

8906

# 水 轮 机

涂建炎

小型水电站运行工人培训教材

水利电力出版社

014030-1

TK73

**(京)新登字115号**

### **内 容 提 要**

本书主要介绍水轮机基本知识。全书共七章，内容包括：概述；水轮机结构；水轮机工作原理；水轮机汽蚀、磨损与振动；相似理论和特性曲线；水轮机的选择；引水室和尾水管。

本书除作小型水电站运行工人的培训教材外，还可供具有初中以上文化程度者自学使用，并可作为水电系统技工学校和中等专业学校有关专业的参考书，亦可供地方水电部门小型水电站水轮机设计和安装人员参考。

小型水电站运行工人培训教材

### **水 轮 机**

涂 建 炎

\*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

\*

850×1168毫米 32开本 14.875印张 393千字 3插页

1991年10月第一版 1991年10月北京第一次印刷

印数0001—3020册

ISBN 7-120-01362-9/TV·479

定价12.70元

# 前 言

近年来，我国小水电建设发展很快。为了提高小水电站、电网运行工人的技术和管理水平，充分发挥小水电的经济效益，巩固和扩大办电成果，迫切需要加强对职工进行技术培训。为此，我们组织成都科技大学的有关同志，编写了培训讲义。经多次使用并广泛征求读者意见，现修改编写成这套“小型水电站运行工人培训教材”，供各地举办技术培训班之用。全套教材共十一册：《电工数学基础》、《电工原理》、《电子技术及应用》、《电机原理和运行》、《电工仪表和测量》、《水电站电气一次部分》、《水电站电气二次部分》、《地方电力系统》、《水轮机》、《水轮机调节》、《水轮发电机组辅助设备及自动化》。本教材内容丰富、针对性强、理论联系实际，凡小型水电站和35千伏及以下电网运行、维护、检修中应当掌握的主要知识，都作了较系统的讲述。对有关领域的新设备和新技术，也有简要的介绍。

本教材适用于培训具有初中毕业文化程度的小型水电站和电网的发、供电运行工人，也可作为具有同等文化程度的有关人员的自学参考书。各地可根据实际需要，选用其中有关分册，进行培训。一般以半年为一期，总教学时数控制在500左右。

《水轮机》一书由涂建炎同志编写，全书由周鹏教授主审，陈国基、张沪俊高级工程师对部分章节进行了审阅，在此一并致谢。全书教学时数约为80学时。

由于受经验和水平限制，本书中存在的缺点和问题，恳请读者批评指正。

四川省地方电力公司

1990年11月

# 目 录

前 言

<b>第一章 水轮机概述</b> .....	1
第一节 水轮机基本工作参数.....	1
第二节 水轮机基本类型.....	12
第三节 水轮机型号.....	16
<b>第二章 水轮机结构</b> .....	20
第一节 反击式水轮机结构.....	20
第二节 冲击式水轮机结构 .....	110
第三节 水轮机发展情况 .....	124
<b>第三章 水轮机工作原理</b> .....	129
第一节 水流质点运动 .....	129
第二节 水流与转轮相互作用的过程 .....	135
第三节 水轮机基本方程式 .....	141
第四节 水轮机效率 .....	150
第五节 反击式水轮机进出口速度三角形 .....	154
第六节 水斗式水轮机射流作用 .....	160
<b>第四章 水轮机汽蚀、磨损与振动</b> .....	167
第一节 水轮机汽蚀 .....	167
第二节 水轮机汽蚀类型和等级 .....	180
第三节 反击式水轮机汽蚀系数 .....	187
第四节 水轮机吸出高度和安装高程 .....	193
第五节 水轮机泥沙磨损 .....	205
第六节 防磨抗蚀措施 .....	210

第七节	水轮发电机组振动 .....	216
<b>第五章</b>	<b>相似理论和特性曲线 .....</b>	<b>237</b>
第一节	水轮机相似条件 .....	237
第二节	水轮机相似定律 .....	240
第三节	水轮机的单位参数与比转速 .....	244
第四节	相似律及其简化公式 .....	246
第五节	比转速与水轮机结构及性能的关系 .....	250
第六节	模型与原型参数的换算 .....	253
第七节	水斗式水轮机的综合特性参数 .....	260
第八节	水斗式水轮机效率 .....	263
第九节	斜击式水轮机 .....	273
第十节	水斗式与斜击式水轮机特性曲线 .....	277
第十一节	模型试验简介 .....	279
第十二节	水轮机飞逸特性 .....	304
第十三节	水轮机特性曲线 .....	315
第十四节	应用主综合特性曲线图初步换算和验证原型 水轮机的主要参数 .....	325
第十五节	运转综合特性曲线图的绘制 .....	339
<b>第六章</b>	<b>水轮机的选择 .....</b>	<b>349</b>
第一节	水轮机选择的基本资料 .....	349
第二节	水轮机选择的原则和方法 .....	356
第三节	反击式水轮机的选择 .....	358
第四节	水斗式水轮机的选择 .....	367
<b>第七章</b>	<b>引水室和尾水管 .....</b>	<b>374</b>
第一节	引水室形式及其应用范围 .....	374
第二节	蜗壳的功用和蜗壳中的水流运动 .....	377
第三节	蜗壳参数选择 .....	380
第四节	圆形断面蜗壳的水力计算 .....	384
第五节	多边形断面蜗壳的水力计算 .....	390
第六节	蜗壳的简化水力计算 .....	396

第七节	尾水管的功用	398
第八节	尾水管与转轮	401
第九节	尾水管效率	404
第十节	尾水管参数	409
附录		428

# 第一章 水轮机概述

水轮机定义：水轮机是一种将水能转变为旋转机械能的动力机械，是一种水力原动机。水轮机与发电机组成水电站的水轮发电机组，又称水电站主机组。

在自然界里，水能是一种不断循环的、可以再生的能源。水能是世界各地分布很广而又无环境污染之虞的天然能源。

水流的能量：按水力学能量方程可知，单位重量水流所具有的机械能包括三部分：

$$E = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha v^2}{2g} \quad (1-1)$$

式中  $E$  —— 单位机械能，简称总比能 (m)；

$z$  —— 单位位能，简称比位能 (m)；

$p/\gamma$  —— 单位压能，简称比压能 (m)；

$\alpha v^2/2g$  —— 单位动能，简称比动能 (m)；

$\alpha$  —— 流速分布不均匀系数。

根据水电能源学的发展趋势，展望未来，人类在水能利用上将愈趋完善，从我国古代的水碓、水车、水磨，发展到今天的水轮机，其利用水能的最高效率点已达95%~97%，远远高于火电站利用热能的效率。预期未来的水轮机结构型式和工作原理，将会突破现有框框，以崭新面貌出现，更巧妙更充分地利用水能。

## 第一节 水轮机基本工作参数

在水电站运行中，表示水轮机工作过程基本特性的参数，称为水轮机基本工作参数。



## 一、水头

现以河床式及坝后式水电站为例，阐述水头的含义。

### (一) 水电站毛水头

作用于整个水电站水工建筑物上的水头，称为水电站毛水头，一般可用 $H_g$ 来表示，即水电站可能利用的水流比能。

如图1-1所示，单位重量的水体从进口处A点，通过厂房中的流道，流到下游尾水渠计算断面处（通常取具有最高自由水面的尾水渠断面作为计算断面）D点，在此流程中给予水电站参与转换为电能的水流比能，就是河床式水电站的毛水头。

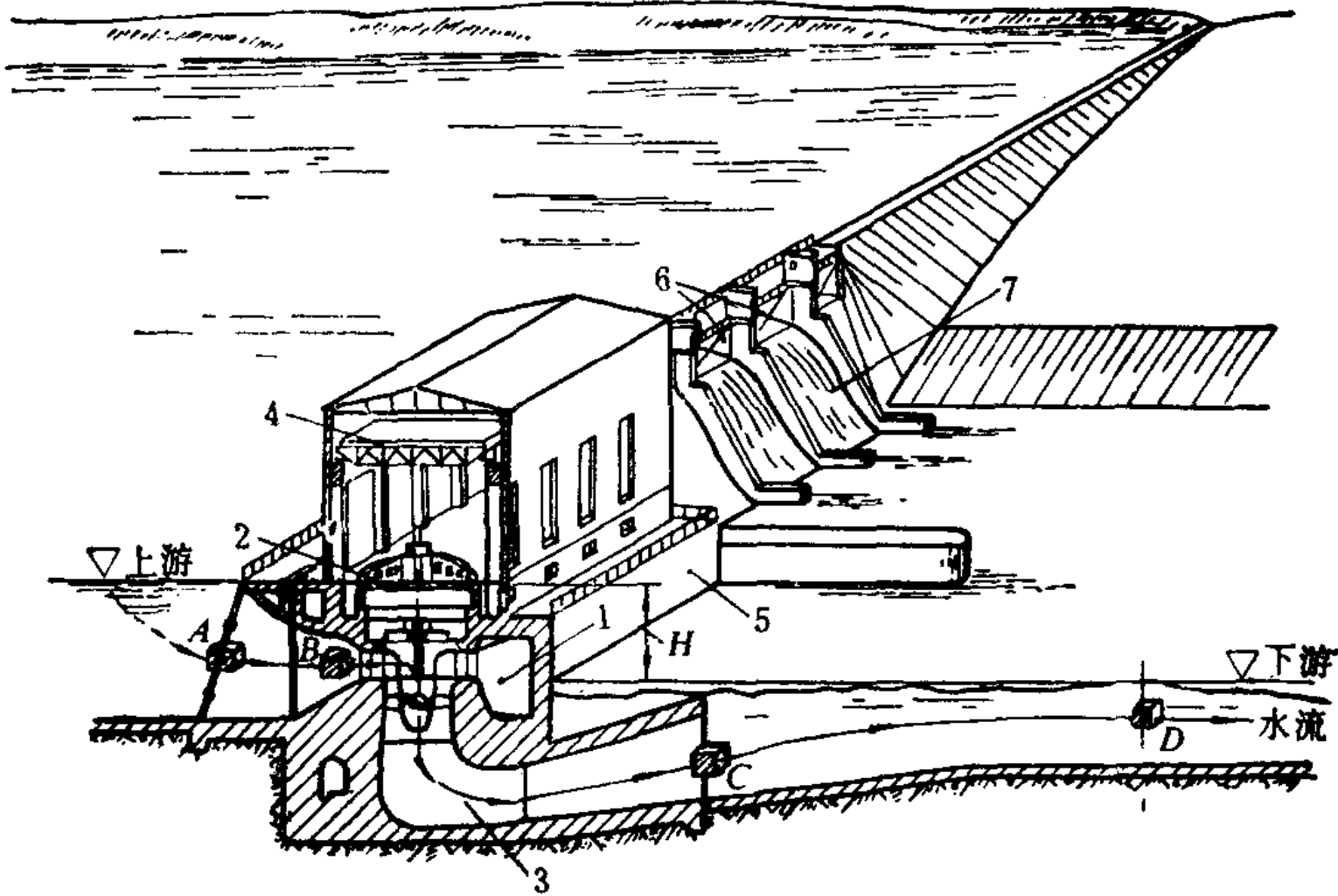


图 1-1 河床式水电站

1—蜗壳；2—发电机；3—尾水管；4—吊车；5—厂房；6—闸门；7—溢流坝

由图1-2可知，A点和D点处的总比能分别为 $E_A$ 和 $E_D$ ，故

$$\begin{aligned}
 H_g &= E_A - E_D \\
 &= \left[ (z_A + p_A/\gamma) + \frac{\alpha_A v_A^2}{2g} \right] - \left[ (z_D + p_D/\gamma) + \frac{\alpha_D v_D^2}{2g} \right] \\
 &= \left[ \nabla_u + \frac{\alpha_A v_A^2}{2g} \right] - \left[ \nabla_d + \frac{\alpha_D v_D^2}{2g} \right]
 \end{aligned}$$



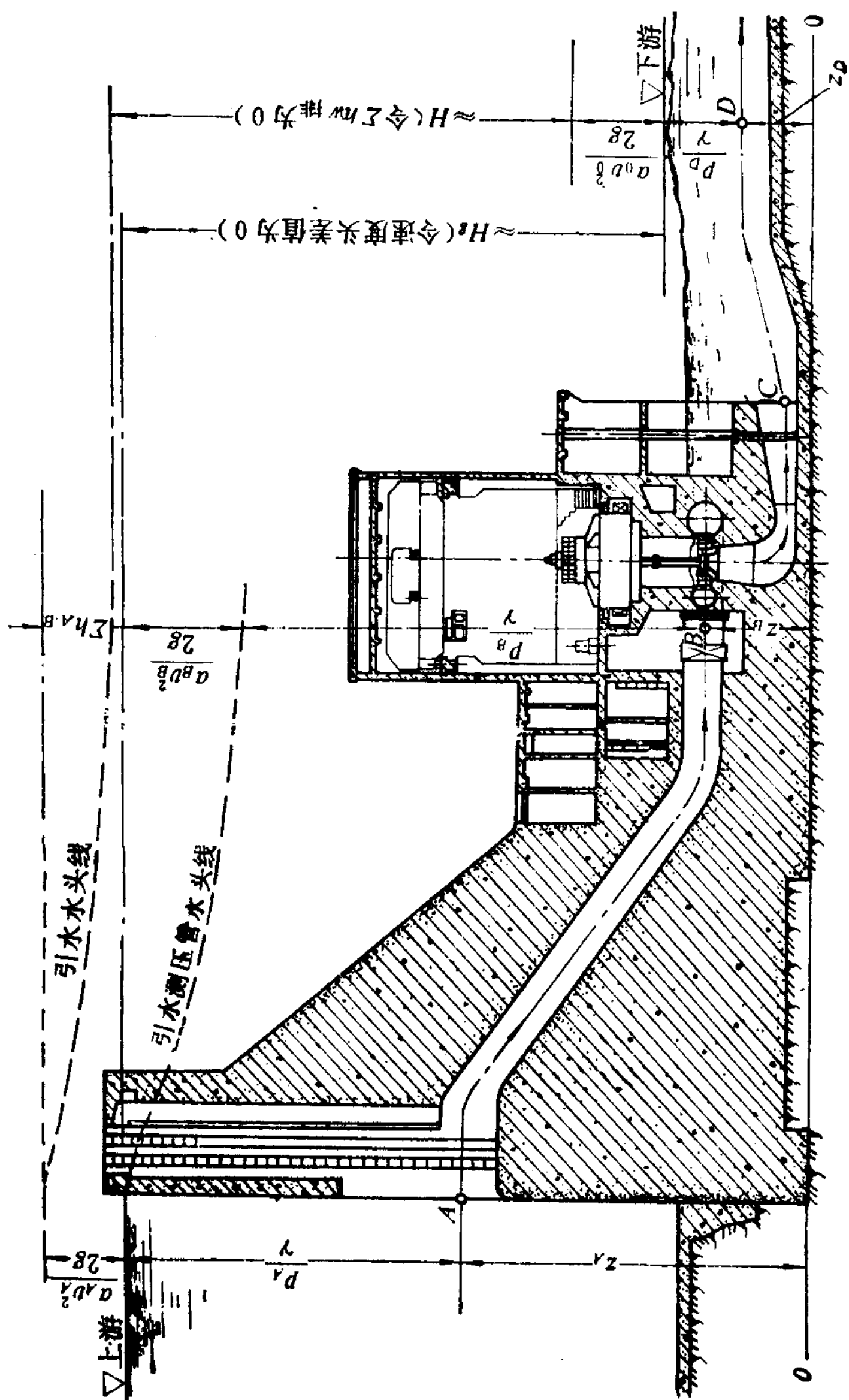


图 1-2 坝后式水电站

$$= (\nabla_u - \nabla_d) + \frac{\alpha_A v_A^2 - \alpha_D v_D^2}{2g} \quad (1-2)$$

式中， $\nabla_u$ 、 $\nabla_d$ 分别为水电站的上、下游水位（高程以m计）。

考虑到A、D两处过流断面比较开阔，因而流速小且其流速分布不均匀系数为 $\alpha_A \approx \alpha_D \approx 1$ ，比动能的差值可忽略不计，故

$$H_g \approx \nabla_u - \nabla_d \quad (1-3)$$

式中符号同前。

## （二）水轮机工作水头

这是指能给水轮机转换为机械能的水流比能，称为水轮机工作水头。其值等于水轮机进、出口断面处的比能之差值。

如图1-2所示，由于水流进入蜗壳之前，以及从尾水管排至尾水渠，在其流程中都有能量损失，所以在各运行工况下，在B点和C点处的比能为：

在蜗壳进口处：

$$E_B < E_A \quad E_B = E_A - \Sigma h_{A-B}$$

在尾水管出口处：

$$E_C > E_D \quad E_C = E_D + \Sigma h_{C-D}$$

所以

$$\begin{aligned} H &= H_B - H_C \\ &= (E_A - \Sigma h_{A-B}) - (E_D + \Sigma h_{C-D}) \\ &= E_A - E_D - (\Sigma h_{A-B} - \Sigma h_{C-D}) \\ &= H_g - \Sigma h_w \end{aligned} \quad (1-4)$$

式中  $\Sigma h_{A-B}$ ——A点到B点处的累计水流阻力损失；

$\Sigma h_{C-D}$ ——C点到D点处的累计水流阻力损失；

$\Sigma h_w$ ——A点到D点处的累计水流阻力损失。

由水力学可知， $\Sigma h_w$ 等于各处的沿程水头损失和局部水头损失之和。

对运行水电站，其流道各处的过水断面面积 $F_i$ 、特征断面的计算长度 $L_i$ 、水力半径 $R_i$ 、阻力系数 $\lambda_i$ 和 $\zeta_i$ 均为定值。故在选定断面处，其对应工况下流速正比于过流量。即 $v_i^2 \propto Q_i^2$ ，故在各

工况下的工作水头 $H_i$ 值为:

$$\begin{aligned} H_i &= H_{i\text{总}} - \Sigma h_{i\text{损}} \\ &= H_{i\text{总}} - \left( \Sigma \lambda_i \frac{L_i}{4R_i} + \Sigma \zeta_i \right) \frac{v_i^2}{2g} \\ &= (\nabla_{i\text{上}} - \nabla_{i\text{下}}) - A_i \theta_i^2 \end{aligned} \quad (1-5)$$

式中  $i$  ——下角注  $i$  表示在计算水力损失时所选择特征流道的段数及各特定工况;

$\Sigma \lambda_i \frac{L_i}{4R_i}$  ——对应该工况下的沿程阻力系数;

$\Sigma \zeta_i$  ——对应该工况下的局部阻力系数;

$A_i$  ——对应该工况下水电站的综合阻力系数;

$\theta_i$  ——对应该工况下的比动能。等于  $v_i^2/2g$ 。

上式表明,当水轮机变化工况时,其工作水头 $H_i$ 随着变化。

基于 $H_i$ 与水头损失 $\Sigma h_{i\text{损}}$ 密切相关(或与 $A_i \theta_i$ 密切相关),故应尽量设法降低水头损失,使水电站整个流道处于平顺畅通状况。

通常,拦污栅及尾水渠的淤堵会降低 $H$ 值。

如图 1-2 所示,鉴于尾水管出口处 C 点实际流态极为复杂,难以精确测定;而 C、D 两点之间的流程短,且流速趋于平缓,故近似计算时,忽略 C、D 两点间的水头损失,即  $E_D \approx E_C$ , 所以

$$\begin{aligned} H &= E_R - E_D \\ &= (E_A - \Sigma h_{A-B}) - E_D \\ &= H_{\text{总}} - \Sigma h_{A-B} \end{aligned}$$

式中符号同前。

### (三) 水轮机特征工作水头

对运行的水轮机来说,特大洪峰、单机空载流量、调压井和前池水面涌浪及管道水击压力等所形成的瞬态极限水头值,在发电效益上没有代表性。因此工作水头 $H$ 应理解为本电站水轮机运行中持续出现的净水头。

特征工作水头通常由水能水力计算确定,在实际运行中又因各电站情况不同,可能出现各种不同的上下游水位与对应的水力

损失组合。为此，运行人员必须根据具体的上下游水位，进行具体分析，确定出工作水头。

### 1. 最大工作水头

最大工作水头 $H_{max}$ 是按本电站的设计级别标准，在水轮机允许运行范围内，可能持续出现的最大净水头。

### 2. 最小工作水头

最小工作水头 $H_{min}$ 是按本电站的设计级别标准，在水轮机允许运行范围内，可能持续出现的最小净水头。

为了说明上述水头，兹举例如下：

#### (1) 坝后式水电站。

坝后式水电站最大工作水头：

$$H_{max} = \text{水库正常高水位} - \text{下游设计最低尾水位} - \Sigma h_w$$

下游设计最低尾水位可按单机额定容量 $N_r$ 的50%所下泄流量时的下游水位，可查下游水位~流量关系曲线得。

最小工作水头 $H_{min}$ 可能出现在下列两种情况：

1) 可能出现在枯水季末、水库放空而供电紧张时刻。

$$H_{min} = \text{水库死水位} - \text{水轮机下泄最大流量时的尾水位} - \Sigma h_w$$

即上游为水库死水位，而下游则为水电站装机满发时下泄流量所对应的尾水位（可查下游水位~流量关系曲线）。

2) 可能出现在汛前水库限制水位和设计洪水来临前。

$$H_{min} = \text{水库汛前限制水位} - \text{水轮机下泄最大流量时的尾水位} - \Sigma h_w$$

#### (2) 河床式水电站。

河床式水电站最大工作水头：

$$H_{max} = \text{水库正常高水位} - \text{下游设计最低尾水位(或按单机 } N_r \text{ 的50\%下泄流量时的尾水位)} - \Sigma h_w$$

对日调节河床式水电站，其最小工作水头可能发生在洪水季节：

$$H_{min} = \text{上游设计洪水位} - \text{下游设计洪水位} - \Sigma h_w$$

#### (3) 引水式水电站。

引水式水电站最大工作水头:

$$H_{\max} = \text{前池溢流堰顶高程} - \text{下游设计最低尾水位} - \Sigma h_w$$

最小工作水头:

$$H_{\min} = \text{前池溢流堰顶高程} - \text{下游设计洪水水位} - \Sigma h_w$$

有关水电站设计洪水位的确定,可参照《水利水电枢纽工程等级划分及设计标准》,详见表1-1、表1-2及表1-3。

表 1-1 水利水电枢纽工程的分等指标

工程 等 别	工程规模	分 等 指 标				
		水库总库容 (亿m <sup>3</sup> )	防 洪		灌 溉 面 积 (万亩)	水电站装 机 容 量 (万kW)
			保护城镇及工矿区	保护农 田面积 (万亩)		
一	大(1)型	>10	特别重要城市、工矿区	>150	>150	>75
二	大(2)型	10~1	重要城市、工矿区	500~100	150~50	75~25
三	中 型	1~0.1	中等城市、工矿区	100~30	50~5	25~2.5
四	小(1)型	0.1~0.01	一般城镇、工矿区	<30	5~0.5	2.5~0.05
五	小(2)型	0.01~0.001			<0.5	<0.05

注 (1)总库容指校核洪水水位以下的水库库容。

(2)分等指标中有关防洪、灌溉两项系指防洪或灌溉工程系统中的重要骨干工程。

(3)灌溉面积系指设计灌溉面积。

表 1-2 水工建筑物级别的划分

工 程 等 别	永久性建筑物级别		临时性建筑物级别
	主要建筑物	次要建筑物	
一	1	3	4
二	2	3	4
三	3	4	5
四	4	5	5
五	5	5	

表 1-3

永久性建筑物洪水标准

洪水重现期 运用情况	建筑物级别				
	1	2	3	4	5
正常运用(设计)	2000~500	500~100	100~50	50~30	30~20
非常运用(校核)	5000	1000	500	300	200

表 1-2中:

1) 永久性建筑物: 系指枢纽工程运行期间使用的建筑物, 根据其重要性分为:

主要建筑物: 系指失事后将造成下游灾害或严重影响工程效益的建筑物。例如: 坝、泄洪建筑物、输水建筑物及电站厂房等。

次要建筑物: 系指失事后不致造成下游灾害或对工程效益影响不大易于恢复的建筑物。例如: 失事后不影响主要建筑物和设计运行的挡土墙、导流墙、工作桥及护岸等。

2) 临时性建筑物: 系指枢纽工程施工期间使用的建筑物。例如导流建筑物等。

例如, 电站装机容量为12万kW, 则相应查得该电站属中型规模、三等工程、电站厂房按三级建筑物标准设计, 其设计洪水位按50~100年一遇的洪水重现期决定。

需要指出: 制造厂家提供的 $H_{max}$ 及 $H_{min}$ , 是按水轮机能量、汽蚀、振动特性、结构刚度及强度等因素决定的。

### 3. 加权平均水头

加权平均水头 $H_e$ 是指电能加权平均水头或时间加权平均水头。

(1) 电能加权平均水头。

计算公式:

$$H_e = \frac{\sum H_i N_i t_i}{\sum N_i t_i} \quad (1-6)$$

式中  $H_i$ ——某工况运行下的实际净水头；

$t_i$ ——该水头出现的持续时间；

$N_i$ ——对应水头下的水轮机功率。

乘积  $N_i t_i$  表示  $H_i$  水头所出现的持续时间  $t_i$  内，水轮机所发出的机械能。

(2) 时间加权平均水头。

计算公式：

$$H_e = \frac{\sum H_i t_i}{\sum t_i} \quad (1-7)$$

上式的意义是在各工况运行下，累计各时段  $t_i$  中通过水轮机转换为单位机械能  $H_i$ ，并累计其乘积  $\sum H_i t_i$  除以累计时段  $\sum t_i$ ，即得时间加权平均水头  $H_e$ 。

$H_e$  是涉及运行持续时间而推算出的平均水头值，从概率论角度可以近似认为  $H_e$  是经常出现的净水头。

为使选择的水轮机经常处于能满发、高效率运行，则应使  $H_e$  对应于最优工况点。

#### 4. 设计水头

设计水头  $H_d$  又称计算水头，是指在同步发电机的额定功率因数 ( $\cos \phi$ ) 下，水轮机发出额定功率 (轴功率)  $N_d$  所需要的最小水头。

对河床式水电站：  $H_d = 0.9 H_e$ 。 (1-8)

对坝后式水电站：  $H_d = 0.95 H_e$ 。 (1-9)

鉴于我国多数径流引水式和河床式电站的调节性能极低，洪水季节下游水位很高，河道洪枯流量变幅大，为使机组在汛期能发电而且兼顾枯水期满足单机多发、满发的运行要求，可考虑适当地把  $H_d$  定得更低些，即不受式 (1-8) 或 (1-9) 之限。

#### (四) 工作水头标定

国际电工委员会对各类机型的工作水头作出简化标定，供参考，如图1-3至图1-6所示。

##### 1. 混凝土蜗壳反击式水轮机 (图1-3)



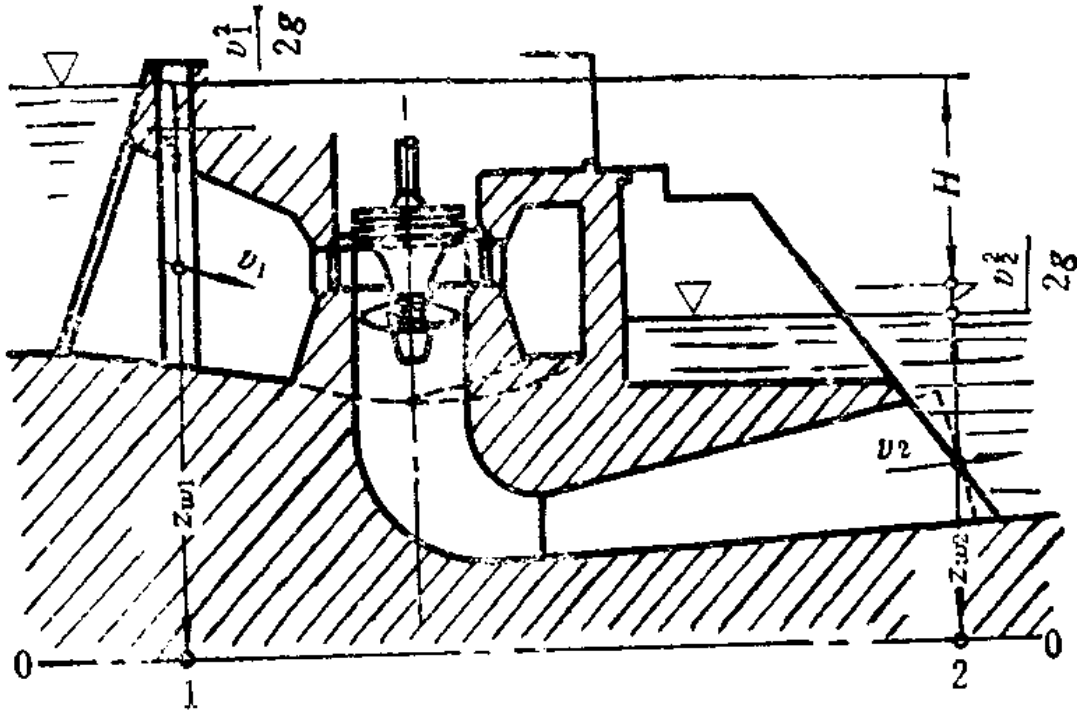


图 1-3 混凝土蜗壳反击式水轮机

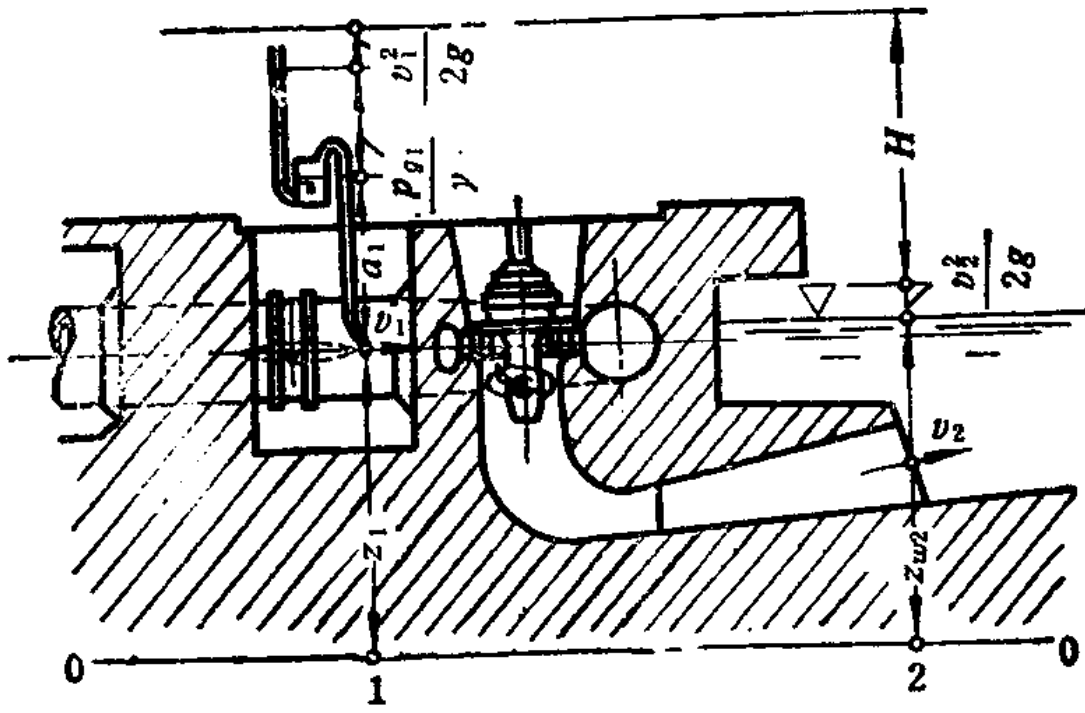


图 1-4 圆形断面蜗壳反击式水轮机

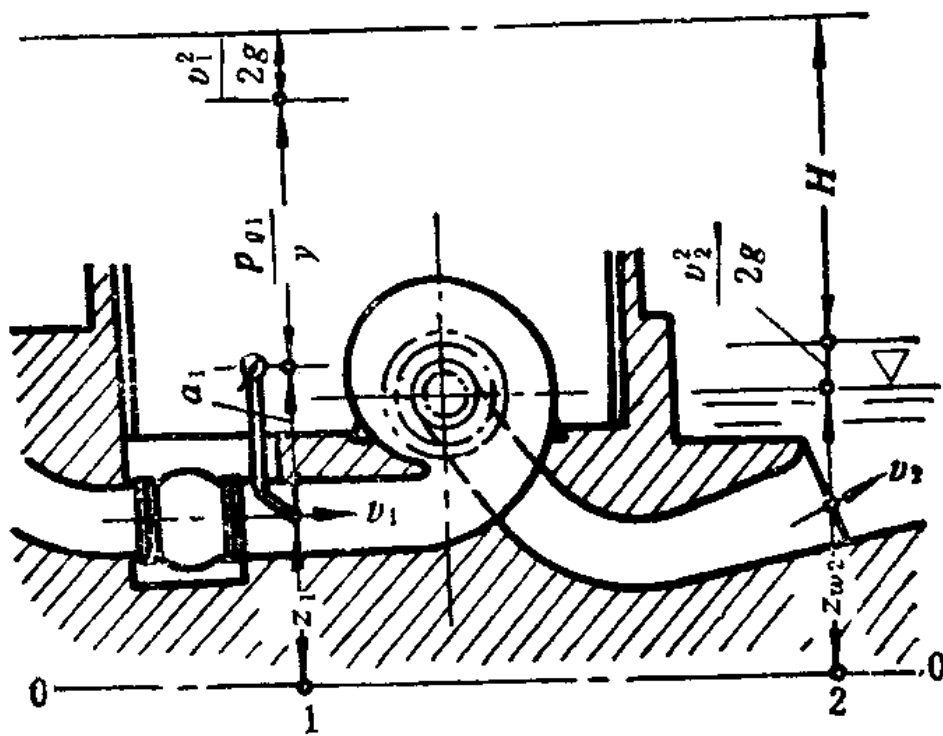


图 1-5 卧式反击式水轮机

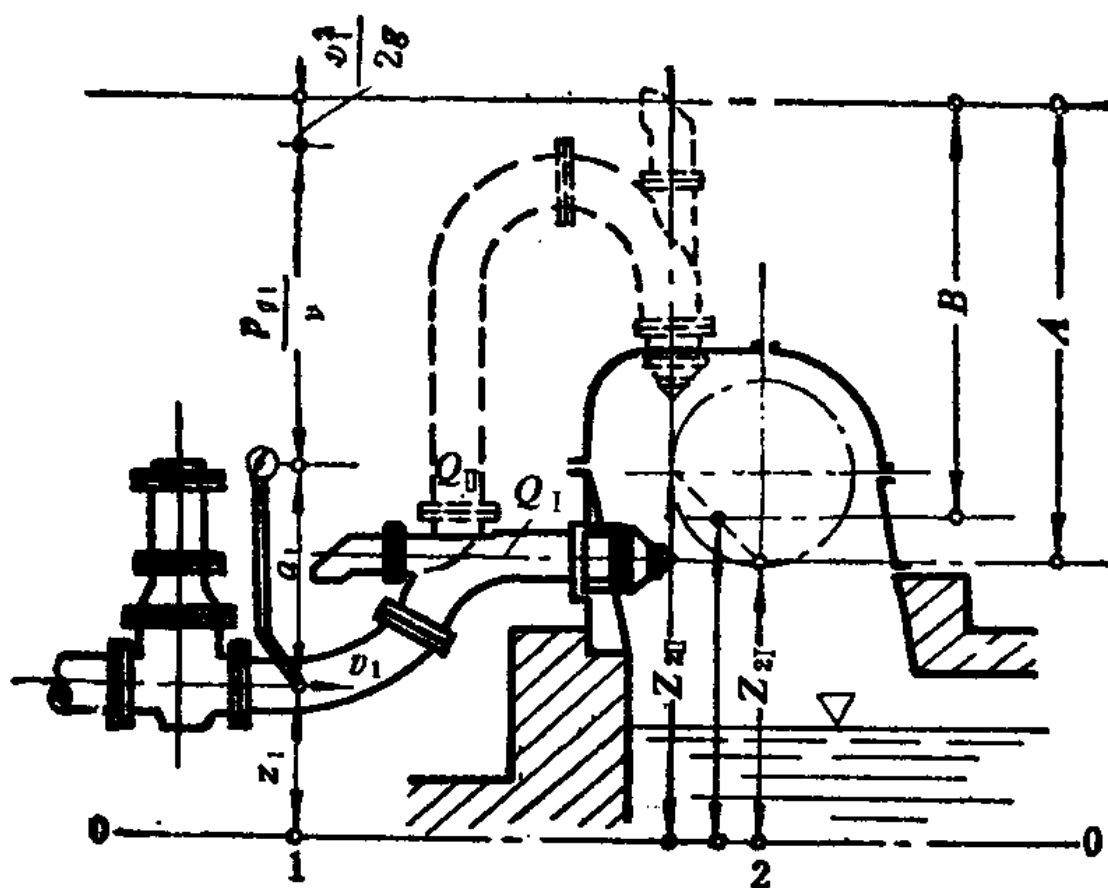


图 1-6 冲击式水轮机

计算公式:

$$H = (z_{w1} - z_{w2}) + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g}$$

2. 圆形断面蜗壳反击式水轮机 (图1-4)

计算公式:

$$H = (z_1 + a_1 - z_{w2}) + \frac{p_{s1}}{\gamma} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g}$$

3. 卧式反击式水轮机 (图1-5)

计算公式:

$$H = (z_1 + a_1 - z_{w2}) + \frac{p_{s1}}{\gamma} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g}$$

4. 冲击式水轮机 (图1-6)

(1) 单喷嘴。

计算公式:

$$H_1 = (z_1 + a_1 - z_{z1}) + \frac{p_{s1}}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g}$$

(2) 双喷嘴。

计算公式: