

doi: 10.7690/bgzdh.2014.10.019

# 挖掘机器人电液比例位置自调整模糊 PID 控制技术研究

骆云志, 张春华, 王钊

(中国兵器工业第五八研究所军品部, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 针对挖掘机器人工作装置液压系统存在滞后、不确定性和非线性, 不能实现有效精确控制的问题, 设计一种基于模糊 PID 的电液比例位置自调整控制策略。介绍了电液比例位置控制系统组成和自调整模糊 PID 控制器原理, 建立了控制规则表, 采用中点向下融合法进行模糊推理和去模糊化处理。仿真与实验验证结果表明: 该控制方法具有很好的鲁棒性, 控制效果满足技术要求。

**关键词:** 挖掘机器人; 电液比例位置控制; 模糊 PID

**中图分类号:** TP241.3 **文献标志码:** A

## Research on Self-Tuning Fuzzy PID Control for Electro-Hydraulic Proportion Positional Control System of Robotic Excavator

Luo Yunzhi, Zhang Chunhua, Wang Qian

(Department of Military Products, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industry, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** A method of electro-hydraulic proportional position control based on fuzzy PID self-tuning control strategy is designed, in the light of the problem of servo control precision because of the hysteresis, uncertainty and nonlinearity of work devices and hydraulic system of the robotic excavator. Introduce the structure of electro-hydraulic proportional positional control system and the principle of fuzzy self-tuning PID controller parameters, forms the fuzzy PID control rule table. It also introduces a method of midpoint down fusion fuzzy inference and defuzzification techniques. Simulating and experimental results indicate the method has good robustness and meets technology requirements.

**Keywords:** robotic excavator; electro-hydraulic proportional positional control; fuzzy PID

### 0 引言

挖掘机器人的驱动执行机构由电液比例先导减压阀、梭阀、LUDV 多路阀和液压缸等组成, 其中液压缸为非对称单杆液压缸。它存在滞后、摩擦、液压介质粘滞、阻尼变化和负载波动等问题, 所以具有时变、不确定和不稳定的强非线性动态特性, 难以实现稳定的高精度位置自动控制。这样的系统非常复杂, 难于建立数学模型, 即使采用系统辨识, 也不能获得收敛的模型参数。如采用非线性方法建模, 实现起来难度大、成本很高。

液压系统中的电液先导比例减压阀、M7 多路阀和液压缸都存在死区, 且是非线性的, 死区会随负载变化而变化, 当负载增大时, 死区会在某一方向上增大。死区是产生运行不稳定和轨迹跟踪误差的主要原因。不少学者为解决挖掘机器人电液比例位置控制系统所存在的上述问题, 以实现稳定和高精度的位置控制进行了模糊 PID 控制技术研究<sup>[1-6]</sup>, 虽取得了一定的研究成果, 但仍存在精度不高和鲁棒性不令人满意等问题。在此基础上, 笔者采用 13×13 模糊规则表、中点向下融合模糊推理和去模

糊法进行参数自整定模糊 PID 研究, 经仿真和实验验证, 满足了挖掘机器人的位置重复精度 50 mm 的技术指标。

### 1 工作装置和电液比例位置控制系统

挖掘机器人由工作装置和控制系统组成。如图 1, 挖掘机器人工作装置由回转、动臂、斗杆、斗杆伸缩和铲斗等关节组成, 各关节都采用液压缸驱动和拉线式绝对码盘测量液压缸活塞杆伸缩位移。

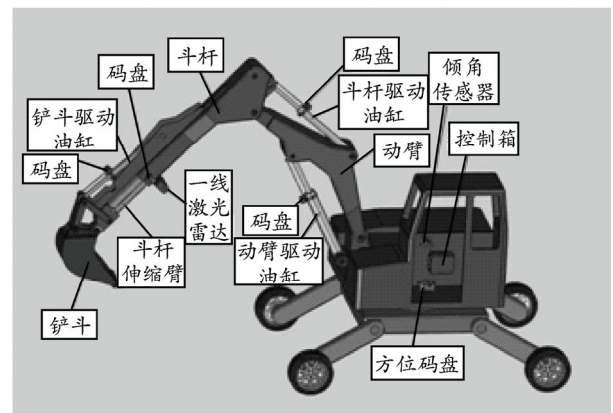


图 1 挖掘机器人工作装置

收稿日期: 2014-05-12; 修回日期: 2014-07-09

作者简介: 骆云志(1971—), 男, 重庆人, 硕士, 研究员, 从事无人地面平台环境感知和多传感器信息融合研究。

由于挖掘机器人各关节的电液比例位置控制系统组成相同，故笔者以挖掘机器人的动臂电液比例位置控制系统为例进行论述。它由电液先导比例减压阀、LUDV 多路阀、液压缸和测量液压缸活塞杆伸缩位移的拉线式绝对码盘等组成，如图 2 所示。

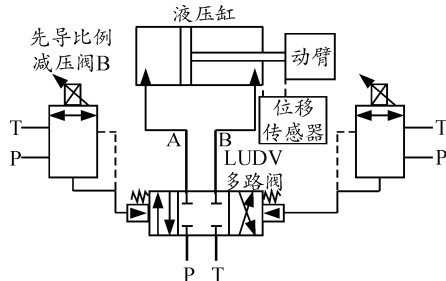


图 2 动臂电液比例位置控制系统

## 2 电液比例位置的模糊 PID 控制器

电液比例位置控制系统一般采用 PI 或 PID 的控制方法，该方法对模型的依赖性较强，受控制系统模型的非线性和时变性影响较大。电液比例位置控制系统在生产现场，由于不同工况、不同工作环境、不同寿命周期内其模型参数都会有较大变化，不能建立确定的数学模型，传统的 PID 控制方法很难保

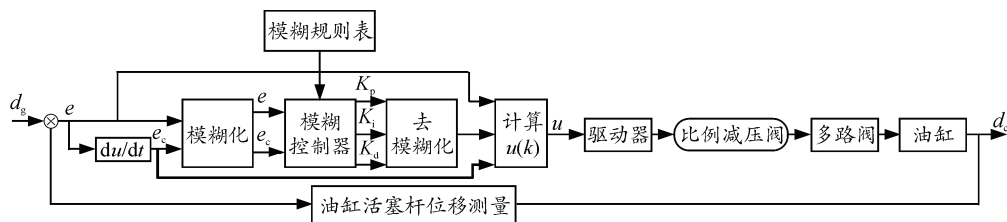


图 3 电液比例位置控制系统模糊 PID 控制器原理

### 2.2 求取 $K$ 时刻的 $e(k)$ 和 $e_c(k)$

由图 3 可得  $e(k)$ ，如下式：

$$e(k) = d_g(k) - d_c(k) \tag{1}$$

式中： $d_g$  为油缸活塞杆给定位移值； $d_c$  为油缸活塞杆实际位移值。

误差变化率  $e_c(k)$ ，如下式：

$$e_c(k) = e(k) - e(k-1) \tag{2}$$

离散化的数字 PID 控制形式如下式：

$$u(k) = k_p e(k) + k_i \sum_{j=0}^k e(j)T + K_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \tag{3}$$

式中： $T$  为采样周期； $K$  为采样序号； $K_i = K_p/T_i$ ， $T_i$  为积分时间； $K_d = K_p T_d$ ， $T_d$  为微分时间。

增量式 PID 如下式：

$$\Delta u(k) = k_p [e(k) - e(k-1)] + k_i e(k) + k_d [e_c(k) - e_c(k-1)] \tag{4}$$

证所设定的电液比例位置控制参数在整个系统变化范围内达到最优。而模糊控制理论注重长期积累的操作经验，不苛求被控制对象具有准确的数学模型，对被控系统模糊参数的变化有较强的适应能力。

### 2.1 电液比例位置自调整模糊 PID 控制原理

PID 控制技术原理虽然简单、鲁棒性强和可靠性高，但控制参数无法实时调整。若利用模糊控制算法，根据控制者对 PID 控制器的设计经验，将 PID 控制参数的实时调整策略制定为模糊控制规则，实现 PID 控制参数的在线调整，即可实现模糊控制与 PID 控制的结合。由此构成的自调整模糊 PID 控制器，如图 3 所示。它实际上是对 PID 控制器进行了非线性处理，实现了系统特性变化与控制量之间的非线性映射关系，从而把 PID 控制与模糊控制的简便性、灵活性以及鲁棒性融为一体，发挥了传统控制与模糊控制的各自长处，是一种性能更为优良的新型智能控制器。由图 3 可看出，只要给定输入  $d_g$ ，就可得到一个输出  $d_c$ ，不需要输入和输出之间的数学关系，它主要取决模糊规则表和模糊变量的隶属度函数。

## 3 电液比例位置自调整模糊 PID 控制方法

### 3.1 电液比例位置自调整模糊 PID 控制方法

电液比例位置自调整模糊 PID 控制方法是：

- 1) 对  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 、 $e(k)$  和  $e_c(k)$  进行模糊归一化处理；
- 2) 确定模糊 PID 隶属度函数和建立模糊控制规则表；
- 3) 采取中点向下融合法进行模糊推理和去模糊化。

### 3.2 模糊归一化处理

#### 3.2.1 $K_p$ 、 $K_i$ 和 $K_d$ 模糊化

设： $K_p$  的基本论域为  $[0, 60]$ ， $K_i$  的基本论域为  $[0, 20]$ ， $K_d$  的基本论域为  $[0, 0.2]$ 。

设： $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  的论域  $[-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6]$ 。

则： $K_p$  的量化因子， $k_{K_p} = 6/60 = 0.1$ ；  
 $K_i$  的量化因子， $k_{K_i} = 6/20 = 0.3$ ；  
 $K_d$  的量化因子， $k_{K_d} = 6/0.2 = 30$ 。

### 3.2.2 对 $e(k)$ 和 $e_c(k)$ 进行模糊归一化处理

#### 3.2.2.1 对 $e(k)$ 进行模糊归一化处理

按  $n_e = e(k)/d_g$  计算，其  $n_e$  值作如下归一化处理，根据式 (5) 所计算的  $n_e$  值，在闭区间  $[0, 1]$  有 13 个等级，为  $[-0.6, -0.5, -0.4, -0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6]$  它对应论域 [负最大，负大，负较大，负中，负小，负最小，零，最小，小，中，较大，大，最大]。

$$\begin{aligned}
 |n_e| &= 0, & 0 \leq n_e < 0.1 \\
 |n_e| &= 0.1, & 0.1 \leq n_e < 0.25 \\
 |n_e| &= 0.2, & 0.25 \leq n_e < 0.35 \\
 |n_e| &= 0.3, & 0.35 \leq n_e < 0.45 \\
 |n_e| &= 0.4, & 0.45 \leq n_e < 0.55 \\
 |n_e| &= 0.6, & 0.65 \leq n_e < 0.85 \\
 |n_e| &= 0.5, & 0.55 \leq n_e < 0.65 \\
 |n_e| &= 0.6, & 0.65 \leq n_e < 0.85
 \end{aligned} \tag{5}$$

误差为负时与误差为正时相类同，只是相应的符号发生变化。

#### 3.2.2.2 对 $e_c(k)$ 进行模糊归一化处理

按  $n_{ec} = e_c(k)/d_g$  计算，其  $n_{ec}$  值作如下归一化处理，根据式 (6) 所计算的  $n_{ec}$  值，在闭区间  $[0, 1]$  有 13 个等级，为  $[-0.6, -0.5, -0.4, -0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6]$  它对应论域为 [负最大、负大、负较大、负中、负小、负最小、零、最小、小、中、较大、大、最大]。

$$\begin{aligned}
 |n_{ec}| &= 0, & 0 \leq n_{ec} < 0.1 \\
 |n_{ec}| &= 0.1, & 0.1 \leq n_{ec} < 0.25 \\
 |n_{ec}| &= 0.2, & 0.25 \leq n_{ec} < 0.35 \\
 |n_{ec}| &= 0.3, & 0.35 \leq n_{ec} < 0.45 \\
 |n_{ec}| &= 0.4, & 0.45 \leq n_{ec} < 0.55 \\
 |n_{ec}| &= 0.6, & 0.65 \leq n_{ec} < 0.85 \\
 |n_{ec}| &= 0.5, & 0.55 \leq n_{ec} < 0.65 \\
 |n_{ec}| &= 0.6, & 0.65 \leq n_{ec} < 0.85
 \end{aligned} \tag{6}$$

误差为负时与误差为正时相类同，只是相应的符号发生变化。

### 3.3 隶属度函数和控制规则表

#### 3.3.1 电液比例位置模糊 PID 控制的隶属度函数

隶属度函数的选取原则：表示隶属度函数的模糊集合，必须是凸模糊集合；变量所取隶属度函数通常是对称和平衡的隶属度函数，要符合语义顺序，避免不恰当的重叠，论域中的每个点，应该至少属于 1 个隶属度函数的区域；同时它一般应该属于至多不超过 2 个隶属度函数的区域；对于同一输入，没有 2 个隶属度函数，会同时有最大隶属度；对 2 个隶属度函数重叠时，重叠部分对于 2 个隶属度函数的最大隶属度不应该有交叉。本文中选取三角型隶属度函数， $e(k)$  的三角型隶属度函数如图 4， $K_p$  的三角型隶属度函数如图 5 所示。

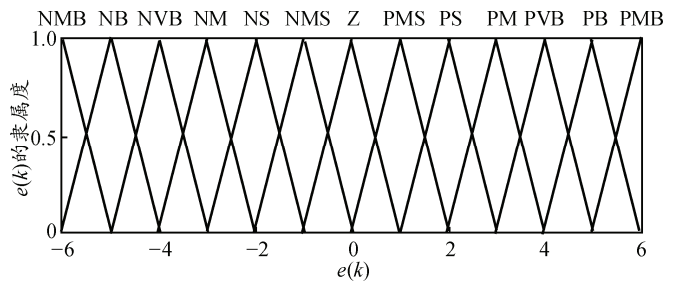


图 4  $e(k)$  的三角型隶属度函数

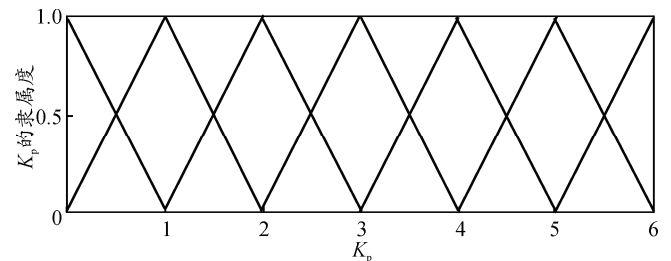


图 5  $K_p$  的三角型隶属度函数

#### 3.3.2 建立模糊 PID 控制规则表

根据完备性、合适性、一致性、专家经验、实验结果和以下原则建立对应于阶跃函数的模糊 PID 控制规则表，如表 1 所示。

- 1) 上升时 ( $e > 0, e_c < 0$ ):  $K_p$  取大,  $K_i$  和  $K_d$  置零。
- 2) 制动时 ( $e < 0, e_c > 0$ ):  $K_p$  和  $K_i$  置零,  $K_d$  取大。
- 3) 回复时 ( $e < 0, e_c > 0$ ):  $K_p$ 、 $K_i$  取小，使得回复更平稳。
- 4) 稳定时 ( $e \approx 0, e_c \approx 0$ ):  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  取小，系统达到稳定。

表 1 模糊 PID 控制规则

e <sub>c</sub>	e																				
	最大			大			较大			中			小			最小			0		
	K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>d</sub>	K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>d</sub>	K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>d</sub>	K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>d</sub>	K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>d</sub>	K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>d</sub>	K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>d</sub>
最大	6	0	0	5	0	0	4	0	1	3	0	2	2	0	3	1	0	4	0	0	5
大	6	0	0	5	0	0	4	0	1	3	0	2	2	0	3	1	0	4	0	0	5
较大	6	0	0	5	0	0	4	0	1	3	0	2	2	0	2	1	0	4	0	0	5
中	6	0	0	5	0	0	4	1	1	3	1	1	2	0	2	1	1	3	0	0	4
小	6	0	0	5	0	0	4	1	1	3	1	1	2	1	2	1	1	3	0	0	3
最小	6	0	0	5	0	0	4	1	1	3	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	2
0	6	0	0	5	0	0	4	1	1	3	1	1	2	1	1	1	1	2	2	3	1

注：1) 误差为负时与误差为正时相类似，只是相应的符号发生变化；2) 表中的数值是根据经验所得，但必须由实验验证和修改。

### 3.4 模糊推理和去模糊化

从式 (5) 和式 (6) 可看出， $e(k)$  和  $e_c(k)$  进行模糊化时会产生量化误差，为减小此误差所带来的精度降低问题，笔者采取中点向下融合法进行模糊推理和去模糊化给以解决。

以  $k_p$  为例进行说明。如在  $k$  时刻的  $|e|$  隶属度为“大”和  $|e_c|$  隶属度为“较大”，则当采取中点向下融合进行模糊推理时，可得  $k$  时刻的  $|e|$  隶属度为“大”和“较大”， $k$  时刻的  $|e_c|$  隶属度为“较大”和“中”，根据表 1 模糊 PID 控制规则表，有以下 4 个推理语句：

- 1) if  $|e|$ =[大] and  $|e_c|$ =[较大] then  $K_{Pu1}=5$
- 2) if  $|e|$ =[大] and  $|e_c|$ =[中] then  $K_{Pu2}=5$
- 3) if  $|e|$ =[较大] and  $|e_c|$ =[较大] then  $K_{Pu3}=4$
- 4) if  $|e|$ =[较大] and  $|e_c|$ =[中] then  $K_{Pu4}=4$

由以上推理语句，可得：

$$K_{pd} = K_{Pu1} \cap K_{Pu2} = 5$$

$$K_{pdj} = K_{Pu3} \cap K_{Pu4} = 4$$

按中点法对  $K_p$  进行模糊判决，在乘以量化因子  $1/K_p$  后即可得到去模糊化  $K_p$  的精确整定值：

$$K_p = \frac{1}{2}(K_{pd} + K_{pdj}) \frac{1}{k_{K_p}} = \frac{5+4}{2} \times 10 = 45$$

同理， $K_i$  和  $K_d$  参数的模糊推理和去模糊化运算过程与  $K_p$  相同。这样就实现了在线自整定  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$ ，将它们代入式 (4)，就可得到  $K$  时刻的  $\Delta u$ ，能直接作为自调整模糊 PID 控制器参数的整定值输出，从而实现了模糊 PID 参数的在线自调整。

### 4 仿真和实际验证

采用自调整模糊 PID 控制策略进行仿真验证，其仿真模型如图 6 所示。对应于阶跃函数的过渡响应如图 7 所示。

从图 7 不仅看出  $e$ 、 $e_c$ 、 $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  的变化规律，而且也能看出动臂电液比例位置控制系统的位置跟踪过程，能满足静态跟踪误差  $\leq 50$  mm、无振荡和无超调的技术要求。

对挖掘机器人动臂实际控制验证情况是：发动机转速 1 300 rad/min，正负方向死区为 53%/-47%，动臂液压缸活塞杆运动速度 200 mm/s 条件下，其位置跟踪结果如图 8 所示，向上运动最大静差 0.5 mm，稳态震荡幅度 0.4 mm。启动纯延时 2 s，到达给定位置延时 3 s。向下运动最大静差 1 mm，稳态震荡幅度 0.4 mm。运动过程中启动纯延时 0.7 s，到达给定位置延时 3 s。

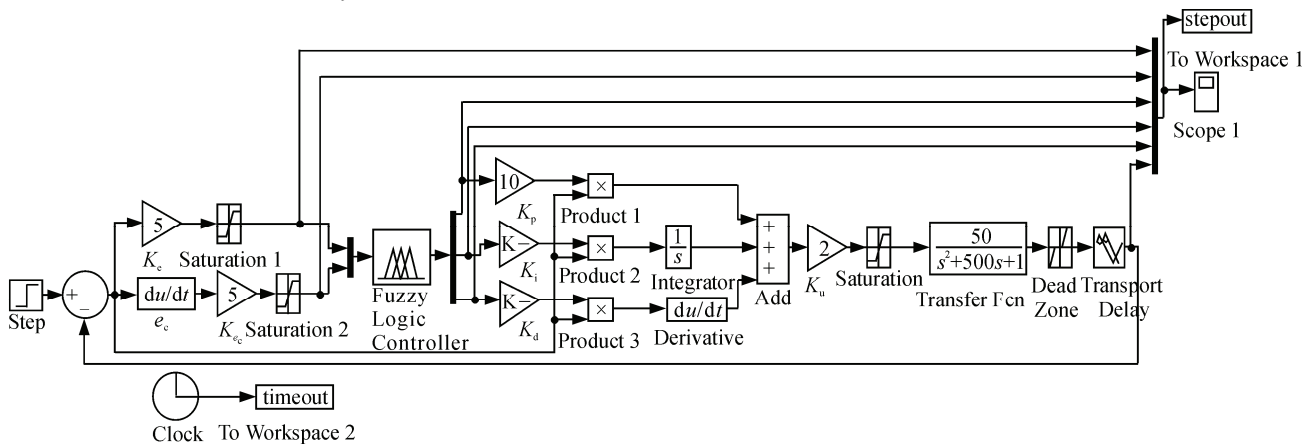


图 6 模糊自整定 PID 仿真模型

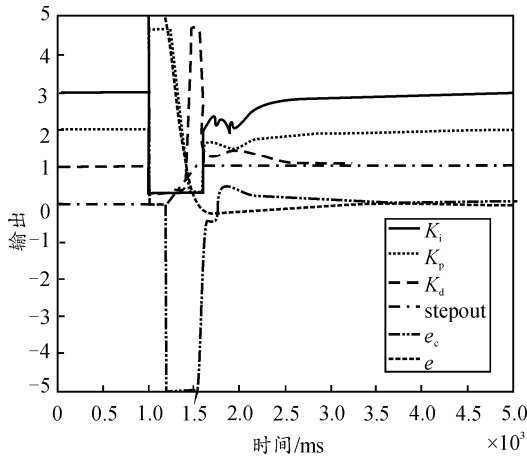


图 7 对应于阶跃函数的过渡响应

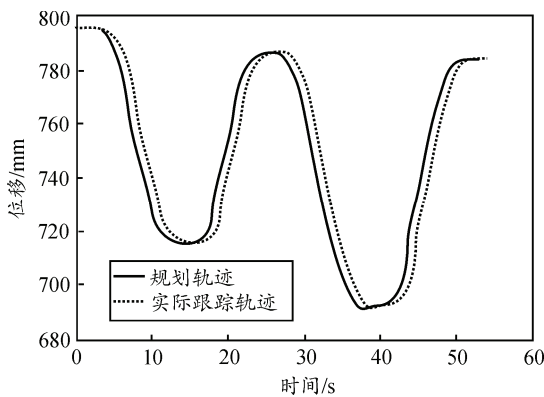


图 8 动臂实际位置跟踪测试

### 5 结束语

笔者主要对参数自调整模糊 PID 控制器原理、模糊化、建立 13×13 模糊 PID 控制规则表、中点向下融合法和去模糊化等内容进行研究，仿真和实际验证结果说明了文中所研究的自整定模糊 PID 控制技术是可行的，具有很好的鲁棒性，其效果满足技术要求，但存在滞后，故下一步的研究重点是采用前馈控制理论解决滞后问题。

### 参考文献:

[1] 李俊明, 阴涌光, 王登峰, 等. 电液比例系统的模糊控制[J]. 农业机械学报, 1997, 28(3): 90-94.  
 [2] Corbet T, Sepehri N, Lawrence P D-Fuzzy Control of class of hydraulically actuated industrial robots[J]. IEEE Trans on Control systems Technology, 1996, 4(4): 419-426.  
 [3] 陈燎原. 电液伺服系统的模糊控制研究[J]. 农业机械学报, 2002, 33(1): 90-93.  
 [4] Situm, Z. Pavkovic. Novakovic B. Servo Pneumatic position Control using fuzzy PID gain Scheduling Journal of Dynamic System, Measurement and Control[J]. Transactions of the ASME, 2004, 126(2): 376-387.  
 [5] Chopra Sauto tuning of fuzzy PI type controller Structures [J]. IEEE Transactions on Syst, May, Cybern: B, 1999, 29(3): 373-374.  
 [6] 尚涛. 液压挖掘机作业及行走系统节能控制研究[D]. 吉林: 吉林大学机械科学与工程学院, 2005.

(上接第 59 页)

表 4 是不同射速下炮口中心振动曲线的振幅。通过数据分析、比较，可以看出在行进间射击，射速较高时，炮口中心的位移和速度曲线的振幅较小，低射速射击时，位移和速度曲线的振幅反而明显增大，由振荡的轨迹和趋势看，主要受路面的影响较大，应通过优化设计武器站稳定装置以提高行进间射击精度。

表 4 不同射速下炮口中心振动曲线振幅

振动特性参数	射速		
	300 发/min	200 发/min	100 发/min
位移/mm	5.5	3.0	11.6
速度/(mm/s)	46.5	45.9	73.5

### 3 结论

研究结果表明:

1) 停止间射击时，不论从位移曲线还是速度曲线看，采用低射速进行射击时，炮口振动都呈现出较强的规律性。

2) 行进间射击时，当以较低的速度行驶时，顶置武器站以较高射速射击，炮口振动影响较小，低射速射击时，受到路面不平度的影响，炮口振动反而增大。

3) 行进间以低射速射击时，受路面激励影响，炮口振动增大，由于笔者并未将武器站稳定装置加入模型当中，将在今后做进一步研究。

### 参考文献:

[1] 毛保全, 王传有. 某型遥控武器站射击密集度仿真与优化[J]. 装甲兵工程学院院报, 2010(4): 36-40.  
 [2] 甘高才. 自动武器动力学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1990: 8-15.  
 [3] 毛保全. 车载武器发射动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010(8): 9-10.  
 [4] 国家标准局. GB 7031—86 车辆振动输入-路面平度表示方法[S]. 北京: 中国标准出版社.  
 [5] 陈树勇, 孙逢春. 电传动履带车辆驱动系统建模与转向特性研究[J]. 系统仿真学报, 2006(4): 2815-2818.