

图1-1 东方660MW汽轮机本体结构图

一 超临界汽轮机技术特点

水蒸汽的临界参数： $p_c=22.064 \text{ MPa}$ ； $t_c=374^\circ\text{C}$

超临界与超超临界机组参数的区别：

超临界蒸汽参数： $24.2\text{MPa}/538^\circ\text{C}/538^\circ\text{C}$ （ $566/566^\circ\text{C}$ ）

超超临界蒸汽参数：

日本 - 主蒸汽和再热蒸汽温度提高到 593°C 或 600°C ；

欧洲 - 蒸汽参数提高到 28MPa 和 580°C ；

中国 - 主汽压为 $25\text{MPa}\sim 28\text{MPa}$ ，主蒸汽和再热蒸汽温度为 $580^\circ\text{C}\sim 600^\circ\text{C}$ 。

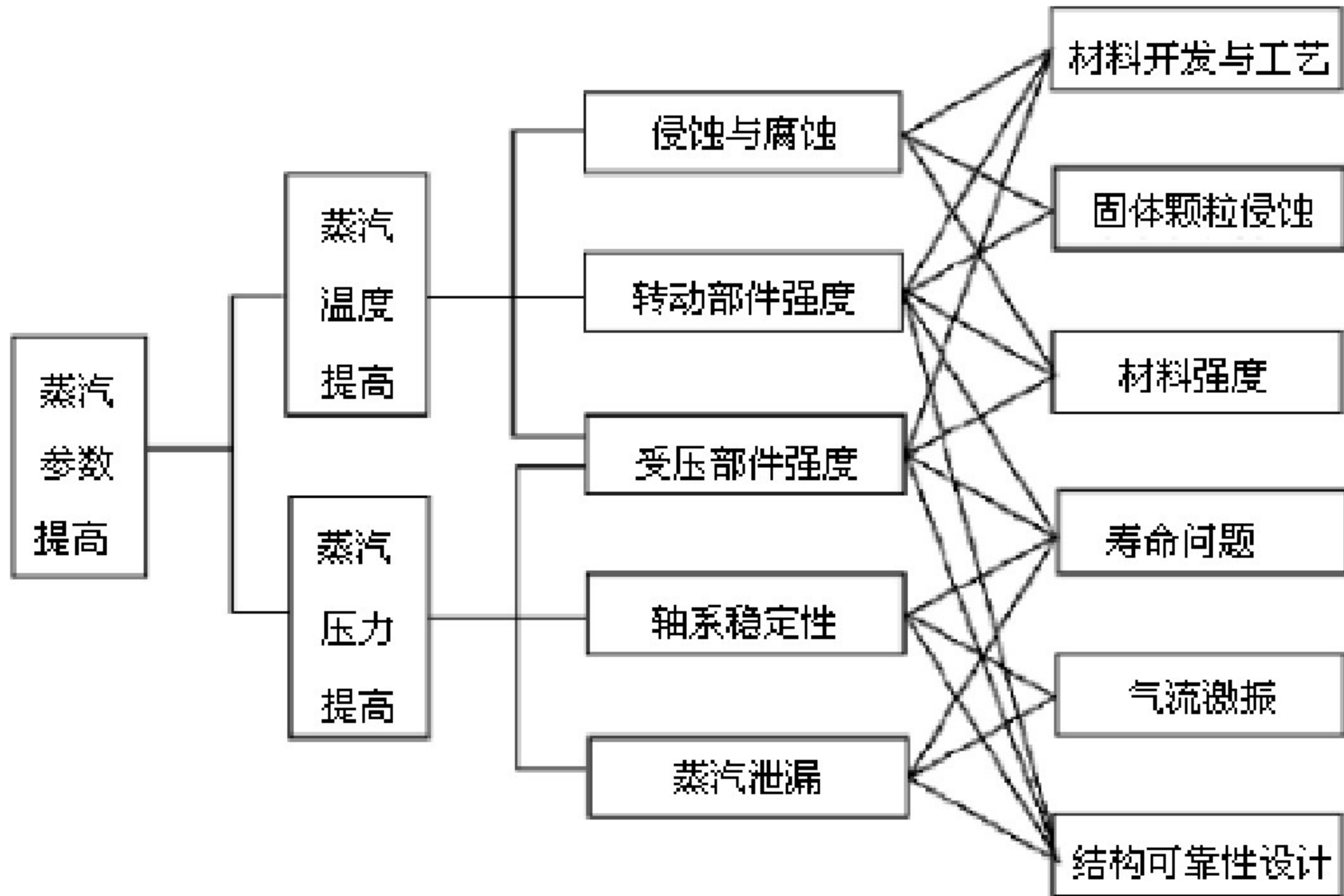
在蒸汽参数超临界的条件下，提高汽温比提高汽压具有更高的经济性和可靠性。

欧共体制定了“THERMIE AD 700”先进燃煤火电机组的发展计划，联合开发 $37.5\text{MPa} / 700 / 700^\circ\text{C}$ 的超超临界火电机组，其效率达 $52\text{-}55\%$ 。重点是高温镍基合金的研发，解决高温强度、高温腐蚀、高温氧化难题。

超临界机组的经济性

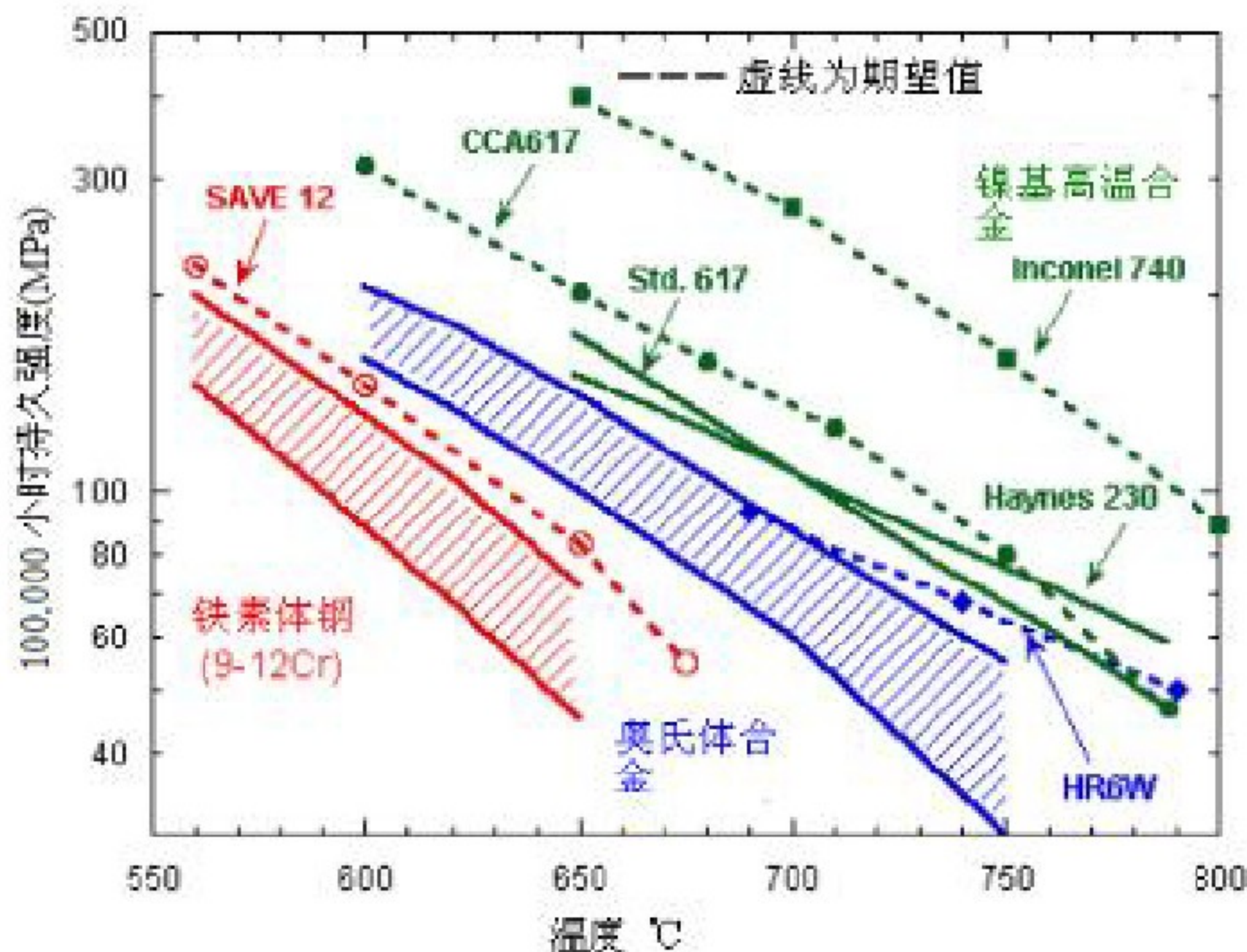
- **16.7/538/538** 亚临界机组供电热效率为**38%**，发电煤耗为**325 g/KW.h**
- **24.1/538/538** 超临界机组供电热效率为**41%**，发电煤耗为**310 g/KW.h**
- **玉环 26.25/600/600** 超超临界机组供电热效率为**45.4%**，发电煤耗为**270.6 g/KW.h**。

超临界机组的可靠性



超临界汽轮机组用材

- 超超临界机组选用的不同材料等级合金的 10^5 h 持久强度
- 我国1000MW机组600℃下的经济用材：改进型9%~12%Cr铁素体/马氏体钢

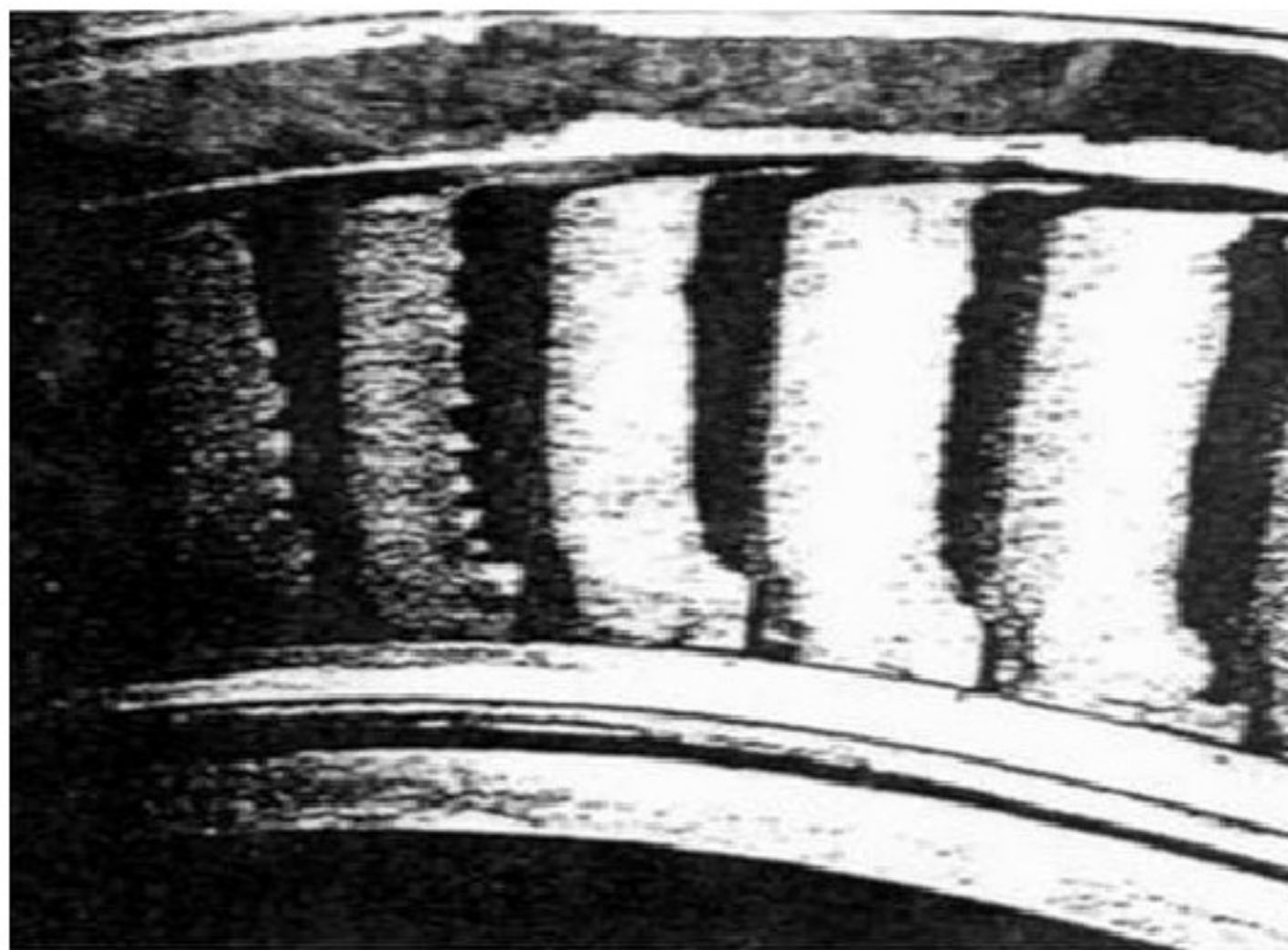


固体微粒侵蚀（SPE）及防护措施

- 固体颗粒侵蚀（Solid Particle Erosion - SPE）：
- 汽轮机进汽中固体颗粒的来源：锅炉水冷壁、过热器、再热器及主蒸汽和再热蒸汽管内表面在高温下氧化剥落下来和停机时因腐蚀而产生的坚硬的氧化铁粒子。（每年形成的固体粒子的重量可达数百千克至上千千克）
- 形成固粒的因素：温度愈高、运行时间愈长、气体介质中氧分压愈高、管内流速愈慢时，其金属材料的氧化发展速度愈快，其抗氧化性能愈低。
- 氧化皮剥落的原因：是由于它和锅炉管母材的热膨胀系数不同以及机组在某些运行工况下两者间存在较大的温差。一般情况下，随着机组运行时间的延长炉管内氧化皮的厚度会增加，在机组频繁启动或调峰运行时，炉管温度的变化很大，促使氧化皮开裂，从而又使深层的金属被氧化，导致氧化皮进一步增厚。原因可解释为“热骤冷”。

- 固粒侵蚀部位：SPE发生最严重的部位是汽轮机高温蒸汽进口处的汽道上，并向下游呈递减之势。再热第1级和高压第1级最易受**SPE**损伤，其次，依序是再热（中压）第2、3级和高压第2、3等各级。
- 固粒侵蚀危害的主要工况：锅炉启动、长期低负荷运行。
- 避免**SPE**侵蚀的技术措施：叶片设计、制造、安装的改进；安装滤网；合理投停旁路；选用更高一档的抗氧化和耐腐蚀性能的钢材；控制水和蒸汽的化学品质；避免锅炉部件超温运行；汽轮机采用全周进汽、变压运行；锅炉采用内置式汽水分离器。

固粒对汽机中压一级喷嘴出口边的损伤



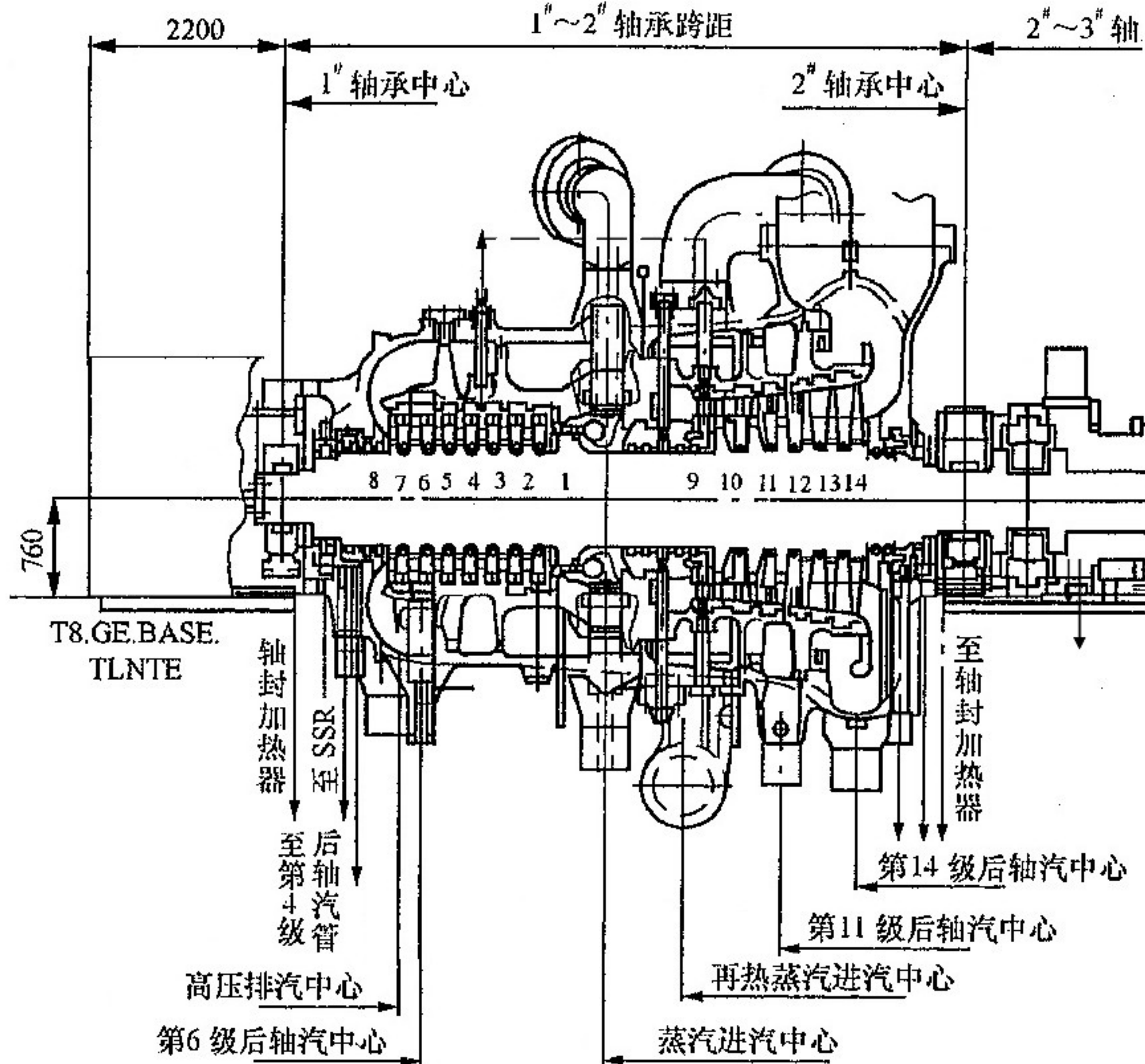
研制超超临界汽轮机的关键技术

- 随着蒸汽参数的提高，材料开发与工艺、固体颗粒侵蚀、强度问题、寿命问题、汽流激振、结构可靠性设计、蒸汽冷却技术、通流部分优化等技术已经成为研制超超临界汽轮机的关键技术。

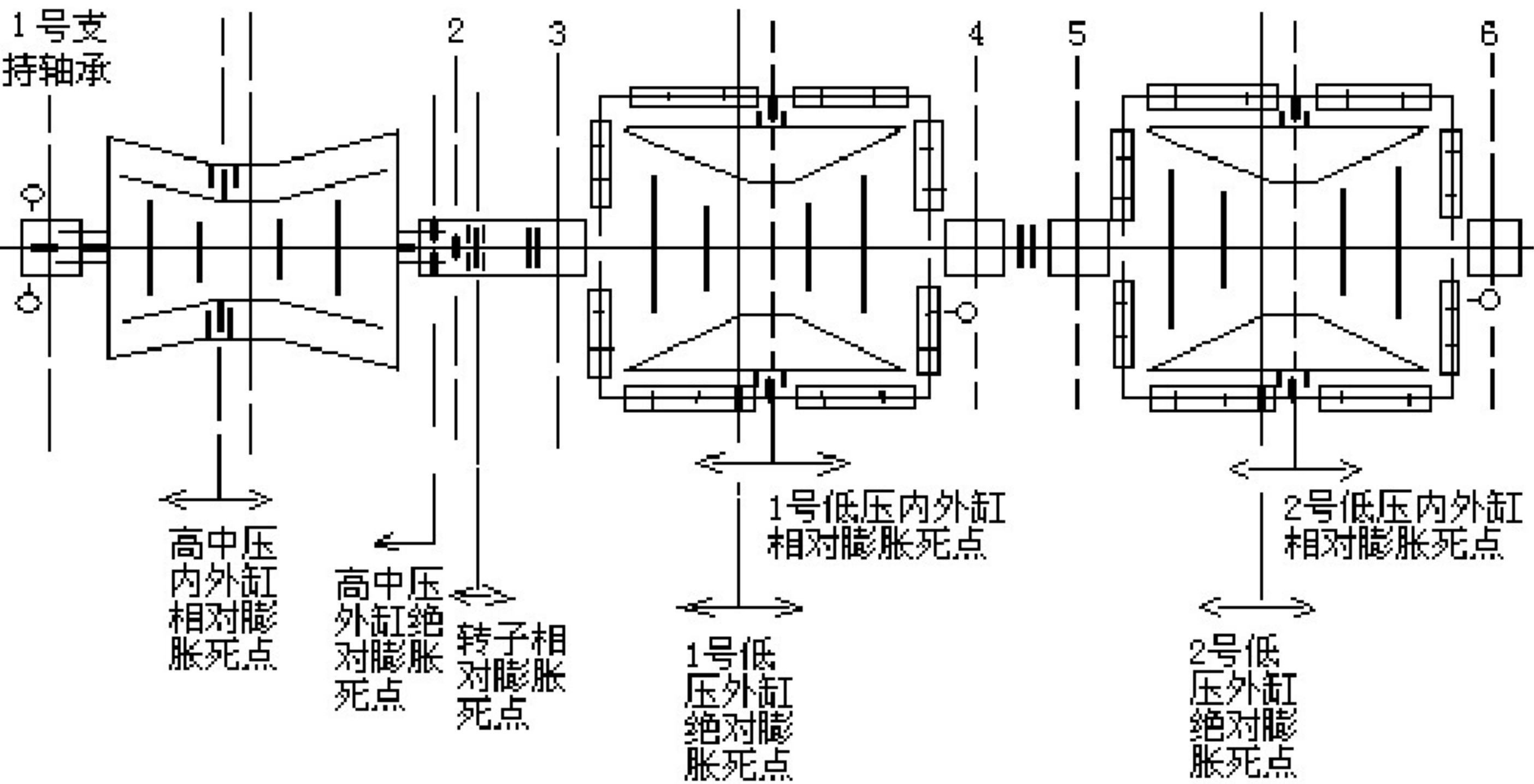
东方600MW等级汽轮机材料对比

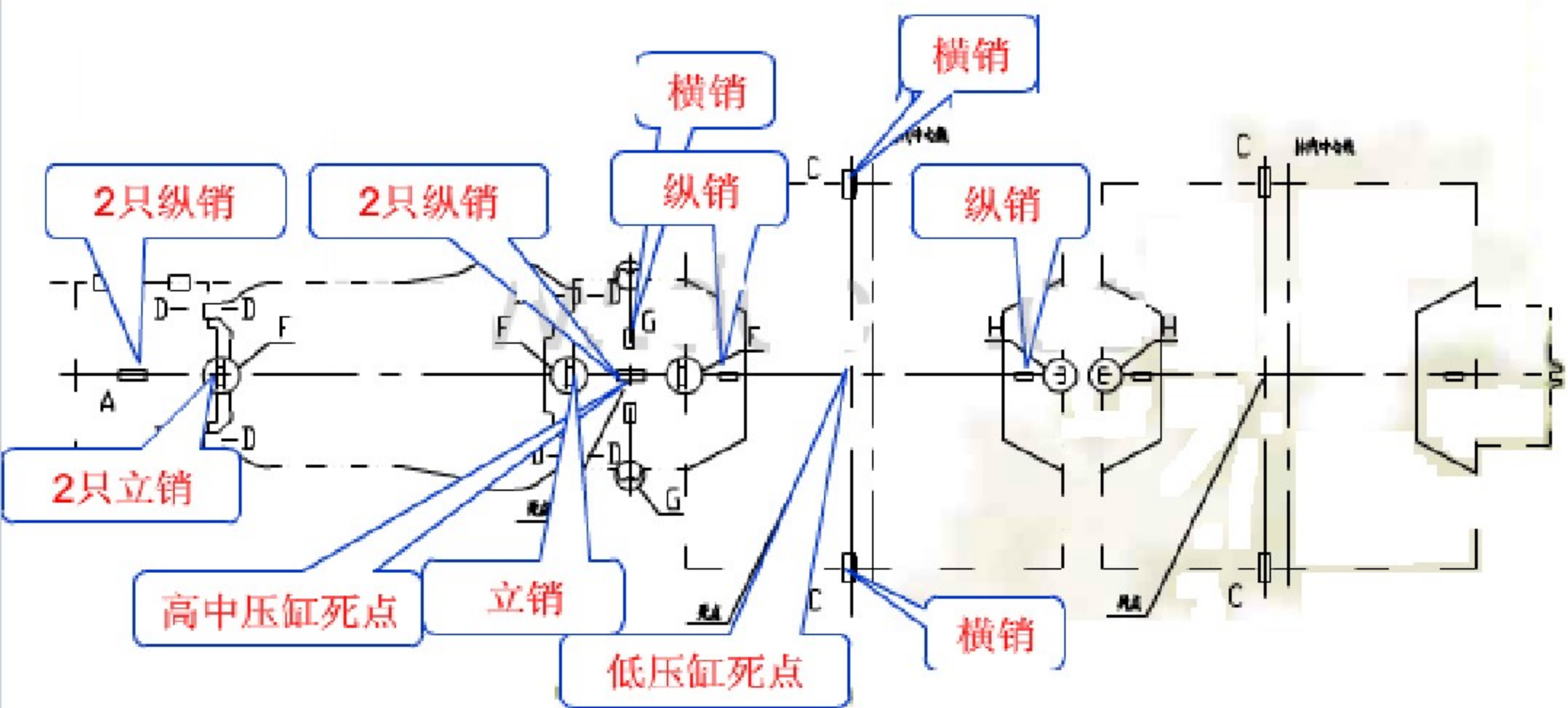
主要零部件	超超临界	超临界
高中压转子	12Cr钢	改良型Cr-Mo-V
低压转子	Ni-Cr-Mo-V钢	Ni-Cr-Mo-V钢
高中压外缸	Cr-Mo-V钢	Cr-Mo-V钢
高中压内缸	12Cr钢	Cr-Mo-V钢
喷嘴室	12Cr钢	Cr-Mo-V钢
汽缸高温螺栓	Cr-Mo-Nb-V-W-N	Cr-Mo-W-V钢
高压主汽阀壳	12Cr钢	12Cr钢
高压调节阀壳	12Cr钢	Cr-Mo-V钢
联合汽阀壳	12Cr钢	Cr-Mo-V钢

高中压合缸

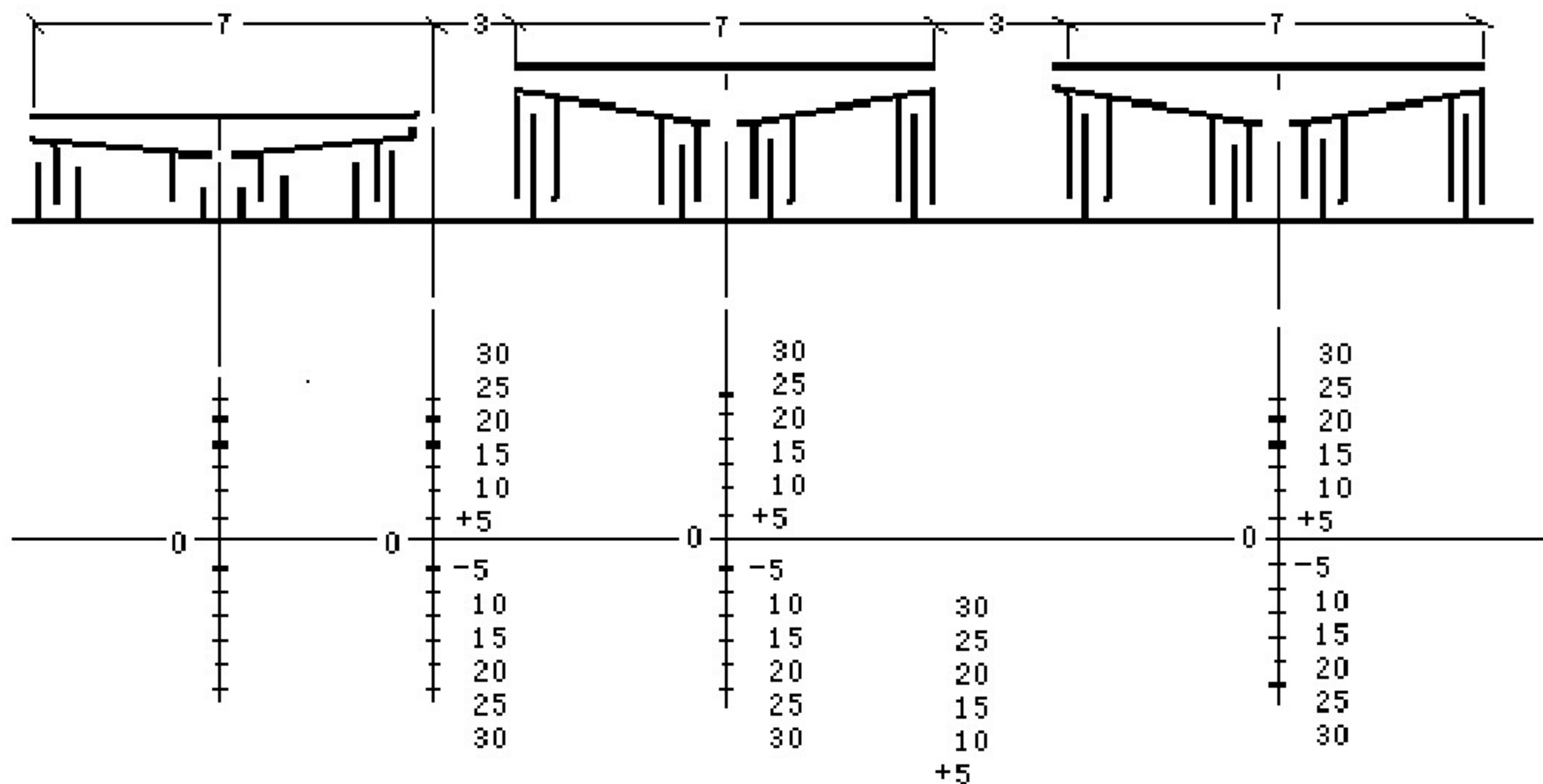


汽缸和转子的支承、定位、推拉及膨胀导向





东方660MW汽轮机热膨胀曲线





当心扎脚





当心扎脚













图1—3 汽轮机高中压内下缸

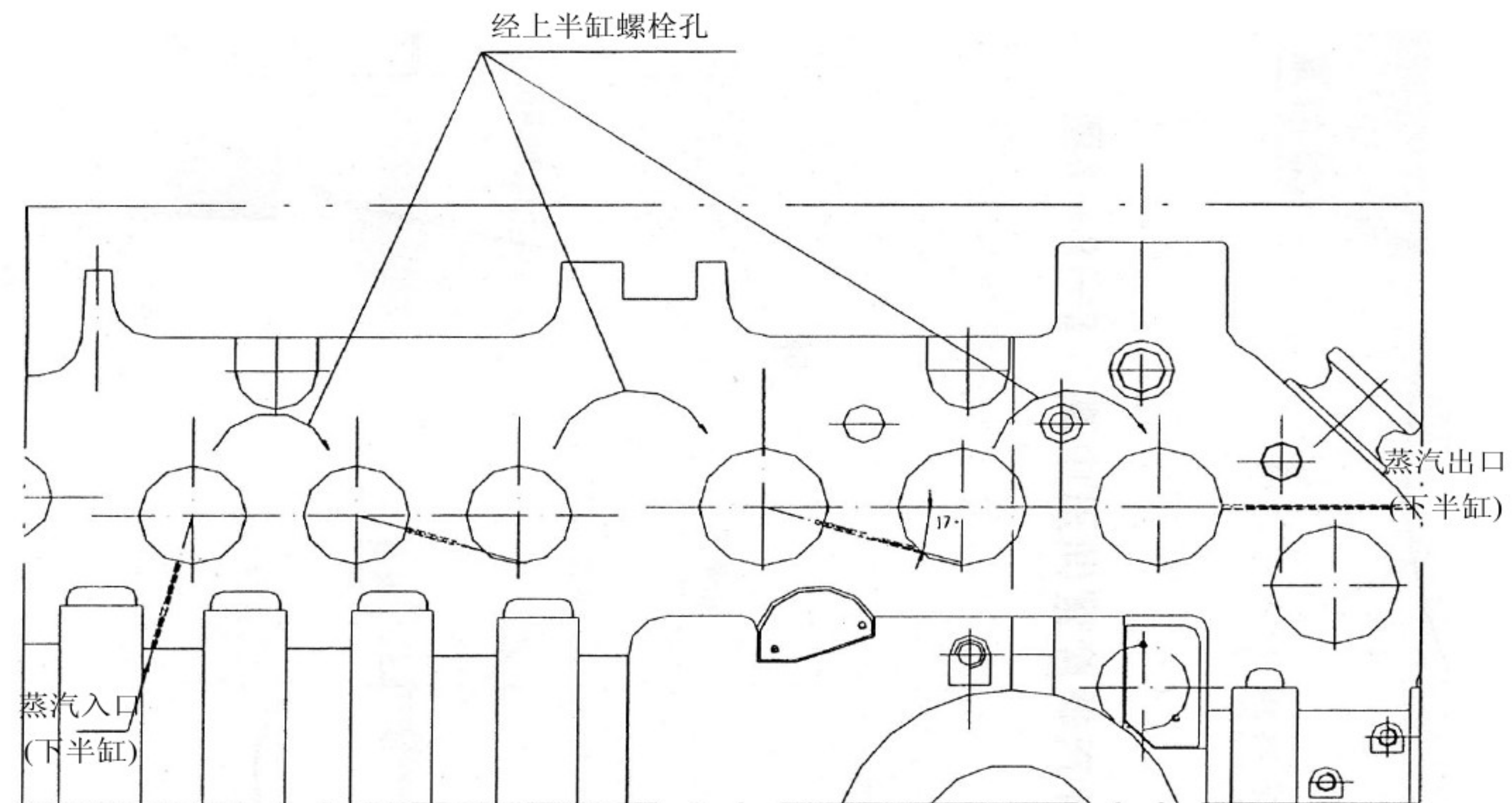
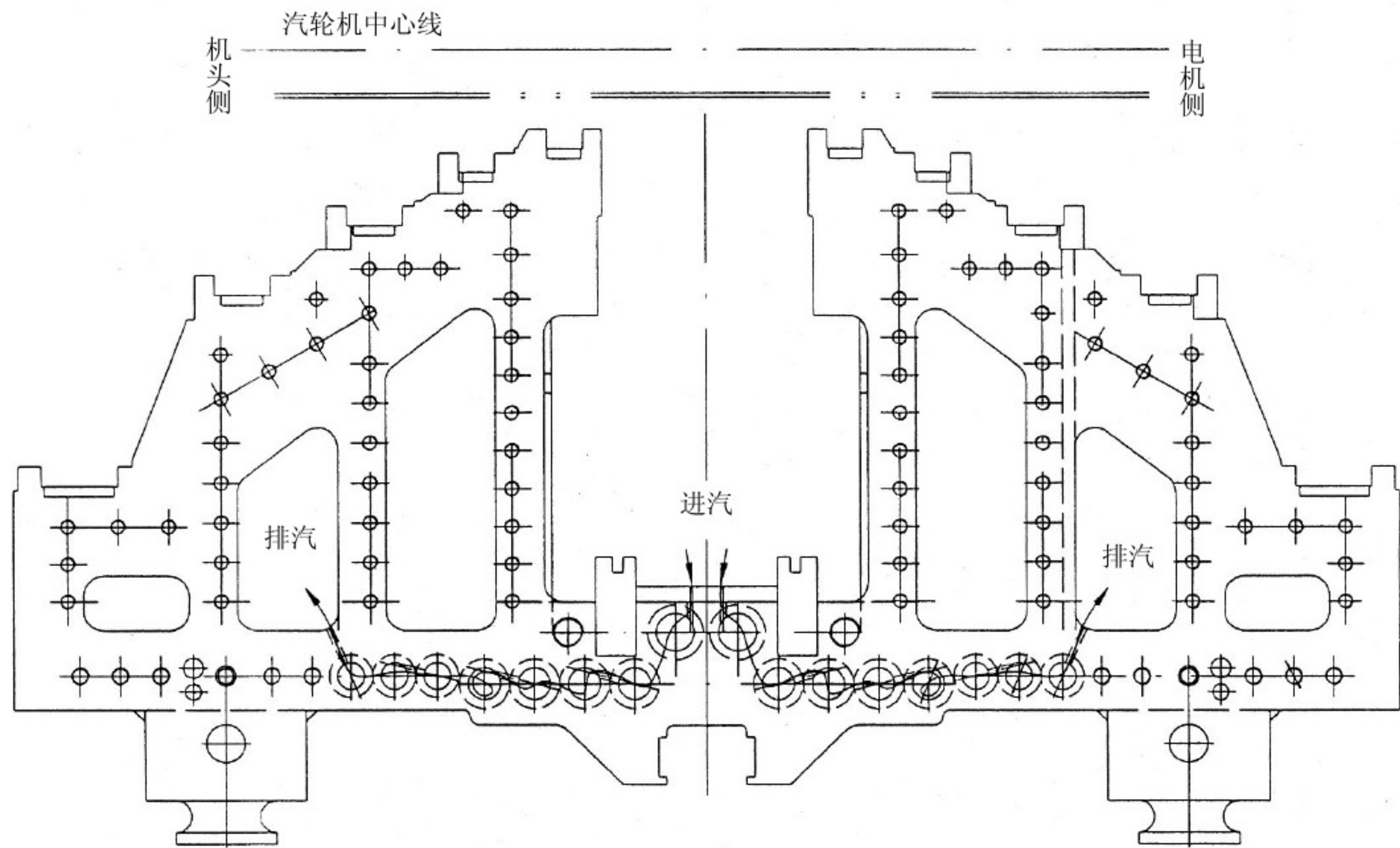


图2-14 大螺栓自流冷却/加热示意图(内缸)

为减少启动过程中螺栓与法兰温差，降低运行时螺栓的使用温度，特采用大螺栓自流冷却/加热系统：从高压第4级后引入蒸汽至螺栓孔，再由中压进汽处排出。正常运行时内流冷却高温区中分面螺栓，而在启动时又可以加热螺栓，可以降低启动时螺栓的温度应力，避免法兰及螺栓的塑性变形。安装时螺栓要热紧。



大螺栓自流加热示意图(低压内缸)

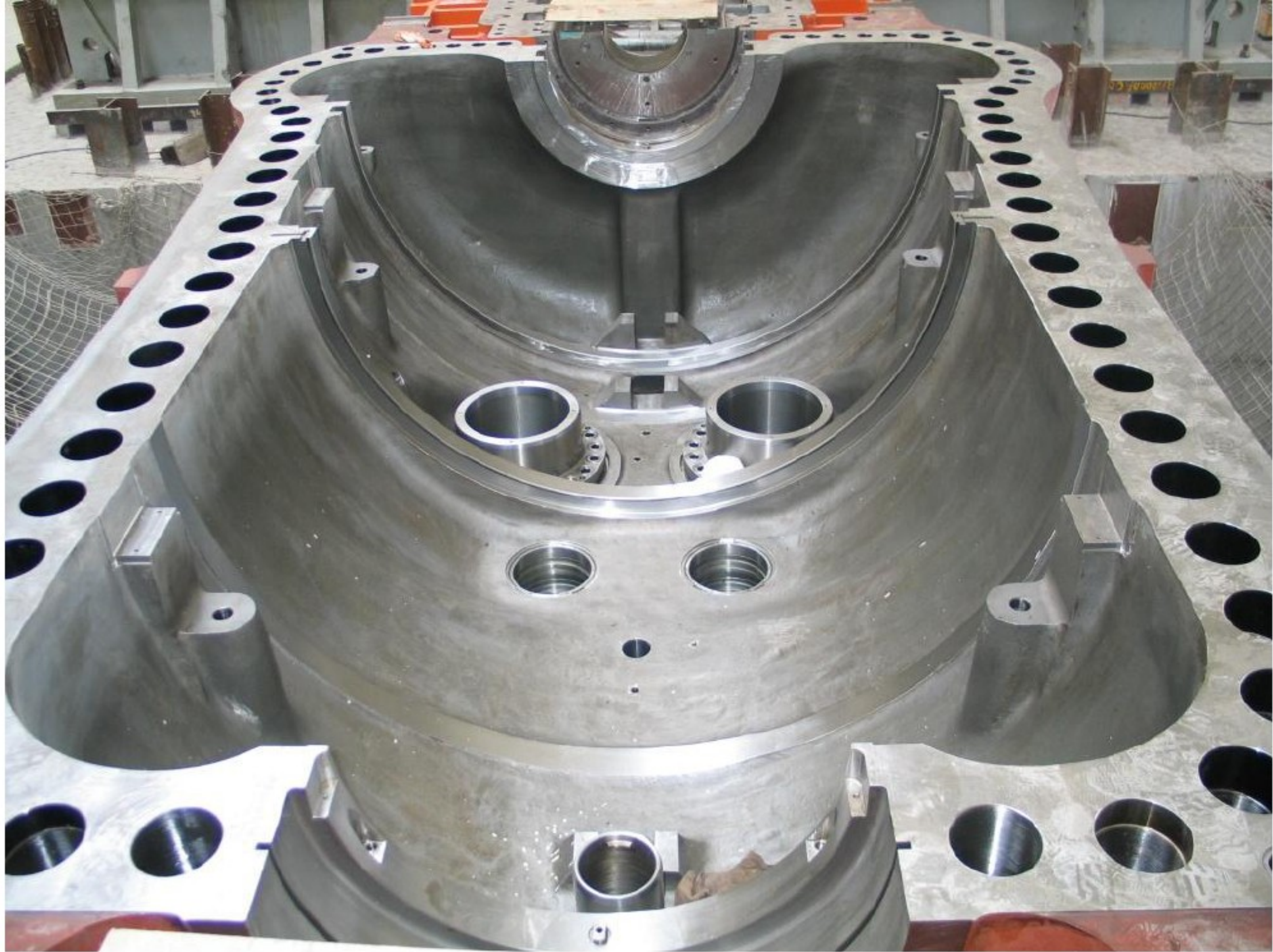
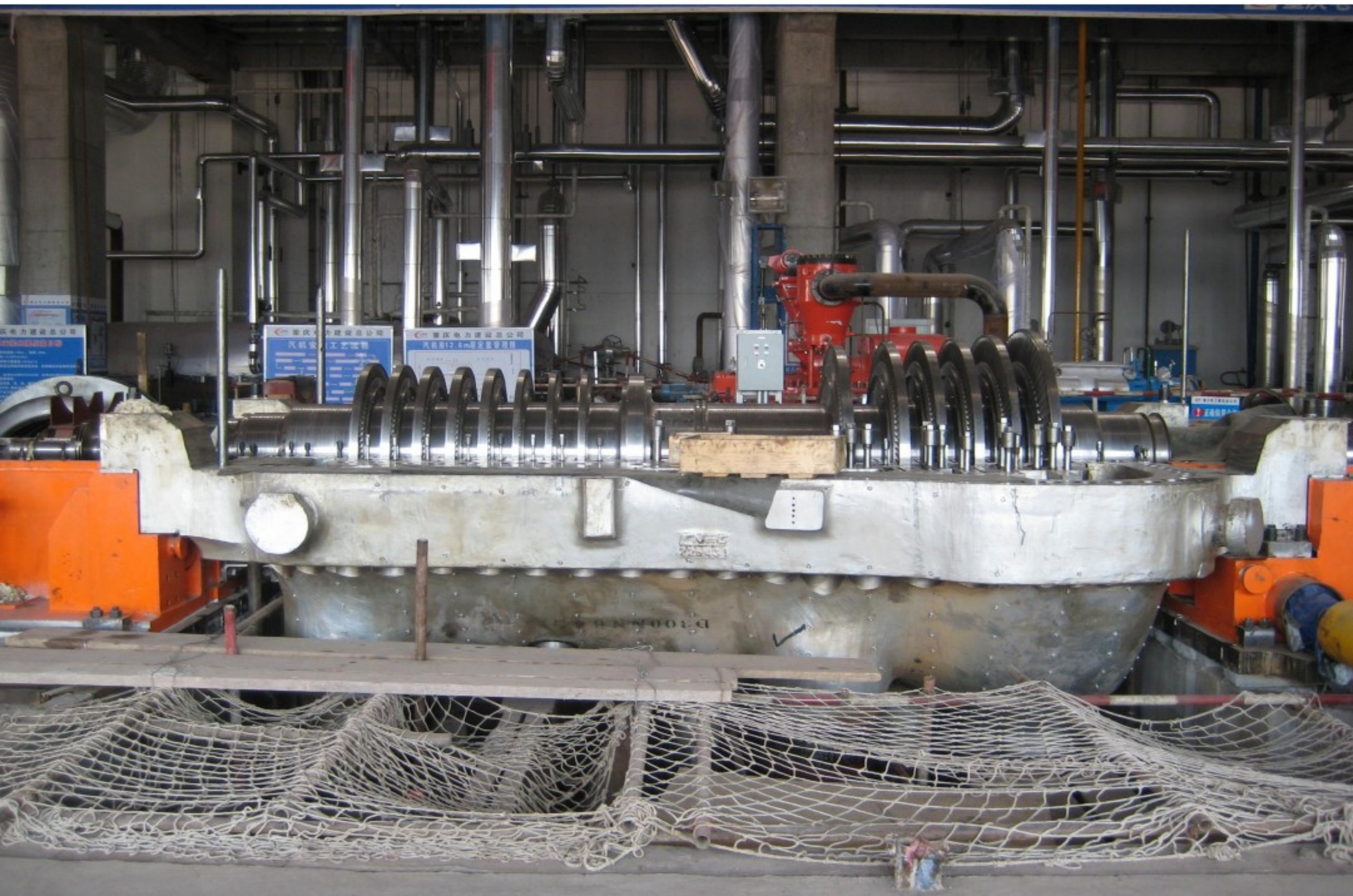


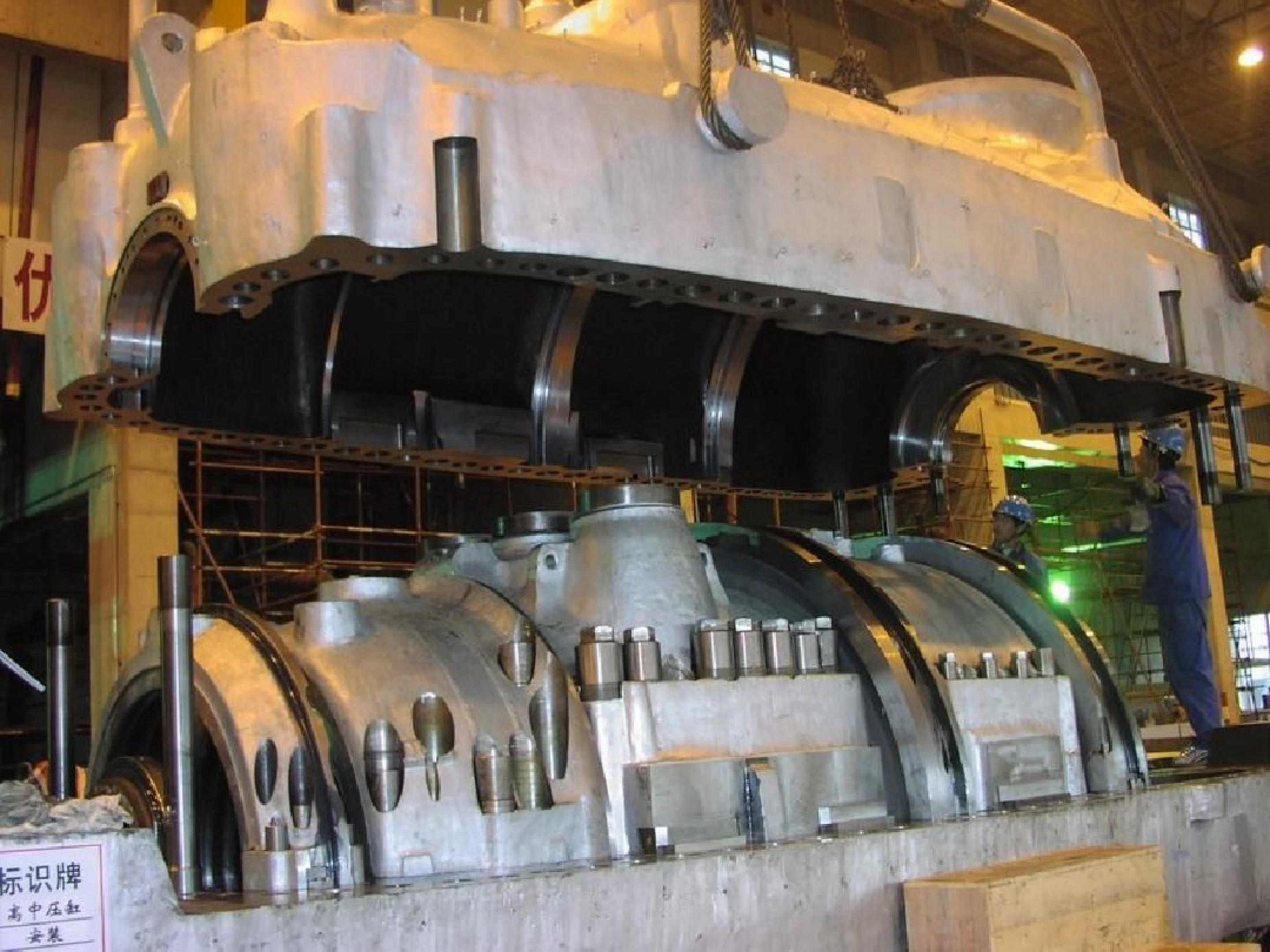
图1—5 汽轮机高中压外下缸

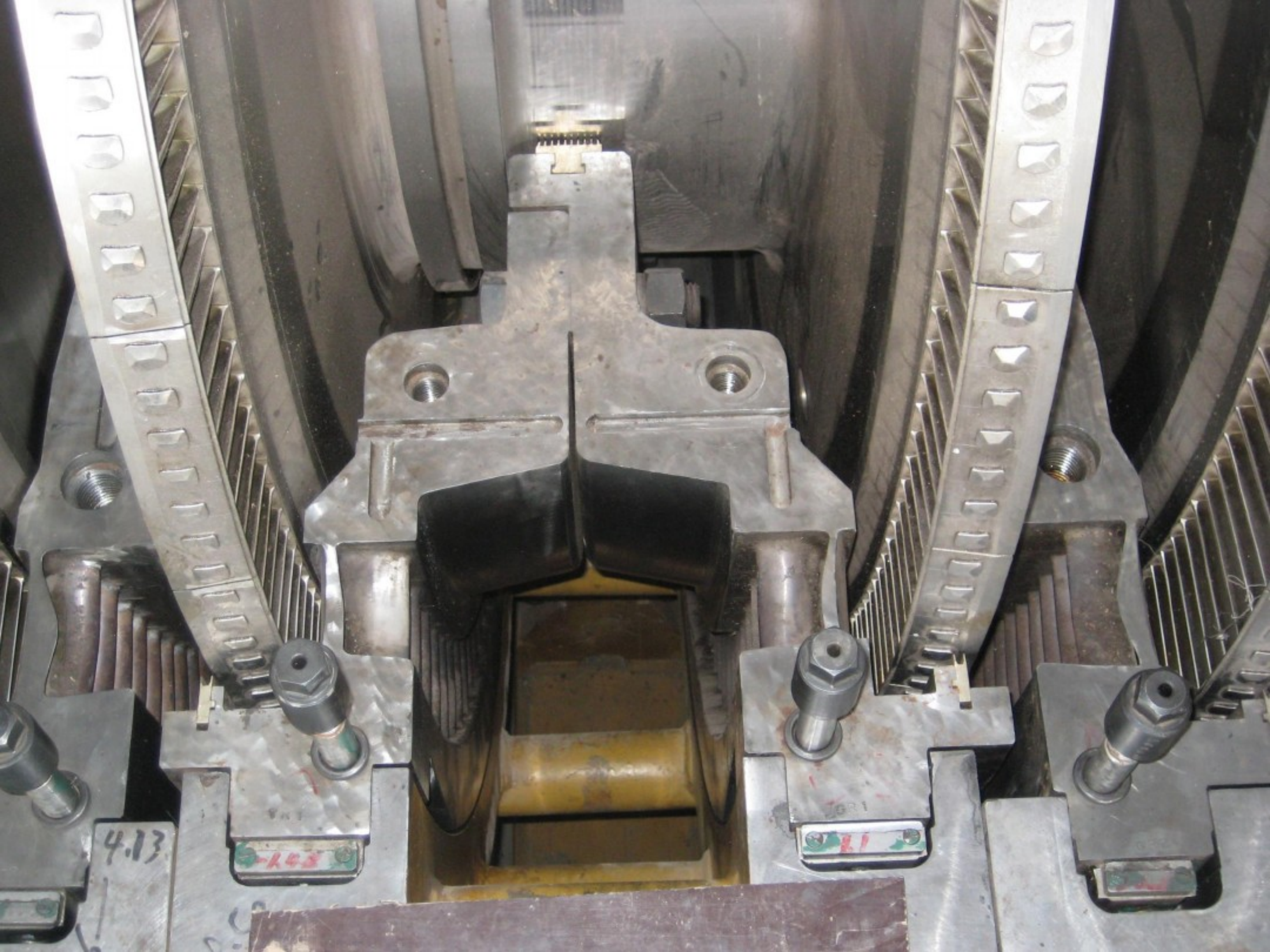
外下缸猫爪水平中分面支承



付

标识牌
高中压缸
安装



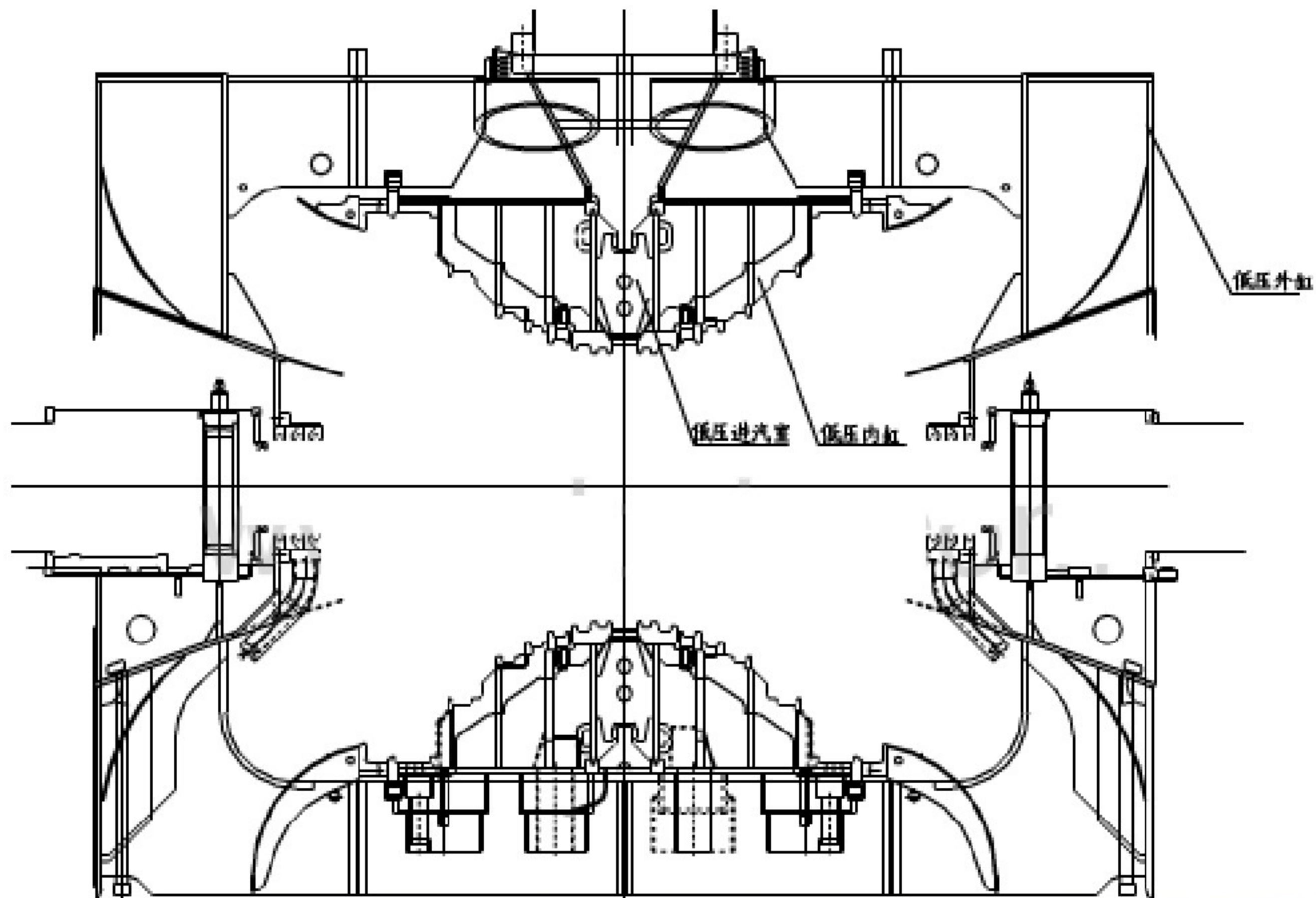


4.13

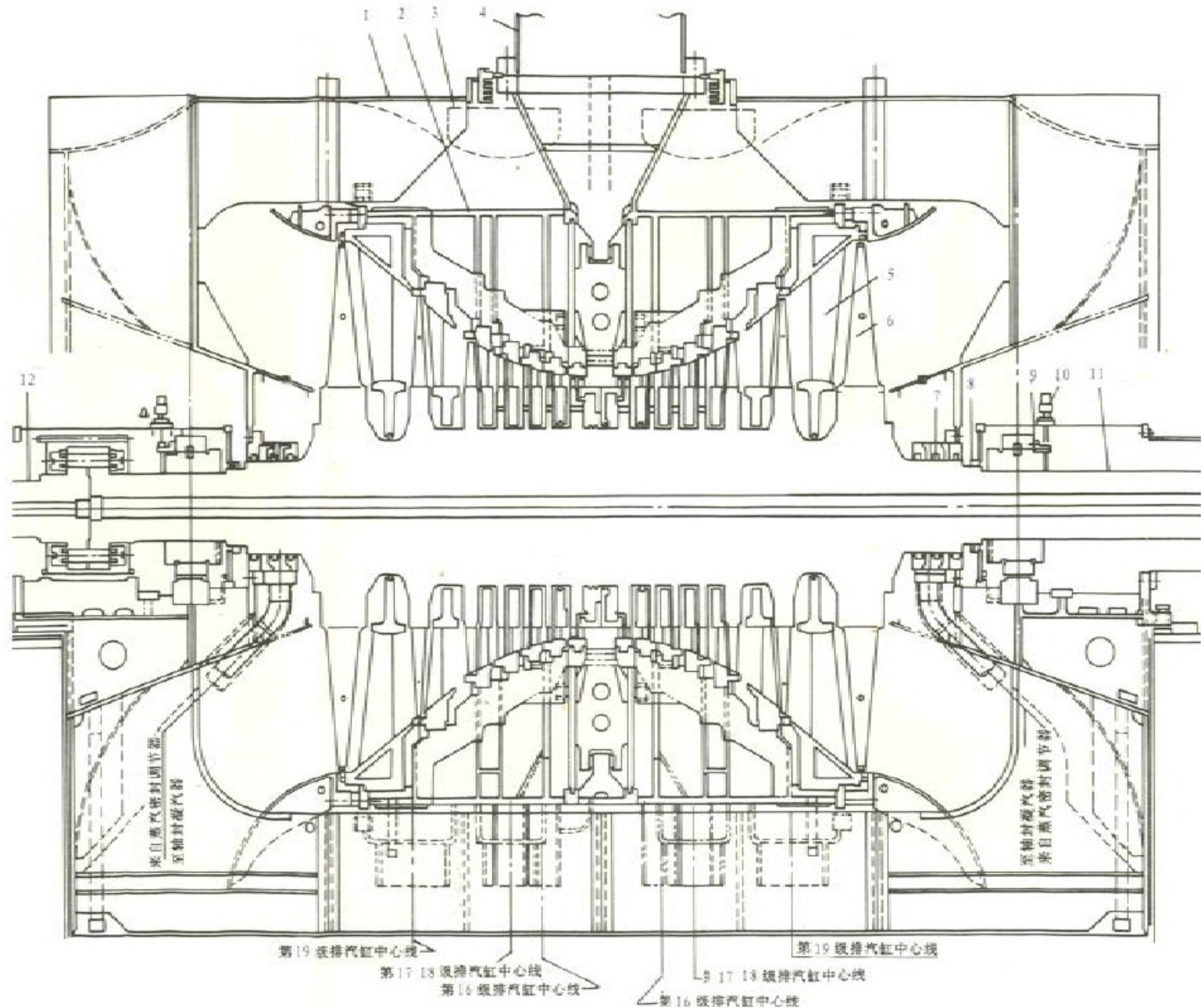
4.13

4.13

4.13

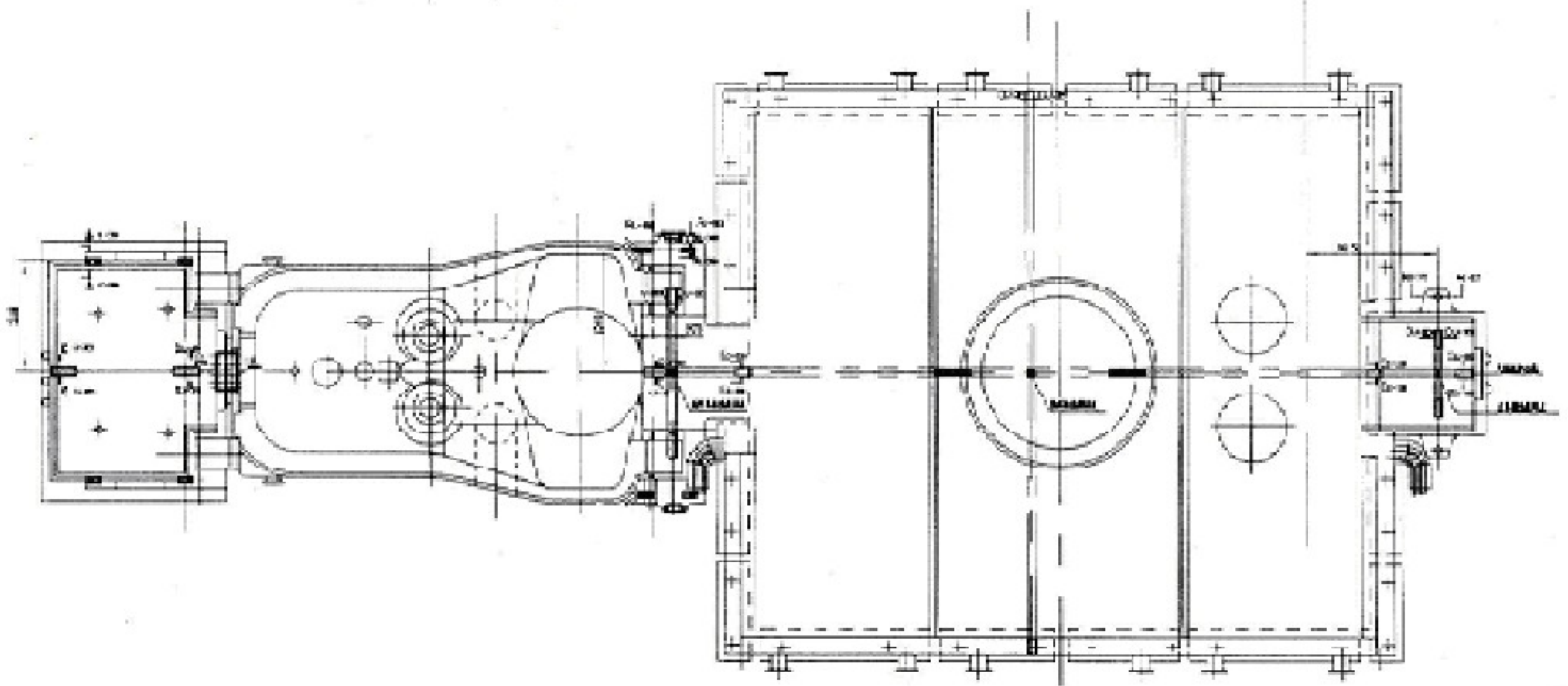
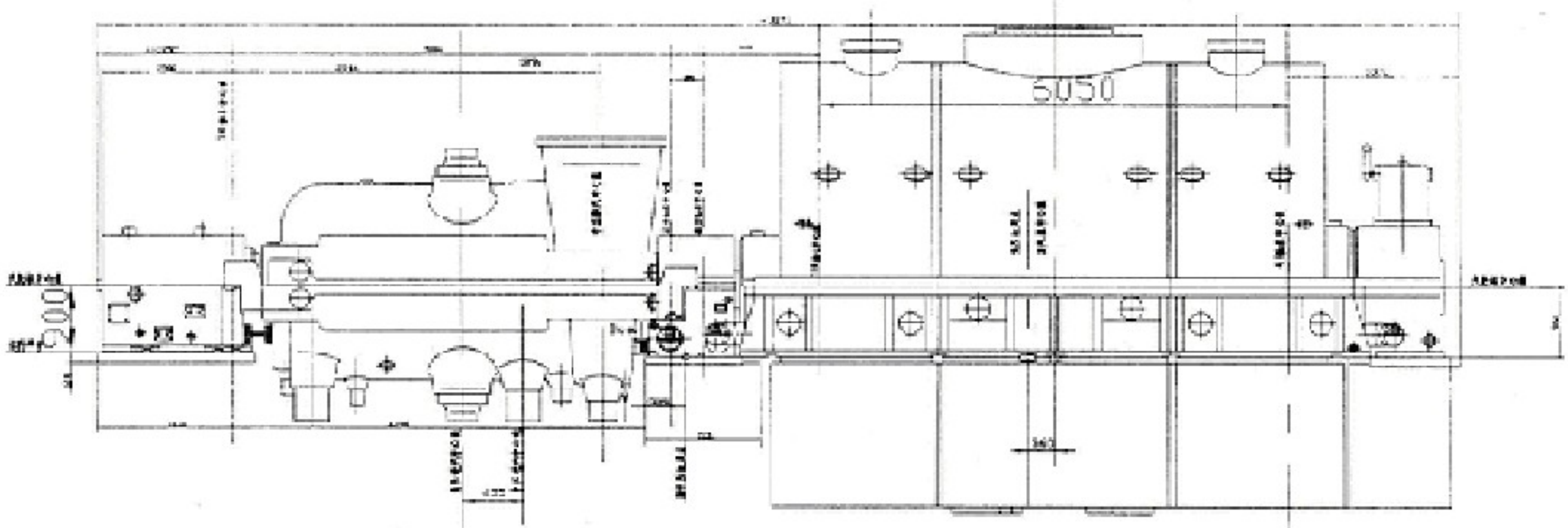


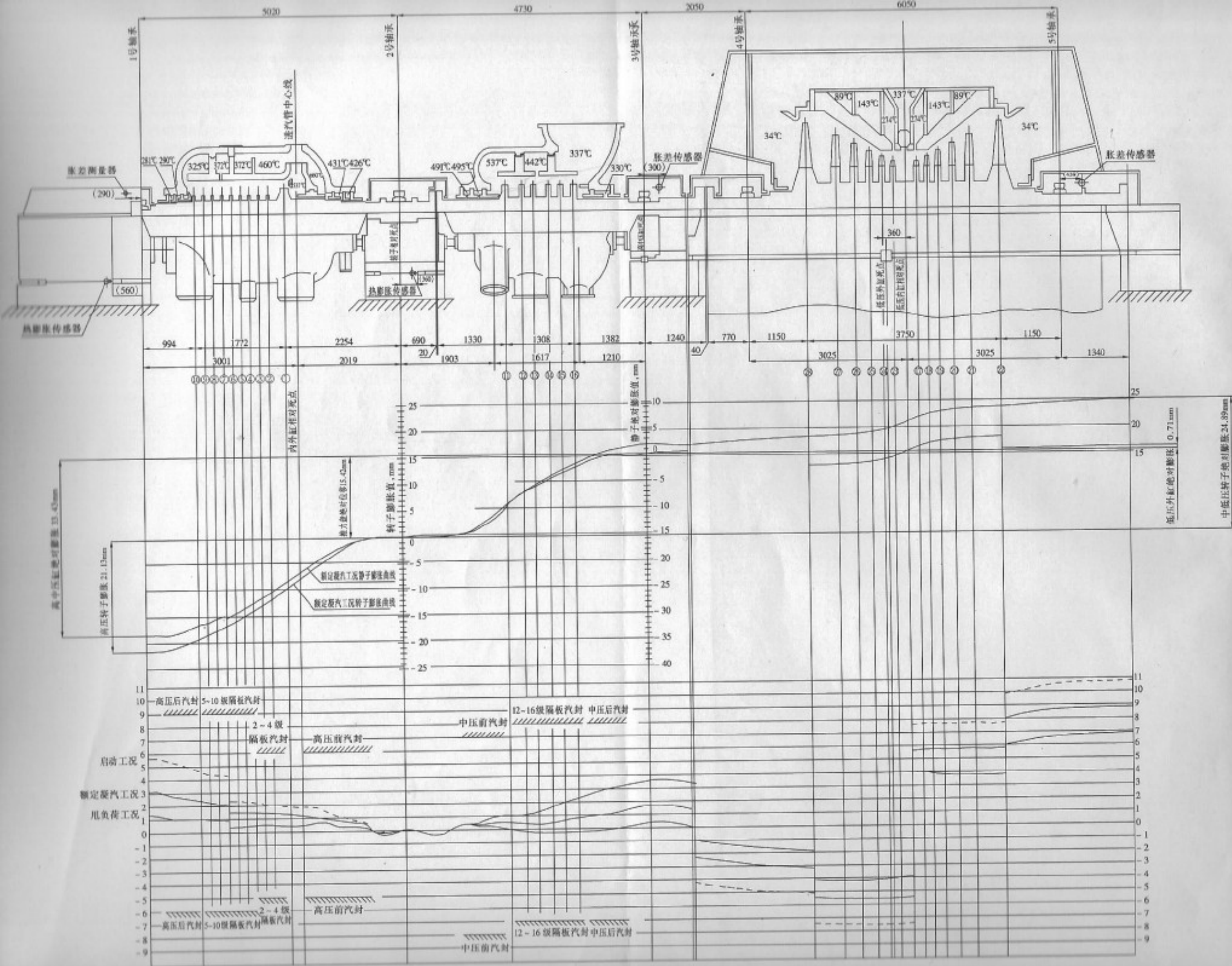
低压缸



低压缸喷水系统自投逻辑条件：转子转速达到**600r/min**时自动投入，并在机组带上约**15%**额定负荷前连续运行，同时当排汽缸温度超过**70℃**时亦会自动投入。

在低负荷或空载情况下，如果排汽温度超过**80℃**，则必须通过增加负荷或改善真空逐步地降低后汽缸的温度。低压后汽缸的极限温度为**120℃**，如果达到这一温度，则应停机并排除故障。





进汽部分及中低压连通管

高中压缸配汽形式、调节方式及配汽机构

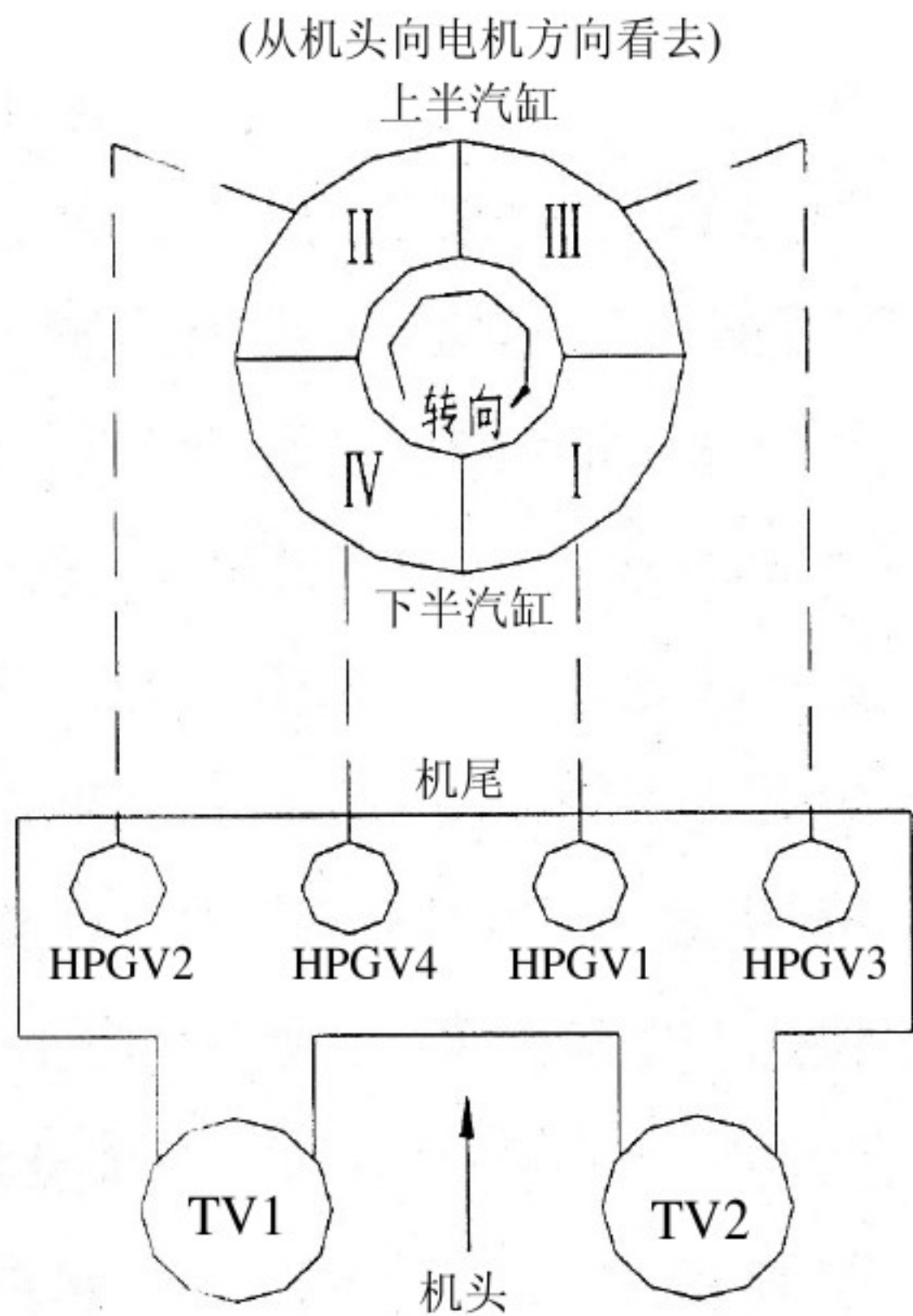
高压缸调节级为喷嘴配汽，可采用喷嘴调节（顺序阀）或节流调节（单阀）

高中压主汽门、调门结构

调门特性：开度—流量关系，有线性与非线性。

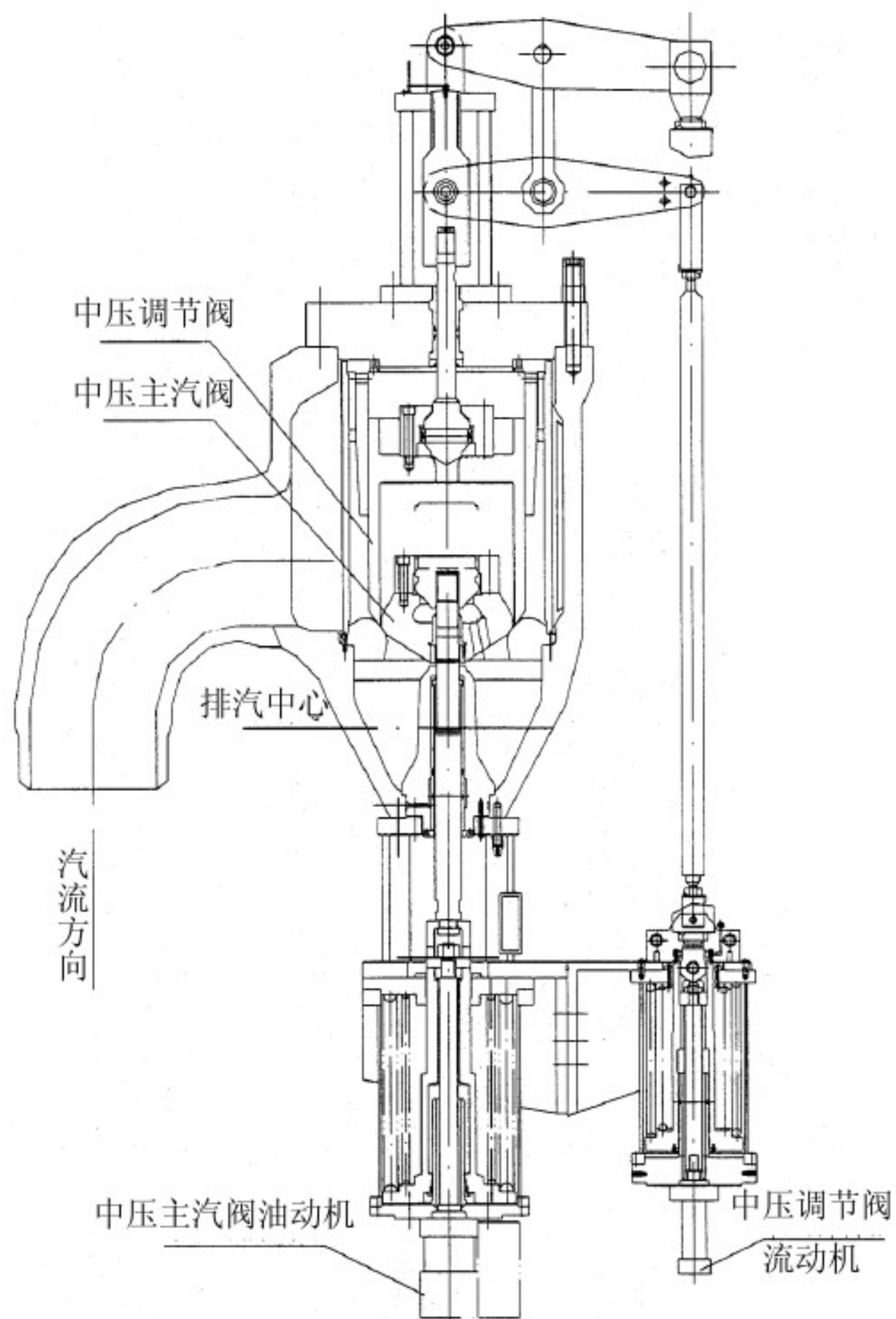
主汽阀完成关闭动作的时间小于**0.2** 秒

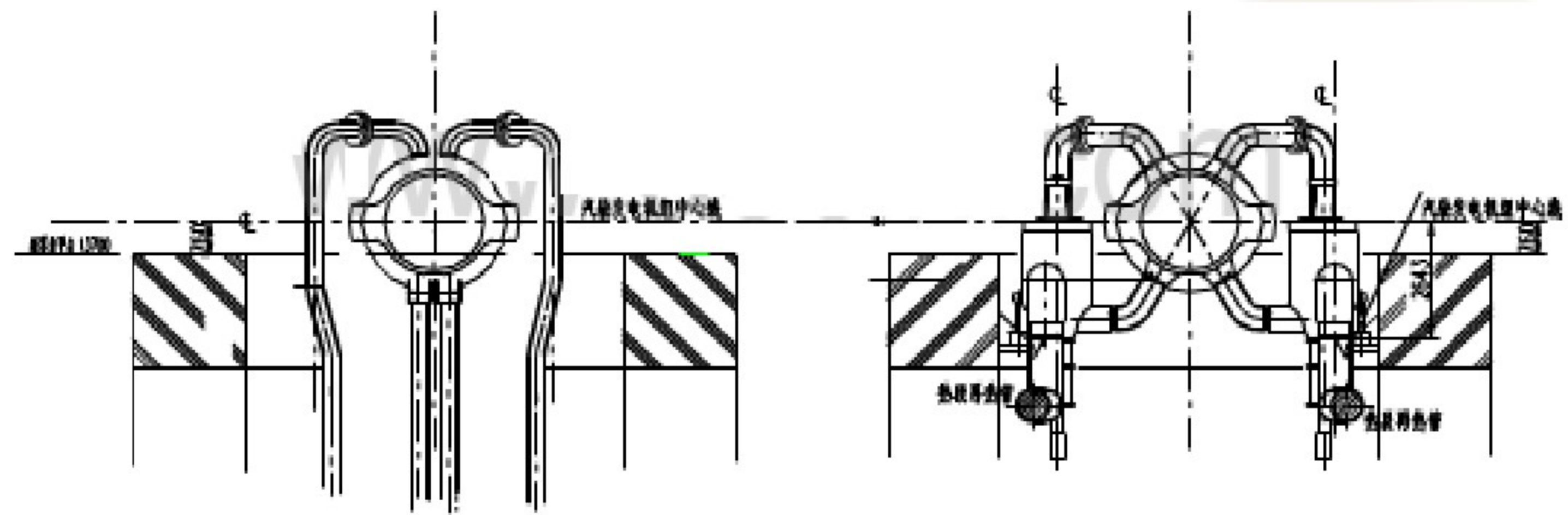
中低压连通管结构特性：与汽缸接口间为挠性连接，平衡消除相互间推拉作用力。

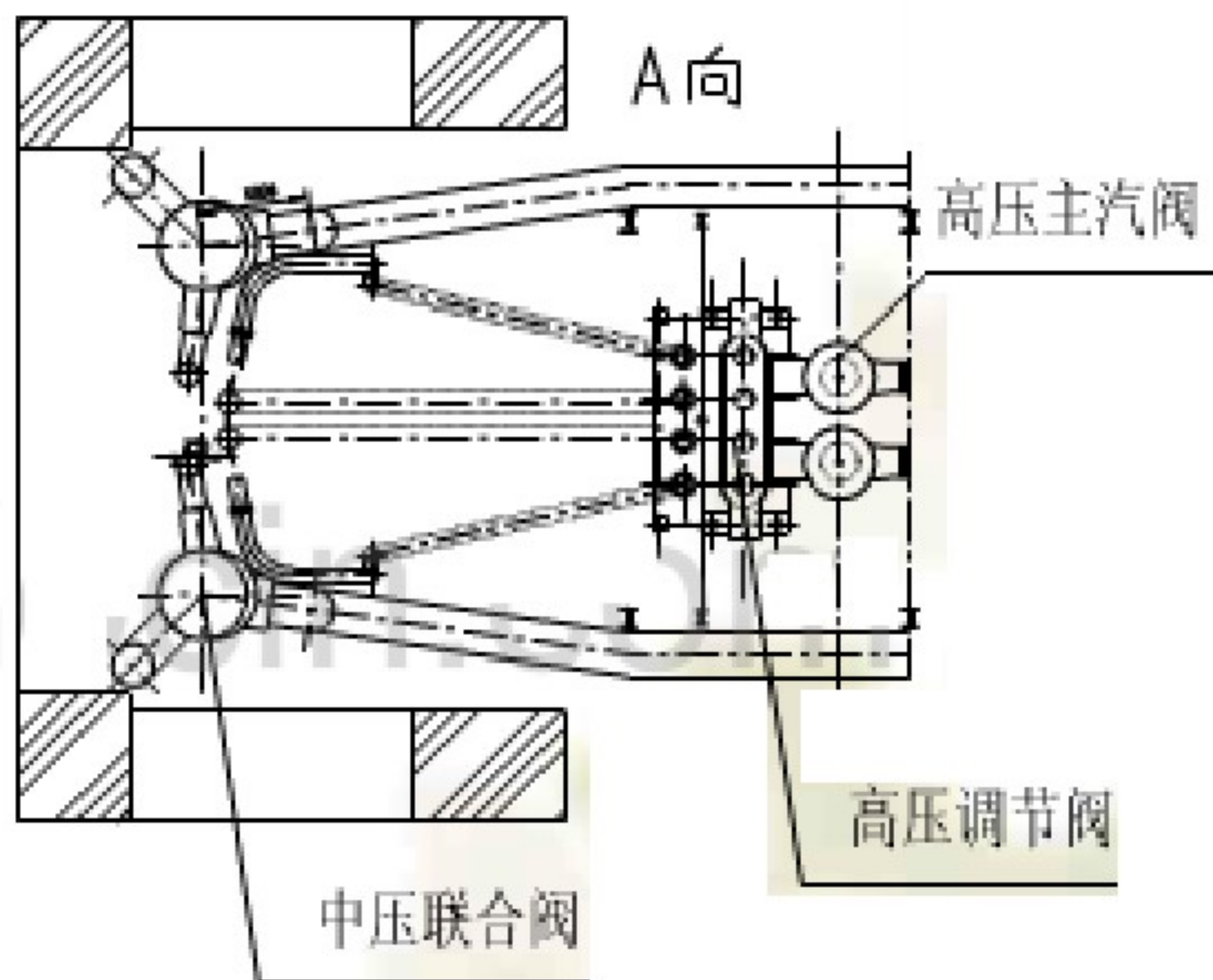
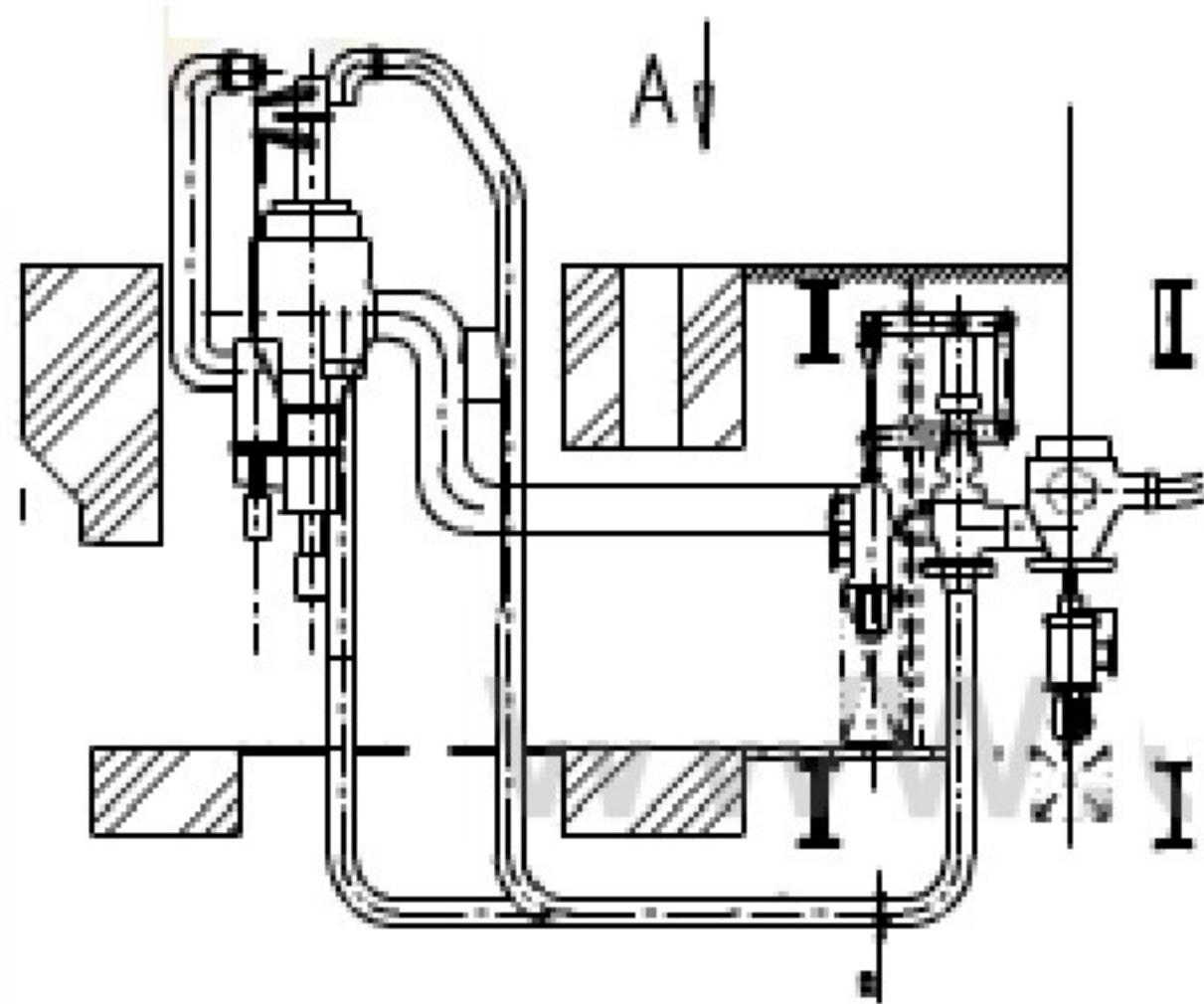


符号说明:

TV 主汽阀; HPGV 高压调节阀; IPGV 中压调节阀

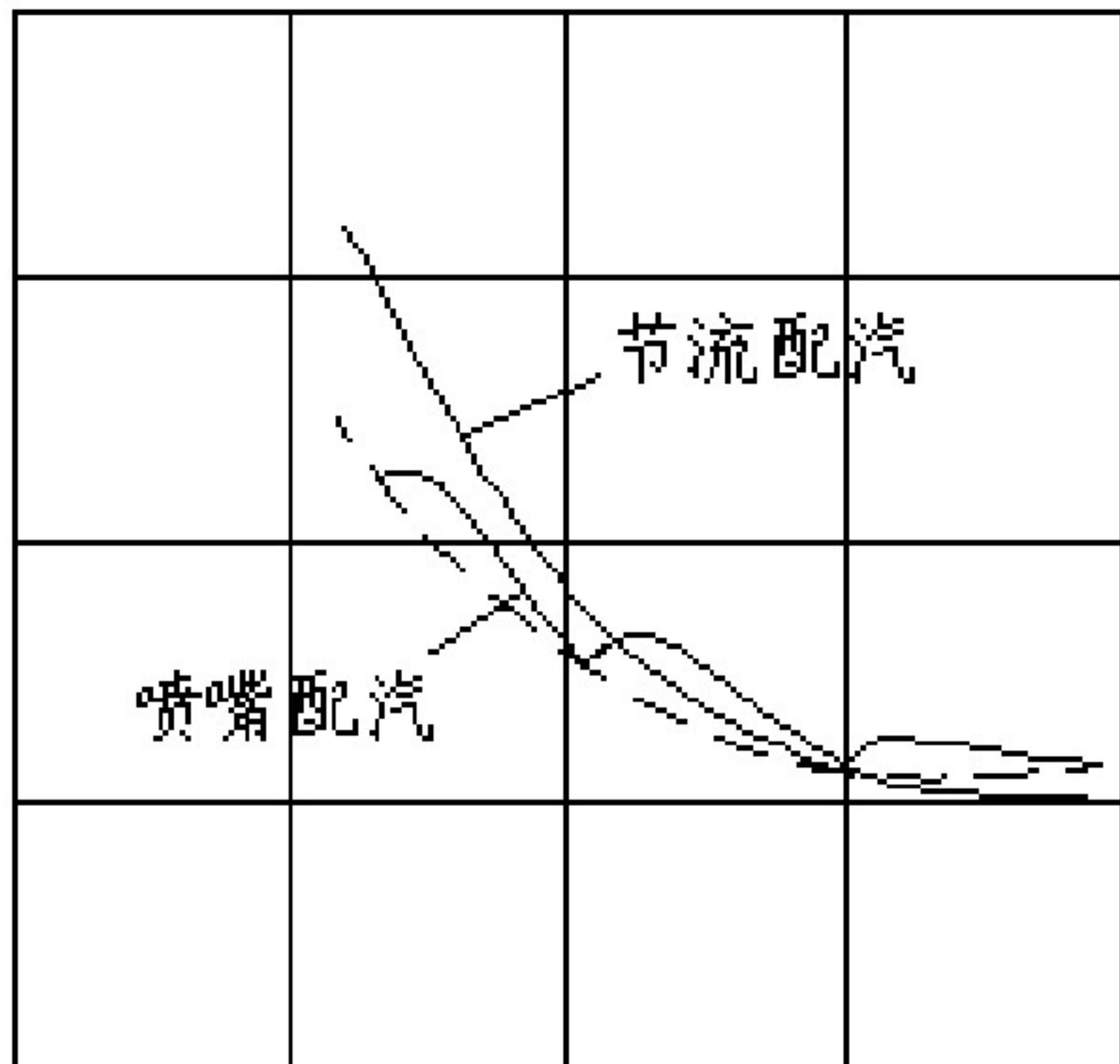






热耗比
较曲线

热耗
 K



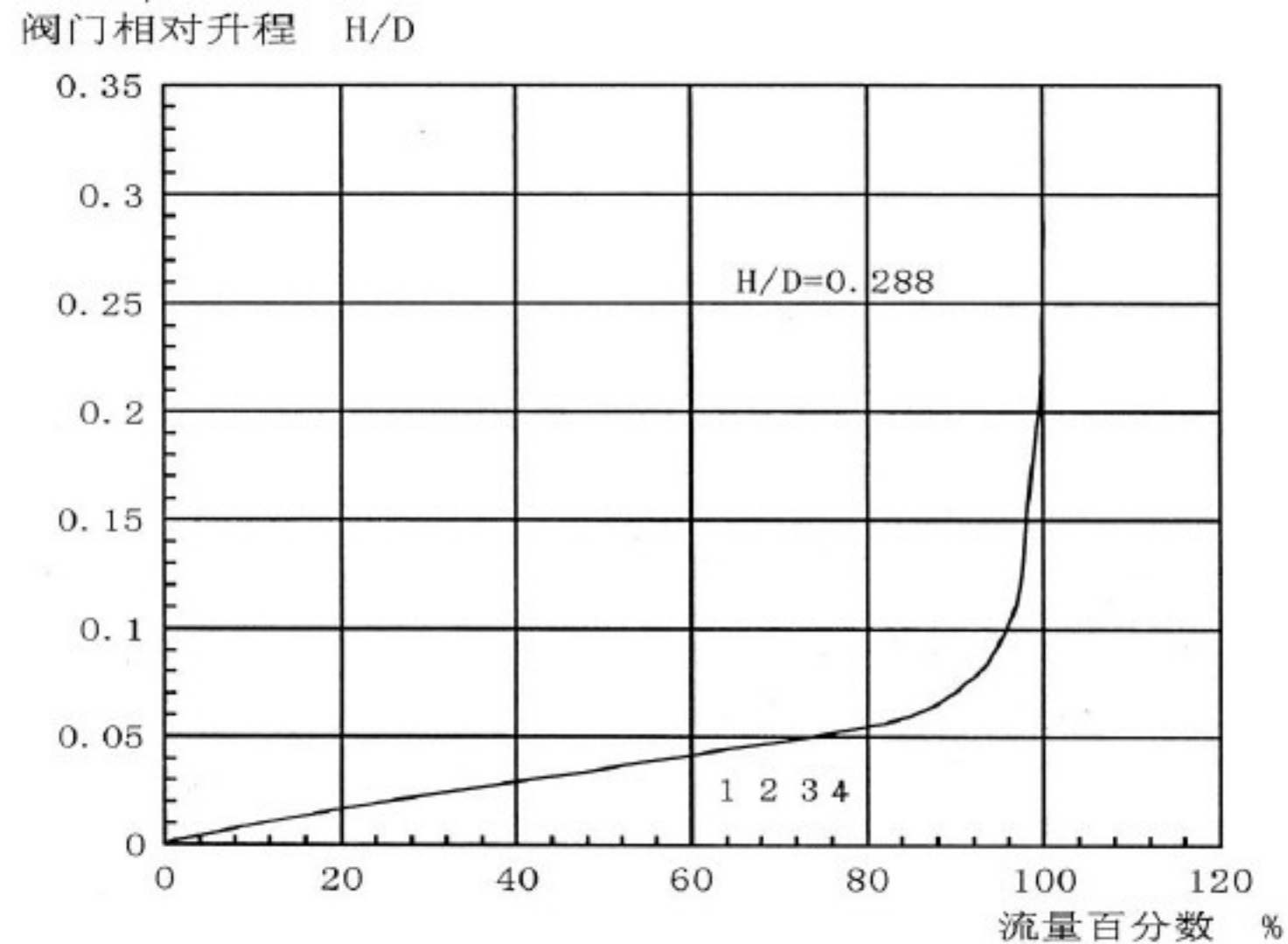
节流配汽

喷嘴配汽

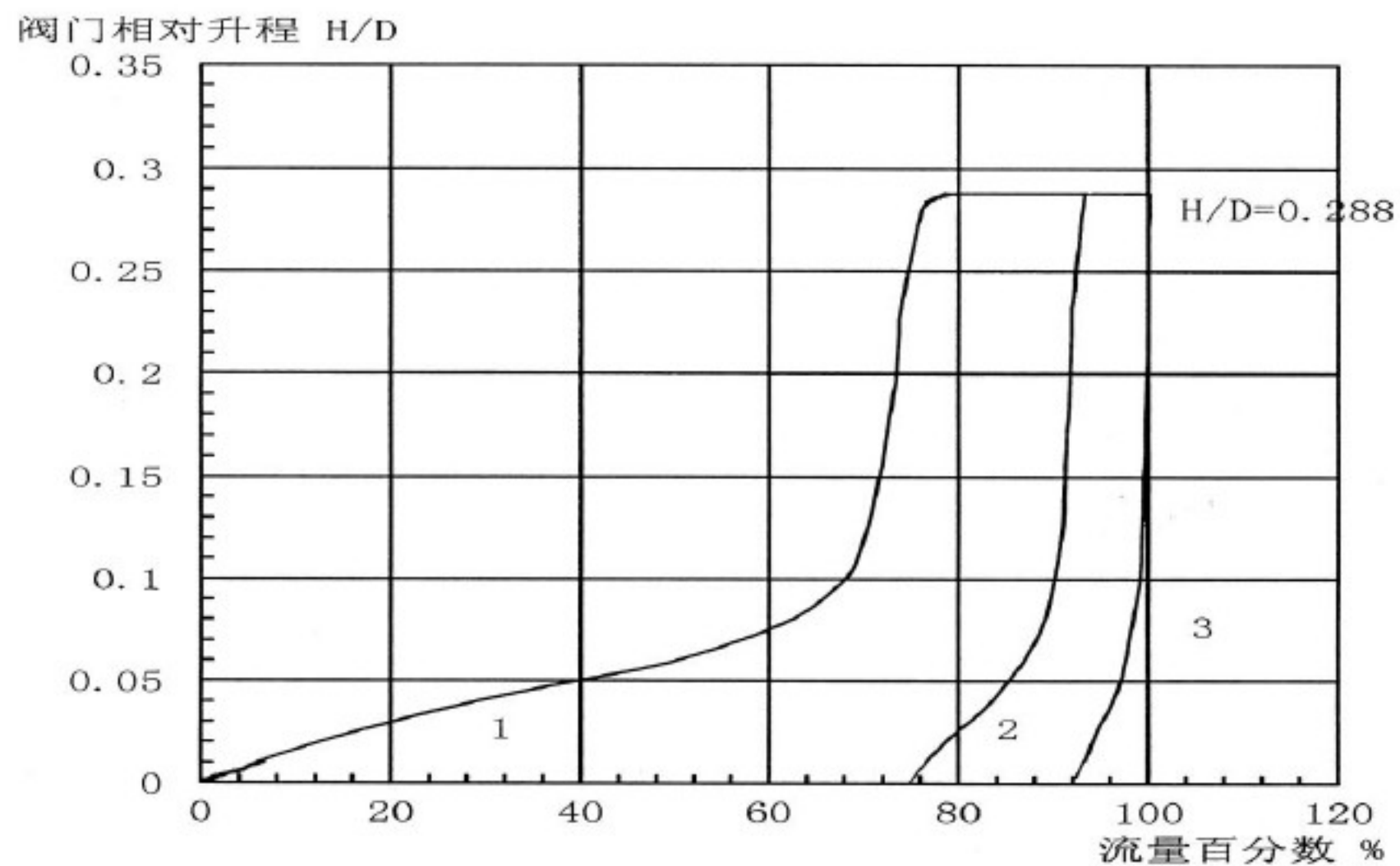
—— G 流量

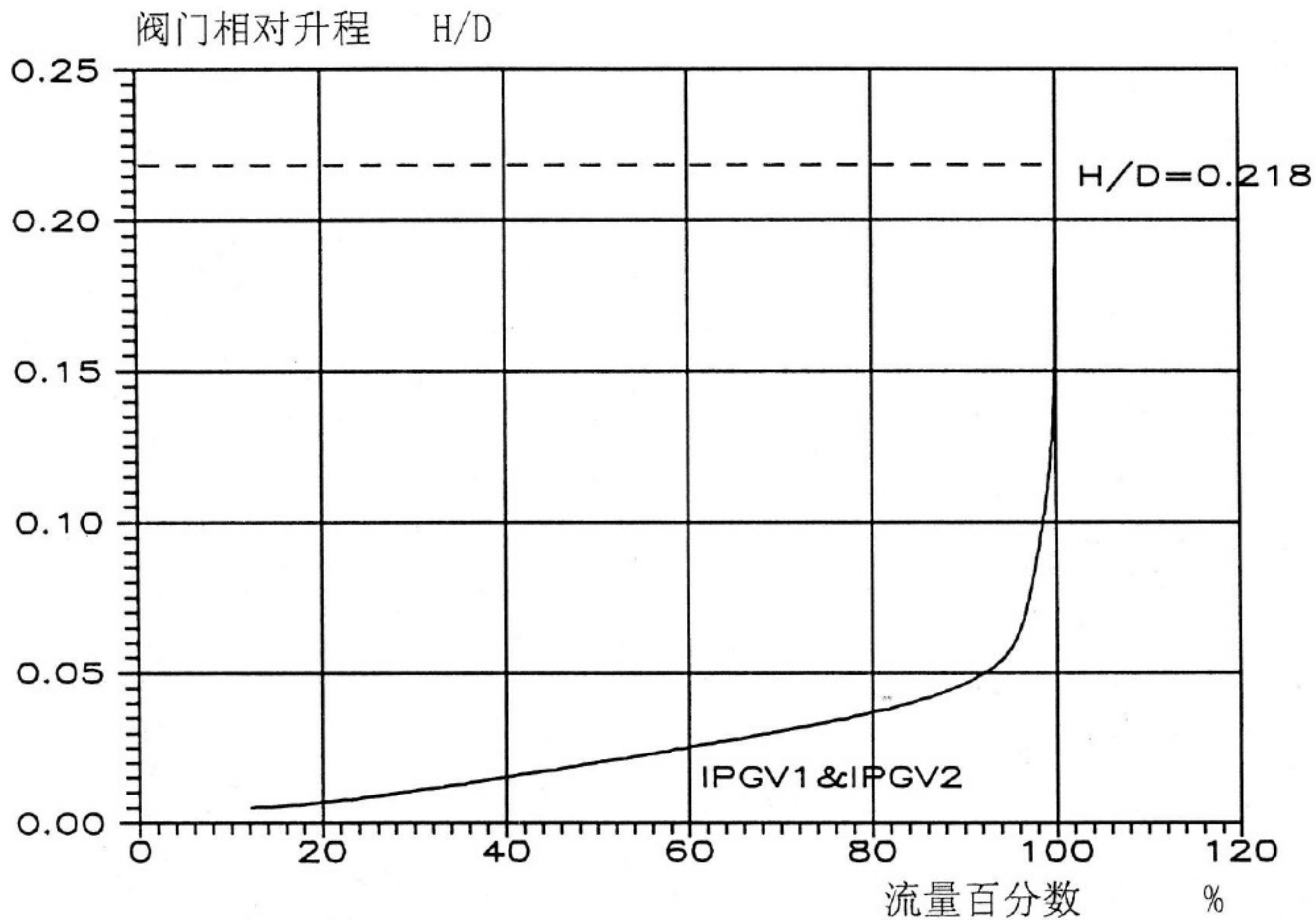
喷嘴配汽和节流配汽
汽轮机的热耗曲线及其比较

高调门单阀



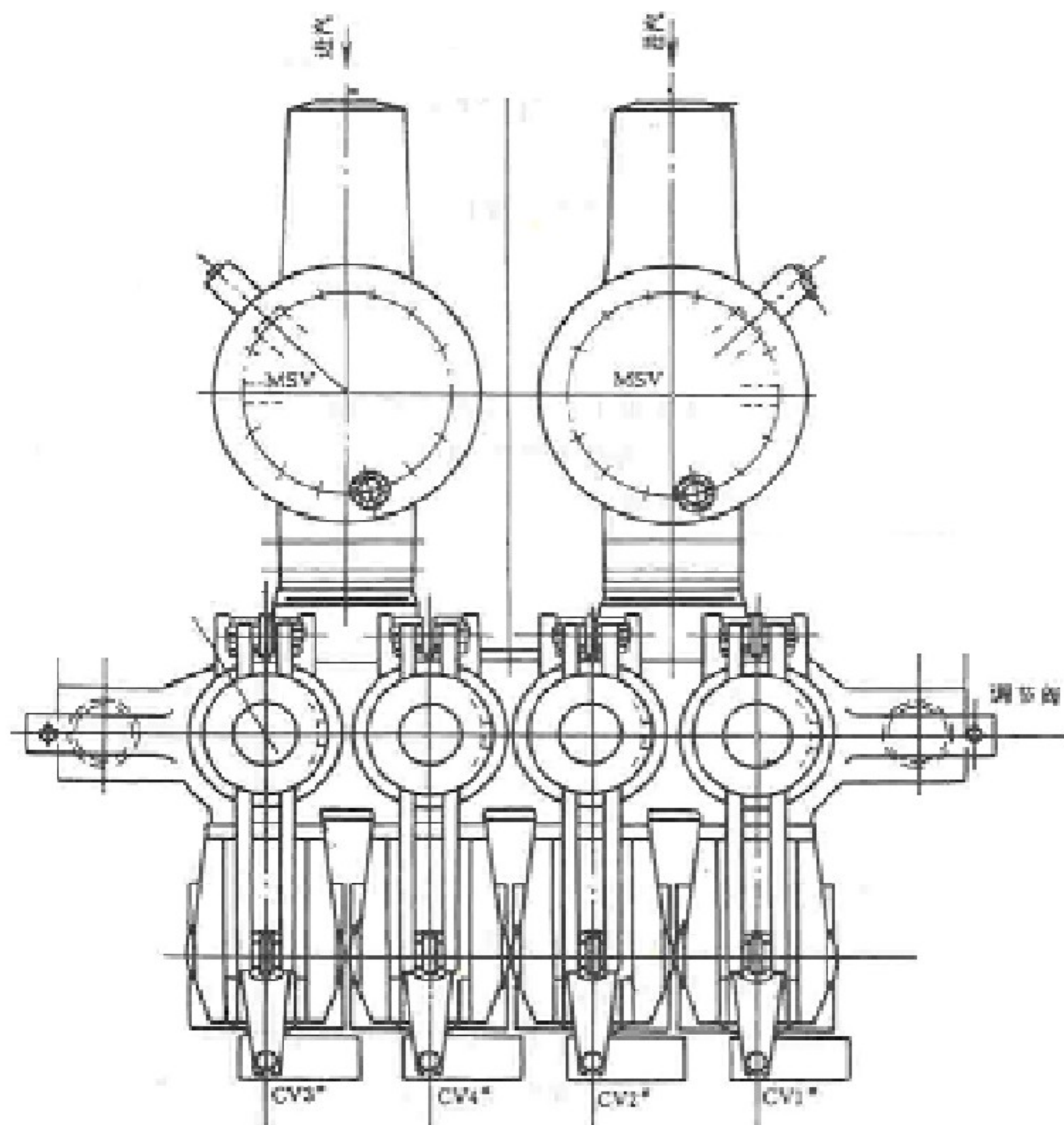
高调门顺阀



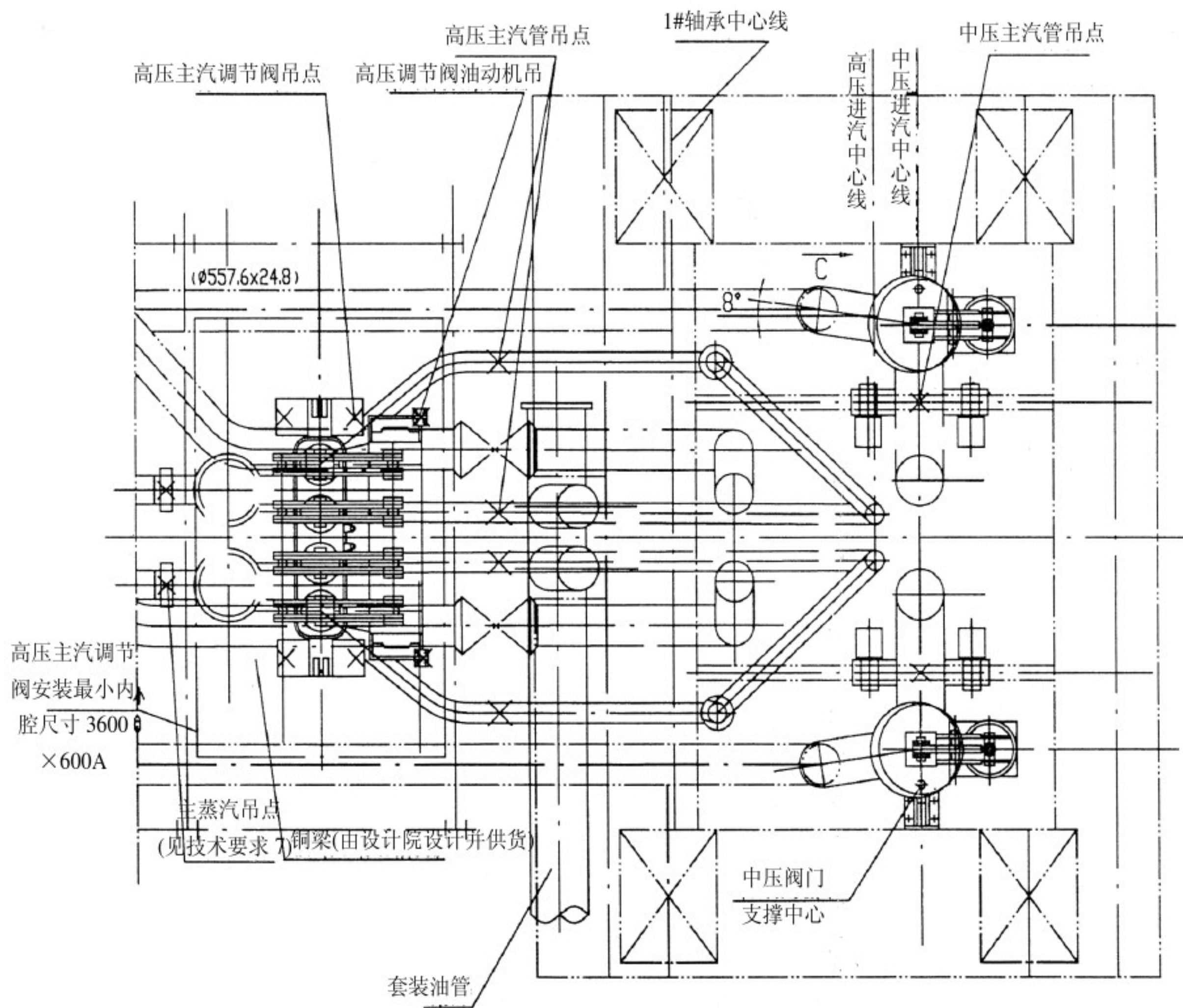


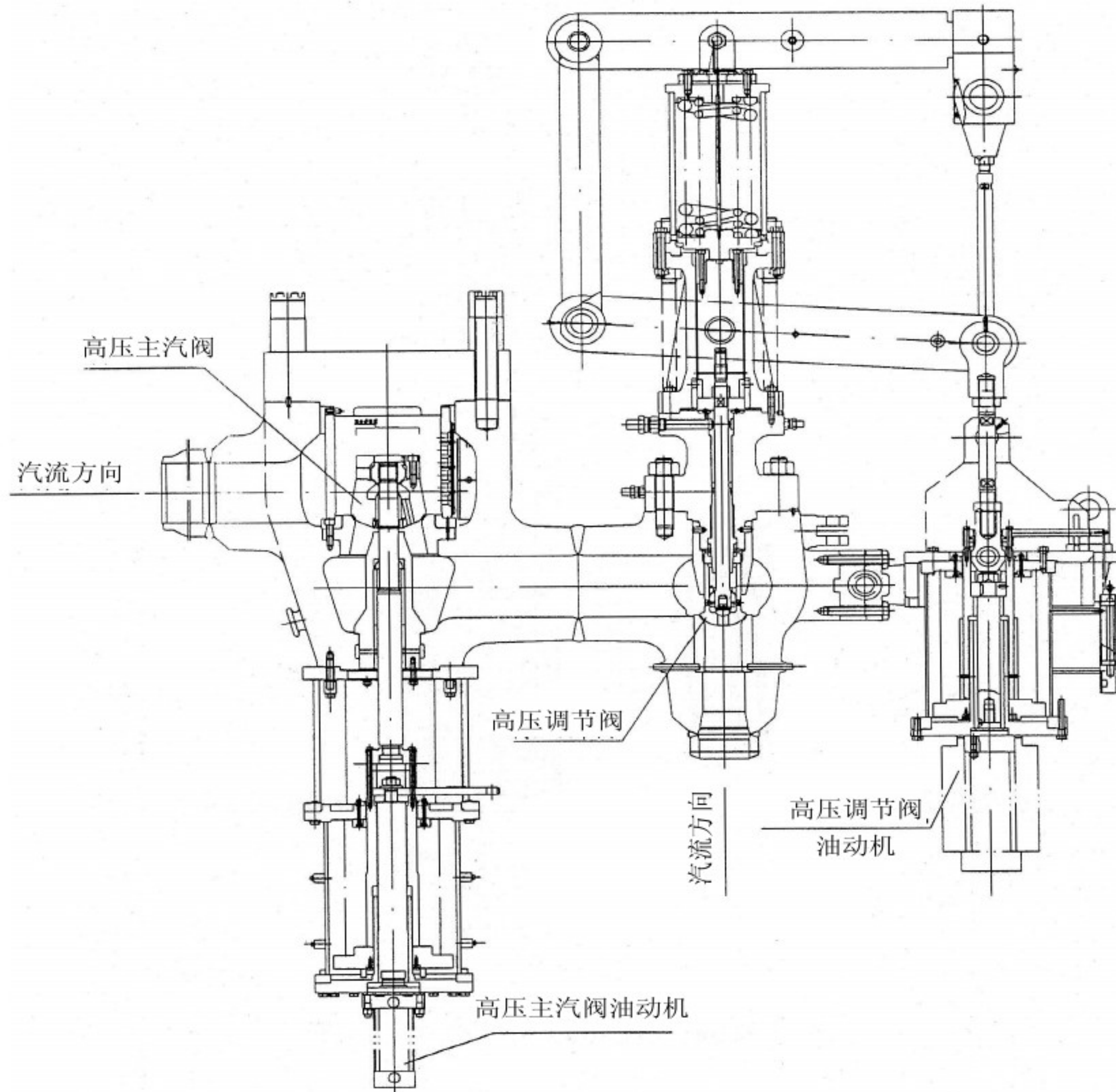
中调门单阀

高压缸配 汽机构结构

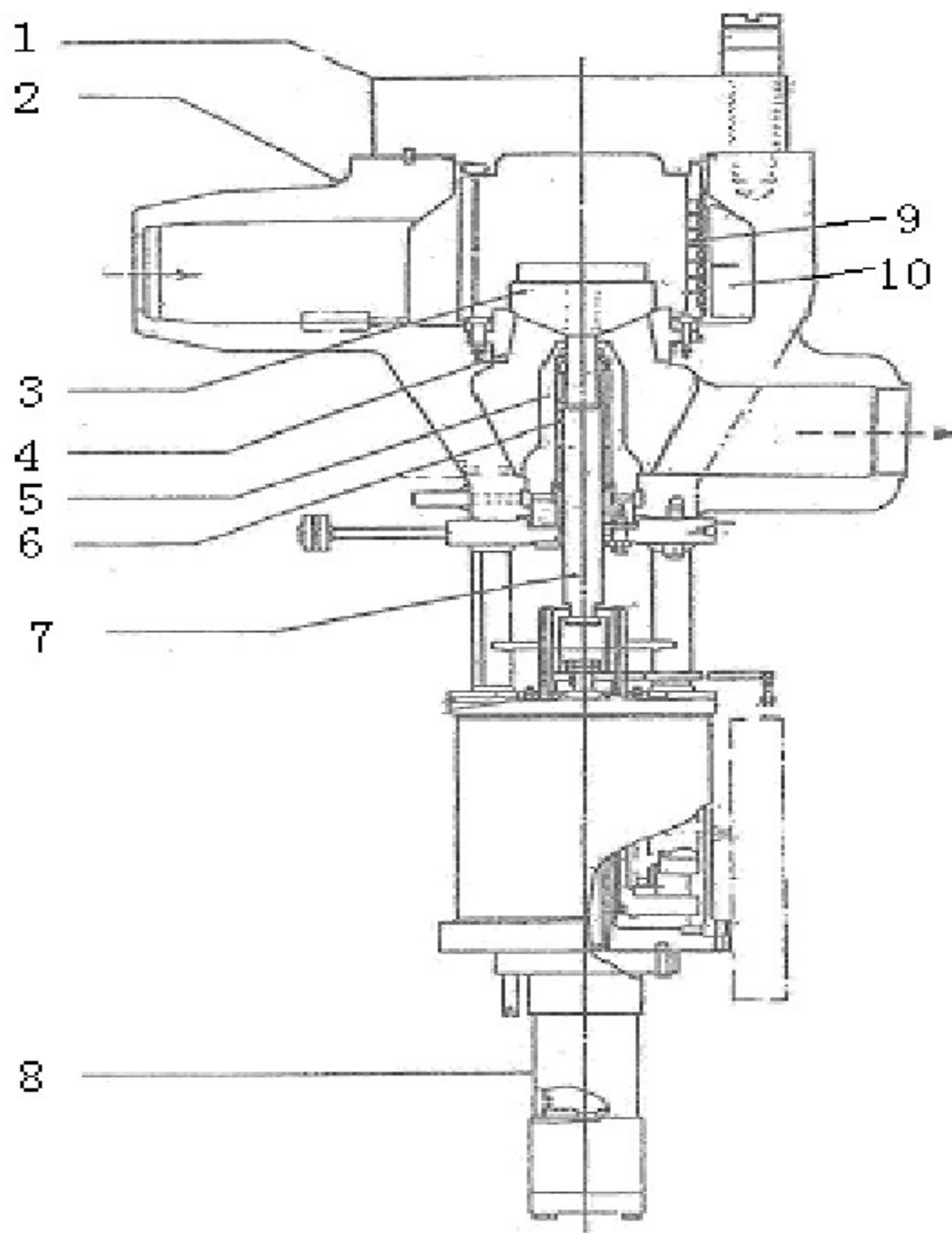












1.阀盖 2.阀壳 3.阀蝶 4.阀座 5.套筒 6.密封 7.阀杆 8.执行机构 9.滤网 10.阀腔

图1—13高压主汽门示意图



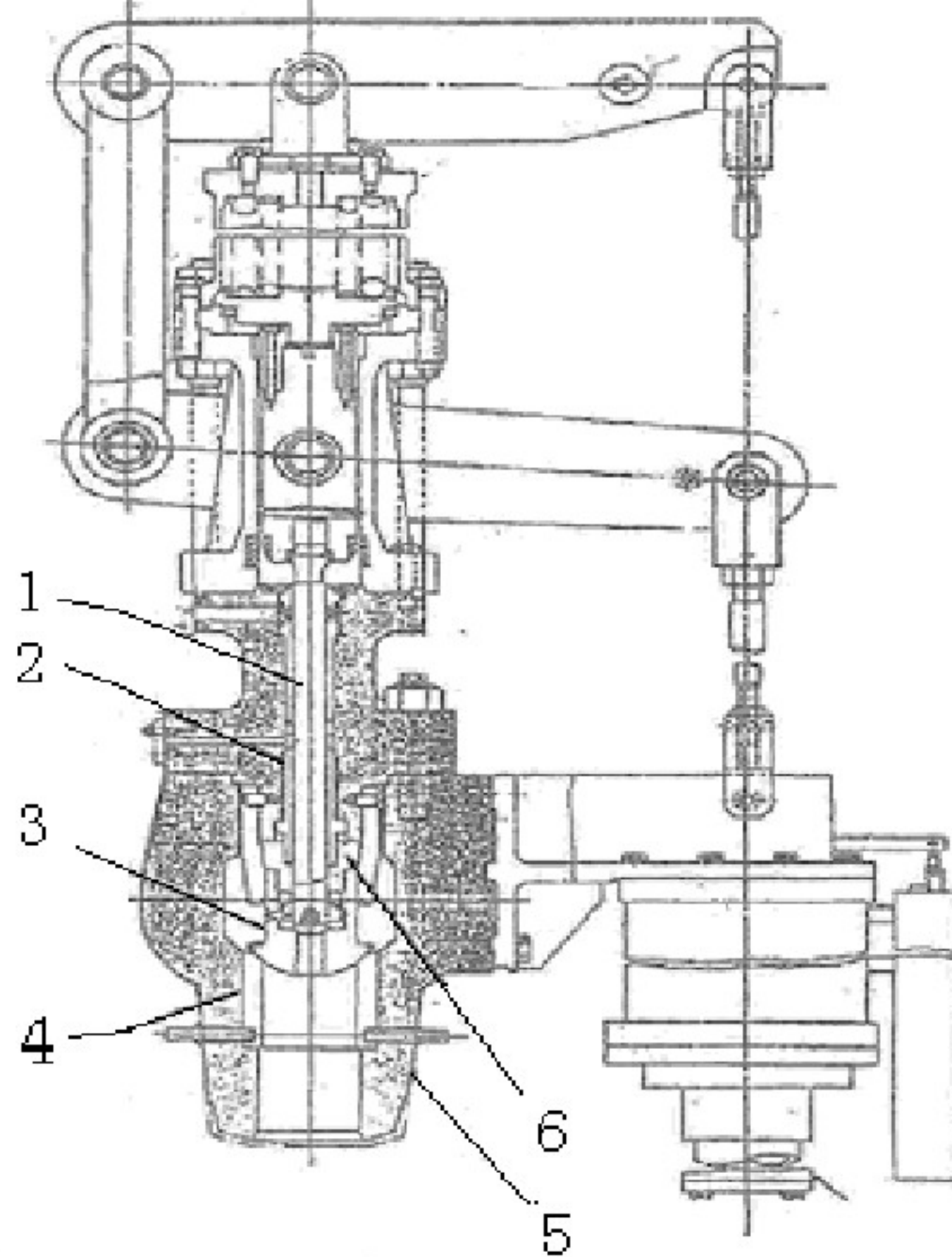
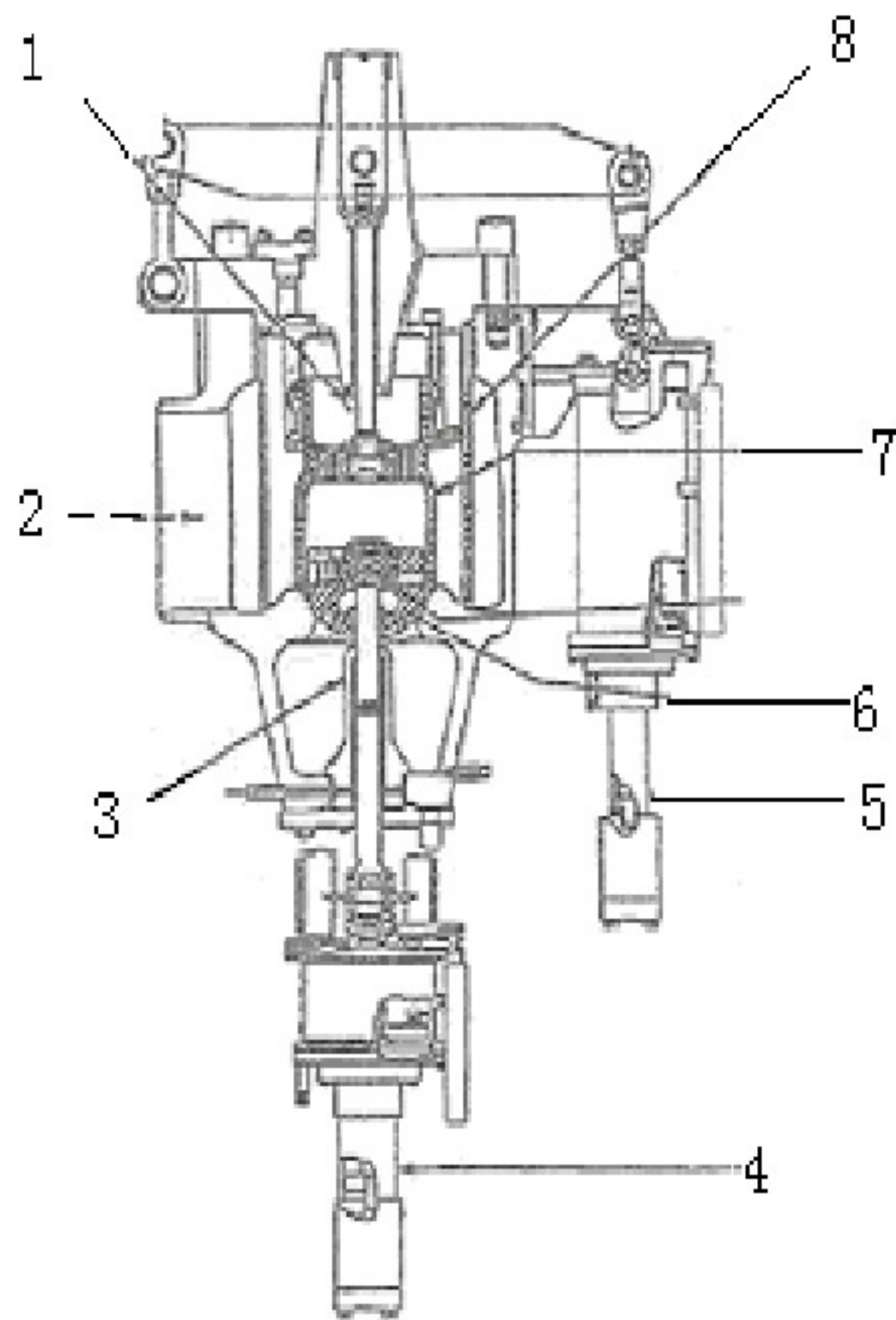


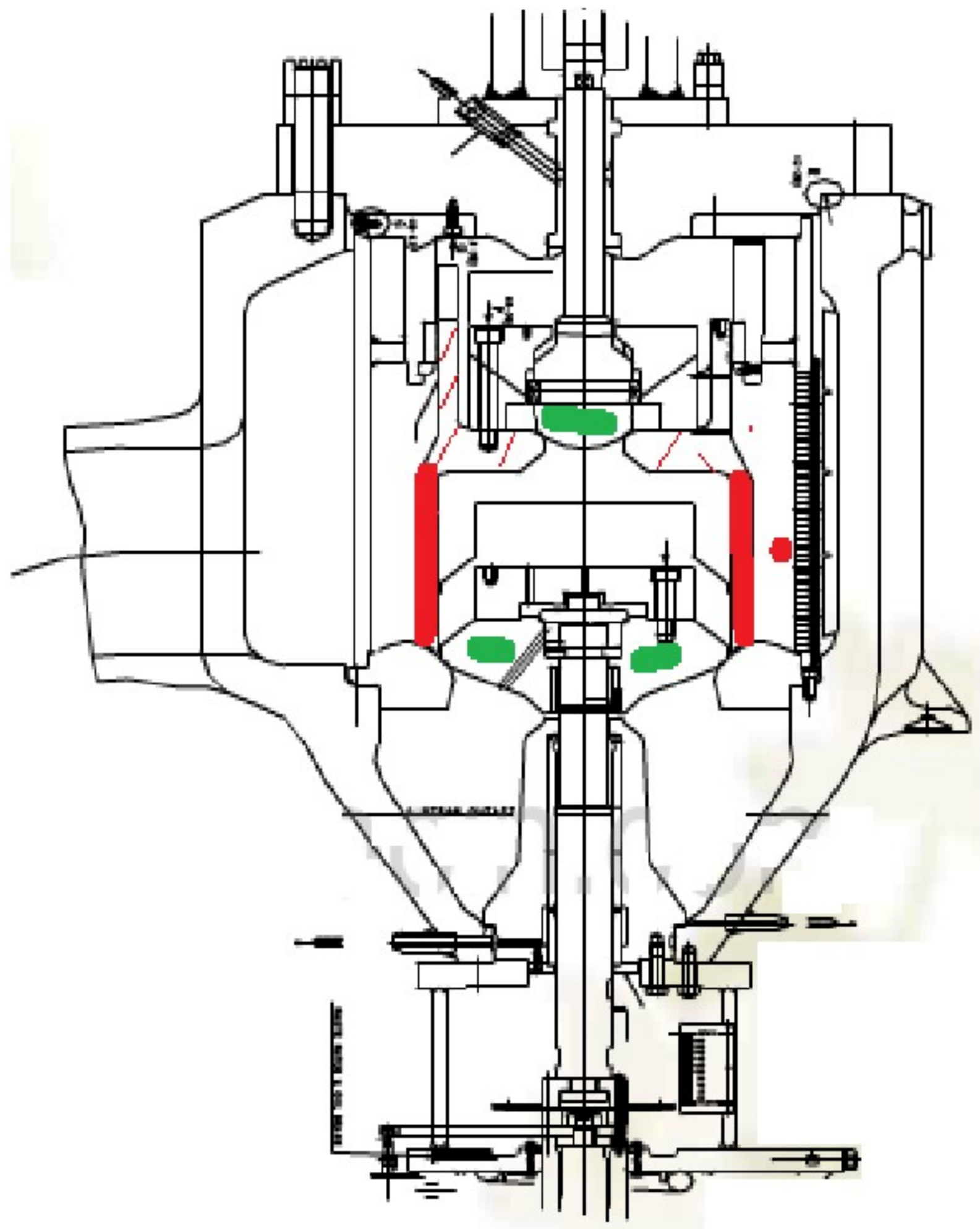
图1—14 高压调节阀示意图

1. 阀杆 2. 阀杆套筒 3. 阀蝶 4. 阀座 5. 阀壳 6. 密封



1.中压调节阀阀杆 2.中联阀进汽 3.中主阀阀套 4.中主阀执行机
5.中调阀执行机构 6.中主阀阀蝶 7.中调阀阀蝶 8.滤网

图1—15 中压联合阀示意图



D600RN 1

右 中压阀

装箱单
PACKING SLIP

东方汽轮机有限公司
地址：四川省成都市双流区
电话：028-26081111
传真：028-26081112
邮编：610200
网址：www.dongfang-turbine.com
E-mail: info@dongfang-turbine.com
D600RN 1
合同号：A88-06000
设备名称：中压蒸汽阀
规格：DN1000 PN16
重量：10000kg

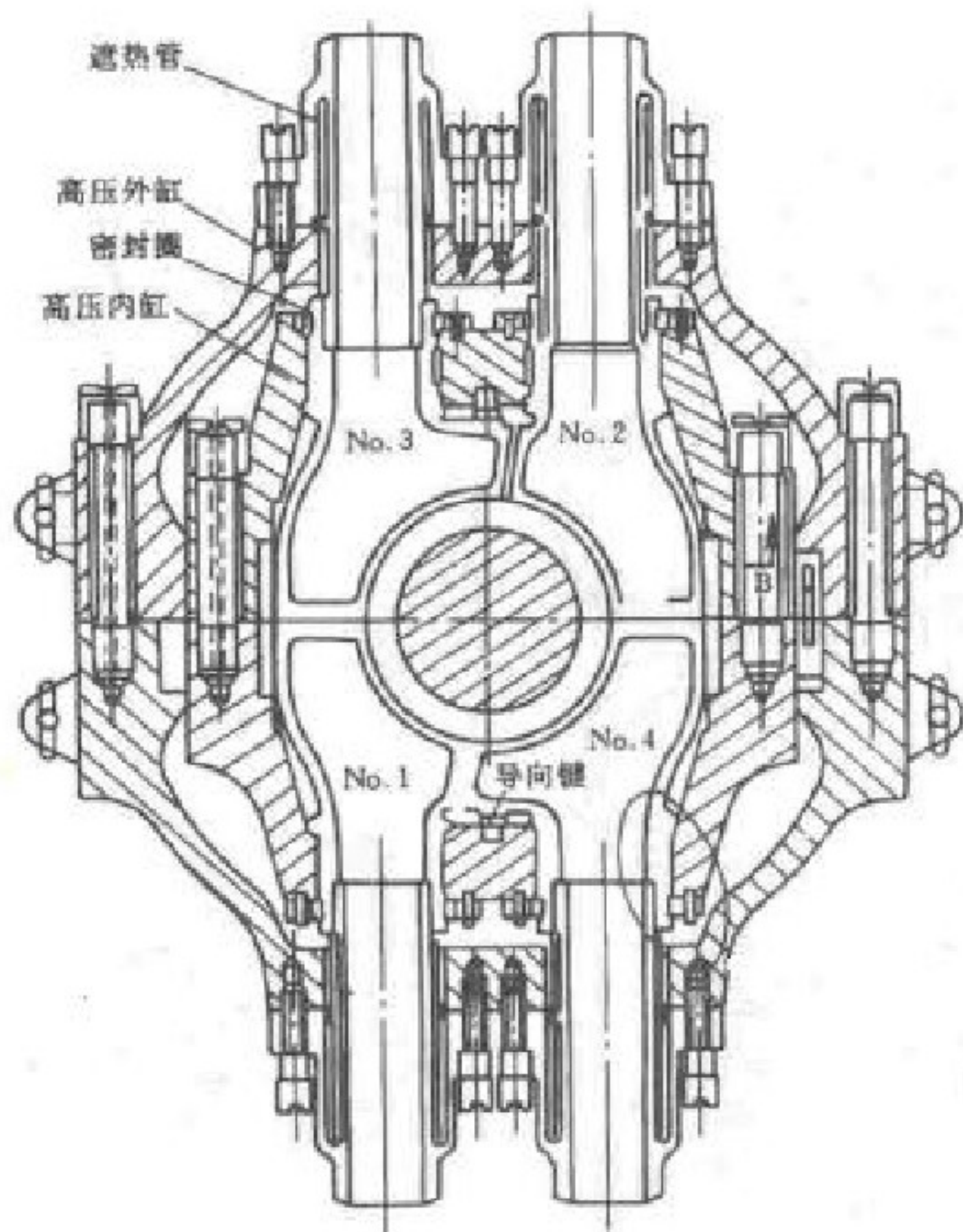


图1—16高压导汽管与喷嘴室

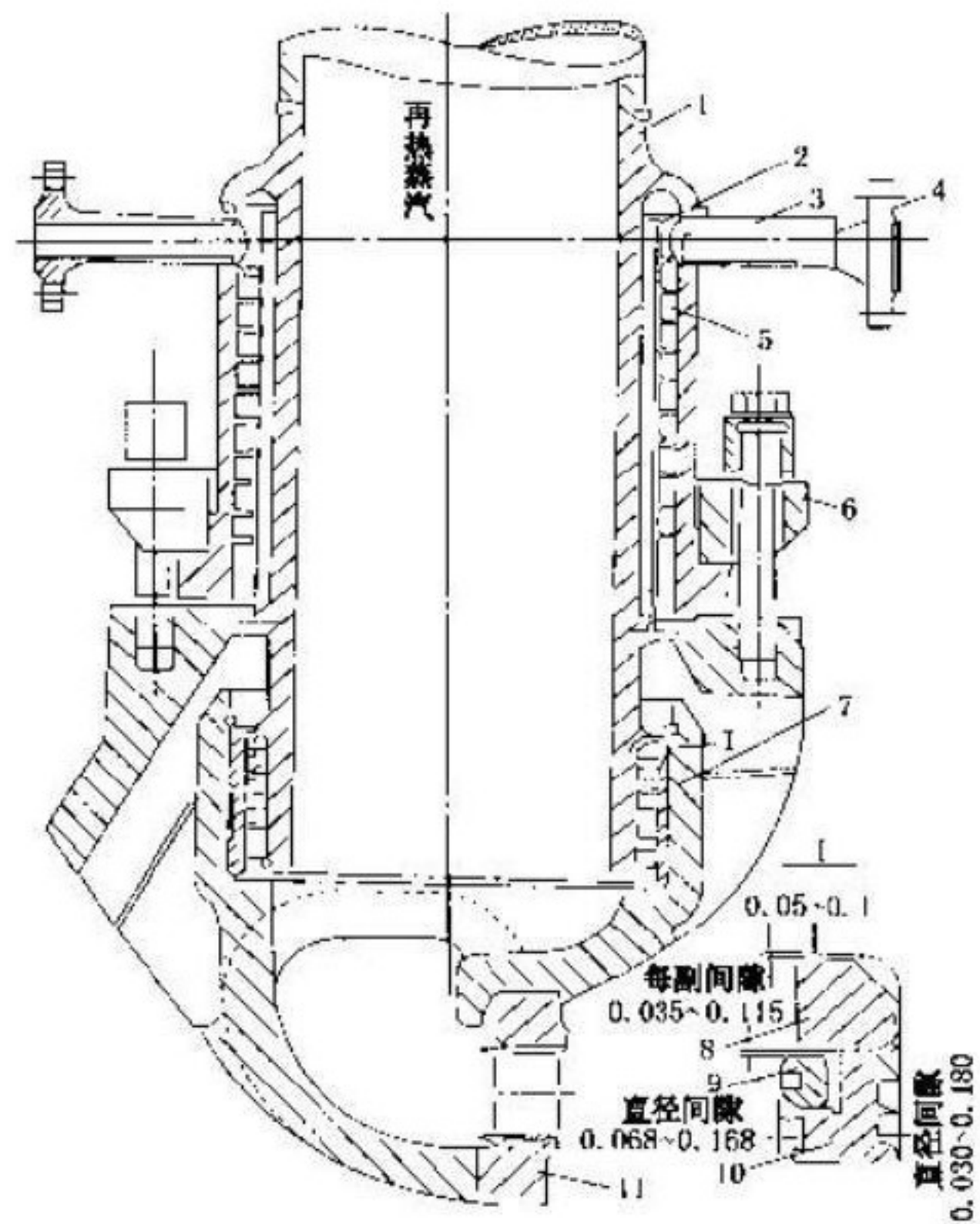
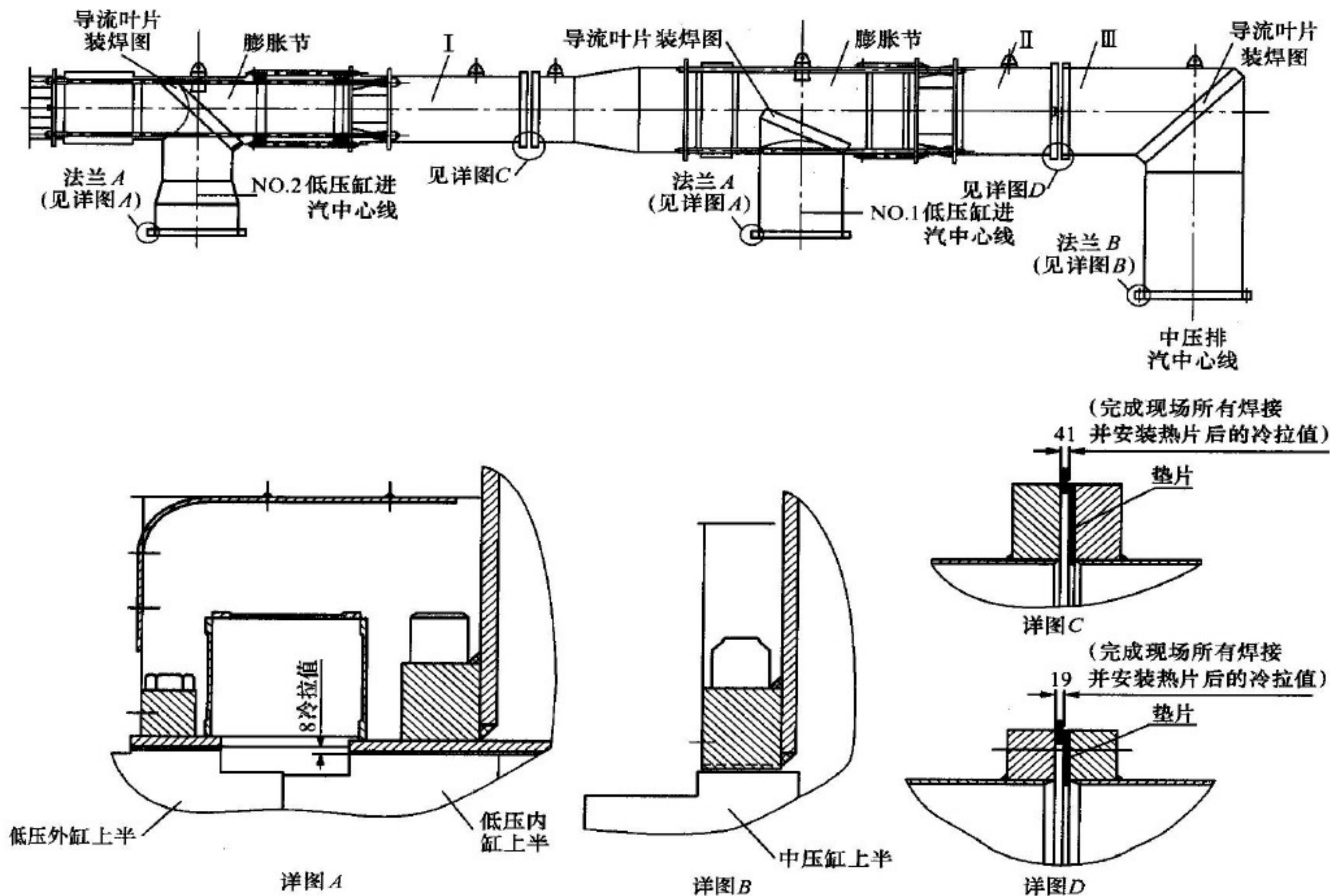


图1—17中压导汽管与喷嘴室

某600MW汽轮机中低压连通管



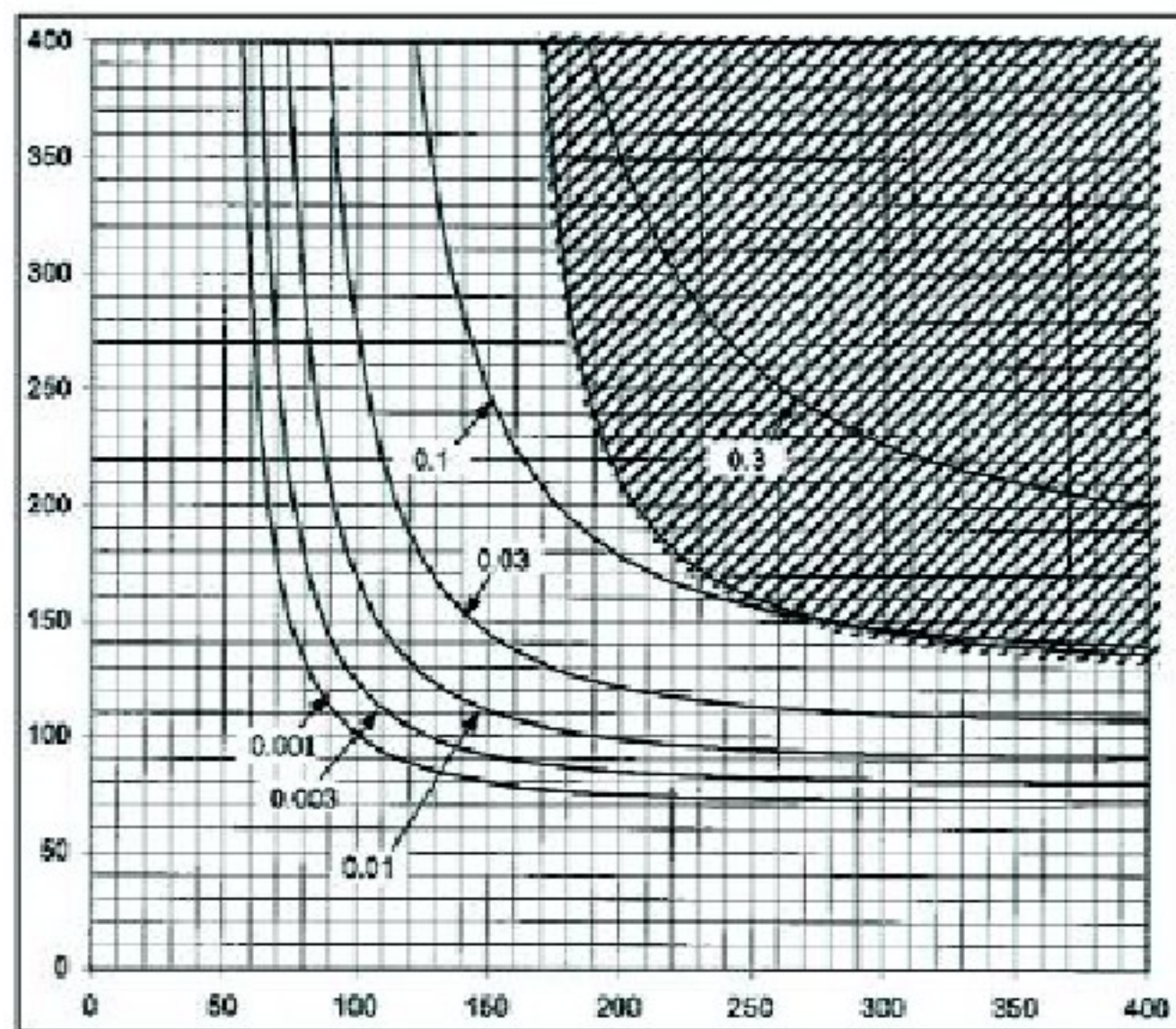
汽轮机转子及动叶片

1. 转子工作时的受力
2. 转子共振及临界转速
3. 转子的应力监控及寿命损耗
4. 转子结构及轴系的连接安装
5. 动叶片的结构、受力、共振及调频
6. 调节级及中压第一级喷嘴和动叶固体颗粒冲蚀（**SPE**）及防止措施

东方660MW汽轮机及发电机各节点的设计扭矩、扭应力和安全系数及所对应的异常工况如下：

考核截面	设计扭矩 $10^6\text{N}\cdot\text{M}$	扭应力MPa			扭应力值最大时的安全系数
		最大工况	二相短路	三相短路	
高中压前轴颈处	0	0.0	0.17	0.20	—
高中压后轴颈处	1.1	73.4	76.2	91.3	4.6
A低压前轴颈处	1.1	52.5	58.3	69.5	8.3
A低压后轴颈处	1.6	76.8	207.5	186.2	5.7
B低压前轴颈处	1.6	75.6	204.9	182.5	5.8
B低压后轴颈处	2.2	88.4	374.8	341.2	5.0
发电机前轴颈处	2.2	78.1	325.3	292.8	5.6
发电机后轴颈处	0.0	0.00	5.3	4.7	—

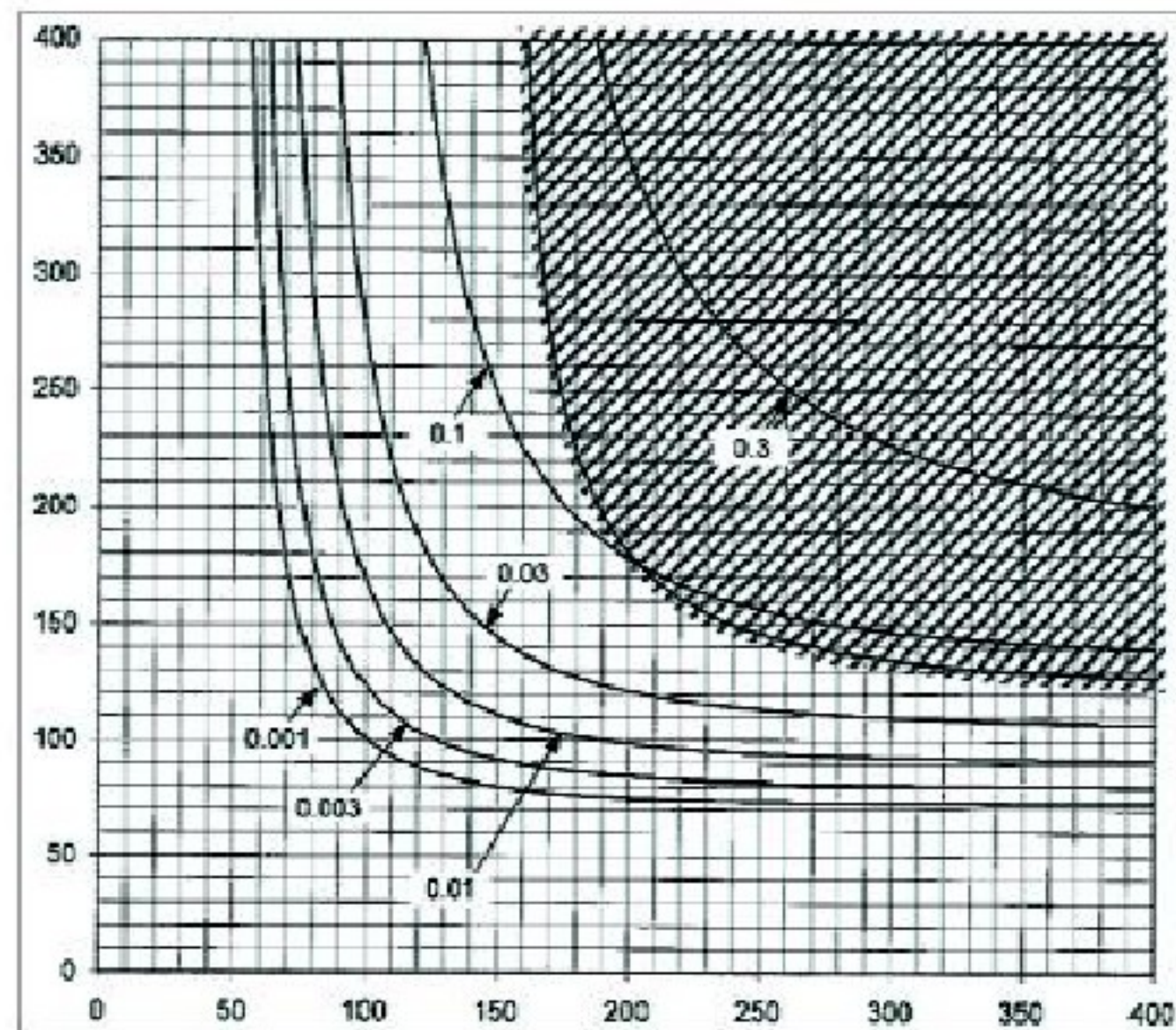
金属温度变化率($^{\circ}\text{C}/\text{h}$)



金属温度变化量($^{\circ}\text{C}$)

高压转子在各种循环寿命消耗条件下的温度变化率和变化量的关系

金属温度变化率($^{\circ}\text{C}/\text{h}$)



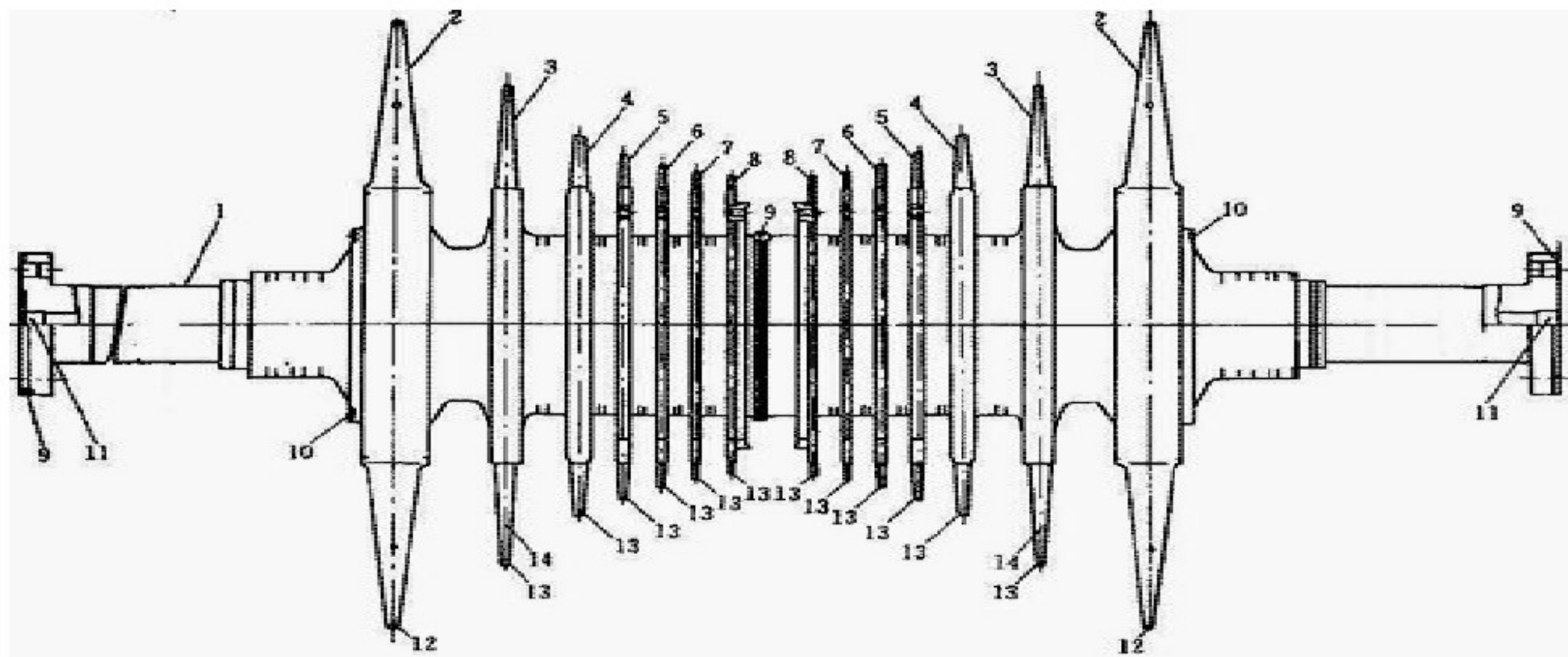
金属温度变化量($^{\circ}\text{C}$)

中压转子在各种循环寿命消耗条件下的温度变化率和变化量的关系

- 1 阴影区给出转子中心的应力极限，此区内严禁运行
- 2 各条曲线上数值为每次循环的寿命消耗（百分比表示）

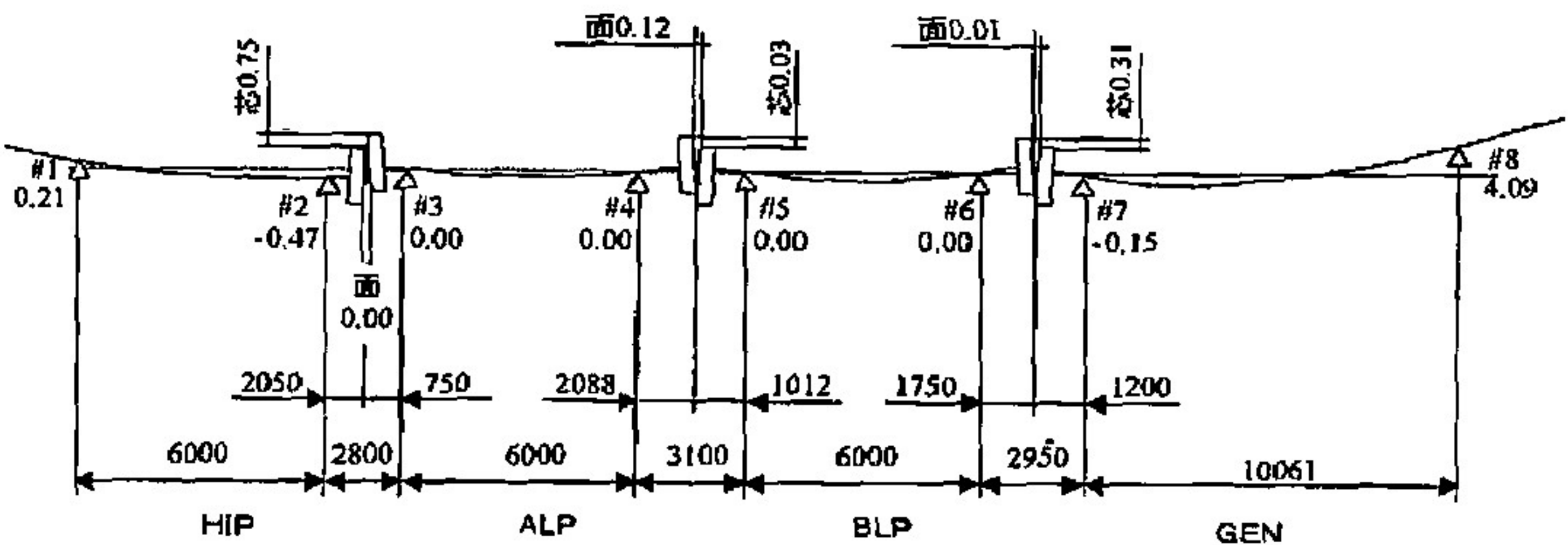
运行方式	寿命期内次数	寿命消耗（%/次）	寿命消耗（%）
冷态启动	200	0.03	6
温态启动	1200	0.0095	11.4
热态启动	5000	0.0027	13.5
极热态启动	300	0.02	6
负荷阶跃	12000	0.0008	9.6
总的寿命消耗%			46.5





- 1、转子 2、第19级动叶 3、第18级动叶 4、第17级动叶
 5、第16级动叶 6、第15级动叶
 7、第14级动叶 8、第13级动叶 9、10、平衡重块 11、塞
 销 12、整圈式围带 13、围带 14、拉筋

图1-22 冲动式低压转子

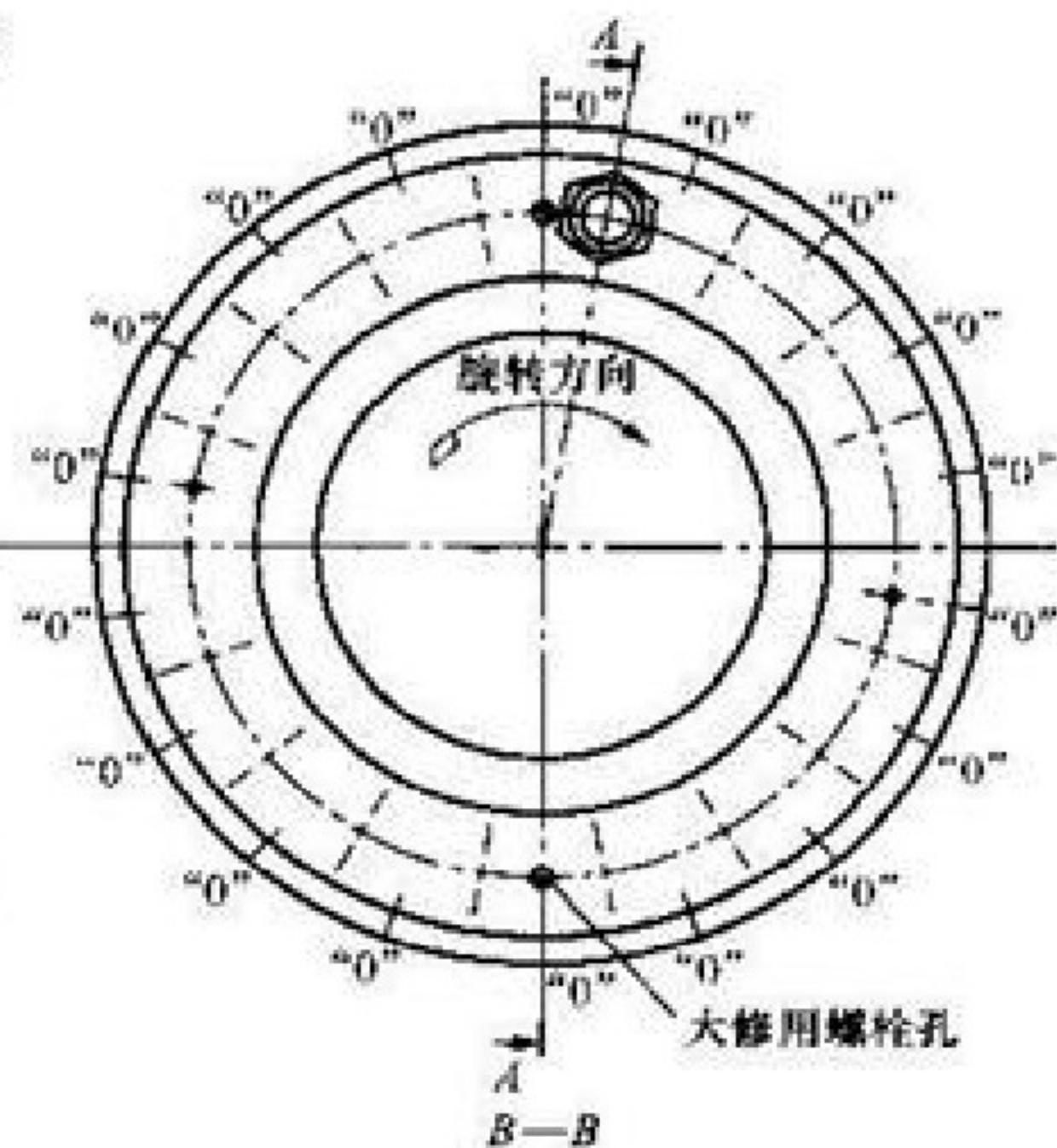
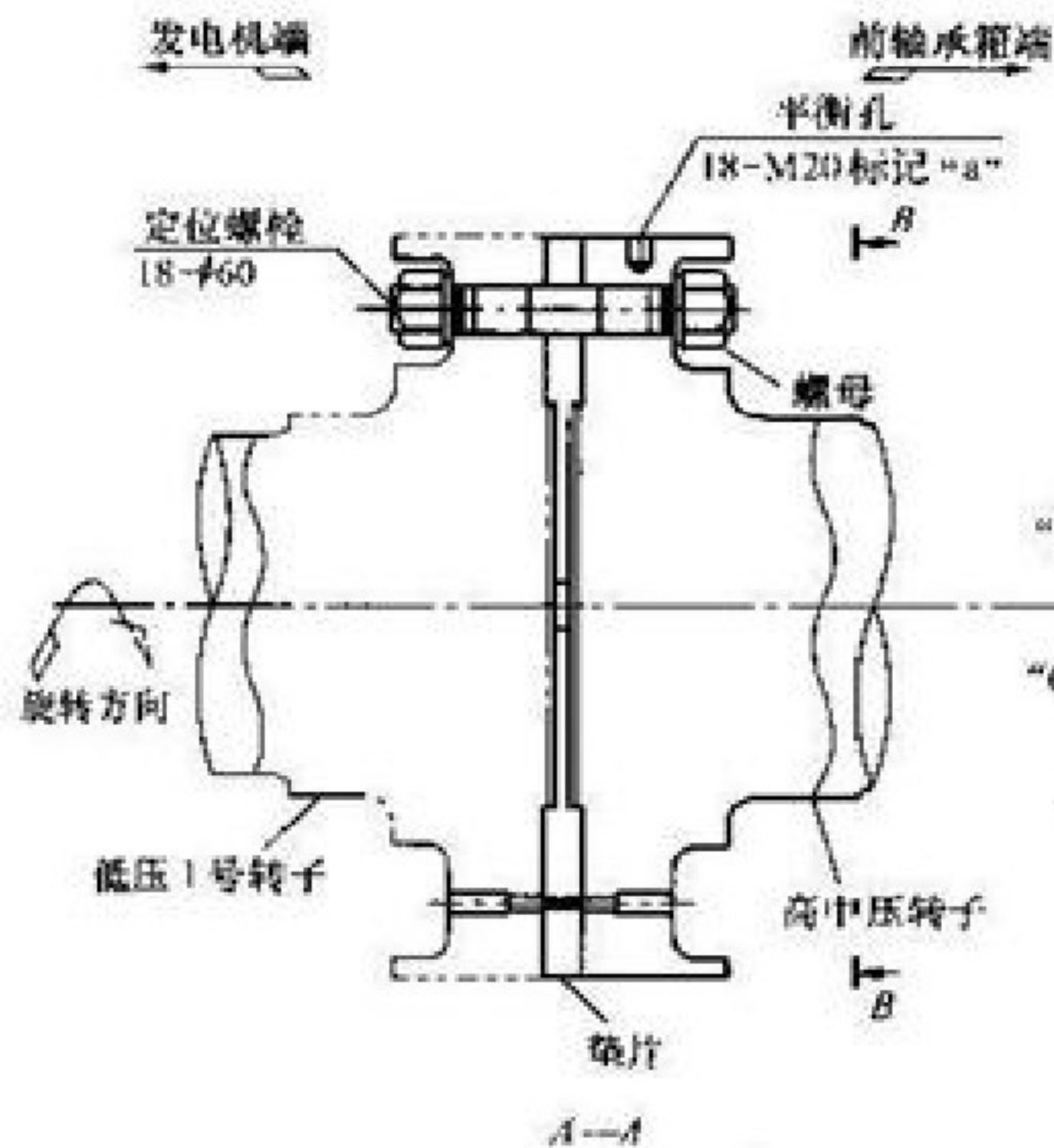


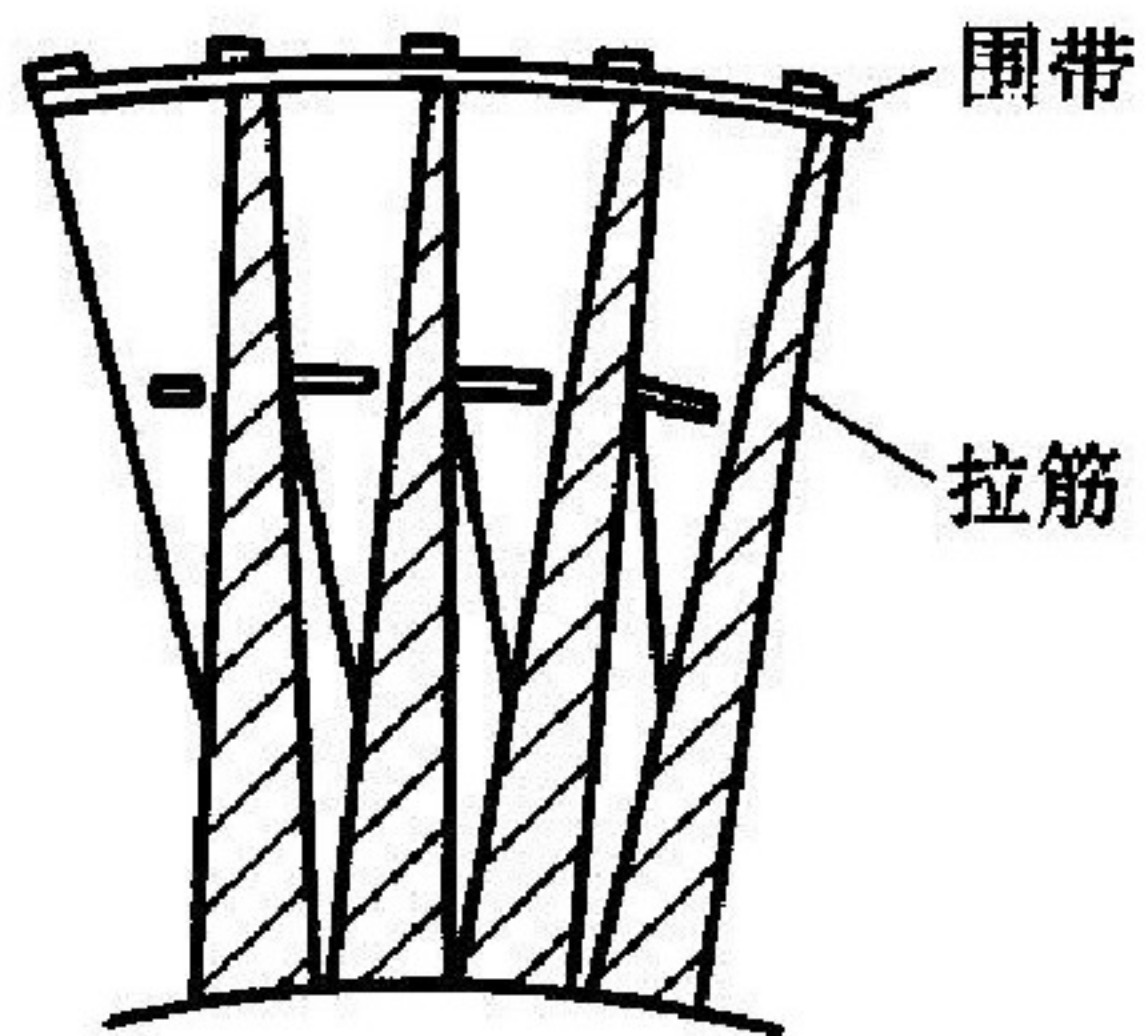
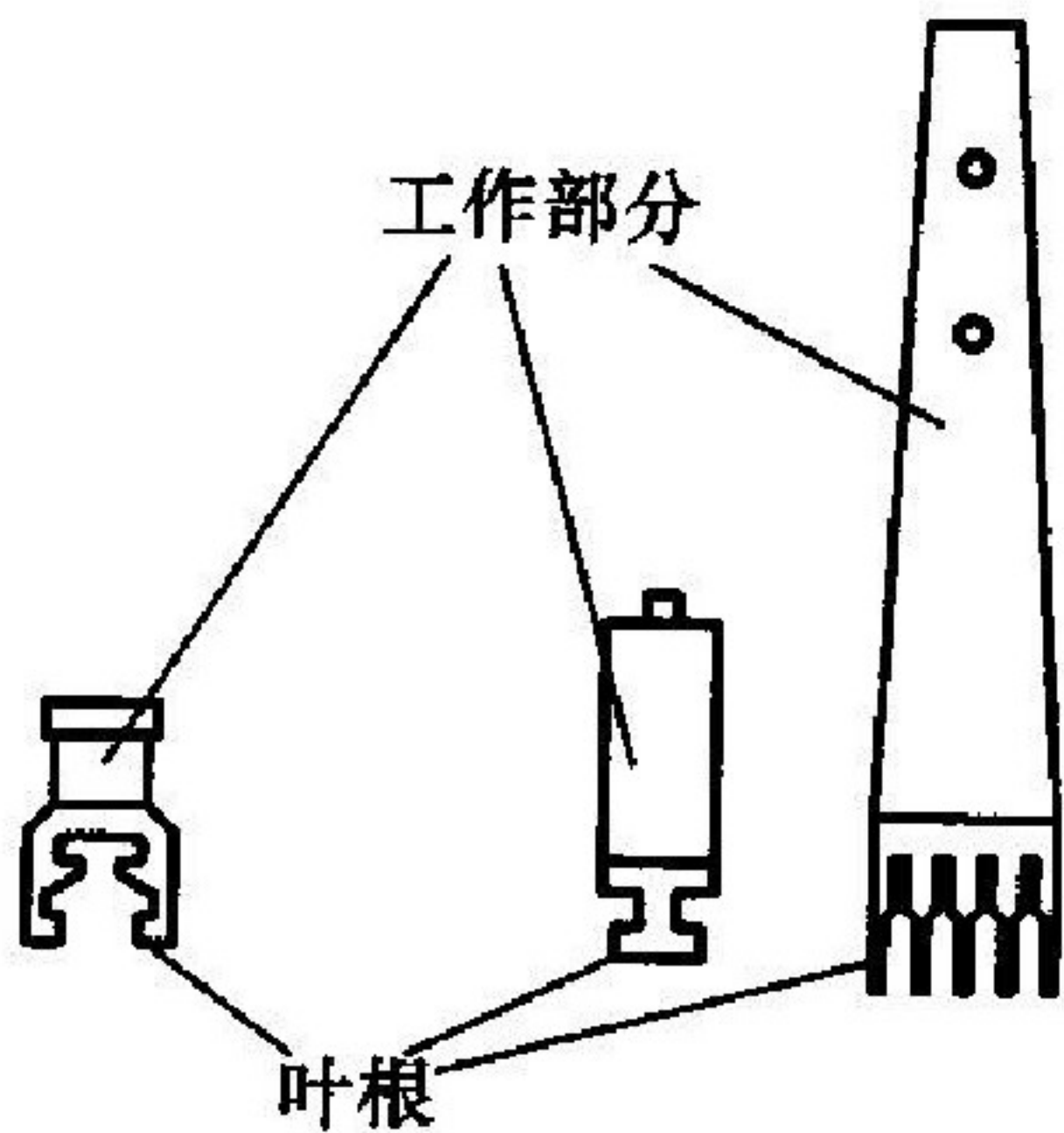
转子的稳定性

在所有稳定运行工况下运行时，在任何轴颈上所测得的双振幅（水平、垂直方向）相对振动值应不大于**0.05mm**，轴承座振动限值不大于**0.025mm**，各转子轴系在通过临界转速时各轴颈双振幅相对振动允许值不大于**0.15mm**，轴承座的振动值不大于**0.075mm**。

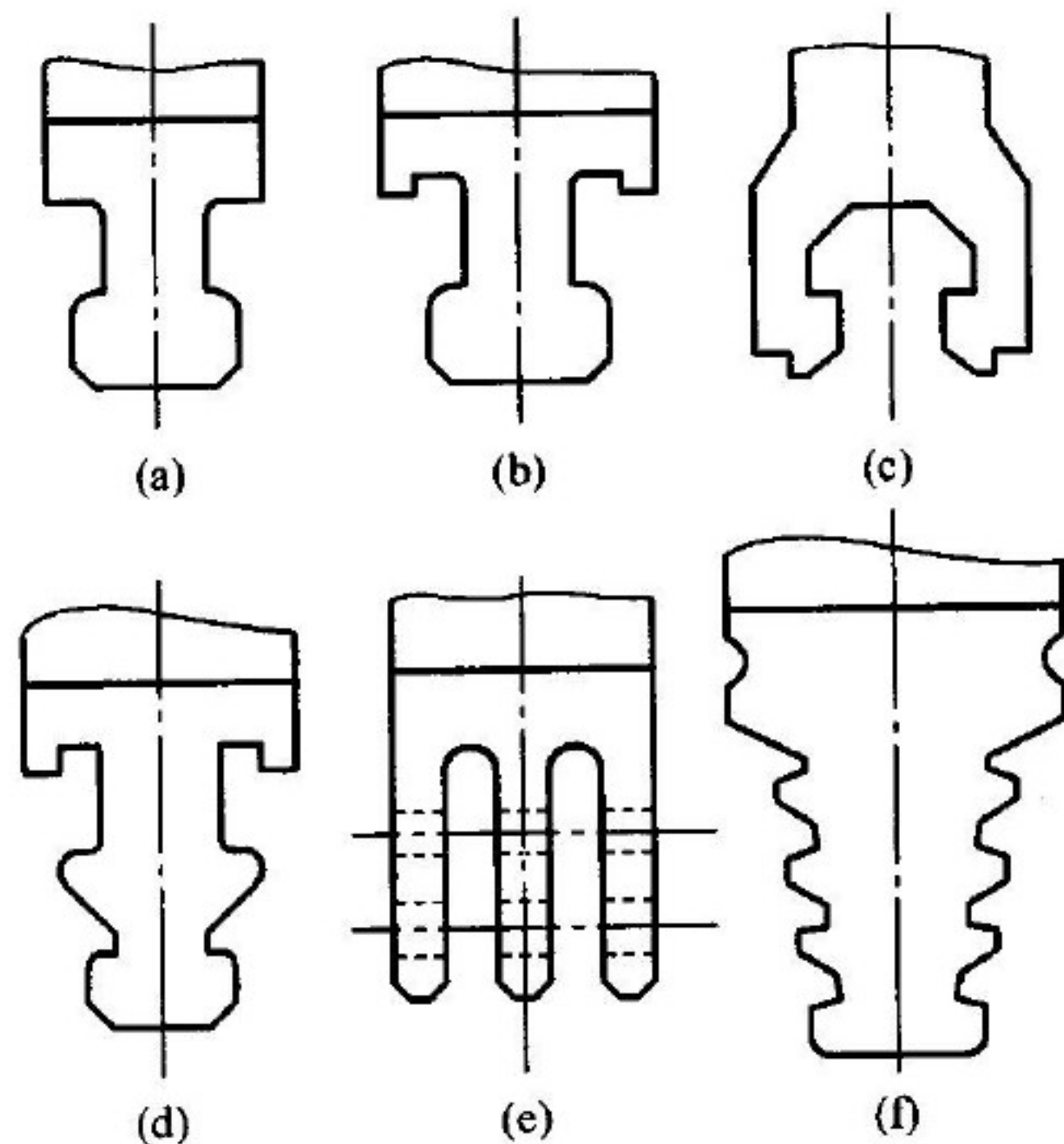
轴段名称	一阶临界转速r/min		二阶临界转速r/min	
	轴系	轴段	轴系	轴段
高中压转子	1602	1560	>4000	>4000
低压转子A	1725	1705	>4000	>4000
低压转子B	1752	1713	>4000	>4000
发电机转子	970	926	2652	2690

轴系各阶临界转速应与额定转速避开**-10%至+15%**的区间。





叶片结构



叶根结构

- (a) T型叶根; (b) 外包凸肩T型叶根;
 (c) 菌型叶根; (d) 外包凸肩双T型叶根;
 (e) 叉型叶根; (f) 枞树型叶根

660MW机叶片结构：

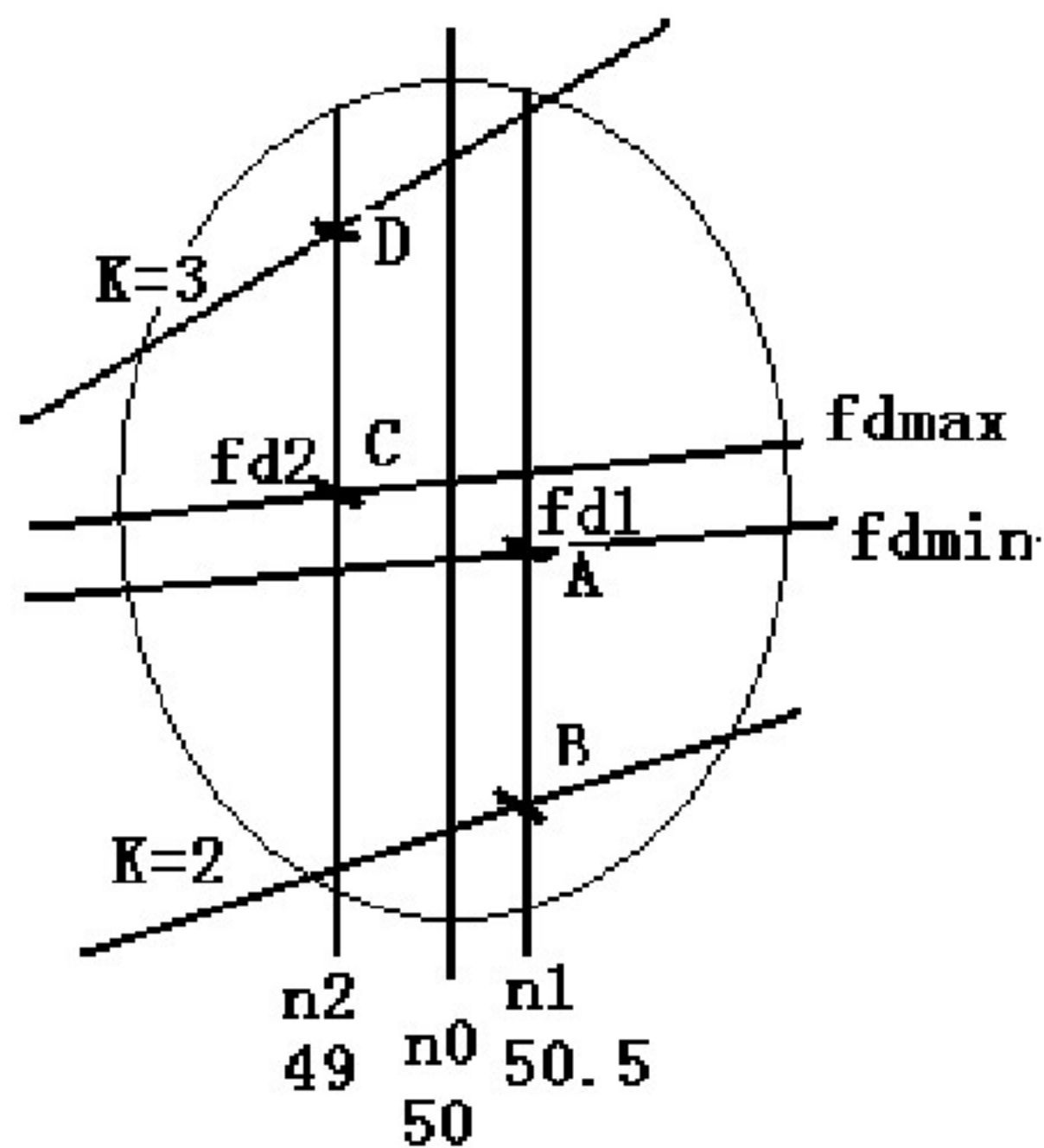
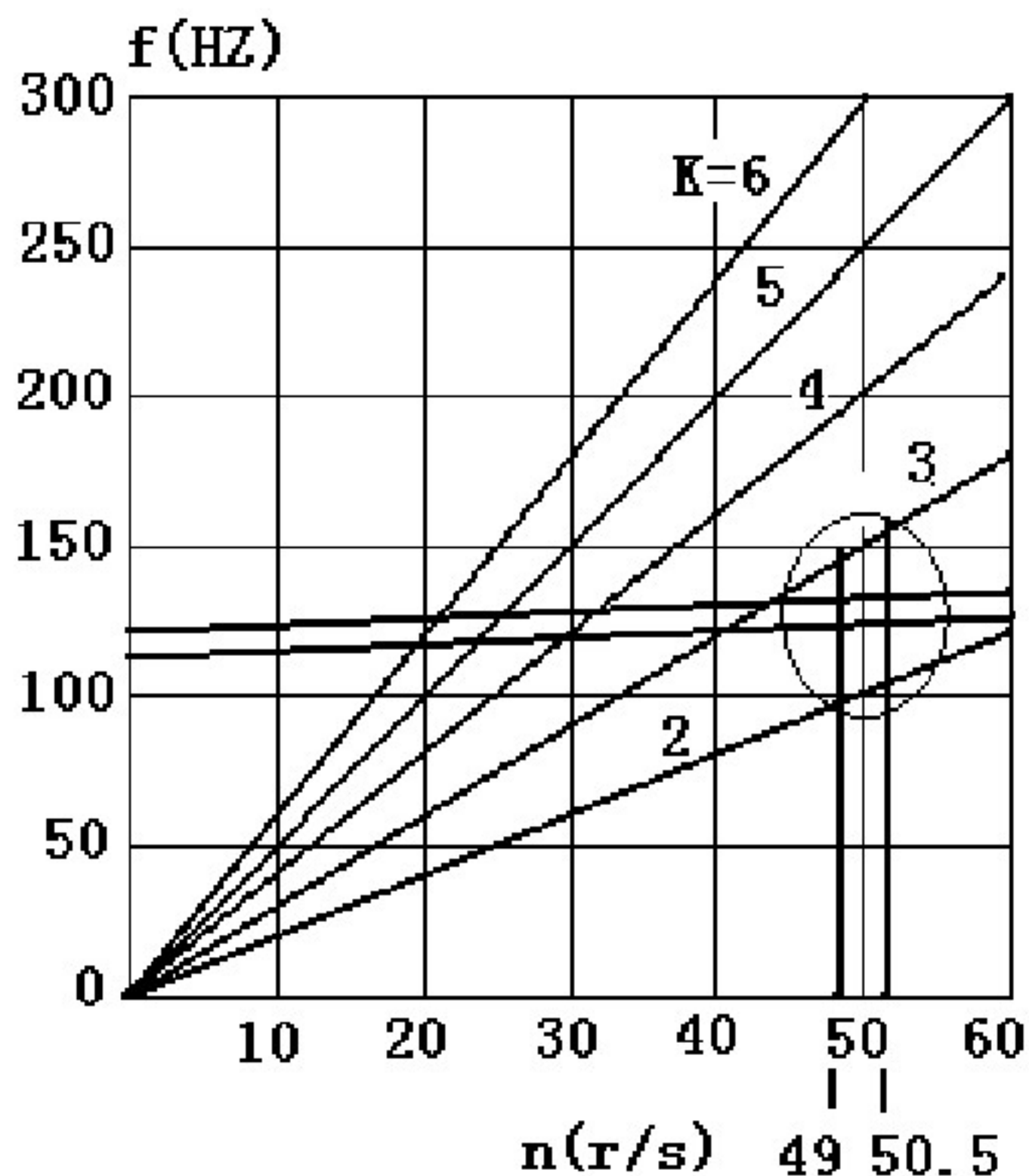
调节级叶片采用大宽度、双倒T型叶根、两层围带结构。

高压缸其余叶片采用外包菌型叶根，

中压各级采用轴向装入式枞树形叶根，

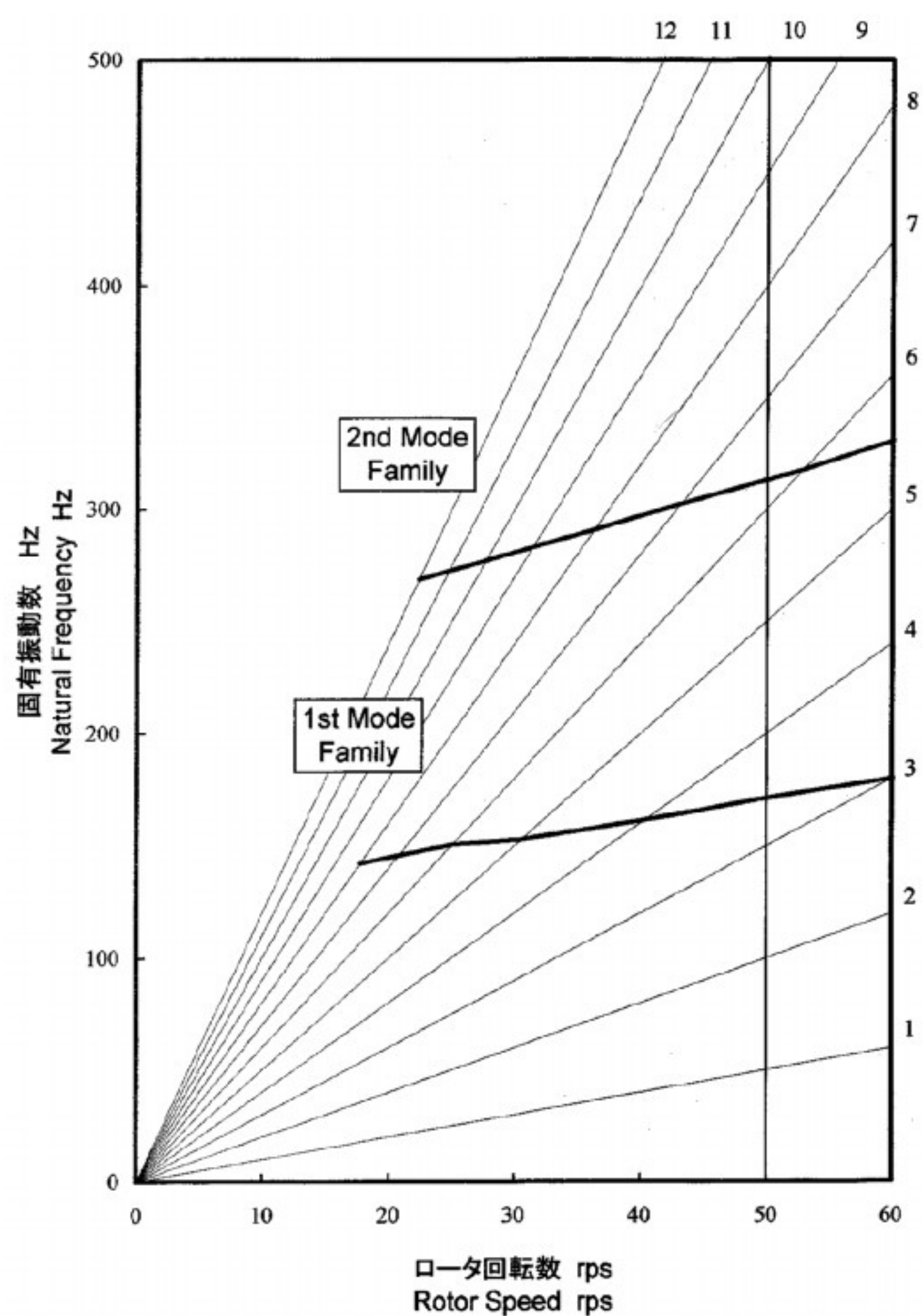
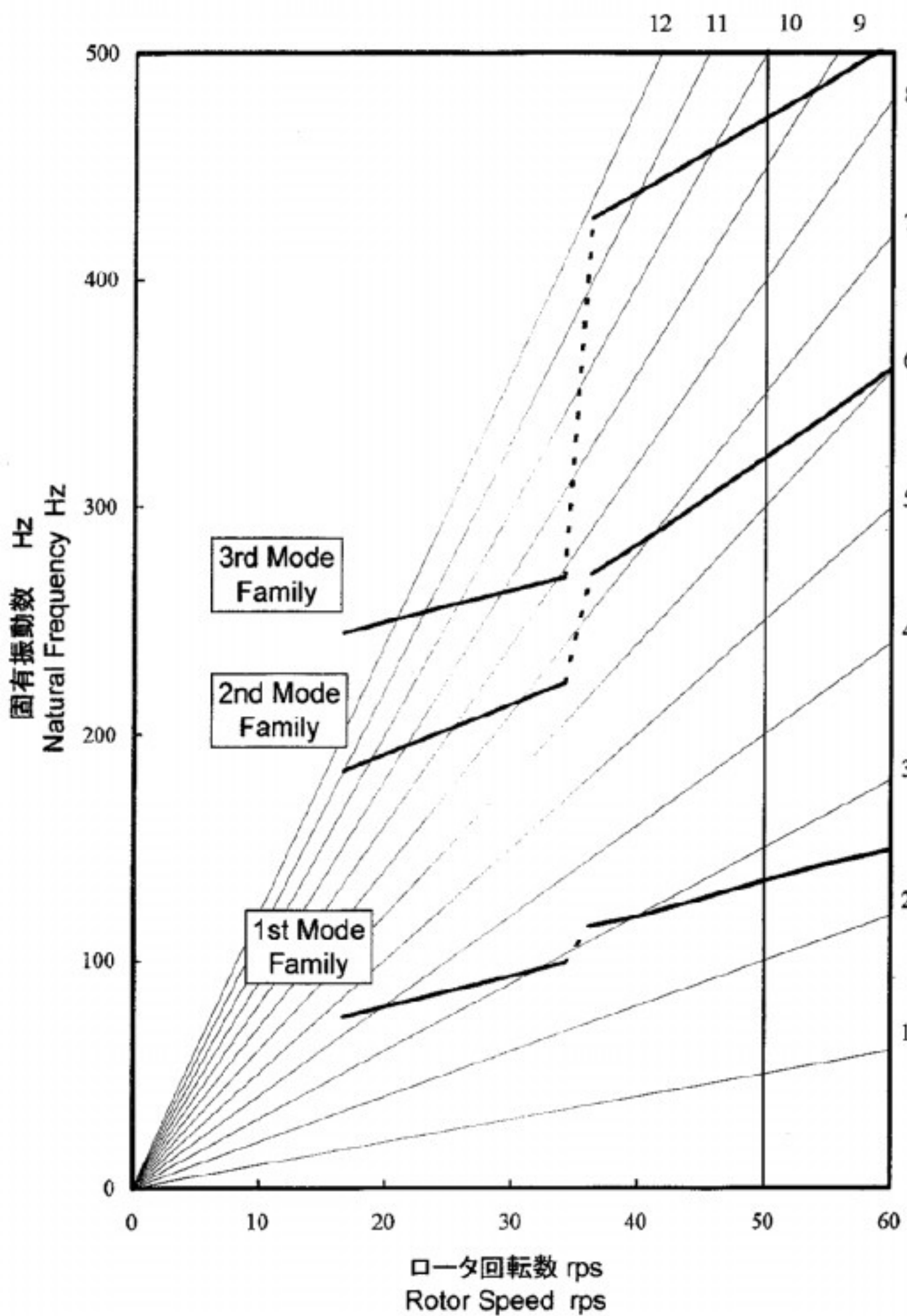
低压缸第1至5级为外包菌型叶根，次末级为5叉型叶根，末级为7叉型叶根。全部采用围带成组，低压末级采用双层围带，

长叶片 A_0 型共振的调频 — 坎贝尔图



$$K n_2 - f_{d2} \geq 7.5 H_r$$

$$f_{d1} - (K-1) n_1 \geq 7.5 H_r$$

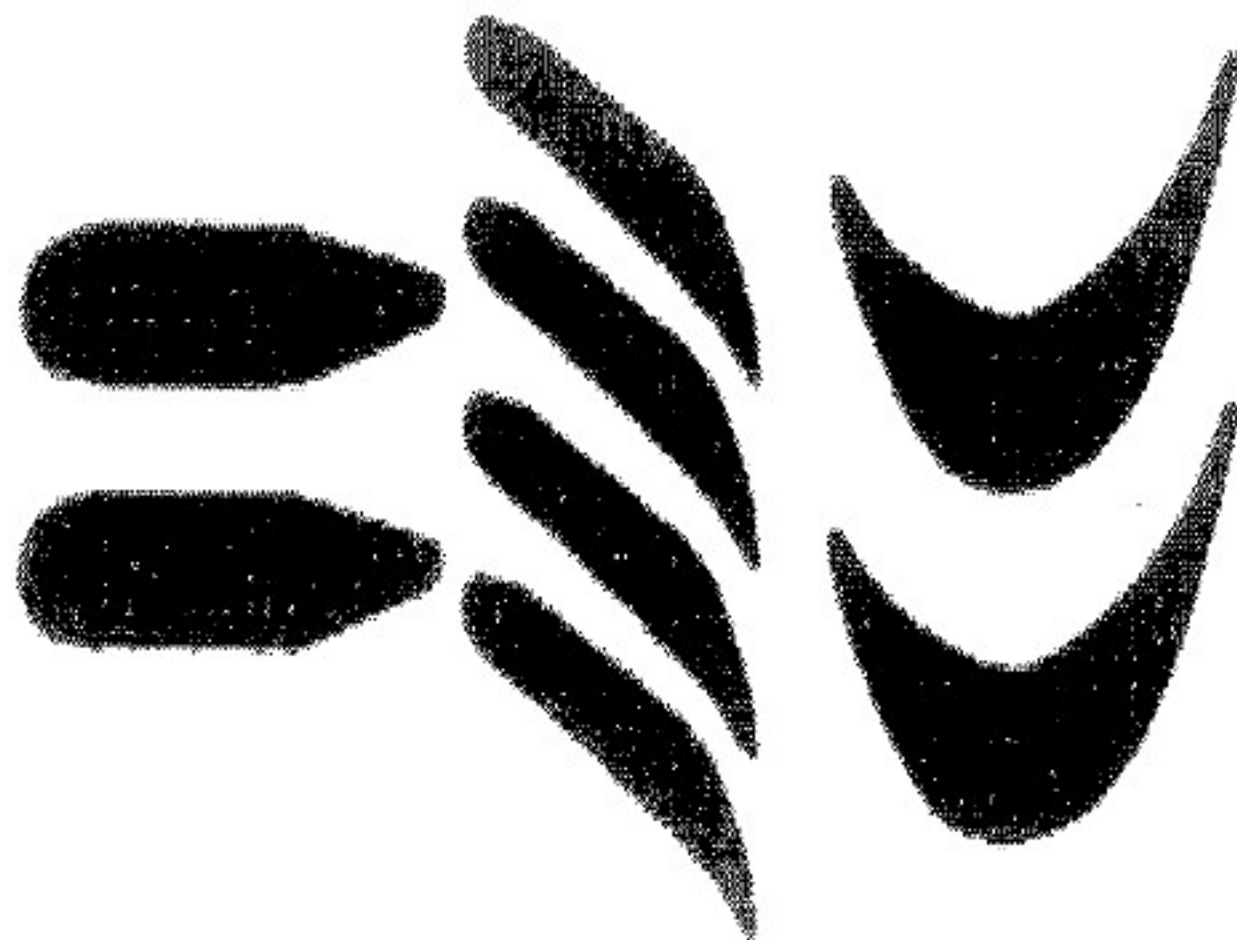


低压末级及次末级叶片的坎贝尔频谱 (CAMPBELL) 图

叶片改形防SPE



普通型



改进型

汽封及轴封系统

1.汽封的作用,工作原理及安装部位

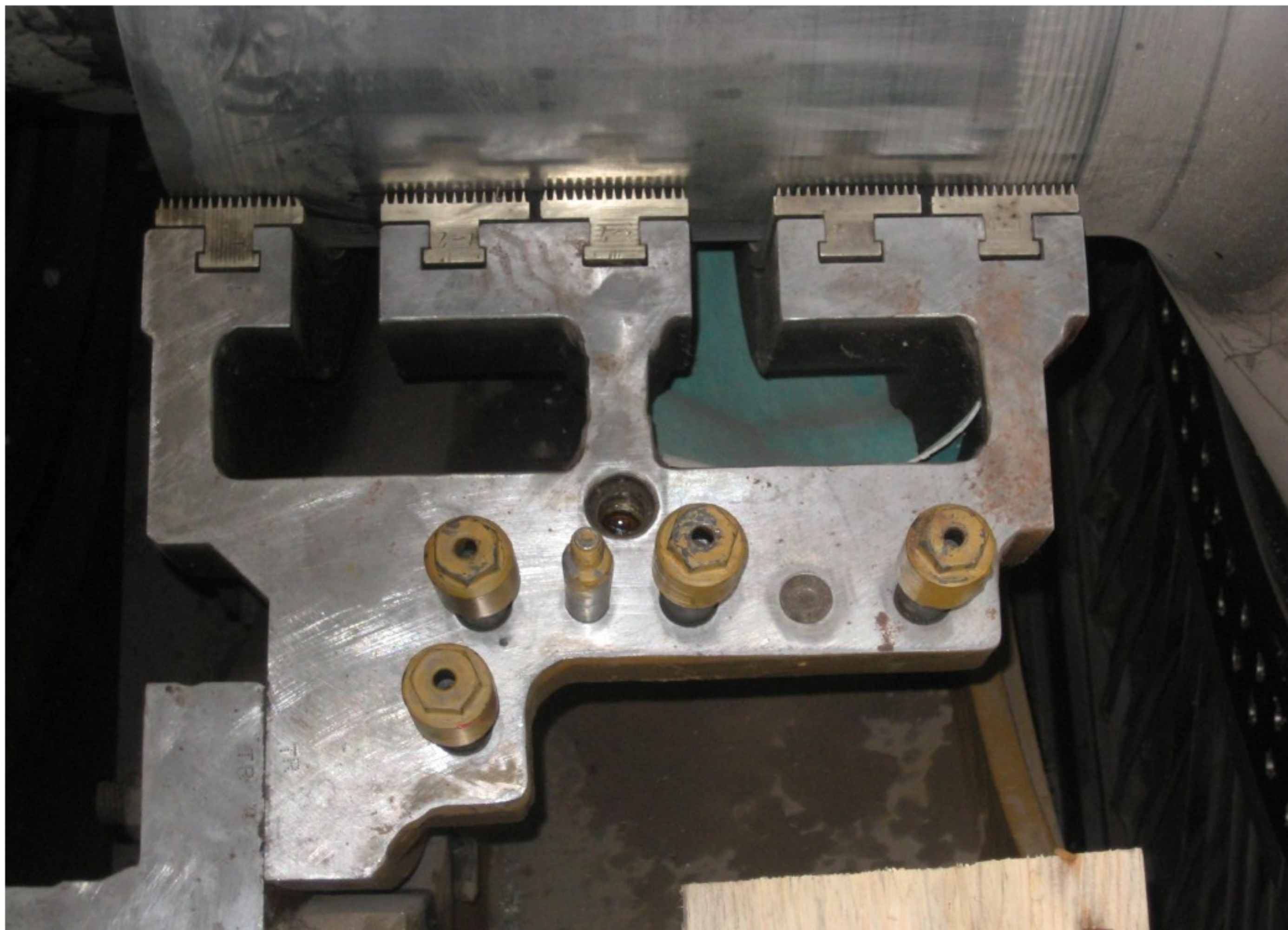
2.本机通流部分汽封及轴端汽封的型式

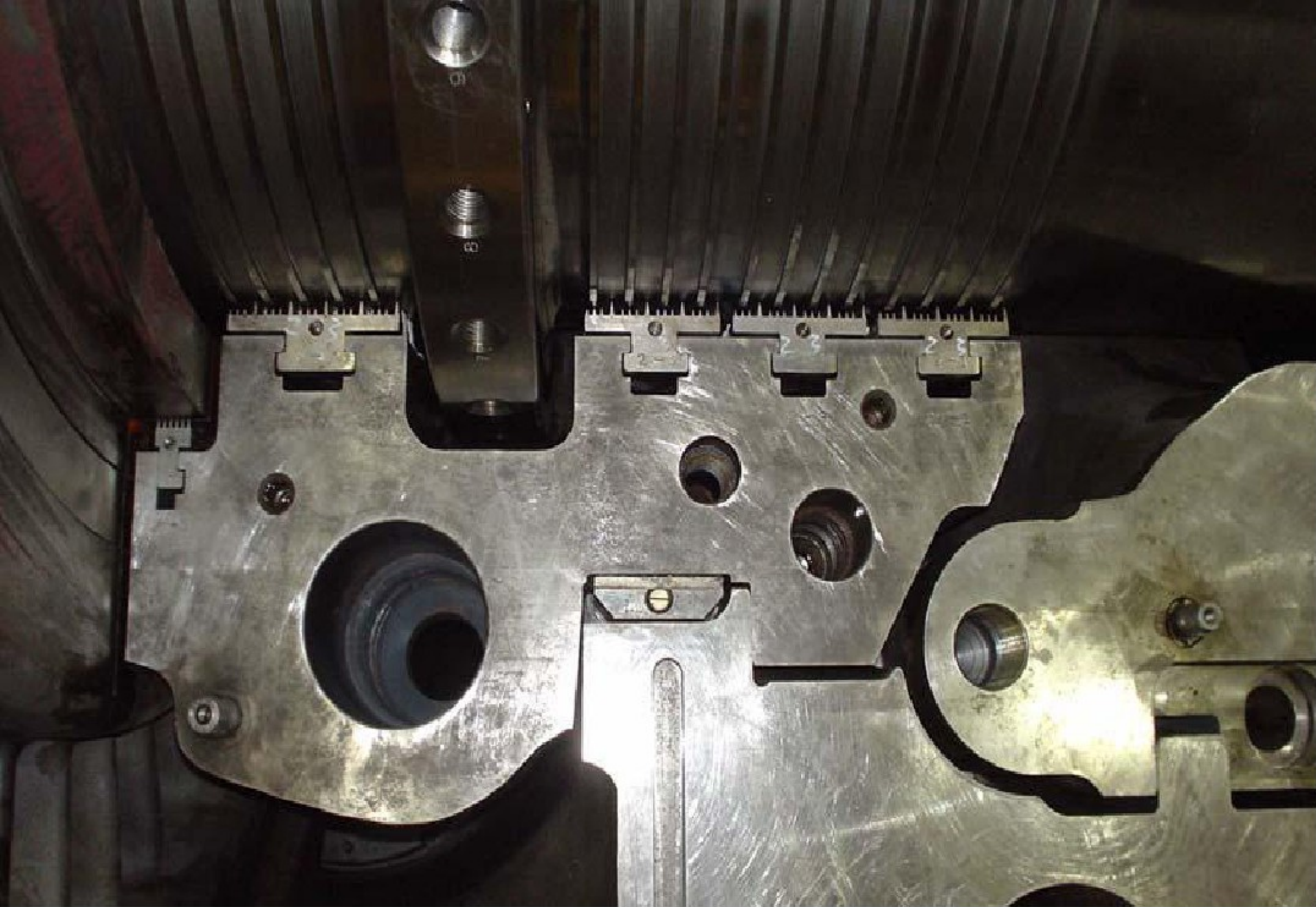
通流部分汽封：叶顶（4个高低齿的椭圆汽封；
隔板（高中及**A**低缸为高低齿汽封，**B**低缸为平齿汽封）

轴端汽封：高中及**A**低缸轴端为高低齿汽封，**B**低缸轴端为平齿汽封）

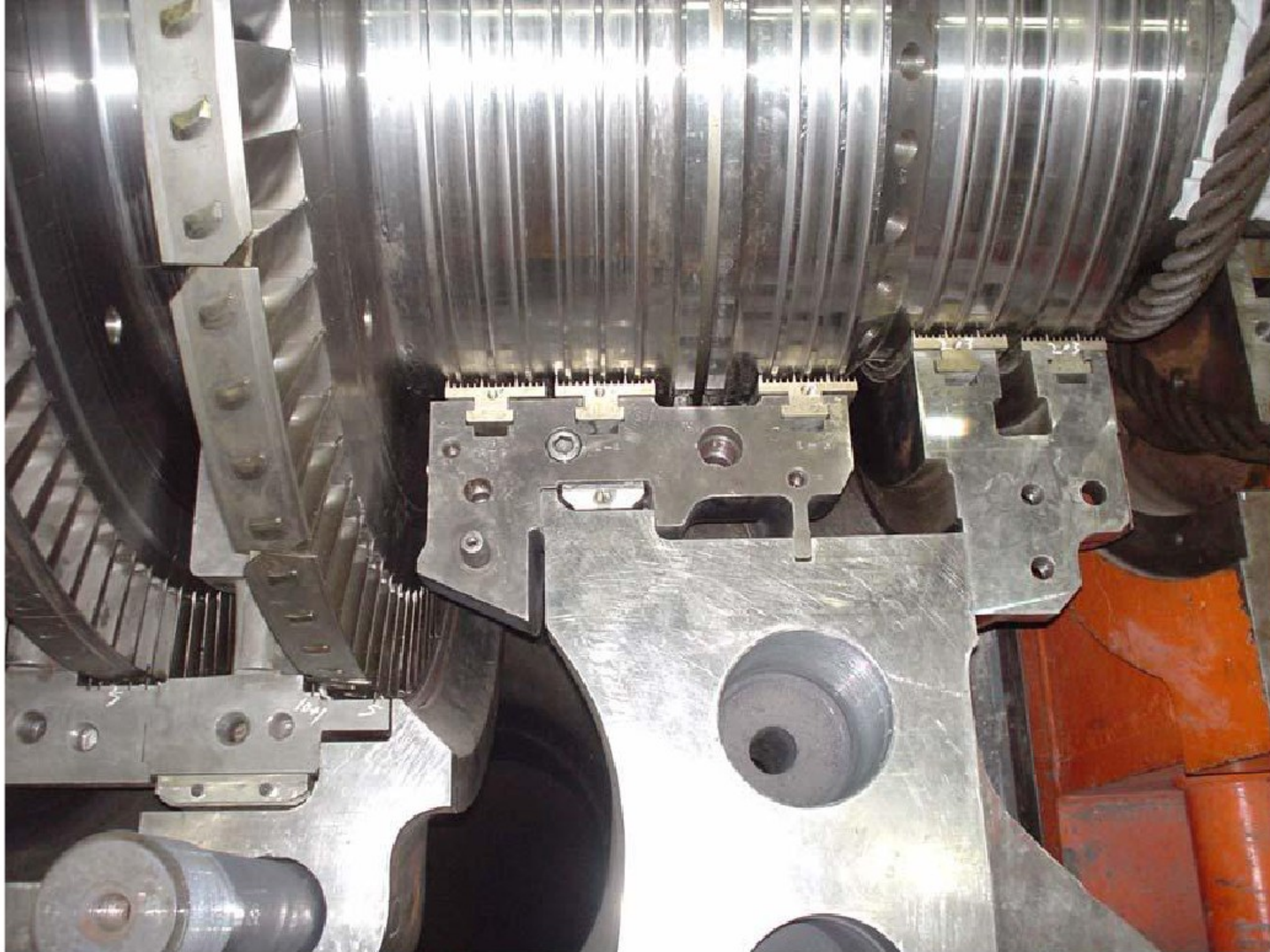
3.本机轴端汽封结构：高缸尾端为四段三腔室
中缸尾端为三段两腔室；高中压间为两段一腔室
低缸为三段两腔室。

低压缸轴端平齿汽封





高中压间轴封



高压后轴封

4. 自密封系统及运行

系统组成及主要设备：

轴封系统对辅助蒸汽参数的要求：

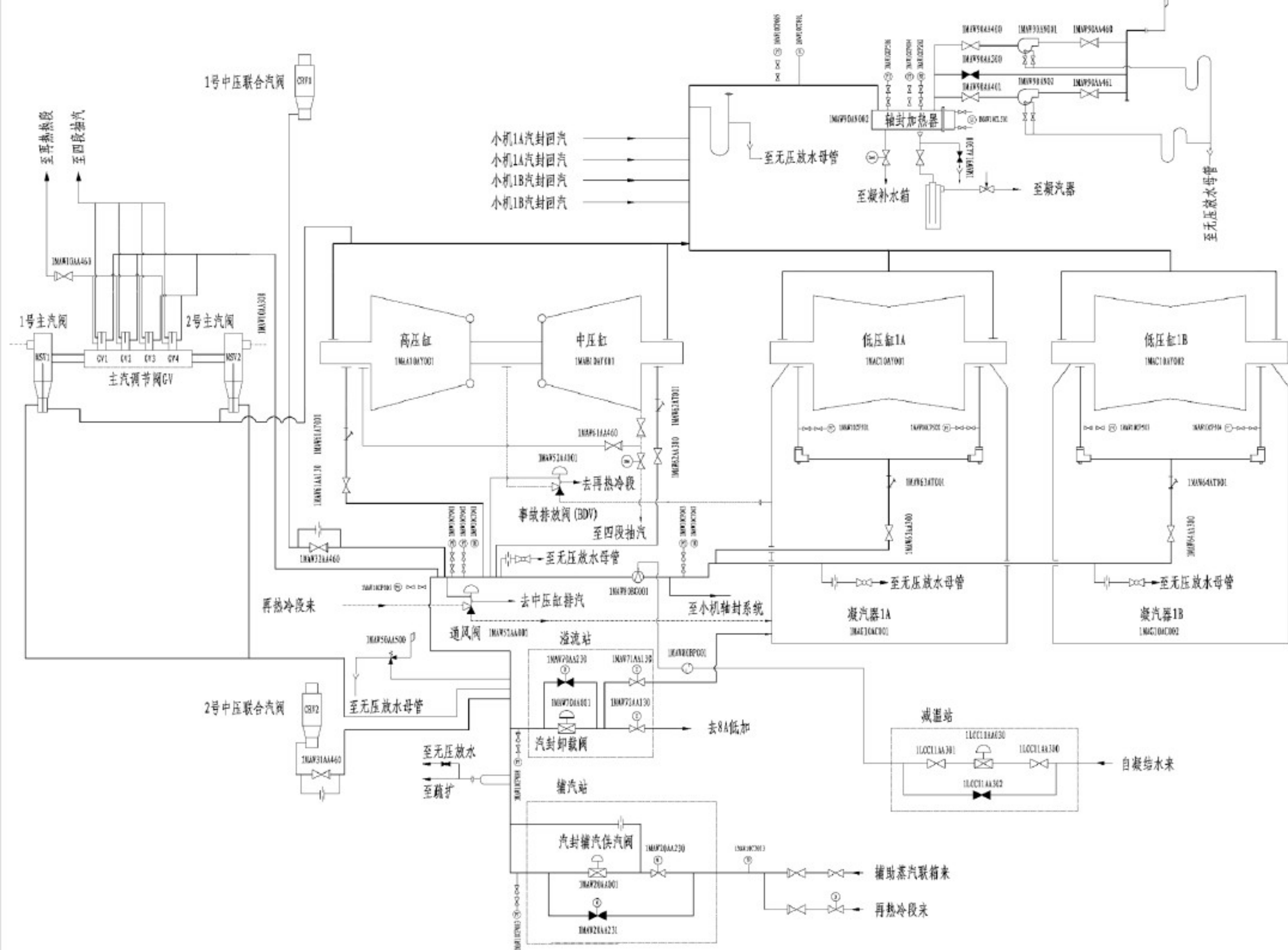
蒸汽压力： **$0.588 \sim 0.784 \text{ MPa}$**

温度：冷态启动约 **$150 \sim 260^{\circ}\text{C}$** ；热态启动约 **$208 \sim 375^{\circ}\text{C}$**

轴封系统的启动：

1) 盘车、冲转及低负荷阶段：汽封供汽来自辅汽，供汽母管压力维持在 **0.124 MPa(a)**

2) **$25\% - 60\%$ TRL**负荷阶段：由再热冷段提供，也可以使用辅助蒸汽，并自动维持供汽母管压力 **0.127 MPa (a)** 。



3) 60%TRL以上：当蒸汽母管压力升至**0.130MPa(a)**时，所有供汽站的调节阀自动关闭，溢流站调节阀自动打开，将多余的蒸汽通过溢流控制站排至汽机侧**8#**低压加热器。若**8#**低压加热器事故或停运，可将多余蒸汽排至凝汽器。至此，汽封系统进入自密封状态，母管压力维持在**0.130MPa(a)**，正常运行时应关闭再热冷段管路上电动截止阀。

4) 机组甩负荷时：用符合温度要求的备用辅助汽源，否则用主汽汽源。

5) 所有运行工况下的温度调节：维持低压汽封温度在**121~177℃**。

各控制站调节阀整定和运行情况

汽封母管 压力 MPa	高压汽源 控 制站	辅助汽源 控 制站	溢流控制 站	运行状态
0.124	关闭	打开并调 节	关闭	抽真空阶段（冷态 启动）
0.127	关闭	打开并调 节	关闭	~25%负荷
0.130	关闭	关闭	打开并调 节	自密封
0.118	打开并调 节	关闭	关闭	甩负荷
0.118	打开并调 节	关闭	关闭	抽真空阶段（热态 启动）

轴封系统常见故障及处理

轴封供汽母管压力偏高:

轴封处冒汽:

低压供汽温度高:

低压供汽温度低: