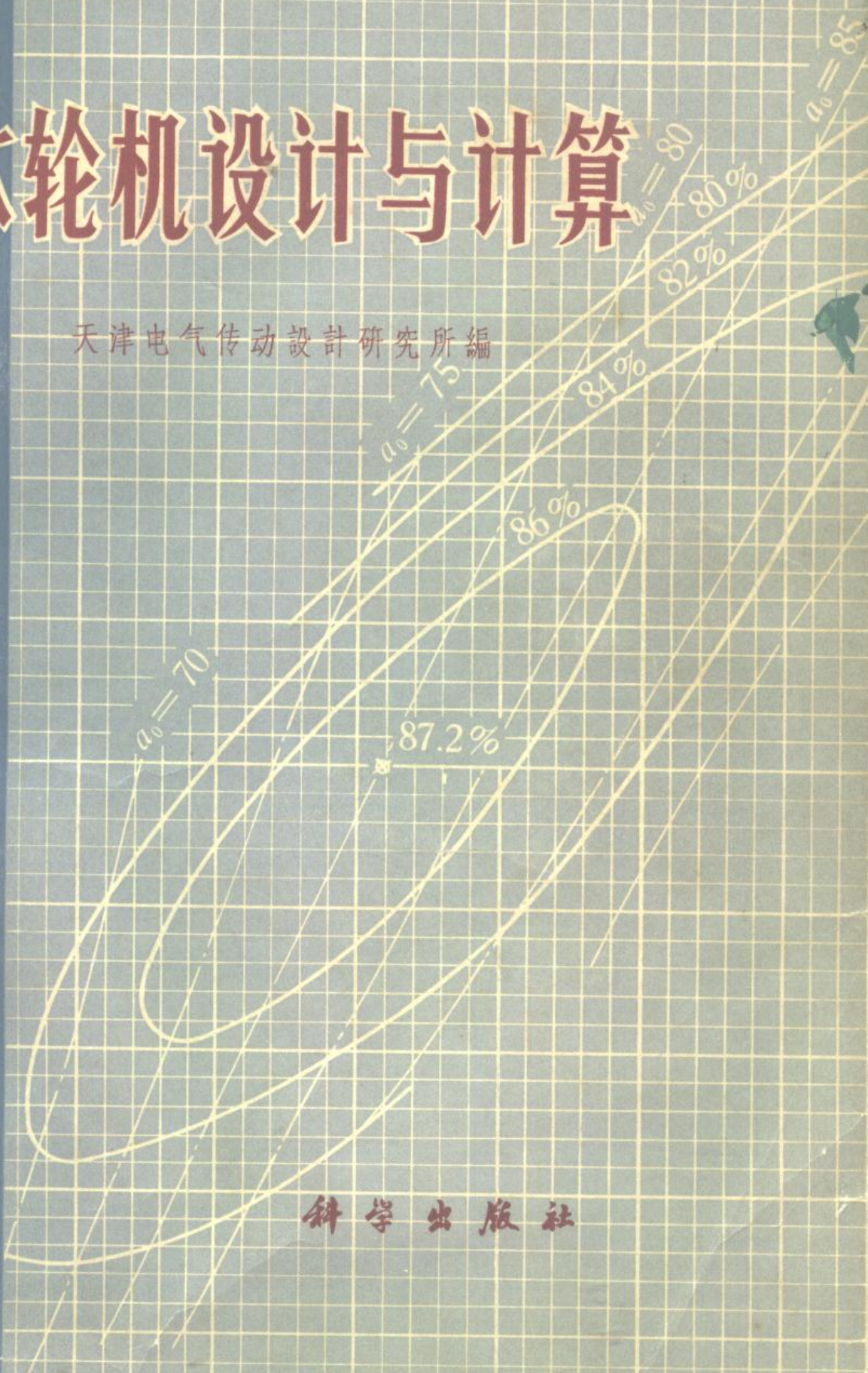


水轮机设计与计算

天津电气传动设计研究所编



科学出版社



水轮机设计与计算

天津电气传动设计研究所編

科学出版社

1971

内 容 简 介

本书简要介绍了水轮机工作原理、参数、类型和结构型式，并附有供选型用的各种水轮机基本参数、特性曲线及其使用范围图表；为方便设计，归纳了各种类型水轮机的各种设计方法、计算公式、参数选择以及设计所需要的各种曲线、图表和数据等；对配套用的调速器和自动化元件作了概要介绍；本书还搜集了近年来我国工人群众和革命技术人员研究创制出来的性能优良的水轮机转轮性能等资料。

本书可供从事水轮机设计、制造和维修的工人、技术人员，水电部门规划选型以及有关部门设计电站时参考，亦可供大专院校等有关专业师生作教学参考。

2R71/38
01

水 轮 机 设 计 与 计 算

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1971 年 12 月第一版

1971 年 12 月第一次印刷

定 价： 1.50 元

毛主席语录

**我们的方针要放在什么基点上？
放在自己力量的基点上，叫做自力更生。**

**社会主义革命和社会主义建设，
必须坚持群众路线，放手发动群众，大
搞群众运动。**

**中国人民有志气，有能力，一定
要在不久的将来，赶上和超过世界先
进水平。**

前 言

伟大领袖毛主席亲自发动和领导的无产阶级文化大革命的伟大胜利，为我国社会主义建设的迅速发展开辟了极其广阔的道路。全国人民高举“九大”团结胜利的旗帜，遵循毛主席“**中国应当对于人类有较大的贡献**”这一伟大教导，在阶级斗争、生产斗争和科学实验这三大革命运动中都取得了伟大胜利。

在当前，我国工农业生产新高潮正在不断高涨，作为国民经济各行各业动力之一的电力工业也出现了波澜壮阔的群众运动，其中水电建设的热潮更是汹涌澎湃。我国无论山峦重迭的高原山区还是江河滨海平原地区都蕴藏着极其丰富的各种各样的水力资源，我国各地人民在党的领导下，遵照毛主席“**社会主义革命和社会主义建设，必须坚持群众路线，放手发动群众，大搞群众运动**”的教导，狠批了叛徒、内奸、工贼刘少奇的反革命修正主义路线，大破专家路线、爬行主义、洋奴哲学和因循守旧的右倾保守思想，发扬“**自力更生**”“**艰苦奋斗**”的革命精神，敢想敢干，以“**一不怕苦，二不怕死**”的革命气概，战天斗地，劈山引水，一座座中小型水电站象雨后春笋般地涌现，有力地促进了当地工农业的发展。这些星罗棋布的中小水电站在战时还将成为轰不烂、炸不塌、摧不垮的小水电系统，它具有“**备战、备荒、为人民**”的伟大战略意义。

随着水电事业突飞猛进的发展，各地水轮机制造厂纷纷上马，原有的有关水轮机科技书籍比较烦琐，资料陈旧而分散，已经远远不能满足群众性大搞水电设备的需要。我们本着毛主席“**抓革命、促生产、促工作、促战备**”的伟大指示，将有关水轮机所常用的设计资料（公式、曲线、技术数据等），按设计与计算程序进行汇编，其中还搜集了一些我国工人阶级和革命技术人员在三大革命实践中所总结出来的水轮机设计计算经验和科研成果。我们在编写过程中，本着“少而精”和破旧立新的精神，破除了脱离生产实际的条条框框，避免了水轮机设计中繁琐的叙述和冗长累赘的理论推导，以便于设计者选择参考和使用，这本类似手册性质的汇编具有简明、扼要、实用的特点。

我们在汇编过程中，得到了有关工厂、科研单位的大力支持，在此表示衷心的感谢。由于我们水平有限，可能存在不少错误和不足之处，望广大工农兵，革命干部和革命技术人员予以批评和指正。

目 录

第一章 水轮机参数和水轮机选型	1
水轮机工作参数	1
水轮机工作原理	3
水轮机的相似律	4
水轮机模型试验意义	7
水轮机的汽蚀	7
水轮机的类型及结构型式	9
水轮机的系列和型谱	18
我国中小型反击式水轮机暂行系列型谱系列数确定的原则	19
我国中小型反击式水轮机暂行系列型谱转轮直径系列确定的原则	20
我国反击式水轮机所采用的转轮情况及转轮特性曲线	21
附：我国中小型反击式水轮机暂行系列型谱说明	21
第二章 反击式水轮机的水力计算	74
模型转轮的性能及主要技术数据	74
转轮尺寸换算	75
效率换算	75
单位流量修正	77
单位转速修正	78
异形部件对水轮机能量特性的影响	78
水轮机的技术数据	79
水轮机运转综合特性曲线	79
吸出高度的计算	81
飞逸转速计算	84
轴向水推力的计算	85
系列使用范围图表的绘制	85
导水机构主要尺寸的确定	86
金属蜗壳的计算	87
金属蜗壳的图解解拆法	89
不完全蜗壳的图解解拆法	92
单导叶水轮机的蜗壳	93
微型机组蜗壳	94
明槽引水室推荐	94
罐式引水室推荐	95
固定导叶设计	95
导水机构设计	96

单导叶设计	99
闸筒调节	99
轴向导叶设计	100
直锥形尾水管	106
喇叭管	107
弯肘形尾水管	107
卧式机组用的等截面弯管	109
卧式机组用的变截面弯管	109
贯流式水轮机的流道设计	110
尾水渠尺寸的确定	117
调速功计算	117
调节保证初步计算	119
调节保证精确计算	124
 第三章 冲击式水轮机的计算	 129
冲击式水轮机概论	129
改变比速的水斗式水轮机主要参数计算	130
喷嘴设计	133
喷针行程与射流直径关系的计算	135
喷针调速功计算	136
为减少喷针操作力(或调速功)所加弹簧力的确定	138
折向器操作力及调速功	138
制动喷嘴的确定	141
引水管、导水管及其曲率半径	141
转子室及机坑尺寸	142
安装高程	142
斜击式水轮机的特点及其应用范围	142
斜击式水轮机转轮	143
斜击式水轮机的喷嘴及其与转轮的相对位置	144
斜击式水轮机主要参数计算	144
斜击式水轮机机壳	145
双击式水轮机应用范围及其特点	145
双击式水轮机主要参数计算	150
双击式水轮机转轮设计	151
双击式水轮机喷嘴及导叶设计	151
双击式水轮机机壳及尾水管	152
双击式水轮机的分段调节	154
 第四章 水轮机机械计算	 155
按摩擦传递扭矩的主轴强度计算	155
按精配螺栓传递扭矩的主轴强度计算	157
卧式水轮机主轴(二支点)强度计算	159

卧式水轮机主轴(三支点)强度计算	160
三支点双悬臂等刚度轴横向振动计算	161
二支点双悬臂等刚度轴横向振动计算	165
三支点单悬臂变截面轴横向振动图解法计算	166
混流式转轮机械计算	170
轴流式转轮接力器容量计算	177
转轮叶片移动旋转中心计算	180
轴流式转轮叶片计算	181
轴流式转轮叶片轴的计算	187
轴流式转轮叶片固定螺栓计算	188
轴流式转轮叶片转臂计算	189
止推环计算	192
转浆机构连杆计算	193
耳柄与耳柄轴计算	193
操作架及抗磨板计算	194
转轮接力器活塞计算	195
转轮接力器杆计算	196
转轮接力器盖计算	197
转轮接力器缸计算	199
转轮体计算	199
转浆机构轴销和轴套计算	201
操作油管计算	201
叶片密封零件计算	204
水斗式转轮计算	206
飞轮计算	211
接力器最低工作油压计算	212
混流式水轮机顶盖计算	215
轴流式支持盖与顶盖计算	220
顶盖分半螺栓计算	221
小型明槽式水轮机顶盖计算	223
双耳平行式控制环计算	223
双耳交叉式控制环计算	226
单耳悬挂式控制环计算	232
三支点导叶计算	234
二支点导叶计算	240
内调节导叶计算	242
导叶套筒计算	243
整体式导叶臂计算	245
分体式导叶臂计算	246
导叶臂销计算	246
导叶臂键计算	247
连接板计算	247
剪断销计算	247

连杆计算	248
连杆叉头计算	248
喷针计算	249
喷嘴计算	250
套筒计算	251
折向器轴计算	252
折向器刀板连接销计算	253
作用于接力器上的力	253
接力器缸计算	254
缸盖计算	257
密封盖计算	258
活塞计算	258
锁定体计算	260
推拉杆计算	261
推拉杆销计算	261
操作喷针的推拉杆、叉头、销子(由外边接力器通过推拉杆操作喷针)计算	262
环形支架(当喷针通过外边接力器推拉杆操作时在喷针尾端的支架)计算	263
等厚度蜗壳强度计算	265
中大型焊接蜗壳计算	266
卧式水轮机座环强度计算	268
埋入混凝土的混流式水轮机座环强度计算	269
埋入混凝土的轴流式水轮机座环强度计算	274
引水管计算	278
三叉管交叉断面计算	281
机壳连接部分计算	281
水润滑轴承水量计算	282
液体润滑推力轴承计算	287
半干摩擦推力轴承计算	290
液体润滑径向轴承计算	290
油冷却器计算	294
水润滑轴承上部压力水槽计算	295
组合器凸轮设计	296
许用应力	301
 第五章 调速器、自动化元件的选择及蝴蝶阀计算	 304
中小型调速器的选择	304
大型调速器的选择	311
油压设备选择计算	314
电气液压调速器	317
射流调速器	321
水轮机组自动化元件概述	324
机组配套供应的自动化主要元件	325

机组转速监视装置	325
温度信号装置	328
压力信号装置	330
液位信号装置	332
液流信号元件	335
导叶保护销信号器	337
电磁阀及液压阀	338
蝴蝶阀计算	342

第一章 水轮机参数和水轮机选型

水轮机是靠自然界水能进行工作的动力机械。与其他动力机械相比,它具有效率高、成本低、环境卫生等显著优点。因此,随着国民经济的飞跃发展,全国各地充分利用水力资源,建立各种类型的水电站,已经并正在得到越来越广泛的重视。水轮机是水电站的重要组成部分,根据不同的水力资源和用电情况,选用不同类型的水轮机是众所周知的,但是具体又如何选呢?这一章就来简略介绍一下水轮机的基本参数、工作原理、水轮机的系列和型谱的建立与应用等方面的内容,使我们对水轮机的选型先有一个比较基本的了解。

建立多大规模的水电站,选用哪种类型的水轮机,不是凭主观的愿望所决定,更不可以超过客观情况所许可的条件去计划自己的行动,而必须“**按照实际情况决定工作方针**”,也就是说,我们必须对当地的情况做一番深入细致的调查研究工作以掌握第一手材料:首先搞清水力资源亦即水库径流调节的有关水文情况,从而拟定现实可行的合理的水工建筑物的设计方案,以便正确确定该电站的水头和流量的变化范围;再结合当地的动力系统负荷图的情况,进行全面地综合分析,才能够定出该电站的装机容量及选择相应的水轮机设备。

对于小水电站的水轮机设备,通常只作初步选择:根据电站具体情况尽量减少机组台数(最好不要少于两台);以电站总装机容量,除以机组台数,便得到每一台机组的出力(也称为单机出力);如按标准规格选择水轮机,可根据已知的单机出力和水头查有关的图表,则可立即定出所需要的水轮机。如果按图表定出几种水轮机,此时,可根据当地条件,从中选出一种最经济最合理的型式。

对于大电站水轮机的选择必须持慎重态度,要综合当地的各种有关资料和实际情况,首先需概括出若干个初步方案,这些方案在水轮机类型、机组台数、直径、转速和吸出高度等方面有所差别。通过对这些方案进行充分的分析和反复比较,特别是经济上和技术上的合理性以及吸出高度方面进行对比。**“有比较才能鉴别”**,从中选出最优方案。

水轮机工作参数

水轮机工作参数是表明水轮机对水流能量利用的特性值,主要有:出力 N (通常用瓩为单位);流量 Q (米³/秒);水头 H (米);每分钟转数 n (通常称转速,单位为转/分);特征尺寸 D_1 (通常表示转轮直径,单位为米)以及效率 η 。下面将分别说明之。

在电站(图 1-1)坝前水轮机进口处($B-B$ 断面)水流所具有的单位能量为

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

在尾水渠 $K-K$ 断面处水流所具有的能量为

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

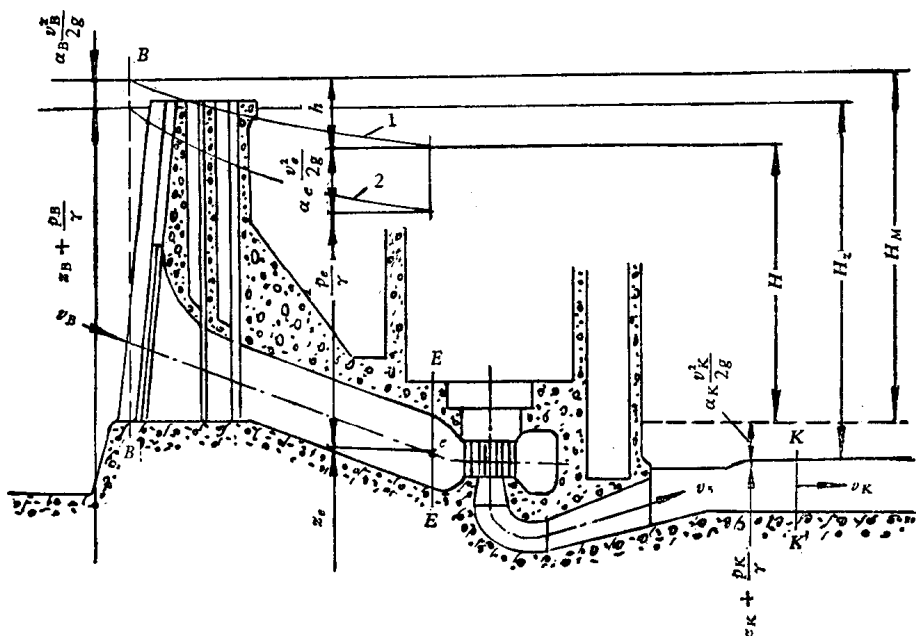


图 1-1

两断面的能量差就是我们通常所称之电站毛水头: $H_M = E_B - E_K$ 。一般水流表面均系大气压力, 即 $p_B = p_K = p_a$ (p_a ——大气压); 且 $B-B$ 、 $K-K$ 断面处的流速都是很小的。因此两断面的速度水头差可以忽略不计; 此时 $B-B$ 、 $K-K$ 两断面之间的单位能量差就是两断面的水位差, 我们称之为电站的装置水头 H_z 。装置水头 H_z 并非全部为水轮机所利用, 其中有一部分耗损于电站水工建筑物(引水渠、管道等)的阻力。真正为水轮机所利用的水头应该是水轮机进口断面 $E-E$ 和尾水渠 $K-K$ 断面之间的单位能量差, 这称为水轮机的工作水头 H :

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

从图 1-1 可以看出: 水轮机的工作水头 H 要小于电站装置水头 H_z 。它等于电站装置水头 H_z 减去引水和排水水工建筑物的水头损失。

具有水头为 H , 流量为 Q 的水流出力为 $QH\gamma$ (γ 为水的比重), 当通过水轮机时, 部分能量要消耗于水轮机的水力阻力和摩擦损失上, 水轮机的出力应该是: $N = \eta Q\gamma H$ 。式中小于 1 的乘数 η ——称有效利用系数(简称效率)。

水轮机在工作过程中效率 η 不是一个常数。它有两个特征效率: 当水轮机达到极限出力时的效率称为限制工况下的极限效率; 水轮机在最优工况下的效率称为最高效率, 它在极限出力的 70~90% 之间。

现在我们知道, 当已知水头 H 、流量 Q 、效率 η 时, 就可以算得出力 N 。但仅由 N 可以设计和制造出不同的水轮机。这些水轮机具有不同的转速 n 。其中若在给定的水头 H 下, 通过给定的流量 Q 和得到给定的出力下所工作的水轮机, 只有在某一转速下才能有高效率值。这个转速可以由下式来确定:

$$n = n_s \frac{H^{5/4}}{\sqrt{N(\text{马力})}} = \frac{6}{7} n_s \frac{H^{5/4}}{\sqrt{N(\text{瓩})}}$$

式中 n_s 称为比速。

由上式可以看出：在高水头、高比速及小出力下所得到的转速较高，反之则转速较低。换句话说，若保持适当的转速，在高水头和小出力下应当采用低比速水轮机，否则将达到不可允许的高转速；反之在低水头和大出力时应当采用高比速水轮机，否则将会得到不可允许的低转速。

现代水轮机一般都直接带动水轮发电机，通过直接传动或间接传动来带动加工机械的情况较少。我国电网所采用的标准频率为 $f = 50$ 周/秒。为得到 50 周/秒的标准频率必须满足下一条件：

$$np = 6000$$

式中： n ——发电机同期转速(转/分)； p ——发电机磁极对数。

这样，发电机同期转速 n (转/分)可取：3000、1500、1000、750、600、500、428.6、375、333、300……

对应的发电机磁极对数 p 为：2、4、6、8、10、12、14、16、18、20……

发电机的造价大约与转速的平方成反比。需要指出的是对水轮发电机来说：根本不采用同期转速 3000，因为当发生事故时，其飞逸转速对发电机转子是有危险的；转速 1500 采用于极小的水轮发电机；转速 1000 比较适用于小型水轮发电机。

为使水轮机能和发电机直接传动，水轮机的转速应符合发电机的同期转速。

水电站的出力取决于其水头和流量，而要决定每一台机组出力则还应计及水电站上的机组台数。显然，机组台数越少，每台机组的流量和出力就越大，每台机组的尺寸也就越大。对于机组的尺寸应以特征尺寸来表示，我们采取水轮机的基本工作机构——转轮的直径 D_1 作为水轮机的特征尺寸，根据该特征尺寸可以将试验用的模型水轮机的工作参数换算到所设计的较大型水轮机上。在实验室里作试验用的模型水轮机转轮直径 D_1 通常取为 0.25~0.46 米。

当电站要决定机组台数和机组尺寸时，应考虑到水电站水工建筑物的造价，例如在低水头电站，其主厂房要花费很多资金，而水轮机等设备的造价仅占水电站总投资的极小部分，那么降低厂房造价就成为主要矛盾，此时应取大尺寸机组，机组台数少些，厂房面积可以大大缩小，如果机组尺寸虽大些，但又不要求厂房的基础挖得很深，则厂房投资可大大减小。因此水轮机合理的直径 D_1 和机组台数应对厂房、机组造价以及水能利用的合理性等方面进行全面比较后才能确定。

综合上述工作参数的简要叙述，可以看出：它一方面取决于水力资源等自然条件，还取决于包括机组在内整个电站的经济性、合理性、可靠性以及技术上可能性等等。因此应根据每一电站的具体条件来选择水轮机。

水轮机工作原理

一股水流以速度 v_1 从叶片流道进口断面 ac 处进入，以速度 v_2 从出口断面 bd 处流出（见图 1-2）。在进口断面 ac 处，水流给流道的作用力为 $\frac{Q\gamma v_1}{g}$ 。在出口断面 bd 处，水流给流道的作用力是与 v_2 方向相反的力 $-\frac{Q\gamma v_2}{g}$ ，整股水流给流道的作用力就是二者的几

何合成力 P 。它对转轮中心产生一个力矩 M ，力矩 M 以下式表示：

$$M = \frac{Q\gamma}{g} (v_1 \cos \alpha_1 \cdot R_1 - v_2 \cos \alpha_2 \cdot R_2)$$

该式右边，也可以理解为动量矩的改变或转换。由于转轮轴对称的布置着许多叶片流道，因此 M 和 Q 是指整个转轮的力矩和流量。

假若水轮机以角速度 ω 等速旋转，力矩 M 产生的出力（也就是水流对水轮机产生的出力）为：

$$\begin{aligned} N_{sl} &= M\omega \\ &= \frac{Q\gamma}{g} (v_1 \cos \alpha_1 R_1 \omega - v_2 \cos \alpha_2 R_2 \omega) \\ &= \frac{Q\gamma}{g} (u_1 v_1 \cos \alpha_1 - u_2 v_2 \cos \alpha_2) \end{aligned}$$

式中： $u_1 = \omega R_1$ 及 $u_2 = \omega R_2$ 分别为转轮上

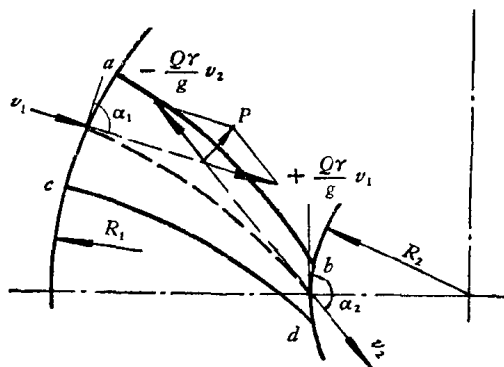


图 1-2

相应点的圆周速度。

因为 $N_{sl} = \gamma Q H \eta_{sl}$ (η_{sl} ——称水力效率) 因此可得

$$\eta_{sl} H = \frac{u_1 v_1 \cos \alpha_1 - u_2 v_2 \cos \alpha_2}{g}$$

考虑到圆周方向的分速度 $v_{1u} = v_1 \cos \alpha_1$, $v_{2u} = v_2 \cos \alpha_2$, 上式也可改写成：

$$\eta_{sl} H = \frac{u_1 v_{1u} - u_2 v_{2u}}{g}$$

考虑到采用环量概念 $\Gamma_1 = 2\pi R_1 v_{1u}$, $\Gamma_2 = 2\pi R_2 v_{2u}$ 上式又可改写成：

$$\eta_{sl} H = \frac{(\Gamma_1 - \Gamma_2) \omega}{2\pi g}$$

上面各式都是水轮机基本方程式的不同表达形式。它也可以根据相对运动的伯努里方程式来推导，其结果完全相同。由此可以理解水轮机基本方程式的物理意义是：转轮所获得的力矩及能量是由于水流内部对转轮旋转轴的动量矩(或速度矩或环量)及能量转换和改变而保证的。它们必须相互平衡，没有这种动量矩及能量转换，水轮机转轮就不能获得机械能。

水輪机的相似律

根据流体力学的推导，两个液流要呈力学相似，必须满足下列几个条件：

两个液流在定常流动惯性力方面的相似： $Sh = \frac{l}{v t} = \text{常数}$ 。水轮机中的水流对流动是定常流动，但对地球是不定常流动，因此模型水轮机与实际水轮机相似要满足这个条件。

两个液流要在重力方面相似： $Fr = \frac{v^2}{gl} = \text{常数}$ 。

两个液流要在压力方面相似: $Eu = \frac{p}{\rho v^2} = \text{常数}$

两个液流要在粘性力方面相似: $Re = \frac{vl}{\nu} = \text{常数}$. 当液流为紊流(湍流)时, 还应补充一项紊性(湍度)的相似: $N = \text{常数}$.

模型水轮机(用下标符号 M 表示)和实际水轮机(用下标符号 T 表示)在满足 $Sh = \frac{l_M}{v_M t_M} = \frac{l_T}{v_T t_T} = \text{常数}$ 时, 线性尺度 l 用转轮直径 D_1 来表征. 速度 v 是与 $\sqrt{H\eta_{sl}}$ 成正比, 时间 t 可以用转轮转一转所需的时间 $\frac{1}{n}$ 来表示, 就可得到:

$$\frac{n_M D_{1M}}{\sqrt{H_M \eta_{s1M}}} = \frac{n_T D_{1T}}{\sqrt{H_T \eta_{s1T}}} = \text{常数}$$

在满足压力相似时, 则必须 $Eu = \frac{p_M}{\rho_M v_M^2} = \frac{p_T}{\rho_T v_T^2} = \text{常数}$, 压力 p 是与 $\gamma H \eta_{si}$ 成正比, 速度 v 与 $\frac{Q \eta_0}{D_1^2}$ 成正比 (η_0 ——水轮机的容积效率), 于是上式可改写为:

$$\frac{Q_M \eta_{0M}}{D_{1M}^2 \sqrt{H_M \eta_{s1M}}} = \frac{Q_T \eta_{0T}}{D_{1T}^2 \sqrt{H_T \eta_{s1T}}} = \text{常数}$$

由于水力效率 η_{sl} 和容积效率比较难以准确地测定, 因此往往近似地取模型与实际水轮机的该两项效率值相等. 即

$$\eta_{s1M} = \eta_{s1T}; \quad \eta_{0M} = \eta_{0T}$$

列宁说过: “物质的抽象, 自然规律的抽象, 价值的抽象以及其他等等, 一句话, 一切科学的(正确的、郑重的、非瞎说的)抽象, 都更深刻、更正确、更完全地反映着自然.”

这样, 表达 $Sh = \text{常数}$ 的准则就抽象为以水轮机主要参数 n 、 D_1 、 H 等来表示的 $n'_1 = \frac{n D_1}{\sqrt{H}} = \text{常数}$ 准则, 它定义为转轮直径为一米, 水头为一米时的水轮机转速, 故 n'_1 称单位转速.

表达 $Eu = \text{常数}$ 的准则就抽象为以水轮机主要参数 Q 、 D_1 、 H 等来表达的 $Q'_1 = \frac{Q}{D_1^2 \sqrt{H}} = \text{常数}$ 准则. 它定义成转轮直径为一米, 水头为一米时通过的水轮机流量, 故称单位流量.

“我们讨论问题, 应当从实际出发, 不是从定义出发.” 根据生产实际总结和抽象出来的概念(或定义), 其目的是便于判断、推理和分析. 定义如果脱离或不符合实际, 它成了出发点而不是认识工具就毫无意义, 甚至是唯心主义的东西了. 因此对于几何相似的水轮机在相似工况下工作时, 单位转速 n'_1 、单位流量 Q'_1 必须具有相同值, 这成为水轮机中模拟的两项重要准则. 在由模型水轮机的参数换算到实际水轮机的参数时, 这两项相似准则是严格保证的, 水轮机的特性曲线就以 n'_1 、 Q'_1 为坐标轴.

关于粘性力的相似, 即应满足 $Re = \frac{v_M l_M}{\nu_M} = \frac{v_T l_T}{\nu_T} = \text{常数}$. 一般, 模型和实际水轮机都以水来工作, 即 $\nu_M = \nu_T$ 因此可得:

$$\frac{v_M}{v_T} = \frac{D_{1T}}{D_{1M}} = m \quad \left(m = \frac{D_{1T}}{D_{1M}}, \text{一般 } m = 10 \sim 50 \text{ 之间} \right)$$

又因 v 与 $\sqrt{H}$ 成正比, 上式可改写成:

$$\frac{H_M}{H_T} = m^2 = 10^2 \sim 50^2 = 100 \sim 2500$$

这意味着实验时的水头要远远高于实际水轮机的水头, 这是难以满足的。要满足的话, 可以将模型水轮机做得很大, 这样 $m = \frac{D_{1T}}{D_{1M}}$ 可以很小, 但模型水轮机太大也是不现实的。

当液流是紊流时, 除要满足 $Re = \text{常数}$ 外, 还要求水流紊性相似, 但是关于紊性的影响, 至今几乎还没有研究出什么结果来。

鉴于粘性力的相似不能得到满足, 就造成模型水轮机与实际水轮机的参数有所差别, 故进行换算时, 应予以修正。

关于重力相似 $Fr = \frac{v^2}{gl} = \text{常数}$, 按同样方法处理可得 $\frac{H_M}{H_T} = \frac{1}{m} = \frac{1}{10} \sim \frac{1}{50}$ 。这对一些中、高水头水轮机是可以达到的, 但对低水头水轮机就不易达到, 从上面两个公式可以看出: 同时满足重力相似和粘性力相似是矛盾的。然而水轮机中的水流在其所受的诸力中, 重力所占的比重很小, 因此这一相似条件可以忽略。

按照相似条件: $n'_1 = \frac{nD_1}{\sqrt{H\eta_{sl}}} = \text{常数}$ 、 $Q'_1 = \frac{Q\eta_0}{D_1^2\sqrt{H\eta_{sl}}} = \text{常数}$ 。水轮机出力可以写为:

$$N = \gamma Q H \eta = \gamma Q'_1 D_1^2 \sqrt{H\eta_{sl}} \cdot \frac{1}{\eta_0} H \eta = \gamma Q'_1 D_1^2 (H\eta_{sl})^{3/2} \eta_j$$

式中: $\eta = \eta_0 \eta_{sl} \eta_j$; η_j ——水轮机机械效率。

所以:

$$\frac{N}{D_1^2 (H\eta_{sl})^{3/2} \eta_j} = \gamma Q'_1 = \text{常数}$$

此常数以 N'_1 来表示:

$$N'_1 = \frac{N}{D_1^2 (H\eta_{sl})^{3/2} \eta_j} = \text{常数}$$

由此可知在相似工况下工作的几何相似水轮机, 其 N'_1 值也必然相等。 N'_1 代表转轮直径为一米、有效水头 ($H\eta_{sl}$) 为一米、 $\eta_j = 1$ 时水轮机所发出的功率, 故称单位功率。

为了能以 N 、 H 、 η 等参数来表达水轮机的相似判别数可以引进一个新的概念 n_s :

$$n_s = n'_1 \sqrt{N'_1} = \frac{n \sqrt{N}}{(H\eta_{sl})^{5/4} \eta_j^{1/2}} = \text{常数}$$

在相似工况下工作的几何相似水轮机, 其 n_s 必然相等。 n_s 代表当有效水头 ($H\eta_{sl}$) 为一米、发出功率为一马力、 $\eta_j = 1$ 时, 水轮机所具有的转速, 称之为比转速 (简称比速)。

由于模型试验时, 水力效率和机械效率都比较难以确定, 为实用起见, 往往近似采用:

$$n_s = \frac{n \sqrt{N}}{H^{5/4}} = \text{常数}$$

既然 n_s 是水轮机的相似判别数, 水轮机在最优 (即效率最高) 工况时的 n_s 可以用来代表各类型水轮机的一个重要参数。

n_s 也可以化为 n'_1 、 Q'_1 的关系, 将

$$n = \frac{n'_1 \sqrt{H}}{D_1}, \quad N = \frac{\gamma Q H \eta}{75} = \frac{\gamma Q'_1 D_1^2 H^{3/2} \eta}{75}$$

代入比速 n_s 的公式, 则:

$$n_s = n'_1 \sqrt{Q'_1} \sqrt{\frac{\gamma \eta}{75}} \approx 3.65 n'_1 \sqrt{Q'_1 \eta}$$

由此可见相似水轮机的相似工况, 其 n'_1 、 Q'_1 值是相同的, n_s 值也必然相同, 再次说明比速相等是相似水轮机相似工况的必要条件。我们把这个新引进的概念 n_s 作为水轮机的相似判别数。

水轮机模型试验意义

人类认识的历史告诉我们, 许多理论的真实性是不完全的, 经过实践的检验而纠正了它们的不完全性。许多理论是错误的, 经过实践的检验而纠正其错误。水轮机近代理论就是这样, 它还不足以精确地考虑各种因素对水轮机工作过程的定量影响, 水轮机内水流的复杂性, 使理论计算方法到目前为止还不能够精确地计算水轮机。这是因为理论计算的假定条件或多或少地不符合水轮机内真实水流状况。计算结果必然带来或多或少的误差。因此计算的准确性只能是近似的, 甚至是不能令人满意的。

一个正确的认识, 往往需要经过由物质到精神, 由精神到物质, 即由实践到认识, 由认识到实践这样多次的反复, 才能够完成。要完满地解决水轮机的水力设计问题, 必须依靠实验研究和理论计算相结合的方法。

由于水轮机尺寸都比较大, 往往给实验研究带来很大的困难。这就要求将水轮机按比例缩小成模型, 以便在实验室内进行试验和研究。

根据流体力学相似原理, 水轮机也存在相似准则。只要按相似准则的要求, 就可以将模型试验得来的特性和参数换算到水轮机原型上去。因此水轮机的相似准则是水轮机模型试验的理论基础。

由此可见, 水轮机模型试验是进行水轮机水力设计的重要手段, 当要创立一个新的水轮机类型时, 可将不同参数的不同组合之模型转轮进行试验, 从中选出性能最好的模型转轮, 该模型转轮就是这个新水轮机类型的“标准”转轮, 以后这个新水轮机类型的任何品种转轮, 都将按照该“标准”(模型)转轮相似放大(或缩小)来制造。

水轮机的汽蚀

水在一个标准大气压(10.33 米水柱)下, 当温度 $t = 100^\circ\text{C}$ 时, 便开始沸腾汽化。水在另外较低的温度下, 只要水的压力降低到与该温度相适应的某一值时, 水也会沸腾汽化。例如当水温 $t = 20^\circ\text{C}$ 时, 若压力降低到 0.24 米水柱时, 水就沸腾汽化。这样, 水的每一温度必定相应有其能沸腾的某一压力。该压力称为这一温度下的饱和蒸汽压力。如果水轮机中水流压力降低到饱和蒸汽压力时, 水就会大量逸出气泡而沸腾。出现的汽泡随着水流进入高压区时, 在该区域内水流压力高于饱和蒸汽压力, 水蒸汽将不能存在而开