

邱彬如 抽水蓄能文集

中国水电顾问集团北京勘测设计研究院 邱彬如 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

邱彬如

抽水蓄能文集

中国水电顾问集团北京勘测设计研究院 邱彬如 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

图书在版编目(CIP)数据

邱彬如抽水蓄能文集/邱彬如著. —北京: 中国电力出版社,
2013. 11

ISBN 978-7-5123-4559-1

I. ①邱… II. ①邱… III. ①抽水蓄能水电站-文集
IV. ①TV743-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 125211 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 11 月第一版 2013 年 11 月北京第一次印刷

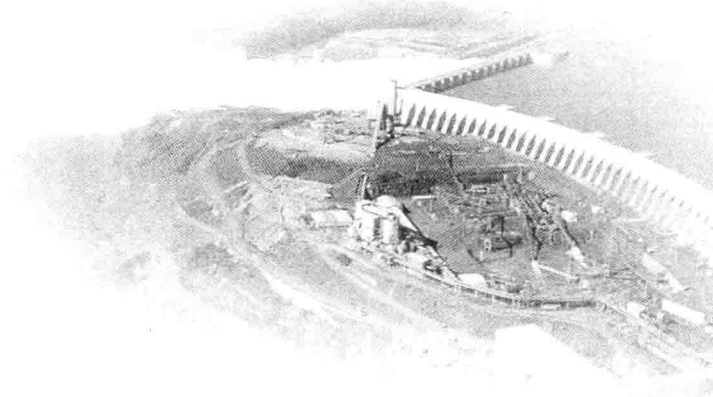
880 毫米×1230 毫米 16 开本 22 印张 659 千字

定价 88.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



序

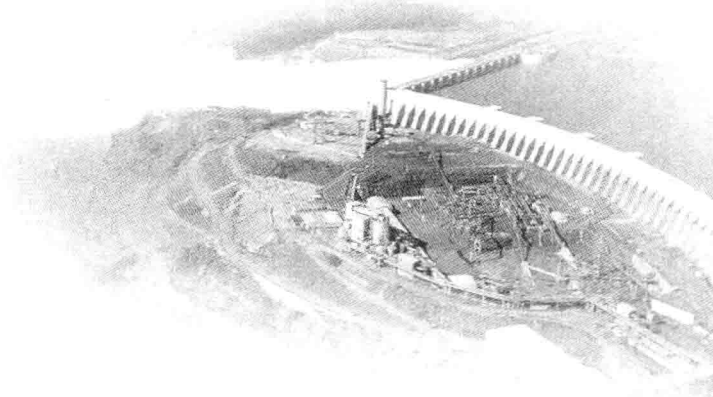
抽水蓄能电站具有调峰、填谷、调频、调相、事故备用和黑启动等功能，对电力系统的安全、稳定和经济运行具有重要的保障作用。世界上第一座抽水蓄能电站于1882年修建于瑞士，但较具规模的开发则始于20世纪50年代，主要建于欧美和日本等经济发达国家。我国抽水蓄能电站建设始于20世纪60年代，但真正的大规模开发建设则始于20世纪90年代，目前我国已建和在建抽水蓄能电站已达30余座。

中国水电顾问集团北京勘测设计研究院（以下简称北京院）是国内最早从事抽水蓄能电站研究和设计工作的单位。20世纪60年代，设计建成了我国第一座抽水蓄能电站——河北岗南抽水蓄能电站（11MW）。20世纪70年代开始进行华北地区抽水蓄能电站选点工作，之后陆续开展了华北、华东、东北等地区的抽水蓄能电站选点规划工作，新近刚完成新一轮的华北、东北和内蒙古7省区抽水蓄能电站选点规划。20世纪90年代以来，北京院先后设计建成了北京十三陵、安徽琅琊山、河北张河湾、山西西龙池抽水蓄能电站，目前设计在建的抽水蓄能电站有内蒙古呼和浩特、吉林敦化、河北丰宁抽水蓄能电站等。

邱彬如总工程师从事水电工程设计工作近50年，曾担任北京院总工程师多年，直接参与并领导过北京院承担的各抽水蓄能电站规划和设计工作，经历了我国抽水蓄能电站建设发展的主要历程，是我国抽水蓄能方面的专家。退休后仍热心我国水电和抽水蓄能事业，笔耕不辍，先后主编出版了《世界抽水蓄能电站新发展》、《抽水蓄能电站工程技术》等专著。本书汇总了邱彬如总工程师有关抽水蓄能的文章，包括国外抽水蓄能电站建设情况及经验的介绍和我国抽水蓄能电站建设经验教训的总结等，相信对从事抽水蓄能电站建设的技术人员会大有裨益。

中国水电顾问集团北京勘测设计研究院总工程师

吕明治



前言

目前,我国抽水蓄能电站建设又进入一个高潮期,不仅完成了 20 余个省份的抽水蓄能电站选址规划,还有一大批工程正在开工建设,更多的工程正处于前期勘测设计工作阶段。西部地区的部分勘测设计院也开始参与抽水蓄能电站设计工作,许多技术人员第一次接触抽水蓄能电站建设,他们希望更多地了解抽水蓄能电站的有关知识,但相关专著仅十余种,很难满足大家的需要。

在水电行业中,部分人认为抽水蓄能电站装机规模、坝高等都不如常规水电站,能做常规水电站的设计就可做抽水蓄能电站的设计,没有什么技术难度可言。事实并非如此,抽水蓄能电站有其特殊技术问题,有些技术难度还高于常规水电站。例如,水泵水轮机水力特性复杂,工况转换种类多,水力过渡过程变化要复杂得多;对过机含沙量要求高,下水库拦沙排沙设施也更复杂;高压隧洞水头也高得多;上水库库盆防渗要求高;沥青混凝土面板坝(库)应用多;需更多利用软弱及风化岩石筑坝;地下厂房埋藏深,有些需在复杂地质条件下修筑等。抽水蓄能电站是一种特殊的水电站,其基本技术与常规水电站相同,但简单地照搬常规水电站的技术是不可能成功的,必须掌握其特点,才能设计出优秀的抽水蓄能电站。

中国水电顾问集团北京勘测设计研究院(简称北京院)是我国最早开始抽水蓄能电站设计工作的设计院,也是完成抽水蓄能电站设计项目最多的设计院之一。笔者自 1964 年进入北京院工作并从事水电设计工作,至今已近 50 年,前期主要从事常规水电站设计工作,后期则主要从事抽水蓄能电站设计工作,笔者经历了抽水蓄能电站建设发展历程的主要阶段。

本书汇总了笔者关于抽水蓄能的文章,并按发表年份排列,以便读者对抽水蓄能电站建设发展过程有个概念。但考虑到读者工作繁忙,不一定有时间顺序阅览全书,因此,为方便读者使用,按年份由新而旧排列,读者可以首先选阅近年撰写的几篇综述性的总结文章。

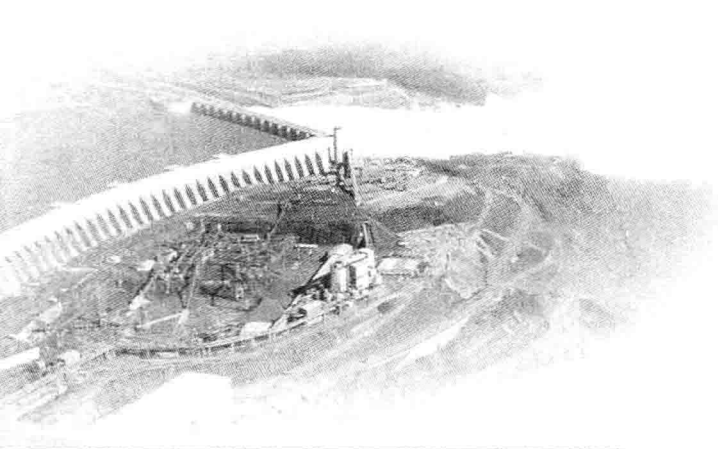
由于我国抽水蓄能电站建设的发展是从主要学习借鉴国外经验与技术,逐渐转向自主创新开发,因此,前期主要是介绍国外抽水蓄能电站建设情况和经验(包括两篇考察报告),后期则主要是我国抽水蓄能电站建设,尤其是设计方面的一些经验总结。我国建成和在建抽水蓄能电站已达 30 余座,有必要也有条件进行总结工作。通过笔者的抛砖引玉,希望有更多专家发表更多有深度的总结性论文,以利于我国抽水蓄能电站建设事业更健康、更好地发展。

本书的出版工作得到北京院领导的大力支持,信息室的同事也给予了许多具体帮助,在此一并表示感谢。

中国水电顾问集团北京勘测设计研究院

邱彬如

2013 年春节于上海



目 录

序
前言

抽水蓄能电站枢纽布置及建筑物形式选择·····	1
严寒气候复杂地基上世界最高沥青混凝土面板堆石坝的设计 ·····	33
高度重视高水头钢筋混凝土压力管道的风险 ·····	86
抽水蓄能电站·····	113
中国抽水蓄能电站建设·····	144
月牙肋钢岔管结构的优化·····	149
抽水蓄能电站上水库库盆防渗形式选择·····	155
从经济性角度看抽水蓄能电站站址选择·····	160
西龙池抽水蓄能电站特殊技术问题研究·····	166
电力体制改革后抽水蓄能电站建设的新问题·····	173
世界抽水蓄能电站发展新趋势·····	177
日本抽水蓄能电站的信息化施工·····	184
日本抽水蓄能电站考察报告·····	191
欧洲的抽水蓄能电站与水电建设·····	282
迈向 21 世纪的抽水蓄能电站建设 ·····	291
法国抽水蓄能电站考察报告·····	328
抽水蓄能电站站址选择探讨·····	337

抽水蓄能电站枢纽布置及建筑物形式选择

抽水蓄能电站站址选定之后，枢纽布置及建筑物形式选择就成为影响工程投资最重要的因素之一，也是前期设计中的重要工作内容之一。本文对抽水蓄能电站枢纽布置及建筑物形式选择展开讨论。

1 上水库

有上、下两个水库是抽水蓄能电站区别于常规水电站最显著的特点之一，尤其是上水库，更是常规水电站所没有的。抽水蓄能电站枢纽布置首先要选定上、下水库的库址，库址一旦确定，水道系统和厂房系统建筑物布置范围就基本确定了，即枢纽布置格局基本确定。

其次，上、下水库布置及建筑物形式选择的优劣对工程投资影响较大，据国内部分抽水蓄能电站统计，上、下水库投资占枢纽建筑物投资的比例为 6%~35%，变幅达 29%，突显上、下水库，尤其是上水库的布置及建筑物形式选择，对抽水蓄能电站经济性的影响之大，自然成为设计关注的重点。

1.1 上水库库盆防渗型式

1.1.1 上水库库盆防渗型式选择是重中之重

上水库投资占土建投资比重大，尤其是库盆防渗型式影响最大。我国抽水蓄能电站建设的早期阶段，由于缺乏经验，选址时往往强调距高比尽量小及水头尽量高，而将上水库置于山顶。因而忽略了上水库渗漏条件，许多电站都需要全库盆防渗。如张河湾和西龙池抽水蓄能电站水道长度和机组额定水头之比分别为 2.81 和 2.92，在我国抽水蓄能电站之中均属于最小之列，但上水库都采用沥青混凝土面板全库盆防渗，使得工程投资均较高。

从表 1 可见，尽量选择只需局部防渗（以垂直防渗帷幕为主）的上水库已成为一种趋势。例如，广东省在建的清远抽水蓄能电站上水库共建 6 座副坝，帷幕防渗段长 2500m，占库周总长度的 60%；深圳抽水蓄能电站上水库共建 5 座副坝，帷幕防渗段长 2500m，占库周总长度的 82%，两者都选择帷幕防渗，而不采用全库盆防渗。

表 1 抽水蓄能电站上水库库盆防渗型式统计

防渗型式 电站类型	全库盆防渗				垂直防渗
	沥青混凝土面板	混凝土面板	混凝土面板+土工膜	沥青混凝土面板+黏土铺盖	灌浆帷幕为主
已建电站	20.0%	20.0%	6.7%	6.7%	46.7%
在建电站	12.5%	0	12.5%	0	75%

1.1.2 地下水位与水库防渗型式选择

水库防渗型式的选择，应根据地形、地质、径流及补水、气温、施工、材料等条件，通过技术经济比较确定。这里不准备就各个因素展开详细讨论，仅就确定是否采用全库盆防渗的关键因素之一——地下水位作讨论。

由渗流基本公式 $Q=k(H/L)TB$ （式中： Q 为渗流量； k 为渗透系数； H 为水库内外水头差； L 为渗流长度； H/L 为渗流平均梯度； T 为渗流层厚度，取决于相对隔水层埋深； B 为渗流段宽度）可见，地下水位是确定库盆防渗型式最根本的条件，而相对隔水层埋深等是次要因素。只要地下水位高于正常蓄水位， H 为负值，则不论相对隔水层埋深为多大，都不可能出现库水外渗，库盆就不需要防渗。

当地下水位不仅低于正常蓄水位，更低于库底高程，则不仅存在库盆内水向库盆周围的侧向渗流，还存在向库盆底下的垂直渗流。若仅采取在库盆周围的垂直帷幕防渗措施往往是事倍功半，必须采取包

括库底在内的全库盆防渗措施。例如，西龙池抽水蓄能电站上水库位于石灰岩地区，岩溶发育，地下水位位于正常蓄水位以下约 300m。如不采取防渗措施，上水库渗漏量将达 1.57 万 m³/d，其中库底渗漏量为 1.2 万 m³/d，占 77%。只得采用全库盆沥青混凝土衬砌的防渗措施。又如溧阳抽水蓄能电站上水库岩石破碎，如不采取防渗措施，上水库渗漏量将达 2.5 万 m³/d，，地下水位又低于正常蓄水位约 135m，也采用混凝土面板+土工膜的全库盆防渗措施。

当地下水位位于正常蓄水位与库底高程之间时，可采用全库盆防渗、局部垂直防渗或垂直+水平防渗等防渗型式，究竟选择何种防渗型式往往需要通过技术经济比较来确定。

尤其要注意：

(1) 渗漏大小对工程安全的影响。张河湾抽水蓄能电站上水库库盆底下有几条贯穿整个山包的缓倾角软弱夹层，渗水将进一步降低软弱夹层的抗剪强度，对工程安全构成严重的威胁。因此，不仅采用全库盆沥青混凝土衬砌的防渗措施，更采用有上、下防渗层的简易复式衬砌结构。

(2) 补水条件。如华北地区，抽水蓄能电站地质条件往往较差，上水库岩体渗透性较大；而且降雨量较少，当下水库控制流域面积较小时，补水保证率较低，将造成抽水蓄能电站运行困难，就需对上水库防渗提出更高的要求，采用全库盆防渗措施的抽水蓄能电站就较多。而广东地区，正好相反，降雨量大，补水条件好；再加上地质条件较好，至今无一个抽水蓄能电站采用全库盆防渗措施。

(3) 即使地下水位位于正常蓄水位与库底高程之间，可考虑只采用局部垂直帷幕防渗，但若存在陡倾角断层与断裂构造，尤其是首部式地下厂房，该类断层与断裂构造又与地下厂房贯通时，仅采用垂直帷幕防渗往效果不佳，仍需在库盆底部采用局部水平防渗措施，将断层等渗漏通道的入口予以封闭才更有效。

例如，泰安抽水蓄能电站上水库，沿库底发育的区域性断层 F₁，断层宽约为 33~52m，具有横向相对不透水性，将库区左、右岸分隔成 2 个不同的水文地质单元。其右岸山体节理密集带发育，渗透性好。为保证布置于右岸山体的首部式地下厂房系统的安全运行，库盆右侧库岸采用混凝土衬砌，库盆底部采用土工膜防渗（见图 1）。

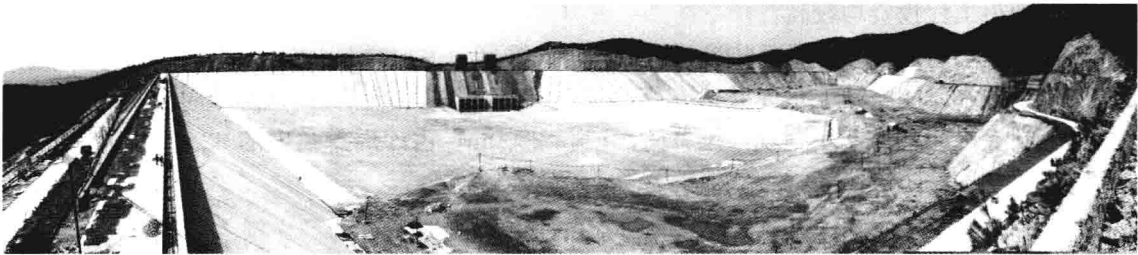


图 1 泰安抽水蓄能电站上水库库盆局部防渗图

又如，洪屏抽水蓄能电站上水库，南库岸地段存在向地下厂房渗漏的贯通性断层及断裂网络，其渗透性都较大，库盆底部局部采取黏土+土工膜水平防渗措施。

为此，归纳出库盆防渗型式与地下水位等的关系见表 2。

表 2 库盆防渗型式与地下水位等的关系

地下水位与正常蓄水位关系	库盆渗漏性（渗漏量大小及危害性）和补水条件	库盆防渗型式	工程实例
地下水位高于正常蓄水位		不防渗	广州、敦化、荒沟
地下水位在库底高程与正常蓄水位之间，局部构造带等部位地下水位低于库底高程	岩体及构造渗透性，相对隔水层埋深，地下水位埋深，渗径长短	局部垂直防渗	丰宁、文登
		垂直+水平防渗	泰安、洪屏
		全库盆防渗	天荒坪、宜兴
地下水位低于库底高程	岩体及构造渗透性通常较强	全库盆防渗	西龙池、张河湾、十三陵、溧阳



1.1.3 上水库帷幕防渗标准

以往抽水蓄能电站上水库帷幕防渗标准几乎都取 1Lu，理由是上水库补水不易，需从下水库抽上去，因此，上水库帷幕防渗标准应从严掌握。近来，抽水蓄能电站上水库帷幕规模越来越大，设计越来越细化，该问题仍然应通过技术经济比较确定。

例如，广东省惠州抽水蓄能电站上水库天然状态下渗漏量主要集中在大于 3Lu 的全强风化岩石带，将帷幕防渗标准从 1Lu 降低到 3Lu，增加的渗漏量仅占总渗漏量的 0.8%，差别很小。其次，以 3Lu 作为帷幕防渗标准，计算年总渗漏量为 309 万 m³。而上水库流域面积 5.22km²，年均径流量就有 977.5 万 m³。降低帷幕防渗标准后年渗漏量增加的 2.5 万 m³ 几乎可忽略不计。

又如内蒙古丰宁抽水蓄能电站上水库，帷幕防渗范围如图 2 所示。对帷幕防渗标准选择进行了详细的技术经济比较，详见表 3，最终也选择 3Lu 作为帷幕防渗标准。

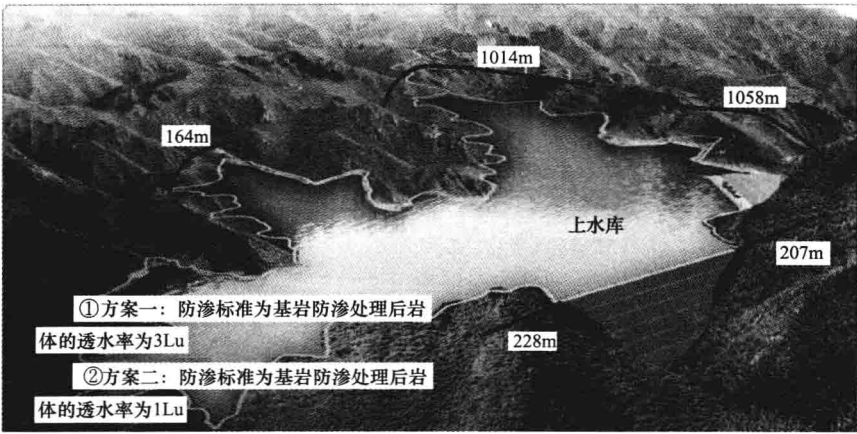


图 2 丰宁抽水蓄能电站上水库帷幕防渗范围示意

表 3 丰宁抽水蓄能电站上水库帷幕防渗标准技术经济比较表

编号	项 目		单位	方案一 3Lu	方案二 1Lu	比较意见
1	工程量	帷幕灌浆	m	163 870	266 911	方案一工程量省 10.3 万 m
2	帷幕 灌浆 深度	最大深度	m	67	106	方案一技术难度较小 最大深度减少 39m 平均深度减少 18m
		平均深度	m	31	49	
3	渗漏量	日渗漏量	m ³ /d	7572	5272	两方案渗漏量均满足要求， 方案二年渗漏量少 84 万 m ³
		占库容百分比	%	0.157	0.11	
4	投资估算		万元	6732	9185	方案一投资省 2453 万元

1.1.4 上水库正常蓄水位选择与水库防渗类型的关系

图 3 所示为抽水蓄能电站上水库流域面积与水库防渗类型的关系，可见，采用全库盆防渗的上水库，流域面积大多在 0.1~0.4km²，即都布置于山顶。而采用帷幕为主的局部防渗上水库，流域面积在 0.6~7km²，即正常蓄水位选得较低，不再布置于山顶。

首先，采用全库盆防渗的上水库，均以沥青混凝土面板或混凝土面板为主，造价较贵，衬砌面积宜尽量减小。由表 4 和表 5 可见，上水库衬砌面积（含坝与库盆）约在 18 万~34 万 m²之间。其次，尤其是沥青混凝土面板，施

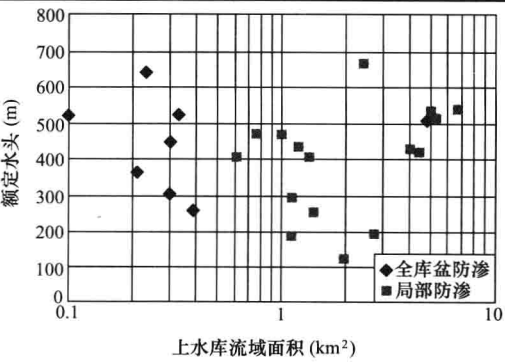


图 3 抽水蓄能电站上水库流域面积与水库防渗类型的关系

工对转弯半径等都有限制，要求库盆形状较规整，布置于山顶为宜。又由于已采用全库盆防渗，对库盆基岩渗透条件就可降低，布置于山顶也无妨，如图 4 所示。

表 4 沥青混凝土面板全库盆防渗工程衬砌面积

电 站	衬砌面积 (万 m ²)			
	合计	坝坡	库岸	库底
西龙池	21.57	11.39	10.18	
张河湾	33.7	20		13.7
天荒坪	28.5			

表 5 混凝土面板全库盆防渗工程衬砌面积

电 站	衬砌面积 (万 m ²)				
	合计	坝坡	库岸	库底	进/出水口前池
宜兴	18.07	3.54	6.37	6.91	1.25
十三陵	17.7	3.25	5.84	8.6	

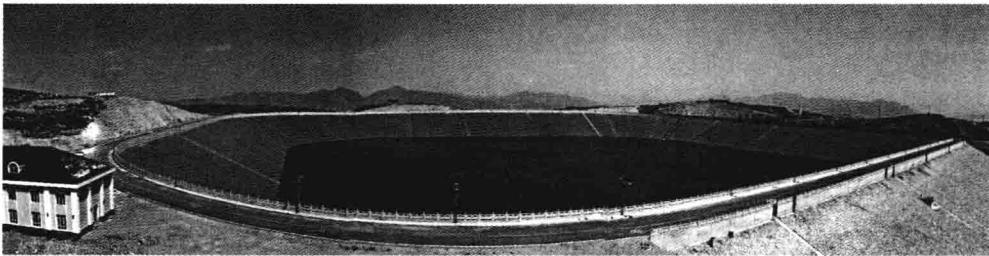


图 4 西龙池抽水蓄能电站上水库俯视图

采用帷幕为主的局部防渗上水库，对库盆形状无要求；又要求地下水位尽量高于正常蓄水位。受地下水位埋藏深度的限制，往往需要适当降低正常蓄水位，以减少防渗帷幕工程量，如图 5 所示。当然，降低正常蓄水位，机组额定水头减小，相应上下水库库容、水道尺寸等会加大，最终仍将由技术经济比较后确定。

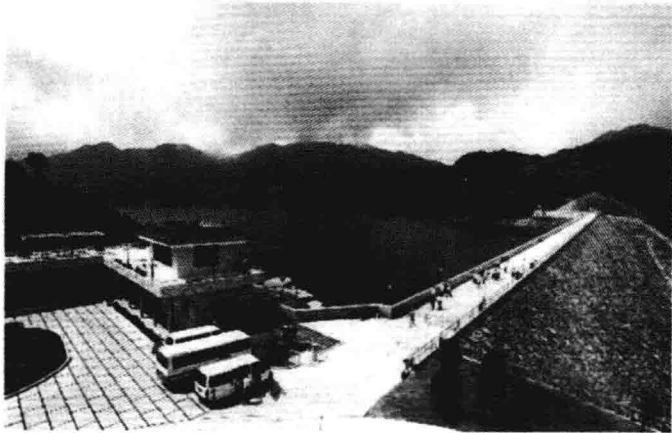


图 5 广州抽水蓄能电站上水库俯视图

1.1.5 全库盆衬砌防渗工程排水系统

全库盆衬砌防渗工程抵抗外部渗水外压力能力较低，尤其是沥青混凝土面板，仅能承受 0.6m 水头。因此，坝顶高程较低，流域面积较大时，除衬砌背面完善的排水系统外，尚应注意支沟拦洪及山体内部排水系统的设置。

西龙池抽水蓄能电站下水库为一特例，全库采用沥青混凝土和钢筋混凝土面板防渗衬护，但水库位于大龙池沟中段，三面环山，山坡高达数百米，为确保工程安全，设置了完整的排水及防洪系统。

下水库排水系统除通常在防渗面板下布置的排水垫层、PVC 排水花管、排水检查廊道系统外，在



库盆东岸及东北岸的山体内布置了库岸排水洞，断面尺寸为 $2\text{m} \times 2.5\text{m}$ ，长度约为 839m ；沿排水洞设排水孔幕，以阻截通过断层及裂隙的渗水，防止其对库岸防渗面板形成反向水压。

下水库库区防洪系统分库岸防洪系统及上游支沟防洪系统两部分。其中库岸防洪系统由左右岸沿开挖坡布置的排水沟与集水槽、库顶公路排水沟、左右岸排水渠组成。上游支沟防洪系统包括浆砌石拦沙坝、排洪洞及沟内多道铅丝笼拦沙坎。

1.1.6 上水库勘测重点应放在库周地下水位

综上所述，抽水蓄能电站上水库设计重点是库盆防渗型式的选择。而上水库大坝坝高通常不高（大多低于 100m ），坝基以硬岩为多，且往往裸露在外。因此，勘测布置应抓住该特点，不以坝基为主，而以查清库周地下水位为主。

在规划及预可阶段只可能布置少量钻孔时，钻孔不能只布置在坝基，而应更多地布置于库周，查清库周地下水位分水岭高程，以利于库盆防渗型式的初步选择。

可行性研究阶段则应在库周布置足够多的钻孔，最好能像文登抽水蓄能电站上水库那样，作出地下水位等值线图（见图6）。可确定，只有右库岸地下水位分水岭有一个低于正常蓄水位的缺口，需设置帷幕防渗。

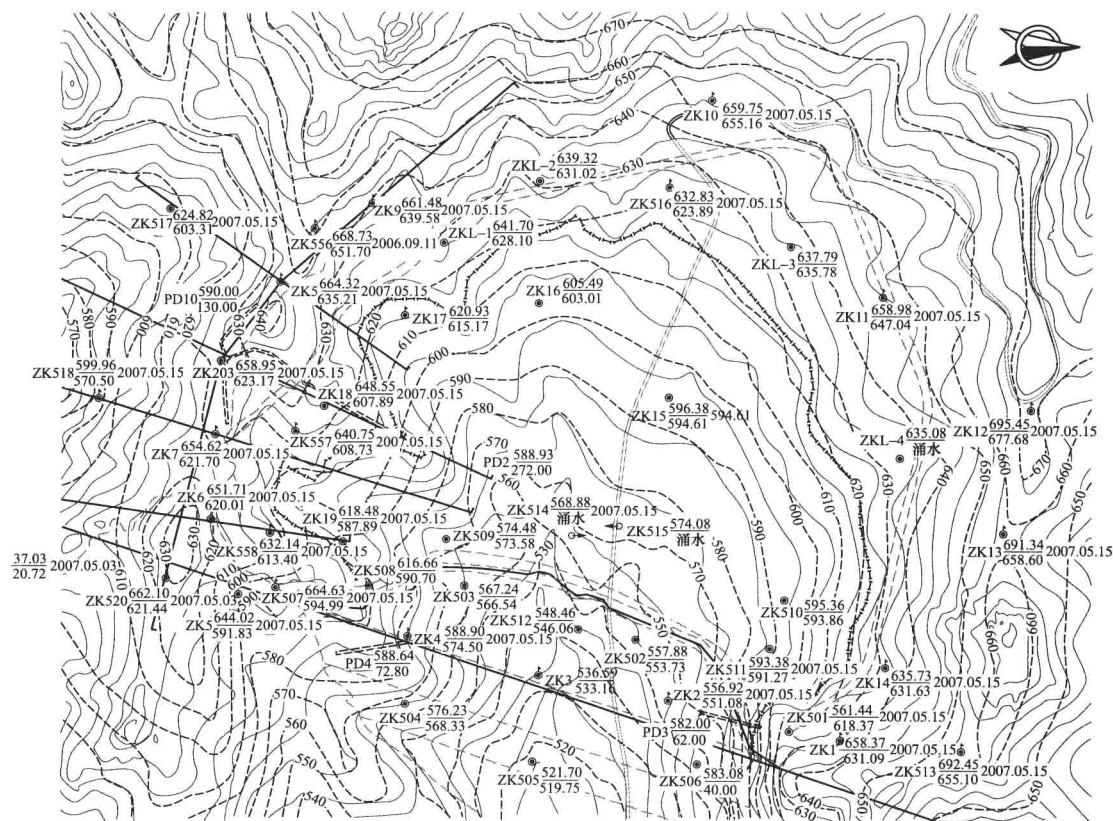


图6 文登抽水蓄能电站上水库地下水位等值线图

当缺乏条件作出地下水位等值线图时，至少也要像丰宁抽水蓄能电站上水库那样，沿库周切一个纵剖面，作出地下水位、 1Lu 与 3Lu 等值线图（见图7），以确定防渗帷幕的长度、深度等。

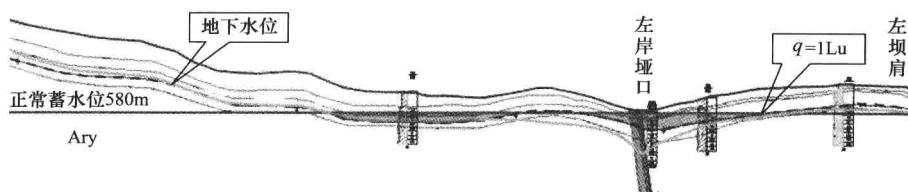


图7 丰宁抽水蓄能电站上水库库周地下水位、 1Lu 与 3Lu 等值线纵剖面图

1.2 上水库主坝坝型选择

抽水蓄能电站上水库主坝坝型的选择, 应根据库容、水文、气象、地形地质、当地材料、地震烈度、施工、运行等情况, 经技术经济综合比较后选定。但据统计 (见表 6), 上水库为新建时, 主坝绝大多数采用土石坝 (占 86.9%), 尤以混凝土面板堆石坝最多 (占 56.5%), 混凝土坝仅占 13%。

这是因为, 首先, 从筑坝材料而言, 一般抽水蓄能电站库盆开挖、地下洞室开挖有数百万立方米以上的石方需要弃置, 采用土石坝坝型可就地取料, 通常在经济上是有利的; 其次, 上水库流域面积都较小, 设计洪峰流量及洪量也较小, 混凝土坝泄洪布置上的优势也无从发挥。

凡采用混凝土坝的电站往往有一些特殊条件。例如, 深圳抽水蓄能电站上水库位于自然风景旅游观光区, 要求上水库的建设必须与自然景观相结合, 土石料场的开采和弃渣场的设置受到严格的限制。主坝及 4 号副坝采用碾压混凝土重力坝, 其余 5 个副坝采用风化土心墙石渣坝。这种坝型组合方案既能显著减少上水库石料开采量, 又能够利用坝基开挖土石料作为堆石坝的筑坝材料, 减少弃渣。而投资虽非最低, 也还是较低的方案, 故最终选择之。

又如, 洪屏抽水蓄能电站上水库, 主坝坝高 44m, 坝顶长 107m, 坝体填筑量较小, 选用混凝土重力坝比混凝土面板堆石坝投资仅多 200 万元。而上水库流域面积 6.67km², 校核洪水流量达 172m³/s, 在纯抽水蓄能电站中都算是较大的。选用混凝土重力坝便于泄洪布置, 有利于工程安全, 故坝型选择混凝土重力坝。

面板堆石坝应用最多, 因为断面较小, 石料开采量较少; 对抽水蓄能电站上水库水位频繁升降的适应性也优于心墙坝。通常都采用混凝土面板, 因为采用沥青混凝土面板需配置整套沥青混凝土骨料的加工制备、拌和、摊铺和碾压等专用设备, 单独坝体沥青混凝土面板的沥青用量较小, 经济性上不利, 还使施工复杂化。

只有在全库盆防渗, 库盆与坝体都用沥青混凝土面板时, 它的防渗性远胜于混凝土面板; 而经济性不输于混凝土面板; 由于连续施工, 施工速度也占优, 使沥青混凝土面板与混凝土面板比较时略占优。全库盆采用沥青混凝土面板防渗的抽水蓄能电站有天荒坪、张河湾、西龙池、呼和浩特、宝泉 (库底为黏土) 等, 参见表 4; 全库盆采用混凝土面板防渗的抽水蓄能电站有十三陵、宜兴、溧阳 (库底为土工膜) 等, 参见表 5。

表 6 抽水蓄能电站新建上水库主坝坝型统计

主坝坝型	混凝土面板堆石坝	沥青混凝土面板堆石坝	黏土心墙土石坝	碾压混凝土重力坝	混凝土重力坝
所占比例	56.5%	21.7%	8.7%	8.7%	4.3%

黏土心墙土石坝在抽水蓄能电站中应用较少, 除对抽水蓄能电站上水库水位频繁升降的适应性、施工条件不如面板堆石坝之外, 更主要原因是, 如在库外选取土料场时, 往往要占用耕地, 涉及征地移民、环境破坏等复杂问题。因此, 除非在库区内有合适的土料场, 通常不会考虑此坝型。在建工程中, 清远抽水蓄能电站上、下水库和深圳抽水蓄能电站下水库主坝选用黏土心墙土石坝。例如, 清远抽水蓄能电站上水库库盆内, 靠近进/出水口的 4 个小山包上就有合适的土料; 深圳抽水蓄能电站下水库主坝利用坝基开挖全风化土料作为防渗料。

在严寒地区, 混凝土面板和沥青混凝土面板的抗冻性都还存在疑虑, 心墙土石坝就有优势。例如, 吉林省敦化抽水蓄能电站上水库最冷月平均气温 -24.2℃, 极端最低气温 -44.3℃, 属严寒地区, 抗如此低温的沥青混凝土材料尚无把握; 混凝土面板要求抗冻等级不低于 F500, 技术难度也较大, 可靠性得不到保证; 复杂的抗冻措施使造价增加, 经济性也不占优; 当地又缺乏心墙土料, 最终选择沥青混凝土心墙土石坝。

1.3 挖填平衡原则

抽水蓄能电站上水库大多采用土石坝型, 填筑量通常需几百万立方米。而为了扩大调节库容、改善进/出水口水流流态, 满足全库防渗衬砌平顺要求、库区边坡稳定处理以及清库等需要, 库盆又需要进行开挖。一般抽水蓄能电站库盆及地下洞室开挖也有数百万立方米的石方需要弃置。现在, 抽水蓄能电站设计者已取得共识, 坝体填筑方量最小的方案不一定是经济的方案, 将库区及地下工程开挖与坝体



填筑作为一个系统工程,充分利用开挖料,基本做到挖填平衡的方案才是最优方案。因此,尽量做到土石方挖填平衡已成为抽水蓄能电站水库设计原则之一,既节省投资,又减少另选料场及弃渣场造成的环境污染及水土流失,还可扩大调节库容。

以响水涧抽水蓄能电站上水库为例,石料取自库内中部小山梁,而弃渣直接堆在小山梁两侧沟谷中、坝前进水口底板以下、副坝后坡(堆填高度只比坝顶低 5m),参见图 8。

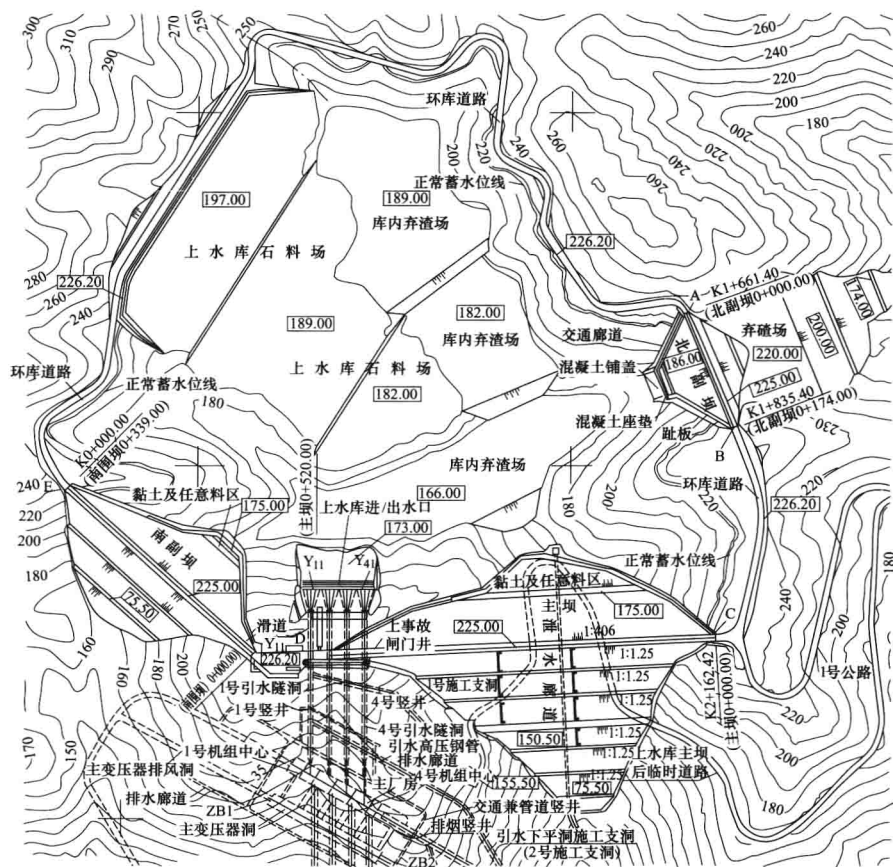


图 8 响水涧抽水蓄能电站上水库挖填示意

将开挖弃渣堆填在坝后坡,避免另选弃渣场,这种方案也被越来越多的工程所采用,如响水涧、仙居、荒沟等抽水蓄能电站。最有代表性的工程实例为日本京极抽水蓄能电站上水库,库盆开挖弃渣近 400 万 m^3 ,为坝体填筑量的 3.2 倍,围堤背面东南西三侧全部堆满弃渣。弃渣场顶面高程仅比坝顶高程低 5.4m,下游坡为 1:3,参见图 9 和图 10。

将开挖弃渣堆填在坝后坡时,除注意堆渣体的坡度,以满足坝体稳定要求外;更要注意,堆渣体往往细颗粒含量较多,对主坝坝体排水不利,必须在堆渣体内布置必要的排水设施。

将开挖弃渣堆填在库内时,还要注意其堆填高程不要对机组进/出水口的水流流态产生不利影响,机组引水不会把泥沙带入水泵水轮机内。

1.4 以料定坝原则

1.4.1 以料定坝

抽水蓄能电站与常规水电站区别之一,是强调要充分利用枢纽建筑物的开挖料,尽量从库盆内开采坝料,基本做到挖填平衡。要贯彻此原则,必然涉及如何利用较差的库盆开挖料,包括软弱、风化严重的岩石作为筑坝料的问题。即要按开挖料的数量和质量来进行坝的断面和填筑分区设计,可简称为“以料定坝”。

以文登抽水蓄能电站为例,在可行性研究报告中论证了库盆深挖方案比另开挖料场方案为优,投资省 598 万元,且环保不利影响小。库区开挖料中,弱风化及以下岩石为 316 万 m^3 ,全强风化岩石为 206

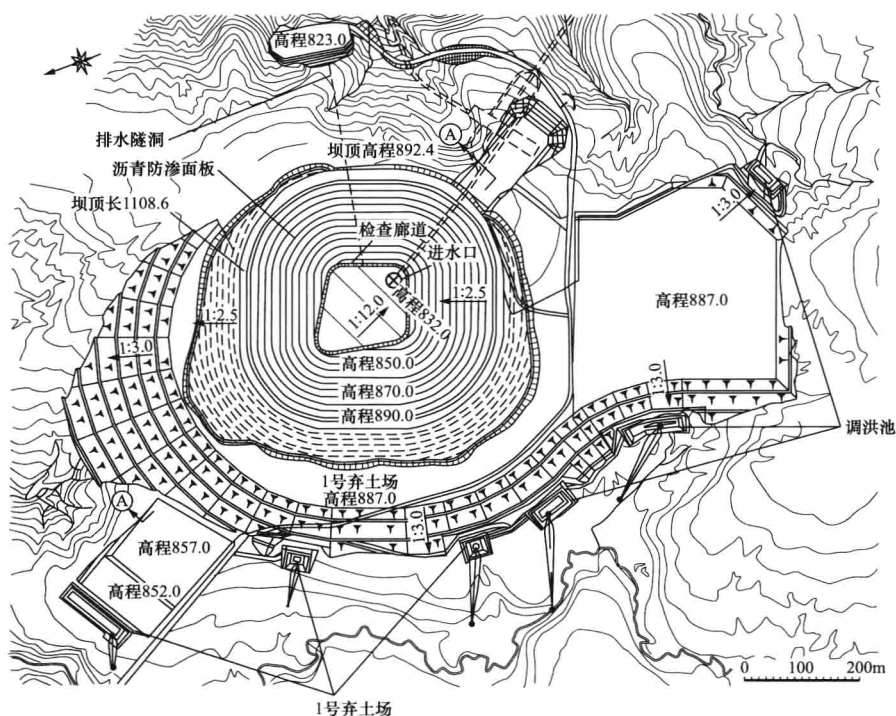


图9 京极抽水蓄能电站上水库平面图(单位: m)

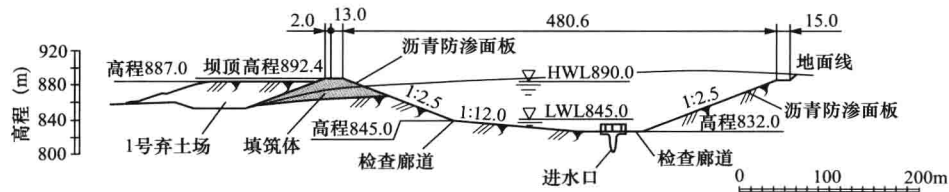


图10 京极抽水蓄能电站上水库剖面图(单位: mm)

万 m^3 。根据风化岩石不同的利用程度, 比较了坝体三种分区方案(参见图 11)。推荐方案 3, 考虑部分全强风化料上坝, 上游坝坡 1:1.4, 下游坝坡 1:2。

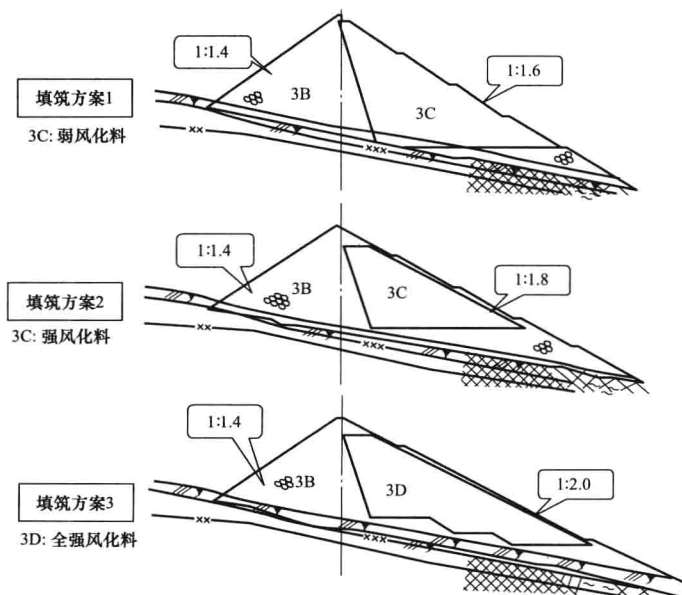
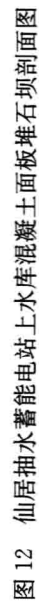


图11 文登抽水蓄能电站上水库坝体分区方案比较图

1.4.2 库盆开挖全强风化岩石筑坝

利用软弱、风化严重的岩石作为筑坝料, 在我国建设第一批大型抽水蓄能电站时已开始研究。最早在十三陵抽水蓄能电站上水库混凝土面板堆石坝, 已将强风化安山岩用于下游坝体填筑, 相应下游坝坡采用 1:1.75。天荒坪抽水蓄能电站的上水库混凝土面板堆石坝, 最大坝高 72m, 已利用全强风化土石筑坝, 相应下游坝坡为 1:2.2。

近期建设的抽水蓄能电站应用全强风化土石筑坝的工程越来越多, 如清远、仙居、文登等抽水蓄能电站。以仙居抽水蓄能电站上水库混凝土面板堆石坝为例, 最大坝高 86.7m, 下游坝体也利用全强风化土石筑坝, 相应下游坝坡为 1:2.2 (下部坝下游有弃渣压坡部位坝坡为 1:2), 参见图 12, 可



减少弃渣 45 万 m³。下游坡面还可采用草皮护坡，美化环境效果也明显优于常规堆石坝下游坡面的干砌块石护坡。

利用全强风化土石料筑坝，关键是要做好排水，以免全强风化土石料区出现渗透稳定问题。仙居抽水蓄能电站在主堆石与全强风化土石料之间设置 1.5m 宽的排水过渡料，在下游侧坝面高程 597.00m 以下采用主堆石区料填筑。另外，也要注意料摊铺时的均匀性及碾压的密实。

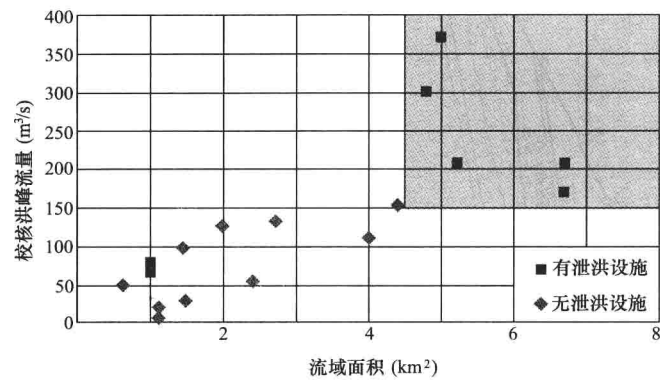


图 13 抽水蓄能电站上水库泄洪设施的设置

因此，校核洪峰流量才 79m³/s，仍设了竖井式泄洪洞。

部分抽水蓄能电站上水库采用的泄洪设施情况见表 7，其中以广东省的抽水蓄能电站为多，这与广东省降雨量较大，遇到台风等暴雨的概率较大有关，为了安全，泄洪设施上多留些余地。

表 7 抽水蓄能电站上水库泄洪设施

电站	流域面积 (km ²)	校核洪峰流量 (m ³ /s)	坝 型	泄洪设施
广州	5	372	混凝土面板堆石坝	侧槽溢洪道
宝泉	4.8	303	沥青混凝土面板堆石坝	副坝开敞式溢流坝+无压排水洞
惠州	5.22	211	碾压混凝土重力坝	自由溢流溢流坝
洪屏	6.67	172	混凝土重力坝	无闸门溢流坝
清远	1	79	黏土心墙堆石（渣）坝	竖井式泄洪洞
溪口	1	68.6	混凝土面板堆石坝	开敞式溢洪道

由于泄洪量较小，各种泄洪型式在技术上都不存在困难，主要从经济性上比选。混凝土重力坝自然采用溢流坝。堆石坝最常用岸边溢洪道，只要岩石质量尚可，溢洪道开挖料可以用作填筑料，开挖量大些不再成为问题。只有正在建设的清远抽水蓄能电站，为了充分利用导流洞，而采用竖井式泄洪洞。

美国 Taum Sauk 抽水蓄能电站为美国第一座抽水蓄能电站，1963 年投入运行。上水库大坝为土石坝，坝高 27.4m，上游面喷混凝土。2005 年 12 月 14 日，电站上水库主要及备用的两套自动控制水位计皆失灵，造成超抽漫顶溃坝事故。其失事是由多方面原因造成的，包括设计不当、施工质量不良、堤坝下游边坡稳定性不足、堆石坝体的沉陷以及坝基处理不良、仪器方面的失误和人为失误等。

该事故使人们对抽水蓄能电站上水库设置泄洪设施的必要性展开了再一次的讨论。溃坝后调查结论就认为：没有设置常规溢洪道是大坝溃决最主要的原因。重建水库时，采取了增设溢洪道，增加坝高，对上水库进行视频监控等安全措施。但我国水电界不少人士认为，现在技术水平已大大提高，有多种手段可防止超抽事故的发生，不一定非设溢洪道不可。无论如何，重视超抽事故发生的可能性，采取相应的措施确保大坝的安全是必要的。

1.6 上水库放空洞

抽水蓄能电站上水库死水位至进/出水口底板高程之间的库容，一般可通过机组空转向下水库泄放。



上水库进/出水口底板高程以下的库容，可通过放水孔（洞）来完成。当该部分库容较小时，也可设临时抽水泵排空。因此，多数抽水蓄能电站上水库不设放空设施。出于与泄洪设施情况同样的考虑，设放空设施的抽水蓄能电站，也以广东省为多，参见表 8。

表 8 抽水蓄能电站上水库放空设施

电站	上水库流域面积 (km ²)	上水库洪峰流量 (m ³ /s)		上水库放空洞
		设计	校核	
洪屏	6.67	125	172	排水涵管 2×2.5m
惠州	5.22	174	211	φ1.4m 放水底孔
溪口	1	58.7	68.6	导流洞改建
清远	1	66.65	79.05	生态放水管 φ0.14m
琅琊山	1.97	115	127	φ0.6m 放水底孔
响水涧	1.12	4.59	7.15	坝下排水廊道内 φ0.8m 排水钢管
深圳	0.62	42.45	52.13	导流洞堵头埋 φ0.4m 放水钢管，供给景观水

2 下水库

2.1 抽水蓄能电站下水库流域面积满足补水要求即可

抽水蓄能电站新建下水库通常是抽水蓄能电站专用水库，没有综合利用的要求。抽水蓄能电站下水库首先要有足够的库容以容纳发电所需循环水量；另外，要有一定的径流量，补充上、下水库蒸发、水库及输水系统的渗漏损失的水量。通常 1000MW 级的抽水蓄能电站每年约需 300 万~400 万 m³ 的补水量即可满足电站运行要求。由图 14 可见，我国抽水蓄能电站下水库流域面积以 10~30km² 为多，相应年径流量约在 400 万~2000 万 m³（这显然与各地区年降雨量的不同有关）。

抽水蓄能电站下水库不宜选在流域面积大的河流上，首先，流域面积大，对应河流宽度就大，通常相应大坝工程量就大；其次，洪水也大（参见图 15），相应泄洪建筑物规模也大；再次，泥沙也多，增加防沙排沙的难度，总之，会使投资增加。因此，不必局限在大江大河，在干流附近去选站址。在许多支流上都可找到更适宜的抽水蓄能电站下水库。

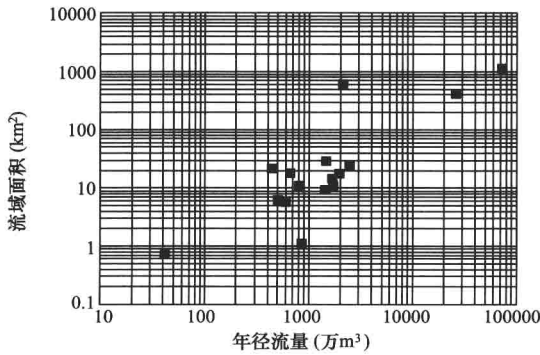


图 14 抽水蓄能电站下水库流域面积与年径流量

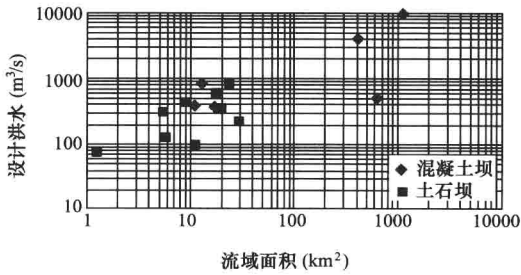


图 15 抽水蓄能电站下水库流域面积与设计洪水

2.2 防沙排沙

与上水库不同，抽水蓄能电站下水库通常位于地下水的汇流区，周围山体较高，库盆防渗不是主要矛盾。由参考文献 2 可知，下水库设计的关键是防沙排沙设计，对投资影响最大。抽水蓄能机组水头高，转速快，对过机含沙量要求很严，甚至要求“一盆清水”（例如：允许过机含沙量仅 10~20g/m³）。

表 9 示出若干已建和在建抽水蓄能电站下水库含沙量及防沙排沙处理措施。由于过机含沙量数据在前期设计时不易取得，若以多年平均含沙量为标准，大致可以 1kg/m³ 为界，当平均含沙量小于 1kg/m³