



Y1871697

**Thesis Submitted to Tianjin University of Technology for
the Master's Degree**

The Tube Furnace Combustion State Monitoring System Development

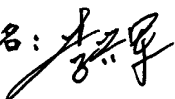
By
Li Xingjun

Supervisor
Professor. Chen Zaiping
Associate Professor. Dong Enzeng

January, 2011

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 天津理工大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

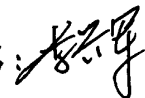
学位论文作者签名：

签字日期：2011 年 2 月 25 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津理工大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津理工大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编，以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复本和电子文件。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名：

导师签名：

签字日期：2011 年 2 月 25 日

签字日期： 年 月 日

摘要

管式加热炉是一种直接受热式加热设备,主要用于加热液体或气体化工原料,是石油化工行业必不可少的一种设备。由于其是一个能耗设备,同时排出大量的热量和烟气,对环境造成污染,其加热效率也不高。近年来,很多石油化工企业开始重视节能减排,对其进行在线监测和优化控制也逐渐成为该行业研究的热点。

由于管式加热炉的生产过程复杂,采用普通的 DCS 控制效果不是很好,很难提高其加热效率。本文根据现场条件,采用 PLC 集中采集数据,通过无线传输模块送到中央控制室进行数据处理,在中控室实现管式加热炉的监测与调炉决策。主要由以下几部分组成:

1. 采集系统包括温度与烟气采集两个子系统,温度采集系统由热电偶与温度变送器组成,通过烟气分析仪对烟气中的 CO 、 O_2 、 SO_2 三种气体进行分析。主控制器采用 S7-200 (CPU224) 对温度和烟气进行采集,其中温度信号是通过 RS-485 与 PLC 的 Port0 相连,采用 MODBUS 协议进行读取数据;烟气中的三种气体是通过采集其三路 4-20 mA 信号,再通过量程转化来实现对烟气采集。无线传输系统是由两个 ZIGBEE 传输模块,PLC,装有组态王软件的上位机组成。由于 PLC 的 PPI 协议是不公开的,本文采用其自由口协议来实现中控室的上位机与现场的控制器通信。

2. 由于管式加热炉的模型很难由机理分析法建立,本文采用数值建模对其模型进行逼近。以 CARMA 模型为参考结构,通过现场采集的数据,经过数据处理,利用预测误差法对其模型辨识。现场主要采集数据包括鼓风机压力,燃油流量,影响烟气挡板开度的压力值作为模型的三路输入值,以及预热器前后的温度、预热器后氧含量作为输出值来实现对其建模。最后经过模型验证,得出本文采用的数值分析方法,具有较好的精度。

3. 为了达到在线优化的目的,本文提出了的冗余决策系统包括基于模型的精确控制的决策系统和基于规则库的决策系统。基于模型的控制是在系统稳定下由广义预测控制 (GPC) 对辨识出的模型加以控制;基于规则库的控制主要是由平时工人经验和专家知识组成的,应用在系统不稳定的情况。

4. 本文根据系统的控制目标,运用 OPC 技术解决了 MATLAB 与组态软件的通信问题。组态王在前台完成基本的数据采集,和简单的运算,历史报表以及给出良好的组态画面视图,而 MATLAB 在后台完成对模型的控制算法,二者结合更好的给出了调炉建议,从而大大的提高了加热炉的加热效率。

关键词: 管式加热炉 CARMA 模型 预测误差法 广义预测控制 OPC 技术

Abstract

Tube furnace is a direct furnace heating equipment, mainly for heating liquid or gas chemical raw materials, and is a essential device for the petrochemical industry. It is an energy consumption equipment, as it emits a lot of heat and smoke on the environment ,which is caused pollution, and its heating efficiency is not high either. In recent years, many petrochemical companies start to focus on energy conservation, which makes line monitoring and optimal control of the industry become a hot researching subject.

As the tube furnace production process is complex and the use of common DCS control effect is not very good, it is difficult for the tube furnaces to improve their heating efficiency. This research is based on spot conditions, using PLC centralized data collection, which can transmit the data through the wireless transmission module to the central control room for data processing, achieved the monitoring and adjustment of decision-making furnace in the tubular heater's control room. The research is mainly constituted by following several parts:

1. Acquisition system is composed of temperature and flue gas acquisition .Temperature acquisition system composed by a thermocouple and temperature transmitter. The flue gas analyzer is used to analyze the three gases (CO, O₂, SO₂) of the flue gas. Master controller uses S7-200 (CPU224) for temperature and flue gas acquisition, in which the temperature signal use RS-485 to connect with the PLC through the Port0 , using MODBUS protocol for reading data. Flue gas collects the three kinds of gas through the 4-20 mA signal three collection, and then transformed to achieve the gas through the range of flue gas acquisition. Wireless transmission system is composed of two ZIGBEE transmission modules, PLC, and with the KingView software components. Since the PPI protocol of PLC is not open, this research uses its free port protocol to achieve communication between the host machine of the control room and site controller.

2. As models of the furnace tube are difficult to establish by the mechanism analysis, the numerical modeling is used to approach its model in this research. Based on the structure of the CARMA model, field data were normalized by the data processing, identified its parameter by prediction error method. Data were collected from the spot, including blower pressure, fuel flow, flue gas baffle opening of the pressure value as the three input values of a model , and before and after preheater temperature, oxygen content after the preheater as the three output values of a model to achieve its modeling. After the final model validation, drawn numerical analysis method used in this research has good accuracy.

3. This research presents a redundant decision-making system, including the precise control of model-based decision-making system and rule-based decision system libraries, to achieve the online optimization. Model-based stability in the system under control is controlled by the generalized predictive control (GPC) of the identified model; rule-based

decision system is usually composed of workers' experience and expertise, and it uses in the instability system.

4. According to the control objectives of system, this research solved the MATLAB and configuration software' communication problems by using OPC technology. The KingView completed the basic configuration of the data acquisition front, and simple operations, history statements, and presented a good view of the configuration screen. The MATLAB completed the model control algorithm in the background. The combination of both gives the better proposals of tone furnace to greatly increase the furnace's heating efficiency.

Key words: Tube Furnace, CARMA model, Prediction error method, Generalized Predictive Control, OPC Technology

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 管式加热炉简介.....	1
1.1.1 管式加热炉一般结构.....	1
1.1.2 管式加热炉的主要技术指标.....	2
1.2 加热炉控制现状.....	3
1.3 课题研究的目的和意义.....	3
1.4 课题的主要研究内容.....	4
1.5 本章小结.....	5
第二章 管式加热炉数据采集与无线传输系统.....	6
2.1 数据采集系统.....	7
2.1.1 数据采集系统硬件配置.....	7
2.1.2 采集点的确定.....	8
2.1.3 数据采集系统中的几个关键参数.....	8
2.2 无线传输系统.....	11
2.2.1 现场 S7-200 的设置.....	12
2.2.2 ZIGBEE 模块参数设置.....	12
2.2.3 ZIGBEE 模块与上位机组态软件的设置.....	13
2.3 本章小结.....	13
第三章 管式加热炉的数学建模.....	15
3.1 模型结构的确定.....	15
3.1.1 模型结构的简化.....	16
3.1.2 CARMA 模型的改进.....	17
3.2 模型辨识方法.....	17
3.2.1 CARMA 模型的辨识机制.....	17
3.2.2 预测误差法.....	18
3.2.3 辨识过程.....	19
3.3 系统数据处理与参数辨识结果.....	20
3.3.1 数据预处理.....	20
3.3.2 参数辨识结果.....	22
3.4 本章小结.....	25
第四章 管式加热炉的调炉决策系统.....	26

4.1 基于模型的控制策略..... 26

4.1.1 广义预测的解耦设计 27

4.1.2 系统仿真..... 30

4.2 基于规则库的控制策略..... 31

4.3 冗余决策系统的评价机制..... 34

4.4 本章小结..... 35

第五章 中控室监控系统的实现..... 36

5.1 基于 OPC 技术 MATLAB 与组态王的通讯 36

5.1.1 OPC 技术规范简介 36

5.1.2 MATLAB 与组态王的通讯 37

5.2 系统重要数据监测与调炉建议..... 39

5.3 本章小结..... 41

第六章 总结和展望..... 42

6.1 工作总结..... 42

6.2 工作展望..... 43

参考文献..... 44

发表论文和科研情况说明..... 47

致 谢..... 48

第一章 绪论

1.1 管式加热炉简介

1.1.1 管式加热炉一般结构

管式加热炉一般由四个主要部分^[1,2]组成：燃烧器、辐射室、对流室、预热器及烟囱，图 1-1 是一典型的圆筒炉示意图。

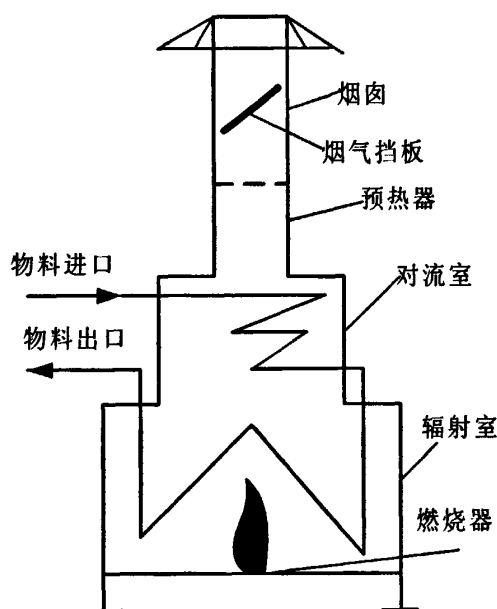


图 1-1 管式加热炉结构

(1) 燃烧器

炉底的油气联合燃烧器(火嘴)喷出高达几米的火焰，温度高达 1000-1500℃，主要以辐射传热的方式，将大部分热量传给辐射室(又叫炉膛)的炉管(也叫辐射管)内流动的油品。烟气沿着辐射室上升到对流室，温度降到 700-900℃。以对流传热的方式继续将部分热量传给对流室炉管内流动着的油品，最后温度降至 200-450℃的烟气从烟囱排气。油品则先进入对流管再进入辐射管，不断吸收高温烟气传给的热量，逐步升高到所需要的温度。

(2) 辐射室

辐射室是加热炉的核心部分，从火嘴喷出的燃料(油或气)在炉膛内燃烧，需要一定的空间才能燃烧完全，同时还要保证火焰不直接扑到炉管上，以防将炉管烧坏，所以辐射室的体积较大。由于火焰温度很高(最高处可达 1500-1800℃左右)，又不允许冲刷炉管，所以热量主要以辐射方式传送。

(3) 对流室

对流室内,烟气冲刷炉管,将热量传给管内油品,这种传热方式称为对流传热。烟气冲刷炉管的速度越快,传热的能力越大,所以对流室窄而高些,排满炉管,且间距要尽量小。有时为增加对流管的受热表面积,以提高传热效率,还常采用钉头管和翅片管。在对流室还可以加几排蒸汽管,以充分利用蒸汽余热,产生过热蒸汽供生产上使用,有时候需要在对流顶段增加余热回收装置。

(4) 预热器

烟气离开对流室时还含有不少热量,有时可用空气预热器进行部分热量回收,使烟气温度降到 200°C 左右,再经烟囱排出,但这需要用鼓风机或引风机强制通风。有时则利用烟囱的抽力直接将烟气排入大气。由于抽力受烟气温度、大气温度变化的影响,要在烟道内加挡板进行控制,以保证炉膛内最合适的负压,一般要求负压为 $2\sim 3\text{mm}$ 水柱,这样既控制了辐射室的进风量,又使火焰不向火门外扑,确保操作安全。

(5) 排烟系统

排烟系统可以分为自然通风和强制通风两种方式,其主要功能是给燃烧器通过风门控制引入空气,利用烟气挡板把废烟气排出加热炉。本课题的加热炉采用自然通风方式,依靠烟囱本身的抽力通风,炉膛是靠炉膛内高温烟气与炉子外冷空气的密度差所形成的压差把空气冲外界吸入。安装在烟道内的挡板可以由全关状态连续开启到全开状态。因本岗位的加热炉采用自然通风方式,所以挡板的作用是用于控制进入加热炉炉膛的空气用量。通过调整挡板和风门开度能够调整炉膛负压和烟道气中氧气的含量。

1.1.2 管式加热炉的主要技术指标

1. 热负荷

每台加热炉单位时间内向管内介质传递的总热量,单位为 W 或 kJ/h 。炉子的热负荷越大,其生产能力越大。

2. 炉膛热强度

燃料燃烧的总发热量除以炉膛体积,称之为炉膛热强度(又称体积热强度),它表示单位体积的炉膛在单位时间里燃料燃烧所放出的热量,单位为 $\text{kJ/m}^3\cdot\text{h}$ 或 W/m^3 。炉膛热强度越大,完成相同的热任务所需的炉子越紧凑。

3. 表面的热强度

炉管表面的热强度是指单位时间内单位加热炉管表面积所能传递的热量,单位一般为 $\text{kJ/m}^2\cdot\text{h}$ 。炉管表面热强度越大,完成相同热任务所需的传热面积越小,使用的炉管就越少,炉子体积可减小,投资可以降低。应注意的是炉管表面热强度一般指平均值。

4. 炉膛温度

当烟气从辐射室进入对流室的时候,此时的温度被称为炉膛温度,是衡量加热炉加热效率的一个重要指标。一般石化炼油企业中通常需要测量的炉膛温度是指对流顶段处的温度。

1.2 加热炉控制现状

在 20 世纪 70 年代前, 国外关于工业上的加热炉控制研究工作主要在加热炉的燃烧状态控制上。主要是对控制加热炉各主要过程变量, 这些变量主要包括加热炉炉温值、加热炉炉堂内的压力、以及燃料和空气流量的定值控制, 炉堂内的温度与进入加热炉燃料流量的串级控制, 燃烧器中的燃料与助燃空气的比值控制以及烟道中废气的含氧量控制等。以上这些控制方法基本上都属于以加热炉温度为主要控制对象的基础自动化控制阶段。到 70 年代后期, 燃烧控制技术已经基本成熟, 控制重点对象也发生了变化, 主要是由从基本参数的控制到以某种性能指标的优化控制为主要控制目标的转变。加热炉加热过程所建立起的物理模型被普遍的应用到工业计算机控制上。近些年, 一些在整个生产线上装有的高度自动化设备, 且能够在线连续对加热炉况自动控制的理论研究^[3,4]和实际应用也已稳步深入和提高, 这些控制方法代表着加热炉控制设计进入了以整个系统为主要控制对象、以全方位协调优化整个生产系统为目标的计算机集中调度管理的新阶段。当前, 国外石化炼油行业的加热炉的自动化程度很高, 大多数企业均采用先进控制系统来完成对加热炉的控制, 可以实现真正的办公自动化, 能够使加热炉的加热效率在 85% 以上。

国内的石油化工企业运行着大量的管式加热炉, 这些加热炉的控制停留在以生产工艺为主的控制, 而对于能耗的优化控制很少在生产企业中获得应用。然而由于我国石化行业起步比较晚, 我国石油化工企业中运行的管式加热炉一部分还是在上世纪七、八十年代从国外引进的, 无论是在能耗方面, 还是控制理念方面, 与目前的行业标准有点差距, 更远远落后于世界先进水平。由于加热炉实际在整个运行过程中, 由于进料量和给风量等运行参数, 燃料成分必将发生变化, 会直接导致运行工况偏离原来的设计值。因此, 开展对加热炉的节能以及一整套的优化控制已经相当紧迫。

1.3 课题研究的目的和意义

中国石化某分公司目前共有 40 座左右管式加热炉, 在这些管式加热炉中大部分已采用了 DCS 控制, 对加热炉的控制主要以生产工艺上的要求为目标, 对于能耗的问题没有过多的考虑。中国石化某公司为了响应国家对节能减排的要求, 决定在原有设备的基础上进行相应的技术改造, 并且也取得了一定的成果。然而, 目前国内石油化工业对于加热炉能耗优化控制^[5]的工作研究还十分薄弱, 能够改进的空间还很大, 因此开展这方面的工作以提高石油石化企业加热炉的能耗控制水平。

近年来, 我国越来越加强工业节能、环境保护, 不断加大对大型工业企业的加热炉运行状况监测力度, 监测实时性的要求也越来越高。国内的烟气分析监测系统也由原来的通过许多化学溶液过滤测量, 发展为国际上较通用的通过气体多组分传感器来测量检测各种气体含量, 并由此来推断出加热炉的燃烧状况, 并且正在向多功能和智能化的方向发展。因而, 开展管式加热炉的集中控制对于今后的长远发展具有相当大的现实意义。

1.4 课题的主要研究内容

针对某石化公司加热炉的运行现状,课题拟在已有前期研究工作的基础上,开发设计管式加热炉燃烧状态监测系统,解决目前加热炉存在的无法在线监测、调炉过程滞后、调炉过程比较粗糙以及不够科学的问题,进一步提高加热炉热效率,以达到企业节能减排目的;开发设计管式加热炉燃烧状态监测系统并在某石化公司相关加热炉加以示范应用,为进一步实现加热炉远程调炉自动闭环控制提供技术依据。为此本课题设计的主要系统包括温度烟气采集系统,加热炉现场数据无线传输系统,加热炉炉况分析与冗余调炉决策子系统。如图 1-2 所示:

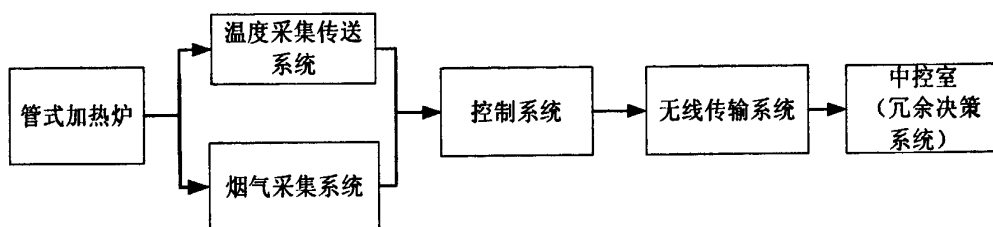


图 1-2 系统总框图

(1) 采集系统的设计

该系统主要包括温度采集系统和烟气采集系统。主要功能是对加热炉多点的烟气与温度进行数据采集,烟气与温度的采集是管式加热炉能耗优化的基础,该系统主要为中央控制室监控系统提供基础数据。烟气采集是用直接抽取法,连续在线检测烟气的二氧化硫浓度、一氧化碳浓度和氧含量浓度,该法是用标准气对分析仪进行标定,保证监测数据的准确性。温度采集则采用热电偶与 SWP 系列的智能测温仪表对加热炉温度进行采集并通过 RS-485 总线与控制器进行 MODBUS 通讯实现数据传输。在整体的系统中,以 PLC 控制为核心,烟气与温度参数的准确是整个系统的前提,因此构建一个稳定而又准确的烟气与温度采集系统,对整个管式加热炉集中控制系统是非常重要的。

(2) 研究实现无线传输系统的稳定性

无线传输系统是基于 ZIGBEE 无线传输技术^[6],实现现场控制器 PLC 与远程的中控室 PC 机进行相互通信一套系统。由于 PLC 厂家的通信协议封闭性,为了满足通信的实时性,我们需要对通信协议加以研究。本文采用 S7-200 的自由口协议与 ZIGBEE 模块来克服协议的未知性,因而可以实现协议的人为设定,从而解决了现场与中控室上位机的通信问题,进步调整其通信速率使其满足整个系统对数据传输稳定性的要求。

(3) 研究建立管式加热炉的精确数学模型

建立精确的数学模型是建立调炉决策系统的关键,也是集中控制系统的核心内容。通过建立起的数学模型,采用先进的控制方法^[7]如 GPC、PFC 对管式加热炉进行控制,以便给出科学的调炉建议。本文采用通过现场采集的数据,基于 CARMA 模型的结构,利用最小二乘法,预测误差法等过程辨识的方法对其进行离线辨识,最后通过新一组数据进行验证,可以根据实际所需,调节系统阶次和各参数达到任意的精度。

(4) 研究调炉决策系统以及其切换机制

调炉决策系统主要是对加热炉给出调炉建议，可以实时提醒工作人员进行调炉。由于实际加热炉工况复杂，因此提出采用冗余调炉的策略，该系统由两套调炉子系统组成以实现冗余调炉，一套是以经验为基础的规则库调炉子系统，另一套是以模型为基础的模型调炉子系统。基于规则库调炉系统是通过平时现场调炉工人给出的调炉经验和调炉专家的知识所制定的调炉规则，其实是对管式加热炉的一种粗放调节，来给出调炉建议。基于精确数学模型调炉系统可以增加管式加热炉的鲁棒性，适用于在线稳定下的调炉决策，因此在基于系统辨识方法建立加热炉整体模型的基础上引进先进算法，并给出更精确的调炉建议。

冗余切换机制主要用于实现两套调炉决策子系统的切换。本文建立对加热炉运行状况与调炉建议进行综合评判以及在线优化的机制，研究两种调炉决策子系统之间相互切换的边界条件，将加热炉运行状况分为临界稳定运行和稳定运行两种情况，以便在不同炉况时采用不同的调炉策略。进一步促使提高其加热效率，实现节能的目标。

1.5 本章小结

本章介绍了管式加热炉的基本结构以及其主要技术指标，并阐述了当前国内外对加热炉的控制现状，进而引出课题的研究目的和意义，重点介绍了本文研究的内容。从中体现了研究开发管式加热炉燃烧状态监测系统的必要性和紧迫性。

第二章 管式加热炉数据采集与无线传输系统

根据现场的施工条件以及集中监控系统对数据要求，确定了现场采集数据的方式，必须通过无线传输模块把数据传到中控室。为了满足中控室对现场炉况的实时监控，采集系统分为烟气采集系统和温度采集系统两部分。本文以某石化炼油部两台常减压炉为控制对象，以 S7-200 为控制器、无线传输模块^[8-10] ZIGBEE,以及温度传感器和 SWP 系列的智能温度仪表，烟气分析仪等实现数据的采集和传输，具体实现结构图如图 2-1 所示：

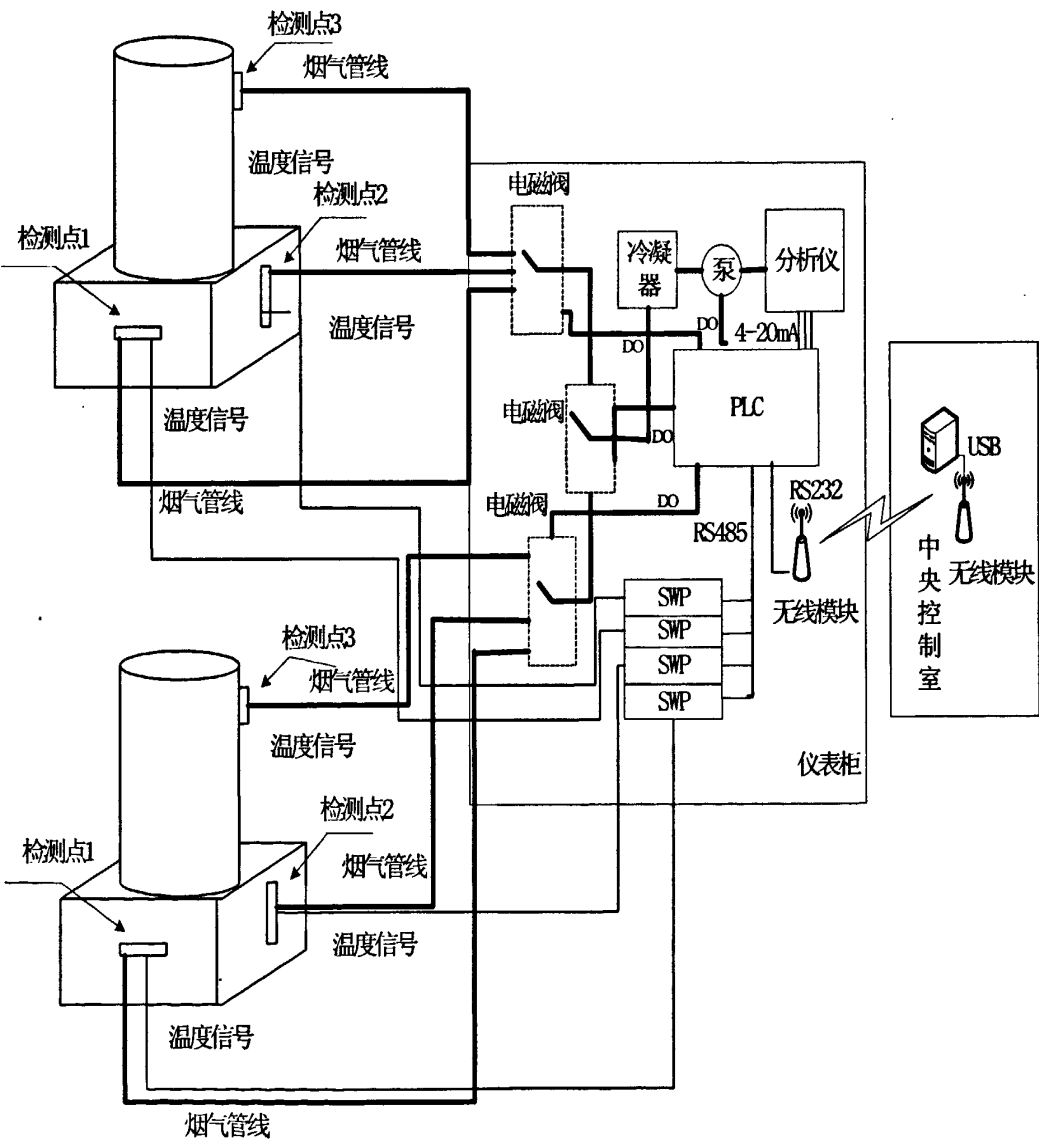


图 2-1 系统硬件结构图

2.1 数据采集系统

本子系统由烟气采集和温度采集系统组成。烟气采集是采用直接抽气的方法对每台加热炉进行烟气的采集，再由 S7-200 控制^[11]的电磁阀通过编程来决定当前时刻所采集那一路的烟气，经烟气分析仪进对烟气中的 O₂、CO 和 SO₂ 进行分析，最后把烟气分析仪分析出的三路 4~20mA 的信号送回主控制器 S7-200 来完成烟气的采集；温度采集主要是对预热器前后进行温度采集，通过热电偶和热电阻传感器分别经由温度变送器的 RS-485 总线送回到主控制器的通信端口 1，经控制器^[12,13]经 MODBUS 协议^[14-18]对各个智能测温仪器进行地址标号，进而实现各路温度在 RS-485 总线上数据的读取。

2.1.1 数据采集系统硬件配置

整个工艺系统设计采用西门子 CPU224 (14 DI/10 DO) PLC 作为控制核心。CPU224 本身具有 24 个 DI/DO 点和 2 路 AI,1 路 AO 与 1 个 EM231 扩展 4 路模拟信号输入 (A,B,C,D)，以满足设计需要。

根据集中监控系统的要求，需要控制器具备以下控制功能：

- 1. 该模块主要实现采集现场的三种烟气信号
- 2. 对四路温度变送器信号采集；
- 3. 实现控制六路烟气自动切换；
- 4. PLC 对现场烟气排水阀进行继电控制以及对抽烟气泵的继电控制；
- 5. 两套现场调试时继电控制的时间和实际在线运行的时间的之间切换
- 6. 实现 PLC 采集数据无碍与 ZIGBEE 进行通信

具体 I/O 接线配置图如表 2-1 所示：

表 2-1 S7-200 I/O 接线表

序号	PLC	描述	序号	PLC	描述
1	I0.0	启动	10	Q0.1	第一路烟气继电输出
2	I0.1	停止	11	Q0.2	第二路烟气继电输出
3	I0.2	调试	12	Q0.3	第三路烟气继电输出
4	I0.6	采样为 10 分钟	13	Q0.4	第四路烟气继电输出
5	I1.1	采样为 4 小时	14	Q0.5	第五路烟气继电输出
6	A(+)	一氧化碳信号输入	15	Q0.6	第六路烟气继电输出
7	B(+)	氧气信号输入	16	Q0.7	加热炉烟气选择继电输出 1
8	C (+)	二氧化硫信号输入	17	Q1.1	加热炉烟气选择继电输出 2
9	Q0.0	泵开	18	Q1.2	排水电磁阀输出

2.1.2 采集点的确定

本子系统对管式加热炉烟气各成份含量和温度进行分析目的是为了找出加热炉运行中存在的问题以及计算出加热效率和酸露点,以便指导现场的工作人员进行调炉,下面是常见的加热炉运行中存在的问题:

1、排烟温度偏高:造成加热炉排烟温度偏高的主要原因是受热面积灰、结垢,空气预热器产生露点腐蚀等。由于原油含杂质多,燃料含硫增高以及吹灰器吹灰效果有限,加剧了炉管的积灰结垢。积灰结垢后炉管传热热阻增加,传热效率降低,出力降低。为了保证炉子出力,势必提高炉膛温度,进而排烟温度也会随之升高。若介质含硫量比较高,这可能会导致管内由于酸露点的影响形成积灰,影响管子的换热效果差,进而会产生大量的热量外流。排烟温度越高,烟气带走的热量就越多,对热效率的影响就越大。我们可以通过对预热器前后以及对流段进行检测其温度,这样就可以找出可能存在的积灰处,从而提高加热效率。

2、氧含量偏高 (过剩空气系数偏大):氧含量偏高的原因有两种,一种是风油比不合适或者燃料和空气的混合不好,造成氧气过剩。氧含量偏高并不能直接判断为供风太多,还要参考 CO 的含量,如果 CO 的含量也偏高,那么可能是燃烧器的问题,造成燃料没有和空气充分混合,也有可能是漏风造成。造成炉体漏风有看火门不严、对流段漏风、烟道漏风和空气预热器漏风等。要准确判断氧含量高的原因是由于空气过剩、燃料混合问题,还是漏风造成,具体漏风处在何处,应该在辐射、对流出口处以及空气预热器前后设立检测点,通过检测烟气成分和排烟温度,通过系统分析才能准确作出结论。

3、CO 含量偏高: CO 含量偏高是由于没有完全燃烧造成,同样没有完全燃烧不能简单地判断为供风不足,还要通过对其它烟气成分的分析。也不能因为最终排烟里 CO 含量不高,就判断燃烧状况良好,因为漏进大量的空气可能稀释了 CO 含量。所以也要多设立检测点才能综合判断。

从问题分析可以看出,要想准确的找到加热炉的问题所在处,至少要在对流段出口,空气预热器前后设立监测点。

2.1.3 数据采集系统中的几个关键参数

数据采集系统^[19]主要是为了中控室监测现场的加热炉燃烧状态,由于排烟温度、氧含量、CO 含量、空气过剩系数是衡量加热炉运行状况的重要参数。烟气中 SO₂ 含量是直接影响酸露点的重要指标,因此我们需要检测的烟气成分包括 O₂、CO 和 SO₂ 含量,并且根据所检测的成分推算空气过剩系数、热效率,以及酸露点温度。

1. 空气过剩系数和加热炉热效率的计算

a) 空气过剩系数 α

实际供给燃料燃烧的空气与理论空气量的比值叫做过剩空气系数。比如 1 公斤燃料从理论上计算需要 14.3 公斤空气正好完全燃烧,而实际供给的空气量是 17.2,则过剩空气系数就是 $17.2/14.3=1.2$ 。

过剩空气系数的大小会直接影响炉子的加热效率,过剩空气系数过高,表明进入

炉内的空气比较多,会使炉膛内的温度下降,从而使加热效率降低。而过剩空气系数比较低,表明燃料没有完全燃烧而使得燃料浪费。因此,过剩空气系数通常取值为 1.1~1.5 左右。通常选取过剩空气系数按下式进行计算:

$$\text{干烟气(取样分析): } \alpha = (21 - 0.0627O_2) / (21 - O_2) \quad (2-1)$$

$$\text{湿烟气(氧化锆氧分析仪): } \alpha = (21 + 0.116O_2) / (21 - O_2) \quad (2-2)$$

式中 O_2 —氧含量百分数, %, 例如 5%, 则式中代入 5。

b) 加热炉的综合热效率 η

炉子所能接收的热负荷与燃料完全燃烧所能够发出的总热量之比叫全炉的综合热效率。管式炉的热效率一般为 76% 左右, 目前先进的管式炉热效率为 80%~85%, 最高可达 88%~92%, 热效率高, 表明相同的热负荷所耗的燃料量少。根据相关文献资料, 下列各式是能够综合反映热效率的计算方法:

$$\eta = 100 - q'_1 - q'_2 - q'_3 \quad (2-3)$$

$$q'_1 = \frac{(8.3 \times 10^{-3} + 0.031\alpha)(t_g + 1.35 \times 10^{-4} t_g^2) + (5.65 + 4.7 \times 10^{-3} t_g)W - 1.1}{1 + 3.4 \times 10^{-4}(t_A - 15.6) + 0.0657W} \quad (2-4)$$

$$q'_2 = \frac{(4.043\alpha - 0.252) \times 10^{-4} CO}{1 + 3.4 \times 10^{-4}(t_A - 15.6) + 0.0657W} \quad (2-5)$$

式中 η —综合效率, %

q'_1 —通过排烟损失的热量与燃料完全燃烧所能供给总能量的百分比, 单位是%。

q'_2 —不完全燃烧损失热量与燃料完全燃烧所能供给总能量的百分比, 单位是%。

q'_3 —表面散热损失热量与燃料完全燃烧所能供给总能量的百分比, 单位是%。

t_g —排烟温度, 单位是℃, 生产操作的数据。

W —燃烧器的雾化蒸汽用量, 单位是 kg/kg; 通常情况下可以代入燃烧器的生产设定值。

CO—烟气中 CO 含量, 单位是 ppm。

t_A —当有外部供热装置时, 是指预热后的温度的值, 单位是℃; 当没有外部预热源时, 上式中的 $3.4 \times 10^{-4}(t_A - 15.6)$ 这一项为 0。

单烧气时: $W = 0$ 。

单烧油时: 若不计蒸汽量, W 取设计值, 一般取 0.2。

油气混烧时: $W = (\text{设计汽耗率} \times \text{燃料油耗量}) / (\text{燃料油耗量} + \text{燃料气耗量})$

---流量单位为 kg/h, 一般取 0.1。

2. 酸露点温度的推算

根据管式加热炉技术规范可知酸露点的计算方法, 图 2-2 为过剩空气系数与转化率的关系图, 由图可以计算出 SO_3 的数值, 以便进一步计算酸露点。图 2-3 是烟气中水蒸汽

含量与烟气中 SO_3 气体体积含量关系图,由图可以计算出酸露点。

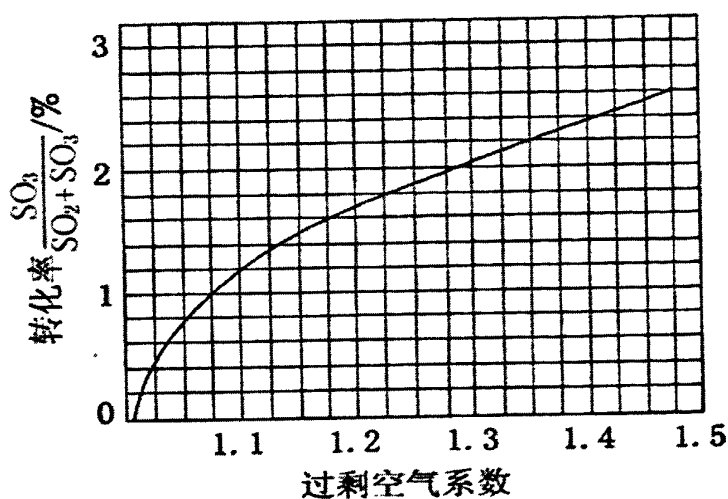


图 2-2 过剩空气系数与转化率关系

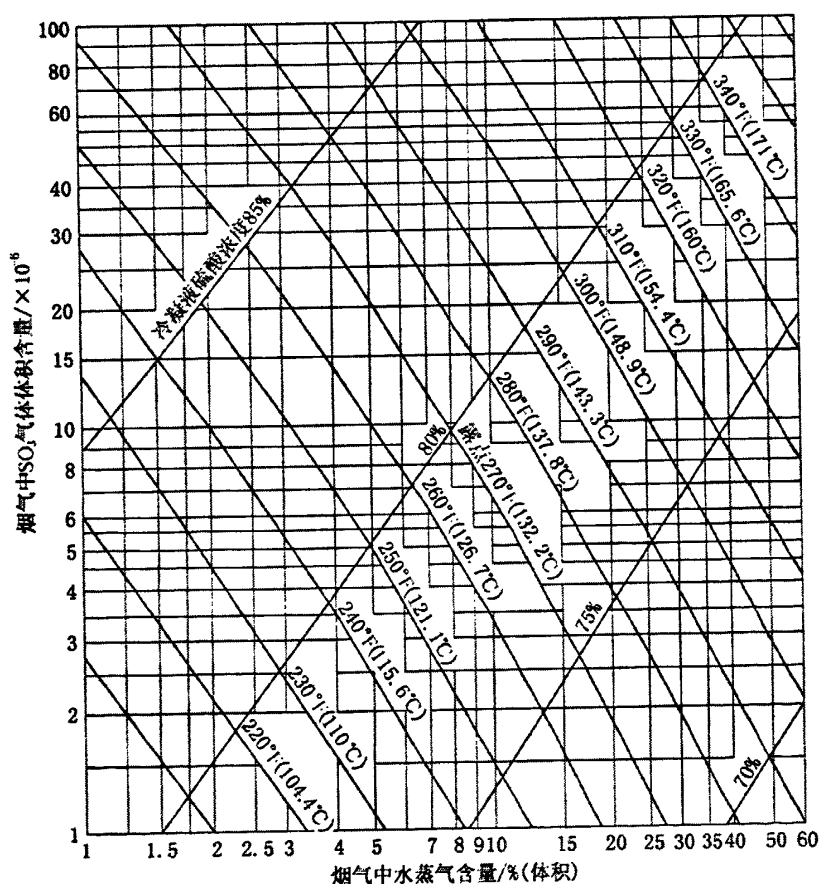


图 2-3 烟气中水蒸气含量与烟气中 SO_3 气体体积含量关系

对图 2-2 进行数据处理,运用最小二乘法进行数据拟合得到的多项式为:

$$\omega = -0.52\alpha^4 + 5.54\alpha^3 - 21.53\alpha^2 + 36.59\alpha - 19.77 \quad (2-6)$$

则可求得 SO₃ 的含量:

$$SO_3 = \frac{SO_2 \times \omega\%}{1 - \omega\%}$$

(2-7)

式中的α是过空气系数, ω是转化率, SO₂是可测烟气含量。由式(2-6)和式(2-7)结合图2-3, 通过查询就可知酸露点了。为了方便计算机进行查表计算, 如表2-2所示。一般情况下石油工业上烟气中水蒸气的含量是7%和10%这两个量。

表 2-2 酸露点查询表

烟气中水蒸气含量 7%		烟气中水蒸气含量 10%	
SO ₃ 的含量 (%)	酸露点范围 (℃)	SO ₃ 的含量 (%)	酸露点范围 (℃)
1 ≤ SO ₃ < 1.4	114~115.6	1 ≤ SO ₃ < 1.5	118.4~121.1
1.4 ≤ SO ₃ < 1.8	115.6~118.4	1.5 ≤ SO ₃ < 2.1	121.1~123.9
1.8 ≤ SO ₃ < 2.8	118.4~121.1	2.1 ≤ SO ₃ < 3.3	123.9~126.7
2.8 ≤ SO ₃ < 4.0	121.1~123.9	3.3 ≤ SO ₃ < 4.3	126.7~129.4
4.0 ≤ SO ₃ < 6.1	123.9~126.7	4.3 ≤ SO ₃ < 6.5	129.4~132.2
6.1 ≤ SO ₃ < 8.4	126.7~129.4	6.5 ≤ SO ₃ < 8.8	132.2~135.1
8.4 ≤ SO ₃ < 12.7	129.4~132.2	8.8 ≤ SO ₃ < 13.9	135.1~137.8
12.7 ≤ SO ₃ < 16.2	132.2~135.1	13.9 ≤ SO ₃ < 17.5	137.8~140.5
16.2 ≤ SO ₃ < 26.9	135.1~137.8	17.5 ≤ SO ₃ < 24.5	140.5~143.3
26.9 ≤ SO ₃ < 31.9	137.8~140.5	24.5 ≤ SO ₃ < 36.1	143.3~146.1
31.9 ≤ SO ₃ < 44.2	140.5~143.3	36.1 ≤ SO ₃ < 48.2	146.1~148.9
44.2 ≤ SO ₃ < 66.6	143.3~146.1	48.2 ≤ SO ₃ < 66.1	148.9~151.1
66.6 ≤ SO ₃ < 87.5	146.1~148.9	66.1 ≤ SO ₃ < 93.2	151.1~154.4
其它	酸露点<110	其它	酸露点<118.4

2.2 无线传输系统

无线传输系统是管热加热炉集中监控系统的必不可少的部分。主要解决现场无法布线的弊端, 通过 S7-200 采集来的数据需要通过无线网路传输到中控室 PC 机进行模型辨识, 进而加以控制。因此解决无线模块与 S7-200 采集模块, 与上位机通信是本系统的难点。本文提出用 ZIGBEE 无线模块与 S7-200 自由口^[20]功能相结, 并通过上位机组态软件进行校验, 实现现场采集数据与中控室的实时传输与控制。该子系统需要设置现场的 S7-200、无线模块之间的设置, 无线模块与上位机的设置, 该系统如下图 2-4 所示:

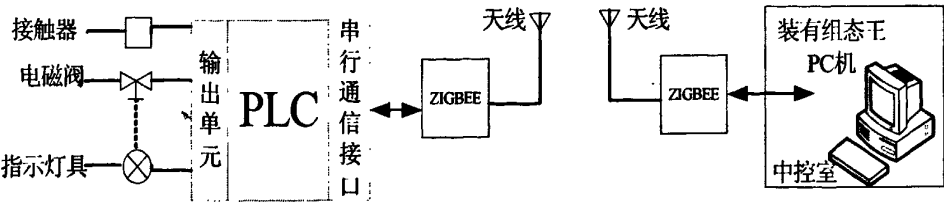


图 2-4 无线传输系统示意图

2.2.1 现场 S7-200 的设置

现场运行的各种设备以 S7-200 为主控制器,其编程软件为 STEP7-Micro/WIN32,该软件有 STL、FBD 和 LADDER 三种编程模式,有 SIMATIC 指令和 IEC131-3 指令两种指令。本系统的自由口协议^[21]采用的是 IEC131-3 指令的梯形图编程方式,通过上位机的组态可以控制设备的各种运行方式。由于现场采用西门子系列的 S7-200(CPU224)具有两个与 RS-485 兼容的 9 针 D 型连接器,因此可以直接采用无线数传模块与 PLC 的 RS-485 接口连接,接收端模块接收到数据后,PLC 启动相应的中断程序,开始进行运行相应的控制程序。

自由口模式的控制字的选取是由 CPU 中的特殊存储器决定的,SM0.7 特殊存储器的位值反映了 CPU 工作方式的模式开关当前位置,且能够决定自由口是否打开。当 SM0.7 的值为 0,模式开关处于 TREM 的位置;当 SM0.7 的值为 1 时模式开关处于 RUN 的位置。因此只有当 SM0.7 位为 1 时,才允许进行自由口通讯。特殊寄存器 SMB30 是自由口模式控制字节,它用来设定校验方式、通讯协议、波特率等通讯参数。采用自由口通信协议后,接收端接收到数据,在中控室的上位机组态王通过 ZIGBEE 无线数传模块传送到 PLC 中,启动相应程序,其程序编制采用图 2-5 所示流程图。

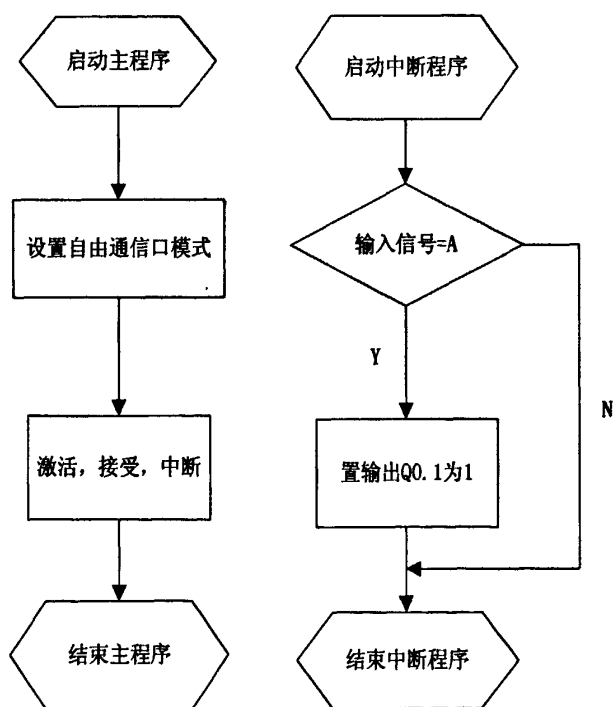


图 2-5 PLC 接收无线模块流程图

2.2.2 ZIGBEE 模块参数设置

首先,把 ZIGBEE 无线模块与 PC 机的串口相连,并且通过 PC 机的超级终端配置模块。无线模块配置内容:设备地址,节点类型;信道配置;网络类型,网络 ID;发送模式,数据类型;串口配置;数据源地址设置等,中继器的实现只需在节点类型上选取

中继就可以，其他配置不变。具体配置情况如图 2-6:

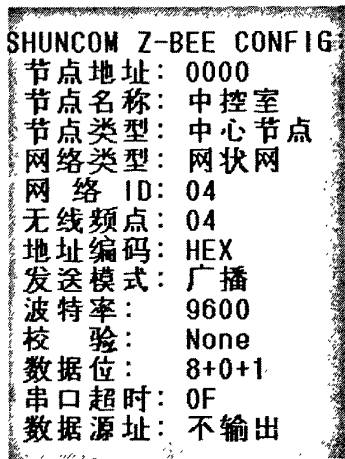


图 2-6 ZIGBEE 模块参数配置

2.2.3 ZIGBEE 模块与上位机组态软件

由于 S7-200 使用的是 PPI 协议，支持 11 位或 10 为数据（奇偶校验，起始，停止位）传输，而 ZIGBEE 模块所支持最多 10 位数据。因此本文提出通过 S7-200 自由口功能实现与 ZIGBEE 无线模块的数据传输。在上位机通过组态王软件对 COM 口设备进行设置，要与无线传输模块的波特率、奇偶校验、数据位设置保持一致。经测试可以很好的实现上位机对其的监控。其中“内部输入”是指通过组态王内部寄存器 V300.1 进行开关量的控制，“外部输入”则是由在现场的 PLC 输入口 I0.1 进行控制，而“输出”是指 PLC 输出口 Q0.1,在上位机上监控图如图 2-7 所示,由此验证了中控室 PC 机可以实现对现场 PLC 的控制。

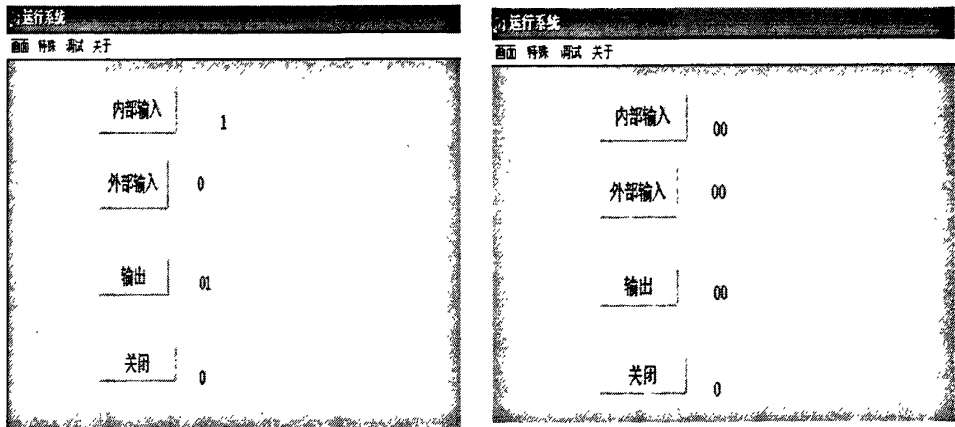


图 2-7 双向通信测试结果图

2.3 本章小结

本章主要介绍了管式加热炉集中监控系统的数据采集系统以及无线传输系统，以及

管式加热炉的重要的参数即热效率与酸露点的计算方法。给出了系统的整体硬件结构图，详细的列出了 S7-200 的 I/O 口接线方式。重点强调无线传输系统的实现方式，包括 S7-200、无线模块之间的设置，无线模块与上位机的设置方式，从而解决了中央控制室集中控制的采集任务。

第三章 管式加热炉的数学建模

石化企业中常减压加热炉^[22]是一类复杂的控制对象，特别是燃烧系统和多路进料支管出口氧含量系统，是相互关联耦合的多变量时变系统^[23]。本章根据现场所收集的数据，通过对 CARMA 模型进行简化，进而利用预测误差法对管式加热炉模型^[24-26]进行辨识。最后通过一组新的数据验证，经所得到的结果具有很强的跟踪效果，并且根据实际需要可以通过调节参数阶次正以达到很高的精度。

3.1 模型结构的确定

现有控制方法忽略管式加热炉各输入变量间的耦合作用，看成若干个单输入单输出系统后分别建模后设计串级 PID 控制器，这种方法由于不考虑耦合等作用，控制精度不高。这样处理其实是对问题的一种简化处理，实际上基于加热炉多变量建模^[27-30]，是一个多输入多输出的非线性系统。根据现场可采集数据，其基本结构如图 3-1 所示：

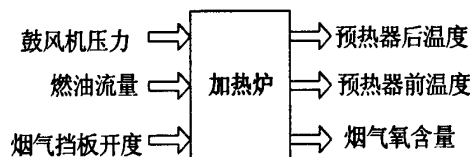


图 3-1 管式加热炉模型结构

构建数学模型如下式：

$$Y(t) = f(U(t-d), t) \quad (3-1)$$

式中 $Y(t) = [T_1(t) \ T_2(t) \ O_2(t)]^T$ ，分别代表加热炉预热器后温度、预热器前温度和烟气氧含量； $U(t) = [u_1(t) \ u_2(t) \ u_3(t)]^T$ ，分别为鼓风机压力、燃油流量和烟气挡板开度； $f(\cdot)$ 是反映管式加热炉输入向量 $U(t)$ 和输出向量 $Y(t)$ 之间的非线性映射函数，在实际工程应用中，这样的非线性映射关系一般很难通过机理分析法来确定。本文通过对现场数据的采集，应用模型辨识相关理论方法，如用预测误差法^[31]建立高阶的自回归滑动平均模型 即 CARMA 模型来逼近该非线性关系，如式（3-2）所示：

$$A(z^{-1})Y(k) = z^{-d}B(z^{-1})U(k) + \varepsilon(k) \quad (3-2)$$

式中的 $A(z^{-1})$ 和 $B(z^{-1})$ 为 3×3 维多项式矩阵，如下式所示：

$$A(z^{-1}) = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \quad B(z^{-1}) = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} A_{ij}(z^{-1}) &= 1 + a_{ij1}z^{-1} + \cdots + a_{ijn_i}z^{-n_i} \\ B_{ij}(z^{-1}) &= b_{ij0} + b_{ij1}z^{-1} + \cdots + b_{ijn_j}z^{-n_j} \\ (i, j &= 1, 2, 3) \end{aligned}$$

$U(k)$ 和 $Y(k)$ 分别为系统的输入向量和输出向量, $\varepsilon(k)$ 是均值为零、方差为 σ^2 的白噪声序列, d 是指纯时滞时刻。

3.1.1 模型结构的简化

若直接用式 (3-2) 来直接进行辨识, 计算机编写其相应的算法比较复杂, 为了增加其可操作性, 本文对其模型进行规范化处理。Mesarovic^[32]曾对多变量系统做了深刻的论述, 他将相等数目的输入量与输出量的耦合对象, 划分为三种规范型: P 规范型、V 规范型和非 P 非 V 规范型。

P 规范型 假如 $n \times n$ 维对象, 每个输出量 $C_i (i=1, 2, \dots, n)$ 都受所有输入变量 $M_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的影响, 称为 P 规范对象。

V 规范型 假如 $n \times n$ 维对象, 每个输出量 $C_i (i=1, 2, \dots, n)$ 不但受其本通道输入变量 $M_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的影响, 而且被其他所有输出量经过第 i 通道所影响, 称为 V 规范对象。

而其它类则属于非 P 非 V 规范型。经经验所得, 本文所讲的管式加热炉的炉况属于 P 规范型的。下面就对 P 规范型作一阐述, 其他规范型见文献。

P 规范型对象的输出为:

$$\begin{cases} C_1 = P_{11}M_1 + P_{12}M_2 + \cdots + P_{1n}M_n \\ C_2 = P_{21}M_1 + P_{22}M_2 + \cdots + P_{2n}M_n \\ \vdots \\ C_n = P_{n1}M_1 + P_{n2}M_2 + \cdots + P_{nn}M_n \end{cases} \quad (3-3)$$

式中 P_{ik} 表示第 i 个输入对第 K 个输出的传递函数。或式 (3-3) 可简化为

$$C = PM \quad (3-4)$$

$$\text{式中: } C = [C_1 \ C_2 \ \cdots \ C_n]^T, \quad (3-5)$$

$$M = [M_1 \ M_2 \ \cdots \ M_n]^T \quad (3-6)$$

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

在上面的理论基础上, 本文对 P 规范进一步化解, 把对 n 输入 p 输出的 MIMO (多输入多输出系) 简化为 p 个 n 输入单输出的 MISO (多输入单输出系统), 那么式 (3-2) 中的 $A(z^{-1})$ 可以化简为式 (3-8):

$$A(z^{-1}) = \begin{bmatrix} A_1(z^{-1}) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_2(z^{-1}) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & A_p(z^{-1}) \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

而 $B(z^{-1})$ 式不变, 其中 $C(z^{-1})$ 是由噪声种类决定的, 在此对 $C(z^{-1})$ 且不做分析。这样就使得辨识的参数大大减少, 具体表现成 P 规范型如式 (3-9) 下:

$$\begin{aligned} A_{11}(z^{-1}) y_1(t) &= B_{11}(z^{-1}) u_1(t) + \cdots + B_{1m}(z^{-1}) u_m(t) \\ &\vdots \qquad\qquad\qquad \vdots \qquad\qquad\qquad \vdots \\ A_{pn}(z^{-1}) y_n(t) &= B_{p1}(z^{-1}) u_1(t) + \cdots + B_{pm}(z^{-1}) u_m(t) \end{aligned} \tag{3-9}$$

对于本文要辨识的管式加热的各个输出状态而言, 式(3-9)中的 m 值为 3, p 值为 3。具体对应的 $A(z^{-1})$, $B(z^{-1})$, 中的阶次 n_a , n_b , 是根据输入输出的测量数据经辨识方法得出的。

3.1.2 CARMA 模型的改进

由于实际各个输入量对加热炉输出的时间响应有所不同, 为了更精确的辨识出模型的结构, 本文提出对 (3-2) 式中的 CARMA 模型^[33,34]进行改进, 把每一路输入分别进行时间滞后, 改进后结构如下:

$$A(z^{-1})Y(k) = B(z^{-1})U(k, nk) + \varepsilon(k) \quad (3-10)$$

其中 $A(z^{-1})=1+a_1z^{-1}+\cdots+a_nz^{-n}$, 而 $B(z^{-1})=[B_1(z^{-1})\ B_2(z^{-1})\ B_3(z^{-1})]$ 是多项式行向量 $B_i(z^{-1})=b_{i0}+b_{i1}z^{-1}+\cdots+b_{in_i}z^{-n_i}$, $U(k, nk)=[u_1(k, nk_1)\ u_2(k, nk_2)\ u_3(k, nk_3)]^T$ 是多项式列向量, nk 输入计算步长滞后量, $i=1, 2, 3$ 。

3.2 模型辨识方法

3.2.1 CARMA 模型的辨识机制

由式 (3-10) 可知, 对于存在干扰 $v(k)$ 的情况下, 误差的产生机理如下图 3-2 所示:

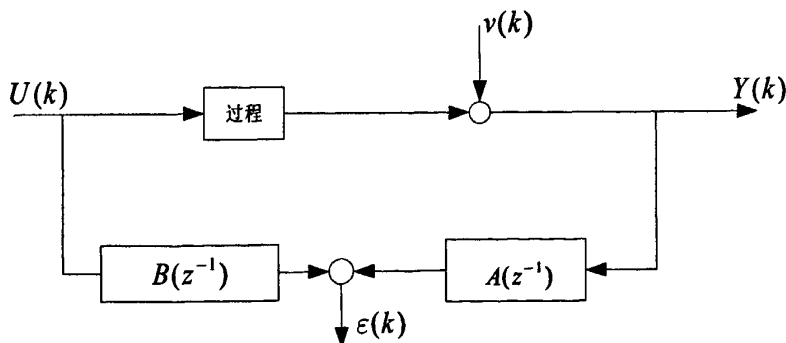


图 3-2 改进 CARMA 模型误差的产生

3.2.2 预测误差法

预测误差法^[35]是利用 k 时刻以前的输入, 输出信号计算 $k+1$ 直到将来时刻的输出。它在给定了观测量 $y(k)$ 后, 调整参数 θ 使预报的均方差达到最小。把式(3-10)变形得到式(3-11)

$$\begin{aligned} y(k) &= \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}u(k) + \frac{1}{A(z^{-1})}\varepsilon(k) \\ &= \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}u(k) + \left[\frac{1}{A(z^{-1})} - 1 \right] \varepsilon(k) + \varepsilon(k) \end{aligned} \quad (3-11)$$

令 $G(z^{-1}) = \frac{1}{A(z^{-1})} = 1 + g_1z^{-1} + \dots + g_nz^{-n}$ 由于 $A(z^{-1})$ 是首1的多项式, 因此滤波器

$$\left[\frac{1}{A(z^{-1})} - 1 \right] = g_1z^{-1} + g_2z^{-2} + \dots + g_nz^{-n} \quad (3-12)$$

具有一个单位的延迟。这意味着式(3-11)中的第二项是一个仅依赖于 $k-1$ 时刻及其以前数据的信号。当用 $u(k)$ 和 $y(k)$ 来表达这个信号时, 我们有式(3-13)

$$\begin{aligned} y(k) &= \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}u(k) + \left[\frac{1}{A(z^{-1})} - 1 \right] \frac{A(z^{-1})}{1} \left[y(k) - \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}u(k) \right] + \varepsilon(k) \\ &= B(z^{-1})u(k) + [1 - A(z^{-1})]y(k) + \varepsilon(k) \\ &= z(k) + \varepsilon(k) \end{aligned} \quad (3-13)$$

其中

$$z(k) = B(z^{-1})u(k) + [1 - A(z^{-1})]y(k) \quad (3-14)$$

注意, $z(k)$ 和 $\varepsilon(k)$ 是不相关的。如果以 $z(k)$ 作为 $y(k)$ 的一步向前预测, 那么预测误差 $\varepsilon(k)$ 是白噪声。若令 $y^*(k)$ 为 $y(k)$ 的任意一个预测值, 则预测误差方程为式(3-15)

$$\begin{aligned} E[y(k) - y^*(k)]^2 &= E[z(k) + \varepsilon(k) - y^*(k)]^2 \\ &= E[z(k) - y^*(k)]^2 + E\varepsilon(k)^2 \\ &\geq E\varepsilon(k)^2 = E[y(k) - z(k)]^2 \end{aligned} \quad (3-15)$$

因此, $z(k)$ 是在最小方差意义下的最佳预测值。在辨识中, 我们可将最佳滤波器表示为未知多项式的形式, 如式(3-16)

$$\hat{y}(k|\theta) = B(z^{-1})u(k) + [1 - A(z^{-1})]y(k) \quad (3-16)$$

其中 $\theta = (a_1, a_2, \dots, a_m, b_{11}, b_{12}, \dots, b_{nb1}, b_{21}, b_{22}, \dots, b_{nb2}, b_{31}, b_{32}, \dots, b_{nb3})$ 并且可通过使预报误差平方和最小化来确定参数, 如式(3-17)

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y(k) - y^*(k)]^2 \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [A(z^{-1})y(k) - B(z^{-1})u(k)]^2
 \end{aligned} \tag{3-17}$$

常用的预测误差目标函数:

$$\begin{aligned}
 J_1(\theta) &= \text{Trace}(\Gamma D(\theta)) \\
 J_2(\theta) &= \lg \det D(\theta)
 \end{aligned} \tag{3-18}$$

其中 Γ 为预先选定的正定阵, $\text{Trace}[\bullet]$ 为求取矩阵的迹。通过极小化 $J_1(\theta)$ 和 $J_2(\theta)$ 来获得预报误差的估计量。

3.2.3 辨识过程

采用 Newton-Raphson^[36-37]法对 (3-18) 式极小化的算法处理可以用下式来表示:

$$\hat{\theta}_{n+1} = \hat{\theta}_n - h_n \left[\frac{\partial^2 J_1(\theta)}{\partial \theta^2} \right]^{-1} \left[\frac{\partial J_1(\theta)}{\partial \theta} \right]^T \bigg|_{\hat{\theta}_n} \tag{3-19}$$

其中, $\hat{\theta}_n$ 是指第 n 次迭代的参数估计值; $\frac{\partial J_1(\theta)}{\partial \theta}$ 是 $J_1(\theta)$ 关于 θ 的梯度; $\frac{\partial^2 J_1(\theta)}{\partial \theta^2}$ 为 Hessian 矩阵; h_n 是指迭代步长, 它使得 $J_1(\hat{\theta}_{n+1})$ 最小。预测误差准则 $J_1(\theta)$ 的梯度 $\frac{\partial J_1(\theta)}{\partial \theta}$ 可以根据下式计算:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial J_1(\theta)}{\partial \theta_i} &= \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N e^T(k) W \frac{\partial e(k)}{\partial \theta_i} \\ \frac{\partial J_2(\theta)}{\partial \theta_i} &= \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N e^T(k) D^{-1}(\theta) \frac{\partial e(k)}{\partial \theta_i} \end{aligned} \right\} \tag{3-20}$$

预测误差准则 $\frac{\partial J_1(\theta)}{\partial \theta}$ 的二阶导数按下式进行计算:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 J_1(\theta)}{\partial \theta_i \partial \theta_j} &= \frac{\partial}{\partial \theta_j} \left[\frac{2}{N} \sum_{k=1}^N e^T(k) W \frac{\partial e(k)}{\partial \theta_i} \right] \\
 &= \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N \left\{ \left[\frac{\partial e(k)}{\partial \theta_j} \right]^T W \left[\frac{\partial e(k)}{\partial \theta_i} \right] + e^T(k) W \frac{\partial^2 e(k)}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \right\} \\
 &\approx \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N \left[\frac{\partial e(k)}{\partial \theta_j} \right]^T D^{-1}(\theta) \left[\frac{\partial e(k)}{\partial \theta_i} \right]
 \end{aligned} \tag{3-21}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 J_2(\theta)}{\partial \theta_i \partial \theta_j} &= \frac{\partial}{\partial \theta_j} \left[\frac{2}{N} \sum_{k=1}^N e^T(k) D^{-1}(\theta) \frac{\partial e(k)}{\partial \theta_i} \right] \\ &\approx \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N \left[\frac{\partial e(k)}{\partial \theta_j} \right]^T D^{-1}(\theta) \left[\frac{\partial e(k)}{\partial \theta_i} \right]\end{aligned}\quad (3-22)$$

式中, $i, j = 1, 2, \dots, L$ 为参数矩阵 θ 的维数。式(3-21)和(3-22)都作了近似化处理, 是因为精确解得到的二阶导数可能不是正定的, 且使用精确解迭代计算量很大, 因此实际中常使用如上式 (3-21), 式 (3-22) 的近似二阶导数。公式(3-21)和(3-22)中的 $\frac{\partial e(k)}{\partial \theta_i}$ 可由下式计算:

$$\frac{\partial e(k)}{\partial \theta_i} = -\frac{\partial}{\partial \theta_i} [f(Y^{(k-1)}, u^{(k-1)}, \theta)] \quad (3-23)$$

由以上推到, 可以得出 Newton-Raphson 法的计算步骤如下:

- (1) 给定迭代步长 h_n , 任取一个参数矩阵 θ 的初值 $\hat{\theta}_n$, 使 $n=0$ 。
- (2) 将 h_n 和 $\hat{\theta}_n$ 代入公式 (3-18) 和 (3-23) 中, 计算得出 $D(\hat{\theta}_n)$ 、 $e(k)|_{\hat{\theta}_n}$ 和 $\frac{\partial e(k)}{\partial \theta}|_{\hat{\theta}_n}$, 其中 $k=1, 2, \dots, L$ 。
- (3) 根据公式(3-20), (3-21)和(3-22), 计算 $\frac{\partial J_l(\theta)}{\partial \theta}|_{\hat{\theta}_n}$ 和 Hessian 矩阵 $\frac{\partial^2 J_l(\theta)}{\partial \theta^2}|_{\hat{\theta}_n}$ 。
- (4) 使用标量搜索常数 h_n 做线性搜索, 使 $\hat{\theta}_{n+1} = \hat{\theta}_n - h_n \left[\frac{\partial^2 J_l(\theta)}{\partial \theta^2} \right]^{-1} \left[\frac{\partial J_l(\theta)}{\partial \theta} \right]^T|_{\hat{\theta}_n}$ 达到最小。
- (5) 由(3-19)式, 计算 $\hat{\theta}_{n+1}$ 。
- (6) 如果 $J(\theta_{n+1}) - J(\theta_n)$ 达到指标要求就停止, 否则令 $n=n+1$, 转向(2)如此循环, 最后得到的 $\hat{\theta}_{n+1}$ 就是模型的预报误差参数估计值。

3.3 系统数据处理与参数辨识结果

3.3.1 数据预处理

在实际的工业应用中, 由于各物理量的一致性, 若直接用采集到的数据来进行模型参数的辨识, 这样会使系统及其不稳定, 且辨识出的模型参数也不精确, 通常情况下采用归一化方法进行处理。

归一化是一种简化计算的方式, 即将有量纲的表达式, 经过变换, 化为无量纲的表达式, 成为纯量, 例如概率中的密度函数就满足归一化条件, 归一化是一种无量纲处理手段, 使物理系统数值的绝对值变成某种相对值关系。简化计算, 缩小量值的有效办法。

本文采用的方法是把所有采集到的数据都归一到 0 到 1 之间这一量纲,进行相应的辨识,最后控制量可以进行反归一化处理来实现对加热炉的控制。

归一化处理有以下几种方法:

1、线性函数归一化,如下式所示:

$$y = (x - \text{MinValue}) / (\text{MaxValue} - \text{MinValue}) \quad (3-24)$$

说明: x 、 y 分别为转换前、后的值, MaxValue 、 MinValue 分别为样本的最大值和最小值。

2、对数函数归一化,如下式所示:

$$y = \log_{10}(x) \quad (3-25)$$

说明: x 、 y 分别为转换前、后的值。

2、反余切函数归一化,如下式所示:

$$y = a \tan(x) * 2 / \pi \quad (3-26)$$

说明: x 、 y 分别为转换前、后的值。

在 3.2 节已阐述了模型的结构,现在将采用从现场采集来的一个月的数据(250 组数据)前 200 组进行离散辨识,后 50 组对模型进行校验。首先要对数据进行归一化处理,应用上述归一化法对数据进行处理。经处理后前 200 组的数据如图 3-3 (输入数据)和图 3-4 (输出数据)所示:

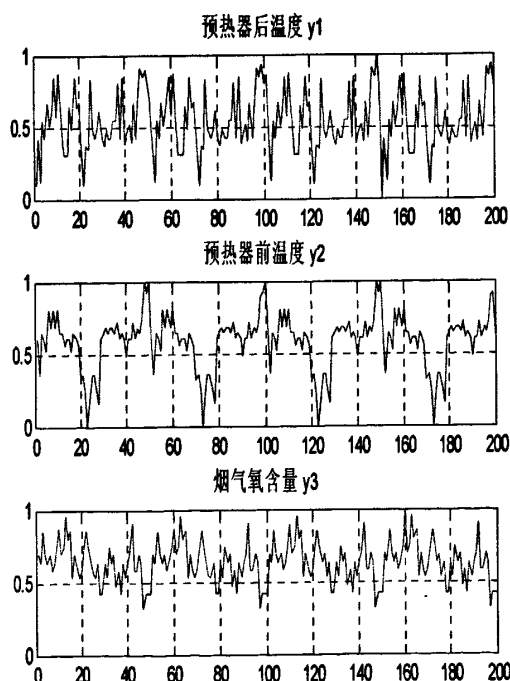


图 3-3 模型采集的输入数据

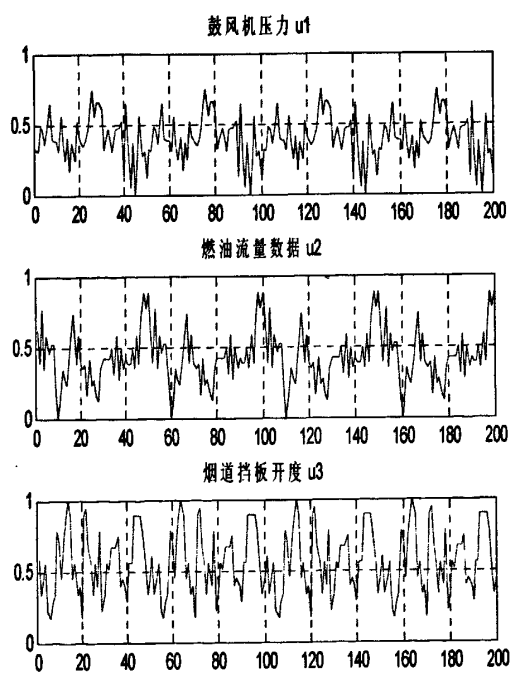


图 3-4 模型采集的输出数据

3.3.2 参数辨识结果

数据经过处理以后，在 MATLAB (R2007a)平台上进行参数辨识，具体辨识流程如下图 3-5 所示：

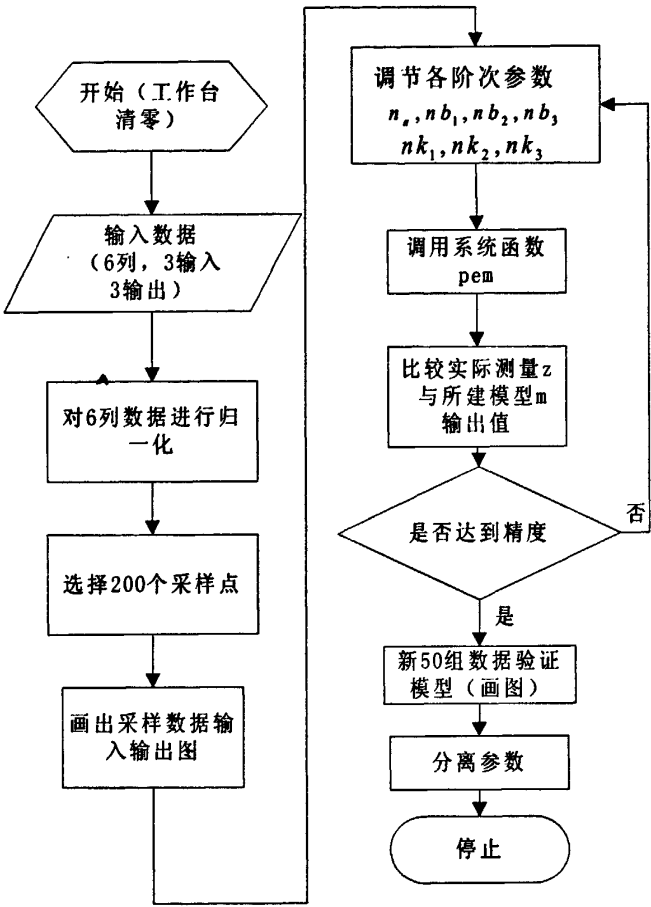


图 3-5 辨识流程图

通过不断的调节各阶次的参数使其达到最最小误差，调节阶次参数如表 3-1：

表 3-1 调节各模型阶次表

阶次 模型	n_a	nb_1	nb_2	nb_3	nk_1	nk_2	nk_3
预热器后温度	3	8	8	9	4	4	4
预热器前温度	3	7	8	8	2	3	4
烟气中氧含量	5	7	8	8	4	4	4

通过辨识得到如下预测图 3-5，图 3-6，图 3-7， z 为原始测量数据， m (虚点圈线) 为改进 CARMA 模型，比较可知所建模型有很好的跟踪效果，图 3-8，图 3-9，图 3-10 是利用新测数据(50 组)对模型检验， zzz 为实际测量数据， m (虚点线)为预测值，经检验模型具有很好的精度。根据式 (3-23) 辨识出来的各参数如式 (3-24)，式 (3-25)，式 (3-26) 所示。

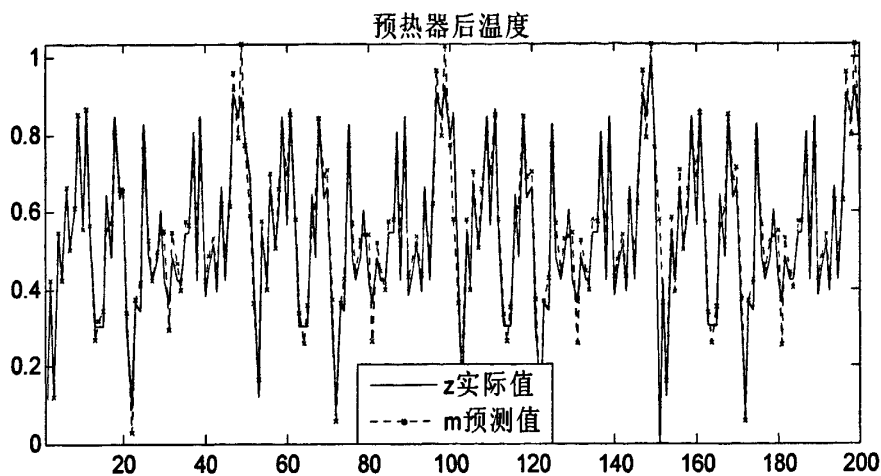


图 3-5 预热器后温度辨识效果图

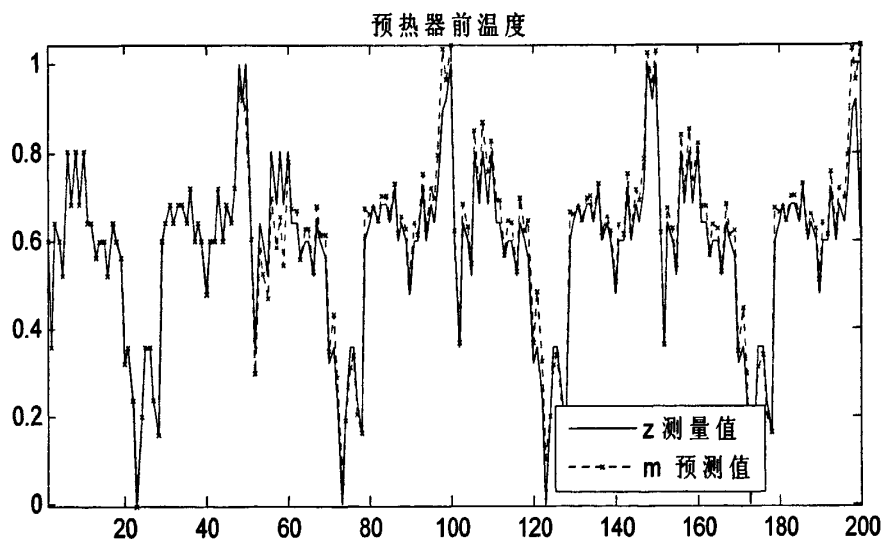


图 3-6 预热器前温度辨识效果图

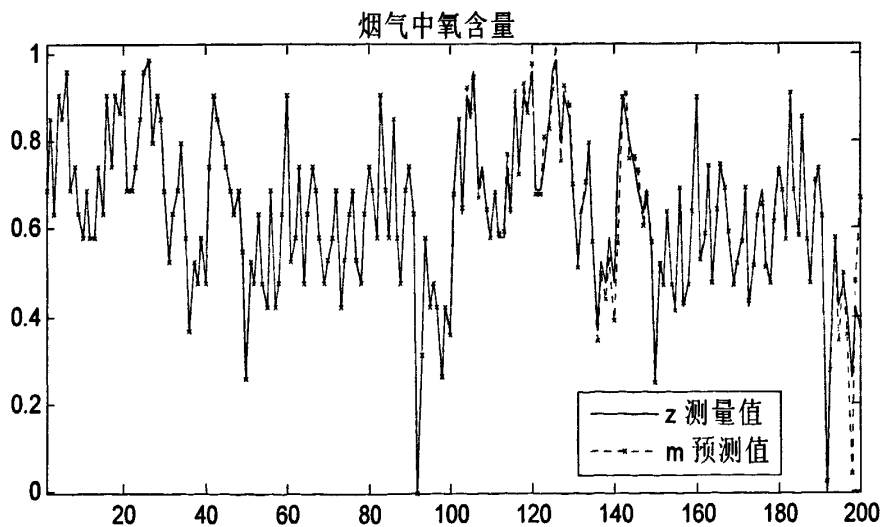


图 3-7 烟气中氧含量辨识效果图

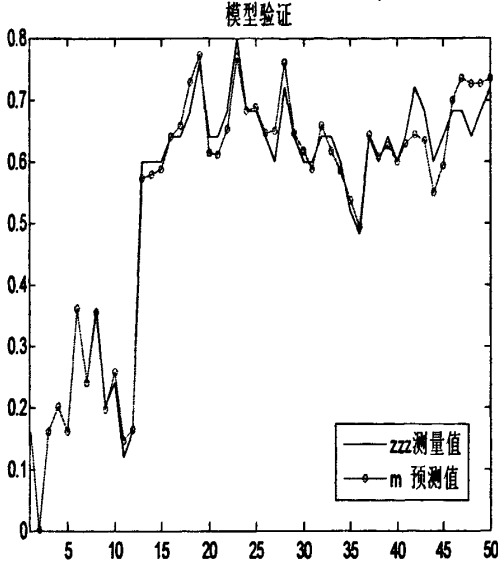


图 3-8 预热器前温度模型验证图

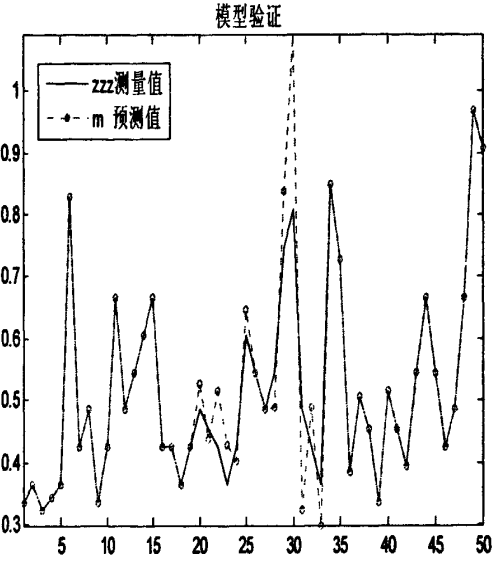


图 3-9 预热器后温度模型验证图

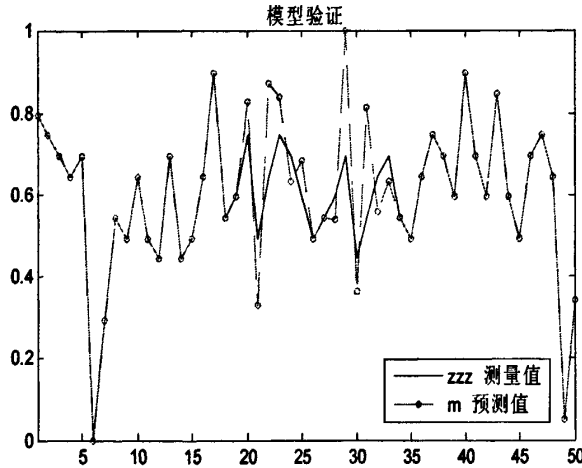


图 3-10 烟气中氧含量模型验证图

预热器后温度模型如式 (3-24)

$$\begin{aligned}
 A(z^{-1}) &= 1 - 0.6z^{-1} - 0.2416z^{-2} + 0.7203z^{-3} \\
 B_1(z^{-1}) &= -0.1031z^{-4} - 0.02069z^{-5} + 0.005921z^{-6} - 0.332z^{-7} - 0.02916z^{-8} - 0.1009z^{-9} + 0.2356z^{-10} - 0.0993z^{-11} \\
 B_2(z^{-1}) &= 0.06516z^{-4} - 0.1351z^{-5} + 0.1553z^{-6} + 0.1915z^{-7} - 0.5942z^{-8} - 0.5081z^{-9} + 0.3255z^{-10} + 0.553z^{-11} \\
 B_3(z^{-1}) &= 0.1189z^{-4} - 0.1159z^{-5} + 0.08975z^{-6} + 0.08126z^{-7} - 0.14z^{-8} + 0.3397z^{-9} - 0.7135z^{-10} + 0.709z^{-11} - 0.1489z^{-12}
 \end{aligned} \tag{3-24}$$

预热器前温度模型如式 (3-25)

$$\begin{aligned}
 A(z^{-1}) &= 1 - 0.7223z^{-1} - 0.7597z^{-2} + 0.3092z^{-3} \\
 B_1(z^{-1}) &= -0.02563z^{-2} - 0.202z^{-3} + 0.2748z^{-4} - 0.05185z^{-5} + 0.301z^{-6} - 0.2776z^{-7} - 0.03788z^{-8} \\
 B_2(z^{-1}) &= -0.1461z^{-3} + 0.09645z^{-4} - 0.03905z^{-5} - 0.06908z^{-6} + 0.0196z^{-7} + 0.1752z^{-8} - 0.1808z^{-9} + 0.09568z^{-10} \\
 B_3(z^{-1}) &= -0.01257z^{-4} + 0.03527z^{-5} + 0.04069z^{-6} + 0.1124z^{-7} + 0.1208z^{-8} + 0.1931z^{-9} - 0.01463z^{-10} + 0.1751z^{-11}
 \end{aligned} \tag{3-25}$$

烟气中氧含量模型如式 (3-26)

$$\begin{aligned}
A(z^{-1}) &= 1 - 0.1999z^{-1} - 0.4374z^{-2} + 0.03077z^{-3} + 0.2237z^{-4} - 0.2369z^{-5} \\
B_1(z^{-1}) &= 0.1318z^{-4} - 0.2384z^{-5} - 0.1519z^{-6} + 0.0376z^{-7} + 0.2068z^{-8} - 0.07036z^{-9} + 0.1954z^{-10} \\
B_2(z^{-1}) &= 0.08511z^{-4} - 0.0249z^{-5} - 0.05845z^{-6} - 0.5003z^{-7} - 0.006z^{-8} + 0.2717z^{-9} + 0.3531z^{-10} + 0.0785z^{-11} \\
B_3(z^{-1}) &= -0.01963z^{-4} + 0.07626z^{-5} - 0.1043z^{-6} - 0.2552z^{-7} + 0.09018z^{-8} - 0.08938z^{-9} - 0.04592z^{-10} + 0.3389z^{-11}
\end{aligned} \tag{3-26}$$

3.4 本章小结

本章介绍了基于改进 CARMA 模型对加热炉进行建模, 采用从现场采集的数据建立起了管式加热炉的三种输出状态的模型, 详细阐述了建模的过程, 并给出辨识结果图, 经检验得出改进的 CARMA 更好的辨识效果, 从而为基于模型的调炉决策系统打下基础。

第四章 管式加热炉的调炉决策系统

加热炉作为工况复杂、参数多变、运行惯性大、控制滞后的一个系统，其中的许多不稳定因素，如空气、燃料气压力值和燃料发热值的频繁波动，各变量之间相互耦合、相互干扰，虽不占主导地位，但对加热炉的正常生产不可忽略。冗余调炉策略子系统分为模型控制策略系统和加热炉基于规则库两部分，模型控制策略系统采用广义预测控制（GPC）先进控制^[38-42]方式，能够在炉况稳定时提高加热炉的各调节动作的控制精度；加热炉规则库能够增强常减压加热炉的鲁棒性，保证其全天候安全运行。常减压加热炉炉况分析子系统主要用于判断加热炉的运行状况，决定采用那种调炉策略，判断炉况稳定时，可采用模型控制策略系统得到的调炉策略；判断炉况不稳时，可采用基于规则库的控制系统得到的调炉策略。基本流程图如图 4-1 所示：

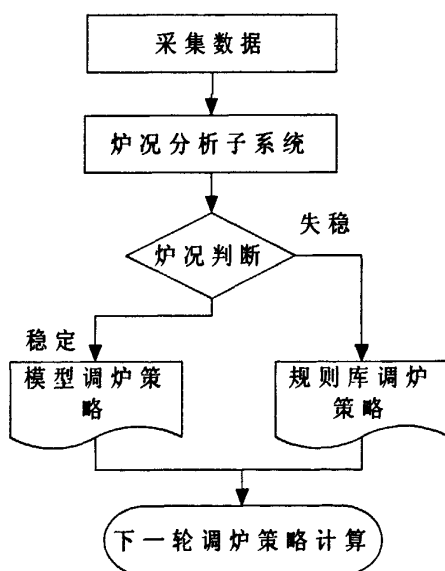


图 4-1 调炉决策系统示意图

4.1 基于模型的控制策略

对于模型控制策略系统，本文在基于系统辨识方法建立加热炉整体模型的基础上，引入 GPC 控制技术，GPC 是近年来发展起来的一种先进的控制算法^[43-45]，适用于控制不易建立精确数学模型且比较复杂的过程。针对式 (3-10) 是一个 MIMO 系统，具有强耦合性，给多变量的控制带来了困难，对于一般的多变量系统已有一些较好的解耦控制方法，但如何在广义预测控制方法中实现解耦^[46-47]则研究甚少，本文采用一种具有解耦设计的多变量系统广义预测控制算法。最后对系统进行测试，表明解耦后的系统，具有良好的跟踪能力。

4.1.1 广义预测的解耦设计

针对 (3-10) 模型, 有

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k-1) + \varepsilon(k) \quad (4-1)$$

其中

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= I + A_1 z^{-1} + \cdots + A_{n_A} z^{-n_A} \\ \hat{B}(z^{-1}) &= \hat{B}_0 + \hat{B}_1 z^{-1} + \cdots + \hat{B}_{n_B} z^{-n_B} \end{aligned}$$

$\{u(k)\}$ 和 $\{y(k)\}$ 分别为 m 维输入和 m 维输出向量, $\varepsilon(k)$ 是 m 维互不相关的随机扰动向量, 其均值为零, 方差为 σI 。不失一般性, 假设 $A(z^{-1})$ 为对角矩阵。

将 $B(z^{-1})$ 分为两部分, 即

$$B(z^{-1}) = \bar{B}(z^{-1}) + \tilde{B}(z^{-1}) \quad (4-2)$$

其中 $\bar{B}(z^{-1})$ 是一个对角矩阵多项式, $\tilde{B}(z^{-1})$ 是对角线为零的矩阵。(4-2) 式表明 $\bar{B}(z^{-1})$ 是输入输出对之间的直接联系, 而 $\tilde{B}(z^{-1})$ 则是通道间的相互耦合部分。

由式 (4-1) 和 (4-2) 式得出:

$$A(z^{-1})y(k) = \bar{B}(z^{-1})u(k-1) + \tilde{B}(z^{-1})u(k-1) + \varepsilon(k) \quad (4-3)$$

性能指标选取如下

$$J = E \left\{ \sum_{j=1}^N \|y(k+j) - r_j w(k+j) + \tilde{S}_j(z^{-1})u(k+j-1)\|^2 + \sum_{j=1}^N \|u(k+j-i)\|_{\lambda_j}^2 \right\} \quad (4-4)$$

$y(k+j)$ 表示广义输出。 $w(k+j)$ 是设定值向量, $\|X\|_Q^2$ 表示 $X^T Q X$ 。 Q 是对称正定矩阵。同一般的广义预测控制性能相比, (4-4) 式中多出一项 $\tilde{S}_j(z^{-1})u(k+j-1)$ 。 $\tilde{S}_j(z^{-1})$ 是对角线上为零的多项式, 用来消除通道间的耦合作用。同样, 加权常数矩阵 λ_j 也可以分为两部分 $\bar{\lambda}_j$ 和 $\tilde{\lambda}_j$, $\bar{\lambda}_j$ 是一对角矩阵, $\tilde{\lambda}_j$ 是对角线为零的矩阵, $\tilde{\lambda}_j$ 的作用同 $\tilde{S}_j(z^{-1})$ 。

定义 Diophantine 方程

$$I = F_j(z^{-1})A(z^{-1}) + z^{-j}G_j(z^{-1}) \quad (4-5)$$

其中

$$\begin{aligned} F_j(z^{-1}) &= I + F_1^j z^{-1} + \cdots + F_{n_d+j-1}^j z^{-n_d-j+1} \\ G_j(z^{-1}) &= G_0^j + G_1^j z^{-1} + \cdots + G_{n_A-1}^j z^{-n_A+1} \end{aligned}$$

由于 $A(z^{-1})$ 是对角矩阵, 所以 $F_j(z^{-1})$ 和 $G_j(z^{-1})$ 也是对角矩阵。

用 $F_j(z^{-1})$ 左乘 (4-3) 式, 可得

$$y(k+j) = F_j(z^{-1})\bar{B}(z^{-1})u(k+j-1) + F_j(z^{-1})\tilde{B}(z^{-1})u(k+j-1) + G_j(z^{-1})y(k) + F_j(z^{-1})\varepsilon(k+j) \quad (4-6)$$

由于上式中 $F_j(z^{-1})\varepsilon(k+j)$ 项与其他项互不相关的, 则 $y(k+j)$ 的最优预报可表示为

$$y^0(k+j) = F_j(z^{-1})\bar{B}(z^{-1})u(k+j-1) + F_j(z^{-1})\tilde{B}(z^{-1})u(k+j-1) + G_j(z^{-1})y(k) \quad (4-7)$$

将 $F_j(z^{-1})\bar{B}(z^{-1})$ 和 $F_j(z^{-1})\tilde{B}(z^{-1})$ 分为两部分

$$F_j(z^{-1})\bar{B}(z^{-1}) = E_j(z^{-1}) + z^{-j}L_j(z^{-1})$$

$$F_j(z^{-1})\tilde{B}(z^{-1}) = \tilde{E}_j(z^{-1}) + z^{-j}\tilde{L}_j(z^{-1})$$

其中

$$E_j(z^{-1}) = E_0^j + E_1^j z^{-1} + \cdots + E_{j-1}^j z^{-j+1}$$

$$L_j(z^{-1}) = L_0^j + L_1^j z^{-1} + \cdots + L_{n_D+n_B-1}^j z^{-n_D-n_B+1}$$

$$\tilde{E}_j(z^{-1}) = \tilde{E}_0^j + \tilde{E}_1^j z^{-1} + \cdots + \tilde{E}_{j-1}^j z^{-j+1}$$

$$\tilde{L}_j(z^{-1}) = \tilde{L}_0^j + \tilde{L}_1^j z^{-1} + \cdots + \tilde{L}_{n_D+n_B-1}^j z^{-n_D-n_B+1}$$

式 (4-7) 可表示为

$$y^0(k+j) = E_j(z^{-1})u(k+j-1) + \tilde{E}_j(z^{-1})u(k+j-1) + G_j(z^{-1})y(k) + L_j(z^{-1})u(k-1) + \tilde{L}_j(z^{-1})u(k-1)$$

将上式代入 (4-5) 中并选择 $\tilde{S}_j(z^{-1})$ 满足

$$\tilde{S}_j(z^{-1})u(k+j-1) + \tilde{E}_j(z^{-1})u(k+j-1) + \tilde{L}_j(z^{-1})u(k-1) = \tilde{M}_j(z^{-1})u(k-1)$$

其中

$$\tilde{M}_j(z^{-1}) = \tilde{M}_0^j + \tilde{M}_1^j z^{-1} + \cdots + \tilde{M}_{n_M}^j z^{-n_M}$$

是一个对角线为零的矩阵多项式, 则 (4-4) 可表示为

$$J = \sum_{j=1}^N \|E_j(z^{-1})u(k+j-1) + L_j(z^{-1})u(k-1) + \tilde{M}_j(z^{-1})u(k-1) + G_j(z^{-1})y(k) - r_j w(k+j)\|^2 + \sum_{j=1}^N \|u(k+j-1)\|_{\lambda_j}^2$$

$$= \|EU + Lu(k-1) + Gy(k) + \tilde{M}_j u(k-1) - RW\|_r^2 + \|U\|_{\lambda}^2$$

其中

$$E = \begin{bmatrix} E_{10} & 0 & \cdots & 0 \\ E_{21} & E_{20} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ E_{NN-1} & E_{NN-2} & \cdots & E_{N0} \end{bmatrix} \quad U = \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \vdots \\ u(k+N+1) \end{bmatrix} \quad W = \begin{bmatrix} \omega(k) \\ \omega(k+1) \\ \vdots \\ \omega(k+N+1) \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} G_1(z^{-1}) \\ G_2(z^{-1}) \\ \vdots \\ G_N(z^{-1}) \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} L_1(z^{-1}) \\ L_2(z^{-1}) \\ \vdots \\ L_N(z^{-1}) \end{bmatrix} \quad \tilde{M} = \begin{bmatrix} \tilde{M}_1(z^{-1}) \\ \tilde{M}_2(z^{-1}) \\ \vdots \\ \tilde{M}_N(z^{-1}) \end{bmatrix}$$

$$R = \text{diag}(r_j)$$

$$\lambda = \text{diag}(\bar{\lambda}_j) + \text{diag}(\tilde{\lambda}_j) = \bar{\lambda} + \tilde{\lambda}$$

其中

$$j = 1, \dots, N$$

对于 J 可求得最小值, 得

$$U = (E^T E + \bar{\lambda})^{-1} E^T [RW - Gy(k) - Lu(k-1) - \tilde{M}u(k-1)] - (E^T E + \bar{\lambda})^{-1} \tilde{\lambda} U \quad (4-8)$$

在上式中 $\tilde{M}$ 和 $\tilde{\lambda}$ 中的数值可由闭环系统方程来确定

定义 $(E^T E + \bar{\lambda})^{-1} E^T$ 的前 m 行为 $e^T = [e_1, \dots, e_N]$, $(E^T E + \bar{\lambda})^{-1}$ 的前 m 行为 $h^T = [h_1, \dots, h_N]$

则 $u(k)$ 可表示为

$$u(k) = [e_1, \dots, e_N] [RW - Gy(k) - Lu(k-1) - \tilde{M}u(k-1)] - [h_1 \bar{\lambda}_1 + \dots + h_N \bar{\lambda}_N z^{N-1}] u(k)$$

将上式代入 (4-3), 可得闭环方程

$$\begin{aligned} & \{[I + z^{-1}(e_1 L_1 + e_2 L_2 + \dots + e_N L_N)]A + z^{-1} \bar{B}[e_1 G_1 + e_2 G_2 + \dots + e_N G_N]\} y(k) \\ & = \bar{B}[e_1 r_1 + e_2 r_2 z + \dots + e_N r_N z^{N-1}] w(k) - \tilde{T}u(k-1) + V\varepsilon(k) \end{aligned} \quad (4-9)$$

其中 $\tilde{T}$ 表示相互耦合的项

$$\begin{aligned} \tilde{T} &= \bar{B}[z^{-1}(e_1 \tilde{M}_1 + e_2 \tilde{M}_2 + \dots + e_N \tilde{M}_N)] + z^{-1} \bar{B}[e_1 G_1 + e_2 G_2 + \dots + e_N G_N] + (h_1 \bar{\lambda}_1 + \dots + h_N \bar{\lambda}_N z^{N-1}) \\ &\quad - [I + z^{-1}(e_1 L_1 + e_2 L_2 + \dots + e_N L_N)] \bar{B} \end{aligned} \quad (4-10)$$

从 (4-9) 式已知, 为使闭环系统实现解耦, 则必须使 $\tilde{T} = 0$ 。然而方程 (4-10) 中未知的个数小于方程的个数, 只能用最小二乘法^[48]求解 (4-10) 式中的 $\tilde{M}_j(z^{-1})$ 和 $\bar{\lambda}_j$, 这将使得 $\tilde{T}$ 不能精确为 0, 因此解耦只能是近似的。

另外由于本系统中的控制对象 (4-1) 式是 CARMA 模型, 为了保证闭环系统输出无稳态误差, 必须在线确定性能指标 (4-4) 适中的 r_j 。为了简单起见, 设 $r_1 = r_2 = \dots = r_N = r$, 则从 (4-9) 中可求出 r 。

$$\begin{aligned} r &= (e_1 + \dots + e_N)^{-1} \times \{\bar{B}(1)^{-1} [I + e_1 L_1(1) + e_2 L_2(1) + \dots + e_N L_N(1)] A(1) \\ &\quad + e_1 G_1(1) + e_2 G_2(1) + \dots + e_N G_N(1)\} \end{aligned} \quad (4-11)$$

将求出的 $\bar{\lambda}_j$, $\tilde{M}_j(z^{-1})$ 和 r_j 代入 (4-8) 中, 则可求得如下解耦控制律。

$$u(k) = [I, 0, \dots, 0] (E^T E + \bar{\lambda})^{-1} \times E^T [RW - Gy(k) - Lu(k-1) - \tilde{M}u(k-1)] \quad (4-12)$$

至此，得到如下的广义预测解耦算法。

第 1 步：用 (4-2) 式将 $\hat{B}(z^{-1})$ 分为两部分 $\bar{B}(z^{-1})$ 和 $\tilde{B}(z^{-1})$ 。

第 2 步：利用最小二乘法求解 (4-10) 式中的 $\tilde{M}_j(z^{-1})$ 和 $\bar{\lambda}_j$ 。

第 3 步：利用 (4-11) 求出 r_j 。

第 4 步：利用 (4-12) 求出 $u(k)$ 。

4.1.2 系统仿真

由上一章所求的模型 (3-24)，(3-25) (3-26) 利用上小节解耦方法进行仿真。通过设定预定值，经过广义解耦算法，给出相应的调节量，人工调节相关输入 $U(k)$ ，使其达到预定值，具体的系统控制框图如图 4-2 所示：

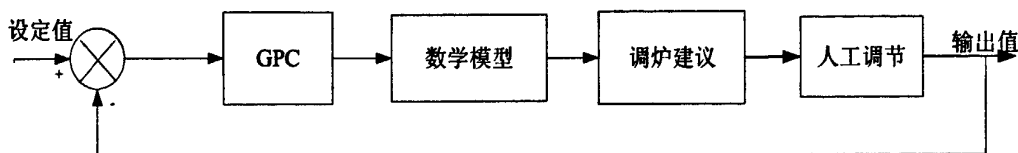


图 4-2 系统控制框图

预热器后温度的控制仿真图如图 4-3，设定值为 120℃，加入随机噪声；预热器前温度的控制仿真图如图 4-4，设定值为 220℃，加入随机噪声。烟道中氧含量控制图如图 4-5，设定值为 4%。通过仿真可以看出，GPC 解耦算法具有很好的稳定性，很稳定的控制效果。

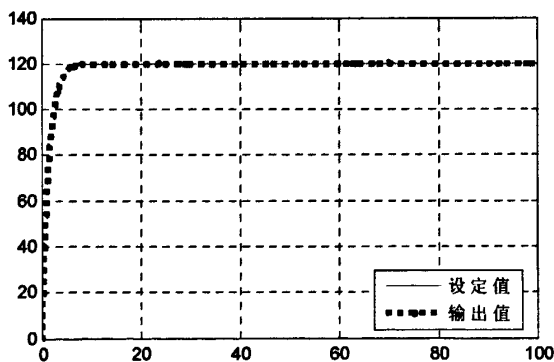


图4-3 预热器后温度控制效果图

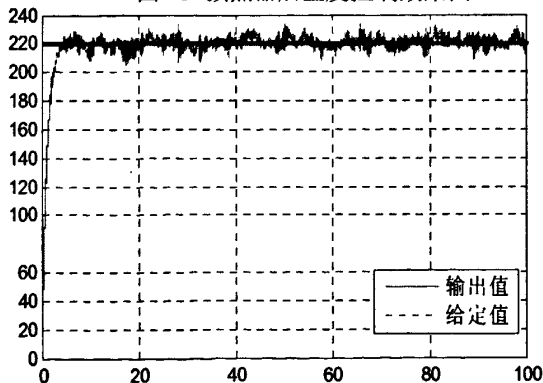


图 4-4 预热器前温度控制效果图

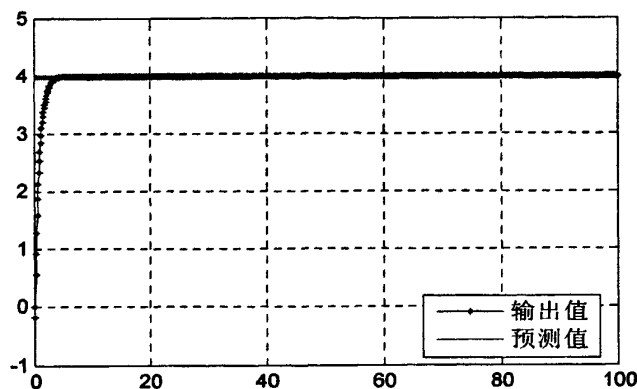


图 4-5 预热器后烟气中氧含量控制效果图

4.2 基于规则库的控制策略

基于规则库^[49]的调炉控制系统是在炉况不稳的状态提出来的,通过平时操作工人们的经验调炉建议与调炉相关专家制定出的规则。并且可以通过实践经验来增加和删除某些规则。具体调炉策略是即通过测量输出值以及相关参数值,最后综合评定给出调炉建议,进行人工调炉。因此,此调炉方法是一种粗调。控制原理框图如下:

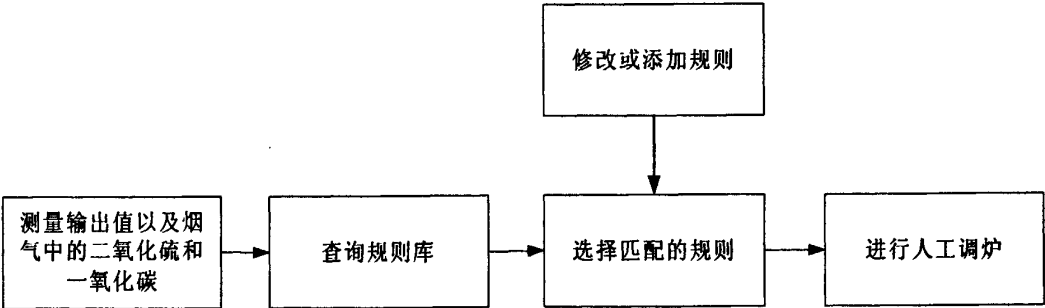


图 4-6 基于规则库的控制策略

以上功能均在中央控制室中完成,通过组态王软件自身编程来实现。查询规则通过: IF < 条件 1 > AND < 条件 2 > AND < 条件... > THEN < 结论 >, 查表法来进行匹配,从而给出调炉建议。但是由于实际规制库的匹配条件是指在一定的数值范围内,而实时测定的数据是一个定值。所以需要把实际数据线性化,划归到一个合理的范围,比如可以把预热器后的温度可以划分为“高”,“正常”,“低”这三个档次来决定。采用梯形法对数据进行处理,如下式来表示:

$$u_A = \begin{cases} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} & a_1 < x < a_2 \\ 1 & a_2 < x < a_3 \\ \frac{a_4-x}{a_4-a_3} & a_3 < x < a_4 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \tag{4-13}$$

假设预热器后温度在测得的数据在 (a_1,a_2) 之间,就表明温度低,同理在 (a_2,a_3) 之间说明温度正常,当温度在 (a_3,a_4) 之间说明温度高。当然为了更进一步的把规则库细分,可以把“高”,“正常”,“低”继续来细分,比如 $a_1=90^{\circ}\text{C}$, $a_2=120^{\circ}\text{C}$,当测量值为 $x=110^{\circ}\text{C}$ 时, $u_A=0.67$ 。在这里可以用

IF $x>a_1$ AND $x<a_2$ AND $u_A>0.5$, THEN 判断:“预热器后温度低大”

在这里本文规定权值以 0.5 为界,高于 0.5 就认为“大”,低于 0.5 就认为“小”,对于测量的相关参数(温度,CO,SO₂,O₂)均可以通过以下梯形的隶属度来表示相关隶属关系,通过梯形图来表示如下:

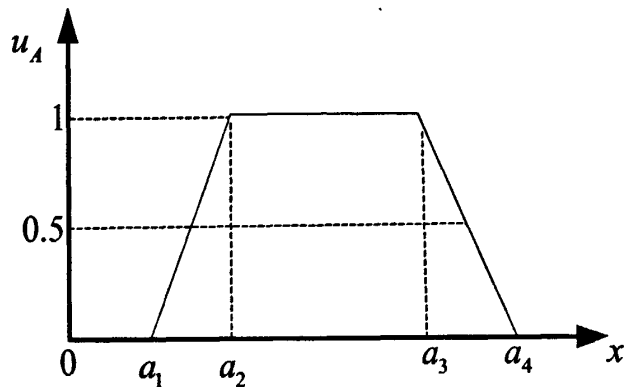


图 4-7 相关隶属度

这样就可以通过查询规则库来匹配相应的调炉建议。表 4-1 是总结平时工人调炉给出的基本调炉规则。

表 4-1 基本调炉规则库及调炉建议

监测点	现象	判断	建议
检测点 1 (对流顶)	对流顶出口的 O ₂ 含量偏高(大于 5%), 且 CO 含量正常	1. 燃油与空气的混合不好,造成氧过剩, w (权值)=0.8	调整燃烧空气用量, 调节燃料和雾化蒸汽压力
		2. 看火门不严实、对流顶段漏气 w (权值)=0.9	检查对流顶段是否漏风
	对流顶段出口的 O ₂ 含量偏高(大于 5%), 且 CO 含量在 0ppm 左右	鼓风机进风量过剩 w (权值)=0.7	减少鼓风机的进风量
	对流顶段出口 O ₂ 含量偏高(大于 5%)或者在 5%附近波动, 且 CO 的含量偏高(大于 100ppm)	1. 燃烧器中的油燃烧不完全, 并且看火门不太严实、可能对流顶段有漏风 w (权值)=0.8 2. 喷火嘴可能结焦 w (权值)=0.8 3. 燃烧器可能出现問題 w (权值)=0.9	可以适当增加燃烧器中的进风量, 并且检查看火门是否严实; 对喷火嘴进行清焦; 若以上方法均无效, 建议更换燃烧器
	对流顶段出口的 O ₂ 含量偏低(小于 3%), 且 CO 的含量偏高(大于 100ppm)	燃料燃烧不充分 w (权值)=0.9	建议增加燃烧器的进风量

	对流顶段出口 O ₂ 含量正常(3~5%), CO 含量正常(小于 100ppm)	炉子的燃烧状态良好 w (权值)=0.9	维持现状
	对流顶段出口温度超过预设温度 (380℃)	对流顶段处可能有积灰 w (权值)=0.9	当出口排烟温度大于 460℃时, 建议马上除灰
	对流顶段的 SO ₂ 含量较高 (大于 200ppm)	可能是由于燃料的含硫量比较高, 在烟道及预热器的低温换热面上产生酸露点腐蚀 w (权值)=0.9	确保燃料在规定内的含硫量
检测点 2 (预热器前)	预热器前的 O ₂ 含量参照对流顶段出口 O ₂ 含量, 且测量的排烟温度与对流顶段类似	与对流顶段相同	与对流顶段相同
	预热器前的 O ₂ 含量比对流段的出口 O ₂ 含量高, 且预热器前的排烟温度低	烟道某处或者对流顶段烟道挡板有漏风处, w (权值)=0.8 其它与对流顶段相同	检查排烟的烟道和烟道中的挡板是否漏风; 其它与对流顶段相同
检测点 3 (预热器后)	预热器后的 O ₂ 含量与预热器前氧含量基本类似	与对流顶段, 预热器前相同	与对流顶段, 预热器前相同
	预热器后的 O ₂ 含量比预热器前 O ₂ 含量高	预热器某处有漏风的地方 w (权值)=0.9 其它与对流顶段, 预热器前相同	检查预热器是否漏风, 其它的与对流顶段, 预热器前相同
	预热器后的排烟温度较高 (大于 200℃)	可能由于燃料的含硫高, 导致预热器的产生酸露点, 而最终使热管积灰甚至于堵塞, 换热器效果比较差 w (权值)=0.9	建议对预热器进行清灰

如果判断的结果是调炉规则不存在, 或者多条规则均满足条件, 则采用带有加权的规制来描述状态, 表示形式如下:

If N_1 and N_2 and...and N_n , then H ,可以表示成 $CF(H|N)$

上式中的 $N_1, N_2 \cdots N_n$ 所对应的权重是, $w_1, w_2 \cdots w_n$, 其中 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$, 权值在制定规则的时候根据经验人为的规定。CF 为可信度可以表示成:

$$CF(N) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot CF(N_i)$$
$$CF(H) = CF(N) \cdot CF(H|N) \tag{4-14}$$

当系统有多条规则同时支持一条结论时, 本文采用加权的方法来计算出最后结论。如有两条规则 R_1, R_2 , 总结论 $CF = A \times CF_1 + B \times CF_2$, A, B 为 R_1, R_2 两条规则的权重, 而 $CF_1(H|N)$ 和 $CF_2(H|N)$ 分别为 R_1, R_2 的可信度。A, B 的权重计算方法如下式:

$$A = \frac{CF_1(H|N)}{\sum_{i=1}^2 CF_i(H|N)} \tag{4-15}$$

$$B = \frac{CF_2(H|N)}{\sum_{i=1}^2 CF_i(H|N)} \tag{4-16}$$

4.3 冗余决策系统的评价机制

前两节阐述了系统两种调炉决策方法，如何针对采集的数据来判断采用哪一种决策是本小节主要阐述的内容。本文采用氧含量，二氧化硫含量和一氧化碳含量，以及采用相应的基准值来确定系统该采用哪一种调炉决策。具体评价机制如下图所示：

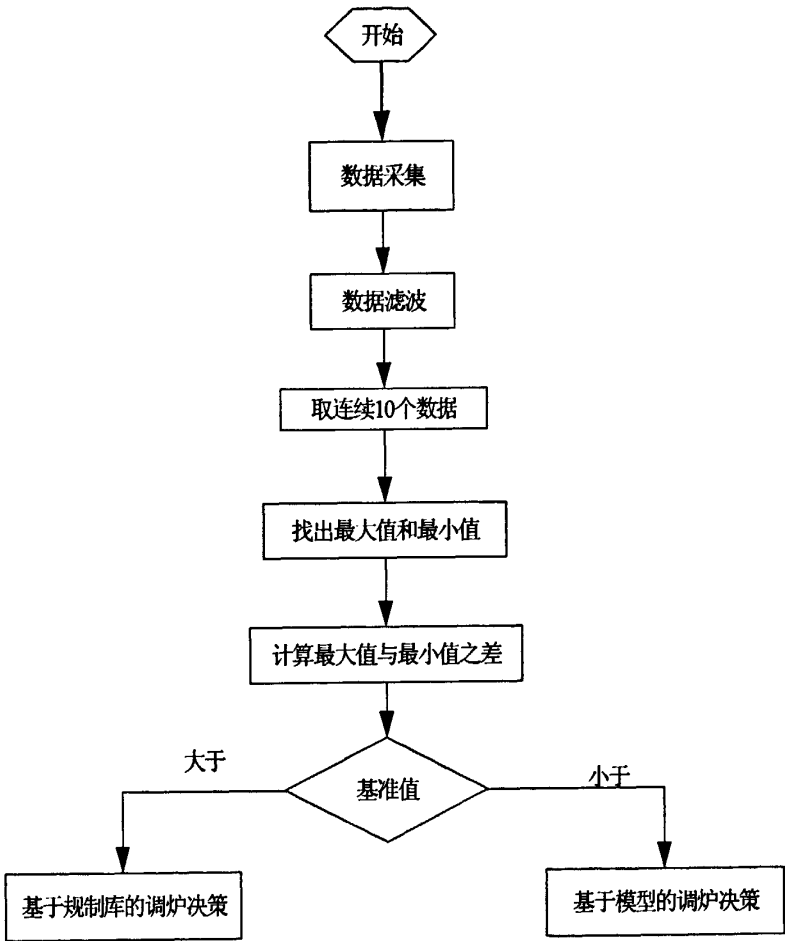


图 4-8 决策系统的评价机制

数据采集是对氧含量，二氧化硫含量和一氧化碳含量这三种数据进行实时采集，其中数据滤波分别取连续采样 20 个数据，去掉最大值和最小值，计算余下的 18 个数据的平均值作为新的数据来应用。从滤波后的数据中取连续 10 个数据，计算其最大值和最小值之差来与给定的基准值来比较，得出三组比较结果，若有其中一组大于其基准值，则就可以认为炉况不稳定，选择基于规则库的调炉决策，若三组结果均小于其基准值，则认为炉况稳定采用基于模型的调炉决策，由此可以判定出究竟采用哪种调炉决策。图

4-8 中的基准值可以通过人为根据经验来设定其值的标准。下表 4-2 为各含量的设定的基准值。

表 4-2 三种数据 (O₂,CO,SO₂) 的基准值

种类 比较项	O ₂ (%)	CO (ppm)	SO ₂ (ppm)
基准值	1	25	25

4.4 本章小结

本章阐述了加热炉的调炉系统，分别介绍了基于模型的调炉决策和基于规则库的调炉决策，以及二者的调炉评价机制即采用哪一种调炉方法。应用 GPC 解耦算法对多入多出系统进行解耦，并进行系统仿真，结果显示实际控制量与给定值基本一致；其次叙述了规则库的制定与调用方法，并且采用加权值的算法来解决多条结论的总体判断；最后通过比较基准值来判断采用哪一种决策机制来实现两种调炉决策的转换。

第五章 中控室监控系统的实现

管式加热炉的监控系统是在中控室 PC 机上实现实时的监控、MATLAB 控制算法与组态王的通信以及现场情况的实时显示。具体实现方法框图如下所示：

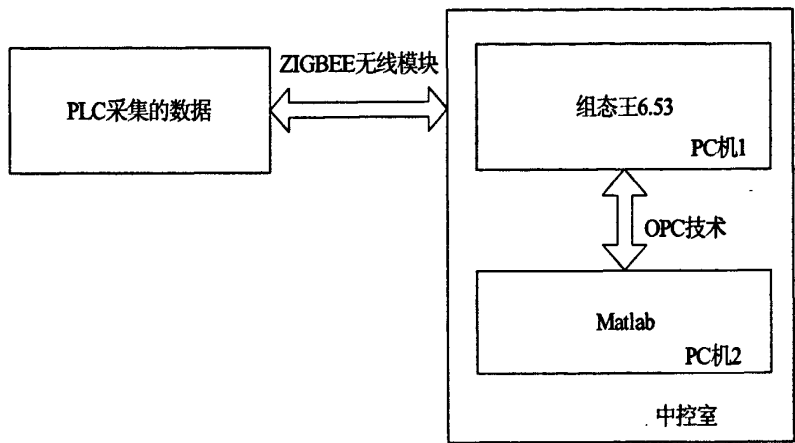


图 5-1 加热炉的中控室监测系统实现框图

5.1 基于 OPC 技术 MATLAB 与组态王的通讯

中控室监控系统主要是由装有组态王 6.53、Matlab7.0 的上位机通过组态实现现场画面的模拟，以及两者通过 OPC 数据交换技术实现数据的互相调用。组态王主要实现对现场数据进行显示以及相关控制（选择采样时间）和调炉决策的显示，而 Matlab 实现对现场数据的 GPC 控制。

5.1.1 OPC 技术规范简介

OPC（OLE for Process Control）是常用的工业控制领域接口标准，它可以按照既有的标准的方法实现不同设备之间的通信。OPC 基金会负责制定相应的 OPC 规范，包括实时数据访问、历史数据访问、事件与报警、批处理、OPC DA XML^[50]等一系列标准。

OPC 基于微软的 COM 技术，主要有以下几个特征：

- (1) 较以往的 DDE 传输模式，其在通信速率有明显的提高；
- (2) 主要是基于微软分布式 COM 安全性的管理机制；
- (3) 其开发成本比较低；
- (4) 能够实现高度通信功能的系统；
- (5) 系统具有很高的可靠性；

OPC 服务器包含几个对象：服务器、标签组和标签项。OPC 服务器对象包含标签组，标签组包含标签项。层次关系如下：

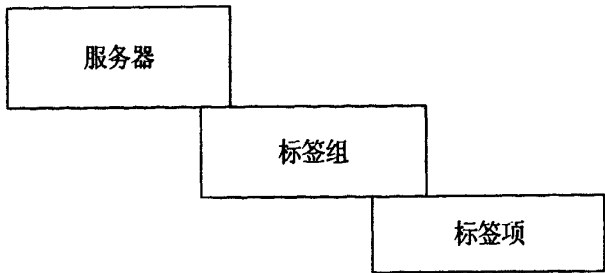


图5-2 对象层次关系

5.1.2 MATLAB 与组态王的通讯

利用 Matlab OPC Toolbox 就可以实现 Matlab 客户端与组态王服务器^[51]端之间的数据通信。利用 MATLAB 的 OPC 工具箱不必了解其服务器的内部如何设置，通过 OPC 的简单函数调用就能访问任何一个 OPC 数据服务器，这样就可以对连接到 OPC 服务器数据进行读写操作，由于 OPC 数据访问服务器由唯一的 ID 号确定，因此每台主机的服务器 ID 号是唯一的，在网络中唯一地确定身份。

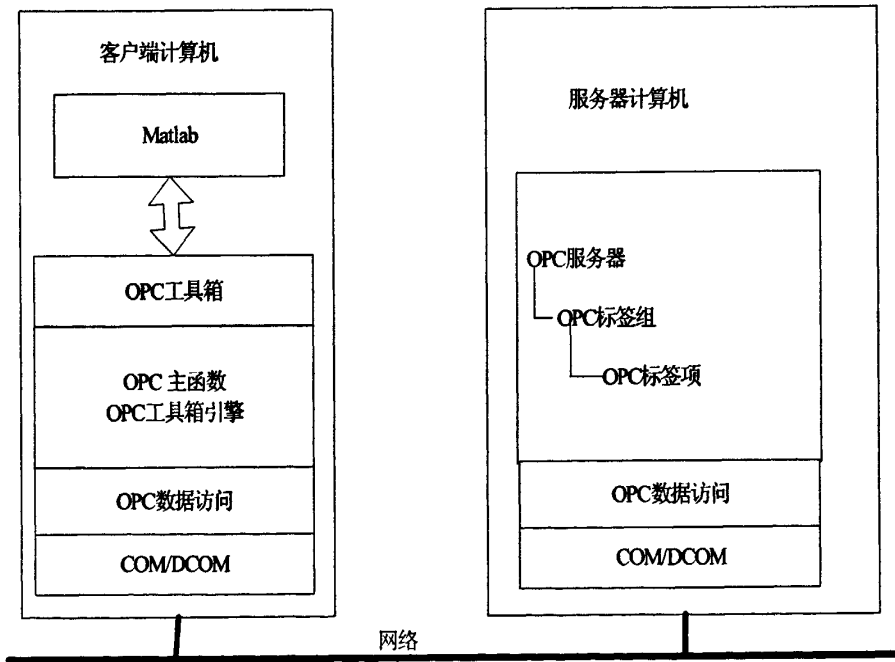


图 5-3 OPC 客户端与 OPC 服务器之间的关系

为了说明问题，在组态王 6.53 软件中建立了一个模拟的预热器前后两个温度的高低控制系统，在组态王 OPC 数据服务器建立了 4 个变量,分别是预热器前温度、预热器后温度、预热器前温度的上限值和预热器后温度上限值,用于表示预热器前后温度的变化量和上限值。MATLAB 与组态王的通信主要由系统函数构成，这些函数主要包括调用函数 opcd、连接函数 connect、添加组函数 addgroup、以及相应的变量添加函数 additem。通过以上这些函数的具体设置以及在 MATLAB 中编写相应的程序，程序流程如图 5-4 所示。

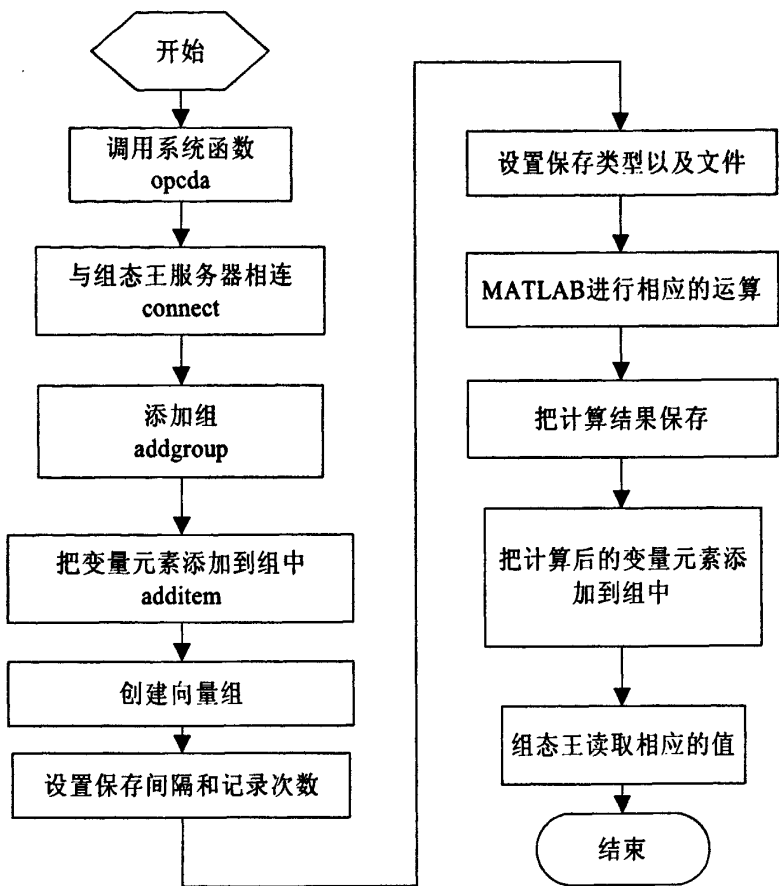


图 5-4 组态王与 MATLAB 通信程序流程图

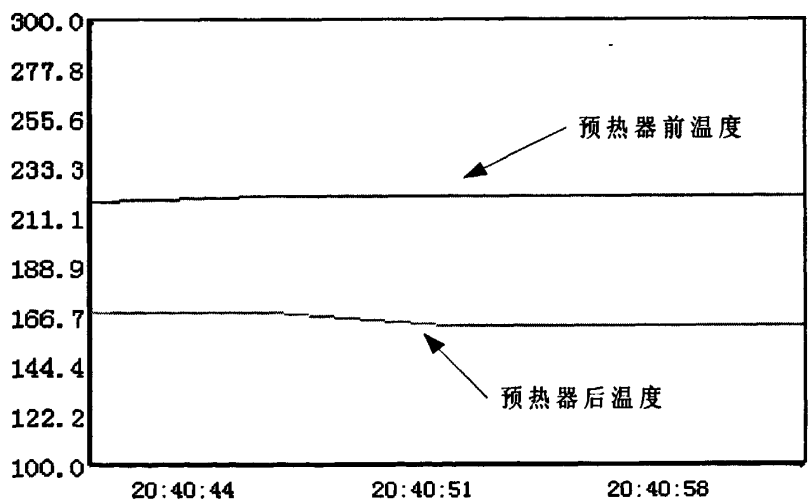


图 5-5 MATLAB 读取组态王实时数据图

图 5-5 是运行 MATLAB 读取组态王 6.53 的 OPC 数据服务器数据程序后得到的预热器前后的温度变化值。在 MATLAB 界面中可以实时地看到预热器前后温度的实时数据所绘制的趋势图。横坐标代表实时的时间，更新频率设定为 7 秒，纵坐标表示温度。当 MATLAB 通过计算得出结果返回 OPC 数据服务器^[52-53]写入数据程序，组态王的运行情

况也会发生相应的变化，因此运用此方法可以实现其他相关参数的互相调用。

5.2 系统重要数据监测与调炉建议

上位机的系统由无线模块 ZIGBEE 传输来的数据，经过量程转换通过组态软件中的命令语句进行编程，计算得出加热效率，和酸露点等相关数据，如图 5-6 所示。

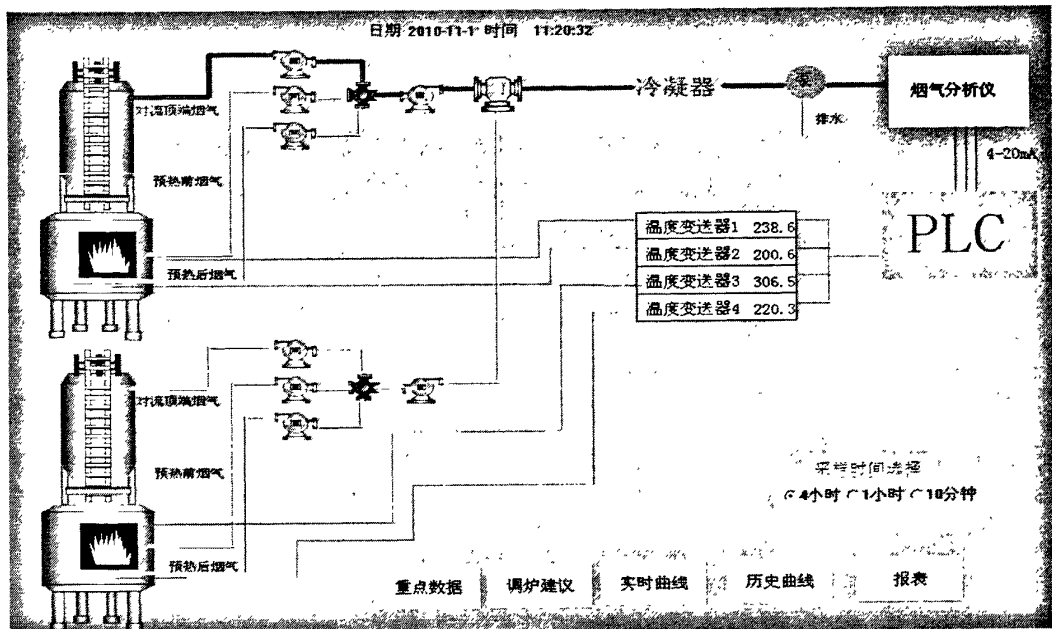


图 5-6 系统监控界面

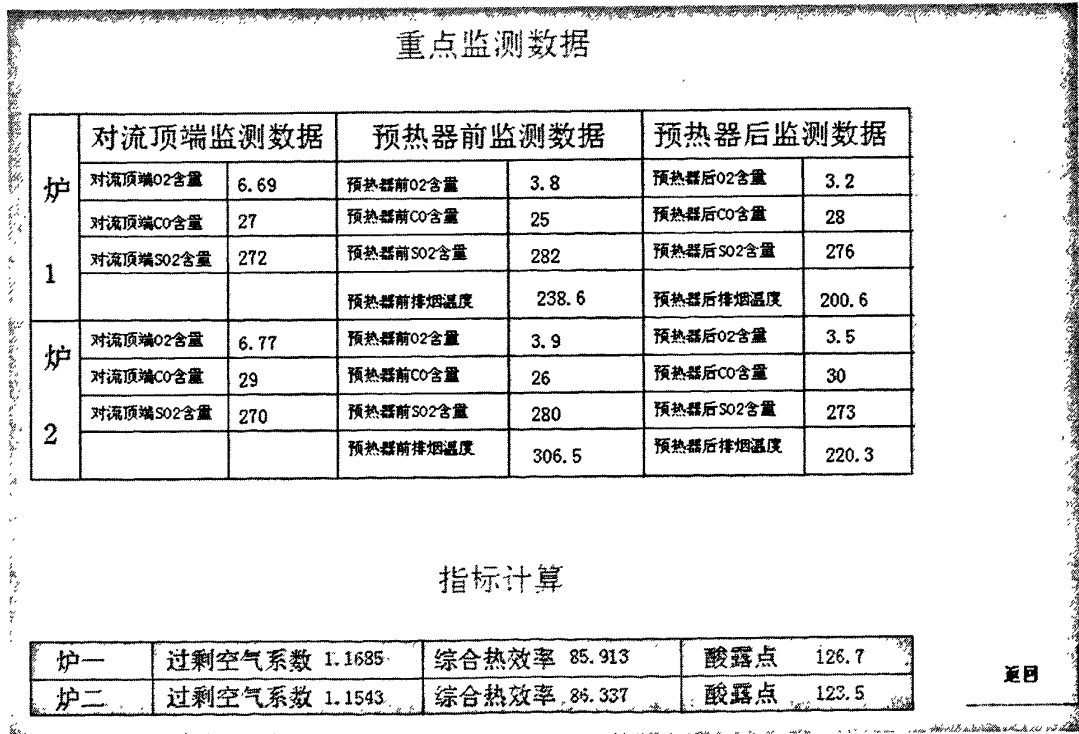


图 5-7 重点监测数据界面

当系统运行时可以设定采集数据的频率，通过组态王命令语言编辑滤波程序，以及相应的量程转化设置，而调炉决策建议是根据系统采集来的数据通过冗余决策机制来进行性判断采用哪一种调炉决策，下图显示的是基于规则库的系统调炉决策。

炉一：运行情况	诊断	建议
对流顶端： 1 O2偏高 2 CO正常 3 SO2较高	对流顶端： 风门比不合适或者燃料和空气的混合不好，造成氧气过剩 看火门不严、对流传漏风 燃料含硫量较高，容易在烟道及余热回收设备的低温换热面上产生低温露点腐蚀	对流顶端： 适当调整燃烧空气用量，调整进燃料和雾化蒸汽的压力 查对流段的漏风并堵漏 建议减小管式加热炉风门开度，降低氧含量
预热器前： 排烟温度超过设计温度	预热器前： 对流传有积灰	预热器前： 建议除灰
预热器后： 排烟温度偏高	预热器后： 由于含硫增高，空气预热器的冷端产生露点腐蚀而使热管积灰甚至堵漏，换热效果差，加热炉的烟气没有进行充分余热回收就排入大气	预热器后： 温度太高会导致预热器管损坏，建议除灰，排烟温度过高时，会导致空气预热器损坏，建议空气预热器除灰。
炉二：运行情况	诊断	建议
对流顶端： 1 O2偏高 2 CO正常 3 SO2较高	对流顶端： 风门比不合适或者燃料和空气的混合不好，造成氧气过剩 看火门不严、对流传漏风 燃料含硫量较高，容易在烟道及余热回收设备的低温换热面上产生低温露点腐蚀	对流顶端： 适当调整燃烧空气用量，调整进燃料和雾化蒸汽的压力 查对流段的漏风并堵漏 建议减小管式加热炉风门开度，降低氧含量
预热器前： 排烟温度超过设计温度	预热器前： 对流传有积灰	预热器前： 建议除灰
预热器后： 排烟温度超过设计温度	预热器后： 由于含硫增高，空气预热器的冷端产生露点腐蚀而使热管积灰甚至堵漏，换热效果差，加热炉的烟气没有进行充分余热回收就排入大气	预热器后： 温度太高会导致预热器管损坏，建议除灰，排烟温度过高时，会导致空气预热器损坏，建议空气预热器除灰。
综合评价机制 炉一 炉二 基于规则库 基于规则库 返回		

图 5-8 系统调炉决策界面

而图 5-9 是可以根据平时现场工人的工作经验和相关领域的专家的建议，建立的规则库维护机制，从而不断地丰富规则库，更加有效地控制管式加热炉的燃烧状态，也进一步实现了中控室的在线优化功能。

文件(F) 编辑(E) 排列(L) 工具(T) 图库(Z) 画面(H) 帮助(H)

规则库维护

添加规则库

修改规则库

序号

现象1

现象2

判断

建议

结论可信度

权重1

权重2

添加人

日期

添加

	A	B	C	D	E
1	序号	部位	现象1	现象2	判断
2	1	对流顶端	o2 偏高	co 正常	风门开度不合适或燃料混合不合适
3	2	对流顶端	o2 偏高	co在0附近	进风量过剩
4	3	对流顶端	o2 偏高	co偏高	没有完全燃烧, 看燃烧器是否正常
5	4	对流顶端	o2 偏低	co偏高	没有完全燃烧
6	5	对流顶端	o2 正常	co 正常	燃烧状况良好

图 5-9 规则库维护图

5.3 本章小结

本章主要描述了如何实现中控室监测系统的各功能。重点介绍了基于 OPC 技术 MATLAB 与组态王的通信方法，以预热器前后温度为例详细的叙述了 OPC 技术在二者之间的应用。通过系统监测现场的数据以及给出相应的调炉建议从而能够真正的实现办公自动化，更能实时指导现场工人的调炉，进一步提高了加热炉的加热效率。

第六章 总结和展望

6.1 工作总结

管式加热炉是石油化工行业应用最普遍,最广泛的炼油装置。工业对其的控制一般采用 DCS,对加热炉的调炉也是根据现场工人已有的经验来进行调炉,因而很难保证其高的加热效率,更不易实现在线监测。因此针对其能耗大,加热效率不高,难以在线监测的特点,本文提出管式加热炉的监测系统来解决这些弊端。

管式加热炉监测系统是经过现场调研,方案论证后,最终确定的可行性系统。其主要包括数据采集子系统,无线传输子系统,调炉决策系统,监测画面子系统。本课题研究的主要内容总结如下:

采集子系统是采集烟气各成份含量和温度,并进行分析是为了找出加热炉运行中存在的问题以及计算出加热效率和酸露点,以便现场的工作人员进行调炉。其主要是以 S7-200(CPU224)为控制器进行采集,对温度信号采集是采用与智能温度仪的 RS-485 总线直接相连进行 MODBUS 协议的通信,烟气含量的采集则通过烟气分析仪出来的 4-20mA 三路烟气信号通过 PLC 的模拟量采集来实现。

无线传输系统则是通过 S7-200 的自由口与一个 ZIGBEE 无线传输模块的 RS-485 口物理连接,实现与远程中央控制室装有组态软件的上位机互相通信。上位机则与另一个 ZIGBEE 模块相连,通过组态软件的设置以及在 S7-200 中编写自由口协议程序实现现场与中控室的通信,这样就可以解决现场无法布线的困难,并且可以通过 ZIGBEE 各节点的设置,实现网络覆盖整个厂区,便于对所有加热炉进行监测。

调炉决策系统是由基于模型的调炉和基于规则库的调炉两部分组成,主要通过决策机制来选择究竟采用哪一种调炉方法来对加热炉的进行人工调炉。基于模型的调炉系统主要依赖与加热炉的精确数学模型,本文通过现场采集来的数据,基于 CARMA 模型运用预测误差法来对加热炉进行离线辨识,最后通过验证得出所建模型具有很高的精度。在模型确定之后,本采用 GPC 算法对模型加以控制,以阶跃响应为输入信号,取得了很好的控制效果;基于规则库的调炉主要是根据平时工人调炉经验和专家经验人为的编写的规则,通过采集来的数据进行划分档次,规定在某一范围再进行规则匹配,给出调炉建议。此子系统主要是实现在线优化,并为现场调炉工人提供决策建议。

中控室的监测系统既对各子系统运行的情况测试,也是为了指导现场工人的调炉建议。组态王通过 OPC 技术与 MATLAB 相互通信实现二者数据的互相调用,本文以预热器前后的温度来举例说明其调用功能,并且利用此技术实现了控制算法与组态界面相结合。在中央控制室实现调炉决策以及相应的历史数据和报表等功能,真正的实现在线优化,满足设计要求和目标。

6.2 工作展望

由于实验室的条件，本人的能力和时间所限，本系统还可以从以下几个方面进行完善和改进：

对于基于规则库的调炉建议，可以通过增加相应的规则来实现更精确的调炉。进一步建立专家系统来实现对规则的推理，修改和自我学习等来完善调炉建议。

对于调炉决策评价机制本文只是通过简单的基准值来比较决定的采用哪一种调炉方式，为了更科学合理的调炉可以增加相应的评价要素，如加热效率，酸露点，以及和相应的环境条件相结合起来，利用模糊推理机制来精确实现二者的切换机制。

对于本系统本文采用的是开环控制，因而还不能真正实现无人值守控制。可以进一步把系统做成闭环控制，实现对鼓风机的转速、燃油流量、烟气挡板的开度等相关量的闭环控制。

参考文献

- [1] 武春燕. 常减压装置的在线优化[D]. 北京:北京化工大学,1999.
- [2] 袁喜武. 加热炉燃烧系统模糊控制的研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2005.
- [3] 汤秀琴,王云川,张东平. 加热炉加热过程优化控制系统的应用[J]. 控制工程,2006(03):218-220,281.
- [4] 刘红军,宁奎凤,赵彦来等. 加热炉高效燃烧控制技术应用[J]. 莱钢科技,2005(06): 137-138.
- [5] 贾小楠. 管式加热炉烟气温度在线监测与运行优化系统的研究[D]. 天津:天津理工大学,2009
- [6] 袁文鼎,李昌华. ZIGBEE 技术在气体浓度监控系统中的应用[J]. 电脑知识与技术, 2009(2):1235-1236.
- [7] 何群. 基于广义预测控制的锅炉测控系统研究[D]. 秦皇岛:燕山大学博士论文,2005.
- [8] 孙科,肖斌杰. ZIGBEE 技术在测温系统中的应用[J]. 测控技术, 2008(27):1,36-38.
- [9] 李银华,姬光峰. 基于 ZIGBEE 技术的烟叶仓库温湿度监测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2009 (5):111-113,119.
- [10] 陆霓凤,王培爱. 基于 ZIGBEE 的无线传感网络在工业监控中的应用[J]. 电气技术与自动化, 2009(4):76-78.
- [11] 王茂军. 用 PLC 实现电动机分批再启动和自动切换[J]. 石油化工自动化,2007(4):40-42,60.
- [12] 西门子公司. SIMATICS7-200 可编程序控制器系统手册[M]. 西门子公司,2001.
- [13] 高强,王朝硕,王政. 基于网络的 PLC 通信系统的研究[J]. 电力系统通信, 2003,(01):12-15.
- [14] 陈铭. 基于 MODBUS 协议的设备和 PLC 实现通信的研究[J]. 湖南科技学院学报, 2009,(04):60-62.
- [15] 车继勇. MODBUS 通信协议 PLC 主站软件设计[J]. 自动化技术与应用, 2008,(04):24-26.
- [16] 王念春. 基于 MODBUS 协议的 PC 与下位机 PLC 间的通信程序[J]. 自动化仪表, 2001,(08):44-46,49.
- [17] 汪正果. MODBUS 协议在 S7-200 PLC 与 PC 机通信中的应用[J]. 煤矿机械, 2010,(02):192-194.
- [18] 邓志君,梁松峰. 基于 RS485 接口 MODBUS 协议的 PLC 与多机通讯[J]. 微计算机信息, 2010,(08): 107-108.
- [19] 李志国. 管式加热炉冗余调炉决策支持系统[D]. 天津:天津理工大学,2010.
- [20] 金元郁,李磊. 一种 PC 与 PLC 在自由口模式下的串行通讯方法[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2005,(04):351-353
- [21] 马启青,刘志强,韩建武等. 基于自由口模式实现 S7-200 系列 PLC 与 PC 机串行通信 2002,(04):22-28

- [22] 陈安民. 石油化工过程节能方法和技术[M]. 中国石化出版社, 1995.
- [23] 钱海伦, 李朝祥, 吴承勇. 连续加热炉通用在线数学模型[J]. 安徽工业大学学报, 2009(26): 131-134.
- [24] 吴晓帆. 加热炉多变量系统模型的辨识[J]. 石油化工自动化, 2003, 1: 23-26.
- [25] 白克强, 刘知贵, 陈思海等. 工业大系统多模型-分散辨识方法[J]. 化工自动化及仪表, 2009, 36(5): 45-47.
- [26] 王晓刚, 刘玉生. 非线性系统辨识[J]. 微计算机信息(管控一体化), 2009, 3(3): 166-168.
- [27] Ding F, Chen T. Modeling and identification for multirate systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2005, 31(1): 105-122.
- [28] Zheng W X. Parameter estimation of stochastic linear systems with noisy input[J]. International Journal of Systems Science, 2004, 35(3): 185-190.
- [29] 李春涛, 谭永红. 迟滞非线性系统的建模与控制[J]. 控制理论与应用, 2005(2): 281-287.
- [30] 魏国, 刘剑, 雷苗等. 基于 B 样条递推最小二乘的非线性 MISO 传感器系统建模方法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(7): 1404-1409.
- [31] 伍越, 裴海龙. 基于预测误差法小型无人直升机系统辨识[J]. 微计算机信息(测控自动化), 2009, 2(1): 228-230.
- [32] Pan Lideng, Huang Xiaofeng, Ma Junying, Pan Yuiying. RBF Networks and Its Application in Establishing Nonlinear System Self-Tuning Model. ADICHEM'97, Proceeding From the IFAC Symposium, Banff, Canada, 1997. 6, Pergamon: 319-322.
- [33] 李勇刚, 何炎平, 杨煜. 引入模型定阶的 ARMA 模型在风力发电系统风速仿真中的应用[J]. 华东电力, 2010, (03): 395-398.
- [34] 闫庆华, 程兆刚, 段云龙. AR 模型功率谱估计及 Matlab 实现[J]. 计算机与数字工程, 2010, (04): 154-156.
- [35] 朱豫才. 过程控制的多变量系统辨识[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2004.
- [36] 王春民, 崔兴华. 预测误差法参数辨识及其 MATLAB 仿真[J]. 系统仿真报, 2005, 2(17): 145-147.
- [37] 刘铁男. 辨识相预报方法及其应用[M]. 哈尔滨工程大学出版社, 1994.
- [38] 王倩. 多变量广义预测自校正控制隐式算法[J]. 计算技术与自动化, 1992, 11(2): 37-42.
- [39] 徐立泻, 冯纯伯. 加权多步预测控制[J]. 自动化学报, 1991, 17(6): 658-667.
- [40] S.Y. Long, S.H. Ye, C. Jian. Predictive control for polytopic uncertain linear systems with Guaranteed constraints satisfaction. Control Theory & Applications[J], 2003, 20(2): 193-198.
- [41] 郑海涛. 广义预控制的稳定性研究[J]. 自动化学报, 1993, 19(4): 493-496.
- [42] 袁著祉, 陈增强等. 工业锅炉的加权预测自校正控制[J]. 自动化学报, 1993, 19(2): 46-53.
- [43] BARUCH J E F, COX M. Remote control and robots: an internet solution[J]. Computing and Control Engineering Control, 1996, 7(1): 39-45.
- [44] Koutaro Nakano, Toru Yamamoto and Takao Hinamoto. A Design of Robust Self-Tuning GPC-Based PID Controller[J]. IEEE. 2003, : PP: 285-290.

- [45] A.C.Burden,R.Z.Tantalean,P.B.Deshpande.Control and optimize nonlinear systems.Chemical Engineering Progress[J],2003,99(2):63-73.
- [46] 孙艳萍,黄东安.基于广义预测控制的自适应 PID 电厂主温度控制仿真研究[J].科技信息,2009,(35)1193,1201.
- [47] J.L.Guzman,M.Berenguel,S.Dormido.Interactive teaching of constrained generalized Predictive control[J].Control Systems Magazine,IEEE,2005,25(2):52-66.
- [48] 王伟.广义预测控制理论及应用[M].北京:科学出版社,1998.
- [49] 文拯.关联规则算法的研究[D].长沙:中南大学,2009.
- [50] 李正,徐皑冬,林跃.基于 OPC_XML 技术的 Web 远程监控系统[J].仪表技术与传感器,2005(3),56-58.
- [51] 李安伏,崔亚量,基于 OPC 的 Matlab 与组态王的数据通信[J],电力自动化设备,2007(27)7,113-115.
- [52] LIN Yue,ZHANG Yan-wu.Application of OPC technology in the industry control software[J].Basic Automation,2001(2):43-45.
- [53] 高宏岩,毕丽君,王毅.基于 OPC 技术的上位机与 PLC 之间的通信[J].可编程控制器与工厂自动化,2006(5):79-80,94.

发表论文和科研情况说明

发表的论文:

- [1] 陈在平, 李兴军, 董恩增. “基于 CARIMA 模型管式加热炉辨识研究”, 《化工自动化及仪表》, 2010 年 12 月, 第 12 期
- [2] Chen Zaiping, Li Xingjun, Dong Enzeng, “Research on the Identification of Tubular-Furnace Based on improved CARIMA model”, The International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control (ICEEAC2010), Nov. 26 - 28, 2010, Zibo, China
- [3] 陈在平, 李兴军, 董恩增, 孙全胜, 常 乐 “基于改进 ARMA 模型的管式加热炉氧含量辨识与建模”, 《仪器仪表学报》, (已录用)

参与的科研项目:

- 1. 管式加热炉智能烟气监测系统开发, 横向合作课题。
- 2. 参与天津市科技支撑重点项目(编号: 10ZCKFGX03000) “Ethernet/IP 工业以太网从节点关键技术研究”

致 谢

本论文的工作是在导师陈在平教授和董恩增副教授的悉心指导下完成的，他们严谨的治学态度，科学的工作方法给了我极大的帮助，无论在生活上，还是学习上他们都给了我很大的帮助，衷心感谢三年来他们对我的关心和指导。

在实验室工作及撰写论文期间，郭衍雷，于兰、李海芬，绍夏，王永刚同学对我研究工作给予了热情帮助，一起度过美好的三年时光，在此向他们表达我的感激之情。

在做课题期间，感谢魏一，苗家森等其他同学，他们无私的的帮助，一起帮我攻克一道道难关，才使我能顺利完成课题。同时也感谢我的师兄，贾小楠，李志国在课题先前阶段所做的贡献。

另外特别感谢我的父母，亲人，朋友，有了他们的理解和支持使我能够在学校专心完成我的学业。