

文章编号: 1000-8055(2006) 01-0131-06

某离心叶轮改型气动设计

陈江¹, 季路成²

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083;

2. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100080)

摘要: 针对某航空发动机离心压气机实施改型气动设计与数值模拟, 以达到其“效率提高不低于2%”的性能指标。设计、计算结果表明: 改型离心叶轮达到或超过了性能指标要求, 可为类似的叶轮机改型气动设计提供借鉴。

关键词: 航空、航天推进系统; 航空发动机; 叶轮机械; 离心压气机; 气动设计; 数值模拟

中图分类号: V231

文献标识码: A

Aerodynamic Redesign of a Centrifugal Compressor Impeller

CHEN Jiang¹, JI Lu-cheng²

(1. School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. Institute of Engineering Thermophysics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Aerodynamic redesign of an aero-engine centrifugal compressor impeller was presented. The goal is to increase efficiency by more than two percents. NUMECA Fine/Turbo was used as a numerical tunnel to ensure the design. Results show that the redesigned impeller successfully reached the goal. The experiences accumulated in this procedure are useful for similar impeller aerodynamic designs.

Key words: aerospace propulsion system; aero-engine; turbomachinery; centrifugal compressor; aerodynamic design; numerical simulation

叶轮机气动设计通常有两种途径: 一是模化设计; 二是全新设计。对于叶轮机改型气动设计, 应是介于两者之间。改型设计原则既要满足改型约束条件, 又要在性能上有所提高, 所以往往是在原型基础上采用新的设计手段或技术实施改型。

鉴于我国航空动力的匮乏, 拟对某航空发动机改型以拓展推力能力, 扩大使用范围, 快速、经济、可靠地实现其性能提升。本文针对该航空发动

机离心压气机部件实施改型气动设计与计算分析, 改型总性能目标是“效率提高不低于2%”, 流量、压比与原型保持不变或略有改善。

1 原型验算

改型设计需对原型性能有基本了解, 这是改型基础。原型离心压气机是由二元离心叶轮(导流轮+离心叶轮, 后面统称原型离心叶轮)、径向扩

收稿日期: 2005-01-24; 修订日期: 2005-09-07

基金项目: 国家自然科学基金资助(50376062)

作者简介: 陈江(1963-), 男, 四川开江人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院高级工程师, 博士, 主要从事叶轮机械气动设计的研究。

压器、轴向扩压器构成。根据结构图纸整理出原型离心压气机相关几何数据,包括流道、导风轮与离心叶轮几何尺寸,图1为整理的原型导风轮+离

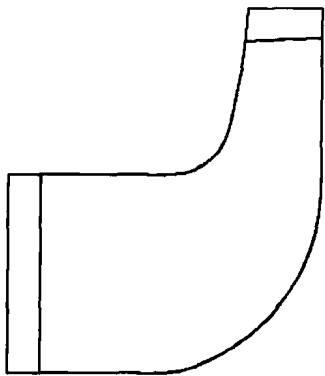


图1 原型导风轮+离心叶轮流道图
Fig. 1 Flow path of baseline impeller

心叶轮流道图。根据试验数据整理出离心压气机进、出口相关气动参数,主要是进口总压、总温、气流角、设计转速、流量、压比及绝热效率。对原型离心叶轮实施全三维数值模拟,计算采用商用 NUMECA 软件^[1]进行。

1.1 控制方程和求解方法

计算采用流动控制方程为三维定常N-S方程组,取用Baldwin-Lomax湍流模型。控制方程组的空间离散采用中心差分格式,同时为数值稳定添加了二阶、四阶混合人工粘性项。计算中使用多重网格以及残值光顺方法加速收敛,具有很高的收敛速度。

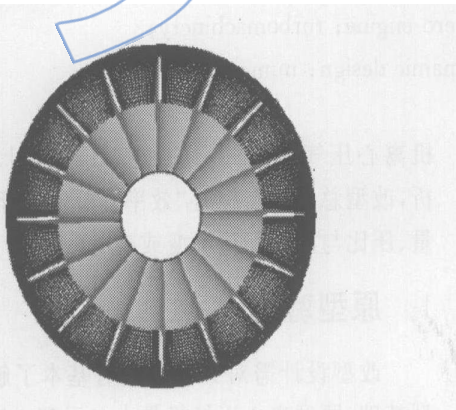


图2 原型离心叶轮三维计算网格
Fig. 2 3D computational mesh of baseline impeller

1.2 计算网格

计算网格由NUMECA软件AUTOGRID模块自动生成。采用H型多块结构化网格。在暂未考虑叶尖间隙影响下,径向网格仅取了33站,周

向33站,轴向131站,叶轮前、后钝头采用钝前、后缘模型,周向取17站。最终总网格数为:177 507,网格密度则保证了叶展中径处近壁间距 $Y^+ < 5$ 。图2为原型离心叶轮的三维网格图。

1.3 数值计算

数值计算的初值条件人为给出均匀静压场。边界条件根据整理数据确定,进口给定均匀总温、总压、进气角度,出口给出等值背压。因没有原型设计点参数,选取背压 $p_2 = 28\,000\text{ Pa}$ 作为设计参考点背压,计算得到原型离心叶轮的总性能。

2 改型设计

在原型流道与离心叶轮基础上实施改型设计。改型设计目标通过以下几何改型实现:一是流道改型;二是由原型导风轮+离心叶轮改型成整体离心叶轮设计。

2.1 改型流道设计

离心压气机气动设计性能好坏直接由流道和叶片几何所决定,确定子午流道几何是把握改型设计方向和质量的至关重要的步骤。确定流道几何首先应考虑离心叶轮的载荷要求,其次考虑沿流道气流损失及分离情况。对给定负荷离心叶轮,进出口面积比是流量、效率的重要控制参数,面积比大小基本限定了给定负荷下所能达到的最高效率,但由于改型设计的条件限制,出口面积不变,所以流道改型的挖潜增效只能在改变流道的变化曲率、减小流道损失及改善气流分离上体现。

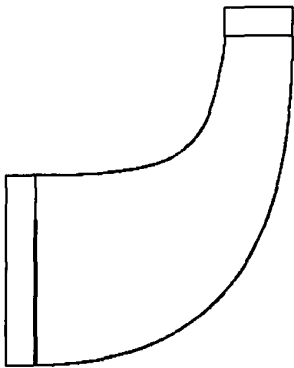


图3 改型离心叶轮流道图
Fig. 3 Flow path of baseline impeller

子午流道改型根据已有的流道修改而成。采用离散点曲线拟合方式,鉴于Bezier曲线对形状描述的灵活性,对叶根、叶尖流道均采用多段Bezier曲线进行描述。由离散点在原型流道基础

上给出任意光滑曲线, 流道确定过程中尽可能保证流道光滑, 同时保证出口与原型尺寸一致。流道改型真正控制的是子午曲率的变化, 与离心叶轮改型设计协调匹配, 减小内、外流道的流动损失。改型流道几何见图3。

2.2 改型叶片设计

将原型导风轮+ 离心叶轮改型为整体离心叶轮。改型思路是叶片数相同, 先将其原型叶片几何规律应用于改型中, 叶型叶厚分布尽可能与原型相一致, 然后在此基础上优化叶型几何角, 同时根据强度计算要求改变叶厚值, 数值模拟后择优定型。

离心叶轮叶片具有非常复杂的空间几何形状, 单一叶片在很短轴向距离内横跨的周向角可达几十度, 由此使其难于加工, 限制了更优异造型方法的使用, 本改型设计采用直纹面造型方法, 给定根、尖两个回转面叶型坐标, 然后寻找直母线生成其它回转面叶型。

离心叶轮叶片造型过程中, 除了已经确定的流道外, 根、尖回转面内叶片构造角的沿流程分布、厚度分布和生成母线均需给定, 尤其是叶片构造角的沿流程分布, 它对离心叶轮的加载能力和效率水平有极大影响。

此基础上改进气动效率, 不能完全抛弃已有成功部分而采取全新设计, 有继承性的改型设计其成功率更有保障, 也是降低改型技术风险所需要的。根据原型叶片构造角规律进行适当修正后的改型叶片构造角分布形式见图4。从图中可见其出口角度为径向 90° 与原型设计一致, 这主要仍是考虑与原径向扩压器匹配问题, 同时也考虑改型设计的扩压能力不能低于原型设计, 所以没有采用能进一步提高气动效率的后弯角方案。

改型设计的初始叶厚选取与原始叶型基本一致, 根据强度核算后的要求对叶厚进行调整。从气动性能优化角度考察, 离心叶轮最大厚度位置对气动性能有较大影响, 当然这要与流道一起统筹考虑。

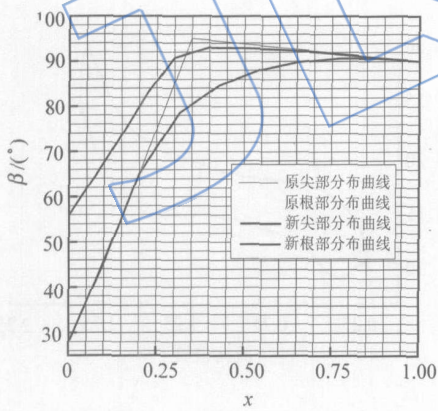


图4 改型离心叶轮叶片构造角分布形式
Fig.4 Distribution of metal angle of redesign impeller

叶片构造角即叶片中弧线角度。Krain 博士^[2, 3]研究表明, 叶片构造角(与切向夹角)的分布曲线在根部可以用4条二次Bezier曲线来确定, 在尖部则可仅由两条二次Bezier曲线确定, 本文遵循该经验。实际改型中叶片构造角沿流线分布规律根据原型叶片构造角进行修正。如此理由是原型设计已经长年可靠、有效运行, 改型目标是在

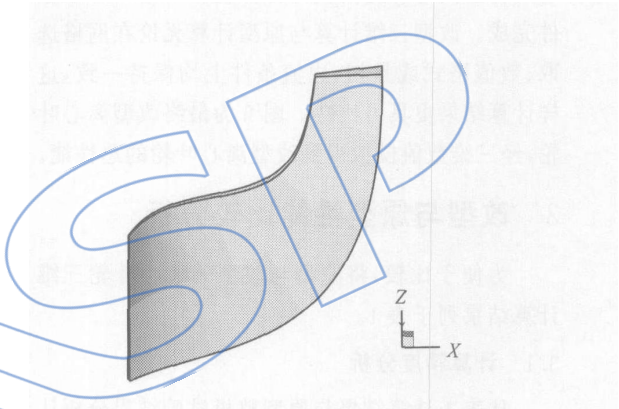


图5 改型叶片造型结果
Fig.5 Redesign blade profile

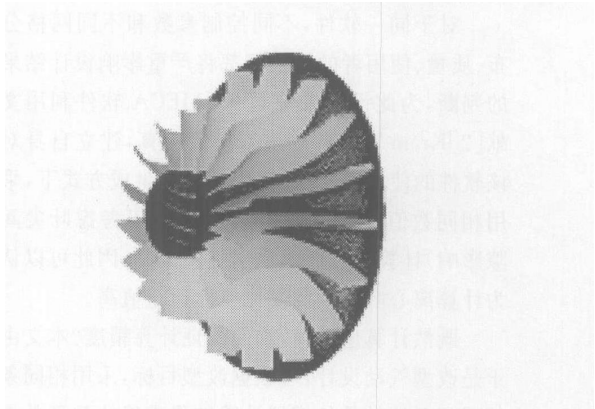


图6 改型离心叶轮
Fig.6 Redesign of impeller

离心叶轮的前缘厚度对压气机流量有较大影响, 在强度许可的条件下前缘厚度尽可能小些。离心叶轮的后缘由于考虑到与扩压器匹配因素其出口宽度 b_2 与原型相同(计算分析其宽度 b_2 减小些更有利), 出于强度原因, 所以尾缘叶厚较大。改型

表 1 原型、改型离心叶轮三维定常计算性能比较

Table 1 Comparison between baseline and redesign centrifugal impeller by 3D computational results

方案	原型 A	改型 B	(B- A) / A
进口流量/(kg/s)	14. 519 1	14. 855 73	2. 33%
出口流量(kg/s)	14. 519 1	14. 857 1	2. 33%
压比	3. 843 1	3. 882 5	1. 03%
绝热效率	0. 906 3	0. 934 1	

离心叶轮叶片型线见图 5。

2. 3 改型三维计算

改型离心叶轮的设计计算仍由 NUMECA 软件完成。改型三维计算与原型计算无论在网格选取、数值格式或是初、边值条件上均保持一致, 这样计算结果更具可比性。图 6 为最终改型离心叶轮, 经三维数值模拟得到改型离心叶轮的总性能。

3 改型与原型性能比较分析

为便于比较, 将原型与改型的离心叶轮三维计算结果列于表 1。

3. 1 计算精度分析

从表 1 计算结果与原型整机试验结果分析认为, 三维计算的离心叶轮性能参数值偏高, 那么如何判断数值模拟的置信度?

对于同一软件, 不同控制参数和不同网格分布、质量、使用者的经验等都将严重影响设计结果的判断, 为此设计者曾对 NUMECA 软件利用文献[2] Krain 离心叶轮进行摸索验算, 建立自身对该软件的使用经验。在惯用的网格生成方式下, 采用相同数值格式, Krain 离心叶轮(不考虑叶尖间隙影响) 计算的绩效值比实际值偏高, 因此可以认为计算离心叶轮性能要比实际运行值高。

既然计算值偏高, 如何保证计算精度? 本文由于是改型气动设计, 可根据改型目标, 采用相同条件下相对比较数值模拟计算结果来确认改型效果应有较高的可信度。

3. 2 设计参考点性能比较与流场分析

由表 1 列出的原型与改型离心叶轮在设计参考点性能比较可知, 在相同条件下, 改型比原型流量大 2. 33%, 压比高 1. 03%, 改型较原型绝热效率改进为 2. 8 个百分点。所以就设计参考点而言是达到性能指标要求的。

由于原型、改型离心叶轮三维计算条件一致, 计算流场可比性强, 比较分析得出改进结论。

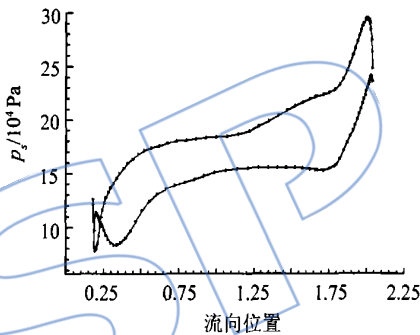


图 7 原型叶中截面静压分布
Fig. 7 Baseline P_s distribution a mid span

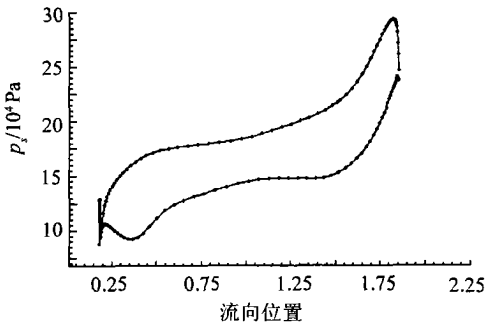


图 8 改型叶中截面静压分布
Fig. 8 Redesign P_s distribution a mid span

图 7、图 8 是原型与改型离心叶轮叶中截面叶表静压分布, 从中看出: 一是改型与原型叶表压力分布型相似; 二是改型较原型叶表压力分布变化更平缓、顺畅, 且其加载能力更强; 三是都存在一定负攻角, 对离心叶轮的裕度及流量有利。

图 9、图 10 是原型与改型离心叶轮 S_1 叶中截面绝对总压等值线分布。在叶轮出口段存在明显分离, 主要在尾缘段吸力面处, 且覆盖范围宽, 这是离心叶轮的主损区, 改型无力达到消除该区分

离, 只能做到有所改善。

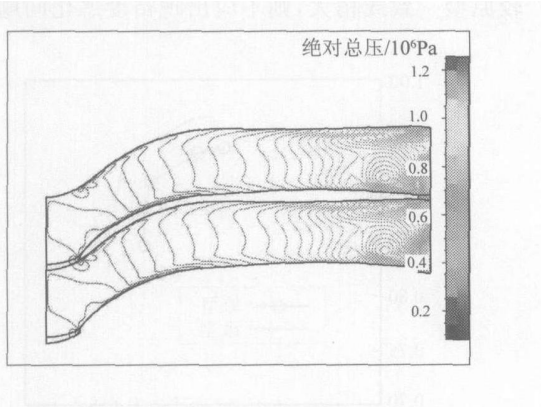


图9 原型叶总压等值线分布

Fig. 9 Baseline total pressure contour at mid-span

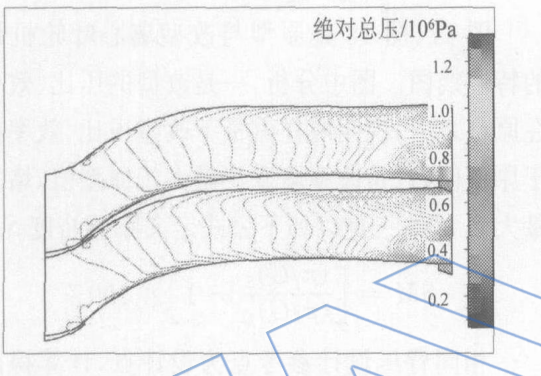


图 10 改型叶中 S_1 总压等值线分布

Fig. 10 Redesign total pressure contour at mid-span

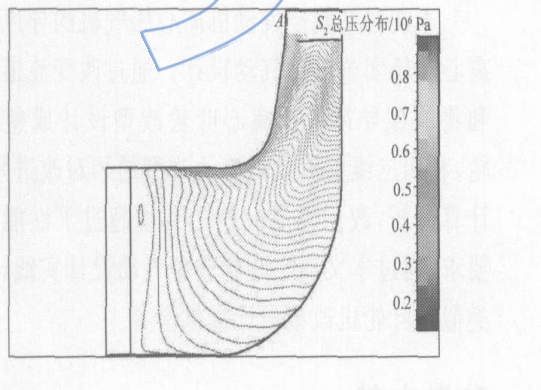


图 11 原型 S_2 总压等值线分布

Fig. 11 Baseline S_2 total pressure distribution

图11、图12 是原型与改型离心叶轮 S_2 中分面总压等值线分布, 比较而言, 改型的叶尖区域总压线堆积较薄, 改型设计的总压梯度更有层次和规律, 损失相对较少, 但改型叶尖部分仍不理想, 主要原因是叶尖速度高, 且气流由轴流转为径流历

程较短, 使其出口叶尖低能流堆集, 存在分离现象, 改型只能做到有所改善。

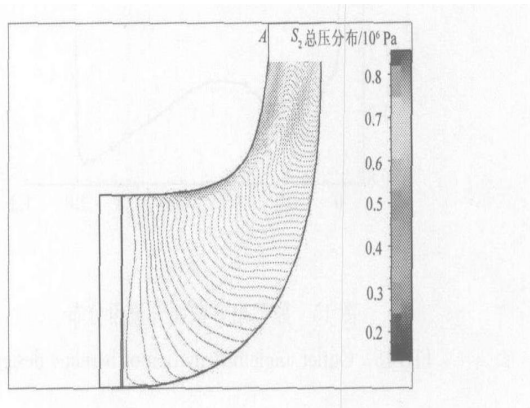


图 12 改型 S_2 总压等值线分布

Fig. 12 Redesign S_2 total pressure distribution

图13、图14 为原型、改型 S_2 中分面熵值线图, 从中看出, 离心叶轮的损失主要集中在叶尖部分和出口区域。

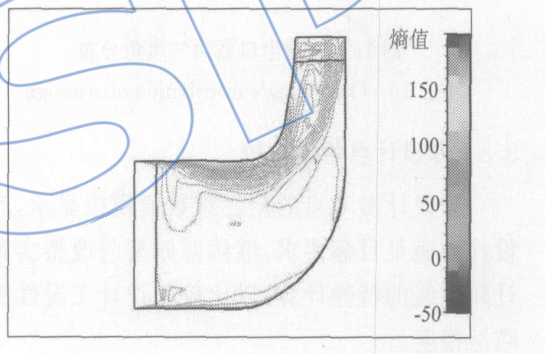


图 13 原型 S_2 熵等值线分布

Fig. 13 Baseline S_2 entropy distribution

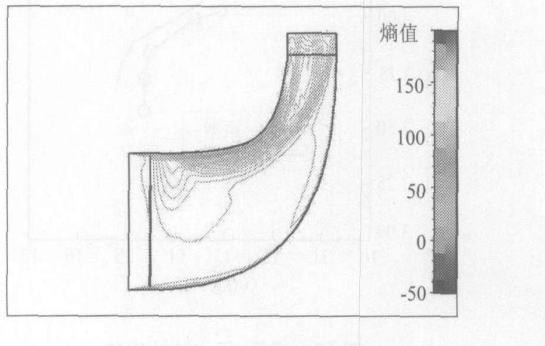


图 14 改型 S_2 熵等值线分布

Fig. 14 Redesign S_2 entropy distribution

图15、图16 分别为原型与改型出口子午周向气流角沿出口轴向分布, 说明改型与原型出口气流速度三角型基本一致, 其目的是保证改型离心叶轮与原型径向扩压器的匹配关系。

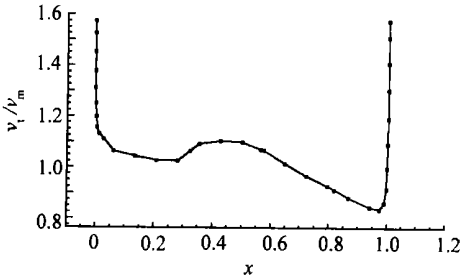


图 15 原型出口截面气流角分布
Fig. 15 Outlet angle distribution of baseline design

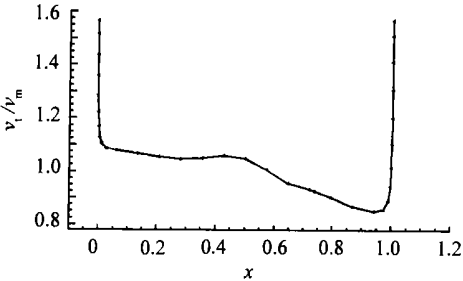


图 16 改型出口截面气流角分布
Fig. 16 Outlet angle distribution of redesign

3.3 非设计点特性比较

对设计参考点的全三维数值模拟显示, 改型设计已满足目标要求, 继续对原型与改型实施设计转速线的特性计算, 以比较非设计工况性能与喘振裕度。

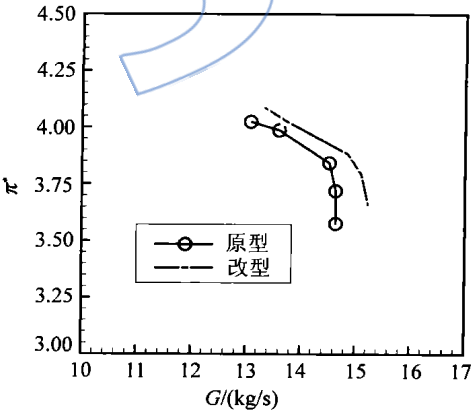


图 17 流量、压力特性比较
Fig. 17 Comparison of pressure ratio characteristic

利用三维数值方法计算原型与改型离心叶轮特性线, 采用不断变化背压, 以逼离心叶轮向不稳定点靠拢, 计算不再收敛点暂定为不稳点工作点。当然计算与实际喘点存在误差, 但原型离心叶轮

已经多年使用, 满足裕度要求, 改型离心叶轮裕度较原型一致或稍大, 则不应出现裕度恶化问题。

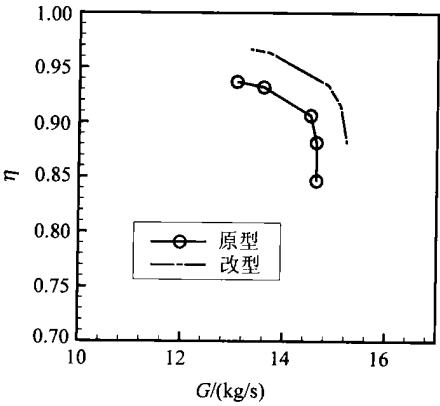


图 18 流量、效率特性比较
Fig. 18 Comparison of efficiency characteristic

图 17、图 18 是原型与改型离心叶轮机计算的特性线图。图中分析, 一是改型的压比、效率都在原型之上, 说明同样流量下改型压比、效率都高于原型值; 二是改型堵塞流量大于原型值, 堵塞流量大 2.3%; 三是以如下公式定义喘振裕度 SM:

$$SM = \left[\frac{(\pi/G)_s}{(\pi/G)_D} - 1 \right] \times 100\% \quad (1)$$

相同背压设计参考点为设计点, 计算得出原型设计: $SM_{原} = 16.25\%$, 改型设计: $SM_{改} = 17.37\%$, 原型离心叶轮的裕度满足运行要求, 则改型离心叶轮的裕度也应是满足要求的。

4 结 论

本文对某航空发动机离心压气机的导风轮+离心叶轮实施改型气动设计。通过改变流道曲率和将原型导风轮+离心叶轮改型设计成整体叶轮, 利用三维数值模拟确认改型的相对改进效果。计算分析, 改型离心叶轮达到或超过了性能指标要求。通过本文离心叶轮改型气动设计实践, 可为类似的叶轮机改型设计提供借鉴。

参考文献:

[1] Hirsch Ch. Numerical Computation of Internal and External Flows[M]. 1990.
[2] Krain H, Richter F A, Tiede V. Investigations of the Flow Through a High Pressure Ratio Centrifugal Impeller[R]. A S M E Paper GT- 2002- 30394, 2002.
[3] Krain H. Review of Centrifugal Compressor's Application and Development [R]. A S M E Paper GT - 2003- 38971, 2003.