

## 第七章 压水堆核电站的二回路系统及设备

### 7.1 主蒸汽系统

主蒸汽系统将蒸汽发生器产生的新蒸汽输送到主汽轮机和其他用汽设备及系统。与主蒸汽系统直接相关的设备是：主汽轮机高压缸、汽轮机轴封系统(CET)、汽水分离再热器(MSR)、蒸汽旁路排放系统(GCT)、主给水泵汽轮机(APP)、辅助给水泵汽轮机(ASG)、除氧器(ADG)和蒸汽转换器(STR)。

三台蒸汽发生器顶部引出的三根外径为  $\square 812.8\text{mm}$  主蒸汽管，分别穿过反应堆厂房(安全壳)；进入主蒸汽隔离阀管廊，并以贯穿件作为主蒸汽管在安全壳上的锚固点。穿过主蒸汽隔离阀管廊后进入汽轮机厂房，然后合并为一根外径为  $\square 936\text{mm}$  的公共蒸汽母管，再将蒸汽引向各用汽设备和系统。如图 7.1 所示。

在主蒸汽隔离阀管廊中的每根主蒸汽管道上装有一个主蒸汽隔离阀，其下游安装了一个横向阻尼器。主蒸汽隔离阀上游的管道上装有 7 只安全阀，一个大气排放系统接头和一个向辅助给水泵汽轮机供汽的接头。大气排放系统接头和辅助给水泵汽轮机供汽接头之所以要接在主隔离阀的上游，是考虑到当二回路故障蒸汽隔离阀关闭时大气排放系统和辅助给水系统还能工作。

在主蒸汽隔离阀两侧还接有一条旁路管，其上装有一个气动隔离阀，在机组启动时平衡主蒸汽隔离阀两侧的蒸汽压力，并在主蒸汽管暖管时提供蒸汽。

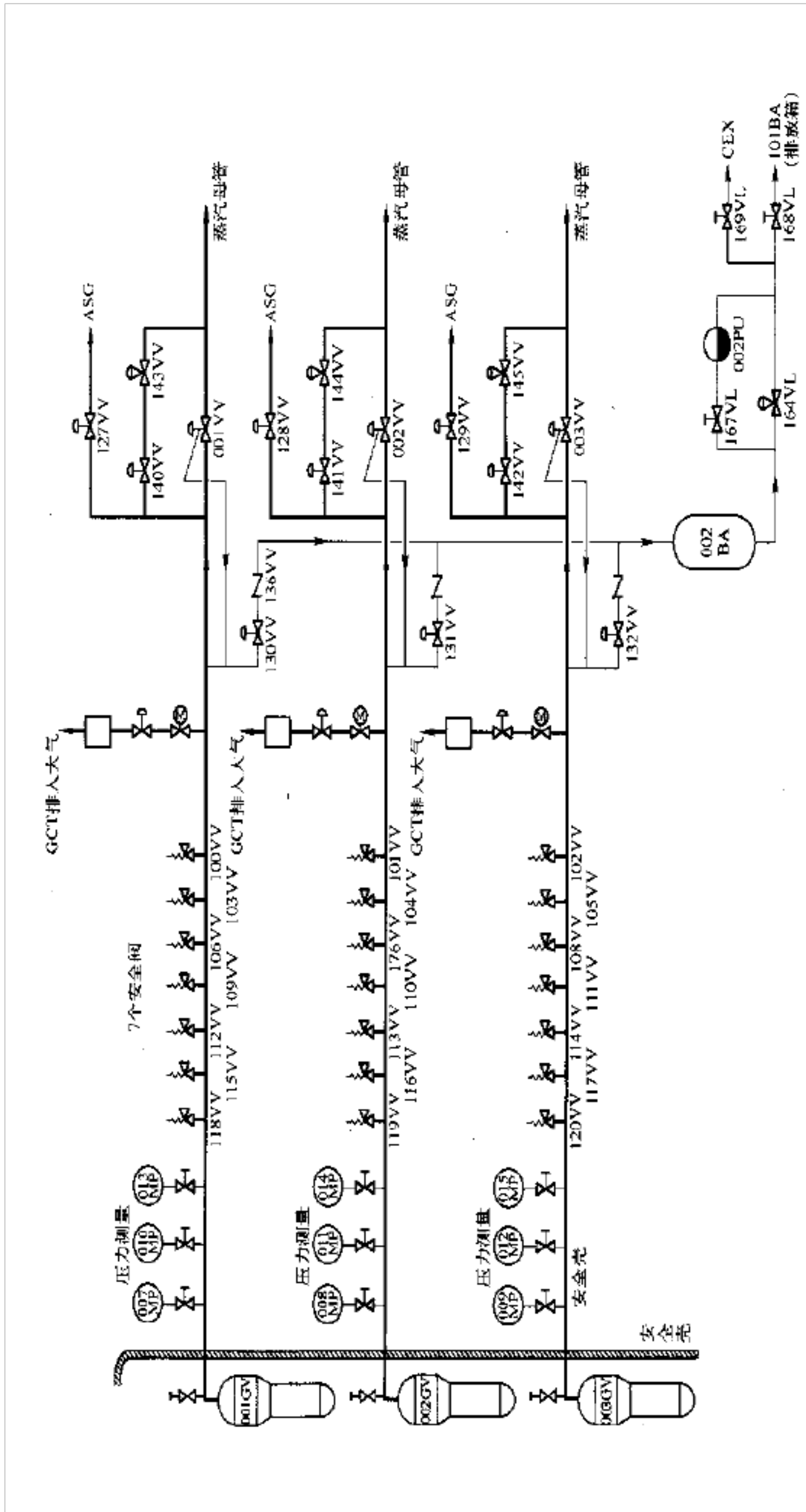
在汽轮机厂房内，从蒸汽母管上引出四根  $\square 631\text{mm}$  的管道与主汽轮机的四个主汽门相连，向汽轮机高压缸供汽。此外，从蒸汽母管两头还引出二条通往凝汽器两侧的蒸汽旁路排放总管。管上各引出 6 条通往凝汽器的蒸汽排放管，去主给水泵汽轮机、除氧器、蒸汽转换器、汽水分离再热器和轴封的供汽管。两条蒸汽排放总管由一根平衡管线连接在一起。

#### (1) 主蒸汽隔离阀

主蒸汽隔离阀为对称楔形双闸板闸阀。正常运行时全开，但在收到主蒸汽管线隔离信号后能在 5 秒内关闭。

隔离阀的执行机构是一个与氮气罐相连的液压缸。氮气进入液压缸活塞的上部，其名义压力为  $198\text{bar.a}$ 。氮气的膨胀力使隔离阀关闭。为开启阀门，设有一套气动油压泵液压系统，产生名义压力为  $329\text{bar.a}$  液压油进入液压油缸活塞的下部，克服氮气的压力和开启阻力使阀门开启，见图 7.2。快速关阀是由快速排泄液压油缸活塞下部的油液实现的。

控制分配器用于关闭主蒸汽隔离阀。它们由电磁阀操纵。当电磁阀通电时，分配器开启，将液压油缸活塞下部的液体通过常开隔离阀排出，主蒸汽隔离阀在氮气压力作用下迅速关闭。两条排油管线是冗余的，单独一条管线就足以使阀门在 5 秒内关闭。



统系汽蒸主的站电核湾亚大 1.7图

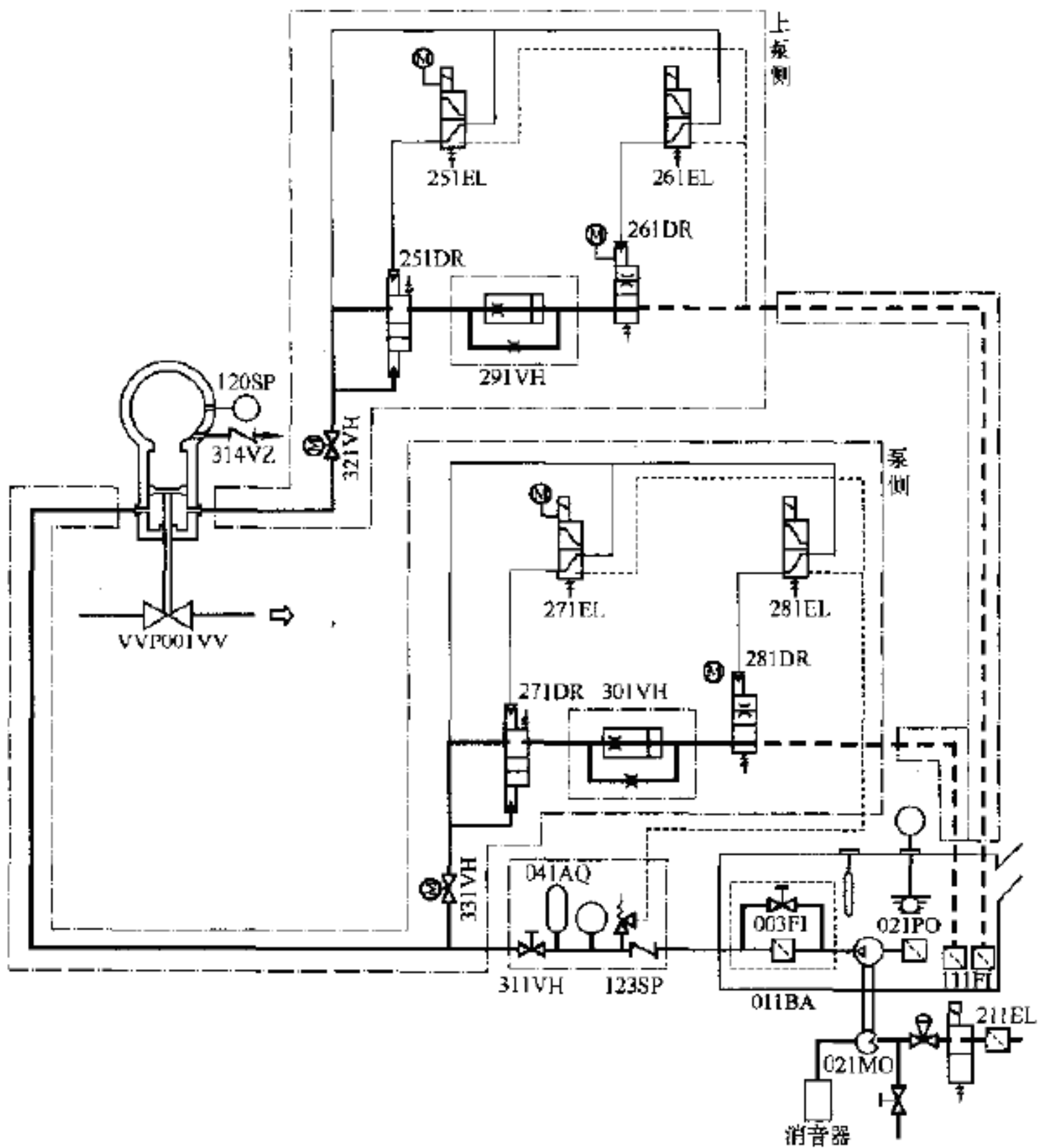


图 7.2 主蒸汽隔离阀执行机构

开启主蒸汽隔离阀时，需使电磁阀断电，从而关闭控制分配器，切断液压油缸的泄油通路，油系统压力升高是阀门开启。

### (2) 主蒸汽安全阀

主蒸汽安全阀是防止一、二回路超压的最后一道安全屏障，其功能是：

- ① 蒸汽发生器二回路侧和主蒸汽系统提供超压保护；
- ② 防止一回路超压和过热；
- ③ 限制蒸汽释放的数量和速率来防止堆芯过冷。

安全阀的总排放量一般都取额定蒸汽量的 110%。但单个安全阀的排放量，在反应堆热停堆工况下，不会引起反应堆所不允许的过冷却。安全阀通常采用多个分组设置。故每条管

线上的 7 个安全阀分为两组：

第一组为气动操作安全阀，共三只。用来限制蒸汽发生器二回路侧压力，保证不超过蒸汽发生器的设计压力 86 bar .a 。考虑到蒸汽管线的压降、阀门特性和整定误差，把这一组安全阀的整定点定为 83 bar .a 。

第二组为弹簧加载安全阀，共四只，用来限制蒸汽发生器二回路侧和主蒸汽管线中的最高压力不超过设计压力的 110% 。这一组安全阀的整定点定为 87 bar 。

### (3)主蒸汽母管

主蒸汽母管的功能是：

平衡三台蒸汽发生器二次侧的蒸汽压力，均衡汽轮机进口蒸汽压力，分配蒸汽到各有关用汽设备和集中疏水。

为使主蒸汽管束集中疏水，蒸汽管道的安装标高较低，以便主蒸汽隔离阀后管道、通往汽轮机的管道和通往蒸汽旁路排放总管的管道均能将疏水自流到主蒸汽母管。在集管上设有三个大直径的疏水器。

## 7.2 核电站汽轮机及设备

### 7.2.1 压水堆核电站汽轮机的主要特点

#### (1)新蒸汽参数在一定范围内变化

对常规火电站来说，汽轮机的新蒸汽参数( $p_0$ 、 $t_0$ )在正常运行期间是不变的(在起、停过程中的滑参数运行除外)。因此，锅炉运行人员的主要责任就是在运行过程中始终保持锅炉出口新蒸汽参数为额定值。

对压水堆核电站来说，如果仍然保持这种运行方式，则反应堆平均温度  $T_{ave}$  变化太大，如图 7.3 所示。

这种运行方式虽对常规岛有利，但给核岛带来了很大问题。

(a)由于反应堆平均温度变化，就要求一回路系统具有较大的体积补偿能力，使一回路的压力补偿问题变为更为严重。

(b)对于具有负温度系数的压水反应堆来说，在功率提升过程中要求有较大的控制棒位移，即要求有较大的反应性补偿。

这些问题给一回路设计、运行带来很大困难，因此目前基本上不采用这种运行方式。

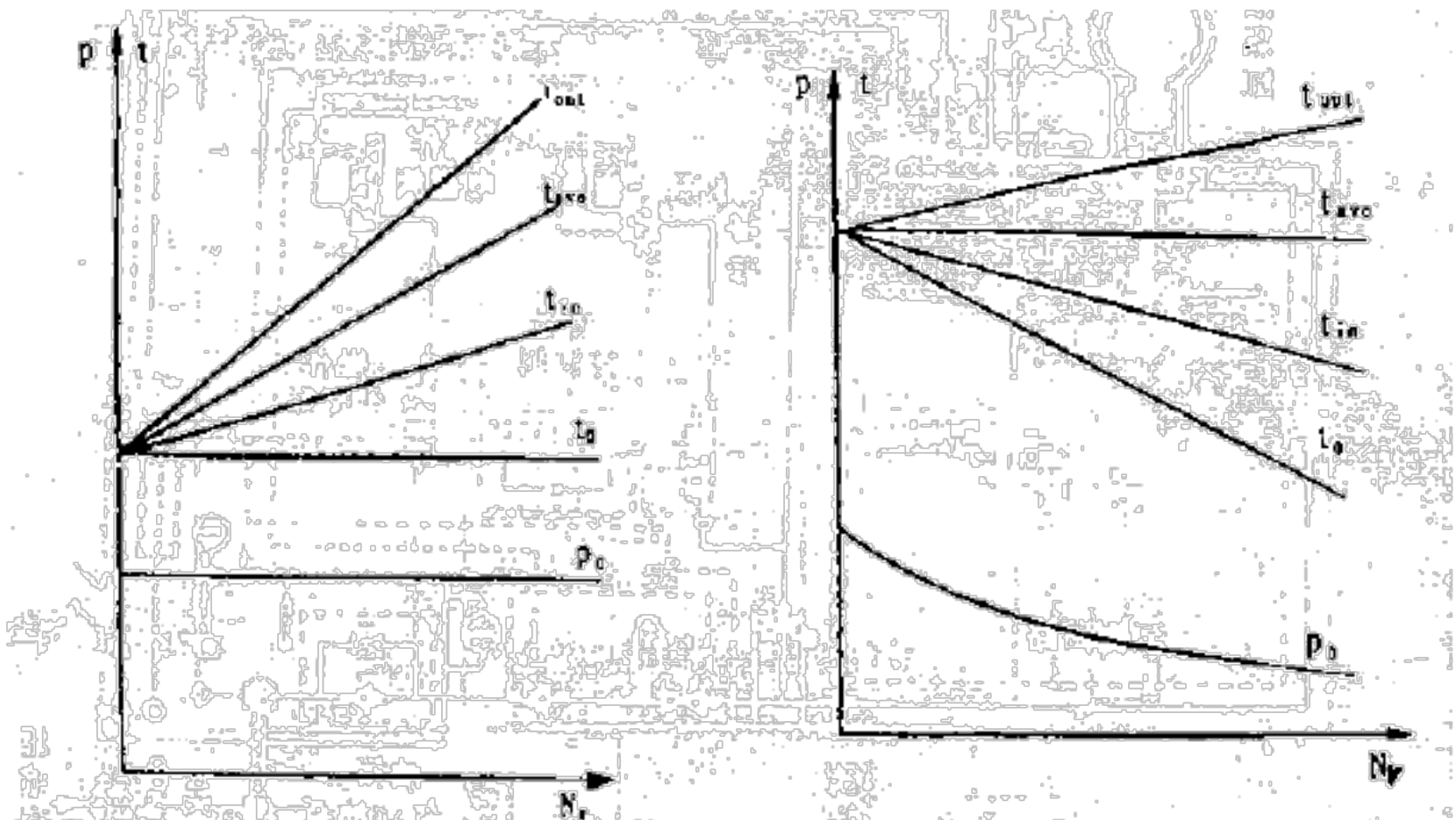


图 7.3  $t_0, p_0 = \text{常数}$  时输出功率和温度压力的关系

图 7.4  $t_{\text{ave}} = \text{常数}$  方案的温度、压力功率关系 (冷却流量不变)

对反应堆比较有利的是平均温度不变的运行方式，如图 7.4 所示。前面谈的两个问题都可很容易得到解决。但是，这种运行方式蒸汽参数变化太大，对二回路不利。

因此，压水堆核电站常采用一种折衷的运行方式，图 7.5 所示为大亚湾核电站的运行方式。这里，反应堆平均温度  $t_{\text{ave}}$  和汽轮机新蒸汽参数  $p_0, t_0$  都作了适当变化，但又都不太大。蒸汽发生器出口新蒸汽压力为零负荷时 76 bar，满负荷时 67.1 bar，对应新蒸汽温度为 291.4°C 和 283.6°C。

### (2) 新蒸汽参数低，且为饱和蒸汽

对压水堆核电站来说，二回路新蒸汽参数取决于一回路的温度，而一回温度又取决于一回路压力，提高一回压力将使得反应堆压力容器的结构及其安全保证措施变得复杂，尤其是反应堆压力容器尺寸很大时。因此，压水堆核电站汽轮机的新蒸汽压力，应按照反应堆压力容器计算的极限压力和温度来选取，一般不超过 60—73 bar 的饱和蒸汽，大亚湾核电站一回压力为 155 bar，额定工况下二回路蒸汽压力为 67.1 bar。

### (3) 理想焓降小，容积流量大：

一般饱和蒸汽汽轮机的理想焓降比高参数火电机组的理想焓降约小一半。因此，在同等功率下核电站汽轮机的容积流量比高参数火电站汽轮机约大 60~90%，这样核电站汽轮机在结构上有以下特点：

- ① 进汽机构的尺寸增大 (包括管路)；
- ② 功率大于 500~800 MW 时汽轮机的高压缸采取双分流；
- ③ 由于叶片高度达，要求采用扭叶片的级数增加，提高了制造成本；
- ④ 调节剂的叶片高度大，所以叶片中弯曲应力大，不易采用喷嘴配汽；
- ⑤ 由于低压缸通流量大，故需要增多分流数目，或采用低转速。

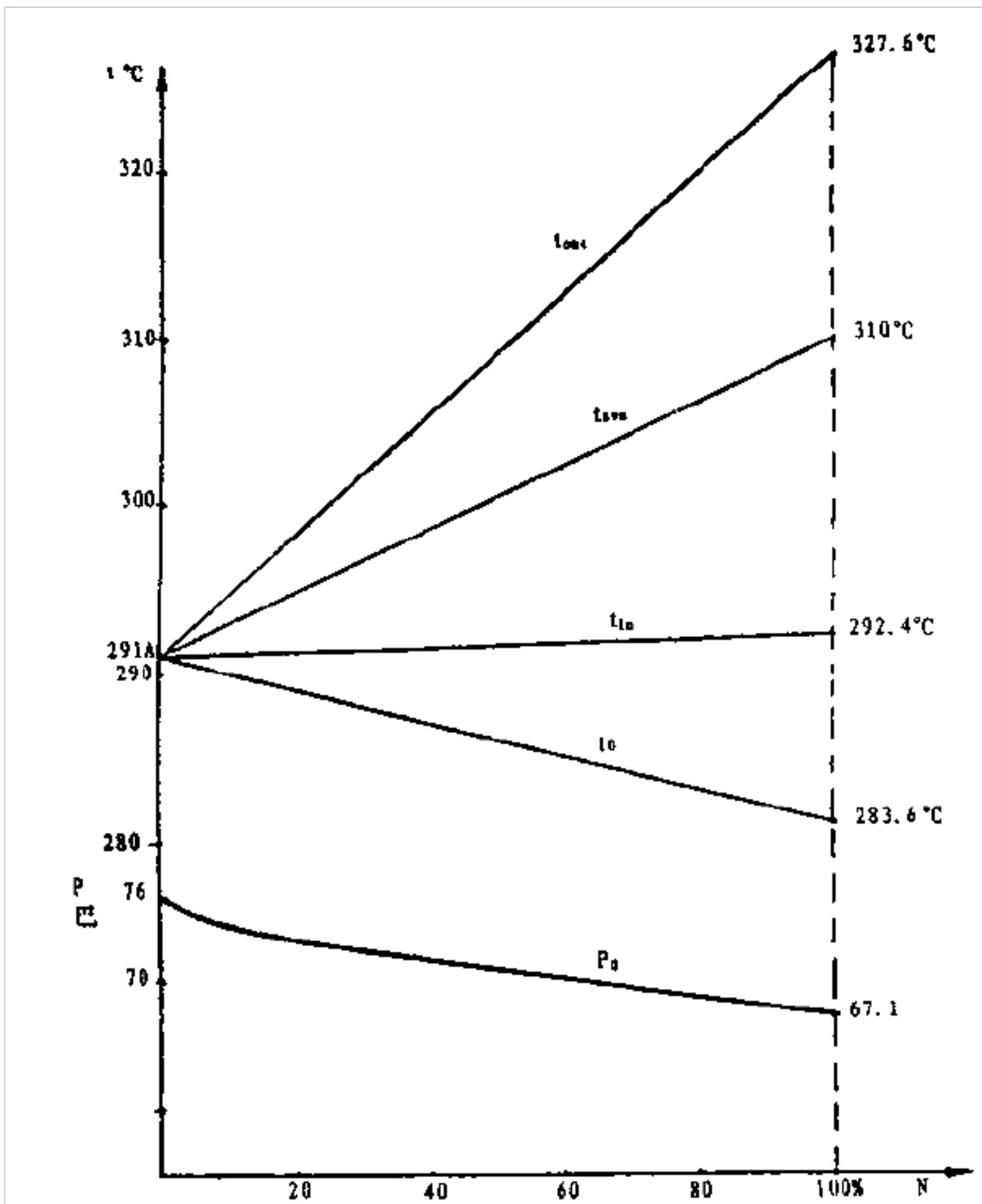


图 7.5 蒸汽发生器一、二回路参数

#### (4) 通流表面积聚水分多，更易超速

与火电站中间再热式汽轮机一样，核电站汽轮机各缸之间也有很大的蒸汽容积，在甩负荷时会使转子升速。另外，处于湿蒸汽区工作的核电站汽轮机及其汽水分离再热器的通流表面上覆盖着一层水膜，当负荷发生大幅度速降时，流道内压力突然降低，这层水膜就会闪蒸，流至汽轮机各级做功，易使汽轮机超速。计算与试验表明，由于这一原因，在甩负荷时，转速会增长 15~25%。为减少核电站汽轮机的转速飞升，可采取一下措施：

- ①在汽水分离再热器后、低压缸前的进汽管道上装设快速截止阀；
- ②提高分压缸压力，减少管道尺寸，将汽水分离器和蒸汽再热器做成一体；



汽耗率: 5.61kg/kW [h]

热耗率: 10128.7kJ/kW [h]

末级叶片高度: 945 mm

主汽门前进汽参数: 压力: 66.3bar.a

温度: 283°C

湿度: 0.48%

流量: 1532.7kg/s

高压缸入口蒸汽参数: 压力: 61.1bar.a

温度: 276.7°C

湿度: 0.61%

流量: 1532.7kg/s

高压缸出口蒸汽参数: 压力: 7.83bar.a

温度: 169.5°C

湿度: 14.2%

流量: 1274.14kg/s

低压缸入口蒸汽参数: 压力: 7.4bar.a

温度: 264.8°C

湿度: 0

流量: 1011.6kg/s

低压缸出口蒸汽参数: 压力: 0.075bar.a

温度: 40.3°C

湿度: 9.3%

排汽量: 3\*276.47=829.41kg/s

主要结构参数

	高压缸	低压缸	总计
长(m)	6.31	7.38=21.9	28.21
宽(m)	3.25	7.95	7.95
高(m)	3.98	5.72	5.72
重量(定子+转子)(吨)	160+32.5=192.5	(270+66)8=1008	1200.5



蒸汽在高压缸做完功后，由汽缸两端的8个对称排列的排汽口排出。上半缸的4个排汽口(前后流道各2个)通过法兰与汽水分离再热器的冷再热管相连。下半缸的4个(前后流道各2个)，排汽口与冷再热管为焊接结构。高压缸的排汽分别送往2个汽水分离再热器。

## (2) 低压缸

低压缸的进汽机构由6只截止阀和6只调节阀组成，每只低压缸各有2只截止阀和2只调节阀。所有截止阀和调节阀均为蝶阀。一只截止阀和一只调节阀组成一个低压蒸汽柜，安装在低压缸的进汽管上。

由2个汽水分离再热器来的再热蒸汽沿6根 1142mm 的蒸汽管道进入低压蒸汽柜的截止阀。蒸汽由调节阀出来后再沿6根  $\square 990\text{mm}$  的管道进入低压缸上部的进汽口、每个低压缸上部的2个进汽口也是通过法兰与蒸汽管连接。

低压汽缸为焊接双层缸，低压轴承座直接放在机座(或台板上)，而低压缸采用由下缸伸出的支承面支承在台板上。因此，大气压力引起外缸的任何变形不影响转子间的对中和轴承的载荷，如图7.8所示。

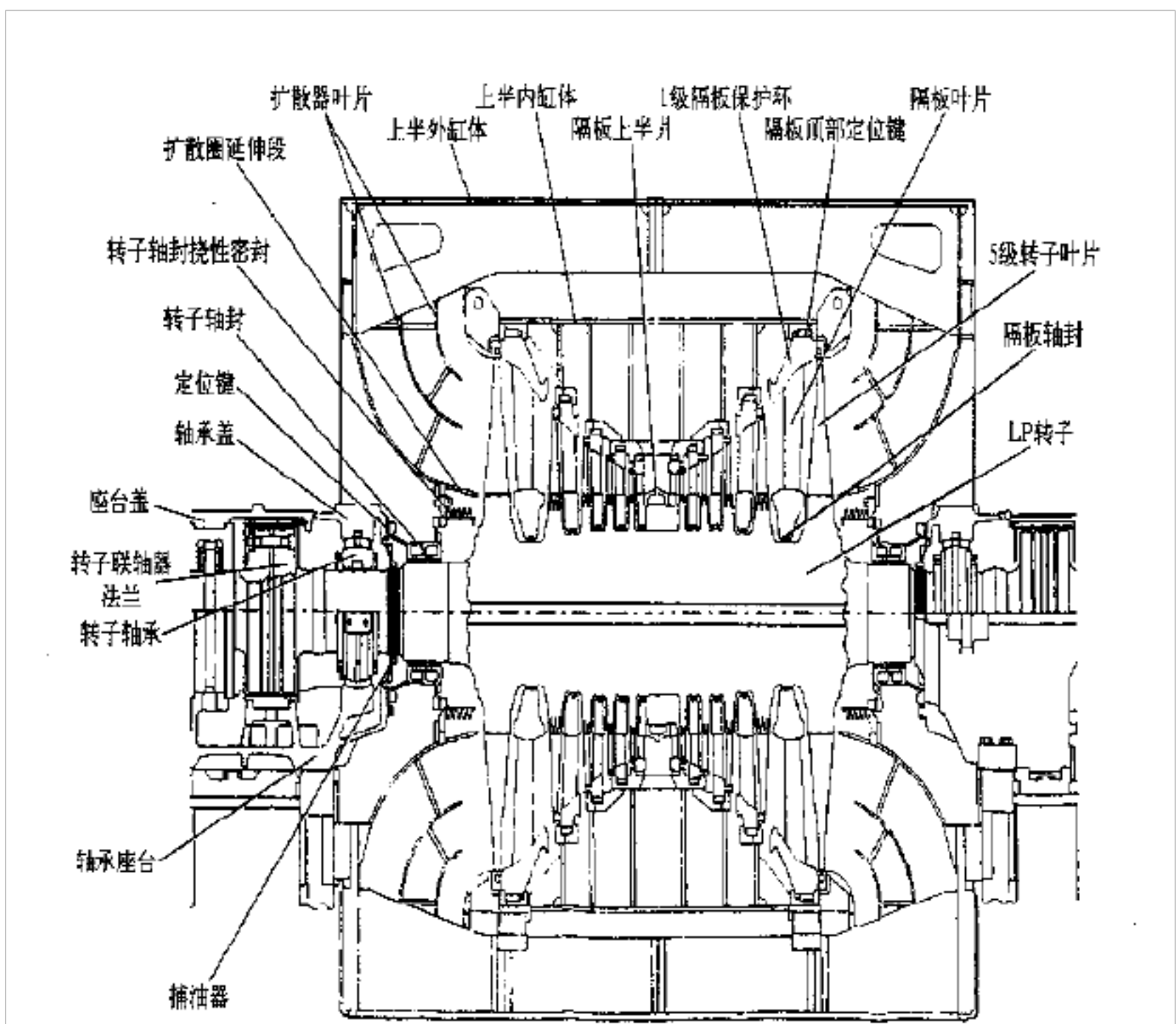


图 大亚湾核电站主汽轮机的低压缸

从而满足低压缸端部的密封要求。

由于进入低压缸的蒸汽为过热蒸汽，故第 1、2 级隔板上未设除湿沟槽，第 3、4、5 级隔板上均有除湿沟槽。

低压缸转子也为整锻式。动叶的叶根除末级为枞树型外，其余 4 级都是叉型结构。末级叶片高度为 945 mm，顶部堆焊了钨铬钴合金。

蒸汽在低压缸做完功后，沿各自两端的排汽口排入低压缸下部的凝汽器。为提高低压缸的刚度和使排气通道有合理的导流形状，减少排汽损失，低压缸的排汽口中装有导流板。

### (3)抽汽

为提高热力循环，设置了 7 级抽汽回热，高压缸 3 级(包括高压缸排汽至除氧器)，低压缸 4 级。

高压缸的 3 级抽汽，一级抽自高压缸后流道第二级后，抽汽压力为：27.57 ，称为第 1 级抽汽。另一抽自高压缸前流道第三级后，抽汽压力为：19.08bar ，称为第 2 级抽汽；第三级抽汽是高压缸排汽，至除氧器，抽汽压力为：7.83bar 。

低压缸的抽汽采用前后流道对称布置，即第 4 级抽汽在 2 号低压缸前后两个流道中的第一级后，抽汽压力为 3.863bar .a ；

第 5 级抽汽在 1 号和 3 号低压缸前后每个流道中的第二级后，抽汽压力为 2.02bar .a ；

第 6 级抽汽抽自 1、2、3 号低压缸前后每个流道中的第三级后，抽汽压力为 0.96bar .a ；

第 7 级抽汽在 1、2、3 号低压缸前后每个流道中的第四级后，抽汽压力为 0.359bar .a 。

### (4)气封

#### (1)级内汽封

高、低压缸各级的隔板及动叶顶部均设有曲径式汽封，以减少级内漏气，提高机组效率。

隔板汽封是由汽封块安装在隔板内孔槽中构成的，汽封块被弹簧压紧在内壁上，如图 7.9 所示。汽封块上镶嵌着许多汽封片。

动叶顶部的汽封是由围带和隔板的外环构成，汽封片插在外环上。外环是用螺栓固定在隔板上后与隔板整体加工而成。这样的汽封结构减少了叶顶处漏汽，并在任何可能产生的动静摩擦的情况下，只会磨去外环上的汽封片，而不至损坏叶顶。

低压缸末级叶片没有围带，但其顶部有倾斜的薄边，和隔板上的外环一起构成末级叶顶的轴向汽封。

为了防止高压蒸汽外漏，减少汽轮机内作功的蒸汽量和防止空气漏入低压部分，破坏凝汽器的真空，高、低压缸两端均设有曲径式端部汽封。

高压缸的端部汽封块并不直接安装在汽缸上，而是采用了汽封套的方式。汽封套在中分面处通过螺栓连成一个整体，安装在汽缸上。

高压缸端部气封组成三个汽封，在启动、低负荷运行及停机时，由外汽源将密封蒸汽送

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/348105024054006035>