

725058

581

2342.0

水力机械

大连工学院 天津大学 清华大学合编

卜华仁主编

水利科学技术大学图书馆
基本藏书



大连工学院

一九八四年五月

2.0

前 言

本教材是根据“水利水电工程建筑”专业《水力机械》课程大纲编写的。

本教材在内容上反应了教学的基本要求，同时注意加强基本理论，尽量总结先进的经验。编写上贯彻“少而精”的原则。

本教材的重点为：水轮机的类型与构造，其中以混流式水轮机为主；水轮机的工作原理；水轮机的动力特性和选型；并对水轮机的调速系统，水泵的类型、构造、工作原理、特性和选型等也作了一定的介绍。

本教材由大连工学院、天津大学和清华大学三校合编，大连工学院卜华仁同志主编。第一章和第三章第一、二节由大连工学院卜华仁同志执笔，第二章由大连工学院范素兰同志执笔，第三章第三、四节和第四章由天津大学李惕先同志执笔，第五章由清华大学胡汉卿同志执笔。

对本教材中的缺点和意见，请寄大连市大连工学院水利系水电站教研室。

编 者

一九八四年五月

目 录

第一章 水轮机的类型与构造.....	1
§ 1-1 水轮机概述.....	1
§ 1-2 水轮机的主要类型及其主要部件.....	7
§ 1-3 水轮机的轮系、型号和外形尺寸.....	33
第二章 水轮机工作原理.....	39
§ 2-1 水轮机的基本参数.....	39
§ 2-2 水轮机的能量损失及效率.....	42
§ 2-3 水轮机的基本方程式.....	43
§ 2-4 水轮机水力效率的分析.....	47
§ 2-5 水轮机尾水管的作用及其效率.....	53
§ 2-6 水轮机的汽蚀特性、吸出高度与安装高程.....	57
第三章 水轮机的动力特性和选型.....	70
§ 3-1 水轮机相似理论及比转速.....	70
§ 3-2 水轮机的模型试验和特性曲线.....	87
§ 3-3 反击式水轮机的选择.....	122
§ 3-4 水轮机蜗壳、尾水管选择与尺寸的确定.....	140
第四章 水轮机的调速系统.....	155
§ 4-1 水轮机调速系统的功能和调节特点.....	155
§ 4-2 水轮机调速系统的组成、工作原理和对负荷的调整.....	156
§ 4-3 水轮机自动调速器类型及其选择.....	164
第五章 水泵.....	168
§ 5-1 水泵概述.....	168
§ 5-2 水泵的特性.....	177
§ 5-3 水泵的运行和调节.....	188
§ 5-4 水泵的选择.....	195

第一章 水轮机的类型与构造

§1-1 水轮机概述

发展能源是保证国民经济持续增长和实现四个现代化的重大课题。水电具有取之不尽和连续供应的特点，使它成为最引人注意的能源之一。水轮机是人类利用河流、潮汐等天然水能的重要工具之一。其根本任务是将水能转换为转轮旋转能量。水轮机可以带动各种工作机，但在现代，它主要是用来带动发电机，取得电能。

水轮机 发电机

水能 $\longrightarrow$ 转轮旋转能 $\longrightarrow$ 电能

水轮机和发电机都是水电站的主要设备。通常将它们合称为水轮发电机组，或简称机组。水电站对水流能量的有效利用程度，以及水电站建筑物的设计，都同所选用的机组类型，特别是水轮机的性能、构造和尺寸密切相关。在这里，我们将对水轮机的类型、构造、工作原理、动力特性、选型及其调速设备等进行介绍和讨论。

首先让我们了解一下水轮机及其工作的概貌。图 1-1 为水电站机组部分电站剖面和平布置图。水流由水轮机高压管道经蜗壳、导水机构进入弯形尾水管，而后泄入下游河道。大、中型水轮机的主轴直接和发电机连接，当转轮在水力作用下旋转时，便带动发电机旋转而发出电来。大、中型水轮机采用自动调速器。通过导水机构接力器，使各个导水叶绕各自本身的轴转动，从而改变导水叶与导水叶之间的过水面积，这样来控制进入转轮的流量，使流量大小与外界用电负荷相适应，以保证转轮的旋转速度不变。油压设备是用来为机组调速器提供压力油源。当机组转速上升 110% 额定转速，又遇到调速器故障时，超速限制器的事故配压阀自动投入，关闭导叶，使机组紧急停机。

大、中型水轮发电机组的装置方式（指水轮发电机组轴的装置方向和机组的连接方式），除了贯流式水轮机是横轴或斜轴装置外，大多采用图 1-2 立轴装置。其主要原因是横轴装置的卧式机组，巨大的蜗壳和转动部分将在结构上引起很大的附加力，使机组本身部分结构变得复杂和笨重，

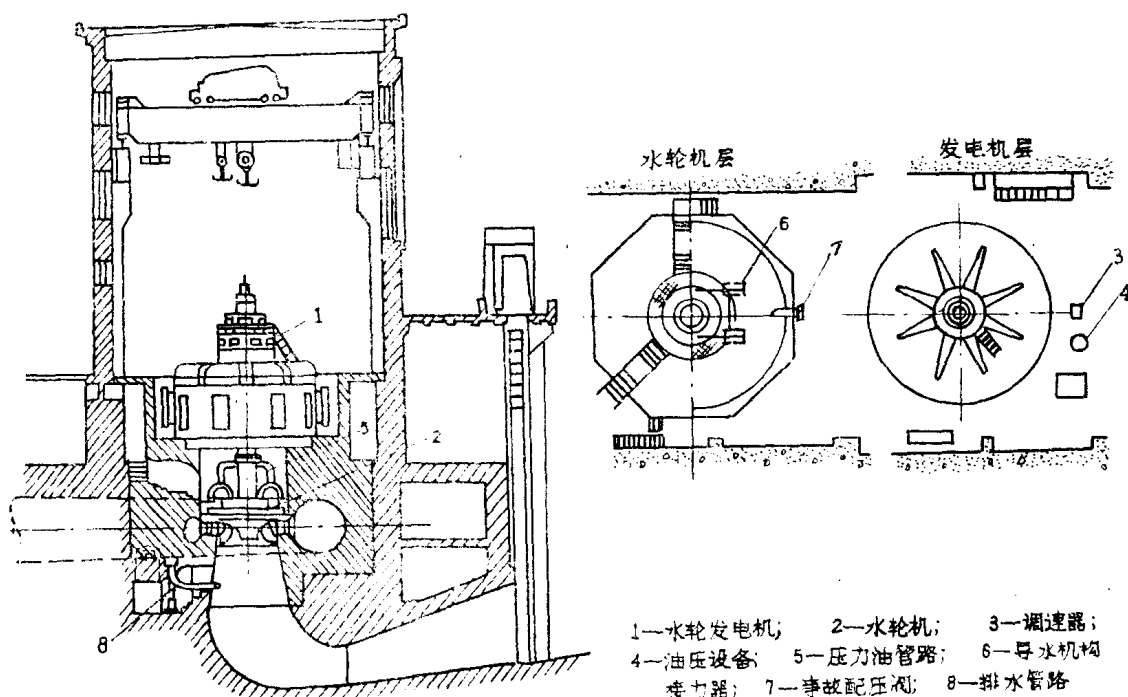


图 1-1 电站剖面和平布置图

交接部分、轴承部分设计增加困难，而且厂房面积和挖方也相应增大。此外，立轴装置的水轮机装拆、检修方便，轴和轴承受力情况良好，发电机安装高程提高，不易受潮，管理维护方便等等。因而目前广泛应用立式机组。

如图 1-2 所示，发电机的基本部件有：带磁极的转子 1 和定子 2，转子在工作时产生旋转磁场，定子线圈切割磁力线产生电流，随后输入电网。水轮机的基本部件有：工作部件——转轮 3、引水部件——蜗壳 4、导水部件——座环 5、导水机构 6 和泄水部件——尾水管 7。水轮机转轮用轴 8 与发电机转子连接，轴可以采用组合的（发电机轴和水轮机轴用法兰 9 刚性连接），见图 1-2，a、b，或者整体（见图 1-2，c）的结构形式。因为水轮机转轮与发电机转子是用共同的轴刚性连接的，所以它们的旋转频率相同，转速一致。

机组的转动部件可以采用不同的支承方式。适用于转速在 200 转/分以下的悬式发电机组支承系统，如图 1-2，a 所示。推力轴承 17 和上导轴承 14 都支承在上机架 10 上，并通过上机架把荷载传到定子的支承体上。发电机下导轴承布置在下机架 11 上，而下机架则支承在混凝土机墩上。水

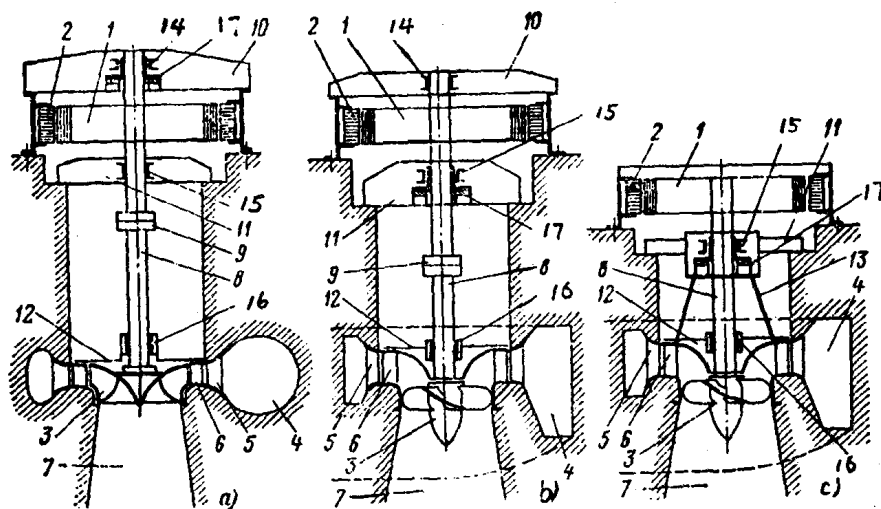


图 1-2 水轮发电机组的装置方式

1—发电机转子；2—发电机定子；3—水轮机转轮；
4—蜗壳；5—座环；6—导水机构；7—尾水管；8—轴；
9—法兰；10—上机架；11—下机架；12—水轮机顶盖；13—支承构件；
14—发电机上导轴承；15—发电机下导轴承；
16—水轮机导轴承；17—推力轴承。

轮机导轴承 16 则固定在水轮机顶盖上。这种布置方式虽然可靠，但厂房高度较高，机组结构不够紧凑。分别适用于转速 $100 \sim 200$ 转/分之间和 100 转/分以下的伞式发电机组的支承方式如图 1-2, b 和 c 所示。在伞式发电机组中，推力轴承 17 布置在发电机转子的下面，并支承在下机架 11 上（图 1-2, b），这种布置可以降低厂房高度，或通过支承构件 13 而直接传给水轮机顶盖 12（图 1-2, c），这种布置结构紧凑，降低厂房高度，但对于中、小型机组，由于水轮机机坑空间有限，推力轴承支架直接布置在水轮机顶盖上，会使检修不便。由此可见，水轮发电机组的所有转动部件——转子、轴及转轮具有统一的轴承系统，必须同时设有防止转动部件径向位移的导轴承和承受轴向载荷的推力轴承。

现在我们来分析一下，水轮机是怎样在水力作用下工作的。

可以作这样一个实验。如图 1-3a，将一根胶管接在水源上，末端装一弯头。当水还没有放入胶管之前，胶管处在垂直的位置上，但如开启

水源上的阀门使水通过胶管，则胶管立即向后移动，如图虚线所示的位置；而且当水头愈高时，由于管内流速愈大，胶管向后移动的距离也愈大。这是因为胶管内的水流受到弯头的作用力使流速 V 改变了方向，因而使水流对弯头产生了一反作用力 P ，这个反作用力迫使弯头连同胶管向后移动。如果我们对由若干铁管组成的回转体（图 1-3b）进行类似实验，则水流对管端弯头的反作用力，将可使这个回转体顺时针方向旋转。

现代水轮机，能量的转换是在转轮中借助水流与叶片的相互作用而实现的，也就是利用水流本身所具有的能量对转轮叶片的反作用力来使转轮旋转。例如图 1-4 所示的水轮机，在水流对转轮叶片的反作用力推动下，将沿顺时针方向旋转。

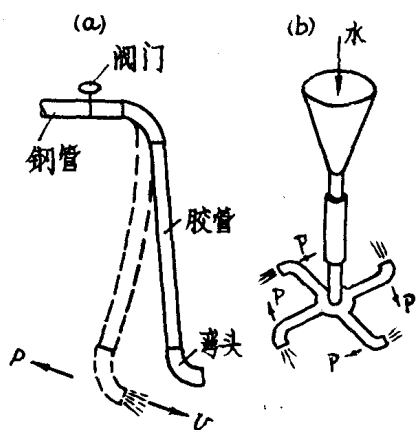
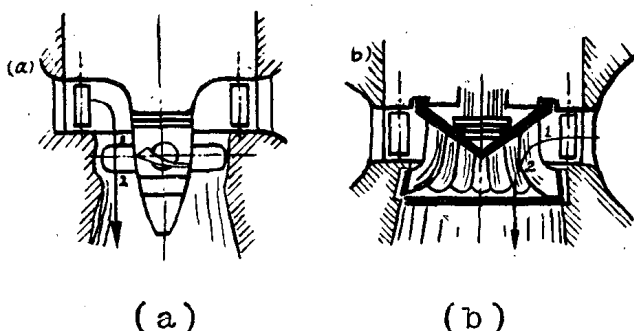


图 1-3 水流的反作用力



(a) 轴流式
(b) 混流式
图 1-4 反击式水轮机转轮

为了研究方便，只研究单位能量，即单位重量水体通过水轮机所具有的能量。根据能量的守恒性，单位重量水体通过水轮机时，可以得到利用的水的单位能量 E ，将等于水轮机进口断面 1-1 的单位能量 E_1 减去出口断面 2-2 的单位能量 E_2 和损失 h_{1-2} （图 1-5）。

$$\begin{aligned}
 E &= E_1 - E_2 - h_{1-2} = \left(Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) - \left(Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right) \\
 &= \left(Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} \right) - \left(Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \right) + \frac{\alpha_1 V_1^2 - \alpha_2 V_2^2}{2g} - h_{1-2} \quad (1-1)
 \end{aligned}$$

式中： E_1 和 E_2 ——水轮机进口和出口断面的单位能量，米；

Z_1 和 Z_2 ——水轮机进口和出口断面在基准面以上的几何高度，米；

$\frac{P_1}{\gamma}$ 和 $\frac{P_2}{\gamma}$ ——水轮机进口和出口断面的压力能，米；

$\frac{\alpha_1 V_1^2}{2g}$ 和 $\frac{\alpha_2 V_2^2}{2g}$ ——水轮机进口和出口断面的动能，米；

h_{1-2} ——水流自水轮机进口到出口断面的能量损失，包括摩擦损失和局部损失（水流急剧转弯，截面尺寸变化等），米。

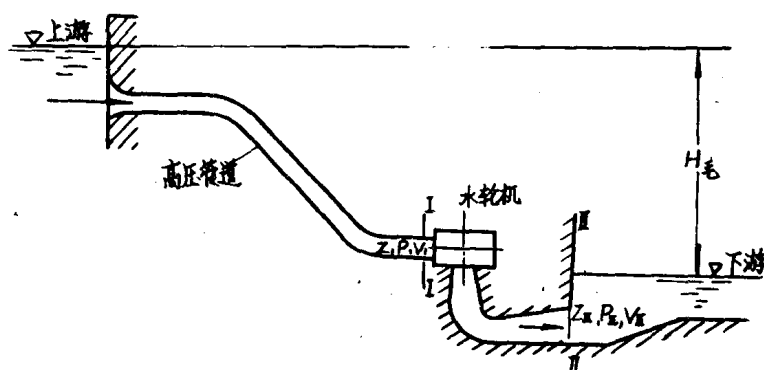


图 1-5 水电站水轮机装置示意图

水轮机所能利用的单位能量 E ，一般称为水轮机的工作水头 H 。在设计水电站时，通常采用电站的毛水头 $H_{\text{毛}}$ （若忽略电站上、下游流速和表面大气压力的差别，毛水头 $H_{\text{毛}}$ 就等于电站上、下游水位差，如图 1-5 所示）减去从高压管道进口到蜗壳进口之间的水头损失，作为水轮机的工作水头（即净水头）。以此来计算水轮机的出力及绘制运转特性曲线等。

水轮机的工作水头主要有最大水头 H_{max} （满足水轮机的结构强度和抗汽蚀的要求），最小水头 H_{min} （保证水轮机运行的稳定性和避开低效率区工作）和设计水头 $H_{\text{计}}$ （指水轮机发出额定出力时的最低水头）。

水轮机在设计水头下发出额定出力时所需的流量称为水轮机的设计流量。

在图 1-4 和 1-5 所示的水轮机中，水在压力流状态下通过转轮，因而上式中的势能部分 $(Z_1 + \frac{P_1}{\gamma}) - (Z_2 + \frac{P_2}{\gamma})$ 和动能部分 $\frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g}$ 直接在压力流状态下造成水体对转轮叶片的反作用力，即水能主要以压能

形态由转轮转换成旋转能。这一类水轮机，称为反击式水轮机。图 1-6 为另外一类水轮机，水流为无压流动，在大气中通过转轮，转轮的进口压力和出口压力都是大气压力，且都在同一几何高度上，此时， $\frac{P_1}{\gamma} = \frac{P_2}{\gamma}$ ， $Z_1 = Z_2$ ，故公式 (1-1) 成为：

$$E = \frac{\alpha_1 V_1^2 - \alpha_2 V_2^2}{2g} - h_{1-2} \quad (1-2)$$

水流的势能在进至转轮之前已先全部转变成为动能，在射流状态下水体给转轮造成一个冲击力，即这种型式的水轮机转轮仅利用水流的动能。这一类水轮机，称为冲击式水轮机。

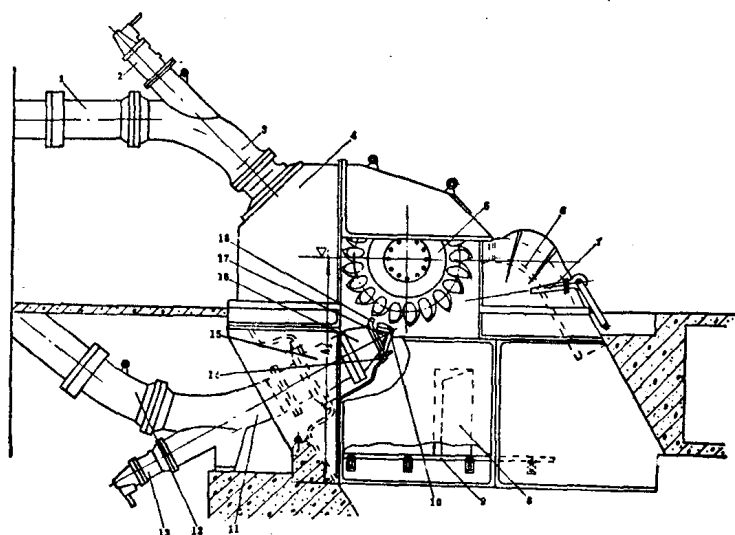


图 1-6 冲击式（斗叶式）水轮机结构图

- 1—上伸缩节；2—上喷管接力器；3—上弯管；4—机壳；
5—转轮；6—导流板；7—制动喷嘴；8—检修
进人门；9—稳流栅；10—偏流器；11—下弯管；
12—下伸缩节；13—下喷管接力器；14—冷却
喷管；15—下喷管；16—喷嘴头；17—喷针头；
18—挡水板

反击式水轮机按水流通过转轮时的方式不同，又再区分为轴流式和混

流式二种。所谓轴流式水轮机，是指水轮机工作时，水流顺着主轴的方向流进转轮，然后又顺着主轴的方向流出（参看图1-4a）。混流式水轮机工作时，水流顺着辐向流进转轮，而后逐渐变为轴向流出（参看图1-4b），所以有时也称它为辐轴流式。轴流式和混流式水轮机都是常见的水轮机型式。轴流式水轮机适用于水头 $H=3\sim 80$ 米的低水头大流量的条件，一般当水头大于50米时采用较少，最大单机容量已达23万千瓦。混流式水轮机的适用范围很广，可用于水头 $H=30\sim 700$ ，它在30~300米水头范围内运行时大多数都比较经济，最大额定单机容量已达70万千瓦，将来单机容量可望达到100万千瓦以上。

冲击式水轮机中最常用的一种型式是斗叶式水轮机，如图1-6所示。它主要应用在高水头而流量相对较小的水电站上，其适用水头范围自100米至200米，通常用于450~1200米水头范围，最大单机容量达31万千瓦。目前它是唯一适用于700米以上的高水头水轮机。最近，水头范围在700米以内时，冲击式水轮机有被混流式水轮机取代的趋势，因为混流式水轮机比转速较高，比较经济，然而冲击式水轮机在450米水头以上仍被普遍采用。

应该注意不同型式水轮机水头应用范围重叠的情况，例如30~80米水头范围内，既可使用轴流式轮机，也可使用混流式水轮机。这时应根据具体条件和技术经济比较的结果来选择最佳的水轮机型式。而且各种水轮机的水头应用范围也并不是固定不变的，由于某种原因，可能会出现超出上述范围的情况。

总之，目前水轮机的发展趋势是增大单机容量，提高利用水头和增加比转速，同时简化结构，进一步提高运行的可靠性。

§1-2 水轮机的主要类型及其主要部件

一、混流式水轮机及其主要部件

一八四九年最早使用的一台水轮机是混流式水轮机。由于它的结构简单，制造、安装方便，运行可靠，具有较高的效率，较小的汽蚀系数，且适用于中水头及较高的水头，因此，在大中型电站得到广泛采用。

图1-7示出混流式水轮机的轮廓图。它的工作情况是：水从高压管道1，流入蜗壳2，继而通过座环3和导水机构4进入水轮机内，使转轮5

转动，并带动同轴的发电机7，发出电来。从水轮机转轮泄出的水，经其下方的弯形尾水管6流入下游。

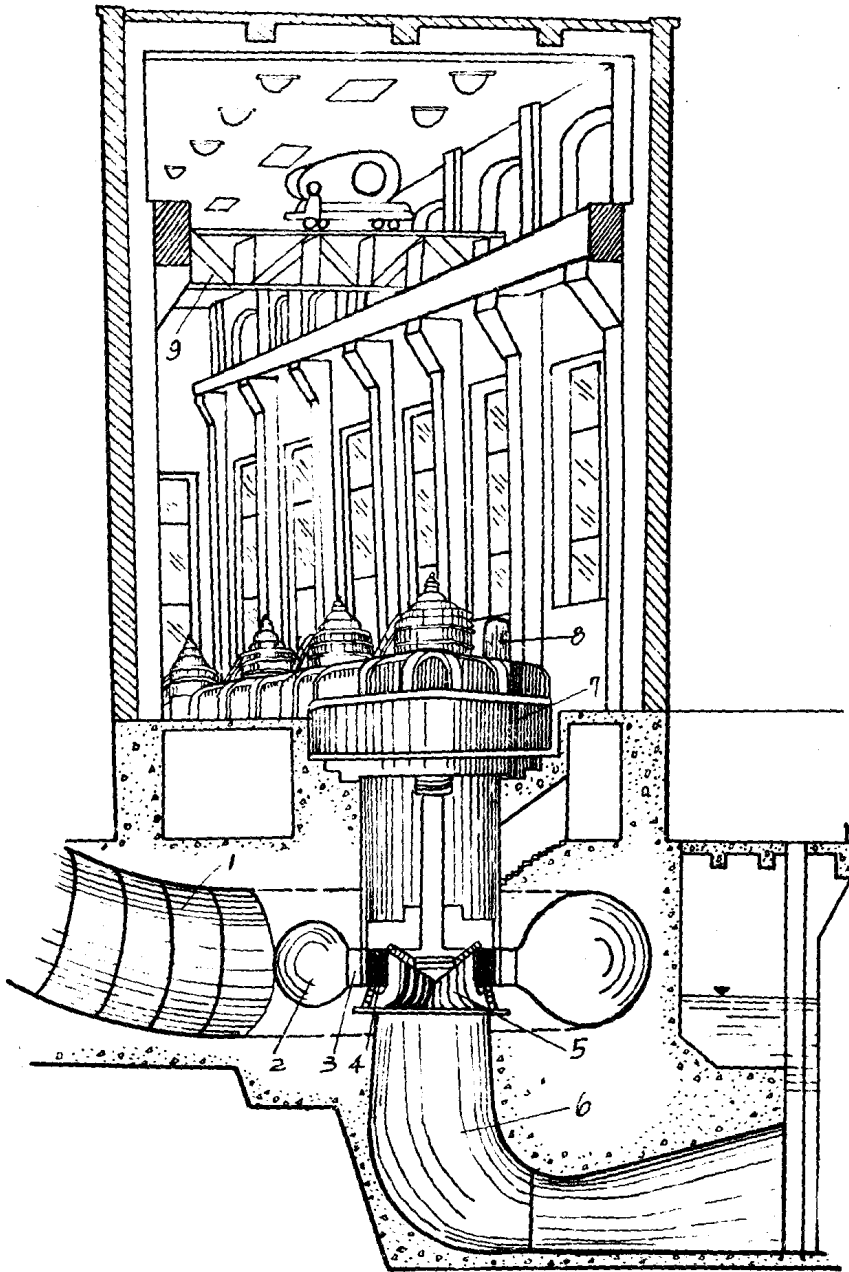


图 1-7 混流式水轮机轮廓图

- 1—高压管道；2—蜗壳；3—座环的立柱；
4—导水机构的导水叶；5—转轮；6—尾水管；
7—发电机；8—自动调速器；9—吊车

图 1-8a、图 1-8b 和图 1-8c 是混流式水轮机剖面图、平面图和水

平剖面图。水流从蜗壳进至转轮，首先要经过座环和导水机构。座环是一环状结构，由若干立柱20嵌固在埋置于混凝土内的上环19和下环21组成。导水机构的位置在座环和转轮之间，它的主要工作部件是许多导水叶4。每一导水叶装在各自己的导水机构上环18和底环3的轴承中，并借导水叶转臂8、连杆9和调速环10相联，调速环又用销子和油压接力器的推拉杆26联在一起。由水轮机的自动调速器来操作油压接力器的推拉杆，即可使调速环旋转，并使导水叶摆转一定角度。水轮机转轮由一定数量的

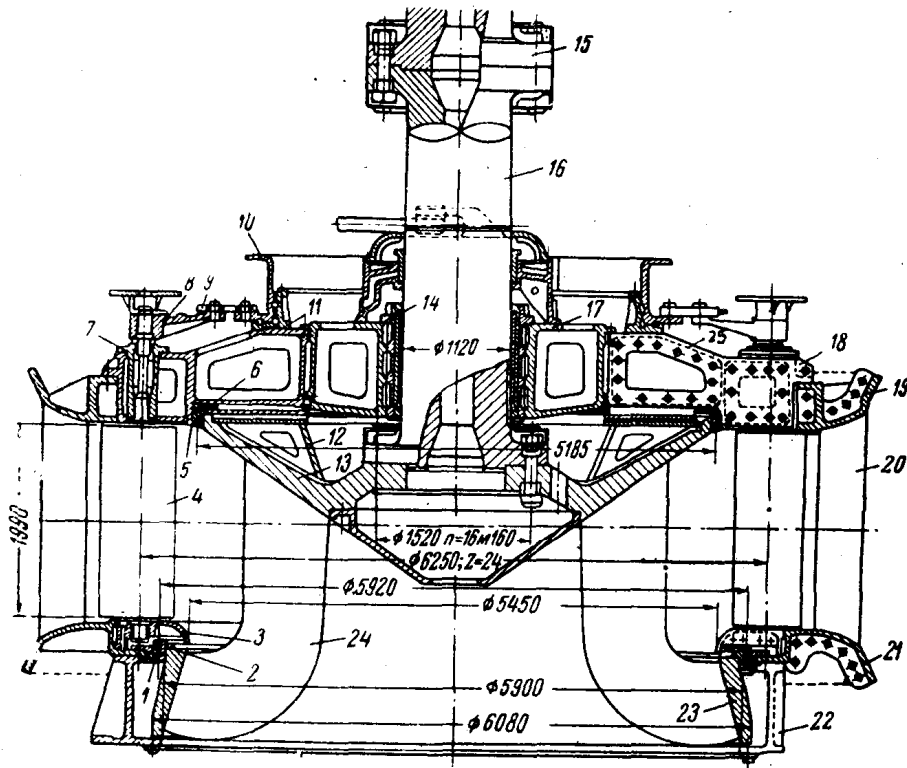


图 1-8 a 混流式水轮机剖面图

- 1—下部固定止漏环；2—下部转动止漏环；3—导水机构底环；4—导水机构导水叶；5—上部固定止漏环；6—上部转动止漏环；7—导水叶轴承；8—导水叶转臂；9—连杆；10—调速环；11—调速环支座；12—减压装置；13—轮毂；14—导轴承；15—发电机主轴；16—水轮机主轴；17—导轴承支架；18—导水机构上环；19—座环上环；20—座环立柱；21—座环下环；22—基础环；23—转轮下环；24—转轮叶片；25—水轮机顶盖；26—接力器推拉杆；27—接力器坑衬；28—水轮机坑衬

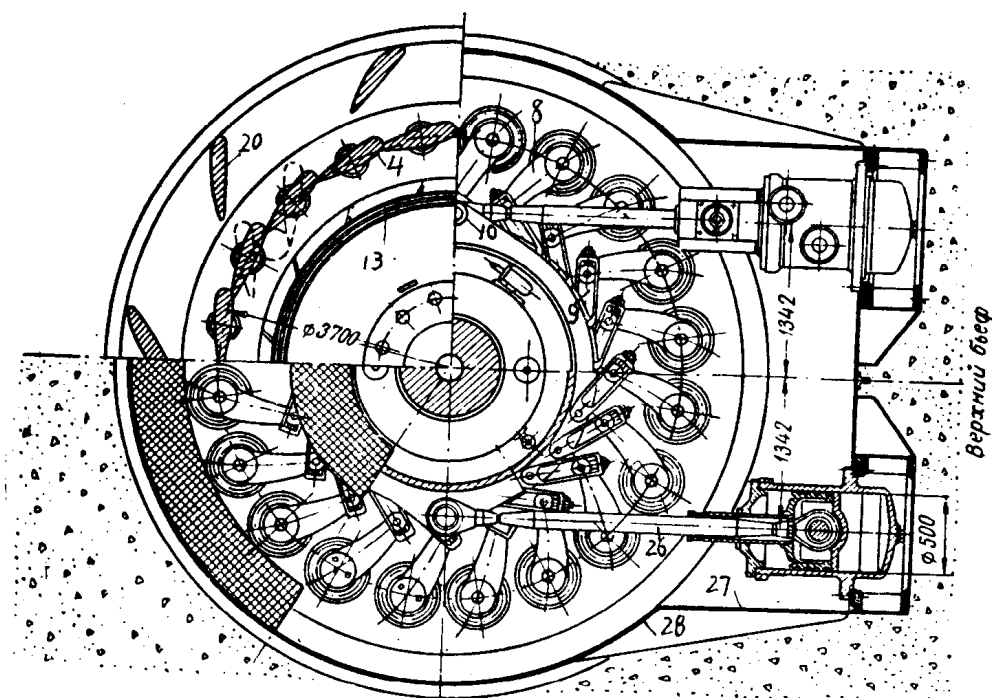


图 1-8b 混流式水轮机平面图

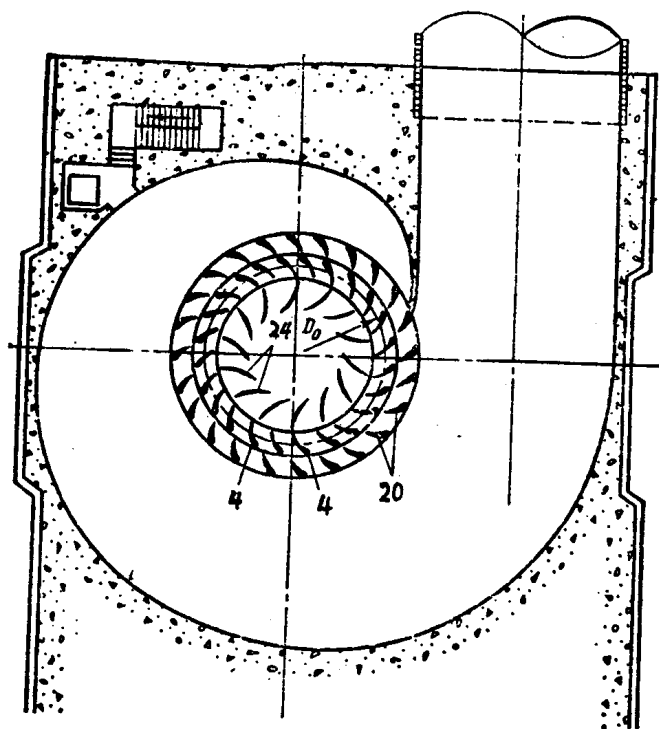


图 1-8c 混流式水轮机蜗壳层剖面图

叶片 24、轮毂 13 和转轮上环 23 所组成。转轮用固定螺栓与水轮机主轴 16 联成一体，并通过法兰盘与发电机主轴 15 相连。在主轴靠近转轮处装有水轮机导轴承 14，用以防止主轴的偏摆。为了减小转轮部分与固定部分的间隙漏水，在转轮的下部边缘和上部边缘分别设有转动止漏环 3 和 6，而在相对应的固定部分上则分别设有固定止漏环 1 和 5。

由上述可知，混流式水轮机是以转轮为核心，由许多部件组成的综合体。它的主要组成部件包括：1) 转轮，2) 导水机构，3) 蜗壳，4) 尾水管，5) 其他构件，如座环、主轴、轴承、顶盖、基础环和止漏装置等。关于蜗壳和尾水管将在 § 2-5 和 § 3-4 中专门讲述，下面主要对转轮、导水机构和其它有关构件的构造进行简要介绍。

转轮是水轮机最重要的过流部件，其作用是将从蜗壳引入水流的水能转换为转轮的旋转能，它的外貌如图 1-9 和图 1-10 所示。它的特点是轮叶 4 嵌固在轮毂 3 内，不能转动。轮叶呈扭曲状，其下端的扭曲程度较急，上端较缓。各轮叶间形成狭长的流道，水流通过流道时对轮叶产生反作用力而推动转轮旋转。改进转轮流道形状，可导致水轮机比转速和单位出力的增高，转轮的气蚀性能也有重大改善。这些改进还可使水轮机部件

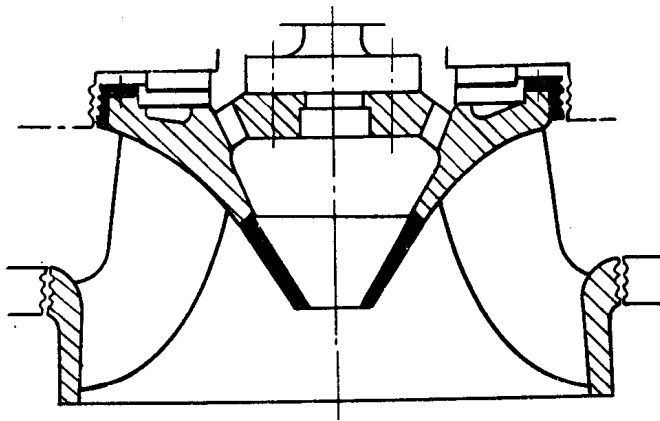


图 1-9 混流式水轮机转轮

1—减压装置；2, 6—止漏环；3—轮毂（上冠）；4—叶片；5—泄水锥；7—下环

的尺寸减小，从而带来经济上的重大利益。轮叶的扭曲程度和数目，都可显著影响水轮机的工作性能。其数目自 10 到 24 片，我国常采用 14~17 片。轮叶数多，会增加水流阻力，减少水轮机的单位流量，但能增加转轮

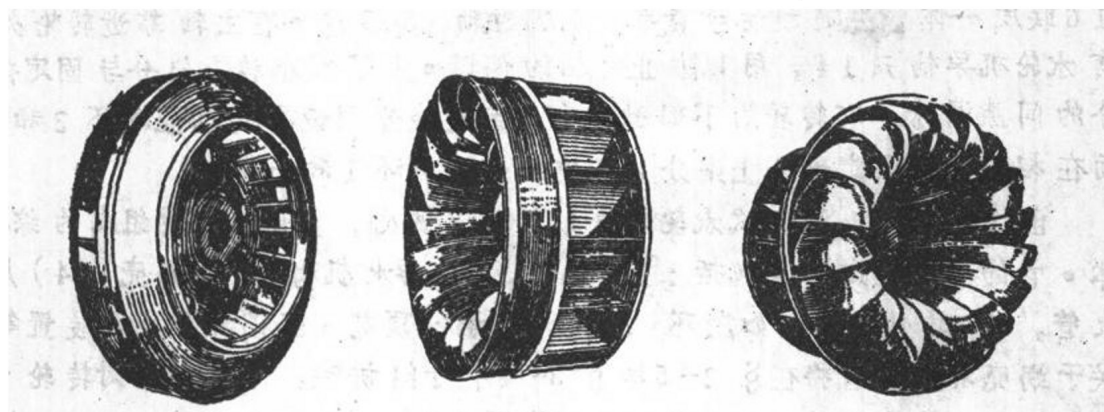


图 1-10 各种比转速的混流式水轮机转轮
a—低比转速转轮； b—中比转速转轮； c—高比转速转轮

的强度和刚度。故适用于高水头情况的转轮，轮叶数目比较多。而低水头、高比转速的转轮，为了增加水轮机的单位流量，叶片数目可以少些。

在轮毂（上冠）的中心装有一锥形状部件，称为泄水锥，是用来引导辐向的水流顺畅地转为轴向，以避免从流道出来的水流互相撞击，减少旋涡损失和振动。

转轮的代表性尺寸为：转轮进口边缘的最大直径 D_1 ，出口边缘的最大直径 D_2 ，以及导水叶的高度 b_0 。混流式水轮机的转轮，因适用水头的不同而有着不同的几何形状。适用于高水头（或者说，低比转速）的转轮，

$D_1 > D_2$ ，且 $\frac{b_0}{D_1}$ 值较小 ($\frac{b_0}{D_1} < 0.2$)，如图 1-10a 和图 1-11a；适用

于中水头（中比转速）和低水头（高比转速）的转能， $D_1 \leq D_2$ ，且 $\frac{b_0}{D_1}$

值较大 ($\frac{b_0}{D_1} = 0.2 \sim 0.39$)，如图 1-10b、c 和图 1-11b、c。转轮

在几何形状上的差别，对水轮机的工作性能有着决定性的影响。总之，比转速愈高，转轮的进水高度 b_0 愈大，下环的出水圆锥面也愈扩大，因而水轮机引用流量也愈大。

小直径混流式水轮机的转轮先用钢板压制轮叶，然后浇铸在铸钢或铸铁的轮毂和下环中。有时用铸钢整体铸造。大直径的转轮因受制造和运

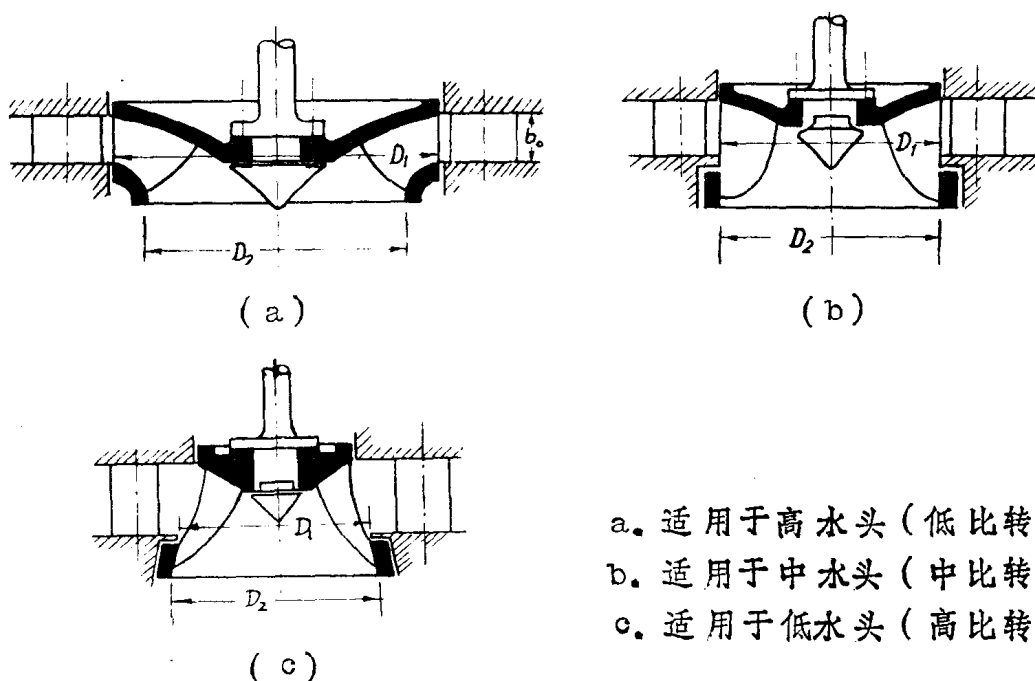


图 1-11 混流式水轮机转轮剖面示意图

输条件的限制，在设计和制造上广泛采用分瓣的组合结构。

导水机构的作用，除了为适应负荷变化而调节进入转轮的流量外，还在于根据转轮对进口流量的要求，使水流按一定的速度和方向进入转轮，使水流在转轮前形成必须的旋转，以构成必要的切向分速。图 1-8 所示的导水机构，由许多具有流线型断面的导水叶组成，称为多叶式导水机构，它在调节流量和切向分速方面都具有良好的性能，所以目前最广泛地应用在大、中型混流式和轴流式水轮机上。

导水机构在运行过程中，如果某两个导水叶之间，或导水叶和座环的立柱之间，被水流中的硬物卡住，便将妨碍所有其他导水叶的摆转。为了避免出现这样的事故，常在导水机构中设有安全装置（例如采用脆性连杆，或安全螺栓，或其它措施），以便当某一导水叶故障时，不至影响到其他导水叶的摆转，而保证整个导水机构的正常运行。

图 1-12 示出导水叶的密封。当水轮机停机时，导水叶必须封水严密，防止漏水。漏水量大不仅将加剧因间隙汽蚀而引起的破坏作用，而且将使经常处在停机状态的尖峰负荷机组造成大量的水能损失。此外，当水轮机作调相机组运行时将增加调相时的漏气量。为了减少漏水量，停机时必须减小导叶间隙。为此可采用橡胶的或金属（不锈钢）制成的密封件。在高

水头情况下则可采用专门的管状密封装置，其内腔充压缩空气，能使导叶间隙完全密封。

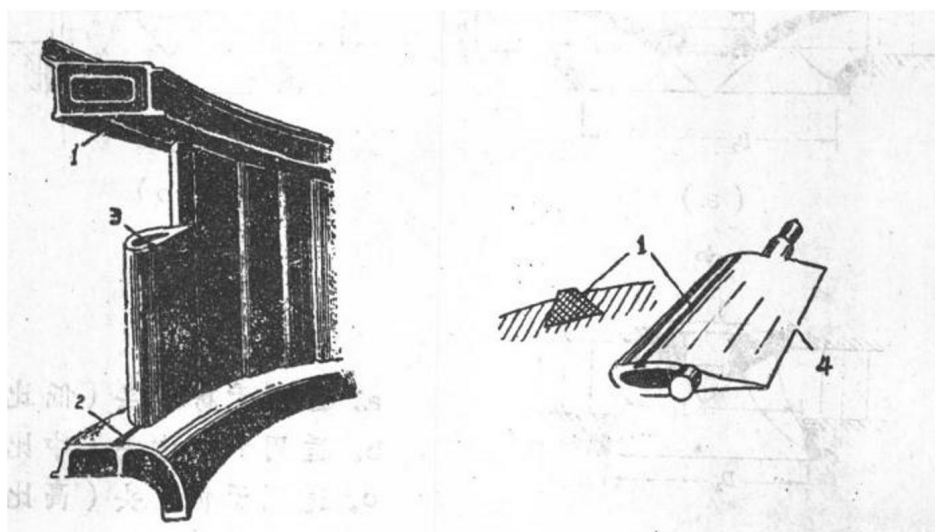


图 1-12 导水叶密封
1—顶端密封；2—底面密封；3—立面密封；
4—导水叶叶尖

图 1-13 示出导水机构接力器的不同型式。除图 1-8 中所介绍的园柱形接力器外，有时还采用摇摆式接力器、环形接力器和每个导水叶设单独的接力器等不同型式。园柱形接力器在我国应用比较普遍，其主要优点是制造比较简单，密封性好，漏油少。摇摆式接力器在我国最近才开始应用，它的主要优点是可布置在水轮机机坑内壁或水轮机顶盖上，这样对水工部分施工和布置有利，安装检修方便。这种结构推拉杆不摆动，而是接力器缸带动整个接力器摆动，故称为摇摆式接力器。环形接力器可直接布置在水轮机顶盖上或轴承支座上，接力器的可移动部件做成大半径的环形，其园心重合在调速环的轴线上。这样，在接力器和调速环连接时可省去推拉杆、连杆等中间环节，使结构简化而紧凑，尺寸小，重量轻，但加工较复杂，漏油的可能性大。每个导叶设单独接力器，其缺点是数量多，安装、检修不便。

导水机构的上盖（上环）18 和水轮机顶盖 25 连接在一起。导水机构的底环 3 则和座环的下环 21 及基础环 22 连接在一起（参见图 1-8a），成为水轮机的基础部分。