

文章编号: 1000-8055(2010)03-0577-05

某型串列静子的三维气动数值优化设计

刘晓嘉, 宁方飞

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院 航空发动机数值仿真研究中心, 北京 100191)

摘 要: 针对某型高负荷轴流压气机串列静子近轮毂处存在的分离, 利用自行开发的压气机三维气动数值优化设计平台, 选择复合形优化方法, 通过修改串列静子近轮毂处的三维积叠方式对串列静子进行了优化设计. 结果表明, 优化设计取得了良好效果, 在消除分离的同时, 有效提高了压气机的整体性能.

关 键 词: 串列静子; 气动; 三维; 优化; 复合形方法

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Numerical optimization of aerodynamics of some 3-D tandem stators

LIU Xiao-jia, NING Fang-fei

(Aeroengine Numerical Simulation Research Center, School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The tandem stators of a high load axial compressor have been optimized by changing three-dimensional (3-D) stacklines near the hub. An in-housed optimization platform for 3-D numerical aerodynamics design of compressors was used and the complex method was adopted. After the optimization, the separation near the hub has been removed, and the performance of the compressor has been effectively improved.

Key words: tandem stators; aerodynamics; three-dimensional (3-D); optimization; complex method

串列叶片作为一种气流折转角大、总压损失小、工作范围大的叶片设计形式, 自 20 世纪 40 年代至今, 已经开展了很多的研究^[1]. 如今, 串列静子已经成为压气机常常采用的一种设计.

为了指导设计, 研究人员通过大量的数值计算和吹风试验, 研究了各个参数对串列叶栅性能的影响, 并总结了相应的设计准则, 大致归纳如下^[1-3]: ①前后排叶栅相对周向偏距 h/t 在 0.75~0.85 之间, 不宜过大, 也不宜过小; ②串列叶栅整体稠度约 G/t 为 2.0; ③后排叶栅和前排叶栅的弦长比 G_2/G_1 在 0.6~1.0 之间; ④后排叶栅和前排叶栅的弯角比 ϕ_2/ϕ_1 应大于 1.0. 从流动机理上讲, 串列叶片一方面对叶片表面边界层的发展有利, 在相同稠度下分割成两个叶片意味着

中断了边界层的发展, 同时两个叶片合适的周向相对位置可使上游叶片近压力面的高压流体流过下游叶片的吸力面, 从而对该叶片吸力面边界层的抗分离能力有益; 另一方面, 上游叶片负荷要取得较小, 从而可以抗较大的攻角, 下游叶片进气角由于有上游叶片的约束而变化不大, 所以可以对其取较大的负荷. 然而, 这些设计准则是在二维平面叶栅的计算和试验中总结出来的, 对于高负荷压气机内部流动的三维性没有加以考虑. 尤其是在轮毂和机匣附近的端壁区域, 由于端壁边界层和二次流等因素, 较易出现分离. 单纯依据二维串列叶栅经验准则设计的串列静子往往在叶片中部具有良好的气动性能, 而在近端壁区则有可能表现欠佳. 因此, 对于串列叶片的三维设计, 是需要

收稿日期: 2009-02-22; 修订日期: 2009-03-30

基金项目: 973 课题 (2007CB210103)

作者简介: 刘晓嘉 (1981-), 女, 土家族, 湖北恩施人, 博士生, 主要从事压气机优化设计方面的研究.

重新考量的。在数值优化技术日益发展的今天,对遵循传统经验设计出来的串列静子进行三维气动数值优化设计,是改善端壁区的流动的一种有效途径。

针对某型高负荷轴流压气机的串列静子在轮毂处存在的明显分离,作者利用自主开发的压气机气动数值优化设计平台进行了三维气动数值优化设计,在消除分离的同时有效提高了压气机的整体性能。

1 优化策略

原始串列静子近轮毂处存在明显的分离,是损失的主要来源,消除此分离团对改善流动状况,提高压气机的气动性能将会起到主要作用。因此,数值优化过程中的优化对象选择为串列静子,CFD(计算流体动力学)求解对象选择为转子+串列静子,目标函数为级绝热效率,通过罚函数保证流量不会减少。

1.1 三维静子叶片几何控制

串列静子的三维几何控制参数即数值优化中的优化设计变量。本文工作中串列静子叶片采用叶型重心沿径向积叠的方式,通过对积叠线的调整实现叶片的弯掠几何控制,而二维叶型保持不变。如图1所示,每个静子叶片分别由不同叶高的13个截面描述,选择其中0%,15%,50%,85%,100%叶高的截面作为控制截面,其重心即为积叠线的控制点。对新叶片5个控制点坐标位置相对于原始位置的变化量进行样条拟合,再将其余非控制截面的重心对应的位移偏差叠加到原始坐标上,即可实现对新的叶片的三维描述。在原始设计中,串列静子靠近轮毂处存在较大分离,而其他部位的流动状况良好,因此5个控制截面中,固定50%,85%和100%叶高处的截面,只改变0%和15%叶高处的截面位置,通过修正叶片局部积叠来改善近轮毂处的流动。参考Denton和Xu关于叶片掠和倾的定义方式^[4],控制截面的移动方式如图2所示,平行于弦线方向的移动为掠、垂直于弦线方向的移动为倾。在此次优化设计中,移动方式仅考虑了垂直于弦线方向的移动,因此优化变量只需要4个,这对减少数值优化的计算量有利。

1.2 数值方法

流场求解中采用的网格生成软件和CFD软件为自行开发的多级叶轮机气动数值模拟网格生成软件(MTAGG)和多块结构化气动数值模拟

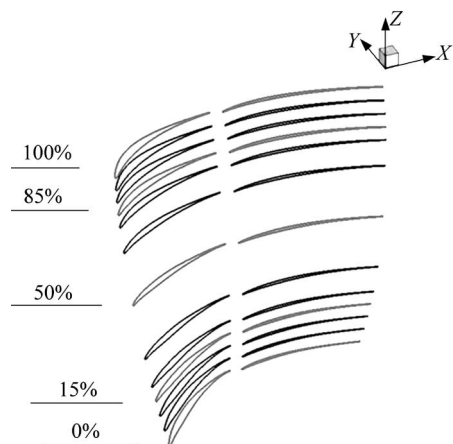


图1 叶片三维控制示意图

Fig. 1 Control sections of 3-D blade

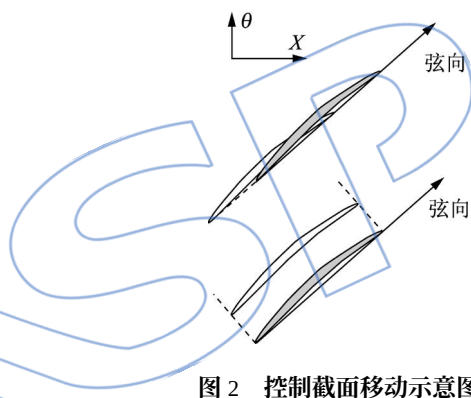


图2 控制截面移动示意图

Fig. 2 Movement of control section

软件(MAP)。

MTAGG采用的是经White改进的Hilgenstock椭圆型方程网格生成方法,速度快,正交性好,自动化程度高,不需要人为干预。MTAGG采用的多块网格拓扑结构,可实现大小叶片、轴流、离心、混合式压气机的网格生成,如图3。

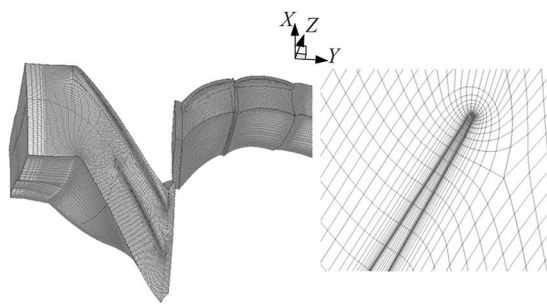


图3 CFD计算网格

Fig. 3 Grid for CFD

MAP利用有限体积方法对Navier-Stokes方程进行空间离散,对流量采用LDFSS(low-diffusion flux-splitting schemes)方法计算,黏性通

量采用通常的中心差分格式.对于隐式时间离散的控制方程组,采用 Gauss-Seidel 算法求解.湍流模型为改进的 Spalart-Allmaras 方程模型.另外,为模拟转捩流动,采用了 AGS (Abur Ghannam and Shaw) 转捩模型^[5-6].MAP 程序支持 Windows/Linux 系统下的 MPI 并行计算,并具备较高的并行效率,为优化过程中流场求解节省了耗时.

优化方法选择复合形法^[7],这里不再赘述.

2 优化结果

优化计算在 SGI 并行机群上进行,使用 16 个 1.4 GHz 的 CPU,求解目标函数 18 个,耗时近 12 h.所有计算结果均采用原始设计的设计点参数进行归一化处理.

优化前后的串列静子三维造型如图 4 所示.原始设计第一排静子尾缘和第二排静子前缘的相对位置在整个叶展上基本保持一致,在每个叶高上都符合二维串列叶栅的设计特点.优化后,第一排静子轮毂截面垂直于弦线正向移动,15%叶高截面垂直于弦线负向移动;第二排静子与初始设计相比,没有明显变化.

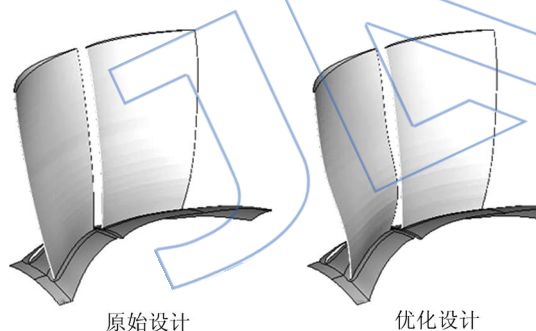


图 4 优化前后串列静子三维造型

Fig. 4 Three-dimensional blades of initial design and optimized design

图 5 为设计点处优化前后叶片近表面轴向速度的分布.对于原始设计,轮毂附近的分离在第一排静子 25% 的弦长位置便已出现,在第二排静子上从前缘便存在,并在径向上持续扩大,而优化设计中则没有出现明显的分离.叶片排出口参数的展向分布如图 6 所示,可见优化后的串列静子气动性能的提高主要来源于近轮毂处流动的改善.另外,优化前后转子出口各气动参数沿展向的分布也基本保持不变,表明优化前后转子工作条件相同、串列静子的进口条件相同,流动的变化主要集中在静子叶片通道内.

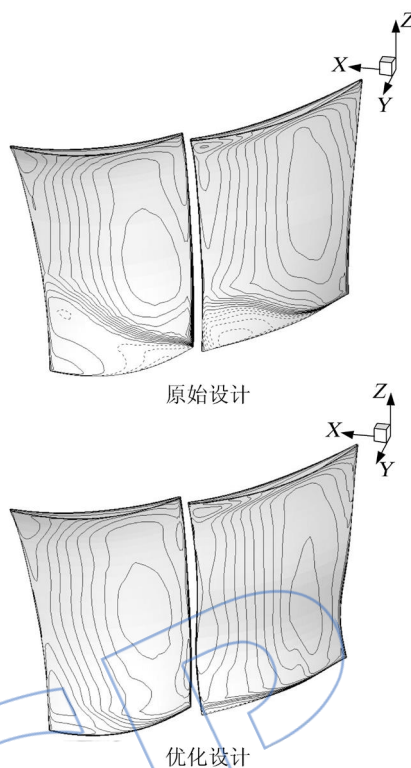


图 5 设计点叶片近表面轴向速度分布
(虚线代表 $V_x < 0$)

Fig. 5 Axial velocity distribution of the design point near the blade surface (dashed line means $V_x < 0$)

原始设计中,第一排静子基本上为径向积叠,近轮毂处的分离相信是由于负荷较重所致.分离产生的低速团使得第一排静子轮毂处发生堵塞,叶片通道内的流通面积减小,流体产生径向和周向迁移.径向上,流体向叶中部位置迁移;在周向上,流体向叶片通道内靠近相邻叶片压力面的方向偏移.流体的迁移使得大量流体要从前后排串列静子的缝隙附近通过,导致串列静子缝隙处发生堵塞.由于分离区的压力相对于通道其他位置的较低,轮毂处气流加速流过串列静子的缝隙之后,有一部分气体会绕过第一排静子的尾缘,倒流至分离区内,这会进一步加强通道的堵塞,如图 7 所示.第一排静子流动的恶化也直接影响了第二排静子的进口条件,导致第二排静子出现分离.

优化设计第一排静子的近轮毂部分由于局部正倾,压力面和轮毂成锐角,叶片对靠近轮毂附近的流体施加了向下的叶片力,增加了近轮毂处的静压,轮毂到叶中的径向压力梯度减小,维持径向平衡所需要的通道内气流速度减小,气流在叶片通道内的折转角减小,分离消除,流通面积增加,相对于原始设计中流体的径向和周向迁移大大减

弱,同时扩压能力明显提高.流量在周向上相对比
较均匀,通过串列静子缝隙的流量减少,堵塞消
除.第一排静子流动的改善也有利于第二排静子
的流动.

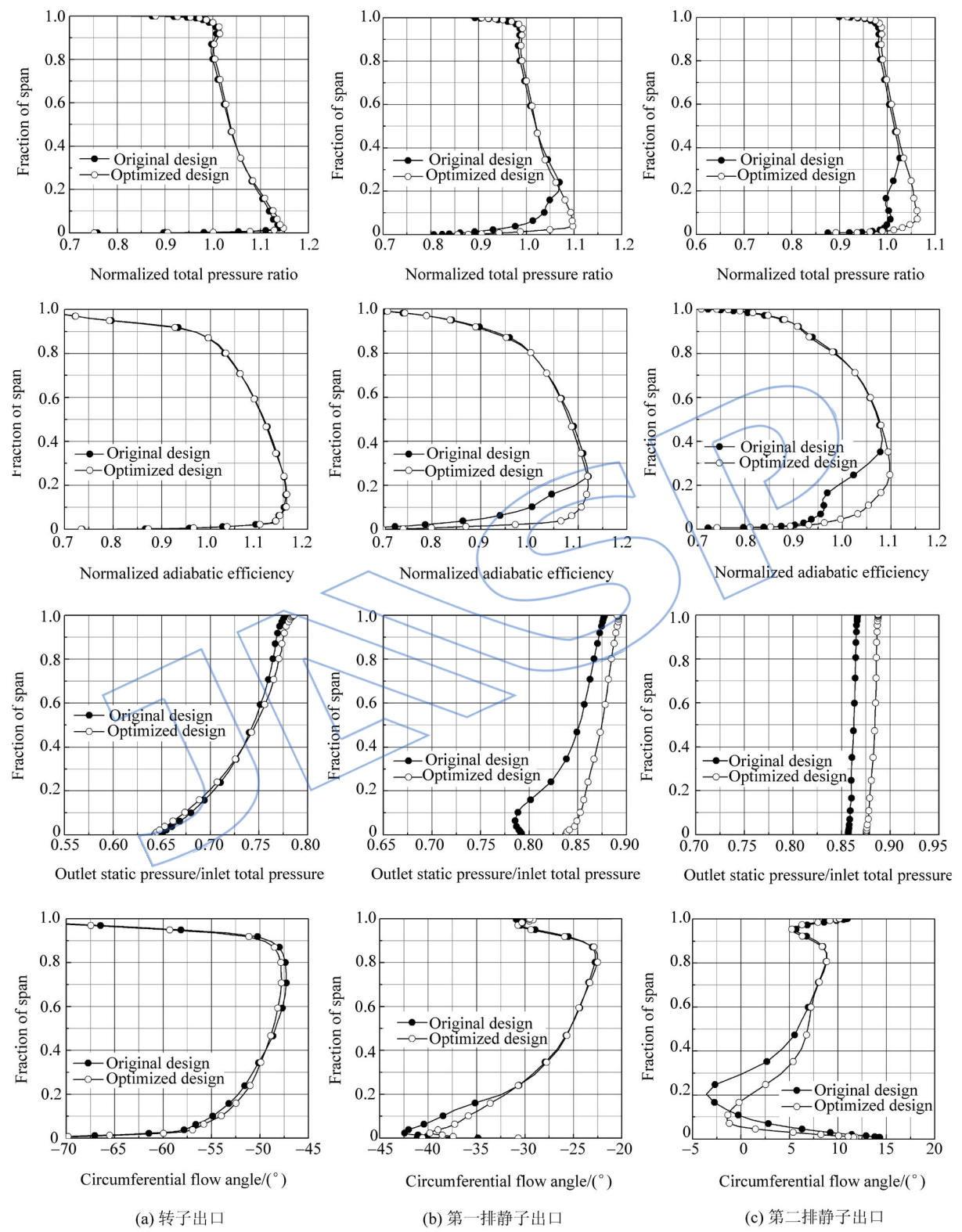


图 6 设计点叶片排出口周向平均的气动参数沿展向的分布

Fig. 6 Spanwise distribution of the circumferential averaged aerodynamic parameters at the outlet of each blade row of the design point

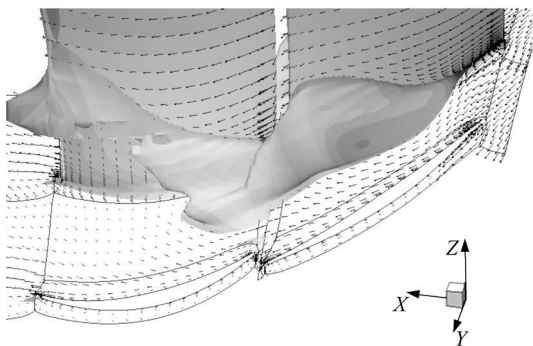


图 7 原始设计叶根处的堵塞(曲面为 $Ma=0.13$ 等值面,云图为静压,矢量为速度)

Fig. 7 Blockage near the hub of initial design (curved surface is the isosurface in which $Ma=0.13$, the contour is about static pressure, and vectors show velocity)

优化设计和原始设计特性线如图 8 所示. 在整个工作范围内,压气机的气动性能都有了明显的提高,在设计点,级绝热效率提高了 2.34%,总压比提高了 1.75%;在原始设计的近失速流量点,级绝热效率提高了 3.58%,总压比提高了 4.22%.

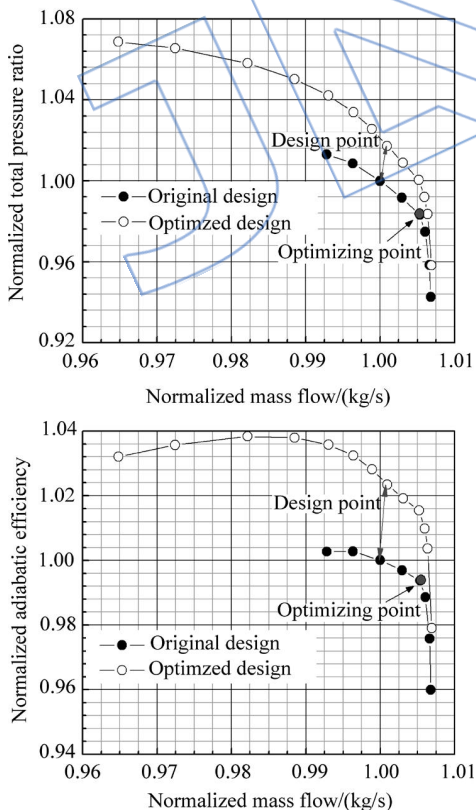


图 8 压气机特性曲线

Fig. 8 Characteristic lines of the compressors

由式(1)定义的失速裕度,优化设计比原始设计增加了 6.95%.

$$M_s = \left(\frac{\pi_{t^*}^* / G_{t^*}}{\pi_{t^*}^* / G_{t^*}} - 1 \right) \times 100 \% \quad (1)$$

3 结 论

通过对上述串联静子三维气动数值优化设计的研究可以得到如下结论:

1) 采用修改三维积叠的方式对串联静子进行了优化,结果表明优化策略有效.优化静子对流动的改善主要在静子轮毂处,轴流转子性能几乎不受影响.

2) 遵循串联叶栅设计准则设计的串联静子在端壁处应加以修正,以考虑三维效应的影响,减弱/消除可能存在的分离,从而降低端壁损失.

参考文献:

- [1] 吴国钊. 串联叶栅理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996. WU Guochuan. Theory of tandem blade cascades[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996.
- [2] 庄表南, 吴国钊, 郭秉衡. 压气机双圆弧串联叶栅流动性能的试验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 1986, (1): 20-35. ZHUANG Biaoan, WU Guochuan, GUO Bingheng. An experimental investigation in flow performance of tandem blade cascades of compressors with double-circular arc profiles[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1986, (1): 20-35. (in Chinese)
- [3] 庄表南, 郭秉衡. 双圆弧单排叶栅和串联叶栅流动性能的试验研究[J]. 航空动力学报, 1989, 4(2): 169-172. ZHUANG Biaoan, GUO Bingheng. Experimental investigation on characteristics of single and tandem blade cascades with double-circular arc profile[J]. Journal of Aerospace Power, 1989, 4(2): 169-172. (in Chinese)
- [4] Denton J D, Xu L. The effects of lean and sweep on transonic fan performance[R]. ASME Paper GT-2002-30327, 2002.
- [5] 宁方飞. 考虑真实几何复杂性的跨音压气机内部流动的数值模拟[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2002. NING Fangfei. Numerical investigations of flows in transonic compressors with real geometrical complexities[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002. (in Chinese)
- [6] Ning F F, Xu L P. Numerical investigation of transonic compressor rotor flow using an implicit 3D flow solver with one-equation Spalart-Allmaras turbulence model[R]. ASME Paper 2001-GT-0359, 2001.
- [7] 高健. 机械优化设计[M]. 北京: 科学出版社, 2000. GAO Jian. Mechanism optimization design[M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)