

• 125/135MW 火力发电机组技术丛书 •

汽轮机设备及其系统

胡念芬 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



编 委 会

主任委员 唐必光

副主任委员 潘 笑 熊信银 胡念苏 周柏青 朱全利

委 员 (以姓氏笔画为序)

王建梅 卢理成 叶信芳 刘 勇 刘克兴 朱全利

余艳芝 吴耀武 张世荣 张国忠 李正奉 杨德先

陈志和 周柏青 罗 嘉 苗世洪 胡念苏 唐必光

夏中明 喻红梅 谢建君 谢诞梅 熊立红 熊信银

樊天竞 潘 笑

胡念苏

前 言

我国的火力发电机组正朝高参数、大容量方向发展，但 125MW 机组由于具有较好的经济性和运行性能，在火电厂仍占有一定比例。在发展过程中，通过对汽机通流部分的改造，又形成了 135MW 系列。为满足广大技术人员和现场生产人员对了解 125/135MW 系列火力发电机组结构、运行、控制知识的需要，我们组织人员编写了这套《125/135MW 火力发电机组技术丛书》。本丛书包括《燃煤锅炉机组》《汽轮机设备及其系统》《电厂化学》《热工控制系统》《发电机及电气系统》五个分册。

本丛书可供从事 125/135MW 火力发电机组设计、安装、调试、运行、检修的工程技术人员及管理人员阅读，也可作为现场运行、检修人员的培训教材，亦可供高等院校有关专业师生参考。

《汽轮机设备及其系统》分册以上海汽轮机厂第二次改进设计后的 125MW 汽轮机(即 B151 机型)和 135MW 汽轮机为主，系统地介绍了 125MW 和 135MW 汽轮机设备的原理、结构、特性以及运行、维护。内容包括汽轮机本体结构，汽轮机调节与保护系统，汽轮机热力系统，汽轮机主要辅助设备，汽轮机的运行等。由于很多电厂对早期投产的 125MW 老机组进行了改造，所以在第一章中还对这些改造情况作了简要介绍。

本分册由武汉大学胡念苏主编，参加编写的人员有胡念苏（第一、五章）、谢诞梅（第三章）、叶信芳（第二章）、樊天竞（第四章）、王建梅（第六章）。刘先斐、张恒良和胡祖培也参加了部分编写工作。

本分册由武汉大学陈汝庆教授担任主审，桂林虹源发电有限公司总工程师秦健锋担任审稿，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，在此谨表示诚挚的谢意。

由于部分设备所搜集厂家资料不全，加之编者水平所限，错漏之处难免，敬请读者批评指正。

编者



前言

第一章 设备及系统概况	1
第一节 汽轮机主要技术规范及结构概述	2
第二节 125MW 汽轮机组的改进设计	5
第三节 125MW 汽轮机组的改造	8
第二章 汽轮机本体结构	15
第一节 汽缸	15
第二节 进汽部分及中低压联通管	31
第三节 喷嘴组、隔板及隔板套、静叶环及静叶持环	36
第四节 汽轮机转子	41
第五节 动叶片	47
第六节 汽封及轴封系统	55
第七节 轴承箱与轴承	70
第八节 盘车装置	82
第三章 汽轮机调节与保护系统	86
第一节 汽轮机调节保护系统概述	86
第二节 液压调节系统的主要部套	92
第三节 液压保护系统的主要部套	115
第四节 汽轮机监视装置 (TSI)	126
第五节 调节保护系统的试验和调整	130
第六节 DEH 调节系统	135
第七节 汽轮机的供油系统	144
第四章 汽轮机热力系统	149
第一节 概述	149
第二节 主蒸汽系统	151
第三节 汽轮机旁路系统	154
第四节 回热抽汽系统	157

第五节	主凝结水系统	162
第六节	主给水及除氧系统	164
第七节	加热器疏放水系统	169
第八节	启动汽源及辅助蒸汽系统	171
第九节	凝汽器抽真空系统	173
第十节	循环冷却水系统及工业水系统	176
第十一节	汽轮机本体疏水系统	180
第五章	汽轮机辅助设备	182
第一节	凝汽器	182
第二节	抽真空设备	187
第三节	回热加热器及轴封加热器	190
第四节	除氧器	200
第五节	给水泵组	205
第六节	液力偶合器	212
第七节	凝结水泵	215
第八节	旁路减温减压装置	218
第九节	抽汽（高压缸排汽）逆止阀及其控制系统	221
第六章	汽轮机的运行和维护	227
第一节	概述	227
第二节	冷态滑参数启动	233
第三节	热态滑参数启动	240
第四节	汽轮机的停机	246
第五节	汽轮机的正常运行维护	252
参考文献	256



设备及系统概况

汽轮机是火力发电厂的主要设备之一，它与锅炉、发电机一起被称作火电厂三大主机。与其它动力机械相比，汽轮机具有转速高、单机功率大、效率高、安全可靠等特点。自从1883年，瑞典工程师C.G.P.de拉瓦尔建造了第一台功率为3.67瓦有实用价值的汽轮机以来，汽轮机经历了120年的历史。一个多世纪以来，汽轮机沿着增大单机容量、提高蒸汽参数、不断改进材料和制造工艺、加强自动化水平的方向发展。中国制造的第一台容量为6000kW的汽轮机，于1956年投运，以后陆续制造出12MW，25MW，50MW的中压和高压汽轮机，1959年投运了100MW的汽轮机。1969年9月我国自行设计制造的125MW超高压中间再热汽轮机组正式投产发电，标志着我国火力发电设备的制造和运行水平进入了一个新时期。在此以后，我国自行设计制造了200MW，300MW机组，并在引进技术的基础上制造了300MW，600MW汽轮机发电机组，且陆续投入了运行。

第一台125MW机组的汽轮机由上海汽轮机厂制造，投产30多年以来，先后已有130余台125MW的机组投产发电，占全国电网容量的9%，成为我国火力发电的主力机组之一。30多年来，125MW机组经过不断的设计优化和技术完善，各项技术指标和运行实绩也有了不断的提高。该汽轮机的优化设计工作一直在进行，其中第一阶段在1978~1981年间在生产第35~47台机组中进行，其产品编号仍为151。主要针对此前生产的34台汽轮机所暴露出来的问题与不足进行优化改进。第二阶段在1982~1986年间，在生产第48~58台机组中进行，产品编号为A151。这次改进的目的主要是提高整个电厂的安全可靠性，同时在保持其出力不变的前提下主蒸汽温度和再热蒸汽温度均由原550℃降低到535℃。第三阶段工作是在第59~86台机组中进行，产品编号仍为A151。主要考虑到机组的运行安全性、可靠性及出力，改进的内容较少。第四阶段从第87台机组开始，产品编号为B151，主要目的是提高机组的经济性，使机组在不抽厂用汽情况下热耗率达到8499kJ/(kW·h)。同时，进一步提高机组的安全性和自动化水平。改进后首台机组于1991年4月出厂，10月投运。在此之后，又改进制造了产品编号为C151型机组。这几个阶段的设计改进工作情况详见本章第一节及表1-1。

近年来，在125MW机组的基础上，上海汽轮机厂又研制生产了采用引进技术的135MW汽轮发电机组（产品编号从D151开始），其技术性能有了进一步的提高，并采用了数字式电调系统。目前135MW机组也有多台投入运行。

本书内容以上海汽轮机厂第二次改进设计后的125MW汽轮机（即B151机型）和135MW汽轮机为主，同时对较早期的151机型和新一代C151机型的不同之处也作了一些介绍。由

于很多电厂对已投产的老机组进行了改造，所以本章第四节中还对这些改造情况作了介绍。

第一节 汽轮机主要技术规范及结构概述

一、N125-13.24/535/535 型 (B151 机型) 主要技术规范

1) 型号	N125-13.24/535/535 型
2) 型式	超高压、一次中间再热、单轴、双缸双排汽冲动凝汽式汽轮机
3) 配套锅炉蒸发量	400t/h
4) 配套发电机	12.5MW 双水内冷同步发电机
5) 汽轮机的额定功率	125MW
6) 最大功率	131MW
7) 额定转速	3000r/min
8) 转动方向	顺时针 (面向汽轮机车头)
9) 主蒸汽压力 (主汽门前)	
额定值 ¹	13.24MPa (135ata)
连续运行允许值 ²	最高 13.73MPa (140ata), 最低 12.75MPa (130ata)
10) 主蒸汽温度 (主汽门前)	
额定值 ¹	535℃
连续运行允许值 ²	最高 540℃, 最低 520℃
异常允许值 ³	最高 545℃, 最低 520℃
11) 再热压力 (中压联合汽门前)	
额定值	2.295MPa (23.4ata)
12) 再热温度 (中压联合汽门前)	
额定值 ¹	535℃
连续运行允许值 ²	最高 540℃, 最低 520℃
异常允许值 ³	最高 545℃
13) 主蒸汽流量	382.6t/h (额定) 420t/h (最大)
14) 冷却水温度	20℃ (正常) 33℃ (最高)
15) 排汽压力	0.0049MPa
16) 给水温度	242.66℃ (额定工况)
17) 保证热耗率 ⁴	8499kJ/(kW·h)
18) 保证汽耗 ⁴	3.06kg/(kW·h)
19) 汽轮机级数	
高压级	单列调节级 1 级, 压力级 8 级
中压级	压力级 10 级

1 任何 12 个月运行期间平均值。

2 在保证连续运行主蒸汽压力 (或主蒸汽温度、再热温度) 为额定值的前提下。

3 一年的累计不大于 400h, 每次不超过 38min。

4 在额定进汽参数、额定冷却水温、发电机 $\cos\varphi = 0.85$ 的条件下。

低压级	压力级 6 × 2 级
20) 配汽方式	喷嘴调节
21) 给水泵与拖动方式	两台电动给水泵
22) 低压缸末级叶片参数	
长度	700mm
平均直径	2035mm
顶圆圆周速度	420.6m/s
23) 转子临界转速	
第一阶	1200r/min
第二阶	1900—2100r/min

24) 轴承座双幅振动值

工作转速下	≤0.03
越过临界转速时	≤0.10

25) 周波允许变化范围 48.5—50.5Hz

26) 本体最大尺寸 (不包括罩壳)

 长×宽×高 (运转层上) 13.5m×7.84m×5.4m

27) 本体总重 约 320t

28) 在下列任何一种情况下 (但不可同时发生) 可发出额定功率, 并允许长期运行:
蒸汽参数为额定值, 冷却水温度升高至 33℃;

主蒸汽压力降至 12.75MPa (130ata), 主蒸汽和中间再热蒸汽温度降至 520/520℃, 冷却水温度为 20℃。

二、N125-13.24/550/550 型 (151 机型) 主要技术规范

- 1) 主蒸汽压力 (主汽门前) 13.24MPa (135ata)
- 2) 主蒸汽温度 (主汽门前) $550 \pm 1.5^\circ\text{C}$
- 3) 高压缸排汽参数 (额定功率) 2.55MPa (26 绝对大气压) /330℃,
- 4) 再热压力 2.29MPa (23.4 绝对大气压)
- 5) 再热温度 $550 \pm 1.5^\circ\text{C}$
- 6) 给水温度 239℃
- 7) 保证热耗率 8582.9kJ/(kW·h)
- 8) 保证汽耗 3.1kg/(kW·h)
- 9) 最大进汽量 423t/h (功率 142.942kW, 再热流量为 344.7t/h)

10) 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 12.75MPa (130 绝对大气压), 主蒸汽和再热蒸汽温度降至 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。

三、N135-13.2/535/535 型主要技术规范

- 1) 型号 N135-13.2/535/535 型
- 2) 型式 超高压、一次中间再热、单轴反动式、双缸双排汽凝汽式汽轮机
- 3) 配套锅炉蒸发量 420t/h (B-MCR)
- 4) 配套发电机 135MW (发动机出线端)

5) 汽轮机的额定功率	135MW (铭牌工况 TRL)
6) 额定转速	3000r/min
7) 转动方向	顺时针 (面向汽轮机车头)
8) 主蒸汽压力额定值	13.2MPa
9) 主蒸汽温度额定值	535℃
10) 再热压力额定值	3.15MPa
11) 再热温度额定值	535℃
12) 冷却水温度	20℃
13) 排汽压力	0.0049MPa
14) 给水温度	240.9℃ (TRL 工况)
15) 保证热耗率	8521.7kJ/(kW·h) (TRL 工况)
16) 保证汽耗	3.111kg/(kW·h) (TRL 工况)
17) 汽轮机级数	
高压缸	单列调节级, 13级反动式压力级
中压缸	12级反动式压力级
低压级	8×2级反动式压力级
18) 配汽方式	喷嘴调节
19) 给水泵驱动方式	电动
20) 低压缸末级叶片参数	
长度	710mm
平均直径	2035mm
顶圆圆周速度	420.6m/s
21) 转子临界转速	
第一阶	1542 (高中压缸), 2123 (低压缸), 1220 (发电机) r/min
	1660 (励磁机) r/min
第二阶	> 4000r/min
22) 本体最大尺寸 (不包括罩壳)	
长×宽×高 (运转层上)	15.937m×8.400m×5.543m

四、N125-13.24/535/535 型 (B151 机型) 汽轮机的结构概述

N125-135/535/535 型汽轮机为超高压中间再热、双缸、双排汽单轴布置的冲动式凝汽机组, 其纵剖面图如图 1-1 所示 (见文末插页)。它的结构特点是高、中压汽缸合缸, 通流部分反向布置, 其主蒸汽及再热蒸汽的进气管集中在高中压汽缸的中部; 低压缸采用分流式对称布置的结构, 以缩短机组轴向尺寸, 平衡轴向推力。高中压缸的高温部分采用双层缸, 以减小汽缸的热应力。低压排汽缸为径向扩压式结构, 可以降低排汽阻力。

该机组轴系为三支点支承, 高中压转子与低压转子的连接采用刚性联轴器, 有利于各轴承在运行时负荷分配的稳定性; 低压转子与发电机转子采用半挠性联轴器连接。汽轮机共有三个轴承座, 内装有 3 个汽轮机径向轴承、1 个发电机前轴承以及 1 个推力轴承。轴承座全部落地, 在 1 号轴承座 (前轴承座) 内除装有径向轴承外, 还装有主要的调节保安部套, 如

主油泵、危急遮断装置，旋转阻尼，磁阻发送器和相对胀差发送器等。

汽轮机的高速盘车装置安装于后轴承座上盖上，由电动机经减速后带动，转子盘车速度为 62r/min。盘车装置手动操作投入，机组冲转后能自动退出。为减小盘车装置的功率，保护各轴承不致损坏，汽轮机设有两台高压顶轴油泵，在盘车时供给各个轴承顶轴油压，使大轴抬起 0.04~0.08mm。

汽轮机运转层的标高为 9m。前端两侧各装有高压主汽门和高压调节阀联合体，座落在主汽门支架上。四根挠性高压进汽管分别与四只调节阀及高压缸上、下进汽短管连接。四只调节阀由二台单侧油动机控制其动作。每一调节阀控制调节级的一个喷嘴组的进汽量。三阀全开时可以发出额定功率，第四组喷嘴为保证夏季和低参数情况下能发出额定功率而设置。两个中压联汽门由单侧油动机控制，分别布置在机组中部左右两侧，汽轮机膨胀时它可在其支承面上作自由移动。

从锅炉过热器来的主蒸汽，经两根主蒸汽管、两个主汽门和四个调节阀进入高压缸的调节级和八个压力级，由高压排汽缸的下缸二个排汽口排出，分别经两个排汽逆止阀进入再热器。再热后的蒸汽通过二根再热热段管道进入二个中压联合汽门，然后由四根刚性进汽管引入中压缸，经过十个压力级从中压排汽缸的上缸二个排汽口排出。中压缸的排汽经两根有柔性补偿能力的联通管进入低压缸，分成两部分，各流经 6 个低压级，从两端的排汽缸排入凝汽器。在第 7、9、15、17、19、22/28、24/30 级后各有一个回热抽汽口，抽出部分蒸汽分别供两台高压加热器，一个除氧器和四台低压加热器加热给水和主凝结水。

五、N135-13.2/535/535 型汽轮机的结构概述

N135-13.2/535/535 型汽轮机为双缸、双排汽中间再热超高压反动式凝汽机组，采用数字电液调节系统。高中压部分采用合缸、蒸汽反向流动的单层缸结构，低压缸采用对称三层缸结构。图 1-2（见文末插页）是该汽轮机的纵剖面图。其高中压缸的高压部分由冲动式的单列调节级和 13 个反动式压力级；中压部分有 12 个反动式压力级，对称双流的低压缸每侧各有 8 个反动式压力级。由于是反动式汽轮机，级的轴向推力较大，除高、中压通流部分采用反向流动外，还在高中压转子上设置平衡活塞，以减小转子的轴向推力。高中压转子和低压转子各有两个支持轴承，分别置于三个轴承座内，推力轴承置于前轴承座内。

主蒸汽从锅炉经二根主蒸汽管分别到达汽轮机两侧的主汽门和调节阀，并由四根挠性导汽管进入高压缸的喷嘴室，逐级流经各高压级。高压缸排汽从其下缸端部两个排汽口排出，经两根再热冷段蒸汽管回到锅炉再热器。其中部分蒸汽由回热抽汽口抽出。从锅炉再热器出来的再热蒸汽，经两根再热蒸汽管到达汽轮机两侧的中压主汽门与调节阀，流经中压部分各级，然后经导汽管从低压缸的中部进入低压缸，分为两部分，各经 8 级由两端扩压式排汽缸导入凝汽器。在高压排汽管（再热冷段蒸汽管）、中压第 6 级后、中压排汽缸下部、低压第 2、4、6 级后各有一个回热抽汽口，抽出部分蒸汽供两台高压加热器、一台除氧器和三台低压加热器来加热锅炉给水和主凝结水。

第二节 125MW 汽轮机组的改进设计

一、概述

上海汽轮机厂第 1 台 125MW 超高压中间再热式的汽轮机自 1969 年 5 月投运以来，至

2000年累计已投产130多台,遍及全国16个省市。该机组具有运行安全可靠,启动方便的特点,特别是安装周期短,可做到当年破土动工,当年即可投运。因此得到用户的欢迎,目前仍有一定的市场需求。但是该机型的首批机组(第1~34台),由于受当时技术水平的限制,其经济性和技术水平均较低,机组的热耗率高达 $8792\text{kJ}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。为此,上海汽轮机厂一直在对该机组进行优化设计,改善其性能,使其热效率不断得以提高,热耗率不断降低。经过几个阶段的改进,至1990年(即第59~86台),该机组的设计保证热耗率已降低到 $8583\text{kJ}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。此后,又进一步进行优化,使机组的热耗率在不抽厂用汽情况下达到 $8499\text{kJ}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。同时,进一步提高机组的安全性和自动化水平。以此为基础,又推出了新一代优化型125MW中间再热凝汽式汽轮机(产品编号C151)。

二、机组优化设计内容

在过去的近25年中,上海汽轮机厂对125MW机组曾先后进行多次优化改进设计,并取得了一定的效果。前后可分为四个阶段,其主要改进项目如下:

1. 第一阶段

这一阶段是在1978~1981年间生产的第35~47台产品(产品编号为151)中进行的,主要针对前34台所暴露出来的问题与不足之处进行优化改进,其主要内容为:

- (1) 改进通流部分结构,加高1~12级的叶栅高度;
- (2) 增加调节级喷嘴组通流面积,各喷嘴组的喷嘴数,由原先的6个增加到7个,通流面积增加17%;
- (3) 2号高压加热器增加设置疏水冷却段;
- (4) 改进汽封加热管路,简化本体温度测点;
- (5) 低压缸由铸造结构改为铸焊结构;
- (6) 改进各级叶片的振动特性,提高安全可靠。其中包括增加第14、15级隔板的喷嘴片数,以增加B型切向振动的安全裕度;更改第19、20级动叶型线,防止发生围带飞脱事故;第22级动叶高度由333mm改为323mm。

2. 第二阶段

这一阶段是1982~1986年间在第48~58台产品(产品编号为A151)中进行。这次改进的目的主要是提高整个电厂的安全可靠性。首先将主蒸汽和再热蒸汽温度均由 550°C 降低到 535°C ,但保持其出力不变。其它优化改进内容主要为:

- (1) 将高压缸第1~8级叶栅高度作适当减小,使其高度介于第34台前和第35~47台之间;
- (2) 调节级各喷嘴组的喷嘴数由7个改为6个,并将安装角由 33° 改为 34° ;
- (3) 高压隔板采用铣制喷嘴片、铣制加强筋;
- (4) 中压第10~12级采用强化61TC-IA型线,轴向宽度由60.78mm改为70mm;
- (5) 中压第14~18级动叶安装角由 $33^{\circ}55'$ 加大到 $36^{\circ}41'$,轴向宽度由60.78mm改为65.28mm,第16~18级增加动叶片数;
- (6) 从第3段和第5段回热抽汽口分别抽出厂用蒸汽2t/h、13t/h,其热耗率为 $8499.2\text{kJ}/(\text{kW}\cdot\text{h})$;不抽厂用蒸汽时,热耗率为 $8583\text{kJ}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

3. 第三阶段

这一阶段的完善化工作原来是为产品出口作准备的(第59~86台,产品编号A151),

因此主要考虑到机组的运行安全性、可靠性及出力，其改进的内容相对较少。主要是将调节级喷嘴组的喷嘴数由 6、6、6、6 改为 6、6、5、5，将高压第 2~8 级隔板的上、下半各减少 3 根加强筋，以提高其效率。

4. 第四阶段

从第 87 台开始的产品（产品编号为 B151）进行了第四阶段的优化设计工作。经过上述三次优化改进后，机组的经济性和安全可靠均有较大程度的提高，然而与当时国际上同容量等级的机组相比，其经济性尚有较大差距。为此，在 1989~1990 年着手第四阶段的优化改进设计。这次改进的主要目的是提高机组的经济性，使机组的热耗率在不抽厂用汽情况下达到 $8499\text{kJ}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。同时，进一步提高机组的安全性和自动化水平。改进后首台机于 1991 年 4 月出厂，10 月投运。其主要的优化内容如下：

(1) 高压缸部分。适当缩小调节级喷嘴组的通流面积，喷嘴安装角改为 33° ；喷嘴数为 6、6、5、5；动叶片顶部增加径向汽封齿数；调整高压各级通流部分面积，适当地提高调节级背压、减少调节级焓降。

(2) 中压缸部分。改进中压前 4 级直叶片及隔板，适当缩小其通流面积；对 14~18 组隔板进行改进，采用 HQ-2-2 红旗叶型。

(3) 低压缸部分。首先，对第 1~3 级的动叶栅和喷嘴叶栅的面积比进行适当调整，使其焓降分配均匀；其次分别改进了末级和次末级叶片，包括增大末级的通流面积，喷嘴数由 58 只减少到 50 只，采用可控涡流型，用铣制喷嘴叶片替代原来爆炸成型的空心叶片等；增大次末级动叶栅通流面积，并采用可控涡流型的新型线，叶片数由 76 只减少到 56 只；同时增大喷嘴叶片的安装角，适当增加次末级喷嘴叶栅的通流面积。

(4) 调节系统。借鉴引进技术，将双侧油动机改为单侧油动机；改进中压联合汽阀结构，使其压损降低，以提高机组的动态调节性能和经济性；配用模拟电调装置，采用以电调为主，电液并存的系统；并采用先进的保护系统，提高机组的自动化水平。

三、新一代优化型 125MW 汽轮机

125MW 机组虽经上述四个阶段的完善化后，1991 年以后出厂的机组与以前的 86 台相比，确实有很大程度的提高。然而，随着国际上同类型机组的技术水平不断提高，尤其是以 90 年代的水平来衡量，国产 125MW 机组的差距仍然较大，特别是热耗率偏高。为此，上海汽轮机厂在前四次优化改进的基础上，采用先进技术再一次对 125MW 机组进行了优化设计，主要内容有：

(1) 通流部分的设计采用三元流动的理论和设计方法，设计扭转喷嘴片、高效动叶片、高效跨声速叶栅，改进汽封结构和采用自带围带等技术。

(2) 在调节控制系统方面，采用了数字式电液调节系统。

(3) 高中压缸采用圆筒形结构，取消法兰加热装置，以提高机组的启动性能。

(4) 在系统及辅机部分。主要对油系统、凝汽器、抽汽器、轴封加热器、冷油器及滤水器等作了进一步优化，以提高其质量。

通过以上优化改进，在锅炉、汽轮发电机、系统等配套设备维持原状的情况下，考虑到适当的余量，功率可以达到 130MW。

为了查阅方便，将 125MW 机组的几次改进设计的主要内容列于表 1-1 中。

表 1-1

上海汽轮机厂对 125MW 机组的几次改进设计的主要内容

时间	第一阶段	第二阶段	第三阶段	第四阶段	新一代优化型汽轮机
	1978—1981	1982—1986 年	1987—1991	1991 年以后	
台号	35 ~ 47	48 ~ 58	59 ~ 86	87 台以后	
编号	151	A151	A151	B151	C151
本体 通流 部分	<p>加高 1 ~ 12 级的叶栅高度；</p> <p>增加喷嘴组通流面积，各喷嘴组的喷嘴数由 6 个增加到 7 个，通流面积增加 17%；</p> <p>增加第 14、15 组隔板的喷嘴数；</p> <p>更改第 19、20 级动叶型线；</p> <p>第 22 级动叶高度由 333mm 改为 323mm</p>	<p>主蒸汽和再热蒸汽温度由 550℃ 降低到 535℃；</p> <p>调整高压缸第 1 ~ 8 压力级叶栅高度，介于 34 和 47 台之间；</p> <p>高压喷嘴组的喷嘴数由 7 个改为 6 个，安装角由 33° 改为 34°；</p> <p>高压隔板采用铣制喷嘴、铣制加强筋；</p> <p>中压第 10 ~ 12 级采用强化 61TC-1A 型线、轴向宽度由 60.78mm 改为 70mm；</p> <p>中压第 14 ~ 18 级动叶安装角由 33° 55' 加大到 36° 41'，轴向宽度由 60.78mm 改为 65.28mm，第 16 ~ 18 级增加汽道数</p>	<p>高压喷嘴组的喷嘴数由 6、6、6、6、改为 6、6、5、5；</p> <p>高压第 2 ~ 8 级隔板上、下半各减少 3 根加强筋，以提高其效率</p>	<p>适当提高调节组背压；</p> <p>调节阀直径改为 $\phi 100\text{mm}$、$2 \times \phi 120\text{mm}$；</p> <p>高压喷嘴组喷嘴的安装角改为 33°，增加动叶片顶部径向汽封齿数；</p> <p>改进中压联合汽阀结构，降低压损；</p> <p>改进中压缸前 4 级直叶片及隔板，适当缩小其通流面积；改进 14 ~ 18 组隔板，采用 HQ-2-2 红旗叶型；</p> <p>低压末级喷嘴数由 58 只减少到 50 只；采用可控涡流型铣制喷嘴片替代原来爆炸成型的空心叶片等；</p> <p>增大次末级通流面积，采用可控涡流型的新型线，只数由 76 只减少到 56 只等。</p> <p>适当调整低压 1 ~ 3 级的动叶栅和喷嘴叶栅的面积比</p>	<p>对通流部分的设计采用三元流动的理论和方法设计的扭转喷嘴叶片、高效动叶片、高效的跨声速叶栅，光滑流道，改进汽封结构和自带围带叶片等技术</p>
本体 其它 部分	<p>改进汽封加热管路，简化本体温度测点；</p> <p>低压缸由铸造结构改为铸焊结构</p>				<p>高中压缸采用圆筒形结构，取消法兰加热装置</p>
热力 系统	<p>2 号高加设置疏水冷却段。</p>	<p>液压控制抽汽逆止阀改为气动控制逆止阀</p>			<p>对油系统、凝汽器、抽汽器、轴封加热器、冷油器等作进一步优化</p>
调节 保护					<p>采用数字式电液调节系统</p>

第三节 125MW 汽轮机组的改造

上世纪 90 年代初，原能源部和机电部曾明确提出：经过十年努力，火电平均供电煤耗率降低 60g/(kW·h)，机组设计煤耗率努力降低 20 ~ 30g/(kW·h)。为达到这一目标，除了

不断增加 300MW、600MW 以及更大容量的机组在电网中的比例，停运或改造中温中压的 25MW 及以下的机组外，一个重要的措施就是对 125 ~ 210MW 老机组进行技术改造。目前，这类机组仍然占全国电网总装机容量的 1/3，仅 125MW 机组就有 100 台以上。其中，1993 年全国装机容量较大的一年，100MW 等级以上投产的 9925MW 装机容量中，125 ~ 210MW 机组就投运 19 台，共计 4050MW，占 40.8%。

125MW 汽轮发电机组投产以来，受到用户的欢迎。根据全国的电力形势和国家对电力建设投资政策，相信 125MW 机组在今后相当长的时期仍将在电网中发挥重要作用。但是，一大批 125MW 汽轮发电机组毕竟是上个世纪 80 年代以前设计的产品，与目前国内外同类机组相比，其性能的差距比较大，主要是机组效率低、热耗率大。特别是实测的高压缸效率比较低，一般为 76% ~ 80%，与先进机组的差距约为 5% ~ 9%，对机组效率影响较大。近几年，来自国内外的汽轮机生产厂商和发电厂对如何提高 125MW 机组的效率，降低热耗，适应调峰，有利环保，以及如何提高机组安全性和自动化水平，适应现代化电网 AGC 控制的需要做了很多的工作，对其进行了多方面的技术改造和技术创新。

随着汽轮机通流部分的三元流动设计技术的应用以及计算机技术在汽轮机设计中的广泛应用，使汽轮机的经济性有了明显的改善。尤其是随着汽轮机技术的进步，国际上一些工业先进国家亦将老机组改造放在重要位置上，因为老机组采用新技术进行改造，不仅是效率的提高，出力的增加，而且可大大节省电厂的基建投资，使老机组“焕发青春”，真正做到“物尽其用”。美国的 GE 公司和 WH（西屋）公司均在积极进行老机组翻新工作。1994 年 2 月中旬 WH 公司动力部年会上指出，美国的装机容量已接近饱和，目前主要任务是老机组改造。据上述两公司的统计，翻新改造后的老机组，其出力、可用率和热效率均可提高，热耗率大大降低，且新增出力每 kW 的投资仅为新装机组的 50% 左右。日本的日立公司从 80 年代初就对 125 ~ 1000MW 老机组进行改造，改造的主要内容为改进动、静叶型、改进汽封、降低中、低压缸排汽损失等。改造后机组的热效率提高了 2% ~ 4%。东芝公司对 110、165、220MW 等老机组进行通流部分更新，使 3 种汽轮机的热效率分别提高了 1.2%，1.4% 和 1.3%。可见老机组的改造对于节能降耗、提高出力具有极为重要的意义，国际上称这一措施为“决策性的措施”。

我国对已投产的老 125MW 机组进行技术改造始于 1997 年，当年 8 月由国家电力公司安运部举办的“日本东芝公司技术对国产 125MW 机组技术改造方案研讨会”在山东召开，由此拉开了 125MW 机组改造的序幕。由于当时东芝改造方案费用高达 400 万美元，国内电厂难以接受。会议要求争取国内合作伙伴，走国产化道路，以降低造价。此后，北京全三维动力工程公司、北京重型电机厂，东方汽轮机厂在 200MW 机组改造取得成功经验的基础上，开始对 125MW 机组改造进行设计。上海汽轮机厂也先后推出采用西屋技术（反动式）改造和与日本东芝公司合作技术（冲动式）改造方案。

1998 年 3 月国家电力公司安运部组织国内汽轮机方面的专家在海南召开会议，对东汽公司和全三维公司 125MW 机组的改造方案进行评审，并指出 125MW 机组在今后相当长的时期仍在电网内发挥重要作用，国内老机组改造经过十几年的实践，技术已经成熟，并接近国际先进水平。125MW 机组改造有较大经济效益，一般都可以在 4 ~ 5 年回收投资，符合国家资源开发与节约并举，把节约放在首位的政策。125MW 汽轮发电机组的改造主要集中在以下方面：

一、汽轮机通流部分的改造

提高通流部分效率，使机组热耗率由 8582 ~ 8666kJ/(kW·h) 降到 8200kJ/(kW·h)，煤耗率降低 10 ~ 14g/(kW·h)，在锅炉出力为 390t/h 时，汽轮机的最大连续出力增至 135MW。改造费用控制在 1500 ~ 2000 万元以内，如果机组年利用小时为 5500h 左右，可在 3 ~ 4 年内通过节煤降耗回收投资。若考虑机组增容效益，投资回收期还可缩短。

由于计算机技术的发展，特别是近几十年来，叶轮机械气动热力学和汽轮机通流部分设计概念与手段的发展，使以一维/准三维/全三维气动热力分析计算为核心的汽轮机通流部分设计方法已趋于成熟，以弯扭联合成型全三维叶片为代表的第三代通流设计已进入工业化实用阶段，其效率比第二代汽轮机（可控涡流设计）提高约 1.5%。并在 200MW、100MW 机组改造中取得成功，供电煤耗下降 10 ~ 15g/(kW·h)。现各制造厂对 125MW 机组技术改造采用的主要新技术有：高效叶型、弯扭叶片、全三维的气动及热力计算技术、级间泄漏的控制和叶片加工的数控技术。上海汽轮机厂提出了对已投运的 125MW 机组改造的两个方案，即冲动式和反动式优化设计方案。

1. 冲动式改造方案

该方案主要对高中压缸和低压缸进行优化，而着重点在低压缸。对于高压部分改造的原则为：级数不变，转子不变，主要采用调整焓降分配、减少汽封漏汽和叶片端部损失等方法。高压调节阀和喷嘴组，按照 B151 型机组方案。具体改进措施和效果如表 1-2 所列。

表 1-2 高压缸改造效果

措施	效益		措施	效益	
	高压缸效率提高 (%)	热耗率下降 [kJ/(kW·h)]		高压缸效率提高 (%)	热耗率下降 [kJ/(kW·h)]
减少调节级焓降	0.24	4.2	采用分流叶片	1.0	17.6
减少漏汽损失	0.69	12.1	总计获得收益	1.93	33.9

中压部分改造的原则为：级数不变，喷嘴采用新型线和可控涡流型线，减少动叶片冲角。同时，采用新的扭转叶型，调整焓降分配，改进末 3 级叶片反动度等。具体的改进措施和相应的效果如表 1-3。

表 1-3 中压缸改造效果

措施	效益		措施	效益	
	中压缸效率提高 (%)	热耗率下降 [kJ/(kW·h)]		中压缸效率提高 (%)	热耗率下降 [kJ/(kW·h)]
改进喷嘴型线	0.2	4.7	减少漏汽损失	0.1	2.3
减少冲角	1.0	23.4	总计获得收益	1.6	27.4
改善反动度	0.3	7.0			

低压缸改造的原则为：级数不变，采用三元流计算程序设计，前 4 级的喷嘴叶栅采用扭曲叶片，末两级的喷嘴叶栅则采用马刀型弯扭叶片，前 4 级动叶栅采用铣制围带叶片，并用气动性能好的叶型等。具体改进措施和相应效果见表 1-4。其中由于优化设计中末级反动度的提高和级焓降的提高，使排汽余速损失有所提高。

表 1-4

低压缸改造效果

措施	效益		措施	效益	
	中压缸效率提高 (%)	热耗率下降 [kJ/(kW·h)]		中压缸效率提高 (%)	热耗率下降 [kJ/(kW·h)]
冲角改善	1.84	63.5	漏汽损失减少	0.40	13.8
叶型更新及采用可控涡	0.71	24.5	排汽余速增加	-0.40	-13.8
子午液道的光顾	0.40	13.8	总计获得收益	2.95	101.8

从表 1-4 中可见, 125MW 汽轮机的低压缸经优化改进, 即可增加出力 1250kW, 热耗率可下降 101.8kJ/(kW·h)。以年运行 5000h 计, 则每台每年可多发电 625 万 kW·h, 可节省标煤 2214t。若与 87 台以前的产品比较, 则电厂获益将更多。

综合以上所述, 冲动式优化改造方案, 改进高、中、低压通流部分, 可使整个机组的热耗从 B151 的 8499.2kJ/(kW·h) 下降到 83261kJ/(kW·h), 降低 173.1kJ/(kW·h), 仍以每台每年运行 5000h 计, 则可节省标煤 3750t。若与早期产品 (第 1~34 台) 的热耗率 8792.3kJ/(kW·h) 比, 每年每台可节省标煤 10000t。

同时, 由于 125MW 的出力在目前锅炉、电机系统不变的条件下, 可以使功率达到 130MW, 即比目前的机组功率多 5MW, 亦以年运行 5000h 计, 每台机组每年可多发电 2500 万 kW·h, 以电厂电价新增利润 0.2 元/(kW·h) 计, 每年可盈利 500 万元。若将节省标煤所得和多发电两项加起来, 与早期机组相比年效益超过 700 万元。即使与 B151 (第 87 台后) 机型相比, 亦可年得益 600 余万元。而伴随着煤价和电价的上涨因素, 电厂的得益将会更大。

2. 反动式改造方案

该方案技术改造的原则要求机组的轴承间距和高中压外缸不变, 仅改变转子的直径与级数等。主要是利用引进 WH 公司技术, 采用反动级来代替高、中压冲动式压力级, 提高高中压缸效率。这样, 对老机组改造来说就要求更换高中压转子, 而低压缸的改进则与冲动式优化设计改造方案相同。

反动式改造方案的主要内容为:

- (1) 高压部分采用冲动式调节级和反动式压力级, 级数为 1+12, 效率为 83.3%;
- (2) 中压部分采用反动式压力级, 级数为 14, 效率为 90.57%;
- (3) 低压缸设计方案与冲动式相同, 级数为 2×6, 效率为 84.6%。

改造后, 机组的热耗率可降到 8248kJ/(kW·h), 达到目前国外同类机组的先进水平。虽然其改造的投资要较冲动式方案高些, 然而其热耗率较冲动式方案低 78.1kJ/(kW·h), 以年运行 5000h 计, 每台机组每年比冲动式方案节省标煤 1610t。故从长远效益来看, 反而较冲动式方案有利。

以上两种改造方案具有较大程度的通用性, 可用于新机组的优化改进, 亦可用于老机组的更新改造, 特别是老机组的改造, 其经济效益更为显著。以我国的实际情况预计, 老机组改造每 kW 的投资仅为新装机组投资的 30%。由于其分缸压力及轴承之间的跨距不变, 故亦可分汽缸进行改造, 其中低压缸的改造经济效益最大, 可单独实现。

二、汽轮机调节系统的改造

125MW 机组原设计的调节系统采用传统的液压控制, 汽轮机在启动、冲转、升速过程

中，调速系统处于开环运行。当转速达到约 2800r/min 以上时旋转阻尼感受到转速信号，产生一次油压，通过放大器放大转变成二次油压，达到控制汽轮机转速的目的。因为该调速系统控制信号和反馈信号都是由放大器、油动机、杠杆配汽机械或液压等部件产生和执行，所以动作迟缓率较大，影响了汽轮机的调节精度。另外机组启动或低负荷运行，只有部分进汽，汽缸受热不均匀，热应力大，不能适应快速启动，保护系统不完善，甩负荷后超调量大，自动化水平低，不能满足机炉协调控制和电网 AGC 控制的要求。

目前对 125MW 机组调节系统的改造方案，主要有：

- (1) 在原有液压调节系统的基础上，增加电调部分，电、液调节并存；
- (2) 低压透平油（2MPa）DEH 数字电液调节；
- (3) 高压抗燃油（> 10MPa）DEH 数字电液调节。

前两个方案已在我国 125MW 机组改造中应用。改革开放以来我国在吸收消化引进技术的基础上，开发成功 DEH 调节系统，并取得较好的业绩，技术上已比较成熟。采用高压抗燃油的 DEH 电液调节系统已在 200MW、300MW 机组改造中取得成功经验。DEH 调节系统由电控调节装置和液压控制系统两部分组成，电调控制系统部分较成熟，但高压液压部件的改造方案还没有在 125MW 机组上实践。下面是有关厂家对 125MW 汽轮机液压部分的改造的简要情况。

对于改造方案（1），其液压部分要求做如下改进：更换原来液压调节系统不适用的液压调速部件，加装电液转换器、流量放大器、切换电磁阀等液压部件，形成电液调节和液压调节并存的调节系统。电液转换器采用力矩马达碟阀式结构，可以降低对油质的要求；增加流量放大器，将电液转换器输出的控制油压信号进行流量放大，以控制高、中压油动机，改变调门开度；更换启动阀及增加启动器，满足远方挂闸建立安全油压、开启主汽门的要求。对早期生产 151、A151 型汽轮机采用的双侧进油油动机要改为单侧油动机，以缩短油动的关闭时间（减少到 0.35s），改善甩负荷动态特性。切换电磁阀的作用是进行电液调节和液压调节间的切换。

对于改造方案（2），则在方案（1）的基础上，消除系统中的油压放大器、同步器和切换电磁阀，切断一次脉冲油路，成为用低压透平油控制的 DEH 电液调节系统。

对于采用高压抗燃油的电调 DEH 电液调节系统，由于该系统的液压部件、执行机构采用高压抗燃油驱动，因此改造需要重新设计能承受高压的液压部件，增加一套独立的高压抗燃油供油系统。取消原液压调节部件（旋转阻尼、放大器、同步器、高、中压油动机），保留原透平油保安系统，低压安全油与高压抗燃油用隔膜阀联系。每个高压调节阀操纵机构配备 1 只高压单侧油动机与伺服阀（MOOG 阀）控制调节阀的开度，以调节进汽量，使高压油动机关闭时间小于 0.15s。由于中压调门不参与调节，为减小改造工作量，便于维修，也可将原中压调门油动机更换成高压单侧油动机，其它不作改动。

三、发电机的改造

由于汽轮机通流部分经过改造，提高了效率，降低了消耗，最大的连续出力增至 135MW。汽轮机的改造改变了发电机的工况。因此，对发电机也应作相应的改造，以提高整套机组的配套性及经济性，真正实现降耗与增容的目标。目前制造厂对 125MW 发电机改造提出两种改造方案：

第一种方案将定、转子的水冷却器更换为不锈钢水冷却器，并增加换热面积，提高可靠