

一种大流量高速开关阀的研究与设计*

石延平 刘成文

(淮海工学院机械工程系 连云港 222005)

张永忠

(中国矿业大学机电与材料工程学院 徐州 221008)

摘要: 介绍了一种新型的大流量高速开关阀,它采用二级控制,先导阀采用特殊心结构,并以超磁致伸缩驱动器作为电-机转换装置,大大提高了阀的切换速度及开关频率;主阀采用球阀结构,密封性好,响应速度快。试验结果表明,该阀切换时间为8~10 ms,最大输出流量达到120 L/min。与压电晶体式高速开关阀比较,能够获得更大的输出流量,而耗电功率却大大降低,是一种很有前途的高速开关阀。

关键词: 超磁致伸缩驱动器 PWM 高速开关阀

中图分类号: TG244.3

0 前言

在液压控制系统中,采用脉宽调制(PWM)的液压数字控制,具有工作可靠、维修方便、对油液污染不敏感以及便于与计算机连接等特点。但这种控制方法需要高速开关阀。因为仅当开关阀的开启和关闭时间足够小时,才能提高控制精度。

目前国内对高速开关阀的研制尚处于初始阶段,所研制的几种阀的输出流量都比较小(<20 L/min)。所设计的高速开关阀,采用了新型电-机转换装置及二级控制方式,较好地解决了高速和大流量的矛盾。

1 结构与原理

该阀采用二级控制,其中主阀为二通插装式球阀,如图1所示。

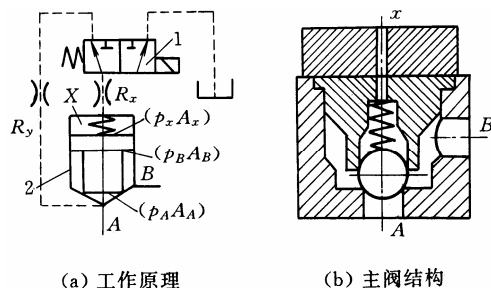


图1 阀的工作原理及结构

1.先导阀 2.主阀

图1中主阀阀心(钢球)的启闭状态由其所受合

力的方向和大小决定。若不计阀心重量和摩擦阻力,得到阀心上的力平衡方程为

$$\sum F = p_x A_x - p_A A_A - p_B A_B + F_1 + F_2$$

式中 p_x, p_A, p_B ——控制腔 x 、工作腔 A 和 B 的压力

A_x, A_A, A_B ——控制腔 x 、工作腔 A 和 B 的面积; $A_x = A_A + A_B, A_A > A_B$

F_1, F_2 ——弹簧力和液动力

在原始状态下钢球受 x 腔压力和弹簧力作用。合力 $\sum F > 0$, 钢球关闭, 入口油路 A 和出口油路 B 不通, 控制腔 x 通过先导阀和阻尼孔 R_x 与入口油路 A 相通。

当驱动器通电, 先导阀换向后, 控制腔 x 与油箱相通, x 腔压力下降。 $\sum F < 0$ 时, 钢球上下产生压差使之抬起, 油路 A 和 B 接通。当先导阀驱动器断电后, 钢球复位。先导阀的工作原理及基本结构如图2所示。其电-机转换装置采用超磁致伸缩驱动器, 基本结构及工作原理如图3所示。

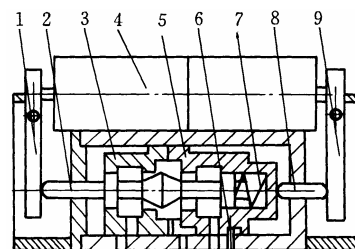


图2 先导阀的结构

1.左杠杆 2.阀心 3.左活动阀套 4.超磁致伸缩驱动器
5.右活动阀套 6.油口定位销 7.复位弹簧 8.推杆 9.右杠杆

由于超磁致伸缩驱动器的输出位移比较小,为使先导阀能够获得较大的通流面积,所以使用了两个相同的超磁致伸缩驱动器,安装在先导阀阀体上,

* 江苏省教育厅自然科学基金资助项目(03KJD460035)。20030226 收到初稿, 20030730 收到修改稿

并分别通过杠杆式位移放大机构,驱动阀心1与活动阀套3、5相对移动,使阀的通流面积得以增大。为便于装配,活动阀套为分体式。另外,为使活动阀套上的油孔与阀体上的油孔能够准确对正,采用定位销6来定位。

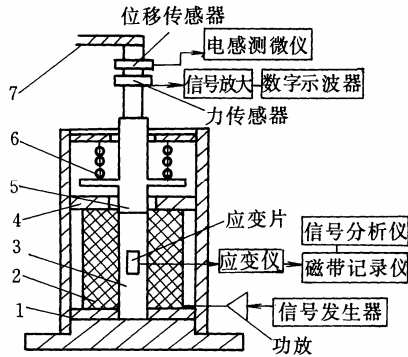


图3 超磁致伸缩驱动器的结构与试验原理图

- 1.底座 2.激励线圈 3.超磁致伸缩材料
4.工业线圈骨架 5.输出杆 6.预压弹簧 7.压盖

超磁致驱动器是基于稀土铁化物超磁致伸缩效应的新型电—机转换装置,其输出位移和力比压电晶体都高,但功率消耗及驱动电压却比较低,因此受到国内外有关研究机构的重视^[1,2]。超磁致伸缩驱动器的结构与试验原理如图3所示。中心的超磁致伸缩材料5为北京科技大学产的 $T_bD_VF_c(\phi 12\text{ mm}\times 110\text{ mm})$,其下端固定于底座1上,上端通过伸缩输出杆5和弹簧6给磁致伸缩材料加上预应力。磁致伸缩材料的周围是产生驱动场的激励线圈2。当采用交流激磁时偏置磁场线圈,超磁致伸缩材料在正负磁场的作用下都为伸长,其产生机械运动的频率是外加电流频率的两倍,这便是所谓的“倍频现象”。消除“倍频现象”需要额外的偏置磁场。另外,如果激磁电流频率很高,则需要安装线圈冷却铜水管。但采用PWM电流激磁时,线圈上只作用正磁场,不存在“倍频现象”,另外高速开关阀的开关频率一般小于200 Hz,所以也不需要冷却装置,从而简化了结构。伸缩传递轴等其他零件均是非磁性不锈钢制成。超磁致伸缩材料呈脆性,为避免其在拉应力状态下工作,需要在其轴向通过弹簧施加预应力,同时,适当的预应力也能提高输出位移。

2 超磁致伸缩驱动器性能试验

2.1 超磁致驱动器的静态特性试验

超磁致驱动器的静态特性曲线,即电流—位移和电流—力曲线,可通过在驱动器输出杆顶端布置电感测微仪和力传感器(如图2所示)测得,如图4所示^[3]。

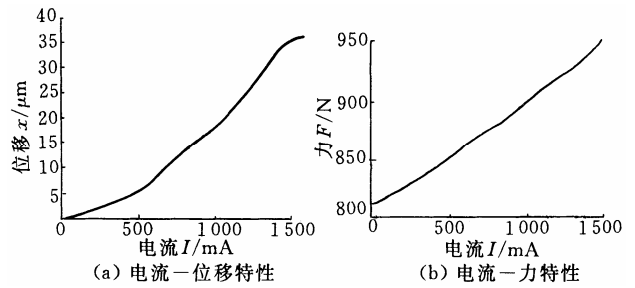


图4 超磁致伸缩驱动器特性曲线

图4a表示磁致伸缩棒的预压力为820 N,即当输入电流为零时,磁致驱动器输出力为820 N,当输入电流为1550 mA时,输出力达980 N;图4b表示在同样输入电流时,位移输出达35 μm,但该位移对于先导阀心的移动还比较小,需要进行放大。本设计采用了如图1所示的放大比为10的杠杆机构。当位移被放大,驱动力相应缩小。但超磁致驱动器输出力大,即使减小输出位移放大的倍数后,仍足以驱动先导阀。

2.2 超磁致伸缩驱动器的动态特性试验

超磁致驱动器的动态特性曲线,即阶跃响应曲线,能够反映驱动器的伸缩时间,可通过在超磁致伸缩棒上粘贴应变片测得,如图3所示。由信号发生器给驱动器输入一阶跃信号,然后通过应变测试装置测得响应曲线,如图5所示。由图5可知,驱动器超磁致棒伸长时间大约为0.25 ms,在0.5 ms附近基本稳定。若采用合适的校正方法,其稳定时间仍能缩短。

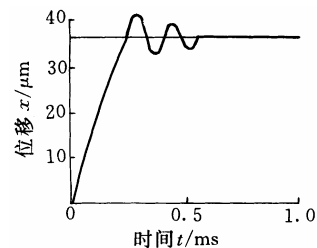


图5 超磁致伸缩驱动器的阶跃响应曲线

3 先导阀的开关特性试验

图6所示先导阀在PWM脉冲信号作用下的动态特性试验曲线,其中阀心的开关运动曲线是基于图7所示的试验装置,通过采用压力传感器及应变仪,测量液压缸进油路压力的变化获得。由图看出实际开关阀的开启和关闭时间要长一些,分别为1.4和1.8 ms。这是由于一方面开关阀阀心运动要消除间隙及克服阻力,使其开关阀开启和关闭时间比驱动器伸缩时间延长;另一方面采用压力法测试要比

位移法测试时间长一些。

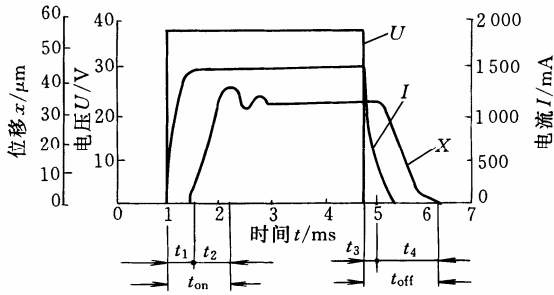


图 6 先导阀的开关动态试验曲线

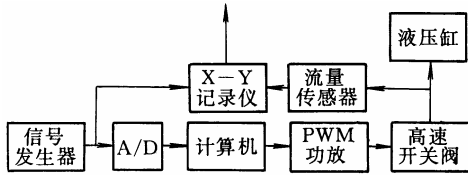


图 7 阀的流量特性试验原理框图

4 主阀的开关特性试验

基于图 7 所示的试验原理，类似先导阀开关动态特性的试验，通过使用压力传感器检测主阀出口油路 B 的压力变化，确定钢球的开启和关闭时间^[4]。一般来说，影响钢球开启和关闭时间的主要因素是先导阀的流量、弹簧刚度及预压力、阻尼 R_x 和 R_y 。为使钢球能达到最大的开启和关闭速度，分别对采用三组不同的弹簧刚度及预压力和不同阻尼 R_x 盖板的主阀，进行了开关动态试验，结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 不同弹簧预压力及刚度时阀的启闭试验结果

	负载压力 p /MPa			弹簧预压力 F /N	弹簧刚度 k /($N \cdot m^{-1}$)
	5	10	20		
开启时间	7	6	5	41.2	4 653
t_{on}/ms	8	7	6	153.0	7 435
	9	8	7	343.2	14 536
关闭时间	18	20	22	41.2	4 653
t_{off}/ms	14	16	17	153.0	7 435
	10	11	12	343.2	14 536

注：阻尼 R_x 为 1.9 mm。

表 2 不同阻尼 R_x 时阀的启闭试验结果

	负载压力 p /MPa			阻尼 R_x /mm
	5	10	20	
开启时间	12	11	10	0.8
t_{on}/ms	10	9	8	1.5
	9	8	7	1.9
关闭时间	16	17	17	0.8
t_{off}/ms	13	14	15	1.5
	9	10	10	1.9

注：弹簧刚度为 $14\ 536\ N \cdot m^{-1}$ ，弹簧预压力为 $342.2\ N$ 。

表 1 表示，阀的开启时间比关闭时间要短。这是由于上下压力相差较大，开启时间就短；关闭时则由于上下压力基本平衡，主要靠弹簧力进行关闭，因而关闭时间就较长。显然增大弹簧预压力和弹簧刚度对开启时间影响不大，但可以缩短阀的关闭时间。但是加大弹簧刚度和预压力会造成阀启闭时较大的压力波动。

表 2 表示，阻尼孔的改变也对阀的启闭时间有影响。这是由于改变阻尼孔的大小，可以改变阀芯上下压差和 x 腔的进、出流量，因而能够调节启闭时间，阻尼孔越大，启闭时间越短，反之则越长。但是加大阻尼孔直径也会造成阀启闭时较大的压力波动。另外，液动力主要在阀芯小开度 ($0 \sim 1\ mm$) 时起关闭作用，与流向无关。表中所示开关阀启闭时间包括先导阀的启闭时间。

5 阀的流量特性

根据图 7 所示的试验原理，在温度为 $30\ ^\circ C$ ，压力为 $5\ MPa$ ，调制频率分别取 $30\ Hz$ 、 $50\ Hz$ 和 $100\ Hz$ 时，得出了如图 8 所示的占空比—空载流量特性曲线。该曲线表明如下现象。

- (1) 当调制频率较低 ($30\ Hz$) 时，曲线的线性范围较大，但曲线粗糙度较大，即流量脉动性大。
- (2) 随着调制频率的提高，流量的脉动减小，但当调制频率取 $100\ Hz$ 时，零偏变大，线性范围有所减小。
- (3) 曲线在 $30\ Hz$ 和 $50\ Hz$ 时，线性范围即没有缩小，流量的脉动性也较低。因此阀的临界频率在此范围。
- (4) 阀的最大空载流量为 $120\ L/min$ 。

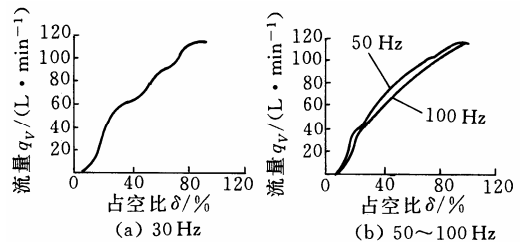


图 8 阀的空载流量特性曲线

6 结论

- (1) 与传统的电磁铁及新型压电晶体式驱动器相比，超磁致驱动器具有输出力及位移大，响应速度快，能量密度高，工作温度范围宽，耗能小。

(2) 采用超磁致驱动器驱动高速开关阀时, 能获得更好的切换特性, 提高 PWM 脉冲信号的调制频率, 获得较高的控制精度。

(3) 设计的先导阀和主阀, 结构简单, 调整方便, 密封性好且动作灵敏。

(4) 由于采用 PWM 脉冲电流激磁, 线圈上只作用正磁场, 不存在“倍频现象”, 所以无需偏置线圈, 简化了结构。

需要说明的是, 温度对超磁致伸缩材料工作性能的影响不能忽略^[5]。随着工作温度的增加, 其工作效率降低, 当温度高于其居里点温度时, 其磁致伸缩特性消失。所以当激磁电流频率很高时, 会因涡流致热而降低驱动功率。通常在超磁致棒的周围安装冷却水管来降低温度。有研究表明, 超磁致伸缩材料产生涡流损耗的极限频率与其几何尺寸(直径)成反比。所以可以根据超磁致棒的直径, 来初步计算所需的激磁频率。目前有关温度对超磁致伸缩材料工作性能影响还有待进一步研究。

参 考 文 献

- 1 Claeysen F, Lhermet N, LeLetty R. Actuators and motors based on giant magnetostrictive materials. *Journal of Alloys and Compounds*, 1997, 258: 61~73
- 2 夏春林, 丁凡. 超磁致伸缩材料驱动器实验研究. *电工技术学报*, 1999(4): 14~17
- 3 吕福在, 项占琴, 戚宗军, 等. 稀土超磁致伸缩材料高速强力微位移机构的开发及动态响应特性研究. *机械科学与技术*, 2001(3): 198~199
- 4 宋拥政. 快速二通插装阀组的工作原理和特性. *锻压机械*, 1997(4): 26~27
- 5 戴道生, 钟文定, 廖绍彬. *铁磁学*. 北京: 科学出版社, 1987

DESIGN AND STUDY OF A NEW KIND OF LARGER FLOW RATE HIGH-SPEED ON-OFF VALVE

Shi Yanping Liu Chengwen

(Department of Mechanical Engineering, Huaihai Institute of Technology, Huaihai 222005)

Zhang Yongzhong

(Institute of Mechanical Electrical and Material Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008)

Abstract: A new kind of high-speed on/off valve is recommended. It has two-stages structure, in which a special valve spool and a giant magnetostrictive actuator as electric-mechanism switchover sets are used for the pilot stage, so the switch speed and frequency of the valve are greatly increased. The second stage of the valve has a ball valve, so its sealing property and respond speed is well. The result of experiment shows that the time of switch is 8~10 ms and the maximum flow has get to 120 L/min. Comparing with the piezoelectric high-speed on-off valve, this valve can get a more output flow and the fall of consume of electric power and is a kind of up-and-coming high speed on-off valve.

Key words: Giant magnetostrictive actuator PWM High-speed on-off valve

作者简介: 石延平, 男, 1958 年出生, 副教授, 博士研究生。主要从事液压传动与控制及现代工况监测方面的教学与研究, 发表论文 20 余篇。

E-mail: shiyanping@163.net