

文章编号: 1000-8055(2006) 02-0285-05

低雷诺数效应对某可控扩散叶型性能的影响

赵 峰, 桂幸民

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘要: 为研究雷诺数效应对叶栅流动的影响, 对某可控扩散叶型的平面叶栅流动进行数值模拟, 计算在叶弦雷诺数分别为 1×10^6 , 7.7×10^4 , 1.6×10^4 , 7.2×10^3 和 3.4×10^3 条件下的不同攻角的流动情况, 研究雷诺数对叶栅总压损失系数和攻角特性的影响。对叶栅性能和流场特性进行了分析, 结果表明随着雷诺数的降低, 叶栅流动的总压损失系数不断上升, 低损失攻角范围逐步减小。

关键词: 航空、航天推进系统; 低雷诺数; 可控扩散叶型; 数值模拟

中图分类号: V 231.3

文献标识码: A

The Low Reynolds Number Effects on the Performance of Some Controlled Diffusion Airfoils

ZHAO Feng, GUI Xing-min

(School of Jet Propulsion,

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

Abstract: In order to analyze the effect of low-Reynolds number on the performance of some controlled diffusion airfoils, calculations were performed under different Re No. of 1×10^6 , 7.7×10^4 , 1.6×10^4 , 7.2×10^3 , 3.4×10^3 with different incidences respectively. The results of numerical simulation show that the total pressure loss coefficient increases with the decrease of Reynolds number. Under the condition of low Reynolds number, the incidence range of low loss becomes narrow.

Key words: aerospace propulsion system; low Reynolds number; controlled diffusion airfoil; numerical analysis

雷诺数 Re 是衡量流体粘性对航空发动机增压及涡轮部件性能影响的重要准则之一。一般来说, 当涡轮喷气或涡轮风扇发动机进口气流的雷诺数 Re 大于某一临界值时, 雷诺数对发动机各部件(包括风扇、压气机和涡轮)的影响可以忽略, 因此增压部件的流量、压比和效率也将基本不受雷诺数变化的影响; 但当发动机进口雷诺数小于此

临界值时, 雷诺数的变化对各部件的影响逐步显现, 并对发动机各性能参数均带来直接影响。用于衡量雷诺数效应影响的临界值被称为临界雷诺数, 而雷诺数的变化对发动机各部件工作性能的影响也被称为低雷诺数效应^[1]。

当飞行高度升至20 km 且飞行马赫数小于0.75时, 入口气流的压力和密度均已显著降低, 使

收稿日期: 2005- 03- 02; 修订日期: 2005- 05- 16

基金项目: 国家自然科学基金资助(50076001; 50136010)

作者简介: 赵峰(1981-), 男, 新疆乌鲁木齐人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院硕士生。

表征叶轮机雷诺数的叶弦雷诺数大大降低, 流场特性也大大偏离设计状态, 并使发动机的工作性能严重恶化。不同的发动机流道和叶型设计具有不同的临界雷诺数(此临界值的量级通常为 10^5 左右), 且雷诺数效应对不同型号发动机的影响程度和方式也不尽相同。但大量的理论和实验研究发现了风扇/压气机部件雷诺数效应的若干规律和特点, 这对认清低雷诺数条件下的流动规律至关重要。

一般认为, 诱发低雷诺数效应的流动机理如下: 当风扇进口叶弦雷诺数高于临界雷诺数并处于自模区时, 雷诺数对风扇叶栅的流动特性几乎不受影响; 但当叶弦雷诺数低于此临界值时, 叶栅流动将以分离泡的形式实现从层流向湍流的转换, 同时损失上升、叶片力减小、落后角增加; 当闭式分离泡在进一步降低的叶弦雷诺数下转而变为大尺度开式分离时, 风扇叶栅通道逐步丧失其应有的流动特征, 叶栅流动损失急剧上升^[2]。不同的风扇叶型设计具有不同的临界雷诺数, 且临界雷诺数明显地受到流动湍流强度的影响, 当湍流强度高于1.5%时, 临界雷诺数通常会在 10^5 以下^[3]。

本文使用 NUMECA 三维软件对一种可控扩散叶型叶栅吹风试验进行了二维定常流动数值模拟, 得到在不同进口条件下的低雷诺数效应。分析低雷诺数情况下基元流动的特点, 对比高低雷诺数情况下总压损失系数和攻角特性的差别, 得到雷诺数对基元流动的影响。

1 算例介绍

本算例选取的可控扩散叶型为 MAN GHH 1-S1叶型^[4], 数值模拟如图1所示的叶栅流动。

1.1 计算网格

网格用 NUMECA 软件的 IGG 网格生成器生成, 网格数为113(周向)×365(流向), 由于采用手动生成平面二维网格, 较好的控制了网格的质量。图2为计算网格示意图。

1.2 基本方程和湍流模型

采用三维雷诺平均 Navier-Stokes 方程。湍流模型选取 S-A 一方程模型和标准 $k-\epsilon$ 双方程模型。

1.3 边界条件

边界条件的处理方法为: 进口边界给定总温、总压、气流角的分布, 出口边界给定静压。

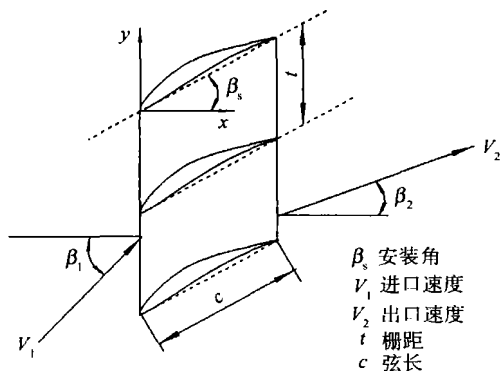


图1 叶栅流动进出口条件的定义
Fig.1 Definition of cascade inlet and exit flow condition

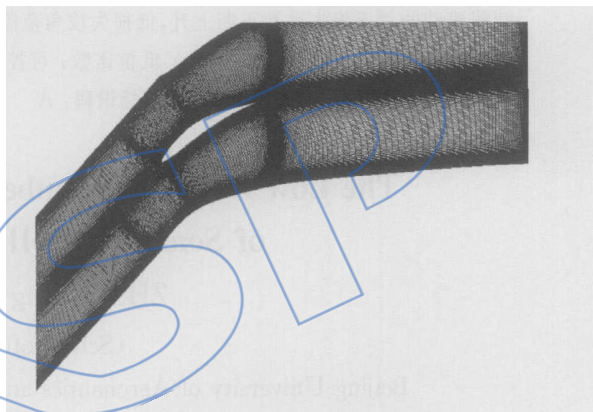


图2 计算网格示意图
Fig.2 The grid for calculation

1.4 雷诺数的计算

雷诺数的计算公式为:

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} \quad (1)$$

其中: Re 数反映了流体微团所受惯性力与粘性力的相对关系, 如果 Re 数越大, 说明惯性力的作用越大而粘性力的作用越小。 v 为流体速度, 为流体密度, l 为流体微团的长度, μ 为动力粘性系数。本文选取得不同雷诺数主要是由于流体密度 ρ 的改变造成的。

1.5 计算方法

工质假定为理想气体, 空间离散格式为中心差分格式, 采用多重网格法加速收敛。

计算时改变不同状态下的流体密度进而改变雷诺数。为了得到不同雷诺数下相同的进口马赫数($Ma_1 = 0.62, Ma_1 = 0.55, Ma_1 = 0.7$), 在某一雷诺数情况下固定进口总温和总压, 不断改变出口静压, 最终得到计算结果。为了比较雷诺数对攻

角特性的影响, 计算了攻角分别为 0° 、 -4° 、 $+3^{\circ}$ 、 $+5^{\circ}$ 和 $+7^{\circ}$ 情况时不同雷诺数下的流动。

2 计算结果

本文计算了雷诺数分别为 1×10^6 、 7.7×10^4 、 1.6×10^4 、 7.2×10^3 和 3.4×10^3 下的流动情况。图3和图4分别为S-A 一方程模型和标准k-ε 双方程模型计算得到在设计进口马赫数条件下 ($Ma_1=0.62$) 不同攻角条件下总压损失系数($\bar{\omega}=(p_1^*-p^*)/(p_1^*-p)$) 随雷诺数变化的情况。其中k-ε 表示标准k-ε 双方程湍流模型计算结果, S-A 表示S-A 一方程湍流模型计算结果。

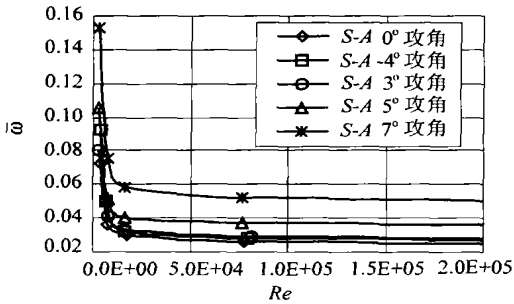


图3 S-A 模型计算总压损失系数随雷诺数的变化
($Ma_1=0.62$)

Fig. 3 Under the different incidences, calculated with S-A turbulence models, total pressure loss coefficient versus Re numbers
($Ma_1=0.62$)

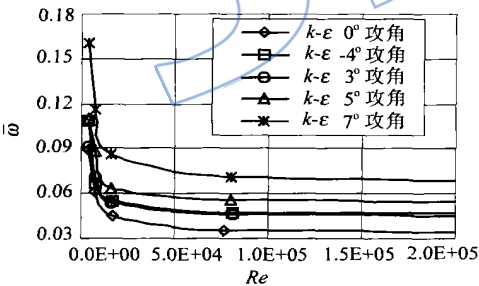


图4 k-ε模型计算总压损失系数随雷诺数的变化
($Ma_1=0.62$)

Fig. 4 Under the different incidences, calculated with k-ε turbulence models, total pressure loss coefficient versus Re numbers
($Ma_1=0.62$)

两种湍流模型计算得到总压损失系数随雷诺数变化的趋势一致。攻角一定的情况下, 雷诺数大于 1×10^5 时, 随着雷诺数的降低, 总压损失系数基

本不变, 而当雷诺数低于 1×10^5 后, 总压损失系数开始随雷诺数的降低而升高, 当雷诺数达到 3.4×10^3 时, 各攻角条件下总压损失系数都开始急剧升高。可以看出此叶型在较大的攻角情况下仍然保持较低的总压损失系数。可见此可控扩散叶型在设计进气马赫数条件下有很好的性能表现。

图5为S-A 一方程模型计算得到的在非设计进口马赫数条件下 ($Ma_1=0.7$) 不同攻角条件下总压损失系数 随雷诺数变化的情况。在非设计进口马赫数条件下得到的总压损失系数随雷诺数变化的趋势同设计马赫数条件下的变化趋势一致。

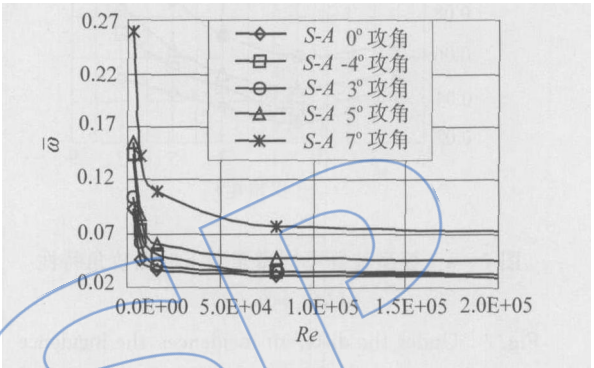


图5 S-A 模型计算总压损失系数随雷诺数的变化
($Ma_1=0.7$)

Fig. 5 Under the different incidences, calculated with S-A turbulence models, total pressure loss coefficient versus Re numbers
($Ma_1=0.7$)

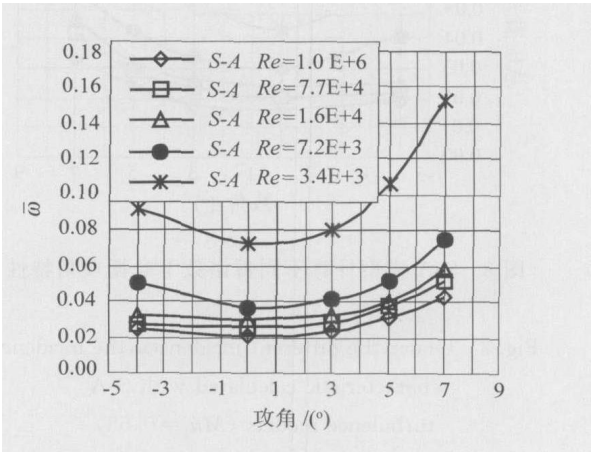


图6 S-A 模型计算不同雷诺数下叶栅攻角特性
($Ma_1=0.62$)

Fig. 6 Under the different incidences, the incidence characteristic calculated with S-A turbulence models ($Ma_1=0.62$)

图6和图7为两种湍流模型计算得到的雷诺数

分别为 1×10^6 , 7.7×10^4 , 1.6×10^4 , 7.2×10^3 和 3.4×10^3 情况下总压损失系数随攻角地变化。从图6和图7中可以看出相同的雷诺数条件下, 攻角从负值逐渐增加到0度后增加为正值的过程中, 损失系数先降低后升高。随着雷诺数的降低, 平面叶栅的低损失攻角范围越来越小, 说明低雷诺数条件下, 叶栅对攻角变化更加敏感, 在很小的正攻角或负攻角时损失开始急剧增加。

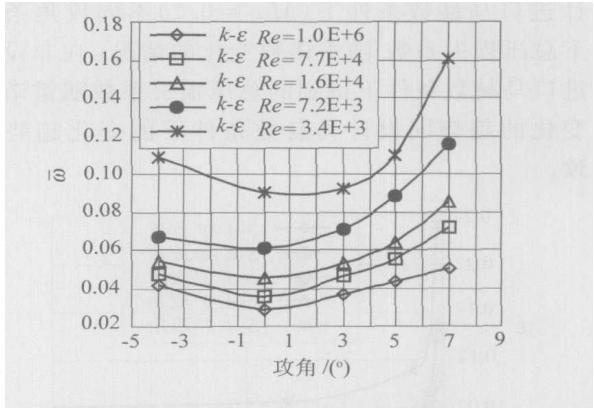


图7 $k-\epsilon$ 模型计算不同雷诺数下叶栅攻角特性
($Ma_1=0.62$)

Fig. 7 Under the different incidences, the incidence characteristic calculated with $k-\epsilon$ turbulence models ($Ma_1=0.62$)

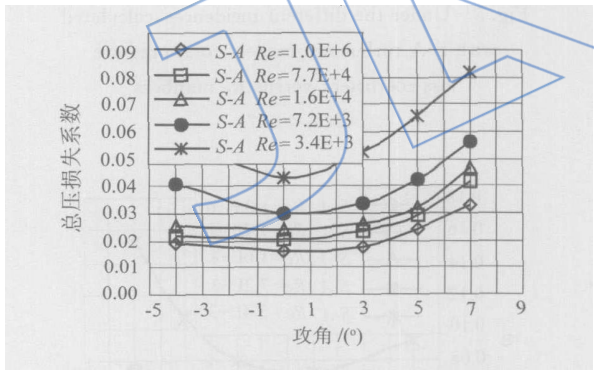


图8 S-A 模型计算不同雷诺数下叶栅攻角特性
($Ma_1=0.55$)

Fig. 8 Under the different incidences, the incidence characteristic calculated with S-A turbulence models ($Ma_1=0.55$)

图8和图9为 S-A 一方程模型计算得到的在非设计进口马赫数条件下 ($Ma_1=0.55$, $Ma_1=0.7$) 不同雷诺数下叶栅攻角特性。可以看出非设计进口马赫数条件下雷诺数对叶栅攻角特性的影响趋势同设计进口马赫数条件下完全一致, 非设计进口马赫数条件下的低损失攻角范围较设计进

口马赫数条件的有所减小, 印证了此可控扩散叶型在设计进气马赫数条件下的良好性能。

$k-\epsilon$ 模型计算得到的不同雷诺数0 攻角条件下, 吸、压力面的静压分布如图10所示, Pressure Coefficient 表示以入口静压 P_0 为参考值的压升 (P/P_0)。

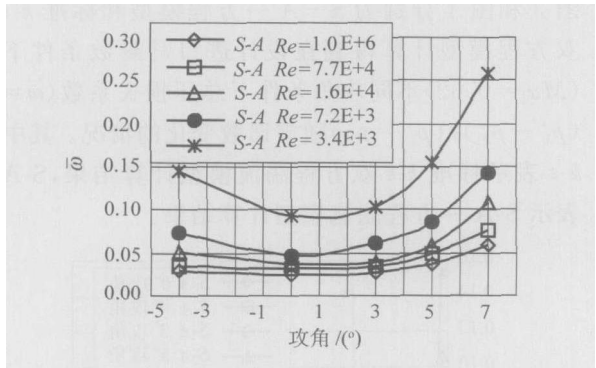


图9 S-A 模型计算不同雷诺数下叶栅攻角特性
($Ma_1=0.7$)

Fig. 9 Under the different incidences, the incidence characteristic calculated with S-A turbulence models ($Ma_1=0.7$)

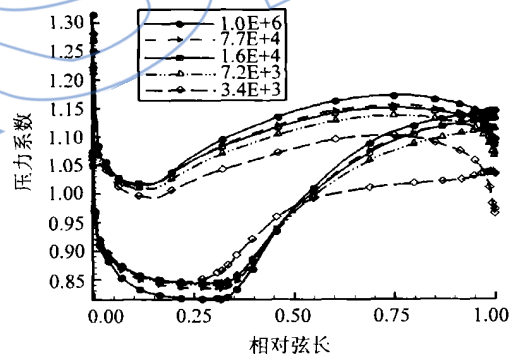


图10 $k-\epsilon$ 模型计算不同雷诺数0 攻角条件下, 吸、压力面的静压系数沿弦向的变化
($Ma_1=0.62$)

Fig. 10 Under the different Reynolds number, calculated with $k-\epsilon$ turbulence models, Pressure distribution contrast at 0 deg of incidence

从图10所示的壁面静压分布可以看出, 随着雷诺数的降低, 吸压力面包络面积逐渐降低, 意味着加功量的逐渐减小。雷诺数为 1×10^6 , 7.7×10^4 , 1.6×10^4 , 7.2×10^3 和 3.4×10^3 时, 压力在吸力面速度最大位置后不断增加, 直到尾缘, 说明吸力面流动并未发生分离。而当雷诺数达到 $3.4 \times$

10^3 时, 压力在吸力面速度最大位置后先增加, 在60%弦长到尾缘位置都保持基本不变, 说明流动发生了分离, 而且分离达到尾缘。该雷诺数下, 吸压力面压差很小, 意味着叶片力的减小和加功量的减小。这些都印证了雷诺数在 3.4×10^3 时损失的急剧增加。

图11和图12为 $k-\epsilon$ 模型计算得到的0攻角时, 雷诺数分别为 1×10^6 和 3.4×10^3 情况下叶栅流动的速度矢量图。

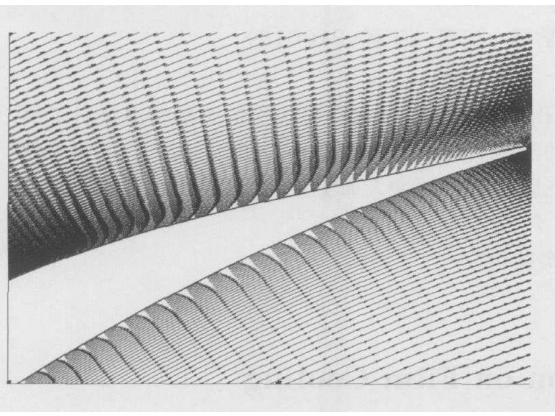


图11 $k-\epsilon$ 模型计算0 攻角条件下, $Re=1 \times 10^6$ 时叶栅流动的速度矢量图 ($Ma_1=0.62$)

Fig. 11 $Re=1 \times 10^6$, calculated with $k-\epsilon$ turbulence models, Velocity vector at 0 deg of incidence ($Ma_1=0.62$)

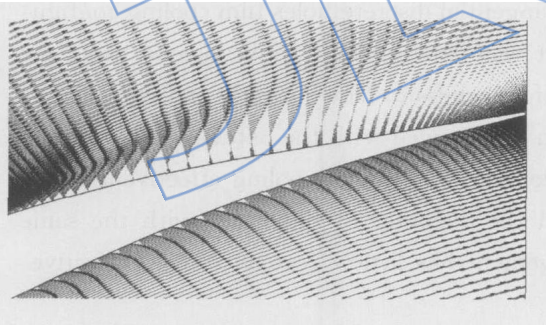


图12 $k-\epsilon$ 模型计算0 攻角条件下, $Re=3.4 \times 10^3$ 时叶栅流动的速度矢量图 ($Ma_1=0.62$)

Fig. 12 $Re=3.4 \times 10^3$, calculated with $k-\epsilon$ turbulence models, Velocity vector at 0 deg of incidence ($Ma_1=0.62$)

两图都可以清楚地看出叶片吸压力面边界层随流动逐渐增厚, 在低雷诺数(3.4×10^3)时, 吸力面边界层厚度增加的更严重, 流动在60%弦长位置开始发生分离, 分离一直持续到尾缘位置。大尺度的分离使得压力在吸力面60%弦长到尾缘位

置保持基本不变, 分离也导致了损失的剧烈上升。

3 结 论

通过对某可控扩散叶型叶栅实验的数值模拟和分析低雷诺数效应对叶栅流场结构和性能的影响, 可以得出如下结论:

(1) 随着雷诺数的降低, 叶栅流动的总压损失系数不断升高, 尤其是当雷诺数达到 3.4×10^3 时, 总压损失系数升高的十分剧烈。

(2) 雷诺数的降低对平面叶栅流动的攻角特性影响较大。随着雷诺数的降低, 平面叶栅的低损失攻角范围越来越小, 说明低雷诺数条件下, 叶栅对攻角变化更加敏感, 在较小的正攻角或负攻角时损失就开始急剧增加。

(3) 低雷诺数情况下, 吸力面边界层厚度增加的更严重, 流动在60%弦长位置开始发生分离, 分离一直持续到尾缘位置, 大尺度的分离使得损失剧烈上升。

(4) 三维数值模拟技术的计算精度较高, 但其结果在相当程度上受网格质量、网络密度、控制参数和收敛准则等因素的影响。目前缺乏对于转捩的数值模拟的有效手段, 本算例使用的Numeca软件未加入其转捩模型模块, 并未模拟出流动的转捩现象。同时, 数值模拟方法在低雷诺数条件下的模拟精度未得到验证。

(5) 标准 $k-\epsilon$ 湍流模型较 S-A 湍流模型能更好的模拟雷诺数对平面叶栅流动的影响, 但其计算时间较长, 收敛性较差。

参考文献:

- [1] Wassell A B. Reynolds Number Effects in Axial Compressors [J]. *Trans. of ASME (A), J. of Engineering for Power*, 1968, 90(2): 149~156.
- [2] 顾明皓, 桂幸民. 低雷诺数效应对某型风扇的性能影响及改进方案研究[J]. *航空动力学报*, 2004, 8(4): 438~443.
Gu Ming-hao, Gui Xing-min. Low-Re Number Effects on the Performance of Some Fans and the Modified Design [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2004, 8(4): 438~443.
- [3] Hobson G V, Weber S. Prediction of a Laminar Separation Bubble over a Controlled-Diffusion Compressor Blade [R]. *ASME 2000-GT-277*, 2000.
- [4] Steinert W, Eisenberg B. Design and Testing of a Controlled Diffusion Airfoil Cascade for Industrial Axial Flow Compressor Application [J]. *Trans of ASME, J. of Turbomachinery*, 1991, 113: 583~590.