

基于模糊神经网络预报的抽油机节能控制研究

丁 宝, 齐维贵, 朱学莉

(哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: 基于油田多数抽油机轻载运行的现状, 提出抽油机“间歇启停”运行的节能控制方案, 考虑采油为一复杂过程, 选择模糊神经网络(FNN)预报方法给予实现. 为了实现这一方案, 首先介绍了 T-S 模糊神经网络的结构, 结合抽油过程的特点和研究的需要, 对其进行了简化和改进; 然后运用采油现场的样本信息和专家知识对 FNN 进行训练; 最后给出了实用的抽油机节能 FNN 预报算法, 将该算法应用在智能抽油机控制器中, 取得了满意的节能效果.

关键词: 游梁式抽油机; 模糊神经网络; 预报; BP 算法

中图分类号: TP273.4, TE933.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 10-1742-04

A Study of Energy-Saving Control of Oil Pump Based on Fuzzy Neural Network Prediction

DING Bao, QI Wei-gui, ZHU Xue-li

(Electric Engineering and Automation College, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: This paper proposes energy-saving control plan of “intermittent start-stop” operation for oil pump based on light load operation of most oil pumps in oil field. Fuzzy neural network (FNN) prediction method is used as oil-extracting is a complicated process. First, the paper introduces the structure of T-S fuzzy neural network, the structure is simplified and modified combined with the feature of oil-extracting process and requirements for study. Second, the fuzzy neural network is trained by sampling information and expert knowledges. Finally, a practical energy-saving FNN prediction algorithm for oil pump is given. The algorithm is used in controller of intelligent oil pump and energy-saving effects are achieved.

Key words: beam-balanced pump; fuzzy neural network; prediction; BP algorithm

1 引言

在石油开采中, 游梁式抽油机被广泛地应用. 为了保证抽油机的启动要求和有足够的过载能力, 通常抽油机装载电动机的功率较大, 而抽油机正常工作常常是轻载下运行. 这就造成了俗称的“大马拉小车”现象. 尤其是在油田开采后期, 采油井的产量下降, 抽油机存在不同程度的“泵空”现象. 荷载率低, 无效行程增加, 其结果是造成电能的浪费, 又增加了设备的磨损. 为了满足抽油机节能的需要, 针对目前抽油机节能的研究现状^[1,2], 本文提出“变抽油机连续运行”为“间歇启停”的控制方案, 即在井下蓄油量较少, 抽油机“空抽”或“半抽”时及时停机, 待蓄油量增加到抽油机能够连续“满抽”时重新开机. 抽油机“间歇启停”工作, 判断“泵空”及时停机比较容易, 但判断几千米深的井下达到“满抽”的准确时间, 及时开机并非易事. 因此确定停机后何时再开机的时间即关机的时间间隔是关键. 由于油田采油是由抽油、注水、地质和油藏组成的复杂过程, 很难用精确的数学模型描述这一过程, 所以不能采用传统的方法求得抽油机节能的“停机时间”. 但是有经验的采油工和采油专家通过长期的知识积累, 能得心应手地处理采油

中的“复杂”问题, 于是在解决“间歇启停”的关键问题上, 本文选择模糊神经网络预报法给出抽油机的节能控制.

2 T-S 模糊神经网络的改进

模糊系统具有被人容易理解的表达能力, 而神经网络则有极强的自适应学习能力, 两者结合起来构成 FNN 系统, 可提高被研究对象的性能. 根据抽油机采油过程的特点, 拟采用 T-S 模糊模型构造 FNN, 并在此基础上对 FNN 进行改进.

2.1 T-S 模糊系统

T-S 模糊系统^[4]的第 l 条规则为

R^l : if x_1 is F_1^l , x_2 is F_2^l , ..., x_m is F_m^l , then,

$$y^l = p_0^l + p_1^l x_1 + p_2^l x_2 + \dots + p_m^l x_m \quad (1)$$

式中 x_i —第 i 个模糊语言输入变量, $i = 1, 2, \dots, m$;

F_i^l —论域 U_i 上相应 x_i 的模糊变量值, 其隶属度函数的参数为前提参数;

y^l —第 l 条规则的输出;

p_i^l —结论参数.

如果给定输入向量 (x_1, x_2, \dots, x_m) , 则输出 y^l 由各条规则输出加权平均求得

$$y = \frac{\sum_{l=1}^n G^l y^l}{\sum_{l=1}^n G^l} \quad (2)$$

式中 n —模糊规则数量;

G^l —第 l 条规则的真值,由式(3)计算给出

$$G^l = \prod_{i=1}^m F_i(x_i) \quad (3)$$

式中 \prod —模糊化算子.

根据式(1)~(3)可给出 T-S 模糊神经网络如图 1 所示.

为简化问题,图 1 为两输入单输出的简单 FNN 结构.

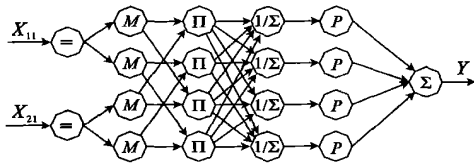


图 1 T-S 模糊神经网络结构

图中第二层是隶属度层,计算输入数据在各自论域的隶属度.当用三角形隶属函数时

$$\mu_{F_i} = \begin{cases} 1 - \frac{|x_i - c_i^l|}{b_i^l}, & \text{当 } x_i \in [c_i^l - b_i^l, c_i^l + b_i^l] \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

式中 c_i —隶属函数的中心;

b_i —三角函数宽度参数.

2.2 FNN的改进

改进后的 FNN 分前件和后件两部分,如图 2 所示.

图中 A-D 层为前件部分,其中 $w_c, w_g, 1$ 和 -1 是神经元间的连接权, w_c 和 w_g 决定 Sigmoid 函数的中心位置和倾斜度. C 层节点的输出表示为

$$x_j^{(c)} = 1 / [1 + \exp(-w_g(x_i + w_c))] \quad (5)$$

E 层输出为每条规则的适用度归一化的结果 \bar{a}_i .

$$\bar{a}_i = \frac{a_i}{\sum_{l=1}^n a_l} \quad (6)$$

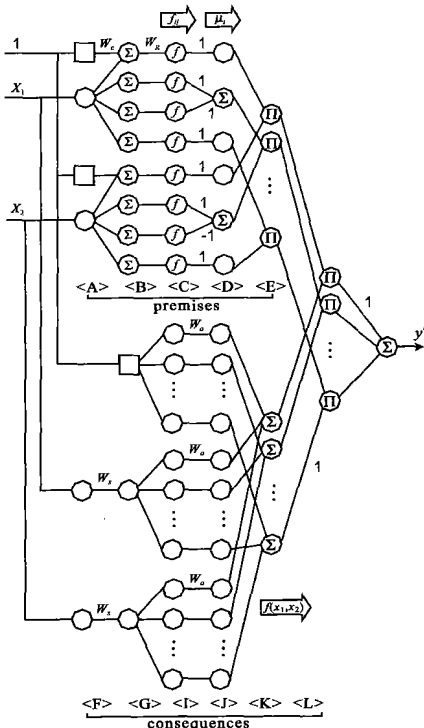


图 2 改进的 FNN 结构

后件见图中的 FL 层,输出量 y^* 是每条规则输出量的加权平均

$$y^* = \sum_{l=1}^n \bar{a}_l f_l(x_1, x_2) \quad (7)$$

其中

$$f_l = p_0^l + p_1^l x_1 + p_2^l x_2 \quad (8)$$

式中 p_0^l, p_1^l, p_2^l 由 w_s 和 w_a 决定, w_a 和 w_s 的乘积作为回归系数,模糊规则通过修正 w_a 来实现, w_s 固定不变.

2.3 改进 FNN 的学习规则

前件规则确定原则

$$c_l = \frac{\sum_{i=1}^k a_{il}}{k}; a_{il} = \begin{cases} a_{il} & a_{il} > \text{low} \\ 0 & \text{else} \end{cases}; b_{il} = \begin{cases} 1, & a_{il} > \text{low} \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

式中 c_l —第 l 条规则的平均置信度;

i —训练样本数, $i = 1, 2, \dots, k$;

l —规则数目 $l = 1, 2, \dots, n$;

a_{il} —第 i 个样本第 l 条规则的置信度. a_{il} 的模糊集合 low 在论域中的取值范围在学习过程中可以调整.

后件结构确定原则

定义: $v_l = \max_i a_{il}$, v_l 为第 l 条规则中最大置信度.

规定条件 C_1 :若 $C_1 > \text{level } 1$, 则 $C_1 = 1$, 否则, $C_1 = 0$

规定条件 C_2 :若 $v_l > \text{level } 2$, 则 $C_2 = 1$, 否则, $C_2 = 0$

参数 level 1 (0,1), level 2 (level 1,1).

规定当 $C_1 \& C_2 = 1$ 时, $R^l \in M(\text{model})$, 否则 $R^l \notin M$. 当 $p_j^l > \text{level } 3$ 时, $p_j^l = p_j^l$, 否则 $p_j^l = 0$. level 1、level 2、level 3 的取值由专家来确定.

3 FNN 的简化

从工程应用角度出发,在确保 FNN 的性能前提下,要提高实时性,这需要对改进 FNN 进行简化.简化后的算法可用单片机微处理器的指令实现.

3.1 规则简化

FNN 预报模型以归一化后的 $I^* \frac{dl}{dt}$ 、 $I^* dt$ 为输入,并将输入空间划分为 $A_i = (S(\text{small}), M(\text{middle}), B(\text{big}))$, 以停机时间 T 为输出.总结专家经验取得以下模糊逻辑规则

$$R^1: \text{if } x_1 \text{ is } S, x_2 \text{ is } S, x_3 \text{ is } S, \text{ then } y^1 = w^1$$

$$R^2: \text{if } x_1 \text{ is } S, x_2 \text{ is } S, x_3 \text{ is } M, \text{ then } y^2 = w^2$$

$$R^3: \text{if } x_1 \text{ is } S, x_2 \text{ is } S, x_3 \text{ is } B, \text{ then } y^3 = w^3$$

$$R^4: \text{if } x_1 \text{ is } S, x_2 \text{ is } M, x_3 \text{ is } S, \text{ then } y^4 = w^4$$

$$R^5: \text{if } x_1 \text{ is } S, x_2 \text{ is } M, x_3 \text{ is } M, \text{ then } y^5 = w^5$$

...

$$R^{27}: \text{if } x_1 \text{ is } B, x_2 \text{ is } B, x_3 \text{ is } B, \text{ then } y^{27} = w^{27}$$

系统的规则数目 $n = 27$.

3.2 结构简化

简化 FNN 的第 l 条规则用式(1)描述,模糊变量的隶属度函数为式(4)的三角函数形式,并令第 l 条规则输出 $y_l = w_l$, 则系统输出

$$y = \prod_{l=1}^n \frac{\mu^l}{\mu^l} w^l = \prod_{l=1}^n \mu^l \cdot w^l \quad (9)$$

其中 $\mu^l = \prod_{i=1}^k \mu_{R_i^l}(x_i)$.

依据式(1)、式(4)和式(9),可对改进的FNN进行简化,图3为简化FNN的部分结构

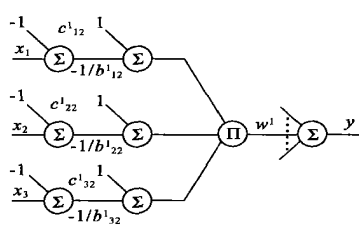


图3 简化后 FNN 结构图

3.3 简化 FNN 的 BP 算法

简化 FNN 是前向网络,采用 BP 算法,对网络前提参数 c, b , 结论

参数 w 按网络中的权系数进行优化计算^[6]

$$\begin{cases} c_{ij}(k+1) = c_{ij}(k) - c \frac{\partial L}{\partial c_{ij}} \\ b_{ij}(k+1) = b_{ij}(k) - b \frac{\partial L}{\partial b_{ij}} \\ w^l(k+1) = w^l(k) - w \frac{\partial L}{\partial w^l} \end{cases} \quad (10)$$

式中 $\frac{\partial L}{\partial c_{ij}} = \pm \frac{e}{\mu_{ij} b_{ij}} [\mu^l (w^l - y)]$;

$$\frac{\partial L}{\partial b_{ij}} = \frac{e |x_i - c_{ij}|}{\mu_{ij} b_{ij}^2} [\mu^l (w^l - y)]$$

$$\frac{\partial L}{\partial w^l} = e \mu^l$$

c, b, w —学习率;

i —语言变量数目, $i = 1, 2, 3$;

l —模糊值数目, $l = 1, 2, \dots, 27$.

结合简化的 FNN 结构和式(10)可以编写出节能控制软件.

4 FNN 训练及工程应用

为了保证 FNN 算法的稳定、收敛及鲁棒性能,需要对 FNN 进行训练.

4.1 采集样本

以负荷电流 $I, \frac{dI}{dt}, Idt$ 为 FNN 预报模型的输入,停机时间 T 为 FNN 预报模型的输出,在采油现场测取多组样本.表 1 给出了有代表性的两口油井的采样数据,两口油井分别用 A 和 B 表示.

根据表 1 的数据可以看出抽油机电机电流、电流变化和电流累积的趋势,依此可对电机的节能间歇启停进行分析.

(1) 停机后的启动阶段 抽油开始, I 有增加, $\frac{dI}{dt}$ 较大, Idt 小,这段数据说明抽油机处于“满抽”状态,但由停机到启动,油泵中的油渗回油井,当再次开机油泵需短时间充满.

(2) 稳定满抽阶段 启动后, I 保持稳定, $\frac{dI}{dt}$ 较小.

(3) “半抽”过渡阶段 I 缓慢下降,抽油机负荷减小,这

时油泵吸液能力大于油井渗油能力.

(4) 空抽阶段 采油后期, I 稳定在较小范围, $\frac{dI}{dt}$ 较小,

Idt 达到最大,说明抽油机达到“空抽状态”.

依据抽油电机负载及其变化趋势,结合采油专家的丰富经验,可以给出抽油机停机时刻和停机时间间隔的准确预报.这些信息可作为 FNN 训练的教师样本信号.

表 1 A、B 两口油井的采样数据

时间	A			B		
	I	$\frac{dI}{dt}$	Idt	I	$\frac{dI}{dt}$	Idt
1	31	0	1	24	0	1
2	32	2	2	25	1	2
3	32	0	4	29	4	4
4	34	2	4	31	2	7
5	35	1	7	34	3	9
6	35	0	8	34	0	12
7	35	0	10	34	0	14
8	35	-1	11	34	0	17
9	35	1	13	33	-1	18
10	34	-2	14	31	-1	21
11	34	1	16	29	0	23
12	34	0	17	29	0	25
13	33	-1	19	27	-2	27
14	34	0	20	27	0	28
15	34	0	22	27	0	31
16	34	0	23	26	-1	31
17	34	0	25	26	0	32
18	33	-1	26	25	-1	33
19	33	0	28	25	0	35
20	33	0	29	23	-2	35
21	31	-2	30	23	0	36
22	31	0	31	22	-1	37
23	28	-3	32	19	-3	37
24	30	1	33	18	-1	37
25	27	-2	34	18	0	37
26	27	0	34	19	1	37
27	27	0	35	20	1	37
28	26	-1	35	21	1	38
29	26	0	36	19	-2	38
30	25	-1	36	18	-1	38
31	25	0	37	18	0	38
32	25	0	37	18	0	38

4.2 FNN 的训练

通过对样本分析, $I, \frac{dI}{dt}, Idt$ 含负荷、负荷变化、负荷积累的信息,用这三个量作为 FNN 预报模型输入,从多组采集中选择标准样本,利用三角隶属函数将其模糊化后,提供给采油专家,专家依据经验,给出抽油机的停机时间,从而取得 FNN 的训练样本.用训练样本,结合 BP 算法反复训练 FNN,分析所得结果,修改模型的结构和规则,剔除不合理的参数或成分,确保 FNN 预报模型和学习算法的有效性.

4.3 FNN 预报软件的应用

基于 FNN 预报理论研究的节能控制软件,现已在“智能抽油机节能控制器”中应用.这种节能控制器在几个油田采油厂运行可靠,抽油机自动启停时间合理,在保证采油量稳产的前提下,节电率达 30%以上.

5 结语

为了达到抽油机节能的目的,提出“间歇启停”的控制方案,并选用 FNN 智能控制理论研究抽油机“间歇启停”的关键,即确定停机时间.研究的主要工作包括:

(1)在分析基于 TS 模型的 FNN 结构基础上,对传统的 FNN 结构进行改进,确定了有效的学习规则,改进后的 FNN 具有良好的自学习能力.

(2)从工程应用出发,在确保 FNN 性能的前提下,要提高算法的实时性,因此对改进后的 FNN 又进一步进行了简化.

(3)进行现场采样,取得样本;从专家处得到实用规则,依次训练 FNN.

(4)所研究的基于 FNN 智能控制算法,已经在工程中取得了显著的节能效果.

参考文献:

- [1] 苏德胜,刘先刚,吕卫祥,等.游梁式抽油机节能机理综述[J].石油机械,2001,29(5):49-53.
- [2] 白连平,马文忠,杨艳,等.关于游梁式抽油机用电动机节能的讨论[J].石油机械,1999,27(3):41-44.
- [3] Auström KJ. Direction in intelligent control[A]. Plenary Session IFAC International Symposium[C]. Tallinn, USSR:ITAC91,1991.15-17.

- [4] Tomohiro Takagi, Michio Sugeno. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control [J]. IEEE Trans SMC, 1985, 15 (1): 116-132.
- [5] K X Qian, P zeng, H Y Yuan. Measurement of rotary pump flow and pressure by computation of driving motor power and speed [J]. Journal of System Medical Engineering Technology. 2000, 24 (1): 273-276.
- [6] 张延丽.基于智能控制的抽油机节电控制器的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2002.

作者简介:



丁宝男,1960年生于吉林蛟河,副教授,主要从事电力电子及电气传动、节能控制技术的研究.



齐维贵男,1944生于辽宁黑山,教授,主要从事模糊控制、智能控制、控制理论及应用研究.