

分类号_____密级_____

UDC_____

学 位 论 文

首钢三高炉 TRT 控制系统的研究和实现

作者姓名：王绪

指导教师：何大阔 副教授

东北大学信息科学与工程学院

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 12 月 8 日 论文答辩日期：2009 年 1 月 5 日

学位授予日期：2009 年 月 答辩委员会主席：刘建昌 教授

评 阅 人：贾明兴 副教授 胡丕俊 高级工程师

东 北 大 学

2008 年 12 月

A Thesis for the Degree of Master in Control Engineering



**Research and Realization of the Control System for 3rd
TRT in ShouGang**

by WangXu

Supervisor: Associate Professor He DaKuo

Northeastern University

December 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：王绪

日期：2009. 1. 6

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：王绪

导师签名：何大阔

签字日期：2009. 1. 6

签字日期：2009. 1

首钢三高炉 TRT 控制系统的研究和实现

摘 要

钢铁企业是能源消耗大户，充分利用二次能源是企业可持续发展的重要保障。高炉炉顶煤气余压透平发电 TRT (Blast Furnace Top Gas Pressure Recovery Turbine) 作为目前国际上公认的钢铁业极具价值的二次能源回收工艺，研究其控制系统设计与实现问题具有重要的理论与实际意义。

国内大部分 TRT 工艺布置为并联形式，首钢三高炉 TRT 采用的则是串联形式，这种布置形式较之传统的并联形式具有低压启动、防共振、多阶梯运行等突出优点，因此，本文以首钢三高炉 TRT 项目为背景，针对其串联布置 TRT 控制问题展开研究。首先，介绍 TRT 生产工艺过程、国内外发展状况以及 TRT 的控制方法等；在深入研究 TRT 工艺过程和控制要求的基础上，研究并设计了包括透平机启机、升速控制、透平机前压力控制，高炉炉顶压力控制、正常停机和重故障停机控制、升功率和降功率控制、氮气密封控制及辅助设备自动控制在内的 TRT 全过程控制方法；同时，针对高炉炉顶压力在正常工况和异常工况下的控制进行了深入研究，设计了前馈补偿控制，解决了克服高炉上料和透平静叶全关扰动的滞后问题；并采用“偏差先行”策略实现了升降功率控制平稳和安全运行的目的。最后，选用 Symphony Rack 系统设计并实现了功能较为完善的 TRT 自动控制系统，提高了整个生产过程的监控、操作及自动控制水平，从而进一步提高了生产效率，创造较好的经济效益。

关键词：串联布置 TRT；高炉炉顶压力控制；前馈补偿控制

Research and Realization of the Control System for 3rd TRT in ShouGang

Abstract

Iron and steel enterprises are the major energy customers, to make full use of secondary energy sources is an important guarantee for continuable development of the enterprises. Blast Furnace Top Gas Pressure Recovery Turbine Unit (TRT) is recognized as a valuable secondary energy recovery technology by international iron and steel enterprises. It has the great theoretical and practical significance to investigate the design and realization of the control system.

Most of the domestic arrangements for the TRT technology is in the parallel form, but the 3rd TRT in ShouGang take form in series. Compared with the traditional parallel form, this form of arrangement has more advantages such as: low-pressure start, anti-resonance, multistage operation, and so on. To the 3rd TRT of ShouGang as an example, this paper discusses the TRT control in series form. First of all, the TRT production process, development of the situation at home and abroad as well as the methods of TRT control are discussed; secondly, on the basis of the in-depth study of TRT process and control requirements, TRT control of the entire process are Researched and designed, including the starting of turbine, acceleration control, Pre-pressure control of the turbine, top gas pressure control of the blast furnace, normal stop and emergency stop control, power up and power down control, Nitrogen seal control and automatic control of the auxiliary equipments; furthermore, in-depth research of the control of blast furnace top pressure in the Normal operating conditions and abnormal conditions is carried out. A feed-forward compensation control is designed to settle the lag related to counteract the disturbances caused by feeding the blast furnace and totally shutting down the guide vane of turbine; The strategy of "deviation first" is also adopted to achieve the smooth control of ascending and descending power, as well as safe operation. Finally, by choosing Symphony Rack system, a complete automatic control system has been set up. The levels of supervision, operation and automatic control in the entire production process have been improved, so as to further enhance productivity and create better

economic benefits.

Key words: TRT arranged in series; Blast Furnace Top Gas Pressure control; feed-forward compensation control.

目 录

独创性声明	I
摘 要	II
ABSTRACT	III
目 录	V
第一章 绪 论	1
1.1 课题的背景及意义	1
1.2 TRT 系统简介	2
1.2.1 TRT 工艺流程	2
1.2.2 TRT 技术发展概述	4
1.2.3 经济效益和社会效益	4
1.3 TRT 工艺对自动控制的要求	5
1.4 本文的技术难点	5
1.5 本文的主要工作	6
第二章 TRT 工艺过程控制方法研究	7
2.1 首钢三高炉 TRT 工艺流程简介	7
2.1.1 首钢三高炉 TRT 工艺及设备	7
2.1.2 首钢三高炉 TRT 特点	7
2.2 TRT 启动控制	8
2.2.1 透平机升转速控制	8
2.2.2 透平机前压力控制	10
2.3 高炉炉顶压力控制	11
2.3.1 高炉炉顶压力控制场所切换和升功率控制	11
2.3.2 正常工况下高炉炉顶压力控制	12
2.3.3 紧急停机情况下高炉炉顶压力控制	14
2.4 TRT 停机控制	14
2.4.1 正常停机控制	14
2.4.2 重故障停机控制	15
2.5 TRT 辅助系统控制	16
2.5.1 动力油系统	16
2.5.2 润滑油系统	17
2.5.3 氮气密封系统	17

2.5.4 循环水系统.....	17
2.5.5 其它设备控制.....	18
第三章 控制算法的选择和应用	21
3.1 前馈控制模型的选择.....	21
3.1.1 前馈控制原理.....	21
3.1.2 前馈-反馈控制模型.....	23
3.1.3 多变量前馈控制	25
3.1.4 前馈调节规律的实施	26
3.1.5 前馈控制系统的整定	28
3.1.6 前馈控制模型的应用	30
3.2 PID 控制算法	31
3.2.1 基本 PID 调节器	32
3.2.2 PID 控制算法的应用.....	33
3.3 分程控制.....	33
3.3.1 分程控制的原理.....	33
3.3.2 分程控制的应用.....	35
3.4 选择性控制	36
第四章 DCS 控制系统的集成	37
4.1 控制系统的选型	37
4.1.1 SYMPHONY RACK 系统概况	37
4.1.2 过程控制单元 PCU 简介.....	39
4.1.3 系统的技术特点	42
4.2 控制系统的软硬件构成	44
4.2.1 硬件系统构成.....	44
4.2.2 软件系统构成.....	47
4.3 编程和调试	48
4.3.1 程序功能码说明	48
4.3.2 操作员站组态.....	53
4.3.3 现场调试和控制参数整定	58
第五章 结论与展望	63
参考文献	65
致 谢	67

第一章 绪 论

1.1 课题的背景及意义

高炉炉顶煤气余压透平发电装置(Blast Furnace Top Gas Pressure Recovery Turbine Unit)简称 TRT。它通过将高炉炉顶煤气导入透平膨胀机做功,使高炉炉顶煤气的压力能及热能转化为机械能,驱动发电机发电。钢铁企业是能源消耗大户,充分利用二次能源是企业可持续发展的重要因素。采用 TRT 装置代替减压阀组,不改变原高炉煤气的品质,也不影响煤气用户的正常使用,却回收了过去白白损失的能量,可回收高炉鼓风机所需能量的 30%~50%,经济效益十分显著,同时降低了噪声,是典型的节能环保项目^[1-2]。因此越来越引起各方面的重视。

国家计委、国家经贸委、国家科委关于《中国节能技术政策大纲》中规定:TRT 装置是目前及今后应大力发展和推广的项目,并给予政策面的有效支持。国家经济贸易委员会《关于加强资源节约综合利用工作的意见》中提出 1200~1500 立方米以上高炉要大力发展高炉炉顶煤气余压透平发电技术。根据我国行业标准《钢铁企业设计节能技术规定》(YB9051-98)中规定“炉顶压力大于 130kPa 的高炉,应设有炉顶煤气余压发电装置,并采用干式除尘或节水型湿式除尘装置。”

通过 TRT 回收利用二次能源一直是首钢的一大心愿。1983 年在二高炉首次从日本引进第一套 TRT 成功投运后,由于投资大,一直到 1992 年才在四高炉继续 TRT 应用,但这次国内成套的应用很不成功,主要是控制系统很不成功,无法实现 TRT 的高压运行,发电效率仅 60%。随着国内 TRT 技术的日趋成熟首钢于 2005 年再次决定在三高炉应用 TRT,并决定由我们公司来完成自动控制系统的设计和集成。首钢三高炉 TRT 控制系统研究和实现课题就是在这样的背景下开展的。

高炉 TRT 根据高炉煤气净化方式分为湿式、干式和干湿两用 TRT,工艺布置形式根据与减压阀组的相对布置关系分为并联式和串联式,国内各钢铁厂高炉 TRT 工艺布置形式多为并联式的湿式或干式 TRT。首钢三高炉容积 2536m^3 ,炉顶压力 $0.18\sim 0.2\text{MPa}$,高炉煤气净化采用干式为主、湿式为辅的工艺。采用 TRT 装置与高炉减压阀组串联工艺布置,TRT 机组型式为干、湿两用型。研究首钢三高炉 TRT 控制系统的设计和实现不仅是保证本次首钢三高炉 TRT 项目成功实施的关键,同时对于探索适应串联工艺布置和干湿两种煤气净化工况下的 TRT 控制系统和集成方法具有很重要的理论和现实意义。

1.2 TRT 系统简介

TRT 的工作原理^[3-4]是把经净化的高炉煤气引出,经入口蝶阀、入口插板阀、快切阀等阀门后进入透平机入口,通过导流器使气体顺轴向进入叶栅,气体在静叶栅和动叶栅组成的流道中不断膨胀做功,煤气压力和温度逐级降低,并转化为动能作用于工作轮(即转子和动叶片)使之旋转,工作轮通过联轴器带动发电机一起转动而发电。叶栅出口的气体经过扩压器进行扩压,然后经过蜗壳流出透平机,再经过出口插板阀、出口蝶阀进入煤气管网供用户使用。整个过程将高炉煤气在进出透平机前后压力差产生的势能和温差产生的热能转化为了电能。

1.2.1 TRT 工艺流程

TRT 工艺流程因布置形式不同分为并联式和串联式工艺,如图 1.1 所示为并联式工艺布置流程^[5],图 1.2 所示为串联式工艺布置流程。由图可以看出,并联式布置和串联式布置最大的不同就是串联布置的工艺形式在减压阀组后增加了一套与 TRT 并联的旁通阀组,这样不仅增加了一次投资,因为增加旁通阀组设备,使得控制更加复杂。但串联布置工艺流程也有其优点,主要体现在^[6]:

(1) 实现 TRT 装置低压启动

TRT 机组中有两个重要的生产步骤涉及到安全,其中之一就是转速,这个问题在透平机启动时更为重要,启动的过程就是控制转速的过程,若转速不能很好控制进入临界共振区而又不能在短时间内迅速超过,机组就会出现大事故。启动控制中,当采用低压启动时,可以形成初次冲转,转速低,升速平稳,升速率容易控制,增加了转速的可控性。在控制转速过程中不影响高炉顶压稳定,减压阀组串联布置在 TRT 的上游,控制高炉顶压的稳定。

(2) 提高防共振能力,确保机组安全

TRT 装置在透平机组为柔性轴结构时,机组一阶临界转速低于工作转速,因此确保快速、安全的通过一阶临界转速,一直是 TRT 机组要解决的难题。以往并联机组运行中,只能采取在跨过临界共振区时封机组振动监视联锁点的方法,采取让机组盲操作方式,这样对机组的安全运行形成隐患,且又无任何调节手段;当采用减压阀组协调时,由于减压阀组的控制权在高炉,联系、操作困难,串联布置就可以很好的解决这一难题,开车实践证明此工艺是非常有效的,并且可操作性强,重复性能好,参数一经整定完成即可锁定形成操作程序,不受人为影响和干扰。

(3) 多阶梯运行方式,实现全电能回收

TRT 装置设计、运行的基本原则是安全、长期、连续。高炉年工作时间为 8520h,在高炉生产时间内总有由于高炉炉况不好,炉顶压力不稳定的一些时候,需要由减压

阀组控制炉顶压力，在这一段时间内并联布置的 TRT 不出力，因而没有电量回收。采用串联布置的 TRT 装置通过透平机喷嘴与 TRT 机组的旁通阀组配合协调透平前压的稳定，就可以实现接近高炉操作时间进行 TRT 回收能量，这样 TRT 装置的运行范围扩大了，煤气流量、煤气压力数值可以在比较大的范围进行调节，尽量多地回收电能。因此 TRT 运行的发电量是可以随高炉状况进行调整，不追求尖锋瞬时高负荷，而长期、连续运行延长了 TRT 装置的运行时间，不仅多发电，对于改善环境状况、降低噪声、减轻操作强度都有益处。

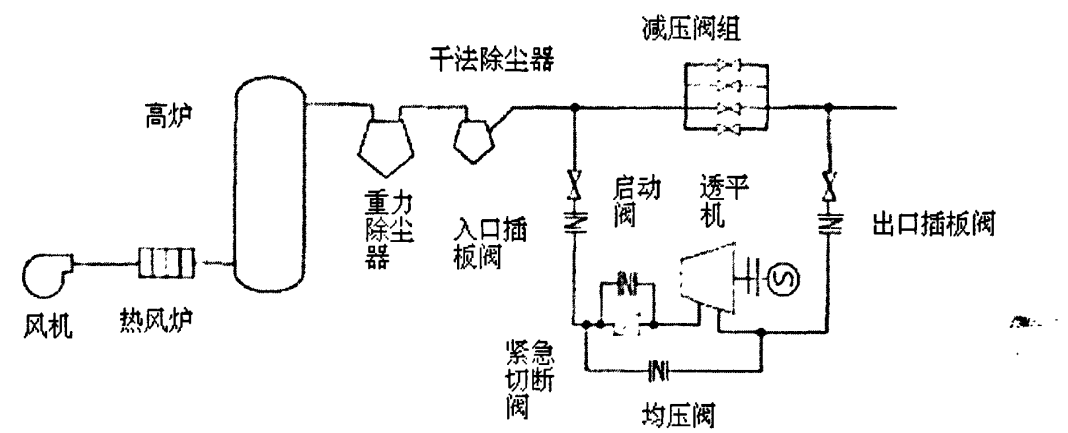


图1.1 TRT并联式工艺流程

Fig.1.1 Produce process of parallel TRT

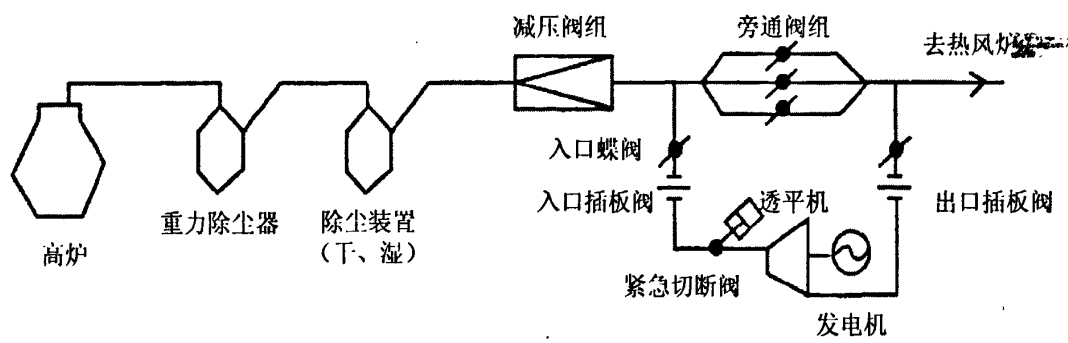


图1.2 TRT串联式工艺流程

Fig.1.2 Produce process of serial TRT

TRT 串联布置工艺流程如图 1.2 所示。主要是高炉产生的煤气经干法除尘或湿法除尘后，通过减压法组引出，经入口蝶阀、入口插板阀、快速切断阀、透平膨胀机、出口插板阀、出口蝶阀后并入高炉煤气管网，在 TRT 旁路并联一组旁通阀组，以保证 TRT 通路切断时，高炉煤气通路不受影响。TRT 装置由三大部分及八个子项组成，主要包括：透平主机系统、高低压发配电系统、自控系统、给排水系统、氮气密封系统、大型阀门及主煤气系统、动力油系统、润滑油系统。

1.2.2 TRT 技术发展概述

TRT 技术兴于欧洲,发展成熟于日本,应用普及于日本。由于 TRT 在运行中不需要燃料,不改变原有高炉煤气的品质,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品质,降低了冶炼成本,是典型的高效节能环保装置^[7]。因此引起了世界各国的广泛重视,并进行了大力研究和推广应用。

世界上第一台 TRT 装置是由前苏联于 1962 年研制成功的半干式轴流冲动式 TRT 装置。1969 年法国索菲米尔公司试制成功了第一台湿式径流反动式煤气透平机,该装置在透平内安装了喷水装置,配合煤气的冷凝作用,可以冲刷透平内部,防止透平内部积灰堵塞,但效率较低。1970 年日本川崎重工引进法国径流式高炉煤气透平专利技术,并加以改进后,于 1974 年生产了第一台 8200KW 的 TRT 装置在川崎制铁水岛 2 号高炉投入运行^[8]。1976 年日本开始研制湿式轴流反动式 TRT,并于 1979 年成功投运。透平第一级静叶可调,停机可改变 2~3 级静叶角度,效率可到 85%。从 20 世纪 80 年代开始,TRT 技术在日本得到了较快发展。三井造船、川崎重工和日立造船三家公司在 TRT 技术研究和装置制造装备等均走在了世界前列。他们在研究径流式积灰堵塞和叶片磨损等缺陷后,发明制造出了干式轴流反动式透平,并利用可调静叶控制炉顶压力,透平效率达到了 86%。目前日本是世界上 TRT 技术发展最快、水平最高,专利最多和装备最多的国家,据资料显示,日本的高炉全部安装了 TRT 装置。

中国在本世纪初 TRT 技术也得到较大发展,以陕鼓为代表的国产 TRT 技术也趋成熟,已达国际先进水平,部分技术还为世界首创,这极大地促进了该技术在国内的推广。据 2007 年资料显示,中国有 1000m³ 以上的高炉约 80 座,有 58 座已建或在建 TRT,普及率已达 72.5%。而 1000m³ 以下的高炉约 200 座,安装了 11 台 TRT,普及率仅为 5.5%。如果国内 280 座 300m³ 以上高炉全部安装 TRT,总装机容量将达 1700MW,年发电可达 137 亿度,可见节能挖潜的余地还很大。

在控制系统的研究方面,最近十多年才活跃起来,但主要针对并联布置 TRT 控制系统,且对 TRT 装置大都采用静叶可调技术 PID 控制高炉炉顶压力^[9-10]。而串联布置 TRT 控制系统未能查到相关文献,所以进行本文的工作是很有意义的。

1.2.3 经济效益和社会效益

TRT 装置是投资省、见效快、低投入、高产出的节能环保设备,通过 TRT 可将高炉生产的副产品高炉煤气所携带的势能和热能转化为电能,使没有 TRT 时白白浪费的能源合理有效地回收利用了起来,达到了节能、降噪、环保目的,具有显著经济效益和社会效益^[11-13]。

以首钢三高炉 TRT 为例, TRT 装置平均正常发电功率干式运行 11000KWh, 最高 12500KWh; 湿式运行时为 8000KWh, 最高 10000KWh。年平均发电量 6290 万 KWh, 按照外购电价 0.46 元/KWh 计算, 节约外购电费用 2893 万元, 扣除运行成本, 每年创利 1560 万元。经济效益非常可观。

1.3 TRT 工艺对自动控制的要求

做为能量回收的 TRT 装置在高炉整个工艺过程中处于辅助地位, 其投入运行的前提条件是在任何情况下均能保证高炉炉顶压力稳定, 不影响高炉主流程工艺过程。即在 TRT 装置启动、运行、正常或紧急停机时都必须保证炉顶压力波动在高炉工艺允许范围内。同时由于高炉煤气是有毒可燃气体, 要求 TRT 装置必须安全可靠。TRT 不能单独向用户供电, 必须并入工厂电网。由此可以看出, 要想让 TRT 装置投入运行, 并且尽可能提高其发电效率, 就必须在工艺上解决高炉顶压控制手段问题, 煤气密封不泄露问题, 同期并入电网问题等, 而有效的自动控制系统是实现这个目标的重要保证。

串联布置 TRT 工艺过程对自动化控制的要求主要包括:

- (1) 能够使 TRT 安全平稳启动, 达到并网转速, 自动并网;
- (2) 能够使 TRT 平稳升功率, 使 TRT 高效运行;
- (3) 能够使 TRT 控制高炉炉顶压力, 品质优于减压阀组;
- (4) 能够在正常停机时使 TRT 平稳降功率, 平稳将高炉炉顶压力控制由 TRT 转移给旁通阀组, 最后转移给减压阀组;
- (5) 能够在严重故障或紧急停机时顺利将高炉炉顶压力控制平稳转移给旁通阀组, 最后转给减压阀组;
- (6) 能够控制氮气密封系统和水封系统保证煤气不泄漏;
- (7) 机组辅助系统的有效控制和机组安全的有效连锁保护。

1.4 本文的技术难点

利用 TRT 发电, 用户往往担心 TRT 装置会降低高炉顶压的稳定性, 从而影响主流程工艺过程。炉顶压力不稳定, 会引起炉内反应的剧烈波动。炉内压力高于额定值时, 会使炉内煤气气流分布不均, 引起塌料, 严重时损坏设备。当炉内压力低于额定值时, 会引起炉内煤气体积增大, 气流压力损失增大, 煤气流速上升, 使炉喉磨损严重, 更有甚者, 会引起炉顶设备损坏^[14-15]。所以在整个 TRT 运行过程中保证高炉顶压稳定是控制系统设计和实现的最大技术难点, 也是研究的重点。本文以首钢三高炉 TRT 为对象, 针对串联布置 TRT 控制系统的设计和集成进行研究, 其技术难点主要体现在如下几个方面:

- (1) TRT 启动过程, 既要保证透平机快速跨越临界共振区又不超速, 同时还要

保证高炉炉顶压力稳定是 TRT 控制的一大难点。本文采取控制透平机前压力的方法,保证了低压启动,转速平稳上升。通过前馈补偿模型解决了机组跨越临界共振区时静叶突然开大或关小对透平机前压力的扰动影响,实现了透平机前压力稳定,从而很好地解决了机组跨越临界区又不影响高炉顶压这个问题。

(2) 高炉炉顶压力由 TRT 侧控制时,如何提高高炉顶压的控制品质和保证控制对象从静叶切换到旁通阀组对高炉顶压影响最小是 TRT 控制的又一技术难点。本文通过对影响高炉顶压的因素进行研究,针对正常工况下主要扰动高炉间歇上料和紧急停机时控制对象切换,采取前馈补偿控制模型和线性叠加多变量前馈模型取得良好的控制效果。

(3) TRT 升功率和降功率控制,实现平稳升功率和降功率而不影响高炉顶压稳定也是 TRT 控制的一个技术难点。

1.5 本文的主要工作

本文以首钢三高炉 TRT 项目为背景,针对首钢三高炉 TRT 自动控制系统开展研究工作。本文首先详细介绍了高炉 TRT 的工艺流程、国内外发展现状以及 TRT 生产过程的控制方法及其应用;在深入了解高炉与 TRT 生产工艺过程的基础上,以安全、高效、先进、可靠为原则,进行了 TRT 自动控制系统的深入研究、设计与实现,最终完成了控制系统的集成,并在实际运行过程中取得了较好的控制效果。主要内容如下:

(1) 详细介绍了高炉 TRT 的工艺流程及其设备,以及国内外发展现状;

(2) 对首钢三高炉 TRT 工艺流程进行分析,并对实现控制系统功能所选择的相关模型和算法的理论依据进行了论述,对应用进行了说明,确定 TRT 工艺流程的自动控制方法。

(3) 通过对高炉工艺流程进行分析,确定造成高炉炉顶压力波动的主要因素,研究建立有效控制高炉炉顶压力的控制方法。

(4) 在确立 TRT 控制方法的基础上,设计集成控制系统,完成 TRT 自动控制系统的硬件配置和软件组态,然后对控制系统进行调试,并将系统投入实际运行。

第二章 TRT 工艺过程控制方法研究

2.1 首钢三高炉 TRT 工艺流程简介

首钢三高炉容积 2536m^3 ，高炉炉顶压力 $0.18\sim 0.2\text{MPa}$ ，高炉煤气净化采用干式为主、湿式为辅的工艺。TRT 装置为陕西鼓风机厂生产制造的干、湿两用型机组。

2.1.1 首钢三高炉 TRT 工艺及设备

如图 1.2 所示，首钢三高炉 TRT 工艺流程采用 TRT 装置与高炉减压阀组串联工艺布置，经净化处理的高炉煤气（湿法时温度 55°C ，干法时温度 145°C ）在减压阀组后经 TRT 入口电动蝶阀、入口插板阀、文丘里流量检测装置、快速切断阀，再经透平一级可调静叶进入透平膨胀机，在透平机将压力能和热能转化为动力能驱动发电机发电同时，引出的高炉煤气压力和温度均有所降低（压力 0.011MPa ，温度 45°C 左右），经出口插板阀进入煤气管网。TRT 停机期间净化高炉煤气经过旁通阀组直接并入煤气管网。为了机组正常安全运行，必须配备有相应的辅助设备和系统。主要包括：

- （1）动力油系统，这是可调静叶和旁通阀组动作的动力来源。
- （2）润滑油系统，这是保证机组正常运行、减少磨损和损坏的重要系统。
- （3）氮气密封系统，这是防止 TRT 机组泄露高炉煤气造成煤气中毒伤害事故的必备系统。
- （4）透平级间排水和煤气凝结罐水封系统，这是干湿两用机排水防止煤气外溢的防护系统。
- （5）循环冷却水系统，这是保护机组，防止在运转过程中因温度过高损坏轴瓦的必备系统。
- （6）在快切阀旁并联一均压阀，通过连通快切阀前后，来抵消存在的压差阻力，保证快切阀的正常动作。
- （7）入口插板阀和出口插板阀间设有一泄压阀。用来泄掉停机后透平机前留存的较高压力。
- （8）冲洗水电动阀，喷雾水电动阀、透平机隔声罩通风机和发电机隔声罩通风机，盘车 电机等设备。

2.1.2 首钢三高炉 TRT 特点

首钢三高炉 TRT 采用串联布置工艺形式，具备以下特点：

(1) 在减压阀组后与 TRT 装置并联增加一套旁通阀组, 以保证 TRT 装置停止运行时高炉煤气的通路; 这样当 TRT 停机时高炉炉顶压力控制由 TRT 切换到减压阀组时, 就需要通过旁通阀组过渡, 使得在进行高炉炉顶压力控制执行主体转移时, 因增加环节而控制难度增加。而并联布置形式下只需要 TRT 装置与减压阀组间进行直接切换。

(2) 由于采用串联工艺布置, 实现了 TRT 低压启动-高压运行模式, 既利于 TRT 平稳顺利启动, 又能保证高压运行, 充分发挥机组的发电效率, 实现高效安全的目标。

(3) TRT 机组为干湿两用型机组, 高炉煤气净化干法除尘和水洗法除尘并存, 所以存在导入 TRT 的高炉煤气含尘量和气体温度的不同, 会对控制系统的适应性提出更高的要求。

2.2 TRT 启动控制

TRT 启动是有条件的, 只有满足这些条件后才可以向高炉发出启动 TRT 申请, 接到高炉同意启动确认信息后, TRT 方可启动。通常 TRT 启动条件有:

(1) 煤气置换完毕。在 TRT 通煤气前, 要先用惰性气体氮气将其中的空气置换后再用高炉煤气将氮气置换, 才能安全运行。

(2) 润滑油最远点压力大于设定值, 确认润滑系统正常。

(3) 动力油压力大于设定值, 确认动力油系统正常。

(4) 电气系统正常, 确认配电供电和电器保护系统正常。

(5) 透平静叶全关, 确认 TRT 静叶在初始角位置。

(6) 入口电动蝶阀全关, 确认 TRT 在初始状态。

(7) 氮气总管压力大于设定值, 确认氮气密封系统正常。

(8) 冷却循环水总管压力大于设定值, 确认循环冷却水系统正常。

(9) 透平级间密封罐液位正常, 确认水密封系统正常。

(10) 煤气管道凝结水罐液位正常, 确认水密封系统正常。

以上条件满足后, TRT 侧通过软按钮向高炉发出“TRT 申请启动”信号。当 TRT 主控室接到高炉主控室发来的“允许 TRT 启动”信号后, 透平机前压力定值调节开始投入自动, 通过旁通阀组使透平机前压力稳定在 0.1MPa 之后, 手动慢开 TRT 入口电动蝶阀到全开, 进入启动升速并网阶段。

2.2.1 透平机升转速控制

首钢三高炉 TRT 机组为柔性轴, 存在一阶临界转速和二阶临界转速, 所以升速控制的核心是平稳升速, 快速越过临界, 稳定并网。为了操作方便和需要, 本升速控制

设计了三种操作控制方式:手动操作控制、手动-自动结合操作控制和全自动操作控制。

(1) 手动操作控制

盘车后,由操作人员手动调整静叶角度,并不断观察机组转速变化,直到接近 1300~1400rpm 一阶临界转速时,直接将静叶打开到 45%开度位置,在同时要将旁通阀组的一副阀和二副阀关闭相当的比例,来保证透平机前压力保持在 0.07~0.1MPa,否则转速会因透平机前压力瞬间大幅下降造成转速掉头,不升反降。跨过一阶和二阶临界转速后,要逐渐将转速调到 3000rpm,通过同期装置并网。

(2) 手自动结合操作控制

盘车后,由操作人员手动调整静叶角度,并不断观察机组转速变化,直到接近 1300~1400rpm 一阶临界转速时,直接将静叶打开到 45%开度位置,在 TRT 机前压力定值调节系统的作用下,保证了透平机顺利通过一阶临界转速和 1800~1900rpm 的二阶临界转速,这时可将转速定值调节系统投入自动,使机组稳定在 2200rpm,经对机组各运行情况进行检查确认无异常,提升转速设定值到 3000rpm,当转速达到 2850rpm 时向同期装置发出“自动准同期投入”信号,由同期装置将机组于 3000rpm 时自动并网。

(3) 全自动操作控制

就是在盘车后,TRT 按照预设的升速控制曲线,完成均匀升速、快速跨越临界转速、稳定在 3000rpm 自动并网。如图 2.1 所示自动升速过程分为四个阶段:

第一阶段为启动升速段。设初始透平机转速设定 100rpm,该值可根据实际调试情况进行调整,原则是要比盘车转速大。之后让透平机组按照每秒增加 5rpm,一个台阶一个台阶的升速到 1200rpm。

第二阶段为检查等待阶段。升速到 1200rpm 后,稳定调节 60 秒,供操作人员对机组运行状况进行确认。检查透平是否存在异常情况,如有异常由操作人员按下停机按钮,以便进行处理。没问题,将继续升速。

第三阶段为机组一阶临界和二阶临界转速超越段。根据开机试验可以测定为 1200~2200rpm。要使机组转速以每秒增加 200rpm 的斜率快速冲过临界共振区。在跨越临界共振区过程中,如果振动、位移或转速达到了联锁停机的条件,就立即联锁停机。为安全起见,在现场调试时要确定静叶开度的安全范围值,即上下限幅。当冲过临界转速达到 2200rpm 后,转速设定值稳定在 2200rpm 这个值上 120 秒,供操作人员对机组运行状况进行确认。没问题,将继续升速。

第四阶段为定转速调节并网阶段。当机组超越临界转速后,可将机组转速每秒增加 5rpm,一个台阶一个台阶的升速到 2950rpm;然后再以每秒 1rpm 的斜率升转速到设定值 3000rpm 并稳定在这一值,直到并网。当转速升到 2850rpm 时发出“自动准同期投入”信号,以便机组并网发电。当接收到来自电气的“发电机并网”信号后,

TRT 升速过程控制结束，自动将可调静叶开度开到 30%左右的位置，并向高炉中控室发出“TRT 并网运行”信号。

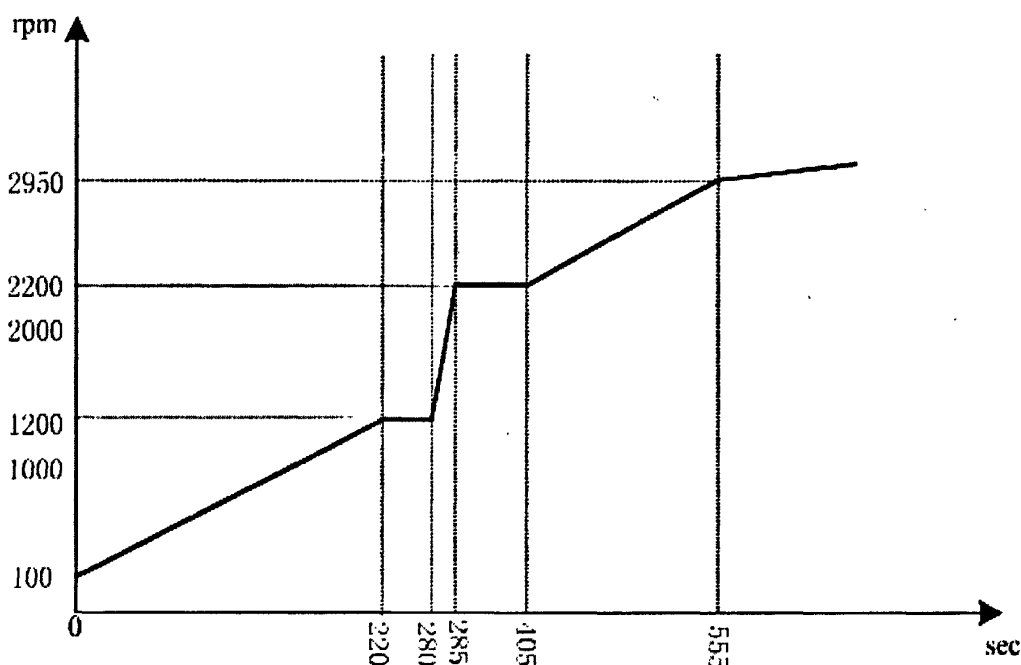


图2.1 TRT自动升速曲线

Fig.2.1 Ramp of Rate for TRT

2.2.2 透平机前压力控制

在串联工艺布置情况下，TRT 可以进行低压启动，使透平机转速容易控制，减少了超速的几率，是串联工艺的一大优点，但如果在升速过程中，不能保证足够和较稳定的驱动压力，转速可能会在升速的过程中出现不升反降的问题，所以进行透平机前压力调节是透平机能否顺利完成升转速实现并网过程的重要环节。

TRT 启动过程主要分为四个阶段。第一个阶段为 1200rpm 之前均匀上升，第二个阶段是检查确认阶段，第三个阶段是跨越 1200rpm~2200rpm 的临界共振区，第四个阶段是 2200rpm~3000rpm 均匀上升并稳定在 3000rpm 并网。在这四个阶段中，很显然第一个阶段和第四个阶段采用经典 PID 控制器就可以很好实现透平机前压力控制稳定在 0.07MPa~0.1MPa 这样一个目标，从而保证升速均匀平稳。第三阶段由于要在短时间内跨越临界区，可调静叶角度需要在瞬间变化较大幅度，这样必然造成瞬间煤气通路扩大，透平机前压力快速下降，单纯透平机前压力 PID 反馈调节无法快速响应，消除这么大扰动。需要采取其它有效手段解决。很显然，将静叶打开增加的煤气流量用旁通阀组关闭减少的煤气流量去平衡，就会消除对透平机前压力的影响。按照这个

思路,把可调静叶的开度变化作为旁通阀调节 TRT 透平机前压力的前馈扰动处理,引入静态前馈控制模型。实现了透平机前压力稳定控制,保证机组成功跨越临界共振区。

2.3 高炉炉顶压力控制

高炉炉顶压力控制是 TRT 项目中最重要和最复杂的控制。在 TRT 从开机到停机的整个运行周期里,研究高炉炉顶压力控制问题主要涉及两个方面,一是高炉炉顶压力控制场所由高炉切换到 TRT 后,透平可调静叶控制高炉炉顶压力和旁通阀组控制高炉炉顶压力;二是 TRT 故障停机时,高炉炉顶压力控制由透平静叶切换到旁通阀组,最后切换到减压阀组,高炉顶压控制权由 TRT 侧转给高炉。因此首先对高炉炉顶压力影响因素进行分析,之后再确定对高炉炉顶压力进行控制的方法。

2.3.1 高炉炉顶压力控制场所切换和升功率控制

在 TRT 并网后,要提高发电效率,就要不断提高透平机前压力,增加透平机前后压力差,而减少高炉炉顶压力与透平机前压力的差,即减小减压阀组的阻力,这样的结果就是减压阀组控制高炉炉顶压力功能逐渐失效,高炉炉顶压力的控制场所必须切换到 TRT 侧,由透平机可调静叶控制。从高炉侧控制高炉炉顶压力平稳地切换到 TRT 侧的过程实质上是升功率的过程。即关小旁通通路,开大透平机通路,使高炉煤气主要流经透平机组,最大限度地利用压力能和热能多发电。

首先要说明的是首钢三高炉减压阀组由四个阀组成:三个手动阀,一个自动阀,在减压阀组控制高炉炉顶压力时,高炉工长是通过手动将三个量程阀放到合适位置后,靠自动阀进行 PID 反馈控制实现的。因此要转换就需要高炉工长配合,手动将减压阀组逐渐开大,来达到高炉炉顶压力控制场所切换和升功率目的。

当高炉中控室接到“TRT 并网运行”信号后,若旁通阀组的控制权仍在高炉侧,则将旁通阀组的控制场所切换到 TRT 侧,然后先将可调静叶自动控制透平前压投入,并同高炉中控室配合将旁通阀组中的电动旁通主阀手动慢速关闭,全关之后,利用“偏差先行”的原理,将旁通阀组控制透平机前压力的设定值取值为可调静叶控制透平机前压力设定值加上一个先行的偏差值,通过这种方式实现自动开静叶、关旁通阀组。

设透平机前压力为被控对象,用 P_1 表示,采用 PID 反馈控制,控制对象为可调静叶的控制器设定值用 SV_1 表示,先行偏差值用 ϵ 表示,则控制对象为旁通阀组的控制器设定值为 $SV_1 + \epsilon$ 。因为控制对象旁通阀组的设定值比控制对象可调静叶的设定值大 ϵ ,当被控对象透平机前压力等于设定值 SV_1 时,控制对象可调静叶控制器偏差为“0”,输出不变,而控制对象旁通阀组的控制器存在偏差 ϵ ,输出变化,关小旁通阀组;而当被控对象透平机前压力等于设定值 $SV_1 + \epsilon$ 时,控制对象旁通阀组的控制器

偏差为“0”，输出不变，控制对象可调静叶控制器存在偏差“ $-\varepsilon$ ”，输出变化，开大可调静叶。如此往复，当旁通一副阀（或旁通二副阀）关到 5%时停，自动开始关旁通二副阀（或旁通一副阀），当旁通二副阀（或旁通一副阀）关到 5%时，停止关旁通阀组，或当静叶开度达到 60%时，也要停止关旁通阀组。之后旁通阀组自动控制前压解除。当通过憋前压的方式使顶压和透平前压不断接近，直到顶压和透平前压之差小于某一值（该值由整定确定，条件是当减压阀组控制高炉炉顶压力品质开始变差）时，高炉将炉顶压力的控制场所切换为 TRT 侧，TRT 静叶控制高炉炉顶压力自动投入。TRT 侧慢关旁通阀组，直到旁通阀组全关后。将旁通阀组辅助控制顶压自动投入，这时 TRT 全功率发电并控制顶压。

在升功率过程中，旁通阀组中的旁通一副阀和旁通二副阀采用分程控制实现。即控制对象旁通阀组控制透平机前压力的输出一分为二，当控制器输出 0~50%时，

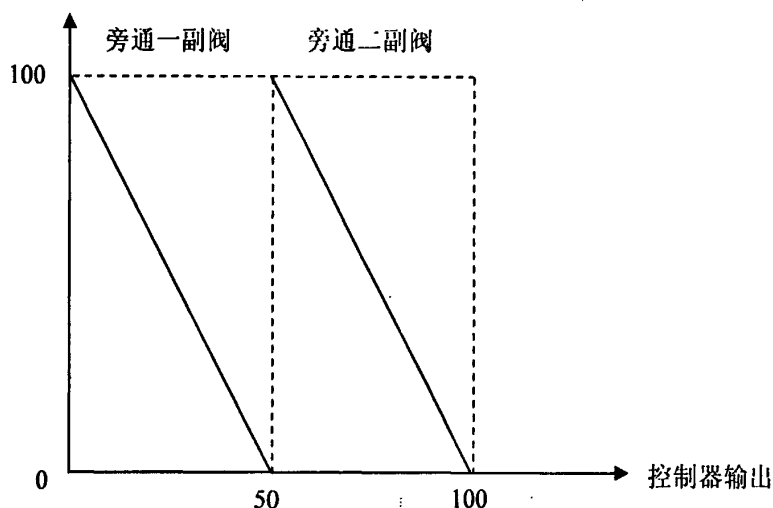


图2.2 旁通阀组分程控制动作图

Fig.2.2 Split of collateral valves

旁通一副阀关闭，对应范围 100~5%，二副旁通阀不动；当控制器输出 50%~100%时，旁通一副阀达到了开度 5%的极限，旁通二副阀开始关闭，直到满足上面陈述的关到 5%或可调静叶开到 60%条件。图 2.2 所示旁通一副和旁通二副在分程控制的动作图。

2.3.2 正常工况下高炉炉顶压力控制

在 TRT 完成升功率过程之后，开始通过透平机静叶控制高炉炉顶压力，进入发电正式生产阶段。正常工况下，为了使 TRT 尽可能实现全额发电，高炉煤气应主要通过 TRT 通路，所以高炉炉顶压力主要采用调节 TRT 系统透平机可调静叶开度来控制，同

时为了保证高炉生产稳定,在极端情况下要通过旁通副阀组进行辅助调节。

通常的 TRT 控制系统,将高炉炉顶压力控制设计为 PID 反馈控制,其方块图如图 2.3 所示。

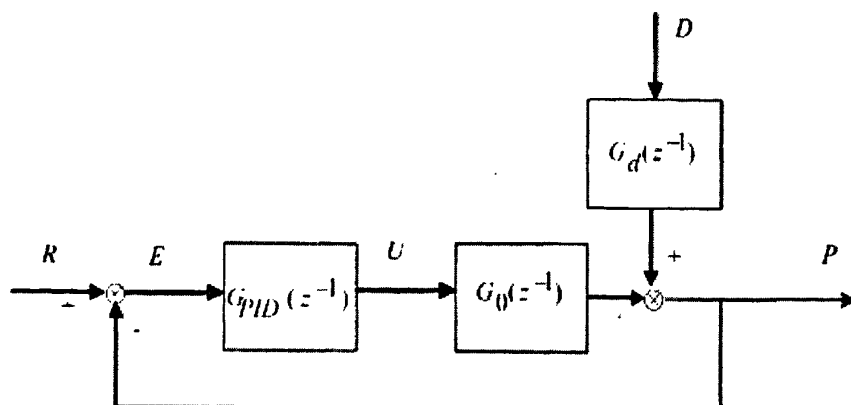


图2.3 正常工况下高炉炉顶压力控制方块图

Fig.2.3 Top Gas Pressure control at normal

其中: R —高炉炉顶压力给定值;

E —偏差;

U —透平机静叶开度;

D —高炉上料扰动;

P —高炉炉顶压力;

$G_0(z^{-1})$ —前向通道上被控对象的传递函数;

$G_d(z^{-1})$ —干扰通道传递函数;

$G_{PID}(z^{-1})$ —反馈通道上比例积分微分控制器的传递函数。

从图 2.3 中可以看出,正常工况下,高炉炉顶压力控制系统的被控变量是高炉炉顶压力 P ,控制器输出,即控制变量,是透平机可调静叶开度 U ,通过对高炉实际运行过程的观察和分析,得到影响高炉炉顶压力稳定的因素。主要有:

(1) 高炉间歇上料过程

高炉每间隔 4~5 分钟就会打开高炉炉顶与炉顶料罐间下密封阀装一次焦炭,然后再过 3~4 分钟装一次矿料,在此过程中,装焦炭过程时间短,造成高炉炉顶压力下降幅度较小,但装矿料时,时间较长,造成高炉炉顶压力下降影响较大,所以造成高炉炉顶压力波动的主要扰动是上料过程间歇打开下密封阀。而单 PID 控制的反馈系统,克服这个扰动影响需要更长的动态响应时间,同时还会存在上下超调,影响高炉稳定。

(2) 管道纯滞后

被控对象高炉炉顶压力与控制对象 TRT 透平机可调静叶之间要经过除尘环节和约 150 米左右的管道环节,所以当控制对象变化时,需要经过一定滞后才能在被控对

象上反映出来。滞后时间大约 3 秒左右。

(3) 高炉煤气发生量过大

在某些时候,高炉煤气发生量会很大,达到满量程,这时 TRT 透平机可调静叶全部打开也存在高炉炉顶压力高出设定值的问题,为了使高炉炉顶压力降回到设定值,就需要将旁通阀打开一定开度,使透平机可调静叶从控制死区回到可调范围。

从上面的分析可以看出,管道纯滞后时间只有 3 秒,而高炉间歇上料是影响高炉炉顶压力的主要扰动,所以在克服上料扰动后管道纯滞后对高炉炉顶压力稳定性影响就可忽略,不用专门处理。因此通过引入前馈补偿控制模型,消除 PID 反馈控制系统的调节滞后。高炉煤气量过大造成透平机可调静叶进入调节死区的问题,通过采用分程控制模型使旁通阀作为量程阀在可调静叶进入调节死区时参与调节,来保证高炉炉顶压力稳定在设定值。

2.3.3 紧急停机情况下高炉炉顶压力控制

当 TRT 紧急故障停机时,高炉煤气的 TRT 通路会因为快速切断阀和可调静叶突然关闭而阻断,如果不能快速将煤气通路建立就会造成高炉炉顶压力快速升高,形成“憋压”。因此紧急停机情况下的高炉炉顶压力控制就是要解决从 TRT 通路快速切换到旁通阀组通路,既不能造成高炉炉顶“憋压”,也不能因为旁通通路打开太大,使顶压下降太低,影响顶压稳定。像透平机组在启动过程跨越临界共振区时引入前馈控制方法一样道理,引入前馈补偿控制模型,将静叶突然关闭时通过透平机的煤气通量全部转换到旁通通路,旁通阀组应该打开相应的开度,之后旁通阀组采用与正常工况下由透平静叶控制高炉炉顶压力相同的前馈-反馈控制模型保证顶压稳定。

2.4 TRT 停机控制

TRT 停机通常有两种情况,一种是正常停机,一种是故障紧急停机。在停机过程中最重要的是保证停机过程不影响高炉炉顶压力稳定或影响最小。平稳将高炉炉顶压力控制场所切换回高炉一侧,由减压阀组控制。

2.4.1 正常停机控制

正常停机,实际是一个降功率的过程,将发电功率由正常值降到工艺上认为的“0”值时,发出解列停机信号,安全停机。

在操作人员按下正常停机按钮后,要将正常工况下可调静叶和旁通阀分程调节解除,即使可调静叶和旁通阀的关联解除,以便完成高炉炉顶压力主要控制对象从可调静叶向旁通阀的转换。

降功率采用与升功率相同的偏差先行之法，将控制对象旁通阀控制高炉炉顶压力功能投入，完成将高炉炉顶压力由可调静叶控制切换到旁通阀组控制，之后减负荷降功率到“0”。在降功率过程中旁通阀组自动控制高炉炉顶压力。

设高炉炉顶压力为被控对象，用 P 表示，采用前馈-反馈控制，控制对象为旁通阀组的控制器设定值用 SV 表示，先行偏差值用 ϵ 表示，则控制对象为可调静叶的控制器设定值为 $SV + \epsilon$ 。因为控制对象可调静叶的设定值比控制对象旁通阀组的设定值大 ϵ ，当被控对象高炉炉顶压力等于设定值 SV 时，控制对象旁通阀组的控制器偏差为“0”，输出不变，而控制对象可调静叶的控制器存在测量值小于设定值的偏差 ϵ ，输出变化，关小可调静叶；而当被控对象高炉炉顶压力等于设定值 $SV + \epsilon$ 时，控制对象可调静叶的控制器偏差为“0”，输出不变，控制对象旁通阀组的控制器存在测量值大于设定值的偏差“ $-\epsilon$ ”，输出变化，开大旁通阀组。如此往复，当静叶关小到某一开度，功率降到某一值，工艺认为功率降到了“0”时，TRT 连锁停机：紧急快切阀快关，透平静叶全关，向高炉中控室发出“TRT 停机”信号。关透平静叶时，如果静叶开度大于 10%，要先关到 10%，延时 5 秒再全关。这时旁通阀组控制高炉炉顶压力。

2.4.2 重故障停机控制

重故障停机是指 TRT 系统在运行过程中发生某些参数超过了为保护设备和人身安全而设定的紧急停机值时，系统的连锁停机。要进行的控制主要包括 TRT 停机连锁逻辑控制、旁通阀组控制高炉炉顶压力。

(1) TRT 紧急停机的条件

(a) 透平轴振动任一点大于连锁设定值 80μ 时报警， 120μ 时停机；(4 点)

(b) 透平轴位移任一点大于连锁设定值 (2 点)。其中工作面大于 0.3mm 报警， 0.5mm 停机，负推力面大于 $0.3\text{mm} + \text{间隙值}$ 报警，大于 $0.5\text{mm} + \text{间隙值}$ 停机。

(c) 机组润滑油最远点压力小于连锁设定值。变送器信号或电接点信号之一低于 0.1MPa 时报警，低于 0.06MPa 时停机。

(d) 机组动力油压力小于连锁设定值。变送器信号或电接点信号之一低于 11MPa 时报警，低于 9MPa 时停机。

(e) 机组轴承温度大于连锁设定值 (12 点)。其中透平机轴承温度 8 个点高于 90°C 报警，高于 100°C 停机，发电机轴承温度 4 个点高于 65°C 报警，高于 75°C 停机。

(f) 透平级间液位大于连锁设定值；

(g) 紧急停机按钮按下 (手动紧急停机)；

(h) 发电机事故跳闸 (发电机甩负荷)；

(i) 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);

- (j) 联络柜跳闸;
- (k) 上级变电所开关跳闸 (上级开关跳闸);
- (l) 机组转速过高 (3 点中有两点同时出现);
- (m) 发电机轴振动过高 (2 点);
- (n) 快切阀油压低于连锁设定值;
- (o) 高炉侧紧急停机;
- (p) 旁通阀组油压过低;
- (q) 低电压保护可以有选择地加入 (设选择权限)。

当 TRT 运行过程中出现以上停机连锁条件之一时, 就会使 TRT 紧急停机, 同时向高炉中控室和干法除尘发出“TRT 重故障停机”信号, 并将高炉炉顶压力控制对象由可调静叶自动切换到旁通阀组。

紧急快切阀快关, 透平静叶全关。关透平静叶时, 如果静叶开度大于 10%, 要先关到 10%, 延时 5 秒再全关。

(2) 重故障状态下旁通阀组控制高炉炉顶压力

TRT 系统紧急停机前, 高炉炉顶压力由透平机可调静叶控制。TRT 紧急停机时, 迅速切换到旁通阀组控制, 而可调静叶在 1~2 秒内即全关。透平静叶瞬间全关, 将对高炉炉顶压力产生很大影响, 使高炉炉顶压力上升, 这时仅仅依靠控制对象旁通阀组在引入高炉上料前馈控制模型基础上的前馈-反馈控制功能将很难满足迅速消除透平静叶瞬间全关扰动对高炉炉顶压力造成较大影响的要求。进一步引入透平静叶瞬间全关前馈控制, 因为扰动高炉间歇上料和透平静叶瞬间全关之间相互独立, 所以通过建立以线性叠加为基础的多变量前馈控制模型, 就可以使得在透平静叶瞬间全关时旁通阀组提前打开到一定开度, 以抵消透平静叶瞬间全关时造成的高炉炉顶压力上升影响。

2.5 TRT 辅助系统控制

2.5.1 动力油系统

动力油系统是透平机可调静叶和旁通阀组动作的动力源。设有两台动力油泵和一台动力油加热器。

(1) 动力油泵控制: 设手动自动控制两种方式; 当选择一号泵为主泵时, 一号泵运行, 二号泵自动备用。若油压低于某一值 (由工艺给出, 一般为 11MPa) 时, 二号泵自动启泵; 选择二号泵为主泵时, 一号泵自动备用。

手动停泵前提条件是: 油压正常且两个泵均在运行, 手动停一个。操作条件: 1

号或 2 号动力油泵被选择；油温不低于 20℃。油箱液位底时报警。

(2) 动力油加热器控制

当动力油箱温度低于 21 摄氏度时自动开启，高于 25 摄氏度时自动关停。

2.5.2 润滑油系统

润滑油系统是提供机械润滑，保证机组运行的前提。设有两台润滑油泵、一台润滑油加热器和排雾电机。

(1) 润滑油辅助泵控制

设手动自动控制两种方式；当选择一号泵为主泵时，一号泵运行，二号泵自动备用，若油压低于某一值（由工艺给出，一般为 0.1MPa）时，二号泵自动启动；选择二号泵为主泵时，一号泵自动备用。

当主油泵运行同时透平机转速达 2500rpm 后自动停止运行的润滑油泵；当润滑油最远点油压低于 0.1MPa 时，自动开启一台润滑油泵，延时 3 秒后，若该泵运行未返回，自动开启另一台泵。油压大于 0.1MPa 延时 5 秒后，停润滑油泵。

操作条件是：1 号或 2 号润滑油泵被选择；油温不低于 20℃。油箱液位底时报警。

(2) 润滑油加热器控制

当润滑油箱温度低于 21℃ 时自动开启，高于 25℃ 时自动关停。

(3) 排雾电机控制

手动、自动间歇两种控制方式。

操作条件：润滑油最远点压力正常，排雾电机被选择。

2.5.3 氮气密封系统

TRT 装置的介质是高炉煤气，属于易燃、易爆、有毒气体。其泄露后的危害不言而喻。因此为防止透平机轴端泄露高炉煤气，特设置了氮气密封差压调节系统。其原理是通入比被密封介质压力高的氮气，以防止透平机轴端高炉煤气的泄露。氮气压力由用户减压至 0.3~0.4MPa，然后经气动薄膜调节阀调压后至密封处的氮气压力高于被密封的高炉煤气压力 0.02~0.03MPa 左右^[9]，氮气向压力低的透平机内流入，有效地阻止了高炉煤气外泄。

氮气密封旁通阀控制：手动控制。当氮气总管压力低于 0.2MPa 时，自动打开此阀。

2.5.4 循环水系统

循环水系统是为了机组降温，防止透平机和发电机轴瓦烧坏。为了防止在湿法除尘工艺模式下，高炉煤气中含有的水在凝结后排出时煤气泄露，设置了排水液位密封

控制系统。均采用单回路 PID 反馈控制。

(1) 高炉煤气凝结罐液位控制

(2) 透平级间排水密封罐液位控制

(3) 冲洗水电动阀控制

纯手动控制。当阀开到位或关到位信号返回时，操作停止。操作条件：冲洗水电动阀被选择。

(4) 喷雾水电动阀控制

分手动、自动间歇、自动连续三种方式。

当阀开到位或关到位信号返回时，操作停止；操作条件：并网后，喷雾水电动阀被选择。

(5) 透平级间排水球阀控制

通常情况下全开，当排水罐液位低于 100mm 时，关闭。

(6) 高炉煤气凝结罐液位排水球阀控制

通常情况下全开，当凝结罐液位低于 100mm 时，关闭。

2.5.5 其它设备控制

(1) 透平入口蝶阀控制

纯手动控制。操作条件是：泄压阀全关；启机条件满足；入口插板阀开。

(2) 均压阀控制

手动控制。快切阀打开时，自动关闭。操作条件：均压阀选择。

(3) 入口插板阀控制

设置手动按钮，进行煤气置换人工确认时操作。操作条件：泄压阀开后、启机综合条件满足、开机后不许关、停机后不许开。

过程：收到入口插板阀操作信号且煤气置换确认按钮按下，入口插板阀松开控制发出，当入口插板阀松开限位返回，发出入口插板阀松开到位到现场操作盘指示，并且切除入口插板阀松开控制；发出入口插板阀开走板，当入口插板阀开走板限位返回，发出入口插板阀开走板到位信号到现场操作盘指示，并且切除入口插板阀开走板；发出入口插板阀夹紧控制，当入口插板阀夹紧限位返回，发出入口插板阀夹紧到位到现场操作盘指示，并且切除入口插板阀夹紧控制；将入口插板阀松开控制按钮和入口插板阀夹紧控制按钮复位，可以进行关操作。关阀条件是：正常停机或紧急停机之后。关阀过程是松开，关走板，夹紧。

(4) 出口插板阀控制

同入口插板阀一样，设置手动按钮，进行煤气置换人工确认时操作。过程：收到

出口插板阀操作信号且煤气置换确认按钮按下，出口插板阀松开控制发出，当出口插板阀松开限位返回，发出出口插板阀松开到位到现场操作盘指示，并且切除出口插板阀松开控制；发出出口插板阀开走板，当出口插板阀开走板限位返回，发出出口插板阀开走板到位信号到现场操作盘指示，并且切除出口插板阀开走板；发出出口插板阀夹紧控制，当出口插板阀夹紧限位返回，发出出口插板阀夹紧到位到现场操作盘指示，并且切除出口插板阀夹紧控制；将出口插板阀松开控制按钮和出口插板阀夹紧控制按钮复位，可以进行关操作。关阀条件是：正常停机或紧急停机之后。关阀过程是松开，关走板，夹紧。

(5) 发电机隔声罩通风机控制

手动控制。操作条件：发电机隔声罩操作选择。

(6) 透平机隔声罩通风机控制

手自动控制两种方式。自动时，当一氧化碳浓度高于 30ppm 时自动启机。操作条件：透平机隔声罩通风机操作选择。

(7) 盘车电机控制

手动操作。显示返回信号。操作条件：盘车选择。

(8) TRT 停机复位

当高炉侧停机时，停机连锁条件解除后 TRT 侧通过按钮操作发出复位信号。

(9) 快切阀控制

快关：连锁停机时自动快关；

慢关：手动，机组运行时不许关，检测到全关时解除控制输出。

慢开：手动，有连锁停机条件时不许操作，检测到全开时解除控制输出。

游动：手动，保持 5 秒的信号，在全开状态下操作。

第三章 控制算法的选择和应用

工业生产中，对各个工艺过程的物理量都有一定的控制要求，有些工艺变量直接表征生产过程，对产品的数量和质量起着决定性的作用^[16]。而对生产工艺过程的连续控制最重要的就是对控制算法的研究与应用。通过对 TRT 从开机到停机的整个过程分析研究，针对不同的被控对象在不同控制阶段选择应用了简单 PID 控制算法、前馈补偿控制算法、分程控制和选择性控制。本章将着重对 TRT 控制模型和算法选择的理论依据做论述。

3.1 前馈控制模型的选择

3.1.1 前馈控制原理

从自动控制技术的发明史来看，很早以前，甚至在反馈调节问世之前，就有试图按照扰动量的变化来补偿其对被调参数影响的思想，从而达到被调节参数完全不受扰动量的影响^[17]。

把按照扰动进行调节的思想应用于如图 2.3 的高炉炉顶压力上料扰动中来说明前馈控制的原理。前面论述过造成高炉炉顶压力波动的主要扰动是高炉间歇上料 D ，通过测量影响高炉炉顶压力的扰动量——高炉炉顶压力与高炉炉顶料罐之间的压力差，将该信号经过一个动态补偿装置 $G_{ff}(S)$ ，其输出对调节阀产生校正作用。力求做到上料扰动 D 到被控压力 P 的动态响应，与由 D 经 $G_{ff}(S)$ 到高炉煤气流量 G_s 到 P 的动态响应完全相同，只是符号相反，这样便做到了完全补偿。这种按照扰动产生校正作用的控制方式称为前馈控制，简称 FFC（Feed Forward Control）。

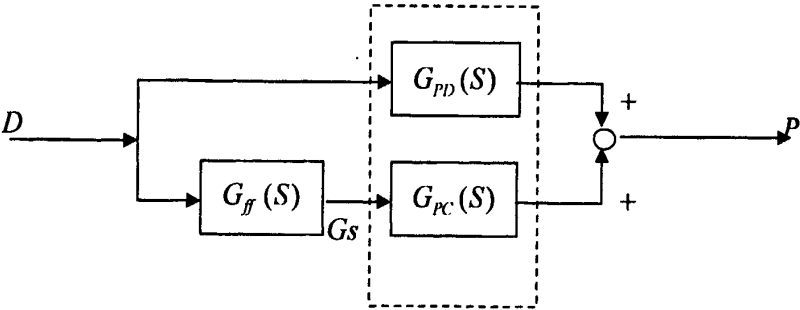


图3.1 前馈控制系统方块图

Fig.3.1 The diagram of feed-forward control system

经上面定性分析，可以看到前馈控制规律 $G_{ff}(s)$ 决定调节通道 ($G_s - P$) 与扰动通道 ($D - P$) 的特性。图 3.1 所示是 FFC 系统的方块图。下面应用不变性原理定量

的导出前馈动态补偿装置的传递函数式。系统传递函数表示为：

$$\frac{P(S)}{D(S)} = G_{PD}(S) + G_{ff}(s) G_{PC}(S) \tag{3-1}$$

式中 $G_{PD}(S)$ 、 $G_{PC}(S)$ ——分别为对象扰动通道与调节通道的传递函数。

根据不变性原理，系统对扰动 D 实现完全补偿的条件是

$$\frac{P(S)}{D(S)} = 0 \tag{3-2}$$

(3-2) 式代入 (3-1) 式，导出前馈补偿环节的传递函数为：

$$G_{ff}(s) = -\frac{G_{PD}(s)}{G_{PC}(s)} \tag{3-3}$$

满足 (3-3) 式的前馈环节就能使被控变量 P 不受扰动量 D 变化的影响，是一个被控对象 P 对扰动 D 绝不灵敏的系统。图 3.2 所示是前馈控制的完全补偿过程。

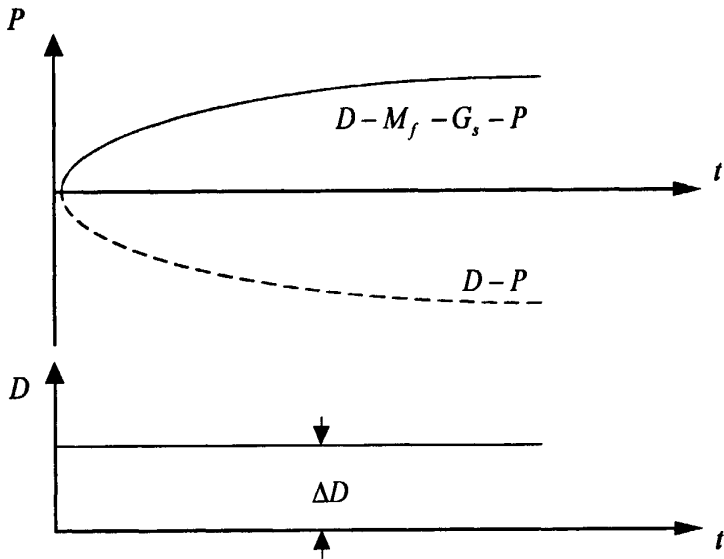


图3.2 前馈控制系统的完全补偿过程

Fig.3.2 The complete expiating process about feed-forward control system

不变性原理或称扰动补偿原理是前馈控制的理论基础。“不变性”是指控制系统的被控变量与扰动量完全无关，或在一定准确度下无关，所以不变性原理就是通过前馈控制器的校正作用，完全消除进入控制系统使被控对象发生偏离其给定值的扰动的影响。

单纯的前馈控制系统根据对干扰补偿的特点，可分为动态前馈控制及静态前馈控制。

(1) 动态前馈控制

力求在任何时刻均实现对扰动影响的补偿，以使被控变量完全或基本不变，这样

的前馈控制系统称为动态前馈控制系统。其传递函数为：

$$G_{ff}(s) = -\frac{G_{PD}(s)}{G_{PC}(s)} \quad (3-4)$$

当控制通道与扰动通道的动态特性差异较大时，需要引入动态补偿。对于线性系统，动态补偿算法为

$$G_{ff}(s) = -\frac{G_{PD}(s)}{G_{PC}(s)} = -\frac{K_{PD}}{K_{PC}} \times \frac{g_{PD}(s)}{g_{PC}(s)} \quad (3-5)$$

式中 $g_{PD}(s)$ 、 $g_{PC}(s)$ 分别表示通道特性的动态部分，其稳态增益均为 1。

K_{PD} 、 K_{PC} 分别表示扰动通道的放大系数和控制通道的放大系数。

令：

$$K_{ff} = \frac{K_{PD}}{K_{PC}} \quad (3-6)$$

$$g_{ff}(s) = \frac{g_{PD}(s)}{g_{PC}(s)} \quad (3-7)$$

则对于线性系统，动态前馈控制器可表示成静态与动态两部分

$$G_{ff}(s) = -K_{ff} g_{ff}(s) \quad (3-8)$$

对于非线性系统，上式中静态前馈部分可由对象的非线性静态模型计算得到，而动态部分同样可按线性对象处理。动态前馈补偿的一般形式为

$$g_{ff}(s) = \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1} \exp(-\tau s) \quad (3-9)$$

(2) 静态前馈控制

在生产实际中有时并没有动态前馈控制那样高的要求，只要求在稳定工况下，实现对扰动量的补偿。

$$G_{ff}(s) = -\frac{G_{PD}(s)}{G_{PC}(s)} \Big|_{s=0} \quad (3-10)$$

由 (3-8) 可知

$$G_{ff}(0) = -K_{ff} g_{ff}(0) \quad (3-11)$$

当采用静态前馈补偿时，与时间因子无关，静态前馈控制算式：

$$G_{ff}(0) = -K_{ff} \quad (3-12)$$

3.1.2 前馈-反馈控制模型

前馈控制系统中不存在被控变量的反馈，对于补偿效果没有检验的手段，如果调节的结果无法消除被控变量的偏差，系统也无法获得这一信息而作进一步的校正。由

于实际工业对象存在着多个扰动, 为了补偿它们对被控对象的影响, 势必要设计多个前馈通道进行补偿, 增加了控制系统得复杂性, 使自动化投资费用和维护量加大, 而仅对主要扰动实现前馈补偿, 一旦非前馈扰动量出现后, 系统便处于没有调节的状态, 被控变量将大大偏离其设定值, 这是不允许的。另外对于已经实现了前馈补偿的扰动, 也会因为前馈控制模型精度的限制、对象特性受负荷和工况等因素影响而产生漂移, 导致 $G_{PD}(S)$ 、 $G_{PC}(S)$ 的变化, 一个固定的前馈模型, 难以获得良好的控制品质。

人们熟悉的反馈调节系统是按照被调量的偏差进行调节的, 被控变量的偏差是校正作用的依据。表 3.1 是前馈控制与反馈控制特点的比较。

如果将前馈控制和反馈控制结合起来, 就可以既发挥前馈校正作用及时的优点, 又保持了反馈调节能克服多种扰动及对被控对象最终检验的长处^[12]。这种把按扰动调节和按偏差调节结合的负荷控制系统称为前馈-反馈 (FFC-FBC) 控制系统。如图 3.3 所示是 FFC-FBC 系统的方块图。其闭环传递函数为:

$$\frac{P(S)}{D(S)} = \frac{G_{PD}(S)}{1 + G_{PID}(S)G_{PC}(S)} + \frac{G_{ff}(S)G_{PC}(S)}{1 + G_{PID}(S)G_{PC}(S)} \quad (3-13)$$

同样应用不变性原理, 有

$$P(S) = 0, \quad D(S) \neq 0 \quad (3-14)$$

代入 (3-13) 式, 同样导出前馈补偿器的传递函数:

$$G_{ff}(s) = -\frac{G_{PD}(s)}{G_{PC}(s)} \quad (3-15)$$

由比较 (3-4) 式与 (3-15) 式可知。FFC 与 FFC-FBC 系统实现完全补偿的条件是相同的。

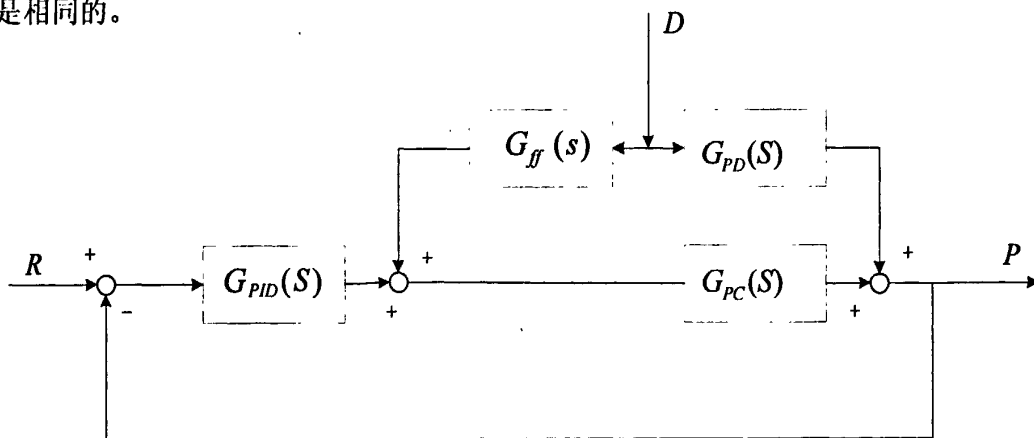


图 3.3 FFC-FBC 系统的方块图

Fig.3.3 The diagram of a FFC-FBC system

表 3.1 前馈控制与前馈-反馈控制的比较

Table3.1 The compare between FFC and FFC-FBC

前 馈 控 制	前馈-反馈 控 制
扰动可测，但不要求被控量可测	扰动、被控量直接可测
超前调节，可实现系统输出的不变性(但存在可实现问题)	超前调节和偏差控制结合，对主要扰动校正及时，又能克服多种扰动
开环调节，无稳定性问题	闭环调节，更易稳定
系统仅能感受有限个可测扰动	系统可感受所有影响输出的扰动
对于干扰与控制通道的动态模型，要求已知而且准确	对于干扰与控制通道的动态模型，要求已知而且准确
对时变与非线性对象的适应性弱	对时变与非线性对象的适应性与鲁棒性强

FFC-FBC 系统具有下列优点：

- (1) 由于在 FFC 系统中增加了 FBC 回路，大大简化了原有前馈系统，只需对最主要的扰动进行前馈补偿，而其它扰动均可由反馈予以校正。
- (2) 由于反馈回路的存在，降低了对前馈控制模型精度的要求，为工程上实现比较简单的前馈补偿装置创造了条件。同时，对于负荷或工况变化所引起的对象特性漂移具有一定的适应能力。

3.1.3 多变量前馈控制

工业生产过程的扰动因素很多，特别当按照数学模型实现前馈控制时，通常需要按照物料平衡、能量平衡建立前馈控制方程，这样势必形成前馈系统具有多个输入与多个输出，称为多变量前馈系统。通常多变量前馈控制模型的建立分三种情况：

- (1) 由工艺关系建立多变量前馈控制模型
这一方法是在有条件按照工艺机理导出静态前馈控制方式时采用。
- (2) 以线性叠加为基础建立多变量前馈控制模型
- (3) 多输入-多输出的多变量前馈控制模型

下面着重介绍以线性叠加为基础建立多变量前馈控制模型。

假设一个前馈控制方程为：

$$m_f = f(d_1, d_2, \dots, d_n) \tag{3-16}$$

式中 m_f 、 d_i 分别表示前馈控制作用与系统的扰动量。

当无法由工艺机理分析确立 (3-16) 式具体形式时，可对这个一般的函数式在稳定工况附近线性化，建立一个线性控制方程。假定对象的动态特性表示为图 3.4 所示

的形式，则相应的对象动态方程为：

$$Y(s) = G_m(s)M_f(s) - \sum_{i=1}^n G_i(s)D_i(s) \quad (3-17)$$

式中 $G_m(s) = Y(s) / M_f(s)$

$$G_i(s) = Y(s) / D_i(s)$$

根据系统不变性原理有：

$$D_i(s) \neq 0 \quad (i=1,2,\dots,n); \quad Y(s)=0$$

则导出多变量线性前馈控制模型为：

$$M_f(s) = \sum_{i=1}^n \frac{G_i(s)}{G_m(s)} D_i(s) \quad (3-18)$$

式中 $G_i(s) / G_m(s)$ 为满足不变性条件的各扰动补偿通道的前馈补偿函数。

(3-18) 式为多变量线性叠加前馈控制模型的一般表示式，建立这种模型不需要知道对象的静态模型，非常适合在工程上应用。应用这种处理方法的条件是：

(1) 各扰动量之间应该相互独立。

(2) 如若扰动量间存在关联，则在测试对象特性时应扣除关联扰动量的影响，使得 $G_i(s)$ 仅仅是 $D_i(s)$ 作用下所获得的通道特性。

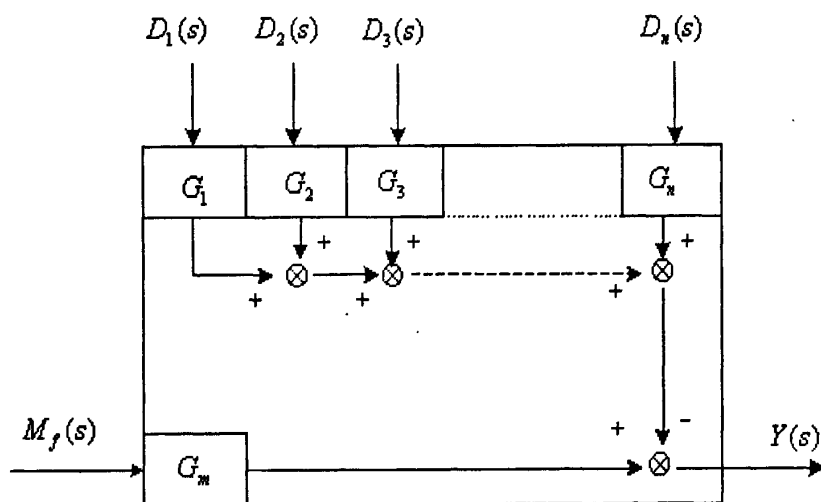


图 3.4 对象动态特性方块图

Fig.3.4 The diagram of object dynamic characteristic

3.1.4 前馈调节规律的实施

经上面的讨论，不难得出这样的结论，即前馈控制规律决定于对象调节与扰动通道的特性。严格的说，工业对象的特性极为复杂，导致了前馈调节规律的形式颇多。但是，从工业应用的观点出发，力求控制的模式具有一定的通用性，对于设计、运行、

维护都会带来许多方便。实践证明，相当数量的化工、热工对象都具有非周期与过阻尼的特性，因此往往可以用一个一阶或二阶的容量滞后，必要时串联一个纯滞后环节近似之。一工业对象的动态特性为：

$$G_{PD}(s) = \frac{K_2}{T_2s+1} \exp(-L_2s) \tag{3-19}$$

$$G_{RC}(s) = \frac{K_1}{T_1s+1} \exp(-L_1s) \tag{3-20}$$

则

$$G_f(s) = -\frac{G_{PD}(s)}{G_{RC}(s)} = -K_f \frac{T_1s+1}{T_2s+1} \exp(-L_f s) \tag{3-21}$$

式中 $K_f = K_1 + K_2$ 静态前馈放大系数

$$L_f = L_2 - L_1$$

(3-21) 式表示了带有纯滞后的“一阶超前/一阶滞后”的前馈动态补偿式。

当 L_1 与 L_2 相差不大时，为了简化前馈补偿装置，经常采用

$$G_f(s) = -\frac{T_1s+1}{T_2s+1} \tag{3-22}$$

(3-21)、(3-22) 式中的负号通常在前馈输出信号与反馈输出信号相加的加法器中

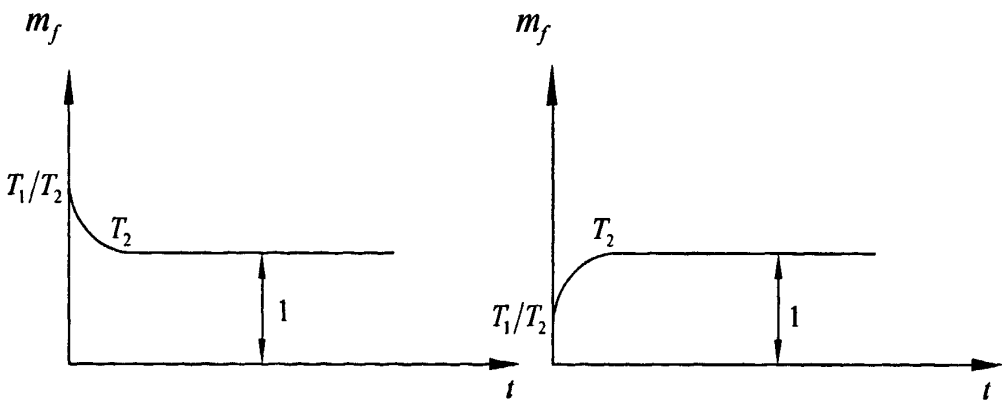


图 3.5 输入为单位阶跃扰动下， $\frac{T_1s+1}{T_2s+1}$ 输出的时间响应

Fig.3.5 The $\frac{T_1s+1}{T_2s+1}$ output for unit step input

体现。“超前一滞后”前馈补偿器在单位阶跃扰动作用下的时间特性可表示为：

$$m_f(t) = 1 + \left(\frac{1}{\alpha} - 1\right) \exp\left(-\frac{t}{\alpha T_1}\right) \quad (3-23)$$

式中 $\alpha = T_1/T_2$ 。

$\alpha > 1$ 与 $\alpha < 1$ 相应的时间特性曲线示于图 3.5。由图示曲线可见，当 $\alpha > 1$ 时，前馈补偿是带有超前性质的，也即适用于对象调节通道的滞后大于扰动通道滞后的场合。反之当 $\alpha < 1$ ，则前馈补偿带有滞后性质，也即适用于调节通道滞后小于扰动通道滞后的场合。“超前/滞后”形式的前馈模型已经成为目前广泛应用的一种动态前馈补偿的模式。

3.1.5 前馈控制系统的整定

前馈控制模型参数决定于对象的特性。但是，动态测试工作往往受到条件的限制，因此，系统现场整定工作仍然具有十分重要的意义。这里以最常用的前馈模型

$$“K_f \frac{T_{1s} + 1}{T_{2s} + 1}”$$

为例，阐明整定的基本思路，这个模型整定的任务是决定 K_f 、 T_1 、 T_2 三个参数。

(1) K_f 的整定

在前模型中，静态参数 K_f 的整定十分重要，实质上正确的选择 K_f ，也能准确的决定阀位。反之，如果 K_f 选得过大，也就相当于对反馈调节回路施加了扰动，错误的前馈静态输出，将要由反馈输出来补偿。因此，一般的整定过程是由 $K_f = 0$ 开始，逐步加大 K_f ，如果 K_f 过大则会出现过补偿的现象。 K_f 对调节过程的影响示于图 3.6。

此外，也可以运用反馈系统的运行数据，来决定 K_f 。具体方法是，开断 FFC 回路，仅作 FBC 运行，在稳定工况下施加前馈输入的扰动，由反馈调节器来克服它们对被控变量的影响，直至被控变量仍然回到原来的给定值，则前馈放大系数 K_f 的计算式为：

$$K_f = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_D} \quad (3-24)$$

式中： ΔI_D —扰动量变送器输出电流的变化的幅值；

ΔI_C —施加扰动前后反馈调节器输出电流变化的幅值。

这一测试方法是很容易理解的，也即借助于反馈调节器的调节功能，决定前馈合理的输入与输出的比例关系，在 ΔI_D 扰动作用下，如果没有 FBC 的作用，而依靠 FFC 实现补偿，前馈补偿器的输出同样应该改变 ΔI_C ，显然， K_f 应该符合 (3-24) 式所示关系。

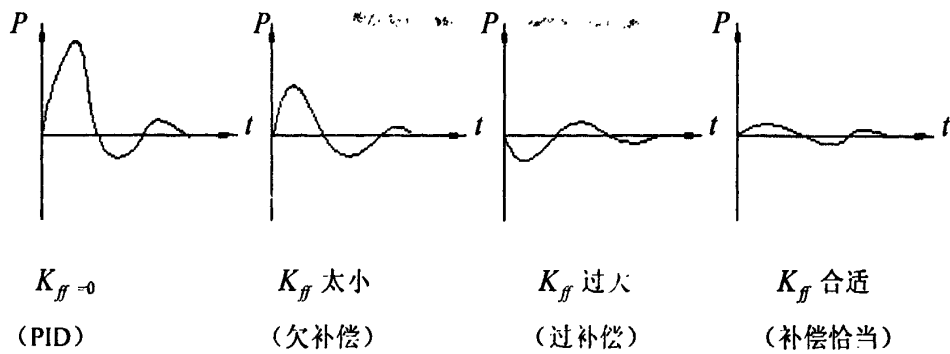


图 3.6 K_{ff} 对调节过程的影响

Fig.3.6 Effect for K_{ff} in controlling

(2) T_1 、 T_2 的整定

由 (3-21) 可知，前馈模型中的 T_1 、 T_2 分别对应于对象调节通道和扰动通道的时间常数，当事先未经动态测试定量地求取这两个时间常数时，只能通过在线运行的曲线来整定 T_1 、 T_2 。

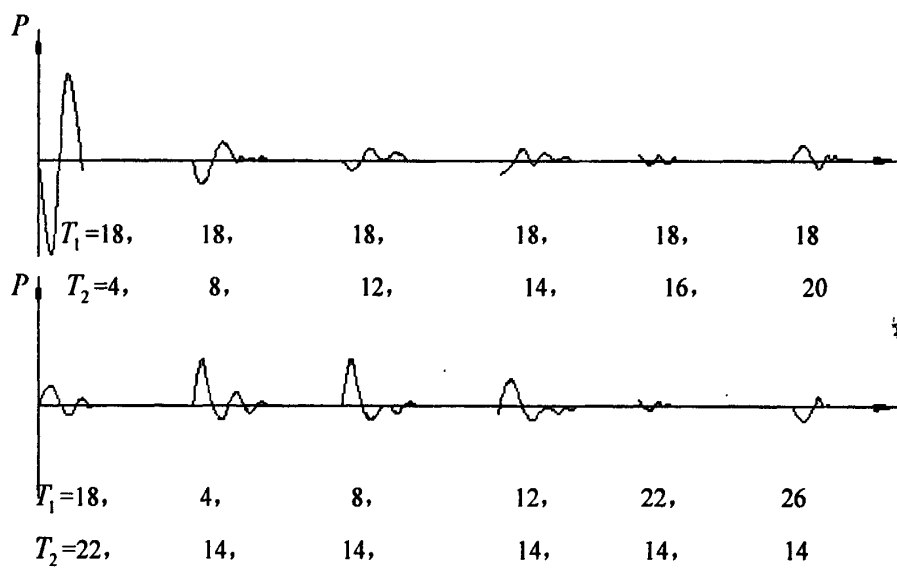


图 3.7 T_1 、 T_2 对调节过程的影响

Fig.3.7 produce as a effect for T_1 、 T_2 in controlling

一个 FFC-FBC 系统，前馈模型 T_1 、 T_2 对调节过程的影响结果示于图 3.7。

由图示曲线可见当 T_1 过大或 T_2 过小会产生过补偿现象，所得的调节过程甚至较纯粹的 FBC 系统品质更差，反之，当 T_1 过小或 T_2 过大，则会产生欠补偿现象，未能有效地发挥前馈补偿的功能。因此，在整定 T_1 、 T_2 时，总是从欠补偿开始，逐步强化前馈作用，当开始出现过补偿趋势时，略减弱前馈作用，即可获得满意的控制过程。

3.1.6 前馈控制模型的应用

(1) 透平机前压力前馈-反馈控制

前文提到在 TRT 启动过程中, 要进行透平机前压力定值控制。当透平机在跨越临界共振区时可调静叶需要瞬间将开度进行较大幅度调整, 希望透平机转速迅速上升, 快速通过临界共振区, 但如果透平机前压力反馈调节滞后没有迅速跟进将因可调静叶打开产生的扰动消除, 回到原来的稳态, 这个跨越临界的过程就不能成功。因此设计针对该扰动量引入前馈控制模型。根据前面的论述, 当干扰通道和控制通道滞后相差不大时, 应用静态前馈控制方法已能够获得较高的调节精度。而可调静叶和旁通阀组并联在一起, 距离较近, T_1 和 T_2 可以认为相等。所以选择 (3-12) 的静态前馈控制模型:

$$G_f(0) = -K_f \quad (3-25)$$

按照 (3-22) 前馈放大系数 K_f 的计算式为:

$$K_f = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_D} \quad (3-26)$$

式中: ΔI_D —扰动量可调静叶开度的变化的幅值;

ΔI_c —施加扰动前后前馈调节器输出变化的幅值

根据此式可以在调试时对 K_f 的值进行整定。

(2) 高炉炉顶压力前馈-反馈控制

在正常工况下, 通常的高炉炉顶压力采用可调静叶为控制对象的反馈控制方法, 该方法对于来自高炉上料的扰动响应存在较大滞后, 以至于使高炉炉顶压力在高炉上料时偏离设定值很大幅度, 最严重时达到 10kPa, 而且达到稳态的过渡过程较长, 对高炉生产造成较大影响, 所以当高炉上料时让控制对象及时做出反应消除响应滞后是解决问题的关键。故采用了在反馈控制中加上前馈超前补偿模型的控制方法。应用前馈控制模型的前提是扰动量可测, 当获得高炉上料打开下密封阀的数字量信号时, 可以测得该时刻高炉炉顶压力和高炉炉顶料罐压力模拟量信号, 通过计算这两者之间的压力差 ΔP_D , 可调静叶对该扰动反馈控制响应滞后时间 T_1 和高炉上料信号产生到高炉炉顶压力下降的响应滞后时间 T_2 均可在整定时测得。因此静态前馈补偿系数 K_f 可用式 (3-26) 计算为:

$$K_f = \frac{\Delta I_c}{\Delta P_D} \quad (3-27)$$

式中: ΔP_D —高炉炉顶压力与高炉炉顶料罐压力差值;

ΔI_c —施加扰动前后前馈调节器输出变化的幅值

当高炉间歇上料, 打开下密封阀时, 将前馈补偿控制引入高炉顶压前馈-反馈控制

器,当下密封阀关闭时要将前馈补偿取消掉,否则就会造成过补偿,反而对高炉炉顶压稳定造成不利影响。对象调节通道和扰动通道的时间常数 T_1 和 T_2 均可通过在线运行的曲线来整定测得。且对象调节通道时间常数 T_1 比扰动通道时间常数 T_2 要大。

(3) 重故障情况下高炉炉顶压力的多变量前馈控制

如前所述,TRT系统在紧急停机前,高炉炉顶压力由透平机可调静叶控制。紧急停机时,要迅速切换到旁通阀组控制,而可调静叶在1~2秒内即全关。透平静叶瞬间全关,将对高炉炉顶压力产生很大影响,使高炉炉顶压力上升,这时仅仅依靠控制对象旁通阀组在引入高炉上料前馈控制模型基础上的前馈-反馈控制功能将很难满足迅速消除透平静叶瞬间全关扰动对高炉炉顶压力造成较大影响的要求。进一步引入透平静叶瞬间全关前馈控制,因为扰动高炉间歇上料和透平静叶瞬间全关之间相互独立,所以通过建立以线性叠加为基础的多变量前馈控制模型,就可以使得在透平静叶瞬间全关时旁通阀组提前打开到一定开度,以抵消透平静叶瞬间全关时造成的高炉炉顶压力上升影响。

被控对象高炉炉顶压力的高炉上料扰动和透平机可调静叶全关扰动的前馈控制功能线性叠加,因为高炉上料扰动如前所述本身不可测,是通过检测高炉上料数字量信号出现时的高炉炉顶压力变化量来表征,而在整个运行过程中,还有其它情况下的扰动会造成被控量的变化,所以线性叠加后的前馈控制功能,每个分量是否有效,取决于该扰动的产生,即只有高炉上料一个主要扰动时其相应的单变量前馈控制作用有效,而可调静叶全关前馈补偿作用无效;反之一样。如果高炉上料和可调静叶全关两个扰动同时发生,则将两个单变量前馈补偿分量线性叠加即可。静态前馈补偿系数和动态前馈时间常数的整定可以在单独扰动情况下如单变量前馈控制一样进行取得。

3.2 PID 控制算法

PID控制是连续系统中应用最多的一种控制调节规律,并且它本身可以分解为P、PI、PD等调节规律^[18]。据统计,工业控制的控制器中PID类控制器占有90%以上^[19]。它的结构简单,参数易于调整,并在长期应用中已积累了丰富的经验,特别是工业过程控制中,由于控制对象精确数学模型难以建立,系统参数又经常发生变化,运用现代控制理论分析综合要耗费很大的代价进行模型辨识,且往往不能得到预期的效果,而采用PID控制并根据经验进行在线参数整定,可得到较为满意的控制效果^[20]。随着计算机技术的发展,PID数字控制算法可在计算机上实现,使得PID控制算法在工程上得到更广泛的应用。

3.2.1 基本 PID 调节器

(1) 连续 PID 控制

PID 控制规律是指在控制过程中被控量的偏差信号（即控制器输入信号）与控制输出信号之间的运算关系，这种关系由控制器决定。比例、积分、微分控制的简称是 PID 控制。

理想连续 PID 作用可用下式描述：

PID 调节器的微分方程为：

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3-28)$$

式中 $u(t)$ —PID 调节器输出；

K_p —比例放大系数（又称比例增益）；

T_i —积分时间常数；

T_d —微分时间常数；

$e(t)$ —设定值 $r(t)$ 和测量值 $y(t)$ 的偏差，即 $e(t) = r(t) - y(t)$ 。

比例控制的特点是纠正偏差，反应迅速。输入与输出是一一对应的关系，时间上无滞后，但有余差。积分作用的特点是消除余差，导致控制器频率特性相位滞后，导致闭环系统振荡倾向，稳定裕度下降。增加闭环响应动态特性的阶数，响应趋于缓慢。增加积分作用，也就是减小 T_i 或提高 K_p ，使闭环系统的响应趋于灵敏，提高闭环响应速度，造成较大的超调量和较长时间的振荡。微分控制的特点是从时间特性看，微分作用是按偏差的变化趋势来控制的，比较及时；时间上超前显然对控制有利。引入微分作用后，相位超前，对提高闭环稳定性有利，若达到同样稳定性则可提高 K_p ，而使最大偏差或超调量减小，调节时间缩短。微分作用对纯时间滞后起不到改善品质的效果。微分先行，即把微分环节放在比例环节之前。

(2) 数字 PID 控制

数字计算机对数据的处理在时间上是离散的，设采样周期为 T_s ，则每经过一个采样周期进行一次数据采样、控制运算、数据输出，控制器输出并通过保持器使数据在采样间隔期间予以保持。离散理想 PID 控制算法可分为三种形式：位置式、增量式、速度式。位置式输出必须经过 D/A 转换为模拟量，且要有保持器，使输出信号保持到下一采样周期输出信号到来是为止。

$$\text{设采样周期为 } T, \text{ 则 } u(t) \approx u(k), \quad e(t) \approx e(k), \quad \frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(k) - e(k-1)}{T}$$

$$\int e(t)dt \approx T \sum_{j=0}^k e(j)$$

差分方程为:

$$\begin{aligned} u(k) &= K_p \left[e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T} (e(k) - e(k-1)) \right] \\ &= K_p e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)] \end{aligned} \quad (3-29)$$

式中: K_p — 比例系数, 只要被调量偏离其给定值, 调节器会产生与偏差成正比的输出信号, 通过执行器使偏差减小, 但存在静态误差;

K_I — 积分系数, 只要被调量存在偏差, 调节器的输出作用便随时间不断加强, 直到偏差为零, 并且能保持静差为零;

K_D — 微分系数, 在偏差信号出现或变化的瞬间, 调节器立即根据变化的趋势, 产生强烈的调节作用, 使偏差尽快地消除于萌芽状态中。但微分作用对静态偏差毫无抑制作用, 不能单独使用。

3.2.2 PID 控制算法的应用

在 TRT 控制中, 无论高炉炉顶压力控制、透平机转速控制、透平机前压力控制、升功率/降功率控制、氮气密封差压控制还是煤气排水密封罐液位控制, 都应用了基本的 PID 控制算法。

高炉炉顶压力的前馈-反馈控制模型中, 是在 PID 反馈控制算法中增加了前馈补偿算法。PID 控制算法是控制基础, 是连续作用的。而前馈补偿控制则是在扰动产生时叠加到反馈控制回路, 扰动消失时也要停止作用, 是断续作用的。

3.3 分程控制

3.3.1 分程控制的原理

分程控制通俗地讲, 就是将调节器控制输出 0~100% 范围, 分成两个以上的区段, 每一区段经放大后分别输出控制对应的调节阀, 使之满足工艺系统的控制要求。比如: 调节器 (PID) 输出 0~40% 通过信号放大为 0~100% 输出给调节阀 A, 调节器 (PID) 输出 40%~100% 通过信号放大为 0~100% 输出给调节阀 B, 从而实现当 PID 调节输出在 0~40% 区段变化时, A 阀动作, B 阀不动, 而当 PID 调节输出在 40~100% 范围内变化时, A 阀不动, B 阀动作。

由此可以看出, 通过分程控制可以实现两方面的目的: 一是从改善调节系统的品

质角度出发,采用分程调节可以扩大调节阀的可调范围,使系统更合理可靠;如在大型锅炉汽包液位的控制中往往设有大给水、中给水、小给水(或大给水、小给水)三个调节阀,三冲量调节(或单冲量调节)输出分段输出给三个调节阀,以实现汽包液位的精确控制。二是满足工艺上操作的特殊要求。

分程调节方案中,调节阀的开关形式可以分为两种类型:一类是阀门同向动作,即随调节阀的输入信号增大或减小,调节阀门都开大或关小。另一类是阀门异向动作,即随着调节阀的输入信号增大或减小,阀门总是按一只关闭另一只打开的方向进行。如图 3.8 所示。

需要注意的是分程控制以扩大可调范围为主要目的时,必须了解分程调节阀的特性选择。调节阀有一个重要指标,阀的可调范围 R ,是一项静态指标,表明调节阀的流通能力,在满足工艺的基础上可以调整的范围,表示为:

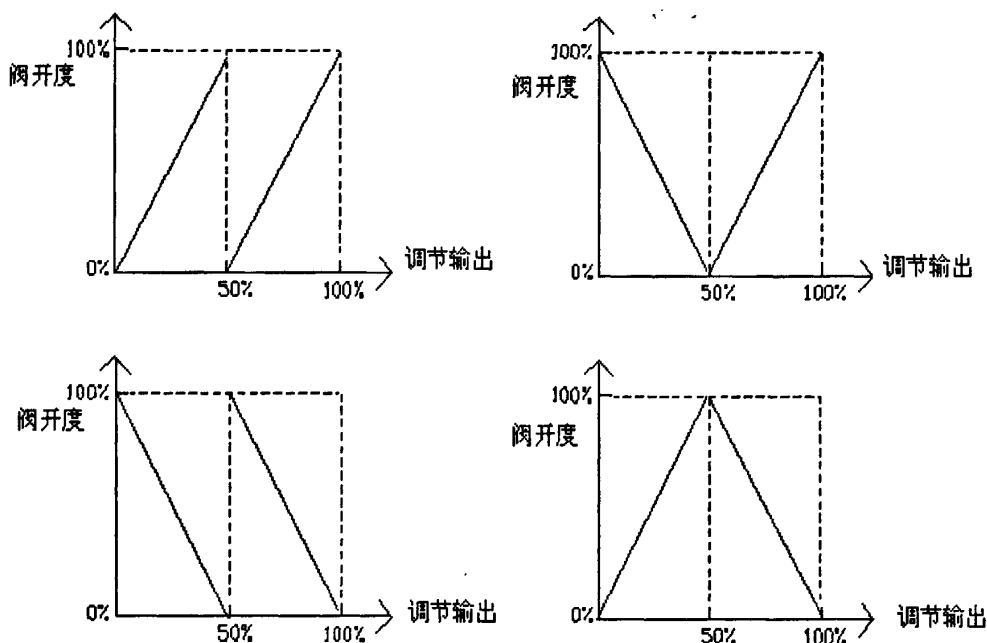


图 3.8 分程控制原理示意图

Fig.3.8 The principle diagram of split control

阀的可调范围可用下式表示:

$$R = \frac{C_{\max}}{C_{\min}} \quad (3-30)$$

式中 $C_{\max}$ -阀的最大流通能力, 流量单位;

$C_{\min}$ -阀的最小流通能力, 流量单位。

根据以往选择调节阀的原则,在考虑选择分程阀时,应还要考虑其合成后的总流

所以具体应用时如何选择同向或异向规律的调节阀特性，完全由工艺需要决定。

3.3.2 分程控制的应用

如前所述，为了解决因高炉进风量太大造成的高炉煤气流量满量程甚至超量程，使透平机可调静叶的调节范围不能满足该工况要求的问题，在高炉炉顶压力控制系统中采用分程控制算法，将旁通阀组中的一个旁通副阀引入扩大可调静叶的可调范围，使高炉炉顶压力能够更好地控制在设定值。根据透平机可调静叶的特性曲线可知，当可调静叶开度超过 85%后，进一步增大开度对流量的影响越来越小，也就是说在 80%之前静叶开度变化对被控对象的作用是明显的，超过 80%以后作用已经不再明显，同理，超过 85%开度后，再增加开度，发电量也不会有太明显的增加。所以分程点设在 85%是比较合适的。如图 3.9 所示反映了可调静叶和旁通副阀的分程动作情况。

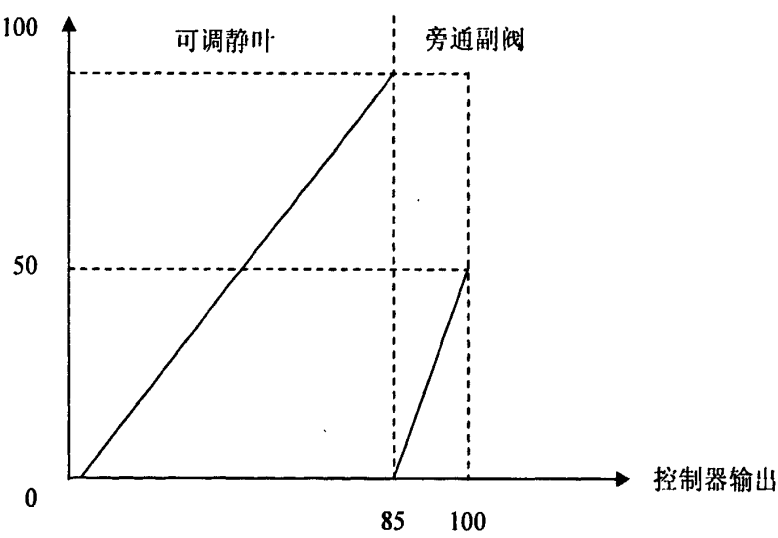


图3.9 可调静叶和旁通副阀分程控制动作图

Fig.3.9 The principle diagram of split control about vane and valves

很显然旁通副阀对控制器输出 85~100%做出的响应，是 100%还是 50%亦或是百分之多少，主要根据调试或者实际生产过程中的需要，单从首钢三高炉的情况分析，将可调静叶的可调范围扩大 50%已经足够了。无需放大太多。

在升功率过程中，旁通阀组中的旁通一副阀和旁通二副阀采用分程控制实现。第二章中已有论述，在此不再重复。

3.4 选择性控制

选择性控制是把由工艺生产过程中的限制条件所构成的逻辑关系，叠加到正常自动调节系统上去的一种控制方法。选择性调节还可用于改善调节品质，构成非线性调节，或借助选择器实现一定操作规律的开停车。因此选择性控制应用非常广泛。

选择性控制一般分为被控对象的选择性控制和控制对象的选择性控制。要构成一个选择性调节，一般应具备两个条件：

- (1) 从工艺上看，生产操作有一定的选择性逻辑规律；
- (2) 从组成调节系统的各个环节作用看，必包含着选择性功能的选择器。

在 TRT 控制系统设计过程中，涉及到同一控制对象在不同工艺操作阶段不同控制器的调节指令。如透平机静叶，在升速阶段，接受转速控制器输出，在并网发电生产阶段，接受高炉炉顶压力控制器输出，升功率阶段又接受透平机前压力控制器输出，通过被控对象的选择性控制方案，实现了工艺操作的选择性规律要求。同时对于同一被控对象，如高炉炉顶压力，在正常工况下以静叶做为主要控制对象，而在紧急故障时控制对象就被选择为旁通阀组。所以本项目设计中通过广泛且灵活应用选择性控制，达到了工艺操作不同阶段安全平稳过渡和机组安全保护。

第四章 DCS 控制系统的集成

4.1 控制系统的选型

控制系统的选择原则是高可靠性、易实现和方便操作、维护简单等。从前面的论述可以看到, TRT 的控制很复杂, 特别是对于同一个调节阀或静叶这样的设备, 在不同阶段的控制各不相同, 但各阶段切换时, 要做好阀位跟踪处理, 实现无扰切换, 同时还要实现反馈控制、前馈控制、分程控制等复杂控制, 对所选择控制系统的仪、电综合性能要求很高。DCS 克服了常规仪表控制过于分散和人机联系困难的特点^[21], 集“4C”技术(计算机技术 Computer、控制技术 Control、通信技术 Communication、显示技术 CRT)于一体^[22], 先进网络通讯技术的引进, 保证了 DCS 实时控制信息的传输, 以及全系统的信息综合传输和管理^[23]。DCS 一般用于复杂工艺过程控制, PLC 则常用于顺序控制, 但两者都是基于处理器的数字控制系统^[24], 在 DCS 系统中可以实现多种基本和复杂的控制算法, 组成一个控制算法模块库^[25]。利用这些模型, 通过组态可实现复杂的过程控制规律。因此 DCS 较之 PLC 在仪控方面具有突出优势, 是本文控制系统集成选型的首选。考虑到首钢电力厂在应用 Infi90 控制系统方面的经验和 Infi90 Open 系统自身优良的性能特点, 结合电力厂的意见选择了采用 ABB 贝利公司的分布式控制系统的第四代产品 Symphony Rack 系统作为首钢三高炉 TRT 的控制系统。

4.1.1 Symphony Rack 系统概况

Symphony Rack 系统^[26]是 ABB 贝利于九十年代中期推出的, 它不但与第三代产品 Infi90 Open 系统兼容, 而且还进一步发扬了分布式控制系统的特点, 即控制器物理位置分散、控制功能分散、系统功能分散及显示、操作、记录和管理集中。该系统借助当今世界多种先进技术, 比如微处理技术、CRT 图形显示技术、高速通信技术、先进控制技术, 已形成一个功能更加完善的、更加开放的分布式控制系统。

(1) 系统硬件:

用于过程控制, 实现物理位置相对分散、控制功能相对分散的设备, 称为过程控制单元 PCU(Process Control Unit)。在一个 PCU 内, 可以配置数个高性能处理器为核心, 能进行多种过程控制运算, 并通过子总线和相关 I/O 模件连接, 获得现场信息的智能模件型控制器, 称为多功能处理器 MFP(Multi-Function Processor)。

用于过程监视、操作、记录等功能, 以及报警、数据处理、数据归档、数据交换和通信等功能, 并以通用计算机为基础的硬件软件有机结合的设备, 称之为入系统接

口 Conductor NT。

采用通用计算机和操作系统，以及完整的专用组态软件系统，为过程控制应用完成软件组态、系统监视、系统维护等任务，并能够在线或离线工作的设备，称为系统工具 Composer。

为了提高系统的应用效率，Symphony 系统采用多层、各自独立、不同通讯方式与信息类型结构，将过程控制单元 PCU、人系统接口 Conductor NT、系统工具 Composer 等硬件设备，构成一个完整的分布式控制系统。

(2) 系统软件：

在 MFP 模块内，已固化在 ROM 中可供系统设计组态，完成过程控制、数据采集的标准子程序称为功能码（Function Code）。在对控制器组态时，使用的块状语言 FC 相关的基本概念还包括：块地址即调用功能码时赋予的块号、规格参数即功能码的输入参数。

用系统工具 Composer 对控制器组态的工具为 Automation Architect；为人系统接口 Conductor NT 画面组态的编辑器为 Grafx。

(3) 网络结构

兼容的 INFI90 系统通讯网络

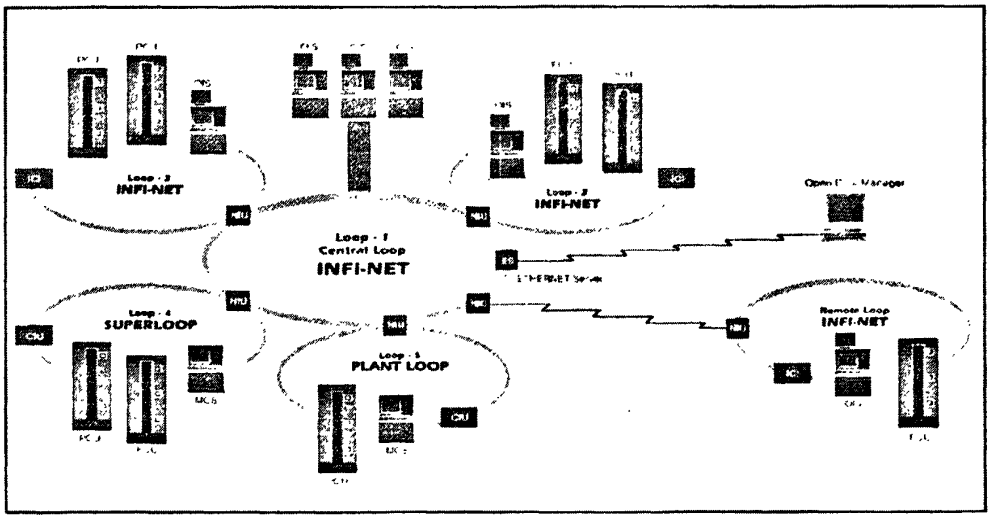


图 4.1 Symphony Rack 网络结构示意图

Fig.4.1 Schematic drawing of Symphony Rack network

如图 4.1 所示 Symphony Rack 系统网络结构中包括了四个数据层：

- (a) 企业数据管理层，一般为：操作网络 Operation Network (Onet)
- (b) 过程数据管理层，一般为：控制网络 Control Network (Cnet)
- (c) 过程控制数据层，一般为：控制通道 Control way (CW)

(d) 过程 I/O 数据层, 一般为: 子总线 Slave Bus (SB)

4.1.2 过程控制单元 PCU 简介

过程控制单元是一个由 DCS 核心组件组成的集合, 其最重要的组件是多功能处理器模件 MFP。MFP 是 Symphony Rack 系统中一个高集成度、高度模块化、高效能的完成过程控制的核心模件。它能够完成多种类型的过程控制和数据采集。在控制器的 NVRAM 中存在控制组态。由于有相应后备电池的支持, 所以在失电的状况下也不会丢失组态。为提高系统的可靠性和控制的完整性, MFP 可以构成冗余配置。冗余的 MFP 共同支持子总线。另外冗余的 MFP 还可以提供在线修改组态的能力。

(1) 多功能处理器模件 MFP。

多功能处理器模件 MFP 是一个单印刷电路板模件, 占 MMU 一个槽位的主模件, 它是 Symphony 模件系统中功能最强的一种模件。

(a) 功能: 数据采集及处理, 过程控制、通信协议转换等。

(b) 特点:

冗余功能: MFP 可以设置成 1:1 冗余, 其冗余方式为: 主 MFP 处于执行方式时, 冗余 MFP 处于热备跟踪方式。主 MFP 和冗余 MFP 间串行链速率为 1Mbps。

带载能力: 一个 MFP 通过本身的子总线接口连接 64 个各种类型的子模件。

接口能力: 一个 MFP 具有两个通讯接口, 可有两种组合方式: 1 个 RS-232 和 1 个 RS485 端口或 2 个 RS-232 端口。

带站能力: 一个 MFP 可带 64 个 IISAC01 手动控制站(需同时选择 IMCISI2 子模件及端子)。

自诊断能力: MFP 自动判别软、硬件故障。

执行段: MFP 的程序可分段执行, 其运行速度分为 8 个档次, 控制程序可在不同的速度下运行。

扫描周期: MFP 对模拟信号的最快扫描周期为每秒 12 次, MFP 对模拟信号的一般扫描周期为每秒 4 次; MFP 对数字信号的最快扫描周期为每秒 50 次, MFP 对模拟信号的一般扫描周期为每秒 10 次。

软件键: MFP 的特色之一就是软件键。这个键可防止非法复制和更改软件, 任何要复制模件软件的企图都会导致模件失效。

(c) 操作: MFP 有三种操作方式: 组态, 执行, 出错(软件、硬件)。

组态方式: 用户在组态方式输入自己的控制策略, MFP 接收来自控制通道或模件总线上的组态命令, 改变具有后备电池 NVRAM 内的数据。在组态方式下, 用户可以组态地址为 30~9998, 其它地址为固定功能块占用。地址 0~14: 执行功

能码81:地址15~19:段控制码82;地址20~29:扩展执行码90;地址9999:结束码89。

执行方式: MFP将与子模件和其它控制模件通讯, 并处理例外报告, 组态及控制信息。MFP执行用户的控制方案, 将读入信息, 修正输出。

出错方式: 如果内装的系统诊断程序, 检查出硬件或组态中的错误, MFP就会进入出错方式。如果是硬件问题, 模件就会暂停, 并在前面板显示出错码。如果NVRAM出错, 状态LED就会闪烁, 但模件会继续运行, 这是由于RAM内存放的是有效组态的复制文件, MFP就会按照RAM里的内容运行。下一次如果MFP被复位, 就不能再启动了, 因为NVRAM出错。

(2) 数字输入子模件

(a) 介绍: IMDSII_X是为控制模件-MFP提供数字输入通道的子模件。它是一个单印刷电路板模件, 占MMU的一个槽位。DSI提供16个独立的数字输入信号(24VDC, 125VDC和120VAC), 它们被分成两组, 每组8个点。其中12个点是相互隔离的, 其它两对点共用公共的正极输入端。

(b) 功能结构: I/O总线接口, 控制逻辑, 数字输入隔离区, 阈值检测, 模件数据。

(c) 输入特性: 如表4.1所示。

表 4.1 数字输入子模件特性

Table 4.1 The characteristic of digital input module

通道数量	16路只有光电隔离的数字输入通道
通道性质	IMDSII ₂ : 24VDC / 48VDC / 125VDC / 120VAC IMDSII ₃ : 24VDC IMDSII ₄ : 48VDC IMDSII ₅ : 125VDC / 120AC
相对应的功能码	FC84
端子及电缆	NTDI01, NKTU01

(3) 数字输出子模件: DSO14

(a) 介绍: DSO14是为控制模件MFP提供数字输出通道的子模件。它是一个单印刷电路板模件, 占MMU的一个槽位。DSO通过板上的固态电路输出16个独立的数字信号, 12个输出被相互隔离, 其它两对点共用公共的正极输入端。

(b) 功能结构: I/O总线接口, 隐含控制逻辑块, 数字输出, 输出寄存器, 隐

含值寄存器，数据选择器，状态缓存器。

(c) 输出特性：如表4.2所示。

表 4.2 数字输出子模件特性

Table 4.2 The characteristic of digital output module

通道数量	16路具有光电隔离的数字输出通道
通道性质	IMDS014: 250mA / 24VDC, 125mA / 48VDC
相对应的功能码	FC83, FCI28(设置隐含值)
端子及电缆	NTDI01或NTR002, NKTU01

(4) 模拟输入子模件FECI2

(a) 介绍：IMFECI2是连接标准高电平电压、电流模拟输入信号的子模件。它与多功能处理器通过子总线通信，为多功能处理器模件提供标准现场模拟信号。

(b) 功能结构：模拟输入，微处理器和控制逻辑，模拟数字转换器，I/O子总线接口。

(c) 输出特性：如表 4.3 所示。

表 4.3 模拟输入子模件特性

Table 4.3 The characteristic of simulant input module

通道数量	15路独立高电平信号输入通道
通道性质	1~5V、4~20mA、-10~+10V、0~1V、0~10V、0~5VDC
相对应的功能码	FCI32
端子及心缆	NTAI05, NKTU01
测量精度	4~20mA: 0.1%; 1~5V: 0.1%。

(5) 模拟输出子模件ASO11

(a) 介绍：IMASO11是一个专门提供标准信号输出的多路通道模件，占模件安装单元的一个标准槽位，并通过相应的子总线与多功能处理器模件MFP通信，以获得输出指令，经转换后将标准模拟信号送往现场。

(b) 功能结构：子总线接口，总线故障检测器，模拟输出，控制逻辑，输出逻辑，D / A转换器，隐含操作，反馈选择器，A / D转换器，模件状态。

(c) 输出特性：如表 4.4 所示。

表 4.4 模拟输出子模块特性

Table 4.4 The characteristic of simulant onput module

通道数量	14路独立高电平信号输入通道
通道性质	1~5V、4~20mA
相对应的功能码	FC149
端子及电缆	NTDI01, NKTU01
测量精度	4~20mA: ≤0. 25%; 1~5V: ≤0. 15%。

4.1.3 系统的技术特点

Symphony Rack 系统采用了多层的通讯结构，在整个系统中通讯网络可分为：环形网络、总线网络。环形网络采用存储转发的通讯方式。其特点是可靠性高、纠错能力强、通讯速度达 10M 波特率。通讯环可以挂接 250 个节点，两相邻节点间距离达 2000 米。环形的高层通信层所具备的这些结构和能力保证了全厂控制和管理的实现。操作员站 C-NT、工程师站 EWS 和现现场控制单元 PCU 通过通讯模块 NIS 挂接到环形网上，环形网内外环冗余配置，保证了数据流的畅通和可靠。现场控制单元 PCU 由通讯模块对 NIS 和 NPM 及以下部分组成，并且通讯模块对和多功能处理器冗余配置。NIS 模块主要承担系统通信协议的执行，信息报告的发送与接收，是保持协议一致的接口模块，在环形网络中不可缺少。NPM 模块一边与 NIS 配对缺一不可，另一边支持相应的控制通道(Control Way)，把多功能处理器产生的例外报告收集起来，并按要求达到的通信地址分类，传入相应的 NIS 模块形成信包。同时 NIS 也能把接到的本节点信息包，传入相应的多功能处理器，去执行过程控制的要求。I / O 子模块通过子总线(Slave Bus)将从现场采集到的数据传入多功能处理器，同时把控制指令从多功能处理器传到现场。

(1) Symphony Rack 系统在环形控制网络中使用了存储转发协议，控制通道使用自由竞争式协议。

存储转发协议的特点是：在系统网络上，没有通信指挥器，所有节点的地位是平等的，每一节点均是独立的，带有缓冲寄存器的信息转发器。每一转发器随时、独立地进行数据接收、数据发送、数据撤消等。每一节点通过相应的传输介质与另外两个相邻的节点连接，最后形成一个闭合的环形网络结构。数据报告将环形网络内的所有节点依次传递，从信息源节点开始至目的节点，再由目的节点回到原发出信息报告的节点止。由于此种协议规定的传输方式在整个网络中没有指挥器，所以网络中的节点只要有信息报告需要发送，在没有指挥器的干预下，完全能独立自主的发送，从而去

掉了等待指挥器指令、令牌及时间间隙等等待的时间,使信息的例外报告非常快的走出节点,节省了时间,减少了延迟。另外,由于此种输方式是点对点进行的,并且经过每一节点的寄存器信息得以重新转发,所以能保持信息的电平水平,这样就既提高了抗干扰能力,又保证了网络的安全,又能做到适度的长距离传输。

所谓自由竞争式就是指某一时刻,所有网络上的通讯主体,不受约束竞争发出信息报告。如果某一时刻内,有两个以上通讯主体需要占用总线时,就可能发生“碰车”现象,这时各通讯主体会自动退回,经延迟再重新发送,而完成通讯职能。该协议适应不封闭的,两端开口的总线型通讯网络。这一网络中没有通讯指挥器,各能产生信息报告的部件均是独立的通讯主体。因无通讯指挥器,发送信息不受约束,所以对信息的响应极快,延迟非常小。在轻载的情况下,总线的响应更容易提高,并且由于通讯结构简单,所以非常容易进一步扩展。

(2) Symphony Rack 系统使用了例外报告技术、信息压缩技术和确认重发技术等先进技术。

例外报告技术:是指当过程变量的变化率(幅值,时间)超过了预先规定的范围时,该变量的信息才能通过网络传递至相关节点;否则有关节点则认为该信息没有变化,仍使用该点前一次的值。

例外报告技术使用的结果为:对变化快的信号,监视器监视得就频繁,对其扫描的频率就高,产生的例外报告就多。对变化缓慢的信号,监视器扫描的频度低,产生的例外报告就少,从而做到了对信息量的有效控制。

信息压缩技术:由于控制网络中,所有节点均具有缓冲器,为了提高内存的利用率,系统采用了信息打包技术。在信息打包、传送、移出的完整操作过程中,它可以保证信息包在到达任一目的节点的顺序与被发送的顺序是一致的。这也是保证能够实现分布控制的关键技术之一。

确认重发技术:信息包在转发过程中可能遇到几种不利于传输的意外。其补救的方法就是做该信息包的重发处理。如果在所有的重发之后,信息包传输仍然没有成功,目的节点就被表示为离线。并同时通知所有节点,推迟与该节点的进一步通讯,直到他能够重新正常响应为止。然后网络接口模块会周期地查询离线的节点。

数据传输安全对一个成功的通讯系统是至关重要的。Symphony 系统得控制网络将精心设计的错误检测与重发逻辑结合在一起,构成了高度安全的分布通讯系统。

(3) 分布数据库

在控制网络的每个节点上都有一个数据通讯与处理模块,用于保存一个实时的数据库,这个数据库中存有关本节点内所有应与外界发生关系的数据,无论是读入还是写出,这样就在网络与控制之间建立了缓存区,使之可以异步地工作,使两方面都可以

发挥最大的效率,控制系统在读数据时不必为查询控制系统而耽误时间,完全是并行地工作。分布数据库的另一个好处是系统的通讯状态都在数据库中有记录,使通讯模块不仅仅起接口的作用,而且起到数据管理的作用。

(4) Symphony Rack 系统配有丰富方便的组态软件。

上位监控和图形画面组态软件 Conductor NT 运行于 Windows2000 操作平台下,具有客户端/服务器结构,采用了文件浏览器技术、ActiveX 的控制技术、OPC 集成技术、SQL 的历史数据库结构、TCP / IP 以太网通信协议、DCOM 技术等一系列当前大家都在遵守的标准,以促进设备的开放和更新。由于 Conductor NT 采用了面向对象的软件,内有大量工控图形组件 Submodel,对它的组态可用填空的方式完成,所有运行功能的实现全部建立在标签名的基础上,对于状态工艺图的编辑依赖一个先进的图形编辑器和可利用的静态、动态逼真的工业标准符号来支持在线的用户动态图形开发,所以使组态图形画面变得非常容易和方便。Conductor NT 可以用 Excel 格式产生报告和报表。使报表的实现变得非常容易。

控制逻辑组态由软件 Composer 完成。通过该软件对控制过程的组态是基于特定的控制算法-功能码进行的。功能码实际上是一种经过编码,代表一定控制算法及有关参数的软件。该软件能够一起调入功能块来实现有关的过程控制。功能码实际上是 Symphony Rack 系统完成过程控制的灵魂。Composer 实现了软件图形化,把复杂的编程改变为功能码的调用,使工程师的工作重点从繁杂的指令输入中解脱出来,而集中精力充分利用时间设计出优秀的控制软件。因为功能码的图形化把所有有关的输入、输出特性非常清晰的表达出来,所以设计者能够一目了然,既了解了特性,又便于连接输入、输出形成控制策略。Composer 运行于 Windows2000 操作系统下,有很强的窗口和数据浏览能力。尤其是它的项目树结构、对象交换的文件建立方式都为用户创造了十分有利的工作条件。Composer 的突出功能在于它允许在线和离线两种方式下组态并向多功能处理器 MFP 中下装组态,更好地适应生产过程控制的要求。

4.2 控制系统的软硬件构成

4.2.1 硬件系统构成

根据 TRT 系统工艺监控点数进行 DCS 硬件配置。由 Symphony Rack 系统构成的 DCS 控制系统硬件结构示意图如图 4.1 所示。系统采用主控制器 CPU 冗余、通讯网络 Cnet 冗余、上位监控操作员站 OIS 冗余、供电单元冗余的冗余配置,并将其中一台操作员站兼用作工程师站,既减少设备投资,又方便了以后对系统组态的完善和维护。控制单元 PCU 和两个端子柜 T/C1 与 T/C2,与系统外部联系均通过端子柜内的端子板

实现，端子板的存在，方便了供电方式的选择，同时对系统起到一定保护作用。网络采用 Slave Bus、Control Way、Cnet、Onet 四层网络，完成 TRT 工艺过程数据采集、处理控制、监视管理等功能。

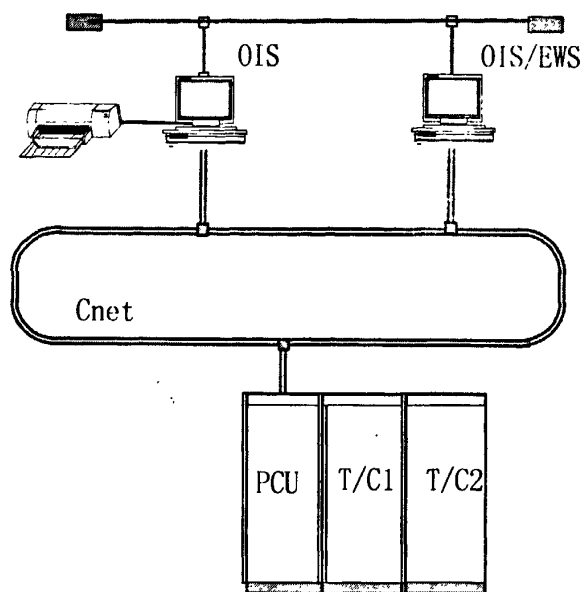


图 4.1 DCS 系统结构示意图

Fig.4.1 Schematic drawing of DCS System

(1) 首钢三高炉 TRT 项目 I/O 点配置

TRT 系统涉及 I/O 点的配置：

(a) 模拟量输入信号：高炉炉顶压力，管道内高炉煤气的温度、压力、流量信号，透平机可调静叶开度、旁通阀组的开度信号，透平机轴瓦温度、振动、位移信号，动力油系统和润滑油系统等辅助系统的压力、流量、液位信号。采集到的信号进入 DCS 系统经过处理后在操作员站上显示、记录，并根据控制逻辑或控制模型对系统设备的运行进行控制管理。

(b) 模拟量输出信号：对可调静叶开度或者旁通阀组中旁通阀的开度控制输出信号；对通过煤气管路、透平机、旁通阀组的煤气流量的控制，实现对高炉炉顶压力的控制；氮气密封压差、煤气管路凝结水液位、透平级间排水液位等控制输出信号；以及入口电动蝶阀的控制。

(c) 开关量输入信号：透平机转速、透平机振动、位移的报警信号；TRT 启动条件的数字量信号；来自高炉的联系信号；设备运转或开关等状态信号，采集到的信号进入 DCS 系统经过处理后在操作员站上显示、记录，并根据控制逻辑或控制模型对系统设备的运行进行控制管理。

(d) 开关量输出信号：传送给高炉中控室的 TRT 状态信号和与高炉的联系信号；

动力油泵、润滑油泵、入口插板阀、出口插板阀、快切阀、均压阀、泄压阀、排雾电机等非模拟量控制的设备的启停控制。

首钢三高炉 TRT 项目 I/O 点统计情况如表 4.5 所示。

表 4.5 首钢三高炉 TRT 项目 I/O 点统计表
Table 4.5 The I/O list of 3rd TRT in ShouGang

类型	数量
数字量输入	149
数字量输出	76
4~20mA 模拟量输入	116
4~20mA 模拟量输出	14

根据以上输入输出的类型及各自需要的数量,对模件进行选装配置。表 4.6 是 DCS 控制系统集成配置模块数量统计情况。

表 4.6 首钢三高炉 TRT 项目 DCS 硬件配置清单
Table 4.6 Configuration list of DCS in ShouGang 3rd TRT

名称	型号	数量
CPU	MFP12	4
电源模件	PAS2	2
网络处理模件	INNPM11	2
网络接口模件	INNIS01	2
数字量输入模件	IMDSI22	10
数字量输出模件	IMDSO14	5
4~20mA 模拟量输入模件	IMFEC12	8
4~20mA 模拟量输出模件	IMASO11	2

系统通过环形网络 Cnet 将以多功能处理器 MFP 为核心的过程控制单元、操作员站 Conductor NT5.0、工程师站 Composer4.3 连成一个整体。这是由网络处理模件 NPM 和网络接口模件 NIS 连接在冗余配置的系统环形网络上实现的。I/O 信号处理模件必须通过端子板与现场 I/O 连接,并向需要供电的外部 I/O 提供标准供电,这些端子板布置在端子柜 T/C1 和 T/C2 内。需要注意的是端子板根据是否向外部提供电源而进行

不同的电路跨接，如果跨接线错误就会烧坏关联的设备。

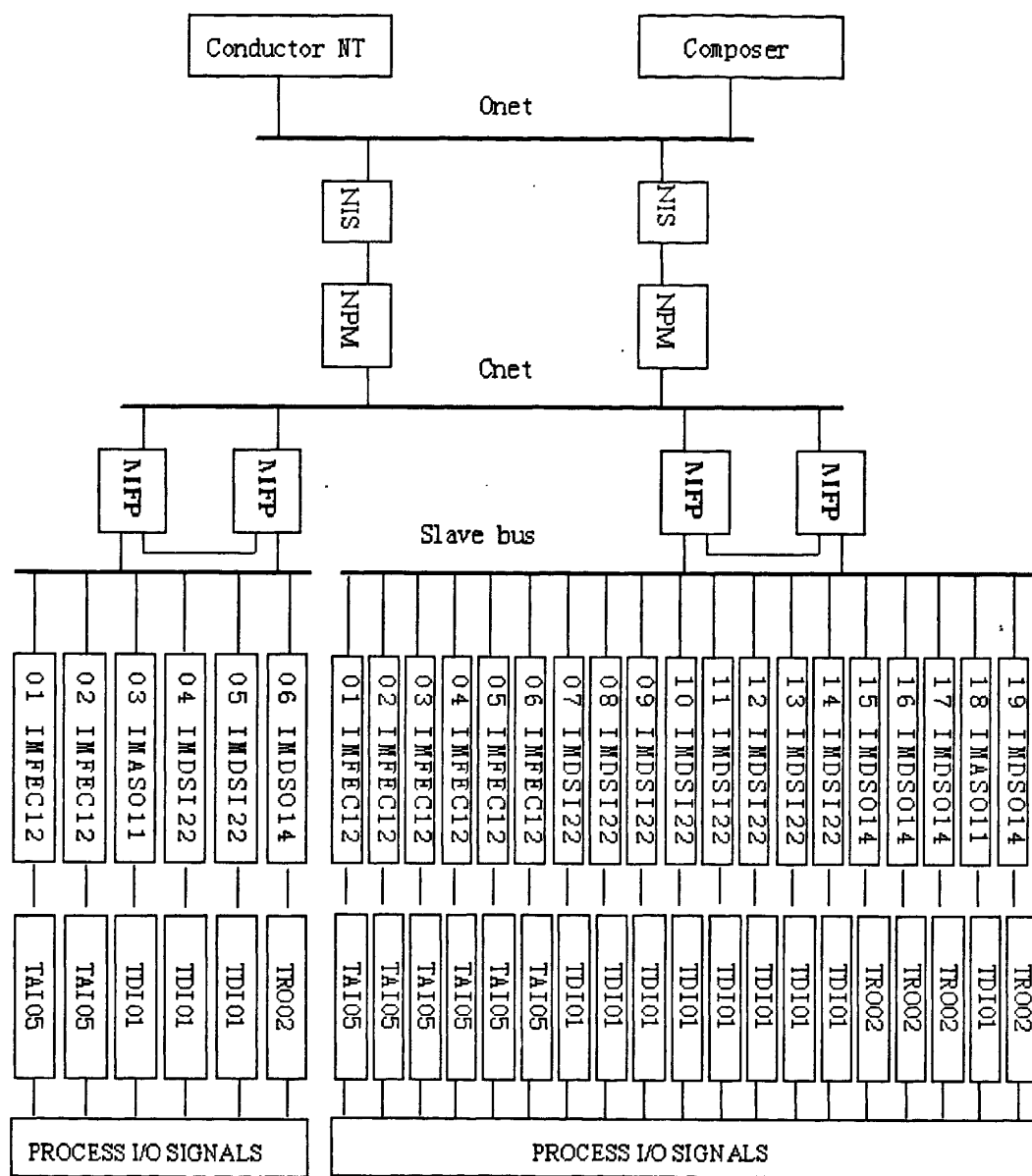


图 4.2 DCS 配置图

Fig.4.2 Schematic drawing of DCS

4.2.2 软件系统构成

软件系统是在工程师站和操作员站硬件平台上构建的支持人们进行组态、监视、操作、管理、维护等各种功能的软件平台。主要由系统软件、组态软件 and 用户应用软件组成。

本操作员站和工程师站操作系统采用 Windows 2000 Professional+SP2。操作员站

(OIS) 组态软件是 Conductor NT5.0, 工程师站 (EWS) 控制组态软件是 Composer4.3。用于报表的 Excel2000 软件。下表 4.7 所列为系统主要软件配置情况。

表 4.7 系统主要软件配置

Table 4.7 System main software configuration		
站类型	软件种类	软件名称
操作员站	操作系统	Windows 2000 SP2
	Symphony 系统软件	Conductor NT5.0(具有操作监控和组态功能)
工程师站	操作系统	Windows 2000 SP2
	报表处理	Microsoft Excel 2000
	电子文档阅读	Adobe Acrobat Reader 6.0
	Symphony 系统软件	Composer4.3(具有系统组态功能)

4.3 编程和调试

4.3.1 程序功能码说明

在 Symphony 系统中, 编程工作就是利用系统组态软件提供的丰富的功能码, 有效合理的组合, 完成想要实现的控制思想策略, 下面就应用到的主要功能码进行说明。

(1) 功能码 FC156-高级 PID 控制器

功能码 FC156 实际是带有前馈控制算法的前馈-反馈控制器。较之其他 PID 控制器 (如功能码 FC18 和 FC19) 有如下一些特点:

- (a) 直接加入一前馈信号到 PID 控制器。
- (b) 微分作用的改进算法。
- (c) 加入一外部重置或手动重置信号的改进算法。
- (d) 控制输出增加和减少抑制信号可以约束当遇到限位值时的用于串级组态的控制器。这可以防止当子回路控制输出饱和时主回路结束。
- (e) 提供一互不影响 PID 控制算法或一经典 (模拟量) 连续相互影响的 PID 控制器的数字化工具。
- (h) 提供一快速饱和恢复操作。

除高级特点外, 功能码 156 还有一个 PID 控制器的通用特点, 包括:

- (a) 手自动无扰动切换。
- (b) 比例带无扰动调整。
- (c) 防重置 (积分) 终结功能。

- (d) 正反作用切换。
- (e) 允许无扰动修改设定值操作。

利用功能码 156 就可以方便地实现如前所述的 TRT 启动升速过程中透平机前压力前馈-反馈控制、高炉炉顶压力前馈-反馈控制功能。作为实例如图 4.3 所示，实现高炉上料扰动的前馈补偿程序。用红圈标注的地方就是高炉上料扰动信号，蓝圈就是静态前馈补偿系数 K_{ff} ， T_1 和 T_2 通过整定得到。

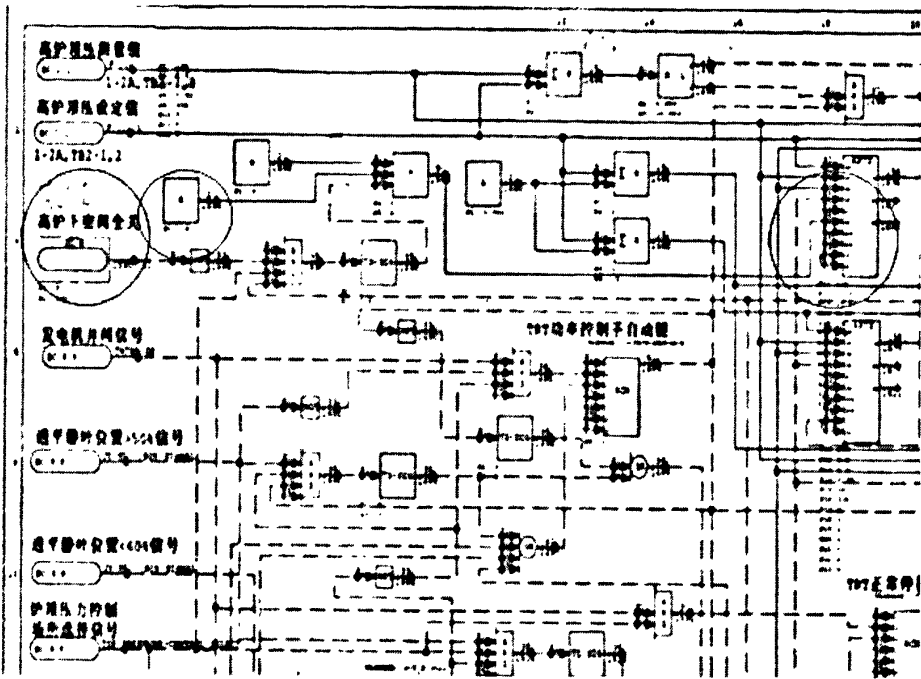


图 4.3 前馈控制组态图实例

Fig.4.3 Instance of feedforward control plan

(2) 功能码 FC1-函数发生器

函数发生器功能码 FC1 能将一个非线性的输入-输出关系通过分段线性化处理，可将输入以分为 5 段，每段近似为不同斜率的直线段，使复杂的非线性函数问题线性化后更易于工程上实现。利用该功能码可以实现升速曲线。

用一时间计数器作为 FC1 的输入，按照前文所述，升速曲线分为五段，即 0~1200rpm、1200rpm、1200~2200rpm、2200rpm、2200~3000rpm。该曲线每段的斜率可以由工艺给出或通过试验整定获得。

利用该功能码还可以实现分程控制。输入 S1 为被控对象控制器的输出，经过 FC1 的分段处理，可以很容易将 X 轴的变化换算为 Y 轴上希望的变化，根据分程控制阀的个数确定相应 FC1 的个数，就可以实现分程控制功能了。

(3) 功能码 FC18、FC19-基本 PID 控制器

FC19 (PV 和 SP) 对输入的过程变量和设定值的偏差进行比例、积分和微分计算。是实现单回路反馈控制最常用的功能码。功能码 FC18 和 FC19 基本功能相同，不同就是 FC18 (Error Input) 是直接接受偏差输入的 PID 控制器。而 FC19 是分别接受对象的设定值和过程测量值。如图 4.4 所示，用 FC19 和 FC80 实现了氮气密封差压 PID 控制。

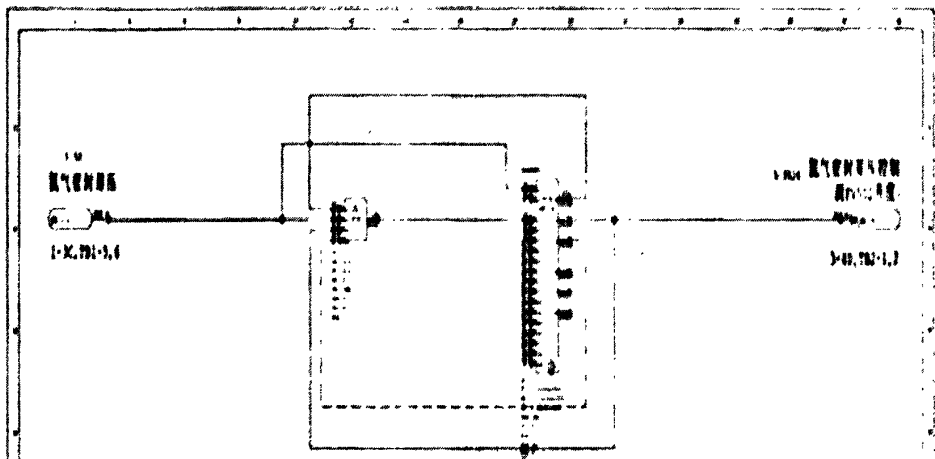


图 4.4 氮气密封差压控制组态图

Fig.4.4 Control plan of nitrogen pressurize

(4) 功能码 FC7、FC14、FC15、FC16、FC17

这些功能码是完成加减乘除和开放运算的基本功能码，FC7 是完成开方运算的功能码，在差压流量计算时很有用；FC14 和 FC15 分别是有四个输入和两个输入的加法运算功能码，通过内部设定系数的正负，就可以进行减法运算，所以没有专门的减法运算功能码。FC16 是乘法运算的，FC17 是除法运算的，这在控制组态和编程时是经常使用的功能码。

(5) 功能码 FC10、FC11

FC10 是四选一的高选功能码、FC11 是四选一的低选功能码。这两个功能码为实现选择性控制提供了方便。

(6) 功能码 FC3-Lead/Lag

这个功能码提供了对输入的超前或滞后处理，通过设定超前时间常数 T1 或滞后时间常数 T2 就可以方便地实现消除工艺过程中对象的纯滞后或超前问题。为实现前馈补偿控制提供了又一途径。

超前/滞后功能时的微分方程分别为：

$$Y = -Y_L + \frac{dt(<S_1 > - Y_L)}{T_2 + dt}$$

(4-1)

$$Y = -Y_L + \frac{T_1(<S_1 > - <S_{1L} >) + dt(<S_1 > - Y_L)}{dt}$$

(4-2)

式中：Y-当前输出值
Y_L-前次输出值
dt-模块循环扫描周期,单位 s
S₁-当前输入值
S_{1L}-前次输入值
T₁-超前时间常数，单位 s
T₂-滞后时间常数，单位 s

(7) 功能码 FC35-Timer

本功能码输入是开关量信号，提供三种定时方式：参数 S2 设为 0 时，为脉冲输出方式；参数 S2 设为 1 时，为延迟输出方式；参数 S2 设为 2 时，为保持输出方式。参数 S3 为设定时间常度。如表 4.8 所示。

表 4.8 定时器功能

Table 4.8 Function of Timer

取值	方式	说明
S2=0	Pulse output(P)	输入一个脉冲，输出就保持 S3 设定时间长度
S2=1	Timed out(TO)	在延迟 S3 设定时间长度后将输入信号输出
S2=2	Timing(T)	在 S3 设定时间长度内将输入信号输出

FC35 是逻辑控制中常用而重要的功能码。

(8) 功能码 FC33, FC37, FC38, FC39, FC40

FC33 为逻辑“非”功能码，FC37 和 FC38 是二输入和四输入逻辑“与”功能码，FC39 和 FC40 是二输入和四输入逻辑“或”功能码。这是构成逻辑顺控组态所必需的最基本的功能码。

(9) 功能码 FC34, FC62

功能码 FC34 是 R/S 触发器。功能码 FC62 是具有远程控制功能的 R/S 触发器。这两个功能码的不同在于，FC62 可以组态作为操作按钮使用，而 FC34 因为没有远程控制功能，只能组态为控制逻辑中间的触发器，存储或复位中间的逻辑状态。所以使用 FC62 可以很容易实现设备手动操作软按钮的设计组态。图 4.5 是 TRT 启动信号组态图，红圈显示的是功能码 FC34 的应用，当满足条件时触发器保持启动信号，直到复

位信号到来。蓝圈显示的是功能码 FC62 的应用，对应 OIS 画面上有操作按钮，可以接受操作人员的指令。

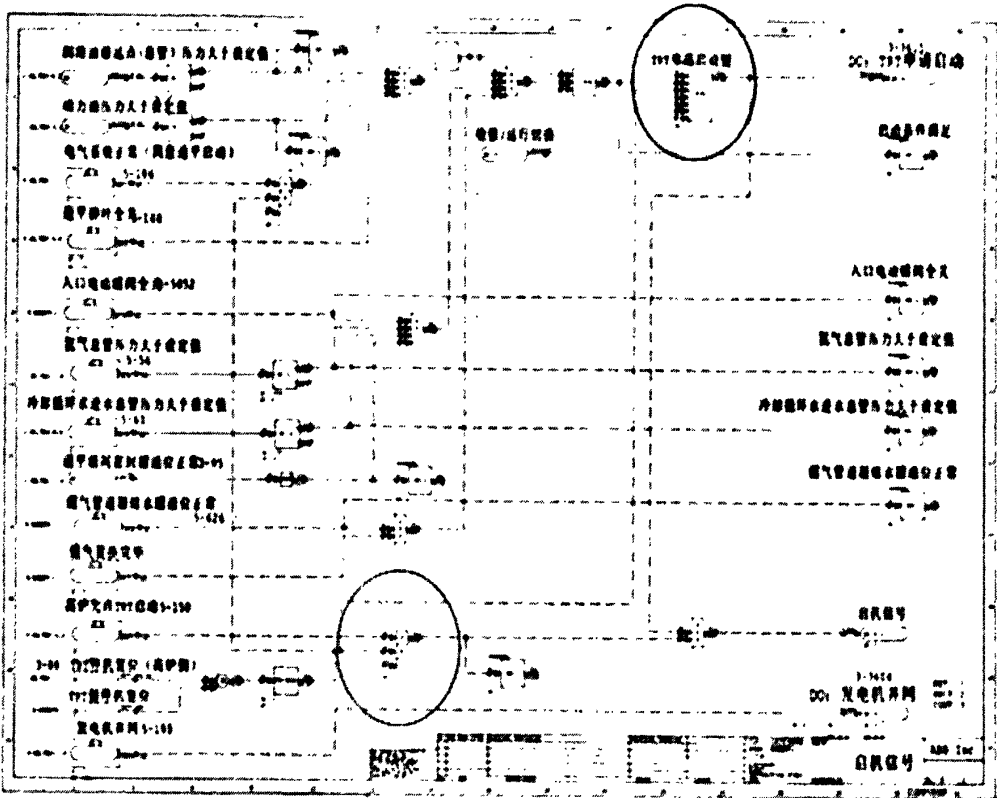


图 4.5 TRT 启动信号组态图

Fig.4.5 Startup logic plan of TRT

(10) 功能码 FC80-控制站

功能码 FC80 可以看作是提供 PID 控制器与人交互的接口函数，只有通过 FC80，FC18、FC19、FC156 等 PID 控制器的参数才可以在 OIS 上显示，操作人员也只有通过 FC80 将比如手自动切换，手动控制输出调整，P、I、D 参数修改等设置传递给 FC18、FC19、FC156 等 PID 控制器，才能使它们按照操作人员的要求作出调整，因此在组态时，凡是选有 PID 控制器就要配有 FC80 控制站。

(11) 功能码 FC85，FC166

功能码 FC85 是计数器 (Up/Down Counter)，可以上升计数或下降计数。配合功能码 FC35 和 FC33 可以实现升速时间计数功能。功能码 FC166 是积分器，利用该功能码可以进行流量累积运算。图 4.6 就是透平机升速曲线组态图。

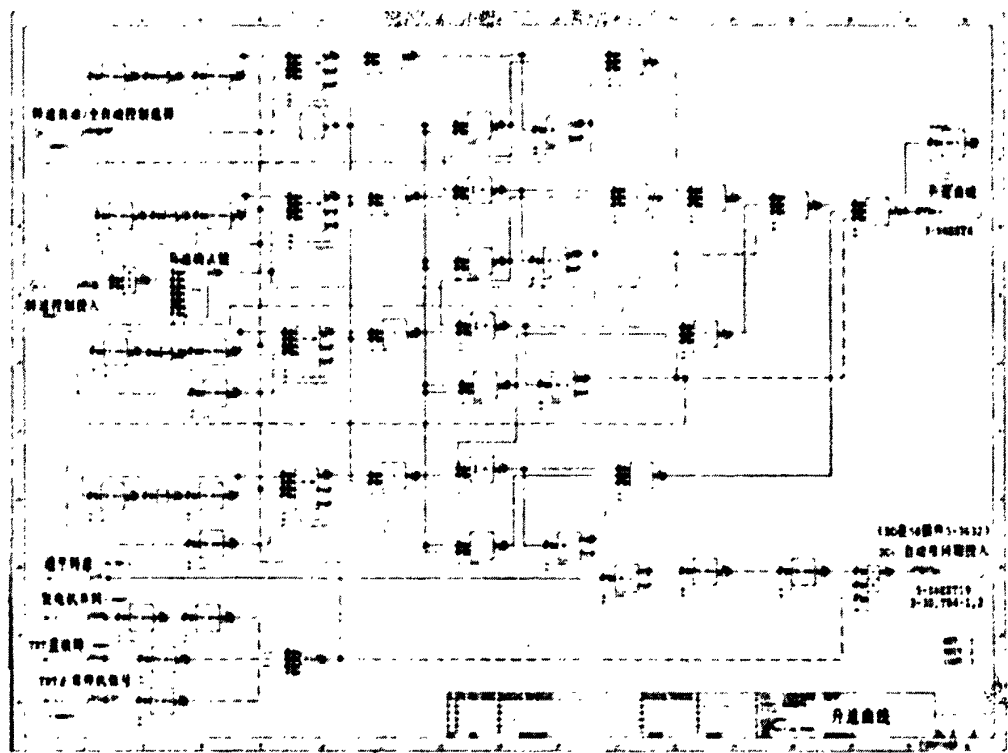


图 4.6 升速曲线组态图
Fig.4.6 Configuration plan of rate

4.3.2 操作员站组态

操作员站为工程师构成了组态接口。通过它来组态和修改结构图形画面，标签数据库，过程控制方案，以及打印报表及设定保密级等特性。

(1) 设置安全级

在系统初次启动时，操作台安全级处于非触发状态，并以缺省登录存在，权限为最高级，对安全级进行组态，是为了保证系统运行和生产组织管理安全有序的基础。最高级 Level3 是 Supervisor，超级用户，赋予工程师；Level2 是操作员管理级，授予操作班长；Level1 是普通操作员级，一般用户拥有。

(2) 标签组态

标签是一个模拟或数字过程值在操作台上的定义，作为一个控制点或监视点。一个标签包含有在过程控制组态中（象功能块）的某个点你所需要找到的所有信息，并且建立该点和操作台之间的通讯。Conductor NT 操作台允许在线标签组态。标签的组态就是通过添加或删除创建有用的标签列表。该表应包括标签的五个信息字段。如表 4.9

表 4.9 标签属性

Table 4.9 Property of Tag

属性	说明
标签名:	每个标签在数据库中的一个唯一的名称
描述:	描述标签的字符串
标签类型	标签的类型
操作状态	标签的状态
修改	对标签所做的最后一次修改的数据和时间

(3) 历史数据库

任何组内的 Conductor NT 服务器或客户，可被组态从一个 Conductor NT 服务器上采集信息，并保存它做各种各样的应用，如：记录、趋势和数据归档，这些所采的数据被保存在历史数据库里。

历史数据库的组态就是建立和编辑历史数据库标签名，每个历史标签数据库标签名被安排一个 Conductor NT 服务器中实时标签库中的一个点。在一个 Conductor NT 组内每个服务器节点可采集 2000 个历史数据库点。

(4) 组态结构画面

图形画面需要完全组态，而结构画面是 Conductor NT 软件提供的被固定格式的画面，其形式不能修改。结构画面包括：汇总画面，组画面，点画面。

(a) 工艺流程画面

TRT 工艺流程的各主要设备，其运行状态信号进入 DCS 系统的，均可在图中显示。本图不仅反映了 TRT 的工艺过程，而且也反映了各设备的运行状态，设备的运行状态为绿色，停止状态为红色，报警状态为黄色等。同时进行生产状态的跟踪，如：高炉炉顶压力控制场所指示、TRT 启动、并网、重故障停机等 TRT 运行状态指示等。如图 4.7 所示是首钢三高炉 TRT 的流程画面。

(b) 组操作画面

如图 4.8 所示是首钢三高炉 TRT 的组操作画面图。组画面的目的是为了操作方便快捷，特别是在紧急情况下比流程操作更易集中相关的信息和操作，而减少了操作面板的切换时间，所以组操作画面组态要了解特定情况下设备关联性和工艺特点，在此基础上确定成为一组的操作元素。

(c) 动力油系统画面

如图 4.9 所示是首钢三高炉 TRT 的动力油系统画面图。动力油系统画面组态采用流程图方式，集中了动力油系统的设备组成、状态，控制信息、报警信息、操作接口

等，方便了操作人员全面了解该系统运行信息和进行适当的操作。

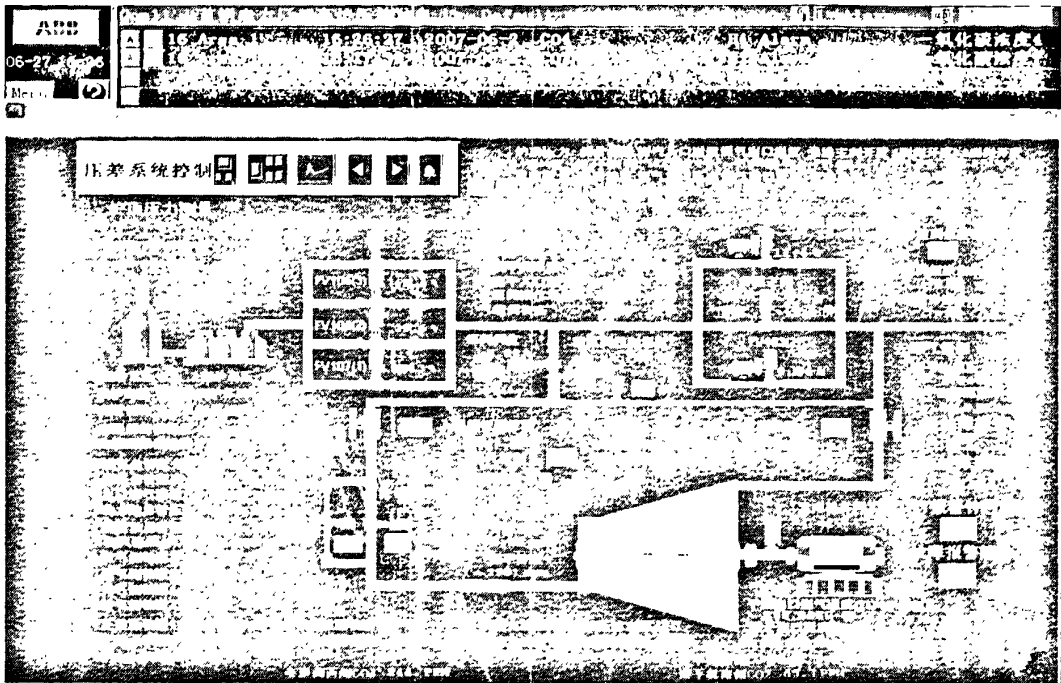


图 4.7 流程画面图

Fig.4.7 Technology process display

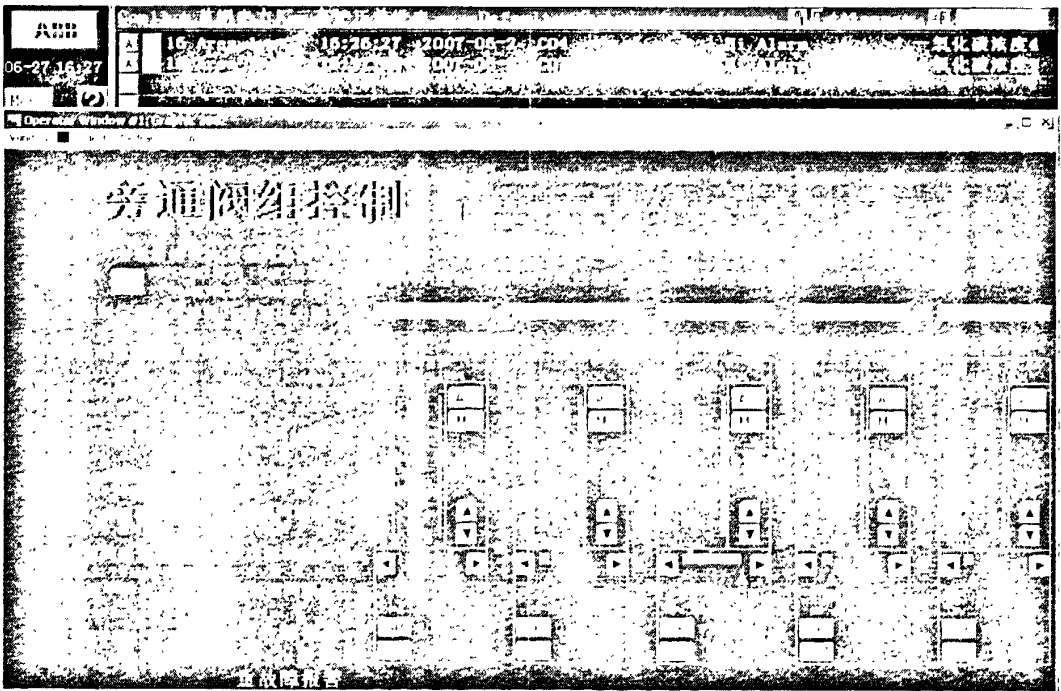


图 4.8 组操作画面图

Fig.4.8 Operating in group display

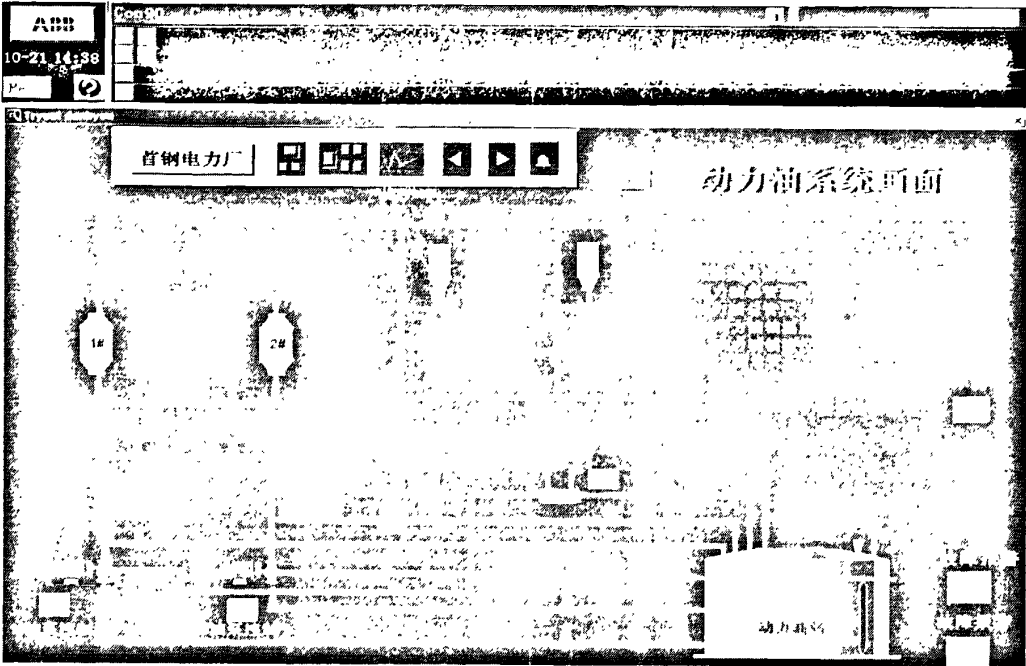


图 4.9 动力油系统画面图

Fig.4.9 Drawing of motivity oil system

(d) 润滑油系统画面

像动力油系统画面组态一样润滑油系统画面如图 4.10 所示。

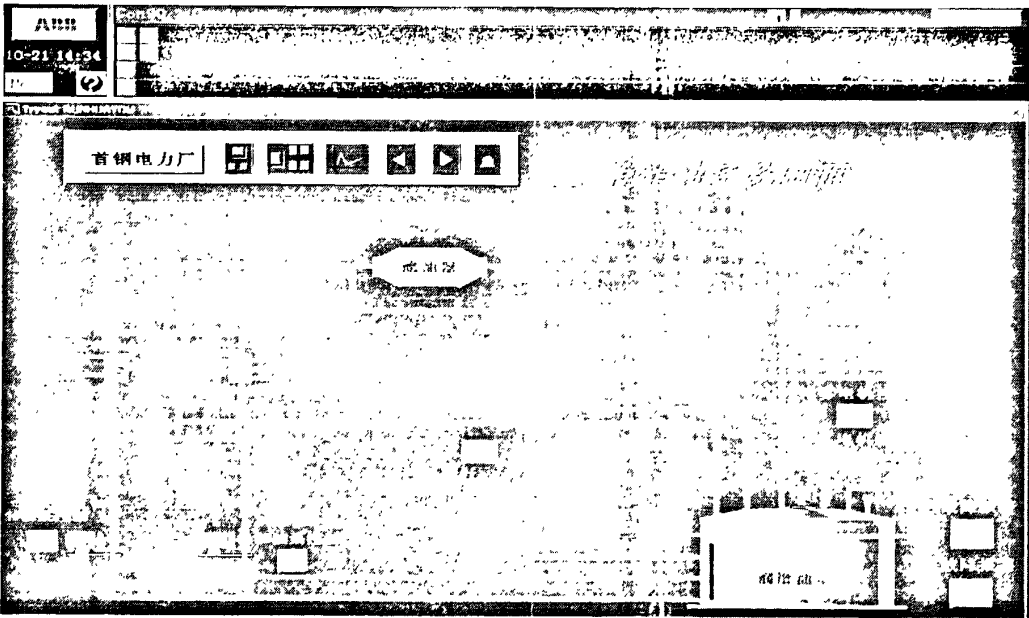


图 4.10 润滑油系统画面图

Fig.4.10 Drawing of lube system

(e) 氮气密封系统画面

氮气密封系统画面如图 4.11 所示。

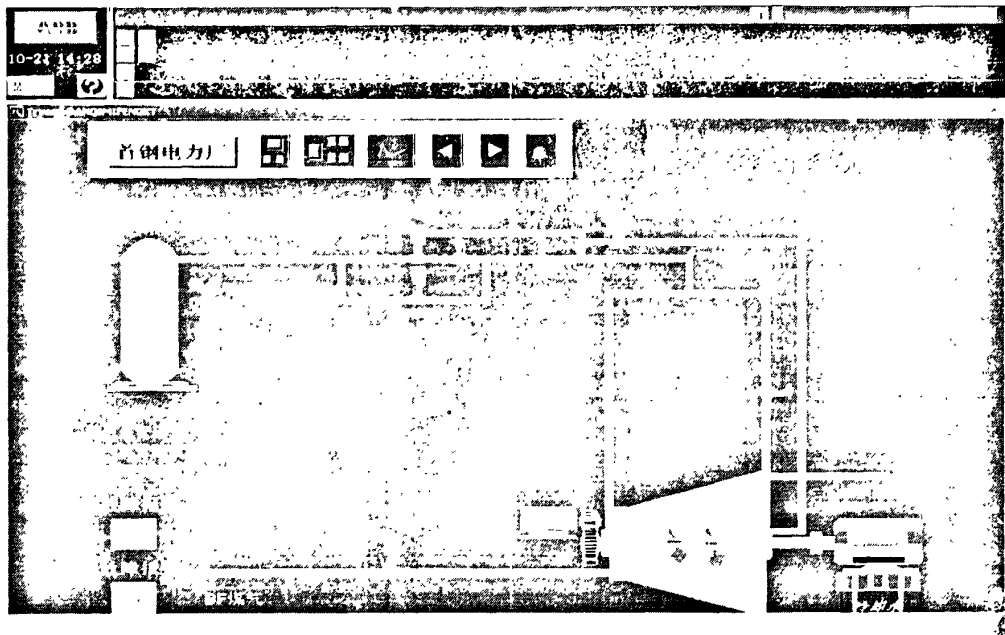


图 4.11 氮气密封系统画面图

Fig.4.11 Drawing of nitrogen pressurize system

(f) 循环水系统画面

循环水系统画面如图 4.12 所示。

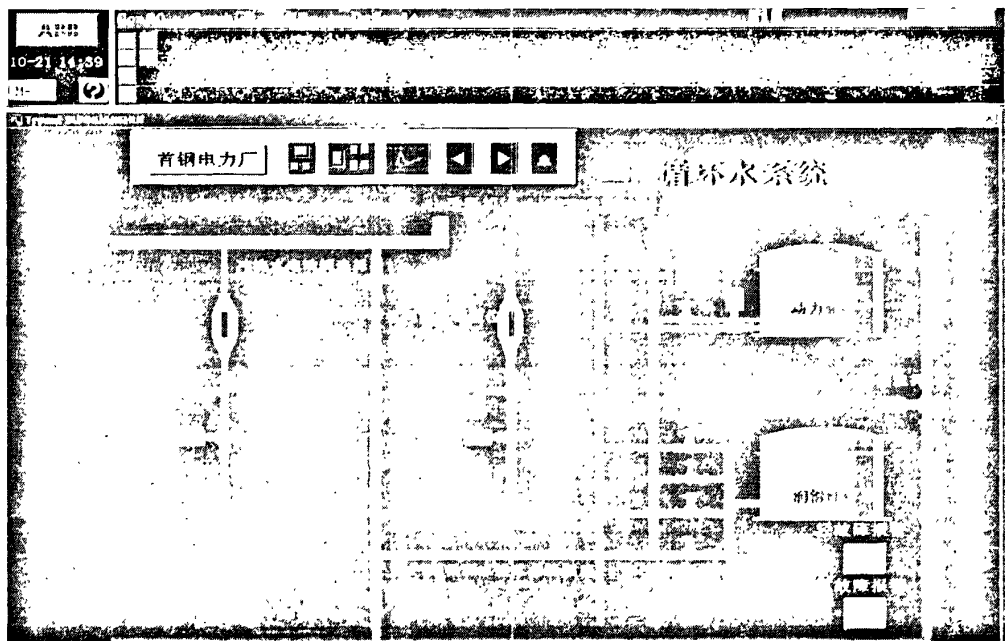


图 4.12 循环水系统画面图

Fig.4.12 Drawing of circulating water system

(g) 透平机组及发电机组画面

透平机组及发电机组画面如图 4.13 所示。

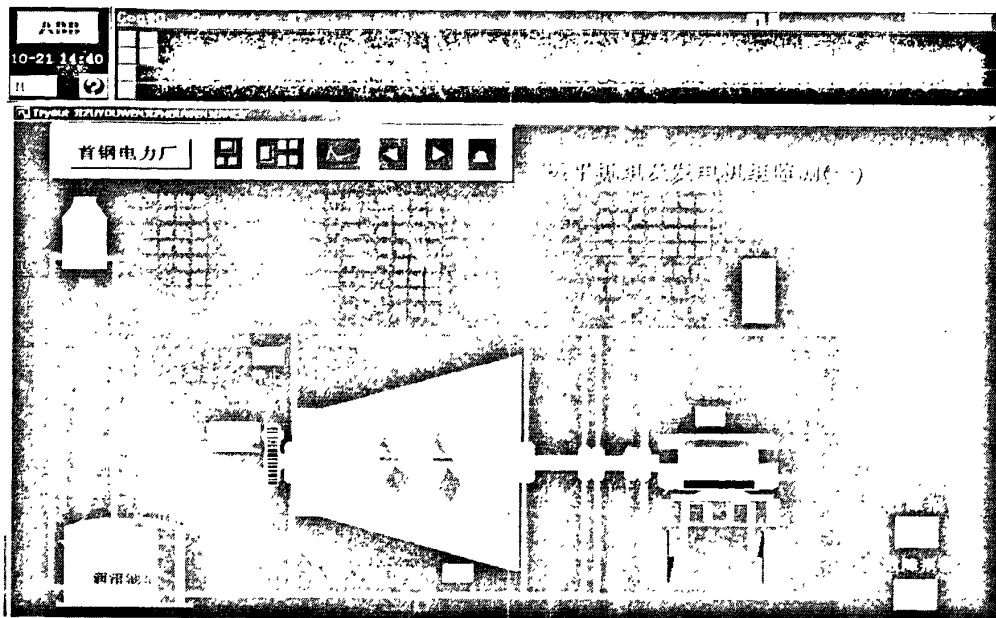


图 4.13 发电机监视画面图

Fig.4.13 Drawing of generator

其它画面的组态还包括：运行数据汇总画面、报警汇总画面等。

4.3.3 现场调试和控制参数整定

现场调试主要是把完成工艺过程控制构想的控制设备和控制组态结合起来，解决彼此间存在的问题或控制构想存在的偏差，不断修正和完善控制组态，对需要经过试验进行取得的控制参数进行整定，直到最后使整个系统协调地运转起来。所以在把控制组态应用于实际生产过程之前，要对系统进行各种各样的测试，包括系统信号处理精度测试、系统冗余性能测试、操作站软件测试等，以保证系统在投运之前是正常的。

(1) 系统信号处理精度测试

(a) 模拟量输入信号精度测试

主要是测试系统对各种模拟量输入信号的处理精度是否满足要求。对于每一点，用标准信号源从机柜相应端子上输入一组不同的值如分别为量程的 25%、50%、75%、100%，查看在操作站上显示的被测试点相应的物理量，对照每一输入相应的理论值，算出测量值，检查是否满足要求。如有问题进行分析处理，直到满足系统要求。

(b) 模拟量输出信号精度测试

主要是测试模拟量输出信号的处理精度。在操作员站上通过手动方式对每一点置一组不同的值如分别为量程的 0%、25%、50%、75%、100%，用标准信号测试仪器分

别对各点进行测试,对应每一个输出相应的理论值,算出测量误差,检查是否满足要求。

(c) 数字量输入正确性测试

改变每一点的输入状态,在操作员站(OIS)上观察每一点的变化情况,检查其是否完全正确。

(d) 数字量输出正确性测试

在操作员站上手动改变每点的值,从输出端子上测量其状态。

DCS 中只涉及到上述四种类型的信号,所以只介绍四种类型的信号测试。经过测试,首钢三高炉 TRT 的 DCS 中各类信号的处理精度均满足要求。

(2) 系统冗余性能测试

(a) 通信网络测试

主要是检测系统通信网络的双冗余是否符合要求。方法是在系统运行时拔掉一根通讯电缆,观察其通信是否正常。

(b) CPU 冗余测试

在系统运行时,将主 CPU 的电源断开,检查备用 CPU 的状态变化,观察各控制输出的数值是否有变化。

(c) 系统容错性能测试

主要是检测系统的操作员站对非法输入及外设故障的容错能力。测试方法是在操作员站上非法输入一系列的命令,观察操作员站的反应。在系统运行过程中,将操作员站的显示器电源断开,然后再打开,看屏幕显示有无变化。

(3) 设备单体调试

设备单体调试是进行系统联调的基础,即通过设备单体调试,解决存在的问题将各设备调整为正常状态。设备单体调试主要进行动力测试(动力源是否符合指标),手动单步动作测试,连锁动作测试(单体设备内部分多步骤动作),每一步状态返回点是否正常。对于控制对象主要调试模拟量输出和设备动作的对应关系,有位置反馈的要检查反馈电信号与机械位置的一致性,存在较大误差的要调整到误差允许范围内。同时对于控制程序中进行计算处理结果进行了验证。

(4) 设备联合调试

通过设备单体调试,解决了存在的极限位置反馈安装问题,入口蝶阀时常过热保护的问题,动力油蓄能器的问题等,对控制组态进行修改,使单体设备处于良好状态。设备可以进行联合调试,主要通过开机试验,对控制程序进行全面检验,确定本机组临界共振的实际区间等。

(5) 参数整定

PID 控制参数的整定通常有临界比例度法、反应曲线法^[27-28]、利用调节系统的综合法^[29]等。但传统的整定方法是一个繁琐而费时的过程，还有一种只需整定一个参数的整定方法^[30]相对前面三种方法省了不少。

(a) 临界比例度法

是在闭环情况下整定参数，整定时将控制器的积分和微分作用全部除去，按比例放大系数 K_c 由小至大的变化规律，对应于某一 K_c 值做阶跃干扰，以获得临界状态下的等幅振荡。获得临界振荡周期 P_u 与所对应的临界比例放大系数 K_u 。并查表得到最佳参数值。

(b) 反应曲线法

是根据广义对象的时间特性来整定控制器参数的方法。开环状态下加入阶跃变化的方法，这种方法显然不可能在此种情况下使用（高炉生产不可能允许）。

(c) 利用调节系统的综合法

是根据对象的模型和过渡过程的要求来获得控制器最佳参数的方法。但在工程中需要进行繁琐的计算，影响了实际的应用

(d) 只需整定一个参数的整定方法

为了减少在线整定参数的数目，人为假设约束条件，以减少需要整定的独立变量数。

具体有假设 PID 控制器的 T_i 及 T_d 为：

$$T_i = 0.5T_u \quad (4-3)$$

$$T_d = 0.125T_u \quad (4-4)$$

式中： T_u -在纯比例作用控制下临界振荡过程的周期。

这样就将参数整定简化为只需要整定 K_c 一个参数了。

本文采用了初始只用 PI 作用，并将 K_c 和 T_i 设定为一经验值上，再根据控制的振荡衰减过程，先固定积分时间，整定比例放大系数 K_c ，然后再整定 T_i ，最后根据系统是否存在容量滞后决定 T_d 的值。

整定后系统控制效果良好，高炉炉顶压力控制品质达到了 $\pm 3\text{kPa}$ 。比减压阀组的控制波动范围 $-6\text{kPa} \sim 3\text{kPa}$ 品质得到很大改善。同时也达到了国内和国际的先进水平。

如图 4.14 是 TRT 控制高炉炉顶压力效果图，图中 GDYSDZ-KP 和 GDYCLZ-KP 分别是高炉炉顶压力的设定值和测量值曲线，黄色的 TJWZ 是可调静叶开度轨迹。

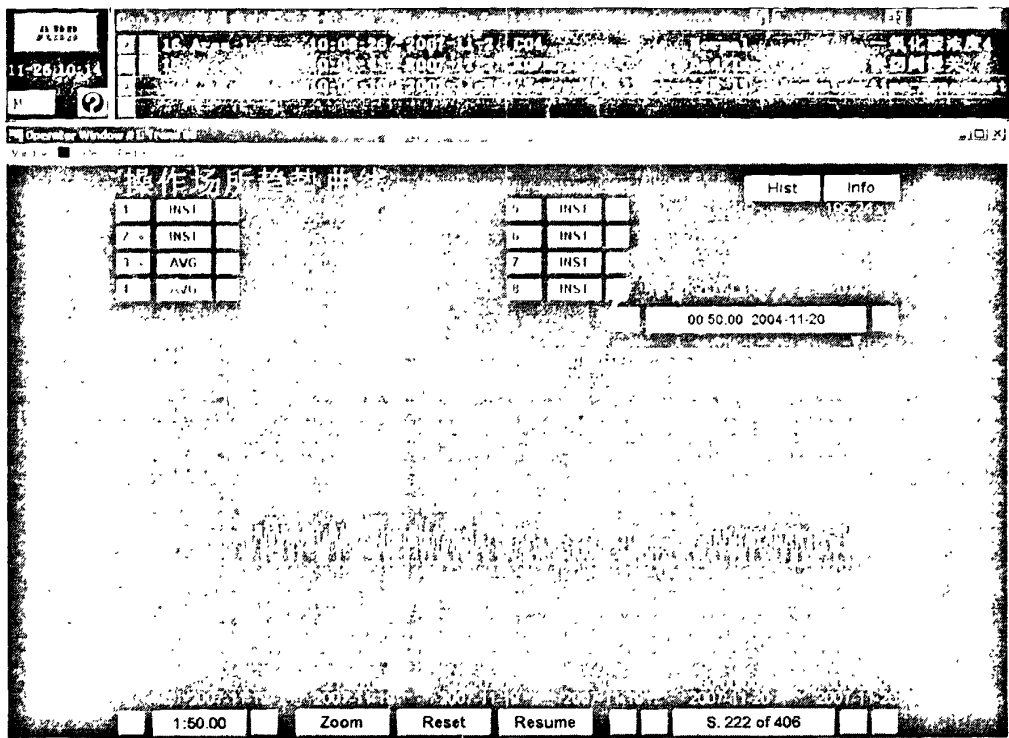


图 4.14 TRT 控制高炉炉顶压力

Fig.4.14 Top Gas pressure control for TRT

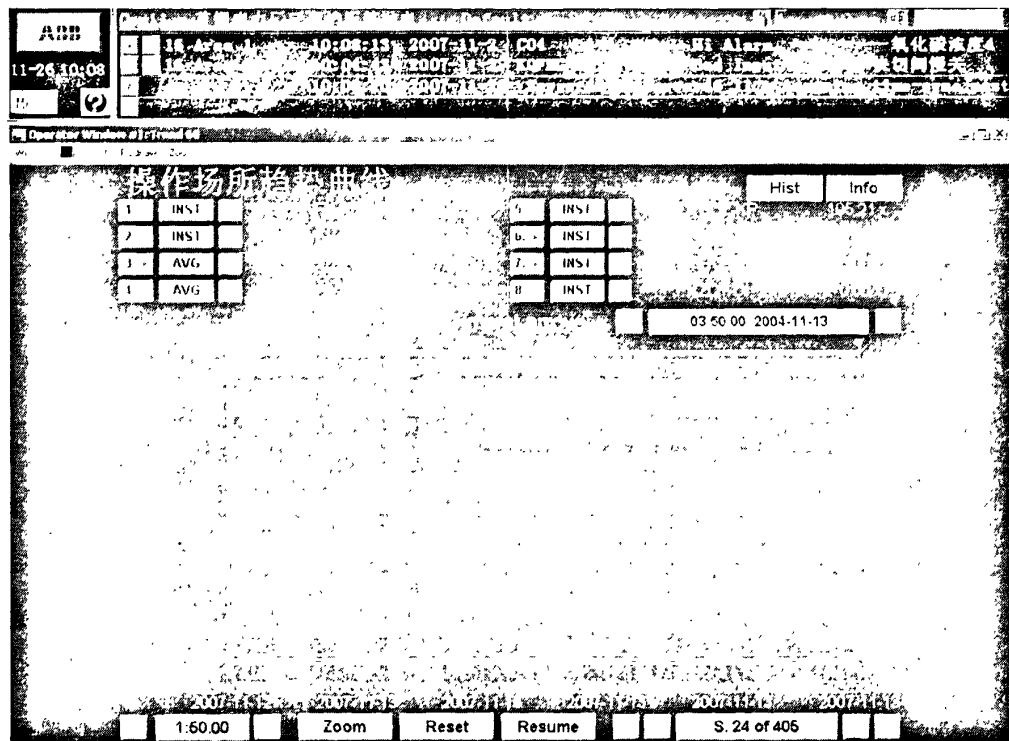


图 4.15 减压阀组控制高炉炉顶压力

Fig.4.15 Top Gas pressure control for Blast Furnace valves

第五章 结论与展望

高炉炉顶煤气余压回收透平发电装置 (TRT) 是国际上公认的很有价值的二次能源回收装置, TRT 机组的运行和全额发电必须以保证高炉炉顶压力稳定为前提。本课题以首钢炼铁厂三号高炉 TRT 机组控制系统设计和集成为依托, 研究并解决了串联布置 TRT 发电生产过程中的控制难点, 实现了对 TRT 发电过程不同的控制变量的精确、可靠的控制。完成了如下主要工作:

(1) 针对 TRT 工艺进行了深入学习和研究, 对 TRT 装置与减压阀组串联工艺布置形式的特点以及对控制系统设计的影响进行了分析, 从而确定了低压启动升速控制的设计思路。

(2) 对造成高炉炉顶压力波动的因素进行研究, 针对正常工况下高炉炉顶压力主要扰动高炉上料因素设计建立了前馈补偿控制模型, 取得良好的控制效果。

(3) 研究解决了升功率和降功率的控制方法, 采用了同一被控对象的不同控制对象“偏差先行”的控制策略, 在保证高炉炉顶压力稳定的前提下自动平稳地完成升/降功率。

(4) 设计了故障情况下机组连锁保护控制, 利用前馈控制模型很好地实现了串联工艺情况下高炉炉顶压力从透平静叶控制平稳转换到旁通阀组。

(5) 针对 TRT 对控制系统的要求, 合理进行 DCS 选型, 配置 Symphony Rack 硬件和软件系统, 完成系统组态和调试任务, 实现了系统高效运行, 稳定安全, 操控灵活方便, 很少维护的优良目标。

展望未来, 随着 TRT 推广, 进一步提高控制系统的控制品质和降低运行成本是将来 TRT 控制系统研究重要的努力方向。因此在现有工作基础上, 继续研究将对象前馈模型控制同流体力学知识结合, 进一步提高高炉炉顶压力控制精度的方法。

参考文献

1. 盛钢, 柳黎光. TRT顶压稳定技术研究与实践[J], 通用机械, 2005, (8) : 96-99.
2. 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, (8): 13-15.
3. 高伟, 王琦, 王萍. CS3000控制系统在包钢燃气厂1#TRT的应用[J], 包钢科技, 2006, 32 (3) : 23-25.
4. 韦金珍, 林锋. 8号高炉煤气余压透平发电装置的自动控制[J], 柳钢科技, 2006, (2) : 42-45.
5. 李婷婷. 正常工况下TRT系统高炉顶压动态建模及控制研究[D], 杭州浙江大学, 2007.
6. 韩渝京, 曹勇杰. 首钢3号高炉余压发电设计特点与生产实践[J], 冶金动力, 2007, (3) : 47-49.
7. 俞俊权. 高炉顶压回收透平发电装置的现状和发展前景[J], 冶金能源, 1996, (3) : 31-33.
8. 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实验研究[D], 杭州浙江大学, 2003.
9. 黄景华. 唐钢3#TRT的过程控制及其实现[J], 冶金动力, 2001, (5) : 70-72.
10. 黄景华. TRT影响高炉顶压问题的解决[J], 冶金动力, 2000, (4) : 60-61.
11. 中国钢铁工业能耗现状与节能前景[J], 中国钢铁工业, 2004, (8) : 17-21.
12. 郑秀萍. TRT技术及其节能环保作用 (上篇) [J], 通用机械, 2004, (9) : 11-12.
13. 郑秀萍. TRT技术及其节能环保作用 (下篇) [J], 通用机械, 2004, (10) : 30-31.
14. 曹烈, 孙蓉琳. 马钢四铁厂高炉TRT控制系统[J], 工业仪表与自动化装置, 2002, (5) : 53-55.
15. 马琴, 马玉玲, 赵佳等. 高炉TRT发电机组自动控制系统研究[J], 冶金自动化, 2005, (5) : 88-90.
16. 于杰. DCS自动控制系统在生产过程中的应用[J], 山东煤炭科技, 2002, (4) : 11-13.
17. 王骥程. 化工过程控制工程[M], 北京: 化学工业出版社, 1981, 121-122.
18. 张毅等. 带前馈的PID控制回路的控制器性能评估[J], 化工自动化及仪表, 2008, 35 (1): 20-23.
19. 胡寿松. 自动控制原理[M], 北京: 国防工业出版社第3版, 1994, 221-229.
20. D. Popovic, V. P. Bhatkar. Distributed Computer Control for Industrial Automation[M],

- Marcel Dekker Inc, 1991, 121-122.
21. 陶永华. 新型PID控制及其应用[M], 北京: 机械工业出版社, 2003, 62-65.
22. 张国范, 顾数生. 微型计算机控制技术[M], 沈阳: 东北大学出版社, 2002, 104-121.
23. 王常力, 罗安. 分布式控制系统(DCS)设计与应用实例[M], 北京: 电子工业出版社, 2004, 19-21.
24. 俞金寿. 过程控制系统和应用[M], 北京: 机械工业出版社, 2003, 42-44.
25. Gary A. Mintchell. Distributed Control Does Discrete[J], Control Engineering, 2000, (10) : 8-10.
26. 北京贝利. Symphony系统综述[M], 北京: 北京ABB贝利控制有限公司, 2003, 11-58.
27. Andy M Smith, Martin Davis. The DCS as enabling platform[J], Measurement and Control, 2007: (2) : 54-55.
28. 王锦标, 刘宇. DCS中PID功能块的无扰动切换[J], 基础自动化及仪表, 1999, (4) : 18-19.
29. A.M.Lopez. Tuning Controllers With Error-integral Criteria[M], Instrumentation Tech., 1967, 57-58.
30. 浙江大学化工自动化教研组等. 调节器的工程整定和校验[M], 北京: 石油化学工业出版社, 1976, 43-44.

致 谢

在论文的写作过程中，得到了导师何大阔副教授认真、耐心地指导。何老师学识渊博、治学严谨，尽管工作繁忙，仍对本人进行了细致、深刻的指导，尤其在本人撰写论文期间，何老师更是给予我多次指导和帮助，并认真细致地审阅，提出修改意见，使本人论文得以顺利完成。

在学位论文撰写过程中，还得到了胡丕俊高级工程师的帮助和支持。胡高工用其丰富的学识和实践经验，给予了我极大的帮助与支持，使我受益匪浅。在此致以诚挚谢意。

我还要向首钢三高炉 TRT 项目组的全体成员致以真诚的感谢。感谢他们在整个项目开展过程中的辛勤工作和贡献。同时我也要感谢我的妻儿对我的大力支持和鼓励，使我能够坚持完成论文工作。最后我要对信息科学与工程学院其他教师以及北京首钢自动化信息技术公司同事的帮助表示诚挚的谢意。

