

文章编号:1671-251X(2024)S2-0215-05

PMW 控制比例多路阀低温特性研究

张登山¹, 杨浩², 刘隽宁¹

(1. 国能神东煤炭集团有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017200;

2. 航天重型工程装备有限公司, 湖北 孝感 432000)

摘要:工程机械经常在低温环境中使用, 液压元件工作性能可能受到影响。多路阀作为液压系统主要的控制元件, 其性能对整机影响较大。为深入了解多路阀在环境温度较低情况下的工作特性, 以 PMW 控制的比例控制负载敏感多路阀为例进行低温性能试验, 并对测试数据进行分析。研究结果可为相似负载敏感多路阀在低温环境下的应用提供参考依据。

关键词:负载敏感; 比例多路阀; 低温特性; 脉宽调制

中图分类号:TD403

文献标志码:A

Research on low temperature characteristics of PMW control proportional multi-way valve

ZHANG Dengshan¹, YANG Hao², LIU Junning¹

(1. CHN Energy Shendong Coal Group Co., Ltd., Erdos 017200, China;

2. Aerospace Heavy Engineering Equipment Co., Ltd., Xiaogan 432000, China)

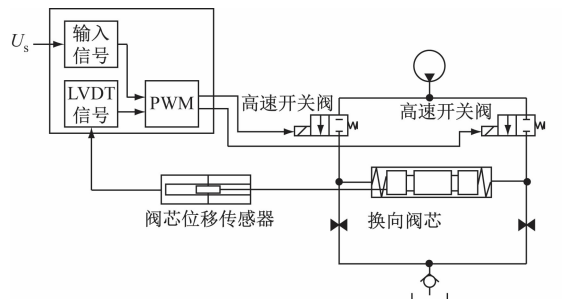
0 引言

工程机械广泛应用于各种低温环境中。对于在低温情况下液压元件的工作特性, 制造商在各自的元件选型样本中一般都介绍得不够全面。由于液压油的黏度等特性会随着温度的变化而变化, 加上电磁铁、控制电路、液压元件内部结构件受到温度变化的影响, 液压元件的工作性能会受到影响, 使得工作特性发生改变。元件工作特性的改变直接影响整个液压系统的匹配特性, 因此, 研究液压元件的低温工作特性十分必要。本文对典型的 PMW 控制电液比例多路阀进行了不同低温不同负载压力情况下的试验测试研究, 并从测试数据中对阀的低温工作特性进行分析。

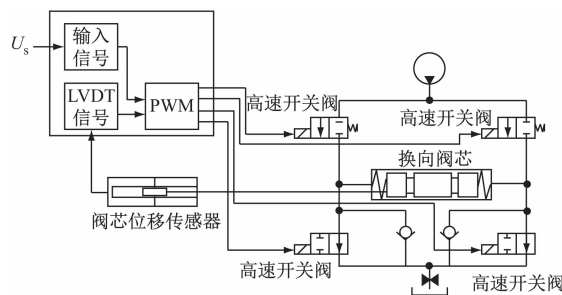
1 负载敏感多路阀工作原理

用于测试的多路阀为 PVG32 的 PVE 系列比例控制负载敏感多路阀, 包括: PVEH 高比例性能多路阀, 具有低迟滞、高控制精度、高响应速度等特点; PVEA 优良比例控制性能多路阀, 具有低迟滞、高分辨率特点, 适用于对响应速度要求不高的场合; PVE 系列多路阀内部集成反馈传感器, 可以实时检测阀芯的运动并产生反馈信号, 根据反馈信号和输

入信号的对比所得的差值, 执行机构通过一个内部的电磁阀桥路配合传感器和控制电路改变阀芯的先导压力等级, 从而控制主阀芯的运动方向、速度和位置。2 种比例控制负载敏感多路阀原理如图 1 所示。



(a) PVEA 多路阀



(b) PVEH 多路阀

图 1 2 种比例多路阀控制原理

2 种比例多路阀都是通过 PMW 脉宽调制信号

收稿日期:2024-10-09;责任编辑:李明。

作者简介:张登山(1975—),男,河南新乡人,高级工程师,现主要从事煤矿管理工作,E-mail:758648232@qq.com。

来实现对阀芯位移的精确控制,指令信号 U_s 经过比例阀控制电路转换为高频 PMW 信号,用于直接控制比例阀内的高速开关阀开启和闭合,从而精确控制换向阀两端的压力差,推动阀芯运动。当阀芯位移达到一定值后,压力差与阀芯弹簧力达到平衡状态,阀芯停止运动。为精确控制阀芯的位移,比例多路阀控制系统需要集成闭环反馈,从而达到纠正开环系统稳态误差的目的。

相较于传统的比例换向阀,这种通过高速开关进行控制的比例阀能够直接与计算机接口连接,不需要 DAC,结构简单,操作维护简便,且抗干扰能力强。

PVEA 比例阀与 PVEH 比例阀的主要不同之处在于阀芯控制液压回路。PVEH 比例阀中的高速开关阀比 PVEA 多 2 个,为了避免阀芯位移过程中出现的死腔阻碍阀芯运动,在阀芯两侧增设 2 个单向阀,以达到疏解阀芯弹簧困油的目的。PVEA 比例多路阀仅是将缺少的高速开关阀用阻尼孔替代,因此在阀芯压差控制的精确程度上,PVEH 更具优势。对于控制精度要求较高、响应速度要求较快的场合,PVEH 比例多路阀明显优于 PVEA 比例多路阀,但 PVEH 内部结构更加复杂,对于液压油的清洁度要求更高,造价较贵,通常对于一些要求不算高的场合,PVEA 比例多路阀也能满足使用要求。

2 测试系统

测试系统采用的低温试验间最低可将温度降至 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在测试液压系统置入低温试验间对测试系统进行降温前,按照图 2 检查各管路连接是否正确可靠。测试液压系统共测试 2 联多路阀,第 1 联多路阀采用 PVEH 高比例性能多路阀,第 2 联采用 PVEA 优良比例性能多路阀。多路阀均采用 C 型阀芯,即阀芯处于中位时 P,T,A,B 口均被切断,当阀芯开度达到最大时,理论设计的最大流量为 45 L/min 。

液压系统采用电动机带动定量齿轮泵作为油源,最大流量为 50 L/min ,最大工作压力为 25 MPa ,压力传感器精度为 1.5% ,流量传感器精度为 3% ,液压系统回路中其他元件按照系统需求选型。控制多路阀用的稳压电源供电电压为 $\pm 50\text{ V}$ 连续可调,满足阀 $+24\text{ V}$ 控制电压需求。液压油源所使用的液压油为 10 号航空液压油,相对于普通工程机械常用的 32 号或 46 号液压油具有更好的低温特性,有利于观察低温对液压阀本身的影响,将液压油因低温产生的影响降到最低。由于测试仅考察阀本身的特性,而负载敏感特性的测试考察必须建立在较完

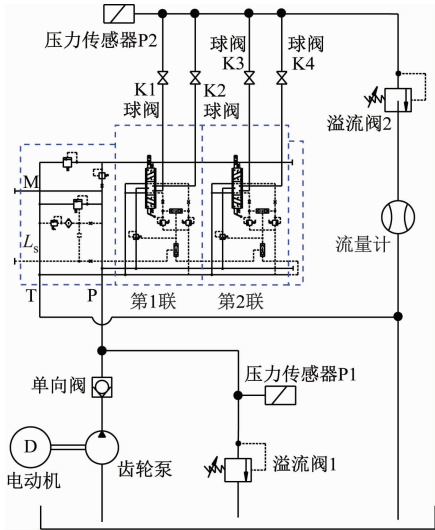
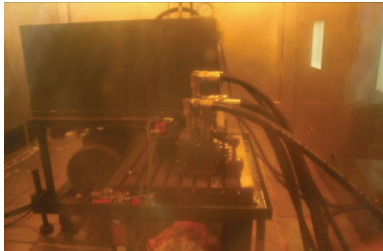


图 2 负载敏感多路阀测试液压系统原理

整的泵、阀、载荷之间的压力传递回路之上,这将为测试带来难以准确评估的外部变量,所以测试回路中对比例阀中的 L_s 反馈油口进行封堵处理。

测试系统搭建完毕后,将设备放置在低温试验间进行低温测试。测试设备状态如图 3 所示。当油温达到测试要求温度后,先测试第 1 联多路阀,打开球阀 K1 和 K2,使第 1 联多路阀的 A,B 口油路接通,其余球阀关闭。启动电动机,调节溢流阀 1 使系统通流量为 50 L/min 时安全工作压力达到 21 MPa ,调节溢流阀 2 来调节负载压力,通过调节电压信号来控制阀口开度。测试过程中记录各传感器数值。测试第 2 联多路阀时,将球阀 K3 和 K4 打开,其余球阀关闭,后续步骤与第 1 联多路阀相同。



(a) 低温试验间中的设备



(b) 温度监控显示面板

图 3 低温试验过程

3 测试数据分析

3.1 试验用液压油特性

瑞典机械工程师协会曾推荐 $1\,500\text{ mm}^2/\text{s}$ 作为

系统启动最大黏度,天津工程机械研究所在我国东北及青藏高原等寒冷地区进行试验后指出冷启动最大黏度为 1 000 mm²/s 左右。本次试验使用的 10 号航空液压经过测试后得到的数据见表 1。

表 1 10 号航空液压油低温测试数据

温度/℃	密度/(g·cm ⁻³)	运动黏度/(mm ² ·s ⁻¹)
+50	0.815	10.17
+20	0.835	20.51
0	0.847	43.31
-20	0.859	107.8
-40	0.872	451
-60	0.872	3 200

对表 1 中的数据进行曲线拟合,拟合函数为指数函数:

$$f(x) = a\exp(bx) + c\exp(dx) \tag{1}$$

其中 $a = 3.34, b = -0.113\ 3, c = 40.14, d = -0.031$ 。经过拟合后, $R^2 = 1$, 剩余标准差为 1.585, 曲线拟合达到预期效果。拟合后的液压油黏温特性曲线如图 4 所示。可看出 -50 ℃ 时黏度约为 1 000 mm²/s, 能够适应启动工作黏度要求。

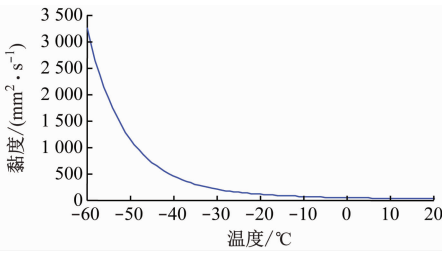


图 4 10 号航空液压油黏温特性曲线

3.2 多路阀测试数据分析

3.2.1 常温测试

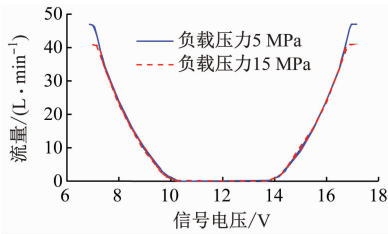
为与低温试验结果对比,进行常温测试。先测试多路阀的常温工作特性,测试时室温为 20 ℃,油温为 50 ℃。测试时信号电压控制阀芯从中位开始移动到 P→A 极限位置,然后回到中位再移动至 P→B 极限位置,最后再次回到中位。测试结果如图 5 所示。图 5 (b) 和图 5 (d) 中, P1 和 P2 为负载 15 MPa 时多路阀前后压力, P3 和 P4 为负载 5 MPa 时多路阀前后压力。

测试结果表明, PVEA 和 PVEH 的流量特性曲线有良好的重复精度, PVEH 的死区比 PVEA 的稍小, 流量特性曲线的线性度较好, P→A 和 P→B 的流量特性曲线对称性良好, 多路阀内的压力补偿器功能良好, 基本可以保持阀的进出口压差恒定。

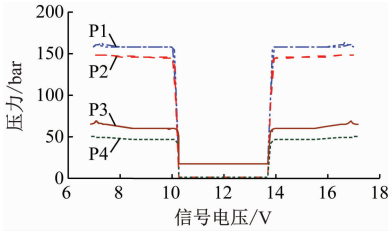
3.2.2 低温测试

1) PVEA 多路阀低温测试。

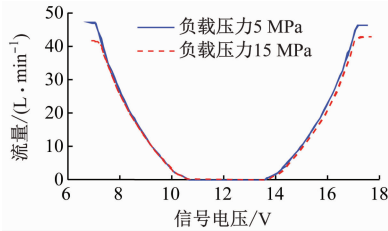
按照与常温测试相同的步骤对 PVEA 多路阀



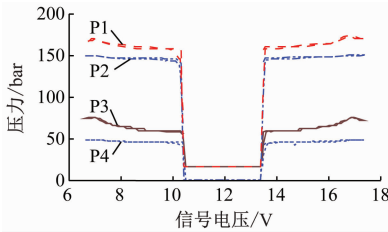
(a) PVEA 流量曲线



(b) PVEA 阀前后压力曲线



(c) PVEH 流量曲线



(d) PVEH 阀前后压力曲线

图 5 常温下多路阀特性曲线

进行测试。根据记录数据绘制各种试验设定状态下的流量特性曲线,如图 6(a)—图 6(c)所示。测试时阀的前后压力测量曲线如图 6(d)所示,其中 P1 和 P2 为 -10 ℃ 时负载压力 5 MPa 下的阀前与阀后压力, P3 和 P4 为 -10 ℃ 时负载压力 15 MPa 下的阀前与阀后压力, P5 和 P6 为 -10 ℃ 时负载压力 5 MPa 下的阀前与阀后压力。各流量特性曲线的滞环宽度如图 6(e)所示,其中曲线 a、b、c 分别代表图 6(a)、图 6(b)、图 6(c)中各流量特性曲线的滞环宽度。

从图 6 可看出,油温为 -20 ℃ 时 PVEA 多路阀流量特性曲线的滞环较明显,根据图 6(e),此时滞环宽度最大值达 7% 以上,流量特性曲线形状变得比较扭曲,流量曲线的线性度受到了较大影响。当油温为 -10 ℃ 时,流量曲线的滞环、死区、线性度基本恢复到常温水平,在 PVEA 多路阀低温试验过程中,压力补偿器控制压差恒定的性能只是略微受到影响,根据实测数据曲线,在低温或大流量时阀的前

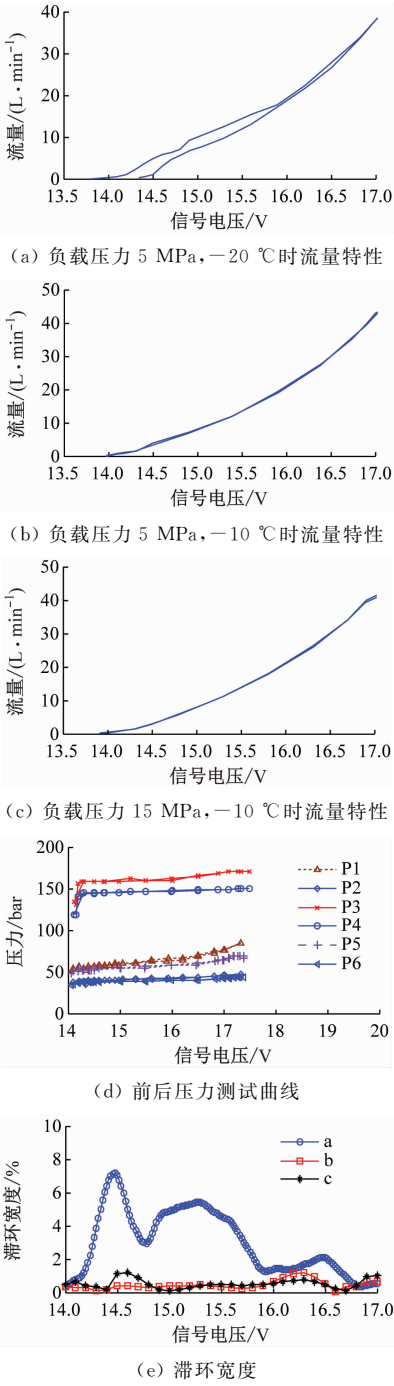


图 6 PVEA 多路阀特性曲线

后压差有扩大趋势。

2) PVEH 多路阀低温测试。

对 PVEH 多路阀进行相同的低温测试,当温度降低到预定温度再对多路阀进行测试,测试步骤与在常温时一致。根据记录的数据绘制各种设定状态下的流量曲线,如图 7(a)—图 7(c)所示。测试时阀的前后压力曲线如图 7(d)所示,其中 P1 和 P2 为 -37 °C 时负载压力 5 MPa 下的阀前与阀后压力, P3 和 P4 为 -10 °C 时负载压力 5 MPa 下的阀前与阀后压力, P5 和 P6 为 -10 °C 时负载压力 15 MPa 下的阀前与阀后压力。各流量特性曲线的滞环宽度如图 7(e)所示,其中曲线 a、b、c 分别代表图 7(a)、

图 7(b)、图 7(c)中各流量特性曲线的滞环宽度。

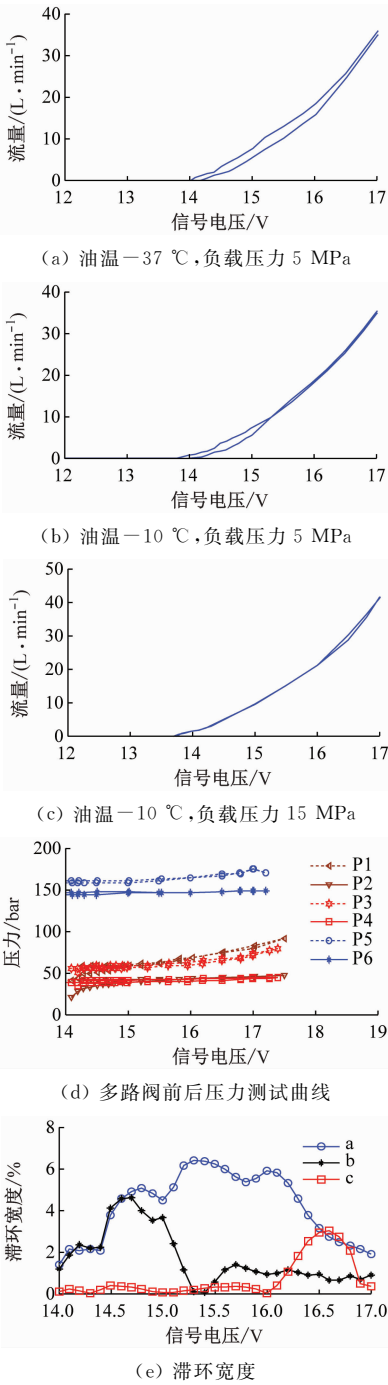


图 7 PVEH 多路阀性能曲线

图 7(a)表明油温为 -37 °C、负载压力为 5 MPa 时,多路阀 PVEH 的重复精度受影响较大,流量曲线的滞环变大;图 7(b)表明油温为 -10 °C 时流量曲线的重复精度提高,但流量小于 10 L/min 时滞环仍较明显;从图 7(c)得出的结论与图 7(b)相似,不同之处在于滞环较明显的区段对应的流量为 25~35 L/min,因此相同温度下负载对于 PVEH 多路阀流量曲线的重复精度也有一定影响;图 7(e)中 a、b、c 3 条曲线对应图 7(a)、图 7(b)、图 7(c)曲线的滞环宽度变化,在 -37 °C 时滞环的变化相对平缓,最大值只有 6%左右。

当温度达到 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,滞环宽度相对于 $-37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 明显减小,但滞环宽度峰值所处位置因负载压力不同而不同。从实测数据可看出, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,5 MPa 负载压力对应的滞环宽度最大值约为 5%,15 MPa 负载压力对应的滞环宽度最大值约为 3%。

4 结论

针对 2 种比例控制负载敏感多路阀进行低温测试,得到不同油温和不同负载压力条件下多路阀的静态特性实测数据,分析得出以下结论:

- 1) 油温在低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时多路阀滞环明显增大,若设备需要在此温度以下的环境中工作,且对流量控制要求较高,则需酌情考虑是否选用。
- 2) 若油温大于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,则多路阀的性能比较稳定,所以本次试验中的 2 种多路阀的正常使用温度建议控制在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。
- 3) 低温对于阀内的压力补偿器影响有限,流量大小对于压力补偿器的压差维持能力影响程度比温度更明显。

研究结果为低温下使用 PVEH 和 PVEA 多路阀提供了较为全面的测试试验根据,为研究其他相似类型的多路阀提供了参考。

参考文献:

[1] 荣相,史哈,蒋德智,等. 一种矿用变频器滤波装置[J]. 工矿自动化,2020,46(5):76-81.

[2] 张莉萍,徐雷,张少秋,等. 某电液比例负载敏感多路阀滑阀的 CFD 数值研究[J]. 机械工程与自动化,2019(3):17-20.

[3] 陈革新,王维福,宋佳,等. 负载敏感比例多路阀中二通压力补偿阀对微动特性的影响[J]. 液压与气动,2018(7):72-80.

[4] 狄九旺,文嘉杰,滕媛媛,等. 基于遗传算法的超低温截止阀密封结构优化[J]. 船舶工程,2023,45(增刊1):245-251.

[5] 程玮玮,吴瑞. 大功率三电平 PWM 整流器无权值系

数预测控制[J]. 工矿自动化,2021,47(1):81-86.

[6] 侯云,侯海峰,张启明,等. 一种高压电磁阀低温环境下 O 形圈密封性能优化[J]. 液压气动与密封,2023,43(9):87-90.

[7] 胡玉龙,刘会勇,罗杨,等. 负载敏感比例多路阀的建模与仿真[J]. 机床与液压,2017,45(1):118-120,132.

[8] 刘继凯,马彪,关万俊,等. 电液比例多路阀泄漏特性研究[J]. 机床与液压,2016,44(3):120-124.

[9] 艾超,林加城,孔祥东,等. 颤振信号对比例多路阀流量波动的影响研究[J]. 高技术通讯,2015,25(6):631-638.

[10] 周连仝,陈思瑶,包磊. 起重机液压多路换向阀试验台的研制[J]. 机床与液压,2014,42(14):79-82,85.

[11] 孟轩,张湛,韩彪. 比例多路阀及其补偿阀工作原理析[J]. 工程机械与维修,2014(6):133-135.

[12] 蔚亚. 基于负载敏感原理的比例多路阀中溢流阀的稳定性分析与改进[D]. 兰州:兰州理工大学,2014.

[13] 郑树伟. 液压阻尼对多路阀特性的影响分析[D]. 秦皇岛:燕山大学,2014.

[14] 蔚亚. 基于负载敏感原理的比例多路阀中溢流阀的稳定性分析与改进[D]. 兰州:兰州理工大学,2014.

[15] 蔡泽能. 机械液压系统中的故障类型与诊断对策探析[J]. 价值工程,2018,37(35):158-159.

[16] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,1990.

[17] 周志强,周海强. 低温液压油的选择[J]. 液压气动与密封,2009,29(2):17-20,34.

[18] 雷天觉. 液压工程手册[M]. 北京:机械工业出版社,2003.

[19] 李伟波. 电液伺服阀低温试验台液压系统设计[J]. 液压与气动,2015(2):95-97.

[20] 李俊士. 矿用电磁先导阀换向特性低功耗测试平台设计[J]. 工矿自动化,2022,48(12):158-163.

[21] 姚卓,王伟,韦文术,等. 本安型电磁阀动静态特性分析及影响参数优化研究[J]. 工矿自动化,2024,50(6):150-158.

[22] 李峰秋. 液压阀低温试验系统及相关要点[J]. 林业机械与木工设备,2005(9):24-25.