

叶片厚度对低比转速离心泵性能影响的研究

宋文武, 金永鑫, 符杰, 徐耀刚

(西华大学能源与动力工程学院, 四川成都 610039)

摘要:在低比转速离心泵的设计过程中, 叶片厚度对叶轮性能的影响很少被考虑。在运用速度系数法设计叶轮时, 也只是将叶片厚度的影响放在排挤系数的因数中参与扬程计算, 没有从根本上研究叶片厚度与低比转速离心泵叶轮性能的关系。本研究运用数值模拟方法对叶片出口厚度 $\delta_2 = 5$ 、10 和 15 mm 3 种方案进行分析, 计算工况范围取 $(0.2 - 1.4) Q_d$ 。结果显示: 出口处叶片厚度增加会改变叶轮出口处喉部条件, 对通道内的流动情况产生影响; 叶片厚度增加会使扬程和效率有所提高, 同时轴功率也随之增加。

关键词:低比转速离心泵; 叶片厚度; 离心叶轮; 性能预测

中图分类号: TH311 文献标识码: A
DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.03.033

引言

对低比转速离心泵性能影响较大的是叶轮进口与出口面积差距, 大的面积差距会导致液流在通道内的扩散增大, 出口处还容易出现“尾迹-射流”现象^[1-3]。出口处流体的流态不稳定不仅导致低比转速离心泵的性能指标不高, 还容易出现不利于运行操作的问题。

目前, 国内外对混流泵和轴流泵的叶片厚度对水力性能影响的研究报道比较多^[4-6]。在低比转速离心泵的性能研究的过程中更多的是关注叶轮的外径 D_2 、叶片出口角 β_2 、叶轮出口宽度 b_2 、叶片进口直径 D_1 以及叶片包角 φ 等因素^[7-9]。对于这些因素的研究已经取得了较多的成果。但是, 对于叶片出口真实厚度 δ_2 这一影响因子对低比转速离心泵的性能影响没有得到足够的重视。严敬教授用理论公式推导对低比转速离心叶轮出口参数条件对其性能的影响做了充分论述^[10-11], 江苏大学袁寿其教授对离心叶轮的出口参数采用正交实验方法进行研究并

提出了不同的堵塞流道的方式改善低比转速叶轮出现驼峰的问题^[12]。堵塞流道的方式就是变相的对叶片的厚度加厚, 减小流道的扩散, 改善流道内流体的流态。

在离心泵能量转换的研究过程中发现, 叶轮通道中进口喉部到出口这一段能量变化梯度远高于脱离叶片挟持区域的能量变化梯度。在叶片出口处加厚不仅减小了平面上的扩散, 同时也增加了进口喉部到出口的长度。进口喉部到出口喉部长度的增加也就使液流处在比较高的能量变化梯度的区域^[13]。

本研究采用不同厚度叶片模型进行数值模拟, 对叶片出口真实厚度 δ_2 这一参数对叶轮性能的影响规律进行探讨。

1 研究方案

1.1 低比转速离心泵叶轮的特点

低比转速的特点就是“高扬程、小流量”, 在采用速度系数法设计中, 在转速一定的情况下叶轮进口直径 D_1 与流量 $\sqrt[3]{Q}$ 相关, 叶轮出口外径 D_2 与扬程 \sqrt{H} 相关。由此就导致 D_2/D_1 值较大, 叶轮内部通道扩散较大, 在叶轮内部通道易产生脱流, 这是导致低比转速离心泵效率过低的原因之一。同时低比转速离心泵在运行过程中其 $Q-H$ 曲线易出现驼峰等不利于运行操作的现象。

低比转速叶片进口处的排挤系数 ψ_1 会影响泵的整体性能, 由于叶片进口处 ψ_1 值对空化性的影响比较敏感, 所以进口处叶片的真实厚度不能过大, 否则会使进口排挤系数 ψ_1 值过小, 进而影响泵的整体性能。

收稿日期: 2014-08-07; 修订日期: 2014-08-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51279172); 四川省教育厅重大培育项目(14CZ0013); 西华大学流体及动力机械教育部重点实验室开放基金资助项目(szj2014-039); 西华大学研究生创新基金资助项目(ycej2014168)

作者简介: 宋文武(1965-), 男, 四川阆中人, 西华大学教授, 研究生导师。

1.2 叶轮水力设计

(1) 采用少叶片的设计理念,这样可以保证进口处的排挤系数 ψ_1 不至于太小。

(2) 采用大包角的设计理念,这样的设计理念可以使叶轮流道的长度增加,扩散角变小,减小脱流的可能性。

(3) 加大叶片中间到出口处的叶片真实厚度,可以达到堵塞流道的效果,使流道进出口面积比不至于过大,减小脱流的可能性。

(4) 设置出口角 β_2 不能过大,考虑到低比转速离心泵轴功率容易产生过载的问题,采用无过载的设计理论,同时使 $Q - H$ 曲线出现驼峰的可能性降低。

2 实例分析

2.1 方案设计

对设计流量 $Q = 75 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H = 80 \text{ m}$,转速 $n = 2950 \text{ r/min}$,比转速 $n_s = 58$ 的泵叶轮在相同出口安放角、不同叶片厚度的情况下的流场进行解析。泵叶轮的主要参数如表 1 所示。文献 [12] 中提出,加厚叶片的同时要增大叶轮出口宽度 b_2 ,保证出口面积不变,从而保证对比方案的合理。在叶片出口角 β_2 不变的情况下,出口面积保持不变,理论上就可使泵的设计扬程不变。

表 1 离心叶轮主要参数

Tab.1 Main parameters of a centrifugal impeller

方案	叶轮进口直径 D_1/mm	叶轮轮毂直径 d_h/mm	叶轮外径 D_2/mm	叶轮出口宽度 b_2/mm	叶片出口处真实厚度 δ_2/mm	叶片数 Z	叶片出口角 $\beta_2/(\circ)$
1	100	50	260	10	5	5	23
2	100	50	260	11	10	5	23
3	100	50	260	12	15	5	23

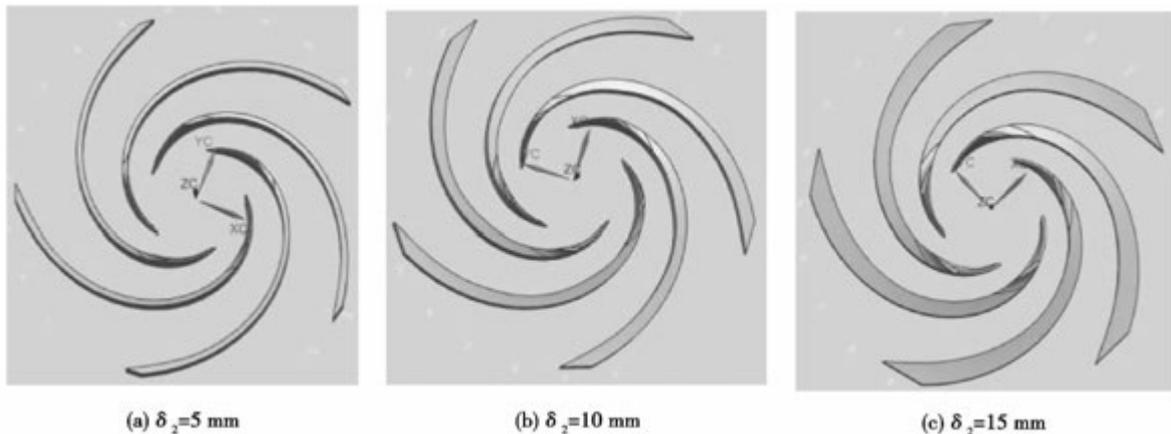


图 1 3 种不同方案叶片三维模型

Fig.1 Three-dimensional model for blades in three different schemes

2.2 数值计算

为保证叶轮进口、蜗壳出口处的流动稳定,在叶轮进口和蜗壳出口分别延伸外径 3 倍和 5 倍的长度,进而保证进出口处的数据可靠性。运用网格划分软件 ANSYS - ICEM 采用非结构四面体网格对离心泵流体区域进行网格划分。进口段网格数为 805 217,出口段网格数为 1 460 115,蜗壳网格数为

843 216,方案 1、方案 2、方案 3 的叶轮网格数量分别为 987 341、1 053 264、925 678,网格质量都在 0.3 以上。

数值模拟过程使用 ANSYS - CFX(商用 CFD 软件)求解雷诺时均方程,使用 RNG $k - \epsilon$ 双方程模型封闭。叶轮和蜗壳采用“冻结转子”法耦合,壁面采用无滑移模型,残差收敛于 10^{-4} 。计算工况范围取

(0.2 - 1.4) Q_d 。

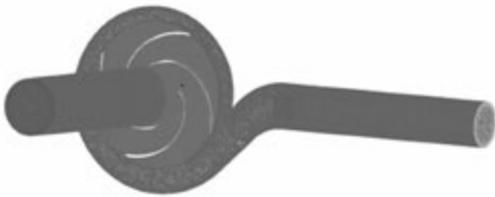


图 2 计算域网格

Fig. 2 Mesh of computation domain

3 结果分析

3.1 外特性分析

离心泵的外特性是评价泵性能好坏的依据,但是对于内部流场中的各部位的流动状况通过外特性是看不出来的,外特性只能很笼统的、综合地对泵的内部的流场进行评价。因此,了解泵内部流动状况,对其内、外特性查看以及两者对照分析是很有必要的。

泵扬程计算:

$$H = \frac{\overline{P_{out}} - \overline{P_{in}}}{\rho g}$$

其中, $\overline{P_{in}}$ 、 $\overline{P_{out}}$ —— 进出口加权平均总压, Pa。

泵轴功率计算:

$$P = N \cdot \omega = \frac{N \cdot \pi \cdot n}{30}$$

其中, N —泵轴的扭矩, $N \cdot m$; ω —叶轮旋转角速度, rad/s; n —叶轮的转速, r/min。

泵效率计算:

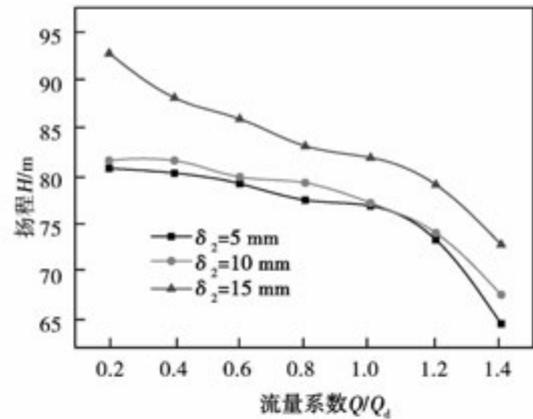
$$\eta = \frac{\rho g Q H}{P} \times 100\%$$

其中, Q —离心泵出口流量, m^3/h ; H —离心泵扬程, m; P —离心泵轴功率, kW。

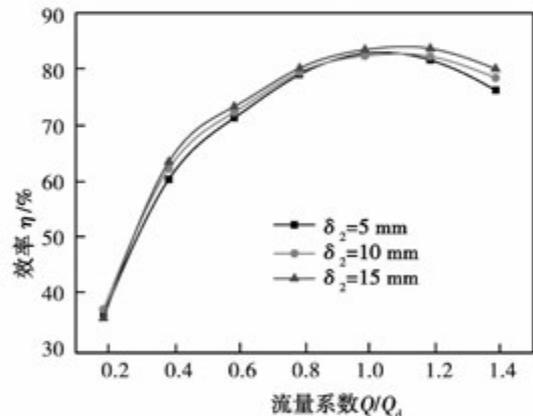
将数值模拟结果的数据按以上公式处理,最终得到性能曲线如图 3 所示。

图 3 是 3 个方案的 $Q-H$ 、 $Q-\eta$ 、 $Q-P$ 对比曲线。由图中可以看出:(1) 叶片真实厚度增加,会使叶轮的各个工况点的扬程有一定的提高;(2) 叶片厚度增加后离心泵的效率会有一定的提高;(3) 在叶片真实厚度增加后,轴功率有一定的增加。 $\delta_2 = 15 \text{ mm}$ 方案中扬程的增加对轴功率的增加贡献比较

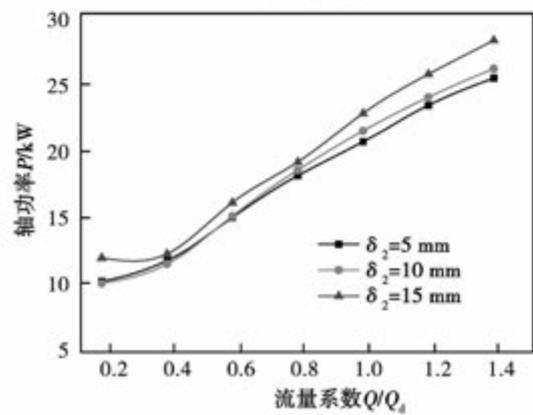
大,由图 4 可看出, $\delta_2 = 15 \text{ mm}$ 方案的叶轮内部流道的流态较前 2 种方案更好,这很好地解释了 $\delta_2 = 15 \text{ mm}$ 方案中的扬程和效率高于 $\delta_2 = 5 \text{ mm}$ 、 $\delta_2 = 10 \text{ mm}$ 方案原因。



(a) 扬程曲线



(b) 效率曲线



(c) 轴功率曲线

图 3 3 种不同方案外特性曲线

Fig. 3 Characteristics curves of three different schemes

3.2 内特性分析

在外特性中是内特性的综合表现,内特性的分

析有助于更好地了解各个部位的流动情况。

由图4可以看出,在小流量工况下叶片加厚可以很好的控制液流流态。从而使小流量工况下的扬

程在叶片加厚后有所提高。这和外特性分析的结果起到很好的对照。

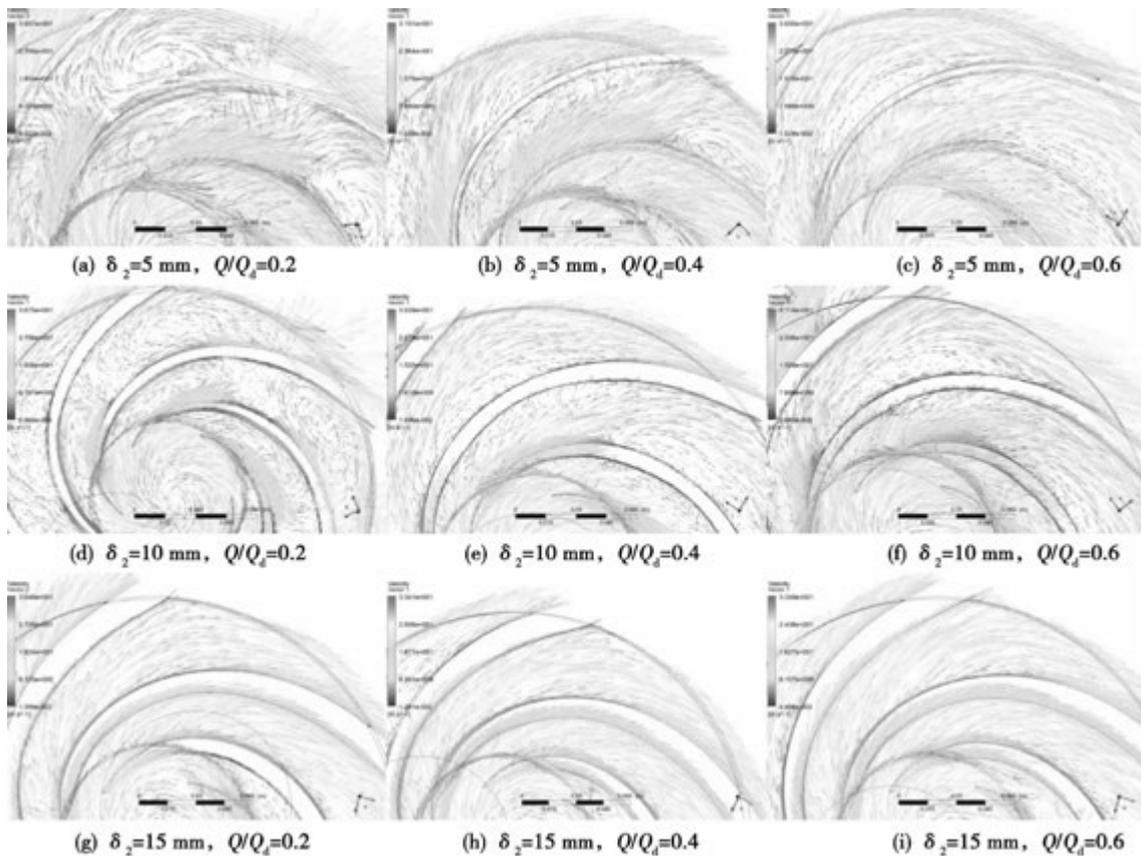


图4 叶轮内部速度矢量图

Fig.4 Velocity vector diagram in impeller

4 结论

叶轮出口处的叶片厚度的变化会改变出口处的喉部条件,出口处喉部条件的改变直接影响着叶轮出口处的有效液流角,从而影响到离心泵的外特性。

叶片出口厚度加厚后对低比转速离心泵有明显的影响:

(1) $\delta_2 = 15 \text{ mm}$ 方案相对于 $\delta_2 = 5 \text{ mm}$ 、 $\delta_2 = 10 \text{ mm}$ 设计工况下扬程提高 5.05、4.7 m; 效率提高 1.7%、1.1%; 轴功率升高 2.1、1.3 kW。

(2) 叶片出口厚度增加使流道内的流态得到很好的控制。

叶片出口处厚度增加使同一外特性参数以及主要参数都不变的叶轮在小流量工况下运行的性能得到很大的提高。建议在小流量工况下工作时间较长

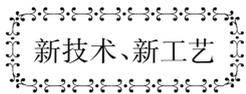
的低比转速离心泵采用叶片加厚的设计方案,提高在小流量运行时的稳定性以及外特性指标。

参考文献:

- [1] 王川,施卫东,陆伟刚,等.不同叶片厚度的不锈钢冲压泵性能模拟与试验[J].农业机械学报 2012,43(7):94-99.
WANG Chuan,SHI Wei-dong,LU Wei-gang etc. Effect and experiment of different blade thickness on stainless steel sampling well pump performance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 94-99.
- [2] Johann Friedrich Gülich. Centrifugal Pumps [M]. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [3] 李世煌.叶片泵的非设计工况及其优化设计[M].北京:机械工业出版社,2005.
Li Shi-huang. Off design conditions and optimal design of vane pump [M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [4] 杨军虎,张建华,孙庆冲,等.叶片型线及厚度变化规律对离心泵性能的影响[J].兰州理工大学学报,2011,37(5):50-55.

- YANG Jun-hu, ZHANG Jian-hua, SUN Qing-chong etc. Influence of variation of blade thickness and profile on centrifugal pump performance [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2011, 37(5): 50-55.
- [5] 邴浩, 谭磊, 曹树良. 叶片数及叶片厚度对混流泵性能的影响 [J]. 水力发电学报, 2013, 32(6): 250-255.
- BING Hao, TAN Lei, CAO Shu-liang. Effects of blade number and thickness on performance of mixed-flow pumps [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(6): 250-255.
- [6] 沙毅, 侯丽艳. 叶片厚度对轴流泵性能影响及内部流场分析 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(18): 75-81.
- SHA Yi, HOU Li-yan. effects of blade thickness on performance of axial flow pump and analysis of internal flow field [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(18): 75-81.
- [7] 关醒凡. 现代泵理论与设计 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.
- GUAN Xing-fan. The theory and design of modern pump [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2011.
- [8] 吴玉林, 刘娟, 陈铁军, 等. 叶片泵设计于实例 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- WU Yu-lin, LIU Juan, CHENG Tie-jun, CHENG Nai-xiang. Design and examples of blade pump [M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [9] Lobanoff. Centrifugal pumps design & application [M]. Houston: Gulf Publication, 1994.
- [10] 严敬. 低比转速离心泵——原理、参数优化及绘形 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1998.
- YAN Jing. Ultra-low Specific-speed Centrifugal Pump——Principle, Parameter Optimization and Drawing [M]. Chengdu: China Machine Press, 1998. Sichuan Publishing House of Science and Technology, 1998.
- [11] 严敬. 无过载叶轮几何参数的计算 [J]. 农业机械学报, 2002, 33(3): 37-38, 46.
- YAN Jing. Calculation of eometrical Parameters of an Impeller with Minimal Power Required [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(3): 37-38, 46.
- [12] 袁寿其. 低比速离心泵理论与设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- YUAN Shou-qi. Theory and design of low specific speed centrifugal pumps [M]. Beijing: China Machine Press, 1997.
- [13] 张翔. 不锈钢冲压焊接离心泵能量转换特性与设计方法 [D]. 江苏大学, 2011.
- ZHANG Xiang. Energy Conversion Characteristics of Stainless Steel Stamping and Welding Centrifugal Pumps and Design Method [D]. Jiangsu University, 2011.

(姜雪梅 编辑)



煤到甲醇扩建项目

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.03.034

据《Gas Turbine World》2013年9-10月刊报道,久泰集团已经选择GE公司的8.7 MPa高压气化技术用于内蒙古的煤到甲醇工作的扩建项目。

该扩建将使工厂煤到甲醇的生产能力增强为每年产量增加150万t,生产能力翻番。

与原来的设备比较,预期采用GE的气化技术可以使生产甲醇的成本减少11%。

它也将超过中国的能源规则,该规则要求工业利用更加有效、环境友好的技术。

对于该项目,GE神华气化技术公司,包括神华集团在内的一个合资企业,将提供GE气化技术许可证、气化过程设计程序包、技术服务和关键设备。

GE Oil & Gas也将提供用于聚乙烯和聚丙烯生产的3台DH7JM型压气机。这些压气机将由GE公司制造,并且将在2014年引进中国。

扩建的甲醇生产设备预定在2016年开始商业生产。

(吉桂明 摘译)

叶片厚度对低比转速离心泵性能的影响研究 = **Study of the Influence of the Thickness of Blades on the Performance of a Low Specific Rotating Speed Centrifugal Pump** [刊, 汉] SONG Wen-wu, JIN Yong-xin, FU Jie, XU Yao-gang (College of Energy Source and Environment, West China University, Chengdu, China, Post Code: 610039) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(3) . -441 -445

In the design process of a low specific rotating speed centrifugal pump, the influence of the blade thickness on the performance of an impeller is scarcely taken into account. When the velocity coefficient method is used to design an impeller, the influence of the blade thickness will be only placed in the factors of the extrusion coefficient to take part in the lift calculation, thus having not radically studied the relationship between the blade thickness and the performance of the impeller in a low specific rotating speed centrifugal pump. A numerical calculation method was used to conduct a numerical analysis of three versions: the thicknesses at the trailing edge of the blade are $\delta_2 = 5$ mm, $\delta_2 = 10$ mm and $\delta_2 = 15$ mm respectively and the operating conditions calculated ranged from $0.2 Q_d$ to $1.4 Q_d$. It has been found that to increase the thickness at the trailing edge of the blade may change the operating conditions at the throat at the outlet of the impeller, thus influencing the flow conditions in the flow passages. The external characteristic curves show that to increase the blade thickness can force the lift and efficiency to somewhat increase and in the meantime, the shaft power will increase accordingly. Through an analysis of the three versions, the authors learned more about the law governing the influence of the blade thickness on the external characteristics of the low specific rotating speed centrifugal pump, therefore, offering reference for rationally controlling blade thicknesses in design. **Key Words:** low specific rotating speed centrifugal pump, blade thickness, centrifugal impeller, performance prediction

600 MW 机组汽动引风机系统控制策略优化与仿真 = **Optimization and Simulation of the Control Strategies for a 600 MW Unit Steam-turbine-driven Forced Draft Fan System** [刊, 汉] GUO Jun-shan, SI Feng-qi, SHAO Zhuang (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) , ZHU Kang-ping (Sehtou Power Generation Co. , Ltd. , China Electric Power Investment Group Corporation, Shuozhou, China, Post Code: 036800) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(3) . -446 -451

In the light of the safety problems encountered when a 600 MW thermal power plant unit steam-turbine-driven forced draft fan was operating at a low load, the authors analyzed its control strategies and proposed optimized control strategies for coordinating and controlling the negative pressure in the furnace by changing the rotating speed of