基于数值模拟的 CP型喷射泵喉管长度计算

顾青春[1], 俞志君[2], 王丰景[3], 龙新平[3]
(1.海军驻 704所军事代表室, 上海 200031; 2.海军工程大学, 湖北 武汉 430033; 3.武汉大学 动力与机械学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 采用 SIMPLE算法和 RNG $k-\varepsilon$湍流模型, 针对某一种 CP型喷射泵的内部流场进行了数值模拟, 模拟中考虑几种不同的喉管长度, 对比分析了泵的性能和内部流场. 结果表明: 喉管长度对泵的性能、沿程压力和内部流场有重要影响. 不考虑汽蚀因素影响, 在 2.5~6.0倍喉管直径范围内, 喉管越长, 喷射泵的最高效率也就越高, 最高效率点随之右移. 通过对效率、喉管出口断面的动能修正系数、动量修正系数及沿程压力变化曲线的分析, 表明在 3.7~4.5倍喉管直径范围内, 该泵在设计工作点的性能最优. 综合以上各因素, 该 CP型喷射泵最优喉管长度应为喉管直径的 3.7~4.5倍.

关键词: 喷射泵; 数值模拟; 喉管长度; 流场分析; 效率
中图分类号: TV131 文献标志码: A 文章编号: 1005-6254(2008)05-0034-04

Calculation of throat pipe length in CP type jet pump based on numerical simulation

GU Qing-chun[1], *YU Zhi-jun*[2], *WANG Feng-jing*[3], *LONG Xin-ping*[3]
(1. Navy Representative Section at 704 Research Institute, Shanghai 200031, China; 2. Navy University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China; 3. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: Based on SIMPLE algorithm and RNG $k-\varepsilon$ turbulence model, numerical simulation was carried out to calculate the inner flow field of the CP type jet pump with throat pipe of different lengths. By comparison and analysis on their performance and inner flow field, it was found that the throat pipe lengths has important effect on the performance, the pressure distribution as well as the inner flow field of the jet pump. Regardless of cavitation, with the length of throat pipe in the range of (2.5~6.0) times of throat diameter, the peak efficiency will also increase and the point of peak efficiency will move to the right to the larger flow rate ratio region. By analysis of the efficiency, the kinetic energy correction coefficient α and the momentum correction coefficient α' at the throat outlet section together with the pressure distribution, it revealed that in the range of (3.7~4.5) times of throat diameter, the jet pump performs best in the design duty point, which must be the optimal length of throat pipe for the CP jet pump.

Key words: jet pump; numerical simulation; throat pipe length; flow field analysis; efficiency

喷射泵本身没有运动部件, 具有结构简单、密封性好、可靠性高、便于维护和加工容易等优点, 在储存放射性、易燃、易爆等物品的特殊场合具有不可替代的优势. 因此, 被广泛应用于动力、机械、农业、航空航天等领域. 喷射泵主要由喷嘴、喉管、扩散管及吸入室等部件组成, 喉管是其中重要的组成部分. 喷嘴喷射的高速流体与被抽吸的低速流体主要在喉管内进行动量、能量的交换与混合, 所以喉管尺寸的选择对喷

收稿日期: 2008-05-19
基金项目: 海军引进装备课题基金资助项目 (ZJJ/G2006-234/B071)
作者简介: 顾青春(1966—), 男, 江苏泰兴人, 高级工程师, 主要从事舰船流体机械的研究.
俞志君(1970—), 男, 江苏姜堰人, 高级工程师 (zhbyyz@sina.com), 主要从事流体机械的研究.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

射泵的性能有极其重要的影响. 喉管长度是影响喷射泵效率的重要几何参数之一, 通常以喉管直径的倍数关系 n来表示. 一般期望工作流体和被抽流体正好在喉管出口处完成混合过程, 并形成管流的流速分布. 喉管过短, 流体不能在喉管内均匀混合, 导致出口处流速分布不均匀, 会在扩散管中形成较大流动损失; 相反, 喉管过长则会增加流体在喉管内摩阻损失. 因此有必要对喉管长度最优取值范围进行深入研究.

国内外学者对喷射泵性能、内部流场及喉管长度取值进行了分析和研究[1-7], 给出了最优喉管长度取值范围. 但由于喷射泵结构参数不尽相同, 因此结论有较大出入. 陆宏圻等[7]认为最优喉管长度 n应为 5~ 8, 而另有学者则认为应取 3~ 7. 另外, 以往研究不考虑汽蚀的发生, 分析使喷射泵达到最高效率所对应最优喉管长度, 很少单独考虑在面积比确定情况下, 某一流量比所对应的最优喉管长度.

数值模拟在泵的设计计算与分析中得到了广泛的应用[8]. 为此, 本研究应用 FLUENT软件, 对 CP型喷射泵内部流场进行数值计算, 以效率最高为准则分析泵的最优喉管长度; 另外还根据工程实际情况, 对于某一面积比, 分析使某一流量比具有最高效率所对应的最优喉管长度. 揭示喉管长度对喷射泵特性的影响, 给出最优喉管长度取值范围.

1　计算模型、网格和边界条件

本研究模拟的 CP型喷射泵结构见图 1, 其喉管长度为 115 mm, 与喉管直径比 n= 3. 7, 原设计流量比为 0. 79. 在计算中, 假定泵的其他结构参数不变, 通过改变喉管长度来进行数值计算, 以便确定其最优值.

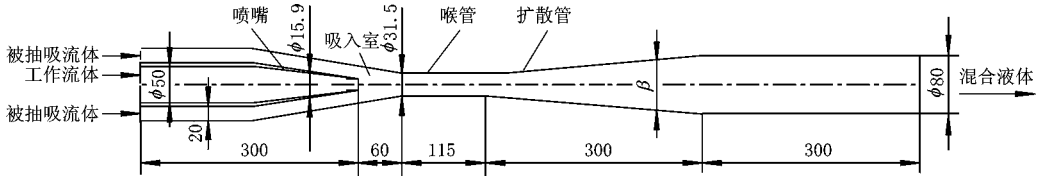


图 1　CP型喷射泵结构简图

Fig. 1　Structure diagram of CP type jet pump

一般射流泵吸入管位置对泵性能的影响可以忽略[6]. 因此在保证喉管流量和喷嘴出口截面积不变的前提下, 可认为被抽吸流体与工作来流方向一致, 从而将流动简化为轴对称问题. 为保证来流稳定, 可设距喷嘴出口上游 300 mm 处为无穷远来流处, 并定义为两股流体的进口. 另外, 为了保证流场出口的稳定, 在扩散管后增加了 300 mm 的直管段.

喷射泵内部流场属于不规则区域的有限空间射流流动, 所以计算不宜采用统一的网格, 而应根据速度梯度的变化来调整. 从喷嘴出口到喉管入口这一区域, 两股流体开始混合, 发生剧烈的能量交换, 紊流剪切力和压力脉动较大, 故此区域的网格划分较密. 采用 RANS方法计算, 选用 RNG $k-\varepsilon$湍流模型, 而压力和动量方程的耦合采用 SIMPLE算法.

边界条件设定中, 进口设为质量流量进口, 出口设为压力出口, 壁面按无滑移壁面处理, 对称轴采用轴对称边界. 离散项中动量方程设置为二阶迎风格式.

2　喷射泵性能模拟与试验对比分析

喷射泵的性能通常用无因次参数压力比 h、流量比 q与面积比 m 来表示, 各参数定义详见文献 [7]. 喷射泵的基本性能 $h = f(m, q)$, 是以 m为参变量的曲线, 一般 $h = f(q)$ 曲线基本呈直线变化[7]. 而喷射泵的效率可以表示为

$$\eta = \frac{qh}{1-h} \qquad (1)$$

为了验证数值模拟的有效性, 本研究将计算结果与试验数据进行了对比 (见图 2). 由图 2知, 计算结果和试验数据吻合较好. 表明利用 FLUENT计算喷射泵内部流场和性能, 并对喉管长度进行优化是可靠的.

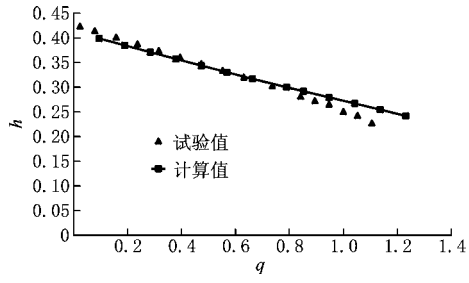


图 2　模拟与试验的喷射泵性能曲线对比

Fig. 2　Comparison of performance curve between simulation and experiment

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 结果与分析

3.1 喷射泵的效率

为了研究喉管长度变化对喷射泵内部流场和性能的影响, 本研究中喷射泵的其他几何尺寸不变, 喉管长度分别取直径的 2.5~6.0倍来进行计算, 以分析其对效率的影响. 在计算中, 设定工作流体质量流量不变, 通过改变被抽流体的流量来改变流量比 q. 流场计算收敛后, 输出工作流体入口、被抽流体入口和混合流体出口的压力和速度, 并计算得到相应的 h和 η, 计算结果如图 3所示.

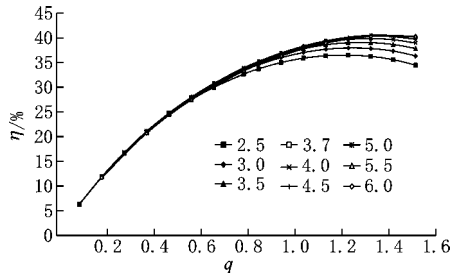


图 3 不同喉管长度的 $\eta - q$曲线

Fig. 3 $\eta - q$ performance curve of different throat length

从图 3可以看出, 小流量比情况下, 不同喉管长度的 $\eta - q$曲线基本重合在一起, 说明在小流量比工况下, 喉管长度的变化对效率影响很小. n在 2.5~6.0范围内时, n越大, 喷射泵的最高效率也就越高, 最高效率点随之右移, 高效区的宽度也随之增长. 但不同的是, n在 2.5~3.7范围内时, 喉管长度的变化对泵的效率影响很大, 而当 n在 3.7~6.0范围内时, 喉管长度的变化对泵效率影响相对较小, 其中 n在 4.5~6.0范围内时, 几条曲线基本重合在一起.

在喉管入口及喉管内, 工作流体和被抽流体开始混合, 流速渐趋一致, 至喉管某一截面处, 两股流体混合均匀, 完成能量交换, 对应的长度即为最优喉管长度. 如果喉管长度低于最优喉管长度, 两股流体未混合均匀就进入扩散管, 流动损失加大, 降低泵的效率; 反之, 喉管过长则沿程损失加大, 泵的效率也降低.

3.2 设计工作点的泵效率

在工程实际中, 由于泵长期在某一流量比左右工作, 该工作点泵性能的好坏直接影响到整个系统的经济运行, 而以往的研究很少对这一问题进行分析. 该泵的设计流量比为 0.79, 本研究选取该流量比进行分析, 所得结果如表 1所示. 其中, a为不同喉管长度所对应效率与设计喉管长度对应效率的相对值.

从表 1可以看出, n = 3.7~4.5时, 喷射泵的效率都有不同程度的提高, 当 n = 4.0时喷射泵在此流量比下的效率最高, 比设计效率提高 0.19%. 喉管过长或者过短都会降低该点泵的效率. 在实际运行中, 喷射泵长期在该工作点运行, 效率的高低将会对整个系统的经济性带来影响.

表 1 不同喉管长度下, 设计工作点的效率

Tab. 1 Efficiency of duty point of different throat length

n	2.5	3.0	3.5	3.7	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
η/%	32.65	33.38	33.78	33.84	33.91	33.86	33.71	33.50	33.26
a/%	-3.52	-1.35	-0.19	0	0.19	0.06	-0.38	-1.01	-1.73

3.3 喉管出口速度分布

在喷射泵性能的研究中, 国内外学者一般都采用一元流和准二维理论, 即总体上假定流速沿过流断面均匀分布, 然后利用动能修正系数 α及动量修正系数 α'进行修正[7]. α与 α'定义为

$$\alpha = \frac{\frac{\rho g}{2g}\int_A u^3 \mathrm{d}A}{\frac{\rho g}{2g}v^3 A} = \frac{\int_A u^3 \mathrm{d}A}{v^3 A}$$

$$\alpha' = \frac{\frac{\rho g}{2g}\int_A u^2 \mathrm{d}A}{\frac{\rho g}{2g}v^2 A} = \frac{\int_A u^2 \mathrm{d}A}{v^2 A}$$

式中 u为各点实际流速; v为断面平均流速; A为断面面积.

α和 α'表征了某一截面流速分布的均匀程度, 其大小取决于截面上各点 u的分布, α和 α'越大, 表示该截面流速分布越不均匀. 表 2显示了在 q = 0.79时, 不同喉管长度所对应的喉管出口处的 α及 α'值.

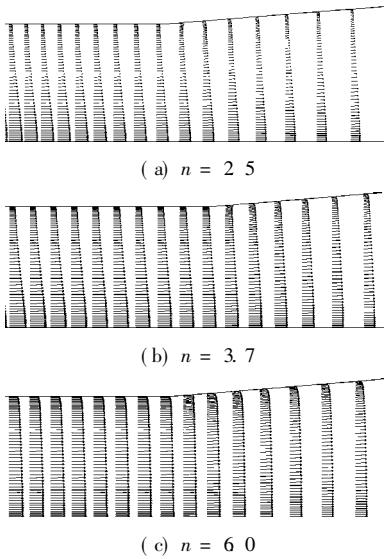
从表 2可见, 喉管长度与喉管出口处的 α及 α'之间存在着直接的联系, 喉管越长, α与 α'也就越小, 说明两股流体在喉管内混合得越均匀. 图 4则直观地显示了 q = 0.79时, 3种喉管长度所对应的喉管出口处的速度分布. 从图 4中可以看出, 喉管越长, 两股流体在喉管内混合得越充分, 流速也更趋于均匀.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　不同喉管长度下喉管出口断面 α与 α′(*q* = 0.79)

Tab.2　α and α′ at throat outlet section of different throat length(*q* = 0.79)

n	2.5	3.0	3.5	3.7	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
α	1.42	1.28	1.18	1.16	1.12	1.08	1.06	1.05	1.04
α′	1.15	1.11	1.08	1.07	1.06	1.05	1.04	1.03	1.03



(a) *n* = 2.5

(b) *n* = 3.7

(c) *n* = 6.0

图 4　不同喉管长度下喉管出口断面速度分布(*q* = 0.79)

Fig.4　Velocity distribution at throat outlet section of different throat length

3.4　沿程压力变化

图 5为 *q* = 0.79,工作压力 p_g = 300 kPa时,不同喉管长度对应的壁面压力沿程变化.喉管入口处,泵的过流面积突然减小,此处的壁压有一定下降.在喉管内,两股流体发生动量、能量的交换,壁压随之升高.在喉管的某一断面处,两股流体混合均匀,完成能量的交换,对应的壁压升至局部峰值.随着混合流体流入扩散管,部分动能转化为压能,壁压逐渐升高直至稳定在某一数值.

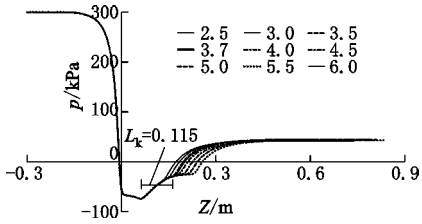


图 5　壁面压力沿程变化

Fig.5　Wall pressure distribution

图 5中, *Z* 表示沿泵轴线的距离,原点设在喷嘴出口处,朝泵的出口方向为正.在喉管前端,几条曲线基本重合在一起,说明喉管长度变化对上游压力场影响很小. *n* < 3.7时,由于两股流体在喉管内尚未充分混合均匀就进入扩散管,所以压力提升很快,但增大了扩散管内的流动损失; *n* > 4.5时,流体在喉管前段已经混合均匀,因此壁压在喉管后段变化较小,有一段很明显的压力平缓下降区,增大了喉管内的摩阻损失.因此在 3.7 ~ 4.5倍直径范围内,喉管内壁面压力提升的较为理想.

4　结　论

本研究应用 FLUENT软件,选用 RNG *k* - ε湍流模型和 SIMPLE算法,对 CP型喷射泵分别选取 2.5~6.0倍喉管直径的不同喉管长度,数值模拟了其内部流场和性能.对比分析表明, *n* 对喷射泵内部流场和性能有很大的影响.喉管长度过长或过短都会降低喷射泵效率.而对某一确定的流量比, *n* 的变化对喉管上游压力场影响很小.在设计流量比 *q* = 0.79下, *n* = 3.7~4.5时,泵的性能最优.综合考虑,对于 CP型喷射泵,最优喉管长度应为喉管直径的 3.7~4.5倍.该结论为同类喷射泵的设计提供了有力的参考.

参考文献(References)

[1] Winoto S H, Li H, Shah D A. Efficiency of jet pumps [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, 126(2): 150-156.

[2] 龙新平, 朱劲木, 梁爱国, 等. 射流泵喉管最优长度的数值计算 [J]. 水利学报, 2003(10): 14-18.
LONG Xin-ping, ZHU Jin-mu, LIANG Ai-guo, et al. Numerical calculation of optimal length of throat pipe in jet pump [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003(10): 14-18. (in Chinese)

[3] 朱劲木, 梁爱国, 龙新平. 射流泵性能的数值计算 [J]. 武汉大学学报: 工学版, 2002, 35(6): 7-10.
ZHU Jin-mu, LIANG Ai-guo, LONG Xin-ping. Numerical calculation of performances of jet pump [J]. *Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering*, 2002, 35(6): 7-10. (in Chinese)

[4] 龙新平, 程　茜, 韩　宁, 等. 射流泵最佳喉嘴距的数值模拟 [J]. 核动力工程, 2008, 29(1): 35-38.
LONG Xin-ping, CHENG Qian, HAN Ning, et al. Numerical simulation of optimal nozzle-to-throat clearance of jet pump [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2008, 29(1): 35-38. (in Chinese)

(下转第 49页)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 结　论

传统的各类型圆柱形叶片有一共同不足: 叶片包角这一重要叶轮参数是由叶片进、出口边界条件确定的, 不能由设计人员根据需要给定, 这是妨碍提高圆柱形叶片性能的一重要原因. 本研究以艾尔米特插值技术为基础, 通过数值计算, 导出了一可给定包角的圆柱形叶片型线的极坐标插值方程, 研究中给出了这一插值方程的推证过程及叶片绘形过程, 为低比转速叶轮设计人员提供了一种新的圆柱形叶片设计新方法.

参考文献 (References)

[1] Kelder J D H, Dijkers R J H, Van B P M. Experimentakl and theoretical study of the flow in volute of a low specific-speed pump [J]. *Fluid Dunamics Research*, 2001, 28: 267-280.

[2] 谈明高, 刘厚林, 袁寿其. 离心泵水力损失的计算 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2007, 28(5): 405-407.
TAN Ming-gao, LIU Hou-lin, YUAN Shou-qi. Calculation of hydraulic loss in centrifugal pumps [J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2007, 28(5): 405-407. (in Chinese)

[3] Lobanoff. *Centrifugal Pumps: Design & Application* [M]. Houston: Gulf Publishing Company, 1996: 29-43.

[4] 曹树良, 王万鹏, 祝宝山. 离心泵压水室内部流动数值模拟 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2004, 25(3): 185-188.
CAO Shu-liang, WANG Wan-peng, ZHU Bao-shan. Numerical simulation of internal flow through the spiral casing of centrifugal pump [J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2004, 25(3): 185-188. (in Chinese)

[5] Pedersen N, Larsen P S, Jacobsen C B. Flow in a centrifugal pump impeller at design and off-design conditions [J]. *Journal of Fluid Engineering*, 2003, 25: 61-72.

[6] 阎永强, 梁武科. 遗传算法在离心泵叶片优化设计中的应用 [J]. 排灌机械, 2004, 22(2): 5-7.
YAN Yong-qiang, LIANG Wu-ke. Prospect of genetic alogritym to optimization design of blade for centrifugal pump impellers [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2004, 22(2): 5-7. (in Chinese)

[7] 严　敬, 潘光玉, 阚能琪. 低比转速叶轮叶片数的选择原则 [J]. 排灌机械, 2008, 26(1): 18-20.
YAN Jing, PAN Guang-yu, KAN Neng-qi. Criteria of blade number selection for low specific-speed impeller [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2008, 26(1): 18-20. (in Chinese)

[8] 陈乃祥, 吴玉林. 离心泵 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 105-117.

[9] Yan J. A new way of plotting cylindrical blade [J]. *Journal of Paver of Energy: Part A*. 1990, 204(4): 277-280.

(责任编辑　贾国方)

(上接第 37页)

[5] Karassik I J, Messina J P, Cooper P, et al. *Pump Handbook* [M]. 3rd ed. New York: McGRAW-HILL, 2001: 1-4, 30.

[6] Zhu Jinmu, Han Ning, Long Xinping. Three-dimensional numerical simulation on flow field within a jet pump [C] // Xue Shengxiong, Shu Pingling. *8th Asian Intemational Fluid Machinery Conference*. Hefei: Press of Hefei University of Technology, 2005: 427-435.

[7] 陆宏圻, 龙新平, 朱劲木, 等. 喷射技术理论及应用 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004.

[8] 王福军, 黎耀军, 王文娥, 等. 水泵 CFD应用中的若干问题与思考 [J]. 排灌机械, 2005, 23(5): 1-10.
WANG Fu-jun, LI Yao-jun, WANG Wen-e, et al. Analysis on CFD application in water pumps [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2005, 23(5): 1-10. (in Chinese)

(责任编辑　赵　鸥)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net