

doi: 10.7690/bgzdh.2020.09.009

## 液压缸位置伺服系统模糊 PID 控制器

吕卫强<sup>1</sup>, 席静<sup>2</sup>, 章百宝<sup>1</sup>, 魏文彬<sup>1</sup>, 高洁<sup>1</sup>

(1. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司特种产品事业部, 四川 绵阳 621000;  
2. 陆军装备部北京地区军代局驻北京地区第五军代室, 北京 100039)

**摘要:** 为使电液比例节流控制能够适应负载的变化, 修正开度大小, 设计一种模糊 PID 控制器, 对电液比例阀进行死区补偿。通过查找模糊规律表的方法, 使用历史数据计算油缸速度与加速度, 对  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  参数进行修正, 并与传统 PID 方法进行实验对比。结果表明: 该模糊 PID 控制器受负载的影响比传统 PID 控制器小, 能改善控制效果, 且具有较强的鲁棒性以及较短的调节时间, 阶跃响应更快。

**关键词:** 液压缸; 模糊 PID; 电液比例; 负载流量比

**中图分类号:** TP202 **文献标志码:** A

## Fuzzy PID Controller of Hydraulic Cylinder Position Servo System

LYU Weiqiang<sup>1</sup>, Xi Jing<sup>2</sup>, Zhang Baibao<sup>1</sup>, Wei Wenbin<sup>1</sup>, Gao Jie<sup>1</sup>

(1. Department of Special Product, Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China; 2. No. 5 Military Representative Office in Beijing, Beijing Military Representative Bureau of Army Equipment Department, Beijing 100039, China)

**Abstract:** In order to make electro-hydraulic proportion throttle control can adjust to varying load and modify mouth size, design the fuzzy principle to adjust PID controller parameter. Carry out dead-time compensation for electro-hydraulic proportion valve, use finding fuzzy principle rule method and adopt history data to calculate the cylinder speed and acceleration to modify  $K_p$ ,  $K_i$ , and  $K_d$  parameters. Compare it with traditional PID method. The result show that the fuzzy PID controller is less affected by the load than the traditional PID controller, and the control effect is improved. It has stronger robustness, shorter regulation time, and faster step response.

**Keywords:** hydraulic cylinder; fuzzy PID; electro-hydraulic proportion; load flow ratio

### 0 引言

液压缸通常应用于工程机械、工业设备, 是一种传动效率较低, 但稳定性高的执行设备, 其数学模型具有非线性、时变性, 内部的结构件会因磨损产生泄压效应。如何使用液压缸构建更为精确的位置伺服系统, 成为当今学术界的研究热点。

液压缸功率=流量×压力, 当液压缸功率恒定时, 流量会随负载变化而改变, 使用常规的限流方式控制液压缸的速度难度较大。曾乐等<sup>[1]</sup>指出, 电液比例限流阀控制液压缸的流量时, 液压缸的速度会随负载变化出现明显的非对称性, 不能较好地跟踪轨迹规划给出的速度、加速度。模糊控制器是一种容易控制、掌握的较理想的非线性控制器, 具有较佳的鲁棒性、适应性及容错性, 不依赖于被控对象的精确数学模型, 特别适用于非线性、时变、滞后、模型不完全系统的控制。为了使电液比例节流控制能够适应负载的变化, 修正开度大小, 笔者使用模糊 PID 控制器, 取得了较好的控制效果。应用

于无人自主挖掘机上, 能有效提高自主挖掘的控制精度, 解决时延、死区等问题。

### 1 液压缸工作特性

#### 1.1 液压缸工作原理

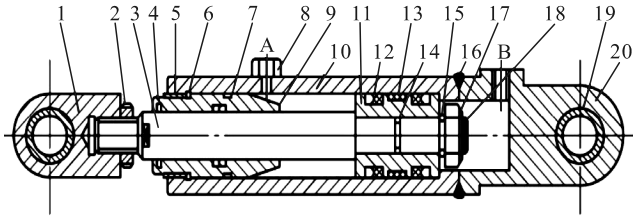
液压缸是将液压能转变为机械能、做直线往复运动(或摆动运动)的液压执行元件, 结构简单、工作可靠。用它来实现往复运动时, 可免去减速装置, 并且没有传动间隙, 运动平稳; 因此, 在各种机械的液压系统中得到广泛应用。液压缸输出力和活塞有效面积及其两边的压差成正比; 液压缸由缸筒和缸盖、活塞和活塞杆、密封装置、缓冲装置与排气装置组成。缓冲装置与排气装置视具体应用场合而定, 其他装置则必不可少。

活塞式液压缸可分为单杆式和双杆式 2 种结构, 其固定方式有缸体固定和活塞杆固定 2 种, 按液压力的作用情况有单作用式和双作用式。在单作用式液压缸中, 压力油只供液压缸的一腔, 靠液压

收稿日期: 2020-04-25; 修回日期: 2020-06-07

作者简介: 吕卫强(1975—), 男, 河南人, 硕士, 从事无人控制装备软件研究。E-mail: 3549389@qq.com。

力使缸实现单方向运动,反方向运动则靠外力(如弹簧力、自重或外部载荷等)来实现;而双作用液压缸活塞 2 个方向的运动则通过两腔交替进油,靠液压力的作用来完成。其结构<sup>[2]</sup>如图 1 所示。



1. 耳环; 2. 螺母; 3. 防尘圈; 4. 17. 弹簧挡圈; 5. 套; 6. 15. 卡键; 7. 14. O形密封圈; 8. 12. Y形密封圈; 9. 缸盖兼导向套; 10. 缸筒; 11. 活塞; 13. 耐磨环; 16. 卡键帽; 18. 活塞杆; 19. 衬套; 20. 缸底。

图 1 液压缸机械结构

### 1.2 液压缸数学模型

液压缸的负载流量方程:

$$Q_{La} = C_l p_L + \frac{V_e}{4\beta_e} p_L + A_{me} \dot{y} \quad (1)$$

液压缸的压力方程:

$$p_L = \frac{1}{A_e} (m\ddot{y} + B_v \dot{y} + K_s y) \quad (2)$$

液压缸数学模型<sup>[3]</sup>:

$$Y(s) = \frac{\frac{K_{xa}}{A_{me}}}{\left( \frac{s^2}{\omega_{he}^2} + \frac{2\zeta_{he}}{\omega_{he}} s + 1 \right)} X(s) \quad (3)$$

其中:

$$\omega_{he} = 2\sqrt{A_e A_{me} \beta_e / V_e m}; \quad (4)$$

$$\zeta_{he} = K_{ta} \sqrt{n\beta_e / V_e A_e A_{me}} + \frac{B_v}{4} \sqrt{V_e / n\beta_e A_e A_{me}} \quad (5)$$

式中:  $\zeta_{he}$  为液压缸等效阻尼比;  $\omega_{he}$  为液压缸固有频率;  $K_{xa}$  为流量增益,  $m^2/s$ ;  $C_l$  为液压缸总的泄漏系数,  $m^3/(s \cdot Pa)$ ;  $A_{me}$  为活塞平均面积;  $V_e$  为液压缸的等效体积;  $y$  为液压缸活塞的位移量;  $\beta_e$  为液压油的体积弹性参数, Pa;  $m$  为负载质量;  $B_v$  为负载的黏性阻尼系数,  $N \cdot s/m$ ;  $K_s$  为液压缸弹性系数,  $N/m$ ;  $A_e$  为活塞等效面积。

### 1.3 液压缸的负载流量特性

电液比例阀具有一定的死区,可通过实验测得,一般不受压力、温度影响。液压缸则不同,流量特性一般不对称,在空载状态的基础上,当液压缸承受压力与承受拉力时,会存在一定的提速或降速。如图 2 所示,  $p_s$  为系统的供油压力。

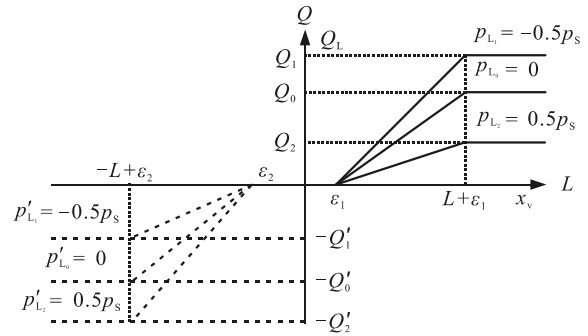


图 2 液压缸负载流量特性

图中,以空载为基本状态,区间  $\epsilon_1 \sim \epsilon_2$  为电液比例节流阀的死区段,在电液比例阀开度达到最大时,系统进入饱和段,流量不再变化。液压缸受压时,正向负载流量斜率减小,反向负载流量斜率增大;当液压缸受拉时,正向负载流量斜率增大,反向负载流量斜率减小<sup>[4]</sup>。

轨迹规划给出了液压缸运动至目标位置过程中的中间位置、速度以及加速度。在构建伺服系统时,除了位置反馈外,应当引入速度反馈。该反馈不直接影响电液比例节流阀的开度大小,否则容易造成较大的速度波动。

## 2 液压缸模糊 PID 控制器设计

PID 控制器适用于常规的线性时不变系统,在进行适当的参数整定后,具有较快的响应速度以及较好的动态过程,理论上可以消除稳态误差。针对上述系统,功率恒定时流量会随压力发生变化,不满足时不变性,而在实际工作中,负载会影响功率损耗,确定负载对流量的影响难度较大。笔者提出在不同负载条件下测试液压缸的速度与加速度,并调节 PID 控制器,确定最优的 PID 参数。使用差量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  制定的 PID 模糊规律如表 1—3 所示。

表 1  $\Delta K_p$  模糊规律

$a/(mm/s^2)$	$v/(mm/s)$						
	80	40	20	0	-50	-100	-200
10	-5	-3	-1	0	5	10	20
5	-3	-1	0	0	3	5	10
0	-1	0	0	0	0	0	-1
-10	10	5	3	0	0	-1	-3
-20	20	10	5	0	-1	-3	-5

表 2  $\Delta K_i$  模糊规律

$a/(mm/s^2)$	$v/(mm/s)$						
	80	40	20	0	-50	-100	-200
10	-2	-1	0	0	0	1	2
5	-1	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0
-10	1	0	0	0	0	0	-1
-20	2	1	0	0	0	-1	-2

表 3  $\Delta K_d$  模糊规律

$a/(mm/s^2)$	$v/(mm/s)$						
	80	40	20	0	-50	-100	-200
10	-5	-3	-1	0	1	3	5
5	-3	-1	0	0	0	1	3
0	-1	0	0	0	0	0	-1
-10	3	1	0	0	0	-1	-3
-20	5	3	1	0	-1	-3	-5

由于液压缸结构上存在一定的自重，缩短方向的速度与加速度相对于伸长方向较快。当速度方向与加速度方向相同时，负载力与运动方向同向，负载流量斜率增大，应适当地减小电液比例阀的开度大小；反之，当速度方向与加速度方向相反时，负载力与运动方向反向，负载流量斜率减小，应适当增大电液比例阀的开度。

在液压缸刚开始运动时，液压缸位于加速段，用模糊控制可以提升系统的响应速度与动态性能；当前位置逐渐接近目标位置时，液压缸进入减速段，速度与加速度均减小，模糊规律表的修正量减小至 0，此时主要采用 PID 控制，可以获得较好的静态性能与较小的稳态误差<sup>[5]</sup>。

油缸外侧装有位置传感器，通过 CAN 总线每隔 10 m/s 回传一帧数据，表示油缸当前位置，通过 2 帧数据可以计算当前速度  $v_0$ ，3 帧数据可以计算出 2 个速度值，即可求得当前加速度  $a_0$ ，具体的量化规则如式(6)、式(7)所示：

$$\left. \begin{aligned} v = 80 & \quad v_0 > 60 \\ v = 40 & \quad 30 < v_0 \leq 60 \\ v = 20 & \quad 10 < v_0 \leq 30 \\ v = 0 & \quad -25 < v_0 \leq 10 \\ v = -50 & \quad -75 < v_0 \leq -25 \\ v = -100 & \quad -150 < v_0 \leq -75 \\ v = -200 & \quad v_0 \leq -150 \end{aligned} \right\}; \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} a = 10 & \quad a_0 > 8 \\ a = 5 & \quad 3 < a_0 \leq 8 \\ a = 0 & \quad -5 < a_0 \leq 3 \\ a = -10 & \quad -15 < a_0 \leq -5 \\ a = -20 & \quad a_0 \leq -15 \end{aligned} \right\}。 \quad (7)$$

受液压缸非对称性影响，需要在空载条件下对伸长与收缩方向进行 2 次 PID 参数整定，再将模糊规律表引入控制系统，通过历史数据查表修正参数后，系统的结构如图 3 所示。

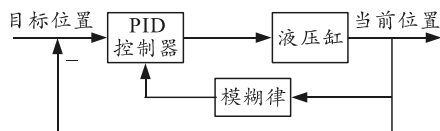


图 3 液压缸控制系统结构

### 3 液压缸试验分析

为了验证所制定模糊律的有效性，将本控制器实验结果与未引入模糊律的试验结果进行比较，使用一对液压缸在相同负载下同时发送控制命令，记录其位移传感器输出的位置<sup>[6]</sup>。试验结果如图 4—8 所示，其中一个液压缸控制器使用传统 PID 控制器，而另一个液压缸在传统液压缸 PID 参数的基础上引入模糊律，可以看出传统 PID 相对于模糊 PID 总会存在一定的滞后。

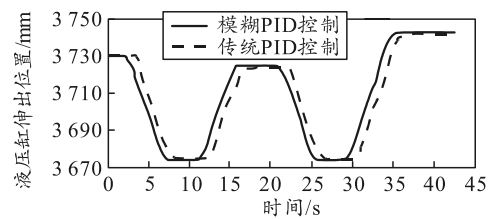


图 4 负载为 3.0 MPa 的位置

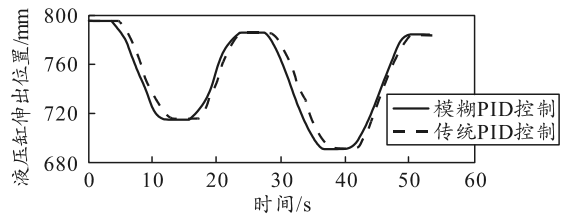


图 5 负载为 2.0 MPa 的位置

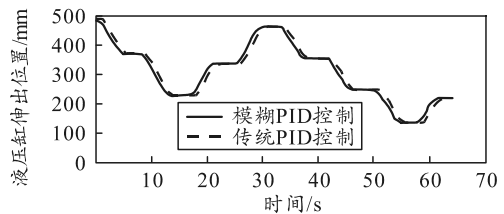


图 6 负载为 1.0 MPa 的位置

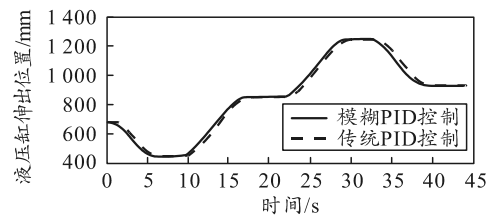


图 7 负载为 0 MPa 的位置

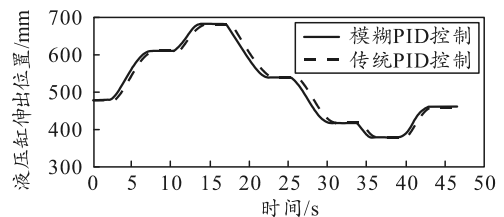


图 8 负载为 -1.5 MPa 的位置

2 种控制器稳态误差均较小，主要区别在于动态性能。控制系统的输入由一系列达到目标位置的中间点组成，以阶跃信号的形式发送至控制器<sup>[7]</sup>，

当液压缸匀速跟踪轨迹时，目标位置与当前位置总是存在一个波动较小的差值。从图中可以看出：传统 PID 控制器开始运动后，相对于模糊 PID 的滞后导致其差值总是大于模糊 PID 控制器，影响轨迹跟踪的精度。

当负载逐渐减小后，模糊 PID 控制器与传统 PID 控制器的结果相近，但模糊 PID 的控制效果仍优于传统 PID，因为模糊律在加速度绝对值较大时，PID 参数修正量也较大，缩短了加速与减速的时间。

#### 4 结论

液压缸应用广泛，实现其自动控制具有长远的意义与价值。笔者在应用中构建模糊 PID 控制器，通过实验制定了一套模糊规律表，在一定程度上抑制了负载的降速效应。实验结果表明，该方法相对于传统 PID 控制器具有更好的控制效果。

经实际测试，使用该控制方法的液压缸控制应用于无人自主挖掘机时，挖掘机的挖掘精度、时延、跨越死区等指标均有极大提高。该方法对无人化自主挖掘领域的无人工程机械发展有一定贡献。

\*\*\*\*\*

(上接第 24 页)

表 3 预警体系雷达装备能力提升贡献率

弹道序号	预警时间/s	连续跟踪比率	火控支持时间/s	贡献率
1	0.23	0.37	0.33	0.302
2	0.09	0.21	0.17	0.150
3	0.10	0.12	0.37	0.187
4	0.04	0.13	0.15	0.100

由于预警体系技术调整后只是增加了 1 部雷达装备，根据式(16)计算出装备 X 对整个作战体系的贡献率为 0.185。从表 3 可知：装备 X 对于每条弹道而言，对体系的贡献率不同，考虑到装备受实际部署位置、阵面的朝向等因素的影响。另外，从表中的纵向来看，4 条弹道对每个指标的贡献率聚合值分别为 0.115、0.207 5、0.255，说明装备对于后 2 个指标的贡献较大，这与装备本身的作战能力有关。实验结果可为装备的优化部署和作战体系结构设计研究提供有利的参考。

#### 4 结束语

笔者构建反导预警体系雷达装备的贡献率评估指标体系，通过计算每项指标的能力提升贡献率加权合成得到雷达装备对整个作战体系的能力提升贡献率，选择预警时间、连续跟踪比率、火控支持时

#### 参考文献：

- [1] 曾乐, 谭建平, 杨俊, 等. 电液比例阀控非对称缸系统的负载流量特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(7): 2281-2286.
- [2] 王进军. 电液比例负载敏感控制变量柱塞泵技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 132-138.
- [3] 马纪明, 付永领, 王岩. 最优控制理论在液压喷漆机器人伺服系统中的应用研究[J]. 液压与气动, 2003(6): 4-6.
- [4] 何禹锬, 高强, 侯远龙. 某定深电液伺服系统的粒子群优化神经网络 PID 控制[J]. 兵工自动化, 2019, 38(11): 24-28.
- [5] 张大庆, 赵喻明, 刘心昊, 等. 液压挖掘机四自由度自适应控制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(z1): 455-458, 470.
- [6] 刘辉, 吴云洁, 刘旺开, 等. 基于模糊神经网络 PID 的串级温度控制系统研究[J]. 兵工自动化, 2018, 37(8): 37-40.
- [7] 张大庆, 何清华, 郝鹏, 等. 液压挖掘机铲斗的轨迹跟踪控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2005, 35(5): 490-494.

间 3 个技术指标，通过仿真实例验证了该算法的有效性和合理性，可为进一步研究武器装备体系贡献率提供支撑。

#### 参考文献：

- [1] 徐瑛, 陈秀山, 刘凤良. 经济研究 [M/OL]. (2006-08-009). <https://baike.so.com/doc/5336982-5572421.html>.
- [2] 管清波, 于小红. 新型武器装备体系贡献度评估问题探析[J]. 装备学院学报, 2015, 26(3): 1-5.
- [3] 常雷雷. 基于灰靶理论的武器装备体系技术贡献度评估研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [4] 罗小明, 朱延雷. 基于复杂适应系统的装备作战试验体系贡献度评估[J]. 装甲兵工程学院学报, 2015, 29(2): 1-6.
- [5] 杨风暴, 王肖霞. D-S 证据推理的冲突证据合成方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 1-34.
- [6] 金从镇, 黄炎炎, 周少平, 等. 基于效用函数的装备技术对作战系统贡献度评估方法[C]. 第四届中国指挥控制大会论文集, 2016: 419-424.
- [7] 马彦恒, 侯建强. 机动合成孔径雷达成像研究现状与发展趋势[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(11): 111-115.
- [8] 钟辉. 雷达装备融合保障机制探讨与实践[J]. 兵工自动化, 2019, 38(11): 19-23.