

船用燃气轮机动力涡轮可调导叶级的流场结构

刘顺隆¹, 冯永明¹, 刘 敏², 王 林²

(1. 哈尔滨工程大学 动力与核能工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨·第七 三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘 要: 基于耦合求解可压缩 Favre 平均 Navier-Stokes 方程及 Menter 的 Baseline(BSL) 双方程湍流模型, 本文对一个考虑可调导叶设计的船用燃气轮机变几何动力涡轮进行了全流场的三维粘性数值模拟。计算结果表明, 采用可调导叶技术, 涡轮各级热力反动度发生了明显变化; 可调导叶级的流动特性变化更显著影响变几何动力涡轮的气动性能; 选取具有良好冲角适应性和跨音速性能的可调导叶是船用燃气轮机变几何动力涡轮气动设计的一个关键技术。由此, 根据数值计算结果, 重点分析可调导叶级的气动特性及其流场结构。

关 键 词: 船用燃气轮机; 可调导叶; 变几何动力涡轮; 三维粘性流场; 数值研究

中图分类号: TK47 文献标识码: A

1 引 言

20 世纪 50 年代, 美国国家航空航天管理局就着手开展变几何涡轮技术可行性的理论研究和实验研究, 并在一个两级航空燃气涡轮上验证了可调导叶(VAN)技术方案^[1]。英国 Rolls-Royce 公司则根据 1971 年所进行的一系列涡轮变几何技术试验研究得出重要结论——最有效的变几何涡轮技术是采用 VAN 技术方案。从此, 西方国家对变几何涡轮技术的研究或应用均采用 VAN 技术方案。在非设计工况下, 采用可调导叶可以有效控制涡轮流量变化, 进而调节和优化燃气轮机各部件之间的匹配关系, 有效提高整个机组的加减速特性和低工况性能^[2~3]。由于船用燃气轮机在寿命期 90% 以上的时间都在部分负荷下运行, 所以采用变几何涡轮技术成为提高其低工况性能的一个重要考虑措施。

1989 年, 美国 Solar 和 Caterpillar 公司联合研制成功了动力涡轮采用 VAN 技术的 Solar5650 型船用燃气轮机, 尽管其仅采用了回热和 VAN 技术, 但经

过试验研究和理论分析, 发现它的油耗却可以减小到与中速柴油机相同的水平^[2]。从 1991 年开始, 美国就开始设计发展新一代船用燃气轮机—WR-21, 正是基于间冷、回热和 VAN 三大关键技术的有机配合使用, 从而使 WR-21 船用燃气轮机在大部分功率范围内具有一平坦的耗油率曲线。如今 WR-21 船用燃气轮机已成功应用于英国海军船只, 而美法等西方国家海军则进一步拟将其应用于综合全电力推进系统^[5~9]。因此船用燃气轮机变几何涡轮技术研究具有现实的国防意义和重要的应用前景。

目前, 由于湍流模型性能的提高和高精度数值方法的发展, 叶轮机械全三维定常粘性 CFD 技术已经能够比较准确揭示多级透平复杂的流场结构和损失分布, 成为其实际工程设计的先进手段^[7]。为了使数值模拟具有较高的准确性, 本文采用 CFX-TASCflow 软件平台, 基于可以计及动静干涉的叶轮机械全三维定常粘性 CFD 技术, 对整个动力涡轮进行四级联算, 设计工况与非设计工况对定几何动力涡轮的数值计算结果与相应可利用的设计参数吻合较好。基于此, 本文对该动力涡轮采用可调导叶的变几何涡轮设计方案的不同工况全流场进行了三维数值模拟分析。计算结果表明, 可调导叶级的流动特性变化显著影响了变几何动力涡轮的气动性能, 由此本文重点分析可调导叶级的气动特性及其三维粘性流场结构。

2 控制方程与数值方法

经过 Favre 平均三维粘性可压缩 $N-S$ 方程在一般曲线坐标系 (ξ, η, ζ) 下可写为如下形式:

收稿日期: 2004-05-28; 修订日期: 2004-12-10

基金项目: 海军装备预研基金资助项目(40101030104)

作者简介: 刘顺隆(1939-), 男, 浙江湖州人, 哈尔滨工程大学教授, 博士生导师

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(E - E_V)}{\partial \xi} + \frac{\partial(F - F_V)}{\partial \eta} + \frac{\partial(G - G_V)}{\partial \zeta} = S \quad (1)$$

式中: Q —未知变量的一般形式; E, F, G —对流通量; E_V, F_V, G_V —粘性通量; S —源项, 计及了离心力和科氏力的影响, 它们的相关表达式不再赘述。其中动力粘性系数 μ 由 Sutherland 公式计算; 湍流涡粘系数 μ_t 由 Menter 发展的 BSL 双方程湍流模型计算, 其相关常量取值参见文献[8]。

若分别以 Φ_1, Φ_2, Φ_3 表示 $K-\omega$ 模型和 $K-\epsilon$ 模型及 BSL 模型中的函数关系, 则 BSL 双方程湍流模型可简单表示为:

$$\Phi_3 = F_1 \Phi_1 + (1 - F_1) \Phi_2 \quad (2)$$

式中: F_1 — $K-\omega$ 模型和 $K-\epsilon$ 模型转换的控制变量, 在近壁区边界层内 $F_1 = 1$; 在边界层外 $F_1 = 0$ 。由式(2)可知对 BSL 模型而言: 一方面利用近壁区 $K-\omega$ 模型可以给出较高精度的边界条件及保证计算收敛的稳定性特点; 另一方面可充分发挥远壁区 $K-\epsilon$ 模型对自由流条件具有良好适应性的特点[8]。

本文计算中涡轮进口给定总温、总压, 绝对气流角分布; 出口给定背压; 在叶片内、背弧和上、下端壁施加无滑移条件, 并应用了温度的法向梯度为零的条件; 求解叶栅流场还采用了周期性边界条件。在采用 CFX-TASCflow 软件平台求解 $N-S$ 方程时, 对流项数值格式采用线性分布对称迎风格式(LPS)加物理对流修正(PAC), 粘性项采用中心差分格式, 为加快程序的计算速度采用了全隐式多网格耦合求解技术。

3 网格生成及级间处理

目前, 叶轮机械数值模拟中广泛采用分区结构网格技术, 以适应叶片复杂外形及流道空间拓扑结构的要求。本文计算中动叶顶部间隙网格生成时采用了如下拓扑结构: 绕叶型(Ω_1)具有一圈 O 型网格, 在入口段和流道中部(Ω_2)采用的是 C 型网格, 在出口段($\Omega_3 \sim \Omega_4$)采用的是 H 型网格。对于叶顶间隙区域采用“镶嵌”式网格结构, 由三部分区域($\Omega_5 \sim \Omega_7$)组成, 它们在拓扑结构上等同于 H 型网格。这样的分区保证了叶片前缘、尾缘及流道中的网格质量。图 1 和图 2 分别为动叶顶分区计算网格和涡轮的计算网格。

片排首尾通过“混合平面”相连。设计点和非设计点的全流场最大计算残差均收敛到 10^{-4} 以下, 这说明本次计算采用的数值方法和级间处理对本算例是合理的。本次计算静叶栅网格径向取 46 个网格点; 动叶栅径向取 54 个网格点, 其中叶顶间隙取 9 个网格点; 单列静、动叶栅网格点数分别约 10 万个及 14 万个, 总的计算网格点数约 95 万个。

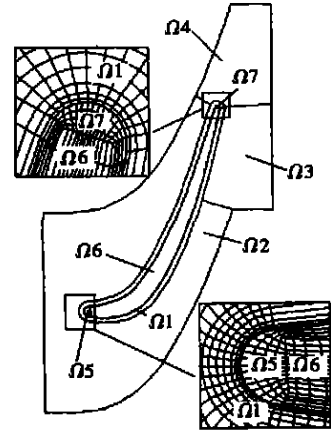


图 1 动叶顶分区计算网格

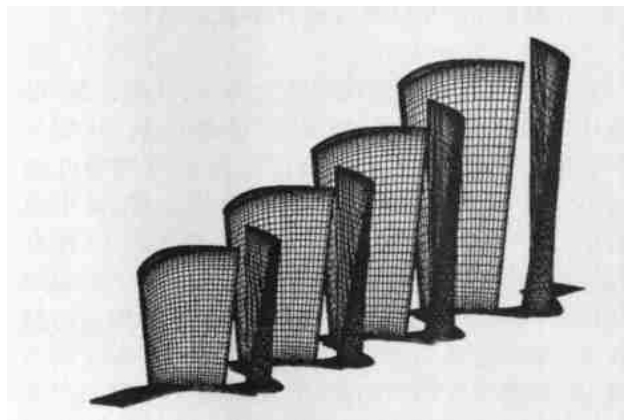


图 2 涡轮计算网格

4 数值计算结果及分析

由图 3 可见, 船用燃气轮机动力涡轮效率随着功率减小逐渐降低, 对定几何涡轮的计算结果与可以利用的设计曲线整体趋势吻合良好, 其中功率以设计参数的额定功率进行无量纲化。通用汽车公司的实验研究表明[3]: 无论可调导叶开大还是关小, 由于涡轮偏离最佳设计冲角运行, 变几何涡轮的效率都将下降, 本文计算结果与此相一致, 这里不再给出相关变化曲线。其实, 对变几何涡轮技术而言, 在部

计算中动静叶片排轴向间隙未作延伸处理, 叶

分负荷时, 由于可调导叶关小, 从而可以使动力涡轮在较高的进口总压、总温下运行, 所以将提高整个机组低工况的热效率; 而且若采用间冷回热技术并与此相结合, 那么低工况时将通过提高回热效率而进一步提高整个机组的经济性^[6]。目前, 叶轮机械 CFD 技术还不能达到提供绝对精确数据的要求, 但却可以相当精确地给出叶轮机械内部的流场结构以及损失分布^[9], 本文的计算具有较高精度, 能够准确地进行涡轮的流场预测与分析。

反动度几乎不发生变化。不过相比而言, 末级的热力反动度略微有所增加。

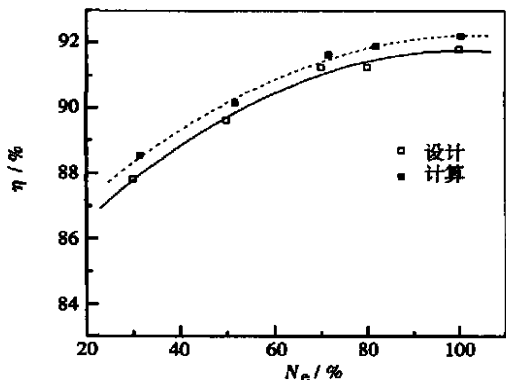


图 3 计算结果与设计参数的对比

对于本文模拟的变几何动力涡轮, 其各级静、动叶采用的叶型基本上分别属于“后部加载”叶型及“均匀加载”叶型。图 4 为设计工况下可调导叶级静、动叶 10% 叶高表面处无量纲静压分布, 从中可以看出: 静叶最低压力点在轴向弦长 58% 位置左右, 动叶叶片表面载荷分布均匀; 静叶属于“后部加载”叶型, 而动叶属于“均匀加载”叶型。采用后部加载叶型, 可通过减小叶片端部靠近前缘的横向压力梯度, 削弱端部气体横向流动, 以求减小叶栅二次流损失。实验和数值模拟研究表明^[10]: 后部加载叶型具有良好的攻角适应性, 而且其气动负荷特性还可降低叶栅三维通道的二次流损失。因此“后部加载”可调导叶将能够很好地适应现代船用燃气轮机变工况的要求。

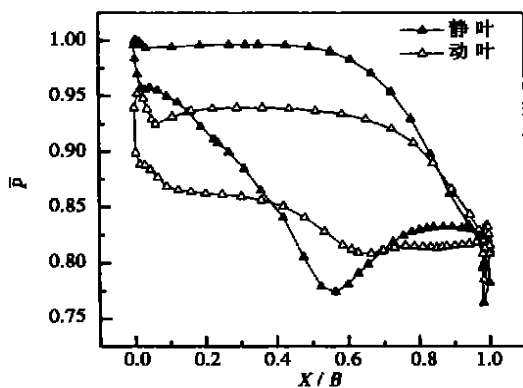


图 4 可调导叶级静、动叶表面无量纲静压分布

在转速一定的情况下, 转动可调导叶改变了喷嘴的有效通流面积, 则导致涡轮级间焓降重新分配, 从而热力反动度 Ω_h 也随之改变。图 5 为在设计转速、压比情况下, 各级热力反动度随可调导叶转角变化的变化曲线。由图 5 可见, 随着可调导叶转角增加, 可调导叶级即第一级热力反动度几乎成线性逐渐增加, 其余各级在关小 3° 以下, 热力反动度减小的趋势逐渐加大, 而在可调导叶由此逐渐开大时, 热力

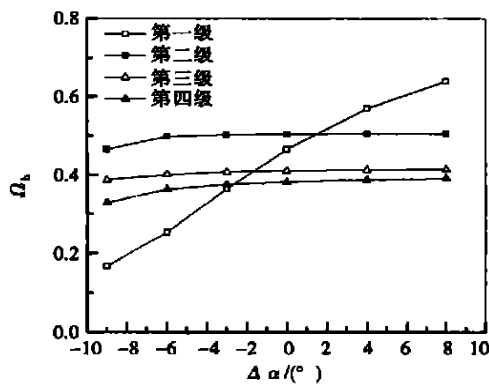


图 5 设计转速、压比时, 涡轮各级热力反动度随可调导叶转角变化的变化关系

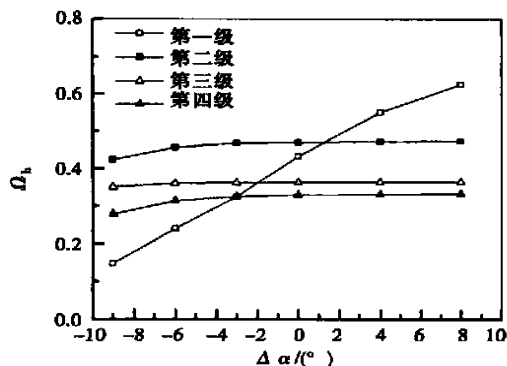


图 6 部分负荷、低转速低压比时, 涡轮各级热力反动度随可调导叶转角变化的变化关系

何设计时可调导叶级倾向于选择较高的热力反动度, 为避免动叶根部出现负的反动度, 最好采用可控涡设计方法。

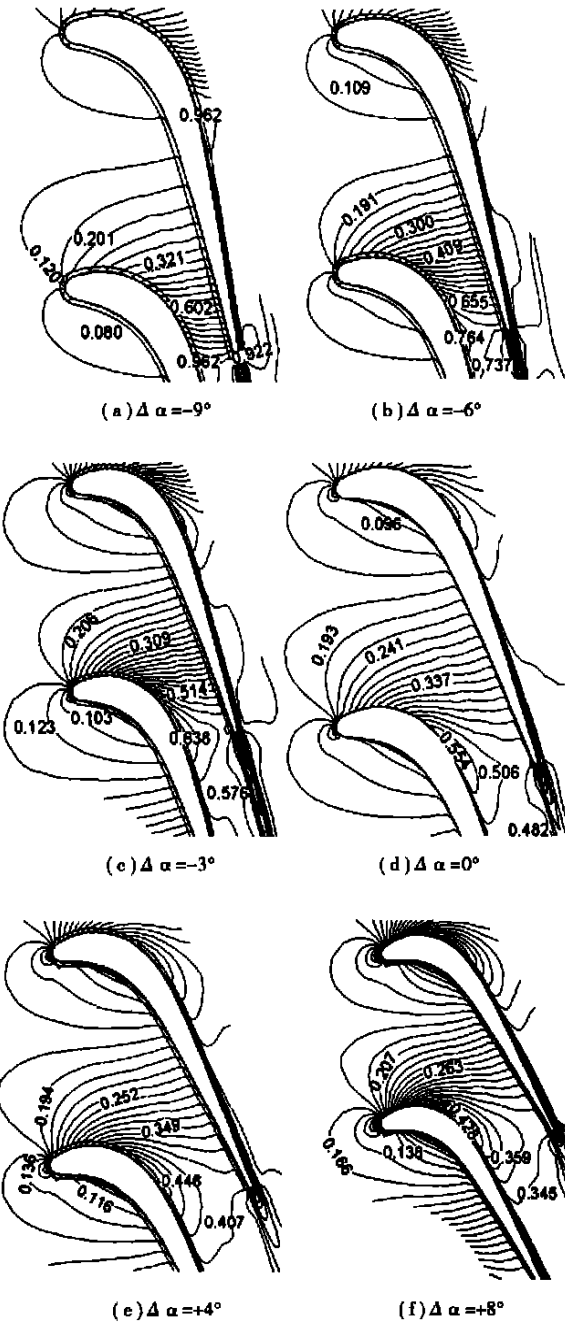


图 7 转角不同典型位置可调导叶级静叶展向中部 S1 流面马赫数分布等值线

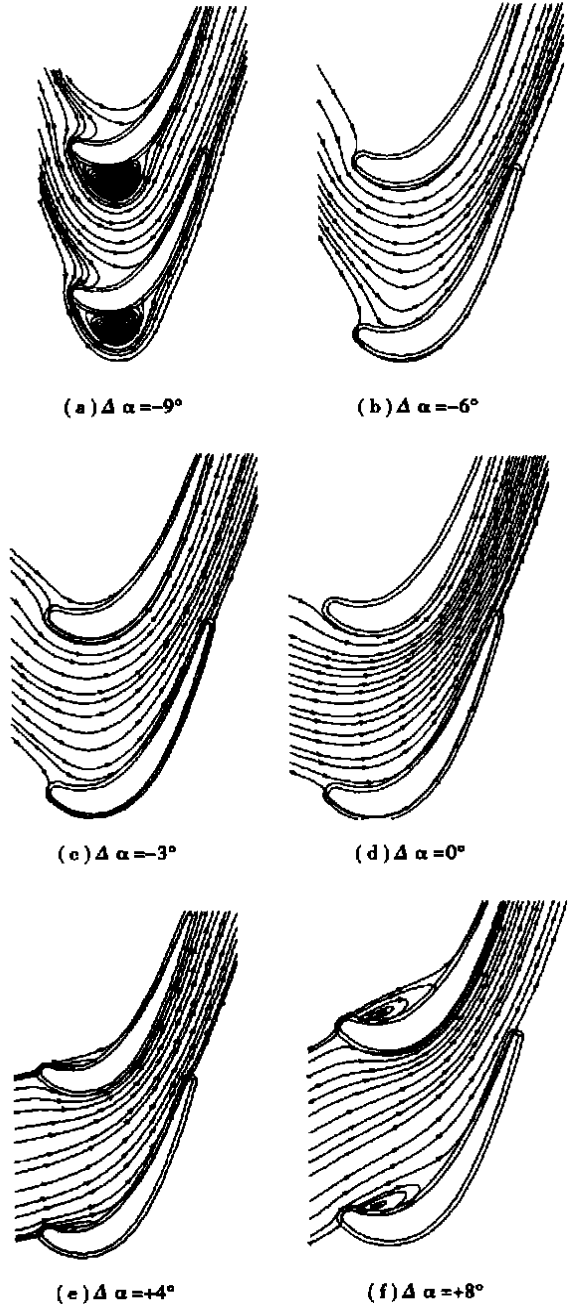


图 8 转角不同典型位置可调导叶级动叶展向中部 S1 流面流线

图 6 为部分负荷、低转速低压比时, 变几何动力涡轮各级热力反动度与可调导叶转角的变化关系曲线。对比图 5 及图 6 可见, 两者的变化趋势基本一致, 结合两者进一步可以看到, 各级的热力反动度随着转速降低逐渐减小, 而且从中可见, 船用动力涡轮原设计的热力反动度在 0.3 ~ 0.5 之间。根据以上分析可见, 对于变几何动力涡轮的气动设计而言, 其定几

图 7 为图 5 相应工况 $\Delta\alpha$ 典型位置可调导叶级静叶展向中部 S1 流面马赫数分布等值线图。由图 7 可见, 当转角由定几何逐渐减小, 可调导叶级静叶由中亚声速流动逐渐进入跨音速流动, 并由较小负

冲角趋向在较大正冲角下运行,其吸力面高亚声速区逐渐扩大;当转角由定几何逐渐开大,可调导叶在较大负冲角下运行,两种情况均导致可调导叶总损失加大。可调导叶气动特性要求其具有良好的冲角适应性和跨音速性能。

图8为图7相对应可调导叶级动叶展向中部S1流面流线。由图8可见,当转角由定几何逐渐减小,动叶逐渐在相对较大正冲角下运行;当转角由定几何逐渐开大,动叶逐渐在较大负冲角下运行,不论是大的正冲角或是大的负冲角,都导致可调导叶级动叶栅流道出现了闭式分离。进一步对比可见:可调导叶级动叶栅在较大正冲角下运行,在叶栅吸力面上形成大尺度旋涡区;而在大负冲角下运行,则在叶栅压力面上形成大尺度旋涡区,比较而言,在正冲角下流动分离的强度尺度显然很大,但是随着负冲角加大,其压力面前缘也将发生闭式分离,并逐渐增强;两者产生的原因是气流在惯性作用下来不及转折和分别受到来自吸力面或者压力面分支气流的排挤,引起叶片前缘近壁区域的主流流向大幅度改变和加速,在叶栅头部即发生分离。这必将严重降低叶栅的气动性能和改变涡轮的通流特性,因此可调导叶转角的确定及其与相应动叶的级间匹配对变几何动力涡轮的气动设计具有重要意义。

5 结 论

通过有效控制流量变化,采用可调导叶技术的变几何动力涡轮可以随着工况的改变,有效调节和优化机组各部件之间的匹配关系,从而改善整个机组的变工况性能,因此对于船用燃气轮机变几何动力涡轮来说,可调导叶的转角是个至关重要的参数。通过变几何动力涡轮多级环境下的三维数值模拟分析,可得到以下结论:

(1) 变几何动力涡轮各级热力反动度随着转角 $\Delta\alpha$ 的变化规律有所不同,可调导叶级热力反动度随转角关小几乎成线性递减。对于变几何动力涡轮的气动设计而言,燃气轮机动力涡轮定几何设计时优先考虑采用可控涡方法设计,可调导叶级倾向于选

择较高的热力反动度。

(2) 可调导叶转角不论是关小还是开大都将导致叶型损失增大,可调导叶转角关小,由于静叶喉部局部超音速将导致复杂的膨胀激波,进而导致叶型损失增大;可调导叶转角开大,由于在较大的负冲角下运行,从而也导致叶型损失增大。

(3) 对于后部加载叶型,国内进行了大量的理论研究和实验研究,因此可调导叶设计时可优先考虑采用自主设计的先进后部加载叶型^[9]。但采用可调导叶使透平叶栅处于大攻角范围内运行,因此必须进行足够精度的整机数值模拟,进而对可调导叶进行气动优化设计并优化确定其与相应动叶的级间气动参数匹配。

参考文献:

- [1] CAMPBELL C E, WEINA H J. Preliminary evaluation of turbine performance with variable-area turbine nozzles in a turbojet engine [J]. NACARM-E52J20, 1953.
- [2] RAZINSKY E H, KUZIAK W R J. Aerothermodynamic performance of a variable nozzle power turbine stage for an automotive gas turbine [J]. ASME Journal of Engineering for Power, 1977, 99: 587-592.
- [3] 朱行健,王雪瑜.燃气轮机工作原理及性能[M].北京:科学出版社,1992.
- [4] KARSTENSEN K W, WIGGINS J O. A variable-geometry power turbine for marine gas turbines [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1990, 112: 165-174.
- [5] 闻雪友,李伟.WR-21——新一代的船用燃气轮机[J].热能动力工程,1999,14:1-6.
- [6] MCCARTHY S J, SCOTT I. The WR-21 intercooled recuperated gas turbine engine: operation and integration into the royal navy type 45 destroyer power system [R]. ASME Paper: GT-2002-30266, 2002.
- [7] 刘宝杰,邹正平,徐力平,等.叶轮机计算流体动力学技术现状与发展趋势[J].航空学报,2002,23(5):394-404.
- [8] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [9] DENTON J D, DAWES W N. Computational fluid dynamics for turbomachinery design [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 1999, 213(2): 107-124.
- [10] 安柏涛.涡扇发动机涡轮低压导向器气动性能的实验和数值研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2002.

(渠 源 编 辑)

高温燃料电池与燃气轮机相结合的混合发电系统 = A Power Generation System Based on the Combination of High-temperature Fuel Cells and Gas Turbines - a Hybrid Power Generation System [刊, 汉] / CHEN Qi-mei, WENG Yi-wu, WENG Shi-lie, et al (Power Machinery and Engineering Education Ministry Key Laboratory under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(2). — 111 ~ 115

A hybrid power generation system based on the combination of high-temperature fuel cells and gas turbines features high-efficiency, protection of environment and reliable performance. Such an innovative power generation system enjoys bright prospects of wide applications in the realm of future distributed power generation. Numerous experts and scholars have carried out a huge amount of research concerning its system configuration, matching and performance. Currently, several of such hybrid power generation systems are already operating successfully. However, there still remain many problems, which require further study and exploration in order to realize their early commercial operation. The authors have presented an overview of the present status of hybrid power generation development along with a forecast of its future research trends and development prospects. **Key words:** high-temperature fuel cell, gas turbine, hybrid power generation system

冲角对不同掠型压气机叶栅扩压因子的影响 = The Impact of the Variation in Incidences on the Diffusion Factor of Compressor Cascades of Different Swept Types [刊, 汉] / CHEN Fu, ZHAO Gui-jie, SONG Yi-ping, et al (College of Energy Science & Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(2). — 116 ~ 119

An experimental investigation was conducted of the compressor cascades composed of straight, swept-forward, swept-curved and swept-back blades. In connection with the energy loss distribution at the cascade outlet, the static pressure distribution at the blade surface and blade loading discussed are the influence of variation in incidences on the diffusion factor of compressor cascades of different swept types as well as the interrelationship between the cascade diffusion factor and cascade energy loss on the one side and the blade loading on the other. Study results have shown that the swept-forward and swept-curved cascades markedly contribute to the improvement of flows at the root portion of the cascades, thus effectively eliminating the possibility of flow separation caused by a flow speed reduction. The combined action of a greater reverse-pressure gradient of the above two types of cascade and a lower blade loading at midspan has resulted in a smaller diffusion factor at the two ends of the blade than that at the straight cascade. **Key words:** compressor, test, diffusion factor, swept-curved blade, incidence

船用燃气轮机动力涡轮可调导叶级的流场结构 = The Flow Field Structure of the Power-turbine Variable-area Nozzle Stage of a Marine Gas Turbine [刊, 汉] / LIU Shun-long, FENG Yong-ming (College of Power & Nuclear Energy Engineering under the Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), LIU Ming (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(2). — 120 ~ 124

Based on the coupled solution of a compressible Favre-averaged Navier-Stokes equation and Menter baseline (BSL) dual-equation turbulence-flow model the authors have conducted a full flow-field three-dimensional viscous numerical simulation of a variable-geometry power turbine, taking into account a variable-area nozzle design. Computational results indicate that with the use of the variable-area nozzle techniques there occurred a significant change in the thermodynamic reaction of the various stages of the turbine. The change in the flow characteristics of the variable-area nozzle stage can more markedly influence the aerodynamic performance of the variable-geometry power turbine. The selection of a variable-area

nozzle with fine adaptability to incidence and a good transonic performance represents a key technology of variable-geometry power turbine design for a naval gas turbine. In view of this, on the basis of the numerical calculation results, the authors' analysis has been focused on the aerodynamic performance and the flow field structure of the variable-area nozzle stage. **Key words:** naval gas turbine, variable area nozzle, variable-geometry power turbine, three-dimensional viscous flow field, numerical investigation

两套后部加载叶栅的对比实验研究 = **Contrast Experimental Study of Two Kinds of Rear-loaded Cascades** [刊, 汉] / YUE Guo-qiang, HAN Wan-jin, LU Wen-cai (College of Energy Science & Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), LI Dian-xi (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(2). — 125 ~ 129

To investigate the impact of blade front-edge diameter and load distribution on the aerodynamic performance of rear-loaded cascades, a contrast blow-down test was conducted of two sets of rear-loaded cascades with different front-edge diameters and load distribution. Detailed measurements were taken of the flow field parameters and surface static pressure at the following incidences: 0° , $+20^\circ$, -20° . The results of the investigation indicate that through a proper selection of the front and rear edge diameter and a rational matching of outlet inverse-pressure stage length and inverse pressure gradient magnitudes it is possible to effectively reduce the secondary flow losses of the cascades and enhance the adaptability of cascades to incidence variation, thus resulting in a more uniform distribution of outlet flow-field aerodynamic parameters along the blade height. **Key words:** rear loading, experimental investigation, incidence, cascade

平板滞止区内饱和液体喷流沸腾的临界热流密度 = **Critical Heat flux Density of the Jet Flow Boiling of a Saturated Liquid in a Flat-plate Stagnation Zone** [刊, 汉] / QIU Yu-hao, LIU Zhen-hua (College of Mechanical & Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China. Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(2). — 130 ~ 133

A systematic steady-state experimental study was conducted with respect to the critical heat-flux density of a round jet-flow impingement boiling of a saturated liquid in a high-temperature flat-plate stagnation zone. Investigated was the influence of the various system conditions, such as different liquids, flow velocities and jet flow diameter, etc. on the critical heat-flux density of the jet-flow boiling. A semi-theoretical and semi-empiric equation was established for forecasting the critical heat-flux density. The basic form of the equation was obtained by adopting available former research results. The coefficients of the equation were derived by a fitting of the experimental data of the present study. The study results indicate that the critical flow-flux density of the saturated fluid jet-flow impingement boiling depends on the physical properties of the liquid, stagnation impingement speed and jet flow diameter. By using the semi-theoretical and semi-empirical formula obtained as a result of the present study it is possible in a extensive range of tests accurately predict the critical heat-flux density of the jet-flow boiling. **Key words:** jet flow, boiling, critical heat-flux density

制冷剂 R-134a 在螺旋环形通道内凝结换热的实验研究 = **Experimental Investigation of the Condensation Heat Exchange of Refrigerant R-134a in a Spiral Ring-shaped Channel** [刊, 汉] / HAN Ji-tian, SU Guo-ping (College of Energy & Power Engineering under the Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(2). — 134 ~ 137, 141

The role played by refrigerant R-134a in the condensation heat exchange in spiral tubes and its pressure-drop characteris-