

超超临界火电机组 热工控制技术

张雨飞 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

超超临界火电机组 热工控制技术

张雨飞 主编
吕剑虹 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是论述火力发电厂 1000MW 超超临界机组热工控制系统的技术专著。

本书以目前国内两种典型的 1000MW 超超临界机组热工控制系统为例,对超超临界机组热控系统进行了全面深入的分析,包括协调控制系统、燃烧控制系统、给水控制系统、汽温控制系统、旁路控制系统、辅助控制系统、炉膛安全监控系统、顺序控制系统,并对这些控制系统的控制组态 SAMA 图、控制策略进行了分析与说明。

本书可作为从事超超临界火力发电机组热工控制系统设计、调试、运行人员的技术参考书,可以作为运行检修人员的培训教材,还可以作为高等院校热控专业高年级本科生、研究生的专业辅助教材。

图书在版编目(CIP)数据

超超临界火电机组热工控制技术/张雨飞主编. —北京:中国电力出版社,2013.2
ISBN 978-7-5123-3705-3

I. ①超… II. ①张… III. ①火力发电-发电机组-自动控制系统 IV. ①TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 260626 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 3 月第一版 2013 年 3 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.25 印张 470 千字
印数 0001—3000 册 定价 55.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

1000MW 火力发电超超临界机组发电技术，是当今火力发电的主流技术和大力发展的技术，代表着新一代火力发电的最新发展，是节能、高效和环保技术指标都很高的发电技术。我国现在新上的火力发电机组，绝大部分都会采用超超临界机组。目前，1000MW 超超临界机组的发电煤耗低于 290g/kWh，各项环评指标也都优于其他类型机组。

1000MW 超超临界机组在控制系统、控制策略方面，与亚临界机组和超临界机组有所不同；在控制策略和控制系统配置上有着比较鲜明的特点。

本书是一本 1000MW 超超临界机组热工控制系统方面的技术专著，选用了两套目前国内 1000MW 超超临界机组的典型系统，对采取的控制策略和控制组态 SAMA 图进行了深入剖析，包括协调控制系统、燃烧控制系统、给水控制系统、汽温控制系统、旁路控制系统、辅助控制系统、炉膛安全监控系统、顺序控制系统等。希望通过对这些控制系统的分析，能够帮助读者对超超临界机组的控制系统有更加深刻的认识。

本书由东南大学张雨飞主编并编写第一章、第二章、第三章，崔晓波、黄军林编写第四章、第五章；舒亮编写第六章、第七章；赵紫亮编写第八章；李园园编写第九章；董永宁、夏君珺编写第二章部分内容。

吕剑虹教授对本书的编写提出了自己的独到见解，并对本书进行了认真审核，提出了很多宝贵意见，在此表示真诚的感谢。

本书在编写过程中得到了南京华能金陵电厂的支持，在此表示衷心感谢！

由于编者水平所限，书中难免存在疏漏和不足之处，敬请读者提出宝贵意见，以便改正！

张雨飞

2013 年 2 月 金陵

目 录

前言

第一章 超超临界机组控制系统概述	1
第一节 超超临界机组的特点及控制要求.....	1
第二节 超超临界机组的控制系统.....	3
第三节 超超临界机组采用的控制策略.....	7
第四节 超超临界机组控制系统的性能指标	14
第二章 协调控制系统	17
第一节 概述	17
第二节 负荷指令控制回路	22
第三节 超超临界单元机组的对象特性	22
第四节 超超临界单元机组协调控制	24
第五节 超超临界机组典型的负荷控制系统特点	31
第六节 超超临界单元机组负荷控制系统实例	31
第三章 燃烧控制系统	80
第一节 概述	80
第二节 超超临界机组燃烧控制系统	83
第三节 燃烧控制系统的动态特性	86
第四节 水燃比控制实例	88
第五节 燃料控制系统实例	98
第六节 风量控制系统实例.....	132
第七节 炉膛压力控制系统实例.....	165
第四章 给水控制系统	176
第一节 给水控制系统组成与任务.....	176
第二节 给水控制系统对象动态特性.....	177
第三节 给水控制系统实例.....	178
第五章 汽温控制系统	189
第一节 主蒸汽温度对象的动态特性.....	189
第二节 主蒸汽温度控制系统实例.....	193
第三节 再热汽温的控制方式.....	209

第四节	再热汽温控制系统实例·····	210
第六章	旁路控制系统·····	221
第一节	旁路启动系统·····	221
第二节	旁路控制系统·····	230
第七章	辅助控制系统·····	243
第一节	高/低压加热器控制系统实例·····	243
第二节	除氧器控制系统实例·····	249
第三节	凝汽器控制系统实例·····	254
第八章	炉膛安全监控系统·····	261
第一节	概述·····	261
第二节	锅炉炉膛爆燃·····	264
第三节	炉膛安全监控系统相关设备简介·····	267
第四节	炉膛安全监控系统公用逻辑实例·····	272
第五节	锅炉保护系统的运行·····	280
第九章	顺序控制系统·····	282
第一节	概述·····	282
第二节	机组级顺序控制系统·····	283
第三节	锅炉风烟系统顺序控制·····	284
第四节	高压加热器系统顺序控制·····	294
第五节	电动给水泵顺序控制·····	296
参考文献	·····	299

超超临界机组控制系统概述

第一节 超超临界机组的特点及控制要求

一、超超临界机组的特点

随着高性能的金属材料与设备制造技术水平的不断提高,以提高主蒸汽参数为目标的超超临界火力发电机组,越来越多地投入运行。特别是近几年来,国内投产运行的火力发电机组,都是主蒸汽压力在 27MPa、主蒸汽温度 600℃ 以上的超超临界 1000MW (百万千瓦) 机组。根据热力学理论,提高蒸汽的初始参数,将有效地提高机组的热效率。

百万千瓦机组的热效率一般为 43%~48%, 供电煤耗为 260~290g/kWh, 与相同容量的常规机组相比,效率提高 5% 左右,可以大幅提高热效率,降低发电煤耗。理论和实践都证明常规超临界机组的效率可比亚临界机组高 2% 左右,而高效的超超临界机组,其效率可比常规超临界机组再提高 4% 左右。另外,超超临界机组的水资源可以节约 10% 左右,通过改进燃烧器的结构和配风方式可有效控制 NO_x 的排放,再加上尾部的脱硫装置控制 SO₂ 的排放指标,空气污染物排放指标大幅度降低,在当前环境保护的压力下优势明显,是火力发电的首选机型。

单机容量已提高到 1000MW 的超超临界机组,处于高温高压状态下运行,对自动控制水平要求更高。对高效率、高参数的机组实现自动控制及保护是机组安全、经济运行的基础,超超临界机组运行的稳定性和经济性强烈地依赖于自动控制系统。超超临界机组对自动控制的软、硬件都提出了更高的要求。

二、超超临界机组的动态特性

与常规亚临界机组相比,超超临界机组的动态特性复杂,主要表现为:

(1) 动态特性随负荷大范围变化,呈现很强的非线性和变参数特性;为了适应调峰的需要,超超临界机组常采用复合变压运行,这就意味着超超临界机组实际上要在亚临界区、临界和超临界区运行,而在亚临界和超临界条件下工质的特性不同,对象特性表现出很强的非线性。为此,需要调节器要进行变参数调节,来改善调节效果。

(2) 由于没有汽包,在各个控制回路之间,存在着很强的非线性耦合,直流锅炉的控制对象是一个三输入/三输出的耦合系统。当给水量、给煤量、汽轮机调节阀任一数值发生变化时,机组有功功率、主蒸汽压力和主蒸汽温度都会发生变化。

(3) 锅炉蓄热小,容易发生超温超压。

由于直流锅炉给水流量的变化对机组负荷、主蒸汽压力、主蒸汽温度的影响最大,因此直流炉水燃比的控制是控制系统运行稳定的关键。

三、超超临界机组启动系统

1. 汽水分离器的启动系统

根据超临界直流锅炉启动分离器的运行方式,启动系统可分为内置式和外置式两种。

外置式启动分离器系统只在机组启动和停运过程中投入运行，而在正常运行时被解列。我国 125MW 和 300MW 亚临界机组锅炉均采用外置式启动分离器系统。外置式启动分离器系统在启动系统解列或投运前后操作复杂，汽温波动大，难以控制，对汽轮机运行不利。因此，欧洲国家、日本及我国运行的超临界和超超临界锅炉均未采用外置式启动分离器系统。

内置式启动分离器系统在锅炉启停及正常运行过程中，汽水分离器均投入运行。所不同的是在锅炉启停及低负荷运行期间，汽水分离器湿态运行，起汽水分离作用；而在锅炉正常运行期间，汽水分离器只作为蒸汽通道。内置式启动分离器设在蒸发段与过热段之间，汽水分离器与蒸发段和过热器间没有任何阀门，系统简单，操作方便，无外置式启动系统那样的分离器解列或投运操作，从根本上消除了汽温波动问题。由于它适合于机组调峰，因而在世界各国超临界及超超临界锅炉上得到了广泛应用。我国超（超）临界锅炉全部采用内置式启动分离器系统。

2. 锅炉变负荷速率的能力

一般亚临界自然循环汽包锅炉允许变负荷速率为 $0.6\% \text{MCR}/\text{min}$ ，控制循环汽包锅炉变负荷速率为 $3.6\% \text{MCR}/\text{min}$ ，而螺旋管圈式直流锅炉允许变负荷速率为 $5\% \sim 8\% \text{MCR}/\text{min}$ 。直流锅炉由于没有厚壁部件汽包，具有快速变负荷的能力。但是，随着锅炉参数的提高，内置式启动分离器的壁厚会增加，因而将限制锅炉负荷的变化速率。超超临界锅炉由于材料等级的提高，分离器壁厚仅为亚临界 600MW 锅炉汽包壁厚的 $1/3$ 左右，因此超超临界锅炉允许负荷变化速率还是较大的。国外超超临界机组的变负荷速率一般为 $2\% \text{MCR}/\text{min}$ ，完全可以满足机组的负荷变化速率的要求。

超超临界机组的良好性能是基于低负荷滑压运行，即主蒸汽压力随着负荷的降低而降低。从滑压运行到定压运行的切换点在 30% 负荷，这提高了机组在低负荷时的效率。

四、超超临界机组的控制特点

目前超超临界机组主要采用内置式汽水分离器的启动系统，当锅炉蒸汽流量大于最小流量，启动分离器内饱和水全部变为饱和蒸汽，直流锅炉运行在干态方式，即直流控制方式。所以，超超临界机组的控制包括湿态和干态方式下的控制策略。

超超临界机组控制，具有如下特性。

1. 被控对象特性

超超临界机组在直流运行状态汽水之间没有明确的分界点，给水从省煤器进口就开始被连续加热、蒸发与过热，根据工质（水、湿蒸汽与过热蒸汽）物理性能的差异，可以划分为加热段、蒸发段和过热段三大部分，在流程中每一段的长度都受到燃料、给水、汽轮机调节阀开度的扰动而发生变化，导致功率、压力、温度的变化，如图 1-1 所示。

另外，超超临界机组在大范围的变负荷运行中多采用滑参数运行，压力运行范围为 $10 \sim 27 \text{MPa}$ ，机组实际运行在超临界和亚临界两种工况下。由于超临界与亚临界间工质物性的差异，以及不同燃烧率下锅炉蒸发点迁移等因素的影响，使超超临界机组呈现出很强的多参数非线性特性，稳态下典型的工质状态和参数变化情况如图 1-2 所示。

2. 负荷控制特性

针对超超临界机组的特性，恰当地选取控制量与被控量的关系，是负荷控制成功的基础。

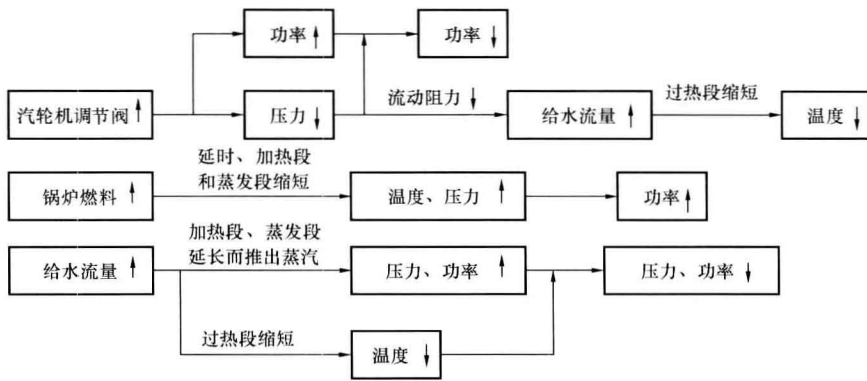


图 1-1 超超临界机组主控参数耦合特性关系

运用静态反馈解耦方法对图 1-1 进行分析：压力在稳态响应下仅与汽轮机调节阀、燃料量有关，与给水流量关系不大。而燃料量对汽压变化有明显的延时，因此，利用汽轮机调节阀控制汽压更有助于机组的稳定，并能有效减少对汽温的交叉影响。考虑到锅炉特性慢和汽轮机特性快的区别，需在协调控制系统中设置动态补偿环节，协调锅炉与汽轮机的控制。

稳态响应下，机组功率仅与燃料的多少有关，由于燃料对工况影响的滞后性，使超临界机组和亚临界机组一样，在协调控制方案中可以利用负荷指令加上微分前馈作为燃料的粗调指令。

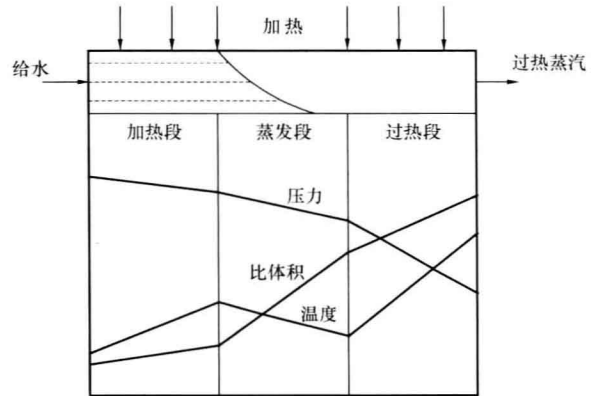


图 1-2 超超临界机组水汽工质状态及参数变化

第二节 超超临界机组的控制系统

超超临界机组的自动化控制由分散控制系统 DCS 来实现。分散控制系统包括数据采集系统 DAS、模拟量控制系统 MCS、顺序控制系统 SCS、锅炉炉膛监控系统 FSSS、电气监控系统 ECS、凝结水精处理等各项控制功能，是一套包含了机组各项控制功能的完整控制系统。

一、模拟量控制系统 MCS

机组分散控制系统的主要控制系统——模拟量控制系统，涵盖了机组所有的模拟量控制子系统，包括协调控制系统、给水控制系统、过热汽温/再热汽温控制系统、燃烧控制系统（包括制粉系统）、送风控制系统（含氧量）、炉膛压力控制系统、一次风压力控制系统，以及旁路回路、除氧器和凝汽器控制等其他单控制系统等。

1. 协调控制系统 CCS

作为国产超超临界 1000MW 机组，协调控制系统的好坏直接代表了机组自动化水平。

协调控制系统如图 1-3 所示。考虑到锅炉和汽轮机的差异和特点，使机—炉同时按照电网负荷的要求变化，接受外部负荷的指令，根据主要运行参数的偏差，协调进行控制。锅炉主控/汽轮机主控根据机组主控系统产生汽轮机负荷控制指令，使发电功率达到要求。负荷与主蒸汽压力设定信号产生一个完整的控制，锅炉输入（给水、燃料、风等）作为锅炉输入指令（BID）信号使主蒸汽压力控制在设定值内。

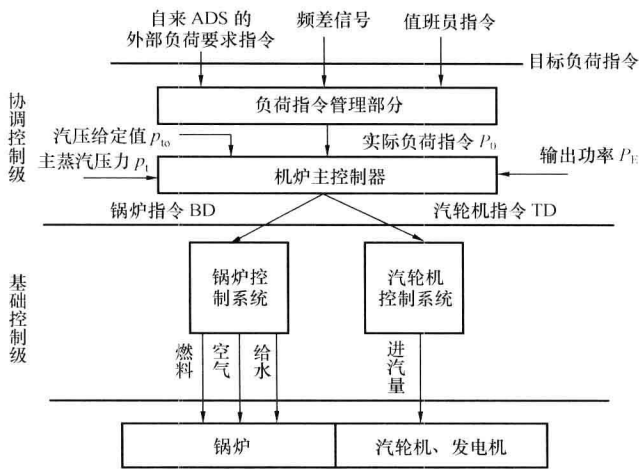


图 1-3 协调控制系统

直流锅炉是汽水一次性循环，不具有类似于汽包的储能元件。因此，锅炉的储能比较小，很难找到类似于热量信号（仅反映燃料的变化不反映汽轮机调节阀变化及给水流量变化）的信号。直流锅炉—汽轮机是复杂的多输入、多输出的被控对象，燃料量、给水量、汽轮机调节阀开度的任一变化均会影响机组负荷、主蒸汽温度、主蒸汽压力的变化，而且燃料、汽轮机调节阀的变化又会影响到给水流量的变化，其中的影响媒介就是主蒸汽压力的变化。因此，对于直流锅炉机组的

协调控制系统来说，主蒸汽压力控制非常重要。直流锅炉是汽—水一次性循环，汽—水没有固定的分界点，它随着燃料、给水流量以及汽轮机调节阀的变化而前移或者后移，而汽—水分界点的移动直接影响汽—水流程中加热段、蒸发段和过热段的长度，影响主蒸汽的温度，并导致主蒸汽压力、负荷的变化，因此，控制中间点温度一直被认为是直流锅炉控制的重要环节。

协调控制系统有以下四种方式：

(1) 机—炉协调。锅炉主控和汽轮机主控都投入自动运行。锅炉与汽轮机之间有机地建立适当的关系，当机组负荷指令发生变化时，锅炉和汽轮机同时调节，此种方式机组响应负荷变化较快，但由于锅炉有较大延迟和惯性，锅炉参数短时间内会有较大偏差。

(2) 锅炉跟随。锅炉主控投入自动运行，汽轮机主控处于手动状态。汽轮机响应机组负荷指令或运行人员手动指令的变化，锅炉响应蒸汽流量变化及由汽轮机引起的汽压偏差。

(3) 汽轮机跟随。锅炉主控处于手动状态，汽轮机主控投入自动运行。锅炉主动满足机组负荷指令的变化，汽轮机响应由锅炉引起的汽压变化。

(4) 基本方式。锅炉主控和汽轮机主控都处于手动状态。在这种方式下锅炉和汽轮机单独操作，由操作员负责控制负荷和压力。操作员在锅炉主控 A/M 站上设定燃料和助燃风指令。

2. 给水控制系统

给水流量调节系统主要包括电动给水泵液力耦合调节回路、A 和 B 汽动给水泵转速调节回路、给水旁路阀调节回路等。给水流量调节系统分给水流量设定值形成、给水泵给水流量主调节系统、给水调节阀给水流量辅助调节系统。

给水流量设定值形成原理是在超超临界机组中，没有汽包这样的中间介质，因此，必须使给水流量与锅炉的蒸汽流量—喷水流量的需求相适应。在蒸汽流量和燃料量和给水流量之间的任意一方出现配合不当均会使锅炉的蒸发点移动。在有的情况下，需要控制省煤器出口温度和储水箱水位。在给水中，正常给水流量设定值是通过负荷和主蒸汽压力控制器的输出形成给水流量和燃料指令的基础，同时，设计有省煤器汽化保护回路和分离器储水箱水位补偿回路。

汽动给水泵给水流量调节原理是给水流量定值形成后和省煤器入口流量信号比较作为汽动给水泵给水流量调节 PID 调节器的输入，汽动给水泵给水流量调节是通过调节 2 台汽动给水泵的转速来调节省煤器入口流量。

电动水泵给水流量调节原理是给水流量定值形成后和省煤器入口流量信号比较作为电动水泵给水流量调节 PID 调节器的输入，电动水泵给水流量调节通过调节电动水泵勺管（旁路阀开度），来调节省煤器入口流量。

给水旁路阀辅助调节系统是典型的单回路调节系统。调节器接受给水流量偏差信号，经 PID 调节器运算后，作为调节阀开度指令，调节给水流量。给水调节阀水位调节系统只用于上水和低负荷阶段，此时电泵在最小转速状态。正常负荷情况下，该调节阀关闭，或手动调节。

3. 过热汽温控制系统

过热汽温采用三级喷水减温控制。采用三级减温调节控制末级过热器出口温度。减温调节是基于一个两回路控制，而不是像传统的串级控制外回路那样是一个慢速回路，它预测了末级过热入口的温度。在这个回路中设置了末级过热出口温度设定值，考虑了末级过热出口温度自身变化对末级入口温度设定值的影响，设置了负荷变化前馈信号，同时对末级入口温度设定值进行饱和度的限制。内层快速回路是一个基于常规 PID 调节器的控制，它对末级过热器入口温度（二级减温器出口温度）进行调节。A、B 侧屏式过热器入口、屏式过热器出口温度均采用三选中标准逻辑。一级减温调节的原理与二级减温调节相似。一级减温调节控制屏式过热器出口温度，顶棚过热器出口温度设定值是基于储水箱出口压力的函数，经过与汽水分离器饱和温度的差值进行校正，形成一级减温水过热的修正信号。一级减温水的流量指令是给水流量和机组目标负荷的函数，加上一级减温水的过热度修正信号，通过调节器进行调整。

4. 再热汽温控制系统

再热汽温调节，采用燃烧器倾角控制、烟气调节挡板和喷水减温相结合的方式。在一般情况下，通过调节燃烧器倾角和烟气调节挡板来维持再热汽温。当燃烧器倾角和烟气调节挡板不能维持再热汽温，使得再热蒸汽超温时，需要投入喷水对再热蒸汽进行减温，以保护再热器的运行安全。

5. 燃料控制系统

燃料控制包括给煤量控制、给煤机转速控制、磨煤机控制。按照锅炉主控发出的锅炉指令，调整给煤量指令；按照给煤量指令，来控制给煤机的转速、磨煤机的出口风粉温度和一次风流量，保证煤粉的安全输送。同时，还要对一次风压力进行控制，保证一次风具有足够的刚度，将煤粉正常输送到炉膛内。通过调节 2 台一次风机动叶开度，维持一次风母管风压到设定值。当燃料主控指令发生变化时，一次风压设定值会随之发生变化。

6. 氧量校正的送风控制系统

氧量控制系统与送风机控制系统共同组成了送风控制系统。

氧量控制系统中，在锅炉两侧的氧量传感器测量信号，经过平均运算后作为氧量调节器的被调量。给煤机煤量指令经过分段线性功能块按照一定的比例关系计算出理论氧量设定值，加上运行人员手动偏置量作为氧量调节器的设定值。氧量调节器的输出指令送到送风调节系统，作为风量设定值的校正信号。

在送风控制系统中，根据锅炉输入指令和燃料量设定形成风量基本指令，经氧量校正、风量补偿后，通过风煤交叉逻辑的限制形成最终的风量设定值，然后通过 2 台送风机入口动叶的调节，保证锅炉燃烧的经济性和稳定性。

7. 炉膛压力控制系统

炉膛负压控制系统通过调节 2 台引风机入口导叶的开度维持炉膛压力。炉膛两侧各有 3 个炉膛压力测量信号，采用了三取中处理后，再进行平均处理作为炉膛压力调节器的测量值。为了保证炉膛压力调节的快速性，使用了一个炉膛压力调节器，调节器的输出送到两侧引风机的手操站，加上偏置信号和前馈信号后控制引风机入口导叶的开度。设计有主燃料跳闸 (MFT) 后锅炉防内爆、外爆和单风道隔离功能。

8. 锅炉启动控制系统

锅炉的启动及控制系统是为了更好地适应机组变压运行的要求，设计带有循环水泵 (BCP) 启动，使系统根据启动运行的要求，配以汽轮机一级大旁路。它投资小，运行检修维护方便，在保证机组安全运行的情况下，实现锅炉的干—湿态转换，从经济性角度选择是最佳的启动系统。启动系统设置的控制系统基本上满足了锅炉对启动过程的要求，保证机组运行安全、可靠并长期稳定地运行。

湿态—干态方式转换按以下方式确定：

随着负荷和燃料量的增加，分离器储水箱液位和锅炉循环水流量将逐渐减少，当燃料量增加且锅炉达到最小给水流量时，进入分离器的工质全部是蒸汽。

1) 湿态转换干态方式：负荷大于 29% 或锅炉循环水调节阀关闭或循环水泵停止后 60s。

2) 干态转换湿态方式：负荷小于 25%，或锅炉循环水调节阀没有关闭且循环水泵运行。

(1) 湿态方式。从启动到负荷 25%~29% 时，水冷壁出口蒸汽仍然是湿态，水冷壁出口湿态蒸汽里的水流到分离器储水箱。

主蒸汽压力按以下方式控制：负荷小于 15% 时，通过汽轮机旁路阀控制主蒸汽压力，蒸汽排到冷凝器；负荷为 15%~25% 时，通过燃料调节来控制主蒸汽压力，与汽包炉相同；达到负荷 15% 时，汽轮机旁路逐渐关闭。

(2) 干态方式。当机组负荷达到 29% 时，水冷壁出口的蒸汽处于干态，分离器储水箱液位为零，锅炉循环水泵停止，锅炉处于直流状态，由锅炉输入控制主蒸汽压力。汽轮机旁路系统主要是协调锅炉和汽轮机用汽量之间的不平衡，在机组启动期间，对过热器和再热器系统进行预热，可加快启动速度。在机组甩负荷时，将剩余蒸汽通过旁路系统，使锅炉瞬变过渡工况运行稳定，达到改善启动和带负荷特性，减少机组的寿命消耗，提高运行的安全性和经济性。对于其他单回路控制系统，可通过调节调节阀或调节挡板来维持被调量等于设定值。

9. 主要辅助控制系统

包括除氧器控制，高、低压加热器控制，高、低压旁路控制，凝汽器控制。这些辅助控制系统作为分散控制系统中的一部分，对辅助设备的安全运行提供保证。

主要辅助控制系统控制方式比较简单，主要采用单回路 PID 控制策略；当然也包括控制方式的手、自动切换，故障报警等保护措施。

二、锅炉炉膛监控系统 FSSS

锅炉炉膛监控系统，包括锅炉保护系统、火焰检测控制系统、炉前燃油控制系统、油燃烧器控制系统、给煤和磨煤机启动停止控制系统、火检冷却风机控制系统、密封风机控制系统等。FSSS 主要通过顺序控制逻辑来实现保护与控制。

锅炉保护系统有主燃料跳闸 (MFT)、燃油跳闸 (OFT)、炉膛吹扫、磨煤机跳闸等。MFT 保护包括软逻辑部分和硬件接线跳闸柜。在正常运行中，触发 MFT 软逻辑的任意一个动作，软逻辑将发送信号到硬接线跳闸柜，触发 MFT 继电器动作，输出 MFT 信号到各系统和设备，同时到操作器中触发软逻辑 MFT，作出相应动作。在主燃料发生跳闸后锅炉点火之前，都需要启动吹扫程序以清扫干净锅炉内的燃料，保证正常点火。

火焰检测控制系统对火焰状态进行检测，现场安装有火焰检测器，将燃烧器火焰信号送至火焰检测控制系统中，进行火焰状态判断。

燃油系统控制系统在每次点火前，都要进行油泄漏试验，以确认燃油是否泄漏。

三、顺序控制系统 SCS

顺序控制系统的主要控制功能，是对锅炉和汽轮机侧的主要辅机设备及吹灰程序进行控制，按电厂生产工艺流程控制的需要，完成辅机系统的启停控制，实现顺序自动控制。同时它以功能组控制为主，与分散控制系统的其他子系统配合，完成连锁保护功能和自动调节功能。

四、给水泵汽轮机电液控制系统 MEH

目前国内大多数大型火电厂给水泵汽轮机电液控制系统 MEH，已经在 DCS 中实现。作为 DCS 过程级的一个独立控制器，对给水泵汽轮机进行控制。

MEH 配备了独立的控制器，通过接受 DCS 发出的遥控转速信号来控制高、低压调节阀开度，达到调节给水泵汽轮机转速的目的，满足系统给水要求。

MEH 接受由锅炉主控器计算出的锅炉所需求的给水量，通过 DCS 输出转速指令信号给水泵汽轮机控制器。同时，接收就地转速探头传来的转速信号，通过比较两者之间的偏差，输出调节阀控制指令，控制就地伺服阀，开大或关小阀门，通过改变给水泵汽轮机进汽量来改变给水泵汽轮机的转速，使给水泵汽轮机出力满足锅炉给水要求。

在 1000WM 超超临界机组中，考虑到技术保护与机组的运行安全，汽轮机和给水泵汽轮机制造厂一般都不愿将汽轮机电液控制系统 DEH 和给水泵汽轮机电液控制系统 MEH 纳入 DCS，它们往往随主设备配套提供，外高桥电厂一期、玉环电厂工程、泰州电厂均如此，这些 DEH 及 MEH 的功能和范围有时较国内已往的 DEH 和 MEH 内容要多。

第三节 超超临界机组采用的控制策略

在超超临界机组的控制中，广泛采用了常规控制策略，这些常规控制策略的采用，可以

满足控制系统对可靠性的要求。另外，针对超超临界机组的特点，广泛采用前馈控制技术，以保证控制的及时性和有效性。

一、常规 PID 控制系统

在超超临界机组的控制中，使用最广泛的控制器依然是 PID。新一代 PID 控制器以数字计算机为核心，使用的是数字 PID 控制算法。对少数控制性能要求特殊或对象具有复杂特性的系统，会采用先进的控制策略或智能控制方法。绝大多数的热工生产对象，采用数字 PID 控制均可取得满意的控制效果。

PID，是比例 P (proportion)、积分 I (integral)、微分 D (differential) 的缩写。所谓 PID 控制，就是按照偏差的比例、积分、微分进行运算的控制算法。

常规 PID 控制系统如图 1-4 所示，采用数字 PID 控制器对热工对象进行控制。



图 1-4 常规 PID 控制系统

数字 PID 控制器不但可以实现 PID 控制算法，而且可以对 PID 算法进行改进，将 PID 控制与其他控制算法相结合，极大地提高 PID 算法的可靠性和实用性，比如对微分项进行改进的实际微分 PID

算法、对积分进行改进的各种积分分离 PID 算法、带死区的 PID 算法、变比例系数 PID 算法、变参数 PID 等。针对不同的应用条件，采用不同的 PID 算法，可以有效地解决 PID 控制的适应性问题。

针对实际使用中出现的问题，PID 控制有各种改进算法，比如针对滤除高频干扰的带滤波的 PID 控制、针对积分饱和的积分分离 PID 控制、补偿控制对象非线性因素的可变增益 PID 控制等。

PID 控制不适用于以下情况：

- (1) 有大时间滞后的控制对象。
- (2) 参数变化较大甚至结构也变化的控制对象。
- (3) 系统复杂、环境复杂、控制性能要求高的控制过程。

二、超超临界机组控制系统结构

超超临界机组常采用反馈、前馈、前馈—反馈、串级、比值、解耦等控制系统结构。

1. 反馈控制

反馈控制是根据给定值与被调量之间的偏差值，来进行控制的一种最基本控制方式。反馈控制是一种滞后控制，其结构如图 1-4 所示。它必须在被调量与给定值的偏差出现后，调节器才能进行调节，以此来补偿干扰对被调量的影响；在干扰已经产生而被调参数还未发生变化时，调节器是不会动作的，即反馈控制总是落后于干扰作用，因此称为滞后控制。

反馈控制系统的结构，决定了无法将干扰对被控量的影响克服在被控量偏离设定值之前，从而限制了这类控制系统控制质量的进一步提高。

被控对象通常存在一定的纯滞后和容积滞后，从偏差驱动调节器动作到改变被控量使之发生变化要经过一段时间，而这段时间内，扰动对被控量的影响可能会很大。这样，就使得控制的作用总是滞后于扰动的影 响。这是由反馈控制结构本身决定的，无法将干扰对被控量的影响克服在被控量偏离设定值之前，从而限制了这类控制系统控制质量的进一步提高。

2. 前馈控制

系统的调节器根据干扰作用的大小和方向,对被调节对象进行控制来补偿干扰对被调量的影响,这种控制叫做前馈控制或前馈补偿。前馈控制是直接按扰动来进行控制,而不是按偏差进行控制的一种控制方式。

前馈控制主要考虑干扰作用的结果,要对干扰进行监测。扰动一产生,被调量还未发生变化时,前馈调节就动作,及时抵消扰动对被调量的影响,控制及时有效,理论上可以把偏差消除,按照这种理论构成的控制系统称为前馈控制系统。前馈控制对于扰动的消除要比反馈控制系统及时得多。

前馈控制系统框图如图 1-5 所示。图中, X 是扰动; Y 是被调量; $W_{yx}(s)$ 是扰动通道对象特性; $W_{ox}(s)$ 是前馈通道对象特性; $W_b(s)$ 是前馈调节器。理想的情况下,针对某种扰动设计的前馈控制,能够完全补偿因扰动而引起的被调量的变化,这称作完全补偿。实现对干扰完全补偿的关键是确定前馈控制器的形式。 $W_b(s)$ 取决于前馈通道对象特性和干扰通道对象特性。

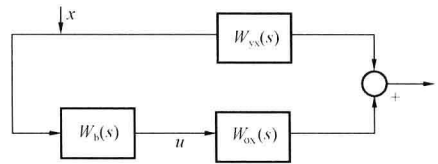


图 1-5 前馈控制系统框图

整定前馈控制器 $W_b(s)$ 参数的主要依据是不变性原理。

不变性原理:设计前馈调节器,使被调量 y 与扰动无关,或者在一定程度下无关。对图 1-5,有

$$W_{yx}(s) + W_b(s)W_{ox}(s) = 0 \Rightarrow W_b(s) = -\frac{W_{yx}(s)}{W_{ox}(s)} \quad (1-1)$$

如果 $W_{yx}(s)$ 和 $W_{ox}(s)$ 可以很准确地测量出来,且 $W_b(s)$ 完全按照式(1-1)来确定,则不论干扰信号发生怎样的变化,前馈控制都能做到完全补偿,使被调量因干扰而引起的动态和稳态偏差均为零。

这种按照不变性原理设计出的前馈控制器,是一种理想控制器。实际系统在使用过程中,由于对象特性的实时变化,很难做到前馈控制的完全补偿。

工程上常用静态前馈控制或者一些特定形式的动态前馈控制。

静态前馈:根据不变性原理求出 $W_b(s)$,用其静态放大系数作为前馈控制器,它是一个比例环节,即

$$k_b = W_b(s) \Big|_{s \rightarrow 0}$$

动态前馈:静态前馈直接根据不变性原理求得的 k_b 一般比较复杂,故在热工过程控制中常用动态前馈,即

$$W_b(s) = \frac{1 + T_2 s}{1 + T_1 s} \quad (\text{超前—滞后环节})$$

当 $T_2 > T_1$ 时,超前补偿(PD作用),改善动态特性,加快响应速度。

当 $T_1 > T_2$ 时,滞后补偿(P+惯性作用),降低响应速度,改善稳态精度(I控制)。

前馈控制的局限性体现在如下几个方面:

(1) 前馈控制是开环控制,无法保证控制精度。单纯的前馈控制系统中不存在被调量的反馈,即对于前馈补偿的结果没有检验的手段。因而,当前馈作用并没有完全消除偏差时,系统无法判断控制效果。

(2) 只能实现主要扰动的有限补偿。由于实际工业对象存在多个干扰，如果要做到对所有扰动进行补偿，势必设计多个前馈通道。为了减少系统投入和维护工作量，只对主要扰动进行补偿。对不可测量的扰动，无法实现补偿。

(3) 前馈控制器的效果受限于对象特性的变化。前馈控制器取决于对象特性，当对象特性受负荷和工况等因素的影响而发生变化时，一个事先固定的前馈控制器不可能获得良好的控制质量。

3. 前馈—反馈控制

前馈控制往往不会单独使用，一般会与反馈控制结合，组成前馈—反馈控制系统。

在工程实际应用中，为提高控制质量、克服前馈控制和反馈控制的缺点，会对主要扰动采取前馈补偿控制，而对其他引起被调参数变化的干扰采用反馈控制，以这种形式组成的系统称为前馈—反馈控制系统，如图 1-6 所示。

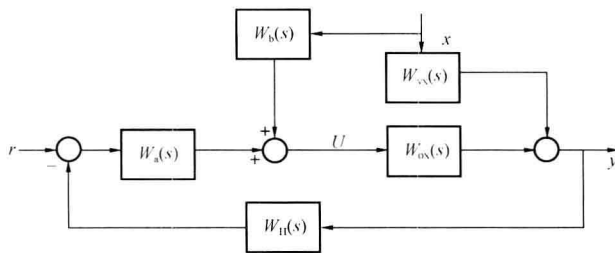


图 1-6 前馈—反馈控制系统

前馈—反馈控制系统既能发挥前馈调节控制及时的优点，又能保持反馈控制对各种扰动因素都有抑制，保证系统稳定（即最终消除扰动，控制精度高的特点），在实际工程中得到了广泛的应用。

前馈—反馈控制系统具有如下特点：引入反馈控制后，前馈控制中的完全补偿条件不变。复合控制系统补偿控制的控制规律不仅与对象控制通道和干扰通道的传递函数有关，还与反馈调节器的位置有关。两者的结合，可以使前馈控制器采用简单的形式（大致抵消扰动），而主控制器的动作放慢，显著地减少被调量的动态偏差。前馈—反馈控制时，扰动对输出的影响要比纯前馈时小得多。

4. 串级控制

在热工自动控制中，单回路反馈调节系统是一种普遍采用的调节系统，但随着机组容量的增大及对生产过程运行要求的提高，单回路反馈调节系统对一些主要过程的调节往往不能满足要求，而暴露出了一些缺陷。比如，在单回路控制中，调节器动作的结果，明显迟后于扰动的变化，不能及时消除干扰对被调量的影响，造成被调量变化较大；单回路控制器是根据受控对象来整定的。而热工对象一般是惯性大、阶次高。为了保证系统的稳定，控制器的动作必须缓慢，控制作用强度不能过大，造成调节过程太长。

造成这种缺陷的原因有两个：一是受控对象的可控性差，二是由于系统结构不是最佳。针对上述两种原因，可以对单回路系统加以改进，改进的途径有两种：

1) 对于闭环回路外的扰动，设法设计一个前馈调节装置，以及时消除因扰动而产生的被调量偏差。可以采用带有导前微分信号的控制系统，前馈—反馈控制系统等。

2) 若能改善调节作用下对象的动态特性，则无疑会改善调节变量。尽量取得一些比被调量提前反映扰动的辅助信号，这样调节器就能提前动作，有效的限制被调量的动态偏差。这相当于改善调节作用下对象的动态特性。这类典型的控制系统就是串级控制系统。

(1) 串级控制系统结构。串级控制系统结构如图 1-7 所示。调节系统有两个调节回路，称作主、副回路，两个调节器串联工作，共同发挥作用，维持被调量恢复到给定值。

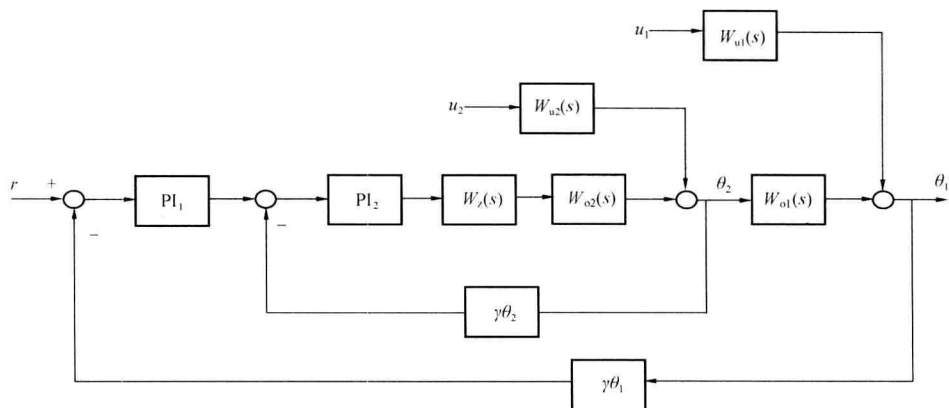


图 1-7 串级控制系统方框图

图 1-7 中，调节对象中间点参数 θ_2 以前的部分 $W_{o2}(s)$ ，称为调节对象导前区，也称副控对象； θ_2 以后的部分称为调节对象的惰性区 $W_{o1}(s)$ ，也称主控对象。

根据主参数与给定值的偏差而动作的调节器为主调节器，见图 1-7 中的 PI_1 ；以主调节器的输出为给定值，并根据副参数与给定值的偏差而动作的调节器为副调节器，见图 1-7 中的 PI_2 。

(2) 主、副调节器的选择与中间点的选择。当主参数要求高，副参数也有一定要求时，中间点只能由生产过程要求确定，而主、副调节器均应选择 PI，以使稳态时，主、副参数均等于给定值，如汽压调节系统。

当主参数等于给定值，副参数不加限制时，副调节器选 P 或 PD，以尽快消除内回路扰动。

如果主参数控制质量要求不十分严格，同时在对副参数的要求也不高的情况下，为使两者兼顾而采用串级控制方式时，主副调节器均可采用比例控制。

中间点的选择条件为：① 能提前反应被调量的变化；② 能将较多的扰动包含在内回路；③ 能测量。

(3) 副回路的选择原则。副回路应该把生产系统的主要干扰包括在内，应力求把变化幅度最大、最剧烈和最频繁的干扰包括在副回路内，以充分发挥副回路改善系统动态特性的作用，以尽量减少它们对主参数的影响，提高系统抗干扰能力，保证主参数的稳定。

主、副对象的时间常数应适当匹配，原则是两者相差大一些，效果好。串级控制系统与单回路控制系统相比，其工作频率提高了，但这与主副对象的时间常数选择是有关的。

(4) 串级系统分析。一般来说，评价一个系统的好坏，可以从它的抗干扰能力和跟踪能力来分析。抗干扰性能是系统回归稳态的能力，而跟踪性能是系统从一个稳态到达另一个稳态的能力，体现的是动态调节性能，两者评价的角度不同。若给定值 r 经常变化，而系统要求 y 跟着 r 变化，此系统可看作是随动系统。这时 y 跟踪 r 越快越好，跟踪能力好，如串级系统的内回路。

若 r 维持不变，系统目的是使维持 $y=r$ ，那么 u 就是扰动，这样的系统可以看做是定值系统。一般希望定值系统的抗干扰能力强，即 $\frac{y(s)}{u(s)} \rightarrow 0$ ，如串级系统的外回路。