

东北大学
硕士学位论文
首钢第一线材厂三车间加热炉计算机控制系统
姓名：孙贵锁
申请学位级别：硕士
专业：自动化
指导教师：刘建昌
2000. 2. 1

摘 要

(轧钢生产中加热炉的加热过程具有工作机理复杂、影响因素多、滞后大、惯性大等特点, 因此, 难以建立精确的数学模型。)

本文针对首钢第一线材厂线三车间轧钢生产线上的加热炉, 设计了加热炉计算机控制系统, 该计算机控制系统包括总风压控制系统、总油压控制系统和炉温控制系统。

本文通过对影响加热炉炉温因素的分析, 设计了基于 PID 控制算法的总风压、总油压和炉膛压力 PID 控制系统。

应用串级控制理论设计了炉温串级控制系统。应用模糊控制理论, 建立了自适应温度模糊控制器, 从而避免了建立精确数学模型的难题。在控制油量、风量时采用交叉比值控制, 同时通过对加热炉内残氧量的检测, 在线修正风油比。

实验表明, 本文设计的控制系统及控制算法效果良好, 减小了温度误差, 降低了产品损耗, 节约了能源, 降低了环境污染。

(由此可带来较大的经济效益和社会效益)

关键词: 加热炉 炉温 PID 控制 自适应模糊控制器 轧钢

(串级控制理论)

ABSTRACT

The heating process of the furnace has the features that the working mechanism is complex, the influential factors is too much, the delay time is very long, the inertia is great, and so the accurate mathematical models are difficult to established.

Being against the heating furnace in the production line of the third rolling steel mill in the first iron wire factory of ShouGang, this paper designs a computer control system, which contains general air pressure control system, General oil pressure control system and heating furnace temperature control system.

By means of analyzing the influencing factors of the furnace temperature, the paper designs a PID control algorithm based control system of general air pressure, general oil pressure and the chamber pressure of the furnace.

The series control system of the furnace temperature is designed applying the series control theory. Using fuzzy control theory, the adaptive fuzzy controller is designed, and so the difficult problem to establish accurate mathematical models is avoided.

In the control of oil and air mass, the across proportion control is applied. In the same time, the proportion of oil and air is corrected on-line by measuring the remaining oxygen.

The test results show that the designed control system and control algorithm have very good effect, the temperature error is reduced, the production consumption is cut down, the energy is saved, and the environment pollution is reduced.

As a result, a great economical and social benefit is brought.

Keywords: heating furnace, furnace temperature, PID control, adaptive, fuzzy controller

第一章 绪论

一、 加热炉控制在冶金轧钢生产中的意义

加热炉是冶金线材企业生产过程中的一个十分重要的环节，加热炉的控制直接影响到工厂的产品质量、产量和能量的消耗，因此加热炉的控制长期以来一直受到人们的高度重视。

二、 加热炉控制的技术现状

从目前加热炉控制的实际情况来看，比较常见的控制方法有：

- 1、 温度燃料空气流量串级调节。解决串级调节中空燃关系的方法主要有单交叉限幅法、双交叉限幅法、改进型双交叉限幅法。解决空燃比的方法是人工设定空燃比和在线检测残氧量修正空燃比。
- 2、 建立在数学模型基础上的加热炉升温控制。加热炉的生产节奏必须服从于轧机的生产安排，它应按轧机的要求适时地提供加热温度合适的钢坯。钢坯升温过程的数学模型就是要根据变化着的轧制生产情况，估算钢坯在炉内的加热情况，控制燃烧过程。
- 3、 优化炉温设定值控制。在优化控制中以钢坯进入加热炉到出炉的能耗最小为指标设定炉温值。

三、 本论文的主要工作

首钢一线材厂本着提高产品质量、产量和降低能耗、减少污染的原则对线三车间的加热炉进行改造。根据线三车间加热炉改造中加热炉工艺要求本文设计了加热炉计算机自动控制系统。

1. 根据串级控制理论设计了加热炉炉温控制系统。
2. 应用模糊控制理论，在加热炉炉温控制系统尝试设计了自适应温度模糊控制器。

加热炉是一个具有大惯性、大滞后、随机、分布参量的复杂系统，本文针对以往加热炉控制的不足，并结合当前人工智能技术中模糊控制理论的发展，

对加热炉炉温控制中主控制器——温度控制器的设计做了一些尝试。

3. 本文通过对影响加热炉炉温的因素的分析, 避开了建立精确数学模型的困难, 而直接根据系统中易于检测的温度、压力、流量、残氧量等四种物理量, 设计出总风压 PID 控制系统、总油压 PID 控制系统和炉膛压力 PID 控制系统, 以更好地控制加热炉炉温及提高加热炉的热效率。

第二章 加热炉生产工艺

本章就本论文的研究对象——首钢第一线材厂线三车间加热炉的基本情况及其对加热炉控制的要求和影响炉温控制的因素作一些必要的介绍和分析。

第一节 三段连续式水冷热滑道加热炉

一、加热炉

加热炉是钢铁企业的重要设备之一，属于工业窑炉的一种，主要用于在钢材轧制前对钢材进行加热。由于不同的钢材在加热到不同的温度时其特性不同，且在高温下便于轧制，所以就必须根据生产需要和钢材特性使炉膛温度保持在特定的范围之内，以使出炉的钢材温度满足轧制要求。

目前加热炉的种类很多，各个钢铁企业根据自身的生产情况设计了不同类型的加热炉，主要有连续式加热炉、斜底式加热炉、室状加热炉、环形加热炉、步进加热炉等。

二、三段连续式水冷热滑道加热炉

连续式加热炉是将需要加热的钢坯从炉尾由推钢机推入，然后在炉膛中进行加热，按照工艺指标达到加热要求后的钢坯再从炉头由出钢机推出。由于钢坯是不断地一根接一根由炉尾推入，加热后由炉头推出，生产过程是连续的，故称为连续式加热炉。

连续式加热炉可分为一段式、二段式、三段式和多段式。图 2-1 和图 2-2 分别为二段式和三段式加热炉的简图。

产量低或以普碳钢为主的工厂，一段式和二段式的连续加热炉可满足生产的需要；产量高或以合金钢为主的工厂，多采用三段式和多段式的连续加热炉。

本文的实际研究对象是首钢第一线材厂线三车间的三段连续式水冷热滑

道加热炉。图 2-2 也就是它的结构示意图。

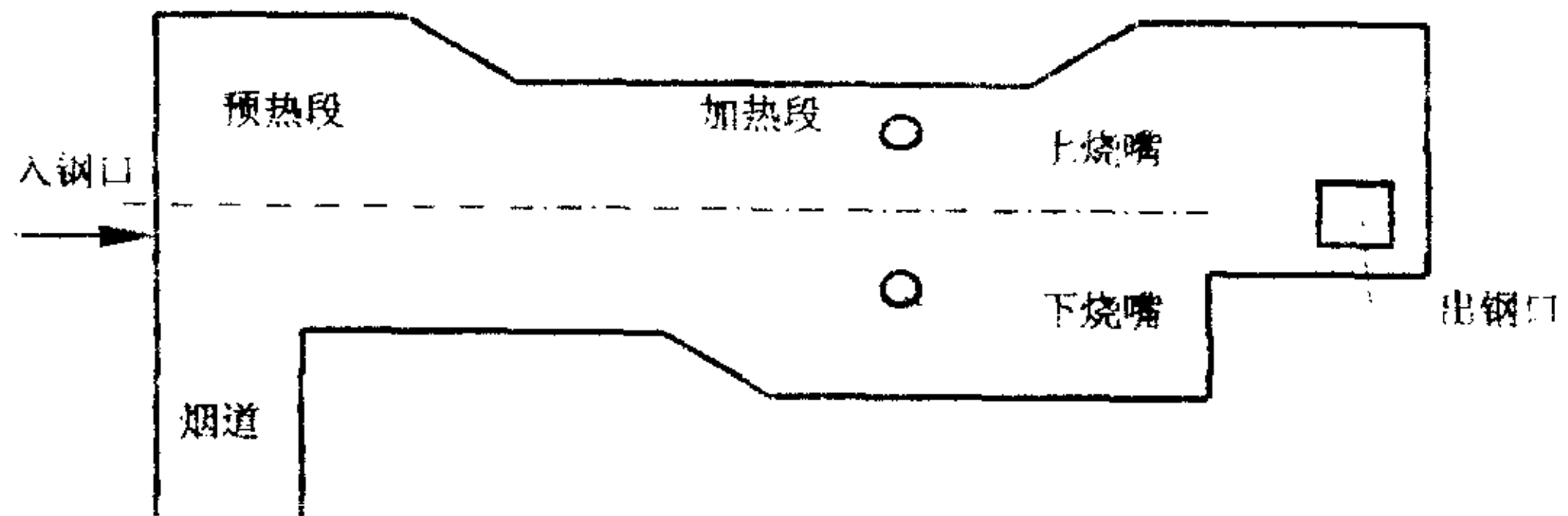


图 2-1 二段连续式加热炉结构简图

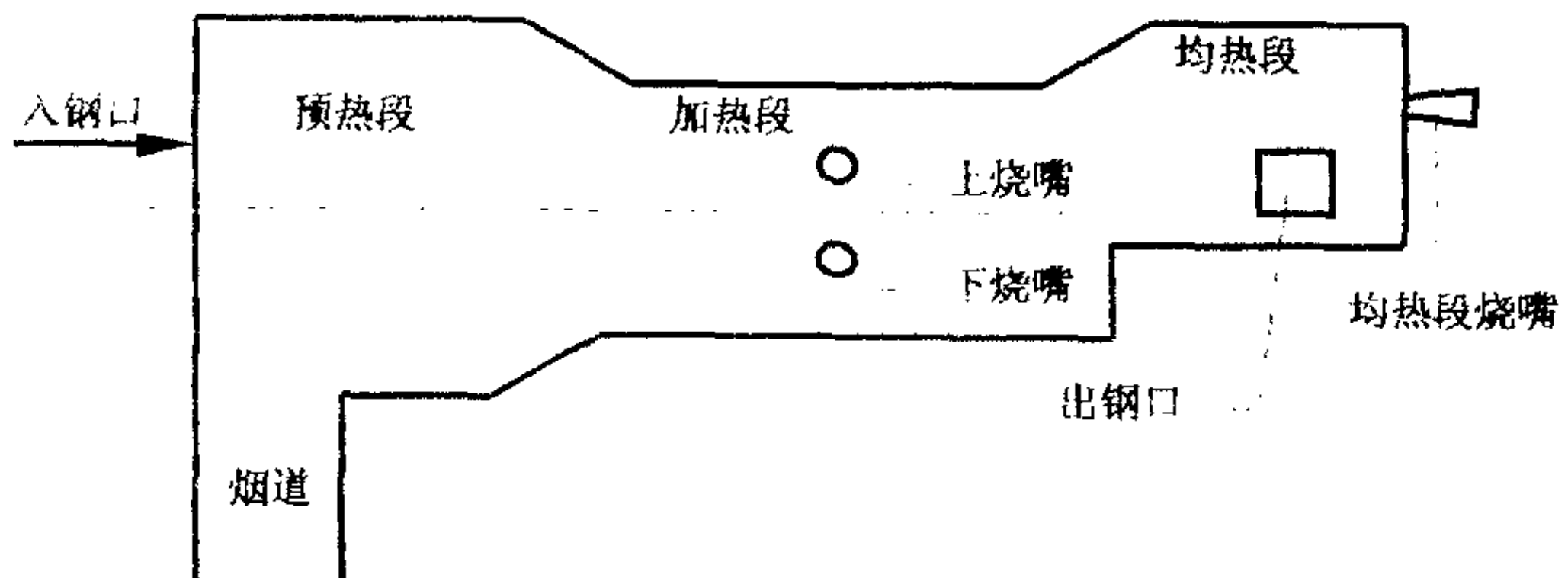


图 2-2 三段连续式加热炉结构简图

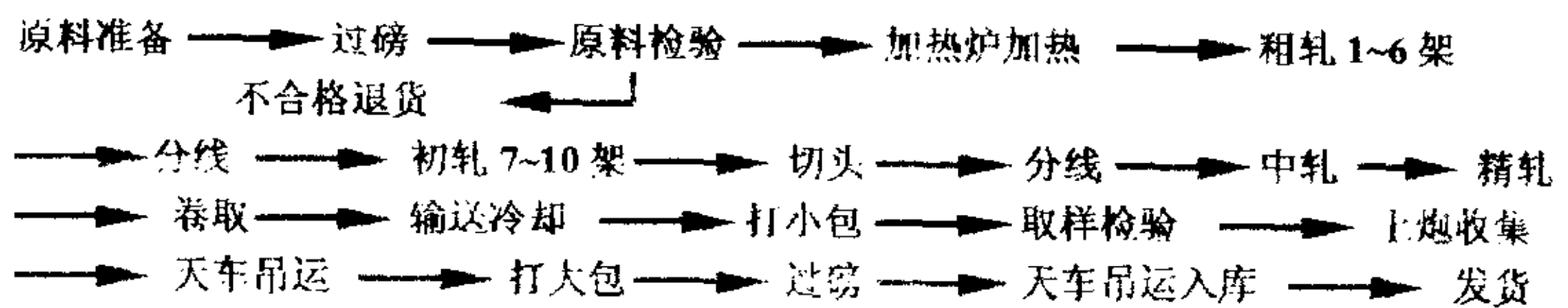


图 2-3 工艺流程简图

线三车间的设计生产能力为年产 $\Phi 8\text{mm}$ 的镇静钢盘条 30~45 万吨。

由于本论文主要从控制的角度来研究，为了节省篇幅，故对其生产原理及生产过程就不再一一陈述。下面简要地画出其工艺流程图，如图 2-3 所示。

第二节 加热炉状况

一、加热炉设备状况

线三车间现有三段连续式水冷热滑道加热炉一座。

炉体结构形式：端进侧出，三段连续式水冷热滑道燃油加热炉。

加热制度：二段式加热。

炉子长度：

总有效：长 22.04m；宽 6.496m。

总外观：长 23.896m；宽 7.736m。

炉子有效面积： $22.04 \times 6.496 = 143.17\text{m}^2$ 。

热滑轨中心距：1.62m。

烟囱：

高度：65m。

出口直径：2.5m。

燃油油品：重油。

燃油管网：总燃油管网；均热段燃油管网；上加热燃油管网；下加热燃油管网。

空气管网：总空气管网；均热段空气管网；上加热空气管网；下加热空气管网。

风机型号：92614#D

油泵型号：3G36R $\times$ 4.6/25

另有空气换热器、推钢机、出钢机、油加热器等设备，由于不是研究重点，就不必作论述了。

、 加热炉的燃烧和钢坯加热过程简述

在任何冶金轧钢生产中，钢坯必须经过加热才能进行轧制。轧钢加热炉的主要作用就是加热钢坯，使之达到轧制所要求的温度分布。

1. 加热炉的燃烧过程

油罐中的重油被油泵抽出，经由总油管至加热器中加热，然后被分配到上、下加热段和均热段油路中，最后到达加热炉各段烧嘴中；与此同时空气由风机送出，经由总风管至烟道内的热交换器中被加热后，分配到各段的风路中，最后也到达各段烧嘴。在各段的烧嘴中油被雾化后同空气混合起来喷射到加热炉内燃烧。燃烧是一个化学过程。

2. 钢坯加热过程

推钢机将钢坯（此时钢坯的温度与环境温度相同）从加热炉炉尾连续推入加热炉，钢坯在预热段进行预热，在预热段段末，钢坯温度达到 700°C 左右后进入加热段。在加热段钢坯经过上下加热后，到达加热段段末时钢坯上下温度基本上都达到了 1220°C 左右，然后进入均热段，在均热段中钢坯经过加热后，将要轧制的钢坯被加热到了 1250°C 左右的温度，钢坯内部和表面温度基本均匀一致，具有了轧制工艺所要求的可塑性，达到工艺所要求的温度分布，然后由出钢机将钢坯从加热炉中顶出，进入轧制工序。钢坯一旦进入加热炉就一直被加热直到被出钢机从加热炉中顶出。钢坯加热是具有热传导和热辐射的过程。

由上述的描述中可以看出评价加热炉性能优劣的指标是钢坯的加热质量，钢的氧化烧损率，加热炉的单位能耗及产量等。

第三节 加热炉控制的基本要求和影响因素

、 加热炉使用计算机控制前的控制状况

加热炉在使用计算机控制前主要是加热炉操作工根据生产节奏及钢坯出炉温度变化人工调整炉温，使得钢温均匀不粘钢。加热炉提温时先增风后增油，

降温时先减油后减风，以防止冒黑烟；在调整风油来提高或降低炉温的同时还要调整烟道闸板，使炉压保持微正压，以减少热损，提高热效率。

在增减风、油时，加热炉操作工都是手动调节风或油流量调节阀门。

计算机控制的基本要求

本加热炉共分三个控制段：上加热段、下加热段、均热段。从上面的叙述中可以看出加热炉控制的基本要求有：

1. 根据轧制节奏自动控制各段炉温

钢坯的加热过程是轧制的前道工序，加热炉的用途是把钢坯从冷态加热到适合轧制的温度要求（如钢坯的表面温度以及表面温度与中心温度之差要在一定的范围内），为了使钢坯满足轧制要求且满足一种优化指标（节能优化或产量优化等），需对加热炉的各段温度加以控制，以达到生产的要求。

2. 通过残氧检测进行空燃比自动调整

加热炉是轧钢生产线上的主要耗能设备。为降低能耗，增加经济效益，要尽可能地降低燃耗。这就要求在将钢坯加热到符合轧制要求温度的条件下，风油配比要合适。如果配比值过大，虽然重油能够充分燃烧，但多余的空气就会将加热炉内的部分热量带走，从而浪费了能源；如果配比值过小，重油就不能充分燃烧，进入加热炉中的重油有一部分就会随废气排出，不仅浪费了能源，而且还污染了环境。

3. 炉温越限报警

加热炉炉温最高不能超过 1320°C ，否则将会对加热炉炉体本身产生破坏作用，加速加热炉自身的老化速度，缩短加热炉的使用寿命。

4. 炉膛压力保持微正压

炉压的高低直接影响着炉子的热效率和成材率。如果炉压太高，炉子开口处向外喷火，热损失大，热效率低；反之，若炉压太低，炉子吸入冷空气，也降低了热效率。更值得注意的是，当冷空气吸入炉内后，使得炉内氧气量升高，增大了钢坯氧化铁皮的生成，使成材率降低，经济效益下降。所以，必须

控制炉膛压力，使得炉压只能在一个合适的区间内变化。

具体控制要求如表 2-1 所示。

表 2-1 加热炉计算机控制要求表

控 制 项 目	上加热段	下加热段	均热段
温 度	1050℃~1250℃	1050℃~1250℃	1180℃~1280℃
炉 膛 压 力	5Pa~15 Pa		
总 风 压	8KPa~10KPa		
总 油 压	0.3MPa~0.45MPa		

一、影响炉温控制的因素及分析

从上面的叙述中可以看出加热炉的生产过程极其复杂，炉内金属加热过程涉及气体的燃料燃烧，高温传热，金属导热，氧化脱碳等复杂的物理化学现象，因此影响炉温的因素很多。

在设备结构方面的影响因素有：炉膛形状和尺寸，燃烧器性能和布置，热电偶安装位置等。

在生产操作方面的影响因素有：钢坯的品种，尺寸和入炉温度，轧制成品的规格，燃料的种类、成份及其温度，空燃比，炉膛压力等。

此外还包括过程参数变化如产量的波动，炉门的开启，热电偶的老化，钢渣堆积造成的热损失变化等的影响因素。

所以，加热炉加热过程受随机因素干扰，参量时变，而且具有非线性的分布参量，整个过程具有大惯性，纯滞后和不确定的控制输入输出关系。

在众多影响加热炉炉温控制的因素中，可以通过对设备的合理安装和布置将设备结构方面的影响尽可能地降低直至消除（如热电偶老化的影响可以通过定期更换热电偶来消除）；由于现场生产中加热的钢坯只有 $6m \times 120mm^2$ 一种规格，并且入炉温度为环境温度，因此钢坯的品种、尺寸入炉温度的影响因素可

以不考虑；生产的线材产品只有 $\phi 8\text{mm}$ 一种规格，产品规格的影响也可以不考虑。燃料只使用重油，并且重油在管路输送的过程中由加热器进行充分的加热，因此燃料的种类、成分及温度的影响可以不考虑；炉门在生产中是处于常开状态的，也可以不考虑炉门开启的影响；在生产中只有均热段能堆积钢渣，可以让岗位操作工定期清理钢渣，因此，这种影响因素也可以不考虑。

因此，在本文加热炉炉温控制中需要考虑的因素主要有以下几个方面：

1. 加热炉炉膛压力的影响

在相同的热负荷情况下，炉膛压力的高低将直接影响炉温的高低和钢坯的加热效果。当热负荷发生变化时，炉温也会随之变化。随着炉温的变化，炉膛压力也会发生变化，从而影响炉温的控制效果。

2. 空气、燃料流量的影响

众所周知，加热炉炉温的高低主要是由加热炉中空气、燃料混合燃烧所产生的热量及其热负荷的大小决定的。在生产中空气、燃料的流量及热负荷是随时变化的。在热负荷一定的条件下，如果空气、燃料的流量不稳定，将直接影响加热炉炉温的稳定。当热负荷发生变化时，空气、燃料流量是否能够及时调整，将直接影响加热炉炉温的控制。

3. 空燃比变化的影响

所谓空燃比就是加热炉中空气量和燃料量的比值。空燃比的高低将直接影响加热炉中钢坯的加热效果，降低炉温控制的意义。

4. 产量波动的影响

加热炉出钢的节奏必须与轧钢机的生产节奏相协调。当轧制节奏变化时，出钢节奏也须随之变化，而在实际生产过程中，轧制的节奏变化很频繁，其中有的是计划的轧制停顿和节奏变化（产量变化），更多的是由于生产线上发生故障而使节奏发生变化或停顿，也即随机扰动。这类变化主要表现为推钢速度的变化。对于不同的推钢速度，要满足轧制要求和一种优化制度，对炉内各段温度要求也是不同的。

四、影响炉温控制各因素之间的相互关系

当增加供风量和供油量以提高炉温时，加热炉的炉膛压力也会随之增加；当降低供风量和供油量以降低加热炉炉温时，炉膛压力也会随之降低。

当生产节奏变化时，加热炉的炉温就会发生变化，因此，应随生产节奏的变化调整加热炉的供风量和供油量，以使加热炉炉温保持在合适的范围内。

在调整供风量和供油量时，为保证有足够的空气以完全燃烧，增加时应先增加空气，后增加重油，减少时应先减少重油，后减少空气。

第三章 加热炉计算机控制的基本原理

第一节 炉温控制的基本原理

本论文中加热炉炉温是分段控制的，每段炉温的控制原理是相同的，均采用串级比值控制。现将其控制原理叙述如下。

一、串级控制的基本原理

串级控制是在单参数、单回路控制的基础上发展起来的一种控制方法，它可以较方便地解决几个因素影响同一个被控量的问题，同时它又是改善调节过程极为有效的方法，因此得到了广泛的应用。

串级控制系统原理方框图如图 3-1 所示

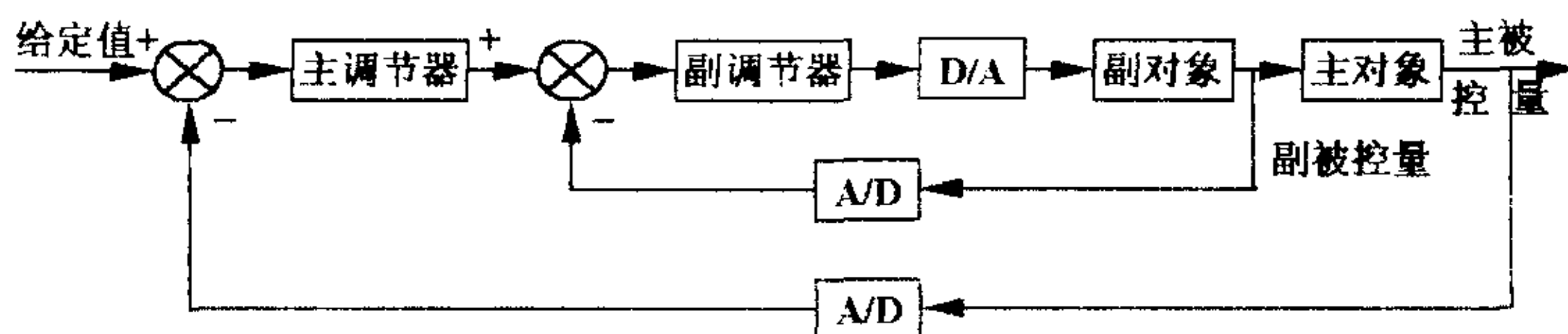


图 3-1 串级控制系统原理方框图

从图 3-1 中可以看出，串级控制系统与单回路控制系统的一个显著的区别是：串级控制系统在结构上形成了两个闭环。一个闭环在里面，被称为副环或副回路，在控制过程中起着“粗调”的作用；一个闭环在外面，被称为主环或主回路，用来完成“细调”任务，以最终保证被调量满足工艺要求。无论是主环还是副环，它们都有各自的调节对象、调节器和检测反馈元件。主调节器具有自己独立的给定值，它的输出作为副调节器的给定值，而副调节器的输出则是去控制生产过程的。

在串级控制系统设计中，应注意的问题是：

1. 副被控量的选择应使副回路的时间常数小，调节通道短，反应灵敏。
2. 副回路应包含被控对象所受到的主要干扰。
3. 避免主、副回路进入共振区。一旦发生共振，系统就失去控制，使控制品质恶化，如不及时处理，还可能导致生产事故，引起严重后果。

串级控制系统主、副回路避免进入共振区的条件是：

$$\omega_{d2} > 3\omega_{d1} \quad (3-1)$$

式中： ω_{d1} ——主回路的工作频率；

ω_{d2} ——副回路的工作频率；

二、比值控制的基本原理

在各种生产过程中，时常要保持两种物料的流量成一定的比例关系，如果一旦比例失调，就会影响产品的质量，严重的甚至会造成生产事故。因此就产生了能够自动保持两个或多个参数之间的比例关系的控制系统，这种控制系统就叫比值控制系统。

假设有 A、B 两个被控量，其中 A 被控量需与 B 被控量保持比例关系，其基本原理方框图如图 3-2 所示。

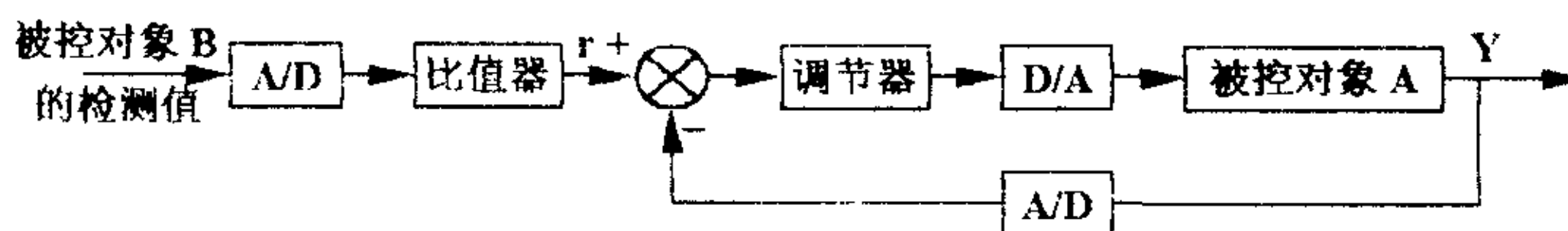


图 3-2 比值控制系统基本原理方框图

关于模糊控制的基本原理参见第五章。

第二节 流量、压力控制的基本原理

PID 控制是仪表过程控制系统中应用最广泛的一种控制规律，由于 PID 技

术最成熟，技术和操作人员比较熟悉，因此在计算机 DDC 控制系统中仍然得到广泛应用。即使在比较复杂的系统，如串级控制等也还是用 PID 算法。在实践中也证明，这种控制算法能适应许多工业生产过程。本论文中加热炉中各种流量和压力就采用了 PID 控制

计算机 PID 控制系统的原理方框图如图 3-3 所示。

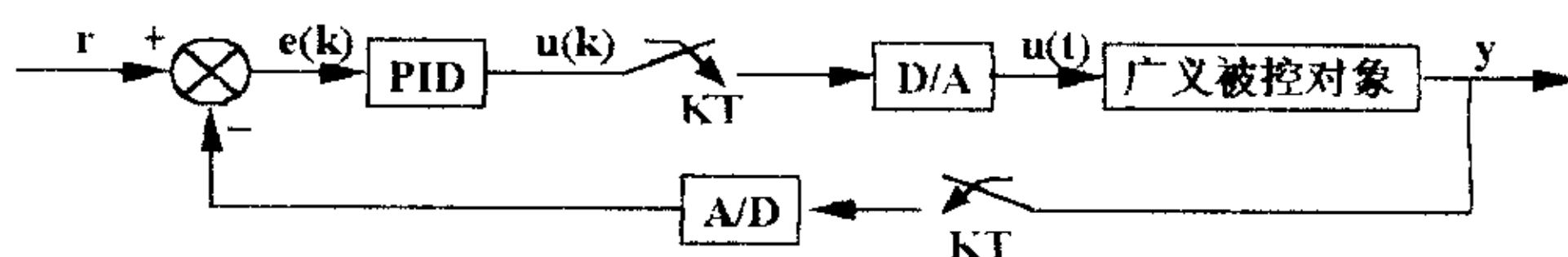


图 3-3 计算机 PID 控制基本原理方框图

图中：1、 r — 控制系统给定值；2、 $e(k)$ — PID 控制器输入值；3、 KT — 采样开关；
4、 $u(k)$ — PID 控制器输出的控制量；5、 $u(t)$ — 被控对象的控制量；
6、 y — 被控量；

一、PID 控制算法

在模拟控制系统中 PID 控制规律的表达式为：

$$u(t) = K_c \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{d e(t)}{dt} \right] \quad (3-2)$$

式中：

K_c 、 T_d 、 T_i 分别为模拟调节器的比例增益、积分时间常数、微分时间常数； $e(t)$ 为偏差； $u(t)$ 为模拟调节器输出的控制量。

计算机控制系统对控制回路进行离散控制，是时间离散控制系统。要实现式(3-2)的控制，就要对其离散化，其离散化后得

$$u(k) = K_c \left\{ e(k) + \frac{T_0}{T_i} \sum_{i=0}^k e(k) + \frac{T_d}{T_0} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (3-3)$$

或

$$u(k) = K_c e(k) + K_I \sum_{i=0}^k e(i) + K_D [e(k) - e(k-1)] \quad (3-4)$$

式中, $u(k)$ 是第 k 次采样时刻计算机的输出; $K_I = \frac{K_c T_0}{T_I}$ 称为积分系数; $K_D = \frac{K_c T_D}{T_0}$ 称为微分系数。

目前增量型 PID 控制算法有比较广泛的应用, 其形式为:

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) \\ &= K_c \left\{ [e(k) - e(k-1)] + \frac{T_0}{T_I} e(k) + \frac{T_D}{T_0} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \right\} \end{aligned} \quad (3-5)$$

或

$$\Delta u(k) = K_c [e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) + K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (3-6)$$

式中:

除上述两种算式外, 还有一种速度型 PID 控制算法。令增量算式除以采样周期即得速度型 PID 算式, 其表达式为:

$$\begin{aligned} v(k) &= \frac{\Delta u(k)}{T_0} \\ &= K_c \left\{ \frac{1}{T_0} [e(k) - e(k-1)] + \frac{1}{T_I} e(k) + \frac{T_D}{T_0^2} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \right\} \end{aligned} \quad 3-7$$

以上位置、增量、速度型 PID 算法的一个共同点是比例、积分和微分作用彼此独立, 互不相关。这就便于操作人员直观理解和检查各参数 (K_c 、 K_I 、 K_D) 对控制效果的影响。通常为编程方便, 人们更愿意采用简单的控制算式。只要将式 (3-6) 改写为

$$\Delta u(k) = (K_C + K_I + K_D)e(k) - (K_C + 2K_D)e(k-1) + K_De(k-2) \quad (3-8)$$

并令 $A = K_C + K_I + K_D$; $B = K_C + 2K_D$; $C = K_D$, 则

$$\Delta u(k) = Ae(k) - Be(k-1) + Ce(k-2) \quad (3-9)$$

此时 A 、 B 、 C 三个动态参数为中间变量。式(3-9)已看不出比例、积分、和微分作用, 它只反映各次采样偏差对控制的影响。为此, 有人把它称为偏差系数控制算式。

究竟选择那一种控制算式, 一方面要考虑执行器形式, 另一方面要考虑应用时的方便。

从执行器形式看[1], 采用位置型控制算式的计算机输出可直接与数字式调节阀连接, 其它形式的 PID 算式必须经过 D/A 转换, 将输出转换为模拟量, 并通过保持电路将其保持到下一个采样周期输出信号的到来。增量型控制算式计算机系统采用步进电机或多圈电位器进行控制。速度控制算式的输出必须采用积分式执行器。

从应用的角度考虑, 增量型控制算式因为输出是增量, 手动、自动切换时冲击比较小。另外, 即使偏差长期存在, 输出 $\Delta u(k)$ 也一次次积累, 最终可使执行器到达极限位置, 但只要偏差 $e(k)$ 换向, $\Delta u(k)$ 也立即变号, 从而使输出脱离饱和状态, 这就消除了发生积分饱和的危险。

此外增量型控制算式只输出增量, 计算机误动作时造成的影响比较小, 使增量型 PID 控制算式在 DDC 系统中获得最广泛的应用。

二、PID 控制算式的改进

为适应不同被控对象和系统的要求, 改善系统控制品质, 可在 DDC 标准 PID 控制算式基础上作某些修改, 如不完全微分算式, 带不灵敏区的 PID 算

式, 积分分离算式以及微分先行算式等等。下面予以说明。

上述标准的 PID 算式的缺点是: 对具有高频扰动的生产过程, 微分作用响应过于灵敏, 容易引起控制过程震荡, 降低调节品质。尤其在 DDC 系统中, 计算机对每个控制回路输出时间是短暂的, 而驱动执行器动作又需要一定的时间。如果输出较大, 在短暂时间内执行器达不到应有的相应开度, 会使输出失真。为克服这一弱点, 同时又要使微分有效, 可以参照模拟调节器, 在 PID 调节器输出串联一阶惯性环节, 如图 3-4 所示。

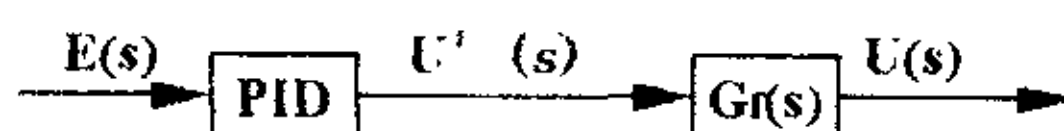


图 3-4 不完全微分 PID 调节器

这就是不完全微分 PID 调节器, 其中

$$G_f(s) = \frac{1}{T_f s + 1} \quad (3-10)$$

$$u'(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

$$T_f \frac{du(t)}{dt} + u(t) = u'(t)$$

所以

$$T_f \frac{du(t)}{dt} + u(t) = K_c \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3-11)$$

式 (3-11) 离散化, 可得不完全微分位置型控制算法

$$u(k) = au(k-1) + (1-a)u'(k) \quad (3-12)$$

式中 $a = \frac{T_f}{T_0 + T_f}$

$$u'(k) = K_c \left\{ e(k) + \frac{T_0}{T_i} \sum_0^k e(i) + \frac{T_0}{T_d} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (3-13)$$

相应的不完全微分速度型控制算法为

$$v(k) = av(k-1) + (1-a)v'(k) \quad (3-14)$$

式中 $v'(k) = \Delta u'(k) / T_0$

2. 带不灵敏区的 PID 算式

某些过程控制系统如液位系统，并不要求液位准确控制在给定值，允许在规定范围内变化。在这种情况下，为避免调节阀频繁动作及因此所引起的系统振荡，可采用带不灵敏区的 PID 算法，即

$$\Delta u(k) = \begin{cases} \Delta u(k) & \text{当 } |e(k)| > B \\ 0 & \text{当 } |e(k)| \leq B \end{cases} \quad (3-15)$$

式中，B 为不灵敏区宽度，其数值根据被控对象由实验确定。B 值太小，调节阀动作频繁；B 值太大，系统迟缓。B=0 则为标准 PID 算法。

式 (3-15) 表明，当偏差绝对值 $\Delta u(k) \leq B$ 时，输出增量为零。当 $\Delta u(k) > B$ 时，则输出 $\Delta u(k)$ 为 $e(k)$ 经 PID 运算后的输出结果。

3. 积分分离的 PID 算式

采用标准 PID 算式的 DDC 系统，当开工、停工或给定值大幅度升降时，由于短时间内出现的大偏差，加上系统本身的迟延，在积分项作用下，将引起系统过量的超调和不停的振荡。为此，可采用积分分离对策。也就是在被调量开始跟踪，系统偏差较大时，暂时取消积分作用，一旦被调量接近新给定值，偏差小于某一设定值 A 时，再投入积分作用。积分分离的控制算法为

$$|e(k)| = \begin{cases} > A, \text{ 取消积分作用} \\ \leq A, \text{ 引入积分作用} \end{cases} \quad (3-16)$$

值得注意的是，为保证引入积分作用后系统的稳定性不变，在投入积分作用的同时，比例增益 K_p 应作相应变化 (K_p 应减小)，这可以在 PID 算式编程时予以考虑。

4. 微分先行 PID 算法

为了避免给定值升降给控制系统带来的冲击（超调量过大，调节阀动作剧烈），可采用如图 3-5 所示的微分先行的 PID 控制方案。它和标准 PID 控制不同之处在于：只对被调量 $y(t)$ 微分，不对偏差微分，也就是说对给定值 $r(t)$ 无微分作用。

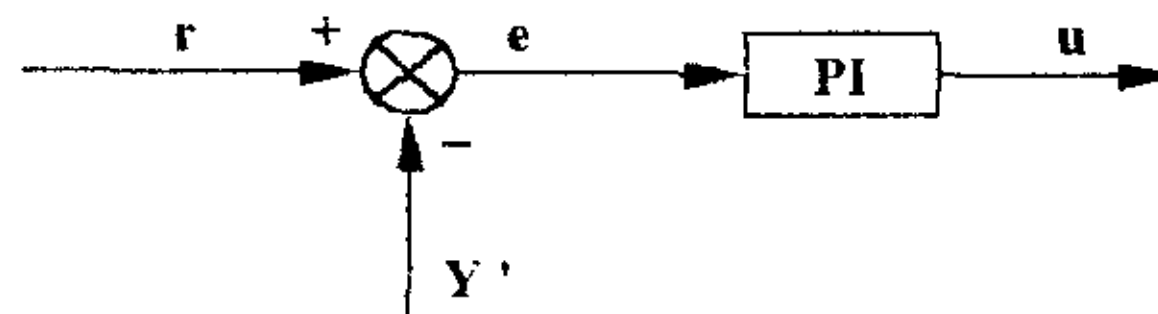


图 3.5 微分先行的 PID 控制方框图

因为偏差 $e(k)$ 是给定值 $r(k)$ 与被调量 $y(k)$ 之差，故

$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (3-17)$$

因此，增量型 PID 控制算法的微分动作项为：

$$K_D \left[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \right] = K_D \left[r(k) - 2r(k-1) + r(k-2) \right] - K_D \left[y(k) - 2y(k-1) + y(k-2) \right] \quad (3-18)$$

由给定值变化及被调量变化组成。如果只对被调量进行微分，那么式的增量型 PID 算式变为：

$$\Delta u(k) = K_c [e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) + K_D [y(k) - 2y(k-1) + y(k-2)] \quad (3-19)$$

第四章 加热炉计算机控制系统的设计

在本章中主要介绍加热炉计算机控制系统的设计。

加热炉计算机控制系统原理图如图 4-1 所示。

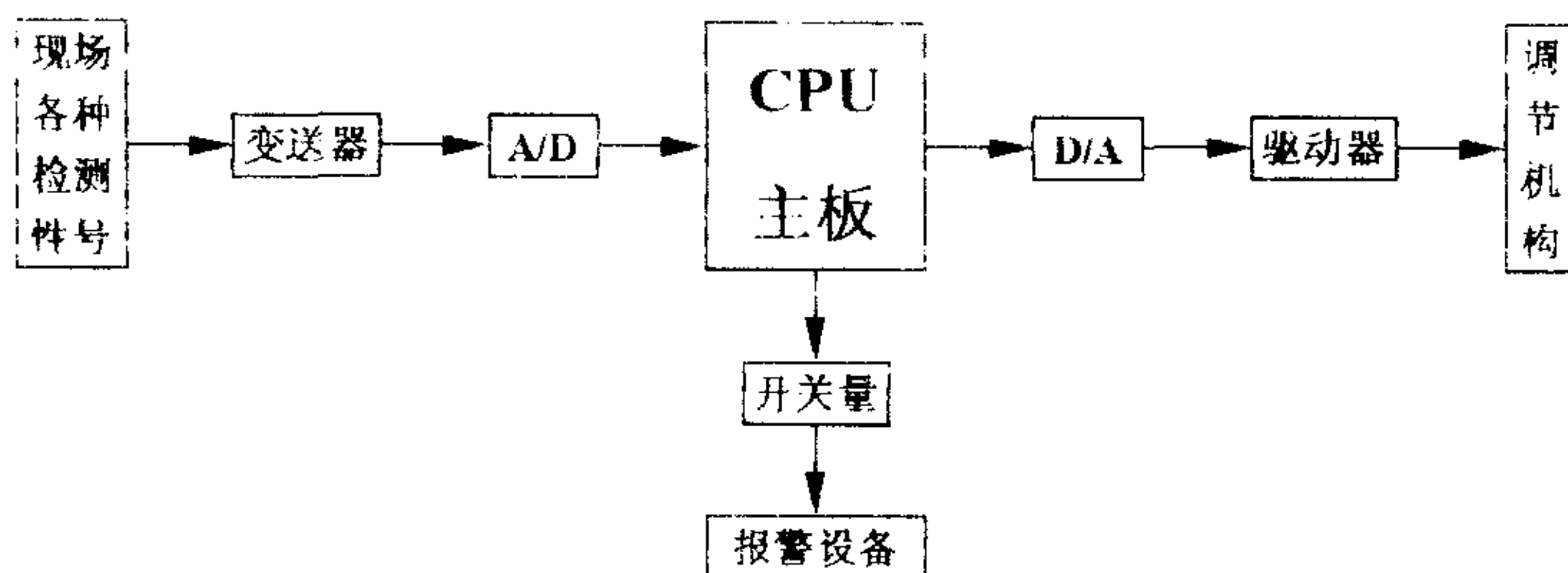


图 4-1 加热炉计算机控制系统结构原理图

第一节 加热炉炉温控制系统的设计

通过第二章的分析，我们可以得出，影响加热炉炉温控制的因素主要有炉膛压力、供风量、供油量、空燃比及轧钢生产的节奏。基于上述因素，根据第三章所述的控制原理，本论文设计的加热炉各段炉温控制系统是串级控制系统。

由于每段炉温的控制相同，下面以均热段炉温控制为例，进行说明。

均热段炉温控制框图如图 4-2 所示。

1. 温度设定表

由于加热炉炉膛温度是分段控制的，为了协调控制各段炉温，本文采用了温度设定表的方法来设定各段炉温。

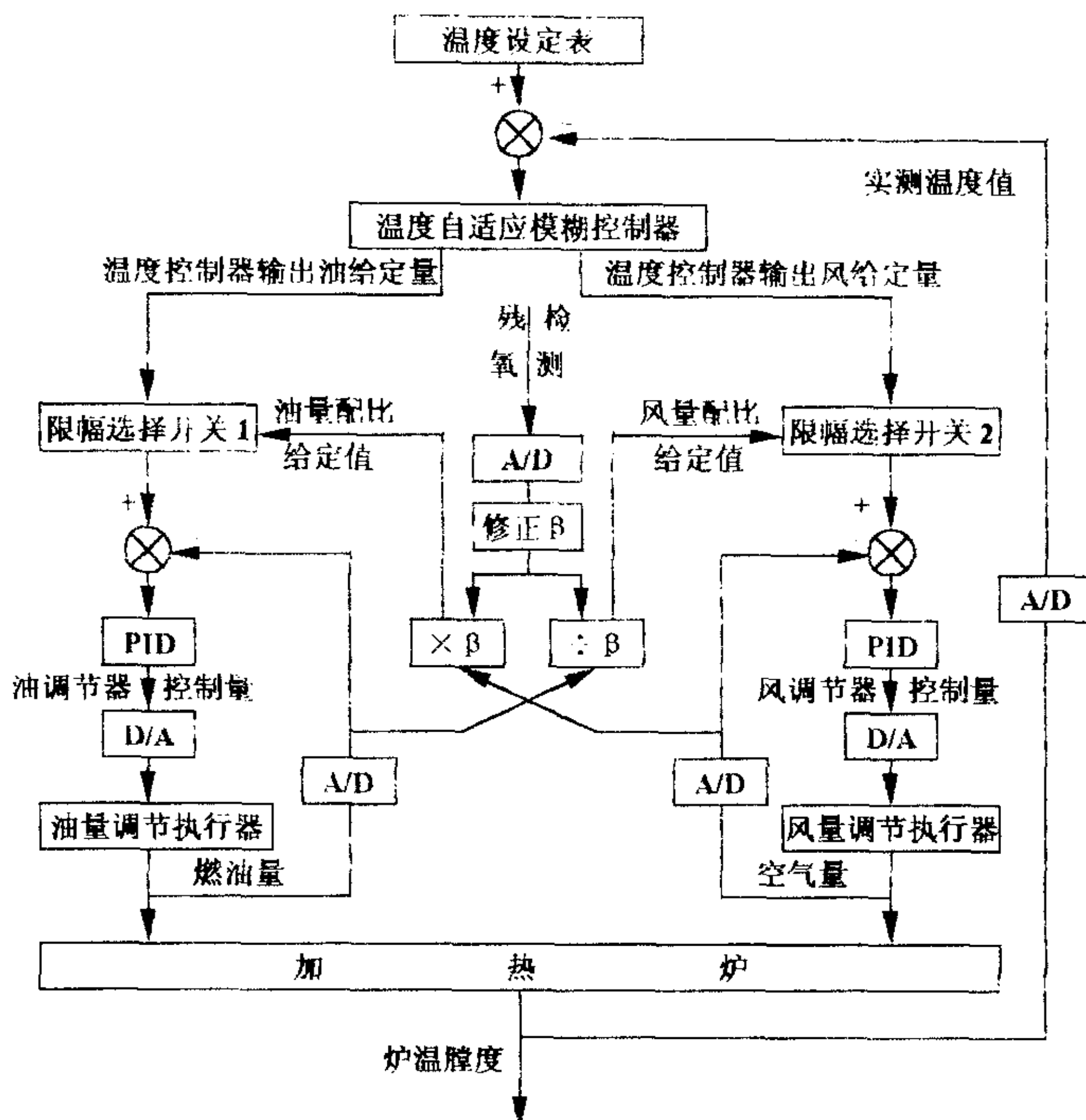


图 4-2 加热炉均热段炉温控制原理方框图

2. 温度自适应模糊控制器

由于加热炉是个复杂系统，难以建立精确的数学模型，故本文设计了温度自适应模糊控制器，对炉温进行控制，有关它的具体论述参见第五章。

在加热炉各段炉温的控制中，各段炉温不直接控制空气和燃料的需要量，它的输出是各段控制供风量和供油量的给定值。

3. 限幅选择开关 1

当工作段负载变化时,温度自适应模糊控制器燃油量输出也发生变化,限幅选择开关 1 的主要功能是将温度自适应模糊控制器输出的燃油量同由实测空气量除以空燃比所得的燃油配比量比较后,选择一个较低值作为燃油量控制的给定值。

4. 限幅选择开关 2

当工作段负载变化时,温度自适应模糊控制器空气量输出也发生变化,限幅选择开关 2 的主要功能是将温度自适应模糊控制器输出的空气量同由实测燃油量乘以空燃比所得的空气配比量比较后,选择一个较高值作为空气量控制的给定值。

5. 燃油量、空气量 PID 控制器

为了保证燃油和空气量能够快速、稳定地跟随加热炉炉温的变化,本文采用了 PID 控制器对其进行控制。有关它的设计详见本章第二节。

第二节 基于 PID 控制算法的流量、压力控制

由于加热炉炉温是分段控制的,各段的供风量和供油量是由总风管和总油管输送的,只有确保总风压和总油压的稳定,才能保证各段供风量和供油量的稳定,为此,本文设计了总风压和总油压 PID 控制系统。

炉膛压力也是影响加热炉炉温和燃烧热效率的一个因素,本文因此也设计了炉膛压力 PID 控制系统。

在每段炉温控制系统中,燃油量和空气量也采用了 PID 控制。

上述各种被控对象的控制原理是相同的,下面以炉膛压力 PID 控制系统为例进行说明。

炉膛压力 PID 控制系统框图如图 4-3 所示。

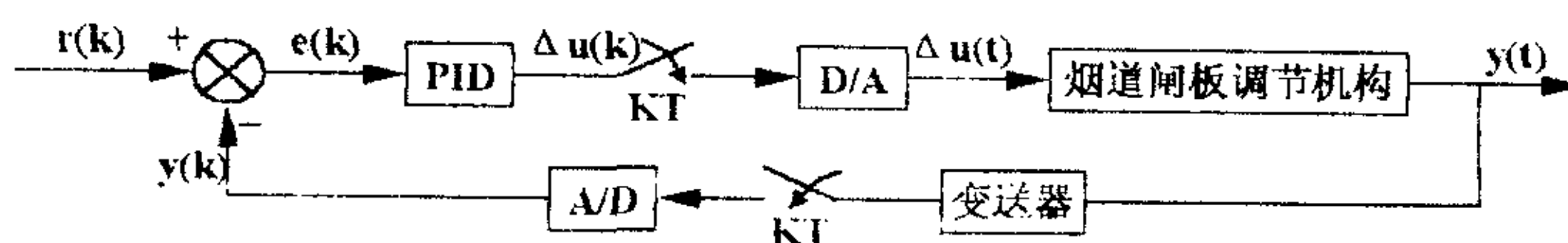


图 4-3 炉膛压力控制系统方框图

图中:

- 1、 $r(k)$ — 炉膛压力给定值；
- 2、 $e(k)$ — PID 控制器的输入值；
- 3、KT — 采样开关；
- 4、 $\Delta u(k)$ — PID 控制器输出的控制量；
- 5、 $\Delta u(t)$ — 烟道闸板调节机构控制量；
- 6、 $y(t)$ — 炉膛压力；
- 7、 $y(k)$ — 炉膛压力检测反馈量；

由于烟道闸板调节机构只需要输入控制量的增量，同时为了避免调节机构频繁动作及因此所引起的系统振荡；以及开工、停工引起的系统过量超调，固本系统的 PID 控制器采用了带死区的积分分离增量式 PID 控制算法。其控制算法流程图如图 4-4 所示。

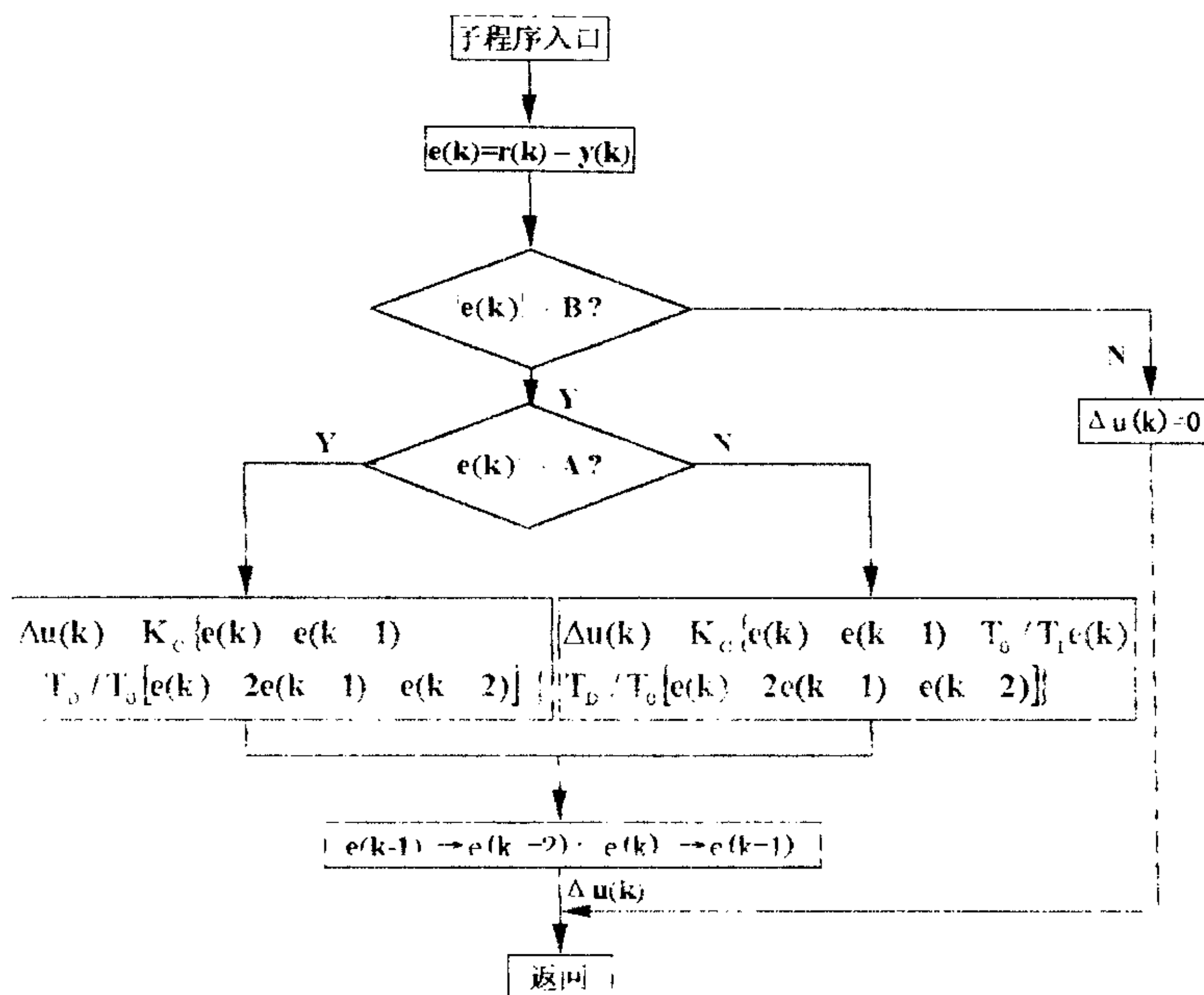


图 4.4 PID 算法流程图

第三节 计算机软件系统设计

一、控制系统对软件的要求

由于加热炉的加热过程是个复杂的热工过程，其影响因素很多，因此，在使用计算机进行控制时，软件须完成以下工作：

1. 确保在指定时间内采集各种数据，并保证其准确性。
2. 快速完成各种数值处理和运算，及时发出控制量。

4. 能及时反映各种不正常工况。

二、 软件设计时的几种处理方法

针对上面的要求, 本文分别采取了相应措施。

采样数据的真实可靠, 在控制系统中是至关重要的。在软件编程中, 对每个采样点都连续采集 5 次, 排序后, 剔除最大和最小值 2 个, 其余 3 个求平均值, 使计算机得到的信号更准确真实。在采集的信号与前值相差较大时, 计算机及时报警, 提醒工作人员检查处理, 这样可避免因外围设备的故障影响系统的正常工作。

在系统软件设计中也考虑到了各种检测仪表可能出现的损坏和故障情况, 从而进行各种相应处理和修正。具体方法是: 给各采样平均值定一个较大的正常范围, 当超过此范围时, 就认为该检测元件损坏。在计算时根据具体的仪表分别采用赋固定值或剔除的办法。如当热电偶损坏时, 就采取将这支热电偶剔除的办法; 而对残氧仪的损坏, 就采用给空燃比赋一固定值的办法。

三、 采样周期的确定

严格地讲, 采样周期应按采样定理来选取, 即要使采样信号不失真, 则采样频率 ω 应大于控制对象频谱中所包含的最高频率 $\omega_{\max}$ 的两倍, 即

$$\omega \geq 2\omega_{\max}$$

但实际应用中存在着被控对象频谱中最高频率不好确定的问题。

采样周期的选择与众多因素有关, 比较明显的因素有:

- (1) 对象所要求的动态品质;
- (2) 受控对象的动态特性;
- (3) 扰动信号的频谱;
- (4) 控制算法和计算机特性;
- (5) 传感器和执行机构特性;
- (6) 计算量和成本。

目前, 由于还没有一个在理论上和实践上都得到公认的选择采样周期的

简便方法，所以一般是根据经验选择大概的采样周期，然后在实践中最后确定采样周期。

对于本文所控制的对象，根据经验，炉温的采样周期定为 30s；燃油量、空气量、炉膛压力、残氧量、总风压、总油压采样周期均定为 5 s。

四、 控制系统软件流程图

控制系统软件主流程图见图 4-5。

控制系统炉温控制子程序流程图见图 4-6。

控制系统总风压、总油压、炉膛压力控制子程序流程图见图 4-7。

流量控制子程序流程图见图 4-8。

在实时控制程序中，A/D、D/A 转换都是调用了子程序来完成的。在 A/D 转换中进行了数字滤波。数字滤波的方法一般有如下五种：

1. 算术平均值法；
2. 系数滤波法；
3. 加权平均值法；
4. 有限记忆平均值法；
5. 中位值法。

在本论文中采用的是算术平均值法。在采样时，连续采集五次，去掉最大值和最小值，然后将其余的三个值求平均。其程序流程图见图 4-9 采样子程序流程图。

D/A 转换子程序流程图见图 4-10。

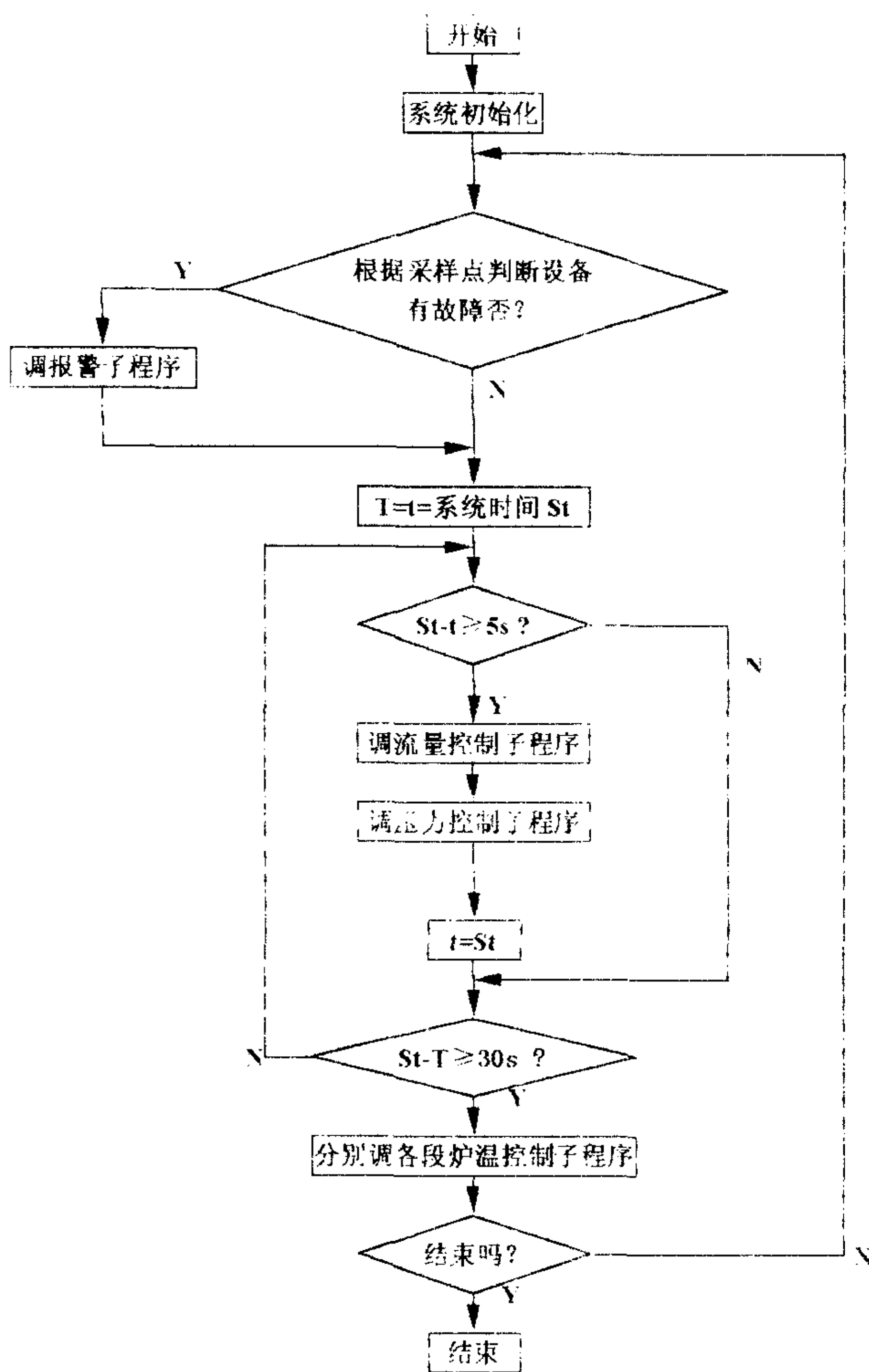


图 4-5 控制系统主程序流程图

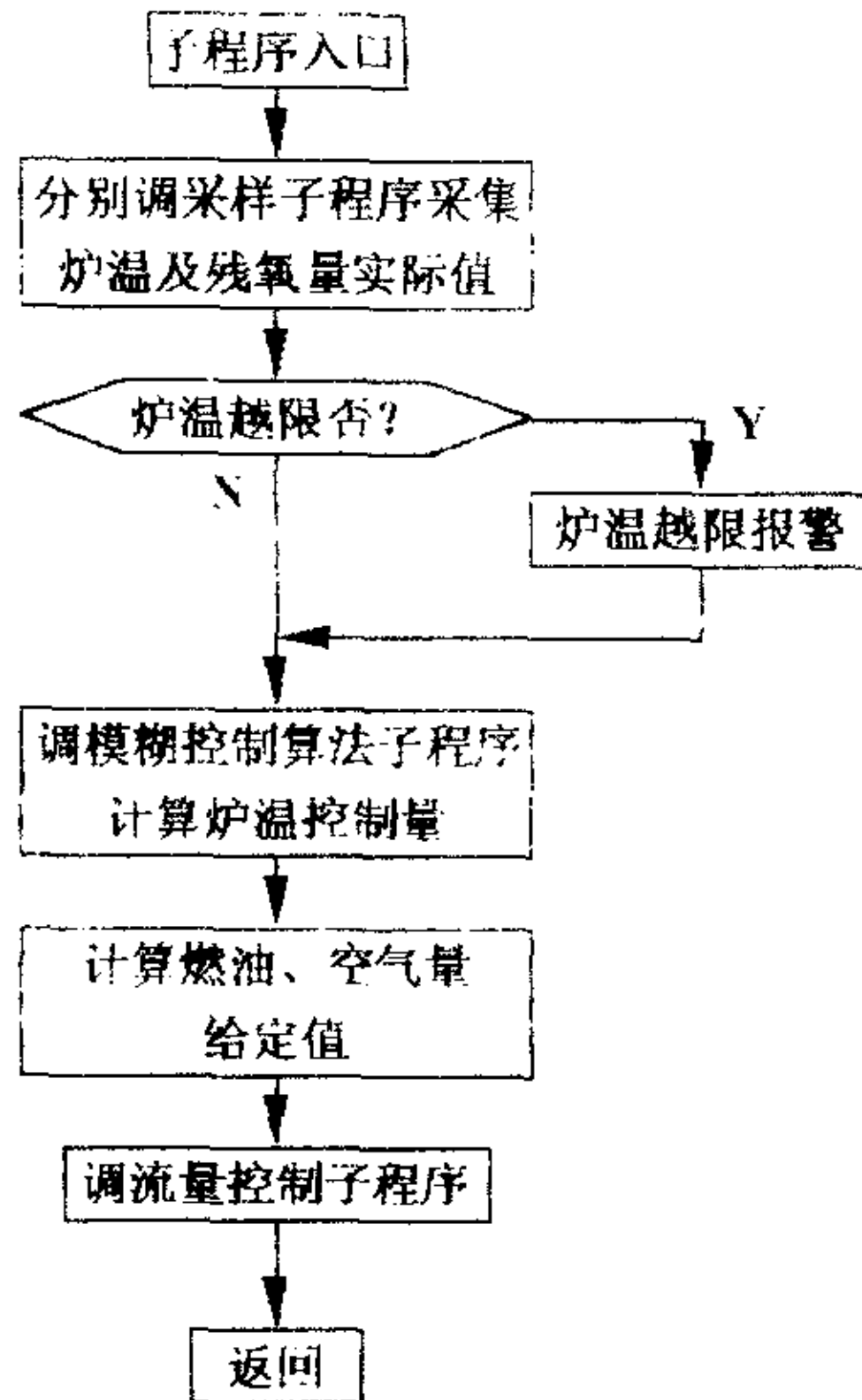


图 4-6 炉温控制子程序流程图

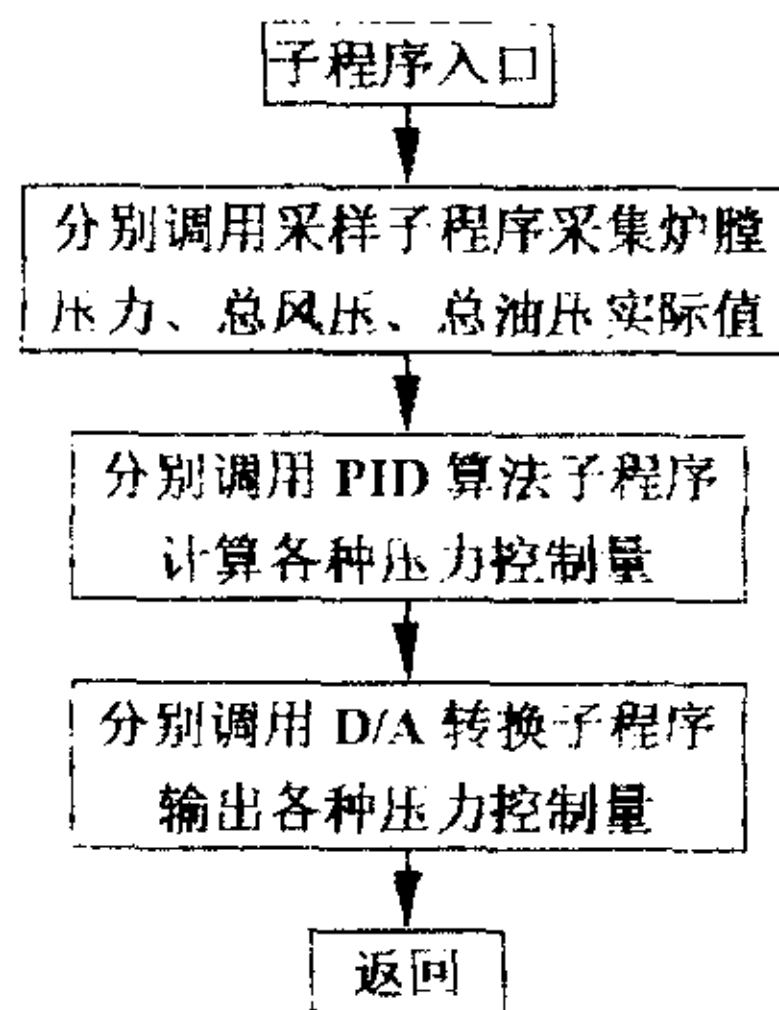


图 4-7 炉膛压力、总风压、总油压控制子程序流程图

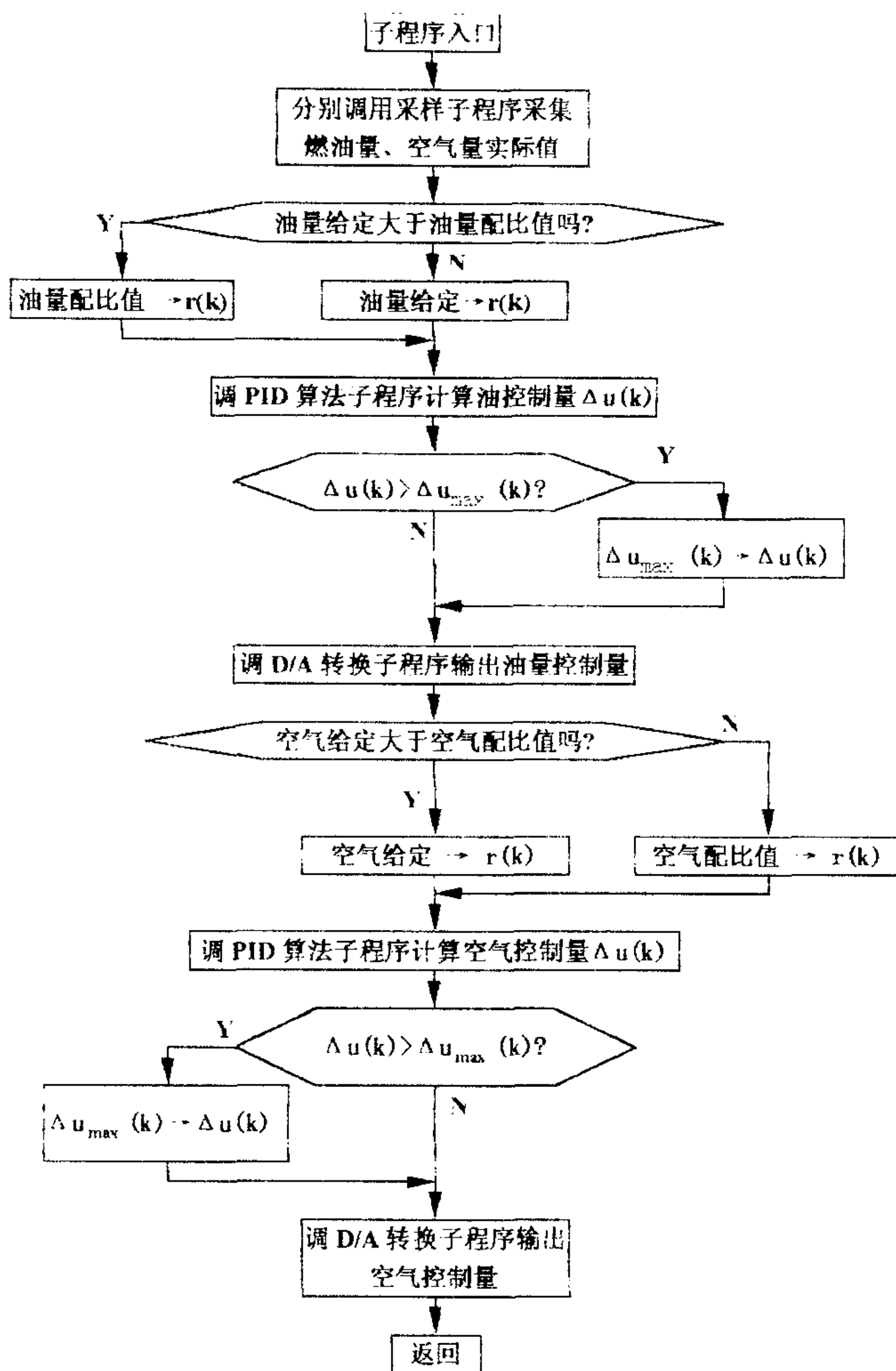


图 4-8 流量控制子程序流程图

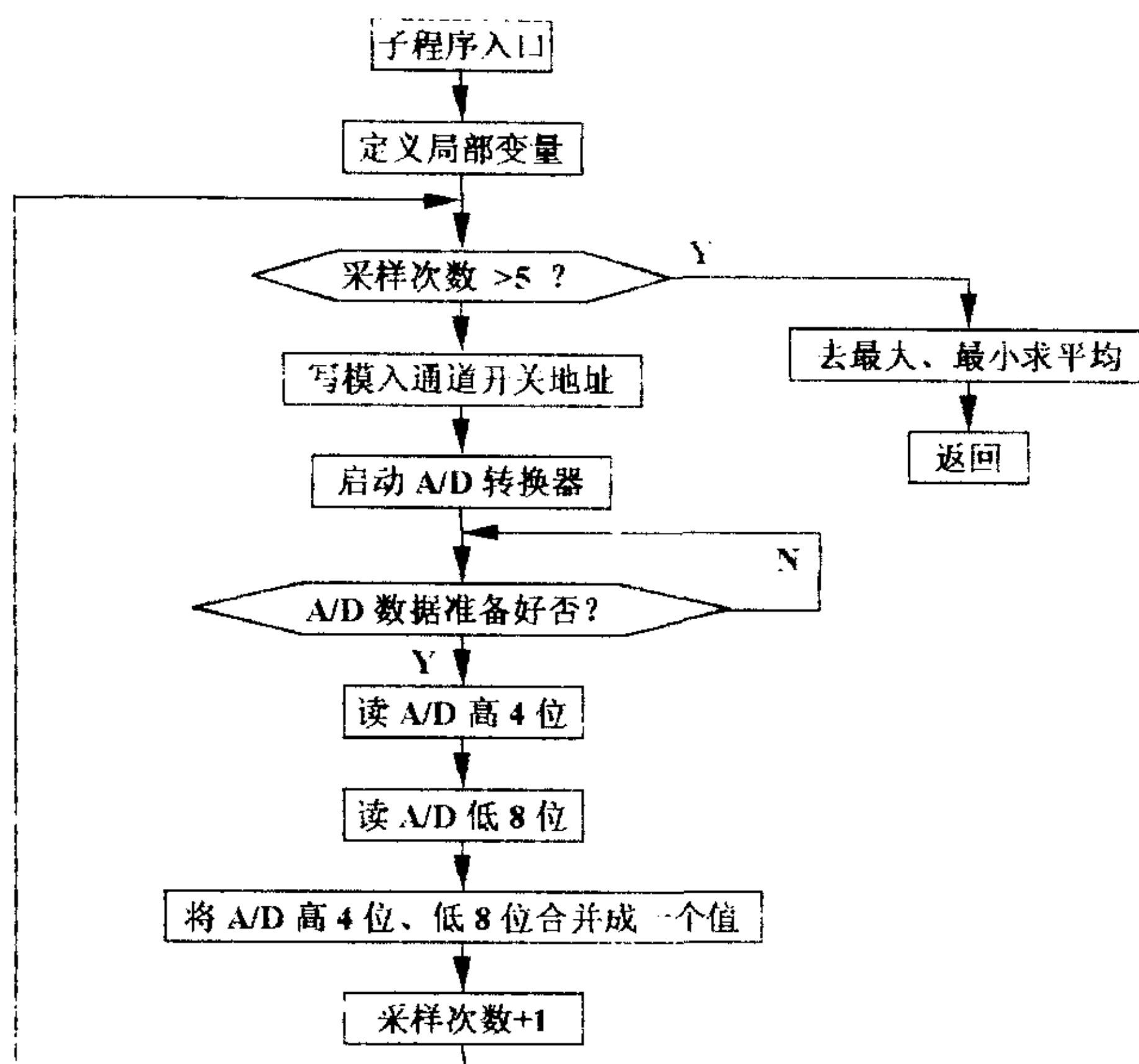


图 4-9 采样子程序流程图

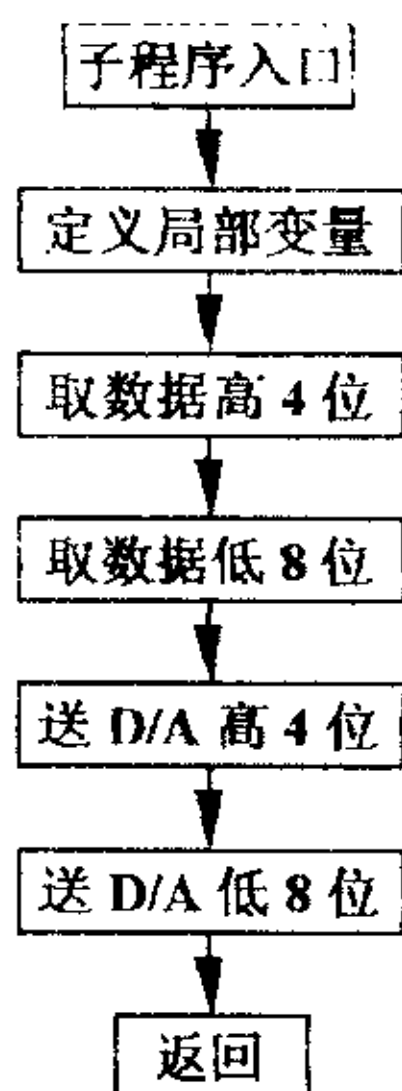


图 4-10 D/A 转换子程序流程图

第四节 计算机硬件系统简介

本节就加热炉计算机控制系统中硬件系统作一些简要介绍。

由于轧钢车间的环境比较恶劣，振动强烈、噪声大、粉尘大、电磁干扰强烈、温度高等不利条件，所有这些不利于计算机控制的因素，都要求计算机具有较高的可靠性和较强的抗干扰能力，以便计算机能够抵御各种不利因素的影响。因此在计算机硬件的选择时就充分地考虑了上述因素。

计算机硬件系统结构原理图如图 4-11 所示。

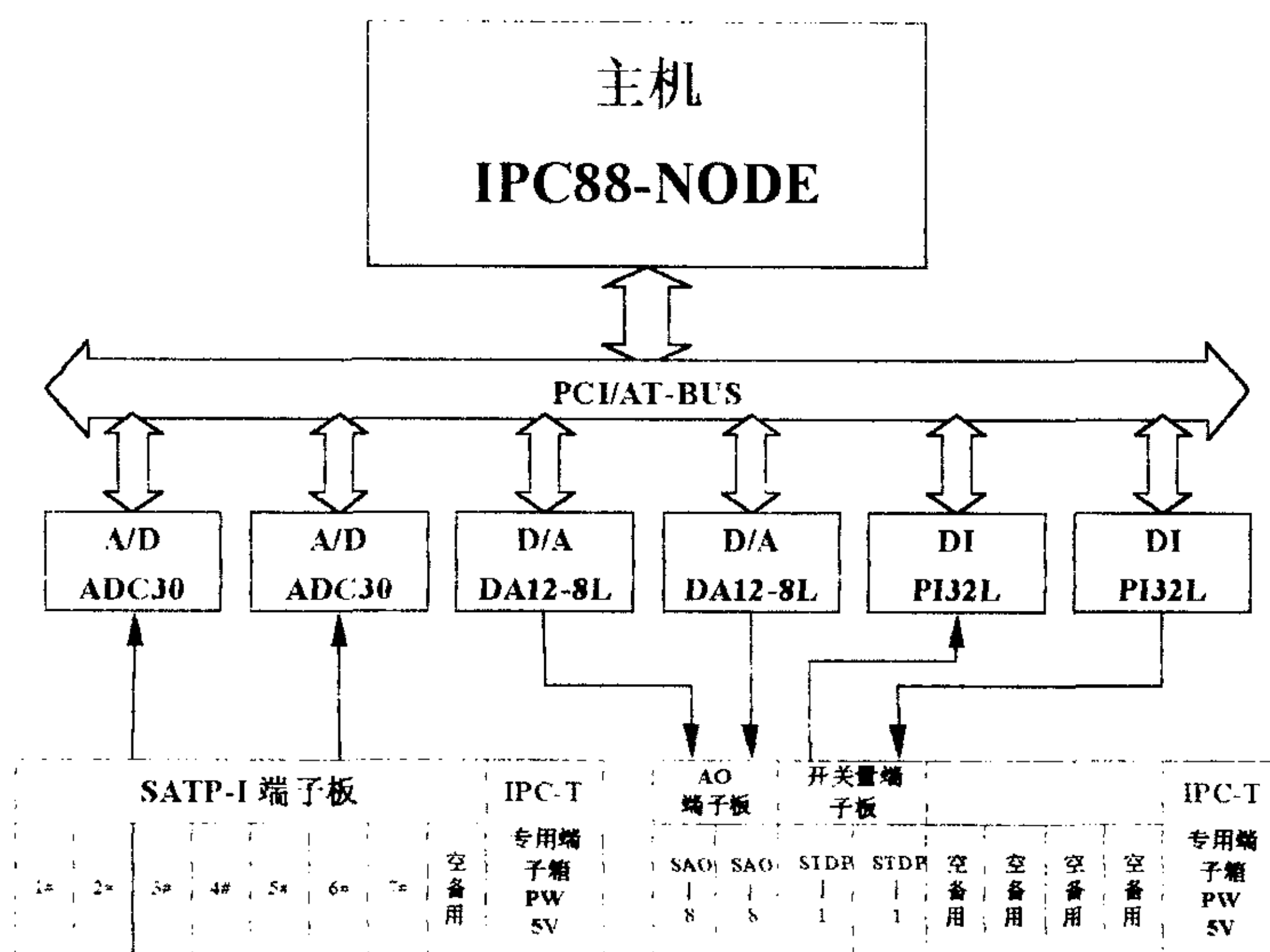


图 4-11 计算机硬件系统结构简图

计算机硬件系统主要由主机 IPC88-NODE（工控机，P5/100）、A/D 卡（ADC30）、D/A 卡（DA12-8L）、DI 卡（PI32L）、DO 卡（PO32L）、专用端

子箱 (IPC-T)、全隔离 (4~20) mA/ (1~5) V 端子板 (SATP-I)、全隔离输出底板 (SAO-8)、4~20mA 隔离输出模块 (5B39-01)、开关量端子板 (STDP-I)、系统隔离电源 (PIF-600) 等组成。

第五章 模糊控制在炉温控制中的应用

第一节 模糊控制的基本工作原理

前面讲过,由于工业过程的不确定性、非线性等原因,精确的数学模型极难建立,于是人们努力探索,绕过精确数学模型的建立来对系统进行控制的方法,其中之一就是以模糊集理论为基础的模糊控制。

模糊控制系统原理方框图如图 5-1 所示:

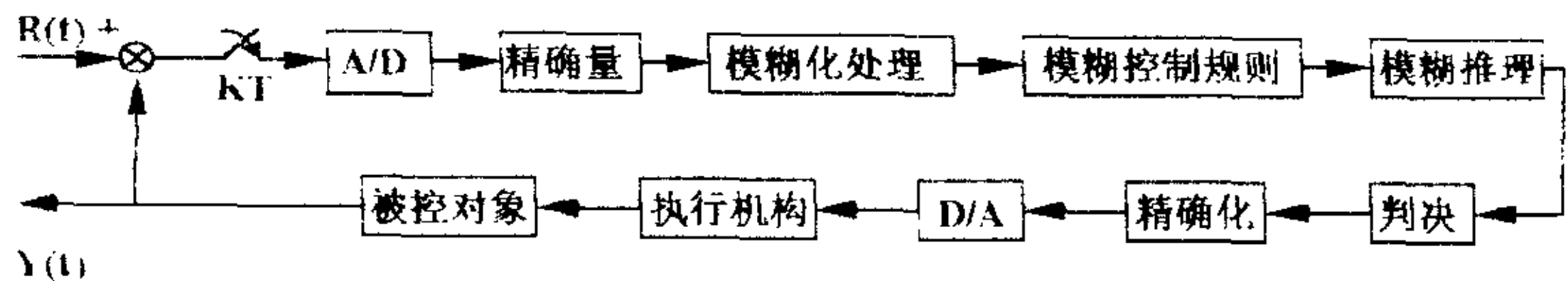


图 5-1 模糊控制系统原理方框图

图中: 1、 $R(t)$ — 模糊控制系统给定值; 2、 KT — 采样开关; 3、 $Y(t)$ — 被控量;

1. 由系统输出的观测量 $Y(t)$ 和给定值 $R(t)$, 经过采样和 A/D 转换得到一个确定的数字量。
2. 精确量在系统中的实际变化范围称为基本论域, 它和语言变量模糊状态的论域往往不一致的, 因此, 必须经过模糊化。

输入的模糊化为:

$$\tilde{E}(K) = \frac{e(k)}{G_e} \quad (5-1)$$

$$\tilde{E}_c = \frac{e_c(k)}{G_c} \quad (5-2)$$

式(5-1)和(5-2)中

G_e 、 G_c — 量化因子;

$e(k)$ 、 $e_c(k)$ — 误差及误差的变化基本论域;

$\tilde{E}(K), \tilde{E}_c(K)$ —— 误差及误差的变化模糊状态基本论域。

此外，每次采样经模糊控制算法给出的控制量（精确量）还不能直接控制对象还必须将其转换到为控制对象能接受的基本论域中去。即

$$k_u = \frac{y_u}{1} \quad (5-3)$$

$$y_{ui} = k_u \bullet l_j \quad (5-4)$$

式(5-3)和(5-4)中

k_u —— 比例因子；

y_u —— 输出的基本论域；

1 —— 输出的模糊状态论域；

l_j —— 输出的模糊状态论域中的一个元素；

y_{ui} —— 输出的基本论域中的一个精确量；

3. 控制规则也即控制策略的选择是非常关键的一步，因为只有选择恰当的控制规则，才能很好的体现有经验操作人员的控制策略。以获得较好的控制效果，使系统既能保证响应的快速性又能保证系统的稳定性。

所谓控制策略就是一些不同条件的推理语句。

4. 所谓模糊推理就是根据某一采样时刻 KT 所得的输入模糊量，由控制器推理判断，现在该用决策集中哪一条进行决策，模糊子集具体运算由输入模糊集与控制算法模糊关系 R 合成运算实现。

对一维输入决策结果为：

$$\tilde{y}(k) = \tilde{E}(k) \circ R \quad (5-5)$$

对二维输入决策结果为：

$$\tilde{y}(k) = [\tilde{E}(k) \cdot \tilde{E}_c(k)] \cdot \tilde{R} \quad (5-6)$$

5. 模糊决策所得的是一个增量型决策，是一个模糊集，它包含所决定的决策值的各种信息，即反映了某一语言控制不同取值的组合。通常，被控对象只能接受一个确切的控制量，因此必须从决策值模糊集中判断出一个确切的清晰量，（一般为最大隶属度原则），然后加到被控对象上去，判决即是从模糊集到普通集合的一个映射，是一个模糊量变成清晰量的过程

第二节 模糊控制方法论述

在模糊控制系统中，模糊控制的性能对系统的控制性能影响很大，随着模糊控制理论发展，产生了许多模糊控制的方法，有纯粹模糊控制方法、模糊控制同经典理论相结合的复合控制方法。

一、纯粹模糊控制方法

在纯粹模糊控制方法中，不同的模糊控制方法的区别主要在模糊控制规则的建立上，也就是说在建立模糊控制规则时，如何才能更好的反映实际情况。因此，建立模糊控制规则可分为直接描述法和解析描述法。

1. 直接描述法

在直接描述法模糊控制器的设计中，控制规则是将专家、技术人员以及现场优秀操作工人的经验用模糊条件语句描述出来，然后经过模糊关系合成运算，得到模糊控制规则表，在实时控制中根据输入变量通过查询模糊控制规则表得到输出量。用这种方法设计出来的模糊控制器的优点是设计比较简单、控制性能比较好。但应该指出的是，这种控制器的模糊控制表由输入输出变量及其论域和模糊变量的赋值表决定，一旦模糊控制表确定之后，这种模糊控制器的控制规则就固定不变。对于不同的被控对象，简单的模糊控制器采用不变的控制规则就不能获得预期的控制效果。

2. 解析描述法

在解析描述法模糊控制器的设计中控制规则可以用与输入变量有关的表达式表达，形成控制规则表。

表达式可分为带可调因子和不带可条因子两种。

我们假设输入变量误差 E 、误差的变化率 C 及控制量 u 的论域均取为

$$\{E\}=\{C\}=\{-3,-2,-1,0,1,2,3\}$$

则对于某一特定对象不带加权因子的控制规则的解析表达式为：

$$u = -\frac{(E + C)}{2} \quad (5-7)$$

带加权因子 α 的控制规则的解析表达为：

$$u = -(\alpha E + (1 - \alpha)C) \quad (5-8)$$

通过调整 α 值的大小，可以改变误差和误差变化率的不同加权程度，当被控对象阶次较底时，应该对误差的加权值大于对误差变化率的加权值；相反，当被控对象阶次较高时，对误差变化的加权值要大于对误差的加权值。

带有一个加权因子 α 可调整模糊控制规则的模糊控制器，虽然可以改变的大小调整控制规则，但是 α 的值一旦选定，在整个控制过程中就不再改变，即在控制规则中，对误差与误差变化的加权固定不变。应该指出的是，模糊控制系统在不同的状态下，对控制规则中误差 E 与误差变化 C 的加权程度一般来说应该有不同要求。对二维模糊控制系统而言，当误差较大时，控制系统的任务主要是消除误差，这时，对误差在控制规则中的加权应该大些；相反，当误差较小时，此时系统已接近稳态，控制系统的主要任务是使系统尽快稳定，为此必须减小超调，这样就要求在控制规则中误差变化的作用大些。这些要求只靠一个固定的加权因子 α 难以满足，于是考虑在不同的误差等级引入不同的加权因子，以实现模糊控制规则的自调整。因此就产生了带自调整因子解析描述表达式：

$$u = \begin{cases} -(\alpha_1 E + (1 - \alpha_1)C) & E = \pm 1, 0 \\ -(\alpha_2 E + (1 - \alpha_2)C) & E = \pm 2, \pm 3 \end{cases} \quad (5-9)$$

或

$$u = \begin{cases} (\alpha_0 E + (1 - \alpha_0) C) & E = 0 \\ -(\alpha_1 E + (1 - \alpha_1) C) & E = \pm 1 \\ -(\alpha_2 E + (1 - \alpha_2) C) & E = \pm 2 \\ -(\alpha_3 E + (1 - \alpha_3) C) & E = \pm 3 \end{cases} \quad (5-10)$$

必须指出,随着误差 E 、误差变化 C 及控制量 u 的论域量化等级增加,加权因子的个数也相应增加,也增加了设计的烦琐程度。

用这种方法设计出来的模糊控制器的优点是设计时控制规则表容易调整,比较容易对不同的被控对象都能获得满意的控制效果。缺点是模糊控制解析表达式不容易全面反映现实中人的行为。

二、模糊控制同经典理论相结合的复合控制方法

纯粹模糊控制系统也存在着一些诸如稳态精度难以令人满意、对较大纯滞后环节控制能力较弱的不足。因此就产生了模糊控制和经典理论相结合的复合控制方法。

常规的二维模糊控制器是以误差和误差变化做为输入变量,因此,这种控制器具有比例—微分控制作用,而缺少积分作用。用这样的模糊控制器组成的模糊控制系统的动态性能较佳,而稳态性能不能令人满意。众所周知,在经典控制理论中,积分控制作用能消除稳态误差,但动态响应响应慢,比例控制作用动态响应快,而比例积分控制作用既能获得较高的稳态精度,又能具有较快的动态响应速度。因此,把 PI 控制策略引入 Fuzzy 控制器,构成 Fuzzy—PI (或 PID) 复合控制,是改善模糊控制器稳态性能的一种有效途径。这种复合控制策略是在大偏差范围内采用模糊控制,在小偏差范围内转换成 PI (或 PID) 控制,二者的转换由微机程序根据事先给定的偏差范围自动实现。

许多工业过程都包含纯滞后,克服纯滞后是改善滞后过程控制品质的一个关键问题。从模糊控制原理上讲,它缺乏对具有较大纯滞后对象的控制能力,因此,在模糊控制中引入 Smith 预估控制,是提高模糊控制器对具有纯时间滞后对象控制能力的有效途径。

对于那些时变的、非线性复杂系统采用模糊控制时，为了获得良好的控制效果，必须要求模糊控制具有较完善的控制规则，这些控制规则是人们对被控过程认识的模糊信息的归纳和操作经验的总结。然而，由于被控过程的非线性、高阶次、时变性以及随机干扰等因素，造成模糊控制规则或者粗糙或者不够完善，都会不同程度地影响控制效果。为了弥补这个不足，自然就考虑到模糊控制应向着自适应、自组织、自学习方向发展，使得模糊控制参数或/和规则在控制过程中自动地调整、修改和完善，从而达到最佳的控制效果。

自适应控制器必须同时具备两个功能：

1. 根据被控过程的运行状态给出合适的控制量，即控制功能；
2. 根据给出的控制量的控制效果，对控制器的控制决策进一步改进，以获得更好的控制效果，即学习功能。

因此，自适应控制器是同时执行系统辨识和控制任务的。自适应控制器有各种类型，而自适应模糊控制器的本质是通过对控制器性能的观察，作出控制决策，并用语言形式描述策略。

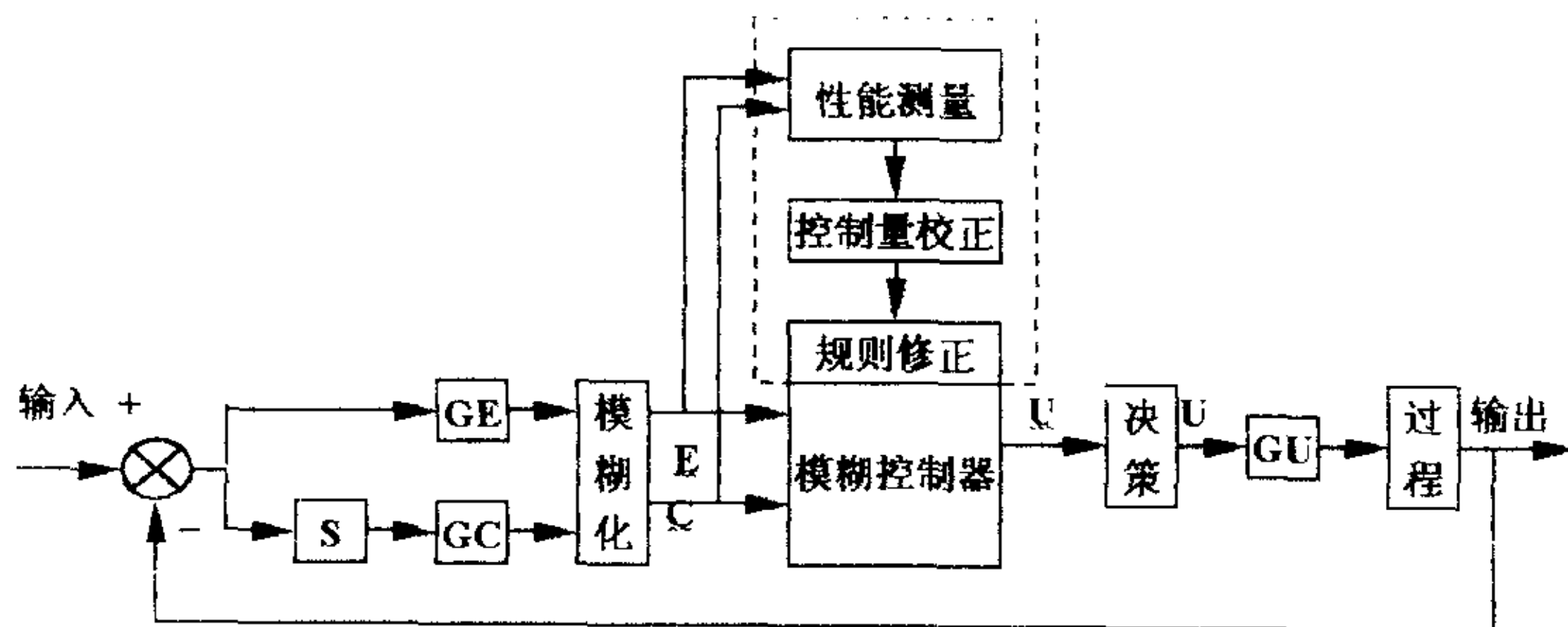


图 5-2 自适应模糊控制器结构简图

自适应模糊控制器在控制被控过程的同时，还要了解被控过程，因此，它实际上是将模糊系统辨识和模糊控制结合起来的一种控制方法。进行系统辨识不是目的，而是一种手段，通过辨识才能更好地了解被控过程，以便使控制

器能跟上过程和环境的变化。这样一来，控制器本身就具有一定的适应变化的能力，或者说自适应模糊控制器具有了一定的智能。

自适应模糊控制器是在简单模糊控制器的基础上，增加了三个模块而构成的一种模糊控制器，其结构如图 5-2 所示。

图 5-2 表示的是单输入单输出的情况。图中虚线框内的三个功能块即为增加的部分，他们分别是：

1. 性能测量——用于测量实际输出特性与希望特性的偏差，以便为控制规则的修正提供信息，即确定输出响应的校正量 P 。
2. 控制量校正——将输出响应的校正量转换为对控制量的校正量 R 。
3. 控制规则修正——对控制量的校正通过修改控制规则来实现。

我们知道，模糊控制器实际上是由计算机实现的一种模糊控制算法，自适应模糊控制器所增加的三个功能块也不例外，都是通过软件来实现各自的功能。所增加的三个环节可以理解为在模糊控制器内部引进了一个“软反馈”，即由软件实现的对控制器自身性能的反馈，通过这个反馈不断地调整和改善控制器的控制性能，以使对被控过程的控制效果达到最佳的状态。

第三节 加热炉炉温模糊控制的基本思想

为保证临近段末、炉末的钢坯加热质量及钢坯本身的质量，在现有条件下，根据工艺所给条件，应着重控制各段炉温尤其是均热段炉温。

其基本思想为：

1. 总结专家和现场技术人员及优秀操作工人的现场经验。
2. 参照模糊控制结构选取误差及误差变化率作为输入，这样既可克服一维模糊控制动态性能不佳的不足，又能避免由于维数过高而使控制规则过于复杂，实现较困难的缺点。

3. 在上述基础上将误差、误差的变化率的模糊量经合成算法，推得模糊规则表。

4. 模糊控制规则自适应修正。

第四节 设计步骤及方法

本模糊控制器是双输入单输出系统，方框图如图 5-3 所示。

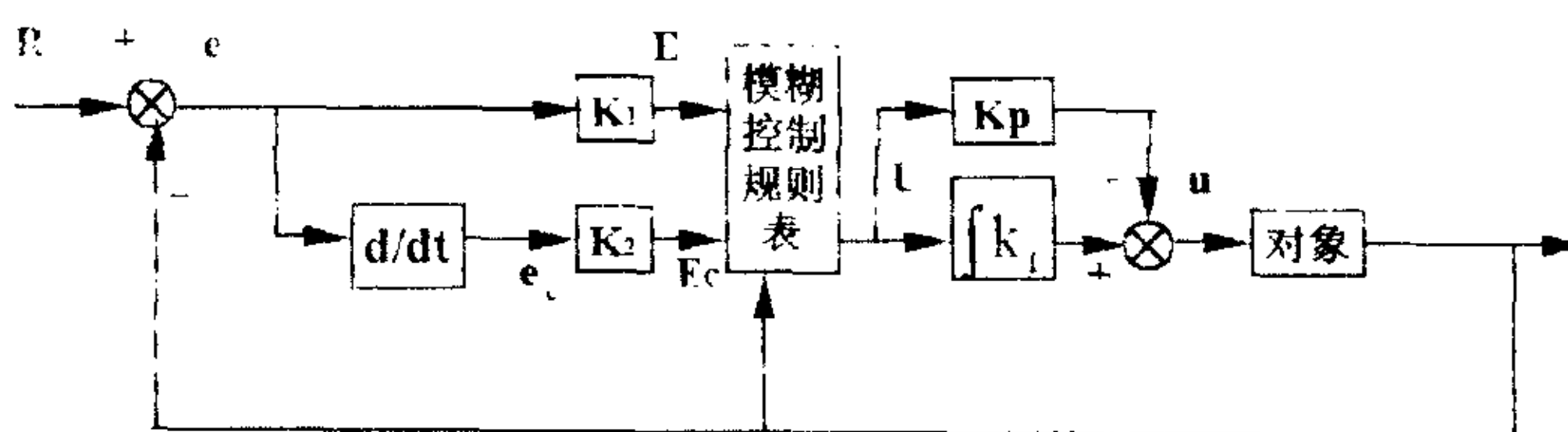


图 5-3 模糊控制系统方框图

图中：

e —— 炉温的偏差的精确量；

e_c —— 偏差变化率的精确量；

E —— 炉温偏差的模糊量；

E_c —— 偏差变化率的模糊量；

U —— 输出的炉温调节模糊量；

u —— 输入的炉温调节精确量；

2. 确定输入，输出变量的模糊状态及其论域

1、 论域及基本论域的确定

e 和 e_c 的基本论域为：

$e \in \{-60 \sim +60\}$ ；

$e_c \in \{-24 \sim +24\}$ 。

E 和 E_c 的论域为：

$\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$

U 的论域为:

$\{-7,-6,-5,-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5,6,7\}$

2、 确定模糊子集

E_c 和 u 的模糊集为:

$\{NB,NM,NS,O,PS,PM,PB\}$

E 的模糊集为:

$\{MB,NM,NS,NO,PO,PS,PM,PB\}$

在 E 的模糊集中区分 NO 和 PO , 主要是为了提高稳整精度。

二、 确定模糊变量的赋值表

模糊变量误差 E , 误差变化率 E_c 及控制量 u 的模糊集和论域确定后, 须对模糊语言变量确定隶属函数, 即对所谓模糊变量赋值, 就是确定论域内元素对模糊语言变量的隶属, 如:

PB_E	0.1	0.4	0.8	1.0
	3	4	5	6

误差模糊变量 E 的赋值表、误差变化模糊变量 E_c 的赋值表及控制模糊变量 U 的赋值表分别如表 5-1、5-2、5-3 所示。模糊变量 E , E_c 及 U 的赋值是根据加热炉的实际情况具体确定。

模糊变量最大等级为 $M_n=6$, 基本论域边界 $e_n=60, e_{cn}=24$, 则模糊量化因子可由下式确定:

$$K_1=M_n/e_n \quad (5-11)$$

$$K_2=M_n/e_{cn} \quad (5-12)$$

表 5-1 模糊变量 E 赋值表

μ E	-6	-5	-4	-3	-2	-1	-0	+0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1.0
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.8	1.0	0.5	0.1	0	0
PO	0	0	0	0	0	0	0	1.0	0.6	0.1	0	0	0	0
NO	0	0	0	0	0	0.1	0.6	1.0	0	0	0	0	0	0
NS	0	0	0.1	0.5	1.0	0.8	0.3	0	0	0	0	0	0	0
NM	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1.0	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 5-2 模糊变量 Ec 赋值表

μ Ec	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1.0
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.0	0.7	0.2	0	0
O	0	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0
NS	0	0	0.1	0.7	1.0	0.9	0	0	0	0	0	0	0
NM	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1.0	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 5-3 模糊变量 U 赋值表

μ U	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1.0
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.4	1.0	0.8	0.4	0.1	0	0	0
O	0	0	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0	0
NS	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1.0	0.4	0	0	0	0	0	0	0
NM	0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1.0	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

三、建立模糊控制规则

基于上述模糊控制的基本思想，控制规则可用下述语句描述：

(1) if $E=NB$ or NM and $E_c=NB$ or NM then $u=PB$;

or

(2) if $E=NB$ or NM and $E_c=NS$ or 0 then $u=PB$;

or

(3) if $E=NB$ or NM and $E_c=PS$ then $u=PM$;

or

(4) if $E=NB$ or NM and $E_c=PM$ or PB then $u=0$;

or

(5) if $E=NS$ and $E_c=NB$ or NM then $u=PM$;

or

(6) if $E=NS$ and $E_c=NS$ or 0 then $u=PM$;

or

(7) if $E=NS$ and $E_c=PS$ then $u=0$;

or

(8) if $E=NS$ and $E_c=PM$ or PB then $u=NS$;

or

(9) if $E=NO$ or $E=PO$ and $E_c=NB$ or NM then $u=PM$;

or

(10) if $E=NO$ or PO and $E_c=NS$ then $u=PS$;

or

(11) if $E=NO$ or PO and $E_c=0$ then $u=0$;

or

(12) if $E=NO$ or PO and $E_c=PS$ then $u=NS$;

or

(13)if E=NO or PO and Ec=PM or PB then u=PM;

or

(14)if E=PS and Ec=NB or NM then u=PS,

or

(15)if E=PS and Ec=NS then u=0;

or

(16)if E=PS and Ec=0 or PS then u=NM;

or

(17)if E=PS and Ec=PM or PB then u=NM;

or

(18)if E=PS or PB and Ec=NB or NM then u=0;

or

(19)if E=PM or PB and Ec=NS then u=NM;

or

(20)if E=PM or PB and Ec=0 or PS then u=NB;

or

(21)if E=PM or PB and Ec=PM or PB then u=NB;

四、建立模糊控制表

上述描写模糊控制的 21 条模糊条件语句之间是或的关系，由第一条语句所确定的控制规则计算出 u_1 。

由第一条语句所确定的模糊关系可用式(5-13)写出，即：

$$R_1 = [(NB_E + NM_E) \times PB_u] \circ [(NB_{EC} + NM_{EC}) \times PB_u] \quad (5-13)$$

如果令此刻采样所得到的实际误差量为 e 且误差的变化为 e_c ，由式(5-13)可得控制量为：

$$u_1 = e \cdot [(NB_E + NM_E) \times PB_u] \bullet e_c = [(NB_{EC} + NM_{EC}) \times PB_u] \quad (5-14)$$

对于 e 及 e_c 的隶属函数值对应于所量化的等级上取 1，其余均取为零

值, 这样可使上式简化为:

$$u_1 = \min \{ \max \{ \mu_{NB_E}(i), \mu_{NM_E}(i) \}, \max \{ \mu_{NB_{EC}}(j), \mu_{NM_{EC}}(j) \}, \mu_{PB_1}(x) \} \quad (5-15)$$

式中, $\mu_{NB_E}(i), \mu_{NM_E}(i)$ 是模糊集合 NB_E 和 NM_E 第 i 个元素的隶属度, 而 $\mu_{NB_{EC}}(j), \mu_{NM_{EC}}(j)$ 是模糊集合 NB_{EC} 和 NM_{EC} 第 j 个元素的隶属度。

同理可得其余各条语句条件下的控制量。

则控制量为模糊集合 u

$$u = u_1 + u_2 + \cdots + u_{21} \quad (5-16)$$

采用隶属度最大原则将模糊控制量转换为精确量即可。

五、 将上述结果离线做成表 5-4(查询表), 以便实时控制时使用。

六、 精确化

上述方法得到的模糊量必须精确化。总结现场工人的经验得到 $K_I=4.0, K_P=1.2$, 我们采用下式得到 $m\Delta\tau$ 时刻 $U(m\Delta\tau)$ 的精确量 $u(m\Delta\tau)$

$$u(m\Delta\tau) = K_I U(m\Delta\tau) + K_P [U(m\Delta\tau) - U(m\Delta\tau - \Delta\tau)] \quad (5-17)$$

七、 自适应功能

动态地测量和修正 u , 可以使受控量尽快接近给定值, 改善输出特性。

令:

$$R = E(m\Delta\tau) + E_C(m\Delta\tau) \quad (5-19)$$

$$S = E(m\Delta\tau - \Delta\tau) + E_C(m\Delta\tau - \Delta\tau) \quad (5-20)$$

$$TT = R - S \quad (5-21)$$

根据 R, S, TT 的值和符号正 u 的值, 具体如表 5-5 所示。

八、 自适应模糊控制器算法流程图

自适应模糊控制器的控制算法是由计算机的程序实现的。自适应模糊算法流程图如图 5-3 所示。

表 5-4 模糊控制查询表

U E _c	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	-1	+2	+3	+4	+5	+6
-6	7	6	7	-6	7	7	7	4	4	2	0	0	0
-5	6	6	6	6	6	6	6	4	4	2	0	0	0
-4	7	6	7	6	7	7	7	4	4	2	0	0	0
-3	7	6	6	6	6	6	6	3	2	0	-1	-1	-1
-2	4	4	4	5	4	4	4	1	0	0	-1	-1	-1
-1	4	4	4	5	4	4	1	0	0	0	-3	-2	-1
0	4	4	4	5	1	1	0	-1	-1	-1	-4	-4	-4
+1	4	4	4	5	1	1	0	-1	-1	-1	-4	-4	-4
+2	2	2	2	2	0	0	-1	-4	-4	-3	-4	-4	-4
+3	1	2	1	2	0	-3	-4	-4	-4	-3	-4	-4	-4
+4	0	0	0	0	-3	-3	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6
+5	0	0	0	-2	-4	-4	-7	-7	-7	-6	-7	-6	-7
+6	0	0	0	-2	-4	-4	-7	-7	-7	-6	-7	-6	-7

表 5-5 规则自适应修正表

R,S,TT符号	u的位置	u的变化趋势	u修正值
$R, S \geq 0, TT < 0$	目标区内	指向目标区	不变
$R, S \geq 0, TT < 2$	目标区内	背离目标区	减1
$R, S \geq 0, 0 \leq TT < 2$	目标区内	背离, 变化大	减2
$S \geq 0, R < 0, TT < 0$	越过目标区	由正向负	减1
$S, R < 0, 0 < TT \leq 2$	越过目标区	由正向负, 变化不大	减1
$S, R < 0, TT > 0$	越过目标区	由正向负, 变化大	减2
$S, R < 0, TT < 0$	目标区下方	背离目标区	加1
$S, R < 0, 0 \leq TT < 2$	目标区下方	指向目标区	不变
$S, R < 0, TT \geq 2$	目标区下方	指向目标区	减1

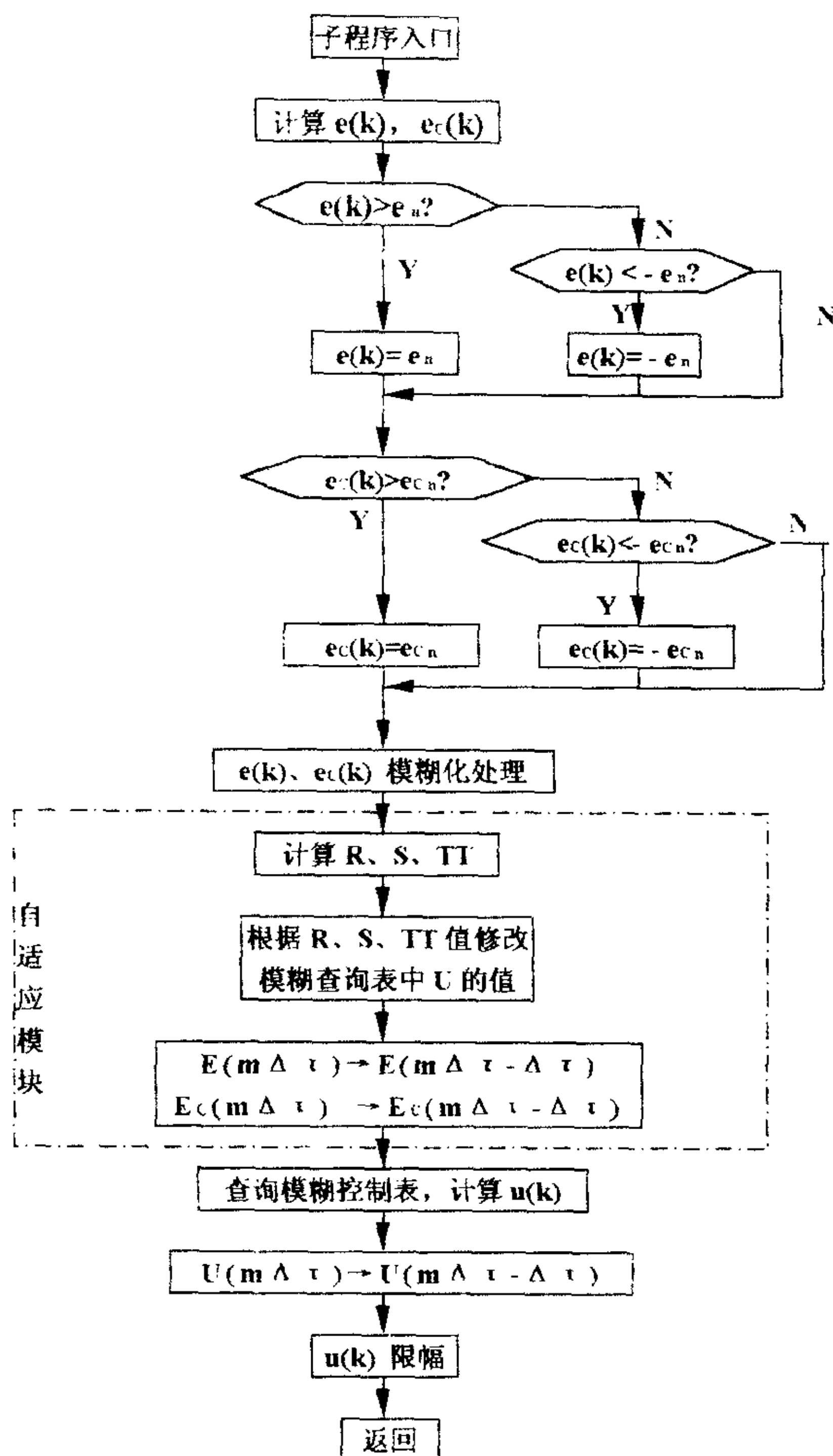


图 5-3 自适应模糊控制器控制算法流程图

第六章 系统实际运行情况简介及结论

、 系统投入运行前后的综合指标分析

系统投入运行后,运行正常,未发生过死机和加热炉冒黑烟现象。我们对系统投入运行后的控制效果进行了统计。统计结果见表 6-1。

表 6-1 使用效果统计表

项 目	比 较	使用计算机前	使用计算机后
炉膛温度:			
上加热段		1000~1300 ℃	1056~1230 ℃
下加热段		1000~1300 ℃	1069~1237 ℃
均热段		1000~1300 ℃	1184~1279 ℃
总风压		7~12 Kpa	9KPa ±10%
总油压		0.4~0.6 Mpa	0.4MPa ±13%
炉膛压力		7~32 Pa	10Pa ±50%
炉子油耗		47.683Kg/t	33.04Kg/t
氧化烧损		1.67%	0.96%

从统计结果可以看出满足了加热炉控制的要求,本系统仅油耗降低这一项,如果每年产量为 40 万吨,则可节油 5600 余吨,每吨油按市场价为 1480 元左右,每年就可产生经济效益 900 万元左右。

、 结 论

本文进行了加热炉风压、油压和炉膛压力的 PID 控制系统和炉温控制系统的设计。

在 PID 控制系统采用积分分离 PID 控制算法,避免了由于给定值大幅突变使系统产生的过量超调和振荡。

在炉温控制系统中,应用模糊控制理论,设计了自适应模糊控制器,绕开了炉温控制中的建模困难的问题,同时通过自适应修正调节量,形成了炉温闭环控制。

通过实践表明, 本系统获得了较好的控制效果, 在一定程度上弥补了以往加热炉控制中的不足。

当然, 炉温自适应模糊控制系统只是初步尝试, 还存在着许多有待探讨的地方。本文所作的尝试旨在能为以后加热炉控制的研究起到参考和促进作用。

致 谢

本论文是在刘建昌副教授和德英高级工程师的悉心指导下完成的，在完成论文的过程中，二位导师给了本人许多关心和帮助，这里谨向二位导师致以最诚挚的谢意。

特别还要感谢在论文完成过程中给予我帮助的东北大学的其他老师，他们的学识渊博、诲人不倦使我受益非浅且深受感动。

此外还要感谢两年多来支持我的领导、同事和同学，他们为论文的完成创造了良好的条件。

参考文献

1. 金以慧主编,《过程控制》,清华大学出版社,1993年第1版
2. 蒋静坪,《计算机实时控制系统》,浙江大学出版社,1992年第1版
3. 何用梅,《现代连续加热炉》,冶金工业出版社,1981年第1版
4. 李洪兴等,《工程模糊数学方法及应用》,天津科学技术出版社,1993年第1版
5. 李士勇,《模糊控制.神经控制和智能控制论》,哈尔滨工业大学出版社,1998年第2版
6. 李膺春 石纯一,《人工智能新进展》,清华大学出版社,1994年第1版
7. 陈来九,《热工过程自动调节原理和应用》,水利出版社,1982年第1版
8. 汪培庄,模糊控制规则的自调整问题,模糊数学,1982年第3期
9. 刘莹等,加热炉智能控制,电子与自动化,1998年第3期
10. 向铁军 彭世则,步进式加热炉计算机控制系统,计算机与自动化,1998年6月
11. 张元生 李庆余,模糊控制器及其应用,系统工程与电子技术,1998年第8期
12. 涂象初 汪培庄,自寻优 Fuzzy PID 调节器与人工智能控制,模糊数学,1985年第3期
13. 顾树生,模糊控制系统稳定性分析及控制器设计,控制与决策,1991年第3期
14. 胡少华,模糊控制规则自生成及其应用研究
15. 成月莉,计算机模糊控制原理及应用,北京航空航天大学出版社,1995年
16. 刘豹,现代控制理论,机械工业出版社,1989年
17. 韩曾晋,自适应控制系统,机械工业出版社,1995年

18. 罗松亮, 卢强, 智能控制与常规控制, 自动化学报, 1994 年第二期
19. 吴宏鑫, 自适应控制技术的发展和应用, 控制理论和应用, 1992 年第二期
20. 周金平等, 无缝钢管厂热轧线加热炉控制系统, 冶金自动化, 1998 年第 5 期