

1932766

分类号 _____

密级 _____

UDC _____

学 位 论 文

TRT 顶压稳定性控制技术研究

作 者 姓 名：刘永军

指 导 教 师：井元伟 教授

东北大学信息科学与工程学院

控制理论与导航技术研究所

申请学位级别：硕士

学 科 类 别：专业学位

学科专业名称：控制工程

论文提交日期：2008 年 6 月 10 日 论文答辩日期：2008 年 7 月 7 日

学位授予日期：

答辩委员会主席：高立辉 教授

评 阅 人：刘永军 高立辉 副教授

东 北 大 学

2008 年 6 月

A Thesis for the Degree of Master in Control Engineering



On Stability Control Method for the TOP Gas Pressure of Blast Furnace Based on TRT System

by Liu Yongjun

Supervisor: Professor Jing Yuanwei

Northeastern University

June 2008

独创性声明

本人声明，所呈交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为了获得其他学位而使用过的材料。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谢意。

学位论文作者签名：



日期：

2008.7.8

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北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、交流。

作者和导师同意网上交流的时间为作者获得学位后：

半年 ☐

一年 ☐

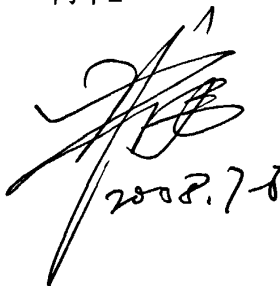
一年半 ☐

两年 ☐

学位论文作者签名：



导师签名：



签字日期：

2008.7.8

签字日期：

TRT 顶压稳定性控制技术研究

摘 要

高炉炉顶煤气余压回收透平发电装置(Top Gas Pressure Recovery Turbine Unit, TRT)是目前国际上公认的有价值的二次能源回收装置。由于 TRT 装置在运行中不需要燃料,不改变煤气品质,不影响使用,却回收了可观能量,净化了煤气,降低了噪声,降低了冶炼成本,是典型的高效节能环保装置。但因 TRT 装置投入的前提条件是确保高炉炉顶压力的稳定,所以各冶金企业和研究部门在推广使用 TRT 装置的同时,纷纷把控制高炉炉顶压力的稳定作为重要工作去研究和开发。

本文是在对首钢迁钢 2#TRT 控制系统改造的基础上形成的,根据生产的实际要求,对原系统的数据处理系统改用模糊专家系统进行控制;为保持系统操作的连贯性,用 ABB DCS 控制系统代替了原 Symphony Rack 系统。

本文针对高炉顶压控制的稳定性要求,对顶压稳定性因素进行了分析,建立了 TRT 系统的结构模型并对辨识了模型参数,得到了以静叶开度和旁通阀开度为控制对象、高炉炉顶压力为控制变量的高炉炉顶压力控制模型,建立了管路系统平衡控制方程,对管路系统进行了动态瞬变分析,并计算分析了顶压的稳定性控制,为控制系统设计提供了理论基础。

本文介绍了专家系统、专家系统的发展状况、专家系统的建造步骤、专家系统的优点和分类,在此基础上提出了模糊专家系统控制器设计,以改善控制效果,同时增强控制器的鲁棒性,为现场改造运用提供了理论根据,并根据影响高炉炉顶压力的参数,设计了高炉炉顶压力预测模糊专家系统。

本文最后设计了 TRT 系统的控制系统组成,其中包括了顺序逻辑控制系统、反馈控制系统和过程监视系统。针对 ABB DCS 系统的特点,进行了控制系统的硬件设计,如过程控制站 CPU 配置、项目 I/O 模件的配置和硬件的参数配置等,同时进行了控制系统的软件设计,如监控软件的设计、程序控制的软件设计等。

本系统改造后投入生产,控制效果明显提高,各指标达到了同行业领先水平。

关键词: 高炉炉顶煤气余压透平发电装置(TRT); 稳定性控制; 模糊专家系统; 控制系统设计; 炉顶压力; 高炉

On Stability Control Method for the TOP Gas Pressure of Blast Furnace Based on TRT System

Abstract

Blast Furnace TOP Gas Pressure Recovery Turbine Unit (TRT) is widely accepted as an effective secondary energy recycle device by domestic and international iron and steel enterprises. Because TRT Unit in operation does not need fuel, without degrading the quality of top gas origin and influencing gas consumer's normal use. However, it recycles considerable energy and lowers the cost of smelting. It is a typical energy-saving and green project as it has significant economical benefits and meanwhile reduces noise during the process. The prerequisite to operate TRT Unit is to ensure the stability of blast furnace top gas pressure. Therefore, while TRT Unit is promoted by the metallurgical enterprises and research sector, one after another blast furnace to the stability control of blast furnace top gas pressure accepts widely research and development as an important work.

Based on the reconstruction of Capital Steel Company 2 # TRT control system, in accordance with the actual production requirements, the data processing systems of the original system is reconstructed using fuzzy expert system to control. In order to maintain the continuity of the system operation, the original Symphony Rack system is replaced with ABB DCS control system.

Based on control requirements of the top gas pressure of the TRT, the stability factors of top gas pressure are analysed. The construction model of top-pressure control system is established through analyzing the configuration of TRT system firstly. And using classical step response method to identify the system parameter, a practicable system model was deduced with the static blade opening degree and bypass valves opening degree as the control objects and with the blast furnace top gas pressure as the control variables. Then the pipeline system is analysed in range instantaneous while the balance control equations of the pipeline system are established. The theoretic foundation is proposed for the design of control with analyzing the stability control of top-pressure.

The expert system is introduced as well as the development situation, the construction

step and also the advantages and classification of the expert system. Based on these above, the design of the fuzzy expert systems controller is presented, in order to improve the control effect and to enhance the robustness of the control system. Therefore, the theoretical basis is provided for the applications of the locale reconstruction.

Finally, the components of the TRT control system, including logic control systems, feedback control systems and the monitoring system, are designed. Based on the characteristics of the ABB DCS system, the hardware systems, including the configuration of the process control station, the configuration of the Project I/O module and the configuration of hardware parameters, are designed; Also the software systems, including monitoring software system, process control software system, are designed.

After the reconstruction to operation of this system, the control effect is improved obviously. And the indicators have reached the industry-leading level.

Key word: Top Gas Pressure Recovery Turbine Unit (TRT); stability control; fuzzy expert system; design of the control system; top gas pressure; blast furnace

目 录

独创性声明.....	I
摘 要.....	II
Abstract.....	III
第一章 绪 论.....	1
1.1 TRT 系统的简介.....	1
1.1.1 TRT 概述及工艺流程.....	1
1.1.2 TRT 技术发展概况.....	2
1.1.3 TRT 装置的特点及优越性.....	3
1.1.4 TRT 系统炉顶压力稳定性控制的重要性.....	4
1.2 课题背景及其实际研究意义.....	5
1.3 本文主要工作内容.....	6
第二章 TRT 顶压稳定控制内容与系统建模.....	7
2.1 顶压稳定性因素分析.....	7
2.2 管路系统平衡控制方程.....	10
2.3 管路系统动态瞬变分析.....	12
2.3.1 管道线性方程.....	12
2.3.2 Newton-Raphson 迭代法.....	13
2.4 顶压稳定性的控制计算.....	14
第三章 模糊专家系统.....	17
3.1 传统的专家系统.....	17
3.1.1 专家系统的组成及建造步骤.....	17
3.1.2 专家系统的特点和优点.....	21
3.1.3 专家系统中的不确定性和不完整性问题.....	22
3.2 模糊专家系统.....	22
3.2.1 模糊理论简述.....	22
3.2.2 模糊专家系统的基本原理.....	25
3.2.3 模糊推理专家系统的构造.....	26
3.3 高炉炉顶压力预测模糊专家系统设计.....	30
3.3.1 高炉炉顶压力预测的知识获取和表示.....	30
3.3.2 高炉炉顶压力预测的影响参数的模糊化.....	31
3.3.3 高炉炉顶压力预报专家系统的模糊化规则库.....	32
3.3.4 高炉炉顶压力预测专家系统的模糊推理机.....	33
3.3.5 高炉炉顶压力预测专家系统的解模糊器.....	34
第四章 DCS 控制系统设计.....	37
4.1 ABB DCS 控制系统的先进性.....	37
4.2 TRT 控制系统的组成设计.....	38
4.2.1 顺序逻辑控制系统.....	38

4.2.2 反馈控制系统.....	39
4.2.3 过程监视.....	41
4.3 控制系统的硬件设计	41
4.3.1 过程控制站 CPU 配置.....	42
4.3.2 项目 I/O 模件的配置	43
4.3.3 工程师站和操作员站的配置.....	44
4.3.4 控制系统硬件的参数配置.....	45
4.4 控制系统的软件设计	46
4.4.1 操作站的设计.....	46
4.4.2 程序控制软件设计	48
4.5 顶压稳定性控制的实现效果	53
第五章 总结与展望.....	55
5.1 总结.....	55
5.2 展望.....	55
参考文献.....	57
致谢.....	59

第一章 绪 论

1.1 TRT 系统的简介

本节对 TRT 系统的工艺流程、发展概况、TRT 系统的优点和高炉顶压的控制重要性等进行介绍，并对本文的背景和意义进行了论述。

1.1.1 TRT 概述及工艺流程

高炉炉顶煤气余压回收透平发电装置^[1](Top Gas Pressure Recovery Turbine Unit, TRT)^[1-3]是目前国际上公认的有价值的二次能源回收装置。它是通过将高炉炉顶煤气导入一台透平膨胀机(煤气透平)做功,使高炉煤气的压力能及热能转化为机械能,再驱动发电机发电。这种发电方式既不改变原高炉煤气的品质,也不影响煤气用户的正常使用,却回收了被减压阀组白白释放的能量,同时有效地控制了炉顶的压力波动,从而改善了高炉的操作条件。该装置在运行过程中不产生污染,不消耗任何燃料,发电成本低,同时又净化了煤气降低了噪音,是高炉冶炼工序的重大节能项目,经济效益和社会效益十分显著。

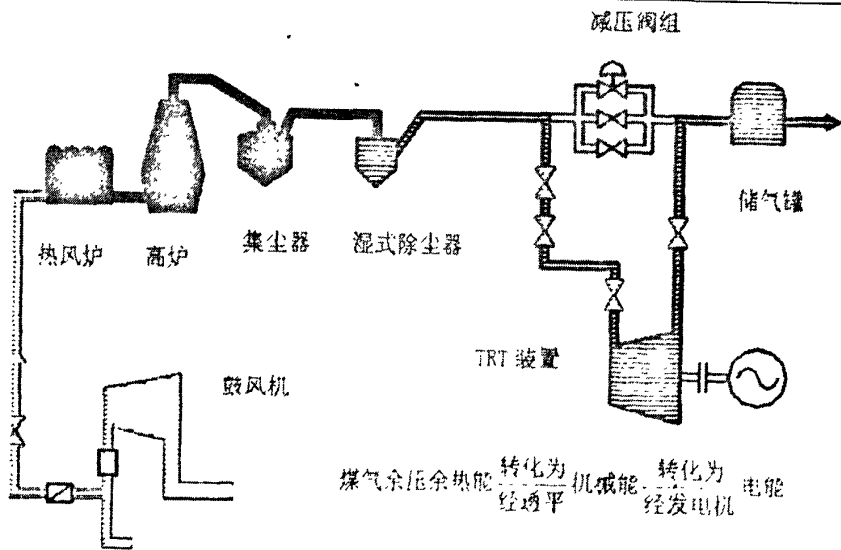


图 1.1 TRT 系统工艺流程图
Fig. 1.1 TRT system process map

高炉 TRT 控制系统工艺流程如图 1.1 所示,从高炉出来的高压煤气经过重力除尘器、煤气清洗设施净化后,煤气压力约低于炉顶压力 0.03 MPa,煤气含尘量达到 $<10\text{mg}/\text{Nm}^3$,净化后的高炉煤气送到减压阀组和高炉余压透平发电装置^[4,5]。减压阀组和高炉余压透平发电装置成并联关系。通入高炉余压透平发电装置的煤气经入口蝶阀、入口插板阀、紧急切断阀和可调静叶后,进入透平机膨胀做功,透平机带动发电机发电。膨胀后的煤气经过出口插板阀、出口蝶阀,送到减压阀组后的煤气主管道上。进入煤气顶压发电装置 TRT 膨胀做功,带动发电机发电。通过 TRT 装置后的煤气压力约 0.01 Mpa,经煤气喷淋冷却塔进入厂区高炉煤气管网。从 TRT 和减压阀组出来的低压煤气再送到高炉煤气柜和热风炉等用户。

1.1.2 TRT 技术发展概况

由于 TRT 装置在运行中不需要燃料,不改变原高炉煤气的品质,也不影响原煤气用户的正常使用,却回收了相当可观的能量,同时又净化了煤气,降低了噪声,不会产生新的污染,改善了炉顶压力控制,降低了冶炼成本,是典型的高效节能环保装置^[6,7]。因此引起了世界各国的广泛重视,并进行了大力研制和推广应用。

上世纪 50 年代,这种利用炼铁高炉煤气余压发电技术就引起国际学术界与工程界的重视。前苏联在 1962 年成功研制了世界第一台半干式轴流冲击式 TRT 装置(6000KW),并在马格尼托方尔斯科钢铁厂投入运行。1969 年法国索费来尔公司试制成功了第一台湿式径流反动式煤气透平,并于 1971 年在 Wendel-sidelert 投入运行^[7-9]。之后 TRT 推广和利用得到了迅猛发展,特别是日本在 TRT 技术研究上发展神速,应用也较广泛^[10,11]。

国内第一台 TRT 于 1983 年在首钢 2[#]高炉投产,装机容量 5.7 MW。截至 2005 年底,全国共有 1000m^3 以上的高炉约 90 座,有 68 座已建 TRT,普及率为 75.5%。 1000m^3 以下高炉约 200 座,安装了 11 台 TRT,普及率为 5.5%。如果国内 280 座 300m^3 以上的高炉全部安装 TRT,总装机容量将达 1700MW 左右,年可发电 137 亿度,回收电费约 70 亿人民币,将给钢铁企业带来了可观的经济效应与社会效应。从环境保护方面来说,也非常有益,它减少了大量的灰尘排放,也降低了工厂噪音的污染。采用 TRT 发电,每年可减少生产同等发电量的燃煤发电所产生的约 2 万吨 CO_2 所向大气的排放量。这对改善日益严重的温室效应和酸雨造成的环境污染具有积极的意义。

1.1.3 TRT 装置的特点及优越性

如何充分利用高炉煤气的余压余热，以回收电能来降低炼铁成本，这一问题已经提到议事日程上来。特别是我国能源的短缺，人们节能环保意识的不断提高以及市场的激烈竞争，都促使冶金行业调整产业结构，降低生产成本，提高竞争力。因此，高炉煤气余压透平发电是冶金行业一条很好的节能环保之路。而国内 TRT 技术的不断发展和成熟，为钢铁企业实施国产化战略奠定了良好的基础。TRT 是目前国际钢铁企业公认的二次能源回收装置，节能环保明显，经济效益显著。它不需要消耗任何燃料，而且是无公害最经济的发电装置。建设 TRT 项目的优越性可总结如下^[12-14]：

(1) 利用高炉煤气余压余热回收能量进行发电。

(2) 适应钢铁企业竞争需要。

近两年国内新上钢铁项目多，使钢铁市场竞争更加激烈。激烈的市场竞争使各钢铁企业更加注重节能降耗，而高炉煤气余压透平发电是降低综合生产成本、提高竞争力的有效手段。

(3) 满足高炉稳定生产需要。

安装煤气余压透平发电装置后的高炉，可稳定炉顶压力，减少炉况波动，使高炉更易稳定高产。减压阀组调压范围一般在 $\pm 15\text{KPa}$ 左右，而 TRT 调压范围可稳定在 $3-5\text{KPa}$ ，提高了高炉利用系数。

(4) 净化了高炉煤气，提高资源利用效率。

高炉煤气通过 TRT 装置后，通过气体膨胀，粉尘沉积，使下游煤气用户得到更为洁净的煤气。

(5) 减少污染物排放、降低噪音、改善环境。

未安装高炉煤气余压透平发电装置的高炉通过减压阀组将高压煤气转换成低压煤气，既浪费了能源，又有巨大的噪声而污染了环境。而在安装高炉煤气余压透平发电装置后，既回收了能源，又大大降低了噪声，是二者兼得的好事。高炉在安装 TRT 装置后，可使高炉原有的减压阀组 140 分贝带来的噪声污染降低至 85 分贝以下^[15]，有效的防止了因噪音带来的环境污染；同时，采用袋式除尘、石灰石炉内脱硫等技术措施，可大大降低污染物的排放。

(6) 是建立节约型社会的有效措施。

(7) 是解决我国电力紧张的可行方式。

1.1.4 TRT 系统炉顶压力稳定性控制的重要性

TRT 装置虽然具有低投入、高回报、一次投资长期得益的突出优点,但是在利用 TRT 装置进行发电的同时,必须要确保高炉冶炼工艺要求,其中最重要的是确保高炉炉顶压力稳定性。而如何保证 TRT 装置高炉炉顶压力稳定性,是目前 TRT 技术研究中一个技术难题问题。

从 TRT 装置的运行原则中可以看到 TRT 装置作为高炉冶炼的附属设备,在运行中不能影响高炉主流程的正常生产。作为高炉生产中的一个重要因素,高炉炉顶压力的稳定性不仅影响高炉冶炼产品的质量,而且对于生产的安全有着重要影响。当高炉炉顶压力过大时,会出现“冒顶”现象,这将对生产带来极大的危害。因此,在安装 TRT 装置后,如何保持高炉炉顶压力的稳定的问题是 TRT 装置是否成功的重要条件;随着冶金高炉的大型化和现代炼铁技术的发展,对高炉炉顶压力的稳定性的要求也越来越高(要求炉顶压力波动小于 $\pm 2\text{Kpa}$)。因此,TRT 机组虽然可以回收原来浪费在减压阀组或比肖夫除尘器上的压力能,但必须在确保高炉炉顶压力稳定的前提下才能谈多回收发电。

一般的控制原则是在 TRT 运行时,当高炉顶压发生波动,即高炉顶压超出过高炉炼铁的允许值时,可通过调节 TRT 装置中的透平机静叶开度进行控制,通常采用常规的 PID 方法控制;当 TRT 系统发生故障紧急停机时,TRT 装置管路要立即断开,同时开启旁通管路的调压阀来保持顶压稳定。

表 1.1 给出了目前顶压控制性能指标(正常顶压波动值,紧急切换顶压波动值和切换峰值时间)与国内外先进技术比较^[16-18]。

表 1.1 国内外顶压控制性能指标技术对比
Table 1.1 Top domestic and international pressure control technology performance comparison

	国内先进代表	国际先进代表
设计制造单位	陕鼓集团	日本川崎
应用单位	上钢一厂	上海宝钢
正常顶压波动值	$\pm 5\text{KPa}$	3KPa
紧急停机切换顶压波动值	$\pm 8\text{KPa}$	6KPa
切换峰值时间	1030 秒	8-20 秒

从表中可以看出,目前国内的 TRT 装置对顶压控制的性能指标与国外先进水平仍然存

在着不少差距,这在一定程度上影响了国内 TRT 产品的推广以及和国际同类产品的竞争力;另一方面高炉生产对于高炉顶压稳定性的要求越来越高,钢铁厂用户在采用 TRT 装置时,已经提出相当高的指标,我们首钢提出,在紧急停机时,要求顶压波动值小于 $\pm 5\text{KPa}$,紧急情况下波动持续时间小于 15 秒。这不仅是国内的 PID 技术无法满足,国际上先进的 PID 技术也很难达到这个要求。

1.2 课题背景及其实际研究意义

我国截至 2005 年底有 1000m^3 以上的高炉约 90 座。有 68 座已建或在建 TRT,普及率为 75.5%。 1000m^3 以下高炉约 200 座,安装了 11 台 TRT,普及率为 5.5%。如果国内 280 座 300m^3 以上的高炉全部安装 TRT,总装机容量将达 1700MW 左右,年可发电 137 亿度,回收电费约 70 亿人民币^[19-20]。我国冶金行业是全国最大的能源用户,单以用电来说,约占全国总用量的 13%~15%,而炼铁又占整个冶金企业用电的 40%左右,且与国际一般水平相比要高出许多。如果冶金企业所有的高炉都装上高炉煤气余压透平发电装置(TRT),则可节省整个企业用电的 6%~8%,节能工作迫在眉睫。

随着冶金高炉的大型化和现代炼铁技术的发展,对高炉炉顶压力的稳定性要求越来越高(要求炉顶压力波动小于 $\pm 2\text{KPa}$),TRT 机组虽然可以回收原来浪费在减压阀组或比肖夫除尘器上的压力能,但必须在确保高炉顶压稳定的前提下多回收发电。因此 TRT 的运行的先决条件就是应该保证炉顶压力的稳定,无论是 TRT 装置无论是在正常情况下还是紧急停机情况下,都必须保证炉顶压力的稳定。

首钢迁钢公司 2[#]TRT 原控制系统采用的是美国 ABB 贝利公司的分布式控制系统的第四代产品 Symphony Rack^[21-23]系统,该系统在该领域虽有其独特的特点,但静叶和旁通快开阀在调控高炉顶压方面存在一定差距,顶压波动时,系统处理时间比实际发生时间往往滞后 5-10s,这与公司不高于 5s 的要求有一定差距,而且对高炉顶压波动的控制往往高于 $\pm 10\text{KPa}$,减压阀组与 TRT 系统的切换时间也超过了 20 秒,最严重的是国外对软件系统出于商业机密的考虑,实行技术封锁,不利于现场的维护,基于以上考虑,迁钢公司领导决定对其控制系统进行改造,本人是该项目负责人,本文就是在此基础上形成的。

1.3 本文主要工作内容

在保证维持原有优点的前提下，我们对原有系统进行了如下改造：

(1) 选用模糊专家系统协调控制整个系统，对用户提供的证据进行推理，以最终对用户提出的特定问题做出回答。

(2) 为保持系统操作的连贯性，我们用 ABB DCS 控制系统^[24-25]代替了原 Symphony Rack 系统。它既具备 DCS 的复杂模拟回路调节能力、友好的人机界面(HMI)及方便的工程软件，同时又具有与高档 PLC 指标相当的高速逻辑和顺序控制性能。

本文所做的主要工作有如下几个方面。

(1) 针对高炉炉顶压力控制的稳定性要求，对顶压稳定性因素进行分析，对 TRT 系统建立模型结构并辨识模型参数，得到了以静叶开度和旁通阀开度为控制量、高炉炉顶压力为被控制变量的高炉炉顶压力控制模型，通过管路系统平衡控制方程、管路系统动态瞬变分析，进行顶压稳定性的控制计算。

(2) 介绍了专家系统、专家系统的发展状况、专家系统的建造步骤、专家系统的优点和分类，在此基础上提出了模糊专家系统控制器设计^[26]，以改善控制效果，同时增强控制器的鲁棒性。

(3) 基于顺序逻辑控制系统和反馈控制系统，以及 ABB DCS 控制系统的先进性，针对 ABB DCS 系统的特点，进行了控制系统的硬件设计，如过程控制站 CPU 配置、项目 I/O 模件的配置和硬件的参数配置等，同时进行了控制系统的软件设计，如监控软件的设计、程序控制的软件设计等。系统应用改造后，效果明显，进一步证明了采用模糊专家系统进行高炉炉顶压力稳定性控制的有效性。

4) 系统投入运行后，系统本身运行良好，在高炉顶压控制上优势明显，各种指标达到国内同行业领先水平。

第二章 TRT 顶压稳定控制内容与系统建模

本章针对高炉顶压控制的稳定性要求对顶压稳定性因素进行分析,对 TRT 系统建立模型结构并辨识模型参数,得到了以静叶开度和旁通阀开度为控制量、高炉炉顶压力为被控制变量的高炉炉顶压力控制模型,建立管路系统平衡控制方程,对管路系统进行动态瞬变分析,从而进行顶压稳定性的控制计算。

2.1 顶压稳定性因素分析

影响高炉顶压稳定性的因素是相当复杂的,主要有以下几点:

- (1) 高炉冶炼加料过程中的不均匀,所引起的高炉内气体流动阻尼的变化;
- (2) 高炉内的流动是多种介质的高温、多相的物理化学流动。由于相变与化学反应的随机性,将会使炉内的流动发生复杂的变化,包括流量、压力以及介质的阻尼变化;
- (3) 高炉进风的鼓风机的压力与流量所出现的随机波动;
- (4) TRT 装置中透平机的静叶开度和运行工况改变。包括启动、正常停机、紧急停机等工况,都将直接影响管路系统流量与压力的变化;
- (5) 由于管路泄漏,除尘器中的积灰等其可能引起流动阻尼发生改变的随机因素。

上述各种因素大多具有不确定性,并且对顶压的变化的影响具有非线性特点;在设计 TRT 装置时,很难事先预见,很难给出确保稳定性的措施,而必须根据运行时实测到的压力信息,进行气动的分析计算,再进行自动控制调节。

因此想要解决顶压稳定性这个难题,就必须建立合理而有系统的模型,采用更为先进的控制方法。

为了建立解决高炉顶压稳定性问题的数学物理模型,不妨先对 TRT 装置的管路系统进行流体力学的理论分析,并在此基础上建立管路的气动力平衡控制方程。为了便于分析和实时控制,在 TRT 装置的管路系统中,设置若干个控制点,其分布位置如图 2.1 所示。

- (1) 鼓风机出口(B点)处,流量 Q_b ,压力 P_b 与温度 P_t 。
- (2) 高炉进风口(F1点),压力 P_{F1} ,温度 T_{F1}
- (3) 高炉顶部(F1点),压力 P_{F2} ,温度 T_{F2}

- (4) 透平机进口管道与减压阀旁通管道的交叉点(C点): 压力 P_C , 温度 T_C 。
- (5) 透平机进口处(T1点): 压力 P_{T1} , 温度 T_{T1} 。
- (6) 透平机出口处(T2点): 压力 P_{T2} , 温度 T_{T2} 。
- (7) 储气罐进风口(G点): 流量 Q_G 与压力 P_G , 温度 T_G 。

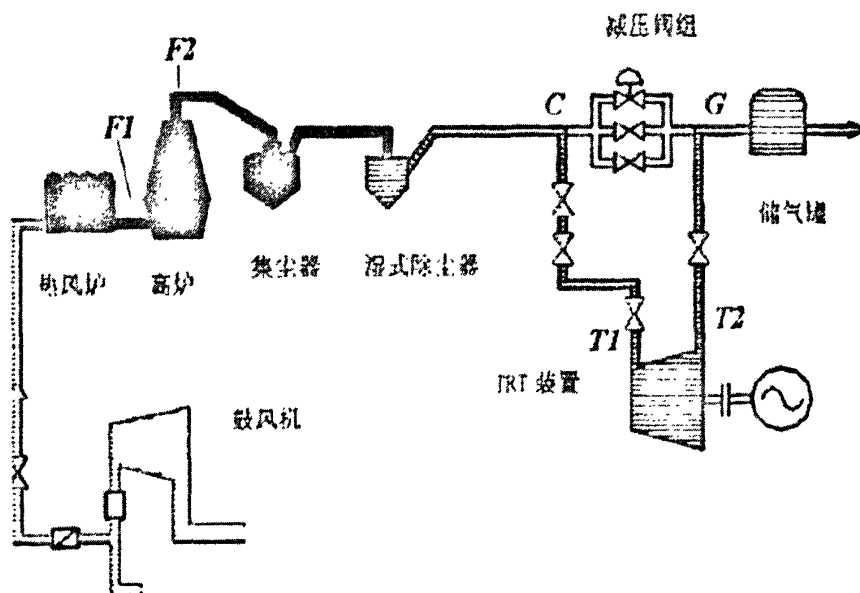


图 2.1 安装 TTR 装置的高炉炼铁管路系统的控制点分布

Fig. 2.1 installed TTR device blast furnace ironmaking pipeline distribution system of control points

虽然影响炉顶压力因素十分复杂,但从管路系统的气动特性分析,把影响高炉的因素进行量化分析,高炉顶压主要受下面四方面因素影响:

- (1) 炉内介质的阻尼特性。

高炉内介质的阻尼变化是引起顶压变化的主要因素。可以引进描述高炉内复杂流动状况的无量纲阻尼特性系数—炉膛阻尼系数 ζ_F 。在进风流量压力给定的情况下,阻尼系数 ζ_F 增大时,顶压将下降; ζ_F 减小时,顶压将增高。由于 ζ_F 是由炉膛内的介质状况决定的,具有不确定性,但可通过高炉进风口的压力 P_{F1} , 流量 Q 和高炉顶部压力 P_{F2} 的检测值,通过计算获得。

- (2) 透平机的运行状况。

透平机的静叶片处于不同开度状态下,透平机的前后压降是不一样的。我们不妨引进描述这种压降特征的无量纲广义阻尼系数 ζ_T ,在透平机流量给定时,压降大,表示 ζ_T 值大;压降小,表示 ζ_T 值小。 ζ_T 值可以通过透平机的 $P-Q$ 特性曲线计算获得。在TRT装置运行时,也可以通过透平机前的压力 P_{T1} 和透平机后的压力值 P_{T2} 的检测值计算获得。

(3) TRT 装置旁通管道减压阀的开启状况。

当透平机正常运行时,若开启减压阀,则一部分煤气将从旁通管路通过,从管路的总体阻尼来看,旁通管路减压阀的开启程度发生改变,将会使阀门的阻尼系数 ζ_v 发生改变,引起管路总体阻尼系数 ζ_m 的变化,从而使流量和顶压发生改变。这样当透平机进入停机程序时,为使总体阻尼系数 ζ_m 保持稳定,可以开启旁通管路的阀门,达到保持顶压稳定性的效果。

(4) 高炉进口的鼓风机气动特性曲线 $P-Q$ 。

前面提到三种因素对顶压的影响程度,与鼓风机 $P-Q$ 的曲线特性密切相关。当高炉内阻尼系数 ζ_F ,透平机广义阻尼系数 ζ_T 或减压阀阻尼系数 ζ_v 发生变化时,会使鼓风机 $P-Q$ 曲线的运行工作点发生变化,这显然将会引起顶压的变化。

上述四种因素中,高炉阻尼系数变化通常是随机不确定的;透平机的静叶开度和减压阀的开度是可以人为调节的。TRT装置运行时,可以通过实时检测获得的信息量,并经软件的分析计算,就可以通过调节后两种因素实现对顶压稳定性的控制。而鼓风机 $P-Q$ 的特性,是反映这三种因素出现时对顶压影响的相关程度,是计算分析中给出量化控制量必不可少的因素。

现在分两种状态说明如何调节静叶片开度或减压阀开度控制顶压的稳定性:

(1) TRT 正常运行时,由于不确定的因素,顶压 P_{F2} 发生波动。 $P_{F2} = P_0 \rightarrow P_{F2} + \Delta P_{F2}$;其中 P_0 是顶压的设定值, ΔP_{F2} 是波动值。当 $\Delta P_{F2} > \varepsilon$ (ε 是给定波动允许值),此时可通过调节静叶片的开度,使得透平机广义阻尼系数发生改变,这样会引起管路总体流量发生变化,根据鼓风机 $P-Q$ 曲线, Q 的变化会使高炉进口处的压力 P_{F1} 的变化;从而使顶压 P_{F2} 改变。我们可以根据流体力学原理推导的平衡控制方程,计算出量化的数值,只要按计算出的静叶片开度 δ_T 进行调节,就可确保 P_{F2} 恢复到正常值。

(2) TRT 进行开动和停机操作时。由于 TRT 在开动和停机时将按规定操作程序进行动作, 反映在管路上, 此时透平机的广义阻尼系数有一个变化过程 $\zeta_T = \zeta_T(t)$, 此时, 为保证顶压的稳定性, 可以按照透平机阻尼 $\zeta_T = \zeta_T(t)$ 的变化, 通过总体平衡控制方程, 计算出旁通管路的阀门开度值 δ_v 。并进行调节, 可使总体的管路阻尼 ζ_m 保持不变, 从而保障顶压的稳定。

由于生产上要求顶压的波动值和超值波动的持续时间有一定精度要求, 为了通过调节静叶片或旁通减压阀准确地达到这个要求, 还需要通过自动控制算法和监控软件去配合。

需要控制系统配合解决的有两个问题:

(1) 执行指令发出的提前量 Δt 是多少?

(2) 计算获得静叶开度 δ_T 或减压阀开度 δ_v 的量化值是否需要修正和分步到位? 如何修正和如何分步到位?

由于这两个问题主要与执行机构的性能和管路中信号传递等因素有关, 理论上很难给出一个准确解, 但可以通过在控制软件中采用混合式专家控制算法, 根据现场调试所积累的知识库, 在控制程序的运行中自动计算形成有关控制参数, 并随着运行控制调节反馈会不断进行自我完善与修正, 不断提高控制的精度。

2.2 管路系统平衡控制方程

为定量计算控制调节量, 可根据管路一维模型的流量压降关系建立由以下方程或关系式组成的管路系统平衡控制方程组。

(1) 高炉压降方程:

$$P_{F1} - P_{F2} = \zeta_F \rho Q^2 / (2S_F^2) \quad (2.1)$$

式中 P_{F1} 、 P_{F2} 是高炉进风口和高炉顶部压力, ζ_F 是高炉阻尼系数, ρ 是气体介质密度, Q 是通过高炉的流量, S_F 是高炉顶部出口管道截面积。

(2) 总体压降方程:

$$P_B - P_G = (\zeta_F + \zeta_T + \sum_i \zeta_i) \rho Q^2 / (2S_B^2) \quad (2.2)$$

式中 P_{F1} 是鼓风机出口压力, P_G 是储气罐的压力, ζ_f 是管路上各个阻尼部件的阻尼系数, ζ_T 是透平机广义阻尼系数, 是可以根据部件的几何形状计算获得, 或通过试验确定, S_b 是鼓风机出口管道截面积。

(3) 鼓风机 $P-Q$ 特性方程:

$$P_b = P(Q) \quad (2.3)$$

这个函数关系式由鼓风机特性曲线给出, 一般由鼓风机厂家提供, 或通过试验获得。

(4) 鼓风机出口至高炉进风口压降方程:

$$P_b - P_{T1} = \zeta_H \rho Q^2 / (2S_b^2) \quad (2.4)$$

式中 ζ_H 是鼓风机出口经过热风炉至高炉进风口这一段管路的阻尼系数。

(5) 透平机压降方程:

$$P_{T1} - P_{T2} = \zeta_T \rho Q^2 / (2S_T^2) \quad (2.5)$$

式中 P_{T1} 、 P_{T2} 是透平机前后的压力, ζ_T 是透平机广义阻尼系数, S_T 是透平机进口管道截面积。

(6) 减压阀旁通管路压降方程:

$$P_C - P_G = \zeta_V \rho Q^2 / (2S_V^2) \quad (2.6)$$

式中 P_C 是旁通管路与透平机管路交叉点的压力, ζ_V 是减压阀的阻尼系数, 需要指出, 当减压阀由两个阀门并联时, 需要进行并联管路阻尼系数的计算。 S_V 是旁通管道截面积。

(7) 透平机静叶片开度 δ_T 与广义阻尼系数 ζ_T 关系式:

$$\zeta_T = \zeta_T(\delta_T) \text{ 或: } \delta_T = \delta_T(\zeta_T) \quad (2.7)$$

(8) 旁通管道调节阀门开度 δ_V 与阀门阻尼系数 ζ_V 关系式:

$$\zeta_V = \zeta_V(\delta_V) \text{ 或: } \delta_V = \delta_V(\zeta_V) \quad (2.8)$$

这个关系式由阀门标准阻尼系数换算获得, 或由试验确定。

(9) 介质的状态方程:

$$\rho = \rho(P, T, \alpha) \quad (2.9)$$

式中 T 是温度, α 是介质参数。这个关系式可以根据具体高炉煤气成分, 给出近似表达式, 或列表给出数据。

上述方程描述高炉煤气管路系统中流量, 压降与阻尼系数之间的关系。在上述方程中, 各个控制点的压力值 P 和流量 Q 是 TRT 管路中直接检测到的已知量。风机特性(2.4), 透平机广义阻尼系数特性(2.8), 阀门特性(2.9)均是事先给出的。我们的问题是:

(1) 在透平机正常运行时, 若高炉顶压 P_{F2} 发生超值波动时。即 $\Delta P_{F2} > \varepsilon$ 时, 将通过上述方程式, 求出静叶开度 δ_r^* , 使得 $P_{F2} = P_0$ 。

(2) 当透平机紧急停机时, 透平机的广义阻尼系数 ζ_r 是可以通过对现场检测量计算获得的, 令 $\zeta_v = \zeta_r$, 并通过(2.8)式确定旁道调节阀的开度 δ_v 。需要指出此时旁道管路的 1 号快开阀在切换时将执行全开指令。

上述方程适用于高炉管路系统静态的情况, 由于高炉管路系统的压力和流量变化是时刻变化的, 因此当管路系统中的压力和流量发生变化时就必须要对管内系统进行动态瞬变分析, 并建立管道内流量和压力的控制方程并进行求解, 可获得管路系统的各个管件的瞬时的压力和流量分布。

2.3 管路系统动态瞬变分析

当高炉内介质的阻尼特性、透平机的运行状况、TRT 装置旁通管道减压阀的开启状况以及高炉进口的鼓风机气动特性曲线 $P-Q$ 发生变化时, 此时高炉管路系统的阻尼系数将会发生变化, 流动出现瞬变现象。而此时再采用静态的控制方程显然不能预计瞬变时高炉管路中的压降分布以及流量变化, 因此需要采用管道一维不定常流动控制方程来计算分析压降和流量变化。

对于管网中的瞬变流现象, 通常采用差分法、特征线法、伽辽金法来分析。从计算的准确性及经济性来看, 特征线法具有明显的优越性, 下面介绍采用特征线方法预计高炉管路系统的瞬变流动现象。

2.3.1 管道线性方程

对于 TRT 管路系统, 描述管道内流体动态的数学模型可用下列拟线性双曲型方程

组来表示:

$$A \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + A \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\pi D f}{8 \rho A^2} M |M| = 0 \quad (2.12)$$

式中, A 为管道截面面积; f 为气体流动摩阻系数; P 为气体介质压力; X 为管道位置变量; t 为时间变量; ρ 为气体介质密度; M 为气体质量流量; D 为管道内径。

考虑气体的状态方程:

$$\frac{P}{\rho} = RT = a^2 \quad (2.13)$$

其中, R 为气体常数; T 为介质的绝对温度; a 为介质的等温声速。则我们可以得到管网内瞬变流现象的特征方程:

$$C_{\pm} = \frac{\alpha^2}{A} \frac{dM}{dt} + \frac{\alpha}{a} \frac{dP}{dt} + \frac{fa^2 M |M|}{2DA^2 P} = 0 \quad (2.14)$$

$$C_{\pm} = \frac{dX}{dt} = \pm \frac{a}{\alpha} \quad (2.15)$$

式中: a 为惯性因子, f 为水力摩阻系数。

式(2.15)描述了方程(2.11), (2.12)的两条特征线, 式(2.14)分别是这两条特征线的特征方程。这里要特别指出的是, 式(2.14)只有在式(2.15)满足时才能成立。特征线法的实质是将整个 $x-t$ 平面上的偏微分方程问题化为只有特征线上成立的常微分方程问题。

2.3.2 Newton-Raphson 迭代法

对于整个高炉管网可以简化化为一系列描述管道、设备、储气罐及其节点的非线性代数方程组, 可采用 Newton-Raphson 方法进行迭代求解。下面简单介绍这种方法。

对于方程组:

$$\begin{cases} F_1(X_1, X_2, \dots, X_k) = 0 \\ F_2(X_1, X_2, \dots, X_k) = 0 \\ \dots\dots\dots \\ F_k(X_1, X_2, \dots, X_k) = 0 \end{cases} \quad (2.16)$$

有迭代式:

$$X(j) = X(j-1) - \delta X(j)$$

其中, $\delta X(j) = [J(j)]^{-1} F(j)$;

对于有一个分支的管网, 迭代法的使用步骤为: 共有 F_0, F_1, F_2, F_3 四个方程, 变量为 $X = \{M_1, M_2, M_3, P\}^T$ 。

(1) 首先求偏导数, 对 F_0, F_1, F_2, F_3 各变量求偏导数, 可得到系数矩阵;

(2) 赋初值, 取 $P = P^j, M_1 = M_{1,N}^j, M_2 = M_{2,0}^j, M_3 = M_{3,0}^j$ 。作为第一次迭代值, j 表示时刻;

(3) 根据 P, M_1, M_2, M_3 的迭代值及其已知量, 计算 F_0, F_1, F_2, F_3 及其各项偏导数;

(4) 解方程求出修正量, 从 $J \cdot \delta X = F$, 解得 $\delta M_1, \delta M_2, \delta M_3, \delta P$;

(5) 于是有 $M_1 = M_1 - \delta M_1, M_2 = M_2 - \delta M_2, M_3 = M_3 - \delta M_3, P = P - \delta P$;

(6) 以新的迭代值反复计算(3), (4), (5), 直到获得满意的结果。

2.4 顶压稳定性的控制计算

通过管路系统的瞬态分析, 可以求得通过各个管路元件的瞬时的流量和压差, 从而求得所感兴趣的阻尼系数, 并通过阻尼系数得到稳定顶压的控制量, 具体的计算步骤如下:

(1) 首先对高炉管路系统中的各个管路元件, 如管件、阀门、鼓风机、透平机进行阻尼系数测试, 得到各个管件的无量纲阻尼系数。如得到阀门和开度所对应的阻尼系数曲线, 透平机静叶片开度与无量纲透平广义阻尼系数的对应关系, 高炉鼓风机的特性曲线。

(2) 通过管路平衡方程(2.2)-(2.10), 计算确定 TRT 装置高炉管路系统的流量以及各个检测点的压力分布。

(3) 然后我们分两种情况来计算高炉顶压波动时, 所对应的控制计算量:

当高炉顶压发生波动, 顶压值超过事先给定的允许波动幅值时, 此时调节透平机静

叶开度, 相应的计算程序如图 2.8 所示, 具体的求解过程如下:

①实时检测顶压, 当顶压 P_{F2} 出现波动且其振幅超过设定值 $|\Delta P_{F2}| \geq \varepsilon$, 即 ε 时, 系统发出指令进行调节。

②根据(2.8)和(2.9)的联立方程^[2], 令 $P_{F2} = P_0$ 计算出静叶片调节开度增量 $\Delta\delta$ 。

③根据当前的高炉风机的 $P-Q$ 曲线以及当前的静叶开度, 对整个 TRT 高炉管网系统进行瞬态分析, 瞬态分析计算程序如图 5.3 所示, 可获得更新的各个检测点的压力 P 和流量 Q 分布。

④分析新的高炉顶压值, 得到更新的顶压 P_{F2} 的波动值 ΔP_{F2} ;

⑤如果新的顶压波动值 $|\Delta P_{F2}| \neq 0$, 根据 ΔP_{F2} 的大小, 通过线性插值调整透平机静叶的开度 $\Delta\delta$, 反复计算③—⑤, 直到 $|\Delta P_{F2}| = 0$

⑥记录 Δ 最终得到的透平机开度 δ , 并向透平机发出指令。

当 TRT 进紧急停机操作时, 旁通管路减压阀门的开启以及控制量的求解过程如下:

①按照 TRT 紧急停机时的规定操作程序进行动作, 首先关闭进入透平机管路的阀门, 同时打开减压阀的快开阀。

②根据紧急停机瞬间各检测点获得的信息量, 利用 TRT 系统的管路平衡方程, 计算出透平机的广义阻尼系数的变化过程, $\zeta_T = \zeta_T(t)$ 。

③令旁通管路的调节阀的阻尼系数变化过程与透平机阻尼 ζ_T 的变化趋势相同, 即 $\zeta_V(t) = \zeta_T(t)$, 使得旁通总体的管路阻尼 ζ_m 与开动和停机时的透平机的广义阻尼系数相等。

④根据旁通管路调节阀的阻尼系数 ζ_V 与开度 δ_V 对应关系, 求得所对应的调节阀的开度值 δ_{V0} , 得到旁通调节阀的计算控制量。

⑤向旁通阀门发出开启调节阀开度量的执行指令。

⑥根据执行指令完成后, 各检测点返回的信息, 进行微调节控制。

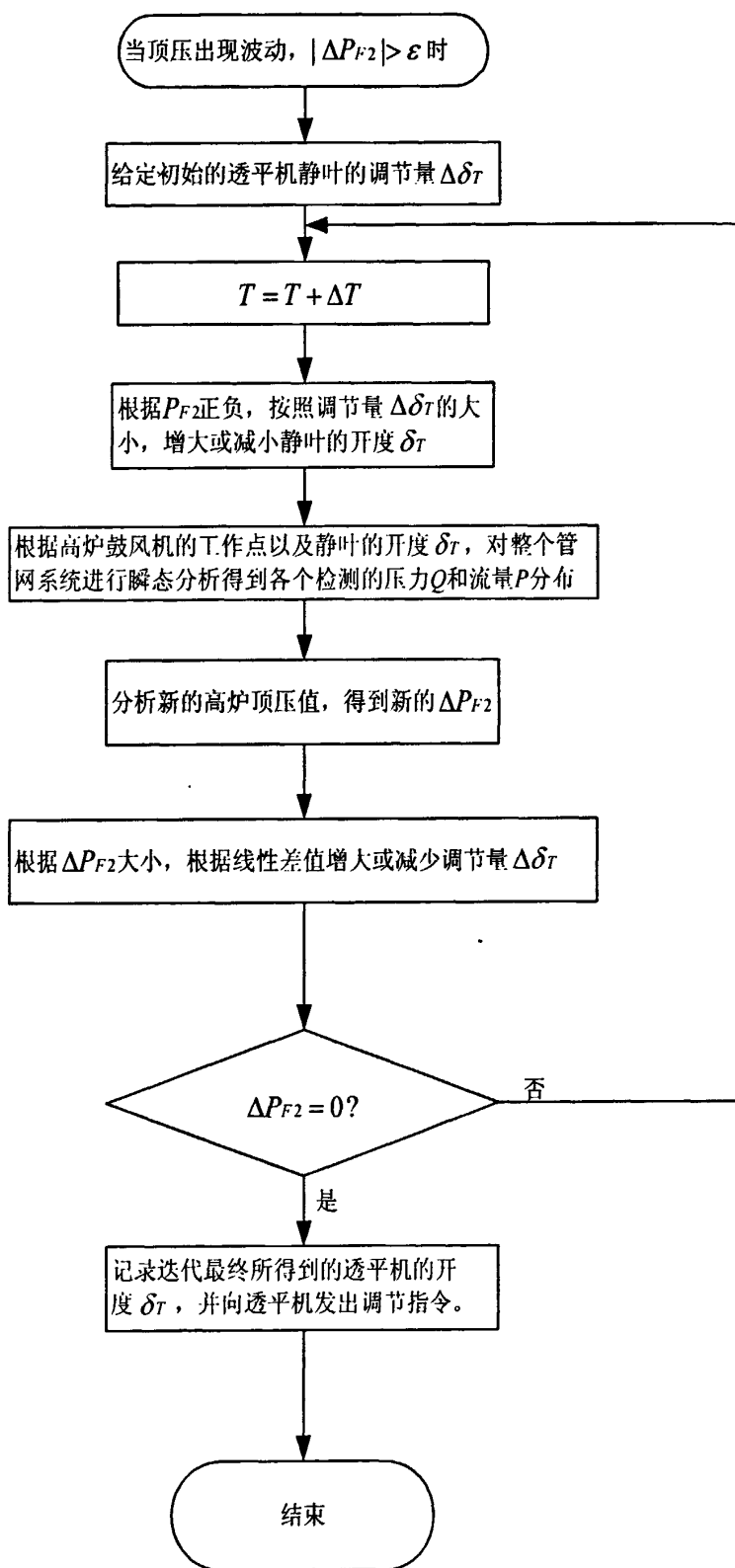


图 2.2 顶压波动时静叶调节时的控制量求解过程

Fig. 2.2 Static pressure fluctuation of regulation for the control of the process

第三章 模糊专家系统

本章介绍了专家系统、专家系统的发展状况、专家系统的建造步骤、专家系统的优点和分类,在此基础上提出了模糊专家系统控制器设计,以改善控制效果,同时增强控制器的鲁棒性。

3.1 传统的专家系统

3.1.1 专家系统的组成及建造步骤

专家系统(Expert Systems, 简称 ES)是一个智能计算机程序系统,内部包含某个领域大量专家的知识 and 经验,能够利用人类专家的知识 and 解决问题的经验方法来处理该领域问题。也就是说,专家系统是一个具有大量的专门知识 with 经验的程序系统,它应用人工智能技术和计算机技术,根据某领域一个或多个专家提供的知识和经验,进行推理和判断,模拟人类专家的决策过程,以便解决那些需要人类专家处理的复杂问题。简而言之,专家系统是一种模拟人类专家解决领域问题的计算机程序系统^[26-28]。

由于专家系统应用广泛,而且还处于不断发展中,故其结构也没有固定的模式。依据当前人们的普遍认识,通常认为,一个较为完备的专家系统应包括以下几个部分:知识库(Knowledge Base)、推理(Inference Engine)机或推理(控制)机制、工作数据库(Data Base)或工作存贮器(Memory)、解释接口(Explanatory Interface)或人一机接口(Man-machine Interface)、知识获取(Knowledge Acquisition)或与处理程序。它们之间的相互关系可用图 3.1 表示,其主要功能如下:

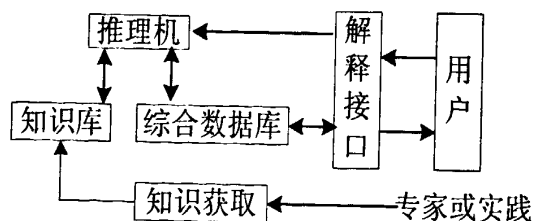


图 3.1 专家系统一般功能结构

Fig. 3.1 expert system generally functions structure

(1) 知识库

知识库是(规则基)专家系统的核心之一,其主要功能是存贮和管理专家系统中的指

示。知识库中存贮的知识主要有两种类型：一类是相关领域中所谓公开性的指示，包括领域中的定义、事实和理论在内，这些知识通常收录在相关学术著作和教科书中；另一类是领域专家的所谓个人知识，它们是领域专家在长期业务实践中所获得的一类实践经验，其中很多知识被称之为启发性知识。正是这些启发性知识使领域专家在关键之处能做出训练有素的猜测，辨别出有希望的解题途径，以及有效地处理错误或不完整的信息数据。领域中事实性数据及启发性知识等一起构成专家系统中的知识库。在知识库中，这些知识必须表达为一定的规范形式。知识的规范表示方法很多，其中最常用的有产生式(规则)表示法、语义网络表示法和框架结构表示法等。从实质上讲，所有的知识表示都是等价的，但其方便程度不相同。因此，在构造知识库时，最好选择最易于表达知识且又易于计算机实现的方法。

(2) 数据库（工作存储器）

综合数据库是专家系统中用于存放反应系统当前状态的事实数据的“场所”。其数据包括用户输入的事实、已知的事实以及推理过程中得到的中间结果等。它们能反映系统要处理问题的主要状态和特征，是系统操作的对象。综合数据库中的内容在系统运行中是不断改变的，并且它可被所有的规则访问，没有局部的数据库是特别属于某些规则的，规则之间的联系只有通过数据库才能发生。

在专家系统中，综合数据库中数据的表示和组织，通常与知识库中知识的表示和组织相容或相一致，以使推理机能方便地去使用知识库中的知识和综合数据库中描述问题当前状态的数据去求解问题。

(3) 推理机

专家系统中的推理机实际上也是一组计算机程序。其主要功能是协调控制整个系统，决定如何选用知识库中的有关指示，对用户提供的证据进行推理，以最终对用户提出的特定问题做出回答。在专家系统中，问题的求解有赖于系统对已存贮的各类常规的和专门的知识的综合运用。在系统求解问题过程中，所涉及到的知识常常包括三个方面的内容：

一类是所谓的叙述性或事实性知识。一类是所谓的操作性、过程性或启发性知识。还有一类知识即所谓的策略性或控制性知识。他们在问题求解过程中的主要作用是制导系统如何选择最佳操作，即确定系统运行的推理机制和控制策略等。在专家系统中，推理过程控制方式主要有正向推理、反向推理和正反向混合推理三种^[29,30]。

正向推理(Forward Chaining)又叫数据驱动型推理或前件(匹配型)推理。它是由原始

数据出发向结论方向进行推理,其推理过程为:系统根据用户提供的原始信息,在知识库中寻找能与之匹配的规则。若找到,则将该知识元的结论部分作为中间结果,利用这个中间结果继续与知识库中的规则匹配,直到得出最终结论。

反向推理(Backward Chaining)又称目标驱动型推理或后件(匹配型)推理。它是先提出假设性结论,然后由此出发寻找支持这一假设结论的证据,当所需的证据与用户提供的原始信息相匹配时,推理即告成功。

正反向混合推理(Forward and Backward Chaining)是一种集中了正向和反向推理特点的综合型推理控制方式。它首先根据原始信息数据通过正向推理帮助系统提出假设性结论(推理聚焦),然后运用反向推理进一步寻找支持该假设的证据,如此循环反复这一过程,直至推理成功或终止。

(4) 解释接口(人—机界面)

有些系统将人机界面与解释程序模块分开考虑,它们均是人机交互程序。解释模块负责回答用户提出的各种问题,包括与系统推理有关的问题和与系统推理无关的关于系统自身的问题。它可对推理路线和提问的含义给出必要的清晰地解释,为用户了解推理过程以及系统维护提供方便的手段,是实现系统透明性的主要模块。人机界面或人机接口则负责把用户输入的信息转换成系统内规范化的表示形式,然后把这些内部表示交给相应的模块去处理。系统输出的内部信息也由人机接口转换成用户易于理解的外部表示形式显示给用户。

(5) 知识获取模块(预处理程序)

这是专家系统中能将某专业领域内的事实性知识和领域专家所特有的经验性知识转化为计算机可利用的形式并送入知识库的功能模块。同时也负责知识库中知识的修改、删除和更新,并对知识库的完整性和一致性进行维护。知识获取模块是实现系统灵活性的主要部分,它使领域专家可以修改知识库而不必了解知识库中知识的表示方法、知识库的组织结构等实现上的细节问题,这大大提高了系统的可扩充性。

早期的专家系统完全依靠领域专家和知识工程师共同合作把领域内的知识总结归纳出来,然后将它们规范化后输入知识库。此外,对知识库的修改和扩充也是在系统的调试和验证过程中人工进行的,这往往需要领域专家和知识工程师的长期合作,并要付出艰巨的劳动。

目前,一些专家系统已经或多或少地具有了自动知识获取的功能。自动知识获取包括两个方面,一是外部知识的获取,即通过向专家提问,以接受教导的方式接受专家的

知识然后把它转成内部表示形式存入知识库。二是内部知识获取，即系统在运行中不断地从错误和失败中归纳总结经验，并修改和扩充自己的知识库。因此，知识获取实质上是一个机器学习的问题。

成功地建立系统的关键在于尽早地着手建立系统，从一个比较小的系统开始，逐步扩充为一个具有相当规模和日臻完善的试验系统。建立系统的一般步骤如下：

(1) 设计初始知识库。知识库的设计是建立专家系统最重要和最艰巨的任务。初始知识库的设计包括：

问题知识化，即辨别所研究问题的实质，如要解决的任务是什么，它是如何定义的，可否把它分解为子问题或子任务，它包括哪些典型数据等。

知识概念化，即概括知识表示所需要的关键概念及其关系，如数据类型、已知条件(状态)和目标(状态)、提出的假设以及控制策略等。

概念形式化，即确定用来组织知识的数据结构形式，应用人工智能中各种知识表示方法把与概念化过程有关的关键概念、子问题及信息流特性等变换为比较正式的表达，它包括假设空间、过程模型和数据特性等。

形式规则化，即编制规则、把形式化了的的知识变换为由编程语言表示的可供计算机执行的语句和程序。

规则合法化，即确认规则化了的的知识合理性，检验规则的有效性。

(2) 原型机(prototype)的开发与试验。在选定知识表达方法之后，即可着手建立整个系统所需要的实验子集，它包括整个模型的典型知识，而且只涉及与试验有关的足够简单的任务和推理过程。

(3) 知识库的改进与归纳。反复对知识库及推理规则进行改进试验，归纳出更完善的结果。经过相当长时间的努力，使系统在一定范围内达到人类专家的水平。

这种设计与建立步骤如图 3.2 所示。

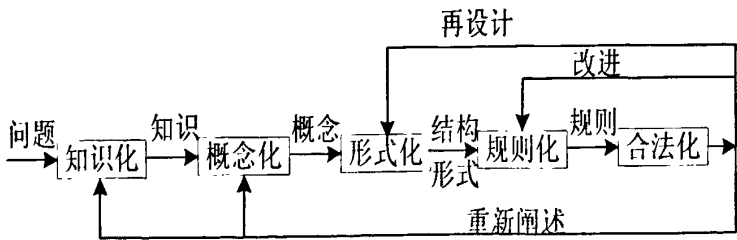


图 3.2 建立专家系统的步骤
Fig. 3.2 expert system to establish the steps

3.1.2 专家系统的特点和优点

专家系统具有下列三个特点，其与常规程序的区别如表 3.1 所示。

- (1) 启发性。专家系统能运用专家的知识与经验进行推理、判断和决策。
- (2) 透明性。专家系统能够解释本身的推理过程并回答用户提出的问题，以使得用户能够了解推理过程，提高对专家系统的信赖感。
- (3) 灵活性。专家系统能不断增长知识，修改原有知识，不断更新。由于这一特点，使得专家系统具有十分广泛的应用的领域。

表 3.1 专家系统与常规程序的区别

Table 3.1 Expert System and the distinction between conventional procedures

分类	专家系统	一般程序
组成	知识+推理	数据结构+算法
知识组成	数据级、知识库级、控制级	数据级、程序级
求解方式	符号处理	数值计算
数据类型	不精确的、模糊的	精确的
解释功能	需要具备	不需要具备

近 20 年来，专家系统获得迅速发展，应用领域越来越广，解决实际问题的能力也越来越强，这是专家系统的优良性以及国民经济所起的重大作用所决定的。具体地说，专家系统的优点包括下列几个方面：

- (1) 专家系统能够高效率、准确、周到、迅速和不知疲倦地进行工作。
- (2) 专家系统解决实际问题时不受周围环境的影响，也不可能忘记或遗漏。
- (3) 可以使专家的专长不受时间和空间的限制，以便推广珍贵和稀缺的专家知识与经验。
- (4) 专家系统能够促进各领域的发展，它使各领域专家的专业知识和经验得到总结和精炼，能够广泛而有力地传播专家的知识、经验和能力。
- (5) 专家系统能够汇集和集成多领域专家的知识与经验以及他们协作解决重大问题的能力，拥有更渊博的知识、更丰富的经验和更强的工作能力。
- (6) 专家系统的研制和应用，具有巨大的经济效益和社会效益。
- (7) 研究专家系统能够促进整个科学技术的发展。专家系统对人工智能的各个领域的发展起了很大的促进作用，并将对科技、经济、国防、教育、社会和人民生活产生极

其深远的影响。

3.1.3 专家系统中的不确定性和不完整性问题

专家系统的发展有广阔而又光明的前景。但是,它还需要解决一系列棘手的技术上的难题。其模糊专家系统在 TRT 系统中控制高炉压力的研究与应用之一就是如何处理知识中广泛存在的不确定性。因为专家系统的核心是“知识”,从一定意义上说,知识的获取、知识的标示和知识的运用构成了专家系统开发的整个核心内容。专家系统强调专家知识在问题求解中的作用,特别是专家启发性知识在问题求解中的作用,这就带来一系列后继问题,其中最主要的难题就是如何从专家那里获取到其专门知识以及如何处理这类经验性知识中广泛存在的不确定性。

造成专家系统中不确定性的主要因素在于自然语言和专家知识的提取。除此之外,造成专家系统中知识表达及推理过程中不确定性的因素还有以下一些:1)事物本身就具有某种不确定性;2)因时间和条件所限,缺乏足够的证据或接受了当时分辨不清的错误信息;3)缺乏可靠的经验等。

对于专家系统中的各种不确定性,人们习惯把它们归纳为三种类型:即由随机性而引起的不确定性;由模糊性而引起的不确定性;由于证据不完全或不确切而引起的不确定性。专家系统中的不确定性主要是模糊性。

模糊专家系统就是在此情况下发生和发展起来的。由于人类专家那里获取的启发性知识有很多是不确定的,而模糊专家系统就是为了更好地解决这种不确定性而研制的。它是建立在模糊集合等理论的基础上,运用模糊推理等技术实现预定功能的一类专家系统。

3.2 模糊专家系统

3.2.1 模糊理论简述

美国教授查德(L. A. Zandeh)1965 年首先提出了模糊集合的概念,由此开创了模糊数学极其应用的新纪元。模糊性是一种不确定性,但它不同于随机性,模糊性是指客观事物在性态和类属方面的不分明性,即中介的过渡性。它是人们在社会交往和生产实践中经常使用的,提供了定性定量、主观与客观、模糊与清晰之间的一个人为折中。模糊数学能解决经典数学无法顾及的模糊领域,大大扩展了应用范围。现在应用模糊数学的

领域有:语言、自动机、系统工程、信息检索、自动控制、图像识别、故障诊断、逻辑、决策、人工智能以及生物学、医学、社会学、心理学、拓扑学及网络技术等领域。模糊数学虽然是研究和描述模糊性现象的一种工具,但它本身是精确的,是用精确的数学方法去描述和研究模糊现象^[31]。

(1) 模糊集合与隶属函数的定义

关于模糊集合及其隶属函数,查德给出了如下定义:

设 U 是给定论域, $\mu_F(u)$ 是把任意 $\mu \in U$ 映射为 $[0,1]$ 区间上某个值的函数,即:

$$\mu_F: U \rightarrow [0,1]$$

$$\mu \rightarrow \mu_F(\mu)$$

则称 μ_F 为定义在 U 上的一个隶属函数,由 $\mu_F(u)$ 所构成的集合 F 称为 U 上的一个模糊集合, $\mu_F(u)$ 称为 u 对 F 的隶属度。从定义可以看出,模糊集合 F 完全是由隶属函数 μ_F 刻画的, μ_F 把 U 中每一个元素 u 都映射为 $[0,1]$ 上的一个值 $\mu_F(u)$ 。 $\mu_F(u)$ 的值表示 u 隶属于 F 的程度,其值越大,表示 u 隶属于 F 的程度越高。当 $\mu_F(u)$ 仅取 0 和 1 两个值时,模糊集合 F 便退化为一个普通集合。

(2) 模糊集合的表示

模糊集合的表示方法与论域性质有关。

离散论域 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 上的模糊子集 A 的 Zadeh 表示法为:

$$A = \sum_{i=1}^n \mu_A(x_i) / x_i = \mu_A(x_1) / x_1 + \dots + \mu_A(x_m) / x_m$$

对于连续的论域 U , 相应的模糊子集完全由隶属函数 $\mu_A(x)$ 的表征, 并且表示为:

$$A = \int \mu_A(x) / x. \text{ 不是积分符号, 只是表示无限论域上的一个模糊集的符号。}$$

模糊集合从经典集合推广了一些运算如等价, 包含, 补集, 并集, 交集, 都以隶属度函数作为运算对象, 例如 U 上的模糊集 A 和 B 的并集记为 $A \cup B$, 其隶属度函数为: $\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$, 除了上面一些运算子外, 模糊集合还定义了一些其他的算子。主要的算子有: 模糊补, 模糊并 S -范数, 模糊交 t -范数, 平均算子。

(3) 隶属函数的形状和类型

对于单个变量的隶属函数的选择形状可选择如图 3.3 所示的三角形、梯形、高斯形、钟形。也可以根据具体的情况设计隶属函数的形状。

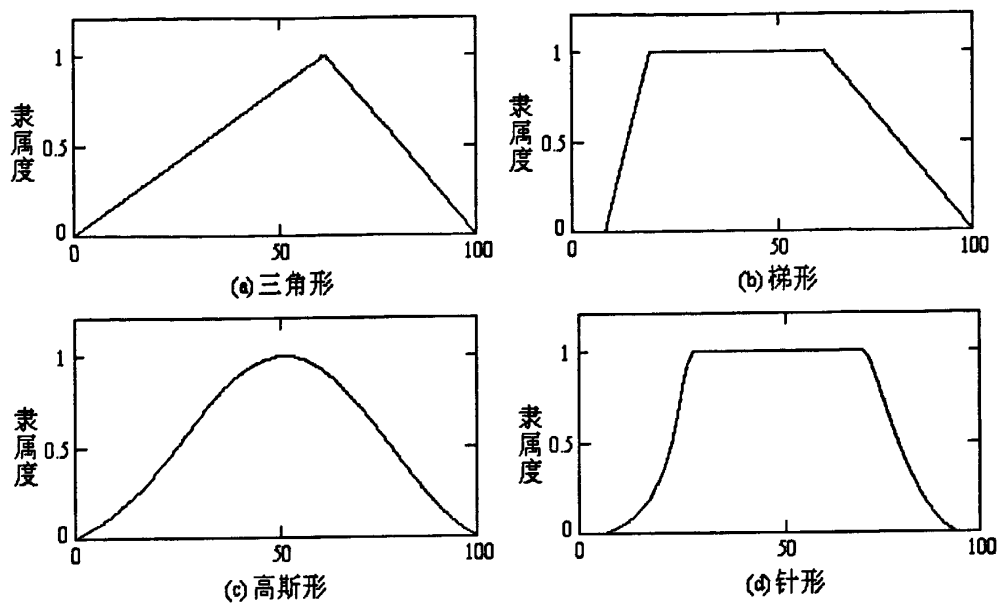


图 3.3 隶属函数的示例
Fig. 3.3 membership function of the sample

(4) 模糊关系及其扩展

模糊关系是一个定义在清晰集 $U_1, U_2, \dots, U_n$ 的笛卡儿积上的模糊集。用模糊集
表示方法可把模糊关系 Q 定义为如下模糊集合：

$$Q = \{ ((\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n), \mu_Q(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)) \mid \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n \in U_1, U_2, \dots, U_n \}$$

模糊关系上一个重要的运算是模糊合成。令 $P(U, V)$ 和 $Q(V, W)$ 表示二个模糊关系，则定义 P 和 Q 合成 $U \times W$ 上的一个关系，记做 $P \circ Q$ ，其隶属度函数由下式给出：

$$\mu_{P \circ Q}(x, z) = \max_{y \in V} t[\mu_P(x, y), \mu_Q(y, z)]$$

其中， t 表示任 t -范数。

(5) 模糊语言变量和模糊 IF-THEN 规则

如果一个变量能够取普通语言中的词语为值，则称该变量为语言变量。这里，词语由定义在论域上的模糊集合来描述，变量也是在论域上定义的。在模糊专家系统中，人类知识用模糊 IF-THEN 规则来表述，可以表述为：IF<模糊命题>THEN<模糊命题>。其中，模糊命题有两种类型：子模糊命题和复合模糊命题。

子模糊命题是单独的陈述句，子模糊命题通过连接词“且”，“或”，“非”连接起来构成的命题叫复合模糊命题，其模糊关系的隶属度确定可分别使用 t -算子， s -算子，和模糊补算子。

那么,如何解释 IF-THEN 运算呢?经典命题运算中,表达式 IF P THEN Q 可以写成 $P \rightarrow Q$, 等价于 $\bar{p} \vee q$ 和 $(p \wedge q) \vee \bar{p}$, 模糊运算中,可分别用模糊补,模糊并,模糊交来分别取代其运算。Mamdani 含义是在模糊系统中使用最广泛的含义:模糊 IF-THEN 规则可以解释为 $U \times V$ 上的一个模糊关系 Q_{MM} 或 Q_{MP} , 其隶属度函数为:

$$Q_{MM}(x, y) = \min[\mu_{FP1}(x), \mu_{FP2}(y)]$$

$$Q_{MP} = \mu_{FP1}(x) \mu_{FP2}(y)$$

3.2.2 模糊专家系统的基本原理

模糊专家系统是指采用模糊技术来处理不确定性的一类专家系统。在这里,模糊技术主要是指建立在模糊集合理论、可能性理论和模糊逻辑推理基础上的一类工程技术,它们是对人类认识和思维过程中所有固有模糊性的一种模糊模拟和反映。

模糊专家系统作为广义专家系统的一种形式,它也有经典专家系统所具有的特征。此外,由于它运用的知识和处理的对象是模糊的,所以又应具有其独特的特征。

(1) 模糊的符号处理能力

模糊专家系统应具有模糊地进行符号处理的能力,它能采用符号精确地或模糊地表示领域有关的信息和知识,并对其进行各种模糊处理和推理。

(2) 对模糊问题的求解能力

模糊专家系统还应具有一些公共的智能行为,即能做各种模糊逻辑推理、目标搜索和常识处理等工作以解决各种模糊问题。为了使它更符合现实情况,应能采用启发性(或试探性)方法进行推理,应该能采用不确定推理与知识不完全推理等。

(3) 知识的复杂性和模糊性

模糊专家系统处理的知识是专门的领域知识,所涉及的面可能很窄,但有一定的复杂性和模糊性。因为领域知识不复杂到一定程度就根部不需要任何专家来解决,从而也就没有什么专家知识可谈,问题不包括模糊性也无需用模糊专家系统解决。

(4) 具有窄的特定领域的专门知识

专家模糊系统的任务必须是很有针对性的,一般把解题领域限制得很窄,以求实现模糊专家系统的可能性和解题的有效性。

3.2.3 模糊推理专家系统的构造

模糊系统是由一个实值向量向一个实值标量得到所作的多输入单输出映射(多输出映射可以分解成一个单输出映射的集合), 并且能够得到这些映射的精确的数学公式; 模糊系统是由来自于以模糊工 IF-THEN 规则为形式的人类知识所组成的基于知识的系统。模糊系统理论的一个重大贡献就是它为从知识库向非线性映射的转换提供了一套系统的程序。正是由于这一转换, 我们才能将基于知识的系统(模糊系统)采用同数学模型及传感器测量一样的方式, 应用到工程应用中(控制、信号处理及通信系统等)。

模糊系统的核心就是由所谓的 IF-THEN 规则所组成的知识库, 一个模糊的 IF-THEN 规则就是一个用连续隶属度函数对所描述的某些句子所做的 IF-THEN 形式的陈述。总的来说, 构造一个模糊系统的出发点就是要得到一组来自于专家或基于该领域知识的模糊 IF-THEN 规则, 然后将这些规则组合到单一系统中。不同的模糊系统可采用不同的组合原则。

在工程系统中经常应用的是具有模糊器和解模糊器的模糊系统, 该系统输入端的模糊器将真值变量转变成模糊集合, 输出端的解模糊器将模糊集合转变成真值变量。模糊推理系统结构如图 3.4 所示

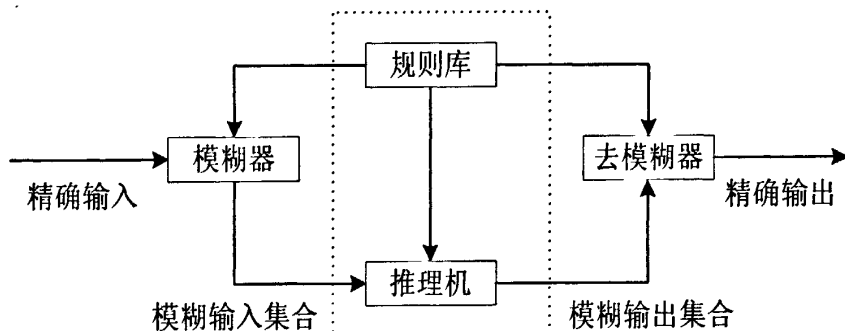


图 3.4 模糊推理系统

Fig. 3.4 fuzzy inference system

(1) 模糊器

将精确量转化为模糊量的过程称为模糊化, 可以将选择的隶属函数叠加如图 3.5 所示, 通过图 3.5 的隶属函数就可以把论域的变量模糊化。模糊隶属函数的选取要根据具体情况进行调整^[32]。

模糊器(Fuzzifiers)可定义为由一实值点 $x^* \in U \subset R^n$ 上的模糊集 A' 的映射。一般有三种模糊器, 即单值模糊器、高斯模糊器和三角形模糊器等。

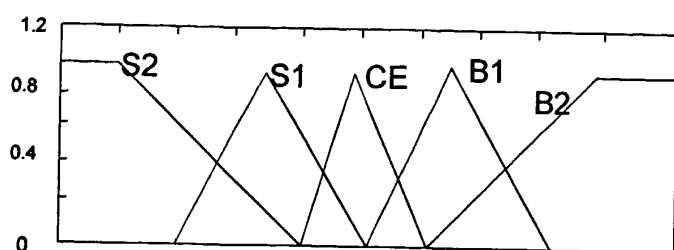


图 3.5 变量模糊化的隶属函数

Fig. 3.5 variables of the fuzzy membership function

(2) 规则库

在模糊推理中, 专家的经验知识通过一组语言描述的规则表示出来, 适用于某一个系统的所有规则就构成了该模糊推理系统的规则库。

①模糊规则的形式模糊推理规则通常采用“如果<前提>, 那么<结论>”的形式, 具体地, 可以分为两大类, 第一类的前提和结论都是模糊的, 对于一个多输入多输出(MIMO)系统, 这类模糊推理规则一般采用以下表现形式:

$$IF [<x_1 = A_1> \text{ and } <x_2 = A_2> \text{ and } \dots <x_n = A_n>]$$

$$THEN [<y_1 = B_1, \dots y_m = B_m>]$$

式中 $A_1, A_2, \dots, A_n$; $B_1, B_2, \dots, B_m$ 均为模糊集合。

第二类规则的前提是采用模糊语言值, 但结论部分是推理量的清晰表达式, 即:

$$IF [<x_1 = A_1> \text{ and } <x_2 = A_2> \text{ and } \dots <x_n = A_n>]$$

$$THEN [y = (x_1, x_2, \dots, x_n)]$$

②模糊规则的生成

专家经验法。根据专家的经验知识, 并经过一定的试凑和调整, 从而得到符合实际的模糊推理规则。

根据对象的模糊模型推断模糊推理规则。专家经验提供的是一种根据已知的状态得到应施加控制量的方法, 但是, 在有些场合下, 无法找到这样的专家, 而被控对象的模糊模型却已知, 那么, 就可以根据对象的模糊模型来推断相应的推理规则。

规则的自动生成及规则修正的自学习法。

③建立规则库的要求

定义良好的规则集合应该满足以下特性:

完备性: 对任意的 $x \in U$, 在模糊规则库中都至少存在一条规则, 称之为规则 R_M^1 若
 如果 x_1 为 A_1' 且.....且 x_n 为 A_n' , 则 y 为 B_1 , 其中, A_i' 和 B_1 分别是 $U_i \in R$ 和 $V \in R$ 上的模糊
 集合, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in U$ 和 $y \in V$ 分别是模糊系统的输入输出变的变量,
 $1=(1, 2, \dots, M)$ 对于所有 $i=1, 2, \dots, n$ 都满足 $\mu_{A_i'}(x_i) \neq 0$ 。

一致性: IF-THEN 规则集合不存在“IF 部分相同, THEN 部分不同”的规则。

连续性: 临近规则的 THEN 部分的模糊集的交集不是空集。

(3) 推理机

模糊推理机是模糊专家系统的核心。它可以根据系统输入的初始不确定性信息, 利用模糊知识库中的不确定性知识, 按照一定的模糊推理策略, 较理想地处理待解决的问题, 给出恰当的结论。为了实现模糊推理, 模糊推理机不仅要具备一般专家系统推理机所具有的推理控制策略(如按深度或广度优先搜索策略进行正向、反向或双向推理), 而月.还要定义一组函数, 用于推理过程中信息不确定性的传播。由于基于模糊技术的不确定性的描述方法很多, 推理机中所确定的信息不确定性传播函数也不完全相同, 但通常要包括以下几组函数:

合并规则前提中各逻辑项的不确定性时的函数;

由规则前提不确定性(模糊真值)和规则强度求出规则结论不确定性(模糊真值)时的函数;

合并由不同规则所得出的同一结论的不确定性(模糊真值)时的函数;

从几个可能性结论中选取最佳结论时的函数。

目前, 在模糊专家系统中常用的模糊推理方法主要有合成推理和利用匹配进行推理。

合成推理方法也叫模糊假言推理, 是目前应用比较广泛的一种推理方法。基本思想是:先求出规则“IF X is A THEN Y is B ”中 A 和 B 的确定关系, 然后将这个关系(是一个二元关系)与观察事“ X is A' ”, 中的 A' (为一元关系)进行合成。

$$A \text{ and } B \text{ are } R, B' = A' \circ R$$

其中, 模糊关系 R 的确定是关键, 目前有多种构造模糊关系的方法, 下面是最常用的几种。(设 F 和 G 分别是论域 U 和 V 上的两个模糊集合)。

模糊关系 R_m 表示为

$$R_m = \int_{U \times V} (\mu_F(u) \wedge \mu_G(v)) \vee (1 - \mu_F(u)) / (u, v)$$

其中, $\times$ 表示模糊集合的笛卡儿乘积。

模糊关系 R_c 表示为

$$R_c = \int_{U \times V} (\mu_F(u) \wedge \mu_G(v)) / (u, v)$$

模糊关系 R_g 表示为

$$R_g = \int_{U \times V} (\mu_F(u) \rightarrow \mu_G(v)) / (u, v)$$

集值统计是在每次试验中得到一个普通或模糊的子集,即相当于领域专家对某一个评价指标的一个区间估计值。可以直接从原始资料及数据出发,中间不需要人为假设而构造出模糊关系。可把 X 与 Y 划分为一些小区域,或是一些离散的小区域,首先固定一个变量,计算另一相关变量的观察值落入各小区域内的百分数,可粗略地得到两个变量之间的模糊关系。

在利用匹配进行推理中,采用语义距离、贴近度或某种模糊匹配度来度量两个模糊变量的匹配程度,即匹配度,是指两个模糊命题的相似程度。当它大于某个阈值时,则启动相应规则;否则,系统将搜索别的规则。

其中,语义距离实际上是描述两个模糊概念之间的差异;贴近度是指两个概念的接近程度,可直接用来作为匹配度。

(4) 解模糊器

解模糊器(Defuzzifier)可定义为由 $V \subset R$ 上模糊集上模糊集 B' (模糊推理机的输出)向清晰点 $y^* \in V$ 的一种映射。从概念上讲,解模糊器的任务是确定一个最能代表模糊集 B' 的 V 上的点。这和一个随机变量的均值是很类似的。不过由于 B' 是以某种特殊方式构造的,所以在确定这一代表点上有多种选择。以下三种常用的解模糊化方法。一般常用的解模糊器是重心解模糊器(Center of gravity Defuzzifier)、中心平均解模糊器(Center Average Defuzzifier)、最大值解模糊器(Maximum Defuzzifier)。

最大隶属度法将模糊推理得到的结论 B' (模糊集合)中最大隶属度值($\mu'_B = \mu'_{B_{\max}}$)所对应的元素 b 作为输出的精确值;如果有多个最大点,则取其平均值。这种方法的优点是简单方便,缺点是丢失的信息较多,在很大程度上忽略了 μ_B 的形状所包含的信息,因此,会引起一定的不精确性。

加权平均法也称面积中心法,其控制量的精确值 μ_w 如下所示。

$$\mu_w = \frac{\int \mu_B(u) du}{\int du}$$

式中, $\mu_B(u)$ 是模糊推理得到的输出量的隶属函数。

对于离散论域，有

$$\mu_w = \frac{\sum_{j=1}^k \mu_{B'}(\mu_j) \mu_j}{\sum_{j=1}^k \mu_j}$$

式中， $\mu_{B'}(\mu_j)$ 表示输出量模糊集合 B' 中第 j 个元素 μ_j 所对应的隶属度，反映该元素在输出中所占权重。权重系数不局限于隶属度 $\mu_{B'}(\mu_j)$ ，需要根据实际情况进行妥善选取。加权平均法是应用最广泛的一种去模糊法。

面积等分法把输出的模糊集合所对应的隶属函数与横坐标之间围成的面积分成两部分，那么用该方法得出的精确值 μ_A 应满足使该两部分的面积相同。即有

$$\int_a^{\mu_A} \mu_{B'}(u) du = \int_{\mu_A}^b \mu_{B'}(u) du$$

如果是离散域，那么，隶属函数是各个元素所对应的隶属度为定点所连成的折线。

3.3 高炉炉顶压力预测模糊专家系统设计

3.3.1 高炉炉顶压力预测的知识获取和表示

设计系统采用的知识获取方式是非自动知识获取，其工作方式如图 3.6 所示。

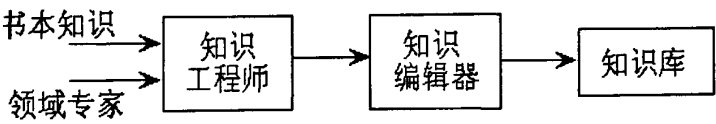


图 3.6 高炉炉顶压力预测专家系统的知识获取方式

Fig.3.6 The knowledge acquisition of expert system for BF top gas pressure prediction

其知识主要来源于高炉冶炼、TRT 系统、专家系统等方面的相关文献，以及同有关高炉专家和现场技术人员学习和探讨获得，获取有用的知识后，通过知识编辑器编辑成为计算机可以识别的知识表示形式，最后存入知识库。本系统采用 Microsoft Access 2000 数据库系统作为知识的存储和管理系统以发挥数据库录入简单、条目明晰的特点。

在高炉炉顶压力预报的过程中，各种对应判断规则是所使用的炉顶压力预测知识。产生式表示法是表示规则的有效方法，同时它又具有接近于人类的思维方式：知识表示直观、自然、便于推理；易于设计、控制和检测；知识的增、删、改方便等优点，因此在炉顶压力预报时采用基于产生式的知识表示法，这些知识来源于领域专家处理问题的知识和经验。既然领域专家的知识 and 经验是不确定的，因而，知识库的规则也就必然具有不

确定性。为了解决这个问题, 本论文采用了模糊化的知识表示形式。

3.3.2 高炉炉顶压力预测的影响参数的模糊化

对于模糊系统而言, 它只能处理模糊化的数据。根据影响高炉炉顶压力的主要因素和高炉专家的经验, 根据长期在高炉整理、统计实践经验, 选取以下变量作为推理的前置条件: 鼓风机出口流量、压力; 高炉进风口压力、温度; 高炉顶部压力、温度; 透平机管道交叉口压力、温度; 透平机进口处压力、温度; 透平机出口处压力、温度; 煤气管道进风口流量、压力与温度。推理的结果是: 高炉炉顶压力与透平机、旁通阀开度的对应关系。

根据对高炉操作专家对这 7 个变量的经验, 确定了相对应的模糊隶属函数。

在本中采用三角形模糊器。三角形模糊器将 $x^* \in U$ 映射成 U 上的模糊集 A' , 它具有如下三角形隶属度函数:

$$\mu_{A'}(x) = \begin{cases} \left(1 - \frac{|x_1 - x_1^*|}{b_1}\right) * \dots * \left(1 - \frac{|x_n - x_n^*|}{b_n}\right); & |x_i - x_i^*| \leq b_i (i=1, 2, \dots, n) \\ 0; & \text{其他} \end{cases}$$

其中, 参数 $b_i (i=1, 2, \dots, n)$ 是正数, t -范数。 $*$ 通常选用代数积算子或最小(min)算子。 x 为向量, p 是 x 的维数。模糊集合 A_x 可按如下表示。

$$\mu_{A_x}(x) = \mu_{A_{x1}}(x_1) * \dots * \mu_{A_{xp}}(x_p)$$

鼓风机出口流量、压力模糊隶属函数, 横轴为流量, 模糊的等级分为 7 个等级(极低、很低、较低、正常、较高、很高、极高)。

高炉顶部压力、温度隶属函数隶属函数, 横轴为温度, 模糊的等级分为 7 个等级(减少极大、减少很大、减少较大、变化不大、增加较大、增加很大、增加极大)。

透平机进口处及管道交叉口压力、温度隶属函数, 横轴为温度, 模糊的等级分为 5 个等级(减少很大、减少较大、变化不大、增加较大、增加很大)。

透平机出口处压力、温度隶属函数, 横轴温度, 模糊的等级分为 7 个等级(没有、极少、很少、较少、较多、很多、极多)。

透平机压力、温度隶属函数, 横轴温度, 模糊的等级分为 5 个等级(减少很大、减少较大、变化不大、增加较大、增加很大)。

透平机静叶片开度 δ_f 与广义阻尼系数 ζ_f , 横轴为 ζ_f , 模糊的等级分为 5 个等级(减

少很大、减少较大、变化不大、增加较大、增加很大)。

旁通管道调节阀开度 δ_v 与阀门阻尼系数 ζ_v ，横轴为 ζ_v ，模糊的等级分为 7 个等级(减少极大、减少很大、减少较大、变化不大、增加较大、增加很大、增加极大)。

3.3.3 高炉炉顶压力预报专家系统的模糊化规则库

经过进一步的分析，对上述影响因素可以做进一步的简化，最终只采用 P_{F2} ， $P(Q)$ ， T ， δ_T ， ζ_T 和 δ_v 6 个参数作为模糊系统设计的基础。

本论文讨论的炉温预报专家系统采用模糊产生式法来表示规则，规则的前提是影响炉顶压力的各个因素，结论是高炉炉顶压力与静叶、旁通阀开度的变化趋势。将采集到的数据进行预处理得到的参数经过上述隶属函数的处理后的响应的模糊规则进行匹配，从而得到预报结果。

根据专家的经验制定了符合生产实际推理习惯的规则，制定了 200 多条推理规则。由于篇幅关系，这里列出几条典型的规则。例如：

当温度极低，且风机流量增加较多，则炉顶压力降低很大；

当炉温很低，且风机流量增加很多，则炉顶压力降低较大；

当炉顶压力正常，且阀门阻尼系数很大，则调节阀开度较大；

当炉顶压力很高，且调节阀开度较大，则炉顶压力变化不大；

当炉顶压力很高，且调节阀开度不大，则炉顶压力升高很大；

当风机流量增加很多，且阀门阻尼系数增加很多，则炉顶压力变化不大；

当炉顶压力极低，且透平机静叶片开度变化不大，则炉顶压力降低很大；

当炉顶压力正常，且透平机静叶片开度变化极多，则炉温降低较大。

在多维模糊控制器中的多输入单输出模糊控制器中，模糊规则的一般形式为：

$$R_1: \text{if } X_1 \text{ is } A_{11} \text{ and } \cdots \text{and } X_m \text{ is } A_{m1}, \text{ then } Y \text{ is } B_1$$

$$R_2: \text{if } X_1 \text{ is } A_{12} \text{ and } \cdots \text{and } X_m \text{ is } A_{m2}, \text{ then } Y \text{ is } B_2$$

⋮

$$R_n: \text{if } X_1 \text{ is } A_{1n} \text{ and } \cdots \text{and } X_m \text{ is } A_{mn}, \text{ then } Y \text{ is } B_n$$

其中， A_{11} ， A_{12} ， $\cdots$ ， A_{1n} ， $\cdots$ ， A_{m1} ， A_{m2} ， $\cdots$ ， A_{mn} 和 B_1 ， B_2 ， $\cdots$ ， B_n 均为输入输出论域上的模糊子集。

对于上述多重模糊推理语句，其总的模糊控制规则为：

$$R = \bigcup_{i=1}^n R_i = \bigcup_{i=1}^n [(A_{i1} \times \cdots \times A_{im_i}) \rightarrow B] = \bigcup_{i=1}^n (A_{i1} \times \cdots \times A_{im_i}) \times B_i$$

又已知前提 X_1 is A_1^* and $\cdots$ and X_m is A_m^*

$$\begin{aligned} B^* &= (A_1^* \times A_2^* \times \cdots \times A_m^*) \circ R = (A_1^* \times A_2^* \times \cdots \times A_m^*) \circ \bigcup_{i=1}^n R_i \\ &= \bigcup_{i=1}^n [(A_1^* \times A_2^* \times \cdots \times A_m^*) \circ R] = \bigcup_{i=1}^n \{(A_1^* \times A_2^* \times \cdots \times A_m^*) \circ [(A_{i1}^* \times A_{i2}^* \times \cdots \times A_{im_i}^*) \rightarrow B]\} \\ &= \bigcup_{i=1}^n \{[A_1^* \circ (A_{i1} \rightarrow B_i)] \cap [A_2^* \circ (A_{i2} \rightarrow B_i)] \cap \cdots \cap [A_m^* \circ (A_{im_i} \rightarrow B_i)]\} \\ &= \bigcup_{i=1}^n \bigcap_{j=1}^m [A_j^* \circ (A_{ji} \rightarrow B_i)] \end{aligned}$$

3.3.4 高炉炉顶压力预测专家系统的模糊推理机

模糊推理机主要是利用模糊逻辑原理把模糊规则库中的 IF-THEN 规则组合成从 U 模糊集 A' 到 V 上的模糊集 B' 上的映射。在高炉炉顶压力模糊推理中, 使用了乘积推理机(Product Inference Engine), 其用到了以下推理: 使用模糊并组合的独立推理; Mamdani 积含义; 所有的 t -范数算子都选用代数积算子, 所有的 s -范数算子都选用最大算子。

其中独立推理的运算过程如下:

(1) 对于规则库中 M 条模糊规则, 确定其隶属度函数:

$$\mu_{A_1^l \times \cdots \times A_n^l}(x_1, \cdots, x_n) = \mu_{A_1^l}(x_1) * \cdots * \mu_{A_n^l}(x_n)$$

(2) 把 $A_1^l \times \cdots \times A_n^l$ 看作 $FP1$, 把 B' 看作 $FP2$, 含义 $\rightarrow$ 取 Mamdani 含义, 然后确定

$$\mu_{R_l}(x_1, \cdots, x_n, y) = \mu_{A_1^l \times \cdots \times A_n^l \rightarrow B^l}(x_1, \cdots, x_n, y), \quad l = 1, 2, \cdots, M$$

(3) 对于 U 上给定的输入模糊集合 A' , 确定每条规则 R_l 的输出模糊集 B_l , 即:

$$\mu_{B_l} = \sup_t [\mu_{A'}(x), \mu_{R_l}(x, y)]$$

(4) 模糊推理机的输出是 M 个模糊集 $\{B_1^l, \cdots, B_M^l\}$ 的并组合或交组合。并和交运算分别取 s -范数算子和 t -范数算子。

乘积推理机用公式表示为:

$$\mu_{B'}(y) = \max_{i=1}^M \left[\sup \mu_{A'}(x) \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i) \mu_{B_i^l}(y) \right].$$

3.3.5 高炉炉顶压力预测专家系统的解模糊器

通过模糊推理得到的结果是一个模糊集合或者隶属函数，但在实际使用中，特别是在模糊逻辑控制中，必须用一个确定的值才能去控制伺服机构。在推理得到的模糊集合中取一个相对最能代表这个模糊集合的单值的过程就称作模糊判决(defuzzification)或解模糊。在本论文中采用重心解模糊器。

所谓重心解模糊就是取模糊隶属函数曲线与横坐标轴围成面积的重心作为代表点。理论上应该计算输出范围内一系列连续点的重心，即：

$$y^* = \frac{\int y \mu_B(y) dy}{\int \mu_B(y) dy}$$

式中： $\int$ 是常规积分，图 3.7 表明了这一计算过程。

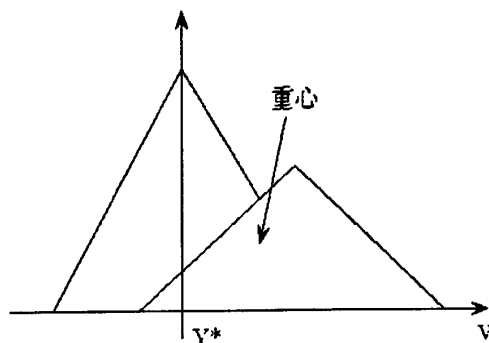


图 3.7 重心解模糊器示意图

Fig. 3.7 the fuzzy-focus

如果将 $\mu_B(y)$ 看作一个随机变量的概率密度函数，则重心解模糊器给出的就是这个随机变量的均值。有时应消去那些在 B' 中的隶属度值太小的 $y \in V$ ，这使得重心解模糊器变为

$$y^* = \frac{\int y \mu_B(y) dy}{\int \mu_B(y) dy}$$

其中， V_α ， α 为常数，定义为：

$$V_\alpha = \{y \in V | \mu_B(y) \geq \alpha\}$$

重心解模糊器的优点在于其直观合理，言之有据。缺点在于其计算要求高。

对于不规则变化形状函数的积分找到统一的算法实现比较困难，通过引入中间节点的方法，解决了隶属函数为梯形函数和三角形函数积分的求解方法。

第四章 DCS 控制系统设计

设计了 TRT 系统的控制系统组成, 包括顺序逻辑控制系统、反馈控制系统及过程监视系统。并针对 ABB DCS 系统的特点, 进行了控制系统的硬件设计, 如过程控制站 CPU 配置、项目 I/O 模件的配置和硬件的参数配置等, 同时进行了控制系统的软件设计, 如监控软件的设计、程序控制的软件设计等。

4.1 ABB DCS 控制系统的先进性

Industrial Freelance2000 系统是 ABB 集团推出的具有世界领先水平的全能综合型开放控制系统, 融传统的 DCS 和 PLC 优点于一体, 并支持多种国际现场总线标准。它既具备 DCS 的复杂模拟回路调节能力、友好的人机界面(HMI)及方便的工程软件, 同时又具有与高档 PLC 指标相当的高速逻辑和顺序控制性能^[33]。在本次改造中仍保留了原系统的控制系统。

系统既可连接常规 I/O, 又可连接 Profibus、FF、CAN、Modbus 等各种现场总线设备。系统具备高度的灵活性和极好的扩展性, 无论是小型生产装置的控制, 还是超大规模的全厂一体化控制, 甚至对于跨厂的管理控制应用, IndustrialIT 都能应付自如。

系统分为两级: 操作管理级(操作站 OS、工程师站 ES 及网关 GS)和过程控制级(过程站 PS 及现场控制器 AC800F)。在操作管理级上不仅实现传统的控制系统监控操作功能(预定义及自由格式动态画面显示、趋势显示、弹出式报警及操作指导信息、报表打印、硬件诊断), 而且完成配方管理及数据交换管理功能。过程控制级实现包括复杂控制在内的各种回路调节(模糊专家系统)和高速逻辑控制、顺序控制以及批量间歇控制功能。

每个过程站 PS 支持 5 个机架单元, 可配置 44 个 I/O 模件 1408 个 I/O 点, PS 过程站的 CPU 模件、电源及系统网络接口均可冗余。AC800F 是现场总线控制器, 它为用户提供了使用现场总线技术的灵活性。AC800F 采集来自 4 条现场总线的过程数据和诊断信息, 并完成与 PS 相同的控制任务。AC800F 通过以因特网与整个系统(如操作站 OS、过程站 PS 或其它现场控制器 FC)通讯。系统控制站硬件均为全金属外壳封装。设备既可安装于机柜中, 也可安装于墙上。系统符合所有当前 EMC 标准并具 CE 标志。

系统采用两种普遍的工业总线。用于过程控制站 PS 内部通讯的是 DigiNet/CAN

(DIN/ISO11898 标准) 总线。PS/FS 与 OS/ES 之间的通讯是由 DigiNetS 网络(以太网/IEEE802.3 标准) 实现, 用户可以选择通讯传输介质(普通电缆或光纤) 和网络拓扑结构。

IndustrialIT 系统的操作站 OS、工程师站 ES 以及数据网关 GS 以 MS WindowsNT 为运行平台, 从而确保了系统的通用性、开放性和易用性, 并对将来的技术升级和维护带来很大方便。PC 机的具体配置可由用户按照需要自行选择(不低于系统基本要求)。系统组态语言基于 IEC1131 - 3 工业标准, 提供了功能块图(FBD)、梯形图(LAD)、指令表(IL)和顺序功能图(SFC)、结构化文本(ST)等图形化组态手段。系统还包含近 170 多个功能块的算法库和具有 200 多个图形符号的基本图库和内含大量 3D 图符的扩充图库。系统使用同一套组态工具软件完成过程级和操作级组态以及调试, 并使用同一个全局数据库。

IndustrialIT 系统规模具备很强的伸缩性, 每个系统可根据工艺或功能分为若干个自动化域, 每个域基本配置为 10 个操作站 OS、10 个过程控制站 PS 或现场控制器 FC。

IndustrialIT 系统特点总结如下:

- (1) 集成 DCS、PLC 及 FieldBus 功能
- (2) 全局数据库
- (3) AC800F 冗余
- (4) 支持 FDT/DTM 组态及 HART 协议, 支持 OperateIT
- (5) 通用性, 标准化, 灵活性, 开放性
- (6) 工程容易, 界面友好, 维护简单

4.2 TRT 控制系统的组成设计

所设计的 TRT 控制系统主要完成顺序逻辑控制、反馈控制和过程监视三大功能。

4.2.1 顺序逻辑控制系统

此系统是 TRT 机组安全可靠运行的保证和提高机组机电一体化装备水平的标志。它由以下各子系统组成:

- (1) 启动联锁控制

其主要作用是保证机组安全正常启动的选择操作与联锁控制。

首先观察模糊域相交的 6 种情况可以分为 3 类，如图 3.8 和 3.9 所示。

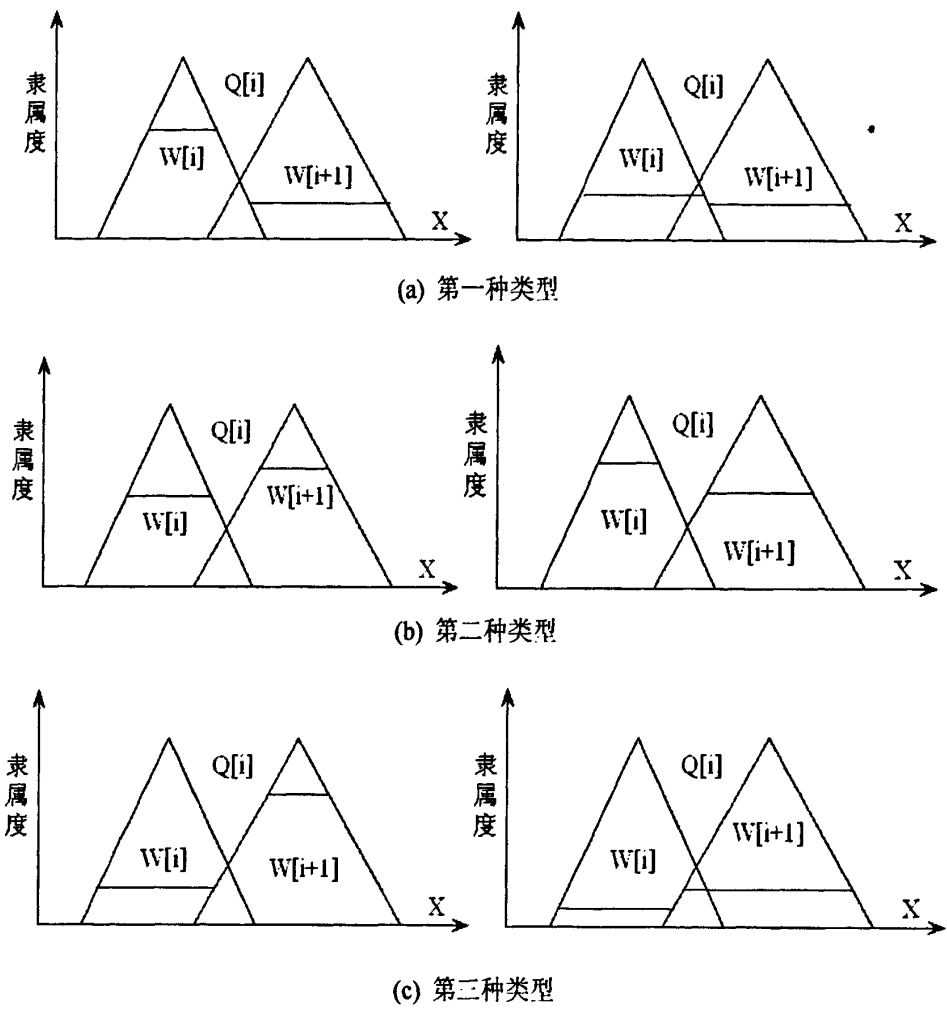


图 3.8 模糊域相交情况分类

Fig. 3.8 The classification of fuzzy domain intersection

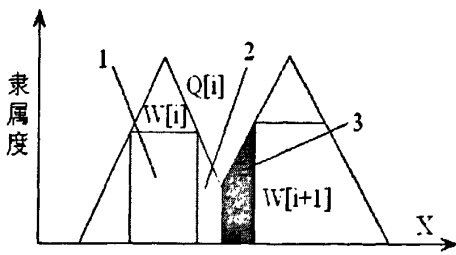


图 3.9 积分区域

Fig. 3.9 The integration Regional

在每个模糊域相交处引入 3 个节点值，具体情况如下：

(1)对于第一节点

第一、二种情况表示为 $x[3i] = \text{Fuzzy_R}(W[i], i+2, 1)$; 第三种情况表示为 $x[3i] = \text{Fuzzy_R}(W[i], i+2, 0)$

(2)对于第三节点

第一种情况表示为 $x[3i+2] = \text{Fuzzy_R}(W[i+1], i+1, 1)$; 第二、三种情况表示为 $x[3i+2] = \text{Fuzzy_R}(W[i+1], i+2, 0)$

(3)对于第二节点

第一种情况表示为 $x[3i+1] = x[3i+2]$; 第二种情况表示为 $x[3i+1] = \text{Fuzzy_R}(Q[i], i+1, 1)$; 第三种情况表示为 $x[3i+1] = x[3i]$

其中, 函数 $\text{Fuzzy_R}(\cdot, \cdot)$ 第一个参数是隶属度, 第二个参数是模糊域的序列号, 第三个参数是位于模糊域的左边或者右边。根据计算出来的一系列的节点值, 就可以很方便的进行积分运算:

第一个节点和上一组的第三个节点间是高度为 $W(i)$ 的面积积分;

第一个节点和第二个节点间是线性函数, 斜率为 $A1[i]$, 截距为 $B1[i]$ 的面积积分;

第二个节点和第三个节点间是线性函数, 斜率为 $A0[i]$, 截距为 $B0[i]$ 的面积积分;

从而得到去模糊化的值。

(2) 大型阀门开关指令系统

大型阀门是指电动蝶阀、进出口插板阀及快切阀，它们的开关指令均由该系统发出，并对其状态进行集中监视。

(3) 电气联锁控制

充分利用 Freelance2000 丰富的控制功能，完成油泵、加热器、电动球阀及小电机的集中监控与操作。

(4) 重故障自动紧急停机联锁控制

紧急停机是机组在运行中发生重大故障而迫不得已的情况下，为了保证机组的安全，防止事故进一步扩大而设计的保护措施。该系统除有自动功能外，在主仪表盘上及透平机旁同时设置有紧急停机按钮。

4.2.2 反馈控制系统

该系统是 TRT 机组启动、停机及正常运行的关键，主要完成透平机转速、发电机有功功率、高炉炉顶压力和氮气密封压差的闭环控制功能，由以下各子系统组成。

(1) 转速调节系统

转速关系到发电机与电网的同步和安全运行，也关系到其它辅机的启停问题。为可靠起见，安装了三只转速传感器检测出机组转速并送至 DCS，经 DCS 进行高值选择后作为转速调节器输入的测量值。在满足所有的启动条件下，TRT 才允许按照一定的顺序步骤启动机组。当转速调节选择为手动状态时，可以通过手动改变转速调节器的输出或设定值来实现升速或降速；当转速调节选择为自动状态时，转速调节器就会按照预先编制好的程序升速。

由于透平机组存在共振区，根据工艺要求，将转速控制分成四个阶段。

第一阶段是启动升转速段。首先由转速由 0 r.p.m 升至 1200r.p.m，通过模糊专家系统调节控制静叶开度来完成。

第二阶段为检查等待阶段，由操作人员检查无误后，按下确认软按钮进入第三阶段；

第三阶段为机组临界转速超越阶段，速度为 1200-2200 r.p.m，当冲过临界转速达到的 2200 转后，转速设定值为 2600 r.p.m 不再变化，稳定在这个值上一段时间。

第四阶段为定转速调节并网阶段。当机组超越临界转速后，逐步升速到 3000 r.p.m 左右；并将转速尽可能稳定在 2990-3010 r.p.m 范围内一段时间。当转速升到 2850 r.p.m

时发出“自动准同期投入”信号，以便机组并网发电。当接到来自电气的“发电机并网”信号后，向高炉中控室发出“TRT 并网运行”信号。

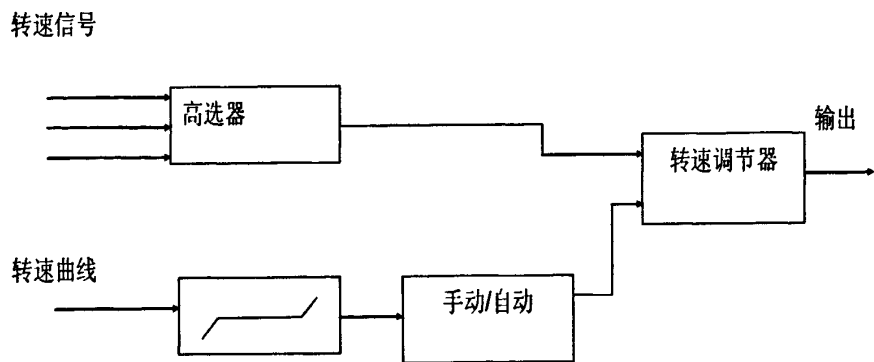


图 4.1 转速控制示意图
Fig. 4.1 Speed control diagram

(2) 功率调节系统

功率调节器的测量值来自安装在电气柜内的有功功率变送器。并网成功后，TRT 进入升功率过程，此过程中 TRT 和高炉的减压阀组共同控制高炉炉顶压力，DCS 系统负责调节静叶开度，不仅要保证高炉炉顶压力，还要保证升功率过程顺利进行。来自高炉的炉顶压力测量值、设定值与升速参数共同用于 TRT 控制系统对静叶的控制，随着静叶开度的增大，使得煤气负荷逐渐转移到 TRT，高炉的减压阀组同时也逐渐关小，以完成升功率过程。在升功率过程中，如果高炉炉顶压力出现波动，DCS 通过调节静叶开度，调节升功率的速度，来保证高炉炉顶压力及时恢复正常。

功率调节器具有全自动、半自动、手动三种控制功能。其中在全自动方式时，由功率调节器实现全自动升功率控制或全自动降功率控制。

(3) 高炉炉顶压力调节系统

并网后，本系统不改动原有炉顶减压阀组控制回路，只在原减压阀组系统上并联一个调节回路来控制 TRT 系统的可调静叶，在不改变高炉操作的情况下，利用可调静叶实现自动控制高炉炉顶压力。在升功率阶段，减压阀组和可调静叶同时参与炉顶压力调节。送入 TRT 炉顶压力调节回路的炉顶压力测量值与高炉原有炉顶减压阀组控制回路的测量值是同一信号。同时，将高炉原有炉顶压力减压阀组控制回路的设定值加上负偏差(-2KPa)后，作为 TRT 炉顶压力调节回路的设定值。从而实现高炉炉力压力控制逐渐由减压阀组转向可调静叶，减压阀组在炉顶压力控制回路 PID 作用下逐渐关闭。同时，

实现 TRT 炉顶压力调节回路能自动跟踪高炉的设定值,高炉炉顶压力的设定权仍在高炉。

当机组发生重故障时,为了保护整个机组免遭进一步损坏,透平入口前紧急快速切断阀在 1s 内完全关闭,切断通向透平的煤气,迫使机组紧急停机。由于减压阀组是电动阀,它的调节作用和机械特性都比较慢,煤气流量的突变会造成炉顶压力的急速上升,如果得不到有效的控制,将会造成炉顶压力大的波动,甚至会危及高炉安全。因此,在紧急切断阀与透平出口之间并联 2 个旁通快开阀,其中 1 个为备用。并设计控制器在此严重干扰未产生影响之前,前馈控制旁通阀开度,使原来从透平流过的煤气改由旁通快开阀流过,从而避免高炉炉顶压力出现大的波动。当旁通阀控制高炉炉顶压力逐渐稳定后,将高炉炉顶压力设定值加上一正偏差 (+2KPa)送入旁通快开阀的控制回路,作为炉顶压力设定值,测量值仍取自高炉炉顶压力实际值,在 PID 控制作用下实现炉顶压力控制权由 TRT 转向减压阀组,旁通阀逐渐关闭。

(4) 氮气密封压差调节系统

由于高炉煤气为有毒介质,为了防止透平轴端及静叶轴端泄漏煤气,机械上设置了氮气密封装置,只有在外部氮气的压力高于被封的煤气的压力时,才不会发生泄漏。因此控制系统专门设计了氮气密封差压调节系统,分别供给快切阀轴端密封和透平轴端密封使用。其测量值为这两种介质压力之差值,经过模糊专家系统控制运算,控制氮气流量调节阀,保证此压差值在允许的范围内。

4.2.3 过程监视

DCS 对机组运行所需监视的全部参数均进行了数据采集,并设置了丰富的显示监视画面,能与 TRT 机组所有的工艺参数,操作指令信息进行监视和操作,主要设有:TRT 总貌、轴系监测、润滑油系统、动力油系统、氮气系统、给排水系统、转速控制、静叶控制、炉顶压力控制、启动画面、停机画面、报表画面、报警画面、趋势画面、报警记录画面。系统配置了两台打印机,用于信息打印、画面拷贝和报表打印等。

4.3 控制系统的硬件设计

根据 TRT 系统的特点及选定的 DCS 模件,利用 Freelance2000DCS 的组态软件 DigiTool 配置本控制系统的硬件结构图,如图 4.2 所示:

4.3.1 过程控制站 CPU 配置

为保证 TRT 生产系统的安全、连续、稳定生产，全系统控制站处理器和电源均采用冗余配置。两个 CPU 模块可以通过冗余电缆连接为一体组成冗余过程站。CPU 模块采集各种类型输入模件信号，通过执行程序对这些信号进行处理，最终将处理后信号送到输出模件。

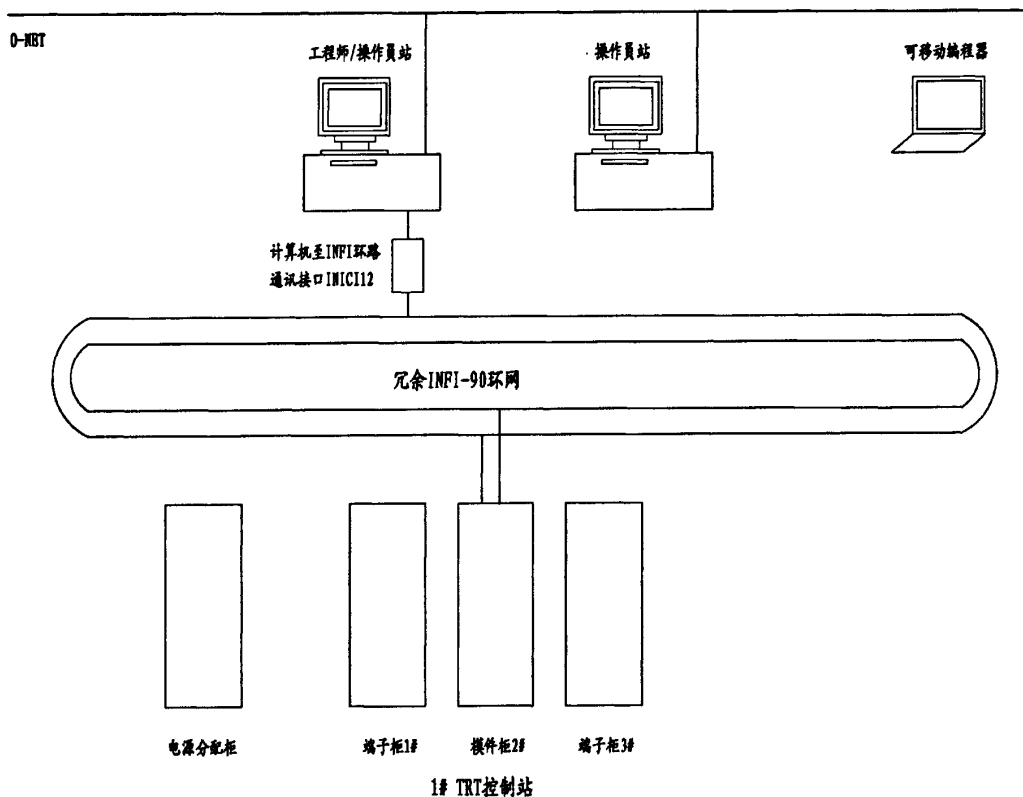


图 4.2 顺序逻辑控制系统

Fig. 4.2 Order logic control system

CPU 处理的数据可以存储在模件中或通过 DigiNets(因特网)系统总线传输到其它过程站中使用，同时可以在操作员站上作为控制与过程监控信号，报警信号，记录与趋势信号。数据同时通过冗余 DigiNets 总线传输到冗余 CPU 模件，冗余 CPU 模件处于热备，若主 CPU 有故障可以直接接管过程处理。

现场总线控制器配置的冗余 ProfibusDP 模件实现与远程 I/O 之间的通讯。过程站采用粗缆或环形光纤因特网与操作员站及其它设备进行通信。系统数据库为全局，所有变量及标签均可以系统范围共享。模件具备实时检测及远程诊断功能。

4.3.2 项目 I/O 模件的配置

TRT 系统涉及 I/O 点配置, 项目 I/O 点的数量如表 4.1 所示:

表 4.1 项目 I/O 点统计表
Table 4.1 Item I/O points tables

类型	数量
数字量输入	234
数字量输出模块	90
4-20 模拟量输入	88
温度模拟量输入	28
模拟量输出	14

根据以上输入输出的类型机各自的数量, 对各输入输出模件进行选型, 如表 4.2 所示:

表 4.2 DCS 模块选型
Table 4.2 DCS module Selection

名称	型号	数量
CPU 模块	MFP12	5
数字量输入模块	IMDSI12-15	8
数字量输出模块	DSO14	2
模拟量输入模块	IMFEC12	5
模拟量输出模块	IMSO11	11
系统配电模块	IEPAS02	3
外部通讯模块	IMMFP12	1

①模拟量输入信号: 高炉炉顶压力; 管道内煤气的温度信号、压力信号、流量信号等;透平机静叶的开度、旁通阀的开度信号等;采集到些信号经过程站处理后在操作站上显示, 可对当前生产过程进行具体监控;

②模拟量输出信号: 对静叶开度或者旁通阀的开度控制信号; 对通过煤气管道、透平机、旁通阀的煤气流量的控制, 实现对高炉炉顶压力的控制;

③开关量输入信号：透平转速、透平轴振动的报警信号；润滑油压力、动力油压力等的报警信号；阀门的是否全开或全关的状态信号等等，采集到这些信号在过程站联锁控制或在操作站流程图上显示各设备的运行情况；

④开关量输出信号：传送到高炉控制室的 TRT 状态信号；动力油泵、润滑油泵、盘车电机等的启停控制；众多电液阀的开关控制，可在操作站上对相应设备进行集中控制；

⑤温度输入信号：TRT 轴温度、管道内煤气温度等。

4.3.3 工程师站和操作员站的配置

TRT 系统设置 2 台操作员站，其中 1 台操作员站兼工程师站。操作员站冗余使用，任何一台出现故障时，其功能都可以在其它操作站上实现。

本系统工程师站 ES 安装 DigiTbool 6.1 编程软件，运行在 WindowsNT4.0 系统上，工程师站在不组态时可作为操作员站使用。工程师站使用因特网与过程站及其它设备进行通信，可以实现硬件编辑、现场过程站编程、现场总线智能仪表组态、操作员站组态一体化编程及调试等。

编程结构采用项目树结构，系统任务采用多任务周期运行方式，根据不同控制对象对每个任务执行周期及优先级进行组态。编程语言与图形化编程语言标准 IEC1131-3 完全兼容，工程技术人员根据实际控制要求可任意选用 FBD、LD、IL、SFC 等方式。系统具备大量标准功能块及功能子程序，如调节块具备标准、比率、步进、2 位、3 位等功能块供用户根据实际情况选用，功能块编程采用参数表形式，同时系统也提供用户自定义接口根据用户要求开发专用功能块。

系统采用全局数据库，系统内的变量实现共享，该全局数据库完全下装到过程级，不采用服务器/客户方案，避免服务器故障造成数据交换任务瘫痪，全局数据库中任何变量更新仅输入一次即可，变量的检查也是全系统范围内进行；DigiTool6.1 软件可以离线编程，在线修改参数，被修改的参数具备自动备份功能可以恢复；该软件还可以在线调试，可以单步运行、跟踪、仿真调试。

操作员站(OS)硬件选用适用工业现场的 DELLPC 机。安装 DigiVis6.1 软件，操作界面及菜单为中文，操作为“所见即所得”方式，软件运行在 WindowsNT4.0 Wbrkstation 操作系统上。操作员站使用因特网与过程站及其它设备进行通信，由于系统数据库为全局，所以操作员站之间数据及画面完全可以共享。

操作员站支持一系列标准预定义显示:如总貌显示、回路及各过程位号面板显示(面板也可以根据用户特殊要求实现自定义)、控制组显示、趋势显示、报警显示、过程信号记录与操作记录列表(实现各种操作的实时记录和实时打印)显示等,用户自定义流程图显示,既支持传统 DCS 流程图,又支持三维立体图形画面,软件具有强大的三维图形库可以调用,该库可以由用户自行扩充,同时画面支持位图功能,使作图更加简单,画面更加直观。位号动态显示不仅支持传统数字表示,而且支持各种动画表示,同时还可弹出对应面板操作。图形数量无软件限制,画面更新时间为 1 秒,可以由编程软件定义;此系统还可实时诊断显示:系统总体、系统过程站和系统模件三大部分,诊断状态信息在诊断画面上以图形方式显示及文字详细提示;DigVis 软件趋势显示功能支持趋势组态,趋势点数量无软件限制,画面可以进行灵活操作,同时支持 FTP 协议数据远传功能;DigVis 还可以实时操作记录及打印。

4.3.4 控制系统硬件的参数配置

1	工程师站					
1.1	工程师工作站软件		S CB SET 5- S CB SET 6	1	套	
	及计算机					
1.2	工程师站系统电源		TEPA502	1	个	
1.3	工程师站至 IWP1 环路		INIC112	1	套	
	通讯接口备件					
1.4	专用操作台		CHX01	1	套	
2	操作员站					
2.1	操作员接口站软件 PCP		S IB TRN X	1	套	
	(S2RVER) 及计算机					
2.2	操作员接口站软件 PCP		I IB TRN X-	1	套	
	(S2RVER) 及计算机					
2.3	操作员站系统电源		TEPA502	1	个	
2.4	操作员站至 IWP1 环路		INIC112	1	套	
	通讯接口备件					
2.5	专用操作台		CHX01	1	套	
3	DCS 机柜					
3.1	操作柜		TECA303C	1	套	
3.2	端子柜		TECA302C	2	套	
3.3	电源分配柜		TECA360C/500	1	套	
4	DCS 通讯接口					
4.1	串行接口模块, 端子		TMCP12	1	套	
	及电缆 RS232					
4.2	移动或编辑器		当前主流配置	1	套	

图 4.5 控制系统参数配置
Fig. 4.5 control system configuration parameters

Freelance2000 的所有站由系统总线 DigiNetS 连接。DigiNetS 是基于因特网的 TCP/IP 通讯。资源和站是两个不同的概念。站是连接到系统总线上的, 具有确定 IP 地址的物

理单元。而资源是要下载到站的软件部分,在项目树中是一个资源节点,在网络中有唯一的资源 ID 号。一个站中可以下载若干个资源(如一台 PC 可安装 VIS 和 DDE)。

通用设置如 4.5 图所示,选择允许时间同步;输入 IP 地址:IP 地址及子网地址与 PC 机网卡设置一致。而 CBF 选择资源 ID: 21。DigiVis 选择资源 ID: 22,并选择 DigiVis 自动启动。

4.4 控制系统的软件设计

控制系统软件操作站的软件设计和程序控制软件设计。

4.4.1 操作站的设计

(1) 操作员站软件 DigiVis

本系统上位机管理采用 Microsoft 的 32 位操作系统 Windows NT4.0, 监控软件为 DigiVis6.1, 该软件为过程数据的可视化、报表、采集以及为用户自由定义的应用程序的协调集成提供了良好的系统环境。无论从功能性、开放性和现代化程度化上, 都具有很强的优越性。可以满足对监视和控制生产过程以及对生产数据进行归档处理的诸多要求。

DigiVis 具有的功能如下: 场信号监控及快速操作; 大量标准显示; 用户自定义显示支持位图方式; 操作方式兼容 MS-Windows 标准; 各种位号与标签的快速选择和操作; 自动和手动控制方式的选择; 系统范围的报警显示及管理; 详细信息显示与管理; 趋势及归档; 信号及用户操作记录; 打印报表; 系统诊断。

(2) 操作员站软件设计

集中操作和控制均通过操作站上的画面实现。画面主要分为 TRT 主画面、轴系监测、润滑油系统、动力油系统、氮气系统、给排水系统、转速控制、静叶控制、顶压控制、启动画面、停机画面、报表画面、报警画面、趋势画面、报警记录画面。下面以 TRT 总貌画面、趋势画面、报警画面和报表打印画面来说明。

TRT 主操作画面: 该画面显示了 TRT 系统的工艺流程, 各设备的状态及各点的温度、压力、流量等。如图 4.6 所示。

趋势画面包括: 保护趋势、综合趋势和电力趋势。这些画面不仅用于对同类及有关重要参数的分析与历史存储, 而且对相关的重要参数进行综合比较, 无论是在正常状态还是在故障状态, 它是分析各类参数变化的强有力的工具。如图 4.7 所示。

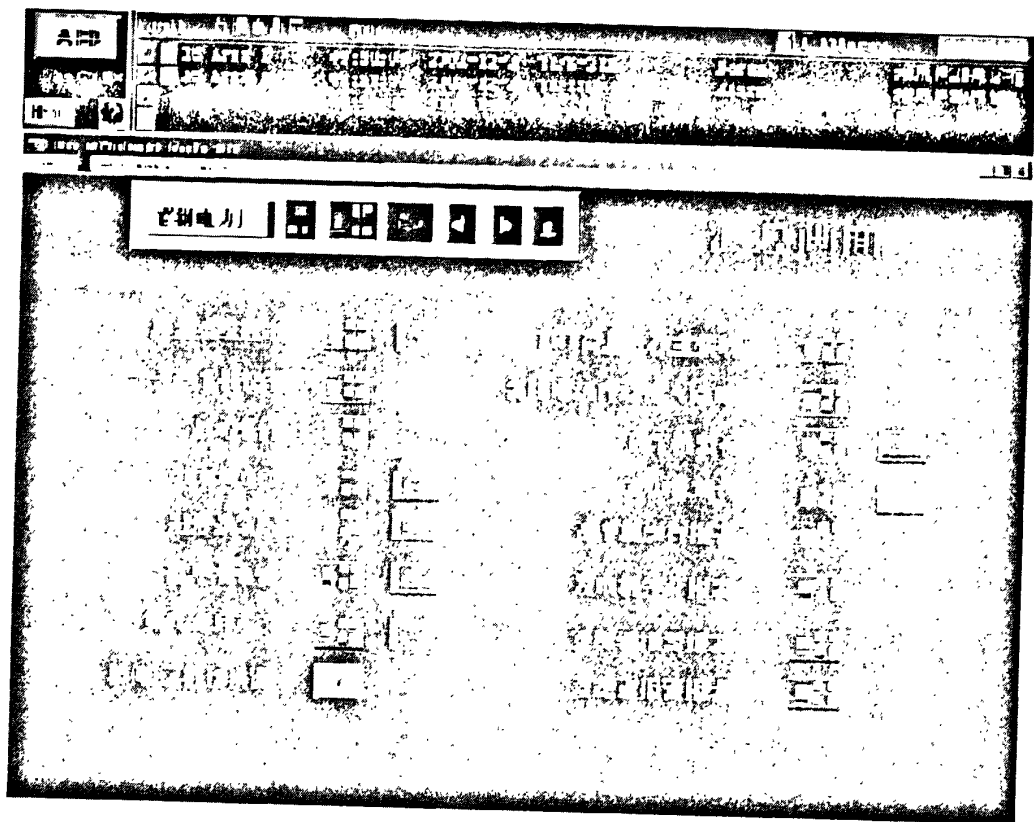


图 4.6 TRT 主操作画面
Fig. 4.6 TRT main screen operation

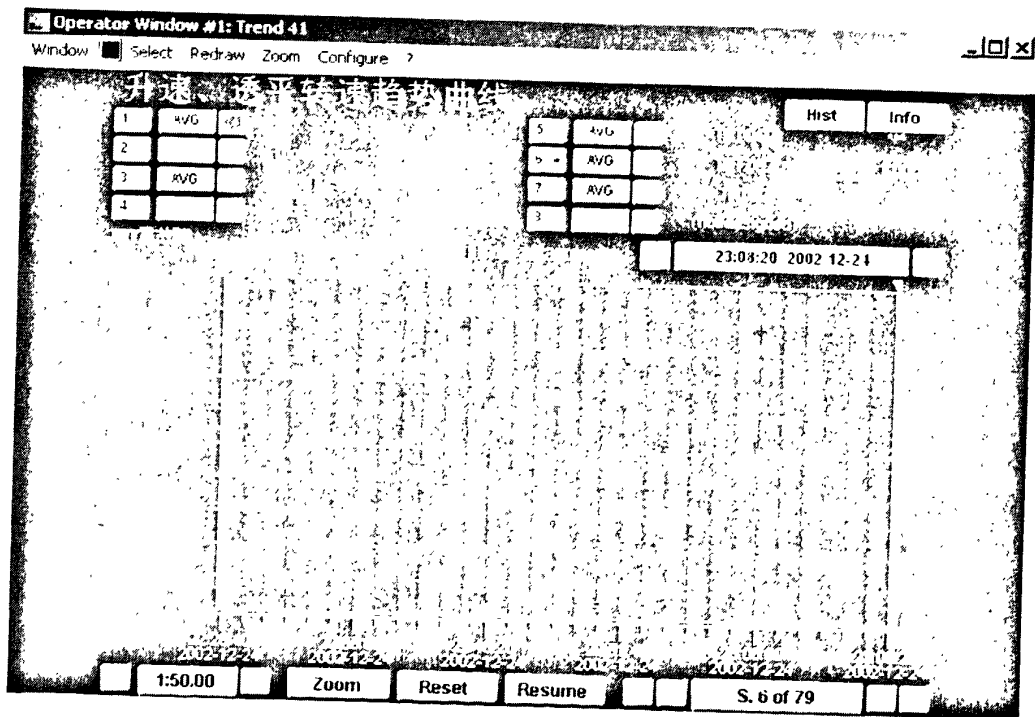


图 4.7 TRT 趋势画面
Fig. 4.7 TRT trend screen

报警画面:该画面以报警事件发生先后顺序从上往下显示,当报警事件消除后,可通过确认按钮使该报警从画面上消失。为防止操作工误动作,该画面对启机、正常运行、停机等过程的所有重要操作都进行实时记录,以便分析查找误动作原因。

报表打印画面:该画面以表格形式显示 TRT 生产过程或故障状态主要工艺参数值。另外,还对动力消耗量(即煤气流量、冷却水流量、氮气流量)、生产发电量等进行累计显示。

4.4.2 程序控制软件设计

(1) 工程师站组态软件 DigiTool

工程师站组态软件 DigiTool 具有以下功能:用于系统编程、参数设定、与调试;现场过程控制组态;操作级显示与信号记录组态;编程语言采用国际标准 IEC1131-3 图形化编程语言大量标准功能块与功能块库;具有用户自定义功能块,适应用户特殊控制要求;在线测试功能;系统范围全局数据库;系统范围程序图形文档;集成在线帮助。

(2) 顺序逻辑控制系统

①启动联锁控制

TRT 机组的启动必须满足特定的条件,并按照一定的步骤顺序进行,当条件不满足时,则“启动联锁”程序将实现入口电动蝶阀锁闭。启动联锁控制程序框图如图 4.8 所示。

以下参数和状态是 TRT 系统的启机条件(共有近 20 个),当以下条件满足时才能对辅助系统进行控制:高炉正常且同意 TRT 启动;

电力系统正常;

润滑油最远点压力值, $\geq 120\text{KPa}$;

动力油压力必须大于设定值 $\geq 8\text{MPa}$;

氮气总管压力必须要大于设定值, $\geq 200\text{KPa}$;透平机轴瓦密封用

冷却循环水总管压力必须要大于设定值 0.6MPa ;

出口插板阀、旁通快开阀、紧急切断阀、均压旁通阀、进口插板阀、启动阀等开关完毕。图 4.9 是 TRT 启动联锁控制程序。

②大型阀门开关指令系统

以快切阀来说明。如图 4.10 所示。

③电气联锁控制

电气联锁控制指成油泵、加热器、电动球阀及小电机的集中监控与操作。

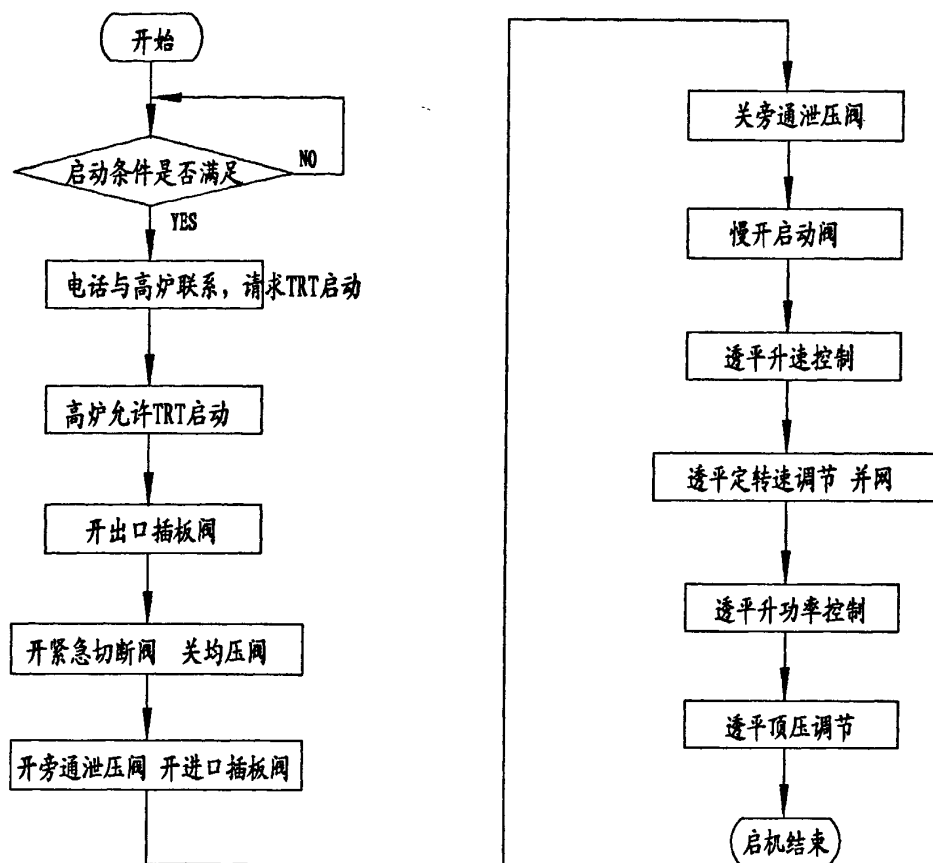


图 4.8 启动联锁控制程序框图

Fig. 4.8 start interlock control procedures diagram

④重故障自动紧急停机联锁控制

TRT 紧急停机条件共 31 个, 比如当下列的主要停机条件发生时, DCS 发出指令使 TRT 停机:

透平机轴振动大于 80μ 时报警, 160μ 时停机;

透平机主轴轴向位移大于任一点大于联锁设定值; (2 点) 工作面大于 0.3mm 报警, 0.5mm 停机;

透平机转速大于 3200 r/min ;

润滑油最远点压力低于 0.08MPa 时报警, 低于 0.06MPa 时停机;

透平机和发电机轴承温度高于 90°C 报警, 高于 100°C 停机;;

电气重故障; 包括: 差动保护、速断保护、励磁两点接地、零序电流保护、低周波保护、发电机失磁保护);

透平机危急保安器油压低于 3.5MPa ;

紧急停机按钮按下（手动紧急停机）；

高炉炉顶放散阀打开等

当 TRT 运行中出现以上的任一停机连锁条件时，发出信号使发电机与电网解列，同时使紧急切断阀、可调静叶关闭，旁通阀进入前馈调节状态。如图 4.10 为例。

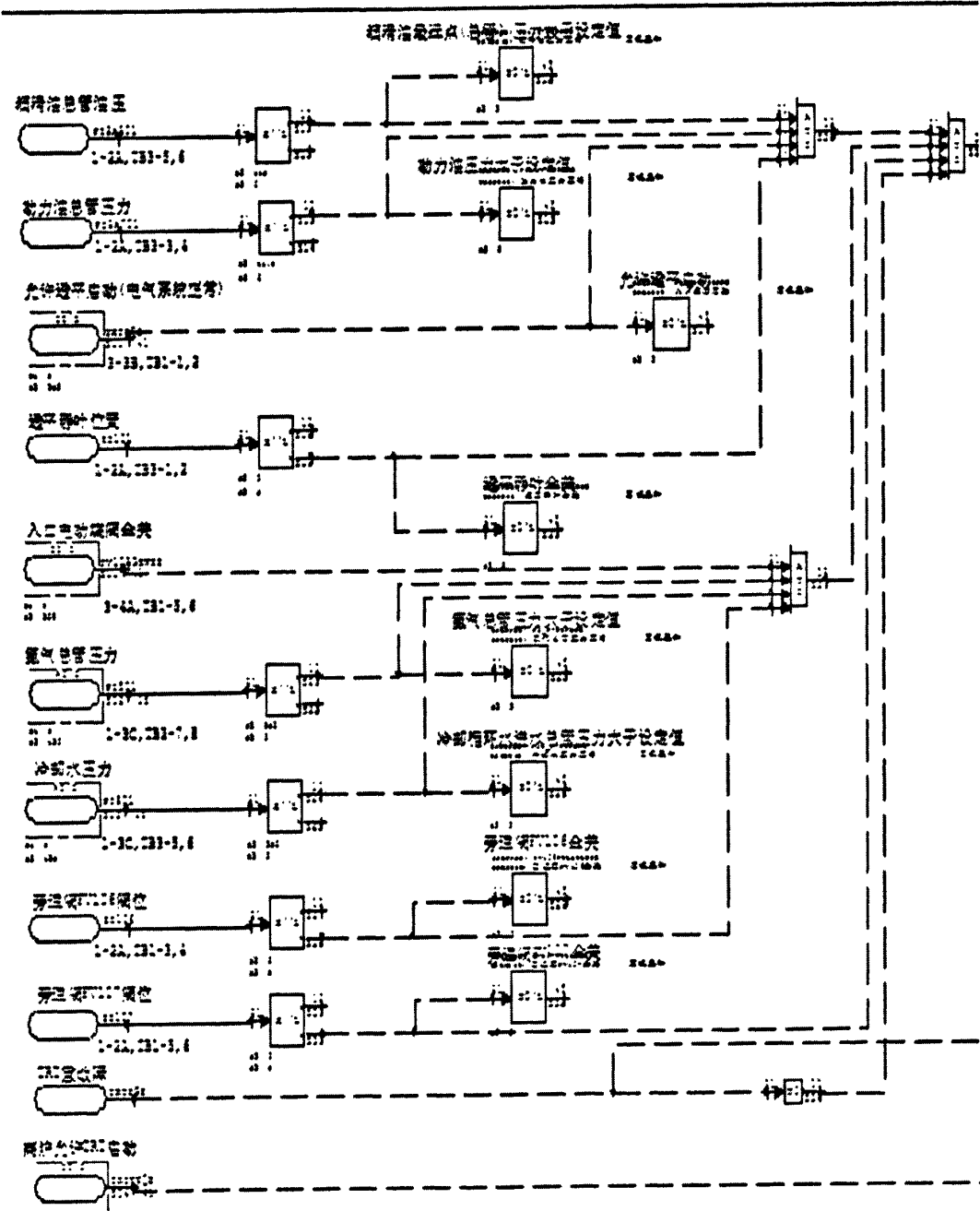


图 4.9 启动连锁控制程序

Fig. 4.9 start interlock control procedures

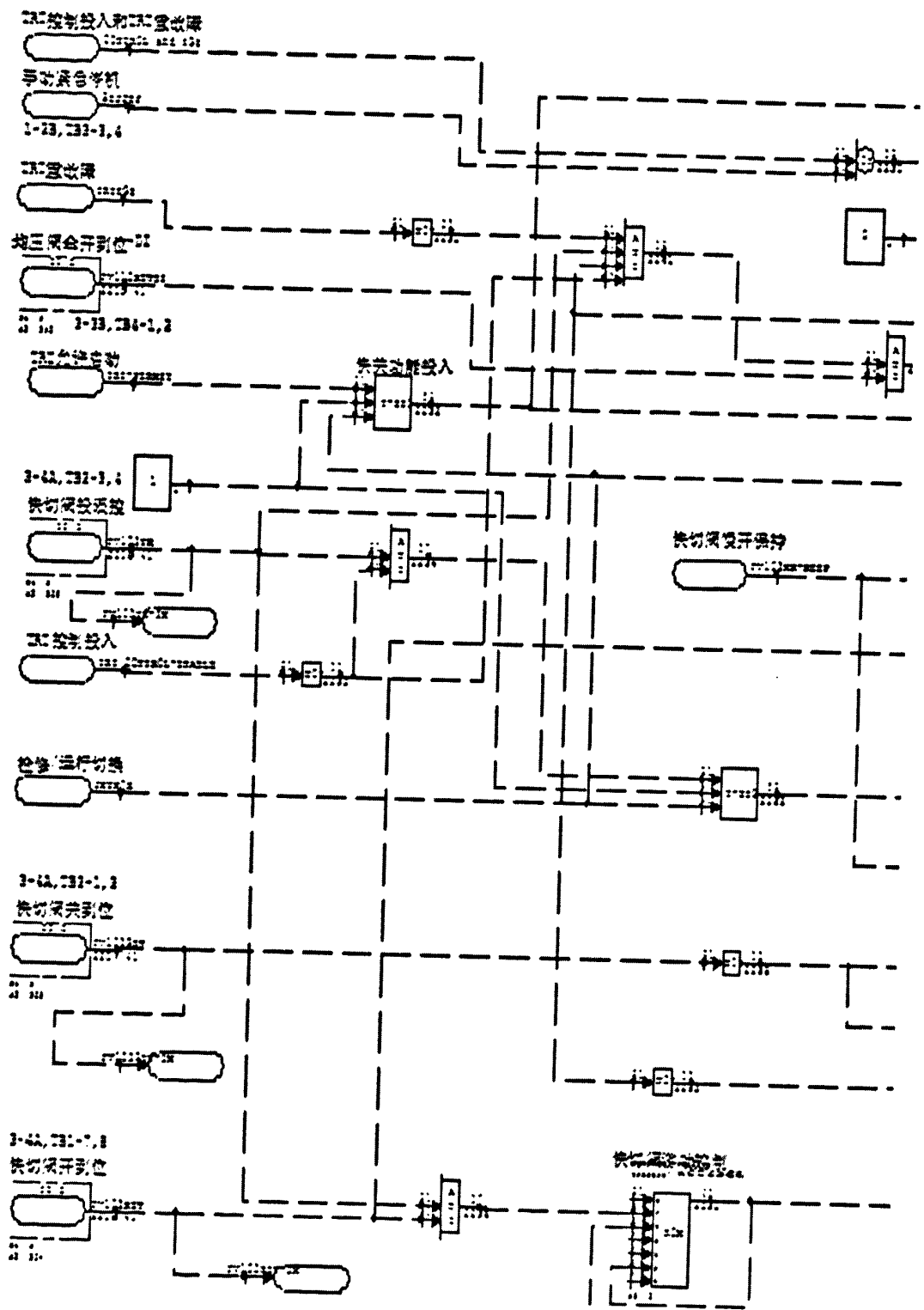


图 4.10 快切阀控制程序

Fig. 4.10 quickly cut valve control procedures

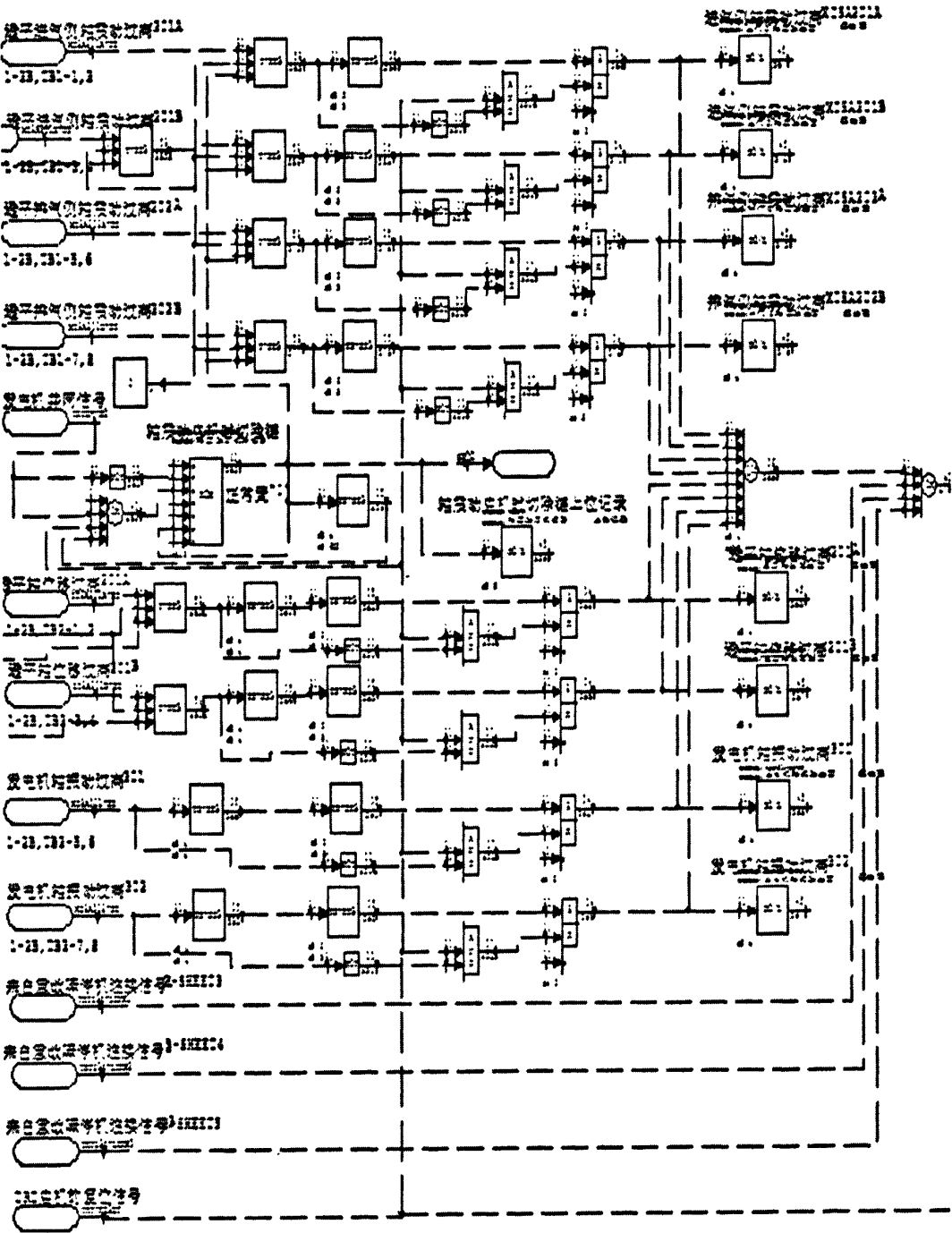


图 4.10 紧急停机条件发生控制程序

Fig. 4.10 emergency shutdown conditions of control procedures

(3) 反馈控制系统的设计

为对高炉顶压进行更好的控制，我们设计了在不同工况下的控制方案，从减压阀组、旁通阀与静叶切换、故障停机、启动等造成顶压波动情况分析，在不同情况设计了各自的自控系统，下面以静叶对顶压控制为例进行说明以静叶控制高炉顶压为例说明反馈控

制系统的设计。控制程序如图 4.11 所示。

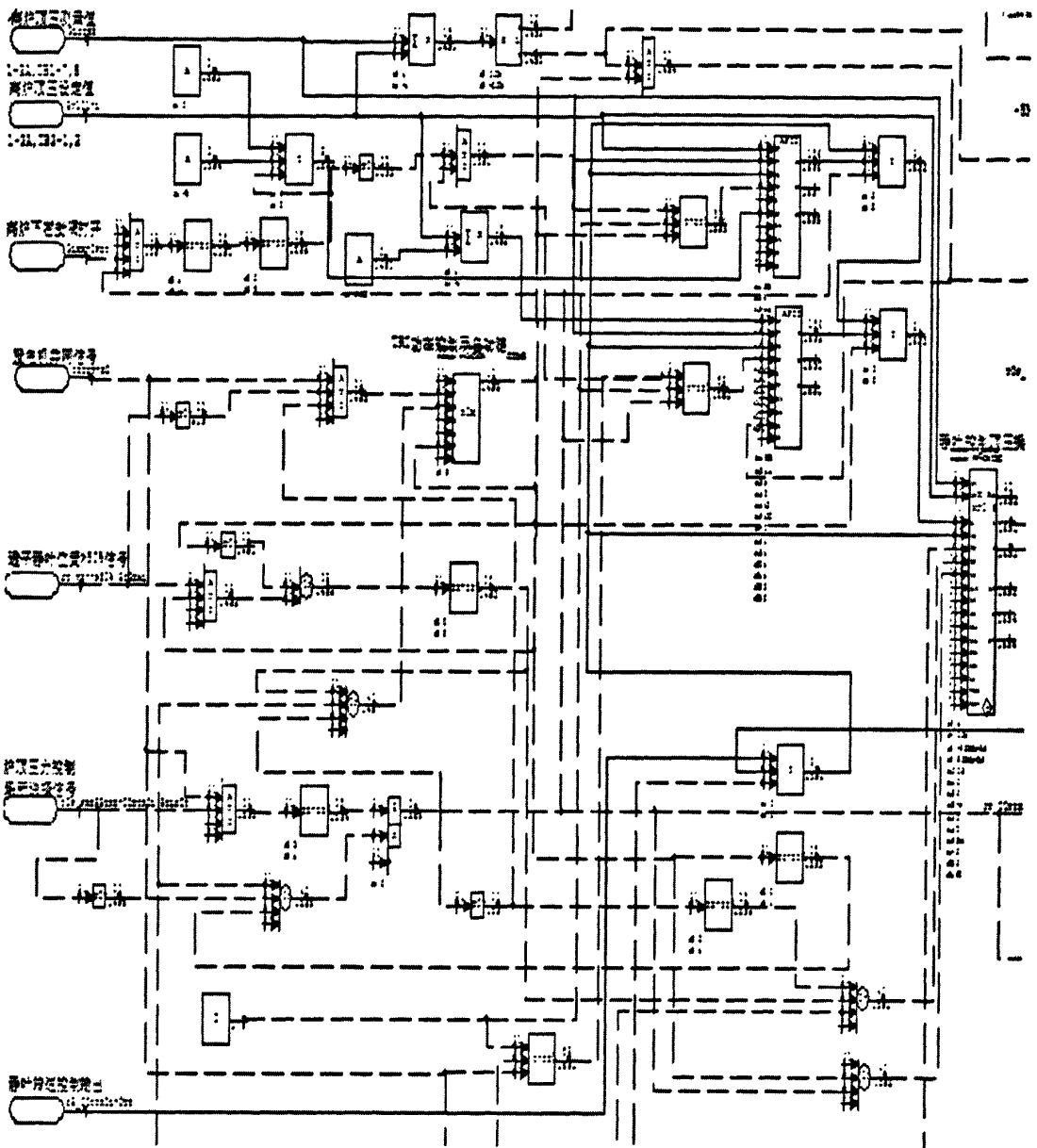


图 4.11 静叶控制系统程序

Fig. 4.11 nitrogen pressure conditioning system closure process

4.5 顶压稳定性控制的实现效果

首钢迁钢公司 2[#]TRT 炉顶稳定控制系统利用 2008 年 5 月份大修机会进行了改造，经过紧张的调试，从近一个月运行效果来看，达到了预想要求，起到了稳定炉顶压力，乃至稳定生产的要求。图 4.12 是静叶启动以及在生产过程中控制炉顶压力控制曲线。

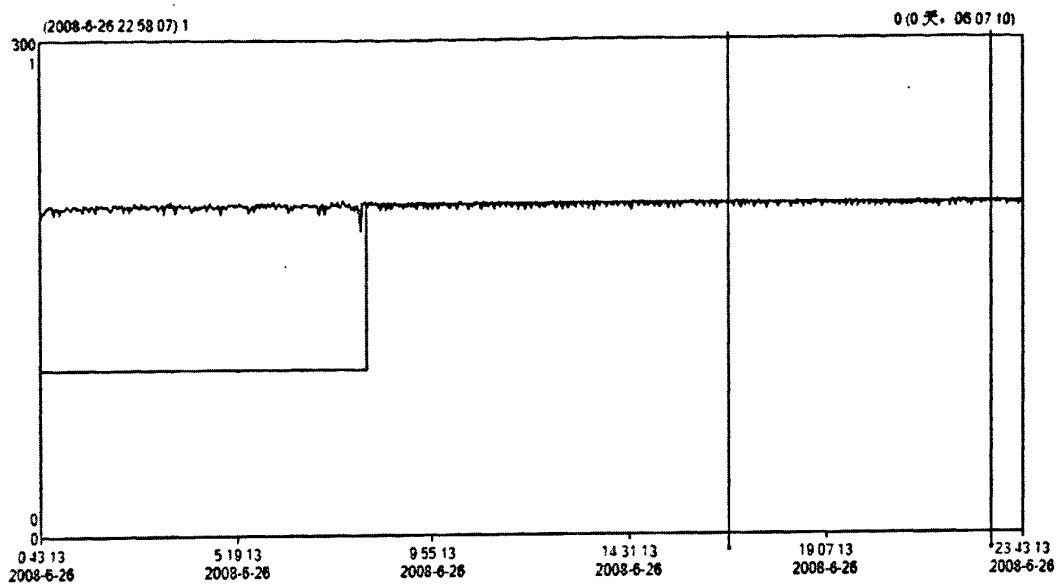


图 4.12 炉顶压力控制曲线
Fig. 4.12 pressure on the top of control

从运行曲线可以看出，改造后的控制系统，不但能满足生产的需求，特别是在高炉顶压控制上，能够将高炉顶压波动控制在 $\pm 5\text{KPa}$ 范围内，比原来系统精度提高了一大步，而且在从减压阀组到 TRT 控制系统转换过程中，切换时间控制在了 15s 以内，达到了预想效果，而且在国内同行业是领先水平。

第五章 总结与展望

5.1 总结

高炉炉顶煤气余压回收透平发电装置(TRT),是目前国际上公认的有价值的二次能源回收装置。利用 TRT 装置发电项目是 2008 年 5 月国家发改委下发的重点节能技术推广项目之一。TRT 机组推广和利用的瓶颈就是在确保高炉顶压的稳定的技术上。国内大多数控制系统在静叶调控高炉顶压方面存在一定差距^[34],往往滞后 5-10s 的时间,与一般不高于 5s 的要求有一定差距,而且对高炉顶压波动的控制往往高于 $\pm 5\text{KPa}$,减压阀组与 TRT 系统的切换时间也超过了 20 秒,最严重的是国外对软件系统出于商业机密的考虑,实行技术封锁,不利于现场的维护,基于以上考虑,首钢迁钢公司对 2#TRT 控制系统进行改造,本文就是在此基础上形成的。

本文在高炉炉顶稳定性控制上,对整个 TRT 系统从流体力学角度进行了分析,并提出了相应的解决方案。主要完成了如下的主要工作:

(1) 针对高炉炉顶压力控制的稳定性要求,对顶压稳定性因素进行分析,对 TRT 系统建立模型结构并辨识模型参数,得到了以静叶开度和旁通阀开度为控制量、高炉炉顶压力为被控制变量的高炉炉顶压力控制模型,通过管路系统平衡控制方程、管路系统动态瞬变分析,进行顶压稳定性的控制计算。

(2) 介绍了专家系统、专家系统的发展状况、专家系统的建造步骤、专家系统的优点和分类,在此基础上提出了模糊专家系统控制器设计,以改善控制效果,同时增强控制器的鲁棒性。根据影响高炉炉顶压力的参数,设计了高炉炉顶压力预测模糊专家系统。

(3) 设计了顺序逻辑控制系统和反馈控制系统,以及 ABB DCS 控制系统的先进性,并针对 ABBDCS 系统的特点,进行了控制系统的硬件设计,同时进行了控制系统的软件设计。应用此系统进行设备改造后,效果明显,进一步证明了采用模糊专家系统进行高炉炉顶压力稳定性控制的有效性。

5.2 展望

(1) 随着高炉冶炼精度和品质要求的提高,高炉顶压稳定性要求会越来越高,随之而来的是对 TRT 控制技术的要求必将会更高^[35],不断采用新技术更新控制系统,改造原有控制系统,是 TRT 控制技术推广和应用的首要任务。

(2) 模糊专家系统控制的前提是必须有经验丰富的“专家”提供的根据已知的状态得到应施加控制量的方法，但是，在有些场合下，无法找到这样的专家，对复杂多变的情况有时控制精度不够高。

(3) 在国际化竞争比较激烈的今天，立足自我，对原有系统进行技术改造，发展自我开发项目，对提高国有企业在国际竞争中的地位有很大帮助。

参考文献

1. 印建安, 章本照, 柳黎光. 高炉煤气余压发电系统顶压稳定性高精度控制技术[J], 陕西科技, 2007(01): 33-38.
2. 印建安. 高炉煤气余压发电装置中炉顶压力稳定性分析与控制试验研究[D], 杭州: 浙江大学, 2003.
3. 叶长青. 高炉煤气余压透平发电装置(TRT)的发展与创新[J], 节能, 2000(08): 21-30.
4. 张红庆, 刘甄, 赵家元. 武钢 2[#]高炉 TRT 自动控制系统[J], 冶金自动化, 2001(04): 23-27.
5. 孟芳群. 汽轮机循环水系统运行方式的优化研究[D], 吉林: 东北电力大学, 2005.
6. 林文斌. 汽轮机运行热经济性诊断方法研究[D], 吉林: 东北电力大学, 2006.
7. 赵金峰. 300MW 汽轮机滑压运行热经济性评价方法研究[D], 吉林: 东北电力大学, 2006 年.
8. De Henau V, Raithby G D, A transient two-fluid model for the simulation of slug flow in pipelines II Validation [J], International Journal of Multiphase Flow, 1996(22): 119-126.
9. Ke S L, Ti H C. Transient analysis of isothermal gas flow in pipeline network [J], Chemical Engineering Journal, 2000, 76(2): 169-177.
10. 鲁叶茂, 曹涛. 汽轮机调门最佳重叠度的确定方法 [J], 发电设备, 2005(06): 51-56.
11. 降爱琴. 汽轮机转速控制系统的分析 [J], 科学之友(B 版), 2006(04): 45-49.
12. Tao W Q, Ti H C. Transient analysis of gas pipeline network [J], Chemical Engineering Journal, 1998, 69(1): 47-52.
13. Dukhovnaya Yulia, Adewumi Michael A. Simulation of non-isothermal transients in gas/condensate pipelines using TVD scheme [J], Powder Technology, 2000, 112 (2): 163-171.
14. Osiadacz Andrzej J, Chaczykowski Maciej. Comparison of isothermal and non-isothermal pipeline gas flow models [J], Chemical Engineering Journal, 2001, 81(3): 41-51,
15. De Henau V, Raithby G D. A transient two-fluid model for the simulation of slug flow in pipelines II Validation[J], International Journal of Multiphase Flow, 1995, 21(3): 351-363.
16. 章水秀. 汽轮机数字电液控制系统在大型火电机组中的应用 [J], 南昌航空工业学院学报(自然科学版), 2001 (04): 23-27.
17. 降爱琴, 陈凤兰. DEH 负荷控制系统分析[J], 电力学报, 2006 (01): 12-15.
18. De Henau V, Raithby G D. A study of terrain-induced slugging in two-phase flow pipelines [J],

- Previews of Heat and Mass Transfer, 1995, 21(4): 324-333.
19. Tentis E, Margaris D, PaPanikas D, Transient gas flow simulation using an AdaptiveMethod of Lines [J], Comptes Rendus Mecanique, 2003, 331(7): 481-487.
20. Osiadacz A J, Hierarchical control of transient flow in natural gas pipeline systems [J], International Transactions in Operational Research, 1998, 5(4): 285-302.
21. 傅腾. Symphony 分散控制系统在 200MW 机组上的应用[J], 东北电力技术, 2000(04): 13-22.
22. 杨志伟. Symphony Rack 分散控制系统及其应用[J], 沈阳工程学院学报自然科学版, 2006(04): 345-348.
23. 王晓峰, 高春升. 600MW 汽轮机的阀门管理与调节级特性 [J], 汽轮机技术, 2003(02): 07-11.
24. Osiadacz A. J., Hierarchical control of transient flow in natural gas pipeline systems [J], International Transactions in Operational Research, 1998, 5(4): 285-302.
25. 谢健育, 潘勇坚, 赖加良. 700 MW 机组汽轮机阀门管理设计分析 [J], 广东电力, 2006(08): 20-25.
26. 张化光. 模糊自适应控制理论及其应用 [M], 沈阳: 东北大学出版社, 2005.
27. 周万珍, 高鸿斌. PLC 分析与设计应用 [M], 北京: 电子工业出版社, 2004.
28. 顾树生, 王建辉. 控制工程发展概论 [M], 沈阳: 东北大学出版社, 2005.
29. 胡文斌. 300MW 汽轮机 DEH 系统阀门管理的研究 [J], 上海电力学院学报, 2003(03): 05-08.
30. 蒙映峰, 罗鹏, 邓涛. 单阀、顺序阀运行方式的切换 [J], 热力发电, 2003(04): 15-18.
31. Ng Moses L, Lin Chien-Liang, Cheng Ya-Tang. Operation of an on-site fuel cell power plant using natural gas with excess carbon dioxide [J], Journal of Power Sourc, 1998, 74(2): 159-168.
32. 朱蓬勃. 某 600MW 汽轮机 DEH 系统阀门管理环节的改进 [D], 吉林: 东北电力大学, 2007
33. Boss M. Steam Turbines for STAGTM Combined-Cycle Power System. GE Power Systems [J], GER-3582E, 1996.
34. 徐伟民. 国产 TRT 推广中应注意的几个问题 [J], 炼铁, 1998(02): 31-33.
35. 潘宏, 彭劲松. 高炉炉顶煤气实际能量利用率及其技术应用展望 [J], 冶金动力, 2000(4): 57-59.

致谢

本论文是在我的导师井元伟教授的悉心指导下完成的。首先，我衷心地感谢我的导师，是他的热情帮助和鼓励，才使我坚定了求学的细心和勇气；在论文的选题、构思直至完成，井教授都对我提出了许多宝贵、有益的建议，使我受益匪浅，使我能够在大学毕业十八年后顺利地完成工程硕士课题的研究工作，井老师那诲人不倦的为师为人之道和和蔼可亲的师者风范，是我今后工作、生活的楷模和榜样。在此，谨向尊敬的井元伟导师表示崇高的敬意和衷心的感谢！

在论文编写过程中，得到了东北大学信息科学与工程学院徐佳鹤的悉心指点和帮助，同时也得到了我的同事和好友张风华的大力支持，在我的论文完成之际，特此表示感谢。

同时感谢 3 年时间攻读东北大学工程硕士期间，各位教授、导师的精心培育和爱护，感谢首钢迁钢公司领导为我提供的这次学习深造机会。在今后的工作中，我将秉承“自强不息，知行合一”的东太校训，以更好的工作成绩回报母校，回报首钢。

