

抽水蓄能式水电站

pumpspeicherwerke

(修订版)

曹善安 编



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

抽水蓄能式水电站

pumpspeicherwerke

(修订版)

曹善安 编



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

抽水蓄能式水电站 / 曹善安编. —2 版. —大连 :
大连理工大学出版社, 2011. 3

ISBN 978-7-5611-0827-7

I. ①抽… II. ①曹… III. ①抽水蓄能水电站 IV.
①TV743

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 033521 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市软件园路 80 号 邮政编码:116023

电话:0411-84708842 邮购:0411-84703636 传真:0411-84701466

E-mail:dutp@dutp.cn URL:http://www.dutp.cn

大连美跃彩色印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸:170mm×240mm 印张:14.25 字数:270 千字
1994 年 11 月第 1 版 2011 年 3 月第 2 版
2011 年 3 月第 2 次印刷

责任编辑:王颖鑫

责任校对:知 轩

封面设计:孙 元

ISBN 978-7-5611-0827-7

定 价:48.00 元

前言

出版此书的目的是向我国读者(从事水利水电建设的工程技术人员,水工专业的大学生与研究生等)介绍欧洲国家,尤其是德国与奥地利的抽水蓄能式水电站建设情况与工程经验。因为,目前我国正在开展大规模的抽水蓄能式水电站的规划设计与施工建造工作,国外的建设经验对我国工程建设是有参考与借鉴之处的。

本书包括四章内容,并配以较丰富的插图与图表。第1章为抽水蓄能式水电站布置方式、结构特点与工程实例;第2章为抽水蓄能式水电站机组组成与布置方式,详细介绍了两种机组组成方式及其工作性能的分析比较,并简要说明了抽水蓄能机组目前的发展状况。第3章重点介绍奥地利在地下埋藏式高压管道与隧洞建设方面的经验。第4章的内容为沥青混凝土防渗体在抽水蓄能式水电站的上池与下库的堤坝建设中的应用。这四方面的内容皆为抽水蓄能式水电站建设中的关键性技术问题与尚待深入研讨的课题。

我要向联邦德国卡尔斯鲁厄大学水工研究所的所有同事们,尤其是担任所长的工学博士彼·拉尔森教授和奥地利茵斯布鲁克大学教授瑞·弗里德里希博士表示衷心的感谢。他们给予我友好的帮助,有益的建设,并协助我收集所需的素材与文献资料。感谢大连理工大学土木系博士董毓新教授,审阅了书稿并提出宝贵的意见;同时向大连理工大学出版社同事们的大力支持、精心印刷表示谢意。

我特别要向大连理工大学的领导与科研处的同事们表示最诚挚的谢意,是他们的大力支持与经费上的资助才使得此书出版得以实现。

编者

1993年2月

VORWORT

Die vorliegende Veröffentlichung verfolgt das Ziel, die chinesischen Leser mit dem Stand und den baulichen Erfahrungen bezüglich Pumpspeicherwerke in europäischen Ländern, besonders in Deutschland und Österreich, vertraut zu machen. Da zur Zeit der Aufbau von Pumpspeicherwerken in China vordergründig betrieben wird, hat der Verfasser die Hoffnung, daß die hier weitergegebenen Erfahrungen nützlich sein werden.

Das Buch ist in vier Kapitel aufgegliedert.

Kapitel 1—"Bausysteme der Pumpspeicherung und Projektbeispiele"—behandelt die Systemauslegung des Pumpspeicherwerkes und ist mit aktuellen Projektbeispielen illustriert. Es wird eine Gliederung bezüglich Typ und Lage der Kraftstation dargestellt, die weitgehend durch die Art der Pumpe geprägt wird. Mitbestimmend sind örtliche Verhältnisse, wie z. B. die Lage des Unterwasserbakens, die für den erforderlichen Druck an der Zulaufseite der Pumpe maßgebend ist.

In Kapitel 2—"Machinensätze der Pumpspeicherwerke"—werden die hydraulischen Maschinen, die bisher verwirklichten Maximalleistungen und—druckhöhen sowie die vom Maschinenkonzept abhängigen Umschaltzeiten zwischen den verschiedenen Betriebszuständen vorgestellt. Es werden zwei prinzipielle Typen von Machinensätzen unterschieden: die Zwei—Machinensätze, in denen eine Pumpe/Turbine mit einem Motor/Generator gekoppelt ist und die sogenannten Tandemsätze mit getrennter Pumpe und Turbine.

Die in Kapitel 3—"Derzeitige Ausführungen von Druckstollen und Druckschächten"—enthaltenen neuen Entwicklungen im Druckstollen-

bau werden mit ausführlichen Erklärungen über österreichische Erfahrungen dargestellt.

In Kapitel 4—"Asphaltdichtungen bei Erd—und Steinschüttdämmen und Becken von Pumpspeicherwerken"—werden Beispiele und Erfahrungen von Dämmen und Becken mit Asphaltdichtungen behandelt.

Ich möchte allen Kollegen des Instituts für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe, Bundesrepublik Deutschland, vor allem dessen Leiter, Herrn professor Dr. Techn. Peter Larsen und Professor Dr. Reinhold Friedrich (Uni Innsbruck Austria), die mir mit ihrer freundlichen Hilfe und ihren nützlichen Ratschlägen zur Seite standen, meinen herzlichen Dank aussprechen. Die Literatur wurde während meines Aufenthaltes an der Universität Karlsruhe zusammengestellt. Ich danke Herrn prof. Dr. Dong Yu—xing für die kritische Durchsicht des Manuskriptes und den erteilten Rat.

Ebenso danke ich dem Verlag der Dalian University of Technology für das verständnisvolle Entgegenkommen und die sorgfältige Ausstattung des Buches.

Ich spreche meinen besonderen Dank dem Leiter und den Kollegen der "Abteilung Wissenschaftliche Forschung" der Dalian University of Technology aus, durch deren Hilfe und finanzielle Unterstützung die Herausgabe der vorliegenden Veröffentlichung ermöglicht wurde.

Prof. Cao Shan an, Dalian University of Technology

再版前言

我国电力事业迅猛发展,带动了抽水蓄能式水电站的建设。近年来,我国各地陆续建成一批大、中型的抽水蓄能式水电站。但是,必须指出的是,现阶段我国抽水蓄能式水电站的建设状况,不论从数量上,还是质量上,均尚处于发展的阶段;而且即将迎来更大规模的建设高潮。

我国已建成的抽水蓄能水电工程,基本上都是利用了优越的地形、地质等方面的自然条件,大都为高水头引水式地下厂房结构形式;拦截高山沟谷造上库。选用可逆式水轮机与同步电机两机组组成的机组方式。抽水蓄能式水电站的进一步发展必将遇到诸多的难题。首先是选址问题,因为理想的自然条件毕竟有限,尤其是在电力负荷中心附近寻求理想的地形、地质条件是相当困难的。因此,抽水蓄能式水电站厂房必须向多元化方向发展,竖井式、掩埋式、露天式、坝式等各种类型的厂房形式都要成为研究的新课题。在无沟谷筑坝条件下,只有选择人工蓄水池。在我国电力系统里,火电厂的比重很高,加之核电站、风能电站等陆续参加电力系统工作,势必对抽水蓄能式水电站的机组工作性能提出更高更严的要求:既要调频,又要调相;既要抽水,又要发电,更重要的是要求工况转换的时间尽可能的短。从而使得两机组合机组(可逆式水轮机与同步电机)难以满足要求;而三机组合机组方式必然要提到议事日程上来。总之,发展抽水蓄能水电事业,任重而道远。欧洲抽水蓄能事业较我国起步早了几十年,不论从蓄能电站设计施工方面,还是机组制造运行方面都积累了丰富的经验及科研方面的成果,本书尽可能地将考察到的这方面

信息提供给读者,尽可能详细地将一些技术课题解释清楚,将一些工程设计中的新思维、新方法提供给读者供参考与借鉴。

为适应当前我国电力事业的大发展,我相信“抽水蓄能式水电站”这本书的再版一定会对我国抽水蓄能式水电站工程的发展起到点滴的积极与促进作用,这也是作者从事几十年水电事业的最大心愿。

本书再版得到校科研处与出版社的大力支持,并得到大连理工大学离退休人员科研专项基金的资助。在此表示诚挚的谢意。

编 者

2011年1月

目 录

第 1 章 抽水蓄能式水电站的布置方式与特点	1
§ 1-1 概述	2
§ 1-2 具有掩埋式地下厂房的抽水蓄能式水电站	12
一、格赖穆斯(Glems)抽水蓄能式水电站	12
二、艾茨豪森(Erzhausen)抽水蓄能式水电站简介	17
§ 1-3 竖井式抽水蓄能式水电站	19
一、融柯豪森(Rönkhausen)抽水蓄能式水电站	19
二、朗根普劳泽腾(Langenprozelten)抽水蓄能式水电站 ...	21
三、劳敦得(Rodund)Ⅱ抽水蓄能式水电站	24
§ 1-4 当今世界最大的竖井式抽水蓄能式水电站——奥地利奎 泰(Kühtai)抽水蓄能式水电站	26
一、工程简况	26
二、竖井的设计与施工程序	28
三、竖井上部圆柱筒体的基础(支承环)设计	31
四、竖井支护应力分析与原型观测	32
§ 1-5 瓦尔德埃凯(Waldeck)Ⅱ抽水蓄能式水电站(地下厂房竖 轴立式机组)	38
一、综述	38
二、人工上池	40
三、引水建筑物	43
四、地下厂房与机组	43

§ 1-6 维尔抽水蓄能式水电站(地下厂房横轴卧式机组)	48
一、工程概述	48
二、上池——霍仁伯尔格人工水池与下池——维尔水库	53
三、高压管道、尾水隧洞与交通洞	57
四、地下厂房	61
§ 1-7 维安登(Vianden)抽水蓄能式水电站(地下厂房横轴卧式机组与竖轴 可逆式机组)	62
一、综述	62
二、人工上池	65
三、高压管道	68
四、地下厂房与机电设备	71
五、尾水隧洞与下库	75
六、维安登 10 号机组与厂房布置	76
§ 1-8 具有露天式厂房的格斯塔赫特(Geesthacht)抽水蓄能式水电站	77
一、人工上池	77
二、引水道系统	79
三、厂房与机电设备	80
§ 1-9 厂坝结合的哈普尔格(Happurg)抽水蓄能式水电站	83
§ 1-10 洛斯哈哥与豪斯林并列布置混合式梯级水电站组	89
§ 1-11 史鲁赫梯级混合式抽水蓄能式水电站组	95
§ 1-12 瑞士欧瓦·斯频(Ova Spin)溢流式坝后抽水蓄能式水电站厂房	99
第 2 章 抽水蓄能式水电站的机组组成与布置方式	102
§ 2-1 机组组成的基本方式	103
一、四机组合方式	103
二、三机组合方式	103
三、两机组合方式	107

§ 2-2 不同机组组合方式工作性能的分析比较	108
一、选用工程实例简要介绍	108
二、三座电站机组的设计特点	111
三、三座电站机组工作性能的分析比较	112
§ 2-3 抽水蓄能机组基本造价与工作效率的分析与比较	113
§ 2-4 抽水蓄能式水电站机组的发展状况	117
§ 2-5 抽水蓄能式水电站可变速的可逆式机组	125
第 3 章 奥地利在水电站地下埋藏式高压管道建设方面经验	128
§ 3-1 概述	129
§ 3-2 径向压缩仪现场测试围岩力学特征	131
§ 3-3 支护结构类型、应用范围与准则	131
一、不设衬砌的有压隧洞	132
二、纯混凝土单层衬砌	133
三、预应力混凝土衬砌	133
四、具有防渗薄膜的预应力混凝土衬砌	134
五、钢板衬砌(地下埋藏式钢管)	135
§ 3-4 缝隙灌浆法预应力混凝土衬砌	136
一、梯瓦葛(TIWAG)缝隙灌浆法	136
二、预应力混凝土衬砌的计算理论与方法	138
§ 3-5 地下埋藏式压力钢管设计新动态	140
一、基本观点与计算方法	140
二、超厚钢板衬砌的处理方法	144
§ 3-6 地下埋藏式压力钢管的安全度	147
一、问题的提出	147
二、影响安全度的主要因素	147
三、在围岩承载能力降低条件下钢板衬砌工作状态的 analysis	148
四、判断地下埋藏式压力钢管强度的安全度条件	150

第4章 沥青混凝土防渗体在抽水蓄能式水电站上池与下库建设中的应用 153

§ 4-1 综述 154

§ 4-2 联邦德国在沥青混凝土心墙土石坝建设方面的经验 163

一、关于沥青混凝土心墙垂直与倾斜布置方式的讨论(工程实例之一)..... 163

二、关于爆破开采的原状石碴料应否直接用于填筑坝体的分析研究(工程实例之二)..... 168

三、沥青混凝土工程性能的试验研究 169

四、高沥青混凝土心墙土石坝抗震性能的试验研究 172

§ 4-3 奥地利沥青混凝土防渗体土石坝的建设经验 180

一、芬斯塔尔大坝简况 180

二、芬斯塔尔大坝坝基抗滑稳定性能的试验研究 182

三、芬斯塔尔大坝原型观测成果分析 183

四、软基上修建的斯梯卢普(Stillup)沥青混凝土心墙土石坝 187

五、沥青混凝土面板防渗的土石坝 188

§ 4-4 具有沥青混凝土防渗体的人工蓄水池 192

一、概述 192

二、格斯塔赫特(Geesthacht)抽水蓄能式水电站沥青混凝土防渗人工上池运用与大修情况 194

附录:我国抽水蓄能式水电站发展概况 196

参考文献 211

第 1 章 抽水蓄能式水电站的布置方式 与特点

§ 1-1 概 述

水电站是将水流能量转换为电能的工厂。通常所讲的水电站是靠储存河流天然来水的能量发电,故更确切地应称做储水蓄能式水电站。抽水蓄能式水电站则是将电能变换为水能储藏起来,接着再将水能恢复为电能,如此循环工作的水电站。所以说两种水电站既有共性,又有个性。当代水电建设的发展是将两者尽可能地有机结合起来,从而更充分地利用水力资源,更好地发挥水电站在电力系统中的作用。

一个水电站可按其储存天然来水能量与抽水蓄能能量所占比重的不同而分为四种类型,即:纯抽水蓄能式水电站;混合式抽水蓄能式水电站;混合式储水蓄能式水电站;纯储水式蓄能水电站(即常规水电站),如图 1-1-1 所示。

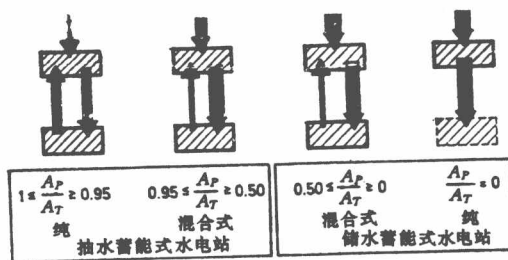


图 1-1-1 按天然储水量与抽水量之间关系划分水电站类型

显然,主要靠储存天然来水能量的属于储水蓄能式水电站范畴;主要靠抽水,而天然径流很少的属于抽水蓄能式水电站范畴。当然,这种分类法只供参考。按照这种分类法,结合奥地利四座大型水电站的实际工程参数,可判断其归属哪种水电站,参见表 1-1-1 所示。

表 1-1-1

水电站名称	储水水库容积/(10^6 m^3)	天然径流量 A_n /(10^6 m^3)	抽水水量 A_P /(10^6 m^3)	A_P/A_T
Oschenik	33	3	133	0.98
Einstertal	60	8	153	0.95
Lünersee	78	12	218	0.95
Kölnbrein	200	105	117	0.53

[注]: $A_T = A_n + A_P$

对绝大多数纯抽水蓄能式水电站而言,其发电工况毛水头 H_T 与抽水工况几何扬程 H_P 是相同的,即 $H_T \cong H_P$ 。因为,只有这样,所需的水量才可能抽上

放下重复使用；上下两个水池或水库才能充分发挥作用。有些地区，优良的地形条件与水文情况提供了低扬程高水头的有利场地可资利用；另外，有时为了利用水位较低的相邻流域水量，而不惜采用大于发电水头的扬程抽取其水，以达到跨流域引水要求。抽水蓄能式水电站，其发电工况的水头与抽水工况的扬程之间关系可能有的几种组合情况，可参见图 1-1-2。大自然提供的客观条件需因地制宜开发利用。

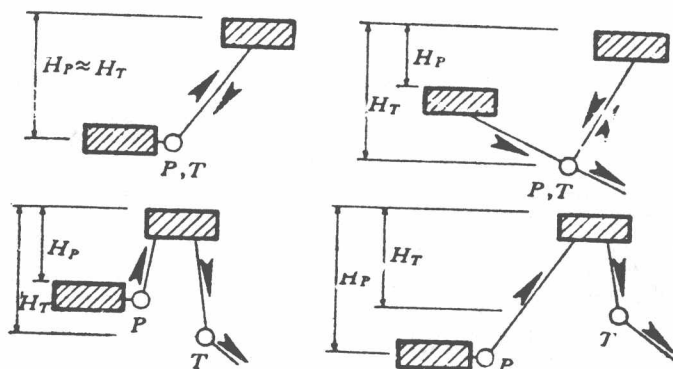


图 1-1-2 按水头与扬程之间比值进行抽水蓄能式水电站分类

抽水蓄能式水电站的布置与结构形式受到诸如：地形地质条件；上池、下池及引水道系统工程的要求；机组运行特性等多方面的影响与制约，故必须因地制宜，全面综合考虑加以确定，常规水电站的坝式厂房、引水式地面厂房、露天式厂房形式均可应用于抽水蓄能式水电站建设中。但是，抽水蓄能式水电站具有两个最为明显的特点，这就是工作水头（或扬程）高于水轮机，水泵的吸出高度（负值）大，因此，为适应这种条件，在抽水蓄能式水电站建设中地下式布置与结构形式得到广泛而深入地应用。采用地下式布置，不论引水道系统，还是厂房本身都可程度不同地利用围岩分担荷载的抗力作用，同时又便于协调各分部建筑物相互关系，紧凑整体布局，缩短引水道系统的长度，较好地适应吸出高度过大的要求。概括起来，抽水蓄能式水电站的地下厂房主要有三种类型，即：掩埋式地下厂房，竖井式地下厂房，以及岩体内开挖成的常规式地下厂房，参见图 1-1-3。

一般来说，抽水蓄能式水电站的厂房紧靠下池布置是经济合理的，但当下池水位变化较大时突出问题有二，一为厂房四周墙壁乃至屋顶必须具有良好的挡水防渗功能；二为厂房地基扬压力过大，必须加强基础刚度，增加厂房自重。为此，将厂房做成封闭式结构，其上回填土压重，这就形成了掩埋式地下厂房形式。

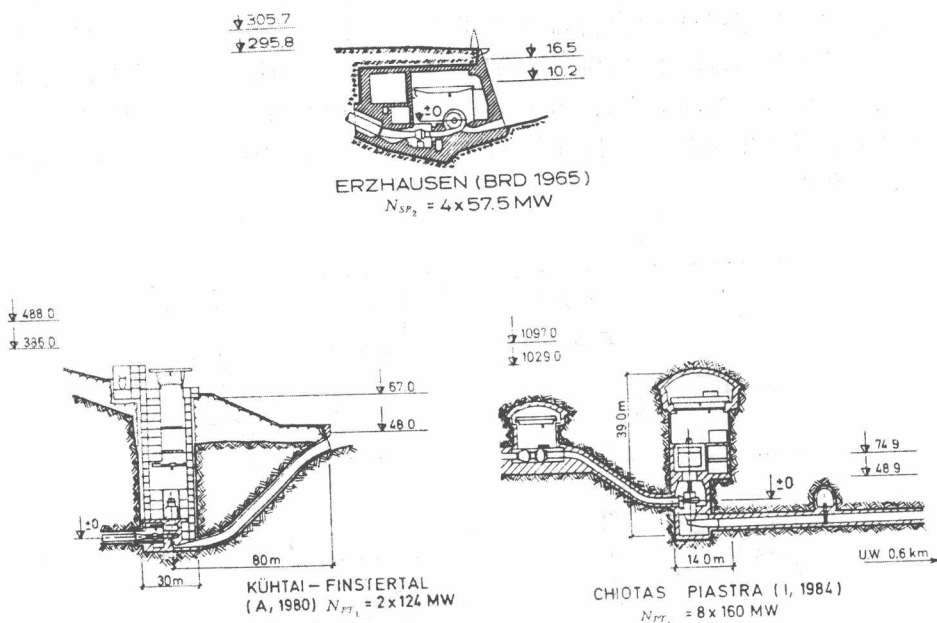


图 1-1-3 抽水蓄能式水电站地下厂房的三种形式

(BRD—联邦德国; A—奥地利; I—意大利)

但是,掩埋式地下厂房所能适应的下游侧水位变化幅度毕竟是有限的,随着吸出高度的继续增大,直接靠近下池的厂房将难以直接承受过大的水压,若将其适当移开下池,做成竖井式地下厂房则较为经济可靠。当然,常规地下式厂房形式在适应高水头,大吸出高度方面更能发挥其独特的优越性能。当代,欧洲修建的一些大型抽水蓄能式水电站很多都采用地下式厂房形式,如:联邦德国的 Wehr、Waldeck II,意大利的 Edolo、Chiotas,卢森堡与联邦德国在界河上合建的 Vian-den,英国的 Dinorwic,瑞典的 Juktan 等皆采用地下式厂房形式。我国广州的抽水蓄能式水电站及北京十三陵抽水蓄能电站也是采用地下式厂房。几座抽水蓄能式水电站地下厂房断面图参见图 1-1-4。

在上池、下池之间距离较大,且有合适的地形、地质条件时,选用船舱式半地下厂房形式也是可行的,奥地利近年修建的中等容量抽水蓄能式水电站 Häusling 与 Rosshag 就是因地制宜地采用了这种形式的厂房。参见图 1-1-5。

上池是抽水蓄能式水电站的重要组成部分,对其位置选择、总体布置、结构形式等都有举足轻重的影响。通常认为:最理想的是高山天然湖泊,或适宜筑坝的高山窄谷均可直接加以利用或改造为上池。但是,除此之外对于上池位置的

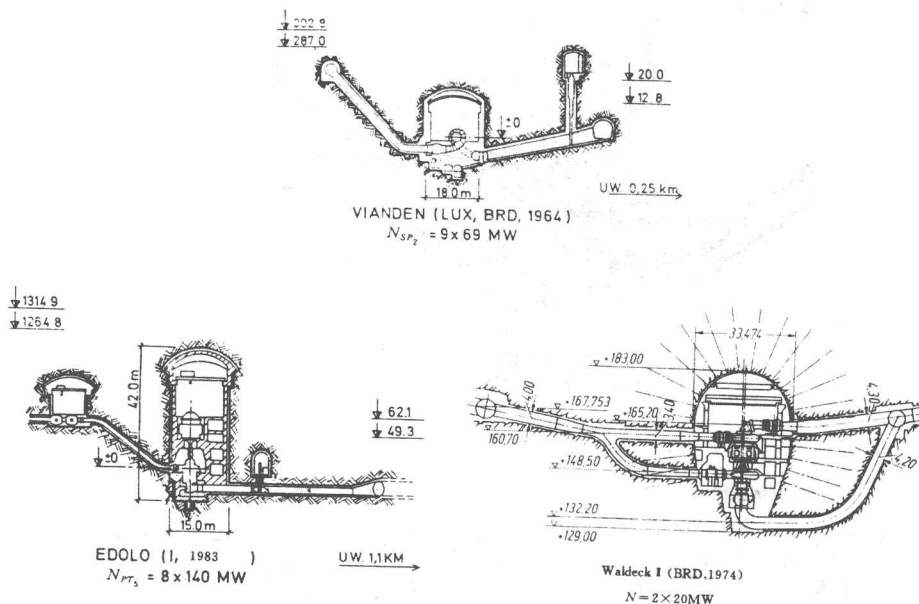


图 1-1-4 抽水蓄能式水电站典型地下厂房断面图

(LUX—卢森堡, BRD—联邦德国; I—意大利)

选择还有更为重要的要求,譬如:①距电力系统负荷中心的距离,这关系到高压输电的距离与输电损失;②是否有适合兴建与其配套的下池工程所需地形地质条件;有无补充损失水量的水文条件;③所形成的上、下池水位落差与其引水系统之间总长度的比值 L/H 是否适当;引水道、厂房、上下池地区的地质条件是否优越,这关系到工程的经济合理性。因此,很多抽水蓄能式水电站都是选择在负荷中心地区,地形、地质、水文等条件较适宜的高地,修建环形坝以形成人工上池。环形坝就地取材,选用清基开挖的土石料填筑,并加设防渗层。沥青混凝土作为坝体与池底防渗材料,配合以监控用的排水廊道系统,经受了长期工程实践的考验,保证了上池工程的防渗性,耐久性与可靠性,是值得推荐的防渗工程措施与工艺。典型环形坝与人工上池及相应排水廊道系统,坝体构造可参见图 1-1-6 与图 1-1-7。