

输油泵模糊控制器的设计及优化

刘 军, 刘 丁, 张光辉

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 由于大容量输油泵系统存在严重的非线性和时变性, 管道流量、输油泵入口压力及出口压力三个参数之间又存在耦合关系, 采用传统的 PID 控制器难以实现对流量、入口压力、出口压力的良好控制. 针对输油泵系统的特点, 提出了一种由两个模糊控制器组成的输油泵控制方案, 并应用改进的遗传算法对隶属函数和融合因子进行了优化. 仿真结果表明, 该控制器能够对管道流量、入口压力、出口压力进行协调优化控制.

关键词: 输油泵; 模糊控制; 遗传算法; 优化控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Design and optimization of fuzzy controller for petroleum pump system

LIU Jun, LIU Ding, ZHANG Guang-hui

(Department of Automation and Information, Xi'an University of Technology, Shanxi Xi'an 710048, China)

Abstract: Owing to uncertainties and non-linearity of the high power petroleum pump system and the couple relations among the flow and inlet pressure and outlet pressure of the system, it is difficult to achieve good control performance by using conventional PID controller. A new fuzzy control strategy of high power petroleum pump system which is composed of two fuzzy controllers is proposed to address those inefficiencies. Based on improved genetic algorithms, the membership functions and the parameters of the controller is optimized. Simulation results show the effectiveness of the new control strategy.

Key words: petroleum pump; fuzzy control; genetic algorithms; optimal control

1 引言 (Introduction)

输油泵系统是石油输送管线的重要动力设备, 它的平稳、安全、高效运行对整个输油管线具有重要的意义. 由于输油泵系统存在严重的非线性, 另外还受到原油物性、环境温度、管道沉积等不确定因素的影响, 采用常规的 PID 控制器难以实现对输油泵的入口压力、出口压力以及管道流量的协调控制. 本文针对输油泵系统具有较强的非线性和不确定性的特点, 根据系统的实际控制要求, 设计了一个由两个模糊控制器组成的输油泵控制器, 采用改进的遗传算法对模糊控制器的隶属函数、融合因子进行了优化, 仿真结果表明本文提出的输油泵系统模糊控制方案能够实现对输油泵系统的优化、协调控制.

2 输油泵模糊控制器的设计 (Design of the fuzzy petroleum pump controller)

2.1 控制方案的提出和模糊控制器的设计^[1-4] (Proposal of the control scheme and design of the fuzzy controller)

输油泵系统的入口压力、出口压力、管道流量的自动调节是输油系统安全、高效运行的重要保证, 通过调节输油泵电机的转速, 可以调节以下运行参数 (按控制优先级顺序排列), 其基本调节原理及某输油首站入口压力、出口压力、流量工作范围如下:

1) 主泵入口压力 (p_s): 当 p_s 较小时, 降低电机转速; 当 p_s 较大时, 提高电机转速. p_s 的工作范围为 0.25 MPa ~ 1.2 MPa.

2) 泵站出口压力 (p_d): 当 p_d 较大时, 降低电机转速; 当 p_d 较小时, 提高电机转速. p_d 的工作范围为 5.6 MPa ~ 7.85 MPa.

3) 管道流量 (Q): 当 Q 较大时, 降低电机转速; 当 Q 较小时, 提高电机转速. Q 的工作范围在 450 m³/h ~ 750 m³/h.

由于输油泵系统存在着较强的非线性, 另外还受到原油物性、环境温度、管道沉积等不确定因素的影响, 采用常规的 PID 控制器难以实现对系统的有效控制, 并易引起系统振荡. 目前大容量输油泵系统

基本上仍采用手动开环控制,当运行条件发生变化时,系统不能自动调节运行参数,这给整个输油管线的安全运行带来了隐患。

输油泵控制系统为单输入 3 输出系统,由于系统存在强耦合作用,本系统控制器的设计不能简单地采用单变量模糊控制器的设计方法.根据相似原理,对应于 1 个流量 Q ,就有 1 个确定的转速 n ,为了简化设计,并防止喘振现象发生,本文采用控制量的基值与调节值相结合的控制方案,即采用 $n = k * Q$ 作为控制量的基值,模糊控制器的输出 Δn 作为控制量的调节值.若在模糊控制器设计时考虑 Q 和 p_s, p_d 3 个量的变化率,虽然控制效果可能会有所提高,

但是模糊变量和模糊子集数量随之增大,模糊控制规则和控制表的构造将非常复杂和繁琐.根据系统的控制要求,为了设计和实现方便,同时考虑到 3 个被控量的优先级,设计了由两个模糊控制器 (FC1, FC2) 组成的输油泵控制器,控制器的结构如图 1 所示.图中 FC1 的输入为 $p_s, \Delta Q$, 输出为 Δn_1 ; FC2 的输入为 p_s, p_d , 输出为 Δn_2 ; 将两个模糊控制器的输出相融合,即得到控制量的调节值为

$$\Delta n(k) = \Delta n(k - 1) + \Delta n_1 \times \alpha + \Delta n_2 \times \beta,$$

最终的控制量为 $N = n + \Delta n(k)$, 其中 α, β 为融合因子, $\alpha + \beta = 1$.

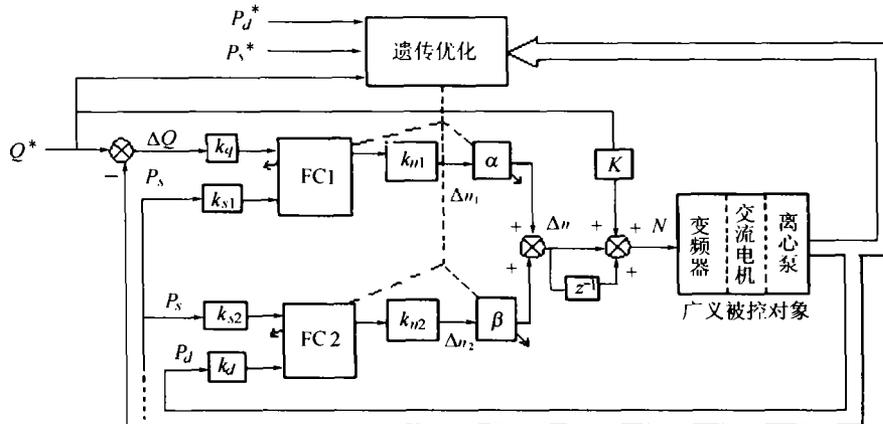


图 1 输油泵机组的模糊控制

Fig. 1 Fuzzy control of the petroleum pump

取 $p_s, p_d, \Delta Q, \Delta n$ 的语言变量分别为 $P_s, P_d, DQ, \Delta N$, 相应的模糊子集均为 {负大 (NB), 负小 (NS), 零 (ZE), 正小 (PS), 正大 (PB)}; 论域为 $\{-7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$. 各个语言变量的隶属函数如图 2 所示, c_1, c_2, c_3, c_4 是决定隶属函数在论域内分布的参数。

根据现场操作人员的经验和专家知识,本文制定了如下控制规则,见表 1、表 2。

表 1 $P_s, \Delta Q$ 与 Δn_1 的模糊规则表

Table 1 Rule-bases of $P_s, \Delta Q$ and Δn_1

P_s	ΔQ				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NS	NS	ZE
NS	NB	NS	NS	ZE	ZE
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	ZE	ZE	PS	PS	PB
PB	ZE	PS	PS	PB	PB

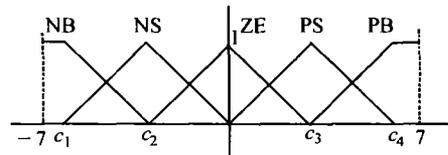


图 2 隶属函数分布图

Fig. 2 Distribution of the membership function

表 2 P_s, P_d 与 Δn_2 的模糊规则表

Table 2 Rule-bases of P_s, P_d and Δn_2

P_s	P_d				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	NS	NS	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NB
ZE	PS	ZE	ZE	ZE	NS
PS	PB	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PS	PS	PS	ZE

2.2 基于改进遗传算法的模糊控制器的优化(Optimization of the fuzzy controller based on the improved genetic algorithm)

通常模糊控制器隶属函数的选取全凭经验知识,带有较大的主观性,一般情况下无法获得全局最优^[5].由于模糊控制的非线性,很难用梯度法和动态规划来进行优化;遗传算法是一种模拟生物进化的全局优化方法,具有很强的鲁棒性和适应能力,能够在复杂空间进行有效搜索^[6-8].因此本文将模糊控制和遗传算法相结合,采用遗传算法对输油泵模糊控制器的隶属函数和融合因子进行离线优化.

2.3 采用遗传算法优化模糊控制器的步骤(Procedure of optimization of the fuzzy controller based on GA)

1) 编码形式及其初始化.待寻优的参数有4个语言变量隶属函数的参数和融合因子 α ,为了计算方便,设各语言变量的隶属函数均为轴对称,即图2中 $c_1 = -c_4, c_2 = -c_3$,这样共有9个待寻优的参数;每个参数编码的长度为16位二进制串,然后将这些参数按照一定的顺序排列,构成一个个体,然后在整个寻优空间按均匀分布生成50个个体,这样可以在初始的几代内找到各极值点所在区域,加快收敛速度.

2) 适应度函数的选取.遗传算法在进化搜索过程中基本上不用外部信息,仅使用适应度函数来评价解的优劣.适应度函数的选取不受连续可微的约束,其定义域可为任意的集合^[9].选取性能指标为

$$J = a_1 \times (Q^* - Q)^2 + a_2 \times (p_s^* - p_s)^2 + a_3 \times (p_d^* - p_d)^2. \quad (1)$$

式中 Q^* 为流量的设定值, p_s^*, p_d^* 为根据经验给出的对应于 Q^* 的入口压力设定值和出口压力设定值.根据流量、入口压力和出口压力控制的优先级取 $a_1 = 0.2, a_2 = 0.5; a_3 = 0.3$.

遗传优化的目的是设计一个模糊控制器,使得系统的性能指标函数 J 最小,取适应度函数为

$$f = C - J. \quad (2)$$

其中 C 为一常数,使得适应度值 $f \geq 0$.

3) 选择.本文采用最佳个体保存法和轮盘赌法,即将群体中适应度最大的个体不进行配对交叉,直接复制到下一代,然后对剩余的个体按照其适应度在整个群体中所占的比例进行配对交叉.

4) 交叉和变异.为了加快收敛速度和防止过早收敛,对于适应值较高的个体,为了防止其被破坏,应选取较小的交叉、变异概率,而对于适应值较小的个体,应选取较大的交叉、变异概率;根据文献^[10],交叉概率的取值范围一般为0.6~0.95,变异概率的取值范围一般为0.001~0.01.考虑到如果选择较小的变异概率,则进化很多代之后才能变异出不同于其它个体的新个体,为了保证群体的多样性,应适当的加大变异概率.根据个体适应度的大小,在文献^[11]的基础上,对自适应交叉概率和变异概率的计算公式进行了改进,改进后的自适应交叉概率和变异概率的计算公式如下:

$$\begin{cases} pc = pc_b - (pc_b - pc_a) \times \frac{(f_c - f_{avg})}{(f_{max} - f_{avg})}, & f_c \geq f_{avg}, \\ pc = pc_b, & f_c < f_{avg}, \\ pm = pm_a + (pm_b - pm_a) \times \frac{(f_{avg} - f_m)}{(f_{avg} - f_{min})}, & f_m < f_{avg}, \\ pm = pm_a, & f_m \geq f_{avg}. \end{cases} \quad (3)$$

式中, $pc_a = 0.6, pc_b = 0.95, pm_a = 0.001, pm_b = 0.2, f_c$ 为要交叉的两个串中较大的适应值, f_m 为要变异的串的适应值, f_{max}, f_{min} 分别为当前代中最大、最小的适应值, f_{avg} 为当前代的平均适应值.

5) 算法的迭代终止条件.在实现遗传算法时,如果群体中大多数个体的适应度值位于某一个值附近时,则可以认为遗传算法搜索已经收敛,此时可以终止算法搜索.本文中算法的搜索终止条件是当最大适应度值与最小适应度值的差小于某一个常数时,结束算法迭代.

6) 采用遗传算法优化后的结果.

采用遗传算法优化后,模糊控制器各语言变量隶属函数的参数和融合因子分别为

$$\begin{aligned} P_s \text{ 的隶属函数参数: } & c_3 = 3.43, c_4 = 4.91; \\ P_d \text{ 的隶属函数参数: } & c_3 = 3.61, c_4 = 6.99; \\ \Delta Q \text{ 的隶属函数参数: } & c_3 = 1.32, c_4 = 5.84; \\ \Delta n \text{ 的隶属函数参数: } & c_3 = 2.77, c_4 = 6.00; \\ \text{融合因子: } & \alpha = 0.37, \beta = 0.63. \end{aligned}$$

图3为优化前后的控制曲面,图(a),(b)为优化前FC1和FC2的控制曲面;图(c),(d)为优化后FC1和FC2的控制曲面;从控制曲面可以明显地看出,优化前控制曲面比较陡峭,而优化后的控制曲面过渡平缓,系统的控制性能得到了改善.

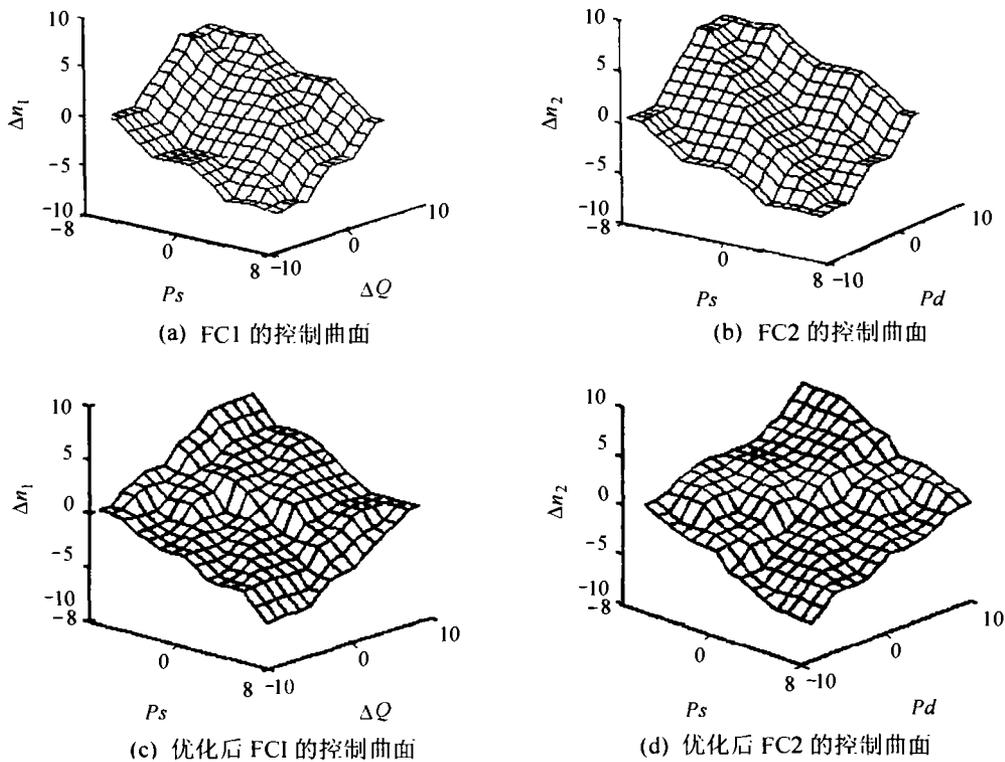


图3 优化前后的控制曲面

Fig. 3 Control surfaces before and after optimization

3 仿真研究(Simulation research)

根据某输油泵站提供的长期运行数据,首先应用1个3层前向神经网络,采用BP算法进行训练,辨识出输油泵系统近似的数学模型;然后分别将优化前后的控制方案应用到对输油泵系统的控制中,仿真结果如下(在0时刻,系统由手动控制切换为自动控制):在50 s~200 s给系统施加一个较大的扰

动,优化前后流量、入口压力、出口压力的控制曲线如图所示(图中实线为优化前的仿真结果,虚线为优化后的仿真结果)。

从图4可以看出,优化前的模糊控制器精度较低,系统抗干扰能力较差;优化后的模糊控制器控制精度较高,系统的抗干扰能力强,仿真实验还表明系统的适应性和鲁棒性大大增强。

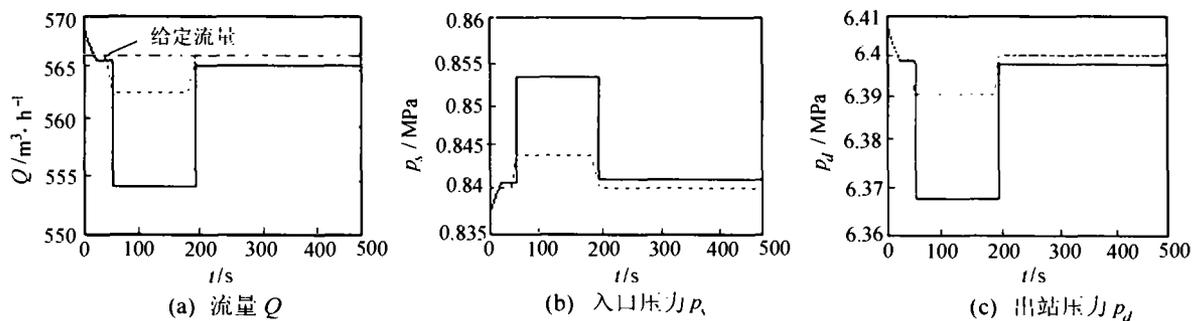


图4 优化前后仿真控制结果

Fig. 4 Simulation results before and after optimization

4 结论(Conclusion)

1) 输油泵系统是一个具有较强非线性的复杂系统,另外还受到油品物性、环境温度以及管道沉积等不确定因素的影响,流量、入口压力、出口压力之

间又存在着强耦合关系,采用常规的PID控制器难以实现对输油泵系统流量、入口压力、出口压力的协调控制。

2) 本文针对输油泵系统的特点和实际控制要

求,设计了一种由两个模糊控制器组成的新型输油泵系统控制器,该控制器既考虑了流量、入口压力、出口压力控制的优先级,又大大简化了多变量模糊控制器的设计.采用控制量的基值与调节值相结合的控制方案减小了系统的调节幅度,防止系统喘振的发生.在调节值输出端引入积分环节,提高了系统的控制精度.该控制器结构简单、计算方便,便于工程应用.

3) 采用改进的遗传算法对模糊控制器进行优化,优化后的模糊控制器在通常情况下和出现较大扰动的情况下都能取得良好的控制效果,大大提高了系统的适应性、鲁棒性和抗干扰能力,仿真结果表明该控制器能够对输油泵系统进行协调优化控制.

4) 输油泵系统的协调优化控制与手动开环控制相比,克服了油品物性、环境温度以及管道沉积等不确定因素对输油计划的影响,提高了输油效率和输油泵系统安全运行的可靠性,在较大程度上减轻了操作人员的工作强度.

参考文献(References):

- [1] ZADEH L A. Fuzzy logic-computing with words [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 1996, 4(2): 103 - 111.
- [2] LEE C C. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller - Part I and Part II [J]. *IEEE Trans on System, Man, and Cybernetics*, 1990, 20(2): 404 - 435.
- [3] BUCKLEY J J, YING H. Expert fuzzy controller [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1991, 44(3): 373 - 390.
- [4] CHAI Tianyou, TONG Shaocheng. Fuzzy direct adaptive control for a class of nonlinear systems [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1999, 103

(3): 379 - 387.

- [5] ARSLAN A, KAYA M. Determination of fuzzy logic membership functions using genetic algorithms [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, 118(2): 297 - 306.
- [6] ZHOU Yisheng, LAI Linying. Optimal design for fuzzy controller by genetic algorithms [J]. *IEEE Trans on Industry Applications*, 2000, 36(1): 93 - 97.
- [7] LEITCH D, PROBERT P. New techniques for genetic development of a class of fuzzy controllers [J]. *IEEE Trans on System, Man, and Cybernetics: Part C*, 1998, 28(1): 112 - 123.
- [8] BELARBI K, TITEL F. Genetic algorithm for the design of a class of fuzzy controllers: an alternative approach [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2000, 8(4): 398 - 405.
- [9] ALIEV R A, FAZLOLLAHI B, VAHIDOV R M. Genetic algorithm-based learning of fuzzy neural networks, part 1: feed-forward fuzzy neural network [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, 118(2): 351 - 358.
- [10] FOGEL D B. An introduction to simulated evolutionary optimization [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1994, 5(1): 3 - 13.
- [11] SRINIVAS M, PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in GAs [J]. *IEEE Trans on System, Man, and Cybernetics*, 1994, 24(4): 656 - 667.

作者简介:

刘 军 (1963 —), 男, 1991 年获西安理工大学电力拖动及其自动化硕士学位, 现为西安理工大学博士研究生. 研究方向为: 智能控制理论与应用. E-mail: liujun0310@sina.com;

刘 丁 (1957 —), 男, 1997 年获西安交通大学系统工程研究所博士学位, 现为西安理工大学副校长, 教授, 博士生导师. 长期从事工业自动化、智能控制理论与应用等方面的研究, 目前承担多项国家重点科研任务, 发表论文 80 余篇, 获国家及省部级科技进步奖 4 项;

张光辉 (1978 —), 男, 1999 年获西安交通大学电气工程学士学位, 现为西安理工大学控制理论与控制工程学科硕士研究生.