

汽轮机设备检修技术

(试用本)

火电生产类中级工培训教材

山西省电力工业局编



水利电力出版社

内 容 提 要

本书是按水利电力部的要求和规划,在编写火电生产类初级工培训教材的基础上,根据部颁发的工人技术等级标准中级工应知技术理论而编写的,是火电生产类中级工培训教材之一。全书共分三篇,第一篇基础知识,主要介绍热力循环、汽水流动损失、锅炉汽水系统和汽轮机设备的用电;第二篇专业技术,主要有材料、备品、焊接、起重、汽轮机设备的结构和运行;第三篇为检修技术,介绍了静止部件检修,转子部件的检修如拆装叶轮、叶片、直轴、测频、找平衡,调节系统的试验,水泵试验以及辅助设备的检修等。此外,还介绍了汽轮机检修的管理知识。本书除供培训中级工作为教材使用外,也可供有关技术人员参考。

火电生产类中级工培训教材
汽轮机设备检修技术
(试用本)

山西省电力工业局编

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 32 开本 19.75 印张 439 千字
1985年7月第一版 1985年7月北京第一次印刷

印数00001—53000册 定价 3.95 元

书号 15143·5778

前 言

为了提高火力发电厂中级工的技术水平,使技术培训工作逐步走上正规,继《火电生产类学徒工初级工培训教材》编写出版之后,1984年10月22日水利电力部又以(84)水电教字第76号文向我局下达编写《火电生产类中级工培训教材》的任务。

根据国家有关加强职工培训通知的精神,在完成“双补”任务的基础上,各单位应适时地转入大力开展中级工人(4~6级工)的技术业务培训工作,要求到1990年工人中实际水平达到中级技术等级的比例逐步提高到50%左右。火电生产类中级工培训教材就是根据这一精神而编写的。

本教材是按照水利电力部1979年颁发的《工人技术等级标准》中4~6级工人“应知”的要求,分工种编写的。教材的内容以20万kW以上的机组为重点,努力反映新技术、新设备、新工艺、新材料和新经验,以适应火电生产发展的需要。整个教材的编写力求体现工人技术培训的特点,本着理论联系实际的原则,努力做到内容准确、文字精炼、插图简明、通俗易懂,并注意同初级工教材相衔接。

《火电生产类中级工培训教材》共十四本,适用于二十二个工种。为了保证这套教材的质量和使之适应在全国范围内使用,我局除承担了部分教材编写任务外,还邀请了清河、陡河、大港、望亭、马头、闵行等发电厂,水利电力部西安热工研究所、华东电业管理局、华北电业管理局和山东省电力

试验研究所等单位及有关同志参加编写和审稿工作。在此，特向上述单位和有关同志表示衷心感谢。

本书编写人员及具体分工如下：

漳泽电厂蒋英豪编写第一、三、四章；

郝开国编写第二、十一、十二、十四、十五、十六章；

望亭电厂赵耀忠编写第五章，第七章第一、二节；

郁有声编写第六章，第七章第三、四节；

黄成康编写第八章；

清河电厂贾舒编写第九章；

马头电厂李守东编写第十、十三章。

本书由郝开国同志主编，山西省电力工业局张洪钟同志主审。

由于编写时间仓促，又缺乏经验，培训教材中难免存在错误和不妥之处，恳请使用单位和广大读者提出宝贵意见。本培训教材现以试用本出版，准备根据各方面意见在再版时进行修改，以进一步提高质量。

山西省电力工业局

一九八四年十二月

目 录

前 言

第一篇 基础知识

第一章 火力发电厂热力循环及其经济性(1)

第一节 火力发电厂的基本热力循环——朗肯循环(3)

第二节 再热循环(9)

第三节 回热循环(13)

第四节 电热合供循环(17)

复习思考题(18)

第二章 流体的流动损失及减少汽水流动损失的方法(19)

第一节 流体的基本知识(19)

第二节 流体的流动损失及其减少的方法(34)

第三节 离心泵的能量损失及其减小的方法(53)

复习思考题(61)

第三章 锅炉的汽水系统(63)

第一节 锅炉的汽水系统(63)

第二节 机炉汽水系统的联系(70)

复习思考题(83)

第四章 汽轮机设备的用电(84)

第一节 厂用电系统(84)

第二节 汽轮机设备的用电(94)

复习思考题(97)

第二篇 专业知识

第五章 汽轮机检修常用材料和备品(98)

第一节 汽轮机主要部件及材料	(98)
第二节 主要钢材的焊接	(110)
第三节 密封材料	(120)
第四节 润滑油脂	(124)
第五节 轴承	(127)
复习思考题	(132)
第六章 检修的起重工作	(133)
第一节 力的基本概念	(133)
第二节 起重方法	(142)
第三节 常用起重工具的使用和检验	(154)
复习思考题	(170)
第七章 汽轮机及其辅助设备的结构	(171)
第一节 汽轮机本体的结构特点	(171)
第二节 调节系统的结构	(190)
第三节 高压给水泵的结构	(210)
第四节 其它辅助设备的结构	(219)
复习思考题	(246)
第八章 汽轮机运行	(248)
第一节 汽轮机的起动	(248)
第二节 汽轮机的停用	(253)
第三节 汽轮机运行中各部件的工作特点	(255)
复习思考题	(262)

第三篇 检修技术

第九章 汽轮机主要静止部件的检修	(263)
第一节 汽缸的检修	(263)
第二节 隔板的检修	(293)
第三节 轴承的检修	(304)
第四节 密封瓦的检修	(327)

复习思考题	(334)
第十章 汽轮机转子的检修	(336)
第一节 叶轮的拆装	(336)
第二节 叶轮的检修	(350)
第三节 大轴的检查 and 直轴	(356)
第四节 转子的断裂	(379)
复习思考题	(384)
第十一章 叶片	(386)
第一节 叶片振动频率的测定	(386)
第二节 叶片损坏原因及防止措施	(404)
第三节 叶片的更换	(411)
复习思考题	(487)
第十二章 调节系统的试验与调整	(439)
第一节 调节系统的静态试验与调整	(439)
第二节 调节系统的动态特性试验	(458)
复习思考题	(466)
第十三章 汽轮机找中心	(467)
第一节 找中心的目的和方法	(467)
第二节 水平、扬度及轴封凹窝中心的测量	(471)
第三节 转子按联轴器找中心	(479)
第四节 隔板及轴封套按转子找中心	(491)
第五节 三支点的两转子找中心	(496)
复习思考题	(501)
第十四章 汽轮发电机组的振动与找平衡	(503)
第一节 振动的测量与振动标准	(503)
第二节 常见的机组振动原因及消除对策	(506)
第三节 刚性转子的低速动平衡	(513)
第四节 转子的高速动平衡	(543)
复习思考题	(565)

第十五章 辅助设备的检修	(566)
第一节 水泵的检修质量要求与试验	(566)
第二节 管道计算基本知识及管道阀门的检修要求	(582)
第三节 凝汽器及回热设备的检修	(598)
复习思考题	(603)
第十六章 汽轮机设备的检修管理	(604)
第一节 汽轮机设备的检修管理	(604)
第二节 特殊项目的技术措施	(611)
第三节 检修的施工组织措施	(614)
第四节 停机前的安全措施	(616)
复习思考题	(618)
附录 常用法定计量单位	(619)

第一篇 基础知识

第一章 火力发电厂热力循环及其经济性

在现代火力发电厂中，将燃料的化学能转变为热能，并进一步转化为机械功，这一过程是在复杂的热力循环中完成的。根据热力学第二定律，理想热机的最高效率是卡诺循环的热效率，但由于实际存在的各种困难，卡诺循环在工程上是难以实现的。目前凝汽式电厂热效率只有35~45%左右，而同温限内卡诺循环的热效率却可高达55~64%。这说明，进一步提高电厂的热经济性还有一定的潜力。因此，深入研究改进汽轮机设备的热力循环，对提高电厂的热经济有着重要的意义。

在确定热力循环和选择热力参数时，不仅需要考虑循环的热经济性，同时还应对组成循环各设备的工作安全可靠性和设备投资和运行维护费用等方面问题，进行综合技术经济比较，从而得出比较科学、合理的结论。

现代火力发电厂的热力循环是在简单基本循环的基础上，加上给水回热、对外供热、中间再热等设备组成的。

图1-1表示N125-135/550/550型汽轮机的原则性热力系统。该机组为125MW超高压中间再热汽轮发电机组，双缸双排汽凝汽式，配用400t/h(吨/时)超高压煤粉锅炉。压力为13.5MPa(135at)、温度为550°C的新蒸汽从过热器2出来后被送入汽轮机4的高压缸做功，其2.6MPa(26at)、331°C

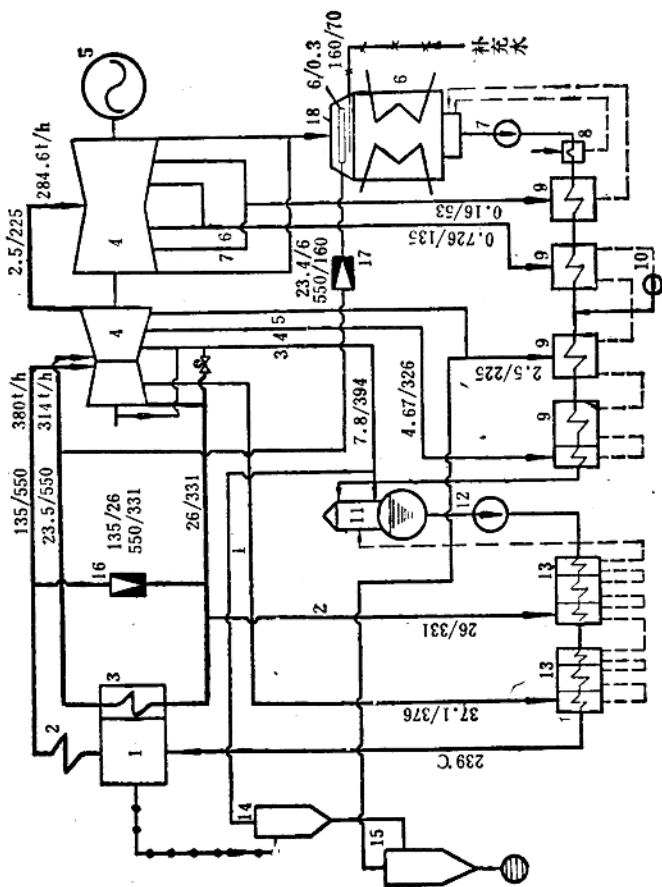


图 1-1 N125-135/550/550型汽轮机原则性热力系统

1—锅炉；2—过热器；3—再热器；4—汽轮机；5—发电机；6—凝结水泵；7—凝结水泵；8—轴封加热器；9—低压加热器；10—疏水器；11—压力除氧器；12—给水泵；13—高压加热器；14—I级非排污扩容器；15—II级非排污扩容器；16—I级旁路减温减压器；17—II级旁路减温减压器；18—III级旁路减温减压器

的排汽送回到锅炉再热器3再次加热到 550°C (称中间再热),然后送往汽轮机中压及低压缸做功,乏汽排入凝汽器被冷却水凝结。主凝结水经凝结水泵升压后,流经轴封加热器及四台低压加热器进入除氧器,经过除氧和升温的水由给水泵12进一步升压后经两台高压加热器加热到 239°C (称给水回热),最后给永送回锅炉。在此循环中汽轮机的回热抽汽共七段。两台125MW机组每小时消耗标准煤约 80t/h (吨/时),如果用10台25MW中参数非再热机组发出同样功率的电量,则需耗标准煤约 125t/h (吨/时),比两台125MW机组多耗煤约50%。由此可见,大型超高参数中间再热机组的热经济性是比较高的。

第一节 火力发电厂的基本热力循环 ——朗肯循环

一、朗肯循环的组成

发电厂的基本热力循环由四个主要设备组成,即蒸汽锅炉、汽轮机、凝汽器和给水泵。工质在热力设备中连续进行吸热、膨胀、放热和压缩四个过程,使热能不断地转变为机械能。这就是火力发电厂广泛采用的基本循环,叫做朗肯循环,如图1-2所示。构成朗肯循环的热力设备,其作用分别是:

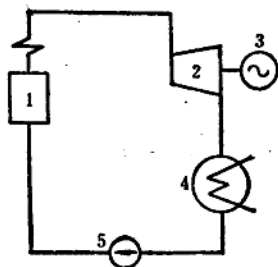


图 1-2 纯凝汽式发电厂最简单的热力系统图

1—锅炉; 2—汽轮机; 3—发电机; 4—凝汽器; 5—水泵

(1) 锅炉(包括省煤器、炉膛水冷壁和过热器) 锅炉的作用是将给水定压加

热，产生过热蒸汽，通过管道把过热蒸汽送入汽轮机。

(2) 汽轮机 蒸汽进入汽轮机中绝热膨胀做功，将热能转变为机械能。

(3) 凝汽器 做完功的乏汽排入凝汽器，用冷却水加以冷却，使乏汽在定压下凝结成饱和水（凝结水）。

(4) 给水泵 凝结水在给水泵中进行绝热压缩，升高压力后送回锅炉。经给水泵升压后的凝结水称为给水。

二、朗肯循环的 $p-v$ 图和 $T-s$ 图

图1-3和图1-4分别表示朗肯循环的 $p-v$ 图和 $T-s$ 图。由图看出：

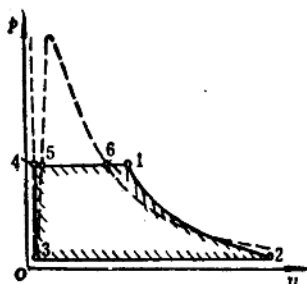


图 1-3 朗肯循环的 $p-v$ 图

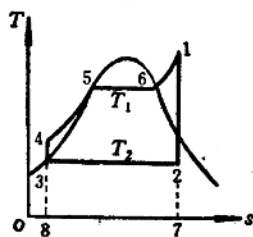


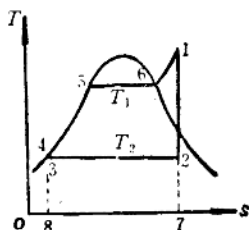
图 1-4 朗肯循环的 $T-s$ 图

4-1线——表示水在锅炉中的定压加热过程。其中，4-5表明把水定压加热到饱和水；5-6表示把饱和水定压加热成饱和蒸汽（汽化）；6-1则表示饱和蒸汽定压加热成过热蒸汽（过热）。

1-2线——表示过热蒸汽在汽轮机中的绝热膨胀过程。

2-3线——表示排汽在凝汽器中的定压放热凝结过程。

3-4线——表示水在给水泵内的绝热压缩过程。由于水的压缩性很小，在 $p-v$ 图上3-4线又可看作是定容线；而在 $T-s$ 图中，因温度升高很小，3和4两点可以认为重合在一起，所以朗肯循环的 $T-s$ 图可简化成图1-5的形式。



三、朗肯循环的热效率

朗肯循环热效率 $\eta_{\text{朗}}$ 的计算式

如下：

$$\eta_{\text{朗}} = \frac{W}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} \quad (1-1)$$

图 1-5 朗肯循环的简化图

式中 W ——1kg工质在循环中获得的有用功，kJ/kg(千焦/公斤)；

q_1 ——1kg蒸汽在锅炉中定压下吸收的热量，kJ/kg；

q_2 ——1kg排汽在凝汽器中定压下放出的热量，kJ/kg。

1kg蒸汽在锅炉中定压下吸收的热量为：

$$q_1 = i_1 - i_{\text{给}} \approx i_1 - i'_2 \quad \text{kJ/kg} \quad (1-2)$$

式中 i_1 ——过热器出口蒸汽的焓，kJ/kg；

$i_{\text{给}}$ ——锅炉给水的焓，kJ/kg；

i'_2 ——凝结水的焓，kJ/kg。

因为水在给水泵中被绝热压缩时，其温度的变化不大，所以 $i_{\text{给}}$ 可以近似地认为等于凝结水焓 i'_2 。

1kg排汽在凝汽器中定压下放出的热量为：

$$q_2 = i_2 - i'_2 \quad \text{kJ/kg} \quad (1-3)$$

式中 i_2 ——汽轮机出口排汽的焓，kJ/kg。

在循环中，获得的有用功为：

$$W = q_1 - q_2 = (i_1 - i'_2) - (i_2 - i'_2) = i_1 - i_2 \quad (1-4)$$

所以
$$\eta_m = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i'_2} \quad (1-5)$$

在计算朗肯循环的热效率时， i_1 和 i_2 由给定的蒸汽初参数 p_1 、 t_1 和排汽压力 p_2 确定，均可在*i-s*图上查得， i'_2 可通过查表取得。

在朗肯循环*T-s*图中，面积4-5-6-1-7-8-4的大小表示1kg蒸汽在锅炉中吸收的热量 q_1 ；面积3-2-7-8-3的大小表示循环中被凝汽器冷却水带走的热量 q_2 ；面积1-2-3-4-5-6-1的大小表示循环中有用功 $(q_1 - q_2)$ 的大小。在*p-v*图中，面积3-4-5-6-1-2-3的大小也表示循环中有用功的大小。

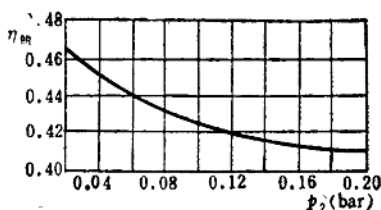
所以，朗肯循环的热效率也可参照*T-s*图由下式表示：

$$\eta_m = \frac{\text{面积}1-2-3-4-5-6-1}{\text{面积}4-5-6-1-7-8-4}$$

应当指出，在热效率的计算中忽略了给水泵的压缩功，这在工程上是允许的，但在高温高压情况下则不能忽略水被压缩所消耗的功。

从公式(1-5)可见，朗肯循环热效率取决于蒸汽初焓 i_1 、终焓 i_2 以及凝结水的焓 i'_2 。进入汽轮机内蒸汽的初焓 i_1 决定于蒸汽压力 p_1 和温度 t_1 ；蒸汽终焓 i_2 及凝结水的焓 i'_2 都决定于蒸汽在汽轮机内膨胀以后的压力 p_2 。所以朗肯循环的热效率同初参数 p_1 、 t_1 及终参数 p_2 有密切的关系。

当提高初参数 p_1 、 t_1 时，蒸汽焓 i_1 值也提高，从而使循环热效率 η_m 提高；汽轮机排汽压力 p_2 降低时（即真空高），排汽焓 i_2 也降低，式(1-5)中的分子 $(i_1 - i_2)$ 加大，所以循环热效率 η_m 就可提高。图1-6是朗肯循环热效率同排汽压力的关系曲线。



(1bar = 0.1MPa)

图 1-6 朗肯循环热效率同排汽压力的关系曲线

提高蒸汽初参数后,循环经济性相应提高,但也带来了一些问题。蒸汽压力愈高,则汽轮机、锅炉以及所有的蒸汽管道和阀门的制造安装费用也就愈高。蒸汽温度提高时,对金属方面的要求也将提高,因为这时就要求金属必须在高温下能保持较强的抗蠕变和抗氧化能力,并能维持一定的强度,为此不得不采用优质合金钢;当汽温提高到570℃以上时,就需要采用价格昂贵的奥氏体不锈钢。

至于排汽压力 p_2 的降低,也是有限度的。因为过低的排汽压力会使汽轮机的排汽比容大大增加,从而导致汽轮机低压叶片尺寸过大。此外,为达到很低的排汽压力势必增加冷却水量,这样就使厂用耗电量相应增加。

目前,国内外200MW以上机组,蒸汽压力一般采用16~17MPa (160~170at,属于亚临界压力)及24~25MPa(240~250at,属于超临界压力)的两档范围;而蒸汽温度则稳定在535~566℃的范围内,而且趋向于采取低值。表1-1列出了国产机组的蒸汽初参数。

表 1-1

国产机组蒸汽初参数

	低参数	中参数	高 参 数	超高参数	亚临界参数
进汽初压 p_1 MPa (at)	1.3(13)	3.5(35)	9.0 (90)	13.5(135)	16.5 (165)
进汽初温 t_1 (℃)	340	435	535	550, 535	550, 535
发电机功率 P (MW)	1.5~3	6~25	50~100	125, 200	200, 300, 600

四、朗肯循环的汽耗率、热耗率、煤耗率

除循环热效率外，汽耗率、热耗率、煤耗率也是衡量循环经济性的一些主要指标。

1. 汽耗率

产生 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 的功 (即 1 度电) 所消耗的蒸汽量 (kg) 叫做汽耗率。用符号 d 表示，其计算式为：

$$d = \frac{D}{N} \quad \text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h}) [\text{公斤}/(\text{千瓦}\cdot\text{小时})] \quad (1-6)$$

式中 D ——汽轮机每小时消耗的蒸汽量， kg/h (公斤/小时)；

N ——汽轮机 D 公斤蒸汽产生的电功率， kW (千瓦)，

对于朗肯循环：

$$N = \frac{D(q_1 - q_2)}{3600} = \frac{DW}{3600} = \frac{D(i_1 - i_2)}{3600}$$

所以
$$d_m = \frac{D}{N} = \frac{3600}{q_1 - q_2} = \frac{3600}{W} = \frac{3600}{i_1 - i_2} \quad (1-7)$$

2. 热耗率

产生 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ (即 1 度电) 的功所消耗的热量叫做热耗率，以 q 表示。因为产生 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 的电功要用 d 公斤蒸汽，

而每一公斤蒸汽在锅炉中吸收的热量为 $(i_1 - i'_2) \text{ kJ}$ (千焦), 所以, 对于朗肯循环:

$$q_{\text{m}} = d_{\text{m}}(i_1 - i'_2) = \frac{3600}{i_1 - i'_2} (i_1 - i'_2) = \frac{3600}{\eta_{\text{m}}} \text{ kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h}) [\text{千焦}/(\text{千瓦} \cdot \text{小时})] \quad (1-8)$$

3. 煤耗率

产生 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 电功所需之标准煤量叫做煤耗率, 用符号 b 表示。如计及锅炉与管道效率, 对于朗肯循环则:

$$b_{\text{m}} = \frac{q_{\text{m}}}{Q_D^y \eta_{\text{p}} \eta_{\text{g}}} = \frac{q_{\text{m}}}{29300 \eta_{\text{p}} \eta_{\text{g}}} \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h}) [\text{公斤}/(\text{千瓦} \cdot \text{小时})] \quad (1-9)$$

式中 Q_D^y ——标准煤的发热量, 其值为 29300 kJ/kg ;

η_{p} ——锅炉效率;

η_{g} ——管道效率。

第二节 再 热 循 环

一、再热循环的意义和应用

如前所述, 提高循环热效率的途径之一是提高朗肯循环中蒸汽的初压力。可是, 这样做的同时也出现了一个对汽轮机工作不利的现象, 即蒸汽在汽轮机内膨胀终了时的湿度将大为增加。例如新汽温度保持 550°C , 而把压力从 9 MPa (90 at) 提高到 25 MPa (250 at), 则绝热膨胀到排汽压力为 0.0039 MPa (0.04 at) 时, 蒸汽的干度将由 0.794 降低到 0.718 , 这样汽轮机最后几级叶片就会受到夹杂着大量细微水滴的蒸汽冲蚀而很快损坏。

为了使排汽的干度不致过低 (一般应不低于 0.88 左右),