

发电厂和变电所运行高级工培训教材

汽轮机设备运行技术

甘肃省电力工业局 合编
河南省电力工业局

中国电力出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

汽轮机设备运行技术/甘肃省电力工业局, 河南省电力工业局编, —北京: 中国电力出版社, 1995

发电厂和变电所运行高级工培训教材

ISBN 7-80125-026-5

I. 汽… I. ①甘… ②河… II. 汽轮机运行-技术培训-教材 N. TK267

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 14705 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

北京市地矿局印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1995 年 11 月第一版 1995 年 11 月北京第一次印刷

787×1092 毫米 32 开本 20.375 印张 448 千字 2 插页

印数 00001—10960 册 定价 26.70 元

版权专有 翻印必究

出 版 说 明

为满足高级工培训工作的需要，根据部颁《电力工人技术等级标准》的要求，我社组织出版了发电厂和变电所运行高级工培训教材。本套教材第一批共 9 种，是由河南省电力工业局和甘肃省电力工业局在其省内广为使用、多次办培训班所采用的运行高级工培训教材的基础上，根据教学中的经验和使用单位与读者的意见，对内容进行了增、删，结构上进行了调整，经重新修改而成，使之更适应运行高级工培训的要求。其中，火电厂运行高级工培训教材分为 4 种，即《火电厂电气设备及运行》、《火电厂继电保护及自动装置》、《锅炉设备运行技术》、《汽轮机设备运行技术》；变电所运行高级工培训教材分为 2 种，即《变电所电气设备及运行》、《变电所继电保护及自动装置》；水电厂运行高级工培训教材分为 2 种，即《水轮发电机组运行技术》、《水工观测技术》。另外，《电力系统运行及过电压保护（火电厂、水电厂和变电所共用）》为共用教材。本套教材供运行高级工培训及自学用，也可供相关专业的工人及技术人员参考。

中国电力出版社

1995 年 7 月

前 言

在改革开放政策的指引下，我国电力工业近年来有了长足的发展，装机容量已接近 2 亿 kW。在火力发电方面，高参数大容量机组的比重不断扩大，据不完全统计 10 万 kW 以上机组的总容量已占火电装机容量的 65% 以上，自动化程度显著提高，表征机组经济性和可靠性的指标明显改进，火力发电整体技术已达较高水平，进入更高层次。为了适应新形势的要求和满足广大火电生产运行人员学习技术与培训工作的需要，甘肃省电力工业局教育处和河南省电力工业局教育处在总结多年来组织高级技术工人培训工作经验的基础上，联合组织编写了火电厂运行高级工培训教材《锅炉设备运行技术》和《汽轮机设备运行技术》，这两本教材系根据部颁《电力工人技术等级标准》的要求编写的，编写内容尽可能结合我国现阶段技术发展的实际情况，并在结合生产实际的基础上适当加强理论论述和适当扩充知识面，力求能将锅炉、汽轮机运行高级工培训应涉及的有关内容包括进去，以切合火电运行高级工提高技术水平和知识水平的要求。

参加本书《汽轮机运行技术》编写的有西固热电厂方晓军、靖远电厂曾强、河南电力工业学校李振强和孙建勋、首阳山电厂庞笑菲、郑州热电厂陈文刚等同志。甘肃省电力工业局教育处蒋芳林同志在本书编写的组织、书稿的最终审核和定稿工作中做了大量的工作，特此致谢。

尽管编写本书的愿望是好的，但限于编写人员的水平特别是编写时间仓促，难免有不少疏漏、不妥甚至错误之处，我

们恳切希望广大读者和使用本教材进行培训的同志指正，以便再版时更正。

甘肃省电力工业局教育处
河南省电力工业局教育处

1995 年 7 月

目 录

出版说明

前 言

第一章 大型汽轮机结构总体概述	1
第一节 N100-8.82/535 型汽轮机	2
第二节 N200-12.75/535/535 型汽轮机	5
第三节 引进型 300MW、600MW 汽轮机	8
第四节 东方汽轮机厂开发的 300MW 汽轮机简介	40
第五节 供热式汽轮机的特点	41
第二章 变速泵	49
第一节 给水泵的结构特点	49
第二节 液力耦合器	62
第三节 给水泵汽轮机	73
第三章 汽轮机的调节与保护	100
第一节 汽轮机的供油系统	100
第二节 汽轮机调节系统的基本原理及组成	121
第三节 调节系统的静态特性	124
第四节 同步器	131
第五节 中间再热式汽轮机的调节	139
第六节 调节系统的动态特性	154
第七节 汽轮机的保护装置	158
第八节 功频电液调节	168
第九节 国产 200MW 汽轮机调节保护系统举例	188
第十节 调节系统的调整及试验	234
第十一节 调节系统静态特性的调整	247
第四章 凝汽式发电厂的主要经济指标及	

汽轮机热力试验	258
第一节 凝汽式发电厂的主要经济指标	258
第二节 汽轮机热力试验参数的测量及仪表	260
第三节 汽轮机的热力试验与试验结果的整定计算	262
第五章 汽轮机的热应力、热膨胀和热变形	282
第一节 汽轮机启停和变工况时的传热现象	282
第二节 汽轮机的热应力	293
第三节 汽轮机的热膨胀	306
第四节 汽轮机的相对膨胀及其控制	312
第五节 汽轮机的热变形	323
第六章 汽轮机的寿命	336
第一节 金属材料的机械性能	336
第二节 金属材料的高温机械性能	345
第三节 汽轮机的寿命	355
第四节 汽轮机的寿命管理	365
第五节 长期停运机组的保护	371
第七章 汽轮机的启动与停机	376
第一节 汽轮机启停过程的优化分析	376
第二节 汽轮机的启动方式和中压缸启动技术	382
第三节 汽轮机的停机及其快速冷却技术的应用	392
第四节 上海汽轮机厂引进型 300MW 汽轮机的 运行特点	402
第八章 汽轮机的调峰与经济运行	406
第一节 汽轮机在变工况下的工作	406
第二节 配汽方式及其对定压运行机组变工况的影响	429
第三节 汽轮机的调峰运行方式与监控	441
第四节 调峰汽轮机	456
第五节 单元制机组的控制方式	474
第六节 汽轮机的经济运行	481

第九章 新机组的试运及验收	498
第一节 新汽轮机组试运前的准备工作	500
第二节 分部设备试运	501
第三节 整套设备启动	506
第四节 满负荷试验	513
第五节 试生产及竣工验收	525
第十章 汽轮发电机组运行中的异常振动	528
第一节 振动概述	528
第二节 机组振动状态的评定	541
第三节 扭振概述	553
第四节 汽轮发电机组异常振动原因分析	559
第五节 大机组运行振动在线监控	568
第十一章 汽轮机典型事故及预防	585
第一节 汽轮机事故处理原则和一般分析方法	585
第二节 汽轮机真空下降	590
第三节 汽轮机超速	593
第四节 汽轮机水冲击	597
第五节 轴承损坏	601
第六节 通流部分动静磨损	604
第七节 汽轮机叶片损坏	605
第八节 汽轮机转子弯曲	613
第九节 火灾事故	617
第十节 厂用电中断	624
第十一节 给水泵故障	628
第十二节 汽水管道故障	634

第一章 大型汽轮机结构

总体概述

我国自 1955 年制造第一台 6MW 汽轮机以来,已走完了从制造中压机组到亚临界压力 600MW 机组的全部过程。1958~1959 年,上海汽轮机厂、哈尔滨汽轮机厂分别制成了高压 50MW 和 100MW 的汽轮机。1969 年上海汽轮机厂制成了超高压中间再热 125MW 汽轮机。1972 年哈尔滨汽轮机厂制成了 200MW 汽轮机。1974 年上海汽轮机厂生产的亚临界压力中间再热 300MW 机组在江苏望亭电厂投运,由于缺乏设计制造大型机组的经验,在设备质量上存在一些问题,后来几经完善和更新换代,至今已推出改进型的第三代产品(装在石洞口电厂),质量有所提高。改革开放以来,电力建设迅速发展。1987 年上海汽轮机厂引进美国西屋公司技术制造的亚临界压力 300MW 汽轮机在山东石横电厂投运,哈尔滨汽轮机厂引进美国西屋公司技术制造的首台 300MW、600MW 机组也已分别在珠江电厂和平圩电厂安装、投运。东方汽轮机厂新开发的 300MW 机组,以国产技术为主,低压缸部分采用美国通用电气公司和日本日立公司技术,调节级采用西屋公司技术,其首台机组装在沙岭子电厂。北京重型电机厂与法国阿尔斯通公司合作生产的 330MW 汽轮机已装在四川江油电厂。上述引进型机组,其经济性、安全性、灵活性和自动化水平都有较大提高,已成为我国电网中的主力机组。本章主要介绍 100~600MW 汽轮机的总体结构。

第一节 N100-8.82/535 型汽轮机

N100-8.82/535 型汽轮机为高压、双缸、单轴、冲动、凝汽式汽轮机，其纵剖面如图 1-1 所示。

汽轮机额定功率和经济功率均为 100MW，新蒸汽参数为 8.82MPa、535℃，凝汽器压力为 4.9kPa，额定转速为 3000r/min。汽轮机内效率为 86.1%，汽耗率为 3.694kg/(kW·h)，热耗率为 9253kJ/(kW·h)。

汽轮机通流部分高压缸由一个双列速度级和 14 个压力级组成，低压缸采用分流方式，共有 2×5 个压力级。

汽轮机采用喷嘴调节，共有 4 个带预启阀的调节汽阀，各控制 17 个喷嘴。其中第一和第二调节汽阀同时开启，以减小在空、低负荷时上、下缸的温差；同时可以避免第一阀全开、其余阀全闭时调节级动叶过载。第三调节汽阀全开可达到额定功率，第四调节汽阀为过负荷汽阀，当它全开并保证初参数在上限值(9.37MPa/540℃)时，汽轮机功率可达 130MW。

汽轮机高压缸由前后两部分组成，借助垂直结合面用法兰螺栓连接在一起。4 个喷嘴室和 4 个蒸汽室分别铸出，分组两两焊在一起，再与浇铸好的高压缸前部焊接。低压缸为双分流式，由一个铸铁铸成的中部和左右两钢板焊成的排汽缸组成，三部分之间用螺栓连接。高缸排汽经导汽管引入低缸中部，在低压缸内做完功后，分别经扩压管进入凝汽器。

为保证汽缸胀缩自由，确保动、静中心一致，汽轮机设有一套滑销系统，死点位于低压缸中间前部两块基础台板上的横销连线与前后基础台板上的纵销连线的交点处。受热后，死点前面的低压前排汽缸和高压缸向前膨胀，死点后面的低

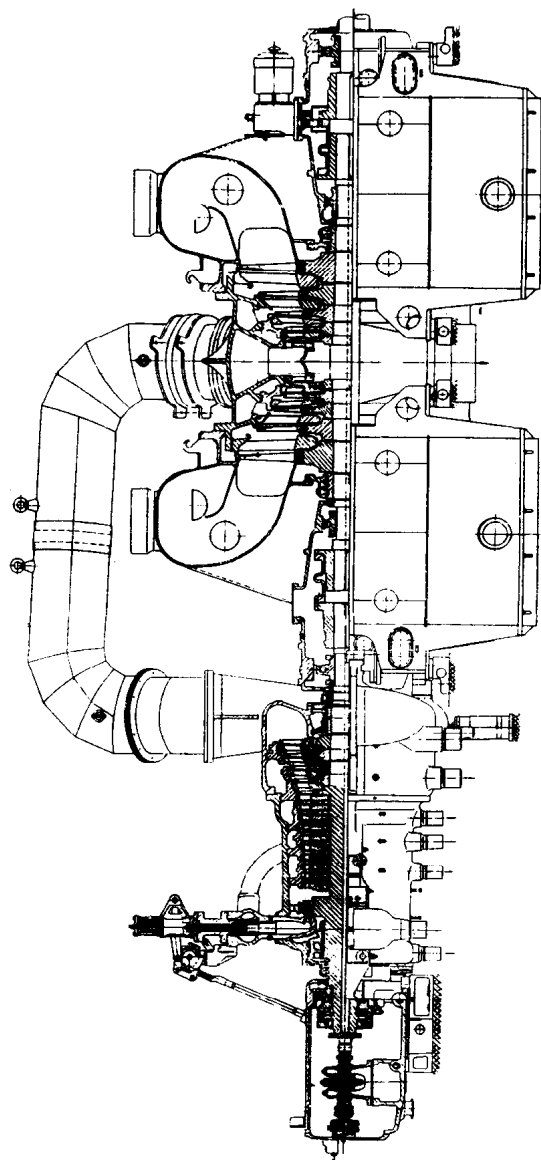


图 1-1 国产 N100-82/535 型汽轮机纵剖面图

压后排汽缸向后膨胀。

高压缸为单层缸，其内有 5 个隔板套共安装 14 个压力级隔板；低压缸也是单层缸，有 2 个隔板套安装 4 级隔板，其余 6 级隔板直接装在低压缸上。第 2~11 级采用焊接隔板，以后各级采用铸造隔板。每个排汽缸的末两级设有去湿装置，以减轻冲蚀现象。汽轮机高压轴封为梳齿型汽封，低压轴封为 J 型汽封。

汽轮机第 1~10 级动叶片均为等截面直叶片，第 11~25 级动叶片为变截面扭曲叶片。第 1~8 级为 T 型叶根，低压缸每侧末 3 级为叉型叶根，其余各级为外包 T 型叶根。低压缸每侧倒数第二级动叶片进口上部背弧处焊有司太立合金，每侧末级采用电火花强化处理，以抗冲蚀。第一级叶片采用整体铣制围带，第 2~15 级、16/21 级、17/21 级是铆接围带，第 20/25 级采用拱型围带，以提高抗振性能和减少叶顶漏汽损失。

汽轮机高压转子为组合式，其双列速度级和前 10 个压力级的叶轮与主轴整体锻出，采用 30Cr2MoV 钢，后 4 级叶轮采用热套加键固定在水轴上。低压转子为套装式，水轴采用 34CrMo 钢，从水轴左右分别套装 5 个叶轮。为了减小叶轮轮孔处的应力集中，末 4 级都采用端面径向键连接。除调节级和低压缸左右末 3 级外，其余各级叶轮上开有平衡孔，以减少转子轴向推力。汽轮机高低压转子支承在 4 个轴承上，高缸前部采用推力-支持联合轴承，其余为支持轴承。所有支持轴承都采用三油楔轴承，均设有高压油顶起装置，由 4 台柱塞泵供油。

高压转子的临界转速为 2060r/min，低压转子临界转速为 1814r/min。汽轮机高低压转子及与发电机转子的连接均

采用半挠性联轴器。本机采用摆动齿轮式电动盘车，其转速为 40.56r/min 。

汽轮机有 7 段非调整抽汽，用来加热给水及除氧（二高、四低、一除氧）之用。

第二节 N200-12.75/535/535 型汽轮机

N200-12.75/535/535 型汽轮机为超高压、三缸、单轴、中间再热、凝汽式汽轮机，其纵剖面见图 1-2。

汽轮机的额定功率和经济功率均为 200MW，最大功率为 220MW。新蒸汽参数为 12.75MPa 、 535°C ，中间再热蒸汽压力为 2.47MPa （冷段）和 2.07MPa （热段），再热后温度为 535°C ，凝汽器压力为 4.9kPa 。额定转速为 3000r/min 。汽轮机内效率为 87.5% ，额定功率下的汽耗率为 $2.875\text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ，热耗率为 $8403\text{kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

汽轮机为三缸、三排汽口型式，高、中压汽缸为分缸结构、对头布置。中压缸后部直接连接着一个排汽缸，其排汽室与分流式低压缸的两个排汽室完全相同。汽轮机通流部分由 37 级组成。高压部分有一个单列调节级和 11 个压力级，中压部分为 10 个压力级，低压部分为三分流式，每一分流为 5 个压力级。

汽轮机采用喷嘴调节，新蒸汽经 2 个高压主汽阀、4 个高压调节汽阀后进入高压缸。高压缸排汽经高排逆止阀进入中间再热器。蒸汽再热后经 2 个中压主汽阀、4 个中压调节汽阀后进入中压缸。中缸排汽经 3 个排汽室做完功后进入 3 台凝汽器。在 35% 额定负荷以上时，仅由高压调节汽阀进行调节，中压调节汽阀全开。中压调节汽阀只在小于 35% 额定负荷时才参与调节。

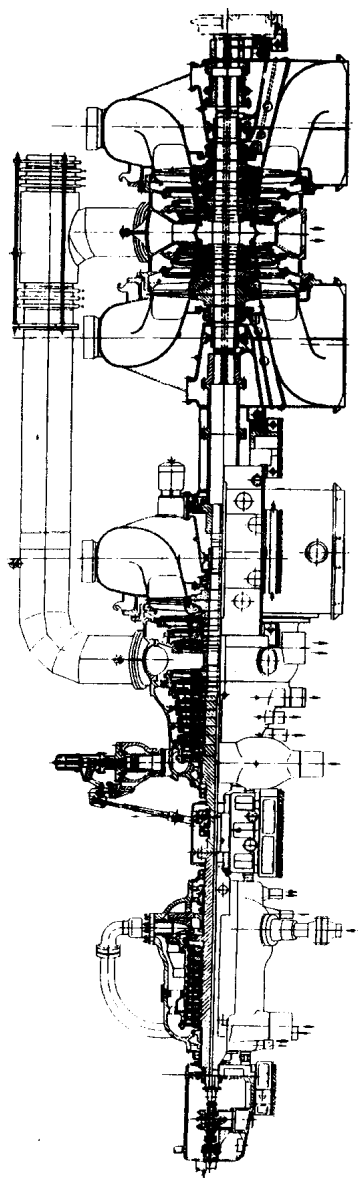


图 1-2 国产 N200-12.75/535/535 型汽轮机纵剖面图

高压缸采用双层结构,高压内缸及喷嘴室分别单独铸成,采用 ZG15Cr1Mo1V 或 ZG20Cr1Mo 铸成。内外缸之间由隔热环隔成高温区和低温区两个空间,分别由进汽短管与汽封套的漏汽以及第九级后抽汽中的一部分来冷却,以减小内缸高温段的内外壁温差。中压缸采用单层缸加隔板套结构。汽缸前部用 ZG15Cr1Mo1V 钢铸造,中部用 HT20-40 灰口铸铁铸造,排汽部分用钢板焊接而成与低压缸排汽部分相同。高、中压缸均设有法兰、螺栓加热装置。低压缸由铸铁浇铸的中部与钢板焊接的两侧排汽部分组成。为了增加排汽部分的刚性,减小排汽阻力,排汽缸中设置了加强筋及导流装置。为防止启动、空转及低负荷时排汽缸温度过高,低压缸内还设有喷水减温装置。

汽轮机滑销系统为:在前、中轴承座与台板间有 4 个纵销、8 个角销;在高压缸前猫爪与前轴承座之间、高压缸后猫爪和中压缸前猫爪与中轴承座之间,设有 3 对猫爪横销;中压缸排汽室机脚与它的后台板间、低压前排汽室机脚与它的前基础台板间设有 4 个横销;在高压缸与前、中轴承座间,中压缸前端与中轴承座间,中压排汽室与连接铁间以及低压前排汽室与连接铁和低压后排汽室与发电机轴承座间,又分别设有 6 个立销。这样就能保证汽轮机受热后,在纵向、横向和垂直方向的自由膨胀,同时又保证了汽缸与轴承座间、轴承座与基础台板间的中心不变以及动静部分中心一致。

汽轮机自第 2~19 级采用焊接隔板,其余为铸造隔板,每个低压排汽缸末两级静叶片采用电火花强化处理。全机有 8 个隔板套,高压缸 1 个,中压缸 5 个,低压缸 2 个。隔板和隔板套的支承采用中分面支承,利用 Z 型悬挂销和圆柱销及定位键来实现。汽轮机的高、中、低压轴封采用 J 形汽封,隔

板汽封采用梳齿形汽封。

汽轮机高压转子为整锻式，12个叶轮和主轴用30Cr2MoV钢整体锻造。中压转子为组合式，前7级叶轮和主轴用30Cr2MOV钢整体锻造，后8级叶轮热套于轴上。第1、13级，第20~37级采用锥形叶轮，其余各级采用等厚度叶轮。高压转子临界转速为2150r/min，中压转子临界转速为1685r/min，低压转子临界转速为2240r/min。

该机第1~9级采用等截面直叶片，其余各级均采用扭曲叶片。调节级采用2只叶片共1个整体的T型叶根，中压部分和低压部分的末3级采用叉型叶根，其余各级均采用外包T型叶根。末级叶片高度为665mm，叶顶部分采用弹性拱型围带，除第22、25（30、35）、26（31、36）级不装围带采用叶顶削薄之外，其余各级均采用板状围带。

高、中压转子之间用刚性联轴器连接，故可用3个支持轴承。中、低压转子之间用刚性联轴器连接，低压转子与发电机转子用半挠性联轴器连接。汽轮机Ⅱ号支持轴承与推力轴承为联合轴承，装在高、中压缸之间的轴承座内，其余轴承均采用三油楔轴承，并设有高压油顶起装置。汽轮机装有摆动式电动机械盘车装置及水力盘车装置各一套，可视情况选用或同时使用。前者设置在中、低压缸之间的中压缸后轴承座上；后者利用凝结水泵供水，经4组装在后汽缸上的喷嘴，喷射到每个排汽口前的末级动叶栅上，以产生盘车力矩。

第三节 引进型300MW、600MW汽轮机

一、产品概况

上海汽轮机厂引进技术生产的第一台亚临界压力

300MW 机组，于 1987 年 6 月 30 日在山东石横电厂投运；哈尔滨汽轮机厂引进技术生产的第一台亚临界压力 600MW 机组，于 1988 年 11 月在安徽平圩电厂投运。考核试验的热耗基本上达到了设计值。该产品既保留了美国西屋公司机组的主要技术特点，诸如反动式叶片、整锻式转子、多层汽缸、数字电液调节等，同时也在引进技术国产化的基础上，对 300MW、600MW 汽轮机进行了优化和改进。主要的改进有：通流部分采用控制涡设计；采用末级叶片高度 900mm 和次末级改为拱形围带的低压模块；全部动叶片采用自带围带成圈连接结构；全部静叶和动叶采用扭曲叶片等。改进后的优化机组在经济性方面较考核机组提高了 1.2%~1.35%，安全性方面也有所提高。

二、技术规范

汽轮机型式	300MW 汽轮机	600MW 汽轮机
	亚临界压力 中间再热	亚临界压力 中间再热
	2 缸	4 缸
	2 排汽	4 排汽
	单轴	单轴
	凝汽式	凝汽式
额定功率(MW)	300	600
主汽阀前额定蒸汽压力(MPa)	16.7	16.7
主汽阀前额定蒸汽温度(℃)	537	537
再热阀前额定蒸汽温度(℃)	537	537
额定功率主蒸汽流量(t/h)	918	1815
	(上汽 922.36)	
额定功率再热蒸汽流量(t/h)	750	1496