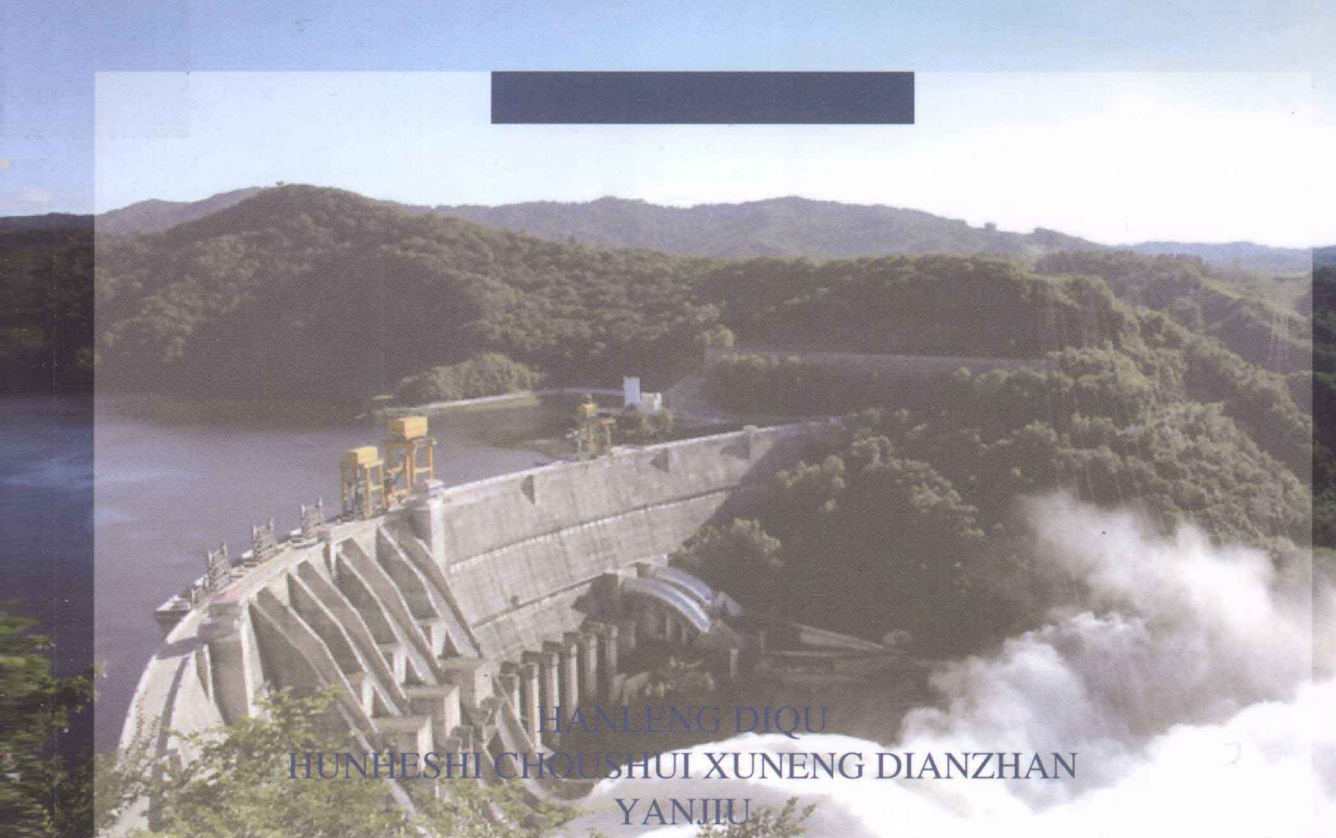




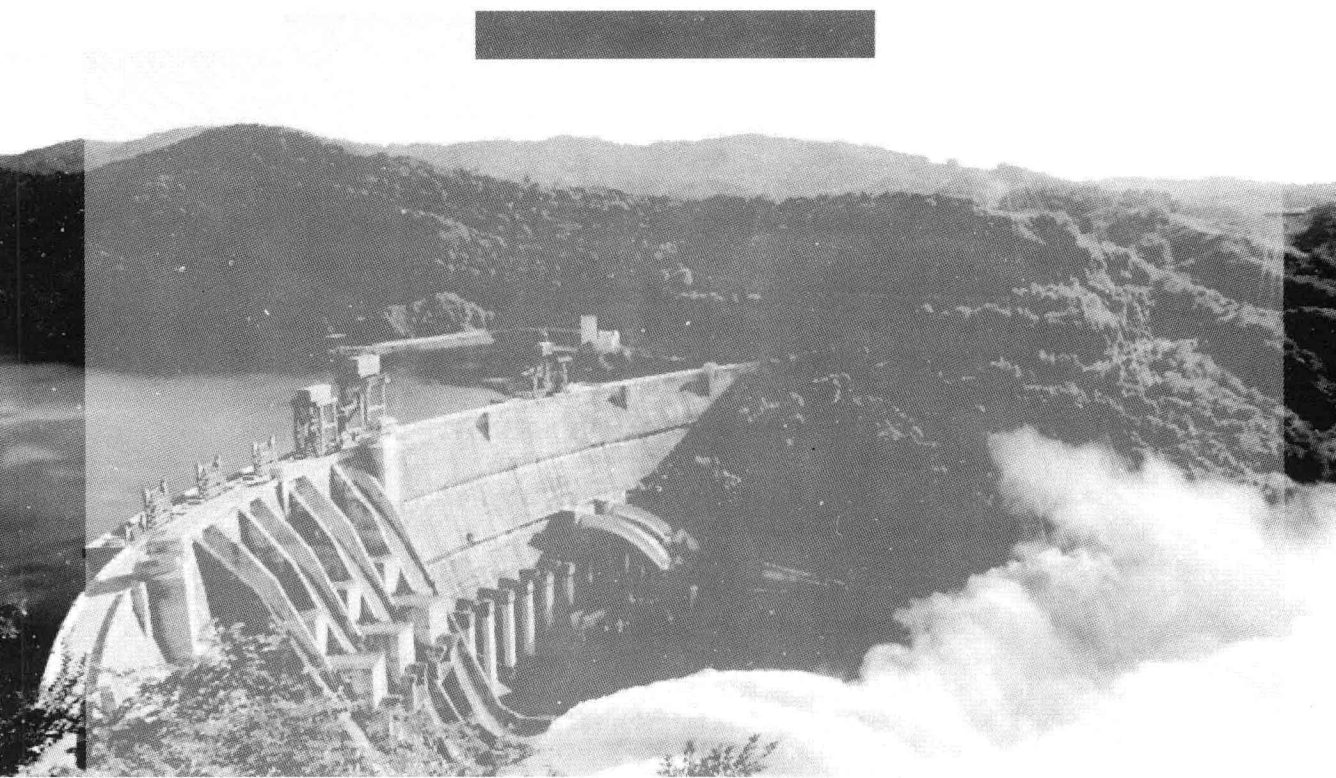
HANLENG DIQU
HUNHESHI CHOU SHUI XUNENG DIANZHAN
YANJIU

寒冷地区 混合式抽水蓄能电站 研究

中水东北勘测设计研究有限责任公司◎组织编写
主 编◎苏加林 副主编◎吕永明 常万军 丁松滨



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



寒冷地区 混合式抽水蓄能电站 研究

中水东北勘测设计研究有限责任公司◎组织编写
主 编◎苏加林 副主编◎吕永明 常万军 丁松滨



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

随着我国社会经济的持续快速发展,对电力需求也不断增长,抽水蓄能电站成为现代电力系统中有效的、不可或缺的调节工具。本书对寒冷地区混合式抽水蓄能电站的研究成果予以了详细总结和提炼,全书共分 17 章,包括:抽水蓄能电站发展综述、水文系列研究、复杂地下工程地质条件研究、工程装机容量及规模论证、白山混合式开发电站枢纽总体布置研究、地下厂房及附属洞室布置与结构设计、输水系统建筑物布置、地下厂房围岩稳定计算有限元分析、下库进水口水工整体模型试验研究、地震情况下白山大坝应力及稳定分析、水轮机设备及金属结构、电气一次设计、抽水蓄能机组励磁系统设计及设备国产化研究、混凝土配合比试验研究、工程开挖爆破控制、工程安全监测、进出水口拦污栅振动研究等。

本书适合水利水电工程、电力工程等相关专业设计人员、工程人员、科研人员参考借鉴,也可供相关院校师生辅助学习。

图书在版编目(CIP)数据

寒冷地区混合式抽水蓄能电站研究 / 苏加林主编 ;
中水东北勘测设计研究有限责任公司组织编写. — 北京
: 中国水利水电出版社, 2013. 5
ISBN 978-7-5170-0901-6

I. ①寒… II. ①苏… ②中… III. ①寒冷地区—抽水蓄能水电站—研究—中国 IV. ①TV743

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第106648号

书 名	寒冷地区混合式抽水蓄能电站研究
作 者	中水东北勘测设计研究有限责任公司 组织编写 主 编 苏加林 副主编 吕永明 常万军 丁松滨
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京时代澄宇科技有限公司
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 22 印张 522 千字
版 次	2013 年 5 月第 1 版 2013 年 5 月第 1 次印刷
印 数	0001—1000 册
定 价	68.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

本书编委会

主 编：苏加林

副主编：吕永明 常万军 丁松滨

参 编：苑润保 潘 虹 范景春 齐立伟 郑玉玲
朱奎卫 宋永军 王 影 郭学仲 王 智
张显伟 周炳昊 李艳萍 黄如卉 陈晓霞
王相波 路永明 黎 昕 俞 宏 齐丽萍
李大伟 陈喜坤 王云宽 赵欣波 郝长生

前 言

抽水蓄能电站于 1882 年问世，至今已有 100 余年的历史。从 20 世纪初到 50 年代末期，抽水蓄能处于缓慢发展阶段，20 世纪 60 年代以来，西欧各国及美国、日本等许多工业发达国家建设了一批抽水蓄能电站，使总容量有了很大的增加。抽水蓄能电站的发展速度，约为电力装机容量发展速度的 2 倍，基本上与核电发展速度相当，大大超过其他类型电站的发展速度。

西欧国家最早发展抽水蓄能电站，20 世纪 60 年代以前，一直名列世界前茅。美国、日本、意大利、德国、西班牙、法国、英国、奥地利等国家，是当今世界上抽水蓄能电站装机容量最多的一些国家。抽水蓄能机组向高水头、大容量发展，且发展重点由欧美向亚洲转移。中国从 1999 年起又有一批共 11 座抽水蓄能电站陆续开工建设，建设规模达到 11220MW，约为已建抽水蓄能电站装机容量的 2 倍。

由于环境保护要求不断提高、电力市场化改革带来的风险增加等原因，在经济发达国家新建抽水蓄能电站越来越困难；即使取得许可，建设成本也要增加。美欧等国家抽水蓄能电站建设重点已从新建电站转为对老电站的更新改造和扩建增容。更新改造与扩建增容是一种在科学技术得到长足进步后，对已有资源重新优化配置的手段，是使抽水蓄能电站的生产得以持续发展的重要措施之一。

随着我国社会经济的持续、快速发展，对电力的需求也不断增长，电力工业的可持续发展可为国民经济持续快速协调发展和社会全面进步提供强有力的保障，也对电网安全、可靠运行提出了更高的要求。与发达国家相比，我国煤电比例偏高，调峰能力较好的电源比例偏低，煤电调峰任务较重，提高电网调峰能力、保证电网安全经济运行是我国电源结构优化的重要内容。抽水蓄能电站是现代电力系统中有效的、不可或缺的调节工具，合理配置抽水蓄能电站对提高电网供电质量、优化电源结构、促进我国核电、风电等可再生能源的大规模发展，实现我国电力工业可持续发展都具有重要意义。

从东北电网对抽水蓄能电站的需求来看，考虑已建的白山 300MW 电站、完建的蒲石河 1200MW 电站以及前期工作较深的桓仁 800MW 电站和荒沟 1200MW 电站共计 3500MW 的前提下，2020 年东北电网至少还需要 5000MW 抽水蓄能电站才能满足系统经济运行和调峰要求，因此，需要加快东北地区抽水蓄能电站的前期设计工作。

到 20 世纪 80 年代初期，西欧如法国和意大利还有部分混合式抽水蓄能电站在建。从经济性出发，抽水蓄能电站必将向高水头、大容量的纯抽水蓄能电站方向发展。常规水电站增加可逆机组可以有效解决部分电网扩容的需求，减少火电装机，并提高火

发电机组的利用率；同时，抽水蓄能具有火电、核电、燃气电站等无法比拟的灵活运行能力和强大的调峰能力。并且，已经建成的水库，可以直接用于抽水蓄能机组蓄水发电，只需增建水道和厂房系统，因而可大大减少投资。因为可以利用已建电站的现有地质资料和施工记录，可缩短前期勘测、设计工作周期。增机完工后，还可以适当借助原电站的输变电系统，吸收部分已建电站的运行、维护和管理人才，从而大大降低可逆机组的运行和维护费用；同样，这对于已建常规电站降低运行成本并向现代化管理调度方向改进是一个非常好的契机。

我国已开发的混合式电站有潘家口抽水蓄能电站、响洪甸电站。白山抽水蓄能电站为东北地区第一座抽水蓄能电站，也是目前唯一的混合式电站。由于是利用现有工程而不增加淹没土地、移民和环保费用，不需另建输电线路，与新建纯抽水蓄能电站相比可有效节省工程投资。白山电站共分三期，一期电站位于右岸，二期电站位于左岸，三期抽水蓄能电站位于左岸，大坝泄洪消能塘位于河床中间。三期抽水蓄能电站布置受已有的白山右岸一期工程、左岸二期工程以及大坝泄洪消能塘等建筑物的限制和制约。新建建筑物布置地下洞室交叉、下库进/出水口布置与消能塘二级池冲突等问题。常规情况下，国内抽水蓄能机组设备均采用国外进口，白山电站工程2号蓄能机组主机设备、调速设备、励磁设备均实现国产化，是目前国产最大的抽水蓄能机组。水泵水轮发电机组是当时国产的第一台150MW大型抽水蓄能机组。自动化系统第一次由随国外主设备供货，改为国内整体设计，是第一个采用国产励磁设备并进行励磁系统设计的抽水蓄能电站工程，目前运行稳定可靠，说明国内励磁系统设计及设备研发已达到国际领先水平。通过开展开机爆破试验，科学地将中控室机电设备和机组保护屏的爆破振动安全控制标准由规程规范要求的0.5cm/s提高到1.0cm/s。经历140余次实际爆破的检验（通过在线监测系统测试），将中控室和机组保护屏的安全允许振速提高到1.0cm/s是合理的，既能保证发电机组的正常运行，又满足了防洪度汛要求，大大提高了施工强度，使机组提前一年投入运行。

本书第1章由吕永明、常万军、郑玉玲编写；第2章由俞宏编写；第3章由宋永军编写；第4章由王相波编写；第5章由常万军编写；第6章由齐立伟编写；第7章由郑玉玲编写；第8章由郝长生、范景春编写；第9章由王影、郭学仲、王智编写；第10章由常万军、齐立伟、周炳昊编写；第11章由丁松滨、李大伟、路永明、黎昕、赵欣波编写；第12章由潘虹、陈喜坤编写；第13章由张显伟、齐丽萍编写；第14章由李艳萍、黄如卉编写；第15章由朱奎卫编写；第16章由朱奎卫、王云宽、丁松滨编写；第17章由苑润保、陈晓霞编写。全书由苏加林主编，负责统稿和校阅，副主编有吕永明、常万军、丁松滨。

由于水平有限，书中难免有疏漏或错误之处，恳请读者批评指正。

编者

2012年12月

目 录

前言

第 1 章 抽水蓄能电站发展综述	1
1.1 世界抽水蓄能电站发展趋势	1
1.2 国内抽水蓄能电站发展形势	14
1.3 东北电网抽水蓄能电站发展	20
1.4 寒冷地区混合式抽水蓄能电站发展研究	24
第 2 章 水文系列研究	33
2.1 流域自然地理概况	33
2.2 水文基本资料	33
2.3 径流系列	34
2.4 洪水系列	37
第 3 章 复杂地下工程地质条件研究	43
3.1 概述	43
3.2 地质概况	43
3.3 地下洞室主要地质问题	46
第 4 章 工程装机容量及规模论证	50
4.1 建设的必要性及工程开发任务	50
4.2 工程规模	52
4.3 电站主要参数及运行方式	53
第 5 章 白山混合式开发电站枢纽总体布置研究	56
5.1 概况	56
5.2 白山电站枢纽工程布置	57
5.3 白山电站泄洪雾化防护	61
第 6 章 地下厂房及附属洞室布置与结构设计	63
6.1 地下厂房的布置	63
6.2 附属洞室的布置	66
6.3 厂房及附属洞室系统支护设计	68
6.4 地下厂房及附属洞室系统结构设计	70
6.5 地下厂房及附属洞室系统主要设计变更	75
6.6 地下厂房及附属洞室系统存在的问题及建议	76

第7章 输水系统建筑物布置	77
7.1 建筑物布置	77
7.2 水力计算	79
7.3 工程设计的难点和先进性	81
第8章 地下厂房围岩稳定计算有限元分析	84
8.1 工程概况和地质条件	84
8.2 计算方案及计算方法	85
8.3 计算成果描述	86
8.4 计算成果分析及建议	106
第9章 下库进水口水工整体模型试验研究	108
9.1 白山大坝泄洪对下库进水口的影响研究	108
9.2 白山大坝泄洪溅水雾化研究	112
9.3 白山消能塘底板压力及稳定性试验研究	123
9.4 白山大坝泄洪雾化及消能塘底板受力原型观测成果	128
第10章 地震情况下白山大坝应力及稳定分析	131
10.1 综述	131
10.2 控制标准及主要参数	131
10.3 白山混凝土重力拱坝稳定和应力控制指标	131
10.4 抗震计算分析和评价	132
第11章 水轮机设备及金属结构	177
11.1 白山抽水蓄能电站水轮机设备主要参数和结构的选择	177
11.2 白山抽水蓄能电站调速系统设备选择及过渡过程计算	184
11.3 蝶阀设备主要参数的选择	185
11.4 金属结构设计	185
11.5 白山蓄能电站工程通风及除湿设计研究	189
11.6 工业电视监视系统设计	190
第12章 电气一次设计	197
12.1 工程概况	197
12.2 电站接入系统设计	197
12.3 电气主接线	198
12.4 电气配电装置	202
12.5 厂用电系统设计	205
12.6 主变压器	207
12.7 220kV 开关站设备	210
12.8 220kV 高压电缆	211
12.9 过电压保护及绝缘配合	211
12.10 接地系统设计	214

12.11	照明	216
第 13 章	抽水蓄能机组励磁系统设计及设备国产化研究	218
13.1	概述	218
13.2	电站相关参数	219
13.3	系统设计要求	219
13.4	EXC9000 励磁系统	226
第 14 章	混凝土配合比试验研究	230
14.1	概况	230
14.2	混凝土的技术要求	230
14.3	试验依据及其评定标准	231
14.4	混凝土原材料检验结果	231
14.5	混凝土配合比设计	234
14.6	混凝土试验成果分析	235
第 15 章	工程开挖爆破控制	243
15.1	工程爆破环境	243
15.2	施工爆破对已有建筑物的影响	244
15.3	爆破振动试验	251
15.4	开机状态下爆破影响试验	256
15.5	爆破振动自动化监测（在线监测系统）	270
第 16 章	工程安全监测	274
16.1	设计原则	274
16.2	安全监测设计	274
16.3	观测资料整编及分析	278
第 17 章	进/出水口拦污栅振动研究	302
17.1	拦污栅振动的研究与设计现状	302
17.2	白山抽水蓄能电站拦污栅设计及振动研究技术路线	313
17.3	进/出水口拦污栅整体水力学模型试验	314
17.4	拦污栅栅条水弹性模型试验研究	320
17.5	拦污栅整体结构有限元计算	328
17.6	拦污栅结构修改后补充动力计算分析	336

第 1 章 抽水蓄能电站发展综述

1.1 世界抽水蓄能电站发展趋势

抽水蓄能电站是具有削峰、填谷、调频、调相、事故备用及“黑启动”等多种作用的特殊电力装置，是电力系统运行和管理的重要工具。抽水蓄能电站于 1882 年问世，至今已有 100 余年的历史。抽水蓄能电站的最初概念是将火电站非峰荷时的低价电能转化为峰荷时的高价电能，这一概念现已发展到利用抽水蓄能电站来控制电力系统中的电力潮流，由于电力需求不断增长，同时电力系统调峰填谷需要也越来越大，而工业国家的经济发达地区常规水能资源已基本上被开发殆尽，因此很需要建设调峰填谷和动态效益良好的抽水蓄能电站。从电力系统的电力电量平衡考虑，抽水蓄能电站已成为现代大型电力系统构成中不可缺少的一个组成部分，实践表明，抽水蓄能电站是满足电力系统运行负荷剧烈变化的理想手段，因此它有着广阔的发展前景。世界各国尤其是美国、日本、欧洲等发达国家和地区，都曾大力开发抽蓄电站，在建设和运营中积累了大量经验。世界抽水蓄能电站发展具有以下几个特点。

1.1.1 抽水蓄能电站发展很快

据统计，1960 年全球抽水蓄能电站总装机容量仅为 350 万 kW，至 2007 年已增至 13500 万 kW（见图 1.1.1），50 年内增加了近 40 倍，而同期全球发电总装机仅增长了 9 倍，20 世纪 60~80 年代是抽水蓄能电站高速发展的黄金时期。今后还将进一步发展，一些国家查勘规划的抽水蓄能电站站址很多，如日本查勘了 440 处，共可装机 3.29 亿 kW；前苏联欧洲部分对近 30 个抽水蓄能电站站址进行了不同程度的勘设工作，总装机容量达 3000 万~4000 万 kW；美国在不同程度申请许可证的抽水蓄能电站有 47 处，共可装机 2843 万 kW。

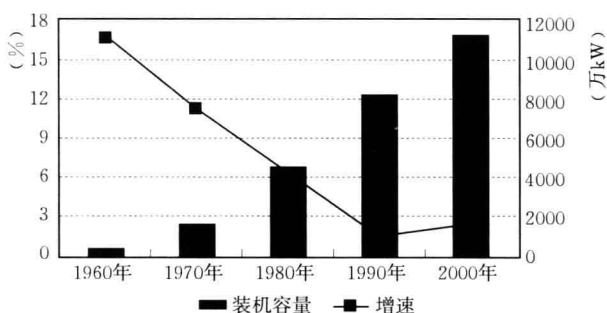


图 1.1.1 全球抽水蓄能电站装机容量及其增速

目前全球抽水蓄能在建项目主要分布在亚洲，“中国、日本、印度、韩国、泰国”5 国的在建规模合计为 2465 万 kW，中国最多（约 1000 万 kW）。从抽水蓄能装机容量绝对值看，我国抽水蓄能电站的发展并不落后，然而从抽水蓄能占本国发电总装机比例、设备国产化程度、投资管理体制等方面看，我国仍然与国外发达国家存在差距。

从发达国家的抽水蓄能发展规律看，抽水蓄能的建设受当地经济水平、能源结构、资源禀赋及开发情况等相关因素的影响，主要与地区经济水平相关。

从统计数据看，全球抽水蓄能电站主要分布在美国、日本、欧洲等经济发达国家和地区。这些国家对电能质量要求较高、电网调峰需求大。

(1) 发达国家的工业自动化水平较高，精密仪器对电能质量的要求高。

(2) 发达国家的生活水平较高，家用电器普及率高，且具有“时段性”使用的特点，易造成负荷的大幅波动。

(3) 随着低端制造业的外迁，发达国家的工作从“三班制”到“两班制”甚至“全日班”，电网调峰难度增加。

在发达国家，调频调峰性能卓越的抽水蓄能电站备受青睐，抽水蓄能装机比例较高（见表 1.1.1）。

表 1.1.1 世界抽水蓄能电站发展情况

序号	国 家	各年装机容量（万 kW）				2007 年已建 （万 kW）	查 勘 规 划	
		1960 年	1970 年	1980 年	1991 年		站数	万 kW
1	美国	9	369	1327	1809	2189	47	2843
2	日本	6	341	1081	1701	2549	440	32912
3	意大利	24	126	362	645	754	1	100
4	德国	103	206	395	562	562	1	106
5	西班牙	1.3	129	211	492	535		
6	法国	23	45	160	490	430		
7	英国	0.5	76	106	302			
8	奥地利	82	89	160	282	458	5	180
共 计		342	1601	4652	8471	13500		

1.1.2 大型抽水蓄能电站较多

迄今为止，全世界有近 50 个国家或地区已建、在建各类抽水蓄能电站，世界各国 1991 年已建抽水蓄能电站 286 座，共计装机容量 8471 万 kW，平均每座规模约为 30 万 kW。至 2007 年年底，世界各国已建抽水蓄能电站总规模达 13500 万 kW。

据初步统计，世界已建、在建大于 100 万 kW 的 44 座抽水蓄能电站中，已建的 35 座总容量为 4490.5 万 kW，占 1991 年世界抽水蓄能电站装机容量的 53%，在建的 9 座总装机容量是 1426.8 万 kW，占 1991 年世界在建抽水蓄能电站装机容量的 57.5%，两者均占世界已建、在建装机容量的 50% 以上，再加上 25 万~100 万 kW 的电站，所有大型抽水蓄能电站装机容量所占比例就更多。世界已建、在建大于 150 万 kW 的抽水蓄能电站共 19 座，大于 180 万 kW 的共 11 座（见表 1.1.2）。

表 1.1.2 世界已建、在建大型抽水蓄能电站（装机容量不小于 180 万 kW）

序号	国 家	抽水蓄能电站	装机容量 （万 kW）	最大水头（m） 抽水/发电	机型	台数×单机 （万 kW）	开始发 电年份
1	中国	广州	240	550/537	可逆 混流式	8×30 （其中扩建 4×3）	1993
2	摩尔多瓦	德涅斯特罗夫	226.8	166/155	可逆 混流式	7×32.4	在建

续表

序号	国 家	抽水蓄能电站	装机容量 (万 kW)	最大水头 (m) 抽水/发电	机型	台数×单机 (万 kW)	开始发 电年份
3	美国	BathCountry 巴斯康斯	210	387/384	可逆 混流式	6×35	1985
4	美国	mounthope	200	810/810	可逆 混流式	6×34	
5	美国	ludington 勒丁顿	198	114/108	可逆 混流式	6×33	1973
6	日本	Okytataragi 奥多多良木	193.2	387/383	可逆 混流式	4×30.3 扩建 2×36	1974
7	英国	Dinorwie 狄诺维克	180	545/541	可逆 混流式	6×30	1982
8	法国	GrandeMaison 大屋	180	955/905	可逆 混流式	8×15 冲击 4×15	1986
9	菲律宾	Kalayan 卡拉彦	180	291/286	可逆 混流式	已建 2×15	1982
10	中国	天荒坪	180	614/608	可逆 混流式	6×30	1998
11	乌克兰	Tawbpek 塔什利克	180	84/81	可逆 混流式	6×13 混流 3×34	在建

查勘规划中还有更大规模的抽水蓄能电站，如美国科罗拉多州的多明格斯 (Dminguez) 电站装机容量达 250 万 kW，前苏联拟建帕娜—雅勒斯卡雅抽水蓄能电站，装机容量达 500 万 kW。

1991 年美国已建 38 座抽水蓄能电站，按各种规模统计，美国所建 100 万 kW 以上大型抽水蓄能电站 7 座，共 993.7 万 kW，占抽水蓄能电站总装机容量的 54.9%，连同 25 万~100 万 kW 的所有大型抽水蓄能 24 座，共占抽水蓄能总装机容量的 93%；中小型电站比较少。

20 世纪 60 年代，日本当时为了充分利用水电站季节性电能，所建的抽水蓄能电站大多是中型混合式抽水蓄能电站，以后由于兴建高效大容量的火电站和核电站以及缺少调节性能好的常规水电站，兴建了一批大型纯抽水蓄能电站。当前世界各国已建和在建 100 万 kW 以上的 44 座大型抽水蓄能电站中，日本为最多，占 13 座。装机容量共为 1639.3 万 kW，占世界 44 座总装机容量 5917.3 万 kW 的 27.7%；美国次之，占 9 座，装机容量共为 1263.8 万 kW，占世界 44 座总装机容量的 21.4%；意大利等西欧国家占 9 座，其中意大利为 4 座，水头均在 500m 以上。

前苏联起步较晚，1986 年莫斯科附近扎戈尔抽水蓄能电站投产，装机容量为 120 万 kW；在建几座大型抽水蓄能电站装机容量约 600 万 kW，其中包括乌克兰的塔什利克电站 180 万 kW、立陶宛的凯希亚多里电站 160 万 kW。前苏联在规划中注意把抽水蓄能电站与热电站、核电站、常规水电站布置在一起，组成动力联合体。例如，抽水蓄能电站与核电站组合，抽水蓄能电站水库即是核电站的冷却水池，省去专用池，同时运行管理机构也相应精减，节省了投资和运行费用。

1.1.3 抽水蓄能机组向高水头、大容量发展

抽水蓄能电站利用水头越高，相对所需流量越少，上库、下库的库容和大坝工程量、引水道尺寸、抽水蓄能机组和厂房都相对比较小，因而投资较低，所以尽量找高水头的站

址。在 44 座 100 万 kW 以上抽水蓄能电站中，按水头分类，以 300~600m 水头的最多，其装机容量占总装机容量的 50.2%，水头在 300m 以上的共占 68.5%（见表 1.1.3）。

表 1.1.3 国外已投运的各类最大容量抽水蓄能机组

机 型	电 站	国 家	机组铭牌出力 (万 kW)	最大出力 (功率) (万 kW)		设计 水头 (m)	投运 年份
				水轮机	水泵		
可逆混流式	巴斯康帝 (BathCountry)	美国	35	45.7	42	329	1985
多级可逆混流式	奇奥塔斯 (Chiotas)	意大利	14.8	17	15.5	1048	1981
可逆斜流式	马漱川 (Masegawa)	日本	14.4	14.9	16	100	1975
可逆灯泡式	朗斯 (Rance)	法国	1	1	1	5.5	1966
可逆轴伸式	杜罗门 (Truman)	美国	2.67	2.67	2.72	13	1977
串联混流式	威文霍 (Wivenhoe)	澳大利亚	26	32.5	24	85	1983
串联多级混流式	霍恩贝格 (Hornberg)	德国	25	26.2	25	575	1975
串联冲击式	马尔他主级	奥地利	18	20.7	14.5	1030	1978

10 多年来，抽水蓄能电站正朝着高水头方向发展，一方面是串联式机组，采用多级水泵和冲击式水轮机，如 1972 年投入运行的意大利圣菲拉诺 6 级串联式机组，最高水头达 1438m，是迄今水头最高的串联式抽水蓄能机组，单机容量为 14.0 万 kW。1975 年德国投产的霍恩贝格抽水蓄能电站是采用二级串联混流式机组，最高水头为 635m，是当前此类机组水头最高的蓄能电站。

另一方面是不断提高可逆式机组的应用水头，目前单级可逆式机组的应用水头已超过常规水轮机。20 世纪 50 年代建成的日本大森川电站，最大发电水头为 118m；20 世纪 60 年代投入运行的瑞士罗比埃抽水蓄能电站，最大发电水头为 390m；70 年代建成的日本沼原抽水蓄能电站，水头为 500m；80 年代初投入运行的南斯拉夫巴其纳斯塔抽水蓄能电站，最大发电水头达到 600m；保加利亚茶拉抽水蓄能电站，最大发电水头达 677m，水轮机最大出力达 21.6 万 kW，最高抽水扬程为 701m。日本鹿角川抽水蓄能电站，水头最高达 728m，机组铭牌出力达 41.2 万 kW。目前正在进行 800m 水头的单级可逆式水泵水轮机的模型试验。据分析，单级可逆式机组的应用水头可望达到 900~1000m。在高水头单级可逆式机组制造方面，日本具有较丰富的经验，如上述有代表性的抽水蓄能电站的可逆式水泵水轮机，除罗比埃电站外，均由日本制造。

当水头进一步提高时，单级可逆式机组受到限制，必须采用多级可逆式机组。20 世纪 70 年代投入运行的法国柯希抽水蓄能电站，首次采用五级可逆式水泵水轮机，最大发电水头为 930m。

1982 年投入运行的意大利埃多罗抽水蓄能电站的五级可逆式混流式机组，最大发电水头达 1256m，为当今最高水头的可逆式水泵水轮机，机组铭牌出力为 12.5 万 kW。

随着大型火电站和核电站的建成，电网容量越来越大，从电力系统综合效益和经济运行观点来看，抽水蓄能电站规模必须相应扩大。因此，增加抽水蓄能机组单机容量已成为人们普遍重视的问题。提高单机出力，不仅可适应大容量调峰能力的要求，还可减少电站

机组台数，简化操作，降低每单位 kW 造价。

20 世纪 70 年代以来，抽水蓄能机组（主要是可逆流式水泵水轮机）单机容量有明显增加的趋势。以单级混流式水泵水轮机为例，50 年代可逆式的水轮最大出力仅 9 万 kW（美国海瓦西电站）；60 年代为 22 万 kW（美国汤姆逊电站）；70 年代为 40 万 kW（美国腊孔山电站）；80 年代投入运行的美国巴斯康蒂抽水蓄能电站可逆式机组，水轮机最大出力达 45.7 万 kW，水头为 328~390m，水泵最大功率为 42.0 万 kW，扬程为 324~393m，转轮直径为 6.35m，额定转速为 257r/min。表 1.1.3 所示为已投运的各类最大抽水蓄能机组一览表。

目前已运行的抽水蓄能机组中，最大容量的发电电动机是美国腊孔山电站机组，发电电动机容量为 425/382MVA，额定工作电压为 23kV，额定转速为 300r/min，由美国西屋公司制造。日本今市电站的发电电动机，单机容量为 390/361MVA，额定转速为 429r/min，其单机容量与转速的乘积创世界纪录，机组由日本东芝公司制造。

1.1.4 抽水蓄能发展重点由欧美向亚洲转移

在西欧及美国抽水蓄能电站建设处于停滞状态时，亚洲各国的抽水蓄能电站建设却处于蓬勃发展期。

至 2009 年年底，我国抽水蓄能电站建成投产总容量达到 11545MW，在建容量为 9860MW。抽水蓄能电站在建规模已超过日本，列世界首位。

印度在建的抽水蓄能电站有 4 座，装机容量共 3250MW，为已建成的抽水蓄能电站装机容量两倍多。

韩国杨阳（1000MW）和冲松（600MW）两座抽水蓄能电站正在施工，另有一座电站 2004 年开工。到 2010 年，又有 2400MW 机组投入运行，将使抽水蓄能电站装机容量翻一番，达到 4800MW。

泰国拉姆他昆抽水蓄能电站（1000MW）在 2001 年投入运行，Khiritham 抽水蓄能电站（660MW）于 2006 年发电。泰国抽水蓄能电站装机容量将达到 2195MW，约为原有装机容量的 4 倍。

日本可谓经济发达国家中的特例，虽然经济衰退已延续 10 多年，抽水蓄能电站建设速度有所放慢，在建规模仍高达 7120MW，仅次于中国，居世界第二位。日本抽水蓄能电站建设的持续发展与日本电力体制有关，日本电力工业由国家参股的民营股份有限公司经营管理，分地区组成发、输、配电统一经营的 9 大电力公司。9 大电力公司统一进行管辖地区的电力发展规划，按最优比例建设抽水蓄能电站。

据初步统计，仅中国、印度、韩国和泰国 4 个国家在建抽水蓄能电站规模就达到 17530MW，若加上日本后更达到 24650MW，分别为世界已运行抽水蓄能电站装机容量的 1/6 和 1/4 左右。亚洲抽水蓄能电站建设的快速发展是由于其经济发展速度及发展阶段的需要。

（1）亚洲经济快速发展。亚洲地区部分中等发达和发展中国家 20 世纪 80 年代和 90 年代 GDP 增长率远远高于欧美经济发达国家，“亚洲四小龙”——中国香港、新加坡、中国台湾和韩国，从 20 世纪 70 年代起经济即以大幅度领先各国的增长率快速发展。继之，东南亚的泰国、马来西亚、印度尼西亚与菲律宾等国也从 80 年代起陆续加入经济高速增长

长国家的行列。即使 90 年代后期受到亚洲金融危机影响的韩国和泰国等国，其 GDP 增长率也达到欧美经济发达国家的 2~3 倍。而中国和印度经济增长率则更高，中国自改革开放以来，连续保持 20 年的快速增长，GDP 增长率始终保持在 10% 左右，成为世界经济发展的新亮点。印度 90 年代 GDP 增长率也达到 5.7% 左右。已有一些经济学家提出，世界经济发展的中心正逐步转移到亚洲地区。

(2) 亚洲经济发展正进入高耗电的重化工业化和家用电器普及化阶段。日美西欧各国是在 20 世纪 60 年代和 70 年代进入抽水蓄能电站建设的高速发展期，当时这些国家人均 GDP 已达到 2000 美元左右，即通常认为的中等经济发达国家的标准。相应的经济发展阶段正是高耗电的重化工业化和家用电器普及化阶段，也是电力负荷与峰谷差迅速增加的阶段。

亚洲四小龙中的中国台湾和韩国分别在 20 世纪 70 年代和 80 年代达到人均 GDP2000 美元的水平，而泰国到 2000 年也达到此水平。与此相应，这些国家也进入抽水蓄能电站建设的发展期。中国台湾在 1985 年和 1992 年分别建成明湖（1000MW）和明潭（1600MW）两个大型抽水蓄能电站。韩国在 1979 年和 1985 年分别建成清平（400MW）和三浪津（700MW）抽水蓄能电站。泰国也在 1995 年建成普密蓬（175MW）和斯林纳盖林特（360MW）两个混合式抽水蓄能电站。

中国和印度人均 GDP 到 2000 年尚不足 1000 美元，但这两国都是世界大国，国土面积辽阔，各地区经济发展水平差距较大，虽然全国人均 GDP 水平不高，局部经济发展快的地区经济水平并不低。以中国为例，2000 年全国人均 GDP 仅 857 美元，但上海市已接近 4200 美元，北京和天津两市已超过 2000 美元，浙江、广东和江苏三省也已达到和超过 1500 美元，中国第一批大型抽水蓄能电站正是出现在这些地区。中国至今已实现国民经济 20 年翻两番的目标，中国共产党第十六次全国代表大会又提出到 2020 年再翻两番的宏伟战略目标。

2010 年我国 GDP 增长率高达 10.6%，人均 GDP 达到 4371 美元。第二产业对整个经济增长的贡献率达到 79.1%，而第二产业中，制造、冶金、机械和化工等重化工业化比例占 50% 以上，标志着中国工业进入重化工业化时期。社会的消费结构开始向发展型、享受型升级，汽车、计算机和高档电器进入家庭，住房需求势不可挡，这一年成为中国经济发展史上的重要里程碑。经济高速发展必然带来电力负荷的高增长，这一年有 2/3 省份缺电，电力需求增加促进电力建设发展，年增装机容量超过 30000MW。与此相应，进入 21 世纪后中国掀起了第二轮抽水蓄能电站建设高潮。

因此，随着世界经济发展中心逐步转移到亚洲，今后世界抽水蓄能电站建设中心也将转移到亚洲，这已是明显的趋势。

1.1.5 抽水蓄能电站建设与环境保护协调发展

抽水蓄能电站与常规水电站相同，是清洁的可再生能源，可减少因燃煤发电排放 CO₂ 等导致全球气候变暖的温室气体，总体上对环境保护是有利的。但不能因此而忽略水电站建设对局部生态系统的不良影响，尤其是对珍稀动、植物物种的不良影响，必须采取更有力的措施来保护自然生态环境。尤其是美欧日等经济发达国家，对环境保护的重视程度越来越高。

(1) 环境影响已成为抽水蓄能电站选址的制约性因素之一，有时可一票否决。例如，美国的康乃尔、兰岭和戴维斯山等抽水蓄能电站分别因为对鱼类、沼泽和自然景观等环境的不利影响而被否决；美国希望山和萨米特两个地下式抽水蓄能电站都因环境保护原因而放弃了经济上最有利的，利用现有湖泊作上水库的方案，而在山顶上开挖筑坝新建一个上水库。

(2) 为环境保护的需要，推迟施工工期也在所不惜。例如，日本小丸川抽水蓄能电站下水库周围为日本濒临灭绝的角鹰的生活繁殖区域，角鹰在每年 10 月左右进入发情交配期，幼鹰的出生和哺育期在每年 2~6 月中旬。因此工程在每年 2~5 月中旬停止地面施工活动，在 11 月至次年 2 月控制施工活动。

(3) 环境保护的基本方针是“顺其自然”，对河流自然生态环境体系的保护要求已从静态提高到动态，即不仅指水流总量，还包括水流程；水质包括水的化学和有机物质含量、浊度等，还包括水温都要要求尽可能维持河流的自然状态。

1) 水量。首先，要保持河流总径流量不变。葛野川和神流川电站都是跨流域工程，神流川电站上库位于信浓川流域的相木川，下库位于利根川流域的神流川。为了保持各自流域总径流量不变，不允许为了增加发电量而将上库的天然径流通过机组泄放到下库。

其次，要维持自然生态平衡，还要保持径流过程也尽量维持原状，即要维持其自然的动态平衡，这是更重要的。日本要求上、下水库大坝尽量做到不拦蓄天然径流，即来多少水放多少水。

以神流川电站下库为例，流域面积为 31.2km^2 ，设计最大洪水流量为 $870\text{m}^3/\text{s}$ ，却设置了 4 套泄水系统。 $102\text{m}^3/\text{s}$ 、 $101\text{m}^3/\text{s}$ 、 $100\text{m}^3/\text{s}$ 和 $101\text{m}^3/\text{s}$ 量级的流量分别从不同的泄水系统下泄，尽量做到来多少水泄多少水。大洪水由表孔溢流坝（最大泄量为 $870\text{m}^3/\text{s}$ ）下泄；常遇洪水从泄流底孔（最大泄量为 $52\text{m}^3/\text{s}$ ）下泄；日常径流从分层取水口（最大泄量为 $2.5\text{m}^3/\text{s}$ ）下泄；而日常小径流量，则在水库上游设小坝拦截，将水沿库顶公路边设置的水渠不经过下库直接从右坝头泄至下游，此水渠也汇集库周山坡上的雨水。

2) 水温。美国巴德溪抽水蓄能电站建成上水库后，下游的霍华河流量将减少约一半，为此，在上库库岸边建一座最大流量为 $0.14\text{m}^3/\text{s}$ 的多进水口泵站。设有几台潜水泵，可根据不同时段要求的水温和溶解氧决定取水深度，分别从上水库深 9m、274m 和 58m 处取水补入霍华河，以维持河中鲑鱼的生长环境。

巴德溪抽水蓄能电站下水库——杰开西湖是深水湖泊，全年都保持低温且富有氧气，利于鲑鱼生长。为了防止电站夏季运行时表层暖水和深层低温水掺混，影响鲑鱼生长，在下水库进/出水口下游 488m 处建一道水下低坝，低坝顶部在杰开西湖满水位以下 13m。当电站抽水时，只有杰开西湖的表层暖水被抽入；当电站放水发电时，上库较暖的水由于密度较低，越过低坝后也不会和下部密度较高的低温水掺混，减少了夏季电站运行对鲑鱼栖息地的扰动。而表层较温暖的水又有利于鲈鱼、太阳鱼等鱼类的生长。

日本葛野川和神流川电站下库坝上均设置了可连续调节高度的伸缩式滑动取水口，可从选定的任意水深处取水，灵敏地控制下泄水流的水温。

3) 减少永久和临时建筑物开挖量和弃渣量，减少施工占地数量，并尽量将它们布置在水库建设区内。

首先是尽量减少弃渣量，即使软弱、风化严重的岩石也尽量用作上坝料，根据料的质

量调整坝坡。神流川电站上库采石场原拟弃掉的 C_L 级岩石（相当于全风化岩石）被用作心墙混合料。部分弃渣就填在坝的上、下游坝脚，下游坝脚弃渣堆高逾 30m，上游坝踵弃渣堆高逾 50m，仅比进/出水口底板高程低 2.5m。地下工程开挖石渣则用作下库碾压混凝土坝等的骨料。

1.1.6 抽水蓄能电站更新改造和扩建增容

由于环境保护要求不断提高，电力市场化改革带来的风险增加等原因，在经济发达国家新建抽水蓄能电站越来越困难；即使取得许可，建设成本也要增加。其次，由于设计和制造加工技术的发展，旧的抽水蓄能电站通过更新改造，可提高效率、快速响应能力和可靠性，适应电力系統对供电质量和可靠性提出的更高要求，有利于增强抽水蓄能电站在电力市场中的竞争力。美欧等国家抽水蓄能电站建设重点已从新建电站转为对老电站的更新改造和扩建增容。

更新改造与扩建增容是一种在科学技术得到长足进步后，对已有资源重新优化配置的手段，是使抽水蓄能电站的生产得以持续发展的重要措施之一。

(1) 更新改造。美国抽水蓄能电站更新改造的规模最大，进入 20 世纪 90 年代后，新建的抽水蓄能电站仅巴德溪和落基山电站两座，绝大多数为老电站的更新改造。萨利纳抽水蓄能电站是最先进行更新改造的工程，1990 年完成。据不完全统计，至今已有 11 座抽水蓄能电站的 47 台机组进行了更新改造，美国 8 座装机容量大于 1000MW 的大型抽水蓄能电站中已有一半进行了更新改造，包括最大的巴斯康蒂抽水蓄能电站。新的机组出力通常可比老的机组出力提高 10%~20%。

(2) 扩建增容。为短期内满足电力负荷迅速增长的需要，将现有的抽水蓄能电站扩建增容是最优，甚至是唯一可行的方案。日本奥清津和奥多多良木抽水蓄能电站都进行了扩建增容，装机容量分别从 1000MW 和 1212MW 增加到 1600MW 和 1932MW。以奥清津抽水蓄能电站为例，扩建增容的理由如下：

1) 经济上比新建燃气轮机电站为优。

2) 上、下库库容可满足现有 1000MW 机组满负荷发电 12h，实际运行以来装机利用小时平均仅 2.7h，因此可以不增加库容就增设两台 300MW 机组，使总装机容量达到 1600MW，调节库容仍可供全部机组满发 7.6h，完全可以满足电力系统的需要。

3) 由于不建新坝，不增加库容，不会引起环境的改变，在环保上也比新建抽水蓄能电站有利。

4) 因为可利用已建电站的现有地质资料及施工记录，缩短前期勘测设计工作周期及施工工期；上、下水库不需改建，只需增建水道和厂房系统；在尽量减少对已有电站发电影响的前提下增建上、下两个进/出水口在技术上是可行的；现有输电线容量有富裕，不需要扩建。只有采用扩建的方案，工期才有可能满足要求。

奥清津抽水蓄能电站扩建工程，从 1990 年开始酝酿，1992 年 10 月开工，1996 年 6 月完工，满足了 1996 年夏季负荷高峰的需要。实际施工只用了 3 年 8 个月，比通常新建抽水蓄能电站缩短 2 年左右。

奥多多良木抽水蓄能电站从 1994 年 12 月准备工程开工，到 1998 年 4 月第一台机组发电，仅 3 年 4 个月，比奥清津电站扩建工程又缩短 4 个月。