

液压控制系统的模糊—PID 算法研究

朱祖灿, 张 果, 王剑平, 程 繁

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 昆明 650500)

摘要: 在 LABVIEW 平台上将模糊控制算法和 PID 控制算法相结合设计出一套应用于液压装置性能检测的测试与控制系统, 该系统使用模糊—PID 自适应控制器, 通过模糊规则的建立, 对 PID 的参数进行动态的调整, 提高系统的动静态特性, 克服传统液压装置效率低, 可靠性差, 结果受人工影响等不足, 本系统中液压缸采用摩擦较低的单活塞杆油缸, 缸内径 $D=40$ mm, 活塞杆直径 $d=20$ mm, 油缸最大行程为 100 cm, 经过反复测试, 控制误差都在 ± 0.5 mm, 达到了系统设计的要求; 最终结果表明: 系统实时响应快、超调小、稳定可靠, 可以实现对油缸位移的精确控制。

关键词: LABVIEW; 液压系统; 位移控制; 数据采集; 模糊—PID 算法

Study of Hydraulic control System Based on Fuzzy—PID Algorithm

Zhu Zucan, Zhang Guo, Wang Jianping, Cheng Fan

(College of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: it designs a set of the test and control system for the hydraulic device performance testing based on fuzzy control algorithm and PID control algorithm with LABVIEW software. The system uses adaptive fuzzy PID controller, through the establishment of fuzzy rules, the PID parameters dynamically adjust the system's dynamic and static characteristics. it overcomes some disadvantages of the conventional hydraulic devices, such as low efficiency, poor reliability, the testing results were affected by operator. The system uses single rod cylinders with a low-friction cylinder, inside diameter of the cylinder is $D=40$ mm, piston rod diameter is $d=20$ mm, maximum stroke of the cylinder is 100cm, after repeated testing, control errors are ± 0.5 mm, reaching the system design requirements. The final results showed that: the system can response with time fast, the system has small overshoot, the system is stable and reliable, the system can achieve precise control of the cylinder displacement.

Keywords: LABVIEW; hydraulic testing device; cylinder displacement; data acquisition; fuzzy—PID control algorithm

0 引言

20 世纪 60 年代初, 国内开始液压控制系统的研制和开发, 经过几十年的发展, 取得了一定的成果, 因其运行稳定, 操作方便的优势广泛运用于工业控制, 尤其是在冶金、矿产开发这些领域。

随着技术的进步, 液压系统的弊端越来越明显, 由于其先天的不足: 非线性、时变性系统, 受运行工况和大量不确定性环境因素影响明显, 难以建立精确的数学模型等。控制过程更多依赖操作人员的经验和知识水平, 而无法做到自动高速、高效测量的目的, 使得试验过程的科学性和严谨性不足, 难以达到试验要求^[1]。

针对上述不足, 与对模糊算法与 PID 算法各自优缺点的综合考虑, 系统引入了模糊—PID 控制算法。PID 控制稳态性好, 精度高, 但鲁棒性较差, 容易产生振荡、积分饱和以及超调; 只使用 PID 算法很难达到控制精度要求^[2]; 而模糊控制对被控对象的参数变化不敏感, 无需建立被控对象的数学模型, 适用于快速控制, 但是其控制精度不够高; 而文献^[3]提出用模糊控制来整定 PID 参数, 并没有用于实际控制, 液压系统的位移控制运用的很少, 大多还只是停留在开环控制; 文献^[4-6]都在模糊控制的基础上加入其他的算法加以改进; 位

移的控制也还可以有其他方式, 文献^[7]用时钟脉冲进行控制并取得一定成果。鉴于此液压系统的不稳定特性和易受干扰影响等因素, 在 LABVIEW 环境下本系统设计出模糊—PID 自适应控制器, 将两种算法结合起来相互补充设计出的自适应控制器, 运用于油缸的位移控制。经过反复的试验, 数据表明该控制器在控制的实时性、稳定性和精度上都优于单纯的模糊或者 PID 控制, 可以满足实际应用需求。

1 位移闭环控制系统的数学模型

系统由液压油缸、光电位移传感器、A/D 转换器、工业控制计算机、执行元件(比例控制阀)、数据采集装置及控制软件等构成, 位移控制系统结构如图 1 所示。控制器将设定值与实际输入位移对应的电压信号进行比较, 得出电压偏差控制量; 通过数据采集卡进行 D/A 转换, 将采集到的电压差送给比例放大器, 经线性放大后转换为电流, 用以驱动比例方向阀并调节节流口开度, 比例方向阀以一定的开口大小给被控液压缸提供相应大小的流量来控制液压缸运动; 再由位移传感器采回数据, 根据误差的大小来调节控制器参数, 反复进行, 最终使控制系统的被控量(位移)达到期望值, 实现位置控制系统精度的提高。

在图 1 中, 电液比例位置控制系统的主要元件是比例阀和液压缸, 系统的动态特性取决于阀和液压缸的特性和负载。比例放大器和位移传感器是比例环节, 分别用 K_a 和 K_m 代替; 比例方向阀看做一个二阶环节。若忽略微小外部干扰量, 油缸负载是惯性负载和弹性负载的组合, 黏性负载很小, 可以忽

收稿日期: 2013-12-01; 修回日期: 2014-01-27。

作者简介: 朱祖灿(1988-), 男, 湖北荆州人, 在读硕士研究生, 主要从事运动控制、智能控制、虚拟仪器研究及应用方向的研究。

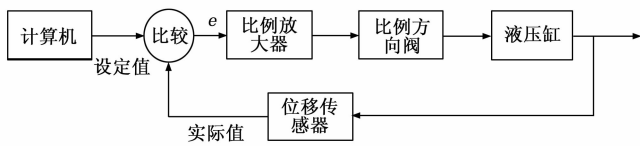


图 1 位移控制系统结构图

略。因此可得液压缸位移控制系统传递函数为:

$$W_h(s) = \frac{A_p}{K_L K_{ec}} \frac{1}{\left(\frac{A_p^2}{K_K K_{ec}} s + 1\right) \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\delta_h}{\omega_h} s + 1\right)}$$

该闭环控制系统能够自动克服干扰, 当干扰出现时, 改变控制量, 使得本来稳定的系统偏离平衡值, 但闭环系统能够自动调节过来, 使系统恢复平衡, 保持正常的工作。

2 模糊-PID 控制器

2.1 模糊 PID 的设计思想

模糊 PID 控制也就是运用模糊控制规则实现对 PID 控制 3 个参数的在线调整^[8], 还有 3 种其他的算法形式参考文献^[9]。其基本原理是: 通过数据采集卡采集得到输入量与输出量, 在计算机程序中进行比较得到受控量 (即位移) 的偏差 e , 将其和偏差变化率 ec , 作为控制器的输入, 输出则为 ΔK_p , ΔK_i 和 ΔK_d 。它是由模糊推理和 PID 调节器构成, 在控制过程中通过检测两个输入量 e 和 ec , 来不断调整比例、积分和微分 3 个增益参数的值:

$$k_p = \Delta K_p + K_{p0}$$

$$k_i = \Delta K_i + K_{i0}$$

$$k_d = \Delta K_d + K_{d0}$$

式中, k_{p0} 、 k_{i0} 、 k_{d0} 为 PID 控制的初始参数。系统在运行中, 控制模块可以通过对模糊逻辑规则的结果进行处理、查表和运算, 便可以完成 PID 3 个参数的自整定运算。

2.2 模糊化模块设计

自适应模糊 PID 控制器设计为二维输入三维输出, 输入和输出的模糊隶属函数均取三角隶属函数, 解模糊方法取中位数法。以位移误差 e 和误差变化率 ec 作为输入, 利用模糊控制规则在线对 PID 的 3 个参数 K_p 、 K_i 、 K_d 进行自整定修改, 以满足不同时刻的 e 和 ec 对 PID 参数的不同要求。自适应模糊 PID 控制如图 2 所示。

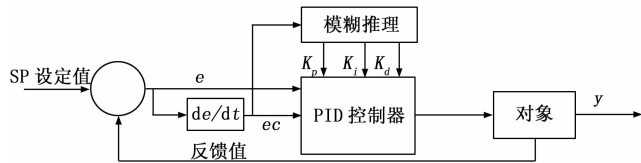


图 2 模糊-PID 控制框图

图 2 中被控对象是液压油缸, 误差 e 可选推进液压油缸设定位移值 sp 和实际行程值 pv 的偏差, 误差变化率 ec 可选其偏差的变化率, 输出信号 y 可选比例阀的位置变化, 其中偏差 e 的论域为 $[-6, 6]$, 偏差变化率 ec 的论域为 $[-6, 6]$ 。将输入输出量的模糊状态论域分为 7 个模糊子集: {PB (正大)、PM (正中)、PS (正小)、ZO (零)、NS (负小)、NM (负中)、NB (负大)}, 模糊状态论域均取为 $[-3, 3]$ 。

模糊自整定部分是找出 PID 的 3 个参数与 e 和 ec 之间的

模糊关系, 在运行中通过不断检测 e 和 ec , 根据模糊控制原理来对 3 个参数进行修改, 从而使被控对象有良好的动、静性能。从系统的稳定性、响应速度、超调量和稳态精度等各方面来分析, 可以归纳出误差 e 和误差变化率 ec 跟 PID 的 3 个参数 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 之间存在如下关系:

1) 当 $|e|$ 较大时, 为加快系统响应速度, 应取较大的 K_p , 为避免系统在开始时可能出现的超范围控制作用, 应取较小的 K_d , 为避免出现较大的超调, 可以去掉积分作用, 取 $K_i = 0$ 。

2) 当 $|e|$ 和 $|ec|$ 中等时, 为使系统超调量小、响应速度快, 应取较小的 K_p , 及适当的 K_i 和 K_d 。

3) 当 $|e|$ 较小时, 为使系统具有较好的稳态性能, 应取较大的 K_p 和 K_i , 为避免在平衡点附近出现震荡, 应取适当的 K_d 。

结合以上总结的输入变量与 K_p 、 K_i 、 K_d 间的关系, 并根据工程技术人员的分析和实际操作经验, 建立了合适的模糊控制规则表, 如表 1~表 3 所示。

表 1 ΔK_p 模糊控制规则表

$ec \backslash e$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZO
NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NM
ZO	PM	PS	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	ZO	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
8PB	ZO	NS	NS	NM	NM	NB	NB

表 2 ΔK_i 模糊控制规则表

$ec \backslash e$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NM	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
PM	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PB	PB	PB

表 3 ΔK_d 模糊控制规则表

$ec \backslash e$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	PS	ZO	ZO	ZO	PB	PB
NM	NS	NS	NS	NS	ZO	NS	PM
NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
ZO	NB	NM	NM	NS	ZO	PS	PM
PS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
PM	NM	NS	NS	NS	ZO	PS	PS
PB	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	PB	PB

本系统有 147 条模糊规则, 采用 Mamdani 模糊推理方法。Mamdani 模糊推理是英国曼丹尼 (E. H. Mamdani) 博士在

1974 年提出, 并成功应用于模糊控制系统。Mamdani 模糊推理的模糊规则形式为:

- R_1 : if e is NB and ec is NB and ΔK_p is PB
- R_2 : if e is NB and ec is NS and ΔK_p is PM
- ...

其中: ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 分别是属于 e 、 ec 论域上模糊集合, 每条模糊规则为直积空间 $e * ec$ 上的一个模糊蕴含关系。

根据模糊规则归纳出模糊关系, 采用 Mamdani 的模糊推理与合成运算, 得到对应 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 论域元素 $f(e, ec)$ 的隶属度, 采用加权平均法进行解模糊运算, 编辑好之后存盘, 生成一个扩展名为 .fs 文件。

2.3 PID 模块设计

采用数字增量式 PID 算法控制, 这样增量值 ΔU 只与最近的 3 次误差值有关, 不会产生大的积累误差, 误动作影响小。算法公式为:

$$Du = U(k) - U(k-1) = K_p(e(k) - 2e(k-1) + T/T_i * e(k) + T_d * (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2))/T) = Ae(k) + Be(k-1) + Ce(k-2)$$

其中: $A = K_p(1 + T/T_i + T_d/T) = K_p + K_i + K_d$;
 $B = -K_p(1 + T_d/T) = -(K_p + 2K_d)$;
 $C = K_p T_d / T = K_d$ 。

一旦确定了 K_p 、 K_i 、 K_d , 就可以用前后 3 次测量的偏差值和 $U_k = U(k-1) + Duk$ 式求出控制量。

3 仿真研究及试验数据分析

本系统采用的是宁波华液公司生产的型号为 BFW033C29550 的不带内置放大器的直动式三位四通比例方向阀, 相配套的比例放大器为 HAP20408 双路比例放大器。液缸采用摩擦较低的单活塞杆油缸, 缸内径 $D=40$ mm, 活塞杆直径 $d=20$ mm, 油缸最大行程为 100 cm。

在 LABVIEW 环境下, 构建 Fuzzy-PID 控制系统仿真框图, 设定值为 200 mm 时的仿真曲线如图 3~图 6 所示。其中, 包括设置仿真开始时间、终止时间、仿真算法等参数。在 LABVIEW 环境下, 运行开始调用上述编辑过的 .fs 文件。

液压油缸行程控制系统对象传递函数为:

$$G(S) = \frac{1}{2S^2 + 3S + 1}$$

对其进行 Z 变换, 并采用前述隶属函数及控制规则, 取 $K_e=0.2$, $K_c=0.2$, $K_p=0.1$, $K_i=12$, $K_d=0$ 时得到模糊控制响应曲线, 如图 3 所示; 图 4、图 5、图 6 是在图 3 的基础上将解模糊因子 K_p 、 K_i 做修改后得到的仿真曲线, 用于与图 3 进行对比证明模糊-PID 控制确实要优于单纯的模糊控制或者 PID 控制, 如图 3 所示 (其中 SP 是指设定目标值, fuzzy-PID 是实际数值, PID 是指 PID 控制下的变化曲线, 横轴表示时间, 纵轴表示幅值)。

通过上面的仿真曲线可以得出: 采用模糊 PID 控制在超调量上较单纯的 PID 控制有优势, 采用 PID 超调达到 2.8, 而采用模糊 PID 的超调量只有 2.1, 超调下降了 0.7; 并且采用模糊 PID 控制器几乎是平滑过渡到设定值, 而 PID 会在设定值上下波动, 这样减小了对硬件设备的损伤, 较好地满足了工程生产的需要。适当地增大量化因子可以加快模糊控制系统的响应速度。

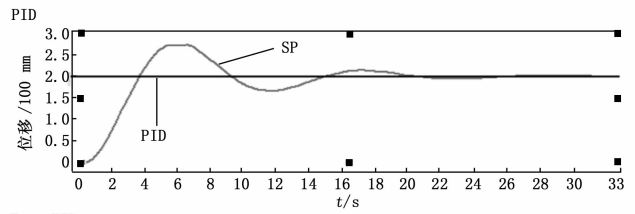


图 3 解模糊因子 $K_p=0.1$, $K_i=12$, $K_d=0$ 时的仿真曲线

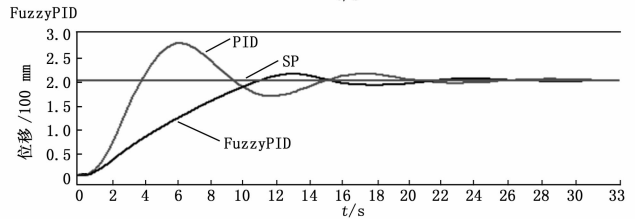


图 4 解模糊因子 $K_p=0.5$, $K_i=12$, $K_d=0$ 时的仿真曲线

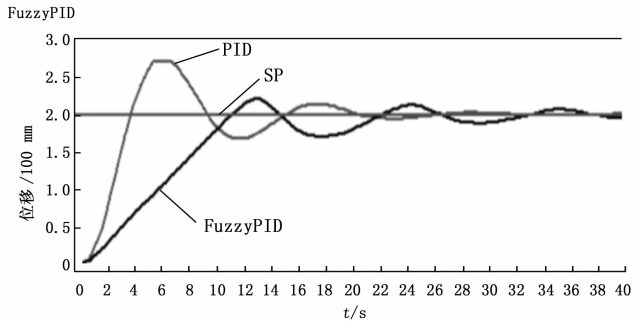


图 5 解模糊因子 $K_p=0.01$, $K_i=12$, $K_d=0$ 时的仿真曲线

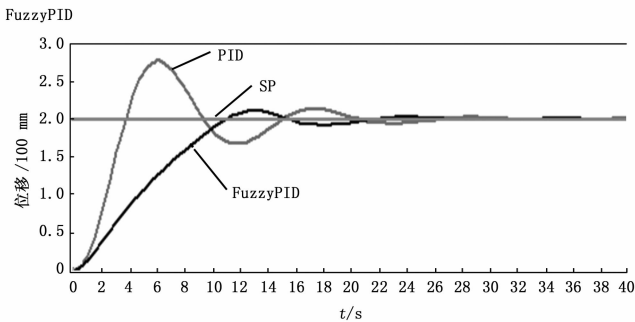


图 6 解模糊因子 $K_p=0.1$, $K_i=20$, $K_d=0$ 时的仿真曲线

应用于实际装置中后无比例阀输入电压限幅时, PID 比 PID 类型的模糊控制器, 响应时间快, 但超调大, 且实际无法 (下转第 2458 页)

能够准确地测量当前的实时温度。从表 1 可以看出：显示温度和实际温度的差值都在±0.05℃以内，具有较高的控制精度，满足设计要求。

为了测试该系统能否针对当前温度进行实时升降温控制，进行实验测试，结果如表 2 所示。

表 2 实验测试结果

设定测温范围 / (°C)	当前显示温度 / (°C)	系统升降温控制 / (°C)
24.00~34.00	23.98	升温
35.00~45.00	45.04	降温
46.00~56.00	48.00	保持
57.00~67.00	67.01	降温
68.00~78.00	67.97	升温

从表 2 可以看出，该系统具有±0.01℃的分辨率，即当前显示温度超过设定温度范围上限或低于下限 0.01℃时，恒温箱系统就会立即启动降温和升温装置，能及时、准确、快速地反映恒温箱内温度的变化情况，实现温度的实时自动控制。

5 结束语

本文针对目前温度控制系统中存在的问题，对恒温箱温度控制系统的硬件和软件进行了系统的设计。以单片机 STC89C52 作为控制核心，数字温度传感器 DS18B20 为控制对象，来实现恒温箱温度的实时自动控制。软件程序采用 C 语言编写，可灵活改变温度的设定值。从系统性能测试结果可知：该系统的温控精度优于±0.05℃，温度分辨率为

±0.01℃，满足设计要求。控制系统性能稳定，操作方便，通用性强，具有明显的优越性，可以满足科学研究及工业场合较高的精度要求，拥有广泛的应用前景。

参考文献：

[1] Liu X R, Gao G H. Temperature Monitoring System Based on AT89C51 [J]. Advances in Computer Science, Intelligent System and Environment, 2011, 104: 601-605.

[2] 汤锴杰, 栗 灿, 王 迪, 等. 基于 DS18B20 的数字式温度采集报警系统设计 [J]. 传感器与微系统, 2014, 33 (3): 99-102.

[3] Zhang Z Y, Guo T L. Design of Water Bath Temperature Control System Based on DS18B20 [J]. Advanced Materials Research, 2012, 462: 753-756.

[4] 于水娟, 李振璧. 全自动孵化控制系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (11): 2952-2954.

[5] 李 艳. 基于 AT89C51 的多点温度巡测及控制系统 [J]. 仪表技术与传感器, 2009, (4): 44-45.

[6] 张俊谟. 单片机中级教程原理与应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.

[7] 张毅刚. 单片机原理与应用设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.

[8] 吕俊亚. 一种基于单片机的温度控制系统设计与实现 [J]. 计算机仿真, 2012, 29 (7): 230-233.

[9] 马江涛. 单片机温度控制系统的设计及实现 [J]. 计算机测量与控制, 2004, 12 (12): 1219-1221.

[10] 楼然苗, 李光飞. 51 系列单片机设计实例 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.

(上接第 2440 页)

实现。而有比例阀输入电压限幅时。PID 类型的模糊控制器比 PID 控制器，角位移超调小，调整时间短，稳态误差小，控制精度高，表 4 是液压缸在 0~900 mm 之间往复运动时采集到的实际值与设定值，从数据可以看出误差在±0.5 mm 以内，平均控制精度在 98% 以上。

表 4 实验数据表 (mm)

设定值	试验值	设定值	试验值	设定值	试验值
300	300.10	510	510.20	723	723.07
390	390.09	590	589.90	789	788.95
440	439.91	635	635.50	802	802.05
493	493.07	694	693.94	886	885.97

4 结语

本文针对液压油缸非线性、时变性的特点，利用 LABVIEW 软件将鲁棒性强的 Fuzzy 算法与具有消除静态误差的 PID 算法有效结合，设计出油缸位移 Fuzzy-PID 位移控制系统，并通过 LABVIEW 仿真模块进行了系统仿真和实际运行。数据表明：模糊 PID 位移控制系统具有动态响应快、调整时间短、稳态误差小及超调量小等特点。从而证明了液压油缸在试验（耐压试验、行程检测试验、容积效率等）过程中，采用 Fuzzy-PID 自适应控制算法，对被检测工件的位移进行控制有很好的应用前景，可以获得理想的控制效果。

参考文献：

[1] 李中山. 基于 LABVIEW 的组台式液压实验台测控系统设计 [D]. 南宁: 广西大学, 2008, (06): 28.

[2] 何春华, 蔡志岗. 基于 LABVIEW 的模糊 PID 控制系统 [J]. 仪表技术, 2010, 7 (3): 57-58.

[3] 邓 华, 李许岗, 段小刚. 重载操作机夹钳角位移控制策略研究 [J]. 控制工程, 2013, 20 (2): 235-236.

[4] Habera R E, Toro R M, Gajate A. Optimal fuzzy control system using the cross-entropy method. A case study of a drilling process [J]. Information Sciences, 2010, 180: 2777-2792.

[5] Armendariz J, Treesatayapun C, Baltazar A. Force feedback controller based on fuzzy-rules emulated networks and Hertzian contact with ultrasound [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 227: 534-550.

[6] Celik O, Ertugrul S. Predictive human operator model to be utilized as a controller using linear, neuro-fuzzy and fuzzy-ARX modeling techniques [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2010, 23: 595-603.

[7] 陈力立, 彭东林, 杨继森, 等. 基于 LABVIEW 的时钟脉冲式位移测量系统 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (3): 648-650.

[8] 庄欠伟. 土压平衡式盾构电液控制系统集成技术及其应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.

[9] 车江鹤, 骆艳洁, 麦云飞. EPS 试验台模糊 PID 控制器设计 [J]. 制造业自动化, 2011, 33 (12): 1-3.