

湖北省水利勘测设计院

主 编

小型水电站 机电设计手册

水力机械

水利电力出版社

小型水电站机电设计手册

水 力 机 械

湖北省水利勘测设计院 主编

水利电力出版社

内 容 提 要

《小型水电站机电设计手册》包括水力机械、电气一次、电气二次、金属结构四个分册。可供机组容量为500~6000千瓦、装机容量为12000千瓦以下的小型水电站设计参考。全套手册分别介绍小型水电站的水力机械、电气、金属结构的设计计算和设备的选择、布置，并附有计算实例及各种图表、设备主要规格及外形安装尺寸、工程典型图纸等。

本书系《小型水电站机电设计手册》的水力机械分册，系统地介绍了小型水电站水力机械的设计原则和计算方法，设备的选择和布置、设计所需的技术资料等。主要内容有小型水电站的水轮机、调速器、进水管、水轮发电机等设备选择、水轮机输水系统的调节保证计算、水机辅助设备系统的设计和选择、起重及机修设备的选择、厂房布置等。

书中列举了大量工程设计实例和设计所需要的常用数据、图表和参考资料，便于查阅和使用参考。

本手册可供从事小型水电站水力机械专业的技术人员使用，也可供安装、运行技术人员和有关院校师生参考。

小型水电站机电设计手册 水力机械

湖北省水利勘测设计院主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 43.5印张 1000千字

1985年12月第一版 1985年12月北京第一次印刷

印数0001—2900册 平装定价10.50元

书号 15143·5574

前 言

为了适应小型水力发电建设事业的发展,在总结我国小型水电站设计经验的基础上,编写了《小型水电站机电设计手册》,以满足机组容量为500~6000千瓦、装机容量为12000千瓦以下的小型水电站设计需要。本手册包括四个分册,内容为水力机械、电气一次、电气二次、金属结构。分别介绍小型水电站水力机械、电气、金属结构方面的设计原则和计算方法、设备的选择和布置、计算实例、设计所需的技术资料、图表、设备主要规格及外形安装尺寸、典型工程图纸等。供从事小型水电站设计的技术人员使用,也可供安装、运行技术人员和有关院校师生参考。由于篇幅有限,手册中对产品原理一般不作介绍,计算公式不作推导。

水力机械分册共分七章,主要内容为小型水电站的水轮机、调速器、进水阀、水轮发电机等设备选择、水轮机输水系统的调节保证计算、水机辅助设备系统的设计和选择、起重及机修设备的选择、厂房布置等。

水力机械分册由湖北省水利勘测设计院主编,华北水利水电学院参加编写。其中第一章第一至四节由华北水利水电学院谢庆涛编写,第二章第一节励磁部分由湖北省水利勘测设计院鱼德仁编写,第三章第一节由华北水利水电学院寿梅华编写,第四章第一至三节由华北水利水电学院陈造奎和湖北省水利勘测设计院邹永楼共同编写,其余各章节均由湖北省水利勘测设计院邹永楼编写,湖北省水利勘测设计院参加编写的还有刘振全、王桂秀、勾国本、张美珍、周在东、倪晓辉等。全书由湖北省水利勘测设计院邹永楼、薛吉春统稿,由袁振纓审阅、定稿。

在编写过程中,许多省(区)的水利水电勘测设计院、中小型水轮机制造厂提供了设计资料;浙江省水利水电勘测设计院、湖南省水利水电勘测设计院、四川省水利勘测设计院、贵州省水利勘测设计院、新疆维吾尔自治区水利水电勘测设计院、河南省水利勘测设计院、陕西省水利水电勘测设计院、甘肃省水利水电勘测设计院、水利电力部昆明勘测设计院地方电站处、天津大学水利系、武汉水利电力学院动力系、清华大学水利系等单位对书稿进行了审查并提出了许多宝贵意见;编者还参考并采用了有关设计院和院校编写的讲义、书刊的部分内容,在此一并表示衷心感谢。

由于编者的经验不足,水平有限,调查研究不够深入,错误之处希望读者发现问题及时告知,以便再版时修订。

编 者

一九八四年三月

目 录

前 言

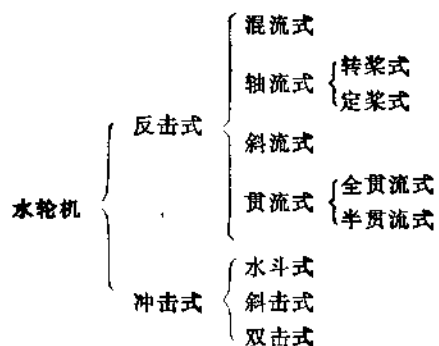
第一章 水轮机	1
第一节 水轮机的类型及结构形式	1
第二节 反击式水轮机的工作原理及基本参数	4
第三节 水轮机汽蚀及安装高程的确定	12
第四节 反击式水轮机的蜗壳和尾水管	15
第五节 水轮机选型	19
第六节 国产500~8800千瓦水轮机的基本数据、结构和安装尺寸选编	61
第二章 水轮发电机	112
第一节 水轮发电机的基本技术资料	112
第二节 国产500~8800千瓦水轮发电机的基本数据、结构和安装尺寸选编	123
第三章 水轮机的调速设备、进水阀和机组自动化元件	154
第一节 水轮机调速设备	154
第二节 进水阀	200
第三节 机组自动化元件	216
第四章 水力机械辅助设备	240
第一节 油系统	240
第二节 供排水系统	276
第三节 压缩空气系统	367
第四节 水力监测系统	392
第五章 起重及机修设备	407
第一节 主厂房起重设备	407
第二节 水电站的机修设备	444
第六章 阀门、管路附件及常用材料	465
第一节 阀门及管路附件	465
第二节 常用材料	519
第三节 国内已建电站水力机械辅助设备资料选编	544
第七章 厂房布置	570
第一节 概述	570
第二节 立轴机组水电站厂房布置	574
第三节 卧轴机组水电站厂房布置	583
第四节 厂房建筑和厂区布置	588
第五节 国内已建电站厂房资料选编	594

第一章 水 轮 机

第一节 水轮机的类型及结构形式

一、水轮机的类型

水轮机类型可归纳为：



各类型水轮机的基本特征及结构示意图列于表1-1。

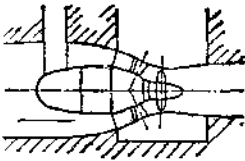
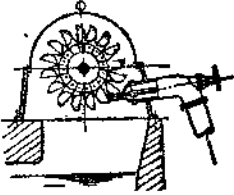
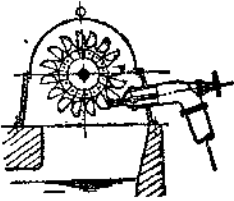
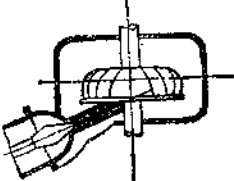
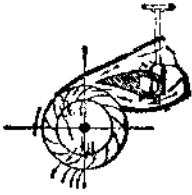
在已建水电站中，各类型水轮机适用的最大水头为：

混流式 672米， 斜流式 113.4米， 贯流式 21米，
轴流式 88米， 冲击(水斗)式 1772米

表 1-1 水 轮 机 的 基 本 特 征

类 型	反 击 式			
型 式	混 流 式	斜 流 式	轴 流 式	
			定 桨 式	转 桨 式
代 号	HL	XL	ZD	ZZ
结 构 示 意 图				
适 用 水 头 范 围 (米)	≤700	40~120	3~50	3~80
比 转 速 范 围 (米·千瓦)	50~300	100~350	250~700	200~850

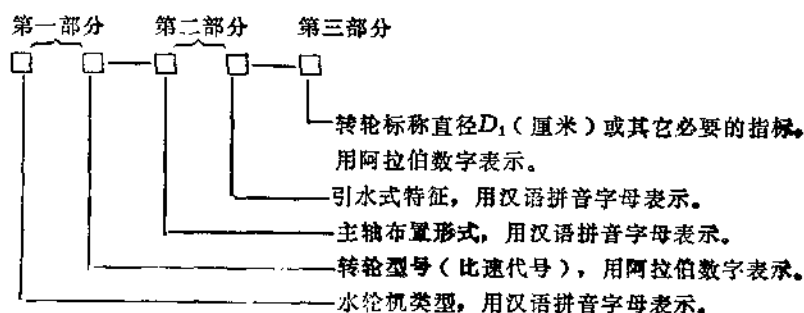
续表

类 型	反 击 式		冲 击 式		
型 式	贯 流 式		水 斗 式	斜 击 式	双 击 式
	定 桨 式	转 桨 式			
代 号	GD	GZ	CJ	XJ	SJ
结 构 示 意 图					
通用水头范围 (米)	2~30		>200	25~300	5~80
比转速范围 (米·千瓦)	<1000		5~35	30~70	35~150

二、水轮机牌号及标称直径

(一) 水轮机牌号

我国水轮机牌号由三部分代号组成，每一部分之间以“—”分开。其排列顺序及代表意义规定如下：



第一部分各类型水轮机型号的汉语拼音见表1-1；水泵-水轮机型号则在前面加“N”表示“可逆”。

转轮型号一律用统一规定的比转速代号，对未编入型谱的转轮，则采用带有单位代号的序号。

第二部分主轴布置形式及引水式特征的代表符号见表1-2。

第三部分中对于冲击式水轮机有特殊要求，具体表示方法为：

$$\frac{\text{水轮机标称直径}}{\text{作用在每个转轮上的射流数目} \times \text{射流直径}}$$

现将牌号表示法举例如下：

表 1-2

主轴布置形式及引水式特征的代表符号

名 称	代 号	名 称	代 号
立 轴	L	明 槽	M(MY)
卧 轴	W	罐 式	G
金 属 蜗 壳	J	竖 井 式	S
混 凝 土 蜗 壳	H	虹 吸 式	X
灯 泡 式	P	轴 伸 式	Z

注 MY—有压明槽。

(1) HL240-LJ-140 表示混流式水轮机, 转轮型号为240, 即比转速 n_s 为240。立轴, 金属蜗壳, 转轮标称直径为140厘米。

(2) CJ22-W- $\frac{92}{1 \times 11}$ 表示单转轮的水斗式水轮机, 转轮型号为22, 卧轴, 转轮直径为92厘米, 单喷嘴, 喷嘴射流直径为11厘米(CJ前无数字表示一根主轴上只有一个转轮, 称单转轮, 2CJ表示双转轮)。

(二) 水轮机标称直径 D_1

水轮机转轮标称直径 D_1 是表征水轮机尺寸大小的参数。[对于各类型水轮机标称直径 D_1 如图1-1所示。

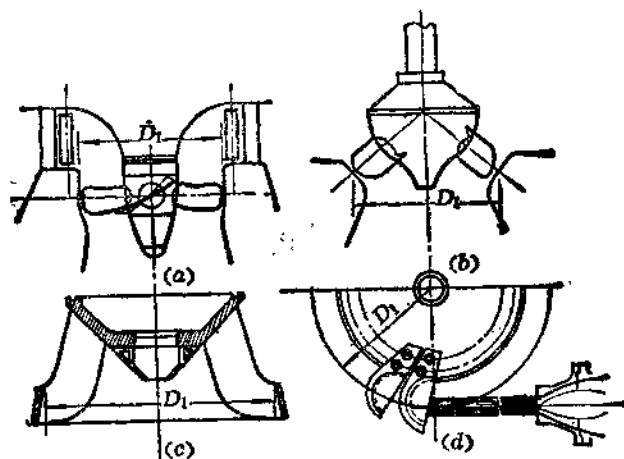


图 1-1 水轮机标称直径示意图

(a)轴流式; (b)斜流式; (c)混流式; (d)冲击式

水轮机转轮标称直径尺寸系列(厘米)规定为:

25、30、35、42、(40)、50、60、71、84、(80)、100、120、140、160、180、200、225、250、275、300、380、410、450、500、600(以下按每隔50厘米进级)……1000(厘米)。

上述带括号的数仅用于轴流式水轮机。

第二节 反击式水轮机的工作原理及基本参数

一、水轮机的工作参数

(一) 工作水头 H

在图1-2中, 电站进水口 $B-B$ 断面和尾水渠 $K-K$ 断面处水流所具有的单位能量分别为,

$$E_B = Z_B + \frac{p_B}{\gamma} + \frac{\alpha_B v_B^2}{2g}$$

$$E_K = Z_K + \frac{p_K}{\gamma} + \frac{\alpha_K v_K^2}{2g}$$

式中 Z ——几何高度,

p ——压力,

v ——水流平均流速,

γ ——水的比重,

g ——重力加速度,

α ——流速不均匀系数, 可取 $\alpha = 1$ 。

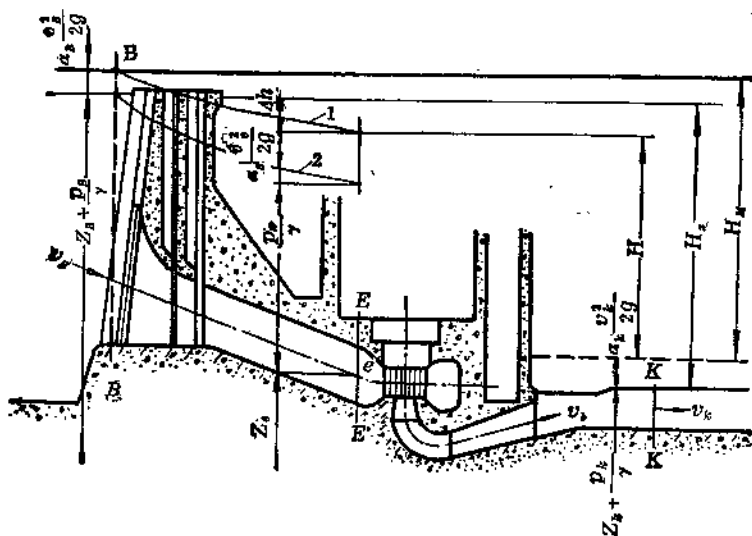


图 1-2 确定水电站的水头示意图

1—毛水头线, 2—净水头线

两断面水流的单位能量差称为电站的毛水头 H_M :

$$H_M = E_B - E_K$$

(1-1)

考虑到上、下游水面压力均系大气压力, 并忽略速度水头, 则有

$$H_M = E_B - E_K \approx Z_B - Z_K = H_s$$

式中 H_s ——上下游水位差。

电站毛水头近似等于上下游水位差。

水轮机工作水头 H (米)是指水流在水轮机进口 $E-E$ 断面与 $K-K$ 断面之间的单位能量差。即:

$$H = E_e - E_K = \left(Z_e + \frac{p_e}{\gamma} + \frac{\alpha_e v_e^2}{2g} \right) - \left(Z_K + \frac{p_K}{\gamma} + \frac{\alpha_K v_K^2}{2g} \right) \quad (1-2)$$

显然 H 要小于 $H_{\text{毛}}$ 。

$$H = H_{\text{毛}} - \Delta h \quad (1-3)$$

式中 Δh ——水轮机输水系统中的水力损失。

水轮机工作水头 H 随电站上下游水位改变及 Δh 的变化而经常变化。表征水轮机工作水头的有以下几个水头:

最大水头 H_{max} : $H_{\text{max}} = H_{\text{毛max}} - \Delta h$;

设计水头 H_d : 水轮机发出额定功率的最小水头;

最小水头 H_{min} : $H_{\text{min}} = H_{\text{毛min}} - \Delta h$;

平均水头 H_{av} : 一般为电能或时间加权时的水头, 表示水电站运行期间出现机会最多的象征水头。

$H_{\text{毛max}}$ ——上游最高发电水位与下游最低水位之差;

$H_{\text{毛min}}$ ——上游最低发电水位与下游最高水位之差。

(二) 流量 Q

在设计水头、额定功率工况下水轮机通过的流量(米³/秒)称为水轮机设计流量。

(三) 功率 N

水轮机主轴输出功率称为水轮机功率 N 。其表达式为:

$$N = 9.81 Q H \eta \text{ (千瓦)} \quad (1-4)$$

$$N = 13.33 Q H \eta \text{ (马力)} \quad (1-5)$$

式中 η ——水轮机效率。

在英制单位中, 水头 H_B 单位为英尺, 流量 Q_B 单位为英尺³/秒, 由下式计算水轮机功率 N ,

$$N = 0.1135 Q_B H_B \eta \text{ (马力)} \quad (1-6)$$

发电机发出额定功率 N_F 的水轮机轴功率, 称为水轮机额定功率 N_T , N_T 与 N_F 关系为:

$$N_T = \frac{N_F}{\eta_F} \quad (1-7)$$

式中 η_F ——发电机效率。小型发电机取 $\eta_F = 0.92 \sim 0.95$; 大中型发电机取 $\eta_F = 0.96 \sim 0.98$ 。

容量较大, 转速较高的发电机, η_F 取较大值。

(四) 效率 η

水轮机效率 η 表示水轮机对水流能量的有效转换程度。它包括以下三项: 水力效率 η_h 、容积效率 η_v , 机械效率 η_m 。

$$\eta = \eta_h \eta_v \eta_m \quad (1-8)$$

η 值随水轮机运行工况不同而异, 在最优工况时 η 值最高。

(五) 转速 n

转速表示水轮机每分钟转数, 单位为转/分。

与发电机直接连接的水轮机, 其转速取与水轮机最优工况转速相近的发电机同步转速。

二、水轮机性能及特性参数

(一) 水轮机相似关系及单位参数

原型水轮机(称真机)与模型水轮机的基本参数相似关系满足于以下公式,

$$\frac{n_M D_{1M}}{\sqrt{H_M \eta_{sM}}} = \frac{n_T D_{1T}}{\sqrt{H_T \eta_{sT}}} \quad (1-9)$$

$$\frac{Q_M \eta_{oM}}{D_{1M}^3 \sqrt{H_M \eta_{sM}}} = \frac{Q_T \eta_{oT}}{D_{1T}^3 \sqrt{H_T \eta_{sT}}} \quad (1-10)$$

$$\frac{n}{n_M} = \left(\frac{D_{1M}}{D_1} \right) \sqrt{\frac{H}{H_M}} \text{ 或 } n = n_M \left(\frac{D_{1M}}{D_1} \right) \sqrt{\frac{H}{H_M}} \quad (1-11)$$

$$\frac{N}{N_M} = \left(\frac{D_{1M}}{D_{1M}} \right)^2 \left(\frac{H}{H_M} \right)^{\frac{3}{2}} \text{ 或 } N = N_M \left(\frac{D_{1M}}{D_{1M}} \right)^2 \left(\frac{H}{H_M} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1-12)$$

式中脚标 T 、 M 分别代表真机和模型水轮机。

工程上常用的相似公式是用单位参数(单位转速 n'_1 、单位流量 Q'_1)来表征的, 即,

$$n'_1 = \frac{n D_1}{\sqrt{H}} \quad \text{或 } n = \frac{n'_1 \sqrt{H}}{D_1} \quad (1-13)$$

$$Q'_1 = \frac{Q}{D_1^3 \sqrt{H}} \quad \text{或 } Q = Q'_1 D_1^3 \sqrt{H} \quad (1-14)$$

单位转速 n'_1 、单位流量 Q'_1 是两个相似准则数, 处于相似工况的同一系列的水轮机, 其 n'_1 、 Q'_1 相等。 n'_1 、 Q'_1 在数值上分别等于该系列水轮机在直径 $D_1 = 1$ 米、水头 $H = 1$ 米时的转速和流量。各系列水轮机的单位参数值已由制造厂通过模型试验确定并绘入综合特性曲线中。在选型计算时, 用相似换算式(1-13)、(1-14)即可求出真机的实际参数。换算时需进行修正。

水轮机模型试验时最优工况相应的单位参数分别称为最优单位转速 n'_{10} 和最优单位流量 Q'_{10} 。

(二) 水轮机比转速 n_s

为了能以 N 、 H 、 n 等参数来综合表达水轮机的相似判别数, 引进另一个单位参数 n_s ,

$$n_s = \frac{n \sqrt{N}}{H^{\frac{5}{4}}} \quad (\text{米} \cdot \text{千瓦}) \quad (1-15)$$

式中 N ——水轮机功率(千瓦);

n ——水轮机转速(转/分);

H ——水轮机工作水头(米)。

由于 $n = \frac{n'_1 \sqrt{H}}{D_1}$ 、 $N = 9.81 Q H \eta = 9.81 Q'_1 D_1^3 \sqrt{H} H \eta$, 所以 n_s 还可以用 n'_1 、 Q'_1 米

表示

$$n_s = 3.13 n'_1 \sqrt{Q'_1 \eta_s} \quad (\text{米} \cdot \text{千瓦}) \quad (1-16)$$

n_s 在数值上等于工作水头为1米、水轮机功率为1千瓦时，水轮机所具有的转速，将此转速称为水轮机比转速（简称比速）。同系列水轮机在相似工况下，其 n'_1 、 Q'_1 值相同，其 n_s 值也必然相同。 n_s 是综合 n'_1 与 Q'_1 而表征某系列水轮机性能的一个重要参数。通常用下列两种工况的 n_s 值来表征某一系列的水轮机。

（1）设计水头、额定转速和额定功率相对应的工况点的比转速称为设计比转速。我国统一规定的、代表水轮机型号的比速代号（例如560、240等）就是该系列水轮机的设计比转速值。计算时，水头 H 单位为米，功率 N 单位为千瓦，效率统一取88%，取计算结果的整数；

（2）最优工况下的比转速称为最优比转速。

过去，在计算比转速时，式（1-15）中 N 的单位习惯用马力^①。现一律用千瓦。换算关系为：

$$n_{s(\text{千瓦})} = \frac{6}{7} n_{s(\text{马力})} \quad (1-17)$$

不同类型水轮机的比转速范围见表1-1。

不同系列水轮机的最优比转速及限制工况下的比转速值见水轮机转轮基本数据表1-6。

（三）水轮机的飞逸特性及飞逸转速

1. 水轮机的飞逸特性

水轮发电机组在运行过程中，若突然甩去全负荷，而调速系统或导水机构又失灵时，水流的能量将大部分用来使机组转速上升，直到稳定在某一最大值，此最大转速称为水轮机的飞逸转速。

同一系列水轮机的飞逸特性是通过模型试验获得的。在导叶各开度下，测得模型水轮机的飞逸转速，并根据公式（1-13）换算为 $H=1$ 米， $D_1=1$ 米的单位飞逸转速 n'_{fr} 。将 n'_{fr} 与导叶开口 a_0 的关系绘成曲线，称为水轮机的飞逸转速特性曲线。图1-3至图1-8为部分转轮的飞逸转速特性曲线。

2. 最大飞逸转速 n_{pmax}

工程上用水电站的最大水头确定水轮机的飞逸转速。飞逸转速可按下述计算求得，对于混流式或轴流定桨式水轮机：

$$n_{pmax} = \frac{n'_{fr} \sqrt{H_{max}}}{D_1} \quad (1-18)$$

式中 H_{max} ——真机最大工作水头；

D_1 ——真机转轮标称直径；

① 当 N 的单位为马力时，与（1-16）式相对应的计算式为：

$$n_s = 3.65 n'_1 \sqrt{Q'_1 \eta_s} \quad (\text{马力})$$

n'_{ir} ——单位飞逸转速。

n'_{ir} 的求取方法:

(1) 按综合特性曲线上的限制工况点对应的 a_0 再乘1.05系数所得模型导叶最大可能开口 a_{0max} 值, 再在飞逸特性曲线上查得 n'_{ir} ;

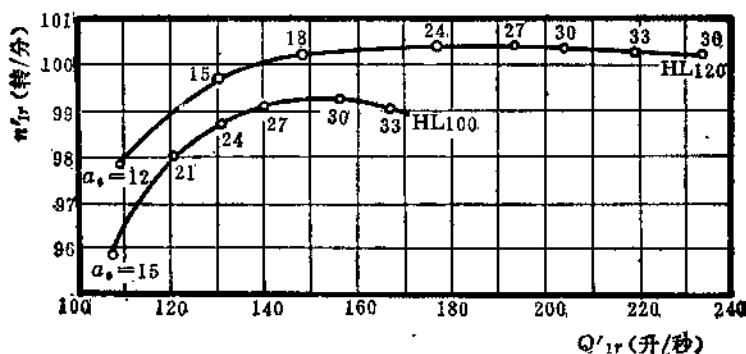


图 1-3 HL100 及 HL120 转轮飞逸特性曲线

试验条件: HL100 $D_1 = 400$ 毫米, $b_0 = 0.1D_1$, $Z_0 = 18$,
HL120 $D_1 = 380$ 毫米, $b_0 = 0.12D_1$, $Z_0 = 18$

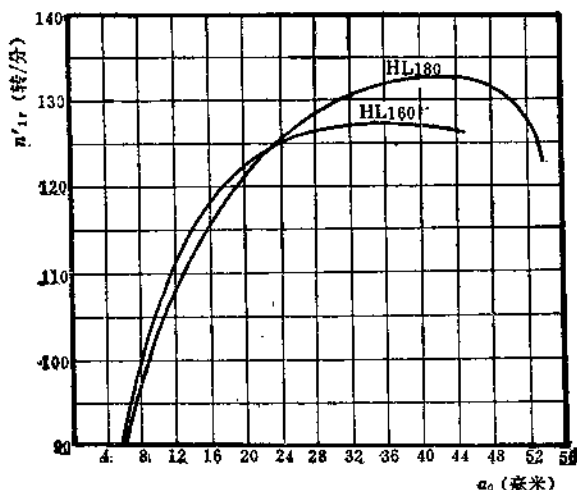


图 1-4 HL160、HL180 转轮飞逸特性曲线

试验条件: HL160 $D_1 = 460$ 毫米, $b_0 = 0.224D_1$, $Z_0 = 24$,
HL180 $D_1 = 460$ 毫米, $b_0 = 0.2D_1$, $Z_0 = 24$

(2) 已知真机导叶最大可能开口 a_{0T} 时, 由下式换算为模型导叶最大可能开口 a_{0max}

$$a_{0max} = a_{0T} \cdot \frac{Z_{0T}}{Z_{0M}} \cdot \frac{D_{0M}}{D_{0T}} \quad (1-19)$$

式中 Z_0 ——导叶数;

D_0 ——导叶中心圆直径;

脚标 T、M 分别为真机和模型的标注。

求出 a_{0max} , 再在飞逸特性曲线上查得 n'_{ir} 。

对于转桨式水轮机,

转桨式水轮机仅在调速机构失灵、导叶和转轮叶片协联关系破坏,且导叶和桨叶均能开启或关闭到任意位置时,才可能出现定桨(在一定 φ 角)曲线所示的飞逸转速。

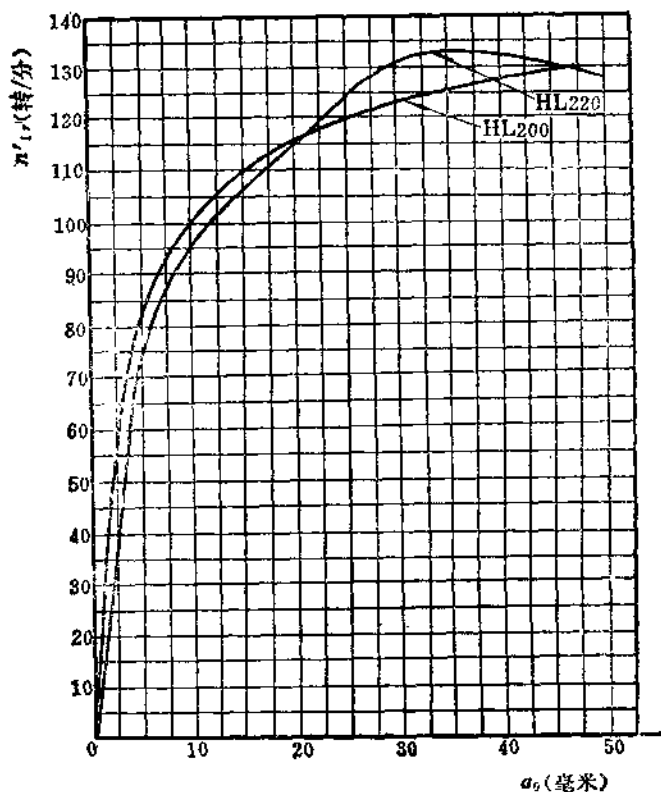


图 1-5 HL200、HL220转轮飞逸特性曲线

试验条件: HL200 $D_1 = 460$ 毫米, $b_0 = 0.2D_1$, $Z_0 = 24$;
HL220 $D_1 = 460$ 毫米, $b_0 = 0.25D_1$, $Z_0 = 24$

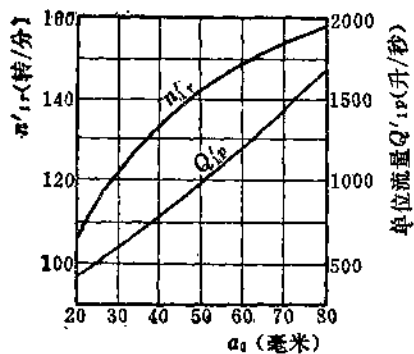


图 1-6 HL240转轮飞逸特性曲线

试验条件: $D_1 = 460$ 毫米, $b_0 = 0.365D_1$, $Z_0 = 24$

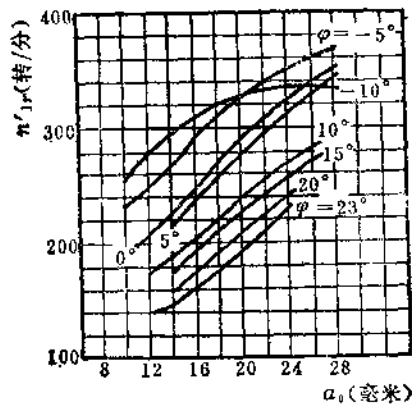


图 1-7 ZZ560转轮飞逸特性曲线

试验条件: $D_1 = 250$ 毫米, $b_0 = 0.4D_1$, $Z_0 = 24$

按协联关系破坏情况, 转桨式水轮机的飞逸转速计算方法同定桨式。即取模型导叶最大可能开口 $a_{0\max}$ 与叶片最小可能转角 $\varphi_{\min}$ 所对应的 n'_{1r} 进行计算。

按保持协联状况, 飞逸前机组为额定转速等, 转桨式水轮机最大飞逸转速的计算步骤如下:

(1) 将水头范围分成若干段, 利用公式(1-13)分别计算 $H_{\min}$ 、 H_p 、 $H_{\max}$ 等各水头所对应的单位转速 n_i 值。

(2) 在每一个 n_i 为定值情况下, 在综合特性曲线中找出若干个典型工况点(φ 、

a_0)。在定桨飞逸转速特性曲线上找出各工况点的 n'_{1r} 值, 绘出 $n'_{1r}=f(\varphi, a_0)$ 关系曲线。

(3) 以各曲线上最高点的 n'_{1r} 值及相应的水头 H , 按下式计算各水头下的最大飞逸转速 n_r :

$$n_r = \frac{n'_{1r} \sqrt{H}}{D_1} \quad (1-20)$$

绘出 $n_r=f(H)$ 关系曲线, 取其最高值为所求最高飞逸转速 $n_{r\max}$ 。如图1-9所示。

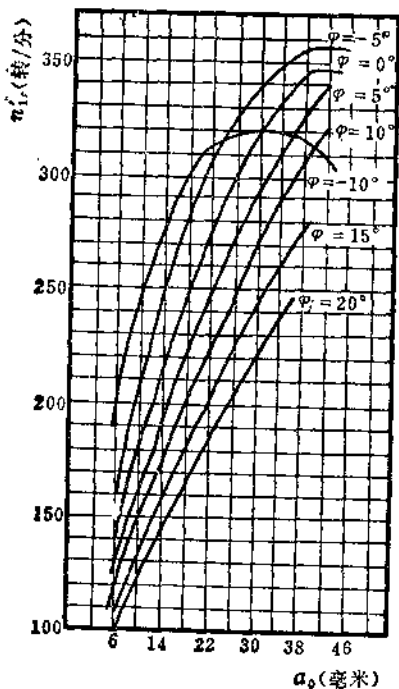


图 1-8 ZZ661转轮飞逸特性曲线

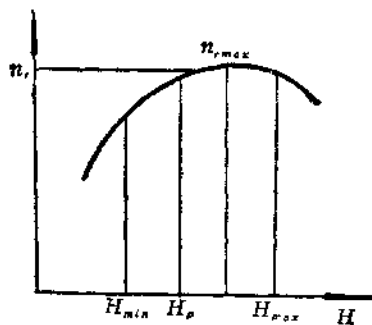


图 1-9 $n_r=f(H)$ 曲线

对于未绘出飞逸转速特性曲线的水轮机:

最大飞逸转速 n_r 的计算可近似用已知最大水头 $H_{\max}$ 和最高单位飞逸转速 n'_{1r} (见表1-6)按下式(1-21)求得:

$$n_r = n'_{1r} \frac{\sqrt{H_{\max}}}{D_1} \quad (1-21)$$

对于冲击式水轮机:

$$n_r = \frac{(n'_{1r}) \sqrt{H}}{D_1} = \frac{(60 \sim 70) \sqrt{H}}{D_1} \quad (1-22)$$

$$n'_{1r} = 60 \sim 70 \text{ (转/分)}$$

飞逸转速 n_r 与额定转速 n 的比值 $K_r = \frac{n_r}{n}$ 称为飞逸系数。各类水轮机的飞逸系数 K_r 大

致范围如下:

混流式、冲击式: $K_r = 1.7 \sim 2.0$;

转桨式(保持协联关系): $K_r = 2.0 \sim 2.2$;

转桨式(协联关系破坏): $K_r = 2.4 \sim 2.6$ 。

飞逸工况对水轮发电机组是有害的, 制造厂一般保证允许飞逸转速持续时间为 2 分钟。

为防止飞逸事故, 应当采取防飞逸措施, 如:

(1) 在引水系统中装设进水阀或快速闸门;

(2) 在调速器开度操作机构中, 加设事故配压阀。调速器失灵时, 事故配压阀动作, 操作接力器, 关闭导叶。

(3) 采用水电阻设施, 当机组突然甩负荷时投入, 可限制转速升高。

小型水电站究竟采用何种防飞逸措施合适, 须根据电站的具体情况来确定。

(四) 轴向水推力

反击式水轮机转轮在正常工作过程中, 会受到顺轴指向尾水管方向的轴向水推力 p_{oc} 的作用。 p_{oc} 对于水轮发电机组设计是重要的数据。其值按下式进行计算:

$$p_{oc} = K \frac{\pi}{4} D_1^2 H_{max} \quad (\text{吨}) \quad (1-23)$$

式中 K ——水推力系数。

K 与转轮型号、上冠的排水方式(混流式)或转轮叶片数(轴流式)有关。自表 1-3 或表 1-4 查取。

表 1-3 混流式水轮机的 K 值

转轮型号	HL310	HL240	HL230	HL220	HL200	HL180	HL160	HL120	HL110	HL100
K	0.37~ 0.45	0.34~ 0.41	0.18~ 0.22	0.28~ 0.34	0.22~ 0.28	0.22~ 0.28	0.20~ 0.26	0.10~ 0.13	0.10~ 0.13	0.08~ 0.11

注 水流含泥沙, 密封间隙有磨损, 或转轮直径较小, 止漏环间隙相对较大的结构取较大的 K 值。

表 1-4 轴流式水轮机的 K 值

叶片数	4	5	6	7	8
K	0.85	0.87	0.90	0.93	0.95

表 1-3、表 1-4 所列 K 值与表 1-6 的 K 值的计算式不同, 后者为前者的 $\frac{\pi}{4}$ 倍, 使用时应予以注意。

轴流式水轮机在甩负荷过程中, 当转速上升到最大值时, 轴向水推力为零。导叶继续关闭, 水轮机进入制动工况(即水泵工况), 水轮机由于桨叶排水产生升力, 出现反向水推力。对轴流式水轮机, 当反向水推力大于机组转动部分重量时, 将使转动部分上抬, 俗

称“抬机”。在停机过程中，若水轮机室真空度过大，引起反水锤，或反向水推力和反水锤两者兼而有之，也会导致“抬机”。“抬机”严重时，将使设备局部损坏。防止抬机的办法，有采用导水叶分段关闭、紧急停机时补入压缩空气或加大真空破坏阀面积、从结构上对允许的抬机高度加以限制、延长导叶和桨叶的关闭时间等。

第三节 水轮机汽蚀及安装高程的确定

一、水轮机汽蚀与汽蚀系数 σ

(一) 汽蚀与汽蚀破坏

汽蚀是一种复杂的物理、化学现象。它与水的汽化压力（水的汽化压力与温度、海拔高度的关系见表4-26、表4-27）和水中空气含量有关。还与水中含有的自由空气核子（未溶解的小气泡）的数量及大小、水的表面张力等有关。按汽蚀产生的原因和部位的不同，可分为叶型汽蚀、空腔汽蚀、间隙汽蚀和粗糙汽蚀四种。在这四种汽蚀中，影响最严重的是叶型汽蚀。

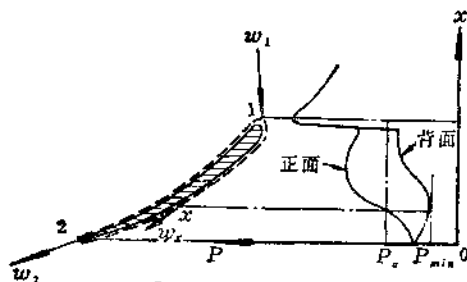


图 1-10 叶片压力分布图

w_1 —叶片进水边处的水流相对速度； P_0 —叶片进水边处的压力； P_{min} —叶片压力最低点处的压力； w_2 —叶片出水边处的水流相对速度

严重的汽蚀会破坏水轮机转轮和尾水管等过流部件，产生强烈的周期性噪音和振动，使水轮机运行不稳定和效率降低等。

(二) 水轮机汽蚀系数 σ

水轮机叶片压力分布见图1-10。

汽蚀系数 σ 表征水轮机的汽蚀性能，它是转轮叶片背面压力最低点 x 处水流动力真空与工作水头的比值。

理论上，水轮机汽蚀系数 σ 可用下式求得：

$$\sigma = \frac{w_1^2 - w_2^2}{2gH} + \eta_w \frac{v_z^2}{2gH} \quad (1-24)$$

式中 w_x ——叶片上压力最低点的水流相对速度；

w_2 ——叶片出水边处的水流相对速度；

v_z ——转轮叶片出水边处的水流绝对速度；

η_w ——尾水管恢复系数，为小于1的数。

从式(1-24)可以看出， σ 与决定水流相对速度的叶片形状及运行工况有关，并与水轮出口动能和尾水管恢复系数的大小有关。所以 σ 为水轮机汽蚀相似数据，同系列水轮机在相似工况下， σ 值应相等。

σ 数值通常采用能量法通过模型汽蚀试验确定。各系列水轮机在各种工况下的汽蚀系数 σ 值，以等汽蚀系数线的形式绘入水轮机综合特性曲线中；或将有关工况（最优工况，限制工况）下的汽蚀系数值列入转轮数据表1-6中。

(三) 水电站装置汽蚀系数 σ_s