater pumps. The calculation domain includes the entire flow fields in the head portion, mainly involving the main steam quick-closing valve, regulating valves and stages. Maximum efforts have been made to ensure the absence of geometric distortions in order to guarantee the accuracy of calculation results. On the basis of flow analyses, an improvement in the steam admission chamber, regulating valves and profiles of the regulating stages has been conducted by employing a numerical test method, effectively lowering the total pressure loss of flows in various parts. With a simultaneous enhancement of steam turbine efficiency the operating stability of the regulating valves has been ensured. **Key words:** turbine, main steam quick-closing valve, regulating valve, regulating stage, numerical simulation, improvement in structure

某氦气压气机三维优化设计 = **The Three-dimensional Optimized Design of a Helium Compressor** [刊, 汉] / CHEN Ying, ZOU Ji-guo (Compressor Design Department, Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), WANG Song-tao (College of Energy Science and Power Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(5). — 504 ~ 511

By analyzing the features of the three-dimensional numerical simulation results for the design scheme of a helium compressor, given were the design direction and guiding principle for its three-dimensional optimized modification design. By employing such methods as adjusting the distribution of blade thickness and the curvature of blade trailing edge profile as well as terminal-bend technology etc., a full three-dimensional optimization design was performed of the aerodynamic design version of the prototype helium compressor. A contrast analysis was conducted of the numerical simulation results before and after the three-dimensional optimized design. The efficiency of the compressor after the three-dimensional optimized design has been increased by 2 percent, effectively limiting the further development of secondary flows. **Key words:** helium compressor, blade modeling, three-dimensional optimization, controllable diffusion blade profile

煤高温气化—高温贫氧燃烧一体化系统的研究与开发 = **Research and Development of an Integrated System Featuring Coal High-temperature Gasification-high-temperature Oxygen-deficient Combustion** [刊, 汉] / CAI Jiu-ju, TIAN Hong, WANG Lian-yong, et al (National Key Laboratory on Environmental Protection and Ecological Industry, Northeastern University, Shenyang, China, Post Code: 110004) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(5). — 512 ~ 516

To address the energy source and environment protection problems of the majority of medium and small-sized industrial furnaces or kilns in China due to the use of traditional direct coal-combustion technology, the authors have independently designed and developed an integrated system of coal high-temperature gasification and high-temperature oxygen-deficient combustion along with a description of the process chart and thermodynamic characteristics of the system. By a combination of experimental study and mathematical simulation, studied was the coal gasification and combustion characteristics of the integrated system. The research results show that by raising the temperature of the air gasification agent it is possible to reduce the air-coal ratio and enhance the coal-gas heat value, gasification efficiency and intensity. When the air gasification agent temperature is increased from the normal temperature to 1 050 °C, the coal gas heat value will be increased by 33%, the air-coal ratio reduced by 43%, and the gasification intensity almost doubled. To raise the temperature of the combustion-supporting air can enlarge the flame volume of combustion gas in the heating furnace and the furnace temperature distribution tends to be uniform, leading to a significant increase in thermal efficiency and a dramatic reduction in NO_x generation concentration. The thermal efficiency of the above system will be more than doubled as compared with that of a normal-temperature coal-gasification furnace and a heat-exchange type of steel-rolling heating furnace system. Moreover, its unit product energy consumption will be reduced by 50%. **Key words:** coal gasification, high-temperature oxygen-deficient combustion, temperature of gasification agent, combustion-supporting air temperature, thermal efficiency, thermal connection