

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.026

叶轮进口挡板改善轴流泵非稳定工况性能研究*

杨 华¹ 孙丹丹² 汤方平¹ 刘 超³

(1. 扬州大学能源与动力工程学院, 扬州 225009; 2. 徐州市水利建筑设计研究院, 徐州 221002;
3. 扬州大学水利科学与工程学院, 扬州 225009)

【摘要】 轴流泵在不稳定区(马鞍区)运行时,叶轮进口存在回流区,水泵效率低、机组振动加剧,严重时将造成机组结构破坏。在轴流泵叶轮进口设置5种挡板方案,采用商用软件 ANSYS CFX,分别对不同的挡板方案进行了三维不可压湍流数值模拟。计算结果表明,挡板与叶轮进口的距离是影响小流量工况水泵性能的主要因素,其中方案3为最佳方案。叶轮进口的轴面流场表明,挡板能抑制小流量工况水泵进口处的回流,降低叶片吸力面的压力,增加叶片的升力,从而有效地提高小流量工况的水泵运行效率。

关键词: 轴流泵 非稳定工况 性能 数值模拟

中图分类号: TH312 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)11-0138-04

Research on the Performance Improvement of Axial-flow Pump under Unstable Condition Using CFD

Yang Hua¹ Sun Dandan² Tang Fangping¹ Liu Chao³

(1. School of Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China
2. Institute of Water Conservancy Works Design of Xuzhou, Xuzhou 221002, China
3. School of Water Conservancy Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract

The recirculation flow exists at the inlet of the impeller when the axial-flow pumps operate at the low flow rate. At this condition, the pump efficiency falls down and the pump system vibrates seriously, sometimes leads to structural damage, so the pump should avoid operating at this unstable condition. Five schemes with different baffles at the inlet of axial-flow pump impeller were presented. 3-D incompressible flow fields, for different baffle schemes, were simulated by using the commercial software ANSYS CFX. The computed results showed that the distance between the baffles and the impeller was the key factor that influences the performance of axial-flow pumps at the condition of low flow rate. Among these five schemes, scheme No.3 was the preferred plan. The flow field at the meridional plane shows that baffles could reduce the backflow at the inlet of axial-flow pump, reduce the pressure at the suction side and increase the lift of the blade, so as to increase the efficiency of axial-flow pumps at the condition of low flow rate.

Key words Axial-flow pump, Unstable condition, Performance, Numerical simulation

引言

由于小流量工况时,轴流泵存在非稳定区(也

称为马鞍区),使得整个水泵机组稳定运行范围受到很大的限制。2004年天津中水北方公司水力机械通用试验台对国内5家单位新开发的27副轴流

收稿日期: 2012-05-04 修回日期: 2012-05-18

* 国家自然科学基金资助项目(50706041)、江苏省自然科学基金资助项目(BK2007558)和科技部国际科技合作计划资助项目(2010DFA64660)

作者简介: 杨华,副教授,主要从事风力机气动性能及水泵叶轮优化设计研究,E-mail: yanghua@yzu.edu.cn

泵水力模型进行同台测试,试验结果显示,轴流泵性能曲线存在明显的非稳定区,有的水力模型非稳定区的谷点扬程低于最高效率点的扬程,这大大地减小了轴流泵稳定运行的工况范围。

Greitzer 等^[1]于 1979 年开始对轴流泵失速进行相关研究,Goltz、Kosyna 等^[2~3]采用高速摄影、PIV 以及油膜法相结合的试验手段揭示了失速工况下叶尖间隙涡以及漩涡低压区云状空化的发展。文献[4]研究了失速时轴流泵叶轮内的涡系结构,给出了一种简单的机匣处理(casing treatments)对轴流泵性能影响的结果,机匣处理是最早用于扩大压气机稳定工作范围的技术措施^[5~7]。国内学者对于轴流泵失速特性的研究主要限于轴流泵非稳定区特性的解释^[8~9],而对失速机理方面的研究相对较少,文献[10]采用 PIV、丝线示踪等手段研究了轴流泵随着流量减小,叶轮进口处流场的演化,结果表明叶轮进口处的不稳定流场是水泵效率低的原因。本文在文献[10]的基础上,采用 CFD 方法研究叶轮进口设置不同径向挡板对非稳定区工况下轴流泵外特性、叶片表面压力、叶轮进口轴面流场、叶片表面相对流速分布的影响。

1 三维数值模拟

1.1 三维造型及网格划分

水泵的数值计算区域由进水直管、叶轮、导叶和出水直管 4 部分组成,如图 1 所示, h 为挡板与叶轮进口边的距离。为了研究挡板位置、数量以及几何尺寸对轴流泵小流量工况叶轮进口流场及其外特性的影响,共设置了 5 种方案,如表 1 所示。挡板厚度为 $0.02D$,其中 D 为叶轮直径。进、出水直管采用 ICEM 造型并进行网格划分。叶轮和导叶采用 ANSYS TurboGrid 专用工具进行网格划分。在数学建模时不同挡板设置方案只需改变进水直管前部分的网格,而其他部分保持不变。

文献[11]曾对本文的轴流泵模型进行过网格独立性分析,根据研究结果,叶轮每个流道网格数约为 5 万个,导叶每个流道网格数约为 4 万个。由于计算的叶轮和导叶的叶片数互为质数,故不能将计算区域简化为一个流道,而需要进行全流道的整场

数值计算。整个计算区域网格总数约 72 万。

表 1 叶轮进口挡板方案
Tab. 1 Schemes of baffles at the inlet of impeller

方案号	宽度	长度	数量	与叶轮进口距离
1	$0.2D$	$0.53D$	4	$0.40D$
2	$0.2D$	$0.53D$	4	$0.12D$
3	$0.2D$	$0.80D$	4	$0.12D$
4	$1.0D$	$0.53D$	1	$0.40D$
5	$1.0D$	$0.80D$	1	$0.12D$

1.2 计算方法

采用商用 CFD 软件 ANSYS CFX 求解轴流泵内部雷诺时均 $N-S$ 方程,采用基于有限元的有限体积法对控制方程离散,对流项采用二次迎风差格式离散,采用全隐式多网格耦合求解技术进行求解。泵内工质为水,视为不可压缩流体,紊流模型选用 $RNG\ k-\varepsilon$ 。

1.3 边界条件

进水直管段长度为 $3D$,认为来流在进口断面上均匀分布,给定断面上法向速度;出水直管段长度约为 $2D$,给定出口断面上的平均静压值;固体壁面采用无滑移边界条件,近壁区域采用标准壁面函数,不考虑壁面粗糙度对流场的影响;轴流泵 CFD 数值计算结果对进口端动能参数的选择并不敏感,湍流强度设为中等, $T_u=5\%$,湍流长度尺度比例因子 $L_e=0.03$ 。

旋转叶轮与进水直管和导叶的交界面采用冻结转子模型(frozen rotor),即流场计算时将叶轮与导叶、进水直管的相对位置固定。文献[12]研究表明,不同相对位置对水泵定常数值模拟结果的影响很小。

2 计算结果与分析

2.1 性能曲线

采用 CFD 模拟技术对叶轮进口设置不同挡板时的流场进行数值模拟,结果如图 2 所示,图中 Q_d 、 H_d 分别为水泵设计点流量、扬程。由图 2a 可见,叶轮进口无挡板时,当水泵流量减小到约 $0.70Q_d$ 工况点时,扬程开始有明显的下降,呈现典型的马鞍形;设置挡板后,轴流泵在流量大于 $0.70Q_d$ 的工况范围内, $Q-H$ 性能基本不变,而在流量小于 $0.70Q_d$ 的工况范围内(非稳定工区),不同的挡板设置方案对水泵的扬程均产生不同程度的影响。

在挡板设置方案中,方案 1 和方案 4 对非稳定区(流量小于 $0.70Q_d$)的水泵流量-扬程性能没有明显改善,水泵仍然存在明显的马鞍区;而方案 2 和方案 5 在非稳定区的扬程比没有挡板时的水泵性能有

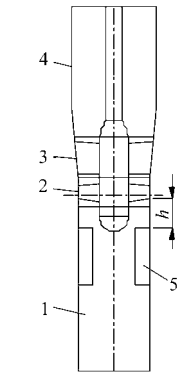


图 1 计算模型
Fig. 1 Computational model

1. 进水直管 2. 叶轮 3. 导叶
4. 出水直管 5. 挡板

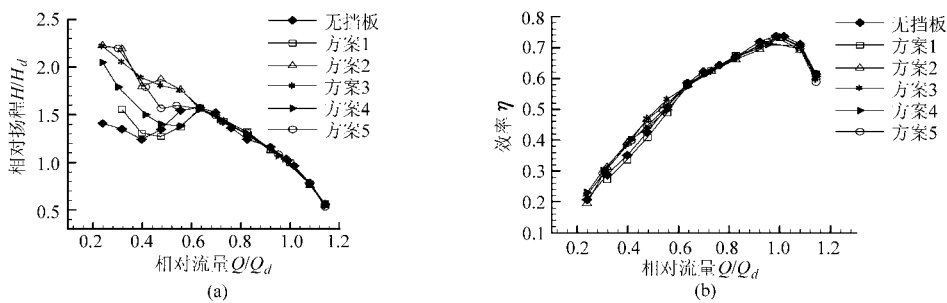


图 2 不同挡板方案的 CFD 计算性能曲线比较

Fig. 2 Comparison of performance curves with different baffle by using CFD computation

(a) $Q-H$ 性能曲线 (b) $Q-\eta$ 性能曲线

较大幅度提高,但是非稳定区的流量-扬程曲线仍不平滑,表明流动不稳定;方案 3 在非稳定区的流量-扬程性能有明显改善,而且水泵的流量-扬程性能曲线平滑,是最佳方案。对比表 1 分析得到:方案 1 和方案 4 挡板与叶轮进口的距离为 $0.4D$,此时挡板对叶轮进口流场的影响小,当两者距离缩小到 $0.12D$ 时,挡板才能对叶轮进口处流场产生显著影响。挡板与叶轮的距离是水泵性能的主要影响因素,挡板的长度是次要影响因素,而挡板宽度对水泵性能的影响很小。

图 2b 显示,当流量小于 $0.70Q_d$ 时,水泵效率有所提升,但提升的幅度与扬程增加幅度不成比例,其原因在于设置挡板后水泵的轴功率也有所增加。

2.2 叶片表面压力

图 3 为不同流量工况下,在 50% 径向位置上水泵叶片表面静压沿弦向的分布图,其中, l 为叶片断面上某点与前缘点之间的距离在弦长方向上的投影长度, t 为叶片断面的弦长。由图 3a 可见,对于流量为 $0.73Q_d$ 的工况,轴流泵还没有进入非稳定区,设置挡板后对叶片表面压力没有影响。当流量减小到 $0.53Q_d$ 时,如图 3b 所示,挡板对叶片压力面上静压没有影响,而叶片吸力面靠近进口边处静压减小,使得叶片表面压差增加。当流量继续减小到 $0.43Q_d$ 时,如图 3c 所示,叶片中部压力面上的压力变化很小,叶片吸力面进口边处压力显著降低,而出口边处压力无明显影响,压力面与吸力面的压差增加,使水泵扬程提升,与图 2 的性能曲线吻合。

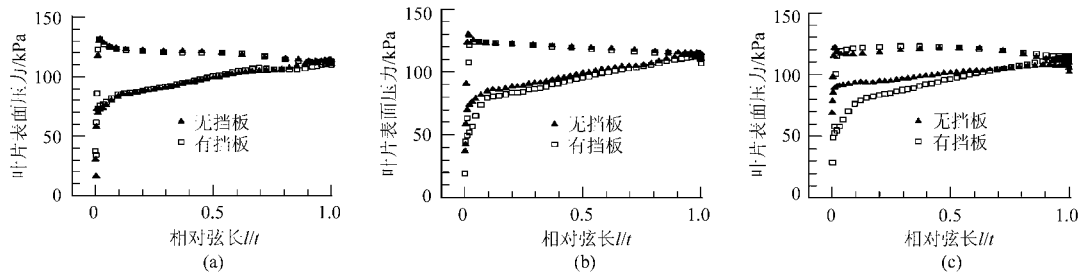


图 3 不同流量工况, 50% 径向位置叶片表面静压分布图

Fig. 3 Static pressure distributions on the section of 50% span at different flow rates

(a) $0.73Q_d$ (b) $0.53Q_d$ (c) $0.43Q_d$

2.3 叶轮进口轴面流场

为了进一步研究挡板对轴流泵进口流场的影响,在 $0.43Q_d$ 流量工况(马鞍区谷点),将方案 3 与未设置挡板时的水泵进口流场进行对比分析,分别选取与叶轮中心距离为 $Z/D = -0.22$ 的垂直于旋转轴的断面和两挡板中间轴面上的流场进行研究,断面位置如图 4 所示。 Z 为所取断面与叶轮中心的距离。

图 5 为叶轮进口轴面流场分布,由图 5a 可以看出:当流量为 $0.43Q_d$ 时,在叶轮进口外缘处出现回流,在轴面上水流由轮毂流入,从叶轮外缘流出。回流造成了叶轮进口流道的堵塞,使水泵内水流有效过流面积减小。图 5b 表明叶轮进口处的挡板有效

地阻断了叶轮进口回流的连续性,削弱了回流沿轴向和径向的发展,减小了回流对叶轮进口通道的阻塞程度,扩大了主流的有效过流面积。

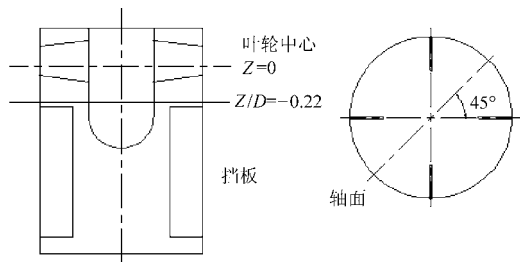


图 4 流场断面位置图

Fig. 4 Location of flow field section

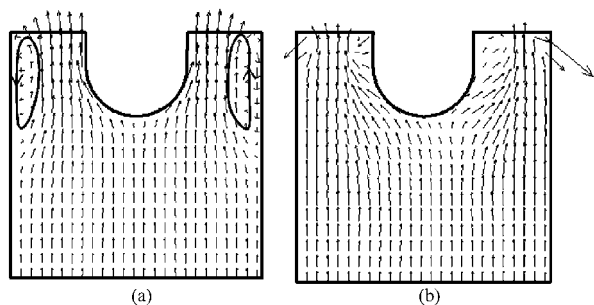


图 5 叶轮进口无挡板与方案 3 轴面上速度分布

Fig. 5 Comparison of velocity in meridional plane between scheme No. 3 and without baffles at the impeller inlet

(a) 无挡板 (b) 方案 3

图 6 为 $Z/D = -0.22$ 断面上的速度分布, 图上等值线为轴向流速值。由图可见, 叶轮进口无挡板时, 该断面上的流速分布受到叶轮影响显著, 靠近轮毂处有 4 个轴向流速的高速区, 在靠近叶轮室壁面约 $R/2$ 范围内, 轴向速度均为负值, 切向流速较大, 在该处形成螺旋形的回流区。

叶轮进口设置挡板后, 在挡板和叶轮的共同作用下, $Z/D = -0.22$ 断面上流速分布发生了变化。与无挡板相比, 流场没有受叶轮显著影响, 而挡板改变了靠近叶轮室壁面的螺旋形回流的连续性, 缩小了回流的区域。

因此小流量工况叶轮进口的挡板有效地抑制了回流, 增大轴向主流区, 有利于提高水泵扬程。

3 结论

(1) 叶轮进口设置挡板对轴流泵稳定运行区水

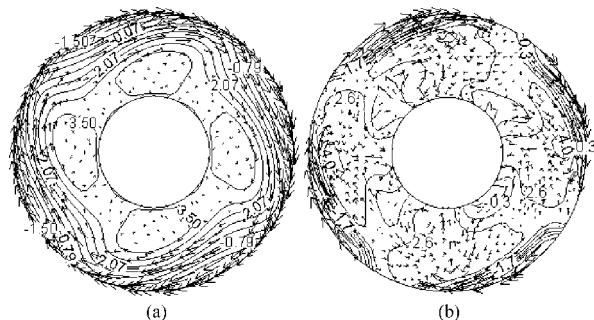
图 6 叶轮进口无挡板与方案 3 在 $Z/D = -0.22$ 断面上速度分布

Fig. 6 Comparison of velocity distribution at the cross section of $Z/D = -0.22$ between scheme No. 3 and without baffles

(a) 无挡板 (b) 方案 3

力性能基本无影响。影响水泵非稳定区性能的关键因素是叶轮进口与挡板的距离。

(2) 挡板能有效消除轴流泵小流量工况性能曲线的“马鞍区”, 使得 $Q-H$ 曲线变化平稳, 且小流量工况效率有所提高。

(3) 小流量工况下, 叶轮进口的挡板使叶片吸力面表面静压减小, 压力面表面压力基本无变化, 从而使得叶片压力面、吸力面压差增大, 叶片升力增加, 使轴流泵扬程提高。

(4) 挡板的设置能有效阻断叶轮进口回流的连续性, 减小叶轮进口由于回流的堵塞而导致的有效过流面积减小的不利影响, 抑制回流的发展。

参 考 文 献

- Greitzer E M, Nikkanen J, PHaddad D E, et al. A fundamental criterion for the application of rotor casing treatment[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1979, 101(2): 237 ~ 243.
- Goltz I, Kosyna G, Stark U, et al. Stall inception phenomena in a single-stage axial-flow pump[J]. Proceedings of the IMechE, Part A: Journal of Power and Energy, 2003, 217(4): 471 ~ 479.
- Goltz I, Kosyna G, Wulff D, et al. Part load operating performance and stall inception of a single-stage axial-flow pump [C] // The 10th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, 2004: 1 ~ 8.
- Kosyna G, Goltz I, Stark U. Flow structure of an axial-flow pump from stable operation to deep stall [C] // ASME 2005 Fluids Engineering Division Summer Meeting (FEDSM2005), 2005, 1: 1 389 ~ 1 396.
- 楚武利, 张皓光, 吴艳辉, 等. 槽式机匣槽宽变化对扩稳影响的实验与数值研究[J]. 航空学报, 2008, 29(4): 866 ~ 872. Chu Wuli, Zhang Haoguang, Wu Yanhui, et al. Impact of grooved width of grooved casing on stall margin improvement[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(4): 866 ~ 872. (in Chinese)
- 祝剑虹, 朴英, 周建兴, 等. 跨声压气机周向槽处理机匣非设计工况研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(4): 687 ~ 692. Zhu Jianhong, Piao Ying, Zhou Jianxing, et al. Investigation of off design performance of a transonic compressor with circumferential grooves[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 23(4): 687 ~ 692. (in Chinese)
- Padova Corso, Dunn Michael G, Barton Jeffery. Casing treatment and blade tip configuration effects on controlled gas turbine blade tip/shroud rubs at engine conditions[J]. ASME Turbo Expo, 2008: Power for Land, Sea, and Air (GT2008), 2008, 5: 261 ~ 276.

- 5 Mario Lanzetta, Colomba Di Blasi. Pyrolysis kinetics of wheat and corn straw [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 1998, 44(2): 181 ~ 192.
- 6 Prasad S, Anoop Singh, Joshi H C, et al. Ethanol as an alternative fuel from agricultural, industrial and urban residues [J]. Resources Conservation and Recycling, 2007, 50(1): 1 ~ 39.
- 7 Zhu Jiying, Wan Caixia, Li Yebo. Enhanced solid-state anaerobic digestion of corn stover by alkaline pretreatment [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(19): 7 523 ~ 7 528.
- 8 马淑勍, 朱宝宁, 李秀金, 等. 氨化预处理对稻草厌氧消化产气性能影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 294 ~ 299.
Ma Shuqing, Zhu Baoning, Li Xiujin, et al. Effects of ammoniation pretreatment on anaerobic digestion performance of rice straw [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(6): 294 ~ 299. (in Chinese)
- 9 Wu Lijuan, Hao Yuanyuan, Sun Chen, et al. Effect of different solid concentration on biogas yield and composition during anaerobic fermentation process [J]. Int. J. Global Energy Issues, 2009, 31(3 ~ 4): 262 ~ 271, 240 ~ 250.
- 10 覃国栋, 刘荣厚, 孙辰. NaOH 预处理对水稻秸秆沼气发酵的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊 1): 59 ~ 63.
Qin Guodong, Liu Ronghou, Sun Chen. Effects of different concentrations of NaOH pretreatment on anaerobic digestion of rice straw for biogas production [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(Supp. 1): 59 ~ 63. (in Chinese)
- 11 刘荣厚, 王远远, 孙辰. 温度对蔬菜废弃物沼气发酵产气特性的影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9): 116 ~ 121.
Liu Ronghou, Wang Yuanyuan, Sun Chen. Effects of temperature on anaerobic fermentation for biogas production from cabbage leaves [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 116 ~ 121. (in Chinese)
- 12 Lee D H, Behera S K, Kim J, et al. Methane production potential of leachate generated from Korean food waste recycling facilities: a lab scale study [J]. Waste Management, 2009, 29(2): 876 ~ 882.
- 13 Komemoto K, Lim Y G, Nagao N. Effect of temperature on VFA's and biogas production in anaerobic solubilization of food waste [J]. Waste Management, 2009, 29(2): 2 950 ~ 2 955.
- 14 Mata-Alvarez, Mata-Alvarez J. Biomethanization of the organic fraction of a municipal solid wastes [M]. London: IWA Publishing, 2003.
- 15 Feijoo G, Mendez R, Lema J M. Sodium inhibition in the anaerobic digestion process: antagonism and adaptation phenomena [J]. Enzyme Microb. Technol., 1995, 17(2): 180 ~ 188.
- 16 Jin Seop Bak, Myoung Dong Kim, In-Geol Choi, et al. Biological pretreatment of rice straw by fermenting with *Dichomitus squalens* [J]. New Biotechnology, 2010, 27(4): 424 ~ 434.

(上接第 141 页)

- 8 刘超, 汤方平, 周济人, 等. 大型立式轴流泵装置的性能和稳定分析[J]. 中国给水排水, 2003, 19(3): 69 ~ 71.
Liu Chao, Tang Fangping, Zhou Jiren, et al. Analysis on characteristics and stability of large-scale vertical axial flow pump system [J]. China Water & Wastewater, 2003, 19(3): 69 ~ 71. (in Chinese)
- 9 成立, 吴璐璐, 刘超. 大型轴流泵水力不稳定区研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, 29(2): 102 ~ 104.
Cheng Li, Wu Lulu, Liu Chao. Hydraulic unstable operating region of large scale axial flow pump [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 29(2): 102 ~ 104. (in Chinese)
- 10 杨华, 孙丹丹, 汤方平, 等. 轴流泵非稳定工况下叶轮进口流场实验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(5): 406 ~ 410.
Yang Hua, Sun Dandan, Tang Fangping, et al. Experiment research on inlet flow field for axial-flow pump at unsteady operating condition [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(5): 406 ~ 410. (in Chinese)
- 11 汤方平. 喷水推进轴流泵设计与紊流数值分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2006: 41 ~ 47.
Tang Fangping. Design and turbulence numerical analysis of water jet axial-flow pump [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2006: 41 ~ 47. (in Chinese)
- 12 成立, 刘超, 汤方平, 等. 基于 RNG 紊流模型的立式轴流泵站三维流动数值模拟及性能预测[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 252 ~ 257.
Cheng Li, Liu Chao, Tang Fangping, et al. 3D numerical simulation and performance predication of vertical axial flow pumping station by RNG turbulent model [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 252 ~ 257. (in Chinese)