

# 大亚湾核电站 运行教程

下

濮继龙 主编

原子能出版社

# 大亚湾核电站运行教程

下 册

濮继龙 主编

原子能出版社

# 大亚湾核电站运行教程

## 编辑委员会

主 编

濮继龙

副主编

陆玮      唐炳生

编 者 (按章节次序排列)

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 唐炳生 | 万安泰 | 高云鹏 | 王钧益 | 于 侃 | 程树军 |
| 杨辉玉 | 和卫东 | 陈观福 | 刘 力 | 黄维哲 | 石小毛 |
| 曹春江 | 卢文耀 | 苏林森 | 方 军 | 吴祥中 | 潘 央 |
| 濮 阳 | 孙 毅 | 王清泉 | 李琳教 | 卢长申 | 邹勇平 |
|     | 刘 敏 | 徐秀芳 | 张睿琼 |     |     |

# 目 录

## 上 册

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| <b>第一章 堆芯物理</b> .....        | ( 1 ) |
| 1.1 基本物理概念 .....             | ( 1 ) |
| 1.1.1 从核能到热能的转变 .....        | ( 1 ) |
| 1.1.2 反应性 .....              | ( 4 ) |
| 1.1.3 中子随时间变化特性 .....        | ( 8 ) |
| 1.1.4 次临界增殖 .....            | (10)  |
| 1.2 反应性控制 .....              | (11)  |
| 1.2.1 棒束控制组件 .....           | (12)  |
| 1.2.2 可燃毒物控制 .....           | (14)  |
| 1.2.3 化学补偿控制 .....           | (16)  |
| 1.3 温度效应 .....               | (17)  |
| 1.3.1 燃料的温度效应 .....          | (17)  |
| 1.3.2 慢化剂的温度效应 .....         | (18)  |
| 1.3.3 空泡系数 .....             | (19)  |
| 1.3.4 功率系数和功率亏损 .....        | (20)  |
| 1.4 氙和钐效应 .....              | (21)  |
| 1.4.1 氙效应 .....              | (21)  |
| 1.4.2 钐效应 .....              | (24)  |
| 1.4.3 氙振荡 .....              | (26)  |
| 1.5 燃耗 .....                 | (27)  |
| 1.6 反应性平衡 .....              | (29)  |
| <b>第二章 反应堆热工</b> .....       | (43)  |
| 2.1 压水堆堆芯设计及传热特点 .....       | (43)  |
| 2.2 燃料棒的传热与冷却 .....          | (44)  |
| 2.3 堆芯功率分布及其影响因素 .....       | (47)  |
| 2.4 热工设计准则 .....             | (50)  |
| 2.5 热通道因子和热点因子 .....         | (52)  |
| 2.6 泡核沸腾、偏离泡核沸腾及烧毁比 .....    | (53)  |
| <b>第三章 反应堆冷却剂系统的运行</b> ..... | (54)  |
| 3.1 反应堆压力容器 .....            | (54)  |
| 3.1.1 脆性转变温度和温差应力 .....      | (54)  |
| 3.1.2 反应堆压力容器的运行限制 .....     | (58)  |

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| 3.2 核燃料的运行 .....                 | (61)  |
| 3.2.1 燃料棒的完整性 .....              | (61)  |
| 3.2.2 运行限制 .....                 | (64)  |
| 3.2.3 高性能燃料 .....                | (69)  |
| 3.3 调节原理 .....                   | (71)  |
| 3.3.1 自动调节的作用 .....              | (71)  |
| 3.3.2 有关自动调节的术语 .....            | (71)  |
| 3.3.3 调节系统组成 .....               | (71)  |
| 3.3.4 自动调节系统的分类 .....            | (72)  |
| 3.3.5 调节器 .....                  | (74)  |
| 3.3.6 调节环节与滤波器的转移函数和动态响应 .....   | (75)  |
| 3.3.7 调节系统品质指标 .....             | (77)  |
| 3.4 蒸汽发生器 .....                  | (79)  |
| 3.4.1 蒸汽发生器稳态运行时热工流体力学 .....     | (79)  |
| 3.4.1.1 两相流的流动型式和沸腾型式 .....      | (79)  |
| 3.4.1.2 空泡份额、含汽量及它们之间的关系 .....   | (80)  |
| 3.4.1.3 蒸汽发生器二次侧水自然循环的机理 .....   | (82)  |
| 3.4.1.4 循环倍率和再循环流量率 .....        | (84)  |
| 3.4.2 蒸汽发生器水位测量 .....            | (87)  |
| 3.4.3 在过渡过程中影响蒸汽发生器水位的因素 .....   | (89)  |
| 3.4.4 蒸汽发生器水位的控制 .....           | (91)  |
| 3.4.4.1 给水泵转速调节系统 .....          | (91)  |
| 3.4.4.2 水位调节原理 .....             | (92)  |
| 3.4.4.3 主给水阀和旁路给水阀的切换 .....      | (100) |
| 3.4.4.4 给水流量调节阀手动转自动的无扰动切换 ..... | (100) |
| 3.4.4.5 与蒸汽发生器水位有关的信号及动作 .....   | (101) |
| 3.4.5 反应堆冷却剂泵 .....              | (103) |
| 3.5.1 轴封注入水流程和主泵支持系统 .....       | (104) |
| 3.5.2 主泵监测和保护仪表 .....            | (107) |
| 3.5.3 主泵的运行 .....                | (111) |
| 3.5.3.1 主泵使用的技术限值 and 规定 .....   | (111) |
| 3.5.3.2 主泵的启动和停运 .....           | (112) |
| 3.6 稳压器 .....                    | (115) |
| 3.6.1 稳压器压力控制系统 .....            | (115) |
| 3.6.2 稳压器水位控制系统 .....            | (122) |
| 3.6.3 稳压器的瞬态过程 .....             | (129) |

## 第四章 一回路辅助系统的运行 .....

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| 4.1 化学容积控制系统 (RCV) .....   | (133) |
| 4.1.1 RCV 系统的功能 .....      | (133) |
| 4.1.2 RCV 系统结构及流程简述 .....  | (133) |
| 4.1.3 RCV 系统的运行与控制 .....   | (134) |
| 4.2 反应堆硼和水补给系统 (REA) ..... | (141) |

|                        |                              |              |
|------------------------|------------------------------|--------------|
| 4.2.1                  | REA 系统的功能 .....              | (141)        |
| 4.2.2                  | REA 系统结构及流程简述 .....          | (142)        |
| 4.2.3                  | REA 系统的运行与控制 .....           | (142)        |
| 4.3                    | 余热排出系统 (RRA) .....           | (152)        |
| 4.3.1                  | RRA 系统的功能 .....              | (152)        |
| 4.3.2                  | RRA 系统的结构及流程简述 .....         | (153)        |
| 4.3.3                  | RRA 系统的运行与控制 .....           | (153)        |
| 4.4                    | 反应堆和乏燃料水池冷却和处理系统 (PTR) ..... | (158)        |
| 4.4.1                  | PTR 系统的功能 .....              | (158)        |
| 4.4.2                  | PTR 系统的结构及流程简述 .....         | (158)        |
| 4.4.3                  | 系统的运行与控制 .....               | (161)        |
| <b>第五章 堆内外测量 .....</b> |                              | <b>(166)</b> |
| 5.1                    | 堆芯温度测量 .....                 | (166)        |
| 5.1.1                  | 堆芯温度测量系统的功用 .....            | (166)        |
| 5.1.2                  | 堆芯温度测量系统的组成 .....            | (166)        |
| 5.1.3                  | 堆芯温度测量系统的原理 .....            | (166)        |
| 5.2                    | 堆芯水位 (压力容器水位) 测量 .....       | (172)        |
| 5.2.1                  | 堆芯水位测量系统的功用 .....            | (172)        |
| 5.2.2                  | 堆芯水位测量系统的组成 .....            | (172)        |
| 5.2.3                  | 堆芯水位测量原理和模拟电路原理 .....        | (172)        |
| 5.3                    | 堆内中子通量测量 .....               | (175)        |
| 5.3.1                  | 堆内中子通量测量系统的功用 .....          | (175)        |
| 5.3.2                  | 堆内中子通量测量系统的组成 .....          | (176)        |
| 5.3.3                  | 堆内中子通量测量系统的原理 .....          | (179)        |
| 5.3.4                  | 堆内中子通量测量系统的运行 .....          | (180)        |
| 5.4                    | 堆外中子通量测量 .....               | (181)        |
| 5.4.1                  | 堆外中子通量测量系统的功用 .....          | (181)        |
| 5.4.2                  | 堆外中子通量测量系统的组成 .....          | (181)        |
| 5.4.3                  | 堆外中子通量测量系统的原理 .....          | (183)        |
| <b>第六章 反应堆控制 .....</b> |                              | <b>(194)</b> |
| 6.1                    | 反应堆控制的目的 .....               | (194)        |
| 6.2                    | 控制方案的选择 .....                | (194)        |
| 6.3                    | 反应性的控制作用 .....               | (196)        |
| 6.4                    | 模式 G .....                   | (196)        |
| 6.5                    | 平均温度控制 .....                 | (198)        |
| 6.5.1                  | 平均温度控制系统的工作原理 .....          | (198)        |
| 6.5.2                  | 最终功率整定值 .....                | (200)        |
| 6.5.3                  | 反应堆过冷闭锁信号 C22 的生成 .....      | (202)        |
| 6.5.4                  | 平均温度控制系统原理框图其它说明 .....       | (202)        |
| 6.6                    | 反应堆功率控制 .....                | (202)        |

|                     |       |
|---------------------|-------|
| 6.6.1 输入信号          | (202) |
| 6.6.2 反应堆功率控制系统工作原理 | (204) |
| 6.7 功率分布与梯形图        | (206) |
| 6.7.1 功率分布与热点因子     | (206) |
| 6.7.2 轴向功率偏移与轴向功率偏差 | (207) |
| 6.7.3 梯形图由来与使用      | (207) |

## 第七章 反应堆保护 (214)

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| 7.1 概述                     | (214) |
| 7.1.1 反应堆保护系统的功用           | (214) |
| 7.1.2 反应堆保护系统的组成           | (214) |
| 7.1.3 保护系统的设计准则            | (214) |
| 7.1.4 KRG, RPN 系统工作原理      | (215) |
| 7.1.5 RPR 系统的工作原理          | (216) |
| 7.1.5.1 系统组成               | (216) |
| 7.1.5.2 对保护系统可靠性的几点分析      | (219) |
| 7.1.6 执行机构                 | (221) |
| 7.1.7 停堆通道的响应时间            | (221) |
| 7.2 包壳保护                   | (221) |
| 7.2.1 包壳损坏的原因              | (221) |
| 7.2.2 参与包壳保护的参数            | (221) |
| 7.2.3 包壳保护的图形表示法           | (222) |
| 7.2.4 $\Delta T$ 保护图       | (224) |
| 7.2.5 $\Delta T$ 保护整定值及逻辑图 | (226) |
| 7.3 其它保护                   | (228) |
| 7.3.1 核仪表系统提供的保护           | (228) |
| 7.3.2 反应堆主回路流量偏低和压力偏低保护    | (229) |
| 7.3.3 防止主回路温度迅速上升的保护       | (230) |
| 7.3.4 反应堆主回路保护             | (232) |
| 7.3.5 蒸汽发生器水位高高保护          | (232) |
| 7.3.6 ATWT 保护              | (232) |
| 7.3.7 紧急停堆综合逻辑图            | (235) |
| 7.4 允许信号                   | (236) |
| 7.5 保护系统运行                 | (239) |
| 7.6 保护系统的周期试验              | (240) |

## 下 册

## 第八章 汽轮发电机组热力回路的运行 (243)

|              |       |
|--------------|-------|
| 8.1 发电厂热效率分析 | (243) |
|--------------|-------|

|                               |       |
|-------------------------------|-------|
| 8.2 汽水回路运行 .....              | (245) |
| 8.2.1 汽回路运行.....              | (245) |
| 8.2.2 水回路运行.....              | (247) |
| 8.2.3 其它.....                 | (248) |
| 8.3 汽机调节 .....                | (248) |
| 8.3.1 汽机调节系统的功能.....          | (248) |
| 8.3.2 汽机调节系统的组成.....          | (248) |
| 8.3.3 微机调节器功能.....            | (254) |
| 8.3.3.1 微机调节器分级 .....         | (254) |
| 8.3.3.2 下位机功能 .....           | (254) |
| 8.3.3.3 上位机功能 .....           | (259) |
| 8.3.4 主要控制原理.....             | (266) |
| 8.3.4.1 功率(负荷)控制原理 .....      | (266) |
| 8.3.4.2 频率控制原理 .....          | (266) |
| 8.3.4.3 应力控制原理 .....          | (266) |
| 8.3.4.4 压力控制原理 .....          | (269) |
| 8.3.5 汽机调节系统运行.....           | (271) |
| 8.3.5.1 启动运行(由停机到带最小负荷) ..... | (271) |
| 8.3.5.2 控荷运行 .....            | (272) |
| 8.3.5.3 停机运行 .....            | (272) |
| 8.3.5.4 瞬态运行 .....            | (273) |
| 8.3.5.5 特殊运行 .....            | (273) |
| 8.3.5.6 故障运行 .....            | (274) |
| 8.4 汽机保护和脱扣系统 .....           | (275) |
| 8.4.1 汽机保护和脱扣系统的功能.....       | (275) |
| 8.4.2 汽机保护和脱扣系统的组成和原理.....    | (276) |
| 8.4.3 汽机保护系统脱扣分级.....         | (277) |
| 8.4.4 汽机脱扣信号分析.....           | (277) |
| 8.4.4.1 机械/液压直接作用引发的脱扣 .....  | (277) |
| 8.4.4.2 电气引发的脱扣 .....         | (278) |
| 8.4.5 汽机保护脱扣信号综述.....         | (288) |
| 8.5 二回路其他控制系统 .....           | (291) |
| 8.5.1 冷凝器水位控制.....            | (291) |
| 8.5.2 凝结水再循环流量控制.....         | (292) |
| 8.5.3 除氧器水位控制.....            | (293) |
| 8.5.4 除氧器压力控制.....            | (293) |
| 8.5.5 加热器的水位和压力控制.....        | (296) |
| 8.5.6 主给水泵转速控制.....           | (298) |
| 8.5.7 汽水分离再热器的控制.....         | (302) |
| 8.5.8 汽动泵疏水系统的水位控制.....       | (307) |
| 8.5.9 油压的控制.....              | (308) |
| 8.6 汽机旁路排放系统(GCT)的运行 .....    | (308) |
| 8.6.1 GCT逻辑信号及控制模式.....       | (309) |



|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| 8.6.2 GCT1, 2, 3, 4 组阀门的开启整定值 ..... | (316) |
| 8.6.3 运行及调节 .....                   | (321) |
| 8.6.3.1 正常运行 .....                  | (321) |
| 8.6.3.2 特殊的稳态运行 .....               | (321) |
| 8.6.3.3 特殊的瞬态运行 .....               | (321) |
| 8.6.3.4 启动和正常停堆 .....               | (325) |
| 8.6.3.5 GCT 运行有关的限制条件 .....         | (325) |
| 8.7 二回路的准备和启动 .....                 | (325) |
| 8.8 保养 .....                        | (328) |

## 第九章 水化学及水质控制 .....

|                                            |       |
|--------------------------------------------|-------|
| 9.1 电厂水化学的基础知识 .....                       | (330) |
| 9.1.1 腐蚀的危害 .....                          | (330) |
| 9.1.2 铁的腐蚀机理 .....                         | (330) |
| 9.1.3 腐蚀的其它表现形式 .....                      | (332) |
| 9.1.4 合金钢腐蚀的特殊形式 .....                     | (332) |
| 9.1.5 腐蚀的防止 .....                          | (333) |
| 9.2 一回路水化学 .....                           | (334) |
| 9.2.1 硼酸 ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) ..... | (334) |
| 9.2.2 氢氧化锂 ( $\text{LiOH}$ ) .....         | (334) |
| 9.2.3 水的辐照分解 .....                         | (336) |
| 9.2.4 其它有害杂质 .....                         | (337) |
| 9.2.5 一回路水的化学监测 .....                      | (337) |
| 9.3 二回路水化学 .....                           | (338) |
| 9.3.1 二回路的水质处理 .....                       | (339) |
| 9.3.2 二回路的化学监测 .....                       | (340) |
| 9.3.3 主要化学规范 .....                         | (342) |
| 9.3.4 海水泄漏进入凝汽器的故障 .....                   | (343) |

## 第十章 发电机及电气系统的运行 .....

|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| 10.1 发电机励磁和电压调节 .....           | (347) |
| 10.1.1 发电机励磁和电压调节系统的功用 .....    | (347) |
| 10.1.2 有关励磁调节的基本知识 .....        | (347) |
| 10.1.2.1 同步发电机工作原理 .....        | (347) |
| 10.1.2.2 发电机的接线 .....           | (349) |
| 10.1.2.3 发电机的功率 .....           | (349) |
| 10.1.2.4 发电机的调节 .....           | (351) |
| 10.1.2.5 $P - Q$ 图 .....        | (354) |
| 10.1.3 励磁机单元的构成 .....           | (356) |
| 10.1.4 励磁系统工作原理 .....           | (359) |
| 10.1.5 自动励磁调节器 (AER) 工作原理 ..... | (359) |
| 10.1.6 励磁与电压调节系统的运行 .....       | (363) |

|          |                        |       |
|----------|------------------------|-------|
| 10.1.6.1 | 正常运行                   | (363) |
| 10.1.6.2 | 特殊稳态运行                 | (363) |
| 10.1.6.3 | 特殊瞬态运行                 | (363) |
| 10.1.6.4 | 启动与正常停运                | (364) |
| 10.1.6.5 | 其它运行                   | (364) |
| 10.2     | 电气系统的运行                | (365) |
| 10.2.1   | 概述                     | (365) |
| 10.2.1.1 | 电气主结线                  | (365) |
| 10.2.1.2 | 电气设备的布置                | (365) |
| 10.2.2   | 发电机回路                  | (368) |
| 10.2.2.1 | 主回路接线方式                | (368) |
| 10.2.2.2 | 主发电机及并网系统 (GSY)        | (368) |
| 10.2.2.3 | 主变压器及厂用变压器             | (373) |
| 10.2.3   | 厂用电系统                  | (374) |
| 10.2.3.1 | 厂用电系统功能                | (374) |
| 10.2.3.2 | 电厂的附属设备分类              | (374) |
| 10.2.3.3 | 厂用电电源                  | (376) |
| 10.2.3.4 | 电厂用的电压等级和标识            | (376) |
| 10.2.3.5 | 厂用电系统的控制               | (379) |
| 10.2.4   | 电力输送系统                 | (379) |
| 10.2.4.1 | 400 kV 开关站电气主接线        | (379) |
| 10.2.4.2 | 500 kV 开关站电气主接线        | (381) |
| 10.2.4.3 | 400/500 kV 开关站的控制      | (381) |
| 10.2.4.4 | 母线联络变压器                | (383) |
| 10.2.5   | 220 kV 辅助电源系统 (LGR)    | (384) |
| 10.2.5.1 | 系统功能                   | (384) |
| 10.2.5.2 | 电气主接线及设备布置             | (384) |
| 10.3     | 电气保护                   | (385) |
| 10.3.1   | 发变组保护                  | (385) |
| 10.3.1.1 | 发电机和输电保护系统 (GPA) 的作用   | (385) |
| 10.3.1.2 | 发电机和输电保护系统 (GPA) 的配置   | (386) |
| 10.3.1.3 | 发电机和输电保护装置的分类          | (387) |
| 10.3.1.4 | 发电机和输电保护功能简述           | (388) |
| 10.3.2   | 主开关站—超高压配电装置 (OGEW) 保护 | (392) |
| 10.3.2.1 | 概述                     | (392) |
| 10.3.2.2 | 线路保护                   | (392) |
| 10.3.2.3 | 联络变压器保护                | (397) |
| 10.3.2.4 | 母线保护                   | (398) |
| 10.3.2.5 | 其它保护功能                 | (400) |

## 第十一章 核安全与安全文化 (401)

|      |           |       |
|------|-----------|-------|
| 11.1 | 核安全的定义和目标 | (401) |
| 11.2 | 核安全三要素    | (401) |

|                                     |              |
|-------------------------------------|--------------|
| 11.3 纵深防御 .....                     | (402)        |
| 11.4 风险与运行工况的分类 .....               | (403)        |
| 11.5 安全分析简介 .....                   | (405)        |
| 11.5.1 核电厂安全分析的任务 .....             | (405)        |
| 11.5.2 两种分析方法之间的关系 .....            | (408)        |
| 11.6 人因故障分析 .....                   | (409)        |
| 11.7 电厂可能受到的侵害 .....                | (409)        |
| 11.8 国际核事件分级 .....                  | (411)        |
| 11.9 安全文化 .....                     | (411)        |
| <b>第十二章 技术规范介绍 .....</b>            | <b>(414)</b> |
| 12.1 技术规范的作用 .....                  | (414)        |
| 12.2 技术规范的主要内容 .....                | (414)        |
| 12.3 多个不可用的处理对策 .....               | (417)        |
| 12.4 特许申请 .....                     | (419)        |
| <b>第十三章 F-COR 规程 .....</b>          | <b>(422)</b> |
| 13.1 初始工况和应该遵守的安全准则 .....           | (422)        |
| 13.1.1 初始工况 .....                   | (422)        |
| 13.1.2 必须遵守的准则 .....                | (422)        |
| 13.2 逼近临界的策略 .....                  | (423)        |
| 13.3 反应性平衡计算 .....                  | (424)        |
| 13.3.1 功率和棒位的效应 .....               | (424)        |
| 13.3.2 毒物效应 .....                   | (425)        |
| 13.3.3 硼浓度计算 .....                  | (427)        |
| 13.4 逼近临界的主要操作 .....                | (428)        |
| 13.4.1 不做 I.C.R. 曲线, 提棒达临界 .....    | (429)        |
| 13.4.2 不做 I.C.R. 曲线, 稀释达临界 .....    | (429)        |
| 13.4.3 做 I.C.R. 曲线, 提棒达临界 .....     | (429)        |
| 13.4.4 做 I.C.R. 曲线, 稀释达临界 .....     | (430)        |
| <b>第十四章 机组的正常运行和瞬态工况 .....</b>      | <b>(432)</b> |
| 14.1 反应堆标准运行方式 .....                | (432)        |
| 14.1.1 标准运行方式 .....                 | (432)        |
| 14.1.2 温度、压力限制 .....                | (436)        |
| 14.1.3 反应性控制 .....                  | (438)        |
| 14.2 机组启动和停运过程 .....                | (441)        |
| 14.2.1 概述 .....                     | (441)        |
| 14.2.2 机组启动过程的主要步骤 .....            | (442)        |
| 14.2.3 机组停运过程的主要步骤 .....            | (446)        |
| 14.2.4 附录 .....                     | (448)        |
| 14.3 BOL、100% $P_n$ 紧急停堆的瞬态过程 ..... | (450)        |

|         |                           |       |
|---------|---------------------------|-------|
| 14.3.1  | 控制棒                       | (450) |
| 14.3.2  | 中子通量                      | (450) |
| 14.3.3  | 汽机蒸汽流量和发电机功率              | (450) |
| 14.3.4  | 汽机转速                      | (451) |
| 14.3.5  | GCT 流量                    | (451) |
| 14.3.6  | 一回路平均温度                   | (452) |
| 14.3.7  | 稳压器水位                     | (453) |
| 14.3.8  | 稳压器压力                     | (453) |
| 14.3.9  | 蒸汽发生器压力                   | (453) |
| 14.3.10 | 蒸汽发生器水位                   | (454) |
| 14.3.11 | 紧急停堆需要遵守的安全准则             | (454) |
| 14.4    | 从 100% $P_0$ 甩负荷到厂用电的瞬态过程 | (455) |
| 14.4.1  | 发电机功率                     | (456) |
| 14.4.2  | 汽轮机的蒸汽流量                  | (456) |
| 14.4.3  | 汽机转速                      | (456) |
| 14.4.4  | G 棒组的位置                   | (457) |
| 14.4.5  | R 棒组的位置                   | (457) |
| 14.4.6  | 中子通量                      | (458) |
| 14.4.7  | 一回路平均温度                   | (458) |
| 14.4.8  | GCT 流量                    | (459) |
| 14.4.9  | 稳压器水位                     | (461) |
| 14.4.10 | 稳压器压力                     | (461) |
| 14.4.11 | 蒸汽发生器压力                   | (462) |
| 14.4.12 | 蒸汽发生器水位                   | (463) |

## 第十五章 设计基准事故下的运行与专设安全设施 (466)

|        |                                |       |
|--------|--------------------------------|-------|
| 15.1   | 设计基准事故                         | (466) |
| 15.2   | 专设安全设施的设计和投运                   | (468) |
| 15.2.1 | 概述                             | (468) |
| 15.2.2 | 安注系统 (RIS) 和安全壳第一阶段隔离 (CIA)    | (470) |
| 15.2.3 | 安全壳喷淋系统 (EAS) 与安全壳第二阶段隔离 (CIB) | (477) |
| 15.2.4 | 辅助给水系统 (ASG)                   | (482) |
| 15.2.5 | 主蒸汽系统 (VVP) 隔离                 | (487) |
| 15.2.6 | 安全壳消氢系统 (ETY)                  | (488) |
| 15.3   | 专设安全设施的维护和试验                   | (490) |
| 15.4   | 典型事故分析及其处置对策                   | (491) |
| 15.4.1 | 失水事故 LOCA                      | (491) |
| 15.4.2 | SG 传热管破裂事故 SGTR                | (496) |
| 15.4.3 | 主蒸汽管道破裂事故 MSLB                 | (499) |
| 15.4.4 | 给水管道的破裂事故                      | (502) |
| 15.4.5 | 未能紧急停堆的预期瞬态 (ATWT/ATWS)        | (503) |
| 15.5   | 大亚湾核电站应急事故规程 (EOP) 简介          | (504) |
| 15.6   | 事故工况下的运行                       | (505) |

附录一 模拟图元件标识代码一览表 ..... (509)

附录二 大亚湾核电站基本系统及代号 ..... (511)

## 第八章 汽轮发电机组热力回路的运行

### 8.1 发电厂热效率分析

热力发电厂是利用热能动力装置来生产电能的工厂，它首先将燃料的化学能（或核能）转变为热能并传给工质，工质通过主蒸汽管道把热能输送到汽机中做功，将热能转换为机械能，再经机械转动由发电机将机械能转换为电能。在能量转换过程中，不可避免地存在着一系列的能量损失。怎样减少各种能量损失，提高电厂的热效率是电厂热力循环回路研究的主要课题。下面我们通过分析能量转换过程中能量的利用程度和损失大小来讨论电厂的热效率，找出提高电厂热效率的主要途径。

(1) 设备热效率 ( $\eta_b$ ): 对火电厂就是指电厂锅炉的效率，现代大容量电厂锅炉的效率  $\eta_b$  可达 90% ~ 92%；对压水堆核电厂是指蒸汽发生器及一回路其他设备的散热损失，其热效率为 98% ~ 99%。

(2) 管道散热损失 ( $\eta_p$ ): 管道散热损失愈小表明管道的保温情况愈好。管道的保温效果好坏，习惯上都用所谓管道热效率  $\eta_p$  来表示。如果不考虑工质的泄漏损失， $\eta_p$  可达 98% ~ 99% 左右。必须强调指出，这里的  $\eta_p$  事实上只是一个习惯上沿用已久的因子，严格讲它并不具有“效率”的意义，因为它仅反映了管道散热损失，而未能反映管道的阻力损失，而后者实际上亦将引起工质做功能力的降低。

(3) 汽机中的能量损失：汽机的损失是指其内部能量损失和外部能量损失的总和。内部能量损失是指蒸汽在汽机内做功过程中的各种损失，用汽机的相对内效率  $\eta_{oi}$  予以概括，一般大型机组  $\eta_{oi}$  为 85% ~ 87%。外部能量损失主要由汽机为了克服轴承的机械摩擦以及带动主油泵等部件而必需消耗一定的功率所引起，常用汽机的机械效率  $\eta_m$  来表示， $\eta_m$  一般为 98.5% ~ 99%。汽机能量损失的大小常用汽机的相对有效效率  $\eta_{oe} = \eta_{oi} \cdot \eta_m$  来表示。注意  $\eta_{oi}$  是表征汽机设备自身的参数。在汽机进汽参数保持一定的情况下，某一台具体的凝汽式汽机的  $\eta_{oi}$  值基本确定。

(4) 热阱损失：此项能量损失是由于乏汽在冷凝器中向冷却水放热而引起的，它由热力学第二定律所决定，是不可避免的一项能量损失。热阱损失的相对量取决于汽机的绝对内效率。汽机的绝对内效率  $\eta_i$  是指理论循环热效率  $\eta_t$  与汽机的相对内效率  $\eta_{oi}$  之乘积，其中理论循环热效率一般都比较低，即使是采用高参数进汽和高真空排汽的凝汽式机组也只能到达 40% ~ 45%，它对热阱损失起决定性的影响。

(5) 发电机中的能量损失：发电机中的能量损失包括两个方面，一是机械方面的轴承摩擦损失、转子鼓风损失，二是电气方面的励磁损失。反映此项能量损失的效率称为发电

机效率  $\eta_g$ ，现代大型交流发电机的效率可达 98% ~ 99%。

就整个发电厂的生产过程而言，如果将上述各种能量损失逐项加以考虑，那么凝汽式发电厂的总效率便可近似地表示为：

$$\eta_{pl} = \eta_b \cdot \eta_p \cdot \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_m \cdot \eta_g \quad (8.1)$$

其中： $\eta_{pl}$ ：发电厂总热效率；

$\eta_b$ ：设备热效率，压水堆核电厂一般为 0.98 ~ 0.99；

$\eta_p$ ：管道热效率，一般为 0.98 ~ 0.99；

$\eta_t$ ：理论热力循环效率，一般为 0.4 ~ 0.45；

$\eta_{oi}$ ：汽机相对内效率，一般为 0.85 ~ 0.87；

$\eta_m$ ：汽机组机械效率，一般为 0.95 ~ 0.99；

$\eta_g$ ：发电机效率，一般为 0.98 ~ 0.99。

目前中、大型凝汽式发电厂的总热效率  $\eta_{pl}$  多半在 0.25 ~ 0.37 范围内，有少数现代化大型凝汽式发电厂的总热效率可接近 40%，可见对大多数凝汽式发电厂来说，其总热效率还是相当低的。

从公式 (8.1) 中可见，汽机、发电机等设备的效率较高，这说明在当代的加工工艺水平上，汽机、发电机设备的制造工艺已经较完善，靠改进设备工艺完善程度来提高效率越来越困难。 $\eta_{pl}$  低的主要原因是理论热力循环效率  $\eta_t$  较低，因此如何提高  $\eta_t$  是提高电厂总效率的关键问题。那么怎样提高  $\eta_t$  呢？

我们知道，热能与机械能的连续转换是通过热力循环来实现的。根据热力学第二定律，在一定温度范围 ( $T_1$ ,  $T_2$ ) 内工作的一切循环，以卡诺循环的热效率为最高，且卡诺循环热效率具有最简单的表达式

$$\eta_{t,c} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

它只与热阱、热源的温度  $T_2$ 、 $T_1$  有关。为了将各种不同的可逆循环进行比较，引入过程平均温度的概念，如图 8.1 所示。

abcda 循环为一任意（多热源）可逆循环，循环中 abc 为加热过程，cda 为放热过程，其中最高加热温度为  $T_1$ ，最低放热温度为  $T_2$ 。若以一个温度为  $\bar{T}_1$  的等温过程 AB 来代替原加热过程 abc，使其加热量和熵变量与原加热过程相等，则：

$$Q_1 = \int_{abc} T \cdot ds = \bar{T}_1 (S_2 - S_1)$$

同理，以一个温度为  $\bar{T}_2$  的等温过程 CD 来代替原放热过程 cda，使其放热量和熵变量与原放热过程相等，则：

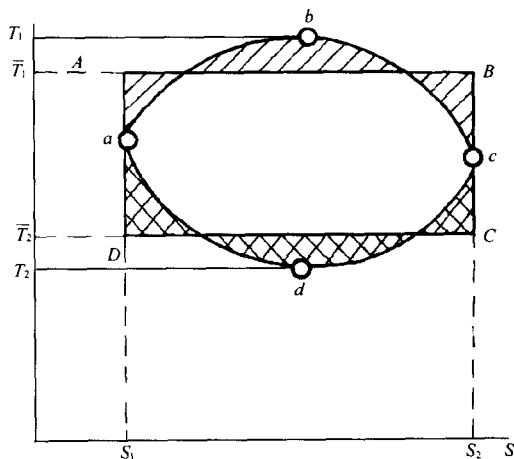


图 8.1 热力循环

$$Q_2 = \int_{abc} T \cdot ds = \bar{T}_2(S_2 - S_1)$$

$\bar{T}_1$  和  $\bar{T}_2$  就称为循环中加热过程和放热过程的平均温度。这样, 任意 (多热源) 可逆循环的热效率可表示为:

$$\eta_i = \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{\bar{T}_2(S_2 - S_1)}{\bar{T}_1(S_2 - S_1)} = 1 - \frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_1} \quad (8.2)$$

显然, 上述循环的热效率  $\eta_i$  与由两个假想的等温过程 ( $\bar{T}_1$ ,  $\bar{T}_2$ ) 和两个等熵过程组成的卡诺循环 ABCA 的热效率相等。

从公式 (8.2) 中可见, 引入平均温度的概念, 使分析比较各种可逆循环的热效率十分简便, 只需比较它们的吸热和放热过程平均温度  $\bar{T}_1$ 、 $\bar{T}_2$  即可。要提高循环的热效率就必须设法提高吸热过程平均温度  $\bar{T}_1$ , 降低放热过程平均温度  $\bar{T}_2$ , 这是提高理论热力循环效率  $\eta_i$  的根本途径。在实际应用中, 采用的主要途径是:

(1) 提高蒸汽初参数压力和温度, 可提高循环的热效率, 因而现代蒸汽动力循环都朝着采用高参数、大容量的方向发展。

(2) 采用给水回热加热, 就是从汽机中抽出一部分做功的蒸汽来加热给水, 将给水温度提高后再送入锅炉 (或蒸汽发生器), 以减少锅炉 (或蒸汽发生器) 中的吸热量。这样可以提高平均吸热温度, 从而提高热效率。

(3) 采用蒸汽中间再热, 就是将汽机中膨胀至某一中间压力的蒸汽撤出汽机, 经再热器加热提高温度后再导入汽机继续膨胀做功。这样不但可以提高平均吸热温度, 还可明显提高乏汽的干度, 从而提高热效率。

(4) 选择最佳冷却水循环和最佳循环倍率。

现代大、中型热力发电厂几乎毫无例外地采用回热循环及中间再热循环, 在核电厂二回路热力系统中设计有不同级数的加热器和中间再热器来提高热效率。

## 8.2 汽水回路运行

核电厂二回路系统主要由汽回路和水回路组成, 见图 8.2。还有一些辅助系统, 用以保证主要系统正常运行, 如油系统、辅助冷却水系统、空气系统等等。

### 8.2.1 汽回路运行

汽回路是热力循环的首要循环, 也是能量转换的第一步。蒸汽发生器就如火电厂的锅炉一样, 把反应堆产生的热量传给二回路的水, 使水蒸发产生 6.71 MPa、282.9 °C 的饱和蒸汽, 进入到汽机高压缸做功。汽机设计的进汽压力为 6.11 MPa, 温度为 276.7 °C。高压缸做功后的排汽压力下降至 0.783 MPa, 相应温度为 168.9 °C, 进入汽水分离再热器, 去湿再热, 压力降至 0.74 MPa, 而温度升高至 264.8 °C, 成为过热蒸汽, 通过六根进汽管从两侧进入到三个低压缸做功, 乏汽排到冷凝器。乏汽的压力为 7.5 kPa, 温度为 40.3 °C。在汽循环过程中, 高压缸、低压缸上布置有若干抽汽孔, 抽出一部分做过功的乏汽用以加热给水, 回收热量, 减少热阱损失, 提高热经济性。



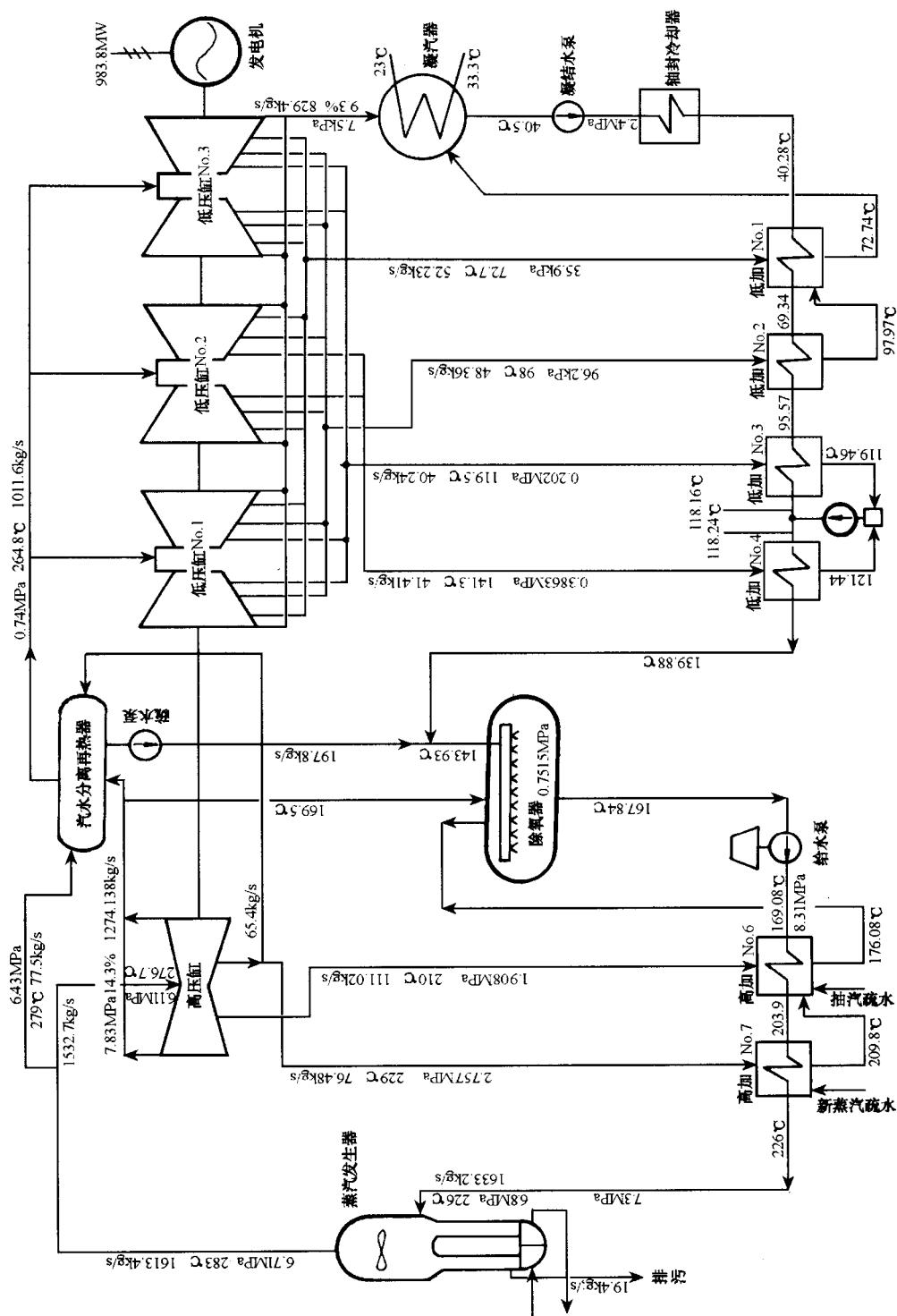


图 8.2 大亚湾核电站二回路热力系统原理图