

前 言

随着新技术、新设备在发电厂的广泛应用，发电厂的动力设备也发生了比较大的变化，特别是计算机监控技术在发电厂的普及应用，使得发电厂动力设备的监测、控制发生了质的变化。微机液压型调速器调节控制的机组和全厂计算机监控使得发电厂无人值班、少人值守、远控遥控操作变成现实。针对目前同类书籍缺少微机液压型调速器和动力设备计算机监控等方面知识介绍的现状，面对高级应用型人才和培养需求，我们策划并编写了本书。

本书较全面地反映了我国目前中小型发电厂的新技术、新设备，特别是目前我国中小型发电厂动力设备计算机监测与控制以及机组的微机液压型调速器调节与控制技术，简要介绍了火电厂环境保护技术等。

因为水轮机与汽轮机同属流体机械，水轮机原理与汽轮机原理几乎相同，只不过工作介质不同；本轮发电机组与汽轮发电机组在同一个电网中运行，水轮机调节与汽轮机调节的工作原理完全相同；现代工业计算机监控系统的结构，基本上都是分散式控制结构，水电厂计算机监控系统的结构与火电厂计算机监控系统的结构也基本相同。所以，本书在编写内容的安排上，对本电、火电的内容同等对待。在本书编写中，编者注重突出了这两种发电厂的共同点和不同点，凡是在前半部分水电厂动力部分中介绍过的知识点，在后半部分对火电厂动力部分的知识介绍时，采用与前面已介绍过的内容进行对比介析的方法，重点介绍它们之间的共性和各自的特点以及在各种使用场合的不同应用，这样既节省了文字篇幅，又对前面已学知识进行了复习和应用，起到事半功倍、举一反三的效果。

本书力求读者看懂动力设备的作用、原理和运行，了解发电厂动力设备相互之间的联系，了解进行计算机实时的监控的手段及信号采集处理的方式，掌握发电机组在电网中的运行方式和电网的频率调整方式，从而对发电厂动力设备有一个系统的、整体的了解，为各种专

第一篇 水电厂动力部分

水电厂动力部分主要由水轮机、调速器和辅助设备组成。水轮机将水能转换成旋转机械能，再由发电机转换成电能。水轮机和发电机组成水轮发电机组，称水电厂的主机，则其他机械设备称水电厂的辅机。调速器能自动调节水轮发电机组的转速，使发电机输出的交流电的频率符合要求。调速器设备应该归属于水电厂的辅机，但是由于水轮机的调速器设备比较复杂，功能比较重要，水轮机调节理论相对独立，因此将调速器及水轮机调节的内容单独放在第四章介绍。水电厂辅助设备中的主阀能实现机组的紧急停机，油、气、水系统设备能向机组提供润滑、冷却、机组制动等技术服务，保证机组的正常安全运行。

第一章 水力发电的基本原理

自然界的河床高程总是沿程下降的，河床高程下降的程度可用河床的坡降表示。有的河床在沿程几千米到几千米范围内，坡降可达几十米甚至几百米，河床中的水流每时每刻从高处流向低处释放能量，将水能消耗在流动的路程上。水力发电的任务是采用最经济安全的方法，将消耗在河床路程上的水能收集储存起来并转换成电能。水力发电是人类改造大自然、利用大自然最成功的一个典范，是取之不尽、用之不竭的绿色再生能源。

第一节 河流的水流能量

一、水能与水头

1. 水体的能量形式

水流作为流体的一种形态，具有三种能量形式，如图 1-1 所示。 m 质量的水体其具有的三种能量为

位能： mgz

动能： $\frac{1}{2}mv^2$

压能： $mg\frac{p}{\gamma}$

式中 γ ——水的容重， $\gamma = 9810\text{N}/\text{m}^3$ ；

z ——水体相对某一基准平面的位置高度，m；

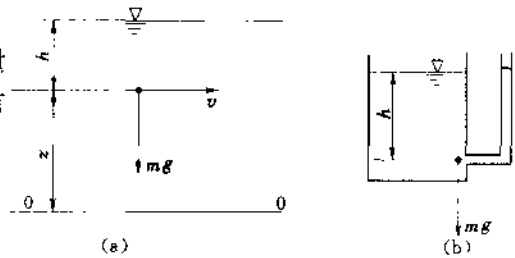


图 1-1 水质点的三种能量形式
(a) 水质点的位能和动能；(b) 水质点的压能

v ——水流过水断面的平均流速, m/s;

p ——水体中某一点的压力, $p = \gamma h$, Pa.

水体压能的表示如图 1-1 (b) 所示, 如果杯子右壁面的细管中原先是空气, 则在水下 h 深处质量为 m 的水体就会释放能量, 在压力 p 的作用下克服地球引力 mg , 沿着细管上升 h 高处, 压力 p 所做的功

$$W_p = mgh \quad (1-1)$$

根据功能原理, 压力 p 所做的功就等于质量 m 的水体在 h 深处所具有的能量——压能, 即质量 m 的水体在 h 深处所具有的压能

$$E_p = W_p = mgh = mg \frac{p}{\gamma} \quad (1-2)$$

2. 压力的计量方法

单位面积上的作用力在工程中习惯称“压力”, 也就是中学物理中的“压强”, 用小写符号“ p ”表示。作用某一面积的压力在工程中习惯称“总压力”, 用大写符号“ P ”表示。压力有以下几种单位:

$$\begin{aligned} 1 \text{at (工程大气压)} &= 10 \text{mH}_2\text{O} = 1 \text{kgf/cm}^2 \\ &= 10000 \text{kgf/m}^2 = 98100 \text{N/m}^2 = 98100 \text{Pa (帕斯卡)} \\ &= 0.0981 \times 10^6 \text{Pa} = 0.0981 \text{MPa (兆帕)} \end{aligned}$$

压力有两种计量方法, 一种是以工程大气压力作为计算零点的计量方法, 另一种是以完全真空作为计算零点的计量方法。因此有四种含义的压力值:

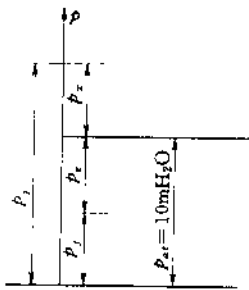


图 1-2 压力的两种
计算零点

(1) 相对压力 p_r 。以工程大气压力作为计算零点, 比工程大气压力大的数值称相对压力, 见图 1-2。

(2) 真空度 p_z 。以工程大气压力作为计算零点, 比工程大气压力小的数值称真空度, 则最大真空度为 $10\text{mH}_2\text{O}$ 。

(3) 绝对压力 p_j 。以完全真空, 即比工程大气压力小 $10\text{mH}_2\text{O}$ 作为计算零点, 比该零点大的数值称绝对压力, 有

$$p_i = p_j - p_{at} \quad (1-3)$$

$$p_z = p_{at} - p_j \quad (1-4)$$

式中 p_{at} ——工程大气压。

(4) 表压力 p_e 。实际工程中使用的各种压力表所指示的压力, 是比当地大气压力 p_{amb} 大的数值 (表相对压力) 或小的数值 (表真空度)。在黄海零高程的海平面上的当地大气绝对压力为 $10.33\text{mH}_2\text{O}$ (物理大气压), 海拔每上升 900m , 当地大气压力就下降 $1\text{mH}_2\text{O}$ 。显然

$$p_j = p_e + p_{amb} \quad (1-5)$$

3. 水体的单位能量

水流三种能量的数值大小不但与水体的能量特征有关, 还与水体的质量 m 有关, 因

此不能确切表示水体的能量特征。为了能确切地表示水体的能量特征，通常用单位重量水体的能量来确切地表示水体的能量特征。单位重量水体的能量又称为水头（ E ），单位重量水体的能量也有三种能量形式，即

单位位能： z

单位动能： $\frac{\alpha v^2}{2g}$ （过水断面平均单位动能）

单位压能： $\frac{p}{\gamma}$

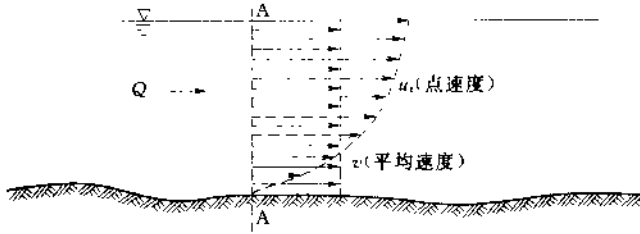


图 1-3 河流过水断面水质点的流速分布规律

由于水流具有粘滞性，使得水流在同一过水断面上流速分布很不均匀。对于有自由表面的河流，在河流表面中心线上的水质点流速最高，与河床固体表面接触的水质点流速为零，见图 1-3 过水断面 A—A，在整个过水断面上，水质点的流速按抛物线规律分布。对无自由表面的管流，在管流中心线上的水质点流速最高，与管道固体表面接触的水质点流速为零，见图 1-4 过水断面 A—A，在整个过水断面上，水质点的流速按抛物线规律分布。因此，我们只能用断面平均单位动能来表示过水断面每一个水质点的单位动能。

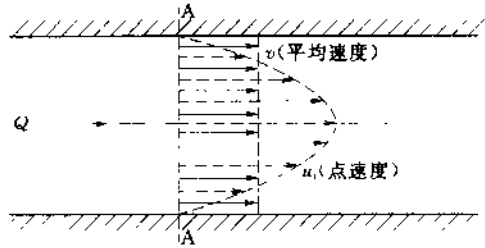


图 1-4 管流过水断面水质点的流速分布规律

设过水断面有 n 个水质点，则过水断面的实际平均单位动能为

$$\frac{\sum_{i=1}^n u_i^2 / 2g}{n} \quad (1-6)$$

式中 $u_i^2 / 2g$ ——第 i 个水质点的单位动能。

由于每一个水质点的点流速 u_i 实际是无法测量得到的，所以只能用过水断面平均流速 v 所表示的单位动能 $v^2 / 2g$ 来表示过水断面实际平均单位动能，但是通过实测发现 $v^2 / 2g$ 小于式 (1-6) 表示的过水断面实际平均单位动能。因此采取对 $v^2 / 2g$ 乘上一个大于 1 的系数 α 来进行修正，并使

$$\alpha v^2 = \frac{\sum_{i=1}^n u_i^2 / 2g}{n} \quad (1-7)$$

式中 α ——动能修正系数，一般 $\alpha = 1.05 \sim 1.1$ ，在定性分析时常取 $\alpha = 1.0$ 。
过水断面平均流速为

$$v = \frac{Q}{A} \quad (1-8)$$

式中 Q ——流经过水断面的水流量， m^3/s ；
 A ——过水断面的面积， m^2 。
水头等于三种单位能量之和，即

$$E = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha v^2}{2g} \quad (1-9)$$

水头的单位为“米水柱高” (mH_2O)，简称“米” (m)。

由于水体的单位能量更能确切地反映水体的能量特征，所以如不作特殊说明，我们讲的水体能量都是指水体的单位能量。水体的三种能量形式相互之间能够转换。

【例题 1-1】 水流总是希望从能量高的状态向能量低的状态释放，例如高处的水总是自发地向低处流动。在静止水体内部水质点只受重力作用，水质点相互之间没有运动，表明静止水体内部水质点的能量处处相等。静止水体内部水质点的动能为零，因此静止水体内部水质点的位能与压能之和处处相等，见图 1-5，即

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} = \dots = \text{常数}$$

公式表明在静止水体内部水质点的位能与压能可以相互转换，既在同一静止水体内部，水质点的位能大了，压能就小了；反之水质点的位能小了，压能就大了，这就是静止水体内部的压力分布规律。由于每一个水质点的总能量都相等，所以所有水质点处于静止平衡状态。

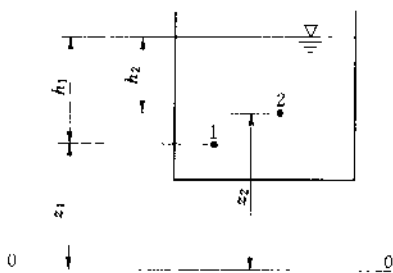


图 1-5 静止水体水质点的总能量

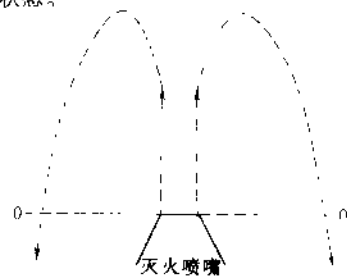


图 1-6 运动水体水质点的能量互换

【例题 1-2】 对运动的水流，例如消防灭火喷嘴的射流，当忽略了空气的摩擦阻力时，水质点的能量转换，如图 1-6 所示，依次为：

水塔中水的位能→喷嘴内水的压能→喷嘴出口水的动能→射流顶端水的位能→射流下落水的动能

水流沿程流速大小、方向不变的流段称为均匀流，水流沿程流速大小、方向变化不大的流段称为渐变流。在均匀流中，水质点既不加速也不减速作匀速运动，同一过水断面上的水质点所受的惯性力为零，只受重力作用，与静止水体内部水质点的受力相同，因此在均匀流中同一过水断面上水质点的压力分布规律与静止水体内部的压力分布规律相同，即

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} = \dots = \text{常数} \quad (1-10)$$

在渐变流中，水质点不是加速运动就是减速运动，或者运动方向发生变化，水质点所受的惯性力不为零，但是由于是渐变流，速度的大小和方向变化较小，水质点所受的惯性力较小，可以忽略不计，近似认为同一过水断面上的水质点所受的惯性力为零，只受重力作用。因此在渐变流中同一过水断面上水质点的压力分布规律近似与静止水体内的压力分布规律相同。

图 1-7 所示为水流流速方向沿程不变，流速大小沿程减速，但是流速大小变化不大，可以认为是渐变流。所以对同一过水断面的不同水质点有

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} \approx z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \approx \dots \approx \text{常数} \quad (1-11)$$

则在均匀流和渐变流中，在同一过水断面上每一水质点的

$$z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha v^2}{2g} = \text{常数} \quad (1-12)$$

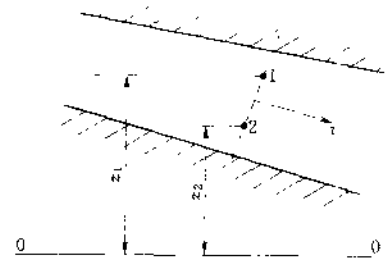


图 1-7 渐变流管流过水断面的压力分布规律

即在均匀流和渐变流中，同一过水断面上水质点的单位能量处处相等，但是不同过水断面上水质点的单位能量处处不相等，并且是沿程下降，因为水流运动需要克服摩擦阻力消耗能量。也就是说，在对均匀流和渐变流中的某一过水断面水质点的单位能量计算时，取该断面上任一个水质点作为计算点都可以。实际工程中，在水流的沿程总能找到均匀流段或渐变流段，避开流速大小、方向变化较大的急变流段，因此在水力计算时，总是把计算的过水断面放在均匀流段或渐变流段上。并且在河流水力计算时将过水断面的计算点放在河流的自由表面上；在管流水力计算时将过水断面的计算点放在管流的管轴线上，这样可使水力计算简单一些。

【例题 1-3】 已知河流某均匀流中的同一过水断面，如图 1-8 所示，水质点位置高度 $z_1 = 5\text{m}$ ， $z_2 = 3\text{m}$ ，断面平均流速 $v = 2\text{m/s}$ ，请计算给定过水断面水质点 1、2 的单位能量 ($h = z_1 - z_2$)。

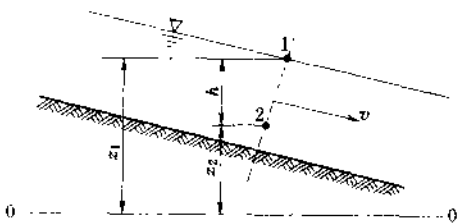


图 1-8 均匀流河流过水断面水质点的总能量

解 (1) 水质点 1 的单位能量——水头 (取 $\alpha_1 = 1$)

$$\begin{aligned} E_1 &= z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v^2}{2g} = z_1 + 0 + \frac{\alpha_1 v^2}{2g} \\ &= 5 + \frac{1 \times 2^2}{2 \times 9.81} = 5.2(\text{m}) \end{aligned}$$

(2) 水质点 2 的单位能量——水头 (取 $\alpha_2 = 1$)

$$\begin{aligned} E_2 &= z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v^2}{2g} = z_2 + \frac{\gamma h}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v^2}{2g} \\ &= 3 + (5 - 3) + \frac{1 \times 2^2}{2 \times 9.81} = 5.2(\text{m}) \end{aligned}$$

由此可见，只要给定过水断面位于均匀流或渐变流上，同一过水断面不同水质点的单位能量相等，即

$$E_1 = E_2$$

从点 1、点 2 计算过程可知，计算点放在河面上点 1 处时，河床表面作用大气压力 $p_1 = 0$ ，可使计算简化。

当水流流速不可忽略时，水质点1的水头 E_1 大于位置高度 z_1 。如果水流流速较小，可以忽略不计，则水质点1的水头 E_1 等于位置高度 z_1 。

二、河流的水流功率

自然河流的水流具有一定的能量，取河流某一河段进行分析，见图 1-9，过水断面 A—A 单位重量水体的能量为

$$E_A = z_A + \frac{p_A}{\gamma} + \frac{\alpha_A v_A^2}{2g} \quad (1-13)$$

断面 B—B 单位重量水体的能量为

$$E_B = z_B + \frac{p_B}{\gamma} + \frac{\alpha_B v_B^2}{2g} \quad (1-14)$$

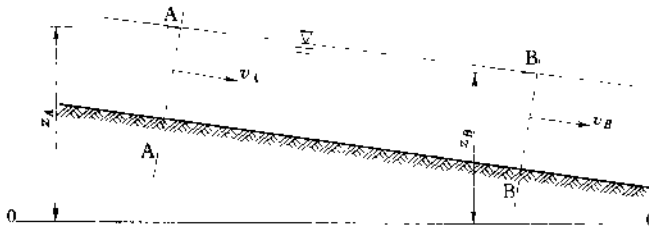


图 1-9 河流的水流能量

两断面之间单位重量水体的能量差值为

$$\Delta E = E_A - E_B \quad (1-15)$$

两断面之间河流的水流功率为

$$N_{ht} = \gamma Q \Delta E \quad (\text{N} \cdot \text{m/s}) \quad (1-16)$$

式中 Q ——河流的常年径流量， m^3/s 。

两断面之间河流的水能蕴藏量为

$$W_{ht} = N_{ht} t = \gamma Q \Delta E t \quad (1-17)$$

式中 t ——时间。

这些水流能量一直消耗在克服水流与水流、水流与河床的摩擦阻力上，消耗在对河床岩石的冲刷上，消耗在对河流泥沙的搬运上。

如果在河流 B 处建造大坝挡水，见图 1-10，抬高水位，就能形成水库和上下游的水位差，现在以黄海平面作为位置高度的基准平面，上游水库中单位重量水体的能量为

$$E_{sv} = \nabla_{sv} + \frac{p_{sv}}{\gamma} + \frac{\alpha_{sv} v_{sv}^2}{2g} \quad (1-18)$$

式中 ∇_{sv} ——水电厂水库上游水位海拔；

v_{sv} ——上游水库水流的平均流速。

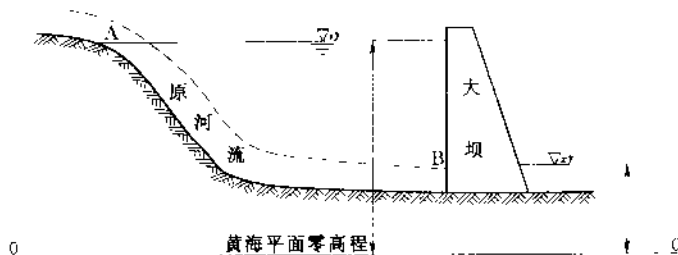


图 1-10 拦河大坝的作用

下游尾水单位重量水体的能量为

$$E_{xy} = \nabla_{xy} + \frac{p_{xy}}{\gamma} + \frac{\alpha_{xy}v_{xy}^2}{2g} \quad (1-19)$$

式中 ∇_{xy} ——水电厂水库下游尾水海拔；

v_{xy} ——下游尾水水流的平均流速。

上游水库与下游尾水之间单位重量水体能量的差值称水电厂毛水头 H_m ，即

$$H_m = E_{sy} - E_{xy} = \left(\nabla_{sy} + \frac{p_{sy}}{\gamma} + \frac{\alpha_{sy}v_{sy}^2}{2g} \right) - \left(\nabla_{xy} + \frac{p_{xy}}{\gamma} + \frac{\alpha_{xy}v_{xy}^2}{2g} \right) \quad (1-20)$$

因为上下游水面作用的都是大气压力，所以水体的单位压能为

$$\frac{p_{sy}}{\gamma} = \frac{p_{xy}}{\gamma} = 0 \quad (1-21)$$

因为上下游水流过水断面面积都较大，平均流速较低，所以水体的单位动能为

$$\frac{\alpha_{sy}v_{sy}^2}{2g} \approx \frac{\alpha_{xy}v_{xy}^2}{2g} \approx 0 \quad (1-22)$$

水电厂毛水头

$$H_m \approx \nabla_{sy} - \nabla_{xy} \quad (1-23)$$

水电厂具有的总的水流功率为

$$\begin{aligned} \Sigma N_d &= \gamma \bar{Q} H_m \quad (\text{N} \cdot \text{m/s}) \\ &= 9.81 \bar{Q} H_m \quad (\text{kW}) \end{aligned} \quad (1-24)$$

式中 \bar{Q} ——水库的常年平均来水量， m^3/s 。

三、水力发电的基本原理

为克服水流运动所产生的摩擦阻力，消耗在河流沿 A—B 河段上的单位重量水体能量 ΔE 又称 A—B 河段的水头损失 h_w ，水头损失 h_w 的大小正比于水流流速 v 的平方。采用筑坝的方法形成水库，使水库中的水流流速大大降低，则 h_w 大大减小，将本来分散消耗在自然河流中的水流量集中储存在水库中，推动水电厂厂房内的水轮机转动，将水能转换成机械能，再由水轮机带动发电机将机械能转换成电能。水电厂发电机总装机容量为

$$\Sigma N_g = \Sigma N_d \eta_z = 9.81 \bar{Q} H_m \eta_z \quad (\text{kW}) \quad (1-25)$$

式中 η_z ——水电厂总效率，主要由引水管道水头损失、水轮机效率和发电机效率三部分组成。一般 η_z 在 80%~85% 之间。

第二节 水电站的类型

水电厂厂房内的机组发电还需要建造在厂房外工程浩大的大坝和引水工程等水利建筑物，因此在讨论包括厂外水利建筑物时，常将水电厂称为水电站

一、水电站的分类

(1) 中小型发电机的机端电压最常用的有 400V、6.3kV 和 10.5kV 三种。根据发电机端电压的等级分有高压机组电站和低压机组电站。发电机的端电压在 6.3kV 及以上称高压机组电站；发电机端电压为 400V 称低压机组电站。单机容量在 500kW 及以下的机组一般都是低压机组。

(2) 高压机组根据电站总装机容量的大小又分有大型、中型和小型水电站。总装机容量在 250MW 以上的为大型水电站，其中 1000MW 以上的称特大型水电站；总装机容量在 25~249MW 的为中型水电站；总装机容量在 24MW 以下的为小型水电站。本书讨论的内容主要以高压机组中的中小型水电站为主。

(3) 根据形成上下游水位差的方法不同分有坝式、引水式和特殊水电站。

二、坝式水电站

这类水电站的特点是上、下游水位差主要靠大坝形成。坝式水电站又有坝后式水电站和河床式水电站两种形式。

(1) 坝后式水电站。厂房位于大坝后面，在结构上与大坝无关，只能形成 300m 以下的水位差，见图 1-11，因为过高的大坝在建造和安全方面都存在难以解决问题。目前我国最高的大坝是四川省二滩水电站大坝，混凝土双曲拱坝的坝高 240m。世界上总装机容量最大的水电站，也是总装机容量最大的坝后式水电站是我国的三峡水电站，总装机为 18200MW。

(2) 河床式水电站。厂房位于河床中作为挡水建筑物的一部分，与大坝布置在同一条直线上，只能形成 50m 以下的水位差，见图 1-12。随着水位的增高，作为挡水建筑物一部分的厂房上游侧墙面厚度增加，使厂房的投资增大。我国目前总装机容量最大的河床式水电站是湖北省葛洲坝水电站，总装机容量为 2715MW。

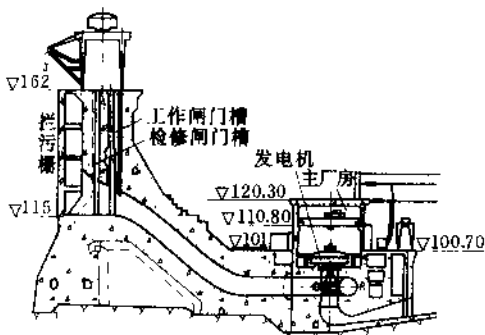


图 1-11 坝后式水电站

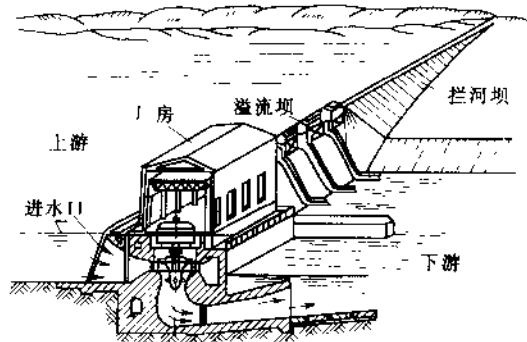


图 1-12 河床式水电站

三、引水式水电站

这类水电站的特点是上、下游水位差主要靠引水形成。引水式水电站又有无压引水式水电站和有压引水式水电站两种形式。

(1) 无压引水式水电站。见图 1-13, 用引水渠道 (2) 从上游水库长距离引水, 与自然河床产生落差。渠首与水库水面为平水无压进水, 渠末接倾斜下降的压力管道进入位于下游河床段的厂房 (4), 只能形成 100m 左右的水位差, 使用水头过高的话, 在机组紧急停机时, 渠末压力前池的水位起伏较大, 水流有可能溢出渠道, 不利于安全。由于是渠道引水, 工作水头又不高, 所以电站总装机容量不会很大, 属于小型水电站。

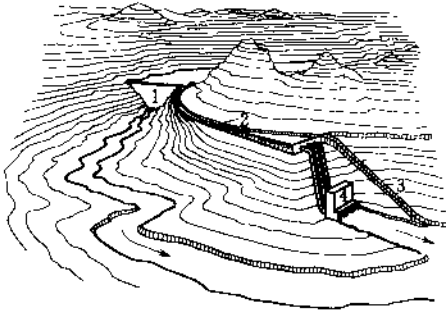


图 1-13 无压引水式水电站布置示意图

- 1—拦河大坝; 2—引水渠;
- 3—溢水道; 4—水电站厂房

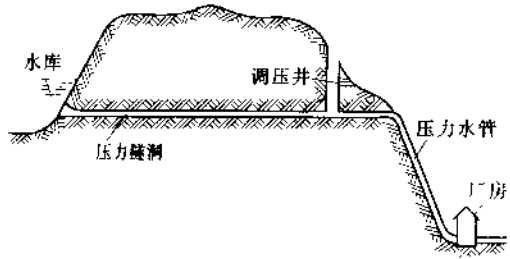


图 1-14 有压引水式水电站剖面图

(2) 有压引水式水电站。用穿山压力隧洞从上游水库长距离引水, 与自然河床产生水位差。洞首在水库水面以下有压进水, 洞末接倾斜下降的压力管道, 进入位于下游河床的厂房。能形成较高或超高的水位差, 见图 1-14, 世界上最高水头的水电站, 也是最高水头的有压引水式水电站是奥地利雷扎河水电站, 其工作水头为 1771m。我国引水隧洞最长的水电站是四川省太平驿水电站, 引水隧洞的长度为 10497m。

四、特殊水电站

这类水电站的特点是上、下游水位差靠特殊方法形成。特殊水电站又分抽水蓄能水电站和潮汐水电站两种形式。

(1) 抽水蓄能水电站。抽水蓄能发电是水能利用的另一种形式, 它不是开发水力资源向电力系统提供电能, 而是以水体作为能量储存和释放的介质, 对电网的电能供给起到重新分配和调节作用。

电网中火电厂和核电厂的机组带满负荷运行时效率高、安全性好, 例如大型火电厂机组出力不宜低于 80%, 核电厂机组出力不宜低于 80%~90%, 频繁地开机停机及增减负荷不利于火电厂和核电厂机组的经济性和安全性。因此在后半夜电网用电低谷时, 由于火电厂和核电厂机组不宜停机或减负荷, 电网上会出现电能供大于求, 这时可启动抽水蓄能水电站中的可逆式机组接受电网的电能作为电动机——水泵运行, 正方向旋转将下水库的水抽到上水库中, 见图 1-15, 将电能以水能的形式储存起来; 在白天电网用电高峰时,

电网上会出现电能供不应求，这时可用上水库的水推动可逆式机组反方向旋转，可逆式机组作为发电机——水轮机运行，将上水库中的水能重新转为电能，这样可以大大改善电网的电能质量，有利于电网的稳定运行。提高了火电厂、核电厂设备的利用率和经济性、安全性及电网的经济效益。

可逆式机组有两个工况：正向抽水、反向发电。发电量与耗电量之比约为 75%，即用 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 的电能将下水库的水抽到上水库，发电时由于各种损耗，使得发电量最多为 $0.75\text{kW}\cdot\text{h}$ 。但是峰电与谷电的上网电价之比大于 1，国外一般为 4:1，因此建造抽水蓄能电站还是有巨大的利润空间。目前我国广州抽水蓄能电站是世界上总装机容量最大的抽水蓄能水电站，总装机容量为 2400MW。随着电网容量的不断扩大，人们生活水平的日益提高，电网一天中的峰谷电负荷差也日益增大，抽水蓄能电站在电网中已到了必不可少的地步。

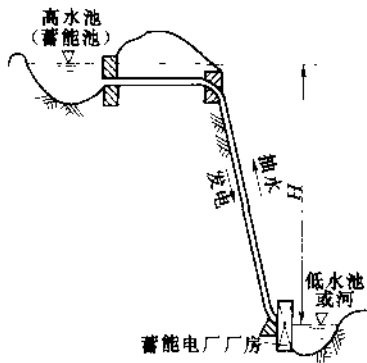


图 1-15 抽水蓄能水电站示意图

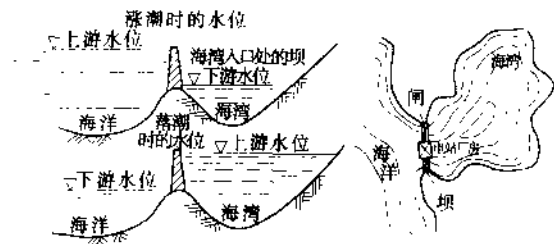


图 1-16 潮汐电站示意图

(2) 潮汐水电站。在海湾与大海的狭窄处筑坝，隔离海湾与大海，可逆式机组利用潮水涨落产生的坝内外水位差发电，见图 1-16。从理论上讲潮汐水电站有六个工况：正向发电、正向抽水、正向泄水、反向发电、反向抽水、反向泄水。世界上最大的潮汐电站为法国的朗斯潮汐电站，总装机容量为 342MW ($38 \times 900\text{kW}$)。

第三节 水轮发电机组的布置形式

根据机组轴线的布置形式不同，水轮发电机组有立式布置和卧式布置两大类。立式机组轴承受力好，机组占地面积小，运行平稳，但是厂房分发电机层和水轮机层，因此厂房高，面积大，机组安装检修不方便，厂房投资大，适用发电机径向尺寸较大的大中型机组。卧式机组发电机和水轮机在同一厂房平面上，安装、检修和运行维护方便，厂房投资小，但是径向轴承受力不好，发电机径向尺寸不能太大，否则容易引起机组振动。机组占地面积较大，水轮机、发电机的噪音对运行人员干扰大，夏天室温高，适用发电机径向尺寸较小的机组。

一、立式机组的布置形式

见图 1-17，立式机组布置的特点是有三个承受机组转动系统径向不平衡力的径向轴

承，即上导轴承（2）、下导轴承（7）和水导轴承（10），一个承受机组转动系统自重和轴向水推力的推力轴承（3）。中小型水电站常见的立式机组有悬挂式机组和伞式机组两种布置形式。

（1）悬挂式机组。这类机组的结构特点是推力轴承布置在发电机转子上部的上机架中，与上导径向轴承布置在同一只油箱中。机组运行稳定性好，但机组高度尺寸较大。

（2）伞式机组。这类机组的结构特点是推力轴承布置在发电机转子下部的下机架中，与下导径向轴承布置在同一只油箱中。机组运行稳定性差，但机组高度尺寸较小。

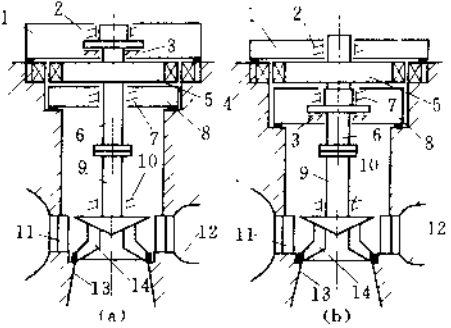


图 1-17 立式机组布置形式

(a) 悬挂式机组；(b) 伞式机组

1—上机架；2—上导轴承；3—推力轴承；4—发电机定子；5—发电机转子；6—发电机主轴；7—下导轴承；8—下机架；9—水轮机主轴；10—水导轴承；11—水轮机导水部件；12—水轮机引水部件；13—水轮机尾水管；14—水轮机转轮

图 1-18 为水电站立式机组的安装平面图，图 1-19 为水电站立式机组的厂房立体剖视图。

二、卧式机组的布置形式

根据承受机组转动系统径向不平衡力和机组转动系统自重的径向轴承个数不同，卧式机组有四支点机组、三支点机组和二支点机组三种布置形式。每台机组承受机组转动系统轴向水推力的推力轴承只有一个。推力轴承一般与最靠近水轮机的径向轴承——水导轴承布置在同一油箱中。

（1）四支点机组。发电机主轴与水轮机主轴弹性联接，对机组安装技术要求较低。机组共有四个径向轴承，其中发电机主轴上两个径向轴承：前导轴承、后导轴承；水轮机主轴上两个轴承：水导轴承、中导轴承，水导轴承油箱中装有一个径向轴承和一个推力轴承。飞轮装在水轮机主轴上。弹性联轴器传递功率较小，适用 500kW 以下的机组。

图 1-20 为四支点机组的平面图，水轮机主轴上中导轴承（5）的结构为支座式径向滑动轴承，水导轴承（4）的结构为支座式径向推力滑动轴承；发电机主轴上两个轴承（7、8）都是端盖式径向滚柱轴承（形同电动机端盖轴承）。图 1-21 为四支点机组水轮机部分的立体图，机组的四个轴承全都是支座式滑动结构，发电机和后导轴承在图中未显示。

（2）三支点机组。发电机主轴与水轮机主轴刚性联接，对机组安装技术要求较高。机组有三个径向轴承，其中发电机主轴上两个径向轴承：前导轴承和后导轴承；水轮机主轴上一个轴承即水导轴承，它的油箱中装有一个径向轴承和一个推力轴承。飞轮装在水轮机主轴与发电机主轴的联轴法兰盘之间。刚性联轴器传递功率较大，适用 500kW 以上的机组。

图 1-22 为三支点机组的平面图，水轮机主轴上水导轴承（3）的结构为支座式径向推力滑动轴承；发电机主轴上两个轴承（5、7）都是支座式径向滑动轴承。图中的励磁机（8）在现代水电厂中已被可控硅励磁取代。

图 1-23 为三支点机组的立体图，机组的三个轴承全都是支座式滑动结构。

（3）二支点机组。图 1-24 为采用端盖式滚柱轴承的二支点机组平面图，没有水轮机

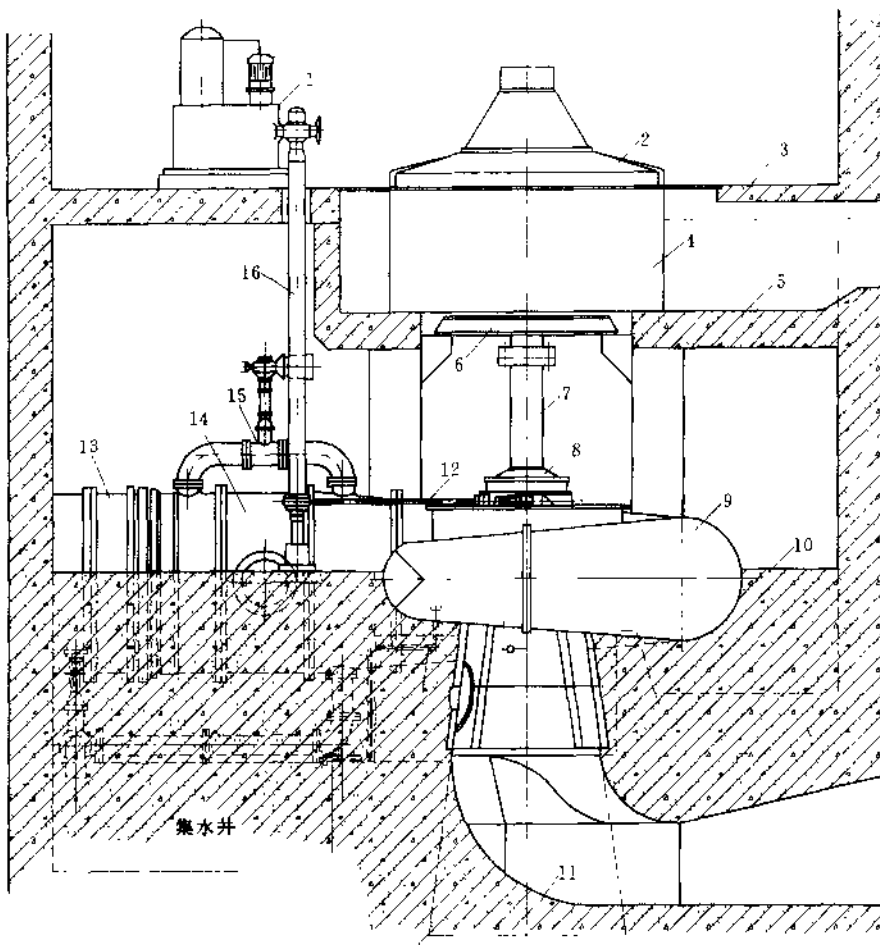


图 1-18 立式机组安装平面图

- 1—调速器；2—上机架；3—发电机层；4—发电机；5—发电机机坑；6—下机架；7—水轮机主轴；
 8—水轮机导轴承；9—水轮机金属蜗壳引水室；10—水轮机层；11—水轮机尾水管；
 12—导水机构推拉杆；13—压力钢管；14—水轮机主阀；15—旁通阀；16—调速轴

主轴。在发电机主轴中间装有转子，主轴的一端装转轮（1），另一端装飞轮（3）。因为只有一根主轴，所以只需两个径向轴承即前导轴承（4）和后导轴承（5）。由于两个径向滚柱轴承能承受少量的轴向水推力，所以不设推力轴承。主轴长度不宜过长和过细，否则刚度不够，容易发生振动，适用低水头、小容量（400kW 以下）机组或高水头、高转速（1000r/min 以上）机组。二支点机组是简化机组结构、降低机组投资和方便检修安装的好办法，现在在中小型水电站中逐步得到推广，最大单机容量已达 5500kW。

图 1-25 为采用支座式滑动轴承的二支点 4000kW 机组立体图，图中的励磁机（6）在现代水电厂中已被可控硅励磁取代，给调速器提供转速信号的永磁发电机（7）在采用微机调速器的水电厂中也被取消。

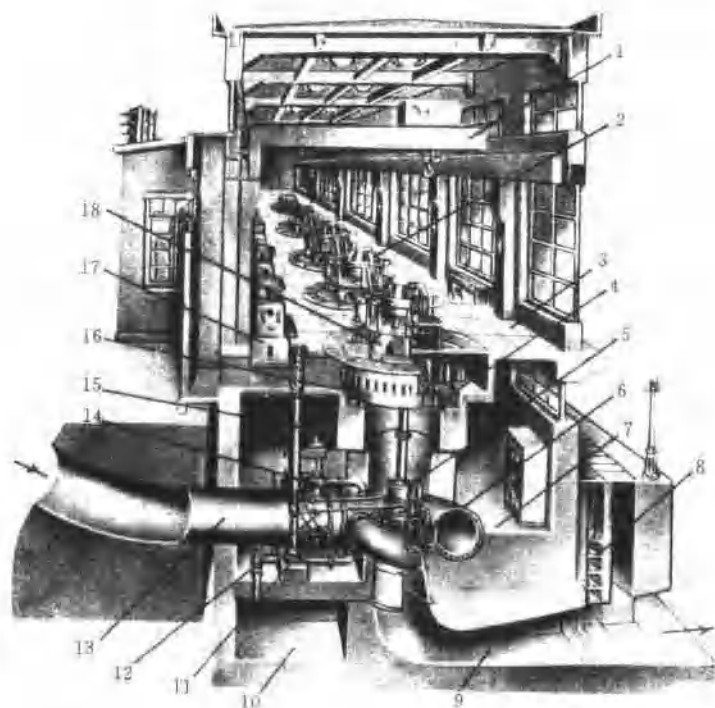


图 1-19 立式机组水电站的厂房立体剖视图

1—起重桥机；2—励磁机；3—发电机层；4—下机架；5—水轮机导轴承；6—水轮机金属蜗壳引水室；7—水轮机层；8—下游尾水闸门；9—水轮机尾水管；10—厂房集水井；11—水轮机主阀；12—导水机构推拉杆；13—压力钢管；14—旁通阀；15—调速轴；16—发电机；17—调速器；18—上机架

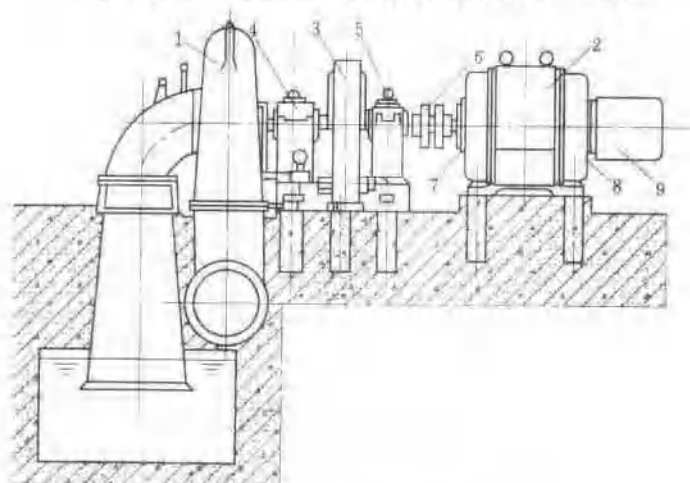


图 1-20 四支点机组平面图

1—水轮机；2—发电机；3—飞轮；4—水轮机导轴承；5—中导轴承；6—弹性联轴器；7—发电机前导轴承；8—发电机后导轴承；9—碳刷滑环罩



图 1-21 四支点机组水轮机部分立体图

1—水轮机；2—导水机构手动电动机操作器；3—水轮机导轴轴承（径向推力轴承）；4—飞轮；5—中导轴轴承（径向轴承）；6—弹性联轴器；7—发电机前导轴轴承（径向轴承）；8—励磁机

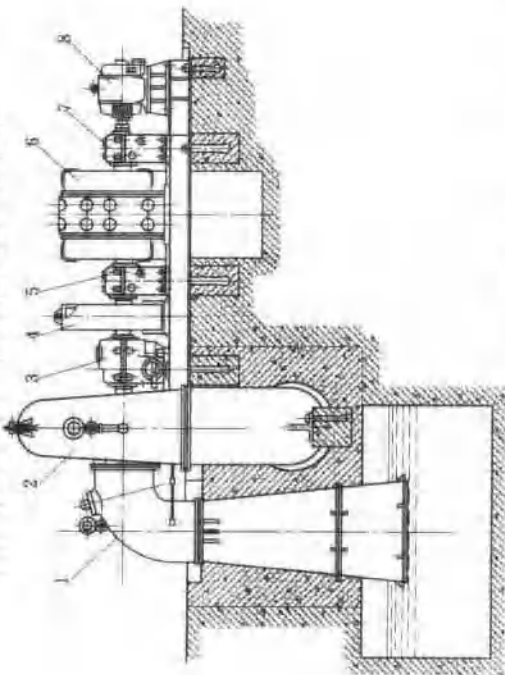


图 1-22 三支点机组平面图

1—水轮机尾水管；2—水轮机金属蜗壳引水室；3—水轮机导轴轴承（径向推力轴承）；4—飞轮；5—发电机前导轴轴承（径向轴承）；6—发电机；7—发电机后导轴轴承（径向轴承）；8—励磁机



图 1-23 三支点机组立体图

1—金属蜗壳引水室；2—调速器；3—推拉杆；4—水轮机导轴轴承（径向推力轴承）；5—飞轮；6—发电机前导轴轴承（径向轴承）；7—发电机；8—发电机后导轴轴承（径向轴承）

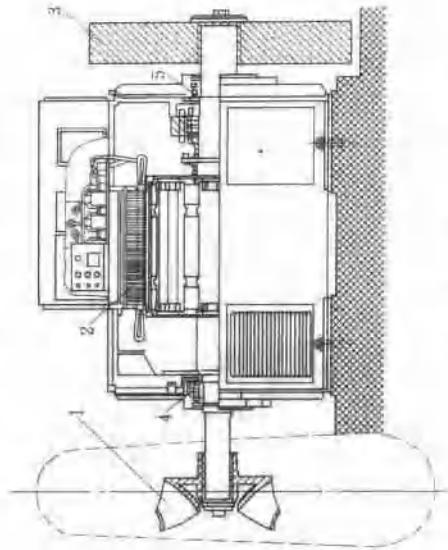


图 1-24 200kW 端盖式滚柱轴承两支点机组

1—水轮机转轮；2—发电机；3—飞轮；4—发电机前导轴轴承（端盖式滚柱轴承）；5—发电机后导轴轴承（端盖式滚柱轴承）

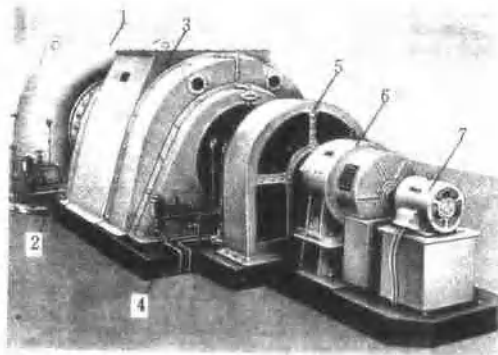


图 1-25 4000kW 支座式滑动

轴承两支点机组立体图

- 1—水轮机；2—发电机前导轴承（径向推力轴承）；
3—发电机；4—发电机后导轴承（径向轴承）；5—飞
轮；6—励磁机；7—永磁机

第二章 水 轮 机

水轮机是以水作为工作介质的流体机械，是水电厂带动发电机发电的原动机，水轮机运行的经济性和安全性直接影响水电厂的经济效益。来自压力管道的压力水经引水部件、导水部件进入工作部件，由工作部件将水能转化成转轮旋转的机械能，导水部件根据机组所带的负荷调节进入工作部件的水流量，经能量转换后的低能水由泄水部件排入下游。本章主要介绍水轮机的主要工作参数和结构及水轮机的工作原理。

第一节 水轮机主要工作参数

一、水轮机工作水头

水轮机工作水头等于水轮机进口断面 1-1 与出口断面 2-2 之间单位重量水体的能量差值，见图 2-1，即

$$H = \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right) \quad (\text{m}) \quad (2-1)$$

也就是水轮机对单位重量水体能量的利用值。

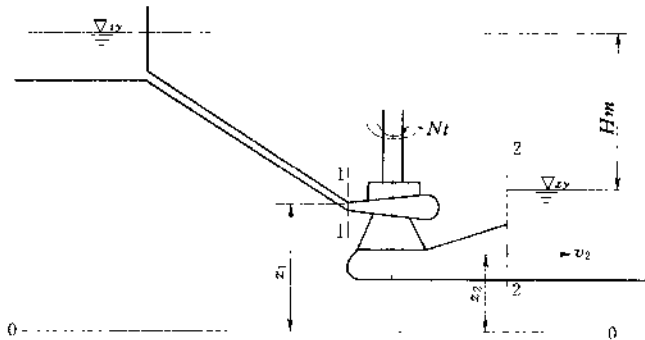


图 2-1 水轮机工作水头

水轮机实际工作水头与水电站的实际工作水头有关，从能量守恒的角度来看，水轮机工作水头约等于水电站毛水头 H_m 减去水电站引水管道的水头损失 h_{uv} ，即

$$H \approx H_m - h_{uv} \approx \nabla_{vy} - \nabla_{xy} - h_{uv} \quad (2-2)$$

由此可见，水轮机实际工作水头随水电站上下游水位高程变化而变化。水轮机实际工作水头有三个特征水头：最大工作水头 H_{max} 、设计工作水头 H_r 、最小工作水头 H_{min} 。

水轮机最大工作水头 H_{max} 约等于水电站上游正常蓄水位与在一台机组空载额定转速时的下游尾水位之差，再减去引水管道在空载额定转速时的水头损失。

水轮机设计工作水头 H_r 约等于水电站上游设计水位与在全厂机组 100% 出力时的下