

普通高等教育实验实训规划教材

电力技术类

600MW超临界压力火电机组 系统与仿真运行

杨成民 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

中国电力出版社

中国电力出版社

600MW超临界压力大型机组 系统与仿真运行

王德明 主编



中国电力出版社



普通高等教育实验实训规划教材

电力技术类

600MW超临界压力火电机组 系统与仿真运行

主 编	杨成民		
编 写	吴 琼	马 岩	付佳静
	张玉江	李凌宴	高玉祥
主 审	朱长河	徐庆山	张绍楠



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育实验实训规划教材（电力技术类）。

本书从机组实际运行的角度出发，以图文并茂的形式详细讲述了600MW超临界压力火电机组启动、停止、运行维护和事故处理的全过程；对机组机、炉、电系统的构成原理也进行了详尽的阐述，使学生熟悉系统，掌握机组运行的实际操作方法，提高理论知识和实际运行技能。

本书可作为高职高专电力类院校火电厂热能动力装置专业、火电厂集控运行专业和发电厂及电力系统专业学生的实训教材，也可作为电厂运行人员的培训教材和从事集控运行专业工程技术人员的参考资料。

图书在版编目（CIP）数据

600MW超临界压力火电机组系统与仿真运行/杨成民主编. —北京：中国电力出版社，2009

普通高等教育实验实训规划教材. 电力技术类

ISBN 978 - 7 - 5083 - 9765 - 8

I. ①6… II. ①杨… III. ①超临界—压力—火力发电—发电
机—机组—电力系统运行—高等学校—教材 IV. ①TM621.3

中国版本图书馆CIP数据核字（2009）第214500号

中国电力出版社出版、发行

（北京三里河路6号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>）

北京博图彩色印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010年1月第一版 2010年1月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 17.5印张 429千字

定价 35.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
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

本书是专为高职高专电力技术类火电厂热动力装置专业、火电厂集控运行专业和发电厂及电力系统专业学生学习 600MW 超临界压力火电机组运行所编写的实训教材。书中详细讲解了机组各主要系统的工作原理,全面阐述了机组的启动、停止、运行维护和事故处理的过程和操作方法,其目的是让学生在有限的实训期间内,最大限度的掌握机组系统的构成和理论,学会运行操作及主要事故分析和处理,以提高其专业技能和素质。

本书由哈尔滨电力职业技术学院教师和哈尔滨热电厂运行工程师共同编写。电气系统与运行的内容由吴琼编写,锅炉系统部分由马岩编写,汽轮机系统部分由付佳静编写,机组事故处理部分由李凌宴编写,自动调节、连锁保护和参数定值等内容由高玉祥编写,机组的启、停和运行维护等内容由杨成民和张玉江编写。本书由杨成民主编并负责全书的统稿工作。

华能鹤岗发电有限公司运行部工程师朱长河、徐庆山、张绍楠担任本书的主审并提出了许多宝贵的意见。本书在编写过程中,得到省内外 600MW 机组运行工程技术人员诸多宝贵建议,并参考了兄弟院校和北京同方电子科技有限公司的诸多文献和资料,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2009 年 12 月

目 录

前言

第一章 机组概述	1
第一节 锅炉主要设备参数.....	1
第二节 汽轮机主要参数.....	3
第三节 发电机主要参数.....	5
第二章 锅炉系统	7
第一节 超临界压力锅炉的整体布置与工作原理.....	7
第二节 超临界压力锅炉的汽水系统.....	9
第三节 风烟系统	18
第四节 制粉系统	23
第五节 燃烧系统	26
第六节 锅炉安全保护系统	30
第七节 炉膛安全监控系统	34
第三章 汽轮机系统	36
第一节 主、再热蒸汽及旁路系统	36
第二节 回热抽汽系统	41
第三节 凝结水系统	44
第四节 给水除氧系统	50
第五节 凝汽器抽真空及其连接管道系统	54
第六节 循环冷却水系统	57
第七节 辅助蒸汽系统	61
第八节 轴封蒸汽系统	63
第九节 润滑油系统	66
第十节 高压抗燃油系统	70
第十一节 机械超速遮断系统	78
第十二节 汽轮机安全监视系统	79
第十三节 发电机冷却系统	81
第四章 电气系统	88
第一节 电气主接线	88
第二节 发电机	89
第三节 励磁系统	96
第四节 厂用电系统.....	101
第五节 变压器.....	113
第六节 发电机—变压器组保护.....	118

第五章 机组的冷态启动	121
第一节 设备送电	121
第二节 辅助系统的投入	138
第三节 点火前的准备	151
第四节 点火、升温、升压	159
第五节 汽轮机冲转	165
第六节 并网	169
第七节 并网后的操作（升负荷）	174
第六章 主要辅机运行	180
第一节 制粉系统的运行	180
第二节 汽动给水泵运行	186
第七章 机组运行维护	190
第一节 机组控制方式	190
第二节 运行参数的监视与调整	192
第三节 正常维护、试验	197
第四节 机组启动、运行限制值	203
第八章 机组的滑停	204
第一节 滑参数停运	204
第二节 滑参数停运及停运后的注意事项	208
第九章 事故处理	210
第一节 锅炉事故处理	210
第二节 汽轮机事故处理	227
第三节 电气事故处理	245
第十章 仿真机组参数定值	259
第一节 锅炉各系统参数定值	259
第二节 汽轮机各系统参数定值	263
附录	271
附表 1 冷态启动机组主蒸汽压力、温度与负荷对应关系	271
附表 2 蒸汽压力与饱和温度对照	273
参考文献	274

第一章 机 组 概 述

本仿真机组的仿真对象为国产 600MW 超临界压力火电机组，仿真程度为火电机组运行的全过程。仿真对象的锅炉由东方锅炉厂生产，汽轮机、发电机分别由上海汽轮机厂和上海电机厂制造，控制系统由 ABB 集团公司配套。

第一节 锅炉主要设备参数

一、锅炉概述

机组锅炉为东方锅炉厂引进技术制造的国产超临界参数、变压、直流、本生型锅炉，型号为 DG1900/25.4-II 1 型。锅炉为单炉膛，一次中间再热，尾部双烟道，固态排渣，全钢结构架，全悬吊结构，平衡通风，露天布置，采用内置式启动分离系统的直流炉。

锅炉设计燃用混煤（贫煤与烟煤），发热量 $Q_{\text{net,ar}}=22\,570\text{kJ/kg}$ 。锅炉在最大连续蒸发量（BMCR）工况下运行，燃料消耗量约为 245t/h。

过热汽温主要通过燃料和给水配比并配合一、二级减温水调整。再热汽温主要通过置于尾部烟道的调温烟气挡板调节，必要时也使用事故喷水减温调节。

机组带基本负荷并参与调峰，30%~90%额定负荷段滑压运行，其余负荷段定压运行。

采用双进双出钢球磨煤机冷一次风正压直吹式制粉系统，每台炉配置 6 套制粉系统，5 套运行 1 套备用。

采用 HT-NR3 旋流燃烧器，前后墙布置、对冲燃烧。在炉膛前后墙各分 3 层，每层 4 只，全炉共布置 24 只燃烧器。每只燃烧器均设有小出力点火油枪，在中层各燃烧器中心设有启动油枪，用于启动和维持低负荷燃烧。在最上层燃烧器的上部布置了燃尽风喷口，防止火焰贴墙，实现充分燃烧。

机组配置两台 50%BMCR 汽动给水泵，一台 30%BMCR 容量的电动调速给水泵；配置了 30%BMCR 容量高、低压串联的汽轮机旁路系统。

锅炉设计最低不投油稳燃负荷不大于 45%BMCR 负荷。

二、锅炉主要设备参数

1. 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

项 目 \ 负 荷	单 位	锅炉额定工况 (BRL)	锅炉最大连续蒸发量工况 (BMCR)
过热蒸汽出口流量	t/h	1810.6	1913
过热器蒸汽出口压力	MPa	25.3	25.4
过热器蒸汽出口温度	℃	571	571

续表

项 目 \ 负 荷	单 位	锅炉额定工况 (BRL)	锅炉最大连续蒸发量工况 (BMCR)
再热蒸汽流量	t/h	1493.5	1582.1
再热蒸汽进口压力	MPa	4.087	4.336
再热蒸汽出口压力	MPa	3.907	4.146
再热器蒸汽进口温度	℃	305	311
再热器蒸汽出口温度	℃	569	569
给水温度	℃	277	281
过热器一级喷水量	t/h	72.4	76.5
过热器二级喷水量	t/h	72.4	76.5
再热器喷水量	t/h	0	0
空气预热器进口一次风温	℃	28	30
空气预热器进口二次风温	℃	21	22
空气预热器出口一次风温	℃	321	325
空气预热器出口二次风温	℃	334	339
空气预热器出口烟气温度（未修正）	℃	123	127
空气预热器出口烟气温度（修正）	℃	118	122
实际燃料消耗量	t/h	234.21	245.21
锅炉计算热效率（按低位发热量）	%	93.13	92.99
炉膛出口过剩空气系数		1.14	1.14
省煤器出口过剩空气系数		1.15	1.15

2. 燃烧设备

燃烧设备规范见表 1-2。

表 1-2 燃 烧 设 备 规 范

设备名称	项 目	单 位	设计数据
启动油枪	形式		伸缩式、蒸汽雾化
	数量	层×只	2×4
	布置方式		前后墙布置
	单只油枪出力	kg/h	约 4700
	工作油压	MPa	2.06
	雾化蒸汽压力	MPa	1.04~1.33
	雾化蒸汽温度	℃	220~250
点火油枪	形式		伸缩式、机械雾化
	数量	层×只	6×4
	布置方式		前后墙布置
	单只枪出力	kg/h	约 250
	工作油压	MPa	1.08

续表

设备名称	项 目	单 位	设计数据
煤燃烧器	形式		HT-NR3 旋流燃烧器
	数量	层×只	6×4
	布置方式		前、后墙布置
	实际煤耗量	kg/s	68.1

3. 安全门参数
安全门动作参数见表 1-3。

表 1-3 安全门动作参数

安装位置	整定压力 (MPa)	回座比 (%)	温度 (℃)
高温过热器出口	30.68	4~7	571
左屏式过热器进口 1	31.56	4~7	448
左屏式过热器进口 2	31.67	4~7	448
右屏式过热器进口 1	31.46	4~7	448
右屏式过热器进口 2	31.74	4~7	448
左侧高温再热器出口	4.95	4~7	569
右侧高温再热器出口	4.91	4~7	569
左侧低温再热器进口 1	5.04	4~7	311
左侧低温再热器进口 2	5.27	4~7	311
左侧低温再热器进口 3	5.21	4~7	311
右侧低温再热器进口 1	5.25	4~7	311
右侧低温再热器进口 2	5.29	4~7	311
右侧低温再热器进口 3	5.21	4~7	311
左 PCV	27	3	571
右 PCV	27	3	571

第二节 汽轮机主要参数

一、汽轮机概述

汽轮机为上海汽轮机厂生产的超临界压力、单轴、三缸四排汽、一次中间再热、凝汽式汽轮机，型号为 N600-24.2/566/566。汽轮机具有冲动式调节级和反动式压力级的混合形式。汽轮机转子共 48 级叶轮，其中高压缸 1+11 级，中压缸 8 级，低压缸 2×2×7 级，具有 8 段不调整抽汽。主蒸汽通过汽轮机两侧的高压主汽阀—调节阀组件进入汽轮机，其中高压进汽管两根接在上缸，两根接在下缸，分别经进汽套管连接到高压缸上。

二、汽轮机主要参数

1. 汽轮机主要设计参数

汽轮机主要设计参数见表 1-4。

表 1-4 汽轮机主要设计参数

项 目	单位	额定工况	最大连续工况	高压加热器切除
功率	MW	600.2	647.3	600.2
主蒸汽流量	t/h	1810.5	1810.5	1461.5
主汽阀前蒸汽压力	MPa	24.2	24.2	24.2
主汽阀前蒸汽温度	℃	566	566	566
再热蒸汽流量	t/h	1493.4	1502.5	1433.4
再热蒸汽压力	MPa	3.845	3.873	3.767
再热蒸汽温度	℃	566	566	566
排汽压力	kPa	11.8	5.4	5.4
给水温度	℃	278.8	279.1	187.3
设计循环水温度	℃	20		
最高循环水温度	℃	33		
大轴绝对振动	mm	≤0.076		
热耗率	kJ/(kW·h)	8102	7513	7791
汽耗率	kg/(kW·h)	3.016	2.797	2.43

2. 汽轮机抽汽参数

额定工况下汽轮机各级抽汽参数见表 1-5。

表 1-5 额定工况汽轮机各级抽汽参数

抽汽点位置	抽汽压力 (MPa)	抽汽温度 (℃)	抽汽量 (t/h)
高压 10 级 (一抽)	6.336	358.2	119
高压 12 级 (二抽)	4.272	307.3	169
中压 5 级 (三抽)	1.919	454.7	66
中压 8 级 (四抽)	0.982	357.8	88
低压缸 I 2 级 (五抽)	0.402	247.9	91
低压缸 II 4 级 (六抽)	0.123	122.9	46
低压 5 级 (七抽)	0.06	85.96	63
低压 6 级 (八抽)	0.018	57.8	8

3. 轴系临界转速

汽轮机轴系临界转速及其振动值见表 1-6。

表 1-6 汽轮机轴系临界转速及其振动值

	实测值 (r/min)	设计值 (r/min)	前侧轴振动 (μm)	后侧轴振动 (μm)
高中压转子	1500~1536	1550	1x—90	2x—59
I 低压转子	1356~1430	1540 (1 阶)	3x—22	4x—17
	2166~2199	—	3x—15	4x—21

续表

	实测值 (r/min)	设计值 (r/min)	前侧轴振动 (μm)	后侧轴振动 (μm)
II 低压转子	1318~1394	1530 (1 阶)	5x—22	6x—22
	2199~2232	—	5x—34	6x—28
发电机转子	825	840 (1 阶)	7x—37	8x—31
	2166~2271	2180 (2 阶)	7y—32	8x—44
滑环短轴	2738~2898		8x—56	9x—168

第三节 发电机主要参数

一、发电机概述

600MW 发电机为上海电机厂生产的 QFSN-600-2 水—氢—氢汽轮发电机。发电机定子铁芯采用高导磁、低损耗的无取向冷轧硅钢板冲制并绝缘叠装而成，紧固成整体。发电机定子共设 42 槽，每槽设上、下两层线棒，绕组由空实心铜线由 1:2 的比例交叉组成线棒。为保证氢气的冷却并防止氢气外漏，在两端各设有两组氢气冷却器和一个双流双环式密封瓦。发电机励磁系统采用静态自并励方式：发电机出口励磁变压器经励磁功率柜整流调节后由磁场开关通过发电机集流器送入发电机转子。励磁调节器为双自动通道加双手动通道。励磁功率柜按 $n-1$ 方式配置，共设 5 柜。定子线圈采用水内冷，定子铁芯及定子端部采用氢外冷，转子采用氢内冷。

二、发电机主要参数

发电机主要参数见表 1-7。

表 1-7

发电机主要参数

项 目	单位	设计数据
形式		三相交流隐极式同步发电机
型号		QFSN-600-2
冷却方式		水—氢—氢
额定容量	MV·A	667
功率 (最大连续/额定)	MW	680/600
额定功率因数		0.9 (滞后)
额定定子电压	kV	20
定子电流 (最大功率/额定)	A	19 245
额定励磁电压 (计算值)	V	407
额定励磁电流 (计算值)	A	4145
空载励磁电压	V	139
空载励磁电流	A	1480
额定效率 (计算值)	%	98.85
额定频率	Hz	50

续表

项 目	单位	设计数据
额定转速	r/min	3000
定子绕组连接方式		YY
绝缘等级		F 级
定子槽数		42
转子槽数		32
短路比		0.54
发电机负序承载能力	%	I_2 (最大稳态值) : 10
	s	$I_2^2 \cdot t$ (最大暂态值) : 10
定子绕组每相对地电容 C_{ph}	μF	0.213
转子绕组电感 L	H	0.701
发电机飞轮力矩	$kg \cdot m^2$	38 000
发电机临界转速 (一阶/二阶)	r/min	760/2120
定子绕组每相直流电阻 (75℃)	Ω	1.51×10^{-3}
转子绕组直流电阻 (75℃)	Ω	0.0936
直轴同步电抗 X_d	%	215.5
直轴瞬变电抗 X_d' (非饱和值/饱和值)	%	30.1/26.5
直轴超瞬变电抗 X_d'' (非饱和值/饱和值)	%	22.3/20.5
交轴同步电抗 X_q	%	210
交轴瞬变电抗 X_q' (非饱和值/饱和值)	%	44.8/26.5
交轴超瞬变电抗 X_q'' (非饱和值/饱和值)	%	21.8/20.1
零序电抗 X_0 (非饱和值/饱和值)	%	10.1/9.59
负序电抗 X_2 (非饱和值/饱和值)	%	22.1/20.3
定子绕组出水温度	℃	85
定子绕组层间温度	℃	90
定子铁芯温度	℃	120
定子端部结构件温度	℃	120
发电机总质量	kg	490×10^3
制造厂家		上海汽轮发电机有限责任公司

第二章 锅 炉 系 统

第一节 超临界压力锅炉的整体布置与工作原理

仿真对象机组锅炉为东方锅炉厂生产的 DG1900/25.4-Ⅱ1 型国产 600MW 超临界参数变压直流本生型锅炉。该锅炉为一次中间再热,用减温水调节过热汽温,用烟道挡板调节再热汽温,单炉膛双尾部烟道,燃烧器前后墙布置对冲燃烧,固态排渣,全悬吊结构,平衡通风,露天布置的直流锅炉。设计燃用山西省晋城贫煤与河南省平顶山烟煤的混煤。

一、超临界压力锅炉的整体布置

超临界压力直流锅炉本体布置见图 2-1 (彩图见图 5-126)。

锅炉采用 Π 型布置。 Π 型布置是普遍采用的传统方式,烟气由炉膛经水平烟道进入尾部烟道,在尾部烟道通过各受热面后排出。其主要优点是锅炉高度相对较低,尾部烟道烟气向下流动有自生吹灰作用,各受热面易于布置成逆流形式,对传热有利等。

锅炉的水循环系统由启动分离器、储水罐、下降管、下水连接管、水冷壁上升管及汽水连接管等组成。在负荷达到 25%BMCR 后,锅炉转直流运行,工质一次上升,完全变成蒸汽,启动分离器入口具有一定的过热度。机组带基本负荷并参与调峰,30%~90%ECR 负荷段滑压运行,其余负荷段定压运行。

省煤器布置在尾部后竖井水平低温过热器的下方,单烟道布置。

炉膛水冷壁分上下两部分。其中,下部水冷壁采用全焊接的螺旋上升膜式管屏,上部水冷壁采用全焊接的垂直上升膜式管屏,下部螺旋围绕水冷壁与上部垂直上升水冷壁之间采用中间混合联箱进行过渡。螺旋水冷壁管采用了内螺纹管结构,整体膜式结构保证了炉膛的严密性。由于管子以相同方式绕过炉膛,吸热均匀,所以水冷壁出口处的工质温度和金属温度也非常均匀,这为机组调峰时的安全可靠运行提供了保证。

过热器及再热器受热面采用了辐射—对流联合布置,这种布置方式可确保锅炉在允许的最低运行负荷下也可达到额定的蒸汽参数,并获得良好的汽温特性。过热器主要由布置在尾部竖井后烟道内的卧式对流低温过热器和布置在炉膛上部的屏式过热器及末级过热器等组成。再热器由布置在尾部竖井前烟道的卧式对流低温再热器及位于末级过热器后的高温再热器组成。过热汽温采用二级喷水减温调节;再热汽温通过尾部双烟道平行烟气挡板调节,必要时也使用事故喷水减温调节。

省煤器、卧式低温过热器和卧式低温再热器均悬吊到炉顶大板梁上,利用包墙系统引出部分管作为他们的悬吊管。

燃烧系统采用旋流燃烧器,前后墙布置、对冲燃烧;每面墙 3 层,每层 4 只燃烧器,每只燃烧器都配备有一阀双枪控制的小出力点火油枪,前、后墙中层各燃烧器中心还配置有大出力的启动油枪;在 3 层燃烧器上方,前、后墙各布置了一层燃尽风口,以实现分阶段按需送风、合理组织炉内气流结构、防止火焰贴墙、达到充分燃烧的目的。

锅炉设计最低不投油稳燃负荷:不大于 45%BMCR 负荷。

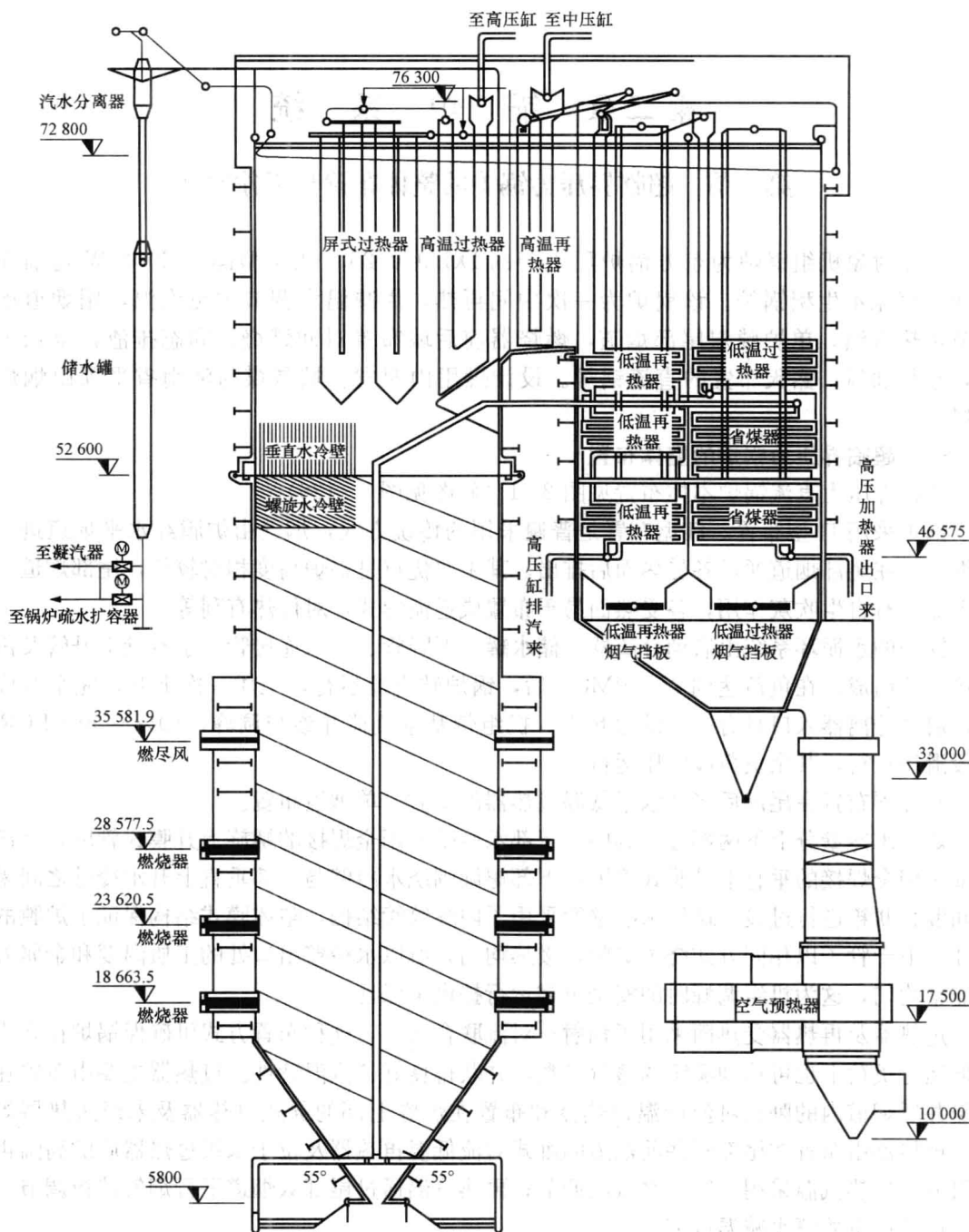


图 2-1 超临界压力直流锅炉本体布置示意

二、超临界压力锅炉工作原理

依靠给水泵的压头将锅炉给水一次通过各受热面预热、蒸发、过热而变成蒸汽的锅炉称为直流锅炉，超临界压力锅炉均为直流锅炉。直流锅炉的工作原理如图 2-2 所示。

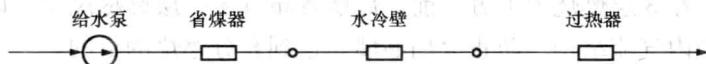


图 2-2 直流锅炉的工作原理示意

在直流锅炉蒸发受热面中,工质的流动不依靠汽水密度差来推动,而是通过给水泵的压头来实现的。在锅炉转直流运行后,工质一次通过各受热面,锅炉蒸发量 D 等于给水量 G ,故一般认为直流锅炉的循环倍率 $K=G/D=1$ 。

直流锅炉没有汽包,进口工质是水,出口工质是过热蒸汽,在加热受热面和蒸发受热面间及蒸发受热面和过热受热面间无固定的分界点,在工况变化时,各受热面长度会发生变化。

沿直流锅炉各受热面流动时,工质的状态和参数的变化情况示于图 2-3。由于要克服流动阻力,工质的压力 p 沿受热面长度不断降低;由于不断吸热,工质的焓值 h 沿受热面长度不断增加;工质温度 t 在预热段由于被加热而不断上升,而在蒸发段工质吸热比例较少,由于压力不断下降,工质温度 t 在此时受压力影响较大而略有降低,在过热段工质温度又不断上升;由于体积增大,工质的比体积 v 沿受热面长度不断上升。

三、超临界压力锅炉的特点

水的临界状态点的参数为 22.115MPa、374.15℃。当锅炉的设计压力等于或超过临界压力时,由于蒸汽的密度与水的密度一样,不能靠工质的汽水密度差进行自然循环,只能采用直流锅炉,因此超临界压力机组均为直流锅炉。

直流锅炉与自然循环锅炉相比,直流锅炉的省煤器、过热器、再热器、空气预热器及燃烧器等与其相似。所不同的是直流锅炉没有汽包,在锅炉的蒸发受热面和过热器之间没有用于汽水分离的容器,工质在给水压头的作用下一次通过各受热面而完全变成蒸汽,各受热面之间无固定的分界点,并且随着锅炉负荷和工况的变动而变动。

直流锅炉没有汽包,不能进行锅内水处理,给水带来的盐分除一部分被蒸汽带走外,其余将沉积在受热面上影响传热,且这些盐分只有停炉清洗时才能除去,因此直流锅炉对给水的品质要求较高。为了确保受热面的安全和较高的蒸汽品质,在凝汽器和低压加热器之间,设有精处理装置,对凝结水进行 100% 的除盐处理。

直流锅炉由于无汽包且蒸发受热面管径小,使得直流锅炉的蓄热能力较低。当负荷发生变化时,直流锅炉必须同时调节给水量和燃料量,以保证物质平衡和能量平衡,才能稳定汽压和汽温,适应负荷的变化。所以直流锅炉对燃料量和给水量自动控制系统要求很高。

同时,还是由于直流锅炉没有汽包且蒸发受热面管径小,直流锅炉通常可节省 20%~30% 的钢材。但由于采用小直径蒸发管后流动阻力增加,给水泵电耗增加,因此直流锅炉的耗电量比自然循环锅炉要大。

由于直流锅炉没有汽包,加热和冷却较快,因此直流锅炉启停速度较快。

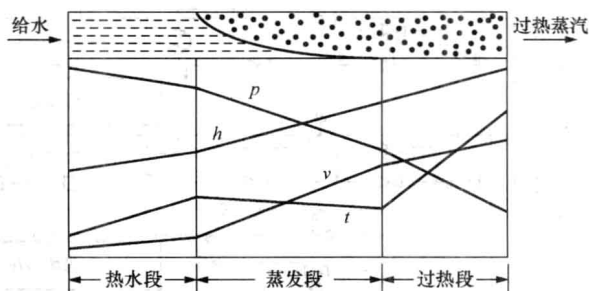


图 2-3 直流锅炉工质状态和参数变化

第二节 超临界压力锅炉的汽水系统

锅炉汽水系统由给水系统、水冷壁系统、锅炉启动系统、361 阀暖管系统、过热蒸汽系统、再热蒸汽系统,疏水、排气及充氮系统和超压保护阀等组成。各系统和设备的安装位置及汽水系统的工作流程见图 2-1 和图 2-4。

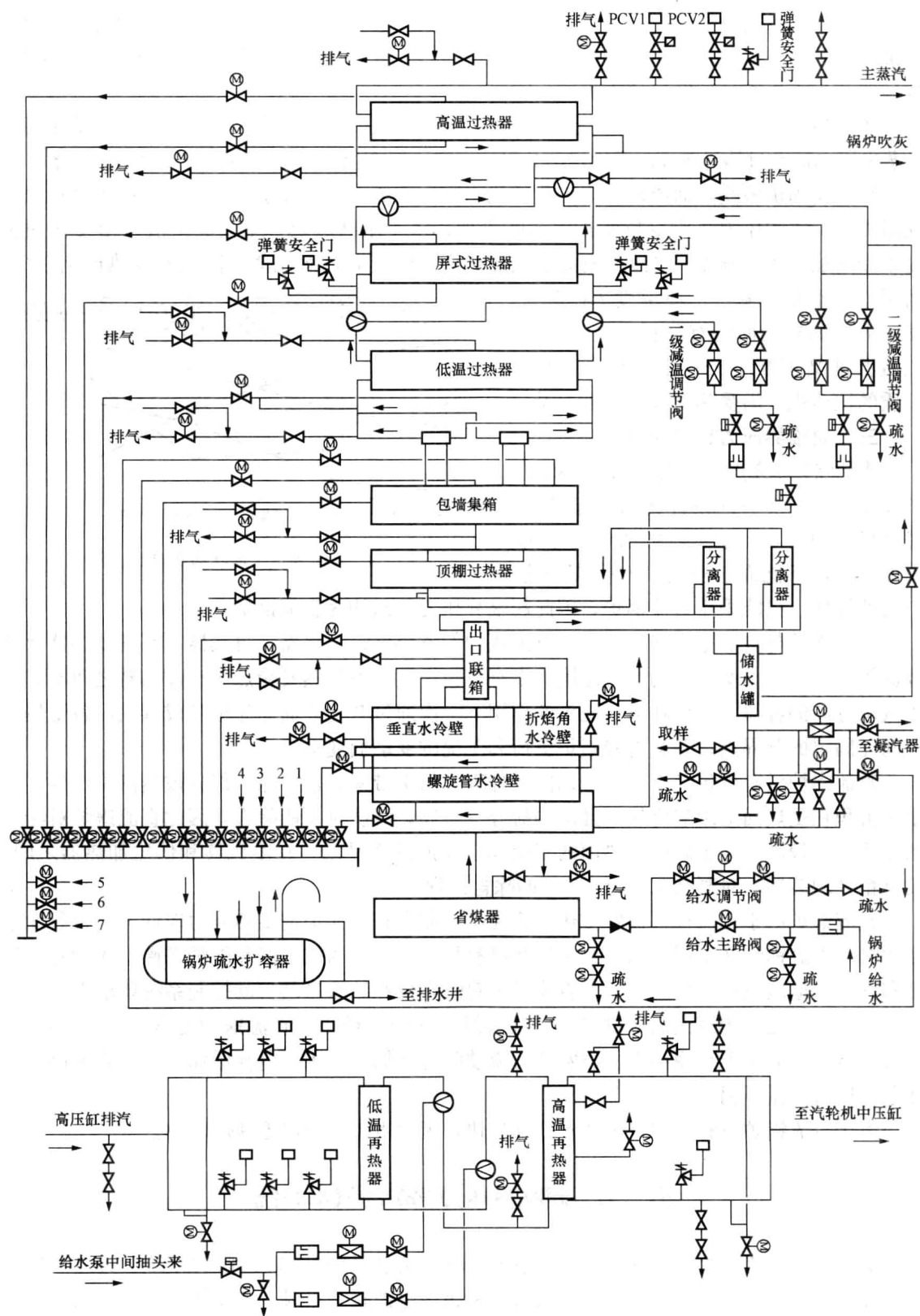


图 2-4 超临界压力锅炉汽水系统原理