

# 高速航空齿轮泵间隙对效率影响研究

张龙望<sup>1,2</sup> 冯治国<sup>1,3\*</sup> 赵磊<sup>2</sup> 张宇<sup>2</sup>

1. 贵州大学机械工程学院, 贵阳, 550025

2. 贵州凯敏博机电科技有限公司, 贵阳, 550025

3. 贵州省特色装备及制造技术重点实验室, 贵阳, 550025

**摘要:** 针对高速航空齿轮泵间隙对效率影响的问题, 建立流场仿真并结合理论模型分析, 研究了不同径向与端面间隙对内泄漏及效率的影响, 探究不同转速下的最佳径向与端面间隙, 同时建立了多组正交试验进行验证。研究结果表明: 转速增大, 最佳端面间隙尺寸也增大, 并且伴随转速的提高, 间隙尺寸变化对燃油齿轮泵效率的影响变小。

**关键词:** 航空发动机; 燃油泵; 高速齿轮泵; 优化; 间隙; 效率

中图分类号: V233.2

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.02.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research on Influences of High-speed Aviation Gear Pump Clearances on Efficiency

ZHANG Longwang<sup>1,2</sup> FENG Zhiguo<sup>1,3\*</sup> ZHAO Lei<sup>2</sup> ZHANG Yu<sup>2</sup>

1. School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang, 550025

2. Guizhou KMB Electromechanical Technology Co., Ltd., Guiyang, 550025

3. Guizhou Key Laboratory of Special Equipment and Manufacturing Technology, Guiyang, 550025

**Abstract:** In order to solve the problems of the effect of high-speed aviation gear pump clearances on the efficiency, a flow field simulation was established and combined with theoretical model analysis to study the effects of different radial and end face clearances on internal leakage and efficiency, as well as to explore the optimal radial and end face clearances at different speeds, and establish multiple groups of orthogonal experiments for verification. The results show that as the speed increases, the optimal end face clearance sizes also increase, and as the speed increases, the effect of the clearance sizes changes on the efficiency of the fuel gear pumps decrease.

**Key words:** aircraft engine; fuel pump; high-speed gear pump; optimization; clearance; efficiency

### 0 引言

减小结构质量、提高效率, 进而提高功重比是航天领域的研究热点<sup>[1-2]</sup>, 航空油泵作为燃油发动机的“心脏”也在向高性能、微型化等方向发展。目前航空油泵主要使用功率密度大的电动燃油齿轮泵, 外啮合齿轮因结构简单、抗污染能力强、可靠性高而被广泛用于燃油泵中<sup>[3-4]</sup>。航空发动机要求油泵体积和质量尽可能小且输出流量大。航天燃油泵排量确定后, 可适当提高转速以减小体积与质量, 但对燃油泵的高速化提出了更高的要求<sup>[5]</sup>。

无论齿轮泵的高效率还是高转速, 径向和端面间隙都是主要影响因素之一。间隙过小, 会出现齿轮刮蹭机壳、抱死等故障<sup>[6]</sup>, 磨损严重, 大大

限制了转速; 间隙过大, 内泄漏严重, 效率降低。微小型齿轮泵间隙更小, 加工时更难以把控。另外, 齿轮油泵工作时, 泵体内部压力变化会使端盖变形, 径向处形成不平衡力将齿轮向低压区挤压, 改变间隙尺寸<sup>[7]</sup>, 所以间隙尺寸的选取需要综合考虑。另外, 齿轮泵虽结构简单, 但是内部流体流动复杂难以在实验中观测, SZWEMIN等<sup>[8]</sup>、HAN等<sup>[9]</sup>指出, 在发生泄漏的小间隙上, 使用数值分析(尤其是CFD)方法极为有效。油液在齿轮泵中的流动状态反映燃油泵的性能, 当运行速度和压力较高且流体黏度较低时, 流体运动转换为湍流状态, 形成湍流更容易引起能量损耗, 缩小小齿轮尺寸可降低齿尖处线速度, 减少湍流的产生<sup>[10]</sup>。而且转速提高到极限值时, 会使吸油腔不能充分吸入油液而出现吸空和空化现象, 导致流量降低<sup>[11]</sup>。因此, 研究转速与间隙对流场的影响具有重要的指导意义。

收稿日期: 2024-08-30

基金项目: 贵州省科技计划(黔科合支撑2801111)

针对齿轮油泵的效率的研究中,ZARDIN等<sup>[12]</sup>提出了利于实际计算的齿轮泵机械效率评价模型,并对流体黏性摩擦引起的端面与径向处能量损失、啮合损失、轴承处损失进行建模预测;文献[13-14]利用离散模型的统计方法估计泵效率,对轴承游隙和套管径向游隙引起的效率降低评估非常有效。CHAI等<sup>[15]</sup>以直线共轭内啮合齿轮泵为研究对象,建立CFD动力学仿真模型,设计了正交试验,分析得出油液的含气量、油温和工作压力会对总效率产生显著影响。

上述研究分析了齿轮泵间隙泄漏、结构尺寸、油液状态等因素对机械效率的影响,但主要集中在高压、中大型泵的研究。目前,主流的中大型泵研究中多为中低速高压泵,一般采用活动侧板方法,工况与无侧板不同,且微小泵放置侧板会增加结构复杂度,降低可靠性。对于低压大流量无侧板类型泵,设计难题主要是间隙取舍,间隙取值主要与加工精度、安装精度有关,综合当前加工条件间隙0.003 mm以下成本极高,不利于量产,而且间隙过小,高转速状态下油泵效率低。

本文针对航空领域的微小型高速齿轮油泵,研究间隙、高转速对流量与效率的影响,为高效率的微型油泵设计提供理论依据。本文以额定转速15 000 r/min的微型航空齿轮油泵为研究对象,最大化效率为目标,研究不同转速下微小型高速齿轮泵端面和径向间隙的最优值。

### 1 高速齿轮泵模型参数

如图1所示,高速航空齿轮泵除了包含齿轮泵部分外,还有无刷电机、电驱部分。与传统有刷式不同,无刷式有刷泵转速可达10 000 r/min以上,同流量下体积可以更小,而且摒弃电刷后油泵的寿命与安全性有所提高。但是转速越高,油液与齿轮、油液与泵内壁的黏性摩擦会增大,从而增大了电机输入转矩,油泵整体效率降低。

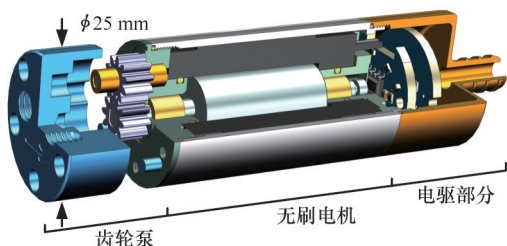


图1 高速航空油泵结构

Fig.1 Structure of high-speed aviation oil pump

齿轮泵可根据航空发动机指标计算出重要的几何参数,参数见表1,工作状态见表2。其中,本

研究中的相关指标要求是油泵在相对压力0.6 MPa下输出流量不得小于1000 mL/min。

表1 高速航空油泵齿轮参数

Tab.1 Gear parameters of high-speed aviation oil pump

模数 $m/\text{mm}$	0.5
齿数 $Z$	12
齿宽 $B/\text{mm}$	5.5
齿顶圆半径 $R_a/\text{mm}$	3.5
齿轮轴半径 $R_g/\text{mm}$	1.0
齿尖宽 $l_a/\text{mm}$	0.19
中心距 $a/\text{mm}$	6.0
工作转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	15 000

表2 RP-3煤油参数及油泵工作状态

Tab.2 Parameters of RP-3 oil and working condition

油液密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	780
25 °C下黏度 $\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	0.000 96
出口输入压差 $\Delta p/\text{MPa}$	0.6

### 2 外齿轮油泵流量及效率理论模型

外啮合齿轮泵工作有吸油、挤压油液、排油三个阶段,随着齿轮的不断旋转,吸油、挤压、排油的过程就会持续循环,从而提供连续不断的油液,如图2所示。但径向间隙、齿轮端面间隙(图3)及啮合线处油液会沿着高压区流入低压区,其中端面间隙泄漏占总泄漏的75%<sup>[16]</sup>。但是为了避免齿轮与壳体内壁干涉,必须预留间隙,所以内泄漏是齿轮泵固有特性,不可避免。

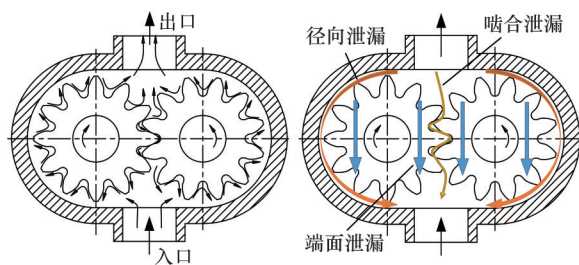


图2 油液流动及内泄漏示意图

Fig.2 Oil flow and internal leakage

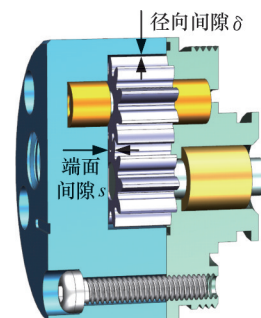


图3 齿轮泵间隙示意图

Fig.3 Gear pump clearance diagram

外齿轮泵效率的主要影响因素如下:①齿尖和泵体内壁间隙处的黏性摩擦;②齿轮端面与泵体内壁之间的黏性摩擦;③齿轮啮合导致的机械能损失;④搅油时汽化、温升损耗。齿轮啮合损耗主要由齿轮啮合相对滑移产生,由于油液润滑,损耗低,空化与温升损耗主要发生在高压油泵,微小油泵一般用于中低压,故不显著<sup>[17]</sup>。因此,内泄漏是齿轮油泵效率的主要影响因素,故齿轮油泵效率指标分为容积效率 $\eta_v$ 和机械效率 $\eta_r$ <sup>[12]</sup>:

$$\eta_v = q_{vv}/q_{vth} \quad (1)$$

$$\eta_r = \frac{T_{th}}{T_r} \quad T_{th} = \frac{V\Delta p}{2\pi} \quad T_r = T_{th} + \sum_i T_{i,loss} \quad (2)$$

式中: $q_{vv}$ 为齿轮有效输出流量,L/min; $q_{vth}$ 为理论输出流量,L/min; $T_{th}$ 为理论扭矩,N·m,由齿轮旋转一周排出流体体积与泵体出入口压差决定; $V$ 为齿轮泵排量, $m^3/r$ ; $T_r$ 为输入扭矩,N·m; $T_{i,loss}$ 为轴承与轴摩擦转矩、啮合摩擦转矩与黏度摩擦转矩等,N·m。

### 2.1 齿轮径向间隙处泄漏及能量损耗

径向泄漏是油液经过齿尖和泵壳的缝隙,从高压区流入低压区,形成泄漏,如图4所示<sup>[17]</sup>。径向间隙处流体一方面是受齿尖黏性摩擦带动流体沿着旋转反向流动,剪切流速 $u_1$ 呈现线性分布;另一方面,间隙内流体受压差作用具有从高压区流向低压区的趋势,其对应流速 $u_2$ 在间隙处呈二次函数分布,越靠近齿尖和内壁,压差引起的流速越小。

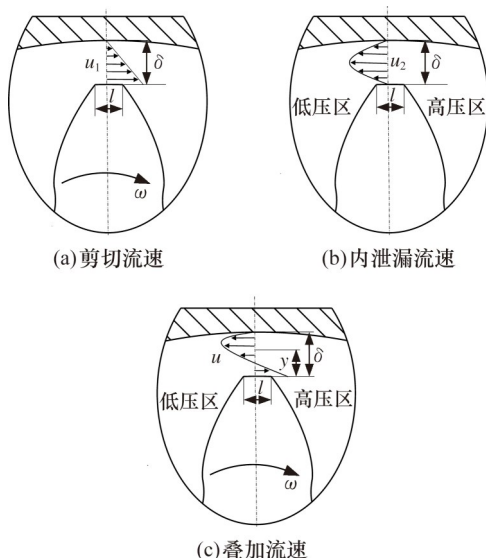


图4 径向间隙处流体状态

Fig.4 Fluid state at the radial clearance

结合文献[8,18],通过伯努利方程求解出径向间隙处流速及泄漏流量(单位: $m^3/s$ ):

$$\Delta q_{v\phi} = \frac{B\delta^3\Delta p}{6\mu LZ'} - \frac{B\delta\pi n R_a}{30} \quad (3)$$

式中: $\delta$ 为径向间隙,m; $B$ 为齿轮宽度,m; $l$ 为齿顶等效宽

度,m; $\Delta p$ 为挤压腔-吸油腔压差,Pa; $\mu$ 为油液黏度,Pa·s; $Z'$ 为单侧压力过渡的齿数; $n$ 为齿轮转速,r/min。

假设:①流体不可压缩;②路径的曲率可以忽略不计,小齿轮齿尖宽度相比于齿顶圆半径很小,可将实际有曲率内壁当平面计算;③高速泵转速快,但体积也小,综合下齿顶处线速度不大,可假设流体流动是层流。

根据径向间隙处流速模型可以得到齿尖剪切应力分布,进而可推导出黏性摩擦引起的能量损耗(单位:W)<sup>[18]</sup>:

$$\Delta P_\phi = \frac{\pi n R_a B \delta}{30} \Delta p + \frac{\mu (\pi n R_a)^2 Z' B l}{450 \delta} \quad (4)$$

根据式(3),径向处泄漏与出入口压差成正比,与间隙三次方成正比,但与转速成反比。由式(4)可以看出,间隙过小或过大都会增加损耗,且与转速的平方成正比,转速过高会大大提高损耗。除此之外,对于微型泵齿轮的齿顶等效宽度 $l$ 值很小,容易影响流量,齿厚是根据排量确定的,故只能通过调整径向间隙降低其影响。

### 2.2 齿轮端面间隙处泄漏及能量损耗模型

齿轮端面间隙泄漏是油液沿着齿轮端面与内壁的缝隙从高压区泄漏到低压区,形成泄漏,如图5所示。端面间隙泄漏较径向更为复杂,它具有齿轮端面与壁面相对转动引起的剪切流速,及压差作用引起的径向流速,属于二元缝隙流动<sup>[19]</sup>。

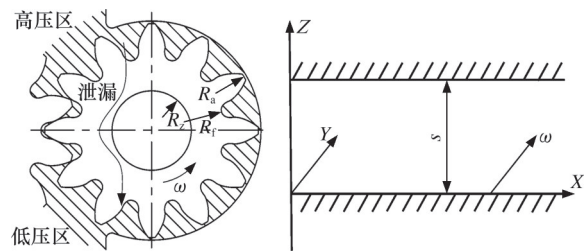


图5 端面间隙处流体状态

Fig.5 Fluid state at end face clearance

根据齿轮端面间隙处的流动模型,泄漏流量(单位: $m^3/s$ )可表示为<sup>[20]</sup>

$$\Delta q_{v\phi} = \frac{s^3 \Delta p}{4\pi\mu} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(1 - \frac{R_z}{R_a})^{2n}}{(1 + \frac{R_z}{R_a})^{2n}} \cdot \left[ \frac{\sin n(\theta_\beta - \pi)}{\theta_\beta} + \frac{\sin n(\theta_z - \pi)}{\pi - \theta_z} \right] \frac{1 + \cos n\pi}{n^2} \quad (5)$$

式中: $s$ 为端面间隙,m; $\theta_\beta$ 为节圆后弦角,rad; $\theta_z$ 为壁面对齿轮包络的角度,rad。

同理,根据端面间隙处流速模型可以得出齿尖剪切应力分布,推导出黏性摩擦引起能量损耗的数学模型<sup>[18]</sup>:

$$\Delta P_s = \frac{\pi^3 n^2 \mu}{25s} \left[ \frac{1}{18} (R_1^4 - R_2^4) + \frac{1}{27} (R_a^4 - R_1^4) \right] \quad (6)$$

式中： $R_i$ 为齿根圆半径，m。

与径向泄漏不同，根据式(5)，端面泄漏仅与端面间隙的三次方成正比。而端面处能量损耗也与转速的平方成正比，与端面间隙成反比，因此端面间隙增大会大大增加泄漏，但是可以降低黏性摩擦损耗，减小负载转矩、提高效率，有利于油泵电机提高转速上限。

根据上述基础理论模型，分析转速、端面间隙、径向间隙参数对齿轮泵的影响机理，从而指导微小型齿轮泵设计。并且可体现微小型高速齿轮泵与大型泵的区别，尤其是端面泄漏模型中：端面能量损耗公式(6)中，能量损耗与端面间隙成反比，微小型泵总功率更小，使得微小型泵效率会更低；而对于中大型泵，功率大，同间隙尺寸下机械效率高。

### 3 流体仿真及分析

式(3)、式(4)是通过假设齿槽压力等差分布而推导出的，即相邻齿槽压力差为 $\Delta p/Z'$ ，而式(5)、式(6)是假设端面压力呈现线性分布。但实际流场中压力与实际参数相关，当端面与径向间隙过小时，压力仅会在局部呈现线性分布，对于微型齿轮泵小间隙场合精度不高，所以本文以理论为指导，结合流场仿真方法对间隙的研究。仿真平台使用PumpLinx，它是专为各类泵、阀的流体力学数值模拟计算而开发的CFD软件。

#### 3.1 仿真建模及设置

高速齿轮旋转过程中局部油液运动呈现无规则复杂状态，流场仿真中使用RNG  $k-\epsilon$ 高雷诺数湍流模型计算，具有较好的稳定性。考虑到高速下的空化现象，仿真采用恒气体质量分数下的全空化模型。

边界条件设置如下：①齿轮泵的进口压力恒为一个标准大气压101 kPa，出口压力恒等于设定值701 kPa；②当油液可压缩时，液压系统中压力变化会非常大，本文泵中的油液均不可压缩；③由于泵体积不大，忽略油液重力对齿轮泵内油液压力的影响。

图6所示为提取流场域及网格划分。图7所示为网格数量与流量关系，网格数量较少时，有限元流场计算不精确，流体元之间力作用不完全，流量偏小。流量收敛时，网格数在 $2.6 \times 10^5$ 以上，单个网格最佳尺寸为0.02 mm，间隙处棱柱网格划分4层以上。

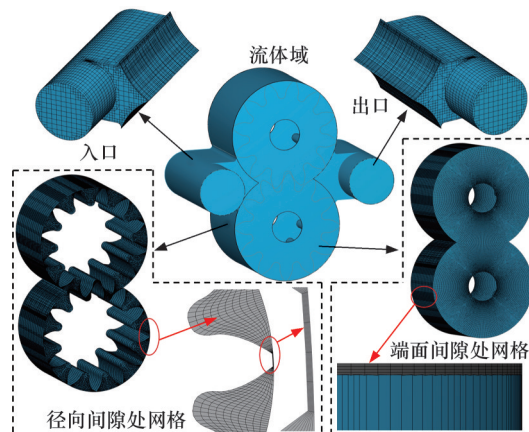


图6 流场域及网格划分

Fig.6 Flow field domain and mesh

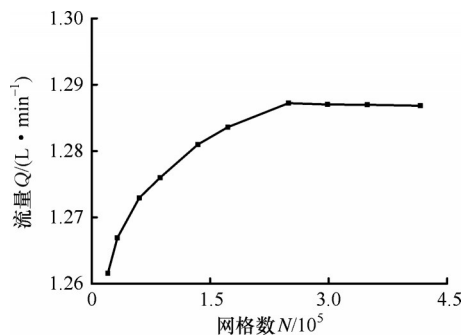


图7 网格无关性验证

Fig.7 Cell independence verification

#### 3.2 流场压力分布

内泄漏易受出入口压差的影响<sup>[21]</sup>，齿轮油泵模型都建立在理想压差条件下，但困油、包络齿数以及出入口大小都会影响出入口压差。为探究间隙对压力分布，对不同端面间隙下出入口附近压力、齿槽压力分析。由于泄漏主要集中在端面上，故主要研究端面间隙对压力分布影响，径向间隙取0.02 mm、转速15 000 r/min，取端面间隙：0.005、0.01、0.015、0.02、0.025、0.03 mm。

该间隙的取值主要是根据实际情况考虑，当间隙小于0.005 mm时，加工费用高，再加上装配误差，间隙再小就很容易引起齿轮与泵内壁副磨；当间隙大于0.03 mm后，齿轮内泄漏大，出口流量小，研究意义不大。

图8所示数值为不同端面间隙下对应的出口附近的最大压力，端面间隙越小，压力越大，端面间隙0.005 mm时，最大压力达1.11 MPa。并且伴随端面间隙增大，压力分布线性度越明显。

图9所示为仿真稳定后对齿槽压力追踪，仿真时间5.1 ms时流体从低压区进入内壁包络区，齿槽压力开始递增。端面间隙增大，压力梯度增加，泄漏增加，但是端面间隙0.005 mm时，5.1~6 ms位置对应压力几乎没有变化，但7.8 ms进入高

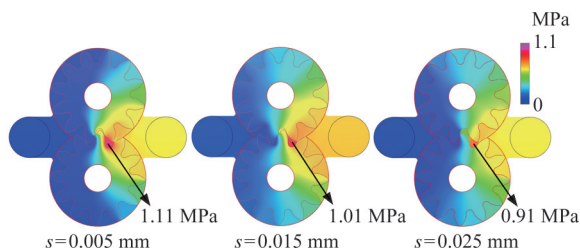


图8 不同端面间隙压力分布

Fig.8 Different end face clearance pressure distribution

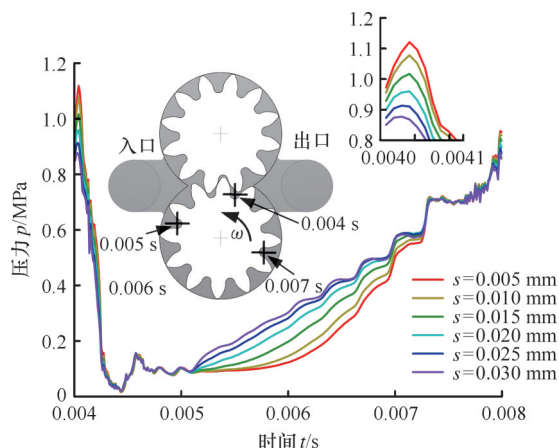


图9 齿槽压力追踪

Fig.9 Cogging pressure capture

压区时压力达到0.8 MPa, 过大的压差会导致流量波动、压力脉动加剧以及负载转矩增加, 增大径向不平衡力, 从而增加磨损并降低油泵寿命<sup>[22]</sup>; 而间隙在0.02~0.03 mm时, 内壁包络下的齿槽压力变化线性度较好。

### 3.3 不同径向与端面间隙对齿轮泵性能影响

同工况下, 流场仿真中端面间隙分别取: 0.005、0.015、0.025、0.020、0.025、0.030 mm, 径向间隙分别取: 0.01、0.02、0.03、0.04 mm。

转速15 000 r/min下不同间隙对应的输出流量如图10所示。径向间隙和端面间隙过小时, 内泄漏的主要原因是径向间隙泄漏占比大。径向与端面间隙越大, 流量越小, 当端面间隙大于0.03 mm后, 排量已经远不符合设计要求。

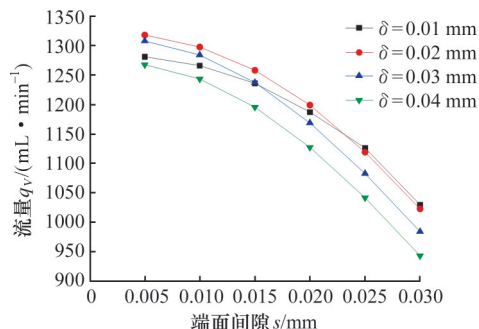


图10 不同间隙输出流量

Fig.10 Output flow caused by different clearances

值得注意的是, 径向间隙过小也会引起内泄流量增加, 结合式(3), 泄漏流量与吸油区-排油区压差 $\Delta p$ 正相关, 再结合齿槽压力追踪图9, 当端面与径向间隙都小时压差 $\Delta p$ 更大, 所以径向间隙为0.01 mm时, 端面间隙小引起压差大, 所以径向间隙处泄漏大, 出口流量减小; 当端面间隙逐渐增大后, 压差 $\Delta p$ 减小, 径向间隙处泄漏减小, 出口流量增大。

图11所示为上述条件下流场仿真的齿轮油泵效率。径向间隙增加效率降低, 主要受到流量的影响, 流量越大效率越高, 因此, 径向间隙0.01 mm处效率反而不高。端面间隙增大, 机械效率先增加后减小, 主要是泄漏间隙小时黏性转矩大, 间隙大时输出流量少。当端面间隙超过0.03 mm后, 因为泄漏流量过大, 效率急速下降。

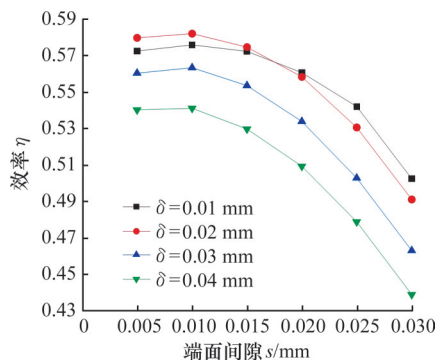


图11 不同间隙的效率曲线

Fig.11 Efficiency caused by different clearances

综合流场仿真的流量与效率可以看出, 在该工况下当径向间隙为0.02 mm、端面间隙为0.01 mm时, 流量符合要求且效率也是最高点。

### 3.4 不同转速对应的最佳间隙探究

转速对流量有直接影响, 针对不同间隙下流量、机械效率影响, 设计转速与间隙的正交流场仿真实验, 速度分别取10 000、12 000、15 000、20 000 r/min, 基于上述最佳间隙, 当研究径向间隙时端面间隙取0.01 mm, 研究端面间隙时径向间隙取0.02 mm, 正交仿真结果如图12、图13所示。

转速对流量的影响显著, 转速越高流量越大, 图12a中径向间隙0.03 mm、端面间隙0.01 mm、转速20 000 r/min时, 流量达1774 mL/min。此外, 径向间隙增大, 流量先提高后降低, 而且伴随转速提高, 流量最大点对应的径向间隙增大, 所以高转速下可取得更大的径向间隙。

由图12b与图13b可看出, 20 000r/min转速时效率整体偏低几乎不随径向间隙变化。主要原因是转速较高时, 间隙处流体的相对转速大, 引起的黏性摩擦损耗大, 所以高转速的机械效率偏低,

间隙增大后损耗降低效率增大。与之对应的转速在 10 000 r/min 时,端面间隙为 0.005~0.03 mm,效率下降了 22.5%。高转速除了可以带来更大排量、有效抑制径向间隙处泄漏外,也可有效解决间隙加工误差引起的机械效率变化问题,最佳机械

对应的端面间隙为 0.01 mm,转速 20 000 r/min 对应的端面间隙为 0.02 mm。

#### 4 实验

流场仿真结果表明,端面间隙对内泄漏及效率影响较大,实验主要围绕转速与端面间隙进行正交试验验证。实验流程如图 14 所示。航空齿轮油泵结构如图 15 所示。

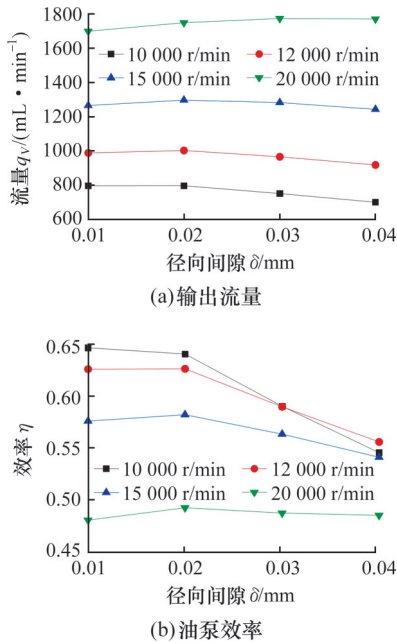


图 12 不同径向间隙、转速的仿真结果

Fig.12 Simulation of different radial clearances and

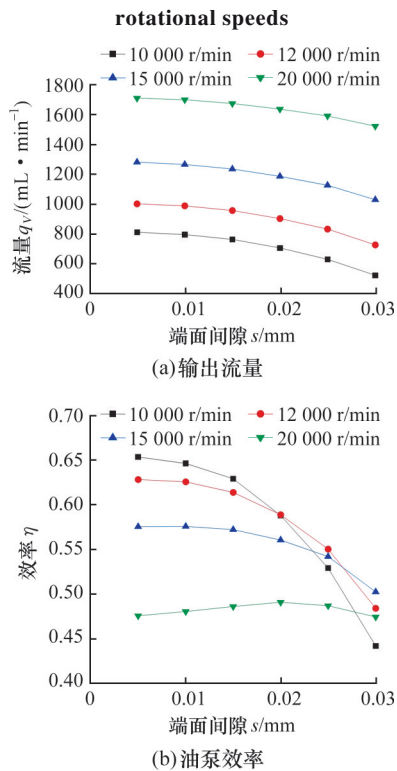


图 13 不同端面间隙、转速的仿真结果

Fig.13 Simulation of different end face clearances and rotational speed

效率点对应的端面间隙值可以更大,图 13b 所示转速 15 000 r/min 时,齿轮油泵的最佳机械效率



1. 不同厚度齿轮
2. 油泵电机驱动及采集装置
3. 油泵
4. 可调截流器
5. 压力监测仪
6. 可调电源
7. 上位机

图 14 航空齿轮油泵实验流程简图

Fig.14 Schematic diagram of the experimental flow of aviation gear oil pump



图 15 航空齿轮油泵结构图示

Fig.15 Structure diagram of aviation gear oil pump

实验步骤如下:测量泵腔宽度为 5.512 mm,内圆直径为 7.038 mm,研磨出不同厚度齿轮,公差在 ±0.003 mm 以内,研磨后齿轮参数见表 3。通过截流实验,一一测试不同厚度齿轮在相对压力 0.6 MPa 下的流量及油泵电机电流,其中转速与压力通过可调截流阀与供电电源来调节。再根据电流与转速,通过磁滞测功机测出电机在该工作点的转矩,即可计算油泵部分效率,如图 16 所示。

如图 16a 所示,实验情况下流量比流场仿真的流量偏低,主要是加工误差及安装误差等因素造成,再加上轴承与齿轮轴间存在间隙加剧了内

表3 实验齿轮数据

Tab.3 Experimental gear data mm

目标齿轮厚度	实际厚度	实际齿顶圆直径	实际端面间隙	实际径向间隙
5.500	5.502	6.994	0.005	0.022
5.490	5.491	6.995	0.0105	0.0215
5.480	5.480	6.994	0.0155	0.022
5.470	5.471	6.996	0.0205	0.021
5.460	5.462	6.995	0.030	0.0215

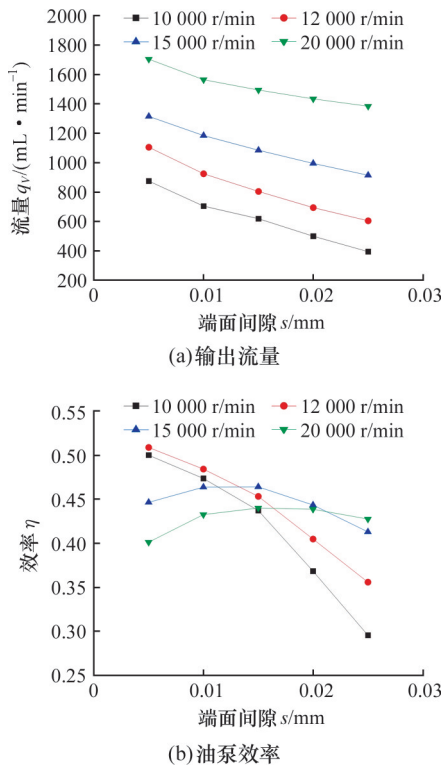


图16 不同端面间隙、不同转速下的实验结果

Fig.16 Experimental of different end clearances and different speeds

泄漏降低流量<sup>[23]</sup>,但是误差在75 mL/min以内。图17所示为正交试验下通过磁滞测功机测出不同状态下的电机输出等效转矩,转速高、间隙小,主动齿轮所受转矩越大,测试条件下间隙超过0.02 mm时,转矩基本不再减小。

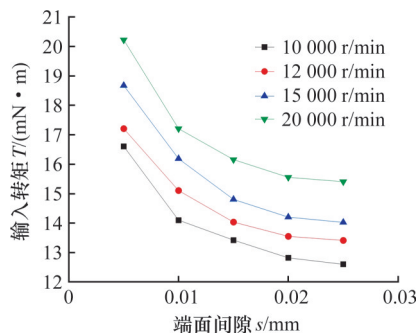


图17 不同转速、端面间隙下的输入转矩

Fig.17 Input torque at different speeds and radial clearance

图16b中,与流场仿真相比较,10 000 r/min与12 000 r/min效率整体降低,主要原因是实际流量偏小,但是黏性转矩并没有减小,所以效率降低,高速流量基数大,故影响并不明显。

与之不同的是,15 000 r/min与20 000 r/min对应的最佳端面间隙在0.015 mm,流场仿真对应的最佳端面间隙为0.020 mm,该差距主要是受齿轮研磨的公差及测试误差的影响,再加上实际实验中轴承处、齿轮啮合均会产生额外的能量损耗。但整体趋势与预测相同,且在20 000 r/min工况下,0.005~0.025 mm间隙差320 mL/min流量,占总流量的18%,但机械效率仅相差2.8%,远小于10 000 r/min转速的实验情况。

### 5 结论

1)对于高速油泵,最佳效率与间隙与转速有关。转速越高,最佳机械效率对应的间隙越大,结合流场仿真与实验情况,15 000 r/min转速的最佳端面间隙为0.01 mm,最佳径向间隙为0.02 mm,而20 000 r/min转速的最佳端面间隙为0.02 mm。

2)高速下,齿轮泵效率降低但流量增大,而且转速越高,间隙尺寸变化对效率的影响逐渐减低,20 000 r/min转速下效率几乎不随间隙变化而变化;但10 000 r/min转速下,端面间隙0.005 mm时效率为50.0%,间隙0.025 mm时效率为29.6%。这种特性可提高微型高速齿轮油泵在工程应用中对间隙误差的容许范围。

### 参考文献:

[1] 张卫红,唐长红. 航空航天装备的轻量化:挑战与未来[J]. 航空学报, 2024, 45(5): 1-7.  
ZHANG Weihong, TANG Changhong. Lightweighting of Aerospace and Aeronautical Equipment: Challenges and Perspectives[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2024, 45(5): 1-7.

[2] 蔡显新,齐思鑫,吴春来,等. 航空发动机静强度设计中的保护准则探讨[J]. 机械工程学报, 2017, 53(13): 101-107.  
CAI Xianxin, QI Sixin, WU Chunlai, et al. Investigation on the Protect Criteria of Aero-engine Static Strength Design [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(13): 101-107.

[3] 赵磊,张宇,杨立,等. 航空用涡喷发动机的电动燃油泵设计与研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(5): 77-80.  
ZHAO Lei, ZHANG Yu, YANG Li, et al. Design and Realization of an Electric Fuel Pump for Turbojet Engine [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2021(5): 77-80.

[4] 孟嘉嘉,刘伟,韩志英. 航空航天用外啮合齿轮泵结构优化[J]. 液压气动与密封, 2017, 37(9): 39-41.  
MENG Jiajia, LIU Wei, HAN Zhiying. The Gear Pump's

- Optimization on Structure Applied on Aerospace[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2017, 37(9): 39-41.
- [5] 姜继海, 车明阳, 吴金光, 等. 微小型航空外啮合齿轮泵轴向摩擦副研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(16): 1-6.  
JIANG Jihai, CHE Mingyang, WU Jinguang, et al. Research on Axial Friction Pair of Mini Aerospace External Gear Pump[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(16): 1-6.
- [6] 王向前, 孟嘉嘉, 高贵锋, 等. 航空齿轮泵径向配合间隙的研究与分析[J]. 液压气动与密封, 2019, 39(3): 62-64.  
WANG Xiangqian, MENG Jiajia, GAO Guifeng, et al. The Research and Analysis on the Radial Fit Clearance of the Aviation Gear Pump[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2019, 39(3): 62-64.
- [7] CIEŚLICKI R, KARPENKO M. An Investigation of the Impact of Pump Deformations on Circumferential Gap Height as a Factor Influencing Volumetric Efficiency of External Gear Pumps[J]. Transport, 2022, 37(6): 373-382.
- [8] SZWEMIN P, FIEBIG W. The Influence of Radial and Axial Gaps on Volumetric Efficiency of External Gear Pumps[J]. Energies, 2021, 14(15): 4468.
- [9] HAN Guangzhi, HUANG Kang, XIONG Yangshou, et al. Fluid Analysis of the Cavitation of the Microsegment Gear Pump Operating at High-pressure Condition[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2025, 239(6): 3400-3412.
- [10] RITURAJ, RANSEGNOLA T, VACCA A. An Investigation on the Leakage Flow and Instantaneous Tooth Space Pressure in External Gear Machines [C]//2018 Global Fluid Power Society PhD Symposium (GFPS). Samara, 2018: 1-8.
- [11] 杨国来, 李晗, 郭霖贤, 等. 吸油口压力影响下外啮合齿轮泵极限转速特性研究[J]. 液压与气动, 2021, 45(2): 91-94.  
YANG Guolai, LI Han, GUO Jixian, et al. Limiting Speed Characteristics of External Gear Pump under the Influence of Suction Pressure [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2021, 45(2): 91-94.
- [12] ZARDIN B, NATALI E, BORGHI M. Evaluation of the Hydro-Mechanical Efficiency of External Gear Pumps [J]. Energies, 2019, 12(13): 2468.
- [13] BATTARRA M, MUCCHI E. On the Assessment of Lumped Parameter Models for Gear Pump Performance Prediction[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2020, 99: 102008.
- [14] BORGHI M, ZARDIN B. Axial Balance of External Gear Pumps and Motors: Modelling and Discussing the Influence of Elastohydrodynamic Lubrication in the Axial Gap[C]//ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Houston, 2015: V015T19A038.
- [15] CHAI Hongqiang, YANG Guolai, WU Guoguo, et al. Research on Flow Characteristics of Straight Line Conjugate Internal Meshing Gear Pump[J]. Processes, 2020, 8(3): 269.
- [16] 李玉龙. 齿轮泵无轴向泄漏的新结构研究[J]. 润滑与密封, 2019, 44(4): 127-130.  
LI Yulong. Research on New Structure of External Gear Pumps without Axial Leakage[J]. Lubrication Engineering, 2019, 44(4): 127-130.
- [17] 陈云鹏, 张中波, 陈亭西. 齿轮泵内部间隙泄漏的研究综述[J]. 液压气动与密封, 2024, 44(5): 49-57.  
CHEN Yunpeng, ZHANG Zhongbo, CHEN Tingxi. Review on Internal Clearance Leakage of Gear Pump[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2024, 44(5): 49-57.
- [18] ZHAN Peng, WEI Liejiang, LIU Rongmin, et al. Flow Field Modeling and Simulation of High-speed Gear Pump Considering Optimal Radial and End Clearance[J]. IEEE Access, 2023, 11: 64725-64737.
- [19] 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, 32(2): 108-112.  
KONG Fanyu, HE Yuyang, ZHENG De, et al. Analysis of Influence Factors on Flow Rate Characteristics in Gear Pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(2): 108-112.
- [20] XU Hong, YANG Lijuan, JING Baode, et al. Research of Internal Leakage Theory Model in the Exterior Meshing Gear Pump[C]//2009 International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. Hangzhou, 2009: 331-334.
- [21] ZHOU Yang, HAO Minghui. The Study of Leakage of Circular Arc - Involute - Circular Arc Gear Pump [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(9): 168781401772008.
- [22] PELLEGGRI M, VACCA A. A CFD-radial Motion Coupled Model for the Evaluation of the Features of Journal Bearings in External Gear Machines [C]//ASME/BATH 2015 Symposium on Fluid Power and Motion Control. Chicago, 2015: V001T01A025.
- [23] THIAGARAJAN D, VACCA A, WATKINS S. On the Lubrication Performance of External Gear Pumps for Aerospace Fuel Delivery Applications[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 129: 659-676.

(编辑 陈勇)

作者简介:张龙望,男,1999年生,硕士研究生。研究方向为无刷直流电机及齿轮油泵。冯治国(通信作者),男,1978年生,教授、博士研究生导师。研究方向为机器人技术及应用、材料加工。E-mail: zgfeng@gzu.edu.cn。

本文引用格式:

张龙望,冯治国,赵磊,等. 高速航空齿轮泵间隙对效率影响研究[J]. 中国机械工程,2026,37(2):390-397.  
ZHANG Longwang, FENG Zhiguo, ZHAO Lei, et al. Research on Influences of High-speed Aviation Gear Pump Clearances on Efficiency[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(2): 390-397.