



“十三五”普通高等教育本科规划教材

单元机组集控运行

赵爽 李西军 主编
智关 韩玉霞 李雅侠 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

单元机组集控运行

主 编 赵 爽 李西军
副主编 智 关 韩玉霞 李雅侠
编 写 赵 立 赵 健
主 审 杨建蒙



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书以单元制大型燃煤火力发电机组为例，分别从系统组成、机组启停、运行调节、事故处理四方面进行了讲解。主要内容包括单元机组系统组成、单元机组自动控制及保护系统、单元机组（配汽包炉）的启停与运行调节、单元机组（配其他锅炉）的启停与运行调节和单元机组事故诊断与对策。

本书可作为普通高等院校能源与动力工程及其他相关专业的教材，也可作为集控运行人员岗前的培训教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

单元机组集控运行/赵爽, 李西军主编. —北京: 中国电力出版社, 2015. 12

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5123-8147-6

I. ①单… II. ①赵…②李… III. ①火电厂-单元机组-集中控制-高等学校-教材 IV. ①TM621.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 187299 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>)

三河市百盛印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 12 月第一版 2015 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.25 印张 472 千字 4 插页

定价 42.00 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

编者具有多年的单元机组集控运行的授课经验,授课对象为在校学生和具有工作经验的运行人员。在对在校学生的授课中发现,由于理论学习和实践严重脱节,学生的学习过程是“记住了”,而不是“理解了”,也就是“知其然而不知其所以然”,其结果是“出了考场全部忘光”。而对于具有工作经验的运行人员来说,往往是现场经验极其丰富,但由于离开学校多年,理论知识比较薄弱。为此,本书的编写原则是在讲解理论知识的过程中尽量与实际运行情况相贴近。书中采用了大量的控制画面、系统图、运行实例和曲线,希望能对大家的学习提供帮助。

目前,我国的大型机组还是以火力发电为主,因此,本书以单元制大型燃煤火力发电机组为例,分别从系统组成、自动控制及保护系统、单元机组的启停与运行参数的调节、事故诊断与处理四方面进行了讲解。因为不同机组所用设备形式和主要系统的布置形式均有所不同,所以本书在编写时尽量做到重点突出、覆盖全面。在编写系统组成、机组启停和运行参数的调节三方面时,侧重点为汽包炉、冷态滑参数启动、滑参数停运,即本书的第1章、第3章。在第4章中分别对配置直流锅炉和循环流化床锅炉的单元制机组的启停和运行调节进行了讲解。

本书由内蒙古工业大学赵爽、韩玉霞,内蒙古岱海发电有限责任公司李西军、智关、赵立和赵健,沈阳化工大学李雅侠共同编写。其中赵爽、李西军编写第1章1.1节、1.3节、第2章2.1~2.8节、2.10节、第3章3.1节,韩玉霞编写第1章1.2节、第4章,赵立、赵健编写第1章1.4节、第2章2.9节,智关编写第3章3.2节,李雅侠编写第5章。全书由赵爽、李西军任主编并统稿。华北电力大学杨建蒙副教授担任全书的主审。

本书在编写过程中,得到了内蒙古岱海发电有限责任公司多位具有多年工作经验的运行人员的帮助,在此特别表示感谢。

由于编者水平有限,难免会有疏漏和不足之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2015年10月

目 录

前言	
绪论	1
1 单元机组系统组成	3
1.1 公用系统	4
1.2 锅炉侧主要系统	7
1.3 汽轮机侧主要系统	37
1.4 电气侧系统	87
小结	101
综合习题	101
2 单元机组自动控制及保护系统	103
2.1 分散控制系统	103
2.2 计算机数据采集系统	104
2.3 协调控制系统	105
2.4 顺序控制系统	112
2.5 炉膛安全监控系统	115
2.6 汽轮机数字电液调节系统	122
2.7 汽轮机安全监视系统	131
2.8 旁路控制系统	132
2.9 电气监控系统	136
2.10 单元机组的保护	140
小结	149
综合习题	150
3 单元机组（配汽包炉）的启停与运行调节	151
3.1 单元机组（配汽包炉）的启动与停运	151
3.2 单元机组（配汽包炉）的运行调节	193
小结	226
综合习题	227
4 单元机组（配其他锅炉）的启停与运行调节	230
4.1 单元机组（配直流锅炉）的启停与运行调节	230
4.2 单元机组（配循环流化床锅炉）的启停与运行调节	242
小结	263
综合习题	263

5 单元机组事故诊断与对策	265
5.1 单元机组事故的特点及处理原则	265
5.2 锅炉侧事故诊断与处理	266
5.3 汽轮机事故诊断与处理	281
5.4 单元机组电气设备及厂用电系统事故与处理	292
小结	300
综合习题	300
参考文献	302

绪 论

煤是我国主要的能源，因此，火力发电目前仍是我国最主要的发电形式。在火力发电机组中，原煤经过处理后进入锅炉中进行燃烧，其释放出的热量使锅炉过热器出口产生符合规定的过热蒸汽。该蒸汽进入汽轮机中做功并推动汽轮机转子旋转，同时带动发电机转子同步转动。在发电机中，转子绕组中通以励磁电流，从而产生旋转磁场，定子绕组切割该磁场产生电流。经过汽轮机做功后的蒸汽进入凝汽器中被冷却水或空气冷凝成水，并经过凝结水泵升压后进入除氧器中进行热力除氧，之后再经过给水泵升压后送入锅炉，经锅炉加热后成为过热蒸汽，由此完成了一个完整的汽水流程。配汽包炉的湿冷（采用开式循环冷却水）火力发电机组的生产流程简图如图 0-1 所示。

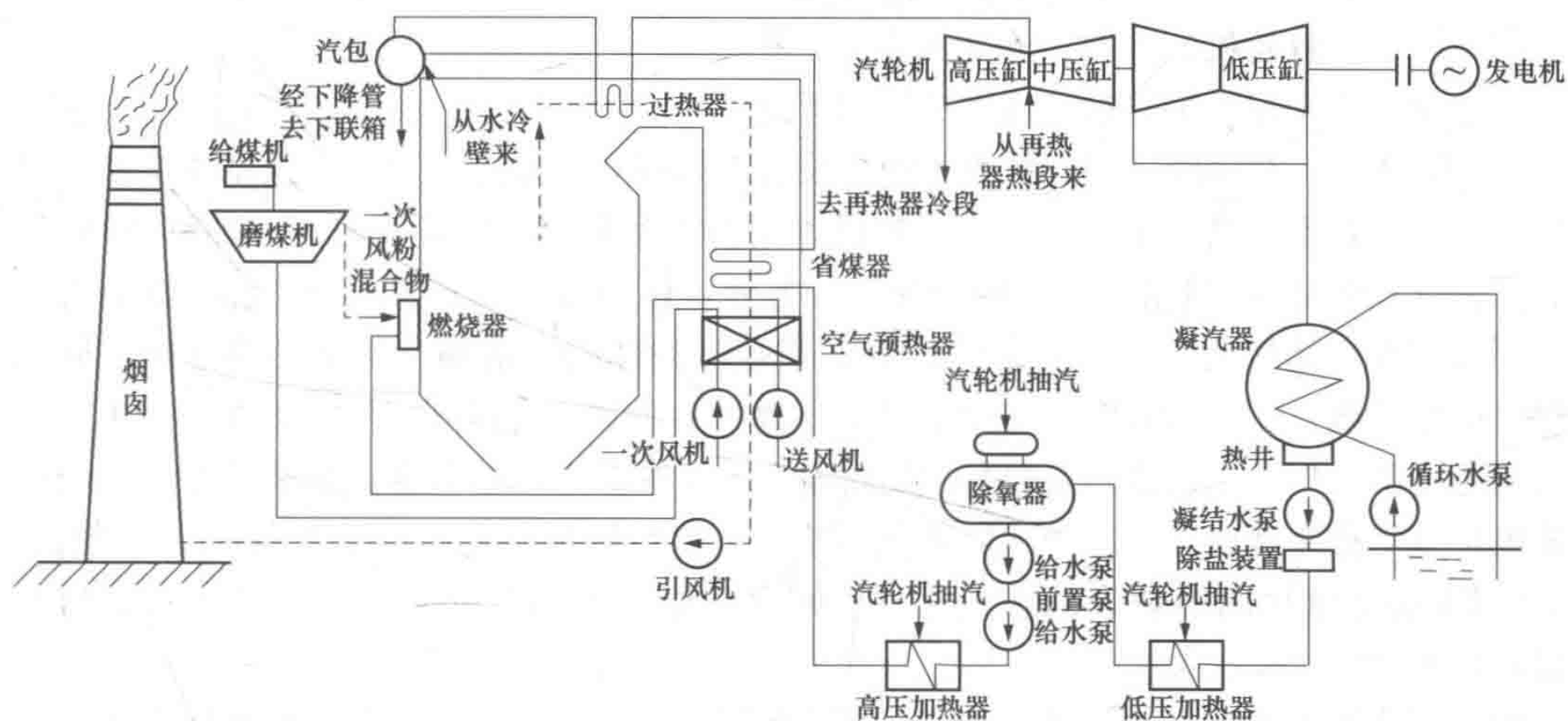


图 0-1 配汽包炉的湿冷（采用开式循环冷却水）火力发电机组的生产流程简图

火力发电机组通常有母管制与单元制两种布置形式。

几台锅炉产生的蒸汽均进到同一个蒸汽母管中，再根据需要分配到几台汽轮机中，锅炉与汽轮机之间无一一对应的关系，因此，两者之间的台数也可不等，此即为母管制。

目前，大型机组多采用具有一次中间再热和旁路系统的单元制形式。所谓单元制，即由一台锅炉、一台汽轮机和一台发电机及相应的辅助系统构成一个单元。如图 0-2 所示，为采用一次中间再热，并配有两级串联旁路的单元制机组的布置形式。单元制系统的各单元之间无横向联系的母管，灵活性较差，因此，有的电厂也采用扩大单元制系统，即将各个单元机组的蒸汽管道之间用一根直径较主蒸汽管道小的母管横向连接起来。

在母管制系统中，母管中储存了大量的蒸汽，使汽轮机能够很快地响应外界负荷的变化，使负荷的调节变得相对简单。锅炉与汽轮机之间无一一对应的关系，因此，一台或几台

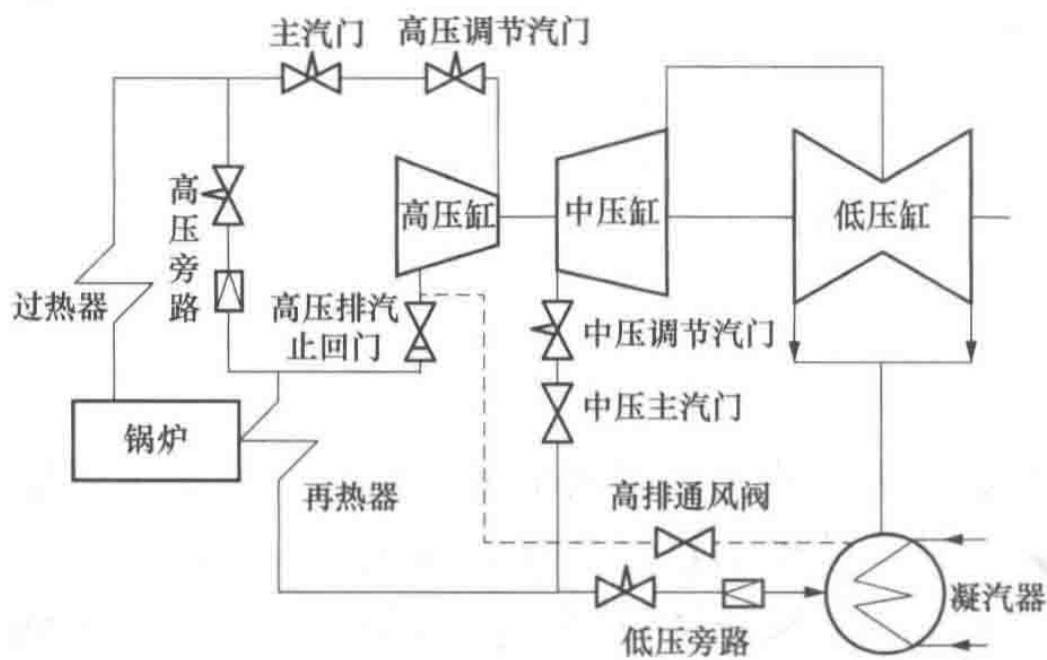


图 0-2 单元制布置形式

锅炉故障不会引起汽轮机停运，反之亦然。但是，由于母管中的蒸汽参数是一个定值，因此，汽轮机只能采用额定参数启动及定压运行的方式，使母管制机组的经济性相对较低，以前的小型机组大多采用这种形式。对于采用了中间再热的机组来说，再热蒸汽的参数会随着每台机组负荷的变化而变化，不是一个定值，因此，无法布置再热蒸汽母管，只能采用单元制的形式。

不同的机组形式，对应的设备及机组

的控制方式也不同。对于小容量机组来说，其主要设备的控制方式为单独控制，而现代大型发电机组均采用集中控制的方式，即把汽轮机、锅炉、电气三侧各主要设备及辅机当做一个整体进行控制，并设置了完善的协调控制与联锁保护功能，使机组运行的自动化程度更高，也更安全、可靠。集控运行方式对运行人员的素质提出了更高的要求，不再是以前的司炉、司机，而是汽轮机、锅炉、电气全能值班员。

为了更好地学习本书，这里特别进行如下说明：

(1) 对于同一个系统，不同机组可能会采取不同的布置和连接方式，但基本工作原理与组成大致相同，本书第 1 章~第 3 章主要以内蒙古岱海发电有限责任公司（简称岱海电厂）一、二期 $4 \times 600\text{MW}$ 机组为例来进行介绍，另外，还参考了内蒙古大唐托克托发电有限责任公司（简称托克托电厂）一期 $2 \times 600\text{MW}$ 机组和内蒙古大唐国际呼和浩特热电有限责任公司（简称呼热） $2 \times 300\text{MW}$ 机组的资料。所提到的参数和所用到的控制画面，如无特别说明，均为岱海电厂一期机组的参数和控制画面。第 4 章分别以国电建投内蒙古能源有限公司布连电厂（简称布连电厂） $2 \times 660\text{MW}$ 超超临界直流锅炉和内蒙古京泰发电有限责任公司 $2 \times 300\text{MW}$ 循环流化床锅炉为例进行介绍。如有不尽之处，请参考具体机组的布置与参数设置。

(2) 在介绍各个系统时，均附以该系统的控制画面来说明该系统的流程；控制画面比较简单，易于看懂，便于没有接触过现场的在校学生学习；但是，对于有些系统，如润滑油系统、EH 油（高压抗燃油）系统等，控制画面相对于实际系统过于简化，因此，另外附以该系统的系统图，系统图中各设备、阀门、管道等与现场一一对应，可将控制画面与系统图相互对照进行学习。

(3) 本书中很多内容是相互交叉的，如锅炉吹扫，在“FSSS 系统的功能”和“单元机组启动”中均会出现，为此，书中做了一些“提示”信息，以方便前后对照进行学习。

(4) 本书的内容涉及了很多专业基础课和专业课，如热力学、传热学、流体力学、泵与风机、锅炉原理、汽轮机原理、热工控制系统、热工仪表、热力发电厂等，因此，在学习过程中可以参考其他专业教材进行学习。如果具备仿真机教学条件，还可以结合仿真机进行学习，会取得更好的效果。

1 单元机组系统组成

单元机组由汽轮机、锅炉、发电机三大核心设备以及辅助系统组成；单元机组的辅助系统包括全厂公用系统、锅炉侧系统、汽轮机侧系统、电气侧系统和控制保护系统。单元机组的启停，也就是将机组中各个设备及系统按照相应顺序启动及停运的过程。控制和保护系统，如分散控制系统 DCS、炉膛安全监控系统（Furnace Safeguard Supervisory System, FSSS）、数字电液控制系统（Digital Electrohydraulic Control System, DEH）、汽轮机电气危急遮断控制系统（Turbine Emergency Trip System, ETS）等，则是机组启、停及运行操作的载体，通过它们可以完成设备的启停、设备出力的自动或手动调节、运行参数的监视，并在参数超限或危急情况下，对设备和机组实行保护。因此，在介绍单元机组的启动和停运前，首先对汽轮机、锅炉、电气三侧各主要辅助系统的组成、投停及运行维护的方法进行说明。控制保护系统将在第 2 章进行说明。

【运行实例1-1】

误操作导致运行人员死亡的重大事故

2000 年 9 月 8 日某电厂 2 号锅炉正常运行中，2:30，化学人员联系 2 号锅炉进行定期排污；2:40 左右，副值准备执行排污工作，由第二副巡检去就地进行排污（即放水）操作；2:45，集控室内运行人员突听一声巨响，明显感觉到集控室受到冲击，地面在振动，同时发现集控室外从零米楼梯口处冒出大量蒸汽，运行人员不知何故，立刻派人到零米查看，发现该巡检已躺倒在地，立刻将其送至医院进行治疗。与此同时，现场其他运行人员发现炉后 B 角和炉前 D 角底部上放水门开启，现场有管道发生爆破，大量蒸汽（高温高压炉水从管道喷出后立刻降压变为蒸汽）不断向外冒出。运行人员将炉前 D 角和炉后 B 角底部上放水门关闭，爆破管道停止冒汽。该巡检由于被高温蒸汽喷中，全身烫伤面积达到 70%，经医院全力抢救无效，于 2000 年 9 月 9 日因呼吸衰竭死亡。后经分析，该巡检在去底部排污时，本应将炉前 D 角和炉后 B 角的定期排污一、二次门打开，由于对系统和设备不熟悉，又没有认真地核对阀门上所标识的名称，从而错误地将与之相连的炉前 D 角和炉后 B 角的上放水门当作定排二次门打开，由于部分电动小阀不严漏汽，使锅炉侧高压汽水介质流至低压管路，造成上放水系统管道爆破，大量高压蒸汽喷出，将正在此处的该巡检冲至零米地面并烫伤，最终导致抢救无效死亡。

电厂运行人员上岗前的一项非常重要的培训或工作内容就是根据系统图“逛”现场，将系统图中的设备、阀门、管道、测量仪表等与现场中的上述诸项一一对应起来。如果运行人员不熟悉系统，那么就有可能发生误操作；如果对设备及系统的作用及工作原理也不熟悉，那么也就无法正确判断误操作可能对设备及人身带来哪些伤害。

1.1 公用系统

对于以前的小型发电厂来说，公用系统指的是同时为汽轮机、锅炉两侧提供服务的系统，通常包括压缩空气系统、辅助蒸汽系统等；而对于大型发电厂，从机组布置的角度来讲，通常将两台机组共称为一个单元，一个单元中的辅控系统，如输煤、化学水处理等系统通常也是公用的，还有两台机组共用的除灰、脱硫、脱硝的部分系统也是如此，因此，也可将它们称为公用系统，单元机组启动之前应保证这些系统具备启动条件。

1.1.1 压缩空气系统

压缩空气系统包括厂用压缩空气系统（也称杂用压缩空气系统）和仪用压缩空气系统两部分。厂用压缩空气系统主要用来进行除灰（用于采用气力除灰系统的机组）、锅炉受热面检修清灰等，也可用来进行锅炉受热面吹灰；仪用压缩空气系统用于气动挡板和气动门的控制，以及某些仪表，如火焰检测器、火焰电视的冷却用风，风烟系统压力，流量测点的吹堵风等。不同机组的压缩空气系统各有不同，如内蒙古岱海电厂一期 $2\times 600\text{MW}$ 机组，主厂房布置了4台 $40\text{m}^3/\text{min}$ （标准状态下）喷油螺杆式空气压缩机，压力为 0.8MPa 。其中2台运行、2台备用。同时还配有2套干燥能力为 $80\text{m}^3/\text{min}$ （标准状态下）的空气干燥装置，运行中，仪用压缩空气需经过干燥后使用，厂用压缩空气则无需干燥。空气干燥净化设备直接安装在空气压缩机后，能自动匹配空气压缩机的运行状态，以保证经处理后的压缩空气品质符合技术参数要求。除主厂房布置的空气压缩机外，一期的除灰系统还单独布置了6台空气压缩机。内蒙古岱海电厂二期 $2\times 600\text{MW}$ 机组，主厂房布置了3台空气压缩机，除灰系统布置了9台空气压缩机，两者布置在一起；由于主厂房空气压缩机台数较少，运行中除灰空气压缩机可作为其备用。

1. 压缩空气系统的投运与退出

压缩空气系统投运前应保证闭式冷却水系统已经投运，空气压缩机及冷干机的冷却水流量建立，仪用及杂用储气罐的出入口门开启，底部疏水门开启。对空气压缩机本体进行检查，如果要投入仪用压缩空气，还应对干燥装置进行检查，使其具备启动条件。对相应的仪表等进行检查。

当上述投运条件具备后，可以手动启动空气压缩机。空气压缩机电动机启动，冷却风扇电动机启动，空气压缩机卸载运行；经过加载延时（ $0\sim 20\text{s}$ ）后空气压缩机加载运行。加载时对面板中各参数进行检查。空气压缩机停运分为正常停运和紧急停运，在面板上进行手动按键操作。如果全部空气压缩机停运，应停止干燥装置。

2. 压缩空气系统的运行与维护

压缩空气系统运行中应检查空气压缩机电动机运行正常，振动、轴承温度及油气分离器油位正常；检查冷干机入口空气压力正常；检查加热器状态正确，温度表指示正常；检查吸收塔工作及再生正常，吸收塔压力与当前状态符合等。

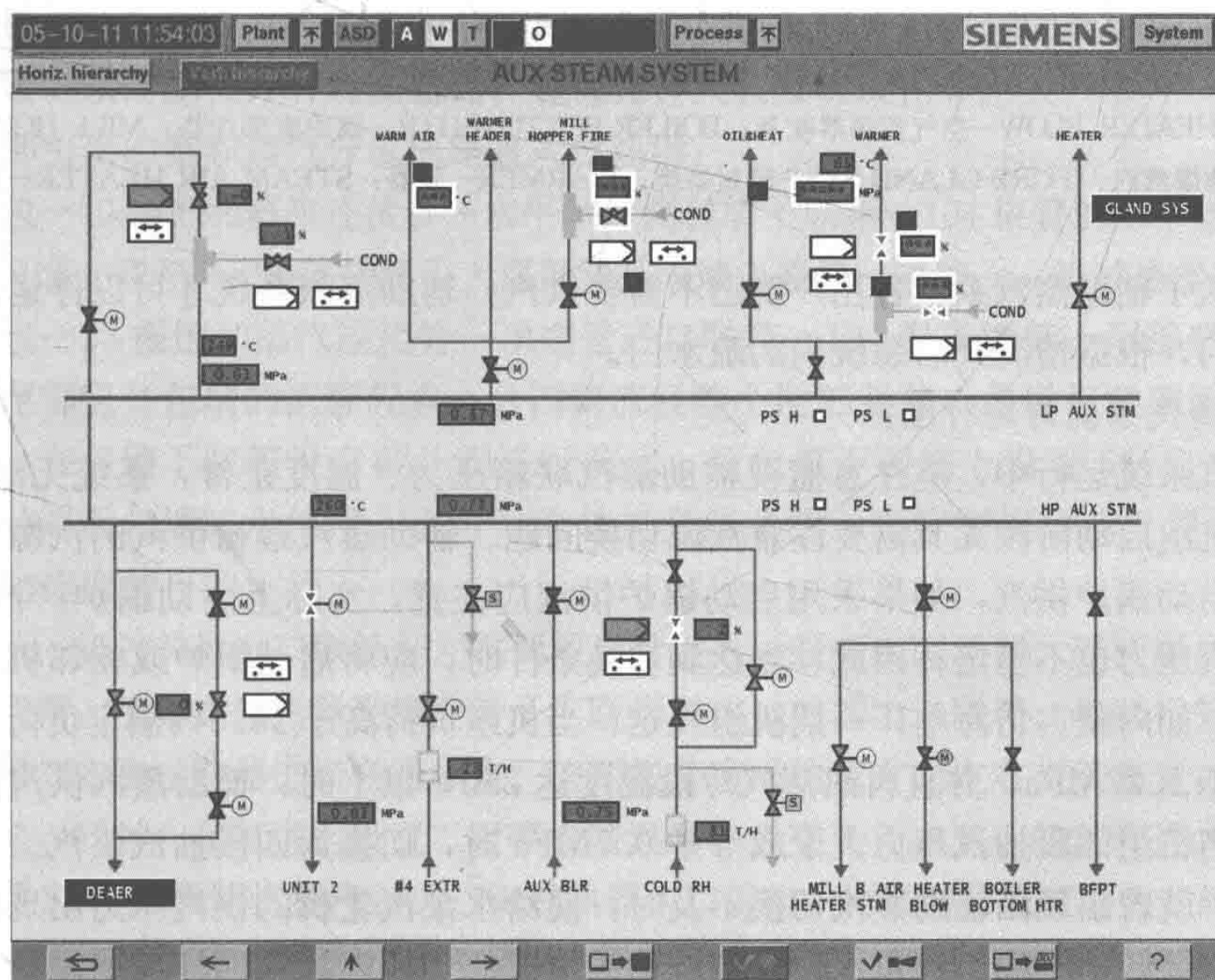
1.1.2 辅助蒸汽系统

辅助蒸汽系统主要向机组的一些辅助设备及系统提供蒸汽。机组启动初期，辅助蒸汽来源为外界汽源（如启动锅炉或相邻汽轮机来汽），可为汽轮机轴封、燃油吹扫、暖风器、给水泵汽轮机驱动用汽、锅炉底部加热及除氧器的加热等提供蒸汽。机组正常运行时，辅助蒸汽来源为本机抽汽，可为其他机组或本机需要供汽的用户供汽。

有些机组的辅助蒸汽系统只设一个辅助蒸汽联箱，有些则设置高、低压两个辅助蒸汽联箱。内蒙古岱海电厂二期系统采用前一种布置方式，只设置了高压辅助蒸汽联箱；一期系统则采用后一种布置方式，图 1-1 (a) 和图 1-1 (b) 为内蒙古岱海电厂一期、二期辅助蒸汽系统控制画面。内蒙古岱海电厂一期、二期四台机组的四个高压辅助蒸汽联箱串联布置，相邻联箱间有联络管相连。从图 1-1 可以看出，一期 1 号机组的高压辅助蒸汽供汽汽源为启动锅炉、再热器冷段及四段抽汽，其用户为除氧器、给水泵汽轮机、空气预热器吹灰、锅炉底部加热等，同时向 2 号机提供辅助蒸汽；高压辅助蒸汽经减温减压后变为低压辅助蒸汽，为磨煤机的防爆蒸汽、轴封系统和暖器等提供蒸汽。二期 3 号机的供汽汽源为 2 号机辅助蒸汽系统、再热器冷段和四段抽汽，用户与 1 号机基本相同，同时为 4 号机提供辅助蒸汽。系统中的很多用户只在机组启动过程中使用辅助蒸汽，因此，为了防止管道积水，管道中设置了很多疏水点，并在辅助蒸汽联箱底部设有疏水管。

1. 辅助蒸汽系统的投运及退出

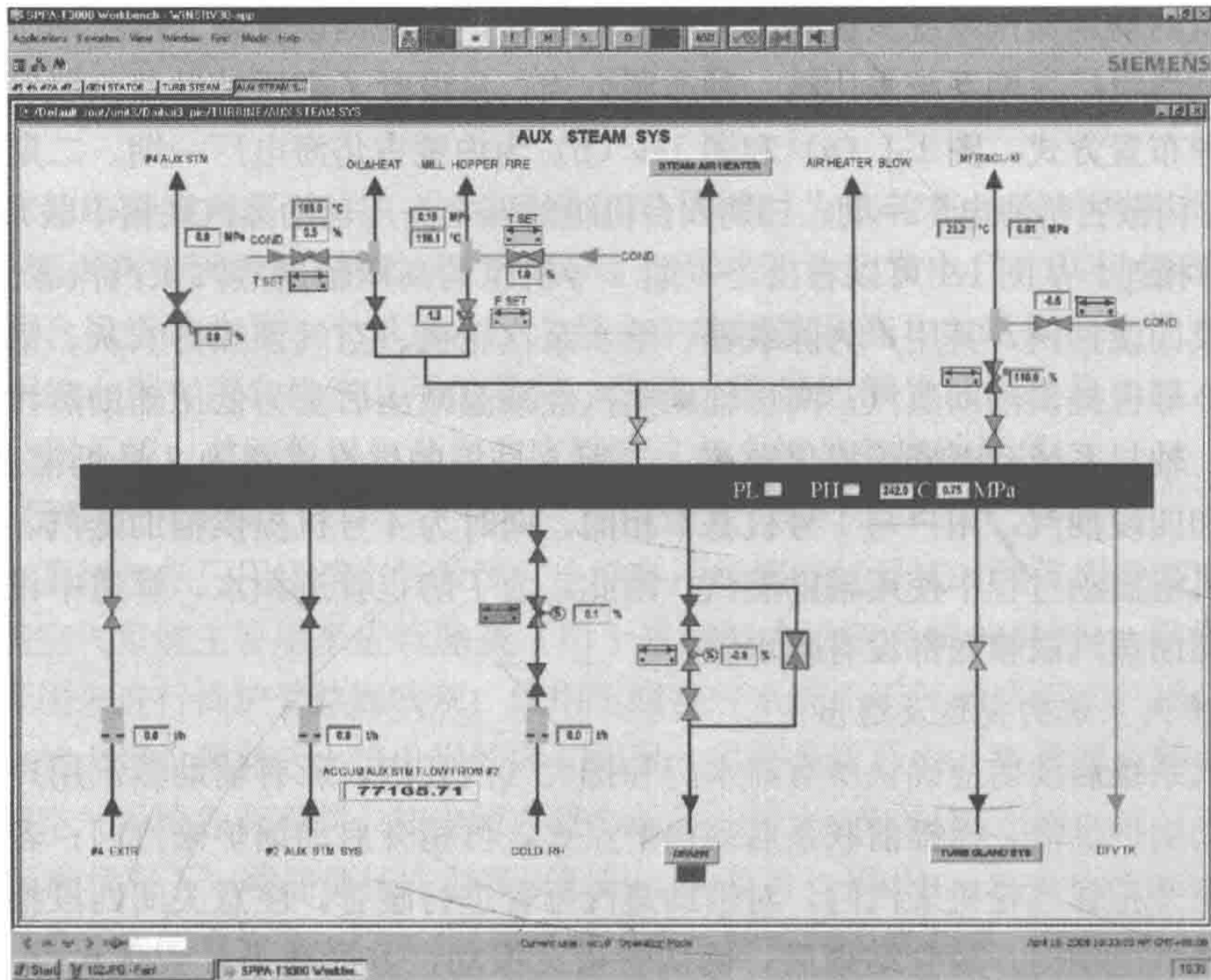
辅助蒸汽系统启动前应确认所有疏水门和排大气门开启，所有辅助蒸汽用户均在切断状态。若需启动锅炉供汽，需提前联系启动锅炉点火，再稍开启动锅炉来汽门；若由相邻汽轮机来汽，则稍开相邻汽轮机来汽门，对辅助蒸汽母管进行暖管，注意关闭四段抽汽、再热器冷段供辅助蒸汽电动门。暖管结束后，确认管道无振动，方可适当开大疏水门，继续疏水。当各处疏水无水流出后，全关所有疏水门，疏水进入疏水器。监视疏水箱水位变化，适当水位时投入疏水泵，同时将水位调节门及疏水泵投入自动。辅助蒸汽联箱压力正常后，将调节门投自动，并投入减温水。



(a)

图 1-1 岱电一期、二期辅助蒸汽系统控制画面 (一)

(a) 一期 1 号机辅助蒸汽系统控制画面 (设高、低压两个辅助蒸汽联箱)



(b)

图 1-1 岱电一期、二期辅助蒸汽系统控制画面 (二)

(b) 二期 3 号机辅助蒸汽系统控制画面 (只设置了高压辅助蒸汽联箱)

HP AUX STM—High pressure auxiliary steam, 高压辅助蒸汽; LP AUX STM—Low pressure auxiliary steam, 低压辅助蒸汽; UNIT 2—2 号机组; AUX BLR—Auxiliary boiler, 启动锅炉; COLD RH—Cold reheater, 再热器冷段; 4 号 EXTR—4 号 extraction, 四段抽汽; DEAER—Deaerator, 除氧器; BFPT—Boiler feedwater pump turbine, 给水泵汽轮机; AIR HEATER BLOW—空气预热器吹灰; BOILER BOTTOM HTR—锅炉底部加热; MILL HOPPER FIRE—磨煤机防爆蒸汽; TURB GLAND SYS—轴封系统; WARMER—暖器; STEAM AIR HEATER—暖风器

只有确认了辅助蒸汽系统各用户确已不需要供汽, 辅助蒸汽系统才可以停运。关闭辅助蒸汽各供汽门, 根据情况开启系统内的疏水门。

2. 辅助蒸汽系统的运行维护

辅助蒸汽系统运行中, 应注意监视辅助蒸汽联箱压力、温度正常, 系统无泄漏和振动。除此之外, 机组启动阶段尤其需要注意汽源切换问题。辅助蒸汽最初供汽的汽源可以是相邻机组供汽或启动锅炉供汽, 如果采用启动锅炉供汽应注意, 实际上启动锅炉产汽并不稳定, 导致辅助蒸汽压力也不稳定; 因此, 当达到切换条件时, 应将启动锅炉或相邻机组供汽切换为本机供汽。如内蒙古岱海电厂一期机组规定, 当机组负荷高于 16.5% 额定负荷, 再热蒸汽冷段压力高于 1.27MPa, 并且再热蒸汽冷段温度达 250℃ 以上时, 辅助蒸汽供汽汽源切为再热器冷段; 当机组四段抽汽压力大于或等于 0.7MPa 时, 切换为四段抽汽供汽。有的机组在启动过程中, 就曾出现因辅助蒸汽切换不及时, 使给水泵汽轮机的供汽压力出现波动, 从而导致汽动给水泵转速不稳、汽包水位大幅波动的情况。切换汽源前同样需要暖管, 切换时应缓慢, 注意保持辅助蒸汽压力的稳定, 防止对其他用户造成影响。当机组跳闸时, 通过启动锅炉或相邻汽轮机向高压辅助蒸汽联箱供汽, 以保持辅助蒸汽系统运行。

1.2 锅炉侧主要系统

1.2.1 锅炉侧汽水系统



提示

本节只介绍自然循环和控制循环锅炉的汽水流程和受热面布置情况，直流锅炉和循环流化床锅炉将在第4章中专门进行介绍。

1. 自然循环锅炉

以内蒙古岱海电厂一期 $2 \times 600\text{MW}$ 亚临界机组所用B&WB-2028/17.5-M型锅炉为例来介绍自然循环锅炉汽水系统的组成。该锅炉的具体形式为一次中间再热、单炉膛、平衡通风、固态排渣、全钢构架的II型单汽包锅炉。

省煤器的来水进入汽包，汽包中的水通过下降管进入下联箱后再进入水冷壁进行吸热，水冷壁来的汽水混合物在汽包中进行汽水分离，分离出来的饱和蒸汽进入过热器，水则进入下降管继续循环。锅炉侧汽水系统包括省煤器、汽包、水冷壁、下降管、过热器和再热器等。水冷壁采用膜式全焊结构，共有水冷壁管996根，水冷壁划分为28个循环回路。前水冷壁与后水冷壁沿锅炉宽度各分为6和12个回路，两侧水冷壁各分为5个回路。炉水由四根大直径下降管引至标高8m的水冷壁下联箱位置，经118根供水管分配到每个水冷壁下联箱。经水冷壁加热后进入水冷壁上联箱，再由184根引出管导入汽包内前后隔仓并分配到每个旋风分离器。水冷壁上开有燃烧器孔、窥视孔、人孔及吹灰孔等。

汽包顶部引出的饱和蒸汽分成两路进入过热器：

(1) 汽包→10根饱和蒸汽连接管→水平烟道侧包墙下联箱→104根管的水平烟道侧包墙→水平烟道侧包墙上联箱→8根连接管引入尾部竖井隔墙上联箱→隔墙→一级过热器进口联箱。

(2) 汽包→28根饱和蒸汽连接管→顶棚管进口联箱→134根顶棚管→尾部竖井前墙上联箱。此处为尾部竖井包墙的流程起点，分四路流经整个尾部竖井，最后汇联到两个一级过热器进口联箱。在包墙下联箱设有截止阀进行疏水，后包墙下联箱上设有5%启动疏水旁路，作为锅炉启动时后包墙疏水使用；也可与汽轮机旁路系统一起控制锅炉的升温、升压过程，达到加快启动速度的目的。

之后，从一级过热器出口联箱经左右两根导管进入一级喷水减温器。经两根导管引入屏式过热器进口联箱，经屏式过热器受热面管子汇联到屏式过热器出口联箱。经两根管道将屏式过热器出口联箱与二级过热器进口联箱相连。这两根管道沿炉宽方向左右交叉布置，以消除左右蒸汽温度偏差，同时，在管道上设置二级喷水减温器。经交叉和减温后的蒸汽进入二级过热器进口联箱。经34根分联箱将蒸汽引进二级过热器入口管组，再通过分联箱导入二级过热器出口管组，最后主蒸气汇联到过热器出口联箱，由联箱中部等径三通引出，经过 90° 弯头，再引至锅炉右侧主蒸汽管道，去汽轮机高压缸做功。从高压缸排出的蒸汽经单根再热蒸汽管道引入再热器进口联箱，先通过布置在尾部竖井前部的3个水平管组，然后经过渡管组进入水平烟道垂直管组，最后汇联到再热器出口联箱，由左端引入再热蒸汽管道，去汽轮机中、低压缸做功。

上述各过热器和再热器的布置如下：

分隔屏过热器布置在炉膛上方，后屏及末级过热器布置在炉膛折焰角上方，垂直高温再热器布置在水平烟道；尾部竖井由隔墙分成前、后两个烟道，前部烟道中布置了水平的低温再热器和省煤器，后部为低温过热器和省煤器。在分烟道底部设置了烟气调节挡板装置，用来调节再热蒸汽的温度。烟气通过调节挡板后重新汇集在一起，经两个尾部烟道引入左、右各一的回转式空气预热器。

2. 控制循环锅炉

内蒙古岱海电厂二期 $2 \times 600\text{MW}$ 亚临界机组所用锅炉为 SG2059/17.5-M920 型控制循环锅炉。控制循环锅炉的受热面布置与自然循环锅炉基本相同，下面仅介绍其与自然循环锅炉不同的部分。

(1) 汽包。控制循环锅炉的汽包形式与自然循环锅炉有所不同，其汽包内设置弧形衬板，水冷壁出来的汽水混合物从汽包顶部引入，自上而下流过汽包内壁与弧形衬板之间的环形通道，使汽包上、下壁同时受到加热或冷却。因此，不会产生象自然循环锅炉启、停时那样大的汽包上、下壁温差，加快了启动速度。

(2) 炉水循环泵。控制循环锅炉在锅炉的下降管侧增加了炉水循环泵，水循环的阻力由炉水循环泵和自然循环共同克服，使锅炉在低负荷下的水循环变得更加可靠。各水冷壁中的流量按照热负荷大小，通过调节水冷壁进口处安装的节流孔板来进行分配，锅炉的循环倍率通过调节炉水循环泵的转速进行控制，“控制循环”的名称也由此而来。由于循环回路中有足够的压头来保证水冷壁中汽水混合物的流速，使换热更加充分，因此，控制循环锅炉的水冷壁直径要比自然循环锅炉的小。

控制循环锅炉通常设置 3 台炉水循环泵，2 台运行、1 台备用；但是根据运行经验，通常采用 3 台炉水循环泵同时运行的方式，以避免两台泵运行时，1 台泵突然故障，而备用泵无法及时启动，影响锅炉满负荷运行。

1) 炉水循环泵的启动。炉水循环泵启动前应进行排气，如果泵内原已有水，无需排气，否则启动泵排气。启动前还应确认汽包水位处于高位、泵出口阀开、冷却水流量不低且各项参数正常后，可以启动炉水循环泵。电动机电流应在规定时间内返回，炉水循环泵启动后，出、入口差压应立刻升高，如果不升高应立即停泵，同时检查备用泵进、出口压差不应升高。检查振动、摩擦等情况。在锅炉上水、点火、升压直到汽包压力达到 2.07MPa 之前，炉水循环泵需连续注水以防止脏水进入泵中，汽包压力达 2.07MPa 时，关闭注水门，开启暖泵联络门。

2) 炉水循环泵的停运。停泵前如有备用泵处于联锁状态，则解除备用泵的联锁。停止炉水循环泵运行，注意汽包水位变化；锅炉汽包压力降至 2.0MPa 时，投入凝结水至炉水循环泵连续注水。炉水循环泵备用时两个出口门开启；作热备用时开启热平衡门，使备用泵的温度保持和运行泵相同。如果停泵的时间较长，而泵内又注满水，则应按常规加以检查，备用泵每月至少运转 10min ，并保持冷却水的正常流量。锅炉在热态下，炉水循环泵所有保护监视系统必须正常投入；如在停炉后全停炉水循环泵，必须在炉水温度小于 150°C 后进行。

锅炉冷却放水后，炉水循环泵可放水，此时炉水循环泵电动机腔室温度应小于 49°C ，冲洗水连接投入，炉水循环泵放水。放水结束后，待泵壳冷却至 62°C 以下，停运炉水循环泵连续注水。泵体放水完毕后，电动机腔室放水，之后停用炉水循环泵的低压冷却水系统。

3) 炉水循环泵的运行维护。炉水循环泵运行过程中，应注意监视电动机电流、电动机

振动、电动机水温、电动机冷却水流量、泵的进出口压差等参数。

【阅读材料1-1】

不一样的炉水循环泵

电厂中有很多较大型的水泵，如给水泵、给水泵前置泵、凝结水泵、循环水泵、开闭式水泵、炉水循环泵等，其形式均为叶片式。其中炉水循环泵的结构非常特别，与其他泵均不同，不同在于其采用了湿式电动机的形式，即泵的叶轮和电动机在同一泵体内。而其他泵的电动机和泵体则是分开的。虽然炉水循环泵本身的扬程并不高，属低扬程泵，但其进口的水与汽包中水的压力基本相同，这样就使得水泵进、出口都处在高压环境下，使密封变得困难，因此，将电动机做成湿式，使电动机与泵成为一体，水泵的轴封问题也就不复存在了。电动机运行中会产生热量，因此，必须设置相应的冷却水系统。炉水循环泵电动机的冷却水系统通常由高压一次和低压二次冷却水系统组成。高压一次冷却水取自给水泵出口，为闭式循环系统，其冷却电动机轴承后温度升高，再由低压二次冷却水进行冷却。湿式电动机采用水润滑的形式，由于轴承和电动机绕组的间隙很小，即使储存很少量的空气也会破坏这些部分的润滑和冷却，使设备严重损坏；因此，锅炉上水前，应对炉水循环泵电动机进行注水、清洗和充分的排气。图 1-2 所示为炉水循环泵剖面图，图 1-3 和图 1-4 所示分别为炉水循环泵和常用离心泵的外形，从图中可看出两者的不同。

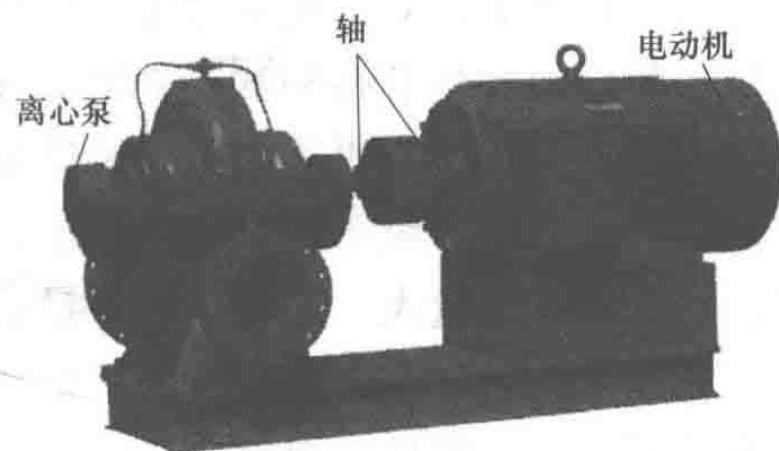
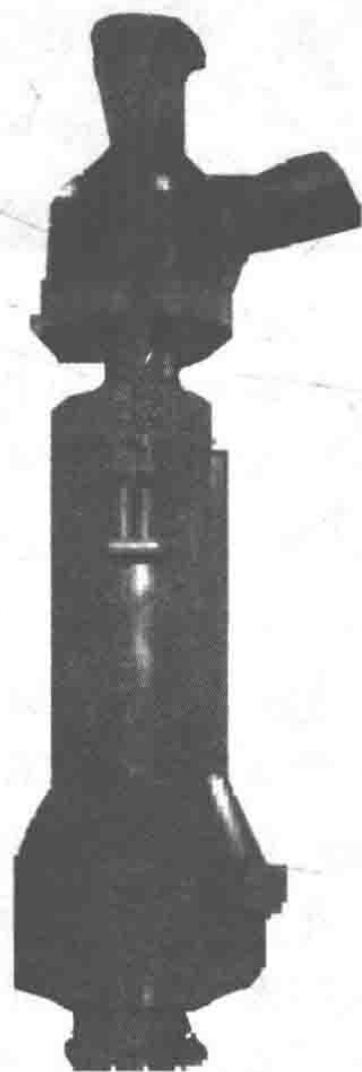
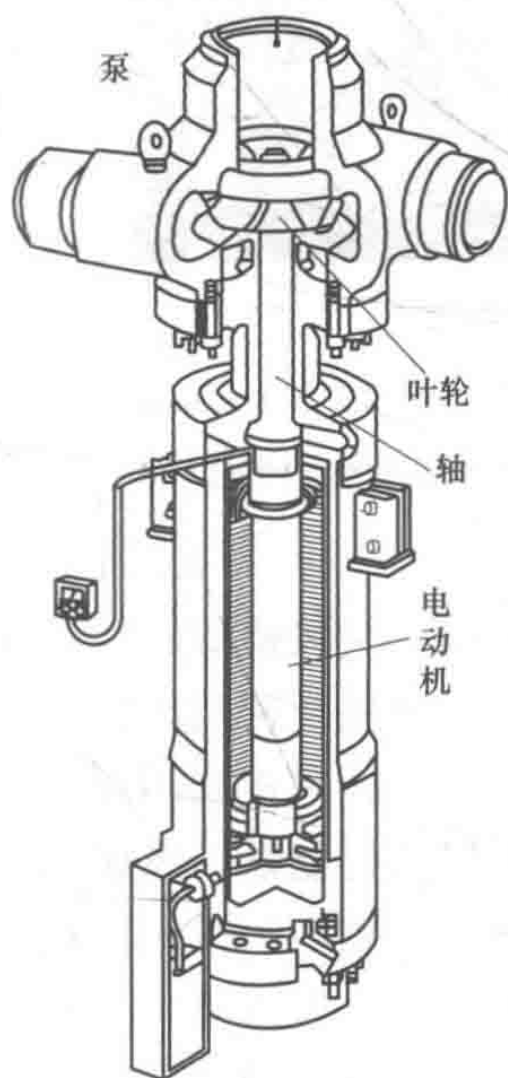


图 1-2 炉水循环泵剖面图 图 1-3 安装好的炉水循环泵

图 1-4 常用离心泵

1.2.2 风烟系统

风烟系统是为锅炉炉膛燃烧送入氧气，同时将燃烧后形成的烟气抽离锅炉的系统。该系统包括送风机、引风机、空气预热器等主要设备，通常采用双列布置。随着大型辅机可靠性、电网坚强程度和电源点容量裕度的增加，辅机单列布置也变为可能，布连电厂 $2 \times 660\text{MW}$ 超超临界机组炉侧的送风机、引风机、一次风机和空气预热器即采用 $1 \times 100\%$ 容量的单列布置，其汽轮机侧的汽动给水泵组也采用 $1 \times 100\%$ 的单列布置，这在我国电力建设史

上也属首创。单列布置不仅可以节约投资、简化系统，其运行成本也下降了。

图 1-5 为内蒙古岱海电厂一期风烟系统（采用传统的双列布置）的控制画面。由于 A 侧和 B 侧的布置完全相同，图中仅标出了 B 侧的设备和挡板名称。

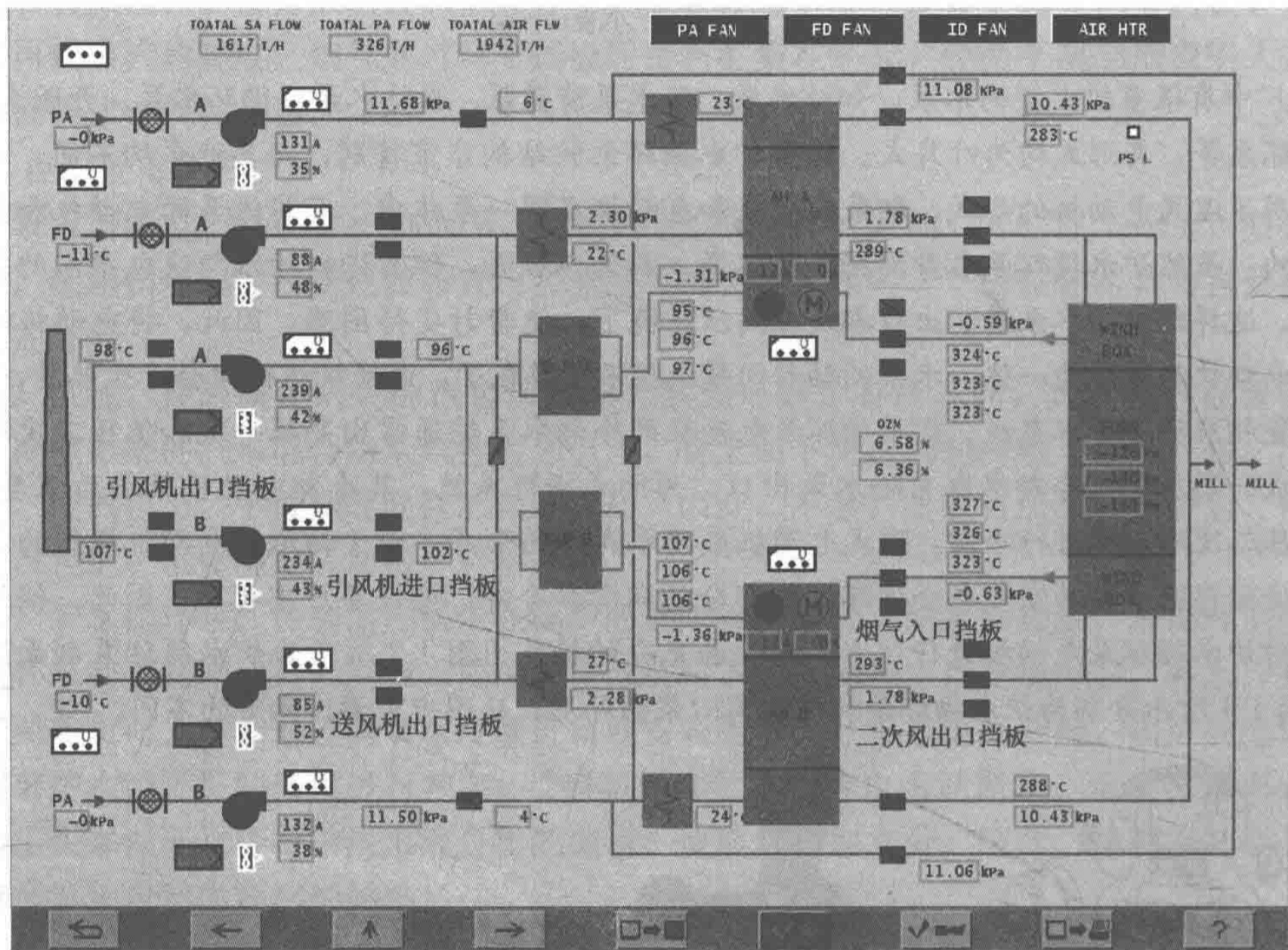


图 1-5 风烟系统控制画面

PA—Primary Air，一次风；FD FAN—Forced Draft Fan，送风机；AH—Air Heater，空气预热器；E-P—Electrostatic Precipitator，（静）电除尘器；FURN—Furnace，炉膛；WIND BOX—二次大风箱；ID FAN—Induced Draft Fan，引风机

1. 风机

风机是火力发电机组中最重要的辅机之一，包括送风机、引风机和一次风机等，因为一次风机的启停和调节是和磨煤机紧密联系在一起的，所以，本书将一次风机及密封风机归入制粉系统。大型送风机、引风机可以采用离心式和轴流式两种形式。离心式风机利用离心力使流体获得能量，风压高，但流量小；轴流风机利用挤压推进力使流体获得能量，风压相比离心式低，但流量大。随着机组容量的增大，在获得相同风量的情况下，离心风机的体积过于巨大，给制造、安装、运行和维护都带来了困难。目前，我国大型锅炉的送风机、引风机大多采用轴流式风机，根据风量调节方式不同，轴流式风机又分为动叶可调和静叶可调（也称子午加速轴流式风机）两种形式。动叶可调是指通过调整叶轮上叶片的安装角度来改变风机的特性曲线，从而改变风机的出力；静叶可调则是通过调节安装在风机进口处的导叶的角度来改变风机的特性曲线，导叶是不随轴旋转的，因此，该方式被称为静叶可调。离心式风机的叶片无法改变角度，因此，只能采用调整进口导叶的角度来改变风机出力。无论离心式还是轴流式风机，在改变叶片角度的同时，还可以采用变速调节来改变出力。为了使运行安全可靠，送风机、引风机都采用两台风机并联的布置形式。

(1) 风机启停概述。为了防止风机启动时电动机过载，应在风机功率最小状态进行启

动。图 1-6 和图 1-7 分别为离心式风机和动叶可调轴流泵的性能曲线（动叶可调轴流式泵与风机的性能曲线变化趋势相同），其中，离心式风机的 q_V-P （流量—轴功率）曲线为一条上升曲线，即 $q_V=0$ 时，轴功率最小，因此，应在出口挡板关闭的状态下启动；对于动叶可调轴流式风机（或泵）来说，在某一动叶安装角度下其 q_V-P （ $H-P$ ）曲线是一条下降曲线，流量越大，轴功率越小；因此，对于动叶不可调的轴流式风机来说，应在出口挡板开启状态下启动。当动叶可调时，随着动叶安装角度减小，其 q_V-H （流量-扬程）和 q_V-P 曲线都会向左下方移动，即动叶角度越小，其扬程和轴功率越小；因此，动叶可调轴流式风机应在动叶全关及出口挡板关闭的条件下进行启动。当风机达到全速后，就可以打开出口挡板并开大动叶角度了。静叶可调轴流式风机，当静叶角度变化时，其曲线特性的变化与动叶可调式相同，应在静叶全关、出口挡板关闭的状态下启动。

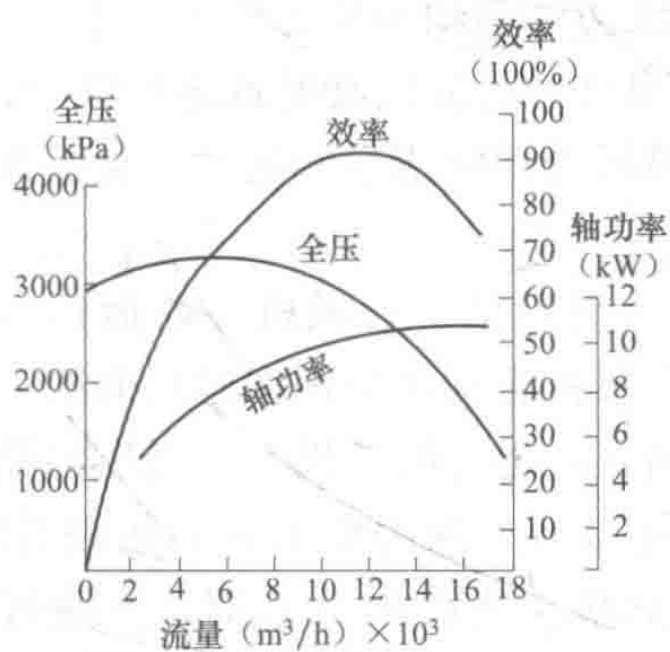


图 1-6 离心式风机性能曲线

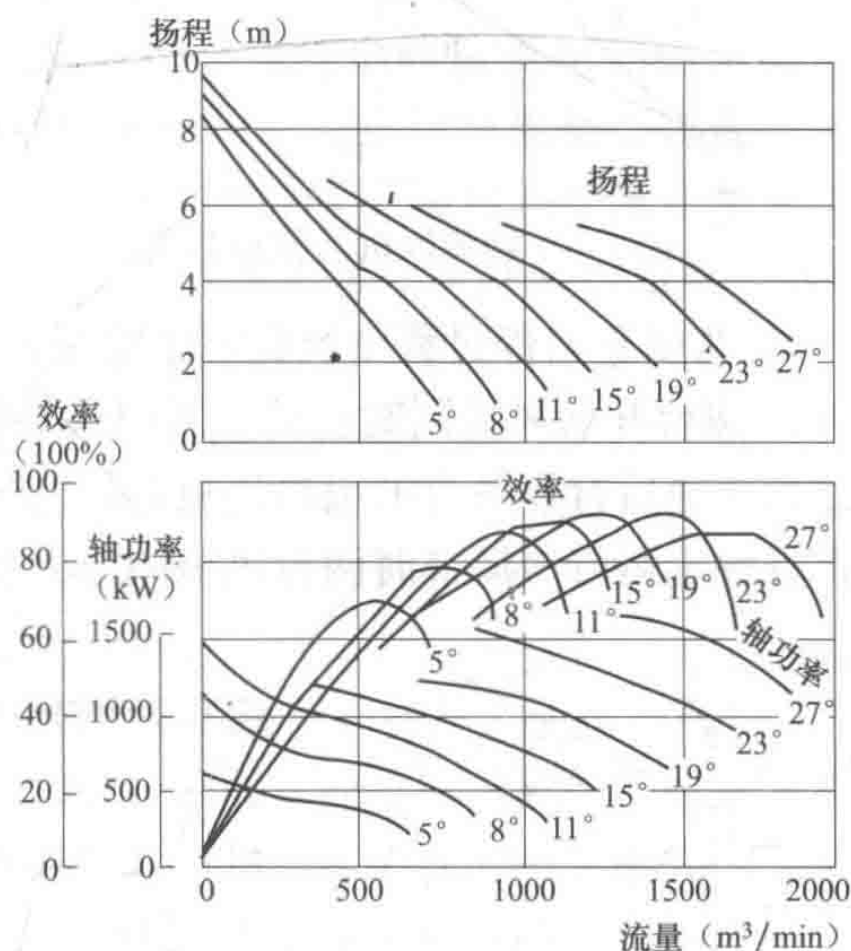


图 1-7 动叶可调轴流泵性能曲线

如图 1-8 所示，轴流风机的 q_V-p （流量-全压）曲线为马鞍形，其马鞍形最高点（K 点）左侧为不稳定工作区。运行时风机的工作点由风机的性能曲线（I 曲线）与管路特性曲线（II 曲线和 III 曲线）的交点决定，如果工作点落入不稳定工作区域，风机就会发生喘振；图 1-8 中 B 点为稳定工作点，A 点为不稳定工作点。喘振发生时风机的流量、压力、电流以及炉膛负压会大幅摆动，风机振动加剧，运行时的噪声也由原来的高频尖啸声变成低频沉闷的轰鸣声，严重时还会导致锅炉主燃料跳闸（Main Fuel Trip, MFT），甚至设备损坏。

1) 风机启动及运行中存在以下情形时，风机易发生喘振。

a. 风机启动及两台风机并列运行时，两者的出力不一致；并列运行风机的风压相同，出力小的风机流量小，如果小于 q_{VK} ，那么就会发生喘振。

b. 空气预热器严重积灰，风机进、出口挡板误关等，都会使风烟系统的阻力增加，使管路特性曲线变陡，如果管路特性曲线 (q_V-p_c) 由 II 变为 III，风机就会发生喘振。

为了防止风机喘振的发生，大型轴流式送风机、引风机在叶轮进口处都装有喘振报警装置，并根据喘振报警线进行预警，喘振报警曲线如图 1-9 所示。其原理是将动叶（或静叶）各角度对应的性能曲线峰值点 (K_1 、 K_2 、 K_3) 平滑地连接起来，形成该风机的喘振边界线，再将该边界线向右下方移动一定距离，就得到了喘振报警线。风机工作时，应工作在此边界线的右下方。一旦在某一角度下的工作点沿曲线向左上方移动到喘振报警线时，即发出报警