

文章编号: 1000-8055(2004)01-0113-05

非定常环境中叶栅总压恢复系数的数值研究

闫 朝, 季路成, 于海力, 徐建中
(中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100080)

摘要: 利用以 N_i 格式和隐式双时间步法求解二维非定常 $N-S$ 方程为基础的数值模拟方法研究了流动的非定常性对涡轮叶栅总压恢复系数的影响, 并与文中提出的定常模型和准定常模型进行了对比。结果发现, 非定常流动能够提高叶栅的总压恢复系数, 但这是建立在与准定常流相比较的层面上, 而和定常流比较时, 非定常流只会使总压恢复系数下降。

关键词: 航空、航天推进系统; 非定常流; 数值模拟; 定常模型; 准定常模型; 涡轮叶栅
中图分类号: V 231.3 **文献标识码:** A

Numerical Investigation of Total-Pressure Recovery Coefficient of Cascade in Unsteady Environment

YAN Zhao, JILU-cheng, YU Hai-li, XU Jian-zhong

(Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: A numerical method based on N_i and implicit dual-time steps scheme for solving the 2-D unsteady $N-S$ equations is applied to investigating the influence of unsteadiness on the total-pressure recovery coefficient of turbine cascade, results of which are compared with that of the steady model and quasi-steady model introduced in this paper. Calculated results show that the unsteadiness of flow can increase the total-pressure recovery coefficient of cascade, when compared with quasi-steady flow. The unsteady flow tends to decrease the total-pressure recovery coefficient when compared with steady flow.

Key words: aerospace propulsion system; unsteady flow; numerical simulation; steady model; quasi-steady model; turbine cascade

在航空燃气轮机内部, 相邻叶排的相对运动造成叶栅内部流动的非定常性。伴随着航空燃气轮机性能的提高, 叶轮机负荷系数不断增加, 叶排间的轴向间距也正被不断缩短, 流动非定常性因而变得越来越强, 逐渐成为影响叶栅性能的一个不可忽略的因素。在此条件下, 以往的定常设计体

系造成的误差越来越大, 为了获得研究叶栅各项性能指标所需的更为精确、可靠的结果, 非定常研究方法显然是更接近于实际流动、更为准确的一种方法, 代表着航空燃气轮机设计的将来。迄今, 国内外通过实验^[1]和数值模拟^[2~5]两种途径在叶栅的非定常流动方面已经作出了大量工作。

收稿日期: 2003-03-24; 修订日期: 2003-07-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59906012); 国家重点基础研究发展规划项目资助(G1999022305);
中国科学院知识创新工程资助项目(KGCX2-301)

作者简介: 闫朝(1975-), 男, 河南郑州人, 中国科学院工程热物理研究所博士生, 主要从事叶轮机非定常流动机理研究

随着非定常研究的展开和深入,人们不禁提出一个问题:非定常环境下叶栅性能和定常假设下究竟有何异同?非定常环境能够使叶栅效率有所增益吗?

本文将通过数值模拟的手段,以叶轮机设计的基础元素——叶栅为对象,针对表征叶栅主要性能指标之一的总压恢复系数展开非定常环境下的基础研究,根据大量的非定常流动时间精确模拟结果,最终比较并确定叶栅总压恢复系数这一性能参数在非定常和定常环境下的区别。

1 研究方法

研究叶轮机内部的非定常流动比定常流动的困难大的多。首先,由于叶轮机非定常流场频率通常很高,且处于狭小、高速的旋转环境下,不仅造成实验研究成本高、周期长,而且难度巨大,无法对各种工况进行全面细致的考察;其次,因为非定常流动控制方程高度非线性,以往低速叶轮机设计中使用的无粘、线化等理论在目前的以高转速、高负荷为特征的叶轮机设计领域已不再适用。相比而言,随着计算机硬件和软件技术的飞速发展,数值模拟在叶轮机非定常研究领域正在发挥着越来越重要的作用。

1.1 物理模型

研究对象为一亚音速涡轮叶栅,由入口总压、总温、入口气流角度和出口静压(背压)4个因素共同决定其流动状态。为了模拟更加真实的非定常流动环境,叶栅的进口条件最好由上游叶排所形成的真实流场确定,但这样由上游叶排计算得出的下游入口条件会使情况复杂化,不确定性增加,进而难以对影响非定常环境中叶栅性能的各种因素加以分离,并准确分析。所以,本文只对单排叶栅进行计算,根据 Liu & Sockol^[6]的工作在入口边界施加非定常边界条件:

$$P_0 = \begin{cases} (P_0)_{\text{inlet}} - P_{\text{amp}} \cdot (P_0)_{\text{inlet}} \cdot \left[1 - \left(\frac{|y - y_w|}{W_b} \right)^{1.5} \right]^2 & \text{if } |y - y_w| \leq W_b \\ (P_0)_{\text{inlet}} & \text{other} \end{cases} \quad (1)$$

$$y_w = U_{\text{wake}} \cdot \text{time} \quad (2)$$

其中: $(P_0)_{\text{inlet}}$ 为入口总压基值, P_{amp} 是总压亏损系数, y 是入口处栅向坐标, y_w 是尾迹中心位置, W_b 为半尾迹宽度, U_{wake} 是尾迹移动速度, time 是物理

时间。

计算中假定入口总温、进气角、背压均匀,入口总压由公式 1 给定以模拟非定常入口条件。以此为基础,本文就一系列显著影响叶栅非定常流动性能的因素,如总压亏损、进气角和尾迹移动速度等,考察它们对叶栅效率的影响情况。

1.2 数值方法

采用数值模拟的方式对非定常问题进行研究。主控制方程为雷诺平均 N-S 方程,并以 Baldwin-Lomax 湍流模型封闭方程组。计算网格如图 1 所示 H 型网格,网格数量为 112×56 ,共 6272 个网格微元,并在叶栅前缘、尾缘和边界处适当加密,壁面 $y^+ < 10$ 。

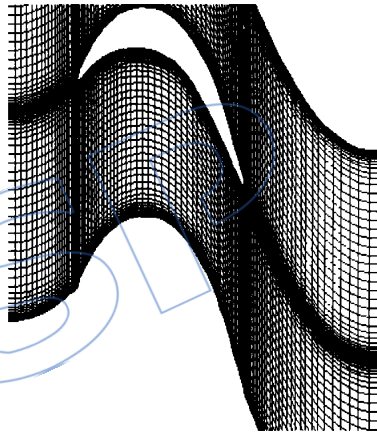


图 1 叶栅 H 型网格

Fig 1 H-type mesh in cascade

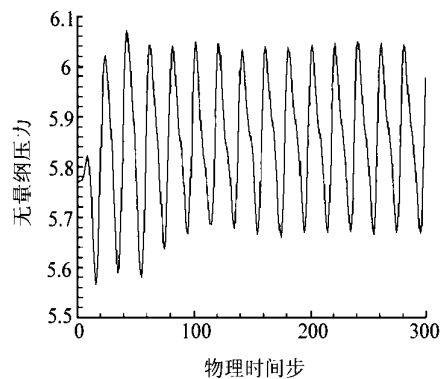


图 2 一典型非定常计算收敛史

Fig 2 Convergent history of unsteady calculation

离散建立在 N^2 方法基础上,结合 TVD 格式和 Jameson^[3]提出的双时间步法对方程组进行求解。在保证计算在空间和时间方向具有二阶精度的同时,为了加快收敛速度,计算中还引入了当地时间步长和多重网格法。为确保非定常计算的

精确性,文中对所有算例每个周期均分为 20 个时间层,经过 6 个周期迭代出现周期性,结果取在第 15 个周期左右。如图 2 所示,通过对叶栅前缘附近某点静压的监测,可观察非定常计算过程的收敛情况。

1.3 比较方法

动静叶排的相互干扰是造成叶轮机内部流场非定常性的根本原因。对于此种类型的非定常流动,其流动非定常性的形成因素主要有两个方面:(1)来流的非均匀性;(2)来流的周向相对转动。两种因素共同形成入口条件的周期性变化,缺一不可。也就是说,当上游来流均匀时无法形成非定常性(相当于入口均匀的定常流动),来流不均匀但没有周向运动(即周期性变化)时也不能造成非定常流动(相当于入口非均匀的定常流动或转速无限慢的准定常流动)。

由此引出了本文中所使用的两种和非定常流动具有近似可比性的模型。模型一(对应于因素 1),首先对非定常计算结果的进出口参数(如总压、总温、进气角、背压等)沿周向按流量平均,将所得结果作为定常计算的进出口条件,是一种定常模型;模型二(对应于因素 2),采用与非定常计算相同的计算方法,但认为尾迹移动速度无限缓慢,是一种“准定常”模型,实际计算时求出与非定常计算一个周期相同的时间层数,(每时间层对应的上游尾迹中心位置与非定常计算时相同),最后将一个周期内不同时间层的结果平均。

此两种模型的差别在于它们是在两个不同的层面上和非定常流进行比较:模型一代表的是边界条件沿周向均匀的与非定常流具有近似可比性的定常流,而模型二代表了上游不均匀来流的周期性变化无限缓慢的准定常流。可以把它们看成非定常流的两种极端形式,此时流动的非定常性趋于零。

另外需要说明的是按流量平均的定常边界模型是一种在定常研究和设计中普遍采用的方法,尽管有一些方法(如“时均相关项”法)能够将非定常损失引入到定常计算的计算域之内,但因其不亚于湍流模型的难度并未得到普遍应用。本文的目的仅在于比较常用边界模型和非定常模型的区别,“时均相关项”等方法将不予考虑。

本文将使用以上两种模型与非定常情况进行对比,研究非定常性的强弱对叶栅总压恢复系数的影响。

2 计算结果及对比分析

考虑到非定常计算量非常大,文中仅对不同的入口总压亏损、进气角和尾迹移动速度这三个对叶栅总压恢复系数有显著影响的参数在非定常环境中进行研究,并与 1.3 节所提到的模型 1 和模型 2 做了对比。所采用叶栅选自 E^3 文集^[7]低压涡轮第三级动叶平均截面。

2.1 入口总压亏损的影响

算例中,边界条件为:平均入口总压 $\bar{P}_0$ 为 245917.72 Pa,入口总温 T_0 为 399.8 K,进气角 47.8° ,背压 P_2 为 192944 Pa,尾迹速度 300 m/s, Strouhal 数 $St = 2.023$ ($St = L/V_0T$, L 为轴向弦长, V_0 为来流速度, T 为周期时间)。入口总压由公式(1)给定,具体方法是预估一个 $(P_0)_{inlet}$,代入计算,将所得结果在入口处沿周向按流量平均得到 $\bar{P}_0$ 并调整 $(P_0)_{inlet}$ 的大小,直到 $\bar{P}_0$ 与设计点 $\bar{P}_0$ 的偏差小于千分之一的量级。亏损程度由总压亏损系数 P_{amp} 决定,入口总压分布如图 3 所示,这里令 P_{amp} 分别等于 0.07, 0.15, 0.20 和 0.25,研究不同的入口总压亏损程度对叶栅总压恢复系数的影响。

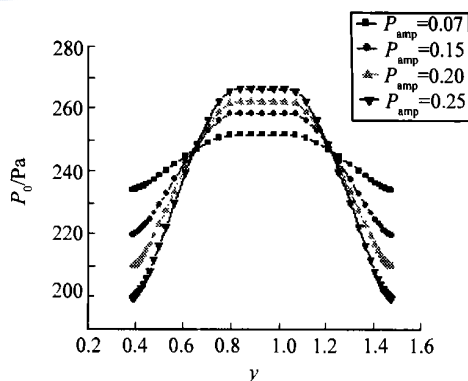


图 3 入口处不同总压亏损形成的总压分布

Fig 3 Total pressure distribution responding to different quantities of total pressure loss

图 4 展示了一个总压亏损达到 15% 的非定常算例的等马赫线在一个周期内的变化过程。可以看到,非定常流动的历史性变化会带来一些独特的现象,如入口尾迹掺混距离的缩短(和准定常流动相比),叶背处涡的脱落等。

图 5 对在不同入口总压亏损情况下叶栅的总压恢复系数进行了比较。对于定常态而言,由于其边界条件始终不变,所以该状态下叶栅效率不随总压亏损变化。可以看到,随着亏损程度的加剧,

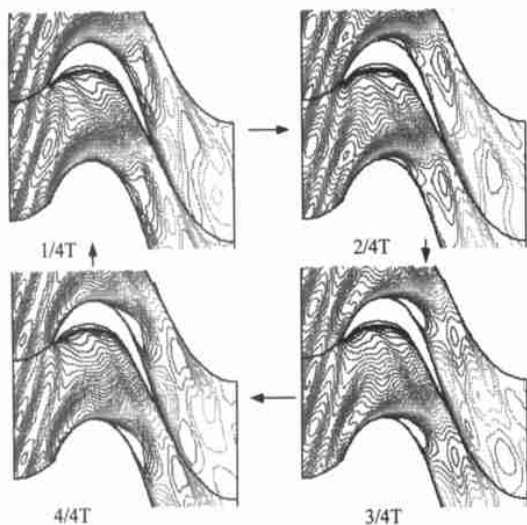


图 4 总压亏损 15% 时等马赫线变化过程

Fig 4 Variation of contour of Mach number with total pressure loss equal to 15 percent

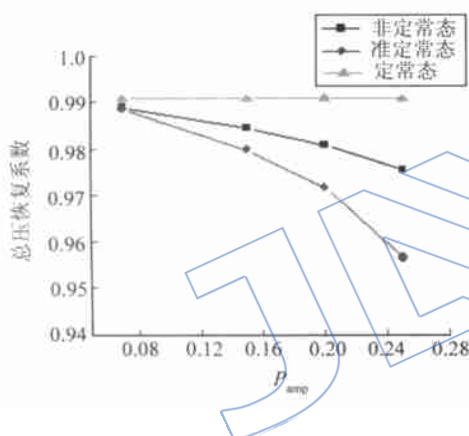


图 5 总压恢复系数随入口总压亏损的变化

Fig 5 Variation of total pressure recovery coefficient with total pressure loss

非定常和准定常流效率下降, 且相互间距离以及与对应的定常流动的距离都在拉大, 这表明, 来流总压亏损程度的增大会使叶栅入口流动的不均匀性增强, 掺混过程加剧, 进而降低叶栅的总压恢复系数。反过来看, P_{amp} 减小时, 非定常条件下叶栅总压恢复系数逐渐逼近定常情况, 可以预见当 P_{amp} 继续减小, 非定常态将逐渐逼近定常态, 所以说可以认为定常态是非定常态的一种极端形式。对于定常流, 因为人为的将入口条件按流量平均, 没有了入口不均匀性带来的掺混过程, 所以叶栅总压恢复系数保持在较高的水平。图中还能发现, 和准定常流相比, 较高的非定常流的总压恢复系数说明流动的非定常性能够提高叶栅的效率, 而且随着总压亏损变大, 入口流场不均匀性增强, 这

种提高变得更为明显。

2.2 进气角度的影响

进口气流角是影响叶栅性能的另一个重要因素。那么在非定常环境下它对叶栅性能的影响和定常环境下究竟有何差别呢? 针对这一问题, 这里取尾迹速度 300 m/s , 进气攻角分别为 7.4° , -2.6° , -12.6° , -22.6° 和 -37.6° ; 总压亏损 $P_{amp} = 0.07$, 其它边界条件与 2.1 节相同, 得到总压恢复系数随攻角的变化曲线。如图 6 所示, 非定常情况下叶栅总压恢复系数的变化趋势和定常、准定常情况基本一致, 其大小和 3.1 节所得结论一致, 还是定常情况下叶栅的效率最高, 准定常时最低, 但最大值所对应的攻角角度各不相同。值得注意的是, 当攻角达到 -2.6° 时, 由于叶背处较大的分离区造成流动恶化, 总压恢复系数快速降低, 尤其是准定常情况, 可见, 与准定常情况相比, 流动非定常性的增强能够在一定程度上缓解流动恶化, 抑制效率的降低。不过, 当攻角继续增大为 7.4° 时, 尽管非定常流动效率仍然高于准非定常流动, 但提升幅度开始下降, 此时, 非定常流动对总压恢复系数急剧下降的抑制已显得力不从心, 说明非定常流对恶化的抑制能力是有限的。

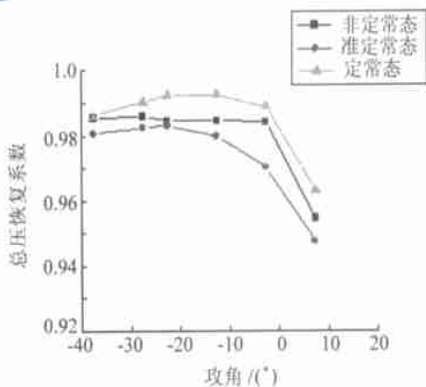


图 6 总压恢复系数随攻角的变化

Fig 6 Variation of total pressure recovery coefficient with incidence angle

2.3 上游尾迹移动速度的影响

上游尾迹移动速度 (U_{wake}) 的增加会加剧叶栅流动的非定常性, 它是左右流场非定常性的关键因素。这里将考察 U_{wake} 对叶栅效率的影响情况, 所以不考虑定常流动的情况, 准定常流动则作为非定常流动的一种特殊情况 ($U_{wake} = 0$)。计算时, 对总压亏损 $P_{amp} = 0.07$ 的情况, 取 $U_{wake} = 0, 60, 100, 200, 300, 450, 600 \text{ m/s}$ 七种情况, $P_{amp} = 0.15$

时取 $U_{wake} = 0, 100, 200, 300, 400 \text{ m/s}$ 五种情况, 其它边界条件与 3.1 节相同。如图 7 所示, 随着 U_{wake} 的增大, 对应于 $P_{amp} = 0.07$ 的曲线先降后升并在最后下降, 叶栅效率在 450 m/s 处达到最大, 对应于 $P_{amp} = 0.15$ 的曲线和 $P_{amp} = 0.07$ 的变化趋势一致但最大值位置不同, 在 300 m/s 处。可以看出, 随着 U_{wake} 的增大, 流动非定常性的增强会同时带来效率的下降和提升, 且存在一个最佳的尾迹移动速度使叶栅效率达到最大, 但该最佳速度会随着 U_{wake} 的不同而发生变化。图 7 中还能发现, 与准定常流动相比, $P_{amp} = 0.07$ 时总压恢复系数最多提高 1%, $P_{amp} = 0.15$ 时达到 5%, 增加了 5 倍。可见, 对于入口不均匀性(相当于上游叶栅引起的尾迹亏损)比较强的情况, 非定常流动所能带来的效益更为明显。但应该注意到, 尽管 $P_{amp} = 0.15$ 时的叶栅效率始终低于 $P_{amp} = 0.07$ 表明非定常流动所能带来的效益还不能完全抵消由尾迹亏损所引起的损失, 但它对叶栅效率的提升相当明显, 已经达到不可忽视的程度。所以应该清楚地认识到, 对应于某一确定的工况和对象, 优化流动的非定常性能够带来的性能提升不容忽视, 但同时也是有限的。

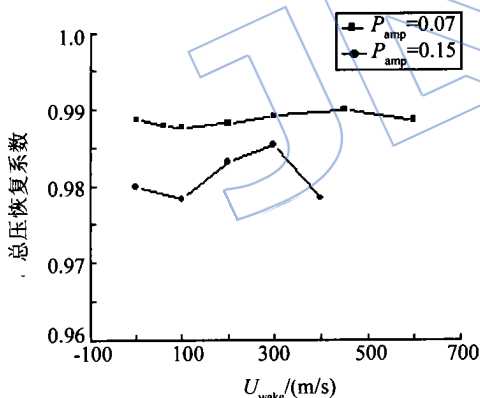


图 7 总压恢复系数随尾迹移动速度的变化

Fig. 7 Variation of total pressure recovery coefficient with wake velocity in pitchwise

3 结 论

通过比较非定常流和相应的定常流, 准定常流情况下的叶栅总压恢复系数, 可以得出以下结论:

(1) 处于非定常环境的叶栅总压恢复系数低于相应的定常流动情况下的总压恢复系数, 入口

处流动分布不均匀性造成的非定常掺混损失是造成这一结果的主要原因。

(2) 非定常情况下总压恢复系数在一定的周期变化频率下高于准定常时的总压恢复系数, 说明由入口不均匀流场周期变化频率(而不是不均匀程度)引起的流动非定常性的增强可以在一定程度上提高叶栅总压恢复系数, 并且能够使叶栅适应更宽的攻角变化范围。

(3) 在其它条件不变的前提下, 存在一个最佳的尾迹移动速度或者说最佳的入口周期性变化频率使得叶栅总压恢复系数能够得到提升(相对于准定常情况)并达到最大, 提升的幅度随尾迹亏损程度的增大而增大。

非定常流动一直是人们关心但又困惑的问题。本文通过以上对影响非定常环境下叶栅总压恢复系数几个主要因素的独立分析可以知道, 非定常流动的起因在于进出口边界条件的不均匀性及其周期性的变化, 非定常性的强弱由这两个因素共同决定。非定常流能够在一定程度上提高叶栅效率, 这种提高尽管有限, 但绝对不容忽视。还应该注意到, 这个结论建立在和准定常流动比较的层面上而不是定常流动的层面。在另一个层面上, 由于入口不均匀流场的影响, 非定常流动始终低于相同工况下入口流动均匀的定常流的总压恢复系数。

参考文献

- [1] Schulte V, Hodson H P. Unsteady Wake-Induced Boundary Layer Transition in High Lift LP Turbines[R]. ASME Paper 96-GT-486, 1996.
- [2] Ni R H. A Multiple-Grid Scheme for Solving the Euler Equations[R]. AIAA Paper 81-1025R, 1981.
- [3] Janson Antony. Time Dependent Calculations Using Multigrid, with Application to Unsteady Flow past Airfoil and Wings[R]. AIAA Paper 91-1596, 1991.
- [4] 于海力, 闫朝, 季路成, 等. 探讨一种叶轮机非定常流数值模拟的方法[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(1): 46-48.
- [5] 季路成, 项林, 陈江, 等. 非定常环境下叶栅性能的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(2): 211-215.
- [6] Liu J S, Sockol P M. Unsteady Euler Cascade Analysis[R]. AIAA Paper 89-0322, 1989.
- [7] 航空航天工业部高效节能发动机文集编委会主编. 高效节能发动机文集(第五分册)[M]. 北京: 航空工业出版社, 1990.