

机械工程手册

第 75 篇 水 轮 机

(试 用 本)

机械工程手册
电机工程手册

编辑委员会



机械工业出版社

-62

75

机 械 工 程 手 册

第 75 篇 水 轮 机

(试 用 本)

机械工程手册 编辑委员会
电机工程手册



机 械 工 业 出 版 社

本篇以总体设计为重点,总结了我国的实践经验,概括了大、中、小各种型式水轮机的主要技术内容,扼要介绍了水轮机的汽蚀、强度和振动问题,在水力与结构方面提供了一些实用数据,并对水轮机的辅助设备及自动控制系统作了相应介绍。

机 械 工 程 手 册

第75篇 水 轮 机

(试 用 本)

哈尔滨大电机研究所 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/8}$ · 印张 $7^{1/2}$ · 字数 207 千字

1979年4月北京第一版·1979年4月北京第一次印刷

印数 00,001—34,000 · 定价 0.59 元

*

统一书号: 15033·4520

编 辑 说 明

(一) 我国自建国以来, 机械工业在毛主席的革命路线指引下, 贯彻“独立自主、自力更生”和“洋为中用”的方针, 取得了巨大的成就。为了总结广大群众在生产和科学研究方面的经验, 同时采用国外先进技术, 加强机械工业科学技术的基础建设, 适应实现“四个现代化”的需要, 我们组织编写了《机械工程手册》和《电机工程手册》。

(二) 这两部手册主要供广大机电工人、工程技术人员和干部在设计、制造和技术革新中查阅使用, 也可供教学及其他有关人员参考。

(三) 这两部手册是综合性技术工具书, 着重介绍各专业的理论基础, 常用计算公式, 数据、资料, 关键问题以及发展趋向。在编写中, 力求做到立足全局, 勾划概貌, 反映共性, 突出重点。在内容和表达方式上, 力求做到深入浅出, 简明扼要, 直观易懂, 归类便查。读者在综合研究和处理技术问题时, 《手册》可起备查、提示和启发的作用。它与各类专业技术手册相辅相成, 构成一套比较完整的技术工具书。《机械工程手册》包括基础理论、机械工程材料、机械设计、机械制造工艺、机械制造过程的机械化与自动化、机械产品六个部分, 共七十九篇; 《电机工程手册》包括基础理论、电工材料、电力系统与电源、电机、输变电设备、工业电气设备、仪器仪表与自动化七个部分, 共五十篇。

(四) 参加这两部手册编写工作的, 有全国许多地区和部门的工厂、科研单位、大专院校等五百多个单位, 两千多人。提供资料和参加审定稿件的单位和人员, 更为广泛。许多地区

的科技交流部门，为审定稿件做了大量的工作。各篇在编写、协调、审查、定稿各个环节中，广泛征求意见，发挥了广大群众的智慧和力量。

（五）为了使手册早日与读者见面，广泛征求意见，先分篇出版试用本。由于我们缺乏编辑出版综合性技术工具书的经验，试用本在内容和形式方面，一定会存在不少遗漏、缺点和错误。我们热忱希望读者在试用中进一步审查、验证，提出批评和建议，以便今后出版合订本时加以修订。

（六）本篇是《机械工程手册》第75篇，由哈尔滨大电机研究所主编，参加编写的有天津电气传动设计研究所、东方电机厂、华中工学院等单位。许多有关单位对编审工作给予大力支持和帮助，在此一并致谢。

机械工程手册 编辑委员会编辑组
电机工程手册

常用符号表

a ——转轮叶片开口 mm	n_r ——额定转速 r/min
a_0 ——导叶开口 mm	n_s ——比转速
a_{0M} ——模型水轮机导叶开口 mm	P ——转轮接力器的总推力 kgf
b ——固定导叶高度 m	P_c ——导水机构接力器的总推力 kgf
b_0 ——导叶高度 m	P_t ——轴向水推力 kgf
$\bar{b}_0$ ——导叶相对高度 $\bar{b}_0 = b_0/D_1$	p_r ——额定工作油压 kgf/cm ²
C ——离心力 kgf	Q ——流量 m ³ /s
D ——主轴直径 cm	Q'_1 ——单位流量 m ³ /s
D_0 ——导叶分布圆直径 m	Q'_{10} ——最优单位流量 m ³ /s
D_{0M} ——模型导叶分布圆直径 m	Q'_{1r} ——设计单位流量 m ³ /s
D_1 ——转轮标称直径 m	Q_r ——设计流量 m ³ /s
D_2 ——转轮出口直径 m	q ——冷却水量 l/min
D_c ——控制环小耳环分布圆直径 m	R_a ——固定导叶外切圆半径 m
D_p ——轴承直径 m	R_b ——固定导叶内切圆半径 m
D_v ——控制环大耳环分布圆直径 m	S ——接力器行程 cm
d_0 ——射流直径 mm	T_d ——缓冲时间常数 s
d_H ——转轮体轮毂直径 m	T_s ——导叶关闭时间 s
$\bar{d}_H$ ——轮毂比	u ——圆周速度 m/s
d_c ——导水机构接力器名义直径 cm	u_1 ——转轮叶片进口水流的圆周速度 m/s
E ——材料的弹性系数 kgf/cm ²	u_2 ——转轮叶片出口水流的圆周速度 m/s
f ——频率 1/s	v_0 ——涡壳进口断面平均流速 m/s
GD^2 ——飞轮力矩 tf·m ²	v_1 ——转轮叶片进口水流的绝对速度 m/s
g ——重力加速度 m/s ²	v_2 ——转轮叶片出口水流的绝对速度 m/s
H ——净水头 m	v_m ——轴面流速 m/s
H_{max} ——最大净水头 m	v_{u1} —— v_1 在圆周方向的分速度 m/s
H_{min} ——最小净水头 m	v_{u2} —— v_2 在圆周方向的分速度 m/s
H_{pj} ——平均净水头 m	v_z ——绝对速度的轴向分速度 m/s
H_r ——设计净水头 m	w_1 ——转轮叶片进口水流的相对速度 m/s
H_s ——名义吸出高度 m	w_2 ——转轮叶片出口水流的相对速度 m/s
h_s ——理论吸出高度 m	Z ——断面模数 cm ³
I ——惯性矩 cm ⁴	z_0 ——导叶数
k ——涡壳常数 m ² /s	z_{0M} ——模型水轮机导叶数
L ——轴瓦高度 mm	z_1 ——转轮叶片数
l ——翼弦长 mm	α_0 ——导叶出口角 度
M_K ——扭转力矩 kgf·cm	γ ——水的重度 kgf/m ³
M_S ——水力矩 kgf·m	η ——水轮机的总效率
M_t ——摩擦力矩 kgf·m	η_s ——水力效率
N ——功率 kW	η_t ——水轮机的真机效率
N'_1 ——单位功率 kW	π ——圆周率
N_r ——水轮机额定功率 kW	σ ——应力 kgf/cm ²
N_t ——水轮机功率 kW	$[\sigma]$ ——许用应力 kgf/cm ²
n ——转速 r/min	σ_M ——模型水轮机汽蚀系数
n_0 ——导叶相对偏心距	σ_p ——装机汽蚀系数
n'_1 ——单位转速 r/min	τ ——剪切应力 kgf/cm ²
n'_{10} ——最优单位转速 r/min	φ ——转轮叶片转角 度
n'_{1r} ——单位飞逸转速 r/min	φ_0 ——涡壳最大包角 度
n'_{1r} ——设计单位转速 r/min	ω ——角速度 1/s
n_R ——飞逸转速	∇ ——高程 m

目 录

编辑说明

常用符号表

第1章 概 述

- 1 水力发电与水轮机75-1
 - 1.1 水力发电75-1
 - 1.2 水轮发电机组75-1
- 2 水轮机的分类和型号75-2
 - 2.1 分类75-2
 - 2.2 型号75-2
 - 2.3 转轮的标称直径75-2
- 3 各种水轮机的总体结构与性能特点75-3
 - 3.1 混流式水轮机75-3
 - 3.2 轴流式水轮机75-3
 - 3.3 斜流式水轮机75-3
 - 3.4 贯流式水轮机75-3
 - 3.5 可逆式水泵水轮机75-4
 - 3.6 切击(水斗)式水轮机75-13
 - 3.7 斜击式水轮机75-14
 - 3.8 简易微型整装水轮发电机组75-14

第2章 水轮机的基本方程式、 汽蚀和振动

- 1 功率与水头75-15
- 2 水轮机的基本方程式75-15
 - 2.1 基本方程式75-15
 - 2.2 流量调节方程式75-16
- 3 相似关系与比转速75-16
 - 3.1 单位参数75-16
 - 3.2 比转速75-17
- 4 汽蚀75-17
 - 4.1 汽蚀现象75-17
 - 4.2 汽蚀系数75-17
 - 4.3 吸出高度75-18
 - 4.4 汽蚀破坏部位75-19
 - 4.5 减轻汽蚀损坏的途径75-19
- 5 振动及其处理75-19

- 5.1 尾水管中涡带引起的振动75-20
- 5.2 卡门涡列引起的振动75-20
- 5.3 转轮止漏通道压力变化引起的振动75-21
- 5.4 转轮入口处压力脉动引起的振动75-21
- 5.5 切击(水斗)式水轮机尾水上涨引
起的振动75-21
- 5.6 水斗缺口排流引起的振动75-21

第3章 反击式水轮机主要参数的 选择与计算

- 1 转轮的特性参数75-22
- 2 主要参数的选择和计算75-22
 - 2.1 设计单位流量的选择75-23
 - 2.2 转轮直径75-25
 - 2.3 真机效率75-25
 - 2.4 额定转速75-25
 - 2.5 吸出高度和安装高程的确定75-25
 - 2.6 飞逸转速75-26
 - 2.7 水推力75-27

第4章 混流式和轴流式水轮机 转轮的水力设计

- 1 轴流式水轮机转轮的水力设计75-27
 - 1.1 转轮通道75-27
 - 1.2 转轮叶片数和轮毂比75-27
 - 1.3 叶片的水力设计75-28
 - 1.4 转轮的水力性能与叶栅几何参数
的关系75-30
- 2 混流式水轮机转轮的水力设计75-32
 - 2.1 转轮通道75-32
 - 2.2 水力设计75-33
 - 2.3 提高水力性能的主要途径75-35

第5章 反击式水轮机主要零部件 的设计和计算

- 1 涡壳75-37
 - 1.1 结构75-37
 - 1.2 混凝土涡壳的水力设计75-37

75-VI 目 录

1.3 金属涡壳的水力设计	75-38
1.4 金属涡壳的强度计算	75-39
2 座环	75-40
2.1 结构	75-40
2.2 尺寸系列	75-42
2.3 固定导叶的水力设计	75-43
3 尾水管	75-44
3.1 尾水管回收的能量	75-44
3.2 弯肘形尾水管	75-44
3.3 直锥形尾水管	75-46
4 导水机构	75-47
4.1 导叶开口	75-47
4.2 结构	75-47
4.3 尺寸系列	75-50
4.4 导叶	75-52
4.5 导水机构接力器的选择	75-53
5 转轮	75-55
5.1 混流式转轮	75-55
5.2 轴流式转轮	75-56
6 主轴	75-61
7 立式水轮机的导轴承及其密封装置	75-62
7.1 水润滑橡胶轴承	75-62
7.2 筒式自循环稀油润滑轴承	75-63
7.3 分块瓦自循环稀油润滑轴承	75-64
7.4 轴承密封	75-65
8 卧式水轮机	75-67
8.1 结构	75-67
8.2 轴承布置方式	75-67
8.3 卧式机组的轴承	75-67
8.4 飞轮	75-70
9 水轮机的附属装置	75-70
9.1 真空破坏阀	75-70
9.2 补气装置	75-71
9.3 涡壳排水阀	75-72

第6章 冲击式水轮机

1 切击(水斗)式水轮机主要参数的选择和计算	75-73
2 切击(水斗)式水轮机的转轮	75-74
3 喷嘴	75-74

3.1 喷嘴流道	75-74
3.2 喷嘴结构	75-74
4 切击(水斗)式水轮机的机壳	75-76
5 切击(水斗)式水轮机的制动喷嘴	75-77
6 斜击式水轮机	75-77

第7章 调速器、油压装置及机组自动化

1 自动控制系统与机组操作程序	75-79
1.1 自动控制系统	75-79
1.2 机组操作	75-79
1.3 机组保护	75-81
2 调速器	75-81
2.1 功用与基本原理	75-81
2.2 规格等级与主要技术数据	75-82
2.3 机械液压调速器	75-83
2.4 电气液压调速器	75-84
2.5 性能与参数调整	75-87
2.6 调速器的选择	75-88
3 油压装置	75-89
3.1 组成及主要部件	75-89
3.2 油压装置的选择	75-91
3.3 常用数据	75-92
4 自动化	75-92
4.1 速度保护及制动	75-92
4.2 温度保护	75-94
4.3 液位控制	75-94
4.4 YSX型油混水信号装置	75-95
4.5 JX型剪断销信号器	75-96

第8章 水轮机的主要阀门

1 进水阀的作用	75-96
2 蝴蝶阀	75-96
3 球形阀	75-98
4 蝴蝶阀和球形阀的操作机构	75-98
5 阀门附件	75-98
5.1 旁通阀	75-98
5.2 空气阀	75-98
5.3 伸缩节	75-98
6 进水阀的自动控制系统	75-101

6.1 蝴蝶阀自动控制系统	75-101
6.2 球形阀自动控制系统	75-101
7 调压阀	75-102

附 录

附录 I 水轮机模型转轮综合特性曲线与飞

逸特性曲线	75-105
附录 II 中、小型反击式水轮机的使用范围图	75-110
附录 III 大、中型反击式水轮机的重量估算	75-111
参考文献	75-112

第1章 概 述

1 水力发电与水轮机

1.1 水力发电

水轮机是水力原动机，近代水轮机主要用作水力发电的原动机。

图 75·1-1 为坝后式水电站。发电时，水由上游水库经引水管 1，进水阀门 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，水能转换为水轮机转轮的旋转机械能，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。

1.2 水轮发电机组

大中型水轮发电机组包括下述主要设备：

水轮机 将水能转换为机械能；

发电机 将机械能转换为电能；

励磁设备 供给发电机转子磁极直流励磁电源；

调速器 控制机组开、停机，或在给定的负荷

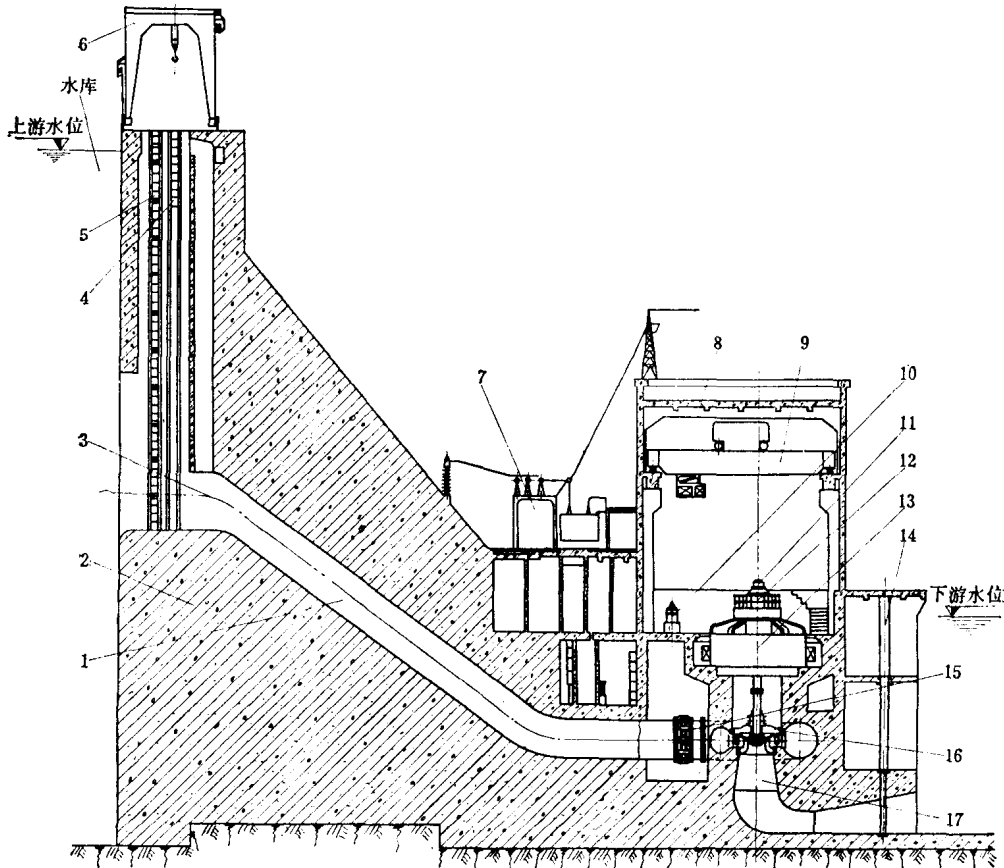


图75·1-1 坝后式水电站剖面图

- 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—电厂厂房 9—吊车 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—进水阀门 16—水轮机 17—尾水管

下以额定转速稳定运行;

永磁机 供给调速器测速电源及发出各种转速控制信号;

油压装置 供给调节、操作系统所需的压力油;
自动化系统 完成操作与事故保护。

有的电站还装有进水阀门,在机组较长时间停机、检修或发生事故时用以切断水流。

2 水轮机的分类和型号

2.1 分类

按水流作用原理分:

反击式 同时利用水流的动能和势能;

冲击式 利用水流的动能。

按转轮区水流相对于水轮机轴的流动方向分:
混流式、轴流式、贯流式、斜流式、切击(水斗)式、斜击式、双击式等。

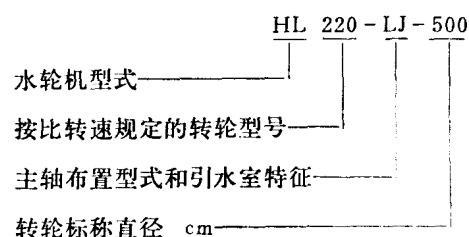
另外,轴流式和贯流式水轮机按结构特征分:

转桨式 转轮叶片可转动;

定桨式 转轮叶片不能转动。

2.2 型号

反击式水轮机的型号示例



对于可逆式水泵水轮机,在水轮机的型式代号后加字母“N”。

冲击式水轮机的型号示例

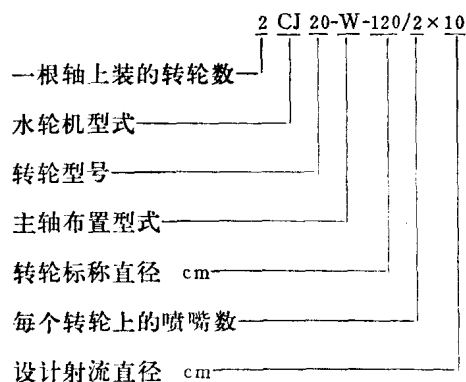


表75-1-1 水轮机型式与代号

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

表75-1-2 引水室特征与代号

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

立轴与卧轴布置分别以字母“L”及“W”表示。

2.3 转轮的标称直径(图75-1-2)

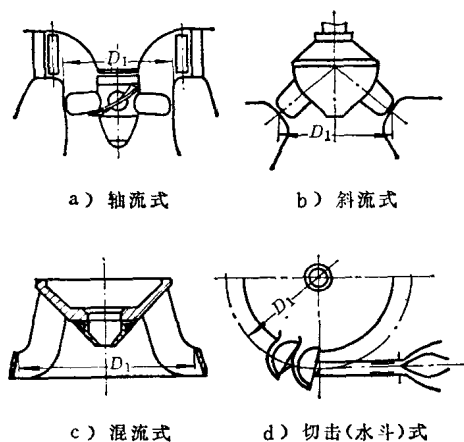


图75-1-2 转轮标称直径

对于轴流式和斜流式,指与转轮叶片轴心线相交处的转轮室内径。

对于混流式,指转轮下环或底环流道的最小直径。

对于切击式,指转轮水斗与射流中心线相切处节圆直径。

反击式转轮直径 D_1 的尺寸系列 cm:

	25	30	35	42(40)	50	60	71	84(80)
100	120	140	160	180	200	225	250	275
300	330	380	410	450	500	550	600	650
700	750	800	850	900	950	1000		

括弧内尺寸仅适用于轴流式转轮。

3 各种水轮机的总体结构与性能特点

3.1 混流式水轮机(图75·1-3~6)

是一种采用最多的水轮机。适用水头:大中型的为30~700 m;小型的为5~200 m。其比转速 $n_s = 50 \sim 300$,比冲击式高;汽蚀系数比轴流式小;满负荷时效率高。

低水头大容量混流式水轮机的转速低,尺寸大,要重视大型零部件的加工、运输以及结构刚度问题。

高水头混流式水轮机(图75·1-6)的汽蚀、磨损和振动问题比较突出,转轮宜用不锈钢或其他抗汽蚀材料制造,导水机构有关部位要采取抗磨和防止间隙汽蚀的措施。为减少容积损失,转轮一般采用梳齿形止漏装置,并且上冠与下环上的梳齿布置在相同直径的圆周上。有时还要考虑拆去尾水管锥管段后即可将转轮拆出进行检修的可能性。

3.2 轴流式水轮机

适用水头:转桨式为3~80 m,定桨式为3~70 m。比转速 $n_s = 200 \sim 850$,比混流式高,但汽蚀系数大,装机高程较低。在甩负荷过程中易发生抬机现象,常用顶盖补气、导叶分段关闭或加设止推装置等方法加以防止或限制。叶片及其边缘和转轮室内壁容易产生汽蚀,常采取抗汽蚀措施。低水头轴流式水轮机过流量大,要注意尾水管的能量回收;但尾水管和涡壳的平面尺寸不宜过大,以免增大机组间距。

为便于在不拆除顶盖和导叶的情况下拆出转轮检修,一般设计成支持盖和顶盖分离的结构。

轴流转桨式水轮机(图75·1-7)的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,但结构较复杂, $D_1 < 1.8$ m时不宜采用。

轴流定桨式(图75·1-8)的轮毂比小,设计工况的过流能力和汽蚀性能比转桨式有所改善。但平均效率低,适用于低水头小容量机组或水头和负荷变化不大的多机组电站。一般不采用在停机时调整叶片转角的结构。

3.3 斜流式水轮机(图75·1-9)

适用水头40~120 m, $n_s = 150 \sim 350$ 。比混流式平均效率高,对水头、负荷变化的适应性好;比轴流式汽蚀系数小,叶片强度和受力条件较好,使用水头较高。实践证明,采用锥形导水机构对水力和厂房布置好处不大,却给制造和维护检修带来不便。目前多采用径向导水机构。转轮叶片采用刮板接力器操作,有利于简化传动机构。确定叶片端面和转轮室的间隙时,要综合考虑容积损失和在水推力作用下转动部分下沉引起的间隙变化,并采取监视和调整措施。由于这种水轮机的转轮体大,喉管小,结构和制造复杂,在水头和负荷变化不大的情况下,一般不宜采用。

3.4 贯流式水轮机

适用水头一般小于20 m, $n_s = 600 \sim 1000$ 。由于在导叶和转轮之间的水流无变向流动,又采用直锥形尾水管,故效率高,过流能力大,比转速高,便于把机组布置在坝体内。但由于适用水头低,电站投资和机组单位千瓦金属消耗随水头降低而增加,使大容量贯流式水轮机的发展受到一定限制。

贯流式机组的飞轮力矩较小,必要时可增设飞轮或采取其他措施,保证调节稳定性。

小型贯流式水轮机导轴承一般采用滚动轴承,大、中型机组采用滑动轴承。

明槽贯流定桨式(图75·1-10):适用水头 $H \leq 6$ m, $D_1 \leq 0.6$ m。多用于渠道落差发电。一般无活动导叶,用水电阻进行功率调节。

虹吸贯流式(图75·1-11):适用于上游水位变化不大, $D_1 \leq 1$ m的电站。机组用真空抽气泵和电磁真空破坏阀开停机。功率用耗能调节。

轴伸贯流式(图75·1-12):适用水头 $H < 20$ m, $D_1 \leq 1.6$ m。机组可配用系列发电机,使用维护方便。为保持尾水管性能,一般采用前伸轴方式。

竖井贯流式(图75·1-13):发电机布置在竖井内,防潮及密封条件较好。运行稳定性较好。适用

于水头较高, 容量较大的中型贯流式机组。但水力性能不如灯泡贯流式。

灯泡贯流转桨式(图75·1-14): 适用水头 $H < 20$ m。由于流道平直, 适于作潮汐电站的可逆式水泵水轮机。发电机布置在灯泡形体内, 对防潮, 绝缘, 安装, 使用, 维护等需特殊考虑。为便于结构布置, 一般用于 $D_1 > 3$ m的机组上。为改善流道, 需缩小发电机尺寸, 对 $H < 6$ m, $N < 8000$ kW的机组可采用增速机构, 提高发电机转速。

3·5 可逆式水泵水轮机(图75·1-9)

一般用于扬水发电站, 利用系统低负荷时的剩余电力抽水蓄能, 在系统峰荷时发电。具有带负荷迅速灵活, 接近负荷中心等优点。近年来发展极为迅速。有混流、斜流、贯流可逆式水泵水轮机。目前正向高水头、大容量、高比转速方向发展。采用最多的是混流可逆式水泵水轮机, 适用水头100~600 m。

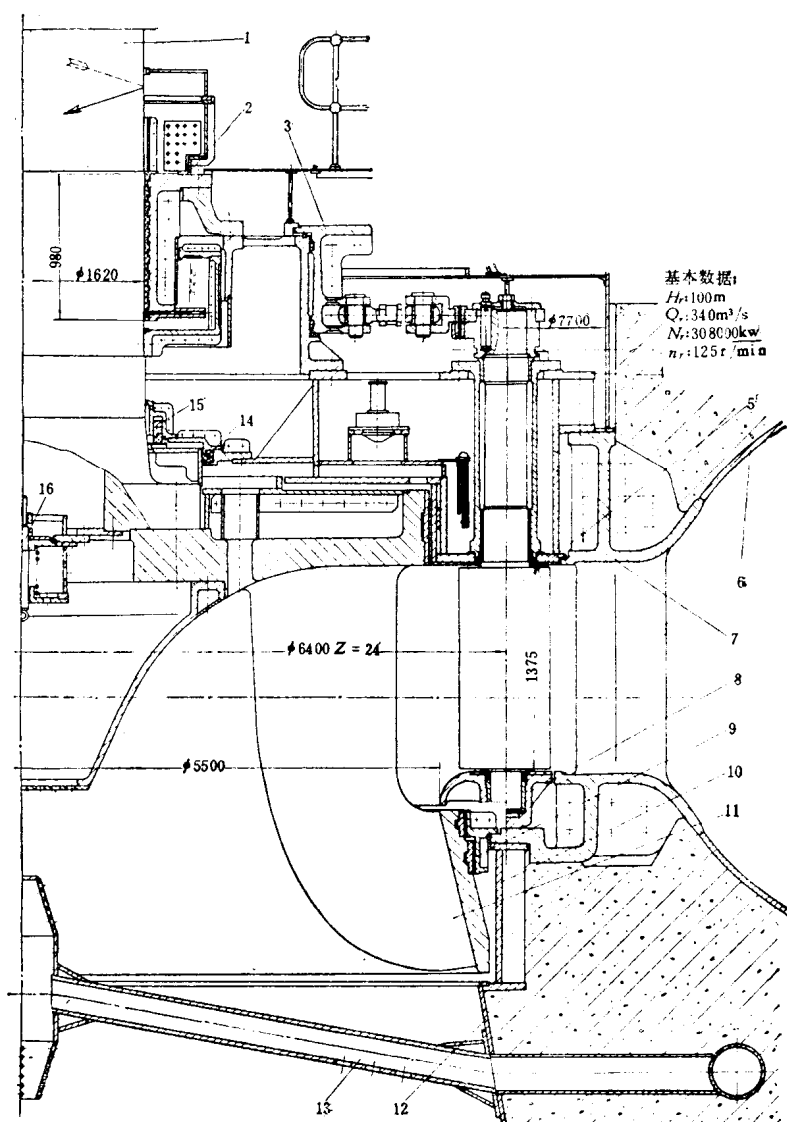


图75·1-3 300×10³ kW混流式水轮机剖面图

- 1—主轴 2—导轴承 3—控制环 4—顶盖 5—导叶 6—蜗壳 7—座环 8—底环 9—下止漏环 10—基础环 11—转轮 12—尾水管里衬 13—十字架补气装置 14—检修密封装置 15—水压式端面密封 16—补气阀

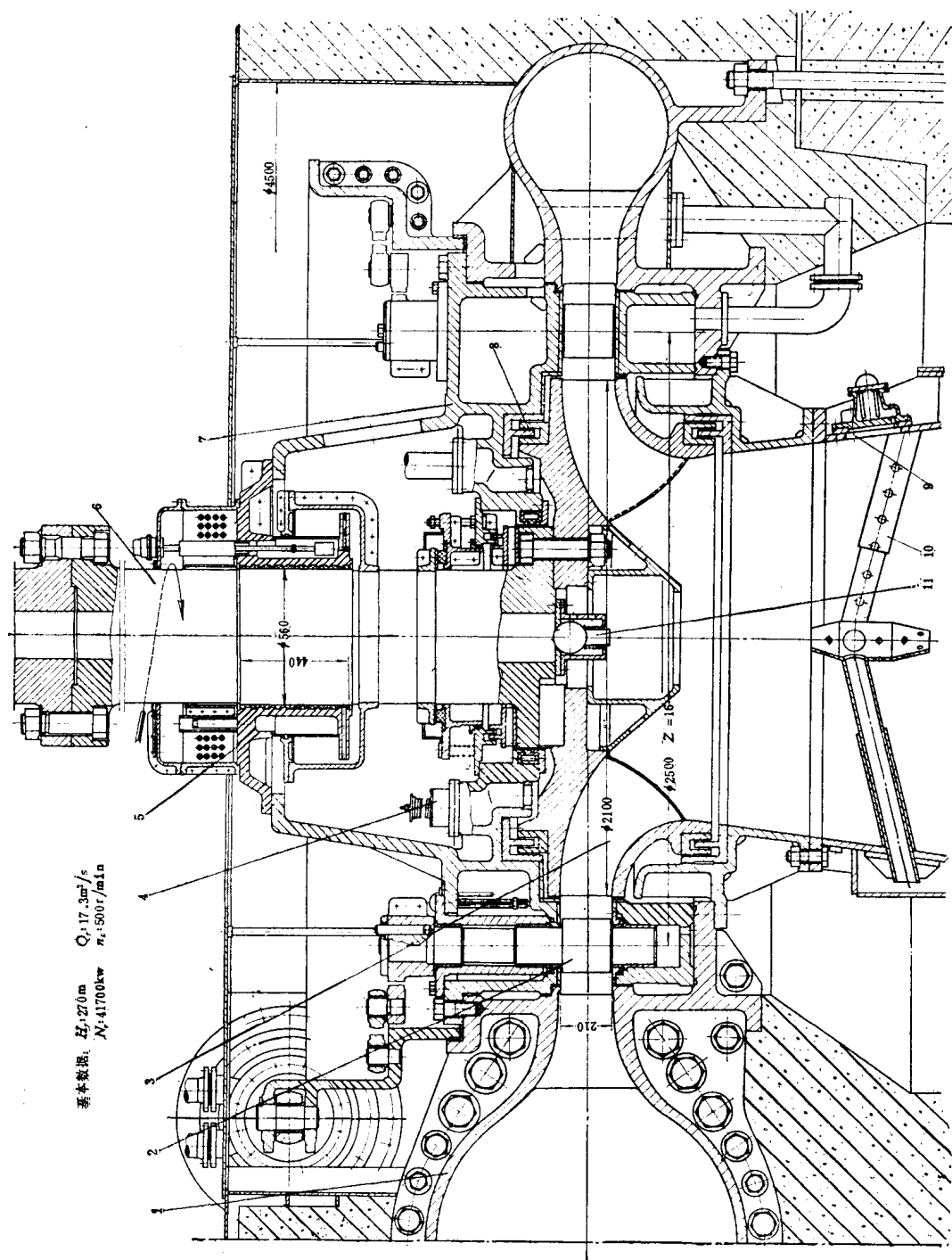


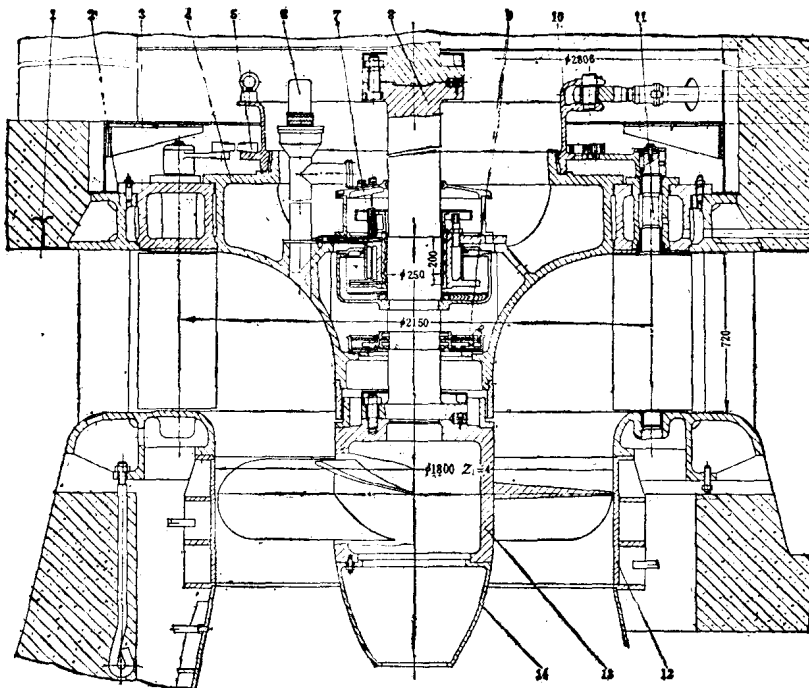
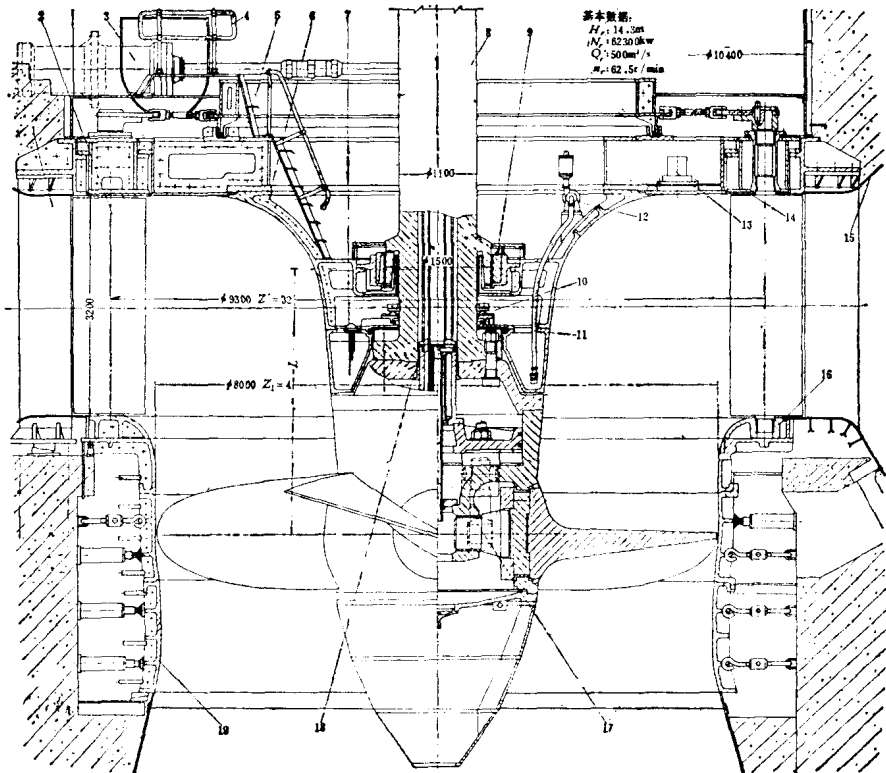
图75-1-6 HL100-LJ-210水轮机剖面图

1—涡壳座环 2—导叶 3—不锈钢铸造转轮 4—真空破坏阀 5—导轴承 6—主轴 7—顶盖 8—梳齿密封 9—尾水管 10—十字架补气装置 11—轴心孔补气阀

图75-1-7 ZZ560-LH

-800水轮机剖面图

- 1—固定导叶 2—导叶
3—接力器 4—地板扶梯
5—支持盖 6—导流锥
7—水位信号器
8—整锻主轴 9—导轴承
10—弹簧式端面密封
11—橡胶围带式检修密封
12—排除积水装置
13—真空破坏阀
14—顶盖 15—混凝土
蜗壳 16—底环 17—
转轮 18—操作油管
19—转轮室（分上环、
中环、下环）



基本数据: $H_r = 10\text{m}$, $Q_r = 16.9\text{m}^3/\text{s}$, $N_r = 1320\text{kW}$, $n_r = 250\text{r/min}$

图75-1-8 轴流定桨式水轮机剖面图

- 1—蜗壳 2—整铸的座环与底环 3—顶盖 4—支持盖
5—导叶传动机构 6—真空破坏装置 7—导轴承
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

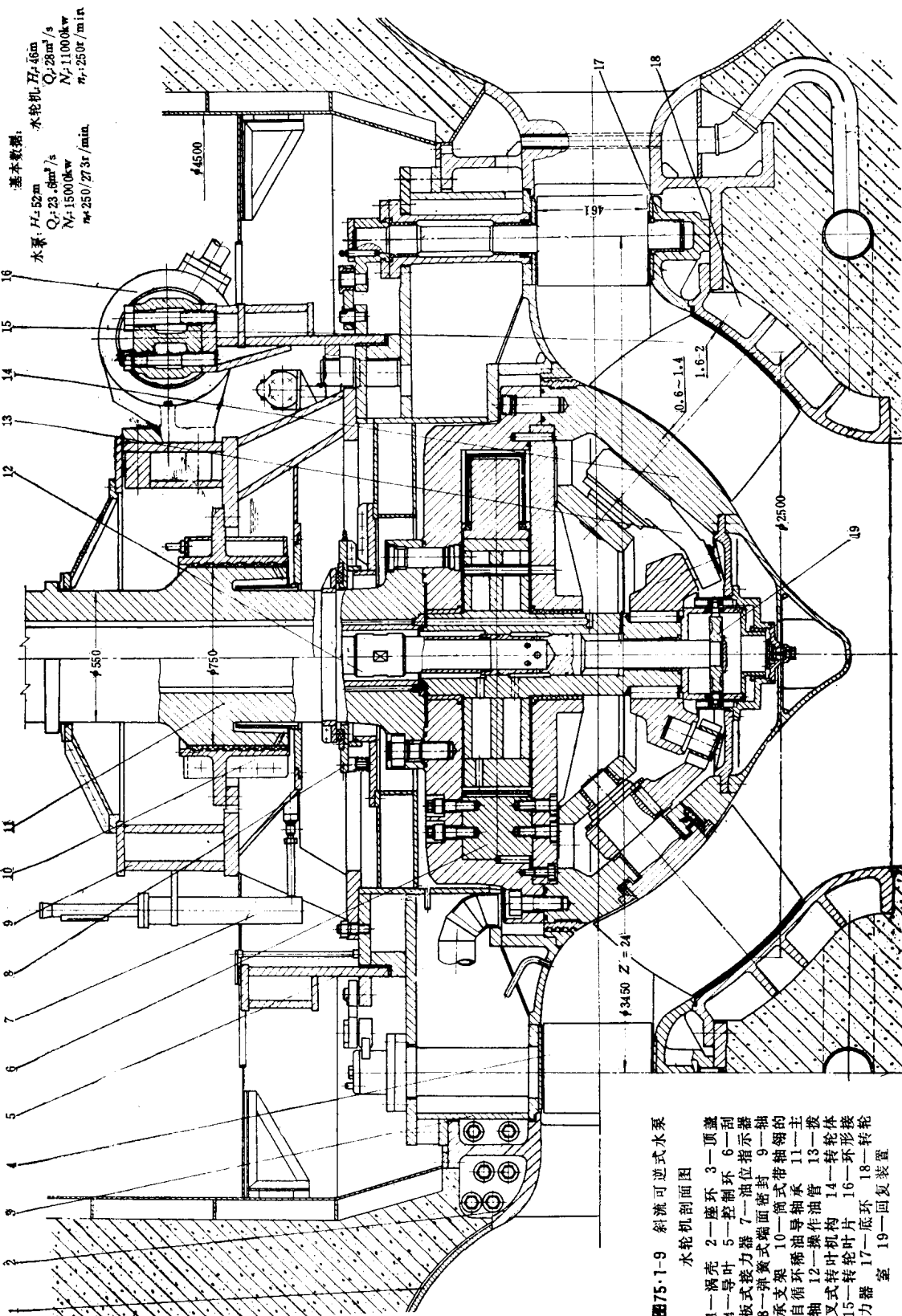


图75.1-9 斜流可逆式水泵
水轮机剖面图

1—蜗壳 2—顶环 3—顶盖 4—导叶 5—控制环 6—刮板式接力器 7—油位指示器 8—弹性式端面密封 9—轴承支架 10—筒式带轴轴承 11—主自循环油导轴承 12—操作油管 13—拨叉式转叶机构 14—转轮体 15—转轮叶片 16—一环形接力器 17—底环 18—转轮室 19—回装装置