DOI: 10.3901/JME.2020.04.233

新型高性能动圈式电液比例阀及其性能*

许小庆 权 龙 王旭平

(太原理工大学机械与运载工程学院 太原 030024)

摘要: 动铁式比例电磁铁作为电液比例阀的机电转换装置,其电磁力本身对铁心位移是非恒定的,其恒定化是研究人员研究的重点之一,并因为铁心的存在导致其线圈电感很大,不利于提高电路的响应速度。为研制高性能电液比例阀/电液伺服比例阀,在前期完成了研究动圈式比例电磁铁及其相关理论的基础上,研制出高性能动圈式比例电磁铁样机,提出了利用动圈式比例电磁铁组成电液比例阀的结构方案,分析具有所提结构的电液比例阀的主要性能,提出了相应的动静态性能试验研究方案,并对这种结构方案进行试验研究。研究结果表明,利用所研制的动圈式比例电磁铁组成比例阀的方案具有动静态性能高的优点,所研制的比例电磁铁静态具有非常好的恒力特性,开环情况下被控阀芯位移对 100% 输入信号的阶跃响应时间不超过 15 ms。研究结果对研制高性能电液伺服比例阀具有积极意义。

关键词: 比例阀; 伺服比例阀; 动圈式比例电磁铁; 性能测试

中图分类号: TG137

New High Performance Electro-hydraulic Proportional Valve and Its Performance

XU Xiaoqing QUAN Long WANG Xuping

(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024)

Abstract: Moving-iron proportional electromagnet is the mainstream electro-mechanical converter of electro-hydraulic proportional valve. Its electromagnetic force is not constant to the displacement of iron core. Constanting the force is one of the key jobs for researchers. And because of the existence of iron core, the coil inductance is very large, which is disadvantageous to improve the response speed of the circuit. In order to develop high-performance electro-hydraulic proportional valve / servo proportional valve, A high-performance moving coil proportional electromagnet has been developed based on the study of the moving coil proportional electromagnet and its related theories in the early study stage. A structural scheme of electro-hydraulic proportional valve composed of moving coil proportional electromagnet is proposed. The main performance of electro-hydraulic proportional valve based on the scheme is analyzed. The corresponding experimental research scheme of dynamic and static performance is proposed, and the structural scheme is studied with the test system. The research results show that the structural scheme of moving coil proportional valve that is developed has high dynamic and static performance. The proportional electromagnet has very strict constant force characteristics. The step response time of spool displacement to the 100% input signal is less than 15 ms in the open loop. The research results are beneficial to develop high performance electro-hydraulic servo proportional valve.

Key words: proportional valve; servo proportional valve; moving coil proportional electromagnet; characteristic testing

0 前言

电液比例阀和电液伺服比例阀广泛应用于制造业、国防工业等领域,是电液伺服系统或电液比例系统的关键控制元件,虽然目前我国已经有企业可以仿制部分国外产品,但产品的性能、可靠性都难

以达到国外同类产品的指标,其应用范围非常有限。因此研制高性能电液比例控制元件对提高我国制造业装备技术水平有积极意义。

作为电液比例控制元件的关键部件的机电转换装置,目前大多数是动铁式比例电磁铁,这种基于电磁吸力的比例电磁铁具有推力大、结构简单的特点,但这种基于电磁吸力的动铁式比例电磁铁,存在明显缺点:① 静态输出力受到铁心位置的严重影响,闭环处理时难度高;② 单

* 国家自然科学基金(51505317)和国家重点研发计划(2018YFB2001202)资助项目。20190315 收到初稿,20191105 收到修改稿

个电磁铁输出力单向输出,实际应用时总是需要两个电磁铁;③ 由于有铁心的存在,通电线圈具有很强的电感,转折频率明显不高。而另外一种电机机械转换器——动圈式比例电磁铁,正好可以克服动铁式比例电磁铁的这几个缺点,一旦研制出相应产品,比动铁式比例电磁铁在性能上具有很强的竞争优势。

国外目前对动铁式比例阀的研究已经比较成熟,比如关于动铁式比例阀模型研究^[1]、电磁铁阀芯力及位移控制技术^[2]等,并已经有了占据市场主导地位的电液伺服比例阀,如美国穆格公司的伺服比例阀系列产品^[3],德国力士乐公司的系列产品^[4]。在动圈式比例元件的研究方面,能看到的资料很少,相关产品也很少。国外目前研究较多的是基于新材料、新结构的电机机械转换元件,并有一定研究成果,如德国学者研究的电致伸缩直驱伺服阀^[5],其带宽可以轻松达到 1 kHz 以上,但消耗的功率太大,几乎无法应用,日本学者研究的磁致伸缩直驱伺服阀^[6],其动态响应快,但静态输出量非常小且温飘大。目前为止还没有见到具有竞争力的基于新材料的比例阀或伺服阀产品。

国内在电液比例控制元件的研究上,以跟随国外为主。动铁式比例电磁铁的研究方面有大量已完成的研究成果,如动铁式比例电磁铁的线性特性研究^[7]、耐高压双向驱动器研究^[8]、动铁式比例电磁铁的性能改进方法研究^[9-10],市场上也有国产动铁式比例阀,但这些比例阀均为仿制国外产品,且目前竞争力很弱。在基于新材料的电机机械转换器及比例阀研究方面,国内参与研究的团队较多,并有大量研究成果,例如,压电驱动伺服阀研究^[11-12]、超磁致伸缩驱动器及伺服阀研究^[13-14],但是目前国内也没有见到基于新材料的伺服阀产品和试验样机。也有进行特殊结构比例元件的研究成果^[15]。在动圈式比例元件方面,笔者所在的研究团队在这方面完成了一定的研究成果,如动圈式比例电磁铁研究^[16-17]、双自由度比例电磁铁研究^[18],并在动圈式比例阀方面进行过初级研究^[19]。

为在动圈式比例阀领域实现进一步突破,笔者所在研究团队一直在动圈式比例电磁铁方面进行着不断的研究,将动圈式比例电磁铁与液压阀结合,组成动圈式比例阀,是向研制动圈式伺服比例阀迈出的重要一步,本文将提出相应的组合方案,用于未来组成样机,在理论上研究动圈式电液比例阀的动静态特性,提出试验研究方案并进行试验研究。

1 高性能动圈式比例阀

1.1 动圈式比例电磁铁

图 1 显示的是动圈式比例电磁铁的原理图,永久磁铁在工作气隙中产生均匀磁场,置于磁场中的线圈受到洛伦兹力的作用,通过与线圈连接的输出杆将电磁力输出。

图 1 动圈式比例电磁铁工作原理

在前期的研究工作中,为提高动圈式比例电磁铁的静态输出力,以输出力最大为原则,对永久磁铁、线圈、磁路等参数进行了优化^[17]。为了提高其动态响应速度,在前期研究中,提出了以动圈式比例电磁铁运动部件的加速度为最大值进行优化设计的理论和方法^[19]。

图 2 是研究团队最新研制的高性能动圈式比例电磁铁的样机,与文献[16]所研究的动圈式比例电磁铁相比,其性能有很大提高,这在后面的试验曲线中可以看到。

图 2 动圈式比例电磁铁样机

图 3 显示的是最新研制的动圈式比例阀样机的静态试验测试结果 $F=(i, x)$ 关系,可明显看出输出力对线圈位移的恒值特性、与线圈电流几乎完全是线性关系。

这种新的动圈式比例电磁铁具有推力大、摩擦力小、动态响应快的特点,用其组成的比例阀与动铁式比例阀相比,有以下明显特点。

(1) 动圈式比例电磁铁的输出力为 $F=Bl i$, 其中的磁感强度 B 、线圈长度 l 在工作过程中均不变,因此其输出力仅与线圈电流有关,与线圈运动位移无关。

图3 动圈式比例电磁铁静特性曲线

(2) 输出力 F 的方向与电流的方向有关, 使得电磁铁可通过改变输入电流方向简单地实现双向输出的目的。

(3) 从结构上看, 线圈支架直径大, 内部基本没有铁心, 因此其电感很小, 驱动线圈电流的电路转折频率很高, 为大幅度提高电磁铁的响应速度提供了可能。

1.2 动圈式比例阀

将动圈式比例电磁铁与液压比例阀的阀芯刚性连接, 确保双向驱动方式, 可构成动圈式比例阀, 其中需要保证线圈支架和比例阀阀芯的刚性连接, 如图4所示。这种用动圈式比例电磁铁直接驱动的比例阀, 具备了动铁式比例阀的一些特点, 即电磁铁直接驱动阀芯运动, 无需先导级, 抗污染能力强、可靠性高, 同时还具有很高的转折频率, 即具有很高的动态响应速度。下面对所研制样机进行性能方面的研究。

图4 动圈式比例阀驱动结构

2 动圈式比例阀静态性能

2.1 静态特性

比例阀的静态特性指液压阀阀芯位移 x_v 与比例电磁铁线圈电流 i 或电压 u 之间的静态关系, 理想情况下 $x_v - i$ (或 $x_v - u$) 为一条直线, 并确保 $x_v \in [-x_{vmax}, +x_{vmax}]$ 。

一般情况下, 电磁铁的静态输出为

$$F = f(i, x_v) \quad (1)$$

动圈式比例电磁铁优点之一是其输出力 F 为线圈受到的洛伦兹力 $F = Bli$, 对线圈电流而言输出力具有恒值输出特性, 式(1)也可以写成

$$F = K_i \cdot i \quad (2)$$

式中, K_i 为动圈式比例电磁铁静态增益, 比例阀阀芯受到的静态力包括对弹簧力和液动力, 即

$$F = (K_s + K_r) \cdot x_v \quad (3)$$

式中 K_s 为弹簧刚度, K_r 为液动力刚度, 因此, 阀芯位移为

$$x_v = K_i / (K_s + K_r) \cdot i \quad (4)$$

空载情况下, 液动力为零, 则

$$x_v = K_i / K_s \cdot i \quad (5)$$

2.2 静态特性试验

2.2.1 试验系统

图5是根据所提出的动圈式比例阀组建方案提出的比例阀性能试验研究系统原理。图中比例电磁铁的输出杆与液压比例阀的阀芯刚性连接(满足双向驱动要求)。在不通油的情况下, 为尽量测试到接近通油情况下的动静态特性, 在阀芯两端装上刚度足够大的弹簧用来模拟比例阀工作过程中的稳态液动力, 刚度为 $30 \sim 40 \text{ N/mm}$ 。

图5 动圈式比例阀性能试验研究原理

利用位移传感器和电流表可完成方案中比例阀的静特性 $x_v - i$ 的研究。

试验系统中的数据采集器和控制器主要为对动态性能进行研究, 控制器既可发出直流电压控制信号, 也可产生给定频率的 PWM 控制信号。研究过程中, 不对所研究比例阀的阀芯位移进行闭环控制, 以得到开环情况下所提方案中的比例阀的基本控制特性。图6是试验研究系统照片。

图6 动圈式比例阀性能试验研究系统

2.2.2 静态试验

图7是对方案中比例阀(基于图2样机)进行静态特性的试验测试结果, 试验研究中的比例阀阀芯由所研制动圈式比例电磁铁直接驱动, 即没有进行闭环校正情况下的阀芯位移静态控制特性。

图7 所研比例阀结构的阀芯位移静态控制特性

从图7可看出: ① 所研制的样机静态关系基本呈线性关系, 受到摩擦力及测试环节影响, 其中个别点略有偏差; ② 试验中输入电流为1.8 A时, 电磁铁未见过热现象(手触及有微热感觉), 此时双向总行程不小于2 mm, 单边行程不小于1 mm, 试验研究的比例阀阀芯直径12 mm。如果要求构成一个电液比例阀, 在单边压差3.5 MPa下产生60 L/min的流量, 其阀芯行程或直径小于以上数据, 理论上其液动力约在50 N, 所研比例电磁铁完全可以满足要求。

3 动态性能

3.1 比例阀动态特性

线圈电流*i*与输入电压的关系是 $u = Ri + L di/dt$, 其中,*u*为输入电压,*R*为线圈电阻,*L*为线圈电感, 线圈电流为

$$i = \frac{1}{s/\omega + 1} \cdot \frac{u}{R} \quad (6)$$

式中, 转折频率 $\omega = R/L$ 。所研制动圈式比例电磁铁的最大特点就是电感*L*非常小, 因此 ω 很大, 这是动圈式比例电磁铁的一大优点。

阀芯受力关系为

$$F = M_v \ddot{x}_v + B_v \dot{x}_v + (K_s + K_r)x_v \quad (7)$$

式中, *M_v*为阀芯和线圈及支架等运动部分的总质量, *B_v*为动态过程中的阻尼力, 根据式(2), 可将式(7)写成

$$x_v = \frac{1}{M_v s^2 + B_v s + (K_s + K_r)} \quad (8)$$

理论上, 比例阀的开环传递函数就是式(8)所描

述的简单关系。

3.2 动态特性试验研究系统

动圈式比例阀有很多优点, 为了满足其大电流、双向驱动、高转折频率的要求, 设计满意的驱动电路也是目前存在的一个待研究的问题, 在市场上没有合适的产品并且还没有研制出合适的驱动电路时, 在我们的研究过程中从以下几个方面解决这一问题, ① 采用双向大电流高速驱动电路; ② 采用高频PWM驱动方式; ③ 分析结果时, 考虑动态响应过程是电路响应过程和比例电磁铁响应过程的综合作用结果。

试验研究过程中采用的PWM驱动技术中, 控制器产生的PWM信号经过放大后加载到线圈, 可在一定程度上避免样机加工误差和安装误差带来的摩擦影响。

3.3 试验

图8是所研制动圈式比例电磁铁驱动比例阀阀芯的开环阶跃响应过程, 图中的两条曲线分别设置稳态电流*I* = 0.8 A和*I* = 1.8 A, 负载弹簧刚度约为40 N/mm。

图8 阀芯位移开环阶跃响应(弹簧刚度 40 N/mm)

可以看出种两个驱动电流情况下, 阀芯打开过程的阶跃响应时间都不超过15 ms, 这一时间是放大器、线圈电路、机械运动几个响应过程的综合时间, 这一数值达到甚至超过目前市场上主要比例阀的闭环阶跃响应的速度。

回中位时, 所研比例阀出现明显欠阻尼现象, 因为试验过程中, 回中位采用的是撤掉控制电流的做法, 此时阀芯和线圈完全由弹簧推回中位, 在接近中位时弹簧力很小, 摩擦作用影响相对增加, 一旦实现对阀芯位移的闭环控制, 这种现象比较容易消除。

3.4 影响阀芯响应速度的因素

影响阀芯响应速度的因素, 或进一步提高基于所研究动圈式比例电磁铁的比例阀的响应速度, 可以从以下几个方面进行。

(1) 提高电路的响应速度, 如前所述, 图9中

两条曲线的响应过程均包含了电流 i 对电压 u 的响应过程, 电路响应速度提高必然可以提高比例阀的响应速度。

图9 动圈式伺服比例阀原理

(2) 提高线圈的绕线和走线工艺, 样机研制过程中发现, 改进绕线工艺, 选择恰当尺寸的导线, 对提高驱动线圈的数量有明显作用, 从而提高驱动力, 加快响应速度。

(3) 闭环控制后采用合适的控制方案。

4 动圈式比例伺服阀

对基于所研制动圈式比例电磁铁的比例阀性能研究, 是对动圈式比例阀开环性能的研究。为构成电液伺服比例阀, 还需要实施闭环控制, 以提高其整体指标, 尤其是静态指标。图9显示的是利用所研制动圈式比例电磁铁构成伺服比例阀的方案。其中位移传感器利用现有技术产品, 而高性能的放大电路和优秀的控制策略对伺服比例阀的综合指标有决定性影响, 这也是目前我团队正在进行的研究内容之一。

5 结论

(1) 所研制的动圈式比例电磁铁具有双向输出特性, 输出力对被控阀芯位移具有很好的恒力特性, 对输入电流具有良好的比例特性。

(2) 所提动圈式比例阀结构方案具有较好的线性特性, 其静态输出能力足, 线性度和恒力特性良好, 动态响应时间短, 不超过 15 ms。

(3) 通过对所研究电液比例阀方案实现闭环控制可构成电液伺服比例阀, 其性能可在电液比例阀的基础上大幅提高, 尤其是静态指标。

参 考 文 献

[1] PLATUS D L. Negative-stiffness-mechanism vibration isolation system[C]//Proceedings of the SPIE-the International Society for Optical Engineering. San Jose. International Society for Optical Engineering, 1999,

98-105.

- [2] VAUGHAN N D, GAMBLE J B. The modeling and simulation of a proportional solenoid valve[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1996, 118(1): 120-125.
- [3] CHUNG SOON K, CHARLES ROBERT K, LYNCH ALAN F. Flatness-based feedback control of an automotive solenoid valve[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15: 394-401.
- [4] MOOG. Moog-Valves-D633_D634-Catalog-en.pdf [EB/OL]. [2018-06-05]. <http://www.moog.com>.
- [5] ROXROTH. RC29061.pdf. [2018-06-05]. <https://www.boschrexroth.com>.
- [6] BAUCER F. The use of piezo-actuated for high dynamic servovalves[J]. O+P, 2005: 6.
- [7] SUGIYAMA Takahiro, UCHIDA Kenko. Modeling of direct-drive servovalve which has giant magnetostrictive material and spool position control by gain scheduling[J]. システム / 制御 / 情報, 2001, 14(3): 110-116.
- [8] 李其朋, 丁凡. 比例电磁铁行程力特性仿真与实验研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(2): 104-107.
LI Qipeng, DING Fan. Simulation and experimental study on force-stroke characteristics of proportional solenoid[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(2): 104-107.
- [9] 李其朋, 丁凡, 王传礼. 耐高压双向比例电磁铁的研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(2): 322-325.
LI Qipeng, DING Fan, WANG Chuanli. Study of high pressure bi-directional proportional solenoid[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2006, 40(2): 322-325.
- [10] 许小庆, 权龙, 李斌. 开关型电磁铁控制电液伺服比例阀的方法及实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(21): 93-98.
XU Xiaoqing, QUAN Long, LI Bin. Study on controlling theories and methods of switching solenoids proportional servovalve[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(21): 93-98.
- [11] 王旭平, 权龙, 许小庆. 信号校正改善开关电磁铁特性的原理及方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(12): 117-122.
WANG Xuping, QUAN Long, XU Xiaoqing. Principle and method for improving the switch solenoid characteristics with signal compensator[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(12): 117-122.
- [12] 俞军涛, 焦宗夏, 吴帅. 基于液压微位移放大结构的新压电陶瓷直接驱动阀设计及仿真[J]. 机械工程学报, 2013, 49(2): 151-158.

- YU Juntao, JIAO Zongxia, WU Shuai. Design and simulation study on new servo valve direct driven by piezoelectric actuator using hydraulic amplification[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(2): 151-158.
- [13] 沈传亮, 程光明, 杨志刚. 新型直动式压电伺服阀[J]. 机械工程学报, 2004, 40(9): 125-128.
- SHEN Chuanliang, CHENG Guangming, YANG Zhigang, et al. New type piezoelectric direct drive servovalve[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(9): 125-128.
- [14] 李跃松, 朱玉川, 吴洪涛, 等. 超磁致伸缩伺服阀用电-机转换器传热及热误差分析[J]. 农业机械学报, 2014, 46(2): 343-350.
- LI Yuesong, ZHU Yuchuan, WU Hongtao, et al. Modeling of heat transfer and displacement error from heat of giant magnetostrictive actuator applied in servovalve[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2014, 46(2): 343-350.
- [15] 王传礼, 丁凡, 方平. 基于超磁致伸缩转换器喷嘴挡板阀的控制压力特性[J]. 机械工程学报, 2005, 41(5): 127-131.
- WANG Chuanli, DING Fan, FANG Ping. Control pressure characteristic of nozzle flapper valve base on GMA[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(5): 127-131.
- [16] 吴帅, 彭传龙, 焦宗夏, 等. 比例阀线性双向电磁铁设计与试验研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(22): 200-206.
- WU Shuai, PENG Chuanlong, JIAO Zongxia, et al. Design and experimental research of the linear bi-directional force solenoid for electro-hydraulic proportional valve[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(22): 200-206.
- [17] 许小庆, 权龙, 王旭平. 伺服比例阀用动圈式直线电机[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(12): 92-96.
- XU Xiaoqing, QUAN Long, WANG Xuping. Moving coil linear motor used in servo proportional valve[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(12): 92-96.
- [18] 宋宗南, 许小庆, 高宇. 新型阀用动圈式电机械转换器[J]. 微特电机, 2014, 42(4): 41-43.
- SONG Zongnan, XU Xiaoqing, GAO Yu. New moving coil electro-mechanical transformer used in servo proportional valve[J]. Small & Special Electrical Machines, 2014, 42(4): 41-43.
- [19] 许小庆, 权龙, 王旭平. 双自由度阀用电-机械转换器原理及特性[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(9): 119-124.
- XU Xiaoqing, QUAN Long, WANG Xuping. Principle and characteristics of novel 2-degree-of-freedom electro-mechanical transformers used in valves[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(9): 119-124.
- [20] 张罗涛, 许小庆, 马小刚. 基于动圈式电机械转换器的电液比例阀[J]. 机床与液压, 2018, 46(1): 45-48.
- ZHANG Luotao, XU Xiaoqing, MA Xiaogang. Electro-hydraulic proportional valve based on moving-coil electro-mechanical transformer[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018, 46(1): 45-48.
-
- 作者简介: 许小庆, 男, 1964 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为电液伺服系统、阀用电机械转换器。
E-mail: xuxiaoqing@tyut.edu.cn