

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.03.006

# 双电磁铁比例方向阀零位位置 控制死区补偿方法研究\*

张佳旭<sup>1</sup>, 俞亚新<sup>1\*</sup>, 翁之旦<sup>2</sup>, 金波<sup>3</sup>, 郭强<sup>3</sup>

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018; 2. 宁波华液机器制造有限公司, 浙江 宁波 315153; 3. 浙江大学机械工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**针对双电磁铁驱动并带有阀心位置传感器的比例方向阀位置控制在零位存在死区的问题,运用 Simulink 对阀心位置控制系统进行了建模,对零位死区的形成原因进行了研究。通过仿真,对形成零位死区的各个影响因素对死区时间的影响程度进行了分析;基于不同的影响因素,提出了零位电流阶跃与衰减式位置指令跳跃的补偿策略;比较了该控制策略与其他控制方法对阀心位置的控制性能,最后通过实验进行了验证。研究结果表明:采用该位置控制补偿策略可以有效地消除由于系统非线性和时变性所带来的比例方向阀的零位位置控制死区,改善了阀心位置的响应波形。

**关键词:**零位位置死区;位置补偿;电流阶跃;比例方向阀;阀心

中图分类号:TH138.52<sup>+</sup>3;TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)03-0262-05

## Dead zone compensation method of zero position control of double electromagnet proportional direction valve

ZHANG Jia-xu<sup>1</sup>, YU Ya-xin<sup>1</sup>, WENG Zhi-dan<sup>2</sup>, JIN Bo<sup>3</sup>, GUO Qiang<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical and Automatic Control, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;  
2. Ningbo HOYEA Machinery Manufacture, Ningbo 315153, China; 3. Department of  
Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of proportional directional valve position control in zero position, which is driven by two electromagnet and with valve center position sensor, the valve center position control system was modeled by Simulink, the cause of zero dead zone was studied. The influence of the factors forming zero dead zone on the time of dead zone was analyzed by simulation. The compensation strategies of zero current step and attenuated position instruction jump were proposed according to different factors, and the compensation performances of different compensation methods were compared. Finally, it was verified by experiments. The results indicate that the dead zone of zero position control and response waveform of the valve, which due to the nonlinear and time-varying system can be effectively eliminated by the position control compensation method.

**Key words:** zero position dead zone; position compensation; current step; proportional directional valve; valve core

收稿日期:2018-09-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51521064)

作者简介:张佳旭(1993-),男,浙江嘉兴人,硕士研究生,主要从事比例方向阀控制方面的研究。E-mail:phzhangjiaxu@163.com

通信联系人:俞亚新,女,副教授,硕士生导师。E-mail:yyxin@zstu.edu.cn

# 0 引言

电液比例阀能够按照输入电信号的大小以及极性来控制输出流量的大小和方向,但当电液比例方向阀处于零位时,不能够线性地响应控制信号,即产生较大的死区。对于以零位为工作点的闭环系统,这样的死区会严重影响系统控制质量,因此要获得良好的伺服控制效果,就必须尽量地减少比例阀死区对系统的影响果<sup>[1]</sup>。对此,国内外专家提出了各种解决的方法。

针对零位附近电流值过小的情况,有不同形式的电流补偿方式,如定值补偿。刘白雁等人<sup>[2]</sup>提出了线性化补偿和智能补偿方法,并被相继运用到比例阀的控制上,大大改善了响应的波形。针对PID控制方式的局限性,衍生出了多种PID控制的变形,比如积分分离、微分先行或者参数自整定的方式,提高了比例电磁铁的控制精度,从而更加精确地控制了阀心的位置<sup>[3-4]</sup>。近年来,又有人提出了模糊控制和神经网络控制等智能控制方式<sup>[5-8]</sup>,有效地改善了系统非线性及时变性带来的影响。ACUÑA-BRAVO W等人<sup>[9]</sup>提出了采用递阶控制结构来控制比例方向阀的位移,即采用双闭环的方式来控制比例阀。

本文将通过建立虚拟样机的研究方法,研究零位控制死区的成因,并在此基础上提出一种新的结合PID的补偿控制方式。

## 1 比例阀的结构及建模

### 1.1 比例方向阀结构

本文以华液公司生产的T-5BFW型的比例方向阀作为研究对象,其结构如图1所示。

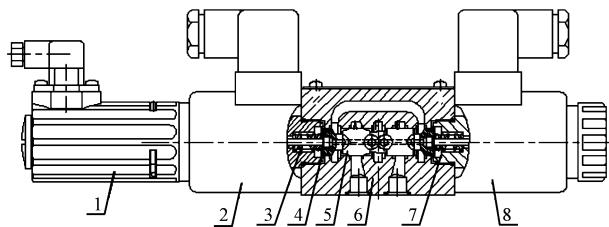


图1 比例方向阀装配图

1-位移传感器;2-比例电磁铁A;3-弹簧A;4-弹簧座;5-阀心;6-阀体;7-弹簧B;8-比例电磁铁B

由图1可知:比例方向阀是带阀心位移传感器的比例阀,含有两个比例电磁铁和两个弹簧。其中:弹簧座用来限定弹簧的安装位置和预压缩量。阀心两端分别紧挨着弹簧和比例电磁铁推杆,在零位时,电磁铁推杆和弹簧都刚好与阀心相接触,此时对阀心均不产生

力的作用。

### 1.2 比例阀模型

对比例阀阀心进行受力分析,得到动力学方程为:

$$M\ddot{x}_v = F_{mA} + F_{KA} - F_{mB} - F_{KB} - F_f - F_b - F_y \quad (1)$$

式中: $F_{KA}, F_{KB}$ —左右弹簧力; $F_{mA}, F_{mB}$ —左右电磁铁输出的力; $F_f$ —摩擦力; $F_b$ —阻尼力; $F_y$ —液动力; $M$ —阀心质量; $x_v$ —阀心推移。

比例阀一般采用的控制策略如图2所示。

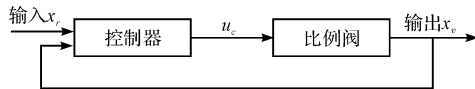


图2 比例方向阀控制示意图

控制器输出电流指令  $u_c$  为:

$$u_c = f(x_r, x_v, t) \quad (2)$$

式中: $x_r$ —输入信号阀心位置指令。

其各个分力的方程如下:

(1) 弹簧力。其方程为:

$$F_{KA} = \begin{cases} 0, & x_v > 0 \\ K_A(x_{A0} - x_v), & x_v \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$F_{KB} = \begin{cases} K_B(x_{B0} + x_v), & x_v > 0 \\ 0, & x_v \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $x_{A0}, x_{B0}$ —弹簧预压缩量; $K_A, K_B$ —弹簧刚度。

(2) 电磁力。两个电磁铁的静态输出力为:

$$F_{mA1} = \begin{cases} 0, & I_A < i_{Ad} \\ \frac{F_{mA1}(I_A - i_{Ad})}{i_{Am} - i_{Ad}}, & I_A \geq i_{Ad} \end{cases} \quad (5)$$

$$F_{mB1} = \begin{cases} 0, & I_B < i_{Bd} \\ \frac{F_{mB1}(I_B - i_{Bd})}{i_{Bm} - i_{Bd}}, & I_B \geq i_{Bd} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $I_A, I_B$ —左右电磁铁的电流值; $F_{mA1}, F_{mB1}$ —相对应电磁铁能够输出的最大推力; $i_{Am}, i_{Bm}$ —两个电磁铁电流限定值; $i_{Ad}, i_{Bd}$ —两个电磁铁的工作死区电流,即电流在该范围内,电磁铁不产生力。

由于电流放大器与电磁铁本身的特性,实际电磁铁的力输出为:

$$u_{cA} = \begin{cases} 0, & u_c < 0 \\ u_c, & u_c \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$u_{cB} = \begin{cases} u_c, & u_c < 0 \\ 0, & u_c \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \frac{F_{mA}}{I_A} = F_{mA1} e^{-\tau_d A S} \\ \frac{I_A}{u_{cA}} = \frac{1}{\tau_A S + 1} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \frac{F_{mB}}{I_B} = F_{mB1} e^{-\tau_{dB}s} \\ \frac{I_B}{u_{cB}} = \frac{1}{\tau_B s + 1} \end{cases} \quad (10)$$

式中： $\tau_A, \tau_B$ —惯性环节时间常数； $\tau_{dA}, \tau_{dB}$ —电磁力纯滞后时间。

阻尼力的方程如下：

$$F_b = B\dot{x}_v \quad (11)$$

式中： $B$ —阻尼系数； $\dot{x}_v$ —阀心运动速度。

摩擦力的公式如下：

$$F_f = \mu F_n \quad (12)$$

式中： $\mu$ —摩擦系数； $F_n$ —径向卡紧力。

## 2 阀心位置控制策略

### 2.1 比例阀零位位置控制死区

比例阀最常用的控制策略为 PID 控制,其表达式为:

$$I = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (13)$$

式中： $K_p$ —比例系数； $K_i$ —积分系数； $K_d$ —微分系数。

$e(t)$  的表达式为:

$$e(t) = x_r - x_v \quad (14)$$

对比例阀阀心位置控制系统进行仿真,具体参数如表 1 所示。

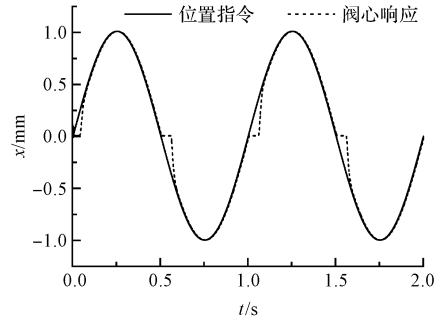
表 1 仿真参数表

质量 $M/\text{Kg}$	0.01	阻尼系数 $B/(\text{N} \cdot \text{ms}^{-1})$	100
弹簧刚度 $K_A, K_B$	10 400	最大输出推力 $F_{mA_m}, F_{mB_m}$	120
$/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$		$/\text{N}$	
纯滞后时间	0.002	电流幅值 $i_{A_m}, i_{B_m}$	2.5
$\tau_{dA}, \tau_{dB}/\text{s}$		$/\text{A}$	
死区电流 $i_{Ad}, i_{Bd}$	0.1	预压缩量 $x_{A0}, x_{B0}$	0.001
$/\text{A}$		$/\text{m}$	
惯性环节时间常数 $T_A, T_B/\text{s}$	0.001	PID 参数	1 200、 46 000、 1.8
		$K_p, K_i, K_d$	
摩擦系数 $\mu$	0.03		

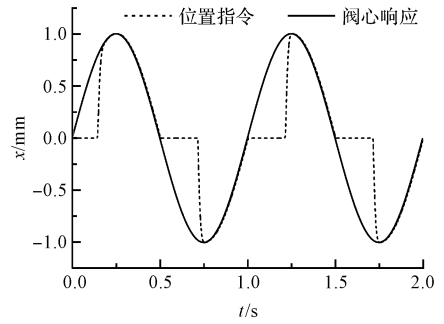
在 Matlab 中进行仿真。在 PID 控制下,系统对 1 Hz 满行程正弦位置指令响应的结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出:当阀心位置在零位时,有一段明显的位置控制死区,对比例阀的控制性能影响很大,特别是当指令信号较小时,阀心位移波形失真严重。其产生的原因主要有:

(1) 由于比例电磁铁的动态特性,它具有一定的电流死区与滞后时间,电磁力有一段时间为零,然后再逐渐增加;



(a) 100%满行程输入PID控制下阀心位置响应



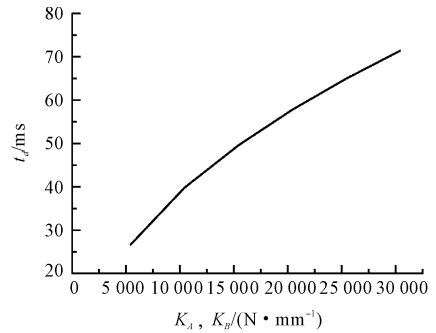
(b) 10%满行程输入PID控制下阀心位置响应

图 3 PID 控制下阀心位置响应

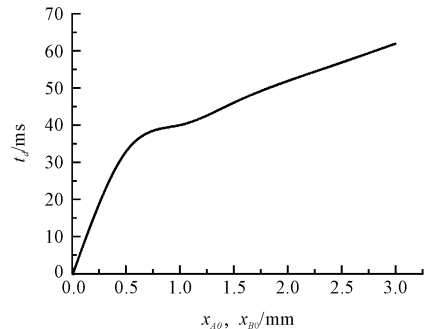
(2) 由于阀心在零位换向时,电磁力要逐渐增加到克服弹簧的预压缩力后才能推动阀心。

### 2.2 位置控制死区的影响因素

在采取措施对位置控制死区进行补偿前,先对系统各参数对死区时间长短  $t_d$  的影响进行仿真,结果如图 4 所示。



(a) 弹簧刚度变化对死区时间长度的影响



(b) 弹簧预压缩量变化对死区时间长度的影响

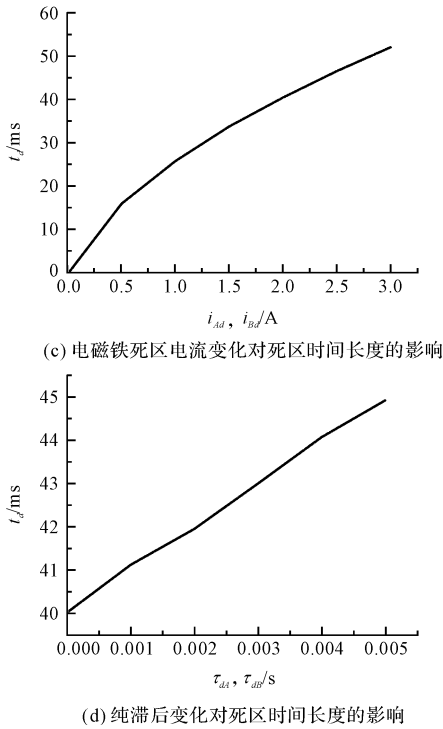


图4 死区时间长度影响因素

通过仿真可得到如下结论:

- (1) 死区时间随着弹簧的刚度增加而增加,约成线性关系;
- (2) 死区时间随着弹簧的预压缩量的增加而增加,且增加的趋势逐渐变缓;
- (3) 死区时间随着电磁铁的死区电流的增加而增加,约成线性关系;
- (4) 纯滞后时间对死区时间有影响,影响相对较小。

### 2.3 位置控制死区补偿策略

由于阀心位置控制死区主要受弹簧刚度及其预压缩量、电磁铁电流死区的影响较大,当电磁铁切换时,给PID控制器输出的电流指令加上一个电流阶跃,使电磁力可以迅速升高到克服弹簧预紧力,以驱动阀心运动。

电流阶跃表达式为:

$$u_c = \begin{cases} I + I_{补}, & I \geq 0 \\ I - I_{补}, & I < 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $I$ —PID控制器输出; $I_{补}$ —电流阶跃的补偿值。

对零位电流阶跃控制方式进行仿真,结果如图5所示。

由图5可知:电流阶跃补偿有效地减少了位置控制死区,但由于电磁铁的切换滞后于位置指令的换向时间,仍有较小的位置控制死区。据此,笔者对阀心位置指令加上补偿,当它过零时,叠加一个位置指令补偿量,使电磁铁的切换时间提前。其补偿量表达式如下:

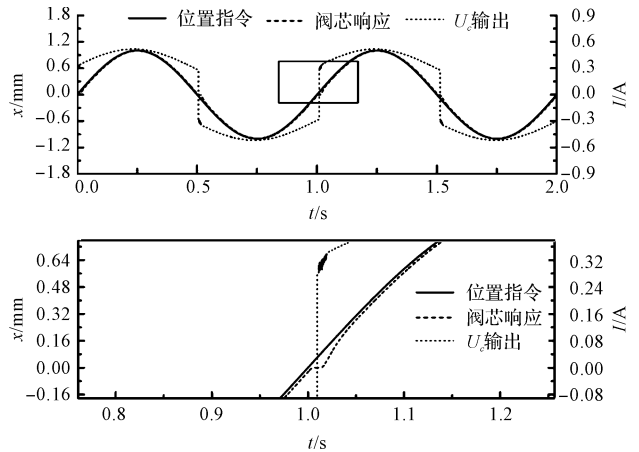


图5 100%满行程输入时电流阶跃控制下阀心位置响应

$$T_n = t, \text{当 } x_v = 0:$$

$$x_c(t) = \begin{cases} -x_{cr} + \frac{x_{cr}}{\Delta t}(t - T_n), & T_n < t < T_n + \Delta t \text{ 且 } \dot{x}_v < 0 \\ x_{cr} - \frac{x_{cr}}{\Delta t}(t - T_n), & T_n \leq t \leq T_n + \Delta t \text{ 且 } \dot{x}_v > 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $x_{cr}$ —最大补偿值,具体为满行程的5%; $\Delta t$ —补偿时间,具体值为20ms; $x_r$ —位置指令信号; $\dot{x}_v$ —输入信号的速度。

该补偿信号在一定时间后逐步衰减为零,以免对位置控制的静态特性产生影响。位置补偿控制策略输入的位置指令信号可以表示为:

$$x'_c = x_r + x_c(t) \quad (17)$$

本研究对采用PID、PID+电流跳跃、PID+电流跳跃+衰减式位置指令跳跃的控制响应进行仿真,输入指令幅值分别为满量程的100%和10%,其中PID参数、电流阶跃值和位移补偿值均相同。仿真结果如图6中曲线1、2、3所示(其中虚线框中的放大位于曲线下方)。

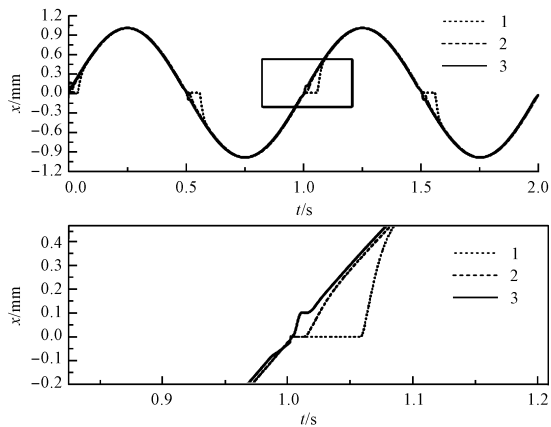
由图6知:增加了衰减式位置指令跳跃补偿的控制效果最佳,也能有效地降低小幅值输入下的波形失真。对100%输入而言,PID控制下的零位死区时间大约是40ms,电流阶跃控制下的阀芯零位死区时间大约是5ms,而位置补偿控制策略下的零位死区时间在3ms以下。

### 3 试验结果

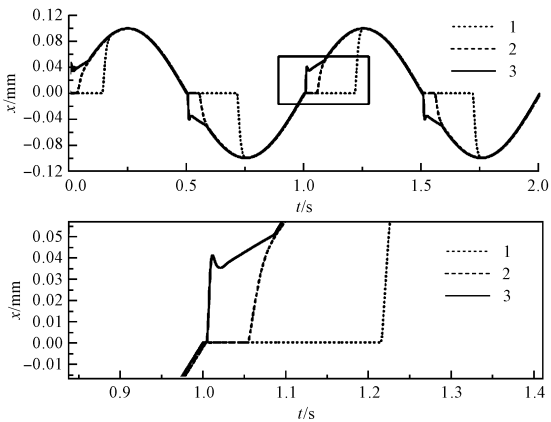
本研究将PID、PID+电流跳跃、PID+电流跳跃+衰减式位置指令跳跃的3种控制策略应用于数字式比例方向阀放大器中<sup>[10]</sup>,在试验台上对阀心位置控制性能进行实验,其结果如图7中曲线1、2、3所示(其中虚线框中的放大位于曲线下方)。

实验结果表明:电流阶跃和位置指令跳跃均能有效地减少位置控制死区时间长度,而位置指令跳跃补

偿响应更快。

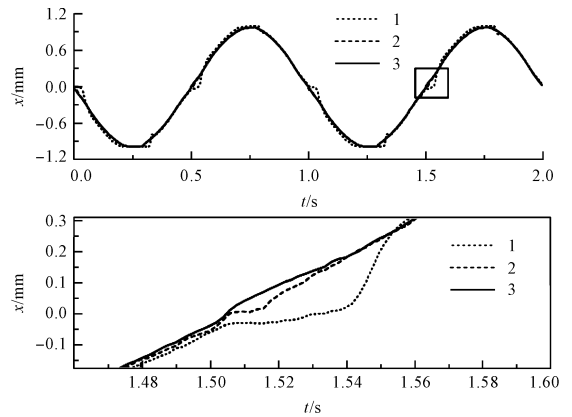


(a) 100%满行程输入时的位置控制响应

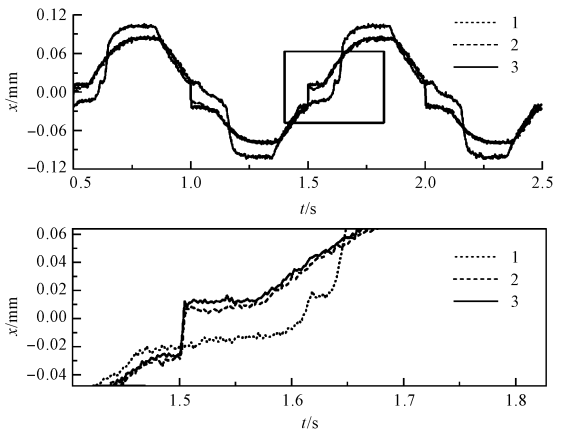


(b) 10%满行程输入时的位置控制响应

图 6 不同幅值输入下的仿真结果



(a) 100%满行程输入时的位置控制响应



(b) 10%满行程输入时的位置控制响应

图 7 不同控制方式下的实验结果

## 4 结束语

本研究针对双电磁铁比例阀存在阀心零位位置控制死区的问题,建立了仿真模型进行分析,结果表明:位置控制死区的产生原因主要是由于电磁铁的电流死区及对中弹簧的预紧力。

根据死区成因,本研究提出了零位电流阶跃和衰减式位置指令跳跃两种补偿方法,仿真结果表明:这两种补偿方法均能方便地为嵌入式控制器采用,并且可以有效地减少零位位置控制死区并改善阀心位置响应波形;电流阶跃的方式死区的时间减少了 87.5%,加上位置指令跳跃后补偿效果更佳。实验结果与仿真结果基本一致。

### 参考文献 (References):

- [1] 刘白雁. 电液比例方向阀死区的智能补偿[J]. 机床与液压, 2002(2): 89-90.
- [2] 谢建, 李泰嵩. 电液比例阀性能影响因素及补偿方法的研究[J]. 液压气动与密封, 2016, 36(9): 10-12.

- [3] 赵江辉. 比例阀用比例电磁铁控制系统的研究与设计[D]. 太原: 太原理工大学电气与动力工程学院, 2011.
- [4] 刘世界. 装载机电液比例系统位置控制方法研究[D]. 长春: 吉林大学机械科学与工程学院, 2006.
- [5] WANG X. Fuzzy-PID control in electro-hydraulic proportional valve system[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2003 (6): 1454-1457.
- [6] 谈怀江, 刘银水, 韩明兴. 水压比例流量阀的模糊 PID 控制策略研究[J]. 液压与气动, 2017(4): 1-7.
- [7] 钱阳辉, 陈冰冰. 基于电液比例阀控缸位置系统控制策略的研究[J]. 液压与气动, 2012(7): 103-105.
- [8] 彭熙伟, 何砚高. 基于迭代学习算法的电液比例伺服控制[J]. 机械工程学报, 2018, 54(20): 271-278.
- [9] ACUÑA-BRAVO W, CANUTO E, AGOSTANI M, et al. Proportional electro-hydraulic valves: an embedded model control solution[J]. *Control Engineering Practice*, 2017 (62): 22-35.
- [10] 陈飞飞, 徐辉, 王世杰, 等. 带位置反馈的数字式比例方向阀放大器研究[J]. 机电工程, 2016, 33(8): 939-943.

[编辑: 张豪]

### 本文引用格式:

张佳旭, 俞亚新, 翁之旦, 等. 双电磁铁比例方向阀零位位置控制死区补偿方法研究[J]. 机电工程, 2019, 36(3): 262-266.

ZHANG Jia-xu, YU Ya-xin, WENG Zhi-dan, et al. Dead zone compensation method of zero position control of double electromagnet proportional direction valve [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019, 36(3): 262-266.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>