

技工学校交流讲义

水力机组及其辅助设备

丰满水电技工学校编

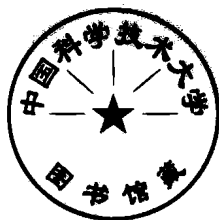
学校内部使用

中国工业出版社

本书是水电技工学校机械专业的教材。

本书简要地介绍了水轮机的一般概念；其次着重阐述了反击式水轮机、冲击式水轮机和发电机的结构；简要地叙述了水轮机的工作过程；并研究了飞逸转速、汽蚀、振动对水轮机的影响及其消除方法以及水轮机的特性曲线的意义；介绍了调速机的功用；几种主要型式的调速机的工作原理；最后介绍了水力机组的附属设备的结构和工作原理。

参加本书写和审修工作的有：丰满水电技工学校许华田、何有林、李树成、黄兰、宁芷成、刘维芹、姜树林，官厅水电厂赵忠志，浙江水电技工学校赵文昌。



水力机组及其辅助设备

丰满水电技工学校编

*

水电技工教材编辑组编辑（北京阜外月坛南路房）

中国工业出版社出版（北京修德园路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可出字第110号）

中国工业出版社第二印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本850×1168 $\frac{1}{2}$ ·印张6 $\frac{13}{16}$ ·插页5·字数149,000

1961年12月北京第一版·1961年12月北京第一次印刷

印数0,001—2,120·定价(1-2)0.81元

*

统一书号：15165·1146(水电-196)

目 录

第一章 水轮机的一般概念.....	1
§1-1 水力机械的概念.....	1
§1-2 水力机械的分类.....	2
§1-3 水轮机的分类.....	4
§1-4 水轮机的装置方式、进水部件型式及联结方式.....	5
§1-5 水轮机的工作参数.....	9
§1-6 水轮机的尺寸及代表符号.....	13
第二章 辐向轴流式水轮机.....	16
§2-1 辐向轴流式水轮机概述.....	16
§2-2 转轮.....	20
§2-3 止漏装置.....	22
§2-4 主轴.....	25
§2-5 水轮机轴承.....	27
§2-6 导水机构.....	30
§2-7 座环、基础环、蜗壳、尾水管.....	50
§2-8 水轮机的工作过程.....	54
§2-9 反击式水轮机的损失分析.....	55
§2-10 水轮机的附属装置.....	58
第三章 轴流式水轮机.....	67
§3-1 轴流式水轮机的一般概念.....	67
§3-2 螺旋桨式和转桨式水轮机的结构.....	70
§3-3 轮叶转动机构.....	81
§3-4 反击式水轮机的轴向压力.....	86
§3-5 水轮机的飞逸转速.....	89
第四章 冲击式水轮机的结构.....	92
§4-1 冲击式水轮机的一般概念.....	92
§4-2 水斗式水轮机.....	93
§4-3 冲击式水轮机与反击式水轮机的比较.....	105
第五章 水轮机的汽蚀和振动.....	106

§5-1	汽蝕及其防止方法	106
§5-2	水輪機吸出高度的決定	108
§5-3	振動現象和成因	112
§5-4	振動的消除方法	114
第六章	水輪機的特性曲綫	114
§6-1	水輪機的特性及其特性曲綫的概念	114
§6-2	水輪機特性曲綫的類型	115
第七章	水輪發電機的結構	119
§7-1	水輪發電機的類型	119
§7-2	水輪發電機主要部件的構造及作用	120
§7-3	轉子與定子	123
§7-4	制動裝置及空氣冷卻器	128
§7-5	軸承(推力軸承和導軸承)	130
§7-6	上部機架與下部機架	137
§7-7	勵磁機與同期發電機(永磁發電機)	138
§7-8	發電機的軸電流	138
§7-9	轉數繼電器	140
第八章	水輪機調速系統的基本概念	143
§8-1	概述	143
§8-2	調速機的动作原理	145
§8-3	雙調整調速機动作原理	150
第九章	調速系統的結構	153
§9-1	壓油裝置	153
§9-2	調速機部件的結構	165
§9-3	P型調速機的动作原理	182
§9-4	PK型調速機的动作原理	189
§9-5	YK型調速機的动作原理	196
§9-6	調速機不穩定的原因	203
第十章	輔助設備	204
§10-1	蝴蝶閥(又稱蝶形閥)	204
§10-2	水泵	209
§10-3	空氣壓縮機	215

第一章 水輪机的一般概念

§1-1 水力机械的概念

水力机械是一种能将液体的动能轉化为机械能，或者能将机械能轉化为液体的动能的机器。按能量轉化方式的不同，水力机械可以分为水力原动机和水力工作机两大类。

能将液体的能量轉化为机械能的机器称为水力原动机（如水車、水輪机）。

能将机械能轉化为液体的动能的机器称为水力工作机（如水泵等）。

水力原动机多用来作为原动力直接带动机器運轉或带动发电机发电；而水力工作机被用来抽水、輸送潤滑性液体。

液体經過水力机械时，能量是变化的。通过水力原动机时，液体的能量减少；而通过水力工作机时，液体的动能則增加。

如图 1-1 所示，在两个管道中間裝置一水力机械：

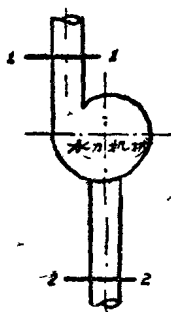


图 1-1

在断面1-1处每公斤液体的能量为 E_1 ：

$$E_1 = Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g}$$

在断面2-2处每公斤液体的能量为 E_2 ：

$$E_2 = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}$$

此水力机械若是原动机，則 $E_1 > E_2$ ；若是工作机，則 $E_1 < E_2$ 。

在水力机械中，每公斤液体能量的变化称为水头。用下式来表示：

$$H = E_1 - E_2 = Z_1 - Z_2 + \frac{P_1}{\gamma} - \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} \quad (1-1)$$

凡是在水力机械中液体能量的增加不是依靠机械能转化为液体的动能，而是靠一种液体的动能传递给另外一种液体，这种机器称为水力装置。它的作用与水力工作机的作用相同。

除了水力原动机、水力工作机和水力装置外，还有液压传动装置，它是由水力工作机和水力原动机组成的。如图 1-2 所示，

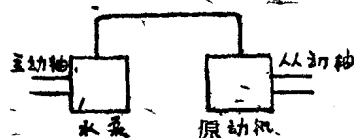


图 1-2

水力工作机由主动轴驱动，以产生高压液体，传递给水力原动机，然后由水力原动机驱动从动轴转动。它起离合器、变速器、制动器的作用。一般应用在精密的金属切削机床、船舶、汽车、

轧钢机及其他机器中。

§1-2 水力机械的分类

由公式(1-1)中可看出，液体在水力机械中能量的改变是由于位能、压能或动能的变化而引起的。按能量变化形式的不同，水力原动机可分为水位能机、水动能机、水压能机和水动压能机。

水位能机：这种机器是利用水流的位能来工作的；

水动能机：这种机器是利用水流的动能来工作的；

水压能机：这种机器是利用水流的压能来工作的；

水动压能机：这种机器是利用水流的动能和压能来工作的，如图 1-3 所示。

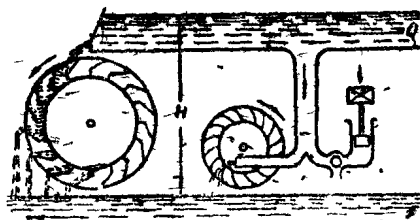
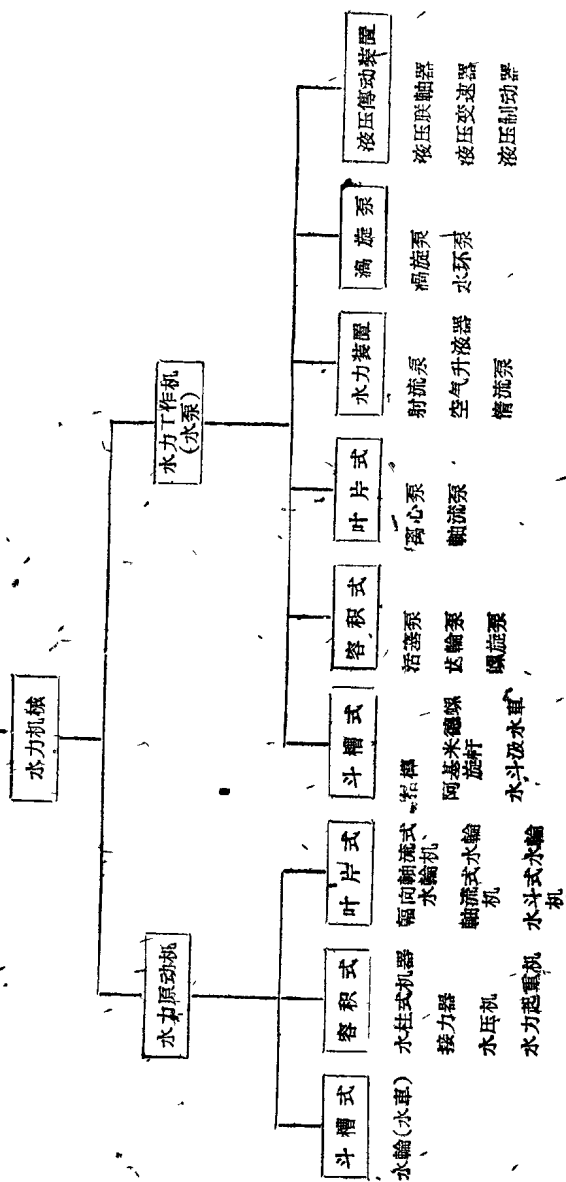


图 1-3

按结构特征的不同水力机械可以分为斗槽式、容积式和叶片式。表 1-1 为水力机械的分类。

表 1-1



§1-3 水輪机的分类

水輪机是水电站的主要設備之一。它的工作情况取决于水电站的水头和流量，而水头和流量的大小取决于河流的天然条件，对于各个水电站可以相差很大。因此，需要設計制造出很多种类型的水輪机，来适应不同情况的水电站，以充分利用水力资源。

現代水輪机的种类很多，一般可按下面的方法来分类：

1.按水力作用的不同，水輪机可以分为反击式水輪机和冲击式水輪机两大类。

(1)反击式水輪机：反击式水輪机是利用水流的动能和压能来进行工作的，水流流经轉輪时，动能和压能都发生变化。工作时，轉輪中充滿水流，輪叶上受有水流的作用力，使轉輪旋轉。进入轉輪时的压力比由轉輪出来时的压力为大。

(2)冲击式水輪机：冲击式水輪机是借只具有动能的射流作用在轉輪之斗叶上而工作，其进入轉輪的压力与由轉輪出来的压力一样。

2.按水流流入轉輪的方向水輪机可分为輻向軸流式、軸流式、切流式等。

(1)輻向軸流式水輪机：工作时，水流沿輻向流入，逐渐地轉为軸向。

(2)軸流式水輪机：工作时，水流的方向始终是沿着軸的方向。

(3)切流式水輪机：工作时，水流的方向与轉輪圓周相切。

3.按軸的裝置位置水輪机可分为豎軸式水輪机、橫軸式水輪机和斜軸式水輪机三种。大、中型水輪机多采用豎軸裝置，橫軸裝置及斜軸裝置則应用于小型水輪机中。

4.按結構特征水輪机可以分为輻向軸流式水輪机、螺旋桨式水輪机、轉桨式水輪机和水斗式水輪机。这四种水輪机是現代最基本的类型，所以被广泛采用。

5.按出力的大小水輪机可分为巨型水輪机、大型水輪机、中型水輪机和小型水輪机。

6.按制造材料水輪机可分为金属水輪机和非金属水輪机(如木制水輪机)。

§1-4 水輪机的装置方式、进水部件型式及联結方式

水輪机在水电站中不会单独进行工作，必和发电机联結在一起工作。每一套水輪机和发电机的組合就称为机组。

1. 水輪机的装置方式

水輪机的装置方式决定于水輪机的工作条件和它的工作参数，特别是水头、出力和上下游水位的变化。区别装置方式的主要标志是水輪机軸的装置位置。

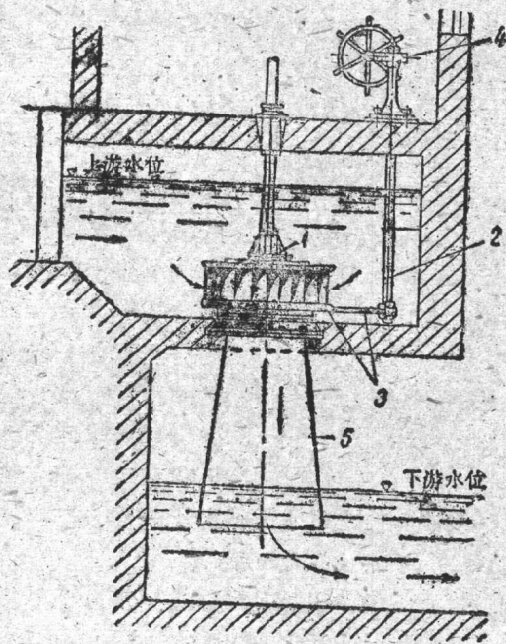


图 1-4 开敞式竖軸水輪机

1—导軸承；2—調整軸；3—調整环和拉杆；4—手动調整台；5—吸出管。

水輪機軸的裝置位置有下列兩種：

(1) 豎軸裝置(圖1-4, 1-5)：採用豎軸裝置時，因水輪機軸和發電機軸同在一垂直平面內，故安裝和拆卸時都比較方便；同時軸和推力軸承的受力情況較好；由於發電機裝在水輪機的上面，

位置較高，故不易受潮；所占的廠房面積也較小，加上管理維護方便，所以在巨、大、中型水電站中，通常採用這種裝置。

這種裝置雖然具有很多優點，但它也存在一些缺點，如採用這種裝置會產生很大的集中荷重，增長機組的軸的長度，同時還使廠房的水下部分的深度加深。

(2) 橫軸裝置(圖1-6~1-8)：採用這種裝置時，水電站動力設備的安裝和拆卸所要求的廠房高度較小，機組的全部重量分布在較大的廠房面積上，不致產生很大的集中荷重。但軸受力情況較豎軸裝置複雜，且占廠房面積較大。一般在小型水電

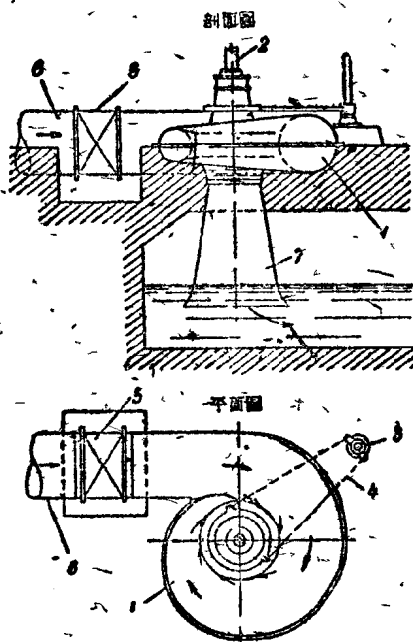


圖 1-5 殼式豎軸水輪機

1—殼；2—軸；3—調整軸；4—調整環的拉桿；5—閘門；6—導水管；7—吸出管。

站中常採用這種裝置。沖擊式水輪機由於轉輪必須安裝在水電站下游最高水位以上，通常採用橫軸裝置。

也有採用斜軸裝置的，但這種裝置小型水電站中採用，大型水電站很少採用，斜軸裝置如圖1-9所示。

2. 水輪機的進水部件型式

(1) 開啟式裝置(圖1-4, 1-6)：多用於小型水電站的水輪機。

(2) 封闭式装置：可分为混凝土蜗壳装置、金属蜗壳装置（图1-5, 1-7）和圆筒式装置三种。前两种在中型和大型水轮机上采用较多，但小型也采用，第三种多用在小型水轮机上。

3. 水轮机的联结方式

水轮机轴和发电机轴用法兰盘直接联结时，这种联结方式称为直接联结。如果水轮机的转速很低，而小容量的发电机的转速又很高，这时为了使发电机获得所需的转速，必须装设一套变速装置。这种联结方式称为间接联结。

(1) 直接联结：多用于巨、大、中型水轮机的联结中，由于

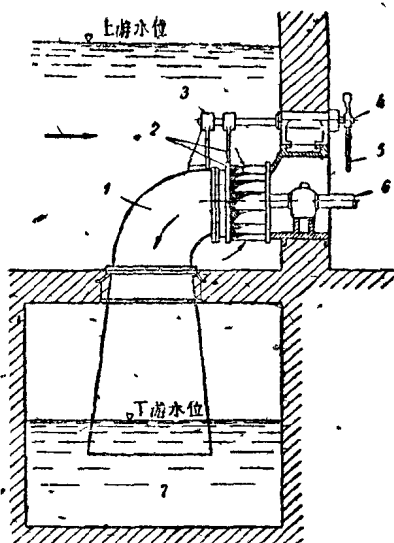


图 1-6 开敞式横轴水轮机

- 1—吸出管；2—调整环及其拉杆；3—轴承；
4—调整轴；5—联结手动调整台的拉杆；
6—轮轴；7—尾水廊道。

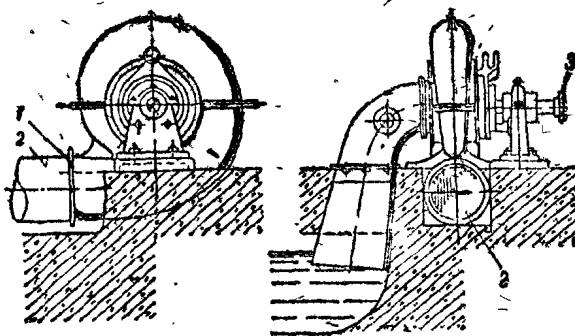


图 1-7 蜗壳式横轴水轮机

- 1—进水口；2—导水管；3—轮轴。

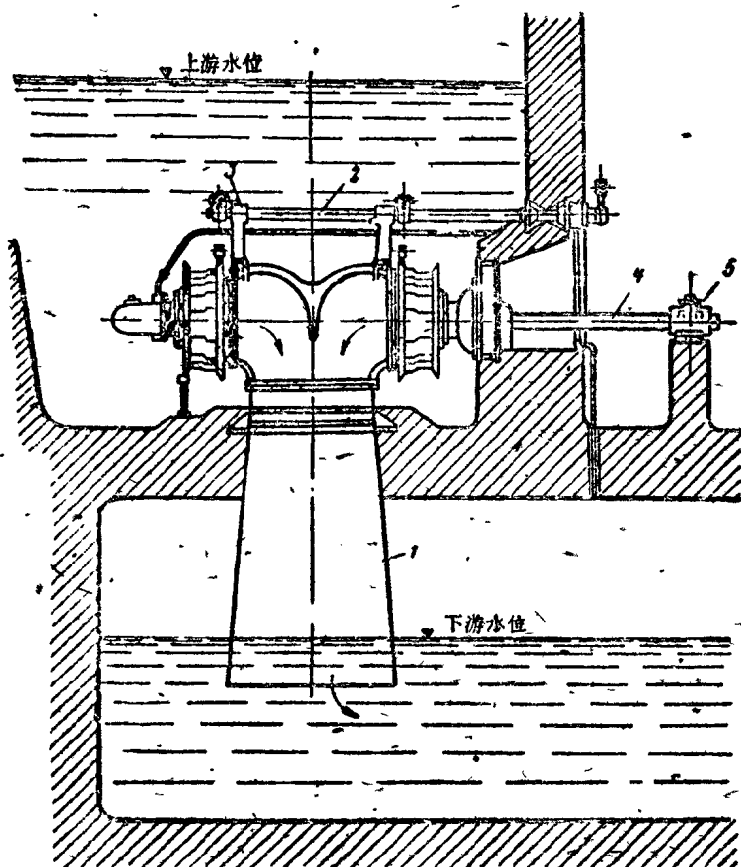


图 1-8 开敞式横轴双轮轴水轮机

1—公用吸出管；2—调整轴；3—调整轴的轴承；4—轮轴；5—转轴的轴承。

直接联结不需要设置变速装置，因而机械损失较小。

(2) 间接联结：间接联结多用于小型水电站的水轮机中，容量在 120 瓩以下的水轮机多采用这种联结方式。由于这种联结方式增加了一套复杂的传动(变速)装置，使机械损失增加了，因而降低了水力机组的效率，且占去的厂房面积较大。

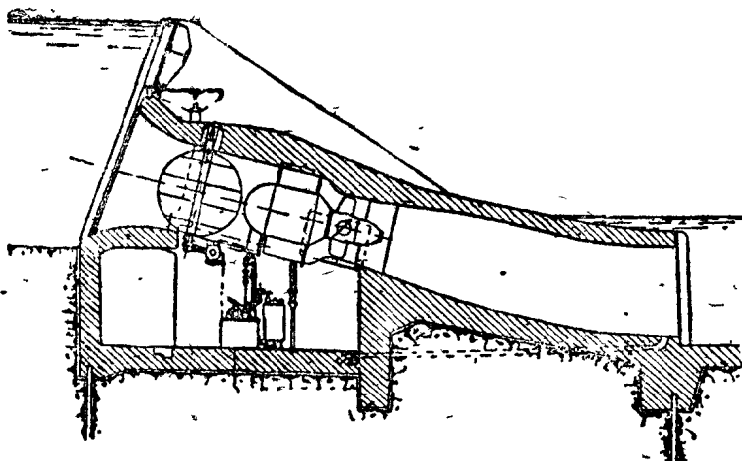


图 1-9 斜軸裝置水輪機

§1-5 水輪機的工作参数

水流在流經水輪機的轉輪時，能量發生改變，這個能量的改變過程就是水輪機的工作過程。其中的變化參數如水頭、流量等就是水輪機的工作參數。它可以表示水輪機的工作特性。

1. 水頭

水頭是水輪機的一個重要工作參數，它的大小直接影響着水輪機出力的大小和水輪機型式的選擇。圖1-10是水电站的水頭分布圖。

(1) 总水头(水电站的裝置水頭): 总水头是水电站上、下游水流(每公斤水流)的能量差。

上游 B-B 断面处每公斤水流的能量为 E_b :

$$E_b = Z_b + \frac{P_b}{\gamma} + \alpha_b \frac{v_b^2}{2g} \quad (1-2)$$

下游 K-K 断面处每公斤水流的能量为 E_k :

$$E_k = Z_k + \frac{P_k}{\gamma} + \alpha_k \frac{v_k^2}{2g} \quad (1-3)$$

水电站的总水头 $H_{\sigma p}$ 为:

$$H_{\sigma p} = E_{\sigma} - E_{\kappa}. \quad (1-4)$$

式中 α_{σ} 、 α_{κ} 为水流流速的不均匀系数。

如果用相对大气压, 并认为上、下游水流的流速相等, 则水电站的总水头为上下游水位差:

$$H_{\sigma p} = Z_{\sigma} + Z_{\kappa}, \quad (1-5)$$

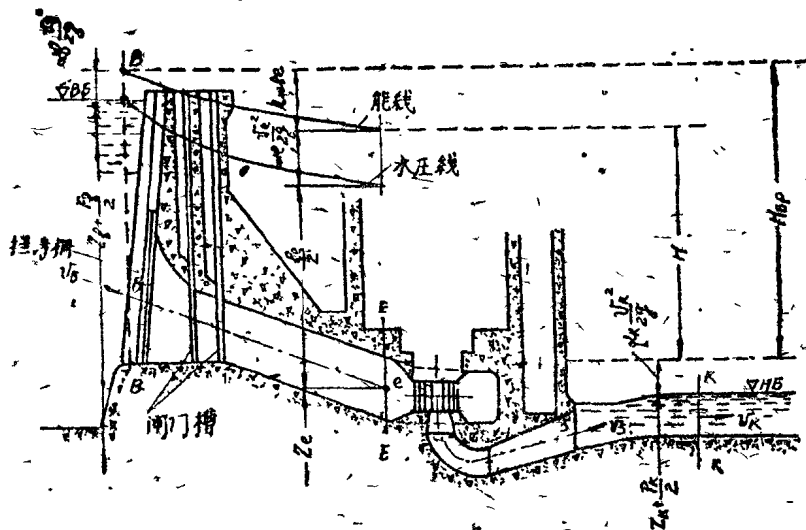


图 1-10 水电站水头分布图

(2) 净水头(水轮机的工作水头): 净水头是水轮机进口断面 $B-B$ 处和出口断面 $K-K$ 处每公斤水流的能量差, 用 H 表示:

$$H = E_{\sigma} - E_{\kappa} = \left(Z_{\sigma} + \frac{P_{\sigma}}{\gamma} + \alpha_{\sigma} \frac{v_{\sigma}^2}{2g} \right) - \left(Z_{\kappa} + \frac{P_{\kappa}}{\gamma} + \alpha_{\kappa} \frac{v_{\kappa}^2}{2g} \right). \quad (1-6)$$

如果水轮机是开敞式装置, 则:

$$H = Z_{\sigma} - Z_{\kappa}, \quad (1-7)$$

即净水头等于上下游的水位差。

如果水轮机是封闭式装置, 则:

$$H = \frac{P_e}{\gamma} + \alpha_e \frac{v_e^2}{2g} + (Z_e - Z_k). \quad (1-8)$$

由图 1-10 可以看出，总水头和淨水头之间的关系如下：

$$Z_e + \frac{P_e}{\gamma} + \alpha_e \frac{v_e^2}{2g} = Z_e + \frac{P_e}{\gamma} + \alpha_e \frac{v_e^2}{2g} + \Delta h_{e-e}, \quad (1-9)$$

式中 Δh_{e-e} ——水流从断面 $B-B$ 至断面 $E-E$ 间的水头损失。

$$Z_e + \frac{P_e}{\gamma} + \alpha_e \frac{v_e^2}{2g} = Z_k + \frac{P_k}{\gamma} + \alpha_k \frac{v_k^2}{2g} + \Delta h_{e-k}, \quad (1-10)$$

式中 Δh_{e-k} ——水流从断面 $E-E$ 至断面 $K-K$ 间的水头损失。

故总水头 H_{sp} 为：

$$\begin{aligned} H_{sp} &= \left(Z_e + \frac{P_e}{\gamma} + \alpha_e \frac{v_e^2}{2g} \right) - \left(Z_k + \frac{P_k}{\gamma} + \alpha_k \frac{v_k^2}{2g} \right) \\ &= \left(Z_e + \frac{P_e}{\gamma} + \alpha_e \frac{v_e^2}{2g} \right) - \left(Z_k + \frac{P_k}{\gamma} + \alpha_k \frac{v_k^2}{2g} \right) \\ &\quad + \Delta h_{e-e} + \Delta h_{e-k} = H + \Delta h_{e-k}, \end{aligned} \quad (1-11)$$

式中 Δh_{e-k} ——总的水头损失。

从 1-11 式可看出总水头等于淨水头和总的损失之和。

2. 流量

每一种型式的水轮机有一极限允许流量值，如果超过这一允许的极限流量，就会使水轮机的效率下降。

3. 水轮机的出力

水轮机的出力即水轮机在单位时间内轴上所输出的功，其大小与工作水头和流量有关。

(1) 水流的出力

$$N = \gamma Q H \text{ (公斤-米/秒)}, \quad (1-12)$$

式中 N ——水流的出力(公斤-米/秒)；

H ——水轮机的工作水头(米)；

Q ——水轮机的流量(米³/秒)；

γ ——水的重率，等于 1000 公斤/米³。

(2) 水轮机的出力：由于水流流经轉輪时，有一部分能量损失了，因此水轮机的实际出力比水流的出力小。

$$N_T = \gamma Q H \eta_T \text{ (公斤-米/秒)}, \quad (1-13)$$

式中 N_T ——水輪機出力;

η_T ——水輪機的效率。

在工程上通常用馬力或瓩作為計算出力的單位。

1 馬力 = 75 公斤-米/秒;

1 瓩 = 102 公斤-米/秒。

故 1-13 式可寫成:

$$N_T = \frac{1000 Q H \eta_T}{75} = 13.3 Q H \eta_T \text{ 馬力}; \quad (1-14)$$

$$N_T = \frac{1000 Q H \eta_T}{102} = 9.81 Q H \eta_T \text{ 瓩}. \quad (1-15)$$

4. 水輪機的效率

由於水輪機工作時有水力損失和機械損失，因此水輪機出力比水流的出力要小些，水輪機出力 N_T 和流入水輪機殼的水流出力 N 的比值稱為水輪機的效率：

$$\eta_T = \frac{N_T}{N}. \quad (1-16)$$

5. 水輪機的轉數

水輪機的轉數就其本身而言是不受限制的，同一水輪機在不同的工作條件下，可以有不同的轉數，但發電機所需的轉數是一定的，這和發電機的磁極對數和電流的頻率有關，所以水輪機的轉數必須與聯結在一起的發電機的轉數相適應。

$$n = \frac{60}{P} f, \quad (1-17)$$

式中 n ——發電機的轉數(轉/分);

f ——電流頻率，我國規定的標準為 50 周波;

P ——發電機磁極對數。

電流的頻率由國家規定，不能任意改變。為了製造上的方便，磁極對數一般採用偶數。表 1-2 是常用的磁極對數和轉數值。

表 1-2 常用的磁极对数和轉数値

磁极对数 P	轉 数 n (轉/分)	磁极对数 P	轉 数 n (轉/分)	磁极对数 P	轉 数 n (轉/分)
4	150	18	166.7	44	68.2
5	600	20	150	45	62.5
6	500	24	125	50	60
7	423	28	107	52	57.7
8	375	30	100	56	53.6
10	300	32	93.8	60	50
12	250	34	88.2	64	46.9
14	214	36	83.3	68	44.1
16	181.5	40	75		

6. 比速

比速是水輪机在 1 米水头下发出一馬力出力时的轉数, 它是水輪机的重要特性数据之一。通常用 n_s 表示。它是由水輪机的轉数 n 、出力 N 和水头确定的, 可用下式表示:

$$n_s = \frac{n\sqrt{N}}{H^{\frac{5}{4}}\sqrt{H}} \text{ (轉/分)}, \quad (1-18)$$

式中 n_s ——比速(轉/分);

n ——水輪机的轉数(轉/分);

N ——水輪机出力(馬力);

H ——水头(米)。

§1-6 水輪机的尺寸及代表符号

水輪机的几何尺寸是以轉輪的标准直徑 D_1 表示的。

轉桨式及螺旋桨式水輪机的直徑是轉輪室的最大直徑, 它比轉輪的直徑大两条縫隙, 約为 $0.001D_1$, 如图 1-11, a 所示。

輻向軸流式水輪机的直徑是轉輪进水处的最大直徑, 如图 1-11, b, c 所示。

水斗式水輪机的直徑是切于从噴嘴流出的射流中心綫的圓周的直徑, 如图 1-11, d 所示。