

基于参数自整定模糊 PID 的飞机 液压能源油温控制

赵红艳

(山东英才学院, 济南 250104)

摘要: 某飞机液压源的特点是油箱容积大、流量大、功率大, 液压油温控制精度在某飞机的液压能源系统中要求较高, 该油温控制系统存在时变性、非线性及大时滞; 对该系统设计参数自整定模糊 PID 控制器; 利用 MATLAB/FUZZY 工具箱进行仿真, 结果表明该控制器比传统的 PID 控制器鲁棒性和动态性更好; 实验表明在 250s 时间内, 该算法实现对液压油温在 $60 \pm 2^\circ\text{C}$ 之间精确的控制, 该控制器能较好地处理此类飞机液压源温控。

关键词: 液压源温控; 模糊控制; 自整定 PID; 大时滞;

Parameters Self-Tuning Fuzzy PID in Temperature Control of Airplane Hydraulic Energy System

Zhao Hongyan

(Shandong Yingcai University, Jinan 250104, China)

Abstract: The oil temperature control of a airplane hydraulic energy system demand higher accuracy, this type of aircraft hydraulic source has characteristics of high power, big flow and large volume of tank. This is an oil temperature control system with larger hysteresis, nonlinearity and time-varying. Considering the feature of this system, a fuzzy parameter self-tuning PID controller was designed. The simulation was done by using the MATLAB/FUZZY tool box. The simulation results show that the controller has better dynamic and robustness than traditional PID controller. Experiments show that the algorithm is implemented on the hydraulic oil temperature at $60 \pm 2^\circ\text{C}$ precise control in 250 s, the controller has better effect in oil temperature control of this type of aircraft hydraulic source.

Key words: hydraulic source temperature control; fuzzy control; self-tuning PID; large hysteresis

0 前言

某大型飞机液压能源系统是为飞机的飞控系统和各个液压子系统提供液压助力或动力。在系统运行过程中, 功率损失会造成液压油温度升高, 导致液压油粘度下降, 会增加液压系统泄漏量, 使摩擦阻力提升, 加剧磨损, 降低整个系统效率^[1]。因此该系统的地面半物理仿真实验台需要精度达到国标规定 B 级 ($\pm 2^\circ\text{C}$) 的液压油温度控制^[2], 同时要提升油温控制系统的鲁棒性、精确性和动态性, 确保在能源系统中各项实验的真实性和可靠性。

在液压能源的地面实验台中, 该飞机的配电功率是 225 kW, 最大流量是 150 L/min。采用封闭式的自供增压型油箱, 其容量是 45 L。板式的散热器安装在回油路上用于水冷降温, 冷却后的水流量是 200 L/min。使用比例的水阀控制, 该系统是一个时变、非线性、大时滞的系统^[3]。目前大时滞过程控制方法有广义预测控制、Simth 预估控制器、神经网络控制、大林算法、模糊控制等。基于液压系统温度场热交换过程中存在随机性和复杂性, 通过参数自整定模糊 PID 控制算法使用模糊推理在线调整 PID 的 3 个参数, 不仅避免了传统 PID 依赖系统模型, 对时变参数动态响应较差和敏感缺陷, 而且比常用的模糊控制稳态精度要高。该算法集合了两种控制方法的

优势, 系统准确性、稳定性和快速性均得到提高。结合 fuzzy 工具箱, 使用 Matlab 中的 Simulink 进行仿真, 实验结果表明该算法满足温控要求, 具有鲁棒性和动态响应特性强的优点。

1 液压能源温控系统组成和工作原理

该飞机液压能源地面半物理仿真实验台简要液压原理如图 1 所示。该图为某型飞机单侧液压能源系统原理图, 其中包含一半的中央翼合、两个吊挂和机翼一部分。

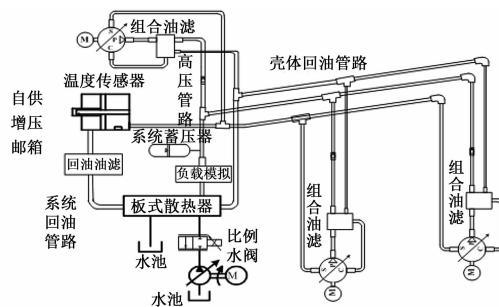


图 1 液压能源温控系统原理图

系统整体由 3 台恒压变量泵提供飞机液压能源, 高压油经负载模拟装置 (用于模拟飞机各用户系统所需流量压力) 进入回油管路, 液压油在回油路串连板式散热器中进行热交换实现冷却, 使用模糊的 PID 控制器输出控制电流调节比例水阀开口来改变散热器中冷却水的流量, 从而提高冷却能力达到控制油温的作用。主要测温点为自供增压型油箱中的温度传感组

收稿日期: 2014-01-10; 修回日期: 2014-02-28。

作者简介: 赵红艳 (1974-), 女, 河北保定人, 硕士, 副教授, 主要从事数据挖掘、数据库、数学建模等方向的研究。

件，主要被控对象为比例水阀中阀芯位置。

2 参数自整定模糊 PID 控制器的设计

PID 控制器传统上是基于被控对象的精确模型而设计的，具有可靠性高、稳定性好、结构简单的特点，主要用于定常、线性、时不变系统。然而，存在时变、非线性、大时滞的系统，依赖于系统模型、对时变参数动态响应差、敏感的传统 PID 控制方法显示出不足^[4]。尽管模糊控制稳态精度较差，但其调节速度快、鲁棒性好、且不依赖于系统模型的优点可以弥补常规 PID 缺点。因此结合两种控制策略形成模糊 PID 复合控制方法，一方面可以避免各自缺点，另一方面可以发挥各自的优势，得到得控制效果较好。

2.1 系统结构

基于模糊型逻辑推理 PID 的控制器，参数自整定型模糊 PID 的控制器使用控制专家的整定 PID 配置参数的经验和知识作为基础，依据系统响应中过程模式在线识别，采取模糊推理的方法对 PID 配置参数在线进行自整定^[5]。

首先根据对象参数的辨识取得被控对象的特征参数，并整定出其 PID 的参数初始量，然后基于常规 PID 型控制原理，将油箱的温度传感组件的采集值和目标值误差 e 与误差的变化率 e_c 用作输入量，基于初始的 PID 型参数值的基础上采取模糊推理用于 PID 参数 K_p, K_I, K_D 在线的自整定，得到的参数能满足不同 e 和 e_c 下的需求，最后通利用 PID 的运算较好完成静态与动态控制被控对象。

2.2 PID 参数自整定规则

判定控制的规则模型中不仅要兼顾提高系统响应速度、减小超调，而且提高系统稳定性更为重要^[6]。依据系统响应曲线进行分析，如图 2 所示。从中取得控制经验信息进而确定 fuzzy 策略下 PID 的参数规则调整^[7]。

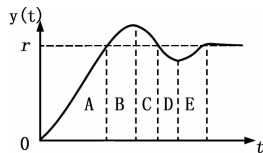


图 2 系统阶跃的响应曲线

对系统阶跃的响应曲线分析可得如下结论：

- 阶段 A： $e > 0, e_c < 0$ 输出近于给定值 r ；
- 阶段 B： $e < 0, e_c < 0$ 输出远于给定值 r ；
- 阶段 C： $e < 0, e_c > 0$ 输出近于给定值 r ；
- 阶段 D： $e > 0, e_c > 0$ 输出远于给定值 r ；
- 阶段 E： $e > 0, e_c < 0$ 输出近于给定值 r 。

由以上结论可知，PID 型参数模糊整定规则如下：

(1) 当误差的绝对值大时，无论 e_c 如何，需采取较强比例控制，系统快速性增加，取较大 K_p ，易造成积分饱和，一般取 K_I 为零， K_D 较小的取值可防止抖动。

(2) 误差与误差的变化率符号相同时，如果误差绝对值比较大，取较大 K_p 、较小的 K_I 及中等 K_D ，从而提升稳态与动态性。如果误差绝对值比较小，通过一般控制用来改变误差的趋势变化，取中等 K_p 、较大 K_I 及较小 K_D ，提升稳态性能。

(3) 误差与误差的变化率符号相异时，如果误差绝对值比较大，此时会趋于给定值，因此取中等 K_p 可以促进快速性，并且较小 K_I 与中等 K_D 能够提升稳态性和动态性；如果误差

绝对值比较小，选择较小 K_p 、较大 K_I 能够提升稳态性，并且较小 K_D 可以避免振荡。

2.3 控制器设计

本文设计的是两输入 (e, e_c) 三输出 ($\Delta K_p, \Delta K_I, \Delta K_D$) 的模糊型控制器。取输入与输出的变量语言值为 {正大 (PB), 正中 (PM), 正小 (PS), 零 (ZO), 负小 (NS), 负中 (NM), 负大 (NB)}。全部输入与输出的变量基本论域，模糊论域，比例因子与量化因子为表 1 与表 2 所示。

表 1 e 与 e_c 基本论域，模糊论域与量化因子

输入	基本论域	模糊论域	比例因子
E	[60, -60]	[-6, 6]	-0.1
e_c	[-0.5, +0.5]	[-6, 6]	12

表 2 $\Delta K_p, \Delta K_I, \Delta K_D$ 模糊论域与比例因子

输出	模糊子集	模糊论域	比例因子
ΔK_p	{ PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB }	[-2, 8]	0.1
ΔK_I		[-6, 6]	0.001
ΔK_D		[-6, 1]	7

采用常用的工程上三角形的隶属度函数，数学描述应为：

$$\mu_A = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & (a \leq x \leq b) \\ \frac{x-c}{b-c} & (b < x \leq c) \end{cases} \quad (1)$$

式中， $b = (a + c) / 2$ 。

依据 PID 的参数整定规则，能得出输出变量 ($\Delta K_p, \Delta K_I, \Delta K_D$) 的参数配置调整规则。以 ΔK_p 为例，模糊控制的规则表如下。

表 3 ΔK_p 模糊规则

$e_c \backslash \Delta K_p$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB
NM	PM	PM	PM	PS	ZO	ZO	ZO
NS	ZO	ZO	ZO	NS	NM	NM	NM
ZO	NS	NS	NS	ZO	NS	NS	NS
PS	NM	NM	NM	NS	ZO	ZO	ZO
PM	ZO	ZO	ZO	PS	PM	PM	PM
PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB

依据表示模糊控制的参数调整规则写出对应的 $\Delta K_p, \Delta K_I, \Delta K_D$ 的模糊语句 (共 49 条)：

- (1) if $e = NB$ and $e_c = NB$ then $\Delta K_p = PB$ and $\Delta K_I = NB$ and $\Delta K_D = NB$;
- (2) if $e = NB$ and $e_c = NM$ then $\Delta K_p = PB$ and $\Delta K_I = NB$ and $\Delta K_D = NB$;
-
- (49) if $e = PB$ and $e_c = PB$ then $\Delta K_p = PB$ and $\Delta K_I = NB$ and $\Delta K_D = NB$;

也可以写出 $\Delta K_I, \Delta K_D$ 的模糊语句。求得 ΔK_p 在不同的误差与误差变化条件下全部模糊取值隶属度，使用加权平均公式

$$u = \sum \mu_C(x_i) \cdot x_i / \sum \mu_C(x_i) \quad (2)$$

对此模糊集合使用解模糊的判决得出当前 e 和 e_c 对应的 ΔK_p 。同理可得出响应 $\Delta K_I, \Delta K_D$ 确切值。依据 PID 的参数在线进行修正的公式

$$K_L = K_{L0} + \Delta K_L (L = P, I, D) \quad (3)$$

从而得到此时 K_p 。

3 仿真分析

3.1 建立仿真数学模型

对该大型的飞机液压型能源系统温控模型进行简化, 得到具有纯滞后性的一阶惯性环节, 传递函数是:

$$G_s = \frac{Ke^{-\tau s}}{1 + Ts} \quad (4)$$

式中, K 是系统增益, T 是时间常数, τ 是滞后时间。利用实验曲线法确定所有参数取值。实验的响应曲线如图 3 所示。

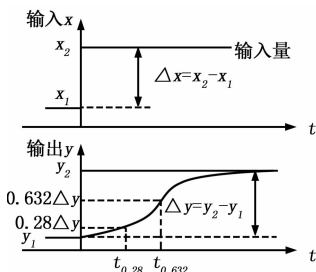


图 3 实验响应的曲线

首先使被控对象处于稳定状态时, 向输入端输入 Δx 并保持不变。将对象的输入与输出相应曲线记录下来。根据 Cohn-Coon 公式如下:

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (5)$$

$$T = 1.5(t_{0.632} - t_{0.28})$$

$$\tau = 1.5(t_{0.28} - \frac{1}{3}t_{0.632})$$

求解对象参数得 $K = 2.8, T = 320, \tau = 60$ 。

PID 参数的初始值则根据 Z-N 参数整定法得到 $K_{p0} = 2.2, K_{I0} = 0.018, K_{D0} = 66$ [4]。

3.2 系统仿真分析

用 Matlab/Simulink 搭建系统仿真模型, PID 控制器根据误差进行控制量计算, 模糊控制器则根据误差和误差变化在线调整 PID 参数值。

比较模糊 PID 与常规 PID 控制效果, 用两种控制算法分别进行仿真, 效果如图 4 所示。

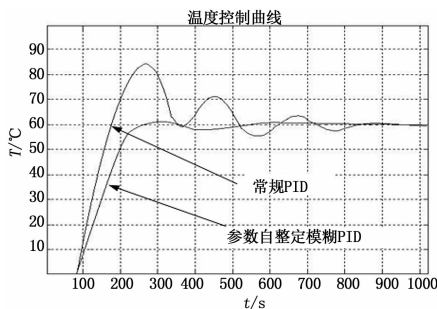


图 4 常规 PID 和模糊 PID 仿真曲线

如图 4 所示, 模糊 PID 较常规 PID 的控制稳态精度可以在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内, 超调较小, 调节时间减小, 系统的动态性能更佳。

4 实验结果

在实际的液压系统使用参数的自整定型模糊控制器用于温控实验, 实验工况见表 4。

表 4 实验工况表

电机功率	负载流量	系统压力	目标温度
150 kW	90 L/min	20 MPa	60 °C

实际实验曲线如图 5 所示。

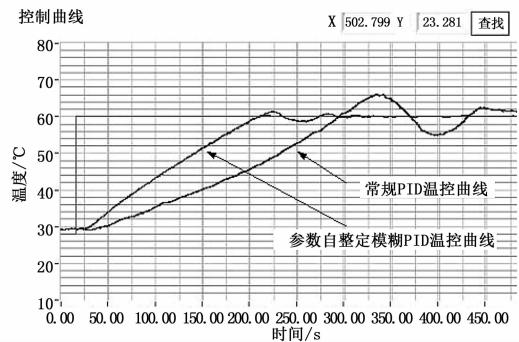


图 5 常规 PID 与模糊 PID 温控实验曲线

由图 4 可知系统工况稳定不变的情况下, 参数的自整定型模糊的 PID 控制的稳态精度能达到 $\pm 1.5^\circ\text{C}$, 满足系统需求 $\pm 2^\circ\text{C}$ 与用时 250 s 左右, 与常规 PID 比较, 超调明显得到降低。系统的响应时间明显缩短, 系统的稳态性能和动态性能显著提高。

5 结论

某飞机液压能源系统, 其液压油温度控制采用参数自整定型模糊 PID 控制算法, 通过 Matlab/fuzzy 工具箱和 Simulink 结合进行仿真, 实验结果表明参数的自整定型模糊 PID 的控制算法具有比常规的 PID 控制更好的时变性, 而且在大滞后型复杂温控的系统里有较优鲁棒性。在 250 s 时间内, 该算法实现对液压油温在 $(60 \pm 2)^\circ\text{C}$ 之间精确的控制, 显示了较好的动、静态响应性能, 很好地解决某飞机的液压能源型实验台中液压油的温度场系统复杂的控制, 对设计温控系统提供有力参考, 具有重要的理论意义和工程实际应用价值。

参考文献:

- [1] 路雨祥, 液压气动技术手册 [M], 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [2] 中华人民共和国标准. 液压元件通用技术条件 [S]. GB/T 7935-2005.
- [3] 孙 薇, 何 洪, 周恩涛. 基于 MNN 神经网络的液压系统油温的 PWM 自学习控制 [J]. 中国机械工程, 1998, 9 (7): 7-14.
- [4] 陈智军, 蔡增伸, 施文康. 基于模糊自适应 PID 的材料试验机控制系统 [J]. 计算机测量与控制, 2005, (11): 1226-1229.
- [5] 徐晓东, 徐晓辉, 任安业. 基于参数自整定模糊 PID 控制的大型液压源温控系统设计 [J]. 上海航天, 2010, (5): 60-64.
- [6] 张 涛, 李家启. 基于参数自整定模糊 PID 控制器的设计与仿真 [J]. 交通与计算机, 2001, (S1): 27-30.
- [7] 尹玉珍. 基于参数自整定模糊 PID 控制液压万能试验机控制研究 [J]. 液压与气动, 2012, (4): 75-77.