

超磁致伸缩伺服阀用伺服放大器的设计及分析

李跃松¹,朱玉川^{1,2},吴洪涛¹,田一松³,牛世勇³

(1. 南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016;2. 浙江大学 流体动力与机电系统国家重点实验室,浙江 杭州 310027;
3. 西安飞行自动控制研究所,陕西 西安 710065)

摘要:为驱动超磁致伸缩伺服阀,结合超磁致伸缩执行器驱动电源与伺服阀用伺服放大器的性能要求设计了超磁致伸缩伺服阀用伺服放大器,并建立了其电路模型,仿真分析了功率运算放大器的开环增益对其输出性能的影响。仿真结果表明,在功率运算放大器开环增益大于 80 dB 时,电路特性可满足设计要求。在驱动负载为额定值时,测试结果表明,样机的输出电流线性度为 3%;输出电流 2 A 时,其阶跃响应的调节时间小于 0.5 ms,幅频宽可达 2 kHz;在驱动频率小于 1 kHz 时,输出电流失真小且无相位滞后。

关键词:超磁致伸缩执行器;伺服阀;伺服放大器;开环增益;频宽

中图分类号:TN384 文献标识码:A

Design and Analysis of Servo Amplifier for Servovalve Driven by Giant Magnetostrictive Actuator

LI Yuesong¹, ZHU Yuchuan^{1,2}, WU Hongtao¹, TIAN Yisong³, NIU Shiyong³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. State Key Lab of Fluid Dynamics and Electromechanical System, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
3. Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: To drive servovalve driven by giant magnetostrictive actuator, a new-type of servo amplifier for servovalve driven by giant magnetostrictive actuator has been designed and the circuit model has been established by considering the specification requirements for the driving power of giant magnetostrictive actuator and the servo amplifier using in servovalve. The effect of the open-loop gain of power operational amplifier on its output performance has been simulated and analyzed. The simulation results show that the circuit characteristic can meet the requirements when the open-loop gain of power operational amplifier is more than 80 dB. When the driving load is a rated value, the measured results of the prototype are that the linearity of the output current is 3%, the adjusting time of step response is less than 0.5 ms and the amplitude-frequency bandwidth is 2 kHz at 2 A of output current. When the driving frequency is less than 1 kHz, the distortion of output current is small and no phase lagging.

Key words: giant magnetostrictive actuator; servovalve; servo amplifier; open-loop gain; bandwidth

0 引言

超磁致伸缩伺服阀因具有响应快,精度高及可靠性高等优点而广泛用于航空航天等对电液伺服系统性能要求较高的领域^[1-2]。其使用特性在很大程度上取决于伺服放大器的精度、线性度、稳定性、响应速度及频宽^[3]。传统伺服放大器输出电流较小,而驱动超磁致伸缩执行器的电源又不考虑伺服放大

器的设计要求^[4-5],都不适合驱动超磁致伸缩伺服阀。本文结合两者的特点,设计了驱动超磁致伸缩伺服阀的伺服放大器,并测定了其性能,为超磁致伸缩伺服阀性能的充分发挥奠定了基础。

1 超磁致伸缩伺服阀用伺服放大器的设计

1.1 性能要求

超磁致伸缩伺服阀用伺服放大器的性能应满足

收稿日期:2012-03-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175243,50805080);航空科学基金资助项目(20110752006);流体动力与机电系统国家重点实验室 2011 年度开放基金资助项目(GZKF-201116);江苏省普通高校研究生科研创新计划基金资助项目(CXZZ11_0196)

作者简介:李跃松(1985-),男,河南三门峡人,博士生,主要从事机电控制及自动化的研究。E-mail:liyaosong707@163.com。通信作者:朱玉川,副教授。E-mail:meeyczhu@nuaa.edu.cn。

伺服阀用伺服放大器及超磁致伸缩执行器驱动电源两者的性能要求,具体如下^[4,6-7]:

- 1) 输出电流受负载及外界干扰的影响要小。
- 2) 输出电流非线性失真要小,输入电压与输出电流间的线性度要高。
- 3) 具有较高的响应速度和频宽。
- 4) 具有过载保护电路,电路稳定且可靠。
- 5) 具有双向输出正负电流的能力,且输出功率要足够使超磁致伸缩执行器产生额定位移。

1.2 电路原理

伺服阀用伺服放大器电路由前置放大电路、调零电路、调节电路、颤振信号电路、电压-电流转换电路组成^[3,6],但因前置放大电路、调节电路、调零电路及颤振信号电路的功能可由微控制芯片实现,且复杂的伺服放大器电路会降低超磁致伸缩伺服阀的精度及可靠性,因此采用微控制芯片、高精度数/模转换器及电压-电流转换电路构成超磁致伸缩伺服阀用伺服放大器,此时超磁致伸缩伺服阀用伺服放大器的性能仅取决于电压-电流转换器的性能,设计也主要是电压-电流转换器的设计。

为消除感抗变化造成的伺服阀高频动态增益的变化,且使线圈电感引起的输入电压与线圈中电流的相位滞后减到最小,电压-电流转换器必须具有深度电流负反馈的功率放大器。现有伺服放大器多采用运算放大器构成深度电流负反馈,然后通过三极管将运算放大器的输出功率进行放大^[3,6]。目前集成功率运算放大器的输出功率、带宽、失真度、动态响应等性能超过分立元器件构成的功率放大电路且具有完善的保护电路^[8],因此,高性能的超磁致伸缩伺服阀用伺服放大器的电压-电流转换器应采用集成功率运算放大器为其核心元件。

结合已有伺服阀用伺服放大器电路及超磁致伸缩执行器驱动电源电路^[3,9],设计的超磁致伸缩伺服阀用伺服放大器的核心电路如图 1 所示。

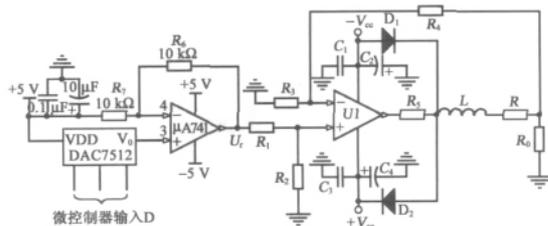


图 1 超磁致伸缩伺服阀伺服放大器核心电路

图 1 中 R_5 起过载保护作用,防止负载短路对功

率运算放大器 U1 造成损坏;电容 $C_1 \sim C_4$ 起滤波作用消除供电电源对电路的影响; L 、 R 分别为伺服阀线圈的电感与电阻;采样电阻 R_0 与 $U1$ 、 R_3 、 R_4 构成具有深度电流负反馈的功率放大电路,保证输出电流不随驱动频率而改变,实现电压到电流转换的功能;运算放大器 $\mu A741$ 与电阻 R_6 、 R_7 构成减法电路与 12 位数/模转换芯片 DAC7512 相连,使电压-电流转换电路的输入电压 U_r 为双向,即

$$U_r = 5 \left[\left(\frac{D}{2^{12}} \right) \left(\frac{R_6 + R_7}{R_7} \right) - \frac{R_6}{R_7} \right] (V) = \frac{10}{4096} D - 5 (V) \tag{1}$$

式中 $D=0 \sim 4095$ 为微控制器的输入。

1.3 电压-电流转换电路建模及其性能仿真

设 $U1$ 的开环增益为 K , $R' = R + R_3$, 伺服阀线圈中电流为 I_o , 则建立电压-电流转换电路模型如图 2 所示。

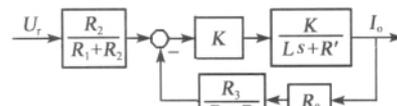


图 2 电压-电流转换电路的模型

将图 2 写成传递函数的形式为

$$I_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{K}{Ls + R'} \frac{U_r}{1 + \frac{K}{Ls + R'} \frac{R_3 R_0}{R_3 + R_4}} \tag{2}$$

式中 s 为复频率。

取电阻 $R_1 = R_2$, $R_3 = R_4$ 则式(2)化简为

$$I_o = \frac{K}{Ls + R'} \frac{U_r}{2 \left(1 + \frac{K R_0}{Ls + R'} \right)} = \frac{K U_r}{2(Ls + R') + K R_0} \tag{3}$$

对于理想功率型集成运算放大器,其 $K = \infty$, 则由式(3)得,伺服放大器的输出电流

$$I_o \approx U_r / R_0 \tag{4}$$

但实际集成功率型运算放大器的 $K = 60 \sim 140$ dB(即 $1 \text{ k} \sim 10^4 \text{ k}$), 为了选择合适的功率运算放大器,需分析 K 对电路性能的影响。虽在一定频率范围内,线圈的电阻与电感随频率而变化,但其阻抗却随频率的增大而增大,预设计伺服阀放大器频宽为 1 kHz , 此时实测线圈电阻 $R = 6 \Omega$, 电感 $L = 3 \text{ mH}$ (含铁心时的电感)。在 $R_0 = 0.5 \Omega$ 时,取 K 分别为 1 k 、 10 k 、 100 k 、 1000 k , 对电压-电流转换电路的静态特性、时域及幅频特性仿真如图 3~5 所示。

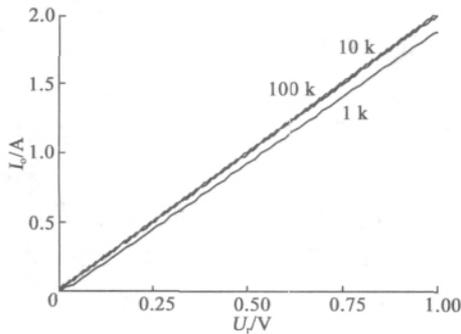


图3 不同 K 下的静态特性曲线

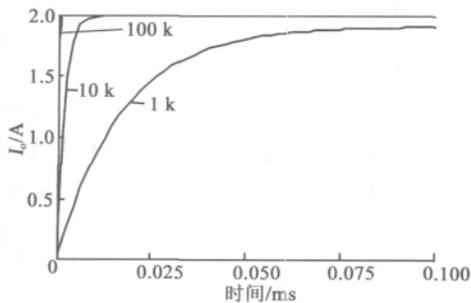


图4 $U_r=1\text{ V}$ 时,不同 K 下的阶跃响应曲线

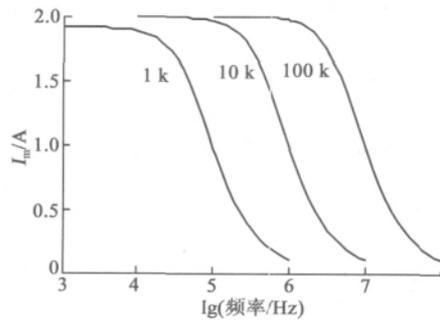


图5 $U_r=\sin(2\pi ft)$ 时,不同 K 下输出电流的幅值 I_m 随频率 f 的变化

由图3~5可知,在功率运算放大器的 $K > 10\text{ k}$,即 $K > 80\text{ dB}$ 时,伺服放大器的静、动态性能均能满足设计要求。

2 性能测试实验

综合性能及价格等因素,功率运算放大器选用失真度 0.01% 、开环增益 86 dB 、最大功率 80 W 、带过热保护等功能的芯片 $LM12\text{ clk}$,研制的超磁致伸缩伺服阀用伺服放大器的样机如图6所示。



图6 超磁致伸缩伺服阀伺服放大器样机

将电流表与线圈串联接入样机,测得线圈中 I_o 与 U_r 的静态关系如图7所示。

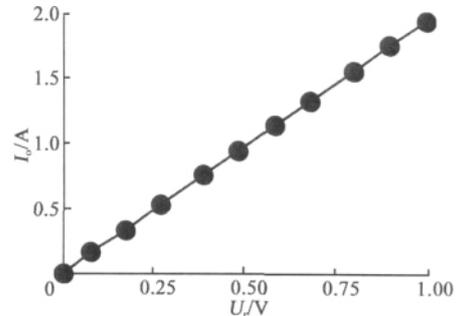


图7 样机的静态特性实验曲线

由于动态电流测量不方便,但线圈中的 I_o 与采样电阻两端电压 U_o 成正比,因此, U_o 与 U_r 的关系即反映了 I_o 与 U_r 的关系,实验结果如图8、9所示。

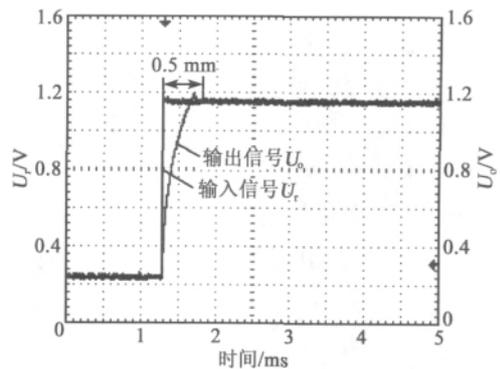


图8 样机的阶跃响应实验曲线

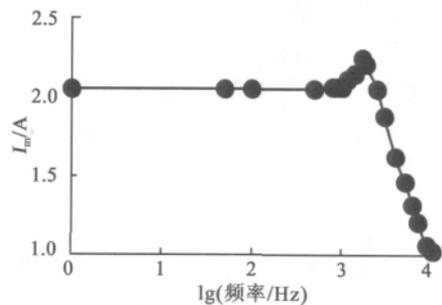


图9 $U_r=\sin(2\pi ft)$ 时,样机 I_m 与 f 的关系

由图7~9可知,所研制的伺服放大器输入电压与输出电流之间近似成线性,线性度可达 3% ;在输入电压为 1 V 下,其调节时间小于 0.5 ms ;在幅值为 1 V 的正弦信号输入下,其幅频宽可达 2 kHz 。

在频率 1 kHz 、幅值 1 V 的正弦信号输入下, U_o 与 U_r 的测试结果如图10所示。由图可知,在 1 kHz 的正弦信号驱动下,研制的伺服放大器样机输出电流不但波形失真小,且与输入信号之间几乎

无相位滞后。

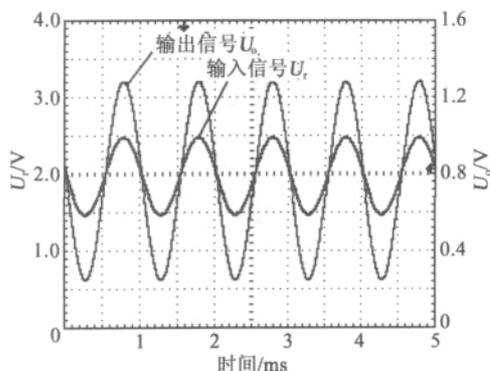


图 10 1 kHz 驱动下,伺服放大器输入与输出的测试结果

3 结束语

采用微控制器、数/模转换器、电压-电流转换器设计了简单可靠的超磁致伸缩伺服阀用伺服放大器,通过实验测得研制样机的线性度为 3%;输入为 1 V 时,其阶跃响应的调节时间小于 0.5 ms,幅频宽可达 2 kHz;在额定的输入电压和驱动频率下,输出电流的失真度和相位滞后较小。

参考文献:

- [1] KARUNANIDHI S. Design, analysis and simulation of magnetostrictive actuator and its application to high dynamic servovalve [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, 157(2): 185-197.
- [2] 李跃松,朱玉川,吴洪涛,等.超磁致伸缩执行器驱动的射流伺服阀参数优化[J].*航空学报*, 2011, 32(7): 1336-1344.
LI Yuesong, ZHU Yuchuan, WU Hongtao, et al. Parameter optimization of jet-pipe servovalve driven by giant magnetostrictive actuator[J]. *Acta Aeronauticae Astronautica Sinica*, 2011, 32(7): 1336-1344.
- [3] 周恩涛,张栋,李井杰,等.伺服放大器的设计及特性仿真[J].*机床与液压*, 2006(2): 113-115.
ZHOU Eentao, ZHANG Dong, LI Jingjie, et al. The design of servo-amplifier and the realization of simulation[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2006(2): 113-115.
- [4] 杨兴,贾振元,武丹.基于功率 MOSFET 的超磁致伸缩执行器驱动电源[J].*压电与声光*, 2001, 23(1): 33-36.
YANG Xing, JIA Zhenyuan, WU Dan. Study on driving power of giant magnetostrictive actuator based on power MOSFET[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2001, 23(1): 33-36.
- [5] JIA Zhenyuan, LIU Huifang, WANG Fujing. Researches on the computer digital control system of giant magnetostrictive actuator[J]. *Mechatronics*, 2009(19): 1192-1196.
- [6] 陈新元,卢云丹.伺服放大器的设计及特性分析[J].*仪表技术与传感器*, 2008(2): 63-64.
CHEN Xinyuan, LU Yundan. Design and characteristic analysis of servo-amplifier[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2008(2): 63-64.
- [7] 郭志佳,刘延斌,孟文宝,等.超磁致驱动式流量阀流量特性的数值模拟研究[J].*重庆邮电大学学报:自然科学版*, 2012, 24(4): 512-517.
- [8] 陈永真.线性功率集成电路原理与应用[M].北京:机械工业出版社, 2009: 80-84.
- [9] 武丹.超磁致伸缩执行器及其控制技术研究[D].大连:大连理工大学, 2000.
- [10] 侯军芳.六自由度微动精密平台主动隔振技术研究[D].石家庄:军械工程学院, 2009.
- [11] 陶帅,白鸿柏,何建设,等.压电作动器位移输出特性分析[J].*压电与声光*, 2010, 32(5): 807-810.
TAO Shuai, BAI Honghai, HE Jianshe, et al. Analysis of the output displacement characteristics of piezoelectric actuator [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2010, 32(5): 807-810.
- [12] 李俊宝.智能桁架结构设计、建模与阻尼控制的理论和试验研究[D].南京:南京航空航天大学, 1996.

(上接第 75 页)

- [19] FROUZAKIS C E, ADOMAITIS R A, KEVREKIDIS I G. An experimental and computational study of subcriticality, hysteresis and global dynamics for a model adaptive control system[C]//Elsevier Science Ltd; European Symposium on Computer Aided Process Engineering-6, 1996: 1029-1034.
- [20] 李俊宝.智能桁架结构设计、建模与阻尼控制的理论和试验研究[D].南京:南京航空航天大学, 1996.

- [21] 侯军芳.六自由度微动精密平台主动隔振技术研究[D].石家庄:军械工程学院, 2009.
- [22] 陶帅,白鸿柏,何建设,等.压电作动器位移输出特性分析[J].*压电与声光*, 2010, 32(5): 807-810.
TAO Shuai, BAI Honghai, HE Jianshe, et al. Analysis of the output displacement characteristics of piezoelectric actuator [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2010, 32(5): 807-810.