

# 尿素生产过程区域优化控制研究<sup>1)</sup>

周金荣 黄道 蒋慰孙

(华东理工大学自动化所 上海 200237)

## 摘 要

从复杂工业过程优化控制的特点出发,提出了一种新的区域优化控制策略.该策略与传统的优化控制技术相比,适用范围广且决策更为灵活.采用这一策略开发了尿素生产过程的实时优化专家系统,该专家系统已在某大型化肥厂实际运行,经济效益显著.

**关键词:** 区域优化,优化控制,专家系统,尿素生产过程.

## 1 引言

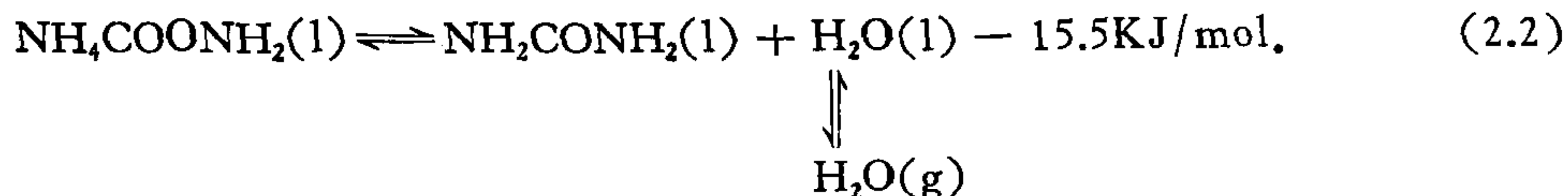
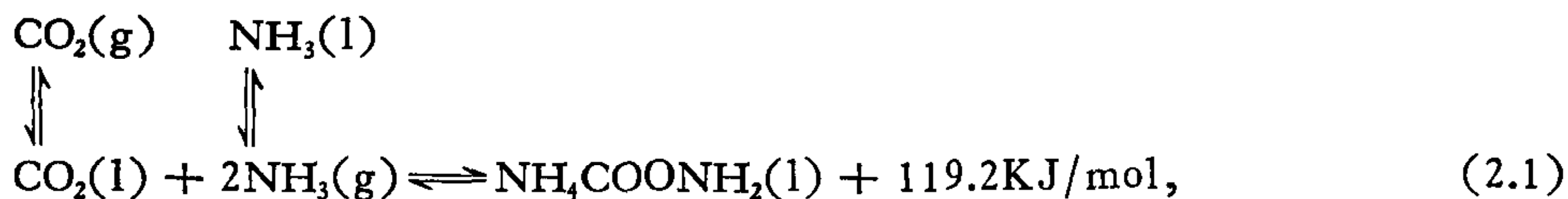
当前,过程控制的高要求和工业过程的复杂性,对工业过程的优化控制提出了新的挑战.而实际工业过程的优化控制,可以带来巨大的经济效益,这已为实践所证明.新的适合于工业过程要求的优化控制策略的研究已成热点.其中以人机综合为特点,充分发挥人的判断、决策能力的交互式优化控制研究更是引起了工业界和控制界的共同关注<sup>[1-2]</sup>.

尿素生产过程是合成氨生产的后续过程,由于它是一个典型的非线性、时变、大滞后的涉及相变及可逆反应的复杂工业过程,所以对它进行在线优化控制的研究工作很少.基于对尿素过程的深入了解,作者应用人工智能、专家系统技术,以实现过程区域优化控制为目标,建立了尿素装置的实时专家系统来解决这一复杂过程的优化控制和决策问题.考虑到尿素生产过程的机理不够清楚,因此专家系统的知识主要由神经网络模型知识、专家经验知识和工况测试知识组成.同时应用一种新的遗传算法来获取并优化部分规则,以作为过程知识的重要来源.最终构成的专家系统具有优化决策、故障诊断、工况预测等功能.该系统已在某大型化肥厂投入在线运行,并取得了显著的经济效益.

## 2 尿素生产过程机理特征分析

尿素生产过程是一个包含多种组分化学平衡,相平衡的复杂的可逆反应过程.依据已有理论,其主要反应机理可以由下述两个反应式和三个气液平衡关系来近似:

1) 本文工作得到国家自然科学基金(重点)项目基金资助.  
本文于1994年11月24日收到



反应机理的复杂性导致了工艺流程的复杂,加之尿素生产中腐蚀性严重,设备老化,因而经验因素在这一生产过程中占有重要地位.传统的基于精确模型的优化方法难以解决这一操作优化和控制问题.

依据分析,尿素生产过程的优化目标应该在保持装置平稳操作的前提下,实时地根据工况进行操作优化,使尿素生产中全装置吨尿素氨耗最低.此为一全局性优化指标.根据对尿素过程的分析以及工厂现场的实际调研,基于二氧化碳气提法的工艺特点,得到如下三个具有工程意义的优化子目标:1) 尿素合成塔的转化率最高;2) 气提塔的气提效率最高;3) 低压吸收部分返回水量最少.这三个命题的数学表达式分别为:

**命题 1.**  $\max_{T,a,b,P} \eta = f_1(T, a, b, P),$   
 s. t.  $T_{\min} \leq T \leq T_{\max}, P_{1\min} \leq P_1 \leq P_{1\max},$   
 $a_{\min} \leq a \leq a_{\max},$   
 $P_{\min} \leq P \leq P_{\max},$   
 $b \leq b_{\max}.$

**命题 2.**  $\max_{b',P_2,P} \alpha = f_2(b', P_2, P),$   
 s. t.  $b' \leq b_{\max},$   
 $P_{2\min} \leq P_2 \leq P_{2\max},$   
 $P \leq P_{\max}.$

**命题 3.**  $\min F = f_3(\eta, \alpha, P_3, T_1),$   
 s. t.  $P_{3\min} \leq P_3 \leq P_{3\max},$   
 $T_{1\min} \leq T_1 \leq T_{1\max}.$

其中  $\eta, \alpha, F$  分别为合成系统的转化率、气提效率、低压系统的返回水量;  $T, a, b, P_1, P, b', P_2, P_3, T_1$  分别为合成反应温度、反应氨碳比、水碳比  $b$ 、高压甲胺冷凝器汽包压力、高压系统压力、系统内部  $\text{H}_2\text{O}/\text{Ur}$  比、气提塔壳侧加热蒸汽压力、低压系统的系统压力、低压系统的冷凝温度.

由此可看到:(1) 因缺乏机理知识,系统的精确模型难以建立,优化命题的解析表达式无法获得(作者曾总结了已有的机理模型研究成果,结合自行开发的合成系统机理模型,发现其精度难以满足要求);(2) 三个优化子目标是通过系统中水量的关联形成了互相依赖、互相制约的局面;(3) 某化肥厂负荷变化频繁且幅度大(50%—100%),操作优化难度大,对上述优化命题而言,它们都涉及到若干优化变量,当由于某一变量的取值在不同的工况下有不同要求时,围绕同一优化目标,针对不同工况有变化的优化域.



### 3 区域优化策略及其工程实现

#### 3.1 区域优化策略的意义

区域优化是相对于点优化而言的,特指围绕命题的优化目标,以搜索解空间中的具有次优特点的满意区域为目的的寻优技术。

对于任何一个优化命题,当采用各种传统的优化算法进行寻优时,最终所获得命题的最优解(或次优解)在解空间中都表现为一个最优点,这可以称之为点优化。但是,类似于尿素生产过程优化控制这样的工程优化命题,区域优化更为合适。一方面,随着点优化进行,当进入某一区域后,继续寻优对优化目标函数的影响作用已不明显;另一方面,即使不考虑优化命题所依赖的各种过程知识可能出现的不可靠问题,仅从工程实际中所广泛存在的噪声、不可测扰动等因素对工况的影响就使得点优化难以真正实现。此外,在优化进行过程中随着工况的改变,优化要求可能发生改动,且可能存在多种优化方案,这就须要加以权衡。工程中通常都是把接近最优点附近的某区域作为可行域,这种确定可行域的方法实质上就是区域优化思想的一种体现。

#### 3.2 区域优化策略的工程实现

图 1 为由  $X_1$ 、 $X_2$  两优化变量组成空间中各类区域划分示意图。图中,“ $\leftrightarrow$ ”表示边界是可移动的,非故障区域的边界根据生产安全、设备性能等方面的要求进行确定,可行域与优化域的初始边界则需由专家规则和机理分析结果加以选定。

可行域的确定较为简单,这里不作详细讨论。优化区域的获得最终归结为边界的确定和修正规则集的获取,一种方便易行的方法是基于反映目标变量与优化变量关系的神经网络模型,进行传统意义上的寻优,获得理想的优化点(对于其它类型的数学模型亦可同样处理),在此基础上,结合专家系统规则和机理分析确定出优化区域。为保证优化区域的动态优化性,可周期性地对神经网络模型进行校正训练和寻优,进而对优化区域进行修改。同时依据工况运行情况总结出可靠的边界修正规则,组成规则集(如当工况操作条件越出边界后系统的性能趋向更优,则需适当地扩展和移动边界)。维持优化区域始终处于动态演变状态。

在无法进行传统的点优化的情形下,可直接根据专家经验规则和机理分析知识进行优化区域的搜索,此时要求优化区域边界修正规则集非常有效和合理。

修正规则集的建立和修改可分为自动学习和人机综合两方面的内容。若采用神经网络模型来作为知识、规则表达的手段时,神经网络自身所具有的自学习功能可实现上述规则集的修改,而且还可利用遗传算法实现规则的自优化;另一方面,可通过现场技术人员

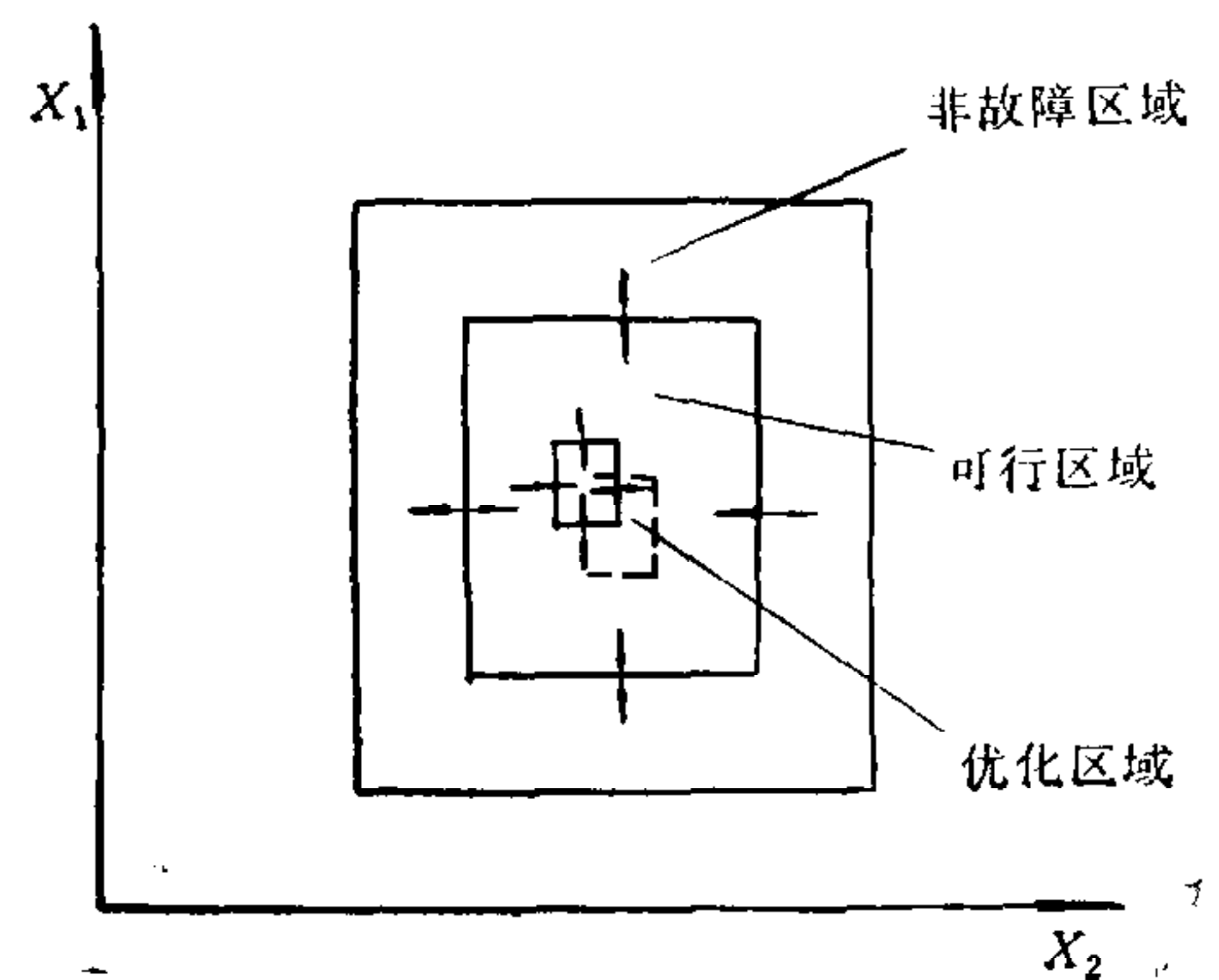


图 1 变量空间区域划分示意图



的参与(通过人机接口进行规则的补充及修改等),充分发挥人的判断、决策能力来进行交互式优化控制策略的确定,这些思想在尿素生产过程专家系统中都得到了应用。

由可行域获得优化区域,专家系统在这方面具有独特的优势,利用现场专家大量的经验规则和一定的定量计算可引导由可行域到优化区域的搜索过程。区域优化能否实现取决于所获得的专家知识是否可靠和全面。

当优化命题含有  $m$  个优化变量时,其优化区域为一  $m$  维空间,可类似于上述过程搜索得到优化域。

### 3.3 区域优化策略的特点

当然,从最优性上来看,区域优化相对于点优化是稍逊一筹的,但是无论从工程实现还是从应用价值两方面来看,区域优化思想更能为人们所接受(经典的数值寻优除外),而且区域优化思想非常适合采用专家系统进行工程实现。这一区域优化策略的主要特点如下:

- 1) 这一思想来源于工业过程实际,非常适合于解决具有多目标多约束的工程优化问题;
- 2) 对数学模型的精度要求低,适于反应机理复杂、操作具有经验性以及优化要求高的工业过程操作的优化;
- 3) 强调人机综合,能充分发挥人的判断、决策能力,优化问题可依操作人员随工况而作变化,具有主观、交互式优化的特点;
- 4) 采用了在线滚动优化机制,获得的过程操作变量优化区域将随着工况变化及优化要求的不同而移动,优化过程中能充分满足某些操作变量的硬约束。

## 4 基于区域优化尿素生产专家系统的开发

### 4.1 新的分层协调专家系统结构的应用<sup>[3]</sup>

根据上面分析得到的尿素生产过程的各级优化目标,尿素生产过程被分解成三个子过程,即合成区(包括尿素合成塔、高压甲铵冷凝器等)、气提区(包括气提塔等)和循环回收区(包括中压吸收塔及低压分解回收设备)。合成区与气提区组成了高压区,循环回收区则为中、低压区。据此,采用分层递阶的思想建立了图 2 所示的新型分层结构专家系统。

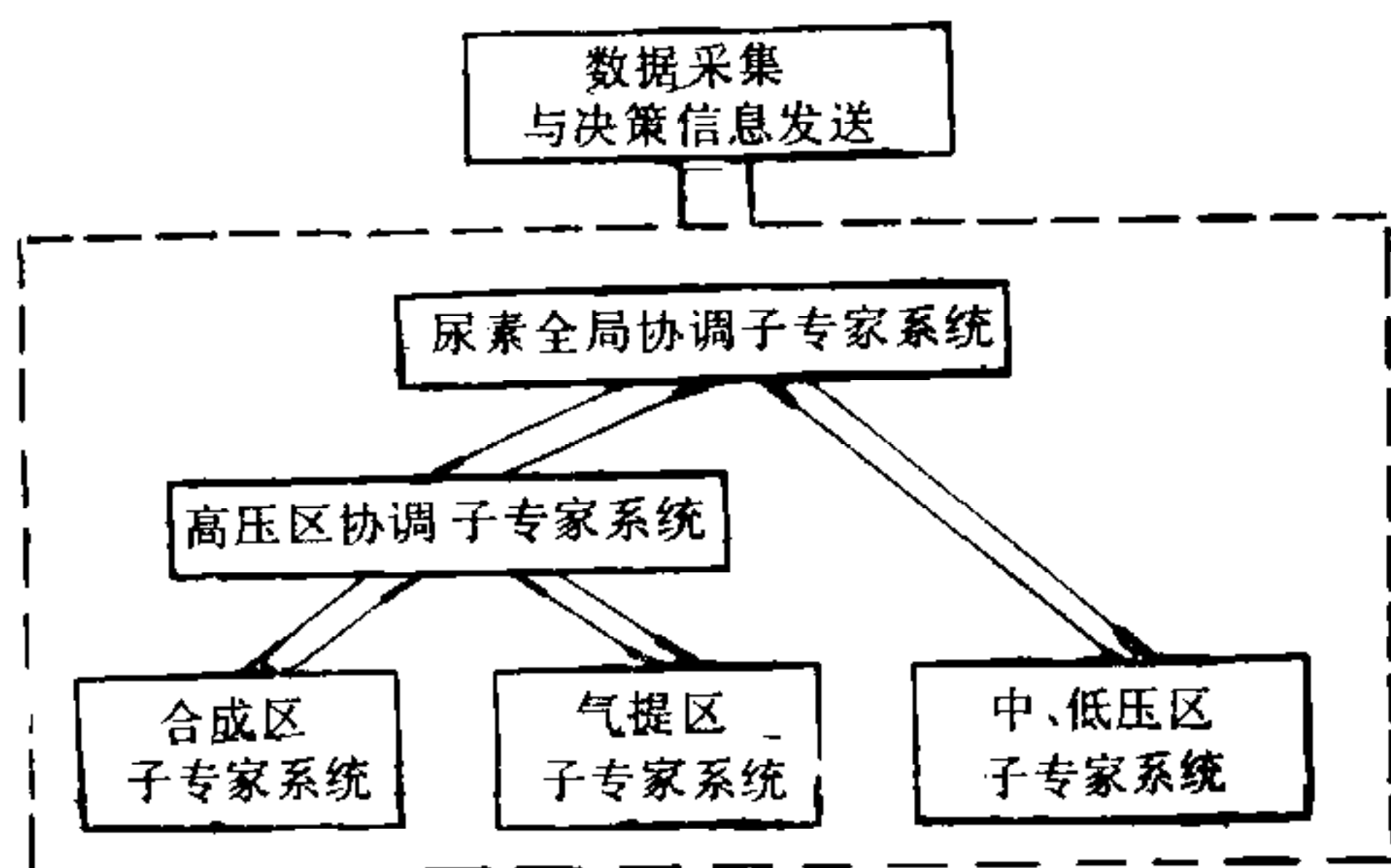


图 2 尿素生产过程专家系统结构图

各基础子专家系统面向各子过程,依据子过程的优化目标和过程知识作出优化决策。局部智能协调子专家系统则以系统的局部优化目标和与之相关的各子过程间的关联知识为基础对各基础子专家系统的

决策进行协调,作出局部优化决策。全局智能协调子专家系统面向全过程对各局部的优化决策进行总协调,所作出的决策为全系统的结论性决策。



从结构上对系统知识进行分布式存贮和分层协调决策,对解决知识的完备性和一致性,加快决策速度具有重要意义。

#### 4.2 神经网络等应用于过程知识表示<sup>[4-6]</sup>

神经网络所具有的众多优良性能为尿素生产过程模型化问题的解决提供了一条新的途径,但在应用研究中有许多难题需一一加以解决。

在神经网络结构的应用研究中,根据对尿素合成塔等系统的分析,采用了过程机理知识与网络结构选择相结合的方法,提出了三种具有不同连线特征的神经网络,即多层复杂前馈型网络、多层复杂反馈型网络和多层混合型网络。同时提出了一种由一静态网络和一动态网络所组成的新型网络结构。

在样本抽取方面,根据实际工业过程数据常受各种干扰影响的特点,确定样本数据库由两部分组成,一类是包含过程动态信息的以周期  $T$  为间隔的采样样本,另一类则是表征随机系统的稳态信息的一段时间区域上的均值样本,从而保证了所获过程知识的可靠性和有效性。在此基础上,分别建立了尿素合成塔、气提塔、低压循环过程等的神经网络模型,为尿素专家系统的建立提供了可靠的深层知识。

遗传算法是 1975 年由 Holland 提出的模仿自然界生物进化思想而得出的一种全局优化算法。对于尿素生产这样的实际过程,作者提出了改进型遗传算法,即将传统的遗传算法对变量本身的离散化编码改变成直接进行浮点式进化遗传计算,并应用它进行了尿素生产过程若干决策规则获取和优化的研究<sup>[7]</sup>。

利用以上所获得的各类过程知识,并结合部分机理知识和现场工况测试获得的知识,采用一种新型的启发式推理,即通过定义和自动校正变量的优先级别进行推理决策。最终基于区域优化策略构成了具有优化决策、故障诊断、工况预测等功能的专家系统。

#### 4.3 尿素生产专家系统的现场实施

作者所开发的尿素生产专家系统于 1993 年在某化肥厂年产 52 万吨尿素的大型装置上实现了在线闭环的计算机控制和操作优化,取得了良好的投运效果和显著的经济效益。装置的吨尿素氨耗由投运前 591 公斤降至 583.5 公斤,年增效益达 1138 万元。该课题作为国家“八五”重大科技攻关项目“合成氨和尿素装置优化控制和调度”的内容已于 1994 年 10 月通过国家级鉴定。专家鉴定书认为“该成果属国内首创,总体水平达到当前国际先进水平,其中在线闭环优化达到国际领先水平”。

### 参 考 文 献

- [1] McAvoy T J. Contemplative stance for chemical process control-an IFAC report. *Automatica*. 1992, 28(2):441—442.
- [2] Ming Rao. frontiers and challenges of intelligent process control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 1992, (5):475—481.
- [3] 周金荣,黄道,蒋慰孙. 尿素生产专家系统的开发研究. 华东理工大学学报. 1994, 20(2): 205—209.
- [4] 周金荣,黄道,蒋慰孙. 基于机理神经网络结构及其应用的研究. 一九九四年中国控制会议论文集. 中国科技出版社. 1994, 821—826.
- [5] 周金荣,黄道,蒋慰孙. 基于神经网络的随机动态系统优化新方法. 华东化工学院学报. 1992, 18 (suppl.): 27—32.
- [6] 周金荣,黄道,蒋慰孙. 一种新型神经网络模型的研究. 信息与控制. 1994, 23(1): 22—26.
- [7] 周金荣,黄道,蒋慰孙. 一种改进型遗传算法的研究及其应用. 工业过程模型化及控制. 上海交通大学出版社. 1994, 392—397.

## OPTIMAL CONTROL FOR UREA PLANT VIA REGION OPTIMIZATION

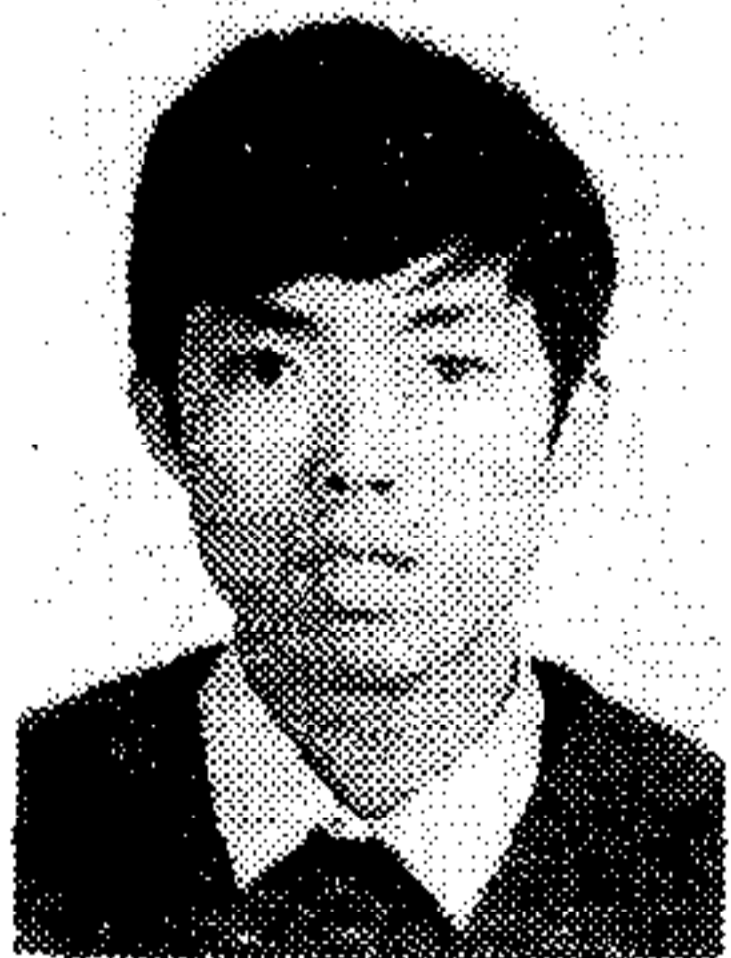
ZHOU JINRONG    HUANG DAO    JIANG WEISUN

*(Institute of Automation, East China University of Science  
and Technology Shanghai 200237)*

### ABSTRACT

In this paper, a new regional optimizing strategy(ROS) is studied via control requirements of complex industrial process. Compared with traditional optimization methods, ROS is more suitable and flexible. By the use of this strategy, an active expert system is built for the large-scale urea plant. The significant economic benefit was achieved in a fertilizer factory.

**Key words:** Region optimizing strategy, optimal control, expert system, urea production process.



**周金荣** 1965 年生于江苏省姜堰市。1993 年毕业于华东理工大学自控系, 获博士学位。现为华东理工大学自动化研究所副教授。主要研究兴趣是复杂化工过程计算机控制、神经网络理论与工业应用以及工业过程专家系统开发等。



**黄道** 1947 年生于江苏常州。1985 年毕业于华东理工大学自控系, 获博士学位。现为华东理工大学自动化研究所所长, 教授。长期从事过程数学模型和计算机控制方面的研究, 主要学术方向是计算机集成生产系统和工业过程智能控制等。

**蒋慰孙** 照片、简介见本刊第 18 卷第 1 期。