

第 6 篇

水 轮 机

主编单位 哈尔滨大电机研究所

编写单位 哈尔滨电机有限责任公司
机械工业部天津电气传动设计研究所
东方电机股份有限公司

主 编 刘光宁

副 主 编 傅宪章 赵荫成

编 写 人 刘光宁 徐南根 陆楚勋 傅宪章
殷士光 李朝东 温国珍 赵希久
陈泽铨 凌振瀛 何国任 周汉城
张沪俊 闵风宾 马海云 吉敏刚
曹文秀 周寿祺 雷迪鼎 连希德
郭纪金 李 晃 常志贤

主 审 陶 炜 吴新润

常用符号表

a ——转轮叶片开口(mm)	$H_{\max}$ ——最大净水头(m)
a_0 ——导叶开口(mm)	$H_{\min}$ ——最小净水头(m)
$a_{0,m}$ ——模型水轮机导叶开口(mm)	H_n ——净水头(m)
b ——固定导叶高度(m)	H_r ——额定净水头 (m)
b_0 ——导叶高度(m)	H_w ——加权平均水头(m)
$\bar{b}_0$ ——导叶相对高度	H_s ——公称吸出高度(m)
b_p ——永态转差系数	h_s ——理论吸出高度(m)
b_t ——暂态转差系数	I ——机组的转动惯量($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
C ——离心力(N)	I_a ——惯性矩(cm^4)
D ——主轴直径(cm)	K ——蜗壳流速系数
D_0 ——导叶分布圆直径(m)	K_h ——水推力系数
$D_{0,m}$ ——模型导叶分布圆直径(m)	K_1 ——积分增益(1/s)
D_1 ——转轮公称直径(m)	K_D ——微分增益(s)
D_2 ——转轮出口直径(m)	K_P ——比例增益
$\bar{D}_2$ ——转轮出口相对直径	k ——蜗壳常数(m^2/s)
D_c ——控制环小耳环分布圆直径(m)	L ——轴瓦高度(mm)
D_p ——轴承直径(m)	翼弦长(mm)
D_r ——控制环大耳环分布圆直径(m)	M_h ——水力矩($\text{N} \cdot \text{m}$)
d_0 ——射流直径(mm)	$M_{h,11}$ ——单位水力矩($\text{N} \cdot \text{m}$)
d_B ——转轮体轮毂直径(m)	M_K ——扭转力矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$)
$\bar{d}_B$ ——轮毂比	M_t ——摩擦力矩($\text{N} \cdot \text{m}$)
d_c ——导水机构接力器公称直径(cm)	M_{11} ——单位力矩($\text{N} \cdot \text{m}$)
d_n ——喷嘴口直径(cm)	m ——质量(t)
d_b ——水斗设计直径(m)	n ——转速(r/min)
E ——材料的弹性模量(MPa)	n_0 ——导叶相对偏心距
F ——转轮接力器的总推力(N)	n_{11} ——单位转速(r/min)
F_c ——导水机构接力器的总推力(N)	$n_{11,\text{opt}}$ ——最优单位转速(r/min)
F_h ——水推力(N)	$n_{11,\text{run}}$ ——单位飞逸转速(r/min)
$F_{h,11}$ ——单位水推力(N)	$n_{11,r}$ ——额定单位转速(r/min)
F_t ——轴向水推力(N)	n_{run} ——飞逸转速(r/min)
f ——频率(Hz)	n_r ——额定转速(r/min)
GD^2 ——飞轮力矩($\text{N} \cdot \text{m}^2$)	n_s ——比转速($\text{m} \cdot \text{kW}$)
g ——重力加速度(m/s^2)	P ——功率(kW)
H ——水头(m)	P_r ——额定功率(kW)
高度(m)	p_{abs} ——绝对压力(Pa)
H_{av} ——平均净水头(m)	p_b ——环境压力(Pa)
H_d ——设计水头(m)	p_i ——初始压力(Pa)

$p_{\max}$ ——最大瞬态压力(Pa)	安装高程(m)
p_r ——额定工作油压(Pa)	z_0 ——导叶数
p_{va} ——汽化压力(Pa)	喷嘴数
Q ——流量(m^3/s)	$z_{0,m}$ ——模型水轮机导叶数
Q_{11} ——单位流量(m^3/s)	z_1 ——转轮叶片数
$Q_{11,\max}$ ——最大使用单位流量(m^3/s)	水斗数
$Q_{11,\text{opt}}$ ——最优单位流量(m^3/s)	α_0 ——导叶出口角($^\circ$)
Q_r ——额定(设计)流量(m^3/s)	η ——水轮机的总效率
$Q_{11,r}$ ——额定(设计)单位流量(m^3/s)	尾水管恢复系数
q ——冷却水量(L/min)	η_{rel} ——相对效率
R_a ——固定导叶外切圆半径(m)	η_s ——水力效率
R_b ——固定导叶内切圆半径(m)	η_p ——原型(真机)水轮机效率
S ——接力器行程(m)	积分平均效率
S_n ——喷针最大行程(mm)	$\eta_{m,\text{opt}}$ ——模型最优效率
T_d ——缓冲时间常数(s)	η_w ——加权(算术)平均效率
T_i ——导叶(或接力器)有效关闭时间(s)	π ——圆周率
T_n ——机组加速时间常数(s)	σ ——水轮机空化系数
T_s ——导叶全段关闭时间	应力(MPa)
u ——圆周速度(m/s)	σ_c ——临界空化系数
u_1 ——转轮叶片进口水流的圆周速度(m/s)	σ_m ——模型水轮机空化系数
u_2 ——转轮叶片出口水流的圆周速度(m/s)	σ_0 ——初生空化系数
v_0 ——蜗壳进口断面平均流速(m/s)	σ_p ——电站空化系数
v_1 ——转轮叶片进口水流的绝对速度(m/s)	σ_{th} ——理论空化系数
v_2 ——转轮叶片出口水流的绝对速度(m/s)	τ ——切应力(MPa)
v_m ——轴面流速(m/s)	φ ——转轮叶片转角($^\circ$)
v_{u1} —— v_1 在圆周方向的分速度(m/s)	喷嘴流速系数
v_{u2} —— v_2 在圆周方向的分速度(m/s)	φ_0 ——蜗壳包角($^\circ$)
v_2 ——绝对速度的轴向分速度(m/s)	ω ——角速度(rad/s)
w_1 ——转轮叶片进口水流的相对速度(m/s)	∇ ——高程(m)
w_2 ——转轮叶片出口水流的相对速度(m/s)	ξ ——瞬态应力变化率
Z ——截面系数(cm^3)	

第 1 章 概 论

1 水力发电站与水轮机

1.1 水力发电站

水力发电是水能利用的主要形式。水力发电站是利用河流中以水的落差(水头)和流量为特征值所积蓄的势能和动能来发电的水力设施。修建水力发电站一要形成水头,二要调节天然流量。

水力发电站通常分三类:

(1) 堤坝式。用堤坝形成水头。

(2) 引水式。用水渠、隧道及压力钢管等形成水头。

(3) 混合式。用堤坝和水渠、隧道及压力钢管等形成水头。

图 6·1-1 为一坝后式水力发电站剖面图。发电时,水由上游水库经引水管 1、主阀 15 流入水轮机 16,经尾水管 17 排至下游。水流经过水轮机转轮时,水能转换为机械能,由主轴传递给发电机 13 转换成电能,通过输变电设备 7 向电力系统供电。

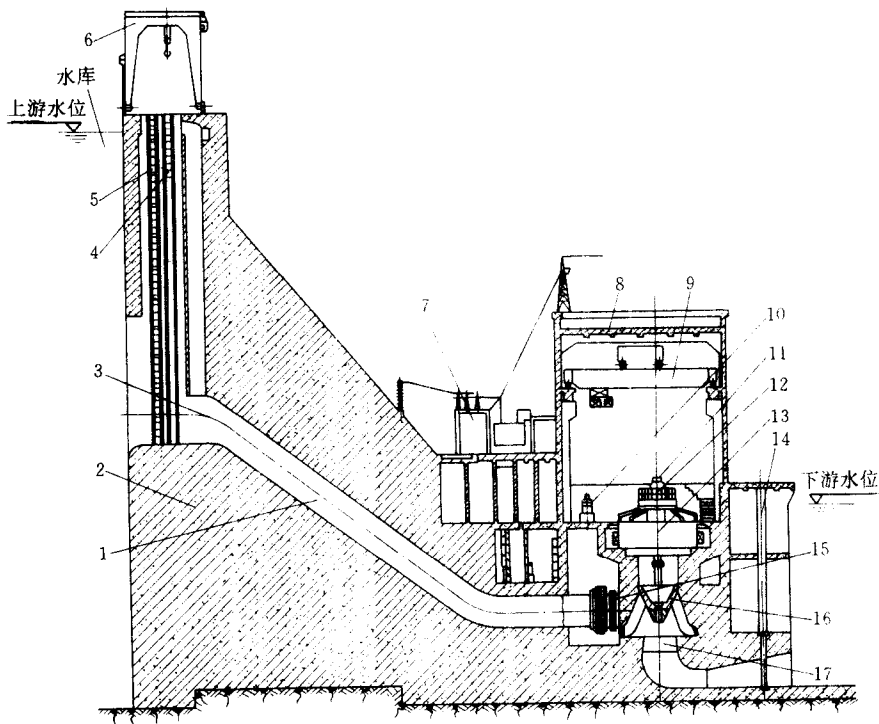


图 6·1-1 坝后式水电站剖面图

- 1—引水管 2—大坝 3—进水口 4—检修闸门 5—拦污栅 6—龙门起重机
7—输变电设备 8—电站厂房 9—桥式起重机 10—调速器与油压装置
11—永磁机 12—励磁机 13—水轮发电机 14—尾水闸门
15—主阀 16—水轮机 17—尾水管

1.2 水轮发电机组

大中型水轮发电机组包括以下主要设备:

(1) 水轮机。将水能转换为机械能。

(2) 发电机。将机械能转换为电能。

(3) 励磁设备。供给发电机转子励磁绕组的励磁电源。

(4) 调速器。控制机组开、停机,或在给定负荷下以

给定转速稳定运行。

(5)油压装置。供给调节、操作系统所需的压力油。

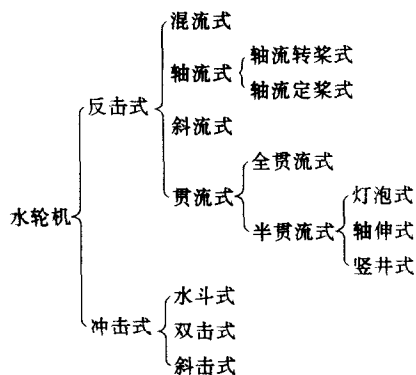
(6)自动化系统。完成操作与事故保护。

许多电站还装有主阀,以便在机组较长时间停机、检修或发生事故时切断水流。

2 水轮机型式

2.1 水轮机分类

现代水轮机按水流作用原理和结构特征可分为两类:同时利用水流动能和势能的称为反击式水轮机;仅利用水流动能的称为冲击式水轮机。属于这两类的各型水轮机如下:

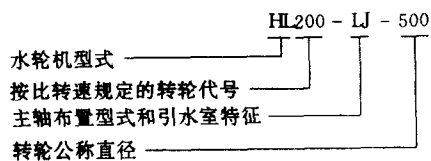


除上述型式外,随着蓄能电站的发展,出现了水泵水轮机。常规的水泵水轮机有混流式、斜流式和轴流式三种。

2.2 水轮机型号

水轮机的型号由三部分代号组成,每一部分之间以“-”分开。第一部分由汉语拼音字母和阿拉伯数字组成:拼音字母表示水轮机型式(见表6.1-1);阿拉伯数字表示转轮的比转速或试验单位的代号和试验序号。第二部分由二个汉语拼音字母组成:第一个字母表示主轴布置型式,立轴为L,卧轴为W;第二个字母表示引水室特征(见表6.1-2)。第三部分表示转轮的公称直径,单位为cm。

反击式水轮机型号示例:



冲击式水轮机型号示例:

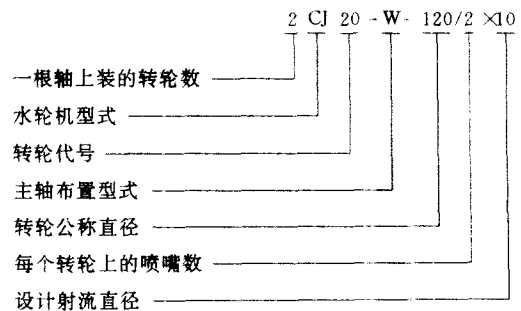


表 6.1-1 水轮机型式与代号

水 轮 机 型 式		代 号
反 击 式	混流式	HL
	轴流转桨式	ZZ
	轴流定桨式	ZD
	斜流式	XL
	贯流式	GL
冲 击 式	水斗式	CJ
	双击式	SJ
	斜击式	XJ

注:水泵水轮机需在型式代号之后,转轮比转速代号之前加“N”表示可逆。

表 6.1-2 引水室特征代号

引 水 室 特 征	代 号
金属蜗壳	J
混凝土蜗壳	H
灯泡式	P
明槽式	M
罐式	G
竖井式	S
虹吸式	X
轴伸式	Z

2.3 转轮的公称直径

水轮机转轮的公称直径 D_1 ,我国规定如下(见图6.1-2):

对于轴流式和斜流水轮机,指与转轮叶片轴线相交处的转轮室内径(图6.1-2a和图6.1-2b);

对于混流水轮机,指转轮叶片进水边的最大直径(图6.1-2c);

对于水斗式水轮机,指转轮与射流中心线相切处

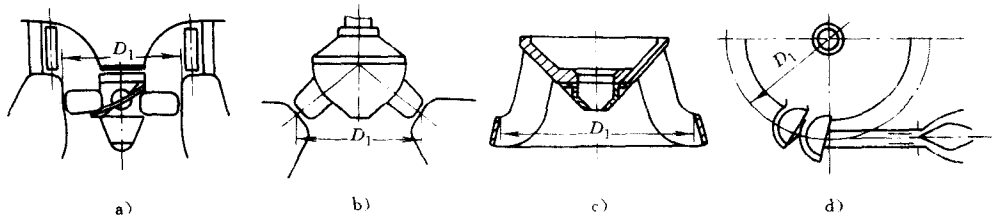


图 6-1-2 水轮机公称直径示意图

a) 轴流式水轮机 b) 斜流式水轮机 c) 混流式水轮机 d) 水斗式水轮机

节圆的直径 (图 6-1-2d)。则取转轮出口最大内径为公称直径。

混流式水轮机转轮的公称直径国外有不同的取法,有的把下环或底环流道的喉径作为公称直径,有的

2.4 各型水轮机的性能和特点 (表 6-1-3)

表 6-1-3 各型水轮机的性能和特点

型式		图 示	水 头 (m)	比转速 (m · kW)	特 点
混 流 式		见图 6-1-3	30~700	50~300	适用水头范围广,空化系数比轴流式的小,满负荷时效率高 中低水头大容量的水轮机,转速低、尺寸大,要注意大部件的加工、 运输及结构刚度问题 高水头水轮机的空化、磨蚀、振动等问题比较突出
轴 流 式	转 桨 式	见图 6-1-4	3~80	200~850	适用水头低,比转速比混流式的高,空化系数较大。随负荷变化,叶 片与导叶协联动作,平均效率高。适用于水头与负荷变化较大的电 站。水轮机直径 $D_1 < 1.8\text{m}$ 时不宜采用
	定 桨 式	见图 6-1-5			平均效率较低、适用于低水头及水头与负荷变化不大的电站。转轮 室与转轮轮毂可做成圆柱形。由于没有叶片操作机构,轮毂直径可适 当缩小
斜 流 式		见图 6-1-6	40~120	150~350	性能介于轴流式和混流式之间,对水头和负荷变化的适应性比混 流式的好,平均效率也比混流式的高。转轮叶片与机组轴线成 45° 或 60° 角,叶片强度和受力条件比转桨式的好,但转轮结构复杂,给制 造、维护和检修带来不便,故较少采用
贯 流 式	全 贯 流 式	见图 6-1-7	<25	600~1000	全贯流式机组流道平直,上游侧有一直径较小的灯泡体,导水机构 呈锥形。与灯泡式机组的主要不同点是发电机布置在流道外面。全 贯流式水轮机转轮叶片外缘带有一个圆环,与发电机转子直接把合 在一起,转轮圆环与转轮室的上下游侧有密封装置。结构紧凑,转动 惯量大,运行稳定。适用于平原河川和潮汐电站
	半 贯 流 式	见图 6-1-8			灯泡式水轮机适用于水头变化较大的电站。 $H < 12\text{m}$ 时采用 4 叶 片转轮; $H > 12\text{m}$ 时采用 5 叶片转轮
	半 贯 流 式	见图 6-1-9			轴伸式水轮机的发电机置于流道之外。水轮机主轴从进水管伸出 或从泄水管伸出。从进水管伸出的机组性能较好。从泄水管伸出的 机组布置方便、合理,采用较多。当转速较低时,可采用齿轮增速器提 高发电机的转速

(续)

型式		图 示	水 头 (m)	比转速 (m · kW)	特 点
贯 流 式	半 贯 流 式	见图 6·1-10	<25	600~1000	竖井式水轮机的发电机布置在一个混凝土或金属构成的竖井坑内,安装方便,通风、冷却、防潮及密封条件较好。用在较低水头时,往往采用平行于轴的增速齿轮或行星齿轮增速器,提高发电机转速,效率不如灯泡式水轮机的高
水 斗 式		见图 6·1-11	300~1700	10~35 (单喷嘴)	最高效率稍低于混流式,但负荷变化时效率曲线平坦。适用于高水头、小流量的电站。其结构比高水头混流式水轮机简单。空化和磨蚀轻,易于维修,采用折向器、喷嘴双重调节。延长喷嘴关闭时间可改善压力钢管的压力上升值。中小型多为卧式,大型采用立式
双 击 式		见图 6·1-12	50~80	30~150	适用于功率小于 1MW 的水轮机。结构简单,制造容易,使用范围较宽,部分负荷时效率较高
斜 击 式		见图 6·1-13	25~300	30~70	射流斜向射入转轮,其性能与射流椭圆后移量、射流入射角、叶片数、叶片进水边形状、喷嘴与转轮间的距离以及机壳形状等因素有关。结构简单,效率比水斗式和混流式的低。适用于 5MW 的小型电站
水泵水 轮机①		见图 6·1-14	80~500	200~100②	一般用于抽水蓄能电站。利用系统低负荷时的剩余电能抽水蓄能,峰荷时发电或作调相运行。转轮宜用不锈钢材料制造,采用多级密封结构,要求轴承能适应主轴正反向旋转。安装高程决定于水泵工况,叶片主要按水泵设计

① 仅指混流式水泵水轮机。

② 水泵工况下在最高效率时的比转速。

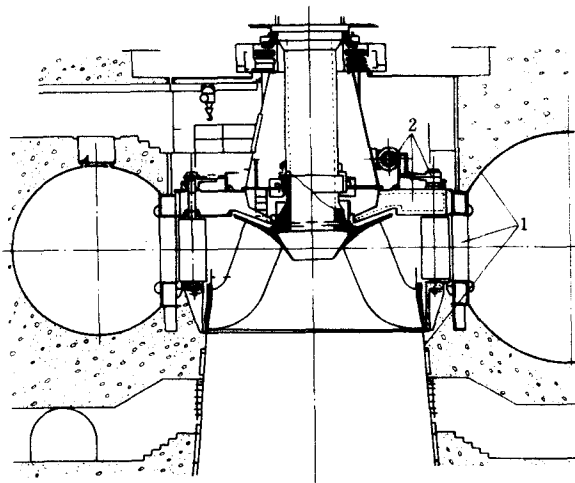


图 6·1-3 混流式水轮机剖面图
1—埋入部分 2—导水机构部分

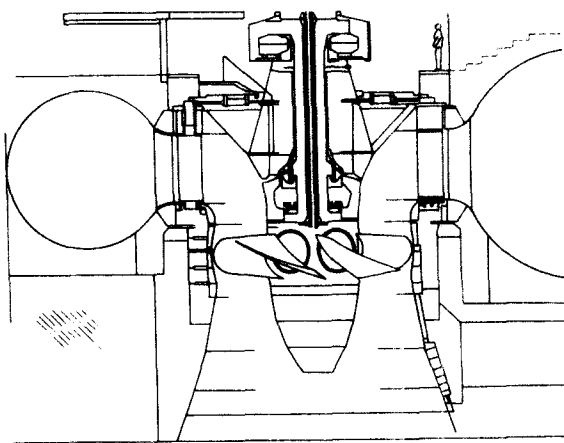


图 6·1-4 轴流转桨式水轮机剖面图

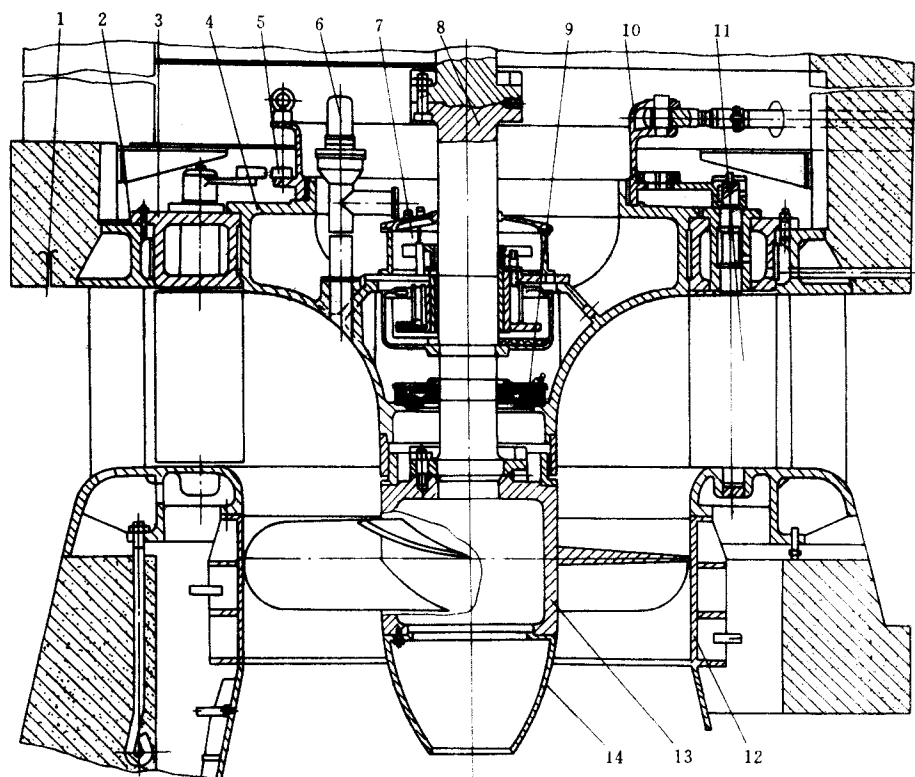


图 6-1-5 轴流定桨式水轮机剖面图

1—涡壳 2—整铸的座环与底环 3—顶盖 4—支持盖 5—异叶传动机构 6—真空破坏装置 7—异轴承 8—主轴
9—橡胶平板密封 10—控制环 11—导叶 12—转轮室 13—转轮(叶片直接焊在转轮体上) 14—泄水锥

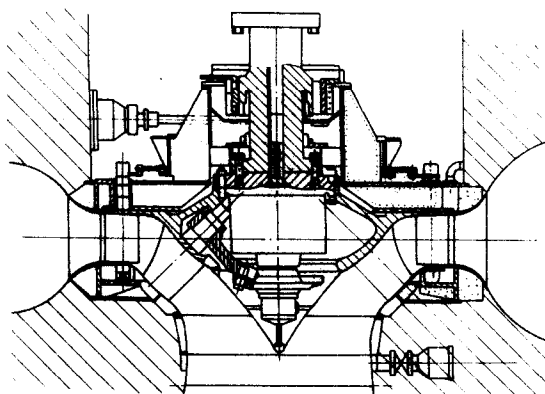


图 6·1-6 斜流式水轮机剖面图

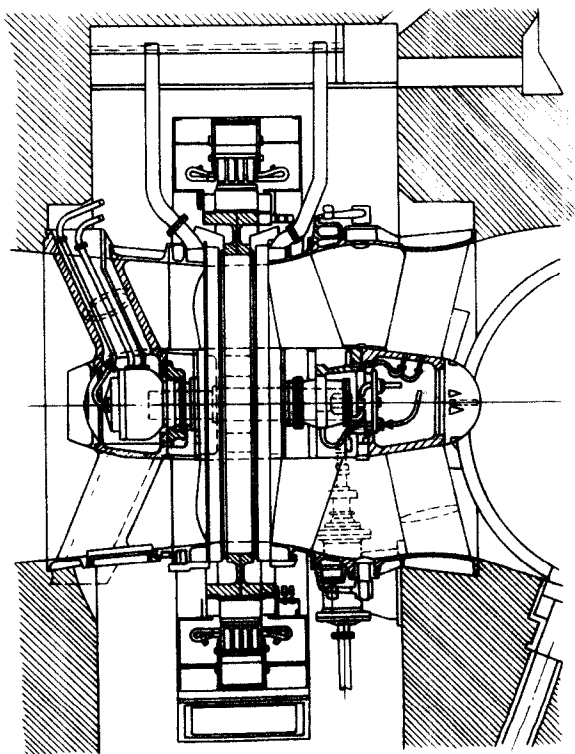


图 6-1-7 全贯流式水轮机剖面图

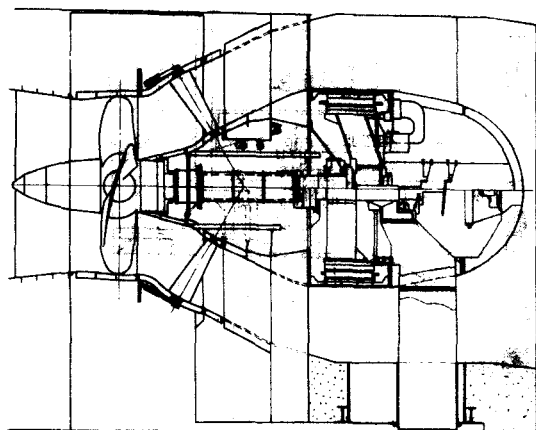


图 6-1-8 半贯流(灯泡)式水轮机剖面图

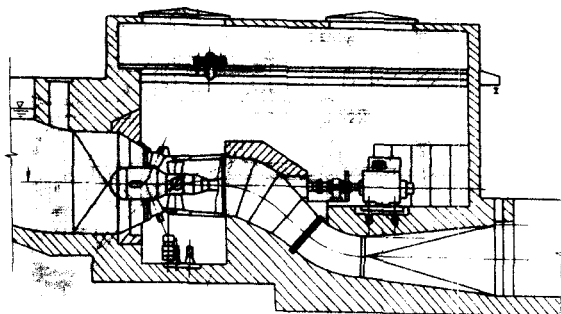


图 6-1-9 半贯流(轴伸)式水轮机剖面图

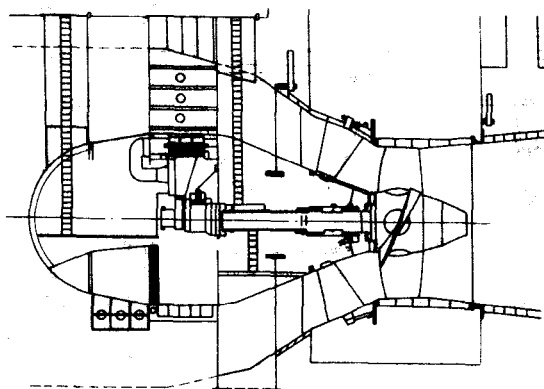


图 6-1-10 半贯流(竖井)式水轮机剖面图

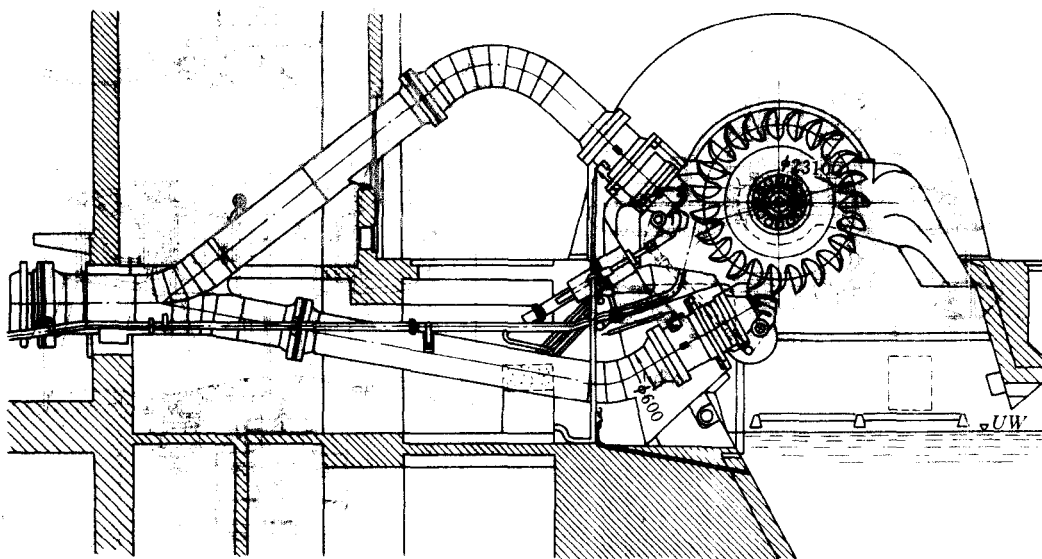


图 6-1-11 水斗式水轮机剖面图

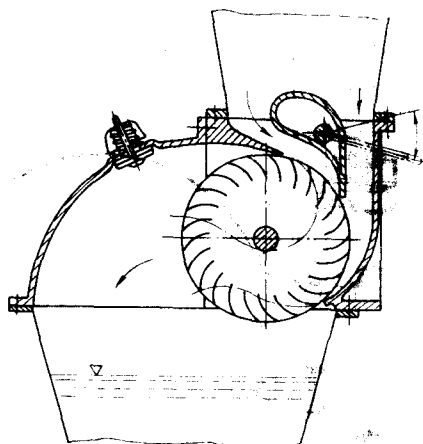


图 6-1-12 双击式水轮机剖面图

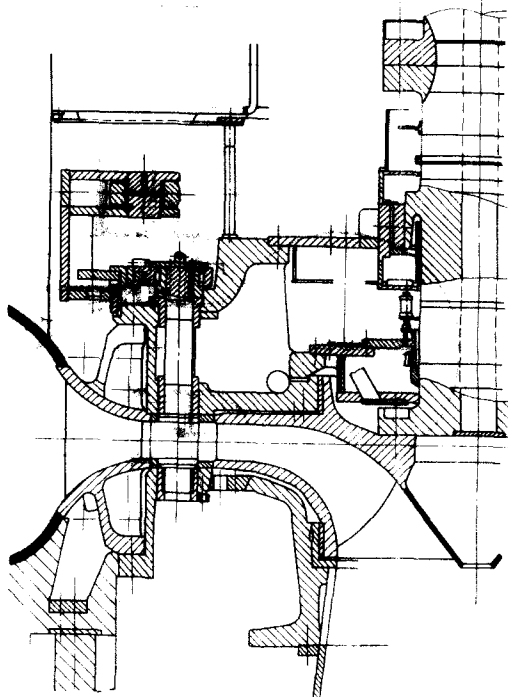


图 6-1-14 水泵水轮机剖面图

3 水轮机的结构

3.1 反击式水轮机的组成

反击式水轮机一般由以下几部分组成,见图 6-1-15。

(1)埋入部分,包括蜗壳、座环、基础环、尾水管里衬、机坑里衬等。对轴流式水轮机还有转轮室,对贯流式水轮机还有管形座。

(2)导水机构部分,包括顶盖(大中型轴流式水轮机分顶盖和支持盖)、底环、导叶、传动零件。对贯流式水轮机还有导叶内、外环。

(3)转动部分,包括主轴、转轮、导轴承及密封零件。

(4)辅助部分,包括接力器、真空破坏阀和补气阀。

3.2 冲击式水轮机的组成

冲击式水轮机由转轮、喷管、喷针、折向器、控制机构、机壳、主轴、导轴承及密封等主要部件组成,见图 6-1-16。

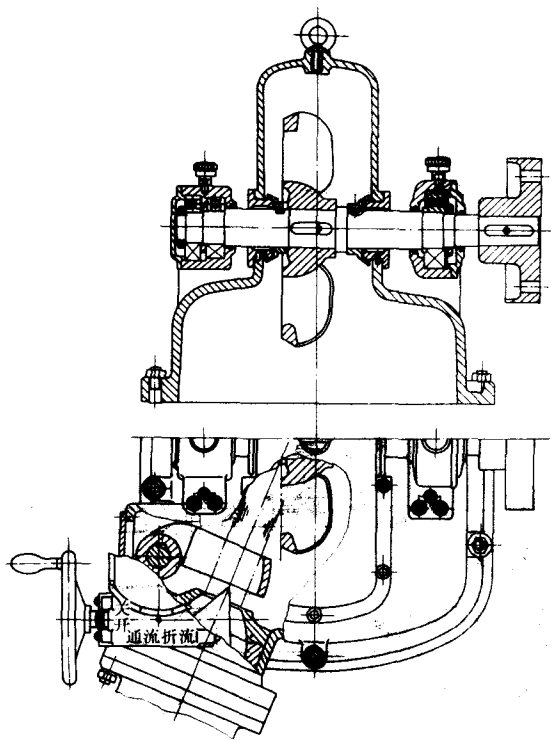


图 6-1-13 斜击式水轮机剖面图

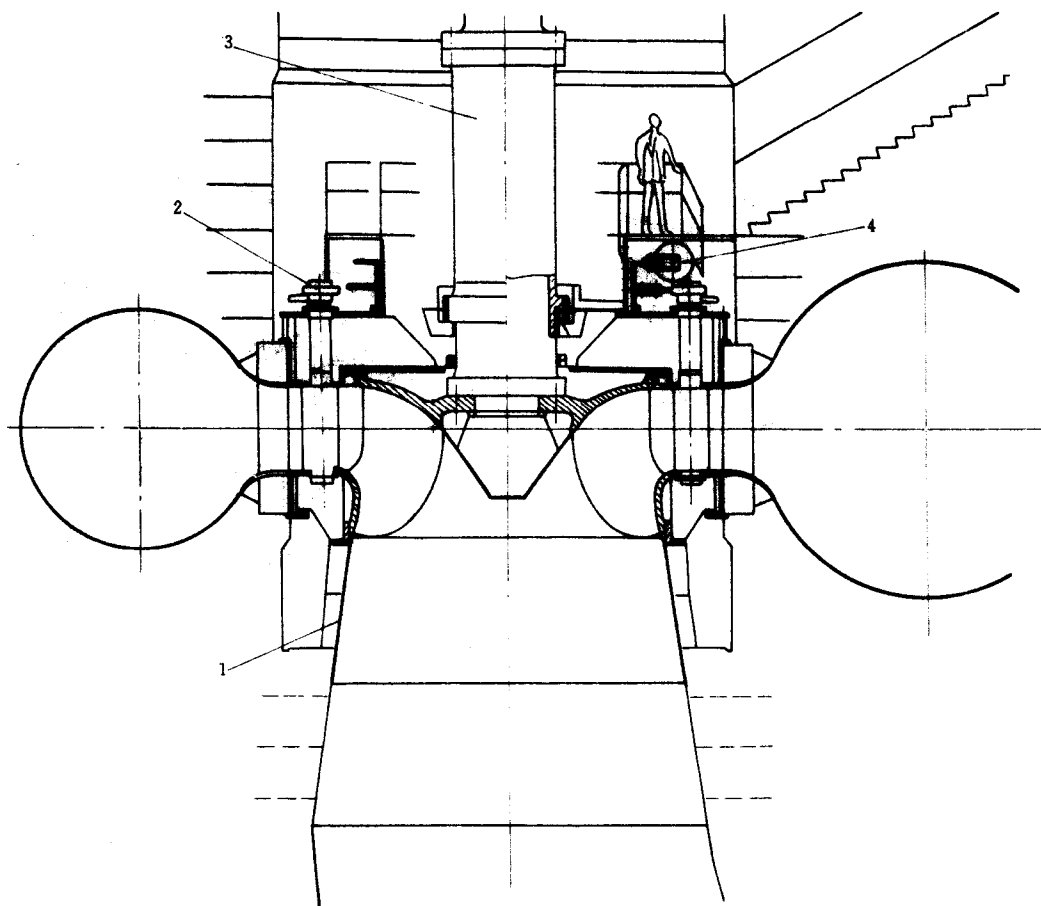


图 6-1-15 混流式水轮机剖面图

1—埋入部分 2—导水机构部分 3—转动部分 4—辅助部分

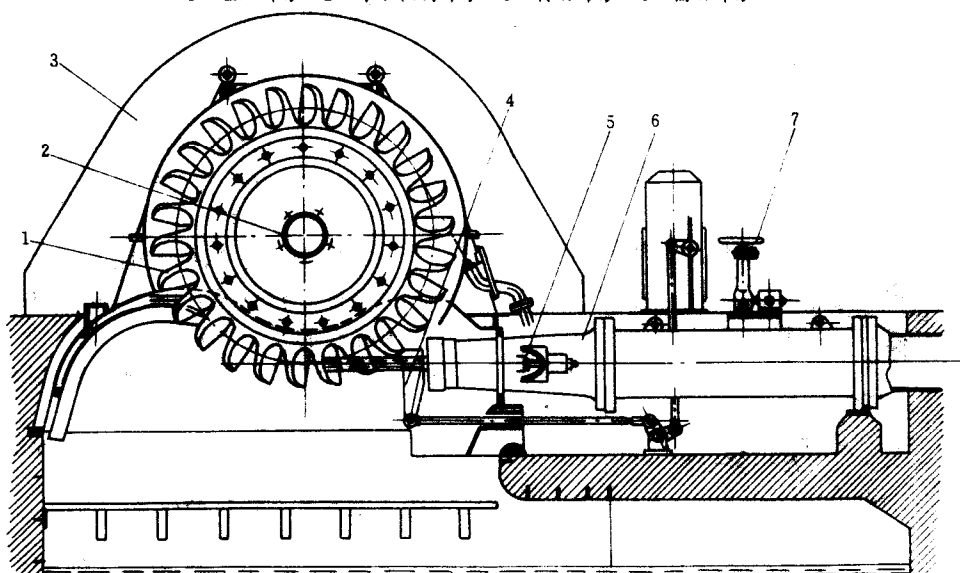


图 6-1-16 冲击式水轮机剖面图

1—折向器 2—主轴 3—机壳 4—折向器 5—喷针 6—喷管 7—控制机构

4 水轮机的发展趋势

产品见表 6-1-4。

近代水轮机正在向高水头、大容量、高性能、高可靠性、高度自动化的方向发展。各种类型水轮机的代表

1. 高水头、大容量 随着科学技术的发展和电网容量的增大,各种类型水轮机的最大使用水头正在提高,尺寸和容量也在增大。

表 6-1-4 水轮机代表产品

型式	电 站 名 称	水 头 (m)	功 率 (MW)	转 速 (r/min)	转轮公称 直径(m)	制 造 厂	首台机组出厂年份
HL	大古力(美国)	86.9	716	85.7	9.223	AC	1978
	依泰普(巴西)	108	711	90.9	8.4506	Voith、Neyrpic	1984
	五强溪(中国)	44.5	248	68.18	8.3	哈电、Voith	1994
	岩滩(中国)	59.4	302.5	75	8.0	哈电	1991
	劳斯亥克(奥地利)	672	58.4		1.98	EW	1967
	鲁布革(中国)	312	150	333.3	3.46	哈电	1989
ZZ	水口(中国)	47	200	107	8.0	哈电、日立	1993
	铁门(南斯拉夫)	27.16	178	71.5	9.5	JIM3	1972
	葛洲坝(中国)	18.6	170	54.6	11.3	东方	1982
	葛洲坝(中国)	18.6	125	62.5	10.2	哈电	1981
	那门比亚(意大利)	H _r /88	13.5	375	2	FT	
	石门(中国)	67/78	12.5	500	1.8	哈电	1975
ZD	罗基里治(美国)	26.3	125	85.7		AC	1971
	红石(中国)	23.3	50	107	6.0	哈电	1985
	凯特尔-列皮德斯(加拿大)	—/30	106	88	7.36	Franco. Tosi	1974
CJ	圣西玛(挪威)	885	315	333	5.1	ABB	1988
	S. G. 乌曼诺(意大利)	636	282	300	4.35	Riva	
	西尔茨(瑞士)	1233	260	500	3.426	Vv/EW	1981
	天湖(中国)	1022.4	15	750	2.15	重水	1990
	雷塞克	1767	24	750	2.6	Charmilles	1955
可逆式	巴斯康蒂(美国)	329(335)	457(420)	257	6.35	AC	1985
	拉岗山(美国)	286(305)	400(395)	300	4.93	AC	1978
	恰伊拉(保加利亚)	677(701)	216	600	3.74	东芝	1987
	广州抽水蓄能(中国)	537.18 (550.01)	300	500	3.886	Neyrpic	1993
	比索特(法国)	1194(1187)	156	600		Neyrpic	1980(多级)
GZ	只见(日本)	18.4	65.8	100	7.5	日立	1989
	石岛(美国)	12.5	54	85.7	7.4	Neyrpic	1977
	安居(中国)	8	15	88.2	5.5	重水	1990
	白垢(中国)	6.2	10.46	78.9	5.5	天发	1981
	安纳波里斯(加拿大)	5.5	20	50	7.6	EW	1984(全贯流式)
	阿尔登华特(奥地利)	13.57	41.2	103.4	6.0	Voith	1981
	奥扎克(美国)	9.8	25.2	60	8	AC	1965

注: 1. 括号内的数字指水泵水轮机。

2. 哈电—哈尔滨电机有限责任公司; 东方—东方电机股份有限公司; 重水—重庆水轮机厂; 天发—天津发电设备总厂。

我国可供开发的水力资源达 $3.78 \times 10^5 \text{ MW}$, 占世界首位。近年将开发的水电站大多为高、中水头。许多电站宜选用大尺寸、大容量的水电机组。目前, 国内制造厂已具备研制高水头、大尺寸、大容量轴流式和混流式水轮机的能力。

2. 高性能、高可靠性 近代水轮机的发展重点是通过采用现代计算机分析技术、计算方法和试验方法, 开发具有高水力性能的模型水轮机; 采用先进的制造方法进一步提高蜗壳、导叶、尾水管等过流部件, 特别是转轮过流表面的加工质量, 以适应使用部门高性能、高可靠性、适应性和经济性的需要。

3. 开发贯流式和抽水蓄能机组 我国低水头水力资源丰富, 贯流式机组的需求量很大, 目前国内已有一定的研制基础。通过进一步消化吸收引进技术, 有步骤地增大机组尺寸, 提高单机容量, 可以满足国内外市场的需求。

随着电网容量的增大和大型核电站的投入, 开发

大型可逆式水电机组已迫在眉睫, 为此, 应加强基础技术的研究, 通过国际合作, 逐步掌握各项关键技术, 满足国内电力发展的需要。

4. 综合治理水轮机磨损问题 我国许多河流都含有较大数量的泥沙, 除了防止水轮机过流部件的空蚀外, 还要设法减轻泥沙磨损。从水土保持、电站设计、水轮机水力研究、磨损机理、结构工艺、抗磨损材料、配套电机(变速或调速)等各个方面, 综合治理水轮机的磨损问题。

5. 提高自动监测和保护水平 为保证水轮机的安全运行, 延长使用寿命, 必须加强水轮机运行状态的自动控制、自动监测和保护。开发各类传感器和相应的接口装置。通过国际合作和国内外配套, 提高自动化水平。

6. 加速老电站机组的技术改造 我国有一大批老水电机组役龄已超过 25 年, 只要花少量经费, 更新某些过流部件, 就可以明显提高水轮机的性能, 获取巨大的经济效益。

第 2 章 水轮机的工作原理及主要性能

1 功率和水头

(1) 功率

$$P = \rho g Q H \eta = 9.81 Q H \eta \quad (\text{kW}) \quad (6.2-1)$$

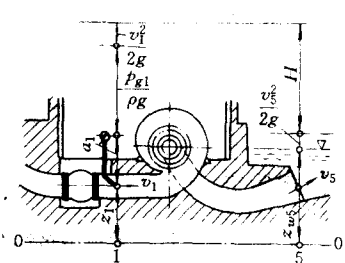
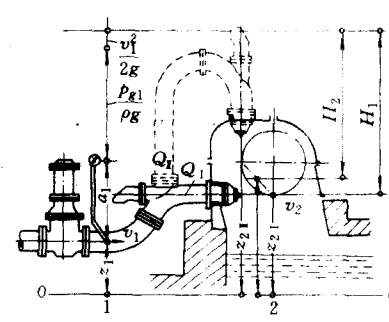
(2) 水头。水轮机进口与出口测量断面的水位差。

各种水轮机水头的定义见表 6.2-1。

表 6.2-1 水头定义

水轮机型式	尺寸图	水头 H 公式	备 注
反击式水轮机 (混凝土蜗壳)		$H = (z_{w1} - z_{w5}) + \frac{v_1^2 - v_5^2}{2g}$	式中 z, a —高程(m) v —流速(m/s) Q —流量(m^3/s) H —水头(m)
反击式水轮机 (金属蜗壳)		$H = (z_1 + a_1 - z_{w5}) + \frac{p_{g1}}{\rho g} + \frac{v_1^2 - v_5^2}{2g}$	$p_{g1}/\rho g$ —以米水柱表示的表压(m)

(续)

水轮机型式	尺寸图	水头 H 公式	备 注
卧式反击式水轮机		$H = (z_1 + a_1 - z_{w5}) + \frac{p_{g1}}{\rho g} + \frac{v_1^2 - v_5^2}{2g}$	式中 z, a —高程(m) v —流速(m/s) Q —流量(m ³ /s) H —水头(m) $p_{g1}/\rho g$ —以米水柱表示的表压(m)
冲击式水轮机		单喷嘴 $H = (z_1 + a_1 - z_{21}) + \frac{p_{g1}}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g}$ 双喷嘴 $H = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} (z_1 + a_1 - z_{21}) + \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} (z_1 + a_1 - z_{21}) + \frac{p_{g1}}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g}$	

2 相似关系和比转速

水轮机的水力特性主要通过模型试验获得, 然后按相似律换算到真机。

2.1 单位量

几何相似的水轮机, 当满足运动相似和动力相似时, 可近似按下述单位量进行参数换算:

单位转速

$$n_{11} = \frac{nD_1}{\sqrt{H}} \quad (\text{r/min}) \quad (6.2-2)$$

单位流量

$$Q_{11} = \frac{Q}{D_1^2 \sqrt{H}} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (6.2-3)$$

单位功率

$$P_{11} = \frac{P}{D_1^5 H^{1.5}} \quad (\text{kW}) \quad (6.2-4)$$

上述单位量表示 $D_1=1\text{m}$ 、 $H=1\text{m}$ 时水轮机的转速、流量和功率。

若转轮公称直径采用出口直径, 则上式中以 D_2 替换 D_1 , 在性能比较时要进行适当换算。

对于冲击式水轮机

$$\left. \begin{aligned} n_{11} &= 84.6 \frac{u}{v_0} \quad (\text{r/min}) \\ Q_{11} &= 3.48 z_0 \varphi \left(\frac{d_0}{D_1} \right)^2 \quad (\text{m}^3/\text{s}) \\ P_{11} &= 34 z_0 \eta \varphi \left(\frac{d_0}{D_1} \right)^2 \quad (\text{kW}) \end{aligned} \right\} \quad (6.2-5)$$

式中 u/v_0 ——转轮节圆圆周速度 (u) 与射流速度 (v_0) 之比;

φ ——喷嘴流速系数;

z_0 ——喷嘴数。

若 $z_0=1$, $\varphi=0.97$, $u/v_0=0.475$, $\eta=0.86$, 则

$$\left. \begin{aligned} n_{11} &= 39 \sim 40 \\ Q_{11} &= 3.38 \left(\frac{d_0}{D_1} \right)^2 \\ P_{11} &= 28.4 \left(\frac{d_0}{D_1} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (6.2-6)$$

2.2 比转速

水轮机比转速 (n_s) 系指几何相似的水轮机当水头为 1m 、输出功率为 1kW 时的转速。

$$\text{通常} \quad n_s = \frac{n \sqrt{P}}{H^{5/4}} \quad (\text{m} \cdot \text{kW}) \quad (6.2-7)$$

$$\text{或} \quad n_s = 3.13 n_{11} \sqrt{\eta Q_{11}} \quad (\text{m} \cdot \text{kW}) \quad (6.2-8)$$

在一定水头下,提高 n_s 意味着 Q_{11} 、 n_{11} 和 η 的增加。 Q_{11} 和 η 增加,则功率增加; n_{11} 增加,则转速提高,机组尺寸缩小,可减轻机组质量。因此, n_s 对水电机组的技术经济指标有重要影响。随着技术的发展, n_s 在逐步提高,但它的提高受到空蚀和部件强度等的制约。

有时,在式(6·2-7)中,以流量 Q 代替 P 来定义比转速,即

$$n_s = \frac{n \sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (\text{m} \cdot \text{kW}) \quad (6 \cdot 2-9)$$

冲击式水轮机的比转速

$$n_s = 493 \frac{u}{v_0} \frac{d_0}{D_1} \sqrt{z_0 \eta \varphi} \quad (\text{m} \cdot \text{kW}) \quad (6 \cdot 2-10)$$

若 $z_0=1$, $\frac{u}{v_0}=0.475$, $\varphi=0.97$, $\eta=0.86$,

$$\text{则} \quad n_s = 214 \frac{d_0}{D_1} \quad (6 \cdot 2-11)$$

由式(6·2-10)可见, n_s 与 $\sqrt{z_0}$ 成正比。增加喷

嘴数可提高冲击式水轮机的比转速。

目前,国内外生产的大中型水轮机的比转速与水头的关系大致为

$$\text{轴流转桨式} \quad n_s = \frac{2419}{H^{0.489}} \quad (6 \cdot 2-12)$$

$$\text{混流式} \quad n_s = \frac{2357}{H^{0.538}} \quad (6 \cdot 2-13)$$

3 能量特性

水轮机的能量特性是指水轮机的单位转速(或水头)、单位流量(或功率)与水轮机效率之间的关系。

3.1 水轮机比转速与最优效率的关系

当比转速过高或过低时,水轮机模型的最优效率都有下降的趋势(见图6·2-1)。当混流式水轮机的 $n_s=160 \sim 180 \text{ m} \cdot \text{kW}$,轴流式水轮机的 $n_s=400 \sim 500 \text{ m} \cdot \text{kW}$ (叶片数为5或6)时,最优效率达到峰值。

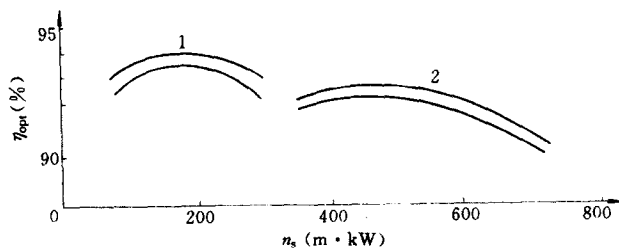


图 6·2-1 水轮机模型最优效率与比转速的关系

1—混流式 2—轴流转桨式

3.2 效率修正

对于几何相似的水轮机,在相似工况下,因雷诺数(Re)不同,需对其效率进行修正。

其修正公式为

$$\eta_p = \eta_m + \Delta\eta$$

对混流式水轮机

$$\Delta\eta = \frac{2}{3} (1 - \eta_{m, \text{opt}}) \left[1 - \left(\frac{D_{1,m}}{D_{1,p}} \right)^{0.2} \right] \quad (6 \cdot 2-14)$$

对轴流式水轮机

$$\Delta\eta = 0.7 (1 - \eta_{m, \text{opt}}) \left[1 - \left(\frac{Re_m}{Re_p} \right)^{0.2} \right] \quad (6 \cdot 2-15)$$

对冲击式水轮机

$$\Delta\eta = 0$$

式中 η_p ——修正后的真机效率;

$\Delta\eta$ ——效率修正值;

$\eta_{m, \text{opt}}$ ——对转桨式水轮机为模型各转角下的最优效率,对混流式水轮机即为模型最优效率;

Re_m, Re_p ——模型及真机最优工况下的雷诺数。

IEC(国际电工委员会)推荐用下列公式进行效率修正:

$$\eta_p = \eta_m + \delta_{\text{ref}} \left[\left(\frac{Re_{u, \text{ref}}}{Re_{u, m}} \right)^{0.16} - \left(\frac{Re_{u, \text{ref}}}{Re_{u, p}} \right)^{0.16} \right] \quad (6 \cdot 2-16)$$

$$\delta_{\text{ref}} = \frac{1 - \eta_{m, \text{opt}}}{\left(\frac{Re_{u, \text{ref}}}{Re_{u, m}} \right)^{0.16} + \frac{1 - V_{\text{ref}}}{V_{\text{ref}}}}$$

$$Re_u = \frac{D_u \omega}{\nu}$$

式中 Re_u ——用圆周速度表征的雷诺数;

D_u ——混流式水轮机取出口直径,其余型式水轮机取公称直径(cm);

$Re_{u, \text{ref}}$ ——最优工况下标准的雷诺数,为 7×10^6 ;

δ_{ref} ——在 $Re_{u, \text{ref}}$ 下的相对可换算损失率;

V_{ref} ——损失分布系数值,见表6·2-2;

ν ——运动粘度(m^2/s)。

表 6·2-2 损失分布系数值

水 轮 机 类 型	V_{rel}
轴流转桨式、斜流转桨式、灯泡贯流式水轮机	0.8
轴流定桨式、斜流定桨式水轮机	0.7
混流式水轮机与水泵水轮机	0.7

对于冲击式水轮机

$$\eta_p = \eta_m$$

4 空化特性

4.1 空化现象和空蚀

一般认为,当水流经过转轮通道的低压区,压力降至该温度下的汽化压力时,会产生气泡。气泡随水流进入高压区时迅速凝结,凝结时,四周的水质点以高速度向气泡中心冲击,以填充由气泡凝结而产生的空间,从而产生冲击波或冲击射流,这种现象叫空化现象。如发生在材料表面,引起材料的破坏,这就叫空蚀。受空蚀的金属呈暗褐色海绵状。剧烈的空化会引起噪声、机组振动以及功率和效率的降低。

空化的产生与水温和水中的含气量有关,水中含气量愈高,就愈易发生空化。

4.2 空化系数

水轮机的理论空化系数 (见图 6·2-2)

$$\sigma_{th} = \frac{w_x^2 - w_2^2 + u_x^2 - u_2^2 - v_2^2}{2gH} - \zeta_r \quad (6 \cdot 2-17)$$

式中 w_x 、 u_x ——叶片压力最低点 x 处水流的相对速度和圆周速度 (m/s);

ζ_r ——尾水管的相对损失。

表征水轮机空化对其性能影响的参数有临界空化系数和初生空化系数。要通过专门的空化试验,根据空化系数对效率的影响程度和叶片气泡发生的状况,按某种规定的方法,确定它们的数值。如图 6·2-3 所示,在 1 点开始观察到叶片出现气泡,该点即为初生空化系数 σ_0 。在 3 点效率明显开始下降,此时,叶片上已

有较多气泡,通常把这一点的空化系数称为临界空化系数 σ_c 。试验中,常对气泡图象进行观测与记录,确定初生空化系数、气泡位置及其发展程度。

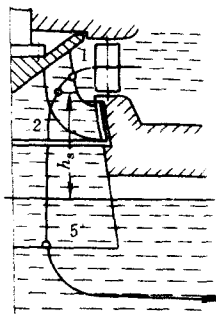


图 6·2-2 空化系数理论计算图
水轮机的电站空化系数按下式计算:

$$\sigma_p = \frac{10 - \frac{\nabla}{900} - h_s}{H} \quad (6 \cdot 2-18)$$

考虑到试验取值偏差、尺寸误差及比尺效应,又照顾到电站造价,在设计水轮机时,应取 $\sigma_p > \sigma_c$,即令 $K = \sigma_p / \sigma_c > 1$, 则

$$h_s = 10 - K \sigma_c H - \frac{\nabla}{900} \quad (m) \quad (6 \cdot 2-19)$$

式中 h_s ——理论吸出高度,即转轮叶片压力最低点到下游水位的高程差 (m);

∇ ——电站海拔高度 (m)。

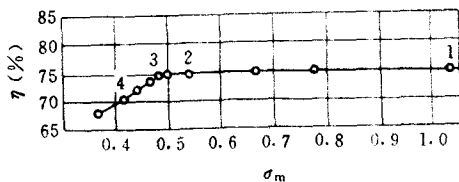


图 6·2-3 用能量法进行空化试验时 σ_m 与 η 的关系

4.3 吸出高度

准确确定叶片上压力最低点是困难的,一般用公称吸出高度 H 。确定水轮机的安装高程,见表 6·2-3。

表 6·2-3 水轮机的吸出高度

水轮机型式	给定的叶片压力最低点的高程	水轮机安装高程起算点	公称吸出高度 H , 换算公式	附 图
立式混流式	底环上端面	导叶水平中心线	$H_s = h_s + \frac{b_0}{2}$	