

新型大流量三通压力补偿阀的设计与研究^①

艾超^{②*} 林加城^{*} 孔祥东^{③*} 赵小龙^{*}

(^{*}燕山大学河北省重型机械流体动力传输与控制实验室 秦皇岛 066004)

(^{**}先进锻压成型技术与科学教育部重点实验室(燕山大学) 秦皇岛 066004)

(^{***}浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室 杭州 310027)

摘 要 针对定量泵液压系统 LUDV 多路阀内压力补偿阀流量小的问题,采用单通道双溢流的方法,设计出一种新型大流量三通压力补偿阀;经理论计算,设计了该补偿阀的关键结构参数。通过 AMESim 仿真和实验研究证明了该阀在大流量工况下具有较好的压力卸荷特性及压力补偿特性,其流量可达到 400L/min,卸荷压力降到 3MPa 以下,满足工程机械定量泵液压系统大流量的使用要求。

关键词 三通, 压力补偿, 定量泵液压系统, 大流量, LUDV 多路阀

0 引言

在用于定量泵液压系统的 LUDV 多路阀中,三通压力补偿阀主要用于实现压力限制和流量分配^[1-5]。该阀由 P 口、T 口和 LS 口三个油口组成,通过与多路阀内的梭阀网络配合工作,实现定量泵出口压力与各路换向阀的最高负载压力差保持恒定^[6-10]。因压力限制和流量分配问题是设计多路阀的关键和难点所在^[11,12],故合理设计三通压力补偿阀至关重要。

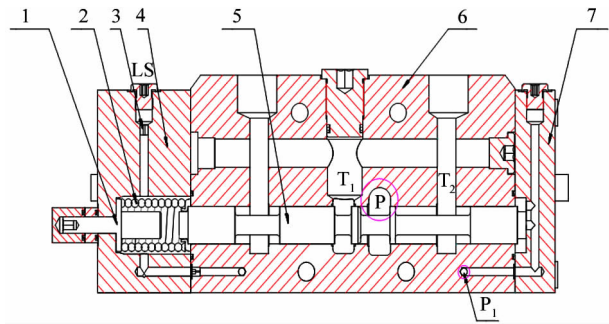
国内主机厂家受负荷传感变量泵技术限制和迫于成本压力,在 50T ~ 135T 及履带式起重机 LUDV 液压控制系统中大多希望采用定量泵液压系统,其流量要求为 400L/min,压力至 35MPa。然而,目前用于 LUDV 多路阀的三通压力补偿阀的流量还比较低,对于流量在 400L/min 及以上的三通压力补偿阀仍不能满足市场的需求。虽然国内相关研究人员在三通压力补偿阀流量问题上进行了相关研究^[13-16],但未见有关 LUDV 多路阀用大流量三通压力补偿阀

的研究报道。针对以上问题,本研究设计了一种配合工程机械 LUDV 多路阀使用的新型大流量三通压力补偿阀,并通过仿真分析和实验研究证明,该阀能满足大流量工况要求。

1 结构设计

1.1 原理分析

新型三通压力补偿阀的结构如图1所示,主要



1-调节螺钉 2-压力弹簧 3-阻尼元件 4、7-端盖
5-压力补偿阀芯 6-阀体

图 1 新型大流量三通压力补偿阀剖面示意图

① 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室开放基金 (GZKF - 201403) 和 2015 年工业转型升级强基工程国内公开招标 (TC150B5C0-29) 资助项目。
② 男,1982 年生,博士,讲师;研究方向:流体传动及控制;E-mail: aichao@ ysu. edu. cn
③ 通讯作者,E-mail: xdkong@ ysu. edu. cn
(收稿日期:2016-03-07)

由阀体、压力补偿阀芯、压力弹簧、端盖、调节螺钉和阻尼元件等组成。图2为立体结构示意图。

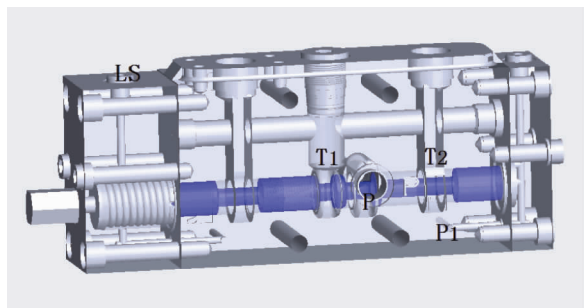


图2 新型大流量三通压力补偿阀立体结构示意图

该阀的公称压力为35MPa,公称流量为400L/min,卸荷压力小于3MPa,适用于工程机械定量泵液压系统。

一般来说,采用溢流阀进行压力限制的定量泵系统,系统最高压力由溢流阀决定,多余的高压流量需通过溢流阀返回油箱,能耗较大。通过使用三通压力补偿阀可以解决这些问题。为了方便理解该三通压力补偿阀的工作原理,现将上述整阀简化为一联比例换向阀叠加定差溢流型压力补偿阀组成一个定量泵液压系统用阀,如图3所示。

主要工作原理如下:

(1) 比例换向阀在中位时,系统压力 P 通过 $P1$ 口作用在压力补偿阀芯的右侧,由于压力补偿阀芯左侧的 LS 腔没有负载压力,压力补偿阀芯可直接推动 LS 腔的压力弹簧向左运动,实现 $P-T1$ 和 $P-T2$ 流动(如图4所示),即可使三通压力补偿阀以较小的压力卸荷,实现系统的节能,同时由于双边溢流,满足了通流能力大的设计要求。

(2) 当换向阀换向时, LS 腔压力和梭阀网络所筛选出的最高负载压力相等,在图3中,即为 A 腔(或 B 腔)的压力。在不考虑油道压力损失的情况下,由静力平衡原理, P 腔压力会比最高负载压力高一个弹簧力的压力,在满足系统需要压力和流量的情况下,多余的流量可通过三通压力补偿阀芯卸荷。在这个过程中, P 腔压力与最高负载压力之差基本保持恒定,因此在比例阀开度一定的情况下,可以确保流向执行机构的流量基本恒定。

(3) 通过调整调节螺钉可以调整压力弹簧的预压缩量,从而调整三通压力补偿阀的卸荷压力。当卸荷压力较低时,比例换向阀的流量增益较低,当卸荷压力较高时,比例换向阀的流量增益较高,从而可以在一定范围内实现对最大流量的控制。

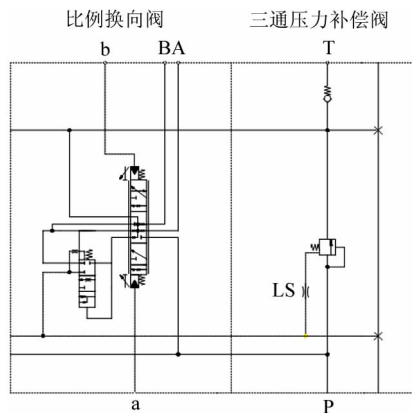


图3 整阀液压原理简化图

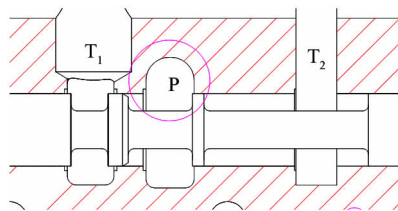


图4 压力补偿阀芯装配示意图

1.2 关键参数设计

1.2.1 进油口直径

进油口直径 d 满足公式^[17]

$$d \geq 4.63 \sqrt{\frac{Q_g}{V_g}} \quad (1)$$

式中 Q_g 为最大流量(L/min), V_g 为进油口直径 d 处油液流速(m/s)。取 $Q_g = 400\text{L/min}$, $V_g = 14\text{m/s}$,代入式(1),得

$$d \geq 4.63 \sqrt{\frac{400}{14}} = 24.7\text{mm} \quad (2)$$

取 $d = 25\text{mm}$,即进油口直径为25mm。

1.2.2 主阀芯直径

阀芯大直径 D 和小直径 d 从强度考虑,需满足 $d \geq D/2$ 。通过阀芯与阀体间环形通道的流量为

$$Q = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) V_g \quad (3)$$

若取 $d = D/2$, $Q = Q_g = 400\text{L/min}$,代入式(3),

可得：

$$D \geq 0.94 \sqrt{Q_g} \geq 0.94 \sqrt{400} = 18.8\text{mm} \quad (4)$$

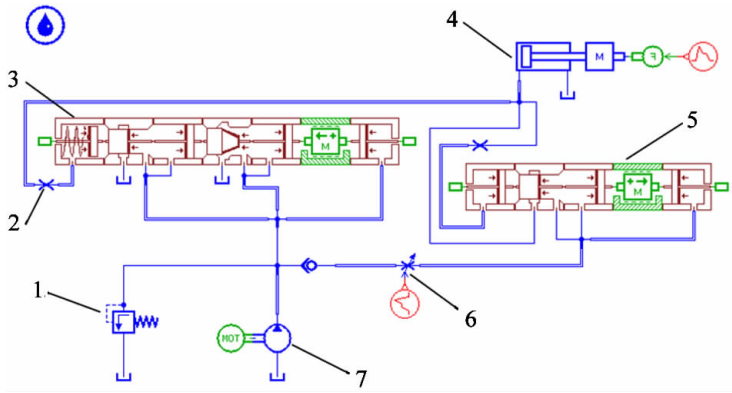
考虑产品零件以及加工工艺的通用性和一致性,取 $D=25\text{mm}$,则

$$d \geq \frac{D}{2} = 12.5\text{mm} \quad (5)$$

取 $d=13\text{mm}$ 。

2 仿真研究

2.1 仿真模型搭建



1-安全阀 2-LS 口阻尼孔 3-新型大流量三通压力补偿阀 4-液压缸
5-二通压力补偿阀 6-多路阀主阀口 7-定量泵

图 5 负载敏感多路阀压力补偿系统仿真图

表 1 仿真参数设置

序号	参数	设定值
1	安全阀调定压力	35(MPa)
2	三通压力补偿阀阀芯质量	0.63(kg)
3	三通压力补偿阀阀芯直径	25(mm)
4	三通压力补偿阀弹簧预紧力	900(N)
5	三通压力补偿阀弹簧刚度	94.8(N/mm)
6	三通压力补偿阀右控制腔阻尼孔直径	1.2(mm)
7	多路阀主阀口最大开口量	14.5(mm)
8	二通压力补偿阀阀芯质量	0.5(kg)
9	二通压力补偿阀阀芯直径	25(mm)
10	负载油缸活塞直径	40(mm)

2.2 仿真结果分析

2.2.1 阀芯锥角对卸荷压力的影响

新型大流量三通压力补偿阀阀芯结构如图 6 所示,结合图 4 所示的阀芯装配示意图,可以看出阀芯

根据新型大流量三通压力补偿阀的结构原理,利用 AMESim 中的 HCD 库搭建相应的仿真模型,如图 5 中的元件 3 所示。结合其它零部件的结构原理,可搭建 LUDV 多路阀系统仿真模型,如图 5 所示。仿真模型各零部件的主要参数设置如表 1 所示。

在 $P-T_1$ 处存在长度为 1mm 的锥角。该锥角直接影响阀口面积梯度,对三通压力补偿阀的性能有重要影响。

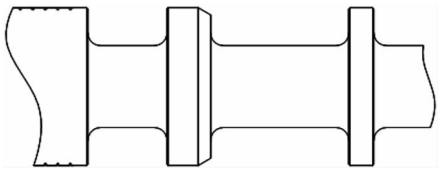


图 6 补偿阀芯结构示意图

为了研究阀芯锥角对三通压力补偿阀卸荷压力的影响,分别设置阀芯锥角为 20° 、 25° 、 30° 、 35° 、 40° 、 45° ,长度均为 1mm;设置系统供油流量在 30s 内从 0L/min 线性增加到 400L/min 。利用 AMESim 中的批处理仿真功能,可得到不同锥角下的流量-卸荷压力曲线,如图 7 所示。

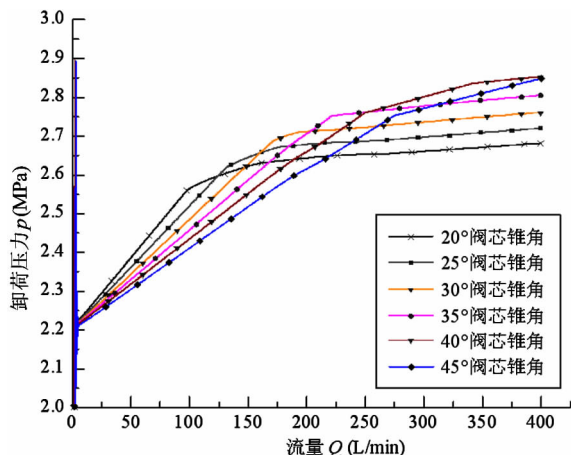


图7 不同锥角下流量-卸荷压力曲线图

从图7可知,在同一锥角下,随着流量的增大,系统卸荷压力逐渐升高,但升高幅度逐渐降低。曲线上存在一个拐点,因在该点处另外一个阀口开启溢流。在不同锥角下,当系统工作流量达到400L/min时,三通压力补偿阀阀芯锥角角度越大,阀芯开启压力波动就越大,系统卸荷压力也越大,无法达到节能的效果。但是,若锥角角度越小,在小流量处的压力随流量变化的增益越大。由于在多路阀主阀开度最大时,从三通压力补偿阀处溢流的流量最小,该工作点处无法维持一个稳定的压力,综合考虑,取锥角为30°,此时系统全流量卸荷时卸荷压力约为2.76MPa。

2.2.2 调压弹簧刚度对卸荷压力的影响

调压弹簧影响着三通压力补偿阀的动作和性能,和其静态特性和动态特性密切相关。为了研究调压弹簧刚度对三通压力补偿阀卸荷压力的影响,分别设置调压弹簧刚度为50N/mm、60N/mm、70N/mm、80N/mm、90N/mm、100N/mm,调压弹簧预紧力为900N;设置系统供油流量在30s内从0L/min线性增加到400L/min。利用批处理仿真功能,进行压力补偿系统仿真,可得到不同调压弹簧刚度下的流量-卸荷压力曲线,如图8所示。

从图8可知,在一定范围内,调压弹簧刚度越大,系统的卸荷压力越大。故减小调压弹簧的刚度大小,有利于降低系统的卸荷压力,减小能量损失。但是,为了使得多路阀主阀开口达到最大时,输出流量能达到400L/min,最终设计的弹簧刚度为94.8N/mm。

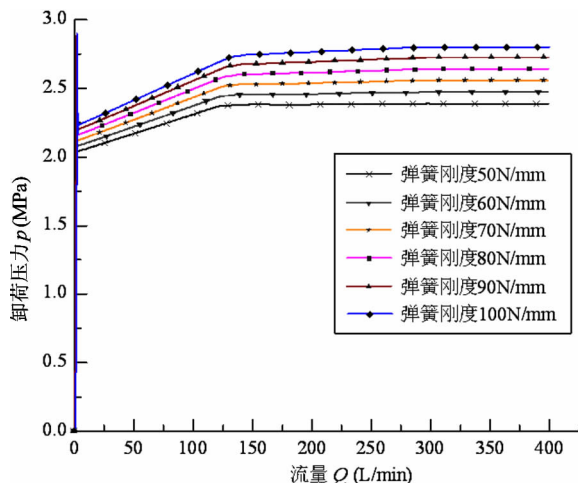


图8 不同刚度下流量-卸荷压力曲线图

2.2.3 补偿特性

在压力补偿系统仿真模型中,首先设置负载压力恒定为15MPa,持续0.15s;然后从15MPa阶跃变化到30MPa,持续0.1s;最后从30MPa阶跃变化到0MPa。多路阀主阀口的度在刚开始的0.15s内从0变到最大,可得到负载变化时P-LS压力跟随特性曲线,如图9所示。从仿真结果可以看出,三通压力补偿阀入口压力跟随负载压力变化响应快,无明显超调,且始终能保持系统的供油压力仅比负载压力高出一个定值。由此可得出结论:所设计的新型大流量三通压力补偿阀具有较好的负载压力跟随特性,即压力补偿特性良好。

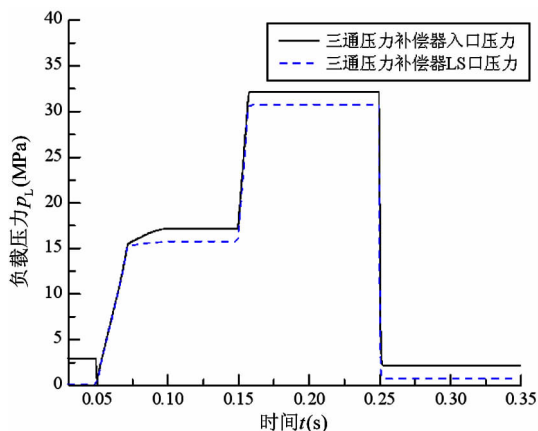
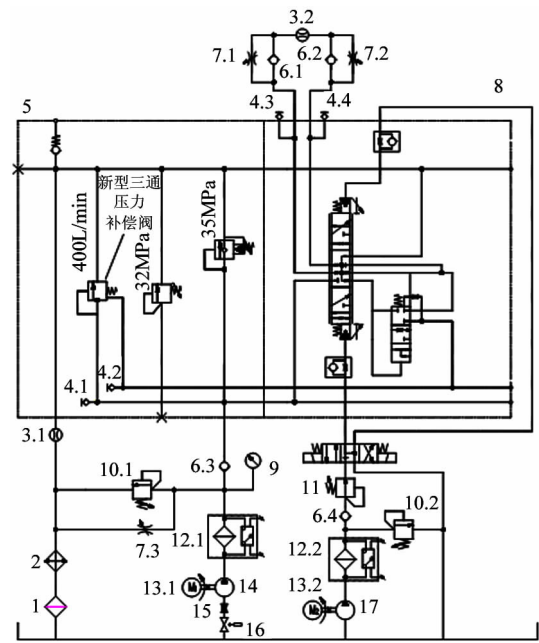


图9 负载变化时P-LS压力跟随特性曲线图

3 实验研究

3.1 实验原理

为验证所设计的新型大流量三通压力补偿阀具有较好的压力卸荷特性及压力补偿特性,利用多路阀综合实验台进行测试实验。实验原理图如图 10 所示。



1-回油过滤器 2-冷却器 3-流量传感器 4-测压接头
5-多路阀连接块 6-单 0 向阀 7-节流阀 8-多路阀换向块
9-压力表 10-溢流阀 11-减压阀 12-过滤器
13-电机 14-定量泵 15-避震喉 16-蝶阀 17-补油泵

图 10 实验系统原理简图

3.2 卸荷压力特性实验

三通压力补偿阀卸荷压力随系统流量变化的实验结果如图 11 所示。可以看出,当流量达到420L/min 的卸荷流量时,其卸荷压力也仅为2.8MPa。满足卸荷流量 400L/min 时卸荷压力低于 3MPa 的设计要求,具有较低的卸荷压力,降低大流量工况下的能耗,符合主机液压系统的要求。

3.3 补偿特性实验

图 12 为负载流量变化时 p-LS 压力跟随特性测试曲线。可以看出,多路阀工作时,该三通压力补偿阀保持了良好的负载压力跟随特性,使系统的供油

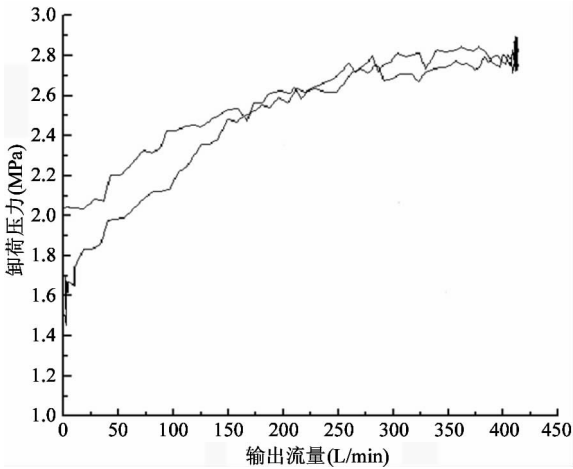


图 11 台架实验系统流量-卸荷压力特性实验

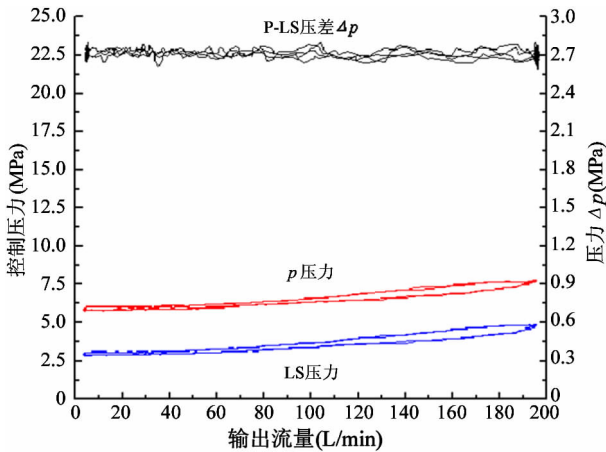


图 12 执行器流量变化时 p-LS 压力跟随特性测试曲线

压力始终保持比负载压力高 2.7MPa 向系统供油,提高系统能量利用率。

4 结 论

本文通过对新型大流量三通压力补偿阀的结构及原理进行理论计算、仿真分析和实验研究,得到如下结论:

(1) 采用单通道双溢流型结构,结构设计合理,达到在卸荷流量 400L/min 时卸荷压力低于 3MPa 的设计要求,满足 50 ~ 135T 及履带式起重机等工程机械定量泵液压系统的使用需求。

(2) 三通压力补偿阀阀芯锥角和弹簧刚度对卸荷压力有重要影响。在一定的工作流量下,锥角越小,弹簧刚度越小,系统卸荷压力也越小,系统能耗

降低。

(3) 大流量工况下,负载压力变化时,新型大流量三通压力补偿阀具有良好的负载压力跟随特性,使系统的供油压力仅比负载压力高出一个定值,提高系统能量利用率。

参考文献

- [1] 牛越胜, 张圣峰, 徐兵等. LVDV 多路阀中压力补偿阀的仿真分析. 机电工程, 2011, 28(08): 914-915
- [2] Luo Y, Qiu X, Chen L. Simulation analysis on the flow fields of the pressure compensated valve in the multi-pass valve based on fluent. *Machine Tool & Hydraulics*, 2012, 40(21): 146-150
- [3] 白玉珠, 罗艳蕾. 多路阀出口压力补偿阀特性分析. 煤矿机械, 2012, 33(04): 104-106
- [4] 夏庆超. 某系列负载敏感比例多路阀静态特性研究:[硕士学位论文]. 秦皇岛:燕山大学机械工程学院, 2013. 1-9
- [5] 孙伟. 负载敏感多路阀设计及仿真研究:[硕士学位论文]. 湘潭:湘潭大学机械工程学院, 2013. 1-10
- [6] 毛智勇. 三通压力补偿阀的设计与研究. 液压与气动, 2011, 03: 15-16
- [7] 李新福, 陈伦军, 罗艳蕾等. 定量泵压力补偿系统中三通压力补偿器特性仿真分析. 机床与液压, 2013, 41(07): 172-174

- [8] Sørensen J K, Michael R. Hansen & Morten K. Novel concept for stabilizing a hydraulic circuit containing counterbalance valve and pressure compensated flow supply. *International Journal of Fluid Power*, 2016, 17(03): 153-162
- [9] 刘会永, 刘宗红, 牟东等. 压力补偿器在液压系统中的应用. 煤矿机械, 2010, 31(6): 170-172
- [10] 王宝琳. 负载敏感和压力补偿技术在高空作业车液压系统中的应用. 中国修船, 2009, 22(4): 61-62
- [11] Tita I, Mardare I. Research regarding pressure compensated flow control valves. *Applied Mechanics & Materials*, 2015, 809: 992
- [12] Russ H. The evolution of load-sensing hydraulics. *Diesel Progress Engine & Drives*, 1998, 17(4): 53-55
- [13] 纪绪. 大吨位履带起重机液压系统的动态特性研究:[博士学位论文]. 长春:吉林大学机械科学与工程学院, 2013. 1-15
- [14] 罗艳蕾, 白华, 白玉珠. 定量泵系统中多路阀出口压力补偿特性的仿真研究. 煤矿机械, 2011, 32(09): 58-61
- [15] 徐启杨, 陈业, 曾明波. 大流量压力补偿器在液压系统中的应用. 液压气动与密封, 2013, 08: 63-64
- [16] 叶小华, 岑豫皖, 王爱国. 大流量进口压力补偿器的设计与仿真研究. 机床与液压, 2011, 39(19): 61-62
- [17] 李壮云, 贺小峰, 万会雄. 液压元件与系统. 北京: 机械工业出版社, 2011. 206-208

Design and research of new large flow three-way pressure compensation valves

Ai Chao^{***}, Lin Jiacheng^{*}, Kong Xiangdong^{****}, Zhao Xiaolong^{*}

(* Hebei Province Key Laboratory of Heavy Machinery Fluid Power Transmission and Control, Qinhuangdao 066004)

(** Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science (Yanshan University), Ministry of Education of China, Qinhuangdao 066004)

(*** State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Hangzhou 310027)

Abstract

In the view of the problem that the flow in the pressure compensation valve of the LUDV multi-way valve of a constant hydraulic pump system is low, a new large flow energy-saving pressure compensation valve was designed by theoretical calculation. The valve contains a main channel and two overflow channels. Through the AMESim simulation and experiments, the good unloading pressure characteristic and the good pressure compensation characteristic in large flow working conditions of the new large flow three-way pressure compensation valve were verified. The flow of the new valve can reach 400 L/min and the unloading pressure can be reduced to 3MPa. Thus, the new valve meets the requirements of LUDV multi-way valves in quantitative pump hydraulic systems of construction machinery. The new large flow three-way pressure compensation valve makes an important contribution to the further research on multi-way valves.

Key words: three-way, pressure compensation, constant hydraulic pump system, large flow, LUDV multi-way valve