

环形弯扭静叶栅流场的计算与实验研究*

哈尔滨工业大学 杨弘** 于清 徐文远 顾发华 冯国泰

【摘要】 本文应用 S_2 流面正问题计算方法和三维 Euler 方程的时间推进计算方法对某涡轮弯扭静叶栅流场分别进行了分析计算, 并在环形涡轮叶栅实验台上测试了该叶栅出口截面上气动参数的分布。通过分析、比较计算结果和实验数据, 既考核了算法, 也研究了弯扭静叶栅中的流动机理, 由此得出对弯扭叶片的气动设计计算具有重要意义的几点结论。

关键词: 叶栅 风洞 弯扭叶片 数值计算

1 前言

本文应用 S_2 流面正问题计算方法^[1]和三维 Euler 方程的时间推进计算方法^[2]分别对某涡轮的弯扭静叶栅流场进行了计算研究。还在环形叶栅实验台上进行了吹风实验, 测试了叶栅出口流场气动参数的分布并与实验工况下的数值计算结果进行了对比分析。计算与实验研究的对象是某涡轮的弯扭静叶栅。图1示出了组成该叶栅的弯扭叶片的几何形状, 其径高比 $D/h = 6.0$, 在根部为正倾斜 (倾角 $\gamma_h = 18^\circ$), 在顶部为负倾斜 (倾角 $\gamma_t = -2^\circ$)。



图1 弯扭静叶片

2 计算、实验方法、结果分析

2.1 计算方法

分别对上述的弯扭静叶栅流场进行了平均 S_2 流面正问题计算和三维 Euler 方程的计算。所采用的 S_2 流面正问题计算方法是流函数线松弛迭代算法^[1]。所使用的三维 Euler 方程的计算方法是时间推进法, 它是一种有限体积显式计算技术^[2], 其出口边界条件给定的是叶栅出口平均半径处的静压 (在出口速度小于音速的条件下)。

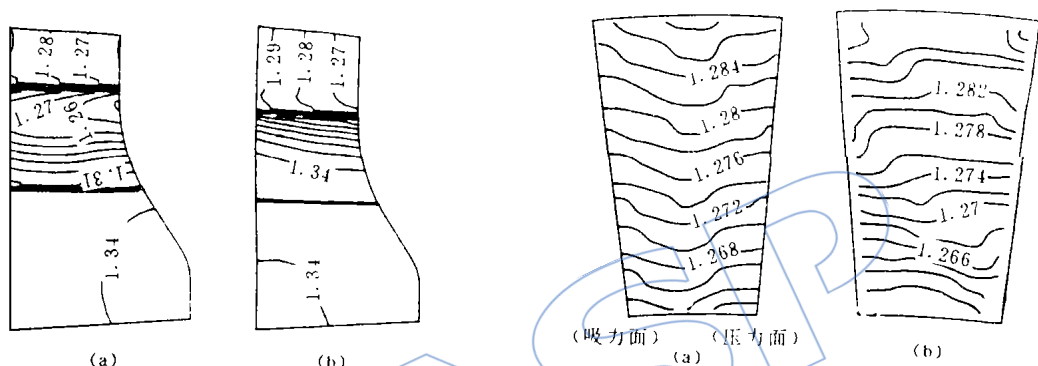
2.2 实验方法

在风洞实验中使用 Π 型和 L 型五孔束状探针测量了该环形叶栅的出口流场, 沿径向取了 15 个测量高度, 在每个测量高度上的一个栅距内取了均匀分布的 25 个测点。实验中叶栅进口的来流条件是: 总温 $T^* = 307\text{K}$, 总压 $p^* = 1.082\text{at}$, 进气角 $\alpha = 90^\circ$ (轴向进气)。

2.3 计算结果与实验数据的分析

为了便于与实验数据进行对比, 对上述叶栅在实验工况下进行了 S_2 流面计算和三维

Euler 方程的计算。图 2 是三维 Euler 方程计算得到的叶片吸力面和压力面上的相对压力 $\bar{p}$ 的等值线在子午面上的投影图, $\bar{p} = p / (\rho_{cr} a_{cr}^2)$, 其中 ρ_{cr} 和 a_{cr} 分别为临界密度和临界音速。由图可见叶片的弯曲在吸力面前半部分产生了明显的 C 型压力分布, 这是因为弯叶片的弯曲效果主要体现在叶型曲率变化较大的区域中。与常规非弯曲叶片相比, 这种 C 型压力分布造成了吸力面附近端部流动状态的改善, 但是叶片的弯曲对压力面附近的流动影响不大。图 3 示出的是叶栅出口截面上相对压力 $\bar{p}$ 的三维 Euler 解和实验值的等值线分布。由于三维 Euler 方程计算的是无粘流, 不能考虑叶栅出口尾迹的影响, 并且在计算中需将尾缘削尖处理, 因而三维 Euler 方程计算得到的出口压力在周向的分布与实验值有较大差异, 但是周向平均压力沿径向的分布却有可比性 (图 4)。



文的 S_2 流面计算中, 出气角是通过将有效几何出气角进行落后角修正^[3]后得到的, 它较没有考虑粘性影响的三维 Euler 解更接近于实验值。在叶顶附近, 由于没有很好地考虑二次流的影响, 造成了

计算值与实验值有较大的偏差。我们在 S_2 流面计算中还发现, 如果不进行落后角修正而仅以有效几何出气角来确定出口处的 S_2 流面形状将会使叶根附近的出气角与实验值间产生 2 以上的偏差。图 5 中的实验数据显示出在叶顶附近出气角随半径的增大而急剧减少, 这就造成了叶顶处气流的折转角过大, 从而大大增加了顶部的流动损失。

在图 6 ($-S_2$ 流面计算值, $\triangle$ 实验值) 中, 实线是在 S_2 流面计算中采用了修正的安利损失模型的计算结果, 它在大部分高度上与实验值基本相符。图 7 示出了实测的叶栅能量损失系数的等值线分布, 可见叶片在根部的弯曲造成了叶根吸力面附近的流动损失较小。另外, 由图 7 还可以看到叶顶附近的流动损失较大, 这主要是因为顶部叶型的折转角偏大, 并且弯扭叶片的径向积叠线的“峰点”离叶顶太近 (见图 1)。

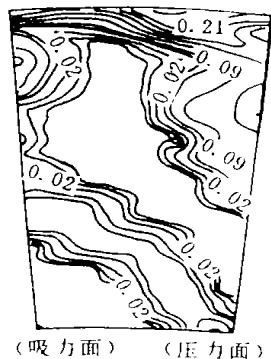


图 7 实测能量损失系数等值线

3 结 论

(1) 叶片的弯曲可以改善叶栅端部的流动状况, 但应精心设计弯扭叶片径向积叠线的几何形状。端部的叶型折转角不应设计过大, 否则将会使端部的流动状况恶化。

(2) 在 S_2 流面正问题计算中确定流面形状时须要考虑落后角修正。使用的损失模型须要反映出弯扭叶栅流动损失沿径向的分布规律, 因而应进一步发展更准确的适用于弯扭叶栅流场计算的落后角模型和损失模型。

(3) 为准确地模拟弯扭叶栅的复杂三维流场, 应大力发展精度高、收敛快的三维 Euler 方程或 N-S 方程的计算方法, 并且在 Euler 方程的计算中应加入适宜的损失模型。

参 考 文 献

- 1 王仲奇, 杨弘等. 具有弯扭叶片的燃气透平正问题计算方法. 航空动力学报, 1992, 7 (2)
- 2 Ni R H, Bogoian J. Prediction of 3D Multi-Stage Turbine Flow Field Using a Multiple Grid Euler Solver. AIAA Paper 1989, 89-0203
- 3 刘顺隆编. 船舶涡轮机原理. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990: 141-160

(责任编辑 魏星禄)