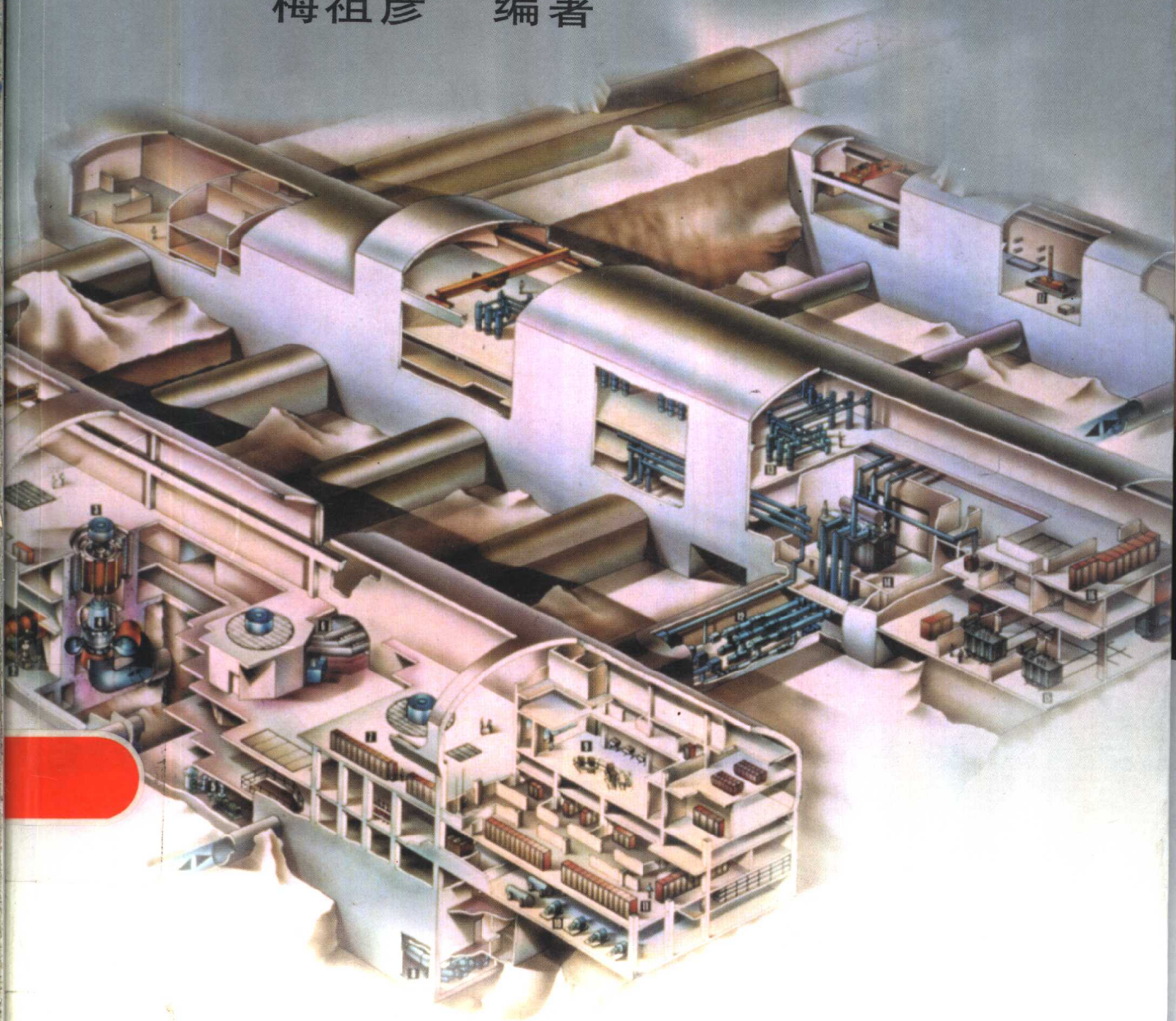


# 抽水蓄能发电技术

梅祖彦 编著



机械工业出版社  
China Machine Press

187306

TV743  
M473

# 抽水蓄能发电技术

梅祖彦 编著



机械工业出版社

抽水蓄能技术是电力系统中作为调节手段的一种先进技术，是一种行之有效的蓄能装置，经过国外三四十年、我国近十多年的应用，已经取得了显著的经济效果。

本书分析了当前我国电力系统对抽水蓄能的需要，综述了国外抽水蓄能技术兴起的过程及发展现状，较系统地阐述了抽水蓄能电站的规划和应用、经济效益、水泵水轮机及电动发电机的结构和特性、电气设备的选用以及运行控制等方面的原理和设计考虑。

本书可供从事电力建设的技术管理、设计、科研和制造等方面技术人员使用，也可以作为高等学校水利水电各专业的教学参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

抽水蓄能发电技术/梅祖彦编著. —北京: 机械工业出版社, 2000.7

ISBN 7-111-07995-7

I. 抽… II. 梅… III. 抽水蓄能发电站-技术 IV. TV743

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 06092 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 钱飒飒 版式设计: 张世琴 责任校对: 张 佳

封面设计: 方 芬 责任印制: 何全君

中国农业出版社印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 6 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·17.25 印张·2 插页·412 千字

0 001—2 000 册

定价: 28.80 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换  
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

# 前 言

经过解放以来近 50 年的建设发展,我国已成为世界上的能源大国。我国大陆到 1998 年发电机组总装机容量为 277GW,年发电量 1160TWh,两项均居世界第二位。其中热力发电及核电装机容量为 214GW,发电量为 987TWh,分别占全国总装机容量的 77.2% 和 82.9%,而水力发电装机容量只有 63.1GW,发电量 197TWh,分别只占总量的 22.8% 和 17.1%。

我国水力资源在世界上居首位。理论水电资源为 680GW,可经济开发容量为 405GW。但是到目前为止,实际开发的水电资源只有 15.8%,可见我国的水电发展程度与天然资源条件是十分不相称的,在世界较大国家中是属于落后的。

我国具有以燃煤为主的能源结构,需要有相当规模的水力发电容量来承担电网的负荷调节。我国几个大电力系统,如华北、东北、华东电网的水电装机容量比重均在 17% 以下,其中华北系统只有 4.3%。有的电力系统虽水电比重高一些,如华中系统(37.6%),但某些大型水电站需要担负基荷发电,而且受季节性径流的影响,没有很多调节能力,有时水电站需大量弃水后才能使其参与电网的调峰。我国的电力建设经过几十年的努力,现在已基本上达到电量充足,限制用电的情况已大体消除。但很多电力系统的调峰能力还很差,有几个系统峰谷差大大超过了水机组的容量,同时峰谷差的增长速度超过了负荷的增长速度。为此,很多火电厂被迫使用中型热力机组来调峰,这样做既耗费燃料又损伤设备。

然而,抽水蓄能电站和常规水力发电站一样,在担当调峰、调频、事故备用、旋转备用等方面都有明显的功效,另外它还有一独特功能,就是可以吸收电力系统中负荷低谷时段的多余电能,因而可以解除大型火力发电机组压低出力运行的困难。所以建设抽水蓄能电站是增强电力系统调节能力的有效措施,它有助于提高供电质量以及提高电力系统本身的经济性。

按照我国电力发展规划,到 2000 年末我国总装机容量将达 300GW,其中水电将占 25%,即 75GW。现在的研究结果表明,为达到低限度的电网调节能力,电力系统中应至少具有总容量 5% 的抽水蓄能机组,若要达到较好的调节能力,则需要有总容量 10% 的蓄能装机。按此计算,到本世纪初,我国应该建有 15~30GW 的抽水蓄能装机容量,这个比例应相当于届时水电装机容量的 20%~40%。

据现在的抽水蓄能建设进度,我国已建成的抽水蓄能电站,共有容量 6.6GW。在建的电站容量可能有 2~3GW,加在一起也只有 8~9GW,占总装机容量的 3% 上下。所以我国目前的抽水蓄能电站建设进展距近年的需求水平还相差很远。从我国各主要电力系统的发展预估,可以看出随电力系统容量的增加,峰谷差将以更高的比例上升。在进入 21 世纪后,全国电力系统在保证发电质量方面仍将处于紧张的状态。所以发展抽水蓄能电站在我国将是一项长期任务。

尽管国内很多电力和水电设计单位已对发展抽水蓄能有了规划,也积累了不少设计经验,我国制造厂和科研单位在研制抽水蓄能设备方面也取得了某些成绩,但总体来说,我国



现在距全面掌握抽水蓄能技术尚有一定差距。国外在发展这项技术的经验和存在的问题尚有待我国技术人员去深入分析和消化。为此作者编写了这本专题论述,对抽水蓄能电站规划和应用、经济效益、水泵水轮机结构和特性、电动发电机结构,电气设备以及运行控制等方面作了详细的介绍和分析。本书的内容主要取材于国内外的技术文献,也介绍了我国在抽水蓄能方面取得的最新成就,包括作者在国内外参观访问所得到的资料。70年代和80年代是欧美和日本抽水蓄能电站建设大发展的时期,很多有价值的研究成果都是在这一时期发表的,现在编写本书时这些资料很有用,仍引用了早一些年代的参考文献。

本书的第1章介绍抽水蓄能的工作原理、类型和主要组成部分,以及国外和国内抽水蓄能电站的发展情况,用发展实例说明我国在抽水蓄能的建设上存在繁重任务。

在第2章中对抽水蓄能的经济效益分析方法作了介绍。因为抽水蓄能没有径流电量,它和常规水电站在电源开发中的地位不同,它的作用主要在其动态效益,因而需要增加一些新的动能经济概念。事实已证明,抽水蓄能电站与大型火电站或核电站配合运行时动态效益最明显。

水泵水轮机的性能、结构和应用是本书的重点部分。第3章介绍了在抽水蓄能电站中使用的各种类型水泵水轮机的结构和功能;第4章着重介绍水泵水轮机水力特性、模型和真机试验以及选型计算方法;第5章深入介绍水泵水轮机各组成部分的水力设计和结构设计问题。

第6章介绍电动发电机的结构及应用,其中抽水工况的起动是抽水蓄能机组特有的问题。另外介绍了国外电动发电机的发展新趋势,可变转速电机的应用。第7章介绍抽水蓄能电站的主要电气设备和自动控制系统的特点,以及运行监测保护系统。

第8章讨论抽水蓄能电站主要参数选定过程的考虑,并扼要介绍抽水蓄能电站的总体布置和各组成部分,如水库、输水管道、进出水口、调压井、电站厂房的布置和结构。

第9章介绍抽水蓄能电站水力过渡过程现象、全特性曲线的表达方式及过渡过程的计算。

第10章介绍抽水蓄能电站首台机组的起动调试以及抽水蓄能机组的各种工况转换过程。对有关章节中某些较细致的描述或计算例题均列入书后的附录中。

作者在1988年曾出版过《抽水蓄能技术》一书,主要介绍了国外抽水蓄能建设的成就和技术知识。根据近十多年来国内外抽水蓄能电站建设的新进展,特别是我国抽水蓄能电站的发展,现在将原书的内容进行了更新,重新编写了本书。

在编写过程中,得到有关设计院、业主单位、蓄能电站和安装单位提供的资料,使本书的内容更为丰富和实用。作者在清华大学的同事和从事抽水蓄能建设的有关专家对本书的编写提出了宝贵意见,广州抽水蓄能电站联营公司和水利水电科学研究院对本书的出版提供了支持,机械工业出版社的编辑同志为本书的编印付出了巨大的努力,作者在此一并表示深切的感谢。

作者  
2000年3月

## 主要符号表

符号	名称	常用单位	符号	名称	常用单位
常用物理量(拉丁字母)					
A;F	面积	m <sup>2</sup> ;cm <sup>2</sup>	B <sub>0</sub> ,b <sub>0</sub>	导叶高度	m;cm
α	加速度	m/s <sup>2</sup>	D;D <sub>1</sub>	转轮、叶轮直径	m;cm
B	常数	—	D <sub>0</sub>	导叶中心圆直径	m;cm
C	常数	—	D <sub>d</sub>	转轮高压边直径	m;cm
D	直径	m;cm;mm	D <sub>s</sub>	转轮低压边直径	m;cm
F	力	N,kN	D <sub>b</sub>	转轮高压边高度	m;cm
f	摩擦系数	—	E	电压	V
f	频率	1/s <sup>2</sup> ;Hz	ε	水力损失中可比例计算的比重	·
g	重力加速度	m/s <sup>2</sup>	F <sub>0</sub>	导叶开度	·
H	水头、扬程	m(水柱)	G	负荷、力	N
L,l	长度	m;cm	GD <sup>2</sup>	转动惯量	tm <sup>2</sup>
L,l	升	cm <sup>3</sup>	H <sub>S</sub>	吸出高度、吸水高度	m
M	力矩	Nm	h	相对水头	—
n	转速	r/min	K	比速系数	—
p	压力(压强)	kPa;MPa	K	环量系数	—
Q	流量	m <sup>3</sup> /s;L/s	M <sub>11</sub>	单位力矩	Nm
T,t	温度	℃;K	m	相对力矩	—
T,t	时间	s;min;h;d	n	转速	r/min;r/s
V,v	速度	m/s	n <sub>11</sub>	单位转速	r/min
V	体积	m <sup>3</sup>	n <sub>r</sub>	飞逸转速	r/min
常用物理量(希腊字母)					
α	绝对速度与切向夹角	·	n <sub>q</sub>	比转速 水泵工况用	
η	效率	%	n <sub>s</sub>	比转速 水轮机工况用	
β;θ	相对流速与切向夹角	·	P	功率	kW;MW
λ	阻力系数、压力系数	—	Q <sub>11</sub>	单位流量	m <sup>3</sup> /s;L/s
μ	粘度(动力粘性系数)	Pas	q	相对流量	—
ρ	密度	kg/m <sup>3</sup>	r	电阻	Ω
ν	运动粘性系数	m <sup>2</sup> /s	S	视在功率	kVA;MVA
τ	切应力	kPa;MPa	S <sub>r</sub>	转速比	—
σ	正应力	kPa;MPa	T	力矩	Nm
φ	流量系数	—	u	切向流速	m/s
ψ	压力系数	—	v	绝对流速	m/s
ω	角速度	rad/s	w	相对流速	m/s
机械电气常用符号					
α	相对转速	—	X	阻抗	Ω
α <sub>0</sub>	导叶开度	mm	Y	导叶开度	mm
下 标					
			y	相对导叶开度	—
			T	水轮机工况	
			P	水泵工况	

符号	名称	常用单位	符号	名称	常用单位
i	进口		m	轴面	
o	出口		P	原型	
$\infty$	叶片无限多条件		M	模型	
h	水力性		r	基准值;标么值	
m	机械性		o	额定值;最优值	
u	切向;周向				



## 作者简介

梅祖彦 1924年出生。1949年在美国获学士学位、1951年获硕士学位,后在流体机械工厂从事设计工作。1954年后在清华大学任教,历任讲师、副教授、教授。主要承担水力机械理论及设计教学和可逆式水力机械和水力过渡过程研究和试验。

参与过多项水电站水力机械设计。主持过大型试验设备的建立与课题研究,多年研究有关抽水蓄能建设问题,近年负责过“长江三峡水轮发电机组关键技术基础性研究”重大项目中的“三峡水轮机优化设计理论及试验研究”课题。

曾获得北京市学术成果奖,水利部科技进步奖及能源部科技进步奖。曾任中国机械工程学会流体工程学会副理事长,为国际水力研究协会(IAHR)会员,和本专业的国内外专家有密切联系,多次主持过国际会议。

编著《抽水蓄能技术》(1988),主编《水力机械结构及制造》(英文,1991),参编《抽水蓄能电站》(1992)。



# 目 录

前 言  
主要符号表

## 第 1 章 抽水蓄能的应用

1.1 抽水蓄能电站概述 .....	1
1.1.1 我国电力系统的发展形势 .....	1
1.1.2 抽水蓄能电站的工作原理 .....	1
1.1.3 抽水蓄能电站的类型 .....	4
1.1.4 抽水蓄能电站的组成部分 .....	6
1.2 抽水蓄能电站在电力系统中的作用 .....	7
1.2.1 抽水蓄能机组对改善电网运行的作用 .....	7
1.2.2 抽水蓄能电站在能源利用上的作用 .....	7
1.2.3 抽水蓄能电站在提高水电效益方面的作用 .....	8
1.3 抽水蓄能电站的发展概况 .....	8
1.3.1 国外抽水蓄能电站的发展概况 .....	8
1.3.2 我国抽水蓄能电站的发展概况 .....	12
参考文献 .....	16

## 第 2 章 抽水蓄能电站的经济效益

2.1 抽水蓄能电站的经济性 .....	17
2.1.1 抽水蓄能电站的静态效益 .....	17
2.1.2 价值分析 .....	18
2.1.3 抽水蓄能电站的可靠性和可用率 .....	21
2.1.4 抽水蓄能电站的建设投资 .....	21
2.1.5 抽水蓄能电站的运行费用 .....	23
2.2 抽水蓄能电站的动态效益 .....	24
2.2.1 抽水蓄能电站的动态效益 .....	24
2.2.2 抽水蓄能电站动态效益的评价 .....	26
2.2.3 抽水蓄能电站效益的综合考虑 .....	27
2.2.4 抽水蓄能电站与核电站的配合运用 .....	28
参考文献 .....	29

## 第 3 章 水泵水轮机的类型和发展

3.1 水泵水轮机概述 .....	31
3.1.1 水泵水轮机的结构特点 .....	31
3.1.2 高水头可逆式水泵水轮机 .....	34
3.1.3 低水头可逆式水泵水轮机 .....	41
3.1.4 组合式水泵水轮机 .....	43
3.1.5 水泵水轮机的发展趋势 .....	47
3.1.6 我国抽水蓄能电站水泵水轮机使用实例 .....	49
参考文献 .....	61

## 第 4 章 水泵水轮机的工作特性和选型

4.1 水泵水轮机的工作特性 .....	62
4.1.1 水泵水轮机的工作原理 .....	62
4.1.2 水泵水轮机的基本参数 .....	64
4.1.3 水泵水轮机的能量特性 .....	70
4.1.4 水泵水轮机的空化特性 .....	73
4.1.5 水泵水轮机的压力脉动特性 .....	76
4.1.6 水泵水轮机的力特性 .....	81
4.2 水泵水轮机试验 .....	86
4.2.1 水泵水轮机模型试验 .....	86
4.2.2 水泵水轮机模型验收试验 .....	89
4.2.3 水泵水轮机真机验收试验 .....	91
4.3 水泵水轮机的选型 .....	92
4.3.1 水泵水轮机的选型原则 .....	92
4.3.2 水泵水轮机的选型计算 .....	93
4.3.3 混合式抽水蓄能电站水泵水轮机的选型 .....	99
4.3.4 水泵水轮机的效率换算 .....	99
4.3.5 运转特性曲线 .....	101
4.3.6 吸出高度的选择 .....	102
参考文献 .....	103

## 第 5 章 水泵水轮机的水力设计和结构设计

5.1 水泵水轮机的水力设计 .....	105
----------------------	-----

5.1.1	可逆式转轮设计	105
5.1.2	涡壳设计	109
5.1.3	座环及固定导叶设计	113
5.1.4	导叶设计	113
5.1.5	尾水管设计	118
5.2	水泵水轮机的结构设计	119
5.2.1	可逆式转轮	119
5.2.2	导水机构	127
5.2.3	座环与涡壳	129
5.2.4	顶盖与底环	130
5.2.5	进口阀	133
5.2.6	压力平衡装置	135
	参考文献	136

## 第6章 电动发电机

6.1	电动发电机概述	137
6.1.1	电动发电机的特点	137
6.1.2	电动发电机的主要参数	138
6.2	电动发电机的结构	138
6.2.1	转子	139
6.2.2	转动部分	141
6.2.3	定子	142
6.2.4	推力轴承	142
6.2.5	通风冷却系统	144
6.3	可变转速电动发电机	147
6.3.1	换极式变转速电机	147
6.3.2	可调式变转速电机	148
6.4	电动发电机工况起动方式和 制动方式	150
6.4.1	同轴电动机起动	150
6.4.2	异步起动	151
6.4.3	同步(背靠背)起动	152
6.4.4	半同步起动	153
6.4.5	变频起动	154
6.4.6	各种起动方式的比较	155
6.4.7	电气制动	155
	参考文献	157

## 第7章 抽水蓄能电站的电气设备

7.1	抽水蓄能电站主接线和设备	158
7.1.1	抽水蓄能电站主接线	158
7.1.2	变压器	160

7.1.3	励磁装置	162
7.1.4	开关设备	163
7.1.5	继电保护系统	165
7.1.6	厂用电源	166
7.2	抽水蓄能电站监控系统	166
7.2.1	全厂集中控制方案的选择	166
7.2.2	计算机监控系统结构的选择	166
7.3	运行监测和故障分析	168
7.3.1	状态监测模块	168
7.3.2	信号分析模块	168
7.3.3	故障诊断模块	169
	参考文献	170

## 第8章 抽水蓄能电站

8.1	抽水蓄能电站布置	171
8.1.1	抽水蓄能电站站址选定	171
8.1.2	抽水蓄能电站的特点	172
8.2	抽水蓄能电站主要参数的 选定	174
8.2.1	抽水蓄能电站主要参数选择	174
8.2.2	和抽水蓄能电站主要参数 有关的问题	175
8.2.3	装机容量的确定	176
8.2.4	建设混合式蓄能电站的考虑	177
8.3	抽水蓄能电站进出水口	178
8.3.1	进出水口的功能和类型	178
8.3.2	进出水口的水流特性	179
8.3.3	拦污栅	181
8.4	抽水蓄能电站输水道及 调压井	184
8.4.1	抽水蓄能电站输水道	184
8.4.2	调压井(室)	186
8.5	抽水蓄能电站厂房	190
8.5.1	抽水蓄能电站厂房布置形式	190
8.5.2	抽水蓄能电站厂房结构形式	190
8.5.3	其他形式抽水蓄能电站	195
	参考文献	199

## 第9章 抽水蓄能电站水力过渡过程

9.1	水泵水轮机全特性	200
9.1.1	水泵水轮机全特性曲线	200
9.1.2	水泵水轮机过渡过程	204

9.2 全特性曲线的表达方式 .....	207
9.2.1 全特性曲线处理方法 .....	207
9.2.2 小开度工况机组特性的数学模型 .....	213
9.2.3 导叶零开度工况参数的计算 .....	213
9.2.4 抽水蓄能电站水力过渡过程特点 .....	214
9.2.5 过渡过程轨迹线 .....	215
9.3 水力过渡过程计算 .....	217
9.3.1 水击特征线方程及有限差分解法 .....	217
9.3.2 水轮机工况甩负荷的过渡过程计算 .....	218
9.3.3 水泵工况失去动力的过渡过程计算 .....	221
9.3.4 抽水蓄能电站仿真范围与控制工况 .....	221
参考文献 .....	223

## 第10章 抽水蓄能机组的安装、试运转和控制

10.1 抽水蓄能机组的安装 .....	224
10.1.1 机组安装工作的重要性 .....	224
10.1.2 水泵水轮机的安装 .....	225
10.1.3 电动发电机的安装 .....	225
10.1.4 机组辅助系统的安装 .....	226
10.2 首台机组起动准备 .....	226
10.2.1 压水起动过程 .....	226
10.2.2 用主泵向上水库充水 .....	229
10.3 抽水蓄能机组联合试运转 .....	230

10.3.1 水泵工况起动试验 .....	230
10.3.2 机组起动试验与上水库充水相结合 .....	230
10.3.3 机组及机电设备带负荷连续运行 .....	231
10.3.4 发电工况空载不稳定性问题 .....	231
10.4 抽水蓄能机组的工况转换 .....	234
10.4.1 可逆式抽水蓄能机组工况转换 .....	234
10.4.2 组合式水泵水轮机工况转换 .....	236
10.4.3 抽水蓄能机组的机械控制系统 .....	238
10.5 抽水蓄能机组的水力振动 .....	242
10.5.1 水泵水轮机的自激振动 .....	242
10.5.2 抽水蓄能电站压力管道的自激振动 .....	243
参考文献 .....	245

## 附 录

附录1 无量纲参数的换算 .....	246
附录2 可逆式水泵水轮机选型计算例题 .....	247
附录3 水泵水轮机模型验收试验 .....	252
附录4 水泵水轮机原型(真机)验收试验 .....	254
附录5 抽水蓄能机组故障诊断实例 .....	255
附录6 抽水蓄能机组的安装实例 .....	256
附录7 充气压水系统实例 .....	259
索引 .....	261

# 第 1 章 抽水蓄能的应用

## 1.1 抽水蓄能电站概述

### 1.1.1 我国电力系统的发展形势

经过解放以来近 50 年的建设发展,我国已成为世界上的能源大国。我国大陆到 1998 年发电机组总装机容量为 277GW,年发电量 1160TWh<sup>⊖</sup>,均居世界第二位<sup>⊖</sup>。其中各种热力发电及核电装机容量为 2.14GW,发电量为 987TWh,分别占全国总装机容量的 77.2%和总发电量的 82.9%,而水力发电装机容量只有 63.1GW,发电量 197TWh,分别只占总量的 22.8%和 17.1%。

我国水力资源在世界上居首位。理论水电资源为 680GW,可经济开发容量为 370GW。但是到目前为止,实际开发的水电资源只有 15.8%,可见我国的水电发展程度与天然资源条件是十分不相称的,在世界较大国家中是属于落后的。

我国的能源结构是以燃煤为主,作为现代化的电力系统,应该有相当规模的水力发电容量来承担电网的负荷调节。但是我国电力系统和其他大国电力系统一样,负荷的发展也是很不平衡的,需要增加运用灵活的调节容量,才能达到较高的效益。我国几个大电力系统,如华北、东北、华东电网的水电装机容量比重均在 17%以下,其中华北系统只有 4.3%。有的电力系统虽水电比重高一些,如华中系统(37.6%),但某些大型水电站需要担负基荷发电,而且受季节性径流的影响,没有很多调节能力,有时则需大量弃水以使水电站参与调峰。我国的电力建设经过几十年的努力,现在已基本达到电量充足,限制用电的情况已大体消除。但很多电力系统的调峰能力还很差,有几个系统峰谷差大大超过了水电机组容量,峰谷差的增长超过了负荷的增长。很多火电厂被迫使用中型热力机组来调峰,这样既耗费燃料又损伤设备。因之发展可能提高供电质量以及提高电力系统本身经济性的技术非常必要,其中抽水蓄能是最经济和运用方便的手段。

目前能够担任调峰的设备有调峰火电机组、燃气轮机组、内燃机组和抽水蓄能机组等,其中抽水蓄能机组具有独特的工作方式,是一种行之有效的蓄能装置。抽水蓄能机组具有水电设备起停快速和调节灵活的优点,能很有效地应付负荷的变化,在国外已有多年广泛的应用,我国现在也已开始大力建设抽水蓄能电站。

### 1.1.2 抽水蓄能电站的工作原理

抽水蓄能电站利用可以兼具水泵和水轮机两种工作方式的蓄能机组,在电力负荷出现低谷时(夜间)做水泵运行,用基荷火电机组发出的多余电能将下水库的水抽到上水库贮存起来,在电力负荷出现高峰时(下午及晚间)作水轮机运行,将水放下来发电。一座抽水蓄能电站具有如图 1-1 所示的几个基本组成部分。

⊖ 1GW=1000MW,即 100 万 kW。1TWh=10<sup>9</sup>kWh,即 10 亿度。

⊖ 如包括台湾,总装机容量为 303GW,年发电量为 1285TWh。

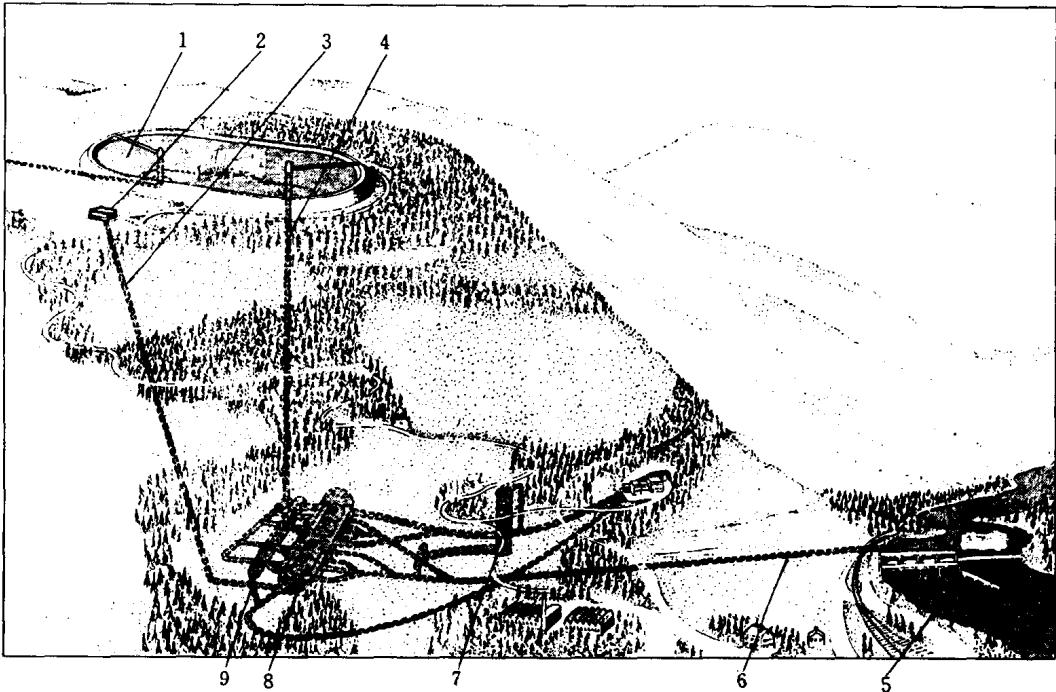


图 1-1 抽水蓄能电站的基本组成部分

1—上水库 2—地面控制室 3—出线洞 4—压力管道  
5—下水库 6—尾水隧道 7—尾水调压室 8—地下厂房 9—主阀室

抽水蓄能机组可以和常规水电机组安装在一座电站内，这样的电站既有电网调节作用又有径流发电作用，称为常蓄结合或混合式电站。有的蓄能电站是专为电网调节修建的，与径流发电无关，则称为纯抽水蓄能电站。抽水蓄能电站可以按照计划发电，在电网中承担峰荷或腰荷，而其更大的作用是在电网中担负不定时的调峰和调频任务。另外，抽水蓄能机组也可以担负调相任务，在事故备用（包括旋转备用）方面更具有优势。

现在电力系统中使用的发电机组容量越来越大，我国已在生产单机容量为 600MW 的热力机组，并已使用由国外引进的核电站 900MW 热力机组。但由于结构上的原因，这些巨大的热力机组和核电机组很不适于在变化负荷下运行，并且有最小技术出力限制（大型火电机组为额定出力的 70% 左右，核电机组为 80%~90%），故均不适于在低负荷下运行。为了使发电能力和用户负荷平衡，需要有调节能力很强的设备，在电力有剩余时把能量贮存起来，在电力不足时把能量释放出来，抽水蓄能机组正好具有这种功能。

目前我国以热力机组为主的发电系统的组成是：使用单机容量很大、经济性很高的燃煤机组来承担负荷中不变的部分（基荷），使用调节性能较好的燃煤或燃油调峰机组和某些水电机组来承担负荷中有规律变化的部分（腰荷），使用水电机组或燃气轮机来承担负荷中变化频繁的部分（峰荷）。电力系统如装有抽水蓄能机组，则可以用来替代承担腰荷及峰荷的热力机组。

图 1-2 表示一个大型电力系统在 24h 之内电力负荷的实际变化规律，这种图形称为日负荷图。从图上可以看出，每天夜间是负荷的低谷时段；上午负荷急速上升；到午后达到顶

点；到晚间又逐渐下降，回到低谷处，最低点负荷约为最高点的 44%。此图累计了 30 多年的负荷变化资料，电力系统的总容量增加了 10 倍以上，但是每天负荷的相对变化规律却十分相象。

为便于分析，将电力系统的日负荷图简化，如图 1-3 所示。图中最大的负荷值为  $P_{\max}$ ，最小的负荷值为  $P_{\min}$ ，按能量计算的平均负荷为  $\bar{P}$ 。现在用负荷率的概念来表征负荷波动的程度，将负荷率定义为：

$$\text{最小负荷率 } \beta = P_{\min} / P_{\max}$$

$$\text{平均负荷率 } \gamma = \bar{P} / P_{\max}$$

在以热力机组为主的电力系统中，根据运行经济性的要求，希望日最小负荷率  $\beta$  值不小于 0.7~0.75，日平均负荷率  $\gamma$  值不小于 0.85~0.9。但是我国电网实际的负荷率都远远低于这些数值，所以为提高电力系统的功能，除装设基荷的发电机组外，还必须有一定数量能起调节作用的调峰和调频机组。

从图 1-3 上看，如果只装设调峰热力机组、燃气轮机或常规水电机组，所需的总装机容量为  $P_{\max} - P_{\min}$ ，而在此容量内有些机组的使用率是很低的。如果这项调峰任务由抽水蓄能机组来承担，则装机容量只需为  $P_{\max} - \bar{P}'$  ( $\bar{P}'$  略大于  $\bar{P}$ )， $\bar{P}'$  线以上为蓄能机组发电部分， $\bar{P}'$  线以下为蓄能机组抽水部分。抽水的动力要来自基荷火电，所以这个系统的基荷容量可以提高到  $\bar{P}'$ 。使用抽水蓄能机组的第一个优点是允许提高电力系统基荷发电量的比重，降低调峰容量的比重；其次，蓄能机组在调节过程中有发电和抽水两种运行方式，机组的使用率也比装设调峰火电机组要高。

用  $\bar{P}'$  线来代替平均负荷率  $\bar{P}$  线的理由是因为抽水蓄能机组在运转时在输电线路、机电设备和水力系统中都将有损失，故抽水所需电能要比发电产生的电能多一些，也就是  $\bar{P}'$  线以下的面积要比  $\bar{P}$  线以上的面积大一些。实际上，电力系统并不要求抽水蓄能把负荷曲线完全调整到一条水平线。如前所述，如能将平均负荷率调到 0.85~0.9，则余下的负荷波动就可以由常规的热力机组来承担。

图 1-4 表示了一个中型电力系统的预测日负荷图，用作规划发展的依据。这个系统的最大负荷为 8700MW，

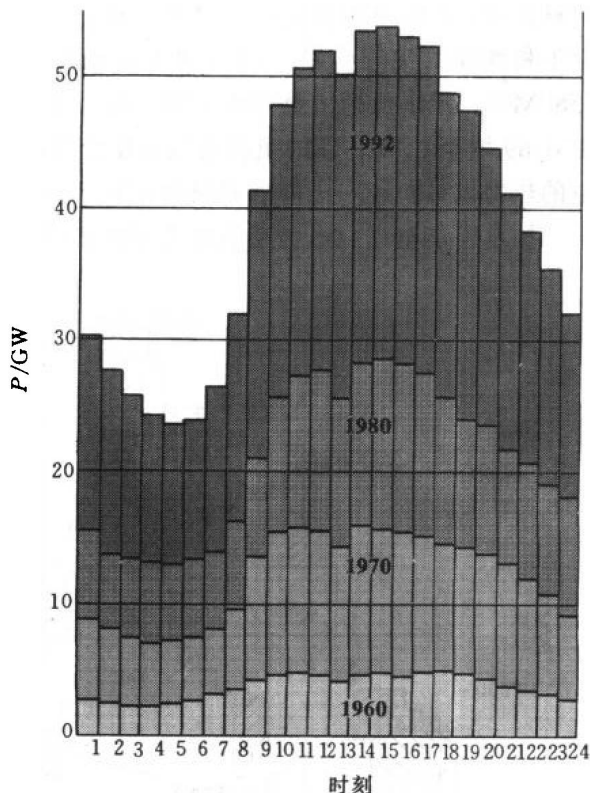


图 1-2 电力系统负荷变化规律—日负荷图

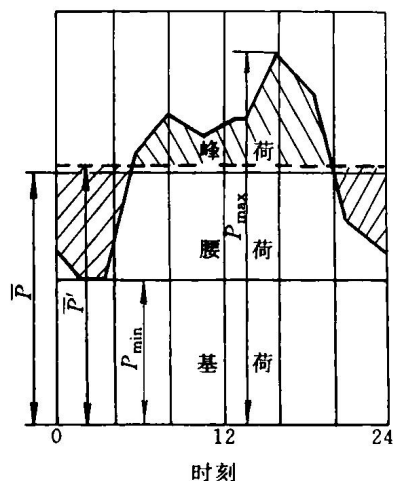


图 1-3 电力系统日负荷变化分析图



最小负荷为 6040MW。系统中只有少量的水电，其余都是火电，现在拟修建两个抽水蓄能电站：A 电站的容量较大，每天发电一次，抽水一次，利用后半夜的多余电能来承担晚间的高峰负荷；B 电站的容量小些，每天发电二次，抽水三次，主要利用白天的多余电能来承担上午和晚间的尖峰负荷。经过抽水蓄能电站的调节后，热力机组所承担的最大负荷减至 7580MW，最小负荷增至 6820MW，峰谷差由原来的 2660MW 减为 760MW，最小日负荷率由 0.69 增至 0.90，新的负荷曲线如粗黑线所示。如果在这个系统中只装设与蓄能机组同容量的热力调峰机组，则峰谷差只能减至 1540MW，最小日负荷率只能提高到 0.80。

抽水蓄能电站在电力系统电力平衡图中的地位如图 1-5 所示。

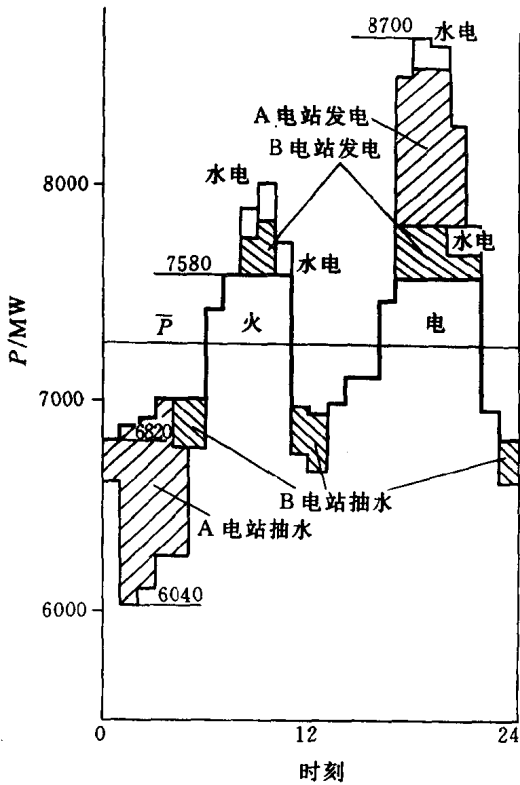


图 1-4 电力系统日调节规划图

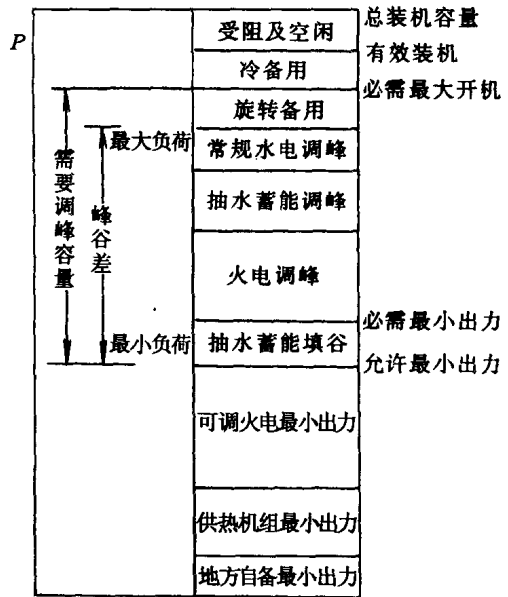


图 1-5 抽水蓄能电站在电力系统电力平衡图中的地位

### 1.1.3 抽水蓄能电站的类型

#### 1.1.3.1 建设类型

装有常规水轮发电和抽水蓄能两种机组的水电站称为混合式抽水蓄能电站，或称常蓄结合水电站。有的水电站在设计时就考虑安装常规水电和抽水蓄能两种机组，也有的在常规水电站使用若干年后加装抽水蓄能机组，都称为混合式蓄能电站。这种电站可能在一个厂房内装有两种机组，也可能在新建的厂房内另外装设抽水蓄能机组。电站的电能构成一部分为天然径流发电，一部分为抽水蓄能发电。

有的抽水蓄能电站或利用现有水库为上水库，或利用现有水库为下水库，人工新建另一水库及引水系统和厂房。就抽水蓄能的功能而言和径流发电无关，故属于纯抽水蓄能电站类型。另一种纯抽水蓄能电站利用不上现有水库，完全依靠人工修造上下两个水库和引水系

统，电站系统内的水体往复循环，只为抵消蒸发和渗漏需要补充少量水源，厂内安装的完全是抽水蓄能机组。

### 1.1.3.2 调节规律

如抽水蓄能电站在夜间和午间系统负荷低谷时抽水，在上下午及晚间负荷高峰时发电，每天都按此规律操作，则称为日调节电站。这种电站的水库容量按每日调峰的发电量来决定。典型的运行方式可能是：抽水：11~13时，22时~次日6时；发电：10~11时，14~16时，19~22时。

有的电力系统不呈现日循环规律而为周循环规律，在一周的五个工作日中，蓄能机组每天都有一定次数的发电和抽水，但是每天的发电量多于抽水量，如图1-6所示，故上水库的蓄水量逐天减少，到了周末水库已接近于放空，但因周末工业负荷很小，这两天不发电只抽水，到星期一早上水库又蓄满了水。按周调节规律运行的电站所需的水库库容要比日调节的大些。

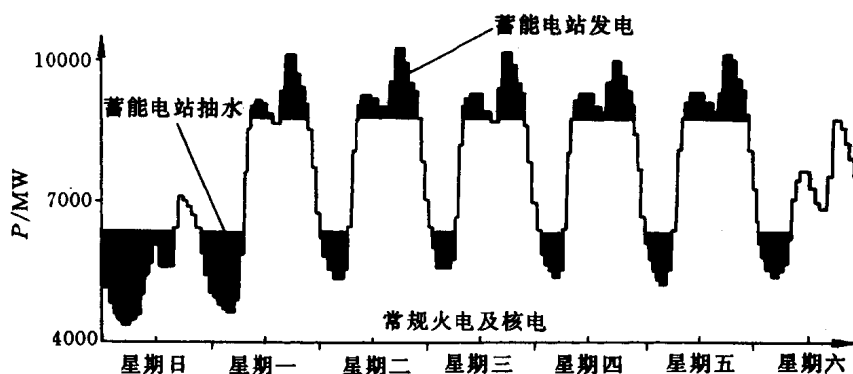


图 1-6 电力系统负荷变化规律一周负荷图

如利用径流式水电站丰水期的季节性电能将水抽到另一个水库中存蓄起来，到枯水季节再放下来发电，则称为季调节抽水蓄能电站。在西欧一些国家，早年发展抽水蓄能就是从季节性蓄水开始的。在汛期利用工业多余电能把河水抽到山上的水库蓄起来，枯水季节放下来发电。另外，多山的国家冬季都有大量积雪，春季溶化后成为上水库的水源。我国葛洲坝水电站因为装机容量很大（2715MW）而保证出力很小（700MW），也在考虑在其附近修建一座抽水蓄能电站来调节一段时间的水量。

### 1.1.3.3 利用水头

混合式蓄能电站受天然落差的限制，水头一般不超过150~200m，如我国在常规水电站增装蓄能机组的岗南、密云、潘家口、响洪甸等都是水头100m以下的电站。

纯蓄能电站则趋向于使用高水头，因为在容量和蓄能量相同的条件下，有效水头越高，所需要的流量和库容越小，单位造价就可减少，故抽水蓄能电站的造价随水头增大而降低。我国的高水头蓄能电站如广州、十三陵、天荒坪等的利用水头已到400~600m或更高，国外使用单级水泵水轮机的蓄能电站已用到700m以上，使用多级水泵水轮机的蓄能电站已用到水头1300m。

### 1.1.3.4 机组型式

国外早期的抽水蓄能电站使用的是单独的水泵机组和水轮机组，即水泵配以电动机，水

轮机配以发电机，形成四机式机组。由于抽水和发电使用不同的电机，投资显然要大。后来随技术进步，一台电机可以兼做电动机及发电机使用，四机式机组应用得就很少了。近代有少数水电站因装机容量有裕度，加装大型水泵在负荷低谷时将水抽回水库以增加总的调峰发电量，也是四机式装置的一种方式，如我国白山水电站在5台300MW的水轮发电机组已运行多年后，现在准备增装2台150MW的大型离心泵。

随后出现的是将水泵、水轮机与电机连接在一起的三机式机组，又称组合式机组。机组的水泵和水轮机都可以按电站的具体要求设计，故能保证在各自的条件下高效率运行。同时水泵和水轮机都向同一方向旋转，在切换工况时不需停机，增加了机组的调节灵活性。到了近年，组合式机组逐渐被可逆式机组所取代。但在高水头范围，如600~800m或更高，组合式机组仍是很具有竞争力的。组合式机组的缺点是主机投资高，整体尺寸大。

从50年代起，出现了将水泵和水轮机合并成一个机器的可逆式水泵水轮机，或称二机式机组。它向一个方向旋转为水轮机工况，向另一方向旋转为水泵工况。可逆式机组的主要优点是结构简单，造价低。除低水头范围内使用一些斜流式机组外，大多数蓄能电站均使用混流式机组。

水头更高时，单级水泵水轮机的比转速将变得很小，很难保持高效率，故需采用多级的可逆式水泵水轮机。多级机组可使用较高的比转速因而提高效率。在欧洲现在有的蓄能电站使用4~6级的高水头水泵水轮机。

#### 1.1.4 抽水蓄能电站的组成部分

##### 1.1.4.1 上下水库

混合式蓄能电站的上水库一般为已建成的水库，下水库可能是下一级电站的水库，或为用堤坝修建起来的新水库。纯抽水蓄能电站多数是利用现有水库为下库，而在高地上或山间筑坝建成上库。

人工修筑的水库，其容量除应满足全天发电所需的水量外，另有一定的备用库容，以抵消蒸发和渗漏。据估计，大型蓄能电站每年损耗水量可达100~200万 $m^3$ 。上库的修筑工作量是巨大的，所形成的库容十分宝贵，库底及边壁都应有防渗保护。国内外现在广泛使用沥青混凝土全面铺盖，也有用混凝土板防护的，对上库原来有水源的也应视情况决定是否采取防护措施。

##### 1.1.4.2 引水系统（高压部分）

和常规水电站一样，蓄能电站引水系统的高压部分包括上库的进水口、引水隧洞、压力管道和调压室。上库的进水口在发电时是进水口，但在抽水时是出水口，故称为进出水口。为满足双向水流的要求，进出水口应按两种工况的最不利条件设计。常规水电站在进水口都装有拦污栅。在蓄能电站中，因水泵工况的出水十分湍急，对拦污栅施加很大的推力和振动力，所以拦污栅是进出水口设计的一个重要项目。

蓄能电站引水隧洞上的分岔管在发电工况时流向是分流的，在抽水工况则是合流的，为使两个方向水流的损失都能最小，需要进行专门的试验研究。

##### 1.1.4.3 引水系统（低压部分）

地下电站的尾水部分（低压部分）是有压的，通常也做成圆断面的隧洞。设计中要特别注意过渡过程中可能出现的负压，如隧洞较长，一般需在机组下游修建尾水调压井。因为引水系统高压部分的造价比低压部分高，故现在趋向于将厂房向上游移动，也就是尾水隧洞将