



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

单元机组运行 与仿真实训

陈洁 齐强 主编
姜锡伦 黄锋 张仁金 副主编

行动导向式



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

单元机组运行 与仿真实训

主 编 陈 洁 齐 强

副主编 常 颖 伦 黄 锋 张仁金

编 写

主 审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十二五”职业教育国家规划教材。

本书依据火电厂集控运行工作对知识和能力的需求来选择和组织内容，重点介绍了单元机组的启动、运行调节、停运及事故处理，注重强调工作任务和岗位能力与知识的联系。全书紧密围绕单元机组运行所需的知识和技能，将单元机组运行分解为5个项目共19个相对独立的学习任务，充分体现了工作过程的完整性。每个任务主要由教学目标、任务描述、任务准备、相关知识、任务实施等部分组成。

本书可作为高职高专电力技术类火电厂集控运行、电厂热能动力装置及相近专业的教材，也可作为中、高级工和电厂运行人员的培训教材。

图书在版编目（CIP）数据

单元机组运行与仿真实训 / 陈洁，齐强主编. —北京：中国电力出版社，2015.8

“十二五”职业教育国家规划教材

ISBN 978-7-5123-7076-0

I. ①单… II. ①陈… ②齐… III. ①火电厂—单元机组—电力系统运行—高等职业教育—教材 IV. ①TM621.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 033566 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>）

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015年8月第一版 2015年8月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 15印张 363千字

定价 30.00 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

本书主要以典型 300MW 燃煤火电机组为背景组织材料,分为 19 个基本学习工作任务。每个任务按指导行动的思维过程所具有的六大环节,即“资讯、计划、决策、实施、检查、评估”进行编写,并据此指导学生的学习活动,实现学习过程的完整性,从而为学生从事单元机组运行的职业活动、实现工作过程的完整性打下坚实的基础。本书注意但不强求知识的体系与结构完整,知识内容的采编仅体现在为完成学习工作任务所必需的知识信息准备以及在分析工作问题中的具体应用上。

本书项目 1、项目 2 中任务 2.1、2.2、2.8 由长沙电力职业技术学院陈洁编写;项目 2 中任务 2.3、2.9、2.10 由西安电力高等专科学校齐强编写;项目 2 中任务 2.4~2.6 和项目 5 中任务 5.1 由郑州电力高等专科学校姜锡伦编写;项目 2 中任务 2.7 由长沙电力职业技术学院付蕾编写;项目 3 由福建电力职业技术学院张仁金编写;项目 4 和项目 5 中任务 5.2 由山西电力职业技术学院黄锋编写。全书由陈洁统稿。

本书由长沙理工大学谭欣星主审,并在编写过程中征求了许多从事火电厂集控运行工作的专家的意见,得到了许多同仁的大力支持和帮助,在此一并表示深切的谢意。

限于编者水平,书中疏漏之处在所难免,恳请专家和读者批评指正。

编 者

2015 年 6 月

目 录

前言	
项目 1 单元机组集控环境	1
项目 2 单元机组启动	20
任务 2.1 启动方式的选择	20
任务 2.2 厂用电系统送电	33
任务 2.3 辅助系统恢复运行	47
任务 2.4 锅炉上水及炉底加热	62
任务 2.5 锅炉吹扫及点火	66
任务 2.6 锅炉升温升压	73
任务 2.7 汽轮机冲转及定速	80
任务 2.8 发电机并网	95
任务 2.9 机组升负荷至额定	108
任务 2.10 单元机组的热态启动	114
项目 3 单元机组的运行调节	118
任务 3.1 锅炉的运行调节	118
任务 3.2 汽轮机的运行监视	143
任务 3.3 发电机—变压器组与厂用电设备的运行监视	159
项目 4 单元机组的滑参数停机	178
任务 4.1 单元机组滑参数停机	178
任务 4.2 单元机组紧急停机	190
项目 5 单元机组事故处理	198
任务 5.1 锅炉典型事故及处理	198
任务 5.2 汽轮机典型事故处理	206
任务 5.3 发电机—变压器组及典型厂用电系统事故及处理	213
附录 A	223
附录 B	225
附录 C	227
参考文献	232

项目 1 单元机组集控环境

【教学目标】

知识要求：(1) 了解单元机组，建立单元机组集控运行的概念。

(2) 熟悉单元机组集控对象，了解锅炉、汽轮机、发电机—变压器组的结构，掌握机组额定工况下主要参数。

(3) 掌握分散控制系统（DCS）画面的切换，以及各种阀门及各种弹出式窗口的操作方式。

能力要求：(1) 能说出锅炉、汽轮机、发电机—变压器组的主要参数。

(2) 能熟练操作 DCS 画面；会根据界面颜色判断各种执行机构的工作状态，并能熟练操作弹出式窗口。

态度要求：(1) 能主动学习，在完成任任务过程中能够发现问题、分析问题和解决问题。

(2) 在严格遵守安全规范的前提下，能与小组成员通过协商和交流配合完成本学习任务。

【任务描述】

班级学生自由组合为 4~6 人的运行学习小组，各运行学习小组自行选出单元长（由锅炉主控兼任），并明确各小组成员的角色及岗位职责。在仿真环境下，各运行学习小组掌握单元机组集控对象和集控系统，为后续工作任务的学习打下基础。

【任务准备】

课前预习相关知识部分。根据典型的单元机组集控运行控制对象的结构特点和主要运行参数，独立回答下列问题。

(1) 什么是单元机组集控运行？单元机组集控运行的主要内容有哪些？

(2) 本机组锅炉、汽轮机、发电机的型号和类型是什么？

(3) 单元制火电机组的 DCS 由哪些子系统组成？

(4) 站在自身岗位的角度，阐述如何做好一个值班员。

【相关知识】

一、单元机组及集控运行的概念

(一) 单元机组的构成和特点

典型的单元机组系统如图 1-1 所示。

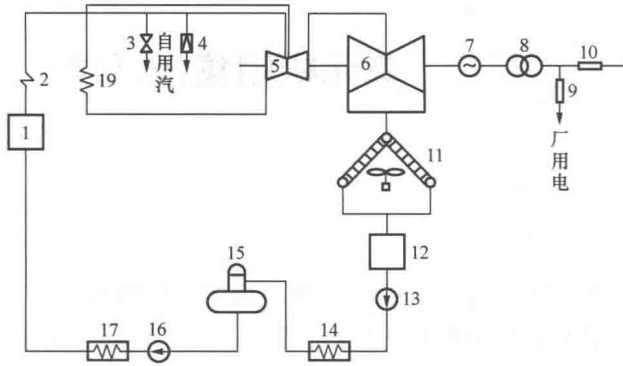


图 1-1 典型单元机组系统

1—锅炉；2—过热器；3—阀门；4—减压阀；5—汽轮机高、中压缸；6—汽轮机低压缸；7—发电机；8—主变压器；
9—厂用电开关设备；10—发电开关设备；11—直接空冷凝汽器；12—凝结水箱；13—凝结水泵；
14—低压加热器；15—除氧器；16—给水泵；17—高压加热器；18—再热器

每台锅炉直接向所配合的一台汽轮机供汽，汽轮机驱动发电机，发电机发出的电能直接经一台升压变压器送往电力系统，组成炉、机、电纵向联系的独立单元。各独立单元之间没有大的横向联系，在机组正常运行时，本单元所需要的蒸汽和厂用电均取自本单元。这种独立单元系统的机组称为单元机组。

与非单元制系统（母管制系统）相比，单元机组系统简单、管道短，发电机电压母线短，管道附件少，发电机电压回路的开关电器少，投资最为节省，系统本身发生事故的可能性也最少，操作方便，便于滑参数启、停，适合炉、机、电集中控制。

单元机组的缺点是其中任一主要设备发生故障时，整个单元都要被迫停止运行，相邻单元之间不能互相支援，机炉之间也不能切换运行，运行的灵活性较差；当系统频率发生变化时，单元机组由于锅炉的热惯性大，故对负荷变化的适应性相对较差。

（二）单元机组集控运行的概念和内容

1. 单元机组集控运行

单元机组的炉、机、电纵向联系非常密切，相互构成了一个不可分割的整体。因此在单元机组的运行中，必须把锅炉、汽轮机、发电机—变压器组及其连接设备作为一个整体来进行监视和控制，这就是所谓的单元机组集控运行。

2. 单元机组集控运行的内容

单元机组集中控制应能满足以下要求：

- (1) 对机组实现各种方式的启动、停运。
- (2) 在机组正常运行时，对设备的运行情况进行监视、控制，维护，以及对有关参数进行调整。

(3) 机组的紧急事故处理。

单元机组集控运行的内容如下：

- (1) 自动检测。自动检查和测量反映单元机组运行情况的各种参数和工作状态，监视单元机组运行的生产情况和趋势。
- (2) 自动调节。自动维持单元机组在规定的工况下安全、经济地运行。
- (3) 程序控制。根据值班员的指令，自动完成整个机组或局部工艺系统的程序启停。

(4) 自动保护。当机组运行情况出现异常或参数超过允许值时,及时发出报警信号或进行必要的动作,以避免发生设备事故和危及人身安全。

二、单元机组集控对象

单元机组集控运行的控制对象包括:锅炉本体及燃料供应系统、给水除氧系统、汽轮机本体及其冷却系统、抽汽回热加热系统、凝结水系统、润滑油系统、发电机—变压器组系统、高低压厂用电及直流电源系统等。升压母线及送出线电气系统另设网控室控制。全厂公用系统中,水处理系统、氢气制备、燃料运输系统、循环水系统、压缩空气系统、脱硫系统等采用公用辅助 DCS 控制。

(一) 锅炉总体介绍

1. 锅炉整体布置

图 1-2 所示为哈尔滨锅炉厂采用美国 ABB-CE 公司引进技术设计制造的 HG-1056/17.5-YM39 型锅炉,与哈尔滨汽轮机厂 NZK300-16.7/537/537 型汽轮机及哈尔滨电机厂 QFSN-300-2 型发电机匹配成单元机组。锅炉为亚临界参数、一次中间再热、自然循环、单炉膛、固态排渣煤粉炉。设计燃用煤种为乌达烟煤。在锅炉的最大连续蒸发量(BMCR) 1056t/h 时,机组电负荷为 329.137MW;机组在额定电负荷 300MW 时,锅炉的额定蒸发量为 943.8t/h。采用中速磨煤机直吹式制粉系统、四角切圆燃烧、固态排渣方式。过热蒸汽温度采用二级三点喷水调节,再热蒸汽温度调节方式采用摆动燃烧器调节。锅炉采用全钢结构构架、高强螺栓连接,连接件接触面采用喷砂处理工艺,提高了连接结合面间的摩擦系数,锅炉为紧身封闭布置结构。

锅炉本体具有下列设计特点:

(1) 锅炉为单炉膛,采用四角布置的摆动式直流燃烧器、切向燃烧方式。每角燃烧器为五层一次风喷口,燃烧器采用传统的大风箱结构,由隔板将大风箱分隔成若干风室。每角燃烧器共有 14 个风室,其中顶部燃尽风室 2 个,上端部辅助风室 1 个,其间煤粉风室 5 个,油风室 3 个,中间辅助风室 2 个,下端部辅助风室 1 个。一次风喷嘴可上下摆动 20° ,二次风喷嘴可上下摆动 30° ,顶部燃尽风室喷嘴反切 18° ,可削弱炉膛上部的气流旋转,减少炉膛出口烟温偏差,并且能够上下做 $+30^\circ \sim -5^\circ$ 摆动,以改变燃烧中心区的位置,调节炉膛内各辐射受热面的吸热量,从而调节再热汽温。制粉系统为正压直吹式,配 5 台 ZGM95N 型中速磨煤机,在 BMCR 工况时,4 台磨煤机运行,一台备用。

(2) 锅炉的汽包、过热器出口及再热器进出口均装有直接作用的弹簧式安全阀。在过热器出口处装有一套动力排放阀(PCV),以减少安全阀的动作次数。

(3) 汽温调节方式。为消除过热器出口左右汽温偏差,过热汽温采用二级三点喷水。第一级喷水减温器设于低温过热器与分隔屏之间的大直径连接管上,布置一点;第二级喷水减温器设于过热器后屏与末级过热器之间的大直径管上,分左右两点布置。减温器采用笛管式,设计喷水量为 BMCR 工况下主蒸汽流量的 10%,其中一级减温水设计喷水量为总喷水量的 $2/3$,二级减温器设计喷水量为总喷水量的 $1/3$ 。再热汽温的调节主要靠燃烧器摆角摆动来调节,过量空气系数的改变对过热器和再热器的调温也有一定的作用。再热器的进口导管上装有两只雾化喷嘴式喷水减温器,主要作为事故喷水减温用。设计事故喷水量为 BMCR 工况下再热蒸汽流量的 5%。

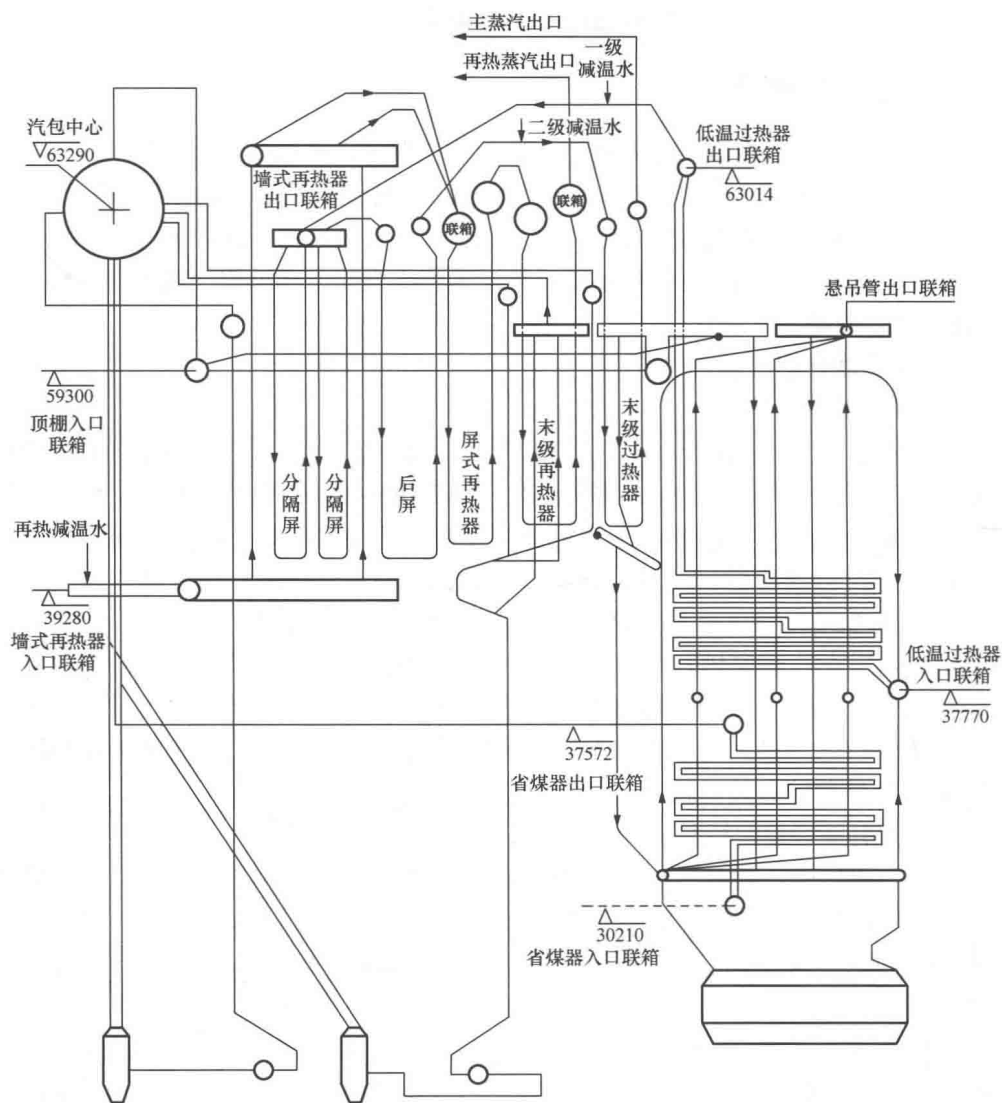


图 1-2 锅炉本体布置图

在炉膛、各级对流受热面和回转式空气预热器处均装设不同形式的吹灰器，吹灰器的运行采用可编程序控制，所有的墙式吹灰器和伸缩式吹灰器根据燃煤和受热面结灰情况每 2~4h 全部运行一遍。炉膛及炉膛出口水平烟道采用蒸汽式吹灰器，尾部烟道和回转式空气预热器采用脉冲式吹灰器。

在锅炉的尾部竖井下联箱装有容量为 5% 的启动疏水旁路。锅炉启动时利用该旁路进行疏水以达到加速过热器升温的目的。该 5% 容量的小旁路可以满足机组冷、热态启动的要求。

锅炉装有炉膛安全监控系统 (FSSS)，用于锅炉的启、停、事故解列以及各种辅机的切投，其主要功能是炉膛火焰监测和灭火保护，对防止炉膛爆炸和“内爆”有重要意义。

机组由 DCS 进行汽轮机和锅炉之间的协调控制，它将锅炉和汽轮机作为一个完整的系统

来进行锅炉的自动调节。

2. 各受压部件

(1) 锅炉给水和水循环系统。锅炉给水从省煤器入口联箱进入省煤器蛇形管，给水在省煤器蛇形管中与烟气呈逆流向上流动，给水被加热后汇集到省煤器出口联箱，再经省煤器出口连接管引到炉前，并从汽包的底部进入汽包。汽包底端设置了 4 根集中下降管，由下降管底端的分配联箱接出 74 根分散引入管，进入水冷壁下联箱。炉膛四周为全膜式水冷壁，从冷灰斗拐点上 3m 到分隔屏底，以及上炉膛中辐射再热器区未被再热器遮盖的前墙和侧水冷壁管采用内螺纹管（其余部分为光管）。饱和水流出水冷壁下联箱后，自下而上沿炉膛四周不断加热，汽水混合物进入水冷壁上联箱，然后由引出管引至汽包，在汽包内进行汽水分离。

(2) 省煤器。省煤器的作用是从离开锅炉的烟气中回收热量并加热锅炉给水。省煤器布置在锅炉尾部竖井烟道下部，管子为 $\phi 51 \times 6.5\text{mm}$ ，沿锅炉宽度方向顺列布置 98 片水平蛇形管。所有蛇形管都从省煤器入口联箱接入，终止于省煤器出口联箱。

给水经省煤器入口联箱，再进入蛇形管。水在蛇形管中与烟气呈逆流向上流动，以进行有效的热交换，同时减小蛇形管中出现气泡造成停滞的可能性。给水在省煤器中加热后，经出口管引入汽包。

在省煤器入口联箱端部和集中下降管之间装有省煤器再循环管。在锅炉启动停止上水时，打开再循环门，将炉水引到省煤器，防止省煤器中的水产生汽化。启动时，再循环管路中的阀门必须打开，直到连续供水时关闭。

(3) 汽包。汽包内径为 1778mm，壁厚 190mm，筒身长度为 18000mm，总长 19982mm，汽包总重 177.3t，由 SA-299 碳钢材料制成。汽包筒身顶部焊有饱和蒸汽引出管座、放气阀管座；两侧焊有汽水混合物引入管座；筒身底部焊有大直径下降管座、给水管座及紧急放水管座；封头上装有人孔门、安全阀管座、加药管座、连续排污管座、2 对就地水位表管座、5 对单室平衡容器管座等。安装现场不能在汽包筒身上进行焊接。

(4) 过热器。过热器由顶棚过热器和包墙过热器、立式低温过热器和水平低温过热器、分隔屏过热器、后屏过热器、末级过热器五个主要部分组成。

1) 顶棚过热器和包墙过热器由顶棚管、后烟道侧墙、前墙及后墙、水平烟道延伸侧包墙组成。后烟道包墙过热器形成一个垂直下行的烟道。

2) 水平低温过热器位于尾部竖井烟道省煤器上方，共 102 片，管径为 $\phi 51\text{mm}$ ，以 136mm 的横向节距沿炉宽方向布置。立式低温过热器位于尾部烟道转向室内，水平低温过热器上方，共 102 片，管径为 $\phi 51\text{mm}$ ，以 136mm 的横向节距沿炉宽方向布置。

3) 分隔屏过热器位于炉膛上方，前墙水冷壁和后屏过热器之间，沿炉宽方向布置 4 大片，每大片又沿炉深方向分为 6 小片。管径为 $\phi 51\text{mm}$ ，从炉膛中心开始，分别以 3429、2743.2、2566.3mm 的横向间距沿整个炉膛宽度方向布置。

4) 后屏过热器位于炉膛上方折焰角前，共 20 片，管径为 $\phi 60\text{mm}/54\text{mm}$ ，以 685.8 mm 的横向间距沿整个炉膛宽度方向布置。

5) 末级过热器位于后水冷壁排管后方的水平烟道内，共 90 片，管径为 $\phi 51\text{mm}$ ，以 152.4mm 的横向间距沿整个炉宽方向布置。

(5) 再热器。再热器由末级再热器、前屏再热器、墙式辐射再热器三个主要部分组成。

1) 末级再热器位于炉膛折焰角后的水平烟道内, 在水冷壁后墙悬吊管和水冷壁排管之间, 共 60 片, 管径为 $\phi 63\text{mm}$, 以 228.6mm 的横向节距沿炉宽方向布置。

2) 前屏再热器位于后屏过热器和后水冷壁悬吊管之间, 折焰角的上部, 共 30 片, 管径为 $\phi 63\text{mm}$, 以 457.2mm 的横向节距沿炉宽方向布置。

3) 墙式辐射再热器布置在水冷壁前墙和侧墙之间靠近前墙的部分, 约占炉膛高度的 1/3。前墙辐射再热器由 234 根管径为 $\phi 50\text{mm}$ 的管子组成, 侧墙辐射再热器由 196 根管径为 50mm 的管子组成, 以 50.8mm 的节距沿水冷壁表面密排而成。

在后屏过热器下方、炉膛左侧装有一只烟温探针, 在锅炉启动过程中, 监视炉膛出口烟气温度, 当炉膛出口烟气温度超过 538°C 时自动退出, 以保护再热器受热面不超温。

3. 锅炉主要设计参数

锅炉主要设计参数见表 1-1。

表 1-1 锅炉主要设计参数

名称	单位	负荷工况				
		BMCR	THA	75%THA	35%BMCR	高压加热器全切
主蒸汽流量	t/h	1056	943.8	687.56	369.6	824.32
主蒸汽出口压力	MPa	17.5	17.32	16.89	16.71	17.15
主蒸汽出口温度	$^{\circ}\text{C}$	540	540	540	526.6	540
给水温度	$^{\circ}\text{C}$	283.3	276	256.6	221.2	178.6
给水压力	MPa	19.4	18.91	17.974	17.19	18.44
再热蒸汽流量	t/h	872.12	785.25	583.04	322.27	808.84
再热蒸汽出口压力	MPa	3.839	3.453	2.55	1.336	3.616
再热蒸汽出口温度	$^{\circ}\text{C}$	540	540	540	496	540
再热蒸汽进口压力	MPa	4.039	3.633	2.684	1.41	3.801
再热蒸汽进口温度	$^{\circ}\text{C}$	332.9	322.6	299.3	257.1	332
减温水喷水压力	MPa	20.679	19.859	18.499	19.319	19.279
减温水喷水温度	$^{\circ}\text{C}$	179.6	175.3	163.7	138.1	178.5
过热器一级喷水量	t/h	0	12.5	36.1	6	59.7
过热器二级喷水量	t/h	0	6.4	17.9	3.0	29.1

续表

名称	单位	负荷工况				
		BMCR	THA	75%THA	35%BMCR	高压加热器全切
再热器喷水量	t/h	0	0	0	0	0
总燃煤量	t/h	142.2	129.6	100.2	56	134.2
总风量（到风箱）	t/h	1158.2	1055.9	919.1	475.5	1092.8
炉膛漏风	t/h	60.96	55.6	48.4	25	57.5
总风量	t/h	1219.16	1111.5	967.5	500.5	1150.3
下炉膛出口烟温	℃	1311	1313	1252	1146	1288
炉膛出口烟温	℃	1032	1016	963	818	1014
煤粉喷嘴投运数	层	4	4	3	2	4
喷嘴摆动角度	°	0	12	20	27	-18
炉膛截面热负荷	kW/m ²	4.416	4.025	3.099	1.718	4.168
炉膛容积热负荷	kW/m ³	101.18	92.22	71.01	39.36	95.49
总热损失	%	10.36	10.26	10.66	10.38	9.48
效率（按高位发热量）	%	89.64	89.74	89.34	89.62	90.52
效率（按低位发热量）	%	93.50	93.60	93.18	93.47	94.41
过量空气系数		1.25	1.25	1.412	1.312	1.25

（二）汽轮机总体介绍

1. 汽轮机整体布置

图 1-3 所示为哈尔滨汽轮机厂生产的 N2K300-16.7/537/537 型汽轮机整体布置。

（1）新蒸汽从下部由主蒸汽管进入布置于高中压合缸两侧的两个高压主汽调节联合阀，由 6 个调节阀（每边 3 个）经 6 根高压导汽管，按一定的顺序从高中压外缸的上半部和下半部通过钟形套筒分别进入高压缸的 6 个喷嘴室，通过各自的喷嘴组流向正向的冲动式调节级，然后返流经过高压通流部分的 12 级反向的反动式压力级后，由高压缸下部两侧排出进入再热器。再热后的蒸汽由再热主汽管进入置于汽轮机机头两侧的两个中压再热主汽调节联合阀，再经过两根中压导汽管将蒸汽从下部导入高中压外缸的中压内缸，经过中压通流部分 9 级正向布置的反动式压力级后，从中压缸上部排汽口经过联通管进入低压缸。低压缸为双分流结构，蒸汽从中部流入，经过正反向各级反动式压力级后，从两个排汽口向下排入一个排汽装置。

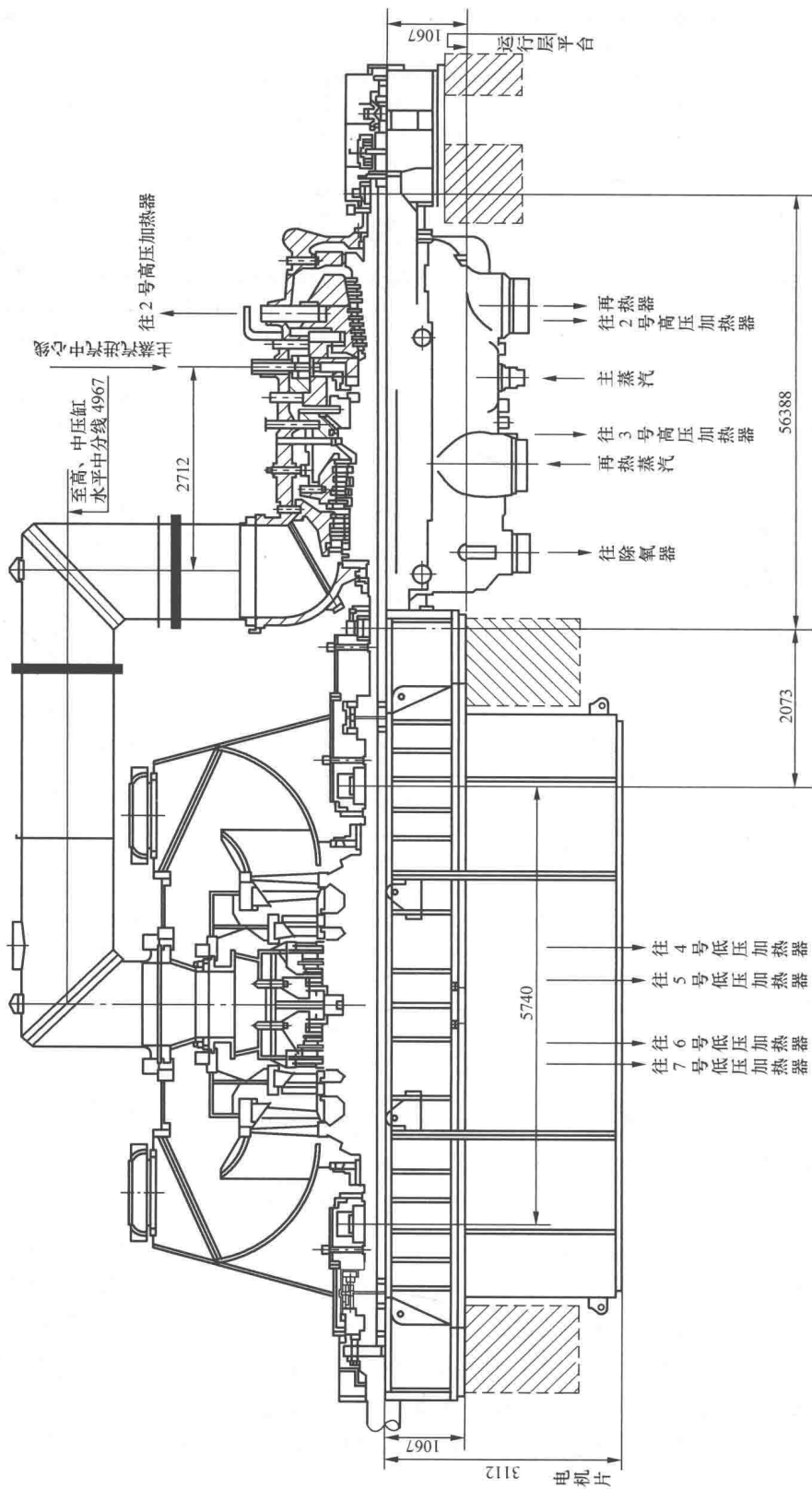


图 1-3 汽轮机本体布置图

TV、GV 及喷嘴弧段排列（从调速器向发电机方向看）如图 1-4 所示。

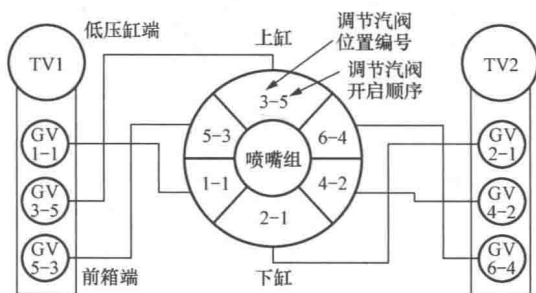


图 1-4 TV、GV 及喷嘴弧段排列

(2) 高中压转子是高中压部分合在一起的 1 根 30Cr1Mo1V 耐热合金钢整锻结构，高压部分为鼓形结构，中压部分为半鼓形结构。调节级叶轮根部有冷却蒸汽口，调节级后的蒸汽一股通过冷却蒸汽口反向流动，冷却高压转子及蒸汽室，另一股流向高压平衡环汽封。高压平衡环汽封漏汽一股流向高压外缸与高压内缸的夹层，冷却高压内缸外壁及高温进汽部分，经高中压外缸上下部分各 1 根冷却蒸汽管引向 2 级抽汽止回阀前的抽汽管路；另一股通过中压进汽平衡环汽封漏往中压进汽区，冷却中压转子进汽区。在中压外缸与中压内缸的夹层中有来自中压 5 级后的冷却蒸汽冷却中压内缸外壁。设计的冷却蒸汽系统可延长转子、汽缸的使用寿命。在转子的前端用螺栓刚性连接 1 根接长轴，推力盘、主油泵叶轮及危急遮断器均在该轴上。推力轴承位于前轴承箱处，与推力盘形成轴系的膨胀死点。高压动叶片叶根由纵树形改为 T 形，消除了纵树形叶根处的漏汽，提高高压缸效率。调节级正向布置，高压叶片反向布置，中压叶片正向布置，同时还设计有 3 个平衡鼓，机组在额定负荷运行时保持不大的正推力。在某一负荷出现负推力时，推力轴承非工作瓦承力，保持稳定运行。

(3) 低压转子为 30Cr2Ni4MoV 合金钢整锻结构。低压转子为双分流对称结构，1~5 级为半鼓形结构，6 级带有较大的整锻叶轮。低压末级叶片，强度高，跨声速性能好。低压转子通过中间轴与发电机转子刚性连接。

(4) 转子装好叶片后，要进行高速动平衡，达到一定平衡精度，减少运行时的振动。为此在每根转子的中部和前后各有一个动平衡面，沿每个平衡面圆周分布螺孔，可以实现制造厂高速动平衡和电厂不揭缸动平衡。

(5) 高中压汽缸由高中压外缸、高压内缸、中压内缸组成，形成双层缸结构，高温区设计有回流冷却，从而使每个汽缸承受的压差及温差均有降低，内压应力和热应力水平均可降低。内外缸壁的厚度都可以设计得比较薄。外缸和内缸水平中分面螺栓靠近缸壁中心线，使缸壁与法兰厚度差别量减小，上下半缸结构基本对称，质量接近，热容量差别小，因而对热负荷变化的适应性增强。内缸由外缸的水平中分面支承，顶部和底部由定位销导向，以保证内缸在外缸内横向定位，并可使内缸随温度的变化在外缸内自由地膨胀和收缩，内缸的定位靠内缸凸台与外缸槽的配合来实现。外缸下半部分有 4 个猫爪，支承在前轴承箱两侧及低压缸轴承箱两侧，支承面与水平中分面相平，受热时汽缸中心保持不变。

(6) 高压缸共有 6 个喷嘴室，上下半部分各 3 个，进口都焊在高压内缸上，靠喷嘴室上

的键槽镶嵌在内缸的凸缘上定位。高中压隔板由单只自带内外环的静叶片整圈组焊而成。

(7) 低压外缸全部由钢板焊接而成, 为了减少温度梯度设计成 3 层缸。由外缸、1 号内缸、2 号内缸组成, 减少了整个缸的绝对膨胀量。汽缸上下半部分各由 3 部分组成: 调端排汽部分、电端排汽部分和中部。各部分之间通过垂直法兰面由螺栓做永久性连接而成为一个整体, 可以整体起吊。排汽缸内设计有良好的排汽通道, 由钢板压制成, 由面积足够大的排汽口与排汽装置弹性连接。低压缸四周有框架式撑脚, 增加低压缸刚性, 撑脚坐落在基架上承担全部低压缸重量, 并使得低压缸的重量均匀地分在基础上。在撑脚四边通过键槽与预埋的基础内的锚固板形成膨胀的绝对死点。在蒸汽入口处, 1 号内缸、2 号内缸通过 1 个环形膨胀节相连接, 1 号内缸通过 1 个承接管与连通管连接。内缸通过 4 个搭子支承在外缸下半中分面上, 1 号内缸、2 号内缸和外缸在汽缸中部下半部分通过 1 个直销定位, 以保证 3 层缸同心。为了减少流动损失, 在进排汽处均设计有导流环。

(8) 低压缸两端的汽缸盖上装有 2 个大气阀, 其用途是当低压缸的内压超过其最大设计安全压力时, 自动进行危急排汽。大气阀的动作压力为 $0.034\sim 0.048\text{MPa}$ (表压)。低压缸排汽区设有喷水装置, 空转和低负荷时按要求自动投入, 降低低压缸温度, 保护末级叶片。

(9) 根据直接空冷机组的运行特点, 低压缸和轴承箱分别落地, 以避免排汽温度的变化使轴承标高受到影响, 保证轴承的稳定性。同时低压缸端汽封以 3 个支撑臂固定在轴承箱上, 并具有水平及横向键以确定汽封体的中心, 这样端汽封能与转子具有良好的同心性, 避免动静碰磨, 保持合理的间隙。汽封体与低压缸之间设有膨胀节, 在保证真空前提下, 能吸收低压缸膨胀引起的位移。

(10) 汽轮机的连通管上采用连杆膜板式膨胀节, 吸收各方向热膨胀。

2. 汽轮机主要设计参数

汽轮机主要设计参数见表 1-2。

表 1-2 汽轮机主要设计参数

序号	项目	单位	数据
1	机组类型	亚临界压力、一次中间再热、单轴、双缸、双排汽、直接空冷凝汽式汽轮机	
2	汽轮机型号	NZK300-16.7/537/537	
3	TRL 铭牌出力工况	MW	300
4	T-MCR 最大保证工况	MW	317
5	VWO 调阀全开工况	MW	329
6	THA 热耗率保证值工况	MW	300
7	高压加热器停用工况 (全停, 部分停)	MW	300
8	厂用汽工况	MW	300
9	额定主蒸汽压力	MPa	16.7
10	额定主蒸汽温度	℃	537

续表

序号	项目		单位	数据
11	额定高压缸排汽压力		MPa	3.8
12	额定再热蒸汽进口压力		MPa	3.42
13	额定再热蒸汽进口温度		℃	537
14	主蒸汽额定进汽量		t/h	943.8
15	主蒸汽最大进汽量		t/h	1056
16	再热蒸汽额定进汽量		t/h	785.3
17	排汽压力		kPa	15
18	配汽方式			喷嘴
19	额定给水温度		℃	276
20	额定转速		r/min	3000
21	THA 工况热耗		kJ/kWh	8187
22	给水回热级数（高压+除氧+低压）			3+1+3
23	低压末级叶片长度		mm	620
24	通流级数	高压缸		I +12
		中压缸		9
		低压缸		2×6
25	临界转速 (一阶/ 二阶)	高中压转子	r/min	1711/4215
		低压转子	r/min	1632/3831
		发电机转子	r/min	1313/3463
26	机组外形尺寸		m×m×m	17.4×10.4×6.95
27	盘车装置	盘车转速	r/min	3.6
		全真空惰走时间	min	48
		无真空惰走时间	min	10~15

（三）发电机总体介绍

1. 发电机整体布置

图 1-5 所示为哈尔滨电机厂生产的 QFSN-300-2 型水-氢-氢冷发电机整体布置图。

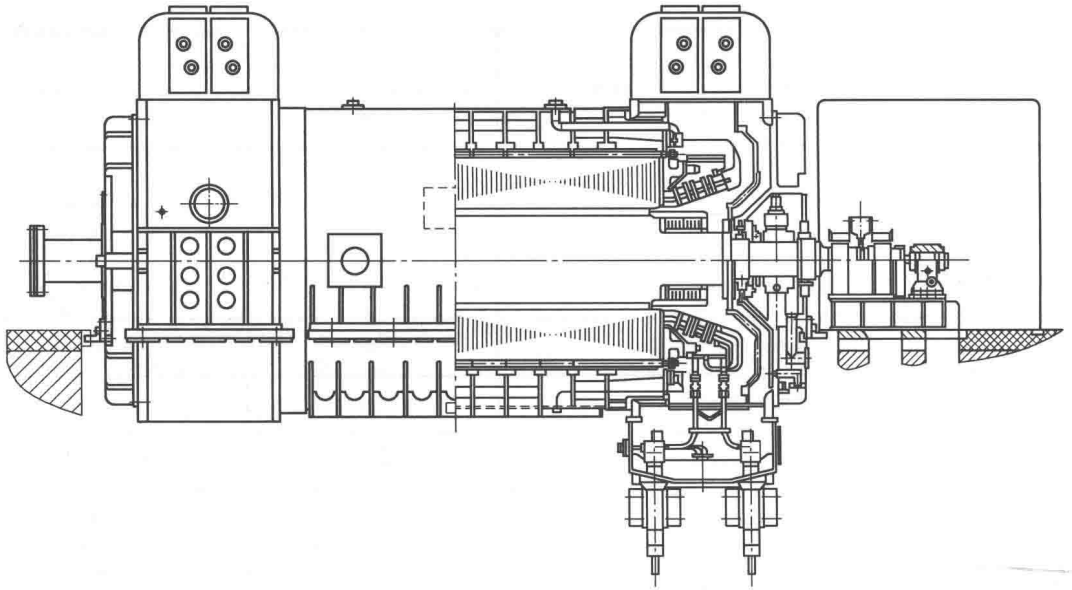


图 1-5 发电机整体布置图

(1) 定子。定子由机座及其隔振结构，定子铁芯、定子绕组及其进、出水汇流管，主引线、出线罩、出线瓷套端子与电流互感器等部件组成。

发电机的机座为整体式。机座外壳由优质锅炉钢板卷制成筒后，套装焊接而成。整个机座焊后经过消除应力处理、水压强度试验和严格的气密检验，具有足够的强度、刚度和气密性。

定子铁芯由高导磁、低比损耗的无取向冷轧硅钢板冲制的扇形片叠压而成，每张冲片的两面均经绝缘处理。铁芯由定位筋固定到机座上，两端通过无磁性压指及压圈固定整体，以确保压紧铁芯。铁芯沿轴向分成 64 段，每段铁芯间形成约 8mm 的径向通风沟。在两端压圈外侧用特制的铜屏蔽覆盖，以减小端部铁芯的损耗和发热，满足发电机进相运行的要求。

定子绕组由实心股线和空心股线编织而组成，绕组槽内部分采用 5400 罗贝尔换位，以减小环流附加损耗。五分之一股线为空心股线。空心股线构成冷却线圈的水路，因此绕组本身的温度很低。定子绕组对地绝缘采用“F”级多胶云母带连续缠绕模压成型。绕组槽内部分的固定采用在上、下层线棒间放中温固化适形材料的方法，以保持良好接触，使线棒坚固可靠。线棒与槽楔之间垫弹性波纹板并有滑移层，保证压紧的同时允许线棒轴向胀缩，以便适应调峰运行工况并满足事故状态下所要求的足够的刚度和强度。

定子绕组总进、出水汇流管分别装在机座的励磁和汽端，在出线罩内还装有单独的出水小汇流管。由进水汇流管经绝缘引水管构成向定子绕组、主引线、出线瓷套端子及中性点母线板的供水通路，由出水汇流管汇集排出。这些水路元件构成了发电机内部水系统。总进、出水管的进、出口位置设在机座的顶部侧面，保证绕组在事故状态下不失水。

(2) 转子。发电机转轴是高强度高导磁率合金钢整体锻件，具有优异的机械性能。本体开有轴向槽用于安放励磁绕组。在本体磁极表面沿轴向均匀地开有横向槽，以平衡本体两个方向的刚度。转子绕组每匝线圈由两股铜排组成，槽内部分加工出两排风孔构成斜流式气隙去气冷却风道。端部铜排铣成凹形，两个凹形铜排彼此对合形成一根空心导体，并与槽部的斜向风道相通。绕组的匝间绝缘用热固定性胶粘接到铜上，匝间绝缘上有着与铜排对应的双