

# 负载敏感液压泵稳定性仿真与参数优化<sup>\*</sup>

马 冲,孔晓武<sup>\*</sup>

(浙江大学 流体传动与控制国家重点实验室,浙江 杭州 310027)

**摘要:**针对负载敏感泵压力偏差较大与稳定性差的问题,基于 Pro/E、ADAMS 以及 AMESim 专业仿真软件建立了负载敏感液压泵的虚拟样机。通过理论分析与仿真,提出了负载敏感液压泵变量机构控制系统中阻尼孔和容腔的参数匹配方法,基于该方法对 56 cc/r 的负载敏感液压泵进行了优化,得到了较好的阻尼孔和容腔的匹配效果。最后,通过试验验证了仿真分析的正确性。研究表明,参数优化后的负载敏感液压泵具有较好的稳定性,降低了恒压控制的压力偏差以及压力波动。

**关键词:**负载敏感液压泵;阻尼孔;稳定性;压力偏差;参数优化

中图分类号:TH322

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)05-0548-05

## Stability simulation and parameter optimization of load sensing pump

MA Chong, KONG Xiao-wu

(State Key Lab of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the large pressure bias and the poor stability of the load sensing pump, a virtual prototype of a load sensing pump was developed by combining Pro/E, ADAMS and AMESim. Through analyzing the pump's working principle and the simulation results, a method that how to match the volume and the diameter of damping orifices was reached. Based on this method, the 56 cc/r load sensing pump was optimized, and the better match effect of volume and damping orifice was gotten. The feasibility and effectiveness of this method were verified through many experiments. The results indicate that the load sensing pump optimized shows a stable performance, and the output pressure bias and vibration are decreased in high pressure condition.

**Key words:** load sensing pump; damping orifice; stability; pressure bias; parameter optimization

## 0 引 言

电液比例负载敏感变量泵能够在负载压力变化的情况下输出恒定的流量,并且在负载压力升高到一定值时,泵输出流量自动减小到仅维持泵的输出压力恒定。这样的特性应用在注塑机上起到了很好的节能效果,工作效率较高。

计算机仿真技术的应用提高了研究效率,缩短了研究周期,给研究提供了很大的方便。文献[1]利用计算机仿真技术研究了压力控制变量泵的动态响应,发现高压时泵输出压力和变量柱塞腔的压力波动较大,斜盘倾角同样存在振荡现象。文献[2]对压力流

量复合控制变量泵控制元件的模型进行优化,利用 Simulink 仿真对系统进行性能预测和分析,但是柱塞泵的模型较为简化。文献[3]采用 AMESim 对负载敏感泵进行建模,仿真分析了负载敏感阀的弹簧刚度、开口形状以及附加阻尼对负载敏感泵动态特性的影响,但仿真模型也采用了较简化的柱塞泵模型。文献[4]主要介绍了 ADAMS/AMESim 联合仿真技术方法,利用两个软件的各自的优势,考虑了传统仿真方法中容易忽略的参数,提供了变量柱塞泵较为真实的仿真结果。文献[5]采用虚拟样机技术,分析了配油盘位置与压力冲击,泵出口容积对压力脉动影响,以及柱塞运动特性与主轴应力应变情况。

收稿日期:2010-12-03

基金项目:浙江省重大科技专项和优先主题计划资助项目(2007C11171)

作者简介:马 冲(1986-),男,江苏徐州人,主要从事变量柱塞泵方面的研究。E-mail: mchseu@126.com

通信联系人:孔晓武,男,副教授,硕士生导师。E-mail: xwkong@yahoo.com.cn

变量柱塞泵的动态特性受到许多参数不同程度的影响,在参数优化方面已有较多的研究。文献[6]在配油盘上加入了大阻尼的单向阀,用于改善柱塞腔压力快速切换时产生的压力突变现象,最终样机减小了输出流量脉动和气穴现象。文献[7]对变量柱塞泵进行数学建模并得出了变量机构以及变量泵的控制增益的设计方法,但是忽略了斜盘转动惯量和运动阻尼。文献[8]通过数学方程推导分析了在稳定情况下负载敏感泵内部各参数的取值范围,提出增加变量机构的阻尼来削弱负载敏感泵的振动,对后面的研究工作提供了重要指导。

本研究旨在研究负载敏感泵控制系统中阻尼孔和容腔的参数匹配对其控制特性的影响。使用 Pro/E 建立三维模型, ADAMS 建立动力学模型<sup>[9]</sup>,并结合 AMESim 的液压模型得到了负载敏感泵的虚拟样机<sup>[10]</sup>。利用该虚拟样机对负载敏感泵恒压控制过程的压力偏差与控制稳定性进行研究与优化。

### 1 工作原理与理论分析

负载敏感泵的控制原理图如图 1 所示。从原理图可以看出,当负载压力较低时,比例节流阀 5 两端的压差  $\Delta P$  由作用在调节阀 3 上的弹簧预压缩力调定。通过机械反馈原理保证节流阀阀口压差基本保持不变,因此泵输出的流量就由节流阀的阀口开度大小决定。

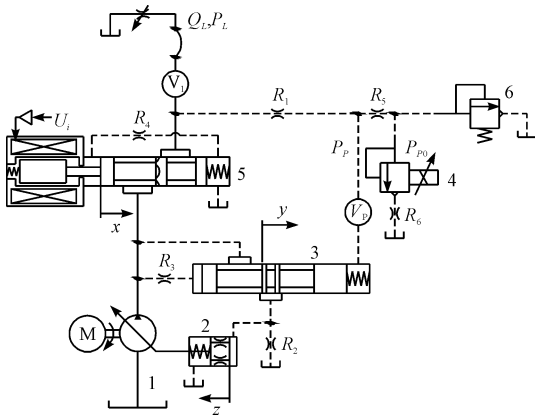


图 1 负载敏感泵原理图

1—变量柱塞泵;2—变量柱塞;3—调节阀;4—比例压力阀;5—比例节流阀;6—安全阀

当负载压力达到比例压力阀 4 调定值时,比例压力阀开启,使得负载压力不再升高,泵进入恒压控制状态。此时压力控制回路存在两个重要的阻尼孔  $R_1$  和  $R_5$ , 稳态状况下均有流量通过,其流量关系为:

$$Q_{R_1} = \frac{\pi d_{R_1}^2 C_d}{4} \sqrt{\frac{2\Delta P_{R_1}}{\rho}} = Q_{R_5} = \frac{\pi d_{R_5}^2 C_d}{4} \sqrt{\frac{2\Delta P_{R_5}}{\rho}} \quad (1)$$

此时,调节阀的稳态平衡方程为:

$$\Delta P A_y = K_y (y + y_0) + F_{s_y} \quad (2)$$

式中: $\Delta P$ —调节阀两端压差, $A_y$ —调节阀端面积, $K_y$ —调节阀弹簧刚度, $y$ —阀口开度, $y_0$ —弹簧预压缩量, $F_{s_y}$ —阀口稳态液动力。

由于  $y/y_0 \ll 1$ , 且忽略液动力  $F_{s_y}$  的影响,则有  $\Delta P \approx K_y y_0 / A_y$ , 即基本保持不变。在恒压控制过程中,柱塞泵仅输出负载所需的最小流量,而比例节流阀阀口保持在设定开口大小,此时只有较小的流量经过比例节流阀,阀口压降非常小,所以近似有  $\Delta P_{R_1} \approx \Delta P$ 。因此,阻尼孔  $R_1$  的大小直接决定了恒压控制的溢流流量大小。

溢流流量必须大于比例压力阀的最小稳定流量。同时过大的阻尼孔  $R_1$  将导致阻尼孔  $R_5$  上的压力降增大,对比例压力控制非常不利,而且带来较大的发热量,造成额外的功率损耗。鉴于此,阻尼孔  $R_1$  的大小应当使溢流流量略大于比例压力阀的最小稳定流量为佳。

负载敏感泵采用比例溢流阀作为先导压力控制阀,由于直动式先导溢流阀响应速度快,压力波动较大,而且柱塞泵本身就是一个波动源,必须采取措施防止恒压工作过程中泵的输出压力波动过大。为了减小比例压力阀的波动带来的影响,可以借鉴电路中 RC 滤波器的原理,在压力控制回路中加入压力 1 阶惯性环节,即在阻尼孔  $R_1$  与阻尼孔  $R_5$  之间设置适当大小的容腔  $V_p$ , 比例节流阀出口、阻尼孔  $R_1$  与负载节流阀之间设置容腔  $V_L$ 。对阻尼孔稳态流量公式进行线性化,列出容腔  $V_L$ 、 $V_p$  的增量化流量连续性方程分别为:

$$k_{c_1} A_{R_1} (P_P - P_L) - Q_L = \frac{V_L \cdot s}{E} P_L \quad (3)$$

$$k_{c_5} A_{R_5} (P_{P_0} - P_P) - k_{c_1} A_{R_1} (P_P - P_L) = \frac{V_p \cdot s}{E} P_P \quad (4)$$

式中: $k_{c_1}$ ,  $k_{c_5}$ —阻尼孔  $R_1$ 、 $R_5$  的线性化流量系数; $A_{R_1}$ ,  $A_{R_5}$ —阻尼孔  $R_1$ ,  $R_5$  的面积; $P_{P_0}$ —溢流阀入口压力; $P_P$ ,  $P_L$ —容腔  $V_p$ ,  $V_L$  的压力; $Q_L$ —负载流量。

对式(3,4)进行简化,得到 1 阶惯性环节的传递函数为:

$$\frac{P_P}{P_{P_0}} \approx \frac{1}{\frac{V_p}{k_{c_5} A_{R_5} E} s + \frac{k_{c_1} A_{R_1}}{k_{c_5} A_{R_5}} + 1} \quad (5)$$

$$\frac{P_L}{P_P} \approx \frac{1}{\frac{V_L}{k_{c_1} A_{R_1} E} s + 1} \quad (6)$$

从式(5,6)可以看出,阻尼孔  $R_5$  与容腔  $V_p$  以及

阻尼孔  $R_1$  与容腔  $V_L$  分别构成了 1 阶惯性环节,起到一定的滤波效果,而且阻尼孔  $R_1$ 、 $R_5$  直径越小,容腔  $V_p$ 、 $V_L$  越大,则 1 阶惯性环节的时间常数越大,越有利于降低压力的波动性。因此合理匹配阻尼孔  $R_1$ 、 $R_5$  和容腔  $V_p$ 、 $V_L$  是保证泵输出压力稳定的关键。

## 2 仿真建模

液压泵属于液压系统动力源,因此在对液压泵的仿真研究时应当首先建立相对准确的模型,并且尽可能地考虑相关的细节特性。在本研究中,为了更好地体现负载敏感泵的内部特性,结合 Pro/E、ADAMS 和 AMESim,最后建立了负载敏感泵的虚拟样机。

### 2.1 柱塞模型

设斜盘的倾角为  $\alpha$ ,轴的转角为  $\theta$ 。笔者分析了柱塞的运动过程,如图 2 所示,柱塞从初始的 A 点转动到 B 点位置时,投影在  $Oxyz$  坐标系中为 C 点。可以得出柱塞在旋转的过程中,沿坐标系  $Oxyz$  中  $x$  轴的位移和速度为:

$$\begin{cases} x = -R \tan(\alpha) \cos(\theta) \\ v = \dot{x} = R \omega \tan(\alpha) \sin(\theta) \end{cases} \quad (7)$$

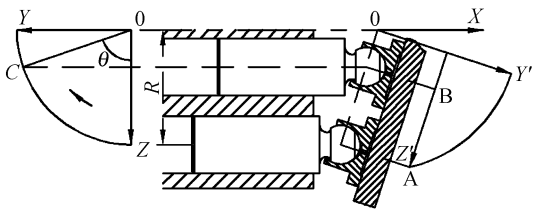


图 2 柱塞的运动分析

从柱塞的运动速度方程可以看出,柱塞泵的输出流量波动属于其固有特性,因此建立较准确的柱塞模型是十分重要的。柱塞是在斜盘的作用下实现往复运动,即在速度为正时吸入低压油,在速度为负时将高压油压出,基于此,本研究在 AMESim 中建立了如图 3 所示的柱塞模型。其中,吸油与排油两个油路的开关状态(即配流盘的作用)由缸体的转角  $\theta$  控制。为了更真实地模拟柱塞与缸体的间隙,本研究在柱塞模型中考虑了泄漏。

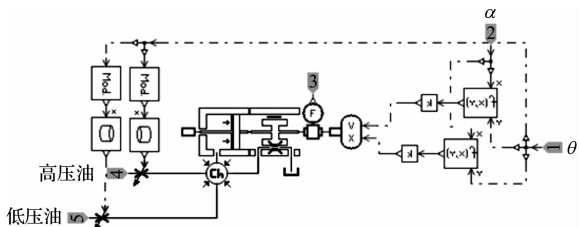


图 3 AMESim 中柱塞的模型

### 2.2 动力学仿真模型

建立变量柱塞泵的动力学模型,可以更好地研究变量泵的动态特性。本研究利用 Pro/E 建立了变量柱塞泵的三维模型,这弥补了 ADAMS 在三维建模上的不足。将模型导入 ADAMS 后,对该模型的配合、约束进行定义,得到了变量柱塞泵的动力学模型,如图 4 所示。

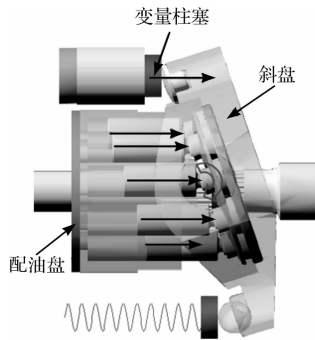


图 4 变量柱塞泵的 ADAMS 动力学模型

### 2.3 联合仿真模型

本研究利用 AMESim 软件提供的 HCD 库建立了压力流量复合控制变量泵中的调节阀、比例节流阀以及比例压力阀等。为了实现 AMESim 与 ADAMS 的联合仿真,还必须在 ADAMS 中建立两个软件的接口。如图 5 所示,AMESim 将变量柱塞的推力以及 9 个柱塞的推力(高压腔)或拉力(低压腔)输送给 ADAMS 进行动力学仿真;而 ADAMS 则将计算出来的斜盘的倾角、缸体的转角,以及变量柱塞的位移和速度传递给 AMESim,用来仿真液压控制回路。

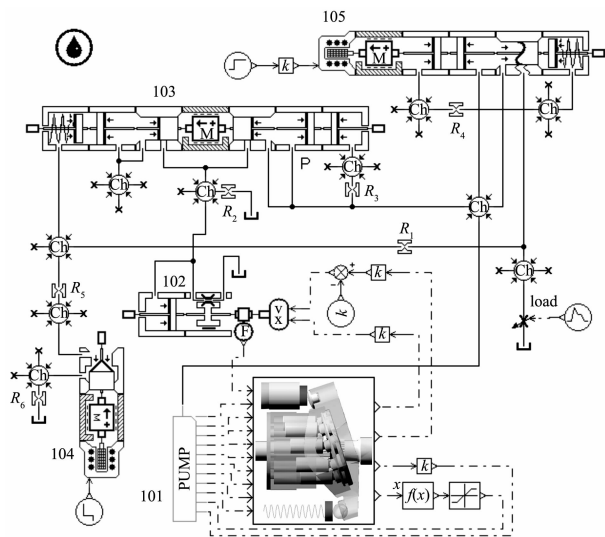


图 5 负载敏感泵的虚拟样机模型

## 3 仿真研究与试验

压力流量特性曲线综合显示了负载敏感泵的稳态

特性。将压力调至 14 MPa, 流量调至 45 L/min, 并调整阻尼孔  $R_1$  的直径从 0.6 mm 变化到 1.4 mm 分别进行仿真计算, 将仿真数据进行滤波处理后得到的压力流量特性曲线如图 6 所示。从图中可以看出, 负载敏感泵的恒流与恒压两个控制阶段特性较好, 说明仿真模型符合负载敏感泵的工作原理。但随着阻尼孔  $R_1$  直径的增加, 恒压控制的偏移量逐渐增加, 这也为  $R_1$  的直径选择提供了参考。

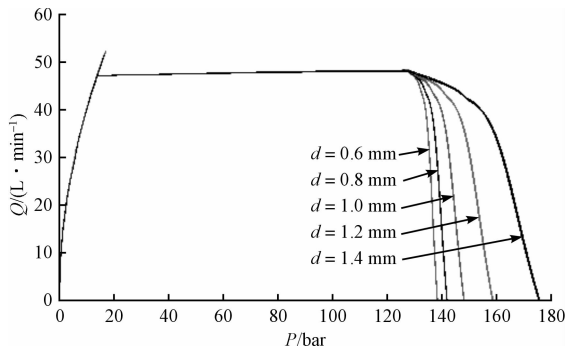


图 6 压力流量特性曲线(调整  $R_1$  直径)

通过改变阻尼孔  $R_5$  的直径从 0.6 mm 变化到 1.4 mm 分别进行仿真计算, 同样可以得到负载敏感泵的压力流量特性曲线, 如图 7 所示。由图中可以看出随着阻尼孔  $R_5$  直径的减小, 恒压控制的偏移量逐渐增加, 因此  $R_5$  直径过小, 不利于恒压控制特性。

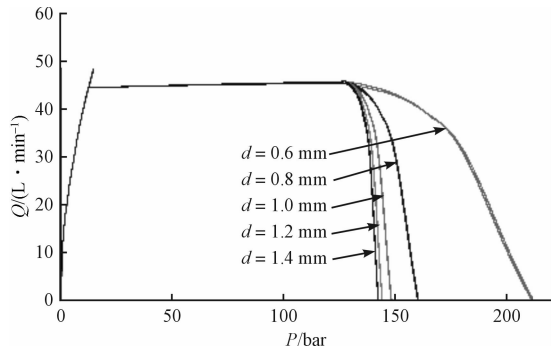


图 7 压力流量特性曲线(调整  $R_5$  直径)

由于恒压工况下有  $\Delta P_{R_1} \approx 4$  bar, 本研究选取  $R_1$  的直径为 1 mm, 通过  $R_1$  的流量为  $Q_{R_1} = C_d A_{R_1} \sqrt{2\Delta P_{R_1}/\rho} \approx 1$  L/min, 此流量大于比例压力阀的最小稳定流量, 所以比较合适。由于  $R_5$  的稳态流量与  $R_1$  的流量相等,  $R_5$  的直径应当与  $R_1$  的直径相等或者略大于  $R_1$  直径, 这样有利于降低恒压控制偏差。

泵出口经过一段软管连到负载端, 假设软管长约 1 m, 16 通径。仿真参数设定值如表 1 所示, 按表 1 设定参数, 并进行仿真对比, 可得到泵输出压力曲线, 如图 8 所示。

表 1 仿真参数设定值

曲线	$R_5$ 直径 $\phi$ /mm	容腔 $V_p$ /mL
1	2	5
2	2	20
3	1	5

从曲线上可以看出,  $R_5$  直径为 2 mm 和容腔  $V_p = 5$  mL 时泵输出压力波动较大。保持  $R_5$  直径不变而增加容腔  $V_p = 20$  mL, 或者保持容腔  $V_p = 5$  mL 不变而减小  $R_5$  直径为 1 mm, 均会减小泵输出压力波动的幅值。分析参数可以发现, 曲线 2 对应的容腔为曲线 1 的 4 倍关系; 曲线 3 对应的阻尼孔通流面积为曲线 1 的 1/4 关系, 即液阻为 4 倍关系。容腔  $V_p$  与阻尼孔  $R_5$  构成的 1 阶惯性环节在这里起到了滤波的效果, 且其时间常数与容腔大小成正比, 与阻尼孔直径成反比, 即  $\tau \propto V/d_R^2$ 。因此, 阻尼孔  $R_5$  直径越小, 容腔  $V_p$  越大, 越能降低压力波动, 提高稳定性。但是本研究考虑到柱塞泵的高度集成性, 在柱塞泵体设计出一个较大的容腔是不现实的, 所以为了减小对容腔  $V_p$  的要求,  $R_5$  选择 1 mm 为佳。

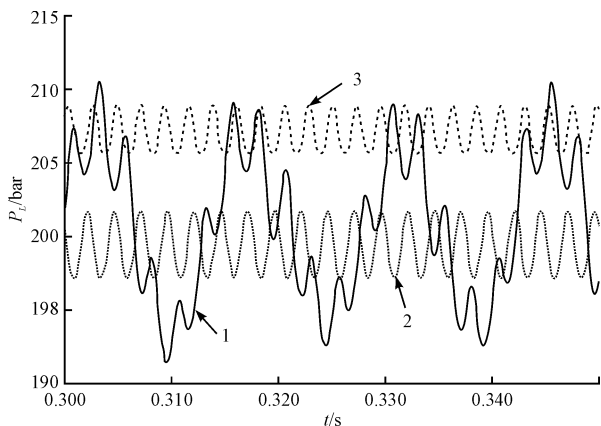


图 8 容腔与  $R_5$  对压力波动特性的影响

结合以上仿真分析结果, 本研究选择阻尼孔  $R_1$  直径 1 mm,  $R_5$  直径 1 mm, 在负载敏感泵样机上进行试验分析, 设定流量 45 L/min, 压力为 14 MPa, 测得负载敏感泵压力流量曲线如图 9 所示。

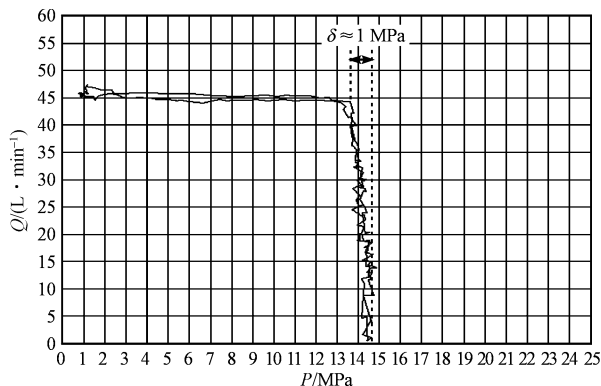


图 9 压力流量试验曲线(优化后)

负载敏感泵在参数优化前的压力流量特性试验曲线如图 10 所示。对比参数优化前后的试验曲线可以看出,参数优化后负载敏感泵在恒压工况下输出压力偏差约为 1 MPa,而优化前输出压力偏差约为 2.2 MPa,说明参数优化明显降低了压力偏差,并且提高了压力稳定性。

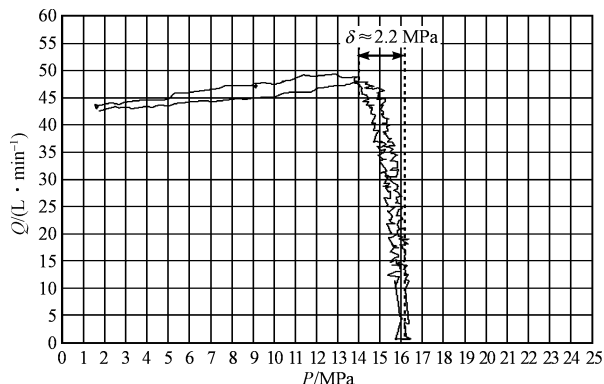


图 10 压力流量试验曲线(优化前)

为了观察优化后的负载敏感泵在高压工况下的压力稳定性,本研究设定压力为 20 MPa,流量为 45 L/min,进行试验,得到高压工况下压力流量特性曲线如图 11 所示。从曲线中发现,参数优化后的负载敏感泵在高压工况时输出压力波动要稍大于低压工况,压力偏差约为 1.8 MPa,小于参数优化前的 14 MPa 工况的压力偏差,说明优化对于高压工况也是有利的<sup>[11-13]</sup>。

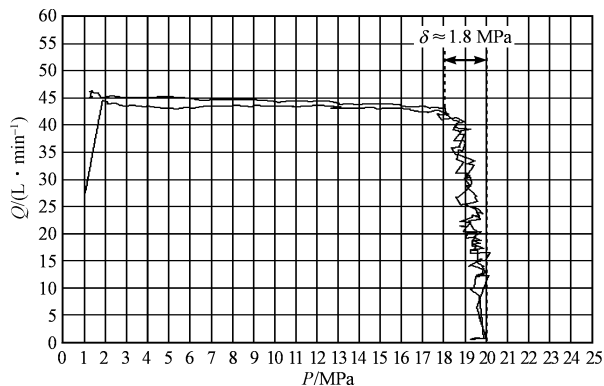


图 11 压力流量试验曲线(优化后)

## 4 结束语

本研究利用 Pro/E、ADAMS 与 AMESim 3 个软件联合建立了负载敏感泵的虚拟样机,并通过仿真研究重点分析了负载敏感泵恒压控制过程中阻尼孔  $R_1$ 、 $R_5$  与容腔  $V_p$ 、 $V_L$  对泵的输出压力稳定性以及压力偏差的影响:

(1) 阻尼孔  $R_1$  的大小决定了溢流量的大小,应当以使溢流流量略大于比例压力阀的最小稳定流量为佳;

(2) 阻尼孔  $R_5$  直径越小,容腔  $V_L$  越大,越有利于提高输出压力稳定性;

(3) 阻尼孔  $R_5$  的直径应大于或等于阻尼孔  $R_1$  的直径,以减小恒压工况下的压力偏差。

试验研究结果表明,仿真优化参数后的负载敏感泵的稳定性和恒压工况波动与压力偏差均有减小,对设计和研究负载敏感泵具有较大的参考价值。

## 参考文献 (References):

- [1] KALLAFETIS P, COSTOPOULOS T. Modelling and simulation of an axial piston variable displacement pump with pressure control[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 1995, 30(4):599-612.
- [2] 乔丰立,唐兵,卢堃,等.比例控制径向柱塞泵性能预测[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(10):66-70.
- [3] 王炎,胡军科,杨波.负载敏感泵的动态特性分析与仿真研究[J]. *现代制造工程*, 2008(12):84-87.
- [4] ROCCATELLO A, MANCO S, NERVEGNA N. Modeling a variable displacement axial piston pump in a multibody simulation environment[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2007, 129(4):456-468.
- [5] 杨智炜,徐兵,张斌.基于虚拟样机技术的轴向柱塞泵特性仿真[J]. *液压气动与密封*, 2006(3):33-36.
- [6] HARRISON A M, EDGE K A. Reduction of axial piston pump pressure ripple[J]. *Proceedings Institution of Mechanical Engineers*, 2000, 214(1):53-63.
- [7] MANRING N D, JOHNSON R E. Modeling and designing a variable-displacement open-loop pump[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1996, 118(2):267-271.
- [8] 伍燕芳,葛思华,王佑民,等.负载敏感液压系统的稳定性分析[J]. *西安交通大学学报*, 1992, 26(2):23-28.
- [9] 郭卫东.虚拟样机技术与 ADAMS 应用实例教程[M].北京:北京航空航天大学出版社,2007.
- [10] 王占森. AMESim 系统建模和仿真从入门到精通[M].北京:北京航空航天大学出版社,2005.
- [11] 王冠军,袁丹青,刘吉春,等.叶片形状对旋涡泵性能的影响[J]. *轻工机械*, 2009, 27(2):27-31.
- [12] 卢晓江,李辉普.离心式桶泵特性及流量调节[J]. *轻工机械*, 2009, 27(6):20-21.
- [13] 刘爱国.装载机变速泵的改进设计[J]. *机电技术*, 2009, 32(2):41-43.

[编辑:张翔]