

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.05.013

铲运机用负载敏感泵流量响应特性影响因素研究*

林广旭

(中国煤炭科工集团太原研究院有限公司,山西太原 030006)

摘要:为解决煤矿铲运机用负载敏感变量泵结构因素影响其工作特性的问题,并为其结构优化提供理论参考,开展了负载敏感变量泵的结构参数对其流量响应特性的影响研究。分析了负载敏感变量泵的工作原理,建立了其液压泵控系统模型,推导了负载敏感泵阀芯直径、弹簧刚度,以及旁路阻尼孔直径等结构参数与负载敏感泵输出流量和输出压力之间的传递函数关系;基于所建立的数学模型和计算机模拟仿真方法,建立了液压泵控制系统的 AMESim 模型,验证分析了负载敏感泵流量动态响应特性。研究表明:适当地增加阀芯直径、弹簧刚度以及旁路阻尼孔直径,有利于提高负载敏感泵的流量响应速度和稳定性;其结构参数增加过度,会导致系统的输出流量在阶跃下降过程中出现振荡。

关键词:负载敏感;流量响应;结构参数;AMESim;阶跃响应

中图分类号:TH3;TD524

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)05-0515-04

Factors influencing flow response characteristics of load-sensitive pumps used on scrapers

LIN Guang-xu

(China Coal Technology & Engineering Group, Taiyuan Research Institute, Taiyuan 030006, China)

Abstract: In order to solve the problem that the structural parameters of the load-sensitive pump affect working characteristics of scraper, and provide a theoretical reference for its structural optimization, the effect of the structural parameters on the pump output flow was studied. The working principle of the load-sensitive pump was analyzed, its hydraulic control system was established, and the transfer function of the output flow and output pressure was derived, based on structural parameters such as spool diameter, spring stiffness and bypass orifice diameter. The AMESim model of the hydraulic control system was performed to verify the dynamic flow response characteristics. The results indicate that the proper increase in the spool diameter, spring stiffness, and bypass orifice diameter can help improve the flow response speed, and its stability and the excessive increase can cause the output flow of the system to oscillate during the step-down process.

Key words: load sensitive; flow response; structural parameters; AMESim; step response

0 引言

煤矿铲运机是一种用于综采工作面成套设备快速搬家的重型车辆^[1],其作业效率高、机动性好,短距离铲运时作业成本低。然而,油价上涨和排放要求对其液压系统的节能进行改进。

负载敏感技术的工作原理是通过阀芯感应负

载压力的变化,并及时反馈给泵组机构,泵组机构立刻对泵的输出状态进行调节,使得输出压力和流量适应所承受的负载,减少系统损耗^[2];并且在负载压力升高到一定值时,泵输出流量自动减小,维持泵的输出压力恒定。目前,负载敏感技术已应用于多种工程场合,尤其在煤矿机械中的应用十分广泛^[3]。王敬国^[4]设计了一种新型的负载敏感阀,实

收稿日期:2018-11-18

基金项目:山西省科技成果转化引导专项项目(201704D131011)

作者简介:林广旭(1984-),男,辽宁葫芦岛人,助理研究员,主要从事机电一体化设计方面的研究。E-mail:dagelin2000@sina.com

现了全液压钻机的液控系统从阀控技术到负载敏感泵控技术的全面提升,并对负载敏感阀在使用中出现的主要故障和原因进行了分析;苗国华等^[5]提出了一种平地机负载敏感液压系统方案,基于平地机总体性能参数要求确定了液压系统控制逻辑,解决了现有定量系统复合动作响应差等问题;王晨升等^[6]将负载敏感泵应用于回撤吊车液压系统,研究了负载敏感泵压力、流量和斜盘倾角的响应情况;马冲等^[7]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,基于该方法对负载敏感泵的阻尼孔和容腔参数进行了优化,并利用 ADAMS 和 AMESim 进行了仿真验证;迪茹侠^[8]以负载敏感系统为对象,对液压系统产生冲击的因素和防冲击方法进行了研究,针对液压系统冲击危害大的问题,建立了液压系统的数学模型,分析了影响负载敏感系统稳定性的主要因素。

本研究旨在研究负载敏感控制系统中的结构参数对其流量响应特性的影响,通过建立液压泵控系统模型,考虑负载敏感阀阀芯直径、弹簧刚度以及旁路阻尼孔直径等结构参数,推导出负载敏感泵输出流量和输出压力的传递函数,并采用 AMESim 对其流量响应进行验证分析。

1 负载敏感工作原理

某铲运机泵控系统液压原理图如图 1 所示。

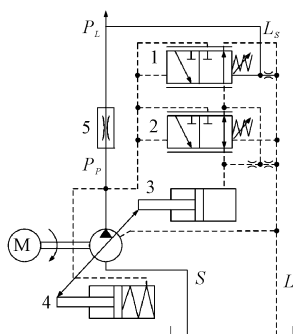


图 1 泵控系统液压原理图

1—负载敏感阀;2—恒压阀;3—变量缸大腔;4—变量缸小腔;5—比例调节阀;S 处—系统进油口;L 处—系统排油口(LI 处堵死);LS—压力控制油路

该负载敏感泵的型号为力士乐 A10VODFR(压力)型。泵控系统中,工作负载压力 p_L 被反馈到负载敏感阀 1 的左端,而变量泵输出压力 p_s 被反馈到阀 1 的右端,两端反馈压力差 Δp 可用弹簧力来表示,即 $\Delta p = p_s - p_L = 1 \text{ MPa} \sim 2 \text{ MPa}$;调节恒压阀 2 的弹

簧力来调定系统极限工作压力,当负载压力达到此极限值后,阀芯右移,控制油缸打开,系统压力使得斜盘角度达到最小值,致使泵输出流量为零。

其流量调节原理为^[9]:

当比例调节阀 5 开口度减小,过流截面 A 越小,比例调节阀两端反馈压力差 Δp 越大,导致变量泵向最小流量方向摆动,当反馈压力差 Δp 回到设定压力值时,泵停止摆动;反之,当反馈压力差越小,泵向最大流量方向摆动,当 Δp 回到设定值时,摆动结束^[10]。

2 数学模型与 AMESim 仿真模型

2.1 负载敏感阀的动态特性

根据阀芯动力学微分方程,有:

$$(p_s - p_L)A_v - F_0 = M_v \frac{d^2 x_v}{dt^2} + K_s x_v \quad (1)$$

$$\Delta p = p_s - p_L \quad (2)$$

式中: A_v —阀芯压力感应面积, cm^2 ; F_0 —预设弹簧力, kgf ; M_v — $4/3$ 倍弹簧质量, $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{cm}$; x_v —阀芯移动距离,右移取正, cm ; K_s —弹簧刚度, kgf/cm 。

根据变换求出负载敏感阀芯传递函数为:

$$W_1(s) = \frac{x_v(s)}{E(s)} = \frac{\frac{1}{K_s}}{\frac{s^2}{\omega_{nv}^2} + 1} \quad (3)$$

式中: ω_{nv} —阀体固有频率, $\omega_{nv} = \sqrt{K_s/M_v}$, s^{-1} ; $E(s)$ —压力差信号, $E(s) = (p_s(s) - p_L(s))A_v$ 。

2.2 斜盘的动态方程

负载敏感阀流量方程为:

$$Q = c_d w x_v \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (4)$$

式中: c_d —流量系数, $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}/(\text{kgf} \cdot \text{cm}^{-2})$; w —负载敏感阀开口面积梯度, cm ; ρ —液体密度, $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{cm}^4$ 。

则斜盘运动传递函数 $W_2(s)$ 为:

$$W_2(s) = \frac{x_p(s)}{x_v(s)} = \frac{\frac{k_q}{A_1}}{s \left(\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\delta_n s}{\omega_n} + 1 \right)} \quad (5)$$

式中: ω_n —斜盘固有频率, $\omega_n = \sqrt{A_1 \beta r_0^2 / (VJ)}$, s^{-1} ; δ_n —无因次阻尼系数, $\delta_n = \omega_n (K_p + c_0) J / (2A_1^2 r_0^2)$ 。

2.3 泵的流量和压力输出特性

泵的流量增量方程为:

$$Q_p = -K_Q n x_p \quad (6)$$

式中: K_Q —排量梯度, cm^2/r 。

则泵输出流量传递函数 $W_3(s)$ 为:

$$W_3(s) = \frac{-Q_p(s)}{x_p(s)} = K_Q n \quad (7)$$

流量导致压力变化的微分方程为:

$$-Q_p + Q_L - c_l p_s = \frac{V_t}{\beta} \frac{dp_s}{dt} \quad (8)$$

则泵输出压力传递函数 $W_4(s)$ 为:

$$W_4(s) = \frac{p_s(s)}{I(s)} = \frac{\frac{1}{c_l}}{1 + \frac{s}{\omega_T}} \quad (9)$$

式中: $I(s)$ —流量偏差信号, $I(s) = -Q_p(s) + Q_L(s)$;
 V_t —出口腔容积, cm^3 ; ω_T —惯性转折频率, $\omega_T = \beta c_l / V_t$,
 s^{-1} ; c_l —变量缸弹簧腔泄漏系数, $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1} / (\text{kgf} \cdot \text{cm}^{-2})$ 。

负载敏感泵传递函数方框图如图2所示。

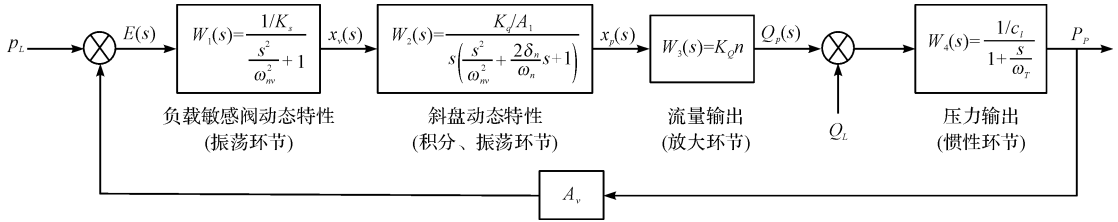


图2 负载敏感泵传递函数方框图

由此可求负载敏感泵开环传递函数 $W(s)$ 为:

$$W(s) = \frac{\frac{1}{K_s} \frac{K_q}{A_1} K_Q n \frac{1}{c_l} A_v}{s \left(1 + \frac{s}{\omega_T}\right) \left(\frac{s^2}{\omega_n^2} + 1\right) \left(\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\delta_n}{\omega_n} s + 1\right)} \quad (10)$$

则可得系统开环增益系数 K 为:

$$K = \frac{1}{K_s} \frac{K_q}{A_1} K_Q n \frac{1}{c_l} A_v \quad (11)$$

开环增益系数 K 的变化会导致系统稳定性与响应速度产生很大变化^[11], 因此, 结构参数 A_1 、 K_Q 、 n 、 c_l 对负载敏感阀的动态响应具有重要影响。

2.4 负载敏感泵仿真模型

泵控系统仿真模型如图3所示。

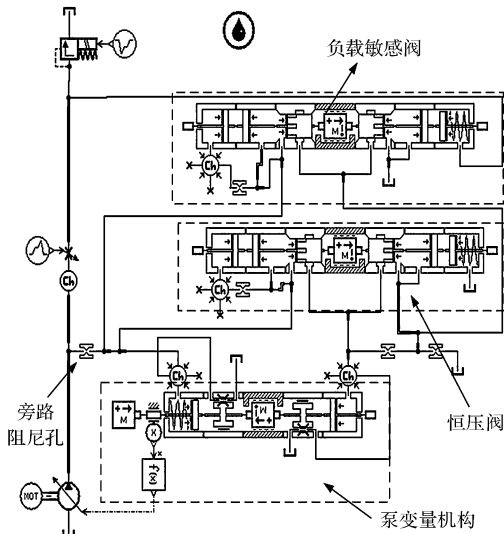


图3 泵控系统仿真模型

根据负载敏感泵原理图, 本研究用 HCD 库搭建负载敏感泵 AMESim 模型^[12-15]。

3 结构参数对流量特性的影响

3.1 不同阀芯直径的影响

不同的阀芯直径下泵的输出流量曲线如图4所示。

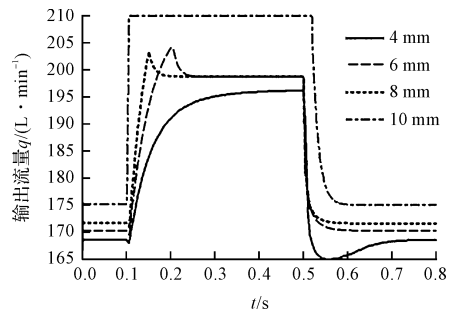


图4 不同阀芯直径下泵输出流量曲线

由图4可知: 阀芯直径越大, 流量阶跃上升到稳定状态用时越短, 并且阶跃响应越迅速, 而超调量却逐渐增大。当 $d = 10 \text{ mm}$ 时, 泵流量输出阶跃响应较差, 无超调; 当 $d = 4 \text{ mm}$ 或 10 mm 时, 流量阶跃下降过程中系统振荡较大; $d = 6 \text{ mm}$ 所对应阶跃变化相对合理。

3.2 不同弹簧刚度的影响

不同的弹簧刚度下泵的输出流量曲线如图5所示。

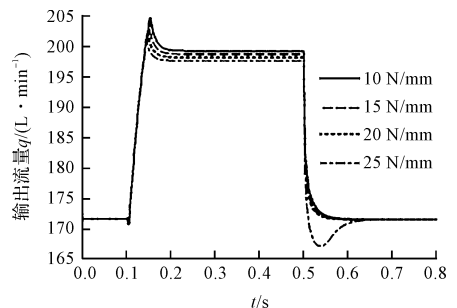


图5 不同弹簧刚度下泵输出流量曲线

由图 5 可知:弹簧刚度越大,流量阶跃变化达到稳定用时越短,超调量也随之减小;较大的阀芯弹簧刚使得流量再次恢复到稳定状态时系统振荡变大,所以阀芯弹簧刚度不宜过大,取 $K_s = 15 \text{ N/mm} \sim 20 \text{ N/mm}$ 较为合理。

3.3 不同旁路阻尼孔直径的影响

旁路阻尼孔用以减小压力超调量,调节响应时间,使得系统更加稳定。因此,阻尼孔大小对系统响应性能有重要影响。

不同旁路阻尼孔直径下泵输出流量响应曲线如图 6 所示。

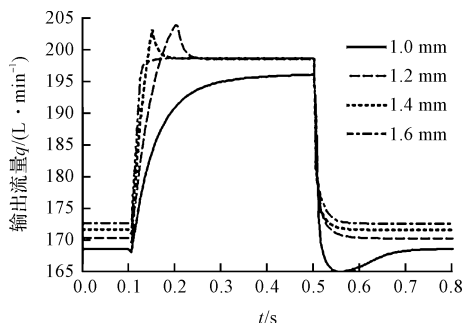


图 6 不同旁路阻尼孔直径下泵输出流量响应曲线

由图 6 可知:较小的旁路阻尼孔直径使得流量阶跃响应时间变长,无超调;适当增加旁路阻尼孔直径,流量阶跃上升达到稳定用时变短,有超调;然而,旁路阻尼孔直径过大会导致流量状态不稳定。

因此,适当增加旁路阻尼孔直径有利于流量阶跃响应稳定。

4 结束语

本文研究了负载敏感控制系统中的结构参数对其流量响应特性的影响,建立了负载敏感变量泵液压泵控系统模型;考虑负载敏感阀阀芯直径、弹簧刚度以及旁路阻尼孔直径等结构参数,推导了负载敏感泵输出流量的传递函数,并使用 AMESim 分析验证负载敏感阀泵流量响应特性,即:

(1)适当增大阀芯直径,流量阶跃上升稳定用时变短,并且阶跃响应变迅速,阀芯直径为 6 mm 所对应泵输出流量的阶跃变化较为合理;

(2)15 N/mm ~ 20 N/mm 范围内的弹簧刚度所对应的流量响应特性较好,过大的弹簧刚度使得流量阶

跃下降时系统振荡变大;

(3)适当增加旁路阻尼孔直径,流量阶跃上升到稳定用时变短,且流量阶跃响应稳定性较好,然而过大的旁路阻尼孔会导致流量状态不稳定。

仿真研究结果表明:负载敏感泵的结构参数对其工作性能的稳定性存在较大影响。

本研究结果对后续煤矿铲运机负载敏感泵的结构设计及优化具有一定的参考价值。

参考文献 (References):

- [1] 潘成杰. 煤矿井下窄型铲运机稳定性仿真与分析[J]. 煤炭工程,2015,47(6):129-131.
- [2] ZHANG J, ZHANG T, CHENG L. Dynamic Simulation Research Based on AMESim Load-Sensing Pump[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014,687(1):195-200.
- [3] 刘文涛. 基于 SIMPACK 的矿用铲运机工作装置动力学仿真分析[J]. 煤矿机械,2012,33(8):101-103.
- [4] 王敬国. 负载敏感阀在全液压钻机中的应用分析[J]. 煤炭工程,2017,49(4):129-131,135.
- [5] 苗国华,崔元福,王永,等. 平地机负载敏感液压系统设计[J]. 液压气动与密封,2017,37(1):56-59.
- [6] 王晨升,姚丽英,苏芳,等. 回撤吊车负载敏感液压系统设计及仿真分析[J]. 液压与气动,2018(6):49-53.
- [7] 马冲,孔晓武. 负载敏感液压泵稳定性仿真与参数优化[J]. 机电工程,2011,28(5):548-552.
- [8] 迪茹侠. 负载敏感液压系统防冲击机理及试验研究[D]. 西安:长安大学工程机械学院,2018.
- [9] 郭治富,张子飞,王虹. 负载敏感系统建模与仿真研究[J]. 机床与液压,2018,46(6):8-12.
- [10] 郭治富,张子飞,王虹. 负载敏感泵参数辨识与计算方法研究[J]. 液压与气动,2017(7):67-70.
- [11] 谢飞,桂芳. PID 参数整定对被控系统相对稳定性的影响研究[J]. 制造业自动化,2010,32(A5):55-56.
- [12] 刘登科. 液压系统动态特性研究方法概述[J]. 流体传动与控制,2015(6):7-9.
- [13] 桑勇,邵利来,段富海. 基于 AMES 的液压系统管路动态特性的研究[J]. 液压气动与密封,2018(2):16-21.
- [14] 恽灵明. 基于产品实例的液压系统动态特性分析方法研究[D]. 合肥:合肥工业大学机械工程学院,2013.
- [15] 张茂力,朱海清,费宏伟. 基于预估浊压的安全阀在线校验技术研究[J]. 压力容器,2017,34(11):76-80.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

林广旭. 铲运机用负载敏感泵流量响应特性影响因素研究[J]. 机电工程,2019,36(5):515-518.

LIN Guang-xu. Factors influencing flow response characteristics of load-sensitive pumps used on scrapers[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019,36(5):515-518.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>