

离心风机三维流场动力学特征和泄漏损失特性研究

李春曦, 雷 泳, 王松岭, 吕玉坤

(华北电力大学 动力工程系, 河北 保定 071003)

摘 要: 研究离心式风机内部结构, 提高其工作效率, 对火电厂的节能增效具有重要意义。基于标准 $k-\epsilon$ 紊流模型, 利用 Fluent 对 G4-73No. 8D 型离心式风机以及在分别加装 A 型、B 型防涡圈后的风机内部三维流场进行数值模拟和分析。对风机内部流场动力学特征和间隙泄漏的研究表明, 与未加防涡圈的风机相比, 加装防涡圈后的风机, 流场趋于均匀, 大尺度旋涡得到有效破碎, 泄漏损失大大减少; 而且, 在破碎大尺度旋涡和减少泄漏损失方面, B 型防涡圈明显优于 A 型防涡圈。研究结果可为风机的节能改造提供理论依据。

关 键 词: 离心通风机; 流场; 防涡圈; 泄漏损失; 数值模拟
中图分类号: TH4, O355 文献标识码: A

1 前 言

在火力发电厂中风机的耗电量约占发电机组发电量的 1.5%~3%, 是仅次于泵的耗电大户。其中, 离心式风机占有较大比例, 因此, 研究和改进离心式风机, 提高其工作效率, 对火电厂的节能增效有着重要意义^[1]。

在离心式叶轮机械中, 叶轮曲率半径大, 哥氏力、离心力、横向压力及粘性等因素相互作用, 叶轮和蜗壳内的流动情况十分复杂。目前, 国内外对离心式风机的研究大多集中于叶轮和蜗壳的结构和流场特性, 而对进气口、机壳和叶轮前盘三者之间的三维空间区域的流场关注不多^[2]。实际上, 这部分空间区域内旋涡造成的速度场和压力场的变化将直接影响到泄漏流量的大小, 进而影响到风机的整机效率。如图 1 所示, 从叶轮出口流出的气流中的一部分会在进气口、机壳和叶轮前盘三者之间的空间区域形成旋涡, 并会通过叶轮进口与进气口之间的间隙流回到叶轮进口的低压区, 这就形成了风机的泄漏损失(容积损失)。在离心式通风机中, 进气口和叶轮进口间存在的泄漏损失以及进气口和机壳间存

在的旋涡是导致风机效率降低和噪声产生的主要原因之一。试验表明: 径向间隙 δ_r 与叶轮直径 D_2 的比值 δ_r/D_2 从 0.5% 减小到 0.05%, 可使效率提高 3%~4%, 通常间隙约为 $(0.01 \sim 0.005)D_2$ ^[1]。但一般的离心式风机的径向间隙已经达到保证叶轮正常安装、旋转所要求的最小值。

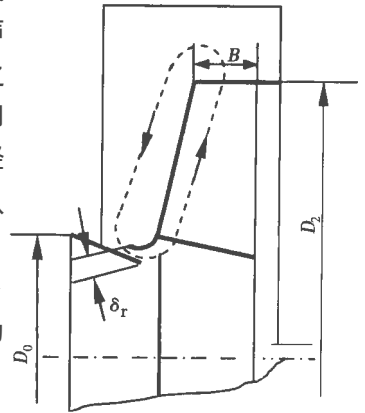


图 1 泄漏损失示意图

为减少泄漏损失, 提高风机效率并降低噪声, 只能考虑其它途径^[3]。本文尝试通过在风机进气口、机壳和叶轮前盘间的空间区域加装防涡圈来减少泄漏损失。基于上述思想, 采用 Fluent 对风机在未加装防涡圈和加装不同型式防涡圈后的三维流场进行数值模拟, 并对流体动力学特征和泄漏损失情况进行分析, 为风机的节能改造提供理论依据。

2 计算模型的建立

2.1 模型确立和网格划分

确立 G4-73No. 8D 型离心式风机为研究对象。G4-73 型系列离心风机是广泛应用于 200 MW 及 300 MW 火力发电机组的锅炉送、引风机, 因此对其进行研究具有广泛的现实意义和实际工程应用价值。

采用 Fluent 对通风机内部三维流场进行数值模拟, 计算区域由叶轮、蜗壳和进气口组成, 风机结构参数取自风机产品样本^[4]。用前置处理器 Gambit 建模并

在其中生成计算网格,因几何模型的复杂性,网格划分采用三维非结构化网格。相对于结构化网格,非结构化网格计算过程比较复杂,但局部加密比较容易,对不规则空间适应能力较强,易于显示流场的细微结构。共生成网格单元约 130 万个,如图 2 所示。

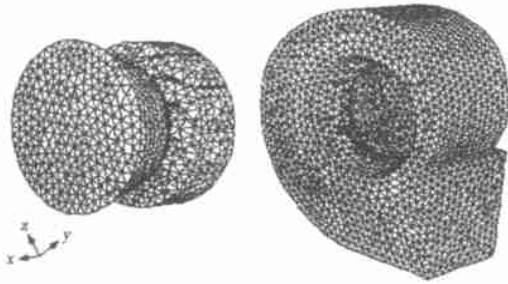


图 2 计算网格模型图

2.2 控制方程

工程实际中,流体基本处于紊流状态,因此控制方程采用标准 $k-\epsilon$ 紊流模型:

$$\rho \frac{\partial K}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial K}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \epsilon \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \right] + \frac{c_1 \epsilon}{K} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - c_2 \rho \frac{\epsilon^2}{K} \quad (2)$$

湍流粘度为:

$$\mu_t = c_\mu \rho K^2 / \epsilon \quad (3)$$

式中: $c_\mu = 0.09$, $c_1 = 1.44$, $c_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$ ^[5]

2.3 边界条件

假定风机在额定工况下稳定运行,环境压力为 1 个大气压,空气密度 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ 。气流作不可压缩稳定流动,计算中忽略重力对流场的影响。

气流进口:以体积流量作为入流条件,进口压力为大气压。

气流出口:出口速度按体积流量计算。

蜗壳内壁及叶轮壁面粗糙度均采用默认值 0.5。

2.4 计算模型的设定

风机模型包含旋转的动边界和静止的静边界,因此将整个计算域划分成定子和转子两个子区域。旋转叶轮和静止蜗壳之间的耦合采用多参考坐标系模型(简称 MRF)。其原理是将风道内流场计算简

化为叶轮在某一位置的瞬时流场,采用稳态方法计算非稳态问题。转子区域的网格在计算时保持静止,在惯性坐标系中以作用的哥氏力和离心力进行定常计算;而定子区域是在惯性坐标系里进行定常计算。在两子区域的交界面处互换惯性坐标系下的流体参数,保证交界面的连续性。

在旋转坐标系中,运动方程如下:

$$\frac{\partial \vec{v}_r}{\partial t} + \vec{v}_r \cdot \nabla \vec{v}_r + 2\Omega \times \vec{v}_r + \Omega \times (\Omega \times \vec{r}) + \frac{\partial \Omega}{\partial t} \times \vec{r} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \vec{\tau} + \vec{f} \quad (4)$$

式中: \vec{v}_r —相对速度矢量; Ω —旋转坐标系的旋转角速度; \vec{r} —质点在旋转坐标系中的矢量; $\vec{\tau}$ —粘性应力张量; ρ —流体密度; \vec{f} —单位质量力。

交界面处交换的数据主要为速度矢量,两侧速度设定为连续。在旋转坐标系中,绝对速度为:

$$\vec{v} = \vec{v}_r + \Omega \times \vec{r} + \vec{v}_i \quad (5)$$

其中: \vec{v} —绝对速度; \vec{v}_i —旋转坐标系的平动速度,本文中, $\vec{v}_i = 0$ 。计算过程中,将旋转坐标系里的相对速度转换为惯性坐标系里的绝对速度,在交界面上计算得到的速度可直接应用于另一子区域的速度边界条件。

3 计算结果及分析

利用 Fluent 对未加装防涡圈和加装不同型式防涡圈的风机模型分别进行了数值模拟,计算过程采用 3-D SIMPLE 方法,一阶迎风差分格式,收敛以所有变量的残差绝对值小于 10^{-3} 作为判据。由于风机内部结构和流场的复杂性,在引入混合面模型的时候,计算过程不易稳定,有时会产生强烈震荡,通过适当调整混和面模型的欠松弛因子可解决收敛问题,经过约 600 次的迭代达到收敛。计算结果以流场轴向剖面图表示。

3.1 未加防涡圈的流场动力学特性

图 2 为未加装防涡圈的风机,其流场动力学特征如图 3 所示。由图可知,在进气口、机壳和叶轮前盘之间的空间区域存在明显的旋涡流动,这种流动自叶轮出口开始到叶轮与进气口之间间隙流出经历了一个产生、发展和耗散的演变过程,并且可清楚地看到叶轮出口存在尾流—射流痕迹。

模拟结果表明,在叶轮出口和机壳形成的空间的不同位置,存在不同尺度和不同旋转强度的旋涡。不同的旋涡对消耗能量、降低效率和产生噪声的影

响也有所不同, 尺度和旋转强度相对较大的旋涡的影响则更为明显。显然, 如果能减小旋涡的尺度并降低其旋转强度, 势必会改善内部流场, 从而达到减小泄漏损失和提高风机效率的目的。

受风机制造工艺和安全性能的要求, 不可能完全消除旋涡。但是, 如果能消除或减小部分大尺度的旋涡, 可有效提高风机效率。由

图 3 可见, 大尺度旋涡主要存在于进气口和叶轮前盘及机壳形成的三角区域。如能在该区域内加装防涡圈, 势必会改善风机内部的流场动力学特性, 并对此区域的旋涡产生破碎作用, 减小旋涡尺度, 降低旋转强度, 从而减小进气口与叶轮进口的气流泄漏速度和泄漏量, 提高容积效率。

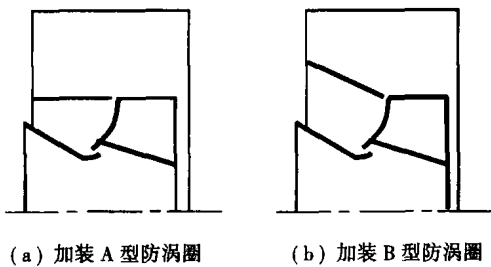


图 4 加装防涡圈的风机结构简图

3.2 加装防涡圈后的流场动力学特性

设计了两种不同类型的防涡圈, 加装防涡圈后的风机结构如图 4 所示。其中, A 型防涡圈为圆筒型, 其母线与机壳垂直; B 型防涡圈为圆锥筒型, 其母线与机壳成 60° 角。将以上两种加装 A、B 型防涡圈的风机在 Gambit 里建好模型, 并重新划分网格, 然后代入 Fluent 进行计算, 边界条件与未加防涡圈的风机模型完全相同。流场轴向剖面图如图 5 所

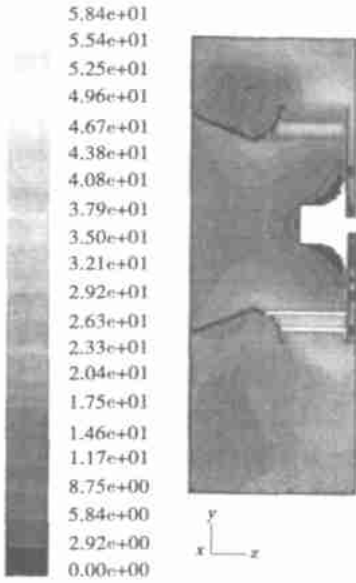


图 3 风机轴向流场速度剖面图(未加装防涡圈)

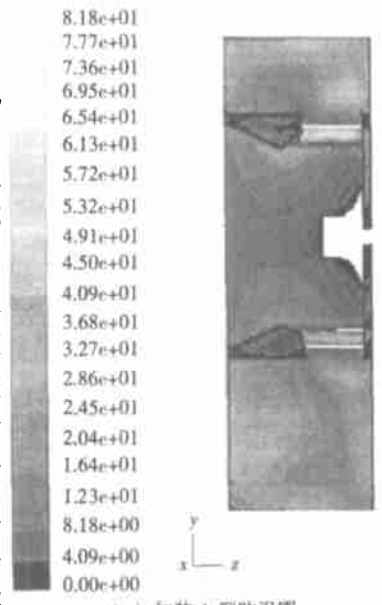
示。

图 5 表明, 与未加防涡圈的风机内部流场相比, 加装 A 型和 B 型防涡圈后, 其内部流场的均匀性明显得到改善, 大尺度旋涡明显得到破碎, 气体流动比较均匀, 而且, 叶轮出口处的射流所形成的旋涡尺度也有所减小, 尤其在风机的下部表现得更为突出。

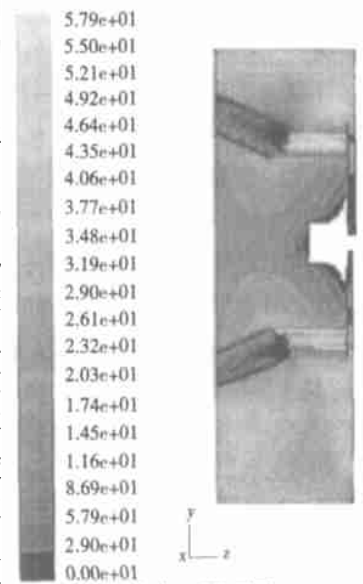
另外, 对于加装 A 型防涡圈的风机, 在进气口、机壳和叶轮前盘三者之间的空间区域仍存在较弱的流场不均匀现象, 旋转强度较大, 而对加装 B 型防涡圈的风机, 在上述区域几乎不存在这种现象, 旋转强度较小。这说明在破碎大尺度旋涡和降低旋转强度方面, B 型防涡圈优于 A 型防涡圈, 对于改善风机内部流场具有更好的效果。

3.3 加装防涡圈后的泄漏损失分析

比较图 3 和图 5 可知, 加装防涡圈后, 由于间隙两侧的压差变小, 间隙内的速度大大降低, 从而通过间隙回流到叶轮的气流量有效地减少。为定量比较加装防涡圈前后的泄漏损失, 将以上的 3 种风机模型, 在体积流量分别为 269.27、304.07、340.7、375.5、410.3 和 445.1 m^3/min 等 6 个工况进行计算,



(a) 加装 A 型防涡圈



(b) 加装 B 型防涡圈

图 5 加装防涡圈后的风机轴向速度流场剖面图

得出间隙泄漏量与流量的关系曲线,如图6所示。

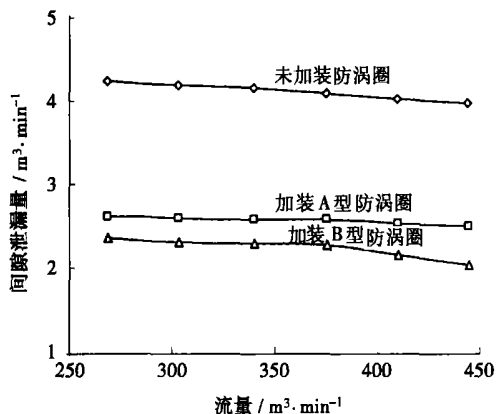


图6 加装防涡圈前后的风机流量与间隙泄漏量的关系

图6表明,在未加装防涡圈,加装A型防涡圈和加装B型防涡圈3种情况下风机的间隙泄漏量均随流量增加而逐渐降低,这是由风机本身的性能曲线决定。随流量的增加,气体获得的全压逐渐减小。风机全压的降低使得间隙两侧的压强差变小,因而泄漏损失量也将减小。

由图可知,加装防涡圈后,风机的泄漏损失明显下降。以未加装防涡圈的风机泄漏量为基准,加装A型防涡圈的风机,其泄漏量减少了37.1%~38.3%,平均减少37.6%;加装B型防涡圈的风机,其泄漏量减少44.4%~48.7%,平均减少45.6%。

这说明加装防涡圈改善了风机内部流场,极大地减少了风机泄漏量,也将会提高风机效率。

B型防涡圈在制造工艺和保证风机安全运行方面,与A型防涡圈大体相同,若以A型防涡圈的泄漏量为基准,加装B型防涡圈的风机泄漏量减少了9.96%~18.5%,平均减少12.9%,降低泄漏损失的效果仍十分显著。

4 结 论

基于标准 $k-\epsilon$ 紊流模型,利用 Fluent 对未加装防涡圈和加装A型、B型防涡圈的风机内部三维流场动力学特性和泄漏损失进行了数值模拟。研究表明:与未加防涡圈的风机相比,在加防涡圈后的风机,其内部流场更均匀化、大尺度旋涡得到有效破碎,旋涡旋转强度明显降低,同时泄漏损失也大大减少。而且,在保证风机安全运行和不增加制造工艺难度的基础上,B型防涡圈的节能效果优于A型防涡圈。本文的数值计算结果可为风机的节能改造提供理论依据。

参考文献:

- [1] 安连锁. 泵与风机[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [2] 李新宏, 何慧伟, 宫武旗, 等. 离心通风机整机定常流动数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(4): 453-456.
- [3] 聂能光, 李福忠. 风机节能与降噪[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [4] 机械工业部编. 风机产品样本[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [5] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.

LM2500 燃气轮机将装机韩国的宙斯盾驱逐舰

据《Gas Turbine World》2005年3月号报道,韩国三星重工已订购美国GE公司功率为22MW的12台LM2500船用燃气轮机,用于驱动韩国海军的下一代KDX三型驱逐舰。

韩国现代和或大宇造船厂将建造总计三艘的该型驱逐舰。每艘驱逐舰将使用4台LM2500发动机,总的输出功率约为88MW。

提供的LM2500推进发动机将包括GE公司最新的集成控制系统,为发动机在高输出功率下运行提供良好的控制。

KDX三型驱逐舰的排水量约为7000t,类似于美国的阿利·伯克级导弹驱逐舰,KDX三型舰也将装有宙斯盾作战系统。该级舰建成后,将成为韩国海军最先进的导弹驱逐舰。该级舰的首舰将于2008年进行海上试验。

(吉桂明 供稿)

cussed. A study has revealed that the lowering of semicoke reactivity is mainly due to the semicoke crystal-lattice growth and the gradual disappearance of catalytic action of minerals during the pyrolysis process. At a temperature lower than 900 °C during the further pyrolysis of the semicoke formed by raw coal being deprived of a majority of volatile matter the crystal-lattice growth phenomenon is not very significant. However, there emerged a marked reduction of reactivity, which is mainly related to the loss of activity of minerals in coal during the pyrolysis process. **Key words:** semicoke, pyrolysis, combustion reactivity, crystal-lattice growth, catalytic action of minerals

不同粒径煤粉燃烧后一次颗粒物的特性研究 = **A Study of the Characteristics of Primary Particulate Matter after the Combustion of Pulverized Coal of Different Particulate Diameters** [刊, 汉] / LU Jian-yi, LI Ding-kai (Key Laboratory for Thermal Energy Sciences and Power Engineering under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(5). — 513 ~ 516

A sedimentation furnace was employed as a combustion device to study the characteristics of primary particulate matter formed after the burning of pulverized coal of different particulate diameters. Under an oxidizing atmosphere at 1100 °C pulverized coal of different particulate diameters was burned. With the help of an Andersen particulate striking device the particulate samples were separated and collected after combustion. It can be shown that the combustion of pulverized coal of relatively small particulate diameter can yield a greater quantity of fine particulates and produce a vast amount of sub-micron particulates. An analysis has revealed that this is caused by the different approaches whereby the particulate matter was produced. The results of the scanning of samples by an electronic microscope indicates that after the combustion of pulverized coal of two different particulate diameters the resulting products of approximately equal size may assume different appearances. Through an analysis the process of the formation of particulate matter following the burning of pulverized coal of two different particulate diameters was revealed. By utilizing the results thus obtained the authors have come up with a concept of environment-compatible pulverized coal fineness. **Key words:** pulverized coal combustion, sampling, particulate matter, formation mechanism, pulverized coal fineness

离心风机三维流场动力学特征和泄漏损失特性研究 = **A Study on the Dynamics Characteristics of the Three-dimensional Flow Field and the Leakage Loss Features of a Centrifugal Fan** [刊, 汉] / LI Chun-xi, LEI Yong, WANG Song-ling, et al (Department of Power Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(5). — 517 ~ 520

The study of the internal structure of a centrifugal fan to raise its operating efficiency is of major significance for achieving energy savings and cost-effectiveness enhancement at a thermal power plant. On the basis of a standard $k-\epsilon$ turbulent model and by using software Fluent a numerical simulation and analysis was conducted of the three-dimensional flow field in a model G4-73 No. 8D centrifugal fan as well as in fans fitted respectively with vortex-prevention rings of type A and B. A study of the dynamics characteristics of the internal flow field and the clearance leakage of the fans indicate that compared with fans not being fitted with a vortex-prevention ring the flow field of fans additionally fitted with a vortex-prevention ring tends to be more uniform. With the effective crushing of large-sized vortexes the leakage loss has been drastically reduced. Moreover, in respect of large-sized vortex breakdown and the reduction of leakage losses the vortex-prevention ring of type B is markedly superior to that of type A. The research findings can serve as a theoretical basis for the energy savings-related modification of fans. **Key words:** centrifugal fan, flow field, vortex-prevention ring, leakage loss, numerical simulation

天然气炭黑燃烧特性的热天平研究 = **Thermogravimetric Study of the Combustion Characteristics of Natural-gas Soot** [刊, 汉] / XIE Guang-lu, FAN Wei-dong, XU Bin, et al (Institute of Mechanical & Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(5). — 521 ~ 526

By using a thermogravimetric analytical balance a study was conducted of the combustion performance of the soot obtained