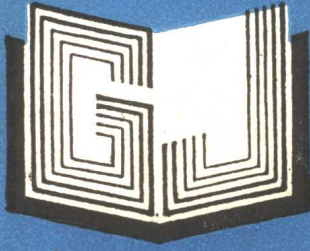


98312



高等学校教材



抽水蓄能电站

李惕先
天津大学 季云 合编
河海大学 刘启钊



9831.01

高等学校教材

抽水蓄能电站

天津大学 李惕先 季云
河海大学 刘启钊 合编

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书共分三篇。第一篇为抽水蓄能电站规划,讲述抽水蓄能电站的类型、作用和功能、站址选择、水库及其参数的选择、装机容量选定,以及抽水蓄能电站国民经济评价和财务评价的内容和方法。第二篇为抽水蓄能电站的设备,讲述了各类抽水蓄能机组应用的历史沿革及其发展趋势、各种发电电动机(包括变速转者)的结构特点、抽水工况的各种启动方式、抽水蓄能机组的工况变换,最后简要介绍了可逆式机组运行控制特点及抽水蓄能电站的计算机监控系统。第三篇为抽水蓄能电站建筑物,讲述了抽水蓄能电站的挡水、输水、平水(调压室)、厂房等建筑物在结构布置和工作上的特点,重点讲述了抽水蓄能电站多种水力—机械过渡过程的特点和计算方法。

本书主要作为高等学校水利水电工程建筑专业的选修课教材,也可供水利水电动力工程、水利水电工程施工等专业大学本科师生、水力发电工程专业研究生及工程技术人员参考。

高等学校教材

抽 水 蓄 能 电 站

天津大学 李惕先 季云
河海大学 刘启钊 合编

*

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
北京市朝阳区小红门印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 15.75印张 357千字
1995年8月第一版 1995年8月北京第一次印刷

印数 001—770册

ISBN7-120-02188-5/TV·863

定价 9.00元

前 言

在水利电力部高等学校水利水电类专业教学委员会水电站建筑物教学组1991年5月在清华大学召开的全组会议上,讨论通过了《抽水蓄能电站》一书的编写大纲,本教材就是根据该大纲编写而成的。

本书在内容上较全面地介绍抽水蓄能电站的规划、机电设备、建筑物以及运行、监控诸方面,是一本系统论述抽水蓄能电站的大学专业课程的选修教材。编写时注意到按专业需要重点选材,并尽量避免与论述常规水电站规划、建筑物以及水力机械等有关课程内容的不必要的重复。在第一篇抽水蓄能电站规划中,以抽水蓄能电站在电力系统中的作用和功能、站址和水库主参数选择、装机容量确定及抽水蓄能电站的经济评价方法等为重点。在第二篇抽水蓄能电站的设备中,以可逆式机组、各种发电电动机的结构特点、抽水工况启动方式及抽水蓄能机组的工况变换等为重点。在第三篇抽水蓄能电站建筑物中,重点介绍了挡水、输水、调压室、厂房等建筑物在结构布置和工作上与常规水电站不同之处,并着重论述了抽水蓄能电站多种水力—机械过渡过程的特点和计算方法。

因受篇幅限制,本书只能包括最基本的内容,在采用时,各院校可根据具体情况增删。

本书由天津大学教授季云、李惕先和河海大学教授刘启钊合编,其中第一篇和第二篇由季云、李惕先共同完成,第三篇由刘启钊编写,全书最后由李惕先统一定稿。

本书由清华大学水电工程系梅祖彦教授主审。梅教授对书稿提出了许多宝贵意见,这对提高本书质量很有帮助,作者表示衷心感谢。同时,还要感谢第二届水利水电类专业教学委员会水电站建筑物教学组全体委员对编写大纲的积极讨论和认真审定。此外,编写过程中的主要引用材料,在文中有所注明,本书的有关参考文献也已列于书末,对有关作者以及其他关心本书编写、出版的所有同志,在此一并表示感谢。

对于书中的不足和存在的问题,希望读者批评指正,意见请寄天津市天津大学水资源与港湾工程系水力发电教研室。

作 者

1994年5月

目 录

前 言

第一篇 抽水蓄能电站规划

第一章 抽水蓄能电站工作原理及其发展.....	1
第一节 抽水蓄能电站工作原理.....	1
第二节 抽水蓄能电站在电力系统中的作用与功能.....	1
第三节 兴建抽水蓄能电站的前提条件.....	5
第四节 抽水蓄能技术发展简况.....	6
第二章 抽水蓄能电站分类及站址选择.....	13
第一节 抽水蓄能电站分类.....	13
第二节 抽水蓄能电站站址选择.....	17
第三章 抽水蓄能电站水库及其参数选择.....	21
第一节 抽水蓄能电站水库.....	21
第二节 水库参数的计算与选择.....	22
第四章 抽水蓄能电站装机容量选择.....	29
第一节 抽水蓄能电站装机容量选择特点.....	29
第二节 装机容量选择的依据.....	30
第三节 装机容量选择方法.....	31
第五章 抽水蓄能电站经济评价.....	42
第一节 抽水蓄能电站经济评价的意义和内容.....	42
第二节 抽水蓄能电站及替代电站的主要技术经济指标及其计算.....	42
第三节 抽水蓄能电站效益分析.....	46
第四节 抽水蓄能电站国民经济评价和财务评价 ^[12]	50
第五节 抽水蓄能电站经济评价实例 ^[15]	55
第六节 国外抽水蓄能电站经济评价方法简介.....	62

第二篇 抽水蓄能电站的设备

第六章 水泵水轮机.....	78
第一节 机型种类及其适用条件.....	78
第二节 可逆式水泵水轮机.....	86
第三节 机组主要参数及其计算方法.....	93
第四节 可逆式水泵水轮机的选型计算.....	97
第七章 发电电动机.....	104
第一节 发电电动机的类型.....	104
第二节 发电电动机结构特点.....	105
第三节 变转速发电电动机.....	109

第四节	水泵工况起动方式	112
第八章	抽水蓄能机组的工况变换	123
第一节	工况切换概述	123
第二节	几种工况变换的特殊问题	125
第三节	工况变换过程	129
第四节	可逆式机组的事故情况	133
第九章	监控系统	135
第一节	可逆式机组运行控制的特点	135
第二节	监控系统的作用及基本要求	137
第三节	计算机监控系统的结构及功能	139

第三篇 抽水蓄能电站建筑物

第十章	水工建筑物	147
第一节	抽水蓄能电站的组成建筑物及其布置	147
第二节	水库及挡水、泄水建筑物	152
第三节	输水建筑物	155
第四节	调压室	184
第十一章	抽水蓄能电站水力—机械过渡过程	200
第一节	抽水蓄能电站水力—机械过渡过程的种类及其特点	200
第二节	水泵水轮机的全特性	200
第三节	水力过渡过程	210
第四节	可逆式机组的过渡过程	217
第五节	水力—机械过渡过程	218
第十二章	厂房	221
第一节	抽水蓄能电站厂房的特点和类型	221
第二节	地下厂房基本尺寸及厂房、厂区布置	226
第三节	地下厂房结构	240
参考文献		245

第一篇 抽水蓄能电站规划

第一章 抽水蓄能电站工作原理及其发展

第一节 抽水蓄能电站工作原理

抽水蓄能电站是以一定水量作为能量载体，通过能量转换向电力系统提供电能的一种特殊形式的水力发电站。为此，其上、下游均需有水库以容蓄能量转换所需的水体。

在抽水蓄能电站中，必需兼备抽水和发电两类设施。在电力负荷低谷时或丰水时期，利用电力系统待供的富余电能或季节性电能，将下水库中的水抽到上水库，以位能形式储存起来；待电力系统负荷高峰时或枯水季节，再将上水库的水放下，驱动水轮发电机组发电，并送往电力系统，这时，用以发电的水体又回到下水库。

可见，抽水蓄能电站既是一个吸收低谷电能的电力用户（抽水工况），又是一个提供峰荷电力的水电站（发电工况）。

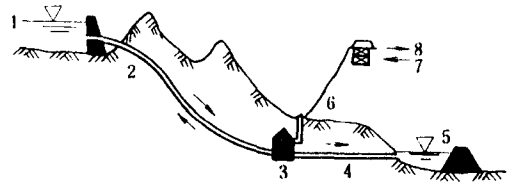


图 1-1 抽水蓄能电站工作原理图

1—上水库；2—压力钢管；3—厂房；4—尾水与抽水隧洞；5—下游水库；6—输电线；
7—由电网供电；8—向电网送电

第二节 抽水蓄能电站在电力系统中的作用与功能

一、抽水蓄能电站在电力系统中的作用

1. 调峰

抽水蓄能电站白天与常规水电站配合，担任电力系统峰荷中的尖峰部分。峰荷的上升与下降变动比较剧烈，蓄能机组响应负荷变动的能力很强，能够跟踪负荷的变化。例如英国狄诺威克（Dinorwic）抽水蓄能电站，可在10s内由零出力达到130万kW，而且在此出力下维持运行8h，不需抽水^[1]。

2. 填谷

抽水蓄能电站夜间或周末利用电力系统富余电能抽水，使火电机组不必降低出力或停机，保持在热效率较高的区间运行，从而节省燃料，并提高系统运行的安全、稳定性。填谷作用是抽水蓄能电站独具的优点，常规水电站即使是调峰性能最好，也不具备填谷作用。

当机组处于水泵工况而遇系统供电量减少的情况，机组可立即停止抽水，或快速转为发电工况。

3. 备用

抽水蓄能机组启动灵活、迅速，从停机状态启动至带满负荷仅需1~2min，由抽水工况转换到发电工况也只需3~4min，因此适于担任电力系统事故备用作用。

仅以欧洲电网1989年发生的一次事故为例：5月10日，暴风雨冲击了两条连接法国和意大利北部的380kV高压线，自动保护装置立即予以切除。当时这两条高压线正输送从邻国来的500万kW电力中的190万kW，切除后增大了其他国际电网的运行负荷，结果自动保护装置又切断了意大利电网，使意大利电力需求为2559.3万kW中突然减少了500万kW，电网频率由50Hz骤降到48.8Hz，造成一些火电机组乱真跳闸，出力减少（图1-3）。事故发生后，处于部分机组运行的常规水电站和抽水蓄能电站立即开机，处于冷备用的抽水蓄能电站也立即投入运行，几分钟后，阿勒涛·吉索（Alto Gesso）等五座电站的17台机组并网运行，总计达200万kW。不到10min，频率恢复到50Hz，并能重新加入欧洲电网运行和再次恢复欧洲电网向意大利供电。在20min内，所有用户重新得到供电保障。图1-4示出事故期间意大利电网频率变化情况^[2]。

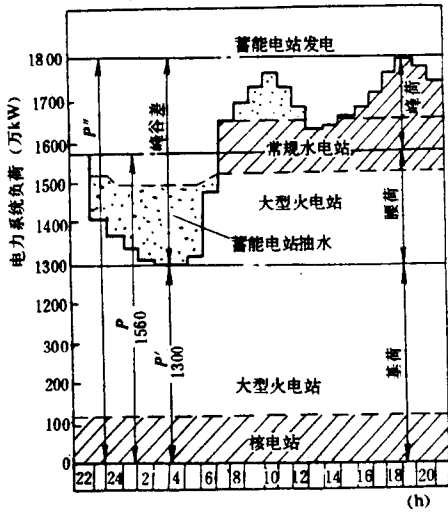


图 1-2 抽水蓄能电站调峰填谷作用图

图 1-3 欧洲电网事故跳闸后各类电站出力变化

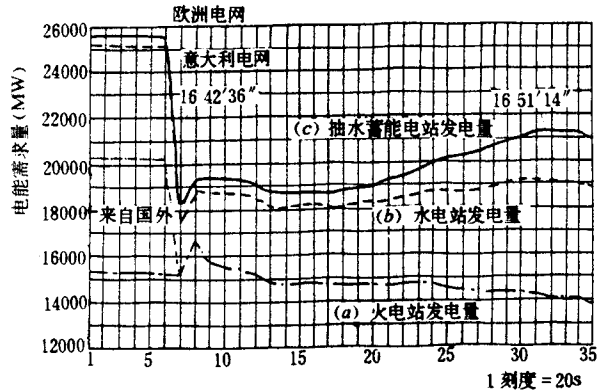


图 1-3 欧洲电网事故跳闸后各类电站出力变化
(1989年5月10日)

4. 调频

抽水蓄能机组承卸负荷迅速灵活，负荷跟踪性能好。当电力系统周波偏离正常值时，它能立即调整周波，使之维持在正常范围内，而火电机组远远适应不了负荷陡升陡降。例如，30万kW火电机组的爬坡速度每分钟仅为容量的1%，而抽水蓄能机组就快得多，像美国勒丁顿（Ludington）电站，单机容量34.3万kW，机组全部投入仅需160s，卢森堡菲安登（Vianden）抽水蓄能电站，2min可投入110万kW容量。

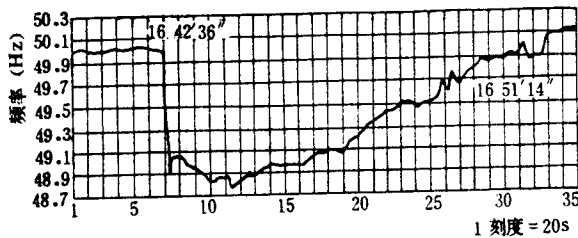


图 1-4 欧洲电网事故期间意大利电网频率变化情况
(1989年5月10日)

图 1-3 欧洲电网事故跳闸后各类电站出力变化

5. 调相

抽水蓄能电站的同步发电机，在没有发电和抽水任务时，可用来调相。

抽水蓄能电站一般离负荷中心较近，控制操作方便，对改善系统电压质量十分有利。

二、抽水蓄能电站的功能

1. 节省燃料

抽水蓄能电站的抽水耗电量大于发电量。但是，在以火电为主的电力系统中，蓄能机组与火电机组联合运行，可改变火电厂工作位置，提高火电机组运行效率，从而减少全网燃料消耗。抽水蓄能电站节省燃料体现在以下两个方面：①减少电网中开停调峰的火电机组，节省火电机组由于开停调峰而增加的燃料消耗；②改善原有担负腰荷运行的火电机组运行方式，使之负荷均匀化，从而降低该部分机组的发电（包括厂用电）燃料消耗。

抽水蓄能电站在抽水运行时，变压器、电动机、水泵和压力钢管中都将产生损失。而在发电运行时，压力钢管、水轮机、发电机和变压器中将产生损失。若设各种设备的效率为：变压器98%，电动-发电机96%，水轮机92%，水泵88%，压力钢管96%~98%（取决于钢管长度），则抽水蓄能电站的综合效率在65%~75%之间。抽水蓄能电站在峰荷期间发电，替代了运行费用较高的峰荷机组；在低谷期间抽水所用电能来自运行费用较低的腰荷机组（运行位置恰处基荷之上）。若抽水蓄能电站综合效率按0.7考虑，即抽水电量约为发电电量的1.43倍，也就是说，只有当抽水蓄能电站发电时所替代的峰荷机组的平均热耗高于担负抽水负荷的腰荷机组的平均热耗1.43倍以上时，抽水蓄能电站才能显示出节约燃料的功能。峰荷、腰荷火电机组在经济性上差别愈大，抽水蓄能电站节省燃料的功能愈显著。

根据电能平衡和燃料平衡，可粗略地导出抽水蓄能电站单位燃料消耗 $b_{抽}$ 的算式：

$$b_{抽} = \frac{1}{\eta_{综}} \left[b_0 - \frac{a}{1-a} (b_T - b_0) \right] \quad (1-1)$$

式中 $\eta_{综}$ ——抽水蓄能电站综合效率，取值0.7左右；

b_0 ——抽水电源（腰荷火电站）的经济燃料消耗（即热效率最高情况下的燃料消耗）；

a ——设备日利用率， $a = \frac{\text{设备日运行小时数}}{24}$ ；

b_T ——抽水电源（腰荷火电站）在日利用率为 a 时的单位燃料消耗，一般情况下， $b_T > b_0$ 。

由式(1-1)可见，抽水蓄能电站单位燃料消耗 $b_{抽}$ 由两部分组成，其中 $b_0/\eta_{综}$ 是电站夜间抽水、高峰发电时每度电实际耗用的燃料，另一部分 $\Delta b = a(b_T - b_0)/\eta_{综}(1-a)$ 是由于夜间抽水用电，改善腰荷火电站运行条件而为系统节约的燃料。只有当 $b_T = b_0$ 时，才有 $\Delta b = 0$ ；当 $b_T > b_0$ 时， Δb 总是大于零， Δb 随 b_T 的增大而增大。设 $b_0 = 330\text{g/kW}\cdot\text{h}$ （全国高压凝气式火电站单位煤耗最低值）； $b_T = 376\text{g/kW}\cdot\text{h}$ （全国高压凝气式火电站单位煤耗平均值）； $a = 2/3$ （夜间低谷时间为8h），则 $\Delta b = a(b_T - b_0)/\eta_{综}(1-a) = 131.4\text{g/kW}\cdot\text{h}$ ；

$$b_{抽} = \frac{b_0}{\eta_{综}} - \Delta b = 471.4 - 131.4 = 340\text{g/kW}\cdot\text{h}。$$

可见，抽水蓄能电站的节省燃料消耗是客观存在的。

2. 提高火电设备利用率

抽水蓄能电站替代电力系统中的热力机组调峰, 或者使大热力机组不压负荷或少压负荷运行, 可避免热力机组频繁开、停机所导致的设备磨损, 减少设备调节系统、止动附件、密封件及其他部件中的故障率, 从而提高热力机组的利用率和使用寿命, 减少小修次数, 延长大修周期。

例如天津军粮城火电厂, 1978年以前单机容量为5万kW的机组一般担任基荷, 后来以开停方式进行调峰, 每天开停一次, 使大修时间平均每次增加5~10d, 小修平均增加1~2d, 计划外检修则每天都要进行。天津大港电厂32.5万kW进口机组原设计只担任基荷, 每六年大修一次, 如今以压负荷方式调峰, 两年需大修一次。据对宝钢自备电厂35万kW机组的寿命消耗率(或称寿命消耗分配)的调查分析, 正常负荷变化为0.0025%/次, 正常停机为0.002%/次, 而冷态起动为0.01%/次, 极热态起动为0.029%/次, 带厂用电低负荷运行为0.033%/次, 说明火电机组调峰对机组寿命是有相当影响的, 带厂用电运行和极热态起动时, 交变应力最大, 对机组寿命的影响也大。

3. 美化环境景观

抽水蓄能电站具有上、下两座水库, 有的修建在风景秀丽的天然公园领域内, 只要在施工和运行期间注意环境改良和水质控制, 并持续进行监测, 不但不会污染环境, 还会美化景观, 增辉添色。如日本装机容量为46万kW的沼泽Ⅱ(Daini-Numazawa)抽水蓄能电站, 上水库是天然湖泊, 下水库为控制塘, 两座水库均位于天然公园域内, 投入运行10年来, 作为上游水库的沼泽(Numazawa)湖的水质一直保持良好的; 位于意大利中南部的普列生扎诺(Presenzano)抽水蓄能电站, 装机100万kW, 施工中在下水库堆石堤坝外边坡形成连续草坪, 在取料场梯形平台边缘种上绿苗, 围绕压力管道锚块铺盖粘土种草种树等等, 形成更美的景观。

再以英国狄诺威克(Dinorwic)抽水蓄能电站为例^[3], 进一步说明抽水蓄能电站在电力系统中的作用与功能。该电站装有六台300MW可逆式蓄能机组, 1982年第一台机组投运, 1984年建成, 是迄今欧洲最大的抽水蓄能电站, 属中央电力管理局。这个电力系统原来的水电站及抽水蓄能电站比重很小, 仅占1.5%。狄诺威克电站发电水头为488~534m, 运行方式为日循环。设计要求该电站能在10s内由零出力达130万kW, 且可维持130万kW连续运行8h, 不抽水。抽水工况效率达78%。

电站除调峰填谷外, 还承担130万kW的备用, 其中100万kW由旋转机组承担, 30万kW由停运机组承担。电站投产前, 电力系统备用由低负荷运行的火电和核电分散承担。狄诺威克电站担任备用后, 每年为电力系统节约2000万英镑。它调峰改善火电运行条件, 每年又为系统节约2500万英镑。为此, 蓄能机组每天变换工况约30次, 提供75万kW峰荷出力。

狄诺威克的运行经验表明, 蓄能机组的可用率和可靠度接近设计值, 达95%~99%。电站的投入, 使英国电力系统的频率和电压调整得到明显改善, 5min频率偏差由0.085下降到0.075Hz。

狄诺威克抽水蓄能电站在电力系统中有五种基本运行方式, 即①发电工况; ②空载工况(转轮在空气中沿发电方向空转); ③静止工况; ④空载工况(转轮在空气中沿抽水方

向空转)；⑤水泵工况。业主对制造厂家提出的要求是：机组每天能承受40次工况转换，每年共承受15000次，其中5000次为启动和停机工况。表1-1列出狄诺威克电站主要工况转换的时间。

表 1-1 狄诺威克抽水蓄能电站运行工况转换时间 [3]

运行工况转换	时 间	
	电 站	机 组
静止→空载发电(在水中)	90s	90s
空载发电(在水中)→带130万kW负荷	10s	10s
空载发电(在空气中)→带130万kW负荷	11s	11s
满负荷→空载发电(在水中)	10s	10s
空载发电→静止	6min	6min
静止→抽水空载(排水启动)	30min	9min
抽水空载→抽水满载	3min40s	1min20s
抽水满载→抽水空载(在水中)	10s	10s
静止→抽水满载(水中同步启动)	—	120s
水泵空载(在水中)→水泵空载(在空气中)	15s	15s
满载发电→满载抽水	37min	17min
满载抽水→满载发电：正常情况	8min	8min
紧急情况	90s	90s
空载抽水(在空气中)→空载发电(在水中)：正常情况	8min	8min
紧急情况	2min30s	2min30s

由于狄诺威克抽水蓄能电站有很快的响应能力，使电力系统能够减少使用油耗甚高的燃气轮机组。

第三节 兴建抽水蓄能电站的前提条件

一、电力系统的需要与可能

只有在电力系统需要与可能的条件下，才能充分发挥抽水蓄能的独特优势。所谓需要是指电力系统缺乏调峰电源；而可能性则是指电力系统在负荷低谷时是否有足够的富余电量充当抽水能源。电力系统的需要与可能是建造抽水蓄能电站的两个同等重要的条件。

抽水蓄能电站装机规模大小，直接与电力系统可能提供的抽水用的电能量有关；供抽水的电能量一般来源于两个方面，即①夜间负荷低谷时火电站运行机组(包括空载机组)的待供电能。以这部分电能作为抽水电源，抽水蓄能电站能起到调峰填谷作用。②丰水时期水电站的季节性电能。以季节性电能作为抽水能源，即变丰水期的季节性电能为枯水期的保证电能，使水能资源得到充分、合理地利用。

一般地讲，对以大型火电为主且峰、谷负荷差别大的电力系统，迫切需要调峰电源，这时，拟建的抽水蓄能电站的抽水能源也是有保证的。

二、蓄能库容及相应水源要有保证

抽水蓄能电站必须具有上水库和下水库，以保证有必要的蓄能库容，并由上库或下库保证提供可循环使用的抽水、发电水源。

混合式抽水蓄能电站，多利用河川常规水电站的水库作为上水库(如我国的北京市密

云和河北省岗南、潘家口电站)。这种蓄能电站的水源是有保证的,其下水库则往往是新建的小水库,或梯级水电站的下一级水库。

对于纯抽水蓄能电站,上水库可能靠筑坝形成,电站水头主要由坝抬水集中;也可能是修建在高出河水面数百米处的人工水库(如我国京津唐地区在建的十三陵抽水蓄能电站),这时电站水头主要由引水道采集。下库则利用河流上已建的水库,或在电站下游用低坝新建成一座小水库,或利用现有湖泊或河道作为下水库。这种情况下,要由下水库保证水源,或引用外来径流。

为了使抽水蓄能电站在抽水工况时能在高效区运行,水泵的计算扬程与最大扬程之间应保持一定关系。换句话说,抽水工况对水库工作深度有一定的限制,不希望水库工作深度变化过大(参见第四章第一节)。

三、抽水容量要有保证

目前,工作水头在600m以内的纯抽水蓄能电站,几乎全部采用可逆式机组,即电机可兼作电动机和发电机,水机兼作水泵和水轮机。

采用可逆式机组时,发电机容量 N_T 与电动机容量 N_P 之间有一定的关系,这种关系取决于两者功率因数的差异,通常发电机功率因数 $\cos\phi_T = 0.85$,电动机功率因数 $\cos\phi_P = 0.95$,则有:

$$N_P = \left(\frac{N_T}{0.85} \right) \times 0.95 = 1.12 N_T \quad (1-2)$$

对于混合式抽水蓄能电站,常因蓄能部分的装机容量 N_T 过小且工作时间较长,利用相应的 N_P 来抽水蓄能难于满足要求,换句话说,就是可供的蓄能量小于所需的发电量。为使抽水容量得到保证,需将常规发电部分的一些机组改用可逆式机组,这部分容量可称之为混合式抽水蓄能电站的共用容量。例如,某混合式抽水蓄能电站装机容量为80万kW,原设计常规的发电部分和蓄能部分容量分别为50万kW和30万kW。为满足抽水容量的需要,该电站装设四台10万kW的常规机组和四台10万kW的可逆式机组。所增加的10万kW蓄能机组容量即为共用容量,它既是常规水电站部分的容量,又是蓄能电站部分的容量。

总之,在电力系统有必要建造抽水蓄能电站的前提下,必须在能源、蓄能库容及水源、抽水容量等方面都得到保证时,建造抽水蓄能水电站在技术上是可行的。

第四节 抽水蓄能技术发展简况

一、国外抽水蓄能电站简况

第一座抽水蓄能电站于1882年诞生在瑞士苏黎世,其功率为515kW,扬程153m。19世纪初,意大利、德国和瑞士修建的第一批抽水蓄能电站,单机出力仅数千kW。从本世纪初到50年代末期,抽水蓄能处于缓慢发展阶段。近30年来,美国、日本等许多工业发达国家竞相发展抽水蓄能,使总量有了很大的增加,表1-2列出了国外已建抽水蓄能电站的装机总容量的增长情况。

本世纪60年代平均每年装机125万kW,70年代为299万kW,80年代561万kW,由1960年

表 1-2

国外已建抽水蓄能电站总容量

(单位: 万kW)

年 份	1960	1970	1980	1990
总 装 机	348	1603	4591	10204
相 对 倍 数	1.0	4.6	13.19	29.32
年平均装机	125	299	561	

到1990年期间的30年, 全世界抽水蓄能电站总装机容量增加了28倍。

世界上抽水蓄能电站装机容量最多的四个国家为: 美国2797万kW, 日本1912万kW, 意大利858万kW, 法国658万kW, 表1-3中列出总容量处于前10名的国家的情况(统计至1990年)。目前, 全世界有35个国家已建、在建和拟建抽水蓄能电站。

表 1-3

抽水蓄能电站装机最多的一些国家的发展情况

序号	国 家	1960年	1970年	1980年	1990年	资 料 来 源
1	美 国	9	369	1327	2797	根据美刊《国际水力发电和坝工建设》1989年手册和《The World's Pumped Storage Plants》, Water Power & Dam Costruction, 1990.4统计。 德国的统计数据由两部分合成:“+”号左侧是联邦德国的数据, 右侧为民主德国数据
2	日 本	11	296	1081	1912	
3	意大利	24	126	362	858	
4	法 国	23	45	160	658	
5	西班牙	1.3	129	211	584	
6	德 国	85 + 18	148 + 58	292 + 58	565	
7	英 国	0.5	76	106	324	
8	奥地利	82	89	160	281	
9	瑞 士	32	81	110	268	
10	波 兰	7.5	36	86	155	

值得指出的是, 目前抽水蓄能电站总容量占世界首位的美国, 在60年代以前仅有9万kW, 但发展迅速, 1990年达2797万kW, 其中大型抽水蓄能电站较多, 装机容量100万kW以上的有8座, 总容量1103万kW, 占同期全部抽水蓄能电站总容量的39.4%。另一特点是多数250m以上的高水头电站, 绝大部分采用可逆式机组。美国土木工程师学会认为, 利用已建水库发展抽水蓄能的潜力很大, 可再建27处, 新增装机6000万kW, 预计2000年抽水蓄能电站总装机容量将达4890万kW。

日本抽水蓄能发展也很快。1960年以前仅有11万kW, 不及当时日本全国水电总装机容量的1%, 1987年达1665万kW, 超过其水电总装机容量的50%。1990年达1912万kW, 与常规水电容量相等。现正在建几座大型抽水蓄能电站, 日本电气事业审议会提出, 2000年抽水蓄能电站总装机容量约为3300万kW, 将占总设备容量的11%左右。

西欧国家是最早发展抽水蓄能电站的。60年代以前在世界上占主要地位。1987年西欧各国抽水蓄能电站总装机容量达3374万kW, 仍占全世界的40%。

前苏联起步较晚, 1970年只建有库班(Cooban)一处, 1.9万kW。1972年, 装机22.5万kW的基辅(Kiev)抽水蓄能电站投入运行。进入80年代后加快了建设速度, 1986年莫斯科附近扎戈尔(Zagorsk)抽水蓄能电站投产, 装机120万kW。在建的五座大型电站, 总装机容量为1070万kW, 其中包括装机容量达160万kW的立陶宛凯夏多尔(Kaishador)抽水蓄能电站。前苏联在抽水蓄能电站规划中注意把它与热电站、核电站、常规水电站结合在一

表 1-4 国外装机容量100万 kW以上已建抽水蓄能电站

序号	站名	国别	调节性能	机组型式	装机容量 (万kW)	机组台数	单机容量 (万kW)	额定水头 (m)	投产年份	制造厂家
1	巴斯康蒂 (Bath County)	美国	—	混流可逆式	210	6	35	329	1985	AC, WH
2	路丁顿 (Ludington)	美国	—	混流可逆式	187.2	6	31.6	93	1973	日立
3	狄诺威克 (Dinorwic)	英国	日调节	混流可逆式	180	6	30	513	1982	B, GE
4	大屋 (Grand Maison)	法国	季调节	多级混流可逆式	180	蓄能机 8 常规机 4	15	905(最大)	1986	N
5	卡拉彦 (KaLayan)	菲律宾	日调节	混流可逆式	180	1~2期 2 3~6期 1	15 30		1982	N, GIE
6	腊孔山 (Raccoon Mt.)	美国	—	混流可逆式	153	4	38.25	286	1978	AC, WH
7	图穆特第三 (Tumut III)	澳大利亚	日调节	串联混流式	150	蓄能机 3 常规机 3	25	155	1972	东芝, 三菱
8	新高濑川 (Shin Taka Segawa)	日本	—	混流可逆式	128	4	32	229	1979	东芝, 三菱
9	卡斯泰克 (Castaic)	美国	—	混流可逆式	125	蓄能机 6 常规机 1	20 5	274	1971	日立
10	奥多多良木 (Okutataragi)	日本	—	混流可逆式	121.2	4	30.3	383	1974	日立, 三菱
11	奥吉野 (Okuyoshino)	日本	日调节	混流可逆式	120	6	20	530	1978	东芝
12	玉原 (Tamahara)	日本	—	混流可逆式	120	4	30	518	1982	日立, 三菱
13	吉尔博 (Gilboa)	美国	日调节	混流可逆式	120	4	30	335	1973	日立
14	札戈尔 (Zagorsk)	前苏联	日调节	混流可逆式	120	6	20	100	1984	—
15	俱野川 (Matonogawa)	日本	—	混流可逆式	120	4	30	489	1986	日立
16	奇奥塔斯 (Chiotas)	意大利	日调节	四级混流可逆式	118.1	8	14.8	1084	1982	Hyd, EW, RC

续表

序号	站名	国别	调节性能	机组型式	装机容量 (万kW)	机组台数	单机容量 (万kW)	额定水头 (m)	投产年份	制造厂家
17	奥矢作 I (Okuyahagi I)	日本	—	混流可逆式	114	I 3	I 10.5	159/415	1981	东芝, 日立
18	新丰根 (Shintoyne)	日本	周调节	混流可逆式	112.5	5	22.5	203	1973	东芝
19	维昂登 (Vianden)	卢森堡	日调节	I 串联混流式 II 混流可逆式	110	I 9 II 1	I 10 II 20	270	I II 1964 1963	V
20	今市 (Imaichi)	日本	日调节	混流可逆式	108	3	36	524	1984	东芝
21	赫尔姆斯 (Helms)	美国	日调节	混流可逆式	105	3	35	495	1984	日立, WH
22	马克斯巴赫 (Markersbach)	德国(东)	日调节	混流可逆式	105	6	17.5	281	1981	CKD
23	布康瓦尔格兰德 (Roncovalgrande)	意大利	日调节	冲击式	104.4	8	13.05	746.5	1971	—
24	巴德溪 (Bad Creek)	美国	—	混流可逆式	102.8	4	25.7	309	1986	AC
25	奥清津 (Okukiyoitsu)	日本	—	混流可逆式	100	4	25	470	1978	日立
26	下乡 (Shimogo)	日本	日调节	混流可逆式	100	4	25	387	1983	东芝
27	德拉肯斯堡 (Drakensberg)	南非	周调节	混流可逆式	100	4	25	451	1981	东芝
28	埃多罗 (Edo Lo)	意大利	日调节	多级混流可逆式	100	8	12.5	1256(最大)	1982	Hyd, RC, EW
29	霍恩贝格 (Hornbergstufe)	德国(西)	日调节	串联混流式	100	4	25	575	1975	EW
30	诺斯菲尔德山 (NorthField Mt.)	美国	—	混流可逆式	100	4	25	220	1972	BLH
31	德尔奥湖 (Lago Delio)	意大利	—	串联冲击式	100	8	12.5	754(最大)	1971	Hyd, EW
32	普列生札诺 (Presenzano)	意大利	日调节	混流可逆式	100	4	25	489(最大)	1987	Hyd

起，组成动力联合体，颇具特色。例如抽水蓄能电站与核电站组成动力联合体，抽水蓄能电站的水库便是核电站的冷却水池，省去专用池。此外，运行管理机构亦相应精减〔4〕。

表1-4列出国外已建的装机容量100万kW以上的抽水蓄能电站的情况。

分析近20~30年末抽水蓄能电站迅速发展的原因，主要有以下几点：

(1) 近20年来，许多发达国家的电源结构发生了很大变化，热力发电机组的单机容量增长很快，例如燃油火电机组单机容量已超过100万kW；燃煤机组单机容量达120万kW；核电机组单机容量达160万kW，这些巨型机组的调峰能力均较差，需要大容量抽水蓄能机组与之配合运行。一般情况下，核电站与抽水蓄能电站在电力系统中的容量比例应为5:1。有些国家的抽水蓄能电站与核电站同步修建。

(2) 与其他调峰机组相比，抽水蓄能机组除调峰之外还能填谷，一些水电比重较大的国家，如瑞典、西班牙等，水电承担基荷中的重要部分，仍需要建设抽水蓄能电站与火电站配合运行。

(3) 抽水蓄能机组除调峰填谷的功能外，还具有良好的承担事故备用等方面的性能，在电力系统发生事故时能即时提供出力，防止系统产生过大的振荡，有时，兴建抽水蓄能电站主要从增加系统事故备用能力考虑。

(4) 许多国家实行峰、谷电差价政策，峰谷电价比约为3:1~4:1，意大利最多为5:1，而法国甚至达10:1，抽水蓄能电站抽水时用低价电，发出的电力可售高价，其经济性显而易见。

(5) 有些国家的水能资源已开发得比较充分，常规水电已无力提供更多的调节容量，而抽水蓄能电站的发展则几乎不受水力资源条件的限制。

二、我国抽水蓄能电站建设简况

我国河川水能资源蕴藏量居世界首位，可开发的水电站甚多，加上对抽水蓄能电站在电网中的作用缺乏共识，以致在较长时期对抽水蓄能电站建设不够重视，起步较晚。

1968年，首次在河北省石家庄市附近的岗南水电站装置一台由日本引进的蓄能机组，容量为1.1万kW。1972年又在北京市郊区的密云水电站安装了两台国产的类似机组，但由于水库调度和试制机组的质量问题，没有很好地发挥作用。这些安装在灌溉为主的水库枢纽的抽水蓄能机组，水头不高 ($H_{\max}=64\text{m}$)，容量又小，水头变幅却很大，机组性能难于保证，机组制造比较复杂，成本很高，故以后没有再建。1981年，台湾省兴建了第一座抽水蓄能电站—明湖电站，装机容量为 4×25 万kW，于1985年建成并网送电。随后，再以日月潭为上水库建明潭抽水蓄能电站〔3〕。

近十年来，随着国民经济的发展，电网不断扩大，尖峰负荷越来越突出，尤其是有些地区开始兴建核电站，电力系统对调峰填谷的需求日益迫切（表1-5），而且电力系统内常

表 1-5 我国若干电网的峰谷差(1989年) (单位: 万kW)

电网名称	最大负荷	峰谷差	网内水电容量
华北电网	636	220	66
东北电网	1250	352	337
华东电网	1312	430	93
广东省电网	320	120	75

规水电容量也不足以满足调峰要求。在这种背景下,国家电力工业中长期规划中制定了“在调峰能力弱,系统峰谷差大的电网,要建设一批抽水蓄能电站”的方针。

近年来,建设抽水蓄能电站的意义及其特有功能逐步被认识和理解,开始兴建大型抽水蓄能电站。广州、十三陵和羊卓雍湖抽水蓄能电站已在建,天荒坪抽水蓄能电站已完成初步设计,上报了项目建议书(表1-6)。各地纷纷进行抽水蓄能电站站址普查,对部分电站进行了可行性研究和初步设计(表1-7)。

表 1-6 我国已建和在建的抽水蓄能电站

电站名称	省区	县市	水头(m)	装机容量(万kW)	上水库	下水库	建设年份
岗南	河北	石家庄市	64/28	1×1.1+2×1	岗南水库	东岗南调节池	1960~1968
密云	河北	密云县	61/34	4×1.5+2×1.1	密云水库	发电量渠扩大	1960~1972
潘家口	河北	迁西县	85.03/35.44	3×9	潘家口水库	河道低坝	1976~1990
广州	广东	广州市	537.18/504.29	4×30	天然盆地	天然盆地	1988~1993
十三陵	北京	昌平区	475/432	4×20	大坝雍高	十三陵水库	1989~1994
羊卓雍湖	西藏	拉萨市	842.2/809.9	4×2	羊卓雍湖	雅鲁藏布江	1989~1994
天荒坪	浙江	安吉县	570	6×30	天然洼地	大溪峡谷	1993年始建
明湖	台湾	南投县	316.5/269.5	4×25	日月潭	明湖	1981~1985
明潭	台湾	南投县	380	6×26.7	日月潭	筑坝形成	1987年兴建

表 1-7 我国正在开展前期工作的抽水蓄能电站

电站名称	省区	县市	毛水头(m)	装机容量(万kW)	上水库	下水库
响洪甸	安徽	金寨	65	8	已有水库	河道低坝
琅琊山	安徽	沧州市	130	40	山顶盆地	已有水库
青石山	江苏	句容县	101	30	山顶盆地	已有水库
西湾	江苏	武进县	57	15	大坝雍高	太湖
奉化	浙江	奉化县		8	山顶盆地	已有水库
张河湾	河北	井陘县	349	100	围堤	已有水库
雾灵山	河北	兴隆县	850~1100	150~300	山顶盆地	河道低坝
西龙池	山西	五台县	819	100	山顶盆地	围堤
桃花寺	天津	蓟县	172	50	山顶盆地	已有水库
岱海	内蒙	凉城	63	10	大坝雍高	已有水库

近年可建成的浙江省天荒坪抽水蓄能电站,装机容量达180万kW,它将成为华东电力系统的主力调峰电源;在广东,还准备在广州抽水蓄能电站的基础上,扩建二期电站,容