

结构化网格在气热耦合计算中的应用

郭兆元, 王 强, 颜培刚, 冯国泰

(哈尔滨工业大学推进理论与技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 采用商用网格生成器生成结构化气热耦合计算网格, 应用多块网格技术提高网格质量并对流动边界层和热边界层等流场参数变化较大的区域进行加密, 同时采用高精度的数值传递方式在网格块间进行数值传递, 从而保证高精度差分格式在网格块间不被破坏, 提高耦合计算效率。最后通过 Mark II 叶片气热耦合的计算, 并将耦合计算结果与实验值进行比较, 中径处压力沿叶型分布两者相差在 1% 范围内, 而中径处温度沿叶型分布在大部分地方两者相差在 4% 范围内。

关 键 词: 结构化网格; 高精度; 计算效率; 气热耦合

中图分类号: TK472 文献标识码: A

引 言

现代高效率、高性能涡轮的主流燃气温度远远超过了叶片材料所承受的极限, 尽管新材料的承受能力在不断的增加, 但是经过长时间的运行发现, 只是靠提高叶片的承受能力来维持叶片的正常工作是不够的。为了维持这些热端部件的正常工作, 并尽可能延长其寿命, 因此采用复杂冷却方法对其进行冷却。随着抽气量的增加, 大大的降低了压气机的通流量, 使得整个发动机的效率提高变的很困难。提高涡轮的冷却效率, 降低抽气量是目前气冷涡轮的一个重要的研究方向。温度场计算的准确性对气冷涡轮的设计极为重要, 作为解决该问题的一种重要的设计手段—气热耦合计算, 目前研究重点在网格质量、差分格式、采用 LES 与 DNS 等湍流模拟方法^[1]。在不改变计算模型的基础上, 计算结果要受到网格质量与差分方法的影响, 加密后的网格可以减少数值误差, 捕捉到边界层中的一些流动与传热细节, 从而影响到温度场计算精度。

结构化网格和多块结构化网格在流体力学和计算固体力学中具有一定的优点: (1) 可以采用较为成熟的网格生成方法, 对任何复杂的几何区域构造结构化网格, 每一个网格单元都具有较高的网格质

量, 即网格对复杂边界可以保持较好的贴体性, 另外网格可以具有很好的正交性; (2) 相应的流场和温度场求解算法比较成熟, 效率高是特别应用于粘性流计算; (3) 降低了对内存的要求, 或者说在内存一定的情况下, 可以使用较多的网格点; (4) 方便区域分裂并行计算过程的实施, 适用采用并行计算的流动模拟; (5) 在不同的块中可以采用不同的求解方程, 以提高效率。

多块结构化网格的研究和应用在国外较多, 国内在温度场计算和流场计算有人做了一些工作^[2-4], 但是对于采用多块结构化网格进行涡轮内气热耦合计算的文献较少。本研究的目的是在气热耦合计算中采用多块结构化网格, 解决块与块之间的数据传递与交换, 并保证整个区域的差分格式的精度不因网格块与块的数据传递而降低, 从而实现网格块之间数据的快速传递。

1 网格块之间的数值传递

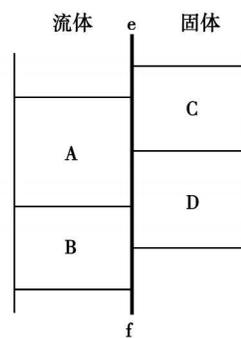


图 1 网格区域示意图

在气热耦合计算中, 网格块 A、B 为流场计算域网格, C、D 为温度场计算域网格, 如图 1 所示; 网格块与其周围网格块相接按照类型可以分为: 流场内部网格块, AB 面; 温度场内部网格块, CD 面; 流场与

收稿日期: 2008-03-17; 修订日期: 2008-12-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50476028)

作者简介: 郭兆元(1980-)男, 陕西横山人, 哈尔滨工业大学博士研究生

温度场网格块 AC、AD 与 BD 面, 所有的流体和固体的交接面可以形成一个完整的面, 在流场侧为面 F_{ef} 、在温度场侧为面 S_{ef} 。

1.1 流场内部网格块之间数据传递

图 2 给出了两个分区边界及两个区中相互交叠的网格, 并具体给出分区边界上信息传递的处理方法。图中 1 区中的虚线网格为 2 区的网格在 1 区中的交叠部分, 交叠网格内的气动参数值通过如下方法确定: 以 2 区在 1 区内的交叠网格为例, 首先确定交叠网格 $(N+1)$ 在 1 区中的几何位置, 令网格单元上的气动参数以 U 表示, 然后在 1 区内通过单侧插值求出网格 $(N+1)$ 左、右边界 U_{N+1}^L 和 U_{N+1}^R , 并由这些气动参数及交叠网格的几何位置构造 Riemann 问题, 则 U_{N+1}^L 和 U_{N+1}^R 作为网格单元 $(N+1)$ 上 Riemann 问题的初始条件, 通过此 Riemann 问题求出该交叠网格上的气动参数值。同样求出 $N+2$ 点的气动参数值, 最后在单元边界 AB 构造边界数值通量。由于 Godunov 方法本身的特点, 该分区处理方法可以准确捕捉来自任意方向上的间断, 从而保证了分区计算中信息传递的准确性, 同时可以保证差分格式在分区边界上的求解精度。

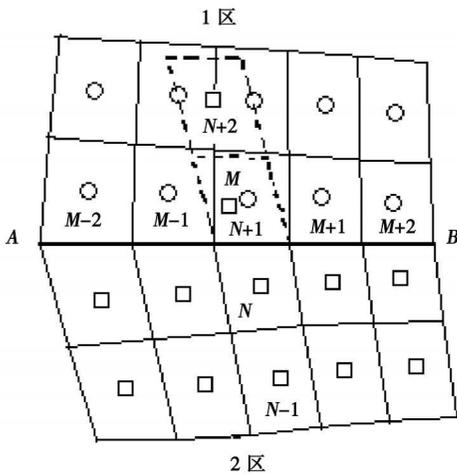


图 2 分区计算网格

1.2 温度场内部网格块之间数据传递

根据 $D-N$ 算法, 对于固体温度场在边界处需要满足: 边界处的热流量相同 (第二类边界条件); 边界处温度相同 (第一类边界条件)。如图 1 所示, 在计算时 C 块传给 D 块热流密度通过求解法线方向热流方程 $\vec{q} = -\lambda \frac{\partial}{\partial n}$, 得到 D 区边界上的温度; D 块直接传给 C 块温度值。计算时, 同一个网格块的 6 个界面不能同时都为第二类边界条件, 必须至少有一个第

一类边界条件, 否则计算不能收敛到正确的结果。数据传递的精度取决于法线方向热流方程求解的精度, 采用单侧二阶差分格式离散, 追赶法求解 5 对角方程组得到第二类边界条件时边界处的温度值。

1.3 流场与温度场网格块之间数据传递

流场与温度场网格块之间数据处理的方式取决于气热耦合边界条件的给定和对数据传递的精度要求。气热耦合要求在耦合边界面上空间同一个位置应满足: 温度值大小相等、热流量大小相等且方向相同, 即 $t_f = t_s, \vec{q}_f = \vec{q}_s$ 。在保证数值传递简单、计算效率快的前提下, 在边界面上通过流场区域传递给固体场温度值、固体场区域传递给流场区域传递边界面法线方向热流量来保证耦合边界。耦合计算时热流量和温度传递过程: 首先讨论流场到温度场数据传递过程, 由于流体计算是在流体的网格单元中心内进行的, 根据单元内流体已知量得出温度值, 由壁面处给定的热流量, 通过方程 $\vec{q} = -\lambda \frac{\partial}{\partial n}$ 解出壁面处的温度值, 因为流场热边界层内的热传导系数比主流区较小, 温度梯度在热边界层是很大的, 因此不能将网格单元中心的温度值作为叶片表面处的温度值。为了加快计算, 将每个流固交接面上的温度值都集中到面 F_{ef} 上, 面 F_{ef} 和面 S_{ef} 空间上是完全重合的, 而两者的网格节点不一定会完全对应的, 传递数据需要通过空间三维插值完成。首先通过位置关系搜索出面 F_{ef} 的网格节点 P 位于面 S_{ef} 的单元 V, 如图 3 所示, P 点将网格单元划分成 R1、R2、R3、R4 等 4 个小的长方形, 流场网格节点 P 处温度值通过叶片网格节点 V1、V2、V3、V4 处的温度值求出, 设 Φ 表示要传递的参数:

$$\Phi_p = (\Phi_{v1} S_{R3} + \Phi_{v2} S_{R4} + \Phi_{v3} S_{R1} + \Phi_{v4} S_{R2}) / (S_{R1} + S_{R2} + S_{R3} + S_{R4})$$

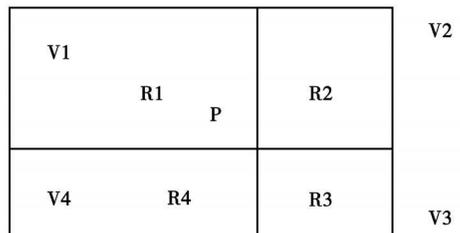


图 3 插值示意图

这样就将流场在壁面处的温度传递给面 S_{ef} , 再有面 S_{ef} 与各个子区域的关系, 完成了流场到温度场的温度传递。采用类似的方法, 可以完成热流量

从固体场到流场的传递。该方法具有二阶的数值精度,相对于其它全局插值法,具有简单、易于实现、cpu 占有时间短的特点,而对数值梯度较大的变量能够准确传递不被抹平。

2 计算算例分析

2.1 计算几何与边界条件

选用文献[5]中 MarkII 型叶片 5411 号实验工况,叶片内部有 10 个径向圆管型冷却通道。进口边界条件 $p_{0,1}=3.4037 \times 10^5 \text{ Pa}$ $T_{0,1}=788 \text{ K}$, $\alpha=90^\circ$, $Ma_1=0.19$; 出口边界条件 $p_2=1.71498 \times 10^5 \text{ Pa}$, $Ma_2=1.04$ 。

2.2 网格

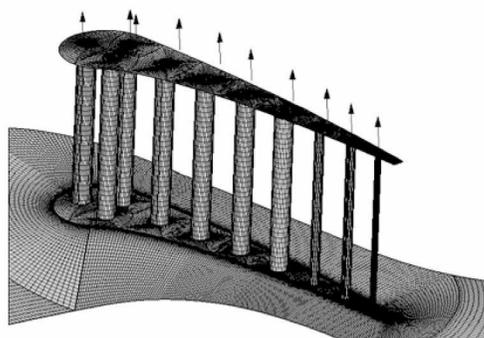
气热耦合网格类型、拓扑以及网格的质量不仅影响计算速度、差分格式精度和构造的难易程度,更重要的是影响计算的结果,能否将流场边界层内的流动细节、热传递细节和转捩状态模拟出来与网格的质量有很大的关系。为了提高计算效率,尽可能地减少网格块的数量,同时采用高效的块间数据传递方式。由于 Markii 型叶片形状的复杂性和热边界层的复杂性对气热耦合网格要求很高,因此,流场计算域的网格必须采用数量巨大的结构化网格块,热边界层处的网格加密必须通过在流体边界层内布置许多小的结构化网格块,然后对每个结构化网格块进行加密实现。网格块的增加不但使计算效率降低和网格块间的差分格式精度可能降低,同时网格块增加给网格块的管理带来了压力和给块间数据交换带来困难,因此在完成网格划分后,对具有相同拓扑结构的网格块进行合并,以减少块与块之间进行数值带来的时间消耗。由于网格的稀疏变化对温度场的计算结果影响不大,只要保证网格的质量较好即可;然而冷却叶片的形状非常复杂,为了保证生成质量高的结构网格,也只能增加网格块的数量来实现。

本研究的网格是采用 AnsysIcem 网格生成器生成,叶片采用 O 型网格和 H 型网格,为了使得计算的网格块数最小,将具有相同拓扑的网格块进行合并,每个冷却孔周围一个 O 型网格区。由于在尾部孔间距相对较远,因此在尾部带有 3 个 H 型网格区,总共 13 个网格块,共计 24.8 万网格,这样使得网格的正交性较好,并将网格长宽比控制在一定的范围内。

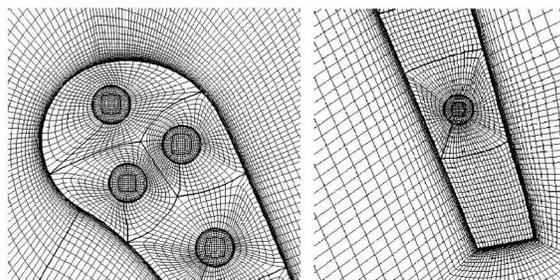
流场区域采用 HOH 型网格拓扑结构,为精确模拟固体与流场交接面的温度梯度,叶片表面第一层网格的无量纲 y^+ 距离控制在 1 以内,以保证第一网

格点在粘性底层以下,并在边界层内保证了 20 个网格节点,同时在流向(特别是转捩的发生区域和激波位置)进行了加密,以保证准确的预测转捩过程和激波对热边界层的影响。从而能够准确预测出热边界层的厚度和热边界层内的温度梯度,其中 $y^+ = y \frac{\sqrt{\tau_w \cdot \rho_w}}{\mu_w}$ 。由于该叶片为直叶片,气动参数沿叶高的变化平缓,因此网格沿叶高不进行加密。网格总数分别为: $33 \times 57 \times 29$, $409 \times 41 \times 29$, $33 \times 57 \times 29$, 总数为 62.6 万。

冷却通道内采用 OH 网格在绕固体区域为 O 型网格,内部为 H 型网格,10 个孔共有 13.6 万网格。



(a) 流道网格和冷气孔示意图



(b) 前缘网格

(c) 尾缘网格

图 4 计算网格

2.3 计算方法

流场采用 HIT3D 计算程序数值计算,流场计算部分采用的格式为隐式的且具有 TVD 性质的三阶精度 Godunov 格式,隐式部分采用迎风对角线隐式近似因式分解法,并引用粘性通量的简化算法,显式部分采用三阶精度 TVD 格式,同时在单元边界上构造 Riemann 问题,通过该问题的解求得单元边界上的数值通量^[6]。叶片温度场计算部分采用三维 Douglas-Rachford 交替方向隐式格式来求解,在空间方向上具有二阶的求解精度,通过 B-L 代数湍流模型对流动进行模拟。

2.4 结果分析

该实验叶片处于高温高压的燃气中, 叶片进口处由于气流的速度比较低, 气流的温度与进口的总温相差不大, 相对比较高; 气流经过前缘鞍点后分为吸力面的分支和压力面的分支, 吸力面分支流动状态为层流气流加速后, 气体的内能转换成动能, 气流的温度也随之下降, 大致在 $X/L=0.45$ 的位置由于一强激波的出现, 使得气体的速度突然下降, 而温度也随之增加, 气流由于激波的干扰由层流转捩为湍流, 再次不断加速, 温度也随之下降, 大致在叶片出口处产生一弱激波, 气流经过该激波后速度再次降低, 温度也随之增加, 在尾缘处形成了低的尾迹速度, 而且聚集了大量的低能流体, 气流的温度几乎和气流进口的滞止温度差不多; 压力面分支气流速度比较低, 流动状态为介于层流和湍流之间, 温度相对比较高; 压力面分支的气流和压力面分支的气流在出口处不断的掺混, 在大约弦长的 50% 位置处气流掺混均匀, 从温度云图可以看出, 温度分布也是均匀的。从图 5 可以看出, 由于冷却通道中的冷气对叶片的冷却作用, 叶片表面的温度要低于相同位置流场的温度, 叶片表面处气流温度存在着较大的梯度, 然而各计算块(流道内部块、叶片固体块与叶片固体块、流道块与叶片固体块)之间的温度连续性很好, 表明采用的网格块间的数据传递方式是正确的, 也是准确的。

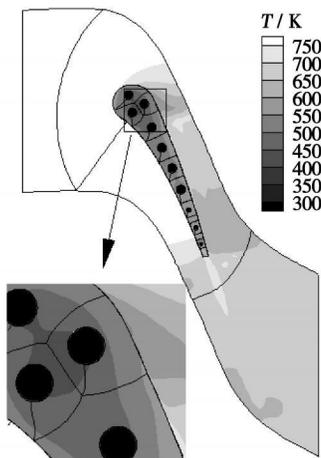


图 5 中径处流道、叶片、冷却通道温度分布云图

图 6 为实验、耦合计算和绝热计算型面压力分布。可以看出, 与实验相比, 耦合与绝热计算压力和实验相差不多; 而耦合计算结果与绝热计算结果相差不多, 耦合计算压力比绝热计算压力能更接近实验数据。两种计算压力和实验压力的差别主要在于激波位置处, 反映出了计算模型对强间断的模拟能

力。

图 7 为实验、耦合计算和绝热计算型面温度分布, 绝热计算温度值同实验数据相差较大, 尤其在压力面离前缘大约 20% 的位置, 相差大约为 0.39 (316 K); 而在压力面离尾缘大约 5% 位置, 温差最小约为 0.22 (178 K)。总体来说, 绝热计算与实验型面处的温度值相差大约 200 K, 该结果和文献[7]对 C3X 叶片计算相似。虽然耦合计算所得的型面温度值和实验值相差较多, 但是温度的分布趋势和实验温度分布的趋势很相似, 耦合计算后型面温度有了明显的降低, 冷却通道对叶片的冷却作用也很明显。然而由于计算采用的湍流模型为 $B-L$ 代数湍流模型, 该模型是不考虑转捩的影响, 而转捩的模拟对准确模拟热传导系数和壁面温度是至关重要的, 这是耦合计算所得的型面温度高于实验数据的主要原因, 对转捩准确的模拟必须采用其它考虑转捩的湍流模型或转捩模型, 这部分内容将是今后气热耦合计算的主要研究方向。

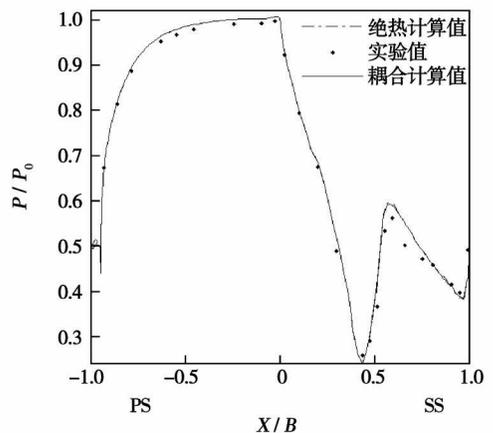


图 6 型面静压

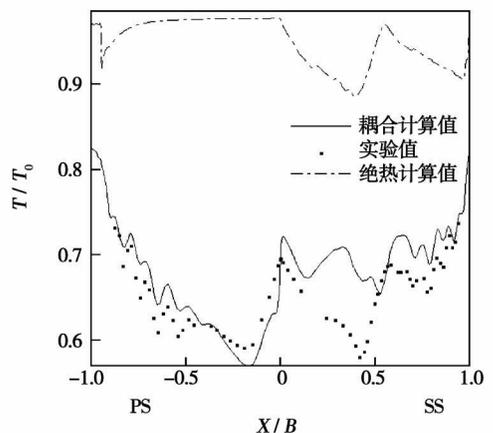


图 7 型面静温

3 结 论

(1) 通过分块方式, 解决了复杂几何域结构化网格生成的难题, 所采用的分块数据传递方式能够保证块与块之间具有较高的传递精度, 通过对 MakII 型叶片的气热耦合计算, 证明了多块结构化网格块之间数据传递的准确性和有效性。

(2) MarkII 型叶片表面的流动状态非常复杂, 在整个前缘(包括压力面的大部 and 吸力面激波前区域)为层流状态, 在吸力面的中后部因为激波分离诱发转捩变为湍流, 在靠近压力面的尾缘区域内部不稳定的扰动增加, 不完全等同于层流状态。

(3) 所研究的多块结构化网格不仅解决了气热耦合网格生成和数据的传递的问题, 并为进一步进行涡轮气热弹耦合数值计算打下基础。

参考文献:

- [1] 王 强, 董 平, 冯国泰, 等. 提高气冷涡轮气热耦合计算精度的措施 // 热机气动热力学学术会议论文集[C]. 北京: 中国工程热物理学会, 2007. 847—863.
- [2] 张 敏, 武淑萍, 马 倩. 非结构化网格中圆管流动的传热计算[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2006, 4(3): 25—29.
- [3] 毛枚良, 陈坚强, 邓小刚, 等. 高超声速流动分区对接网格算法研究[J]. 空气动力学学报, 2003, 21(2): 173—181.
- [4] 陈海昕, 李凤蔚, 鄂 秦, 等. 复杂流场数值模拟中的网格生成[J]. 西北工业大学学报, 2000, 18(2): 194—197.
- [5] HYLTON L D, MILHEC M S, TURNER E R, et al. Analytical and experimental evaluation of the heat transfer distribution over the surface of turbine vanes[R]. NASA—CR—168015, 1983.
- [6] 顾发华. 采用高精度 TVD 格式的涡轮三维流场方法及其应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1996.
- [7] LI HONGJUN, KASSAB ALAIN J. Numerical prediction of fluid flow and heat transfer in turbine blades with internal cooling[R]. AIAA Paper 94—2933, 1994.

(编辑 伟)

新技术、新产品

В АУ-6 辅助核动力装置

《Судостроение》2008 年 5~6 月号报道了前苏联于 20 世纪 60 年代中期开始研制一直到 1993 年退出海军舰队, 并报废的具有辅助核动力装置 ВАУ-6 的 651Э 型大型导弹潜艇建造和试运行的历史。

НИКИЭТ(动力工程科学—研究设计所)于 1965~1967 年完成了 ВАУ-6 装置的技术设计, 研制对该装置各组成部分:(汽轮机、发电机、专用阀门和附件)进行了各种方案的协调, 也设计了反应堆、活性区、汽水分离器的结构, 建造了用于有关载热体在沸腾的反应堆和汽水分离循环回路流体力学修整的试验台。

为了 ВАУ-6 装置的修整和试验研究, 决定建造陆上样机试验台; 为此, 在 1967~1969 年制定了设计—运行文件, 并制造了试生产的基本设备。

该潜艇是双轴推进, 动力装置由每台 2 984 kW (4 000 hp) 功率的两台柴油机、一台 1 000 kW 功率的柴油发电机、每台 4 476 kW (6 000 hp) 功率的 149.2 kW 两台主电动机、每台 149.2 kW (200 hp) 的两台巡航电动机组成。

在现有的机舱里补充安装上具有较小尺寸的辅助核动力装置, 形成 АИР(不依赖空气的动力)系统, 以便补充它的动力, 并保证可以长时间地在水下航行。

辅助核动力装置 ВАУ-6 的反应堆 ТВИ-4 的热功率为 5 MW。小尺寸的汽轮发电机是单轴机组, 由 2 级汽轮机和频率为 400 Hz、功率为 600 kW 的三相交流发电机组成。在汽轮机轴上装有 2 级离心式给水泵。转子转速为 8 000 r/min。

ВАУ-6 将近 3 年的运行证明, 柴油机潜艇长期在水下航行的可能性, 允许实际上无限制地增加潜艇的作用半径, 并使潜艇上浮到水面位置的次数缩减到最少。

给出了装有 ВАУ-6 辅助核动力装置的 651Э 型导弹潜艇总布置图, 以及在 ВАУ-6 装置内各种设备的布置图。

(吉桂明 供稿)

流动蒸汽湿度测量方法的研究与比较= **Study and Comparison of Flowing-steam Wetness Measurement Methods**[刊, 汉]/NING De-liang, GAO Lei, LIU Xin-quan (CSIC No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036)//Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2009, 24(2). — 149 ~ 153

In the light of the importance of flowing wet-steam wetness measurement, summed up were both the commonly used methods and the approach under current exploration for measuring the flowing-steam wetness along with an analysis of the limitations of various methods during their applications. Based on the theory that with a different equivalent permittivity of saturated wet steam the capacity of a capacitor will also be different at an identical pressure and temperature, presented and analyzed was a new approach for the on-line measurement of the flowing-steam wetness by using a cylindrically shaped capacitor type sensor. The calibration test results show that this type of sensors has stable static characteristics, and when the wetness ranges from 0 to 12%, the steam flow wetness assumes a comparatively conspicuous nonlinear relationship with the output frequency difference. Finally, the authors have mentioned problems needing special attention during the calibration tests and sensor design. **Key words:** flowing steam, wetness measurement, equivalent permittivity, capacitance method

抑制叶顶间隙泄漏的叶轮机叶片流场的模拟= **Flow Field Simulation of Turbomachine Blades with Their Tip Clearance Leakage Being Suppressed**[刊, 汉]/ MAO Jia-ni (College of Energy Source and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074), CAO Zi-yin (Applied Mathematics and Mechanics Research Institute, Shanghai University, Shanghai, China, Post Code: 200072)// Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2009, 24(2). — 154 ~ 157

With the growth of national economy, turbomachines are widely used in industrial and mining enterprises. In the light of the special feature of a major influence as exercised by blade-tip clearance stream on turbomachine performance, designed was a new type of blades. The blades in question are provided with a “dovetail crown” at the blade tip, forming a “barb” at both the pressure and suction side of the blade tip. Through a numerical simulation of the flow fields in the blades and other ordinary blades, compared was the difference of the overall performance, flow field characteristics and blade-tip clearance leakage of a compressor between the above two kinds of blades under equivalent conditions. The authors concluded that the “dovetail crown” shaped blades thus optimized and designed can relatively well maintain the pressure on the blade surfaces, reduce the possibility that a leakage vortex occurs at blade tips and diminish the leakage from the blade tip clearance. The data and relevant conclusions thus obtained can provide a helpful reference and basis for improving and raising the operating performance of turbomachines. **Key words:** turbomachine, “dovetail crown” shaped blade, numerical simulation, blade-tip clearance stream, leakage vortex

结构化网格在气热耦合计算中的应用= **Application of Structured Grids in a Gas-heat Coupled Calculation**[刊, 汉]/GUO Zhao-yuan, WANG Qiang, YAN Pei-gang, et al (Propulsion Theory and Technology Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001)// Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2009, 24(2). — 158 ~ 162

A structured grid for calculating gas-heat coupling was established by adopting a commercial grid generator, and multi-block grid technology was employed to improve the grid quality. The areas of flow- and thermal boundary layers etc. subject to a relatively big change of flow field parameters have been refined. In the meantime, a high-precision numerical transfer mode was used to perform a numerical transfer among various grid blocks, thereby ensuring the high-precision difference scheme among the grid blocks not to be destroyed and thus enhancing the coupled calculating efficiency. Finally, through a gas-heat coupled calculation of Mark II blades and a comparison of the calculation results with test ones, it has been found that the difference of the pressure distribution along the blade profile at the pitch diameter was in a range of 1%, while that of the temperature distribution in a majority of places, in a range of 4%. **Key words:** structured grid, high ac-

curacy, calculation efficiency, gas-heat coupling

带后导叶轴流式通风机内流特征的数值模拟 = **Numerical Simulation of the Inner Flow Characteristics of an Axial Fan with Rear Guide Vanes**[刊, 汉] / YE Xue-min, LI Jun, WANG Song-ling, et al (College of Energy Source and Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(2). — 163 ~ 166

Axial fans with adjustable rotating blades are very often used due to their relatively wide high-efficiency zone. By utilizing software Fluent and with an OB-84 type axial fan incorporating adjustable rotating blades and rear guide vanes serving as an object of study, the SIMPLE method was employed to seek solutions to the $N-S$ equation and Realizable $k-\epsilon$ turbulent flow model with a simulation of the inner flow characteristics on the radial and axial characteristic stream surface of the impeller being conducted under design and off-design operating conditions. It has been found that the fan total pressure gradually increases along the radial direction. There exist a high-pressure zone in the tail portion of the pressure surface and a reverse pressure gradient on the suction surface, and the total pressure at the trailing edge decreases remarkably. When the fan operates under off-design conditions, a vortex will first emerge at the trailing edge, forcing the return flow of a portion of fluid and forming a relatively big flow resistance. The total pressure along the cascade flow path assumes a linear increase, which mainly results from a static pressure. The fan total pressure and efficiency characteristic curves obtained from the numerical simulation are in good agreement with the test results, and the simulation results can relatively well reflect the overall operating performance of the fan. **Key words:** axial fan, rear guide vane, inner flow characteristics, numerical simulation

超高负荷吸附式压气机叶栅气动性能分析 = **Analysis of the Aerodynamic Performance of a Super-highly Loaded Adsorption Type Compressor Cascade**[刊, 汉] / CHEN Shao-wen (College of Energy Source and Power, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), GUO Shuang, LU Hua-wei, CHEN Fu (College of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(2). — 167 ~ 171

Numerically studied was the influence of boundary layer elimination by a suction at a low speed on the aerodynamic performance of a super-highly loaded compressor cascade. The distribution of the total pressure loss, diffusion factor and air-flow angle along the blade height was analyzed, and the limit streamline and profile static pressure on the suction surface were given. It has been found that the boundary layer elimination by suction can effectively improve the cascade aerodynamic performance, and the low-energy fluid removal through a suction can decrease the separation of the suction surface and the corner area, increasing the capacity of the flow path and enhancing the cascade load and diffusion capacity. In addition, the larger the suction air flow rate, the more conspicuous the improvement. A suction at a location of 60% axial chord can achieve the best effectiveness. The influence of the suction location on suction effectiveness is larger than that of the suction air flow rate. To appropriately increase the suction air flow rate can enhance the suction effectiveness, and the selection of an optimum suction location and air flow rate is correlated with the diffusion process and separation degree inside the cascade. **Key words:** super-highly loaded compressor cascade, boundary layer elimination through a suction, suction location, suction air flow rate

内可逆焦耳—布雷顿功热并供系统的焓优化分析 = **Exergy Optimization Analysis of an Endo-reversible Joule-Brayton Power-and-heating Cogeneration System**[刊, 汉] / XIE Ping, HUANG Yue-wu (College of Environment Science and Engineering, Donghua University, Shanghai, China, 201620) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(2). — 172 ~ 176