

# 径向间隙对转子泵容积效率的影响

钱浩海, 李 昶

(浙江理工大学浙江省流体传输技术研究重点实验室, 杭州 310018)

**摘 要:** 探讨间隙尺寸对转子泵容积效率与工作可靠性的影响。基于给定的不同径向间隙, 利用动网格技术, 对非接触式凸轮转子泵的内部流场进行二维非定常数值模拟研究, 获得了不同间隙对凸轮转子泵性能的影响规律。结果表明: 在相同进出口压差条件下, 随着径向间隙的增加, 间隙处泄漏量随之增加, 转子泵的容积效率出现明显下降; 在相同的间隙下, 随着压差的增大, 转子泵的容积效率随之减小, 但随着压差增大, 间隙对容积效率的影响增大。其结果可为转子泵的性能预测和优化提供参考。

**关键词:** 凸轮转子泵; 径向间隙; 容积效率; 数值模拟

**中图分类号:** TH326 **文献标志码:** A

## 0 引 言

凸轮转子泵是一种非接触式容积式泵, 具有体积小、结构简单、重量轻和拆卸维修方便的优点, 广泛用于化工、食品和医药等领域。凸轮转子泵由于转子之间和转子与机壳内壁之间不接触, 设有一定的间隙, 可以输送多种介质, 尤其是对含有气的泡沫质与颗粒的多种液体和较大粘性的液体, 具有很好的发展前景。间隙在转子泵结构设计中是至关重要的, 间隙的合理性直接影响着转子泵的流量和容积效率。因此, 如何准确、方便地确定转子泵的间隙最佳值, 是业内的研究热点。文献[1-2]介绍了转子泵的设计采用经验数据给出的推荐值, 再通过内泄量分析确定具体的间隙值。张洪信等<sup>[3]</sup>介绍了转子泵的结构参数的优化设计, 结合泄漏量理论公式计算出间隙。熊滨生等<sup>[4]</sup>通过对罗茨风机内泄量流量理论计算分析, 得出了间隙与内泄量之间的关系。陈长崎等<sup>[5]</sup>建立了径向间隙泄漏模型, 通过此模型获得了径向间隙与极限压强之间的关系。宋建强等<sup>[6]</sup>通过分析罗茨鼓风机转子工作间隙的影响因素, 确定转子各部间隙。文献[7-9]介绍了间隙对齿轮泵

性能的影响, 从各个方面对间隙进行优化设计, 得出间隙的最佳值。上述文献都是通过理论计算和实验方法得出结果, 其过程复杂, 计算繁琐。

本文利用 FLUENT, 对三叶凸轮转子泵内流场进行仿真计算, 分析不同径向间隙下, 转子泵的流量和容积效率的变化规律; 同时分析在不同进出口压差的工况下, 间隙对泵的流量和容积效率的影响。与常用理论分析和实验方法相比, 本文采用的方法更加方便精确。根据数值仿真的研究结果, 合理选择转子泵径向间隙, 对于产品的设计和选型均有重要的参考价值。

## 1 计算模型建立和数值计算方法

### 1.1 计算模型建立和网格划分

本文采用三叶凸轮转子泵, 其几何参数为: 转子叶顶圆直径  $D=180$  mm, 转子中心距  $A=136$  mm, 主动转子的转速  $n=300$  r/min。凸轮转子泵的三维计算模型如图 1 所示。

由于凸轮转子泵三维模型可以由二维模型轴向延伸得到, 三维模型径向截面流动与二维的流动情况基本相同, 二维的计算模型已经能满足分析流场的需求。又由于本文 CFD 的计算为非定常, 花费的

收稿日期: 2013-04-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51249003)

作者简介: 钱浩海(1986-), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事电液控制与流体传动的研究。

通信作者: 李 昶, 电子邮箱: liyi@zstu.edu.cn

时间比较长,且计算区域划分网格的尺寸小,划分的总体网格数大,所以计算中采用了二维模型。



图 1 三维计算模型

对凸轮转子泵的二维模型进行网格划分,根据凸轮转子泵的结构特点,可以将计算流场分为三个部分:左侧入口部分、右侧出口部分和中间运动部分。出入口部分是静止部分,可以采用四边形网格划分;中间运动部分采用三角形网格划分,以保证网格在运动过程中,较小的网格扭曲度和计算收敛性。网格划分示意图如图 2 所示,实际网格数为 167 558,其最大扭曲度为 0.556。由于两转子之间和转子与机壳间的尺寸较小,为了更好地捕捉到转子泵的内部流动特征,需对转子啮合处和转子与泵壁的间隙网格进行加密(如图 3 所示)。

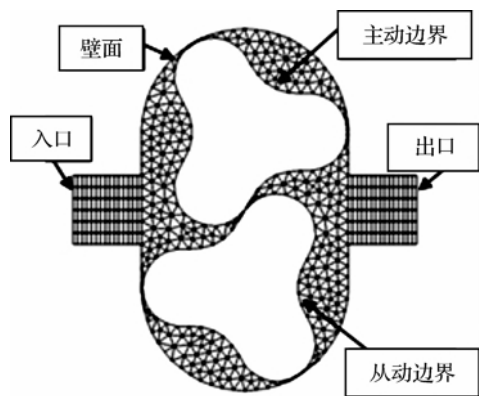


图 2 二维模型网格划分

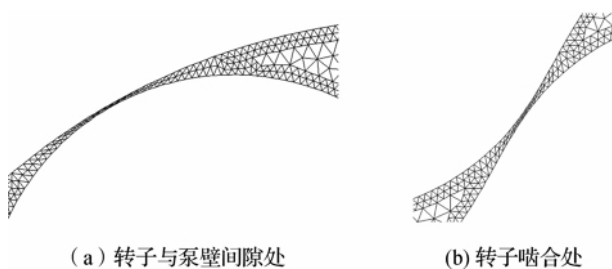


图 3 网格示意局部放大图

## 1.2 计算方法和湍流模型

本文凸轮转子泵内部流体运动满足湍流  $N-S$  方程组,运用非稳态湍流模型对其进行数值模拟。在转子泵的数值分析中,标准  $k-\epsilon$  模型和 RNG  $k-\epsilon$  模型最常用,但 RNG  $k-\epsilon$  模型在解决旋涡问题上相比标准  $k-\epsilon$  模型显得更好,且 RNG  $k-\epsilon$  模型中的耗散率  $\epsilon$  方程比标准  $k-\epsilon$  模型增加了一个约束条件,可以有效改善精度,因此本文选择 RNG  $k-\epsilon$  模型<sup>[10]</sup>。计算采用 Pressure-Based 的非定常、隐式求解器,固体壁面采用标准壁面函数,对于求解器的控制则采用 SIMPLE 的压力-速度耦合形式,并使用二阶迎风格式,时间步长设为 0.000 1,时间步为 2 500 步进行迭代计算。

本文采用压力进出口边界条件,其初始值为:绝对压力进口(101 325 Pa)、绝对压力出口(301 325 Pa),介质为液态水。

## 1.3 动网格技术

由于凸轮转子泵周期性转动,出口容积周期性变化,则本文采用局部网格重构和弹簧光滑模型<sup>[10]</sup>来实现动网格以适应实际流场的需要。

局部网格重构用于变化较大的网格将重新划分。在进行下一个时间步迭代之前,重新检查网格的尺度和扭曲率,当被检网格的尺寸大于或小于设定尺寸,网格畸变率大于系统畸变率标准,则进行网格重生成。

在弹性光滑模型中,网格边被理想化为节点间相互连接的弹簧。变动前的网格间距相当于由弹簧组成的边界系统处于平衡状态,网格节点发生位移后,采用虎克定律,经迭代计算,使各节点上的合力最终等于零从而确定新的网格节点位置。在该模型中分别对弹簧弹性系数、边界点松弛因子、收敛判据以及迭代次数进行适当设置。

对于转子的旋转运动,动网格是以转子固体相对于重心的线速度或角速度为基本参考定义。由于凸轮转子泵两转子以角速度 300 r/min 匀速转动,运动较为简单,因此本文通过编制自定义函数(profile 函数)对转子的运动参数进行定义,两个转子均为刚体。

## 2 计算结果与分析

按照上述数值方法的思想,对不同间隙的转子泵内部流场进行数值模拟。图 4 给出了某一间隙转子的进口质量流量的变化规律,在流动时间(flow time)为 0.05~0.25 s 的一个周期内,进口流量随

时间出现了6次谐波变化。这是由于两转子周期性转动且相互啮合所产生的,流量重复性好,其频率与转子泵的转子叶片数相符合,由此可以表明用此模型进行数值计算,能较为准确地模拟转子泵的工作过程。

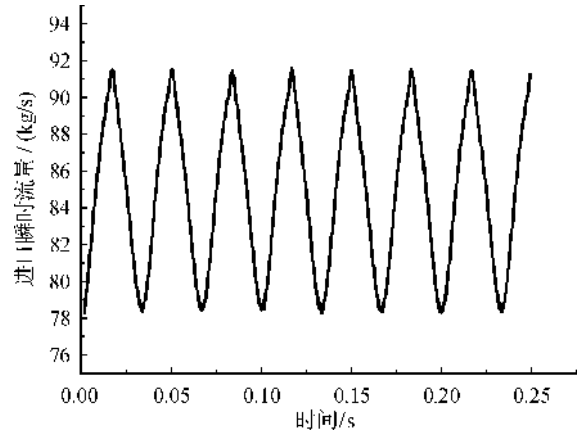
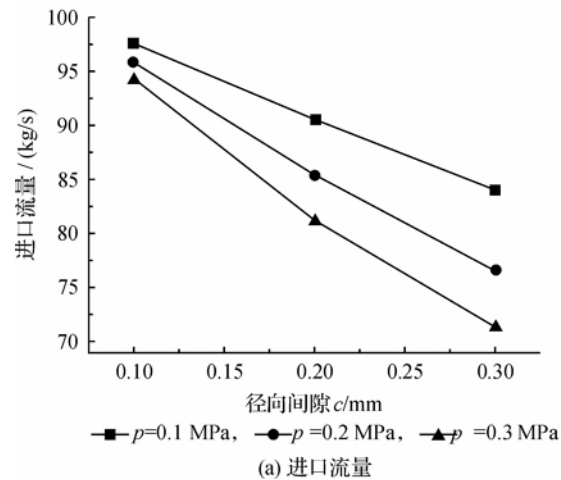


图4 进口质量流量随时间变化规律曲线



2.1 性能分析

本文对不同间隙的转子泵进行数值模拟,其间隙的推荐值范围是根据经验数据和内泄量理论分析得出的间隙来选取的<sup>[1-3]</sup>。利用 FLUENT 软件模拟分析,得出了转子泵的时均特性随径向间隙的变化规律如图5所示。由图5可以看出,在压差相同的情况下,转子泵质量流量和容积效率随径向间隙的增加而明显减小;然而在径向间隙相同的情况下,转子泵的质量流量和容积效率随压差的增加而减小。表1为转子泵在各个径向间隙和压差下的时均质量流量和容积效率的具体数值。表1数据显示,当转子泵的径向间隙  $c$  从 0.1 mm 增加到 0.3 mm 时,在 0.1、0.2、0.3 MPa 3 个压差值下,转子泵的容积效率分别下降了 12.5%、17.7%、21.0%。上述结果说明:径向间隙增加,容积效率下降;对于该转子泵,随着压差增大,径向间隙增加对容积效率的影响增大,这也限制了泵出口压力的提高。

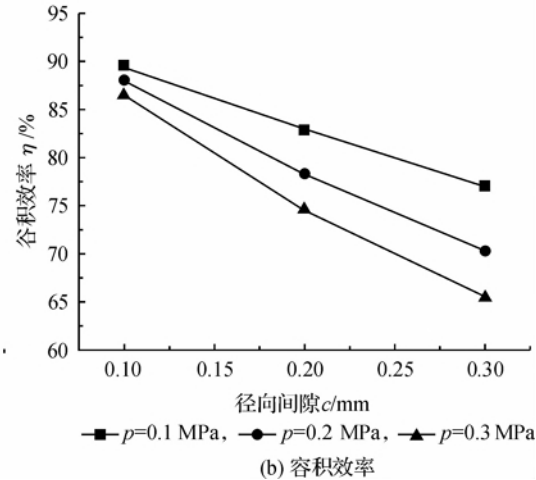


图5 转子泵时均特性

表1 转子泵时均流量和容积效率

径向间隙 $c/\text{mm}$	压差 $p/\text{MPa}$	时均质量流量 $\overline{m_s}/(\text{kg/s})$	容积效率 $\eta_v/\%$
0.10	0.1	97.5	89.5
0.20	0.1	90.3	82.9
0.30	0.1	83.9	77.0
0.10	0.2	95.8	88.0
0.20	0.2	85.3	78.3
0.30	0.2	76.6	70.3
0.10	0.3	94.2	86.5
0.20	0.3	81.2	74.6
0.30	0.3	71.3	65.5

表1中,转子泵的容积效率  $\eta_v$  计算公式如下:

$$\eta_v = \frac{V_s}{V_1} = \frac{\overline{m_s}}{\rho V_1} \tag{1}$$

式中,  $V_s$  是实时供油量,  $\overline{m_s}$  是时均质量流量,  $V_1$  是理论供油量。其中  $V_1$  的表达式如下:

$$V_1 = ((D/2)^2 - (A/2)^2) \times L \times n \times 2\pi \tag{2}$$

式中,  $D$  是转子顶圆直径(mm),  $A$  是两转子中心距(mm),  $L$  是转子宽度(mm) (二维理论流量计算, 转子宽度  $L = 1\,000\text{ mm}$ ),  $n$  是转子的转速(r/min)。

2.2 内部流场分析

图6、图7、图8为压差值 0.2 MPa 的工况下,分别在 0.1、0.15、0.2 s 三个时刻位置时,不同间隙下转子泵的速度矢量图(其他压差类似)。由图6局

部放大图可以看出,在转子之间和转子与机壳壁面之间的间隙处泄漏速度较大,出现了回流现象,由于出口腔和基元容积的压强大于进口腔,导致回流速度相对于转子泵内部其它区域的速度较大。通过比较分析图 6 中的图 a、图 b、图 c 可知,随着转子泵间隙的增大,间隙处的泄漏速度也在增加,泄漏量增大,导致泵的质量流量和容积效率下降。然而回流速度增大,对转子的冲击加大,影响泵的性能和使用寿命。图 7 与图 8 也显示了类似的流场信息。

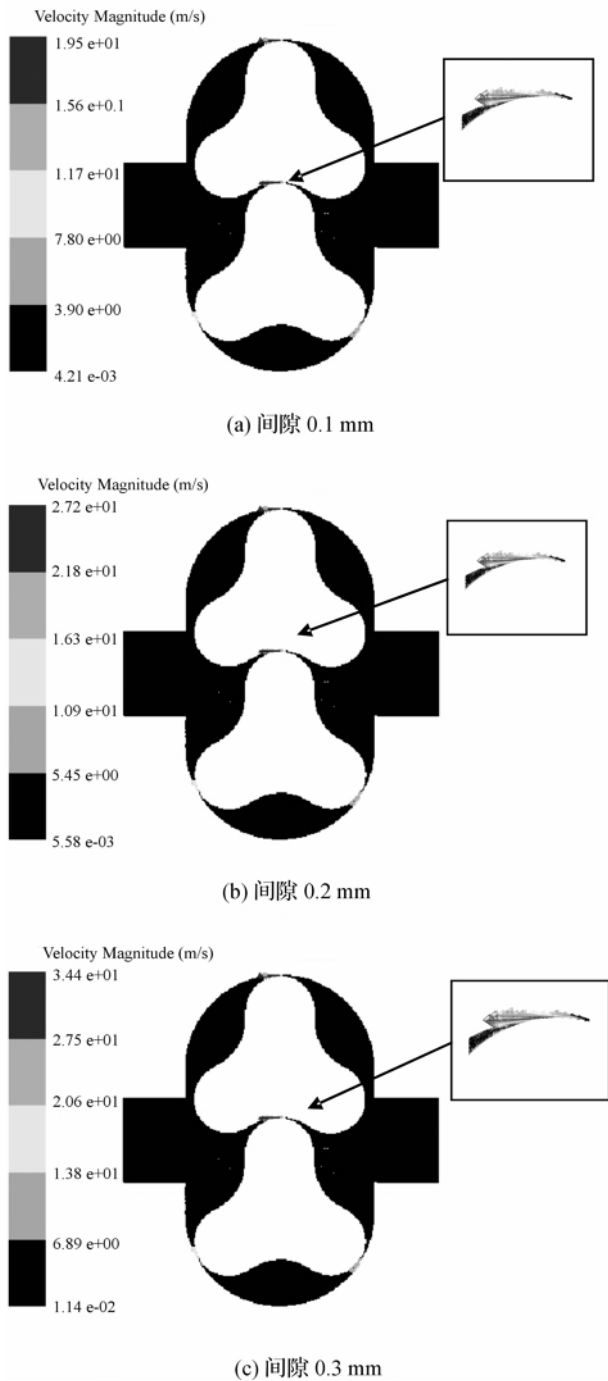


图 6 0.1 s 时刻转子泵的速度矢量图(压差  $p=0.2$  MPa)

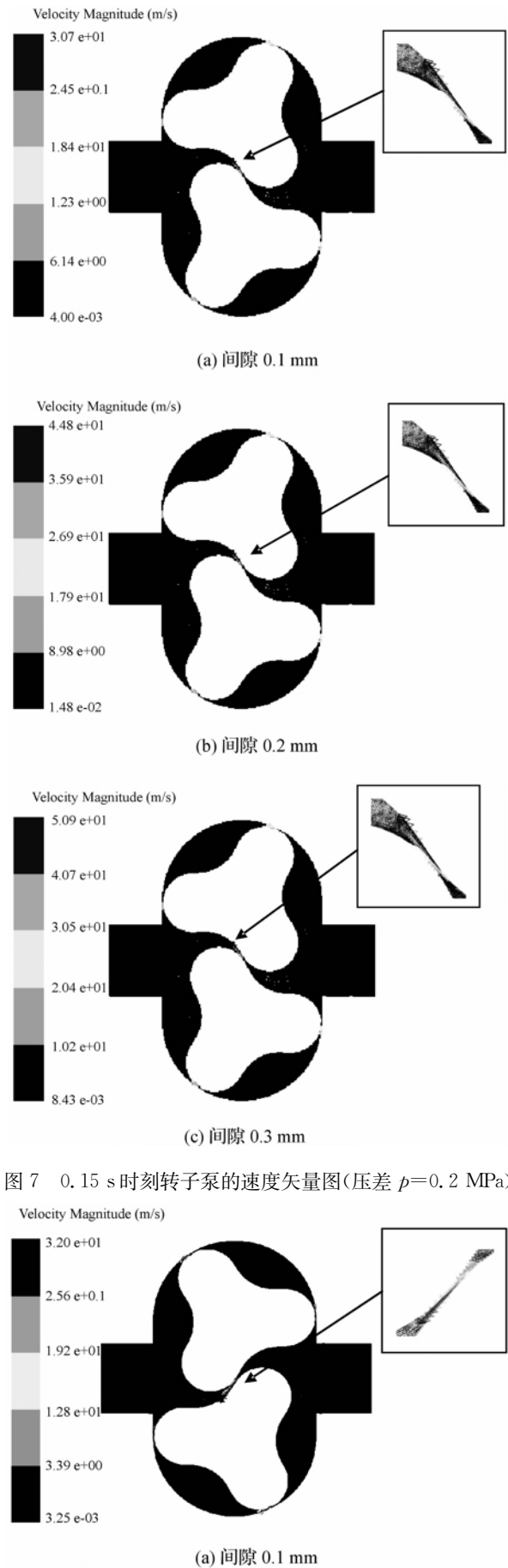


图 7 0.15 s 时刻转子泵的速度矢量图(压差  $p=0.2$  MPa)

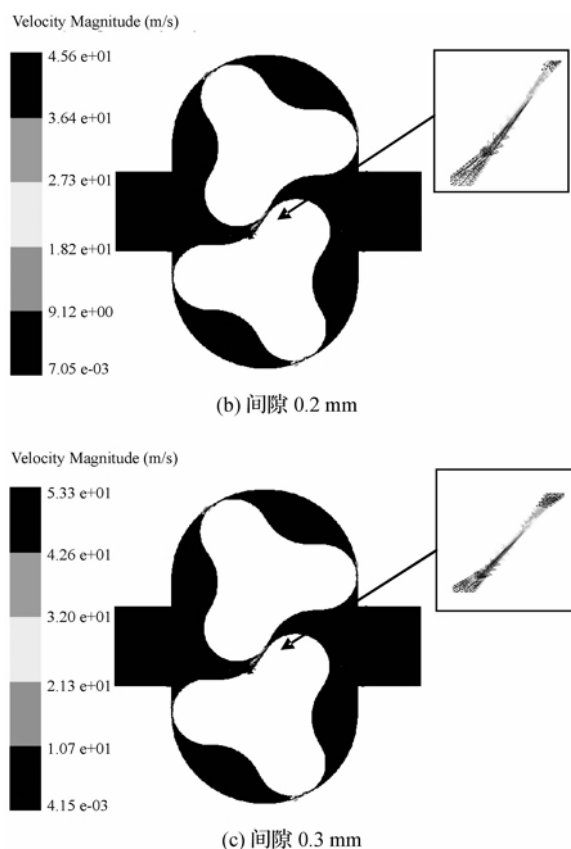


图8 0.25 s时刻转子泵的速度矢量图(压差  $p=0.2$  MPa)

### 3 结论

利用 FLUENT 软件模拟分析了不同径向间隙对转子泵性能的影响,可得出如下主要结论。

(a) 在相同的压差下,转子泵的时均质量流量和容积效率随着间隙的增加而明显减小;在相同的间隙下,转子泵的时均质量流量和容积效率随压差的增加而减小。

(b) 转子泵随着进出口压差的增大,间隙的增大对泵的容积效率的影响也在增大,这也限制了转子泵的出口压力的提高。

(c) 在压差相同的情况下,得出的不同间隙的转子泵速度矢量图可以看出,径向间隙处的回流速度较大,且大于转子泵的其它区域,尤其是在啮合处。且随着间隙的增大,间隙处的回流速度也随着增大,使间隙处泄漏量加大,从而导致泵的容积效率下降。

### 参考文献:

- [1] 张铁柱, 张洪信, 赵红. 非接触式转子泵的设计与试验[J]. 农业机械学报. 2002, 33(3): 39-41.
- [2] 张铁柱, 张洪信, 赵红. 非接触式转子泵转子理论型线与实际型线设计[J]. 机械工程学报. 2002, 38(11): 152-155.
- [3] 张洪信, 张铁柱, 张继忠, 等. 非接触式转子泵的优化设计[J]. 机械工程学报. 2005, 36(7): 65-67.
- [4] 熊滨生, 熊安然, 冯力, 等. 三叶罗茨鼓风机的内泄漏流量分析[J]. 矿山机械. 2006, 34(12): 31-32.
- [5] 陈长崎, 王旭迪. 罗茨泵径向间隙泄漏量的研究与建模[J]. 流体机械, 2002, 30(11): 29-31.
- [6] 宋建强. 罗茨鼓风机转子各部间隙的分析与计算[J]. 化工机械. 2010, 37(6): 697-701.
- [7] 李玉龙, 王学军, 顾广华. 外啮合齿轮泵困油历程的仿真研究[J]. 机械传动. 2004, 28(6): 19-21.
- [8] 周雄, 朱新才, 李良. 外啮合齿轮泵齿顶与泵体间的最佳理论径向间隙[J]. 液压与气动, 2007, 28(12): 63-64.
- [9] 陈英, 荆宝德, 王义强. 外啮合齿轮泵的间隙优化[J]. 机床与液压. 2006, 35(9): 156-158.
- [10] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004, 185-253.

## Research on Influence of Radial Clearance on Volumetric Efficiency of Rotor Pump

QIAN Hao-hai, LI Die

(Key Laboratory of Fluid Transmission Technology Research of Zhejiang, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** This paper discusses the influence of gap size on the volumetric efficiency and operational reliability of rotor pump; conducts numerical simulation study of two-dimensional non-fixed constant in inner flow field of non-contact cam rotor pump by using dynamic mesh technique based on the given different radial clearances and obtains the law of influence of different clearances on the performance of cam rotor pump. The result shows that, under the same inlet and outlet differential pressure condition, the leakage rate at clearance increases with the increase of radial clearance and the volumetric efficiency of rotor pump significantly decreases. With the same clearance, the volumetric efficiency of rotor pump decreases with the increase of differential pressure; however, the influence of clearance on volumetric efficiency increases with the increase of differential pressure. The research result can provide reference for performance prediction and optimization of rotor pump.

**Key words:** cam rotor pump; radial clearance; volumetric efficiency; numerical simulation

(责任编辑: 张祖尧)