

配合间隙对直线共轭内啮合齿轮泵流场特性的影响

陈鼎¹ 张杨^{1,2} 叶绍干² 盛精¹

(1. 厦门理工学院机械与汽车工程学院, 厦门 361024;

2. 厦门大学萨本栋微米纳米科学技术研究院, 厦门 361021)

摘要: 直线共轭内啮合齿轮泵是液压系统中的关键组件,因其高效的压力输送特性而广泛应用于工程领域。本文采用计算流体动力学模拟方法对直线共轭内啮合齿轮泵进行研究,分析轴向间隙和径向间隙对齿轮泵泄漏和流场的影响。研究结果表明:配合间隙的变化对齿轮泵的流场特性产生广泛影响,轴向间隙是引发泄漏的主要因素,约占总泄漏量的80%;当轴向间隙由0.03 mm增加到0.07 mm后,输出流量减少20.81%,平均压力下降33.15%,空化产生的气体体积分数增加0.021;而设置相同径向间隙后,输出流量仅下降0.69%,平均压力下降2.76%,空化产生的气体体积分数增加0.005。此外,导致泵内流速变化的主要配合间隙是轴向间隙,适当减小轴向间隙可提升泵内的流体速度,从而提升泵的整体效率。

关键词: 直线共轭内啮合齿轮泵; 泄漏; 流场特性; 配合间隙

中图分类号: TH325 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)02-0442-08

OSID:



Influence of Mating Clearance on Flow Field Characteristics of Linear Conjugate Internal Gear Pump

CHEN Ding¹ ZHANG Yang^{1,2} YE Shaogan² SHENG Jing¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China

2. Pen-Tung Sah Institute of Micro-Nano Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Linear conjugated internal gear pump plays a key role in hydraulic system, and its efficient pressure transmission characteristics make it widely used in engineering field. In this paper, the effects of axial clearance and radial clearance on leakage and flow field of linear conjugate internal gear pump are analyzed by means of computational fluid dynamics simulation. The results show that the variation of mating clearance has a wide and significant influence on the flow field characteristics of gear pump, in which the axial clearance is the main factor causing leakage, accounting for 80% of the total leakage. Specifically, when the axial clearance increases from 0.03 mm to 0.07 mm, the output flow rate decreases by 20.81%, the average pressure decreases by 33.15%, and the volume fraction of the gas generated by cavitation increases by 0.021. In contrast, the setting of the same radial clearance only resulted in a 0.69% decrease in output flow, a 2.76% decrease in average pressure, and a 0.005 increase in the volume fraction of the gas produced by cavitation. In addition, the study also found that the main matching clearance leading to the change of flow rate in the pump is the axial clearance. A modest reduction in the axial clearance helps to increase the fluid speed in the pump, thereby enhancing the overall efficiency of the pump. These results provide useful theoretical support for the design and optimization of linear conjugate internal gear pump, which is helpful to improve its performance and reliability in hydraulic system.

Key words: linear conjugate internal gear pump; leakage; flow field characteristic; mating clearance

收稿日期: 2023-11-12 修回日期: 2023-12-06

基金项目: 福建省科技计划引导性项目(2021H0027)和福建省自然科学基金项目(2021J01049, 2021J011202)

作者简介: 陈鼎(1985—),男,讲师,博士,主要从事机械系统动态监测技术研究, E-mail: chending@xmut.edu.cn

通信作者: 叶绍干(1989—),男,特任研究员,博士,主要从事高端空天装备电液伺服驱动元件和系统创新设计与智能控制研究, E-mail: shaoganye@xmu.edu.cn

0 引言

齿轮泵在液压系统中的应用非常广泛^[1-2],具有结构紧凑、流量和压力脉动低、工作压力高、噪声少、自吸性能优、传动平稳、不容易受介质污染影响等优点,内齿圈采用动静压油膜润滑,因此泵的使用寿命长。由于其低流量脉动特性,内啮合齿轮泵广泛应用于电液比例控制系统、室内机械以及对噪声敏感的应用场景,例如舰船等低噪声的场合。内啮合齿轮泵具有高转速能力,提高了容积效率^[3]。这些优势将为未来的机械工业带来更大的需求和广泛的应用范围^[4-5]。而计算流体动力学是一种工程领域的数值模拟技术,用于研究流体流动、传热和质量传递等现象。贵辛未等^[6]采用计算流体动力学技术提出了含有转轮泵的联合泄排水降压结构,这种结构在减少主轴密封压力、上冠轴向水推力和上冠间隙泄漏方面效果显著;邹修国等^[7]为了准确测量肉鸡养殖过程中鸡舍内的氨气浓度,运用计算流体力学技术模拟装置在不同状态下的速度云图和速度矢量图,得到空气龄,确定了单次进气时间。朱文颖等^[8]以单层隔板包装箱和单层普通包装箱为研究对象,比较相同初始条件和边界条件下,隔板包装与普通包装内部的温度场分布、风速场分布、冷却时间、冷却速率和冷却均匀性,结果表明隔板包装和普通包装的冷却时间和冷却速率基本一致。

泵的设计和制造中,如轴向和径向间隙不合适,会导致液体泄漏,对容积效率产生不利影响。过大的间隙则可能导致泄漏损失进一步增加。降低泄漏量,提高泵效率是国内外学者关注的研究焦点,也是评估齿轮泵性能的关键指标。张旭燕等^[9]采用液压油和纯水两种介质,制作了不同转速下的气相体积分布云图,并对内啮合齿轮泵的容积效率与转速之间的关系进行了分析;闻德生等^[10]对泵的容积效率进行了理论计算,得出多输出内啮合齿轮泵采用内泵单独工作时的容积效率最高,外泵单独工作容积效率最低;陈科等^[11]将齿轮泵的轴向间隙、径向间隙、液压油温度、工作压力和输入转速作为随机变量获得在不确定性下的齿轮泵容积效率;杨国来等^[12]运用矩形卸荷槽、渐开线型卸荷槽、异型卸荷槽分析泵内油液的流动状况,得出了导致泵空化现象发生的原因;王国志等^[13]研究了深海环境下的内啮合齿轮泵容积效率;SHEN 等^[14]分析了齿轮泵内部的流场压力,并用单向流固耦合的方法计算了齿轮接触疲劳寿命;VINEET 等^[15]利用 CFD 方法将齿轮泵泄漏环境与图像成像技术的流动显示进行了比

较,仿真结果与泄漏图像具有良好的一致性;HONG 等^[16]对齿轮泵内部流场进行了数值模拟,结果表明,随着齿轮转速的增大,泵内流体速度突变面积减小,压力突变面积减小,流体体积增大趋于平衡;GUO 等^[17]通过流场仿真计算得到外啮合齿轮泵的流量分布、速度分布、压力分布、湍流动能分布等二维流场;KIM 等^[18]对齿轮泵的流量进行了测量,通过与实验数据和仿真结果比较,验证了所提近似模型的正确性。国内外一些学者采用数值计算的方法研究齿轮泵在传统工况下的性能^[19-25]。国内外的科研人员在内啮合齿轮泵领域已取得一些进展,但尚未展开与配合间隙相关的流场特性研究。本文借助 CFD 方法,探究配合间隙对内啮合齿轮泵流场特性的影响规律。

1 模型

1.1 数学模型

在直线共轭内啮合齿轮泵中,油液流动应当遵循 3 个基本的物理定律,即质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程。由于本文不涉及能量转换过程,因此只需考虑质量守恒方程和动量守恒方程。其质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho \mathbf{V}) = S_m \tag{1}$$

式中 $\mathbf{V}$ ——速度

ρ ——(瞬时/雷诺)平均流量密度

S_m ——(外部/用户)质量源

t ——时间

∇ ——哈密顿算子

动量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla \tau + \rho \mathbf{B}_f + \mathbf{F} \tag{2}$$

式中 p ——(瞬时/雷诺)平均静压

τ ——应力张量

$\mathbf{B}_f$ ——物体的力,包括重力、浮力或在非惯性参照系中的额外项

$\mathbf{F}$ ——其他依赖于模型的源

湍流特性利用标准的 $k-\varepsilon$ 模型表示为

$$\nabla (\rho \mathbf{V} k) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G - \rho \varepsilon \tag{3}$$

$$\nabla (\rho \mathbf{V} \varepsilon) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] +$$

$$\frac{\varepsilon}{k} (C_{s1} G - C_{s2} \rho \varepsilon) \tag{4}$$

其中

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{5}$$

式中 k ——湍流动能

ε ——耗散率
 μ ——纯水动力黏度, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$
 μ_t ——湍流黏滞系数, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$
 G ——平均速度梯度产生的湍流动能

其中 σ_k 取 1.0, σ_ε 取 1.3, C_{s1} 取 1.44, C_{s2} 取 1.44, C_μ 取 0.09。

1.2 内啮合齿轮泵参数

选取研究对象为一种直线共轭内啮合齿轮泵, 该泵的内啮合结构使其整体尺寸相对较小, 适用于有空间限制的环境。此外, 直线共轭内啮合齿轮泵采用共轭齿形设计, 确保齿轮在啮合时能够高效、平稳地输送液体(图 1), 该直线共轭内啮合齿轮泵主要由泵体、吸油口、排油口、传动轴、共轭内齿圈、直线外齿轮和月牙板等组成。其中直线外齿轮为主动轮带动共轭内齿圈旋转, 月牙板固定在泵体上用于隔绝吸、排油腔。在吸油口, 直线外齿轮和共轭内齿圈分离, 导致吸油区容积增大, 从而形成真空, 完成吸油过程。随后, 吸入的油液通过密闭的过渡腔, 由直线外齿轮、共轭内齿圈和月牙板输送至出油口。最后, 在出油口, 直线外齿轮和共轭内齿圈互相啮合, 将高压油压缩并排放到排油口。其主要几何参数如表 1 所示。

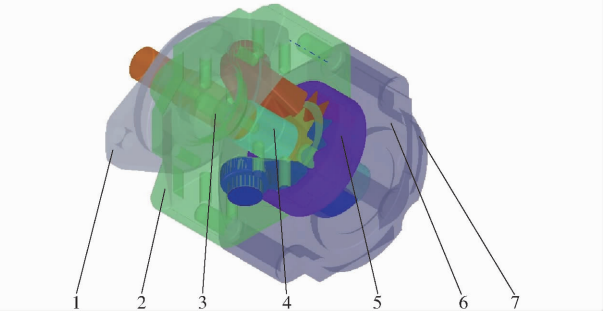


图 1 直线共轭内啮合齿轮泵结构示意图

Fig.1 Structure diagram of linear conjugate internal gear pump

1.前泵盖 2.上泵体 3.直线齿轮轴 4.滑动轴承 5.共轭内齿圈 6.下泵体 7.后泵盖

表 1 直线共轭内啮合齿轮泵主要参数

Tab.1 Main parameters of linear conjugate internal gear pump

参数	数值
齿轮模数/mm	10/3
直线外齿轮齿数	10
共轭内齿圈齿数	13
直线齿廓齿形半角/(°)	27.28
节圆齿厚系数	0.33
齿顶高系数	0.61
齿根高系数	0.79
齿顶间隙系数	0.05
齿宽/mm	27

2 网格无关性

采用计算流体力学(CFD)方法对齿轮泵的流场进行数值分析。如图 2 所示,提取齿轮泵流体域进行网格划分。在出口流道上设置监测点。

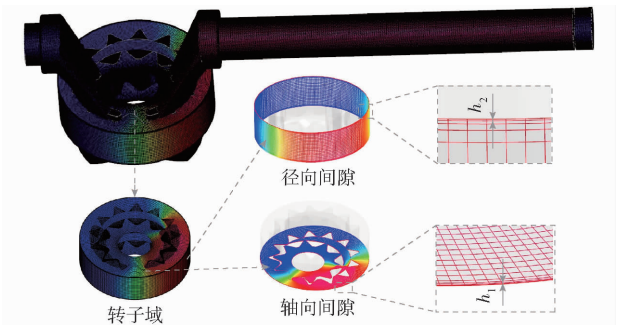


图 2 流体域及其网格划分

Fig.2 Fluid domain and its meshing

网格质量直接影响计算结果的准确性。如网格过于密集,结果更准确,但会消耗大量时间和资源。反之,网格数量过少会降低计算结果精度。为了平衡计算精度和效率,进行了网格无关性验证。结果如图 3 和表 2 所示,当网格数量为 1.92×10^5 和 5.26×10^5 时,容积效率之间仅相差 0.23 个百分点。满足网格无关性和计算精度要求。本文选择网格数为 5.26×10^5 。此外,油液密度为 $800 \text{ kg}/\text{m}^3$ 和动力粘度为 $0.007 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

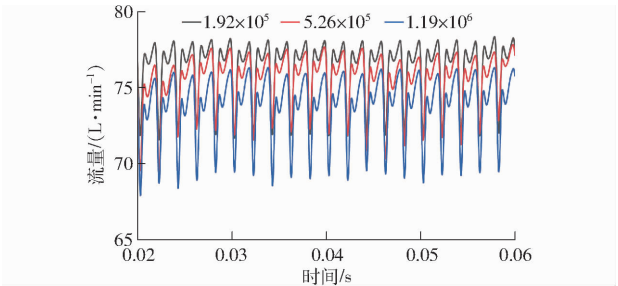


图 3 网格无关性验证

Fig.3 Grid independence verification

表 2 网格无关性

Tab.2 Grid independence

计算案例	网格数量	容积效率/%
1	1.92×10^5	87.77
2	5.26×10^5	87.54
3	1.19×10^6	85.32

3 直线共轭内啮合齿轮泵流量特性

3.1 轴向间隙对输出流量的影响

为了精确了解轴向间隙对输出流量的影响,将轴向间隙油膜厚度 h_1 划分为 0.03、0.04、0.05、0.06、0.07 mm。将泵出口压力设定为 21 MPa,转速为 3 000 r/min。

从图4可以看出,随着齿轮泵轴向间隙从0.03 mm增加到0.04 mm,输出流量降低4.73%;从0.04 mm增加到0.05 mm,输出流量降低4.99%;从0.05 mm增加到0.06 mm,输出流量降低5.49%;从0.06 mm增加到0.07 mm,输出流量降低5.81%。这表明,齿轮泵轴向间隙即使略微增加,也会导致泵出口输出流量明显下降,同时齿轮泵容积效率也会显著下降。

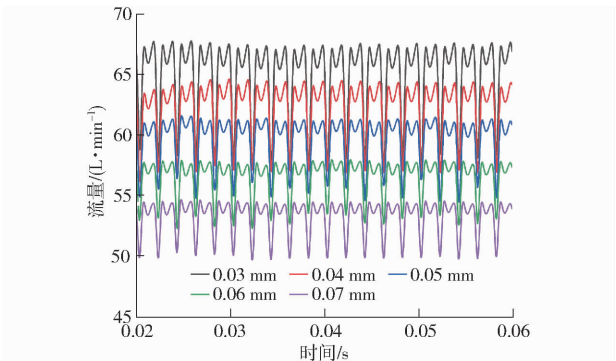


图4 不同轴向间隙油膜厚度时泵出口处输出流量
Fig.4 Output flow at pump outlet with different axial clearance film thicknesses

3.2 径向间隙对输出流量的影响

取径向间隙 h_2 为 0.03、0.04、0.05、0.06、0.07 mm,并进行仿真分析。在此过程中,保持泵的出口压力和转速不变。

由图5可知,不同的径向间隙导致的输出流量变化相对较小。从径向间隙 0.03 mm 增加到 0.07 mm 后,泵出口输出流量仅下降 0.757%。相较于轴向间隙,径向间隙对泵性能的影响较小,泵的输出流量相对稳定。

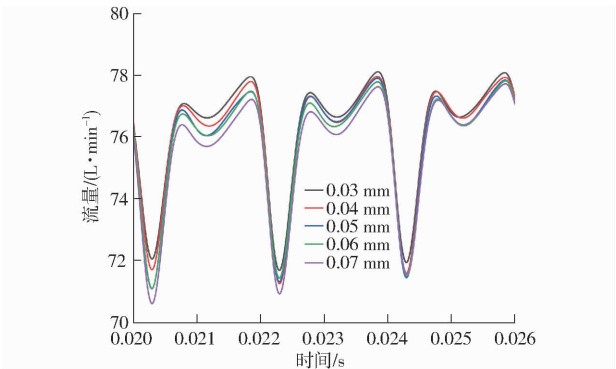


图5 不同径向间隙油膜厚度时泵出口处输出流量
Fig.5 Output flow at pump outlet with different radial clearance film thicknesses

3.3 轴向和径向间隙对流量的影响对比

将轴向间隙 h_1 和径向间隙 h_2 都设为 0.05 mm,分成3种情况进行仿真:只考虑轴向间隙(轴向间隙设为 0.05 mm,径向间隙为 0 mm)、只考虑径向间隙(轴向间隙设为 0 mm,径向间隙设为 0.05 mm)以及

不考虑任何间隙(轴向间隙和径向间隙都设为 0 mm)。

由图6可知,当只考虑轴向间隙时,输出流量下降 20.81%;而当只考虑径向间隙时,输出流量下降 0.69%。齿轮泵内泄漏主要发生在轴向间隙处,约占总泄漏量 80%。因为轴向间隙具有较大的泄漏面积和较短的泄漏途径,通过减小轴向间隙,可以降低泄漏并提高设备效率,减少了沿轴向方向的泄漏或倒流。但过小的轴向间隙可能会增加摩擦损失,从而降低效率。

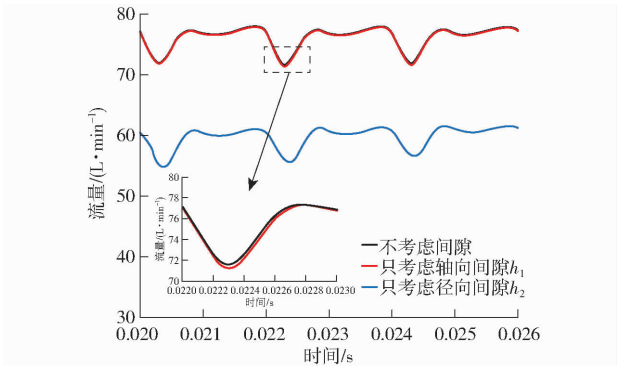


图6 轴向与径向间隙出口流量对比
Fig.6 Comparison of axial and radial clearance outlet flow

4 直线共轭内啮合齿轮泵流场特性

4.1 配合间隙对齿轮泵压力场的影响

为了研究轴向间隙与流体压力的关系,分析5种不同轴向间隙下的油膜压力和压力脉动图像。将监测点设置在泵的出口位置,以观察在不同轴向间隙下的出口压力脉动情况。

由图7可以看出,随着轴向间隙增大,油膜压力不断降低。如图8所示,轴向间隙增大导致内部流场的压力减小。因为较大的轴向间隙意味着更多液体会从齿轮之间的间隙泄漏,而无法有效地输送到泵的出口。这增加了泵内泄漏液体的体积,从而导致较少的液体输送到出口,从而降低内部压力。此外,较大的轴向间隙还会引起较大的压力损失,因为

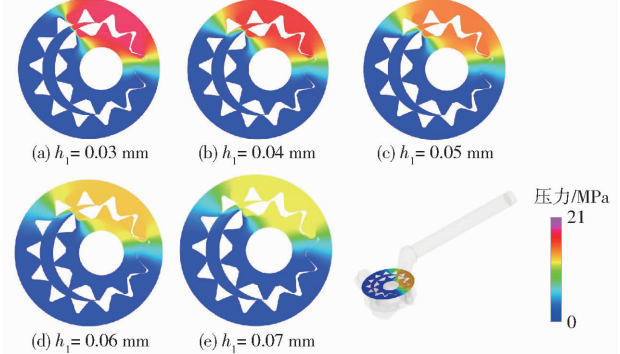


图7 轴向油膜压力分布
Fig.7 Axial oil film pressure distribution

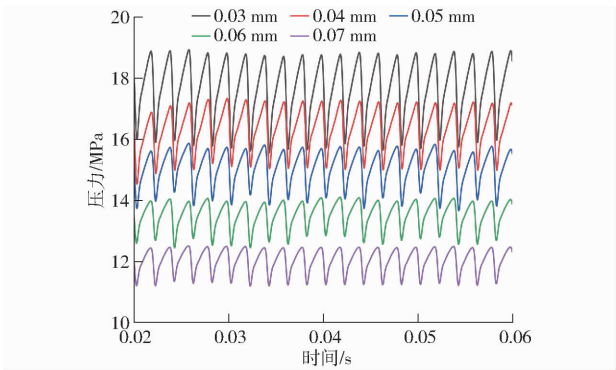


图 8 监测点位置压力脉动

Fig. 8 Pressure pulsation at monitoring point

液体需要克服更多的阻力才能在泄漏过程中流动，进一步降低了泵的输出压力。

除了轴向间隙还必须考虑径向间隙对流动特性的影响,同样设 5 种不同径向间隙 h_2 , 根据仿真结果绘制不同径向间隙处的压力分布云图, 如图 9 所示。从图 9 可以看出, 径向油膜压力随油膜厚度的变化较小, 因为从齿轮泵容腔到径向间隙处泄漏途径长, 压力损失比较小。同时齿轮泵使用的润滑油通常具有一定的黏度, 这有助于在齿轮和泵壳之间形成稳定的径向油膜。润滑油的性质以及油膜的黏度有助于减小径向油膜厚度对油膜压力的敏感性, 这也有助于齿轮泵在不同工作条件下保持稳定的性能。

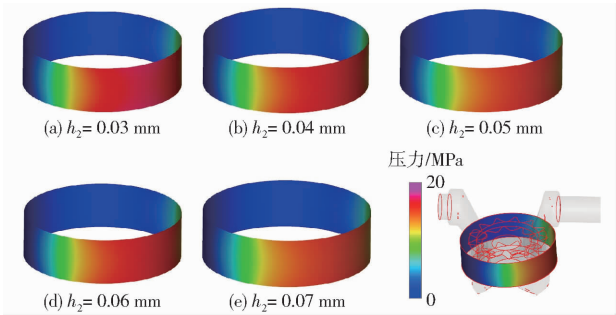


图 9 径向油膜压力分布

Fig. 9 Radial oil film pressure distribution

将轴向间隙 h_1 和径向间隙 h_2 分为 3 组, 径向间隙为 0 时, 轴向间隙分别取 0.03、0.05、0.07 mm; 轴向间隙为 0 时, 径向间隙分别取 0.03、0.05、0.07 mm。从图 10 可以看出, 不论是轴向间隙还是径向间隙, 随着间隙的增大, 齿轮泵内泄漏增加, 导致压力未能充分利用, 进而引出口处监测点压力下降。在 0.03 ~ 0.07 mm 范围内, 轴向间隙处平均压力下降 33.15%, 而径向间隙处平均压力下降 2.76%。

4.2 配合间隙对齿轮泵速度场的影响

一般情况下, 泵的流速越高泵的效率也就越高, 但泵的流速一旦超过某个临界值, 泵的内部能量损耗就会增加从而导致泵的效率变低, 同样高流速也

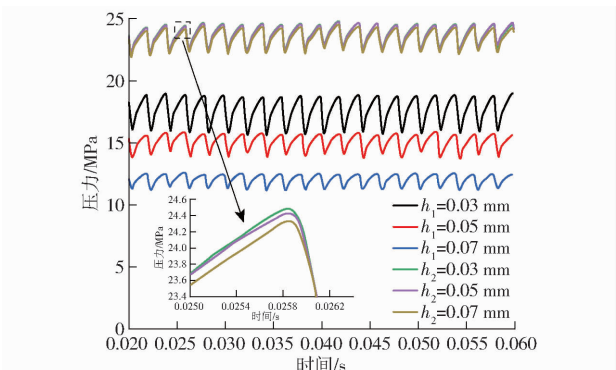


图 10 不同轴向与径向间隙监测点压力对比

Fig. 10 Pressure comparison between different axial and radial clearance monitoring points

会引起较大的振动与噪声。从图 11 可以看出, 引起泵内流速变化的主要是轴向间隙。径向间隙处泄漏少, 少量增加径向间隙对齿轮泵的速度场影响较低, 这是因为齿轮泵的压力损失主要存在于轴向间隙处, 在齿轮泵内, 当液体被挤压到齿轮之间并加速流动时, 其压力增加, 同时流速也会随之升高。

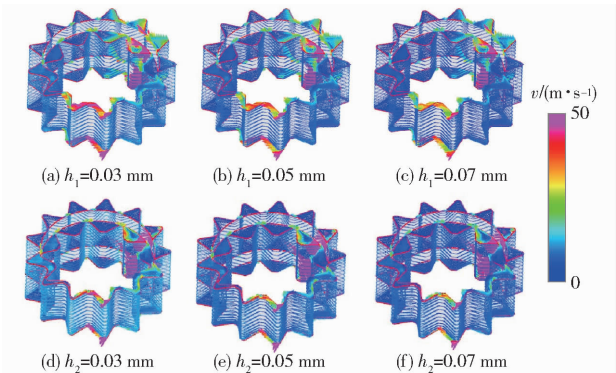


图 11 容腔内流速对比

Fig. 11 Intracavity flow rate comparison

较小的轴向间隙通常有助于提高齿轮泵的流速性能, 因为它们减少了泵内的泄漏流量, 使更多的液体能够被有效地送到出口。因此, 对于需要高流速的应用, 通常会选择较小的轴向间隙, 以确保更高的效率和密封性。另一方面, 在低流速要求的应用中, 较大的轴向间隙可能更容易处理液体, 因为它们允许一定程度的泄漏流量, 有助于减轻液体的力学压力, 从而更适合这种情况。径向间隙的油膜厚度对齿轮泵出口处的流速并没有明显影响。适当增大径向间隙有利于降低齿轮与泵体之间的摩擦和磨损, 这对提高齿轮泵的整体性能非常有益。通过平衡径向间隙, 可以在保持泵可靠性的同时减少不必要的磨损, 延长设备寿命, 并提高泵的效率。

4.3 配合间隙对齿轮泵空化的影响

在齿轮泵中, 轴向间隙与空化之间存在密切的关系。轴向间隙可以直接影响齿轮泵是否容易发生空化现象。从图 12 可看出, 较大的轴向间隙通常会

增加齿轮泵发生空化的风险。空化是一种液体中的气泡或蒸汽形成和坍塌的现象,通常发生在液体低压区域中蒸发后,随后在高压区域中坍塌。轴向间隙的增大可以导致泄漏流量增加,液体在低压区域中的蒸发可能更为显著,从而增加了空化的可能性。

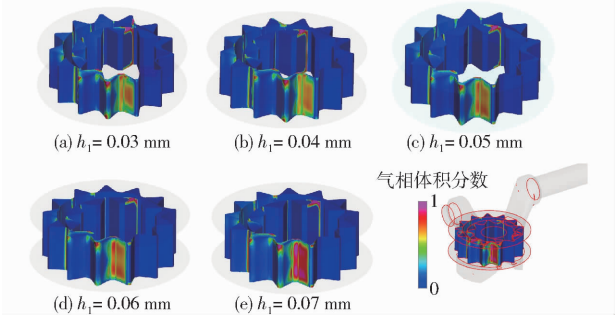


图 12 不同轴向间隙时气相体积分数分布云图

Fig. 12 Gas phase volume fraction distribution cloud images with different axial gaps

在径向间隙处使用相同的 5 组径向间隙油膜进行对比,观察齿轮泵的空化云图对比因径向间隙不同引起的空化现象。由图 13 可知,由于径向间隙处泄漏较小,径向间隙的油膜相对稳定,油液从高压到低压区域过程中产生的总气体体积也较小。因此,随着径向间隙的增加,齿轮泵在径向间隙处的空化现象不明显。这是因为较小的泄漏和较小的气体体积减少了在液体从高压区域到低压区域时产生气泡或蒸汽的可能性。

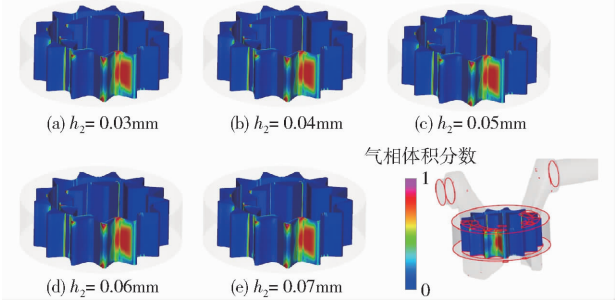


图 13 不同径向间隙时气相体积分数分布云图

Fig. 13 Gas phase volume fraction distribution cloud images with different radial clearances

齿轮泵在工作过程中,压力突然降低使液体中的气体产生气泡并进入泵内,从而导致泵性能下降或损坏。通过产生的气体体积来比较轴向与径向间隙对齿轮泵空化现象的影响。轴向间隙导致压力的损失较为明显,当压力骤降时,低压区会析出气泡,

而图 14 表明,轴向间隙越大,压力损失越明显,产生的气体体积分数越大,轴向间隙由 0.03 mm 增大到 0.07 mm 后,所产生的气体体积分数增大 0.021。而根据前文分析的径向间隙处压力云图可知,径向间隙引起的压降较小,所产生的气体体积分数变化也较低,导致了径向间隙由 0.03 mm 增大到 0.07 mm 后,所产生的气体体积分数仅增大 0.005。

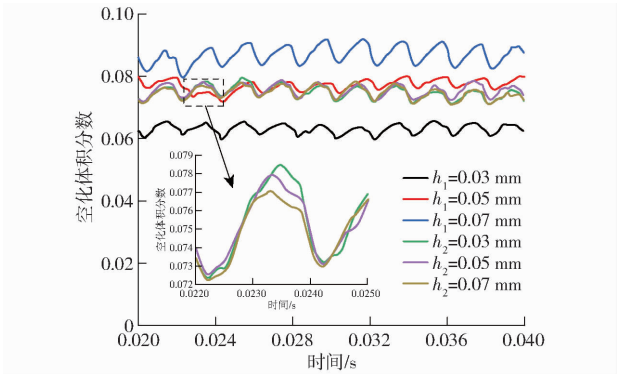


图 14 气体体积分数对比

Fig. 14 Gas volume fraction comparison

5 结论

(1) 由于轴向间隙处泄漏途径短、泄漏面积大,轴向间隙引起的内泄漏占总泄漏的 80% 左右。当轴向间隙由 0.03 mm 增加到 0.07 mm 后,输出流量减少 20.81%,径向间隙设置相同的数值,输出流量仅减小 0.69%。因此,轴向间隙稍有增加,泵出口处的输出流量就会明显下降,齿轮泵的容积效率也会显著下降。

(2) 相比于径向间隙,轴向间隙改变引起的压力损失更为明显,因为轴向间隙处泄漏导致了压力损失。当改变间隙后,轴向间隙导致的压降为 33.15%,径向间隙引起的压降为 2.76%。由于径向间隙处压力损失较小,可适当增大径向间隙来减小齿轮泵与泵体间的摩擦磨损。

(3) 导致泵内流速变化的主要配合间隙是轴向间隙,适当减小轴向间隙可以提升泵内流体速度从而提升泵的整体效率。

(4) 轴向间隙越大所引起的压降越明显,会导致在低压区析出的气泡越多,对泵的危害也会越大。通过不同间隙的仿真计算可知,轴向间隙增大导致空化产生的气体体积分数增大 0.021,径向间隙的增大导致气体体积分数增大 0.005。

参 考 文 献

[1] 陈宗斌,何琳,廖健. 内啮合齿轮泵发展综述[J]. 液压与气动,2021,45(10):20-30.
CHEN Zongbin, HE Lin, LIAO Jian. An overview of the development of internal gear pumps[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2021, 45(10):20-30. (in Chinese)

- [2] 杨华勇,周华. 水液压技术研究新进展[J]. 液压与气动,2013,37(2):1-6.
YANG Huayong, ZHOU Hua. Recent advances in hydraulic technology research [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics,2013,37(2):1-6. (in Chinese)
- [3] 王霞琴,邓龙,柴红强,等. 变工作条件下齿轮泵特性分析[J]. 液压与气动,2022,46(8):178-188.
WANG Xiaqin, DENG Long, CHAI Hongqiang, et al. Characteristics analysis of gear pumps under variable operating conditions [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics,2022,46(8):178-188. (in Chinese)
- [4] 李宏伟,杨成. 基于 ANSYS 的内啮合齿轮泵壳体有限元分析及优化[J]. 液压与气动,2011,35(2):32-35.
LI Hongwei, YANG Cheng. Finite element analysis and optimization of the housing of an internal gear pump based on ANSYS [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics,2011,35(2):32-35. (in Chinese)
- [5] 蒋祖武. 浅析国内外航空用齿轮泵的发展[J]. 装备制造技术,2014(9):184-185.
JIANG Zuwu. A brief analysis of the development of aerospace gear pumps in domestic and international contexts [J]. Equipment Manufacturing Technology,2014(9):184-185. (in Chinese)
- [6] 贵辛未,牧振伟,夏庆成,等. 混流式水轮机上冠泄排水联合降压数值模拟[J]. 农业机械学报,2022,53(11):208-214,235.
GUI Xinwei, MU Zhenwei, XIA Qingcheng, et al. Numerical simulation of combined pressure reduction with upper crown discharge and drainage of a francis turbine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(11):208-214,235. (in Chinese)
- [7] 邹修国,祝忠钲,SU Steven,等. 基于 MCU 和 CFD 的鸡舍氨气检测装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(9):338-345.
ZOU Xiuguo, ZHU Zhongzheng, SU Steven, et al. Design and experiment of ammonia detection device for chicken house based on MCU and CFD [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(9):338-345. (in Chinese)
- [8] 朱文颖,史策,韩帅,等. 基于 CFD 的苹果隔板包装预冷温度场研究[J]. 农业机械学报,2019,50(1):331-338.
ZHU Wenying, SHI Ce, HAN Shuai, et al. Research on pre-cooling temperature field of apple partition packaging based on CFD [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(1):331-338. (in Chinese)
- [9] 张旭燕,曹文斌,杨国来,等. 变转速工况对直线共轭内啮合齿轮泵容积效率的影响[J]. 液压与气动,2023,47(2):54-61.
ZHANG Xuyan, CAO Wenbin, YANG Guolai, et al. Influence of variable speed operating conditions on the displacement efficiency of straight conjugate internal gear pumps[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics,2023,47(2):54-61. (in Chinese)
- [10] 闻德生,刘小雪,田山恒,等. 多输出内啮合齿轮泵泄漏与容积效率分析及密封改进[J]. 西北工业大学学报,2019,37(5):1060-1069.
WEN Desheng, LIU Xiaoxue, TIAN Shanheng, et al. Analysis of leakage and displacement efficiency in multi-output internal gear pumps and seal improvement [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019,37(5):1060-1069. (in Chinese)
- [11] 陈科,钱林峰,於孝朋,等. 外啮合齿轮泵随机内泄漏模型的研究[J]. 计算力学学报,2018,35(6):782-788.
CHEN Ke, QIAN Linfeng, YU Xiaopeng, et al. Research on stochastic internal leakage model for external gear pumps [J]. Journal of Computational Mechanics,2018,35(6):782-788. (in Chinese)
- [12] 杨国来,王文宇,白京浩,等. 不同卸荷槽影响下外啮合齿轮泵空化特性[J]. 制造技术与机床,2020(9):106-111.
YANG Guolai, WANG Wenyu, BAI Jinghao, et al. Cavitation characteristics of external gear pumps under the influence of different unloading chambers[J]. Manufacturing Technology and Machine Tools,2020(9):106-111. (in Chinese)
- [13] 王国志,唐敬来,邓斌,等. 深海环境下的齿轮泵效率研究[J]. 机床与液压,2018,46(11):111-114.
WANG Guozhi, TANG Jinglai, DENG Bin, et al. Efficiency research of gear pumps in deep-sea environments [J]. Machine Tools and Hydraulics,2018,46(11):111-114. (in Chinese)
- [14] SHEN Haidong, LI Zhiqiang, QI Lele, et al. A method for gear fatigue life prediction considering the internal flow field of the gear pump[J]. Mechanical Systems & Signal Processing,2018,99:921-929.
- [15] VINEET S, UDAYADITYA M, MANAB K D, et al. Visualization of leakage flow through active contacts in toothed external gear pumps-CFD and photo imaging techniques[J]. Journal of Flow Visualization and Image Processing,2016,23(3/4):345-376.
- [16] HONG Weibo, ZHANG Keping, YAO Yaping. Numerical simulation of the influence of gear rotation speed on the gear pump flow field[J]. Applied Mechanics and Materials,2015,3844(1482):232-236.
- [17] GUO Anfu, JIANG Tingting, WANG Tong, et al. Numerical simulation on the flow field of external gear pump based on fluent [J]. Applied Mechanics and Materials,2014,3207(1118):1421-1425.
- [18] KIM J, KIM S. The flow rate characteristics of external gear pump for EHPS[C] // 2013 4th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation, 2013:346-349.
- [19] CASTILLA R, WOJCIECHOWSKI J, GAMEZ-MONTERO P J, et al. Analysis of the turbulence in the suction chamber of an external gear pump using time resolved particle image velocimetry[J]. Flow Measurement and Instrumentation,2008,19(6):377-384.
- [20] ZHOU Yang, HAO Shuanghui, HAO Minghui. A two-dimensional numerical analysis of a circular-arc gear pump operating at high pressures and high speeds[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E. Journal of Process Mechanical Engineering,2017,231(3):432-443.
- [21] ZHOU Junjie, HU Jibin, JING Chongbo. Lumped parameter modelling of cavitating orifice flow in hydraulic systems[J].

Journal of Mechanical Engineering,2016,62(6):373-380.

[22] 张慧宇,张惟斌,衡亚光,等. 基于浸入实体法的低压外啮合齿轮泵不稳定流动特性[J]. 船舶工程,2021,43(12):120-125.
ZHANG Huiyu, ZHANG Weibin, HENG Yaguang, et al. Unsteady flow characteristics of low pressure external gear pump based on submerged entity method[J]. Marine Engineering,2021,43(12):120-125. (in Chinese)

[23] 王乐. 基于 CFD 和 ANSYS 技术对 CBN 齿轮泵仿真实验分析[J]. 煤矿机械,2019,40(6):185-187.
WANG Le. Simulation experiment analysis of CBN gear pump based on CFD and ANSYS technology[J]. Coal Mine Machinery,2019,40(6):185-187. (in Chinese)

[24] 杨永敏,卢前顺. 基于 CFD 的商用航空发动机齿轮泵浮动侧板设计技术研究[J]. 制造业自动化,2016,38(4):49-53,62.
YANG Yongmin, LU Qianshun. Research on floating side plate design of commercial aero-engine gear pump based on CFD[J]. Manufacturing Automation,2016,38(4):49-53,62. (in Chinese)

[25] SUJAN D, ANDREA V. 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.

(上接第 432 页)

[14] WU L, HUANG X D, CUI J G, et al. Modified adaptive ant colony optimization algorithm and its application for solving path planning of mobile robot[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 215: 119410.

[15] GAO W X, TANG Q, YE B F, et al. An enhanced heuristic ant colony optimization for mobile robot path planning[J]. Soft Computing, 2020, 24(8): 6139-6150.

[16] TAO Y, GAO H, REN F, et al. A mobile service robot global path planning method based on ant colony optimization and fuzzy control[J]. Applied Sciences, 2021, 11(8): 3605.

[17] 马小陆,梅宏,龚瑞,等. 基于改进 ACS 算法的移动机器人路径规划研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2021,48(12):79-88.
MA Xiaolu, MEI Hong, GONG Rui, et al. Research on path planning of mobile robot based on improved ACS algorithm[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(12): 79-88. (in Chinese)

[18] XUE T, LI L, SHUANG L, et al. Path planning of mobile robot based on improved ant colony algorithm for logistics[J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2021, 18(4): 3034-3045.

[19] 徐菱,付文浩,江文辉,等. 基于 16 方向 24 邻域改进蚁群算法的移动机器人路径规划[J]. 控制与决策,2021,36(5):1137-1146.
XU Ling, FU Wenhao, JIANG Wenhui, et al. Mobile robots path planning based on 16-directions 24-neighborhoods improved ant colony algorithm[J]. Control and Decision, 2021, 36(5): 1137-1146. (in Chinese)

[20] MIAO C W, CHEN G Z, YAN C L, et al. Path planning optimization of indoor mobile robot based on adaptive ant colony algorithm[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 156: 107230.

[21] LUO Q, WANG H B, ZHENG Y, et al. Research on path planning of mobile robot based on improved ant colony algorithm[J]. Neural Computing and Applications, 2020, 32(6): 1555-1566.

[22] 张恒,何丽,袁亮,等. 基于改进双层蚁群算法的移动机器人路径规划[J]. 控制与决策,2022,37(2):303-313.
ZHANG Heng, HE Li, YUAN Liang, et al. Mobile robot path planning using improved double-layer ant colony algorithm[J]. Control and Decision, 2022, 37(2): 303-313. (in Chinese)

[23] DAI X L, LONG S, ZHANG Z W, et al. Mobile robot path planning based on ant colony algorithm with A* heuristic method[J]. Frontiers in Neurorobotics, 2019, 13: 15.

[24] YANG H, QI J, MIAO Y C, et al. A new robot navigation algorithm based on a double-layer ant algorithm and trajectory optimization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(11): 8557-8566.

[25] 敖邦乾,杨莎,叶振环. 改进蚁群算法水面无人艇平滑路径规划[J]. 控制理论与应用,2021,38(7):1006-1014.
AO Bangqian, YANG Sha, YE Zhenhuan. Improved ant colony algorithm for unmanned surface vehicle smooth path planning[J]. Control Theory & Applications, 2021, 38(7): 1006-1014. (in Chinese)

[26] 王洪斌,尹鹏衡,郑维,等. 基于改进的 A* 算法与动态窗口法的移动机器人路径规划[J]. 机器人,2020,42(3):346-353.
WANG Hongbin, YIN Pengheng, ZHENG Wei, et al. Mobile robot path planning based on improved A* algorithm and dynamic window method[J]. Robot, 2020, 42(3): 346-353. (in Chinese)

[27] 劳彩莲,李鹏,冯宇. 基于改进 A* 与 DWA 算法融合的温室机器人路径规划[J]. 农业机械学报,2021,52(1):14-22.
LAO Cailian, LI Peng, FENG Yu. Path planning of greenhouse robot based on fusion of improved A* algorithm and dynamic window approach[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 14-22. (in Chinese)

[28] 刘建华,杨建国,刘华平,等. 基于势场蚁群算法的移动机器人全局路径规划方法[J]. 农业机械学报,2015,46(9):18-27.
LIU Jianhua, YANG Jianguo, LIU Huaping, et al. Robot global path planning based on ant colony optimization with artificial potential field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 18-27. (in Chinese)