

基于模糊策略的液压系统油温自适应 PID 控制^①

徐 锋^{②*} 楼 平^{**} 林海波^{*}

(* 台州职业技术学院自动化研究所 台州 318000)

(** 嘉兴职业技术学院机电与汽车分院 嘉兴 314036)

摘 要 研究了液压系统的油温控制。考虑到液压系统油温具有大滞后、非线性、时变特点,传统的 PID 控制难以取得满意的控制效果,提出了一种基于模糊策略的自适应 PID 控制方法。该方法采用模糊推理实现 PID 控制器参数的在线自寻优,根据 PID 参数对输出响应的影响实现不同工况下 PID 参数的最佳匹配。通过 Matlab/Simulink 软件进行了传统 PID 控制和基于模糊策略的 PID 控制的仿真比较,结果表明,基于模糊策略的 PID 控制在调节速度、超调量及稳定性方面均有良好的表现。将该方法用于 JM128MK 型注塑机液压系统的实验,已验证了该方法的有效性和合理性。

关键词 液压系统, 温度控制, PID 控制器, 模糊控制器, 仿真

0 引 言

液压传动具有体积小、重量轻、工作平稳、惯性小、反应快、控制容易等优点,在工业中得到了广泛应用。但液压传动对油温的变化比较敏感,油温变化会影响传动的稳定性,特别是在低温或高温条件下,采用液压传动有一定的困难。油温是液压系统的重要控制参数之一,油温过低会使油的黏度增加,油温过高又会使油的黏度降低。黏度的变化将使系统的阻尼系数发生变化,导致执行机构的流量发生波动,造成机构的运行速度发生变化,从而影响产品质量。因此,液压系统都必须有专门的油温控制装置,把油温控制在一定范围内。

传统的油温控制一般采用比例积分微分 (PID) 技术,对于一个精确恒定的系统而言,PID 控制能得到较好的控制效果。由于液压系统油温随工作状况、环境温度、热交换特性而变化^[1],呈现出多变量、大滞后、时变特点,加之系统可能存在设计缺

陷、使用不当、油质变化和元件本身参数渐变等这些不确定性和偶然性因素,要建立一个精确数学模型非常困难。采用传统的 PID 控制时,PID 参数很难适应协调速度与控制精度之间的关系,控制结果往往难以令人满意。模糊 (Fuzzy) 控制不依赖数学模型,对时变的非线性复杂系统具有良好的适应性和鲁棒性。文献[2]采用二维结构模糊控制器实现了对液压系统油温的控制,系统的动态性能得到明显改善,但二维结构模糊控制器以偏差和偏差变化率为输入量,其控制效果类似比例微分 (PD) 控制,由于缺少积分环节,加之模糊控制器本身在稳定点存在控制盲处,因此静态性能不够理想。本研究根据模糊控制对干扰不敏感和自适应能力强的特点,提出了一种基于模糊 (Fuzzy) 策略的液压系统油温自适应 PID 控制 (以下简称自适应 Fuzzy-PID 控制) 方法,实现了对 PID 参数的在线自整定,以解决传统 PID 或单纯模糊控制器的不足^[1]。仿真和实践均表明了这种控制方法在液压系统油温控制上的可行性。

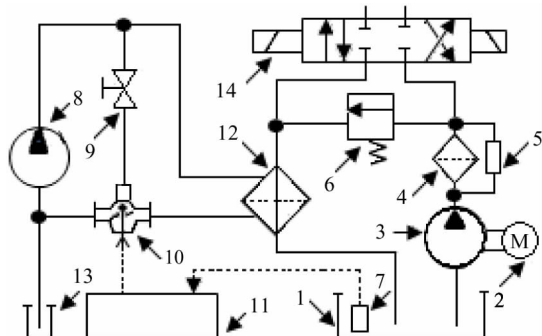
① 浙江省科技厅公益技术研究工业项目 (2014C31029) 和浙江省自然科学基金 (LY14E050001) 资助项目。
② 男,1963 年生,副教授;研究方向:人工智能控制,太阳能 MPPT 控制等;联系人,E-mail: xf630205@sina.com
(收稿日期:2015-10-25)

1 液压油温控系统

1.1 液压油温控系统特点

液压油温控制系统的硬件部分一般由油箱、水箱、油温检测器、变量泵、板式换热器、冷却器以及各种阀门组成。被预热的液压油通过板式加热器时与冷却水进行充分的热交换,通过调节比例水阀的开度,使系统的发热与冷却达到平衡,从而保证油温在设定的期望值^[1]。

图 1 为典型液压油温控制系统结构图。图 1 中,比例水阀 10 的流量与相对开度呈线性关系,它与输入的控制电压呈现出线性关系。



1. 油箱; 2. 电机; 3. 油泵; 4. 过滤器; 5. 报警器;
6. 溢流阀; 7. 测温检测器; 8. 离心泵; 9. 平衡阀; 10. 比例阀;
11. 控制阀; 12. 板式换热器; 13. 水箱; 14. 伺服阀

图 1 液压系统油温控制系统结构图

上述温控系统的传递函数可表示为以下一阶模型:

$$G(S) = \frac{K_i(t)}{1 + T_i(t) \cdot s} \exp[-\tau_i(t)s] \quad (1)$$

式中, $K_i(t)$ 为时变的比例系数, $T_i(t)$ 为时变的时间常数, $\tau_i(t)$ 为时变的滞后时间常数。

由于压力、流量、环境温度等参数是随系统要求和环境变化的时变参数,很难对 $K_i(t)$ 、 $T_i(t)$ 和 $\tau_i(t)$ 用精确的数学语言描述^[3]。系统呈现出大滞后、非线性和时变性特点,当采用传统的 PID 算法时,控制器参数 K_p (比例系数)、 K_I (积分系数)、 K_D (微分系数) 无法始终适应变化的条件,加之 PID 控制本身也存在静态性能与动态性能之间的矛盾。因此,要同时获得优良的动态性能和静态性能是极其

困难的。

模糊控制无需建立精确的数学模型,其规则建立在人类思维方式基础上,控制算法对被控对象参数和干扰具有不敏感性,具有较强的鲁棒性。因此,它比较适用于液压系统的温度控制。

1.2 自适应 Fuzzy-PID 控制原理

基于传统 PID 控制器与模糊控制器的各自的优点,本文提出了一种自适应 Fuzzyl-PID 控制器。该控制器由常规 PID 控制器和 Fuzzy 控制器构成。图 2 为自适应 Fuzzy-PID 控制器的结构示意图。图 2 中,模糊控制器选用单变量二维结构,输入量为温差 e 和温差变化率 de/dt ,输出量为 PID 控制器参数的增量 ΔK_p 、 ΔK_I 和 ΔK_D 。模糊控制器输入的语言变量用 E 和 EC 表示,输出的语言变量用 ΔK_p 、 ΔK_I 和 ΔK_D 表示,执行机构为比例水阀。

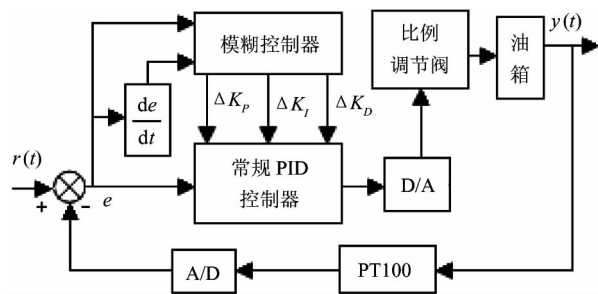


图 2 自适应 Fuzzy-PID 控制器结构框图

自适应 Fuzzy-PID 控制器的控制原理如下:模糊控制器根据油温检测器检测到的当前油温值,并与设定值进行比较,得出温差 e 和温差变化率 de/dt ,通过对输入量的量化、模糊化、模糊推理、清晰化等处理,得出适合当前工况的比例、微分、积分系数的增量 ΔK_p 、 ΔK_I 和 ΔK_D ,再通过 PID 算法得出对应的控制量(与比例调节阀的开度对应电压)。从而实现 PID 控制器参数 K_p 、 K_I 、 K_D 的在线自整定。

可见,Fuzzy-PID 控制器是应用模糊控制理论,建立参数 ΔK_p 、 ΔK_I 、 ΔK_D 与偏差 e 、偏差变化率 de/dt 之间二元关系的一种常规 PID 调节器,这种二元关系可描述为

$$\begin{aligned} \Delta K_p &= f_1(E, EC) \\ \Delta K_I &= f_2(E, EC) \\ \Delta K_D &= f_3(E, EC) \end{aligned} \quad (2)$$

标准的 PID 数字算法如下^[4]：

$$u(k) = K_p e(k) + K_I \sum e(k) + K_D [e(k) - e(k - 1)] \tag{3}$$

式(3)也称为位置式算法,它需要计算全部的历史偏差积累值 $\sum e(k)$,这样就容易产生较大的积累误差。在实际应用中,常采用增量式 PID 算法：

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k - 1)] + K_I e(k) + K_D [e(k) - 2e(k - 1) + e(k - 2)] \tag{4}$$

增量式 PID 算法在 k 采样时刻的实际输出量为

$$u(k) = u(k - 1) + \Delta u(k) \tag{5}$$

可见,增量算法只需计算 $e(k - 1)$ 和 $e(k - 2)$ 两个误差,这样既简化计算,同时也能消除偏差积累。

1.3 Fuzzy 控制器设计

PID 的控制参数与偏差 $e(t)$ 以及偏差变化率 $de(t)/dt$ 之间存在一种非线性关系,这种关系虽然无法用精确的数学关系表达,但能用模糊语言加以描述。

通过对典型 PID 响应曲线的特点分析,可以发现 PID 控制器的参数 K_p 、 K_I 、 K_D 与偏差 $e(t)$ 、偏差变化率 $de(t)/dt$ 之间的关系可用以下自然语言表述^[5,1]：

(1) 当 $e(t)$ 的绝对值很大时,无论 de/dt 变化如何,都应取较大的 K_p ,使系统的阻尼系数和时间

常数减小,从而获得较快的响应速度;为避免系统在开始时可能引起的超范围控制作用,应取较小的 K_D ;同时为了避免出现较大的超调,取积分系数 K_I 为零。

(2) 当 $e(t)$ 与 de/dt 同号,且 $e(t)$ 绝对值为较大时,应取较大的 K_p ,取中等 K_D 值和较小的 K_I 值,以改善系统的动态性能。若 $e(t)$ 的绝对值较小时,为使系统具有良好的稳态性能,取中等大小的 K_D 、较大的 K_I 值;同时为避免在平衡点出现振荡,取较小的 K_D 值。

(3) 当 $e(t)$ 与 de/dt 不同号,且 $e(t)$ 绝对值为较大时,则取中等大小的 K_p 、 K_D 值和较小的 K_I 值,这样有利于改善系统的动态性能。 $e(t)$ 绝对值较小时,则取较小的 K_p 、 K_D 值和较大的 K_I 值,这样有利于改善系统的静态性能。

在本例中,模糊控制器输入的语言变量 E 、 E_c 和输出的语言变量 ΔK_p 、 ΔK_I 和 ΔK_D 在各自的论域范围内,均划分为相同的 7 个模糊子集,即：

$$E = EC = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} \Delta K_p &= \Delta K_I = \Delta K_D \\ &= \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\} \end{aligned} \tag{7}$$

结合上述对控制规则的表述和输入、输出变量模糊子集的划分,可制订出如表 1 所示的模糊控制规则表。

表 1 模糊控制规则表

E	模糊规则表						
	$\Delta K_p, \Delta K_I, \Delta K_D$						
	$CE = NB$	$CE = NM$	$CE = NS$	$CE = ZO$	$CE = PS$	$CE = PM$	$CE = PB$
NB	PB/NB/NB	PB/NB/NB	PB/NB/NM	PB/NB/NM	PB/NB/NM	PB/NB/NB	PB/NB/NB
NM	PM/NM/ZO	PM/NM/ZO	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/NS/NM	ZO/NM/ZO	ZO/NM/ZO
NS	ZO/PM/ZO	ZO/PM/N	PM/NS/NM	NS/PS/NM	NM/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO
ZO	NS/PM/NS	NS/PM/NS	NS/PS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PM/NS	NS/PM/NS
PS	NM/PM/ZO	NM/PM/NS	NM/PS/NM	NS/PS/NM	ZO/PS/NS	ZO/PM/NS	ZO/PM/ZO
PM	ZO/NM/ZO	ZO/NM/ZO	ZO/NS/NM	PS/NS/NM	PM/NS/PS	PM/NM/ZO	PM/NM/ZO
PB	PB/NB/NB	PB/NB/NB	PB/NB/NM	PB/NB/NM	PB/NB/NM	PB/NB/NB	PB/NB/NB

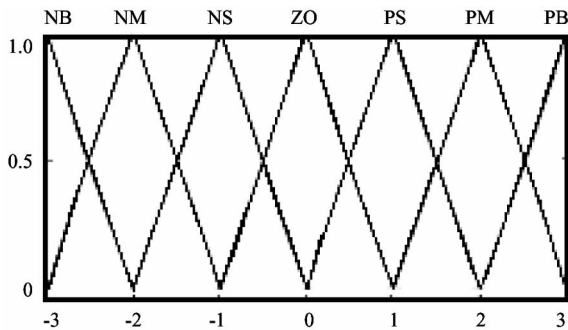
采用以上方法制订的 PID 参数自整定语言规则是具有普适性的。但在实际的实用中还应根据不同的控制对象,根据仿真或实验结果对控制规则进行

适当调整。

将上述模糊规则用于控制时,还需要确定上述语言变量的论域、确定模糊子集的隶属函数以及隶

属函数在各自论域中的分布。

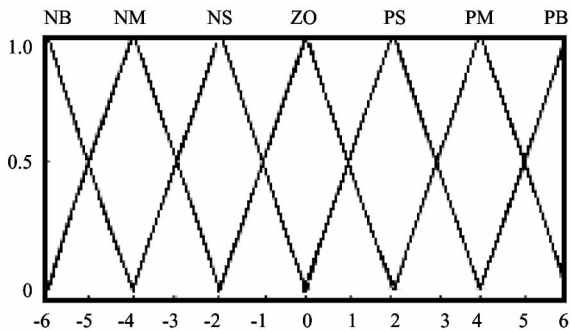
考虑到隶属函数形状、论域上相邻子集重叠交叉程度对控制的影响,同时也为了方便计算,本例模糊子集采用三角形,相邻模糊集重叠处的隶属度取 $\beta=0.5$ 。



(a) E 、 EC 隶属函数分布图

输入/输出语言变量的论域分别取 $E, EC: \{-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3\}$ 和 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d: \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。

图 3 为输入、输出对应的隶属函数在论域上的颁布图。



(b) $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 隶属函数分布

图 3 输入/输出隶属函数分布图

模糊推理一般采用普遍使用的 Mamdani 法。Mamdani 表示方法的基本格式为 if A_i and B_i the C_i 或 $A_i \wedge B_i \rightarrow C_i$, 其三元模糊蕴涵关系 R_i 的 Mamdani 计算方法如下^[6]:

$$R_i = A_i \wedge B_i \wedge C_i = (A_i \wedge B_i) \wedge C_i \quad (8)$$

式中, $\wedge$ 表示“合取”运算。

在求取所有规则的模糊蕴涵关系 R_i 后, 即可得到系统总的模糊关系 R 如下^[7]:

$$R = R_1 \cup R_2 \cup R_3 \cup \dots \cup R_{49} \quad (9)$$

式中, $\cup$ 表示对 $R_1 \sim R_{49}$ 模糊蕴涵关系进行“并”运算。

根据合成推理的原则, 若模糊控制器当前输入为 E_i 和 EC_j , 则模糊控制器的输出如下:

$$\Delta K_{ij} = (E_i \wedge EC_j) \circ R \quad (10)$$

式中, “ $\circ$ ”表示模糊关系合成中的合成算子。

模糊判决采用面积重心法, 其计算方法如下^[6]:

$$K_{(P,I,D)} = \sum_{j=1}^n u_j A(u_j) / \sum_{j=1}^n A(u_j) \quad (11)$$

这样, 模糊控制器根据当前的输入值 e 和 de/dt , 通过推理得到 PID 参数的修正量, 进而得出 PID 参数值:

$$K_p = K_{p0} + k_p \Delta K_p \quad (12)$$

$$K_i = K_{i0} + k_i \Delta K_i \quad (13)$$

$$K_d = K_{d0} + k_d \Delta K_d \quad (14)$$

在式(12)~(14)中, k_p, k_i, k_d 分别为模糊控制器的比例因子; PID 控制器的初始值 K_{p0}, K_{i0}, K_{d0} 为 PID 控制器的初始值^[8]。

初始值 K_{p0}, K_{i0}, K_{d0} 用齐格勒-尼柯尔斯(Ziegler-Nichols)提供的经验公式加以确定^[9], 具体方法为

$$K_{p0} = 0.6 K_m, K_{d0} = K_{p0} \pi / 4 \omega_m, K_{i0} = K_p \omega_m / \pi \quad (15)$$

式中, K_m 为系统开始振荡时的 K_p 值, ω_m 为振荡频率。 K_m 的确定方法是: 首先置 $K_d = K_i = 0$, 然后增加 K_p 直至系统开始振荡(即闭环系统极点在 $j\omega$ 轴上)。

2 仿真与实验

2.1 算法仿真分析

用 Matlab/Simulink 和 Fuzzy-Logic 工具箱构建了如图 4 所示的自适应 Fuzzy-PID 控制器和传统 PID 控制器仿真模型。

仿真选用的温控系统模型如下^[10]:

$$G(s) = \frac{3.0}{300 \cdot s + 1} e^{-80s} \quad (16)$$

根据液压系统的特点, 取模糊控制器输入量 e 的基本论域为 $[-20, +20]$, $ec(de/dt)$ 的基本论域

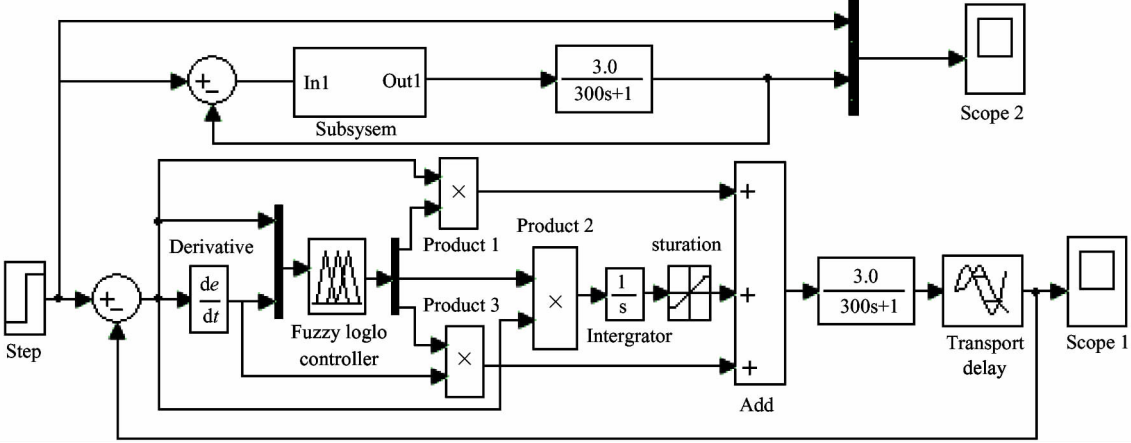


图 4 Fuzzy-PID 控制器和常规 PID 控制器仿真模型

为 $[-2, +2]$, 量化因子分别为 $k_e = 0.15$ 和 $k_{ec} = 3$ 。输出量的比例因子分别取 $k_p = 0.16$ 、 $k_i = 0.0015$ 、 $k_d = 8.6$ 。设定温度为 50°C , PID 参数的初始值用 Z-N 法分别取为 $K_{p0} = 1.5$, $K_{i0} = 0008$, $K_{d0} = 52$ 。

图 5-②为仿真得到的系统阶跃响应曲线。
本例还对常规 PID 控制系统性能进行仿真以比较两种方法的性能。图 5-①中为常规 PID 算法的阶跃响应曲线,其对应的参数分别为 $K_p = 1.5$, $K_i = 0008$, $K_d = 52$ 。

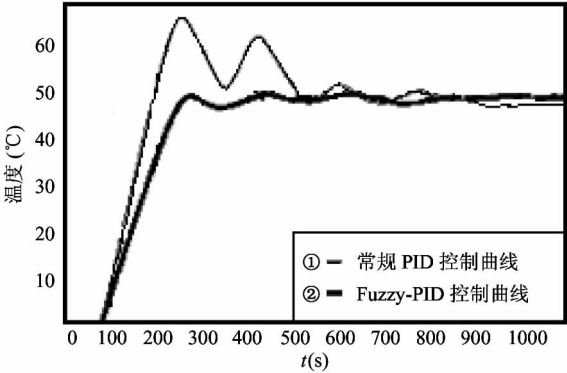


图 5 不同控制方式下的阶跃响应曲线

从图 5 可以看出, Fuzzy-PID 控制静差略小于传统的 PID 控制,而在调节速度(约 500s)和超调量方面则远小于 PID 控制的调节时间(约 500s)和超调量。可见,采用 Fuzzy-PID 控制时,无论是静态性能还是动态性能均优于传统的 PID 控制,尤其在动态性能方面优势更为明显^[11]。

为了验证 Fuzzy-PID 控制器的鲁棒性和自适应

能力,本例还对系统模型发生变化时的情况进行了仿真。

当模型参数分别选为 $T = 310$, $\tau = 80$ 和 $T = 300$, $\tau = 75$, 采用 Fuzzy-PID 控制和 PID 控制方式时得到的仿真曲线如图 6 所示。

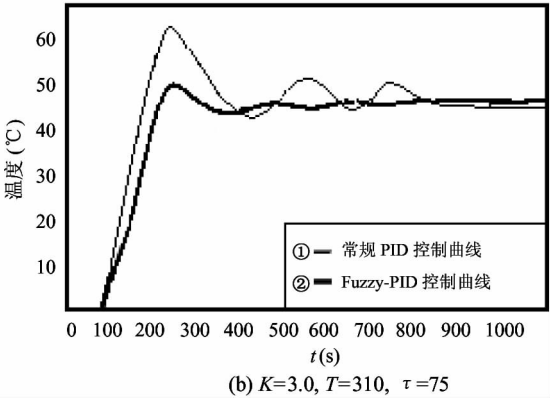
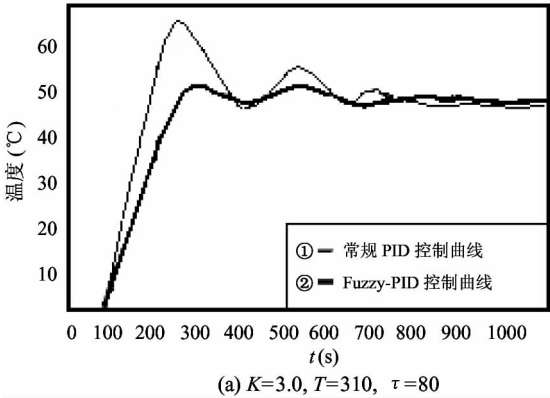


图 6 不同参数时的阶跃响应曲线

由图 6 可见,当模型参数在一定范围内变化时,Fuzzy-PID 响应曲线的变化程度远小于传统 PID 控制曲线的变化,这说明 Fuzzy-PID 控制的鲁棒性和自适应能力都优于传统的 PID 控制器。

2.2 算法实验分析

实验对象为 JM128MK 系列注塑机的液压系统,该系列注塑机的油温要求控制在 $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 范围内。系统的基本参数为供油压力 10MPa,最大供油流量 135L/min,离心泵最大水流量 $25\text{m}^3/\text{h}$;预热后的初始油温约为 $45^{\circ}\text{C}^{[12]}$ 。

控制系统采用的核心控制器为 OMRON-CVM1 系列 PLC 和 C500-FZ001 特殊模块^[13],C500-FZ001 是一款高性能模糊控制专用模块;比例调节阀采用 AR16-FR01C-20 型,温度检测元件采用线性度好的 PT100 型热电偶,直接检测油箱出口油温。

为检验系统的抗干扰能力,在实验过程中,在不同时刻随机改变油泵电机的速度,改变供油量以模拟不同的工况。控制时系统的采样周期定为 3s。

在 VB 环境下开发的温度实时检测软件监测到的温度变化曲线如图 7 所示。

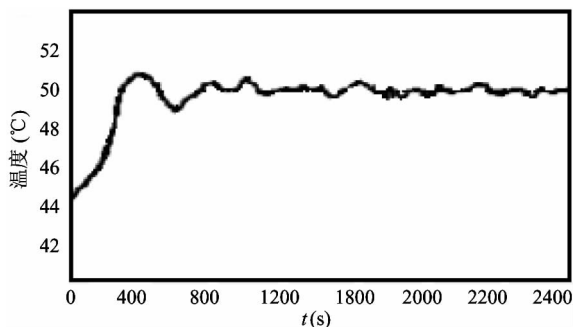


图 7 液压系统温度实验曲线

从图 7 看出,静态温度控制在 $50^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 范围内,当出现干扰时,系统恢复时间快,稳定性好,体现出较好的动态和静态性能。

3 结 论

液压系统的油温控制对产品的质量影响很大。由于液压系统的非线性、大滞后、多变量等原因,传统的 PID 控制很难取得满意的结果。本研究将模糊

控制器应用于 PID 参数的自寻优,利用模糊控制器无需依赖精确的控制模型,对干扰不敏感的特点,较好地克服了时变性系统 PID 参数整定困难的问题,实现了 PID 参数的实时修订和最优匹配。

通过 Matlab/Simulink 仿真研究,并以 JM128MK 系列注塑机液压系统为对象进行的实验验证结果表明,该方法在静态、动态方面较传统的 PID 更具优势,当模型参数发生变化时,该方法也有良好的表现,体现出了较强的鲁棒性和适应性。

参考文献

- [1] 冯斌,龚国芳,杨华勇. 大流量液压系统的油温控制. 浙江大学学报, 2011,45(4):741-746
- [2] 周锡恩,罗飞,邓晓燕等. 模糊自适应 PID 控制在注塑机料筒温度控制中的应用. 自动化技术与应用, 2012,31(10):21-24,30
- [3] 徐锋,郑向军,杨彦青等. Fuzzy-PID 多模控制在金属热处理恒温炉中的应用. 电气自动化, 2014,36(3):13-16
- [4] 徐锋,张嫣华. 数字控制系统的 PID 算法研究. 机床电器, 2008, (6):8-10,19
- [5] 石辛民,郝整清. 模糊控制及其 MATLAB 仿真. 北京:清华大学出版社, 2008,3
- [6] 曾光奇,胡均安,王东等. 模糊控制理论与工程应用. 武汉:华中科技大学出版社, 006,6
- [7] 徐锋. 基于模糊策略的 PID 控制器在光伏 MPPT 中的应用. 气传动, 014,44(5):53-57
- [8] 刘金琨. 先进 PID 控制与 MATLAB 仿真. 京:电子工业出版社, 2007
- [9] 尚超,王新民,王纪森. 液压实验台油温的模糊控制. 机床与液压, 2010,38(9):60-62
- [10] 徐晓东,徐晓辉,任安业. 基于参数自整定的模糊 PID 控制的大型液压源温控系统设计. 上海航天, 2010, 5:60-64
- [11] 钟汉如. 注塑机控制系统. 北京:化学工业出版社, 2003,12
- [12] 郑向军,楼平,徐锋. Fuzzy-PI 混合型控制器在远红外烘干炉中的应用. 应用科技, 2015-42(5):38-41
- [13] 郑向军,徐锋,应一镇等. 基于模糊策略的 PID 控制器在恒温控制中的应用. 电气自动化,2015-37(5):13-16

Fuzzy strategy-based adaptive PID control of the oil temperature of hydraulic systems

Xu Feng^{*}, Lou Ping^{**}, Lin Haibo^{*}

(^{*} Institute of Automation, Taizhou Vocational and Technical College, Taizhou 318000)

(^{**} Electrical and Automotive Branch, Jiaxing Vocational Technical College, Jiaxing 314036)

Abstract

A study on oil temperature control for hydraulic systems was carried out. Considering that the conventional PID control can not achieve the ideal control effect due to the lag, nonlinear and time-varying characteristics of the oil temperature of hydraulic systems, a fuzzy strategy-based adaptive PID control method was proposed. The method uses fuzzy reasoning to realize PID parameters' online self-optimizing, and achieves PID parameters' best match under different conditions according to the influence of PID parameters on the output responses. The performance comparison between the traditional PID control and the proposed fuzzy strategy based PID control was conducted by the simulation using the Matlab/Simulink software, and the results showed that the proposed control method performed better in speed adjusting, overshoot and stability. The proposed method's effectiveness and rationality were proved by its experiment on the hydraulic system of a JM128MK type injection molding machine.

Key words: hydraulic system, temperature control, PID controller, fuzzy controller, simulation