

〔苏联〕H. M. 沙波夫著



水电站的水轮机设备

中国工业出版社

本书研究了各种近代水轮机，水轮机调节，工作过程，不同体系、类型和结构的水轮机的特性及其适用范围，根据每一水电站的具体条件选择水轮机，以及水轮机的运转和试验。

本书主要供水电站设计者、建筑者及运行工作者使用，并可作为建筑工程学院和动力学院学生的教学用书，其中部分内容也可供机械制造学院的学生参考。

本书由黄明忠和徐纪方翻译，由陈可一校对。

* * *

在H. M. 沙波夫逝世后，“水电站的水轮机设备”手稿系由Г. И. 克里夫琴科代为编订。在校订手稿及其出版过程中所发生的问题，由Г. И. 克里夫琴科会同国立动力出版社的编辑Л. П. 马里扬斯基和О. Н. 齐斯特罗瓦解决。

Н. М. Шапов

ТУРБИННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ГИДРОСТАНЦИИ

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ ДОПОЛНЕННОЕ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ МОСКВА 1961 ЛЕНИНГРАД

* * *

水电站的水轮机设备

黄明忠 徐纪方 译

水利电力部办公厅图书编辑部编辑（北京阜外月坛南营房）

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本787×1092¹/₁₆·印张25·插页1·字数548,000

1964年10月北京第一版·1964年10月北京第一次印刷

印数0001—3,590·定价（科六）3.10元

*

统一书号：15165·3111（水电-426）

目 录

第一章 水力机械及水轮机	1	4-2 按新水头换算水轮机	31
1-1 水力机械	1	4-3 相似水轮机及其工作状态的相似	32
1-2 水力发动机	1	4-4 按新直径换算水轮机的效率	33
1-3 上注式水轮	3	4-5 水轮机的类型和系	34
1-4 水力柱塞式机	3	4-6* 相似准则	35
1-5 水轮机	4	4-7 引化工作参数	37
1-6 水轮机的一般参考文献及其术语	5	4-8 水轮机比速的概念	37
第二章 水轮机与水力机组的工作参数	7	第五章 冲击式水轮机	40
2-1 水轮机的工作过程、工作状态及 工作参数	7	5-1 冲击式水轮机的一般性质	40
2-2 水轮机的出力	7	5-2 斗叶式水轮机及其叶片(斗叶)	41
2-3 水轮机的效率	9	5-3 斗叶式水轮机的针状喷嘴及直径比	43
2-4 水轮机的水头	10	5-4 圆周速度	45
2-5 水轮机的流量	10	5-5 比速	46
2-6 水轮机的直径	11	5-6 损失与效率	47
2-7 水轮机的转速	12	5-7 斗叶式水轮机的结构	48
2-8 水力机组	13	5-8 斗叶式水轮机的计算及应用范围	53
2-9 发电机	14	5-9 斗叶式水轮机的牌号与标准规格	54
2-10 水力机组段	16	5-10 斜击式水轮机	56
第三章 水轮机的工作过程	17	5-11 星状式水轮机	58
3-1 液体对容器的反作用力	17	5-12 两击式水轮机	59
3-2 反作用力矩	18	5-13* 环流型冲击式水轮机	61
3-3 水轮机的基本方程式	18	第六章 反击式水轮机	63
3-4 沿旋转工作轮流动时的速度	20	6-1 冲击式水轮机与反击式水轮机的 区别及反击式水轮机的体系	63
3-5 沿旋转工作轮流动的相对流程和 绝对流程	21	6-2 旋转多导叶辐向式导水机构	64
3-6 导水机构	21	6-3 导叶旋转机构	66
3-7 工作过程的力学模型	22	6-4 反击式水轮机的调节过程	69
3-8 最有利的作用条件	22	6-5 水轮机室	73
3-9 环量	23	6-6 蜗状水轮机室(蜗壳)	74
3-10 水轮机的非正常工作	24	6-7 蜗壳的材料及其辐向断面形状	76
3-11 相对流动的伯努利方程式	25	6-8 按等速度矩规律计算蜗壳断面	79
3-12 水轮机的流束理论	26	6-9 完全蜗壳与不完全蜗壳	80
3-13 水轮机的体系及其发展过程	26	6-10 蜗壳式水轮机的座环	81
第四章 水轮机及其工作状态的相似	30		
4-1 同一水轮机的工作状态的相似	30		

注 带有星号的节系在本版中新增的。

6-11* 蜗壳的形状和尺寸对主厂房前缘 长度的影响	84	9-7 工作轮的止漏装置	138
6-12 单导叶调节	85	9-8 水轮机主轴上的轴向力	139
第七章 吸出管	87	9-9 减小水推力	142
7-1 吸出管的概念	87	9-10 推力轴承及导轴承	144
7-2 扩散的吸出管	88	9-11 辐向轴流式水轮机推广用于更高 的水头	146
7-3 吸出管的相对参数	89	第十章 翼叶式水轮机	148
7-4 吸出管的回能系数; 水轮机的 自身效率与总效率	90	10-1 翼叶式水轮机的工作轮	148
7-5 吸出管的内部水力损失及其与几何 损失的相互作用	92	10-2 翼型叶片	149
7-6 实用的圆锥形吸出管	94	10-3 旋桨式水轮机	151
7-7 吸出管的基本型式	95	10-4 旋桨式水轮机的缺点	151
7-8 弯曲形吸出管的形状	97	10-5 叶片的转角	153
7-9 弯曲形吸出管的参数	98	10-6 转叶式水轮机	154
7-10 其它型式的吸出管	100	10-7 简化的转叶式水轮机	160
7-11 吸出管的改进对水轮机工作的影响	103	10-8 轴向推力和泄漏	161
7-12 弯曲形吸出管的最优长度	104	10-9 装有转叶式水轮机的机组段	162
7-13* 作为动能回收器的下游	106	10-10 低水头水轮机进水道中的损失	164
7-14* 水轮机水头及水电站水头的种类	108	10-11 转叶式水轮机推广用于更高或 更低的水头	166
第八章 气蚀	112	10-12 降低高度的机组	169
8-1 水轮机中的压力	112	10-13 降低吸出管的高度	170
8-2 水的饱和蒸汽压力	113	10-14* 贯流式水轮机	171
8-3 水轮机中的气蚀	114	10-15* 无轴式机组	173
8-4 叶片上的压力	115	10-16* 涡轮钻机的多级贯流式水轮机	174
8-5 气蚀的后果	115	10-17* 内流式机组	177
8-6 冲击式水轮机中的气蚀	117	10-18* 具有同轴式水轮机的水力机组	179
8-7 气蚀的简明试验	117	10-19* 中流式机组	181
8-8 防止气蚀及抵抗气蚀的影响	118	10-20* 对角流及辐流转叶式水轮机	181
8-9 水轮机及水轮机装置的气蚀系数	120	10-21 具有泄流的水轮机装置	185
8-10 最大允许吸出高度	121	10-22* 主厂房的尺寸与其中安装的 水轮机的工作参数之关系	187
8-11 吸出管的改进对水轮机气蚀 系数的影响	122	第十一章 水轮机的示性曲线	189
8-12* 模型气蚀系数与原型气蚀系数 的关系	124	11-1 水轮机模型试验的意义	189
第九章 辐向轴流式水轮机	125	11-2 模型的实验室研究	190
9-1 辐向轴流式水轮机的工作轮	125	11-3 工作示性曲线	194
9-2 提高比速	126	11-4 转速示性曲线及主要示性曲线	195
9-3 提高比速的方法	126	11-5 水头示性曲线及水头比	196
9-4 叶片的图形	128	11-6 相对示性曲线	197
9-5 辐向轴流式水轮机的结构形式	130	11-7 综合示性曲线(等值图)	200
9-6 辐向轴流式水轮机的轮廓尺寸	137	11-8 引化等值图	202
		11-9* 相似水轮机在引化等值图上 的相似状态	203

11-10 水輪机的备用出力綫	204	13-6 按对数等值图比較選擇水輪机	267
11-11 各类型水輪机引化等值图的特点	205	13-7 具有标准直徑和标准轉速的水輪机 等值图的迭置	269
11-12 翼叶式水輪机的引化等值图	209	13-8 用网格法轉繪对数等值图	272
11-13 苏联各类型反击式水輪机的引 化等值图	213	13-9 运用对数示性曲綫選擇水輪机的 实例	274
11-14 水头—流量等值图及用网格法 轉繪等值图	213	第十四章 水輪机的自动調节	277
11-15 对数等值图	215	14-1 角速度与力矩及飞輪矩的关系	277
11-16*系列等值图	216	14-2 无調节及用負荷調节的水輪机	278
11-17 气蚀示性曲綫及其获得	217	14-3 离心飞摆	279
11-18*用欧姆电阻或超声波測定气蚀系数	219	14-4 接力器	282
11-19 飞逸示性曲綫	220	14-5 油压装置	286
11-20 運轉示性曲綫及計算水头	221	14-6 配压閥	287
11-21 調度示性曲綫	226	14-7 无复原机构的調节过程	288
11-22 水文示性曲綫	228	14-8 复原机构	289
11-23 单位水头和单位轉速的引化等值图	228	14-9 等速式調速器	290
11-24 示性曲綫在水輪机制造业中的运用	230	14-10 具有殘余不均匀度的等速式 調速器	292
11-25*水力机組在变化的最有利 轉速下工作	230	14-11 轉速改变机构	292
11-26*直流輸电时变化轉速的水力机組	234	14-12 开度限制机构	292
第十二章 水輪机中的損失及能量平衡	236	14-13 压力油筒式和川流式調速器	293
12-1 能量平衡及損失分类	236	14-14 轉叶式水輪机的双重調节式調速器	297
12-2 机械損失	237	14-15 高水头反击式水輪机的双重調节	298
12-3 圆盘損失	239	14-16 斗叶式水輪机的双重調节	300
12-4 容积損失	241	14-17*水輪机飞逸轉速的后果及其防止	301
12-5 轉叶式水輪机的損失按其产生的 部位来分类	244	14-18 水力机組的并列工作	306
12-6 吸出管的損失	246	14-19 水力机組自动化	307
12-7 斜击式水輪机損失的分类	247	14-20 旋桨式水輪机的直接作用閘門 式調节	309
12-8 水力損失按其产生形式的分类方法	248	14-21 叶輪轉叶式水輪机	311
12-9 效率由模型到原型的換算确定	248	14-22*电气液压調速器	312
12-10 沿程損失的換算系数	249	第十五章 水輪机的速率暫态不均匀度	315
12-11 用分类換算法將效率由某一直徑的 水輪机換算到另一直徑的水輪机 的实例	251	15-1 暫态不均匀度的概念及其計算 用的假定公式	315
第十三章 水輪机的标准規格及其選擇	254	15-2 轉矩示性曲綫上的調节过程	318
13-1 水輪机的計算和選擇	254	15-3 水輪机过量关闭	319
13-2 反击式水輪机的标准規格	254	15-4 定水头下暫态不均匀度的 計算确定	320
13-3 按标准規格初步選擇水輪机	263	15-5 水錘作用下暫态不均匀度的 計算确定	321
13-4 水电站各相同水輪机平均分配負荷 的有利性	264	15-6 开度变化状态	324
13-5 水电站状态图	265	15-7 調节時間內多机組的并列工作	325

15-8 关于計算速率暫态不均匀度和 飞輪矩的总结	326	17-2 水輪机在工作中的毛病、损坏 及事故	356
15-9 水輪机自动調速器的发展过程和 試驗研究	328	17-3 气蝕和悬移质泥砂造成的水輪机 损坏	357
第十六章 特殊用途的水輪机及其它		17-4 振动	358
水力发动机	330	17-5 漂积物所造成的故障和损坏	359
16-1 潮汐式水輪机	330	17-6 提高水輪机的过水能力	360
16-2 波浪式发动机	332	17-7 记录水輪机的状况和工作	362
16-3 激岸浪式发动机	333	17-8 經常记录水輪机的流量	362
16-4 水輪机-泵机组	334	17-9 蜗壳流量计和容积計	363
16-5 泵水輪机及其八种工况	337	17-10 按发电量的水輪机单位流量	365
16-6 泵水輪机的射綫形等值图	340	17-11 在同期調相机状态下的水力机组	365
16-7* 輻向軸流式泵水輪机	341	第十八章 水輪机的原型試驗	367
16-8* 軸流式泵水輪机	343	18-1 水輪机原型試驗的意义及 进行情况	367
16-9* 可逆式泵水輪机	343	18-2 原型試驗的种类	368
16-10 微型水电站	345	18-3 監督試驗的規程和进行情况	369
16-11* 倒置式机组	347	18-4 用流速仪測定流量	371
16-12 河道式水力发动机	348	18-5 最优协联关系的調整	373
16-13 悬式水輪	349	18-6 水錘法測定流量	374
16-14 河道螺旋式水輪机	350	18-7* 測定水輪机效率的热法	375
16-15 橫击式水輪机	351	18-8* 水力机组效率的自动測量	377
16-16* 帶型河道式水力装置	353	18-9 吸出管的原型研究	378
16-17* 端流型河道式水力装置	354	18-10 調节的装置研究	379
第十七章 水輪机运轉	355	参考文献	381
17-1 水輪机运轉的任务	355		

第一章 水力机械及水轮机

1-1 水力机械

将液体的机械能(不是化学能、电能或热能)转换为固体的机械能或其转换过程相反的机械均称为水力(液力)机械。进行前一种转换的称为发动机,其种类将在以后阐述,进行后一种转换的称为工作机。

叶片式泵、容积式泵以及机械扬水机均属于水力工作机。

将一种能量形态转换为另一种能量形态的设备,若其中不包括有固体的运动作用,通常就不将它列为机械。例如:电池(将化学能转换为电能)、变压器(将某一电压的电能转换为另一电压的电能)以及蒸汽锅炉(将燃料的化学能转换为蒸汽压力能)等,这一类设备通常称为器械。

从这一观点出发,喷射泵(如[文献196及6])、气压式泵[文献218及9]、水力自动器[文献220]、水锤扬水器[文献240、145及164]、气压提升器[文献118]以及其它类似的设备均不是水力机械,而是水力器械,在它们内部并不发生液体能和固体能之间的相互转换,而仅发生两种液体间或气体与液体间的能量转换。

还有在同轴线的两轴之间的特种液力传动装置——动液变矩器及动液偶合器。它们的特点是在工作时能够改变其传动比。它们是传动装置,是机械零件,而不是发动机或工作机。

水力机械最常使用在淡水中。近代的泵也常常抽送其它液体:石油产品,油,海水,溶液,乳胶,各种带有土壤、煤渣、泥煤等悬浮颗粒的以及带有煤块、马铃薯、鱼类等等的水混合物或矿浆。水力发动机虽然也可使用在其它液体中,但它们通常系以水或油来工作。

1-2 水力发动机

水力发动机将液体的机械能转换为往复运动的固体(活塞、连杆、柱塞)或经常转动的固体(轴)的机械能。这种液体大都是淡水及油,而化学溶液、海水等则用得很少。

流动液体的机械能可以有三种形态:位置、压力及运动。前两种(有时仅第一种)形态的能称为势能(势能),最后一种形态的能称为动能(速度能)。为了表示流动液体机械能的数量,采用了“比能”的概念,所谓比能即单位重量液体的能量。如果任何形态的机械能均以公斤-米来度量,则1公斤液体所拥有的能量 E 将具有长度单位,即以米来度量。在水力学上广泛应用的、彼得堡科学院院士 Л.伯努利于1738年对不可压缩的无粘滞性液体推导出的方程式中,包括的各种形态的能量就是以米或其它长度单位来表示的:

$$E(\text{公斤-米/公斤}) = H(\text{米}) = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}, \quad (1-1)$$

式中 z ——某一比較水平面以上的比位能；

p ——压力(公斤/米²)，由零起算；对所謂剩余压力而言，則由大气压力起算；

γ ——液体的容重，即 1 米³容积液体的、以公斤表示的重量；

v ——液体的速度(米/秒)；

g ——重力加速度(米/秒²)。

在通常情况下，当温度在摄氏 0° 至 20°C 之間和压力变化时，淡水容重的微小变化可以忽略，并取 $\gamma=1000$ 公斤/米³；关于不考虑 γ 随压力而变化对水轮机效率的影响可参看 §18-3。

近来有时利用热水(例如由蒸汽发动机的冷凝器中排出的水)的水头，此时容重 γ 取用較小的(与其温度相应的)数值(表 1-1)。对于海洋的咸水(在潮汐式水电站上)， $\gamma \approx 1030$ 公斤/米³。

表 1-1 水的容重 γ (公斤/米³)及其粘滞性运动系数 ν (米²/秒)与温度的关系

t°	0	4	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
γ	999.87	1000.00	999.75	998.26	995.76	992.35	988.20	983.38	977.94	971.94	965.56	958.65
$10^6 \nu$	1.792	1.567	1.308	1.007	0.804	0.661	0.555	0.477	0.415	0.366	0.327	0.296

通常认为 $g=9.81$ 米/秒²，然而在苏联极北部地区其值可增至 9.825，而在南方則降至 9.782，其值符合于下述公式：

$$g=9.806-0.025\cos 2\varphi-0.000003\nabla, \quad (1-2)$$

式中 φ° ——当地的緯度；

∇ (米)——当地的海拔高程。

考虑变化的 g 值可参看 §4-4。

在图 1-1 上表示出三种水力发动机，其中每一种水力发动机主要是利用三种形态能量中的一种。

图中左面的上注式水輪因其充滿水的一半重于另一半而轉动。在图的右面，重物由于作为其支承的活塞受到水压而上升。在图

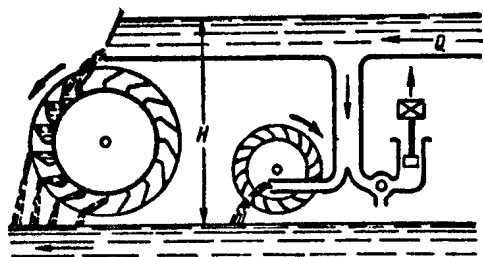


图 1-1 三种水力发动机的示意图

的中間，水的动能迫使水輪机的工作輪轉动。

这里，为了免除可能的疑惑必須附帶說明，将压力能列入液体比能之中是有条件的。液体几乎是不可压缩的。独立的不可压缩的液体单元(例如 1 公斤重的液体)在压力减小时几乎并不膨胀，因而就不可能作出与压力改变相应的功，它所拥有的能量仅取决于位能与动能。因此，实质上 $\frac{p}{\gamma}$ 項不能算作液体质点本身所拥有的能量。但是，在研究有关液体流动的問題时，有条件地将此数值計入液体质点的能量中，亦即比能之中是比較方便的。实际上，在利用这一項能量时，并非該质点而是同一流束的一系列质点在作功，这些质点同时改变自己的位能和动能，并对該质点发生影响。所以，在公式(1-1)中将字母 $\frac{p}{\gamma}$ 放在伯努利方程式的三項之前也仅是为了方便起見而作的假定。

在物质的原子未破裂时，能量守恒定律仍然有效。此时，物质的独立质点不可能有对自己赋予拥有某种机械能或其它(如磁性的，化学的)能量的能力。仅当在其附近存在其它质点或物体时方能认为这一质点拥有位能(引力)。动能等于 $\frac{v^2}{2g}$ 也只是相对于我們假定的固定座标軸而言，当該座标軸在这一运动质点附近亦作某种运动时，动能可能改变，甚至于等于零。仅当在质点附近存在某种化学成份的其它质点时，該质点的化学能才能在不同的程度上表现出来。

但是，为方便起见我們采用伯努利方程式的各项，并假设比能为质点本身所拥有，而实际上比能是属于一系列质点的。

1-3 上注式水輪

上注式水輪(图1-2)主要是利用位能或重力能。由水槽中流来的水充滿着水輪右半部的斗叶，这一半水輪重于左半部，于是水輪开始按順时針方向轉动。下面斗叶中的水将自然地流出。落入斗叶中的水流速度能亦占所利用的总能量之一小部分。它是最古老的水力发动机中的一种，在奴隶社会中已开始应用。在苏联的史册中[文献68]，最早的是在1267年提及过水磨，而无疑地它在更早以前就已存在。十八世紀时俄国的水輪(主要是上注式水輪)已发出就当时来说是巨大的能量。当时俄国所生产的生鉄多于英国，而俄国所有的冶金工厂都是依靠水輪来工作的。早在1910年俄国水輪(主要在磨坊中工作)的总出力达434000馬力[文献163]。现在，它們在极少数的地区仍在繼續工作，但很快就被水輪机所代替。

这种水輪可简单地由木工用木材来制造。效率较高。但是，这种水輪具有下述缺点，每分钟的轉数很小，笨重(因而它不可能有很大的出力)，不能利用斗叶排水高程与下游水位之間的落差，当下游水位升高而水輪下部被淹没时，效率降低。在苏格兰曾有过直径最大(21.3米)的上注式水輪在工作，世界上出力最大(400馬力)的水輪在納罗瓦河上的納尔瓦一直工作到前一世紀九十年代。

除上注式水輪外，还有许多其它体系的水輪。现在更是意义不大，或者已完全被淘汰了[文献80及197]。

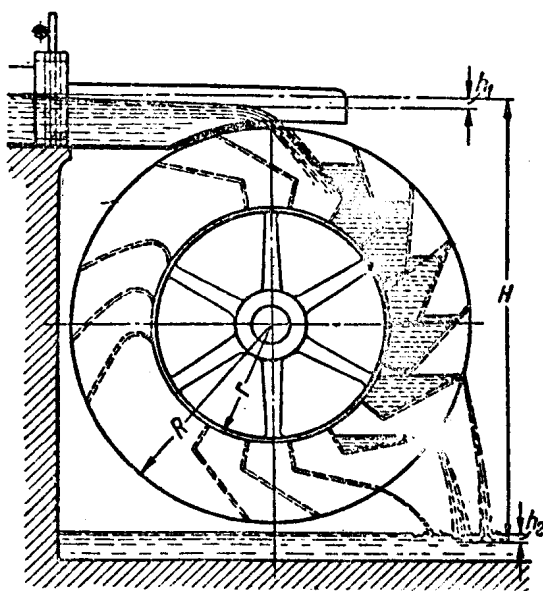


图 1-2 上注式水輪(图上表示了两种形状的斗叶)

1-4 水力柱塞式机

水力柱塞式机是利用液体的压力能，其装置与蒸汽机有些相似(图 1-3)，在水压作用下配压閥让水从其两侧交替地輸入圓筒內，于是活塞在其內作周期性往复运动，然后依靠曲柄机构将活塞的运动傳至軸。十九世紀时这种小型发动机常用在城市自来水管上，随着輸电及电动机的广泛应用，这种机器已几乎停止使用。目前，它們仅以某种形式在許多專門的机器上(特别是金属加工机床)用作小型輔助机械。不带曲柄机构而仅有受力杆傳动的活塞式发动机則应用在水工設備上，例如用在閘門启閉机和水压机[文献158及198]上，以及作为水輪机服务的接力器(§14-4)等。

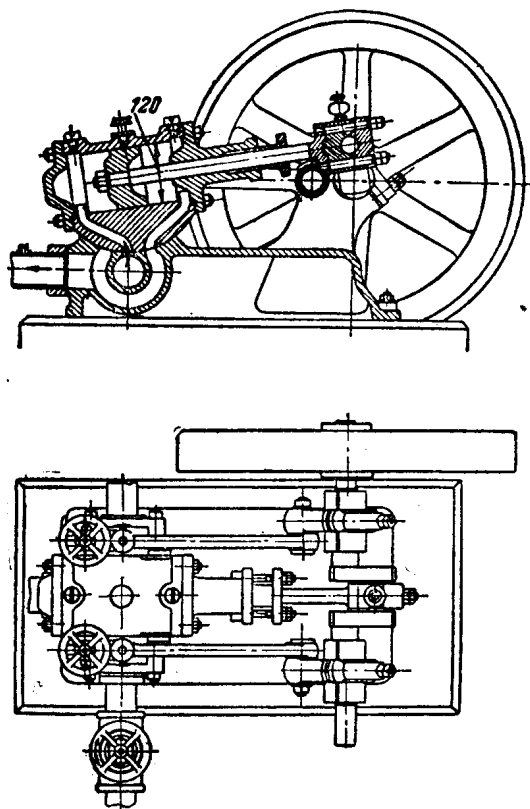


图 1-3 水力柱塞式机

有一种水轮机(星状水轮机, §5-11)与某些类型的水轮机有很多相同之处。它在东方无疑地已存在了许多世纪,但对近代水轮机结构的发展并没有产生影响。

在1750年匈牙利人H. 谢格涅尔按照前此不久巴尔克尔所建议的方案制造出一台水力发动机,然后进行了试验。这种以谢格涅尔命名的到现在仍为大家所知道的发动机,其工作过程已符合于水轮机的现代概念。可是,该体系水轮机具有重大的缺点,由于当时已有的叶片式水力机械理论的不完善,谢格涅尔本人在当时也不可能预见到这些缺点。

约在1754年彼得堡科学院院士H. 欧拉创立了水轮机的基本理论。但是,他所设计的、理论上正确而结构上不完善的水轮机方案(图1-4)并未得到实现。“水轮机”这一术语(相当于俄文的回转器或漩涡发生器)是法国人比尤尔登约在1826年荐用的。约于1830年B. 福尔涅朗在法国造出了第一批结构上可以实现的、工作良好的水轮机(在水头1.4米下出力为6马力)。不久以后,H. E. 萨福诺夫在俄国(可能是与福尔涅朗的工作无关)也造出了一批同样是结构上可以实现的、工作良好的水轮机。他的第一台水轮机(图1-5)在水头2.5米及转速25转/分下出力为36马力[文献2]。A. 涅拉托夫第一次用俄文系统地阐述的水轮机理论及计算已在1841年出版[文献169]。

在十九世纪后半期,各种不同体系的水轮机获得广泛的发展[文献224],但仅到二十世纪当远距离输电广泛应用,以及作为水电站组成部分之一的水工建筑物的建筑技术高速发展时,水轮机才在保证国民经济所需要的电能方面有着巨大的意义。

1-5 水 轮 机

一种体系(冲击式)水轮机是将液体(几乎永远是淡水)的动能转换为固体的机械能,而另一种体系(反击式)水轮机是将动能与压能一起转换为固体的机械能。

位能还在进入水轮机工作轮之前已转换为动能和压能,在工作轮内几乎并不利用位能本身,因为近代的工作轮一般只有相当小的高度尺寸。在某些旧体系——欧拉水轮机及谢格涅尔工作轮中还可明显地看出利用位能。水轮机将水流的能量传给转轴,仅在少数情况下(§10-15及16-4)直接传给工作机的部件。

某些体系的水轮(如下冲式及中冲式水轮)也利用动能。但是,在这些水轮中主要是利用水流对转轮叶片的撞击来工作,而在水轮机内则避免了水流撞击作用,因为它会降低效率。第二个区别是:在水轮中水从流进的同一叶片边缘流出,而在水轮机中水流将流经整个的工作轮。

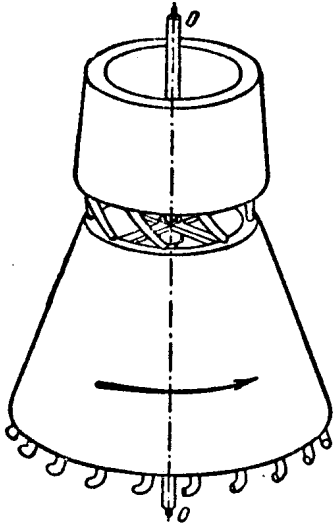


图 1-4 1754年欧拉水輪机的示意图

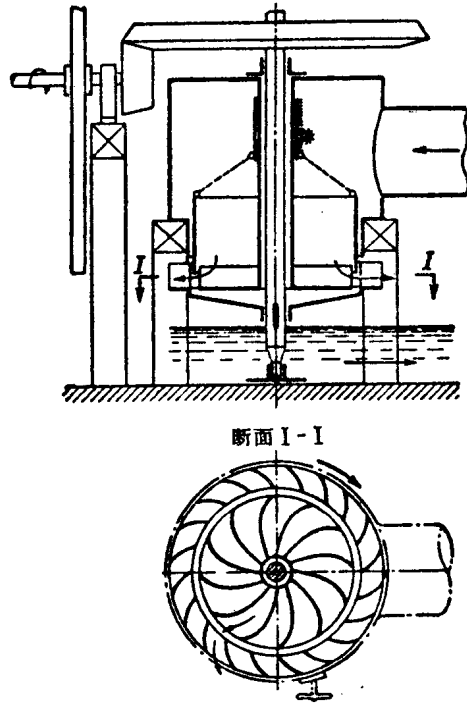


图 1-5 1837~1839年薩福諾夫水輪机的示意图

B. H. 列宁提出了在苏联广泛利用水能的任务。水能的广泛利用是根据全俄国家电气化计划开始的；经过几个五年计划后，水能利用已获得巨大的发展。目前，在伏尔加河、德涅泊河、安加拉河以及其它河流上建造的超巨型水电站保证了更全面地利用水能。它们要求水轮机制造业完成崭新的、困难的但又是光荣的任务。

为了完成这样的任务，苏联水轮机制造业在各方面均有完善的基础，进行着深入的科学研究工作，有巨大的生产能力（工作在雷宾斯克和烏格里奇水电站上的水轮机的直径达9米，而在以列宁命名的伏尔加河水电站上的水轮机的直径达9.3米，这是世界上最大的水轮机），同时产品质量很高（德涅泊水电站上新的苏联水轮机的工作可靠性和效率均优越于在那里同时装设的美国水轮机）。

关于世界上一般的及苏联特别详细的水轮机制造业发展史可参看文献111及296。

在后面，将随着对水轮机工作过程的熟悉而对作为水力发动机的水轮机给出更确切的定义 (§3-9)，并随着对各水轮机体系的熟悉将讨论水轮机的结构。

利用气体（即体积及温度均可改变的流体）工作的汽轮机和燃气轮机，与利用几乎温度不变及不可压缩的液体工作的水轮机有很多相同之点，但工作介质的不同大大地影响到它们的工作过程、计算、结构及制造工艺的特点。汽轮机及燃气轮机的特点是使流体膨胀，并将其热能转换为其它形态的能量。它们没有气蚀现象（第八章）。在结构及制造工艺方面，水轮机与其它叶片式水力机械（泵）更为相近（同汽轮机和燃气轮机比较而言），因而水轮机和叶片式泵经常在同一工厂内联合生产。

1-6 水輪机的一般参考文献及其術語

在苏联大百科全书[文献279]及机械制造百科全书[文献99及209]中，可以找到水轮机

近代理論的簡短敘述及其結構的描述和計算。謝戈列夫及加爾卡維的書〔文獻297〕是技術學校的教材。瓦赫拉麥耶夫的書〔文獻30〕可作為水輪機的通俗讀物。斯米爾諾夫的書〔文獻213〕按大綱和用途接近於本書；該書作者對某些問題的闡述與本書有些不同；他對一些問題敘述較完全，而我們對另一些問題敘述較完全。在莫羅佐夫主編的手冊〔文獻229〕中包括有極為大量的材料，該手冊是列寧格勒的許多專家集體編寫的；其中所載蘇聯及世界大型水輪機製造的大量數據及圖表，以及採用的一系列計算方法，都比本書所包括的更為豐富，而且一部分敘述得更為詳細。在小型水輪機製造方面的文集〔文獻100〕目前仍然沒有失去它的價值。有關水輪機葉片水力計算的文獻將在後面（§10-2）指出。零件強度計算可參看文獻56及100。關於水輪機製造工藝的指南可參看文獻44及119。

隨著科學技術的發展，在其各專業領域內出現了很多前所未有的新概念，這些新概念必須用完整的、確切的但很冗長的文字來闡明。為了文字的精簡，往往用一個或幾個字組成的術語來代替這種闡述，這些術語是有條件的，因為它由於簡短而不能包括新概念的的所有特徵。新的術語常常會自發地產生。因此，它們逐字的意義常和概念的實質發生矛盾，而與相近的概念又不相互協調，也時常根本沒有新的術語。這就使迅速而又準確地交換思想發生困難，使語言和文詞複雜化。

為了整理術語，蘇聯科學院技術術語委員會系統地研究了各個學科，並分別制訂出採用的術語目錄及給出其定義。在水輪機的術語方面，也在我們積極參加下完成了整理工作。相應的目錄〔文獻223〕包括有215個概念，並給出其術語及代表的字母。我們在以後就將應用這些術語。當需要引入新的概念時，我們會指出建議採用的新術語。近幾年來開始研究某些新的水輪機結構，它們還沒有新的俄文術語。在文獻192中給出了我們所採用的相應的術語目錄。

在所建議採用的術語中，以前用個別人名所命名的一些體系的水輪機獲得了新的名稱。不可否認，它們舊有的名稱確實在不同程度上是偶然的，因為這些體系的水輪機可能在這些人進行研究以前即已被提出或者已經是人所共知，在這些人之後又經過了很大的改進，以致於完全不同於其雛型了。

下面列舉幾種水輪機體系的新舊名稱的對照。

法蘭西斯式——輻向軸流式；

卡布蘭式——轉葉式；

托曼式——固定導葉的輪葉調節式；

培爾頓式——斗葉式；

丘爾戈式——斜擊式；

班琪式——兩擊式；

螺旋式水輪機許可同義語：螺旋式水輪機。

必須指出，斗葉式在俄文中允許通用兩種形容詞，*ковшевой* 及 *ковшовый*。前者根深蒂固地用於水輪機製造業中，它是文獻233中採用的。後者用於挖土機製造業中。

這些體系水輪機的實質將在以後討論。

第二章 水輪机与水力机組的工作参数

2-1 水輪机的工作过程、工作状态及工作参数

水輪机在将水流的能量傳至軸上时其各部件中同时发生的水力現象之綜合称为水輪机的工作过程。对同一水輪机在不同的工作条件下，尤其是对不同的水輪机，其工作过程的形式是不同的。这些形式称为水輪机的工作状态。水輪机所表現出的工作状态取决于水輪机的工作参数(指标)，所謂工作参数既是表明水輪机内部过程的特性值，也是表明水輪机对水流能量的利用的特性值。水輪机的基本工作参数(动力参数)为五个有因次值：

出力 N (通常用瓩为单位)；

流量 Q (米³/秒)；

水头 H (米)；

每分钟的轉数 n ；

特征尺寸(通常用某一直徑 D 米表示)以及一个无因次比值——由上述五个有因次值中的某几个值所組成的有效利用系数(以后简称效率) η 。

这些有因次值也可以概括为两个无因次比值。此时，某一水輪机的工作状态取决于这三个无因次比值和五个有因次值中的任何两个，而其余三个有因次值則可由三个无因次比值定出(見§4-5)。

除工作参数外，表征水輪机的还有結構参数。水輪机的特征直徑既是工作参数，也是結構参数。

2-2 水輪机的出力

水輪机对外所作的功取决于它傳給其主軸的出力 N 、主軸旋轉角速度 ω 或每分钟的轉数 n 、以及水輪机的效率 η ，即水輪机对所流經的水流出力的利用程度。

将水从設定的比較面(通常为海平面)算起的某一高程处引进水輪机装置，而在較低的高程处水由水輪机装置排出。这两个高程的差值，也就是水輪机装置的上游水位的比能与下游水位的比能之差，称为装置水头。装置水头的一小部分消耗于不属于水輪机組成部分的水輪机进水装置(如压力水管)的阻力上。因此，水輪机的工作水头 H 比装置水头要小一些；較精确地决定不同种类的水輪机的工作水头可参看§7-14。

水輪机水流的出力，即单位時間內流过水輪机而降落高度 H (相当于水輪机的工作水头)的水流所作的功(公斤-米/秒)为：

$$N_{nom} = Q\gamma H; \quad (2-1)$$

其中乘积 $Q\gamma$ 公斤/秒可以看成为重量流量。通过水輪机的水流的一部分能量消耗于水輪机中的水力阻力及其零件的摩擦損失上，仅这样一部分能量，即有效出力

$$N = Q\gamma H\eta, \quad (2-2)$$

通过水輪机主軸傳給这部分出力的用戶。小于1的乘数 η 称为有效利用系数；为了文字簡

便，可稱之為效率；在外國語中該術語是一個字。

工程上宜於採用比公斤·米/秒要大的出力單位，即採用馬力、瓩或兆瓦：

$$\left. \begin{aligned} 1 \text{ 馬力} &= 75 \text{ 公斤·米/秒} = 0.736 \text{ 瓩}; \\ 1 \text{ 瓩} &= 102 \text{ 公斤·米/秒} = 1.36 \text{ 馬力}; \\ 1 \text{ 兆瓦} &= 1000 \text{ 瓩}. \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

這樣，水輪機的有效出力為：

$$N = \frac{Q\gamma H\eta}{75} \text{ 馬力} = \frac{Q\gamma H\eta}{102} \text{ 瓩}. \quad (2-4)$$

現在，蘇聯幾乎總是用瓩表示出力，有時也用兆瓦。在國外還是經常採用馬力表示出力。

我們引出幾個簡略計算的公式：

$$\left. \begin{aligned} N_{nom} &= 9.8QH \text{ 瓩}; \\ N &= 9QH \text{ 瓩}; \\ N &= 8QH \text{ 瓩}; \\ N &= 7QH \text{ 瓩}. \end{aligned} \right\} \quad (2-5)$$

上式中乘數9.8對應於 $\eta=100\%$ ，即理論出力；而乘數9、8及7分別對應於 $\eta=92\%$ （大型水輪機在最优狀態下的效率）、 $\eta=82\%$ （小型水輪機在最优狀態下的效率）及 $\eta=72\%$ （大型或小型水輪機在較壞狀態下的效率）。效率與水輪機出力的某些較精確的關係將在§2-3中介紹。

在採用英制的國家里，水頭用呎為單位（1呎=0.3048米），流量用每秒立方呎（1呎³/秒=0.0283米³/秒）為單位，而出力用英制馬力為單位，其值規定為550磅·呎/秒。因為1磅等於0.454公斤，故1英制馬力（用HP表示）等於76.04公斤·米/秒或1.014公制馬力。

大型、中型與小型水輪機的分類可參看表13-1。大型水輪機由列寧格勒大林金屬工廠（ЛМЗ）及哈爾科夫基洛夫水輪機製造廠（ХТГЗ）生產。中型水輪機由塞謝爾塔的烏拉爾水力機械製造廠（Уралгидро-маш）生產。小型水輪機則由許多工廠生產，其中包括里文、埃里溫 and 里加的一些工廠，以及烏拉爾水力機械製造廠。

最後，水輪機可分為成批生產的、非成批生產的和單件生產的。大量需要的小型水輪機屬於成批生產的水輪機，它們在工廠備有存貨，可由倉庫直接發售。若僅在接受定貨後才開始設計和製造的一些水輪機屬於非成批生產的水輪機，但這些水輪機的工作參數應該是這樣的，使工廠可以期望其它水電站再來定制這種水輪機。為大型水電站設計的水輪機所採用的條件很少有重複，因而不大可能遇到再次定貨的情況，這種水輪機可稱為單件生產的水輪機（§17-2）^①。

隨著對水輪機的需要和生產的發展，成批生產與非成批生產之間的界限必然會趨向於更大的直徑。

任何發動機均應進行調節，亦即看需要情況，根據發動機應用去的出力（即負荷），有時使其發出較小的出力，有時使其發出較大的出力，直到該發動機在一定水頭下所可能達到的極限出力為止。該極限出力通常最能表示所裝置的水輪機的特徵。

任何小出力的水輪機均可能製造出來。但是，出力小於10瓩的水輪機在蘇聯未必具有實際的意義，也許僅在國內某些偏僻的角落可作裝設無線電之用。在國外水輪機的最大出

① 在本書第三版中已刪去第二版中的第十七章水輪機製造，故這裡所注§17-2已無意義。——譯者

力为 15.2 万千瓦 (加拿大修特-德-帕斯水电站); 苏联目前水輪机的最大出力为 12.6 万千瓦 (以列宁命名的伏尔加河水电站)。但是, 苏联已在制造 22.5 万千瓦的水輪机 (布拉茨克水电站) 和設計 50.8 万千瓦的水輪机 (克拉斯諾雅尔斯克水电站); 并在探討制造出力 100 万千瓦水輪机的可能性。

由公式 (2-4) 看出, 当水头和流量为不同的組合时, 只要二者的乘积保持为常数, 則許多水輪机 (在假定效率不变的条件下) 可以有相同的出力。但是, 这些水头不同而出力相等的水輪机應該有不同的尺寸, 而且按照其类型 (按相对結構参数和工作参数) 乃至体系也常常彼此不相同。

2-3 水輪机的效率

如前所述, 水輪机傳給其主軸的出力 (即有效出力) 对水輪机的水流出力 (理論出力或預想出力) 之比值总是小于 1 的系数。显然, 相对损失 (也可类似地称为“无效利用系数”或“損率”) 将为差数

$$\xi = 1 - \eta. \quad (2-6)$$

水輪机由于調节而可以通过不同的流量, 因而在同一水头下可以发出不同的出力。但是, 此时水輪机的效率并不保持为常数。通常在水輪机的出力比极限出力小一些时, 即約为极限出力的 70~90% 时, 效率达到某一最高值 (图 2-1)。这样, 水輪机的特征效率應該是两种工作条件 (两种工作状态) 下的效率:

在最优 (最有利) 工作状态下的最高效率 η_0 , 以及当水輪机在一定水头及轉速下調节至最大极限出力时的极限效率 η_{np} 。图解地表示水輪机工作参数之間的关系称为示性曲綫。在图 2-1 上表示出一种最简单的示性曲綫。

有时将水輪机在最优状态与极限状态之間工作称为水輪机过载。但对水輪机來說, 这种过载有着与其它机械 (如电机) 不相同的含义。对电机來說, 将出力增加到它只可能在某一短時間內工作的状态称为过载。电机长時間在过载下工作是不允許的, 因为此时电机会被损坏, 例如由于过热而燒坏。水輪机却可以經常在过载的情况下长期工作, 并且对它來說这还是常見的情况。

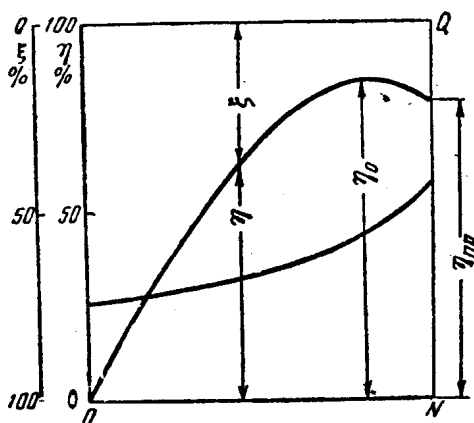


图 2-1 水輪机調节时其流量与效率的变化关系

水輪机的最高效率 η_0 值与許多因素有关: 水輪机計算与設計的完善性、水輪机制造质量、水輪机体系及类型、尺寸及水头、以及水輪机的出力等。但是, 在效率的估算中, 最具有代表性影响的是出力; 一般說来, 水輪机的出力越大, 則水輪机越大, 而效率也就越高。这种估算可采用表 2-1 中的数据。

在苏联水电站上可靠地測得的水輪机最高效率 (指所謂“自身效率”而言, 見 §7-4) 等于 93.6% (水輪机直徑 4.875 米、水头 15.5 米、流量 80.2 米³/秒及轉速 107)。在外国文献上, 曾几次說及反击式水輪机的最高效率为 94.4%; 究竟这个数值是否确实, 无法考究, 因而不能认为这一最高效率值是肯定的。

表 2-1 反击式水輪机的最优效率近似值与出力的关系

N , 瓩	30	60	100	200	300	600	1000
η_0 , %	80	81	82	83	84	85	86
N , 兆瓦	2	3	6	10	20	30	60
η_0 , %	87	88	89	90	91	92	93

极限效率 η_{np} 与水輪机体系的关系比之最优效率要密切一些；某些体系的水輪机的极限效率稍小于最优效率(例如約小 1 %), 而对另一些体系的水輪机来說, 其差值可达 15 %; 一般說来, 該差值約为 3~5 %。

水輪机与其輔助設備一起的造价仅占水电站造价的一小部分(例如 10 %, 大型水电站則約为 5 %), 因为水工建筑物的造价占去特別大的一部分。所以, 不应该在水輪机上节省造价, 只要可能提高其效率, 虽然其造价較高, 但几乎总是对国民經济有利的。

2-4 水輪机的水头

一般說来, 我們將流动液体在沿其流程的两个順序过水断面上的比能之差称为水头。

利用当地的地形、地质和水文条件, 借水工建筑物来造成水电站的上、下游水位差, 这一水位差称为装置水头。正如§2-2中所指出, 水輪机的工作水头 H 小于装置水头, 所差的数值是水輪机进水建筑物中的损失, 而有时也包括水輪机排水建筑物中的损失。

一般說来, 在任何可能有的水头下均可以装設水輪机。但是, 当水头很低时水輪机只能通过极小的流量和发出极小的出力, 否則就必须具有工艺上、运输上、建筑上和經济上所不能容許的巨大尺寸。所以, 小出力水輪机通常不用在水头低于 1.5 米的情况, 較大出力的水輪机通常不用在水头低于 3 米的情况。

在平原地区(如苏联欧洲領土上的大部分地区)最常利用 5~20 米的水头, 山区的利用水头則約为 50~400 米, 在丘陵地区或急滩河流上所利用的水头值常介乎此二者之間。

自然界中很少遇到能直接利用高水头的条件。为此, 必須要有陡峻降落的地形, 以及位置很高的、流量足够均匀的水源, 或者至少应有可能在上游建造均衡流量的水庫。

苏联利用的最高水头(630 米)系在卡查赫斯坦山区的一水电站上。在世界上利用的最高水头是: 奥地利的列謝克水电站为 1,770 米(水輪机单机出力为 22,800 瓩), 瑞士的善多林水电站为 1,742 米(水輪机单机出力为 31,300 瓩)。

全世界和苏联已利用的水头, 以及装設在这些水头下的水輪机基本参数的統計資料可参看文献 170 及 228。

2-5 水輪机的流量

水輪机的流量 Q 通常用米³/秒表示, 有时也用升/秒表示(此时, $\gamma = 1$ 公斤/升)。显然, 当水輪机的出力相同时, 水輪机的水头和效率越低, 則流量越大; 对同一水輪机来

說，若水头越高，流量越大，因而出力也就越大。在調节水輪机时，其流量可在极小值与极限值 Q_{np} 之間很寬的範圍內变化。上面提到的水头为 1,742 米的水电站的水輪机，其流量仅为 0.2 米³/秒，世界上最大的水輪机(在苏联)的流量达到 650 米³/秒，而外国最大的水輪机(在美国皮克維克水电站上)的流量只达 368 米³/秒。

关于有时采用的、水輪机的“过水能力”的概念可参看§17-6^①。

2-6 水輪机的直徑

采取水輪机基本工作机构——工作輪的某一直徑作为水輪机的特征尺寸，根据該特征尺寸可以將試驗用的小型水輪机的工作参数換算到所設計的較大型水輪机上。对不同体系的水輪机，对这一直徑 D 的規定是不同的(参看§13-2 及 5-3)。工作輪的外形(即最大的)結構直徑有时就是特征直徑，而有时却比特征直徑大一些。

在實驗室里作試驗研究用的不同种类的模型水輪机的特征直徑通常取为 0.25~0.46 米(0.18~1.0 米較少見，例如，在水电設計院的斯霍德年試驗性水电站上設有直徑 1.0 米的水輪机試驗台)。在外国最大的轉叶式水輪机(§10-6)的直徑达 8 米(在瑞典的瓦里昂水电站上)；在苏联直徑为 9.3 米的轉叶式水輪机早已工作了(在伏尔加河水电站上)，并正在制造直徑为 10.3 米的轉叶式水輪机(薩拉托夫水电站)。輻向軸流式水輪机的最大直徑(§9-1)在外国为 6.75 米(在美国的加依瓦西水电站上)，在苏联則为 5.45 米(德涅泊水电站)；苏联正在制造直徑 5.5 米和設計 7.5 米的輻向軸流式水輪机(布拉茨克及克拉斯諾雅尔斯克水电站)。斗叶式水輪机的最大直徑(§5-2)为 5.2 米(在美国的桑弗兰齐斯科 I 級水电站上)，在苏联則为 1.95 米(在赫拉姆水电站上)。

通常在同一水头下水輪机的直徑越大，則其流量和出力越大，但每分钟的轉数却减小。

H. H. 克拉列瓦建議按下式估算反击式水輪机的直徑[文献 229]：

$$D = k_1 \sqrt{N}, \quad (2-7)$$

式中 k_1 按 $k_1 = f(H)$ 曲綫图(图 2-2a)查得；

N ——水輪机在計算水头下的額

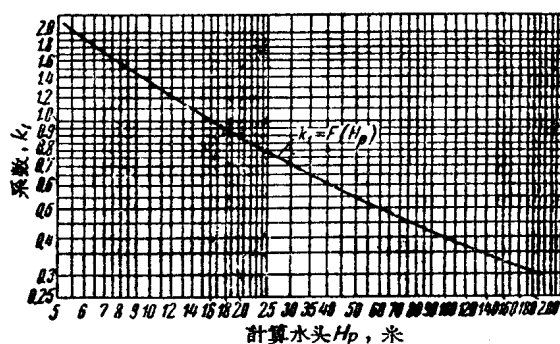


图 2-2a 确定水輪机直徑(确定系数 k_1 值)的曲綫图

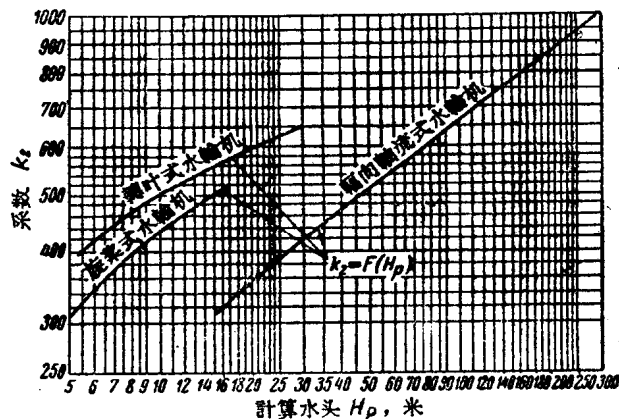


图 2-2b 确定水輪机直徑(确定系数 k_2 值)的曲綫图

① 原文誤为§18-6。——譯者