



中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

仿真机实习

电厂热力设备运行专业

主编 张红飞



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

仿真机实习

电厂热力设备运行专业

主 编 张红飞

责任主审 孙保民

审 稿 杨 飞 刘 彤



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是以国家电力公司制定的《仿真机实习指导》教学大纲为主要编写依据,以典型的 300MW 机组为背景,结合现场运行规程而编写的 300MW 仿真机培训教材。书中重点对典型 300MW 火电机组机、炉、电、控系统进行了分析,对上机运行的各种基本操作和事故处理也进行了详细的介绍。

本书可作为中等职业中专学校热能及热控专业的教材,对参加仿真机培训的学员也有很强的指导作用。

图书在版编目(CIP)数据

仿真机实习/张红飞主编. —北京:中国电力出版社,
2001

中等职业教育国家规划教材

ISBN 7-5083-0760-7

I. 仿… II. 张… III. 仿真机-专业学校-教材
IV. TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 066542 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 [http://www. cepp. com. cn](http://www.cepp.com.cn))

实验小学印刷厂印刷

*

2002 年 1 月第一版 2002 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 8 印张 175 千字

印数 0001—4000 册 定价 9.60 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

电力中等职业教育国家规划教材

编 委 会

主 任 张成杰

副主任 杨昌元 宗 健 朱良镠

秘书长 尚锦山 马家斌

委 员 丁 雁 王玉清 王宝贵 李志丽 杨卫民

杨元峰 何定焕 宋文复 林 东 欧晓东

胡亚东 柏吉宽 侯林军 袁建文 徐建华

梁宏蕴

中等职业教育国家规划教材

出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神，落实《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划，根据教育部关于《中等职业教育国家规划教材申报、立项及管理意见》（教职成[2001]1 号）的精神，我们组织力量对实现中等职业教育培养目标和保证基本教学规格起保障作用的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写，从 2001 年秋季开学起，国家规划教材将陆续提供给各类中等职业学校选用。

国家规划教材是根据教育部最新颁布的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教学大纲（课程教学基本要求）编写，并经全国中等职业教育教材审定委员会审定。新教材全面贯彻素质教育思想，从社会发展对高素质劳动者和中初级专门人才需要的实际出发，注重对学生的创新精神和实践能力的培养。新教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均作了一些新的尝试。新教材实行一纲多本，努力为教材选用提供比较和选择，满足不同学制、不同专业和不同办学条件的教学需要。

希望各地、各部门积极推广和选用国家规划教材，并在使用过程中，注意总结经验，及时提出修改意见和建议，使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司

二〇〇一年十月

前 言

为了促进社会主义经济建设的发展，国家十分重视电力行业的发展，新建和在建不少高参数、大容量的火力发电机组，其中，尤以 300MW 机组居多。300MW 火电机组已成为我国各大电网的主力机组。中等职业专科学校的学生工作后将作为现场运行的主力军，在学习专业知识的同时，有必要了解现场运行的基本知识。现场运行人员也应更全面、更深入地了解生产操作过程，尤其是随着火电机组运行自动化程度的不断提高，培养集控运行的通岗运行人才已是大势所趋，但限于现场培训条件，上仿真机培训无疑成为一条捷径。为此，我们组织编写了这本教材。

本书分为两个单元，第一单元为系统分析，着重介绍和分析了锅炉、汽轮机、电气、控制各系统及仿真系统；第二单元为上机运行，对火电机组的启停、辅助系统的启停、机组正常运行及调整和常见事故的分析及处理做了详细描述。全书由合肥电力学校张红飞主编，参加本书编写的同志还有张忠祥（编写单元一的课题三和单元二的部分内容）和王祥薇（编写单元一的课题一、二、四）。

全书由武汉电力学校林文孚同志主审，并提出了很多宝贵的意见和建议，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2001 年 7 月



中等职业教育国家规划教材出版说明

前言

单元一 系统分析	1
课题一 锅炉设备及系统	1
课题二 汽轮机设备及系统	13
课题三 电气设备及系统	31
课题四 热控系统	41
课题五 仿真系统原理简介	51
小结	54
复习思考题	54
单元二 上机运行	55
课题一 机组正常运行的监视与调整	55
课题二 辅助系统的启动和运行维护	61
课题三 机组全冷态启动	73
课题四 机组热态启动	84
课题五 机组正常停运	86
课题六 事故处理	89
小结	117
复习思考题	117
参考文献	119

系 统 分 析

内 容 提 要

本单元主要是针对 300MW 火电机组全范围仿真机编写的,介绍 300MW 火电机组锅炉、汽轮机、发电机、热工自动控制等四大部分的主要设备、系统及基本工作原理,并对仿真机本身的硬件与软件的构成等也进行了简要说明。

课题一 锅炉设备及系统

教 学 目 的

1. 熟记典型锅炉设备的主要技术参数。
2. 清楚与锅炉相关的辅助系统的工作原理,了解锅炉主要辅助设备的技术参数。
3. 熟悉锅炉各主要系统的组成、基本工作原理。

教 学 内 容

一、锅炉本体

(一) 锅炉的结构特点

火电厂的锅炉种类很多,按水循环特点可分为自然循环锅炉、强制循环锅炉和直流锅炉等。目前,应用较多的是前两种,多数仿真机也以它们为仿真对象。

亚临界压力自然循环汽包锅炉,以哈尔滨锅炉厂生产的 HG-1021/18.2-540/540-WM10 型锅炉为例,其结构特点主要是单炉膛,一次再热,平衡通风半露天“Π”形布置,燃用混合煤,固态排渣,全钢结构,直流燃烧器正四角切圆燃烧。

亚临界压力强制循环锅炉,也称作控制循环锅炉,以上海锅炉厂生产的 SG-1025/18.3-M838 型锅炉为例,其结构特点主要是中间一次再热,采用平衡通风,单炉膛“Π”形露天布置,全钢架悬吊结构,WR 型燃烧器四角同心反向切圆燃烧,固态排渣。自然循环锅炉与之相比主要是没有炉水循环泵,所以汽包标高较控制循环锅炉高。

(二) 锅炉的技术规范

HG-1021/18.2-540/540-WM10 型锅炉按 BMCR 工况设计,最大连续蒸发量为 1021t/h,最大电负荷为 330MW,最大负荷下的主汽压力为 18.2MPa。具有定压和变压运行能力。

SG-1025/18.3-M838 型锅炉按 BMCR 工况设计,最大连续蒸发量为 1025t/h,最大电

负荷为 333MW，最大负荷下的主汽压力为 18.3MPa。启动迅速，以带基本负荷为主。具有定压和变压运行能力。当高压加热器全部停运时，锅炉蒸发量仍能使汽轮发电机达到额定出力。

二、锅炉汽水系统

(一) 汽水系统的组成

自然循环锅炉蒸汽系统由锅筒（汽包）、下降管、下联箱、上升管（水冷壁）、上联箱、过热器、再热器和省煤器组成。控制循环锅炉蒸汽系统除有这些设备外，在下降管与下联箱之间装设了炉水循环泵。

(二) 汽水系统及设备的特点和主要技术参数

1. 汽包

汽包是直径较大的圆筒，由筒身和封头组成。在汽水循环中，它起中枢作用。汽包接受省煤器来的给水，通过下降管和水冷壁组成循环系统，并供给过热器饱和蒸汽。因此，汽包是加热段、蒸发段和过热段受热面的连接点。同时汽包是一个汇集炉水和饱和蒸汽的容器，空间较大，可贮存一定的工质质量和热量，以适应负荷的突然变化。其内置的汽水分离装置、蒸汽清洗装置和连续排污装置保证了蒸汽品质。

上海锅炉厂生产的 SG-1025/18.3-M838 型控制循环锅炉的汽包采用 SA-299 碳钢材料，内径为 1743mm，筒身直段全长为 13106mm，两端采用球形封头，内部布置有 56 只直径为 254mm 的涡流式分离器，每只分离器分离的最大蒸汽流量为 18.6t/h。

2. 水冷壁（上升管）

水冷壁是指敷设在锅炉炉膛四周，由多根并联管组成的蒸发受热面。它主要吸收炉膛中高温火焰及炉烟的辐射热量，加热其内部的工质，使之变为汽水混合物，又能起保护炉墙、防止炉墙结渣的作用。

上海锅炉厂生产的 SG-1025/18.3-M838 型锅炉水冷壁采用焊接气密式水冷壁（膜式水冷壁），即采用外径为 45 的光管和内螺纹管，节距为 57，管间的间隙为金属熔烧焊形成完全气密封炉膛。

3. 省煤器

省煤器由许多并列蛇形管组成，布置在锅炉低温受热面（垂直烟道尾部），利用锅炉排烟余热来加热给水，降低排烟温度，提高锅炉效率，节省燃料。大容量锅炉采用钢管式省煤器。为减轻飞灰磨损危害，常采用合理的烟气流速和烟气均流、合理的折焰角设计、装置防磨装置（不锈钢防磨板等）。

SG-1025/18.3-M838 型锅炉上下两组省煤器均由 126 排光管蛇形管组成，蛇形管垂直于后墙，平行于侧墙，顺列布置。横向节距 $S_1 = 110\text{mm}$ ，纵向节距 $S_2 = 102\text{mm}$ ，设计压力为 21.0MPa，最高平均壁温为 371℃，在额定工况下烟速为 8.78m/s。在省煤器进入管和下水包之间设置了一根再循环管，流量为 4%MCR，当省煤器进水中断或偏少时，打开再循环管阀门，利用炉水泵压头通过再循环管向省煤器进水，保护省煤器。

4. 过热器

过热器是将饱和蒸汽加热成为具有一定温度过热蒸汽的受热面，并且在锅炉负荷或其

他工况发生变动时，能保证过热蒸汽的波动处在允许范围内。过热器可根据布置位置和传热方式分为对流式、半辐射式和辐射式。对流式位于对流烟道，吸收对流热。半辐射式（屏式）位于炉膛出口，呈挂屏型，吸收对流热和辐射热。辐射式（墙式）位于炉墙上，吸收辐射热。对于亚临界压力锅炉，蒸汽过热所需的热量份额大，因而采用较多的过热器受热面，并将相当部分的受热面布置在炉膛出口处和炉膛内。

SG-1025/18.3-M838 型锅炉过热器系统布置按烟气流程为分隔屏、后屏、末级、包覆和低温过热器五级；按蒸汽流程分为炉顶及包覆、低温过热器、分隔屏、后屏和末级对流过热器五级组成。低温、高温过热器采用蛇形管顺流布置，分隔屏有 24 片管屏，后屏过热器有 20 片管屏，采用炉顶和包覆过热器可将炉顶、水平烟道和后部竖井的炉墙直接敷设在包覆管上，形成敷管炉墙。

5. 再热器

再热器是把高压缸的排汽重新加热到一定温度的锅炉受热部件。高压缸乏汽再热后提高了温度，增加了内能，返回汽轮机的低压段再做功，提高了机组效率。按传热特性再热器可分为对流再热器和辐射再热器两种。对流再热器是由大量平行连接的蛇形管及进、出口联箱组成，分为低温段和高温段分别布置在水平烟道和尾部竖井中；辐射式再热器通常是布置在炉膛上部的壁上，也叫做墙式再热器。

6. 炉水循环泵

炉水循环泵可以改善亚临界压力下炉水的循环条件，保证锅炉的汽水循环良好。以 SG-1025/18.3-M838 型锅炉为例，配备 3 台低压头无轴封双出口单级离心循环泵，型号为 LUVc250×2-410/1。

（三）汽水系统的工作流程

控制循环锅炉的锅炉给水在省煤器内加热后，汇集于省煤器出口集箱，然后由三根给水管进入汽包。汽包中的炉水经循环泵增压后进入下水包，再进入炉膛四周的水冷壁，在水冷壁内吸热后形成汽水混合物进入汽包。汽水在汽包内进行良好的分离，分离后的炉水再次进入下降管，而饱和蒸汽引入炉顶过热器进入过热蒸汽系统。蒸汽依次经过炉顶过热器、低温过热器、分隔屏过热器、后屏过热器、末级过热器的加热后，进入汽轮机高压缸，在高压缸作过功的乏汽再送入墙式再热器、屏式再热器和末级再热器进行再热，增加了内能的再热蒸汽被送入汽轮机的中压缸作功，实现热能到机械能的转换，提高了机组的效率。

自然循环锅炉汽包内给水经下降管进入下联箱再进入到水冷壁吸热，形成的汽水混合物进入汽包进行汽水分离。由于下降管不受热，其中充满水，水冷壁及上升管中是汽水混合物，同样的压力下蒸汽的重度比水的重度小，存在重度差，便使汽水自动流动循环。自然循环锅炉的过热蒸汽和再热蒸汽系统与控制循环锅炉没有多大差别。

（四）蒸汽温度的调整方法

蒸汽温度过高会使金属材料的许用应力下降，危及机组安全；蒸汽温度过低则会降低循环热效率，并使汽轮机排汽湿度增大，影响机组安全运行。因此，必须维持稳定的蒸汽温度。蒸汽温度的调节方式通常有两类：蒸汽侧调节和烟气侧调节。

1. 蒸汽侧汽温的调节

这种方法就是通过改变蒸汽的热焓来调节汽温。目前，多采用喷水减温器向过热蒸汽中喷水，调节喷入的水量，可以达到调节汽温的目的。高压、超高压以及亚临界压力锅炉的过热器采用多级减温方式，即在整个过热器系统上，装设二级或三级喷水减温器，在屏式过热器前装设第一级减温器，以保护屏式过热器不超温，并作为过热蒸汽的粗调；在末级高温对流过热器前装设第二级减温器。这样既可以保证高温过热器的安全，同时可减小时滞，提高调节的灵敏度。

2. 烟气侧汽温的调节

烟气侧的调节一般有三种方案：火焰中心位置调节、分流挡板、烟气再循环。

调节火焰中心位置来调节过热蒸汽温度，即是在高负荷时设法使火焰中心下移，可通过加大下层煤粉量或用较大的上二次风量压住火焰，炉膛出口烟气温度降低，对流过热器的传热量减少，使汽温正常。此种方法汽温调节不精细，常与喷水减温配合使用。

采用分流挡板时，一般将过热器的某一级与省煤器并列（或与再热器并列），用挡板调节通过省煤器（再热器）的烟气流量。开大挡板，通过省煤器（再热器）的烟气流量会增大，通过过热器的烟气流量就减少，过热器汽温随之下降，反之，汽温上升。用这种方法调节汽温比较有效，但布置在烟气温度较高区域的挡板易被烧坏，而且尺寸大，结构笨重。

烟气再循环则是把一部分烟气从空气预热器或除尘器后用再循环风机抽出，然后送入冷灰斗或炉膛上部。从冷灰斗喷入时会减少炉内辐射传热，加强对流换热，从而调节过热汽温。从炉膛上部喷入时处于低温烟气段的过热器吸热量增加，处于高温烟气段的过热器吸热气量减少，二者有抵消的影响，所以调节效果不明显。

三、锅炉燃烧系统

（一）燃烧系统的组成

燃烧系统是为使燃料在炉膛内充分燃烧，向锅炉提供足够数量的燃料和空气、排除燃烧生成的烟气所需的设备，是烟、风、煤管道及其附件的组合。本节主要阐述煤粉的燃烧以及燃烧所需的设备。

（二）燃烧系统各设备的特点和主要技术参数

1. 煤粉燃烧器

煤粉燃烧器是煤粉的主要燃烧设备，携带煤粉的一次风和不带煤粉的二次风都经过喷燃器进入炉膛，煤粉气流的着火过程、炉膛中空气动力场和燃烧工况，主要是通过燃烧器的结构及其在炉膛中的布置来组织的。因此，燃烧器的性能、结构、布置对燃烧的稳定和经济性有很大影响。

煤粉燃烧器的型式按其基本工作原理可分为两大类；一类是旋流式燃烧器，另一类是直流式燃烧器。

（1）旋流式燃烧器

旋流式燃烧器出口的二次风射流是绕燃烧器轴线旋转的射流，而一次风射流可为直流或旋转射流。它是利用旋流器使气流在其内部旋转流动，进入炉膛后形成扩散的空心锥形

状。这种扩散环形气流可把周围的高温烟气吸入，锥形气流的内外都有高温烟气，有利于燃料着火燃烧。

（2）直流式煤粉燃烧器

直流燃烧器喷出的一、二次风都是不旋转的直流射流，喷燃器形状狭长，可以布置在炉膛的前后墙、炉膛四角或炉膛顶部，从而形成不同的燃烧方式：U形、W形火焰燃烧方式等。在我国的燃煤电厂中，布置在炉膛四角的切圆燃烧方式应用最为广泛。

根据燃烧器中一、二次风口的布置情况，直流煤粉燃烧器大致可以分为均等配风和分级配风两种形式。均等配风方式是采用一、二次风相间布置，即在两个一次风口之间均等布置一个或两个二次风口，或者在每个一次风口的背火侧均等布置二次风口。一、二次风口间距相对较近，一般为80~160mm，一、二次风自喷口流出后能很快得到混合，故一般适用于烟煤和褐煤。对于较难着火的贫煤、劣质烟煤和无烟煤，则采用分级配风，把燃烧所需的二次风分级分阶段地送入燃烧的煤粉气流中。在分级配风燃烧器中，几个一次风喷口相对集中地布置在一起，并靠近燃烧器下部，一、二次风喷口上下边缘间距较大，约为160~350mm。

（三）燃烧系统的工作原理

现以WR型直流燃烧器四角布置，一、二次风同心反向切圆燃烧方式为例加以说明。该燃烧系统采用三级点火，即由电火花点燃轻油，轻油点燃重油，重油点燃煤粉。四角布置燃烧器一次风粉混合物和二次风气流由炉膛四角高速喷入炉内，卷吸高温烟气着火燃烧，在炉室中央部分形成一个稳定的强烈旋转的低压火焰区。低压区从上、下两方向回流卷吸了大量炉内介质，形成空气、燃料和燃烧产物的强烈混合，造成良好的燃烧条件。另外，炉膛内气流的旋转运动使每只燃烧器喷出的气流将高温烟气吹向相邻燃烧器火炬的根部，形成有利的着火条件。燃烧器在运行中能进行调整，以适应不同性质的燃料，同时用来调节火焰中心的位置，以改变燃烧室的吸热量，调整蒸汽温度。

（四）燃烧的调整

1. 燃烧调节的任务

- （1）保持锅炉在最佳效率下运行，燃料及时着火、完全燃烧；
- （2）使汽压、汽温及水位稳定在规定的范围内，保证有足够的蒸汽满足机组负荷需要；
- （3）组织合理的燃烧，维持正常的水动力工况，尽可能降低排烟中氮氧化物含量；
- （4）保证运行安全可靠。

2. 燃料量与风量的调整

（1）燃料量的调节。燃料量的调节方式与锅炉负荷变化的幅度、制粉系统和给煤机的型式均有关系。

采用直吹式制粉系统时，一台锅炉配有数台磨煤机，当锅炉负荷变化较大时，可启停一台磨煤机及其制粉系统。当锅炉负荷变化不大时，可先调整粗粉分离器出口挡板（或者调节磨煤机再循环风量），增减磨煤机的通风量，利用磨煤机内存粉量的改变来暂时满足锅炉负荷的需要，然后调节给煤机改变给煤量。在调节一次风和给煤量后，二次风也应立

即跟上，以保证燃烧良好。

对于中间储仓式制粉系统，可通过调节给粉机转速来调节燃料量，因而有中间储仓，燃料量调节的动态反应较快，系统结构相对简单。

(2) 风量的调节。保证燃料在炉膛内充分燃烧，送入炉内的风量必须与送入的燃料量相适应，当锅炉负荷增减时，必须使风量和燃料量的增减密切配合。增负荷时，应先加风后加燃料；减负荷时，先减燃料后减风，并要缓慢平稳。同时，必须对引风量进行调节。

锅炉在运行中应尽可能地维持炉内最佳过量空气系数，运行人员可根据氧量表指示来调节风量。动叶可调轴流送风机，送风量的调节就是改变送风机的动叶开度来改变总风量。两台送风机并联运行的锅炉，应同时改变两台风机的动叶开度，以使烟道两侧的烟气流速尽量均匀。引风量的调节应使炉膛负压（平衡通风型式的锅炉）保持在正常的范围内，有利于锅炉安全经济运行。

3. 燃烧器配风工况的调整

按照燃烧器结构的不同，其配风方式和调节的方法会有所不同。一般的燃烧器都会有—次风、二次风和三次风（乏气送粉和直吹式无三次风）。对于—次风的调节，蜗壳式旋流燃烧器可用入口的“舌形”挡板来调节其旋流强度，关小时，旋流强度增大，反之，则减小。对于其二次风以及直流燃烧器的一、二次风，只能以风门挡板调节。一般说来，煤的挥发分较低或燃烧性能较差以及—次风温低时，—次风率及风速宜较低；当煤的燃烧性能好，—次风温高时，—次风率及风速可大一些。燃烧器的倾角及其组合方式也是运行调整要注意的问题，一般应以保持炉内热负荷均匀和保证汽温为主。

四、锅炉风烟系统

(一) 风烟系统的作用及流程

1. 作用

煤粉在炉膛内正常、稳定的燃烧过程是由风烟系统和制粉系统联合完成的，因此，在对制粉系统运行指标监控的同时，必须监控引风机、送风机以及空气预热器各设备的运行指标。根据燃料完全燃烧所需要的风量和炉膛负压进行正确的调整，以达到燃料燃烧过程稳定的目的。

2. 流程

锅炉的风烟系统由送风机、引风机、空气预热器、烟道、风道等构成。现代大容量机组均采用平衡通风方式，冷空气由两台送风机送入空气预热器预热；空气预热器出口的热风经电动隔离门、热风联络母管一部分进入炉两侧的大风箱，并被分配到燃烧器二次风进口，进入炉膛；另一部分引到磨煤机热风母管作干燥剂并输送煤粉。炉膛内燃烧产生的烟气经锅炉各受热面分两路进入两台空气预热器，空气预热器后的烟气经电动隔离阀后接至—根母管，再进入两组电除尘器，由两台引风机抽吸，经烟囱排入大气。

(二) 风烟系统设备及运行

1. 送（引）风机

(1) 作用

锅炉的燃料在燃烧过程中需要连续不断地有空气送入炉膛，提供燃烧所需的充足氧

量；同时，将燃烧产生的烟气排向大气，并使炉膛保持微负压燃烧，此二项任务分别由送风机和引风机完成。风机是转动机械，它将机械能变成流体的动能和势能，在输送流体的过程中克服流动阻力，输送出所需要的流体介质。

(2) 型式

一般火力发电厂锅炉常选用的风机大致有：

1) 轴流式风机，①动叶可调轴流式风机，液压动叶调节，由定速电机驱动；②静叶可调轴流式风机（子午加速轴流风机），靠改变前置导叶角度调节，由定速电机驱动。

2) 离心式风机。①定速电机驱动，用进口导叶或调节门调节；②双速电机驱动，进口导叶或调节门调节；③定速电机驱动，液力耦合器变速调节；④变速电机驱动，采用变速调节。

由于性能和价格等方面的原因，国内中小型电厂锅炉风机用的是最多的是定速电机驱动和进口导叶（或调节门）调节的离心式风机。近年来，我国大型机组发展很快，采用轴流式风机的越来越多。它具有结构紧凑、重量轻、体积小、调节性能好、低负荷下也有较高的效率等特点。但也存在一些问题，如动叶可调轴流式风机调整动叶角度的传动机械易发生故障；调整风机负荷时可能会发生喘振等。

(3) 风机的调节

1) 离心式风机的调节。大容量单元制发电机组风机常采用电动机变速调节和进口导叶调节方式。

变速调节方式通过改变叶轮的工作转速，使风机性能随之改变，由此改变了工作点位置。图 1-1-1 表示了离心式风机采用变速调节时工作点变化的情形。当转速为 n 时，性能曲线与管道特性曲线相交于 A 点，工作点的流量和风压分别为 Q_A 和 p_A ，当负荷增加、系统要求流量增加到 Q_{A1} 时，若将转速提到 n_1 ，离心式风机的流量和风压都相应地增到管道系统所需要的数值（ Q_{A1} 、 p_{A1} ）。相反，负荷减少时，将转速降为 n_2 亦可获得相应的流量和风压（ Q_{A2} 、 p_{A2} ）。

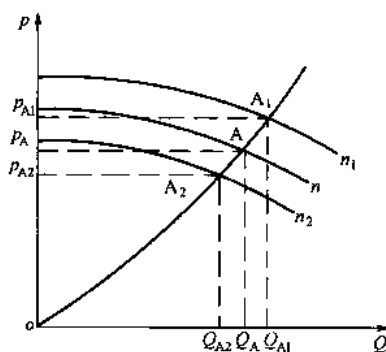


图 1-1-1 离心式风机变速调节的 Q - p 曲线图

进口导叶调节是通过改变进口导叶角度的方法改变风机的性能曲线，以改变工作点的。

2) 轴流式风机的调节。轴流式风机通常采用可动叶片的调节方式，即通过调整动叶的安装角度来改变风机本身的特性（管路阻力不改变），进而改变工作点，以适应负荷的变化。图 1-1-2 为某电厂轴流式送风机（动叶调节）性能曲线。从图 1-1-2 可以看出，轴流式送风机采用动叶调节时，其全风压曲线是一组较陡的曲线，动叶开大时，风量、风压升高，轴功率亦增大。对应某一动叶角度，全风压线较陡直（功率特性亦较陡直），即当阻力增大时，风压上升较多而风量下降较少；与此同时，由于阻力增加将使轴功率增加较快，因此在这种意义上，流量越小，耗功率愈大。因此，轴流式风机启动应在动叶全关而出口阻力最小情况下最佳。图 1-1-2 中，环形虚线为等效

率线，当按风量要求进行动叶调节时管路的特性曲线是始终不变的，起自原点的抛物线，此时工作点沿该阻力抛物线移动。由图 1-1-2 可知，在较宽广的动叶角度范围内，风机仍可保持较高的效率，但动叶角度过小仍是不经济的。由图可见，轴流式风机风压特性是一组有驼峰的曲线。当风机的出口阻力增大时，风机工作点沿风机特性曲线向左上方移动，逐渐接近驼峰。假想当工作点已落在驼峰附近右方，而根据风量要求，还需继续开大动叶时，工作点将可能被强迫移至不稳定工作区（因为新的动叶角度下驼峰向右上方偏右），因此将出现风机的喘振。

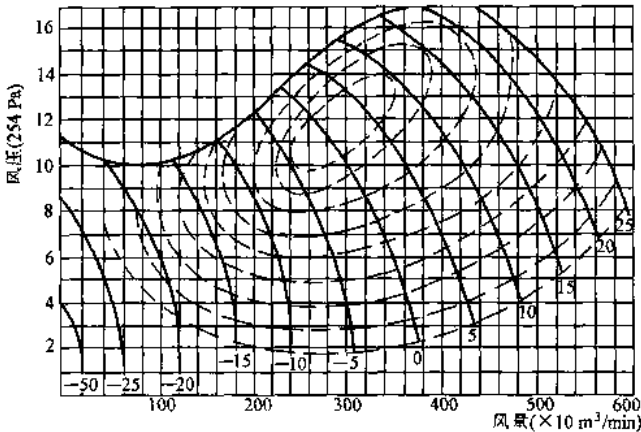


图 1-1-2 轴流送风机性能曲线

(4) 喘振

1) 喘振是使轴流式风机性能反常的一种不稳定的运行状态。当轴流式风机发生喘振时，风机出口的压力和流量突然下降，且有大幅度的脉动，轴功率也极不稳定，风机会由原来的高频尖啸声变成低频沉闷的轰鸣声，并且伴有整台机组的强烈振动，会使轴流式风机转子（特别是叶片）和定子的某些元件（如静叶片）承受交变的动应力，使转子动叶片与定子元件相碰撞，密封和轴承损坏，严重时造成叶片断裂或整台风机损坏。轴流风机的喘振是其本身的固有特性，轴流风机是否在喘振点运行，主要取决于风机所在的管网特性。一般认为轴流风机喘振现象的产生有两方面的因素促成：风机内的气流在一定条件下出现的“旋转脱离”是产生喘振的内在因素；轴流风机所在的管网系统的特性是其外界条件，只有外界条件与内在因素吻合时，轴流风机才发生喘振现象。轴流风机的喘振边界线由于不能完全用理论计算得到，所以通常只能有实验或者实测获得。

2) 旋转失速和喘振的区别：①旋转失速时，由于轴流风机中一个或几个旋转脱离团沿圆周方向旋转传播，气流的脉动是沿风机的圆周方向的。而喘振时气流脉动则是沿风机轴向的。旋转失速的流场是周向不对称的，喘振时气流流场基本上是周向对称的。②旋转失速时，沿风机周向各点上气流流量是随时间而脉动的，但是通过风机截面上总的平均流量不随时间而变化，而喘振时总的平均流量是随时间变化的。③旋转失速属于风机本身工作不稳定时出现的气流脉动现象，而喘振不是单独的机器问题，而是系统的稳定性问题。

2. 空气预热器

(1) 空气预热器的作用及类型

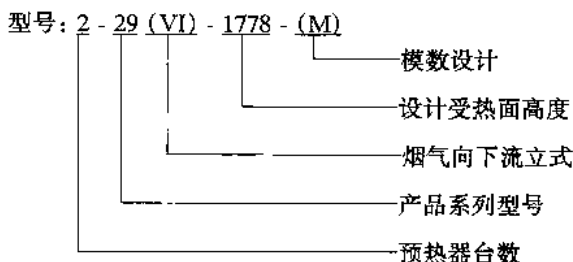
空气预热器是利用烟气的热量来加热燃烧所需空气的热交换设备。它回收了烟气的热量，降低了排烟温度，提高了锅炉效率。

按照换热方式，空气预热器可分为传热式和蓄热式（再生式）。现代电站锅炉中，最常用的传热式空气预热器是管式空气预热器，蓄热式空气预热器是回转式空气预热器。

1) 管式空气预热器。管式空气预热器是由直径为 25~51mm、壁厚为 1.25~1.5mm 的管子制成。通常烟气在管内纵向流动，空气从管间的空间横向绕流过管子，两者成交叉流动。这种预热器结构简单但耗钢材多，体积大，而且易堵灰与磨穿管壁。

2) 再生式空气预热器。再生式空气预热器分为受热面转动和风罩转动两种型式。受热面回转式空气预热器是由一个旋转缓慢的大直径转子与固定的圆筒形外壳构成，有两个互不相通的通道，一个流动烟气，一个流动空气。转子中受热元件（蓄热钢板）先在烟气侧吸热，然后转到空气侧放热，加热空气。就这样连续不断地将烟气中热量传给空气。与管式相比，这种预热器传热密度高，结构复杂，但紧凑，外形尺寸小。在同样的条件下，回转式空气预热器受热面的壁温较高，因而烟气较轻，缺点是密封结构要求高，漏风量较大。大容量锅炉广泛采用这种回转式空气预热器。

上海锅炉厂生产的受热面旋转式空气预热器（容克式）技术规范：



主要工作参数为：预热器转速为 1.17r/min，主电机功率为 18.5kW，转速为 1500r/min，辅电机功率为 5.5kW，转速为 1500r/min。

(2) 空气预热器运行的监控指标

空气预热器运行的监控目的是为了确保空气预热器换热件畅通、润滑油系统运行正常、漏风率在规定范围内以及换热件不发生低温腐蚀和着火等不安全现象。

1) 空气预热器出入口差压。风侧差压和烟侧差压的监控非常重要。差压过大，会直接导致空气预热器冷端漏风加剧，空气预热器后烟气含氧量上升。同时由于锅炉供给燃烧所需空气量降低而使风机出力增加，电流上升，严重时使换热件堵塞，风机出力不能满足负荷的要求，迫使负荷下降，机组效率下降。

2) 空气预热器出口烟气含氧量。空气预热器出口烟气含氧量是标志其内部漏风的重要指标。在回转式空气预热器内部，虽然装设了径向、环向和轴向密封装置，但因换热件的热变形而造成严重漏风一直是难以解决的问题，其中径向漏风又是受热面回转式空气预热器最主要的漏风途径，漏风使得空气直接进入烟道，然后由引风机抽走，使得引风机电

耗增加，严重时限制锅炉出力，影响锅炉的安全经济运行。

五、锅炉制粉系统

(一) 制粉系统组成

制粉系统是火电厂燃煤锅炉的主要系统之一。由于磨煤机型式和其所磨制煤粉的特性不同，以及实际运行的要求和制粉系统型式也不同，目前，大型火力发电厂普遍采用单元制的直吹式和中间储仓式制粉系统。直吹式制粉系统主要由煤斗、给煤机、磨煤机、粗粉分离器等制粉设备及其连接管道组成。中间储仓式制粉系统中还有细粉分离器、煤粉仓、给粉机、排粉机等设备。制粉系统完成的主要任务是磨制出供燃烧所需要的一定数量、一定细度的煤粉，并进行干燥处理，以保证燃料的着火燃烧。

(二) 制粉系统各设备的特点和主要技术参数

1. 磨煤机

磨煤机是制粉系统的重要设备，它的作用是把原煤磨制成合格的煤粉。磨煤机按转速可分为低速磨煤机（15~25r/min）、中速磨煤机（50~300r/min）、高速磨煤机（500~1500r/min）。国内燃煤电厂应用较多的是属于低速磨煤机的筒式钢球磨煤机、中速磨煤机和属于高速磨煤机的风扇式磨煤机。

(1) 筒式钢球磨煤机

球磨机磨煤部分是一个直径为2~4m，长为3~10m的圆筒，筒内装有大量直径为25~60mm的钢球，一端是热空气与原煤进口，另一端是气粉混合物出口。电动机经弹性联轴器、减速器带动筒体转动时，钢球被抛到一定高度，然后落下将煤击碎，钢球在筒内滚动时，兼起研磨作用。磨好的煤粉由干燥气流从筒体带出。球磨机几乎可以磨制所有煤种，工作可靠性高。由于其磨煤功率与磨煤出力几乎无关，而磨煤的单位电耗却随出力的降低而增高，因此，球磨机在低负荷或变负荷下运行是不经济的。这也是与其他型式磨煤机的一个很重要差别。

(2) 中速磨煤机

常用的中速磨煤机有平盘（辊—盘式）磨煤机、E型（球—环式）磨煤机、碗式（辊—碗式）磨煤机和MPS磨（辊—环式）。中速磨的工作原理是原煤在两个碾磨部件的表面之间，在压紧力的作用下受到挤压和碾磨而被粉碎成煤粉。由于碾磨部件的旋转，磨成的煤粉被甩至风环处。干燥用的热风经风环吹入磨煤机内，对煤粉进行干燥，并将其带入碾磨区上部的煤粉分离器中。经过分离，不合格的粗粉返回碾磨区重磨，细煤粉经煤粉分离器由干燥剂带出磨外，煤中杂物经风环落入杂物箱内。

3500×6000 钢球磨煤机的技术参数如下：筒体的有效内径为3500mm，长度为6000mm，工作转速为17.57r/min，容积为5772m³；最大装球量为60t；主电机的功率为1000kW，电压为6000V，转速为1000r/min。

(3) 风扇磨煤机

风扇磨煤机实际上是兼有粉碎功能的排粉机，由叶轮、外壳、轴承及轴承箱组成。叶轮上装有8~12个叶片，称为冲击板，蜗壳内装有护甲，都由耐磨材料制成。风扇磨中，煤的磨碎和干燥同时进行，互相影响。磨碎过程既受机械力作用又受热力作用，比起其他