

# 具有压差反馈的电液伺服阀死区补偿策略及控制特性仿真

梁 强<sup>1</sup>, 刘 芳<sup>1</sup>, 刘红亮<sup>1</sup>, 胡东方<sup>2</sup>, 李 庆<sup>3</sup>

(1. 新乡职业技术学院 汽车技术系, 河南 新乡 453000; 2. 河南科技大学 材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471000;  
3. 郑州机械设计研究院有限公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 针对无阀芯位移电液伺服阀死区引起的流量非线性问题, 在分析电液伺服阀死区模型的基础上, 设计得到了一种具有压差反馈的电液伺服阀死区补偿模型, 实现了无需通过位移反馈便能达到对死区的补偿作用。模拟补偿电压信号增加到电液伺服阀的控制系统中, 并通过设置比例流量阀在不同变化阶段的“电压-流量”斜率来达到快速补偿比例流量阀流量的作用。针对不同进、出口压差条件下的电液伺服阀死区差异, 对电液伺服阀死区进行补偿分析。仿真结果表明: 静态控制特性下, 当进、出口压差从2 MPa升至6 MPa时, 阀芯位移降低近0.1 mm(最大值), 流量死区缩小约2%; 动态控制特性下, 所提出的补偿方法可以将电液伺服阀死区减小到3%, 补偿方法是完全可行的。

**关键词:** 电液伺服阀; 死区补偿; 压力反馈; 控制特性; 比例增益

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.02.024

**中图分类号:** TH137

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940(2022)02-0158-05

## Dead zone compensation strategy and simulation of control characteristics for electro-hydraulic servo valve with differential pressure feedback

Liang Qiang<sup>1</sup>, Liu Fang<sup>1</sup>, Liu Hongliang<sup>1</sup>, Hu Dongfang<sup>2</sup>, Li Qing<sup>3</sup>

(1. Department of Automobile Engineering, Xinxiang Vocational and Technical College, Xinxiang 453000, China;  
2. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, China;  
3. Zhengzhou Machinery Design and Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** Aiming at the non-linear flow problem caused by dead zone of electro-hydraulic servo valve without spool displacement, based on the analysis of the dead zone model of electro-hydraulic servo valve, a compensation model for the dead zone of electro-hydraulic servo valve with differential pressure feedback was designed to achieve the compensation function of dead zone without displacement feedback. Then, the simulation compensation voltage signal was added to the control system of electro-hydraulic servo valve, and the flow rate of proportional flow valve was rapidly compensated by setting the “voltage-flow” slope of the proportional flow valve in different changing stages. According to the difference of the dead zone for electro-hydraulic servo valve under different inlet and outlet differential pressure, the compensation analysis for the dead zone of electro-hydraulic servo valve was carried out. The simulation results show that under the static control characteristics, when the inlet and outlet differential pressure rises from 2 MPa to 6 MPa, the spool displacement decreases by nearly 0.1 mm (maximum), and the flow dead zone shrinks by about 2%. However, under the dynamic control characteristics, the proposed compensation method reduces the dead zone of electro-hydraulic servo valve to 3%, and the compensation method is completely feasible.

**Key words:** electro-hydraulic servo valve; compensation of dead zone; pressure feedback; control characteristics; proportional gain

电液系统被广泛应用于液压控制中, 为了更好地适应多种复杂运行工况, 要求电液比例系统达到更高流量控制精度, 此时常规液压元件已经不能完全满足伺服控制的需求。电液比例流量阀具备运行成本低、控制精度高、不会造成污染等多项优势,

使其成为电液比例控制系统的重要部件<sup>[1-4]</sup>。其中, 阀芯位移与外部输入控制信号呈现正比变化规律, 输出流量和外部输入控制信号也呈现线性变化特征<sup>[5]</sup>。以上阀体结构被设计为阀芯, 处于零位状态下, 阀口产生一定的重叠量, 造成电液比例流量阀在一定的输入信号范围内无法对阀芯移动作出响应, 从而导致电液比例流量阀产生死区现象<sup>[6-7]</sup>。形成死区之后, 比例流量阀会失去原有的控制效果, 控制精度也随之降低<sup>[8]</sup>。

收稿日期: 2021-01-26; 修订日期: 2021-04-25

基金项目: 河南基础科研基金资助项目(51571084)

作者简介: 梁 强(1985-), 男, 学士, 讲师

E-mail: xzy13784933322@163.com

为了克服比例流量阀实际使用过程中的缺陷, 可以采用变幅值补偿方式, 通过对比例流量阀处于不同工作阶段的控制器信号强度进行增益调控, 使阀芯在死区中快速完成运动过程, 可以明显克服比例流量阀产生的死区问题<sup>[9-11]</sup>。此外, 也有一些学者利用信号提前切换补偿的方式来实现补偿作用, 切换过程是在比例流量阀开始换向以及控制信号未达到峰值的阶段进行, 从而起到在峰值两侧平分死区的作用, 有效地减小死区引起的误差, 不过此时阀芯通过死区的时间依然保持恒定<sup>[12-13]</sup>。现阶段基本均是通过位移信号反馈形式进行死区补偿, 鲜有文献报道使用无位移传感器比例流量阀方面的内容。同时, 考虑到阀口压差跟流量表现为非线性变化的现象, 因此, 比例流量阀处于恒压差状态下时输出一种非线性的流量静态曲线<sup>[14-15]</sup>。本文重点分析了无阀芯位移传感器受电液伺服阀死区影响而形成非线性变化的流量, 设计得到了一种经过优化处理的电液伺服阀死区模型, 由此实现无需通过位移反馈便能达到对死区的补偿作用。

## 1 电液伺服阀死区模型

液压系统利用电液伺服阀进行方向与流量控制时均是利用阀芯位置调节的方式来实现。由于实际加工精度有限, 从而造成此类比例流量阀在阀芯区域产生死区的问题, 当阀口进入特定区间输入信号时将不会形成流量。电液伺服阀的实际组成结构如图1所示。

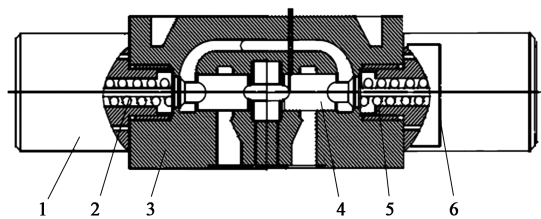


图1 电液伺服阀结构图

1. 电磁铁 2. 弹簧 3. 阀体 4. 阀芯 5. 先导阀 6. 堵丝

Fig. 1 Structure diagram of electro-hydraulic servo valve

在控制期间, 阀芯通过比例电磁铁获得驱动力, 实现对输出流量的控制功能, 但由于此时存在重叠量因素的干扰, 从而造成死区问题。电液伺服阀死区模型如图2所示。其中,  $u_i$  为输入控制信号,  $Q$  为比例流量阀输出流量,  $u_{\min}$  和  $u_{\max}$  分别为正电压下死区的左、右极限,  $-u_{\min}$  和  $-u_{\max}$  分别为负电压下死区的左、右极限,  $\Delta P$  为

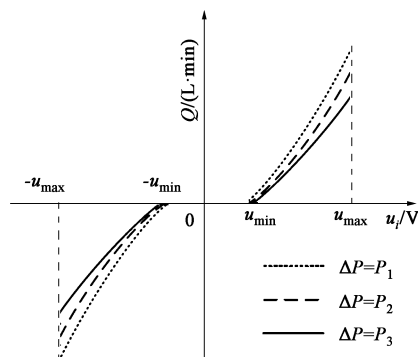


图2 电液伺服阀死区模型

Fig. 2 Dead zone model of electro-hydraulic servo valve

电液伺服阀阀口压差,  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  分别为系统压力的3个典型值。

电液伺服阀的输出流量与控制信号之间的变化趋势呈非线性特征, 可以将其表示为式(1)形式:

$$Q = \begin{cases} -C_d W x(t) \sqrt{2\rho/\Delta P}, & -u_{\max} \leq u_i \leq -u_{\min} \\ 0, & -u_{\min} \leq u_i \leq u_{\min} \\ C_d W x(t) \sqrt{2\rho/\Delta P}, & u_{\min} \leq u_i \leq u_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $C_d$  为阀口流量系数;  $\rho$  为流体密度;  $W$  为面积梯度;  $x(t)$  为阀芯位移;  $t$  为时间。

通过分析可知, 电液伺服阀内产生死区之后, 进入某一输入量区间时, 电液伺服阀中未形成输出流量; 阀口的进口和出口处形成不同的压差时, 电液伺服阀中形成了不同类型的流量死区。

## 2 死区补偿策略

本文根据上述研究内容, 开发了一种能够实现电液伺服阀死区补偿的方法, 通过设置比例流量阀在不同变化阶段的“电压-流量”斜率来达到快速补偿比例流量阀流量的作用。对电液伺服阀死区模型的第1象限进行分析, 重点探讨了电液伺服阀进行死区补偿的过程, 图3显示了对电液伺服阀补偿前后的静态流量控制状态。

在信号放大系统中, 按照基准与非基准压差方法进行模拟补偿电压信号, 通过数模转换后以数字信号的方式增加到电液伺服阀的控制系统中。补偿器原理图如图3所示<sup>[12]</sup>。图3中,  $P_A$  和  $P_B$  分别为进液和出液位置的压差,  $\beta$  为修正系数。

由图3可知, 可以通过下述步骤来实现数字补偿:

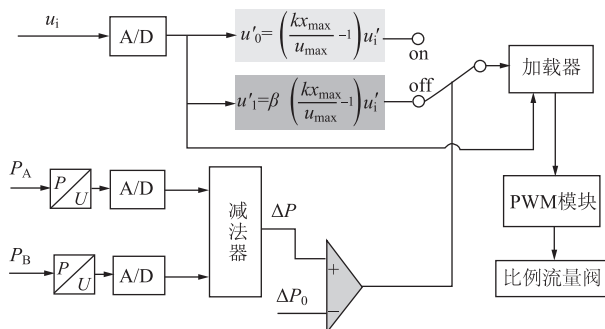


图 3 补偿器原理图

Fig. 3 Principle diagram of compensator

(1) 利用 A/D 转换模块使输入控制信号  $u_i$  被转换为 16 进制的形式  $u'_i$ ，转换过程如式 (2) 所示：

$$u'_i = \text{hex} \left( 3125 \times \frac{u_i}{2} \right) \quad (2)$$

式中： $\text{hex}()$  为模拟量和数字量之间的转换式。

(2) 利用压力传感器采集得到反馈信号，根据减法器运算方式确定进口与出口的压差  $\Delta P$ 。比较  $\Delta P$  与  $\Delta P_0$  ( $\Delta P_0$  为  $\Delta P$  的初始设定值)，在  $\Delta P < \Delta P_0$  的条件下，满足下述关系：

$$u'_0 = \text{hex} \left( 1650 \left( \frac{kx_{\max}}{u_{\max}} - 1 \right) u_i + u_{\min} \right) \quad (3)$$

式中： $u'_0$  为 16 进制补偿信号的设定值； $k$  为阀芯位移调节系数； $x_{\max}$  为比例流量阀阀芯最大位移。

(3) 按照协同分析方法进行比例放大处理，再以加载器和输入控制信号  $u_i$  进行累加，后再将其传输到 DSP 的 PWM 信号输出模块中，得到具有特定占空比  $D_u$  的 PWM 方波信号，把上述方波信号传输至功率放大电路，生成能够进行比例电磁铁驱动电信号。给出了补偿器输出信号  $u_s$  的计算式：

$$u_s = \begin{cases} K_c(u'_i + u'_0), & \Delta P < \Delta P_0 \\ K_c(u'_i + u'_1), & \Delta P > \Delta P_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中： $K_c$  为转换比例； $u'_1$  为 16 进制补偿信号。

为中断程序设置补偿算法，主程序任务结束后，便会发生死循环直至中断。死区补偿算法的运算流程如图 4 所示。

### 3 仿真结果分析

#### 3.1 模型建立

结合以上拉氏转换情况，通过 Simulink 为电液伺服阀构建了图 5 所示的控制模型，其中， $S$  为控制自变量， $K$  为比例增益系数。具体仿真参数见表 1。

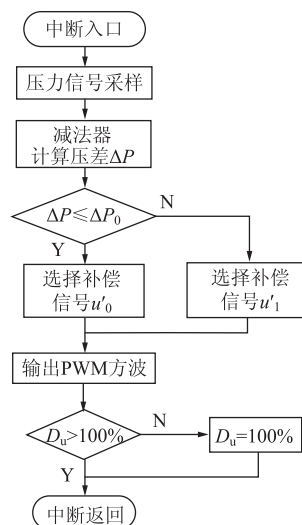


图 4 死区补偿流程图

Fig. 4 Flow chart of dead zone compensation

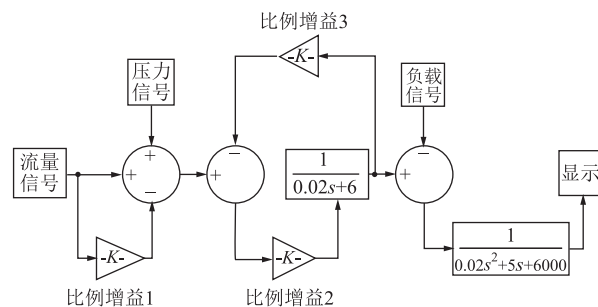


图 5 控制模型图

Fig. 5 Control model diagram

表 1 仿真参数

Table 1 Parameters of simulation

参数	数值
放大器电压放大系数/(V · A <sup>-1</sup> )	2.6
电流反馈系数/(V · A <sup>-1</sup> )	0.41
电阻/Ω	2.2
电感/H	0.02
弹簧刚度/(N · mm <sup>-1</sup> )	25.85
阻尼系数/(N · s · m <sup>-1</sup> )	32.5
电磁铁电流增益/A	28

#### 3.2 静态控制分析

先按照不设置补偿参数的条件对阀芯开展位移静态性能测试。设置进口与出口的压差依次为 2 和 6 MPa，设置电压信号为 0~10 V，设置斜坡信号斜率为 0.2 V · s<sup>-1</sup>，经仿真测试得到图 6 所示的静态控制特性曲线。在进、出口压差为 2 MPa 并且未设置补偿的条件下，电压信号范围在 4~10 V 区间内，阀芯处于 0 位置时，形成的死区比例达到 51%。当超过死区范围之后，阀芯位移相对电压信号参数呈

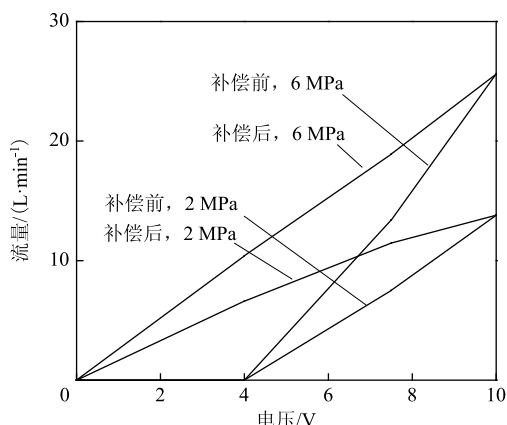


图6 补偿前后静态控制特性

Fig. 6 Static control characteristics before and after compensation

正比关系, 形成最大位移为 1.8 mm。随着进、出口压差从 2 MPa 逐渐提高至 6 MPa, 阀芯位移降低了近 0.1 mm (最大值), 流量死区缩小了约 2%。

### 3.3 动态控制分析

设置死区补偿后, 再进行电液伺服阀静态控制过程的仿真分析。依次设置进口与出口压差依次为 2 和 6 MPa, 设置电压信号为 0~10 V, 设置斜坡信号斜率为  $0.2 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$ , 设定死区补偿后获得的电液伺服阀动态控制特性曲线如图 7 所示。根据图 7 可知, 在 2 MPa 压差下, 未补偿的电液伺服阀的最大输出流量为  $15.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ , 产生的死区占比为 54%; 对上述过程实施补偿的情况下, 获得  $15.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  的最高输出流量, 并使死区占比减小了 4%。在 6 MPa 压差下进行补偿后, 最大输出流量上升了 25.4%, 并且死区范围减小至 3%。由此可见, 利用本文补偿方法可以使电液伺服阀死区减小至 3%, 从而完成对电液伺服阀的死区补偿, 表明这一补偿方法是完全可行的。

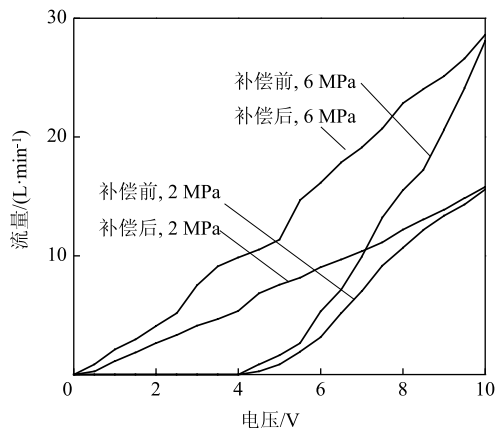


图7 补偿前后动态控制特性

Fig. 7 Dynamic control characteristics before and after compensation

## 4 结论

(1) 静态控制特性: 当进、出口压差从 2 MPa 升至 6 MPa 时, 阀芯位移降低了近 0.1 mm (最大值), 流量死区缩小了约 2%。

(2) 动态控制特性: 所提出的补偿方法可以将电液伺服阀死区减小至 3%, 补偿方法是完全可行的。

### 参考文献:

- [1] 牛勇, 权晓惠, 张营杰. 径向锻造压机电液伺服控制系统建模与仿真 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (2): 144-152.  
Niu Y, Quan X H, Zhang Y J. Modeling and simulation on electro-hydraulic servo control system for radial forging hydraulic press [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (2): 144-152.
- [2] 王灏, 黄家海, 权龙, 等. 基于双线性插值控制策略的比例流量阀特性研究 [J]. 机械工程学报, 2018, 54 (20): 287-296.  
Wang H, Huang J H, Quan L, et al. Characteristics of proportional flow valve based on bilinear interpolation control strategy [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54 (20): 287-296.
- [3] 符耀民, 罗卫东, 贺迪华, 等. 插座阀芯关闭过程内部流场数值模拟研究 [J]. 机械设计与制造, 2020, (9): 144-148.  
Fu Y M, Luo W D, He D H, et al. Numerical simulation of internal flow field in shut-off process of the socket valve core [J]. Machinery Design & Manufacture, 2020, (9): 144-148.
- [4] 宋昭, 刘震洲, 石明礼, 等. 基于积分分离PID神经网络的电液位置同步控制算法 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (5): 167-170.  
Song Z, Liu Z Z, Shi M L, et al. Electro-hydraulic position synchronization control algorithm on integral separation PID neural network [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (5): 167-170.
- [5] 王海民, 胡峰, 陈睿池, 等. 汽轮机高压旁路翼型阀芯调节阀调节特性 [J]. 流体机械, 2020, 48 (6): 44-50.  
Wang H M, Hu F, Chen R C, et al. Regulation characteristics of high-pressure bypass valve with airfoil-shaped spool for steam turbine [J]. Fluid Machinery, 2020, 48 (6): 44-50.
- [6] Huang J H, Dai J J, Quan L, et al. Performance of proportional flow valve with pilot pressure drop-spool opening compensation [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement & Control, 2017, 139 (1): 011009.
- [7] 王慧, 侯冬冬. 电液伺服系统位置跟踪平整度控制策略研究 [J]. 液压与气动, 2019, (7): 107-113.  
Wang H, Hou D D. Research on flatness based controller for position tracking control of electro-hydraulic servo system [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2019, (7): 107-113.
- [8] 白俊, 赵斌, 郝云晓, 等. 基于阀芯结构优化的比例阀液动力补偿方法研究 [J]. 机电工程, 2021, 38 (11): 1444-1450.  
Bai J, Zhao B, Hao Y X, et al. Hydrodynamic compensation method of proportional valve based on valve spool structure optimization [J]. Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38 (11): 1444-1450.