

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.06.044

直线共轭内啮合齿轮泵集中参数法建模与激振源研究

盛精¹ 朱少辉^{1,2} 叶绍干² 陈鼎¹ 赵守军³ 刘会祥³

(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;

3. 北京精密机电控制设备研究所, 北京 100076)

摘要: 直线共轭内啮合齿轮泵作为高效且静谧性能良好的动力元件, 在电静压作动系统得到广泛应用。本文采用集中参数法建立直线共轭内啮合齿轮泵仿真模型。建立了实验平台, 对直线共轭内啮合齿轮泵进出口压力脉动进行了测试。分析了直线共轭内啮合齿轮泵在吸排油区的压力脉动、齿腔内压力分布以及齿轮和齿圈在 x 轴和 y 轴方向的径向力等激振源。研究表明: 所建立的直线共轭内啮合齿轮泵集中参数模型具有良好的精度和可靠性; 齿轮和齿圈径向力随偏转角周期变化, 在 x 轴方向, 齿轮所受到的径向力指向低压区, 齿圈受到的径向力指向高压区。在 y 轴方向, 齿轮和齿圈所受到的径向力在正负之间波动。齿轮和齿圈所受径向力在 x 轴方向的基频幅值均小于其在 y 轴方向的基频幅值; 困油现象会导致齿腔压力略微升高。研究结果为直线共轭内啮合齿轮泵的优化设计和振动噪声分析提供了参考。

关键词: 直线共轭内啮合齿轮泵; 集中参数法; 压力脉动; 径向力; 激振源

中图分类号: TH325

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)06-0434-08

OSID:



Lumped Parameter Modeling and Excitation Sources Analysis of Linear Conjugated Internal Gear Pumps

SHENG Jing¹ ZHU Shaohui^{1,2} YE Shaogan² CHEN Ding¹ ZHAO Shoujun³ LIU Huixiang³

(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

3. Beijing Institute of Precision Mechatronics and Controls, Beijing 100076, China)

Abstract: Linear conjugated internal gear pumps are widely used in eletro-hydrostatic actuating systems as power elements with their efficient and low-noise performance. A linear conjugated internal gear pump simulation model was established by the lumped parameter method, the fluid domain within a linear conjugated internal gear pump can be specified as a finite number of volumes where the fluid properties (e. g, pressure, density, and modulus of elasticity, etc.) can be considered as concentrated variables. A test platform was constructed to measure the suction and discharge pressure pulsations of the linear conjugated internal gear pump. The excitation sources, including the pressure pulsation in the inlet and outlet ports, the pressure in the tooth cavity, and the radial force of the gear and tooth ring in the x and y directions were calculated and analyzed. The results demonstrated that the lumped parameter model of linear conjugate internal gear pump established had good accuracy and reliability. The magnitude of the radial force on the gear and tooth ring varied periodically with the deflection angle. In the x -direction, the radial force acting on the tooth ring was pointed to the low-pressure side, and the radial force acting on the gear was pointed to the high-pressure side. In the y -direction, both theradial forces acting on the gear and ring were fluctuated between positive and negative values. The radial forces in the x -direction were smaller than those in the y -direction at the fundamental harmonic; the phenomenon of oil trapping led to

收稿日期: 2024-03-03 修回日期: 2024-03-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(52175062)、福建省自然科学基金项目(2021J01049、2021J011202)、航空科学基金项目(20220007068002)和福建省科技计划引导性项目(2021H0027)

作者简介: 盛精(1965—),男,教授,博士,主要从事液压元件建模研究,E-mail: shengqqqqing@163.com

通信作者: 叶绍干(1989—),男,特任研究员,博士生导师,主要从事液压系统振动噪声研究,E-mail: shaoganye@xmu.edu.cn

a slight increase in the pressure in the tooth cavities. The research result can provide a reference for the optimized design and vibration noise analysis of linear conjugated internal gear pumps.

Key words: linear conjugated internal gear pump; lumped parameter method; pressure pulsation; radial force; excitation source

0 引言

作为传统的动力组件,直线共轭内啮合齿轮泵因其紧凑、简易且可靠的结构,以及低流量和压力脉动的特性,在注塑机、海洋机械、高端机床等需噪声低的领域得到了广泛应用^[1]。流量脉动会引起压力脉动,从而使管道、阀门等元件产生振动和噪声。为了达到更好的静谧效果,国内外学者对泵的流量特性和压力特性展开了研究,采用的方法主要有齿轮齿廓法、集中参数法、CFD法^[2]。

国外 VACCA 团队^[3-7]运用集中参数模型将每个齿间容积看作一个独立的个体(单室),对渐开线内啮合齿轮泵排油区压力和单个容腔压力进行了仿真,同时考虑齿轮径向微运动对齿轮泵的影响;RUNDO 团队^[8-10]运用集中参数模型将具有油液属性相同的齿间容腔(多室)看作为一个整体,对渐开线外啮合齿轮泵流量特性和容腔压力进行了仿真;国内 LIANG 等^[11]运用 CFD 数值方法对渐开线内啮合齿轮泵的流量脉动进行分析;杜睿龙等^[12]基于多室的集中参数模型,对渐开线内啮合齿轮泵容积效率、压力脉动和困油流量等进行建模分析;吴晓明等^[13]基于单室的集中参数法对渐开线内啮合齿轮泵不同工况下出口压力脉动进行了仿真;ZHOU 等^[14]对圆弧型外啮合齿轮泵进行齿轮齿廓建模来分析泵的理论流量波动;陈鼎等^[15]运用 CFD 数值方法分析了配合间隙对直线共轭内齿轮泵流量脉动的影响;许文纲等^[16]对渐开线外啮合齿轮泵压力脉动进行动力学建模与实验,并分析了转频对压力脉动信号的调制作用;孙壮壮等^[17]通过对泵的不同位置布置动态压力传感器研究了泵的压力脉动分布规律;李彦军等^[18]运用动态压力传感器测试方法研究了空化现象对泵压力脉动产生的影响;司国雷等^[19]运用 CFD 仿真模型得到转速对外齿轮泵压力脉动影响大;林文华等^[20]运用计算流体力学方法,设置不同工况,分析了轴向力对泵的稳定性影响;俞亚新等^[21]运用齿轮齿廓建模法对叶片泵理论流量脉动进行推导分析。综上可知,采用集中参数法建立齿轮泵仿真模型展现了其高效性和准确性。此方法优势在于其能够综合考虑如泄漏、油液特性等多种影响因素,从而确保获得关键压力和流量特性。

柱塞泵和渐开线外啮合齿轮泵的压力脉动理论

研究已经较为成熟,直线共轭内啮合齿轮泵由于其独特而复杂的啮合机制,使其研究相对较为有限^[22-25]。本文采用单室齿槽划分法建立直线共轭内啮合齿轮泵集中参数模型,通过实验对比齿轮泵进出口压力的频域信号,以验证模型准确性,最后对直线共轭内啮合齿轮泵的齿腔压力特性和动态径向力等激振源进行求解分析,以期对直线共轭内啮合齿轮泵振动噪声研究奠定基础。

1 直线共轭内啮合齿轮泵工作原理

图1为直线共轭内啮合齿轮泵三维结构图,其结构主要由后泵盖、外齿轮、后泵体、内齿圈、前泵体、前泵盖、齿轮轴等部件组成。其工作原理为外齿轮带动内齿圈啮合旋转,形成密封腔。齿轮齿圈旋转导致密封腔容积变化,产生吸油区和排油区。在容积增大时,液体被吸入密封腔;而在容积减小时,液体被推向排出口,从而实现吸油和排油的过程。其主要参数如表1所示。

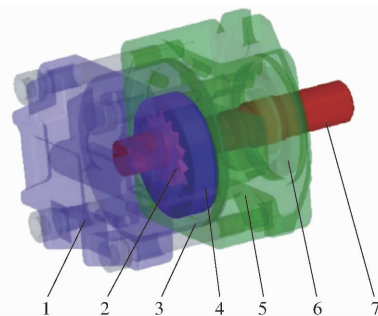


图1 内啮合齿轮泵三维结构图

Fig. 1 3D structure diagram of internal gear pump

1. 后泵盖 2. 外齿轮 3. 后泵体 4. 内齿圈 5. 前泵体 6. 前泵盖 7. 齿轮轴

表1 内啮合齿轮泵主要参数

Tab. 1 Main parameters of internal gear pump

参数	数值
齿轮模数/mm	10/3
直线外齿轮齿数	13
共轭内齿圈齿数	17
直线齿廓齿形半角/(°)	28.18
节圆齿厚系数	0.33
齿顶高系数	0.59
齿根高系数	0.73
齿顶间隙系数	0.04
齿宽/mm	22

如图2所示,将泵内部流场分为吸油腔、排油

腔、齿轮齿腔 $G_1 CV_i$ 、齿圈齿腔 $G_2 CV_j$ 共 4 个控制体积。按主动齿轮旋转方向,对齿轮泵的齿间控制容积进行编号, $G_1 CV_i$ 有 13 个腔室,编号为 1~13,而 $G_2 CV_j$ 有 17 个腔室,编号 1~17。

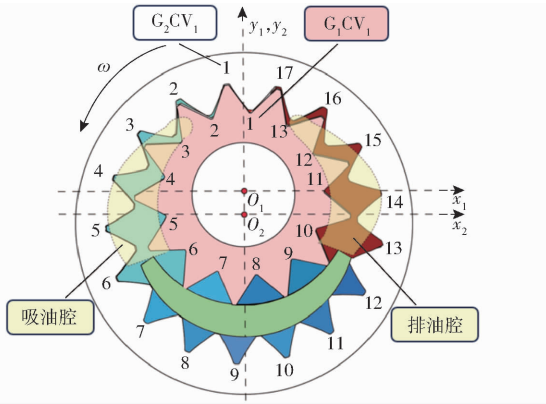


图 2 控制体积划分图

Fig. 2 Control volume diagram

2 直线共轭内啮合齿轮泵集中参数法建模

2.1 压力控制方程

集中参数法是假设直线共轭内啮合齿轮泵内的流体能指定为有限数量体积,其中流体特性(如压力、密度和弹性模量等)可以被视为集中变量。因此,根据相邻控制体积之间的流量、质量守恒,通过压力累积方程确定每个控制体积内压力 p_i 随时间的变化,即

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{1}{V_i} \frac{dp}{dp} \bigg|_{p=p_i} \left(\sum Q_{in,i} - \sum Q_{out,i} - \rho \bigg|_{p=p_i} \frac{dV_i}{dt} \right) \quad (i=0,1,\dots,n+1) \quad (1)$$

式中 ρ ——控制体积内部液压油密度

V_i ——控制体积瞬态体积

$\sum Q_{in,i}$ ——流入控制体积流量总和

$\sum Q_{out,i}$ ——流出控制体积流量总和

齿轮泵油液交换特性方程为

$$Q_{side} = \frac{b_s h_s^3 \Delta p_i}{12 \eta L_s} - \frac{u_s}{2} b_s h_s \quad (2)$$

$$Q_{top} = \frac{b_t h_t^3 \Delta p_i}{12 \eta L_t} - \frac{u_t}{2} b_t h_t \quad (3)$$

$$Q_{drain} = \frac{b_d h_d^3 \Delta p_i}{12 \eta L_d} - \frac{u_d}{2} b_d h_d \quad (4)$$

$$Q = CA_i(\varphi) \sqrt{\frac{2\Delta p_i}{\rho}} \quad (5)$$

式中 Q_{side} ——相邻 $G_1 CV_i$ 和 $G_2 CV_j$ 之间流量

Q_{top} ——齿顶间液体流量

Q_{drain} ——齿间容积流入轴承区域流量

Q —— $G_1 CV_i$ 和 $G_2 CV_j$ 在啮合区域与进出油口之间的油液流量

b_s, b_t, b_d ——齿轮端面、齿顶隙、流向轴承区域的油膜宽度

h_s, h_t, h_d ——对应油膜厚度

L_s, L_t, L_d ——对应油膜长度

u_s, u_t, u_d ——对应油膜剪切速度

Δp_i ——不同控制体积油液压力差

η ——油液流动黏度

C ——节流系数

$A_i(\varphi)$ ——节流面积

2.2 几何模型

齿轮泵几何关系主要是齿轮(齿圈)的齿间容积变化规律和过流面积变化规律,同一齿轮(齿圈)上的控制体积具有相同变化规律,具有角度偏移。图 3 为编号 1 的齿轮和齿圈控制体积变化曲线,齿轮偏转角为 $\omega_{og} = 360^\circ/i$,根据齿轮齿圈之间传动比 $K = 19/13$,齿圈偏转角为 $\omega_{ig} = 360^\circ K/j$ 。图中 $G_1 CV_i$ 和 $G_2 CV_j$ 的变化都具有周期性,但具有不同的周期,齿轮周期为 360° ,齿圈周期 $360^\circ K$ 。因此,由于主动齿轮带动齿圈啮合转动,齿轮控制体积在 100° 逐渐增大, 256° 逐渐减少,齿圈控制体积达到最大需要齿轮转动 98° ,在齿轮转动 360° 齿圈控制体积逐渐减少。

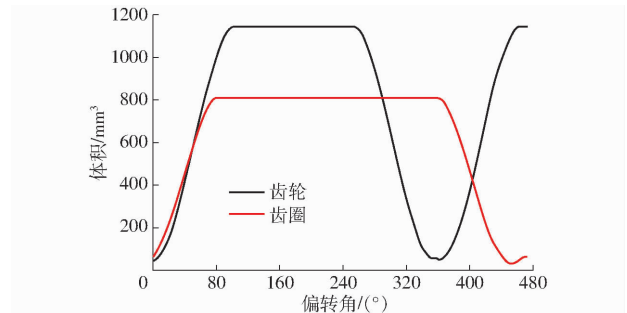


图 3 齿轮和齿圈控制体积变化规律

Fig. 3 Variations of volumes between gear teeth and gear ring

图 4 为控制体积 $G_1 CV_i$ 和 $G_2 CV_j$ 与高低压区(HV/LV)过流面积的变化规律。随着主动齿轮旋转角度的变化,齿轮齿圈过流面积也不断变化。其他齿与分析齿间容积变化规律一样,齿轮需加偏转角 ω_{og} ,齿圈需加偏转角 ω_{ig} 。

2.3 集中参数仿真模型

直线共轭内啮合齿轮泵流量脉动和压力脉动由多个控制体积内部流体共同影响。因此,需建立每个控制体积的流量压力特性方程的耦合关系。根据单个控制体积腔内油液压力特性方程和几何模型,建立直线共轭内啮合齿轮泵流量压力仿真模型。控制体积间连通关系如图 5 所示,图中关键节流口通

道描述如表 2 所示。

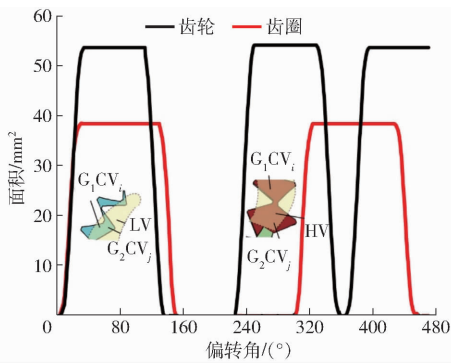


图 4 齿轮和齿圈与高低压区(HV/LV)过流面积

Fig. 4 Overlapping area of gear and ring and high-low pressure zones (HV/LV)

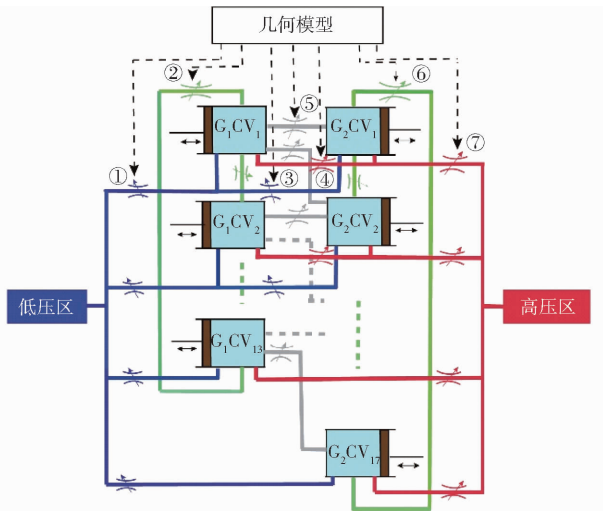


图 5 齿轮泵控制体积之间连接关系图

Fig. 5 Diagram of connection relationships between control volumes in gear pump

表 2 控制体积节流口通道描述

Tab. 2 Control volume throttling channels

通道序号	描述
1	齿轮与低压区节流口
2	齿轮端面间隙齿间流动
3	齿圈与低压区节流口
4	齿轮与高压区节流口
5	齿轮齿圈间节流口
6	齿圈端面间隙齿间流动
7	齿圈与高压区节流口

2.4 径向力求解

对于齿轮泵来说,随着啮合角的不断变化,齿轮和齿圈所承受的力也在变化,因此需对齿轮和齿圈进行受力分析。由于齿轮泵内的液压油具备润滑功能,导致啮合时齿轮泵摩擦力显得极其微小,几乎可以被忽略。如图 6、7 所示,齿轮齿圈受到的径向力主要由液压力 F_h 和啮合力 F_m 组成。

如图 6 所示,作用在齿轮齿廓上的液压力可以

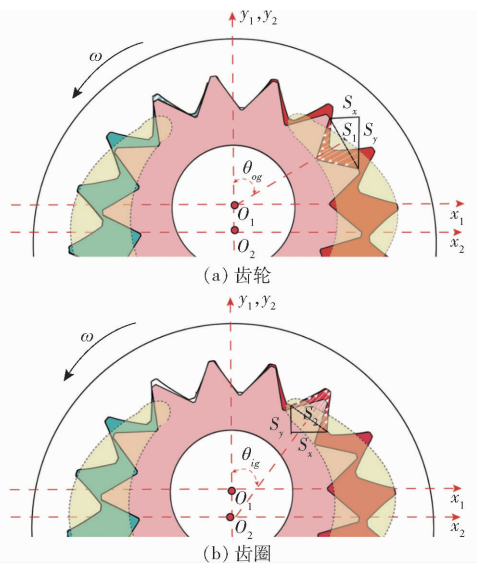


图 6 液压力受力分析

Fig. 6 Hydraulic force analysis

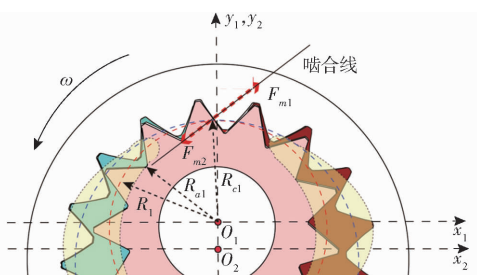


图 7 啮合力受力分析

Fig. 7 Meshing force analysis

等效为作用在平面 S_1 上液压力,齿圈齿廓上的液压力可以等效为作用在平面 S_2 上液压力,主动齿轮偏转角为 θ_{og} ,内齿圈偏转角 $\theta_{ig} = K\theta_{og}$,内齿圈和主动齿轮初始偏转角相差 β 。

如图 7 所示,齿轮和齿圈之间的啮合力是一对相互作用力,其方向沿齿轮齿圈啮合线方向。由于油液具有润滑效果,可以忽略摩擦力。因此,齿轮受到的啮合力矩 M_{Fh1} 等于齿圈受到的啮合力矩 M_{Fm1} , 计算式为

$$M_{Fh1} = \frac{1}{2} B \Delta p (R_{c1}^2 - R_{a1}^2) \quad (6)$$

齿轮受到啮合力为

$$F_{m1} = \frac{M_{Fm1}}{R_1} = \frac{1}{2R_1} B \Delta p (R_{c1}^2 - R_{a1}^2) \quad (7)$$

因此,单个齿轮和齿圈齿间容积径向力合力在 x 轴、 y 轴方向上力分别为

$$F_{gx} = \sum_{i=1}^{13} -p_i(\theta_{og}) S_1 \sin \theta_{og} + \frac{1}{2R_1} B \Delta p (R_{c1}^2 - R_{a1}^2) \cos \alpha \quad (8)$$

$$F_{gy} = \sum_{i=1}^{13} -p_i(\theta_{og}) S_1 \cos \theta_{og} + \frac{1}{2R_1} B \Delta p (R_{c1}^2 - R_{a1}^2) \sin \alpha \quad (9)$$

$$F_{rx} = \sum_{j=1}^{17} -p_j(\theta_{ig}) S_2 \sin(\theta_{ig} + \beta) - \frac{1}{2R_1} B \Delta p (R_{c1}^2 - R_{a1}^2) \cos \alpha \quad (10)$$

$$F_{ry} = \sum_{j=1}^{17} -p_j(\theta_{ig}) S_2 \cos(\theta_{ig} + \beta) - \frac{1}{2R_1} B \Delta p (R_{c1}^2 - R_{a1}^2) \sin \alpha \quad (11)$$

式中 B ——齿厚, m
 Δp ——高低压区压力差, Pa
 S_1 ——齿轮齿廓径向等效面积, m^2
 S_2 ——齿圈齿廓径向等效面积, m^2
 R_{c1} ——啮合半径, m
 R_1 ——齿轮节圆半径, m
 R_{a1} ——齿轮齿顶圆半径, m
 α ——齿轮压力角, ($^\circ$)
 $p_i(\theta_{og})$ ——齿轮齿间容积瞬时内部压力, Pa
 $p_j(\theta_{ig})$ ——齿圈齿间容积瞬时内部压力, Pa

3 实验验证

为了验证齿轮泵集中参数模型的准确性,开展了不同工况下直线共轭内啮合齿轮泵实验验证。被测泵为 NB3-D25F 型直线共轭内啮合齿轮泵,标称排量为 25 mL/r,测试泵出口压力脉动原理和实验设备连接如图 8 所示。测试原理为被测泵由电机驱动,温度计实时检测油箱内油液温度,流量计对系统主回路流量进行测量。类似于仿真测压力脉动建模方法,在泵的吸排油区直接连接一段直径不变的硬管,设置进口压力为大气压,出口压力在硬管另一端通过加载阀调节,泵进出口压力脉动通过安装高频压力脉动传感器进行测量,高频压力脉动传感器通过 LMS SCADAS 数据采集器和便携式计算机进行

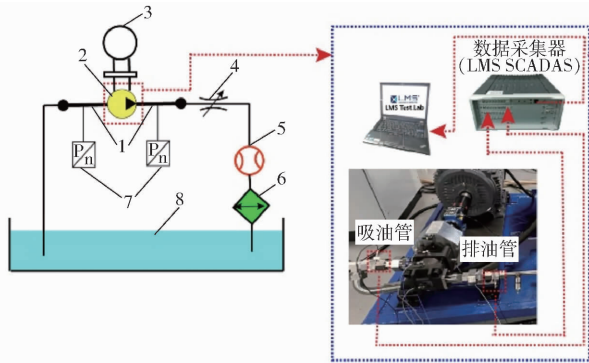


图 8 实验原理及实验设备连接示意图

Fig. 8 Schematic of testing principles and experimental equipment connections

1. 测试管路 2. 被测泵 3. 调速电机 4. 加载阀 5. 流量计
6. 散热器 7. 压力传感器 8. 油箱

数据采集和处理分析,完成齿轮泵压力时域数据测试数据的采集工作。最后,对采集到的压力脉动时域信号通过快速傅里叶变化(FFT)转换为频域信号,与仿真进出口压力脉动的频谱进行对比,验证模型准确性。

如图 9、10 所示,在转速 1 600 r/min 时,对 4、8 MPa 两个不同工况下进出口压力频谱进行仿真和实验对比。表 3 为不同工况下基频幅值对比。内啮合齿轮泵基频频率是由主动齿轮齿数决定,与齿轮齿圈副啮合频率相匹配,齿转速基频为 $n/60 \times Z_1$ (n 为转速, Z_1 为齿轮齿数),因此,转速为

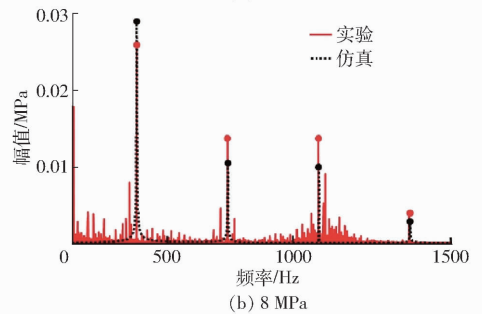
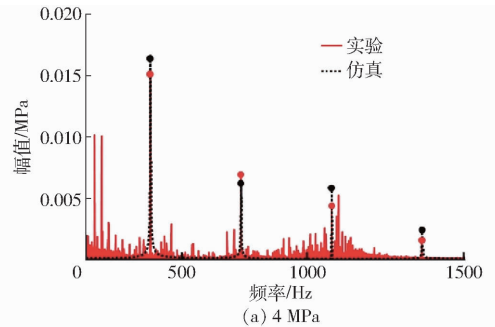


图 9 出口压力脉动频谱分析

Fig. 9 Spectrum analysis of outlet pressure pulsation

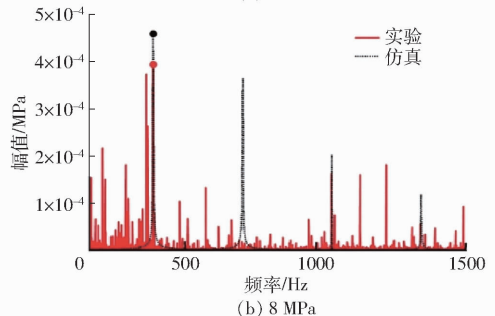
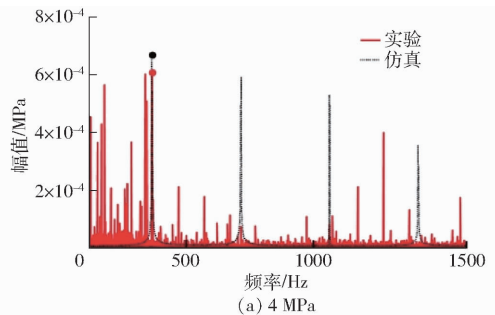


图 10 进口压力脉动频谱分析

Fig. 10 Spectrum analysis of inlet pressure pulsation

表 3 不同工况下压力脉动基频幅值对比

Tab.3 Comparison of pressure pulsations at the first harmonic under different operating conditions MPa

工况	出口压力/MPa		
	4	8	
排油区	实验	0.015 10	0.027 20
	仿真	0.016 50	0.029 80
吸油区	实验	0.000 61	0.000 39
	仿真	0.000 67	0.000 46

1 600 r/min 时, 齿轮泵主频为 347 Hz。由图 9、10 和表 3 可知, 出口压力脉动在基频和倍频处对比效果都较为一致, 而进口压力脉动仅在基频上有一致性。原因为泵进口存在涡流和湍流等非均匀流动, 可能导致流动不稳定, 影响脉动测试准确性。在设计和性能评估中, 更关注泵出口性能, 因此, 出口压力脉动测试更直接反映泵实际性能。进出口基频幅值仿真结果整体略大于实验结果, 这是由于油液泄漏量不确定性以及油液温度分布不均匀性等多个因素对实验结果产生了影响。但整体趋势吻合, 验证了直线共轭内啮合齿轮泵模型准确性。

4 激振源

齿间压力和径向力是直线共轭内啮合齿轮泵的主要激振源。运用前文建立的集中参数模型, 对不同工况下的齿间动态压力、齿轮和齿圈所受径向力进行仿真分析。设置转速为 1 600 r/min, 进口压力为大气压, 出口压力为 4、8、12 MPa, 仿真时间设置为 1 个周期。

4.1 齿间压力

图 11 中以工况为转速 1 600 r/min, 出口压力 12 MPa 为例, 对 G_1CV_1 和 G_2CV_1 的齿间压力变化进行分析。如图 11 所示, 泵出口压力脉动曲线在一个周期内共有 13 个波峰, 这是由主动齿轮齿数决定。在吸油区, 齿间容积 G_1CV_1 和 G_2CV_1 逐渐增大, 齿间压力处于大气压。经过过渡区, 齿间压力逐渐增大到泵的排油区压力。在齿间的高压阶段接近结束时, 齿间容积压力相对于排油区的压力略微上升, 这种变化主要由于齿间容积与吸排油区之间连接面积几乎为零, 齿轮泵产生了困油现象。

4.2 径向力

根据齿轮泵集中参数模型求得的齿间容积动态压力, 利用式 (8) ~ (11) 求解齿轮和齿圈在 x 轴、 y 轴方向上径向力。以工况转速为 1 600 r/min, 负载为 8 MPa 为例, 求解结果如图 12 所示。由图 12

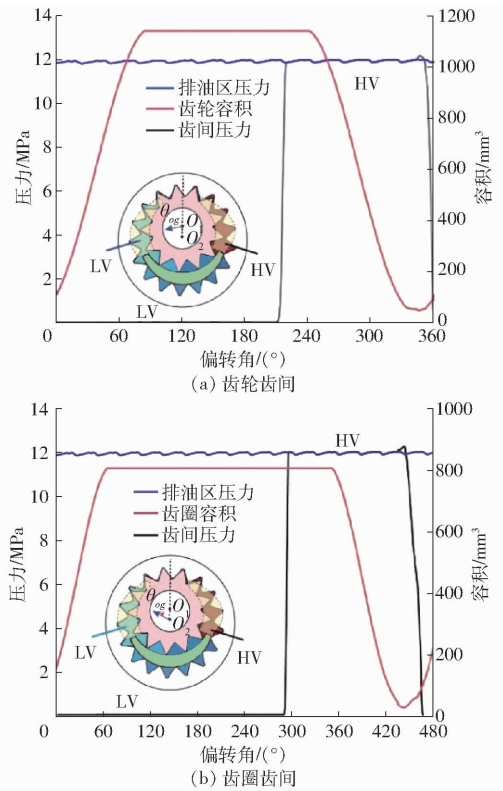


图 11 齿腔压力变化曲线

Fig.11 Analysis of cavity pressure

可知, 在一个周期中, 齿轮径向力往复 13 次, 而齿圈则往复 17 次, 与齿轮和齿圈齿数完全对应。由受力分析可知, 在 x 轴方向, 齿轮受到径向力为 $-8 560 \sim -8 265$ N; 在 y 轴方向, 其径向力变化范围为 $-890 \sim 1 860$ N。相对地, 齿圈在 x 轴方向径向力为 $7 265 \sim 7 950$ N; 而在 y 轴方向, 范围为 $-375 \sim 995$ N。利用 FFT 将时域径向力信号转换为频域。如图 13 所示, 无论是齿轮还是齿圈在 x 轴和 y 轴方向的径向力频域信号, 在主频为 347 Hz 时幅值达到最大值, 而在倍频处则逐渐减小。齿轮和齿圈所受径向力在 x 轴方向的基频幅值均小于 y 轴方向的基频幅值。

5 结论

(1) 通过集中参数法建立了直线共轭内啮合齿轮泵仿真模型, 通过实验对其进出口压力脉动进行了测试, 分析了齿间压力、齿轮和齿圈径向力等主要激振源。

(2) 仿真和实验结果表明, 所建立的直线共轭内啮合齿轮泵集中参数模型具有良好的精度, 直线共轭内啮合齿轮泵基频及其倍频的压力脉动相对较小, 适合作为电静压作动系统使用。

(3) 齿轮和齿圈径向力时域结果表明, 在 x 轴方向, 齿轮所受到的径向力常为负, 指向低压

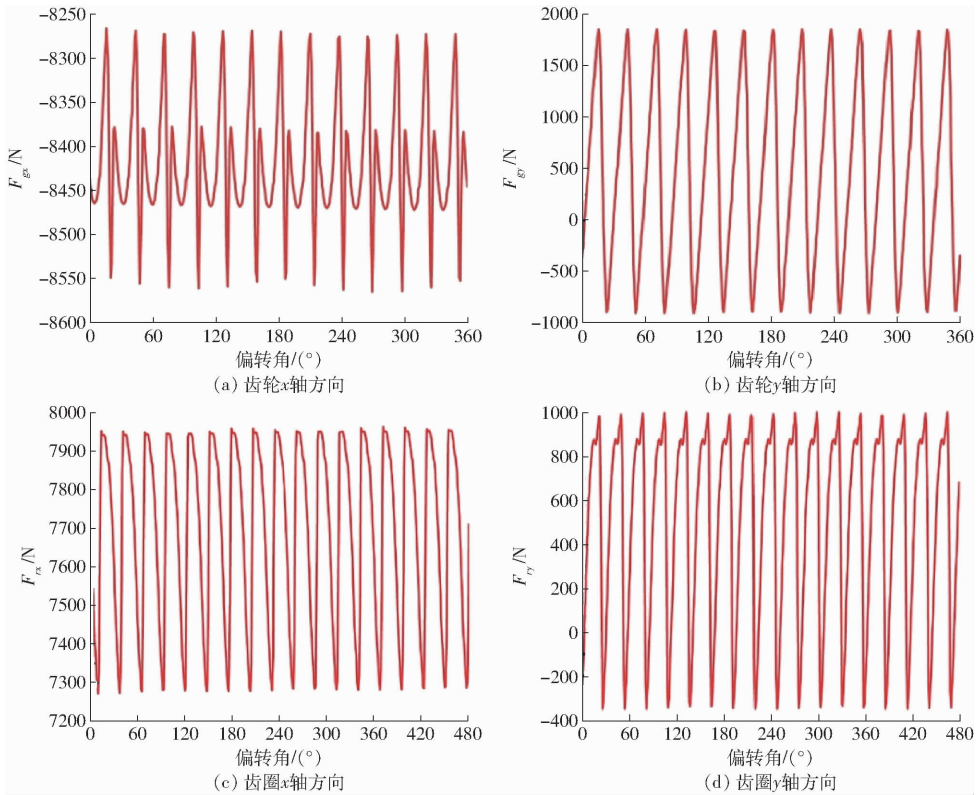


图12 齿轮和齿圈径向力曲线

Fig. 12 Gears and rings radial force curves

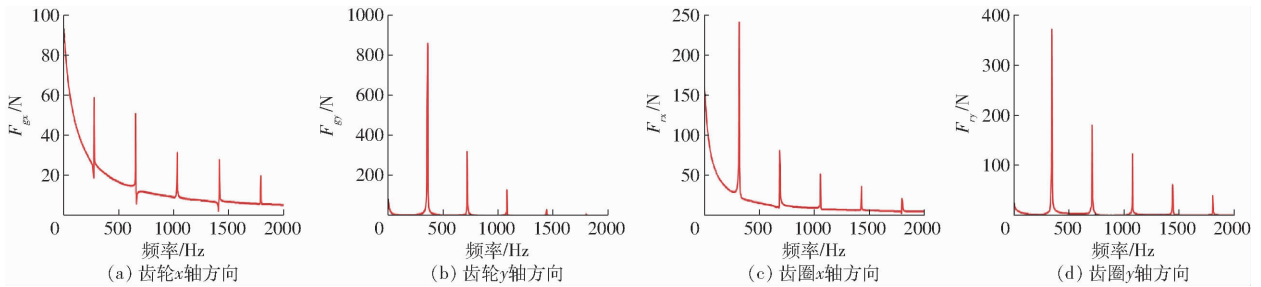


图13 齿轮和齿圈径向力频谱分析

Fig. 13 Gears and rings radial force spectrum analysis

区,齿圈受到的径向力常为正,指向高压区。在 y 轴方向,齿轮和齿圈所受到的径向力在正负之间波动。

(4) 齿轮和齿圈径向力频谱结果表明:齿轮和齿圈所受径向力在 x 轴方向的基频幅值均小于 y 轴方向的基频幅值。

参 考 文 献

- [1] 姚春芳. 齿轮泵研究的现状与发展简论[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(21): 120-122.
YAO Chunfang. Research status and development brief of gear pump[J]. China Petroleum and Chemical Standards and Quality, 2017, 37(21): 120-122. (in Chinese)
- [2] RUNDO M. Models for flow rate simulation in gear pumps: a review[J]. Energies, 2017, 10(9): 1261.
- [3] ZHOU J, VACCA A, CASOLI P. A novel approach for predicting the operation of external gear pumps under cavitating conditions[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2014, 45: 35-49.
- [4] SHAH Y G, VACCA A, DABIRI S, et al. A fast lumped parameter approach for the prediction of both aeration and cavitation in gerotor pumps[J]. Meccanica, 2018, 53: 175-191.
- [5] ZHAO X, VACCA A. Analysis of continuous-contact helical gear pumps through numerical modeling and experimental validation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 109: 352-378.
- [6] MISTRY Z, VACCA A, DHAR S, et al. Simulation and validation of fluid inertia effects in external gear machines using lumped parameter modeling[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2023, 145(9): 091003.
- [7] PAN D, VACCA A. Modeling of crescent-type internal gear pumps considering gear radial micromotion[J]. Chemical Engineering & Technology, 2023, 46(1): 128-136.

- [8] RUNDO M. Theoretical flow rate in crescent pumps[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2017, 71: 1-14.
- [9] FERRARI A, FRESIA P, RUNDO M, et al. Experimental measurement and numerical validation of the flow ripple in internal gear pumps[J]. *Energies*, 2022, 15(24): 9607.
- [10] RUNDO M, CORVAGLIA A. Lumped parameters model of a crescent pump[J]. *Energies*, 2016, 9(11): 876.
- [11] LIANG Y D, CHEN Z B, LIAO J. Numerical simulation and experimental evaluation of flow ripple characteristics of truninger pump[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 11297.
- [12] 杜睿龙, 谢安桓, 周华, 等. 基于集中参数法的内啮合齿轮泵仿真[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(9): 101-106.
DU Ruilong, XIE Anhuan, ZHOU Hua, et al. Simulation of internal meshing gear pump based on central parameter method [J]. *Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2018, 46(9): 101-106. (in Chinese)
- [13] 吴晓明, 王小鹏, 马立瑞. 基于集中参数法内啮合齿轮泵 AMESim 模型的建模方法与仿真研究[J]. *液压与气动*, 2017, 41(7): 103-109.
WU Xiaoming, WANG Xiaopeng, MA Lirui. Modeling and simulation based on lumped parameter method by AMESim for internal gear pump[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2017, 41(7): 103-109. (in Chinese)
- [14] ZHOU Y, HAO S, HAO M. Design and performance analysis of a circular-arc gear pump operating at high pressure and high speed[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2016, 230(2): 189-205.
- [15] 陈鼎, 张杨, 叶绍干, 等. 配合间隙对直线共轭内啮合齿轮泵流场特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(2): 442-449.
CHEN Ding, ZHANG Yang, YE Shaogan, et al. Influence of mating clearance on flow field characteristics of linear conjugate internal gear pump [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(2): 442-449. (in Chinese)
- [16] 许文纲, 王志颖, 孙闯, 等. 变频调制下齿轮泵压力脉动机理[J]. *航空学报*, 2022, 43(9): 221-234.
XU Wen'gang, WANG Zhiying, SUN Chuang, et al. Pressure pulsation mechanism of gear pumps with frequency modulation [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(9): 221-234. (in Chinese)
- [17] 孙壮壮, 王林, 葛恒军, 等. 大型潜水贯流泵装置叶片区压力脉动试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(4): 155-160, 169.
SUN Zhuangzhuang, WANG Lin, GE Hengjun, et al. Experiment on pressure pulsation in impeller of large submersible tubular pump[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(4): 155-160, 169. (in Chinese)
- [18] 李彦军, 陈超, 裴吉, 等. 不同空化工况下轴流泵装置压力脉动试验[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(12): 158-164.
LI Yanjun, CHEN Chao, PEI Ji, et al. Experiment on pressure fluctuation of axial flow pump system under different cavitation conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(12): 158-164. (in Chinese)
- [19] 司国雷, 陈君辉, 陈川, 等. 转速对外啮合齿轮泵内部流动及脉动特性的影响[J]. *液压与气动*, 2023, 47(8): 34-40.
SI Guolei, CHEN Junhui, CHEN Chuan, et al. Influence of rotation speed on internal flow and pulsation characteristics of external meshing gear pumps[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2023, 47(8): 34-40. (in Chinese)
- [20] 林文华, 毛中宇, 李向阳, 等. 水泵水轮机泵工况轴向力特性分析与改善[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(6): 132-137.
LIN Wenhua, MAO Zhongyu, LI Xiangyang, et al. Analysis and improvement of axial force on pump-turbine in pump mode [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(6): 132-137. (in Chinese)
- [21] 俞亚新, 姜建雨, 金波, 等. 球形叶片液压泵流量特性[J]. *中国机械工程*, 2018, 29(8): 930.
YU Yaxin, JIANG Jianyu, JIN Bo, et al. Flow characteristics of spherical blade hydraulic pumps [J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(8): 930. (in Chinese)
- [22] 张自超, 李延频, 陈德新. 水泵水轮机压力脉动传播特性试验研究[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(7): 171-178.
ZHANG Zichao, LI Yanpin, CHEN Dexin. Experimental investigation on transmission characteristics of pressure fluctuation in pump-turbine [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(7): 171-178. (in Chinese)
- [23] 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. Review development of internal gear pumps [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2021, 45(10): 20-30. (in Chinese)
- [24] 张校文, 汤方平, 葛恒军, 等. 涉及临界工况点的贯流泵装置外特性与压力脉动试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(6): 184-191.
ZHANG Xiaowen, TANG Fangping, GE Hengjun, et al. Experiments on external characteristics and pressure pulsation of bulb tubular pump device involving critical operating points [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(6): 184-191. (in Chinese)
- [25] 叶绍干, 葛纪刚, 侯亮, 等. 基于遗传算法的轴向柱塞泵配流盘密封环结构多目标优化[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(1): 441-450.
YE Shaogan, GE Jigang, HOU Liang, et al. Multi-objective optimization of cylinder/valve-plate sealing ring in axial piston pump based on genetic algorithm [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(1): 441-450. (in Chinese)