

分类号_____ 密级 _____

UDC _____

学 位 论 文

TRT 最佳启动过程研究

作 者 姓 名：柴春青

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

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 Best Starting up Process of TRT

By Chai Chunqing

**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谢意。

学位论文作者签名：柴春青

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：柴春青 导师签名：姚光龙

签字日期：2011.6.24 签字日期：2011.6.24

TRT 最佳启动过程研究

摘 要

高炉炉顶煤气余压回收透平发电装置（TRT）是目前国际钢铁企业公认的二次能源回收装置。该装置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，但必须确保高炉炉顶压力的稳定。透平发电装置的平稳启动是保证炉高炉炉顶压力稳定的首要条件。

本文以首钢迁钢 3#高炉透平发电装置为研究对象，提出了透平转子在启动过程中必须快速通过临界共振区，以避免过大机械振动对机组造成长时间的危害；同时也要求透平升速平稳，避免对高炉炉顶压力造成较大的干扰。这就要求控制系统既要保证透平升速的快速性也要保证透平升速的平稳性。由于 PID 控制存在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透平发电装置启动控制技术的要求。因此在一组 PID 控制器参数的基础上增加一组 PID 控制器参数进行交替控制，在不同启动过程由不同参数的 PID 控制器分段控制，保持了 PID 控制器的结构简单、适应性强和整定方便的优点。

最后，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，并与单纯一组 PID 控制器作用效果进行比较。结果表明，在启动过程中，在保证快速通过临界共振区的同时，又能实现升速平稳的工艺要求，达到较好的控制效果。

关键词：透平发电装置；临界共振；PID 控制器；分段控制

Research on the Best Starting up Process of TRT

Abstract

Top Gas Pressure Recovery Turbine Unit is internationally recongnized as a valuable energy unit. Although the energy of pressure wasted in the Pressure Reducing Valve Group or Bischoff Precipitator can be recovered by TRT, however, the stability of the top gas pressure of the blast furnace must be ensured. TRT start-up steadily is the first condition to keep top gas pressure of the blast furnace stability.

This thesis takes the 3rd TRT in ShouGangQianGang as the research object. Advance the turbine rotor in the start-up process must be fast through the critical resonance area, to avoid long time of harm caused by exaggerate mechanical vibration; Also requires TRT start steadily; to avoid causing top gas pressure of the blast furnace disturbance. This requires control system to ensure that both the quickness of TRT start and ensure that the TRT start stability. So this algorithm is difficult to besatisfied with require of TRT Unit starting control. This thesis designs two PID controllers working by turns to adapt to different starting rev process. This control mode has the virtue of good adaptability, simple framework and convenient setting. Cause the PID control overshoot and quickening the existing between irreconcilable conflict, make the algorithm in a certain degree of TRT generating unit is difficult to meet the requirements of the startup control technology.

Finally, the simulation analyses the two PID controllers working by turns for tracking performance, and compares with a certain PID control, The results show that the design of double PID controller working by turns to adapt to different starting rev process can fast transit the critical sympathetic vibration rev area, and has a reposeful rev raising. This control mode achieves better control effect.

Keywords: Top Gas Pressure Recovery Turbine Unit; Critical resonance; PID controll; Subdivision control

目 录

独创性声明 I

摘 要 II

Abstract III

第 1 章 绪 论 1

1.1 TRT 的发展 2

1.1.1 TRT 技术发展现状 2

1.1.2 TRT 装置的特点及优越性 3

1.2 TRT 启动控制的研究意义 4

1.3 TRT 启动控制的发展概况 4

1.4 本文的主要工作 7

第 2 章 TRT 的工艺和控制系统 9

2.1 TRT 控制的指标 9

2.2 TRT 的基本工艺流程 9

2.2.1 采用并联布置的工艺 9

2.2.2 TRT 停机系统控制 12

2.2.3 TRT 辅助系统控制 14

2.3 启动控制过程 17

2.4 启动的控制难点 19

2.5 本章小结 20

第 3 章 TRT 启动控制数学建模 21

3.1 电液位置伺服系统 21

3.2 TRT 启动系统数学模型的建立 23

3.2.1 模块化建模 23

3.2.2 启动系统建模 24

3.3 本章小结 28

第 4 章 启动控制系统的设计 29

4.1 启动单回路 PID 控制 29

4.2 控制系统的构成 30

4.2.1 Symphony 系统概况 30

4.2.2 系统的技术特点 32

4.2.3 系统的硬件构成 35

4.2.4 系统的软件构成 37

4.2.5 现场调试 38

4.3 PID 控制在启动过程中的应用 39

4.3.1 PID 控制的应用 40

4.3.2 PID 调节规律 41

4.3.3 启动控制 PID 的参数整定方法 43

4.4 控制功能的实现 44

4.5 本章小结 45

第 5 章 TRT 启动系统仿真及结果分析47

5.1 搭建仿真模型 47

5.2 仿真结果分析 48

5.3 本章小结 51

第 6 章 总结与展望53

参考文献55

致 谢59

第1章 绪论

随着我国经济的不断发展,钢铁行业发展迅猛,作为能耗大户,2005 年钢铁行业耗能 3.6 亿吨标煤,占全国总能耗 2233 亿吨标煤的 16.11%。《钢铁行业政策》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。

我国钢铁工业节能降耗的主要方向有:

1. 降低有关工序的钢比系数,减少为出口而生产的生铁、铁合金及焦炭的产量,保护我国资源,保护环境,节约能源。
2. 降低各工序的工序能耗。
3. 降低吨钢“其它”能耗。其中,我国钢铁工业中“其它”方面的能耗太高,其值在 250 千克标煤/吨钢以上。其主要原因在于钢铁工业内部能源亏损和有关气体放散严重,厂内运输、燃气加工、机修、二次能源利用和辅助原材料生产等方面的能源消耗过高^[2]。

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^[3]。

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。

1.1 TRT 的发展

1.1.1 TRT 技术发展现状

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。

1962 年苏联最早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。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^[4-6]。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 (8000KW) 之后,加以改进和发展,称为川崎-索费来尔法。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%^[7]。

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,已达到国际先进水平,部分技术还为世界首创,这极大地促进了该技术在国内外推广。截至 2006 年底,我国安装了 TRT 装置的高炉占重点钢铁企业高炉座数 31%。据 2007 年资料显示,中国 1000m³ 以上的高炉约 80 座,有 58 座已建或在建 TRT,普及率已达 72.5%。其中大型高炉安装 TRT 装置的比较高,然而,大部分中小高炉没有安装 TRT 装置。可见我国在节能挖潜的余地还很大^[8]。

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 CO_2 。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 2650m^3 和一台 4000m^3 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。

1.1.2 TRT 装置的特点及优越性

人们越来越重视对高炉煤气余压余热的充分利用, 以回收电能来降低冶炼成本。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^[9-11]:

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 $3\sim 5\text{KPa}$,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 万 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 TRT 启动控制的研究意义

TRT 启动过程中,如控制系统出现滞后或其他干扰导致不能快速跨越共振临界区,长时间停留在临界共振区及其附近,透平转子本身将出现很大变形并作弓状回旋,引起支撑及整个机械的剧烈振,甚至造成轴承和透平转子的破坏。为保证系统正常工作或避免系统因振动而损坏,转动系统的转子工作转速应尽可能避开临界转速,若无法避开,则应采取特殊防振措施^[12]。另外启动时间的增加,相应缩短了机组运行时间,对企业效益产生一定影响。TRT 平稳的启动对高炉炉顶压力干扰小,避免对机组设备造成冲击增加机组寿命,还可以缩短启动时间,对企业产生较好的效益。

1.3 TRT 启动控制的发展概况

TRT 运行过程中静叶积灰等因素会使其特性变坏,使静叶启动出现问题,另外虽然国产部分透平机静叶全关时煤气的漏量较小能够基本满足启动升速的要求,

但还只是部分而不是 100%，而且 TRT 投运之前是无法确定的，因此现阶段还有必须保留带有启动阀的工艺设计，目前国内启动控制方式可分为以下三种方式^[13]：

第一，入口电动蝶阀与一级静叶联合控制开车启动，TRT 开车启动条件满足时，将静叶全关，用手动（点动）开启入口电动蝶阀，根据转速逐渐开大，再配合静叶迅速冲过临界共振区。此种方法在首钢迁钢 1#高炉 TRT 还在采用，1#高炉采用湿法洗汽，高炉煤气经过湿法洗汽后压降和温降都很大，相对于 2#、3#高炉煤气参数较低，采用此种控制方式基本可以按计划升速曲线进行。但迁钢 2#高炉采用干法除尘，2#高炉 TRT 在投产试车，静叶全关时，全开入口电动蝶阀，转速已升到 3000r/min，在开车启动过程中用入口电动蝶阀不容易控制转速。根据实践经验，高炉煤气参数高时不适合采用此种控制方式。

第二，在透平机入口煤气管道上设置调速阀，也是运转和调节高炉顶压的执行结构如武钢、重钢、酒缸、包钢等 TRT 都是这种模式，见图 1.1。随着技术进步，一级静叶可调、全静叶可调，应用在透平机上，静叶片转动灵活、调节范围宽，转动角为 $\pm 30^{\circ}$ 。因此，设计点不一定在最大负荷上，用静叶调节比用调速阀调节功率下降少，透平机效率高，这样调速阀的作用只做为透平机开车启动使用。首钢京唐公司引进日本透平机组仍采用此种方式进行开车启动。这种控制方式因在主管道上加装调速阀，机构复杂，投资大。

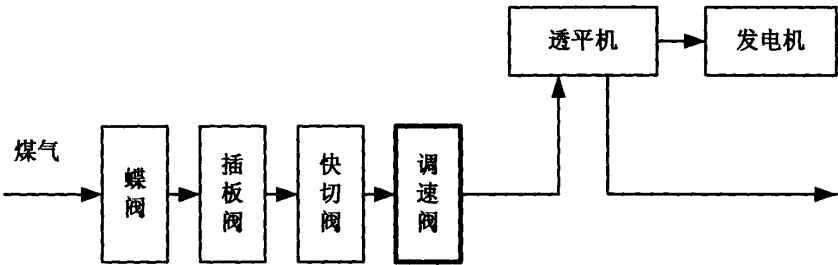


图 1.1 早期 TRT 煤气入口管阀门布置图
Fig.1.1 Early TRT gas pipe valves entrance floor plan

第三，在快切阀前后连接直径较小的旁通管，在旁通管上设电动自动（手动）调节阀，由微机进行控制。因只在开车启动时使用，也称启动阀，如武钢 2#高炉、昆钢、太钢 2#高炉等。TRT 开车启动时，用启动阀调控转数，逐渐升至 3000r/min，完成升速后打开快切阀，由一级静叶调控升功率和复合调节，同时关闭启动阀。

其工艺配置的优点是：

1. 取消了调速阀从而减少了投资。全静叶控制炉顶压力使 TRT 效率最佳，提

高了发电量。

2. 既可以用静叶启动也可以用启动阀启动。

3. 由于启动阀的口径远小于调速阀,用它来控制 TRT 转速比用调速阀控制 TRT 转速的控制品质要高,使发电机并网操作容易。

其不足之处在于:

1. 启动阀与快切阀并接,在用启动阀启动透平时,启动阀除了升速功能以外还充当快切阀的角色,必须具有快关功能。启动阀无论是从电气控制还是从液压原理上讲都不如快切阀的可靠性高。

2. 透平所带的危机保安器只与快切阀相关联,与启动阀无关。启动过程中如危机保安器动作必须设法将其转换为电信号去控制系统停机。用启动阀启动时,透平静叶处在一个预先设定好的角度。要使并网后快切阀能顺利打开,必须使快切阀前后差压在一定范围之内。当工况变化时快切阀前后差压也不一样,严重时会使快切阀打不开。

3. 前馈系统如果用流量信号来启动,虽然能够满足控制要求,但是当工艺参数发生变化时如煤气温度的变化和透平前后压力变化时要对流量信号进行修正,所以前馈控制信号涉及的参数较多,任一参数出现问题就会导致前馈系统不准甚至失灵。

现在首钢迁钢 3#高炉 TRT 采用启动阀与入口电动蝶阀并联,在启动过程中如出现超速等故障,这时的紧急停机只需控制快切阀全关就可以了,避免了因启动阀故障造成透平飞车的隐患。

如果能够取消启动阀,相应的液压控制也取消了,还可以进一步降低投资和简化控制,进一步向国际先进水平迈进,相信随着国产 TRT 技术的进步,取消启动阀也是必然的。

我国 TRT 自动启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钢铁厂也仍然存在许多问题。同其他发达国家相比存在很大差距,且也存在明显的地区差别。从总体上看,TRT 自动启动控制还需要很大的提高。

综合来看,我国 TRT 自动启动自动控制系统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 装置开始采用计算机集散式控制系统,但在大量的现有和改造的 TRT 装置中启动控制系统仍然延续着人工方式;

2. 开始大量采用可靠性高、维护简便的各种电液伺服阀和调节阀,为进一步

提 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设备，在使用和维护方面仍存在许多问题。

3. 随着高炉炉容不断扩大，其产生的煤气参数也越来越高，对 TRT 装置硬件和控制系统提出了更高的要求。

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，特别是国内一些复杂高效新工艺的出现，对相应的自动控制设备提出了更高的要求。

1.4 本文的主要工作

本论文是为了满足中大型高炉 TRT 启动控制的生产要求，以首钢迁钢三高炉 TRT 项目为背景，对启动中的重点进行研究，希望在 TRT 启动控制方面提供理论依据，使生产工艺进一步优化。本文的主要工作大致分为三部分：一部分对 TRT 启动控制进行学习和分析；一部分分析研究启动控制系统的控制难点和常规控制手段的优缺点；最后为解决 TRT 启动控制过程超调量问题，在启动过程中不同阶段由不同参数的 PID 控制器分段控制。具体而言，本论文的工作包括：

1. 主要介绍节能降耗的严峻形势和 TRT 系统发展现状，TRT 启动控制的研究意义和研究现状。

2. 介绍了 TRT 工艺流程，重点介绍 TRT 启动控制系统，以首钢迁钢 3#TRT 为例分析了 TRT 启动控制过程。最后分析了透平启动转速系统控制上的难点，提出控制要求。

3. TRT 透平启动控制数学建模。

4. 在单控制器的基础上，设计适合 TRT 启动，由不同参数的 PID 控制器分段控制的方法。

5. 在 MATLAB/Simulink 环境下的搭建仿真模型，进行仿真测试、调节与验证，并对仿真结果进行分析。

6. 对本课题进行总结与展望，指出下一步的研究方向。

第 2 章 TRT 的工艺和控制系统

2.1 TRT 控制的指标

高炉顶压是高炉生产中的一个重要因数,虽然 TRT 装置具有低投入、高回报、一次性长期得益的突出优点,但是在利用 TRT 装置进行发电的同时,必须保证高炉冶炼工艺的要求,其中最重要的是确保高炉炉顶压力的稳定性。高炉炉顶压力的稳定性不仅影响冶炼产品的质量,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,会使炉内煤气气流分布不均,引起塌料,严重时损坏设备。当炉内压力低于额定值时,会引起炉内煤气体积增大,气流压力损失增大,煤气流速上升,使炉喉磨损严重,更有甚者,会引起炉顶设备损坏。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性的问题是 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也要求越来越高。

2.2 TRT 的基本工艺流程

2.2.1 采用并联布置的工艺

高炉炉顶煤气余压回收透平发电装置 (Top Gas Pressure Recovery Turbine Unit) 简称 TRT。TRT 的工作原理^[14-15]是通过将高炉炉顶煤气导入一台透平膨胀机 (煤气透平) 做功,使高炉煤气的压力能及热能转化为机械能,再驱动发电机发电。这种发电方式既不改变原高炉煤气的品质,也不影响煤气用户的正常使用,却回收了被减压阀组白白释放的能量,同时有效地控制了炉顶的压力波动,从而改善了高炉的操作条件。该装置在运行过程中不产生污染,不消耗任何燃料,发电成本低,同时又净化了煤气,降低了噪音,是高炉冶炼工序的重大节能项目,经济效益和社会效益十分显著。

首钢迁钢三高炉 TRT 控制系统并联工艺流程如图 2.1 所示,高炉炉顶出口的煤气经过清洗除尘设备处理后,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。从 TRT 和减压阀组出来的低压煤气再送到高炉煤气柜和用户。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。

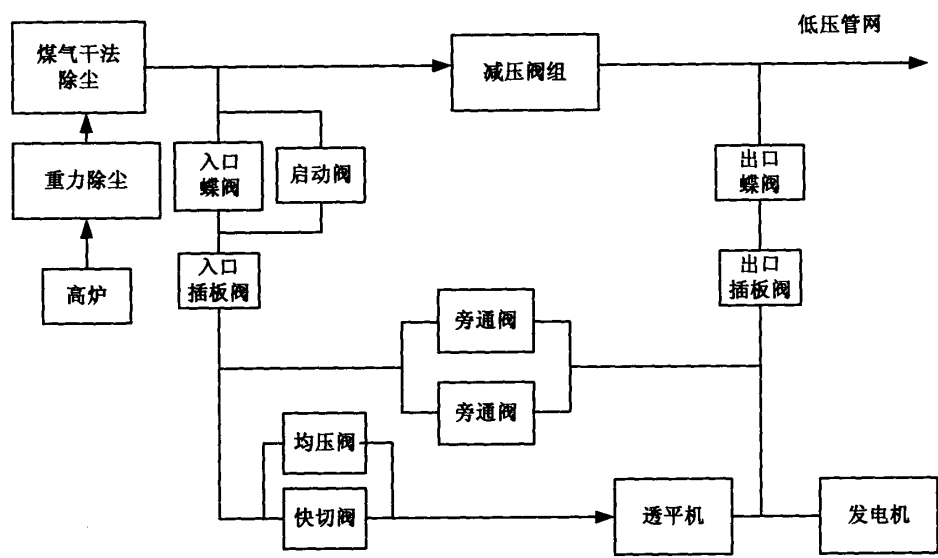


图 2.1 TRT 并联系统工艺流程图
Fig.2.1 TRT multiple system process

1. 正常工况下高炉炉顶压力控制

在 TRT 完成升功率过程之后，开始通过透平机静叶控制高炉炉顶压力，进入发电正式生产阶段。正常工况下，为了使 TRT 尽可能实现全额发电，高炉煤气应主要通过 TRT 通路，所以高炉炉顶压力主要采用调节 TRT 系统透平机可调静叶开度来控制，同时为了保证高炉生产稳定，在极端情况下要通过旁通副阀组进行辅助调节。

通常的 TRT 控制系统，将高炉炉顶压力控制设计为 PID 反馈控制，其方块图如图 2.2 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。

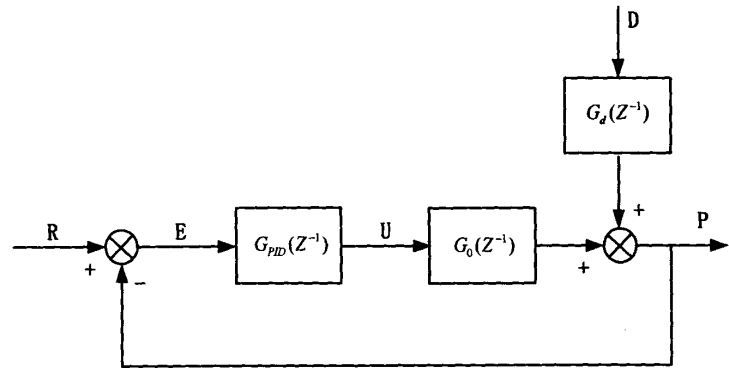


图 2.2 正常工况下高炉炉顶压力控制方块图

Fig.2.2 Under normal working conditions of blast furnace roof and pressure control block diagram

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. 紧急停机情况下高炉炉顶压力控制

当 TRT 紧急故障停机时,高炉煤气的 TRT 通路会因为快速切断阀和可调静叶突然关闭而阻断,如果不能快速将煤气通路建立,就会造成高炉炉顶压力快速升高,形成“憋压”。因此紧急停机情况下的高炉炉顶压力控制就是要解决从 TRT 通路快速切换到旁通阀组通路,既不能造成高炉炉顶“憋压”,也不能因为旁通通路打开太大,使顶压下降太低,影响顶压稳定。引入前馈补偿控制模型,将静叶突然关闭时通过透平机的煤气通量全部转换到旁通通路,旁通阀组应该打开相应的开度,之后旁通阀组采用与正常工况下由透平静叶控制高炉炉顶压力相同前馈一反馈控制模型保证顶压稳定。

2.2.2 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,采用前馈一反馈控制,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大 ε ,当被控对象高炉炉顶压力等于设定值 SV 时,控制对象旁通阀组的控制器偏差为“0”,输出不变,而控制对象可调静叶的控制器存在测量值小于设

定值的偏差 ε ，输出变化，关小可调静叶；而当被控对象高炉炉顶压力等于设定值 $SV + \varepsilon$ 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“ $-\varepsilon$ ”，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. 重故障停机

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

(1) TRT 紧急停机的条件

(a) 透平轴振动任一点大于连锁设定值 80 微米报警，120 微米时停机（4 点）。

(b) 透平轴位移任一点大于连锁设定值（2 点）。其中工作面大于 0.3mm 报警，0.5mm 停机；负推力面大于 0.3mm+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连锁设定值。变送器信号或电接点信号之一低于 0.1MPa 时报警，低于 0.06MPa 时停机。

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

(e) 机组轴承温度大于连锁设定值（12 点）。其中透平机轴承温度 8 个点高于 90℃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) 重故障状态下旁通阀组控制高炉炉顶压力

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

2.2.3 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℃。油箱液位低时报警。

(2) 润滑油加热器控制

当润滑油箱温度低于 21℃时自动开启，高于 25℃时自动关停。

(3) 排雾电机控制

手动、自动间歇两种控制方式。

操作条件：润滑油最远点压力正常，排雾电机被选择。

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

(5) 盘车电机控制

手动操作。显示返回信号。操作条件：盘车选择。

(6) TRT 停机复位

当高炉侧停机时，停机连锁条件解除后 TRT 侧通过按钮操作发出复位信号。

（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。

2.3 启动控制过程

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。

首钢迁钢三高炉 TRT 机组为柔性轴，存在临界转速，所以升速控制要求平稳升速，快速越过临界，稳定并列。为了操作方便和需要，本升速控制设计了三种操作控制方式：手动操作控制、手动、自动结合操作控制和全自动操作控制。

1. 纯手动控制

- （1）将计算机上，升速控制选择“转速手动控制”方式。
- （2）现场投入盘车。
- （3）在计算机上将“检修”切换成“运行”，将“TRT 停机复位”复位。
- （4）先打开均压阀，然后打开快切阀，最后关闭均压阀。

(5) 静叶打开 7%，开启动阀控制转速至 500r/min。

(6) 机组转速超过 13r/min 时，盘车装置齿轮自动脱开，检查盘车电机应自动停止。

(7) 机组转速 500r/min 时稳定运行 20 分钟，进行检查。透平机及发电机内部声音；透平轴位移；轴承温度；轴承振动；轴承回油温度；透平进口压力、温度、流量；冷却水系统、润滑油系统、动力油系统；发电机各参数是否正常。

(8) 逐步升速至 1200-1300r/min，稳定转速检查各参数正常。

(9) 以每分钟 100rpm 的速率逐步升速至 2500r/min，稳定运行 10 分钟。

(10) 检查无问题后，逐步升速至 2700r/min、2800r/min、2900r/min、2950r/min，无问题，投入励磁。

(11) 稳定转速在 3000r/min，检查无问题符合并列条件，采用自动准同期方式并列。

2. 半自动控制

(1) 将计算机上，升速控制选择“转速半自动控制”方式。操作人员通过修改转速设定值，经 PID 调节启动阀和静叶开度，达到改变，稳定机组转速要求。

(2) 在计算机上，手动输出转速设定值为 500r/min，此时启动阀根据组态设定，自动调节，控制机组转速达到稳定在 500r/min。密切注意机组转速变化及机前压力、高炉顶压的变化。

(3) 机组转速超过 13r/min 时，盘车装置齿轮自动脱开，检查盘车电机应自动停止。

(4) 机组启动后，注意检查轴封煤气泄漏情况，测量机旁及现场煤气浓度。

(5) 机组转速 500r/min 时稳定运行 20 分钟，进行检查。透平机及发电机内部声音；透平轴位移；轴承温度；轴承振动；轴承回油温度；透平进口压力、温度、流量；冷却水系统、润滑油系统、动力油系统；发电机各参数是否正常。

(6) 各部检查无问题，在计算机上逐步提高输出转速设定值以计算机设定的速率升速，将机组转速稳定升到 1200-1300r/min，此时启动阀根据组态设定，自动调节、控制机组转速达到稳定在 1200-1300r/min。密切注意机组转速变化及机前压力、高炉顶压的变化。

(7) 机组转速升到 1200-1300r/min，稳定运行 20 分钟，进行检查，项目同 500r/min。

(8) 确认机前压力、温度，冷却水系统、润滑油系统、动力油系统；透平机、

发电机各参数是否正常。

(9) 在计算机上, 手动输出转速设定值为 2300r/min, 此时启动阀根据组态设定, 自动调节、控制机组转速, 稳定在 2300r/min。密切注意机组转速变化及机前压力、高炉顶压的变化, 当机组转速升至 2300r/min, 进行检查。

(10) 机组转速在 2300r/min, 稳定运行 20 分钟, 检查无问题后, 在计算机上, 分别手动输出转速设定值 2700r/min、2800r/min、2900r/min、2950r/min, 检查无问题, 投入励磁。

(11) 在计算机上, 手动输出转速设定值为 3000r/min, 此时启动阀根据组态设定, 自动调节、控制机组达到稳定在 3000r/min。检查无问题后负荷并列条件, 采用自动准同期并列。

3. 全自动控制

(1) 在计算机上, 将升速控制设定为“全自动控制”方式。

(2) 此时机组按照组态设定的升速曲线, 自动修改转速设定值, 经 PID 调节 TRT 的静叶和启动阀开度, 分四阶段自动调节。

(3) 第一阶段为启动升速段 (500r/min), 按计算机程序设定稳定升速至给定值。

(4) 第二个阶段为检查等待阶段 (1200r/min), 升速至程序给定值后等待值班人员检查确认 (检查项目同半自动控制), 各部正常后, 在计算机上按下“自动升速确认”操作按钮后, 进入第三个阶段。

(5) 第三个阶段转速达到 2300r/min。机组转速以一定周期、一定的斜率逐步升速。稳定在程序的给定值, 进入第四阶段。

(6) 第四阶段为定转速调节并列阶段。这个阶段根据程序设定的转速周期、斜率执行。当转速升至 2850r/min 后, 投入励磁, 机组转速继续按照程序执行, 将转速稳定在 2990-3010r/min 范围内, 检查无问题后符合并列条件, 采用自动准同期方式并列。

在以上三种操作控制方式, 重点是调速要求平稳, 防止过度超调, 难点是快速跨越临界共振区, 采用手动控制方式中, 只有少数经验丰富的职工一次成功率达到 80%以上。

2.4 启动的控制难点

TRT 启动系统控制效果的好坏关系到高炉正常生产和 TRT 顺利并列, 是控制的关键所在。但是 TRT 启动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. 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。

2. 启动阀开度与迅速跨越临界共振区所需煤气流量最佳关系。为了对 TRT 迅速跨越临界共振区进行精确的控制，需要对 TRT 煤气入口煤气流量的动态平衡有充分的认识。其包含两个过程：一是高炉正常生产时煤气流量。在 TRT 装置没有启动前，高炉炉顶压力通过减压阀组进行调节控制，高炉冶炼过程所产生的高炉煤气全部通过减压阀组进入到下一道工序。二是在 TRT 装置启动时，需要调整启动阀开度对高炉所产生的煤气进行一部分分流来控制透平转速，此时高炉炉顶压力仍有减压阀组控制。在 TRT 装置实际启动中，要达到既保证启动过程平稳，又确保高炉顶压平稳，操作起来十分困难。

3. 转速时滞时间较长，系统平衡难以在短时间内达到；转速在实际控制中惯性很大，如果跨越临界共振区控制过程中超调量过大，很容易造成透平超速。

4. 设备的局限。目前受煤气介质和成本问题，大多启动阀采用蝶阀，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。

2.5 本章小结

本章首先简要介绍了高炉 TRT 的基本工艺流程，重点介绍了 TRT 启动过程。目前国内主要采用快切阀后加调节阀、启动阀与快切阀并联和启动阀与入口蝶阀并联的三种启动方式。并对首钢迁钢 3#TRT 系统结构及其停机系统和辅助系统进行了简单介绍。目前，首钢迁钢 3#TRT 采用与入口蝶阀并列的启动阀来进行开机操作，在启动过程中存在升速快速与超调量的矛盾。

第 3 章 TRT 启动控制数学建模

3.1 电液位置伺服系统

TRT 装置采用调节透平机启动阀开度来实现 TRT 启动的控制，而控制透平机启动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。

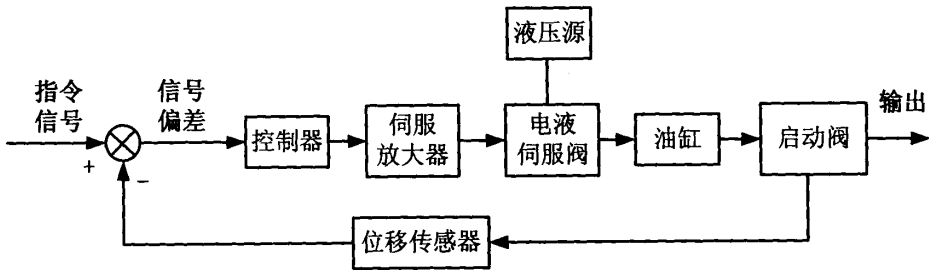


图 3.1 电液位置伺服控制系统方框图

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，即透平机启动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 装置启动大都采用液压启动阀。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。

透平机启动阀伺服控制系统原理图如图 3.2 所示。角位移变送器 ZT 用来测量透平机启动阀实际角度信号，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，带动启动阀达到预期角度，从而实现透平机启动阀开度调节的目的。同时，控制器还送出一路电流信号（4~20mA）到主控制室用于启动阀角度的指示。

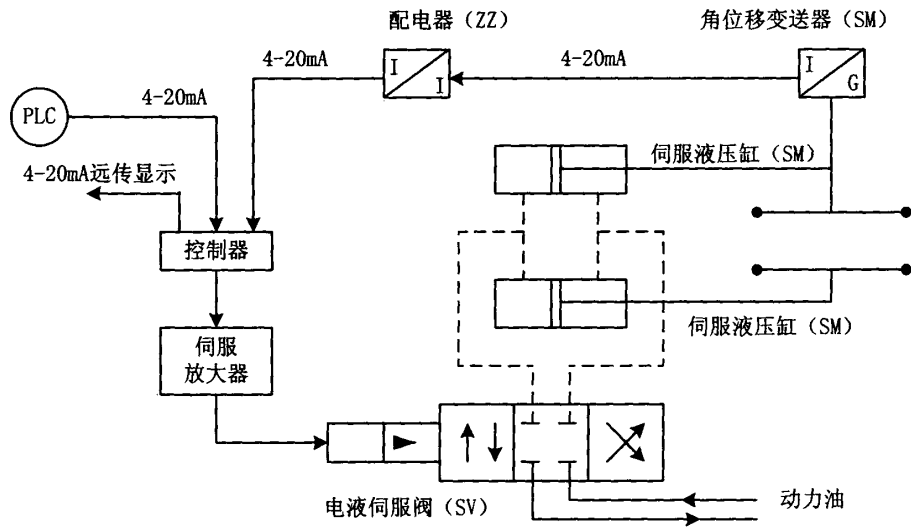


图 3.2 启动阀伺服控制系统原理图
Fig.3.2 Valve control system diagram

TRT 装置通过调节透平机启动阀开度实现启动的控制，控制系统方框图如图 3.3 所示。

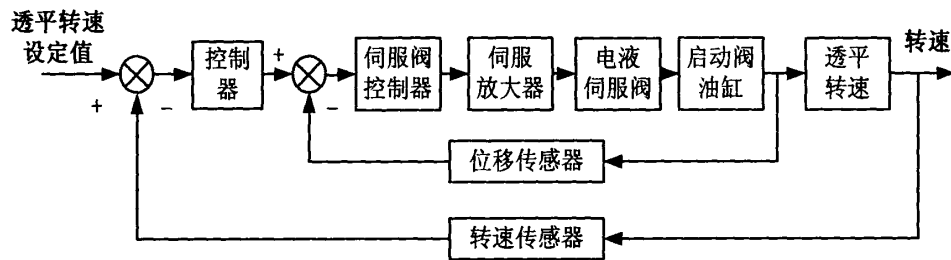


图 3.3 启动阀伺服控制系统流程图
Fig.3.3 Valve control system flow

从图 3.3 中我们看到，透平转速控制系统是一个串级控制系统，PLC 即透平转速控制器的输出作为伺服阀控制器的设定值。主回路实现透平转速控制，副回路即电液伺服控制系统实现启动阀开度控制。PLC 控制系统根据透平转速设定值和转速传感器测量值之间的偏差，给出启动阀开度值，输入伺服阀控制器。PLC 设

定的启动阀开度和位移传感器测量的启动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,带动启动阀旋转,使启动阀转到某一角度,从而实现炉顶压力的控制。在 TRT 启动时,可根据各过程升速的控制要求,通过设定不同的给定值,实现各个过程的控制。

3.2 TRT 启动系统数学模型的建立

3.2.1 模块化建模

热动力系统包括的范围很广,其结构形式变化的跨度很大,从简单的单轴燃气轮机到复杂的联合循环系统、大型火电站等,但是,不论这类系统的结构和工质运动过程如何复杂多变,总是可以看成由大量的属于少数几个典型种类的部件(或称模块)所组成,工质运动过程遵守基本守恒定律,即质量守恒、能量守恒和动量守恒,工质状态参数满足工质热力性质函数关系^[17-19]。因此,我们完全可以根据这些典型部件的特性事先建立起它们的数学模型,整个系统的模型仅仅是这些部件模型通过一定手段实现的一定规律的组合形式,同类部件可以重复使用同一个模块的方程。这样,借助于计算机,我们就可以很容易的了解系统,这就是模块化建模的基本思路^[20]。

模块化建模方法包括以下内容:

1. 对所研究系统进行合理的模块化分解。这是模块化建模的关键,模块划分的形式决定了模块的连接方式,往往与研究者解决问题的侧重点和软件使用的对象有关。模块划分的结果应保证系统的模块化分解和模块的连接组合过程容易进行,同时可使任意一个模块的删除和插入不给其它模块的组合过程带来影响,因此,要求模块能完成独立的物理功能,具有数学独立性,模块内部与外界的数据通讯有明确一致的边界和接口。

2. 建立模块模型库^[21-22]。有一个丰富的预置的模块库是模块化建模的基础,其中应包含研究对象可能拥有的全部典型部件或子系统的数学模型。对热力系统来说,就是要包含诸如管道、阀门、换热器、透平、压气机等等这样一些典型部件的数学模型。这些模型根据基本守恒定律按一定规范用计算机语言编写成标准形式,作为一个代码单元存放于模块库中。

3. 建立一套模块自动连接组合系统^[23]。这是模块化建模得以实现的保证,也是其难点。组合系统应能使用户在应用仿真软件时,只需按一定的规则从外部送入一定的指令和数据,由计算机自动地按要求顺序从模块库中调出所需模块模型,

并把参数值赋予该模块使其代表所研究对象的特定部件的模型，然后将该模块与其他模块进行连接组合，生成整个系统的模型。拆装组合模块的能力应与研究对象的拓扑结构无关。与模块内部的模型结构和形式也无关。

4. 有一个资源库，如工质（水、水蒸气、烟气等）的热力性质函数库，用于支持模块模型，这些函数应具有足够的精度，参数具有足够的变化范围，而且不仅能求诸如焓、密度、熵等参数，还应能求反函数及各种偏导数等。另外，模块化建模还需要包括其它一些的技术内容，如数据输入（即特定系统得拓扑结构描述、过程参数值等）和输出（仿真结果）、模块库的管理、建模环境等。

模块化建模方法有以下优点^[24]：

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。

3.2.2 启动系统建模

在启动控制过程中，减压阀组处于工作状态，对高炉炉顶压力进行调节，两旁通阀和入口蝶阀处于关闭状态。当启动阀有开度时，高炉冶炼所产生的煤气有两个路径，一是经管道、减压阀组到低压管网，另一个路径是经管道、启动阀、透平机到低压管网。

3#高炉 TRT 装置，由陕西鼓风机集团总成，透平机型号为 MPG30.6-341/170，机组工作转速 3000r/min。

透平机为二级双支撑结构形式^[25]，垂直下进气，轴向排气。主体由定子、转子、底座等组成。透平与发电机用刚性联轴器直联，支撑轴承采用圆瓦滑动轴承、推力轴承为可倾瓦轴承，均为强制供油润滑。

透平机的进口法兰均为长方形，在下机壳底部，出口法兰为圆形，沿主轴方向。垂直下进气，轴向排气。从透平机进口向出气口看，转子的旋转方向为顺时针。

前轴承箱上部装有电动盘车装置，手动啮合。当主轴转速超过一定转速时，盘车装置主动轮自动脱开，同时电机停止运转。

透平转子由主轴、一、二级动叶及热装在主轴上的测速齿轮、盘车齿轮等组成。

1. 透平机转子建模

在启机冲转过程中，需要高炉煤气流量较少，冲转过程中和运行过程中，转子叶片受力是有区别的。

转子转动主要由叶片受到的气体冲力带动，使其旋转。叶片受到的冲动力越大，转子转动速度越快，气体冲动转子后由高速气流变为低速气流。转子叶片受到冲动力的面设为转子叶片正面。

转子叶片受到的阻力主要来自于叶片受动力面的背面，因为转子叶片背面相当于切割低速气流，它将受到低速气流对它的阻力。

因为转子叶片是沿轴圆周布置，上述过程可近似认为气流首先冲动转子叶片正面，动量交换后变为低速，然后对下一个沿本圆周转动的叶片产生阻力。这个阻力的性质可近似认为是鼓风阻力性质，由于透平转子在实际转动过程中，受力十分复杂，本文作为简化只从一维考虑其受力情况^[26]。如图 3.4 所示。

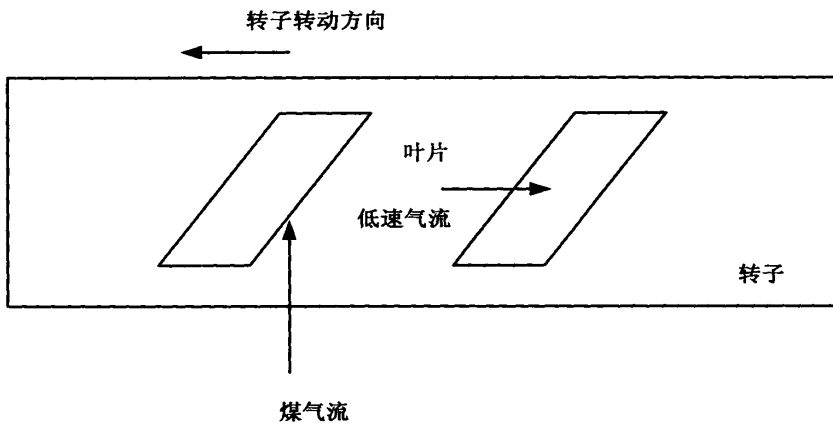


图 3.4 透平转子示意图

Fig.3.4 Turbine rotor schemes

根据鼓风阻力公式^[27]，透平机叶片整体所产生的阻力为

$$F_{阻} = A(\omega \times R)^2 \quad (3.1)$$

由于工业中透平机 DCS 系统采集的转速单位为 r/min，与转速单位不统一，需要变换，变换公式为

$$n = \frac{\omega \times 60}{2\pi} = \frac{30\omega}{\pi} \quad (3.2)$$

综上的鼓风阻力公式为

$$F_{\text{阻}} = A \left(\frac{n\pi}{30} \times R \right)^2 = \frac{A\pi^2 R^2 n^2}{900} \quad (3.3)$$

透平转子受到气流的推动力为 $F_{\text{动}}$ ，那么转子给气流的作用力为 $F_{\text{动}}$ ，启动过程中，对透平做完功的煤气进入低压管网，煤气低压管网系统很大，可认为气流冲动转子后气流速度降为零，动量全部转换给转子，在一个很短的时间内，利用动量定理：

$$-F_{\text{动}} \times \Delta t = 0 - v \times m \quad (3.4)$$

所以

$$F_{\text{动}} \times \Delta t = v \times m \quad (3.5)$$

煤气等于煤气质量流量与时间的乘机

$$m = Q_m \times \Delta t \quad (3.6)$$

代入可得

$$F_{\text{动}} = v \times Q_m \quad (3.7)$$

煤气质量流量等于煤气体积流量与煤气密度的乘机

$$Q_m = Q_v \times \rho \quad (3.8)$$

煤气体积流量等于煤气通流面积与时间的乘积（认为高炉煤气为一恒压系统）

$$Q_v = v \times s \quad (3.9)$$

转换为

$$v = Q_v / s \quad (3.10)$$

代入可得

$$F_{\text{动}} = v^2 \rho s \quad (3.11)$$

代入可得

$$F_{\text{动}} = Q_v^2 \rho / s \quad (3.12)$$

转子叶片受到冲动力和阻力达到平衡时，所以转子可在某一固定转速旋转

$$F_{\text{动}} = F_{\text{阻}} \quad (3.13)$$

即

$$\rho s v^2 = A \pi^2 R^2 n^2 / 900 \quad (3.14)$$

推导得

$$Q_v = B n \quad (3.15)$$

2. 透平机启动阀建模

启动阀为金属硬密封三偏心蝶阀^[28]，如图 3.5 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。

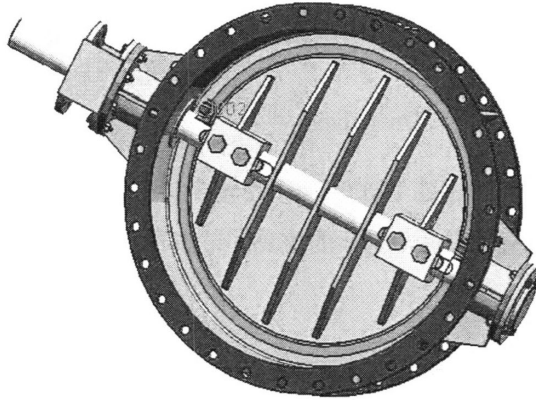


图 3.5 蝶阀示意图

Fig.3.5 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%。

$$\frac{2\alpha}{\pi} = \frac{U}{100} \quad (3.16)$$

所以启动阀实际开度角可表示为：

$$\alpha = \frac{\pi U}{200} \quad (3.17)$$

当启动阀有一定开度时，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启动阀通流面积：

$$s = S \times (1 - \cos \alpha) \quad (3.18)$$

实际开机启动过程中，启动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：

$$Q_v = C \times s \quad (3.19)$$

代入可得

$$Q_v = C \times S \times (1 - \cos \frac{\pi U}{200}) \quad (3.20)$$

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

$$\Delta Q_v = C \times S \times (1 - \cos \frac{\pi \Delta U}{200}) \quad (3.21)$$

又因为瞬时流量 Q_v 为流量变化量 ΔQ_v 的累积

$$Q_v = \int_0^t \Delta Q_v dt \quad (3.22)$$

3. 综上得系统综合模型

$$Dn = 1 - \cos \frac{\pi \int_0^t \Delta U dt}{200} \quad (3.23)$$

D 约等于 6000，煤气通过 TRT 启动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。

3.3 本章小结

本章首先对电液位置伺服系统进行介绍，然后通过对 TRT 启动过程的研究，透平转子在实际转动过程中，受力十分复杂，本文作为简化只从一维考虑其受力情况，近似认为透平转子受到气流的推动力与气流给转子的阻力相同。建立以此为依据建立数学模型。

第 4 章 启动控制系统的设计

4.1 启动单回路 PID 控制

快速跨越临界共振区是 TRT 启动的关键，能够快速通过是由启动阀控制的。一般来讲，为了确保迅速跨越临界共振区，往往启动阀开度调整过大，导致超调量过大，其控制系统示意图如图 4.1 所示。

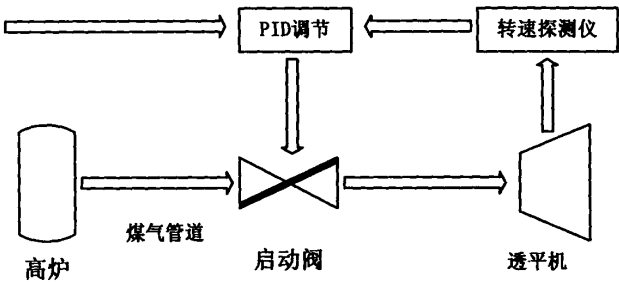


图 4.1 TRT 启动单回路控制示意图
Fig.4.1 TRT system single return route control schematic

图 4.2 中所示的是一个单回路定值调节系统^[29]。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 启动工艺中，启动过程中根据工艺要求目标转速一致。图 4.2 所示的系统是由转速探测仪、PID 调节器、执行器及透平机和高炉煤气系统组成的单回路定值调节系统，由转速探测仪将透平机转速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。启动阀在全开的情況下压力损失比较小，随着开度的减小压力损失会逐步上升。出于优化运行和节能的考虑，需要尽量使调节阀在大开度工况条件下工作。这时需要调节启动阀，使进入透平机的煤气量发生变化，从而控制透平机的转速，使透平转速达到设定值。一般其控制系统结构框图如图 4.2 所示。

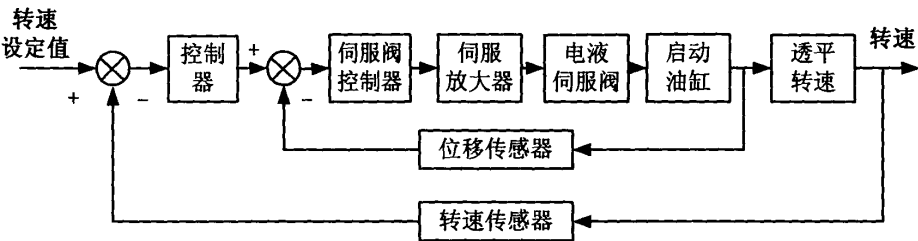


图 4.2 TRT 启动系统单回路控制框图
Fig.4.2 Reboot TRT system single loop control diagram reboot

煤气流量是直接影响透平转速的指标,从工程的角度看,整个启动过程需要许多设备进行参与,包括煤气管路、启动阀反馈器或转速检测仪等,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,会影响到启动过程的稳定和均衡,影响到能否顺利通过临界共振区。不稳定的煤气流量会扰乱转速测量值的真实意义。透平转子动量具有很大惯性不能作为是否通过临界共振区的直接判据,只能凭经验作为一个参考值,无法根据它的数值和变化直接计算煤气量。单回路 PID 控制在能保证快速的跨越临界共振区的前提下,对转速的超调量达不到很好的控制。

4.2 控制系统的构成

4.2.1 Symphony 系统概况

Symphony 系统是 ABB 贝利于九十年代中期推出的,它不但与第三代产品 Infi 90 Open 系统兼容,而且还进一步发扬了分布式控制系统的特点,即控制器物理位置分散、控制功能分散、系统功能分散及显示、操作、记录和管理集中^[30]。该系统借助当今世界多种先进技术,比如微处理技术、CRT 图形显示技术、高速通信技术、先进控制技术,已形成一个功能更加完善的、更加开放的分布式控制系统。

1. 系统硬件:

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

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

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

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

2. 系统软件:

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

3. 网络结构

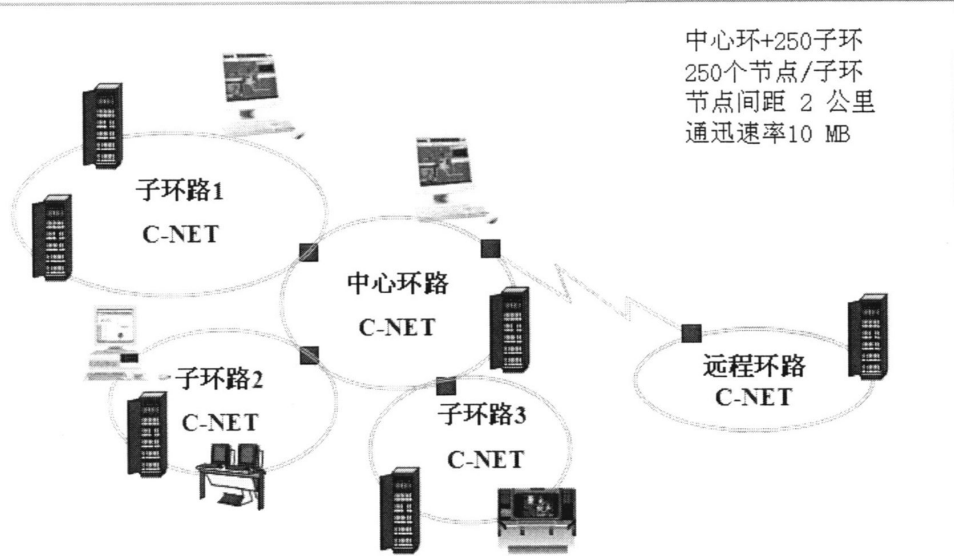


图 4.3 Symphony Rack 网络结构示意图
Fig.4.3 Schematic drawing of Symphony Rack network

过程控制单元是一个由 DCS 核心组件组成的集合，其最重要的组件是多功能处理器模件 MFP。MFP 是 Symphony 系统中一个高集成度、高度模块化、高效率的完成过程控制的核心模件。它能够完成多种类型的过程控制和数据采集。在控制器的 NVRAM 中存在控制组态。由于有相应后备电池的支持，所以在失电的状况一下也不会丢失组态。为提高系统的可靠性和控制的完整性，MFP 可以构成冗余配置。冗余的 MFP 共同支持子总线。另外冗余的 MFP 还可以提供在线修改组态的能力。

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

(a) 功能：数据采集及处理，过程控制、通信协议转换等。

(b) 特点：

冗余功能：MFP 可以设置成 1:1 冗余，其冗余方式为：主 MFP 处于执行方式

时, 冗余 MFP 处于热备跟踪方式。主 MFP 和冗余 MFP 间串行链速率为 1Mbps。

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

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

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

自诊断能力: MFP 自动判别软、硬件故障。

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

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

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

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

组态方式: 用户在组态方式输入自己的控制策略, MFP 接收来自控制通道或模件总线上的组态命令, 改变具有后备电池 NVRAM 内的数据。在组态方式下, 用户可以组态地址为 30-9998, 其它地址为固定功能块占用。地址 0-14: 执行功能码 81; 地址 15~19: 段控制码 82; 地址 20-29: 扩展执行码 90; 地址 9999: 结束码 89。

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

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

4.2.2 系统的技术特点

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

存储转发协议的特点是: 在系统网络上, 没有通信指挥器, 所有节点的地位是平等的, 每一节点均是独立的, 带有缓冲寄存器的信息转发器。每一转发器随时、独立地进行数据接收、数据发送、数据撤消等。每一节点通过相应的传输介质与另外两个相邻的节点连接, 最后形成一个闭合的环形网络结构。数据报告将环形网络内的所有节点依次传递, 从信息源节点开始至目的节点, 再由目的节点回到原发出信息报告的节点止。由于此种协议规定的传输方式在整个网络中没有指挥器, 所以网络中的节点只要有信息报告需要发送, 在没有指挥器的干预下, 完全能独立自主的发送, 从而去掉了等待指挥器指令、令牌及时间间隙等等待的时间, 使信息的例外报告非常快的走出节点, 节省了时间, 减少了延迟。另外, 由于此种输方式是点对点进行的, 并且经过每一节点的寄存器信息得以重新转发, 所以能保持信息的电平水平, 这样就既提高了抗干扰能力, 又保证了网络的安全, 又能做到适度的长距离传输。

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

应更容易提高，并且由于通讯结构简单，所以非常容易进一步扩展。

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

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

例外报告技术使用的结果为：对变化快的信号，监视器监视得就频繁，对其扫描的频率就高，产生的例外报告就多。对变化缓慢的信号，监视器扫描的频率低，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. SymphonyRack 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。

4.2.3 系统的硬件构成

根据 TRT 系统工艺监控点数进行 DCS 硬件配置。由 Symphony Rack 系统构成的 DCS 控制系统硬件结构示意图如图 4.4 所示。系统采用主控制器 CPU 冗余、通讯网络 Cnet 冗余、上位监控操作员站 OIS 冗余、供电单元冗余的冗余配置,并将其中一台操作员站兼用作工程师站,既减少设备投资,又方便了以后对系统组态的完善和维护。控制单元 PCU 和两个端子柜 T/C1 与 T/C2,与系统外部联系均通过端子柜内的端子板实现,端子板的存在,方便了供电方式的选择,同时对系统起到一定保护作用。网络采用 Slave Bus、Control Way、Cnet、Onet 四层网络,完成 TRT 工艺过程数据采集、处理控制、监视管理等功能。

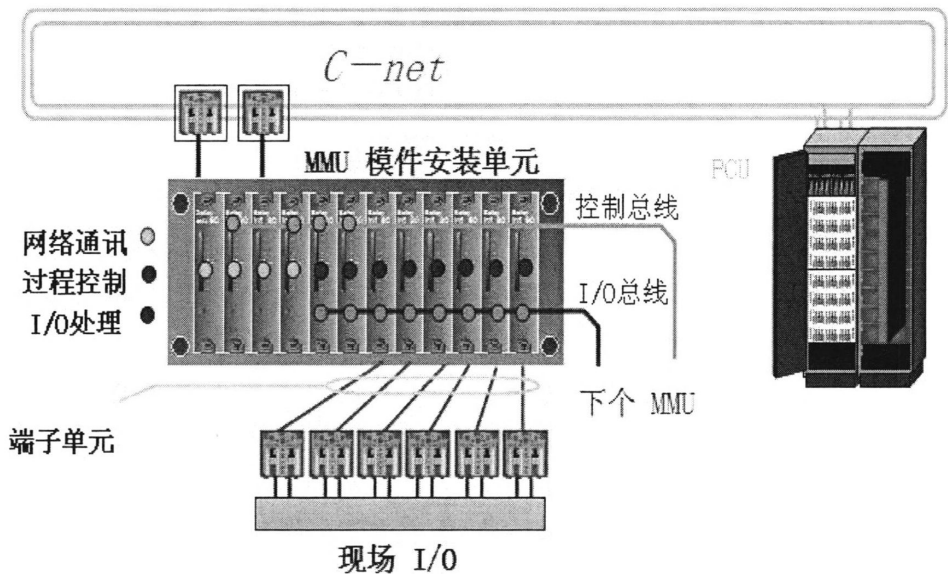


图 4.4 DCS 系统结构示意图

Fig.4.4 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 启动条件的数字量信号；来自高炉的联系信号；设备运转或开关等状态信号，采集到的信号进入 DCS 系统经过处理后在操作员站上显示、记录，并根据控制逻辑或控制模型对系统设备的运行进行控制管理。
- （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 3th 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 3th 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。这是由网络处理模块 NPM 和网络接口模块 NIS 连接在冗余配置的系统环形网络上实现的。I/O 信号处理模块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。

4.2.4 系统的软件构成

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

本操作员站和工程师站操作系统采用 Windows 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 3th 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）

4.2.5 现场调试

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

(1) 系统信号处理精度测试

(a) 模拟量输入信号精度测试

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

(b) 模拟量输出信号精度测试

主要是测试模拟量输出信号的处理精度。在操作员站上通过手动方式对每一点置一组不同的值如分别为量程的 0%、25%、50%、75%、100%，用标准信号测试仪器分别对各点进行测试，对应每一个输出相应的理论值、算出测量误差，检查是否满足要求。

(c) 数字量输入正确性测试

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

(d) 数字量输出正确性测试

在操作员站上手动改变每点的值，从输出端子上测量其状态。

DCS 中只涉及到上述四种类型的信号,所以只介绍四种类型的信号测试。经过测试,首钢迁钢 3#三高炉 TRT 的 DCS 中各类信号的处理精度均满足要求。

(2) 系统冗余性能测试

(a) 通信网络测试

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

(b) CPU 冗余测试

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

(c) 系统容错性能测试

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

(3) 设备单体调试

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

(4) 设备联合调试

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

4.3 PID 控制在启动过程中的应用

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。

4.3.1 PID 控制的应用

启动过程 PID 控制系统结构如图 4.5 所示^[31]:

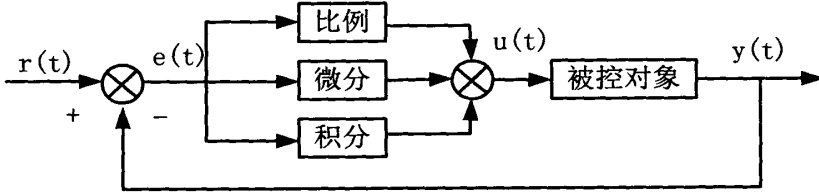


图 4.5 PID 控制系统

Fig.4.5 Block Diagram of PID control System

PID 控制器是一种线性控制器,它将偏差的比例(P)、积分(I)、微分(D)通过线性组合构成控制量,对启动过程进行控制。

控制规律为:

$$u(t) = K_p [e(t) + 1/T_i \int e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (4.1)$$

式中: $e(t) = r(t) - y(t)$ 为转速偏差, $r(t)$ 为系统转速输入(设定值), $y(t)$ 为系统输出(被控量), K_p 为比例增益, T_i 为积分时间, T_d 为微分时间。

在数字计算机代替模拟调节器组成的计算机 PID 控制中,使用的是数字 PID 控制器。其中经常采用的是增量式 PID 控制算法,其控制规律是:

$$\Delta u_n = K_p (e(n) - e(n-1)) + T_s / T_i e(n) + T_d / T_s (e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)) \quad (4.2)$$

$$u(n) = u(n-1) + \Delta u_n \quad (4.3)$$

PID 控制器各个校正环节的作用如下:

比例环节: 成比例地反映控制系统的转速偏差信号 $e(t)$, 偏差一旦产生,控制器立即产生控制作用,以减少偏差。

积分环节: 主要用于消除稳态误差,提高系统的无差度。积分作用的强弱取决于积分时间常数的大小。积分常数越大,积分作用越弱,反之越强。

微分环节: 主要用于反映偏差信号的变化趋势(变化速率),并能在偏差信号变得太大之前,在系统中引入一个有效的早期修正信号,从而加快系统的动作速度,减小调节时间。

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,从而达到调整启动阀开度控制转速的目的。

4.3.2 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

$$u = K_p e \quad (4.4)$$

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

$$\frac{du}{dt} = K_i e \quad (4.5)$$

或

$$u = K_i \int_0^t e dt \quad (4.6)$$

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:

$$u = K_d \frac{de}{dt} \quad (4.7)$$

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:

$$u = K_p e + K_i \int_0^t e dt = K_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt \right) \quad (4.8)$$

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

$$u = K_p e + K_d \frac{de}{dt} \quad (4.9)$$

$$u = K_p \left(e + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad (4.10)$$

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。

4.3.3 启动控制 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 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:

$$K_p = 0.6K_{ps}, \quad T_i = 0.5T_s, \quad T_d = 0.125T_s \quad (4.11)$$

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：

$$K_p = 1.25K_c, \quad T_i = 0.3T_c, \quad T_d = 0.1T_c \tag{4.12}$$

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（4.2~4.12）的公式，求解调节器各整定参数的数值。

4.4 控制功能的实现

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 启动控制仍偏向于 PID 控制，在开机冲转达到 3000r/min 的过程中，根据 TRT 启动工艺要求，对转速的升速率有不同的要求。采用两组不同参数 PID 交替控制^[32]，控制结构图如图 4.6 所示。

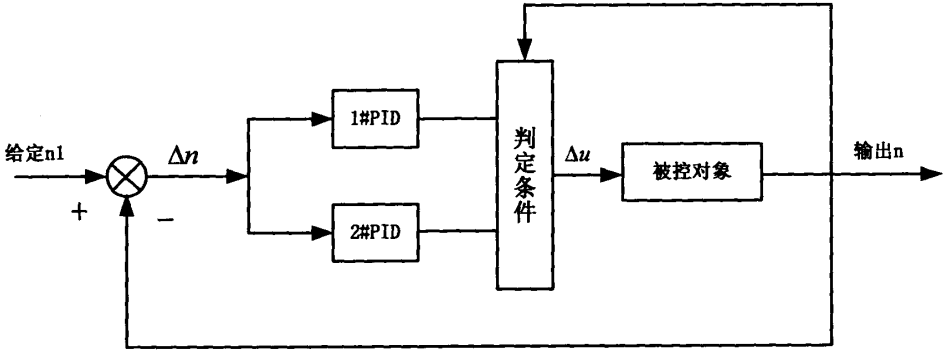


图 4.6 两组 PID 参数的控制结构图

Fig.4.6 Two sets of PID parameters control structure diagram

其中，n1 为透平转速给定值，n 为转速探测器测量的透平实际转速。

图 4.6 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。

两组 PID 参数交替控制流程如图 4.7 所示。

给出冲转信号后，转速 $\leq 2000\text{r/min}$ 时，1#PID 输出到控制系统，2#PID 输出没有输出到系统；当转速 $>2000\text{r/min}$ 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，在启机过程中两个 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。

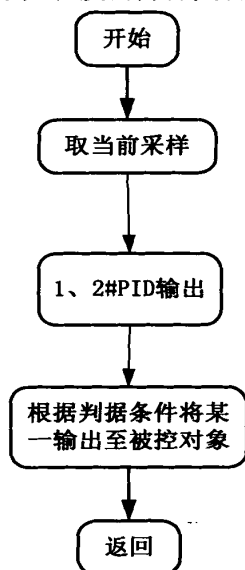


图 4.7 两组 PID 参数交替控制换算法流程图

Fig.4.7 Two sets of PID parameters for alternating control algorithm flow chart

4.5 本章小结

本章首先将 TRT 启动控制与传统 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，不能实现同时保证透平升速的快速性和透平升速的平稳性。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。

第 5 章 TRT 启动系统仿真及结果分析

本文第 3 章中已建立 TRT 启动过程的数学模型为：

$$Dn=1-\cos\frac{\pi\int_0^t\Delta Udt}{200}$$

(5.1)

本章以此模型进行仿真。本仿真实验主要目的在于，对 TRT 启动过程分别用一组 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。

5.1 搭建仿真模型

由于实际启动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^[33]中搭建的仿真模型，如图 5.1 所示。

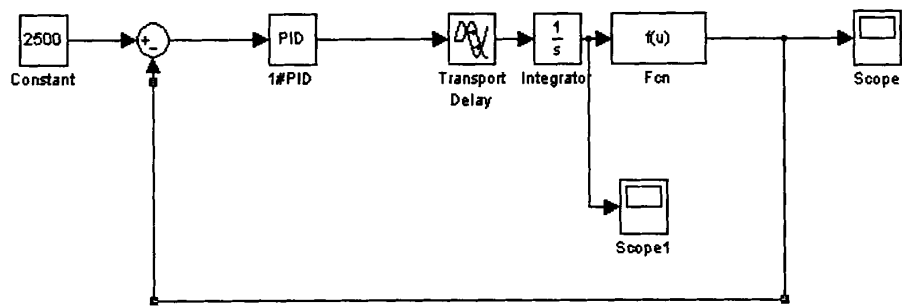


图 5.1 1#PIDTRT 启动控制的 Simulink 仿真框图

Fig.5.1 Simulated structure diagram of 1# PID TRT system control system

2. 单独用 2#PID 在 MATLAB/Simulink 软件中搭建的仿真模型，如图 5.2 所示。

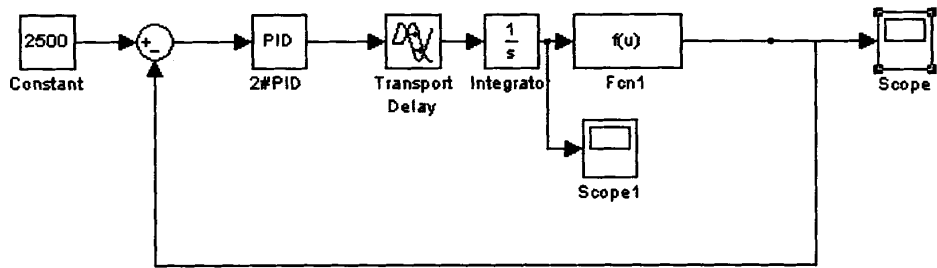


图 5.2 2#PIDTRT 启动控制的 Simulink 仿真框图

Fig.5.2 Simulated structure diagram of 2# PID TRT system control system

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 5.3 所示。

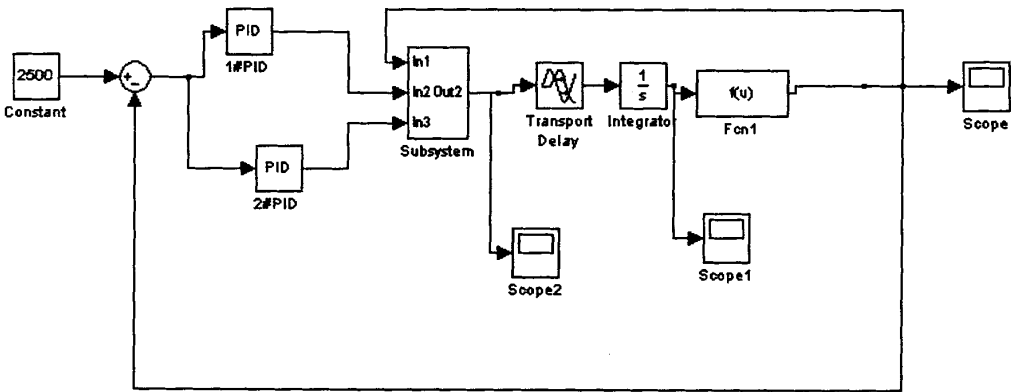


图 5.3 两个 PID 控制器 TRT 启动控制的 Simulink 仿真框图

Fig.5.3 Simulated structure diagram of double PID TRT system control system

根据工艺要求，透平发电机组的临界共振区在 1400r/min-1700r/min，为了保证机组能够安全迅速通过此区域，将此区域放大一些，两组 PID 参数交替控制判据条件搭建如如图 5.4 所示。

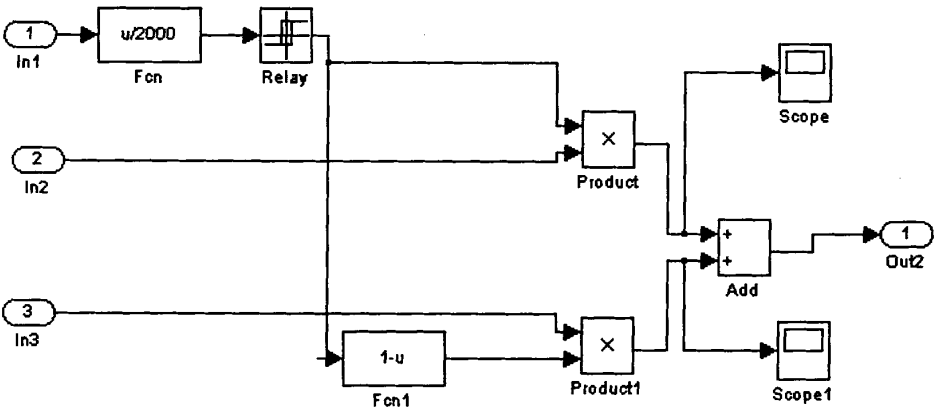


图 5.4 两组 PID 参数交替控制方式条件判定模块

Fig.5.4 Double PID controller alternate control way judge module conditions

图 5.4 中，in1—透平转速输入量，in2—1#PID 输出，in3—2#PID 输出。

条件判定：给出冲转信号后，转速 $\leq 2000\text{r/min}$ 时，1#PID 输出到控制系统，2#PID 输出没有输出到系统；当转速 $> 2000\text{r/min}$ 时，2#PID 的输出到控制系统，1#PID 输出没有输出到系统。

5.2 仿真结果分析

1. 初始值为 1000r/min，设定值为 2500r/min 时，单独使用 1#PID 控制器，系统的仿真结果如图 5.5 所示。

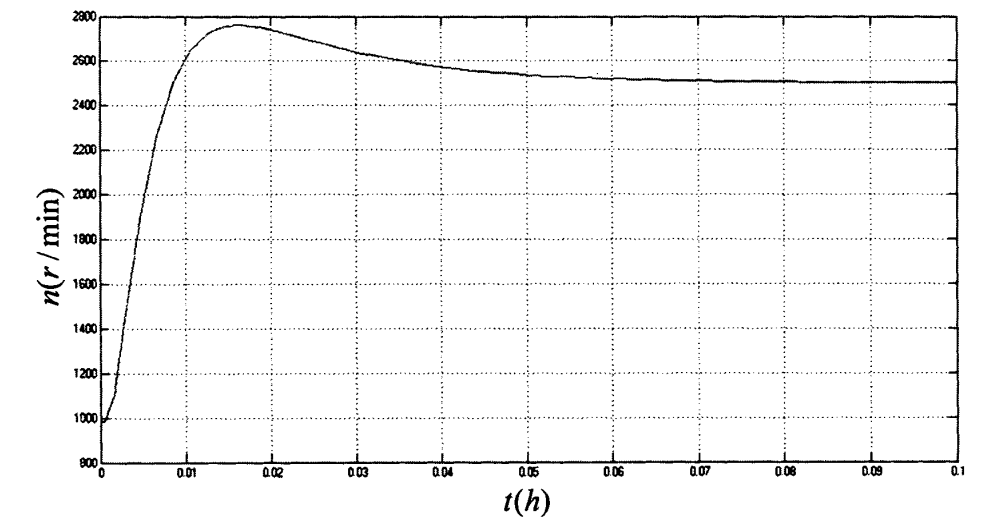


图 5.5 1#PID 输出曲线
Fig.5.5 1#PID outputs curves

1#PID 参数的设定值为： $K_p=3$ ， $K_I=150$ ， $K_D=0$ 。

由图 5.5 可以看出，1#PID 控制器所组成的系统在由 1000r/min 升速到 2000r/min，所需时间很短，能快速通过临界共振区，但由于启动阀在转速由 1000r/2000r/min 这个升速阶段开度变化率变大，会对高炉炉顶压力造成较大的干扰，影响高炉正常生产。另外最高转速接近 2800r/min，离机械超速很近，稍有波动机组就有掉闸的危险。

2. 初始值为 1000r/min，设定值为 2500r/min 时，单独使用 2#PID 控制器，系统的仿真结果如图 5.6 所示。

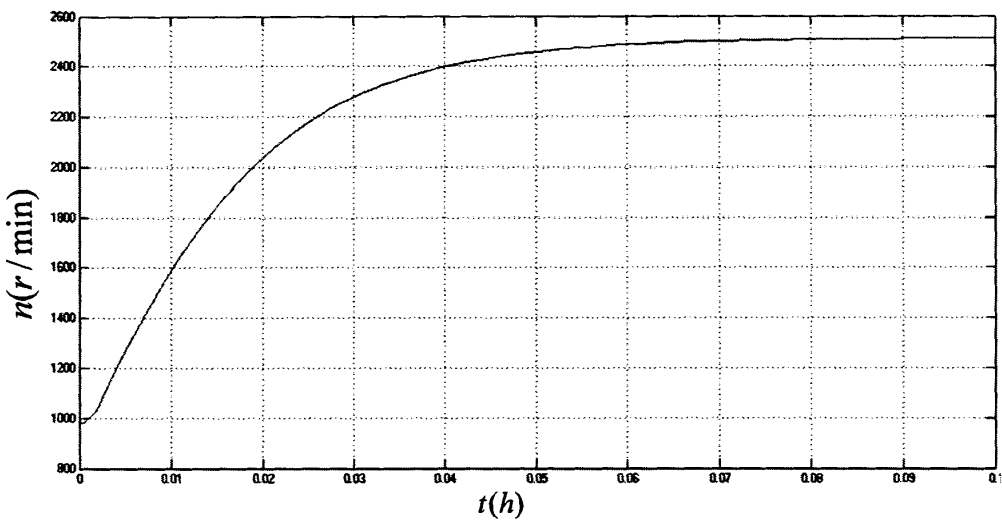


图 5.6 2#PID 输出曲线
Fig.5.6 1#PID outputs curves

2#PID 参数的设定值为： $K_p=1$ ， $K_I=0.5$ ， $K_D=0.0011$ 。

由图 5.6 可以看出，采用 2#PID 控制器所组成的系统升速很平稳，在此种控制方式下，启动阀开度变化率小，此时控制高炉顶压的减压阀组能够及时调整开度，以消除启动阀对高炉顶压的干扰。但在临界共振区停留时间长，对机组安全造成影响。同时可以在图 5.6 中发现，在 1000r/min 到 2000r/min 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 4 倍，也就是说，透平转子产生的振动对机组的伤害大概为由第一组控制方式下的 4 倍。

3. 初始值为 1000r/min，设定值为 2500r/min 时，两组 PID 参数交替控制方式，系统的仿真结果如图 5.7 所示。

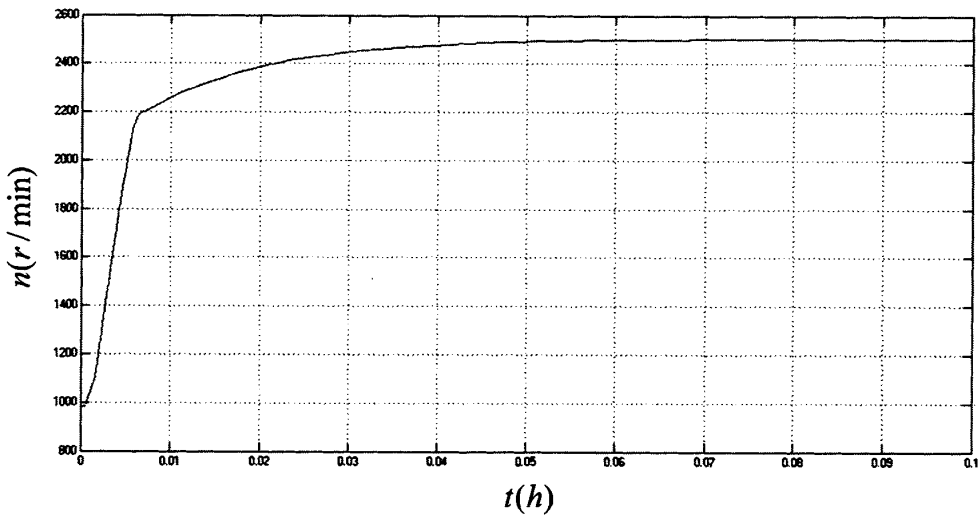


图 5.7 两组 PID 参数交替控制方式输出曲线
Fig.5.7 Double PID controller alternate control method outputs curves

1#PID 参数的设定值为： $K_p=3$ ， $K_I=150$ ， $K_D=0$ 。

2#PID 参数的设定值为： $K_p=1$ ， $K_I=0.5$ ， $K_D=0.0011$ 。

由图 5.7 可以看出，采用两组 PID 参数交替控制方式所组成的系统，在 1000r/min 升速到 2000r/min，具有升速速率快、时间短、超调量小等优点；在 2000r/min 时，两组 PID 参数进行交替控制，但由于转子转动惯性原因，从图 5.7 可以看到当转速 2200r/min 时作为升速率的一个分界点，在 2200r/min 升速到 2500r/min 阶段升速平稳。

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，能够同时保证透平升速的快速性和透平升速的平稳性的要。从图 5.7 中看出在两组 PID 参数交替时转速有一定的升高，但这个值可以根据工艺的要求对判定条件进行调整。

5.3 本章小结

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跨越透平临界共振区,并且超调量很小,能同时保证透平升速的快速性和透平升速的平稳性的要求。

此页不缺内容

第6章 总结与展望

本文以首钢迁钢 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 启动过程。目前国内主要采用快切阀后加调节阀、启动阀与快切阀并联和启动阀与入口蝶阀并联的三种启动方式。并对首钢迁钢 3#TRT 系统结构及其停机系统和辅助系统进行了简单介绍。目前,首钢迁钢 3#TRT 采用与入口蝶阀并联的启动阀来进行开机操作,在启动过程中存在升速快速与超调量的矛盾。

然后通过对 TRT 启动过程的研究,透平转子在实际转动过程中,受力十分复杂,本文作为简化只从一维考虑其受力情况,近似认为透平转子受到气流的推动力与气流给转子的阻力相同。建立以此为依据建立数学模型。将 TRT 启动控制与传统 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,不能实现同时保证透平升速的快速性和透平升速的平稳性。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。

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跨越透平临界共振区,并且超调量很小,能同时保证透平升速的快速性和透平升速的平稳性的要求。

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. 本文只针对启动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启动用煤气量的关系。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。

此页不缺内容

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. 王维兴. 钢铁工业“十五”节能降耗及环境保护工作[J], 冶金能源, 2002, 21(1): 10-12.
3. 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.
4. 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.
5. 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, 2009, (22):119-126.
6. Ke S L, Ti H C. Transient analysis of isothermal gas flow in pipeline network [J], Chemical Engineering Journal, 2008, 76(2):169-177.
7. 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[J], 杭州: 浙江大学, 2003.
8. Jianling Zhang, Guoshun Wang. Energy Saving Technologies and Productive Efficiency [J], Energy, 2008, 33(3): 525-537.
9. Tao W Q, Ti H C. Transient analysis of gas pipeline network [J], Chemical Engineering Journal, 2003, 69(1):47-52.
10. Dukhovnaya Yulia, Adewumi Michael A. Simulation of non-isothermal transients in gas/condpipelines using TVD scheme [J], Powder Technology, 2000, 112(2):1163-171.
11. Osiadacz Andrzej J, Chaczykowski Maciej. Comparison of isothermal and nonisothermal pipeline gas flow models [J], Chemical Engineering Journal, 2010, 8(3): 41-51.
12. 降爱琴. 汽轮机转速控制系统分析[J], 科学之友(B 版), 2006, (04): 45-49.
13. 孙卯君, 冀岗, 朱辉. 国产 TRT 开车启动与一级静叶之调控[J], 冶金动力, 2002, 21(11): 30-32.

14. 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.
15. 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.
16. 王猛. 电液伺服控制技术在 TRT 自动控制系统中的应用[J], 莱钢科技, 2006, (2): 52-54.
17. 倪维斗, 辛国华. 热力系统动力学及应用[M], 科学出版社, 1997, 145-148.
18. 何祖威, 唐胜利, 杨晨. 热力系统模块化仿真技术[M], 重庆大学热力系, 1997, 45-48.
19. 唐胜利. 热动力系统仿真环境的研究与开发[D], 重庆: 重庆大学, 2004.
20. C.A.Jones, N.S.Yee, G.F. Malan. Advanced training simulator development tools for windows [J], Framome Technongies, 2010, 6(3): 35-51.
21. M.T.Matthews, W.T.Sneed, G.F.Malan. An instructor-friendly,object-oriented approach to training sim ulator control [J], Frmatome Technologies, 2009, 3(2): 55-59.
22. 崔跃进. 135MW 火电机组培训仿真机开发-汽轮机部分模型软件设计[J], 重庆: 重庆大学, 2006.
23. C.S.McKim, M.T.Matthews. Modular Modeling System Model Builder [J], E-nergy Conversion Engineering Conference, 1996.IECC 96.Proceedings of the 3 1st Intersociety, 1996, 3:11-16. Aug. 1996.
24. M.S.Donne, A.W.Pike, R.Savry.Appliction of modern methods in power p la-nt simulation and control.Computing&Control Engineering Journa [J], Vol.12, Is-sue:2, April2001.
25. 章水秀. 汽轮机数字电液控制系统在大型火电机组中的应用[J], 南昌航空工业学院学报(自然科学版), 2001, (04): 23-27.
26. 李婷婷. 正常工况下 TRT 系统高炉顶压动态建模及控制研究[D], 杭州: 浙江大学, 2001.
27. 董礼, 廖明夫, 井延伟. 风力机叶片启动设计与建模[J], 太阳能学报, 2009, 1: 122-128.
28. 王晓峰, 高春升. 600MW 汽轮机的阀门管理与调节级特性[J], 汽轮机技术, 2003, (02): 07-11.

29. 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.
30. 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.
31. 陶永华. 新型 PID 控制及应用[M], 北京: 机械工业出版社. 2002, 1-13.
32. 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.
33. 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.

此页不缺内容

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。

首先，我要感谢我的导师——钱晓龙教授。本论文的研究工作一直得到了钱老师的悉心指导。钱老师不仅为本论文的研究指出了方向，而且提出了许多方向性的指导意见，使我受益匪浅。在日常的学习和生活中，钱老师也给予了我很多宝贵意见和帮助。导师深厚的基本功、严谨求实的治学态度、孜孜不倦的工作精神及博大精深的知识体系使我受益终身；导师对新知识的浓厚兴趣，敏锐把握，更给我极大的启迪，是我在今后的学习和工作中的榜样。我不仅学到了广泛的专业知识，打下了扎实的基础，而且也学会了很多为人处世的道理。在论文完成之际，谨向尊敬的导师钱晓龙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、帮助和鼓励的原魁、于美玲、何双萍、王小瑜同学。他们热心、无私、只求付出、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亲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。并祝你们身体健康、生活幸福！

在这两年的时间中，我得到了太多人的帮助，我很难在此一一列出他们的姓名。但是，我会将所有美好的回忆都永远留在心中。大家曾经给予我的鼓励、帮助和支持将会激励着我勇敢地迈向新的人生历程。