

粗糙度对轴流泵性能影响的数值模拟研究

李 龙¹, 王 泽²

(1. 河海大学水利水电工程学院, 南京 210098; 2. 河海大学环境科学与工程学院, 南京 210098)

摘 要: 该文应用三维湍流 Navier-Stokes 方程, 工程上广泛使用的 $k-\epsilon$ 两方程湍流模型, 包含粗糙度的壁面函数, 对不同粗糙度下的轴流泵段的性能和力学特性进行了数值模拟研究, 得到了力矩、扬程、效率随粗糙度变化的趋势, 探讨了轴流泵过流表面粗糙度对泵性能的影响。模拟研究表明, 对轴流泵流道表面进行处理或提高表面铸造光洁度, 可显著提高轴流泵的效率和扬程。其结果对认识粗糙度对轴流泵性能的影响、挖掘提高轴流泵效率的潜力具有指导意义。

关键词: 轴流泵; 性能; 粗糙度; 数值模拟

中图分类号: S277.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)01-0132-04

0 引言

泵的水力性能主要是由过流部件的水力性能和质量决定的, 过流部件的水力性能和质量取决于过流部分的几何形状和表面粗糙度。尽管几何形状是否满足性能要求和符合流动规律, 是决定泵水力性能的关键, 但过流部件流道表面粗糙度对泵的性能, 特别是对泵的水力效率及总效率也有很大影响。文献[1]认为, 对小型泵, 只是清理涡壳流道, 就可使效率提高 2%~4%; 文献[2]给出了一台铸造的大型泵过流表面经过细致的机械加工后, 最佳效率由 78% 增加到 89% 的例子; 文献[3]认为, 尽量提高过流表面的光洁度, 可使效率提高 2%~3%。

为了研究泵表面粗糙度对性能的影响, 本文应用三维湍流 Navier-Stokes 方程, 工程上广泛使用的两方程湍流模型, 包含粗糙度影响的壁面函数, 对 9 种过流表面粗糙度下的轴流泵段的性能和力学特性进行了数值模拟研究, 对力矩、扬程、效率随粗糙度变化趋势进行了分析, 探讨了轴流泵表面粗糙度对泵性能的影响。

1 控制方程与湍流模型

由连续性方程、动量方程及模型构成控制方程组。在本文计算中, 采用工程上广泛应用的 $k-\epsilon$ 两方程湍流模型。

根据雷诺统计模式方法, 可得以下 k, ϵ 方程^[4]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + (\mu_k) \frac{\partial k}{\partial x} &= 2\nu_t(S_{ij}) \frac{\partial(u_i)}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right] - \epsilon \\ \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + (\mu_k) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} &= C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} 2\nu_t(S_{ij}) \frac{\partial(u_i)}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \right] - \\ &\quad C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned}$$

令 $G_k = 2\nu_t(S_{ij}) \frac{\partial(u_i)}{\partial x_j}$, 在定常条件下, 则可得 $k-\epsilon$ 控制方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right] + G_k - \epsilon &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} &= 0 \\ \nu_t &= C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \end{aligned}$$

上式中的常数 $C_\mu = 0.99$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$, $C_{\epsilon 1} = 1.44$, $C_{\epsilon 2} = 1.92$ 。

2 模拟计算

本文数值模拟研究所采用的轴流泵段如图 1 所示, 没有考虑泵出口部分的弯管。叶轮直径为 $\varnothing 300$ mm, 4 片叶片, 导叶数为 7, 泵段进口直径 $\varnothing 300$ mm, 出口直径 $\varnothing 350$ mm, 泵段长为 650 mm, 转速为 1 450 r/min, 流量为 $0.2922 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

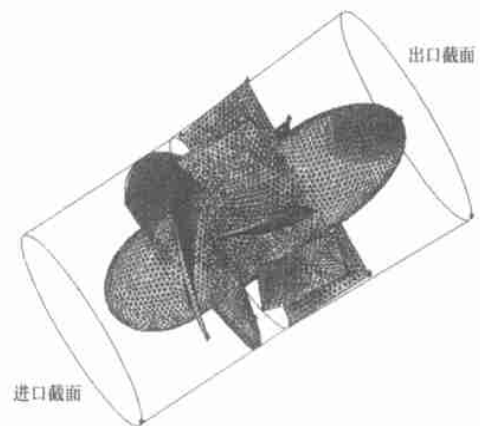


图 1 轴流泵段

Fig 1 Axial-flow pump

2.1 计算网格

由于既有旋转流场, 又有非旋转流场, 所以把在整个计算体分为叶轮区和导叶区两个区域, 两个计算体之间的耦合采用平面混合方法。鉴于叶轮叶片表面和导叶叶片表面为不规则的空间曲面结构, 本文采用非结构网

收稿日期: 2003-06-06 修订日期: 2003-08-28

基金项目: 河海大学科技基金资助项目 (2002409543)

作者简介: 李 龙 (1955-), 男, 教授, 主要从事排灌机械、流体机械的教学及科研工作。南京 河海大学水利水电工程学院, 210098

格, 在计算体体内采用四面体网格, 壁面上采用三角形网格, 图 2 为叶轮叶片表面的非结构网格分布, 网格由计算程序自动生成。整个轴流泵段模拟计算体的网格分布为

- 叶轮区: 四面体网格 169 807 个, 壁面三角形网格 15 976 个;
- 导叶区: 四面体网格 288 617 个, 壁面三角形网格 23 488 个;
- 出口面: 三角形网格 3 452 个;
- 进口面: 三角形网格 2 534 个;
- 节点: 88 825 个。

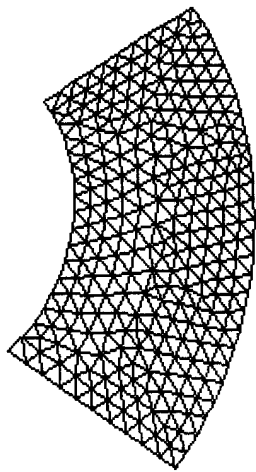


图 2 叶片表面非结构网格(压力面)
Fig 2 Grid on blade surface

2 2 进出口边界条件

泵进口截面处的边界条件设为速度进口, 给定速度大小, 以无旋确定速度方向, 压力设为均匀分布。进口处的湍动能取为进口处平均动能的 1. 0%, 进口处的湍动能耗散率根据湍动能和进口特征长度计算, 即 $\epsilon = C_{\mu} k^{3/3}/l_0$

泵出口速度由质量守恒确定。

2 3 壁面条件

粗糙壁面边界层的流速分布可写为^[15]

$$\begin{cases} u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + C - \Delta u^+ \\ \Delta u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln k_s^+ + C \end{cases}$$

根据克劳泽(F. H. Clauser) 给出的试验资料, 在水力粗糙区($k_s^+ > 70$), C 约为 1. 65, $C = 5. 45$, 并考虑到当 $k_s^+ \rightarrow 0$ 时, $\Delta u^+ \rightarrow 0$, 所以, 有

$$\begin{cases} u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln E y^+ - \Delta u^+ \\ \Delta u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln (1 + 0. 5 k_s^+) \end{cases}$$

在上式中, 取 $\kappa = 0. 42$ ^[16]。

2 4 算法

处理压力与速度耦合关系的算法, 直接影响到收敛的快慢, 对计算机性能的要求和收敛解的参数变化范

围。本文采用收敛速度较好的 S M P L E C 算法^[6]。

3 计算结果

新铸铁的当量粗糙度平均值为 0. 3 mm^[7]。本文分别计算了粗糙度为 0. 0 005, 0. 1, 0. 2, 0. 3, 0. 4, 0. 5, 0. 6, 0. 7 mm, 共 9 个点。计算结果如图 3~ 5 所示。图 6 和图 7 表示了相对于平均粗糙度(0. 3 mm)时, 力矩、扬程和效率随粗糙度变化的相对百分比。

1) 粗糙度对力矩的影响

图 3 表示了压力矩、粘性力矩及总力矩与粗糙度高度的变化关系。可以看出, 压力矩、总力矩随着粗糙度的增加而减小, 粘性力矩随着粗糙的增加而增大。粗糙度较小时变化幅度较大, 随着粗糙度的增加变化幅度减小。粗糙度高度从 0. 1 mm 增加到 0. 5 mm 时, 压力矩从 144. 53 N · m 下降到 122. 24 N · m, 减小了 15. 4%。粘性力矩从 10. 857 N · m 增加到 18. 099 N · m, 增大了 66. 7%。总力矩从 155. 39 N · m 下降到 140. 34 N · m, 减小了 9. 69%。粘性力矩的变化幅度最大, 是压力矩 4. 3 倍, 总力矩的 6. 9 倍。粘性力矩对粗糙度的反映最为明显。

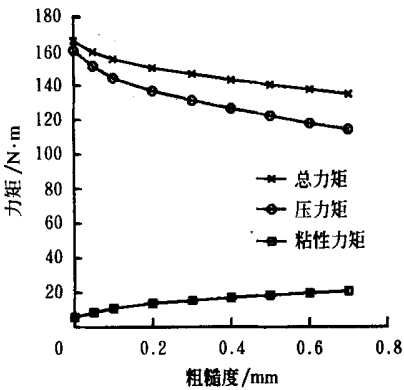


图 3 粗糙度对力矩的影响
Fig 3 Influence of roughness on momentum

2) 粗糙度对扬程、轴功率的影响

图 4 表示了扬程、轴功率与粗糙度的变化关系。由图可见, 扬程、轴功率随着粗糙度高度的增加而减小。粗糙度较小时下降幅度较大, 粗糙度较大时下降幅度较小。粗糙度高度从 0. 1 mm 增加到 0. 5 mm 时, 扬程从 6. 63 m 下降到 5. 36 m, 减小了 31. 8%。轴功率从 23. 588 kW 下降到 21. 304 kW, 减小了 9. 7%。扬程下降幅度比例大, 约为轴功率的 3. 3 倍。虽然轴流泵的输入功率和扬程都在下降, 但由于扬程的下降率大于轴功率的下降率, 致使泵的有效输出与输入之比下降, 泵效率降低。

3) 粗糙度对效率的影响

图 5 表示了效率与粗糙度的变化关系。可以看出, 效率随着粗糙度的增加而减小, 粗糙度较小时下降幅度较大, 粗糙度较大时下降幅度较小。粗糙度从 0. 1 mm 增加到 0. 5 mm 时, 效率从 80. 5% 下降到 72. 09%, 下降了 8. 41 个百分点, 约为 10. 4%。

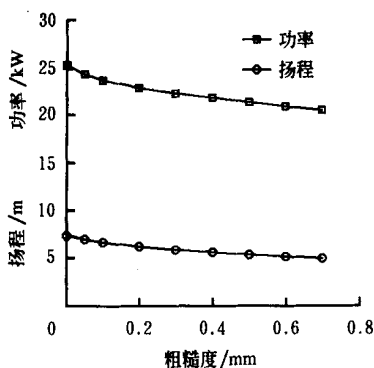


图4 粗糙度对扬程、功率的影响

Fig 4 Influence of roughness on power and efficiency

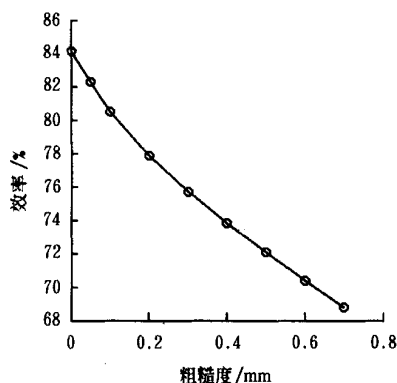


图5 粗糙度对效率的影响

Fig 5 Influence of roughness on efficiency

4) 相对于平均粗糙度的变化

图6、图7表示了力矩、功率、扬程、效率相对于粗糙度为0.3 mm时的变化。粗糙度从0.1~0.5 mm的范围内,粗糙度每增加0.1 mm,压力矩平均减小4.24个百分点,粘性力矩平均增加11.88个百分点,总力矩、轴功率平均减少2.56个百分点,扬程平均减小5.38个百分点,效率平均减小2.78个百分点。

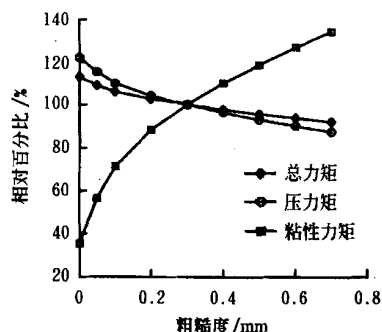


图6 相对于平均粗糙度(0.3 mm)的力矩相对值

Fig 6 Relative value of momentum

若粗糙度从0.3 mm下降到0.1 mm,在相同流量下,可使扬程提高0.74 m,提高幅度为12.6%,效率上升4.77个百分点,上升幅度为6.3%。

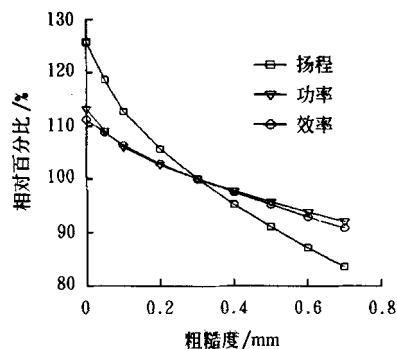


图7 相对于平均粗糙度(0.3 mm)的扬程、功率、效率相对值

Fig 7 Relative value of head, power and efficiency

4 结 论

本文应用三维 $k-\epsilon$ 湍流模型,首次进行了轴流泵表面粗糙度对性能影响的模拟研究。

1) 泵力矩、扬程、效率随着粗糙度增大而下降,在粗糙度小于0.1 mm时,变化梯度较大。粗糙度每变化0.1 mm(在0.1~0.5 mm范围内),总力矩平均变化约2.56个百分点,扬程平均变化约5.38个百分点,效率平均变化约2.78个百分点。

2) 泵内粘性损失随着粗糙度增大而上升,其变化梯度最大,增长速率最快。粗糙度每变化0.1 mm(在0.1~0.5 mm范围内),粘性力矩平均变化11.88个百分点。

3) 粗糙度对轴流泵性能(扬程、轴功率、效率)有显著影响,对轴流泵流道表面进行处理或降低表面铸造粗糙度,可明显提高轴流泵的效率 and 扬程,是挖掘、提高轴流泵效率的有效途径。

本文是以均匀的当量粗糙度模拟计算的,没有考虑粗糙度不均匀及其他铸造情况(如飞边、粘砂等)。

[参 考 文 献]

- [1] A. J. 斯捷潘诺夫 离心泵和轴流泵- 理论、设计和应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1980
- [2] A. A. 洛马金 离心泵和轴流泵 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1978
- [3] 关醒凡 泵的理论与设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1987
- [4] 张兆顺 湍流 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002
- [5] 章梓雄, 董曾南 粘性流体力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999
- [6] 陶文铨 数值传热学(第二版) [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002
- [7] 李家星, 赵振兴 水力学 [M]. 南京: 河海大学出版社, 2001
- [8] 李 龙, 陈黎明 泵优化设计国内现状及发展趋势 [J]. 水泵技术, 2003(2): 8- 12
- [9] Ludwig G, Meschkat S, Stoffel B. Design factors affecting pump efficiency. <http://www.tfa-maschinenbau-tu-darmstadt.de/geman/publi/2002/EEMODS-02-Paper77.pdf/2003-05-18>

- [10] Jin Yan, Smith D. CFD Simulation of 3-Dimensional Flow in Turbomachinery Applications, FLUENT Technical Notes, Presented at Turbomachinery Flow Prediction VIII, ERCOFTAC Workshop, March 2000
- [11] Svetlana Poroseva and Gianluca Iaccarino. Simulating Separated Flows Using The Model Center for Turbulence Research Annual Research Briefs 2001, 375- 383
- [12] 袁寿其, 陈 池, 郑 铭, 等. 无过载离心泵叶轮内三维不可压湍流场计算[J]. 机械工程学报, 2000(5): 31- 34
- [13] 徐 宇, 吴玉林, 刘文俊, 等. 用两相流模型模拟混流式水轮机内空化流动[J]. 水利学报, 2002(8).

Simulation of the influence of wall roughness on the performance of axial-flow pumps

Li Long, Wang Ze

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the Reynolds time-averaged Navier-Stokes equations and the standard $k-\epsilon$ model, the law of the wall modified for wall roughness effects, the performance and mechanics characteristic of an axial-flow pump with different surface roughness were simulated. The variation trend of the momentum, head and efficiency with the wall roughness was obtained. The influences of wall roughness on head, momentum and efficiency were approached. The efficiency potential of commercial axial pumps can be drawn. A mechanical treatment or coating to smoothen the surface can considerably increase the efficiency and the head. The research results are of great significance to understand the effects of roughness on the performance of axial-flow pump and to improve the efficiency of the axial-flow pump.

Key words: axial-flow pump; performance; roughness; numerical simulation

关于本刊论文审稿费和版面费调整的通知

本刊编辑部一贯坚持三级审稿制, 即编辑一审、专家二审、主编终审的制度。近几年学报的来稿量快速增长, 由于稿件送审量的增加, 以及相当部分的稿件需要多次评审等原因, 编辑部审稿费负担加重。为了保证来稿质量和学报出版质量, 参照同类期刊做法, 《农业工程学报》编辑部决定自 2004 年 1 月 1 日起对所有来稿收取评审费, 并对版面费做相应调整。

具体要求如下:

1) 自 2004 年 1 月 1 日起投稿至《农业工程学报》的作者须交纳每篇论文 100 元审稿费, 以编辑部收到日期为准。自 2004 年第 1 期起被录用的论文交纳版面费调整为 4 页以下(含 4 页)每篇论文 1000 元, 每超出一页加收 200 元。

2) 2004 年 1 月 1 日以前编辑部收到的稿件和 2004 年第 1 期前被录用的论文按原规定执行。

3) 请作者在投稿时将稿件与审稿费一并寄出, 编辑部收到审稿费后, 再进行稿件的各项处理工作。

4) 为避免出现差错, 审稿费请通过邮局汇出, 不要通过银行信汇。并务请在汇票备注栏中注明: 审稿费、第一作者姓名、联系电话。汇款单中必须将汇款人及地址书写清楚, 以便邮寄发票。版面费最好通过银行信汇。

收款单位: 农业部规划设计研究院(注明交学报版面费);

开户银行: 农行北京朝阳支行营业部;

帐号: 52-040101040009001;

银行汇款时请写明“学报版面费”及交款人的“姓名”以便开收据备查。

(本刊)