

抽水蓄能电站

陆佑楣 潘家铮 主编

水利电力出版社

943177

TV743
7524

TV743
7524

抽水蓄能电站

Pumped Storage Plants

陆佑楣 潘家铮 主编



水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 简 介

修建抽水蓄能电站对电网的调峰填谷作用和由此所产生的巨大社会效益,已被越来越多的国家所重视。为适应我国今后将建设大批抽水蓄能电站的需要,在能源部陆佑楣副部长和潘家铮总工程师的直接主持下,组织了全国20多位专家,历经3年的时间编写了本书。

全书共有14章,系统地论述了抽水蓄能电站的作用和特点;站址选择,动静态效益分析,装机容量等参数的优化;水泵水轮机的性能、结构和选择设计;电动发电机的特性、结构和各种起动方式;电气和控制系统的特性;电站枢纽布置;上、下水库的设计和防渗措施;双向水流复杂水道系统的水力学和结构问题;地下厂房的结构和布置;多种工况转变过程的特性和水力—机械过渡过程的计算;工程地质勘测的特殊问题;社会经济评价和财务分析;电站的运行管理等。最后,还列入了国内外14个抽水蓄能电站的工程实例。

本书内容系统、丰富,技术信息量大,论述清楚,详略有致;资料引用新而翔实,文图表并茂,便于查阅,实用性强。本书是我国在抽水蓄能电站方面首次出版的一部大型科技专著。

本书适于从事抽水蓄能电站规划、勘测、设计、施工、管理和科研的工程技术人员阅读使用,同时也可供高等院校水利水电专业师生学习参考。

抽水蓄能电站

陆佑楣 潘家铮 主编

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 49.5印张 1133千字 1插页

1992年4月第一版 1992年4月北京第一次印刷

印数 0001—2500册

ISBN7-120-01498-6/TV·539

定价4.85元

主 编 陆佑楣 潘家铮
 副主编 沈祖诒 邴凤山
 主 审 梁瑞驹 左东启

章 序	编 写	统 稿	审 稿
前 言			
第一章	谈为雄 刘启钊 邴凤山	谈为雄	梁瑞驹
第二章	周之豪 李福生 陈守伦	周之豪	张德旺
第三章	梅祖彦 瞿纶富	支培法	单 鹰
第四章	邱景安 尹延凯 梁见诚	尹延凯	陆维勋
第五章	邱景安 梁见诚	尹延凯	陆维勋
第六章	刘启钊 肖贡元 速宝玉	速宝玉	左东启
第七章	王树人 谷兆祺	刘启钊	左东启
第八章	谷兆祺 肖贡元	刘启钊	韩祖恒
第九章	谷兆祺	刘启钊	韩祖恒
第十章	梅祖彦 刘德有	沈祖诒	左东启
第十一章	黄大明	黄大明	左东启
第十二章	李福生	周之豪	张德旺
第十三章	张德旺	沈祖诒	梁瑞驹
第十四章	沈祖诒 张德旺 邴凤山 肖贡元 邱景安 孔令兵 李庆元	沈祖诒	梁瑞驹

11

序

——为新兴的我国抽水蓄能工程而作

抽水蓄能电站的建设已有近百年历史，但在近三四十年才出现具有近代工程意义的大容量抽水蓄能电站，这是现代电网发展的必然产物。电网愈大，调峰填谷问题、提高水电站利用率和减少系统能耗问题以及提高供电质量和安全可靠度问题都愈趋重要，大容量抽水蓄能电站正好可以起到调峰填谷作用、提高火（核）水电站设备利用率和担负调频调相旋转备用以改善电网供电质量并提高电网的灵活性和可靠性，从而成为电网中不可缺少的组成部分。初步统计，目前世界上建成的抽水蓄能电站已达270余座，容量达90000MW。国外电网运行实践及室内模拟试验证明，电网的最佳电源结构是：一般电网要保持水电容量比重不小于20%，在水电资源缺乏地区则需建设容量比重为10%~15%的抽水蓄能电站，才有利于电网的安全经济运行。

我国水电资源丰富，居世界首位，但不仅开发程度很低，而且资源分布集中在西南、西北地区，华北、华东、广东、东北的水电资源相对缺乏，而这些地区都是我国工农业最发达地区。随着经济的进一步发展，特别是生活用电水平的提高，电力负荷的发展将很快，峰谷差不断增大，核电的投入将使调峰填谷问题更为突出，抽水蓄能电站的建设也自然提到议事日程。20多年来，我国已开始进行抽水蓄能电站规划设计的研究和抽水蓄能点子的调查。60年代末期至70年代中，为解决京津地区的调峰问题，利用已建水电站增容或改换机组，修建了岗南、密云和潘家口三座混合式抽水蓄能电站。80年代以来，在天津、华东、广东等地区规划设计了十三陵、天荒坪、广州以及羊卓雍湖等大型抽水蓄能电站，并已开工或筹建。规划设计中的抽水蓄能电站有张河湾、西湾、太河、响水涧、三间房、西龙池、青石岭、雾灵山、琅琊山、泰山、劳山等等，分布于辽宁、河北、安徽、山东等各省区。西南、西北、中南地区的水能资源虽较丰富，但因受各种条件制约，水库库容仍嫌不足，调节性能不够理想（中南区尤甚），所以从长远看也有研究开发抽水蓄能之需要。可以预期，在今后10年，尤其是下世纪初，我国的抽水蓄能建设不仅方兴未艾，而且将逐渐进入高峰期。

综上所述，我国抽水蓄能工程建设的特点一是起步较迟，二是任务艰巨，但更重要的是进展很快。70年代我国还只能进行中小抽水蓄能电站的试点，80年代就着手兴建容量为1200MW及800MW的广州及十三陵工程，不久将兴建的天荒坪工程总容量达1800MW，水头达600m以上，已步入国际水平。与这个形势相适应，我国对抽水蓄能技术的研究工作也取得很大进展，高水头大容量抽水蓄能关键技术已列为国家重点攻关课题。我们深信在不太长的时间里我国就能赶上还在迅速提高中的国际水平。为了配合这一形势，我们已编印过一些介绍国外抽水蓄能电站技术和经验的书籍，现在能源部科技司和中国电力企业联合会会同河海大学组织有关专家编写了《抽水蓄能电站》一书，这是一本较完整的介绍抽水

蓄能技术的专著。书中不仅认真总结国外经验，也根据自己的设计、科研和教学经验对这项技术从规划选点、设备、水力计算、结构设计直到运行管理都作了深入浅出的论述，体系合理、专业全面、内容丰富、资料新颖、图文并茂、可读性好。在当前我国抽水蓄能技术知识尚未普及的情况下，出版这样一本书尤为需要。当然，由于国内实践经验不够，许多内容还有待今后充实提高，但我深信本书会对广大读者有所启发和裨益，并真诚希望本书能对促进我国抽水蓄能电站的科研和设计工作的发展有所帮助，预祝我国抽水蓄能电站能取得更快更大的发展，尽早建成具有自己特色、赶上国际水平的中国抽水蓄能技术体系。是为序。

潘家铮

1991年4月13日于北京

前 言

随着我国国民经济的飞跃发展，全国各地电网容量不断增大，目前东北、华北、华中和华东四大电网装机都接近或超过20000MW，解决电网的调峰容量已成为当前电力生产中的紧迫问题，开发大型抽水蓄能电站是缓解这一问题的有效途径。近年来，一大批300MW与600MW的大型火电机组和900MW的核电机组相继兴建并投入运行，保证这些大机组带基本稳定负荷和安全经济运行，已成为我国电力生产中另一迫在眉捷的问题，开发抽水蓄能电站也是解决这一问题的有效措施。

现阶段我国电网主要利用中型火电机组和大中型水电机组承担峰荷。由于结构疲劳和燃料消耗率的限制，火电机组（尤其是核电机组）难以适应负荷的大幅度变化和频繁的启动。开发抽水蓄能电站能够改善电网运行结构，提高电网整体安全经济性，这是工业发达国家几十年经验所证明的事实。

抽水蓄能技术虽有近百年历史，但具有近代工程意义的设施则是在近三四十年才出现的。大规模抽水蓄能电站的建设是现代电网的必然产物，它在电力系统中起调峰填谷作用，与火（核）电、径流式水电站配合运行，能节约系统能耗，提高火（核）电设备利用率，改善电网供电和环境质量；增加径流式电站电能的有效利用程度，是季节性电能利用的大户；还可在系统中担负调频、调相、负荷调整、旋转备用，提高电网运行的灵活性和可靠性。

在我国，华北电网以火电为主，可担任调峰的水电容量只占2%，再无可开发的常规水电资源；华东和东北电网，可调峰的水电容量虽多些，也只占10%左右，可开发的水电资源甚少；华中电网也是如此。为解决电网运行问题，在这些电网内大力开发和建设一批抽水蓄能电站是势在必行的。根据国家计委和能源部的“八五”和“九五”期间水电发展规划，应在上述电网中兴建足够容量的抽水蓄能电站。此外，在水能资源虽然丰富，但以缺乏调节性能的径流式水电站为主的地区，也应规划和建设一批日调节或季调节的抽水蓄能电站。

根据国外的经验和一些国家电力系统模拟运行结果，电力系统电源结构以水电容量占总容量的20%左右为佳；在火（核）电为主的电力系统中，则应兴建占总容量10%~15%的抽水蓄能电站。目前日本、美国的电力系统，抽水蓄能电站容量已达总容量的10%，今后还可能加大。

瑞士苏黎世的奈特拉电站建于1882年，是世界上最早的抽水蓄能电站，该站抽水扬程153m，功率515kW，是一座季节型抽水蓄能电站。1908年意大利在乌比昂内山建成了第一座抽水蓄能电站；1912年建成了维罗尼抽水蓄能电站，它利用两个天然湖之间落差156m，装机容量7.6MW。1925年德国建成施瓦岑巴赫抽水蓄能电站，装机容量为40MW。1931年日本在小口川第三电站加装1台3.2MW水泵，形成抽水蓄能电站。1938年德国修建了黑湖

抽水蓄能电站。到40年代中期,全世界已有50余座抽水蓄能电站投入运行。60年代末,工业发达国家大力发展抽水蓄能电站。据不完全统计,各年抽水蓄能电站装机容量如下:1950年为1600MW,1960年为3500MW,1970年为16000MW,1980年为46000MW,1990年为90000MW。截至1988年底,据世界38个国家不完全统计,已建成和部分建成的抽水蓄能电站有270座,总装机容量达87000MW,正在施工的有26座,拟建的有65座,几年内将有40000MW容量投入运行。至1988年底,美国有抽水蓄能电站总容量约20000MW,日本有17000MW,意大利有8600MW,法国有5300MW,西班牙有5100MW,德国有3800MW。

目前,世界上容量超过1000MW已建成和部分建成的抽水蓄能电站有32座,其中日本有10座,美国有7座,我国台湾有1座。近年可竣工投产的还有4座,包括我国的广州抽水蓄能电站。当前,规模最大的为美国巴斯康蒂抽水蓄能电站,总装机容量达2100MW;水头最高的为意大利的圣菲拉诺电站,水头达1417m;单级混流可逆式水泵水轮机最高抽水扬程已达701m,安装在保加利亚的茶拉电站上。美国腊孔山电站的水泵水轮机效率最高,发电工况最高效率为93.5%,水泵工况最高效率为92.5%。

我国抽水蓄能电站的研究始于70年代初,当时曾对100~200m水头段的水泵水轮机转轮进行试验研究,对高水头水泵水轮机也做过一些研究工作。在抽水蓄能电站建设方面,60年代初在河北省岗南水电站安装了1台11MW的抽水蓄能机组;70年代在密云水电站安装了2台11MW的抽水蓄能机组;90年代在河北潘家口水电站安装3台90MW抽水蓄能机组;在台湾建成了装机1000MW的明湖抽水蓄能电站。正在施工的有广州抽水蓄能电站(水头510m,装机4×300MW)、北京十三陵抽水蓄能电站(水头430m,装机4×200MW)、西藏羊卓雍湖抽水蓄能电站(水头841.55m,装机4×22.5MW)和浙江天荒坪抽水蓄能电站(水头510m,装机6×300MW)。此外,将开工和正在规划设计的有:黑龙江的三间房电站(水头296m,装机900MW)、五常电站(水头701m,装机900MW)、荒沟电站(水头354m,装机约1000MW);辽宁的青石岭电站(水头440m,装机2000MW)、步云山电站(水头305m,装机1050MW)、蒲石河电站(水头337m,装机1940MW);河北的雾灵山电站(水头1152m,装机2000MW)、张河湾电站(水头348m,装机1000MW);山西的坪上电站(水头185m,装机400MW)、西龙池电站(水头819m,装机1000MW);天津的桃花寺电站(水头172m,装机500MW);山东的泰安电站(水头216m,装机600MW);安徽的琅琊山电站(水头130m,装机400MW)、响洪甸电站(水头65m,装机80MW);江苏的青石山电站(水头101m,装机300MW)、西湾电站(水头57m,装机150MW)和广州抽水蓄能电站二期(装机1200MW)。

为了有计划地开发我国抽水蓄能资源,华北、东北和华东电网均已进行了普查工作。华北电管局、能源部北京勘测设计院等单位在华北地区进行普查,选出60多处抽水蓄能资源点,在此基础上又详查了10个点。这10个点中除上述的雾灵山、张河湾,西龙池、桃花寺等外,尚有板桥峪(水头390m,装机1000MW)、郭家湾(水头660m,装机1000MW)、汾河二库(水头447.5m,装机800MW)、岱海(水头72.77m,装机100MW),王快(水头173m,装机210MW)和朱庄(水头160m,装机200MW)等。东北电管局等单位对辽宁半岛抽水蓄能资源进行了普查。先在1/100000的地图上初选30个点,其中水头在160~200m的有3个,200~300m的有14个,300~400m的有9个,400m以上的有4个。以后,

又在1/10000的地图上进行筛选确定了水头在300m以上、装机在1000MW的站点11个，实地考察后认为有7个站点适宜建抽水蓄能电站。它们是：青石岭（水头440m，装机2000MW）、永陵（水头492m，装机1500MW）、夏家堡（水头325m，装机1800MW）、观音阁（水头628m，装机500MW）、太平湾（水头414m，装机1550MW）、花尔楼（水头539m，装机2000MW）和步云山（水头305m，装机1050MW）。华东电管局在山东、苏南、安徽、浙江、河南等地区亦作了普查。

在我国，抽水蓄能电站的建设尚处在起步阶段，工程技术储备较少。在技术起点低的情况下，要开展大规模的抽水蓄能电站建设，应做好各方面的准备，其中包括适度的舆论准备。能源部领导陆佑楣和潘家铮同志多次指示，在建设抽水蓄能电站的同时，还要进行抽水蓄能电站的知识普及和宣传，广泛开展抽水蓄能电站工程技术的科学研究工作，在总结国内外规划设计技术经验基础上，组织编写一部专著。据此，能源部组织众多专家编写了本书。

本书是一部工程科技专著，以有关领导，决策人员，规划、设计、施工和管理部门的技术人员为主要对象，也可供科研部门和高等学校使用。

本书共分14章，全面系统地介绍抽水蓄能电站的作用和特点；站址选择，动静态效益分析，装机容量等参数优化；水泵水轮机性能、结构和选择设计；电动发电机特性、结构和各种起动方式；电气和控制系统的特性；电站枢纽布置；水位变化大而频繁情况时，上、下水库设计和防渗措施；双向水流的复杂水道系统水力学和结构问题；地下厂房的结构和布置；多种工况转换过程特性和水力—机械过渡过程计算；工程地质勘测的特殊问题；社会经济评价和财务分析；电站运行管理等各方面内容。最后，还列入国内外14个抽水蓄能电站工程实例。

本书在讲清原理和基本理论的同时，着重介绍工程应用和工程实例；内容以抽水蓄能电站特殊和常见的问题为主，力争兼具知识性、科学性和实用性。

在编写过程中，各位专家对专业名词作了斟酌，根据既反映抽水蓄能电站特点，又照顾原有习惯的原则，统一了全书的专业名词。例如：上水库，下水库，进（出）水口，出（进）水口，水泵水轮机，电动发电机等。

对国外工程名称译名也作了统一。工程名字的拉丁文拼写法以《水力发电和坝工建设》杂志1990年第四期刊登的世界抽水蓄能电站一览表为依据，凡在外国地名译名词典可查到习惯译法的采用习惯译法。其它站名则根据英、德、法、西、俄等语种发音习惯作音译，地名中常见的山、河、湖等则作意译，同时照顾国内已有的习惯。日本工程名称一律采用日语中的汉字。

本书的编写组织工作始于1988年春。当时，在能源部北京勘测设计院召开了一次会议，讨论了本书编写大纲初稿。1989年9月，能源部科技司为加快本书的编写工作，请河海大学水力发电工程系协助组织编写工作，同年12月确定了编写大纲和作者分工。本书涉及专业内容较多，作者比较分散。为提高全书质量，特聘请河海大学有关专业的教授、副教授负责各部分的统稿工作。

本书由教授梁瑞驹、左东启，高级工程师单鹰、韩祖恒、张德旺和陆维勋审稿，并于

1991年3月底能源部科学技术司在南京召开了审稿会。审稿人认真细致地对书稿进行了全面审查，提出了许多宝贵意见。在此，向他们表示由衷的感谢。

在编写过程中得到许多同志的帮助和支持，在本书出版之际，特向河海大学有关领导和教师，北京勘测设计院张学易、李庆元同志，能源部何伯镛、王建忠、朱成章、张津生、方继立、杨金栋、陈宗樑、孙林等同志表示衷心感谢。

目前我国抽水蓄能电站建设经验不多，国外工程资料核实困难，加之作者水平有限，难免还有疏漏和错误之处，敬请读者批评指正。意见请寄南京河海大学水力发电工程系沈祖诒收。

编者

1991年3月

目 录

序 前 言

第一章 总论	1
第一节 抽水蓄能电站发展简史	1
第二节 抽水蓄能电站工作原理及类型	5
第三节 抽水蓄能电站站址规划	16
第四节 抽水蓄能电站建设与环境	25
参考文献	27
第二章 抽水蓄能电站动能规划	28
第一节 抽水蓄能电站的工作特点及作用	28
第二节 抽水蓄能电站经济效益分析	32
第三节 抽水蓄能电站的主要参数	37
第四节 装机容量选择	44
第五节 常规水电站改建成抽水蓄能电站	75
参考文献	82
第三章 水泵水轮机	84
第一节 水泵水轮机类型和发展趋势	84
第二节 水泵水轮机的工作特性	103
第三节 水泵水轮机的选型	133
第四节 水泵水轮机结构	158
第五节 水泵水轮机运行控制过程	166
参考文献	175
第四章 电动发电机	178
第一节 电动发电机的结构和参数	178
第二节 电动发电机在电动机工况的起动	204
参考文献	230
第五章 抽水蓄能电站电气部分	232
第一节 电气主接线	232
第二节 机组和电站自动控制	247
第三节 抽水蓄能机组的继电保护	271
第四节 电气设备的布置	276
参考文献	283
第六章 抽水蓄能电站布置与上、下水库	285
第一节 抽水蓄能电站布置	285
第二节 上、下水库	304
第三节 库区防渗和排水设计	319

第四节	上、下水库的观测	369
参考文献		376
第七章	进(出)水口与水道水力学	378
第一节	进(出)水口	378
第二节	水道系统水力学	389
参考文献		439
第八章	输水道结构	441
第一节	引水道结构	441
第二节	压力管道	449
第三节	岔管	466
第四节	闸门和启闭机	473
参考文献		484
第九章	电站厂房	486
第一节	地下厂房位置选择	486
第二节	厂房与厂区布置	490
第三节	地下洞室、洞群布置与围岩的稳定计算	502
第四节	地下厂房的结构设计	512
第五节	地面及半地下厂房	522
第六节	地下厂房观测	527
参考文献		532
第十章	抽水蓄能电站水力—机械过渡过程	534
第一节	水泵水轮机全特性	534
第二节	水力—机械过渡过程计算	550
参考文献		586
第十一章	工程地质勘测	588
第一节	电站建设中的工程地质	588
第二节	上水库工程地质	592
第三节	水道系统和厂房工程地质	596
第四节	下水库工程地质	608
第五节	工程地质勘测工作布置	612
参考文献		623
第十二章	抽水蓄能电站经济评价	624
第一节	抽水蓄能电站经济评价的基本依据与主要影响因素分析	624
第二节	抽水蓄能电站国民经济评价实例分析	628
第三节	财务评价实例分析	635
参考文献		645
第十三章	运行和管理	646
第一节	运行特点和对电站设计的要求	646
第二节	抽水蓄能电站的运行、管理和维修	650

第三节 抽水蓄能电站的运行经验.....	652
参考文献.....	659
第十四章 抽水蓄能电站实例	660
第一节 国外抽水蓄能电站实例.....	678
第二节 国内抽水蓄能电站实例.....	752
参考文献.....	777

第一章 总 论

第一节 抽水蓄能电站发展简史

一、国外抽水蓄能电站的发展情况

抽水蓄能电站从1882年在欧洲问世以来,已有100多年的历史。在瑞士苏黎世兴建的世界第一座蓄能电站,功率仅515kW,抽水扬程153m,是一座季节型的抽水蓄能电站。此后这种电站逐年增加,1910年已建有14座,1930年达42座。到40年代中期,世界上已有50余座抽水蓄能电站投入运行,其中有些蓄能电站抽水扬程在300m以上。当时最大单机容量为33MW,电站装机容量达132MW。

早期的抽水蓄能电站以蓄水为主要目标,大多在汛期抽水蓄存在上水库中供枯水期发电用。本世纪50年代开始,随着电力系统的发展,抽水蓄能电站进而以调峰和调频等为主要任务。60年代后抽水蓄能电站有了很快的发展,1961年世界各国投入运行的蓄能电站装机容量为6400MW,1972年约达35000MW,1980年世界上已建成的抽水蓄能电站有170多座,总装机容量已近70000MW,20年中增长10倍。1990年世界抽水蓄能电站总装机容量达到90000MW左右。

美国于19世纪20年代修建了第一座小型抽水蓄能电站。但大规模的发展是从60年代开始的。1960年建成4座抽水蓄能电站,总装机容量仅87MW,至1980年拥有30座,装机容量已发展到13270MW,20年内平均年增长率达28.6%。1985年抽水蓄能电站装机容量为16360MW,居世界第一位。预计2000年将达49800MW,已经投入运行的装机容量超过1000MW的电站有7座。1974年建成的拉丁顿(Ludington)抽水蓄能电站装机容量为1872MW,1985年投入运行的巴斯康蒂(Bath County)电站装机容量为2100MW,是当今世界上已建成的最大的抽水蓄能电站。蓄能电站迅速发展的主要原因,是系统核电、火电容量大,极需抽水蓄能填谷调峰。美国近30年来所兴建的抽水蓄能电站,绝大部分是利用已建的水库作下水库,而在附近高处利用有利地形筑坝,形成上水库。少数利用天然湖泊作下水库,或拦河筑坝作下水库,或不筑坝而直接以天然河流作下水库。美国还成立了核电站—抽水蓄能电站—常规水电站联合中心,分配核电站和火电站承担基荷,抽水蓄能电站和常规水电站承担峰荷,彼此配合,既可满足用电需要,还可节省投资。

日本由于水力资源丰富,长期以来一直以水力发电为主。到1960年共建水电站1531座,总容量12680MW。水电的经济坝址大都已开发完毕。60年代以后,因其经济空前增长,电

力需要量急速上升,火电迅速发展,水电比重明显下降,1980年水电装机容量和发电量的比重,在总电源构成中分别为20.7%和15.9%。大容量火电厂成为主要电源。为了解决具有调节性能水电站的不足,开始兴建抽水蓄能电站,主要是混合式开发,采用可逆式机组,扬程为70~190m,单机容量一般在50~100MW之间。在70年代,由于兴建高效率大容量火电站和开始发展核电站,更加迫切需要兴建大型抽水蓄能电站,这一时期兴建的电站水头200~500m,单机容量200~300MW。至1985年抽水蓄能电站总装机容量为14650MW,占水电总装机的43%,其中1000MW以上抽水蓄能电站6座。日本通过研究认为,在以火电和核电为主的电力系统中,需要占容量10%~15%的抽水蓄能电站。

苏联水能资源丰富,但分布很不平衡,远离欧洲经济中心。欧洲部分只占18.4%,且适于经济开发的水力资源几乎已利用完,新增发电设备主要是大型凝汽式火电厂和核电站,水电比重较小。由于尖峰负荷的增长速度比基本负荷的增长速度更快,从60年代开始研究修建抽水蓄能电站的可能性和合理性。考虑到远距离输送调峰电力在技术上和经济上存在的问题,苏联在欧洲部分的水电开发重点转移到抽水蓄能电站的建设上。1956年首次建成库班抽水蓄能电站,蓄能周期为季调节,容量19MW,水头14.5~30m。基辅(Kiev)混合式抽水蓄能电站于1972年建成,装有3台41.5MW常规机组和3台33.4MW可逆式抽水蓄能机组,总装机容量约225MW。基辅电站的运行经验表明建设抽水蓄能电站是经济有效的发展方向,70年代以后加速建设。80年代开始建设超过1000MW的抽水蓄能电站有6座,总装机容量12000MW。其中卡涅夫(Kanev)抽水蓄能电站,装机3600MW,是世界上在建的最大的抽水蓄能电站。据全苏水工建筑物设计院论证,至1990年苏联欧洲部分需要投入的抽水蓄能电站不少于10座,总容量为10000~12000MW。苏联建设抽水蓄能电站的经济分析表明,如果带峰荷的抽水蓄能电站每天发电4~5h,抽水7h,单位千瓦投资不超过火电站投资的4~5倍是经济的;带腰荷的抽水蓄能电站,每天抽水6~7h,发电10~16h,单位千瓦投资不超过同样负荷火电站投资的4~5倍是经济的。

在西欧国家中,意大利的抽水蓄能电站占第一位,从1963~1985年抽水蓄能装机由700MW猛增到6000MW,增长了8.6倍。60年代后,意大利电网中水电比重逐年下降,火电比重快速增长,以调节容量为主的抽水蓄能电站的大量投入,使电网提高了调节的灵活性,取得了较大的经济效益。法国是核电供电占很大比例的国家。它处于西欧联合大电网的中心,进行功率交换十分便利。近20年来,法国在大力发展核电站同时,大力发展了抽水蓄能电站,以满足电力系统调峰填谷要求。现在法国拥有大型抽水蓄能电站9座,总容量为5000MW。在开发方式上,法国抽水蓄能电站的特点是很多上水库有天然来流,这样有利于形成较大的上水库库容,增大电站容量,实现周、季蓄能循环。瑞士和奥地利是以水电为主的国家,1982年水电在总发电量中的比重分别占71%和72%。瑞士抽水蓄能电站总容量仅为900MW,主要是混合式开发,它主要消耗核电站和径流式电站所发出的低谷剩余电能。德国电网中主要由火电站供电,火电占总发电量的77%,须建设抽水蓄能电站,后者总容量达3100MW。1975年投入运行的霍恩贝格(Hornbergstufe)纯抽水蓄能电站,容量为4×250MW,水头575m。卢森堡于60年代开始建设的菲安登(Vilanden)抽水蓄能电站分两期开发,第一期9台机组,单机容量100MW,为三机式横轴地下厂房,第二期1

台机组，单机200MW，为可逆式机组井式厂房。英国电力系统以火电为主，从60年代开始建设抽水蓄能电站，1982年投入运行的迪诺威克（Dinorwic）抽水蓄能电站，装机容量1800MW（ $6 \times 300\text{MW}$ ），水头超过500m，主要担任调频和备用容量。

此外，世界上许多地区的国家都在发展大容量的抽水蓄能电站。

从当今世界各国发展抽水蓄能电站的情况，可以归纳出以下特点：

（1）自60年代以来，随着抽水蓄能电站的大量兴建，抽水蓄能技术有很大进步，从而更进一步促进了抽水蓄能电站的建设向高水头、大单机、大容量方向发展。如美国巴斯康蒂抽水蓄能电站装机容量为2100MW，安装了世界上容量最大的可逆混流式水泵水轮机（350MW），其直径为6.35m。此外，在有适合地形地质条件时，总是修建地下厂房，英国迪诺威克蓄能电站地下洞室尺寸已达 $180 \times 24 \times 60\text{m}^3$ 。

（2）抽水蓄能电站的建设是与电力系统的发展密切联系在一起的，随着系统中高参数、大容量火电机组和大型核电机组的投入以及电网供电负荷率的进一步降低，抽水蓄能电站已成为系统电源构成中一个不可缺少的组成部分。

（3）世界上不仅以火电为主或拥有大量核电的国家在大力发展抽水蓄能电站，就是那些水力资源比较丰富的国家，如苏联和巴西，由于水力资源分布不均衡，考虑到远距离输送调峰电力在技术上和经济上所存在的问题，也加速在负荷中心地区修建抽水蓄能电站。

（4）由于抽水蓄能电站运行灵活，除了担任调峰填谷外，它的作用进一步扩展。如英国迪诺威克抽水蓄能电站，其主要作用之一是在系统中担任调频任务，以保证系统对频率稳定的严格要求，另一个主要功能是为系统中核电站提供事故备用容量。

二、我国抽水蓄能电站的发展情况

我国水力资源丰富，但分布极不均衡，主要集中在西南、西北地区。华北、东北、华东等地区水能资源贫乏。为解决电网调峰问题，自60年代开始研究开发抽水蓄能电站。最早在河北省岗南水电站引进1台日本11MW抽水蓄能机组，70年代又有两台11MW抽水蓄能机组安装于京郊密云水电站。它们是水头低、容量小、常规机组和抽水蓄能机组相结合的水电站。70年代初期还在北京郊区和上海周围地区开展纯抽水蓄能电站站址选点阶段的查勘和规划。当时由于对抽水蓄能电站在电力系统中的作用和它的经济效益认识不足，重视不够，因此前期工作进展不快。

自1978年以来，随着国民经济的持续、稳定发展，对电力的需求急剧增长，在京津唐和华东等以火电为主的电力系统中，缺乏调峰电源的矛盾日益突出。因此，在大工业基地和大城市等负荷中心附近，而又缺乏足够的水电调峰能力的电力系统中，修建抽水蓄能电站的必要性和经济合理性日益为人们认识，抽水蓄能电站的建设和规划选点工作的步伐大大加快，开创了我国抽水蓄能电站建设的新局面。70年代后期开始建设潘家口混合式抽水蓄能电站，利用潘家口水库为上水库，除了常规发电机组外，还安装了由意大利引进的3台90MW抽水蓄能机组。高水头、大容量的纯抽水蓄能电站的建设也提上了日程。目前正在施工的有广州抽水蓄能电站和北京十三陵抽水蓄能电站。广州抽水蓄能电站水头542m，分两期建设，目前第一期工程装机 $4 \times 300\text{MW}$ ，它是与我国广东省即将投入运行的大亚湾

核电站配套建设的。十三陵抽水蓄能电站水头481m，装机 $4 \times 200\text{MW}$ 。此外，浙江省天荒坪抽水蓄能电站已通过初步设计，拟装机容量 $6 \times 300\text{MW}$ ，水头610m， L/H 为2.4。在今后10年内可能兴建的电站有浙江天荒坪、河北张河湾、山西西龙池等抽水蓄能电站。基于长远发展前景，许多设计单位在华北、华东和东北等地区分别进行了大量的规划选点工作，选择了许多较为理想的抽水蓄能电站站址。表1-1和表1-2分别列出了华北地区和辽宁省抽水蓄能电站规划的主要指标。

表 1-1 华北地区规划抽水蓄能电站主要指标

序号	电 站	装机容量 (MW)	机组台数	机组型式	设计水头 (m)	厂房型式	厂房尺寸 (长×宽×高) (m×m×m)	单位千瓦投资 (元/kW)
1	板 桥 峪	1000	4	混流可逆式	357	地下式	150×23×50	1287
2	郭 家 湾	1000	4	混流可逆式	610	地下式	137×21×46	1221
3	张 河 湾	1000	4	混流可逆式	310	地下式	146.1×23×51.2	1489
4	西 龙 池	1000	4	混流可逆式	787.25	地下式	130×23×50	1412
5	汾河二库	80	4	混流可逆式	420.4	地下式	100×24×47	1700
6	岱海(双古城)	10	4	混流可逆式	63.7	开敞式	80×17.6×37.6	2080
7	桃 花 寺	50	4	混流可逆式	159	地下式	135×22×45	1686
8	王 快	21	2	混流可逆式	173	地下式	50×20×34	1601
9	朱 庄	20	4	混流可逆式	160	地下式	90×18×25	1839
10	雾 灵 山	200	8	混流可逆式	1093	地下式	163×22×44	1250

表 1-2 辽宁省规划抽水蓄能电站主要指标

序号	电 站	装机容量 (MW)	机组台数	最大毛水头 (m)	输水洞长 (km)	L/H	单位千瓦投资 (元/kW)
1	青 石 岭	2000	8	440	4.4	10.3	991
2	花 尔 楼	2000	8	539	4.0	7.5	855
3	永 陵	1500	5	493	4.8	10.5	965
4	太 平 湾	1550	5	414	4.5	11.4	969
5	夏 家 堡	1800	6	325	5.2	17.2	1274
6	步 云 山	1050	3	305	2.0	7.2	1032
7	观 音 阁	500	2	628	3.2	5.5	980

我国台湾省建成一座装机容量为1000MW的明湖(Minghu)抽水蓄能电站。利用著名的日月潭作为电站的上水库，在此以西约3km处修建了下水库，库容800万 m^3 。电站最大水头321m。4台机组的水轮机和水泵最大流量分别为 $380\text{m}^3/\text{s}$ 和 $328\text{m}^3/\text{s}$ 。以水轮机方式运行时下水库5.8h蓄满，以水泵方式运行时下水库7.7h抽空。明湖电站已于1985年投入台湾省电力系统运行，使电网供电可靠性和灵活性得到改善，并降低电能生产成本。正在建设的明潭(Mingtán)抽水蓄能电站，同样利用日月潭为上水库，装机容量为1600MW。

三、水泵水轮机组的发展特点

最早期的抽水蓄能电站，厂房内部装有两套机组，一套为电动机—水泵机组，另一套为水轮机—发电机组，即抽水机组与发电机组分列，称为“四机式”(四机分置式)。奥地利