

学校编码: 10384

分类号: _____ 密级: _____

学 号: 200433005

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

**FCCU 反应再生部分动态建模与仿真
系统研究**

**Dynamic Modeling and Simulation of the Riser Reactor and
the Regenerator for FCCU**

陈 玉 石

指导教师姓名: 江青茵 教授
专业名称: 化 学 工 程
论文提交日期: 2007 年 7 月
论文答辩时间: 2007 年 8 月
学位授予日期: 2007 年

答辩委员会主席: _____
评 阅 人: _____

2007 年 7 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。
本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1. 保密（ ），在 年解密后适用本授权书。
2. 不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

摘 要

催化裂化是目前炼油厂中的核心加工工艺,国内外对催化裂化反应再生系统的研究十分活跃,其中大量研究工作是关于工艺参数的变化对反应过程的影响,但反应-再生器是一个多参数,非线性、时变及多变量紧密耦合的复杂系统,为此就要建立能反映其化学反应规律的动力学模型,分析和研究反应再生系统动态特性,对其进行设计改进、参数优化以及自动控制系统的建立、控制系统的可靠运行至关重要。

本文基于以上原因,在综合考虑了物料衡算、能量衡算等方程的基础上,采用机理建模方法,建立了催化裂化反应再生系统的动态简化数学模型。在提升管反应器的建模过程中采用五集总(原料油,柴油,汽油,气体,焦炭)动力学模型,再生器采用烧焦罐烧碳反应动力学模型,烟气耗氧动力学模型,再结合提升管二段反应温度,再生催化剂温度方程构建成了反应再生系统数学模型。

为了解决反应动力学参数,利用某工厂催化裂化装置的现场数据,引用工程数学软件 MATLAB7.0 中 Nelder-Mead 单纯形法,然后对求得动力学参数代入模型中进行验证,再通过 MATLAB 中 ODE15s 算法对反应再生系统模型进行仿真模拟,得出结果与现场采集到的数据能够基本吻合。

随后,对提升管反应器模型进行简化,根据反应几乎是在瞬间完成的特点,忽略反应的动态过程,简化后的模型仍然可以很好地反映反应再生系统的动态特性。

最后,本文根据上述简化的动态模型,在本实验室开发的 XD-APC 软件平台软件上组态,创建了反应再生仿真系统,完全模仿实际工业装置的计算机控制过程,并分析研究了催化剂流量、反应温度、进料量以及空气流量对整个系统的动态响应,其结果与实际工业的变化趋势一样,再次证明模型总体上可以正确地反映反应再生系统的动态特性,可以用来作为逼真的虚拟环境来实现工业过程的仿真研究。

关键词: 反应再生系统; 动态建模; 仿真

ABSTRACT

Fluid catalytic cracking (FCC) unit is one of the key processes in modern petroleum refining. Mainly study the influence of technology innovation on reactive process in domestic and abroad. But FCC reactor and regenerator is a complex system for its multivariable, time-varying and nonlinear characteristics, the modeling of the system of complex kinetics reactions should be studied. A dynamic model is put forward to study the operating characteristics of FCC reactor and regenerator; it is also of great importance for the design, optimization of operation parameters and simulation of FCC reactor and regenerator system.

Based on the equations of mass balance, energy balance, a general mathematical model is developed for rigorous dynamic simulations of FCC reactor and regenerator. This paper built up five-lump (including non-conversion raw material oil, diesel oil, gasoline, gas and coke) kinetic model of a riser reactor as well as the temperature of the reactor equations. Carbon burning and flue gas oxygen burning reaction kinetics model is used in FCC regenerator as well as the temperature of the regenerator equations.

The reaction kinetics parameters of the lump model were estimated from the operation data and yields data of FCC reactor (per hour) in an industrial plant by Nelder-Mead minimization algorithm. Then simulation is implemented by the ODE15s of Matlab 7.0. The results of the simulation are in a good agreement with the industrial data.

According to characteristic of rapidly reaction in the reactor, the gas and the solid phases can be ignored. Compared to the former simulation results, the results of simplified model can also reflect the dynamic characteristics of FCC reactor and regenerator system.

Based on the simplified mathematic model, the simulation system of FCC reactor and regenerator is developed on XD-APC, one kind of comprehensive process control software designed by our lab on which appropriate control strategies and optimization technologies can be implemented easily. The system is developed according to the

simplified dynamic model above combined with controller equations, which enables the use of physical insight from the dynamic model to be used directly in the analysis and detailed dynamic simulation capability of a process. Simulation of operation process are carried out to study the effects of catalytic content, a reactor temperature, raw material oil, air fluxes on the system. The results agreed well with the industrial data.

Finally, the overall dynamic simplified mathematical model is successfully developed which present opportunities for the future establishment of suitable integrated advance control of FCC reactor and regenerator system.

Keywords: Reactor and Regenerator system; Dynamic modeling; Simulation



目 录

第一章 文献综述	1
1.1 国内外催化裂化应用现状.....	1
1.2 国内催化裂化面临的问题.....	2
1.3 催化裂化数学模型简介.....	4
1.4 反应再生系统仿真控制发展.....	10
1.5 论文安排.....	11
本章主要参考文献.....	12
第二章 催化裂化反应再生系统模型	16
2.1 生产原理.....	16
2.2 工艺流程.....	17
2.3 催化裂化反应动力学.....	18
2.4 机理建模.....	19
2.5 反应器模型建立.....	21
2.6 再生器模型建立.....	24
2.7 物性计算.....	27
2.8 模型求解方法.....	33
2.9 本章小结.....	36
本章主要参考文献.....	37
第三章 模型仿真结果及其分析	38
3.1 模型参数的确定.....	38
3.2 模拟结果与工业现场数据的比较.....	42
3.3 反应器模型简化.....	47
3.4 模型求解.....	52
3.5 反应速度影响分析.....	55
3.6 本章小结.....	56



本章主要参考文献	57
第四章 催化裂化反应再生控制仿真系统	58
4.1 XD-APC 软件概述	58
4.2 反应再生部分仿真系统设计	58
4.3 控制仿真	61
4.4 本章小结	70
第五章 结论与建议	71
5.1 结论	71
5.2 建议	72
硕士期间所发表的论文	74
致谢	75

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Catalogue

CHAPTER 1 INTRODUCTION	1
1.1 Introduction of recent research on FCCU.....	1
1.2 Internal FCCU' s problem.....	2
1.3 Introduction of reactor and regenerator models.....	4
1.4 Overview of recent research on simulation and control.....	10
1.5 Objectives.....	11
References.....	12
CHAPTER 2 MODELING FOR REACTOR AND REGENERATOR	16
2.1 Operating Principles.....	16
2.2 Process of Industrial Production.....	17
2.3 Reaction Kinetic Model.....	18
2.4 Rigorous Mechanism Model.....	19
2.5 Modeling for Reactor.....	21
2.6 Modeling for Regenerator.....	24
2.7 Physical Properties Correlations.....	27
2.8 Simulation details.....	33
2.9 Brief Summary.....	36
References.....	37
CHAPTER 3 RESULTS OF SIMULATION AND ANALYSIS	38
3.1 Determination of Model Parameters.....	38
3.2 Comparison Between Industrial Data and Simulated Data.....	42
3.3 Simplified Models.....	47
3.4 Solutions to Models.....	52
3.5 Analysis of the influence on reaction rate.....	55
3.6 Brief Summary.....	56
References.....	57

CHAPTER 4 SIMULATION SYSTEM OF REACTOR AND REGENERATOR.....	58
4.1 Introduction of XD-APC Software.....	58
4.2 Design of the Simulation System.....	58
4.3 Simulation and Control.....	61
4.4 Brief Summary.....	70
CHAPTER 5 CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS.....	71
5.1 Conclusions.....	71
5.2 Recommendations.....	72
PAPER LIST.....	74
ACKNOWLEDGMENTS.....	75

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第一章 文献综述

催化裂化装置是现代炼油企业的关键装置。自 1942 年第一套工业化流化催化裂化装置运转以来, 它已发展成为炼油厂中的核心加工工艺^[1], (表 1-1,2005 年原油二次加工能力统计) 催化裂化技术水平不断提高。其中, 催化裂化装置的优化操作与控制一直是一个具有挑战性的重要课题。这一方面是因为催化裂化装置处理量大、利润高, 设备和控制技术的任何改进都会带来极大的经济效益, 另一方面是因为装置中各操作变量间具有高度非线性关系及以下特点: (1)多目标、多变量互相关联, 如反应器与再生器以及它们与能量回收系统的关联产品质量控制与节能降耗(优化)的关联, 这些关联具有不同程度的时间滞后, 动态特性较为复杂。(2)不少重要变量不能通过实时测量得到, 如原料性质、反应深度、催化剂活性、产品产率和产品质量指标(汽油干点和柴油 90%点)等。(3)有些情况存在不确定性, 如原料频繁变化, 生产方案随市场变化, 设备状况或其他条件也在变化, 操作控制必须迅速适应这些变化, 在保证各变量不超限的条件下, 充分发挥装置的潜力, 取得最大效益。(4)运行必须安全可靠, 确保不发生事故。在出现不确定或不正常工况时, 如原料带水、仪表检修或故障、变量超程或设备故障等情况时, 要便于操作处理。

表 1-1 2005 年原油二次加工能力统计

国家	炼油厂(座)	年加工能力(万吨)					
		减压蒸馏	焦化	催化裂化	催化重整	加氢裂化	加氢处理
中国	51	1272	858	3057.6	670.8	275.6	2337.3

上述资料不包括台湾, 资料来源: Oil and Gas Journal 数据截至到 2006 年

1.1 国内外催化裂化应用现状

1.1.1 国外情况

国外催化裂化工艺实现工业化生产已有几十年的历史, 其中流化床工艺也已出现几十年, 并迅速淘汰了固定床和移动床工艺, 不久它就成为一项重要的炼油工艺, 其总加工能力已列各种重油轻质化工工艺的前茅(超过加氢裂化、焦化和减粘裂化之和), 而且进入 21 世纪之后这一地位保持不变^[2]。虽然它曾面临着后

起的加氢裂化工艺的竞争和上世纪末以来生产质量标准日益严格的清洁燃料的挑战，但最终都化险为夷。推其原因首先归结为催化裂化的技术进步，在工艺流程、催化剂性能和机械设备大型化等方面都有长足发展和改进，降低了投资和加工成本，化解了由于节能和环保要求带来的压力；其次是相继开发成功了多种原料预处理、产品精制和改质等工艺技术和催化裂化工艺“配套”，还有其他炼油工艺和催化裂化工艺的合理“组合”；最后是以催化裂化技术为核心派生出来的一系列“家族工艺”，将催化裂化转变为构成“炼油—化工一体化”的主题装置。

1.1.2 国内情况

国内流化催化裂化工艺实现工业化生产即将四十多年。根据我国的具体情况^[3-9]，它的发展势头很猛，进入 21 世纪已建成的装置超过 100 套，年加工能力超过 100Mt。由于清洁燃料的标准逐步向国外高档次靠拢，催化裂化的汽油和柴油质量明显不能满足商品燃料要求。我国石化企业及时抓紧了科研工作，相继开发了多种催化剂、助剂和工艺技术，成功的应对了高价引进国外专利技术和市场开放将导致外油大量进口和高辛烷值汽油组分的调和比例，但我国仍继续保持着独有的以催化裂化汽油为主要商品汽油组分的特色。

1.2 目前我国催化裂化面临的问题

1.2.1 目前我国催化裂化面临的问题

目前世界原油的重质化趋势正在明显加大，在原油质量变重、变差的同时，对轻质产品的需求却日益增多，在我国更是如此。国内目前的石油资源中，大于 500℃ 的馏分在原油中占 40%~50%，而且还有继续变重的趋势^{[4],[10-13]}。然而随着我国经济的飞速发展，国内石油需求特别是轻质油的需求在不断增长。我国自 1994 年以来成为石油净进口国，石油缺口增加很快。随着市场重油需求量的减少，轻质油品需求量的增加以及原料重质化，重油催化裂化将是今后世界催化裂化发展的重要方向^{[9],[14]}。最主要的是面对不断严格的环保要求，主要是汽油规格的升级对汽油中的烯烃和硫含量的要求降低以及烟气排放量的限制，其次是对产品需求比例的变化，如市场对柴油需求比例和数量的增加，即所谓的柴油化趋势。这些都对现有的催化裂化装置与催化裂化的进一步发展形成很大的冲击。

经过多年的努力，我国催化裂化工艺已接近世界先进水平。但从综合水平来

看与国外还有一定差距^[12]。主要表现在以下几个方面:

(1)我国催化裂化装置运转水平不高,自动化水平较低,目前大多数催化裂化装置都采用单参数闭环系统(PID 控制),少数有串级控制,由于催化裂化瞬时变化和滞后性,传统的 PID 控制方法往往达不到令人满意的效果^{[8],[15-16]}。

(2)我国炼油企业催化裂化比例过大,装置开工周期和装置负荷率低,2001年,全国催化裂化装置平均负荷率接近 80%,还有 20%的能力没有发挥作用。这其中有不少装置运转不正常,生产周期短,非计划停工多^{[7],[11]}。

(3)催化裂化产品质量难以满足日益严格的国家标准要求,能耗偏高,产品结构不适合成品油市场的要求^{[14],[17]}。

(4)加工量大,轻质油收率低。近十几年来,国内催化裂化掺炼渣油量在断上升,已居世界领先地位,而轻质油收率与国外炼油厂相对比较低^{[8],[13]}。

(5)研究开发能力不足,工程能力不强。计算机在线、离线调优、先进控制及专家系统等差距更大^[8]。

目前国外许多自动化软件公司现已推出了商品化工业化的催化裂化装置先进控制软件包,但其价格昂贵、使用维护困难。国内虽有多家企业购买,但真正能够长期使用的却很少。

1.2.2 催化裂化装置提高效益的方法

在生产过程中,由于 FCCU 有很大的经济效益,对于一定的处理量,总是在接近约束限下操作。如果操作仅在一个非常小的范围内进行,基于线性动态模型的多变量控制系统,但如果操作范围较宽,催化裂化各变量就表现为高度非线性,在线或离线优化的操作点出现较大的变化。仿真实验采用非线性机理模型,因而 FCC 装置动态仿真为研究这些影响、改进控制性能和提高经济效益提供了一个有用的工具。

(1)改进工艺技术提高催化裂化效益

一些企业以满足市场需求为目标,在催化裂化装置上进行了工艺新技术的改造。如采用适合于渣油的催化裂化新技术,多产柴油新技术,催化裂化提高汽油辛烷值技术^[18-21]等。为了满足环保法规的要求,采用汽油降烯烃技术、汽油脱硫技术和生产清洁燃料的催化裂化技术^[22,23]。一些企业采用改进操作条件如进行催化裂化装置回收系统的改进,优化吸收稳定系统的操作,实行高温短接触催化

裂化,进行提升管反应器的优化^[24-26]等。还有一些企业采用新型催化剂,如渣油催化裂化催化剂,多产柴油催化裂化催化剂,多产低碳烯烃催化裂化催化剂,降低汽油中的硫含量的催化剂^[27,28]。

(2)使用先进控制技术提高催化裂化效益

除进行工艺改造外,大部分企业还使用先进控制或对原有控制系统进行改造以提高装置效益。直接用于催化裂化装置的先进控制技术主要有以下几大类:多变量预估控制、自适应控制、线性和非线性优化、模糊逻辑、性能数学模型、神经网络性质预测以及专家操作系统等。虽然有不少文献报道已有不少先进控制在催化裂化装置上成功应用,但据一些参加过多年炼油行业先进控制系统验收和年会的技术人员介绍,在国内虽然有多家企业曾购买过催化裂化装置先进控制软件包或进行装置的先进控制改造,但真正能够长期投入使用的几乎没有,往往是在验收后不久就不得不停下来。究其原因,这些投运的先进控制系统的有其共同弊端,这些先进控制系统要对实际上的生产装置进行一系列规模很大的试验来获得过程的动态模型,不仅花费很大,而且可能会造成生产装置长时间操作不稳的危险。同时,当设备老化或更新,装置检修以及原料性质有较大的变化时,也需要对原来的动态模型进行更新,这意味着要重新作一系列的现场实验。而这样的实验又非一般工程技术人员能完成,这就给这些软件的使用和维护带来了很大的困难^[29]。

1.3 催化裂化数学模型简介

催化裂化装置的优化操作与控制有赖于建立装置的动态数学模型,这有助于研究装置在各种输入操作条件变化后输出变量的动态变化规律和在线实时优化控制。

自70年代以来,催化裂化装置的稳态模型有了很大发展,已成为生产装置设计、分析和离线优化的有力手段,对于先进控制和实时优化更需要建立动态数学模型。

建立动态数学模型基本上有两种方法^[30,31]:

(1)利用输入输出数据,通过系统辨识或学习方法,建立所谓“黑箱模型”,只注重系统的输入输出特性,当然,通过状态观测也可以了解某些状态变量的特性,

得到所谓的“灰箱模型”，这种建模方法较为简便，但需要对生产装置进行试验以得到辨识所用的数据，试验时会影响生产装置的正常运转，而且所得到的模型一般不能反映过程内部的运动规律，变量也不具备明确的物理意义。

(2)从过程的机理出发,建立“白箱模型”。对于催化裂化这种比较复杂的过程,在线实时应用报道中大部分是前一类模型,如 SETPOINT 和 Profimatic 公司的先进控制软件产品,都是基于脉冲或阶跃响应的卷积模型。由于“黑箱模型”在很多方面的应用不很理想,从机理出发建立动态数学模型已引起了人们的注意。

此外还有人工智能或者其它的建模方法,例如统计回归模型、专家系统、人工神经网络模型等等。

从机理出发建立过程的动态数学模型,除了依据物料和能量守恒原理外,还应考虑依时间变化的积蓄量。这种模型有以下优点:

(1)对于多变量互相影响、具有时间滞后特点的过程,通过合理建模才能比较透彻地掌握其特性,尤其是一些重要变量不可实测,如催化剂循环量,不通过机理分析难以掌握其过程特性。

(2)基于机理的模型在装置运行前就可以建立,生产装置的设计、操作分析、技术人员与操作人员的培训均可通过计算机仿真系统进行。

(3)一些输入变量和状态变量不可实时测量,如原料和产品性质(组成)、催化剂活性等,这就使利用输入输出数据的系统辨识和自学方法遇到了根本性困难,而机理模型仍可给出它们的规律并对其进行实时计算。

(4)利用机理模型可以避免或大量减少干扰生产过程的现场测试工作。

催化裂化(Fluidized Catalytic Cracking Unit)是重油轻质化的主要手段之一,主要包括:反应再生系统、分馏系统、吸收稳定系统(图 1-1)。建立过程动态数学模型的重点和难点在于建立反应再生系统数学模型。反应器和再生器之间的催化剂循环使两器有机地联系在一起,各变量相互影响。所以,反应器和再生器应作为一个整体进行分析,建立反应再生系统的整体动态模型,这样才能得到全面、正确的结论。

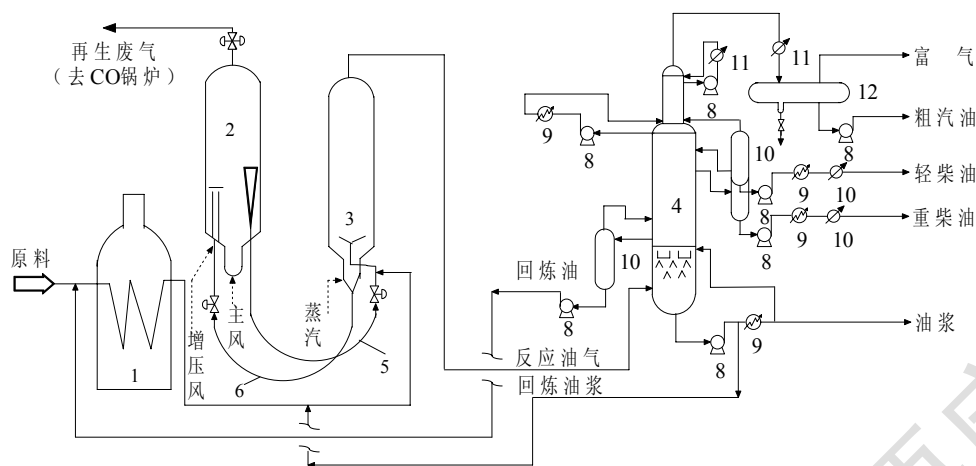


图1 催化裂化装置工艺流程简图

Fig.1 The flow chart of FCCU

1- 加热炉；2-再生器；3-反应器；4-分馏塔；5-提升器（I）；6-提升器（II）；
7-回炼油罐；8-泵；9-换热器；10-汽提塔；11-冷却器；12-粗汽油罐

图 1-1 催化裂化装置图

1.3.1 反应再生部分数学模型分类

反应再生过程数学模型本质上可以分为静态（也称为稳态）数学模型和动态数学模型。根据应用目的的不同，又可将过程的数学模型分为精确模型和简化模型。一般来说，精确模型功能齐全、适应性强、能够为系统设计和优化提供更可靠的信息；简化模型随简化程度的不同而功能各异，一般能满足系统的控制、操作、优化、预测或监测中的某些要求，提供数据的精度、适应性有一定的范围。静态模型和动态模型的主要区别是静态模型主要用于工艺过程的设计和分析以及静态优化，动态模型主要用于过程控制^[31]。静态模型和动态模型在应用范围、模型形式和求解方法上有很多的不同，但是在内容和模型假设方面有很多密切的关系。动态模型是对生产过程更一般的描述，能反映过程的动态变化，其稳定时的变量关系就是稳态模型。因此动态模型常要求借助于稳态模型的结果和假设，但是动态模型有其自身的特点和应用时简化的要求，故又必须有适应动态模型的假设和方法。

由于原料油和催化剂在提升管中的反应是瞬间完成的^[32]，时间非常短，在提升管反应器内各点的温度，集总的浓度变化可以看成只随提升管位置有关。考虑到再生器温度和再生催化剂含碳量比与气体有关的变量响应时间长得多，催化剂藏量总是被控制，因而一般密相床只取再生温度和催化剂含碳量做为动态，其他变量均用拟稳态。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库