

大亚湾核电站 运行教程

上

濮继龙 主编

原子能出版社



数据加载失败，请稍后重试！

大亚湾核电站运行教程

上 册

濮继龙 主编

原子能出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

大亚湾核电站运行教程/濮继龙主编. - 北京:
原子能出版社, 1998.12

ISBN 7-5022-1968-4

I. 大… II. 濮… III. 大亚湾核电站-运行-教程
IV. TM623

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 39378 号

©原子能出版社, 1998

原子能出版社出版 发行

责任编辑: 柴芳蓉

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

中国农业大学印刷厂印刷 新华书店经销

开本: 787×1092mm 1/16 印张 34 字数 933 千字

1999 年 1 月北京第 1 版 1999 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—3000

定价 (上、下册): 148.00 元 (精)
106.00 元 (平)

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		

序 言

大亚湾核电站两台百万级核电机组商运以来，一直保持着良好的安全记录，业绩（WANO）指标逐年有显著提高。1997年7月1日大亚湾核电站顺利地实现了向中方全面自主化管理的过渡。公司员工正在满怀信心地实施“五年发展计划”，争取公司主要技术经济指标在2002年进入世界（核电）先进行列。核电站这几年取得这些成绩有多方面的原因，其中一个非常重要的原因就是公司成立以来始终重视员工队伍的建设，形成了终身培训的制度，建立了核电生产人才培养体系，从而造就了一支各方面具有较高素质的员工队伍。

在提到培训和培训体系时，自然会想到和核电站同步兴建的培训中心，全范围模拟机，想到辛勤劳动的培训工作者，想以先后开设的近百门培训课程和各类教材。《大亚湾核电站运行教程》是众多培训教材中的精品之一。教程的编者在深入消化、吸收法国FRAMATOM公司供应的M310型压水堆技术和英国GEC公司供应的全转速汽轮发电机技术基础上，结合大亚湾核电机组的实际运行工况，以核安全功能为主线，深入浅出地阐明了核电厂的基础知识，各个系统和设备的功能、组成、工作原理和运行特性。《教程》论述清楚、分析详尽，对相互联系明确作了交代，是一本具有科学性、实用性，适用范围广泛、经过教学实践考验，吸取了生产和教学经验反馈的好教材。

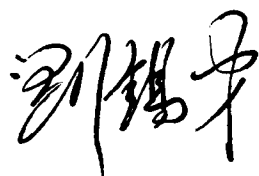
在大亚湾核电站，这部教材早已成为关键技术岗位人员的必修课教材。特别是某些运行技术岗位人员，只有通过系统地学习、全面地掌握了其基本内容，并经考核合格后，才有可能参加更高层次的培训——全范围模拟机培训，以至于获得向关键运行岗位冲刺的机会：即通过严格的考试，取得国家核安全局颁发的“反应堆操纵员执照”，成为“驾驶”核电机组的反应堆操纵员。所以，这本教材已经在核电生产人才培养中发挥了良好作用。

在世纪之交的今天，当“知识经济”时代向我们走来，当广核未来取决于“知识总量，人才素质和科学实力”的时候，公司为了贯彻实施广核人才发展战略，把大亚湾核电站建设成为广核人才培养的摇篮，正在进一步加强培训工作。正是在这个时候，经过几十位核电工作者的不懈努力，《大亚湾核电站运行教程》终于正式出版、发行了。它既是大亚湾核电站培训工作的一项重要成果，也是对核电人才培训工作的一份贡献。我们有充分的理由相信《教程》会成为年青一代核电工作者熟悉大型压水堆核电站的指南。

由于大亚湾核电站运行经验有限，核电技术水平尚待进一步提高，我们殷切地期望国内核电同行、专家们和广大读者对这本教材给予关心扶植，欢迎大家提出宝贵意见，使这本教材趋于完善。

教材的正式出版，经历了多年的努力，凝聚了编写者多年的心血和辛勤劳动的汗水，我谨代表广东核电合营有限公司，向参与编写这本《教程》的核电专家们致以最诚挚的感谢。

广东核电合营有限公司总经理



一九九八年十月二十一日

前 言

《大亚湾核电站运行教程》是大亚湾核电站主控操纵员和维修及技术部门工程师必修课程之一。作为主控操纵员，在学习本课程之前，尚需通过《大亚湾核电站系统和设备教程》的学习，并通过本课程的考试合格之后，才能进行全范围模拟机的培训，继而参加国家核安全局的执照考试，持执照后上岗。

本教程内容的重点在于分析正常工况和事故工况下主要系统和设备的运行状态；描述在暂态工况下主要物理参数的变化和有关控制、调节系统的动作；把物理现象和运行限制与电站控制策略联系起来；解释和证明安全系统动作的合理性；以及阐述在任何工况下如何使核安全的三要素（反应性控制、核燃料的冷却和放射性物质的包容）得到保证。

本教程总的教学时间约需 180 学时，其中包括实验室教学和基本原理模拟机练习及两次考试的时间。

本教程适合于大亚湾核电站运行部门主控室操纵员以上岗位及技术部门主管以上岗位人员学习，也可供其它核电站、研究所及高等院校有关专业人员参考。

1992 年开始，为适应广东大亚湾核电站运行需要，在法国专家及许多技术人员的支持下，大亚湾核电站培训中心开设了《高级运行》课程，经十几期的教学实践，《高级运行》一书于 1995 年 5 月由大亚湾核电站培训中心内部出版。《大亚湾核电站运行教程》是在《高级运行》一书的基础上进一步修改完善后编写而成的。参加《高级运行》一书编写人员有唐炳生（堆芯物理、反应堆压力容器的运行、核燃料、核电厂的化学问题、标准状态）；高云鹏（蒸汽发生器、反应堆冷却剂泵、稳压器）；万安泰（调节原理、堆内外测量、反应堆控制、反应堆保护、汽机调节、发电机励磁与电压调节）；王钧益（化学容积控制系统、余热排出系统、反应堆硼和水补给系统、核安全、技术规范、F-COR 规程、机组启停过程、100% 紧急停堆瞬态过程和 100% 甩负荷瞬态过程）；于侃（二回路系统、汽机旁路系统），程树军（专设安全设施）。

参加《大亚湾核电站运行教程》一书编写的人员有：

第一章，徐秀芳（§ 1.2，§ 1.4.3）；第二章，肖岷；第三章，杨辉玉（§ 3.1，§ 3.5，§ 3.6）、和卫东（§ 3.2）、万安泰（§ 3.3）、陈观福（§ 3.4）；第四章，刘力；第五章，黄维哲；第六章，石小毛；第七章，张睿琼；第八章，曹春江（§ 8.1，§ 8.2，§ 8.5，§ 8.7）、卢文耀（§ 8.3）、万安泰（§ 8.3）、苏林森（§ 8.1，§ 8.2，§ 8.4，§ 8.5，§ 8.7）、于侃（§ 8.6）；第九章，方军；第十章，吴祥中（§ 10.1）、潘央（§ 10.2）、刘敏（§ 10.3）；第十一、十二章，濮阳；第十三章，孙毅；第十四章，王清泉（§ 14.1）、李琳教（§ 14.2）、卢长申（§ 14.3，§ 14.4）；第十五章，邹勇平。其中，§ 8.4（汽机保护）、§ 10.2（电气系统运行）、§ 10.3（电气保护）、第十五章（设计基准事故的运行）等章节为新增加部分。

该书的编辑工作由唐炳生主持，审校工作由杨辉玉（有关一回路内容）、苏林森（有关二回路内容）、万安泰（有关控制调节和电气方面的内容）、唐炳生（其它内容）四人负责。这里特别要感谢参加审校的四位同志，他们对来稿逐字逐句进行了审查、校核和改写，有些部分进行了重写。另外，对其他支持和关心该书的领导和同志们在此一并表示感谢。

由于该书涉及的范围宽和编者知识及水平限制，书中难免有疏漏和不当之处，敬请读者指正。

目 录

上 册

第一章 堆芯物理	(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)
 第二章 反应堆热工	 (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)
 第三章 反应堆冷却剂系统的运行	 (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)
3.4.5.1 轴封注入水流程和主泵支持系统	(104)
3.4.5.2 主泵监测和保护仪表	(107)
3.4.5.3 主泵的运行	(111)
3.4.5.3.1 主泵使用的技术限值和规定	(111)
3.4.5.3.2 主泵的启动和停运	(112)
3.5 稳压器	(115)
3.5.1 稳压器压力控制系统	(115)
3.5.2 稳压器水位控制系统	(122)
3.5.3 稳压器的瞬态过程	(129)
第四章 一回路辅助系统的运行	(133)
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)
第五章	堆内外测量	(166)
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)
第六章	反应堆控制	(194)
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	ΔT 保护图	(224)
7.2.5	ΔT 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 (H_3BO_3)	(334)
9.2.2	氢氧化锂 ($LiOH$)	(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)
第十二章 技术规范介绍	(414)
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)
第十三章 F-COR 规程	(422)
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)
第十四章 机组的正常运行和瞬态工况	(432)
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_0 紧急停堆的瞬态过程	(450)