

高等学校教材

电力系统稳态分析

(第二版)

东南大学 陈珏



高等学校教材

电力系统稳态分析

(第二版)

东南大学 陈珩

水利电力出版社

内 容 简 介

本书系高等学校“电力系统及其自动化”专业的专业课教材。

全书分三部分，分别讨论电力系统的基本概念、电力系统各元件的特性和数学模型（第一、二章），电力系统的潮流计算和控制（第三、四章），以及电力系统的运行调节和优化（第五、六章）。在取材方面，除力求讲清基本概念、基本理论外，也注意介绍国内外先进科学技术和本学科发展方向；除尽量保证学科的系统性、完整性外，也适当述及我国电力工业、电力系统的现状和有关技术政策；除主要阐明运用电子计算机计算分析电力系统的原理外，也仍保留少量手算方法，并以较多例题比较它们的异同。

本书既可供高等学校电力类有关专业师生使用，也可供从事电力系统工作的工程技术人员参考。

高 等 学 校 教 材 电 力 系 统 稳 态 分 析 (第二版)

东南大学 陈 珩

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京飞达印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 18.375印张 416千字

1985年5月第一版

1995年11月第二版 1995年11月北京第五次印刷

印数 51421—61590册

ISBN 7-120-02414-0/TM·650

定价 14.20元

修订版前言

本书第一版出版至今已 10 年。10 年来，我国电力工业和电力系统的规模以及科学技术水平都有了突飞猛进的发展，这种发展理应在高等学校的教学中有所反映，修订本书已刻不容缓。修订本书过程中，恰逢新一届电力工程专业教学指导委员会成立，并重新制订了对电力系统分析课程的基本要求，此次修订就是在 1994 年 4 月新制订的基本要求框架内进行的。

修订版与第一版的主要不同体现在以下几方面：

鉴于同名课程是电力系统及其自动化专业的第一门专业课程，有必要使学生在接触本专业之初，对我国电力工业和电力系统的现状以及相应的技术政策，对电力系统工程学科的内涵有一基本了解，修订版中增加了这些内容。诚然，随着时间的推移，这些内容需不断更新。讲授本课时，可依据我国电力工业信息研究部门已定期出版的有关资料，根据需要随时补充、修改。

鉴于计算机的使用已日益普及，修订版中扩充了有关计算机应用的篇幅并对原有编写顺序作了相应调整。诸如增加了稀疏技术的运用，并将各元件特性和数学模型集中阐述等。与此同时，对手算部分作了删节。

鉴于电力线路的结构和导线截面积的选择将以其它方式进行教学，故修订时大幅度地压缩了前者并全部删除了后者。

无疑，吐故纳新是修订任何书籍都自然遵循的原则，本书也不例外。本着这一原则，修订过程中删除了若干陈旧或不实用的内容，代之以有发展前景或更实用的内容。如删去了借串联补偿电容器调压、以节点阻抗矩阵法计算网损微增率等，引入了潮流的调整控制（灵活交流输电系统）、以转置雅可比矩阵法计算网损微增率等。目录中的“*”号为非必修内容。

但挂一漏万，修订后的本书仍难以尽善，错误和不妥之处仍在所难免，仍希广大读者不吝指正。

最后，借此修订版出版之机，编者谨向本书第一版广大读者，尤其是对其提出批评建议的读者，向不辞辛劳仔细审阅本书第一版和此次修订版初稿的上海交通大学黄家裕教授致以衷心的感谢。修订过程中，编者引用了水利电力信息研究所编辑出版，由孙嘉平、柳椿生主编的《中国电力工业 1993》一书部分内容，引用了东南大学李乃湖、刘中岳和已故张葛乐老师未公开出版的论文。对这些作者的无私支持，谨致以衷心的感谢。

编者

1995 年 1 月

目 录

修订版前言

第一章 电力系统的基本概念	1
第一节 电力系统概述	1
一、电力系统的形成和发展	1
二、近代电力系统	2
三、电力系统的基本参量和结线图	3
第二节 我国电力工业和电力系统简介	5
一、我国电力工业概况	5
二、我国主要电力系统简介	8
三、我国电力工业的发展前景	12
第三节 电力系统运行应满足的基本要求	17
一、电能生产、输送、消费的特点	17
二、对电力系统运行的基本要求	18
三、单一电力系统的联合	19
第四节 电力系统的结线方式和电压等级	20
一、几种典型结线方式的特点	20
二、不同电压等级的适用范围	21
三、电力系统中性点的运行方式	23
第五节 电力系统工程学科和电力系统分析课程	25
一、电力系统工程学科的范畴	25
二、电力系统分析课程的内容	26
三、电力系统研究工具简介	27
小结	28
第二章 电力系统各元件的特性和数学模型	29
第一节 发电机组的运行特性和数学模型	29
一、发电机稳态运行时的相量图和功角特性	29
二、隐极式发电机组的运行限额和数学模型	31
三、凸极式发电机组的运行限额和数学模型	33
第二节 变压器的参数和数学模型	35
一、双绕组变压器的参数和数学模型	35
二、三绕组变压器的参数和数学模型	37
三、自耦变压器的参数和数学模型	39
第三节 电力线路的参数和数学模型	41
一、电力线路结构简述	41
二、电力线路的阻抗	45
三、电力线路的导纳	52

四、电力线路的数学模型	62
第四节 负荷的运行特性和数学模型	71
一、负荷和负荷曲线	71
二、负荷的静态特性和数学模型	73
第五节 电力网络的数学模型	77
一、标么制及其应用	77
二、等值变压器模型及其应用	84
三、电力网络的数学模型	89
小结	90
第三章 简单电力网络的计算和分析	92
第一节 电力线路和变压器运行状况的计算和分析	92
一、电力线路运行状况的计算	92
二、电力线路运行状况的分析	98
三、变压器运行状况的计算	100
第二节 辐射形和环形网络中的潮流分布	103
一、辐射形网络中的潮流分布	103
二、环形网络中的潮流分布	112
第三节 电力网络的简化方法及其应用	121
一、电力网络的简化方法	121
二、简单电力网络潮流计算的实践	122
第四节 电力网络潮流的调整控制	131
一、调整控制潮流的必要性	132
二、借附加串联加压器控制潮流	134
三、借灵活交流输电装置控制潮流	135
小结	137
第四章 复杂电力系统潮流的计算机算法	139
第一节 电力网络方程	139
一、节点电压方程	139
二、回路电流方程	142
三、节点导纳矩阵的形成和修改	143
四、节点阻抗矩阵的形成和修改	146
第二节 功率方程及其迭代解法	151
一、功率方程和变量、节点的分类	152
二、高斯-塞德尔迭代法	155
三、牛顿-拉夫逊迭代法	156
第三节 牛顿-拉夫逊法潮流计算	158
一、潮流计算时的修正方程式	158
二、潮流计算的基本步骤	163
第四节 P - Q 分解法潮流计算	171
一、潮流计算时的修正方程式	171
二、潮流计算的基本步骤	174
* 第五节 潮流计算中稀疏技术的运用	179

一、稀疏矩阵的存储	179
二、因子表的形成和运用	182
三、节点编号顺序的优化	187
小结	193
第五章 电力系统的有功功率和频率调整	196
第一节 电力系统中有功功率的平衡	196
一、有功功率负荷的变动和调整控制	196
二、有功功率负荷曲线的预计	197
三、有功功率电源和备用容量	198
第二节 电力系统中有功功率的最优分配	199
一、各类电厂的运行特点和合理组合	200
二、最优分配负荷时的目标函数和约束条件	203
三、最优分配负荷时的等耗量微增率准则	206
四、等耗量微增率准则的推广应用	211
五、网络损耗的修正	216
第三节 电力系统的频率调整	223
一、调整频率的必要性	223
二、自动调频系统及其动态特性	224
三、频率的一次调整	226
四、频率的二次调整	231
五、调峰调整厂的选择	235
六、关于自动负荷-频率控制	237
小结	241
第六章 电力系统的无功功率和电压调整	243
第一节 电力系统中无功功率的平衡	243
一、无功功率负荷和无功功率损耗	243
二、无功功率电源	244
三、无功功率的平衡	247
第二节 电力系统中无功功率的最优分布	250
一、无功功率电源的最优分布	251
二、无功功率负荷的最优补偿	255
第三节 电力系统的电压调整——电压管理和借发电机、变压器调压	258
一、调整电压的必要性	258
二、电压波动和电压管理	261
三、借改变发电机端电压调压	264
四、借改变变压器变比调压	265
第四节 电力系统的电压调整——借补偿设备调压和组合调压	268
一、借补偿设备调压	268
二、几种调压措施的比较	273
三、几种调压措施的组合——组合调压	274
小结	284
参考文献	286

第一章 电力系统的基本概念

本章介绍有关电力系统的基本知识和我国电力工业、电力系统的基本情况。

第一节 电力系统概述

一、电力系统的形成和发展

1831年法拉第发现了电磁感应定律。在此基础上,很快出现了原始的交流发电机、直流发电机和直流电动机。由于当时发电机发出的电能仅用于电化学工业和电弧灯,而电动机所需的电能又来自蓄电池,电机制造和电力输送技术的发展最初集中于直流电。原始的电力线路使用的就是100~400V 低压直流电。由于输电电压低,输送的距离不可能远,输送的功率也不可能大。

第一次高压输电出现于1882年。法国人M·德波列茨将位于弥斯巴赫煤矿的蒸汽机发出的电能输送到57km外的慕巴黑,并用以驱动水泵。当时他采用的发电机如图1-1所示,采用的电压为直流1500~2000V,输送的功率约1.5kW。这个输电系统虽规模很小,却可认为是世界上第一个电力系统,因它包含了电力系统的各个重要组成部分,即发电、输电、用电设备。

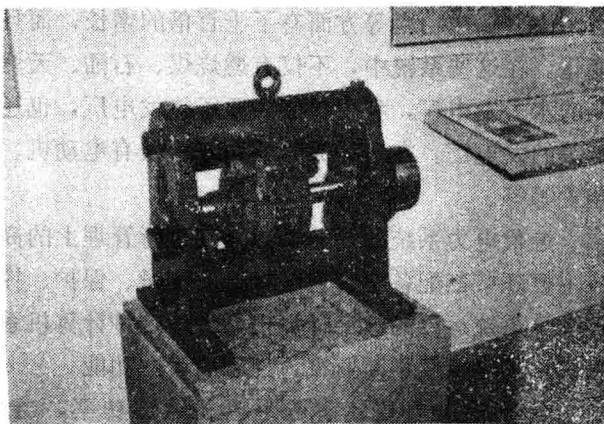


图1-1 第一个直流输电系统中使用的发电机^❶

生产的发展对输送功率和输送距离提出了进一步要求,以致直流输电已不能适应。于是,1885年在制成变压器的基础上,实现了单相交流输电;1891年在制成三相变压器和三相异步电动机的基础上,实现了三相交流输电。

1891年在法兰克福举行的国际电工技术展览会上,在德国人奥斯卡·冯·密勒主持下展出的输电系统,奠定了近代输电技术的基础。这一系统起自劳芬镇,止于法兰克福,全长178km。设在劳芬镇的水轮发电机组,如图1-2所示,其功率为230kVA,电压为95V,转速为150r/min。升压变压器将电压升高至25000V,电功率经直径为4mm的铜线输送至法兰克福。在法兰克福,用两台降压变压器将电压降至112V。其中一台变压器供电给白炽

❶ 摄自慕尼黑德意志博物馆。

灯，另一台给异步电动机，电动机又驱动一台功率为 75kW 的水泵。显然，这已是近代电力系统的雏形，它的建成标志了电力系统的发展取得了重大突破。

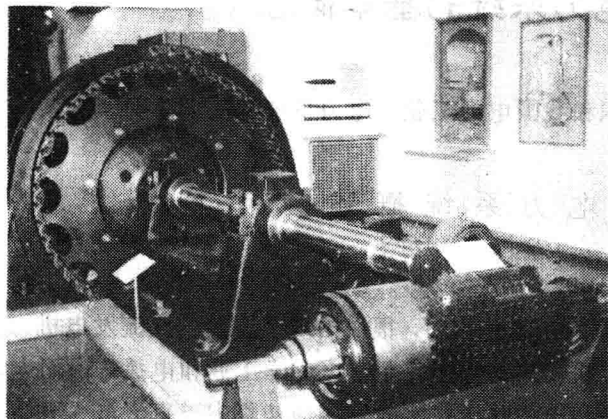


图 1-2 第一个三相交流输电系统中使用的发电机^①

嗣后，三相交流制的优越性很快显示出来，使运用三相交流制的发电厂迅速发展，而直流制不久便被淘汰。再稍后，汽轮发电机组又取代了以蒸汽机为原动机的发电机组，发电厂之间出现了并列运行，输电电压、输送距离和输送功率不断增大，更大规模的电力系统不断涌现。仅数十年，在一些国家中甚至出现了全国性和跨国性的电力系统。

二、近代电力系统

与 100 余年前电力系统的雏形相比，近代电力系统不仅在输电电压、输

送距离、输送功率等方面有了千百倍的增长，而且在电源构成、负荷成分等方面也有很大变化。在这些系统中，不仅有燃烧煤、石油、天然气等利用化学能的火力发电厂，利用水能的水力发电厂，利用核能的原子能发电厂，也还有利用太阳能、风能、潮汐能、地下热能等的发电厂。在负荷成分方面，不仅有电动机、电灯，还有相当比重的电热电炉、整流装置等等。

近代电力系统的另一特点是其运行管理上的高度自动化。如今，不仅组成电力系统的各主要环节都配备有日益数字化的测量、保护、控制装置，而且不少电力系统还配有用以管理全系统运行的数字计算机系统。这种计算机系统，称为能量管理系统。它与电力系统联机，具有持续不断监视、控制后者的功能。

至于输电电压、输送距离和输送功率，当前世界上输电线路的输电电压已超过 1000kV，输送距离已超过 1000km，输送功率已超过 5000MW。而个别跨国电力系统中发电设备的总容量则已超过 400GW。

值得一提的是，为彻底解决同步发电机并列运行的稳定性问题，进一步提高输送能力，直流输电又重新被起用。但今日的直流输电，输电电压已超过 $\pm 600\text{kV}$ ，输送距离已超过 1000km，输送功率已超过 3000MW，与百余年前德波列茨的试验相比，已有霄壤之别。

本书及其姊妹篇《电力系统暂态分析》中将涉及的电力系统就是这种近代电力系统。这种电力系统中各主要环节相互间的联系如图 1-3 所示。其中，锅炉和反应堆分别将化学能和核能转化为热能，汽轮机又将后者转化为机械能，水轮机则直接将水能转化为机械能。发电机将机械能转化为电能，而变压器和电力线路则变换、输送、分配电能，电动机、电热电炉、电灯等消耗电能。在这些设备中，电能又分别转化为机械能、热能、光能，等等。

^① 摄自慕尼黑德意志博物馆。

由此可见，广义的电力系统应该是由锅炉、反应堆、汽轮机、水轮机、发电机等生产电能的设备，变压器、电力线路等变换、输送、分配电能的设备，电动机、电热电炉、电灯等各种消耗电能的设备，以及未示于图 1-3 中的测量、保护、控制装置乃至能量管理系统所组成的统一整体，是一个十分庞大而复杂的研究对象。

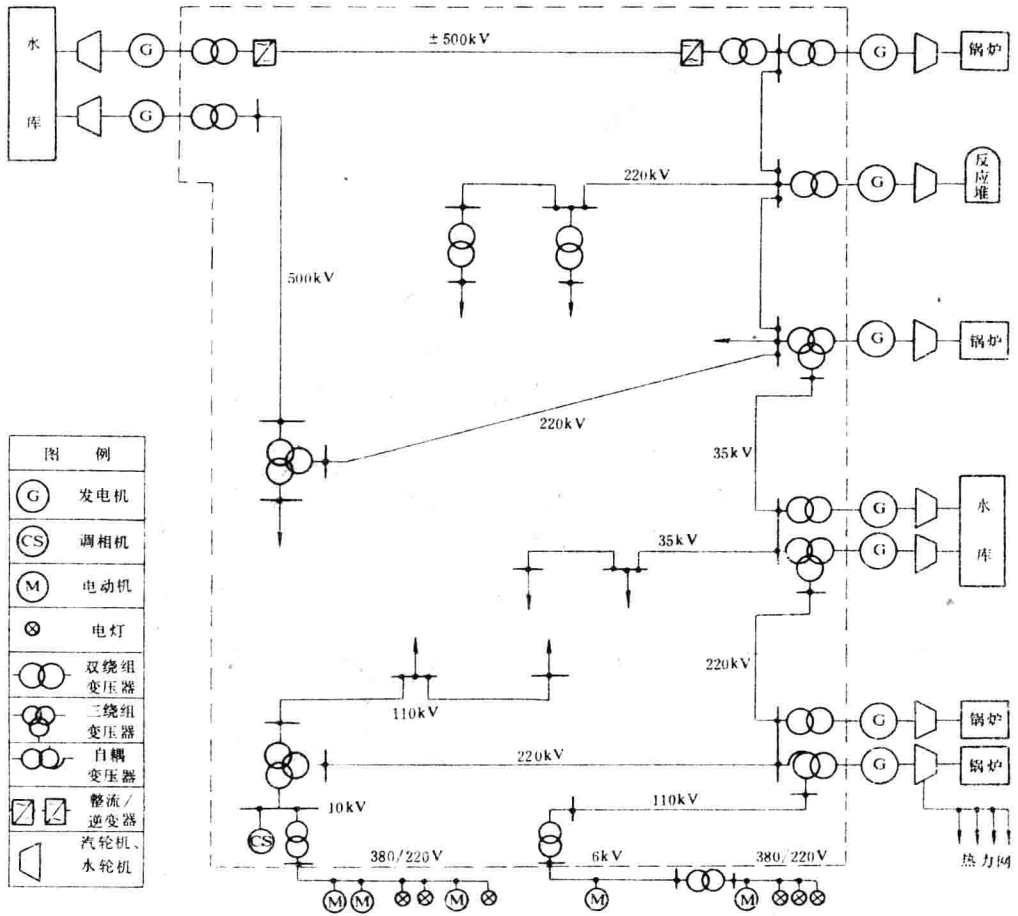


图 1-3 电力系统和电力网络示意图

电力系统中，由变压器、电力线路等变换、输送、分配电能设备所组成的部分常称电力网络，即图 1-3 中虚线所框出部分。

三、电力系统的基本参量和结线图

对一个电力系统的初步认识往往应先了解其基本参量和结线图。描述一个电力系统的基本参量有总装机容量、年发电量、最大负荷、额定频率和最高电压等级，结线图则有地理结线图和电气结线图。分别简述如下：

(1) 总装机容量。电力系统的总装机容量指该系统中实际安装的发电机组额定有功功率的总和，以千瓦 (kW)、兆瓦 (MW)、吉瓦 (GW) 计。例如，1992 年底我国华东电力

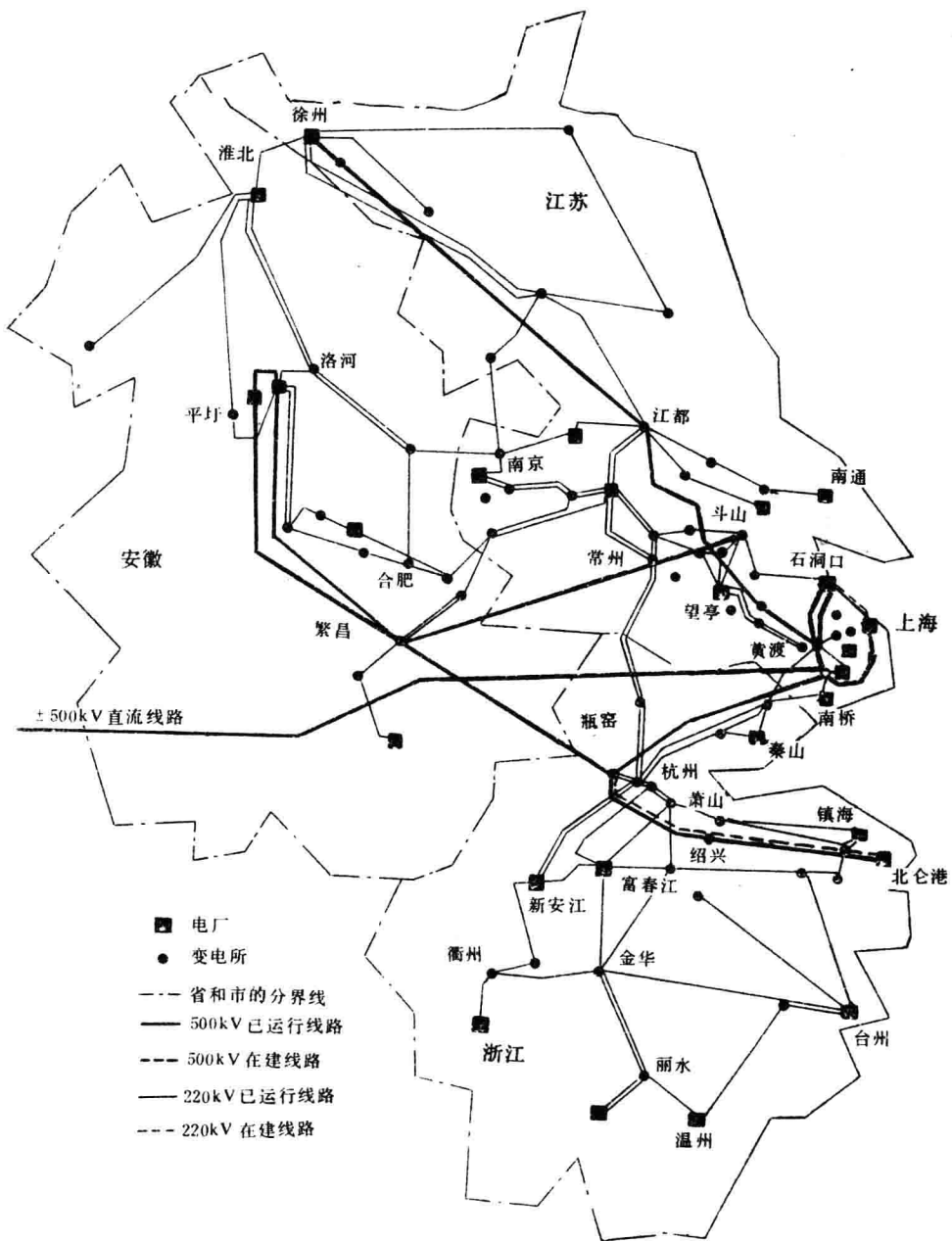


图 1-4 华东电力系统地理结线图

系统的总装机容量为 26703.6MW。

(2) 年发电量。电力系统的年发电量指该系统中所有发电机组全年实际发出电能的总和，以兆瓦·时 (MW·h)、吉瓦·时 (GW·h)、太瓦·时 (TW·h) 计。例如，1992 年

华东电力系统的年发电量为 $133.086\text{TW}\cdot\text{h}$ 。

(3) 最大负荷。最大负荷一般指规定时间，如一天、一月或一年内，电力系统总有功率负荷的最大值，以千瓦 (kW)、兆瓦 (MW)、吉瓦 (GW) 计。

(4) 额定频率。按国家标准规定，我国所有交流电力系统的额定频率均为 50Hz。国外则有额定频率为 60Hz 或 25Hz 的电力系统。

(5) 最高电压等级。如图 1-3 所示，同一电力系统中的电力线路往往有几种不同电压等级。所谓某电力系统的最高电压等级，是指该系统中最高电压等级电力线路的额定电压，以千伏 (kV) 计。例如，图 1-3 所示系统的最高电压等级为 500kV。

(6) 地理结线图。电力系统的地理结线图主要显示该系统中发电厂、变电所的地理位置，电力线路的路径，以及它们相互间的联结。因此，由地理结线图可获得对该系统的宏观印象。但由于地理结线图上难以表示各主要电机、电器间的联系，对该系统的进一步了解，还需阅读其电气结线图。华东电力系统的地理结线图如图 1-4 所示。

(7) 电气结线图。电力系统的电气结线图主要显示该系统中发电机、变压器、母线、断路器、电力线路等主要电机、电器、线路之间的电气结线。因此，由电气结线图可获得对该系统的更细致了解。但由于电气结线图上难以反映各发电厂、变电所、电力线路的相对位置，阅读电气结线图时，又常需参阅地理结线图。图 1-3 中，表示发电机、变压器、母线、电力线路相互联结的部分实际上就是一种简化的电气结线图。

第二节 我国电力工业和电力系统简介

一、我国电力工业概况

我国的电力工业起步很早，但发展缓慢。早在 1882 年德波列茨进行第一次高压输电试验时，在上海就已出现了我国第一个发电厂。但直至 1949 年，全国的总装机容量仅达 1850MW ，年发电量仅达 $4.3\text{TW}\cdot\text{h}$ 。嗣后，经三十年努力，至 1980 年底，全国的总装机容量增加为 65869.1MW ，年发电量增加为 $300.6\text{TW}\cdot\text{h}$ ，分别上升为世界第八、第六位。

80 年代以来，全国总装机容量和年发电量的增长情况见表 1-1，相应的国民生产总值、年发电量和一次能源消耗量的增长则如图 1-5 所示。这些图表中的数字表明，近年来，我国发电设备装机容量增长很快，每年约 15000MW ，已

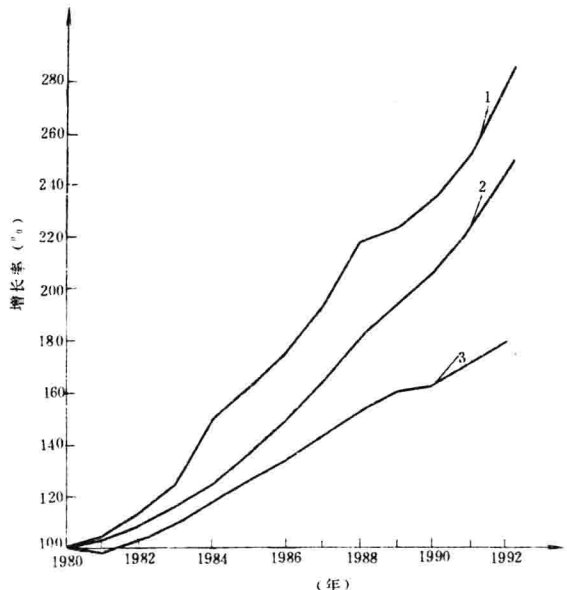


图 1-5 国民生产总值、年发电量和一次能源消耗量的增长曲线

1—国民生产总值；2—年发电量；3—一次能源消耗量

居世界首位；1992 年底总装机容量 166532.4MW、年发电量 754.2TW·h，均已进一步上升为世界第四位。

表 1-1 1980~1992 年全国总装机容量和年发电量

年 份	总 装 机 容 量 (MW)		年 发 电 量 (TW·h)	
	总 量	水电所占百分比 (%)	总 量	水电所占百分比 (%)
1980	65869.1	30.8	300.6	19.4
1981	69132.6	31.7	309.3	21.2
1982	72359.6	31.7	327.7	22.7
1983	76444.9	31.6	351.4	24.6
1984	80116.9	31.9	377.0	23.0
1985	87053.2	30.3	410.7	22.5
1986	93818.5	29.4	449.6	21.0
1987	102897.0	29.3	497.3	20.2
1988	115497.1	28.3	545.1	20.0
1989	126638.6	27.0	584.7	20.2
1990	137890.0	26.1	621.3	20.2
1991	151473.1	25.0	677.5	18.4
1992	166532.4	24.4	754.2	17.4

但是，由这些图表又可见，整个 80 年代，我国年发电量的增长率约为 7.5%，国民生产总值的增长率约为 9.0%，在生产设备得到根本性改善以前，前者之小于后者表明电力供应的不足。

由于从 70 年代起我国就开始缺电，这些数字说明，二十余年来，我国的电力匮乏问题有增无减。还应指出，我国不仅年发电量的增长率低于国民生产总值的增长率，而且变电、输电、配电设备容量的增长率又低于发电设备容量的增长率，使原已不足的发电设备还无法充分发挥效益，出现了电力发展的“瓶颈”。

可喜的是，在同一时期，我国年发电量的增长率高于一次能源消耗量的增长率。这表明，化学能、水能等一次能源转化为电能后再被利用的比重逐年提高。也就是说，我国国民经济电气化的程度正在不断提高。正由于这种提高和各种节能措施的采用，

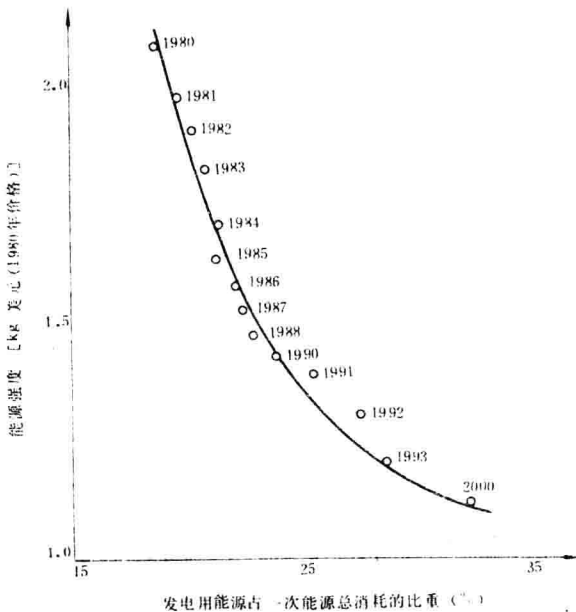


图 1-6 能源强度与发电用能源占一次能源总消耗比重的关系

使能源强度（即单位产值所消耗的能源，以每美元产值消耗的煤重 kg/美元为单位）不断减少，如图 1-6 所示。

附带指出，随着市场经济的发展和人民生活水准的不断提高，近年来，我国电力负荷的结构也在不断变化。表 1-2 给出了 1987~1992 年间，各类负荷在全社会总消费中所占比重的变化。由表可见，重工业用电的比重在持续下降，而市政、商业、城乡居民用电的比重则在不断上升。如再注意到全社会总消费电能绝对值的增大，则这些非工农业生产用电的增长就更加明显。

表 1-2 1987~1992 年全国各类负荷的比重

年 份	全社会总消费 (TW·h)	重工业 (%)	轻工业 (%)	农 业 (%)	邮电、交通 (%)	市政、商业 (%)	城乡居民 (%)
1987	490.27	64.5	16.5	7.1	1.6	4.8	5.5
1988	535.87	64.1	16.2	7.0	1.6	5.1	6.0
1989	576.20	64.0	15.8	7.0	1.7	5.1	6.4
1990	612.60	62.6	16.1	6.8	1.7	5.3	7.5
1991	669.68	61.8	16.0	6.9	1.7	5.6	7.9
1992	745.54	61.2	15.9	6.8	1.8	5.8	8.5

鉴于如上所述：我国发电能力的增长长期来低于国民生产总值的增长，以致缺电问题日益严重；变电、输电能力的增长不能与发电能力的增长相协调，以致出现“瓶颈”阻塞。再注意到我国一次能源资源的特点：煤的蕴藏量较大，而石油和天然气则不多；水力资源很丰富，但远未充分开发利用。因此，今后我国发展电力工业的方针有以下几方面。

1. 继续发展燃煤火电厂，并提高这类电厂的效率

由于我国石油、天然气等资源并不丰富，今后仍以发展燃煤火电厂为主。与此同时，还应提高这类电厂的效率。为此，应更多选用 200、300、600MW 大容量发电机组；建设一定数量可同时生产电能和热能的热电厂；努力改造效率低下的旧电厂；新建的电厂应尽可能靠近煤矿、港口或负荷中心，以减少对交通运输和电力输送的压力。

2. 加速水力资源的勘察和水电厂建设

我国水力资源十分丰富，但由于水电厂建设投资大、周期长，至今只有 10%~15% 被用以发电。而且，在全国总装机容量和年发电量中，水电比重近年来还出现逐步下降的趋势。这种不能很好利用既廉价又洁净水能的现状必须改变。为此，应加速水力资源的勘察和水电厂建设，其中包括兴建举世瞩目的三峡水利枢纽。

3. 加紧建设高压输电线路和电力系统

为充分发挥电力系统的效益，迫切需要改变输电、变电设备容量的增长滞后于发电设备容量增长的现状。为此，需加紧建设现有电力系统中 500kV 电压的骨干线路，以加强这些系统的内在联系；加紧建设从内地火力和水力发电基地向沿海各负荷中心输电的 500kV 输电线路。

4. 及早掌握原子能发电技术, 以创造条件建设更多原子能发电厂。

由于东北三省、华东地区和广东省既缺乏火力发电, 又缺乏水力发电资源, 而这些地区又是负荷密集地区, 在这些地区建立原子能发电厂势在必行。为此, 应在建设浙江秦山、广东大亚湾原子能电厂经验的基础上, 在这些地区建设更多这类电厂。

5. 因地制宜, 利用其它再生能源发电

我国国土辽阔, 不同地区往往有不同的再生能源可供利用, 如小容量水能、太阳能、风能、潮汐能、地下热能等等。其中, 小型水力发电厂的建设和在国际上已享有盛名, 而大规模利用太阳能发电则尚未见报道。在草原、海岛上宜于利用风力; 沿海一带可利用潮汐; 利用地下热能发电, 在西藏已有试验性电厂。要言之, 应尽可能利用这些能源发电, 以补常规方式发电之不足。

二、我国主要电力系统简介

随电力工业的发展, 我国的电力系统也已有长足发展。至今, 已建成的跨省电力系统有五个, 即华东系统、东北系统、华中系统、华北系统和西北系统。另外, 覆盖四川、贵州、云南三省的西南系统的省际间联系尚有待加强; 而覆盖广东、广西两省的华南系统则不仅已建立了强有力的省际联系, 而且这种联系已延伸至贵州、云南两省。独立的省属电力系统尚有山东、福建、海南和台湾系统。此外, 跨省系统之间也已出现了互联, 如华中、华东系统之间经 $\pm 500\text{kV}$ 直流输电线路的互联。

以上这些电力系统的覆盖范围如图 1-7 所示, 它们在 1992 年底的总装机容量和年发电量则示于表 1-3。华东系统的地理结线图已示于图 1-4, 东北、华中、华北、西北、四川—贵州—云南、广东—广西系统的地理结线图则分别示于图 1-8~图 1-13。

以下, 分别对四个总装机容量已超过 20000MW 的跨省电力系统作一简介。

1. 华东电力系统

华东电力系统是现阶段我国总装机容量最大的电力系统, 见图 1-4。该系统中, 500kV 和 220kV 线路都较多。由 500kV 线路构成的系统骨架分别联结徐州、淮南两个地区性原煤

表 1-3 1992 年底各电力系统的总装机容量和年发电量

系统名称	总装机容量 (MW)		年发电量 (TW·h)	
	总量	水电所占百分比 (%)	总量	水电所占百分比 (%)
华东系统	26703.6	9.6	133.086	5.0
东北系统	24585.4	17.6	112.353	6.8
华中系统	23509.1	36.3	112.111	31.2
华北系统	21522.9	5.3	108.078	1.2
西北系统	11105.5	43.3	49.533	30.9
四川系统	7716.0	33.6	35.064	32.4
贵州系统	2390.3	40.8	11.601	34.5
云南系统	3084.8	56.1	12.967	52.8
广东系统	10093.2	36.3	43.875	17.9

续表 1-3

系统名称	总装机容量 (MW)		年发电量 (TW·h)	
	总量	水电所占百分比 (%)	总量	水电所占百分比 (%)
广西系统	3202.6	58.3	13.648	46.9
山东系统	9617.0	0.5	56.329	0.03
福建系统	3418.6	51.7	15.997	49.2
海南系统	642.7	31.7	1.718	35.4



图 1-7 各电力系统的覆盖范围

基地的火电厂和多个沿海港口火电厂，向上海及长江三角洲负荷中心供电。鉴于华东系统所在地区一次能源资源并不富足，而该地区的工农业生产又都很发达，必须从地区外输入电能或其它能源。为此，建设了我国第一条 $\pm 500\text{kV}$ 直流输电线路，由葛洲坝水电厂向上海南桥供电；还建设了我国第一个自行设计和制造设备的浙江秦山原子能发电厂，这也是今后发展的趋势。

2. 东北电力系统

东北电力系统是我国历史最悠久的跨省电力系统，见图 1-8。该系统目前仍主要由 220kV 线路组成。 500kV 线路则恰如一南北向通道，贯穿辽宁、吉林、黑龙江三省，联结南起大连、北至哈尔滨的大城市和工业基地，并西联内蒙古的火力发电基地。此外，哈尔滨地区则还由位于黑龙江东部的火电厂供电。由于东北三省已经过多年开发，一次能源资源已出现短缺，今后除继续开发内蒙古的火力发电基地外，还要从其它地区输入电能或利

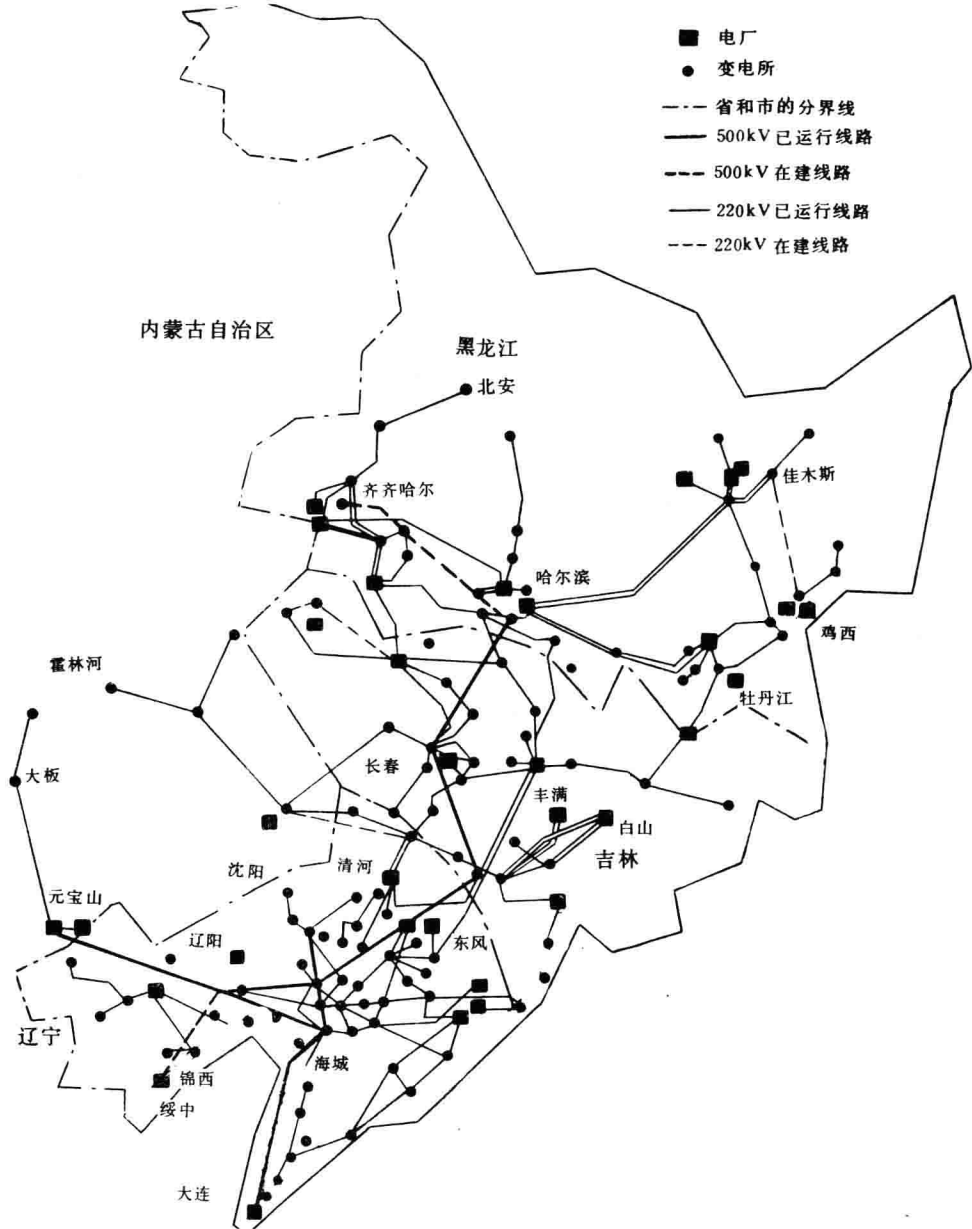


图 1-8 东北电力系统地理接线图

用其它能源，如建设原子能发电厂等。

3. 华中电力系统

华中电力系统中 500kV 线路较多，已初步形成该系统的骨架，即以葛洲坝、武汉、双河的三角形网络为中心，北上姚孟、郑州，与河南北部的火电厂群相联；南下常德、株州，并向西延伸，与湖南西部的水电厂相联，逐步形成另一个 500kV 环网，见图 1-9。该系统所