

东北大学
硕士学位论文
首钢中板厂加热炉模糊控制系统设计
姓名：付敬平
申请学位级别：硕士
专业：计算机技术
指导教师：王建辉
2001. 2. 1

摘 要

模糊控制理论作为智能控制的一个分支,近年来发展很快。尤其是将模糊控制理论应用于工业生产中形成的模糊控制技术,更为人们所青睐。本文通过对型钢加热炉热处理工艺的研究,分析了影响加热炉控制的诸多因素、控制质量与生产效益,探讨了加热炉控制中的现状和发展,结合国内外加热炉控制技术研究现状、发展,提出了首钢中板厂加热炉的模糊控制系统的方案,并进行了讨论。

本文首先对加热炉的工艺,节能操作等进行了综述,分析了加热炉结构、热工参数及其操作对象。

针对加热炉计算机控制中存在的对象数学模型难以精确反映生产实际,造成实际使用难以达到预定效果的问题,提出了采用模糊控制技术的方案,并对模糊在线自校正 PID 参数控制器进行了设计和仿真。

关键字: 加热炉, 模糊控制

ABSTRACT

Fuzzy control theory, as a branch of intelligent control, has achieved great development in recent years, and its application in the industrial process is becoming a popular technology. This article studies the structural steel heater and its heat treatment process, analyses the factors which affect its control system, its controlling quality and economic profit. This article researches the actuality and development about the heater's control system, proposes the scheme of the heater's fuzzy control system and discusses it.

In the first place, this article summarizes the heater's technologies and the energy-saving operations, analyses its structure, thermo parameters and its operating object.

In the heater's computer control system, usually, the mathematical model of the target is hard to reflect the process exactly, so that it is hard to get the supposed controlling result. To find a solution to the problem, we adopted the fuzzy control technology to design and mimic a fuzzy on-line self-adjusting PID parameter controller.

Keyword: heater, fuzzy control

第一章 绪 论

1.1 模糊控制的的产生、发展及其特点

现有的自动控制理论（包括经典控制理论和现代控制理论），都有一个共同的特点，即控制器的设计完全依赖于被控对象准确的数学模型，在建立数学模型的基础上，再根据被控对象对控制系统性能指标的要求，设计出各种类型的控制器。因此数学模型的建立，成为摆在工程技术人员面前的一个重要课题，通常建立数学模型的方法有两种：一是从已知的物理化学定律推导而来，二是进行实验，根据被控对象的输入、输出数据，计算得出。无论用哪一种方法，都存在以下两个问题：

（1）在建立数学模型时，为了简化计算方法，一般都要经过很多理想化的假设，如非线性假设为线性，分布参数假设为集中参数，时变假设为定常等，通过假设得到的数学模型虽然简单，但利用这样的数学模型设计、综合的系统，只能是一种近似，由于没有建立精确的数学模型，有时不能令人满意，甚至会产生错误的结论。

（2）在实际工业生产中，影响因素很多，十分复杂。尤其在经济管理、医学、生物学等领域中，影响因素众多，建立精确的数学模型更加困难，甚至是不可能的。尽管目前依靠系统辨识理论，通过各种测试手段和数据处理方法获得了数学模型，但也很难得到确切描述该过程的传递函数或状态方程，且比较复杂，有的甚至用计算机也难以实现。

面对上述两种情况，人们在探索能否在不建立数学模型的情

况下，从实际系统的输入输出数据，参考现场操作人员的运行经验，对系统进行实时控制。这就是智能控制要解决的问题。在工业生产过程中用经典法设计控制系统时，总会遇到一些不明确的或者说模糊的问题。这些模糊性问题是来自两个方面。

- 1) 建立对象模型时具有的模糊性。
- 2) 设计性能指标函数时存在的模糊性。

所谓“模糊”除有“模糊”的概念外，还有“不分明”和“边界不清”的含意。比如：白与黑、胖与瘦、高与低、深与浅等，本应泾渭分明，但在这明显的两极幅度之间，却有不自不黑、不胖不瘦、不高不低、不深不浅的概念。这些“模棱两可”和“不分明”现象是自然界和社会生活中普遍存在的，而这种不分明性被称之为模糊性。由此可见，“模糊”概念是建立在近似推论之上的近似概念。

为了寻求概念划分上不确定现象的思维模式和方法，1965年，美国加州大学伯克利分校的洛特非·扎德（L. A. Zadeh）教授，发表了轰动科坛的著名论文《模糊集合理论》，标志着数学的一个分支——模糊数学的诞生。模糊数学把复杂系统中所呈现的大量模糊现象作为研究对象，把数学从处理两种绝对状态（即绝对发生，概率为1；绝对不发生，概率为0）转移到连续值的逻辑值上来，在适当的限度上相对地加以划分。以此为基础建立了模糊集合的运行、变换理论。模糊理论认为，只要抓住控制事物的主要本质方面，在无关紧要的小问题上“模糊”一点并无妨碍，“能模糊处则模糊”的概念输入电脑，引进控制学说，就产生了逻辑控制。

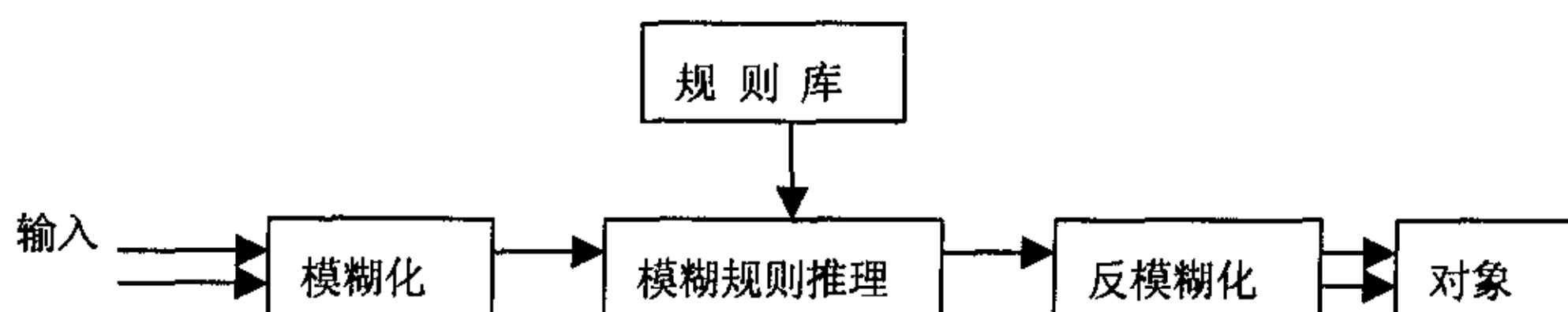
1974年英国伦敦大学的教授马丹尼（Prof. Mamdani）首先把模糊集理论用于锅炉和蒸汽轮机的控制中，效果良好。这一开拓性的工作标志着模糊控制过程的诞生。

随着模糊理论的出现，人们开始应用模糊技术。工业生产是多变复杂的，被控对象客观反映出的现象在大体有三种，即确定的、随机的、和模糊的现象。许多生产工艺，如化工、建材、冶炼等生产环境恶劣、检测条件较为粗糙、生产控制要素之间存在

着严重的非线性、大滞后及强耦合关系，很难找到精确的数量关系，难以建立精确的数学模型，实施满意的控制。对此，传统的控制方式（如 PID 调节等）遇到了巨大的困难，不能收到好的控制品质，许多已投运的过程控制系统不能正常运行，停留在手动状态，工艺控制的实际效果主要是依靠有经验的工程师、操作人员与计算机控制系统共同协作来完成。这些现场人员的智能已成为实际控制系统的重要组成部分，根据他们在实际操作中的经验积累，采取适当对策，就可以取得满意的控制效果。这种情况自然启发人们，如果我们的计算机控制系统能吸收和处理这些人的宝贵经验，则可以大大提高系统的自控水平，使我们利用这种简单而有效的控制方式进行复杂的工艺过程控制。之后，模糊控制的发展主要经历了以下几个阶段：

- (1) 基本模糊控制器的应用阶段；
- (2) 自组织模糊控制器的应用阶段；
- (3) 智能模糊控制器

那么模糊控制主要包括哪些内容呢？它由模糊判断、模糊控制、模糊诊断及模糊设计、模糊决策等方面组成。模糊控制的核心是用自然语言来描述被控系统，利用模糊规则推理对系统的粗略知识进行类似人脑的知识处理，实现对复杂系统的控制决策。一般的控制原理如下图所示。



简言之：对于被控对象输入的精确变量由模糊控制器进行“模糊化”处理，转变成模糊量。事先，模糊控制器用条件命题语句记叙变量之间的关系，形成一个特定的“知识库”。对于特定的模糊变量值，模糊控制器运用模糊规则推理进行类似人脑的运算过

程，作出相应的控制决策，最后通过反模糊化将这种模糊输出转变成精确量输出，完成一个控制动作。模糊控制本质上属于非线性控制，因而对于工业现场大量存在的大滞后、非线性系统，用传统控制方式难以奏效、但人工操作比较好的场合，模糊控制系统则可实现系统的有效控制。

模糊控制工程有以下特点：

- (1) 模糊工程的计算方法虽然是运用模糊集理论进行的模糊算法，但最后得到的控制规律是确定性的、定量的条件语句。
- (2) 在设计系统时不需要建立被控对象的数学模型，只要求掌握现场操作人员或者有关专家的经验、知识或操作数据。
- (3) 与传统的控制方法相比，更接近于人的思维方法和推理习惯。因此便于现场操作人员的理解和使用，便于人机对话以得到更有效的控制规律。
- (4) 由不同观点出发，可以设计几个不同的指标函数，对一个给定系统而言，其语言控制规则是分别独立的，且通过整个控制系统的协调可以取得总体的协调控制。
- (5) 控制效果好。且所需设备简单，经济效益显著。
- (6) 模糊工程与计算机密切相关，从控制角度上来看，它实际上是一个由很多条件语句组成的软件控制器。目前，模糊控制仍由应用二值逻辑的计算机来实现，其中模糊规律经过运算，最后还原为确定性的控制。

1.2 加热炉控制的简介

1.2.1 我国加热炉计算机控制的现状

自 60 年代计算机进入工业领域以来，国外许多国家（如：美、

苏、日、德) 就开始了加热炉的计算机研究及应用。70 年代中后期, 国际上对加热炉数学模型及相应的优化控制策略的研究日益活跃, 控制系统在加热炉上的应用不断完善。80 年代末期, 在工业发达的国家, 已普遍实现了加热炉的计算机双级控制, 并实现了与整个轧线及全企业联网的分布式计算机控制系统 DCS。

我国从 80 年代初开始进入轧钢加热炉的计算机控制应用阶段。近二十年来, 我国的科学工作者进行了大量的卓有成效的研究工作, 取得了许多重要的研究成果。同时, 在多座加热炉上实现了计算机控制和模糊控制, 取得了节能、降耗和提高加热质量的效益。许多单炉的能耗指标已达到世界先进水平, 据统计实现加热炉计算机控制后, 平均每座加热炉可节能 8~10%, 减少金属热氧化烧损 10~30%。

有资料表明, 国外在加热炉上所采用的控制技术国内都有研究和应用, 虽然我国起步较晚, 但理论水平已赶上国际先进水平。

与工业发达国家相比, 我国的加热炉计算机控制起步晚, 且发展极不平衡。到 1997 年为止, 在我国拥有的 700 余座加热炉中, 实现计算机控制的不足 30%, 即使在我国十大钢铁企业中也还存在着人工操作的加热炉。而且, 我国的加热炉计算机控制系统水平大多数仅限于单炉控制, 计算机控制系统与整个轧线计算机成大系统的仅有宝钢、武钢等少数几家, 有的企业刚刚开始这项工作。

1.2.2 我国加热炉计算机控制中存在的问题

据对我国已经投入计算机控制系统的加热炉运行情况考查, 计算机控制系统的应用并非都取得了令人满意的效果, 有些企业虽然配有较先进的计算机系统, 但只是用计算机代替常规仪表, 做一些 PID 调节, 计算机的功能没有充分利用, 控制效果不理想, 效益不明显; 另外一个比较普遍存在的问题是控制系统运行不稳定。有的计算机控制系统虽然带有 SCC 控制, 但 SCC 级不能在线

使用；也有个别企业的两级控制系统都无法在线运行，控制系统处于瘫痪状态。造成控制系统不能长期稳定运行的因素是多方面的，包括炉子构造、外围仪表、各执行机构等硬件因素和管理水平、操作人员素质、控制模型、外围条件如：压力、热值不稳定等因素。无论哪一环节出现问题，都将影响控制系统正常运行。

1.2.3 加热炉模糊控制与计算机控制结合的意义

加热炉计算机控制方面，我国的国情特点是：设备陈旧、与计算机控制系统相配套的外围仪表质量不过关，故障频繁。最常遇到的问题是两个：一个是重油质量差，油表常堵；另一个是煤气压力和热值频繁波动。这一问题不解决，一切控制方案、策略都无法进行。如果这些问题用仪表硬件解决，需要购买价格昂贵的质量流量计和热值仪，大大增加系统投资和维护费用，目前较好的办法就是采用模糊控制技术（使用模糊控制器）。

从加热炉计算机发展的方向看，加热炉计算机控制的最新发展是与智能控制的结合。目前在加热炉计算机控制系统中主要是以数学模型为主的优化控制。但在加热炉大的动态操作下都有其不适的一面。如对于非计划性待轧。往往最后解决问题的是有经验的操作人员。其实，操作人员在处理非计划待轧时的判断、推理和决策过程都是模糊的，因此以模糊控制为代表的智能控制技术就能很好地解决上述问题。智能控制作为一门新兴的理论和技術，是传统控制发展的高级阶段。在国内外智能控制理论和技術已开始加热炉控制系统中得到应用，如重钢的加热炉模糊控制系统。但目前加热炉控制中应用较多的仍是使用计算机作为数字控制器解决燃烧控制问题。我们有理由相信：计算机控制与智能控制的结合将成为加热炉计算机控制的研究热点，必将把加热炉计算机控制提高到一个新水平。

第二章 加热炉工艺介绍

2.1 加热炉类型

加热炉是加热的设备，主要用于把板坯再加热到所需要的温度。加热炉有间断式炉和连续式炉两大类。间断式炉主要用于加热特殊尺寸的厚板，而主要的加热炉是连续式炉，如推钢式和步进式加热炉。

连续式推钢加热炉按其发展又可分为一段式、二段式、三段式和五段式四种，其中：一段式是最古老且形式简单的连续炉，现在几乎不再使用，该式炉炉体仅由加热段一段组成，钢坯沿全炉长单面加热，因此钢坯的上下两面温差很大，且炉温为一段控制，操作不灵活，又由于单面加热，不适用于大容量。

二段式加热炉炉体由加热段和均热段两段组成，为了弥补一段式炉的缺点，使用水冷滑轨，钢坯上下两面加热，提高了单位炉底面积的产量。炉温前后两段控制，均热段的炉温不单独控制，因此也和一段式炉一样，操作不灵活。

三段式加热炉炉体由预热段、加热段和均热温度段组成，加热段和均热段明确分开，加热段负责把钢坯加热到轧制温度，而均热段则主要负责减轻黑印，使钢温达到均匀。炉子分三段，改变各段的炉温，可以改变加热速度。该炉型操作灵活，并且对连续式炉的合理化、现代化作出了很大贡献。因此连续式加热炉的合理化、现代化是从三段式时期开始的，日本 1962 年左右的加热炉，一般都是加热能力 60~120 t/h 的推钢式三段连续加热炉，以后随着钢铁需要量的增加，轧钢机的性能和能力都已提高，因此加热炉也向大型化发展，200~250 t/h 的推钢式五段加热炉开始出现。

五段式加热炉是三段式加热炉的发展，在三段式加热炉的装料端又增加了两个加热段。五段式加热炉炉尾温度比三段式加热炉高，其目的是为了提高加热能力。因此单位炉底面积的产量比三段式加热炉有大幅度提高，但是由于炉尾温度高，废气热损失大，燃料单耗相当高，这种炉子为了减少钢坯黑印，提高加热的均匀性，减少钢坯背面划伤，设置热滑轨。在均热段设有炉顶烧嘴，并用出料机出钢等，但都未得到十分满意的效果。

1965 年开始，钢铁需要量的不断增加，同时对轧材质量提出了更高的要求，1967 年，新的炉型出现了，这就是上下加热的步进梁式加热炉。

本文主要讨论连续式推钢加热炉。

2.2 三段连续式加热炉的设备概况

三段连续式加热炉将炉体分为预热、加热、均热三段，首钢中厚板厂的加热炉为三段连续式（推钢）加热炉，其规格为宽 6 米、长 28 米，燃料为高炉、焦炉和转炉的三种混合煤气，加热能力是 75 t/h。

2.3 三段连续式加热炉的工艺要求

钢坯在炉内时间为 1.1 ~ 1.25 小时，温度控制要求是：加热段 1280 ~ 1350℃，均热段 1250 ~ 1280℃，煤气喷嘴热量为 2300 kcal / m³，一个阀门控制 11 个喷嘴的平焰。检测装置为铂—铑—铂热电偶，采样点是：加热段上下各 6 处（其中一加热和二加热区上下各 3 处），均热段上下各 2 处。

2.4 控制现状

首钢中板厂 2# 加热炉目前为常规仪表，手动操作，不能满足加热炉的生产节奏和要求，能耗、烧损均较大。为此，采用计算机技术结合现代控制理论，对 2# 加热炉进行技术改造，以提高生产水平，降低能耗、烧损，取得较好的经济效益。

2.4.1 设备现状

加热炉的性能以加热能力、加热温度、加热均匀程度及燃料单耗来表示。

首钢中板厂 2# 加热炉为推钢三段式连续加热炉，生产能力为 75 t/h，使用燃料为高炉、焦炉、转炉混合煤气，热值通常为 $(1800 \sim 2500) \times 4.18 \text{ kJ/Nm}^3$ 之间，煤气总管压力一般为 $(2.0 \sim 4.5 \text{ kPa})$ 。

目前该炉燃烧系统只能手动操作，空气系统各段几乎全部百分之百输出，燃气系统除一下加热、二下加热段在 60%~70% 输出范围内，其余各段燃气均百分之百输出，基本上没有可调节的余量，炉温曲线在均热段严重下降，只有 1100℃ 左右。且空/燃气段均无流量检测。

在现有条件下，如不进行改造，要保证最佳燃烧，改善产品质量，节能降耗，减少氧化烧损、避免产生黑印等是不可能的。

目前部分调节阀已不能动作，部分检测点不合适。因此，应对所有原仪表系统进行彻底改造，增加部分仪表，如：增加流量检测，修复调节阀。

2.4.2 基本参数和条件

小时产量: 75 t/h

年产量: 24 万吨

燃料: 混合煤气

混合煤气热值: $(1800 \sim 2500) \times 4.18 \text{ kJ/Nm}^3$

煤气总管压力: 现有压力 4kPa (最低 2.2~2.7kPa)

煤气总管流量: $20625 \text{ Nm}^3/\text{h}$

空气总管压力: 10kPa

空气总管流量: $49200 \text{ Nm}^3/\text{h}$

空气总管通径: 外径 1220*6 (mm)

钢板坯出炉温度: $1150 \sim 1200^\circ\text{C}$

均热上段:

炉温: 1400°C (max)

煤气流量: $3300 \text{ Nm}^3/\text{h}$

煤气管通径: 337*5 (mm)

空气流量: $6860 \text{ Nm}^3/\text{h}$

空气管通径: 630*4 (mm)

均热下段:

炉温: 1400°C (max)

煤气流量: $3600 \text{ Nm}^3/\text{h}$

煤气管通径: 337*5 (mm)

空气流量: $7490 \text{ Nm}^3/\text{h}$

空气管通径: 630*4 (mm)

加一上段:

炉温: 1400°C (max)

煤气流量: $3900 \text{ Nm}^3/\text{h}$

煤气管通径: 426*5 (mm)

空气流量: $6860 \text{ Nm}^3/\text{h}$

空气管通径: 720*4 (mm)

加一下段:

炉温: 1400℃ (max)

煤气流量: 4500 Nm^3/h

煤气管通径: 426*5 (mm)

空气流量: 7490 Nm^3/h

空气管通径: 720*4 (mm)

加二上段:

炉温: 1400℃ (max)

煤气流量: 2800 Nm^3/h

煤气管通径: 325*5 (mm)

空气流量: 5820 Nm^3/h

空气管通径: 529*4 (mm)

加二下段:

炉温: 1400℃ (max)

煤气流量: 3300 Nm^3/h

煤气管通径: 377*5 (mm)

空气流量: 6860 Nm^3/h

空气管通径: 630*4 (mm)

预热段温度: 1100℃

炉尾温度: 1000℃

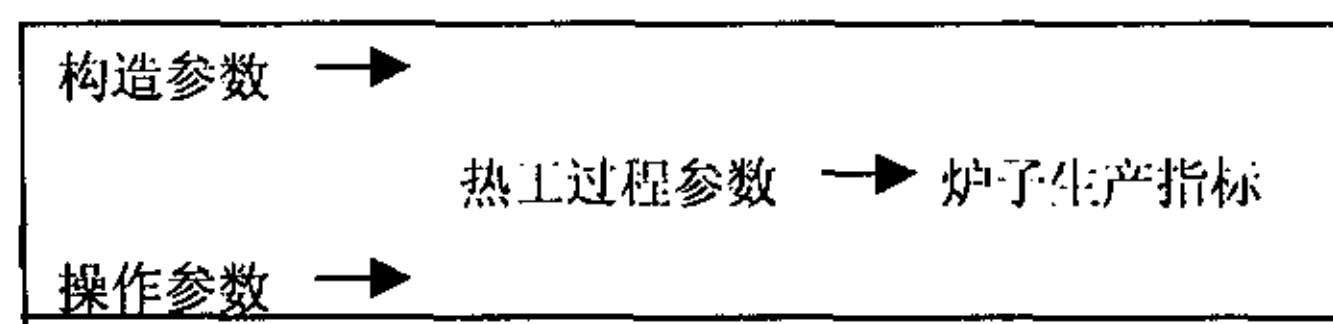
热风温度: 350~400℃

炉压: 0~30Pa

第三章 连续式加热炉控制策略的选取

3.1 影响加热炉操作的因素

加热炉是轧钢生产工序中的重要咽喉设备，通过加热炉生产完成金属轧制前的加热。炉子各变量之间的关系如下所示：



构造参数包括炉子类型、大小、炉体各部位的具体构造、尺寸和材质，燃烧器和换热器的构造和大小，其它附属设备的构造和类型等，可称之为加热炉的“硬件”；操作参数包括供热、供风、及各有关调节，称之为加热炉的软件；构成炉子的生产指标包括加热炉的生产率、燃料消耗、氧化情况等。当进行加热炉生产时，人们希望获得高的生产指标，但可以直接操纵的却不是热工过程参数和生产指标，而是构造和操作两个参数。虽然生产上的问题是从生产指标上反映出来的，但最终解决问题，仍然必须从炉子构造、热工操作方面入手。

就加热炉构造方面的研究而言，人们一直进行着不懈的研究探索，从加热炉结构的局部改造（如：炉头压下，炉膛高度的下调等）到炉子结构型式的变化（推钢式，步进式，蓄热式燃烧装置），使炉子指标不断提高。

但从目前文献看，对结构的研究，远多于对操作的研究，所以有必要从炉子的操作的角度，谈谈炉子的温度控制问题。

一 炉子操作对燃料消耗的影响

对于构造参数一定的炉子，炉子操作水平的高低，对加热炉的生产指标的好坏有很大影响。同一座炉子，由于操作上的差异，生产率和热效率会有很大不同。一座炉子的操作参数较多，而且具体项目随情况而异。但一般来说，热工操作方面的基本参数是热负荷、空气系数、炉膛压力和预热温度。

1. 热负荷

炉子供热（热负荷）是炉子最重要的热工操作，它包括供热量的多少和供热量分配两方面的问题，对炉子生产率和燃料消耗影响极大。

2. 空气系数

正确控制燃烧过程中的空气系数，合理组织燃料的燃烧，是加热炉热工操作的基本内容之一。空气系数过大或过小，对炉子加热过程都不利。

从空气系数与废气热损失之间的关系可以看出，废气温度为 1300℃时，当空气系数由 1.0 提高到 1.3 时，废气物理热损失由 59% 增加到 74%；同样是 1300℃废气温度，空气系数由 1.0 减少到 0.7 时，废气带走的化学和物理热损失仍由 59% 快速上升到 85%。

由此可知，空气系数不仅与废气热损失有关，还直接关系到加热炉的生产率（有效热）。

（1）当空气系数 $n > 1.1$ 时，随着空气系数的增大，炉膛废气温度逐步降低，由于废气体积增加迅速，废气带走的热量逐步增加，同时加热炉生产率逐步降低。只有在空气系数 $n = 1.1$ 时，加热炉效率达到最大值，为 35.6%，而当 $n = 2.0$ 时，热效率降至 22.8%，即空气系数每增大 0.1，加热炉热效率就下降 1.4%，单位热耗升高 4%。

（2）而空气系数 $n < 1.1$ 时，随着空气系数的降低，炉膛废气温度逐步降低，且废气体积逐渐减少，因此废气带走的物理热逐步减少，但是废气中的可燃成分增加很快，废气带走的化学热迅速增加。化学热和物理热两项之和仍逐渐增加，所以生产率仍逐渐降低。资料表明，在 $n = 1.1$ 到 0.8 范围内，炉子的热效率降低 6.7%，即空

气系数每增大 0.1，加热炉热效率就下降 2.2%，单位热耗升高 7%。

综上所述，空气系数的大小，对加热炉的生产率和热效率有重要的影响。

目前我国在炉子操作中，因空气系数控制不当，而造成燃料浪费的现象相当普遍。加热炉的实测热平衡资料表明：有的加热炉因供风量不足，废气中燃料不完全燃烧造成的损失达 15% 以上；有的炉子因供风量过大，废气出口处的空气系数达 2.5 以上。废气热损失高达 50% 以上。因此，为了节约燃料，消除污染，需要发展各种比例调节燃烧器、废气成分测定仪器和燃烧过程自动控制系统，对燃烧过程进行严格的控制，加强燃料与供风比例的调节，提高炉子的热效率。

3. 炉膛压力

炉膛压力及其压力分布对炉子工作有着重要影响，正确控制炉膛压力，也是加热炉热工操作的一个重要内容。

由于火焰是个不严密的热工设备，吸风和溢气很难避免，而吸风和溢气及其造成的热损失，主要取决于炉膛压力的大小，当炉内为静止气体时，炉温为 1300℃，开孔处的炉压为 -1 毫米水柱，开孔直径为 100 毫米时，吸入的冷风就可造成 3×10^4 千卡/时（约 3 公斤油）的热损失；开孔处的炉压为 +1 毫米水柱时，溢出的炉气就可造成 9×10^4 千卡/时（约 9 公斤油）的热损失。

研究资料表明：即使是气密性相当好的试验炉，它的炉膛压力对炉子的生产率和热效率也有较大的影响，如在炉膛压力从 -2 毫米水柱升到 +3 毫米水柱（取压点在炉顶）的过程中，炉子生产率增大 13.9%，热效率提高 3.8%，单位热耗下降 12%。

为了减少炉子的吸风和溢气，正确操作应该是将炉门坎水平面上的压力稳定控制在 ± 0 毫米水柱。

4. 预热温度

预热温度是利用炉膛排出的废气，预热空气及煤气，以充分利用废气的余热，这样可使炉膛排出的废气部分地返回炉膛中，以增加炉膛的热收入，从而降低燃料消耗。空气和煤气预热后，可提高

理论温度，改善炉内燃烧环境。

研究表明，当烟气温度为 800℃ 时，将空气预热 300℃，可节约燃料 15% 左右；当空气预热温度提高到 500℃，可节约燃料 20% 以上。据 1986 年冶金部对轧钢加热炉用 158 台换热器预热空气温度调查结果显示，空气预热温度达 400~500℃ 的仅占 10.8%；大多数的空气温度偏低，都在 300℃ 以下。总的平均空气预热温度只有 222℃，而目前国外轧钢加热炉的空气预热温度已普遍达到 450~500℃，甚至更高。这表明我国还有较大的节能潜力。

5. 降低物料的出炉温度

钢坯加热温度的高低，既影响炉子能耗，也影响轧制电耗。根据资料显示钢坯温度在 1150~1250℃ 的范围内，温度平均每降低 10℃ 时，单位热耗平均降低 $3.58 \times 10^4 \text{ kg/t}$ ，燃料节约率为 2.1%；单位电耗平均增加 $0.25 \times 10^4 \text{ kg/t}$ ，电能增长为 0.8%，单位综合能耗平均降低 $3.33 \times 10^4 \text{ kg/t}$ ，降低率为 1.65%。

由此可见，降低钢坯加热温度，不仅能降低炉子的能耗，而且也能降低综合能耗。此外，还能显著地减少氧化烧损。因此，在日本已把低温出钢作为一项重要的节能措施。目前日本轧钢加热炉的出钢温度普遍较以前降低 30~50℃，因轧钢工艺不同，出钢温度一般为 1080~1230℃。

目前，我国轧钢钢坯加热温度普遍偏高，从某种意义上说，钢坯加热温度偏高所带走的那部分热量，也是一种热损失。因此，在设备条件和产品质量允许的条件下，经过试验，应尽可能地降低钢坯加热温度，以节约能源。

3.2 加热炉加热过程控制的要求

加热炉加热过程控制是为保证钢坯达到需要的轧制温度，避免黑印，使钢坯加热均匀。因此温度的高低直接影响着钢坯的加热质量和加热速度，由于加热段和均热段的热工要求不同，因而对各段

温度的控制过程也有所不同。温度过高，钢坯变形；温度过低，影响轧制效果。同时，加热炉的热工状况非常复杂，空燃比、炉膛压力、喷嘴流量均会对加热质量产生影响，但这里仅以温度控制为主要控制手段。

三段推钢式加热炉从炉头至炉尾，可分为三个温度带：预热带、加热带、均热带。其中加热带又包括一加和二加两个加热段，这里进行温度控制的包括均热段、一加热段和二加热段三个加热区域；加热段是将钢坯加热的轧制温度，而均热段是减少黑印，使钢温均匀。三个温度带的作用不同，加热控制的要求也不同，通常的加热温度控制以均热段为主，配合一加、二加两个加热段的控制。由于要求均热段温度保持稳定，因此要通过温度检测，随时调整烧嘴的煤气阀门开度。从控制的效果来分析就是要求均热段温度不存在稳态误差，或者稳态误差小，稳态无波动现象；抗干扰能力强，一旦受到干扰后，能很快恢复到原来的状态。只有保证了均热段温度的良好控制的情况下，才能保证钢坯的加热效果和工艺要求。

3.3 温度控制策略的选取

上面介绍了有关三段连续式加热炉的工艺特点及其控制要求。根据控制要求我们知道，对于该炉型的加热过程控制主要就是均热段温度控制，而对温度影响最大的因素就是燃料煤气烧嘴的喷入量。这里我们以煤气烧嘴的喷入量为主要控制量来讨论具体的模糊算法实现。

三段式加热炉在冶金工业中的应用已有近 40 年的历史，对于它的控制方法也有很多。包括：仪表温度控制、计算机温度控制、模糊控制系统，尤以模糊控制的效果最佳。

加热炉的加热过程是一个复杂的物理、化学反应过程，其中炉内的热工状况又十分复杂而多变。对于加热炉的加热过程控制虽然涉及温度，空、燃比，及炉膛压力等诸多因素，但在用计算机控制

取代人工操作方面，温度控制以其投资少、控制效果显著而被首选。这里我们选择炉温作为被控参数。

在炉内各加热段均采用煤气烧嘴提供热源，每一加热和均热段都各有煤气和空气管道提供空燃比，通过控制管道阀门的开度大小，提供不等的热源，以达到最佳的加热效果。

因此控制必须保证在工艺要求温度的一定偏差范围之内，并尽量保持温度稳定。从控制的效果来分析就是要求均热段温度控制不存在稳态误差，或者稳态误差小，稳态无波动现象；抗干扰能力强，一旦受到外界干扰后，能很快地恢复原来的状态。只有保证了均热段温度在良好控制下，才能保证钢坯的加热效果，保证反应的充分进行。

第四章 加热炉温度的模糊控制

4.1 加热炉温度控制中的控制变量选择

加热炉的主要工艺特点已经在前面的章节中介绍了，这里不再重复。

首钢中厚板厂的三段连续式加热炉，炉内钢坯温度的主要温度带是一加、二加、均热三段。在整个加热过程中，维持炉内各段的恒温，对钢坯的加热质量起到至关重要的作用。尤其是均热段的温度，更是出钢温度的关键。因此，加热炉的温度控制就以均热段温度为主。选择主要的控制变量为均热段的炉内温度（热电偶测量），与之相关的操作变量为煤气喷嘴的供气流量和空气管流量（以及空燃比，供风风机转速的变频调速等）。选择对温度影响最大且起决定作用的空燃比作为控制量。

4.2 模糊温度控制系统问题的提出

加热炉是一个参数非线性、时变的复杂系统。原来的控制多采用 PID 控制结合人工操作的方式，这种控制在遇到热辐射、热传导、热对流及炉内工艺参数频繁波动时，会影响 PID 的调节效果，此时就不得以进行人工操作，这时人们往往根据积累的经验进行手工控制，以达到满意的控制效果。虽然这样可以较准确地控制温度的加热值，但人的精力有限，不可能不出差错；同时人的视觉、动作或多或少存在着滞后，这将影响控制的效果和精度。因此，在加热炉的温度控制系统中采用模糊控制技术，将可以较

好地解决这一问题。

4.3 模糊控制基本原理

如图 4—1 所示是一个典型的人—机系统。首先，操作者从声、光、数码显示屏上得到系统的输出量及其变化的模糊信息，然后，操作者就用这些信息，根据已有的经验来分析判断，得出相应应在的控制决策，以操作控制器，实现对工业对象的控制。

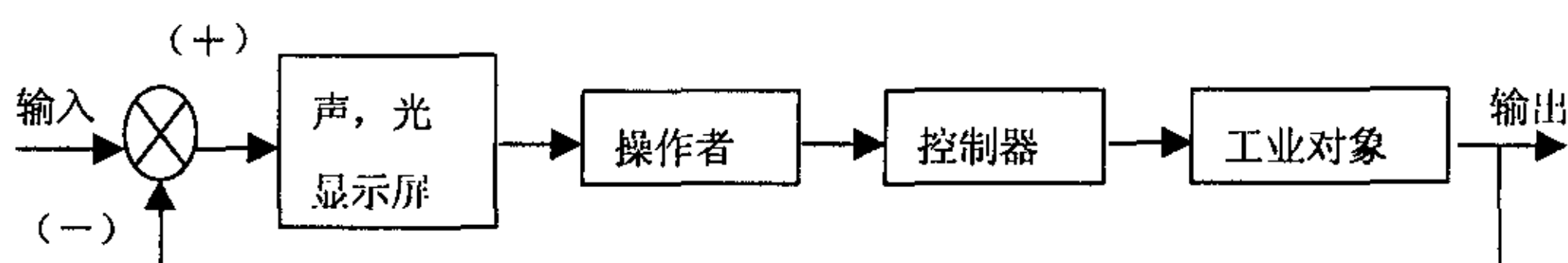


图 4—1 人—机控制系统框图

很明显，操作者在进行控制时，他大脑中许多概念是模糊的。例如，航海驾驶员，当船偏离航线时，他就会根据偏差的大小，相应地转动方向舵，以使船回到原来的航向。所以，我们完全可以将操作者的经验总结成若干条规则（这些规则称为模糊控制规则），经过必要的数学处理，存放到计算机中。同时，我们也可以仿照人脑的模糊推理过程，来确定一定的推理法则。这样，计算机就可以根据输入的模糊信息，按照控制规则和推理法则，作出模糊决策，完成控制动作。但是，当按照已定的模糊决策去执行具体的动作时，所执行的动作又必须是以精确的量表现出来。显然操作者对工业过程进行控制中，是不断地将测量到的过程输入的精确量转化为模糊量，经过人的模糊决策后，再将决策的模糊量转化为精确量，去实现控制动作。

总之，当人进行控制时，首先必须对系统的输出偏差进行判断，

然后根据偏差的情况来决定采取何种控制措施。除此之外，在大多数情况下，还应该对偏差的变化率进行判断。也就是说，人必须根据偏差和偏差变化率综合地进行权衡。把上述各过程用框图表示出来，就得到一个模糊控制器的组成框图，如图 4-2 所示。

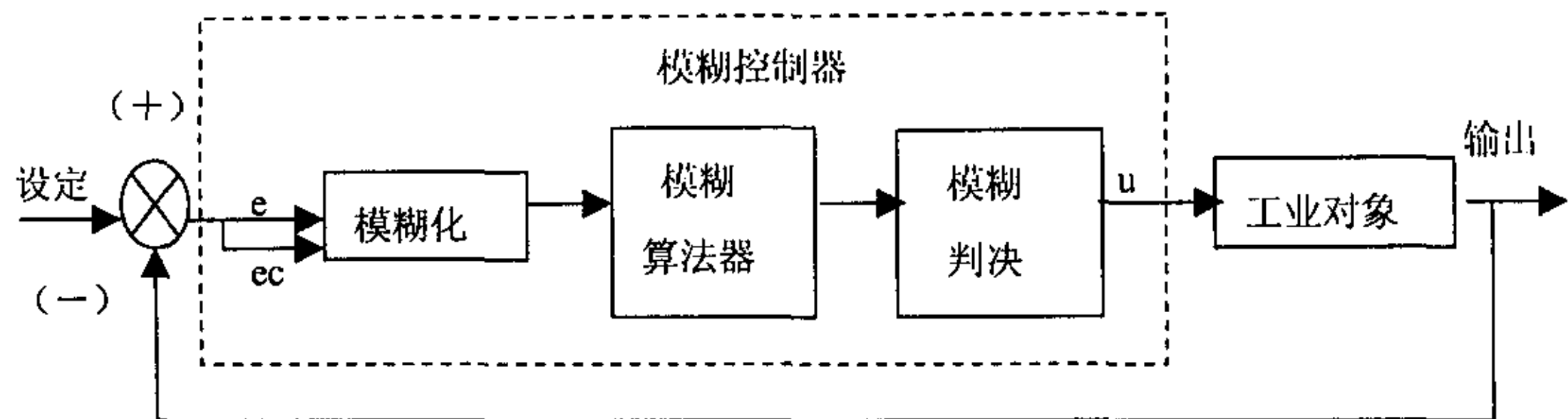


图 4-2 模糊控制示意图

其中，模糊化和模糊判决都涉及到精确量与模糊量的相互转换问题，也涉及到模糊集中隶属函数的求取问题。所以要实现模糊控制，必须解决以下三方面的问题：精确量的模糊化；模糊控制规则的构成（模糊算法器）；输出信息的模糊判决。

（1）精确量的模糊化

系统中的偏差和偏差变化率的实际范围叫做这些变量的基本论域。设偏差或偏差变化率的基本论域为 $[-x, +x]$ ，偏差所取的模糊集的论域为 $(-n, -n+1, \dots, 0, \dots, n-1, n)$ ，即可以给出精确量的模糊化的量化因子 $k=n/x$ 。但实际中的一般作法是，首先把观察到的偏差 e 的变化范围设定为 $[-6, +6]$ 之间变化的连续量，然后将这一连续的精确量离散化，即将其分为几档，每一档对应一个模糊集，而后进行模糊化处理。如果精确量 x 的变化范围不是在 $[-6, +6]$ 之间，而是在 $[a, b]$ 之间，那么我们可以通过变换式 $y = \frac{12}{b-a}(x - \frac{a+b}{2})$ 将在 $[a, b]$ 间变化的变量 x 转化为 $[-6, +6]$ 之间的变量 y 。

人们习惯上把 $[-6, +6]$ 之间变化的连续量分为如下八档：

“正大” (PB) ——多数取 $+6$ 附近。

“正中” (PM) ——多数取 $+4$ 附近。

“正小” (PS) ——多数取 $+2$ 附近。

“正零” (PO) ——多数取比零稍大一点附近。

“负零” (NO) ——多数取比零稍小一点附近。

“负小” (NS) ——一般取 -2 附近。

“负中” (NM) ——一般取 -4 附近。

“负大” (NB) ——一般取 -6 附近。

这八档对应着八个模糊子集，如表 4-1 所示。其中的数字表示 $[-6, +6]$ 之间十三个元素的隶属度。

表 4-1 隶属度表

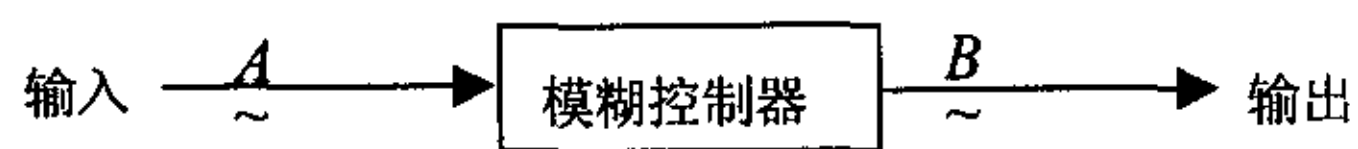
论域 隶属度 变量档	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
NB	1	0.8	0.7	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0
NM	0.2	0.7	1	0.7	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0
NS	0	0.1	0.3	0.7	1	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0
NO	0	0	0	0	0.1	0.6	1	0	0	0	0	0	0
PO	0	0	0	0	0	0	1	0.6	0.1	0	0	0	0
PS	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1	0.7	0.3	0.1	0
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1	0.7	0.3
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.7	0.8	1

隶属度可根据人的思维特点，定义为正态型、三角型、梯型等等，也可根据实际情况来确定。

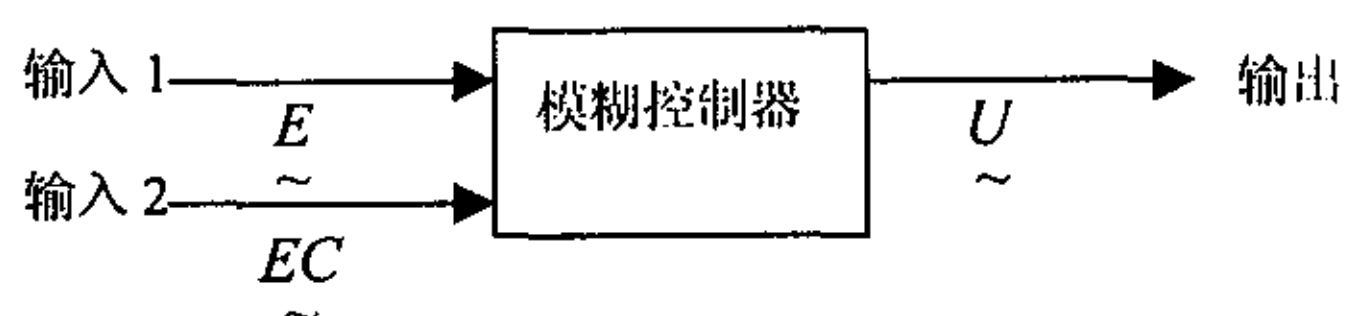
(2) 模糊控制规则的构成

模糊控制规则实质上是把操作者在控制过程中的经验加以总结，并将由经验得来的相应措施总结成一条条控制规则，据此制造一个“模糊控制器”，达到用机器代替人对复杂工业过程进行控制的目的。

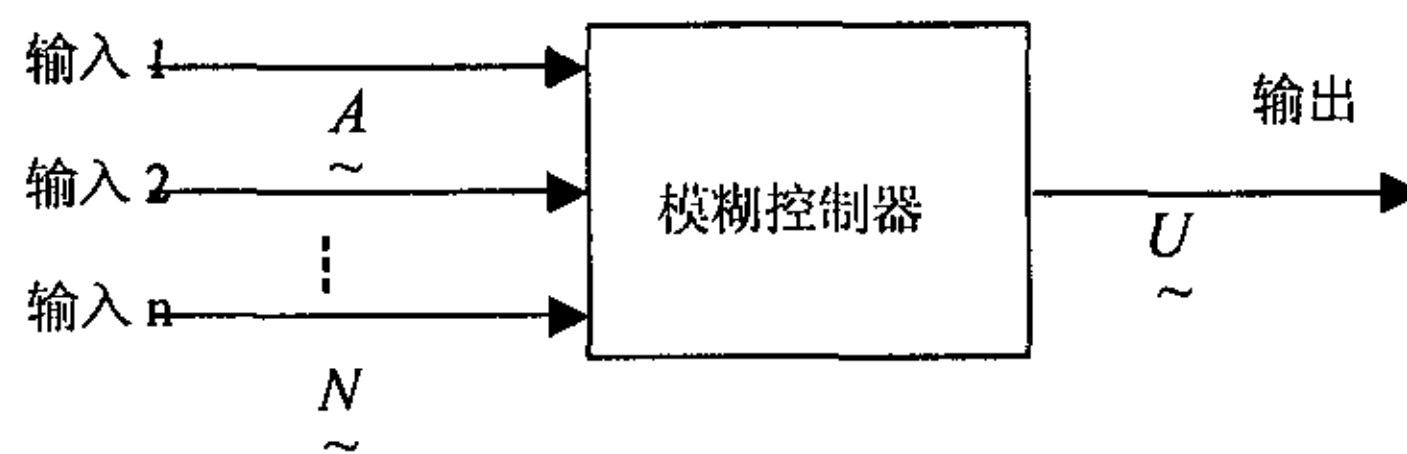
一般的模糊控制器示意图如图 4-3 所示。



(i) 单输入单输出模糊控制器



(ii) 二维输入单输出模糊控制器



(iii) 多维输入单输出模糊控制器

图 4-3 模糊控制器示意图

(3) 输出信息的模糊判决

模糊判决最常用的三种方法:

①最大隶属度法

如果对应的模糊判决的模糊子集为 $\tilde{U}_1$, 则该取模糊子集中隶属度最大的那个元素 $u_{\max}$ 作为执行量, 即应满足

$$\mu_{\tilde{U}}(u_{\max}) \geq \mu_{\tilde{U}}(u) \quad u \in U$$

②加权平均判决法

这种方法有两种形式, 即普通加权平均法和权系数加权平均法。

i. 普通加平均法, 其执行量 $u_{\max}$ 由下式决定:

$$u_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(u_i) \cdot u_i}{\sum_{i=1}^n \mu(u_i)} \quad (3.1)$$

ii. 权系数加权平均法, 其执行量 $u_{\max}$ 由下式决定:

$$u_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \cdot u_i}{\sum_{i=1}^n k_i} \quad (3.2)$$

其中, 权系数 k_i 的选择应根据实际情况来决定。

③取中位数法

为了充分利用模糊子集所有的信息量，我们可以求出把隶属函数曲线与横坐标之间的面积平分为两部分的数，再以此数作为判决的结果。

4.4 模糊控制步骤

经过前文的介绍，我们已经对模糊控制有了初步了解，现在给出进行模糊控制的主要步骤。

1. 输入量的模糊化
2. 输入量的合成算法
3. 规则推理
4. 输出判决
5. 反模糊化

下面就各步骤详细说明：

1. 输入量的模糊化 (Fuzzily Inputs)

这一步工作就是将连续的、确定的输入量，通过一定的隶属度函数将其模糊化成模糊量，以便进行模糊控制。输入量往往是受范围限制的，而且输出量是以隶属度函数的有限集形式给出的（例如 $A=0.1/\text{大}+0.2/\text{小}+0.7/\text{中}$ ）所以模糊化过程无非就是进行查表或函数计算的过程。

所谓查表法，就是将连续的数值中各主要点及其所对应的隶属值一起建立的一张表，对于每一输入量可以直接地或间接地应用插值法将其模糊化。

所谓函数计算法，即将输入量值代入到各隶属度函数中，分别计算求值，进而模糊化。

2. 输入量的合成算法 (Fuzzy Operatro)

一旦输入量模糊化后，我们就可以获得每个推理规则各前件的

隶属度。如果对于某一个推理规则来说，它的前件不只一部分，那么合成算法就可以求出代表前件结果的隶属度值。

输入至 Fuzzy Operator 的模糊化后的输入变量一般都要两个以上的隶属度值，而由 Fuzzy Operator 输出的只为单一值。

合成算法一般都要应用到 AND 和 OR 两种基本运算，也可由这两种基本运算构成一些较复杂的合成算法。此外还可以建立一个代数方程来解决，例如

$$\text{probor}(a, b) = a + b - ab$$

3. 规则推理 (Apply Implication Method)

首先，需要说明每一条规则都应有自己的权重。权重是一个位于 $[0, 1]$ 之间的值，它表示当前规则在推理过程中占据的分量。一般来说，每条规则的权重都设置为 1。但是，权重却不影响推理过程。在推理过程中，你可以不定时的改变每条规则的权重。

规则推理实际上是根据前件（单一隶属度）来确定后件（即一个模糊集合）的。每条规则都是能够单独进行推理。规则一般是使用 if-then 语句书写的，便于阅读和理解。

4. 输出判决 (Aggregate All Outputs)

当我们要将每一条规则的输出量综合起来时，就需要输出判决。这一过程实际上是获得所有规则的输出量的模糊集合，并且将其按一定的原则组合成一个模糊集合，为最后一步（反模糊化）做准备。

在这个过程中，可以使用三个方法：最大值法、估计值法以及求和法（即将每一条规则的输出集合进行简单地求和）。注意，只要判决过程是 commutative，规则的执行顺序是无关紧要的。

5. 反模糊化 (Defuzzy)

反模糊化过程的输入量、输出量分别是一个模糊集合和一个实际量。尽管模糊量有助于进行规则推理等中间过程，但每个输出变量通常为一精确值，因为执行机构往往由精确量来驱动。所以，对于给定的一个模糊集合，它包含着输出量的变化范围，我们需要得到一个具体的精确值，即从模糊量到精确值。

最常用的反模糊化方法的是重心法，它返回值为输出曲线的重心坐标。当然还可以使用其它几种方法：最大隶属度法、加权平均数法等等。

综上所述，模糊控制的五个步骤都已阐述，但要注意这五个步骤都要依靠人的经验来实施，离开人的经验就无从建立起合理的模糊模型。

4.5 模糊控制软件框图

模糊控制流程图如图 4—4 所示。

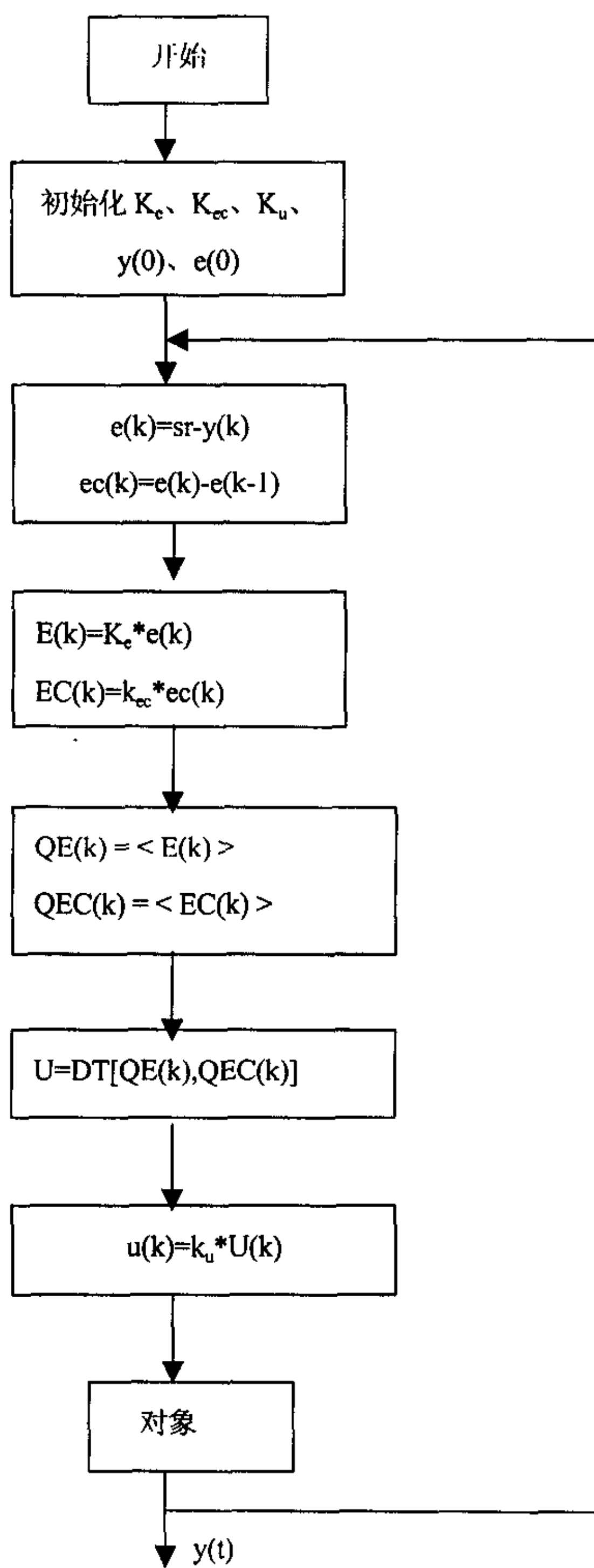


图 4-4 模糊控制流程图

第五章 模糊在线自校正 PID 参数控制器设计

采用计算机实现的 PID 控制算法，其离散 PID 控制规律为

$$U(n) = K_p \left\{ e(n) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^{n-1} e(i) + \frac{T_d}{T} [e(n) - e(n-1)] \right\} \quad (5.1)$$

式中， $U(n)$ 、 $e(n)$ 分别为第 n 个采样时刻控制器输出量（控制量）和输入量（偏差量）； T 为采样周期； T_i 、 T_d 分别是积分和微分时间常数； K_p 为比例增益。由上式可以得到控制器输出第 n 个周期时刻的控制量 $U(n)$ 和第 $n-1$ 个周期时刻的控制量 $U(n-1)$ 之间的增量为

$$\begin{aligned} \Delta U(n) &= U(n) - U(n-1) \\ &= K_p \{ e(n) - e(n-1) + (T/T_i)e(n-1) + (T_d/T)[e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)] \} \\ &= C_1 e(n) + C_2 e(n-1) + C_3 e(n-2) \end{aligned} \quad (5.2)$$

式中， $C_1 = K_p(1 + T_d/T)$ ， $C_2 = K_p(T/T_i - 2T_d/T - 1)$ ； $C_3 = K_p T_d/T$

这是一个增量算式，它只与前 n 次采样值相关，计算量少而实时性强。但它与模拟 PID 控制器一样，存在参数修改不方便、更不能进行调整等特点。如果能实现 PID 控制器的参数在线调整，那么就进一步完善了 PID 控制器自适应性能。目前较多的是采用被控对象的在线辨识，然而根据一定的控制器要求或目标函数，对 PID 控制器的三个参数（ K_p ， K_i ， K_d ）进行在线调整。采样辨识的方法，必须建立在被控对象的精确数学模型基础上，当被控对象（例如轧钢加热炉）具有结构非线性、参数时变性与模型不确定性时，其辨识结果不一定有效。为此，本文提出一种用模糊控制器对 K_p ， T_i ， T_d 三个

参数进行在线调整的“PID 参数自校正模糊控制器”。

5.1 PID 控制器结构

通常的二维模糊控制器都是以误差 $e(t)$ 和误差变化 $ec(t)$ 作为输入，而实际控制系统在过渡过程中，不同时间域所要求的性能指标的重点是不同的，因此将时间作为控制策略的一个重要参考因子是非常必要的。图 5-1 是一个 PID 参数自校正模糊控制器的结构图，它将时间 t 作为各个子模糊控制器的公共输入；而以 $|e(nT)|$ 、 $|e(nT)+e((n-1)T)|$ 和 $|e(nT)-e((n-1)T)|$ 分别作为子模糊控制器 SFC_1 、 SFC_2 与 SFC_3 的另一个输入量 $|e(t)|$ 、 $|ea(t)|$ 与 $|ec(t)|$ 。由上述各子模糊控制器 $SFC_1 \sim SFC_3$ 组成一个复合模糊控制器 CFC (Composition FC)，其输出量分别作为 K_p 、 T_i 、 T_d 的增量 ΔK_p 、 ΔT_i 、 ΔT_d 。

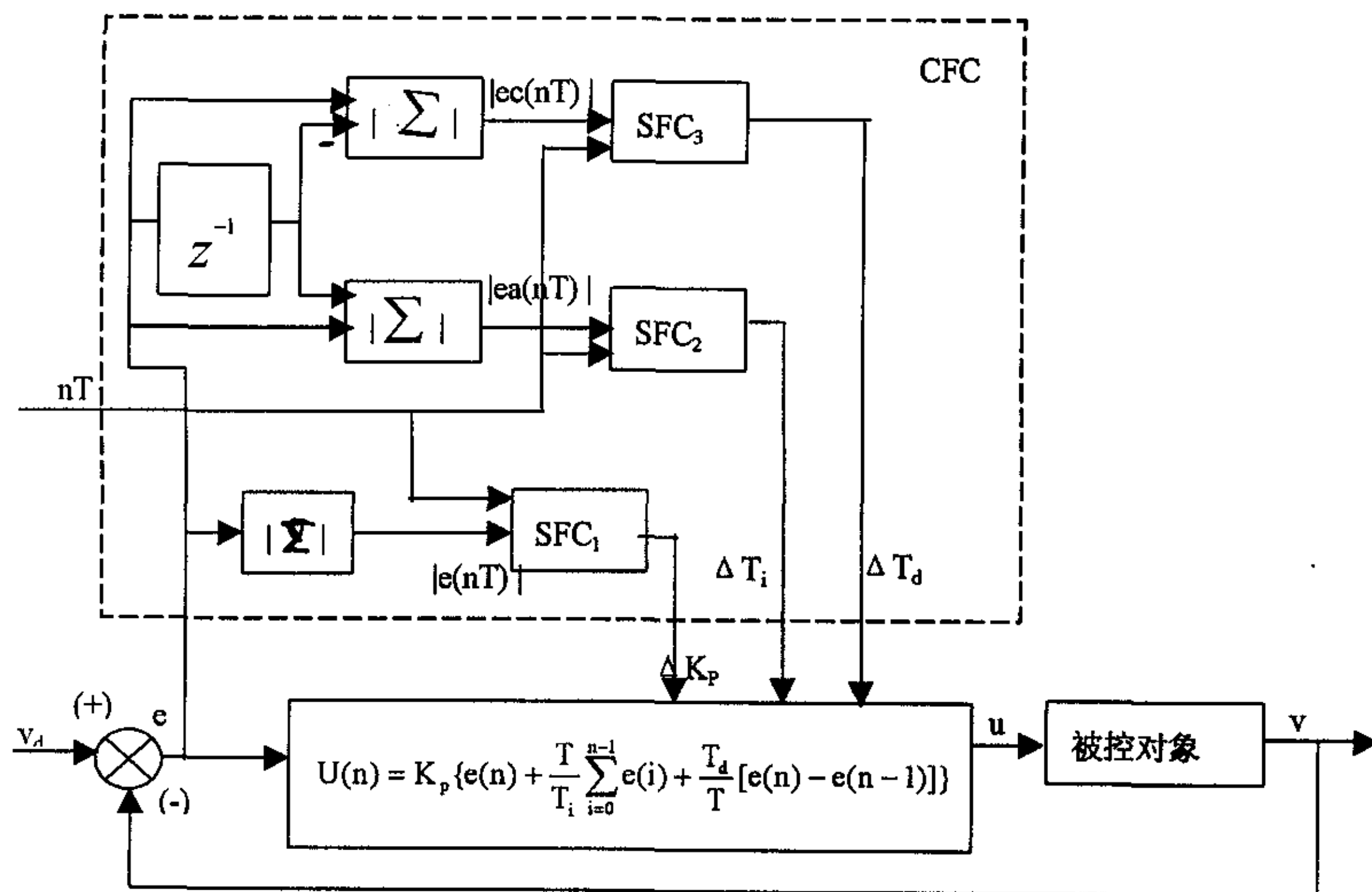


图 5-1 PID 参数自校正模糊控制器

5.2 PID 参数自校正的实现

由于时间变量 t 是三个子模糊控制器的共同输入量，而它们的另一个输入又是不同的变量，为此分别讨论如下：

(1) 时间变量 t 的模糊化

首先取时间 t 的模糊子集为 PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB, 论域量化等级为 $\{-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3\}$ ，对时间 t 量化时，取被控对象纯滞后时间 T 为基本量化单元，于是可以得到 t 的量化域，见表 5-1。按经验确定各模糊子集和隶属度值，见表 5-2。

表 5-1 t 量化域

量化域	$(0,T]$	$(T,2T]$	$(2T,3T]$	$(3T,4T]$	$(4T,5T]$	$(5T,6T]$	$(6T,\infty]$
等级	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

表 5-2 隶属度 $\mu_T(t)$

$\mu_T(t)$ 等级 \ T	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
-3	0	0	0	0	0.2	0.8	1
-2	0	0	0	0.4	0.8	1	0.8
-1	0	0	0	0.8	1	0.4	0.2
0	0	0.2	0.7	1	0.4	0	0
+1	0.4	0.8	1	0.7	0	0	0
+2	0.8	1	0.8	0.2	0	0	0
+3	1	0.4	0.4	0	0	0	0

(2) K_p 控制器

它的作用原理如图 5-2 所示。PID 控制器中，比例增量 K_p 增大，可以加快响应速度，减少系统稳态误差，提高控制精度，但是 K_p 过大会使系统产生超调，甚至导致不稳定；反之减小 K_p ，能使系统稳定裕度增大，减少超调量，但却降低了系统精度，使过渡过程时间延长。因此，实现 K_p 自校正将可以随时改变系统的静态和动态性能。

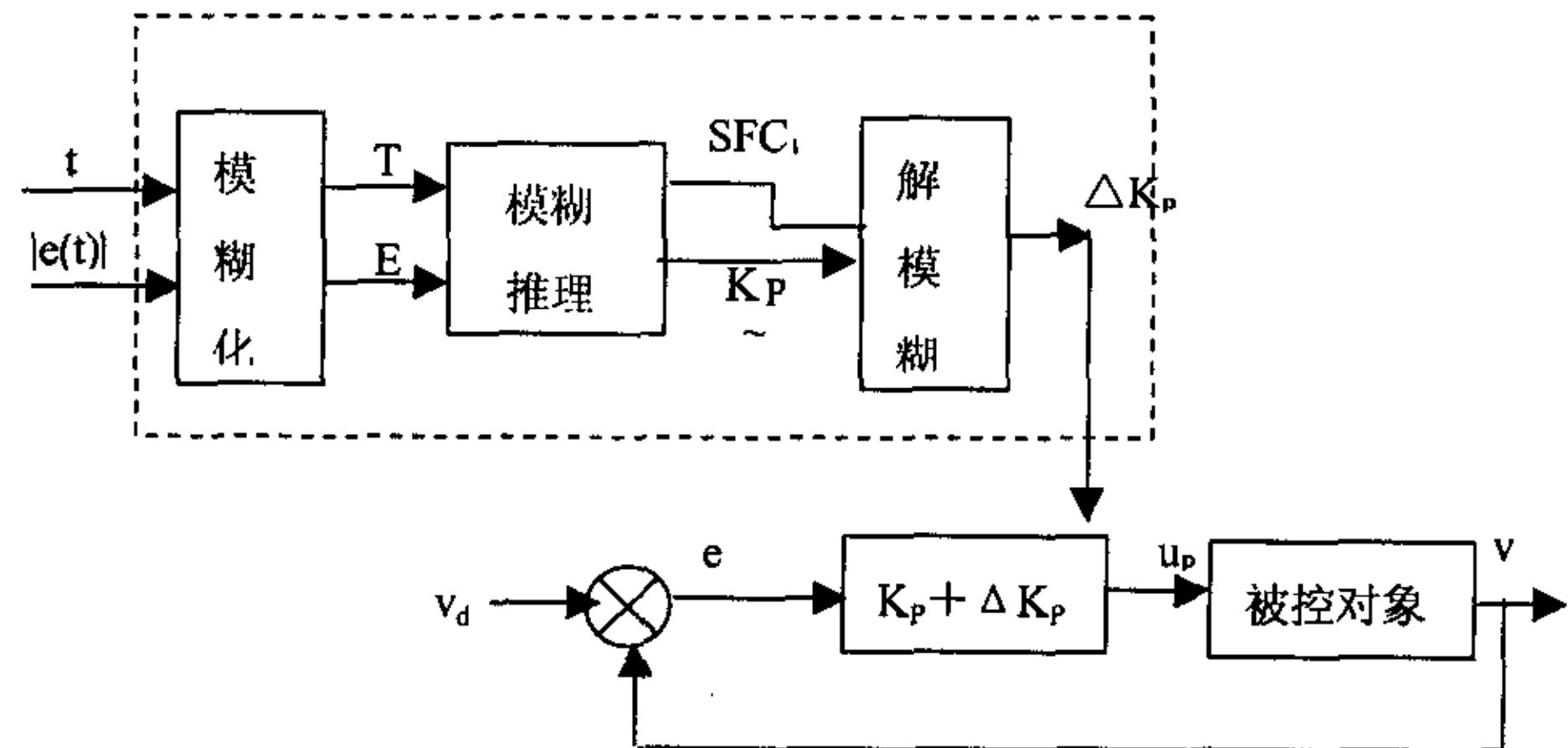


图 5-2 K_p 控制

根据系统控制中对过渡过程要求和专家经验，通常在控制起始阶段，适当地把 K_p 放在较小的档次，以减少各物理量初始变化的冲击；在过程中期，适当加大 K_p ，以提高快速性和动态精度，而当过渡过程后期，又将 K_p 调小，使系统超调减小，提高静态稳定性，由此，将输入量 $|e(t)|$ 的模糊子集取为很大 (VB)、大 (B)、中 (M) 和小 (S)；输出量 Δk_p 的模糊子集取为 PB、PM、PS、ZO、NS、NM、NB，从而得出模糊控制规则表 5-3；取 E 的论域量化等级为 $\{1, 2, 3, 4\}$ ， Δk_p 的论域量化等级为 $\{-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3\}$ 。 $e(t)$ 的量化表如表 5-4 所示，而动态误差绝对值 $|e(t)|$ 各等级对应模糊子集的隶属度值如表 5-5 所示， Δk_p 的对应模糊子集隶

属度如表 5-6 所示。表 5-3 所给出的控制规则实际上具有如下形式：

表 5-3 SFC₁ 控制规则

ΔK_p \ T E	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
VB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB
B	NB	NB	NB	ZO	PS	PM	NB
M	NM	NM	NM	PS	PS	PB	ZO
S	NS	BS	NS	ZO	ZO	ZO	ZO

表 5-4 $e(t)$ 量化域

量化域	$(0, 0.1]$	$(0.1, 0.3]$	$(0.3, 0.5]$	$(0.5, \infty)$
等级	1	2	3	4

表 5-5 隶属度 $\mu_E(e)$

$\mu_E(e)$ \ 等级 E	1	2	3	4
VB	0	0	0.2	1
B	0	0.2	1	0.4
M	0.7	1	0.4	0
S	1	0.7	0.2	0

表 5-6 隶属度 $\mu(\Delta K_p)$

$\mu(\Delta K_p)$ 等级 ΔK_p	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
PB	0	0	0	0	0	0.4	1
PM	0	0	0	0	0.4	1	0.4
PS	0	0	0	0.4	1	0.4	0
ZO	0	0	0.4	1	0.4	0	0
NS	0	0.4	1	0.4	0	0	0
NM	0.4	1	0.4	0	0	0	0
NB	1	0.4	0	0	0	0	0

定义模糊关系 $\tilde{R}_E = \tilde{A} \times \tilde{B}$; $\tilde{R}_{Kp} = \tilde{B} \times \tilde{G}$, 则

$$U_{P_z} = E \circ \tilde{R}_E \wedge T \circ \tilde{R}_{Kp} \quad (5.3)$$

其控制输出 U_p 为

$$U_p = \bigcup_{z=1}^{28} U_{P_z} = \bigvee_{z=1}^{28} U_{P_z} \quad (5.4)$$

由此可得到 ΔK_p 控制查询表 5-7, 从而实现了参数 ΔK_p 的在线调整。

(3) T_i 控制器

表 5-7 ΔK_p 查询表

$\Delta K_p \backslash T$	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
E							
1	0	0	0	0	0	-1	-1
2	0	3	3	1	0	-2	-2
3	-2	3	3	1	0	-3	-3
4	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3

它的工作原理如图 5-3 所示。

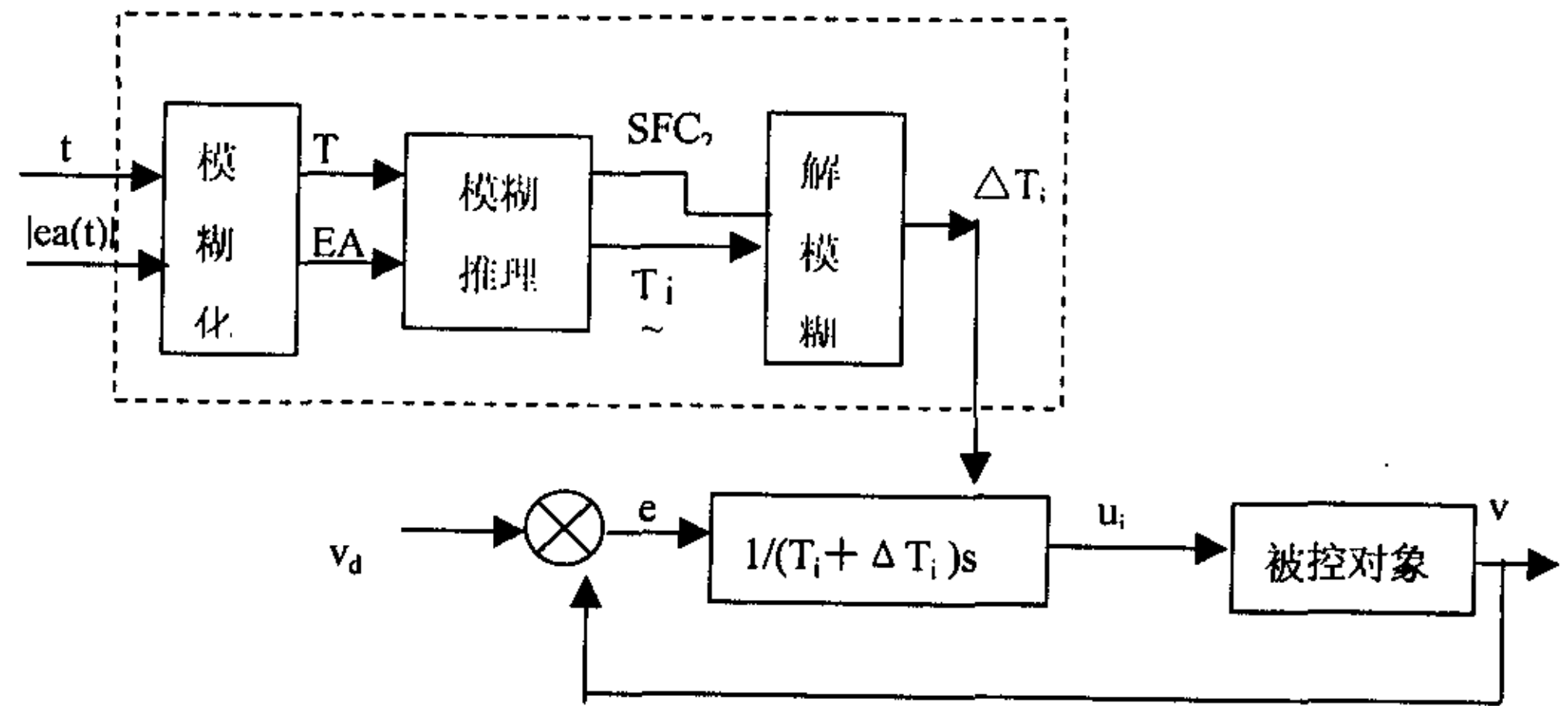


图 5-3 T_i 控制

在 PID 控制器中，积分作用主要是消除系统的静态误差。加强积分作用，有利于减小系统静差，但是过强的积分作用，会使系统超调加大，甚至引起振荡。反之，减弱积分作用，虽然有利于系统稳定，避免振荡，减小超调量，但对消除系统静差不利。一般在调节过程初期，为防止系统饱和和非线性特性等影响所产生的积分饱和现象，而引起系统超调量的增加，这时积分应取弱一些；在过程中期，积分作用应适中，不宜过大，以避免对动态稳定性造成影响；到过程后期，应增强积分作用，以减少系统静态误差，从而提高控

制精度。

因此，输入量 $|ea(t)|$ 的模糊子集与论域取法，均和 $|e(t)|$ 时相同；输出量 ΔT_i 的模糊子集为 PB, PS, ZO, NS, NB；论域量化等级为 $\{-2, -1, 0, +1, +2\}$ 。由上述分析，给出 T_i 在线调整的模糊控制规则，如表 5-8 所示。

表 5-8 SFC₂ 控制规则

ΔT_i \ T	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
EA							
VB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB
B	PS	PS	PS	PS	PS	PS	PS
M	NS	NS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
S	NB	NB	NS	NS	NS	NS	NS

考虑到 $ea(t)$ 为前后两次误差采样值之和，因此，在量化过程中将等级值适当扩大，其量化域如表 5-9 所示，并给定语言变量 EA, ΔT_i 各等级模糊子集的隶属度分别见表 5-10、表 5-11。由表 5-8 给出的控制规则为

$$R: \text{if } EA = C_i \text{ and } T = B_j \text{ then } \Delta T_i = P_k \quad (i, j, k \text{ 同前})$$

5-9 $ea(t)$ 量化域

量化域	(0,0.3]	(0.3,0.4]	(0.4,0.6]	(0.6,∞)
等级	1	2	3	4

表 5-10 隶属度 $\mu_{EA}^{(ea)}$

$\mu_{EA}^{(ea)}$ / 等级 EA	1	2	3	4
VB	0	0.2	0.7	1
B	0	0.2	1	0.7
M	0.4	1	0.7	0
S	1	0.7	0.2	0

表 5-11 隶属度 $\mu(\Delta T_i)$

$\mu(\Delta T_i)$ / 等级 ΔT_i	-2	-1	0	+1	+2
PB	0	0	0	0.4	1
PS	0	0	0.4	1	0.4
ZO	0	0.4	1	0.4	0
NS	0.4	1	0.4	0	0
NB	1	0.4	0	0	0

定义模糊关系 $R_{EA} = C \times P$; $R_{Ti} = B \times P$, 则

$$U_{Tiz} = EA \circ R_{EA} \wedge T \circ R_{Ti} \quad (5.4)$$

其控制输出 U_{Ti} 为

$$U_{Ti} = \bigcup_{z=1}^{28} U_{Tiz} = \bigvee_{z=1}^{28} U_{Tiz} \quad (5.5)$$

由此可以得到 ΔT_i 控制查询表 5—12。从而可实现参数 ΔT_i 的在线调整。

表 5—12 ΔT_i 查询表

ΔT_i \ T \ EA	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-2
2	0	0	0	0	0	-1	-1
3	2	1	1	1	1	1	1
4	2	2	2	2	2	2	2

(4) T_d 控制器

它的工作原理如图 5—5 所示。

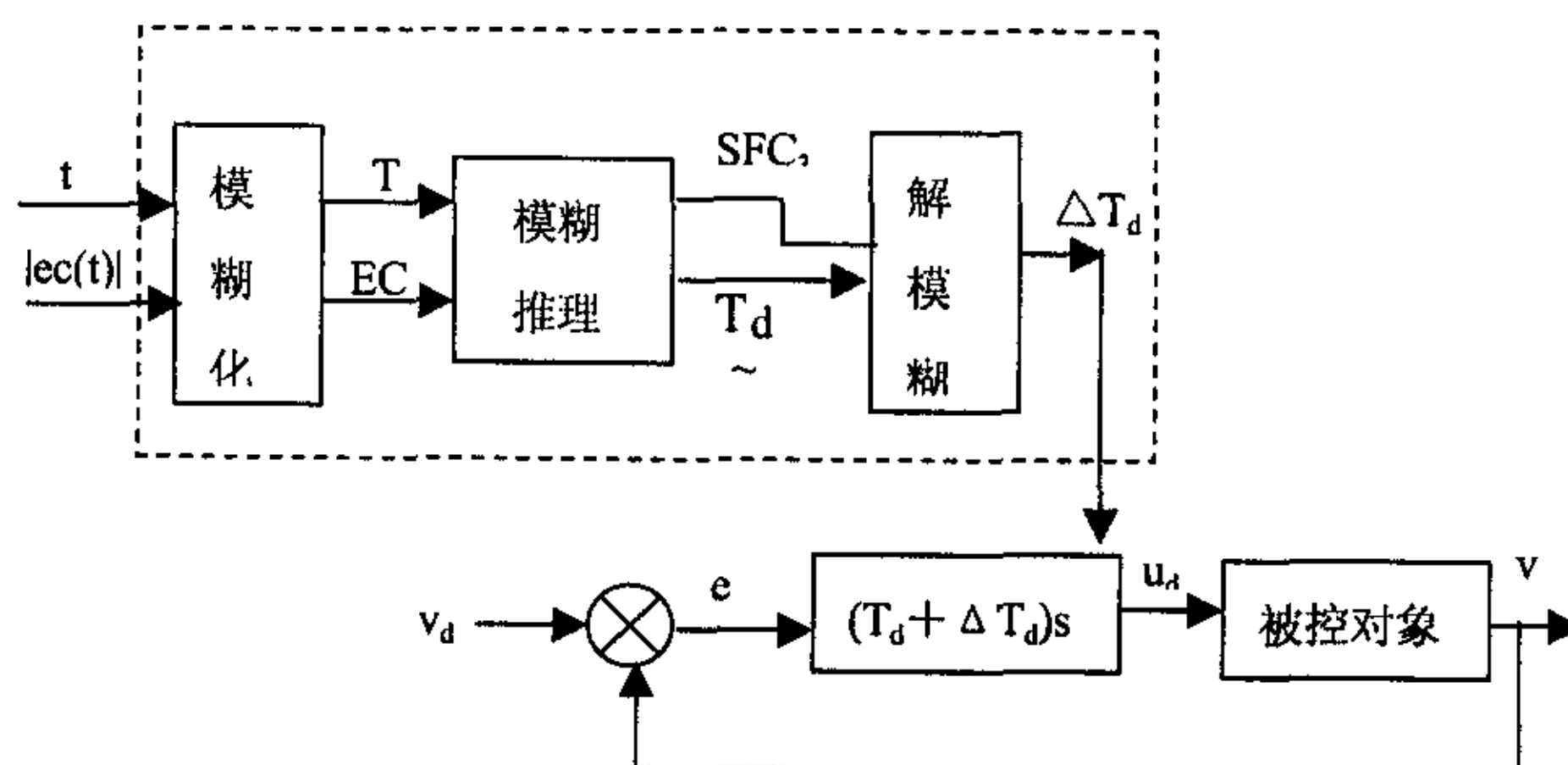


图 5—5 T_d 控制

在 PID 控制器中，微分作用主要是针对具有大惯性的被控对象，改善其动态性能。增大微分时间 T_d ，有利加快系统的响应，使系统超调量越小，稳定性增加，但对扰动敏感，抑制外扰能力减弱；若 T_d 过大，会使调节过程出现超前减速，调节时间增长；反之若 T_d

过小，调节过程的减速将会滞后，过程超调增加，系统响应变慢，稳定性变差。因此，对于时变且不确定系统， T_d 不应取定值，应适应被控对象的时间常数而随机改变。对于象加热炉这类系统，在其调节过程初期，加大微分作用可以减小系统超调，甚至为无超调；在过程中期，由于调节特性对 T_d 的变化较敏感，因此 T_d 应小些，且在这期间保持不变；在调节过程后期， T_d 应再减小，增加系统对扰动的抑制能力，使调节过程初期由于 T_d 较大造成的调节时间增加而得到补偿。

因此， SFC_3 取输入量 $|ec(t)|$ 的模糊子集为 B、M、S，论域为 $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ； ΔT_d 的模糊子集为 PB、PM、PS、ZO、NS、NM、NB，论域为 $\{-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3\}$ ；给出 T_d 在线调整的模糊控制规则如表 5—13 所示。EC(t) 的量化域划分如表 5—14 所示。给定语言变量 EC， ΔT_d 的各等级模糊子集的隶属度分别见表 5—15、表 5—16。由表 5—13 给出的控制规则为

表 5—13 SFC_3 控制规则

$\Delta T_d \backslash EC$	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
B	PS	PS	ZO	ZO	ZO	PB	PB
M	NB	NB	NM	NS	PS	PB	PB
S	NB	NB	NM	NS	ZO	PM	PM

表 5—14 $ec(t)$ 量化域

量化域	(0,0.1]	(0.1,0.15]	(0.15,0.2]	(0.2,0.3]	(0.3,0.4]	(0.4,∞)
等级	1	2	3	4	5	6

表 5-15 隶属度 $\mu_{EC}(ec)$

$\mu_{EC}(ec)$ 等级	1	2	3	4	5	6
EC						
B	0	0	0	0.3	0.7	1
M	0	0.3	0.7	1	0.7	0.3
S	0.7	1	0.7	0.3	0	0

定义模糊关系 $\tilde{R}_{EA} = \tilde{D} \times \tilde{Q}$; $\tilde{R}_{Td} = \tilde{B} \times \tilde{Q}$, 则

$$U_{Tdz} = EC \circ \tilde{R}_{EC} \wedge T \circ \tilde{R}_{Td} \quad (5.6)$$

其控制输出 U_{Td} 为

$$U_{Td} = \bigcup_{z=1}^{21} U_{Tdz} = \bigvee_{z=1}^{21} U_{Tdz} \quad (5.7)$$

由此, 可以得到 ΔT_d 控制查询表如表 5-17 所示, 从而可实现参数 ΔT_d 的在线调整。

表 5-16 隶属度 $\mu(\Delta T_d)$

$\mu(\Delta T_d) \backslash T$	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
ΔT_d							
PB	0	0	0	0	0	0.5	1
PM	0	0	0	0	0.5	1	0.5
PS	0	0	0	0.4	1	0.5	0
ZO	0	0	0.4	1	0.4	0	0
NS	0	0.5	1	0.4	0	0	0
NM	0.5	1	0.5	0	0	0	0
NB	1	0.5	0	0	0	0	0

表 5-17 ΔT_d 查询表

$\Delta T_d \backslash T$	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
EC							
1	1	1	0	-1	-2	-2	-2
2	2	2	0	-1	-2	-3	-3
3	1	1	0	-1	-2	-2	-2
4	3	3	1	-1	-1	-3	-3
5	1	1	0	-1	-1	-1	-1
6	3	3	0	0	0	1	1

5.3 仿真研究

采用 PID 参数自校正模糊控制系统，如图 5-6 所示。图中 CFC 为 PID 参数自校正模糊控制器；零阶保持器传递函数为 $H(s) = (1$

$-e^{Ts})/s$; 被控对象 $G(s) = (K_1 e^{-\tau s}) / (T_1 s + 1)$ 近似为加热炉温度被控模型; 采样周期为 T 。

5.3.1 系统分析

该系统纯滞后时间 τ 为采样周期的 n 倍, 即 $\tau = nT$ 。图 5-7 中零阶保持器与被控对象的总传递函数为

$$\begin{aligned} W(s) &= \frac{K_1(1 - e^{-Ts})}{s(T_1 s + 1)} e^{-n\tau} \\ &= K_1(1 - e^{-Ts}) \left(\frac{1}{s} - \frac{T_1}{T_1 s + 1} \right) e^{-n\tau} \end{aligned} \quad (5.8)$$

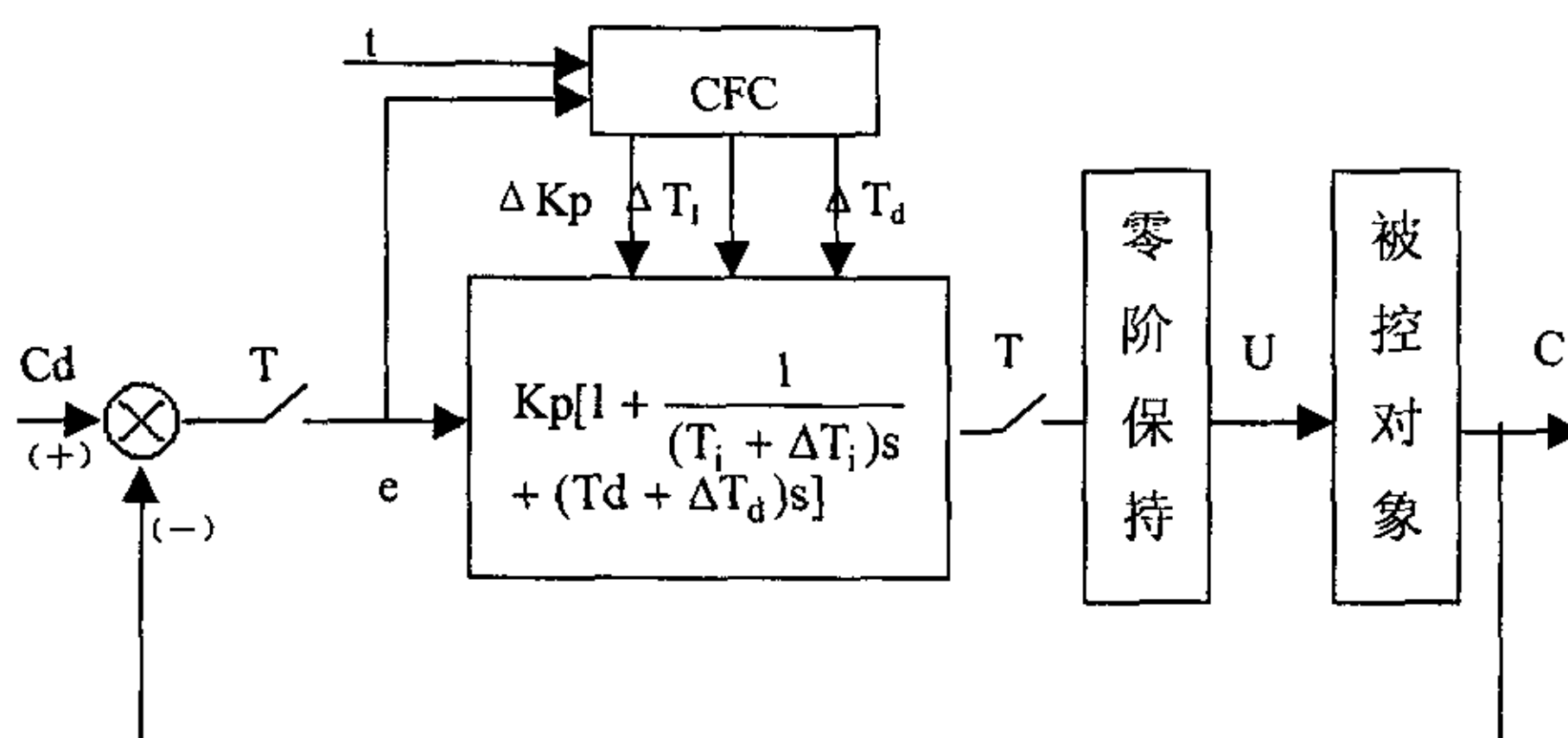


图 5-7 PID 参数自校正模糊控制系统

对上式进行 z 变换, 并设 $\alpha = e^{-T/T_i}$, 则

$$\begin{aligned}
W(z) &= K_1 (1 - z^{-1}) \left(\frac{1}{1 - z^{-1}} - \frac{1}{1 - e^{(-T/T_i)} z^{-1}} \right) z^{-n} \\
&= K_1 (1 - z^{-1}) \left(\frac{z^{-1}(1 - \alpha)}{(1 - z^{-1})(1 - \alpha z^{-1})} \right) z^{-n} \\
&= \frac{k_1(1 - \alpha)z^{-(n+1)}}{(1 - \alpha z^{-1})} \\
&= \frac{C(z)}{e_u(z)}
\end{aligned} \tag{5.9}$$

即：

$$C(z)(1 - \alpha z^{-1}) = K_1(1 - \alpha)e_u(z)z^{-(n+1)} \tag{5.10}$$

其差分方程为

$$C(k) = \alpha C(k-1) + K_1(1 - \alpha)e_u(k - n - 1) \tag{5.11}$$

同时，由式 (5.11) 可以给出 PID 控制器的离散增量输出方程为

$$\begin{aligned}
\Delta e_u(k) &= K_p \left[\left(1 + \frac{T_d}{T} \right) e(k) + \left(\frac{T}{T_i} - 2 \frac{T_d}{T} - 1 \right) e(k-1) + \frac{T_d}{T} e(k-2) \right] \\
&\tag{5.12}
\end{aligned}$$

5.3.2 编程框图

根据前面所讨论 PID 参数自校正模糊控制器设计方法，按图 5-7 进行编程。

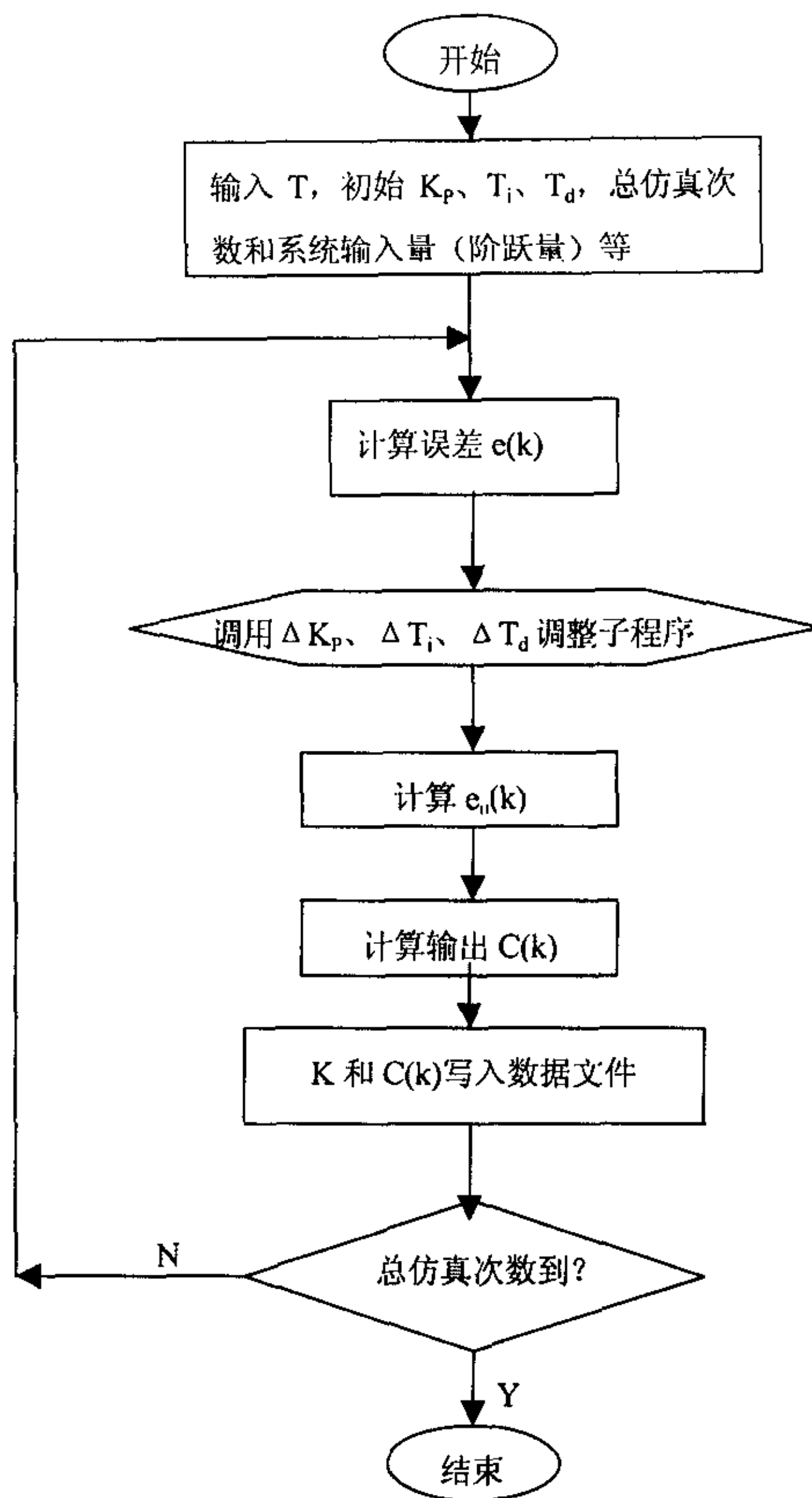
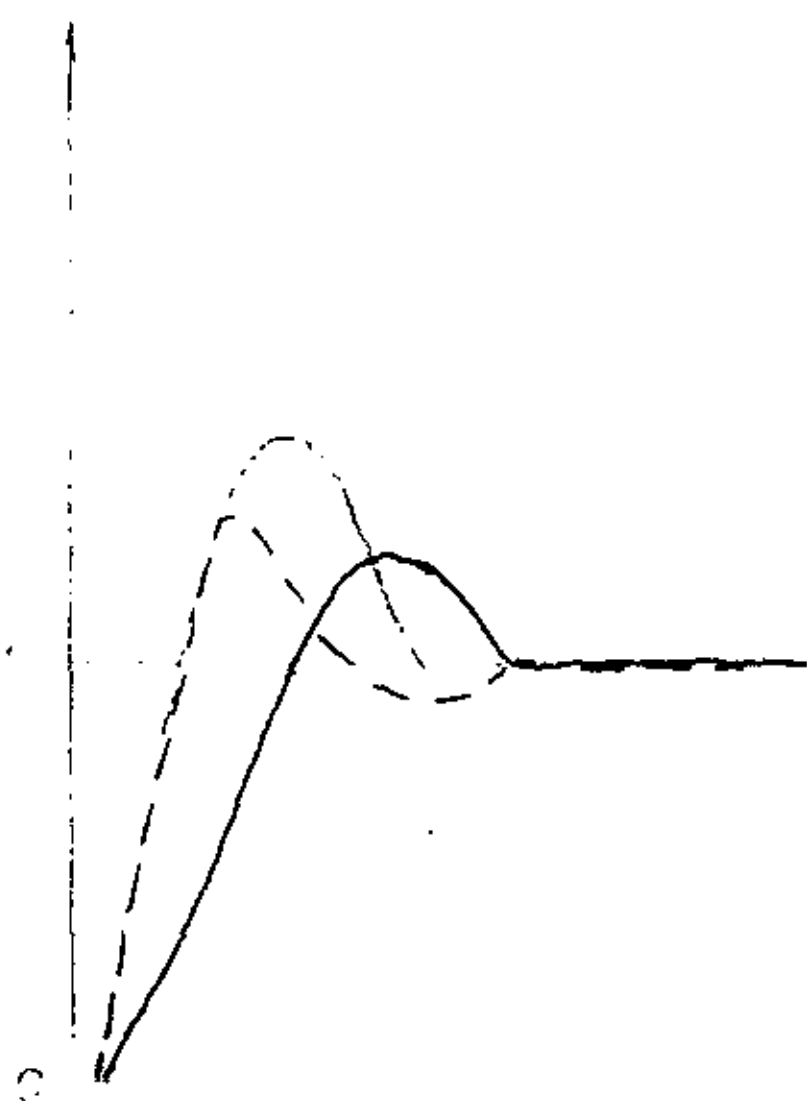


图 5—8 编程框图

5.3.3 仿真结果与比较

加热炉温度过程可以近似地以一阶被控对象环节来逼近。考虑到被控对象的滞后时间和惯性系数较大, 故被控对象取为 $G(s)=e^{-50s}/(100s+1)$, 即 $\tau=50$, $T_i=100$ 。按临界比例度确定初始值 $K_p=7.5$ 、 $T_i=1.2$ 、 $T_d=0.4$ 。在单位阶跃输入下, 分别采用 PID 控制器、基本模糊控制器和 PID 参数交正模糊控制器, 得仿真结果表所示。从图中可以直观地看到 PID 模控制算法具有响应迅速, 且保证基本无稳态误差和稳态极限环振荡。

常规 PID 控制器	基本模糊控制器	PID 自校正模糊控制器
$\sigma=10.2\%$	$\sigma=14.3\%$	$\sigma=11.2\%$
$T=60s$	$T=30s$	$T=30s$
稳态误差=0%	稳态误差=2.2%	稳态误差=0%



— : 常规PID控制的仿真曲线

- - : 基本模糊控制的仿真曲线

- · - : PID自校正模糊控制的仿真曲线

第六章 结论

从以上分析可以看出，模糊控制技术是一种无差的精确控制，目前发展已相当成熟。对大滞后时变系统的加热炉而言，模糊控制系统比 PID 有无法比拟的优点。在控制一定工艺参数时，可以以最佳的空燃比使用最少的燃料达到最佳燃烧，所需匹配的助燃空气通过调节风机转速达到节电、节燃气的效果。炉温控制精度高，加热质量提高、减少了产品的氧化烧损，减少炉子热损，延长炉子寿命。

另外，该加热炉技术改造后，可提高生产作业率，减少劳动强度和定员，改善工作环境及减少对大气环境的污染。

致 谢

本文是在导师王建辉教授的悉心指导下完成的。王老师严谨的学风、活跃而多变的思维方式和丰富的理论知识给学生留下了深刻的印象。王老师在百忙中仍十分关心学生的学习，在作者的研究方向、研究内容上给予了直接而具体的指导。在本文完成之际，作者谨向导师王建辉教授表示衷心的感谢。

同时，感谢首钢电子公司计算机公司的副导师赵连军高级工程师对作者的精心指导。同时还感谢信息科学与工程学院的张石副院长、张素芬老师在学习期间提供的帮助。

另外，我代表首钢 97 级计算机科学与工程工硕班全体学员，对信息科学与工程学院的顾树生院长、刘建昌副院长、王剑主任、毛志忠教授和秦树凯教授，在我们学习和设计阶段给予的无私关怀和帮助表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 王中杰, 余章雄, 柴天佑. 智能控制综述. 基础自动化. 1998, Vol. 5(6), 1~6.
- [2] 谢书明, 柴天佑. 转炉炼钢自动化现状与发展. 冶金自动化. 1998, Vol. 22(1), 1~5.
- [3] 日本工业炉协会编. 工业炉手册. 冶金工业出版社, 1989.
- [4] 何用梅. 现代连续加热炉. 冶金出版社. 1981.
- [5] 张卫军. 加热炉操作节能与计算机控制. 河北省金属学会轧钢学术委员会加热炉及轧钢工艺节能技术交流会专题讲座. 1997, 1~12.
- [6] 熊化平等. 加热炉系统的技术改造. 1999, 鄂钢科技, 1999, 1, 2, 1~3.
- [7] 周箴, 赵金, 万淑芸, 王离九. 简化的模糊 PID 控制方案. 基础自动化. 1998, Vol. 5(6), 41~44.
- [8] 恩莉, 沈清波, 李明忠. 基于模糊推理的均热炉迭代学习控制. 基础自动化. 1998, Vol. 5(2), 57~58.
- [9] 纪咏梅. 模糊控制、神经网络在水泥回转窑温度控制中的应用. 1997, 1~41.
- [10] 宁涛, 高大志. 静电喷塑电加热炉烘道模糊控制. 基础自动化. 1999, 2, 15~17.
- [11] 鲁守荣. 模糊控制器的参数调整的产生式方法. 基础自动化. 1999, Vol. 6(4), 4~6.