

加装短叶片离心叶轮的参数优化及实验研究

吕玉坤, 王 建, 张 健, 卢 权

(华北电力大学能源与动力工程学院 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 河北保定 071003)

摘 要: 利用 NUMECA 软件对 G4-73No. 8D 型离心风机进行了叶轮内部流场的三维数值模拟和流动分析, 发现在叶轮出口处存在着明显的射流—尾流结构。为削弱这一结构对风机性能的不良影响, 对风机叶轮进行了加装短叶片的数值模拟, 依据叶轮流场的改善情况, 确定了短叶片的优化参数, 并在此基础上, 进行了风机性能的对比性实验。结果表明, 改进后的风机全压明显提升, 其额定工况下的效率有所提高, 高效区有小幅加宽。

关 键 词: 离心风机; 射流—尾流; 短叶片; 数值模拟; 实验研究

中图分类号: TH432 文献标识码: A

引 言

风机耗电量约占火电机组发电总量的 1.5%~3%, 其运行费用已直接影响到电厂的经济性^[1]。目前离心风机在我国电厂中仍占有较大比例, 且随着除尘、脱硫装置等设备的增加和送风系统的老化, 原有风机已不能满足生产需要, 而更换新的风机将增加设备投资和运行费用。因此, 研究和改造现有离心风机以提高其性能, 对电厂的节能增效具有重要意义。

研究表明^[2~3]: 有限叶片叶轮对流体的做功存在不均匀性, 在叶片非工作面边界层分离严重, 存在明显的射流—尾流结构, 阻碍了流体在叶轮流道内的流动, 恶化了风机性能。在叶轮流道内容易发生边界层分离的部位加装短叶片会对非工作面附近的流体起到加功作用, 可有效地抑制边界层分离现象的发展。

1 叶轮加装短叶片前、后的数值模拟及参数优化

以 G4-73No. 8D 型离心风机为具体研究对象, 利用 NUMECA 软件对加装不同参数短叶片的离心叶

轮流场进行数值模拟研究, 以确定短叶片的优化参数。

1.1 模型建立及网格生成

根据风机样本参数, 在 CAD 软件中, 按照离心风机实际尺寸建立叶轮模型, 通过接口将模型调入前处理模块 IGG 中, 利用专用网格生产器 AUTO-GRID 来生成网格。网格生成质量的好坏, 直接影响到计算的精度、计算时间和收敛性。最终生成的叶轮单通道的网格数约为 70 万个, 图 1 为叶轮单个流道计算区域网格。

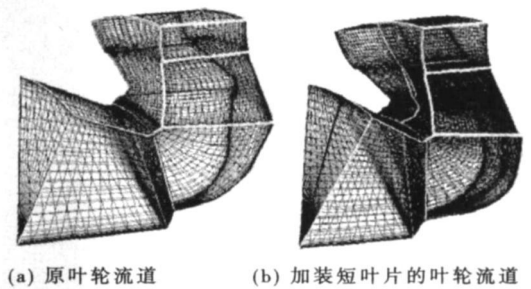


图 1 单通道计算区域网格示意图

1.2 控制方程及边界条件

流体可以看成定常、不可压缩的, 数值模拟采用 NUMECA 的三维雷诺应力平均 Navier-Stokes 方程, 离散格式采用 Jameson 的中心差分格式, 时间推进采用四阶 Runge-Kutta, 湍流粘性选择 Spalart-Allmaras 模型求解。

单个叶轮流道如图 1 所示。叶轮流场由 12 个单通道组成, 它们之间为周期性匹配连接; 叶轮前盘、后盘及叶片表面为固壁边界; 计算区域轴向入口为进口条件, 给定总温、总压和流体参数, 叶轮周向出口为出口条件, 给定背压。计算中, 收敛判据为进出口流量均不再变化且全局残差小于 10^{-5} 。

1.3 数值模拟结果及参数优化

收稿日期: 2007-01-29; 修订日期: 2007-04-16

作者简介: 吕玉坤(1964-), 男, 河北保定人, 华北电力大学副教授。

应用 NUMECA 软件求解离心叶轮内部流场, 计算结果以流场剖面图形式表示。

图2 为原风机叶轮单流道流场剖面图。从图中可以看出, 靠近风机叶片吸力面一侧速度变化剧烈, 边界层分离现象十分明显, 存在较大的射流—尾流结构, 且从整个吸力面一直延伸到压力面附近, 形成了一个三角形区域, 该区域内高速气流大约占据了整个流道宽度的 60%。其原因在于, 叶片压力面比吸力面的压力要高, 所以沿着叶片两个表面产生了二次流。由于产生二次流, 叶片压力面处边界层厚度减小, 而相邻吸力面处增厚, 边界层分离现象严重。在叶片吸力面侧, 由于高速流体和低速流体的相互摩擦, 使得能量损失很大, 使得吸力边流出叶轮的流体质量相对于压力边要少得多, 这个结构增加了流动损失, 对风机的运行十分不利。

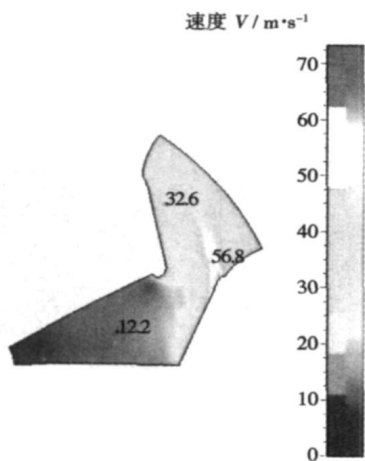


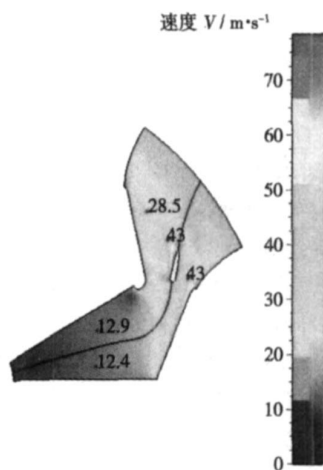
图 2 原风机流道剖面图

在容易发生边界层分离的地方加装短叶片, 使之对吸力面出口附近的流体起到加功作用以抑制脱流的发展; 根据高速流体所形成的近似三角形的涡流区, 短叶片需要尽可能多地破坏这个射流—尾流结构。但叶片数的增加, 会使气流摩擦损失和流道进口处的阻塞作用增大。因此合理确定短叶片的参数, 对改进后风机性能能否提高, 以及提高的水平有着重要影响。

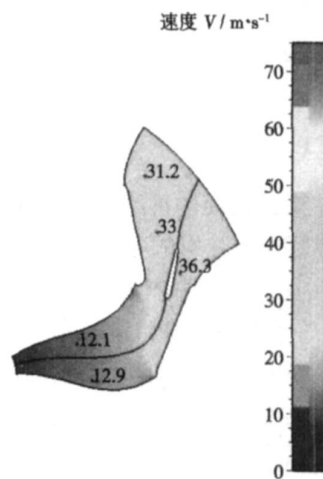
短叶片的参数主要包括短叶片的安装位置和长度, 采用先固定一个参数, 改变另一个参数的办法进行了对比研究, 由于两者方法类似, 因此只以短叶片长度的优化问题为例在某一位置上进行短叶片长度的优化。

短叶片长度采用无量纲的形式表示, 即其与原叶片长度的比值, 记作 $n = L_{短} / L_{原}$, 分别对 n 为

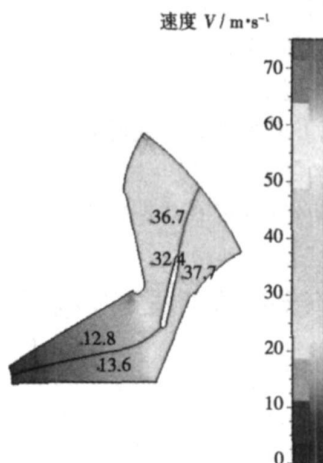
30%、40%、50%、60%和 70% 5 种情况下的流场进行了计算, 沿叶轮周向截取流场剖面图。图 3 仅给出了 n 为 30%、50%和 70%的情况下, 叶轮流场的剖面图。



(a) $n=30\%$ 时叶轮流道剖面



(b) $n=50\%$ 时叶轮流道剖面



(c) $n=70\%$ 时叶轮流道剖面

图 3 加装短叶片后的叶轮流道剖面图

对比图 3(a)、(b)和(c), 可以发现, 加装短叶片后, 流道内的三角形的高速流体团被打碎, 流场情况有所改善, 其中 n 为 50%和 70%时, 流场改善情况相对明显, 流动比较均匀。

为了定量比较风机性能的变化情况, 将 n 分别为不同值时风机在额定工况下的计算全压进行比较并绘制变化曲线, 如图 4 所示。结果表明, n 为 50%时, 风机全压提高明显, 最大约 18%。

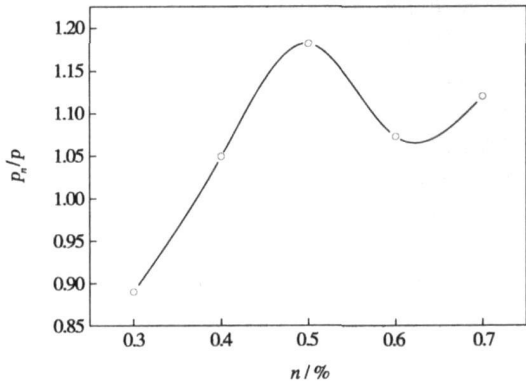


图 4 参数 n 不同情况下的计算相对全压曲线

根据数值模拟的结果, 最终确定在该位置上, 安装的短叶片的优化长度为原叶片长度的 0.5 倍; 然后用相似的方法进行周向安装位置的优化, 最终确定短叶片的安装位置为流道中偏向吸力面 17%处。

2 实验研究

为了验证加装短叶片后风机性能是否有所提高, 对叶轮改进前后的离心风机进行了性能对比实验。

2.1 实验台简介

实验在华北电力大学风机实验台进行, 风机参数如表 1 所示, 实验台及实验设备布置如图 5 所示。

表 1 实验风机参数

流量 / $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	全压 / kPa	转速 / $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	温度 / $^{\circ}\text{C}$
4-73No. 8D 16 156 ~ 30 993	1.400 ~ 2.104	1 450	< 80

2.2 实验结果分析

对所测数据进行处理后, 利用 Origin 6.0 绘制风机的全压及效率曲线, 如图 6(a)和(b)所示。

叶轮改进后, 风机全压在相对流量小于 38%时, 略低于原风机全压, 但不超过 1.4%; 在风机相对流量大于 38%时, 改进后的风机全压大于原风机全压, 平均提高 3.3%, 随着流量的增大, 全压提高的较多, 在风机相对流量超过 100%时, 改进后的风机全压明显大于原风机全压, 最大提高约 11%。数

值模拟的计算全压比实验测量值高出 7%, 这是由于在数值模拟中, 将叶轮的入口集流器与叶轮视为一个整体, 没有考虑间隙泄漏, 同时受条件限制, 所加装的短叶片为气动性较差的直叶片。

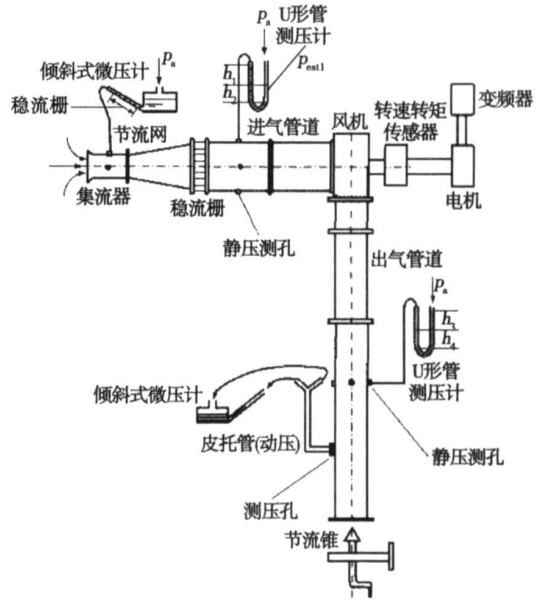
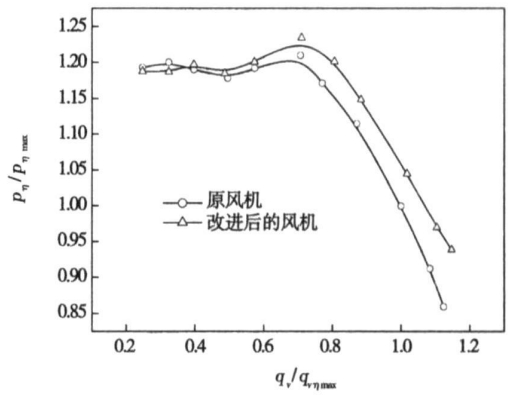
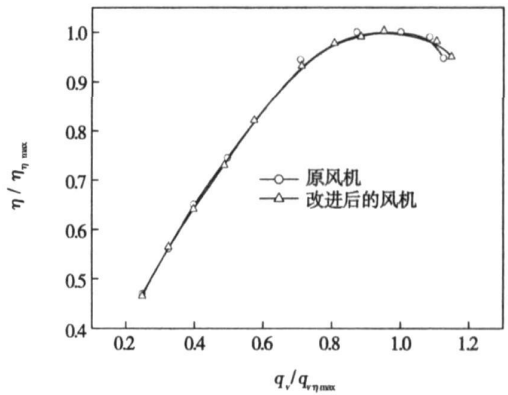


图 5 离心通风机实验台结构布置示意图



(a) 全压曲线



(b) 效率曲线

图 6 风机无因次性能曲线

对比改进前、后的风机全压效率曲线,从整体上看,改进后的全压效率略有增加,高效区有小幅加宽;其中,在风机相对流量低于 95%时,风机改进前后的全压效率基本持平,在风机相对流量超过 95%工况下,全压效率相对于原风机有所提高,最大提高约 1.8%。由于电厂的风机一般要求在较大流量的工况下运行,所以改造方案对于提升风机的全压效率也是有益的。

3 结 语

本文对离心风机叶轮内部流动进行分析。基于 Spalart-Allmaras 湍流模型,利用 NUMECA 软件对叶轮加装短叶片前、后的离心风机进行了数值模拟,确定了小叶片的优化参数,并据此进行了离心风机的改造和性能实验;实验结果表明:当小叶片长度为原风机叶片的 50%时,风机性能改善明显,额定工况

下的全压可提高 18%左右。其额定工况下的效率有所提高,高效区有小幅加宽。

参考文献:

- [1] 黎英,卿钟发. 300 MW 及以上火电机组风机选型与节能分析[J]. 现代节能, 1998, 14(1): 16-19.
- [2] WANG LEQIN, ZHU ZUCHAO. Design and experiment research on low-specific-speed high speed liquid-nitrogen centrifugal pump [J]. Cryogenics, 1998(1): 7-12.
- [3] 罗 晟,蔡兆麟. 变叶片数和长短叶片结构对离心叶轮内三维粘性流场的影响[J]. 风机技术, 2000, 6: 3-6.
- [4] 张 震,王国玉,张晓英,等. 喷水推进器斜流泵级的性能预测研究[J]. 流体机械, 2004, 32(9): 1-3.
- [5] 李春曦,雷 泳,王松岭,等. 离心风机三维流场动力学特征和泄漏损失特性研究[J]. 热能动力工程, 2005, 20(5): 517-520.
- [6] RAFAEL B T, SANDRA V S, JUAN PABLO H C, et al Numerical calculation of pressure fluctuations in the volute of a centrifugal fan [J]. Journal of Fluids Engineering, 2006, 3: 359-369.

(编辑 伟)

新技术、新工艺

汽轮机叶片工作状态的诊断和检查

《ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ》2007 年 7 月号报道,现在汽轮机叶片故障状态的检查都是按照指导性文件“关于在制造、运行和修理过程中,汽轮机工作叶片工作能力评定程序的方法说明”,利用主要的和辅助的检查方法进行的。这时,利用工业用孔探仪、涡流探伤仪、磁力探伤仪以及其它一些手段和目视法检查并确定每个叶片的缺陷。

这是一项很繁重的工作,要求技术人员专门的技能和责任心。此外,实际上所有的检查方法都规定在停机的汽轮机上进行检查—测试工作,这本身也排除了作用在叶片上的固有的动载荷和静载荷,叶片内的缺陷正是在这些载荷的作用下产生和发展的。

简要叙说了汽轮机叶片诊断和检查的各种手段和方法。指出,不接触的 ДФМ(离散相方法)对于工作的汽轮机组叶片应变状态的诊断和检查是很有前途的,它允许确定汽轮机工作轮每个叶片的应变状态。论证了选择并应用具有一个信息外部传感器的离散相方法的依据;确定了在只利用外部传感器的情况下寻找汽轮机叶片故障状态的信息标准;提出了有关根据信息累积的时间确定寻找信息参数概率的计算机模拟的结果;提出并叙述了所制定的汽轮机叶片应变状态检查系统的结构图;提出了用来查明叶片故障状态的全套程序设备的结构图。

(吉桂明 供稿)

a RBF (Radical Based Function) neural network model. The results of comparison show that the calculation model based on the support vector regression is capable of not only accurately calculating the main steam flow rate at different operating conditions, but also adapting itself to the above calculation during a change of the turbine flow path. It also boasts a relatively good generalization ability and stability, and is suitable for on-line calculations, thus meeting the requirements for real-time diagnosis and calculation of the cost-effectiveness of a power plant. **Key words:** main steam flow rate, vector-supported machine, regression, steam turbine, soft-measurement

汽轮机转子二维温度场在线仿真模型建立 = **A Study of the On-line Simulation Model for Two-dimensional Temperature Fields of a Steam Turbine Rotor**[刊, 汉] / LIU Yan-feng, HAO Run-tian, GAO Jian-qiang (College of Energy Source and Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(2). — 127 ~ 130

Under the support of an integrated modular modeling system (IMMS), developed was a general-purpose simulation algorithm based on a finite element model for two-dimensional temperature fields of steam turbine rotors. Furthermore, an on-line simulation model for such fields was also established by using an engineering modular modeling method, thus facilitating the modification of the steam turbine rotor and its meshing geometrical dimensions. A comparison of the simulation test with the two-dimensional analytic results under the same conditions shows that the simulation model thus established enjoys a variety of merits, such as high calculation accuracy and speed as well as great versatility, etc. Meanwhile, the model in question can also be applied for a thermal-state analysis of axially-symmetrical structures with similar boundary conditions. **Key words:** integrated modular modeling, development platform, steam turbine rotor, two-dimensional temperature field, on-line, simulation model

加装短叶片离心叶轮的参数优化及实验研究 = **Parameter Optimization and Experimental Study of a Centrifugal Impeller with Additionally Installed Splitter Blades**[刊, 汉] / LU Yu-kun, WANG Jian, ZHANG Jian, 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. — 2008, 23(2). — 131 ~ 134

Through a three-dimensional numerical simulation and flow analysis of the impeller inner flow fields of a Model G4-73No. 8D centrifugal fan by using software NUMECA, it has been found that there exists a conspicuous jet flow-wake flow configuration at the outlet of the impeller. To mitigate the adverse effect of the above configuration on fan performance, a numerical simulation has been performed of the fan impeller with additionally installed splitter blades. The optimized parameters of the splitter blades have been determined, depending on the flow field improvement inside the impeller. On this basis, a contrast test of the fan performance has been conducted. The results show that the total pressure of the retrofitted fan rises conspicuously with the efficiency at a rated load operating condition being somewhat enhanced and the high-efficiency zone widened by a small margin. **Key words:** centrifugal fan, jet flow-wake flow, short splitter blade, numerical simulation, experimental study

一种离心压缩机叶片优化设计方法 = **A Method for the Optimized Design of Centrifugal Compressor Blades** [刊, 汉] / SHU Xin-wei, GU Chuan-gang, WANG Tong, et al (College of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(2). — 135 ~ 139