

分类号_____ 密级 _____

UDC _____

学 位 论 文

汽轮机 DEH 控制系统的设计与应用

作者姓名： 尹小尧

指导教师： 井元伟 教授 东北大学信息科学与工程学院
曹云祥 工程师 秦皇岛首秦金属材料有限公司

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： 2012 年 5 月 论文答辩日期： 2012 年 6 月

学位授予日期： 答辩委员会主席： 高宪文

评阅人： 郑艳 刘鲁宁

东 北 大 学
2012 年 5 月

A Thesis in Control Engineering



Design and Application of Steam Turbine DEH Control System

By Yin Xiaoyao

Supervisor: Professor Jing Yuanwei

Engineer Cao Yunxiang

Northeastern University

May 2012

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：尹小亮

日期：2012年6月8日

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：尹小亮

导师签名：

签字日期：2012年6月8日

签字日期：

2012年6月8日

汽轮机 DEH 控制系统的设计与应用

摘 要

在冶金企业中，汽轮发电机组是非常重要的复杂设备，必须有稳定、安全、高效的性能。首秦公司自备电站汽轮机是首钢总公司的旧设备，以仪表盘控制为主，控制方式落后，系统稳定性差，精度低，易受外部环境影响，严重制约了生产的进行。对此本文设计了新的控制系统，主要工作如下：

通过对汽轮发电机调速系统工艺流程及工作原理的分析，给出了调速系统的控制要求，并在此基础上，设计了汽轮发电机调速系统硬件构成方案；根据工艺要求，以 505 控制器、电液转换器、油动机等为核心控制器件，以转速测量、功率测量为辅助，设计了汽轮发电机调速控制系统，详细分析了各环节的硬件构成及其功能。

在硬件设计的基础上，建立了 DEH 控制系统的数学模型，给出了软件系统构成图及控制方式，并采用了串级 PI 方式对被控对象进行调节，对调节规律进行了详细的研究。同时给出了 DEH 全过程控制的逻辑设计方法，对设定值的形成及逻辑控制、自动同期、并网带初负荷、流量指令及 ADS 的功能形成逻辑进行了分析，指出了各种情况下 DEH 内部的逻辑控制关系各种保护功能。

通过分析汽轮发电机的启动控制过程，给出了汽轮机的三种启动方式、转速的 PID 控制模式及相关的流程控制，提出了机组的正常停机及故障的处理方法。

汽轮机 DEH 控制系统的开发与应用，较好的解决了汽轮机启动不平稳的问题，该汽轮发电机组自调速系统改造后均实现一次启动成功。实践结果表明：该调速控制系统操作简单方便，性能稳定可靠，满足生产工艺要求，为企业创造了可观的经济效益。

关键词：汽轮发电机；调速控制系统；DEH；505 控制器；电液转换器

Design and application of steam turbine DEH control system

Abstract

In metallurgy enterprises, steam turbo-generator is a very important and complex equipment, which must work stable, safety and high-efficient. The steam turbine of SQS is the old equipment from Shoudu Iron and Steel Corporation, and it's controlled by instrument board with instable and low precision, which is out of date and sensitive to the external interference. This paper design a new control system in order to improve the system performance, the main work of the paper is as follows:

Through the analysis of the technological process and operating principle of speed control system, the requirements of the speed control system are given. On the basis of the requirements, the hardware scheme for turbo-generator governor system is designed. According to process requirements, the turbo-generator governor control system block diagram is designed, including 505 controllers, electro-hydraulic converter. The analysis of function and hardware of the every part of the control system is given.

On the basis of the hardware, the model of the control system is built and the process control logic design method of DEH is given. The cascade PI is used to control the speed, the research of the PI method is given. The logical design method of DEH control is given. The formation of the set value, automatic and logic control, grid-connected with the first load, discharge orders and ADS of a detailed description of the functions form a logical are analyzed. Every situation of inside control logical relation and protection functions.

The start method of steam turbo-generator, the PI control method of the speed and other process control are given It explains the process about Turbine Start mode, PID speed control, Unit with-load starting, Unit normal shutdown and troubleshooting.

The result depicts that this speed control system is simple, convenient. Its performance is steady, which can meet the production process requirements and create considerable economic benefit for SQS.

Key words: Steam turbo-generator; Speed control system; DEH; 505Controller; Electro-hydraulic converter

目 录

独创性声明 I

中文摘要 II

Abstract..... III

第 1 章 绪论..... 1

 1.1 选题背景及意义..... 1

 1.2 汽轮机控制系统分类 1

 1.3 汽轮机控制系统的技术现状..... 3

 1.4 汽轮机控制系统的发展..... 6

 1.5 本文主要研究结构和内容 6

第 2 章 汽轮机调速系统工艺流程及控制要求 9

 2.1 汽轮发电机工艺流程 9

 2.2.1 汽轮机调速系统原理..... 10

 2.2.2 调节油系统工艺流程图..... 11

 2.2 汽轮机调速系统控制要求 13

 2.3 本章小结 14

第 3 章 汽轮机调速系统硬件设计 15

 3.1 505 调速器工作原理及系统介绍..... 15

 3.1.1 基本原理 15

 3.1.2 505 控制器系统构成..... 15

 3.1.3 505 控制器系统介绍..... 17

 3.2 电液转换器原理及调试..... 18

 3.2.1 电液转换器原理..... 18

 3.2.2 电液转换器调试..... 19

 3.3 转速的测量..... 20

 3.4 油动机原理及构成..... 23

 3.5 危急遮断器及隔膜阀 26

 3.6 本章小结 26

第 4 章 汽轮机调速系统软件设计	29
4.1 DEH 控制系统.....	29
4.1.1 DEH 控制系统构成.....	29
4.1.2 DEH 控制系统的数学模型	30
4.1.3 DEH 控制系统的 PI 调节规律.....	31
4.2 控制逻辑.....	32
4.2.1 负荷和转速的目标值形成.....	32
4.2.2 负荷和转速的升速率的设置.....	34
4.2.3 进行和保持的逻辑图.....	36
4.2.4 设定值的形成	37
4.3 自动同期及并网带负荷形成逻辑.....	40
4.3.1 自动同期	40
4.3.2 自动带初负荷	41
4.3.3 流量指令的形成.....	42
4.3.4 ADS 功能的实现.....	43
4.4 DEH 控制系统功能实现	46
4.4.1 试验功能	46
4.4.2 限制保护功能	47
4.5 本章小结	47
第 5 章 汽轮机启动过程控制.....	49
5.1 执行器的标定.....	49
5.2 汽轮机的启动方式	49
5.2.1 手动启动方式.....	50
5.2.2 半自动启动方式.....	50
5.2.3 自动启动方式	50
5.2.4 顺序自动启动	51
5.3 转速 PID 运行方式	51
5.4 超速试验	52
5.5 机组带电负荷	52

5.6 停机 55

5.7 汽轮机甩负荷处理 57

5.8 本章小结 58

第 6 章 结论及展望..... 59

参考文献..... 61

致谢 65

第1章 绪论

1.1 选题背景及意义

首秦公司自备电站汽轮机组是 75T 锅炉的配套设备, 由杭州热能电力公司改造的苏制 AKB 型凝汽式 N15-3.43-435 型单缸、冲动式凝气机组。该机组在改造前以仪表盘控制为主, 采用人工判断及手动开环控制, 控制方式十分落后, 而且在生产运行中, 汽轮机调速系统经常出现卡滞、调节不准确等故障, 人为误操作也经常导致事故的发生, 对企业造成非常严重的经济损失。该套机组在由北京搬迁至秦皇岛后, 为提高市场竞争力, 节约生产成本, 提高经济效益, 使控制稳定可靠, 需要设计新的控制系统。随着调速控制系统自动化的发展, DEH(Digital Electric hydraulic control system) 控制技术^[1]在自动化控制中迅速推广, 使得对工业生产设备的控制变得更加简捷方便, 更加稳定可靠, 优点十分明显, 对落后的汽轮机调速控制系统进行改造的条件成熟。

该汽轮机配套的发电机由南气集团生产的 QFW-15-2S-10.5 型交流无刷励磁、F 级绝缘、空冷式机组; 机组控制系统采用 S7-400PLC 系统; 汽轮机调节采用 505 控制器^[2]的数字电液控制系统, 配置 505 系统一套。该汽轮机组在首秦公司自发电中起到举足轻重的作用, 年均发电量为 9800 万 KWh, 每年为首秦公司创造利润约 5000 万元。

汽轮机调速系统在汽轮发电过程中, 起到至关重要的作用。它能保证汽轮发电机组能及时调整功率, 满足负荷变化的需求, 同时能够保证汽轮机的转速, 使他维持在额定转速运行。本文结合首秦汽轮发电机的特点和工艺流程就控制系统的组成结构和控制方法进行了深入分析和研究, 在硬件方面进行了 DEH 系统组成设计, 在软件方面主要对 DEH 逻辑控制进行了开发, 实现机组自动调速, 稳定并网的功能。

1.2 汽轮机控制系统分类

汽轮机的调速控制系统主要分为四个阶段, 在 60 年代初出现了把电子技术和液压技术相结合的模拟电液控制系统 AEH (Analog Electro-Hydraulic Control) ^[3], 到了 70 年代出现了数字式电液控制系统 (DEH), 80 年代 DEH 系统已经发展到了较高的阶段, 在大型汽轮发电机组中, DEH 系统的应用已经很普及, 早期的 DEH 系统多以小型计算机为核心构成, 近期的 DEH 系统以微型机为基础。目前我国火

电厂的汽轮机配套的控制系统主要有：机械液压式控制系统^[4]、电液并存式控制系统^[5]、模拟电路构成的电液系统^[6]、专用型数字式控制系统和通用型数字式控制系统^[7]。

(1) 机械液压式控制系统

国内汽轮机厂生产的 200MW 级的汽轮机绝大多数配用机械液压式控制系统，采用高速弹性调速器或调速泵作为感应机构，由同步器、调速器错油门组、中间错油门和油动机等组成。125MW 和 300MW 级汽轮机的调节系统采用旋转阻尼作为感应机构，它和放大器、同步器、高中压油动机、启动阀等组成液压调节系统，其示意图如图 1.1 所示。

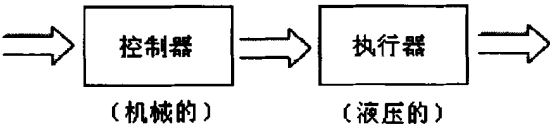


图 1.1 机械液压式控制装置示意图
Fig. 1.1 Mechanical hydraulic control schematic diagram

这种系统的控制器的特点^[8-11]是由机械元件组成的，执行器是由液压元件组成的。这种调节系统的调节精度低，反应速度慢，运行时工作特性是固定的，不能根据转速变化以外的信号调节需要来作及时调整，而且调节功能少。

(2) 电液并存控制系统

20 世纪 60 年代初，电气液压式控制系统 EHC（Electro-Hydraulic Control）得到开发，这种系统有两个控制器，控制器 1 由电气元件组成，控制器 2 由机械元件组成，执行部件仍保留原来的液压部分，其示意图如图 1.2 所示。

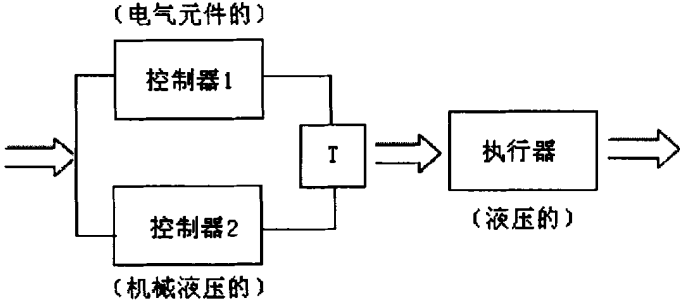


图 1.2 电气液压控制装置示意图
Fig. 1.2 Electro-hydraulic control schematic diagram

电液并存控制系统的特点^[12-14]是很容易实现信号的综合处理，控制精确度高，能适应复杂的运行工况，而且操作、调整和修改都比较方便。由于早期电气元件的可靠性还比较低，组成电路的可靠性还不能满足汽轮机控制系统的要求，因此保留了控制器 2 作为后备，当电调电路出现故障时，还有机械液压式控制系统接

替工作，以保证机组的连续安全运行。

(3) 模拟电液控制系统

汽轮机模拟电液控制系统的控制器 AEH (Analog Electro-Hydraulic Control)由电子电路组成^[15]，有美国 GE 公司的 MARK-II A 型^[16]，法国阿尔斯通公司的 REC-70 型^[17]。这种系统的控制器是由模拟电路组成的，执行部件仍保留原有的液压部分，两者之间通过电液转换器相连接，如图 1.3 所示。

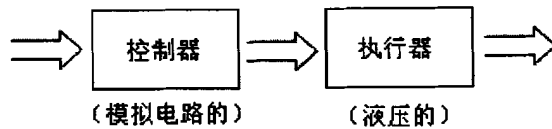


图 1.3 模拟式电气液压控制装置示意图
Fig. 1.3 Analog electro-hydraulic control schematic diagram

(4) 数字式电调控制系统

汽轮机数字式电调控制系统可以分为专用型和通用型两种。专用型数字式电调控制系统有美国西屋（WESTING HOUSE）公司的 DEH- II 型^[18]，法国阿尔斯通公司的 MICRO-REC 型，英国 GEC 公司的 MICRO-GOVERNOR 型^[19]，新华电站控制工程公司的 DEH-III型^[20]。通用型数字式电调系统采用分散控制系统（DCS）构成^[21]，有瑞士 ABB 公司的 PROCONTROL-P 型^[22]，新华电站控制工程公司的 DEH-III A 型^[20]，美国西屋（WESTING HOUSE）用 WDPF 组成的 DEH-III型^[18]，日立公司的 HI-ACS-3000 型^[23]，美国 ETSI 公司的 INFI-90（贝利公司产品）^[24]和美国 MCS 公司的 MAX1000^[25]。

数字式电气液压控制系统的组成特点是控制器用数字计算机实现，执行元件仍保留原有的液压部分，如图 1.4 所示。近年来，在分散控制系统发展的影响下，由分散控制系统组成的数字电调成为主流控制系统。

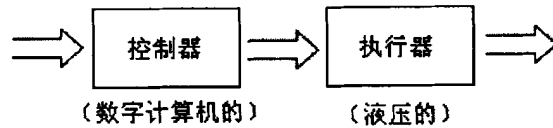


图 1.4 数字式电气液压控制装置示意图
Fig. 1.4 Digital Electric hydraulic control schematic diagram

1.3 汽轮机控制系统的技术现状

国内大容量的汽轮机的各种控制系统，从总体上来说都能满足汽轮机对调节和保安系统的要求，但是无论机械液压式调节系统，还是电液并存调节系统、模拟电调控制系统和数字电调控制系统都存在需要改进和完善之处。

(1) 机械液压式调节系统

我国从 60 年代初开始采用原苏联生产的大容量汽轮机及其机械液压式调节系统^[26]，目前国内使用的近 200 台 200MW 汽轮机，绝大多数采用机械液压式调节系统。

液压工作和润滑为 2.0MPa 的透平油，高灵敏度的高速弹性调速器或调速泵作为转速敏感元件；同步器用来危急遮断油门的挂闸，机组升速、并网和加减负荷；调速器错油门组的分配错油门和中间错油门作为放大机构，油动机作为最后放大机构和执行机构；功率限制器，可以在任意负荷下限制机组的功率；微分器可防止机组甩负荷时汽轮机超速，限制汽轮机动态超速。额定转速 103% 时，保安系统的危急遮断器工作，额定转速 110% 时，附加保安工作，主汽门和调节汽门关闭。

机械液压调节系统响应速度较低，机械间隙引起的迟缓率较大，静态特性固定无法根据需要而任意变动。但是由于它的可靠性在相当长一段时间内比电子元件高，其特性也能基本满足汽轮机运行的要求，所以普遍采用。

(2) 电液并存控制系统

电液并存控制系统^[27]是近几年针对机械液压系统存在的问题而采用的解决方法。电调系统运行时，液压调节系统自动跟踪，液压调节系统运行时，电调系统自动跟踪，两系统无扰切换，而且都可以独立完成汽轮机启动、升速、并网、带负荷以及负荷调节的全过程控制。

电调和液调都是通过电液切换去控制油动机的，电调与液调的分界点是电液切换阀，切换阀的工作位置由直流电磁阀控制，其下限位是电调位，上限位是液调位。当处于液调位时，操作人员通过控制同步器来控制调速错油门滑阀的油压，然后再经过切换阀来控制中间错油门；当处于电调位时，电调控制系统通过控制电液转换器直接控制二次脉冲油压、继而控制油动机。电液并存控制系统的保安系统和机械液压式控制系统基本相同。

(3) 模拟电液控制系统 (AEH)

模拟电液控制系统 (AEH) 是随着电子元件可靠性的提高，在 60 年代中期出现的，它由模拟电路组成。模拟电调系统的调速器部分（即运算部分）由电子元件组成而执行部件仍采用液压执行器，电调的电子部分很容易实现信号的综合处理，控制精度高，能适合各种不同运行工况的要求，而且操作、调整和修改都比较方便，电调的液压部分（液压执行器）输出推动力大，响应速度快。

模拟电液控制系统一般有调节系统、监视系统、保护系统和液压伺服系统组

成。调节系统的功能主要包括全程转速和功率调节；监视汽轮机在运行过程中的机械参数变化情况，包括转速、轴承振动、轴向位移、转子和汽轮机的热膨胀和轴的挠度；在汽轮机组故障情况下停止汽轮机以避免故障的扩大或设备的损坏。

(4) 数字式电液控制系统 (DEH)

随着计算机技术及网络技术的迅速发展，出现了以计算机为基础的数字式电调^[28]，目前我国火电厂中的大多数 300MW、600MW 级汽轮机采用数字式电调控制系统，特别是近十年以来，几乎所有新建的大容量汽轮机组均采用数字式电调。

数字式电调系统由以计算机为基础的数字控制系统，ETS (Emergency Trip System)危急遮断系统^[29]和 EH 液压控制系统^[30]等组成。DEH 系统包括转速和负荷控制、超速保护、负荷限制、阀门控制和管理、热应力计算，汽门快关及 CCS (Coordinated Control System)协调控制^[31]等。DEH 控制系统可以满足汽轮机安全运行和启停的所有要求。

(5) 汽轮机控制系统的应用现状分析

从我国各火电厂调查的情况看，现有的各种汽轮机控制系统均能达到汽轮机的调节和保安要求^[32]。机械液压式调节系统是传统成熟的设备，但由于存在其本身无法克服的不足，如机械误差引起的迟缓率大，特性曲线线性差，以及无法满足电厂的自动化和电网集中调度等问题，已经开始被电调控制系统所取代。

电液并存控制系统，是一种从机械液压式调节到电调控制系统的一种过度产品，主要用于对原火电厂汽轮机调节系统进行改造而采用，而新建电厂一般少采用此类系统^[33]。

模拟式电调的使用情况较好，能够满足汽轮机安全运行和启停的要求。而其主要原因是模拟式电调电路结构直观，使运行人员和维护人员对系统的结构能深入了解，在查找问题和处理故障时，心中有数，能较快、较准地找到原因，保证了系统良好的工作。但因技术不断发展，模拟电路组成的电调已不再产生，而数字式电调控制系统已开始广泛使用^[34]。

数字式电调控制系统 (DEH) 分为两大类即专用型电调控制系统和通用型电调控制系统^[35]。现有的 DEH 系统的工作可靠性已完全满足大容量汽轮机安全运行的要求，所有的 DEH 系统都能很好地满足火电机组的转速控制和负荷控制，但还有许多 DEH 系统的功能发挥得不够理想，例如：现有的 DEH 系统的自动汽轮机控制 ATC (Automatic Turbine Controls) 功能^[36]普遍不完善，没有在电厂真正使用；许多机组不能正常实现阀门管理功能，即使投入使用也存在一些不足；几乎所有

的 DEH 控制系统的汽门快关功能都不完善；而协调控制（CCS）只有一些简单的功能，无法进行有效的复杂协调控制^[37]。造成这些问题的原因是多方面的，既有 DEH 控制系统本身的原因，也有使用人员素质的原因。

1.4 汽轮机控制系统的发展

(1) 数字式电调系统的广泛采用

随着技术水平的发展，大容量汽轮机控制系统的发展方向应该是广泛采用数字式电调。从总体看来，主要是采用通用型数字式电调系统。专用型数字式电调由于专用化程度高，电厂运行人员和维护人员对系统了解较差，使用情况不如通用型数字电调。目前专用型数字式电调的功能大多数未能全面发挥，其中特别是美国西屋（WESTING HOUSE）公司生产的 DEH-III 型^[38]专用数字电调的应用仅限于转速控制、负荷控制和超速保护等基本功能，新华电站控制公司的 DEH-III 型专用数字电调^[39]，在引进型 300MW 汽轮机上的应用与西屋公司的电调系统相似。许多专用型数字式电调系统生产厂家已改用通用型。通用型数字式电调控制系统的软件透明、直观，硬件通用性强，使工作人员可以深入了解系统，熟练地查找问题，解决问题。

(2) 通用型 DEH 系统的发展特点

通用型 DEH 系统采用分散型控制系统（DCS）组成^[40]；工程师站和控制员站采用 WINDOWS 95 或 WINDOWS NT 作为平台；控制软件采用组态方式；通讯方式由原来普遍采用的串行通讯改进为以太网网络通讯^[41]。这些均符合国际标准 IEEE802.3 协议^[42]，通讯速率也由几 Kbps 上升到几 Mbps。硬件采用通用的 INTEL 的 80X86 或 PT CPU，过程控制板的通用性和互换性很高。通用型 DEH 系统发展的主要特点是软件和硬件都广泛采用标准化产品。

(3) 控制思路的发展

最新资料表明，一些先进的设计思路已获使用，如美国 MCS 公司所采用的 DEB (DIRECT ENERGY BALANCE) 协调控制^[43]是一种先进的设计思路，它随着负荷的改变，自动调整控制器参数，使之适应对象动态特性随负荷的变化，改变部分负荷下单元机组的特性。在马鞍山第一发电厂使用情况很好，已有效地消除了单元机组对象动态特性随负荷变化的改变，提高了单元机组在不同负荷下的性能。

1.5 本文主要研究结构和内容

本文给出了汽轮发电机调速控制系统设计改造过程，主要包括以下内容：

第1章简述了汽轮发电机组调速系统的重要作用，以及汽轮机调速系统的发展过程，并比较了各种控制方式的优缺点，指出现代汽轮机控制是朝着自动化程度高、操作简便、安全可靠，以微型计算机控制为主体的方向发展。

第2章主要阐述了汽轮机调速系统的工艺流程、原理、控制要求。其工作原理是通过505控制器将数字信号转换成电信号，再通过电液转换器将电信号转换成液压信号，控制执行机构的动作，即油动机的动作，调节蒸汽的进气量，达到控制转速的目的。

第3章主要对汽轮机调速系统硬件进行了设计。汽轮机调速系统以505控制器、电液转换器、油动机等构成，再辅以危机遮断器、抽气速关阀进行安全保障。

第4章主要对汽轮机调速系统的软件进行了设计。对DEH构成进行了简介，其包括四个部分，分别为测量部分、给定部分、调节部分及伺服控制部分，并建立了数学模型，对传递函数分四种情况进行探讨。其次对控制原理进行了简介，从设定值的形成及逻辑控制、自动同期、并网带初负荷、流量指令及ADS的功能形成逻辑进行了详细的阐述，分析了各种情况下DEH内部的逻辑控制图和实现的功能。

第5章重点对汽轮机调试介绍，从执行器的标定，汽轮机启动方式的选择、转速PID的运行方式、超速试验、机组带负荷运转及停机六个方面进行了阐述，实现机组的试车成功。

第 2 章 汽轮机调速系统工艺流程及控制要求

2.1 汽轮发电机工艺流程

首秦公司自备电站有一台 75T/h 锅炉,通过 75T 锅炉产生中压蒸汽(3.43MPa),通过格栅、喷嘴等将蒸汽的热能转换为机械能,驱动汽轮机旋转。汽轮机通过联轴器带动发电机转动,进而进行发电,年发电量约为 9800 万 KWh。

汽轮机工艺流程如图 2.1 所示,此工艺流程重点包括三个流程,一是蒸汽系统流程,高温蒸汽从 75T 锅炉出来后,进入汽轮机主蒸汽阀,通过油动机及错油门控制调节阀的开度,进而控制蒸汽的流量及压力,推动汽轮机转动,进行发电工作。另一路是油系统,主要包括润滑油及调节油,润滑油起到对各机组轴承的润滑作用,调节油主要起到动力油作用,推动油动机的动作,起到调节作用,控制主气门、速关阀门、危急遮断器等设备的动作,起到安全保护汽轮机的作用。第三路冷却水系统,一部分通过除盐站、除氧器进行处理,进入锅炉;另一部分对汽轮机凝结器、汽轮机冷油器、发电机空冷器进行冷却,保证蒸汽的温度和油的温度,满足工艺条件要求。

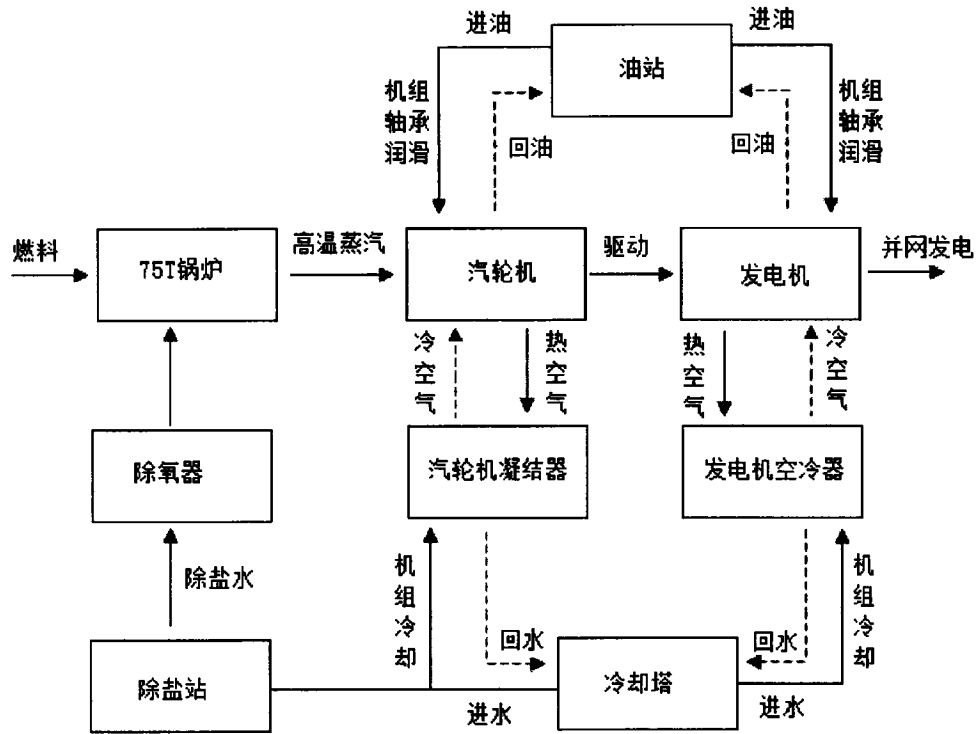


图 2.1 汽轮机工艺流程图
Fig. 2.1 Process flow diagram of steam turbine

2.2.1 汽轮机调速系统原理

发电机在并网过程中，需要严格控制转速，进行躲避临界点，以保证机组的运行，所以对速度的调节控制非常重要。首秦公司自备电站汽轮机有电液调节系统一套 DEH (Digital Electric hydraulic control system)，汽轮机的调节系统是由测速部件、放大部件、执行部件和汽轮机（调节对象）四部分组成的转速负反馈的自动调节系统。现场反馈回来的转速以及功率进入 505 控制系统，与用户设定的值相比较，根据比较的结果调整信号，控制电液转换器，通过液压执行机构调整相应的阀门及蒸汽流量，再控制转速及功率，通过不断的调整，达到我们所需要的转速或者功率。不论是单机或是并网带负荷，调节系统都是依据外界负荷的变化引起机组转速（或频率）变化来自动调整汽门的位置以适应外界负荷的变化。调节系统的给定装置为同步器它的作用是在单机运行时可以改变机组的转速，在并网运行时可以改变机组的负荷，调节原理图如图 2.2 所示。

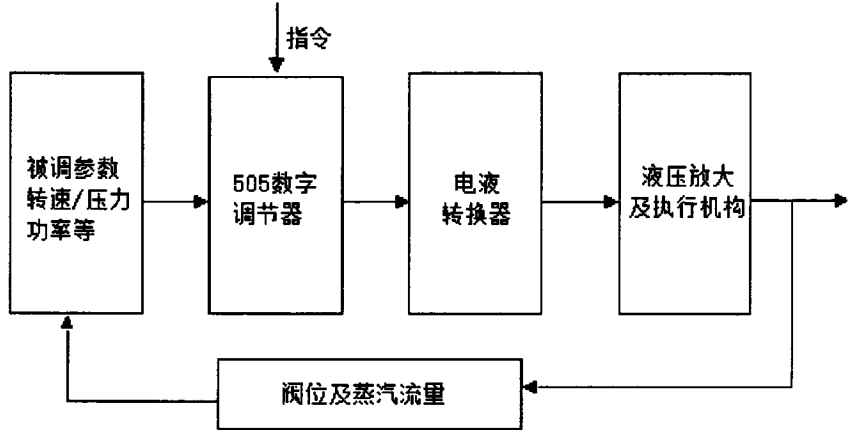


图 2.2 汽轮机调节原理框图

Fig. 2.2 Steam turbine regulation principle diagram

该系统主要由 WOODWARD505 TURBINESC ONTROL 调速控制器，杭州汽轮机调速系统的电液转换器、错油门、油动机、阀门执行机构，美国 HONEYWELL 集散控制 DCS 计算机系统、FAIL SAFE CONTROL (ESD) 系统构成。该方案为新型的现场调速设备，以微处理器为核心的 505 调速控制软件、先进的工业仪表测量技术和计算机通讯技术集成的新系统。主要过程是通过现场转速测速探头接入 WOODWARD505TURBINES CONTROL 调速控制器作为测量值，通过和内置编程设定的暖机/额定转速给定值比较，经过 PID 控制模块运算处理，再通过 LSS 数字式信号低选总线输出一个 4-20MA 电流模拟信号控制现场的电液转换器，改变蒸汽汽门开度大小，调节汽轮机转速恒定在所希望的转速上，这种调速方法最大限度的保护了机组。汽轮机调速系统示意图如图 2.3 所示，其主要包括 505 控制系统、

转速测量及反馈系统、执行系统及高性能过程控制站、故障安全控制系统。

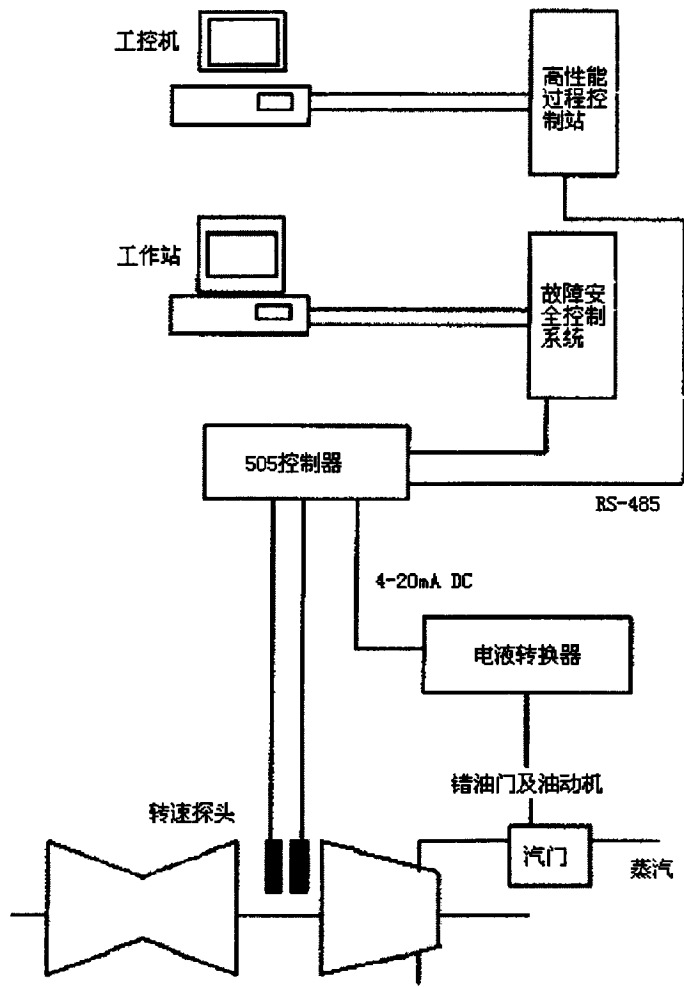


图 2.3 汽轮机调速系统示意图

Fig. 2.3 Steam turbine speed control system schematic diagram

2.2.2 调节油系统工艺流程图

汽轮机的工艺流程主要是两部分，一是蒸汽系统，另外一个油系统，蒸汽系统主要是推进汽轮机旋转，油系统主要起到润滑、保护作用及动力作用。汽轮发电机组的供油系统是保证机组安全稳定运行的重要系统。汽轮发电机组的供油系统包含润滑油和调节用油的两个系统。在机组正常运行时，先启动辅助油泵，将汽轮机油从油箱中吸出，送至各轴承润滑点及盘车装置，待机组启动后，主油泵开始运行，辅助油泵连锁停泵。油经主油泵加压后分至四路，如图 2.4 所示。

- (1) 一路是机组的润滑油，对各汽轮机及发电机各轴承点进行润滑；
- (2) 一路是脉冲油，通过电液转换器，将动力油转换为脉冲油，作为油动机的动作的控制油；

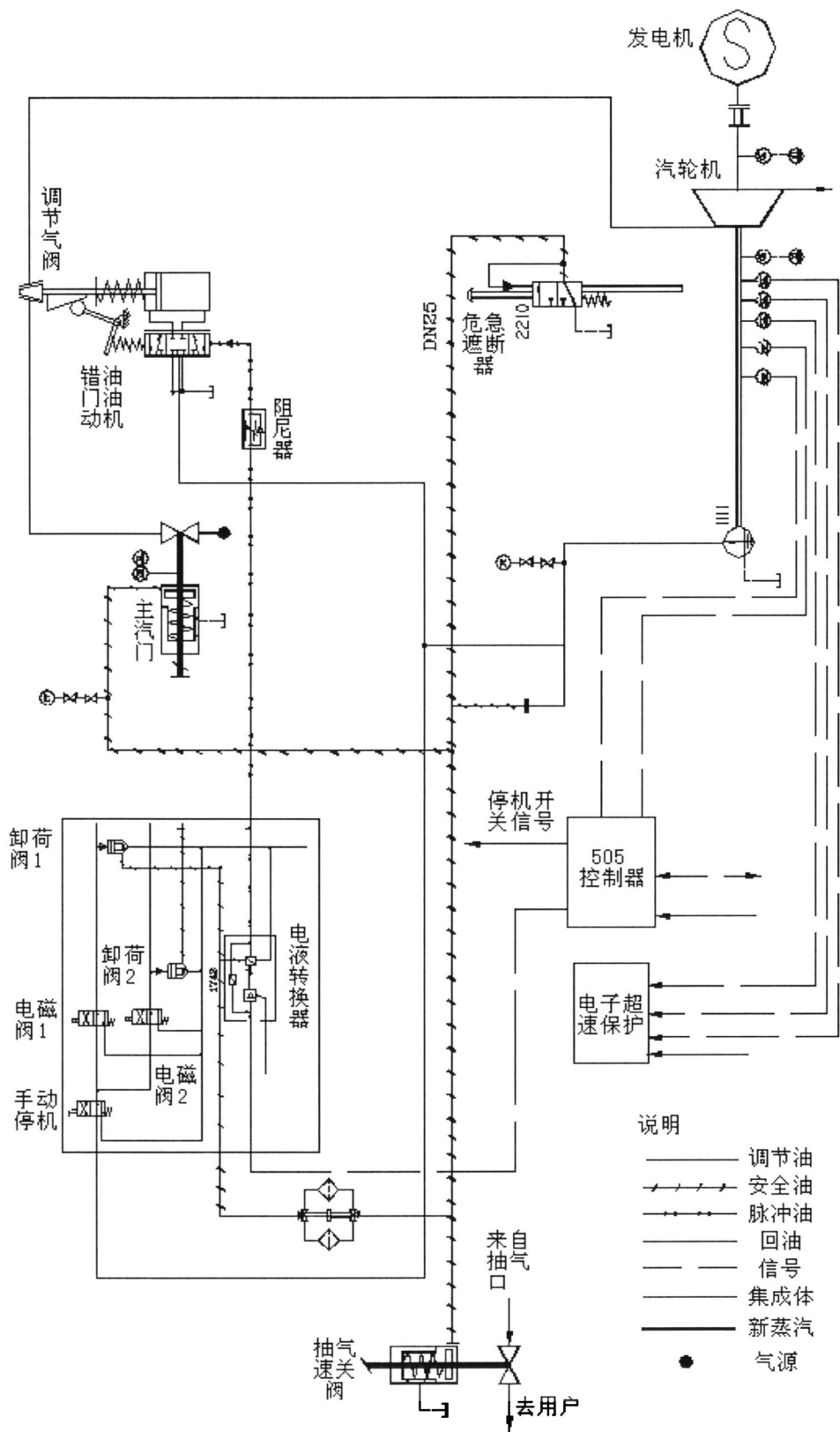


图 2.4 汽轮机调节油系统工艺流程图
Fig. 2.4 The control oil system process flow diagram of steam turbine

(3) 一路作为动力油，驱动错油门的油动机动作；

(4) 一路是安全油，总共有 4 个部位，分别控制危机遮断器、抽气速关阀、主汽门、电液转换器，通过泄油实现机组停机保护。

机组的润滑油系统采用汽轮机透平油，系统除为全部汽轮发电机组轴系的主轴承、推力轴承和盘车装置提供润滑油外，还为发电机提供高压和低压密封油，同时为机械式超速危急遮断系统提供压力油。

润滑油系统主要由润滑油主油箱、主油泵、交流电动辅助油泵、注油器、冷油器、直流事故油泵、顶轴装置、油烟分离装置和净油装置等组成。

在正常运行时，润滑油系统的全部需油量由主油泵和注油器提供。主油泵的出口压力油先进入润滑油主油箱，然后经油箱内油管路分为两路：一路向汽轮机机械式超速危急遮断装置供油，同时作为发电机密封油；另一路作为注油器的射流动力油。注油器的出油分为三路：主油泵进口油；经冷油器送至各径向轴承、推力轴承以及盘车装置的润滑油；发电机密封油。

主油泵向机械超速危急遮断装置提供的一路油，经过一固定节流孔在危急遮断油路中建立起压力。当危急遮断装置动作时，会在瞬间使危急遮断油路泄油失压。由于有节流孔，此时流入该油路的压力油不足以影响快速泄油失压；另一方面，流过节流孔的油量很少，因而也不会造成主油泵出口油压和油量的过大变化，以维持其他用油部件的正常供油量和油压，起到保护机组的作用。

调节油是由主油泵加压后，一方面用来推动油动机的动作，改变蒸汽调节阀门的开度，另一方面通过 505 控制器后，变成脉冲油用来控制五位三通的错油门机构，改变油动机进油量的大小，进而控制油动机动作的幅度大小，达到调节阀门开度的作用。

2.2 汽轮机调速系统控制要求

根据前节对汽轮机调速系统工艺流程的介绍，联系汽轮机的启动过程和正常运行状态，控制系统必须满足一定要求：

(1) 当主汽门完全开时，调速系统应能维持汽轮机空负荷运行。

(2) 当汽轮机由满负荷突然甩负荷时，调速系统应能维持汽轮机的转速在危急保安器的动作转速以下。

(3) 主汽门和调速汽门阀杆、错油门、油动机以及调速系统连杆上的各活动连接装置应没有卡涩和松动现象，当负荷改变时，调门应均匀而平稳地移动，当系统负荷稳定时，负荷不应晃动。

(4) 当危急保安器时，应保证主汽门关闭严密。

2.3 本章小结

本章主要是围绕着汽轮发电机的工艺流程进行了简述，汽轮机发电工艺是75T锅炉产生的中压蒸汽，推进汽轮机运转，带动发电机发电。结合工艺流程，主要有三条主线，一是蒸汽系统流程，二是油系统流程，三是冷却水系统流程。重点分析了汽轮调速系统的工艺流程（油系统流程）和工作原理，简单介绍了调速系统的主要组成结构，根据汽轮机调速系统工艺流程和工作原理，给出了汽轮机对调速控制系统的要求，为后续章节的硬件和软件设计做好铺垫。

zhi ku quan 20150807

第3章 汽轮机调速系统硬件设计

3.1 505 调速器工作原理及系统介绍

505 电子调节器比一般液压系统控制精度高, 自动化水平大大提高, 热电负荷自整性也高, 它能实现升速(手动或自动), 配合电气并网, 负荷控制(阀位控制或功频控制), 抽汽热负荷控制及其它辅助控制, 并与 DCS 通讯^[24], 控制参数在线调整和超速保护功能等。能使汽轮机适应各种工况并长期安全运行。

3.1.1 基本原理

并网前在升速过程中, 转速闭环为无差控制, 505 控制器将测量的机组实际和给定转速的偏差信号经软件分析处理及 PID 运算后输出标准电流信号给电液转换器, 电液转换器接受调节器输出的标准电流信号, 输出与输入电流信号相对应的调节信号油压。调节信号油压经液压伺服机构放大, 控制油动机活塞移动, 通过调节杠杆, 改变调节汽阀的开度, 调节汽轮机高压段、低压段的进汽量。从而减少转速偏差, 达到转速无差控制, 当转速达到 3000r/min, 机组可根据需要定速运行, 此时 505 控制器可接受自动准同期装置发出的或运行人员手动操作指令, 调整机组实现同步, 以便并网。

机组并网后, 如果采用功率闭环控制, 可根据需要决定 505 控制器使机组立即带上初负荷, DEH 实测机组功率和机组转速作为反馈信号, 转速偏差作为一次调频信号对给定功率进行修正, 功率给定与功率反馈比较后, 经 PID 运算和功率放大后, 通过电液转换器和油动机控制调节阀门开度来消除偏差信号, 对机组功率实现无差调节, 若功率不反馈, 则以阀位控制方式运行, 即通过增加转速设定, 开大调节汽阀, 增加进汽量达到增加负荷的目的。在甩负荷时, 505 控制器自动将负荷调节切换到转速调节方式。机组容量较小时建议可不采用功率闭环控制。

在机组带上一定电负荷后可根据需要带热负荷, 投入抽汽控制。505 控制器根据机组工况图对机组电负荷及抽汽压力进行自整控制。

3.1.2 505 控制器系统构成

505 是基于 32 位微处理器控制用的数字控制器。它集现场组态控制和操作盘于一体。操作盘包括一个两行(24 个字符)显示, 一个有 30 个操作键的面板, 操作盘用来组态 505 控制器, 在线调整参数和操作汽轮机起停及运行。通过操作面板上的两行液晶屏可观察控制参数的实际值和设定值。

在控制回路, 505 控制器内有三个相互独立的控制器通道: 转速/负荷控制 PID 回路、辅助控制 PID 回路、抽汽控制 PID 回路。前两者通过低选输出, 另外有一个 PID 控制回路可串接在转速控制回路上用于串级控制。其通讯接口有三种。控制器有三种操作模式: 程序模式、运行模式和服务模式, 程序模式用于组态控制器的功能以适合具体的控制要求, 程序模式一旦组态后不再改变, 直至需要改变控制功能时。运行模式主要用于操作汽轮机启动正常运行至停机整个控制过程。服务模式可以在运行状态修改参数, 根据具体汽轮机控制需要通过编程组态于相应的系统。

本系统控制器有两个控制回路输出 4-20mA, 负载能力为 360 欧姆, 同时可以加颤振电流为 0-10mA。505 控制器有两个转速传感器输入, 其信号输入为高选, 模拟量输入为 4-20mA, 有六个通道可用于组态满足具体使用, 输入阻抗为 200 欧姆。可用于功率及主汽压输入, 由于只有一个通道是隔离的, 当采用其余通道输入时需考虑信号隔离问题。

接点输入为干接点, 共有 16 个, 其中 4 个指定用于停机(机组正常要求常闭), 外部复位(闭合短脉冲信号), 转速升高(闭合短脉冲信号), 转速降低(闭合短脉冲信号)。其余接点可组态使用, 用于并网运行汽轮机的控制系统必须组态两个用于发电机出口油开关触点及并网油开关触点, 这两个触点直接由油开关辅助触点引出(机组并网正常要求常闭), 另外也可组态外部停机(闭合短脉冲信号), 投入解除抽汽控制(投入时为常闭, 解除时为常开), 外部运行(闭合短脉冲信号), 抽汽升高(闭合短脉冲信号), 抽汽降低(闭合短脉冲信号)。

继电器输出容量为 28VDC 1A, 共有八个继电器, 其中两个用于指定为停机及报警, 停机继电器正常带电, 停机时不带电, 另外抽汽机组可组态抽汽投入状态继电器, 其余继电器可组态所需功能, 同样也可组态停机。

控制系统用输入测量元件, 主要包含测速元件、测功及测压元件。

测速元件可以用磁电式或电涡流式测速头, 本系统采用磁电式传感器。磁电式传感器内装永久磁钢, 在其端面磁头处形成磁场, 一旦该处磁阻发生变化, 传感器内部线圈能感应输出响应的交流电压信号。在旋转体上安装导磁体发讯齿轮, 齿轮模数大于 2, 传感器可安装在径向。传感器端面距齿轮顶 1mm 左右, 距离较小则感应出较大的输出信号, 传感器输出为双芯屏蔽线, 其屏蔽线与双芯线中任一根相并联后再连接至 505 转速测量通道“-”端。

测压元件采用常规电容式两线制压力变送器, 压力变送器供电可以外部供电

或控制器本身供电, 由于 505 控制器的模拟量输入通道只有一路是隔离的, 当压力输入采用不隔离通道时, 必须考虑输入隔离问题, 否则须用 505 本身供电 (通过 505E 内部跳线), 采用外供电方式, 测功元件采用发电机功率变送器。

3.1.3 505 控制器系统介绍

汽轮机采用由数字电液控制系统实现的控制方式, 并网前对汽轮机进行转速控制, 在并网后对汽轮机进行负荷控制, 并能在纯凝工况或抽汽工况下安全经济地运行。

505 控制系统的基本自动控制功能是汽轮机的转速控制和负荷 (热电负荷) 控制功能。负荷控制是通过提高转速设定完成的, 同时它也具有其它辅助功能。

(1) 启动升速及转速控制和保护

可以选择自动、手动、半自动三种启动方式之一, 这三种方式的切换只有在停机后在控制器程序组态中改变来实现。在 505 控制下可进行电超速保护试验, 机械超速保护试验, 具有超速保护(110%)功能。

(2) 同步及自动初负荷控制

机组定速后, 可由运行人员通过手动或“自动准同期”装置发出的转速增减信号调整机组转速以便并网。机组并网后, 505 控制器立即自动使机组带上一定的初负荷以防止机组逆功率运行, 当不采用功频控制时控制器将不设初负荷。

(3) 负荷控制及甩负荷

505 系统能在汽轮发电机并入电网后可根据运行情况或电厂运行规程, 运行人员通过操作控制器转速设定控制汽轮发电机从带初始负荷直到带满负荷, 并能根据电网要求, 参与一次调频。

系统具有开环和闭环两种控制方式去改变或维持汽轮发电机的负荷。开环控制根据转速给定值及频差信号确定阀门的开度指令。闭环控制则以汽轮发电机的实发功率作为反馈信号进行负荷自动调节, 该种方式即为功频控制方式。负荷控制可以通过在并网后增加或减少转速设定来实现。抽汽控制可自动或手动投入, 在自动投入情况下, 在抽汽菜单显示时操作投入, 然后通过增加或减少抽汽压力设定即可增减抽汽负荷。投入抽汽控制时控制器将对机组热电负荷进行自整控制, 当机组甩负荷时控制器切换到转速控制方式并切除功率和抽汽控制, 维持汽轮机在同步转速 (2950r/min) 下空转, 以便汽机能迅速重新并网。

(4) 操作及通讯

所有控制指令可以通过控制器本身键盘、触点、遥控或通讯方式。控制器配

备有 RS-232、RS422、RS485 三种通讯接口供用户选择与 DCS 通讯。通讯协议采用 MODBUS 协议。例如转速设定升降可以通过 505 面板 ADJ 键调节，也可以通过 505 外部转速升降触点控制。硬接线开关量采用干接点，模拟量采用 4-20mA。所有控制指令可以通过控制器本身键盘，遥控或通讯方式输入。

(5) 键盘和显示器

505 控制器面板由 30 个操作键和 24 个字符 LED 液晶显示屏组成，LED 液晶显示屏可显示 505 控制器在控制汽轮机过程中的所有信息，操作键可完成控制汽轮机的所有操作。其功能包括 SCROLL、SELECT 选择键、ADJ 调整键、PRGM 编程键、RUN 运行键、STOP 停机键、RESET 复位键、ALARM(F1)报警键、OVERSPEED TEST ENABLE (F2)超速试验投入键及功能键等多项功能。

3.2 电液转换器原理及调试

3.2.1 电液转换器原理

电液转换器的作用是将电信号转换成液压信号，控制液压油的流动方向及压力大小，控制油动机的动作，带动蒸汽调节阀的运转，达到调节蒸汽的作用。电液转换器的原理图如 3.1 所示。

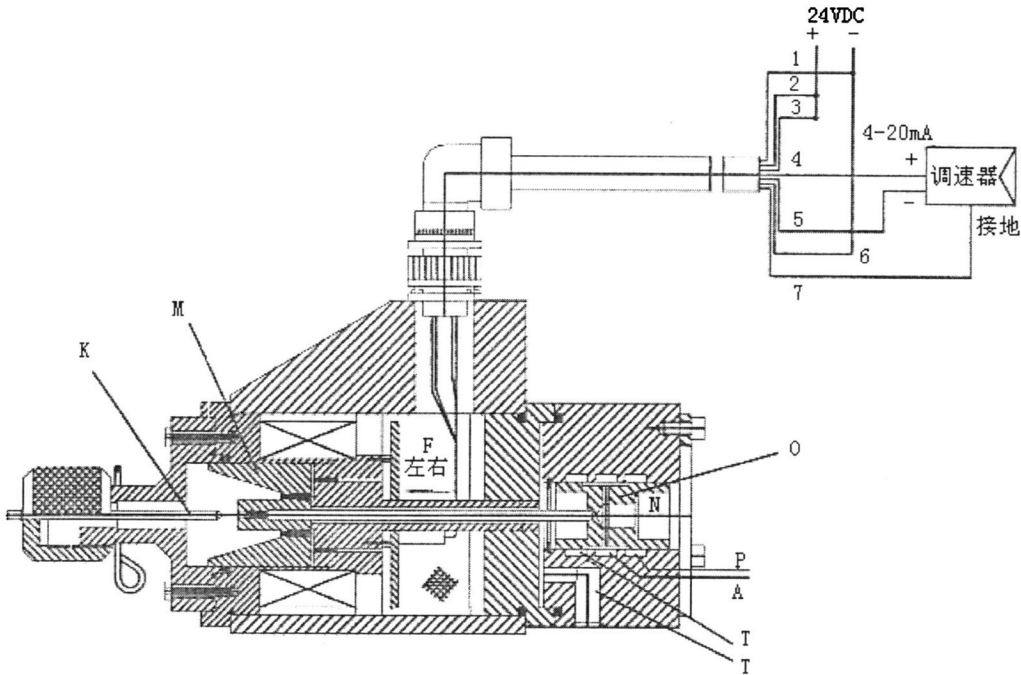


图 3.1 电液转换器原理图

Fig. 3.1 The principle diagram of electro-hydraulic converter

当信号电流 I 为零时，芯棒 M 与滑阀 O 处于左端极限位置，压力油腔 P 与控

制油压 A 之间节流口关闭。A 腔经阀芯中的内孔与回油腔相通，所以 A 腔处于卸压状态。

当信号电流 ($I=4-20\text{mA}$) 增加时，芯棒 M 在磁场作用力下，或比例地产生一个向右作用力 F，推动滑阀 O 向右移动，使控制油腔 A 与回油腔 T 的流通面积减小，与压力油腔 P 的流通面积增大，根据流量平衡原理，控制油压 A 升高，随着油压 A 的升高，与 A 油腔相通的 N 腔压力也升高。当产生的油压力 f 与 F 相抵消时，滑阀 O 达到平衡，控制油压 A 稳定。A 腔油压值即是成比例地对应输入信号的相应值。

当信号电流减小时，芯棒 M 在磁场作用力下，产生一个向左作用力 F。这时，由于与 A 油腔相通的 N 腔油压力大于芯棒作用力，滑阀 O 向左移动，使得控制油腔 A 与回油腔 T 的流通面积增大，与压力油腔 P 的流通面积减小，控制油压 A 降低。同时，N 腔油压亦降低，芯棒上的磁场力与油压力相等，滑阀达到平衡，控制油压 A 稳定。

在手动工作状态，旋动手轮，经传动杆 K 推动芯棒 M 移动，即能调到所要求的控制油压 A。

一般对应 4-20MA 控制电流输出的二次脉冲油压 A 为 0.15-0.45Mpa，在这一段范围内控制特性的线形度较高。

3.2.2 电液转换器调试

为了保障电液转换器的稳定运行，在使用前需要对其进行调试，调试步骤如下：

- (1) 电液转换器油温和油压达到要求，油温一般在 $35-45^{\circ}\text{C}$ ，油压一般控制在 4Mpa 以内；
- (2) 将电液转换器手轮调至最左面，达到初始化要求；
- (3) 根据设计检查电和油压的连接；
- (4) 将空气从电磁阀和液压件中排出；
- (5) 提高和测量进油压力（最大 40Bar）；
- (6) 提供电源；
- (7) 提供系统最低的模拟信号；
- (8) 测量输出压力；（同时增加输出压力的模拟信号，看输出压力是否增加）；
- (9) 提供系统最高的模拟信号；
- (10) 利用电液转换器上的电位器 X1 调整所需要的最高压力；

- (11) 提供系统最低的模拟信号;
- (12) 利用电液转换器上的电位器 X0 调整所需要的最低压力;
- (13) 调试结束。

具体调试过程如图 3.2 所示，从调试的过程，可以得出，首先要使电液转换器调至最左面达到初始化要求，然后再调节最高压力和最低压力，实现满量程的调节过程。

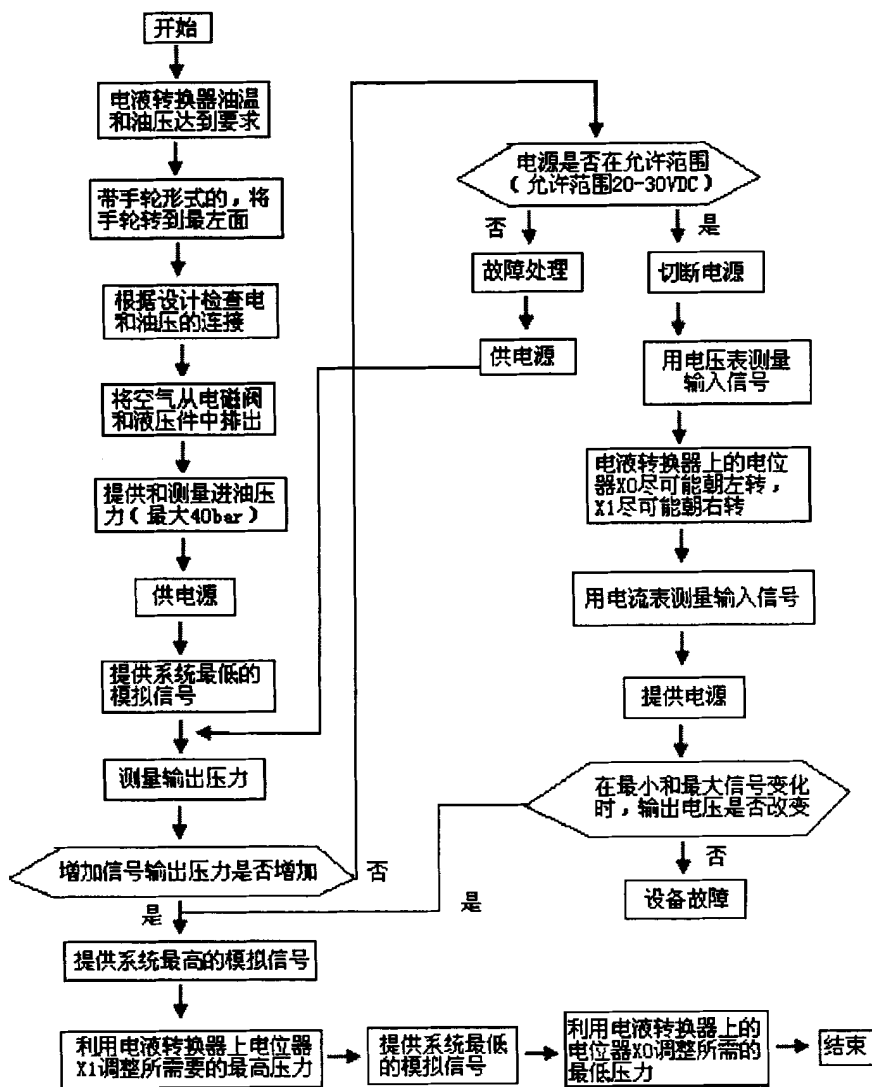


图 3.2 电液转换器调试过程
Fig. 3.2 Electric hydraulic converter debugging process

3.3 转速的测量

汽轮机的转速测量为磁电式转速传感器，是利用磁电感应来测量物体转速的，

属于非接触式转速测量仪表，具有很好的抗干扰性能，多用于发动机等设备的转速监控，在工业生产中有较多应用。

磁电式转速传感器是以磁电感应为基本原理来实现转速测量的。磁电式转速传感器由铁芯、磁钢、感应线圈等部件组成的，测量对象转动时，转速传感器的线圈会产生磁力线，齿轮转动会切割磁力线，磁路由于磁阻变化，在感应线圈内产生电动势。磁电式转速传感器的感应电势产生的电压大小，和被测对象转速有关，被测物体的转速越快输出的电压也就越大，也就是说输出电压和转速成正比，测量原理如图 3.3 所示。但是在被测物体的转速超过磁电式转速传感器的测量范围时，磁路损耗会过大，使得输出电势饱和甚至是锐减。

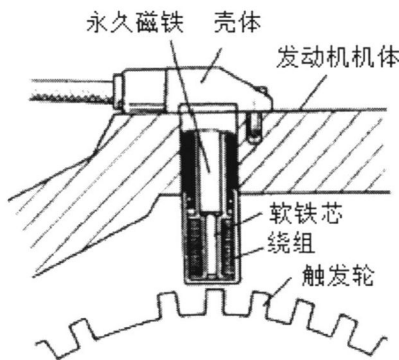


图 3.3 磁电式转速测量原理

Fig. 3.3 The speed measuring principle base on magnetoelectric

磁电式传感器主要由旋转的触发轮（被等分的齿轮盘,上面有多齿或缺齿）和相对静止的感应线圈两部分组成。当汽轮机运行时，触发轮与传感器之间的间隙周期性变化，磁通量也会以同样的周期变化，从而在线圈中感应出近似正弦波的电压信号。其产生的交流电压信号的频率与齿轮转速和齿数成正比。在齿数确定的情况下，传感器线圈输出的电压频率正比于齿轮的转速，其关系见式(3.1)。

$$f = \frac{n}{60} * z \quad (3.1)$$

其中 f 为频率，单位 Hz/s ， n 为被测的转速，单位转/秒， z 为汽轮机齿轮齿数，在设计中 z 一般为 60, 所以, 汽轮机每分钟转数 n 转化成频率为 f 的电压脉冲信号，将该信号接到 505 调速器中就可以参与控制了。在汽轮发电机中，我们一般对 3 组探头的数据传入 505 调速器，参与计算，采用三取二的原理控制超速，超速报警信号接线图如图 3.4 所示。转速超过 10% 认定为超速，任何两个转速超过 10%，报警继电器动作，发出汽轮机超速信号，该信号通过继电器输出驱动超速保护电

磁阀和危机遮断电磁阀，实现汽轮机超速限制、保护功能和机械超速试验备用保护功能。

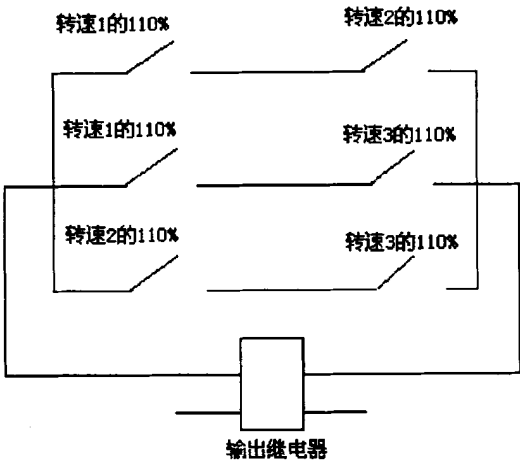


图 3.4 超速报警信号接线图
Fig. 3.4 Overspeed alarm signal wiring diagram

在每次大修之后，都应该进行超速试验。超速试验包括 OPC 试验、电超速试验和机械超速试验。

1) OPC（Overspeed Protective Control），定值为 103% 额定转速。包括两部分试验，一是 OPC 电磁阀试验：在发电机解列的情况下，直接动作 OPC 电磁阀，泄掉 OPC 油压，关闭所有调节汽门。另一个是 OPC 动作试验，动作的条件又分两种：

a. 在发电机解列的情况下，汽轮机的转速达到额定转速的 103%，DEH 输出 OPC 信号，OPC 电磁阀动作，所有调门关闭。

b. 当机组在 30% 额定负荷以上正常运行时，突然发电机解列，触发 OPC 信号，动作 OPC 电磁阀，关闭所有调门。OPC 信号的复位条件是发电机并网或者汽轮机的转速低于 3000rpm，然后由调门控制转速到 3000rpm，而不是转速低于 103% 额定转速，这样做的目的在于避免 OPC 信号频繁动作，损坏设备。试验时由运行人员设定转速目标值 3100rpm 和升速率 50-100rpm/min。

2) 电超速试验。定值为 110% 额定转速，个别机组设定为 109% 额定转速。试验之前要屏蔽 OPC 功能和机械超速功能，在发电机解列的情况下，由运行人员设定转速目标值 3310rpm 和升速率 50—100rpm/min。当汽轮机的转速大于额定转速的 110% 时，DEH 送出电超速信号到 ETS（Emergency Trip System）系统，动作 AST 跳闸电磁阀，泄掉 AST 油压，关闭所有主汽门和调门，汽轮机处于跳闸状态。

3) 机械超速试验。为了使汽轮机在 DEH 和 ETS（汽轮机的控制系统和保护系统）故障时在危急情况下能及时跳闸，关闭所有汽门，保证设备安全，在汽轮机

本体油路上还设计机械超速保护装置，其动作原理是当汽轮机转速达到机械超速定值时飞锤出击，通过碰钩使机械危急遮断机构动作，泄掉安全油压，并通过隔膜阀泄掉 AST 油压，关闭汽轮机进汽阀门，实现紧急停机。

3.4 油动机原理及构成

油动机总成是调节汽阀的执行机构，它将由放大器或电液转换器输入的二次油信号转换为有足够作功能力的行程输出以操纵调节汽阀，控制汽轮机进汽。油动机总成是断流双作用往复式伺服机构，以汽轮机油为工作介质，动力油用 0.8Mpa 的压力油。

油动机总成主要由油缸、错油门和反馈机构组成。错油门通过螺钉与油缸壳体连接在一起，油路接口处装有 O 形密封圈。油缸由油缸上下盖、活塞、活塞杆等构成，活塞配有填充聚四氟乙烯的专用活塞环，活塞动作时在接近上死点处有 $\sim 10\text{mm}$ 的阻尼区，用以减小活塞的惯性力和载荷力并降低其动作速度，缸盖上装有活塞杆密封组件，顶部配装活塞杆导轨及弯角杠杆支座。伺服机构借助油缸法兰来固定，油缸活塞杆上端装有拉杆，通过两端带有关节轴承的螺纹杆使拉杆与调节汽阀杠杆相连接，油动机总成结构如图 3.5 所示。

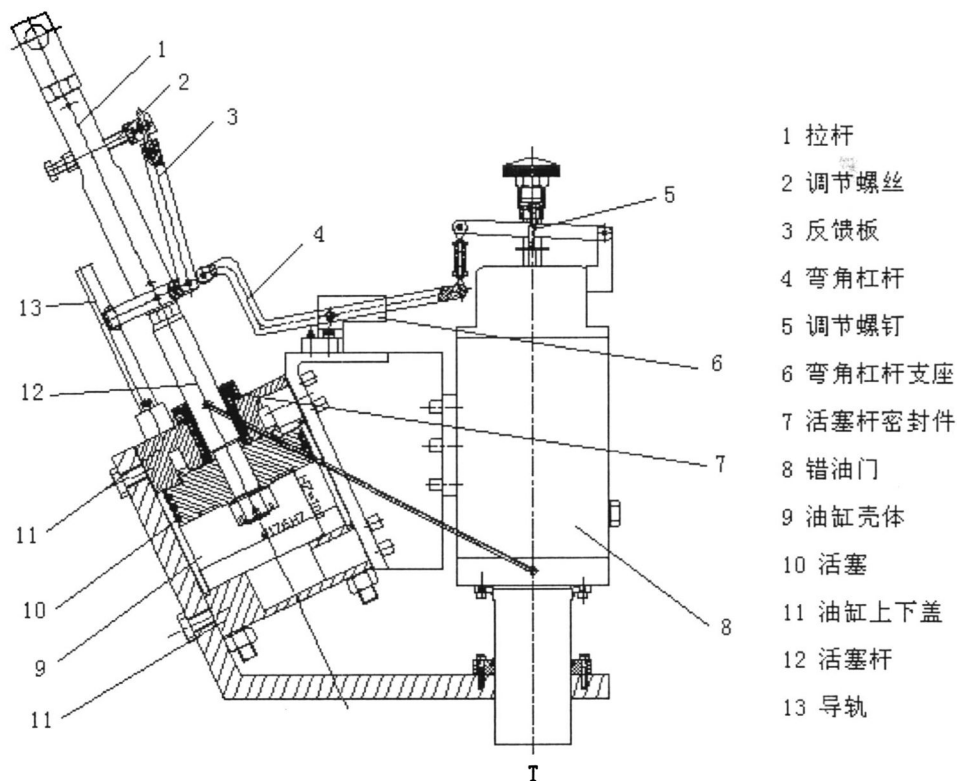


图 3.5 油动机总成机构
Fig. 3.5 Oil motor assembly mechanism

上套筒和下套筒装在错油门壳体，并与壳体用骑缝螺钉固定套筒与壳体中的腔室构成 5 档功用不同的油路，错油门示意图如图 3.6 所示。

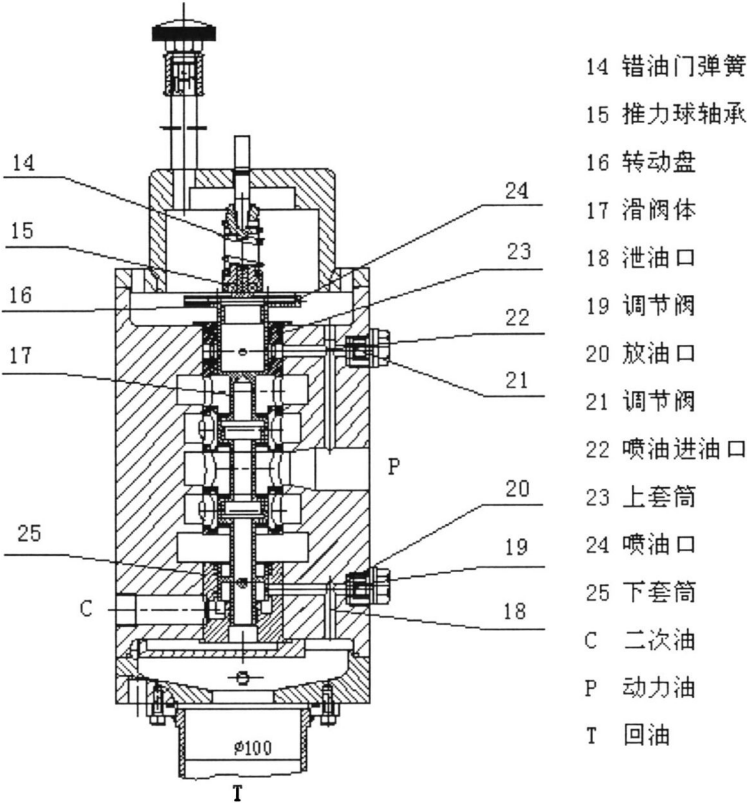


图 3.6 错油门机构
Fig. 3.6 pilot valve mechanism

中间是动力油进油，相邻两个分别与油缸活塞上、下腔相通，靠外端的两个是油动机回油。在工作时，油的流向由错油门滑阀控制，滑阀是滑阀体和转动盘的组合件，在稳定工况下，滑阀下端的二次油作用力与上端的弹簧力相平衡，使滑阀处在中间位置，滑阀凸肩正好将中间套筒的油口封住，油缸的进、出油路均被阻断，因此油缸活塞不动作，汽阀开度亦保持不变。若工况发生变化，如瞬时由于机组运行转速降低等原因出现二次油压升高情况时，滑阀的力平衡改变使滑阀上移，于是，在动力油通往油缸活塞上腔的油口被打开的同时，活塞下腔与回油接通，由于油缸活塞上腔进油，下腔排油，因此活塞下行，使调节汽阀开度加大，进入汽轮机的蒸汽流量增加，使机组转速上升。与此同时，随着活塞下行，通过反馈板，弯角杠杆，等的相应动作，使错油门弹簧的工作负荷增大，当作用在滑阀上的二次油压力与弹簧力达到新的平衡时，滑阀又恢复到中间位置，相应汽阀开度保持在新的位置，机组也就在新工况下稳定运行。如出现二次油压降低

的情况，则各环节动作与上述过程相反。

为提高伺服机构动作的灵敏度，在伺服机构中采用了特殊结构的错油门，其主要特征是在工作时错油门滑阀转动并上、下颤振。在构成滑阀的滑阀体和转动盘中加工有油腔和通油孔，在转动盘上端紧配有推力球轴承。

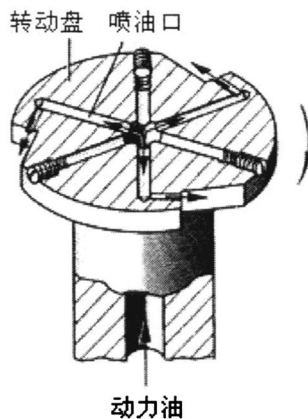


图 3.7 转动盘工作示意图

Fig. 3.7 Rotating disk schematic diagram

图 3.7 是转动盘工作示意图，压力油从进油孔进入滑阀中心腔室，进而从转动盘的 3 只径向、切向喷油孔喷出，在油流力作用下滑阀便连续旋转，转矩取决于喷油量，滑阀转速可借助调节阀来加以调节，滑阀的推荐工作转速为 $300\sim 800\text{r/min}$ （小尺寸滑阀用高转速），转速通常靠经验判断，也可从错油门壳体上盖的冒汽管口观察滑阀的转动情况。

伴随着转动，滑阀还产生上、下颤振，这是因为滑阀每转动一转，滑阀下部径向的一只放油孔便与泄油孔沟通一次，在它们相通的瞬时，由于部分二次油泄放，二次油压略有下降，致使滑阀下移，而当随着滑阀的旋转，放油孔被封住时，滑阀又上移。只要滑阀转动，上述动作就一直重复，二次油压有规律的脉动使滑阀产生颤振，而滑阀的颤振引起油动机活塞、活塞杆和调节汽阀阀杆产生微幅振荡，这样油动机就能灵敏地对调节系统控制信号作出响应。错油门滑阀的振幅可利用调节阀来调整，振幅由油缸活塞杆的振幅间接测定，活塞杆振幅通常控制在 $0.2\sim 0.3\text{mm}$ 。错油门壳体通过螺栓与两端的上盖、下盖连接在一起，盖与壳体接合面装有 O 形密封圈以防漏油。动力油及二次油从壳体侧面的接口 P、C 分别接至错油门壳体，错油门泄油及油缸回油从油动机底部通过过渡板连接最终回到汽轮机前轴承座内。输入伺服机构二次油的变化范围是 $0.15\sim 0.45\text{MPa}$ ，二次油压 P2 与油缸活塞杆行程的对应关系可利用活塞杆上的调节螺栓改变反馈板安装角的

方法来加以修正，不过要注意，反馈板安装角改变必然改变油动机活塞动作的初始值，活塞起始动作时的二次油压值通常是通过错油门顶部的调节螺钉进行调整。

3.5 危急遮断器及隔膜阀

在汽轮机前轴承箱附近，布置有电磁阀危急遮断控制块，主要由二个超速防护系统 OPC (Overspeed Protect Controller) 超速保护阀和四个自动停机跳闸系统 AST (Auto-Stop Trip) 遮断电磁阀组成，它们被安装在一块集成块上，为 OPC 和 AST 总管以及其它部件提供接口。这种紧凑的组合结构简化了外部连接管，提高了整体可靠性。

二个 OPC 电磁阀并联布置，由 DEH 控制器的 OPC 系统控制。当汽轮机转速超过 3090 转/分 (103%)，或者发电机油开关跳闸且机组负负荷在 30%以上时，OPC 电磁阀通电打开，OPC 安全油泄压，关闭所有调节汽门，维持汽机正常转速，实现汽轮机转速的控制功能。

四个 AST 电磁阀受危急跳闸装置 (ETS) 电气信号所控制，采用并、串联布置，可有效防止拒动或误动，保证动作的准确性。危急跳闸装置 (ETS) 监视机组的某些重要运行参数，如汽轮机超速、推力轴承磨损、润滑油压低、EH 油压低、凝汽器真空低、轴向位移大、远控跳闸信号等。只要满足了 ETS 任何一个跳闸条件，所有电磁阀都将失电而迅速开启，AST 总管泄油，所有蒸汽阀关闭，汽轮机紧急停机，从而实现汽机的保护功能。OPC 和 AST 电磁阀结构相同，仅有的区别是 OPC 电磁阀是由内部供油控制的，AST 电磁阀则由高压油路外部供油所控制。

隔膜阀位于前轴承座上，隔膜阀膜片上腔连接着透平油的安全油，下部锥形阀控制 AST 遮断安全油 (抗燃油)。当隔膜阀上腔透平油建立了安全油时，通过膜片产生的压力克服弹簧的弹性力，关死下部锥形阀，AST 油回油口被切断。正常运行时，透平油一次安全油压约为 1.96MPa，二次安全油压约为 14MPa。当机械超速保护和手动遮断总油管中的油压消失，使透平油安全油压跌至约 1.2MPa 时，弹簧力会把锥形阀打开，接通回油，泄掉 AST 油，机组停机，同时保证了润滑油和抗燃油彼此互不接触。当二次安全油压为零，一次安全油压升高到 0.6MPa 时，隔膜阀开始复位。

3.6 本章小结

本章主要研究了 DEH 系统的硬件及系统构成，DEH 系统主要由电子控制装置和液压控制机构两部分组成。DEH 调速系统主要包括的硬件为 505 调速器、电液

转换器、油动机，通过 505 调速器对反馈回来的转速与设定值进行比较，调节输出电信号，再通过电液转换器将电信号转换为液压信号，控制油动机的动作，达到调节蒸汽进气量的目的。本章重点设计了以 505 控制器、电液转换器、油动机等设备为核心，以转速测量系统、危机保安系统为辅助功能的硬件系统，并详细的分析了各硬件的基本性能及工作原理，给出了调试的过程，为下章软件设计奠定基础。

自备电站汽轮机 DEH 控制系统，体现了当前汽轮机调速控制的新发展，集中了两大最新成果，及固体电子学新技术——数字计算机系统，液压新技术——高压抗燃油系统，成为尺寸小、结构紧凑、高质量的控制系统。

第4章 汽轮机调速系统软件设计

在对 DEH 控制系统进行硬件配置后,还需要对其进行软件开发,以实现汽轮机正常运行所必须的各种功能,如试验功能、限制保护功能、调节功能、自启自停控制功能等。

4.1 DEH 控制系统

4.1.1 DEH 控制系统构成

DEH是一个多输入、多回路的反馈控制系统,从功能上分主要有:测量部分、给定部分、调节部分和伺服驱动部分。

(1) 测量部分

测量的模拟量信号有:转速、功率、调节级压力、主汽压力、高排压力、中压排汽压力、阀位反馈等,测量的开关量信号有并网、挂闸、超速以及主汽门的开关状态等。对于重要的信号如转速、功率、并网、挂闸采用三重冗余设计,三取二后进入控制逻辑运算,对于调节级压力、主汽压力、阀位反馈等采用双变送器,信号高选后进行逻辑控制。另外所有模拟量输入信号都经过光电隔离,所有开关量输入信号都经过继电器隔离,这样就可以保证信号的稳定和抗干扰能力。

(2) 给定部分

给定部分就是产生调节系统所需的设定值,具体内容有:主蒸汽压力的设定值、目标转速和目标负荷的设定值,以及相应的速率设定值。给定的方式有:操作员给定、ATC 给定、CCS 给定、AS 给定和 RUNBACK 给定。

(3) 调节部分

它是一个多回路串级调节系统,内回路是调节级压力控制,以增强系统的反应能力,提高调节品质,改善调节特性;外回路是功率控制或转速控制,都采用 PI 调节,以消除静态偏差,满足电网对机组转速和负荷的要求。

(4) 伺服驱动部分

调节部分输出的阀门开度指令输入到 VCC 卡件,与阀位反馈相比较,经过 PI 运算的放大处理转换为动作电液转换器的电流信号,电液转换器在此信号的作用下,通过调整进油和回油口的大小,调节阀门的控制油压,以保证调汽门的开度满足调节要求。

4.1.2 DEH 控制系统的数学模型

图4.1为DEH控制系统原理框图，从图中可知，该系统实际上为模拟-数字、功率-频率、电子-液压调节系统，其采样讯号除转速为数字量外，其余采样讯号均为模拟量，故送入计算机前带经A/D转换器变换成数字量，在计算机中进行数字处理和运算，其输出信号经D/A 反变换后送至电液转换器，将电信号转变成液压信号，此液压讯号作用于油动机以控制主汽门及调节汽门开度，使汽轮机的转速或者功率发生变化。系统中的给定值，有转速给定及功率给定，可以数字量输入，也可以模拟量输入。

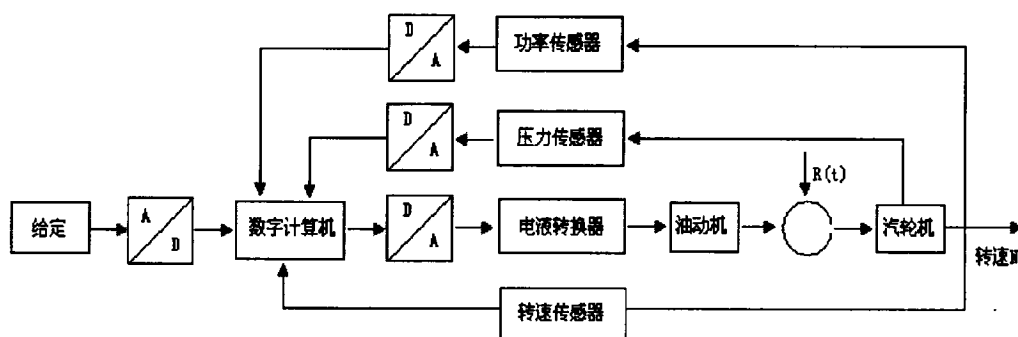


图4.1 DEH组成方框图

Fig. 4.1 The composition block diagram of DEH

根据DEH组成的方框图，建立数学模型，图4.2为机组在电网中运行的传递函数简化图。

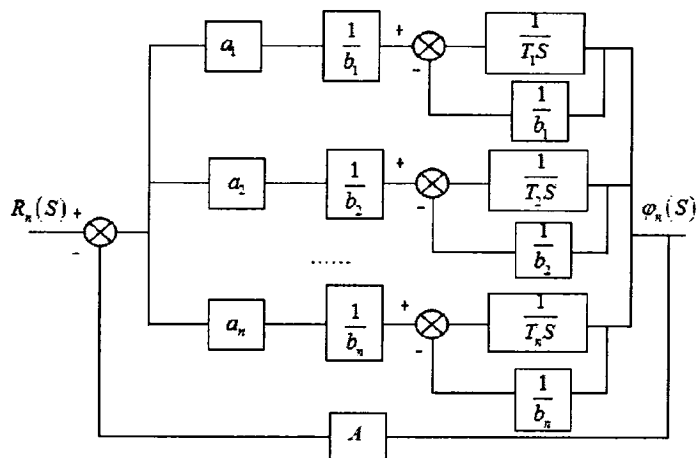


图4.2 并网机组传递函数简化图

Fig. 4.2 Simplified diagram of grid-connected unit's transfer fun

与模拟电调相比, 数字式电液调节系统也是一种功率-频率调节系统, 但其给定、综合比较部分和PID (或PI) 的运算部分, 都是在数字计算机内进行的。对调节对象, 考虑了调节级汽室压力特性、发电机功率特性和电网频率特性, 而计算

机的综合、判断和逻辑处理能力又强，因此它是一种更为完善的调节与控制系统。

由于系统兼有调节汽室压力和功率反馈的快速响应，因此，一般采用比例积分（PI）控制规律，整定参数为比例系数 K_p 和积分时间常数 T_i ，传递函数为：

$$W_n(s) = \frac{\varphi_n(s)}{R_n(s)} = \frac{1}{T_A s + A + 1/\delta} \tag{4.1}$$

机组在电网中运行时，其DEH系统的控制对象的传递函数为：

$$W(s) = \frac{\varphi(s)}{R(s)} = \frac{b}{T_A s + A + (1-b)/\delta} = \frac{b}{T_A s + B} \tag{4.2}$$

其中 $B = A + (1-b)/\delta$ 。

4.1.3 DEH 控制系统的 PI 调节规律

整个DEH控制系统为3个被控对象的串级PI复合调节系统，整个系统由内回路和外回路组成，内回路增加了调节过程的快速性，外回路则保证了输出严格等于给定值。PI调节规律既保证了对系统信息的运行处理和放大，积分作用又可以保证消除静态偏差，实现无差调节，它具有4中不同的方式运行。

(1) 串级PI（比例、积分）控制系统见图4.3。此时系统具有调节级汽室压力、发电机功率和转速3个反馈信号，PI2为内控制回路，PI1为外控制回路。

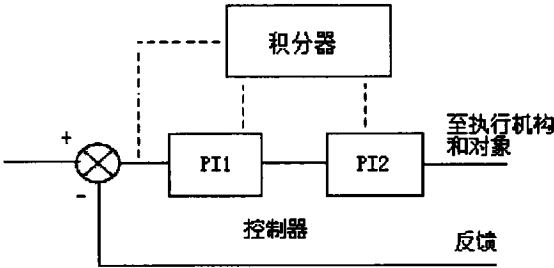


图4.3 串级PI控制系统图
Fig. 4.3 The cascade PI control system diagram

(2) 第一种单级PI1控制系统如图4.4，这种情况，系统只接收发电机功率和转速两种反馈信号。

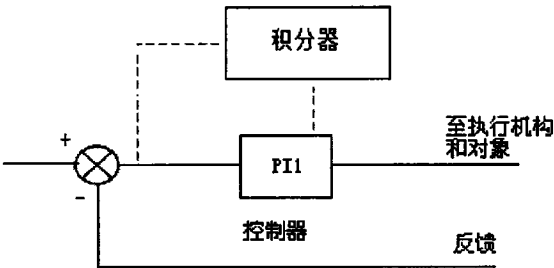


图4.4 串级PI1控制系统图
Fig. 4.4 The cascade PI1 control system diagram

(3) 第一种单级PI2控制系统如图4.5，这种情况，系统只接收调节级汽室压力和转速两种反馈信号。

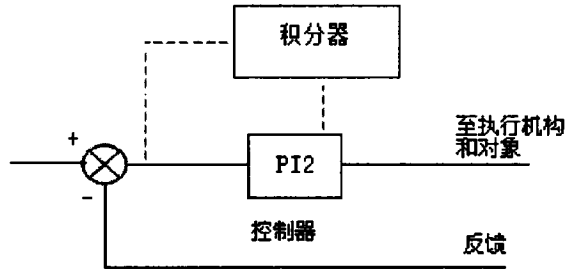


图4.5 串级PI2控制系统图
Fig. 4.5 The cascade PI2 control system diagram

(4) 纯转速控制系统是当系统切除调节汽室压力和功率反馈信号后，系统处于纯转速控制状态，与一般液压调节系统相同。

系统的虚拟“开关”由软件实现。对复合串级控制系统，当调节级汽室压力和发电机功率回路投入运行时，系统的动态品质最好，这也是主要的控制方式。由于调节级汽室压力信号比发电机功率信号反应要快，所以单级PI运行时，调节级汽室压力回路比发电机功率反馈回路的控制品质好。该系统的外回路PI1为主调节器，在基本负荷运行方式下，它保证系统输出功率的给定值与机组实际输出功率相等；在调频运行方式下，被转速偏差修正后的负荷给定值，才是控制系统所应保持的负荷值。内回路PI2能考虑系统中汽压内扰的作用，并尽快调整调节汽门的开度，消除内扰的影响，因而，充分反映了串级调节系统具有良好的动态品质的特点，对于克服抽汽环节功率滞后，提高机组对外界负荷的适应性，起了很大作用。除了速度反馈外，压力信号和功率信号中任一路发生故障，系统仍然照常工作，从而在整体上提高了系统的可靠性。

4.2 控制逻辑

DEH 设定值的形成逻辑包括目标值和速率两部分，首先根据各种逻辑产生转速或负荷的目标值及速率，然后目标值经过速率的限制形成设定值，与反馈信号相比较，经过 PI 调节，输出指令开关阀门，调整蒸汽流量，使被调量等于设定值，完成整个调节过程。

4.2.1 负荷和转速的目标值形成

在汽轮机的控制过程中，负荷及转速的目标值的形成很重要，关系到汽轮机的正常运转，图 4.6 为负荷和转速的目标设置逻辑图，其说明如下：

- (1) “目标值的输入”指运行人员所输入的转速或负荷目标值。

(2) “输入的目标值在临界区”指如果运行人员所输入的转速目标值在转速临界区内，则目标值保持原值，而不采用所输入的目标值。

(3) “输入负荷或转速目标值”指的是在操作员自动方式下，而且没有投入自动同期和 CCS 遥控方式的情况下，运行人员输入合适的转速或负荷目标值并按“输入确认”按钮。输入后形成新的目标值并保持。

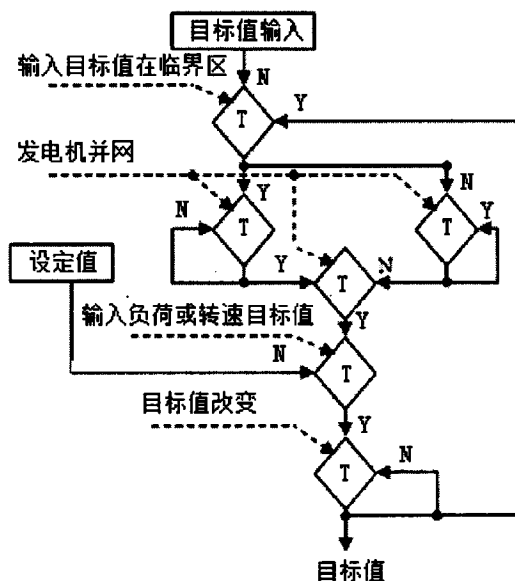


图4.6 负荷和转速的目标值设置逻辑图

Fig. 4.6 Load and speed target value setting logic diagram

从图 4.6 中，我们可以看出，目标值输入后，首先要与临界值进行比较，确定是改变目标值还是保持临界值，然后再对自动同周期、CCS 遥控方式进行判断，如果在没有投入的情况下，输入值才形成新的目标值，并保持。此逻辑图还存在以下几个方面的特点。

(1) “投入自动同期”和“投入遥控方式”的目的在于使目标值跟踪 CCS 和电气脉冲信号对流量指令的修正。而“汽轮机挂闸脉冲”则是使 DEH 的转速目标值在挂闸后为零, 避免阀门在挂闸后就有指令存在而开启。

(2) 此图中需要注意的一个问题是,当存在“目标值改变”信号而且不存在“输入负荷和转速目标值”时,即目标值跟踪设定值时,目标值的输入也要跟踪设定值,这样当切除自动同期或遥控方式或发电机并网脉冲、发电机解列脉冲、功率回路投入脉冲、功率回路解除脉冲、汽轮机挂闸脉冲信号消失时,目标值的输入等于设定值,达到无扰切换。

(3) 汽轮机跳闸时, 控制回路的转速目标值跟踪转速设定值, 均为 0 rpm/min 并保持至汽轮机挂闸; 而汽轮机挂闸后, 在运行人员没有输入新的转速目标值的

情况下, 转速目标值和转速设定值仍保持 0 rpm/min, 以保证汽轮机不会因为挂闸后调门有开度指令而开启, 致使汽轮机失控甚至受到损坏。

(4) 在汽轮机挂闸, 而 DEH 处于手动控制方式时, 控制回路的目标值和设定值均跟踪由阀门开度反算形成的流量指令, 以保证从手动方式切换到操作员自动时达到无扰切换的目的。

(5) 汽轮机挂闸后, 由运行人员输入新的转速目标值和升速率, 然后按“进行”按钮, 转速控制回路开始起作用。对于高压缸启动, 如果选择主汽门控制方式, 则高压调节汽门全开, 由高压主汽门控制汽轮机转速; 否则高压主汽门全开, 由高压调节汽门控制汽轮机转速; 如果选择中压缸启动, 则高压主汽门全关, 高压调节汽门全开, 由中压调节汽门控制汽轮机转速。转速目标值经过速率限制形成转速控制回路的设定值, 此设定值与实际转速的偏差经过 PI 运算, 形成调门的开度指令, 调节汽轮机的进汽量, 以满足转速控制的要求。运行人员输入的转速目标值必须避开临界转速区域, 否则视为无效, 转速目标值继续保持先前值不变。在汽轮机过临界转速区时, 速率自动转为内部设定, 以求快速通过临界区。

(6) 在发电机并网的瞬间, 控制系统的目标值和设定值均跟踪当前的流量指令加上初负荷设定, 使调门在发电机并网的瞬间开大, 避免发电机逆功率; 同时锅炉增强燃烧, 逐步提高机组出力。如果没有投入功率回路, 运行人员可以输入新的目标值和速率, 调门则根据新的设定值调整开度, 此时控制回路开环运行。

(7) 在功率回路投入的瞬间, 目标值和设定值均跟踪实际功率; 在功率回路切除的瞬间, 目标值和设定值均跟踪功率回路的输出值, 从而达到无扰切换, 维持机组运行的稳定。

(8) 在发电机解列的瞬间, 控制系统自动解除功率控制转为转速控制, 转速目标值跟踪转速设定值, 均为 3000rpm, 即汽轮机维持工频转速, 在发电机允许的情况下随时准备并网带负荷运行。

(9) 当 DEH 投入自动同期 AS (Automatic Synchronization) 或 ADS (Automatic Dispatch System) 自动调度控制系统时, 目标值始终跟踪设定值的变化, 而设定值在当前值的基础上经过 AS 或 ADS 的修正形成新的设定值, 以适应 AS 或 ADS 的要求。

4.2.2 负荷和转速的升速率的设置

负荷及转速的控制, 关系着汽轮机的平稳升速, 最后达到并网的目的, 其过程控制尤为重要。图 4.7 为负荷和转速的升速率设置逻辑图, 其说明如下:

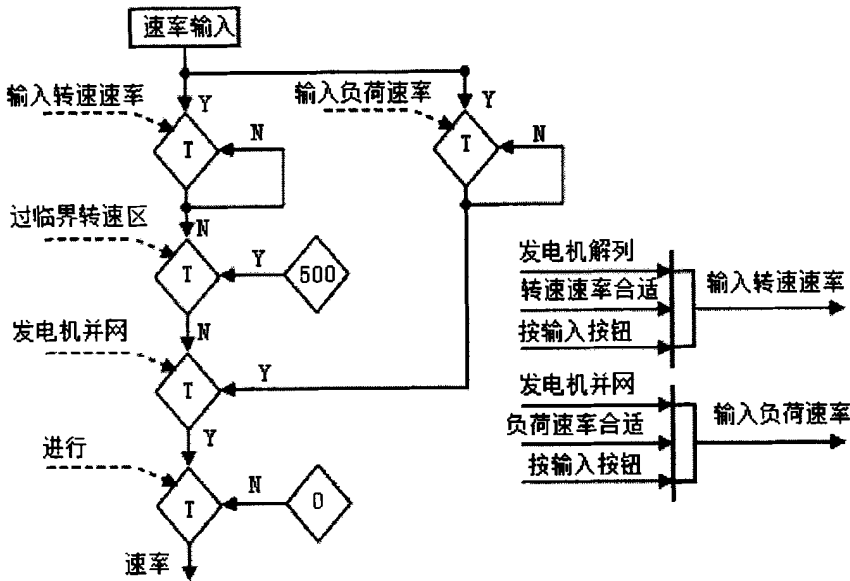
(1) “速率输入”指的是运行人员根据汽轮机的实际运行工况输入的转速或负荷升速率。在输入速率之前，首先输入合适目标转速或目标负荷，然后根据机组运行工况设定合适的速率。

(2) “转速速率合适”指的是速率在 0-500rpm/min 之间。设置此条件的目的在于保证汽轮机转速控制的平稳和机组运行的稳定，避免速率过快引起汽轮机振动超标等造成设备损坏或缩短机组使用寿命。

(3) “负荷速率合适”指的是速率在 0-50MW/分钟之间。设置此条件的目的在于保证汽轮机负荷控制的平稳和机组运行的稳定，避免速率过快引起蒸汽带水等造成设备损坏或缩短使用寿命。

(4) “过临界转速区”指当转速设定值在汽轮机的临界转速区设置范围内时，升速率自动切换到 DEH 内部设置的升降速速率，以求汽轮机快速通过临界区域，降低振动水平，保证机组安全。

(5) “进行”指的是转速或负荷的目标值不等于设定值，在条件允许的情况下设定值按照所设定的速率接近目标值，控制系统可以升降的转速或负荷。否则，速率为“0”，即控制系统的设定值保持不变。



4.2.3 进行和保持的逻辑图

图 4.8 为进行和保持逻辑图，其说明如下：

(1) “保持”优先“进行”，即必须在“保持”的状态下而且“阀位未达到阀限”时才可能继续“进行”，所需的操作就是按“进行”按钮，此时控制系统的运行状态由“保持”转为“进行”，设定值根据所设置的速率开始变化，直至设定值等于目标值。在“进行”时可以随时按“保持”按钮，将运行状态由“进行”转为“保持”。

(2) 当“设定值等于目标值”时，自动复位“进行”信号，即“进行”信号自动消失，速率变为“0”。

(3) 当“输入新的目标值”时，或者“主汽压力值达到低限”、“设定值达到负荷高限”、“阀位指令达到所设阀限”时，控制系统由“进行”状态自动转为“保持”状态。因为运行人员输入新的目标值，一般同时伴随着将输入新的速率，所以有必要先转到“保持”状态，在运行人员确认目标值和速率输入无误时再按“进行”按钮重新调整转速或负荷，减少了误操作的可能性。而“主汽压力值达到低限”、“设定值达到负荷高限”、“阀位指令达到所设阀限”则完全是系统本身的保护使然。

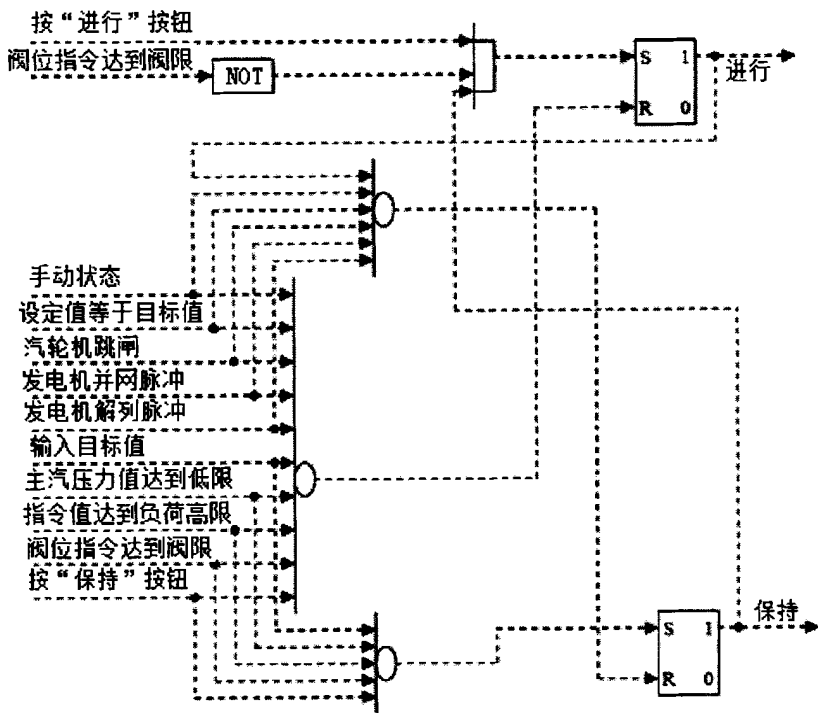


图 4.8 进行和保持逻辑图
Fig. 4.8 The progress and keeping logic diagram

从图 4.8 中可以看出,当控制系统处于“手动方式”或者存在“汽轮机跳闸”信号以及在发电机并网和解列的瞬间,设定值既不保持也不进行,而是与目标值一起处于跟踪状态,以达到无扰切换。只有在“进行”的状态下,运行人员所输入的速率才有效,设定值才能根据所设置的速率接近目标值。也就是说运行在输入目标值和速率后必须按“进行”按钮并且“进行”灯亮才能执行所要求的命令。

4.2.4 设定值的形成

图 4.9 为设定值的形成逻辑图,其说明如下:

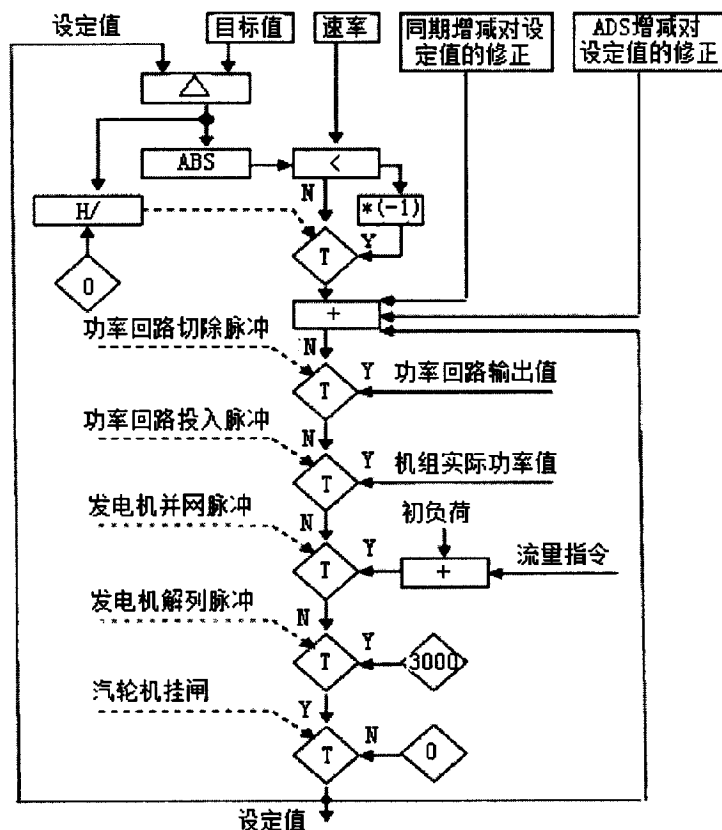


图4.9 设定值的形成逻辑

Fig. 4.9 The logic diagram of set value

(1) “速率”指运行人员根据需要所输入的负荷或转速的升降速率。当设定值处于“保持”状态时,其速率为“0”,设定值保持当前值不变;当运行人员输入合适的目标值和速率后在条件允许的情况下按“进行”按钮,使设定值处于“进行”状态,速率才起作用,这时设定值以设置的速率增减,直到其值等于目标值。在这里需要注意的一个重要问题是控制逻辑的扫描周期与速率设置之间的关系。因为根据控制逻辑设计设定值是通过叠加所设置速率的值来接近目标值,那么控

制逻辑的扫描周期就是实际速率的重要组成部分。假如控制逻辑的扫描周期设置为 200ms, 即控制逻辑一秒钟扫描 5 次, 则一秒内设定值叠加 5 次速率的值, 所以为了保证设定值叠加的实际速率等于所设置的速率, 便将所设置速率的值除以 5 作为所要叠加的实际速率值。因此在实际运用中必须根据逻辑的扫描周期合理设置设定值叠加的实际速率。当设定值与目标值的偏差小于所设置的速率时, 要叠加的速率自动变为偏差值, 以保证设定值完全等于目标值, 而不会因为叠加固定的速率形成偏差。

(2) 一般指运行人员根据需要所输入的转速或负荷目标值。除非存在“汽轮机跳闸”、“发电机解列脉冲”、“发电机并网脉冲”、“功率控制回路投入脉冲”、“功率控制回路切除脉冲”信号或者 DEH 投入 AS 或 ADS 功能, 此时目标值跟踪设定值, 以达到无扰切换。

(3) “功率回路切除脉冲”指切除功率控制回路时, “设定值”和“目标值”瞬间跟踪当时的流量指令(即功率控制回路的输出值)并保持, 形成新的“设定值”, 从而达到切除功率回路的无扰切换。切除功率控制回路后, DEH 画面显示的负荷指令就是流量指令, 运行人员可以输入新的流量目标值和速率, 手动调整机组负荷。这种方式运行一般在机组负荷较低或功率回路有问题时采用。

(4) “功率回路投入脉冲”指在投入功率自动控制回路时, “设定值”和“目标值”瞬间跟踪当时的实际功率, 作为功率控制回路的设定值, 这样设定值等于实际功率, 功率控制回路的输出保持原值不变, 从而达到投入功率回路时的无扰切换。

(5) “发电机并网脉冲”是指在发电机并网的瞬间, “设定值”由先前的转速设定值瞬间转为当时的“流量指令”加上“初负荷”, 从而形成新的设定值, 增大阀门开度, 增加蒸汽流量, 使发电机带上初负荷; 此时“目标值”跟踪“设定值”, 以达到无扰切换。

(6) “流量指令”指 DEH 系统根据内部逻辑产生的负荷需求, 它经过阀门管理程序和阀门流量特性曲线的修正, 输出阀门的开度指令信号, 进入阀门控制卡件, 控制阀门开度, 调节汽轮机进汽量, 满足转速或功率控制的要求。“流量指令”的形成一般有三种情况, 一个是并网前的转速控制回路输出, 即转速设定值与汽轮机实际转速的偏差经过 PI 调节器的无差调节, 输出“流量指令”, 以完成转速控制功能, 此时运行人员所输入的目标值和速率就是转速控制的目标值及其升速率; 另一个是并网后的功率控制回路输出, 即功率设定值与机组实际功率的偏差

经过 PI 调节器的无差调节, 输出“流量指令”, 以完成功率控制功能, 此时运行人员所输入的目标值和速率就是功率控制的目标值及其升速率; 第三个是运行人员直接手动输入流量目标值和速率 (字面上一般称之为负荷目标值, 但它有别于机组的实际负荷, 实际上代表的是流量的目标值), 流量目标值经过速率的限制形成真正的“流量指令”。在投入转速或功率回路时, “设定值”就是其控制回路的设定值, “流量指令”是控制回路的输出值, 而没投入转速或功率回路时, “流量指令”就等于“设定值”。

(7) “发电机解列脉冲”的意义在于当发电机解列时, DEH 的控制回路自动切换到转速自动控制, 转速的目标值和设定值瞬间切换为额定转速, 即 3000rpm, 维持汽轮机空转, 随时准备再次并网带负荷。

(8) “汽轮机挂闸”的意义在于只有当汽轮机挂闸的时候, 设定值才根据控制逻辑的设计接受运行人员所设置的目标值和速率以形成转速或功率的设定值, 否则, 即汽轮机处于跳闸状态时, 转速的目标值和设定值降为 0rpm 并保持, 保证所有调节汽门的指令为零。汽轮机挂闸后, 转速的目标值和设定值保持 0rpm, 直到运行人员输入新的目标值和速率并按“进行”按钮, 设定值才开始增加, 调节汽门开启, 汽轮机开始冲转。

(9) “同期增减对设定值的修正”和“ADS 对设定值的修正”指 DEH 在投入自动同期和 ADS 功能时同期装置和 CCS 系统对转速设定值或 DEH 流量指令的修正。也就是说在 DEH 系统内部, 并不是在投入自动同期的时候, 转速控制回路的设定值直接取自同期装置, 而是在同期装置内部先将转速目标值与汽轮机的实际转速相比较, 以开关量信号的形式送出对 DEH 转速设定值的修正, 在原来转速设定值的基础上叠加所设置的速率, 使实际转速设定值等于同期装置的设定, 这样设计的目的在于保证控制系统的安全可靠性, 避免信号断路引起控制系统的误动作。同样, “ADS 对设定值的修正”就是在 DCS 内部将 DCS 所需求的“流量指令”与 DEH 的实际“流量指令”相比较, 以开关量信号的形式送出对 DEH 流量设定值的修正, 在原来“流量指令”的基础上叠加所设置的速率, 使实际“流量指令”等于 DCS 的设定。

从图 4.9 可知, 设定值跟输入值和速率有关系, 只有输入合适的目标值和速率后在条件允许的情况下按“进行”按钮, 设定值才处于“进行”状态, 速率才起作用, 这时设定值以设置的速率增减, 直到其值等于目标值。同时设定值在“功率回路切除脉冲”、“功率回路投入脉冲”、“发电机并网脉冲”、“发电机解

列脉冲”条件下，设定值跟踪的目标也存在不同，以满足保护机组的要求。

4.3 自动同期及并网带负荷形成逻辑

4.3.1 自动同期

当汽轮机转速达到 2950-3025 rpm 时，DEH 发出“同期允许”信号，这时运行人员可以按“同期”按钮投入自动同期功能，DEH 接受电气来的同期增减脉冲信号，根据内部逻辑形成“同期增减对设定值的修正”信号，改变 DEH 的转速设定值，从而改变汽轮机转速，满足发电机并网要求。

图 4.10 为 DEH 的自动同期投切逻辑图，其特性说明如下：

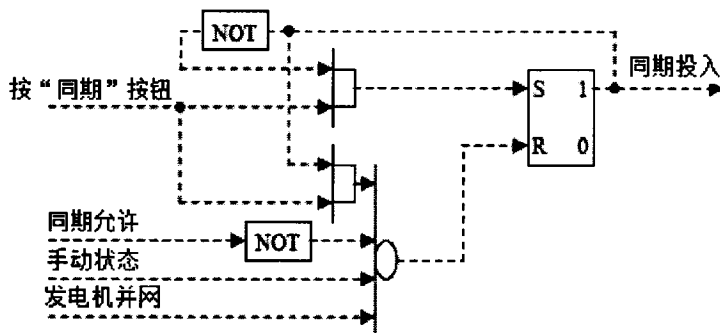


图 4.10 DEH 的自动同期投切逻辑

Fig. 4.10 The automatic synchronization switching logic of DEH

(1) “同期允许”指汽轮机的转速在 2950-3025rpm 之间。首先用 DEH 本身的转速设定值和速率设置以及转速控制回路完成汽轮机的冲转、过临界，以缩短启动时间，当转速接近额定转速 3000rpm 时(一般设置一定范围，比如 2950-3025rpm)，便可以通过自动同期功能根据实际电网频率精确控制汽轮机转速，满足发电机的并网需求。投入自动同期功能首先要满足同期允许的条件。

(2) “手动状态”指运行人员直接输入流量指令和速率，根据阀门管理程序和阀门的流量特性曲线产生调节汽门的指令，开关阀门，调节汽轮机进气量，此时转速控制回路不起作用，所以解除“同期投入”信号。

(3) “发电机并网”信号之所以解除“同期投入”信号，是因为发电机并网后 DEH 控制的是机组的负荷，而不是汽轮机转速。此时汽轮机的转速跟随电网频率变化，转速控制回路不起作用，所以切除“同期投入”信号。

(4) 在同期允许的情况下，按“同期”按钮可以投入自动同期功能；同样，在自动同期投入的情况下，按“同期”按钮可以解除自动同期功能，也可以通过发电机并网自动解除自动同期功能。

自动同期功能投入后，DEH 接受电气同期装置来的同期增减开关量信号，将其转化为对转速设定值修正的模拟量信号，即转速设定值要叠加的值，也就是自动同期时的转速增减速率。DEH 自动同期对设定值的修正逻辑如图 4.11 所示，自动同期功能实现的前提是“同期投入”信号存在，这实际上是一个投入自动同期功能的确认过程，避免误操作。与转速和负荷的升速率设置一样，自动同期对转速设定值的修正速率设置也要考虑控制逻辑的扫描周期。“同期增减对设定值的修正”即同期增加脉冲对转速设定值修正的具体逻辑。

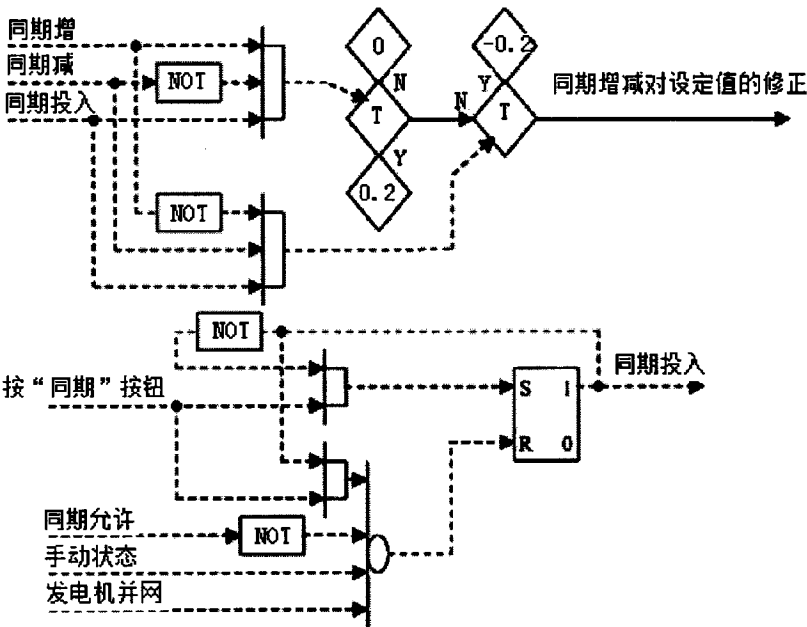


图 4.11 DEH 的自动同期对设定值的修正逻辑

Fig. 4.11 The DEH automatic synchronization of setting value correction logic diagram

“同期增减对设定值的修正”对 DEH 流量指令的修正（设定值的形成逻辑）。此时，DEH 控制系统的目标值处于跟踪状态，即目标值跟踪设定值，以达到无扰切换的目的。系统之间采用脉冲信号作为接口是为了避免信号断线时转速设定值的突变，以保证控制系统的稳定。

4.3.2 自动带初负荷

当 DEH 接受电气来的并网信号后，DEH 系统的流量指令在并网的瞬间加上初负荷的预设值，自动增加进汽量，使机组带 5%左右负荷，保障汽轮机转子的推动力来自蒸汽而非发电机，减少转子的应力作用，保障汽轮机的转子受力均匀，避免发电机出现逆功率现象。初负荷形成逻辑如图 4.12 所示，初负荷的设置值一般取机组额定负荷的 5%左右，比如对于 300MW 机组，初负荷设置值为

300*5%=15MW。

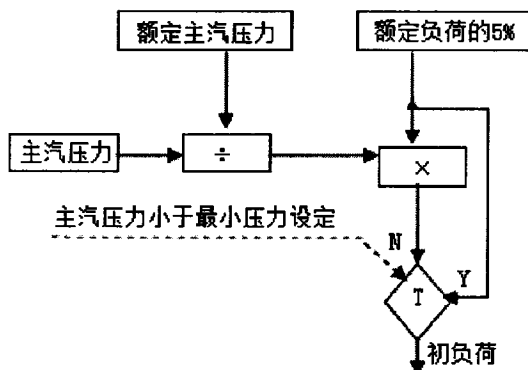


图 4.12 初负荷形成逻辑

Fig. 4.12 The logic diagram of initial load

只有在机组的额定主汽压力下 DEH 内部的流量指令才最接近实际负荷，所以为了保证机组在并网的瞬间带 5%的额定负荷必须根据机组的实际主汽压力对初负荷设置值进行修正，修正系数就是额定主汽压力除以实际主汽压力值。

$$W_2 = W_1 * P_{pr} / P_p \quad (4.3)$$

其中 W_2 为修正后的初负荷设定值， W_1 为修正前的初负荷设定值， P_{pr} 为额定主汽压力值， P_p 为主汽压力实际值。

虽然对初负荷设定值进行了主汽压力的修正，以满足带 5%额定负荷的要求，但主汽压力太低时，则屏蔽主汽压力的修正作用，以避免因为调门瞬间开度太大引起蒸汽带水，危害汽轮机的安全，最小压力设定值一般定为 4.34MPa。

4.3.3 流量指令的形成

流量指令的形成逻辑如图 4.13 所示，DEH 没有投入功率控制回路和转速控制回路时，“设定值”就等于“流量指令”，即根据运行人员输入的流量目标值和升降速率直接形成“流量指令”。这时功率控制器和转速控制器处于跟踪方式，控制器的输出跟踪“流量指令”。

在发电机解列而且投入转速控制回路时，“设定值”作为转速回路的设定值，即根据运行人员输入的转速目标值和升降速率形成的转速设定值。在发电机解列的瞬间，转速设定值为 3000rpm，转速控制器的输出即为“流量指令”。发电机并网后，转速控制回路的输出跟踪“流量指令”。

在发电机并网而且投入功率控制回路时，“设定值”作为功率回路的设定值，即根据运行人员输入的功率目标值和升降负荷速率而形成的功率设定值。在发电

机并网的瞬间，功率设定值瞬间跟踪实际功率，功率控制器的输出即为“流量指令”。发电机解列后，功率控制回路的输出跟踪“流量指令”。

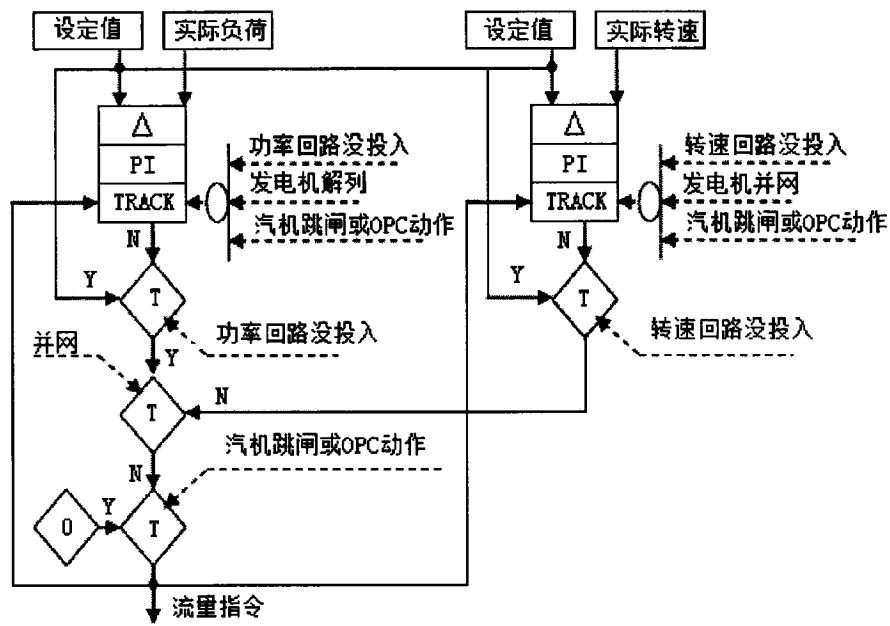


图 4.13 流量指令的形成逻辑

Fig. 4.13 The logic diagram of flow instruction

当“汽轮机跳闸”或者“OPC 动作”时，流量指令自动切为零，关闭所有调门。总的“流量指令”经过阀门管理程序输出各个调节阀门的流量指令，阀门的流量指令再经过阀门的流量特性曲线修正转换为调节阀门的实际开度指令。此逻辑图中需要注意的一个问题是统一量纲，即“设定值”、“实际功率”、“实际转速”和“流量指令”统一换算为 0-100%。

4.3.4 ADS 功能的实现

ADS 功能指 DEH 投入遥控方式，接受 CCS（协调控制系统）来的流量增减脉冲，改变“流量指令”，调整汽轮机进汽量，满足协调控制系统对机组负荷或主汽压力的调节要求。DEH 投入 ADS 功能首先要接受 CCS 来的“ADS 允许”信号，即 CCS 可以无扰动地控制 DEH，运行人员才可以按“ADS”按钮投入 ADS 功能。ADS 投入后，DEH 接受 CCS 来的 ADS 增减脉冲信号，根据内部逻辑形成“ADS 增减对设定值的修正”信号，改变 DEH 的流量指令，从而完成机组协调控制功能。

DEH 的 ADS 投切逻辑如图 4.14 所示，“ADS 允许”指 CCS 在 DEH 投入遥控方式之前控制器跟踪正确，即控制器的输出等于 DEH 的负荷参考（也就是流量指

令)，以达到无扰切换，另外一个条件是 DEH 来的负荷参考信号为好点并在合理范围之内(这主要指 DEH 和 CCS 两个系统之间为模拟量信号接口形式)。如果 ADS 允许信号消失，则 DEH 自动切除 ADS 功能，转为操作员自动方式，以保证控制系统的安全可靠。

在 DEH 处于“手动状态”时，运行人员直接开关阀门，调节汽轮机进汽量，此时 DEH 的流量指令处于跟踪方式，不能接受 ADS 指令，因此自动切除 ADS 功能。为了避免 DEH 和 CCS 两套控制系统之间在控制机组功率时，互相干扰，投入 ADS 功能前，必须先解除 DEH 的功率控制回路。同理，如果 DEH 处于“机调压”方式，则自动解除 ADS 功能，利用 DEH 的调节特性，快速稳定地调节主汽压力，维持机组的安全。

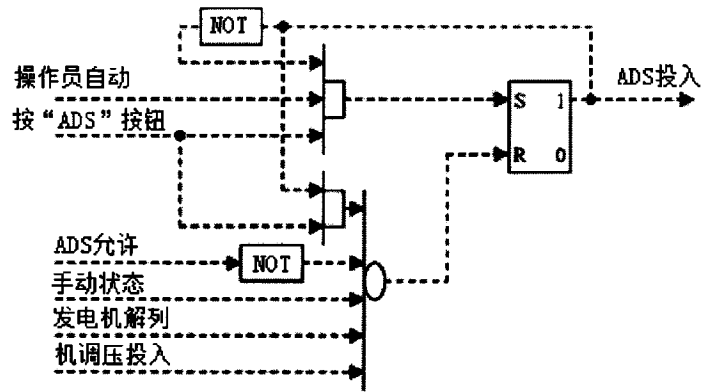


图 4.14 DEH 的 ADS 投切逻辑

Fig. 4.14 The ADS switching logic diagram of DEH

ADS 功能投入后，DEH 接受 CCS 系统来的 ADS 增减开关量信号，将其转化为对设定值修正的模拟量信号，即流量指令要叠加的值，也就是 ADS 功能投入时的流量指令增减速率。“ADS 增减对设定值的修正”对 DEH 流量指令的修正，如图 4.15 所示。

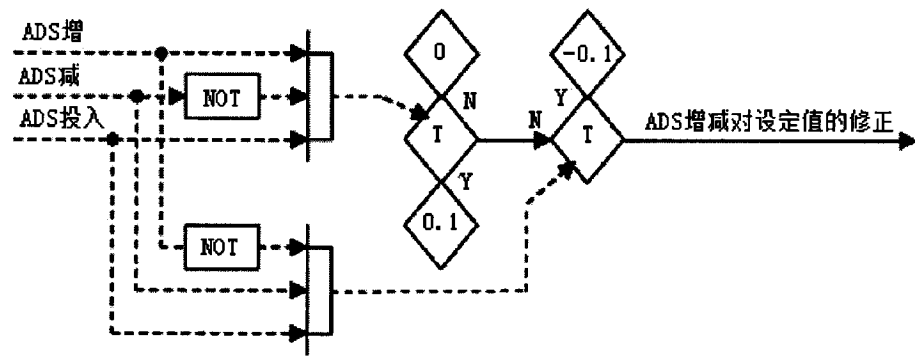


图 4.15 ADS 对设定值的修正逻辑

Fig. 4.15 The setting value correction logic diagram of ADS

此时，DEH 控制系统的目标值处于跟踪状态，即目标值跟踪设定值，以达到无扰切换的目的。ADS 功能实现的前提条件是“ADS 投入”信号存在，这实际上是一个投入 ADS 功能的确认过程，避免误操作。与转速和负荷的升速率设置一样，ADS 功能对设定值的修正速率设置也要考虑控制逻辑的扫描周期。“ADS 对设定值的修正”即根据 ADS 来的遥控指令对 DEH 负荷参考的设定值修正。DEH 与 CCS 系统之间采用脉冲信号作为接口是为了避免信号断线时设定值的突变，以保证控制系统的安全与稳定。虽然这种接口形式安全，信号断开后不影响 DEH 负荷的变化，但接口之间存在信号的速率限制问题，因为每个脉冲都必须有一定的占空比，所以控制系统的调节品质有所下降。所以部分 DEH 控制系统的 ADS 功能采用模拟量信号接口形式，在 ADS 功能投入后，先将 CCS 来的遥控负荷指令与 DEH 内部的负荷参考值相比较，再经过内部设置的 ADS 速率限制，形成 ADS 对设定值的修正信号，再同“ADS 增减对设定值的修正”一样处理即可。具体逻辑见下图 4.16，其特点为这种接口不存在信号的速率限制问题，数据实时变化，快速稳定；其控制误差小，控制精度高，ADS 指令与 DEH 流量指令可完全相等。

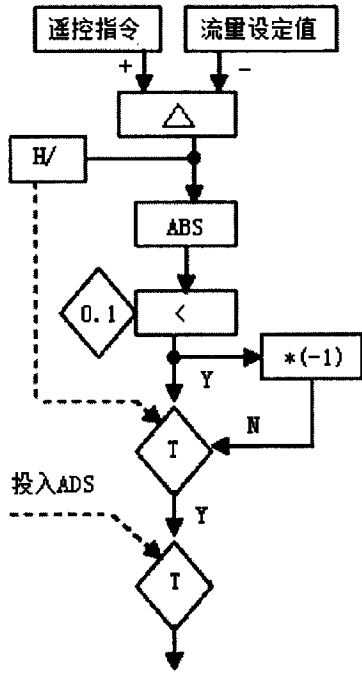


图 4.16 ADS 对流量指令的修正

Fig. 4.16 The flow command correction of ADS

DEH 与 CCS 之间采用模拟量信号接口形式，必须时刻检测信号的好坏和变化速率，避免信号故障引起控制系统的误动作，具体的判断内容有：信号的硬件质量判断、信号的变化速率、信号的超量程或超限等。当 ADS 的模拟量信号故障时

应立即切除 ADS 功能，由 DEH 控制负荷。

4.4 DEH 控制系统功能实现

通过对 DEH 控制系统软件的开发，在完成各种控制逻辑关系后，可以实现汽轮机运行所必须的各种功能。

4.4.1 试验功能

汽轮机在启动前、并网前及运行中，都要进行有关试验，以确认机组设备状况良好、保护系统安全可靠。DEH 控制系统的试验时整个汽轮机保护试验系统的重要组成部分，可分为以下几种：

(1) 超速保护试验。用于检验各超速保护的动作转速。

1) 将自动主气门关到 40mm，电动主气门全关，旁路阀门打开；

2) 用 DEH505 控制面板上 OVERSPEED TEST ENABLE 键，将方式调到试验方式。平稳升速至 3315 ± 15 转/分，危急保安器应动作，自动主气门、调速气门全关，并应发出相应信号，此时记录动作的转速。若转速超过 3360 转/分，危急保安器不动作，应手动打保安器防止转速飞升。

(2) 自动主气门严密性试验

1) 实验前保持汽轮机转速 3000 转/分；

2) 用自动主气门限制手轮全关自动主气门，如汽轮机转速降至 2000 转/分，所用时间不超过 4 分钟为合格；

3) 全开自动主气门稳定升速至 3000 转/分。

(3) 调速气门严密性试验

1) 通过 DEH505 输出控制使调速气门关闭，如汽轮机转速降至 2000 转/分，所用时间不超过 4 分钟为合格；

2) 重新输出指令开启调速气门升速至 3000 转/分。

(4) 真空系统严密性试验

此试验在并网前后均可进行，真空下降至 -0.086MPa 时，应停止试验迅速恢复。

试验方法为：

1) 保持负荷在 80%，记录凝结器真空等有关参数；

2) 关闭抽气器空气阀门，每分钟记录真空值一次；

3) 试验 6 分钟后空气抽气器空气阀门；

4) 求出当 2~5 分钟真空下降平均值不低于 $-0.0027\text{MPa} \sim -0.004\text{MPa}$ 为合格。

4.4.2 限制保护功能

限制保护系统的作用是，当电网或汽轮机本身出现故障时，保护装置根据实际情况迅速动作，使汽轮机退出工作，或者采取一定措施进行保护，以防止事故扩大或造成设备损坏。自备电站汽轮机 DEH 控制系统开发出的限制保护功能有超速限制和超速保护两种。

DEH 系统设有 2 种超速保护，一是超速控制保护，即当转速超过 110% 额定，或在机组带 30% 以上额定负荷时发电机跳闸，超速电磁阀动作，调节油泄压，关闭调速气门，防止机组超速；二是机械超速保护，即当机组转速升至 110% 额定转速时，离心飞锤飞出，危急保安器动作，通过隔膜阀泄掉油压，关闭全部主气门及调速气门，紧急停机。

4.5 本章小结

本章重点对 DEH 构成进行了简介，其包括四个部分，分别为测量部分、给定部分、调节部分及伺服控制部分。通过四个部分建立了内部方框构成，并建立了数学模型，对传递函数分四种情况进行探讨。其次对控制原理进行了简介，从设定值的形成及逻辑控制、自动同期、并网带初负荷、流量指令及 ADS 的功能形成逻辑进行了详细的阐述，分析了各种情况下 DEH 内部的逻辑控制图和实现的功能。

最后对 DEH 控制系统的试验功能及限制保护功能进行了简介，重点是超速限制、超速保护、主气门、调节阀门、危机遮断阀、抽气阀等阀门的试验功能的实现。

第 5 章 汽轮机启动过程控制

通过对汽轮机调速系统的硬件设计及软件逻辑控制，并做好各种试验功能后，汽轮机在启动及并网过程中，就能够得到很好的控制。本章重点是对汽轮机启动过程的控制，执行器的标定、汽轮机启动方式的选择、转速调节等进行分析。

5.1 执行器的标定

在汽轮机第一次运行前或可能影响执行机构或阀门维修后应按下述步骤进行阀门的标定以确保调速器的标定与汽轮机调节阀一致。步骤如下：

- (1) 在标定过程中，紧急停机触点输入必须闭合或跨接。
 - (2) 执行系统 RESET 指令。
 - (3) 按调速器面板上的紧急停机按钮。
 - (4) 按“ACT”键，然后按下翻键直到出现“Stroke Actuatou dsbled , Steam Must be off” (确认主汽门已经切断了汽轮机的汽源)
 - (5) 按“YES”键 (屏幕显示“Stroke to Min-Enabled, Mincurr Adjust *20.000”)
 - (6) 按“YES”键进入该方式或下翻箭头键转入所需的方式。
 - 1) Stroke to Min-Enabld, Min Curr Adjust *xxx.xx-按 YES 键迫使执行机构输出至下限值，按上升或下降键来改变 0%执行机构行程时的电流值。
 - 2) Stroke to Max-Enabld, Max Curr Adjust *xxx.xx-按 YES 键迫使执行机构输出至上限值，按上升或下降键来改变 100%执行机构行程时的电流值。
 - 3) Manually Adjust-Enabld, Stroke Valve xxx.xx-在该屏幕显示下按上升、下降键将以 5% /秒的速率在 0-100%之间改变阀门的输出电流。
 - (7) 当标定结束时，505 所显示的 0-100%阀门位置必须等于 0-100%的实际阀门行程。
 - (8) 按二次 CLEAR 键来保存更改值并退出标定方式。
- 通过标定，使各调节阀门回到零点位置，提高控制精度。

5.2 汽轮机的启动方式

505 控制器有三种可供选择的汽轮机启动方式：手动、半自动或自动。这三种启动方式在程序模式下选择，更改启动方式只能在停机后进入程序模式才能进行。三种启动方式的操作分别如下。

5.2.1 手动启动方式

当组态以手动启动方式时, 采用下列启动操作程序:

- (1) 确认汽轮机已进入准启动阶段。
- (2) 发一复位 (RESET) 指令(使所有报警和停机状态复位)。
- (3) 关闭电动隔离门及其旁通阀门, 然后全开主汽门。

(4) 发出运行 (RUN) 指令。这时, 调速器将以“阀位限制器速率 (Valve Limiter RATE)”开启调节阀至其最大位置。转速给定值以“至最低转速速率 (Rate To Min Rate)”从零变化至最低控制转速。

(5) 以可控速率开启主汽门前旁通阀门。当汽轮机转速升高至最低控制转速时, 调速器的转速 PID 通过控制调节阀的开度来控制汽轮机的转速。

(6) 将电动隔离门开启至 100%开度。转速维持在最低控制转速下直到操作人员进行操作, 如果组态了“顺序自动启动”则就由顺序自动启动程序开始控制。

5.2.2 半自动启动方式

当组态以半自动启动方式时, 采用下列启动操作程序:

- (1) 确认汽轮机已进入准启动阶段。
- (2) 发一复位 (RESET) 指令(使所有报警和停机状态复位)。
- (3) 打开主汽门 (确认汽轮机没有加速)。
- (4) 发“RUN”指令。此时, 转速给定值以“至最低转速速率 (Rate To Min Rate)”

从零变化至最低控制转速给定值。

(5) 以控制的速率提升调速器的阀位限制器。当汽轮机转速升高至最低控制转速时, 调速器的转速 PID 通过控制调节阀的开度来控制汽轮机的转速。

(6) 将阀位限制器提升至 100%开度。转速维持在最低控制转速下直到操作人员进行操作, 如果组态了“顺序自动启动”则就由顺序自动启动程序开始控制。

5.2.3 自动启动方式

当组态以自动启动方式时, 采用下列启动操作程序:

- (1) 确认汽轮机已进入准启动阶段。
- (2) 发出复位 (RESET) 指令(使所有报警和停机状态复位)。
- (3) 打开主汽门 (确认汽轮机没有加速)。

(4) 发出“RUN”指令。调速器将以“阀位限制器速率”开启调节阀至最大位置。转速给定值以“至最低转速速率”升高至最低控制转速。当汽轮机转速升高

且与转速给定值一致时，调速器的转速 PID 通过控制调节阀的开度来控制汽轮机转速。转速维持在最低控制转速下直到操作人员进行操作，如果组态了“顺序自动启动”则就由顺序自动启动程序开始控制。

5.2.4 顺序自动启动

该功能不同于“自动启动方式 (AUTOMATIC START MODE)”。顺序自动启动能够与三种启动方式中的任意一种一起使用。

采用这一功能，发出“RUN”指令后顺序自动启动程序就将转速给定值升至低暖机转速设定值，并在该设定值下保持一段时间。再将转速给定值升高暖机转速设定值，同样在该设定值下保持一段时间。然后将转速给定值升至额定转速设定值。热态启动和冷态启动的所有升速率和保持时间都是可编程的。利用跳闸后的停机时间计时器来确定热态启动和冷态启动的不同控制。当执行停机指令且汽轮机转速降至低于暖机转速设定值时开始计时。

采用顺序自动启动程序，如果在发出“RUN”指令时，系统的停机时间处于所设定的“热态启动”和“冷态启动”时间之间，调速器将在热态启动和冷态启动参数之间进行内插计算以确定启动升速率和保持时间。

随时都能从键盘，触点输入或通过 Modbus 暂停执行顺序自动启动程序。可以通过暂停指令，转速给定值提升或降低指令来暂停执行顺序自动启动程序，也可以从键盘或 Modbus 通信直接输入转速给定值来暂停执行顺序自动启动程序。三个指令源中任意一个最后发出的指令将决定了程序的运行方式。不过，停机状态将使该功能退出执行，只有在执行启动后才能要求重新投入该功能。

5.3 转速 PID 运行方式

转速 PID 根据组态和系统条件，按下列方式之一进行运行：转速控制、频率控制、机组负荷控制。

当组态为非发电机运用时，转速 PID 始终以转速控制方式运行。而当组态为发电机运用时，发电机和电网断路器的状态决定了转速 PID 的运行方式。

(1) 转速控制

发电机断路器触点断开时，转速 PID 以转速控制方式运行，转速 PID 将汽轮机控制在恒定的转速或频率下而与其实际负荷无关。

(2) 频率控制

发电机断路器触点闭合而电网断路器触点断开时，转速 PID 以频率控制方式

运行，机组将运行于恒定转速或频率下而与其实际负荷无关，当断路器的状态使转速 PID 切换到频率控制时，转速给定值立即跃阶变化至选择频率控制前最后一次检测到的转速。如果最后一次检测到的转速不同于“额定转速给定值”，转速给定值将以 1 转/秒的缺省速率变化至“额定转速给定值”。

(3) 机组负荷控制

当发电机和电网的断路器都闭合时，转速 PID 以机组负荷控制方式运行。在电网中并列运行时，给定值高于额定转速就能使负荷从 0 增加到 100%。机组的负荷被转换成额定转速的百分比。

5.4 超速试验

当机组无论按哪种方式启动，并按事先组态好的顺序自动启动程序稳定在额定转速时，就可以进行汽轮机的超速试验。超速试验的步骤如下：

(1) 将转速给定值提升至调速器上限转速设定值。

(2) 为了记录本次超速试验时所达到的最高转速值，必要的话，需要清除掉“Highest Speed Reached”值。清除时按 OSPD 键，下翻至显示屏 2，按 YES 键。注意该值也能在控制（CONT）键下清除或读出。

(3) 试验时同时按 OSPD 键和 Adjust Up 键提升转速给定值。转速给定值升高至高于调速器上限转速设定值时，OSPD 键中的投入超速试验 LED 将亮起。如果此时释放 OSPD 键，转速给定值将返回到调速器上限转速设定值。

(4) 一旦汽轮机转速达到调速器的内部 OVERSPEED TRIP LEVEL 设定值，OSPD 的 LED 就闪烁且屏幕闪烁显示“Speed>Trip”信息。

(5) 如果在超速试验 LED 闪烁时释放 OSPD 键，机组将因超速而跳闸。

(6) 如果进行机械超速试验，则不要释放 OSPD 键且继续调整转速给定值就能使其达到超速试验极限值，超速试验 LED 将以较快的频率闪烁，表示已达到最大转速给定值，机组应已由外部跳闸装置跳闸。

5.5 机组带电负荷

505 控制系统接收到发电机断路器触点和电网断路器触点闭合信号后即可带电负荷。汽轮机在额定参数冷态和额定参数热态状态启动下，启动曲线方式有所不同。

(1) 额定参数冷态启动

额定参数冷态启动升速曲线如图 5.1 所示，启动过程为：

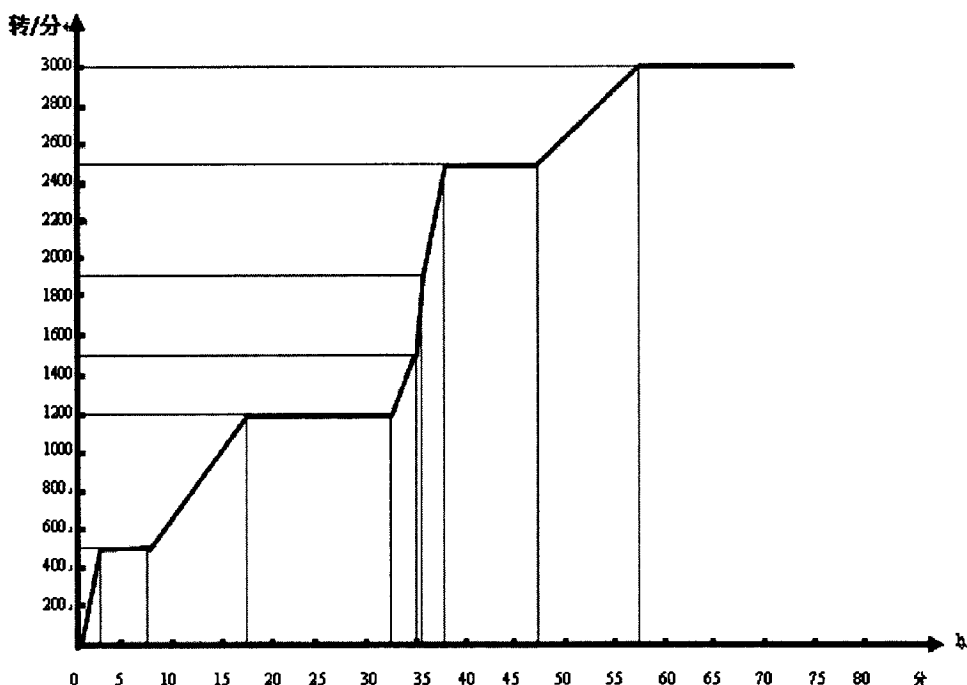


图 5.1 额定参数冷态启动曲线

Fig. 5.1 The starting curve of rated parameters at cold position

- 1) 全开自动主汽门，全关电动主汽门，开调速汽门油动机行程保持在全开位置。
- 2) 检查电动主汽门前主汽温度正常，全开电动主闸门一道旁路门，用二道旁路门冲动转子，控制转速。
- 3) 当转子转数超过 6 转/分时，盘车装置应自动脱开，停止盘车。断开盘车的电源开关。
- 4) 用 2 分钟时间将转速升至 500 转/分，关闭电动主汽门二道旁路门，倾听汽轮机及各转动部份无异音，轴承回油、轴封供汽均正常后，重开电动主汽门二道旁路门，维持转速 500 转/分，暖机 5 分钟。
- 5) 用 10 分钟时间均匀升速到 1200 转/分暖机，并维持 15 分钟，此时对机组进行全面检查。
- 6) 各部参数正常，如凝结器水位高时排地沟。轴瓦回油畅通，回油温度正常。
- 7) 转子无弯曲现象，轴承无低沉的冲击声，振动等。
- 8) 用 5 分钟时间将转速升至 2500 转/分，其间平稳迅速通过发电机临界转速 1556 转/分、汽轮机临界转速 1530 转/分、轴系临界转速 1836 转/分，在 2500 转/分维持暖机 10 分钟。
- 9) 机组定速 2500 转/分以上时，检查电气系统，无问题按电气部分操作规程

进行相应操作。

10) 2500 转/分暖机完成后，用 10 分钟时间将转速升至 3000 转/分，再暖机 10 分钟，并对机组进行全面检查，一切正常后准备并列。期间当转速升至控制器程序设定值时（如 2700 转/分），控制器投入控制，接着利用器将转速升到额定值。

505 控制器控制转速后，可全开电动主汽门。

11) 整个启动过程用时合计约 70 分钟。

(2) 额定参数热态启动

热态启动操作按额定参数冷态启动执行，热态启动升速曲线如图 5.2 所示，具体升速暖机时间如下。

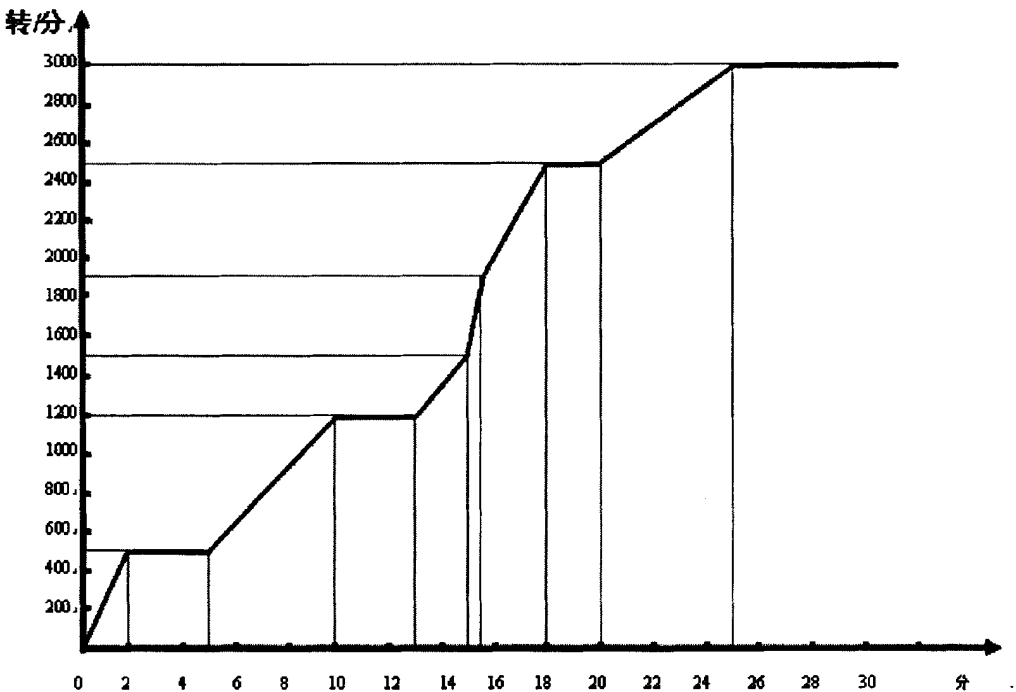


图 5.2 额定参数热态启动曲线

Fig. 5.2 The starting curve of rated parameters at thermal state

- 1) 全开自动主汽门，全关电动主汽门，开调速汽门油动机行程保持在全开位置。
- 2) 检查电动主汽门前主汽温度正常，全开电动主闸门一道旁路门，用二道旁路门冲动转子，控制转速。
- 3) 当转子转数超过 6 转/分时，盘车装置应自动脱开，停止盘车。断开盘车的电源开关。
- 4) 用 2 分钟时间将转速均匀升至 500 转/分关闭电动主汽门二道旁路门，倾听

汽轮机及各转动部份无异音，轴承回油、轴封供汽均正常后，重开电动主汽门二道旁路门，维持转速 500 转/分，并维持 3 分钟；

5) 用 5 分钟时间将转速均匀升至 1200 转/分，并维持 3 分钟，此时对机组进行全面检查；

6) 用 5 分钟时间将转速均匀升至 2500 转/分，并维持 2 分钟（临界转速应迅速平稳通过）；

7) 用 5 分钟时间将转速均匀升至 3000 转/分，暖机 10 分钟进行全面检查。

8) 整个启动升速暖机时间合计为 35 分钟。冲动转子后一切正常，升到额定转速定速后迅速并列，加负荷到冷态启动曲线上与下缸温度相对应的工况点上进行暖机。

额定参数热态冲转时，真空应比冷态启动时略高一些，冲动转子后升速及暖机，要特别注意机组振动，如出现 0.07mm 以上振动时，进行停机处理，待转子静止后投入盘车测量晃度，若超过原始值，直轴后方可重新启动。

5.6 停机

停机是指汽轮机从正常带负荷运行到盘车或静止状态的过程，包括减负荷、打闸、发电机解列、转子惰走、投盘车等过程。停机过程是汽轮机各金属部件降温冷却的过程，所以在汽缸内壁或转子表面产生拉应力，与启动相比更容易造成设备损坏。另外由于转子的冷却速度快于汽缸，胀差将出现负值，因此停机过程要注意汽轮机各部件的温度变化，主要是防止冷却不均匀或冷却过快产生过大的热应力、热变形、负胀差，造成设备损坏。

在正常情况停机主要包括额定参数停机及滑参数停机。额定参数停机是指主蒸汽参数不变，依靠关小调节气门逐渐减负荷到零，直到转子静止的过程。额定参数停机常用于短时间停机处理缺陷后，立即恢复运行的状况。在这种情况下要求停机后汽轮机金属温度保持较高的水平，其优点是能保持汽缸处于较高的温度水平，便于下次启动，热应力小，负胀差较小，缺点是停机后要等较长时间，才能检修，不能利用锅炉余热。停机如果是以检修为主要目的，希望机组尽快地冷却，则可选择滑参数停机方式。滑参数停机是指在调节气门全开状态下，汽轮机负荷随着锅炉蒸汽参数的降低而下降，汽机的金属温度也随着相应下降，直至负荷到零为止。它可以使机组停机后汽缸金属温度降低到较低的水平，大大缩短了汽缸冷却的时间，其优点是采用滑参数停机有利于降低汽缸温度，有利于提前检修，可减少停机过程中的能量和汽水损失，可利用锅炉余热发电。滑参数停机对

叶片喷嘴起清洗作用，但是采用此方式停机，热应力较大。

正常停机操作如下：

(1) 以每分钟 300kw 的速度减负荷，当负荷减到 8000kw 时暖机 15 分钟，在减负荷过程中应注意观察调速汽门是否灵活。

(2) 当负荷减到 8000kw 时，倒换除氧器供汽，倒换正常后关闭不可调抽汽至除氧器阀门，调整切换轴封供汽。

(3) 继续以每分钟 300kw 速度减负荷，当减到 1000kw 时暖机 10 分钟，注意调整发电机风温和冷油器油温。

(4) 开启凝结水再循环门。当负荷减到零时，开起车室、调速汽门疏水。将发电机 BCJ 保护开关退出运行，检查调速汽门开度应符合空负荷位置，调速系统或调速汽门卡涩时，在未采取措施前严禁解列发电机。

(5) 启动辅助油泵或交流润滑油泵，发电机解列，正常后打闸停机。

(6) 打闸后注意自动主汽门、速关门、调速汽门应关闭，全关电动主汽门，记录打闸时间及机组停止惰走时间。

(7) 停止抽气器工作，必要时开启真空破坏门，使转子静止时真空到零，转子静止后投入盘车。

(8) 真空到零时停止向轴封供汽，停止轴封抽汽器，关闭轴封来汽总门。

(9) 关闭主蒸汽来汽门，开开疏水至炉水地沟。

(10) 冷油器出口温度降到 35℃ 时，关闭冷油器入口水门。

(11) 当发电机入口风温降到 25℃ 以下时，关闭空冷器入口水门。

(12) 排汽温度降到 50℃ 以下时，停止盘车、润滑油泵、凝结水泵、循环水泵。（注意盘车停止后排汽温度不应高于 65℃）。将直流油泵选择开关由自动切换到手动位置。

紧急停机操作如下：

(1) 手打危急保安器，停汽封供汽，解列发电机。

(2) 确认自动主汽门、调速汽门及速关门已关闭，并有信号发出，注意汽轮机转速应下降，反之则应关闭电动主闸门，开启自动主汽门前的疏水门。

(3) 启动交流润滑油泵，如不正常时应开启辅助油泵或直流油泵。

(4) 开启真空破坏门，停止抽气器。

(5) 关闭抽汽至除氧器阀门。

(6) 全开汽缸、主汽管疏水。

(7) 其他操作与正常停机相同。

5.7 汽轮机甩负荷处理

(1) 处理甩负荷的原则

1) 对照油压判断汽轮机转速，保证汽轮机的转速不超过 3330 转/分，超过时破坏真空需紧急停机处理。

2) 查明汽轮机危急保安器是否动作，机组振动、串轴有无异常，如一切正常，应使汽轮机迅速恢复负荷。

3) 发生甩负荷事故时，应注意厂用电源情况，如厂用电源有故障，应在确保汽轮机不超速以后，再按厂用电故障处理事故。

4) 恢复以后，升负荷速度，根据机组运行情况决定，若一切正常可以升至事故前负荷，但不能升的太快。

(2) 发电机油开关跳闸

发电机油开关跳闸有三种情况，一是汽轮机转速保持在危急保安器动作转速以内，二是危急保安器按整定值动作，三是转速急剧上升超过 3330 转/分。

1) 发电机油开关跳闸，汽轮机转速保持在危急保安器动作转速以内

汽轮机转速保持在危急保安器动作转速以内，发电机油开关跳闸的表现为负荷到零，进气量到零，调速气门迅速关闭后，又开至空负荷位置，此时进气量又升到空负荷汽耗量，转速先升高后又降回，但稳定在 3270 转/分以内的某一个数值。处理措施为：

a.调整转速在 3000 转/分，调整时注意调速气门，必要时应退出电超速开关，并列后再投入；

b.关小凝结水送水门，开凝结水再循环门，凝结器水位低时补水，保持凝结泵出口水压；

c.检查主蒸汽参数、真空、轴位移、推力瓦温、振动有无异常；

d.调整轴封供气；

e.关闭抽气送除氧器阀门；

f.检查各部正常后，按电气操作规程进行发电机并网，升负荷。

2) 发电机油开关跳闸，危急保安器按整定值动作

表现的现象为负荷到零，进气量到零，自动主气门、调速气门、速关气门全关并发出关闭信号，转速达到危急保安器动作转速后又下降。处理措施为：

a.转速低于 3060 转/分，重新挂闸，开启主气门用同步器调速到 3000 转/分；

b.记录动作转速，注意转速变化，检查自动主气门、调速气门、速关门关闭并发出信号；

c.关闭抽气至除氧器门，调整凝结水，保持凝结器水位，调整轴封供气；

d.迅速检查串轴、推力瓦温度、真空、振动情况和汽轮机内部声音及油温、油压、轴承回油量；

e.检查油压启动高压电动油泵；

f.检查各部正常后退出“电超速”保护开关，进行停机。

3) 发电机油开关跳闸，转速急剧上升 3330 转/分，其现象为负荷到零，进气量减少，转速上升，处理措施为：

a.立即手打危急保安器，注意调速气门、主气门、速关门是否关闭，如果不动作，可再打一次，并电动关闭电动主气门、抽气至除氧器门，调整凝结水，调整轴封抽气；

b.启动备用油泵；

c.破坏真空，注意转速，记录惰走时间；

d.检查机组各部，其他操作与正常停机相同；

5.8 本章小结

本章重点对汽轮机起动的过程及控制进行了分析，从执行器的标定、汽轮机启动方式的选择、转速 PID 的运行方式、超速试验、机组带负荷运转、停机及甩负荷处理七个方面进行了阐述。汽轮机启动方式主要包括手动启动、半自动启动及自动启动三种方式，转速 PID 运行主要按照转速、频率、负荷三个方面进行控制，机组的带负荷重点从额定参数冷态启动和额定参数热态启动两个方面进行分析，最后对机组的正常停机，以及甩负荷停机的处理进行阐述，基本上实现了控制要求，该汽轮机调速系统自投运以来运行稳定可靠，效果良好，满足了生产要求，提高了生产效益。

第6章 结论及展望

汽轮发电机是冶金企业的重要部分，其稳定性和可调节性等性能直接影响到公司发电能否持续安全进行，关系到整个企业的经济效益。之前的汽轮机调速系统存在调节系统迟缓、易卡涩、调节品质差等缺点，以及在可控性和控制功能方面已不能满足机组协调控制和电网自动发电控制的要求，为此本文针对这些问题，提出了基于DEH控制的汽轮机调速系统。DEH调速控制系统使汽轮机起机更加便捷，在汽轮发电机系统中的控制领域越来越广泛，可以减少故障发生，提高生产效率。

本文针对首秦公司汽轮发电机调速控制系统进行设计与研究，总结如下：

(1) 分析了汽轮机调速系统原理，对调速系统构成图及工艺流程图进行了阐述，设计了汽轮机的调节系统。它是由测速部件、放大部件、执行部件和汽轮机（调节对象）四部分组成的转速负反馈的自动调节系统，现场反馈回来的转速以及功率进入505控制系统，与用户设定的值相比较，根据比较的结果调整信号，控制电液转换器，通过液压执行机构调整相应的阀门及蒸汽流量，再控制转速及功率，通过不断的调整，达到我们所需要的转速或者功率。

(2) 对汽轮机调速系统的硬件进行设计，并对505控制器各种控制方式进行了详细的分析。505控制器的控制方式主要包含了启动升速与转速控制、同步及自动初负荷控制、负荷控制及甩负荷等。

(3) 对汽轮机调速系统软件进行设计，对DEH内部结构进行了阐述，对各种逻辑控制进行了分析。DEH主要由测量部分、给定部分、调节部分及伺服驱动部分构成，形成一个多输入、多回路的反馈控制系统；在逻辑设计中，重点分析了目标值形成逻辑、负荷与转速升速率设置逻辑、进行与保持逻辑、自动同周期逻辑等，实现了汽轮机从静止、到转速逐渐上升，到带上初负荷，达到额定负荷的过程。

最后对汽轮机的起动、过程控制及调试进行了分析，实现汽轮机调速系统的自动控制以及平稳的升速、并网发电。在汽轮机的启机时，主要有三种控制方式，一是手动控制，二是半自动控制，三是全自动控制，本系统采用的是半自动控制的方式，一方面通过手动调节，使汽轮机转速逐渐提高，当避开临界区，准备并网时，采用闭环自动调节的方式，使目标值逐渐接近设定值，达到并网的目标。汽轮机的启动分为额定参数冷态启动和额定参数热态启动两种方式，在额定参数

冷态启动时，由于机组处于长期的冷备状态，启动时间稍微长些，约70分钟左右，而热态启动时，启动时间约35分钟。

通过全篇对整个汽轮机调速系统进行了完整的设计，实践证明，该汽轮机调速控制系统在实践中应用比较好，全年多次启动机组，均实现一次启动成功，实现既定的目标。此控制系统还存在更进一步改善的空间，主要从以下几个方面着手。

(1) 汽轮机调节系统存在摆动的现象，表现为调速气门开度指令保持不变，但调速气门的开关程度忽大忽小、反复振荡，造成负荷随之波动，对汽轮机的稳定生产造成严重影响，初步怀疑是信号干扰造成，这是在以后的工作中要重点研究解决的问题；

(2) 现场控制站没有冗余措施，一旦出现故障时，只能手动控制，无法实现两路切换功能，这也是以后需要完善、改造的地方。

(3) 对于阀门的控制，要进行研究，需要采取非线性控制策略，保证控制品质。汽轮机阀门在线活动试验中，需要增加前反馈、变参数等方法，使阀门在线试验过程负荷及气压波动较小。这种采取变参数自适应控制的方法来优化控制策略是以后我们研究的一个方向。

参考文献

1. 黎文彪. 电厂 DEH 控制系统改造及应用[J], 中国高新技术企业, 2009, (14): 47-49.
2. 肖增弘, 徐丰. 汽轮机数字式电液调节系统[M], 北京: 中国水利电力出版社, 2003: 95-98.
3. 饶纪杭. 我国大容量汽轮机电液控制系统的现状[J], 中国电力, 1997, (2): 23-26.
4. 杨峰. 汽轮机纯液调系统的自动升速控制[J], 热力发电, 2001, (1): 57-59.
5. 李德成. 125MW 机组电调装置 (DEH 系统) 运行状况分析[J], 山东电力技术, 2001, (12): 15-19.
6. 丁翠兰, 齐砚东. 采用 DEH 对汽机调节系统改造[J], 山东电力技术, 2001, (4): 25-28.
7. 张宪奎. 200MW 机组 DEH 汽轮机数字式电液控制系统[D], 东北电力学院学位论文, 2006.
8. 翁一武. 大型汽轮机控制系统的技术现状及发展[J], 热能动力工程, 2000, 15(4): 333-336.
9. 阮大伟. 大型火电机组汽轮机数字式电液控制系统[J], 热力发电, 2001, 30(5): 23-26.
10. 田丰, 余天龙. 国产大容量汽轮机电液并存调节系统可靠性分析[J], 热力发电, 2001, (1): 36-40.
11. 饶纪杭, 李子连. 汽轮机控制系统 (DEH) 应用情况调查报告[J], 中国电力, 2000, 33(10): 58-63.
12. 贾云生. 国产 300MW DEH 控制逻辑分析[J], 内蒙古科技与经济, 2009, (11): 15-17.
13. 高伟, 韩守木, 黄树红. 现代汽轮机控制系统的特点[J], 汽轮机技术, 1994, (10): 261-265.
14. 葛晓霞, 缪国均. 汽轮机液压调节系统与数字电液控制系统的分析比较[J], 汽轮机技术, 2000, (8): 23-25.
15. 孔祥正. 汽轮机数字电液控制系统 (DEH) 及其在妈湾电厂的应用[J], 中国电力, 1999, (1): 49-52.
16. Yuliang Dong. Maintenance Decision on Steam Turbine Digital Electro-Hydraulic

- Control System Based on Risk[J], IEEE ICAL 2008, (1): 48-52.
17. Avian. An approach to combined cycle distributed control and data transmission control systems for combined cycle gas turbines[J], IEE Colloquium on, 1991.(1):124-128.
18. Olsen BD, Jang SY, Luning, JM, Segalman RA. Higher order liquid crystalline structure in low-polydispersity DEH-PPV[J], Macromolecules, 2006, 39(13):36-39.
19. Magnus Ullman. Migration of harriers and other raptors at Ashura Deh[J], Sandgrouse, 2010, 32(1):16-19.
20. 上海新华控制技术有限公司. 电站汽轮机数字电液控制系统-DEH[M], 北京: 中国电力出版社, 2005: 5-8.
21. 刘媛杰, 朴在林. 基于 DCS 汽轮机 DEH 控制系统的优化研究[J], 浙江农业学报, 2011, 23(5): 1034-1037.
22. Wu Zhiqiao, Masaharu Mizumoto. PID type fuzzy controller and parameters adaptive method[J], Fuzzy Sets and Systems, 1996, (1):124-125.
23. Jian Xin, Liu Chen. Parallel structure and tuning of a fuzzy PID controller[J], Automatica, 2000, (1):46-48.
24. Cornish. Distirbution control system for conmbined cycle conversion power plant[J], IEE Colloquium on, 1989, (1):87-92.
25. Na Li,Lixia Lv. Parameter Optimization for Turbine DEH Control System Based on Improved Genetic Algorithm[C], Chinese Control and Decision Conference, 2010:46-49.
26. 许泽鹏. 300MW 汽轮机调速系统改造[J], 中国科技信息, 2005, (14): 187-188.
27. 谢诞梅, 杨俊, 李爱军. 华能汕头电厂 300MW 汽轮机保护系统分析[J], 热力发电, 1999, (6): 22-24.
28. 郎泉江. 热工过程自动控制[M], 北京: 中国电力出版社, 1991: 35-38.
29. 田丰, 张俊杰. 大型机组电超速保护装置综述[J], 国际电力, 2001, (5): 13-18.
30. 侯金彦. 电厂 DCS 与 DEH 冗余通讯[J], 自动化与仪器仪表, 2010, (1): 89-91.
31. 吕胜利, 杨春锋. 菏泽电厂 DEH 系统出现的问题及处理[J], 山东电力技术, 2009, (5): 43-46.
32. 田丰, 王进, 吴华盛. 珠海电厂 700MW 机组甩负荷试验[J], 电力情报, 2000, 60(3): 65-67.

33. 田丰, 余天龙. 大型机组甩负荷试验若干问题探讨[J], 中国电力, 2000, 33(7): 84-88.
34. 于文库, 李海涛, 吕晓武, 杨朗, 于达仁. 汽轮机 DEH 系统中电液转换器性能的分析与比较[J], 汽轮机技术, 2006, 48(3): 193-195.
35. 陈立明. 汽轮机 DEH 控制系统常见故障原因分析及处理措施研究[J], 电力学报, 2011, 26(3): 251-253.
36. 贾和. 汽轮机调节系统改造及优化[C], 中国科协 2004 年学术年会电力分会场暨中国电机工程学会 2004 年学术年会论文集, 2004: 192-204.
37. Yuliang Dong, Yujiong Gu, Yi Zhang. Maintenance Decision on Steam Turbine Digital Electro-Hydraulic Control System Based on Risk[J], IEEE ICAL, 2008, (1):45-50.
38. Omer Keles, Yucel Ercan. Theoretical and experimental investigation of a pulse-width modulated digital hydraulic position control system[J], Control Engineering, 2002, 10(6):645-648.
39. Naganobu Honda. Digital Computer Control System for Turbine start up[J], Hitachi Review, 1987, 27(8):135-138.
40. Klure-Jensen J, Hanisch R. Integration of steam turbine controls into power plant systems[J], IEEE Transaction on Energy Conversion, 1991, 6(1):177-185.
41. Ham P A L, Green N J. Developments and experience in digital turbine control[J], IEEE Transaction on Energy Conversion, 1998, 3(3):568-574.
42. Dimeo Robert, Lee Kwang Y. Boiler-turbine control system design using a genetic algorithm[J], IEEE Transaction on Energy Conversion, 1995, 10(4):752-759.

致 谢

本论文是在导师井元伟教授的悉心指导下完成的。在这里，我要衷心感谢我的导师井元伟教授，在课题的开题、研究和论文的写作过程中，自始至终得到了导师悉心指导和大力支持。在论文设计过程中，井老师非常注重培养我的理论知识和实践动手能力，使我独立从事科研工作的能力有了很大的提高。导师渊博的知识和严谨的研究作风，是我学习的榜样。在此谨向井老师致以最诚挚的感谢。

在论文成稿期间，我的师兄苑旭东博士、曹宇博士给与了大量的帮助，进行了无私的指导，对论文提出了很多好的建议，使我的专业技术水平和论文写作水平有了大幅度的提升，在此真心的对他们表示感谢。

攻读工程硕士学位期间，我所在的秦皇岛首秦金属材料有限公司能源部各位领导及同事给予了大力的支持，在工作很紧张的情况下为我提供了许多便利，我对他们表示特别的敬意。我还要特别感谢我的企业导师曹云祥，在课题研究和论文写作期间，他为我提供了大量的资料，对我进行了悉心的指导，使我熟练掌握了现场的自动化控制设备，提升了实践能力，在此对他表示诚挚的谢意。

感谢我的家人多年来在物质和精神上对我的支持和关怀，激励我前进。

感谢各位教授、专家在百忙中对本论文的审阅和赐教！

最后，衷心感谢东北大学信息科学与工程学院全体老师的辛勤培养和教诲。