

模糊控制在退火炉燃烧过程 控制中的应用

胡家耀 吴植翘 宋寿山

(北京轻工业学院) (北京电脑技术应用研究所)

摘 要

燃油退火炉控制的困难在于过程中参数的多变性,非线性,噪声,不对称的增益特性,以及较大的纯滞后。本文介绍了模糊控制在退火炉燃烧过程中的应用。在炉温和炉压控制回路中,采用了经过改进的模糊控制器,得到了较快的响应特性和较精确的温度、压力控制效果。作者还应用模糊集理论设计了一种模糊自寻优控制器,对油/风比进行控制。运行结果表明,模糊控制能克服退火炉燃烧过程控制中的上述困难,具有较强的鲁棒性,获得了满意的控制效果。

关键词——模糊控制,油/风比,自寻优控制,鲁棒性。

一、引 言

传统的控制方法要求首先建立系统的较精确的数学模型。然而对于一些复杂的系统或过程,包括对象特性多变的工业窑炉,这绝非一件容易实现的事。模糊控制摆脱了精确数学模型的束缚,开辟了自动控制的一条新的途径。

燃油退火炉燃烧过程的控制,首先要求克服对象特性的多变性,非线性,噪声,不对称的增益特性,较大的纯滞后等因素的影响,实现较精确的温度和压力的控制。并在此基础上,寻求最佳的燃烧过程,提高热效率,以达到节约能源的目的。各种工业窑炉是消耗能源的大户,是节能潜力较大之处。

退火炉燃烧过程的控制,要求维持稳定的温度以满足生产工艺的要求,保证钢材退火的质量。最佳燃烧过程取决于燃料和空气的比例。根据统计分析,燃烧过程中空气过剩率 $\mu = 1.02-1.10$ 时热效率最高,此区域称为最佳燃烧区。 μ 值低于此区域会导致不完全燃烧而冒黑烟。反之, μ 值太高时空气过剩,废气将带走过多的热量,同时产生大量的 NO_x , SO_x , 污染环境。因此在燃烧过程中,控制系统应该通过控制燃油和空气的比例,来保持最佳的燃烧状态。

此外,炉膛内的压力是随着工作情况而变化的,气温和废气组成等都对炉膛内的压力

有较大影响,而炉压又能影响炉温.因此,要维持稳定的炉温,还需对炉膛内的压力进行调节.保持适当的炉膛压力,可以提高热效率,延长窑炉的寿命.因为炉压太高,会引起烟气外冒,炉压太低则会漏风造成热损失.

综上所述,要保证退火质量,实现最佳燃烧过程,控制系统应包括三个基本组成部分,即

- 1) 温度—燃油/空气流量调节回路;
- 2) 燃油/空气最佳比例调节回路;
- 3) 炉膛压力调节回路.

二、模糊控制系统的组成

退火炉燃烧过程控制的困难在于对象特性的多变性.退火炉每炉钢材的品种规格、装炉重量及空间位置都不相同.炉子的升温 and 降温过程具有不对称的增益特性,燃油的热值也常常变化,所以燃油退火炉控制系统是一个非线性,时变的,有噪音干扰的,具有纯滞后的系统.这类系统建模的困难使现代控制理论中的最优控制难以实现.一些工厂的技术人员和操作人员认为,对于这类对象特性多变的系统,采用传统的 PID 控制在整定参数时也比较费事.对某一过程为最佳的参数,对另一过程就不是最佳的了.

模糊控制摆脱了精确数学模型的束缚,总结人们操作和控制的经验.它模仿人脑的逻辑推理和决策过程,把人们的操作和控制经验条理化,程序化,正适宜应用于这类数学模型未知或多变的过程.国内外的实践证明,与传统的 DDC 和 PID 调节器相比,模糊控制可以取得相同的,甚至更好的控制效果.它对过程参数的变化更不敏感,具有很好的鲁棒性,无疑能够胜任退火炉的控制任务.

对于油/风比的控制,常用的做法是根据烟道废气中的残氧量来进行油/风比的校正.

实践证明,这种方法效果不够理想,主要原因是目前生产的氧化锆不够可靠,且烟道陈旧,漏风严重,以致测量值不能反映真正的残氧量.因此,我们利用热效率与油/风比之间的峰值特性,采用自寻优控制,自动搜索最佳油/风比.作者根据人的操作经验提出的模糊自寻优方法可以加快搜索过程,提高搜索质量,对不可控因素的干扰具有较好的自适应能力.

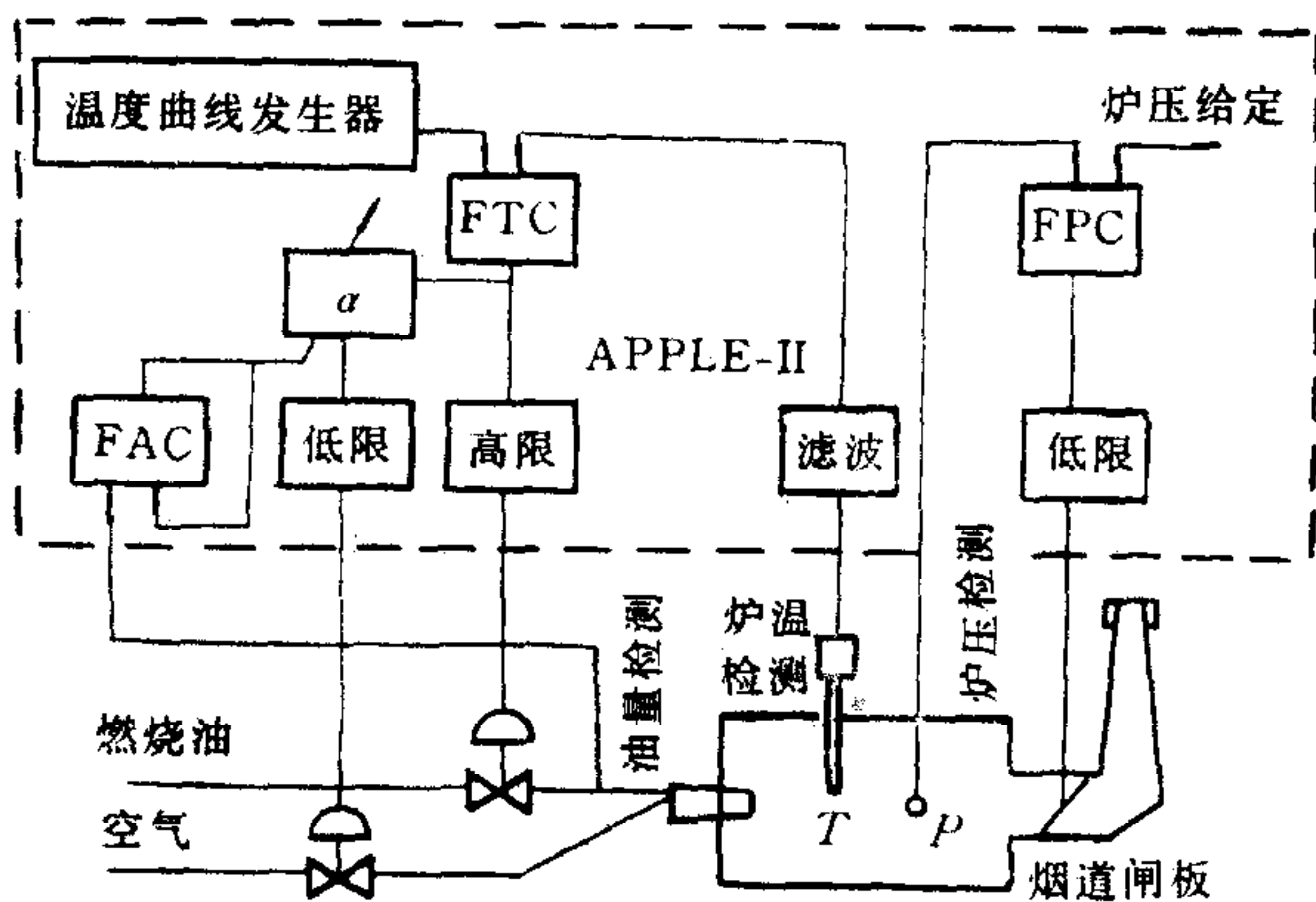


图1 退火炉模糊控制系统图

采用自寻优模糊控制器的退火炉燃烧控制系统如图1所示.图中 FPC 为炉压模糊控制器. FTC 为温度模糊控制器,它根据温度信号对于油量和风量进行调节. FAC 为油/风比模糊自寻优控制器,它不断发出试探信号,通过对燃油量的测量,搜索最佳油/风

比。燃料/空气控制采用并行结构。

系统中采用一台 APPLE-II 微机,包括主机、显示器,磁盘驱动器、打印机, A/D 和 D/A 转换器。

三、模糊控制器和模糊自寻优控制器

1. 模糊控制器

炉温和炉压控制回路中的模糊控制器的原理图如图 2 所示。

图中 e 和 \dot{e} 为误差及其导数。模糊控制表采用文献 [1] 中介绍的控制表,加以适当的人工修正,如表 1 所示。

控制表的输出要经过一个输出环节转换为实际控制量再加入到被控对象上。常用的输出环节有二种:比例输出和积分输出。

前者阶跃响应较快,但为有差控制。后者可接近无差控制,但响应较慢,且超调较大(参阅图 3)。作者把这二者结合起来,采用比例积分输出结构,具有响应快,超调小,暂态时间短的优点,如图 3 中的曲线③所示。

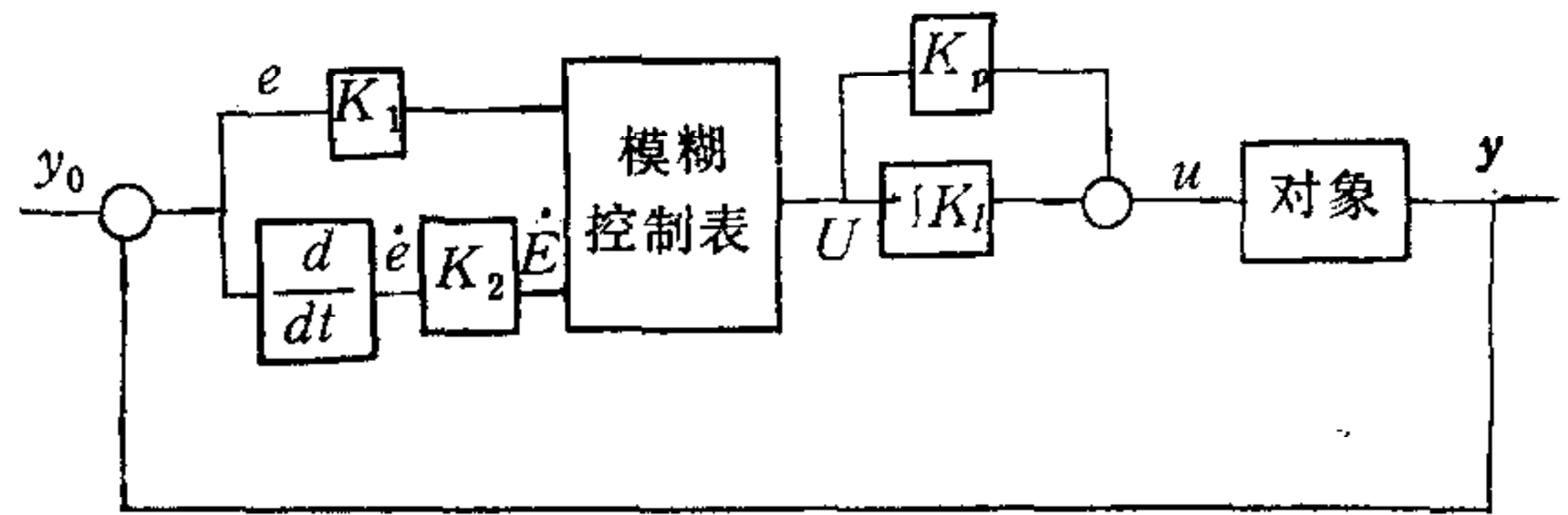


图 2 模糊控制器

表 1 人工修正后的模糊控制表

$E \backslash U \backslash \dot{E}$	\dot{E}												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	7	7	7	7	7	7	7	4	4	2	0	0	0
-5	7	7	7	7	7	7	6	4	4	2	0	0	0
-4	7	7	7	7	7	6	4	4	3	1	0	0	0
-3	7	7	7	7	6	4	4	3	1	0	-1	-2	-2
-2	6	6	6	6	4	4	3	1	0	-1	-1	-2	-2
-1	4	4	4	4	3	3	1	0	-1	-2	-2	-3	-3
-0	4	4	3	3	3	2	0	-1	-2	-3	-3	-3	-3
+0	3	3	3	3	2	1	0	-2	-3	-3	-3	-4	-4
1	3	3	2	2	1	0	-1	-3	-3	-4	-4	-4	-6
2	2	2	1	1	0	-1	-2	-4	-4	-6	-6	-6	-7
3	2	2	1	0	-1	-3	-4	-4	-6	-7	-7	-7	-7
4	0	0	0	-1	-3	-4	-4	-6	-7	-7	-7	-7	-7
5	0	0	0	-2	-4	-4	-6	-7	-7	-7	-7	-7	-7
6	0	0	0	-2	-4	-4	-7	-7	-7	-7	-7	-7	-7

上述模糊控制器有四个可调参数,即量化因子 K_1 、 K_2 ,比例系数 K_p 和积分系数 K_I 。增大 K_1 、 K_2 可以提高系统对误差及其变化的分辨率,使控制精度增高。但 K_1 、 K_2

太大不利于系统的稳定性。增大 K_p 或 K_I 都能使响应速度加快,但可能引起振荡。根据我们的实践经验,可取 $K_1 \approx K_2$, $K_p = (2 \sim 3)K_I$ 。当 K_1 和 K_2 取值较大时,应适当减少 K_p 和 K_I 。若采样周期较长,则 K_p 和 K_I 可选得大一些。

在本系统中, FPC 的采样周期为 1/3 分钟, FTC 的采样周期为 1 分钟。

2. 油/风比模糊自寻优控制器

退火炉的耗油量与油/风比之间存在极值关系。这种极值关系受燃料热值的变化及油嘴变化的影响,会产生漂移。我们可以以最小耗油量为指标,对油/风比进行自寻优控制。

通常的步进或自寻优搜索的步长是固定的。步长太小,收敛速度过慢,对于一些不可控扰动的响应就难以适应。步长太大则搜索损失增大,有时还会引起

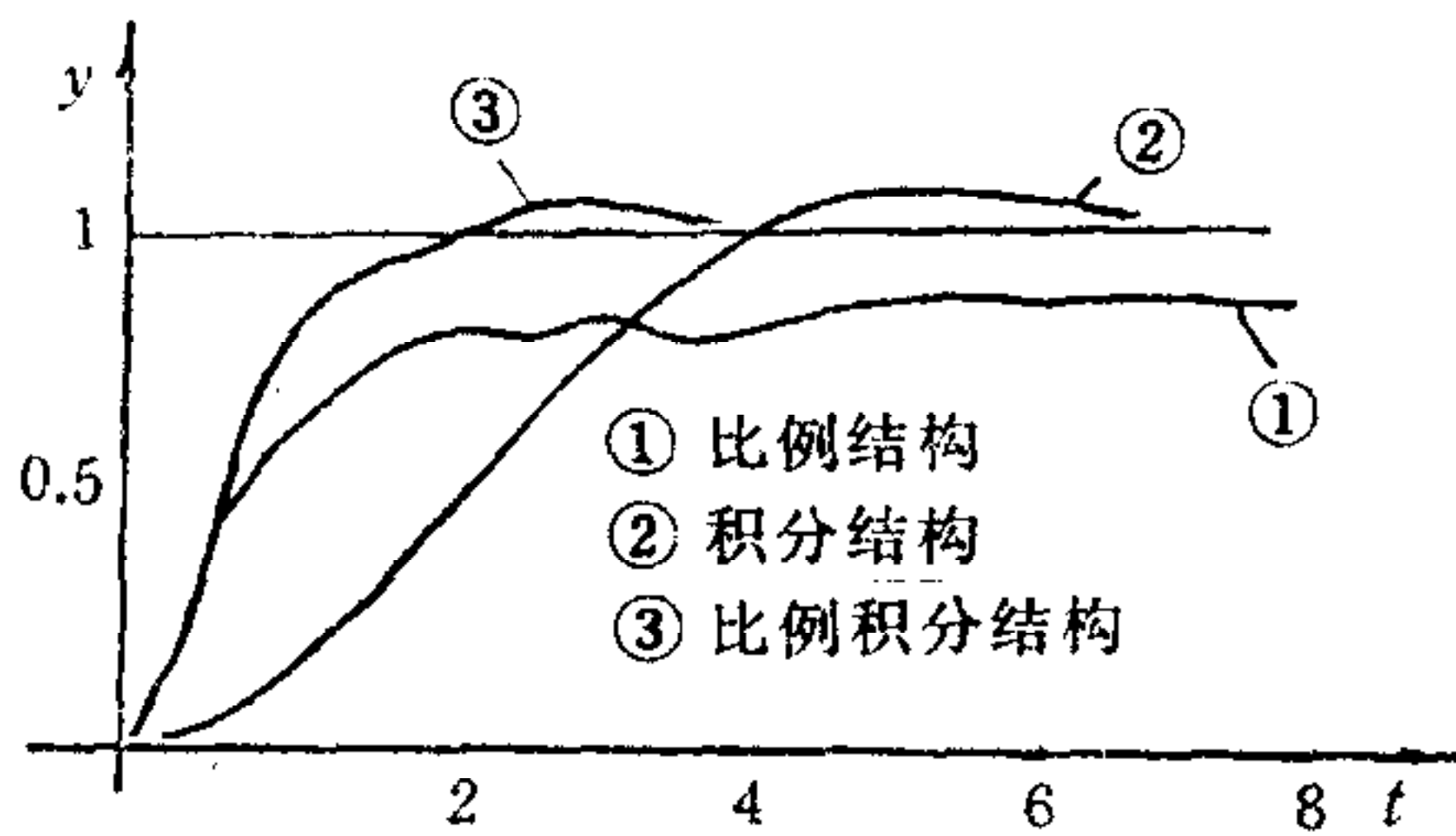


图 3 三种结构模糊控制器的阶跃响应

振荡,影响正常工作。为了提高搜索速度,又减少搜索损失,可以采用变步长的办法。在离极点较远处,曲线较陡处,选用较大步长。而在极点附近曲线平缓处采用小步长进行搜索。步长的自动改变,可以用模糊逻辑判断来实现。

应用模糊集理论设计的模糊自寻优控制器如图 4 所示。它以耗油量为指标,寻找最佳的油风比。在每个采样周期测量油耗增量 Δy , 根据 Δy 和上一周期寻优步长决定本次寻优步长。 ΔY 和 ΔX 分别是耗油增量和步长的模糊语言变量。 K_y 为 Δy 的量化因子, K_x 为比例因子,它把 ΔX 转换为步长的实际值。

我们把 ΔY 、 ΔX 分别分为 8 个和 6 个模糊子集,即

$$\Delta Y = \{NB, NM, NS, NO, PO, PS, PM, PB\}$$

$$\Delta X = \{NB, NM, NS, PS, PM, PB\}$$

其中 $NB, NM, NS, NO, PO, PS, PM, PB$ 分别表示负大,负中,负小,负零,正零,正小,正中和正大。

ΔY 和 ΔX 的论域分别规定为 14 和 12 个等级:

$$Y_a = \{-6, -5, \dots, -0, +0, \dots, +5, +6\}$$

$$X_a = \{-6, -5, \dots, -1, +1, \dots, +5, +6\}$$

在大多数的模糊控制器的设计中,都延用了最早研制模糊控制器的 Mamdani 的方法,采用了上述这种划分^[2]。

自寻优的搜索过程可用表 2 所示的控制规则表表达,其中 ΔX_{i-1} 为上一周期寻优步长, ΔX_i 为本次寻优步长。

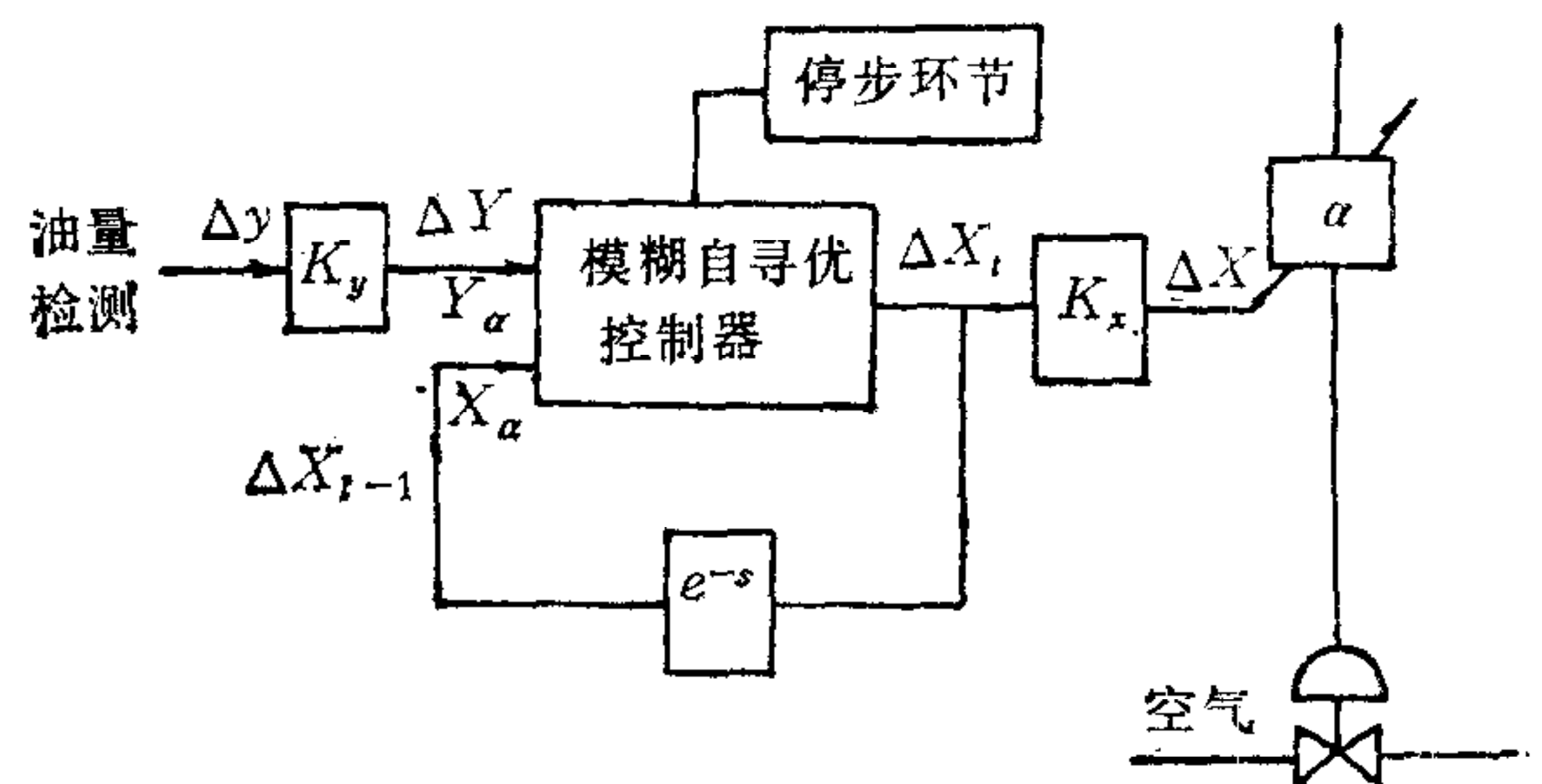


图 4 模糊自寻优控制器

给定 ΔY 和 ΔX 的隶属度赋值表,应用模糊推理合成法则,计算成自寻优控制表,再加以人工修正,可得自寻优控制表 3。

自寻优的过程就是查表运算过程。增加 K_y 和 K_x , 可以提高搜索速度, K_x 的值还影响搜索损失。故可根据对收敛速度的要求选择 K_y , 而根据对搜索损失的要求选择 K_x 。

表 2 模糊自寻优控制规则表

		X_{t-1}						
		NB	NM	NS	PS	PM	PB	
Y	X_t							
	NB	NB	NB	NB	PB	PB	PB	
	NM	NM	NB	NB	PB	PB	PM	
	NS	NS	NM	NM	PM	PM	PS	
	NO	NS	NS	NS	PS	PS	PS	
	PO	PS	PS	PS	NS	NS	NS	
	PS	PS	PM	PM	NM	NM	NS	
	PM	PM	PB	PB	NB	NB	NM	
PB	PB	PB	PB	NB	NB	NB		

表 3 模糊自寻优控制表

		$X_{at} - 1$											
		-6	-5	-4	-3	-2	-1	1	2	3	4	5	6
Y_a	X_{at}												
	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	6	6	6	6	6	6
	-5	-6	-6	-6	-6	-6	-6	6	6	6	6	6	6
	-4	-4	-4	-5	-5	-6	-6	6	6	5	5	4	4
	-3	-4	-4	-5	-5	-6	-6	6	6	5	5	4	4
	-2	-1	-1	-3	-3	-4	-4	4	4	3	3	1	1
	-1	-1	-1	-3	-3	-4	-4	4	4	3	3	1	1
	-0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1
	+0	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
	1	1	1	3	3	4	4	-4	-4	-3	-3	-1	-1
	2	1	1	3	3	4	4	-4	-4	-3	-3	-1	-1
	3	4	4	5	5	6	6	-6	-6	-5	-5	-4	-4
	4	4	4	5	5	6	6	-6	-6	-5	-5	-4	-4
5	6	6	6	6	6	6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	
6	6	6	6	6	6	6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	

在实际应用中,为了保证油/风比自寻优过程的稳定性,加入了一个停步环节。若由于干扰使炉温出现较大波动时,暂停搜索,以避免出现误动作。

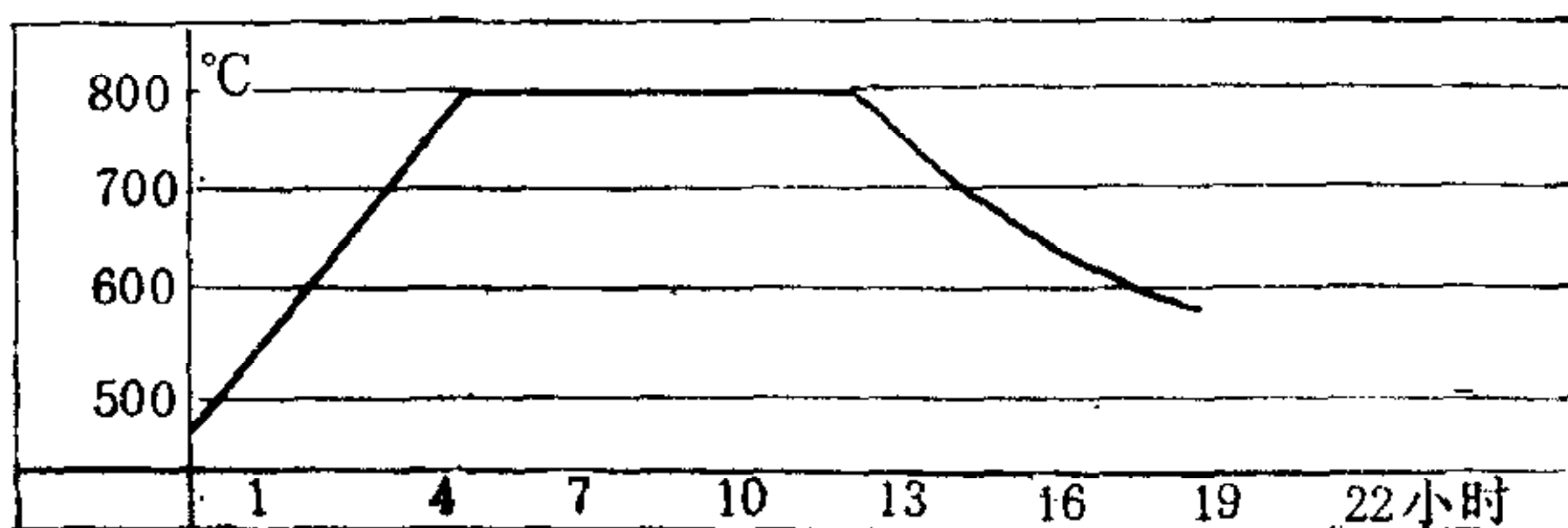
自寻优控制是一种稳态最优比控制,其采样频率应低于对象固有频率的 2—5 倍。因此油风比自寻优的采样周期应为温度调节采样周期的 2—5 倍。我们取自寻优采样周期为

3 分钟,即温度调节回路采样周期的 3 倍。

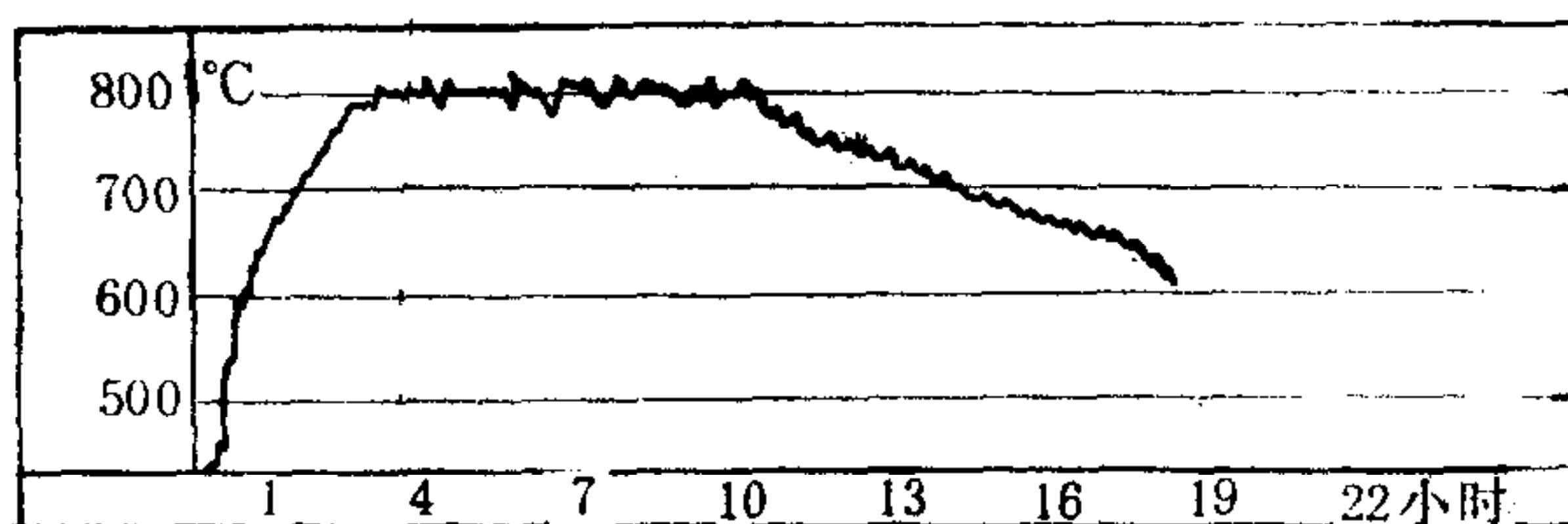
四、应用效果与结论

本系统已用于北京特殊钢厂一台燃油退火炉。程序采用 BASIC 语言编制。系统投入运行数月,取得较满意的控制效果。

该炉的退火工艺曲线如图 5(a) 所示,分升温、保温和降温过程。降温为自由降温,不需控制。原来用手动控制,难以达到工艺要求和保证可靠的质量。图 5(b) 为手动控制时的温度记录曲线。采用模糊控制系统后,升温跟踪误差在 $\pm 4^{\circ}\text{C}$ 以内,保温段精度可达 $+2^{\circ}\text{C}$ 。图 5(c) 为采用模糊控制后的温度记录曲线。炉压给定为 $1\text{mm H}_2\text{O}$,控制精度为 $\pm 0.2\text{mm H}_2\text{O}$ 。



(a) 温度工艺曲线



(b) 手动控制温度记录曲线

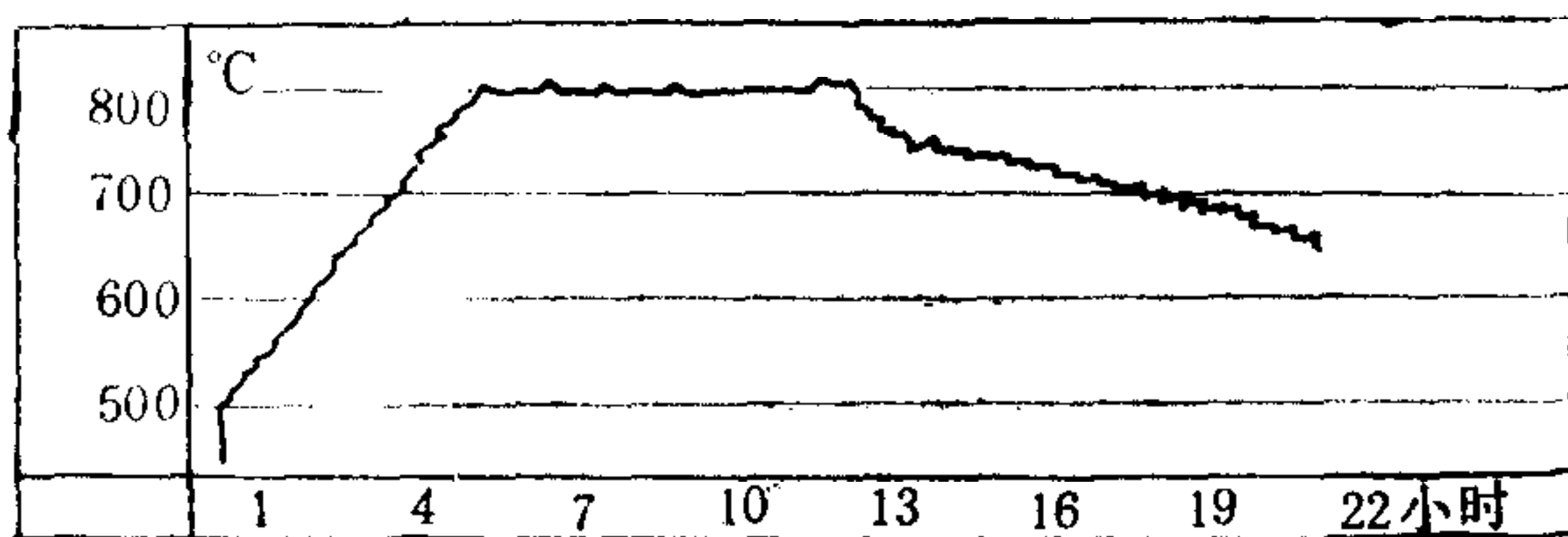


图 5 退火炉的温度曲线

油/风比自寻优控制收敛速度很快,一般经过 6—8 个采样周期即可达到最佳值。但由于炉子的风机选得过大,油/风比达到下限后,空气仍然过剩。即使如此,据初步统计,采用模糊控制在保温阶段比手动控制可节能 10% 左右,经济效益可观。

整个系统运行稳定,没有振荡,在温度控制回路加入 -20% 的阶跃干扰时,温度最大落差为 -10°C ,恢复时间约为 10 个采样周期。

综上所述,模糊控制系统在退火炉上的应用达到了减轻操作人员劳动强度,提高控制精度,保证退火质量,以及节约能源的目的。

模糊控制系统能较好适应过程参数的经常变化,对非线性、噪声和纯滞后有较强的抑制能力,具有较强的鲁棒性。模糊控制器的参数调整方便,通过对现场的情况稍作分析,就能较好地确定参数,且参数适用范围较广。

本文作者在试验中得到北京特殊钢厂蔡庄、刘小石同志的帮助,在此谨表谢意。

参 考 文 献

- [1] 李宝绥,刘志俊,用模糊集理论设计一类控制器,自动化学报,6(1980),No.1.
- [2] Mamdani, E. H. Efstathion H.J.and Sugiyama, K. Developments in Fuzzy Logic Control, Pro. of 23rd Con. on Decision and Control, Las Vegas, NV. December 1984.
- [3] 陈南岳,现代加热炉过程控制技术及其数学模型,冶金自动化, No.3, 1985.
- [4] 王永初,最佳控制系统设计基础,科学出版社,1980.
- [5] 胡家耀,吴植翘,宋寿山,参数自调整 *Fuzzy-PI* 调节器,信息与控制, No.6, 1987.

THE APPLICATIONS OF FUZZY CONTROL TO TEMPERATURE CONTROL OF ANNEALING FURNACE

HU JIAYAO WU ZHIQIAO

(*Beijing Institute of Light Industry*)

SONG SHOUSHAN

(*Beijing Computer Application Research Institute*)

ABSTRACT

What makes the temperature control of the annealing furnace difficult is the variation of process parameters, the high nonlinearity, heavy noise and the large time delay of the process. In this paper, the applications of fuzzy control theory to the annealing control is reported. A modified fuzzy controller structure which has faster response and higher accuracy is used to control the temperature and the pressure of the furnace. And a fuzzy self-optimal controller with the aid of fuzzy sets theory is used to regulate the fuel/air ratio to keep a rational combustion. The operation run shows that the fuzzy control system can overcome the above difficulties, and the result is satisfactory.

Key words ——Fuzzy controller; optimal fuel/air ratio; selfoptimal control.