DOI: 10.3901/JME.2013.10.156

基于型线的螺旋离心泵叶轮做功能力研究*

权 辉¹ 李仁年¹ 苏清苗² 韩 伟¹ 李琪飞¹ 申正精¹

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院 兰州 730050;

2. 兰州理工大学石油化工学院 兰州 730050)

摘要: 为研究螺旋离心泵叶轮各段做功能力,采用 $N-S$ 方程和标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型对螺旋离心泵的内部流场进行数值模拟计算。在数值模拟基础上,考察沿叶片包角的全程速度、压力、体积分数等变化规律,借鉴翼型升力系数和阻力系数的概念,将叶轮对输送介质能量传递分解为离心力做功产生项、翼型升力做功产生项和容积变化产生项,引入离心力载荷系数、升力载荷系数和容积载荷系数的概念,用叶片载荷系数来分析螺旋离心泵叶轮各段做功能力,并且分析两相流介质对叶轮做功的影响。结果表明螺旋离心泵流体的能量主要是螺旋段提供的,叶轮前部螺旋段起到了多级加能的作用;固液两相流在螺旋离心泵内部做湍流运动,受叶轮螺旋推进和离心作用,使得固液两相以不同的速度运动。液相作为主相,能量转换主要是液体能量的变化,固相是在液体的裹挟下运动,固体能量也是通过液体间接进行的。大粒径的固相和较高的体积浓度两相流更有利于两相流中的液体能量转换,相反,体积分数过高时,反而不利于能量传递。

关键词: 螺旋离心泵 型线 载荷系数 数值模拟 做功能力

中图分类号: TH311

Research on Work Capacity of Screw Centrifugal Pump Impeller Based on Profile Lines

QUAN Hui¹ LI Rennian¹ SU Qingmiao² HAN Wei¹ LI Qifei¹ SHEN Zhengjing¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050;

2. School of Petrochemical Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

Abstract: Based on the $N-S$ equation and $k-\varepsilon$ standard turbulence model, the inner flow of a screw centrifugal pump is simulated to study the work capacity of the impeller. The velocity, pressure and concentration along the blade in the whole process are observed, the energy transfer of transmission medium produced by impeller is separated into the centrifugal force work, the airfoil lift work and the volume change with the concept of lift coefficient of airfoil and drag coefficient, the blade load coefficient is used to analyze working capability of each segment of screw centrifugal pump impeller by introduction of load coefficient of centrifugal force, load coefficient of lifting and volume load coefficient, and the effect of two phase flow medium on impeller working is also analyzed. The results show that fluid energy of screw centrifugal pump is primarily provided by helical segment, the helical segment in the front of the impeller play an important role in multistage energized, the solid-liquid flow in screw centrifugal pump is turbulent flow, and the solid and liquid phase flows with different velocities respectively because of being pushed by the impeller screw and centrifugal effect. As liquid phase is the primary phase, the energy conversion is mainly up to the change of liquid energy, the solid phase flows under the wrapped action of liquid, and solid energy is carried out through liquid indirectly. Large particle size of solid phase and the higher volume concentration of two phase flow are more advantageous to the liquid energy conversion in the two-phase flow, on the contrary, when the volume concentration is too high, it is not conducive to the liquid energy conversion.

Key words: Screw centrifugal pump Profile Lines Load factor Numerical simulation Work capacity

0 前言

螺旋离心泵作为一种具有特殊结构的新型杂

质泵,它将螺旋泵与离心泵二者的优势融合为一体(螺旋离心泵实物如图1所示),其独特的结构可将两者的优势充分发挥。相比其他杂质泵,螺旋离心泵具有良好的无堵塞性、吸入性能、调节性能和抗汽蚀性能,并具有无过载、效率高及高效区宽等优点^[1-2]。

* 国家自然科学基金(51079066)、甘肃省自然科学基金(0906ZTB093)和甘肃省财政厅专项基金(5101ZTC003)资助项目。20121114 收到初稿,20130420 收到修改稿

图1 螺旋离心泵叶轮及泵体照片

由于螺旋离心泵叶轮的的特殊性,其独特的结构使内部流动明显的呈混合螺旋运动,相对于普通离心泵,效率还有很大的提升空间。且螺旋离心泵属于典型的固液两相流泵,输送两相流介质时,由于固相和液相的密度不同,导致产生流动分层,这样不但影响了泵的水力性能,而且容易使得固体颗粒和过流表面冲突造成泵过流部件磨损等问题,加上包角较大,如何合理设计叶片和调整螺旋段与离心段的比列,使得叶轮有较大的出力,对于整机的效率提高具有重要的意义。而且,叶轮做功过程的研究是螺旋离心泵的重点和难点,这也是建立该类杂质泵优化设计方法和先进设计理论首要问题。

1 理论基础和试验方案

1.1 理论基础

为分析叶片型线各段的做功原理和能量转化能力,借鉴翼型升力系数和阻力系数的概念,将叶轮对输送介质能量传递分解为离心力做功产生项 H_c 、翼型升力做功产生项 H_a 和容积变化产生项 H_v , 则欧拉方程可写为^[3-4]

$$H_{Too} = \frac{u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1}}{g} = \frac{u_2^2 - u_1^2}{g} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{g} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{g} = H_c + H_a + H_v \quad (1)$$

式中, H 为扬程, u 为牵连速度, c 为绝对速度, w 为相对速度, g 为重力加速度; 下标 1、2 分别表示进出口, Too 为理论无限叶片, c 为离心力, a 为升力, v 为容积。

引入沿叶片包角和叶片型线半径的三个叶片载荷系数, 分别是离心力载荷系数 λ_c 、升力载荷系数 λ_a 和容积载荷系数 λ_v , 定义

$$\lambda_c = \frac{H_c}{H_{Too}} \quad \lambda_a = \frac{H_a}{H_{Too}} \quad \lambda_v = \frac{H_v}{H_{Too}} \quad (2)$$

通过沿叶片全程的速度、压力变化规律, 建立

叶片载荷系数关于螺旋离心泵叶片型线的包角变化曲线, 探究螺旋离心泵叶轮做功能力。

1.2 试验方案

采用沿叶轮轮缘和轮毂型线分段取监测点, 分析其做功能力。其中, 螺旋离心泵叶轮型线如图 2 所示。按以下流程完成。沿叶轮、轮毂取监测点→介质为固液两相流沙水→数值模拟→得到监测点的参数(速度、压强)→应用欧拉方程将能量建立叶轮型线载荷系数的变化曲线→沿轮缘、轮毂型线分析叶轮各段的做功能力。

图2 螺旋离心泵叶轮的型线

为了均匀地得到监测点, 在 Pro/E 软件中以叶轮轴线为轴, 应用投影法将轮缘线、轮毂线投影在叶轮上, 叶轮轴面投影每旋转 36° 与上下轮缘线和轮毂线的交点来取监测点(图 3)。其中, 点标号 PIN1 和 PIN23、PIN24 和 PIN46、PIN47 和 PIN68、PIN69 和 PIN90 分别为轮缘和轮毂线所取的始末特征点。

图3 沿叶轮轮缘和轮毂所取检测点

2 模型建立及数值方法

2.1 模型泵的参数及网格划分

选用 150×100LN-32 型螺旋离心泵建立模型, 其各项性能参数如下: 体积流量 $q_v = 165 \text{ m}^3/\text{h}$, 扬程 $H = 32 \text{ m}$, 转速 $n = 1480 \text{ r/min}$, 轴功率 $P = 23.2 \text{ kW}$ 。

对计算区域, 划分为非结构四面体网格, 其中整个流道网格节点总数为 89 403 个, 单元总数为 507 886 个, 并进行了网格无关性检查。得到各段模

型和网格如图 4 所示。

图 4 螺旋离心泵计算域及网格

2.2 数值方法

螺旋离心泵流道由叶轮和蜗壳组成, 采用固定在叶轮表面的旋转坐标系为相对坐标系, 则叶轮内的流动可视为定常流动, 而整个流道内部流场为三维不可压稳态湍流场。入口处和出口处分别采用速度进口和自然出流边界条件, 同时在进口段、叶轮锥段、蜗壳壁面等固体壁面上采用无滑移边界条件, 在临近固壁的区域采用标准壁面函数^[5-6]。建立相对坐标系下的时均连续方程及 $N-S$ 时均方程等控制方程组, 利用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型来封闭方程组^[7-8]。

根据固液两相流含沙水具体情况, 选用 Mixture 多相流模型。为保证计算精度的前提下尽可能地节省计算时间, 对流项的离散采用一阶迎风格式^[9-10], 耗散项采用中心差分格式, 设定收敛精度为 10^{-5} , 压强-速度方程的迭代求解采用 SIMPLE 算法。

3 数值模拟结果与分析

模拟螺旋离心泵输送的固液两相流体采用含沙水。液相的清水为第一相, 固相的沙粒为第二相, 在定义固体颗粒的体积分数时假定进口处体积分数均匀分布^[5], 且等于固体输送浓度进行数值模拟计算。其中, 两相流的物性如下表所示。

表 流体物性的参数

液体密度 /(kg/m^3)	固体密度 /(kg/m^3)	颗粒粒径 /mm	体积分数 (%)
998	2 650	0.076	20

3.1 计算结果及流场分析

经过数值模拟得到螺旋离心泵内部流场的压力分布、速度分布、固相的体积分数分布如图 5~7 所示。

图 5 压力分布

图 6 速度分布

由图 5 分析可知, 介质在两相流下的压力范围同样比清水的要广, 并且压力更大, 这与蜗壳的作用是有关系, 蜗壳主要作用是收集液体, 导向排出管, 最终将液体的动能转换为静压能, 因此, 当介质由清水换为两相流沙水时, 蜗壳上的压力更大。

分析图 6 可知, 对于固液两相流中的液相清水和固相颗粒来说, 在叶轮的工作面上的速度范围不同, 液相的速度最大值明显比固相的大, 最小值比固相的小, 也就是说液相的速度范围比固相的广。这是因为一方面液相是主相, 另一方面固相密度大, 惯性大, 因此出现了速度滑移, 由此也说明了对于

两相流的沙水, 在叶轮的做功下会出现滑移速度。

由图 7 可以看出固相体积分数分布情况。在进口螺旋段同一轴面, 随着包角的增大, 叶轮工作面的固相体积分数降低, 叶轮背面则相反。这是因为工作面直接参与做功, 叶轮的螺旋推进作用和离心作用使固相颗粒被甩离了工作面; 在出口离心段和蜗壳处, 叶轮背面的固相体积分数从轮毂到轮缘逐渐升高, 在工作面体积分数逐渐降低, 固相颗粒体积分数在蜗壳和出口处逐渐达到平衡。

图 7 固相体积分数分布

3.2 可靠性验证

为了保证研究方法和模拟结果的可靠性, 在开式试验台对 150×100LN-32 型螺旋离心泵进行了外特性试验, 得到了性能曲线中的扬程-流量曲线, 并且数值模拟结果与试验结果进行了比较分析^[11-12]。图 8 为该泵的试验与数值模拟所得性能曲线。

图 8 螺旋离心泵性能曲线

由图 8 中扬程-流量曲线可以看出, 在设计工况下, 扬程的试验值和数值模拟值模拟结果吻合程度较高, 误差在 3% 之内。在体积流量为 0~170 m³/s, 平均误差为 2.6%, 当体积流量为 170~260 m³/s, 平均误差为 5.2%, 整个流量范围内平均误差为 3.6%。通过试验验证, 证明了采用本文中的数值模拟方法, 具有较高的可靠性, 能够满足对螺旋离心泵叶轮做功能力的评价。

3.3 叶轮做功能力分析

将两相流沙水介质分为液相清水和固相沙粒的来处理, 则欧拉方程^[9-10]可做以下变形

$$H_{T00} = \frac{u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1}}{g} = \frac{u_2^2 - u_1^2}{g} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{g} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{g} =$$

$$H_c + H_a + H_v = H_{cw} + H_{cs} + H_{aw} + H_{as} + H_{vw} + H_{vs} \quad (3)$$

式中, 下标 w 表示液相清水, s 表示固相沙粒。

应用式(3), 将两相中的液相和固相应用式(2)建立两相各自的载荷系数, 通过数值模拟, 得到沙粒直径 $d=0.076$ mm, 体积分数为 20% 时各载荷系数沿包角的变化如图 9 所示。

由图 9 给出了轮缘线、轮毂线在叶轮工作面和背面, 沿叶片包角的能量变化以及各载荷系数的比例关系。

由图 9a、9b 可以看出, 轮缘线上沿叶片包角的能量变化趋势整体上一致。整个变化可分为四个阶段。第一阶段, 流体从管道进入泵体入口处。流体经过进口段受叶轮的作用, 做轴向螺旋运动, 使得能量有所减低; 第二阶段, 叶轮螺旋段做功。经过进口段后, 流体在叶轮做功的作用下, 所获得能量持续上升, 其中, 容积载荷系数所占比例最高; 第三阶段, 螺旋段向离心段过渡。此处叶轮半径有最大逐渐减小, 能量急剧下降; 在第四阶段, 叶轮离心段做功。可以看出, 能量整体上是下降的, 也就是叶轮作用能力是降低的, 并且在出口处, 同第三阶段一样, 叶轮做功能力急剧下降, 主要原因是离心段的工作面径向距离变短和叶片出口安放角比较小, 使得离心力小于最大半径处, 对流体做功就少; 另一方面离心段轴向距离较短, 要起到来自轴向速度向径向速度转变的作用, 混合时产生撞击损失, 而且来自最大半径处产生的回流, 势必会导致叶轮出口处的各相载荷系数有不同程度的降低。

由图 9c、9d 可以看出, 在叶轮轮毂处, 进口段由于流体流速由轴向向螺旋段过渡, 能量出现了下降, 而在沿包角变化整个过程中, 由于轮毂处不是做功的主要位置, 所以整体上各相载荷系数变化不是很大。

图9 叶轮各段沿包角 φ 的做功能力变化曲

3.4 两相流介质对螺旋离心泵叶轮做功能力的影响

在设计工况下,除模拟了两相流介质体积分数

为20%,粒径 $d=0.076$ mm的情况下外,还模拟了体积分数为40%,粒径分别为0.5 mm和1 mm时的两相流,以便分析介质对叶轮做功的影响。

3.4.1 两相流介质中固相粒径对做功能力的影响

由图10a可以看,在同样的工况下,当介质流量一定时,对于升力系数,叶轮整个做功过程中,前段螺旋段升力占主要地位,因此升力的载荷系数要比其他两个载荷系数整体大;在半径最大处逐渐减小过渡处,离心段的包角相对于整个叶轮比较小,因此导致升力载荷系数由较大的下降,粒径 $d=1$ mm的升力系数相对于粒径 $d=0.076$ mm下降得更快。对于容积系数,除了进口过后容积增大和离心段逐渐向出口段容积减小外,整体增加比较平缓;对于离心力载荷系数,螺旋段逐渐增加,由图10a变化曲线可以看出,在出口段离心力载荷系数高于其他两个,这个也是合理的,体现了主要是离心力的作用。对比粒径 $d=0.076$ mm和粒径 $d=1$ mm两种情况,粒径 $d=0.076$ mm的载荷系数变化要比粒径 $d=1$ mm大,这是因为同样的体积流量下,粒径下的密度小,因此要比粒径大的变化快。整体分析可以看出,除进口段外,粒径为1 mm的比粒径为0.076 mm的在叶轮做功中各项载荷系数要高,也就是说大粒径两相流有利于液体的能量转换。

由图10b分析,粒径 $d=0.076$ mm时,升力和离心力载荷系数随着包角整体变化不是很大,各段做功能力并不突出;容积载荷系数在进口螺旋段逐渐增大,在螺旋段向离心段过渡处骤然达到最大值,这是因为随着流体流动的深入,过渡处叶轮外径最大,且使得泵腔体的容积达到了最大。在离心段,容积载荷系数变化较复杂,出现了先升后降再升的过程变化,这是因为螺旋段向离心段过渡后,流体由轴向向径向转变,且叶轮轮缘半径是随之减小的,降低了离心段出力的品质,使得该段流体做功呈现了复杂性。而同样的,粒径为1 mm的比粒径为0.076 mm的在叶轮做功中各项载荷系数要高,这是因为在两相流中,能量的传递主要是主相液体完成的,固相是在液相“裹挟”下进行能量传递。

3.4.2 两相流介质中固相体积分数对做功能力的影响

由图11a可以看出,除在包角在 $500^\circ \sim 620^\circ$ 外,体积分数为40%比体积分数为20%的各相载荷系数高,其中,流体液相清水的离心力载荷系数比例高于其他两项。

由图11b可以看出,流体固相体积分数对升力载荷系数的影响较小,流体固相(沙粒)能量增幅不大。由此可知,固相体积分数的增加,在一定程度上强化了离心力的作用,对液体能量传递影响较大,

而对固相的能量传递影响并不明显。而在叶轮的进口段和螺旋段向离心段过渡处, 各项载荷系数急剧变化。这是由于固液两相流中液相和固相的力场不同, 固相速度低于液相速度, 固体对液流的过流通道产生了“相对阻塞”作用, 使液流的过流通道面积相对缩小, 液流畸变速度升高; 在叶轮离心段出口处, 无论是轮缘或轮毂的工作面及背面, 流体两相的流态不但受到水流的速度畸变影响, 还受到蜗壳过流面积的畸变影响, 因此这两段区域的载荷系数复杂多变。

图 10 粒径对叶轮做功能力的影响(体积分数为 20%)

4 结论

(1) 螺旋离心泵的不同于其他的固液两相流泵就在于其叶轮的的特殊性, 通过分析, 发现叶轮的做功主要是螺旋段提供的, 反映能量转换的各相载荷系数在该段整体上升。

(2) 在固相体积分数一定时, 粒径越大的流体, 越有利于液相的能量增加, 而固相随着液相完成能量转换, 因此与液相变化一致。

(3) 在固相粒径一定时, 体积分数大的流体, 越有利于液相的能量增加, 固相体积分数的增加, 使得叶轮离心力的出力增加, 同时, 较大体积分数流体由于固相和液相的速度滑移, 反而不利于能量传递。

图 11 体积分数对做功能力的影响($d=0.5\text{ mm}$)

参 考 文 献

- [1] STAHL M, JACKSON D. The development of a screw centrifugal pump for handling delicate solids[J]. World Pumps, 1982, 185: 53-55.
- [2] JACKSON D. High efficiency immersible pumps for solids handling applications[J]. World Pumps, 1982, 190: 335-341.
- [3] 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京: 宇航出版社, 2011.
GUAN Xingfan. Modern pumps theory and design[M]. Beijing: Astronautic Publishing House, 2011.
- [4] 齐学义. 流体机械设计理论与方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
QI Xueyi. Theory and methodology of fluid machinery design[M]. Beijing: China Water Power Press, 2008.
- [5] 陈冰. 螺旋离心泵的叶片变螺距设计及数值模拟[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2008.
CHEN Bing. Screw centrifugal pump vane variable-pitch

- design and numerical simulation[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2008.
- [6] 车得福, 李会雄. 多相流及其应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- CHE Defu, LI Huixiong. The application of multiphase flow[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007.
- [7] CAO Kun, LI Rennian. The study of wicket-gate flow field of hydraulic turbine[C/CD]//The 3rd Japan-China Joint Conference on Fluid Machinery. Osaka April, 1990.
- [8] ZHANG Yuliang, LI Yi, CUI Baoling, et al. Numerical simulation and analysis of solid-liquid two-phase flow in centrifugal pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 1(26): 53-60.
- [9] GANDHI B K, SINGH S N, SESHADRI V. Improvements in the prediction of performance of centrifugal slurry pumps handling slurries[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2000, 214(5): 473-486.
- [10] 李仁年, 陈冰, 韩伟, 等. 变螺距螺旋离心泵叶片型线参数方程的分析[J]. 排灌机械, 2007, 25(6): 1-10.
- LI Rennian, CHEN Bing, HAN Wei, et al. Analysis of vane profile parameter equation for variable-pitch screw centrifugal pump[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2007, 25(6): 1-10.
- [11] 李仁年, 权辉, 韩伟, 等. 变螺距对螺旋离心泵轴向力的影响[J]. 机械工程学报, 2011, 47(14): 158-163.
- LI Rennian, QUAN Hui, HAN Wei, et al. Numerical Analysis of the variable-pitch influence to axial force of screw centrifugal pump[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(14): 158-163.
- [12] 吴玉林, 曹树良. 渣浆泵叶轮中固液两相湍流的计算和实验[J]. 清华大学学报, 1998, 38(1): 71-76.
- WU Yulin, CAO Shuliang. Solid-liquid two-phase turbulent flow calculation and measurement through centrifugal slurry pump impellers [J]. Journal of Tsinghua University, 1998, 38(1): 71-76.
-
- 作者简介: 权辉, 男, 1984 年出生, 博士。主要从事水力机械及多相流研究。
E-mail: quan2010@163.com
- 李仁年(通信作者), 男, 1963 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要从事流体机械理论与设计研究。
E-mail: lirn@lut.cn