

文章编号: 1673-5196(2015)03-0059-05

离心泵输送清水和含沙水时滑移系数的变化

赵万勇, 葛靖国

(兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 应用 Fluent 软件对离心泵进行清水和含沙水的数值模拟, 分析离心泵在输送清水和含沙水时的滑移系数变化. 结果表明: 滑移系数的变化与扬程有关; 泵在输送清水和含沙水时滑移系数差异较大, 且滑移系数随流量的增大而迅速减小; 含沙水体积分数较小时, 滑移系数随粒径的增大而增大, 扬程也伴随升高; 体积分数增大, 滑移系数随着沙粒粒径的增大而减小, 随着体积分数的增大而递减剧烈, 扬程随之降低.

关键词: 离心泵; 含沙水; 滑移系数; 数值模拟

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A

Difference of slip factor for centrifugal pump between fresh and slit-laden water pumping

ZHAO Wan-yong, GE Jing-guo

(College of Energy and Power Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: Numerical simulation of centrifugal pump for fresh and slit-laden water transporting is performed with software Fluent, and the difference of slip factor for the pump between the two water transporting is analyzed. The result shows that the alteration of slip factor would be related to the pumping head and it would be comparatively significant. The slip factor decreases rapidly with the increase of pumping flow, and increases with the increase of particle size when sand volume fraction is small. And the pump head also increases to the accompaniment of the increase of particle size. When the volume fraction is larger, the slip factor would decrease with the increase of particle size of the sand grains and the slip factor would drastically decrease with the increase of volume fraction. Meantime, the hydraulic head would subsequently decreases.

Key words: centrifugal pump; slit-laden water; slip factor; numerical simulation

两相流离心泵广泛应用于农业、冶金、化工等行业, 特别是在农业生产灌溉中占据非常重要的地位. 离心泵的内部流动却十分复杂, 特别是离心泵叶轮内的流体流动更是一种非常复杂的三元流动, 目前很难精确计算它的内部流场, 同样的滑移系数也无法获取其真实值. 在离心泵的水力设计过程中滑移系数这一参数基本都是采用经验公式进行预测, 在过去的几十年里许多学者对滑移系数进行了研究, 并得到了不同的经验公式. 如: Buseman, Stodla, Pfleider, Weisner 等进行了深入研究并取得了成果, 同时结合试验提出了经验公式以便参考^[1]. 研究

者在研究滑移系数时认为无限多叶片数和有限多叶片数之间的主要差距在于有限多叶片数时相邻叶片流道间产生旋涡, 且旋涡方向与叶轮旋转方向相反, 从而使流体在叶片出口时速度降低, 以致叶轮的扬程降低, 然而理论扬程降低并非是水力损失造成. 无限多叶片数时叶轮的理论与有限多叶片数时的理论扬程有所不同, 以它们之间的差异 $\epsilon = H_t/H_{t\infty}$ 来表示, 称之为滑移系数^[2-3].

对于离心泵的滑移系数都是以清水作为工作介质进行分析研究的, 然而离心泵在输送不同工作介质时内部流动不同, 从而滑移系数也不尽相同. 对于离心泵在输送固液两相(含沙水)流时的滑移系数变化研究目前仍是空白. 因此, 做这方面的研究分析具有显著的理论 and 实用意义.

收稿日期: 2014-03-19

基金项目: 国家科技支撑计划(2013BAF01B02-07)

作者简介: 赵万勇(1962-), 男, 甘肃武威人, 教授.

本文应用传统的滑移系数计算方法和数值模拟相结合,对离心泵在输送含沙水时不同工况下的滑移系数进行计算,得到了滑移系数的变化曲线,并进行对比分析.希望对于以后离心泵的水力设计和性能预测提供参考依据.

1 滑移系数

有限多叶片数与无限多叶片数时叶轮理论扬程的比值称之为滑移系数,定义如下^[2-3]:

$$\epsilon = H_t / H_{t\infty} \quad (1)$$

同时:

$$H_t = (u_2 v_{u_2} - u_1 v_{u_1}) / g \quad (2)$$

$$H_{t\infty} = (u_2 v_{u_2\infty} - u_1 v_{u_1\infty}) / g \quad (3)$$

式中的出口速度分量如图 1 所示.

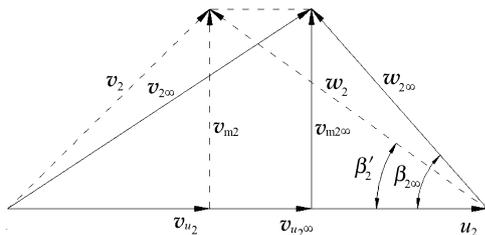


图 1 无限叶片数时和有限叶片数时的叶片出口速度三角形

Fig. 1 Velocity triangles at blade outlet for infinite and limited number of blades

故而滑移系数也可写成:

$$\epsilon = \frac{u_2 v_{u_2} - u_1 v_{u_1}}{u_2 v_{u_2\infty} - u_1 v_{u_1\infty}} \quad (4)$$

式中: H_t 为无限叶片数时叶片的理论扬程; $H_{t\infty}$ 为有限叶片数时叶片的理论扬程; 下标 2 为叶片出口参数, 下标 1 为叶片进口参数.

2 数值计算

2.1 模型建立

本文以某双吸离心泵为研究对象,该离心泵的基本参数为额定工况时扬程 56 m,流量 3 m³/s,效率为 88%,转速 600 r/min,叶片直径 1 150 mm,叶片出口宽度 112 mm,叶片入口平均宽度 246 mm,叶片数 $Z=6$,叶片出口角为 21.5°,叶片入口中间流线安放角为 28°^[4].采用 Pro/E 进行实体的三维建模,该离心泵的叶轮三维模型如图 2 所示.

应用 ANSYS 软件中的 ICEM 进行网格划分与平滑.本文所选离心泵的三维网格划分如图 3 所示.

2.2 数值模拟

计算应用多重参考系法,采用雷诺时均 N-S 方程和标准的 $k-\epsilon$ 模型进行处理,选用 Mixture 多相



图 2 双吸离心泵叶轮三维模型

Fig. 2 Three-dimensional model of double-suction centrifugal pump impeller

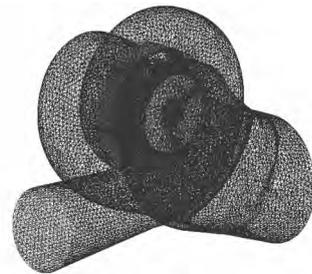


图 3 双吸离心泵网格划分图

Fig. 3 Grid division of double-suction centrifugal pump

流模型,采用 SIMPLEC 算法求解压力速度耦合方程,动量、能量、紊动能、耗散率采用二阶迎风格式.边界条件定义:入口条件为均匀速度入口,出口为自然流,壁面采用无滑移条件,近壁区采用壁面函数法修正.

本文先进行该泵的清水数值模拟,然后进行含沙水的数值模拟.含沙水中固体颗粒取不同颗粒直径和不同的体积分,在进行含沙水流数值模拟时进行以下假设:

- 1) 液相为清水;
- 2) 含沙水中沙粒全部为同种球形颗粒;
- 3) 沙粒材质相同且密度为 2 650 kg/m³.

本文选取 3 种不同的沙粒直径 $d=0.005, 0.015, 0.050$ mm, 4 种体积分 $\varphi=3\%, 7\%, 15\%, 20\%$ ^[5] 进行模拟对比.

3 模拟结果及分析

3.1 清水时的滑移系数

斯托道拉和威斯奈尔假设叶轮流道内存在轴向漩涡,轴向漩涡是影响有限叶片数时叶轮扬程的主要因素,轴向漩涡与叶轮旋转方向相反,仅考虑轴向漩涡对叶片出口速度的影响,在计算叶轮扬程时忽略进口速度的变化对其影响,即均认为 $v_{u_1} = 0$;由此可以得到斯托道拉和威斯奈尔预测的叶轮的扬程^[6].

1) 斯托道拉定义无限叶片数时叶轮的扬程为

$$H_{\infty}' = \frac{u_2 v_{u_2\infty}}{g} \quad (5)$$

有限叶片数时叶轮的扬程为

$$H_t' = \frac{u_2 v_{u_2}}{g} \quad (6)$$

计算有限叶片数时叶轮的扬程主要在于计算叶片出口绝对速度的圆周分量:

$$v_{u_2} = \sigma u_2 - \frac{v_{m2}}{\tan \beta_2} \quad (7)$$

式中: σ 为经验系数并由下式进行计算得到:

$$\sigma = 1 - \frac{\pi}{z} \sin \beta_2 \quad (8)$$

由式(6~8)可以计算得到:

$$H_t' = \frac{u_2 v_{u_2}}{g} = \frac{u_2}{g} \left(\sigma u_2 - \frac{v_{m2}}{\tan \beta_2} \right) \quad (9)$$

由斯托道拉定义计算的有限叶片数与无限叶片数的理论扬程可以计算得到传统定义下的滑移系数:

$$\epsilon = \frac{H_t'}{H_{\infty}'} = \left[\left(1 - \frac{\pi}{z} \sin \beta_2 \right) u_2 - \frac{v_{m2}}{\tan \beta_2} \right] / v_{u_2\infty} \quad (10)$$

2) 威斯奈尔经验公式在计算有限与无限叶片数时计算方法和公式基本一致,差异仅在计算有限叶片数时的经验系数 σ 不同.威斯奈尔定义的经验系数 σ 由下式进行计算:

$$\sigma = 1 - \frac{\sqrt{\sin \beta_2}}{Z^{0.7}} \quad (11)$$

则威斯奈尔计算有限叶片数时的扬程为

$$H_t' = \frac{u_2 v_{u_2}}{g} = \frac{u_2}{g} \left[\left(1 - \frac{\sqrt{\sin \beta_2}}{Z^{0.7}} \right) u_2 - \frac{v_{m2}}{\tan \beta_2} \right] \quad (12)$$

威斯奈尔与斯托道拉定义的无限叶片数时的理论扬程相同,由此,可以由威斯奈尔经验式下的无限叶片数和有限叶片数时的扬程计算得到滑移系数:

$$\epsilon = \frac{H_t'}{H_{\infty}'} = \left[\left(1 - \frac{\sqrt{\sin \beta_2}}{Z^{0.7}} \right) u_2 - \frac{v_{m2}}{\tan \beta_2} \right] / v_{u_2\infty} \quad (13)$$

本文所选模型泵的叶片出口角 21.5° ,叶片数为 6,可以由模型的基本尺寸以及速度三角形计算得到轴面速度 v_{m2} ,圆周速度 u_2 和 $v_{u_2\infty}$.从而可以计算得到斯托道拉和威斯奈尔经验式下的滑移系数.

清水数值模拟时,在叶片进口边和叶片出口加设监测点,并从数值结果计算获得绝对速度的圆周分量 v_u ,即可以得到 v_{u_1} 和 v_{u_2} ,并取计算得到的平均值,同时结合式(4)可以计算得到不同工况下叶轮

的模拟计算的滑移系数值.将模拟计算得到的滑移系数值与由斯托道拉和威斯奈尔计算得到的滑移系数值进行对比,同时应用 Origin 软件进行绘图,从而进行对比分析.绘制的曲线图如图 4 所示.

图 4 绘制了清水时由不同的扬程计算方法计算得到滑移系数变化曲线图.从图可以明显看出由斯托道拉以及威斯奈尔所定义叶轮的理论扬程从而计算的滑移系数 ϵ 与清水时模拟计算得到的滑移系数值差异较大,总体变化趋势相同,都随着流量的增大而减小.而模拟计算的滑移系数值随着流量的增大递减剧烈.图中在额定工况时由各扬程计算得到的滑移系数值差异不大,偏离额定工况时差异较大.其原因在于威斯奈尔和斯托道拉在计算有限叶片数时的理论扬程时忽略了入口速度的变化对其影响即 $v_{u_1} = 0$,而模拟计算时由模拟计算结果中获得进口速度的变化的真实值,这是产生曲线差异较大的主要因素,可见入口速度的变化对扬程的变化有很大的影响.数值模拟时在监测叶片进、出口的速度变化从而计算得到的滑移系数要比经验公式下计算得到的更精确,即表述了经验公式预测的有限叶片数的理论扬程与实际模拟计算的扬程差距较大.

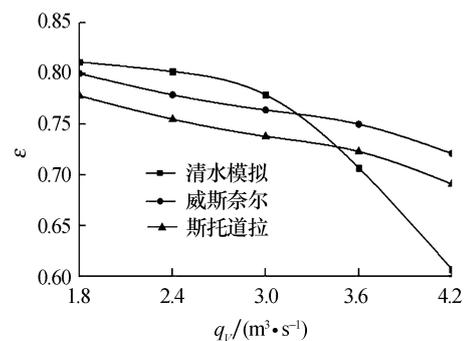


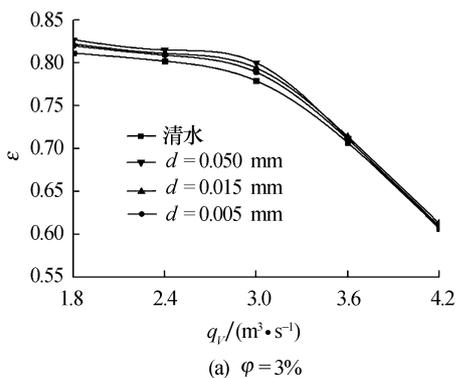
图 4 清水时不同况下的滑移系数变化曲线

Fig. 4 Variation curve of slip factor for fresh water pumping under different operational conditions

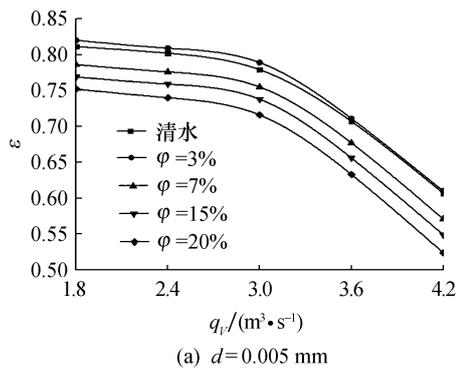
3.2 含沙水时的滑移系数

模拟计算含沙水时滑移系数的方法与清水计算方法相同,均是预先加设监测点,从模拟计算结果获得进、出口绝对速度的圆周分量取其平均值,再应用式(4)计算得到各工况下的滑移系数值,本文将含沙水时计算得到的滑移系数值与同工况下清水时的滑移系数值进行了绘图对比分析,各曲线分布如图 5 和图 6 所示.

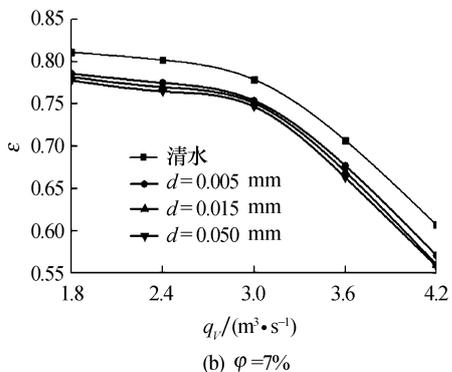
图 5 分别绘制了清水及不同粒径在相同体积分数时的滑移系数变化曲线.由图可见含沙水时的滑移系数与清水时变化趋势相同,随着流量的增大而减小.含沙水在较小体积分数 3% 时滑移系数值在



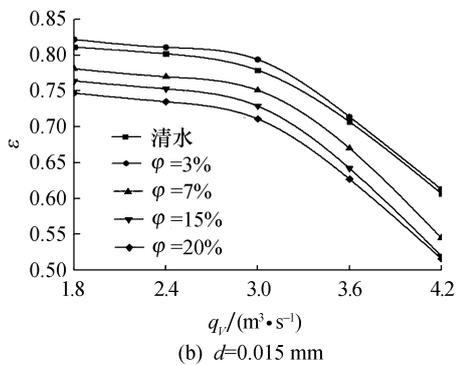
(a) $\varphi = 3\%$



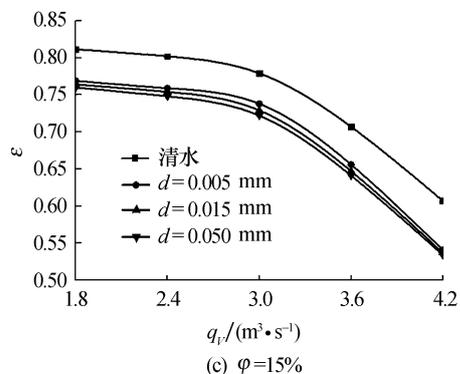
(a) $d = 0.005 \text{ mm}$



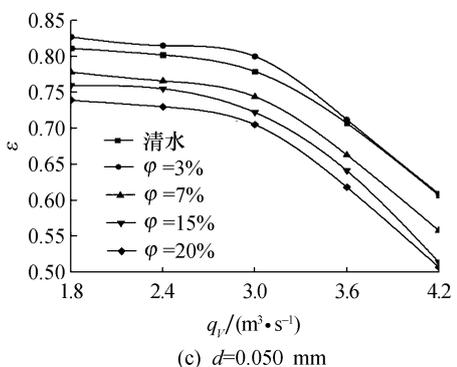
(b) $\varphi = 7\%$



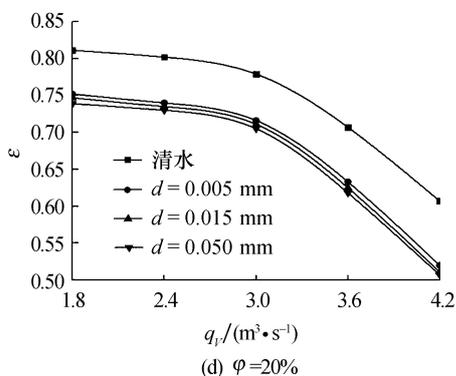
(b) $d = 0.015 \text{ mm}$



(c) $\varphi = 15\%$



(c) $d = 0.050 \text{ mm}$



(d) $\varphi = 20\%$

图 5 不同粒径相同体积分数时含沙水的滑移系数曲线
Fig. 5 Slip factor curves for pumping slit-laden water with different sand particle size and identical volume fraction of sand

同工况下略比清水要高,且随着沙粒粒径的增大而增大,其原因在于沙粒的存在使固相间的摩擦损失增大,然而颗粒粒径的增大又会拟制或延缓边界层

图 6 相同粒径不同体积分数时含沙水的滑移系数曲线
Fig. 6 Slip factor curves for pumping slit-laden water with different volume fraction of sand and identical sand particle size

的分离,使脱流损失减小,当减小的脱流损失大于增大的摩擦损失时,扬程就会升高,而滑移系数是在扬程的基础上计算的,即滑移系数也会随之升高.这与一般的固液两相流的实验结果比较符合^[7].

在较大体积分数时,减小的脱流损失逐渐小于增加的固相间摩擦损失,泵的扬程又开始逐渐降低,并随着沙粒的增大扬程降低越快,由此滑移系数值也随之减小.在大流量工况时滑移系数值降低更加迅速.滑移系数是扬程的比值,因此与扬程有直接的关系,它的数值大小预示有限叶片数时叶轮的理论扬程与无限叶片数时叶轮的理论扬程之间的差距,滑移系数越大差距越小,滑移系数越小,差距越大.

图 6 是分别对清水和相同颗粒直径在不同体积

分数下的滑移系数的曲线变化. 含沙水在较小体积分数时滑移系数较清水时略高, 且随流量的增大而减小. 随着体积分数的增大滑移系数随着粒径的增大而减小. 相同颗粒粒径下, 滑移系数随着沙粒体积分数的增大而迅速减小, 不同体积分数间的滑移系数值在不同工况时差异较大, 在大流量工况时滑移系数值更是迅速减小, 特别是体积分数为 7% 与体积分数为 20% 时相比, 下降的更为显著. 如在额定工况 q_v 时沙粒直径为 0.005 mm 时, $\varphi=20\%$ 与 $\varphi=7\%$ 的滑移系数值相比降低了 2.49%, 在 $1.2q_v$ 时滑移系数值降低了 4.6%; $1.4q_v$ 时滑移系数值降低了 7.81%; 所以滑移系数随着沙粒体积分数的增大递减剧烈.

由图 5 和图 6 分析对比了清水和含沙水时该离心泵的滑移系数的变化规律. 当含沙水体积分数较小时, 滑移系数略高于清水, 且随着沙粒粒径的增大而升高, 扬程也随之升高. 随着沙粒体积分数的增大, 滑移系数下降; 沙粒体积分数相同时, 滑移系数值随着沙粒粒径的增大而减小; 沙粒粒径一致时, 滑移系数值则随着沙粒体积分数的增大而急剧减小. 从选取的含沙水体积分数 φ 为 7%、15%、20% 能够明显表述滑因数值随着体积分数的变化规律. 含沙水时滑移系数随着体积分数和粒径的减小意味着扬程也随之降低, 这与固液两相流的实验和一般的固液两相流的模拟数据结果一致^[7].

通过对清水和含沙水下的滑移系数的分析对比发现, 沙粒粒径和体积分数的变化对滑移系数的影响较大, 即对扬程的影响较大, 滑移系数是扬程的比值, 滑移系数越大说明有限叶片数时的理论扬程越接近无限叶片数时的理论扬程, 则泵的扬程这一性能参数较高. 而斯托道拉和威斯奈尔经验公式计算下的有限叶片数与无限叶片数时的扬程比值即滑移系数与清水模拟计算的滑移系数值有较大差异, 小流量时较低, 大流量时较高, 与实际计算的数值差距较大. 因此, 由这两种经验公式进行预测的叶轮理论扬程与实际流动时叶轮的扬程差距较大, 即对于叶轮的扬程预测有较大的误差.

4 结论

1) 传统滑移系数计算式中对于有限叶片数时叶轮理论扬程的计算由于考虑入口速度的变化, 因此, 要比斯托道拉和威斯奈尔预测的叶轮理论扬程更贴近实际, 由不同叶轮扬程公式计算得到的滑移系数相差较大, 由传统的滑移系数计算式计算得到的滑移系数更精确.

2) 离心泵在输送清水和含沙水时的滑移系数值不同, 滑移系数整体上随流量的增大而减小, 尤其是在大流量工况时滑移系数值减小的更为明显.

3) 含沙水较小体积分数时滑移系数略高于清水, 且随着沙粒粒径的增大而增大. 含沙水体积分数增大时滑移系数会随固相颗粒和固相体积分数的变化变化. 当固相颗粒体积分数恒定时, 滑移系数随颗粒直径的增大而减小. 当固相颗粒粒径恒定时, 滑移系数随着固相体积分数的增大而降低.

4) 滑移系数是扬程的比值, 与扬程有直接的关系. 通过计算叶片进、出口速度来计算叶轮的扬程比较精确, 因此, 可以估测叶轮的进、出口速度来对叶轮的扬程进行预测.

参考文献:

- [1] 章成力. 离心泵叶轮滑移系数算法分析 [J]. 排灌机械, 2011, 33(1): 62-66.
- [2] JOSE A, CARIDAD K. Slip factor for centrifugal impellers under single and two-phase flow conditions [J]. Journal of Fluids Engineering, 2005, 127(12): 343-351.
- [3] MOHAMAD M A. Experimental investigation of slip factors in centrifugal pumps [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, 33(5): 316-321.
- [4] 赵万勇. 大型泵叶轮抗汽蚀性能的改善 [J]. 流体机械, 1998, 34(9): 36-39.
- [5] 刘玮炜, 石 辉. 黄河中游高含沙水泥流沙粒径特征研究 [J]. 人民黄河, 2006, 17(6): 23-28.
- [6] 关醒凡. 现代泵理论与设计 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010.
- [7] 敏 政, 王 乐, 邵翔宇. 泥沙颗粒直径及体积分数对高比转速离心泵的影响 [J]. 兰州理工大学学报, 2009, 35(2): 46-49.