

某型两级涡轮流场数值模拟

吴 猛, 王松涛, 冯国泰, 王仲奇

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要:应用三维粘性流计算程序对某型两级涡轮进行了数值模拟, 该程序采用具有 TVD 性质的三阶精度 Godunov 格式, 湍流模型为 B-L 代数模型, 计算中考虑了变比热的影响。结果分析表明, 由于该涡轮是采用考虑损失的 S_2 流面及单列粘性流计算设计的, 没能很好地反映气流角的匹配问题, 因此在第二级静叶中存在较大的正攻角, 这使得第二级静叶采用后部加载叶型的作用不大, 没有达到减少二次流损失的目的。因此, 在气动设计中进行多级粘性流的匹配计算是必要的。

关 键 词: 三维粘性流; 数值模拟; 两级涡轮

中图分类号: O35 文献标识码: A

1 引言

随着计算机技术的发展, 基于 N.S. 方程的粘性流程序正逐渐被用于叶轮机械部件的设计与优化之中, 计算流体力学的发展使人们有了强有力的工具来对叶栅内的流动进行深入细致的研究。最初由于计算机发展的限制和全粘计算程序准确性与可靠性的限制, 只用来计算单列叶栅的粘性流动, 分析在单列叶栅中的粘性流动, 其在气动设计中起到了很大的作用。对于一级和多级计算基本上采用考虑损失模型的 S_2 流面进行计算, S_2 流面计算在气流角、流量计算上存在较大误差, 特别是在一些情况下, 如叶片数较少、径高比较小及跨音速流动中误差更大。因此迫切需要多级粘性流的匹配计算, 目前各国在这方面进行了很多工作^[1-3]。本文作者对这一工作进行了探讨和研究, 通过对一个两级涡轮的粘性计算与分析, 探讨了应用两级粘性流程序进行匹配计算的必要性及在气动设计中应注意的问题。

2 计算方法与网络

为了能够在多级计算中达到准确与可靠, 我们在粘性流计算程序中采用了具有 TVD 性质的三阶

精度 Godunov 格式^[4], 使其计算精度比较高, 数值粘性小; 为了解决定常计算中叶列间小间隙情况下计算稳定性差的问题, 在交接面上构造了 Riemann 问题解; 采用了外推边界条件保持了本列参数在交接面的周向不均匀性; 考虑到多级透平在很大的温度范围内工作, 采用了变比热计算。文献[5]通过对 NASA 透平级的计算验证了该程序的准确性与可靠性。

网格采用 H 型网格, 为了能够细致地描述流场, 计算取尽可能多的网格点, 但由于受计算容量所限, 本次计算网格周向取 33 个网格点, 径向取 43 个网格点, 轴向共取 257 个网格点, 计算网格点总数约为 36 万个, 其中近壁面第一个网格点的 $y^+ = 5$ 。图 1 为本次计算所采用的网格示意图。

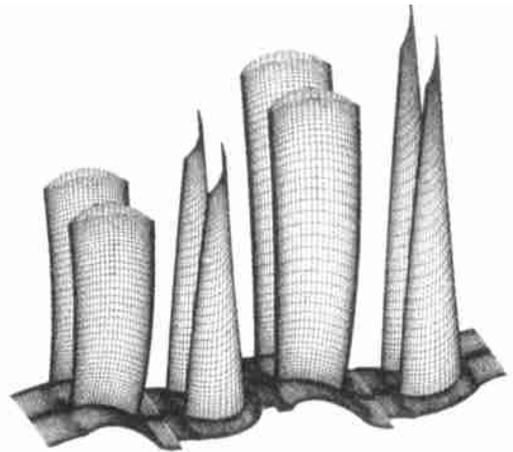


图 1 计算网格示意图

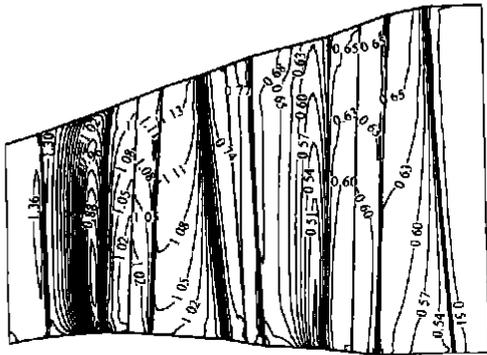
3 计算结果及分析

本文计算对象是某型两级涡轮, 其在设计中采用了 S_2 流面与单列三维粘性流的计算程序。作者应用上述三维粘性流程序对该涡轮进行了数值模拟。

收稿日期: 2000-07-28; 修订日期: 2000-08-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59636180)

作者简介: 吴 猛(1973-) 女, 江苏吴江人, 哈尔滨工业大学博士后

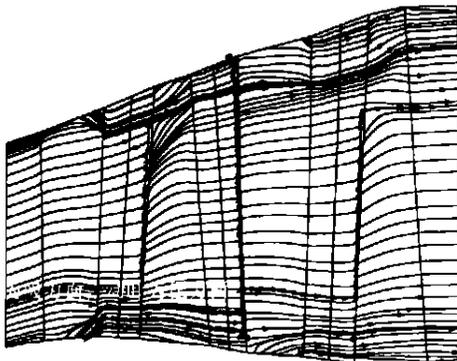


(A) 静叶为吸力面, 动叶为压力面

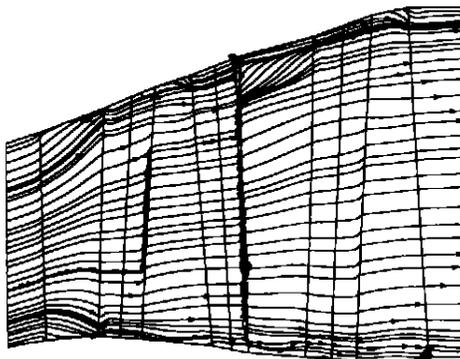


(B) 静叶为压力面, 动叶为吸力面

图2 S₂流面静压分布图

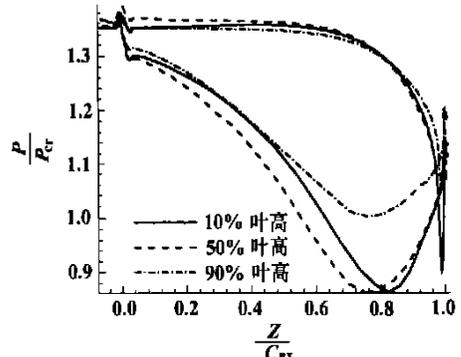


(A) 静叶为吸力面, 动叶为压力面

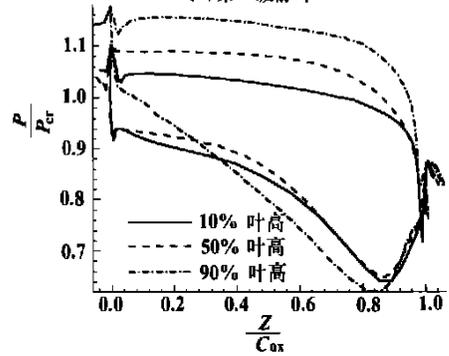


(B) 静叶为压力面, 动叶为吸力面

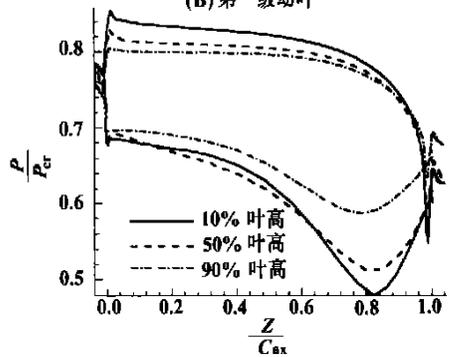
图3 内、背弧极限流线图



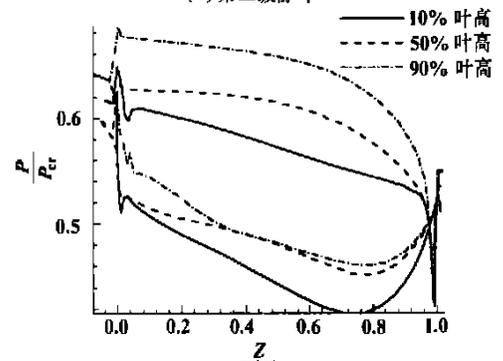
(A) 第一级静叶



(B) 第一级动叶



(C) 第二级静叶



(D) 第二级动叶

图4 叶片表面压力分布图

图2是两级涡轮 S₂ 流面静压等值线分布图。从图2(A)可知, 由于采用弯叶片在第一级静叶背弧生成了“C”型压力分布, 这对减少二次流损失及端部损失是非常有利的。在第二级静叶也采用了弯叶

片,两个端部的压力比较高,也形成了C型压力分布。由图2(B)可以看出第一级动叶顶部有一局部C型压力分布,这一分布是不多见的,它将引起径向掺混损失,应该加以注意。

图3为两级涡轮计算所得的内、背弧极限流线图。在背弧低能流体向中径迁移,而在内弧向两端迁移,从这里可以清楚看到附面层迁移与通道涡的作用。从流线分布图可以看出,端区特别是上端部动叶径向迁移比较大,但没有看到大的回流区,从此可见设计的两级涡轮流线分布是合理的。此外由根、顶截面准 S_1 流面流线分布图可见流线分布基本合理,只是在第二级静叶正攻角大一些。值得注意的是,在第一级动叶内弧近顶部密流比较集中,这种流动产生的主要原因是动叶内弧顶部径向迁移与动、静叶匹配不好而产生的,这种流动会增加局部径向掺混损失。

图4分别是四列叶栅在10%,50%,90%叶高处内、背弧无量纲静压分布图。图4(A)是第一级静叶内、背弧三个截面的无量纲静压分布。从图上第一级静叶是按后部加载叶型设计的,压力最低点比较靠近出口,在进口很长一段,约占35%轴向弦长,内、背弧压差很小,这种叶型二次流损失小,但叶型损失可能稍大,主要是其背弧在出口附近轴向距离20%相对弦长范围内的逆压梯度比较大。由图4(C)知第二级静叶也是按后部加载叶型设计的,但由于有一定正攻角,叶道内前半部内、背弧压差并不小,这样二次流损失并不会小。

图5给出了按周向平均处理得到了第二级静叶及第一、二级动叶进口气流角及其与几何进气角的对比图(图中实线为进口气流角,虚线为几何进气角)。由图5可知在第二级静叶进口处的正攻角比较大,而第一、二级动叶中径以下有比较大的正攻角,中径以上有一定的负攻角,这说明应用 S_2 流面和单列粘性流程序进行设计没能很好地反映级间气流角的匹配问题。

从上面可见原设计采用 S_2 流面与单列三维粘性计算程序是有不足之处的。在 S_2 流面计算时攻角比较小,单列的粘性流计算实质上是在无攻角条件下计算的,而从二级粘性流计算来看第二级静叶

正攻角比较大,虽然第二级静叶是按后部加载叶型

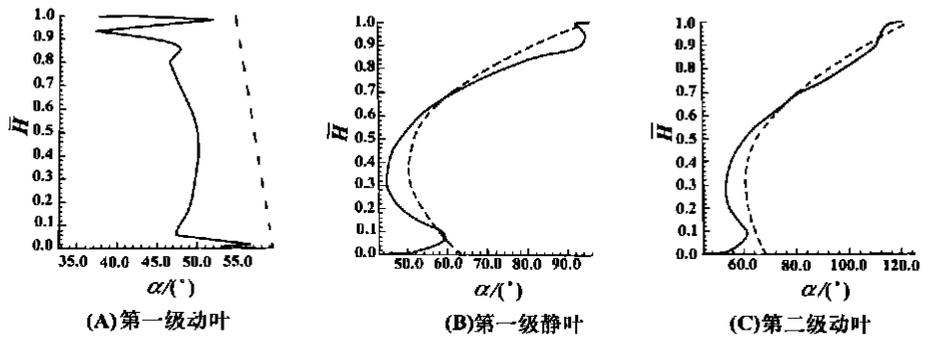


图5 进口气流角分布图

设计的,但是由于匹配不好目的没有达到。此外第一、二级动叶中径以下攻角也比较大。因此,从计算结果看多级粘性流计算是非常必要的。

4 结论

根据本次计算结果可知,两级粘性流计算与考虑损失的 S_2 流面及单列粘性流计算相比可以很好地反映级间气流角的匹配问题。虽然该两级涡轮在功率、流量及效率等方面均达到了设计要求,但由于在第二级静叶存在较大的正攻角,使得采用后部加载叶型的作用不大,没有减少端部二次流。此外,在第一、二级动叶中径以下有比较大的正攻角,中径以上有一定的负攻角。因此在气动设计中有必要进行有足够精度的多级粘性流的匹配计算,只有进行这一设计步骤才能保证叶列与级间的合理匹配,使涡轮的气动性能有进一步提高。

参考文献:

- [1] DAWES W N. Towards improved throughflow capability: the use of 3D viscous flow solvers in a multistage environment[J]. *Trans ASME Journal of Turbomachinery*, 1992, 114(1): 8-17.
- [2] LIAMIS N, DUBOUE J J. CFD analysis of high pressure turbine[J]. ASME Paper, Sweden; Stockholm, 1998-GT-453.
- [3] DENTON J D. The calculation of three dimensional viscous flows through multistage turbomachine[J]. *ASME J of Turbomachinery*, 1992, 114(1): 18-26.
- [4] 王松涛,袁宁,王仲奇,等.具有TVD性质的三阶精度GODUNOV格式在粘性流场计算中的应用[J].*工程热物理学报*, 1999, 20(3): 299-303.
- [5] 袁宁.叶轮机械全三维数值计算与设计方法的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,1999.

(渠源 编辑)

Through a simulation calculation of the air-tightness test of a steam turbine vacuum system it is concluded that the vacuum decrease rate is not a single-valued function of the air leakage into the condenser. The vacuum decrease rate can be affected more or less by a multitude of factors. Among these one may list: steam turbine load, cooling water flow rate, inlet temperature of cooling water and condenser tube material, etc. A detailed analysis is performed of the effect of the above factors on the vacuum decrease rate. The conclusions reached can be of some reference value for a more accurate evaluation of the steam turbine vacuum system. **Key words:** steam turbine, condenser, air-tightness test of a vacuum system

凝汽器喉部蒸汽流动的三维数值模拟 = **Three-dimensional Numerical Simulation of the Steam Flow at a Condenser Throat Section** [刊, 汉] / CUI Guo-min, CAI Zu-hui, LI Mei-ling (Thermal Energy Engineering Research Institute under the Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 520 ~ 522

With the help of a direct simulation Monte Carlo method incorporating a super-particle model and through a domain-decomposition and mathematical modeling of a steam turbine condenser throat a three-dimensional numerical simulation was conducted of the steam flow at the condenser throat of a specific structure. The simulation of the throat steam flow was undertaken with a focus on the analysis of its flow distribution. As a result, identified were the non-uniformity feature of the throat flow field and the underlying cause of the non-uniform flow field. **Key words:** condenser throat, numerical simulation, direct simulation Monte Carlo method

基于 MATLAB 的三轴燃气轮机动态仿真模型研究 = **Dynamic Simulation Modeling of a Three-shaft Gas Turbine Based on a Software MATLAB** [刊, 汉] / AO Chenyang, ZHANG Ning, CHEN Hua-qing (Naval Equipment Research Center, Beijing, China, Post Code: 100073) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 523 ~ 526

Simulation technology represents an effective means for the study of gas turbine performance. With the help of a quasi-nonlinear method set up was the mathematical model of a three-shaft gas turbine. An object-oriented dynamic simulation platform was developed for the three-shaft gas turbine on the basis of a dynamic simulation software MATLAB. The results of the simulation show that the simulation model is correct and rational, featuring simplicity and ease of use. **Key words:** software MATLAB, three-shaft gas turbine, simulation model, object-oriented approach

某型两级涡轮流场数值模拟 = **Numerical Simulation of the Flow Field of a Two-stage Turbine** [刊, 汉] / WU Meng, WANG Song-tao, FENG Guo-tai, WANG Zhong-qi, et al (Energy Science and Engineering Institute under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 527 ~ 529

Through the use of a three-dimensional viscous flow calculation program a numerical simulation was performed of a two-stage turbine. The program adopts a Godunov scheme of third-order accuracy with a turbulent flow model being of a B-L algebraic one. During the calculation the effect of a change in specific heat has been taken into consideration. An analysis of the calculation results indicates that there lacks a proper reflection of the matching of gas flow angles. This comes about because the gas turbine was designed and calculated through the use of a stream surface S_2 and single row viscous flow with losses being taken account of. As a result, there emerged a relatively great positive incidence angle in the second stage stator, leading to an ineffective role of adopting a rear loading profile and a failure to achieve an decrease in secondary flow loss. In view of this it is necessary to conduct in the aerodynamic design a calculation of the matching of multi-stage viscous flows. **Key words:** three-dimensional flow, numerical simulation, two-stage turbine

半干式脱硫系统的热量物质衡算模型 = **Calculation Model of Heat and Mass Balance for a Semi-dry Flue Gas Desulfurization System** [刊, 汉] / GAO Ji-hui, WU Shao-hua, Qin Yu-kun (Energy Science and Engineering Institute