

带后置蜗壳的斜流叶轮机匣处理扩稳研究

楚武利, 高 鹏, 吴艳辉, 袁 森

(西北工业大学 动力能源学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 针对小型高速斜流叶轮的机匣处理进行了实验研究与数值模拟分析。实验结果表明, 所设计的机匣处理结构可以有效地扩大斜流叶轮的工作范围。采用并行计算技术, 对包括斜流叶轮机匣处理以及蜗壳在内的整机流场进行了数值模拟, 揭示了机匣处理扩稳的机理, 机匣处理结构将叶片顶部区域的低能流体抽吸进入处理槽, 从叶片通道内吸力面侧区域流出周向槽, 射入转子通道, 吹除该区域的低能气团阻塞, 改善了转子叶片叶顶区域的气流流动状况, 推迟失速的发生。

关 键 词: 斜流叶轮; 蜗壳; 机匣处理; 失速; 后置蜗壳; 周向槽机匣

中图分类号: TK47 文献标识码: A

引 言

随着当今工程中对叶轮机械高效率、高压比以及在单级上实现更高的负荷追求, 使得叶片尖部载荷进一步增大, 其动叶尖部产生的流动损失在总损失中所占比重也不断增加, 直接导致了叶轮机械稳定工作范围减小, 使其更易进入失速、喘振等非稳定工况。因此叶轮机械稳定工作裕度已成为现今研究中必须确保的重要技术指标之一。

斜流式叶轮作为一种介于离心式叶轮与轴流式叶轮之间的叶轮形式, 同时具有离心式叶轮高压系数、工作范围广和轴流式叶轮大流量系数、高效率的优点。近些年来, 该技术在企业、厂矿等生产部门得到了广泛的应用。然而当前关于带蜗壳斜流叶轮的整机流动特性研究以及斜流叶轮机匣处理扩稳方面的研究很少有报导, 仅为一些关于带蜗壳斜流叶轮内部流场分析研究^[1-3]。本研究针对某具体工程问题中设计后置蜗壳斜流叶轮失速裕度过小的问题, 借鉴轴流压气机领域周向槽机匣处理研究成果^[4-6], 对其进行稳定裕度改进的周向槽式机匣处理的实验与数值模拟, 以期增大其稳定工作范围, 为解决工程应用中稳定裕度不足的问题找到合适的解决方法。

1 后置蜗壳斜流叶轮几何建模及网格生成

以某型高速小尺寸后置蜗壳斜流叶轮作为研究对象, 其叶轮整机几何实物图如图 1 所示。利用 UG 与 IGG 通用接口格式 IGES 建立蜗壳部分的数学模型并生成网格, 叶轮部分网格利用 NUMECA 商业软件中的 AutoGrid 模块生成, 最后在 IGG 中对接形成整个区域的计算网格。由于蜗壳出口处存在很大的漩涡, 且涡的强度和位置均呈现周期性变化, 因此在蜗壳出口加了出口延长管道, 长度是出口当量直径的 5 倍。

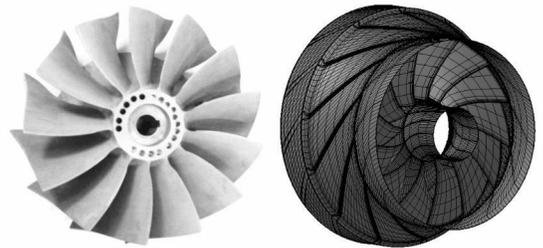


图 1 斜流叶轮实物与网格结构示意图

为了控制网格质量, 采用多块网格生成方法, 将复杂的几何形状分割成若干简单的小块, 然后将每一小块区域单独生成合适的网格, 最后将所有的网格耦合起来。整个计算区域分为叶道区、蜗壳区、周向槽以及耦合叶轮与蜗壳的中间过渡区。叶道区利用 NUMECA 中专门针对叶轮机械部分网格生成模块 AugoGrid 生成, 其中叶片尾缘为钝头结构, 尾缘部分采用单独的网格块, 叶顶间隙采用蝶形网格生成, 分内外两层网格结构。周向槽内采用简单的 H 型网格。蜗壳部分网格利用 UG 与 IGG 通用接口建立数学模型, 利用多块网格技术进行划分。整个计算单元的网格总数约 290 万, 当加上周向槽式处理机匣时, 整机的网格总数将达到 320 万。

收稿日期: 2008-09-08; 修订日期: 2009-07-20

作者简介: 楚武利(1962-), 男, 陕西蓝田人, 西北工业大学教授, 博士生导师。

2 数值模拟方法与实验装置说明

数值模拟计算采用商业计算软件 NUMECA 中的核心求解器 EURANUS, 采用时间相关法求解 Reynolds 时均方程, 为提高计算效率, 采用了多重网格法、局部时间步长和残差光顺等加速收敛措施。应用 Jameson 有限体积差分格式并结合 $B-L$ 湍流模型对相对坐标系下的三维雷诺平均 Navier-Stokes 方程进行求解, 采用显式四阶 Runge-Kutta 法时间推进以获得定常解。由于整个流场呈现一定非定常特性, 因此当进出口流量发生小幅振荡, 也可近似认为计算基本收敛。计算时给定进口静温、进口速度及进口气流角, 出口给定背压, 叶轮与蜗壳的动静干涉采用冻结转子法耦合计算。

工程实际中该叶轮的动力装置由直升机直接提供, 而在试验台上采用交流变频调速电机来供给动力。该实验是在常规大气条件下(大气温度 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, 大气压力 100.5 kPa)进行的, 叶轮性能采用风管式进气试验装置测定, 流量测量采用了圆弧形集流器, 压力测量采用标准 U 型压力计, 功率测量由测功器读出。试验装置如图 2 所示。

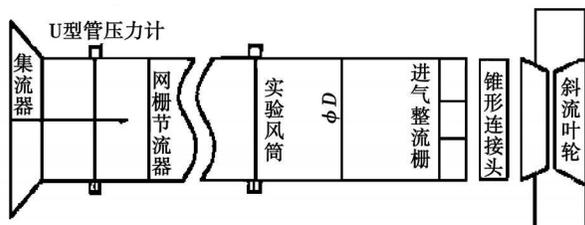


图 2 试验装置简图

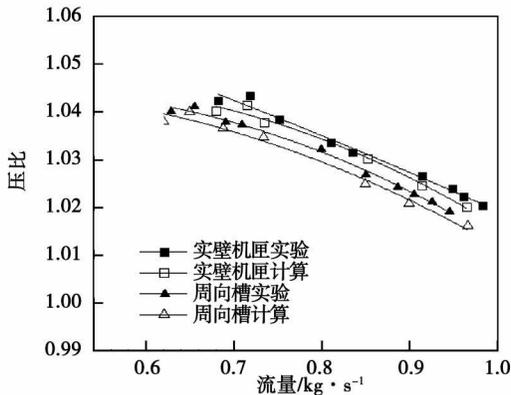
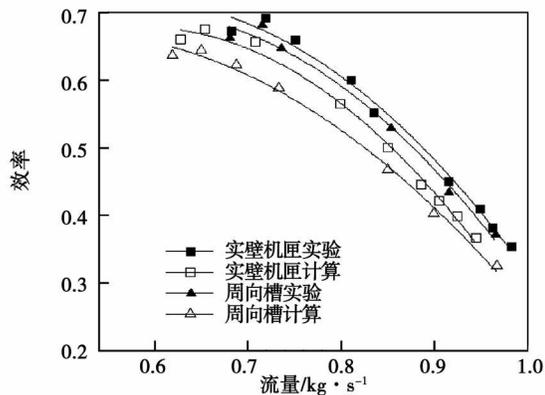


图 4 实验与数值模拟性能曲线比较(转速 $10\ 000\text{ r/min}$)

称性。因此采用 13 个节点的大型计算站, 来全通道数值仿真该带后置蜗壳的斜流叶轮采用周向槽机匣处理前后叶轮内部复杂的流场变化。本研究数值模

集流器使气流收敛, 均匀进入风筒。实验风筒一律采用表面光滑的圆形截面管, 其截面面积应尽量与实验叶轮截面面积相同。当形状与截面面积不同时, 可在斜流叶轮与风筒之间添加收敛形接头, 其截面积比在 $1.0 \sim 1.3$ 之间。实验风筒长度至少要等于 6 倍风筒直径。测量时, 距初始端 $D/2$ 处圆周上装设一组测压管接头, 用集流器获得该处的进口静压, 用以计算进口流量值。在距风筒末端 $2D$ 处装设另一组测量管接头, 测量叶轮进口静压的大小。

实验风筒内气流可能产生漩涡, 为使测点附近气流稳定, 在叶轮进口前顺气流方向设置 4 块隔板构成的“#”型进口整流栅。由于整流栅将产生阻力损失, 使测量压力降低, 所以在性能计算时要考虑其对压力的影响。图 3 给出了实壁机匣与带周向槽处理机匣的实物图。

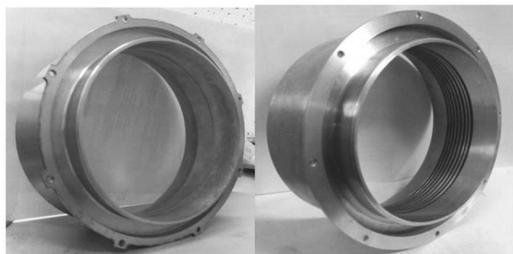


图 3 实壁机匣与带周向槽处理机匣实物

3 实验结果与数值计算结果分析

由于蜗壳的影响, 斜流叶轮各个叶片通道内的流场参数变化很大, 如果用单一通道的方法来数值模拟叶轮内部流场变化, 就很难准确把握这种非对

拟计算采用与实验条件完全一致多个工况点下进行, 大气温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, 大气压力为 100.5 kPa , 进口轴向进气, 给定进口静温、进口速度及进口气流角,

出口给定背压为大气压力。由于全通道计算工作量极大, 耗时太长, 所以只研究了转速为 10 000 r/min 的情况。图 4 为采用周向槽机匣处理前后, 斜流叶轮实验与计算性能曲线比较图。从图中可看出, 计算性能与已有的实验数据吻合较好。计算结果与实验结果之间误差产生的原因除了网格数目、网格质量、湍流模型这些原因外, 还由于叶轮出口与下游蜗壳交界面的处理方法为冻结转子法, 由于冻结转子法的结果取决于动叶的相对位置, 因此定常的稳态解忽略了分离区等非定常的“历史效应”。

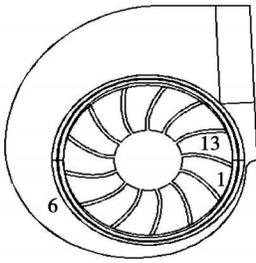


图 5 斜流叶轮 13 个通道的标注

为了方便对带蜗壳的斜流叶轮整机内部流场进行分析, 对于叶轮整机沿轴向截取 3 个垂直于 Z 轴的截面, 即靠近叶轮进口截面的叶轮前部截面、叶轮中部截面以及靠近轮盘的叶轮后部截面, 并且为了分析方便将斜流叶轮的 13 个通道进行了标注, 如图 5 所示。

图 6 为采用周向槽处理机匣结构前后, 叶轮中部截面位置的静压分布云图。从图中可看出, 采用周向槽机匣处理结构后其它叶轮通道的静压变化不大, 有较大变化的通道为靠近蜗舌的 1、2、13 这 3 个叶轮通道。叶轮中部截面周向槽处理前后各个通道的静压变化不大, 只是 1 通道的高静压区域略有减小。通过对比分析发现, 周向槽式机匣处理结构可改善靠近蜗舌处附近几个通道的静压变化, 使这几个通道内主流流动更加均匀, 对于远离蜗舌的其它流道来说, 静压分布变化不大。

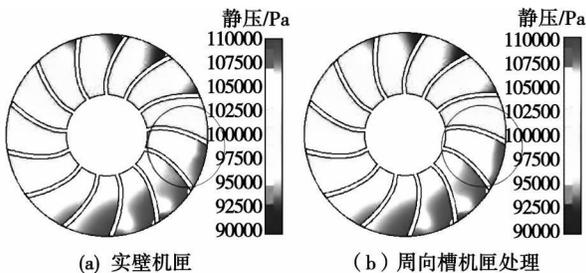


图 6 叶轮中部截面位置机匣处理前后静压比较

将总压损失 C_p 定义为 $C_p = (P_{rt, inlet} - P_{rt}) / P_{rt, inlet}$, 其中的高损失区即对应着叶顶间隙泄漏涡, P_{rt} 为某一截面的相对总压、 $P_{rt, inlet}$ 为叶片进口相对总压。图 7 给出了采用周向槽处理机匣结构前后, 叶轮中部截面位置的总压损失分布云图。通过对总压损失分布分析可见, 通道 13 叶顶与叶片吸力面交汇处的损失值大于 0.12 的高总压损失区域, 采用周向槽机匣结构后已消失至几乎无法看到, 其它通道的高总压损失区域也略有减小。高总压损失区域范围的减小意味着间隙泄漏涡的强度和范围逐渐减小, 使得叶片顶部的气流流动更趋于主流流向, 减小叶顶区域的阻塞, 从而扩大该斜流叶轮的稳定工作范围。

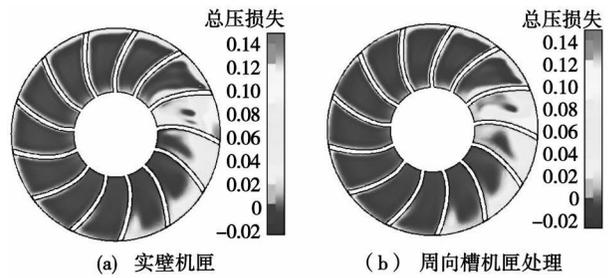


图 7 叶轮中部截面位置机匣处理前后总压损失变化比较

图 8 给出了采用周向槽机匣处理前后, 叶轮中部截面位置相对马赫数分布云图。通过分析发现, 周向槽机匣处理结构都通过将叶轮通道内部的低能流体气团抽吸入周向槽, 并被输运后重新射入主流通道, 改善了叶轮叶顶区域流场, 使得原先实壁机匣时低马赫数区域的范围有明显减小, 增大了靠近蜗舌区域叶片通道内的主流流动, 减小了通道内的低能气团阻塞, 从而扩大该斜流叶轮稳定工作范围。

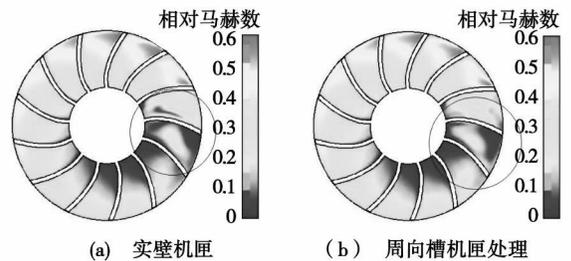


图 8 叶轮中部截面位置机匣处理前后相对马赫数比较

图 9 为在斜流叶轮通道 1、6、13 内, 转子进口截面处实壁机匣和周向槽式机匣处理结构在近失速工况下沿 S3 流面的子午速度三维分布图。从图中可看

出, 由于叶片通道顶部流场附面层的粘性作用和叶轮转子叶片叶顶间隙泄漏流动等的综合影响, 在斜流叶轮通道 1 进口截面处, 实壁机匣工况下转子叶片叶顶区域的流道靠近叶片压力面侧子午速度较低; 然而采用周向槽式机匣结构后, 该区域流场的子午速度值较实壁机匣时有所增加, 而在其它叶高区域, 子午速度在经过机匣处理后变化不大。在通道 6 时, 采用周向槽式机匣处理结构后增大了叶片顶部区域靠近压力面侧的子午速度值。而在通道 13 时, 周向槽式机

匣结构的应用增大了转子叶顶靠近压力面侧的子午速度值。通过分析可看出, 就整个斜流叶轮来说, 不同位置的叶轮通道采用周向槽后斜流叶轮各通道内流场变化不尽相同。但总的来说周向槽机匣结构都是通过将叶片顶部区域压力面侧的低能流体抽吸进入处理槽, 在周向槽内进行气流加速后, 从叶片通道内吸力面侧区域流出周向槽, 射入转子通道, 吹除该区域的低能气团阻塞, 改善了转子叶片叶顶区域的气流流动状况, 推迟失速的发生。

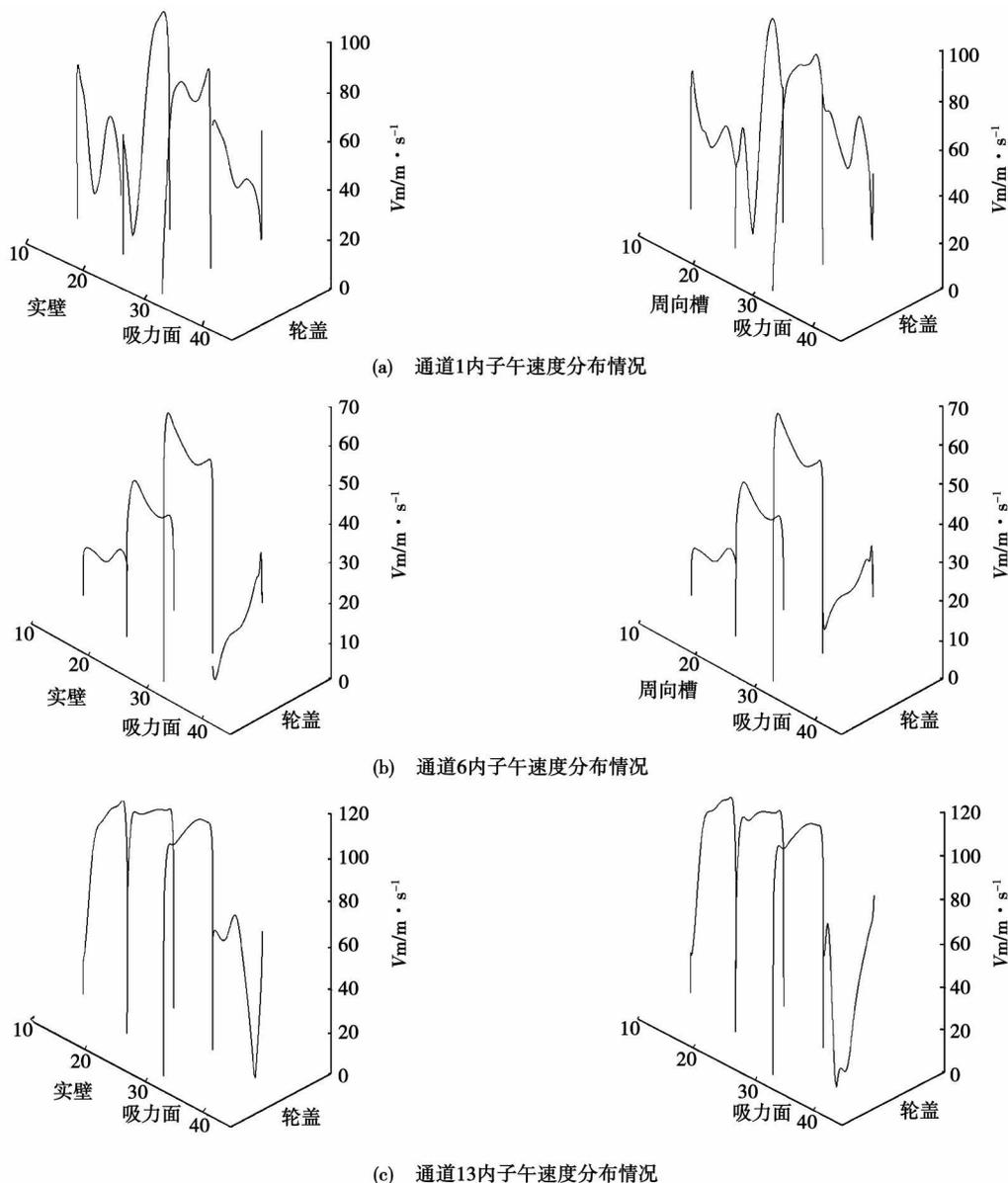


图 9 不同叶轮通道内 S3 流面子午速度分布

4 结 论

(1) 对于带蜗壳的斜流叶轮, 采用周向槽后叶轮

通道顶部流场产生明显变化的仅仅为靠近蜗舌区域附近的几个叶轮通道, 其它叶轮通道变化不大。对不同位置的单独叶轮通道流场变化分析发现, 虽然不同位置的叶轮通道采用周向槽后斜流叶轮各通道内流

场变化不尽相同,但都是通过将叶片顶部区域的低能流体抽吸进入处理槽,在周向槽内进行气流加速后,从叶片通道内吸力面侧区域流出周向槽,射入转子通道,吹除该区域的低能气团阻塞,改善了转子叶片叶顶区域的气流流动状况,推迟失速的发生。总的来看,尽管叶尖附近流场的改善,使其处在更高的载荷下工作,但还不能弥补周向槽造成加功量的耗损。因此,会使原叶轮的压比与效率有所降低。

(2) 周向槽式机匣处理结构的应用,使原后置蜗壳斜流叶轮稳定裕度满足工程实际中的设计要求,为以后解决工程应用中稳定裕度不足的问题找到一条合适的解决方法。

参考文献:

[1] 吴克启, 区颖达. 斜流叶轮顶端间隙流动特性的研究[J]. 流体

机械, 1994, 3: 4-9.

[2] FURUKAWA M, SAIKI K, NAGAYOSHI K. Effects of stream surface inclination on tip leakage flow field in compressor rotors[J]. Journal of Turbomachinery, 1998, 120: 683-694.

[3] 吴克启, 黄 坚. 风机蜗壳内部漩涡流动的数值分析[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(3): 316-319.

[4] EMMRICH R, HONEN H, NIEHUIS R. Time resolved investigations of an axial compressor with casing treatment part 1—Experiment[R]. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2007—Power for Land, Sea and Air, 2007.

[5] KHALEGHI H, TOUSI A M, BOROOMAND M, et al. Recirculation casing treatment by using a vaned passage for a transonic axial-flow compressor[J]. Journal of Power and Energy, 2007, 221 (8): 1153-1162.

[6] 楚武利, 卢新根, 吴艳辉. 带周向槽机匣处理的压气机内部流动数值模拟与试验[J]. 航空动力学报, 2006, 21(1): 100-105.

(编辑 单丽华)

新技术、新设计

世界上第一艘由燃料电池驱动的客船

据《Marine Engineers Review(轮机工程师评论者)》2008年10月号报道,德国 Proton Power System 公司是燃料电池和燃料电池混合系统的一个最主要的设计者、开发者和生产者,并已开发出世界上第一艘由燃料电池驱动的客船。该船依靠由该公司完全拥有的子公司—Proton Motor Fuel Cell(Proton 发动机燃料电池公司)提供的创新的混合燃料电池驱动技术运转。

载客 100 人的 Zem Ship(零排放船)长 25 m、最大船宽 5 m,其母港在德国汉堡。它将依靠结合有 Proton Motor 公司的两个 48 kW 燃料电池系统和一个铅凝胶体蓄电池的混合装置运转。

智能的能量控制系统协调燃料电池和蓄电池之间功率的输出量,以便提供比标准的由柴油机驱动的船舶大一倍的燃料效率。当它使用被储存在船上储气罐内的 50 kg 氢气时,燃料电池混合系统为船舶提供无污染和实际上寂静无声的驱动。该储气量足够船舶 3 天使用。燃料由 Linde Gas 公司提供。

该动力系统已得到 Germanischer Lloyd(德国劳埃德船级社)的书面证明,证明它适于海上运行。

在经过试运行阶段以后,该船的营运者从今年开始将逐渐使该船投入商业服务。

欧共体正在为 Zem Ship 项目直到 2010 年的开发、实用和运行投资 240 万欧元。

该项目也包括建造船坞旁的氢气站,用于为渡船重新充装燃料。

(吉桂明 摘译)

the aerodynamic optimized design thought was fused into the multi-stages of the compressor aerodynamic design to achieve the aim of compressor performance optimization through an aerodynamic design. The above aim has been accomplished by using a commercial software and a compressor aerodynamic optimized design platform. By the use of a commercial general-purpose optimization platform, the authors have conducted an optimized design of one-dimensional and $S2$ reverse problem of axial flow compressors, and employed the full three-dimensional optimized design platform provided by NUMECA to conduct a full 3D (three dimensional) aerodynamic optimized design of the compressors. The calculation results show that the layered aerodynamic optimized design is an effective means for enhancing the aerodynamic performance of a compressor. An advanced optimization algorithm can invariably secure the performance optimization of compressors at various stages of aerodynamic design to a greater extent as compared with the traditional design method. **Key words:** compressor, design system, optimized design, CFD (computational fluid dynamics), layered optimization

带后置蜗壳的斜流叶轮机匣处理扩稳研究 = A Study of the Stability Enhancement Achieved by the Casing Treatment of an Oblique-flow Impeller Equipped with a Rear-mounted Volute Housing [刊, 汉] / CHU Wu-li, GAO Peng, WU Yan-hui, et al (College of Power and Energy Source, Northwest China Polytechnic University, Xi'an, China, Post Code: 710072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(6). — 725 ~ 729

Experimentally studied and analyzed through a numerical simulation was the casing treatment of a small-sized high-speed oblique-flow impeller. The test results show that the casing treatment structure being designed can effectively enlarge the operating range of the oblique-flow impeller. By using a parallel calculation technology, numerically simulated was the flow field of the whole machine, including the casing treatment structure and volute housing of the impeller, revealing the mechanism governing the stability enhancement achieved by the casing treatment. The low-energy fluid in the area of the blade tip was sucked into the treatment slot by the casing treatment structure, flowed out of the circumferential slot in the area at the suction surface side inside the blade passage and jetted into the rotor passage, thus eliminating the blockage caused by the low-energy air mass in the area, improving the air flow status at the blade tip of the rotor and delaying stall occurrence. **Key words:** oblique-flow impeller, volute housing, casing treatment, stall, rear-mounted volute, circumferentially slotted casing

线性唯象传热定律下广义不可逆卡诺热机的频率特性 = Frequency Characteristics of a Generalized Irreversible Carnot Heat Engine Under a Linear Phenomenological Heat Transfer Law [刊, 汉] / LIU Xiao-wei, CHEN Lin-gen, SUN Feng-rui (Postgraduate School, Naval Engineering University, Wuhan, China, Post Code: 430033) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(6). — 730 ~ 736

With a generalized irreversible Carnot heat engine serving as an object of study and the heat transfer between the working medium and the heat source being considered as observing the linear phenomenological heat transfer law, studied was the relationship of the heat engine performance and its cycle frequency. Obtained was the relationship among the output power, efficiency, available temperature difference as well as the ratio of heat absorption and release time under the condition different from an internally reversible Carnot heat engine. Through a numerical calculation, an analysis was conducted of the characteristics influencing the heat leakage and internally irreversible properties. It has been found that at any ratio of the cyclic heat absorption and release time, there exists an optimum cyclic frequency for the engine that can maximize its output power. When there is a heat leakage, at any ratio of the cyclic heat absorption and release time, there exists an optimum cyclic frequency, resulting in a maximal cyclic efficiency. **Key words:** finite time thermodynamics, irreversible heat engine, cyclic frequency, linear phenomenological heat transfer law, frequency characteristics

流型对循环流化床径向气体混合影响的试验研究 = Experimental Study of the Influence of Flow Patterns on Radial Gas Mixing in a Circulating Fluidized Bed [刊, 汉] / YANG Jian-hua, QU Wei-dong, QIN Guang-yao (Department of Power Engineering, Zhengzhou College of Electric Power, Zhengzhou, China, Post Code: 450004) // Journal of En-