

齿轮式机油泵齿形对流量特性的影响分析

Discussion on influence of gear tooth shape on flow characteristic in gear pump

王 文¹ 尹艳美¹ 贺尚红¹ 刘光明²

WANG Wen¹ YIN Yan-mei¹ HE Shang-hong¹ LIU Guang-ming²

(1. 长沙理工大学工程车辆安全性设计与可靠性技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114;

2. 湖南机油泵股份有限公司, 湖南 衡阳 421400)

(1. Hunan Province Key Laboratory of Safety Design and Reliability Technology for Engineering Vehicle,
Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China;

2. Hunan oil pump co., LTD, Hengyang, Hunan 421400, China)

摘要:建立了齿轮式机油泵不同齿形的齿轮模型,运用 pumplinx 进行了内流场仿真,分析了稳态流量和流量脉动的特性。研究表明:与直齿轮式机油泵比较,在低中转速时,其他齿形的齿轮式机油泵流量都低于直齿轮式机油泵的流量,但流量脉动有所降低,其中错位齿轮式机油泵降低的幅度最大,1 100 r/min 时降低了 27% 左右,2 700 r/min 时降低了 35% 左右。对直齿轮式机油泵的流量进行了实验测试,与仿真结果基本吻合,验证了齿轮式机油泵内流场模型的正确性,为机油泵的研发提供了技术支持。

关键词:齿轮式机油泵;齿形;仿真分析;流量;流量脉动

Abstract: The oil pump models with different gear tooth shapes were established and the internal flow field simulation were taken by utilizing Pumplinx. Then the characteristics of steady state flux and flow pulsation were analyzed. The results were as follows. Compared with the straight gear pump, the flow pulsation of other toothed gear pumps was much lower, although they flowed more slowly at the low and medium speeds. Especially the flow pulsation of dislocation gear pump was much lower than straight gear pump. Moreover, It decreased 27% at 1 100 r/min and 35% at 2 700 r/min comparing with the straight gear pump. Finally the straight gear pump flow was practically tested and the experimental results match the simulation very well. Therefore, it was proved that the internal flow field models were correct, and then this might technically support the oil pump development.

Keywords: gear pump; gear tooth shape; simulation analysis; flow; flow pulsation

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:51275059);湖南省自然科学基金项目资助(编号:14JJ7025A, 2015JJ4003)

作者简介:王文,男,长沙理工大学在读博士研究生。

通信作者:贺尚红(1965—),男,长沙理工大学教授,博士。

E-mail: heshanghong@126.com

收稿日期:2016-09-29

机油泵是机械润滑系统的主要部件,作用是把机油送到机械各摩擦部位,使机油在润滑路中循环,以保证机械得到良好的润滑。机油泵按结构形式可以分为齿轮式和转子式两类。齿轮式机油泵又分为内接齿轮式和外接齿轮式,一般把后者称为齿轮式机油泵。齿轮式机油泵是利用密封在壳体内的一对以上的相互啮合的齿轮而工作的机油泵。齿轮在啮合过程中,退出啮合的一侧,齿穴容积增大,形成局部真空,油液在大气压的作用下经吸油口进入吸油腔,形成吸油;进入啮合的一侧,齿穴容积减小,油液经压油口被挤压出去,形成排油^[1]。随着齿轮的不停的旋转,吸油腔和压油腔的体积产生周期性的变化,流量也产生周期性的变化,从而形成了油液的流量脉动。齿轮式机油泵由于自身的特性,结构简单,自吸能力强,对油液不敏感等特点,使其得到了广泛的应用。但其流量脉动大,引起压力脉动,从而产生较大的噪声,并伴随着齿轮式机油泵的发热和气蚀等现象,给其使用寿命和系统的稳定性带来较大的影响^[2-3]。因此,流量脉动大成为影响齿轮式机油泵进一步发展的一大因素。

齿轮式机油泵的工作原理和一般的齿轮泵相同,可以按照一般的齿轮泵进行分析。为解决流量脉动问题,吴百海等^[4]提出了一种分片式齿轮泵结构,即将直齿轮沿齿宽等分为二片、三片或多片,每片依次错开一个角度并构成独立容腔,从而降低流量脉动。周骥平等^[5-7]运用分片式齿轮泵的理论,对斜齿齿轮泵进行了研究,证明了在主要参数相同的情况下,斜齿齿轮泵的流量脉动小于直齿齿轮泵。黄玉萍等^[8]对多联齿轮泵的流量特性分析,得出结论:对于多联齿轮泵,齿数为单数,180°错位安装,流量脉动为普通的 1/4,脉动频率为普通的 2 倍。尚春民等^[9-10]针对外啮合分片错齿(错位)齿轮泵和斜齿齿轮泵的结构特性进行对比,发现错齿(错位)齿轮泵的流量脉动小于斜齿齿轮泵。张永祥等^[11-13]提出并验证了错相位叠加的齿轮泵能有效减小齿轮泵的流

量脉动。

通过以上的研究,可以发现错位齿轮泵与斜齿齿轮泵,斜齿齿轮泵与直齿齿轮泵理论流量脉动关系,但是缺少能验证流量脉动关系的实验、仿真。本研究拟结合分片式齿轮泵理论,运用流体分析软件 Pumplinx,对几种不同齿形的齿轮式机油泵流量特性进行分析,旨在能比较直观地得出各齿形齿轮式机油泵直接的流量脉动关系。

1 齿轮式机油泵流量特性理论分析

分片式结构的齿轮泵,可视为由不同个数的直齿轮转过一个角度而成。若将片数分为两片,就构成了错位齿轮泵;将片数分为无数片,则构成了斜齿齿轮泵和人字形齿轮泵,只是人字形齿轮泵在错开的角度方向上与斜齿齿轮泵有所区别。因为齿轮泵的流量脉动可以看成多个具有同一频率的相同波形,依次错开一定相位角迭加的结果。所以从理论上分析,错位齿轮泵、斜齿齿轮泵和人字形齿轮泵都能降低流量脉动。

分片式齿轮泵的流量可由一对大小完全相同的距基准面任意 x 的无限薄直齿轮啮合所排出的流量积分得到。根据文献[6],一对无限薄直齿轮啮合产生的瞬间流量为:

$$\frac{dv}{d\theta_1} = \frac{dx}{2} [(R_{a1}^2 - R_1^2) + u(R_{a1}^2 - R_2^2) - (1 + u)R_{b1}^2 (\theta_1 + \frac{x \tan\beta}{R_1^2})^2], \tag{1}$$

式中:

- θ_1 ——主动轮齿轮转角,°;
- x ——任意片齿轮到基准面的距离, $(0 \leq x \leq b)$;
- b ——齿宽,cm;
- R_{a1} ——主动轮齿顶圆半径,cm;
- R_1 ——主动轮齿轮节圆半径,cm;
- u ——齿数比,cm;
- R_{a2} ——从动轮齿顶圆半径,cm;
- R_2 ——从动轮齿轮节圆半径,cm;
- R_{b1} ——主动轮齿基圆半径,cm;
- β ——分度圆上的螺旋角,°。

在常见的齿轮泵中,一对齿轮的参数都是相同的,即 $R_1 = R_2 = R, R_{b1} = R_{b2} = R_b, R_{a1} = R_{a2} = R_a, \theta_1 = \theta_2 = \theta$ 因此,式(1)可化为:

$$\frac{dv}{d\theta} = dx [(R_a^2 - R^2) - R_b^2 (\theta + \frac{x \tan\beta}{R^2})^2]. \tag{2}$$

由式(2)可绘出一条条周期性波形曲线,将依次错开的无数条周期性波形迭加,便构成斜齿齿轮泵的输出排量。由于式(2)是一个以 $2n\pi/z$ (z 为齿数)为周期的连续性函数,所以只需考虑一个周期内的函数变化即可知道整个函数的特性,即输出流量的脉动特性。由文献[5]可知,在不计泄漏时,与直齿齿轮泵相比,斜齿齿轮泵流量脉动降低幅度为:

$$\Delta P = R_b^2 b^2 \pi \tan\beta / (2zR). \tag{3}$$

运用分片式结构的理论证明了斜齿齿轮泵能降低流量脉动。斜齿轮式机油泵与斜齿齿轮泵的原理相同,也能降低流量脉动。同理可证,人字形齿轮式机油泵、错位齿轮式机

油泵也能降低流量脉动。

2 不同齿形的齿轮式机油泵流量特性仿真

以直齿轮为例,齿轮式机油泵模型如图 1 所示,运用流体仿真软件 Pumplinx,对齿轮式机油泵的流场进行分析。根据现有的齿轮式机油泵模型,通过 UG 抽取三维流体模型,分别导出齿轮式机油泵进出口和齿轮的流体模型,保存为 STL 格式,如图 2 所示。

分别导入 Pumplinx 中,再根据各个部分的功能,划分为 inlet, gear 和 outlet 三部分,并提取壁面,把进油口 (inlet-inlet), 转子 (drive-gear, slave-gear), 出油口 (outlet-outlet), 有油液流动的壁面 (-mgi) 单独提取命名。然后把 gear 部分用 Pumplinx 自带的网格模板生成结构化动网格, inlet 和 outlet 部分生成笛卡尔网格,并设定参数如下:齿轮的端面间隙为 0.1 mm,径向间隙为 0.15 mm,转轴为 Z 轴,主动轮按顺时针方向旋转,如图 3 所示。

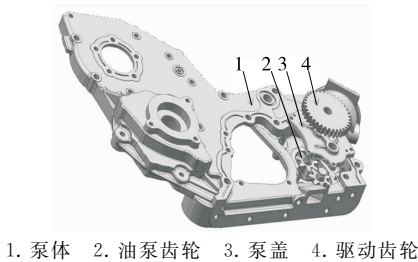


图 1 机油泵模型
Figure 1 Model of oil pump

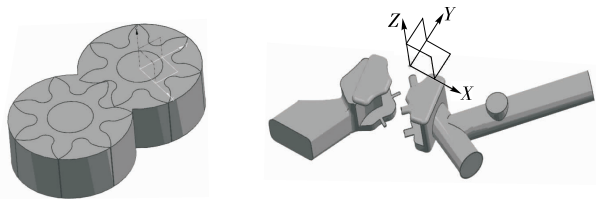


图 2 齿轮式机油泵内流体模型
Figure 2 Model of internal flow field in oil pump

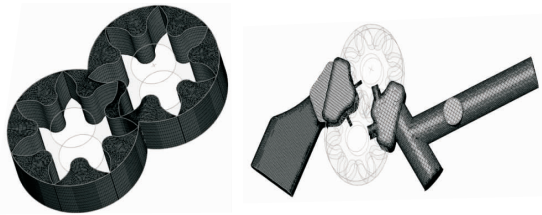


图 3 齿轮式机油泵内流场网格模型
Figure 3 Mesh model of internal flow field in oil pump

根据流体的流动情况,建立交界面,并设置参数:进口压力为 -0.8 kPa ,出口压力为 100 kPa ,油液型号为 $15\text{W}40$,其粘度为 $0.00808 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,密度为 808 kg/m^3 ,油温为 $80 \text{ }^\circ\text{C}$,最后运行,并记录计算结果。通过计算结果,可以得到直齿轮式机油泵的出口流量见表 1。

根据齿轮式机油泵的参数,分别选用不同齿形(直齿、斜齿、人字形齿、错位齿)的齿轮进行仿真分析,如图 4 所示,4 种齿轮除齿形外,其他参数都相同。

表 1 不同转速下流量的仿真结果

Table 1 Simulation results under different rotating speed

转速/ (r · min ⁻¹)	泵出压力/ kPa	CFD 分析流量/ (L · min ⁻¹)
1 100	100	12.191
2 000	100	22.956
2 700	100	31.113
4 000	100	45.496
5 400	100	59.803
6 000	100	66.472

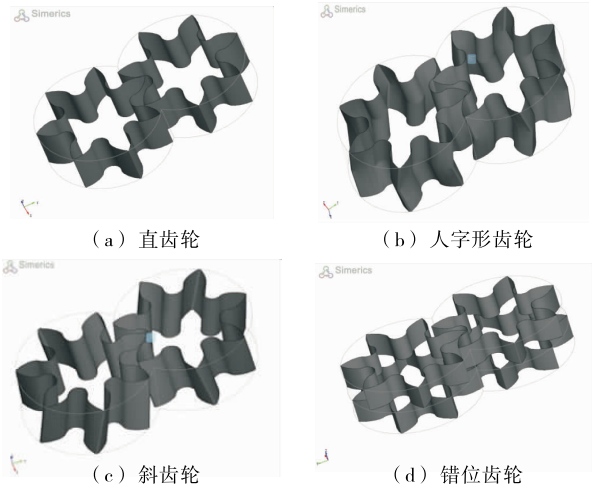


图 4 不同齿形的齿轮模型

Figure 4 Different models of gear tooth

通过 4 种齿形的 CFD 仿真分析,可以得到不同齿形的齿轮式机油泵的输出流量和流量脉动,见图 5、6。

从图 5、6 可以看出:与直齿轮式机油泵相比,斜齿轮式机油泵、人字形齿轮式机油泵、错位齿轮式机油泵的出口流量脉动如下:

(1) 在低中转速 1 100~2 700 r/min 时都有所降低,但是在低中转速下的流量脉动有明显的降低。其中以错位齿轮式机油泵的降低幅度最大,1 100 r/min 时降低了 27% 左右,2 700 r/min 时降低了 35% 左右。

(2) 在中高转速 4 000~5 400 r/min 时,斜齿轮式机油泵、人字形齿轮式机油泵的出口流量与直齿轮式机油泵相当,错位齿轮式机油泵的流量较低,但错位齿轮式机油泵的

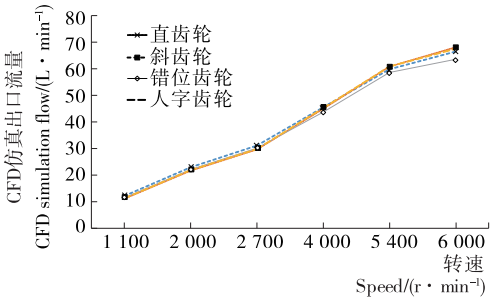


图 5 不同转速下的流量仿真结果

Figure 5 Flow simulation results under different speeds

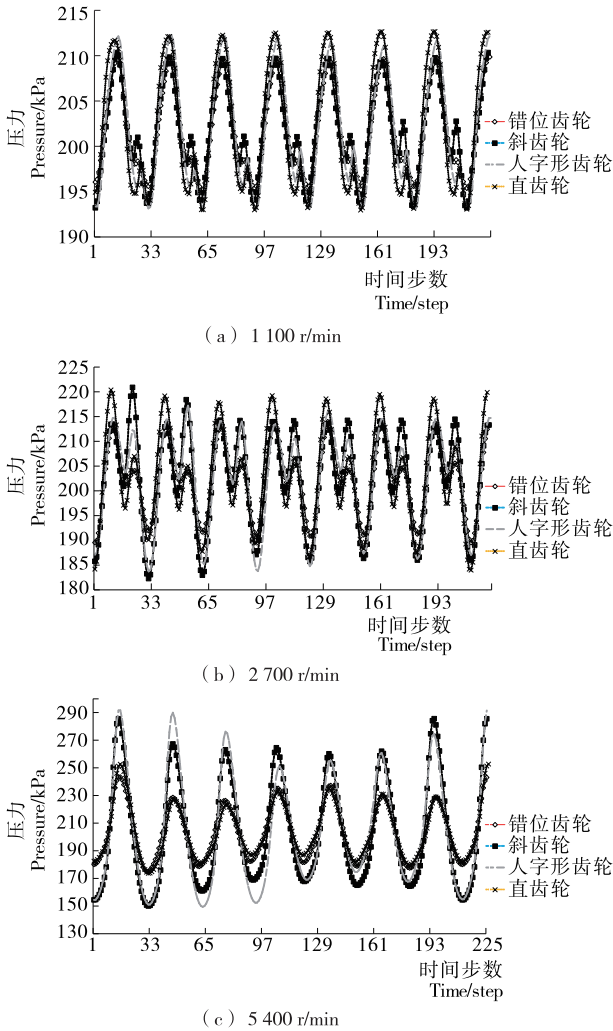


图 6 不同转速下不同齿形的压力脉动对比图

Figure 6 Pressure Pulsation comparison chart of different tooth at different speeds

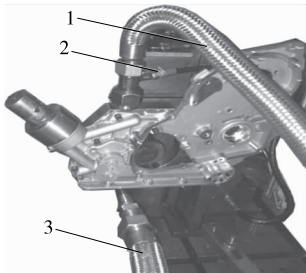
流量脉动与直齿轮式机油泵相当,脉动幅度比其他齿形的齿轮式机油泵小。

3 齿轮式机油泵实验

实验是在湖南机油泵股份有限公司的机油泵噪声实验室进行的,该实验室拥有国家一流的实验中心。由于不同齿形的机油泵还处于理论研究的状态,目前成型的产品只有直齿轮泵,因此就直齿轮式机油泵的出口流量进行了实验,从侧面对 CFD 分析的结果进行验证。

实验台以工业计算机作为主控单元,实时监控测试过程。设置机油泵的转速、齿数、油温、泵出压力等,系统自动采集机油泵的实际转速、供油量、机油泵的进出口压力、进出口温度、容积效率以及总效率等测试数据,并进行信号分析处理,然后根据用户需求绘制测试曲线。实验台如图 7 所示,通过实验,得到不同转速下的流量值,见表 2、图 8。

从表 2 和图 8 可以看出:实验流量和 CFD 仿真分析流量的误差在 5% 以内,实验流量与仿真流量基本吻合,证明了用 pumplinx 对机油泵进行分析可以得到具有参考意义的数据,可以为机油泵的研发提供实验依据与技术支持。



1. 出口 2. 压力传感器 3. 进油口
图 7 齿轮式机油泵实验台
Figure 7 Experiment of the oil pump

表 2 实验流量与仿真流量值比较

Table 2 The flow value of experiment and simulation				
转速/ (r · min ⁻¹)	泵出压 力/kPa	实验流量/ (L · min ⁻¹)	CFD 分析流量/ (L · min ⁻¹)	误差/ %
1 100	100	12.798	12.191 49	-4.97
2 000	100	23.598	22.956 03	-2.80
2 700	100	32.298	31.112 70	-3.81
4 000	100	46.552	45.495 70	-2.32
5 400	100	58.254	59.803 00	2.59
6 000	100	63.264	66.472 17	4.83

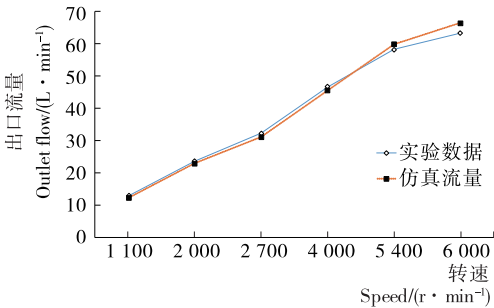


图 8 实验流量与仿真流量曲线
Figure 8 Experiment and simulation of flow curves

4 结论

通过对不同齿形的齿轮式机油泵的 CFD 分析,并对直齿轮式机油泵进行了实验,得到如下结论:

(1) 与直齿轮式机油泵相比,在 1 100~2 700 r/min 时,其他齿形的机油泵出口流量都有所降低,但降低的幅度不大。中高转速 4 000~5 400 r/min 时,流量基本相同,错位齿轮式机油泵的流量较低。

(2) 实验测得的流量与 CFD 分析的流量误差在 5% 以内,基本吻合,证明了 CFD 仿真能比较真实的模拟机油泵的工作情况,为机油泵的研发提供了依据。

(3) 在降低流量脉动方面,错位齿轮式机油泵能有效的降低流量脉动,1 100 r/min 时降低了 27% 左右,2 700 r/min 时降低了 35% 左右,5 400 r/min 时与直齿轮式机油泵一样。所以在中低转速时,错位齿轮式机油泵的流量脉动降低幅度大,效果明显。

(4) 该实验和仿真分析的结论可以为机油泵的研发以及优化提供了理论基础和技术支持。不同齿形的齿轮式机油泵各优化参数还需进一步研究。

参考文献

[1] 熊小艳. 同步齿轮泵的优化设计及基础理论研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2009: 8-9.

[2] LIU Qian. Study on instantaneous flow and pulsation characteristic of the external gear pump[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2013, 37(6): 17-21.

[3] LUAN Zhen-hui. Research on synchronous gear pump[J]. Journal of Coal Science Engineering, 2010, 16(4): 429-433.

[4] 吴百海, 张扬慰, 虞秀敏. 小脉动齿轮泵的理论 and 结构探讨[J]. 机床与液压, 1988, 16(6): 14-20.

[5] 周骥平, 姜铭, 李益民, 等. 斜齿齿轮泵小脉动输出特性[J]. 机械工程学报, 2000(12): 18-20.

[6] 赵亮, 王东屏, 任喜岩. 斜齿齿轮泵流量脉动特性分析[J]. 大连铁道学院学报, 2001, 22(4): 25-28.

[7] 张会霞. 双联斜齿泵流量脉动特性分析[J]. 机床与液压, 2011, 39(10): 80-81, 84.

[8] 黄玉萍, 李宪华, 张军. 多联齿轮泵流量特性的仿真研究[J]. 煤矿机械, 2004(10): 30-31.

[9] 尚春民, 范景峰, 张心明. 两种齿轮泵脉动特性对比分析[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2004, 27(3): 41-43.

[10] 刘玉兰, 刘忠朝. 低脉动低噪音齿轮泵的研究[J]. 西安矿业学院学报, 1990, 10(2): 85-92, 74.

[11] 张永祥, 金健. 齿轮泵的瞬时流量及流量脉动的抑制[J]. 液压与气动, 2015(3): 46-49, 31.

[12] HASSAN Abashar Babikir Babikir(阿巴沙). 减小外啮合齿轮泵流量脉动的措施研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013: 59-63.

[13] 邹洪峰, 贾柱. 齿轮泵的流量脉动机理分析与设计[J]. 机械工程师, 2010(3): 47-48.

(上接第 54 页)

[4] 李贞子, 杨富民, 杨具田, 等. 不同月龄‘兰州大尾羊’肉营养成分分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2011(6): 24-28.

[5] 李贞子, 杨具田, 宋巧, 等. 不同性别及部位的兰州大尾羊肉食用品质[J]. 食品工业科技, 2014, 35(17): 24-28.

[6] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法: ROAV 法[J]. 食品科学, 2008, 29(7): 370-374.

[7] 孙宝国. 食用调香术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 25-32, 123.

[8] 林翔云. 香料香精辞典[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 97, 442.

[9] 乔发东, 马长伟. 宣威火腿加工过程中挥发性风味化合物分析[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(3): 24-29.

[10] FRAUENDORFER F, SCHIEBERLE P. Identification of the key aroma compounds in cocoa powder based on molecular sensory correlations[J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2006(54): 5 521-5 529.

[11] FORSS D A. Odor and flavor compounds from lipids [J]. Progress in the Chemistry of Fats & Other Lipids, 1972, 13(4): 181-258.

[12] GARCIA C, BERDAGUE J J, ANTEQUERA T. Volatile compounds of dry-cured berian ham[J]. Food Chemistry, 1991(41): 23-32.

[13] 陈鑫炳, 范素琴. 羊肉风味的研究[J]. 肉类工业, 2010(9): 36-39.