

文章编号:1000-6893(2007)06-1302-05

## 基于旁路溢流原理的流体脉动主动控制

欧阳平超, 刘红梅, 焦宗夏

(北京航空航天大学 303 教研室, 北京 100083)

### Active Control of Fluid Pulsation Based on Bypass Overflow Principle

Ouyang Pingchao, Liu Hongmei, Jiao Zongxia

(Faculty 303, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**摘 要:** 随着现代飞机液压系统向高压、大功率方向发展, 周期性流体脉动更容易在液压能源系统中产生流固耦合振动, 导致液压管路疲劳破坏。针对被动式流体脉动抑制方法不具备自适应性、对低频脉动抑制效果差等缺点, 提出了基于旁路溢流原理的流体脉动主动控制方法, 即在与能源主管路连通的分支管路上安装压电陶瓷驱动伺服阀主动消振器, 通过主动消振器的溢流产生次级脉动波与主管路中原有压力波相互抵消, 使管路中流体脉动减小。并针对流体脉动周期性特点, 提出一种在线频率估计的自适应前馈控制方法, 利用参考传感器测量泵源脉动信号, 在线获取脉动频率, 并以此频率构造控制器的参考输入信号, 实现对流体脉动的主动控制。为验证所提方法的有效性, 设计了主动消振实验平台。实验结果表明, 所提出的脉动主动控制方法具备很强的自适应性, 能对流体脉动进行很好的抑制。

**关键词:** 振动; 主动控制; 流体脉动; 压电陶瓷; 自适应前馈控制

**中图分类号:** TH137      **文献标识码:** A

**Abstract:** With the development of the aircraft hydraulic power supply system towards high pressure and large load, the periodic fluid-borne pulsation in piping readily leads to fluid-structure interaction vibration and mechanical fatigue. Because the application of passive pulsation control is not adaptive and inefficient in low frequency conditions, an active control method based on bypass overflow principle is presented. The second pressure wave produced by the piezoelectric direct drive servovalve which is placed in bypass piping counteracts the primary pressure wave in main piping. Considering the periodicity of fluid pulsation, an adaptive feedforward control method based on on-line frequency estimation is adopted, which acquires the frequency components from the pressure reference sensor and constructs the periodic reference input signals of controller using the acquired frequencies. A test platform is designed and built to validate the vibration attenuation efficiency. The experimental results show that the vibration active control method is adaptive and robust against disturbance, and can gain high pulsation attenuation efficiency.

**Key words:** vibration; active control; fluid pulsation; piezoelectric ceramics; adaptive feedforward control

随着现代飞机液压系统工作压力的大幅提高, 原本对系统安全和可靠性影响不太重要的液压流体脉动, 正成为制约系统向高压发展的瓶颈。飞机能源管路系统中的流体压力脉动主要由于液压系统中轴向柱塞泵的周期性脉动流量经泵内阻、管路液阻及负载阻抗而产生。流体压力脉动会诱发管路系统产生流固耦合振动, 使管路系统疲劳破坏, 导致飞行事故。传统上对液压流体脉动的抑制, 主要采用被动控制方法, 即通过加装阻性消振器或抗性消振器, 改变系统阻抗来减小系统的流体脉动幅值。但是被动控制方法

只能削减某一特定频带内的流体脉动, 对低频脉动的抑制不理想, 而且由于实际液压系统的复杂性, 如非线性、分布参数和不确定性等因素, 使其很容易受外界干扰的影响。被动消振器的结构参数固定, 不具备自适应消振的能力, 难以满足实际要求。因此, 液压流体脉动的主动控制便应运而生。

液压流体脉动的主动控制, 其基本原理是利用主动消振阀生成外界脉动源, 外界脉动源产生的压力脉动波与原系统中的压力脉动波相互抵消, 以此来消减系统中的压力与流量脉动。液压系统流体脉动的主动控制由于具有消振效

收稿日期: 2006-10-09; 修订日期: 2007-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(50575012)

通讯作者: 欧阳平超 E-mail: ouy2004@asee.buaa.edu.cn

果好、自适应能力强等优点,成为各国科研工作者竞相研究的热点。文献[1-4]都对普通液压系统流体脉动主动控制进行了研究,取得了一定的成果。但是,其研究要么是通过在管路中直接加装伺服作动器,通过伺服作动器的往复运动来增大或减小管路容积,产生压力脉动波抵消原有系统的压力脉动;要么是在管路外壁安装压电陶瓷或磁致伸缩等智能材料作动器,通过作动器的运动引起管壁的弹性变形,从而在管路内产生压力脉动波,以此来抵消管路内原有的压力脉动。前者安装普通液压伺服阀,对抑制高频脉动无能为力;后者容易引起管路的振动,都不适合飞机液压能源管路的流体脉动控制。因此,本文提出一种新的基于旁路溢流原理的流体脉动主动控制方法,即在主管路中引出一分叉管路,在分叉管路上安装高频主动消振阀,通过控制消振阀的运动,达到抑制主管路脉动的效果。

飞机在不同的飞行阶段,管路中的流体脉动频率从低到高在一个很宽的范围内变动。为了在所有的频率范围内对流体脉动进行抑制,本文设计了具有高频响的压电陶瓷直接驱动伺服阀,并采用它作为主动消振元件,通过压电陶瓷直接驱动伺服阀旁路溢流的方式产生次级脉动源,次级脉动源产生的压力波与主管路中的压力波相互抵消,使管路中的脉动减小。在控制方法上,采用一种针对周期性脉动特点的在线频率估计的自适应前馈控制方法,利用参考压力传感器的测量信号在线获取泵源脉动频率,并以此频率构造控制器的输入信号。最后,为了验证主动消振的效果,搭建了实验平台,实验证明采用这种方式进行的脉动主动控制能很好地对流体脉动进行抑制。

## 1 流体脉动主动控制原理

液压流体压力脉动主要是由泵的初始流量脉动在泵内阻、管路阻抗及负载阻抗的作用下,在管路中产生的与泵转速及柱塞数成正比的压力脉动波组成。泵的初始流量脉动包含固有脉动和回冲脉动两种,且回冲脉动占主导地位。设固有脉动的脉动频率为  $f_1$ ,回冲脉动的频率为  $f_2$ ,用数学表达式可表示为

$$f_1 = \frac{nz}{30} \quad (1)$$

$$f_2 = \frac{nz}{60} \quad (2)$$

式中: $n$ 为泵的转速; $z$ 为柱塞数目。

液压流体压力脉动的主动抑制与振动和噪声的主动控制原理相同,就是利用主动消振器产生次级脉源。由次级脉源产生的幅值相等,相位相差  $180^\circ$  压力波与管路中初始压力脉动波相互抵消,以实现管路中压力脉动的有效衰减。

采用旁路溢流产生次级脉动波进行流体压力脉动主动抑制时,主动溢流量与系统初始流量相比非常小,且装置简单,控制方便,其基本原理如图1所示。在位于主管路泵出口的0处安装有参考压力传感器;在主管路的1处引出旁路,旁路上安装的压电陶瓷直接驱动阀为主动消振器,主动消振器的阀芯预先有一定的开口;在主管路的2处安装一个误差压力传感器,用于检测消振后的压力脉动大小。理想情况下,在消振后,误差压力传感器测量到的压力脉动应接近零。在控制算法中先对参考压力传感器测量信号进行处理,得到泵源的脉动频率,以获得的频率构造周期信号,作为主动消振器的控制信号。将误差压力传感器所测的消振后的压力脉动量大小作为控制目标,不断调整该周期控制信号的幅值和相位,直到误差压力传感器测量到的压力脉动最小,从而实现了流体脉动的主动抑制。

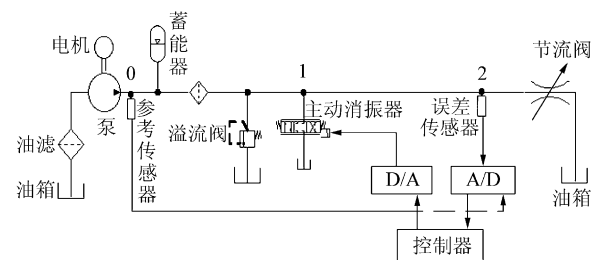


图1 流体脉动主动控制框图

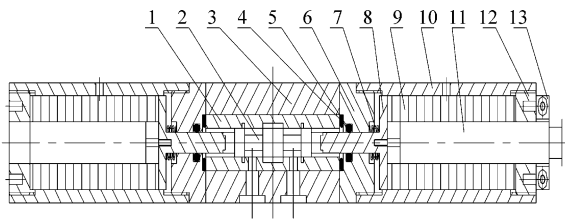
Fig.1 Sketch of active pulsation control

## 2 压电陶瓷直接驱动伺服阀

采用旁路溢流原理对液压流体脉动进行主动控制时,可选用传统的电液伺服阀作为主动消振元件,但电液伺服阀频响低,一般小于  $200\text{ Hz}$ ,难以满足飞机能源管路系统中流体脉动频率在  $200\text{ Hz}$  以上的主动消振要求。因此,设计一种频响高、线性度好,由压电陶瓷元件直接驱动的伺服阀作为主动消振元件是整个脉动抑制过程中最关键的环节。

## 2.1 结构设计与工作原理

压电陶瓷直接驱动伺服阀的结构如图2所示,阀体及阀芯等由普通的电液伺服阀去掉力矩马达和喷嘴挡板机构改装而成。阀体两端为压电陶瓷作动器,压电陶瓷采用中空环型结构,其由力学特性上串联,电学特性上并联的压电陶瓷叠片粘贴而成。其内装位移传感器,传感器动杆与阀芯推杆直接相连,用以检测阀芯位移,位移输出信号作为反馈信号形成闭环控制。两端的调节螺钉用来预紧压电陶瓷片和调节阀芯的初始位置。



图中:1—阀套;2—阀芯;3—阀体;4,5—O型圈;6—端盖;7—弹簧;8—推杆;9—压电陶瓷;10—套筒;11—位移传感器;12—调节螺钉;13—固定夹具。

图2 压电陶瓷直接驱动伺服阀结构

Fig. 2 Structure of piezoelectric direct drive servo valve

对压电陶瓷直接驱动伺服阀两端的压电陶瓷作动器施加大小相等,相位相反的驱动电压,则一端压电陶瓷由于逆压电效应伸长,另一端同时缩短,伺服阀阀芯在伸长的压电陶瓷作用下向缩短另一端方向移动。位移传感器感受阀芯的移动并产生与阀芯位移成正比的电压信号,通过一定的控制算法,实现压电陶瓷直接驱动伺服阀的位移的精确控制。

## 2.2 阀特性实验测试

当施加驱动电压为200 V时,直接驱动阀阀芯位移阶跃响应曲线如图3所示。对其施加正弦驱动电压信号,进行扫频分析,阀芯位移响应幅频和相频宽都超过1000 Hz,实验结果如图4和图5所示。

对压电陶瓷直接驱动伺服阀的静态特性进行测试,在供油压力为5 MPa的情况下,其空载流量特性曲线如图6所示,压力特性曲线如图7所示。从图上可看出,压电陶瓷伺服阀输入电压和输出流量、压力之间存在滞环,这是由压电陶瓷材料本身的特性所决定的,在控制中需加以补偿。

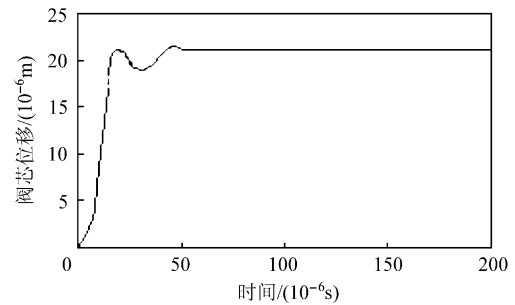


图3 阀芯位移阶跃响应曲线

Fig. 3 Step response of valve spool displacement

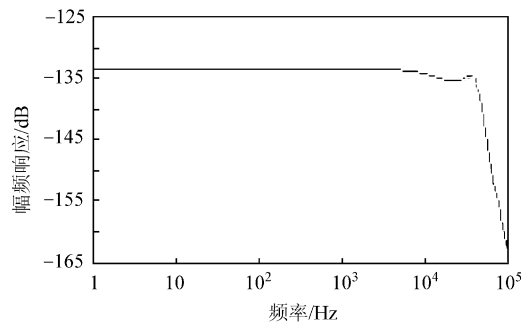


图4 幅频特性曲线

Fig. 4 Amplitude-frequency curve of valve spool

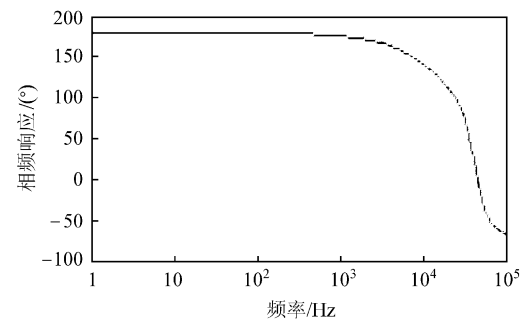


图5 相频特性曲线

Fig. 5 Phase-frequency curve of valve spool

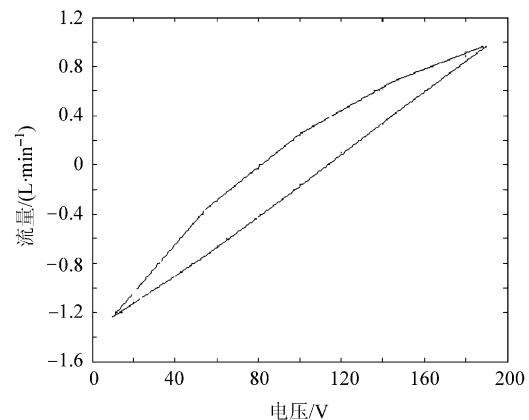


图6 实测流量特性曲线

Fig. 6 Characteristic curve of flow

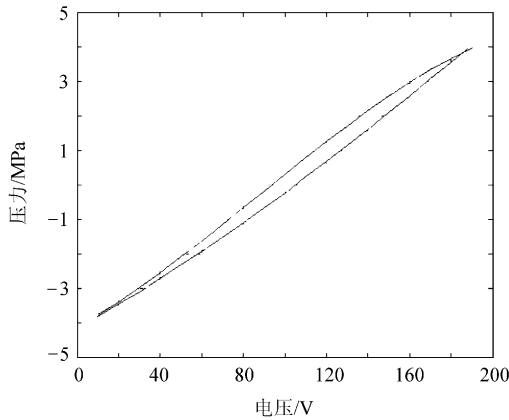


图 7 实测压力特性曲线

Fig. 7 Characteristic curve of pressure

### 3 控制策略

流体脉动主动控制器的结构如图 8 所示,  $p(z)$  为主管路传递函数,  $H(z)$  为控制器输出到误差传感器的次级通道传递函数,  $\hat{H}(z)$  是  $H(z)$  的辨识模型。设参考压力传感器输出的信号为  $x_1(n)$ , 对其做 FFT 变换, 获取泵源的脉动频率  $f_1$  和  $f_2$ , 以获取的频率合成正弦信号, 得参考信号  $r_{11}(n)$  和  $r_{12}(n)$

$$r_{11}(n) = \sin(2\pi f_1 nT) \quad (3)$$

$$r_{12}(n) = \sin(2\pi f_2 nT) \quad (4)$$

式中:  $T$  为采样周期。

对参考信号  $r_{11}(n)$  和  $r_{12}(n)$  相移  $90^\circ$  得到另两个参考信号  $r_{21}(n)$  和  $r_{22}(n)$

$$r_{21}(n) = \cos(2\pi f_1 nT) \quad (5)$$

$$r_{22}(n) = \cos(2\pi f_2 nT) \quad (6)$$

若控制器采用包含 4 个权值参数  $w_{11}, w_{12}, w_{21}$  和  $w_{22}$  的自适应滤波器, 此时控制器的输出信号为

$$\begin{aligned} y_n &= y_1(n) + y_2(n) = \\ &w_{11}r_{11}(n) + w_{12}r_{12}(n) + w_{21}r_{21}(n) + w_{22}r_{22}(n) = \\ &A_1 \sin(2\pi f_1 nT + \varphi_1) + A_2 \sin(2\pi f_2 nT + \varphi_2) \end{aligned} \quad (7)$$

控制器权值的调整采用滤波最小均方(LMS)算法, 控制目标为

$$e^2(n) = (d(n) - y_c(n))^2 \quad (8)$$

由 LMS 算法, 可得权值调整公式

$$\begin{aligned} w_{i,j}(n+1) &= w_{i,j}(n) + 2\mu e(n)r'_{i,j}(n) \\ (i, j &= 1, 2) \end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $\mu$  为权值调整步长;  $r'_{i,j}(n) = r_{i,j}(n)s(n)$ ,  $s(n)$  为次通道的单位脉冲响应, 在实际应用中, 用  $s(n)$  的辨识模型  $\hat{s}(n)$  代替。

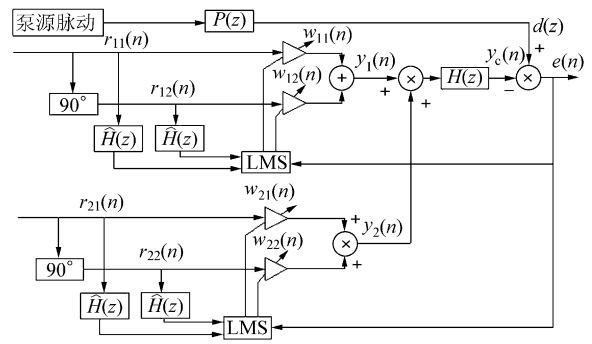


图 8 流体脉动主动控制策略

Fig. 8 Control strategy of fluid pulsation

### 4 实验研究

根据图 5 建立实验平台, 如图 9 所示。其中: 液压泵选用有 9 个柱塞的恒压变量柱塞泵, 型号为 PVBQA5; 参考传感器和误差传感器均为高频动态压力传感器, 型号为 CYG1401; A/D, D/A 数据采集分别采用研华公司的 PCI1716 和 PCI1713 板卡; 控制器采用研华公司的工业控制计算机, 型号为 610H。电机转速为 600 r/min, 油源压力为 5 MPa, 系统采样频率为 2 kHz。图 10 和图 11 为实施主动控制前后流体脉动的结果比较, 可见在泵源脉动的两个频率点 90 Hz 和 180 Hz 处, 主动控制的效果是比较理想的, 消振效果达 10 dB 以上。

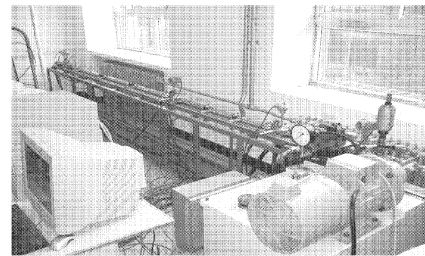


图 9 液压流体脉动主动控制实验台

Fig. 9 Experiment platform

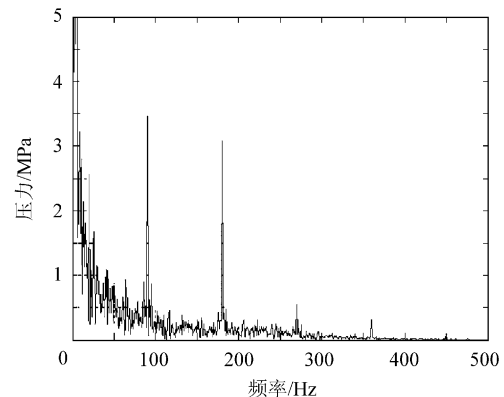


图 10 未实施主动控制压力脉动谱

Fig. 10 Press pulsation spectrums without active control

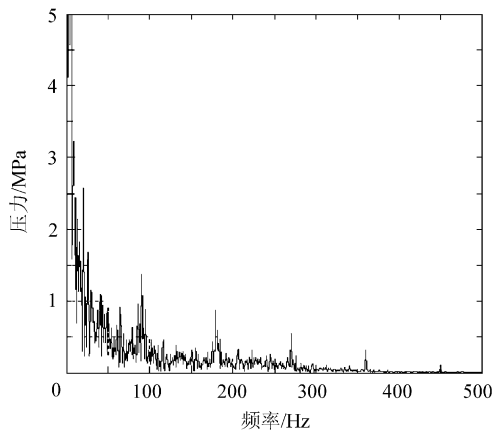


图11 实施主动控制后压力脉动谱

Fig. 11 Press pulsation spectrums with active control

## 5 结论

(1) 提出了基于压电陶瓷直接驱动伺服阀和旁路溢流原理的流体脉动主动控制方法,原理简单,操作方便,克服了传统上采用被动式方法进行流体脉动抑制时的自适应性差等缺点。设计了主动控制平台,对所提出的主动控制方法进行了验证。实验结果表明,该方法具备很强的自适应性,在高、低频都能对脉动进行很好的抑制。

(2) 设计了主动控制方法中的关键元件主动消振阀——压电陶瓷直接驱动伺服阀,对其结构进行了详细说明,对其性能进行了仿真研究。理论和实验都证实所设计的压电陶瓷直接驱动伺服阀频响高,抗干扰强,工作可靠,符合对流体脉动进行主动控制的所有要求。

(3) 针对周期性流体脉动的特点,提出采用基于在线频率估计、自动合成参考信号的自适应前馈控制方法,采用滤波 LMS 算法对控制器权值进行自动调节,实验表明该方法对周期性流体脉动抑制的有效性。

## 参 考 文 献

- [1] Yokota S, Somada H, Yamaguchi H. Study on an active accumulator (Active control of high-frequency pulsation of flow rate in hydraulic systems) [J]. JSME International Journal, 1996, 39(1): 119-124.
- [2] Brennan M J, Elliott S J, Pinnington R J. A non-intrusive fluid-wave actuator and sensor pair for the active control of fluid-borne vibrations in a pipe [J]. Smart Materials and Structures, 1996, 5: 281-296.
- [3] 焦宗夏, 陈平, 华清. 液压能源管路系统振动主动控制的理论研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(4): 465-469.  
Jiao Zongxia, Chen Ping, Hua Qing. Theoretical study on vibration active control of power supply and pipeline system [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(4): 465-469. (in Chinese)
- [4] 刑科礼. 液压系统压力脉动的衰减理论及方法研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 1998.  
Xing Keli. Study on the methods of press pulsation at tenutation in hydraulic system [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1998. (in Chinese)

### 作者简介:

欧阳平超(1977—) 男,博士研究生。主要研究方向:机电控制。

Tel: 010-82326747

E-mail: ouy2004@asee.buaa.edu.cn

(责任编辑:刘振国,鲍亚平)