

# 超超临界

# 火电机组运行

吴少伟 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

# 超超临界 火电机组运行

---

吴少伟 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书介绍了超超临界机组主要设备及系统,详细介绍了超超临界机组自动控制技术,对超超临界机组的启动、停运、运行调整、运行异常及事故进行了较为详细的阐述,具有内容全面、针对性和实用性强的特点。

本书适用于电厂新进毕业生、转岗运行人员和在岗运行人员的培训,也可供电厂技术人员、大专院校相关专业师生参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

超超临界火电机组运行 / 吴少伟主编. —北京: 中国电力出版社, 2012. 7

ISBN 978 - 7 - 5123 - 3331 - 4

I. ①超… II. ①吴… III. ①火力发电 - 发电机组 - 电力系统运行 IV. ①TM621. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 169918 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](http://www.cepp.sgcc.com.cn))

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2012 年 11 月第一版 2012 年 11 月北京第一次印刷

889 毫米×1194 毫米 16 开本 16.5 印张 479 千字

印数 0001—3000 册 定价 59.00 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

## 编 委 会

主编 吴少伟

参编 胡建忠 王崇如 王如良 杜劲松

严仕军 陈映琼

主审 楼丽达 黄红艳 钱小莹





# 前 言

大容量、高参数火电机组在火电装机总容量中所占比例持续增加，特别是近两年，我国明显加快了百万千瓦级超超临界火电机组的建设步伐，60万kW及100万kW超临界、超超临界机组正在成为火力发电的主力机型，这对火电设备的制造和运行水平都提出了更高的要求，电厂运行人员和从事相关工作的技术人员也面临知识更新和提高的过程。

为了帮助现场生产运行人员掌握超超临界火电机组的结构、系统和运行等方面的知识，浙江电力职业技术学院专业教师调研了国电北仑电厂、国华宁海电厂、华能玉环电厂、浙能嘉兴电厂、浙能乐清电厂及相关设计院、制造厂，与国电北仑电厂、国华宁海电厂专业技术人员合作编写了本书。

本书由吴少伟主编，吴少伟、胡建忠、王崇如、王如良、严仕军、陈映琼编写了第一篇、第二篇、第三篇及第五篇，杜劲松编写了第四篇。全书由吴少伟负责统稿。

本书由浙江电力职业技术学院楼丽达副教授主审了全书热动专业的内容，黄红艳副教授主审了全书热控专业的内容，钱小莹副教授主审了全书电气专业的内容。他们对本书进行了认真的审阅，提出了很多宝贵的意见和建议，在此表示诚挚的谢意。

在本书的编写过程中，参阅了相关制造厂、设计院、发电厂的技术资料，在收集资料过程中，上海汽轮机厂、国电北仑电厂、浙能嘉兴电厂、浙能乐清电厂、国华宁海电厂、华能玉环电厂给予了大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限，疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2012年7月



# 目 录

前言

## 第一篇 超超临界机组设备

第一章 汽轮机设备 .....	1
第一节 汽轮机静止部分 .....	3
第二节 汽轮机转动部分 .....	17
第二章 锅炉设备 .....	19
第一节 概述 .....	19
第二节 燃烧设备及系统 .....	22
第三节 水冷壁及蒸发系统 .....	26
第四节 直流锅炉启动系统 .....	28
第五节 过热器和再热器 .....	32
第六节 锅炉脱硝系统 .....	37
第七节 锅炉风烟系统 .....	40
第三章 电气设备 .....	43
第一节 概述 .....	43
第二节 发电机 .....	44
第三节 励磁系统 .....	48
第四节 变压器 .....	55

## 第二篇 超超临界机组启停

第四章 超超临界机组启停概述 .....	61
第一节 汽轮机启停热状态 .....	61
第二节 锅炉启停热状态 .....	64
第三节 X 准则应用 .....	65
第五章 超超临界机组启动 .....	69
第一节 机组冷态启动前的准备工作 .....	69
第二节 辅助系统投运 .....	71
第三节 锅炉点火、升温升压及汽轮机冲转前操作 .....	78
第四节 汽轮机冲转、升速及并网 .....	84

第五节	机组并列后升负荷	87
第六节	机组温态、热态启动	90
第六章	超超临界机组停运	94
第一节	机组停运分类及准备	94
第二节	机组正常停运	95
第三节	滑参数停机	98
第四节	机组停运后的保养	98

### 第三篇 超超临界机组正常运行调整和维护

第七章	汽轮机运行监视	101
第一节	汽轮机主要运行参数的监视	101
第二节	汽轮机定期试验	104
第八章	锅炉运行调整	110
第一节	超临界锅炉蒸汽参数的特性和水动力特性	110
第二节	直流锅炉调节特点	113
第三节	锅炉运行的监视和调整	115
第四节	制粉系统调整	118
第九章	电气设备运行监视和检查	121
第一节	发电机主要运行参数的监视和调整	121
第二节	其他电气设备的运行监视和检查	125

### 第四篇 超超临界机组自动控制系统

第十章	超超临界机组控制系统概述	127
第一节	超超临界机组的控制特性	127
第二节	超超临界机组控制系统的组成	129
第十一章	模拟量控制系统 (MCS)	132
第一节	协调控制	132
第二节	给水控制	141
第三节	主汽温控制	146
第四节	再热汽温控制	150
第五节	燃烧控制	152
第六节	除氧器水位及凝器热井水位控制	158
第七节	FCB 功能	160
第十二章	炉膛安全监控 FSSS 系统	161
第一节	FSSS 系统概述	161
第二节	炉膛安全系统 (FSS)	161
第三节	燃烧器管理 (BCS) 系统	165
第四节	快速减负荷 (RB) 逻辑	168
第十三章	数字电液控制系统	170
第一节	DEH 系统概述	170

第二节	DEH 系统硬件 (西门子系统)	173
第三节	DEH 系统软件	177
<b>第十四章</b>	<b>汽轮机监视仪表 TSI 系统</b>	<b>182</b>
第一节	TSI 系统概述	182
第二节	VM600 TSI 系统介绍	182
第三节	VM600 TSI 系统传感器	184
第四节	VM600 TSI 系统软件	185
<b>第十五章</b>	<b>汽轮机危急遮断系统</b>	<b>187</b>
第一节	危急遮断系统概述 (ETS)	187
第二节	1000MW ETS 保护项目	188
<b>第十六章</b>	<b>顺控系统</b>	<b>190</b>
第一节	顺控系统功能概述	190
第二节	顺控系统功能组及子组组成	190
第三节	顺控系统子组逻辑介绍	191
<b>第十七章</b>	<b>旁路控制系统</b>	<b>197</b>
第一节	旁路系统概况	197
第二节	高压旁路系统	198
第三节	低压旁路系统	202

## 第五篇 超超临界机组运行异常和事故

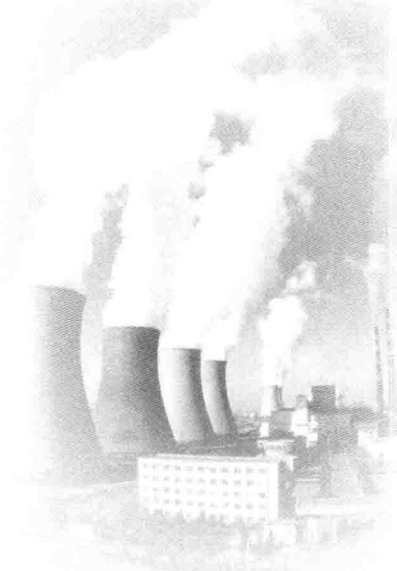
<b>第十八章</b>	<b>汽轮机运行异常和事故</b>	<b>206</b>
第一节	冷却水中断	206
第二节	润滑油压、EHC 油压下降	207
第三节	润滑油温度高、轴承金属温度高	208
第四节	凝汽器真空下降、泄漏	209
第五节	加热器、除氧器水位异常	210
第六节	轴向位移异常	211
第七节	汽轮机水冲击	211
第八节	汽轮发电机组振动大	213
第九节	汽轮机叶片损坏或断落	214
第十节	汽轮机超速	214
<b>第十九章</b>	<b>锅炉运行异常和事故</b>	<b>216</b>
第一节	炉膛压力高	216
第二节	炉膛压力低	217
第三节	锅炉排烟温度高	218
第四节	锅炉结渣、掉渣	219
第五节	NO <sub>x</sub> 排放异常	219
第六节	磨煤机着火	220
<b>第二十章</b>	<b>电气设备运行异常及事故</b>	<b>222</b>
第一节	发电机氢冷系统异常	222
第二节	发电机定子冷却水异常	224



第三节	发电机运行异常·····	226
第四节	主变压器油温度异常·····	228
<b>第二十一章</b>	<b>单元机组运行异常和事故·····</b>	<b>230</b>
第一节	锅炉 MFT、汽轮机跳闸处理 ·····	230
第二节	机组紧急停止运行·····	231
第三节	机组故障停止运行·····	233
第四节	低负荷阶段停机不停炉·····	235
第五节	重要辅机跳闸 (RB) ·····	235
第六节	机组厂用电中断·····	238
第七节	压缩空气失去·····	239
第八节	机组负荷晃动·····	239
第九节	主蒸汽参数异常·····	240
第十节	再热蒸汽参数异常·····	243
<b>附录</b>	<b>某 1000MW 机组典型控制实际逻辑图 ·····</b>	<b>246</b>
<b>参考文献</b>	·····	252



# 第一篇 超超临界机组设备



## 第一章 汽轮机设备

在材料技术发展的支持下，超临界机组正朝着更高参数的超超临界方向发展。目前我国三大汽轮机厂家（上海汽轮机厂、东方汽轮机厂、哈尔滨汽轮机厂）都已具备了生产引进技术超超临界汽轮机的能力，并均有制造 1000MW 汽轮机成功运行的业绩。这批选用 25 ~ 27MPa/600℃/600℃ 蒸汽参数，一次再热，600 ~ 1000MW 单机容量的超超临界机组，已成为今后一个时期火力发电机组发展的重点机型。上海汽轮机厂（以下简称上汽）1000MW 汽轮机纵剖图如图 1-1 所示，东方汽轮机厂（以下简称东汽）1000MW 汽轮机示意图如图 1-2 所示。

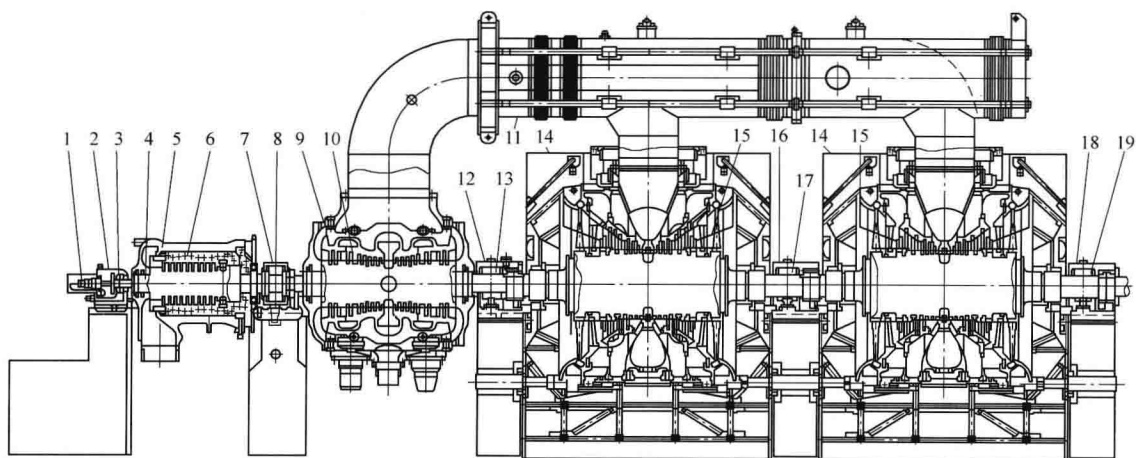


图 1-1 上汽 1000MW 汽轮机纵剖图

- 1—液压盘车装置；2—高压部分/1号轴承座；3—高压缸轴承；4—转子；5—高压部分/高压缸；
- 6—高压部分/高压叶片；7—高压部分/2号轴承座；8—径向推力联合轴承；9—中压部分/中压缸；
- 10—中压部分/中压叶片；11—中低压连接管；12—中压部分/3号轴承座；13—中压缸轴承；
- 14—低压部分/低压缸；15—低压部分/低压叶片；16—低压部分/4号轴承座；
- 17—1号低压缸轴承；18—低压部分/5号轴承座；19—2号低压缸轴承



## 第一节 汽轮机静止部分

### 一、汽缸

#### (一) 上汽 1000MW 汽轮机

##### 1. 汽轮机高压缸

高压缸为单流、双层缸，如图 1-3 和图 1-4 所示。

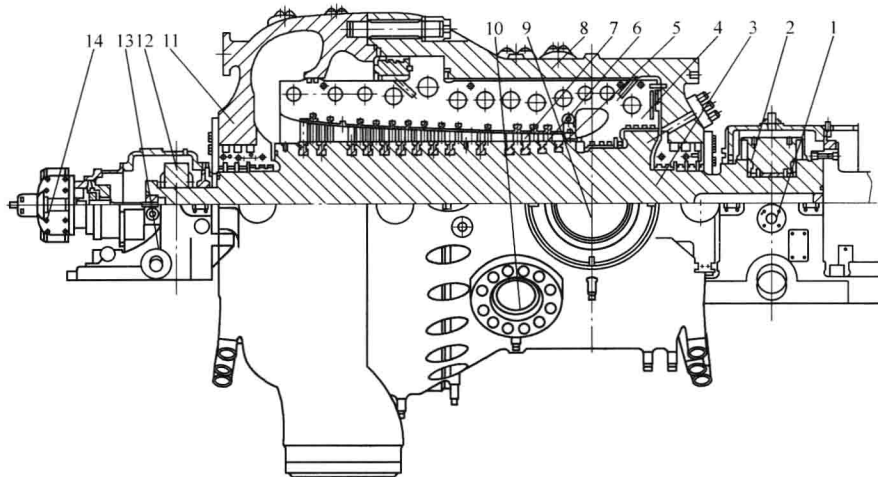


图 1-3 上汽高压缸剖视图

1—2 号轴承座；2—径向推力联合轴承；3—高压转子；4—高压内缸；5—第一级斜置静叶；  
6—高压静叶；7—高压动叶；8—高压外缸进汽段；9—高压进汽口；10—补汽阀进汽口；  
11—高压外缸排汽段；12—高压轴承；13—1 号轴承座；14—液压盘车

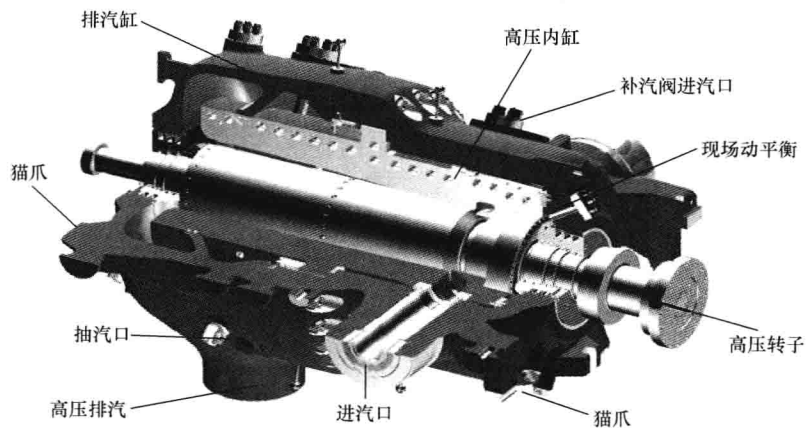


图 1-4 上汽高压缸示意图

高压外缸为桶形、轴向剖分，即由垂直中分面将外缸分为进汽和排汽两个部分，轴向结合面用螺栓连接，整个外缸周向壁厚旋转对称，且无需局部加厚，避免了非对称变形和局部热应力，圆筒结构还可大幅度降低汽缸的应力。缸体进汽端位于发电机方向，排汽端位于机头方向。高压缸排汽端下部设两个高压缸排汽口，排汽口与高压排汽管道采用焊接方式。外缸两端布置有轴封管路。高压缸设有内窥镜开口，可以在不开缸时使用内窥镜检查进汽区域的叶片和末级叶片。

机组设有两套主汽门和调节阀组件，主汽门和主调节阀为一拖一形式，共用一个阀壳布置在机组的

两侧。主调节阀通过大型螺母在机组水平中心线上和高压缸对称相连，无导汽管，如图 1-5 所示。高压蒸汽通过两个主汽门和调节阀组进入内缸，采用全周进汽方式进入第一级斜置静叶。

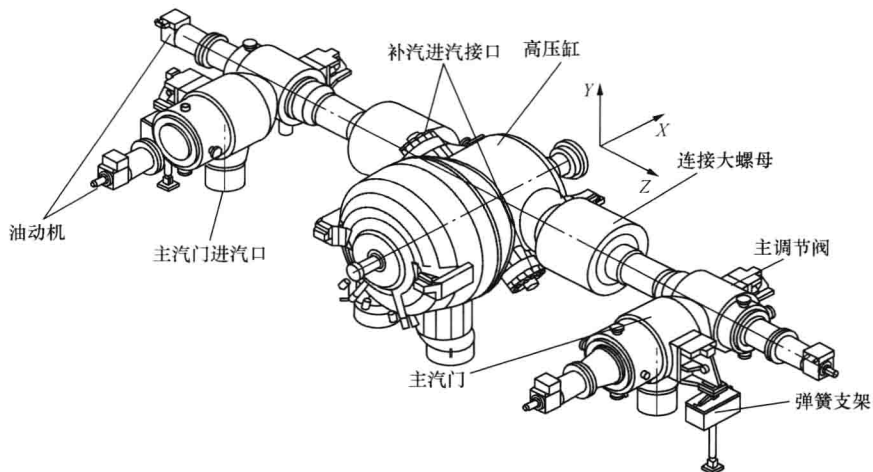


图 1-5 主汽门调节阀组与汽缸连接方式

机组在主汽门后、调节阀前各引出一路进入补汽阀，补汽阀相当于主汽门后的第三个主调阀，如图 1-6 所示。该阀门一般在最佳运行经济工况点后开启，使机组能够到达更高的负荷，同时还具有调频功能；该阀门吊装在运转层平台以下高压缸的区域，通过两根导汽管将蒸汽从主汽门后导入补汽阀内，再通过另两根导汽管将蒸汽从补汽阀后导入高压缸的相应接口上。

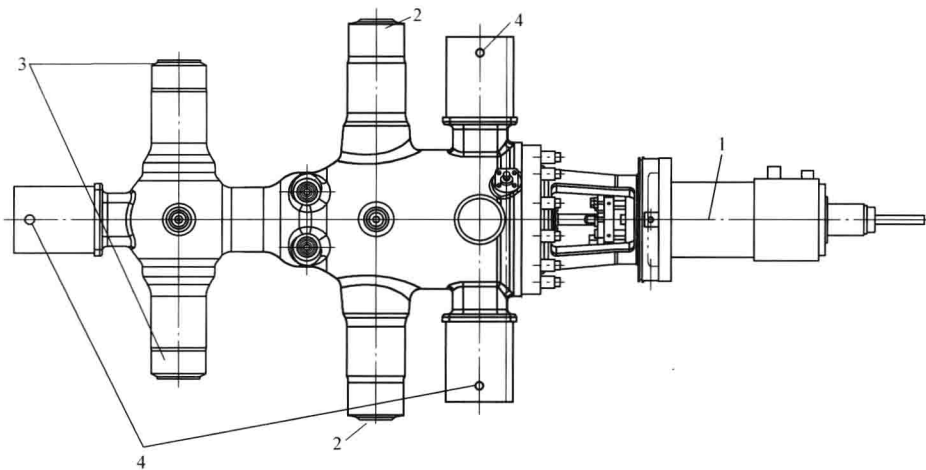


图 1-6 补汽阀

1—补汽阀油动机；2—补汽阀出汽口；3—补汽阀进汽口；4—补汽阀支吊点

补汽阀来汽在左右两侧与水平面成  $35^\circ$  对角进入高压缸的第五级动叶片后，补汽阀与高压缸采用法兰连接。补汽阀的调节方式与主调阀相同。

高压缸由前后猫爪支撑于 1 号轴承座和 2 号轴承座的转子水平中心线上，这种支撑方式确保缸体和转子在热胀过程中的对中，也确定了整个高压缸的位置和高度。在机组运行时缸体热膨胀，汽缸猫爪可以在和支撑键组成一体的滑块上水平滑动，通过安装于轴承座上的挡块压住汽缸猫爪来防止汽缸的上抬。

高压缸的横向定位由汽缸导向装置来保证，导向装置由轴承座上的定位凸台和高压外缸上的相应凹槽配合而成。汽缸导向装置的结构允许外缸凸台在键槽中的轴向移动，并通过调整安装于凸台与凹槽间的垫片保证汽缸与轴承座的精确对中。

高压内缸为垂直纵向中分面结构，静叶片直接安装于内缸内壁。高压内缸卡在高压外缸进汽端的四个凹槽内，并通过键配合与外缸保持对中。内缸由外缸支撑并可以从固定点向径向和轴向自由膨胀，并且在热膨胀的过程中，内缸仍能与转子保持对中。

## 2. 汽轮机中压缸

中压缸采用分流式和双层缸，内、外缸均以水平中分面分为上、下两半，采用法兰螺栓连接。中压缸也可在制造厂经总装后整体发运，不需要在现场重新装配，如图 1-7 和图 1-8 所示。

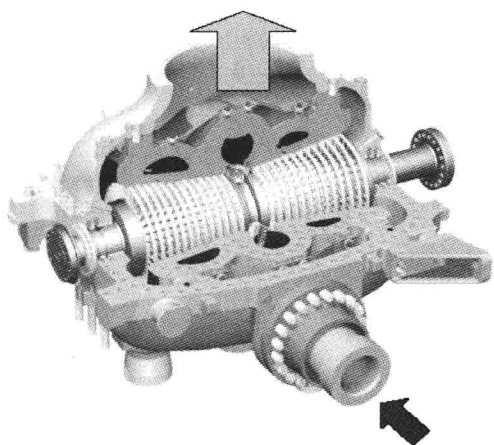


图 1-7 中压缸装配三维示意图

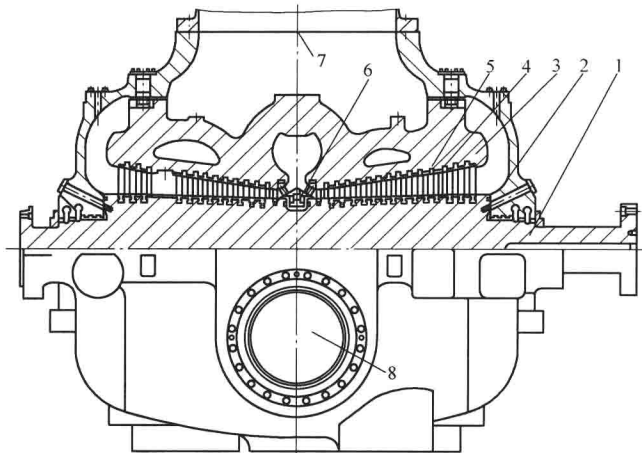


图 1-8 中压缸纵剖面图

1—中压转子；2—中压外缸；3、4—中压静叶；5—中压动叶；  
6—第一级斜置静叶；7—中压缸排汽口；8—中压缸进汽口

各级静叶直接装于内缸，蒸汽从中部通过进汽插管直接进入中压内缸，流经对称布置的双分流叶片通道至汽缸的两端，然后经内外缸夹层汇集到中压缸上半部的中压排汽口，由中低压连通管流向低压缸。因此中压缸高温部件仅局限于内缸的进汽部分。整个中压外缸处在小于  $300^{\circ}\text{C}$  的排汽温度中，压力约为  $0.6\text{MPa}$  (a)，汽缸应力较小，安全可靠性好。由于通流部分采用双分流布置，转子推力基本能够左右平衡。

中压缸有两个再热主汽门与再热调节阀的组件，分别布置在中压缸两侧。每个组件包括一个再热主汽门和一个再热调节阀，其阀壳组焊为一体，如图 1-9 所示。

再热蒸汽通过再热蒸汽进口进入再热主汽门和再热调节阀，再热调节阀通过再热进汽插管和中压缸相连，再热蒸汽通过进汽插管直接进入中压内缸。再热调节阀与中压缸间采用法兰螺栓连接，阀门采用非常简洁的弹性支架直接支撑在汽轮机基座，对汽缸附加作用力小。

## 3. 汽轮机低压缸

低压缸为双流、双层缸结构。内、外缸均由钢板拼焊而成，均以水平中分面分为上下两部分，采用中分面法兰螺栓进行连接。低压内缸中部左右侧各装有一个低压静叶持环，低压缸的前几级静叶装入静叶持环中，末两级或末级叶片直接装于低压内缸两端。低压外缸直接坐落于凝汽器上，外缸与轴承座、内缸和基础分离。

外缸和内缸之间的相对膨胀通过在内缸猫爪处的汽缸补偿器、端部汽封处的轴封补偿器以及中低压连通管处的波纹管进行补偿，如图 1-10 所示。

低压内缸通过其前后各两个猫爪，搭在前后两个轴承座上，支撑整个内缸及其内部静子部件的重量，并以推拉装置与中压外缸相连，保障汽缸间的顺推膨胀，以保证动静间隙。在低压内缸下半底部两端的中间位置处各伸出一只横向销，插入该区域从汽轮机基座上伸入的销槽内，用于限制低压内缸的横向移动，如图 1-11 所示。

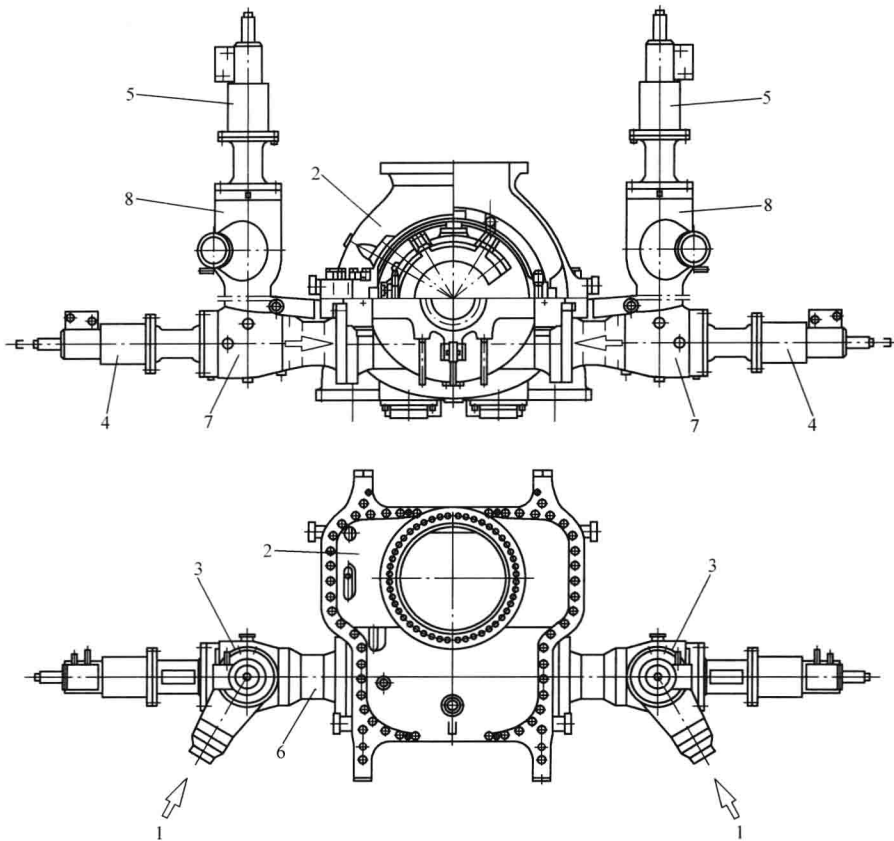


图 1-9 中压缸主汽门与调节阀组件

1—再热蒸汽进口；2—中压缸；3—再热主汽门和调节阀组件；4—再热调节阀油动机；  
5—再热主汽门油动机；6—中压进汽插管；7—再热调节阀；8—再热主汽门

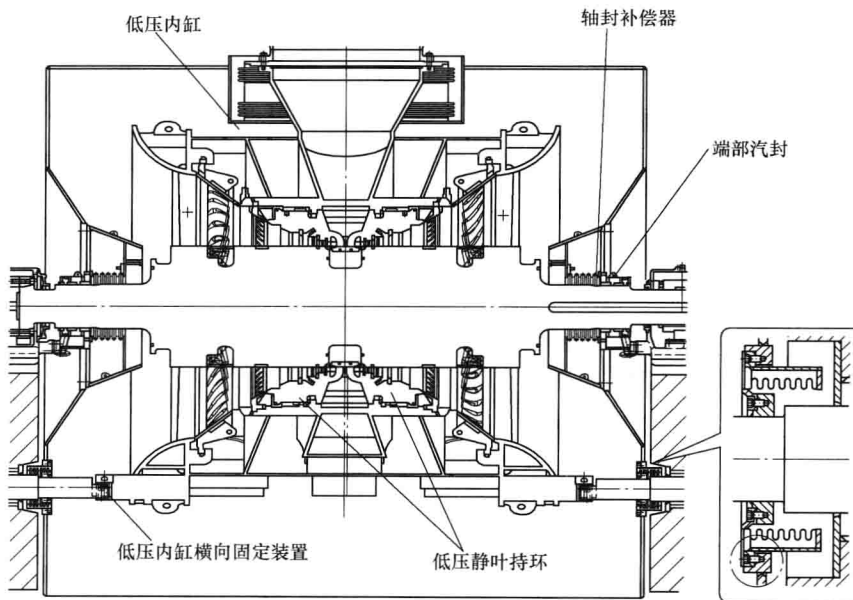


图 1-10 低压缸的各种波纹管补偿器

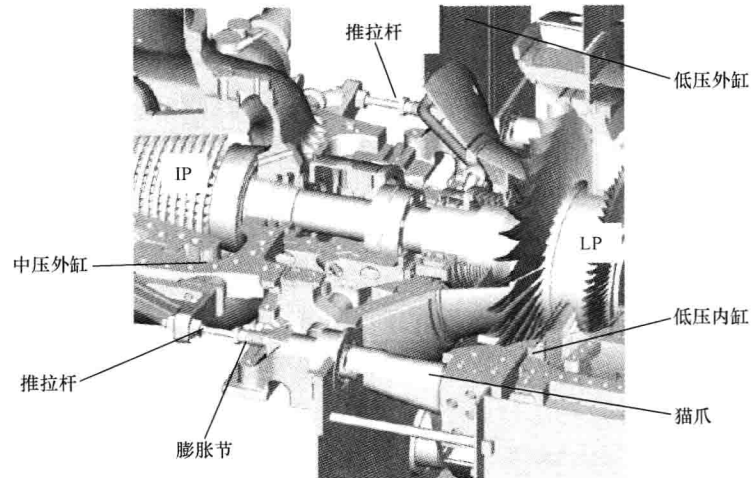


图 1-11 低压内缸支撑

## (二) 哈尔滨汽轮机厂（以下简称哈汽）1000MW 汽轮机

### 1. 汽轮机高、中压缸

高压缸为单流式，包括 1 个双向流冲动式调节级和 9 个冲动式压力级，如图 1-12 所示。高压汽缸采用双层缸结构，内缸和外缸之间的夹层只接触高压缸排汽，缸壁可设计得较薄。高压缸内缸的外壁上铸有挡汽环，以此为界将内外缸分隔成高温和低温区域。

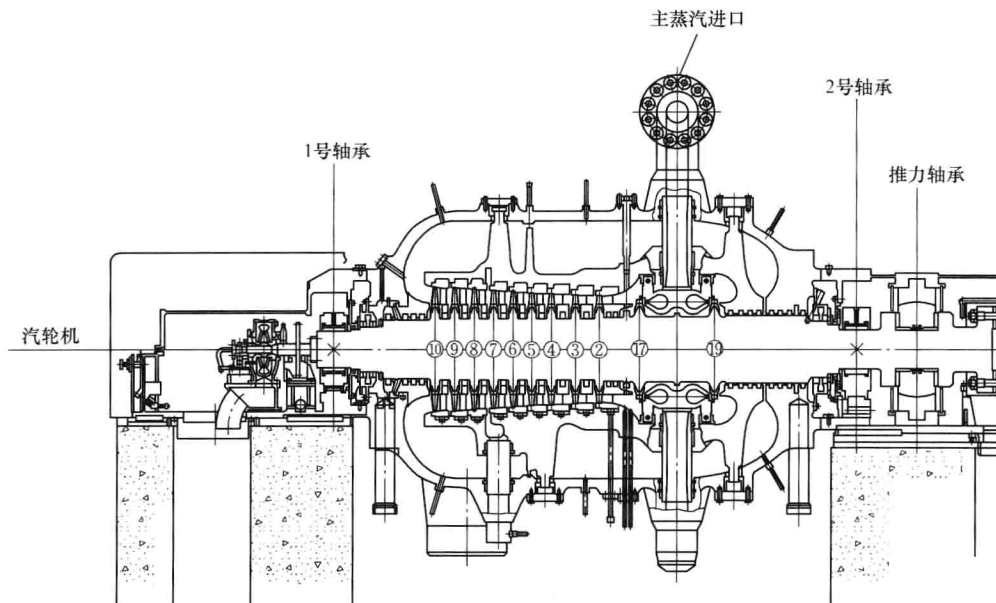


图 1-12 哈汽高压缸纵剖图

高、中压缸的外缸分别由前轴承座、中轴承座和 3 号轴承座支承。高中压缸外缸均采用上猫爪支撑形式，上猫爪与轴承座之间还有横销滑键，帮助汽缸在轴承座上横向自由膨胀。下猫爪的底部凸肩镶嵌在轴承座的凹槽内，凸肩两侧配有纵向推力键，保证高、中压缸连同前、中轴承座一起沿纵向自由膨胀，保证汽缸中心线与转子中心线一致，同时也为汽缸的横向膨胀起导向作用。

高压内缸通过支撑垫块支撑在外缸水平中分面处，并通过轴向键定位，通过支撑垫块上的调整垫片来确保内缸垂直对中的准确性。支撑垫块表面进行硬化处理来减少内缸膨胀和收缩时的相对运动产生的磨损，以确保内缸垂直对中的准确性。由上部和下部的定位键导向，使汽缸保持在汽轮机轴线上的正确



位置，同时使汽缸可根据温度的变化自由收缩和膨胀。

高压汽缸的外缸由延伸到轴承箱上的汽缸猫爪支撑，在垂直中线上通过与轴承箱固定的键进行横向定位，并通过下缸猫爪与支座间的配合键实现高、中压缸与前后轴承箱之间的膨胀传递。高、中压缸内缸的下缸均通过其外缘的四个搭子坐落在相应的外下缸上，搭子下面设有调整垫片，可以调整内外缸的同心度。另外，内缸与外缸之间还设有纵向定位键和纵向导向键，纵向定位键作为内缸的纵向相对膨胀死点，纵向导向键帮助内缸在纵向正确膨胀。

高压调节级后的腔体内，电端的设计压力要比调节端的压力略高。该设计可以强制汽流在腔室内流动，防止高温蒸汽在转子和喷嘴室之间的腔室内停滞，同时冷却高温进汽部分。

中压缸采用分流式和双层缸结构，每个流向包括 7 个冲动式压力级，如图 1-13 所示。

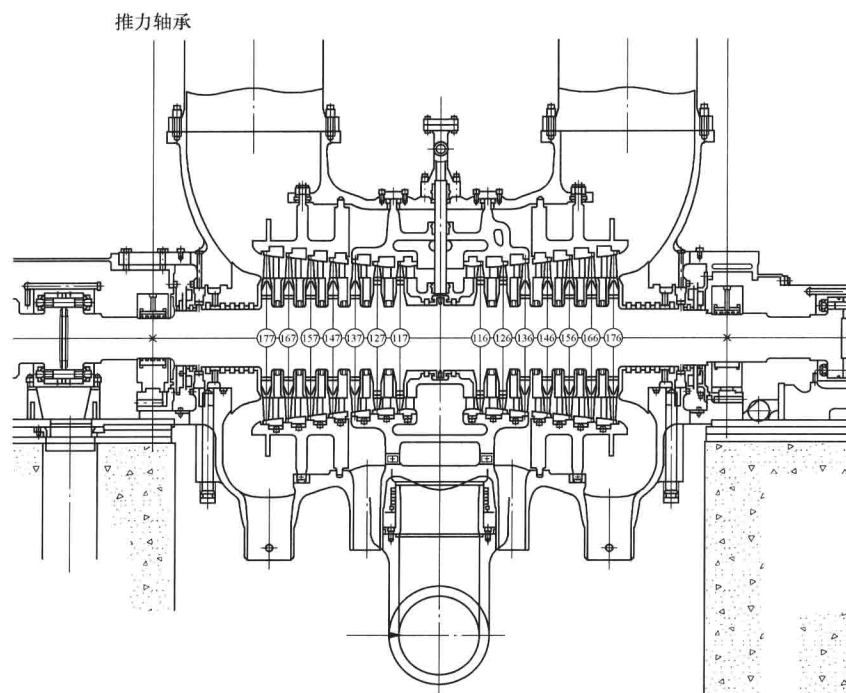


图 1-13 哈汽中压缸纵剖图

## 2. 汽轮机低压缸

两个双流低压缸结构相同，如图 1-14 所示。每个低压缸由外缸、1 号内缸和 2 号内缸组成。内缸由 4 个支撑垫块支撑固定，防止内缸沿轴向和横向移动。为了减少温度梯度，低压缸也设计成双层缸，减少了缸体绝对膨胀量。

低压排汽缸排汽通道由钢板压制而成，低压排汽口与凝汽器弹性连接。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分布在基础上。在 1 号低压缸撑脚四边通过键槽与预埋在基础内的锚固板配合形成膨胀的绝对死点。为了减少流动损失，在进、排汽处设有导流环。每个低压缸两端的汽缸盖上装有两个大气阀，其用途是当低压缸的内压超过最大设计安全压力时，自动进行危急排汽。低压缸排汽区设有喷水装置，空转或低负荷、排汽缸温度升高时按要求自动投入，降低低压缸排汽温度，保护末级叶片。

### (三) 东汽 1000MW 汽轮机

#### 1. 汽轮机高、中压缸

东汽高、中压汽缸采用双层缸结构，如图 1-15 和图 1-16 所示，内缸和外缸之间的夹层只接触高压排汽，缸壁设计得较薄，高压排汽占据内外缸空间，简化汽缸结构。