

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.06.017

# 电液比例放大器双边驱动电路 设计及颤振信号比较研究\*

刘 宁, 游有鹏\*

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:**为提高数字式比例放大器对比例阀芯控制的精度和快速性,分析了常用反接卸荷式驱动电路的断流现象,提出了一种工作模式灵活的双边驱动电路及其控制逻辑。同时研究了数字式比例放大器颤振信号的叠加与作用效果,给出了一种将颤振信息融合于控制信号 PWM 占空比的颤振叠加实现方法;通过建模仿真和实验,比较了几种常用颤振信号对阀芯运动灵敏度和滞环的作用效果。研究表明:双边驱动电路及其控制逻辑可避免断流,提高比例阀芯定位精度,并且可实现比例方向阀快速换向;方波颤振在提升阀芯运动灵敏度和减小滞环方面优于三角波和正弦波颤振,叠加 20% 的方波颤振比无颤振叠加的阀芯滞环减小近 40%,可显著改善比例阀的定位精度。

**关键词:**数字式比例放大器;驱动电路;颤振叠加;建模仿真

中图分类号:TH137.52;TN722.1

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)06-0692-05

## Design of bilateral drive circuit on electro hydraulic proportional amplifier and comparison of dither signal

LIU Ning, YOU You-peng

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In order to improve the precision and rapidity of proportional valve controlled by digital proportional amplifier, the current interruption phenomenon of commonly used inverse discharging drive circuit was analyzed. A bilateral drive circuit with flexible working mode and its control logic were proposed. At the same time, the dither superposition and its effects of digital proportional amplifier were studied. A method which contains the dither information in the duty cycle of PWM control signal was presented. The effects of several common dither on the motion sensitivity and hysteresis of the spool were compared by modeling simulation and experiment. The results indicate that the bilateral drive circuit and its control logic can avoid the current interruption, improve the positioning accuracy of the proportional spool, and realize the rapid commutation of the proportional directional valve. The square wave dither is superior to the triangular wave dither and the sine wave dither in improving the movement sensitivity of the spool and reducing hysteresis. The hysteresis of the valve spool with 20% square wave dither is reduced by nearly 40% of that without dither, which can significantly improve the positioning accuracy of the proportional valve.

**Key words:** digital proportional amplifier; drive circuit; dither superposition; modeling and simulation

收稿日期:2019-10-22

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB1309200)

作者简介:刘宁(1995-),男,山西忻州人,硕士研究生,主要从事嵌入式电路设计方面的研究。E-mail:1047889691@qq.com

通信联系人:游有鹏,男,教授,博士生导师。E-mail:youypeng@163.com

## 0 引言

电液比例放大器是电液比例阀的控制核心,直接影响电液比例阀的控制性能。目前,电液比例放大器主要有模拟式和数字式两种。其中,模拟式比例放大器通过运算放大器电子元件实现计算,原理简单、电流控制精确(颤振信号叠加方便),但功耗温升大、对电路元件依赖性强;数字式比例放大器通过微处理器实现恒流控制,不仅数据处理能力强,有利于复杂算法的实现,而且驱动电路采用脉宽调制(PWM)信号,控制绝缘栅场效应管(MOS)工作在截止区和饱和区,功耗和发热更低,已逐渐成为当今比例放大器的发展主流<sup>[1]</sup>。

本文针对现有数字式比例放大器的不足,围绕影响性能较大的驱动电路和控制信号颤振叠加开展分析设计;对常用的反接卸荷式驱动电路存在的问题进行分析和改进设计;给出颤振叠加的实现方法,并对颤振叠加信号的类型和参数进行仿真分析与实验比较。

## 1 驱动电路设计

数字式比例放大器主要包括控制电路和驱动电路两部分。控制电路以微处理芯片为核心,计算并输出PWM控制信号;驱动电路负责将控制信号功率放大驱动比例阀。为了保证控制精度和抗干扰性能,常引入阀芯位置反馈和电流反馈<sup>[2]</sup>。

整个比例放大器构成如图1所示。

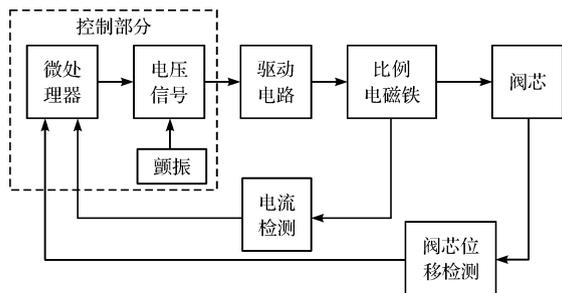


图1 比例放大器系统框图

目前,数字式比例放大器大多采用反接卸荷式驱动电路<sup>[3-4]</sup>,其电路原理简图如图2所示。

图2中,由MOS管控制的上、下桥臂同时导通或关断,当 $U_{PWM}$ 由逻辑1跳变到0时,上、下桥臂同时关断,由于比例电磁铁电感的续流作用,会在线圈两端产生反向的驱动电压,导致电流迅速泄放完毕。

这种方式下驱动电路的动态频宽好,不仅可用于电液比例阀驱动,也适用于柴油机电子燃油喷射等高频响系统。

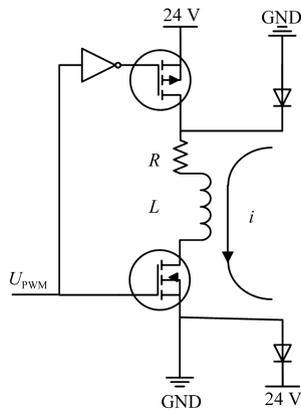


图2 反接卸荷式电路原理简图

但由于电流泄放速度快,当 $U_{PWM}$ 占空比小于50%时,可能导致比例电磁铁电流不连续,即断流现象,从而导致低占空比时阀芯驱动能力迅速下降,影响阀的控制性能。

为解决这一问题,本文将反接卸荷式驱动电路上桥臂和下桥臂的MOS管控制端分开独立控制,构成双边驱动电路。

双边驱动电路原理简图如图3所示。

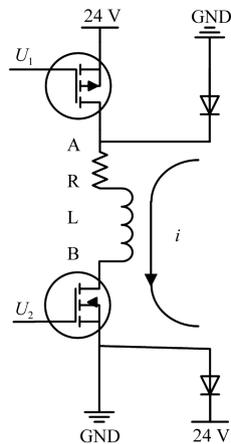


图3 双边驱动电路原理简图

笔者通过设计不同的控制逻辑,形成驱动电路的多种工作模式。

模式1。上、下桥臂同时输入PWM波,电路为传统反接卸荷式驱动电路;

模式2。上桥臂导通,下桥臂输入PWM波,电路为低边驱动形式,通过调整PWM占空比调节电流。下桥臂关断时电流通过二极管续流泄放较慢,电流连续;

模式3。上、下桥臂同时关断,电路为反接卸荷形式,在反向24V作用下电流迅速泄放,可以与模式2配合使用。

双边驱动电路的3种工作模式及其对应的控制逻辑如图4所示。

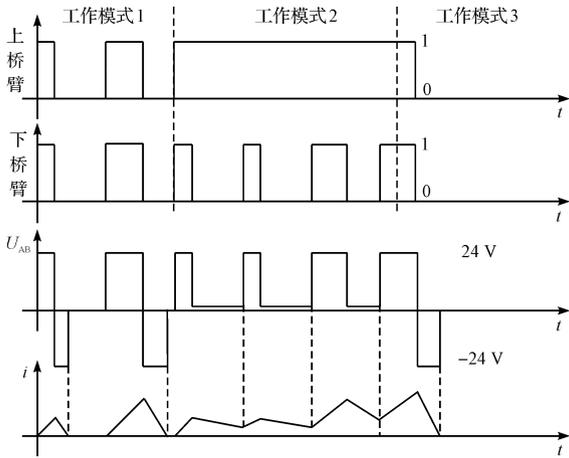


图 4 双边驱动电路工作模式

上、下桥臂导通为逻辑 1, 关断为逻辑 0;  $U_{AB}$ —阀两端电压;  $i$ —比例电磁铁电流

图 4 可知:

利用双边驱动电路可以灵活组合出多种驱动电路形式。如将其应用于电液比例方向阀的控制, 只需模式 2 与模式 3 配合使用: 同向调节比例阀开口大小时, 可用模式 2 保证比例电磁铁电流连续, 避免小占空比时反接卸荷式驱动电路的断流问题; 切换方向时, 可用模式 3 实现电流迅速泄放, 提高换向速度。

因此, 通过双边驱动电路及组合控制逻辑, 不仅克服了反接卸荷式驱动电路 PWM 信号低占空比的断流问题, 提高了阀芯定位精度, 还可方便地实现比例方向阀快速换向控制。

## 2 颤振叠加与分析比较

由于阀芯与阀套间静摩擦大于动摩擦, 阀芯运动灵敏度会降低并且带有滞环。比例放大器常通过叠加颤振信号提高灵敏度、改善滞环<sup>[5]</sup>。

### 2.1 颤振叠加电路设计

数字式比例放大器的驱动信号为 PWM 波, 颤振信息的叠加只能通过 PWM 波占空比体现。叠加的实现方法有软件和硬件两种, 但通过软件编程进行叠加不便, 本文采用硬件实现, 思路是先将微处理器产生的 PWM 信号经过滤波成为直流, 线性叠加颤振信号后, 再将其调制为 PWM 波<sup>[6]</sup>, 此时的 PWM 波占空比便带有了颤振信息。

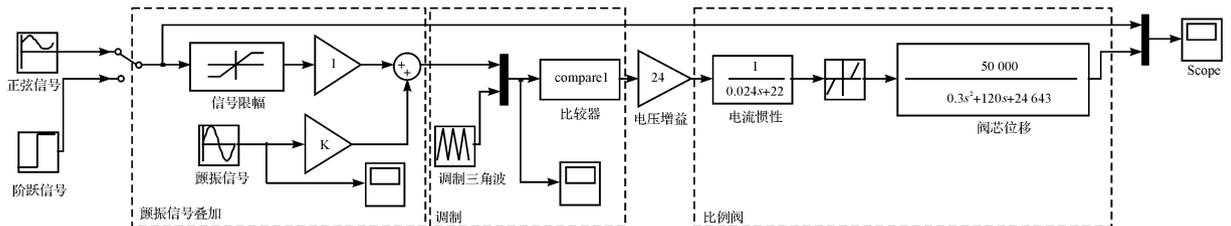


图 6 系统仿真模型

颤振信号线性叠加到直流信号采用加法电路实现, 如图 5 所示。

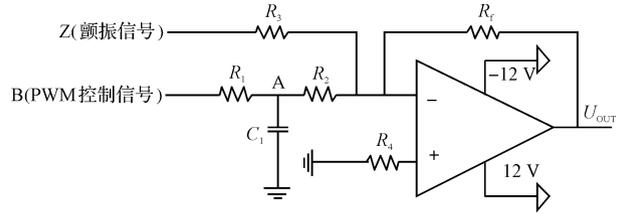


图 5 颤振线性叠加电路

当 PWM 控制信号频率大于  $R_1$  和  $C_1$  组成的低通滤波器截止频率的 10 倍时, 认为高频谐波完全滤去, PWM 控制信号在 A 点变为稳定直流信号, 即:

$$f_{PWM} > \frac{10}{2\pi R_1 C_1} \quad (1)$$

通过式(1) 计算, 可选择合适的电阻电容值。根据相关资料, 此处取电阻  $R_1 = 5 \text{ k}\Omega$ , 电容  $C_1 = 100 \text{ nF}$ , 这样运算电路工作稳定可靠、元件廉价易得<sup>[7]</sup>。

加法电路输出端与 B、Z 两输入端之间的关系可以近似表示为:

$$U_{OUT} = -R_f \left[ \frac{U_Z}{R_3} + \frac{U_{Bdc}}{R_1 + R_2} \right] \quad (2)$$

式中:  $U_{Bdc}$ —B 点 PWM 控制信号的平均值;  $U_Z$ —Z 点颤振电压值。

由式(2) 可知: 通过调整  $U_Z$  或  $R_3$  可独立调整颤振幅值; 由于运算放大器输出反相, 需后接反相器调相<sup>[8]</sup>。

同时, PWM 调制的三角波频率决定了后级驱动电路中 MOS 管的开关频率, 为了降低 MOS 管功耗和温升, 开关频率不宜太高, 但是开关频率太小也会导致比例电磁铁电流寄生颤振<sup>[9]</sup>, 因此, 这里笔者选择三角波频率为 1 000 Hz。

### 2.2 颤振信号的比较分析

工程上常用的颤振信号主要有三角波、正弦波、方波 3 种, 如何选择其类型以及幅值、频率将直接影响比例阀性能。为此, 本文以阀芯微动幅值大小和滞环改善情况为评价指标, 通过建模仿真和实验对 3 种颤振信号及其参数进行评价和优选。

首先本研究通过仿真比较 3 种颤振信号的优劣。

根据电路组成结构, 笔者在 Simulink 中建立比例阀及其放大器的开环模型, 如图 6 所示。

其中,颤振信号叠加和调制部分根据前文电路搭建;比例阀电流惯性环节和阀芯位移环节的具体模型推导可参见有关资料<sup>[10]</sup>。

仿真时,笔者给定控制信号为1.65 V阶跃信号,分别叠加3种颤振信号后比较阀芯处的微动幅值;颤振信号频率为100 Hz、150 Hz和200 Hz,颤振幅值为20%。

实验得到3种颤振叠加的阀芯微动幅值如表1所示。

表1 阶跃信号下不同颤振叠加的阀芯微动比较

颤振信号	100 Hz 微动幅	150 Hz 微动幅	200 Hz 微动幅
	值/mm	值/mm	值/mm
方波	0.095	0.066 8	0.018 1
正弦波	0.074 2	0.041 7	0.017 8
三角波	0.063 9	0.036 9	0.009 1

从表1可以看出:

叠加方波颤振后阀芯微动值最大,原因可能是方波包含多次谐波,即使有部分高次谐波被平滑滤去,仍有部分谐波保留为阀芯微动做出贡献;同时,一定范围内阀芯微动幅值随颤振信号频率增加而下降。当给定控制信号为幅值3.3 V、频率为5 Hz正弦波,仿真上述3种颤振叠加时的阀芯微动情况,仍然是叠加方波颤振后阀芯微动幅值最大。

可见,正弦波、三角波、方波3种颤振叠加信号中,方波的颤振效果最好。

### 2.3 实验及结果分析

为验证数字比例放大器的颤振叠加效果,笔者将前述电路制板并进行实验。实验中,通过比例阀LVDT装置反馈的阀芯滞环大小 $U_b$ 评判颤振叠加效果。

首先比较相同参数下方波颤振、三角波颤振和正弦波颤振对阀芯滞环的影响。为方便观察,笔者选择颤振信号频率为100 Hz,颤振幅值为20%。

改变PWM控制信号占空比,控制阀芯位移从0到极值再返回到0,得到同一占空比下阀开口增大和减小时的阀芯位移反馈值 $U_{b+}$ 和 $U_{b-}$ ,将其作差得到阀芯位移滞环值 $U_b$ ,通过最小二乘拟合后,3种颤振叠加20%的阀芯滞环对比如图7所示。

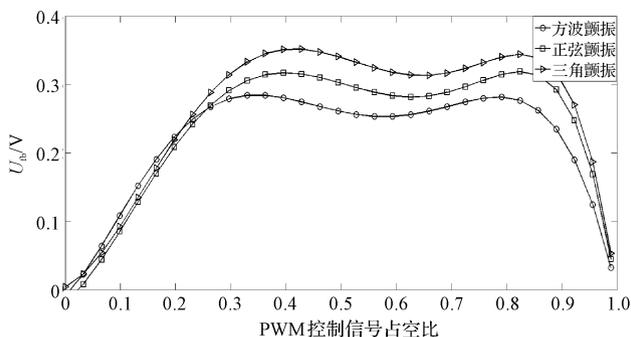


图7 3种颤振叠加20%的阀芯滞环对比

从图7可得,叠加方波颤振后阀芯滞环小于叠加三角波和正弦波的阀芯滞环,说明了相同参数下方波颤振信号效果更佳。

为比较不同振幅的颤振信号对阀芯滞环的影响,笔者分别设定振幅为0、10%、20%、30%的颤振方波,重复上述实验。

实验可得出的阀芯滞环值如图8所示。

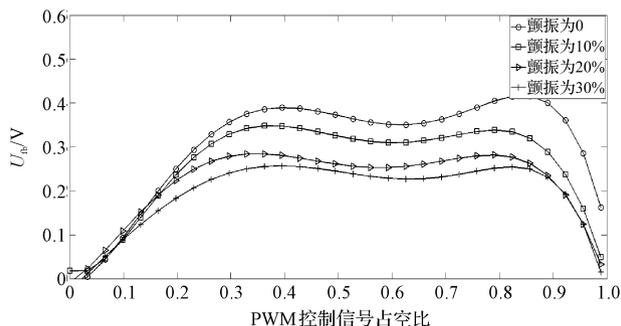


图8 叠加不同振幅方波颤振的阀芯滞环对比

从图8可得,在一定范围内,阀芯滞环随颤振幅值增大而减小,叠加20%的颤振方波时,阀芯滞环比无颤振时减小近40%。

为了保证阀芯运动精度,实际应用中叠加20%的颤振信号即可,无需加大颤振幅值。

### 3 结束语

本文对数字式比例放大器的驱动电路和控制信号颤振叠加进行了分析与设计,在驱动电路方面,分析了反接卸荷电路的不足,并提出了双边驱动电路及其工作模式;在控制电路方面,给出了一种颤振叠加电路方案,对颤振信号类型和参数的作用效果进行了建模仿真和实验验证。

研究表明:方波颤振在提升阀芯运动灵敏度和减小滞环方面优于三角波和正弦波颤振;叠加20%的方波颤振比无颤振叠加的阀芯滞环减小近40%,可显著改善比例阀的定位精度。

本研究可对数字式比例放大器的驱动电路设计和控制信号颤振叠加提供一定的参考。

### 参考文献 (References):

- [1] 许益民. 电液比例控制系统分析与设计[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [2] 曹树平,刘银水,罗小辉. 电液控制技术[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2014.
- [3] 徐兵. 比例放大器驱动电路特性分析及控制器设计[J]. 浙江大学学报,2017,51(4):800-806.
- [4] 尹丽霞. 基于DSP的比例多路阀控制器研究[D]. 洛阳:

- 河南科技大学机电工程学院,2013.
- [5] 吴根茂. 新编实用电液比例技术[M]. 杭州:浙江大学出版社,2006.
- [6] 阮毅,陈伯时. 电力拖动自动控制系统——运动控制系统[M]. 4版. 北京:机械工业出版社,2010.
- [7] 川田章弘. OP放大电路活用技巧[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [8] 成 立,王振宇. 模拟电子技术[M]. 南京:东南大学出版社,2012.
- [9] 朱玉田,唐兴华. 脉宽调制中的颤振算法[J]. 机械工程学报,2009,45(4):214-218.
- [10] JIN Bo, ZHU Ya-guang, LI Wei, et al. A differential control method for the proportional directional valve[J]. **Journal of Zhejiang University (English Edition)**, 2014, 15(10):892-902.

[编辑:李 辉]

## 本文引用格式:

刘 宁,游有鹏. 电液比例放大器双边驱动电路设计及颤振信号比较研究[J]. 机电工程,2020,37(6):692-696.

LIU Ning, YOU You-peng. Design of bilateral drive circuit on electro hydraulic proportional amplifier and comparison of dither signal[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020,37(6):692-696.   
《机电工程》杂志;<http://www.meem.com.cn>

## (上接第 686 页)

- [3] 张传泰. 基于遗传算法和有限元的工件装夹优化研究[D]. 大连:大连理工大学机械工程学院,2010.
- [4] 杨亚辉. 基于混合遗传算法的机床夹具夹紧力优化[J]. 机械设计与制造工程,2016,45(10):25-28.
- [5] 展晓珺,蒋立正,潘柏松. 多轴数控专用机床床身动态特性的可靠性优化研究[J]. 机电工程,2014,31(3):334-337,353.
- [6] 李敏强,寇纪淞. 遗传算法的基本理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [7] BOYLE I, RONG Y, BROWN C D. A review and analysis of current computer-aided fixture design approaches[J]. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, 2010, 27(1):1-12.
- [8] 杨 阳. 基于遗传算法和有限单元法的夹具布局优化[D]. 大连:大连理工大学机械工程学院,2015.
- [9] KUMARSK, PAULRAJ G. Genetic algorithm based deformation control and clamping force optimisation of workpiece fixture system[J]. **International Journal of Production Research**, 2011, 49(7):1903-1935.
- [10] 丁厚安. 改进遗传算法与 ANSYS 协同在结构优化设计中的应用[D]. 南昌:南昌航空大学飞行器工程学院,2016.

[编辑:程 浩]