

1-4-2019

Modeling and Simulating on Flow Characters of Axial Piston Pump with Concial Cylinder Block Considering the Hydraulic Oil Containing Air

Donglin Tang

Southwest Petroleum University Institute of Electrical and Mechanical Engineering, Chengdu 610500, China;

Wu Fan

Southwest Petroleum University Institute of Electrical and Mechanical Engineering, Chengdu 610500, China;

Zhiquan Ma

Southwest Petroleum University Institute of Electrical and Mechanical Engineering, Chengdu 610500, China;

Zhichun Zeng

Southwest Petroleum University Institute of Electrical and Mechanical Engineering, Chengdu 610500, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling and Simulating on Flow Characters of Axial Piston Pump with Concial Cylinder Block Considering the Hydraulic Oil Containing Air

Abstract

Abstract: Aiming at the problem that air bubbles mix into hydraulic oil would affect fluid properties, and then would affect the flow characters of axial piston pump with concial cylinder block, according to the theoretical ananlysis, *the generic submodel of the fluid properties and single piston/swash plate mechanism were developed by AMESet, and the simulation result verified the applicability of the fluid properties generic submodel.* The model of whole pistion pump was developed by AMESim. *The influences of air content in hydraulic oil and pistion dip angle on the flow characters of pistion pump were studied.* The results show that with the increase of air content inhydraulic oil, the average flow will decrease, the efficiency of pump will decrease, and the flow pulsation amplitude and rate will increase. With the increase of piston dip angle, the average flow will increase, the flow pulsation amplitude and rate will decrease. What's more, the variations are both almost linear relationship.

Keywords

axial piston pump with concial cylinder, air content in hydraulic oil, flow characters, AMESet, AMESim

Recommended Citation

Tang Donglin, Wu Fan, Ma Zhiquan, Zeng Zhichun. Modeling and Simulating on Flow Characters of Axial Piston Pump with Concial Cylinder Block Considering the Hydraulic Oil Containing Air[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(10): 3995-4001.

考虑油液含气影响的轴向斜柱塞泵建模与仿真

唐东林, 吴凡, 马志全, 曾志春

(西南石油大学机电工程学院, 成都 610500)

摘要: 针对油液含气影响油液流体属性, 进而影响轴向斜柱塞泵流量特性的问题, 在理论分析的基础上, 利用 AMESet 自定义了流体属性、柱塞/斜盘作用通用子模型, 仿真实验验证了流体属性通用子模型的适用性, 并利用 AMESim 建立整泵仿真模型。仿真研究了不同油液含气量和柱塞倾角对斜柱塞泵流量特性的影响, 结果表明: 随着油液含气量的增大, 泵出口平均流量减小, 容积效率减小, 流量脉动幅值和脉动率增大; 随着柱塞倾角的增大, 泵出口平均流量增大, 流量脉动幅值和脉动率减小; 且各变化均大致呈线性关系。

关键词: 斜柱塞泵; 油液含气量; 流量特性; AMESet; AMESim

中图分类号: TH137.51

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 10-3995-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201810047

Modeling and Simulating on Flow Characters of Axial Piston Pump with Concial Cylinder Block Considering the Hydraulic Oil Containing Air

Tang Donglin, Wu Fan, Ma Zhiquan, Zeng Zhichun

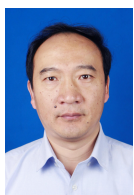
(Southwest Petroleum University Institute of Electrical and Mechanical Engineering, Chengdu 610500, China)

Abstract: Aiming at the problem that air bubbles mix into hydraulic oil would affect fluid properties, and then would affect the flow characters of axial piston pump with concial cylinder block, according to the theoretical ananlysis, the generic submodel of the fluid properties and single piston/swash plate mechanism were developed by AMESet, and the simulation result verified the applicability of the fluid properties generic submodel. The model of whole piston pump was developed by AMESim. The influences of air content in hydraulic oil and piston dip angle on the flow characters of piston pump were studied. The results show that with the increase of air content inhydraulic oil, the average flow will decrease, the efficiency of pump will decrease, and the flow pulsation amplitude and rate will increase. With the increase of piston dip angle, the average flow will increase, the flow pulsation amplitude and rate will decrease. What's more, the variations are both almost linear relationship.

Keywords: axial piston pump with concial cylinder; air content in hydraulic oil; flow characters; AMESet; AMESim

引言

液压泵是液压系统的动力元件, 在液压系统中



收稿日期: 2016-09-08 修回日期: 2016-12-05;
作者简介: 唐东林(1971-), 男, 四川成都, 博士, 教授, 硕导, 研究方向为机械电子工程; 吴凡(1991-), 男, 四川成都, 硕士, 研究方向为液压系统与元件; 马志全(1990-), 男, 河北唐山, 硕士, 研究方向为疲劳寿命预测及软件开发。

占据重要地位。在各类液压泵中, 斜盘式轴向柱塞泵因具有额定压力高、效率高、体积小且寿命长等优点, 在工业液压、行走液压系统中得到了广泛应用。由于其工作原理的影响, 轴向柱塞泵出口流量总具有脉动特性, 其导致的压力脉动是轴向柱塞泵流体噪声的主要来源^[1-2]。

国内外学者针对轴向柱塞泵流量特性进行了

大量研究。翟江^[3]、Casoli 和 Vacca 等^[4-5]利用集中参数法,建立了轴向柱塞泵数学模型,对其流量特性进行了数值计算,其中翟江是对水压轴向柱塞泵进行分析,考虑了水含气导致的流体属性变化,而 Casoli 和 Vacca 则是考虑了不同因素对液压油流体属性的影响。也有学者分别使用 CFD、SimulationX 和 AMESim 对轴向柱塞泵流量特性进行了分析^[6-9],其中马吉恩等^[6-7]利用 CFD 分析了可压缩流体和不可压缩流体两种情况下泵的流量特性。但上述研究均未考虑油液不同油液含气量对其流体属性的影响,也未分析柱塞倾角对流量特性的影响。

当柱塞倾角不为零,为斜柱塞泵,目前关于斜柱塞泵流量特性的研究较少。李磊等^[10]利用集中参数法,考虑柱塞倾角,建立了斜柱塞泵数学模型,分析了斜柱塞泵的流量脉动特性;童水光等^[11]利用数值计算和虚拟样机技术,建立了斜柱塞泵的数学和仿真模型,分析了流量脉动特性等。

综上所述,国内外学者主要采用数值计算和仿真研究方法,建立不同型号柱塞泵的数学和仿真模型,研究其流量特性。但存在未分析油液含气量影响、仿真方法所建模型通用性较弱的不足。因此,本文综合考虑油液含气对流体属性的影响、柱塞倾角对斜柱塞泵柱塞运动和受力的影响,通过推导数学模型,并利用 AMESet 二次开发工具,建立了油液流体属性和斜柱塞泵柱塞/斜盘作用通用仿真子模型,研究了不同油液含气量和柱塞倾角对泵流量特性的影响,对于后续分析泵流体噪声有重要的理论价值。

1 含气油液的流体属性模型

1.1 流体属性数学模型

液压油液不可避免的含有一定量的气体,随着工作压力的变化,气体在油液中的变化过程会影响其流体属性。通常认为 $p > p_s$ 时气体全部溶解, $p_{VL} < p < p_s$ 时出现气泡现象,气体部分释放,

$p_{VL} < p < p_{VH}$ 时出现气穴现象,产生油液蒸汽, $p < p_{VL}$ 时液体全部转换为气体^[4]。根据气体在油液中随压力的变化过程,基于油液属性定义和质量守恒定律,推导得到含气油液有效体积弹性模量 B 和密度 ρ 的协调关系及数学模型:

$$B = \rho \left(\frac{dp}{d\rho} \right) \quad (1)$$

$$B = \frac{c_1 \frac{(1-f_{v-m})}{\rho_l} + c_1 \left(B_l \frac{df_{v-m}}{dp} + f_{v-m} - 1 \right)}{\rho_l B_l} \rightarrow \leftarrow \frac{c_2 \frac{f_{g-v}}{p} + c_3 \frac{f_{v-m}}{p}}{c_2 \left(f_{g-v} - p \frac{df_{g-v}}{dp} \right) + c_3 \left(f_{v-m} - p \frac{df_{v-m}}{dp} \right)} \quad (2)$$

$$c_1 = (1-x)\rho_{l0}, c_2 = xp_a, c_3 = (1-x)\rho_{l0}/\rho_{v0}p_{VH} \quad (3)$$

式中: x 为油液含气量体积百分比; ρ_{g0} 、 ρ_{l0} 分别为标准条件气体和纯油液的密度; ρ_{v0} 为油液蒸汽在饱和蒸汽压下的密度; p 为工作压力; p_a 为大气压力; p_s 为空气分离压; p_{VL} 、 p_{VH} 分别为低、高饱和蒸汽压力; B_l 为纯油液体积弹性模量; f_{g-v} 为未溶解气体体积分数; f_{v-m} 为油液蒸汽质量分数。

1.2 流体属性通用子模型二次开发

在 AMESim 流体属性 Advanced 子模型中,认为气体在油液中随压力的变化过程一直处于平衡状态,即无论气体释放、溶解或汽化等均处于平衡状态。然而在轴向柱塞泵工作过程中,柱塞腔内的液压油液迅速压缩和膨胀,柱塞腔内的液压力亦迅速高低转换,而且无论气体释放或溶解等过程,均需要一定时间,不能瞬间完成。因此对于柱塞泵流量特性研究,若再认为该变化过程处于平衡状态,则其结果是不够准确的。所以,本文认为该变化过程是一个非平衡过程,可依据文献^[12]所研究含气油液内气相组分动态传输过程,对式(2)进行求解,并进行流体属性通用子模型二次开发。其中气相组分动态传输方程给出了气相的质量分数分别为 f_{g-m}

和 f_{v-m} , 又因为未溶解气体密度等于已溶解气体密度且已知, 因此可以通过 f_{g-m} 求得 f_{g-v} , 最终求得有效体积弹性模量。

流体属性计算主要参数见表 1, 表中压力以绝对压力表示, 但需要注意的是 AMESim 中压力为相对压力。

表 1 流体属性计算的主要参数

Tab. 1 Main parameters for calculating fluid properties

参数	取值	参数	取值
B_l	17 000 bar	x	1~10%
ρ_{l0}	850 kg/m ³	p_s	85 bar
ρ_{g0}	1.2 kg/m ³	p_{VH}	0.5 bar
ρ_{v0}	10.615 8 kg/m ³	p_{VL}	0.4 bar
T	40℃	p_a	1.01325 bar

流体属性通用子模型的二次开发是基于 AMESim 二次开发平台 AMESet 进行的, 用户可以通过 AMESet 平台, 根据自身需要, 在理论分析的基础上, 通过对子模型固有属性或运行机理进行 C 语言编程, 以实现用户子模型的定制。二次开发子模型可以分配到相关元件库中, 能在 AMESim 中实现通用^[13]。本节主要对流体属性进行 C 语言编程, 以实现流体属性按照用户自定义函数进行计算的功能。为验证流体属性通用子模型的适用性, 在 AMESim 中建立流体属性计算仿真模型, 仿真中取含气量 x 为 1%, 其它参数如表 1 所示。取上述相同参数, 代入文献^[14]中理论模型进行计算, 并将仿真与理论模型结果进行对比, 如图 1 所示。

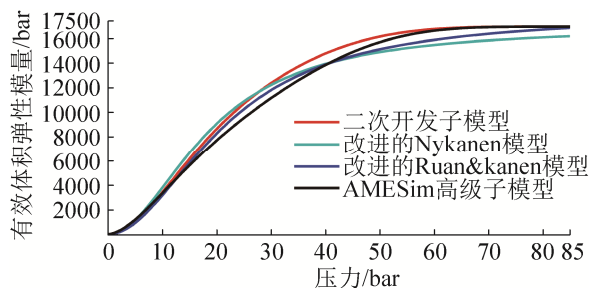


图 1 有效体积弹性模量计算结果

Fig.1 Calculation results of effective bulk modulus

从图 1 可以看出, 二次开发子模型计算结果与

文献[14]中两种改进模型和 AMESim 子模型计算结果吻合良好, 最大误差不超过 5.8%。对比二次开发和 AMESim 子模型可以看出: 在压力低于 p_s 的部分区间内, 二次开发子模型的计算结果略大于 AMESim 子模型的计算结果, 这是因为 AMESim 子模型认为当压力低于 p_s 时, 无论气体释放、溶解或汽化等瞬间完成, 均处于平衡状态, 事实上, 该过程处于非平衡状态, AMESim 子模型过多地预测了油液的含气量, 造成计算结果小于二次开发子模型适用于含气油液流体属性有关的仿真研究, 且由于考虑气体在油液中随压力的变化为动态过程, 因此该二次开发子模型更加适用于轴向柱塞泵流动特性的仿真研究。

2 斜柱塞泵流量特性数学模型

2.1 柱塞运动分析

单个柱塞运动使柱塞腔内压力流量发生变化, 多个柱塞运动耦合作用导致泵出口压力流量脉动。因此要建立准确的斜柱塞泵流量特性数学模型, 需要对单个柱塞运动进行分析。图 2 为柱塞运动和受力分析示意图^[6], 其中(a)为各部件结构关系图, (b)为各部件运动轨迹关系图, (c)是运动轨迹局部放大图。图中 β 为斜盘倾角, α 为柱塞倾角, φ 为柱塞角位移, $\varphi = \omega t$, ω 为主轴角速度, R_0 为柱塞中心线在缸体内的分度圆半径。

以如图所示位置为泵主轴运动初始位置, 推导出得到柱塞沿其中心线方向相对于缸体的位移和速度方程为:

$$S_P = \frac{R_0 \tan \beta (1 - \cos \varphi) (1 + \tan \beta \tan \alpha)}{\cos \alpha (1 - \tan \beta \tan \alpha) (1 - \cos \varphi \tan \beta \tan \alpha)} \quad (4)$$

$$v_P = \frac{R_0 \omega \sin \varphi \tan \beta (1 + \tan \beta \tan \alpha)}{\cos \alpha (1 - \cos \varphi \tan \beta \tan \alpha)^2} \quad (5)$$

根据图 2 几何关系及式(4), 可求得柱塞位移方程在 X、Y、Z 三个方向的分量 S_X 、 S_Y 、 S_Z , 为分析柱塞和斜盘之间的作用力矩提供理论依据。又当柱塞倾角 $\alpha=0$ 时, 可求得直柱塞泵柱塞运动方

程, 可以认为直柱塞泵是斜柱塞泵的特殊型式。

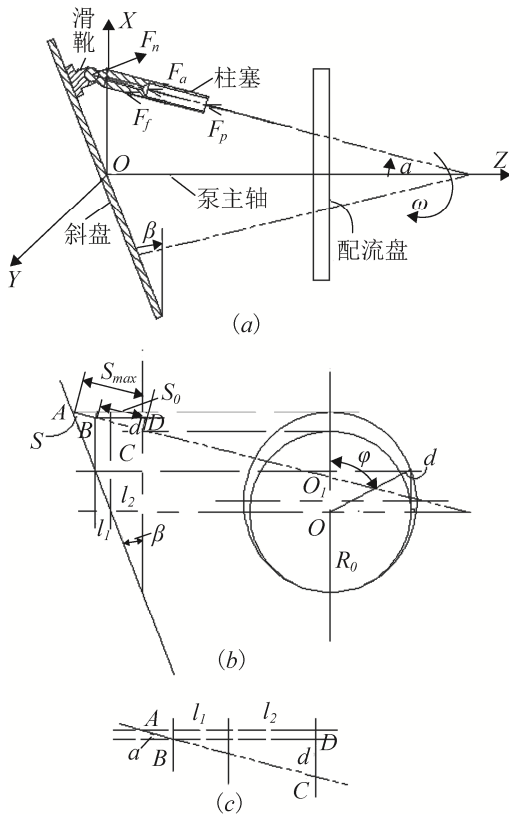


图2 柱塞运动和受力分析简化示意图^[6]

Fig. 2 Schematic diagram of piston move and mechanical analysis

2.2 柱塞和斜盘相互作用力分析

在柱塞运动过程中, 柱塞通过滑靴产生垂直于斜盘的力, 反之斜盘也对柱塞有力的作用, 推动柱塞完成吸排油行程。因此需对柱塞和斜盘之间作用力及力矩进行分析。忽略其它对柱塞受力影响小且难以计算的力, 对于单个柱塞而言, 还受到柱塞腔液压油的作用力 F_p 、柱塞的惯性力 F_a 、缸体对柱塞的轴向摩擦力 F_f 以及斜盘通过滑靴产生对柱塞滑靴组的作用反力 F_n , 因此有:

$$F = F_p + F_a + F_f \quad (6)$$

$$F_n = F / \cos(\alpha + \beta) \quad (7)$$

式中: R_p 为柱塞半径, P 为柱塞腔油液压力。再由图2几何关系, 可求得柱塞所受作用力沿着各坐标轴方向的分力:

$$\left. \begin{aligned} F_X &= F \cdot \sin \alpha \cdot \cos \varphi \\ F_Y &= F \cdot \sin \alpha \cdot \sin \varphi \\ F_Z &= -F \cdot \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

则单个柱塞对斜盘产生的作用力矩为:

$$\left. \begin{aligned} M_X &= F_Z S_Y - F_Y S_Z \\ M_Y &= F_Z S_X - F_X S_Z \\ M_Z &= F_Y S_X - F_X S_Y \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

3 斜柱塞泵流量特性仿真模型

3.1 柱塞/斜盘作用子模型二次开发

柱塞/斜盘作用子模型主要用于分析柱塞和斜盘之间的相互作用, 包括作用力及力矩、柱塞速度和位移等。在 AMESim 标准库中, 有轴向直柱塞泵的柱塞/斜盘作用通用子模型, 但没有轴向斜柱塞泵柱塞/斜盘作用通用子模型。因此, 基于 2.1 和 2.2 所推导斜柱塞泵运动及受力数学方程, 利用 AMESet 对斜柱塞泵的柱塞/斜盘作用子模型进行了二次开发, 将柱塞倾角集成到柱塞/斜盘子模型中。斜柱塞泵柱塞/斜盘作用子模型为 USER_DEFINED_SUBMODEL, 如图3所示。直接调用该子模型, 改变相关参数, 便可以在 AMESim 平台上实现对各型号轴向斜柱塞泵的仿真分析。

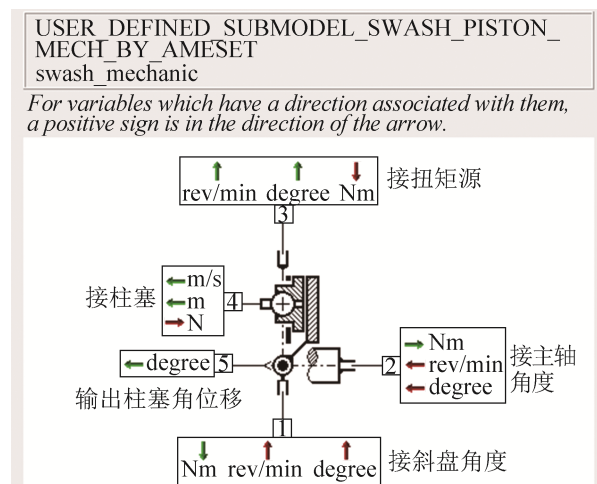


图3 斜柱塞/斜盘作用子模型

Fig. 3 Submodel of swash piston

3.2 整泵流量特性仿真模型

整泵流量特性仿真模型采用 AMESim 建立,

如图 4 所示。为提高整泵仿真模型的直观性, 对相关模型进行超级元件封装处理, 其中配流盘模型采用标准库中的元件图标, 单个柱塞模型单独封装, 采用柱塞实物作为元件图标。液压油液子模型选择前文流体属性二次开发通用子模型。

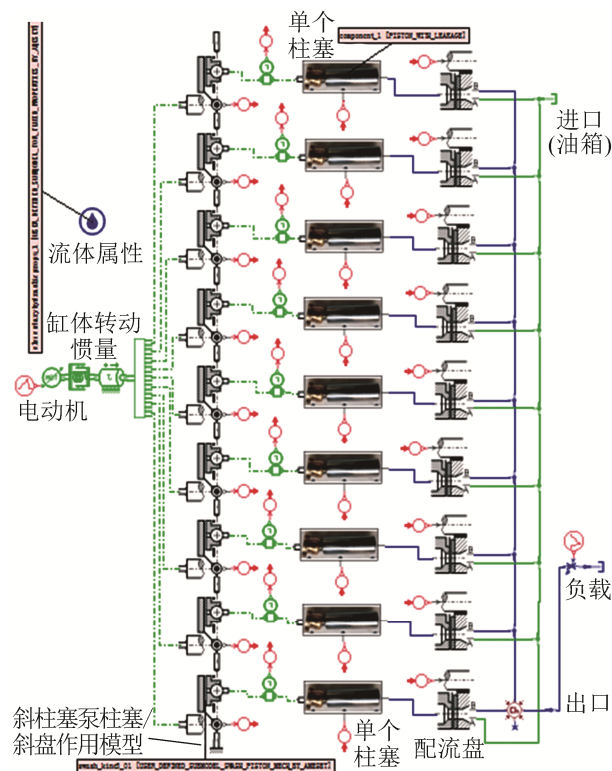


图 4 整泵仿真模型

Fig. 4 The whole pump simulation model

4 仿真结果与分析

本文以 A4VSO71 型斜盘式轴向斜柱塞泵为研究对象, 其额定压力为 350 bar, 排量 71 mL/r。主要结构参数: $\alpha=5^\circ$, $\beta=15^\circ$, $R_0=39.5$ mm, $R_p=11$ mm^[15]。

4.1 油液含气量对流量特性的影响

为研究油液油液含气量对泵出口流量特性的影响, 在 $\beta=15^\circ$, $\alpha=5^\circ$, 转速 $n=1\ 500$ r/min、进口压力为 0 bar 工况下, 分别选择不考虑油液压缩性和 $x=1\%$ 、 3% 、 5% 、 7% 进行仿真分析, 所得结果如图 5 和表 2 所示。其中不考虑油液压缩性时出口平均流量为 104.54 L/min、脉动幅值为 5.89 L/min、

脉动率为 5.63%, 可以看出: 与考虑油液压缩性的流量脉动率相比, 不考虑油液压缩性的流量脉动率小一个数量级。这与文献^[7]利用 CFD 方法得到的结论是一致的。当考虑油液压缩性时: 随着油液含气量的增大, 泵容积效率减小, 出口平均流量减小, 流量脉动幅值和脉动率增大。因为随着油液含气量的增大, 油液有效体积弹性模量在低于空气分离压的范围内减小, 压缩性增大, 压缩性效应使泵出口流量脉动增大^{[6][7]}。

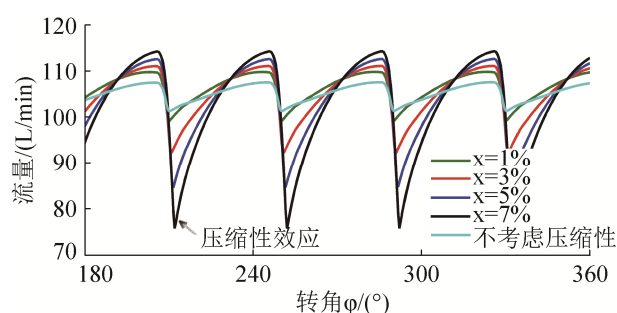


图 5 不同油液含气量对流量脉动的影响

Fig. 5 Effect of air content in hydraulic oil on the flow pulsation

表 2 不同油液含气量流量脉动计算结果

Tab. 2 Results of flow pulsation of pump under different air content

油液含气量 $x(\%)$	1	3	5	7
平均流量(L/min)	104.52	102.025	99.175	96.49
脉动幅值(L/min)	10.49	18.47	27.11	35.82
脉动率(%)	10.04	18.10	27.29	46.79
容积效率(%)	98.14	95.79	93.12	90.60

从表 2 可以看出, 脉动率和容积效率随油液含气量的变化均大致呈线性关系, 含气量增大 2%, 容积容积效率约下降 2.4%。而流量脉动率受含气量影响更明显, 当含气量为 7% 时, 脉动率达到 46.79%。由流量脉动导致的压力脉动, 将会造成严重的流体噪声, 从而引起泵的振动, 影响泵的工作稳定性和可靠性。因此, 在液压传动领域, 要注意防止液压油混入空气, 同时在泵使用前, 也必须对泵进行“灌注”。

4.2 柱塞倾角对流量特性的影响

为研究柱塞倾角对泵出口流量脉动的影响, R_0 不变的条件下, 在 $\beta=15^\circ$, $x=3\%$, 与前述相同工况下, 分别取 $\alpha=0^\circ$ 、 3° 、 5° 、 7° 、 9° 进行仿真分析^[11], 所得结果如图 6 所示, 具体计算结果见表 2 和表 3。可以看出: 当柱塞倾角 $\alpha=0^\circ$ 时, 为直柱塞泵, 其出口平均流量为 98.195 L/min、脉动幅值为 20.37 L/min、脉动率为 20.74%。当 $\alpha>0^\circ$ 时, 为斜柱塞泵, 其平均流量大于直柱塞泵, 脉动幅值和脉动率小于直柱塞泵。对于斜柱塞泵而言: 随着柱塞倾角的增大, 出口平均流量增大, 这是因为柱塞倾角越大, 其柱塞行程越大, 有助于泵出口流量的增大。其次, 随着柱塞倾角的增大, 出口流量脉动幅值和脉动率减小。

从表 3 可以看出: 出口平均流量和脉动率随柱塞倾角的变化均呈线性关系, 柱塞倾角增大 2° , 平均流量约增大 1.6%, 流量脉动率约减小 1%。柱塞倾角增大, 既有利于增大泵出口流量, 又有利于减小流量脉动率。因此, 在斜盘式轴向斜柱塞泵的设计过程中, 可以考虑适当增大柱塞倾角。需指出的是: 样本中仅给出 $\alpha=5^\circ$ 时的实测流量, 因此不能具体分析柱塞倾角对容积效率的影响。

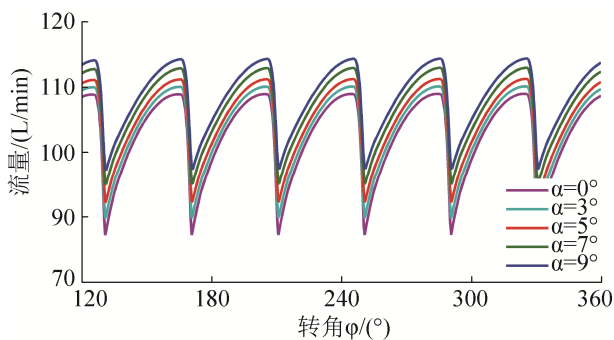


图 6 不同柱塞倾角对流量脉动的影响

Fig. 6 Effect of piston dip angle on the flow pulsation

表 3 不同柱塞倾角流量脉动计算结果

Tab. 3 Results of flow pulsation under different piston angle

柱塞倾角 $\alpha/^\circ$	0	3	7	9
平均流量/(L/min)	98.195	100.445	103.945	105.78
脉动幅值/(L/min)	20.37	19.17	17.85	16.94
脉动率/%	20.74	19.08	17.17	16.01

5 结论

(1) 基于 AMESet 二次开发的流体属性子模型, 其仿真结果与相关理论模型和 AMESim 高级子模型吻合较好, 适用于轴向斜柱塞泵流量特性的仿真研究, 对于其他型式柱塞泵仿真研究亦具有通用性。

(2) 基于 AMESet 二次开发的柱塞/斜盘作用通用子模型, 通过将柱塞倾角集成到子模型中, 拓宽了该子模型的适用范围。

(3) 随着油液含气量的增大, 泵出口平均流量减小, 泵容积效率减小, 流量脉动幅值和脉动率增大, 大致呈线性变化关系。

(4) 随着柱塞倾角的增大, 泵出口平均流量增大, 流量脉动幅值和脉动率减小, 亦呈线性变化关系。

参考文献:

- [1] Ivantysyn, J, Ivantysynova, M. Hydrostatic Pumps and Motors [M]. New Delhi, India: Academia Books International, 2001: 129-133.
- [2] 杨华勇, 马吉恩, 徐兵. 轴向柱塞泵流体噪声的研究现状 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 71-79.
Yang Huayong, Ma Jien, Xu Bing. Current research on the study of axial piston pump fluid-borne noise [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(8): 71-79.
- [3] 翟江, 周华. 流体属性可变的水压轴向柱塞泵压力流量模型 [J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 171-176.
Zhai Jiang, Zhou Hua. Pressure and flow characteristic modeling of water hydraulic axial piston pump based on variable fluid properties [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 171-176.
- [4] Casoli P, Vacca A, Franzoni G, et al. Modelling of fluid properties in hydraulic positive displacement machines [J]. Simulation Modelling Practice & Theory (S1569-190X), 2006, 14(8): 1059-1072.
- [5] Vacca A. A Numerical Approach for the Evaluation of the Effects of Air Release and Vapour Cavitation on Effective Flow Rate of Axial Piston Machines [J]. International Journal of Fluid Power (S1439-9776), 2010, 11(1): 33-45.
- [6] 马吉恩. 轴向柱塞泵流量脉动及配流盘优化设计研究

- [D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- Ma Jien. Study on flow ripple and valve plate optimization of axialpiston pump [D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2009.
- [7] Ma Jien, Xu Bing, Zhang B, et al. Flow Ripple of Axial Piston Pump with Computational Fluid Dynamic Simulation Using Compressible Hydraulic Oil [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(1): 45-52.
- [8] 牛雪梅, 冀鹏飞, 杨阳, 等. 双供油轴向柱塞泵压力流量的脉动特性 [J]. 振动: 测试与诊断, 2012, 32(1): 151-156.
- Niu Xuemei, Ji Pengfei, Yang Yang, et al. Pressure and flow pulsation characteristics of dual discharging axial piston pump [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(1): 151-156.
- [9] 潘阳, 李毅波, 黄明辉, 等. 双联轴向柱塞泵配流盘优化与流量脉动特性分析 [J]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 391-398.
- Pan Yang, Li Yibo, Huang Minghui, et al. Valve Plate Improvement and Flow Ripple Characteristic Analysis for Double Compound Axial Piston Pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 391-398.
- [10] 李磊, 许明恒, 于兰英. 轴向斜柱塞泵流量脉动理论建模与仿真研究 [J]. 机械科学与技术, 2011, 30(10): 1641-1644.
- Li Lei, Xu Mingheng, Yu Lanying. Modeling and simulation of the discharge flow ripple of axial piston pump with conical cylinder block [J]. Mechanical Science and Technology, 2011, 30(10): 1641-1644.
- [11] 童水光, 王相兵, 钟威, 等. 基于虚拟样机技术的轴向柱塞泵动态特性分析 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(2): 174-182.
- Tong Shuiguang, Wang Xiangbing, Zhong Wei, et al. Dynamic characteristics analysis on axial piston pump based on virtual prototypetechnology [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013 (2): 174-182.
- [12] Zhou J, Vacca A, Manhartgruber B. A Novel Approach for the Prediction of Dynamic Features of Air Release and Absorption in Hydraulic Oils [J]. Journal of Fluids Engineering (S0098-2202), 2013, 135(9): 1790-1791.
- [13] Kayani O K. Generic Simulation Model Development of Hydraulic Axial Piston Machines [D]. Linköping, Sweden: University, 2012.
- [14] Gholizadeh H, Burton R, Schoenau G. Fluid Bulk Modulus: Comparison of Low Pressure Models [J]. International Journal of Fluid Power (S1439-9776), 2012, 13(1): 7-16.
- [15] Rexroth. Variable displacement pump A4VSO Ra_92050. 62(21): 218401-218408.
- Hu Fengwei, Bao Bocheng, Wu Huagan, et al. Equivalent circuit analysis model of charge-controlled memtitor and its circuit characteristics [J]. Acta Phys. Sin., 2013, 62(21): 218401-218408.
- [15] 刘秉正, 彭建华. 非线性动力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 417.
- Liu Bingzheng, Peng Jianhua. Nonlinear Dynamics [M]. Beijing, China: Advanced Education Publishing House, 2004: 417.

(上接第 3994 页)

- [13] 洪庆辉, 曾以成, 李志军. 含磁控和荷控两种忆阻器的混沌电路设计与仿真 [J]. 物理学报, 2013, 62(23): 230502-230508.
- Hong Qinghui, Zeng Yicheng, Li Zhijun. Design and simulation of chaotic circuit for flux-controlled memristor and charge-controlled memristor [J]. Acta Phys. Sin., 2013, 62(23): 230502-230508.
- [14] 胡丰伟, 包伯成, 武花干, 等. 荷控忆阻器等效电路分析模型及其电路特性研究 [J]. 物理学报, 2013,