

分类号_____密级_____

UDC _____

学 位 论 文

炼铁高炉透平静叶系统高炉顶压鲁棒性控制研究

作者姓名：孙琨

指导教师：钱晓龙 教授 东北大学信息科学与工程学院

马建才 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6月 论文答辩日期：2011年6月23日

学位授予日期：2011年7月 答辩委员会主席：井元伟

评阅人：李鸿儒 梁全喜

东 北 大 学

2011年6月

A Thesis in Control Engineering



Research on the Robust Control of Blast Furnace Top Gas Pressure in Turbine Unit System

By Sun Kun

Supervisor : Professor Qian Xiaolong

Senior Engineer Ma Jiancai

Northeastern University

June 2011

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诚挚的谢意。

学位论文作者签名：孙巍

签字日期：2011.6.24

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：孙巍

导师签名：孙巍 左

签字日期：2011.6.24

签字日期：2011.6.24

炼铁高炉透平静叶系统高炉顶压鲁棒性控制研究

摘 要

高炉炉顶煤气余压透平发电装置（简称 TRT）是目前国际、国内钢铁企业公认的有价值的二次能源回收装置，其投入运行的前提条件是在任何情况下均能保证高炉顶压的稳定性，从而不影响主流程工艺过程。然而，随着冶金高炉的大型化和现代炼铁技术的发展，对高炉顶压的稳定性要求越来越高，PID 控制已难以达到预期的控制要求。

本文以首钢迁钢公司 1#高炉 TRT 系统为研究对象，对高炉顶压的稳定性进行了研究。针对高炉炉顶压力的特点，通过机理分析和参数辨识相结合的方法建立了正常工况下高炉顶压的动态数学模型。理论分析得到高炉顶压控制系统是满足闭环可辨识性条件的。由于正常工况下高炉顶压存在多种扰动，因此采用抗干扰性较强的内模控制方法设计高炉顶压二自由度内模控制器，以此提高高炉顶压鲁棒性控制。通过对高炉炉顶压力调节执行机构电液伺服系统的设计，完成了高炉炉顶压力控制的目的，为正常工况下 TRT 系统高炉顶压的控制提供了一种新的方法。

最后，利用 Matlab7.0/Simulink 软件对高炉顶压内模控制进行仿真实验，分别在模型精确匹配和模型失配时进行仿真，讨论了内模控制器的可调参数对系统性能的影响。仿真结果表明内模控制性能优越，参数调整方便，通过调整参数可以调整系统的鲁棒性，易于工程实现。

关键词：高炉炉顶煤气余压透平发电装置（TRT）；炉顶压力；动态模型；内模控制；鲁棒性控制

Research on the Robust Control of Blast Furnace Top Gas Pressure in Turbine Unit System

Abstract

Blast Furnace Top Gas Pressure Recovery Turbine Unit (TRT) is widely accepted as a valuable secondary energy recovery device by domestic and international iron and steel enterprises. The precondition of the operation is to ensure the stability of blast furnace top pressure in any case, thus no effect on the main flow process. However, with the large-scale of metallurgical blast furnace and development of modern iron-making technology, the demand for the stability of blast furnace top pressure is higher and higher and PID control has been difficult to achieve the desired control requirements.

In this paper, the study object is 1[#] blast furnace TRT system in ShouGangQianGang Co. and the stability of blast furnace top pressure has been studied. For the characteristics of blast furnace top pressure, the thesis establishes a dynamic mathematical model of blast furnace top pressure in normal operating conditions by the method of combining mechanism analysis and parameter identification. The control system of blast furnace top pressure meets the closed-loop identifiability conditions by the theoretical analysis. Because the blast furnace top pressure exists a variety of disturbances in the normal operating conditions. Internal Model Control of strong anti-interference is used to design the IMC controller with two degrees of freedom for the blast furnace top pressure in order to improve the robustness of the blast furnace top pressure control. Through the design of electro-hydraulic servo system which is an executive body of the blast furnace top pressure, the purpose of blast furnace top pressure control is completed and a new control approach for the blast furnace top pressure of the TRT system in normal conditions is provided.

Finally, the author uses the Matlab7.0/Simulink to simulate the IMC control system of the blast furnace top pressure in the model exact-match and mismatch and discusses the effects of the adjustable parameters of IMC controller on the system performance. The simulation results indicate that IMC control has better performance and easier parameter adjustment and the robustness of system can be adjusted by changing the parameters, which is easy to realize by engineering.

Key words: Blast furnace top gas pressure recovery turbine unit (TRT); Top gas pressure; Dynamic model; Internal model control (IMC); Exact-linearization; Robust control

目 录

| | |
|-----------------------------------|-----|
| 独创性声明..... | I |
| 摘 要..... | II |
| Abstract..... | III |
| 目 录..... | IV |
| 第 1 章 绪 论 | 1 |
| 1.1 课题的研究背景..... | 1 |
| 1.2 TRT 系统国内外发展的现状..... | 2 |
| 1.3 TRT 系统炉顶压力控制的特点..... | 3 |
| 1.4 TRT 系统控制的研究现状..... | 4 |
| 1.5 本文的主要工作..... | 7 |
| 第 2 章 TRT 透平静叶系统 | 9 |
| 2.1 TRT 系统的工艺流程..... | 9 |
| 2.1.1 传统的高炉工艺流程..... | 9 |
| 2.1.2 TRT 系统的工艺流程..... | 10 |
| 2.1.3 TRT 系统控制要点..... | 13 |
| 2.2 TRT 系统的控制结构..... | 14 |
| 2.3 TRT 的 DCS 控制系统..... | 16 |
| 2.3.1 ABB DCS 控制系统..... | 17 |
| 2.3.2 控制系统的硬件..... | 18 |
| 2.3.3 控制系统的软件..... | 21 |
| 2.4 TRT 对高炉炉顶压力鲁棒性的控制难点..... | 23 |
| 2.5 本章小结..... | 24 |
| 第 3 章 TRT 系统高炉顶压控制分析 | 25 |
| 3.1 引言..... | 25 |
| 3.2 TRT 系统数学模型的建立..... | 25 |
| 3.2.1 动态过程数学模型..... | 27 |
| 3.2.2 高炉顶压动态数学模型机理分析..... | 31 |
| 3.3 高炉顶压数学模型..... | 33 |
| 3.3.1 高炉顶压控制系统..... | 33 |
| 3.3.2 高炉顶压系统闭环分析..... | 34 |

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| 3.4 本章小结..... | 36 |
| 第 4 章 高炉炉顶压力内模控制 | 37 |
| 4.1 内模控制及高炉炉顶压力模型的建立..... | 37 |
| 4.1.1 内模控制的建模方法..... | 37 |
| 4.1.2 高炉炉顶压力内模控制推导..... | 38 |
| 4.1.3 内模控制器的性质..... | 40 |
| 4.2 内模控制器的设计..... | 41 |
| 4.3 电液位置伺服系统..... | 44 |
| 4.3.1 电液位置伺服系统的构成和工作原理..... | 44 |
| 4.3.2 电液位置伺服系统在 TRT 的应用..... | 45 |
| 4.4 高炉顶压控制系统设计..... | 46 |
| 4.5 高炉顶压内模控制器设计..... | 47 |
| 4.6 本章小结..... | 48 |
| 第 5 章 TRT 系统仿真实验及结果分析..... | 49 |
| 5.1 搭建仿真模型..... | 49 |
| 5.2 仿真结果分析..... | 50 |
| 5.2.1 模型精确匹配..... | 50 |
| 5.2.2 模型失配..... | 52 |
| 5.3 本章小结..... | 53 |
| 第 6 章 总结与展望 | 55 |
| 6.1 研究工作总结..... | 55 |
| 6.2 未来工作展望..... | 56 |
| 参考文献..... | 57 |
| 致 谢..... | 61 |

第1章 绪论

1.1 课题的研究背景

近些年来,随着我国经济的飞速发展和稳步推进,能源的过度耗费和环境的日益恶化问题也越来越成为人们关注的焦点。2006年制定的十一五规划纲要中指出,2006~2010年我国的单位国内生产总值即GDP能耗降低大约20%;国家发改委颁布的《节能中长期专项规划》中提出:2010年我国主要产品单位能耗指标总体达到或接近20世纪90年代初期国际先进水平^[1]。但就目前的总现状而言,我国的降耗水平与国际发达国家之间仍存在很大的差距,需要进一步提高。在2009年底召开的哥本哈根会议上,我国宣布截至2020年,中国将完成40%~50%的减排目标,这对节能降耗提出了更高的要求。

钢铁工业作为国民经济最重要的原材料工业之一,也是全国最大的能耗用户。据2005年的数据统计,我国钢铁工业的总能耗约占全国总能耗的大约16%,而其中炼铁系统占了大约5%。《钢铁行业发展政策》中规定,2005年到2010年钢铁行业的发展目标是:“大力降低能耗,综合能耗<700千克标煤/吨钢”^[2]。随着经济的发展,各国对钢铁的需求量和钢铁的产量仍在不断的增加。因此,降低钢铁产业的生产能耗已成为迫在眉睫的一项重要任务。而依照目前国内钢铁产业的现状,实现降耗最简单、最有效的方式就是二次能源回收。有数据显示,若充分回收钢铁生产过程中产生的诸如煤气等二次能源,可回收约高达12%的能量,能源回收利用率可达72%。钢铁工业每年排放大量的可燃气体和余热余能,回收利用这一资源,有很大的节能降耗潜力。

首钢迁钢公司为积极响应国家节能降耗低碳减排的号召,在2006~2010年间先后从陕西鼓风机厂引进了三台“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^[3],它是通过将高炉炉顶煤气导入透平膨胀机做功,使高炉煤气的压力能及热能转化为机械能,再驱动发电机发电的一种二次能量回收装置。TRT装置发电过程中不产生任何污染和公害,发电成本低,回收能源效果显著,具有客观的经济效益和社会效益,是目前国际、国内钢铁企业公认的绿色环保的二次能源回收装置,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,从而不影响主流程工艺过程,因此TRT装置中高炉炉顶压力稳定性研究十分重要。

以首钢迁钢公司1[#]TRT装置每小时发电量设计能力为15000KW,现为平均9000KW以上,按照1天24小时,1年平均运行330天计算,1年可以发电0.7亿KWh。按照每KWh电0.5元计算,出去成本及设备折旧1年可以创造经济效益1800多万元,应用前景十分广阔。

TRT 装置具有以下优点:

1. 以前, 在高炉顶压调节中, 高炉煤气通过洗涤和除尘, 再经过减压阀组, 将 200 KPa 左右的压力减弱后送至用户, 这个过程使高炉煤气余压消耗在减压阀组上, 没有产生任何新的能量。通过 TRT 机组, 可以将煤气余压和余热转换成电能, 转换能量后的煤气送至最终用户, 可以获得一定的经济效益。

2. 在产生电能的同时, 也消除了减压阀降低能量时的副作用—噪声、振动等环境污染。

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^[4], 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。

3. 顶压控制品质得到提高, TRT 一般为 2~3 级静叶调节, 因此通过 TRT 机组的静叶来调整高炉顶压, 比减压阀组控制效果更好, 这样可以带来更稳定的高炉顶压, 而稳定的顶压更有利于高炉生产, 对出铁的产量和质量有着积极的作用。

4. 通过对控制过程的优化, 合理设计复合控制功能, 可将煤气消耗降低至最低水平, 发电功率尽量提高, 做到既节能又环保, 同时兼顾操作简易性和控制的稳定性。

所以, 可见 TRT 系统是很具有社会效益和经济效益, 迁钢公司也通过三台 TRT 装置得到丰厚的经济利润。

1.2 TRT 系统国内外发展的现状

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 (6000KW), 并在马格尼托方尔斯克钢铁厂投入运行。前苏联 TRT 装置主要有三种规格 (6000, 8000, 12000 KW), 共制造了 30 多套。1969 年法国索费来尔公司试制成功了第一台湿式径流反动式煤气透平, 并于 1971 年在 Wendel-sidelert 投入运行。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了法国径流式高炉煤气透平专利技术, 于 1974 年 11 月正式投产, 安装在川崎制铁水岛 2 号高炉上 (8000KW) 之后, 加以改进和发展, 称为川崎—索费来尔法。从 20 世纪 80 年代以来, 日本 TRT 装置技术发展较快。三井造船、日立造船、川崎重工三家关于 TRT 的研究走在世界该装备技术领域的前列, 这三

家公司在研究了积灰堵塞和叶片磨损之后,又制造了干式轴流反动式透平,并利用静叶可调节控制炉顶压力,透平效率可达86%。目前国外发展最快、水平最高、数量最多的是日本,据1997年的资料统计,日本42座高炉全部安装了TRT。高炉煤气能量回收透平发电装置也向大型化发展。目前全球运行的5000 M³以上大高炉有16台,由于大型高炉煤气能量回收透平发电装置主要由日本企业垄断,因此运行的13台大型高炉TRT都在日本。在众多的日本透平制造企业中,川崎重工的大型高炉煤气能量回收透平发电装置无论是在技术上,还是在数量和质量上均处于世界领先地位。

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。中国现有1000M³以上的高炉约80座,有58座已建或在建TRT,普及率为72.5%。1000M³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300M³以上的高炉全部安装TRT,总装机容量将达1700MW左右,年可发电137亿度,回收电费约70亿人民币,将给钢铁企业带来了可观的经济效应与社会效应。从环境保护方面来说,也非常有益,它减少了大量的灰尘排放,也降低了工厂噪音的污染。采用TRT发电,每年可减少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。

1.3 TRT系统炉顶压力控制的特点

利用TRT装置进行发电,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,引起崩料严重时会损坏设备。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,会引起炉顶设备事故^[5]。所以作为能量回收的 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,从而不影响主流程工艺过程。即在 TRT 装置启动、运行、正常和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可燃有毒气体,要求 TRT 装置必须安全可靠。

我国 TRT 自动控制系统起步较晚,就全国范围现状来看,即使在自动化程度较高的 TRT 系统也仍然存在许多问题。同其他发达国家相比存在很大差距,实现全自动控制率很低。

综合来看,我国 TRT 系统炉顶压力控制有以下的特点和不足:

1. 各种类型、不同等级的控制系统和控制方式并存。大部分新建 TRT 采用计算机集散式控制系统,但在大量的现有和改造的 TRT 控制系统仍然采用半自动控制方式。

2. 开始大量采用可靠性高、维护简便的各种检测仪表和在线仪表,为进一步提高 TRT 自动控制水平提供了基础条件。但目前使用的大多是进口仪器、仪表,在使用和维护方面仍存在许多问题。

3. TRT 控制系统的监控和通讯功能在硬件和软件开发利用方面存在极大不足,妨碍了调节过程的高效、经济运行。许多控制系统的设计和实际工艺不相符,后期改造涉及硬件设备,整个过程控制缺乏整体性。

4. 国产自控系统、仪表、设备的质量、成套和系列化急需进一步提高,特别是国内一些大容量高炉新工艺的出现,高炉煤气参数有很大提高,对相应的自动控制设备提出了更高的要求。

目前首钢迁钢三台高炉 TRT 中,2[#]、3[#]高炉 TRT 经过后期改造,基本能实现全自动运行。一号高炉 TRT 计划在高炉检修期间增加启动阀,以便实现从开机-升速-并列全自动控制。

1.4 TRT 系统控制的研究现状

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

从 TRT 装置的运行原则中可以看到 TRT 装置作为高炉冶炼的附属设备,在运行中

不能影响高炉主流程的正常生产。作为高炉生产中的一个重要因素，高炉炉顶压力的稳定性不仅影响高炉冶炼产品的质量，而且对于生产的安全有着重要影响。当高炉炉顶压力过大时，会出现“冒顶”现象，这将对生产带来极大的危害。因此，在安装 TRT 装置后，如何保持高炉炉顶压力的稳定的问题是 TRT 装置是否成功的重要条件；随着冶金高炉的大型化和现代炼铁技术的发展，对高炉炉顶压力的稳定性的要求也越来越高（要求炉顶压力波动小于 $\pm 2\text{KPa}$ ）^[6]。因此，TRT 机组虽然可以回收原来浪费在减压阀组或比肖夫除尘器上的压力能，但必须在确保高炉炉顶压力稳定的前提下才能谈多回收发电。一般的控制原则是在 TRT 运行时，当高炉顶压发生波动，即高炉顶压超出过高炉炼铁的允许值时，可通过调节 TRT 装置中的透平机静叶开度进行控制，通常采用常规的 PID 方法控制；当 TRT 系统发生故障紧急停机时，TRT 装置管路要立即断开，同时开启旁通管路的调压阀来保持顶压稳定。

通过参与首钢迁钢公司 1[#]、2[#]高炉 TRT 系统的监装与调试，并长时间从事其岗位的运行工作，总结出对 TRT 系统进行研究要作到下面几个方面：

1. 研究思路

根据流体力学原理，建立顶压稳定分析计算数学物理模型，推导平衡控制方程，分析顶压与各种复杂因素（流量、压力）之间的关系，计算管路系统的阻尼，根据实时在线检测到的信息，编制分析计算对应到透平静叶开度、实时量化调节的软件，保证顶压波动稳定在给定范围内。

2. 目标功能

当透平机正常运行时，顶压瞬间超限，软件将会迅速给出调节静叶开度的量化指令，使执行机构静叶片迅速准确开到位，确保顶压不超限。并在给定的时间范围内，使炉顶压力恢复正常。

3. 煤气切换

当透平机发生重故障或甩负荷时，软件将按程序的指令要求迅速及时、关闭快速切断阀切断主管道煤气，使透平转速不上升。同时快速打开旁通阀门并按瞬间阻尼变化给出合适的开度，快速及时准确在给定的时间内、使炉顶压力恢复到正常范围内。

4. 诊断功能

控制软件采用混合式专家控制算法，具有自诊断功能，可根据 TRT 运行时调节顶压稳定性的数据积累知识库，不断修正程序中的控制参数，因此，该软件使用的时间越长，控制顶压的波动值指标及波动峰值持续时间指标将会降低，TRT 运行、控制效果会越来越好。

目前国内的 TRT 装置对顶压控制的性能指标与国外先进水平之仍然存在着不少差距，这在一定程度上影响了国内 TRT 产品的推广以及和国际同类产品的竞争力从表 1.1

中可以看出；另一方面高炉生产对于高炉顶压稳定性的要求越来越高，钢铁厂用户在采用 TRT 装置时，已经提出相当高的指标，我们迁钢提出，在紧急停机时，要求顶压波动值小于±5KPa，紧急情况下波动持续时间小于 15 秒。这不仅是国内的 PID 技术无法满足，国际上先进的 PID 技术也很难达到这个要求。所以 TRT 系统对高炉顶压的精确控制是具有很强的研究意义。

表 1.1 国内外顶压控制性能指标技术对比

Table 1.1 Top performance index at home and abroad pressure control technology contrast

| | 国内先进代表 | 国际先进代表 |
|-------------|---------|--------|
| 设计制造单位 | 陕鼓集团 | 日本川崎集团 |
| 应用单位 | 迁钢电力作业部 | 上海宝钢 |
| 正常顶压波动值 | ±5KPa | ±3KPa |
| 紧急停机切换顶压波动值 | ±8KPa | ±6KPa |
| 切换峰值时间 | 10~30秒 | 8~20秒 |

确保高炉顶压稳定，提高抗干扰性是 TRT 装置投入运行的前提条件。目前 TRT 装置大都依靠经验 PID 控制可调静叶开度来稳定高炉顶压。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。PID 控制器由比例单元 (P)、积分单元 (I) 和微分单元 (D) 组成。在早期的控制系统中，PID 控制也是唯一的自动控制方式。其具有很强的优越性：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。随着冶金高炉的大型化和现代炼铁技术的发展，对高炉顶压的稳定性要求越来越高，PID 控制难以达到预期的控制要求，需对高炉顶压控制进行理论研究。在深入分析 TRT 装置高炉顶压控制过程的变量及其动态行为的基础上建立动态数学模型，为进一步的高炉顶压控制研究提供依据。然而实际的 TRT 装置高炉顶压控制过程很复杂，影响因素很多，因此需要根据 TRT 装置实际运行工况的特点，考虑主要干扰因素，对过程进行合理的简化。本文从内模控制原理出发，基于所建立的正常工况下 TRT 装置高炉顶压动态数学模型，设计了正常工况下高炉顶压二自由度内模控制系统。仿真结果表明，通过调整可调参数，可以使高炉顶压内模控制系统获得较好的抗干扰性和鲁棒性，该内模控制方法是有效的，而且内模控制器设计简单，参数调整方便，易于工程实现。

内模控制 (Internal Model Control, 简称 IMC) 是一种基于过程数学模型进行控制器设计的新型控制策略。它是在控制系统中引入内部模型，使系统的反馈量由传统的输出反馈变为扰动估计量的反馈。1982 年 Garcia 和 Morari^[7]提出并发展了内模控制，它具有设计直观简便，参数的物理意义明确，参数调整方便，控制性能优越等特点，因此在工业过程控制中得到了广泛的应用^[8-10]。它不仅是一种实用的先进控制算法，而且还是

研究预测控制等基于模型的控制策略的重要理论基础, 以及提高常规控制系统设计水平的工具。与传统的反馈控制相比, 它能够兼顾系统闭环响应性能和鲁棒性, 能够消除不可测干扰以及建模误差的影响, 提供了比较合理简单的设计步骤。

内模控制是一种采用被控对象的内部模型和反馈修正的预测控制, 它是史密斯预估控制的扩展, 因此同样也能明显改进对纯滞后过程的控制。它的主要优点是通过简单的选择一个稳定的内模控制器就可以保证闭环系统的稳定, 另外内模控制在设计上考虑了对系统鲁棒性的调整, 从而使其大大提高了实用价值。内模控制的设计思路是将对象模型与实际对象相并联, 控制器逼近模型的逆^[11], 对于单变量系统内模控制器取为模型最小相位部分的逆, 并附加低通滤波器, 在反馈回路中增加反馈滤波器可独立针对系统的鲁棒性和抗干扰性能。内模控制器的设计思路清晰, 步骤简单, 闭环系统的性能指标直接与该控制器的参数有关, 调整参数能兼顾闭环控制精度和系统的鲁棒性。

1.5 本文的主要工作

本文研究内容围绕正常工况下 TRT 装置对高炉炉顶压力的鲁棒性研究展开, 主要工作大体分为: 介绍 TRT 系统发展及工艺流程、对正常工况下高炉顶压进行数学建模和高炉炉顶压力内模控制三部分研究, 各章的主要内容安排如下:

1. 主要介绍研究 TRT 系统的背景。以及国内外发展现状, 并找出 TRT 系统现阶段和不足及研究现状, 提出需要研究方向和意义。

2. 介绍了 TRT 系统的工艺流程, 重点介绍 TRT 系统的控制要点和控制结构, 以首钢迁钢公司 1#TRT 系统为例分析了 TRT 系统对高炉炉顶压力鲁棒性的研究。简要介绍了首钢迁钢公司三台高炉 TRT 装置采用的 ABB DCS 控制系统的软件和硬件情况。

3. 对正常工况高炉的特点, 对高炉 TRT 系统进行简化, 将正常工况下高炉顶压的几种主要扰动引入模型, 通过机理分析和参数辨识相结合的方法建立了正常工况下高炉顶压的动态数学模型。由于现场数据是在炉顶压力控制系统闭环条件下得到的运行数据, 因此, 基于现场数据的参数辨识还必须先对系统进行闭环可辨识性分析。通过分析得到, 高炉顶压控制系统满足闭环可辨识性条件的。结果表明所建立模型基本上反映了正常工况下炉顶压力的实际运行状况。所建立的动态数学模型为炉顶压力控制系统的设计和优化打下了一定的基础。

4. 基于第三章所建立的正常工况下 TRT 装置高炉顶压动态数学模型设计, 对高炉炉顶压力内模控制进行推导, 并描述了内模控制器的优越性。简要介绍了二自由度内模控制器的设计。通过对高炉炉顶压力调节执行机构电液伺服系统的介绍, 设计完成了高炉炉顶压力内模控制器。深入探讨了高炉顶压内模控制方法简单、参数调整方便、易于工程应用等特点, 为正常工况下 TRT 系统高炉顶压的控制提供了一种新的方法。

5. 利用 Matlab7.0/Simulink 软件对高炉顶压内模控制进行仿真模型的搭建, 通过对模型精确匹配和失配进行仿真, 结果表明通过调整可调参数, 高炉顶压内模控制系统具有较好的控制性能, 能较好地抑制高炉工况干扰对炉顶压力的影响, 在模型失配时具有较好的系统鲁棒性。

第2章 TRT 透平静叶系统

作为能量回收的 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。

2.1 TRT 系统的工艺流程

TRT 装置其主要的工艺系统包括：能量回收透平主机系统、冷却循环水系统、氮气密封系统、润滑油系统、液压伺服控制系统（动力油系统）、煤气管道及大型阀门系统、自动控制系统、和高压发配电系统等八大系统。其中：能量回收透平主机系统为主系统，其余为辅助系统。下面以首钢迁钢公司 1[#]TRT 为例，简要介绍下各辅助系统的作用。

1. 冷却循环水系统：用于冷却动力油、润滑油及发电机组，为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。

2. 氮气密封系统：为防止 TRT 机组运行时泄露高炉煤气造成煤气中毒伤害事故，及启停机时用于置换空气、高气防止发生爆炸的必备系统。

3. 润滑油系统：用于机组各轴瓦间，保证机组正常运行、减少磨损和损坏的重要系统。

4. 液压伺服控制系统（动力油系统）：为可调静叶、旁通阀组和快切阀动作提供动力来源。

5. 自动化控制系统：为系统各设备自动化运行进行控制、检测及保护的重要系统，也是提高 TRT 系统对高炉顶压控制稳定性的重要研究对象。

6. 高低压发配电系统：包括发电机、变压器及高低压输送线路等相关设施。

2.1.1 传统的高炉工艺流程

高炉顶压指高炉炉顶煤气压力。在传统炼铁高炉工艺流程中高炉顶压通常为 150~300KPa，高炉顶压越高，高炉内还原反应能力越充分，炉顶煤气温度越低（通常为 350 摄氏度左右）。经过一次除尘、二次除尘后，仍含有较大的压力能和热能，TRT 装置回收的主要就是高炉煤气中这部分能量。

传统的高炉工艺流程中，高炉炉顶煤气经过减压阀组减压到 10KPa 左右，排入储气罐供应给工厂热风炉^[12,13]。原高炉煤气所具有的压力能和热能被白白地浪费在减压阀组上，造成大量的能源浪费和噪声污染，噪声达 105db (A) 以上。传统的高炉工艺流程图如图 2.1 所示。

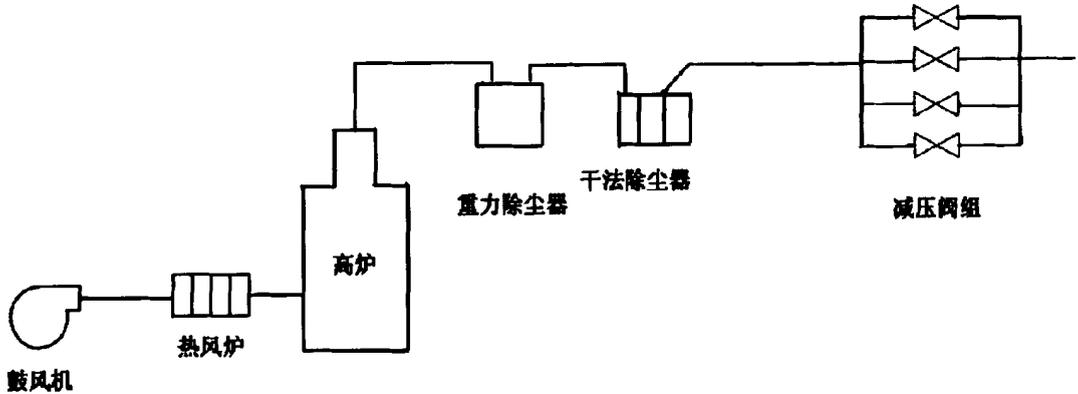


图 2.1 传统高炉工艺流程图

Fig. 2.1 Traditional the blast furnace process flow diagram

2.1.2 TRT 系统的工艺流程

高炉炉顶煤气余压透平发电装置（简称 TRT）是目前国际、国内钢铁企业公认的有价值的二次能源回收装置^[14]。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再驱动发电机发电。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，却回收了过去在减压阀组上白白损失的能量，可回收高炉鼓风机所需能量的 30%-50%^[15]，降低了炼铁工序能耗及成本，经济效益十分显著，同时又可以清除原减压阀组带来的噪音危害，做到了无公害发电，是典型的绿色节能环保项目^[16]。

TRT 的工作原理是在减压阀组前把高炉煤气引出，经过入口蝶阀、入口插板阀等阀门后进入透平机入口，通过导流器使气体转成轴向进入叶栅，气体在静叶栅和动叶栅组成的流道中不断膨胀做功，压力和温度逐级减低，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，以提高其背压达一定值，然后经过蜗壳流出透平机，再经过出口插板阀、出口蝶阀进入减压阀组后管道供用户使用。

迁钢公司 1[#]高炉 TRT 工艺流程图如图 2.2 所示。高炉冶炼产生的带有细小炉料微粒的高炉煤气通过重力除尘器一次除尘后再经过干法除尘装置清理后就达到煤气含尘量 $\leq 5\text{mg}/\text{m}^3$ （标态下）的净煤气了，净煤气送到 TRT 装置和减压阀组。通入 TRT 装置的净煤气经入口蝶阀、全封闭入口插板阀、紧急切断阀进入透平机，透平机膨胀做功带动

发电机发电。膨胀后的煤气经全封闭出口插板阀、出口蝶阀送到减压阀组后的煤气主管道上。这样 TRT 装置和减压阀组之间就形成了并联关系。在紧急切断阀处并联启动调速阀，用于机组启动时的转速调节。在紧急切断阀前到透平机后，并联有旁通快开阀，作为 TRT 紧急停机时 TRT 装置与减压阀组之间的平稳过渡，以确保高炉炉顶压力不产生大的波动^[17,18]。从 TRT 装置和减压阀组出来的低压煤气再送到高炉煤气柜和低压用户。停机时，由于快切阀瞬间切断进入透平的煤气，此时有大量的高压煤气滞留在透平前部的管道内，而此时减压阀组的灵敏性不足以及及时排除所有的高压煤气，因此在透平另一侧并联两个旁通阀，旁通阀在紧急切断透平煤气后快速打开一定角度，使此时的大量煤气顺利通过，起到保护高炉顶压和管网稳定性的作用。两个旁通阀一主一备可切换。

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）、全自动。

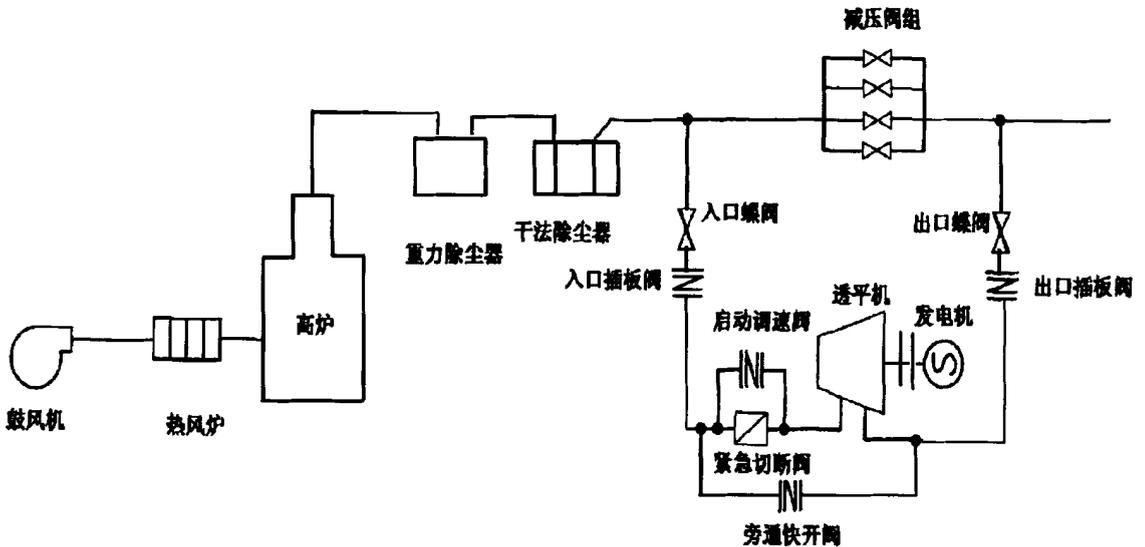


图 2.2 迁钢 1#高炉 TRT 工艺流程图

Fig. 2.2 The Qan Gang company 1#blast furnace TRT system

透平静叶比肖夫环缝系统对顶压的控制：

正常工况下，高炉间歇上料所造成的料柱变化，引起高炉顶压不稳定，当顶压发生波动时，煤气清洗系统其环缝及环缝喷头之间的间隙发生变化，进而控制煤气流量，对顶压进行均压调节。当炉顶压力变低时，环缝关小；当炉顶压力变高时，环缝开大。当 TRT 机组发生重故障时，由两旁通快开阀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，煤气清洗系统环缝调节高炉煤气流量，使高炉顶压安全稳定，保证高炉正常运行。

TRT 的运行工艺包括以下步骤，如图 2.3 所示。一般分为四个过程：启动升速过程、

并网后升功率过程、顶压自动调节过程、停机过程。

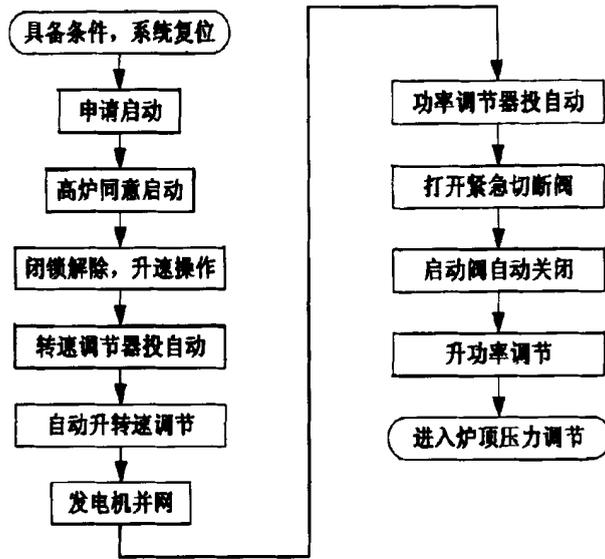


图 2.3 TRT 机组启动过程
Fig. 2.3 TRT unit start-up process

1. 启动升速过程

启动联锁条件满足后向高炉发出申请，高炉回答同意后，解除闭锁，可以投入升速。升速过程分手动和自动两种方式，两种方式可以自由切换，切换过程没有扰动。启动初期，静叶关闭，顺序打开出口插板阀、出口碟阀、紧急切断阀、入口插板阀。最后打开入口电动调节阀，煤气进入透平管道。由于静叶最小角度时存在一定的缝隙，因此随着调节阀的打开，透平将开始运转。随着调节阀的角度越开越大，透平转速将越来越快，最终将在 600 r/min 左右稳定住。此时将入口调节阀可以全开。

自动升速，投入自动升速后，转速将随预先设定的曲线升高，当达到临界点时，快速升高转速，以冲过临界点。达到 2500 r/min 以后，升速速率逐渐降低，直至 3000 r/min 时停止升速。手动升速。脱开自动升速，通过手动调节静叶角度进行升速，或者直接输入预期的转速值，静叶将调节使转速达到预期值。

升速达到 3000 r/min 后，稳定转速，准备进行并网操作，并网操作在电气操作柜上进行，当判断发电机和电网之间的频率、相位、电压三者接近或相等时，通过合闸信号的动作触发接触器合闸，并网成功后返回并网信号（数字量）给控制系统。

2. 升功率过程

并网成功后，将进行升功率操作。并网之前，由于煤气驱动透平转动，做功较小，因此并网之初，向电网输送功率较低，甚至为负功率状态，需要尽快增加功率，使机组进入正常发电状态。增加功率采用加大静叶角度，增大煤气流量来实现。在增加功率的

同时,要兼顾高炉顶压状况,即当高炉顶压较高时,可以快速增加功率;当顶压较低时,可以放慢提升功率的速度,甚至停止升功率,以保证高炉顶压的稳定。

3. 顶压自动调节过程

静叶打开至一定角度后,煤气流量增大,完成升功率过程。对高炉顶压的控制作用随之增大,应进入顶压自动调节过程,由 TRT 透平机组的静叶来控制高炉顶压。此时顶压控制为主要调节量,功率控制为次要调节量。

4. 停机过程

停机过程分为正常停机过程和紧急停机过程,紧急停机用在机组大负荷运转时发生突发状况而产生的停机过程。正常停机在机组正常运行时需要停机检修等场合下使用,两种过程基本类似,其中紧急停机最为重要。

紧急停机:在机组运行期间,如果产生重大故障,则触发紧急停机操作。紧急停机条件包括:机组轴振动过大;机组轴位移过大;透平超速;润滑油压力过低;动力油压力过低;机组轴承温度过高;电气系统重故障;紧急停机按钮;紧急遮断保护。紧急停机触发后,控制系统将产生一系列动作,保证透平顺利停机,发电机快速脱开电网,煤气瞬间切换到旁通阀管道内,保证高炉顶压的稳定。

正常停机过程的后期类似于紧急停机,只是在前期执行降功率过程,逐渐关闭静叶,同时通过旁通阀组导出煤气,稳定压力。随着静叶的关闭,发电功率逐步降低,当功率降低至接近为零的时候,执行小负荷下的紧急停机操作,即完成了正常停机过程。

2.1.3 TRT 系统控制要点

根据首钢迁钢公司 1[#]高炉 TRT 运行统计,总结出 TRT 系统控制要点。

1. 启动升速控制

升速控制采用单回路 PID 调节,通过调节静叶角度使通过的煤气流量产生变化,从而产生不同的驱动力,来实现转速的调节效果。在小流量的情况下,静叶角度对转速的调节不具备线性特征,因此通过程序设定当转速低于 1000 r/min 时,静叶对转速不控制,而采用固定速率打开静叶角度,使转速升高。透平转速达到 1000 r/min 后,此时静叶对转速的控制比较稳定可靠,因此投入 PID 自动调节,转速设定值按照固定速率增加, PID 调节静叶角度,使转速跟踪其设定值。

升速过程中,需要特别关注的是跨临界过程,一般中小型高炉 TRT 由于采用刚性联轴器,可以不考虑临界转速的影响。而对于大多数 TRT,则应考虑跨临界转速的控制。在控制程序里,需要对跨临界时的 PID 参数进行详细整定。首先应计算跨临界的起点、终点和速率,在起点和终点范围内采用高速率进行升速。而相应的 PID 增益参数也应该加大,以保证静叶的快速干预。而在跨临界之前,管道煤气应保持一定流量储备,以保

证在跨临界的时候有足够的煤气驱动透平升速。跨临界过程结束后，透平升速较快，PID 自动调节静叶关闭一定角度，使升速速率降低，直至和设定值基本相符或者接近，此时系统继续进行升速。透平转速接近 3000 r/min 时，升速速率应该降低，以保证达到 3000 r/min 时不致超速，同时发出准备并网信号，自动并网装置投入。

2. 升功率控制

并网成功后，系统将进入功率/顶压复合控制阶段，通过对静叶的控制，达到既满足功率升高的要求，又能够同时稳定高炉炉顶压力。这两个被控量都由静叶执行，因此我们可以做两个 PID，分别根据顶压和功率进行调节，并将输出量以某种特定的方式进行叠加，这种控制被称作静叶复合控制。

3. 顶压自动调节控制

当升功率控制时，功率调节 PID 作为主要调节回路进行控制，顶压调节作为次要控制参数进行干预。当顶压调节控制投入以后，则转为顶压调节 PID 为主回路，功率调节作为次要回路。顶压自动调节是 TRT 的控制核心之一，在调试时首先要确保主回路正常，再加入次要控制参数。对于 TRT 来讲，高炉煤气管道和透平机组之间距离较长，加上压力调节的滞后作用，因此很难找到一个百分之百合理的参数，通过对调节的经验估计，需要按步骤调整，首先是增益值，通过对比静叶角度对顶压的影响数值，确定增益的基本范围。一般静叶每变动 $\pm 2\% \sim 3\%$ ，顶压变动在 $\pm 1\text{KPa}$ 左右。其次是调整积分时间，逐步缩短积分时间，增强其作用强度，直至达到最好状态。此时由于管道长度造成的调节滞后，会使调节作用产生滞后，因此必须增加一定的提前量调节，也就是增加少量微分环节，最后对三个参数进行综合对比，以达到最合理的效果。通过经验对比，顶压调节的最佳值在设定值的 $\pm 2 \sim 5\text{KPa}$ 范围内。

4. 大型阀门控制

为了保护透平机组和高炉顶压，设计上采用了一些特种阀门，例如快切阀（液压逻辑控制）、旁通快开阀（液压伺服控制）、电动插板阀、电动蝶阀等大型阀门，其中最重要的是快切阀和旁通快开阀。前者在紧急停机的时快速切断供应给透平的煤气，同时旁通阀快速打开至一定角度，以保持煤气顺利通过，以保证顶压的稳定。

快切阀控制：快切阀具有 4 个操作动作，分别为：慢开、慢关、游动、快切。在停机状态下，可进行所有的操作，以测试液压系统是否正常。在机组启动后，将慢关和快切两个操作屏蔽，以免产生误操作。

2.2 TRT 系统的控制结构

目前 TRT 装置大都采用静叶可调技术 PID 控制高炉炉顶压力^[19]。TRT 装置与减压阀组并联运行，送入 TRT 炉顶压力调节回路的炉顶压力测量值与高炉原有炉顶压力减

压阀组控制回路的测量值是同一信号。这样就能使 TRT 炉顶压力调节回路能自动跟踪高炉的设定值，炉顶压力的设定权仍在高炉，高炉操作工只需同以往一样操作即可。在不改变高炉操作的情况下，利用调节透平机可调静叶开度实现自动控制高炉炉顶压力。顶压单回路控制系统如图 2.4 所示。正常工况下，高炉顶压的控制权在 TRT 侧。当并网发电后，位于 TRT 主控系统中的功率调节器的输出信号与接收到的顶压调节器输出信号进行低选后，一路去控制透平机静叶开度，一路经系统中的减法器修正后去控制自动阀。在自动阀的慢慢关闭过程中静叶渐渐打开，最终低选环节选中顶压调节器控制信号，减法器输出为零，这样就形成了顶压调节器控制透平静叶的单回路调节。

旁通阀控制：旁通阀采用流量计算开度预置值控制，正常运行时关闭，此时将阀门预设开度值，放入寄存器中，紧急停机的瞬间，该开度值被输出到旁通阀控制输出，旁通阀快速打开，并在顶压稳定一段时间后，缓慢关闭，同时减压阀组相应打开，直至旁通阀全部关闭，减压阀组进行顶压调节，完成全部的停机过程。

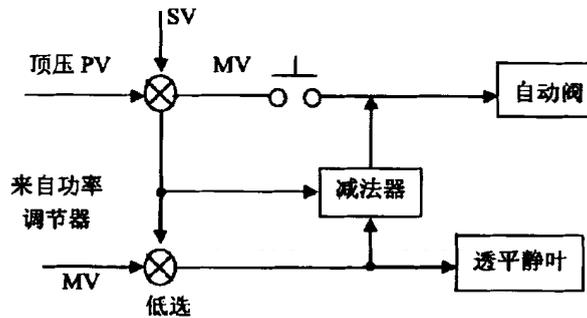


图 2.4 单回路顶压控制系统
Fig. 2.4 Single loop top pressure control system

控制系统在保证顶压稳定的同时，透平机带动发电机进行发电。此时如果减压阀组完全关闭，高炉煤气就得到了全回收。但是在实际运行中发现通过改变 PID 参数来改善控制质量的效果不明显。对于扰动的多阶性及生产工艺参数的改变须调整控制方案，增加一套控制系统即变成顶压双回路控制系统，如图 2.5 所示。高炉主控制室中的顶压调节器控制自动阀，TRT 装置主控系统中增加一套调节器控制透平机静叶。顶压的测量值来自高顶压力检测装置，检测反馈信号一路送给高炉主控制室中顶压调节器，另一路传递给 TRT 主控系统中新增的顶压调节器，两套系统取同一测量值。设定值由高炉操作人员进行设定，设定后传到 TRT 侧控制系统，进行内部运算后再作为新增加的顶压调节器的设定值对透平机静叶进行控制。双回路顶压控制方案首先考虑到自动阀等百分比特性调节性能好，能够保证顶压的稳定，另外又能兼顾 TRT 装置的发电量。TRT 装置侧的调节器只要把接受到的设定值加一偏差使其低于高炉侧的调节器设定值，这样在正常工作状态下，也就是说扰动在给定偏差范围内时，自动阀就处于关闭状态，高炉炉顶压力主要靠透平机静叶控制。但当有大的波动或扰动时，自动阀就会进行调节。

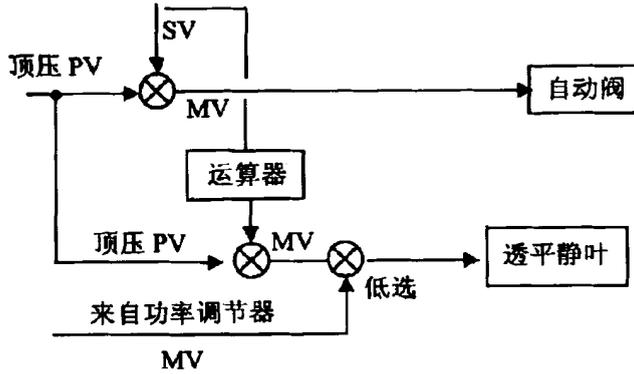


图 2.5 双回路顶压控制系统
 Fig. 2.5 Double circuit top pressure control system

2.3 TRT 的 DCS 控制系统

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，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，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^[20]。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^[21]，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。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。

而在实际运用中目前 TRT 控制系统多是采用集散系统（DCS）来实现过程控制。如唐钢 3#TRT 采用的是 ABB 公司 AC1600CS（OPEN CONTROL SYSTEM）控制系统，而基于 PC 机的操作站和工程站以 WINDOWS 为操作平台，人机交互则通过 Advan Command 应用软件来实现。宣钢 8 号高炉 TRT 控制系统则采用西门子 TI545^[22]，操作站采用研华工控机。杭钢 1#高炉 TRT 控制系统采用浙大中控的 JX-300X DCS 系统，项目由一个工程师站、一个操作员站、一个控制站组成，由 JX-300X DCS 系统提供的图形化组态功能，编制用户控制软件包来实现 TRT 装置的自控。马钢四铁厂 1#高炉 TRT 控制系统采用的是 ABB 公司的 FREELANCE2000 控制系统，项目由一个工程师站、一个操作员站、一个控制过程站组成，软件由 ABB 公司的 FREELANCE2000 系统软件，包括工程站组态软件（DIGITool）和操作员站操作软件（DIGIVIS）。包钢燃气厂 1#

高炉 TRT 控制系统则采用的是日本横河公司的 CS-3000 集散控制系统, 工作站为高性能微机, 现场控制站 (FCS) 完成现场数据采集和生产过程的全程控制。邯钢 2[#]TRT^[23] 控制系统采用的是 Honeywell 公司的 Plantscape 中小型 DCS, 其系统的服务器、控制器及网络均采用冗余方式配置, 服务器及操作站采用高性能的 DELL PC, 并安装运行 TRT 控制应用软件包, 同时又提供标准操作站功能。首钢迁钢电力作业部三台 TRT 系统皆选用的是 ABB 控制有限公司的 Industrial Freelance 2000 系统。

2.3.1 ABB DCS 控制系统

Industrial Freelance 2000 系统是 ABB 集团推出的具有世界领先水平的全能综合型开放控制系统, 融传统的 DCS 和 PLC 优点于一体^[24], 并支持多种国际现场总线标准。它既具备 DCS 的复杂模拟回路调节能力^[25]、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。在本次改造中仍保留了原系统的控制系统。

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

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

每个过程站 PS 支持 5 个机架单元, 可配置 44 个 I/O 模块 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。设备既可以安装在机柜中, 也可安装在墙上。系统符合所有当前 EMC 标准并且 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 总线。PS/ES 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。

Industrial IT 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。

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

IndustrialIT 系统特点总结如下：

- (1) 集成 DCS、PLC 及 FieldBus 功能；
- (2) 全局数据库；
- (3) AC800F 冗余；
- (4) 支持 FDT/DTM 组态及 HART 协议，支持 Operate IT；
- (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。

2.3.2 控制系统的硬件

1. 过程控制站 CPU 配置

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

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

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

2. I/O 模块的配置

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

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

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

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

(5) 温度输入信号：TRT 轴温度、管道内煤气温度等。

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

本系统工程师站 ES 安装 DigiTbool6.1 编程软件，运行在 Windows NT4.0 系统上，工程师站在不组态时可作为操作员站使用。工程师站使用因特网与过程站及其它设备进行通信，可以实现硬件编辑、现场过程站编程、现场总线智能仪表组态、操作员站组态一体化编程及调试等。

TRT 系统涉及 I/O 点配置，数量如下表：

表 2.1 I/O 点统计表
Table 2.1 I/O Point tab

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

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

根据以上输入输出的类型机各自的数量，对各输入输出模件进行选型，如下表：

表 2.2 DCS 模块选型表
Table 2.2 DCS Module selection table

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

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

操作员站（OS）硬件选用适用工业现场的 DELL PC 机。安装 DigiVis6.1 软件，操作界面及菜单为中文，操作为“所见即所得”方式，软件运行在 windows NT4.0 workstation 操作系统，操作员站使用因特网与过程站及其它设备进行通信，由于系统数据库为全局，所以操作员站之间数据及画面完全可以共享。

操作员站支持一系列标准预定义显示：如总貌显示、回路及各过程位号面板显示（面板也可以根据用户特殊要求实现自定义）、控制组显示、趋势显示、报警显示、过程信号记录与操作记录列表（实现各种操作的实时记录和实时打印）显示等，用户自定义流程图显示，既支持传统 DCS 流程图，又支持三维立体图形画面，软件具有强大的三维图形库可以调用，该库可以由用户自行扩充，同时画面支持位图功能，使作图更加简单，画面更加直观。位号动态显示不仅支持传统数字表示，而且支持各种动画表示，同时还可弹出对应面板操作。图形数量无软件限制，画面更新时间为 1 秒，可以由编程软件定义；此系统还可实时诊断显示：系统总体、系统过程站和系统模块三大部分，诊断状态信息在诊断画面上以图形方式显示及文字详细提示；DigVis 软件趋势显示功能支持趋势组态，趋势点数量无软件限制，画面可以进行灵活操作，同时支持 FTP 协议数据远传功能；DigVis 还可以实时操作记录及打印。

Freelance 2000 的所有站由系统总线 DigiNetS 连接。DigiNetS 是基于因特网的 TCP/IP 通讯。资源和站是两个不同的概念。站是连接到系统总线上的，具有确定 IP 地址的物理单元。而资源是要下载到站的软件部分，在项目树中是一个资源节点，在网络

中有唯一的资源 ID 号。

2.3.3 控制系统的软件

1. 操作站

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

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

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^[26]。

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。

2. 程序控制软件

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。

顺序逻辑控制系统主要包括^[27]:

(1) 启动联锁控制: 其主要作用是保证机组安全正常启动的选择操作与联锁控制。

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

(3) 电气联锁控制: 充分利用 Freelance 2000 丰富的控制功能, 完成油泵、加热器、电动球阀及小电机的集中监控与操作。

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

反馈控制系统主要包括：

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

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

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

3. 本文设计控制器切换 DCS 系统方案

本文的控制器设计，就是针对于高炉顶压调节系统。在使用 TRT 与高炉 DCS 系统原有的 DCS 系统的条件下，即可实现本文设计控制器方案，其具体如下：在高炉 DCS 系统增加一个开关量输出，压差 DCS 系统增加一个开关量输入。在高炉上料时，上料机械开始工作时，由高炉 DCS 系统输出一个开关量并保持输出，在压差 DCS 系统接收到信号时，开始前馈环节程序开始执行。在上料完毕，上料设备停止工作时，高炉停止输出，当压差调节系统按程序，把前馈环节的输出归零，即可实现。

2.4 TRT 对高炉炉顶压力鲁棒性的控制难点

根据首钢迁钢公司炼铁作业部日常运行统计,通过列举的一些引起高炉炉顶压力不稳定的原因,我们看到影响炉顶压力稳定的因素十分复杂。但从管路系统的气动特性分析得到,炉顶压力主要受下列因素影响:

1. 炉内介质的阻尼特性

高炉内介质的阻尼变化是引起顶压变化的主要因素。引入描述高炉内复杂流动状况的阻尼特性无量纲系数—炉膛阻尼系数。在进风流量压力给定的情况下,炉膛阻尼系统增大时,顶压将下降;阻尼系统减小时,顶压将增高。

2. 透平机静叶开度

透平机的静叶片处于不同开度状态下运行的前后压降是不一样的。引入描述这种压降特征的无量纲广义阻尼系数,在透平机流量给定的情况下,压降大,表示广义阻尼系数值大;压降小,表示广义阻尼系统值小。广义阻尼系数可以通过透平机的 P-Q 特性曲线计算获得。

当透平机的广义阻尼系数发生变化时,将会影响高炉顶压的变化。当然这种影响是比较复杂的非线性关系。定性地分析,当广义阻尼系数增大时,将会使顶压上升;当广义阻尼系数减少时,顶压将下降。这正是通过调节静叶开度使广义阻尼系数变化,从而调节顶压的定性根据。

3. TRT 装置旁通管道减压阀组的开启状况

当透平机正常运行时,若开启减压阀组,则一部分煤气将从旁通管路通过,从管路的总体阻尼来看,减压阀组的开启程度发生变化,将会使阀门的阻尼系统发生改变,引起管路总体阻尼系数的变化,从而使流量和高炉炉顶压力发生改变。

4. 高炉进口的鼓风机气动特性曲线 P-Q

前面提到的三种因素对顶压的影响程度,与鼓风机 P-Q 的曲线特性密切相关。当高炉内阻尼系数,透平机广义阻尼系数发生变化时,会使鼓风机 P-Q 曲线的运行工作点发生变化,从而引起顶压的变化。

上述因素中,高炉阻尼系数变化通常是随机不确定的;透平机的静叶开度和减压阀组的开度是人为可以控制的。在分析的基础上,根据流体力学原理,建立描述 TRT 装置管路系统中煤气流量、压降及阻尼系数之间关系的平衡方程,即得到了高炉顶压静态数学模型。当高炉顶压发生波动时,我们可以根据已建立的高炉顶压静态模型计算出使顶压恢复到正常值的透平机静叶开度。

过程的静态数学模型描述的是过程变量间稳态关系,一般以代数方程形式表达。然而对于化工过程的控制,人们更关心的是过程的动态行为,即当过程的输入变量(干扰

变量和控制变量) 改变时过程的输出变量如何随时间变化。描述过程各变量间动态关系的表达式即为过程的动态数学模型^[28]。因此, 为了提高 TRT 装置高炉炉顶压力的控制精度, 我们则需通过进一步地理论分析, 建立高炉顶压的动态数学模型。并且对高炉顶压的影响具有非线性特点。因此在推广 TRT 技术时, 既要强调该技术节能环保的优点, 也要对高炉顶压的稳定性进行系统性研究, 最大限度满足高炉冶炼主流程工艺的要求。

2.5 本章小结

本章首先简要介绍了 TRT 系统的工艺流程及传统的高炉工艺, 重点讲述了 TRT 系统的控制要点和控制结构, 以首钢迁钢公司 1[#]TRT 系统为例分析了 TRT 系统的控制研究难点及其对高炉炉顶压力鲁棒性的研究。

第3章 TRT 系统高炉顶压控制分析

正常工况下高炉炉内物料气体阻尼变化（受高炉上料和铁水生产影响）；高炉风口进风的鼓风机的压力与流量变化；除尘器积尘、管路泄漏等引起流动阻尼变化，是引起炉顶压力不稳定的主要因素。本文将该主要扰动变量引入 TRT 系统正常工况下的高炉顶压模型，采用机理分析和基于工业现场实际运行数据的参数辨识相结合的方法建立了该动态模型。结合具体实例分析了高炉顶压控制系统满足闭环可辨识性条件。

3.1 引言

确保高炉顶压稳定是 TRT 装置投入运行的前提条件。目前 TRT 装置大都依靠经验 PID 控制可调静叶开度来稳定高炉顶压。随着冶金高炉的大型化和现代炼铁技术的发展，对高炉顶压的稳定性要求越来越高，PID 控制难以达到预期的控制要求，需对高炉顶压控制进行理论研究。在深入分析 TRT 装置高炉顶压控制过程的变量及其动态行为的基础上建立动态数学模型，为进一步的高炉顶压控制研究提供依据。然而实际的 TRT 装置高炉顶压控制过程很复杂，影响因素很多，因此需要根据 TRT 装置实际运行工况的特点，考虑主要干扰因素，对过程进行合理的简化。

正常运行工况下高炉顶压控制过程的研究是分析 TRT 装置整个运转过程中顶压稳定性的基础。因此，本章以正常运行工况下 TRT 系统为研究对象，建立高炉顶压数学模型。分析该工况下影响高炉顶压稳定性的主要因素。将这些主要扰动变量引入模型，采用机理分析和参数辨识相结合的方法建立正常工况下 TRT 系统高炉顶压动态数学模型，从而为后续的高炉顶压控制研究打下基础。

3.2 TRT 系统数学模型的建立

要想有效地控制工业过程，达到设定的控制要求，就必须了解过程变量及其动态行为规律，即必须知道当外部干扰和控制变量变化时过程的被控变量如何随时间变化，确定过程中各种变量对被控变量的影响。描述过程运动规律的各变量关系的数学表达式称为过程的数学模型；人们建立过程数学模型的活动称为过程的数学模型化即“建模”^[29]。众所周知，实际的工业过程是很复杂的，模型一般不可能考虑过程的所有因素。因此，就这个意义上说，数学模型不是过程本身，所谓的过程模型只是按照模型的目的对过程所作的一种近似描述^[30]。

作为过程运动规律的定量描述，数学模型有多种表现形式。从不同的角度，对过程数学模型进行大致的分类^[31]，例如：描述过程处于过渡过程时各变量之间动态关系的数

学模型属于动态模型，它们一般都为时间的函数；描述过程处于稳态时各变量之间关系的数学模型属于静态模型，它们一般不是时间的函数；以过程的输入、输出变量来描述过程外部特性的数学模型称为输入输出模型，而以过程内部状态变量描述的数学模型称为状态空间模型；描述线性过程的线性模型和非线性过程的非线性模型等等。

一般来说，建立被控过程的数学模型有两种基本方法：机理分析法和系统辨识法。机理分析法^[32]就是根据工业生产过程的机理，写出各种有关的平衡方程如：物料平衡方程；能量平衡方程；动量平衡方程；相平衡方程以及反映流体流动、传热、传质、化学反应等基本规律的运动方程，物性参数方程和某些设备的特性方程等，从中获得所需的数学模型。这种方法也称作理论建模。对于比较复杂的实际生产过程来说，这种建模方法有很大的局限性。因为进行理论建模时，对所研究的对象必须提出合理的简化假定，否则会使问题过于复杂化，然而这些假定往往不一定能符合实际情况。况且实际过程的机理有时候也并非完全知道。同时，过程的某些因素可能在不断变化，而又难以精确描述。因此，理论建模一般与下面介绍的系统辨识法结合起来使用。

一般情况下过程的输入输出信号总是可以测量的。由于过程的动态特性必然表现在这些输入输出数据中，那么就可以利用输入输出数据所提供的信息来建立过程的数学模型。这种建模方法即为系统辨识。就某种意义上来说，这种建模方法有一定的优越性，因为它不需要深入了解过程的机理，只要检测出过程的输入输出信号，获得足够的过程对象特征信息，则由这些输入输出数据可以直接得到过程的数学模型。

实际过程建模一般是将机理分析和系统辨识这两种方法结合起来使用，机理已知的部分采用理论建模的方法，机理未知的部分采用系统辨识建模的方法，充分发挥这两种方法各自的优点。

采用上述方法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。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）。所建的数学模型中应该包括哪些变量完全取决于建模的目的，即过程控制的目的和对象的设计目的。过分庞大和复杂的数学模型应用起来也很不方便，甚至可能难以应用而失去实用价值。因此，在建立工业过程的数学模型时，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。建立过程数学模型时，一般要遵循以下一些基本原则：

1. 目的性—明确建模的目的；
2. 实用性—模型的物理感念要明确；
3. 可辨识性—模型结构要合理；
4. 节省原理—待辨识的模型参数个数要尽可能少。

3.2.1 动态过程数学模型

最小二乘参数估计法设时不变 SISO 动态过程的数学模型是:

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k-d) + e(k) \quad (3.1)$$

其中, $u(k)$ 和 $y(k)$ 是模型的输入输出变量, $e(k)$ 是模型噪声, 多项式 $A(z^{-1})$ 和 $B(z^{-1})$ 的表达式:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a} \quad (3.2)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{n_b} z^{-n_b} \quad (3.3)$$

且结构参数 (系统阶次, 时滞) n_a, n_b, d 已知, $d \geq 1$, 辨识的任务是如何利用过程的输入输出数据, 确定多项式 $A(z^{-1})$ 和 $B(z^{-1})$ 的系数。

由以上定义得, 式 (3.1) 可表示为:

$$y(k) = \varphi^T(k)\theta + e(k) \quad (3.4)$$

其中输入输出观测向量 $\varphi^T(k)$ 和未知参数向量 θ 分别为:

$$\begin{cases} \varphi^T(k) = [-y(k-1), \dots, -y(k-n_a), u(k-d), \dots, u(k-d-n_b)] \\ \theta = [a_1, a_2, \dots, a_{n_a}, b_0, b_1, \dots, b_{n_b}]^T \end{cases} \quad (3.5)$$

根据 N 次观测 $\{y(k), u(k), k=1, 2, \dots, N, N \gg n_a + n_b + 1\}$ 得到 θ 的估计值 $\hat{\theta}$, 那么第 k 次过程观测输出与模型 (3.4) 计算得到的输出之间的偏差为:

$$\varepsilon(k) = y(k) - y_m(k) = \varphi^T(k)\theta + e(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta} = \varphi^T(k)(\theta - \hat{\theta}) + e(k) \quad (3.6)$$

其中随机变量 $\varepsilon(k)$ 也称作残差。引入以下记号

$$Y = \begin{bmatrix} y(1) \\ \vdots \\ y(N) \end{bmatrix}, \quad \phi = \begin{bmatrix} \varphi^T(1) \\ \vdots \\ \varphi^T(N) \end{bmatrix}, \quad \bar{e} = \begin{bmatrix} e(1) \\ \vdots \\ e(N) \end{bmatrix}, \quad \bar{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon(1) \\ \vdots \\ \varepsilon(N) \end{bmatrix}$$

则与式 (3.4) 和 (3.6) 相对应的向量矩阵方程分别为:

$$\begin{cases} Y = \phi\theta + \bar{e} \\ \bar{\varepsilon} = Y - \phi\hat{\theta} = \phi(\theta - \hat{\theta}) + \bar{e} \end{cases} \quad (3.7)$$

定义准则函数:

$$J = \bar{\varepsilon}^T \bar{\varepsilon} = (Y - \phi\hat{\theta})^T (Y - \phi\hat{\theta}) \quad (3.8)$$

因此准则函数 J 可以被看作用来衡量模型输出与实际过程输出的接近情况。最小二乘参数估计算法就是确定使 J 最小的 $\hat{\theta}$, 记作最小二乘估计 $\hat{\theta}_{LS}$ 。由最小二乘一次完成算法得到最小二乘估计 $\hat{\theta}_{LS}$:

$$\hat{\theta}_{LS} = (\phi^T \phi)^{-1} \phi^T Y \tag{3.9}$$

最小二乘一次完成算法，当数据长度 N 很大时， $(\phi^T \phi)^{-1}$ 的计算是个很大的负担，且每增加一个新数据都必须重新计算 $(\phi^T \phi)^{-1}$ 。解决这个问题的办法就是把它化成递推算法。递推算法的基本思想可以概括成：

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \text{修正项} \tag{3.10}$$

新的估计值 $\hat{\theta}(k)$ 是在老的估计值 $\hat{\theta}(k-1)$ 的基础上修正而成的。这样不仅可以大大减少计算量和内存占用量，而且能实现在线实时辨识。

在时变参数条件下，过程参数随时间变化，参数时变的信息显然更多地包含在新的观测数据中。因此，在辨识算法中引入遗忘因子，使算法充分利用新数据所含的信息，尽可能降低老数据的影响，以便获得跟踪参数变化的实时估计。带遗忘因子的递推最小二乘算法：

$$\begin{cases} \hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k) [y(k) - \phi^T(k) \hat{\theta}(k-1)] \\ K(k) = P(k-1) \phi(k) [\phi^T(k) P(k-1) \phi(k) + \rho]^{-1} \\ P(k) = \rho^{-1} [I - K(k) \phi^T(k)] P(k-1) \end{cases} \tag{3.11}$$

其中，遗忘因子 ρ 的取值范围一般为 $0.95 \leq \rho \leq 1$ ，当 $\rho=1$ 时，上述算法即为基本递推最小二乘算法。

2. 闭环辨识及可辨识性条件

在许多实际问题中，不一定都能得到对象开环状态下输入输出数据用于系统辨识。例如一些实际运行着的工业过程，为了不影响生产，过程的反馈回路不能轻易切断。此时基于从工业现场直接测量得到的过程的输入输出信号进行的系统辨识是在闭环状态下的，即闭环辨识。

闭环辨识方法分为间接辨识法和直接辨识法。间接辨识法是先获得闭环系统的模型，再利用反馈通道上的控制器模型，推导出前向通道模型，即过程对象模型。从中可以看出，间接辨识法必须要求反馈通道的控制器模型已知，这一前提条件限制了间接辨识法的应用范围。而不同于间接辨识法的直接辨识法则是利用前向通道可测的输入输出数据，直接获得前向通道上的数学模型，无需知道反馈通道上的控制器模型。

直观分析可得，闭环状态下，过程的输入信号受输出信号的制约，输入信号与输出测量噪声相关，无法用常规开环辨识方法得到一致估计。如何把开环辨识方法用于闭环辨识，换句话说当闭环系统满足什么条件后开环辨识方法可以直接用于闭环系统的辨识。因此对闭环系统辨识来说，存在一个可辨识性问题。在满足闭环可辨识性条件后，开环辨识方法可以直接用于闭环系统的辨识。闭环系统的可辨识性与具体的辨识对象、

模型结构、辨识方法和实验条件有关，影响因素很多。从工程应用的角度上给出了一些结论可供使用，如下所示：

(1) 当反馈通道是线性、非时变的，且不存在扰动信号，给定值又是恒定的时候，闭环系统的可辨识条件是反馈通道的模型结构不要导致闭环传递函数出现零极点相消，且反馈通道的模型阶次不要低于前向通道的模型阶次。此外，如果反馈通道或前向通道存在纯延迟环节，这对可辨识性条件是有利的。

(2) 如果反馈通道上有足够阶次的持续激励信号，并与前向通道上的噪声是不相关的，则闭环系统是结构性可辨识的。

(3) 反馈通道上的控制器是时变的或具有非线性，闭环系统也是结构性可辨识的。

(4) 反馈通道上的控制器能在几种不同调节规律之间切换，闭环系统也是结构性可辨识的。

上述结论 (3) 和 (4) 实际上是在现有的反馈通道上的控制器阶次太低，不能满足可辨识性条件的情况下，所采取的措施。下面将具体分析在反馈通道上不存在扰动信号的情况下，闭环系统直接参数-辨识的可辨识性条件。

设辨识对象如图 3.1 所示。图中， $G(z^{-1})$ 是前向通道上过程传递函数，即辨识对象； $R(z^{-1})$ 是反馈通道上控制器传递函数； $N(z^{-1})$ 是前向通道噪声 $v(k)$ 滤波器； $v(k)$ 为噪声信号； $r(k)$ 为给定值信号

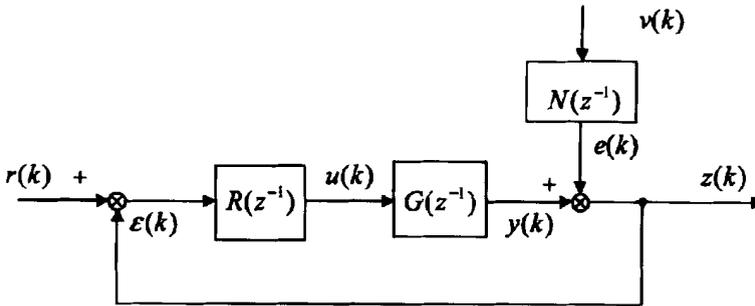


图 3.1 闭环辨识对象
Fig. 3.1 Closed loop identification object

所用的模型结构取：

$$\begin{cases} G(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \\ R(z^{-1}) = \frac{Q(z^{-1})}{P(z^{-1})} \\ N(z^{-1}) = \frac{D(z^{-1})}{A(z^{-1})} \end{cases} \quad (3.12)$$

其中，

$$\begin{cases} A(z^{-1})=1+a_1z^{-1}+\dots+a_{n_a}z^{-n_a} \\ B(z^{-1})=b_0+b_1z^{-1}+\dots+b_{n_b}z^{-n_b} \\ D(z^{-1})=1+d_1z^{-1}+\dots+d_{n_d}z^{-n_d} \\ P(z^{-1})=1+p_1z^{-1}+\dots+p_{n_p}z^{-n_p} \\ Q(z^{-1})=q_0+q_1z^{-1}+\dots+q_{n_q}z^{-n_q} \end{cases} \quad (3.13)$$

由图 3.1 闭环辨识对象可得到，前向通道模型即辨识对象模型：

$$A(z^{-1})z(k)=z^{-d}B(z^{-1})u(k)+D(z^{-1})v(k) \quad (3.14)$$

引入向量 $\varphi(k)$ 和参数估计值向量 θ ，定义如下：

$$\varphi^T(k)=[-z(k-1), \dots, -z(k-n_a), u(k-d), u(k-d-1), \dots, \hat{v}(k-1), \dots, \hat{v}(k-n_d)] \quad (3.15)$$

$$\theta=[a_1, \dots, a_{n_a}, b_0, b_1, \dots, b_{n_b}, d_1, \dots, d_{n_d}]^T \quad (3.16)$$

其中，

$$\hat{v}(k)=z(k)-\varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1) \quad (3.17)$$

而 $\hat{\theta}(k-1)$ 是 $(k-1)$ 时刻的参数估计值

直接利用前向通道上过程对象的输入输出数据，采用开环辨识的方法来辨识模型 (3.14) 的参数 θ 的前提条件是必须保证数据向量 $\varphi(k)$ 中的元素 $z(k-1)$ ， $u(k-d)$ 和 $\hat{v}(k-1)$ 与其他元素不相关，否则开环辨识方法不能直接应用。其中， $z(k-1)$ 和 $\hat{v}(k-1)$ 都是随机变量，所以满足与 $\varphi(k)$ 向量中的其他元素不相关的要求；由于闭环对象存在反馈作用， $u(k-d)$ 可能会出现与 $\varphi(k)$ 向量中的其他元素相关的现象。由反馈通道上的控制器模型得到 $u(k-d)$ 满足下列关系：

$$u(k-d)=-p_1u(k-d-1)-\dots-p_{n_p}u(k-d-n_p)-q_0z(k-d)-\dots-q_{n_q}z(k-d-n_q) \quad (3.18)$$

由式 (3.18) 可以得到，如果 $n_p \leq n_b$ 且 $n_q + d \leq n_a$ ，此时 $u(k-d)$ 必可以表示成 $\varphi(k)$ 向量中 $-z(k-1), \dots, -z(k-n_a), u(k-d), u(k-d-1), \dots, u(k-d-n_b)$ 元素的线性组合，即 $u(k-d)$ 与 $\varphi(k)$ 向量中的其他元素相关，不满足上述前提条件，从而使开环辨识方法不能直接用于辨识模型 (3.14) 的参数 θ 。只有当 $n_p \geq n_b + 1$ 或 $n_q \geq n_a - d + 1$ 时， $u(k-d)$ 才与 $\varphi(k)$ 向量中的其他元素不相关。

通过上面的分析，我们得到在反馈通道上不存在扰动信号的情况下，闭环系统直接参数辨识的可辨识性条件：

$$n_p \geq n_b + 1 \text{ 或 } n_q \geq n_a - d + 1 \tag{3.19}$$

在满足闭环可辨识性条件式 (3.19) 后, 所有的开环辨识方法都可以直接用于辨识闭环模型 (3.14) 的参数 θ 。

3.2.2 高炉顶压动态数学模型机理分析

由于高炉 TRT 装置的复杂性, 为建立适合于控制的高炉顶压动态数学模型, 需根据正常工况下 TRT 装置的特点及影响高炉顶压稳定的因素, 对 TRT 装置高炉炉顶压力对象进行合理的假设和简化, 突出主要因素, 忽略次要因素。首先明确建模的目的, 是为了实现高炉炉顶压力的稳定控制。因此该过程对象的被控变量即为高炉炉顶压力。正常工况下, 减压阀组、旁通阀、启动调速阀关闭, 其它阀门全开, 所以上述阀门对炉顶压力的影响可以略去。透平机正常发电, 炉顶压力由透平机可调静叶开度调节, 即过程对象的控制变量是透平机可调静叶开度。正常工况下, 静叶开度在某个稳定工作点附近

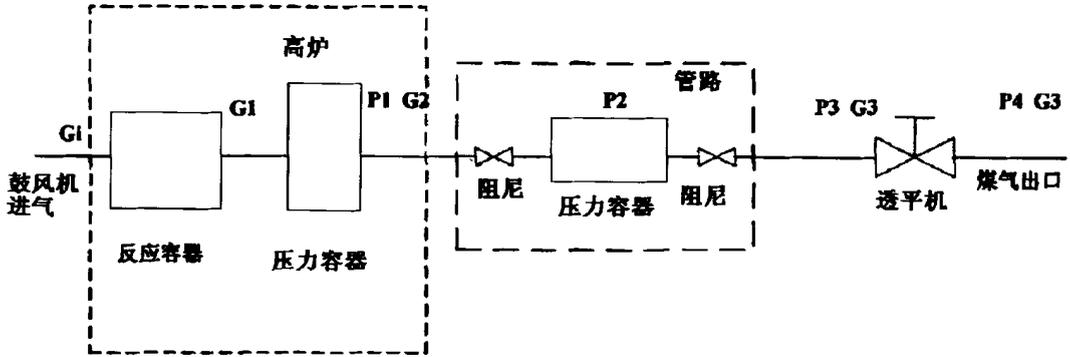


图 3.2 正常工况下 TRT 系统简化模型

Fig. 3.2 Under normal working conditions TRT simplified model system

波动, 因此可以将透平机合理简化为线性调节阀。根据高炉工艺流程, 高炉简化为反应容器和压力容器的串联模型^[33], 管路简化为上下游阻尼与压力容器的串联模型^[34-36]。综合上述简化得到, 正常工况下 TRT 系统简化模型如图 3.2 所示。图中 G 表示煤气的质量流量, P 表示煤气的压力。

下面分别介绍反应容器模型、压力容器模型、管路阻尼模型、线性调节阀模型。

1. 反应容器模型

高炉煤气生成过程模型可用经验公式表示如下:

$$G_1(s) = \frac{K_1}{T_1 s + 1} G_i(s) \tag{3.20}$$

式中: $G_i(s)$ 为鼓风机输入空气的质量流量, $G_1(s)$ 为冶炼过程生成煤气的质量流量, K_1 和 T_1 为反应常数, 此参数和高炉炉料、高炉结构等有关。

2. 压力容器模型

压力容器入口和出口的质量流量^[37]的变化与容器中的密度变化的关系为:

$$(G_1 - G_2) \Delta t = V \Delta \rho \quad (3.21)$$

对上式进行线性化处理 and 拉氏变换得:

$$G_1(s) - G_2(s) = \frac{sV}{RT_0} P(s) \quad (3.22)$$

式中: $G_1(s)$ 为入口的质量流量, $G_2(s)$ 为出口的质量流量, V 为压力容器的体积, R 为气体常数, T_0 为气体的温度, $P(s)$ 为气体的压力。

3. 管路阻尼模型

管路前后压降与管路阻尼系数的关系为:

$$P_1 - P_2 = \frac{\xi G^2}{2\rho S^2} \quad (3.23)$$

对上式进行线性化处理 and 拉氏变换得:

$$P_1(s) - P_2(s) = \frac{\xi G_0}{\rho S^2} G(s) \quad (3.24)$$

假设 ξ 不变, 式 (3.24) 中: $P_1(s)$ 、 $P_2(s)$ 分别为管路前后压力, ξ 为管路阻尼系数, ρ 为煤气密度, S 为管道截面积, $G(s)$ 为煤气流量, G_0 为平衡工作点煤气流量。

4. 线性调节阀模型

线性调节阀质量流量为:

$$G = (kL + k_0) \sqrt{(P_1 - P_2) \rho} \quad (3.25)$$

对上式进行线性化处理 and 拉氏变换得:

$$G(s) = kL(s) \sqrt{(P_{10} - P_{20}) \rho} + \frac{kl_0 + k_0}{2\sqrt{(P_{10} - P_{20})}} \sqrt{\rho} P_1(s) - \frac{kl_0 + k_0}{2\sqrt{(P_{10} - P_{20})}} \sqrt{\rho} P_2(s) \quad (3.26)$$

式中: k 、 k_0 为调节阀的比例常数参数, P_{10} 、 P_{20} 分别为阀门前后两端的平衡工作点压力, ρ 为气体密度, l_0 为阀门平衡工作点开度, $L(s)$ 为阀门的开度, $P_1(s)$ 、 $P_2(s)$ 分别为管路前后压力。

$$k + k_0 = \frac{C_{100}}{36000}, \quad k_0 = \frac{q_{\min}}{10} \quad (3.27)$$

其中, C_{100} 为额定流通能力, q_{\min} 为调节阀在此额定状态下的最小流量。

根据图 3.2, TRT 系统简化模型及上述各单元模型描述可以得到正常工况下高炉顶压动态数学模型:

$$\left. \begin{aligned}
 G_1(s) &= \frac{K_1}{T_1s+1} G_i(s) \\
 G_1(s) - G_2(s) &= \frac{sV_1}{RT_{10}} P_1(s) \\
 P_1(s) - P_2(s) &= \frac{\xi_1 G_{20}}{\rho S^2} G_2(s) \\
 P_2(s) - P_3(s) &= \frac{\xi_2 G_{30}}{\rho S^2} G_3(s) \\
 G_2(s) - G_3(s) &= \frac{sV_2}{RT_{20}} P_2(s) \\
 G_3(s) &= kL(s) \sqrt{(P_{30} - P_{40})\rho} + \frac{kl_0 + k_0}{2\sqrt{(P_{30} - P_{40})}} \sqrt{\rho} P_3(s)
 \end{aligned} \right\} \quad (3.28)$$

令： $A = \frac{K_1}{T_1s+1}$, $B = \frac{sV_1}{RT_{10}}$, $C = \frac{\xi_1 G_{20}}{\rho S^2}$, $D = \frac{\xi_2 G_{30}}{\rho S^2}$, $E = \frac{sV}{RT_{20}}$, $F_1 = k\sqrt{(P_{30} - P_{40})\rho}$,

$$F_2 = \frac{kl_0 + k_0}{2\sqrt{(P_{30} - P_{40})}} \sqrt{\rho}$$

得到高炉炉顶压力与透平机静叶开度之间的传递函数关系式：

$$\frac{P_1(s)}{L(s)} = \frac{-F_1}{B + E + F_2 + BDF_2 + BEF_2 - BCE - BCF_2 - BCDEF_2} \quad (3.29)$$

上式中： $P_1(s)$ 为高炉炉顶压力，即对象的被控变量， $L(s)$ 为透平机可调静叶开度，即过程对象的控制变量。通过将 A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F_1 和 F_2 的表达式代入式 (3.29) 可以发现，描述高炉炉顶压力与透平机静叶开度之间关系的传递函数的分母为关于 s 的二次多项式，因此高炉炉顶压力过程对象的阶次为 2，即确定了正常工况下高炉顶压动态数学模型的结构。

3.3 高炉顶压数学模型

3.3.1 高炉顶压控制系统

正常工况下，TRT 系统高炉炉顶压力采用透平机可调静叶开度调节。高炉炉顶压力控制系统如图 3.3 所示。

从图 3.3 中可以看出，正常工况下，高炉炉顶压力控制系统的输出变量，即被控变量，是炉顶压力 P ；控制器输出，即控制变量，是透平机可调静叶开度 U 。通过对实际正常工况下运行曲线的分析，得高炉正常过程是影响高炉顶压的主要因素，因此在高炉顶压控制系统中引入干扰变量—高炉操作 D 。

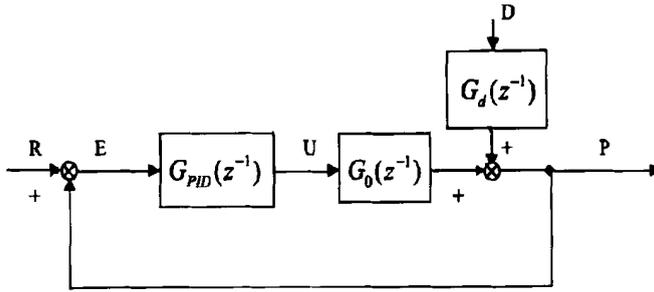


图 3.3 正常工况下高炉顶压控制系统图

Fig. 3.3 Under normal working conditions of blast furnace top pressure control system diagram

注：R—炉顶压力给定值；D—扰动；E—偏差；P—炉顶压力；U—透平机静叶开度；

$G_0(z^{-1})$ —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 3.3 中的前向通道上的过程传递函数 $G_0(z^{-1})$ 即为正常工况下高炉顶压数学模型。通过前面的学习，正常工况下高炉顶压动态数学模型机理分析，得到正常工况下高炉顶压动态数学模型的结构。在模型结构已知的基础上，下面将通过前向通道上可测的输入信号（透平机可调静叶开度 U ）和输出信号（炉顶压力 P ）辨识正常工况下高炉顶压动态数学模型的参数。

3.3.2 高炉顶压系统闭环分析

由于用于正常工况下高炉顶压动态数学模型参数辨识所用的数据，是从工业现场 TRT 系统正常运行情况下测量得到的运行数据，即系统是处于闭环状态下的，因此在通过闭环辨识确定模型参数之前必须先对高炉顶压系统是否闭环可辨识进行分析。闭环辨识及可辨识性条件，介绍了一些关于闭环系统辨识的理论知识和关于闭环可辨识性条件的结论。下面将针对正常工况下高炉炉顶压力系统，具体分析该闭环系统是否满足可辨识性条件。

图 3.3 中，反馈通道上的 PID 控制器的 Z 传递函数为：

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{K_c(1-z^{-1}) + K_i + K_d(1-2z^{-1} + z^{-2})}{1-z^{-1}} \tag{3.30}$$

式中 K_c 、 K_i 、 K_d 为控制器对应的比例、积分、微分系数，根据前面中介绍的控制器模型式 (3.12) 和 (3.13)，得到控制器模型结构参数 $n_q = 2$ ；对于前向通道，由于 U 到 P 之间有一定的滞后，从采集的现场数据分析，得滞后时间大约为 τ (τ 为采样周期，

这里取 3 秒), 即 $d=1$; 正常工况下高炉顶压动态数学模型机理分析, 我们得到了高炉炉顶压力与可调静叶开度之间的传递函数, 如式 (3.29) 所示。经过对该式离散化处理, 得到离散时间高炉顶压输入输出模型, 对应的结构参数 $n_a = 2$ 。

在以上分析的基础上, 我们可以得到式 $n_q \geq n_a - d + 1$ 成立, 即满足闭环系统直接参数辨识的可辨识性条件式 (3.19)。因此, 我们可以直接利用前向通道上可测的输入信号 (透平机可调静叶开度 U) 和输出信号 (炉顶压力 P), 采用开环辨识参数的方法, 如最小二乘法, 辨识高炉顶压动态数学模型的参数。

由图 3.3, 正常工况下高炉顶压控制系统, 可得到炉顶压力 P 与透平机可调静叶开度 U 及扰动 D 的输入输出关系式, 即辨识对象

$$p(k) = G_0(z^{-1})u(k) + G_d(z^{-1})d(k) \quad (3.31)$$

采集工业现场实际运行的 300 组输入输出数据, 用于正常工况下高炉顶压数学模型的参数辨识, 采样周期为 3 秒。前 200 组数据用于参数辨识; 剩下的 100 组数据用于下面高炉顶压动态数学模型的验证。采用带遗忘因子的递推最小二乘算法来辨识模型参数。通过仿真, 最后我们得到了正常工况下高炉顶压动态数学模型, 如下所示:

$$\begin{cases} A(z^{-1})p(k) = B(z^{-1})u(k-1) + C(z^{-1})d(k-3) \\ A(z^{-1}) = 1 - 0.58z^{-1} - 0.24z^{-2} \\ B(z^{-1}) = 0.35 - 0.52z^{-1} + 0.16z^{-2} \\ C(z^{-1}) = -0.23 + 0.29z^{-1} - 0.19z^{-2} \end{cases} \quad (3.32)$$

通过新的 100 组输入输出数据对所建立的正常工况下高炉顶压动态模型进行验证与仿真研究。将新的输入信号 (透平机可调静叶开度 U 和高炉间歇上料干扰 D) 通过所建立的模型, 模型输出与实际过程对象输出相比较, 仿真结果如图 3.4 所示。所建立的正常工况下高炉顶压动态数学模型仿真输出与实际过程对象输出的比较。

从图 3.4 可以看出, 模型仿真输出与高炉顶压的实际输出比较吻合, 即所建立的高炉顶压动态数学模型式(3.32)总体上较真实地反映了正常工况下炉顶压力的实际运行状况, 基本上能够反映实际被控对象的特性, 该模型可以为进一步的控制系统设计和分析提供依据。

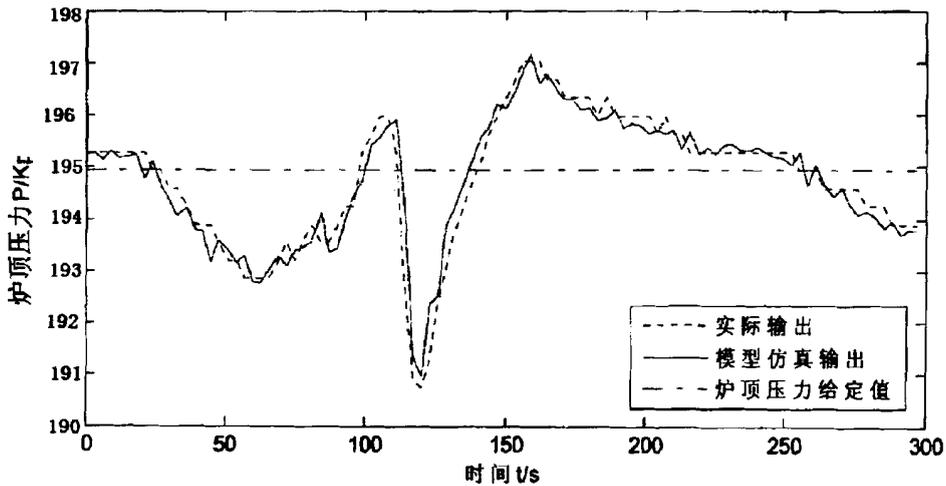


图 3.4 正常工况下高炉顶压动态模型仿真输出与实际输出的比较

Fig. 3.4 Under normal working conditions of blast furnace top dynamic model simulation output pressure with the comparison of the actual output

3.4 本章小结

本章针对高炉炉顶压力的特点，对高炉 TRT 系统进行简化，将正常工况下高炉顶压的几种主要扰动引入模型，通过机理分析和参数辨识相结合的方法建立了正常工况下高炉顶压的动态数学模型。由于现场数据是在炉顶压力控制系统闭环条件下得到的运行数据，因此，基于现场数据的参数辨识还必须先对系统进行闭环可辨识性分析。通过分析得到，高炉顶压控制系统满足闭环可辨识性条件的。结果表明所建立模型基本上反映了正常工况下炉顶压力的实际运行状况。所建立的动态数学模型为炉顶压力控制系统的设计和优化打下了一定的基础。

第4章 高炉炉顶压力内模控制

随着高新技术的发展和应用,对控制系统性能的要求越来越高。在工业控制领域相当多的控制问题可以用简单的PID控制器解决,但许多被控对象机理比较复杂,具有大纯滞后、明显非线性和多变量耦合性,在噪声、扰动和其它一些条件的影响下,过程模型参数甚至结构均会发生变化,即存在一定不确定性。采用常规PID控制器,以一组固定不变的PID参数去适应被控过程参数变化、干扰等不确定因素显然难以获得满意的效果。内模控制(Internal Model Control,简称IMC)是一种基于过程数学模型进行控制器设计的新型控制策略。它是在控制系统中引入内部模型,使系统的反馈量由传统的输出反馈变为扰动估计量的反馈。1982年Garcia和Morari提出并发展了内模控制,它具有设计直观简便,参数的物理意义明确,参数调整方便,控制性能优越等特点,因此在工业过程控制中得到了广泛的应用。它不仅是一种实用的先进控制算法,而且还是研究预测控制等基于模型的控制策略的重要理论基础,以及提高常规控制系统设计水平的工具。与传统的反馈控制相比,它能够兼顾系统闭环响应性能和鲁棒性,能够消除不可测干扰以及建模误差的影响,提供了比较合理简单的设计步骤。

4.1 内模控制及高炉炉顶压力模型的建立

内模控制是一种基于过程数学模型进行控制器设计的新型控制策略。它是在传统反馈控制方法的基础上发展起来的,能够简化控制系统的设计,并使系统的稳定性、抗扰性与鲁棒性问题能够分别得到解决。使其在工业过程控制中的应用越来越广泛。

4.1.1 内模控制的建模方法

内模控制^[38]是一种采用被控对象的内部模型和反馈修正的预测控制,它是史密斯预估控制的扩展,因此同样也能明显改进对纯滞后过程的控制。它的主要优点是通过简单的选择一个稳定的内模控制器就可以保证闭环系统的稳定,另外内模控制在设计上考虑了对系统鲁棒性的调整,从而使其大大提高了实用价值。内模控制的设计思路是将对象模型与实际对象相并联,控制器逼近模型的逆,对于单变量系统内模控制器取为模型最小相位部分的逆,并附加低通滤波器,在反馈回路中增加反馈滤波器可独立针对系统的鲁棒性和抗干扰性能。内模控制器的设计思路清晰,步骤简单,闭环系统的性能指标直接与该控制器的参数有关,调整参数能兼顾闭环控制精度和系统的鲁棒性。下面简单介绍内模控制的原理、结构及其设计步骤。

对于内模控制来说,如何建立准确的内部模型以及内部模型的逆成为内模控制设计

的关键。目前内模控制中几种常用的建模方法如下：

1. 传统数学模型

传统数学模型在内模控制中应用相当广泛，在线性内模控制的研究中常以传递函数来表示系统的输入输出模型。而在非线性内模控制中多种非线性数学模型在内模控制中的应用。传统数学模型的优点是可逆性容易判断，模型可逆时能解析获得模型的逆，能够深入分析闭环系统的稳定性和鲁棒性。

2. 神经网络模型

对于复杂非线性对象数学模型难以建立的问题，可以充分利用了神经网络强大的函数逼近能力，来解决非线性系统难以建模的困难。神经网络在内模控制中应用主要有两种方法：一是利用两个神经网络分别逼近模型和模型的逆；二是采用神经网络逼近模型，然后用非线性优化的方法数值求取控制量。

3. 模糊系统模型

为了将内模控制用于非线性过程，可以采用模糊系统建模，由于模糊系统建模是采用一系列线性模型加权平均来逼近非线性对象，可以使用局部线性模型求逆的加权平均来解析获得模型的逆，以使求逆过程的计算量大大减少。模糊模型最初应用于内模控制中所起的作用类似于神经网络输入输出模型，因而也无法避免模型求逆的困难。针对一类特殊的两输入单输出模糊系统提出了一种解析求逆的方法，并将结论推广到多输入单输出模型。

4. 模糊神经网络建模

将神经网络和模糊控制相结合，充分利用神经网络和模糊逻辑各自的优点，取长补短，使其具有自组织、自学习的能力。因此模糊神经网络结合作为内模控制的建模工具，具有很大的潜力。

4.1.2 高炉炉顶压力内模控制推导

一般反馈控制结构方块图如图 4.1 所示，基本内模控制结构方块图如图 4.2 所示。

图 4.1、4.2 中， $G_p(s)$ 为实际被控过程对象， $\hat{G}_p(s)$ 为被控过程的数学模型， $G_c(s)$ 为一般反馈控制器， $G_{IMC}(s)$ 为内模控制器， $R(s)$ 为过程设定值输入， $D(s)$ 为过程干扰输入， $U(s)$ 为控制量， $Y(s)$ 为过程输出。

由图 4.2 可以得到内模控制系统的闭环响应：

$$Y(s) = \frac{G_{IMC}(s)G_p(s)}{1+G_{IMC}(s)[G_p(s)-\hat{G}_p(s)]}R(s) + \frac{1-G_{IMC}(s)\hat{G}_p(s)}{1+G_{IMC}(s)[G_p(s)-\hat{G}_p(s)]}D(s) \quad (4.1)$$

系统的闭环特征方程为：

$$\frac{1}{G_{IMC}(s)} + [G_p(s) - \hat{G}_p(s)] = 0 \tag{4.2}$$

$$\frac{1}{G_{IMC}(s)G_p(s)} + [G_p(s) - \hat{G}_p(s)] = 0 \tag{4.3}$$

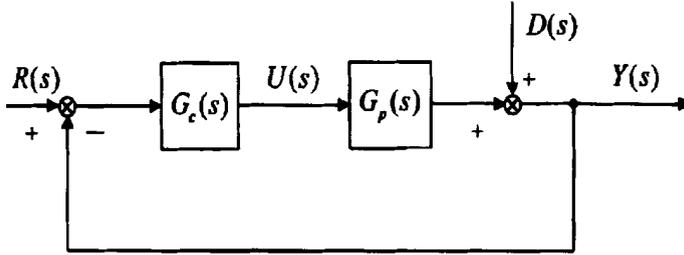


图 4.1 一般反馈控制结构方块图

Fig. 4.1 General feedback control structure block diagram

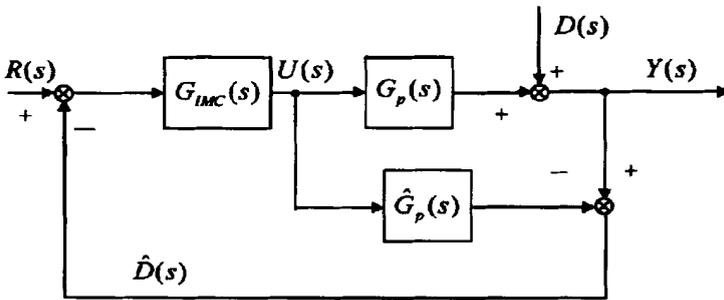


图 4.2 内模控制系统原理图

Fig. 4.2 Internal model control system diagram

在具有内模的控制结构中，由于引入了内部模型，反馈量已经由原来的输出量反馈变为系统扰动量反馈，而且控制器的设计也变的较为容易。当模型与对象失配时，在反馈回去的信息中，除原来的扰动量之外，还包括模型失配的某些信息，从而有利于控制系统的抗扰性设计，增强系统的鲁棒性。内模控制与传统反馈控制相比较，其主要优点是容易获得良好的动态响应，同时也能兼顾稳定性和鲁棒性。

当内部模型与被控对象匹配，即 $\hat{G}_p(s) = G_p(s)$ 时，如果内模控制中的控制器稳定并且被控对象稳定，那么整个系统就一定是稳定的。

当 $\hat{G}_p(s) = G_p(s)$ 时，由式 (4.1) 可知，系统相当于开环。闭环系统的输出 $Y(s)$ 只取决于系统前向通道的传递函数，因此当过程模型与过程被控对象匹配时，分析内模控制系统的闭环稳定性，只要分析前向通道的开环稳定性就可以了，即只要开环稳定，控制器也稳定，闭环系统总是稳定的。尤其在系统是 大时滞、非线性的情况下，稳定性的分析就变得容易了，从而达到简化系统稳定性分析的目的。

对偶稳定性的特点是由内模控制反馈信号的特殊形式所决定的，因为闭环系统的反

馈信号 $\hat{D}(s)$ 为:

$$\hat{D}(s) = [G_p(s) - \hat{G}_p(s)]U(s) + D(s) \quad (4.4)$$

如果模型准确, 即 $\hat{G}_p(s) = G_p(s)$, 且没有外界扰动, 即 $D(s) = 0$, 则由式 (4.4) 可以得到系统反馈信号 $\hat{D}(s)$ 为零。也就是说在无模型不确定性和无干扰条件下, 内模控制系统具有开环结构。

当模型没有误差时, 即 $\hat{G}_p(s) = G_p(s)$, 上式可以简化为:

$$Y(s) = G_{IMC}(s)G_p(s)R(s) + [1 - G_{IMC}(s)G_p(s)]D(s) \quad (4.5)$$

4.1.3 内模控制器的性质

1. 对偶稳定性^[39]

当模型准确时, 即 $\hat{G}_p(s) = G_p(s)$, 则由式 (4.5) 可以得到内模控制系统内稳定的充分必要条件是过程对象 $G_p(s)$ 和内模控制器 $G_{IMC}(s)$ 都是稳定。也就是说, 对于开环稳定对象, 只要内模控制器稳定且模型准确就可以保证闭环系统稳定, 这就是对偶稳定性。这一性质大大简化了闭环系统稳定性的分析。但是另一方面, 从内模控制的结构也可以看出, 对于不稳定对象^[40], 即使模型精确匹配, 闭环系统也将是不稳定的, 因此内模控制不能直接应用于开环不稳定的过程, 应先采用简单反馈控制律使之镇定。

当存在模型失配, 由式 (4.1) 可以得到闭环系统的稳定除了要求 $G_p(s)$ 、 $\hat{G}_p(s)$ 、 $G_{IMC}(s)$ 稳定外, 还要求闭环系统特征方程

$$1 + G_{IMC}(s)[G_p(s) - \hat{G}_p(s)] = 0 \quad (4.6)$$

的根具有负实部, 这可以通过适当的控制器和反馈滤波器的设计来保证。

2. 理想控制器特性

内模控制器的设计思路可以说是从理想控制器出发, 然后考虑了某些实际存在的约束, 再回到实际控制器的。

假设模型准确, 即 $\hat{G}_p(s) = G_p(s)$, 且“模型可倒”, 即 $\frac{1}{\hat{G}_p(s)}$ 可以实现, 则令

$$G_{IMC}(s) = \frac{1}{\hat{G}_p(s)} \quad (4.7)$$

将上式代入式 (4.5) 得到

$$Y(s) = R(s) \quad (4.8)$$

上式表明不管干扰 D 如何变化, 对系统输出 Y 的影响为零, 即控制器可以克服任何

干扰，同时实现对设定值输入 R 的无偏差跟踪。该内模控制器特性就是在“模型精确匹配而且可倒”这个假设条件下的理想控制器的特性。

3. 无静差特性

对图 4.2 的内模控制结构方块图作变换，可以得到图 4.3 基本内模控制的等效方块图。若将图 4.3 中的虚线框内等效为图 4.1 一般反馈控制结构方块图中的 $G_c(s)$ 则得到

$$G_c(s) = \frac{G_{IMC}(s)}{1 - G_{IMC}(s)\hat{G}_p(s)} \quad (4.9)$$

取内模控制器的稳态增益为模型稳态增益的倒数，即

$$G_{IMC}(s)|_{s=0} = \frac{1}{\hat{G}_p(s)|_{s=0}} \quad (4.10)$$

将上式代入式 (4.9) 得

$$G_c(s)|_{s=0} = \infty \quad (4.11)$$

式 (4.11) 表明等效控制器 $G_c(s)$ 的零频增益为无穷大。而图 4.3 中系统偏差 $E(s)$ 可以表示为

$$E(s) = \frac{1}{1 + G_c(s)G_p(s)} [R(s) - D(s)] \quad (4.12)$$

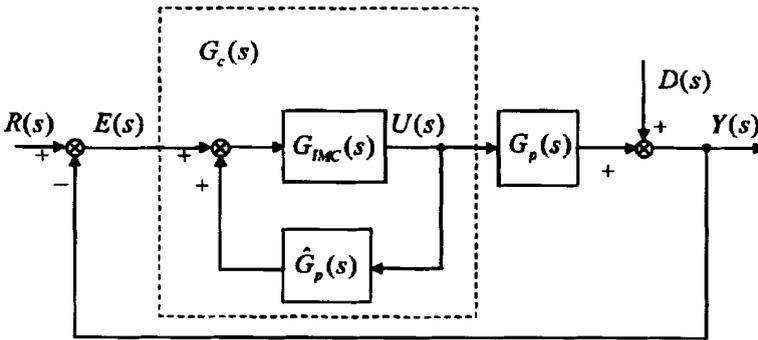


图 4.3 基本内模控制的等效方块图

Fig. 4.3 Basic internal model control block diagram of the equivalent

4.2 内模控制器的设计

经过多年的发展，产生了多种内模控制器的设计方法。比较典型的有：零极点相消法、预测控制法和有限拍法等。当不存在模型误差和扰动时，如图4.2所示，闭环传递函数为 $G_{IMC}(s)\hat{G}_p(s)$ 。因此只要使内模控制器 $G_{IMC}(s)$ 尽可能成为内部模型 $\hat{G}_p(s)$ 的逆就是最佳的控制。

本文采用零极点相消法来设计控制器，所谓零级点相消法，就是设被控对象稳定，

首先利用 $G_{IMC}(s)$ 消去 $\hat{G}_p(s)$ 中的最小相位部分，然后在 $G_{IMC}(s)$ 中增加一个一阶或二阶前馈滤波环节来调节响应的快速性、鲁棒性以及抗扰性，这就是所谓的两步设计法。该法设计和调整都最为直观简单，适用于连续和离散系统。但对于非最小相位控制对象，由于 $\hat{G}_p(s)$ 中的不稳定零点无法消除，系统的响应性能无法得到保证，如果滤波器设计的不好，有可能产生较大输出反调和超调。

“模型精确匹配而且可倒”假设条件下得到的理想控制器的特性，但实际上理想控制器特性常难以获得，其原因可以从两方面考虑：一是模型与各种不同工况下的实际过程总会存在误差；二是 $\hat{G}_p(s)$ 有时不完全可倒，例如： $\hat{G}_p(s)$ 中包含有非最小相位环节（即其零点在右半平面），其倒数会形成不稳定环节，从而闭环系统也不稳定； $\hat{G}_p(s)$ 中包含有纯滞后环节，则其倒数含有纯超前项，这在物理上是难以实现的。

鉴于上述情况，内模控制器的设计可以分成两步进行。首先设计一个稳定的理想控制器，而不考虑系统的鲁棒性和约束；其次引入滤波器，通过调节滤波器的结构和参数来获得期望的动态品质和鲁棒性^[41-44]。

步骤1 稳定控制器设计将过程模型 $\hat{G}_p(s)$ 分解为 $\hat{G}_{p+}(s)$ 和 $\hat{G}_{p-}(s)$ 两项

$$\hat{G}_p(s) = \hat{G}_{p+}(s) \hat{G}_{p-}(s) \quad (4.13)$$

式中， $\hat{G}_{p+}(s)$ 包含了所有的纯滞后和右半平面的零点，并规定其静态增益为1； $\hat{G}_{p-}(s)$ 为具有最小相位特征的传递函数，即 $\hat{G}_{p-}(s)$ 稳定且不包含预测项。

内模控制系统的理想控制器特性在模型匹配时能够获得理想的设定值跟踪和完全的干扰抑制效果。但理想控制器常难以实现，主要原因如下：

(1) 如果对象含有时滞，则 $G_{IMC}(s) = G_p(s)^{-1}$ 中含有纯超前项，这不符合因果规律，在物理上难以实现；

(2) 若对象为非最小相位系统， $G_p(s)^{-1}$ 中有右半平面的零点，则控制器中就有右半复平面的极点，控制器本身就不稳定，因此闭环系统也是不稳定的；

(3) 如果对象模型严格有理，设 $G_p(s)^{-1}$ 分母多项式的阶次比分子多项式的阶次高 N 阶，则理想控制器 $G_{IMC}(s) = G_p(s)^{-1}$ 不是有理的，且其中含有 N 阶微分器，对于过程测量信号中的噪声极为敏感；

(4) 采用理想控制器构成的系统，对模型误差十分敏感。当模型失配时，无法确保闭环系统的鲁棒稳定性。

因此，内模控制器的设计不能直接采用理想控制器的设计方法。在设计内模控制器时应分为两步进行：首先设计一个稳定的控制器，而不考虑系统的鲁棒性和约束；其次

引入滤波器，通过调整滤波器的结构和参数来获得期望的系统动态品质。

步骤 2 在控制器设计时，引入滤波器以确保系统的稳定性和鲁棒性。内模控制器定义如下

$$G_{IMC}(s) = \frac{1}{\hat{G}_{p-}(s)} f(s) \quad (4.14)$$

其中 $f(s)$ 为静态增益为 1 的低通滤波器，是内模控制器的可实现因子。其典型形式是

$$f(s) = \frac{1}{(T_f s + 1)^r} \quad (4.15)$$

式中，可实现因子参数 T_f 可选为所希望的闭环时间常数，参数 r 是一个正整数，它的选择原则主要是使 $G_{IMC}(s)$ 成为合理的传递函数（如它的分母阶次至少应等于分子的阶次）。

假设模型没有误差，即 $\hat{G}_p(s) = G_p(s)$ ，将式 (4.13) 和式 (4.14) 代入式 (4.5) 可以得到

$$Y(s) = \hat{G}_{p+}(s) f(s) R(s) + [1 - \hat{G}_{p+}(s) f(s)] D(s) \quad (4.16)$$

设 $D(s) = 0$ ，由上式得到闭环传递函数

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \hat{G}_{p+}(s) f(s) \quad (4.17)$$

式 (4.17) 表明滤波器 $f(s)$ 与闭环系统性能有非常直接的关系。滤波器的时间常数 T_f 是个可调整的参数，它与系统的跟踪性能和干扰抑制特性有着直接的关系。一般来说，时间常数越小， Y 对 R 的跟踪滞后越小，但系统的干扰抑制特性变差。另外，滤波器在内模控制中还有一个重要作用，即利用它可以调整系统的鲁棒性（即对模型误差的不敏感性）。它的规律是，时间常数 T_f 越大，系统鲁棒性越好。因此对于某一具体系统，滤波器时间常数 T_f 的取值应在系统的跟踪性能，干扰抑制特性和鲁棒性之间做出折中选择。

基本内模控制器的设计，它是一种一自由度的控制器，只有一个可调参数滤波器时间常数 T_f 。调整参数 T_f 以达到兼顾系统的跟踪性能、干扰抑制特性和鲁棒性目的，比较困难。为克服基本内模控制器的不足，在反馈通道上引入一滤波器 $F(s)$ ，构成二自由度内模控制器^[45-46]，该内模结构方块图如图 4.4 所示。可以看出滤波器 $F(s)$ 只有在模型失配或有干扰引起输出误差时才会起作用，因此它对系统的鲁棒性和抗干扰性有着至关重要的影响。图中 $G_{IMC}(s)$ 主要用来调节系统响应的快速性， $F(s)$ 主要用来调节系统

的鲁棒性和抗干扰性。这样的二自由度控制器在设计上更为灵活方便，性能改善的回旋余地也更大。

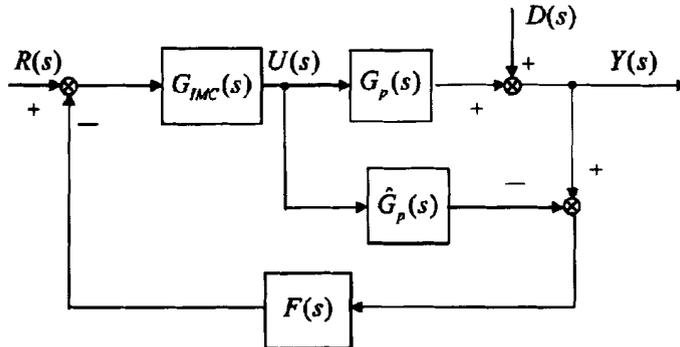


图 4.4 二自由度内模控制结构方块图

Fig. 4.4 Two degrees internal model control structure block diagram

4.3 电液位置伺服系统

TRT 装置通过调节可调静叶的开度实现透平机转速、煤气流量的控制，从而达到对高炉炉顶压力平稳控制的目的。而静叶开度的调节就是由电液伺服控制系统来完成的。因此，设计高性能的电液位置伺服控制系统是提高 TRT 系统高炉顶压控制精度的关键问题。

电液伺服系统是一个典型的非线性系统，其非线性来源可以分为两个方面：一是系统的固有特性，如电液转换和控制元件（伺服阀等）的节流特性和液压动力机构的滞环、死区及限幅等因素；另一方面是负载的非线性。因此，采用常规线性 PID 控制难以达到较高的控制精度。

4.3.1 电液位置伺服系统的构成和工作原理

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 4.5 所示：

电液位置伺服控制系统的工作原理：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，即透平机静叶（阀门）

稳定在指定的开度上。

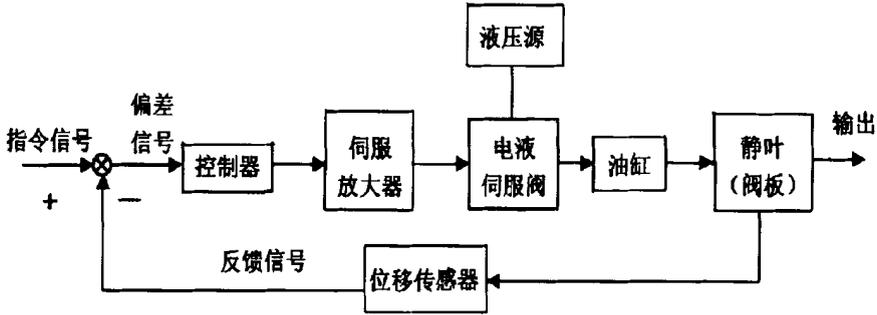


图 4.5 电液位置伺服控制系统方框图

Fig. 4.5 Electro-hydraulic position servo control system

4.3.2 电液位置伺服系统在 TRT 的应用

高炉顶压稳定是 TRT 机组投入运行的前提条件。目前 TRT 装置大都采用静叶可调技术稳定高炉顶压。而调节透平机静叶和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 中的地位和作用是十分重要的。

透平机可调静叶伺服控制系统原理图如图 4.6 所示。角位移变送器 ZT 用来测量透平机静叶实际角度信号，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主控制室 PLC 的 4~20mADC 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，带动静叶达到预期角度，从而实现透平机静叶开度调节的目的。同时，控制器还送出一路电流信号（4~20mA）到主控制室用于静叶角度的指示。

TRT 装置通过调节透平机静叶开度实现高炉炉顶压力的控制，控制系统方框图如图 4.7 所示。从图 4.7 中我们看到，炉顶压力控制系统是一个串级控制系统，DCS 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静叶开度控制。DCS 控制系统根据高炉顶压设定值和压力传感器测量值之间的偏差，给出静叶开度值，输入伺服阀控制器。DCS 设定的静叶开度和位移传感器测量的静叶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，带动静叶旋转，使静叶转到某一角度，从而实现炉顶压力的控制。在 TRT 启动、正常运行和紧急停机时，可根据各过程的控制要求，通过设定不同的给定值，实现各个过程的控制。

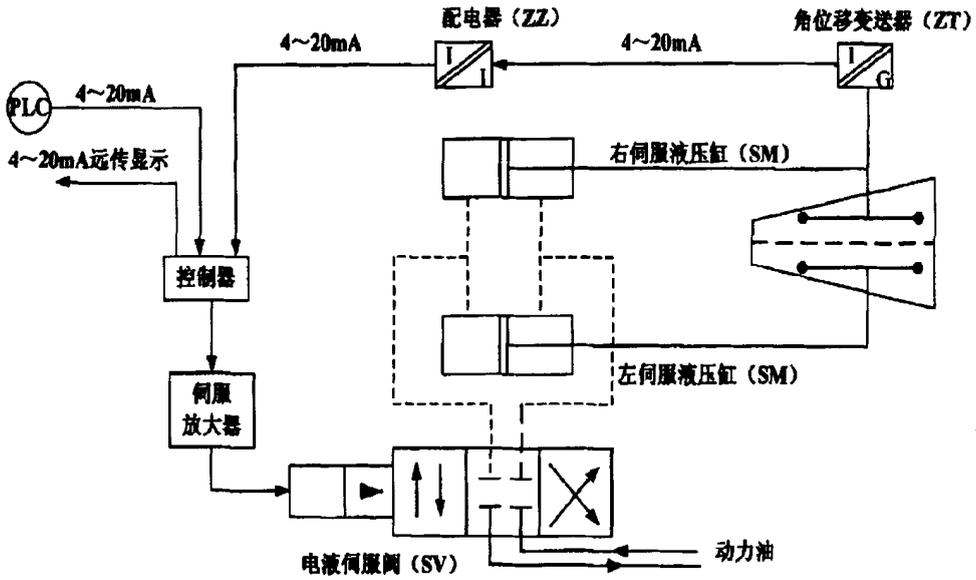


图 4.6 静叶伺服控制系统原理图

Fig. 4.6 Static leaves the servo control system principle diagram

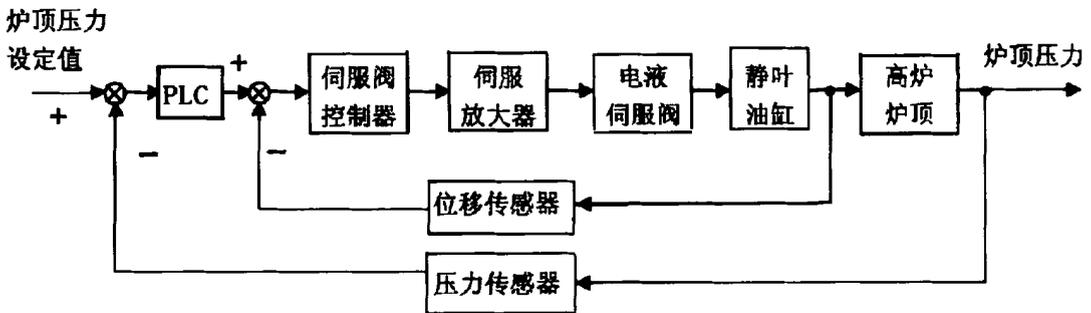


图 4.7 TRT 静叶控制炉顶压力系统方框图

Fig. 4.7 TRT static pressure control system to which leaves roof

4.4 高炉顶压控制系统设计

TRT 装置采用调节透平机静叶开度实现对高炉炉顶压力的稳定控制，而调节透平机静叶开度的手段是电液位置伺服控制系统。参见图 4.7 TRT 静叶控制炉顶压力系统方框图，高炉顶压控制系统是一个串级控制系统，内环即副回路是电液位置伺服控制系统，实现透平机静叶开度的控制；外环即主回路实现高炉炉顶压力的控制。在上节我们已对电液位置伺服系统的控制做了详细地讨论。

鉴于内模控制具有较好的调节和跟踪特性，且控制器设计简单并具有较强的鲁棒性，因此高炉顶压控制系统采用基于过程数学模型的内模控制方法，其结构框图如图 4.8 所示。

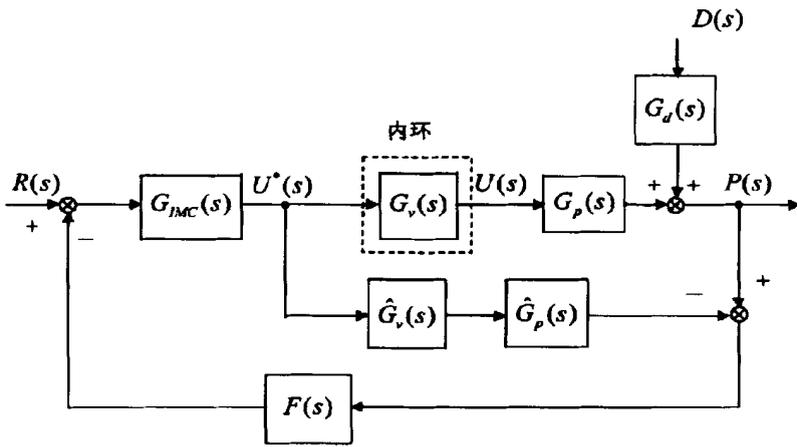


图 4.8 高炉顶压控制系统框图

Fig. 4.8 The blast furnace top pressure control system are presented

图中： $R(s)$ 为设定值输入， $U^*(s)$ 为内模控制器输出，作为透平机静叶开度的设定值送入电液位置伺服系统， $U(s)$ 为透平机实际静叶开度， $P(s)$ 为系统输出即高炉炉顶压力信号， $D(s)$ 为系统干扰即高炉间歇上料操作， $G_{IMC}(s)$ 为内模控制器， $F(s)$ 为内模控制反馈滤波器， $G_v(s)$ 为电液位置伺服系统即系统内环的等效控制阀， $G_p(s)$ 为实际的高炉炉顶压力对象， $\hat{G}_v(s)$ 和 $\hat{G}_p(s)$ 分别为相应过程的数学模型， $G_d(s)$ 为干扰通道传递函数。在第二章我们通过机理分析和参数辨识相结合的方法已经得到了正常工况下高炉炉顶压力的动态数学模型，即得到了图 4.8 中前面通道上的高炉顶压被控对象的传递函数 $G_p(s)$ 和高炉上料干扰通道的传递函数 $G_d(s)$ 。

4.5 高炉顶压内模控制器设计

在第三章我们所建立的是正常工况下高炉顶压离散数学模型式，采用双线性变换法

$$z^{-1} = \frac{1 - \frac{T}{2}s}{1 + \frac{T}{2}s} \tag{4.18}$$

式中， T 为采样周期。可得到高炉顶压连续数学模型

$$P(s) = \frac{0.7687s^2 + 0.1891s - 3.317 \times 10^{-3}}{s^2 + 1.234s + 5.97 \times 10^{-2}} e^{-3s} U(s) + \frac{-0.5299s^2 - 3.98 \times 10^{-2}s - 4.312 \times 10^{-2}}{s^2 + 1.234s + 5.97 \times 10^{-2}} e^{-9s} U(s) \tag{4.19}$$

假设模型不存在误差，则由图 4.8 和式 (4.18) 可得

$$G_p(s) = \hat{G}_p(s) = \frac{0.7687s^2 + 0.1891s - 3.317 \times 10^{-3}}{s^2 + 1.234s + 5.97 \times 10^{-2}} e^{-3s} \quad (4.20)$$

$$G_d(s) = \frac{-0.5299s^2 - 3.98 \times 10^{-2}s - 4.312 \times 10^{-2}}{s^2 + 1.234s + 5.97 \times 10^{-2}} e^{-9s} \quad (4.21)$$

由于高精度的电液位置伺服系统是个快速随动系统，因此其等效环节 $G_v(s)$ 和数学模型 $\hat{G}_v(s)$ 都可近似看成“1”。

根据介绍的二自由度内模控制器的设计方法设计高炉顶压内模控制器。由式(4.14)和式(4.15)可得到

$$G_{IMC}(s) = \frac{s^2 + 1.234s + 5.97 \times 10^{-2}}{-0.0126(s + 0.2624)} \times \frac{1}{\alpha s + 1} \quad (4.22)$$

式中， α 为内模控制器可实现因子滤波器 $f(s)$ 的可调参数。高炉顶压内模控制系统的反馈滤波器 $F(s)$ 采用最常用的一阶低通滤波器结构

$$F(s) = \frac{1}{\beta s + 1} \quad (4.23)$$

式中， β 为反馈滤波器 $F(s)$ 的可调参数。

从上述高炉顶压控制器的设计过程中我们可以看到，二自由度的内模控制器有两个可调参数 α 和 β ，一般通过调节参数 α 来改善系统的动态响应性能，通过调节参数 β 来改善系统的抗干扰性和鲁棒性。

4.6 本章小结

本章从内模控制原理出发，基于第三章所建立的正常工况下 TRT 装置高炉顶压动态数学模型设计，对高炉炉顶压力内模控制进行推导，并描述了内模控制器的优越性。简要介绍了二自由度内模控制器的设计。通过对高炉炉顶压力调节执行机构电液伺服系统的介绍，设计完成了高炉炉顶压力内模控制器。深入探讨了高炉顶压内模控制方法简单、参数调整方便、易于工程应用等特点，为正常工况下 TRT 系统高炉顶压的控制提供了一种新的方法。

第5章 TRT 系统仿真实验及结果分析

由于高炉炉顶压力控制具有滞后性、惯性及干扰性等特点，被调节量不能及时对控制信号的动作做出反应。上一章针对压力的这种特点，设计出了基于内模控制的 PID 控制器。在本章中利用 Matlab7.0/Simulink 软件对高炉顶压内模控制进行仿真实验，分别在模型精确匹配和模型失配时进行仿真，讨论了内模控制器的可调参数对系统性能的影响。仿真结果表明内模控制性能优越，参数调整方便，通过调整参数可以调整系统的鲁棒性，易于工程实现以达到高炉炉顶压力精确控制的效果。

5.1 搭建仿真模型

在各种仿真工具中，MATLAB 凭借其强大的矩阵运算能力、简便的绘图功能、可视化的仿真环境以及丰富的算法工具箱，已成为科研和工程技术人员的有力的开发工具。在 MATLAB 中，Simulink 是一个比较特别的工具箱，它具有两个显著的功能：Simu（仿真）与 Link（链接），是实现动态系统建模、仿真的一个集成环境。具有模块化、可重载、可封装、面向结构图编程及可视化等特点，可大大提高系统仿真的效率和可靠性；同时，进一步扩展了 MATLAB 的功能，可实现多工作环境间文件互用和数据交换。它支持线性和非线性系统、连续时间系统和离散时间系统、连续和离散混合系统，而且系统可以是多进程的。

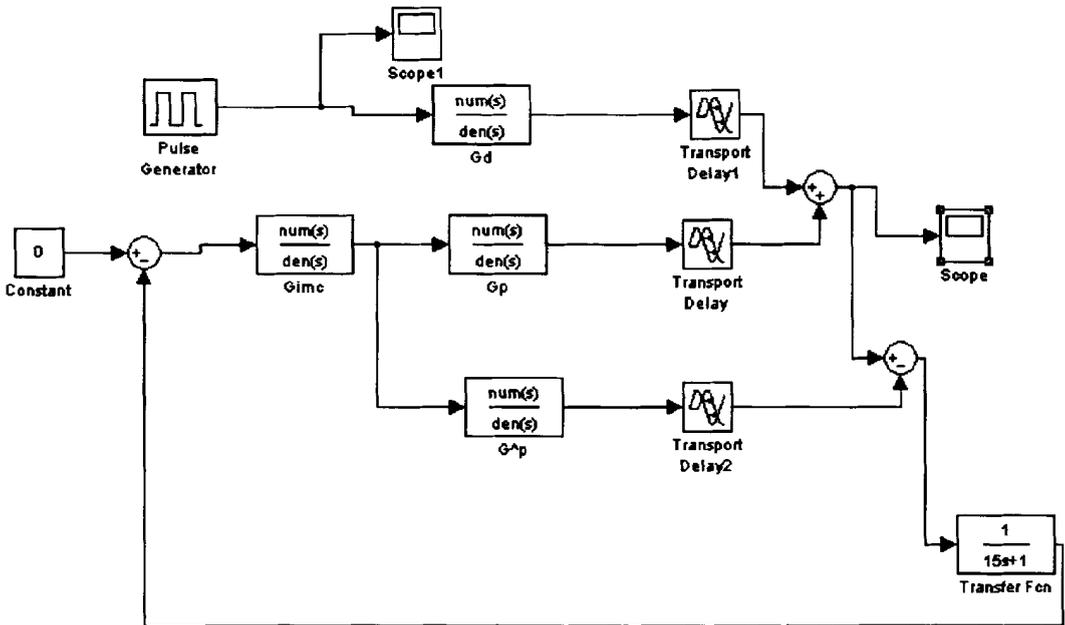


图 5.1 高炉顶压内模控制仿真模型

Fig. 5.1 The blast furnace top pressure internal model control simulation model

在 Matlab7.0/Simulink 软件中搭建的仿真模型，如图 5.1 所示。正常工况下，引起高炉顶压波动的主要因素，高炉炉顶压力的设定值一般不改变。因此，根据正常工况下 TRT 系统高炉顶压系统的特点设计如下仿真实验：设定值输入 $R(s)$ 取为零，系统干扰即高炉操作 $D(s)$ 持续两个周期。

下面分别在模型精确匹配和模型失配时进行仿真实验，通过改变内模控制器可调参数 α 和 β (α 为内模控制器可实现因子滤波器 $f(s)$ 的参数， β 为内模控制器反馈滤波器 $F(s)$ 的参数)，观察该参数对系统性能（动态响应性能、抗干扰性和鲁棒性）的影响，从而在比较和分析的基础上得到参数调整的规律。

5.2 仿真结果分析

5.2.1 模型精确匹配

固定参数 $\beta=10$ ，调节参数 α ，仿真结果如图 5.2 所示。图中，实线 α 为 5，虚线 α 为 10，点划线 α 为 20。从图 5.2 系统对上料扰动的响应曲线我们可以看到，随着 α 变大，系统对扰动的动态响应变慢，过渡时间变长，但同时超调量也减少了。固定参数 $\alpha=5$ ，调节参数 β ，仿真结果如图 5.3 所示。图中，实线 β 为 10，虚线 β 为 20，点划线 β 为 30。从图 5.3 系统对上料扰动的响应曲线我们可以看到，随着 β 变大，系统对扰动的动态响应变慢，过渡时间变长，超调量减少。

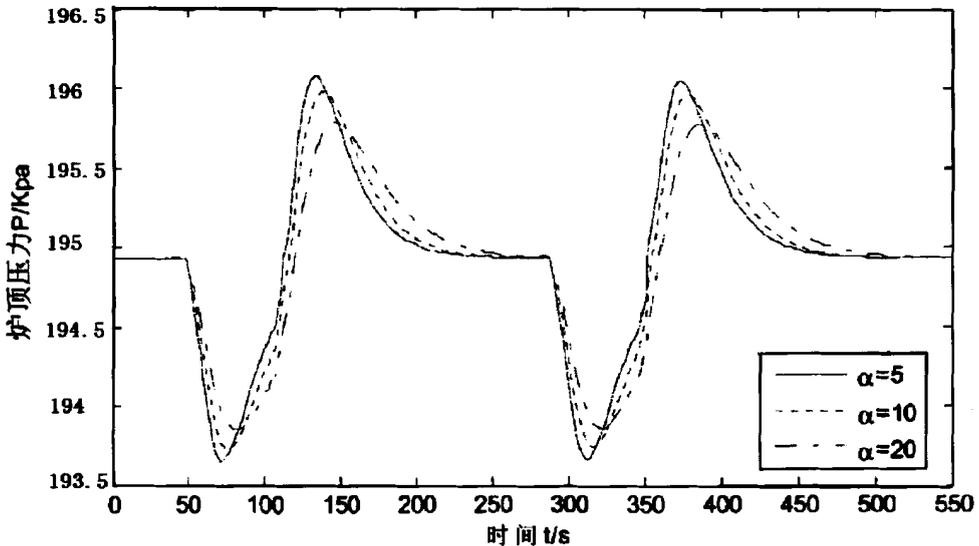


图 5.2 固定 β ， α 取不同值时系统响应曲线比较（模型匹配）

Fig. 5.2 β Fixed, α take different value system response curve more (model matching)

图 5.2 和图 5.3 及上述分析表明, 改变参数 α 和 β 对系统性能有类似的影响。实际上, 我们从图 5.1 高炉顶压控制系统框图和仿真实验的设计可以发现, 改变内模控制器参数 α 和 β 的效果是完全等价的。这是因为我们设计的仿真实验是在设定值输入为零的条件下进行的, 即图 5.1 中 $R(s)=0$, 则此时图中反馈滤波器 $F(s)$ 和内模控制器 $G_{IMC}(s)$ 的可实现因子滤波器 $f(s)$ 在控制系统结构框图中是完全等价的。我们将反馈滤波器 $F(s)$ 合并到内模控制器 $G_{IMC}(s)$ 中, 即取 $F'(s)=1$, 由式 (5.20) 和 (5.21) 得此时的 $f'(s)$ 取为

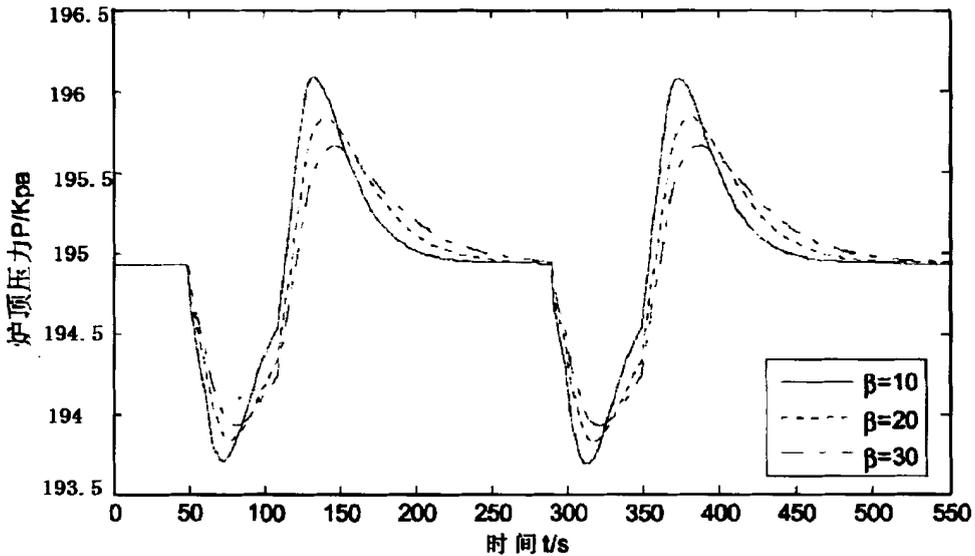


图 5.3 固定 α , β 取不同值时系统响应曲线比较 (模型匹配)

Fig. 5.3 α Fixed, β take different value system response curve more (model matching)

$$f'(s) = \frac{1}{(\alpha s + 1)(\beta s + 1)} \tag{5.1}$$

从而得到与式 (5.1) 和 (5.2) 所描述的完全等效的内模控制器, 该内模控制器的可实现因子为二阶滤波器结构。

内模控制器的可实现因子滤波器 $f(s)$ 与闭环系统性能有非常直接的关系。当滤波器 $f(s)$ 取不同结构或相同结构不同参数时, 闭环系统性能都会发生改变。当模型无误差和反馈滤波器 $F(s)$ 取 1 时, 通过调整可实现因子滤波器 $f(s)$ 的参数, 可使分别采用一阶和二阶滤波器结构的内模控制器达到相近似的控制效果, 仿真结果如图 5.4 所示。图中实线是可实现因子 $f'(s)$ 采用二阶滤波器结构

$$f'(s) = \frac{1}{(15s + 1)(5s + 1)} \tag{5.2}$$

虚线是可实现因子 $f(s)$ 采用一阶滤波器结构

$$f(s) = \frac{1}{15s+1} \tag{5.3}$$

从响应快速性、过渡时间、超调量等方面进行比较，图中两条系统对上料扰动的响应曲线基本相当。因此，从上面的分析我们发现在模型精确匹配时，采用一阶滤波器结构的 $f(s)$ 即采用一自由度的内模控制器，也可以达到满意的控制效果，此时该内模控制器只有一个可调参数，参数调整简单。

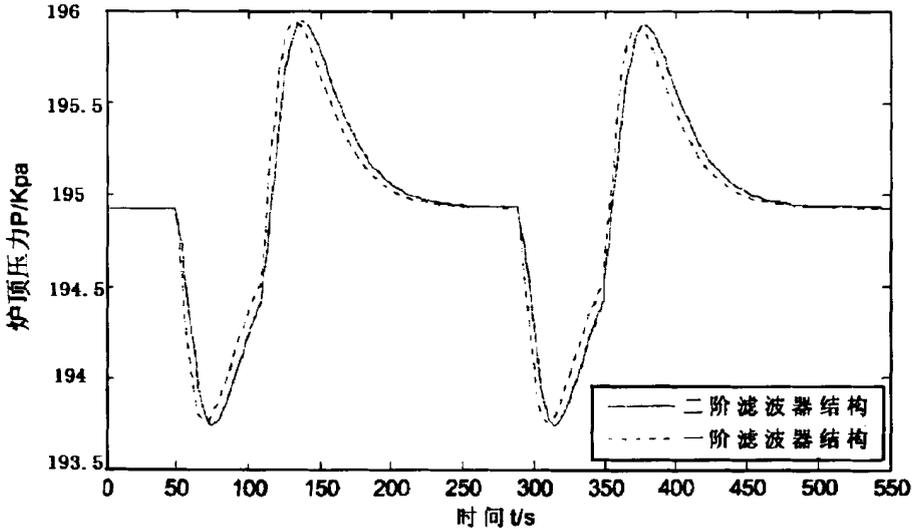


图 5.4 $f(s)$ 采用一阶和二阶滤波器时系统响应曲线比较 (模型匹配)

Fig. 5.4 The first and second order filter system response of $f(s)$ curve when compared (model matching)

5.2.2 模型失配

在上面的分析中，我们得到：在模型不存在误差时 ($\hat{G}_p(s) = G_p(s)$)，高炉顶压控制系统采用基本内模控制器即一自由度内模控制器，其中 $f(s) = \frac{1}{15s+1}$ 与采用二自由度

内模控制器，其中 $f(s) = \frac{1}{15s+1}$ ， $F(s) = \frac{1}{5s+1}$

实现的炉顶压力控制效果相当。然在实际过程中，模型总会存在误差的，下面我们将通过仿真比较这两个控制系统在模型失配时的鲁棒性。假设被控对象即实际高炉炉顶压力对象的时滞分别增大 40%和减少 40%而内模 $\hat{G}_p(s)$ 不变，内模控制器 $G_{DMC}(s)$ 不变，在这样的模型失配情况下进行仿真实验。其中，一自由度内模控制系统发散，系统不稳定；而二自由度内模控制系统没有发散，系统稳定，其响应曲线如图 5.5 所示。图中，实线为模型精确匹配时的系统响应曲线，虚线为对象时滞减少 40%模型失配情况下的系

统响应曲线，点划线为对象时滞增大 40%模型失配情况下的系统响应曲线。

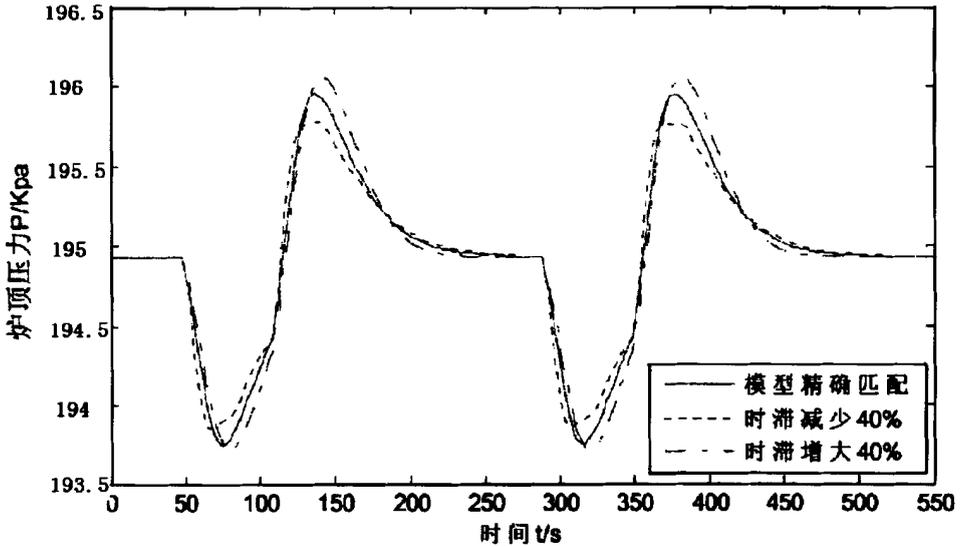


图 5.5 模型失配时二自由度内模控制系统响应曲线比较

Fig. 5.5 Model mismatch when two degrees internal model control system response curve more

二自由度内模控制系统结构是在一自由度内模控制系统结构的基础上引入反馈滤波器 $F(s)$ 。由于反馈滤波器的引入，使二自由度内模控制系统在模型失配时具有较强的鲁棒性，且仿真实验表明反馈滤波器 $F(s)$ 时间常数越大，系统鲁棒性越好。

5.3 本章小结

本章利用 Matlab7.0/Simulink 软件对高炉顶压内模控制进行仿真模型的搭建，通过对模型精确匹配和失配进行仿真，结果表明通过调整可调参数，高炉顶压内模控制系统具有较好的控制性能，能较好地抑制高炉工况干扰对炉顶压力的影响，在模型失配时具有较好的系统鲁棒性。高炉顶压内模控制方法简单、参数调整方便、易于工程应用，为正常工况下 TRT 系统高炉顶压的控制提供了一种性能优越的控制方法。

作为高炉附属设备，TRT 装置在整个运行过程中都必须确保高炉炉顶压力的稳定，因此设计合理的 TRT 装置自动控制系统对装置运行的安全性、可靠性和经济性至关重要。

第6章 总结与展望

6.1 研究工作总结

高炉炉顶煤气余压透平发电装置（简称 TRT 装置）是投资省、见效快、低投入、高产出的节能环保设备，具有很好的经济效益和社会效益，深得钢铁企业的欢迎。所以作为能量回收的 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必须保证高炉炉顶压力的稳定，从而不影响主流程工艺过程，即在 TRT 装置启动、运行、正常和紧急停机时都必须保证高炉炉顶压力波动在高炉工艺允许范围内。目前 TRT 装置大都依靠经验 PID 控制可调静叶开度来稳定高炉顶压。随着冶金高炉的大型化和现代炼铁技术的发展，对高炉顶压的稳定性要求越来越高，PID 控制难以达到预期的控制要求，需对高炉顶压控制进行理论研究。

正常运行工况下高炉顶压控制过程的研究是分析 TRT 装置整个运转过程中顶压稳定性问题的基础。因此，本文以首钢迁钢公司 1[#]高炉 TRT 装置为研究对象，围绕高炉炉顶压力的稳定性问题展开研究，研究工作主要包括正常工况下高炉顶压数学建模和高炉炉顶压力控制两部分。

结合正常工况下 TRT 装置的特点，考虑影响高炉顶压的主要因素，对高炉 TRT 系统进行合理的简化处理。将正常工况下高炉顶压的主要扰动引入模型，采用机理分析和基于工业现场实际运行数据的参数辨识相结合的方法建立了该工况下高炉顶压的动态数学模型。对所建立模型进行了验证与仿真研究，结果表明所建立模型基本上反映了正常工况下炉顶压力的实际运行状况，从而为进一步的高炉顶压控制研究打下了基础。

TRT 装置通过调节透平机静叶开度实现高炉炉顶压力的控制，而静叶开度的调节是由电液位置伺服控制系统来完成的，因此高炉顶压控制系统的设计包括内环即电液位置伺服系统的设计和外环即高炉炉顶压力的设计。针对电液位置伺服系统的非线性特性，内环采用状态反馈精确线性化最优控制策略，外环采用内模控制。从内模控制原理出发，基于所建立的正常工况下 TRT 装置高炉顶压动态数学模型，设计了正常工况下高炉顶压二自由度内模控制系统。内模控制器设计简单、控制性能优越，参数调整方便，通过调整参数可以调整系统的鲁棒性，易于工程应用，为正常工况下 TRT 系统高炉顶压的控制提供了一种新的方法。

最后介绍了作为高炉附属设备，TRT 装置在整个运行过程中都必须确保高炉炉顶压力的稳定，因此设计合理的 TRT 装置自动控制系统对装置运行的安全性、可靠性和经济性至关重要。

6.2 未来工作展望

目前我国 TRT 系统高炉炉顶压力的稳定性研究起步较晚,理论和实际应用中都还有许多问题需要进一步的深入研究。在实际工业现场,高炉 TRT 装置运行工况包括了启动(升速和升功率)、正常运行、正常停机和紧急停机,其中正常工况下高炉顶压建模及控制研究是分析其它工况下高炉顶压稳定性问题的基础。今后需要进一步研究的工作有:

1. 运用在首钢迁钢公司 1[#]TRT 装置长时间工作的经验,以正常工况下高炉顶压的建模及控制为基础,理论联系实际研究 TRT 装置其它工况下的高炉顶压稳定性问题;
2. 进一步研究内模控制器可调参数自整定方法,通过在线调整控制器参数,来改善闭环系统性能;为了提高 TRT 系统高炉顶压的控制精度,在前述内模控制器的基础上引入对高炉运行期间的各种主要扰动的前馈补偿环节,即研究高炉顶压前馈内模控制方法;
3. 深入学习其它先进的控制方法,对 TRT 系统运行阶段存在的各种问题提出相应的研究方案,解决 TRT 系统缺陷确保正常、高效、稳定运行。
4. 结合运行工作经验,对研究出的高炉炉顶压力内模控制方法根据实际生产运行情况进一步完善。

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,(3): 16-19.
3. Takahashi, Masaoki. Process and System for Recovering Top Gas from Blast Furnace or the Like [J], 2006, 30, 19-21.
4. 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.
5. 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: 浙江大学博士学位论文, 2003.
6. 俞俊权. 高炉顶压回收透平发电装置现状和发展前景[J], 冶金能源, 1996, (3): 31-33.
7. Garcia CE, Morari M. Internal Model Control, A Unifying Review and Some New Results [J], Ind. Eng. Chem. Pro. Des. Dev, 1990, 21(2): 308-323.
8. Morari M, Zafriou E. Robust process control [M], New Jersey: Prentice-Hall, 2007, 10(2): 213-221.
9. Economou C G. Internal model control-5, Extension to nonlinear systems [J], Ind. Eng. Chem. Proc. 2006, 25:403-411.
10. Hunt K J, Sburbu D. Neural networks for nonlinear internal model control [J], IEE Proc-D, 1991, 13(8), 431-438.
11. 周涌, 陈庆伟, 胡维礼. 内模控制研究的新发展[J], 控制理论与应用, 2004, 11(3): 475-482.
12. 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.
13. 高伟, 王琦, 王萍. CS3000 控制系统在包钢燃气厂 1 号 TRT 的应用[J], 包钢科技, 2006, 32(3): 23-25.
14. 韦金珍, 林锋. 宝钢 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.
15. 柳黎光. 高炉 TRT 顶压调节稳定技术研究与实践[J], 冶金自动化, 2007, (9): 86-89.
16. 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, 2005, (8): 13-15.
17. 张红庆, 刘甄, 赵家元等. 武钢 2 号高炉 TRT 自动控制系统[J], 冶金自动化, 2001,

- (4): 42-46.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 王贵良, 叶理德. 宣钢 TRT 控制系统的设计[J], 钢铁, 2001, 20(2): 49-50.
23. 李付民. CENTUM-CS1000 集散控制系统在邯钢 1[#]TRT 工程中的应用[J], 自动化信息, 2006, (6): 57-59.
24. 周万珍, 高鸿斌. PLC 分析与设计应用[M], 北京: 电子工业出版社, 2004, 33-55.
25. Andy M Smith, Martin Davis. The DCS as enabling platform [J], Measurement and control, 2007(2): 54-55.
26. 王贵良. TRT 工程全自动启机和全自动停机控制[J], 冶金自动化, 2002, (1): 22-25.
27. 浙江大学化工自动化教研组等. 调节器的工程整定和校验[J], 北京: 石油化学工业出版社, 2008, (8): 43-44.
28. 伍沉. 化工过程动态[M], 北京: 化学工业出版社, 1998, 55-60.
29. 方崇智, 萧德云. 过程辨识[M], 北京: 清华大学出版社, 2003, 38-45.
30. 周春晖. 化工过程控制原理[M], 北京: 化学工业出版社, 1998, 66-88.
31. 王树青. 汽轮机过程控制工程[J], 北京: 化学工业出版社, 2003, 6(5): 88-91.
32. 潘立登, 潘仰东. 系统辨识与建模[J], 北京: 化学工业出版社, 2004, 8(5): 45-52.
33. 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], 浙江大学学报江学版, 2009, 40(9): 1536-1539.
34. 蔡为民. TRT 系统的应用[J], 冶金动力, 2008, 8(5): 4-6.
35. 由文泉. 实用高炉炼铁技术[J], 北京: 冶金工业出版社, 2002, 3(6): 6-10.
36. 成伯兰. 高炉炼铁工艺及计算[J], 北京: 冶金工业出版社, 1991, 5(3): 66-88.
37. 那树人. 炼铁工艺计算[M], 北京: 冶金工业出版社, 1999, 212-231.
38. Zafiriou E, Morari M. Internal Model Control, Robust Digital Controller Synthesis for Multivariable open-Loop Stable or Unstable processes [J]. Control, 1991, 54(3): 665-704.
39. 陈庆伟, 胡维礼. 高炉内模控制研究的新发展[J], 控制理论与应用, 2005, 21(3):

- 475-486.
40. 舒迪前. 预测控制系统及其应用[M], 北京: 机械工业出版社, 1996, 39-55.
 41. Wen Tan, Horacio J. Marquez, Tongwen Chen. IMC Design for Unstable Processes with Time Delays [J], Journal of Process Control, 2009, (13): 203-213.
 42. Aniruddha Datta, James Oehoa. Adaptive Internal Model Control: Design and Stability Analysis [J], Automatica(S0005-1098), 2009, 32(2): 261-266.
 43. Ian GH, Jeffer YRA, Christopher JG. Improve Filter Design in Internal Model Control [J], Industrial Engineering Chemistry Research, 2008, 35(10): 3437-3441.
 44. 陈娟, 潘立登, 曹柳林. 时滞系统的滤波器时间常数自调整内模控制[J], 系统仿真学报, 2006, 18(6): 1630-1633.
 45. 赵耀. 内模控制发展综述[J], 信息与控制, 2007, 29(6): 526-531.
 46. 陈婷. 二自由度内模控制结构中二阶反馈滤波器的研究[D], 成都: 四川大学硕士学位论文, 2005.

致 谢

在本工硕论文即将完成之际，我要向所有帮助、支持过我的老师、领导、同学、亲人和朋友表示衷心的感谢。感谢他们对我真诚的鼓励和帮助，感谢他们对我无微不至的关怀，正因为如此我的课题才能够顺利完成。

我非常感激导师钱晓龙教授，在课题进行期间，钱老师给予了我悉心的指导，他严谨求实、精益求精的科研态度给我留下了深刻的印象。他特别注重工作中思路的开发，方法的选择，为我提供了良好的学术环境和融洽的研究氛围。在整个研究工作中，钱老师以高深的理论造诣、丰富的实践经验和科学研究方面的精辟见解不断给我启迪。本文在修改直至最后定稿的过程中，钱老师都提出了十分详细的修改意见。本论文凝聚着钱老师大量的心血和无私的劳动。在此谨向钱老师表达我深深的敬意和感激。

在攻读东北大学控制工程研究生期间，感谢东北大学的各位老师不远万里到首钢迁钢公司为我们传授知识。同时也要感谢公司的领导为我们提供了这次读研的机会。等我学成之后，一定要用所学的知识回报迁钢、回报社会。

最后还要感谢论文评阅的老师，以及答辩委员会的全体委员，感谢你们的辛苦工作。