文章编号:1001-2060(2003)06-0572-05

流道几何参数对低压导向器气动性能的影响

安柏涛1, 王松涛2, 韩万今2, 王仲奇2

(1. 中国科学院 工程热物理研究所,北京 100080; 2. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要采用数值计算方法对某型低压导向器原型和改型进行 了数值模拟,导向器的子午流道具有一个较长的机匣且过渡段 且机匣段具有较大外壁扩张角,气流易在此处分离恶化导向器 叶栅进口流动。数值研究表明:机匣外壁和叶型的优化设计改 善了导向器的气动性能,在计算域初始条件相同的情况下,导向 器能量损失显著降低。

关 键 词: 低压导向器, 数值模拟; 弯扭叶片; 端壁型线; 优化设计

中图分类号: V231.3 文献标识码: A

1 引 言

为了提高涡轮效率,越来越多的三维设计思想被 应用到实际叶轮机械设计中。叶栅流道是由上、下端 壁及叶片构成的三维空间,对导向叶栅而言,能量损失 是流体与端壁和叶片的相互作用产生的,所以如何优 化上、下端壁型线以及叶片形状是控制涡轮三维空间 流动损失的关键。利用叶片成型控制二次流,主要方 法是设计新叶型以及叶片的弯、扭、掠三维成型的合理 匹配等,这方面的研究成果在减少叶栅损失方面取得 了令人满意的进展^[1]。对于端壁形状的研究,也有很 多学者做了有意义的工作^[2~3],Yan 实验了对上端壁采 用各种形式的非轴对称形状端壁⁴。这些实验结果均 说明,流道任一几何参数的优化,都可能降低涡轮损 失。

本文研究的低压导向器其中间机匣较长且外壁扩 张角较大,原设计方案(原型)的流动效率较低。为了 改善原型的气动性能,对其进行了如下改型设计:优化 扩张角外壁型线、改进叶型、叶片采用弯扭成型等。利 用 *N*—*S* 方程求解程序,对比了两种导向器的性能,并 分析了流道几何参数对导向器性能的影响。

2 计算模型及方法

计算模型分为原型和改型两种。原型叶片的几何 参数同文献[5]。改型叶片的几何参数与原型主要不 同之处是:(1)两种导向器上端壁型线不同。改型方案 上端壁型线采用文献[6]推荐的最佳曲线(见图1)。 (2)叶型不同。原型为均匀加载叶型 改型为后部加载 叶型。(3)积叠方法不同。原型为直叶片,改型为正弯 叶片(根部弯曲20°,顶部弯曲8°,中间从上向下用直线 段一直线段一三次曲线过渡),两种导向器叶片如图2 所示。(4)轴向弦长。原型沿叶高方向具有掠设计,改 型沿叶高方向轴向弦长相等。(5)几何进气角。原型 沿叶高方向几何进气角相均为90°,改型沿叶高方向几 何进气角不同且具都有一定负冲角设计,根、中、顶部 几何进气角分别为75.1°、70.8°、79.5°,如图3所示。



图1 上端壁型线

数值计算方法采用具有 TVD 性质的三阶精度 Godunov格式,具体差分格式及方程推导见文献[7],由 于该方法较好的考虑了真实流动的物理特性,所以求 解精度和数值稳定性都较高⁸。计算网格点的布置为 沿流向 91 点 节距方向 48 点 叶高方向 38 点。进口条 件为总温 1 008 ℃ 总压 4.7 个工程大气压。图 4 为低

收稿日期:2003-01-13

基金项目:国家 973 项目基金资助项目(G1999022309)

压导向器的三维计算网格。两种涡轮的计算域初始条 件相同。



图2 导向器叶片

3 计算结果分析

3.1 气动性能比较



图3 子午面

叶栅出口能量损失的大小最能体现出涡轮性能的 优劣。图 5 给出了导向器出口(第 85 站, *x/ B*=1.17) 节距平均总压恢复系数沿叶高的分布。图中坐标 *H* 代 表平均叶高, σ 代表节距平均总压恢复系数。由图可 见 除去 70%~80%一小段叶展之外,改型方案沿整个 叶高总压损失都小于原型 这一点可从图 6 中 S₃ 流面 损失等值线更清楚说明,改型在 2/3 叶高内高损失区 范围非常小,下通道涡几乎紧贴在吸力面上,由下通道 涡引起的高损失区范围明显小于原型。同时近上端壁 处除上通道涡外,已没有高损失区存在,消除了原型在 上端壁附近低能流体的聚集,但上通道涡强度峰值稍 有提高。



图 4 三维计算网络

计算所得两种导向器的总损失分别为:原型 6.62% 改型5.95%,改型相对原型损失减小了10.1%。

3.2 端壁型线的影响

由于子午流道上端壁具有较大的扩张角,沿流向 至进口前缘附近具有很强的逆压梯度,流动在上端壁 已经分离。但两导向器的分离区有所不同,观察图7 发现,原型的分离区具有明显的旋涡结构且分离区较 大,改型的分离区在尺度上较小,分离区内没有明显的 大尺度旋涡,这说明改型方案上端壁的等速度梯度曲 线具有较好的控制气流分离的作用。图8也可看出, 改型在从扩压开始至结束的过程中,上端壁附近沿流 向压力分布的变化比较平稳,而原型压力分布却出现 了大范围的升降起伏,表现出流动不稳定的特点。

两种扩张流动造成的分离区在形式上虽有差别, 但对导向器损失的影响却具有共同点。首先是这两种 分离区都产生很大的分离损失,其次是在导向器进口 形成急剧增厚的边界层,并与叶栅圆柱形前缘相互作 用形成大尺度、强旋的进口马蹄涡系,该涡系在叶栅 进口流道仍遇逆压梯度进一步发展,将会对通道涡的强







出口 S3 面总压损失等值线

图5 出口(流向85站)节距平均的 总压恢复系数沿叶高分布

度和尺度产生重要影响⁹。显然这一影响在原型中要 比在改型中强烈。图 10 中原型上端壁进口前部有一 个大范围低压区,该低压区不仅使上通道涡范围扩大。 而且低压区内的低能流体并未被上通道涡所全部卷 吸,在出口处上端壁附近仍有残留的低能流体。

3.3 叶型的影响

° 574 °

端壁型线优化改善了导向器叶栅的进口流动,但 叶栅流道中的流动损失还存在进一步减小的可能,改 进叶型就是一个比较有效的措施。改型对叶型进行了 重新设计,具体措施如下。

3.3.1 采用后部加载叶型

从图 9 可看到, 改型根部后加载特征明显, 最低压 力点由原型的 73%移至 90%轴向弦长处,扩压段长度 大大小于原型,气流在扩压段未分离(图 10(a)),此外, 改型除在扩压段横向压差较大外,其余部分横向压力 梯度均小于原型,尤其是进口横向压力梯度的减少,有 利于削弱下通道涡的强度。原型中部区损失较大的根 源最主要的还是喉部以后的扩压流动所致。图 9(b)表 明 原型在扩压段的流向逆压梯度较大。与之对应的, 原型在尾缘处有一个范围很大的高压区(见图10(b)), 在其作用下流动将变得很不稳定并导致叶栅出口中部 流动损失的增加。改型采用后部加载叶片以后,扩压 段的扩压过程较平稳,流动损失较小。

3.3.2 加大叶片根部轴向弦长

从子午流道型线看出,下端壁在叶栅进口前一 直是收敛的, 而在接近前缘处流道折转扩张, 图 9 (a)可观察到原型这一小段扩压流动区 $(2\% \sim 10\%)$ 轴向弦长范围)的存在,图 11(a)也反映了这一现



图6

(b)改型







节距平均的 静压回流向分 布

象。1 而改型时后由于在根部加大了轴向弦长。这 Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



图9 叶型表面压力分布



22日 (a) 下端壁

(b)中径

(c)上**端壁**

图 10 上、下端壁及叶展中部静压等值线



(a)下端壁

(b)上端壁

图 11 上、下端壁速度矢量及流线

段扩压区被容纳进叶栅流道中,从而改善了根部进口的流动。

3.3.3 叶片正弯

由于叶片正弯,将形成由两端区指向中部的所 谓"C"型压力分布。由于根部弯角较大,对于根部 损失的减小非常有利。一般认为,正弯叶片虽然能 减少两端区二次流损失,但中部损失会相应增加,但 改型中部损失并未增加,这一点和后部加载叶型的 采用有关。由于后加载叶型中流体沿吸力面几乎全 部为附着流动,由两端迁移至中部的流体大部分被 主流"吸收",故中部损失仍小于原型。同时应看到, 由于顶部正弯,上通道涡损失峰值有少许提高,这是 因为径向压力梯度使上端壁低能流体向下迁移并卷 入上通道涡所致。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.3.4 减小叶片顶部冲角

如何控制顶部大分离区的流动,始终是改型设 计考虑的主要问题。减小气流在叶片顶部的冲角是 削弱顶部分离的有效措施之一。在叶顶附近,原型 几何进气角为90°,对应进气冲角为0°,而改型几何 进气角为75.1°,对应进气冲角为一14.9°,因此改型 在叶顶附近分离区气流的膨胀加剧,从而使分离区 的低能流体更容易加速进入主流区,并随主流一起 向下游发展,吸力面的流动改善。由图11(b)可见, 改型吸力面附近低速区变薄,边界层损失低于原型。 此外,如图10(c)所示,改型流道前部横向压差远小 于原型,减少了分离区流体向吸力面角区的聚集,同 时配合顶部正弯,顶部损失也有较大幅度减少。

4 结 论

首先,改型出口能量损失比原型有较大幅度降 低,气动性能明显改善。其次,对低压导向器通流部 分进行精细化设计,包括选择端壁型线、改进叶型、 叶片弯扭三维成型等,即优化流道几何参数,可使叶 栅流道空间的压力分布更趋合理,并进一步减少流 动损失。本文中子午上端壁等速度梯度曲线、后部 加载叶型以及正弯叶片等几何参数得到了较好匹 配。

参考文献:

- [1] 宋彦萍. 弯扭叶片的主要研究成果及其应用[J]. 热能动力工 程, 1999, 14(81): 159-163.
- [2] A RNO DUDEN. Controlling the secondary flow in a turbine cascade by 3D airfoil design and endwall contouring [R]. ASME Paper, 98–GT -72, 1998.
- [3] A RNO DUDEN. The secondary flow field of a turbine cascade with 3D airfoil design and endwall contouring at off-design Incidence[R]. ASME Paper 99-GT-211, 1999.
- [4] YAN J. Secondary flow reduction in a nozzle guide vane cascade by non-axisymmetric end-wall profiling [R]. ASME Paper, 99—GT— 339, 1999.
- [5] 安柏涛,韩万今,芦文才,等.子午扩压对环形叶栅流道内旋涡 发生和发展的影响[J].航空动力学报,2000,15(4):361-365.
- [6] 安柏涛,韩万金,王松涛,等.大扩张角子午流道型线对损失的 影响[J].推进技术,2000 22(3):332-335.
- [7] 王松涛,袁 宁,王仲奇,等.具有 TVD 性质的三阶精度 GO-DUNOV 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.
- [8] 王松涛, 吴 猛, 王仲奇, 等. 通道涡结构 稳定性对 损失的影响 [J]. 工程热物理学报, 2000 21(4): 425-429.
- [9] HAN WANJIN. Effects of leaning and curving of blades with high turning angles on the aerodynamic characteristics of trubine rectangular cascades[J]. Trans of the ASME Journal of Turbomachinery, 1994, 116: 417-424.

(辉 编辑)

(上接第567页)

参考文献:

- [1] 萧汉才,李 可. 余热发电工程中热力系统方案选择的研究 [J].长沙电力学院学报(自然科学版),2001,**16**(1):1-3.
- [2] 和 平.全国节能计划与基建工作会议在京召开[J].1994(4): 52.
- [3] 叶剑明,陈汝栈.余热发电的经济性分析[J].动力工程,1994,5 (14):1-4.
- [4] YE FEIFAN. Multi-objective optimization of waste heat recovery trubogeberating system[J]. 宁波大学学报, 1996, 9(1): 30-36.
- [5] PYONG SIK PAK, ARMA T. Oposal and characteristics evaluation of a power generation system utilizing waste heat from factories for load leveling[J], Inst Elektra Eng 2000 120(B): 10-28.
- [6] PYONG SIK PAK, SUZUKI Y. KOSUGI T. Evaluation of characteristics and economics of a CO/ sub 2/ — capturing H/sub 2 / O turbine power generation system utilizing waste heat from a garbage incineration plant[J]. Inderscience Enterprises, 1998 11: 1—4.

出版社,1987.

- [8] 王 伟,周 健,蒋建国.城市垃圾焚烧发电系统热平衡分析与 优化方案[J].城市环境与城市生态,2002,15(3):1-3.
- [9] YOUNG J B. An equation of state for steam for turbo machinery and other flow calculations[J]. J Engng Gas Turbine Pow, 1988, 110 (1): 1-7.
- [10] 何勤伟,李真泽,吴协恭. PTA 装置节能[J].聚酯工业,2002, 15(2):1-4.
- [11] 谭天恩,麦本熙,丁惠华.化工原理:上册[M].第2版.北京:
 化学工业出版社,1990.
- [12] LITINETSKIL V V. An algorithm for calculating the thermodynamic properties of stream by computer[J]. Thermal Engineering, 1986 33 (4): 205-208.
- [13] 陈义华. 数学模型[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1994.
- [14] 谭浩强. C 程序设计[M]. 北京:清华大学出版社, 1997.
- [15] 陈明逵, 凌永祥. 计算方法[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
- [16] 冯 霄,李勤凌.化工节能原理与技术[M].北京.化学工业出版社,1998.

[7] ? 李燕生, 陆桂林, 向心透平与离心压缩机[M], 北京: 机械工业 ? 1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net the method under discussion is applicable for the numerical simulation of flows featuring great inverse-pressure gradients. Moreover, it can also be employed to conduct the in-depth research of various complicated three-dimensional flow phenomena in a centrifugal compressor. **Key words:** numerical simulation, $q^{-\omega}$ turbulent flow model, high-resolution scheme, MUSCL TVD scheme, LU-SGS-GE implicit scheme

流道几何参数对低压导向器气动性能的影响 = The Impact of Flow-passage Geometric Parameters on the Aerodynamic Performance of a Low-pressure Guide Vane Assembly [刊,汉] / AN Bai-tao (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080), WANG Shong-tao, HAN Wan-jin, WANG Zhong-qi (Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2003, 18(6). - 572 ~ 576

By using a numerical calculation method a numerical simulation was conducted of a prototype and modified low-pressure guide vane assembly. The meridian flow passage of the latter has a relatively long casing transition section with the casing assuming a rather great outer-wall divergence angle. Gas flow is liable to separate at the outer wall, resulting in a deterioration of the cascade inlet flow of the guide vane assembly. The results of the numerical study indicate that the optimized design of the casing outer wall profile and blade contour has improved the overall aerodynamic performance of the guide vane assembly. In the case of identical calculation-domain initial conditions there is a marked reduction of outlet energy loss of the guide vane assembly. Key words: low-pressure guide vane assembly, numerical simulation, twisted blade, end wall profile, optimized design

CFB锅炉煤成灰特性的 6 参数模型研究= Six-parameter Model Study of Ash Formation Characteristics of Coals in a Circulating Fluidized Bed Boiler [刊,汉] / YANG Hai-rui, LU Jun-fu, XIAO Xian-bin (National Key Laboratory of Clean Coal Combustion Technology under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), M. WIRSUM (Siegen University, Siegen, Germany) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(6). — 577~581

An experimental method involving static combustion and cold state vibration screening is employed to study the ash formation characteristics of several Chinese coal ranks with the ash formation data-base being given for these coals. Through an analysis of the ash formation data-base of different coals it is found that the distribution of ash formation of an arbitrary narrow sieve fraction assumes a bimodal nature, i. e. being composed of relatively fine and soft ash components and relatively coarse and hard ash ones. These two kinds of ash components can simultaneously satisfy a Rosin-Rommler distribution. A six-parameter model has been set up, which can predict the ash mass portion and relevant particle size distribution of each kind of ash components. By the use of a weighting method the ash formation distribution of coal with a wide sieve fraction can be obtained. **Key words:** ash formation characteristics, soft ash, hard ash, Rosin-Rommler distribution, six-parameter model

近红外光谱分析技术预测煤质挥发分含量模型的研究=A Model Study Concerning the Use of Near Infrared Spectral-analysis Technology for Predicting Volatile Content of Coals [刊,汉]/ II Feng-rui, TANG Yu-guo (Changchun Research Institute of Optical Precision Instruments and Physics under the Chinese Academy of Sciences, Changchun, China, Post Code: 130021), XIAO Bao-lan (Department of Thermal Engineering, Jilin University, Changchun, China, Post Code: 130025)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. – 2003, 18(6). – 582~583

A near infrared spectral method is used to conduct the on-line analysis of various kinds of coal with an emphasis on the determination of coal volatile content. On the basis of reading numerous spectrograms and with the use of a multiple regression method for data analysis and processing the authors have set up a multi-linear model. The correlation factor between the model-derived forecast volatile content of coal and the artificially tested standard value is found to be 0.96. The