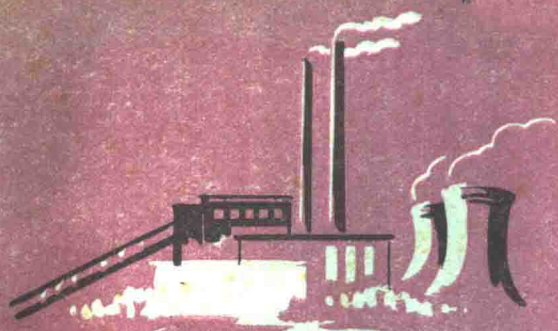




125兆瓦

中间再热式汽轮机

(修订版)

上海吴泾热电厂 马福荣

水利电力出版社

内 容 提 要

本书是《125兆瓦中间再热汽轮机》一书的修订版，比较详细地介绍国产125兆瓦中间再热式汽轮机改型前后的结构和各主要部件的作用。书中以较多的篇幅介绍高参数大容量汽轮机的运行情况和重要改进措施，并与进口同类型机组作了比较。本书以文字介绍为主，辅以各种示意图和装置图，供具有中间再热式汽轮机设备的发电厂汽机工人和专业人员参考，对一般发电厂的汽轮机司机和汽轮机专业学员也有参考价值。

125兆瓦中间再热式汽轮机

(修 订 版)

上海吴泾热电厂 马福荣

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

北京市京东印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 11.125印张 292千字 2 插图

1976年10月第一版

1989年7月第二版 1989年7月北京第二次印刷

印数10281—13040册 定价8.95元

ISBN 7-120-00583-9/TK·98

修订版说明

125兆瓦火力发电机组是我国自行设计、制造，国内最早投入运行的超高压中间再热式机组。1966年底初步完成汽轮机制造设计工作，第一台机组于1969年初在上海吴泾热电厂破土动工，仅花了十个月的时间，于1969年9月21日正式并网发电。

当时在极其缺乏中间再热机组资料和运行实践经验的情况下，上海汽轮机厂广大工人、技术人员在独立自主、自力更生的精神鼓舞下，广泛开展厂内外三结合，总结中、高压汽轮机在设计、制造、运行各方面的经验，通过大量的方案论证与比较，吸取了一些比较成熟的先进经验，大胆地采用了一些新技术、新结构及新材料，如高中压缸合缸、三支点支承、低压缸径向扩压、低压转子采用焊接结构、末级选用700毫米的自由叶片等等。125兆瓦中间再热汽轮机经过多年来的运行实践，证明这些新技术、新结构、新材料是成功的。

通过第一台125兆瓦中间再热机组的顺利投入运行，使我们逐步掌握了中间再热机组的许多规律，为我国更大容量的汽轮发电机组的设计、制造、安装、调试及运行、积累了一定的经验，为加快我国电力工业的建设作出了应有的贡献。

至1985年底，该型机组已有50余台先后投入运行，已成为我国华东等电网的主力机组之一。为了适应这种情况，我们编写并修订了这本书，供同类型发电厂的检修和运行工人参考，以便更好地了解 and 掌握中间再热机组的性能和特点，确保机组的安全和经济运行。

本书第一版主要是根据第一台125兆瓦机组编写的。这次修订时，根据制造厂完善化改进及华东地区投运机组的经验，对内容作了补充，并与同类型进口机组作了比较。在修订中，参考了

上海汽轮机厂、华东电力设计院、华东电管局等单位的完善化改进及调查资料，修订稿经鲍引年总工程师审阅。在此，特向上述单位和个人表示衷心的感谢。

由于机组经过不断完善改进，各发电厂的设备条件及检修、运行方面的做法不尽相同，特别是本人技术水平有限，书中可能还有许多不当和缺点，希望同志们批评指正。

上海吴泾热电厂 马福荣

一九八六年八月

目 录

修订版说明

第一章 设备概况	1
第一节 总述.....	1
第二节 汽轮机热力系统.....	7
第二章 汽轮机主要部件构造	13
第一节 汽缸.....	13
第二节 进汽部分和高压喷嘴的结构.....	21
第三节 转子和通流部分.....	28
第四节 隔板和轴封.....	33
第五节 汽缸、法兰螺栓加热装置.....	42
第六节 汽轮机金属温度测点的布置.....	51
第七节 盘车装置和靠背轮.....	56
第八节 轴承.....	63
第九节 自动主汽门、高压调速汽门和中压联合汽门.....	69
第三章 汽轮机液压调节系统	78
第一节 调节系统.....	78
第二节 保安系统.....	84
第三节 供油系统.....	88
第四节 液压保安系统的主要部件.....	89
第四章 汽轮机功率-频率电液调节装置	117
第一节 概述.....	117
第二节 功率-频率电液调节装置主要部件.....	123
第三节 功率-频率电液调节装置的起动、停机及事故 处理.....	138
第五章 辅助设备	145
第一节 凝汽器.....	145

第二节	射水抽气器	149
第三节	加热器	151
第四节	给水泵和凝结水泵	161
第五节	除氧器	168
第六节	旁路减温减压装置	171
第七节	抽汽逆止门	176
第六章	汽轮机的起动和停机	184
第一节	中参数中压汽缸的起动	185
第二节	滑参数高、中压汽缸的起动	189
第三节	热态起动	192
第四节	滑参数停机	194
第五节	起停过程中的控制指标	196
第六节	汽缸加热装置、法兰螺栓加热装置的使用	201
第七章	汽轮机的运行和维护	205
第一节	正常运行限额	205
第二节	正常运行中的维护试验工作	208
第三节	汽轮机主要事故处理	210
第八章	汽轮机完善化改进	216
第一节	完善化概况	216
第二节	提高机组安全性的改进	217
第三节	调节保安系统的改进	230
第四节	辅助设备及系统的改进	246
第五节	提高机组经济性的改进	254
第九章	国产125兆瓦汽轮机与引进同类型机组的比较	261
第一节	汽轮机主要技术规范及结构	261
第二节	热力系统及辅助设备	265
第三节	热工测量、保护及自动调节	291
第四节	汽轮机的主要经济指标及噪音	294
附录一	125兆瓦汽轮机热力、强度、振动主要数据汇总	297
(一)	基本数据	297

(二)	汽轮机通流部分喷嘴、叶片、汽封尺寸数据	294
(三)	完善化后汽轮机通流部分喷嘴、叶片、汽封尺寸数据	302
(四)	汽轮机叶片强度、振动数据	306
(五)	汽轮机本体主要零部件强度数据	312
(六)	汽轮机热力计算数据	314
(七)	参数变化及其他因素改变影响机组热耗的修正系数	320
附录二		337
(一)	华东电网125兆瓦汽轮机可靠性统计资料	337
(二)	125兆瓦机组汽轮机方面目前存在的问题和薄弱环节	340
(三)	华东地区国产125兆瓦机组发生的重大设备损坏事件统计资料	341
附录三	国产125兆瓦机组投运情况表	343

第一章 设 备 概 况

第一节 总 述

十二万五千千瓦中间再热式汽轮机的型号是N125-135/550/550。“N”表示汽轮机为凝汽式，“125”表示机组容量为125兆瓦，“135/550/550”表示机组进入高压汽缸时新蒸汽的压力为13.23兆帕（绝对大气压），温度为550℃，经再热器后进入中压汽缸的蒸汽温度为550℃。一般来说，新蒸汽压力为11.77兆帕（绝对压力，以后凡不注出者均为绝对压力）以上的机组者称为超高压机组，新蒸汽压力为15.69~16.67兆帕的机组称为亚临界机组，新蒸汽压力大于22.16兆帕称为超临界机组。所以N125-135/550/550型机组是属于超高压机组。如我国目前正在运行的30万千瓦机组，其新蒸汽压力为16.18兆帕，属于亚临界压力。

为了提高机组的循环热效率，N125-135/550/550型机组采用一次中间再热，即新蒸汽由锅炉过热器出来，经过汽轮机高压汽缸做功后，再回至锅炉再热器加热。在额定工况下，高压汽缸排汽压力为2.55兆帕，温度为330℃，经过再热器后，压力降至2.29兆帕，温度升高至550℃，回至汽轮机中压汽缸继续做功。一般来说，再热蒸汽温度每提高10℃，可降低机组热耗0.2%~0.3%。高参数大容量的机组一般都采用中间再热，在同容量、同参数的情况下，与非再热机组比较有如下优点：

- (1) 采用一次中间再热，可降低机组热耗4%~5%；
- (2) 新蒸汽流量及给水泵容量可减少15%~18%；
- (3) 排汽量及凝汽器容量可减少13%~16%；
- (4) 排汽湿度可减少6%左右（中间再热机组的排汽湿度一般为5%~6%）；
- (5) 由于汽轮机的排汽量减少，末级长叶片通道面积可以

相应减少（末级长叶片可以减短），或长叶片高度不变，可以降低排汽余速损失，提高机组热效率。

但是，由于中间再热循环以后，机组结构复杂，高温部分合金钢材约比同容量机组增加35%~50%，其他如发电厂投资大、管道布置和运行维护也较复杂。但总的来说，对于容量在十万千瓦以上的机组，采用中间再热是合理的，也是目前的发展方向。

N125-135/550/550型汽轮机本体，从车头的1号轴承座到低压汽缸后面的3号轴承座，总长度现为13.5米，低压汽缸的横向宽度为7.34米，本体总重量为310吨。图1-1是汽轮机本体在运转层上的布置总图。

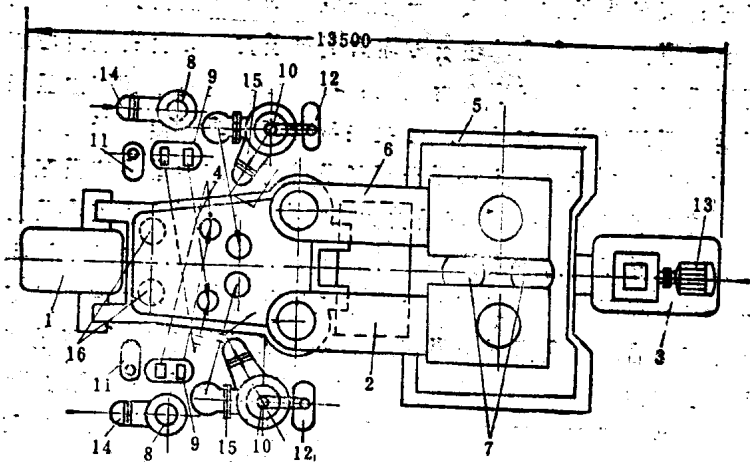


图 1-1 N125-135/550/550型汽轮机本体布置总图

1—1号轴承座；2—2号轴承座；3—3号轴承座；4—高、中压汽缸；5—低压汽缸；6—中、低压联通管；7—低压汽缸安全门；8—高压自动主汽门；9—高压调速汽门；10—中压联合汽门；11—高压油动机；12—中压油动机；13—盘车马达；14—主蒸汽管；15—再热蒸汽管；16—高压排汽口

进入汽轮机高压汽缸的新蒸汽由两只自动主汽门及四只调速汽门控制。一只主汽门和两只调速汽门连在一起，分别布置在机组两侧的基础上，主蒸汽管道以此作为死点。四只调速汽门分别用四根 $\phi 219$ 的导汽管与汽缸相接。再热蒸汽由两只中压联合汽

门控制。中压联合汽门的结构是主汽门和调速汽门设计为一个壳体，用同一个门座供给主汽门门碟及调速汽门门碟之用，因此称之为中压联合汽门。两只中压联合汽门也分别布置在机组中压汽缸两侧，用四根 $\phi 325$ 导汽管与汽缸相接。

N125-135/550/550型汽轮机为双缸双排汽，其纵剖面图见插图1-2。这种汽轮机的结构特点是高、中压缸合并，高、中压通流部分反向布置，新蒸汽及中间再热蒸汽的进汽部分均集中在高、中压汽缸中部。由于高温区集中，对轴承的工作温度及转子、汽缸的热应力均较有利。低压汽缸为分流双排汽，低压外缸为径向扩压式结构，以降低排汽损失。汽轮机的后轴承座为落地支承，以增强轴承的刚度及防止因排汽缸温度升高而影响机组大轴中心线的改变。

高压转子与低压转子采用刚性靠背轮连接。整个汽轮机为三支点支承，有利于各轴承在运行时负荷分配的稳定性，同时缩短了机组的总长度。低压转子与发电机转子采用半挠性靠背轮连接。

推力轴承设置在中、低压汽缸之间的中轴承座内，是与支持轴承分开布置的。支持轴承采用三油楔轴承。这种轴承能消除油膜油压波动的缺陷，因而承载能力大；又由于在运行中大轴的偏心度很小，故提高了低负荷下的运行稳定性，不易产生振动。

本汽轮机与400吨/小时的锅炉及125兆瓦双水内冷发电机配套。根据目前电网负荷的需要，适宜于带基本负荷，也可作为调频机组使用。

汽轮机的额定功率为125兆瓦，经济功率也为125兆瓦。主汽门前的蒸汽压力正常为 13.24 ± 0.49 兆帕；主汽门前的主蒸汽温度正常为 550^{+5}_{-15} ℃，即最高为555℃，最低为535℃，在额定功率时，高压缸排汽压力为2.55兆帕，温度为330℃，经再热后的蒸汽压力降至2.29兆帕，再热温度正常也为 550^{+5}_{-15} ℃。

汽轮机高压汽缸最大进汽量为423吨/时，相当于发电机功率

为142.942千千瓦，这时再热蒸汽流量为344.7吨/时。汽轮机过负荷时，各监视段最高允许压力如下：

抽汽室序号	调节级后	一	二	三	四	五	六	七
允许最高压力 (兆帕)	10.3	4.02	2.84	0.883	0.51	0.275	0.078	0.018

额定工况时，冷却水温度在20℃、排汽压力为0.0049兆帕、最后的给水温度为239℃时，汽轮机保证热耗为8583.4千焦/千瓦·时（2050大卡/千瓦·时），汽耗为3.1公斤/千瓦·时。

在下列情况下，允许汽轮机在额定负荷下长期运行：

（1）主蒸汽压力降至12.75兆帕，主蒸汽和中间再热蒸汽温度降至535/535℃；

（2）冷却水温度升高至33℃，同时新蒸汽参数与通过凝汽器的冷却水流量不低于额定值时；

（3）不抽汽时。

在额定工况下，回热抽汽参数如下：

参 数 \ 抽汽级数	一	二	三	四	五	六	七
压 力 (兆帕)	3.63	2.55	0.77	0.46	0.245	0.071	0.016
温 度 (℃)	373.4	331	394	326	255	135	—
抽汽量(吨/时)	14.24	41.4	4	12.4	20	13.7	8.8

面对汽轮机车头观看时，汽轮机转子以顺时针方向转动，其额定转速为3000转/分。

汽轮机的叶片经过测定，当电网频率为50周/秒时，不会发生共振。不允许汽轮机在电网频率低于49.5周/秒或高于50.5周/秒时工作。

汽轮机高压转子的临界转速为1880转/分，低压转子的临界转速为4200转/分。高、中、低压转子、发电机转子及励磁机转

予速按时的轴系临界转速：第一阶为1200转/分；第三阶为1800~2100转/分。

汽轮机具有高速盘车装置，盘车转速为61.5转/分，使汽轮机在停用任何时间后能再次起动。在起动前和停机后，将盘车装置投入，能使汽轮机大轴保持最小的弯曲度。当汽轮机起动时，盘车装置会在转子被蒸汽冲动时自动退出，而在盘车中当润滑系统中的油压过分降低时，它也会自动停止。

为了减少盘车的起动转矩从而减小盘车装置电动机的容量，汽轮机设有两台150~300兆帕的高压顶轴油泵，供给各个轴承的顶轴油压，使大轴能抬起0.04~0.08毫米。

在汽轮机的轴端，装有迷宫式轴封，用0.59兆帕的除氧器汽平衡管的蒸汽，温度约140℃左右，作为轴封蒸汽的汽源。轴封外端的漏汽用轴封冷却器吸出。轴封加热器内4~6千帕负压（30~50毫米汞柱的真空）是由射水抽气器排水管上设置的喷嘴，利用射水抽气器排水余速建立起的，以保证轴封漏汽不冒向大气。

汽轮机配汽机构的控制，由油动机予以实现。油动机是由错油门控制，错油门则受液压调节系统的阻尼器，即调速器脉冲油压讯号，或功率-频率电液调节系统来的电气讯号，通过电液转换器转变为油压脉冲讯号控制。在液压调节系统中设有启动阀及同步器，在功率-频率电调节系统中设有转速给定及功率给定，分别控制汽轮机的转速或负荷。

汽轮机装有双重的危急遮断装置。当转速超过额定转速的11%~12%时，危急遮断器立即动作，使自动主汽门及高、中压调速汽门迅速关闭，从而切断通入汽轮机的蒸汽。这时，由于脉冲油压被危急遮断器泄掉，使旁路系统自动打开，锅炉新蒸汽通过I级旁路至再热器，再通过II级旁路进入凝汽器，达到既保护再热器，又使锅炉能处于低负荷下稳定运行的目的。

当汽轮机失去负荷后转速上升，如危急遮断器没有动作，转速继续升高超过额定转速的14%（3420转/分）时，旋转阻尼油压达0.287兆帕，主油泵出口油压达1.478兆帕，这两者同时作用

使两个带接点的压力表接通，动作时通保护电磁阀，泄掉自动主汽门及调速汽门的控制脉冲油压，使汽轮机脱扣，切断进汽，从而保证汽轮机不发生重大的飞车事故。

汽轮机装有轴向位移保护装置，当转子轴向位移达极限允许值，且推力瓦乌金温度达 100°C 时，保护动作，关闭高、中压主汽门及调速汽门，及时停止汽轮机，以避免汽轮机动、静部分相碰的危险。

汽轮机装有低真空保护装置，当凝汽器负压下降至80千帕（600毫米汞柱）时，向汽轮机司机发出报警讯号，当凝汽器负压降至62.7千帕（470毫米汞柱）时，真空继电器动作，关闭高、中压主汽门及调速汽门，使汽轮机停机。

汽轮机装有轴承润滑油压降低保护装置，当轴承润滑油压降至0.054兆帕、0.039兆帕时，分别联动低压交流油泵及低压直流油泵，轴承润滑油压继续降低至0.015兆帕，汽轮机盘车装置脱扣。

汽轮机配有下列辅助设备：

（1）两台50-ZLQ-50循环水泵，用以把冷却水送入凝汽器、冷油器、射水抽气器、发电机空气冷却器及发电机水冷却器供冷却用；

（2）两台10NL-12型立式凝结水泵（完善化改进后的凝结水泵型号为12NL-12.5型），把凝汽器中的凝结水抽出来，通过回热加热系统进入除氧器进行除氧；

（3）两台DG-500-180型电动给水泵，把来自除氧器水箱的给水升压，通过两台高压加热器，进入锅炉；

（4）汽轮机设有两台高压加热器，四台低压加热器。其中末级低压加热器的加热蒸汽由汽轮机第七级抽汽供给，这一级抽汽压力很低，故容积流量很大，抽汽管道很粗。为了简化管道布置及设备布置紧凑，把该级低压加热器卧置在凝汽器的喉部。其缺点是当加热器汽侧满水容易倒灌入汽轮机中去，造成水击事故。为了防止水击事故，在该级加热器上应该设置高水位报警

装置。

(5) 在回热系统中，设有两台疏水泵，把低压加热器中加热蒸汽的凝结水送入主凝结水的管道中去；

(6) 汽轮机配有N-5700-1型或N-7100-1型表面式凝汽器。它是在现场直接焊到低压外缸的排汽口上。N-5700-1型为单流程对分式凝汽器。N-7100-1型为双流程对分式凝汽器，在运行中可以适当降低负荷进行半面清洗凝汽器；

(7) 在凝汽系统中，装有两台射水抽气器，在汽轮机启动及正常运行中，抽出凝汽器中的空气。它的工作水的循环方式有闭式循环和开式循环两种。所谓开式循环，即水由循环水母管来，经射水泵升压至0.29~0.39兆帕，进入射水抽气器工作，工作后的水排入循环水出水渠。所谓闭式循环，就是用水箱蓄水，射水泵从水箱中吸水升压，打入射水抽气器工作，工作后的水仍回入水箱。为了防止水箱中水温升高，影响射水抽气器工作效率，因此定期或连续的向水箱补充一部分较低温度的水。

第二节 汽轮机热力系统

N125-135-550/550型汽轮机为超高压中间再热凝汽式机组，锅炉与汽轮机的热力系统采用单元制布置。它的优点是：节约钢材、管道阻力小、便于集中控制和管理操作简单等。但也有其不足之处：如停机时就应停炉，或停炉时就必须停机。

本机组的基本热力系统如图1-3所示。汽轮机的新蒸汽由两根 $\phi 273$ 管道经电动主闸门，分别进入位于机组高压汽缸两侧的高压自动主汽门及四只调速汽门，再用四根进汽导管与高压汽缸相接。新蒸汽管道材料为X20CrMoWV121或10CrMo910，进入高压汽缸的导汽管材料为12Cr1MoV。

蒸汽在高压汽缸内膨胀做功后，排汽经两根 $\phi 470$ 的管道进入锅炉再热器加热。高压汽缸排汽至再热器进口的蒸汽管道简称再热蒸汽冷段母管。在靠近汽轮机侧管道上设置有摇板式逆止门，

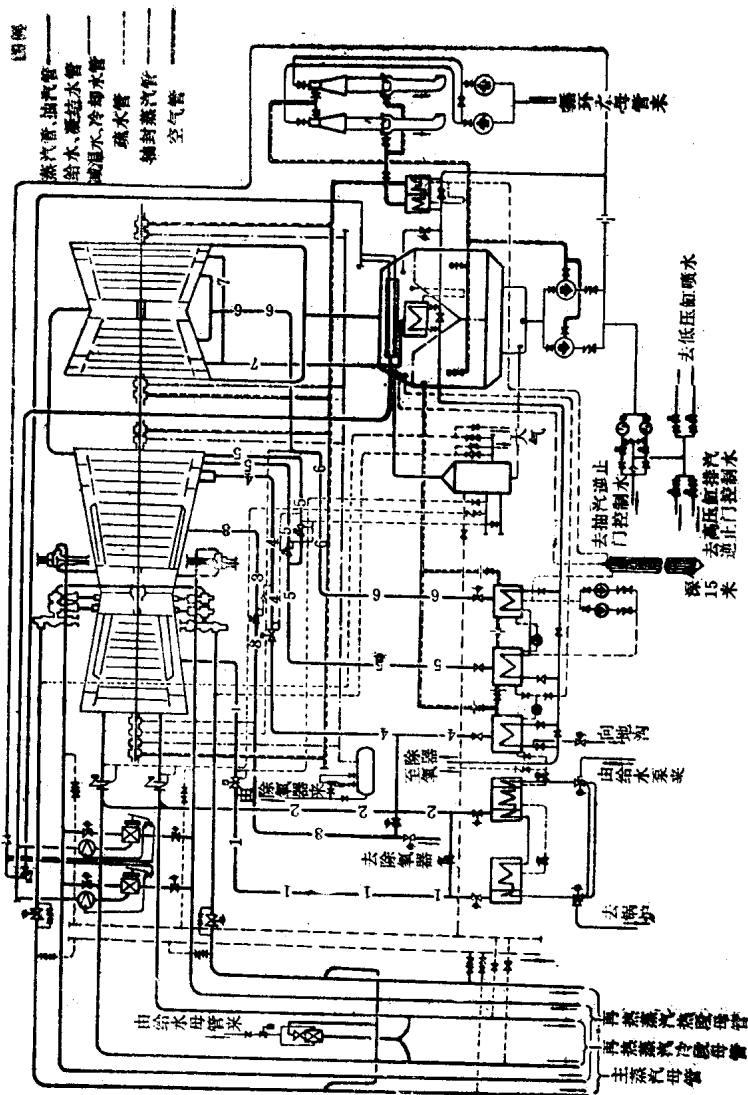


图 1-3 NI25-135/550型汽轮机基本热力系统

图 1-2 为插页剖面图

以防止蒸汽倒回汽轮机高压汽缸中去。再热器冷段母管材料为20号碳钢。

再热后的蒸汽由两根 $\phi 470$ 的管道分别进入位于机组中压汽缸两侧的中压联合汽门，再分四根导汽管进入中压汽缸继续做功。再热器出口至中压汽缸的蒸汽管道简称再热蒸汽热段母管。第一台125兆瓦中间再热机组的热段母管由10CrMo910和10CrSiMoV7两种钢材构成。

中压汽缸做功后的蒸汽经两根低压导汽管进入低压汽缸，蒸汽做功膨胀后排入凝汽器凝结成水。再由凝结水泵打出，经过轴封加热器及四台低压加热器进入两台225吨/时、0.49兆帕的喷雾式除氧器，再由4000千瓦电动给水泵打出，经两台高压加热器，在额定工况下，将给水加热至239℃进入锅炉。由于锅炉的排污及热力循环中泄漏有损失，需要有一定的补充水量。补充水为凝结水或化学处理过的除盐水，由除氧器头部补入。由于机炉在起动过程中，因凝结水水质不合格不能回收，需要大量补水，因此每台除氧器的补水量设计应不少于40吨/时。

为了适应再热机组的起停需要，保证锅炉在低负荷能稳定运行，同时保证再热器有足够的冷却流量，以保护再热器不干烧，在热力系统中设有两级快速减温减压装置，简称旁路系统。在额定工况下，I级旁路蒸汽参数由13.24兆帕降到2.55兆帕，温度由550℃降到330℃，最大流量为120吨/时，减温水用给水泵出口的给水，其喷水量为20吨/时。II级旁路参数由2.55兆帕降到0.59兆帕，温度由550℃降到160℃，其减温水来自凝结水泵出口的凝结水。

旁路容量的大小是根据锅炉的最低稳定负荷来考虑选择的，N125-135/550/550型机组的旁路容量是锅炉额定容量的30%。

I级旁路位于主蒸汽管道与再热器进口冷段母管之间。它的具体布置有两种方案，一种是将减温减压装置靠近锅炉侧布置；另一种是靠近汽轮机侧布置。根据汽轮机热态起动时的需要，I级旁路设置在汽轮机侧为宜，这样主蒸汽管道中的低温蒸汽及疏

水能及时通过I级旁路排除；同时当汽轮机冲转启动时，不会有疏水或低温蒸汽带入温度很高的汽轮机中去。但是也有其不足之处，即在热态启动锅炉点火初期，不可避免地会有冷蒸汽进入温度很高的新蒸汽管道，引起灼热管道的急剧收缩，从而缩短其使用寿命。因此根据有关资料介绍，在没有启动回路的情况下，宁愿将I级旁路布置在靠近锅炉侧。这种布置的缺点可用加大主蒸汽管道的疏水管直径，或将主蒸汽管道疏水接入机组凝汽器疏水膨胀箱来克服。当锅炉汽温达到一定值时，利用凝汽器真空来抽出蒸汽管道中的疏水及低温蒸汽，以保证机组在热态启动时不会有疏水或低温蒸汽带入汽轮机。对于横向布置的汽轮机，由于从锅炉顶部出来至汽机车间的主蒸汽管道及再热蒸汽管道，其垂直管段很长，而进入汽轮机前的水平管道很短；同时由于滑参数启动时冲转参数较低，在启动过程中，锅炉蒸汽参数逐步升高时，管道死角处将会有大量疏水压出，从垂直布置的蒸汽管道一下子冲到汽轮机前的管道中。此时由于水平管道短，来不及排除这些疏水从而冲入汽轮机，使汽轮机受到水击的危险。为了避免上述事故，横向布置的机组，其主蒸汽和再热蒸汽管道的疏水管径必须加大，在启动初期，这些疏水最好直接通入凝汽器，使疏水容易排除。

II级旁路位于再热器出口热段管道与凝汽器之间。在锅炉启动时，调整II级旁路的开度，可以有效地提高再热蒸汽温度。在机组启动时，调整II级旁路，可以控制汽轮机中压汽缸的进汽量。II级旁路的布置一般都靠近汽轮机侧。II级旁路后的蒸汽在进入凝汽器前，还经过一级扩容膨胀式减温减压装置，由0.588兆帕降到0.029兆帕，温度由160℃降到70℃。该装置是设置在凝汽器喉部头颈处。

汽轮机共有七段非调整抽汽。第一段抽汽是从汽轮机高压缸第六压力级叶轮后经高压汽缸内外夹层中抽出，供给6号高压加热器。由于第一段抽汽是高压汽缸内外夹层的冷却蒸汽，在一段抽汽管与二段抽汽管之间设有联通汽门，当6号加热器停用时，必