

地下水电站 建设

李协生 著

● 水利电力出版社

序

众所周知,我国水电资源极为丰富,其理论蕴藏量及实际可开发量,均居世界各国前列。新中国建国40年以来,全国水电装机总容量由16.3万kW激增至3270万kW,成绩十分巨大,但相对于国家发展的需要来说,还远远不能满足要求。从技术上讲和先进国家相比,仍有一定的差距,尤其是地下工程方面,差距更大。

在近10年内,我国待开发许多大中型水电站,它们中的大多数,均位于我国西部或西南部地区,山高谷狭,水流湍急,很多地址宜建地下水电站。因此,地下水电站的设计与施工,将是我国水电建设中极为重要的一个课题,应加强这方面的总结和科研工作。

能源部、水利部成都勘测设计院是我国有经验的勘测设计院之一,几十年来已设计并建成了渔子溪一级、渔子溪二级、龚嘴及映秀湾等地下水电站,积累了十分丰富的经验。目前正在设计大型的二滩水电站,瀑布沟水电站以及岷江上的太平驿水电站,对地下水电站的勘测、设计、科研又做了很多的工作。本书作者李协生高级工程师,曾长期担任成都勘测设计院副院长兼总工程师等领导工作,对上述各电站的设计,施工都起了重要的指导作用。近年来李副院长年事已高,退居二线,又不幸双目失明,在如此困难的条件下,仍孜孜不倦地对水电事业作出贡献,用口述笔录的办法,编写成本书,将其多年工作中积累的经验贡献给水电界,对我国的四化大业继续添砖加瓦。这种精神与毅力实在令人钦佩!

本书第一章介绍了世界上建造地下水电站的历史及概况,介绍了地下水电站的优缺点,同时也介绍了我国地下水电站建设的发展过程、现状与前景,提出了应着手进行科研攻关的一些课题,使读者能对地下水电站有一个概括的了解。

第二章论述了地下水电站厂区建筑物的地质勘测试验工作。从航测图到厂区小范围的地质地形测量,从地表地质填图到钻孔、洞探均作了一些介绍。指出勘探工作应密切结合枢纽建筑物布置,要“协同作战”。本章还介绍了岩石试验要求,包括室内岩块试验和现场岩体试验,施工期及运行期围岩应力和变形的量测,并以国外一个水电站为例,指出一般应做的试验研究项目。本章最后介绍岩体抗剪强度参数取值的方法,评述了以往常用的“点群中心法”存在的问题。提出在二滩工程中,结合国外经验推荐的“优定斜率法”,它以岩体质量分级为基础,综合试验成果,考虑各种因素,选定参数,比较符合实际。

本书第三章论述了地下水电站布置与设计的一些原则。首先介绍了首部开发、中部开发、尾部开发的适用条件及其优缺点。其次介绍了厂房位置选择的原则,并以渔子溪一级电站为例加以说明。接着介绍如何确定厂房长轴方向,提出要使厂房纵轴线与主要陡倾角结构面有较大的夹角,并考虑到地应力的方向,以及水道系统的布置等。以渔子溪二级电站为例,具体阐述了上列问题。本章第六节所论主要洞室间岩柱厚度问题,提出一些经验数字以及计算原则。第八节讨论主要洞室型式的决定。第九节讨论厂区各建筑物及洞室的布置要求。第十节介绍喷锚支护,介绍其作用机理以及布置、实施要点,认为“用锚杆加固周围岩石,使围岩由荷载转为支护”,这无疑是已为实践证实了的设计新概念。第十一节介绍岩壁吊车梁及岩台吊车梁的设计原则,其优点是经济、结构简单,减少了厂房跨度。这

项新技术已开始为国内设计者接受。第三章十二节讨论地下水的问题,作者建议用排水孔或排水廊道来排水,这也是成功的经验。

本书第四章为地下水电站洞室群围岩稳定分析,指出首先要做好地质工作,作块体稳定分析,拟定合理的施工程序,再做必要的理论计算或地质力学模型试验。本章中指出初始地应力对开挖后二次应力场及围岩稳定至关重要,提出用围岩强度、围岩变形相对值、工程经验以及参照模型试验来判断围岩是否稳定。介绍了施工期围岩稳定性监测,以及合理的支护手段,介绍了岩爆机制以及岩爆预测与防护,这些都是实际工程中十分关注的问题。第四章结尾是工程实例,介绍了二滩水电站、渔子溪一级水电站在设计或施工中遇到的围岩稳定以及其他实际问题,介绍了如何处理这些问题。尤其是渔子溪一级水电站,由于地质条件极为复杂,经验教训甚多,是很有参考价值的。

第五章介绍原型观测,讨论了观测项目、仪器设备、测点布置、国内外一些工程实例及成果分析,也指出我国在原型观测方面与先进国家存在的差距,例如设备还未完全定型化,设计、科研、施工、运行单位间的协调尚需改善。随着原型观测技术水平的提高,它对地下建筑的设计一定会提供有益的反馈。

本书第六章介绍施工,作者十分推崇新奥法施工方法,认为是“把设计和施工拧在一起,包括施工管理在内的、比较实用的方法,它以现代岩体力学理论为基础,充分利用围岩承载力,注重现场量测信息的反馈,具有经济、快速、安全、灵活等优点”。作者接着具体介绍喷锚支护量测反馈等手段,并以国内外工程为例介绍了开挖、爆破、支护方面的经验。众所周知,我国地下工程施工技术与国外的先进水平尚有一定差距,传统的将围岩作为荷载来考虑,常常还占主导地位。本书作者上述的论述和介绍,目前尚未被普遍采用,因而确实要大力倡导引进先进技术,使我国地下工程的技术水平有较大的提高。

纵观全书,我们认为本书有几个明显的特点:

(1) 推荐近代地下水电站设计施工中的先进概念及技术,摒弃了原来传统的将洞室围岩作为荷载来考虑的老办法,这样能使地下水电站的设计施工有可能更快、更省、更符合实际。

(2) 本书密切结合实际,介绍了不少具体工程的实例及其经验教训。从勘测、设计、科研,直至施工、原型观测均有涉及,是比较全面系统的。

(3) 本书也注意吸收某些国外的资料、经验,例如加拿大、挪威、日本等国的材料。这对我国实行开放改革,引进先进技术,也是具体的体现。这些外国的先进经验,对我国的水电建设也会有益。

我们十分荣幸,能成为李副院长这本著作的第一批读者,并愿向水电界同仁们推荐这样一本专著。我们相信它对我国地下水电站的建设将会有所裨益。同时,我们还应向李副院长忠于我国水电事业,兢兢业业,克服困难,为水电事业作贡献的精神学习。

清华大学教授 张光斗

谷兆祺

1992年10月

前 言

自第二次世界大战以来,随着战后经济的复苏和科学技术的发展,随着大型施工机械、挖掘机具的诞生和不断革新、完善,地下水电站的建设象雨后春笋般蓬勃兴起,在世界的许多国家呈现出迅猛发展的势头,我国也是如此。1949年建国后即掀起了轰轰烈烈的水利建设热潮,同时开始修建地下水电站,而且从60年代中期以来,随着国际风云的变化,发展也比较迅速。从半个多世纪来的国内外地下水电站建设的工程实践中,可以明显地看出有其一定的优越性。例如,高山峡谷地区的引水式电站和高土石坝枢纽常常优先采用地下水电站,因为地下发电厂房在水利枢纽布置中有很大的灵活性。只要地形地质条件许可,地下厂房可以布设在引水线路的任何部位上,在工期和投资上并不比地面电站差,在安全上可作为战时可靠的战备电源,而且在使用年限上比地面的钢筋混凝土和混凝土厂房为长。当然,也存在洞挖工程量大,为保证运行人员的健康和电气设备运行的需要,在通风、排水、防潮和照明等方面,均须增加不少的设备和投资等问题。

长时间以来,本人一直想把接触到的有关地下水电站建设的资料 and 自己在工程实践中的点滴经验进行总结,但由于日常工作繁忙而未能实现。在1986年,因双眼残疾而退出繁忙的技术、行政领导工作岗位后,我响应党的号召——发挥余热,为社会主义建设添砖加瓦。在家人的协助下,我将30多年来所汇集的文献资料和所做的工作笔记,分类录成盒式磁带,供撰稿时使用。把家人协助我整理写成的初稿再录成磁带,由我反复收听,进行校改后用稿纸抄写成书稿。由于家人对专业不太熟悉,为预防出现不应有的笔误,或由于错别字而致词不达意,特聘请有关专业的高级工程师代为校阅,并征询对书稿的意见。然后,再次将之录成磁带,经反复收听后由我作必要的调整和补充。这样,才使全书完稿。这是我近5年来在视力模糊不清的情况下,为撰写本书逐步摸索和形成的特殊工作方法。

编写本书的动机和指导思想是:长期以来在工作实践中,深感目前国内外缺乏地下水电站建设的专著,缺乏系统介绍工程规划布置和地质勘测试验以及原型观测等方面应注意的基本经验,致使工作中有时走弯路,有时因考虑不周而有所失误;目前国内外在地下水电站建设方面已创造和积累了比较丰富的经验,值得很好总结,可作为今后工作的借鉴。我通过对云南、广东和四川等地区地下水电站建设的调查学习和在工作实践中的感受,对地下水电站建设不仅很感兴趣,而且对其在我国的发展前景充满信心 and 寄予厚望。我虽身残但志不残,愿为党和祖国建设继续发挥余热,决心大胆尝试编写《地下水电站建设》这本小册子,献给从事水电建设的同行们。

本书比较系统地论述了国内外地下水电站建设的概况和在我国发展的前景;地下水电站中地下水工建筑物的地质勘测试验工作;地下水电站工程的布置和设计中应注意的问题;地下水电站厂区洞室群围岩稳定性分析;地下水电站厂区地下水工建筑物的原型观测和施工问题等。我结合工作实践中的经验和体会,以及国内外有代表性的地下水电站建设

的工程实例，简要地阐述了地下水电站建设的基本内容、经验教训、存在问题和攻关方向等。至于地下水工建筑物的具体结构布置、结构尺寸的确定、结构计算以及各有关试验的具体内容等，均有专门的书籍和规程规范、设计手册可资查阅，故在本书中不再一一赘述。

本书在编写过程中承蒙陈道周、高安泽、刘克远、郝石心、张超然和郝志先等同志分别校阅有关章节；全书请清华大学水电系周维垣教授审校并提出书面评审意见；李燕辉、张彩霞和田萍、李燕东同志协助选读和收录资料，并整理抄录文稿和绘制图表等，在此，一并表示衷心的感谢。

限于本人的经验和技术水平，书中内容差错在所难免，敬请水利水电界的同行们多多批评指正，不胜感谢之至。

编 者

1992.8.

目 录

序

前言

第一章 地下水电站建设和发展情况	1
第一节 地下水电站建设概况	1
第二节 我国地下水电站建设的现状和前景	11
第二章 地下水电站厂区建筑物的地质勘测试验工作	22
第一节 概述	22
第二节 地形和地质测绘	22
第三节 勘探工作	23
第四节 岩石力学试验	24
第五节 洞室开挖过程中围岩变化的几项监测试验	28
第六节 岩体抗剪强度参数选值	31
第七节 裂隙勘测法	36
第八节 岩洞空间变形的收敛试验	37
第九节 岩体透水性吕荣试验的选值	41
第三章 地下水电站的布置与设计	44
第一节 概述	44
第二节 厂址选择	44
第三节 开发方式	45
第四节 厂房位置选择	46
第五节 厂房纵轴线方向的选择	49
第六节 岩柱厚度的选定	51
第七节 厂房埋置深度和洞口选择	53
第八节 大型洞室断面的体型设计	54
第九节 厂区枢纽建筑物布置	55
第十节 锚喷支护	57
第十一节 岩锚式和岩台式吊车梁的设计	59
第十二节 地下水的影响及排水措施	64
第十三节 气垫式调压室设计	65
第四章 地下水电站洞室群围岩的稳定性分析	72
第一节 概述	72
第二节 地质分析与评价	73
第三节 理论计算与洞室围岩稳定性的判别	74
第四节 支护结构	83

第五节 岩爆	84
第六节 工程实例	87
第五章 地下水电站的原型观测	106
第一节 概述	106
第二节 原型观测的目的、内容和仪器设备	108
第三节 观测、设计和布置中应注意的问题	107
第四节 地下厂房的原型观测	108
第五节 工程实例	109
第六章 地下水电站厂房施工	129
第一节 概述	129
第二节 新奥法的应用	131
第三节 锚喷支护	133
第四节 工程实例	134
主要参考文献	155

第一章 地下水电站建设和发展情况

第一节 地下水电站建设概况

1897年,瑞士建造了第一座地下水电站——Vernayaz水电站。该电站厂房局部埋入地下,内装三台培尔顿式水轮机,运行水头500m,引用流量 $0.1\sim 0.15\text{m}^3/\text{s}$ 。1907年,德国建造了第二座地下水电站——Buchbergmühle水电站,厂房仍然是局部埋入地下。电站分两级开发,所有的发电机均设在地面上的一个机器房内,第二级的水轮机则装于地下。第一级利用水头72m,引用流量 $4\text{m}^3/\text{s}$,装四台横轴法兰西斯式机组,装机2400kW。第二级的用水取自第一级的尾水,并从Ohe河引用 $0.5\text{m}^3/\text{s}$ 的流量,水轮机设在深65m、直径4m的井道中,为两台竖轴法兰西斯式机组,以65m长的轴与容量750kW的发电机相连接。

从1907~1940年,全世界共建造了29座地下水电站,总装机容量约100万kW。然而自1940~1956年,投入运行的地下水电站则达97座,总装机容量达1000万kW。先是在欧洲各国,如意大利、瑞典、瑞士、挪威和法国等国建造;第二次世界大战后,在美洲、非洲、亚洲和澳洲各国也有迅速的发展。

从1957年以来,由于新的挖掘技术和大型施工机械的出现,世界上很多国家,特别是加拿大、澳大利亚和巴西等国家,都在短期内修建了特大容量和规模的地下水电站,发展十分迅速。目前,世界上许多高山区的引水式电站和配合高土石坝的水电站,不少是采用地下厂房。据不完全统计,建成的地下水电站约有350座,总装机容量近4000万kW。最大的地下水电站为加拿大的拉格朗德二级水电站,装机16台,容量533万kW;地下厂房尺寸长483m、宽26m、高47.3m,岩石开挖量 250万m^3 。其次是加拿大的丘吉尔瀑布水电站,装机11台,容量522.5万kW;地下厂房尺寸长300m、宽24.5m、高45.5m,岩石开挖量 175万m^3 ,工期34个月,开挖速度每月平均为 51500m^3 。大断面地下厂房采用预应力锚索与喷混凝土联合支护,作为永久支护结构,从而大大加速了施工进度,节约了建设投资。此外,近年来抽水蓄能地下水电站的数量增加也很快,厂房尺寸也不断增大。据1970年统计,美国建成和在建的地下水电站装机容量为550万kW,其中430万kW为抽水蓄能地下水电站,比重达78%;其他如意大利抽水蓄能电站的比重约占31%,瑞士占24%,法国和比利时占38%,日本占40%,奥地利占46%,西德则为全部。

国外修建的装机容量25万kW以上的普通地下水电站和抽水蓄能地下水电站的概况见表1-1和表1-2。

国外部分地下厂房的开挖进度见表1-3。

地下水电站的特点是:绝大部分的建筑物均设于地下(即山体内部),如压力引水隧洞、调压井、高压输水管道(包括主管、分岔管和支管)、调压井上部的交通洞,有时在

表 1-1

国外装机容量 25 万 kW 以上的地下水电站

序号	国 家	工 程 名 称	总装机容量 (万 kW)	装机台数 (台)	单机容量 (万 kW)	水 头 (m)	厂房埋深 (m)	地下厂房尺寸(m)			地 质 情 况	完建年份
								长	宽	高		
1	加 拿 大	丘吉尔瀑布	522.5	11	47.5	313	256	300	24.5	45.5	片麻岩、花岗岩脉	1974
2	美 国	卡博拉巴萨	200	5	40	100.5		217	29	57	花岗岩片麻岩	1979
3	加 拿 大	波太基山	133	5	26.6	186	150	270	26	40	砂岩、页岩	1967
4	加 拿 大	温蒙特-克曼诺	189.6	16	10.6	793	240	348	25	42.5	石英闪长岩、花岗闪长岩	1954
5	苏 联	英右力	159	6	26.5	325	160	128	17	47	石灰岩	1974
6	津巴布韦	卡里巴	120	6	10	92	160	143	23	40	片麻岩、黑云母页岩	1959
7	加 拿 大	马尼克巴	117.6	6	19.6	93		164	22.3	35.7	辉长岩	1976
8	墨西哥	内萨瓦尔柯约特	108	6	18	81	88	109	22	40	砂岩、砾岩	1964
9	加 拿 大	伯尔西密斯	96	8	12	266		171	20	24	石英岩、伟晶花岗岩	1957
10	苏 联	汉森斯克	90	6	15			140	20	53.4	粗粒玄武岩	1972
11	英 国	邦达瑞	90	6	15	83		144	23	57	石灰岩、白云岩	1967
12	印 度	伊迪塞	78	6	13	670		141	20	36	片麻岩、花岗岩	1975
13	加 拿 大	乌塔尔湖 III	75.6	4	18.9			127	21	43		1969
14	澳大利亚	戈尔德	75	5	15	192		100	20	42.5	白云岩	1973
15	加 拿 大	过急流	74.6	5	14.9	198	135	140	21	34	花岗岩片麻岩	1959
16	西班牙	阿耳德阿达维托	72	6	12	139.5	245	139	19	40	花岗岩	1963
17	墨西哥	英菲尔尼罗	62.4	4	15.6	101	200	128	21	48	砾岩	1963
18	挪威	迪斯塔特	64	4	16	448			11.6	35		1968
19	赞比亚	卡富埃	60	4	15	400	500	130	15	32	花岗岩片麻岩	1971

续表

序号	国家	工程名称	总装机容量 (万kW)	装机容量 (台)	单机容量 (万kW)	水头 (m)	厂房埋深 (m)	地下厂房尺寸(m)			地质情况	建成年份
								长	宽	高		
20	印度	柯因那	54	4	6	503		166	20	36	玄武岩	1965
21	墨西哥	安哥斯求拉	54	3	18	102.5		120	19	38	砂页岩	1974
22	罗马尼亚	维特拉·安特西	51	3	17	816	130	106	17	34.5	片麻岩	1974
23	法国	拉巴堤	50.1	6	8.35	1120		130	25	32	片麻岩、片岩	1960
24	几内亚	亚美利安	49.5	6	8.25	79		120	17			
25	瑞士	南达兹	48	8	6	100	100	17.5	30			1965
26	几内亚	苏阿皮地	48	4	12	122		70.2	12.5	28	砂岩、片岩、玄武岩	1960
27	巴西	亨利·包登	45	6	7.5	677		120	20	38		1966
28	挪威	托开	42.8	4	10.7	393		16	38.5			1961
29	意大利	格罗姆欧	40	4	10	599		122	20.7	33.9	片岩、片麻岩	1959
30	智利	托罗	40	4	10			103	25	40	花岗岩长岩	1975
31	巴西	尼洛佩桑阿	37.8	6	6.3	310		114	18.3	30.5		1954
32	瑞典	哈尔斯普兰格	37.6	4	9.4	106	60	100	18	31	花岗岩	1951
33	瑞典	斯托诺尔福斯	37.5	3	12.5	75	90	124	19	29	片麻岩、夹钙块云母	1958
34	意大利	普雷马迪欧	37.5	5	7.5	708		147	18.9	25		1955
35	巴西	泡卢阿丰II	36	6	6	80		110	18	35		
36	日本	奥只见	36	3	12	197	50	89.6	24.6	40.5	斑岩	1962
37	希腊	卡尔德马基斯	36	3	12	146.5	80	78	16	34.3	片麻岩	1975
38	南斯拉夫	姆拉丁其	36	3	12	185.8	200	92	17	39	石灰岩	正建

续表

序号	国家	工程名称	总装机容量 (万kW)	装机容量 (台)	单机容量 (万kW)	水头 (m)	厂房埋深 (m)	地下厂房尺寸(m)			地质情况	建成年份
								长	宽	高		
39	巴西	尼罗、皮藤那	33.5	5	6.7	392	115	116	19	33	片麻岩	1958
40	意大利	圣马先扎	35.4	6	5.9	590		193	29	28	石灰岩	1953
41	瑞士	迪克逊斯	33.6	6	5.6	872		130	18	24		1957
42	澳大利亚	土姆特 I	32	4	8	293	305	93	18	34	花岗岩片麻岩	1959
43	法国	塞尔查松	32	4	8	125		100	16.8	26.8		1960
44	哥伦比亚	瓜塔波	32	4	8	840	630	74	16.8	29.5	石英闪长岩	1976
45	挪威	苏达尔 I	31	2	15.5	557		38	16			1963
46	澳大利亚	大湖	30	6	5	832	150	92	14	25	石灰岩、泥灰岩	1964
47	瑞典	里泽姆	30	1	30	160	100	36	17	45		1977
48	挪威	斯克约门	30	3	10	615	218	100	14	31	花岗岩片麻岩	1973
49	挪威	乌拉	28.7	7	4.1	780		136	17	18		1953
								94	17	15		1958
50	瑞典	基尔福尔森	28.8	3	9.6	95		86	18	43	花岗岩	1954
51	日本	黑部第四	28.5	3	9.5	590	205	117	20	31.6	花岗岩	1960
52	澳大利亚	土姆特 II	28	4	7	362	335	93	18	34	花岗岩、花岗岩片麻岩	1962
53	瑞士	比阿斯卡	28	4	7	711		122.5	18.4	30.5	花岗岩片麻岩	1950
54	意大利	索姆科拉果	27.5	5	5.5	290		90.3	25.1	16.6		1957
55	伊朗	巴赫拉维	26	4	6.5	180		75	17.5	34.5	石灰岩	1965
56	挪威	罗萨格	25.8	6	4.3	215		155	14	12.2		1958
57	挪威	曼兰格	26	2	13	838.5		54	17	32	花岗岩片麻岩	1973

续表

序号	国 家	工 程 名 称	总 装 机 容 量 (MW)	装 机 台 数 (台)	单机容量 (MW)	水 头 (m)	厂房埋深 (m)	地下厂房尺寸(m)			地 质 情 况	完建年份
								长	宽	高		
58	巴 西	库巴塔奥	26	4	6.5	677		120	20	33		1958
59	奥 地 利	科普斯	25.4	3	8.46	127	342	70	28	30	花岗岩麻岩、角闪石岩	1971
60	挪 威	尼 斯	25	5	5	285		80.5	16.2			1964
61	加 拿 大	拉格朗德 I	532.8	16	33.3	142/137		483	26	47	花岗岩、变质岩	1979
62	苏 联	罗 宾	360	6	60	300/245		200	28	68	砂 岩	1983
63	加 拿 大	拉格朗德 IV	263.7	9	29.3	120/112		257	33	46	火成岩	1984
64	巴 西	阿丰苏四厂	246	6	41	112.5		209	24	53	花岗岩、黑云母片麻岩	1979
65	墨 西 哥	奇 科 森	240	8	30	189/180	181	205	21	43	石 灰 岩	1980
66	美 国	巴斯康帝	210	6	35	384/329		152.5	51.9	61		1986
67	苏 联	凯夏多尔	160	8	20	110/100		184	33	50		在建
68	日 本	吴野川	123.6	4	30.9	523/489		155	23.5	46.4		1985
69	菲 律 宾	开来扬三级	120	4	30	286/282		38	33	42.5		1982
70	法 国	大 厘	120	8	15			158	15.4	39		1981
71	意 大 利	奇奥达斯	115.2	8	14.4	1070/1048		169	15	39		1980
72	法 国	蒙特其克	114.4	4	28.6	423/417		144.4	25	40.5	花 岗 岩	1976
73	卢 森 堡	文 登	110.5	9/1	10/21.5	292/272		48.8	23.6			1976
74	日 本	今 市	105	3	35	549/524	400	160	33.5	52	流纹岩、粘板岩	1985
75	美 国	海尔德斯	105	3	35	532/495						1983
76	日 本	下 乡	104	4	26	421/387		171	22	45.5	页岩、砂岩、闪绿岩	1984
77	日 本	奥清津	100	4	25	450/470		122	21	37		1976

续表

序号	国 家	工 程 名 称	总 容 量 (万kW)	装 机 数 (台)	单机容量 (万kW)	水 头 (m)	厂 房 埋 深 (m)	地 下 厂 房 尺 寸 (m)			地 质 情 况	完 建 年 份
								长	宽	高		
78	意 大 利	普列生孔诺	100	4	25	501/493		73	23			1986
79	意 大 利	埃德诺	100	8	12.50	1260	260	175	16	47	千枚岩	1981
80	伊 朗	锡亚比舍	100	4	25	509	250	108.6	25	36.6		在建
81	南 非	特恩斯堡	100	4	25	470/451	146	168.3	15.5	26.5		1981
82	日 本	塞拉塔	100					253	35	49.5		在建
83	保加利亚	切 拉	86.4	4	21.6	671/626			27	28.7		1986
84	波 兰	扎尔诺维茨	68	4	17	128/119						1981
85	捷 克	切尔内瓦洛	66.6	6	11.1	434		143	38.9	46.5		1981
86	日 本	木 川	60	2	30	567	270	98	24.3	47.4	黑色片岩	1976
87	日 本	天 山	60	2	30	556/520		90	20	46.4	花岗闪长岩	1986
88	菲 律 宾	开莱杨 I、II 级	60	4	15	285/282		38	33	42.5		1982
89	土 耳 其	哈桑达克尔克	50	4	12.5	111		120	21	45		1979
90	奥 地 利	霍斯林	36	2	18	744/694		26		44	片麻岩	1986
91	奥 地 利	康 太	28.6	2		448/436		26		36		1980
92	奥 地 利	采冬特 II	27	1	27					56		1976
93	埃 及	阿斯旺	210	12	17.5	74/25		260	31	32	花岗片麻岩、变质砂页岩	1967
94	澳 大 利 亚	士姆特 III	150	6	25	151	半地下式	154	22	60		1973
95	意 大 利	拉克德里奥	104	8	13	753/746	130	195.5	21	60.5	片麻岩	1971
96	波 兰	母洛特	75	3	25	266/248	竖井式					

表 1-2 国外装机容量25万kW以上抽水蓄能地下水电站

序号	国家	工程名称	总装机 (万kW)	装机台数 (台)	单机容量 (万kW)	水头 (m)	厂房埋深 (m)	地下厂房尺寸(m)			地质情况	建成或 投产年份
								长	宽	高		
1	法国	拉高斯	32	4	8	931	250	63.9	11.7	39.7		1976
2	瑞典	究克津	32	4	8	269						1977
3	瑞士	格利姆塞尔II	30	4	7.5	370		140	20	30		1978
4	爱尔兰	特洛山	29.2	4	7.3	500	85	82	23	30	花岗岩	1973
5	日本	马漕川I	28.6	2	14.3	109		54	22	50	石英斑岩	1976
6	瑞士	蒂尔弗特	28	3 2	8 2	1040		182	26	26		
7	意大利	塔罗若	25.8	3	8.6	313	320	52	20	38	花岗岩	1974
8	日本	城山	25	4	6.25	182		133	20	38		
9	加拿大	买加	261	6	43.5	183/170	245	237	24	57	花岗岩、麻岩、云母岩	1968
10	英国	底诺尔维克	180	8	22.5	495	450	175	16	98		1982
11	英国	雷孔山	152.8	4	38.2	317/387	210	150	22	27	砂岩	1975
12	日本	新高瀨川	134.4	4	33.6	264/239	276	163	27	54.5	花岗岩、绿岩	1978
13	日本	奥多良木	124	4	31	411/313	195	129	25	49	石英岩、凝灰岩	1974
14	日本	奥吉野	120.6	6	20.1	530	250	144.9	21	50	页岩	1976
15	瑞士	抽水蓄能15	120	6	20	454					石灰岩	
16	日本	玉原	120.6	4	20.1	543/518	300	114	27	49.5	流纹岩、砾岩	1981
17	意大利	舍埃格·皮阿斯特	120	8	15	1048						1978
18	日本	新丰根	112.5	5	22.5	245/208		105	22	47	花岗岩、辉绿岩	1973
19	意大利	阿尔托格索	106	2/4	27/13	1048/951	500	72/121	27.4	36	片麻岩	1976

续表

序 号	国 家	工 程 名 称	总 装 机 (万kW)	装 机 台 数 (台)	单 机 容 量 (万kW)	水 头 (m)	厂 房 埋 深 (m)	基 下 厂 房 尺 寸 (m)			地 质 情 况	完 成 或 投 产 年 份
								长	宽	高		
20	意 大 利	拉克·德略	104	8	13	750	130	195.5	21	60.5	片 麻 岩	1971
21	德 国	霍恩贝格	104	4	26	635/575	380	219	19	33	花岗岩、花岗片麻岩	1975
22	美 国	安通龙湖	100	4	25	397		139	20.4	43	片 麻 岩	1976
23	美 国	北 田 山	100	4	25	252/220	183	100	23	40	片麻岩、石英岩	1972
24	卢 森 堡	维 安 登	90	9	10	270	92	320	17	29.3	页岩、千枚岩	1963
25	日 本	奥矢作II	82.5	3	27.5	434/409		89	21	50	黑云母片麻岩	1981
26	比 利 时	沽 三 桥	81	6	13.5	273/250		128	20	40	千 枚 岩	1971
27	法 国	雷 文	80	4	20	243/230	72	114	17	30	片 岩	1974
28	日 本	沼 原	67.5	3	22.5	512	230	131	22	46	花岗闪绿岩	1973
29	美 国	奥洛维尔	64.5	3/3	9.8/11.7	205	90	167	21	37	角闪石岩	1968
30	日 本	南 原	62	2	31	333	170	75	23	40	花 岗 岩	1975
31	美 国	熊 泽	60	2	30	220		70	24	58	绿泥石片岩	1974
32	捷 克	特鲁埃·斯唐奈	60	4	15	520	120	114	24	49.3		
33	意 大 利	圣菲奥兰诺	56	4	14	1440	200	95.8	20.5	65	片 麻 岩	1972
34	西 班 牙	阿尔曼德拉	54	4	13.5	397.8		94	14	35	花 岗 岩	1970
35	日 本	大 平	50	2	25	537		94	23	49	砂岩、粘板岩	1975
36	美 国	蒙提祖玛	50	4	12.5	515		79	24			1974
37	波 兰	波罗姆加扎尔	40	4	12.5	430	115	124	27	40	砂质页岩	1977
38	日 本	喜 美 山	46.6	2	23.3	230	250	60	26	47	石灰岩、砂页岩	1970

序号	国 家	工 程 名 称	总 装 机 (万kW)	装 机 台 数 (台)	单 机 容 量 (万kW)	水 头 (m)	厂 房 埋 深 (m)	地 下 厂 房 尺 寸 (m)			地 质 情 况	完 成 或 投产年份
								长	宽	高		
39	德 国	瓦尔蒂克II	44	2	22	329	300	106	33.5	54	砂岩、页岩、板岩	1974
40	英 国	克鲁高	40	4	10	163		91	21	39	花 岗 岩	1966
41	日 本	高根 I	34	4	8.5	135		91	19	40	硬质燧石	1969
42	日 本	池 原	34	4	8.5	117.5		122	21.3	42.5	粘板岩、砂岩互层	1965
43	德 国	萨金根	33	4	8.25	411	450	162	23	31	花岗岩、片麻岩	1967

表 1-3 国外部分水电站地下厂房的开挖进度

序 号	国 家	工 程 名 称	总装机容量 (万kW)	厂 房 尺 寸 (m) (长×宽×高)	开 挖 方 量 (万m ³)	施 工 期 限 (月)
1	加 拿 大	丘吉尔瀑布	522.5	300×24.5×45.5	175	34
2	加 拿 大	波太基山	183	270×26×40	80	24
3	西 班 牙	阿尔曼德拉	54	94×14×35	5	13
4	波 兰	波罗姆加扎尔	50	134×27×40	10.8	33
5	日 本	喜 贺 山	46.6	60×26×47	7.5	21
6	德 国	萨 金 根	33	162×23×31	10	21
7	奥 地 利	莫 尔	29.1	43×20×25	2	14.5
8	奥 地 利	科 普 斯	25.2	70×28×30	5.5	23
9	苏 联	上杜鲁门	22.4	86×17.5×37.7		25

调压井内管道进口处设置快速闸门，或在管道进口平段设置专门的阀室、阀门及其交通洞，有时在各支管段设置阀门，并有专门的阀室，没有阀室时，就直接在厂房内设置阀门；厂区部分的主副厂房、安装间、母线廊道、主变压器室、出线洞和开关站；尾水系统的尾水连接管、尾水调压井和尾水洞；此外还有进厂交通洞和通风洞等均设在地下。有时主变压器室和开关站设在地面。同地面厂房相比较，地下厂房有以下几方面的优点：

(1) 开发河段的选择和建筑物枢纽的布置比较灵活，如果地质条件许可，厂房可设在引水隧洞线路上的任何位置。厂房设在地层深处，地质条件相对较好，还可避开高山峡谷地区的高边坡开挖，节省大量的削坡工作量。

(2) 引水隧洞建在地下，可使其线路尽可能成直线布置，缩短长度，因而工程量和投资均可得到节省。在首部式开发布置中，由于缩短了引水道的长度，可用无压或低压的尾水隧洞代替有压的引水道，既减少了水头损失，又改善了动能指标。

(3) 岩石条件好的情况下，压力引水道可充分利用岩石的承载性能，内水压力所产生的大部分荷载可传给围岩承担，这样可节省钢材。井式水轮机输水道常较地面式为短，将会改善机组调节保证条件，并可减轻输水道和水轮机的结构。

(4) 在深山峡谷中电站厂房布设在地下，运行安全，人防条件好，较易解决枢纽布置困难问题，还可避免山崩落石等事故，保存自然条件和保护风景。

(5) 地下厂房可全年施工，不受气候条件的影响，有利于缩短电站的建设工期。因而，地下厂房在条件适当和设计施工较好时，工期并不长，造价也并不高，详见表 1-4。

表 1-4 我国地下水电站与其他型式水电站的比较

电站名称	电站型式	装机容量 (万kW)	造 价 (万元)	单位千瓦造价 (元)	施工周期	建成年份
狮子滩	堆石坝，引水式，地面厂房	4.8	6938	1447	2年2个月	1956
上犹江	重力坝，坝内厂房	6.0	6300	1050	2年8个月	1957
流溪河	拱坝，引水式，地下厂房	4.2	3845	917	2年1个月	1958
黄龙滩	重力坝，坝后引水式地面厂房	15.0	17000	1132	5年2个月	1974
长 湖	重力坝，坝后式地下厂房	7.2	3890	528	3年7个月	1973
石 泉	空腹重力坝，坝后式地面厂房	13.5	12991	960	3年2个月	1973

(6) 地下厂房的运行和检修费用较地面厂房为省。一般地讲，地下建筑物的使用年限较长，因为开挖在岩体内的建筑物，其使用年限和折旧年限均比地面的混凝土和钢筋混凝土建筑物的要长久得多，这在经济上就更为有利。

(7) 山区河流的水位变幅较大，采用地面厂房，洪水期的水位往往要超过厂房顶部，这样就将增加厂房布置和结构设计方面的复杂性。采用地下厂房后，此类问题就比较容易处理。

(8) 地下厂房施工与主坝不干扰，增加工作面，这对高山峡谷地区特别方便。

当然，地下厂房也不可避免地存在一些缺点，主要的有如下各点：