

跨声速离心叶轮负荷分布的影响分析*

石建成^{1,2}, 高 星³, 刘宝杰³

(1 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016

2 中国航空动力机械研究所, 湖南 株洲 412002

3 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘 要: 以某典型负荷跨声速离心叶轮为例, 采用数值模拟的方法, 在级环境下分析了离心叶轮前加载、均匀加载和后加载三种负荷分布对于离心叶轮总体性能的影响, 并通过对比分析离心叶轮内的二次流和熵分布等参数, 讨论了负荷分布影响的内在机制。对比计算结果表明, 后加载形式的负荷分布对于离心叶轮的总性能比较有利, 对于叶轮内部的二次流控制效果较为理想。

关键词: 离心压气机; 负荷分布; 二次流

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2008) 04-0458-07

Effects of loading distribution on a transonic centrifugal impeller

SHI Jian-cheng^{1,2}, GAO Xing³, LIU Bao-jie³

(1 Coll of Energy and Power Nanjing Univ of Aeronautics and Astronautics Nanjing 210016 China

2 Chinese Aviation Powerplant Research Inst, Zhuzhou 412002, China 3 Coll of Energy

and Power Engineering Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics Beijing 100083 China)

Abstract The effects of loading distribution on the performance of a transonic centrifugal impeller are numerically investigated by 3D viscous code. Three kinds of loading distributions, which are forward loading, uniform loading and backward loading, are selected. Their effects on the impeller performances and their flow mechanism are analyzed. It is demonstrated that the backward-loading impeller achieves best performance, and the loss caused by secondary flows is the lowest in the backward-loading impeller.

Key words Centrifugal compressor; Loading distribution; Secondary flow

符号表

B	叶片数
h^+	压力面静焓
h^-	吸力面静焓
m	子午面流线长度
p^+	压力面静压
p^-	吸力面静压
r	半径
W_{mb1}	子午面速度
V_θ	周向平均周向速度

型涡喷/涡扇发动机上, 经过半个多世纪的发展, 离心压气机的研究取得了巨大的成就, 离心压气机的压比不断取得新突破, 当前级压比 8 以上的离心压气机已经应用到了发动机型号上。离心叶轮的造型也越来越复杂, 普遍采用倾斜、后弯叶片, 以及一个或多个分流叶片。再过一二十年, 小型涡扇发动机的推重比、涡轴发动机的功重比将再翻一翻, 必然要求所使用的跨声速离心压气机的负荷将再跨上一个新台阶。

当前的跨声速离心压气机普遍采用半开式叶轮, 其离心叶轮通道狭长、子午流道折转迅速、叶片负荷大、转速高, 导致其内部流动非常复杂。在狭小的空间内存在着激波、泄漏流、通道涡、端壁附面层、叶片附面层、二次流等各种流动结构, 这些流动结构之间,

1 引言

高负荷跨声速离心压气机广泛应用于涡轴和小

* 收稿日期: 2007-06-07; 修订日期: 2007-08-22。

作者简介: 石建成 (1963-), 博士生, 研究员, 研究领域为离心/组合压气机。

及其与分流叶片之间存在着复杂的相互作用,使得跨声速离心叶轮内部流动难以测量、难以模拟。当前关于跨声速离心叶轮内部复杂流动的准确认识主要源于各种激光测量结果^[1~5]。经过不断的发展和完善,日趋成熟的 CFD 技术为跨声速离心压气机的研究提供了先进手段,现在已经能够定性地模拟跨声速离心叶轮内部的各种流动结构及其主要流动机制^[3~5],从而为离心压气机的研究和设计提供了关键技术手段。

随着对于跨声速离心压气机性能要求的不断提高,即便对于离心压气机内部流动结构和机制有了相当深入的认识,依靠简单的几何造型要想获得高性能越来越难,跨声速离心叶轮的设计已经发展到了需要根据其内部流动的具体情况进行优化设计的阶段,在叶轮造型过程中就需要控制叶轮的负荷分布,这是跨声速叶轮设计中一个非常关键的技术。早期,Osborne 等人提出了一种理想的负荷分布规律模型^[6],通过控制吸力面上速度变化来指导设计。20 世纪 90 年代,Zangeneh 等人发展了一套通过给定负荷分布进行叶轮造型设计的方法^[7~9],通过给定环量沿流向的导数 $\partial rV_\theta / \partial m$ 的分布来控制离心叶轮负荷分布,提出了优化叶轮载荷分布的原则,取得了比较好的效果。

当前关于跨声速叶轮负荷分布规律,及其内部流动机理的研究还不是很多,国内这方面的研究就更少一些。随着跨声速离心压气机负荷的进一步提高,叶轮内部流动情况和流动相互作用将更加复杂,为此,有必要围绕这个问题开展多方面的深入研究。本文利用基于 Denton 程序发展的经过一定程度校验的离心/组合压气机三维 CFD 软件,以某一具有典型负荷的跨声速离心压气机为例,在级环境下对比研究了负荷分布对于离心叶轮性能的影响,对比分析了其内部的二次流和熵分布等参数变化,讨论了负荷分布影响的内在机制,希望有助于深化对于跨声速离

心压气机的认识。

2 计算方法

离心叶轮环量沿流向的导数 $\partial rV_\theta / \partial m$ 与叶轮负荷分布之间存在着如下的对应关系^[7,10,11]:

不可压流动中

$$p^+ - p^- = \frac{2\pi}{B} W_{mb1} \frac{\partial rV_\theta}{\partial m} \tag{1}$$

在可压流动中

$$h^+ - h^- = \frac{2\pi}{B} W_{mb1} \frac{\partial rV_\theta}{\partial m} \tag{2}$$

所研究的跨声速离心叶轮的具体指标见表 1,本文对比分析了三种不同的负荷分布规律,如图 1 所示,分别为前加载、均匀加载和后加载。图 2 中给出了三种叶轮的造型对比,为简化问题造型中叶轮的根、尖截面采用了相同的负荷分布规律。在下面的分析中,分别将这三种叶轮称为前加载叶轮、均匀加载叶轮和后加载叶轮,用编号 iv, (E), (四)表示。

Table 1 Design parameter

Mass flow/(kg/s)	2.0
Total pressure ratio	4.2
Rotate speed/(r/min)	37 600
Inlet tip radius/mm	89.3
Impeller outlet radius/mm	129

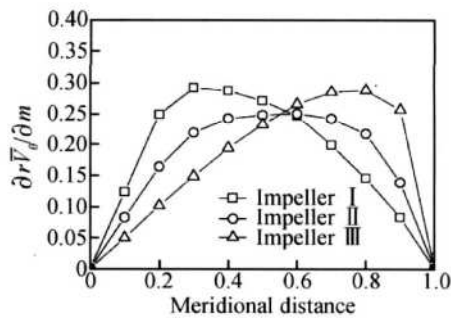


Fig 1 $\partial rV_\theta / \partial m$ distributions

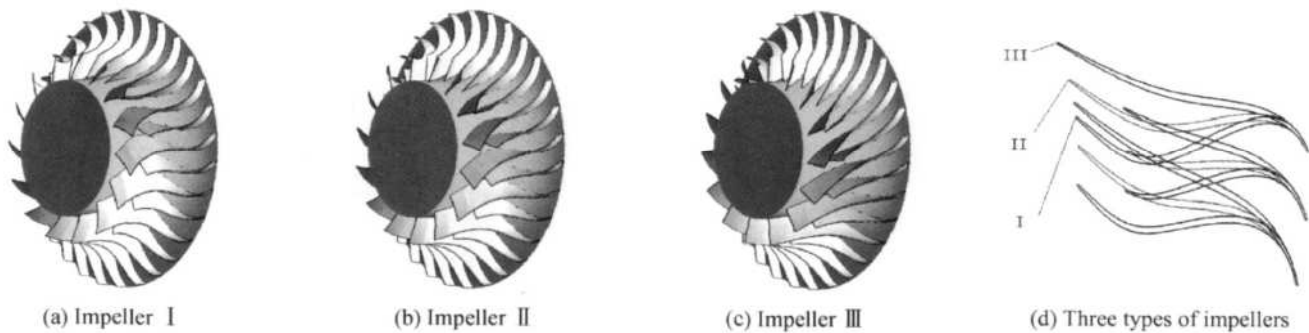


Fig 2 Blades of three impellers

为了使得计算分析更具有代表性,本文三种离心叶轮的计算始终带有相同的径向扩压器。计算采用了基于 Denton 程序发展的离心/组合压气机三维 CFD 软件,新程序不但大大扩展了原有的计算功能,而且改进了其掺混面和湍流模型等,使得离心/组合压气机计算的收敛速度大大加快,计算结果也更为可靠。

如图 3 所示,网格依然采用简单 H 型网格,通过在前缘的加密刻画其几何形状,但对于叶尖和离心叶轮常见的钝尾缘需要采用削尖处理。离心叶轮每个通道内网格数为 $37 \times 190 \times 38$ (周向 $\times$ 流向 $\times$ 展向)。计算中采用了变间隙,削尖处理后,进口处的相对间隙为 0.6%,出口处的相对间隙为 1.2%。

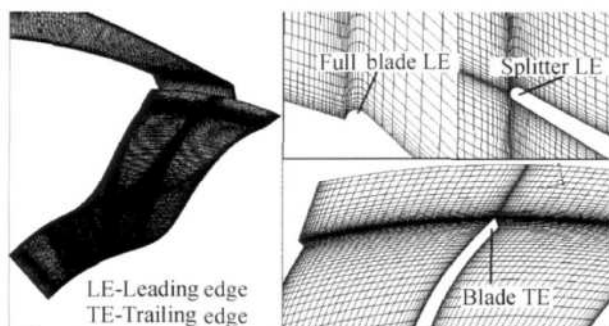


Fig. 3 Computational mesh

3 结果分析

3.1 对叶轮总性能的影响

图 4 给出了计算得到的三组叶轮性能曲线,它们都是从离心压气机级计算结果中提取出来的。从图 4 可以看到,前加载叶轮压比裕度和流量裕度都比较小,效率也明显偏低。虽然后加载叶轮失速压比和流量与均匀加载叶轮的基本一致,但其效率明显更高一些。

3.2 对叶轮内部二次流的影响

通过控制叶片的负荷分布规律,能够有效地控制叶片根尖的相对马赫数分布,进而控制吸力面的二次流。图 5 给出设计点三组叶轮大叶片近吸力面的流线与压力分布。从中可以看出前加载叶轮向叶尖的迁移流动非常明显,在叶片的前部就产生了非常明显的迁移,而后加载与均匀加载叶轮向叶尖的迁移相对比较缓慢,后加载的情况更好一些。从图 5 还可以看出,在子午通道转弯的地方,即叶片中部附近,正是二次流发展最迅速的地方。

图 6 给出了设计点分流叶片近吸力面的流线与压力分布。由于分流叶片比大叶片要短一些,其吸力面附面层相对更薄一些,所以三种叶轮分流叶片吸力

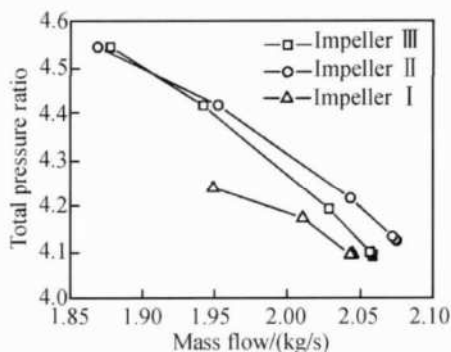
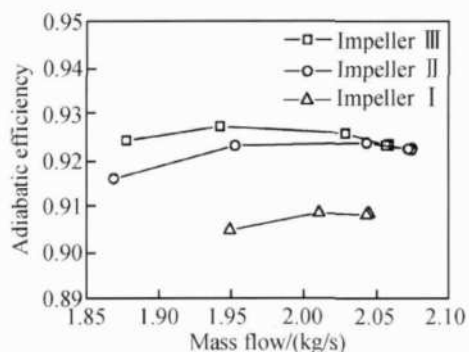


Fig. 4 Performance of three impellers

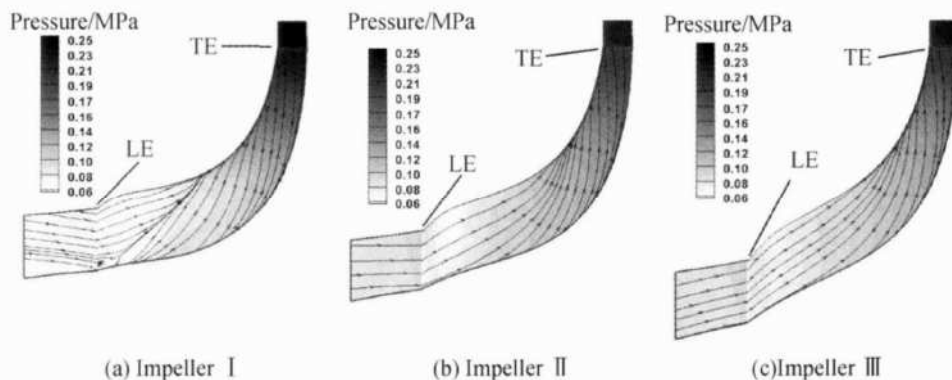


Fig. 5 Static pressure and streamlines on full blade suction surface (design point)

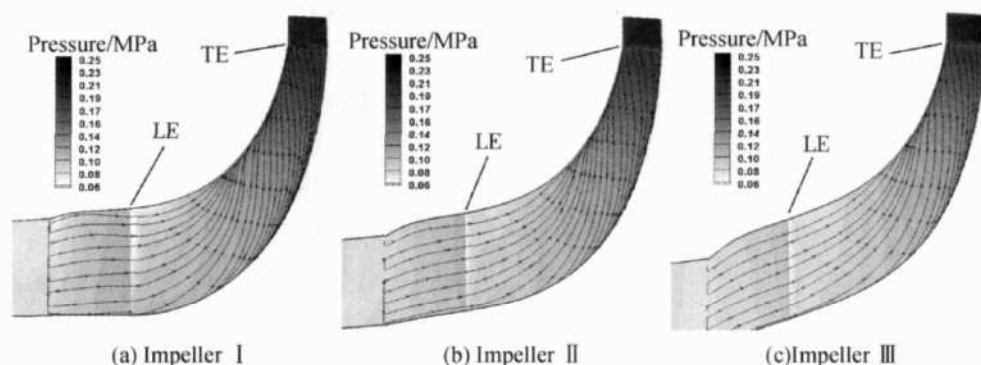


Fig. 6 Static pressure and stream lines on splitter blade suction surface (design point)

面的二次流发展比大叶片要弱得多。对比三组叶片分流叶片表面的流线,可以看出依然是前加载的迁移最明显,后加载的迁移最弱。

图 7 给出了设计点近轮毂表面的流线与压力分布。由于前加载叶轮进口段负荷较大,所以在进口段从压力面向吸力面的迁移流动非常明显,随着负荷的向后移动,叶片前部的周向迁移明显减弱,同时流道后部的周向迁移并没有增大,因此后加载叶轮的周向迁移一直比较微弱,叶片出口的脱轨角自然也最小。

从图 7 可以清楚地看到前加载叶轮在吸力面前

缘根部存在局部分离,其入口攻角显然很大。图 8 是叶轮子午面周向平均速度分布,从中可以看到离心叶轮在轮毂附近存在一个低速区,随着负荷的前移,这个低速区逐渐扩大并且前移。在前加载叶轮中,这个低速区已经移动到进口附近,导致根部入口流速较低,使叶根工作在很大的正攻角下。随着流量的降低,叶轮根部攻角进一步加大,分离区也逐渐加大。这是导致前加载叶轮效率和裕度都明显偏低的根本原因。

3.3 对叶尖泄漏流的影响

从图 8 可以看出在离心叶轮靠近机匣处也存在

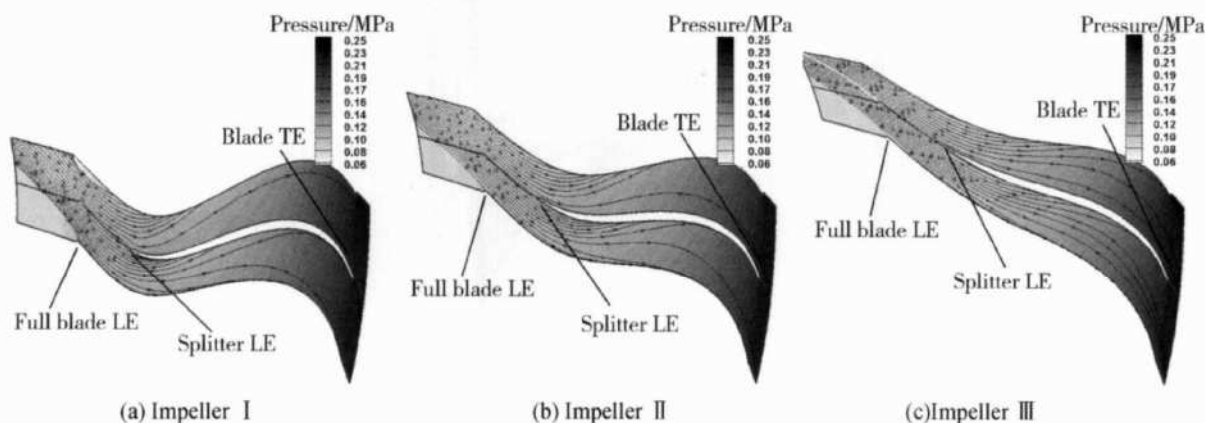


Fig. 7 Static pressure and streamlines on near hub surface (design point)

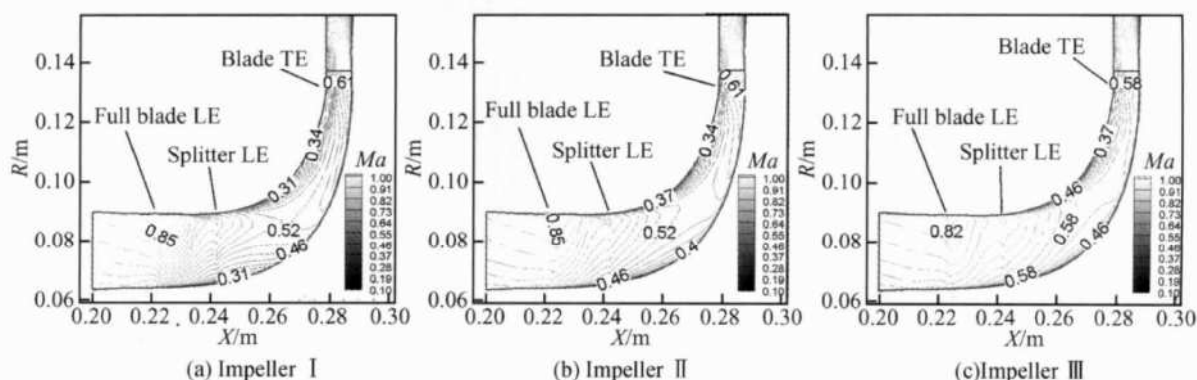


Fig. 8 Circumferentially averaged Mach number distribution (design point)

一个低速区,它主要由于叶尖泄漏造成的,随着载荷的前移,低速区开始的位置逐渐前移,范围也逐渐扩大。

为了更清楚地对比负荷分布对于叶轮槽道中二次流的影响,在与轮毂、机匣型线近似垂直的方向截取 5 个截面进行分析,具体位置如图 9 所示。

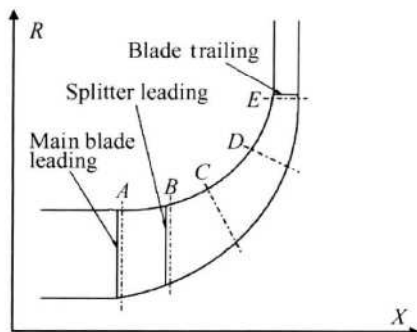


Fig. 9 Position of selected cutting planes

图 10 给出了近机匣表面的流线及马赫数分布和熵增 (Entropy, 用 E 表示) 分布。从中可以看出,前加载情况下无论是泄漏流的范围还是强度都是最大的,后加载叶轮的泄漏损失最小。负荷分布对于大叶片

的泄漏影响最为明显,随着负荷的前移,泄漏损失明显加大。相比之下,分流叶片的泄漏受负荷分布的影响相对要弱一些。

图 11 给出了这 5 个截面上的熵增 E 分布。熵增主要集中在靠近机匣的区域,说明叶尖泄漏带来的损失是离心叶轮中主要的损失来源。叶尖泄漏损失从进口到出口逐渐加强,范围和强度逐渐扩大,最终发展到占据整个通道一半左右的区域。损失的中心随着泄漏的发展逐渐由吸力面向压力面移动,在前加载叶轮中,在机匣与压力面夹角区域形成整个通道中最大的损失。前加载叶轮泄漏开始的位置更靠近进口,损失的强度和范围最强,后加载叶轮最弱。

3.4 叶轮出口流场均匀性

离心叶轮出口流场的均匀性对于扩压器的内部流动,以及叶轮及其径向扩压器的相互作用都有重要影响,因此在具有相同性能参数的叶轮中,出口流场更均匀的叶轮才能获得高的级性能。图 12 给出了三种离心叶轮出口流场的总压分布、总温分布、绝对马赫数和绝对气流角的分布。后加载离心叶轮出口的流场

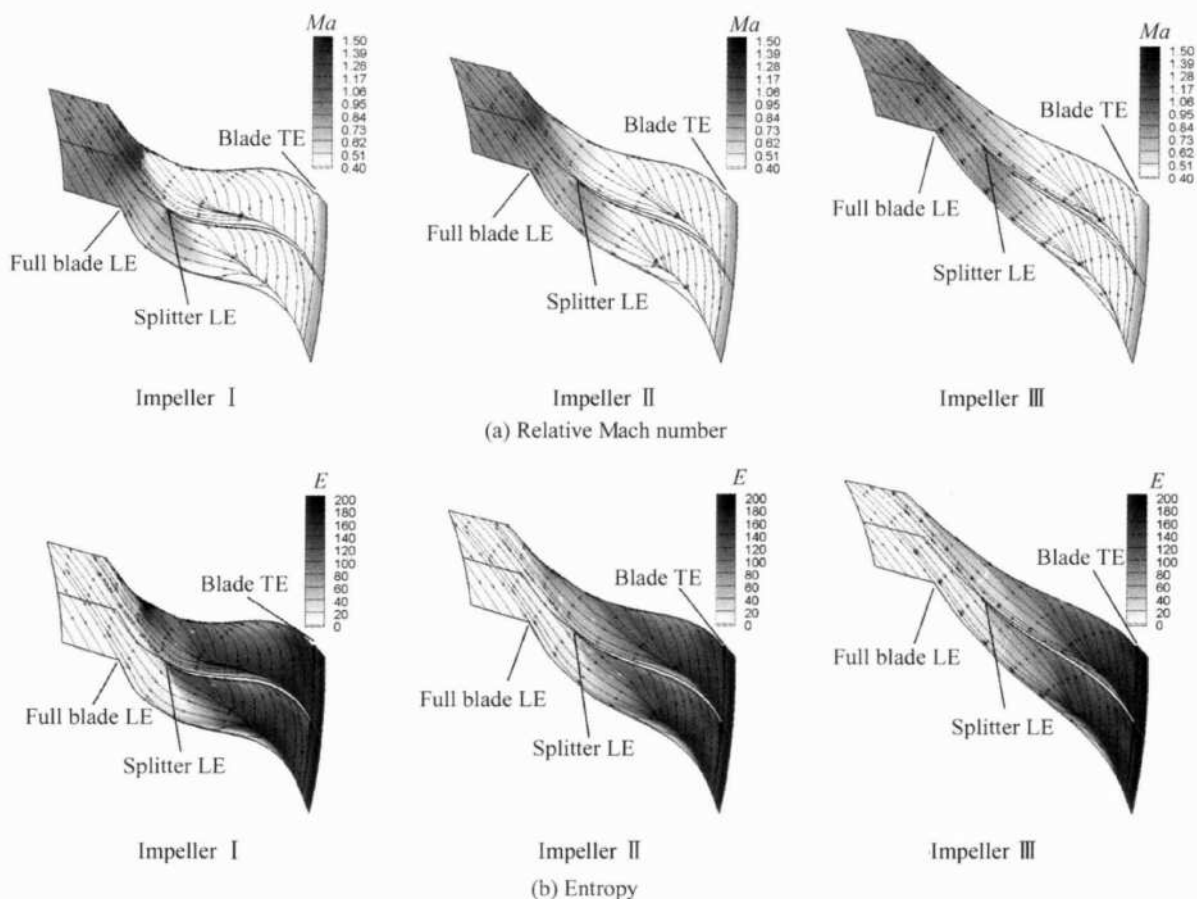


Fig. 10 Stream lines and relative Mach number or entropy on near shroud surface (design point)



Fig. 11 Entropy on selected cutting plane (design point) for impeller

最为均匀,尾迹以及近机匣表面低速流体对主流的影响最小,前加载叶轮出口流动则最不均匀。后加载叶轮均匀的出口流场有利于改善扩压器的内部流动。

4 结 论

为了分析跨声速离心叶轮负荷分布对叶轮性能

的影响及其内在流动机制,本文采用基于 Denton 程序发展的经过一定程度校验的离心/组合压气机三维 CFD 软件,以某一具有典型负荷的跨声速离心压气机为例,在级环境下对比研究了前加载、均匀加载和后加载三种负荷分布的叶轮,得到的主要结论如下:

(1)通过控制离心叶轮的负荷分布规律,能够有

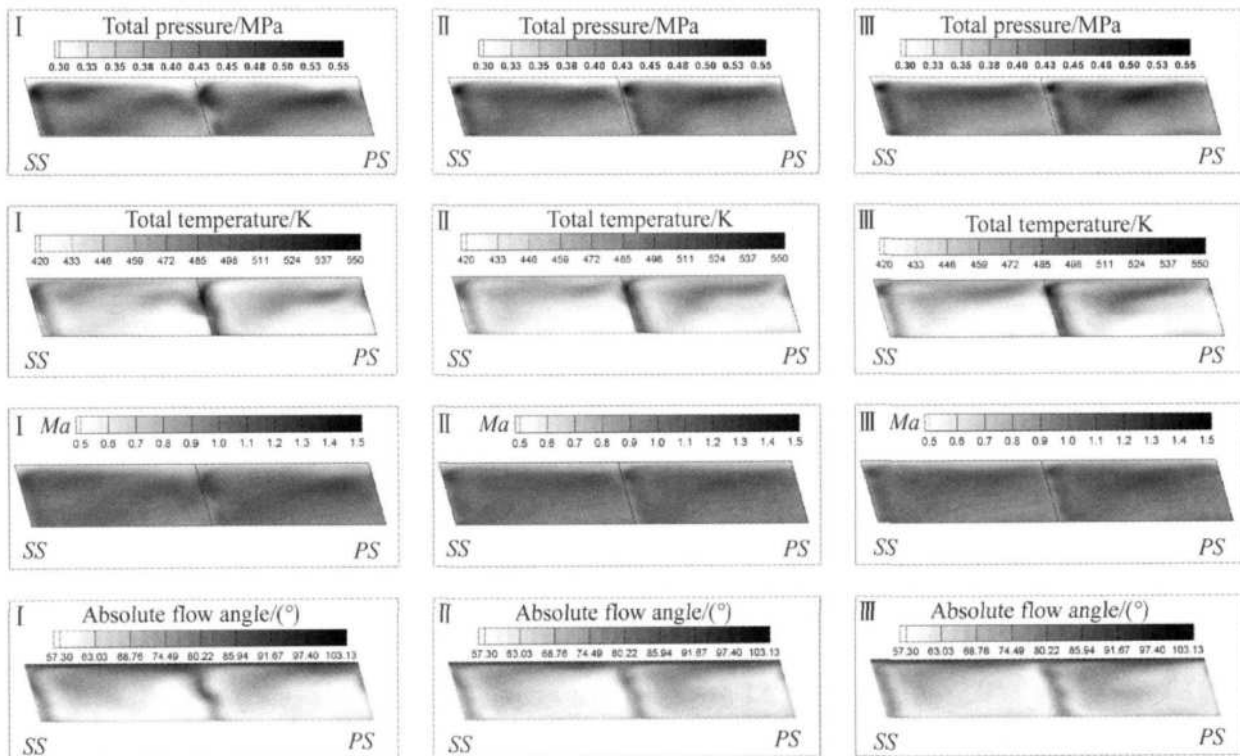


Fig. 12 Flow fields at impellers outlet (design point) for impeller iv, ㊦, ㊧

效地控制叶片根尖的相对马赫数分布,进而控制叶片吸力面和轮毂表面二次流。后加载形式的负荷分布更有利于抑制吸力面和轮毂表面的二次流的产生和发展。

(2)离心叶轮的负荷分布同样对于叶轮叶尖泄漏有重要影响,后加载形式的负荷分布同样有利于抑制叶轮叶尖泄漏流的产生和发展。

(3)后加载形式的负荷分布不但能够使叶轮本身获得好的特性,而且其出口流场更为均匀,还能够使得离心压气机获得好的级特性。

参考文献:

- [1] Eckardt D. Detailed flow investigations within a high speed centrifugal compressor impeller [J]. *ASME Journal of Engineering for Power*, 1976, 98(3): 390~ 402
- [2] Krain H. Swirling impeller flow [J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 1988, 110(1): 122~ 128
- [3] Krain H, Hoffman W. Verification of an impeller design by laser measurements and 3D-viscous flow calculations [R]. *ASME 89-GT-159*
- [4] Ibaraki S, Matsuo T, Kuma H, et al. Aerodynamics of a transonic centrifugal compressor impeller [R]. *ASME 2002 GT-30374*
- [5] Higashimori H, Hasagawa K, Sumida K, et al. Detailed

flow study of Mach number 1.6 high transonic flow with a shock wave in a pressure ratio ㊦ centrifugal compressor impeller [R]. *ASME 2004 GT-53435*

- [6] Krain H. Review of centrifugal compressor's application and development [R]. *ASME 2003 GT-38971*
- [7] Osborne C, Runstadler P W, Dodd W. Aerodynamic and mechanical design of an 8:1 pressure ratio centrifugal compressor [R]. *NASA CR-134782*, 1975
- [8] Zangeneh M. A compressible three-dimensional design method for radial mixed flow turbomachinery blades [J]. *Journal of Numerical Methods in Fluids*, 1991, 13(5).
- [9] Zangeneh M. On the design criteria for suppression of secondary flows in centrifugal and mixed flow impellers [R]. *ASME 97-GT-393*
- [10] Zangeneh M. On the role of three-dimensional inverse design methods in turbomachinery shape optimization [J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1999, 213(1): 27~ 42
- [11] Zangeneh M. Three dimensional design of radial inflow turbine [D]. *Cambridge University Engineering Department*, 1988

(编辑:郭振伶)