

基于 FLUENT 的高压高速螺旋转子泵内部流场分析

王超^{1,2}, 孙炳孝^{1,2}

(1. 淮安信息职业技术学院, 淮安 223003;

2. 江苏电子产品装备制造工程技术研究开发中心, 淮安 223003)

摘要: **目的** 分析高压高速螺旋转子泵运行过程中的内部流场行为, 为高压高速螺旋转子泵的结构优化提供理论依据。**方法** 利用 SolidWorks 建立高压高速螺旋转子泵三维模型, 使用 FLUENT 仿真其在高压高速运行条件下的内部流场, 得到压强云图, 对比有、无气穴时转速对油膜最大压强和最大负压影响。**结果** 气穴对高压区的啮合压强基本没有影响。齿轮啮合处压强最大值、齿轮啮合处负压最大值及空气在液压油中的占有率随转速的增加而增大, 当转速为 12 000 r/min 时, 空气占有率高达 12.81%, 啮合处的压强可高达 37.5 MPa, 是出油口压强的 1.5 倍。**结论** 气穴阻止了部分齿顶间隙的泄漏, 对转子稳定性的提高有积极意义。最大压强出现在螺旋转子泵转子的啮合处, 这使转子产生了剧烈振动, 降低了螺旋转子泵的稳定性。

关键词: 高压; 高速; 螺旋转子泵; FLUENT; 气穴

中图分类号: TB486; TH326 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)23-0187-05

Internal Flow Field of Helical Rotor Pump at High Speeds and High Pressures Based on FLUENT

WANG Chao^{1,2}, SUN Bing-xiao^{1,2}

(1. Huaian Vocational College of Information Technology, Huaian 223003, China; 2. Research Center of Jiangsu Electronics Equipment Manufacturing, Huaian 223003, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the behavior of internal flow fields when the helical rotor pump (HRP) is operating at high speeds and high pressures, which provides theoretical basis for the structure optimization of such HRP. The 3D model of HRP at high speeds and high pressures was established with SolidWorks. FLUENT was applied to simulate the internal flow fields of HRP operating at high speeds and high pressures to obtain the contours of pressure. The influences of speed on the maximum pressure and the maximum negative pressure of oil film with and without cavitation were compared. Cavitation had little effect on the meshing pressure in the high-pressure area. The maximum pressure and the maximum negative pressure at the gear meshing part and the occupation of air in the hydraulic oil were increased with the increase in the rotation speed. When the speed was 12 000 r/min, the air occupation was up to 12.81% and the pressure at the meshing part could reach up to 37.5 MPa, which was 1.5 times the size of pressure at the oil outlet. The cavitation prevents the leakage of partial gear tip clearance, which has positive significance for the improvement of rotor stability. The maximum pressure appears in the area where the HRP rotor meshes, which causes the rotor to generate dramatic vibration and reduces the HRP stability.

KEY WORDS: high pressure; high speed; helical rotor pump; FLUENT; cavitation

液压技术在包装机械中起到举足轻重的地位^[1-2]。齿轮泵作为包装机械的动力来源, 在液压打包机、泡

沫塑料成型机和注塑机等包装领域的应用十分广泛, 更是重型包装机械的必备要素^[3]。动力源的高压力、

收稿日期: 2017-02-20

基金项目: 2015 年江苏省高级访问学者项目 (2015FX010)

作者简介: 王超 (1972—), 男, 硕士, 淮安信息职业技术学院副教授、高级工程师, 主要研究方向为机电控制新技术。

高可靠性和低噪音是包装机械的发展趋势^[4]。齿轮泵的研究对包装机械的轻型化、高效及高可靠性发展具有重要意义。气穴是限制齿轮泵高压化、高速化和小型化的重要因素。困油现象造成齿轮啮合处压力突然增加,导致齿轮寿命严重下降,同时液压油被齿轮挤压,影响齿轮正常啮合,加大了振动和噪音,降低了齿轮泵运行的稳定性^[5-6]。高压高速小型化螺旋转子泵是一种特殊的齿轮泵,因其没有困油现象、低噪音受到人们的青睐^[7-8]。随着齿轮泵向高速化和小型化发展,气穴成为产生压力波动,影响容积效率和产生噪音的重要因素^[9-12]。D.del.Campo^[8]研究了齿轮泵在低转速条件下气穴对流量和容积效率的影响。R.Castilla^[13]采用计算流体力学方法(CFD)对外啮合齿轮泵内部流场进行了三维分析,但是作者并没有引入气穴模型。虽然很多学者利用 FLUENT^[14-15]分析了齿轮泵内部流场行为,但是很少有学者对高压、高速运行的齿轮泵进行仿真,并且考虑气穴模型的研究却并不多见。

文中利用 SolidWorks2014 建立高压高速螺旋转子泵三维模型,使用 FLUENT 仿真其在高压高速运行条件下的内部流场,分析不同转速和气穴对流场压力的影响,为螺旋转子泵降低噪音和提高系统稳定性打下基础,对提高液压打包机、泡沫塑料成型机和注塑机的包装质量有积极意义。

1 螺旋转子齿形建模

螺旋转子齿形为“圆弧-渐开线-圆弧”齿形,见图1。由于齿形关于y轴对称,只需要计算半边齿形,然后通过几何对称就可得出完整齿形。其半边基本齿形是由圆弧 P_1P_2 ,渐开线 P_2P_3 和圆弧 P_3P_4 组成,其中 OO_2 是2个齿轮的中心距。

圆弧 P_1P_2 方程为:

$$\begin{cases} x_0 = r_c \cdot \cos u_1 - R \cdot \sin \varphi \\ x_0 = -r_c \cdot \sin u_1 + R \cdot \cos \varphi \end{cases} \quad (1)$$

渐开线 P_2P_3 方程为:

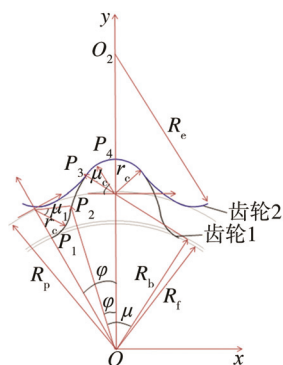


图1 转子齿形

Fig.1 The tooth profile of rotor

$$\begin{cases} x_0 = -u \cdot R_b \cdot \cos(u - \phi) + R_b \cdot \sin(u - \phi) \\ y_0 = u \cdot R_b \cdot \sin(u - \phi) + R_b \cdot \cos(u - \phi) \end{cases} \quad (2)$$

圆弧 P_3P_4 方程为:

$$\begin{cases} x_0 = -r_c \cdot \cos u_c \\ y_0 = r_c \cdot \sin u_c + R_p \end{cases} \quad (3)$$

式中: r_c 为根圆弧半径; u_1 为圆弧 P_1P_2 参数, $\varphi = \pi/Z_0$, Z_0 为齿数; u 为渐开线段参数; R_b 为基圆半径; R_p 为节圆半径; u_c 为圆弧 P_3P_4 的参数。

2 螺旋转子泵三维模型建立

齿轮泵的结构采用常见的三片式,其结构爆炸视图见图2,由泵体、转子、滑动轴承、前后端盖、弹性挡圈、油封构成。齿轮泵前后端盖通过螺钉固定在泵体上,密封圈通过螺钉压紧固定在密封端面上,主动轮伸出端盖和电机相连部分通过油封进行密封,转子是过滑动轴承在泵体内固定,工作时在滑动轴承内做旋转运动。在图3中,齿轮I和齿轮II是相互啮合的两齿轮,当齿轮转动时,在低压腔形成真空,流体由进油口进入泵体内部,通过齿轮表面传送到出油口,齿轮泵在旋转工作过程中,液压油不断的被排除和吸入,保证了齿轮泵的正常工作的。在齿轮泵所有的组成零件中,转子是外啮合齿轮泵最核心的零部件。

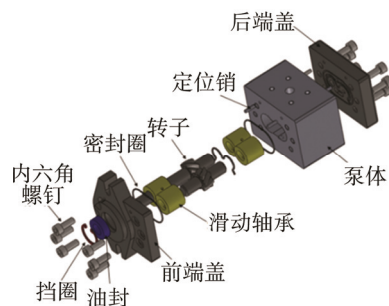


图2 齿轮泵结构和组成

Fig.2 The structure and components of gear pump

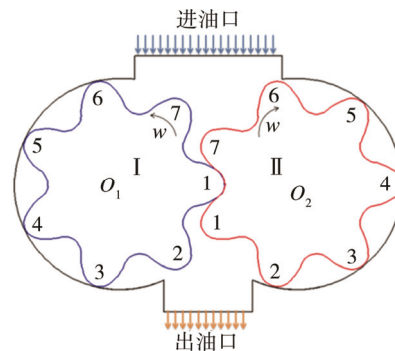


图3 齿轮泵工作原理

Fig.3 The working principle of gear pump

3 螺旋转子泵计算模型建立

采用 Ansys ICEM CFD 对计算区域进行网格划

分, 网格采用四面体网格, 因其适合形状复杂的几何体、生成简单, 见图 4。为了提高网格的质量, 避免在运行过程中出现“负网格”、“不收敛”等错误, 对划分完成的网格有进行了以下 3 种操作: 使用三棱柱网格细化圆弧边缘; 删除了质量低于 0.3 的网格; 删除了不相关的网格点。最终得到 387 155 个细胞。

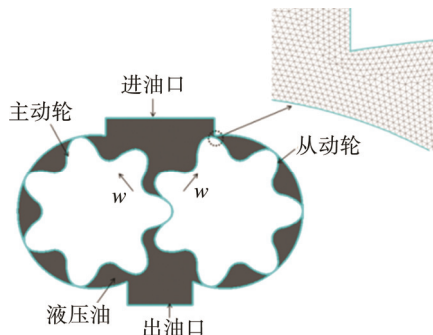


图 4 计算域和网格
Fig.4 Computation domain and mesh

在数值模拟过程中, 由 Ansys Fluent 16.0 完成计算, 紊流模型选择标准的 k-epsilon 模型。Near-Wall 处理方法选择 Standard Wall Functions。采用了全气穴模型, 使用 mixture 模型第 1 相设为 fuel-oil-liquid, 第 2 相设为空气。气穴模型参数: $r_0=10\text{ }\mu\text{m}$, $r_{\text{nuc}}=0.09$, $F_{\text{vap}}=0.4$, $F_{\text{cond}}=0.001$ 。

4 仿真结果与数据分析

当设定螺旋转子泵压强为 25 MPa, 转速为 10 000 r/min, 中心距为 18.12 mm 时, 系统的压强云图和啮合处的最大压强云图见图 5。

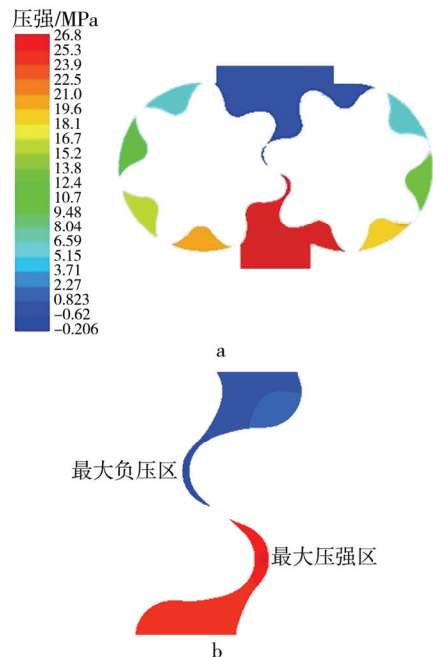


图 5 10 000 r/min 时压强云图和啮合处压强云图
Fig.5 Contours of pressure at 10,000 r/min and where gears mesh

由图 5a 可以看出压强是从出油口到进油口压力逐渐减小, 每个齿与泵体组成一个相对的封闭空间, 空间内部压强基本保持不变。在计算域中, 最大压力发生在高压区内 2 个齿轮啮合处, 而最大负压则产生在低压区两齿轮啮合处, 见图 5b。

4.1 有无气穴时最大压力分析

该小节模拟了在不同转速下且出口处压强为 25 MPa, 有、无气穴的情况下螺旋转子泵内部流体状态, 见图 6。

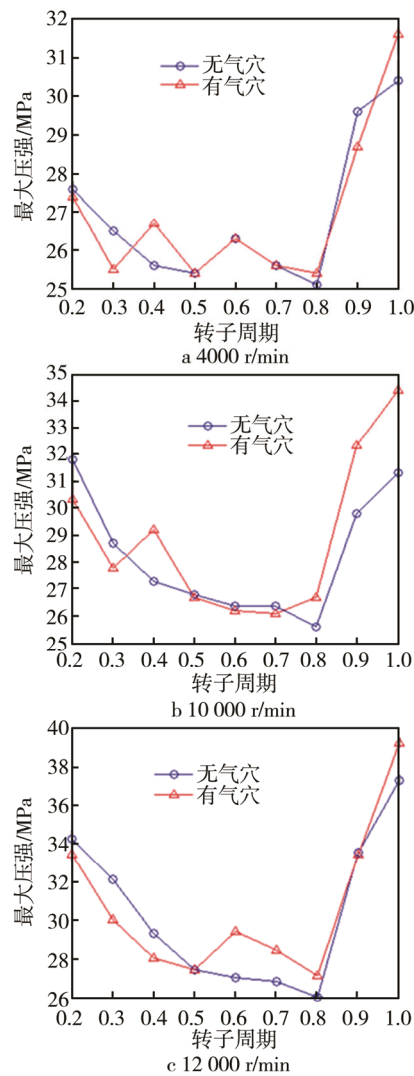


图 6 在有、无气穴时不同转速对最大啮合压强的影响
Fig.6 Influence of different rotation speeds on the maximum meshing pressure with and without cavitation

由图 6 中可以看出, 在没有气穴影响时, 随着转速的增大, 啮合压强逐渐增大, 在 0.8 个周期左右时啮合压强达到最小。当转速为 12 000 r/min 时, 啮合处的压强可高达 37.5 MPa, 是出油口压强的 1.5 倍。此时压力一部分可以通过卸荷槽卸去, 但是当齿轮泵小型化后, 整体尺寸减小, 卸荷槽尺寸也相应的减小, 卸荷作用将明显减弱, 因此, 啮合处压强的波动是制

约齿轮泵小型化、高速化的一个重要因素。在气穴的影响下,最大啮合压强增大,当转速为 10 000 r/min 时,气穴对最大啮合压强的影响最明显,使其增高了约 4 MPa。从图 6 中可以看出,气穴对最大啮合压强的影响主要集中在 0.3~0.7 周期。

4.2 有无气穴时最大负压分析

在有、无气穴时,不同转速对啮合处的负压波动的影响见图 7。在没有气穴影响时,随着转速升高,啮合处的负压下降越快,在 0.7 个周期时负压达到最大值,这就导致了啮合处最大压强和最大负压之间的压差急剧增加,增大了啮合处的泄漏,降低了转子的不稳定。当转速达到 12 000 r/min 时,负压的最大幅值达到约为 16 MPa,是转速为 4000 r/min 时负压值的 2 倍,由此看来,转速对负压的影响很大,速度越高,转子的稳定性越差。在气穴的影响下,转速几乎对最大啮合负压没有影响,气体迅速填充到靠近进口口处最大负压处,所以最大负压维持在: -2 MPa 左右,气

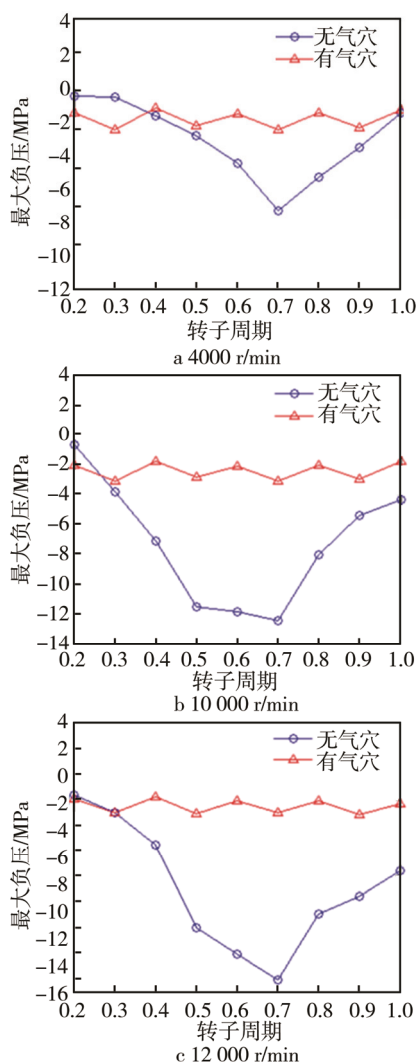


图 7 有、无气穴时不同转速对最大啮合负压的影响
Fig.7 Influence of different rotation speeds on the maximum meshing negative pressure with and without cavitation

穴起到了增加转子稳定性的作用。

4.3 转速对含气比的影响

不同转速下液压油中的空气占有比见图 7, 转速越高, 空气在液压油中的含有率越高, 含有率从 4000 r/min 时的 2.14% 升高到 12 000 r/min 时的 12.81%。在 4 000 r/min 时, 空气在液压油中的含油率比较平稳, 当转速达到 10 000 r/min 后, 空气在液压油中的存在变得不稳定, 最大空气占有率从 0.7 周期向左移至 0.5 周期处, 而最小空气占有率出现在 0.9 周期处。

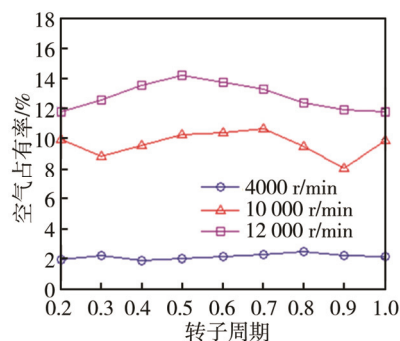


图 7 不同转速下的空气占有率
Fig.7 Air occupation at different rotation speeds

在高速高压状态下, 齿轮泵啮合处的压力远远高于出油口出的压力, 将会造成转子的失稳。径向力的增大, 会造成转子变形以及滑动轴承的损坏。

5 结语

建立了三维螺旋转子泵模型, 通过商业流体分析软件 Fluent 针对螺旋转子泵进行了二维仿真, 模拟了内部流体运动的趋势, 并加入气穴模型使仿真结果更接近于真实情况。讨论了齿轮泵在高压、高速和小型化后对其内部流体的影响, 讨论了由于气穴对流体内部状态的影响, 并与无气穴仿真结果进行比较。虽然仿真结果并不能完全反应其真实状况, 但是对螺旋转子泵的结构改进对提高液压打包机、泡沫塑料成型机和注塑机的包装质量具有重要意义。

参考文献:

- [1] 李鄂民, 王中龙, 李怀印, 等. 铜板自动包装生产线整形机液压同步控制系统的设计与改进[J]. 液压与气动, 2010(1): 75—77.
LI E-min, WANG Zhong-long, LI Huai-yin, et al. The Design and Improvement of Synchronous Hydraulic Control System for the Automatic Packaging Line of Copper Plates[J]. Hydraulic and pneumatic, 2010(1): 75—77.
- [2] 黄建龙, 宋波, 党兴武. 铜包装线整形机液压缸支撑架的有限元分析[J]. 新技术新工艺, 2010(6): 12—14.
HUANG Jian-long, SONG Bo, DANG Xing-wu. The

- Fem Analysis of the Shaping Machine Hydraulic Cylinder Support Part of Copper Automatic Packaging Production Line[J]. *New Technology and New Technology*, 2010(6): 12—14.
- [3] 陈锡栋, 陈伟. 集装箱用液压倾倒平台的设计[J]. *机械设计*, 2001, 18(7): 36—38.
CHEN Xi-dong, CHEN Wei. Design of Hydraulic Dumping Platform for Container[J]. *Mechanical Design*, 2001, 18(7): 36—38.
- [4] 张华良, 顾祖莉, 金国斌. 现代物流中商品运输包装动力可靠性[J]. *包装工程*, 2004, 25(4): 135—137.
ZHANG Hua-liang, GU Zu-li, JIN Guo-bin. The Reliability of Commodity Transportation Packaging in Modern Logistics[J]. *Packaging Engineering*, 2004, 25(4): 135—137.
- [5] EATON M, KEOGHK P S, EDGE A. The Modelling, Prediction, and Experimental Evaluation of Gear Pump Meshing Pressures with Particular Reference to Aero-Engine Fuel Pumps[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2006, 220(15): 396—404.
- [6] WANG S, HISATOSHI S, ADITYA K. Transactions on Mechatronics[J]. *IEEE/ASME*, 2011, 126(16): 945—952.
- [7] LEE G S, JUNG S Y, and BAE J H. Design of Rotor for Internal Gear Pump Using Cycloid and Circular-Arc Curves[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2012, 134(1): 1—12.
- [8] CAMPO D, CASTILLA R, RAUSH G A, et al. Numerical Analysis of External Gear Pumps Including Cavitation[J]. *ASME J Fluids Eng*. 2012, 134(8): 1—9.
- [9] NEYRAT S, ORAND N, JONQUET D. Modeling and Analysis of an Automatic Transmission Internal Gear Oil Pump with Cavitation[C]// *SAE 2005 Noise and Vibration Conference and Exhibition, ITALY*, 2005: 16—19.
- [10] VACCA A, KLOP R. A Numerical Approach for the Evaluation of the Effects of Air Release and Vapour Cavitation on Effective Flow Rate of Axial Piston Machines[J]. *International Journal of Fluid Power*, 2010, 11(1): 33—45.
- [11] ABBOT P A, WALSH J, HALAS R. Cavitation Noise Investigation of a Pump-turbine[C]// *Waterpower 91: A New View of Hydro Resources, USA*, 1991: 2031—2040.
- [12] STRASSER, WAYNE. CFD Investigation of Gear Pump Mixing Using Deforming/Agglomerating Mesh [J]. *ASME J Fluids Eng*, 2007, 129(7): 476—484.
- [13] DHAR S, VACCA A. A Novel CFD-Axial Motion Coupled Model for the Axial Balance of Lateral Bushings in External Gear Machines[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2012, 26: 60—76.
- [14] 耿阳婕, 刘宇怀, 赵天鹏, 等. 基于 FLUENT 仿真的印刷机墨辊冷却结构分析与优化[J]. *包装工程*, 2016, 37(3): 165—169.
GENG Yang-jie, LIU Yu-huai, ZHAO Tian-peng, et al. Analysis and Optimization of Roller Cooling Structure of Printing Machine Based on FLUENT Simulation[J]. *Packaging Engineering*, 2016, 37(3): 165—169.
- [15] 崔曼, 陆佳平. 盒中袋灌装阀阀口流场分析与结构优化[J]. *包装工程*, 2012, 33(7): 74—77.
CUI Man, LU Jia-ping. Flow Field Analysis and Structure Optimization of Valve Port in Filling Valve [J]. *Packaging Engineering*, 2012, 33(7): 74—77.