

doi: 10.11832/j.issn.1000-4858.2015.06.016

# 音圈电机直驱阀的神经网络 PID 控制

张立强<sup>1,2</sup>, 陈 强<sup>1,2</sup>, 柳志姣<sup>1</sup>, 张晓丽<sup>1,2</sup>, 朱礼浩<sup>1,2</sup>

(1. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 温州泵阀工程研究院, 浙江 温州 325105)

**摘 要:** 音圈电机直驱阀是一种新型的直驱阀, 结构上采用音圈电机直接驱动阀芯, 针对液动力负载扰动对直驱阀的稳态、动态性能的影响, 以及经典 PID 控制所存在的不足, 在建立音圈电机直驱阀数学模型的基础上, 建立神经网络 PID 控制。利用神经网络 PID 在线学习功能, 对直驱阀的位置进行自适应补偿。仿真结果表明, 在相同的扰动环境下, 神经网络控制策略具有比经典 PID 控制器更好的抗干扰性和鲁棒性, 具有更好的效率和自适应能力, 而且无超调, 这对音圈电机直驱阀的性能改善有很大的帮助。

**关键词:** 音圈电机; 直接驱动阀; 负载扰动; 神经网络控制

中图分类号: TH137 文献标志码: B 文章编号: 1000-4858(2015)06-0080-04

## Neural Network PID Control of VCM-DDV

ZHANG Li-qiang<sup>1,2</sup>, CHEN Qiang<sup>1,2</sup>, LIU Zhi-jiao<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-li<sup>1,2</sup>, ZHU Li-hao<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050;

2. Wenzhou Academy of Pump and Valve Engineering, Lanzhou University of Technology, Wenzhou, Zhejiang 325105)

**Abstract:** The voice coil motor (VCM) direct drive valve (DDV) is a new DDV with a voice coil motor drive spool directly in structure. Aiming at the load disturbance of fluid load on system performance and some weaknesses in classic proportion integration differentiation controller, we establish a mathematical model of the VCM-DDV, and design a neural network controller. Neural network PID takes advantage of self-learning merit to compensate valve position adaptively. The results indicate that the neural network PID controller strategy has better immunity and robustness than the classical PID controller when restraining external disturbance. It has higher efficiency, adaptive ability and no overshoot, so has a far-reaching impact on VCM-DDV performance improvement.

**Key words:** the voice coil motor, direct drive valve, load disturbance, neural network control

### 引言

直驱式电液伺服阀也称(Direct Drive Valve, DDV)伺服阀, 具有高频响、结构简单等优点, 是目前电液伺服阀的主要研究方向。将音圈电机和闭环控制系统结合在一起, 可适用于要求快速、高精度位置的伺服系统。音圈电机直驱阀的基本原理是用音圈电机直接驱动阀芯运动, 进行位置控制。但是, 采用 VCM 直接驱动阀芯, 液动力负载扰动将直接作用于音圈电机, 对系统的稳、动态性能有较大影响<sup>[1]</sup>。

直接驱动阀伺服系统是航空航天领域中一种新型直驱式伺服系统, 也是机载作动系统的重要组成部分,

有十分广阔的应用前景, 传统的音圈电机控制普遍采用经典 PID(比例 Proportion)、积分(Integration)、微分(Differentiation)控制。PID 控制器结构简单、方便易行、概念明确, 因而在工业控制中被广泛的应用。但由于受制于一些扰动大的场合, 响应时间也不能满足要求, 静态偏差的影响也较大, 难以满足精密的伺服控制的要求。本研究针对常规 PID 控制的缺点, 引入神经

收稿日期: 2014-08-23

作者简介: 张立强(1977—), 男, 河北安国人, 副教授, 主要从事流体、测控技术方面的科研和教学工作。

网络 PID 控制对音圈电机直驱阀控制系统进行对比分析,分别讨论不同控制方式下的响应以及抗负载扰动的能力。

## 1 音圈电机直驱阀

### 1.1 音圈电机的数学模型

音圈电机<sup>[2]</sup>(Voice Coil Motor, VCM)是依据洛伦兹力原理制造的一种新型直接驱动电机,工作原理与电动扬声器类似,与交流直线电机相比,具有运行效率高、力特性好,没有功率因数低的问题,速度和加速度控制范围广,调速控制平顺、灵活、方便等优点。

依据电流回路建立电压平衡方程:

$$u_v = L_v \frac{di}{dt} + Ri + e_m \quad (1)$$

电磁力模型:

$$F_v = K_v i \quad (2)$$

其中  $e_m$  是反电动势:

$$e_m = K_v \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

力平衡方程:

$$F_v - F_s - F_f - F_t = m \frac{d^2x}{dt^2} + B_f \frac{dx}{dt} \quad (4)$$

式中,  $u_v$  —— 回路电压

$L_v$  —— 线圈电感

$i$  —— 回路电流

$R$  —— 线圈电阻

$K_v$  —— 反电动势常数

$x$  —— 当前位移

$m$  —— 线圈和阀芯质量

$F_f$  —— 摩擦力

$B_f$  —— 黏性摩擦力系数

### 1.2 主阀数学模型

流体流经阀口时,液流方向和速度大小的变化将造成流体动量变化,产生一个液流对阀芯的作用力,即为作用在阀芯上的液动力。根据液动力的性质,可分为稳态液动力和瞬态液动力。稳态液动力与滑阀开口量成正比,瞬态液动力与滑阀开口量变化成正比<sup>[3]</sup>。本研究直驱阀为理想滑阀,液动力分析如下。

稳态液动力是在阀口开度一定稳定流动的情况下,液流对阀芯的反作用力为:

$$F_s = -2C_v C_d W x_v \Delta p \cos\theta = -k_s x \quad (5)$$

式中,  $\theta$  —— 射流角  $\theta = 69^\circ$

$C_v$  —— 速度系数

$C_d$  —— 流量系数

$W$  —— 面积梯度

$\Delta p$  —— 阀口压差

$k_s$  —— 稳态液动力系数

瞬态液动力是阀芯运动过程中,阀口开度变化使通过阀口的流量发生变化,引起阀腔内液流速度发生变化,动量变化对阀芯产生的反作用力(为瞬态液动力)<sup>[4,5]</sup>。

$$F_t = C_d W L \sqrt{2\rho\Delta p} \frac{dx}{dt} = k_t \frac{dx}{dt} \quad (6)$$

式中,  $L$  为阻尼长度;  $k_t$  为瞬态液动力系数。

一些参数随音圈电机直驱阀的工作状态变化,造成液动力负载扰动的变化,对系统控制性能有较大影响。这就需要控制器具有更好的抗干扰性。

### 1.3 VCM-DDV 系统模型

对公式(1)和公式(4)进行拉式变换:

$$RI(s) + LsI(s) + K_v sX(s) = U(s) \quad (7)$$

$$K_v I(s) + B_f sX(s) - F_s - F_t - F_f = ms^2 X(s) \quad (8)$$

当频率较低时电感远小于线圈的电阻,忽略电感以及库伦摩擦力,联立上式得位移  $X(s)$  和输入电压  $U(s)$  的传递函数:

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{k_v/R}{ms^2 + \left(\frac{K_v^2}{R} + B_f + K_t\right)s + K_s} \quad (9)$$

音圈电机直驱阀系统方框图如图 1 所示,其中  $G(s)$  是位置调节函数,  $ACR$  为电流调节函数,  $G_{pwm}$  为 PWM 功率转换电路,  $\beta$  为电流滤波系数,  $\beta / (T_{oi} + 1)$  为电流滤波,音圈电机的电气时间常数  $T_s$  远小于电机的机械时间常数  $T_m$ ,也就是说电流的调节过程比速度环的变化过程快得多,在电流的调节过程中可以近似的认为反电动势  $e_m$  不变。将滞后环节看成一惯性环节。因此脉宽控制器和 PWM 功率变换器的传递函数可以近似为  $G_{pwm}(s) = k_s/T_s s + 1$ ,其中  $k_s$  为 PWM 变换器的放大系数。

## 2 系统控制策略

常规 PID 连续格式:

$$U_{pid}(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) T + K_d \frac{ek - e(k-1)}{T} \quad (10)$$

采用的是增益调节,  $ek - e(k-1)$  是误差变化率<sup>[6]</sup>。

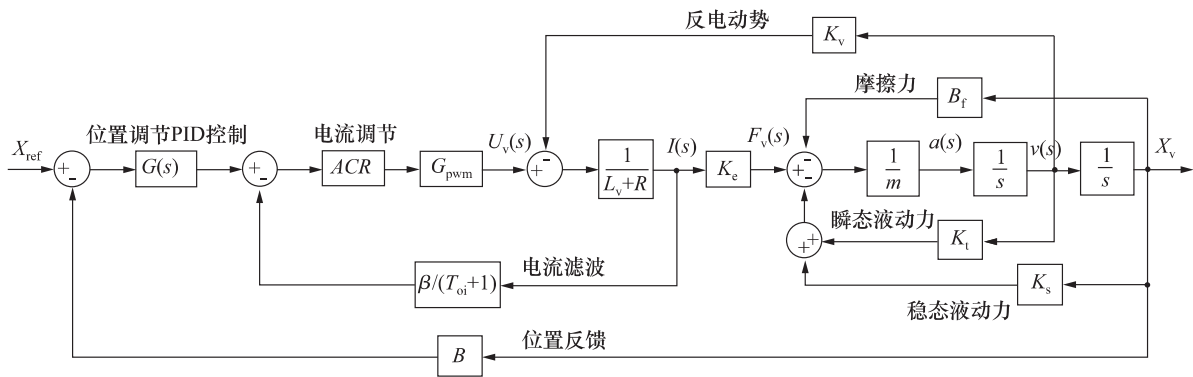


图 1 音圈电机直驱阀系统方框图

神经网络<sup>[7]</sup> PID 控制结合了神经网络良好的动态性能与经典 PID 控制响应快速且稳定的优点,具有自学习和自适应的能力,通过对系统性能的学习来实现具有最佳组合的 PID 控制。RBF 神经网络<sup>[8,9]</sup>即径向基函数神经网络(Radial Basis Function Neural Network),其结构如图 2 所示,它很容易扩展到多输出节点的情形,本研究中把 VCM-DDV 看作网络的一个输出层,只考虑一个输入变量 X,RBFNN 包括一个输入层,一个隐含层和一个输出层的最简模式。

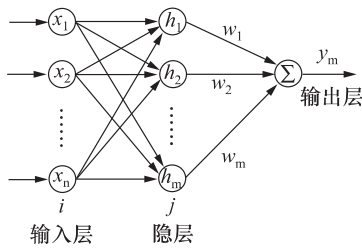


图 2 神经网络结构

其中网络输入向量:

$$X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T \quad (11)$$

$$X = [-0.5359; 0.1741; 0.5042; 0.7119; -0.0304; 0.2666]$$

径向基向量:

$$H = [h_1 \ h_2 \ \dots \ h_j \ \dots \ h_m]^T \quad (12)$$

其中,  $h_j$  为高斯基函数:

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|X - C_j\|^2}{2b_j^2}\right), j = 1 \ 2 \ \dots \ m \quad (13)$$

网络的第  $j$  个节点中心矢量为:

$$C_j = [C_{1j} \ C_{2j} \ \dots \ C_{ij} \ \dots \ C_{nj}]^T \quad (14)$$

$$i = 1 \ 2 \ \dots \ n; j = 1 \ 2 \ \dots \ m$$

$$C = [10.8282 \ 8.7916 \ 11.9357 \ 2.5122 \ -11.4472 \ , \\ 5.4146; -1.3515 \ 3.2425 \ , -6.6360 \ , -2.7096 \ ,$$

$$-1.8995 \ , -3.1160; -10.6009 \ , -3.6080 \ 3.6667 \ , \\ -8.5980 \ , -7.6035 \ , 8.2084]$$

设置神经网络的基宽向量:

$$B = [28.0810; 8.4260; -38.7748; 54.8844; \\ -28.1179; 50.9474]$$

输出层:

$$Y_m = \sum_{j=1}^m w_j h_j(x) \quad (15)$$

设置神经网络辨识器的学习效率  $d\eta$  为 0.4,神经网络控制器效率  $c\eta$  为 0.6,  $\alpha$  取 0.05,  $\beta$  取 0.1。由于神经网络控制具有逼近任意非线性函数的能力,而且结构和学习算法简单明确,具体按照参数先对神经网络控制器进行训练,可以在线整定找到最优控制规律下的 P、I、D 参数。在 MATLAB/Simulink 中编写 m 文件以及搭建相对应系统的常规 PID 控制模型,对 VCM-DDV 进行仿真分析。

### 3 仿真分析

考虑音圈电机直接驱动阀<sup>[10]</sup>,主要参数如表 1 所示,流量系数、流速系数一些按照经验值选取。

表 1 音圈电机直驱阀参数

参数	值
音圈电机增益 $K_v / N \cdot A^{-1}$	41
允许电流 $i_{max} / A$	6.5
线圈电阻 $R / \Omega$	24
线圈电感 $L / mH$	220
线圈和阀芯质量 $m / kg$	0.85
空载阀口压降 $\Delta p / MPa$	5
阀芯最大位移 $x_{max} / mm$	0.65

利用 MABLAT/Simulink 软件分别采用经典 PID 和神经网络 PID 控制搭建音圈电机直驱阀模型,对比分析阶跃响应下的不同控制策略的响应时间,调整时间。

### 3.1 阶跃响应

设置输入阶跃指令  $r = 0.65 \text{ mm}$ 。仿真曲线如图 3 所示。从 Simulink 的仿真曲线可以看出,常规 PID 在阶跃信号的响应时间为  $40 \text{ ms}$ ,无超调;神经网络 PID 控制下的阶跃响应为  $15 \text{ ms}$ ,无超调。神经网络 PID 控制无论是响应速度上还是稳态精度上都优于经典 PID 控制,在一定程度上改善了系统的输出响应特性,起到了良好的控制效果<sup>[11]</sup>。

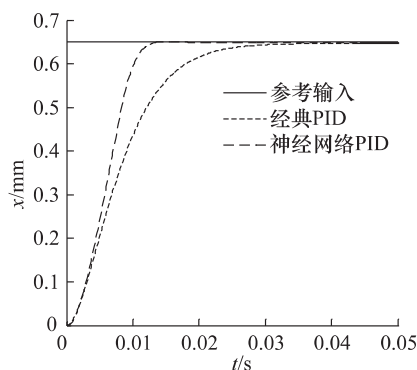


图 3 系统阶跃响应曲线

### 3.2 正弦信号输入

图 4 和图 5 分别是采用经典 PID 和神经网络 PID 控制,输入  $1 \text{ Hz}$  的和  $10 \text{ Hz}$  的正弦信号的响应曲线。当输入信号为  $1 \text{ Hz}$  时,两种控制方式都具有较好的跟踪性能;当输入信号为  $10 \text{ Hz}$  时,经典 PID 控制明显滞后,神经网络 PID 的跟踪性能较好,响应也较快,具有良好的动态跟踪品质。

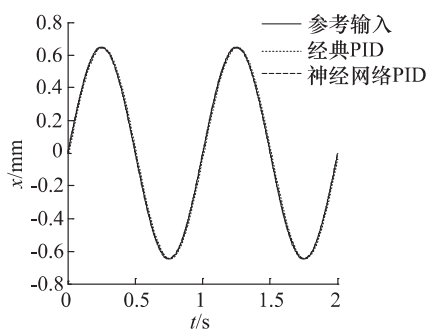


图 4 输入  $1 \text{ Hz}$  的正弦信号

## 4 结论

本研究针对音圈电机直接驱动阀系统,应用神经网络 PID 控制策略,研究对直驱阀性能的影响。通过

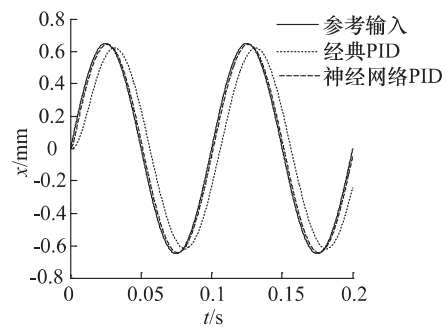


图 5 输入  $10 \text{ Hz}$  的正弦信号

理论分析和软件仿真得出以下结论:

- (1) 应用神经网络 PID 控制策略可以缩短 VCM-DDV 响应时间和调整时间,而且无超调;
- (2) 针对输入  $1 \text{ Hz}$  和  $10 \text{ Hz}$  的正弦信号的仿真分析,可以看出神经网络 PID 有较好的自适应能力和控制效率,同时抗扰动的能力也较强;
- (3) 应用神经网络 PID 控制对 VCM-DDV 的性能的改善有很大的帮助。

### 参考文献:

- [1] 王大彧,郭宏,刘治. 直驱阀用音圈电机的模糊非线性 PID 控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 52-54.
- [2] LI baoren, GAO longlong, Yang gang. Modeling and Control of a Novel High-Pressure Pneumatic Servo Valve Driven by Voice Coil Motor [J]. Journal of Dynamic Systems, 2013, 135(507): 1-6.
- [3] 王春行. 液压控制系统[M]. 甘肃: 兰州理工大学, 1998.
- [4] Josep M. Bergada. Fluid Power Mathematical Design of Several Components [M]. NEW York: Nova Publishers, 2009.
- [5] 田源道. 电液伺服技术 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2008.
- [6] 刘金锴. 先进 PID 控制及 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [7] 张吉礼. 模糊-神经网络控制原理与工程应用 [M], 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.
- [8] Takashi Miyajima, Toshinori Fujita, Kazutoshi Sakaki. Development of a Digital Control System for High Performance Pneumatic Servo Valve [J]. Science Direct, 2007, (31): 156-161.
- [9] Roland S. Burns. Advanced Control engineering [M]. UK: University of Plymouth, 2006.
- [10] 张立佳,王大彧,郭宏. 直线音圈电机的神经网络 PID 控制 [J]. 电气传动, 2010, 40(6): 46-49.
- [11] 杜海,任杰. DRNN 神经网络逆控制方法在 DDV 伺服系统中的应用 [J]. 制造业信息化, 2007, (5): 45-46.