

双圆弧齿轮泵流量特性影响因素数值模拟

Numerical simulation of factors affecting flow characteristics of double-circular-arc gear pump

黄 成¹ 徐 恺^{1,2} 韦智博¹ 李阁强^{1,2}

HUANG Cheng¹ XU Kai^{1,2} WEI Zhibo¹ LI Geqiang^{1,2}

(1. 河南科技大学机电工程学院, 河南 洛阳 471003;

2. 河南科技大学机械装备先进制造协同创新中心, 河南 洛阳 471003)

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China; 2. Advanced Manufacturing Collaborative Innovation Center of Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China)

摘要:目的:分析新型双圆弧齿轮泵内部流场脉动特性的影响因素,采用合理参数以提高齿轮泵输出效率。方法:建立齿轮泵的二维流场仿真模型,采用计算流体力学软件 Fluent 进行仿真分析,研究不同齿顶间隙、不同齿轮偏心距、负载及转速对齿轮泵出口瞬时流量、流量脉动、流场特性的影响。结果:随着齿顶间隙增大,齿轮泵出口流量逐渐减小,当齿顶间隙为 0.09 mm 时,出口流量脉动系数最小为 0.135,为该结构参数下齿轮泵最佳齿顶间隙;受负载压力和转速的影响,齿轮泵中心轴线产生偏差,随着齿轮泵转子中心轴线偏心距增加,齿轮泵出口流量逐渐增大,当偏心距为 0.05 mm 时,齿轮泵出口流量比无中心偏差时增加了 5.09%,提高了流量输出。结论:齿轮泵流量特性主要影响因素为转子转速和齿顶间隙,中心偏差的影响较小。

关键词:双圆弧齿轮泵;瞬时流量;流场特性;数值模拟

Abstract: Objective: Analyzed the influencing factors of the internal flow field pulsation characteristics of the new double circular arc gear pump, and adopt reasonable parameters to improve the output efficiency of the gear pump. Methods: The two-dimensional flow field simulation model of the gear pump was established, and the computational fluid dynamics software Fluent was used for simulation analysis to study the influence of different tip clearance, different gear eccentricity, load and speed on the instantaneous flow, flow pulsation and flow field characteristics of the oil outlet of the gear pump. Results: As the

tooth tip clearance increased, the outlet flow rate of the gear pump gradually decreased. When the tooth tip clearance was 0.09 mm, the minimum pulsation coefficient of the outlet flow rate was 0.135, which was the optimal tooth tip clearance for the gear pump under this structural parameter. Due to the influence of load pressure and rotational speed, the central axis of the gear pump deviates. As the eccentricity of the central axis of the gear pump rotor increased, the outlet flow rate of the gear pump gradually increased. When the eccentricity was 0.05 mm, the outlet flow rate of the gear pump increased by 5.09% compared to without central deviation, improving the flow output. **Conclusion:** The main influencing factors on the flow characteristics of gear pumps are rotor speed and tooth tip clearance, and the influence of center deviation is relatively small. **Keywords:** double circular arc gear pump; instantaneous flow; flow field characteristics; numerical simulation

齿轮泵结构紧凑、制造方便,其良好的适应性被广泛应用于食品工业领域,如对咖啡液的固化、食用油的提取以及酿酒过程的再循环^[1-2]。齿轮泵输送液体过程中,流量和脉动始终是评判其性能优劣的重要标准,为探究影响齿轮泵脉动特性的影响因素,有学者^[3-5]对齿轮泵的流量脉动以及流场特性进行了大量分析及优化。刘茜^[6]依据齿轮啮合原理,采用控制体积法,推导了瞬时流量的计算公式,并进一步分析了不同齿轮转子齿数、压力角、模数以及有无卸荷槽对齿轮泵流量特性的影响。王文等^[7]首先采用 CFD 方法分别对直齿轮、人字齿轮、斜齿轮以及错位齿轮进行仿真分析,而后通过对直齿式油泵进行试验,验证了仿真模型的可靠性。周二杰等^[8]在二维仿真模型下计算了不同转速对齿轮泵流场的影响,得到内部流场的压力图、速度图、流线图、噪声图等,分析

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:51205108)

作者简介:黄成,男,河南科技大学在读硕士研究生。

通信作者:徐恺(1979—),男,河南科技大学副教授,博士。

E-mail: x62025@126.com

收稿日期:2022-11-02 改回日期:2023-05-11

了其转速的关系。李玲辉等^[9]考虑了空化效应,采用 PumpLinx 软件分析了中心距、负载压力、液压油含气率对齿轮泵流量特性的影响,结果表明增大齿轮安装中心距会使齿轮泵脉动系数增加,同时完全溶解于液压油中的空气会在高压下析出产生空化,从而显著增加流量脉动。杨国来等^[10]为提高吸油稳定性,解决高转速齿轮泵空化严重问题,仿真了不同吸油口尺寸下泵的空化特性及吸油稳定性,结果表明吸油口尺寸增加可有效避免产生空化现象,因此,在齿轮泵设计过程中应选用适合的进油口直径。Szwemin 等^[11]通过建立齿轮泵泄漏的理论模型,将试验和仿真结果进行对比,结果表明偏心率的增加对齿轮泵的容积效率有积极影响。

研究将采用新型双圆弧齿轮泵进行分析,其端面齿形由两段圆弧及一条过渡曲线组成,由于其接触属于单点接触,不形成困油区,因此具有流量脉动小,理论上无困油现象的优点^[12-13]。同时,采用数值模拟分析不同齿顶间隙、中心偏差以及负载作用对齿轮泵内部流动特性和流量脉动的影响,通过结构优化提高齿轮泵出口流量品质,为齿轮泵在食品工业中的应用推广提供依据。

1 流体计算理论及模型建立

1.1 流体控制理论

采用 CFD 仿真时,齿轮泵转子为刚体运动,流体为牛顿流体,计算过程中,满足质量守恒、动力守恒等定律^[14-15]。

质量方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

式中:

u_x, u_y, u_z —— x, y, z 3 个方向上的速度分量;

t ——时间, s;

ρ ——流体密度, kg/m³。

动量守恒方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u \vec{u}) = \nabla(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial \rho}{\partial x} + S_u \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho v \vec{u}) = \nabla(\mu \text{grad} v) - \frac{\partial \rho}{\partial y} + S_v \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla(\rho w \vec{u}) = \nabla(\mu \text{grad} w) - \frac{\partial \rho}{\partial z} + S_w \end{cases}, \quad (2)$$

式中:

S_u, S_v, S_w ——动量守恒方程的广义源项。

能量方程为:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla(\rho T \vec{u}) = \nabla \left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T \right) + S_T, \quad (3)$$

式中:

k ——流体热传导系数;

S_T ——流体内热源及由于黏性作用于流体的机械能转换为热能的部分(一般情况下不予考虑)。

湍流模型为 $k-\epsilon$ 方程,表达式为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} - C_{3\epsilon} C_b, \quad (5)$$

式中:

G_k ——由平均速度梯度引起的湍动能, m²/s²;

G_b ——由浮力引起的湍动能, m²/s²;

Y_M ——可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的影响系数;

a_k ——湍动能对应的普朗特数;

σ_ϵ ——湍动耗散率对应的普朗特数;

$C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}, C_2, A_0$ ——经验常数(Fluent 中默认为 $C_{1\epsilon}=1.44, C_{2\epsilon}=1.92, C_{3\epsilon}=0.09, C_2=1.9, A_0=4.0$)。

1.2 仿真模型的建立

研究^[16]表明,齿轮泵容积效率试验与仿真结果具有很好的一致性,试验获得的效率与模拟测试获得的效率之间的差异 $\leq 2\%$,可较为准确地反映齿轮泵内部流动情况,因此采用二维流场进行仿真计算,建立双圆弧齿轮泵二维流场计算模型如图 1 所示。

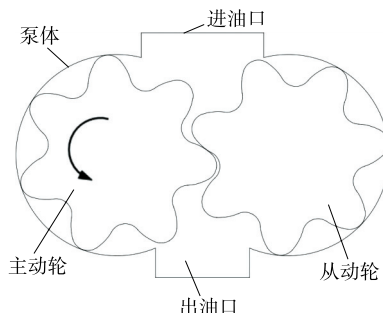


图 1 双圆弧齿轮泵计算模型

Figure 1 Calculation model of double circular arc gear pump

基本参数:齿轮转子副齿数为 7,法向模数 m_n 为 2、端面模数 m_t 为 2.57、法向压力角 α_n 为 28°、分度圆直径为 18 mm、齿顶齿根圆弧半径为 1.67 mm、齿轮齿顶圆半径为 10.67 mm、进口直径为 16 mm、出口直径为 10 mm,理论中心距为 18 mm,为保证计算过程中啮合处不出现拓扑结构损坏,转子副啮合处必须存在一定间隙,仿真时转子中心距设为 18.2 mm。

2 仿真条件设置

2.1 网格划分

在计算机辅助设计软件 CAD 中建立齿轮泵二维模型,将流体域输出为 ACIS(.sat)格式,在 Meshing 中通过

插入网格生成方法和网格尺寸进行网格生成,设置单元尺寸 0.025 生成三角形网格,一般三角形适合非稳态的计算,齿轮泵内部流动状态随时间改变,因此使用非结构化网格进行网格划分,在网格质量中选择单元质量可查看网格质量,显示最小网格质量为 0.54,最大网格质量为 1.00,平均质量为 0.94,该网格质量较高,满足仿真要求,统计中可查看节点数量为 49 万,单元数量为 96 万。网格划分及单元质量见图 2。

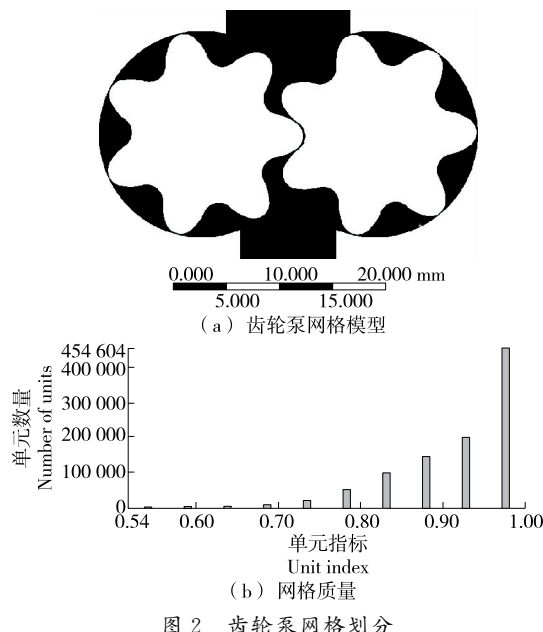


图 2 齿轮泵网格划分

Figure 2 Mesh division of gear pump

2.2 Fluent 仿真条件设定

设置边界条件时,将进口设定为压力入口,压力值设定为 0 Pa,在入口湍流设置中,将方式改为强度和水利直径,湍流强度值为 5%,水利直径按式(6)计算,结果为 0.017 8,设定出口边界条件为压力出口,湍流方式同进口设置保持一致。

$$D_H = \frac{4A}{X}, \quad (6)$$

式中:

A ——流体流过断面的面积, m^2 ;

X ——流过断面与固体壁面的交线周长(湿周), m ;

D_H ——水利直径。

流动介质将空气改为液压油,液压油密度为 844 kg/m^3 ,黏度为 $0.025 49 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ 。采用 $k-e$ 标准壁面函数模型,在动网格中打开光滑和网格重新划分,为保证网格质量,网格尺寸重构间隔为 1,创建动网格时,将进口、出口和壁面类型选取为静止,转子类型设置为刚体,采用 profile 文件驱动齿轮转子转动,以转速 $4 000 \text{ r/min}$ 为例,则每秒钟齿轮转动弧度为 $4 000 \div 60 \times 2\pi = 418.88$,仿真采用混合初始化,时间步长为 $2.5\text{e}-6$,步数为 3 000,此

时齿轮刚好进行 7 次啮合。编写主动轮 profile 文件格式为

```
((left-gl 3 point)
(time 0 1 60)
(omega_z 418.88 418.88 418.88)
```

从动轮 profile 文件与主动轮转速相同,方向相反即可。由于模型以左边齿轮圆心为坐标原点建立,因此设置左边齿轮重心坐标位置为 $(0,0)$,右边重心位置为 $(0.018 2,0)$,参考值进口截面积为 $0.000 32 \text{ m}^2$,其中进口边长 0.016 m ,深度为 0.02 m 。

3 仿真结果与分析

3.1 齿顶间隙对流量特性的影响

为防止摩擦,齿轮泵体与齿轮会形成较小的间隙 δ ,受压强及油液黏度影响,部分液压油会通过齿轮泵体与齿轮形成的间隙朝齿轮旋转方向的反方向形成泄漏,导致容积率降低,因此需探究最适合的齿顶间隙以减小流量脉动的同时提高出口流量,给出的齿轮泵齿顶径向泄漏模型如图 3 所示。

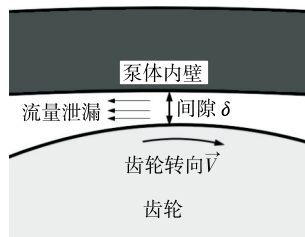


图 3 齿轮泵径向间隙模型

Figure 3 Radial clearance model of gear pump

出口流量和出口流量脉动系数 φ 是决定齿轮泵效率和评判齿轮泵流量品质的重要因素,因此通过改变泵体内壁直径大小,建立不同齿顶间隙仿真模型,探讨齿顶间隙变化对齿轮泵出口流量输出以及流量脉动产生的影响,按式(7)计算齿轮泵常用的两种流量脉动系数^[17]。

$$\varphi = \begin{cases} \frac{q_{V\max} - q_{V\min}}{q_{Vt}}, \\ \frac{q_{V\max} - q_{V\min}}{q_V} \end{cases}, \quad (7)$$

式中:

$q_{V\max}$ 、 $q_{V\min}$ ——瞬时流量最大值和最小值;

q_{Vt} ——理论流量;

q_V ——平均流量。

通过数值模拟,不同齿顶间隙下出口流量随时间变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知,随着齿顶间隙的增大,出口流量逐渐减小, $0.03 \sim 0.15 \text{ mm}$ 齿顶间隙下,平均出口流量依次为 $10.97, 10.45, 9.87, 8.65, 7.26 \text{ L/min}$,随着间隙的增加,出口流量减小的趋势更加明显,间隙为 0.09 mm 相较于 0.03 mm 时出口平均流量降低了 10%,

而间隙为 0.15 mm 相较于 0.09 mm 时出口流量降低了 26%，降幅明显高于前者，因此，设计齿轮泵时，需要着重考虑齿顶间隙对齿轮泵效率的影响^[18]，特别是在大的齿顶间隙下，将明显降低齿轮泵的输出流量，应综合考虑齿轮泵的效率以及流量品质问题，选用最佳齿轮泵齿顶间隙作为齿轮泵设计准则。

根据给出的脉动系数计算公式，得到不同齿顶间隙下齿轮泵出口流量脉动系数变化如图 5 所示。由图 5 可知，在一定范围内，随着齿顶间隙的增加，脉动系数值呈先减小后增大趋势，当齿顶间隙为 0.09 mm 时，最小脉动系数为 0.135，此时可以获得较高的出口流量品质。

3.2 中心偏差对流量特性的影响

由于圆弧螺旋齿轮传动为点啮合传动，不存在困油区，因此无需考虑困油对径向力的影响，但当齿轮泵转子高速旋转时，入口吸油腔内压力骤减形成低压区，同时出口受负载的影响形成高压区，齿轮泵转子在压力差作用下会导致中心轴线向上偏移，产生不同程度的偏差（见图 6）。

由图 7 可知，随着中心偏差的增大，出口平均流量逐

渐增加，靠近低压区齿顶间隙的减小可减缓齿轮泵的径向泄漏。相较于无中心偏差情况，当中心偏差为 0.05 mm 时，出口平均流量由 9.95 L/min 提高至 10.45 L/min，增长率为 5%，相较于于齿顶间隙，中心偏差对出口流量影响较小。

3.3 转速及负载压力对流量特性的影响

通过定量分析法，对转速及负载进行约束分析，探究二者对齿轮泵流量特性的影响，图 8、图 9 分别为转速 4 000 r/min 时内部流场压力云图和内部流场速度云图，此时泵体与齿顶径向齿顶间隙为 0.09 mm，负载为

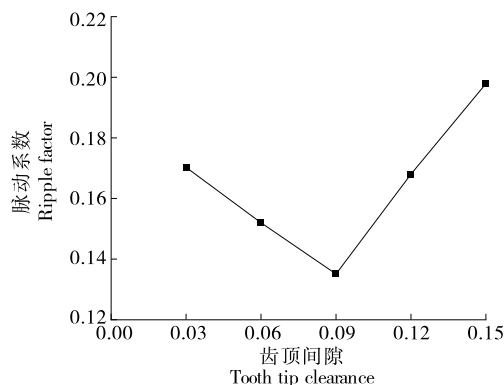


图 5 不同齿顶间隙下出口流量脉动系数

Figure 5 Outlet flow fluctuation coefficient under different top clearance

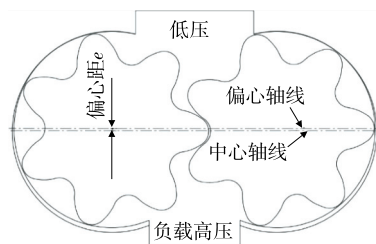


图 6 齿轮泵中心偏差示意图

Figure 6 Schematic diagram of gear pump center deviation

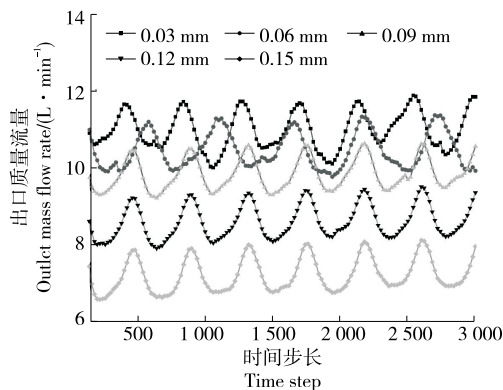


图 4 不同齿顶间隙下出口流量随时间变化图

Figure 4 Variation of outlet flow with time under different addendum clearance

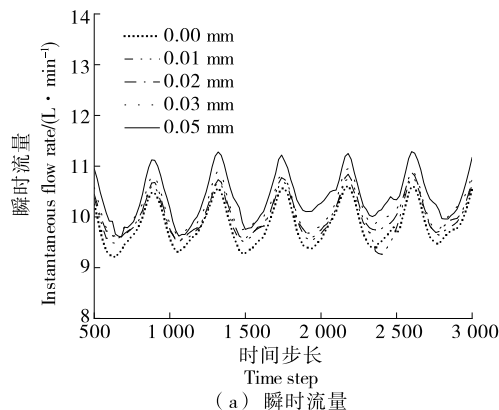
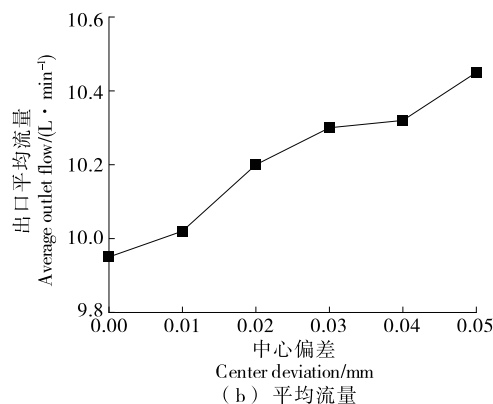


图 7 不同齿轮中心偏差下出口瞬时流量及平均流量

Figure 7 Outlet instantaneous flow and average flow under different gear center deviation



1 MPa。由图 8 可知,在流场域中,最大压力区为负载侧齿轮啮合处,最低负压区为进油口侧齿轮啮合处,从负载区到进油口区的两侧油腔压力值逐渐减小,产生这种现象的原因之一是由于齿轮齿顶间隙的存在导致齿轮齿顶间隙处发生泄漏造成的。同时,齿轮泵流速较高区域为齿轮泵出口中心位置以及齿轮泵壁面与齿轮形成的容积内,齿轮泵出口两侧受负载压力的影响流速较慢,且齿轮泵实际使用过程中齿轮相互接触,仿真结果中齿轮啮合位置由于间隙的存在出现的高速在实际使用过程中可能不存在。

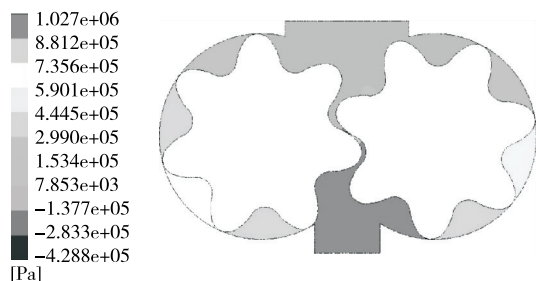


图 8 齿轮泵内部流场压力云图

Figure 8 Nephogram of internal flow field and pressure of gear pump

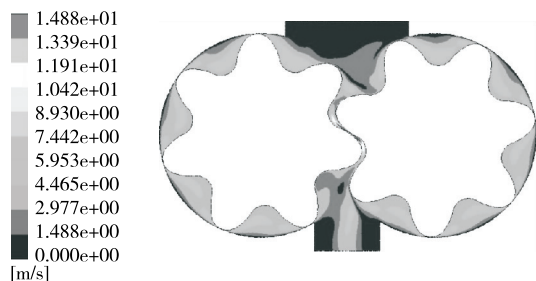


图 9 齿轮泵内部流场速度云图

Figure 9 Nephogram of internal flow field and velocity of gear pump

转速大小会直接影响齿轮泵的泄漏,提高转速会减小泄漏强度^[19],进而影响流场压力和速度,通过 Fluent 结果中通量报告,对齿轮泵在不同齿顶间隙下进油口和出口口压力检测可知,随着齿顶间隙的增加,出口口压力基本保持不变,但进油口负压变大,由于转速极高,齿轮啮合区域将产生远高于负载和其他流动区域内的压力,巨大的压力差是导致啮合区域流场产生空化效应的主要原因。以 0.5 MPa 为间隔,对 1~3 MPa 负载下出口流量进行监测,不同负载下齿轮泵瞬时出口流量如图 10 所示。由图 10 可知,随着负载的增大,齿轮泵出口流量逐渐减小,不同负载压力下平均出口流量分别为 10.92, 9.28, 7.69, 6.52, 5.17 L/min,表明负载对齿轮泵流量影响较大,1 MPa 负载压力下的出口流量为 3 MPa 时的 2.1 倍,在齿轮泵实际使用过程中应对其工作条件进行限制以保证齿轮泵应有的效率。

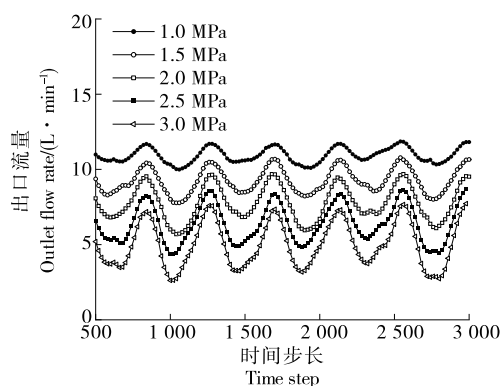


图 10 不同负载下齿轮泵出口瞬时流量

Figure 10 Instantaneous flow at outlet of gear pump under different loads

对负载为 1 MPa 下不同转速齿轮泵进行流场仿真分析,不同转速下出口瞬时流量和脉动系数如图 11 所示。由图 11 可知,出口流量随转速的提高逐渐变大,瞬时流量呈周期性变化,且随着转速的提高,齿轮完成一次啮合的时间变短,脉动频率变大,与理论计算结果一致。图 12 为不同转速下流量脉动系数,随着转速的提高,出口流量

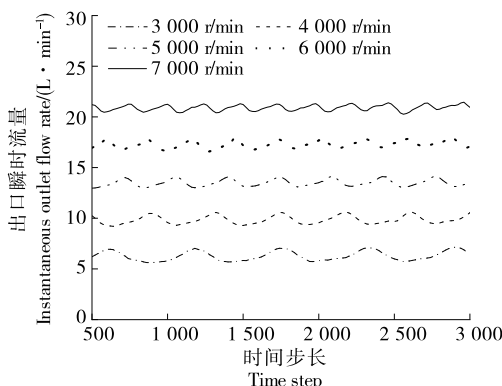


图 11 不同转速下齿轮泵出口瞬时流量

Figure 11 Instantaneous flow at outlet of gear pump at different speeds

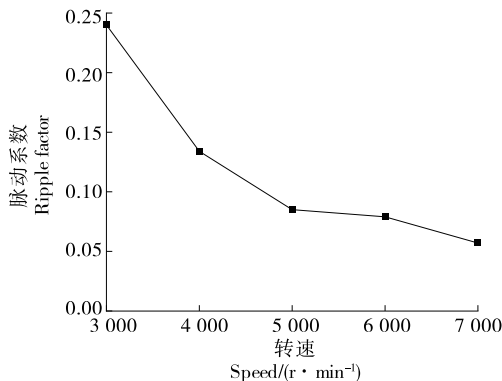


图 12 不同转速下流量脉动系数

Figure 12 Fluctuation coefficient of flow at different speeds

脉动系数逐渐减小。

4 结论

基于一种“圆弧—渐开线—圆弧”齿轮泵转子齿形,使用 CAD 软件建立了齿轮泵仿真模型,导入 Fluent 进行网格划分及边界条件设置,并通过 CFD 软件进行内部流场仿真分析。结果表明,由于齿顶间隙的存在,齿轮泵流量随齿顶间隙的增大而减小,且减小幅度逐步增加,表明在结构参数一定的条件下,齿轮泵存在一个最佳齿顶间隙 0.09 mm,在此间隙下齿轮泵的流量脉动系数最小。齿轮中心偏差距的增加可提高齿轮泵内部流场速度,偏心导致进口口低压区齿顶间隙减小,有利于减小径向泄漏,相较于无偏心情况,0.05 mm 偏心距下齿轮泵出口流量提高了 5%。出口流量随负载的增加而降低,但随转速的提高而增加,同时转速的提高有助于降低齿轮泵内部流量脉动,当转速由 3 000 r/min 提高至 7 000 r/min 时,脉动系数可降低 76%。后续可通过建立两相流仿真模型的方式,讨论油液含气率对齿轮泵流量特性的影响。

参考文献

- [1] GUPTA R. 齿轮泵在食品工业中的应用[J]. 中国食品工业, 2004(11): 48-50.
GUPTA R. Application of gear pump in food industry[J]. China Food Industry, 2004(11): 48-50.
- [2] 刘津臣. 多用途食品泵[J]. 食品机械, 1988(1): 9-10.
LIU J. Multi-purpose food pump[J]. Food Machinery, 1988(1): 9-10.
- [3] 张静, 毛子强, 杨国来. 外啮合斜齿轮泵内部流场仿真与分析[J]. 液压与气动, 2014(2): 10-13.
ZHANG J, MAO Z Q, YANG G L. Simulation and analysis of internal flow field of external helical gear pump[J]. Hydraulic and Pneumatic, 2014(2): 10-13.
- [4] 赵鹏军, 谷立臣, 焦龙飞, 等. 考虑油液特性的齿轮泵内部流场仿真分析研究[J]. 机床与液压, 2017, 45(19): 148-152, 169.
ZHAO P J, GU L C, JIAO L F, et al. Simulation and analysis of internal flow field of gear pump considering oil characteristics[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2017, 45(19): 148-152, 169.
- [5] 魏小玲, 冯永保, 刘珂, 等. 基于 EEMD 的圆弧齿轮泵空化流动及振动特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(10): 90-98.
WEI X L, FENG Y B, LIU K, et al. Experimental study on cavitation flow and vibration characteristics of circular gear pump based on EEMD[J]. Vibration and Shock, 2022, 41(10): 90-98.
- [6] 刘茜. 外啮合齿轮泵的瞬时流量及脉动特性研究[J]. 机械传动, 2013, 37(6): 17-21.
LIU Q. Research on instantaneous flow and pulsation characteristics of external gear pump[J]. Mechanical Transmission, 2013, 37(6): 17-21.
- [7] 王文, 尹艳美, 贺尚红, 等. 齿轮式机油泵齿形对流量特性的影响分析[J]. 食品与机械, 2016, 32(12): 92-95.

- WANG W, YIN Y M, HE S H, et al. Analysis of influence of gear oil pump tooth shape on flow characteristics[J]. Food & Machinery, 2016, 32(12): 92-95.
- [8] 周二杰, 梁培生, 张国政. 基于 Fluent 的农用齿轮泵不同转速下的流场分析[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(3): 27-30.
ZHOU E J, LIANG P S, ZHANG G Z. Flow field analysis of agricultural gear pump at different speeds based on fluent[J]. China Journal of Agricultural Machinery Chemistry, 2017, 38(3): 27-30.
- [9] 李玲辉, 陈奎生, 湛从昌. 考虑空化的外啮合齿轮泵流量特性仿真分析[J]. 武汉科技大学学报, 2021, 44(4): 262-269.
LI L H, CHEN K S, ZHAN C C. Simulation analysis of flow characteristics of external gear pump considering cavitation [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2021, 44(4): 262-269.
- [10] 杨国来, 王文字, 黄付田, 等. 不同吸油口尺寸及转速下齿轮泵空化特性[J]. 液压与气动, 2020(1): 74-79.
YANG G L, WANG W Y, HUANG F T, et al. Cavitation characteristics of gear pump under different oil suction size and speed[J]. Hydraulic and Pneumatic, 2020(1): 74-79.
- [11] SZWEMIN P, FIEBIG W. The influence of radial and axial gaps on volumetric efficiency of external gear pumps[J]. Energies, 2021, 15(14): 4 468-4 489.
- [12] ZHOU Y, HAO S, HAO M. 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, 2015, 231(3): 432-443.
- [13] 李阔强, 张龙飞, 韩伟锋, 等. 双圆弧斜齿齿轮泵脉动特性分析及齿形设计[J]. 中国机械工程, 2018, 29(2): 186-192.
LI G Q, ZHANG L F, HAN W F, et al. Pulsation characteristic analysis and tooth profile design of double-circular-arc helical gear pump [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(2): 186-192.
- [14] 魏列江, 王鑫, 张静, 等. 外啮合齿轮泵内部流场的仿真与分析[J]. 机床与液压, 2013, 41(23): 134-137.
WEI L J, WANG X, ZHANG J, et al. Simulation and analysis of internal flow field of external gear pump[J]. Machine Tool and Hydraulic, 2013, 41(23): 134-137.
- [15] 商嘉玮, 黄志刚, 张一明, 等. 四螺杆挤出机螺杆排列方式对聚乳酸流场特性的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(3): 72-77.
SHANG J W, HUANG Z G, ZHANG Y M, et al. The effect of screw arrangement on the flow field characteristics of polylactic acid in a four screw extruder[J]. Food & Machinery, 2023, 39(3): 72-77.
- [16] CHEN C K, YANG S C. Geometric modelling for cylindrical and helical gear pumps with circular arc teeth [J]. ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2000, 214(4): 599-607.

(下转第 111 页)

- [7] 刘现伟, 颀潭成, 徐彦伟, 等. 基于叠加摆线运动规律的 Delta 机器人轨迹规划[J]. 制造业自动化, 2021, 43(6): 88-94.
LIU X W, JIE T C, XU Y W, et al. Delta robot trajectory planning based on superimposed cycloidal motion laws[J]. Manufacturing Automation, 2021, 43(6): 88-94.
- [8] 徐岩. 基于改进引力搜索算法的高速并联机器人轨迹优化[J]. 食品与机械, 2022, 38(5): 82-86.
XU Y. Trajectory optimization of high-speed parallel robots based on improved gravity search algorithm[J]. Food & Machinery, 2022, 38(5): 82-86.
- [9] 梅江平, 孙玉德, 贺莹, 等. 基于能耗最优的 4 自由度并联机器人轨迹优化[J]. 机械设计, 2018, 35(7): 82-86.
MEI J P, SUN Y D, HE Y, et al. Trajectory optimization of a 4-degree of freedom parallel robot based on optimal energy consumption[J]. Mechanical Design, 2018, 35(7): 82-86.
- [10] 刘现伟, 颀潭成, 徐彦伟, 等. 基于合成运动的 Delta 机器人轨迹规划[J]. 制造业自动化, 2021, 43(7): 19-23, 47.
LIU X W, JIE T C, XU Y W, et al. Delta robot trajectory planning based on synthetic motion[J]. Manufacturing Automation, 2021, 43(7): 19-23, 47.
- [11] LI W, XIONG R. A hybrid visual servo control method for simultaneously controlling a nonholonomic mobile and a manipulator[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2021, 22(2): 141-154.
- [12] 史亚贝. 基于 DSP 的三自由度采摘机械手控制系统研究[J]. 农机化研究, 2022, 12(2): 34-38.
SHI Y B. Research on control system of 3-DOF picking manipulator based on DSP [J]. Agricultural Mechanization Research, 2022, 12(2): 34-38.
- [13] 李光, 章晓峰, 杨加超, 等. 基于残差 BP 神经网络的 6 自由度机器人视觉标定[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 366-374.
LI G, ZHANG X F, YANG J C, et al. Vision calibration of 6-DOF robot based on residual BP neural network [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 366-374.
- [14] 朱大昌, 盘意华, 杜宝林, 等. 一种并联机器人轨迹规划算法研究[J]. 机床与液压, 2023, 51(5): 14-22.
ZHU D C, PAN Y H, DU B L, et al. Research on a trajectory planning algorithm for parallel robots [J]. Machine Tool and Hydraulic, 2023, 51(5): 14-22.
- [15] 伍经纹, 徐世许, 王鹏, 等. 基于 Adams 的三自由度 Delta 机械手的运动学仿真分析[J]. 软件, 2017, 38(6): 108-112.
WU J W, XU S X, WANG P, et al. Kinematics simulation analysis of 3-DOF Delta manipulator based on ADAMS[J]. Software, 2017, 38(6): 108-112.
- [16] 张皓宇, 刘晓伟, 任川, 等. 并联机器人正运动学与 NURBS 轨迹规划[J]. 机械设计与制造, 2021, 12(4): 282-292.
ZHANG H Y, LIU X W, REN C, et al. Forward kinematics and NURBS trajectory planning of parallel robot[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2021, 12(4): 282-292.
- [17] 赵利平, 吴德刚. 基于小波与模糊相融合的苹果分级算法[J]. 食品与机械, 2020, 36(4): 142-145.
ZHAO L P, WU D G. Apple grading algorithm based on Wavelet and fuzzy fusion[J]. Food & Machinery, 2020, 36(4): 142-145.
- [18] AZUMAYA C M, DAYS E L, VINSON P N, et al. Screening for AMPA receptor auxiliary subunit specific modulators [J]. PLoS One, 2017, 12(3): 1 523-1 538.
- [19] 贺禹强, 刘故帅, 肖异瑶, 等. 基于改进 GA-PSO 混合算法的变电站选址优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 143-150.
HE Y Q, LIU G S, XIAO YY, et al. Substation location optimization based on improved GA-PSO hybrid algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 143-150.
- [20] 朱光耀. 基于无标定视觉伺服的全向移动机械臂跟踪控制[J]. 电子测量技术, 2020, 43(23): 23-29.
ZHU G Y. Tracking control of omnidirectional mobile manipulator based on uncalibrated visual servo [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(23): 23-29.
- [21] 王志中. 基于改进蚁群算法的移动机器人路径规划研究[J]. 机械设计与制造, 2018, 12(1): 242-244.
WANG Z Z. Research on mobile robot path planning based on improved ant colony algorithm [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2018, 12(1): 242-244.
- [22] 王曦, 王宗彦, 张宇廷, 等. 基于 NSGA-II 算法的并联机器人多目标轨迹规划[J]. 机械设计与制造工程, 2022, 51(12): 72-77.
WANG X, WANG Z Y, ZHANG Y T, et al. Multi objective trajectory planning for parallel robots based on NSGA-II algorithm[J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2022, 51(12): 72-77.

(上接第 92 页)

- [17] 孔繁余, 何玉洋, 郑德, 等. 外啮合齿轮泵流量特性影响因素分析[J]. 排灌机械工程学报, 2014(2): 108-112.
KONG F Y, HE Y Y, ZHANG D, et al. Analysis of factors affecting flow characteristics of external gear pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014(2): 108-112.
- [18] 李行, 董庆伟, 李阁强, 等. 高速高压圆弧螺旋齿轮泵径向力补偿方法研究[J]. 现代制造工程, 2022(5): 72-78.
LI H, DONG Q W, LI G Q, et al. Research on radial force compensation method of high-speed and high-pressure arc helical gear pump [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022(5): 72-78.
- [19] 刘坤, 徐雷, 杨波, 等. 啮合斜齿轮高压泵的 CFD 数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(4): 307-312.
LIU K, XU L, YANG B, et al. CFD numerical simulation of meshing helical gear high-pressure pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(4): 307-312.