

分类号_____ 密级 _____

UDC _____

学 位 论 文

TRT 紧急停机顶压控制系统研究与应用

作者姓名：孟少得

指导教师：关守平 教授 东北大学信息科学与工程学院

常志明 高级工程师 首钢迁钢公司

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：2011年11月 论文答辩日期：2011年12月23日

学位授予日期： 答辩委员会主席：高宪文

评 阅 人：徐林 刘永军

东 北 大 学

2011年11月

A Thesis in Control Engineering



Research and Application for the Emergency Shut-off Top Pressure TRT System

By Meng Shaode

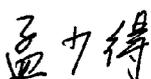
**Supervisor: Professor Guan Shouping
Senior Engineer Chang Zhiming**

Northeastern University

Nov 2011

独创性声明

本人声明，所提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：

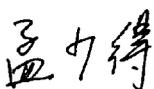
日期：2011.12.20

学位论文版权使用授权书

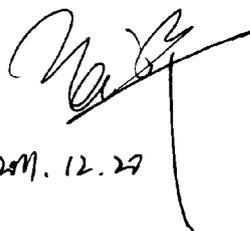
本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。

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：2011.12.20

签字日期：2011.12.20

TRT 紧急停机顶压控制系统研究与应用

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。影响高炉顶压和 TRT 稳定运行的因素很多, 尤其是在紧急工况下保证顶压稳定是整个 TRT 控制系统的关键。

本文以首钢迁钢 3[#]高炉透平发电装置为对象, 在查阅了大量国内外相关文献的基础上, 对 TRT 系统的工艺进行了深入的研究, 对影响系统稳定性的因素进行了分析, 提出了在不同工况下顶压稳定的控制重点。建立了 TRT 系统结构的压力控制数学模型并确定了模型参数。针对原系统采用的 bang-bang+PID 控制算法在 TRT 系统处于非额定发电状态工况下紧急停机会出现过调节的问题, 提出了双参数切换式 PID 控制算法。对顶压稳定性控制提出了系统设计方案, 针对系统的特点, 进行了控制系统的硬件和软件设计。并在 MATLAB/Simulink 环境下的搭建仿真模型, 通过仿真分析了 PID 控制器在两组参数的作用下交替控制的跟踪性能, 并与单组控制器作用效果进行比较。结果表明, 该算法能够解决现有系统中存在的问题。

关键词: TRT; 超调; PID 控制; 分段控制

Research and Application for the Emergency Shut-off Top Pressure TRT System

Abstract

Top Gas Pressure Recovery Turbine Unit is internationally recognized as a valuable secondary energy recovery device. Because the TRT device does not need fuel in the operational process, does not affect gas quality, and does not affect use, while it is able to recycle energy, refine the gas, and reduce the metallurgy cost, it is typical high efficiency energy saving and environmental protection device. Because the premise condition of input device TRT is to ensure the stability of the blast furnace top pressure, while the metallurgical enterprises and research departments promote the use of the TRT, the control of blast furnace in the stability of the top pressure is a very important job to research and development. There are many factors influence blast furnace TRT pressure and top of the stable operation, especially in an emergency condition when it is key to ensure the stability of top pressure in the TRT control system.

Based on the moving steel blast furnace in 3[#] shougang turbine power generation device for object, referring to a lot of related literature at home and abroad, and on the basis of the system of TRT process in-depth study on the influence factors of the stability of the system, this paper analyzed the different working conditions of the pressure stable control key points. The paper established the system structure of pressure control TRT mathematical model and the model parameters are determined. In the original system of the bang bang and PID control algorithm, when the TRT system is in the state of emergency conditions rated power stop opportunity, it will appear the adjustment problems. So we put forward the double parameter switched type PID control algorithm. Put forward the system design scheme for the pressure of stability control, in view of the characteristics of the system, we design the hardware and software of the control system. And construct the simulation model in the MATLAB/Simulink environment, through the simulation analysis in two groups of PID controller parameters under the function of alternating control tracking performance, and compared the controllers. The results show that this algorithm can solve the

problems in the existing system.

Keywords: TRT; Critical resonance; PID control; Subdivision control

目 录

独创性声明	I
摘 要	III
ABSTRACT	V
第 1 章 绪 论	1
1.1 课题的背景	1
1.1.1 循环经济的意义	1
1.1.2 冶金企业节能潜力展望	1
1.2 TRT 系统介绍	2
1.2.1 TRT 简介	2
1.2.2 TRT 的发展状况	3
1.2.3 TRT 装置的特点及优越性	5
1.2.4 炉顶压力稳定性控制的重要性	6
1.3 TRT 紧急停机控制的研究意义	6
1.4 本文的主要工作	7
第 2 章 TRT 工艺介绍	9
2.1 TRT 工艺流程	9
2.2 顶压稳定性因素分析	10
2.2.1 启动控制	10
2.2.2 正常运行时炉顶压力控制	11
2.2.3 TRT 辅助系统控制	12
2.2.4 TRT 停机系统控制	15
2.3 紧急停机控制的难点	17
2.4 本章小结	18
第 3 章 TRT 数学建模	19
3.1 电液位置伺服系统	19
3.2 建模简介	21
3.3 TRT 系统的模型结构及参数辨识	22
3.3.1 高炉 TRT 系统简化	22
3.3.2 单元模型	22
3.3.3 TRT 系统模型	24
3.3.4 模型系数的确定	26
3.3.5 透平机旁通阀建模	29

3.4 本章小结	30
第 4 章 TRT 控制系统设计.....	31
4.1 TRT 控制系统结构	31
4.2 控制系统的硬件设计	33
4.3 控制系统的软件设计	35
4.3.1 系统应用软件设计	35
4.3.2 系统的技术特点	39
4.4 本章小结	42
第 5 章 复合控制算法设计及仿真研究	43
5.1 旁通阀 bang-bang 与 PID 组合控制	43
5.2 控制算法设计	44
5.2.1 bang-bang 控制器简介	44
5.2.2 PID 控制器简介	45
5.2.3 PID 调节规律	46
5.2.4 PID 的参数整定方法	48
5.2.5 切换式 PID 控制方法设计	49
5.3 仿真及结果分析	50
5.3.1 搭建仿真模型	50
5.3.2 仿真结果分析	52
5.4 本章小结	54
第 6 章 总结与展望.....	55
参考文献.....	57
致 谢.....	61

第1章 绪论

1.1 课题的背景

1.1.1 循环经济的意义

改革开放以来,我国经济发展取得了巨大成就,但也付出了不小的能源资源和环境代价。我国人口众多,能源资源相对不足,据资料显示,我国矿产资源总量约占世界总量的12%,人均排名却在第53位,人均拥有量远低于世界平均水平。煤炭、石油、天然气人均剩余可采储量分别只有世界平均水平的58.65%、7.69%和7.05%。目前,我国又处于工业化、城镇化加快发展的重要阶段,能源资源的消耗的低效率问题突出。依靠过度消耗资源和牺牲环境支撑的经济增长,难以持久。能源是我国当前和今后相当长一个时期内,制约经济社会发展的突出瓶颈^[1]。

1.1.2 冶金企业节能潜力展望

我国冶金企业是全国的耗能大户,目前中国钢铁工业总能耗占全国总能耗的16.3%,钢铁工业总产值却仅占全国GDP的3.2%,2005年钢铁行业用电约占全国总用量的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。《钢铁行业发展政策》中规定,2005年到2010年钢铁行业发展目标是:“大力降低能耗,综合能耗<700千克标准煤/吨钢”^[1]。尽管钢铁行业污染高、能耗高,但因为钢铁制造流程工序多、结构复杂,制造流程伴随大量物质和能量排放,其中蕴含着诸多减量化、再利用、再循环的可能性,与其他行业相比,钢铁行业在实施循环经济上具有巨大潜力。

据测算,在不同条件下,各种副产煤气占二次能源的比例有所区别,但所占比例最大,总计达到约60%~80%,是钢厂二次能源的主要形式,副产煤气的充分、合理利用是降低能源消耗、发挥钢厂能源转换功能的关键所在。各种余热、余能资源中,焦炭显热、烧结矿显热、高炉炉顶余压和转炉煤气显热等是余热回收的重点^[2]。

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,并给予了政策面的有效支持。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》的通知: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。国家发展改革委《节能中长期专项规划》(发改环资[2004]2505号):积极推广高炉炉顶煤气余压透平发

电技术 (TRT), 炉顶压力大于 0.1 兆帕的大型高炉均应配装 TRT 系统。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。

我国截至 2005 年底有 1000m³ 以上的高炉约 90 座。有 68 座已建或在建 TRT, 普及率为 75.5%。1000 m³ 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 300 m³ 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。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%, 节能潜力很大, 推广工作迫在眉睫。

1.2 TRT 系统介绍

1.2.1 TRT 简介

高炉炉顶煤气余压回收透平发电装置^[3](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。TRT 的工作原理^[4-5]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。

高炉项压指高炉炉顶煤气压力。在传统炼铁高炉工艺流程中高炉项压通常为 150~300KPa, 高炉项压越高, 高炉内还原反应能力越充分, 炉顶煤气温度越低(通常为 150 摄氏度左右)。经过后续的煤气洗涤、除尘等步骤, 煤气的温度进一步降低。故高炉煤气余热回收的潜力并不大, 但高炉炉顶煤气的压力能却很大, 高炉煤气经除尘后通过减压阀组, 将煤气压力减小到 10KPa 左右, 再排放到主煤气管道中, 安装 TRT 之前的高炉炼铁工艺流程如图 1.1 所示, 在高炉煤气经过减压阀组进行减压的过程中, 高炉煤气所具有的压力能完全被白白浪费在减压阀组上, 同时还将产生巨大的噪声, 造成空间环境的污染。

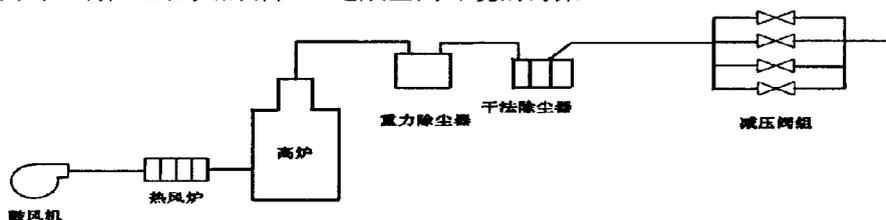


图 1.1 安装 TRT 之前的高炉工艺流程图

Fig. 1.1 TRT system process map

TRT 装置回收的主要就是高炉煤气中这部分压力能，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，TRT 装置可回收高炉鼓风机所消耗能量的 25~50%，一般经过 1-3 年的运行，发电产生的经济效益就可以回收 TRT 装置的全部投资。减压阀组和高炉余压透平发电装置成并联关系，高炉安装 TRT 控制系统工艺流程如图 1.2 所示。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。

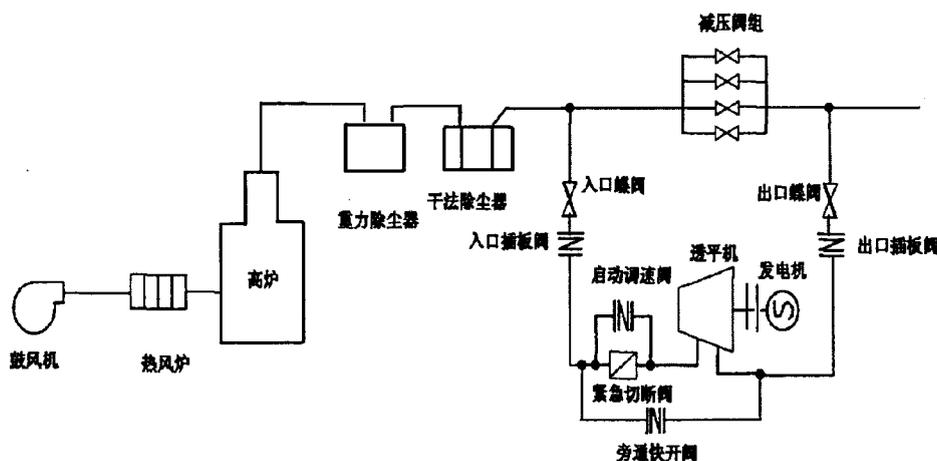


图 1.2 TRT 系统工艺流程图
Fig. 1.2 TRT system process map

1.2.2 TRT 的发展状况

TRT 装置在运行中不需要燃料，利用高炉冶炼后产生的余压余热煤气，所以不改变原高炉煤气的品质，也不影响原煤气的正常使用，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，顶压调整精度比减压阀组高又改善了炉顶压力控制，降低了冶炼成本，是典型的高效节能装置。所以很早便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。

上个世纪五十年代，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。比利时、德国、捷克、前苏联等国开始对 TRT 装置进行试验研究。最早是苏联在 1962 年成功研制了世界第一台半干式轴流冲击式 TRT 装置 (6MW, 并在马格尼托方尔斯克钢铁厂投入运行, 前苏联 TRT 装置共有三种规格(6, 8, 12MW), 共制造了 30 多套。1969 年法国索费来尔公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^[6-8]。这是一套成功的装置，透平内安装了喷水设置，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以防磨损。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，并于 1974 年 11 月正式投产，安装在川崎制铁水岛 2#高炉上（8MW）之后，加以改进和发展，称为川崎-索费尔法。目前，日本的 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，日本高炉 TRT 普及率达到 100%^[9]。

我国的 TRT 技术起步较晚，于上个世纪七十年代末才开始研究和应用。但经过多年的潜心研究和实践运行，目前我国的 TRT 技术不论是在技术上还是产品质量上都已达到国际同等领域的先进水平，部分技术还为世界首创。国内第一台 TRT 于 1983 年在首钢 2#高炉投产，装机容量 5.7MW。我国 TRT 在本世纪初也得到了较大的发展，以陕鼓为代表的国产 TRT 技术也趋于成熟，这极大地促进了该技术在国内外推广。如果国内 300m³ 以上的高炉全部安装 TRT，将给钢铁企业带来了巨额的经济效应与社会效应。单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，每年可减少向大气排放生产同等发电量的燃煤发电所产生的约 2 万吨 CO₂。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。从当前的研究状况可以看到，目前对 TRT 技术的研究主要集中在对 TRT 装置中高炉煤气的净化，透平机的效率以及如何保证高炉炉顶压力稳定性等三个方面。随着无料钟炉顶，干式除尘装置的推广应用，高炉向着高压、高冶炼强度的方向发展。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。

目前，陕西鼓风机厂是国内最大的 TRT 装置的生产企业。从 1979 年至今，陕鼓已为钢铁企业提供了 380 多套 TRT 装置，比其他国外、国内各大透平制造企业业绩之和还要多，并成功出口到巴西、印度和韩国等国家，取得了良好的业绩。随着国内冶金行业的整合重组，钢铁企业筹建高炉也朝大型化的趋势发展，国内大高炉 TRT 市场才刚刚起步。首钢迁钢公司先后从陕西鼓风机厂为两台 2650m³ 和一台 4000m³ 高炉引进了共三台 TRT 系统，投产至今得到了丰厚的经济效益和社

会效益。

1.2.3 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^[10-12]：

(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 $3\text{-}5\text{KPa}$ ，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，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) 是建立节约型社会和循环经济的有效措施。

(7) 是解决我国电力紧张的可行方式。

以首钢迁钢 3[#]高炉 TRT 为例，TRT 装置平均正常发电功率为 17000KWh，年平均发电量 9720 KWh，按照外购电价 0.5 元/KWh 计算，节约外购电费 4860 万元，扣除运行成本，每年创利 2620 万元。经济效益十分可观。

1.2.4 炉顶压力稳定性控制的重要性

确保高炉炉顶压力稳定性^[13-14]是目前 TRT 系统研究中的重要问题，特别是在突发事件时保证 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。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，但必须要确保高炉冶炼工艺要求下，来利用 TRT 装置进行发电。

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 装置快切阀要立即断开管路，同时开启旁通管路的调压阀来保持顶压稳定。

1.3 TRT 紧急停机控制的研究意义

当机组发生重故障时，高炉顶压转为减压阀组控制。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 TRT 紧急停机时应首先保证炉顶压力的变化在允许范围内。与此同时，为保护 TRT 透平安全，避免机组遭到进一步损坏，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。

为实现 TRT 紧急故障停机时的高炉炉顶压力稳定，在快速切断阀关闭时，与 TRT 透平机并联的旁通阀应迅速打开，使管道内积存的大量高炉煤气迅速排放出

去, 避免高炉炉顶压力快速上升, 防止高炉顶压过大波动的发生。

当 TRT 发生重故障时, 为避免造成装置的灾难性事故, 必须立刻使机组停止运作。当任一停机条件发生时, 系统发出指令, 使紧急切断阀立刻关闭, 切断通向透平的煤气, 同时发出信号使发电机与电网解列, 闭锁旁通阀和可调静叶。紧急停机控制由各阀门控制器的安全连锁功能完成, 不论 TRT 是处于升转速还是并网发电阶段, 各控制器处于手动/自动状态, 都能使每个阀门按要求打开或关闭。停机后系统自动将状态存储器置位, 使各阀门闭锁在安全位置, 防止误操作。同时, 还能将导致连锁停机的故障原因保持下来以便事后分析故障。重故障跳机后对顶压的控制: 当 TRT 机组发生重故障时, 快切阀迅速关闭, 切断进入透平机的煤气, 改由两旁通快开阀进行顶压控制。根据透平机和旁通阀煤气流量的比值, 确定旁通快开阀的开度值, 这时为了简化控制过程, 提高顶压的调节速度, 两旁通快开阀同时打开同样开度, 两阀门同步对顶压进行自动调节。在高炉接到 TRT 跳机信号后, TRT 运行人员可将旁通快开阀转为手动, 并逐步关闭旁通快开阀, 将顶压控制全部交给高炉控制室。

1.4 本文的主要工作

本论文是为了满足中大型高炉对 TRT 稳定运行的要求, 以首钢迁钢公司 3[#]高炉 TRT 项目为背景, 对 TRT 系统的生产工艺流程进行了深入的研究, 对影响系统稳定性的因素进行了分析, 找出现有系统中在紧急停机控制方面存在的问题, 提出新的控制方法, 使现场的控制工艺进一步优化。论文安排如下:

第一章介绍了 TRT 系统的发展现状和 TRT 系统在钢铁企业节能减排工作中的重要作用。分析了提高高炉炉顶压力稳定性在高炉安全生产中的重要意义。

第二章系统研究了 TRT 系统的工艺流程, 对影响高炉炉顶压力稳定性的因素进行了逐一分析, 并找出了首钢迁钢公司 3[#]高炉 TRT 系统中存在的问题。

第三章对 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, 进行顶压稳定性的控制计算。

第四章对顶压稳定性控制提出了系统设计方案, 针对系统的特点, 进行了控制系统的硬件和软件设计。

第五章针对对现有算法的局限性, 在对 PID 控制算法深入分析的基础上, 设计出不同参数双 PID 切换控制的算法。并在 MATLAB/Simulink 环境下的搭建仿真模型, 进行仿真测试、调节与验证, 证实该算法能够解决现有系统中存在的问题。

第六章为结论与展望，简要总结本论文研究成果，对进一步的研究工作进行展望。

第 2 章 TRT 工艺介绍

2.1 TRT 工艺流程

首钢迁钢三高炉 TRT 系统的并联工艺流程如图 2.1 所示，从高炉出来的高压煤气经过清洗除尘设备处理后，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。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。

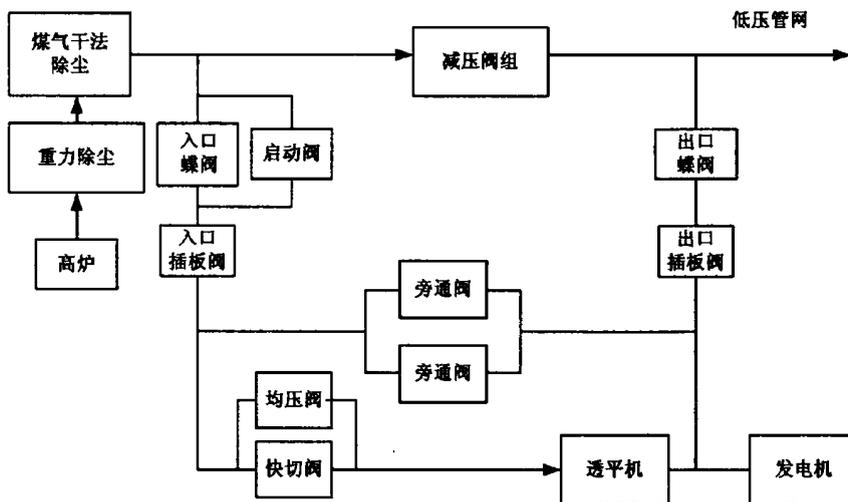


图 2.1 TRT 并联系统工艺流程图
Fig.2.1 TRT multiple system process

在紧急快切阀前到透平机出口后，并联有两个旁通阀，作为 TRT 紧急停机时，补偿 TRT 流量突变之用，以确保炉顶压力不出现过大波动。并联布置可以实现全流量回收高炉煤气流量 TRT 控制系统，简捷便于维护，TRT 旁通系统可随 TRT 装置同期检修。

TRT 装置的运行工况有：启动（升速和升功率）、正常运行、正常停机和紧急停机；在能量回收方式上可分为：部分回收方式、平均回收方式和全部回收方式；在操作方式上可分为：手动、自动（半自动）和全自动。

2.2 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^[15]：

- (1) 高炉冶炼加料过程中的不均匀，所引起的高炉内气压变化；
- (2) 高炉生产过程中各种物料的化学反应在高温、高压下进行，化学反应的随机性，将会使炉内的压力发生随机的变化；
- (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，除尘器中的积灰等都可能引起炉内压力的变化。

虽然上述影响炉顶压力因素十分复杂，但对 TRT 系统，通过快速和合理的控制透平机静叶开度、旁通管道减压阀的开启状况能够实现高炉顶压的稳定。

2.2.1 启动控制

首钢迁钢三高炉 TRT 采用并联布置工艺形式，具备以下特点：

高炉减压阀组与 TRT 装置并联增加一套旁通阀组，以保证 TRT 装置故障停止运行时高炉煤气的通路；这样当 TRT 故障停机时高炉炉顶压力控制来不及由 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。

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。

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，TRT 装置可以启动。

2.2.2 正常运行时炉顶压力控制

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 2.2 所示。

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。

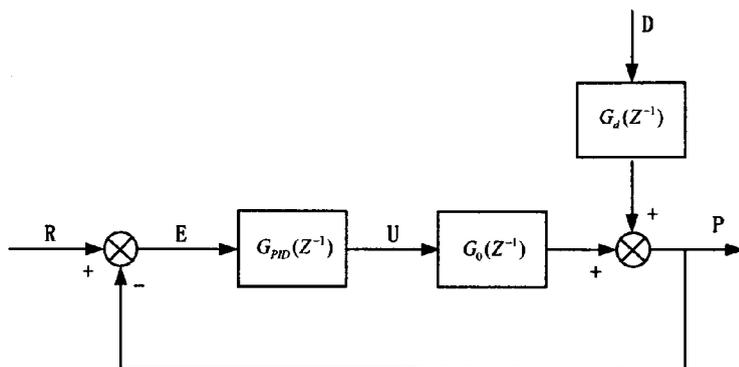


图 2.2 正常工况下高炉压力控制方块图

Fig.2.2 Pressure control block of blast furnace in normal working conditions

从图 2.2 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。

2.2.3 TRT 辅助系统控制

(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 1#泵为主泵时，1#泵运行，2#泵自动备用。若油压低于某一值（由工艺给出，一般为 11MPa）时，2#泵自动启泵；选择 2#泵为主泵时，1#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#或 2#动力油泵被选择；油温不低于 20℃。油箱液位低时报警。

②动力油加热器控制

当动力油箱温度低于 21℃时自动开启，高于 25℃时自动关闭。

(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 1#泵为主泵时，1#泵运行，2#泵自动备用，若油压低于某一值（由工艺给出，一般为 0.1MPa）时，2#泵自动启动；选择 2#泵为主泵时，1#泵自动备用。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#或 2#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

设动、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。

(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，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。

(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，关闭。

(5) 其他设备控制

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，两个条件都满足时，出口插板阀松开控制发出，当出口板阀松开限位返回，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盘车电机控制

手动操作。显示返回信号。操作条件：盘车选择。

⑥TRT 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。

⑦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。

2.2.4 TRT 停机系统控制

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。

(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零值时，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零。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 $SV+\varepsilon$ 。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 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 $SV+\varepsilon$ 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“- ε ”，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) 紧急停机

紧急停机（或称重故障停机）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，系统的联锁停机。要进行的控制主要包括 TRT 停机联锁逻辑控制、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联锁设定值 80 微米报警，120 微米时停机（4 点）。

(b) 透平轴位移任一点大于联锁设定值（2 点）。其中工作面大于 0.3mm 报警，0.5mm 停机；负推力面大于 0.3mm+间隙值报警，大于 0.5mm+间隙值停机。

(c) 机组润滑油最远点压力小于联锁设定值。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联锁设定值。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) 机组轴承温度大于联锁设定值（12 点）。其中透平机轴承温度 8 个点高于 90℃报警，高于 100℃停机，发电机轴承温度 4 个点高于 65℃报警，高于 75℃停机。

(f) 紧急停机按钮按下（手动紧急停机）。

(g) 发电机事故跳闸（发电机甩负荷）。

(h) 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）。

(i) 联络柜跳闸。

(g) 上级变电所开关跳闸（上级开关跳闸）。

(k) 机组转速过高（3 点中有两点同时出现）。

(l) 发电机轴振动过高（2 点）。

(m) 快切阀油压低于连锁设定值。

(n) 高炉侧紧急停机。

(o) 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联锁条件之一时，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紧急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，而快切阀 0.5 内即全关。快切阀瞬间全关，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。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。目前迁钢 3[#]TRT 机组采用旁通阀 bang-bang 控制和快切阀瞬间全关前馈控制，旁通阀在 2 秒内打开到 50%的开度，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。

2.3 紧急停机控制的难点

TRT 紧急停机系统控制效果的好坏关系到高炉正常生产和 TRT 顺利解列，是控制的关键所在。但是 TRT 紧急停机系统的控制在实际应用中存在着很多技术上的难题，主要表现在以下几个方面：

(1) 透平机的静叶开度为随机变量，在不同的运行状态下开度差异巨大，难以确定旁通阀提前打开开度的精确值。

①透平机组稳定运行时，根据发电量的大小，静叶开度在 40%~60%之间变化。

②透平机组在启动和正常停机过程中，静叶随机开度值无法预测。

(2) 高炉炉顶压力为随机变量，其外部环境具有许多不确定因素，因此难以建立控制系统的精确数学模型。影响因素有：

①高炉冶炼加料过程中的不均匀，引起高炉内气体流动阻尼的变化。

②高炉内的流体是多种介质的高温、多相的物理化学流动。由于相变与化学反应的随机性，将会是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。

(3) 设备的局限。目前受煤气介质和成本问题，大多旁通阀采用蝶阀，调节线性差，而且存在反馈阀位误差很大，对每次启动的经验积累造成障碍。

因此，目前迁钢 3[#]TRT 系统设定的在紧急停机时旁通阀提前打开 50%的开度，

只是根据透平机稳定运行过程中透平机静叶开度在 40~60%这个区间的中值设定的，在透平机稳定运行的状态下会的超调或欠调较小，能够满足高炉炉顶压力稳定的控制要求。但如果紧急停机发生在透平机启动或停机过程中时，由于此时透平机静叶的开度小于 40%，这是旁通阀仍按 50%的开度执行，必然会出现超调，使高炉顶压发生大范围的波动，严重时会影响高炉的生产稳定运行。

2.4 本章小结

本章首先简要介绍了高炉 TRT 系统的基本工艺流程，结合迁钢 3[#]TRT 系统结构及各种运行状态的控制进行了介绍。重点分析了迁钢 3[#]TRT 系统所采用的紧急停机的控制方式存在着适应范围窄和超调问题。

第3章 TRT 数学建模

3.1 电液位置伺服系统

TRT装置采用调节旁通阀开度来实现TRT紧急停机的控制，而控制旁通阀开度的手段就是电液位置伺服控制系统。下面将简单介绍电液位置伺服控制系统的构成、工作原理及其在TRT系统中的应用。

电液位置伺服系统由液压源、动力机构、检测部分和控制部分等四部分构成。其中，液压源为液压泵站，为系统提供压力油；动力机构主要是液压缸和电液伺服阀，其作用是将系统的液压能转换为机械能输出；检测部分为位移传感器及其放大电路，检测阀芯位移，并将反馈的实际位移信号输入控制器。由机、电、液构成的电液位置伺服控制系统，其系统方框图如图3.1所示。

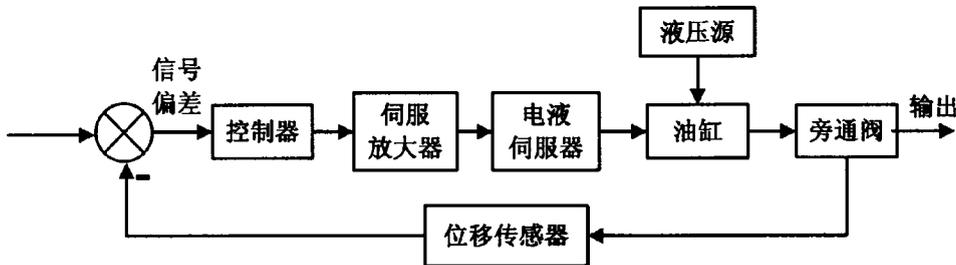


图3.1 电液位置伺服控制系统方框图

Fig.3.1 Block diagram of electro-hydraulic position servo control system

电液位置伺服控制系统的工作原理^[16]：由自控系统发出的指令信号与传感器检测反馈的油缸实际位置信号相比较产生偏差信号。控制器根据偏差情况，通过一定的控制算法，给出控制变量，经伺服放大器放大后，送入电液伺服阀。伺服阀按一定的比例将电流信号转变为液压油量推动油缸运动。位移传感器的反馈信号不断变化，直至于指令信号相等时，偏差信号为零，油缸停止运动。油缸停在指定的位置上，即透平机旁通阀稳定在指定的开度上。

高炉顶压稳定是TRT机组投入运行的前提条件。目前TRT装置起停大都采用液压旁通阀。而调节透平机旁通阀开度的手段就是电液位置伺服控制系统。因此，该系统在TRT中的地位 and 作用是十分重要的。

透平机旁通阀伺服控制系统原理图如图3.2所示。角位移变送器ZT用来测量透平机旁通阀实际角度信号，并将其转换成对应的电流信号(4-20mA)送至控制器作为反馈信号。同时控制器还接收来自自主控制室PLC的4-20mA DC指令信号，在控制器内部对这两个信号加以比较产生偏差。所得偏差反映了指令预期角度和实际角

度之间的差距，偏差经过一定的控制算法运算处理，伺服放大器放大后，最终产生一个可以驱动电液伺服阀SV的电流信号。在伺服阀的控制下，动力油作用于液压缸SM，带动旁通阀达到预期角度，从而实现透平机旁通阀开度调节的目的。同时，控制器还送出一路电流信号(4~20mA)到主控制室用于旁通阀角度的指示。

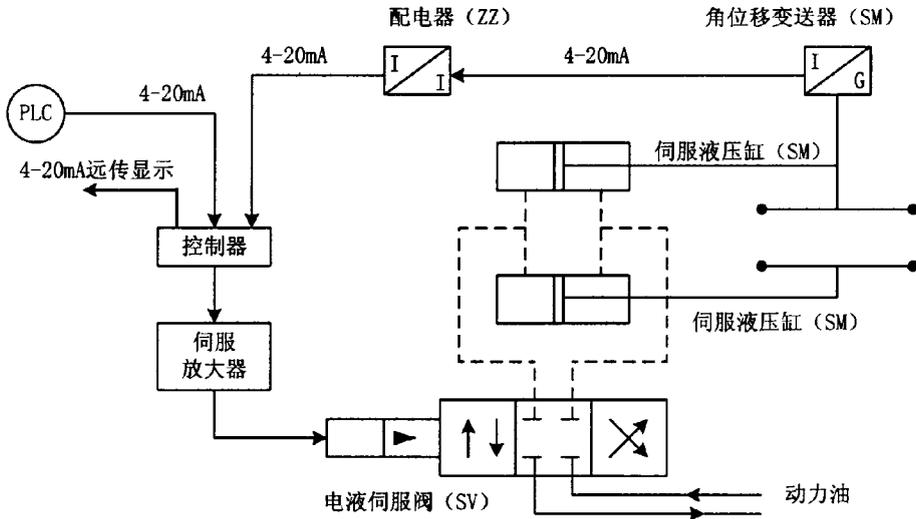


图3.2 旁通阀伺服控制系统原理图
Fig.3.2 Valve control system diagram

TRT装置通过调节透平机旁通阀开度实现紧急停机的控制，控制系统方框图如图3.3所示。

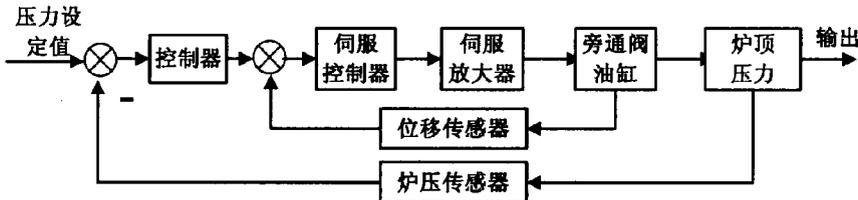


图3.3 旁通阀伺服控制系统流程图
Fig.3.3 Valve control system flow

从图3.3中我们看到，炉顶压力控制系统是一个串级控制系统，PLC即炉顶压力控制器的输出作为伺服阀控制器的设定值。主回路实现炉顶压力控制，副回路即电液伺服控制系统实现旁通阀开度控制。PLC控制系统根据炉顶压力设定值和炉顶压力传感器测量值之间的偏差，给出旁通阀开度值，输入伺服阀控制器。PLC设定的旁通阀开度和位移传感器测量的旁通阀实际开度相比较产生偏差信号。伺服阀控制器根据该偏差信号给出控制变量，经伺服放大器放大后，送入电液伺服阀，推动油缸运动，带动旁通阀旋转，使旁通阀转到某一角度，从而实现炉顶压力的控制。在TRT紧急停机时，可根据各过程炉顶压力的控制要求，通过设定不同的给定值，实现各个过程的控制。

3.2 建模简介

工业过程的数学模型分为动态数学模型和静态(稳态)数学模型^[17-18]。静态数学模型是输出变量和输入变量之间不随时间变化情况下的数学关系。动态数学模型是输出变量与输入变量之间随时间而变化的动态关系的数学描述。从控制的角度看,输入变量就是操纵变量和扰动变量,输出变量就是被控变量。工业过程的静态数学模型用于工艺设计和最优化等,同时也是考虑控制方案的基础。工业过程的动态数学模型则用于各类自动控制系统的分析和设计,用于工艺设计和操作条件的分析和确定。

建模的最终目的还是在于应用所建立的模型更好地指导和服务于工程实际,使得实际生产过程更加有序和科学化。应用动态数学模型的主要内涵是利用模型计算过程变量随时间的变化,从而实现过程的观测、分析、控制和预估。实际的工业过程往往是很复杂的,相应的动态数学模型也比较复杂,其简化处理便成为动态数学模型应用的一个突出问题。

无论是用常微分方程表示的集总参数模型,还是用偏微分方程表示的分布参数模型,都主要是着眼于过程单元动态数学模型的建立,而现在的研究对象是由若干单元组成的一个系统。由于过程系统的特点,其数学模型主要由两部分组成^[19-20]:

- (1) 描述过程单元的过程单元模型;
- (2) 描述过程单元联结关系的过程系统结构模型。

过程系统是由若干过程单元通过物流和能量流联结成的一个完整的体系。要用数学模型来描述整个过程系统,就必须首先对系统进行分析和分解,广泛收集过程单元的有用信息,深入了解过程系统的拓扑结构。之后,利用守恒原理、速率方程、物性关系、物流连续以及设计和控制等要求导出过程单元的数学模型;再利用过程系统的流程拓扑,将单元模型有效的组合起来,构成整体模型。

建立系统的数学模型是自动控制中首要解决的问题,因为没有数学模型,就很难综合控制算法。为对高炉炉顶压力的基于模型的精确控制,本文根据流体力学原理,推导高炉炉顶压力的动态数学模型。一个过程的变量可能很多,它包括输入变量(控制变量、干扰变量)和输出变量(观测变量、状态变量)。对过程建模前必须首先弄清楚过程对象的层次及其周围的环境条件,明确过程所包含的变量,并应当考虑模型的实用性,根据建模目的对过程进行合理的假设和简化,突出主要因素,忽略次要因素。^[21]

使用模块化建模方法有以下优点^[22]：

(1) 把对复杂系统的繁琐的建模工作，化解为比较简单的子系统或部件的建模工作，因此显著降低了建模的复杂性和对用户的要求。

(2) 由于模块有统一的划分和设计规范，因此不同的模块可由不同的研究人员开发，一个模块的模型只需开发一次，并可以在不同的研究对象中重复使用，因此避免了重复劳动，提高了研究和工作效率。

(3) 模块自动连接组合系统一次性开发完成后，可使用户不必再为模块连接及其实现费时费力，而将主要精力和时间投放在新模块模型开发、模块优化、对研究对象进行分析和设计等主要工作上。

3.3 TRT 系统的模型结构及参数辨识

3.3.1 高炉 TRT 系统简化

由于高炉TRT系统的复杂性，为建立适合于炉顶压力控制的动态数学模型，将高炉TRT系统简化为反应容器、压力容器、管道、调节阀4个部分^[23]。其中，反应容器指高炉炉膛还原反应部分，并产生煤气；压力容器指高炉炉顶容腔；管道指高炉煤气出口直至TRT系统的透平机之间的管道；调节阀指TRT系统的旁通阀，透平机静叶也简化为一个调节阀。透平机静叶和旁通阀通过调节开度，以控制通过的煤气流量和透平机前后压差，如图3.4所示。

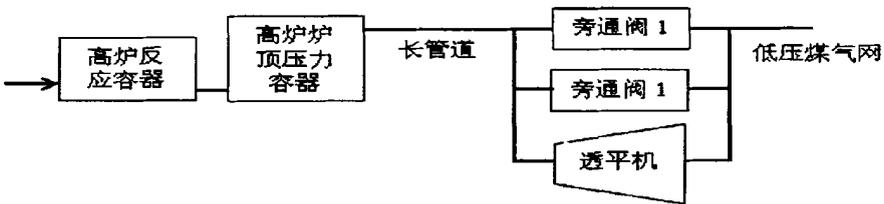


图3.4 TRT系统简化结构图
Fig.3.4 TRT system simplify model map

3.3.2 单元模型

对高炉TRT系统的4个单元：反应容器、压力容器、管道、调节阀分别建模。

(1)高炉炉顶反应容器模型

为简化起见，高炉煤气生成过程模型可用经验公式表示如下^[24-25]：

$$G_f(s) = \frac{K_1}{T_1s + 1} G_1(s) \quad (3.1)$$

式中：

$G_1(s)$ ---进入高炉的空气质量流量;

$G_f(s)$ ---冶炼过程中生成煤气的质量流量;

K_1 和 T_1 ----反应常数, 此参数和高炉炉料、高炉结构等有关系。

(2)高炉压力容器模型

根据高炉炉顶压力容器入口和出口的质量流量的变化与容器中的密度变化的关系^[26-27]。

$$(G_f - G_1)\Delta t = V_1\Delta\rho \quad (3.2)$$

对其平衡点附近的线性化及对时间的拉氏变换得:

$$G_f(s) - G_1(s) = \frac{sV}{RT_0} P_1(s) \quad (3.3)$$

式中:

$G_f(s)$ ---高炉压力容器入口的质量流量;

$G_1(s)$ ---高炉压力容器出口的质量流量;

V ----高炉炉顶压力容器的体积;

ρ ----气体密度;

R ----气体常数;

T_0 ----气体温度;

$P_1(s)$ ---高炉炉顶气体的压力。

(3)管道模型

由于煤气管道很长, 煤气在管道内的传输过程将引起严重的纯滞后时间。为便于分析简化模型结构, 将传递时延作为整个广义对象的一个独立环节, 放到最后分析。将时延环节简化出来后, 管道模型可以表示成如下一阶惯性环节:

$$P_1(s) = \frac{1}{T_2s + 1} P_2(s) \quad (3.4)$$

式中:

$P_2(s)$ ---管道的出口压力;

$P_1(s)$ ---管道的入口压力也即高炉炉顶气力的压力;

T_2 ----时间常数, 由经验所定。

时延环节可表示为 $G_\tau(s) = e^{-s\tau}$, τ 为纯滞后时间。

(4)调节阀模型

文献^[28]推导出线性调节阀质量流量为:

$$G = (kL + k_0)\sqrt{\Delta P\rho} \quad (3.5)$$

对其平衡点进行线性化和拉氏变换得：

$$G(s) = kL(s)\sqrt{(P_{10} - P_{20})\rho} + \frac{kl_0 + k_0}{2\sqrt{P_{10} - P_{20}}}\sqrt{\rho}P_1(s) - \frac{kl_0 + k_0}{2\sqrt{P_{10} - P_{20}}}\sqrt{\rho}P_2(s) \quad (3.6)$$

式中：

$G(s)$ ----调节阀的质量流量；

k 、 k_0 ----调节阀的比例常数参数；

P_{10} 、 P_{20} ----阀门两端的平衡点的压力；

ρ ----气体密度；

l_0 ----阀门初始的开度；

$L(s)$ ----阀门的开度；

$P_1(s)$ 、 $P_2(s)$ ----阀门两端的压力。

文献^[28]提供的方法，已知调节阀的额定流通能力 C_{100} ，则：

$$k + k_0 = \frac{C_{100}}{36000} \quad (3.7)$$

若还已知调节阀在此额定状态下的最小流量，则：

$$k_0 = \frac{q_{\min}}{10} \quad (3.8)$$

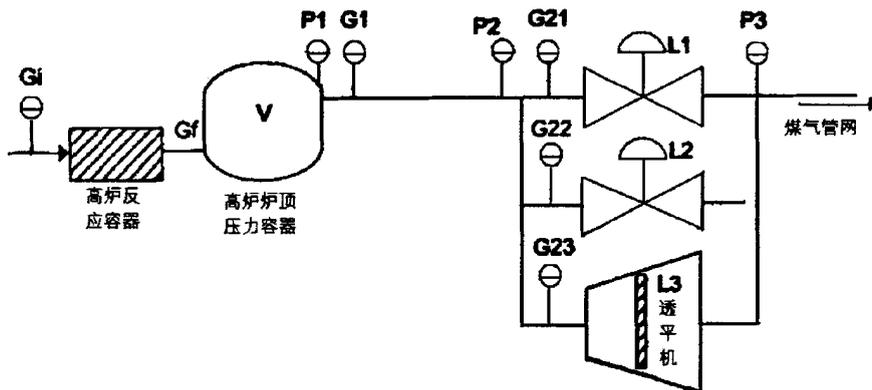
式中：

C_{100} ----调节阀的额定流通能力；

q_{\min} ----调节阀额定状态下的最小流量。

3.3.3 TRT 系统模型

模型参数定义如图3.5所示。



图：3.5 TRT系统模型参数定义
Fig.3.5 TRT system model's parameter definition

图3.5中，进气质量流量为 G_i ，反应器出口质量流量为 G_f ，压力容器的出口流量和压力分别为 G_1 和 P_1 ，管道的出口流量和压力分别为 G_2 和 P_2 ，调节阀后的总流量和压力分别为 G_3 和 P_3 。

假设旁通阀1、2和透平机的前后压力相等，且流量无损失，另外由关联管道的性质可得：

$$P_2(s) = P_{21}(s) = P_{22}(s) = P_{23}(s) = P_3(s) \quad (3.9)$$

$$G_2(s) = G_{21}(s) + G_{22}(s) + G_{23}(s) = G_3(s) \quad (3.10)$$

则根据以上各单元模型得TRT系统模型为：

$$G_f(s) = \frac{K_1}{T_1s + 1} G_i(s) \quad (3.11)$$

$$G_f(s) - G_i(s) = \frac{sV}{RT_0} P_1(s) \quad (3.12)$$

$$P_1(s) = \frac{1}{T_2s + 1} P_2(s) \quad (3.13)$$

$$G_{21}(s) = k_1 L_1(s) \sqrt{(P_{20} - P_{30})\rho} + \frac{k_1 l_{10} + k_{10}}{2\sqrt{(P_{20} - P_{30})}} \sqrt{\rho} P_2(s) - \frac{k_1 l_{10} + k_{10}}{2\sqrt{(P_{20} - P_{30})}} \sqrt{\rho} P_3(s) \quad (3.14)$$

$$G_{22}(s) = k_2 L_2(s) \sqrt{(P_{20} - P_{30})\rho} + \frac{k_2 l_{20} + k_{20}}{2\sqrt{(P_{20} - P_{30})}} \sqrt{\rho} P_2(s) - \frac{k_2 l_{20} + k_{20}}{2\sqrt{(P_{20} - P_{30})}} \sqrt{\rho} P_3(s) \quad (3.15)$$

$$G_{23}(s) = k_3 L_3(s) \sqrt{(P_{20} - P_{30})\rho} + \frac{k_3 l_{30} + k_{30}}{2\sqrt{(P_{20} - P_{30})}} \sqrt{\rho} P_3(s) - \frac{k_3 l_{30} + k_{30}}{2\sqrt{(P_{20} - P_{30})}} \sqrt{\rho} P_3(s) \quad (3.16)$$

$$P_2(s) = P_{21}(s) = P_{22}(s) = P_{23}(s) = P_3(s) \quad (3.17)$$

$$G_2(s) = G_{21}(s) + G_{22}(s) + G_{23}(s) = G_3(s) \quad (3.18)$$

$$A = \frac{K_1}{T_2s + 1}, \quad B = \frac{sV}{RT_0}, \quad C = T_2s + 1 \quad (3.19)$$

$$D_{11}(s) = k_1 \sqrt{(P_{20} - P_{30})\rho} \quad (3.20)$$

$$D_{12}(s) = k_2 \sqrt{(P_{20} - P_{30})\rho} \quad (3.21)$$

$$D_{13}(s) = k_3 \sqrt{(P_{20} - P_{30})\rho} \quad (3.22)$$

$$D_{21} = \frac{k_1 l_{10} + k_{10}}{2\sqrt{P_{20} - P_{30}}} \sqrt{\rho} \quad (3.23)$$

$$D_{22} = \frac{k_1 l_{20} + k_{20}}{2\sqrt{P_{20} - P_{30}}} \sqrt{\rho} \quad (3.24)$$

$$D_{23} = \frac{k_3 l_{30} + k_{30}}{2\sqrt{P_{20} - P_{30}}} \sqrt{\rho} \quad (3.25)$$

则TRT统炉顶压力数学模型可表示为:

$$P_1(s) = \frac{AG_r(s) - (D_{11}L_1(s) + D_{12}L_2(s) + D_{13}L_3(s)) + (D_{21} + D_{22} + D_{23})P_3(s)}{(D_{21} + D_{22} + D_{23})C + B} \quad (3.26)$$

再将 $A = \frac{K_1}{T_2s + 1}$, $B = \frac{sV}{RT_0}$, $C = T_2s + 1$ 代入上式, 将长煤气管道引起的时延环节 $G_r(s) = e^{-\tau s}$ 引入后可得:

$$P_1(s) = \frac{1}{\left[(D_{21} + D_{22} + D_{23})T_2 + \frac{V}{RT_0} \right] s + (D_{21} + D_{22} + D_{23})} \cdot \frac{K_1}{T_1s + 1} \cdot e^{-\tau s} \cdot G_1(s) - \frac{D_{11} \exp(-\tau s)L_1(s) + D_{12} \exp(-\tau s)L_2(s) + D_{13} \exp(-\tau s)L_3(s)}{\left[(D_{21} + D_{22} + D_{23})T_2 + \frac{V}{RT_0} \right] s + (D_{21} + D_{22} + D_{23})} \quad (3.27)$$

3.3.4 模型系数的确定

确定了传递函数的形式以后, 下一步的问题就是如何确定其中的各个参数使之能拟合测试出的阶跃响应。

时域实验建模方法的原理是人为地加入一个特定的扰动, 测定被控对象的响应曲线, 然后根据响应曲线求得对象的传递函数。测定响应曲线用的标准典型输入信号为阶跃信号, 其对应的随时间变化的输出信号曲线称为阶跃响应曲线(或称飞升曲线)。阶跃响应曲线能比较直观地反映被控对象的动态特性, 特性参数数据直接取自记录曲线, 无须中间转换, 它也是最常用的输入信号。

机理建模法得到的传递函数即式(3.27)中的系数均为常数, 可见透平机静叶和旁通阀的开度对高炉炉顶压力的传递函数均为一阶惯性加纯滞后形式。下面介绍两种一阶惯性加纯滞后传递函数参数的方法。

(1) 作图法

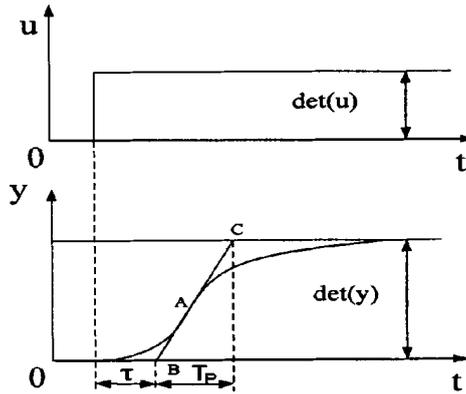


图 3.6 作图法确定参数
Fig.3.6 Mapping for parameter

如果阶跃响应是一条如图3.6所示的单调曲线，结合TRT系统响应特性选择一阶惯性加纯滞后模型 $G_t(s) = e^{-\tau s} / (T_t s + 1)$ 去拟合。设阶跃输入为 u ，输出响应为 $y(t)$ 。分别对输入输出进行无量纲化，则增益 K_t 可由如下关系式求出：

$$K_t = \frac{\frac{\Delta y}{y_{\max} - y_{\min}}}{\frac{\Delta u}{u_{\max} - u_{\min}}} \tag{3.28}$$

而 T_t 和 τ 则可以用作图法确定。为此，在曲线的拐点A作切线，他们与时间横轴相交与B点，与曲线的稳态值渐近线交于C点，这样就确定了如图3-6中所示的 T_t 和 τ 的数值。

(2) 两点法

所谓两点法就是利用阶跃响应 $y(t)$ 上两个点的数据去计算 T 和 τ 。增益 K 按 (3.28) 计算。

与式 $G_t(s) = e^{-\tau s} / (T_t s + 1)$ 相对应的阶跃响应无量纲形式为：

$$\dot{y}(t) = \begin{cases} 0, & t < \tau_t \\ 1 - e^{-\frac{t-\tau_t}{T_t}}, & t \geq \tau_t \end{cases} \tag{3.29}$$

上式中只有两个参数 T_t 和 τ_t ，因此只能根据两个点的测试数据进行拟合。为此先选定两个时刻 t_1 和 t_2 ，其中 $t_2 > t_1 \geq \tau_t$ ，从测试结果中读出 $y(t_1)$ 和 $y(t_2)$ ，并写出下述联立方程：

$$\begin{cases} \dot{y}(t_1) = 1 - e^{-\frac{t_1-\tau_t}{T_t}} \\ \dot{y}(t_2) = 1 - e^{-\frac{t_2-\tau_t}{T_t}} \end{cases} \tag{3.30}$$

由以上两式可以解出：

$$T_i = \frac{t_2 - t_1}{\ln[1 - y(t_1)] - \ln[1 - y(t_2)]} \quad (3.31)$$

$$\tau_i = \frac{t_2 \ln[1 - y(t_1)] - t_1 \ln[1 - y(t_2)]}{\ln[1 - y(t_1)] - \ln[1 - y(t_2)]} \quad (3.32)$$

最后可取另外两个时刻进行校验。两点法的特点是单凭两个孤立点的数据进行拟合，而不顾及整个测试曲线的形态。此外，两个特定点的选择也具有两种随意性，因此所得到的结果需要进行仿真验证，并与实验曲线相比较。在 TRT 系统实际运行中寻找一段阶跃响应曲线，读取输入输出数据，并按以上的阶跃响应曲线用作图法可得： $T_i=2s, \tau_i=2.1s, K_i=1.65$ ，用两点法可得： $T_i=2.1s, \tau_i=2s, K_i=1.5$ ，最终取 $T_i=2s, \tau_i=2s, K_i=1.5$ 。因此可得旁通阀控制高炉炉顶压力的广义对象传递函数为：

$$G_i = \frac{P_i(s)}{L_i(s)} = \frac{1.5}{2s + 1} e^{-2s} \quad (3.33)$$

另选一段时间实际响应曲线做验证，用所拟合出的传递函数与实际响应曲线相比较。在0时刻旁通阀开度为0到5秒的一个阶跃，如图3.7所示：

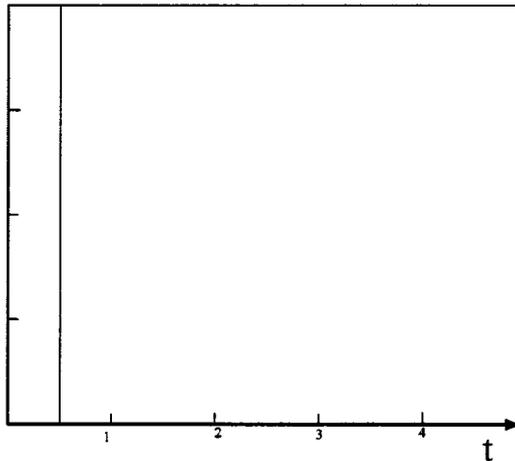


图 3.7 旁通阀开度阶跃变化图
Fig.3.7 bypass valve's step change map

炉顶压力实际变化曲线和所建立的模型的响应曲线如图3.8所示。其中点划线1为实际变化曲线，实线2为模型响应曲线。

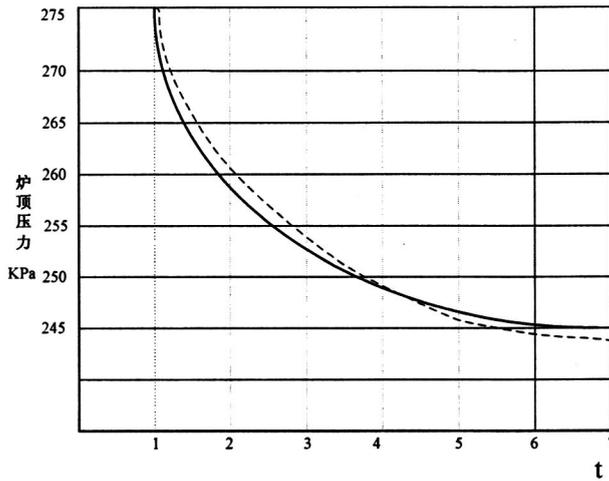


图 3.8 模型阶跃响应与实际曲线比较

Fig.3.8 Comparison of step change and practice map

由图3.8的比较说明，所拟合出的传递函数能够反应实际的对象响应特性，表明了该模型的准确性。

同样的方法可获得旁通阀1控制高炉炉顶压力回路的传递函数：

$$G_{vt} = \frac{P_1(s)}{L_1(s)} = \frac{1.5}{2s + 1} e^{-2s} \quad (3.34)$$

3.3.5 透平机旁通阀建模

旁通阀为金属硬密封三偏心蝶阀^[29]，如图3.9所示，阀门执行机构带有电磁阀、液压执行机构、一体式液压站、电液控制系统，与阀体分开。阀体带有线性指示0-100%，油缸驱动装置并配有手轮可手动。

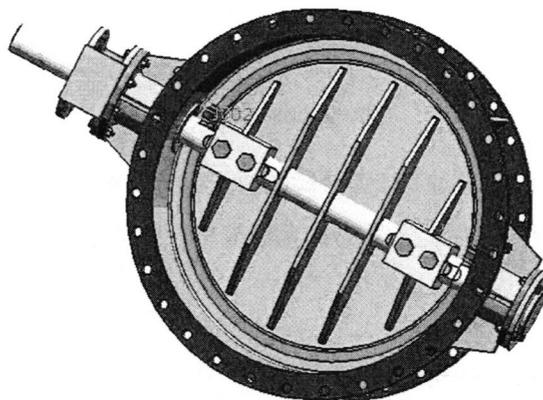


图 3.9 蝶阀示意图

Fig.3.9 Butterfly valve schemes

根据蝶阀特性，开度范围为 $0 \sim \pi/2$ ，随对应DCS开度范围为0-100%。

$$\frac{2\alpha}{\pi} = \frac{U}{100} \quad (3.35)$$

所以旁通阀实际开度角可表示为：

$$\alpha = \frac{\pi U}{200} \quad (3.36)$$

当旁通阀有一定开度时，将阀板（近似为煤气管道管径）在垂直煤气管道平面做投影可得旁通阀通流面积：

$$s = S \times (1 - \cos\alpha) \quad (3.37)$$

旁通阀实际开启过程中，旁通阀对高炉煤气分流很小，把高炉煤气系统作为恒压系统。流量与通流面积呈线性正比：

$$Q_v = C \times s \quad (3.38)$$

代入可得

$$Q_v = C \times S \times (1 - \cos \frac{\pi U}{200}) \quad (3.39)$$

在一个很短的时间 Δt 内，旁通阀开度增加量为 ΔU ，流量变化量是 ΔQ_v ，假设这一过程是趋近于线性的，可得

$$\Delta Q_v = C \times S \times (1 - \cos \frac{\pi \Delta U}{200}) \quad (3.40)$$

又因为瞬时流量 Q_v 为流量变化量 ΔQ_v 的累积

$$Q_v = \int_0^t \Delta Q_v dt \quad (3.41)$$

综上得系统综合模型

$$Dn = 1 - \cos \frac{\pi \int_0^t \Delta U dt}{200} \quad (3.42)$$

D约等于6000，煤气通过TRT旁通阀距转子有一定距离，再加上转子转动有一定惯性，造成一定控制滞后，之后的仿真环节中予以考虑。

3.4 本章小结

本章首先对电液位置伺服系统进行介绍，由于在实际的紧急停机过程中旁通阀的受力和系统压力非常复杂，因此 TRT 系统进行简化，认为旁通阀和透平机两端受力均相同，建立以此为依据建立数学模型。

第 4 章 TRT 控制系统设计

快速、平稳降低炉压是 TRT 紧急停机的控制关键，能够快速平稳降低炉压是由旁通阀控制的。在快切阀、透平静叶瞬间全关时旁通阀组提前打开到一定开度，抵消快切阀瞬间全关时造成的高炉炉顶压力上升影响时，避免发生“超调”引起炉压过量波动。

4.1 TRT 控制系统结构

本系统不但与原有系统兼容，融传统的 DCS 和 PLC 优点于一体，更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，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^[31]。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，控制系统结构如图 4.1 所示。

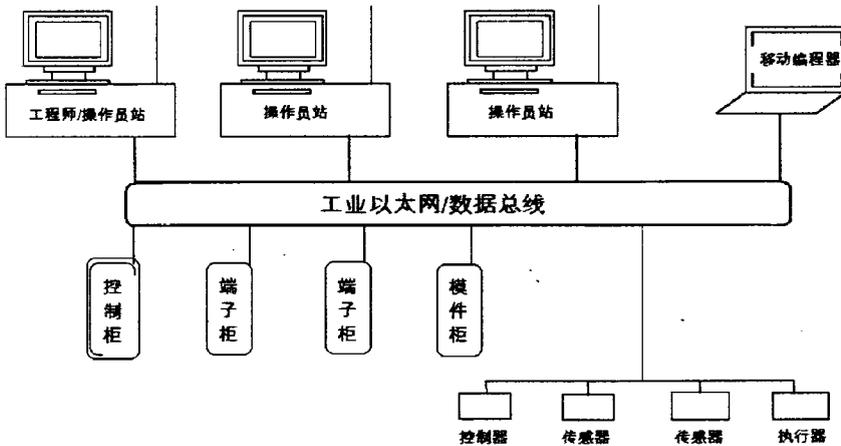


图 4.1 TRT 控制系统结构图
Fig.4.1 Control system structure

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）。

(1) 操作级

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。

(2) 过程控制级

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 模块 1408 个 I/O 点，PS 过程站的 CPU 模块、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
- ③AC800F 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 控制系统的硬件设计

根据 TRT 系统工艺监控点数进行 DCS 硬件配置。DCS 控制系统硬件结构示意如图 4.2 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 CPU 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。

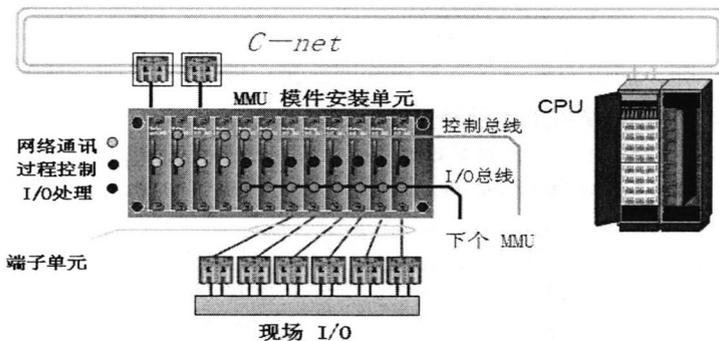


图 4.2 DCS 系统结构示意图
Fig.4.2 Schematic drawing of DCS System

首钢迁钢 3#高炉 TRT I/O 点配置如下：

- (1) 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。

(2) 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；以及入口电动蝶阀的控制。

(3) 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 紧急关闭条件的数字量信号；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。

(4) 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。

首钢迁钢 3[#]高炉 TRT 项目 I/O 点统计情况如表 4.1 所示。

表 4.1 首钢迁钢 3[#]高炉 TRT 项目 I/O 点统计表
Table 4.1 The I/O list of 3[#] TRT in Shou Gang Qiang Gang

类 型	数 量
数字量输入	149
数字量输出	76
4~20mA 模拟量输出	118
4~20mA 模拟量输入	16

根据以上输入输出的类型及各自需要的数量，对模块进行选装配置。表 4.2 是 DCS 控制系统集成配置模块数量统计情况。

表 4.2 首钢迁钢 3[#]高炉 TRT 项目 DCS 硬件配置清单
Table 4.2 Configuration list of DCS in Shou Gang Qian Gang 3[#] TRT

名 称	型 号	数 量
CPU	MFP12	4
电源模块	PAS2	2
网络处理模块	INNPM11	2
网络接口模块	INNIS01	2
数字量输入模块	MDSI22	10
数字量输出模块	IMDSO14	5
4~20mA 模拟量输入模块	IMFEC12	8
4~20mA 模拟量输入模块	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 conductorNT 5.0、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。

4.3 控制系统的软件设计

4.3.1 系统应用软件设计

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 XP。操作员站（OIS）组态软件是 Conductor NT 5.0，工程师站（EWS）控制组态软件是 Composer4.3。下表 4.3 所列为系统主要软件配置情况。

表 4.3 首钢迁钢 3[#]高炉 TRT 项目 DCS 硬件配置清单
Table 4.3 Configuration list of DCS in Shou Gang Qian Gang 3[#]TRT

站类型	软件种类	软件名称
操作员站	操作系统	Windows XP
	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 XP
	报表处理	Microsoft Excel 2003
	电子文档阅读	Adobe Acrobat Reder 8.0
	Symphony 系统软件	Composer4.3（具有系统组态功能）

在 MFP 模件内，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 Architeect；为人系统接口 ConductorNT 画面组态的编辑器为 GrafX。

(1) 操作站软件设计

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 4.3 所示。

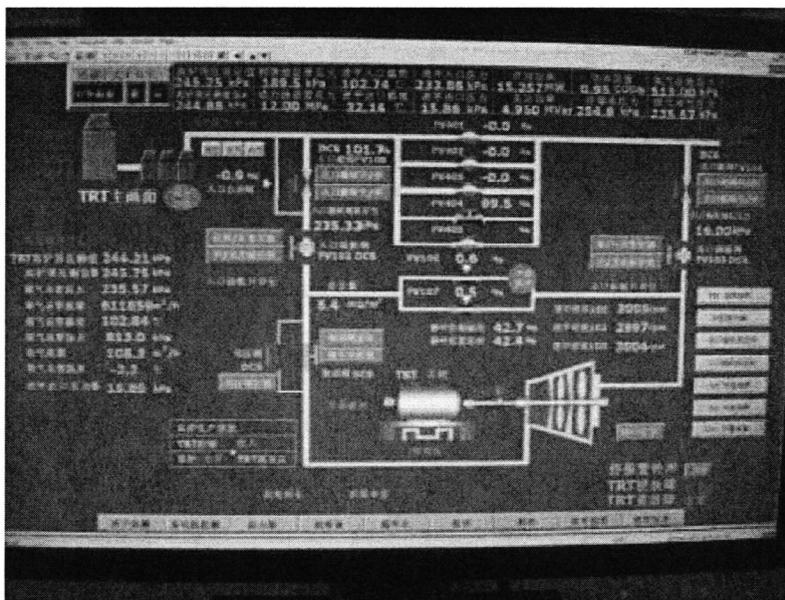


图 4.3 TRT 主操作画面
Fig. 4.3 TRT main screen operation

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。

(2) 程序控制软件

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

TRT 顺序逻辑控制系统包括启动联锁控制、大型阀门开关指令系统、电气联锁控制系统和紧急停机控制等系统构成，以下对启动联锁控制和紧急停机控制系统进行设计。

(a) 启动联锁控制

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 4.4 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。

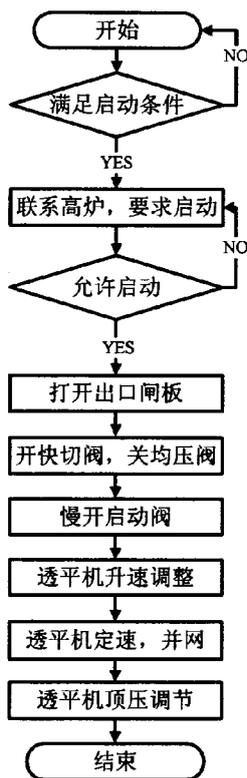


图 4.4 启动联锁控制程序流程图

Fig. 4.4 start interlock control procedures diagram

(b) 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。图 4.5 是紧急停机控制程序。

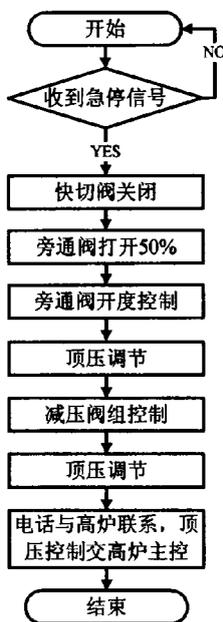


图 4.5 紧急停机控制程序

Fig. 4.5 emergency Shut-off control procedure of TRT system

4.3.2 系统的技术特点

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 MS 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 (SlaveBus) 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) 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) 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，推延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 系统的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) 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 WindowsXP 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。Compose 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 Windows XP 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。

4.4 本章小结

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。

第 5 章 复合控制算法设计及仿真研究

5.1 旁通阀 bang-bang 与 PID 组合控制

快速降低炉压是 TRT 紧急停机的关键，能够快速降压是由旁通阀控制的。在迁钢 3# 机的实际应用中，为了确保炉压迅速降低，往往旁通阀开度调整过大，导致超调量过大，其控制系统流程图如图 5.1 所示。

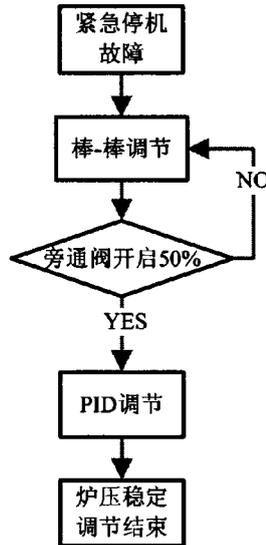


图 5.1 TRT 紧急停机控制流程图

Fig.5.1 emergency Shut-off control flowsheet of TRT system

图 5.2 中所示的是一个定值调节系统^[30]。所谓定值调节，是指在整个生产过程中所要控制的参数始终恒定不变，保持一定的值。在 TRT 紧急停机工艺中，根据工艺要求目标顶压值一致。图 4.2 所示的系统是由顶压探测仪、旁通阀开度测量仪、bang-bang 调节器、PID 调节器、执行器和高炉煤气系统组成的单回路定值调节系统，由顶压探测仪将高炉的顶压测量出来并作为测量信号送入调节器，在调节器内部同工艺要求的给定值进行比较，比较的结果即为偏差信号，调节器将此偏差信号进行 PID 运算后输出去控制执行器。出于优化运行的考虑，这时需要调节旁通阀开度，使通过旁通阀的煤气量在最短的时间内达到透平机停机前的通过量，使炉压回到设定定值。一般其控制系统结构框图如图 5.2 所示。

煤气流量是直接影响炉压的指标，从工程的角度看，整个停机过程需要许多设备进行参与，包括煤气管路、旁通阀反馈器或顶压探测仪等，实际运行中，这些设备能否稳定地工作、能否及时地发现和抑制故障，会影响到整个停机过程的稳定和均衡。更严重的是旁通阀开度的设定值是根据透平机全负荷稳定运行的状

态下设定的，如果紧急停机故障发生在透平机的其他运行状态时，系统将会出现较大的超调问题，达不到高炉对顶压稳定范围的要求。

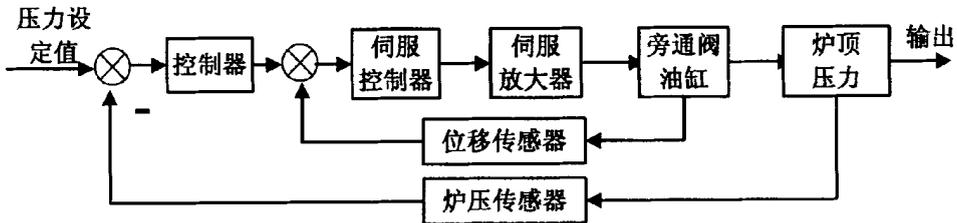


图 5.2 TRT 系统单回路控制框图
Fig.5.2 Single loop control diagram of TRT system

5.2 控制算法设计

5.2.1 bang-bang 控制器简介

bang-bang 控制就是开关量控制器，控制矢量的各个分量都取控制域的边界值，而且不断从一个边界值切换到另一个边界值，是一种最强的控制作用，其特点是输出或者是最小或者是最大，继电器就是一种典型的输出元件，电磁阀或加热器作为 bang-bang 控制器的执行机构，这类控制不适合于快速响应的过程，在工业控制中多用于温度和液位等的控制。与其联系最多的控制理论是最优控制理论，最优控制中常用其解决最短时间控制和最小能耗问题。在过程控制仪表中，bang-bang 控制在一般的场合占有较重要的位置，如美国易达、英国欧陆、中国香港上润、中国福建东辉公司等都有这种控制的二位式、三位式或时间比例控制产品。时间比例控制是 bang-bang 控制中较为先进的控制方式，在时间比例控制中，当执行器接通时，输出是恒定值，例如加热功率是恒定的，而执行器断开时，则无输出，其控制规律是比例特性，这是由于执行器通断时间的长短受偏差输入信号的控制，因而输出信号的脉冲宽度正比于偏差输入信号。

在升温初始阶段，本系统采用 bang-bang 控制作为引导控制，这样可使系统输出上升或下降速度最快，也即使运行时间最短。

最短时间控制有如下特点：

- (1) 控制信号取该信号的极端值，使系统输出上升或下降速度最快；
- (2) 通过控制信号有限次数的切换来实现，切换次数与系统阶数 n 有关，对于系统矩阵实部为实数的情况，每个控制的切换最多不大于 $n-1$ ；
- (3) 当系统是渐进稳定的，通过控制信号在极端值之间有限次的切换，总能使

系统达到平衡点；

(4) 控制信号的切换发生在切换开关曲线(曲面)上。

5.2.2 PID 控制器简介

PID 控制是最早发展起来的控制策略之一，由于其算法简单、鲁棒性好和可靠性高，被广泛应用于工业过程控制^[32]。在早期的控制系统中，PID 控制也是唯一的自动控制方式。伴随着计算机技术的发展，现代控制理论在实用性方面获得了很大进展，解决了许多经典控制理论不能解决的问题。这一现象使很多人认为，新的理论和技术可以取代 PID 控制。但后来的发展说明，PID 控制并没有让位。目前，PID 控制仍然是在工业控制中应用得最为广泛的一种控制方法。这一方面是由于其结构简单，鲁棒性和适应性较强；另一方面，其调节整定很少依赖于系统的具体模型。

PID 控制系统结构如图 5.3 所示^[33]：

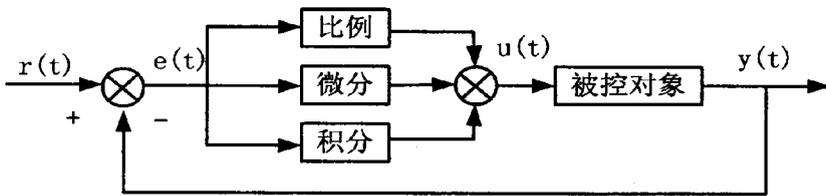


图 5.3 PID 控制系统
Fig5.3 Block Diagram of PID control System

PID 控制器是一种线性控制器，其中， $r(t)$ 为输入， $y(t)$ 为输出，偏差， $e(t) = r(t) - y(t)$ ， $u(t)$ 为控制量，它是偏差的比例(P)、积分(I)、微分(D)的线性组合^[34]。

控制规律为：

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5.1)$$

$$\text{传递函数为：} G(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s \quad (5.2)$$

式中：

K_p ----比例系数；

T_i ----积分时间常数；

T_d ----微分时间常数；

$K_i = K_p / T_i$ ----积分系数;

$K_d = K_p T_d$ ----微分系数。

它的一个基本的思想方法是基于系统的响应特性来设计控制模块，从而组合出控制器。它的一个突出的优点就是它不依赖于被控对象的精确模型，只要了解对象的响应就可以通过仿真设计出控制器，因而它的设计方法简单，方便易行，这正是 PID 控制方法在工业过程控制领域久兴不衰的一个重要原因。

5.2.3 PID 调节规律

本节重点讨论 PID 控制中的各种调节规律以及这些调节规律自身的特点与不足，旨在进一步说明各个调节环节在 PID 控制中所起的作用，以及为了达到最优控制效果，应当如何进行参数的整定，为系统仿真实现奠定理论基础。

(1) 比例调节 (P 调节)

在比例调节中，调节器的输出信号 u 与偏差信号 e 成正比例，即

$$u = K_p e \tag{5.3}$$

式中的 K_p 称为比例系数或增益。

比例调节的显著特点就是有差调节。改变控制器的比例系数 K_p ，可以使闭环极点的分布随之产生相应的变化，从而达到改变系统性能的目的。例如增大 K_p 可以减小系统的稳态误差，提高系统的控制精度。但比例控制对改变闭环系统零极点分布的作用是有限的，因为这种校正不具有削弱或抵消系统中不可改变部分中不良零、极点的作用，也不具有向系统提供所需零极点的能力。特别是，加大控制器的比例系数固然可以减小系统的稳态误差，提高控制精度，但同时导致系统的相对稳定性降低，甚至造成系统不稳定。

(2) 积分调节 (I 调节)

在积分调节中，调节器输出信号的变化率 du/dt 与偏差信号 e 成正比，即

$$\frac{du}{dt} = K_i e \tag{5.4}$$

或

$$u = K_i \int_0^t e dt \tag{5.5}$$

式中 K_i 称为积分增益。上式表明，调节器的输出与偏差信号的积分成正比。

积分控制的输出反映的是输入信号的积分，当输入信号由非零变化为零时，积分控制仍然有不为零的输出，即积分控制具有“记忆”功能。积分控制可以减

小系统的稳态误差，提高系统的控制精度。积分调节是典型的无差调节，这与比例调节的有差调节有所不同。但单纯引入积分环节可能造成系统不稳定，一般会在引入积分环节的同时引入比例环节，构成 PI 控制。积分控制可将原系统的型号提高，从而使系统的稳态误差得到本质的改善。

(3) 微分调节 (D 调节)

不论被调量的变化速度如何，比例调节和积分调节都只根据偏差的大小和方向进行调节，容易造成调节动作滞后，影响控制效果。微分调节能够根据输入信号的变化率，给出系统提前制动的信号，从而赋予调节器一定程度的预见性。

微分调节的控制规律为：

$$u = K_d \frac{de}{dt} \quad (5.6)$$

微分控制反映误差的变化率，只有误差随时间变化时，微分控制才会对系统起作用，而对无变化或者缓慢变化的对象不起作用，因此微分作用不能够单独使用，只能构成 PD 或 PID 控制，另外，微分控制有放大噪声信号的缺点。

上述三种方法是最基本的调节规律，在控制过程中为了满足不同的控制需求，可通过相互叠加对被控对象进行联合控制，通常有以下几种方法：

(4) 比例积分调节 (PI 调节)

PI 调节就是综合 P、I 两种调节的优点，利用 P 调节快速抵消干扰的影响，同时利用 I 调节消除残差。它的调节规律为：

$$u = K_p e + K_i \int_0^t e dt = K_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt \right) \quad (5.7)$$

积分环节的引入带来了消除系统残差的好处，但同时却降低了原有系统的稳定性。为保持控制系统原来的衰减率，PI 调节器比例带应适当加大。因此，PI 调节是以牺牲控制系统的动态品质作为代价来换取较好的稳态性能的。

(5) 比例微分调节规律 (PD 调节)

PD 调节器的动作规律可表达为

$$u = K_p e + K_d \frac{de}{dt} \quad (5.8)$$

$$u = K_p \left(e + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad (5.9)$$

如果系统响应已经达到稳态，则 $de/dt = 0$ ，PD 调节器的微分部分输出为零，因此 PD 调节也是有差调节，与 P 调节相同。引入微分环节可以有效地抑制响应过

大的超调量，提高控制系统的控制品质。微分控制反映输入信号的变化率，能给出系统提前制动的信号，因此，微分控制实质上是一种预见型控制，它的显著特点是具有超前作用。在比例增益不变的情况下，适当增加微分增益 K_d ，将使控制系统的超调量得到有效的抑制，但如果积分增益过大，将会使系统响应时间变长，降低系统的快速性。

因此，通过选择合理的控制参数 K_p 、 T_i 和 T_d 可以使控制量中的三个部分合理组合，从而达到调整旁通阀开度控制炉内压力的目的。

PID 控制具有良好的稳态特性，然而其快速性与超调量之间不可调和的矛盾使得这种算法在一定程度上难以满足高标准的技术要求。同时，对于具有一组固定参数的 PID 控制器来说，当被控对象模型由于某种原因产生剧烈的参数变化，根据原有模型确定的 PID 控制器参数通常难以维持系统的控制品质，因此，要确定最优 PID 控制器的控制参数变得十分困难。

由此可知，探索一种能够充分 PID 的优点，有能力适应对象参数变化剧烈且结构相对简单，适用于实际工程应用的控制方法就显得十分重要。

5.2.4 PID 的参数整定方法

简单的 PID 控制系统是由被控对象和调节器构成的，其控制质量的决定性因素是被控对象的动态特性。而系统能否在最佳状态下工作，则主要取决于调节器各参数的设置是否得当。系统整定的实质，就是通过调整调节器的参数使各个参数的特性与被控对象的特性相互匹配，使调节器最终能够达到最佳的控制效果。

系统整定的方法大致可以分为两大类。一类是理论计算整定法，如根轨迹法、频率特性法。这种整定方法是根据被控对象的数学模型（如传递函数、频率特性），通过计算直接求得整定参数。这种整定方法的局限性在于实际调节器的动态特性与理想的调节器动作规律有差别，理论计算求得的整定参数并不是很可靠，另外，利用理论计算的方法进行参数整定，其计算过程往往比较复杂、繁琐，使用不便。在实际工程中应用最多的是另一类整定方法，称为工程整定法，这种方法大多根据被控对象的阶跃响应曲线进行整定，有些则是直接在闭环系统中进行，方法简单，实用性强。无论采用哪一种方法所得到的控制器参数，都需要在实际运行中进行最后调整与完善。

下面介绍两种在实际工程中常用的工程整定法。

(1) 稳定边界法

这是一种闭环的整定方法。它是基于纯比例控制系统临界振荡试验所得的数

据, 即临界比例增益 K_{ps} 。和临界振荡周期界 T_s , 利用一些经验公式, 求得调节器参数的最优数值。

其整定公式如下:

$$K_p = 0.6K_{ps}, \quad T_i = 0.5T_s, \quad T_d = 0.125T_s \quad (5.10)$$

具体步骤如下:

①将调节器的积分时间设置到最大值 ($T_i = \infty$), 微分时间几乎为零, 比例增益置较小值, 使控制系统投入运行。

②待系统运行稳定后, 逐渐增大比例增益, 直到系统出现等幅振荡, 即所谓的临界振荡过程。记录此时的临界比例增益 K_{ps} , 并计算两个相邻波峰之间的时间差 T_s 。

③利用 T_s 和 K_{ps} 的值, 按给出的整定公式进行计算, 求得调节器的参数值。

需要补充的是, 由于被控对象特性的不同, 此方法求得的调节器整定参数不一定都能获得满意的结果, 仍需要针对具体系统在运行过程中进行在线校正。

(2) 衰减曲线法

与稳定边界法类似, 不同的只是本法采用某衰减比 (通常为 4:1 或 10:1) 时设定值扰动的衰减振荡试验数据, 然后利用一些经验公式, 求得调节器的整定参数值, 其整定公式如下:

$$K_p = 1.25K_c, \quad T_i = 0.3T_c, \quad T_d = 0.1T_c \quad (5.11)$$

对于衰减比为 4:1 的衰减曲线法的操作步骤如下:

①置调节器积分时间到最大值 ($T_i = \infty$), 微分时间为零 ($T_d = 0$), 比例增益置较小值, 使控制系统投入运行。

②系统稳定后, 作设定值阶跃扰动, 并观察系统的响应, 若系统响应衰减太快则增大比例增益, 如果系统响应衰减过慢, 则减小比例增益。直到系统出现 4:1 的衰减振荡过程, 记下此时的比例增益 K_c 和振荡周期 T_c 的数值。

③利用 K_c 和 T_c 的值, 根据(5.1~5.11)的公式, 求解调节器各整定参数的数值。

5.2.5 切换式 PID 控制方法设计

前面已经介绍, PID 控制具有结构简单, 容易实现, 并且对于大多数过程都具有良好的控制效果和鲁棒性, 且算法原理简明, 参数物理意义明确, 理论分析体系完整且应用技术成熟等优点。因此本文对 TRT 紧急停机控制仍偏向于 PID 控制, 在顶压降回到 245KPa 的过程中, 根据 TRT 紧急停机工艺要求, 对顶压的下降率有不同的要求, 采用两组不同参数 PID 交替控制^[35], 控制结构图如图 5.4 所示。

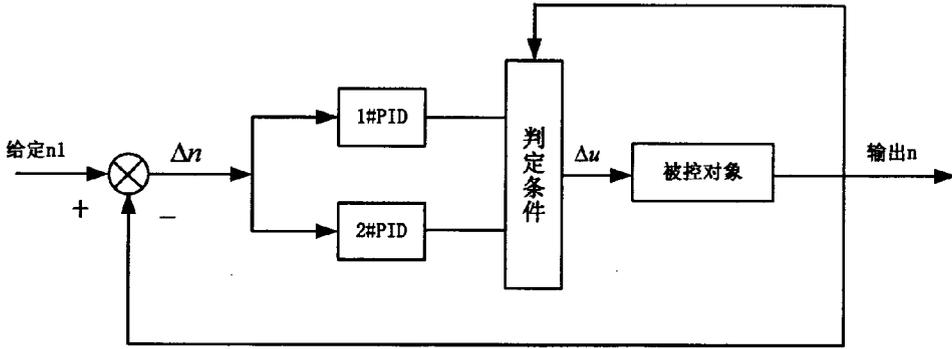


图 5.4 两组 PID 参数的控制结构图
Fig.5.4 Two PID parameters control structure diagram

其中， n_1 为炉顶压力给定值， n 为顶压探测器测量的炉顶实际压力值。

图 5.4 中的 PID 控制器由 1#PID 控制器和 2#PID 控制器两部分组成。两个 PID 控制器的区别在于参数整定的不同。

收到快切阀动作信号，1#PID 输出到控制系统，2#PID 输出没有输出到系统；当顶压值进入到和设定值的差 $\leq 5\text{KPa}$ 时，2#PID 的输出到控制系统，1#PID 输出没有输出到系统。

条件判定模块设计在双组参数不同的 PID 前向通道之后，在紧急停机过程中两个 PID 控制器都在工作之中，只是输出时由判定模块决定是哪一路输出到控制系统，与判定模块前置相比较，能够最大程度的降低交替控制时产生的扰动。

5.3 仿真及结果分析

5.3.1 搭建仿真模型

本文第 3 章中已建立 TRT 紧急停机过程的数学模型为：

$$G_t = \frac{P_1(s)}{L_1(s)} = \frac{1.5}{2s + 1} e^{-2s} \quad (5.12)$$

本章以此模型进行仿真。本仿真实验主要目的在于，对 TRT 紧急停机过程分别用一组 PID 参数和两组 PID 参数的不同控制方法对其控制，比较两种方式的输出结果。

由于实际紧急停机过程中存在控制滞后，在搭建的仿真模型中加入滞后环节。

(1) 单独用 1#PID 在 MATLAB/Simulink 软件^[36]中搭建的仿真模型，如图 5.5 所示。

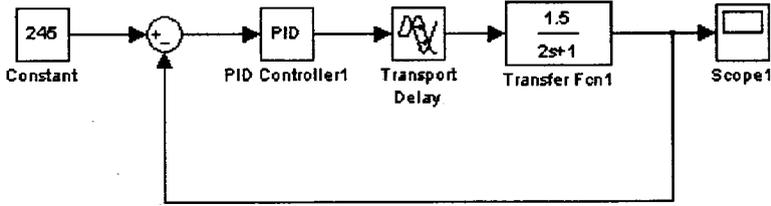


图 5.5 1[#]PID 的 Simulink 仿真框图
Fig.5.5 Simulated structure diagram of 1[#] PID

(2) 单独用 2[#]PID 在 MATLAB/Simulink 软件中搭建的仿真模型, 如图 5.6 所示。

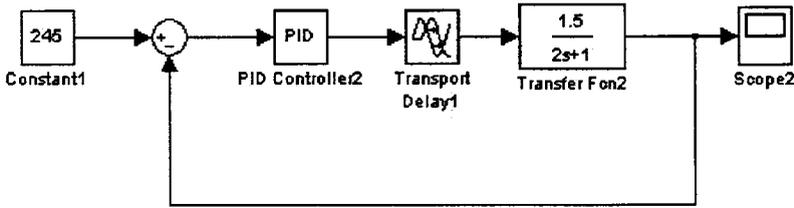


图 5.6 2[#]PID 的 Simulink 仿真框图
Fig.5.6 Simulated structure diagram of 2[#] PID

(3) 两组 PID 参数交替控制在 MATLAB/Simulink 软件中搭建的仿真模型, 如图 5.7 所示。

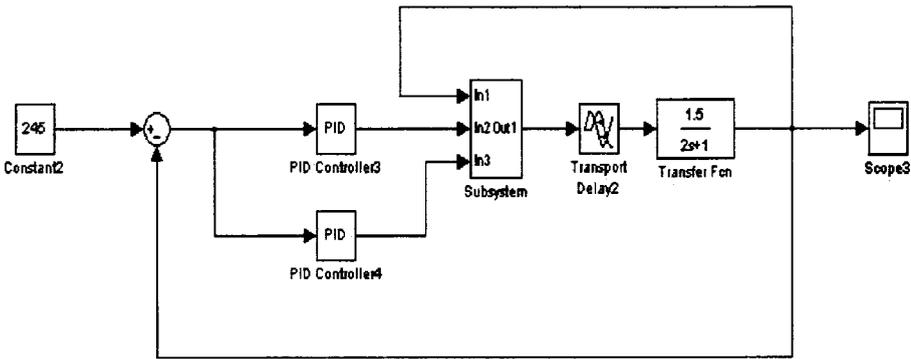


图 5.7 两组 PID 控制器 Simulink 仿真框图
Fig.5.7 Simulated structure diagram of two PID controller

根据工艺要求, 炉压应在控制在 245KPa±5 KPa 范围内, 两组 PID 参数交替控制判据^[37,38]条件搭建如如图 5.8 所示。

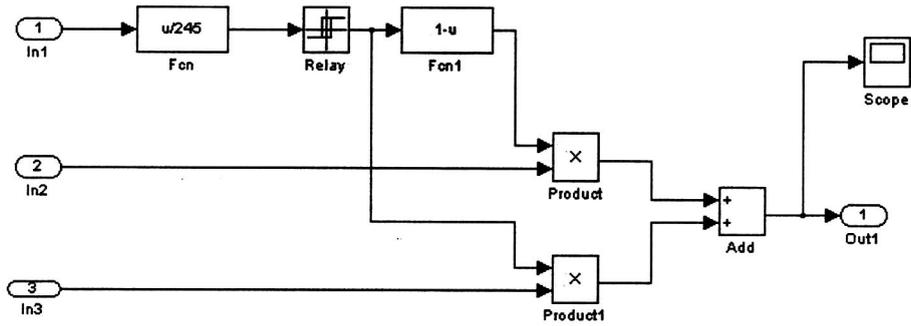


图 5.8 两组 PID 参数交替控制方式条件判定模块
Fig.5.8 Two PID alternate control way judge module

图 5.8 中，in1—高炉顶压输入量，in2—1#PID 输出，in3—2#PID 输出。

条件判定：给急停信号后，1#PID 的输出到控制系统，2#PID 参数没有输出到系统；当高炉顶压测量值和设定值的偏差 $\leq \pm 5\%$ 时，2#PID 的输出到控制系统，1#PID 输出没有输出到系统。

5.3.2 仿真结果分析

(1) 初始值为 0，设定值为 245KPa 时，单独使用 1#PID 控制器，系统的仿真结果如图 5.9 所示。

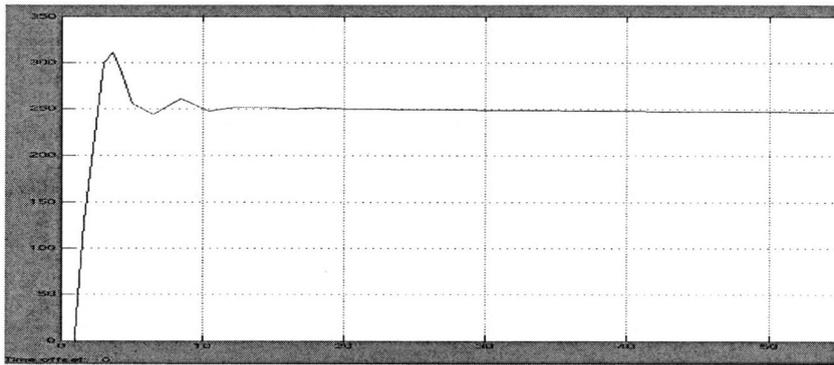


图 5.9 1#PID 压力曲线
Fig.5.9 1#PID pressure curves

1#PID 参数的设定值为： $K_p = 0.8$ ， $K_I = 0.02$ ， $K_D = 0.1$ 。

由图 5.9 可以看出，1#PID 控制器所组成的系统在由 0 提高到 245KPa，所需时间很短，能快速打开旁通阀，但由于旁通阀开度打开过快，在炉压达到 245KPa 后不能迅速稳定，造成高炉炉顶压力出现较大的干扰，影响高炉正常生产。

(2) 初始值为 0，设定值为 245KPa 时，单独使用 2#PID 控制器，系统的仿真结果如图 5.10 所示。

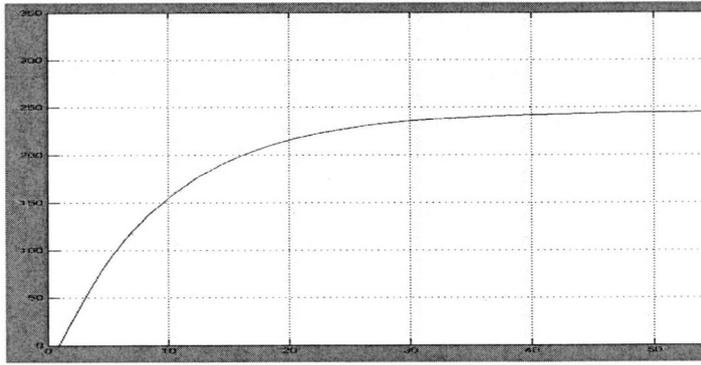


图 5.10 2[#]PID 压力曲线
Fig.5.10 2[#]PID pressure curves

2[#]PID 参数的设定值为： $K_p = 0.1$ ， $K_I = 0$ ， $K_D = 0$ 。

由图 5.10 可以看出，采用 2[#]PID 控制器所组成的系统变化很平稳，在此种控制方式下，旁通阀开度变化率小，此时控制高炉顶压的旁通阀的开度调节虽然能使炉压稳定在 245Kpa，所需时间过长，高炉生产造成影响。同时可以在图 5.11 中发现，在 0-245KPa 这个区域，经历的时间大概是由第一组 PID 参数控制方式下的 10 倍，也就是说，对高炉生产的影响时间大概为由第一组控制方式下的 10 倍。

(3) 初始值为 0，设定值为 245KPa 时，两组 PID 参数交替控制方式，系统的仿真结果如图 5.11 所示。

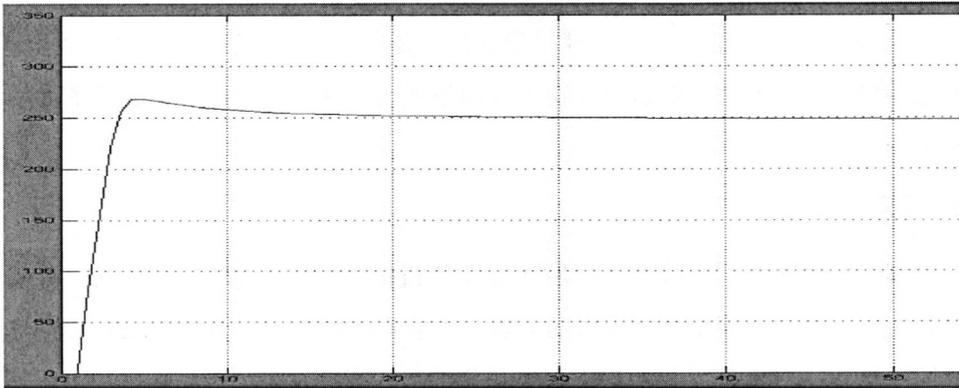


图 5.11 两组 PID 参数交替控制压力曲线
Fig.5.11 Two PID controller alternate control curves

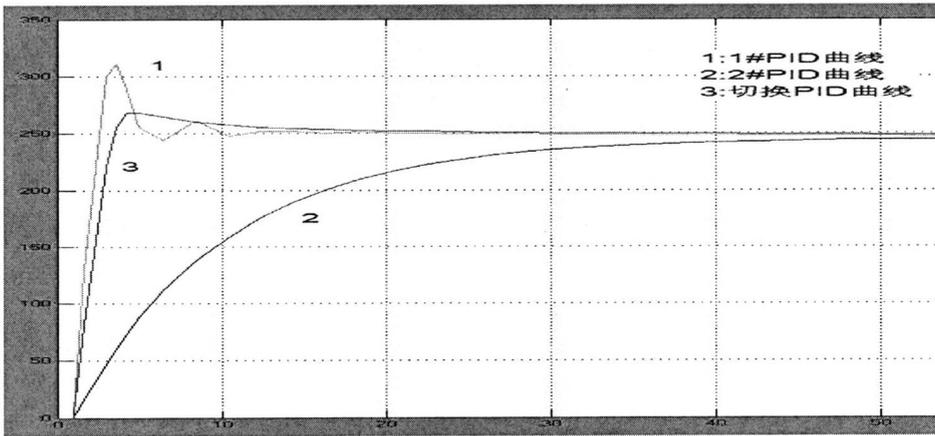


图 5.12 三种控制方式输出曲线比较图
Fig.5.12 Three PID methods output curves

1#PID 参数的设定值为: $K_p = 0.8$, $K_I = 0.02$, $K_D = 0.1$ 。

2#PID 参数的设定值为: $K_p = 0.1$, $K_I = 0$, $K_D = 0$ 。

由图 5.12 可以看出, 采用两组 PID 参数交替控制方式所组成的系统, 在 0-245KPa 区间, 具有调整速率快、时间短、超调量小等优点; 240KPa 时, 两组 PID 参数进行交替控制, 当炉压到达 250KPa 时能够迅速稳定下来, 避免过度超调和调整时间过长的问題。

通过上述的仿真结果可以看出, 采用两组 PID 参数交替控制方式, 总体来说效果理想, 能够同时保证炉压快速和平稳调整的要求。从图 5.12 中看出在两组 PID 参数交替调整的优越性, 炉压虽存在小量的超调, 但这个值可以根据工艺的要求对判定条件进行调整。

5.4 本章小结

本章首先将迁钢 3#炉所采用的 TRT 紧急停机控制与传统 PID 控制结合, 可以发现存在快速性和超调量相互矛盾的问题, 不能实现同时保证旁通阀打开的快速性和炉压控制的平稳性。由于 PID 控制结构简单, 容易实现, 对于大多数过程都具有良好的控制效果和鲁棒性, 并且理论分析体系完整且应用技术成熟。所以考虑采用两组 PID 控制器在不同升速阶段通过改变 PID 控制参数来解决矛盾, 然后介绍了两组 PID 不同参数交替控制系统的构成。

本章主要通过 MATLAB/Simulink 软件对第四章设计进行仿真, 通过对两组 PID 参数交替控制方式搭建仿真模型进行仿真, 并与单一 PID 控制的系统仿真输出作比较, 从仿真结果来看, 采用两组 PID 参数交替控制方式能迅速提高炉压, 并且超调量很小, 能同时保证炉压升速的平稳性的要求。

第6章 总结与展望

本文以迁钢 3[#]高炉 TRT 为研究背景,首先简要介绍了高炉 TRT 的基本工艺流程,重点介绍了 TRT 紧急停机过程。并对迁钢 3[#]TRT 系统结构及其正常工况下开停机系统和辅助系统进行了简单介绍。目前,迁钢 3[#]TRT 采用的 bang-bang+PLD 的控制方法来进行紧急停机操作,在紧急停机过程中存在降压快速与超调量的矛盾。

然后通过对 TRT 紧急停机过程的研究,考虑到 TRT 实际系统在紧急停机转动过程中,扰动十分复杂,本文作为简化只从一维考虑其受力情况,近似认为旁通阀 1、2 和透平机的前后压力相等,且流量无损失。建立以此为依据建立数学模型。将 TRT 紧急停机控制与传统 PID 控制结合,可以发现存在快速性和超调量相互矛盾的问题,不能实现同时保证顶压下降的快速性和平稳性。由于 PID 控制结构简单,容易实现,对于大多数过程都具有良好的控制效果和鲁棒性,并且理论分析体系完整且应用技术成熟。所以考虑采用两组 PID 控制器在不同降压阶段通过改变 PID 控制参数来解决矛盾,然后介绍了两组 PID 不同参数交替控制系统的构成。

最后通过 MATLAB/Simulink 软件对设计方案进行仿真,通过对两组 PID 参数交替控制方式搭建仿真模型进行仿真,并与生产现场采用的 bang-bang+PID 控制的系统仿真输出作比较,从仿真结果来看,采用两组 PID 参数交替控制方式能迅速是炉压迅速回归到高炉工艺允许的范围,并且超调量很小,能同时保证顶压下降的快速性和平稳性的要求。

虽然两组 PID 参数交替控制方式已经基本实现了预期的目标,但是本文对一些问题的研究和理解还不够深入,有些问题更待今后进一步研究,主要有以下几个方面:

(1) 本文只针对紧急停机过程建立了近似模型,并没有考虑高炉工况变化的诸多因素如煤气压力、减压阀组控制方式与煤气量的关系。数学模型的建立有待于进一步的研究。

(2) 对于整个系统的滞后性未进行系统的分析,今后的工作侧重于对系统的滞后性进行分析。

(3) 本文所使用的控制方法,并未应用于实际,需要对算法进行更加深入的研究,希望日后能够在生产过程中实现,真正用于实践。

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，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。顶压控制技术的不断发展和成熟将成为 TRT 系统推广的前提和保障，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. 王泰昌, 张媛媛, 迟京东. 我国钢铁工业节能降耗现状分析(上)[J], 中国钢铁业, 2007, (3): 21-24.
2. 王泰昌, 张媛媛, 迟京东. 我国钢铁工业节能降耗现状分析(下)[J], 中国钢铁业, 2007, (4): 16-19.
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. 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.
5. 韦金珍, 林峰. 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.
6. 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.
7. 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, 50(22): 119-126.
8. Ke S L, Ti H C. Transient analysis of isothermal gas flow in pipeline network [J], Chemical Engineering Journal, 2000, 76(2): 169-177.
9. 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, 2009.
10. Tao W Q, Ti H C. Transient analysis of gas pipeline network [J], Chemical Engineering Journal, 2003, 69(1): 47-52.
11. 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.
12. Osiadacz Andrzej J, Chaczykowski Maciej. Comparison of isothermal and non-isothermal pipeline gas flow models [J], Chemical Engineering Journal, 2010, 8(3): 41-51.
13. 黄景华. TRT 影响高炉顶压问题的解决[J], 冶金动力, 2008, (4): 21-23.

14. 盛钢, 柳黎光. TRT 顶压稳定技术研究与实践[J], 通用机械, 2005, (8): 5-6.
15. 周传典. 高炉炼铁生产技术手册[M], 北京: 冶金工业出版社, 2002, 67-70.
16. 王猛. 电液伺服控制技术在 TRT 自动控制系统中的研究与应用[J], 莱钢科技, 2006, (2): 52-54.
17. 王红卫著. 建模与仿真[M], 北京: 科学出版社, 2002, 33-34.
18. Narciso F. Macia, George J. Thaler 著, 李乃文, 孙江宏等译. 动态系统建模与控制[M], 北京: 清华大学出版社, 2006, 5.
19. 倪维斗, 徐向东. 热力系统建模与控制的若干问题[M], 北京: 科学出版社, 1998, 43.
20. Osiadacz. Simulation and Analysis of Gas Networks[M], 1989, 21-24.
21. 胡上序, 陈海. 化工过程的建模、仿真和优化[M], 杭州: 浙江大学出版社, 1997, 12-13.
22. 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.
23. 杨春节, 吴平, 宋执环. 炼铁高炉 TRT 系统炉顶压力动态数学模型研究[J], 浙江大学学报(工学版), 2006, (09): 5-7.
24. 成伯兰. 高炉炼铁工艺及计算[M], 北京: 冶金工业出版社, 1991, 5-6.
25. 那树人. 炼铁工艺计算[M], 北京: 冶金工业出版社, 1999, 55.
26. 付卫东. 管路系统通过调节阀控制气体流动的动态数学模型建立[J], 航天学报, 1999, (20): 32-34.
27. 董大勤. 压力容器与化工设备实用手册[M], 北京: 化学工业出版社, 2002, 01-01.
28. 付卫东等. 调节阀流量的计算方法[J], 阀门, 1999, (1): 1-6.
29. 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): 7-11.
30. 范翠香, 周庆贵. 基于相关系数辨识法的 PID 自动整定算法[J], 微机发展, 2000, (1): 70-71.
31. 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.
32. 陶永华. PID 控制原理和自整定策略[J], 工业仪表与自动化装置, 1997, (4): 60-64.

33. 陶永华.新型 PID 控制及应用[M], 北京: 机械工业出版社, 2002, 1-13.
34. 俞忠原, 陈一民编著.工业过程控制计算机系统[M], 北京: 北京理工大学出版社, 1995, 89-91.
35. 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.
36. 刘金琨.先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M], 北京: 电子工业出版社, 2003, 130-140.
37. G.Facco, M.E.Petersen, R.J.Schurko. State of the art slab reheating furnaces at dofasco,[J],Iron&Steel Engineer,1990,67(1): 27-36.
38. Tentis E, Margaris D, PaPanikas D.Transient gas flow simulation using an AdaptiveMethod of Lines [J], Comptes Rendus Mecanique, 2003, 331(7): 4-5.

致 谢

在研究生学习生活即将结束之际，我要对在这三年的硕士研究生学习、科研和生活中给予我支持和鼓励的人们表示深深的感谢。

本论文是在我的导师关守平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，关教授都对我提出了许多宝贵、有益的建议，使我受益匪浅，使我能够在工作十六年后顺利地完成工程硕士课题的研究工作，关教授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，谨向尊敬的导师关守平教授致以深深的谢意和最诚挚的祝福。

此外，感谢在论文期间给予我支持、帮助和鼓励的付冲、王亚歌、柴春青、何绪铃、钱中山同学。他们热心、无私、不求回报的精神让我深受感动，愿我们彼此的友谊天长地久。还要感谢迁钢公司各级领导对我们的支持、鼓励，我会用自己的毕生所学回报迁钢领导对我们的栽培。

最后，我还要感谢我的父母、爱人这么多年来对我的悉心照顾，一如既往的支持我完成学业，还有我两岁的女儿歆媛，并祝你们身体健康、生活幸福！

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”的东大校训，以更好的工作成绩回报母校，回报首钢。