

# 重载机车轴流冷却风机流场及失速特性的研究

李一明<sup>1</sup>, 张路宁<sup>2</sup>, 郭小亮<sup>3</sup>, 李宝宽<sup>1</sup>

(1. 东北大学材料与冶金学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 沈阳理工大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110159;  
3. 沈阳鼓风机通风设备有限责任公司, 辽宁沈阳 110021)

**摘 要:** 针对重载机车轴流冷却风机运行条件多变、容易发生失速的现象, 建立了一种三维数学模型来研究轴流通风机的气动性能, 预测失速点. 基于 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型, 在旋转坐标系下采用 SIMPLE 算法求解压力速度耦合方程. 计算了不同工况下风机的性能参数, 绘制特性曲线, 分析了内部流动规律和失速特性. 结果表明: 风机特性曲线存在不稳定工况区, 在小流量范围存在一个拐点; 失速工况下叶轮处静压最小值远高于工作点, 并且叶片静压梯度下降明显; 风机失速时流线弯曲严重, 尾部漩涡区延长; 可以预测失速点在流量系数为 0.201 处.

**关键词:** 轴流通风机; 流场; 失速点; 失速特性; 数值模拟

中图分类号: TF 777 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2015)02-0227-05

## Fluid Flow Field and Stall Behavior of an Axial-Flow Fan in the Heavy-Duty Locomotive

LI Yi-ming<sup>1</sup>, ZHANG Lu-ning<sup>2</sup>, GUO Xiao-liang<sup>3</sup>, LI Bao-kuan<sup>1</sup>

(1. School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China; 3. Shenyang Blower Ventilation Co., Ltd., Shenyang 110021, China. Corresponding author: LI Bao-kuan, professor, E-mail: libk@smm.neu.edu.cn)

**Abstract:** Aiming at the stall of axial-flow fan happened regularly in the heavy-duty locomotive, a three-dimensional numerical model was built to study the aerodynamic performance of the axial-flow fan and predict the stall point. The coupling equations of pressure and velocities were solved with the SIMPLE algorithm, and the RNG  $k-\varepsilon$  turbulence model was also applied to this simulation. The performance parameters under several different conditions were calculated, and the fan characteristic curves were drawn. Furthermore, the internal flow rules and stall behavior of axial-flow fan were analyzed. The results indicated that the fan characteristic curves show an unstable operation region, in which the inflection point exists. Compared with the working condition, the minimum value of static pressure in the impeller area is higher, and the static pressure gradient of the blades significantly drops under the stall condition. When the stall occurs, the curvature of streamline tends to be severe, and the whirlpool zone extends at the tail. Based on the results, the stall point is predicted when the flow coefficient value is 0.201.

**Key words:** axial-flow fan; flow field; stall point; stall behavior; numerical simulation

重载机车在夏季模式运行时空气污物很容易堆积在冷却塔散热器芯体表面和夹层中, 运行环境和工况的变化将引起冷却风机流量和压力的变化, 有可能导致风机进入不稳定的工作状态, 发生失速和喘振<sup>[1-2]</sup>. 在大多数风机设计中, 人们仅关

心主要工况区的性能参数<sup>[3]</sup>, 如果能够在设计时分析风机的内部流动特征, 准确预测风机的运行状态和失速点, 对于冷却风机的有效工作和重载机车的安全运行是非常有益的<sup>[4-5]</sup>.

Bianchi 等<sup>[6]</sup>研究了低速轴流通风机旋转失

速的测量系统和测量方法,但没有研究失速的发生条件. Adamczyk 等<sup>[7]</sup>研究了叶顶间隙对风机失速的影响,但在失速特征方面具有一定的局限性. Julian 等<sup>[8]</sup>研究了通风机失速的监控方法, Choi 等<sup>[9-10]</sup>研究了失速起始和失速恢复的捕获方法,但他们没有进行失速预测研究. Mccaughan 等<sup>[11]</sup>研究了风机喘振和失速规律,但没有详细描述失速下的流场特性. 对失速点的预测和失速工况下的流场特性还需要进一步的研究.

本文利用数学模型计算重载机车轴流冷却风机不同工况点的流量、压力、轴功率、效率等性能参数,得到风机的特性曲线并预测失速点,通过分析工作点和失速点两种不同工况下的内部流动特征,研究内部速度场、压力分布规律,准确预测风机的失速点,为风机设计与优化提供理论支持.

## 1 重载机车冷却风机结构

本文研究对象为某风机企业设计的轴流通风机,其直径为 0.868 m,总长 0.956 m,设计工作点为体积流量 12 m<sup>3</sup>/s 时风机静压要达到 1 600 Pa. 重载机车对冷却塔冷却风机的要求十分苛刻,既受到尺寸、质量、电机功率的约束,又要保证足够的工作能力和较高的效率;为此,在叶轮前后分别设计前导叶和后导叶. 在数值计算中,为了减少进口及出口位置对叶轮内部流态的影响,将风机模型进出口分别连接 3.5 m 的管道进口和 5.4 m 的管道出口.

## 2 数学模型

### 2.1 网格模型

由于叶轮叶片形状复杂,求解区域的局部形状变化较大,因此叶轮部分采用四面体网格进行划分. 模型总体网格数达到 148 万,其中细化的叶轮部分网格数为 59 万. 经过网格无关性检验,已经达到足够的计算精度. 图 1 为网格模型.

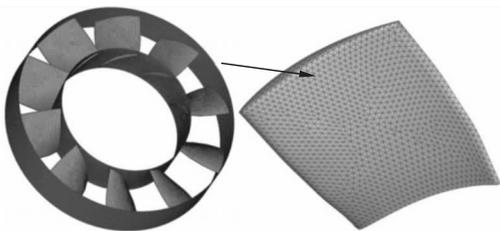


图 1 轴流通风机模型网格  
Fig. 1 Mesh of the axial-flow fan

### 2.2 控制方程及计算模型

当气体在没有热交换条件下作低速流动时,如果马赫数  $< 0.3$ ,气体密度相对变化值约小于 3%<sup>[12]</sup>. 为了简化计算,假定风机产生的气流是稳定、黏性、不可压缩的,并忽略气流质量力的作用.

在旋转坐标系模型 (MRF) 下离散方程采用压力速度耦合的 SIMPLE 算法求解. 轴流通风机内部流场是典型的高雷诺数湍流流动. 对风机的数值计算必须考虑湍流漩涡、强流线弯曲和旋转,使用 RNG  $k-\varepsilon$  模型修正湍流黏度,可以大大提高计算精度. 此外, RNG 理论为湍流 Prandtl 数提供了一个解析公式.

忽略重力体积力、外部体积力以及源项,得到质量守恒方程和动量守恒方程如式(1),式(2).

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - [2\omega \times W + \omega \times (\omega \times R)]. \quad (2)$$

式中:  $-2\omega \times W$  为科氏力;  $-\omega \times (\omega \times R)$  为离心力.

忽略由浮力产生的湍流动能  $G_b$  和由可压缩湍流扩散产生的波动  $Y_m$ , 得到的湍动能方程和湍动能扩散率方程如下:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon. \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (4)$$

根据 RNG 理论,  $C_{1\varepsilon} = 1.42$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.68$ .

经过漩涡影响修正的湍流黏度:

$$\mu_t = \mu_{t0} f(\alpha_s, \Omega, \frac{k}{\varepsilon}). \quad (5)$$

湍流 Prandtl 数  $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.393$ .

### 2.3 边界条件

气流入口为速度入口边界条件,气流出口采用压力出口边界条件,定义出口相对大气压力为 0. 风道内壁、轮毂、支撑及叶片表面均取为不滑移固壁边界条件. 叶轮流体区域移动类型为 MRF, 转速为 187 rad/s.

## 3 结果与讨论

### 3.1 试验验证

本文冷却塔风机试验依据《工业通风机 用标准化风道进行性能试验》,采用 B 型试验管道,用皮托静压管测定流量.

图 2 所示为轴流通风机无因次、有因次特性曲线。从图中可以看出，标准  $k-\varepsilon$  模型无法准确反映风机性能，而考虑湍流漩涡的 RNG  $k-\varepsilon$  模

型则可以较为准确地预测风机性能曲线。除了效率曲线，其与试验结果的偏差不超过 10%，效率曲线的偏差主要由扭矩的模拟误差引起。

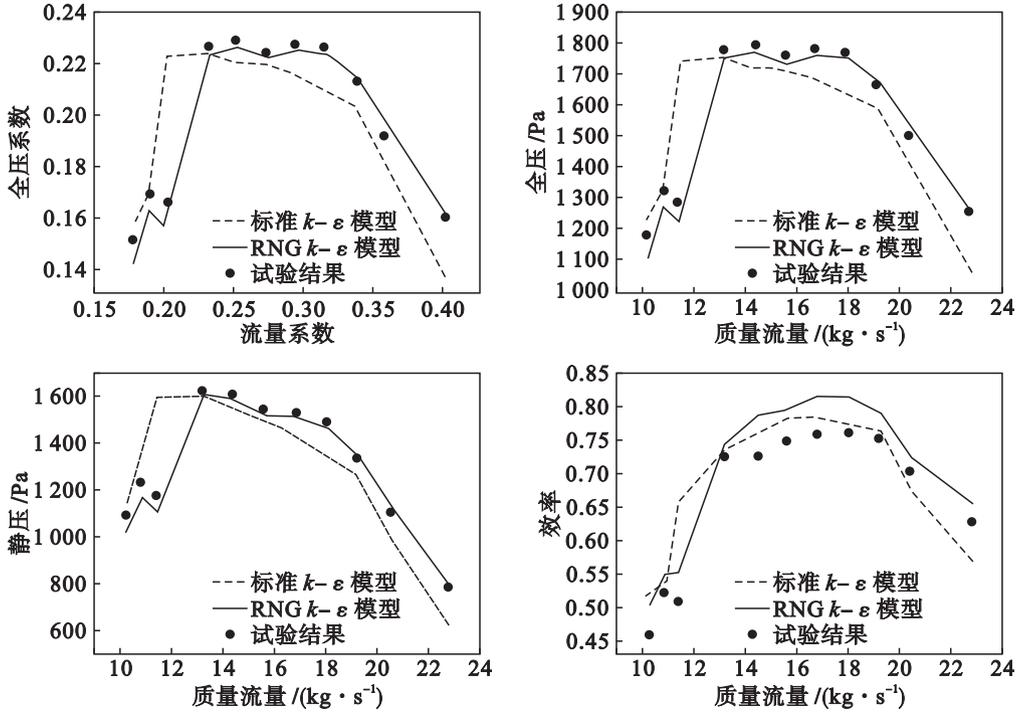


图 2 轴流通风机特性曲线  
Fig. 2 Characteristic curves of the axial-flow fan

在一定转速下，风机的效率随着风量的改变而变化，随着流量的增加呈现先上升再下降的趋势；流量较小时风压和效率变化较大，存在不稳定工况区；压力特性曲线有马鞍形驼峰存在，符合发生失速和喘振的一般条件。从图中可看出全压性能曲线在质量流量为 11.4 kg/s（流量系数为 0.201，全压系数 0.157）处有一个拐点，此处压力下降明显，效率也略有下降，所以此处可能是风机的失速点。

### 3.2 整机静压分布

图 3 示出了风机在工作点和失速点两种工况下子午面  $Y=0$  与  $Z=0$  的静压分布，风机后导叶

叶片数为奇数，所以切割截面时容易出现不对称的现象。图中静压值为相对压力，箭头方向所示为气流方向。叶轮做功作用使机械能转化为气体的动能和压能，由于动静压相互转化和流动损失的作用，静压总体沿气流方向呈先减小后增大的趋势，符合轴流通风机的一般气动性能规律。在叶轮进口处静压达到最小值，但失速点的静压最小值要远高于工作点，并且发生失速后静压最小处更靠近叶轮方向。在失速工况下，静子和转子之间湍流漩涡严重，同时气体流出后导叶后静压尾迹相对较短。

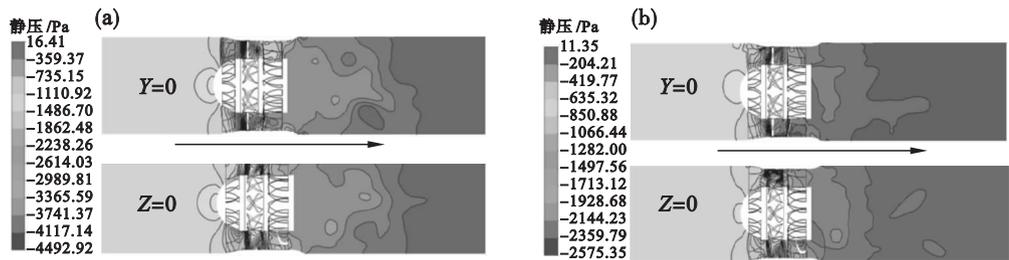


图 3 子午面上的静压分布  
Fig. 3 Distribution of static pressure on meridian plane  
(a) — 工作点；(b) — 失速点。

### 3.3 叶轮静压分布

图 4 所示为工作点和失速点下叶轮和叶片的静压分布. 从气体流入方向看, 叶轮沿顺时针方向转动. 叶轮高速旋转使得处于迎风面的气体受挤压而静压增加, 背风面静压降低, 叶栅受压差作用. 但叶栅受轴承限制不能向前移动, 于是叶片迎

风面的高压气流由叶道流出. 同时背风面低压区使外部气体不断被吸入, 从而形成穿过叶栅的连续气流. 在失速工况下, 叶轮涡流损失显著增加, 流线发生强烈扭曲, 叶片上的静压梯度下降明显, 引起根部失速和尖区分离, 做功能力下降.

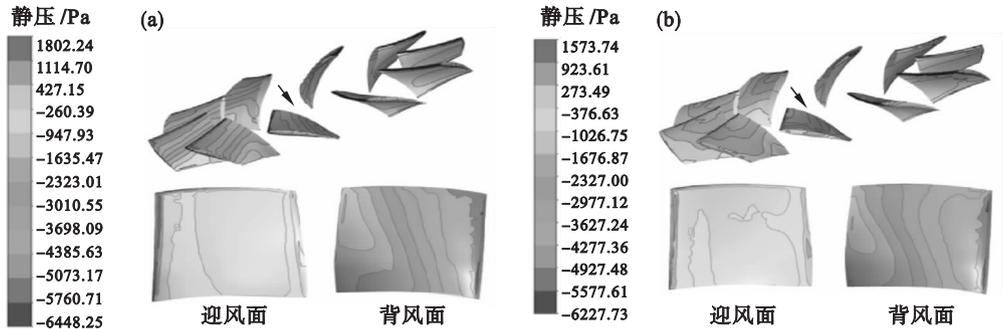


图 4 叶轮和叶片的静压分布

Fig. 4 Distribution of static pressure on wheel/blade

(a)—工作点; (b)—失速点.

### 3.4 整机速度场

图 5 所示为子午面上的速度场. 气体经过前导叶导流进入叶轮, 叶片对气体做功, 气流的流速达到最高; 经过后导叶作用使周向速度转化为轴向速度, 最后由扩散器完成减速增压过程. 相比于

工作点, 失速点的前导叶速度亏损较大, 静子的失速特征要比转子明显. 在失速工况下, 气体离开翼背后发生涡流, 在风机尾部流线弯曲严重, 形成强烈的漩涡, 导致涡流尾迹低速区延长.

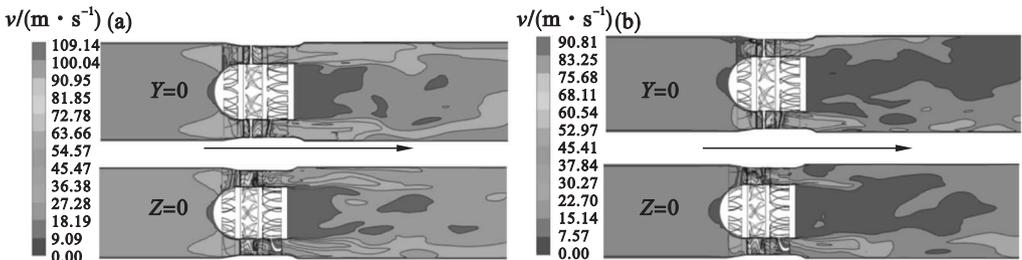


图 5 子午面上的速度场

Fig. 5 Velocity profile of meridional plane

(a)—工作点; (b)—失速点.

### 3.5 失速点

从风机性能曲线可以看到在小流量区压力和效率大幅下降并存在一个拐点, 分析表明拐点处可能是风机的失速点. 通过对工作点和失速点两种工况下内部流动特性的研究, 可知失速点的流场和压力分布体现了风机的失速特征, 因此可以预测流量系数为 0.201 处是该风机的失速点. 在数值计算中, 由于发生失速等现象, 在小流量区域数值模拟计算不易收敛, 这也验证了轴流通风机的失速. 风机在正常运行时, 尽量避开小流量区, 当运行环境变化导致流量系数进入 0.199 到 0.203 范围时, 应该及时采取控制措施, 防止风机发生失速和喘振等事故.

## 4 结 论

1) 风机特性曲线存在不稳定工况区, 在小流量范围有一个拐点, 并且压力曲线有马鞍形驼峰存在, 符合发生失速的一般条件.

2) 流场结果显示, 静子的失速特征比转子明显. 失速工况下的静压最小值远大于工作点, 并且静压最小处更靠近叶轮方向.

3) 在失速工况下, 叶轮涡流损失显著增加, 流线发生强烈的扭曲, 叶片上的静压梯度下降明显, 引起根部失速和尖区分离.

4) 通过对特性曲线和失速特性的研究, 可以

预测失速点在流量系数0.201处。

## 参考文献:

- [1] Vahdati M, Sayma A, Freeman C, et al. On the use of atmospheric boundary conditions for axial-flow compressor stall simulations [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2005, 127(2): 349-351.
- [2] Yamaguchi N, Ogata M, Tanaka S. Mechanism of strong effects of stall suppression by an air separator investigated by internal flow measurements in an axial flow fan [J]. *Journal of Fluid Science and Technology*, 2012, 6(2): 89-101.
- [3] Lazzaretto A. A criterion to define cross-flow fan design parameters [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2003, 125(4): 680-683.
- [4] Shiomi N, Kaneko K, Setoguchi K. Natures of rotating stall cell in a diagonal flow fan [J]. *Journal of Thermal Science*, 2005, 14(1): 9-14.
- [5] Wang Y J, Reddy N P. Fan stall and multiple operating points in multiple-fan ventilation systems [J]. *Mining Engineering*, 1992, 44(2): 167-172.

- [6] Bianchi S, Corsini A, Sheard A. Demonstration of a stall detection system for induced draft fans [J]. *Journal of Power and Energy*, 2013, 227(3): 272-284.
- [7] Adamczyk J J, Celestina M L, Greitzer E M. The role of tip clearance in high-speed fan stall [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1993, 115(1): 28-38.
- [8] Julian A, Nolte F. Monitoring for axial fan stall prevention [J]. *Advances in Instrumentation*, 1983, 38(1): 221-231.
- [9] Choi M, Vahdati M. Numerical strategies for capturing rotating stall in fan [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2011, 225(5): 655-664.
- [10] Choi M, Vahdati M, Imregun M. Effects of fan speed on rotating stall inception and recovery [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2011, 133(4): 1-8.
- [11] Mccaughan F E. Numerical results for axial flow compressor instability [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1989, 111(4): 434-441.
- [12] 丁祖荣. 流体力学(上册) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 28-32.  
(Ding Zu-rong. Fluid mechanics (I) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 28-32.)

(上接第226页)

2) 添加硅铁在球团熔融过程中可加速渣铁分离, 提高渣铁的分离效率, 并可降低渣中 FeO 和金属铁含量, 明显提高钛渣的品位. 未添加硅铁的还原球团熔分后渣中 TiO<sub>2</sub> 质量分数最高为 76.29%, 而添加硅铁可达到 84.75%.

3) 添加硅铁可降低体系熔化温度, 增大钛渣的液相区域, 铁液聚集程度变好. 硅铁对钛渣黏度无明显影响. 本次实验可为后续工业实验研究提供理论基础.

## 参考文献:

- [1] 吴贤, 张健. 中国的钛资源分布及特点 [J]. 钛工业进展, 2006, 23(6): 8-12.  
(Wu Xian, Zhang Jian. Geographical distribution and characteristics of titanium resources in China [J]. *Titanium Industry Progress*, 2006, 23(6): 8-12.)
- [2] Elstad H, Eriksen J M, Hildal A, et al. Equilibrium between titania slags and metallic iron [C]//The 6th International Heavy Minerals Conference. Johannesburg, 2007: 35-42.
- [3] Pourabdoli M, Raygan R, Abdizadeh H, et al. Production of high titania slag by electro-slag crucible melting (ESCM)

process [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2006, 78(3): 175-181.

- [4] 郭宇峰, 吕亚男, 姜涛, 等. 预氧化在攀枝花钛铁矿固态还原过程中的作用 [J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(4): 413-419.  
(Guo Yu-feng, Lyu Ya-nan, Jiang Tao, et al. Effect of pre-oxidation on Panzhihua ilmenite in solid state reduction process [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2010, 32(4): 413-419.)
- [5] Ranganathan S, Bhattacharyya K K, Ray A K, et al. Investigations on the reduction and growth of particles of iron from ilmenite ore [J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 2012, 121(1): 55-63.
- [6] Zhang Y J, Wu Y H, Wang H Z, et al. Research on catalysis of alkali metal carbonate to carbon-heating reduce reaction of perilmene ore [J]. *Non-ferrous Mining and Metallurgy*, 2001, 17(4): 22-24.
- [7] Huang R, Lyu X W, Bai C G, et al. Solid state and smelting reduction of Panzhihua ilmenite concentrate with coke [J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2012, 51(4): 434-439.
- [8] Huang R, Lyu X W, Bai C G, et al. Enhancement reduction of Panzhihua ilmenite concentrate with coke and conglomeration of metal with ferrosilicon [J]. *Steel Research International*, 2013, 84(9): 892-899.