

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.03.009

双螺杆泵 Ω 形对称型螺杆流场数值分析

许卫群^{1,2}, 沈佳栋^{1,2}, 倪益华^{1,2}, 倪忠进^{1,2}, 董娜^{1,2}

(1. 浙江农林大学 工程学院, 浙江 临安 311300;
2. 浙江农林大学 浙江省木材科学与技术重点实验室, 浙江 临安 311300)

摘要: 由于螺杆泵几何结构及流体流动状态较为复杂, 其压力分布和速度等特性很难用数学解析法来分析计算。本文利用参数化设计模块建立双螺杆泵 Ω 形对称型螺杆三维模型, 构建双螺杆流道的流场分析模型, 运用有限元分析方法得出了双螺杆泵流道内压力场和速度场分布规律。结果表明: 流体在流道中的流速分布具有规律性, 整个流道的流场速度高低交替变化, 在螺杆与衬套间隙处的流动为层流, 螺旋面接触区内的流动为复杂的湍流, 离螺杆啮合区近的螺旋槽内易发生涡流。本研究结果对于了解双螺杆泵螺杆工况下的性能情况具有重要的参考价值。

关键词: 双螺杆泵, 流场, 压力场, 速度场

中图分类号: TH327 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2016)03-0039-05

Numerical Analysis of Ω -Shaped and Symmetrical Screw Flow Field for Twin-Screw Pump

XU Weiqun^{1,2}, SHEN Jiadong^{1,2}, NI Yihua^{1,2}, NI Zhongjin^{1,2}, DONG Na^{1,2}

(1. Department of Engineering, Zhejiang A & F University, Linan, Zhejiang 311300, China;
2. Science and Technology Key Laboratory of wood in Zhejiang Province, Zhejiang A & F University, Linan, Zhejiang 311300, China)

Abstract: Because of the complex structure of the screw pump and fluid flow in the flow channel, the pressure distribution and velocity of the screw pump are very difficult to be analyzed by the method of mathematical analysis. In this paper, a three-dimensional model of the Ω -shaped and symmetrical screw of the twin-screw pump was established by using the parametric design model. The flow field analysis model of the twin-screw pump was constructed. The distribution law of the pressure field and velocity field was obtained by using the finite element analysis method. The results showed that the velocity distribution of fluid in the flow channel was regular, and the flow velocity of the whole flow field was changed, and the flow in the gap between the screw and the bush was laminar, and the flow in the spiral surface was complex, and the vortex flow in the screw groove was easy. The numerical analysis of the flow field has important reference value for understanding the performance of the twin screw pump under the condition of the screw pump.

Key words: twin screw pump; flow field; pressure field; velocity field

螺杆泵几何结构及流体流动状态复杂, 且泵内流体一般具有黏性, 不可压缩等特点, 其压力分布和速度等很难用数学解析法来分析计算。采用计算流体力学数值模拟分析的方法, 不仅能对泵的流道进行流场分

析、性能检验等, 还能快速实现设计方案的评估, 为后续的实验验证提供理论基础, 大大缩短了开发周期, 降低了开发成本^[1-2]。原有研究采用标准的 κ - ϵ 湍流模型, 对涡旋前伸式双叶片污水泵、Y 形流管无阀压电泵

收稿日期: 2015-10-13; 修回日期: 2016-02-20

基金项目: 国家自然科学基金 (61175125); 浙江省自然科学基金重点项目 (LZ15E050003); 浙江省教育厅资助项目 (Y201329351); 浙江省高校发展基金 (FX2013061); 浙江农林大学发展基金 (2012FR069)。

作者简介: 许卫群 (1979), 女, 湖北仙桃人, 硕士, 讲师, 主要从事数值计算与力学分析研究。通信作者: 倪益华 (1969), 男, 浙江嵊州人, 教授, 博士, 主要从事制造业信息化研究。E-mail: nyh@zafu.edu.cn

输血泵的流场特性进行了分析,结果表明数值模拟技术能够正确地模拟泵内流体的流体状态^[3-4]。双螺杆泵输送液体时,液体在流道中的流动情况复杂,目前的实验手段和条件很难准确检测流道内部的流场特性。

本文借助 ANSYS Workbench 12.1 集成的 Fluid Flow (FLUENT) 数值计算软件,以双螺杆泵的 Ω 形对称型螺杆为研究对象,对液体在其流道内的压力、流动速度等进行分析计算,为螺杆泵的性能改善及结构改进提供理论依据,并提高其设计效率。

1 双螺杆流道数值分析模型的建立

1.1 流道模型的结构

双螺杆泵的流道曲面复杂,流道模型较难建立。实验表明双螺杆泵 2 螺杆之间啮合区的密封腔对液体的输送、流动影响较大^[5]。因此,在对双螺杆泵进行流场分析时,根据实体流道的结构与尺寸,建立与之相应的流道仿真模型,使控制方程、物理量与实际流道相互联系在一起,以便对流动情况进行流场模拟分析,得出真实流场的流动情况。

在双螺杆泵中,螺杆是装在 8 字形螺杆衬套中,它们之间存有间隙,螺杆被 8 字衬套包住,流道的模型是 8 字衬套的实体减去螺杆的实体。按照双螺杆实际几何尺寸,设置衬套与螺杆的间隙为 1 mm,衬套 2 端各留有长度为 10 mm 的距离。利用 SolidWorks 二次开发的参数化设计模块(自行开发)构建型腔中实际流道的三维模型。双螺杆泵的关键部件是一对相互啮合的螺杆,其性能直接影响泵的效率、流量及使用寿命等,双螺杆泵螺杆型线的三维几何模型如图 1 所示,流道的三维几何模型剖视图如图 2 所示。

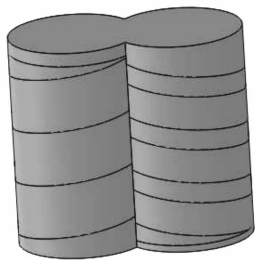


图 1 双螺杆流道的三维几何模型

Figure 1 Three dimensional geometry model of twin screw flow channel

1.2 螺杆流道理论流量的计算

双螺杆泵理论流量由螺杆转子的过流断面面积 A 、螺杆转子的导程 L 、转子的转速 n 3 者共同决定。螺杆每转的排量等于过流断面面积与转子导程的乘积,理论流量等于螺杆每旋转 1 周所排出的体积量乘

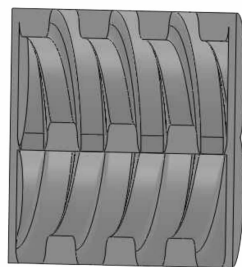


图 2 双螺杆流道的三维几何模型剖视图

Figure 2 Three dimensional geometry model of double screw channel

以转速 n ,即理论流量的计算公式:

$$Q = A \cdot L \cdot n. \quad (1)$$

本文研究的为双吸式双螺杆泵转子的端面型线,其理论流量为同等型号单吸式的 2 倍。即:

$$Q = 2A \cdot L \cdot n. \quad (2)$$

利用 SolidWorks 截面属性命令,可得出螺杆转子过流断面面积 $A = 4789.58 \text{ mm}^2$ 。

已知 $L = 140 \text{ mm}$,若取 $n = 2400 \text{ r/min}$,将上述已知条件代入式(2)中即可得螺杆的理论流量为 $Q = 193.12 \text{ m}^3/\text{h} = 0.054 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

1.3 双螺杆流道的流场分析模型

为了模拟实际流场,以流场特性以及液体输送的具体条件为基础,可作如下的假设^[6-7]:

- 1) 流体为不可压缩的牛顿流体;
- 2) 流场稳定且等温;
- 3) 不考虑远小于黏滞力的体积力如惯性力、重力等;
- 4) 流道被流体完全充满;
- 5) 流道壁面没有滑移。

双螺杆泵流道流场分析计算时需设置 5 个边界条件:出、入口端面,左、右螺杆外表面,流道内表面。进行流场分析计算时,因流道出、入口的压力值都是波动值,很难确定流道出、入口端面的压力值^[8-10]。在出、入口端面处设置压力的边界条件,出、入口的压差 $\Delta P = P_{\text{入}} - P_{\text{出}}$ 。选流道中点作为坐标原点,液体流出方向沿 Z 轴正向。计算域的其他 3 个表面边界只需设置速度边界条件即可。参考流道壁面没有滑移的假设,左、右螺杆外表面上的边界条件是周向转动速度,数值为设计时算出的螺杆转速 $N_s = 2400 \text{ r/m}$;在流道内表面上,其速度为零,即 $V_{\text{内}} = 0 \text{ m/s}$ 。

求解时,Solution Method 默认 Solution control 中的所有松弛因子采用默认值,Press 为 0.3, Density 为 1, Body Forces 为 1, Momentum 为 0.7, Turbulent Kinetic

Energy 为 0.8,在迭代计算过程中不断对其进行修改,使求解过程稳定。对整个流道初始化,然后进行分析计算,设置迭代步数为 200 步,直到 6 条曲线趋于稳定,分析结果收敛。

2 双螺杆泵数值模拟结果分析

2.1 流道压力场分析

如图 3 所示为整个流道的流场压力分布云图,压力沿液体流出的方向逐级增强,最低压和最高压分别为 1.81 MPa 和 3.02 MPa。

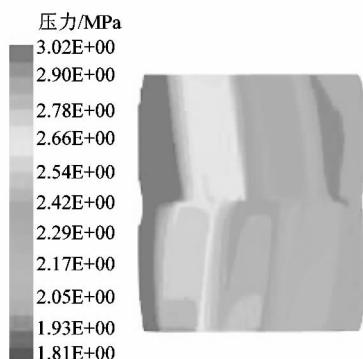


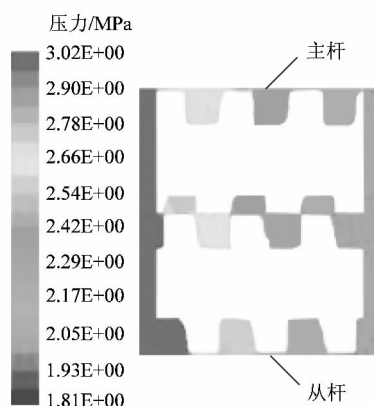
图 3 流道流场压力分布图

Figure 3 Flow field pressure distribution diagram

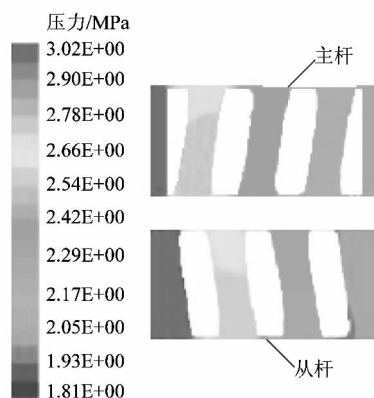
设定垂直于纸面向外的是 X 轴正向,向右的是 Z 轴正向,流体流向是沿 Z 轴负方向。取沿 X 轴正向的截面 1 和 2(X 分别取 20 mm 和 40 mm),从图 4 可知流动液体在流道内压力的总体变化趋势,压力从入口到出口逐渐增大,到出口处达到 3.02 MPa,由截面 1 和 2 可知,主杆流道呈现显著的 4 级压力梯度,从杆为 5 级压力梯度,而主从螺杆啮合区呈现 4 级压力梯度。总体而言压力都为分级变化,从入口到出口压力逐渐增大,啮合区压力情况复杂。

沿流道方向取截面 3 和 4(沿 Z 向的位置分别取 Z 为 27 mm 和 54 mm),如图 5 所示,可知截面 3 和 4 的截面压力分布情况,截面压力分布都较均匀,没有显著变化,主杆流道在每一截面上的总体压力大于从杆流道。

通过以上各截面的压力分布图可知:双螺杆泵输送液体的过程中,由于螺杆之间的相互啮合和螺杆被衬套所包住,导致压力不同的腔之间产生许多个互不相连的密封回路。理论情况下,衬套和螺杆外表面 2 者之间不存在间隙,密封回路内输送液体的压力与被封前初始进口压力相同。实际情况中螺杆的表面与衬套之间存在间隙,在压力作用下处于高压腔的流体会从间隙处流向低压腔,引起液体的泄漏,导致各个密封



(a) 截面1 ($X=20$ mm)



(b) 截面2 ($X=40$ mm)

图 4 X 轴正向截面压力云图

Figure 4 X axis forward section pressure diagram

腔内压力与进口处的压力不再相同。此情况下流体从高压密封腔流向低压密封腔,其压力呈阶梯状递减,且处于同一密封腔的液体的压力基本相同。

2.2 流道速度场分析

图 6 为整个流道的流场速度矢量图,从图中可知流场速度分布的趋势,最大、最小正速分别为 34.9 m/s 和 1.74 m/s,负速为 -1.3×10^{-4} m/s。流道中流体的流动速度分布具有规律性,整个流道的流场速度高低交替变化。

为了从更直观的角度分析流道内流场的压力分布情况,取沿 X 轴正向的截面 1 和 2(X 分别取 20 mm 和 40 mm),截面 1 和 2 速度矢量图如图 7 所示。螺杆与衬套间的间隙处速度高,螺旋啮合区及其根部速度低,螺杆表面到螺旋槽根处速度由大变小。主杆带动从杆转动,主杆流道速度明显大于从杆流道速度,啮合区速度总体大于主杆速度。

沿流道方向取截面 3 和 4(Z 分别取 30 mm 和 60 mm),速度矢量分布如图 8 所示,分析可知,螺杆与衬套间隙区域速度最大,螺杆表面处速度比其他邻近区

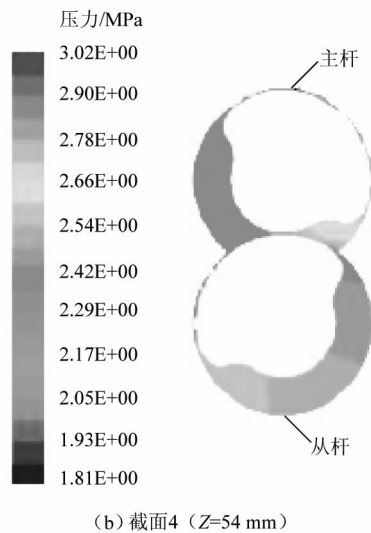
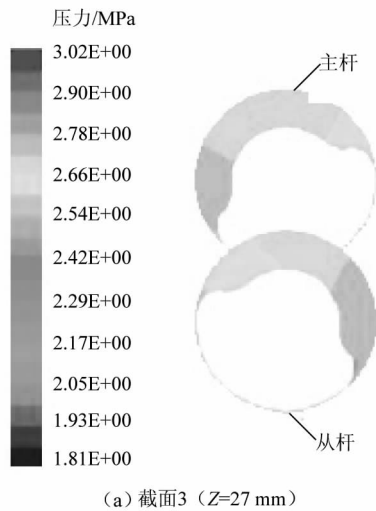


图5 Z轴正向截面压力图

Figure 5 Z axis forward section pressure diagram

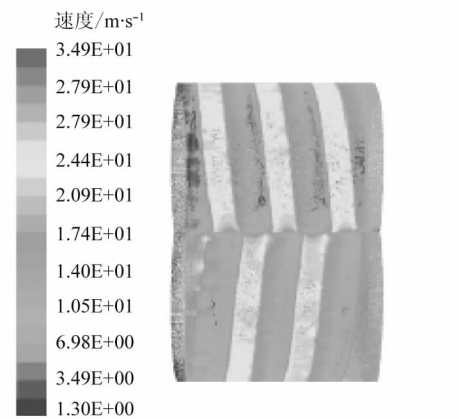


图6 流道流场速度矢量图

Figure 6 Flow velocity vector diagram

域速度大,导致流体在正向剪切速率作用下从流道出口被迫挤出,因此液体不会产生回流现象。螺根底部

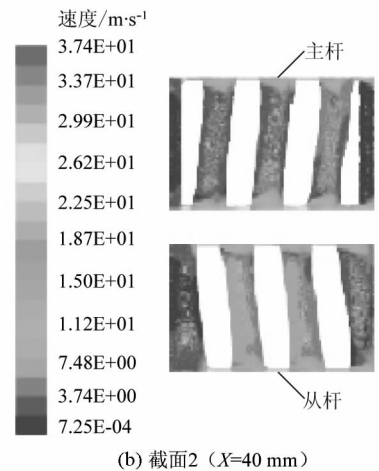
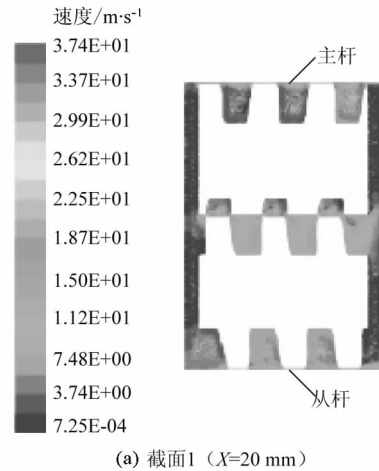


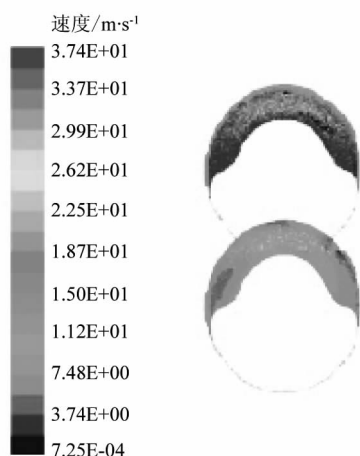
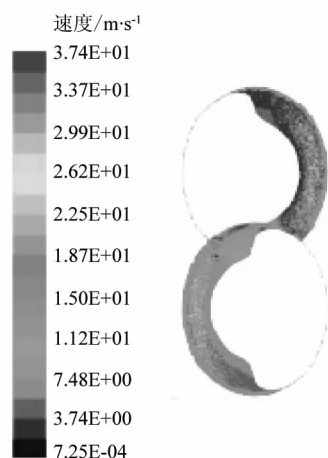
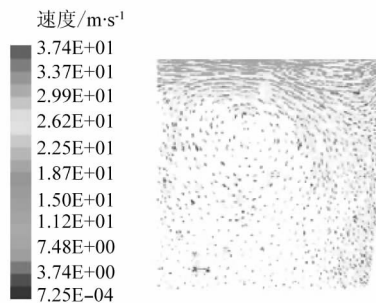
图7 X轴正向截面速度矢量图

Figure 7 X axis forward section velocity vector diagram 的区域及它们相互啮合区域的速度正负分布较复杂,螺旋槽区涡流中心以及速度交换处螺杆啮合区为最大负速度区域,这些区域出现液体泄漏。

另外,通过分析可知临近螺杆壁面处输送流体速度几乎为零,说明壁面没有发生滑移,这与螺杆工作时旋转的实际情况条件相符合。

为了更仔细地观察流道内流体的流动状态,放大 $X=0$ mm 截面处密封腔区及 $Z=60$ mm 截面处螺杆啮合区速度矢量图,如图9和图10所示。

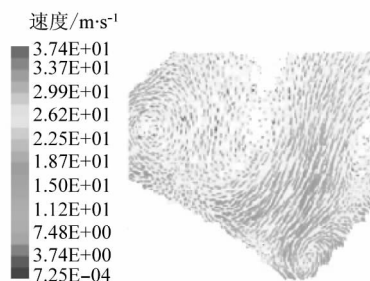
由图9和图10可知,流体在螺杆与衬套间隙处为层流,速度比其它部分大;流体在螺旋面接触区内的流动为复杂的湍流,在主从螺杆旋转带动下,做圆周运动;流体在螺旋槽区域内的流动为涡流,离螺杆啮合区近的螺旋槽易发生涡流,离啮合区远的螺旋槽区域为沿圆周层流。产生上述现象原因是:当螺杆运转时,运动方向不同的流体在螺杆啮合区汇集时速度变化明显,它们之间相互挤压冲击,并从螺杆与壁面之间的间

(a) 截面3 ($Z=30$ mm)(b) 截面4 ($Z=60$ mm)图8 Z 轴正向截面速度矢量图Figure 8 Z axis forward section velocity vector diagram图9 $X=0$ mm 截面处密封腔区速度矢量放大图Figure 9 $X=0$ mm section of the sealing cavity area velocity vector

隙流出,湍流流动能量直接影响到邻近的螺旋槽区域,从而破坏了原来螺旋槽区内流体较规则的圆周运动。

3 结语

本文用有限元法计算得到了双螺杆泵流道内压力

图10 $Z=60$ mm 截面处螺杆啮合区速度矢量放大图Figure 10 $Z=60$ mm section of the screw engagement area velocity vector

场和速度场分布规律,结果表明:流道内的液体压力从入口到出口逐渐增大,流体从高压密封腔流向低压密封腔,呈线性变化,处于同一密封腔的液体压力基本相同;流道中液体的流动速度分布具有规律性,整个流道的流场速度高低交替变化。主杆流道速度大于从杆流道速度,螺杆与衬套间隙处的速度比其他邻近区域的速度都大且流动状态为层流,流道内的流体在主从螺杆带动下大体上做圆周运动,离螺杆啮合区近的螺旋槽易发生涡流。本文的计算结果为螺杆泵的性能改善及结构改进提供理论依据,并提高其设计效率。

参考文献:

- [1] GOMEZ-IRADI S, STEIJL R, BARAKOS G N. Development and validation of a CFD technique for the aerodynamic analysis of HAWT [J]. Journal of solar energy engineering, 2009, 131(3): 376-385.
- [2] TANG Qian, ZHANG Yuanxun. Screw optimization for performance enhancement of a twin-screw pump [J]. Journal of process mechanical engineering, 2014, 228(1): 73-84.
- [3] 王准,施卫东,叶忠明,等. 涡旋前伸式双叶片污水泵流场分析与性能预测[J]. 中国机械工程, 2006, 17(增刊1): 7-9.
- [4] 张建辉,黎毅力. Y形流管无阀压电泵流场分析[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(2): 126-129.
- [5] CUI Jianzhong, XIE Fangwei, LIU Qingyun, et al. Three-dimensional flow field numerical simulation and performance analysis for a new type canned motor pump [J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers part C journal of mechanical engineering science, 2013, 227(12): 2825-2833.
- [6] 唐倩,张元勋,高瞻. 双螺杆泵流场动力特性的数值模拟[J]. 中国机械工程, 2010, 21(12): 1453-1456.
- [7] 胡冬冬,陈晋南. 双螺杆挤出机流场数值模拟中流道进出口边界条件的探讨[J]. 计算机与应用化学, 2005, 22(12): 1137-1141. DOI:10.3969/j. issn. 1001-4160. 2005. 12. 012.
- [8] 张翅翔,李映,张玉良. 极大流量工况下离心泵内部流场数值分析[J]. 机电工程, 2014, 31(8): 974-978.
- [9] 李凤琴,李映,李晓俊,等. 小流量工况下低比转速离心泵内部流场的数值分析[J]. 机电工程, 2015, 32(11): 1438-1442.
- [10] 龚卫锋,李兵,孙卫平. 混流泵内流场的数值模拟[J]. 机电设备, 2009, 26(6): 26-29.