

普通高等教育



“十五”

PUTONG
GAODENG JIAOYU
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

规划教材

发电厂电气部分

姚春球 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育



“十五”

PUTONG
GAODENG JIAOYU
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

规划教材

发电厂电气部分

姚春球 编

杨盘兴 主审



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书着重讲述发电厂和变电所电气一次系统的构成、设计及运行的理论和计算方法,同时讲述二次系统的基本工作原理。内容包括:导体的发热、电力及开关电器的灭弧原理;电气设备的结构和工作原理;电气主接线和厂(所)用电系统的构成及设计;电气设备的选择;配电装置的构成;电力系统中性点接地方式;接地装置的构成和设计;测量、控制及信号回路的构成和工作原理及电力变压器的运行。每章末均附有思考题和习题;书末附有较充足的供授课、解题及课程设计用的附录,给出供参考的课程设计任务书。

本书为本科电气工程专业“电力系统及其自动化”专业方向的教材,也可作为其他专业方向的教学用书,同时亦可供从事电力工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

发电厂电气部分/姚春球编. —北京:中国电力出版社, 2004

普通高等教育“十五”规划教材

ISBN 7-5083-2031-X

I. 发... II. 姚... III. ①发电厂-电气设备-高等学校-教材 ②电厂电气系统-高等学校-教材
IV. TM62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 086597 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2004 年 10 月第一版 2004 年 10 月北京第一次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 32 印张 749 千字

印数 0001—3000 册 定价 45.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

序

由中国电力教育协会组织的普通高等教育“十五”规划教材，经过各方的努力与协作，现在陆续出版发行了。这些教材既是有关高等院校教学改革成果的体现，也是各位专家教授丰富的教学经验的结晶。这些教材的出版，必将对培养和造就我国 21 世纪高级专门人才发挥十分重要的作用。

自 1978 年以来，原水利电力部、原能源部、原电力工业部相继规划了一至四轮统编教材，共计出版了各类教材 1000 余种。这些教材在改革开放以来的社会主义经济建设中，为深化教育教学改革，全面推进素质教育，为培养一批批优秀的专业人才，提供了重要保证。原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会在此间的教材建设工作中，发挥了极其重要的历史性作用。

特别需要指出的是，“九五”期间出版的很多高等学校教材，经过多年的教学实践检验，现在已经成为广泛使用的精品教材。这批教材的出版，对于高等教育教材建设起到了很好的指导和推动作用。同时，我们也应该看到，现用教材中有不少内容陈旧，未能反映当前科技发展的最新成果，不能满足按新的专业目录修订的教学计划和课程设置的需要，而且一些课程的教材可供选择的品种太少。此外，随着电力体制的改革和电力工业的快速发展，对于高级专门人才的需求格局和素质要求也发生了很大变化，新的学科门类也在不断发展。所有这些都要求我们的高等教育教材建设必须与时俱进，开拓创新，要求我们尽快出版一批内容新、体系新、方法新、手段新，在内容质量上、出版质量上有突破的高水平教材。

根据教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的精神，“十五”期间普通高等教育教材建设的工作任务就是通过多层次的教材建设，逐步建立起多学科、多类型、多层次、多品种系列配套的教材体系。为此，中国电力教育协会在充分发挥各有关高校学科优势的基础上，组织制订了反映电力行业特点的“十五”教材规划。“十五”规划教材包括修订教材和新编教材。对于原能源部、电力工业部组织原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会编写出版的第一至四轮全国统编教材、“九五”国家重点教材和其他已出版的各类教材，根据教学需要进行修订。对于新编教材，要求体现电力及相关行业发展对人才素质的要求，反映相关专业科技发展的最新成就和教学内容、课程体系的改革成果，在教材内容和编写体系的选择上不仅要有本学科（专业）的特色，而且注意体现素质教育和创新能力与实践能力的培养，为学生知识、能力、素质协调发展创造条件。考虑到各校办学特色和培养目标不同，同一门课程可以有多种教材供选择使用。上述教材经中国电力教育协会电气工程学科教学委员会、能源动力工程学科教学委员会、电力经济管理学科教学委员会的有关专家评审，推

荐作为高等学校教材。

在“十五”教材规划的组织实施过程中，得到了教育部、国家经贸委、国家电力公司、中国电力企业联合会、有关高等院校和广大教师的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

教材建设是一项长期而艰巨的任务，不可能一蹴而就，需要不断完善。因此，在教材的使用过程中，请大家随时提出宝贵的意见和建议，以便今后修订或增补。（联系方式：100761 北京市宣武区白广路二条1号综合楼9层 中国电力教育协会教材建设办公室 010-63416222）

中国电力教育协会

前 言

本书为中国电力教育协会组织编写的“十五”规划教材。

本教材是根据培养应用型本科人才的需要,针对我国电力工业发展的实际,在总结教学经验、吸收以往教材长处及有关工程技术人员意见的基础上编写的。本教材编写思想是:①采用符合教学规律和实际应用的体系;②在内容上尽量覆盖电气部分的有关方面,对学生通过自学就能学懂的内容指定为“以自学为主”,这样既解决课时限制的矛盾,又能让学生掌握较完整的知识;③考虑到课时限制及有关内容不宜割裂和重复,部分内容不安排在本课程讲授,其中“主接线可靠性的定量分析”宜另开选修课,大电机方面的内容宜在《电机学》中顺带讲授,变压器方面仅讲授在《电机学》中未涉及的部分内容,以便配合课程设计;对实际中有重要应用、而其他课程不讲授或极少讲授的内容予以较充分论述或介绍,包括电气设备的结构和工作原理、电力系统中性点接地方式、接地装置及二次回路等;④注意到新技术和新设备在电力系统中的应用。作为教材,本书重点突出、逻辑性强、层次分明、便于自学、便于记忆、易于讲授、实用性强,亦可供其他专业作教学用书或供从事电力工作的工程技术人员参考。

本书由姚春球编写。全书经江苏省电力公司杨盘兴高级工程师仔细审阅,并结合电力系统实际提出了许多宝贵意见。编者谨在此表示深切谢意。

编 者

2004年3月

目 录

序	
前言	
第一章 绪论	1
第一节 我国电力工业发展概况	1
第二节 发电厂和变电所的类型	7
第三节 发电厂和变电所电气设备简述	18
思考题	22
第二章 导体的发热、电动力及开关电器的灭弧原理	24
第一节 导体的发热和散热	24
第二节 导体的长期发热与载流量	30
第三节 导体的短时发热	32
第四节 大电流导体附近钢构的发热	36
第五节 导体短路的电动力	39
第六节 大电流封闭母线的电动力	47
第七节 开关电器中电弧的产生及熄灭	50
第八节 弧隙电压恢复过程分析	55
第九节 熄灭交流电弧的基本方法	60
思考题和习题	64
* 第三章 电气设备的结构和工作原理	65
第一节 绝缘子和母线	65
第二节 电力电缆和电抗器	74
第三节 高压断路器概述	80
第四节 六氟化硫 (SF ₆) 断路器	84
第五节 真空断路器	92
第六节 油断路器和压缩空气断路器	97
第七节 断路器的操动机构	106
第八节 隔离开关及其操动机构	115
第九节 熔断器、负荷开关及重合器	122
第十节 互感器	130
第十一节 低压开关电器	149
思考题	157
第四章 电气主接线	159
第一节 对电气主接线的基本要求	159
第二节 有汇流母线的主接线	161

第三节	无汇流母线的主接线	170
第四节	发电厂和变电所主变压器的选择	174
第五节	限制短路电流的措施	178
第六节	互感器避雷器在主接线中的配置	183
第七节	各类发电厂和变电所主接线的特点及实例	187
第八节	主接线的设计原则和步骤	192
	思考题和习题	197
第五章	厂(所)用电	198
第一节	发电厂的厂用负荷	198
第二节	厂用电的设计原则和接线形式	201
第三节	所用电的设计原则和接线形式	210
第四节	不同类型的厂(所)用电接线的特点及实例	213
第五节	厂(所)用变压器的选择	219
第六节	厂用电动机的选择和启动及自启动校验	224
	思考题和习题	234
第六章	电气设备的选择	236
第一节	电气设备选择的一般条件	236
第二节	敞露母线及电缆的选择	241
第三节	支柱绝缘子和穿墙套管的选择	252
第四节	高压断路器和隔离开关的选择	254
第五节	高压负荷开关和高压熔断器的选择	258
第六节	限流电抗器的选择	260
第七节	互感器的选择	264
	思考题和习题	270
第七章	配电装置	272
第一节	配电装置的一般问题	272
第二节	屋内配电装置	276
第三节	屋外配电装置	283
第四节	成套配电装置	291
* 第五节	发电机与配电装置的连接	302
* 第六节	发电厂和变电所的电气设施总平面布置	304
	思考题和习题	308
第八章	电力系统中性点接地方式	310
第一节	概述	310
第二节	中性点非有效接地系统	310
第三节	中性点有效接地系统	323
第四节	各种接地方式的比较与适用范围	327
第五节	发电机中性点接地方式	329
	思考题和习题	331

第九章 接地装置	332
第一节 概述	332
第二节 保护接地的基本概念	333
第三节 接地电阻	338
第四节 接地装置的布置	344
思考题和习题	349
第十章 发电厂和变电所电气二次回路	350
第一节 发电厂和变电所的控制方式	350
第二节 二次接线图	352
第三节 直流电源系统	365
第四节 电压互感器回路	376
* 第五节 电气测量仪表的配置	382
第六节 断路器控制回路的基本接线	384
* 第七节 分相操作的断路器控制回路	395
* 第八节 同步回路及同步点断路器控制回路	399
* 第九节 带有 APR 及 AAT 的断路器控制回路	405
第十节 防误闭锁	410
第十一节 中央信号	416
* 第十二节 大型变压器冷却装置控制与信号回路	421
第十三节 发电厂和变电所的弱电控制	427
第十四节 变电所和发电厂网络部分微机监控系统	429
思考题和习题	433
第十一章 电力变压器的运行	435
第一节 变压器的发热和冷却	435
第二节 变压器的绝缘老化	439
第三节 变压器超过额定容量运行时温度和电流的限值	441
第四节 变压器的正常过负荷能力	443
第五节 变压器的事事故过负荷	448
第六节 自耦变压器的特点和运行方式	450
第七节 变压器的并列运行	460
第八节 变压器的经济运行	467
思考题和习题	472
附录一 电力变压器技术数据	475
附录二 导体及电器技术数据	484
附录三 课程设计任务书	501
参考文献	503

注：打“*”章节以学生自学为主，其基本概念属考试范围。每章理论教学建议学时为(章号-学时数)：1-4,2-10,3-4,4-8,5-8,6-8,7-4,8-6,9-4,10-10,11-8,共74学时。课程设计1.5~2周。

第一章 绪 论

本章介绍我国电力工业的发展概况和当前发展的方针，同时简要介绍发电厂和变电所的各种类型和生产过程，以及主要电气设备的作用。

第一节 我国电力工业发展概况

电是能量的一种表现形式。电能具有显著优点：可简便地转变为其他形式的能量，如光能、热能、机械能等；输送、分配方便，易于操作和控制；用电进行控制容易实现自动化，提高产品质量和经济效益。

所以，电力自从应用于生产以来，已成为现代化生产、生活的主要能源，在工农业、交通运输业、国防、科学技术和人民生活等方面都得到了广泛的应用。电力工业发展水平和电气化程度是衡量一个国家国民经济发展水平的重要标志。在实现社会主义四个现代化中，要求电力先行，电力工业要有较高的发展速度。

一、发展概况

我国自 1882 年有电以来，电力工业已经走过了 120 多年的历程。解放前，我国电力工业和其他工业一样，处于极端落后的状态，并带有明显的半殖民地的特点。新中国成立后的 50 多年中，电力工业以很高的速度发展，取得了世人瞩目的成就。我国电力工业已经进入了大机组、大电厂、大电网、超高压、自动化、信息化发展的新时期。具体体现在以下各方面（统计数据未含台湾省和香港、澳门特别行政区）。

1. 装机容量、发电量迅速增长

我国装机容量、发电量增长的具体数据见表 1-1 和表 1-2。装机容量于 1960 年突破 1000 万 kW，居世界第 9 位；1987 年突破 1 亿 kW，居世界第 5 位；1995 年突破 2 亿 kW，居世界第 4 位；1996 年装机容量达到 2.37 亿 kW，跃居世界第 2 位，实现了全国电力供需基本平衡；2000 年突破 3 亿 kW，仍居世界第 2 位。“五五”~“九五”时期，装机容量和发电量的平均增长速度超过 8%，电力生产弹性系数（发电量增长率与国内生产总值增长率之比）平均值超过 1。

表 1-1 装机容量、发电量增长情况

年 份	装机容量 (万 kW)	装机容量 在国际排位	年发电量 (亿 kW·h)	年发电量在 国际排位	备 注
1882 ~ 1949	185 (16)	21	43 (7)	25	建国前 67 年
1960	1192 (194)	9	594 (74)	—	装机容量突破 1000 万 kW
1987	10290 (3019)	5	4973 (1000)	—	装机容量突破 1 亿 kW

续表

年 份	装机容量 (万 kW)	装机容量 在国际排位	年发电量 (亿 kW·h)	年发电量在 国际排位	备 注
1995	21722 (5218)	4	10069 (1868)	—	装机容量突破 2 亿 kW
1996	23654 (5558)	2	10794 (1869)	2	电力供需基本平衡, 结束缺电局面
2000	31932 (7935)	2	13685 (2431)	2	装机容量突破 3 亿 kW
2001	33861 (8301)	2	14839 (2611)	2	
2003	38450	2	19080 (2830)	2	

注 至 1998 年, 香港、澳门特区及台湾省的总装机容量分别为 986.5 万、36.5 万、2668 万 kW。* 表中括号内为其中的水电装机容量及年发电量。

表 1-2 各个时期装机容量和发电量平均增长速度

时 期	“五五” (1976~1980年)	“六五” (1981~1985年)	“七五” (1986~1990年)	“八五” (1991~1995年)	“九五” (1996~2000年)	“五五”~ “九五”平均	2001年
装机容量增长(%)	8.7	5.7	9.6	9.5	8.0	8.3	6.04
发电量增长(%)	8.95	6.44	8.63	10.14	6.33	8.10	8.43
电力生产弹性系数	1.75	0.64	1.12	0.85	0.78	1.03	1.15

至 1999 年, 国际上发电装机容量超过 1 亿 kW 的国家依次是: 美国 (84531 万 kW)、中国 (29877 万 kW)、日本 (25029 万 kW)、俄罗斯 (22430 万 kW)、法国 (12238 万 kW)、德国 (11916 万 kW)、加拿大 (11095 万 kW)。

至 2001 年, 我国已投产和正在建设的 100 万 kW 及以上的电厂达 113 座, 其中火电厂 85 座, 核电厂 4 座, 水电厂 24 座; 已投产的最大凝汽式火电厂为浙江北仑电厂 (5 × 60 万 kW), 最大热电厂为山西省太原第一热电厂 (131.2 万 kW), 最大水电厂为四川雅砻江的二滩电厂 (6 × 550MW, 最大坝高 240m); 已投产的最大火电机组为 80 万 kW (辽宁绥中电厂, 俄罗斯机组), 最大水电机组为 55 万 kW (二滩电厂); 30 万 kW 及以上机组达 349 台, 总容量达 10998 万 kW, 占总装机容量的 34.4%。

我国人均拥有装机容量已由 1952 年的 0.0034 kW 上升到 2001 年的 0.2653kW, 人均占有发电量由 12 kWh 上升到 1163kWh。

2. 电网的建设有较大的发展

1971 年以前, 我国大陆电网最高电压等级为 220 kV, 1972 年建成第一条 330kV 输电线路 (刘家峡—陕西关中, 534km), 1981 年建成第一条 500kV 输电线路 (河南平顶山—武汉, 595km), 1989 年建成第一条 ±500kV 直流输电线路 (葛洲坝—上海, 1046km)。至 2001 年底, 35 kV 及以上电压级的输电线路长度达 76.42 万 km, 变压器容量达 11.18 亿 kVA; “五五”~“九五”时期, 输电线路长度和变压器容量的平均增长速度分别达 5.49% 和 10.03%。具体数据见表 1-3 及表 1-4。

表 1-3 35 kV 及以上输电线路长度和变压器容量

电 压 级	500kV	330kV	220kV	110kV	35kV	总 计
输电线路长度 (万 km)	3.08	0.92	12.99	21.44	37.99	76.42
变压器容量 (万 kVA)	11731	1527	34026	40238	24249	111771

表 1-4 各个时期 35 kV 及以上输电线路长度和变压器容量平均增长速度

时 期	“五五” (1976~1980年)	“六五” (1981~1985年)	“七五” (1986~1990年)	“八五” (1991~1995年)	“九五” (1996~2000年)	“五五”~ “九五”平均	2001年
输电线路长度 增长 (%)	7.46	5.37	5.61	3.95	5.06	5.49	8.07
变压器容量 增长 (%)	11.33	8.18	11.13	9.86	9.66	10.03	12.21

经多年建设,我国大陆已形成东北(黑龙江、吉林、辽宁及部分内蒙)、华北(山西、河北、北京、天津及部分内蒙)、华东(上海、江苏、浙江、安徽)、华中(河南、湖南、湖北、江西)、西北(陕西、甘肃、青海、宁夏)五个跨省区主干电网和南方四省(广东、广西、云南、贵州)及川渝(四川、重庆)互联网,除西北和川渝电网外,其余各跨省区电网的装机规模都超过或接近4000万kW。此外,还有山东、福建、海南、乌鲁木齐和拉萨等六个独立电网。至2001年底,各主要电网的装机容量见表1-5。

表 1-5 至 2001 年底主要电力系统的装机容量

电力系统	东北	华北	华东	华中	西北	南方	川渝	山东	福建	海南	乌鲁木齐	拉萨
装机容量(万kW)	3916	4584	5932	4937	2303	5303	1970	2012	1252	192	289	21

在跨省电网和部分独立省网中已形成了500kV(或330kV)的骨干网架。1989年建成的第一条±500kV直流输电线路开始了华中和华东电力系统之间的联网,2001年华北与东北、福建与华东电力系统实现了互联,2002年川渝与华中电力系统又实现了互联,为实现全国联网打下了良好的基础。

3. 电力设备的制造水平大大提高

国产第一台30万kW和60万kW火电机组(引进美国制造技术)先后于1974年(江苏望亭电厂)和1989年(安徽平圩电厂)投产发电。现在,国内已能批量制造30万kW和60万kW火电机组,70万kW水电机组,30万kW核电机组以及500kV输变电设备。

4. 电力科技水平大大提高

我国电力工业立足于科技兴电,相继建成了一批具有世界先进水平的重点实验室和装置,完成了一批重大科研课题,掌握和解决了大机组建设和全国联网等大电力系统建设、运行等一系列问题。我国的电力队伍已能承担现代化大型水、火、核电厂和电力系统的设计、施工、调试和运行任务,并已经建成投产和正在建设着具有当代国际先进水平的各类大型电厂和500kV交、直流输变电工程;各大电网的计算机监控调度系统已进入实用化阶段,电力系统运行和调度实现了自动化、现代化,其中国调、网调、省调的自动化系统应用率达100%,地调自动化系统已装备85%。

电力环境保护得到加强。例如,在装机容量和发电量大幅度增加的情况下,2000年与1995年相比,火电厂烟尘排放量减少100多万t,废水排放量减少10亿t,二氧化硫排放量减少20%。

5. 在新能源发电方面,掌握了一定的技术

在地热、风力、潮汐、太阳能、城市垃圾等新能源发电方面,经多年的科技攻关及建设

示范性电站或试验电站,已掌握了设计、制造和运行技术。西藏羊八井第一、二地热电站总装机容量 2.518 万 kW,是我国最大的地热电站,居世界第 12 位;浙江省江厦潮汐电站总装机容量 3200kW,是我国最大的潮汐电站;新疆达坂城风电场总装机容量 6.6 万 kW,是我国最大的风电场;杭州天子岭垃圾填埋气发电厂总装机容量 1940kW,是我国第一座垃圾填埋气发电厂;上海浦东垃圾焚烧发电厂总装机容量 1.7 万 kW,是我国最大的垃圾焚烧发电厂;西藏那曲地区的太阳能光伏电站总容量 100kW。1992~2001 年,我国的新能源发电装机容量以年均 44.55% 的速度发展,至 2001 年底,装机容量已达 37 万 kW。

6. 电力运行的技术经济指标不断完善

随着大机组不断进入电力行列,电力运行的技术经济指标不断完善,中国电力工业主要技术经济指标见表 1-6。

表 1-6 中国电力工业主要技术经济指标

年 份	标准煤耗 (g/kWh)		厂用电率 (%)			线损率 (%)
	发 电	供 电	合 计	水 电	火 电	
1980	413	448	6.44	0.19	7.65	8.93
2001	358	386	6.29	0.49	7.20	7.55

7. 积极实施国际化战略

我国电力工业从 1979 年开始利用外资及引进设备、技术和先进的管理方法。到 2000 年,电力工业共签约利用外资协议总额达 269 亿美元,建设项目达 100 项。同时积极实施走出去的战略,开拓国际市场,树立“中国电力”品牌。

二、差距

(1) 人均拥有装机容量和人均占有发电量较低。目前我国人均拥有装机容量和人均占有发电量不到世界平均水平的一半,分别约为发达国家的 1/6 和 1/10。

(2) 技术经济指标平均水平不高。表现在火电厂的平均发电煤耗、供电煤耗、厂用电率及电网线损率等仍较高。

(3) 火电厂的污染物排放量高。火电厂的二氧化硫、氮氧化物及大量粉尘的排放尚未得到有效控制。

(4) 电网相对薄弱,供电可靠性偏低。我国电力建设曾长时间出现过“重发轻供”的现象,即重视电源建设而轻视电网建设,尽管近年来采取了积极措施,但仍滞后于电源建设,电网结构相对薄弱,特别是城乡电网老化,电能损耗大,主要电网的调峰能力普遍不足,供电可靠性偏低。

(5) 发供电设备质量问题较多,性能欠佳。

(6) 结构性矛盾突出。电力在终端能源消费中的比例偏小(1998 年为 9.35%,世界平均水平为 17%);煤炭用于发电的比例偏小(1998 年为 42.12%,发达国家为 70%~80%);发电构成中,水电和核电比重偏小(至 2001 年底,火电占 74.76%,水电占 24.51%,核电占 0.62%)。

(7) 用人过多,人员整体素质和效率不高,效益偏低。

三、发展方针

1. 积极发展水电

至 1989 年底, 大多数西方发达国家已开发的水能资源就已超过其拥有水能资源的 50%。我国可开发的水能资源达 3.78 亿 kW (70% 分布在西部地区), 是世界上水能资源最丰富的国家。水能资源是可再生的、清洁的能源; 在电力系统中, 有一定比重的水电装机容量对系统调峰和安全经济运行极为有利; 水电站的发电成本低, 水库可以综合利用。我国水电装机容量也已居世界第 2 位, 但至目前仅开发了少部分 (约 22% 左右), 所以, 要积极发展水电。

重点开发黄河上游 (青海)、黄河中游 (山西、河南)、红水河 (广西)、澜沧江 (云南)、乌江 (贵州)、雅砻江、大渡河和长江三峡 (四川) 等。

在东北、华东、华中等经济发达而能源短缺地区, 主要在黑龙江、福建、浙江、湖南、湖北、江西等省份, 实行大中小水电站并举, 以大中型水电站为主。

在东北、华北、华东等火电比重较大的电力系统, 建设抽水蓄能电站。

至 2001 年底, 已建成投产的 100 万 kW 及以上的水电站有 18 座; 在建的有 6 座, 包括黄河上游的公伯峡水电站 (5×30 万 kW)、红水河的龙滩水电站 (7×60 万 kW)、澜沧江的大朝山 (6×22.5 万 kW) 和小湾水电站 (6×70 万 kW)、长江三峡水电站 (26×70 万 kW) 及浙江的桐柏抽水蓄能电站 (4×30 万 kW)。“十五”期间还开发四川大渡河的瀑布沟、贵州乌江的构皮滩、湖北清江的水布垭等水电站, 至 2005 年, 水电装机容量将上升到总装机容量的 26.1%。自 2006 年起, 将在金沙江开发 4 座梯级水电站, 其总装机容量达 3850 万 kW, 相当于三峡水电站的两倍。

1994 年底开工建设的长江三峡电站是世界最大的水电站, 总投资 1800 亿元, 于 2003 年 6 月 1 日开始蓄水, 最终蓄水位为海拔 175m, 库容 393m^3 , 2003 年 6 月 24 日 2 号机组首次并网发电, 至 2003 年 11 月 22 日已有 6 台机组投产, 将于 2009 年全部竣工; 1993 年建成的广州抽水蓄能电站 (装机容量 8×30 万 kW) 是世界最大的抽水蓄能电站。1997 年建成的西藏羊卓雍湖抽水蓄能电站 (装机容量 9 万 kW, 水头 840m) 是世界海拔最高的电站, 也是我国目前水头最高的抽水蓄能电站。这一切充分显示我国水电建设已经进入世界先进行列。

2. 优化发展火电

我国有丰富的煤炭、石油和天然气, 其中煤炭储量 7241 亿 t (60% 在“三西”——陕西、山西和内蒙西部)。火电厂的厂址不受限制, 建设周期短, 能较快发挥效益。2000 年以前, 火电厂是以 30 万 kW 机组为主; 2000 年以后, 主要建设 30 万 kW 及以上高参数、高效率、调峰性能好的机组, 引进和发展超临界机组, 例如 90 万 kW 的机组已于 2001 年在上海外高桥电厂开工建设。在“三西”和西南大力发展矿口电厂, 变输煤为输电; 在沿海港口和路口等负荷中心, 主要在渤海湾、东南沿海、长江沿岸, 焦枝线、大秦线、京九铁路沿线等, 建设一批火电厂 (路口电厂指位于燃料产地和负荷中心之间, 靠近铁路枢纽的大型火电厂); 随着“西气东送”工程的实施, 在沿海缺能地区及大城市, 适当建设一批燃气电站, 增加电网的调峰能力。

与此同时, 对部分 20 万 kW 和 30 万 kW 机组进行更新改造, 做好洁净煤电试点项目, 继续关停小火电。

3. 适当发展核电

主要是在沿海经济发达而一次能源短缺的广东、福建、浙江、江苏、辽宁等省建设一批

单机容量 100 万 kW 级的核电站；在山东、江西、湖南、吉林等省建设单机容量 30 万 kW 或 60 万 kW 级国产设备的核电站。1994 年浙江秦山电站一期（30 万 kW 国产机组）和广东的大亚湾电站（装机容量 2×90 万 kW，法国机组）的投产运行实现了我国核能发电零的突破。在建的核电站有浙江秦山电站二期（装机容量 2×60 万 kW，我国自主设计建造，2002 年投产）和三期（装机容量 2×70 万 kW，重水堆式机组，中加合作项目，2002 年 11 月投产），广东的岭澳电站（装机容量 2×90 万 kW，法国机组，2002 年投产），江苏的连云港田湾电站（装机容量 2×100 万 kW，俄罗斯机组，2004 年投产）。“十五”期间重点开工建设山东核电站（总装机容量 200 万 kW，国产机组）。至 2005 年，核电装机容量将上升到总装机容量的 2.4%。

4. 重点发展电网，促进全国联网

在继续大力发展电源的同时，应高度重视电网的建设。主要是：各跨省区电网加强 500kV 电网建设（西北电力系统仍以 330kV 电网为主）；不断扩大跨大区的联网送电，提高资源使用效率和优化配置，目前正在实施华中与南方、华中与华北、华中与西北、西北与川渝电力系统及华北与山东电力系统的互联工程；从 2000 年起，实施了“西电东送”战略，并被列为西部大开发战略的标志性工程之一，大力开发西部的水电和煤电基地的火电，同时实施南北互供，建设多回 500kV 输电线路，形成北、中、南三大输电通道，到 2005 年将基本实现全国主要大区电力系统之间的联网；随着三峡电站及其输变电工程建设（于 1997 年开工）的完成，到 2010 年将基本实现以三峡为中心的全国联网格局，并形成全国统一的联合电力系统。另外，各大区电力系统和各省电力系统不断扩大 220kV 的供电区域，同时对城市电网和农村电网进行建设和改造（1998 ~ 2001 年国家已先后投入 3000 多亿元进行城乡电网改造）。

世界上电网的最高电压，早在 1965 年就已达到 735kV（加拿大），1985 年就已达到 1150kV（前苏联），所以，我国电网的电压等级还将进一步提升。

5. 因地制宜发展新能源发电，做好农村电气化建设

在边远农村和沿海岛屿，因地制宜建设小水电、风力发电、潮汐发电、地热发电和太阳能发电等。我国有丰富的风力资源（我国 10m 高度层可开发利用的风能有 2.53 亿 kW，主要在内蒙、新疆、东北、华北和东南沿海等地）、地热资源（分布在西藏、云南、福建、广东等省区）和潮汐资源（沿海可开发的潮汐资源达 2158 万 kW）。

新能源发电以风力发电为主。至 2005 年，风电装机容量将达 118 万 kW；到 2010 年，新能源发电将占全国装机容量 1% 以上。

由于国民经济的持续快速增长，预计在今后若干年内电力工业将以更高的速度发展。据有关资料介绍，至 2004 年底，全国总装机容量将达 4.2 亿 kW，同比增长达 9%。

6. 开发和节约并重

在开发能源的同时，采取有效措施节约能源、降低损耗（煤耗、水耗、线损等），提高能源利用效率。

7. 高度重视环境保护

实行电力发展与环境保护相协调的方针，使电力建设与环境保护“同步规划、同步实

施、同步发展”。例如，及时关停效率低、煤耗高、污染严重的小火电机组（至2001年共关停了917万kW）；火电厂停止向江河排灰，装设烟气脱硫及降低氮氧化物设施，开展洁净煤燃烧技术的研究及应用等。

第二节 发电厂和变电所的类型

电力系统由发电厂、变电所、线路及用户组成。发电厂是把各种天然能源（化学能、水能、原子能等）转换成电能的工厂。变电站是联系发电厂和用户的中间环节，起着变换和分配电能的作用。发电厂生产的电能，一般先由电厂的升压站（升压变电所）升压，经高压输电线路送出，再经变电所若干次降压后，才能供给用户使用。

一、发电厂类型

至1995年，全世界总装机容量为30.58亿kW，发电量为130977亿kWh。在发电量中，火电占62.98%，水电占19.34%，核电占17.30%。

1. 火电厂

火电厂是把化石燃料（煤、油、天然气、油页岩等）的化学能转换成电能的工厂。火电厂的原动机大都为汽轮机，也有用燃气轮机、柴油机等。火电厂又可分为以下几种。

(1) 凝汽式火电厂。凝汽式火力发电厂的生产过程在《发电厂动力部分》中已有详细介绍。在此仅作简介，其生产过程的示意图如图1-1所示。煤粉在锅炉炉膛8中燃烧，使锅炉中的水加热变成过热蒸汽，经管道送到汽轮机14，推动汽轮机旋转，将热能变为机械能。汽轮机带动发电机15旋转，再将机械能变为电能。在汽轮机中做过功的蒸汽排入凝汽器16，循环水泵18打入的循环水将排汽迅速冷却而凝结，由凝结水泵19将凝结水送到除氧器20中除氧（清

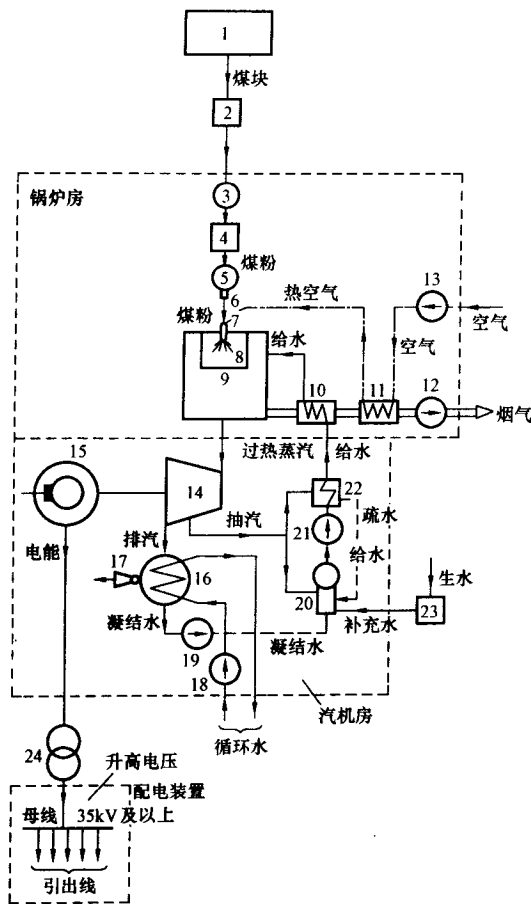


图1-1 凝汽式火电厂生产过程的示意图

- 1—煤场；2—碎煤机；3—原煤仓；4—磨煤机；5—煤粉仓；6—给粉机；7—喷燃器；8—炉膛；9—锅炉；10—省煤器；11—空气预热器；12—引风机；13—送风机；14—汽轮机；15—发电机；16—凝汽器；17—抽气器；18—循环水泵；19—凝结水泵；20—除氧器；21—给水泵；22—加热器；23—水处理设备；24—升压变压器

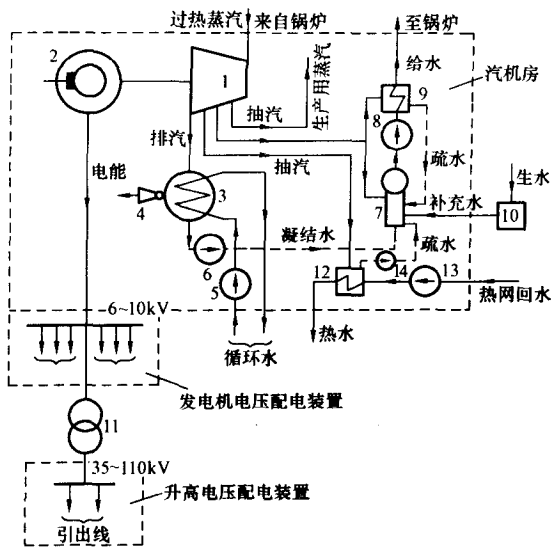


图 1-2 热电厂生产过程的示意图

- 1—汽轮机；2—发电机；3—凝汽器；4—抽气器；5—循环水泵；
6—凝结水泵；7—除氧器；8—给水泵；9—加热器；10—水处理设备；
11—升压变压器；12—加热器；13—回水泵；14—泵

发电；当热力负荷减少时，热电机组相应地少发电。因而，其运行方式不如凝汽式发电厂灵活。

(3) 燃气轮机发电厂。用燃气轮机或燃气—蒸汽联合循环中的燃气轮机和汽轮机驱动发电机的发电厂，称为燃气轮机发电厂。前者一般用作电力系统的调峰机组，后者则用来带中间负荷和基本负荷。这类发电厂可燃用液体燃料或气体燃料。以天然气为燃料的燃气轮机和联合循环发电，具有效率高、污染物排放低、初投资少、工期短及易于调节负荷等优点，近年来在北美、欧洲得到迅速发展。目前燃气轮机的单机容量已发展到 30 万 kW。

燃气轮机的工作原理与汽轮机相似，不同的是其工质不是蒸汽，而是高温高压气体，其基本循环示意图如图 1-3 所示。空气经压气机 1 压缩增压后送入燃烧室 3，燃料经燃料泵 2 打入燃烧室。燃烧产生的高温高压气体进入燃气轮机中膨胀做功，推动燃气轮机旋转，带动发电机发电。做过功后的尾气经烟囱排出，或分流部分用于制热、制冷。这种单纯用燃气轮机驱动发电机的发电厂，热效率只有 35%~40%。

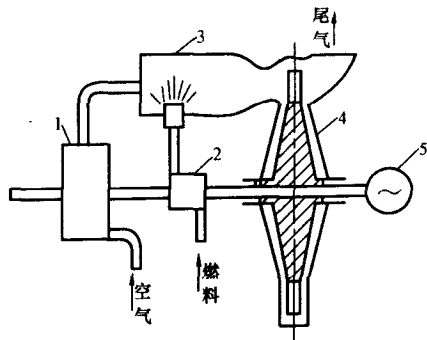


图 1-3 燃气轮机基本循环示意图

- 1—压气机；2—燃料泵；3—燃烧室；
4—燃气轮机；5—发电机