

〔苏〕 Ю. У. 埃杰尔 著

A stylized graphic of a water wheel. The central hub is a yellow circle with concentric green and blue rings. Radiating from the hub are 16 curved, petal-like segments. The top half of these segments is light green, and the bottom half is dark blue. Each segment has a fine, parallel line texture. The entire graphic is set against a background of vertical blue and green stripes.

水斗式水轮机

机械工业出版社

水斗式水轮机

〔苏〕 IO. Y. 埃杰尔 著

黄益生 译

寇希岩 校

机械工业出版社

内 容 简 介

本书系统地总结了近代水斗式水轮机及其水电站的设计、运行及机组的制造经验,全面地论述了水斗式水轮机的水力计算原理、结构设计步骤、试验研究方法,并列出了部分计算实例。书中还大量收集了各国有关水斗式水轮机的试验研究资料及数据,是一本很有实用价值的专业书。

本书可供从事水轮机设计、制造、安装、检修、试验及运行等技术人员参考,亦可供高等院校有关专业师生参考。

Ковшовые Гидротурбины

Ю. У. Эпель

Ленинград "Машиностроение"

Ленинградское отделение

1980年

水 斗 式 水 轮 机

[苏] Ю. У. 埃杰尔 著

黄益生 译

寇希岩 校

责任编辑: 高金生 版式设计: 乔 玲

封面设计: 姚 毅 责任校对: 张 媛

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 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 $9\frac{5}{8}$ · 字数 252 千字

1990年7月北京第一版·1990年7月北京第一次印刷

印数 0,001—1,120 · 定价: 10.40元

ISBN 7-111-01391-3/TH·237

译 者 的 话

水斗式水轮机是水轮机三大基本机型之一，主要应用在水头较高的区域内。由于它有很多独特的优点，因此广泛地使用在中、小型水电站上。近20年来，特别是多喷嘴立式机组出现后，其比速和效率均有巨大提高，这就促进了它的进一步发展。目前世界上已投产的机组最大单机容量超过了300MW，单机出力100MW以上的已有100多台。

尤·乌·埃杰尔所著《水斗式水轮机》一书（第二版），全面介绍水斗式水轮机理论、设计制造与运行维护的经验，并广泛收集世界各国有关的资料和数据。

目前我国水斗式水轮机制造工业相对落后。因此，译者为了满足广大水电站设计，水斗式水轮机机型试验研究、机组的设计制造和检修运行等方面人员的需要，翻译了此书。

在本书翻译过程中，曾得到水利水电科学研究院沈祝平同志大力协助。成都科技大学涂建炎同志为本书的出版做了很多工作，并对本书的第一章和第五章进行了初校，全书由兰州电机厂寇希岩同志校核，在此一并表示衷心谢意。

由于本人水平有限，译文中缺点和错误在所难免，恳请广大读者批评指正。

译 者

原 序

本书的第一版出版至今已过去15年了。在过去的这段时间里，国内外水轮机制造、特别是水斗式水轮机制造方面取得了很大进展。如果说在60年代初水斗式水轮机的单机出力不超过100~110MW的话，那么现在正在制造的水斗式水轮机单机出力已高于300MW，即出力增长三倍。正在设计的水斗式水轮机单机出力已达400~500MW。

在水轮机生产中，苏联一直优先重视混流式及转桨式水轮机，水斗式水轮机应用暂时还较少。然而，这一点必然要改进。安装在塔捷夫水电站上、出力为54.6MW的最大的水斗式水轮机已成功地运行了好几年。现在正在为若拉玛戈水电站设计出力为187MW的水斗式水轮机。

此外，对水头很高的水力蓄能电站，采用其它机型的水轮机是不合理的，只能采用水斗式水轮机〔9〕。国外很多这样的高水头蓄能电站早已投入运行。

水斗式水轮机非常普遍地运用在小型水电站上。在采煤、机床制造及化学工业等上，人们用它作水力传动装置。

近15年来，国内外都对水斗式水轮机进行了大量地研究工作，使其工作过程理论获得了进一步的发展，更主要的是它得到了具体的应用，积蓄了丰富的制造和运行经验。这些新的资料均被收入在本书中。

本书总的内容并未改变，只是简化或全面改写了第一版很多地方，书中的结构也有某些变化。除了水斗式水轮机的发展史之外。删去了目前在大、中型水轮机上、实际已不采用的其它类型的冲击式水轮机。

与第一版不同，相似性问题不再列为单独的一章，而是分散

在与具体原理有关的各章中。在相似原理部分，本书中引入了一套更为合理的“单位参数”。它比目前水力机械行业中所采用的习惯“单位参数”更易为大家理解和接受，并可推广应用到所有类型水轮机上。为此，书中也介绍了习惯“单位参数”，并对二者作了比较。

在第一版中已推导出水斗式水轮机的工作过程理论以及用其确定过流部件断面的方法，它当时尚未用于实践。但在本书出版前的这段时间内，这个理论不仅已正式采用，而且已经接受了实践及水轮机运行的考验。实践证明，采用这种理论是合理的、必要的。

根据实践经验，为了进一步完善工作过程理论，本书阐述了虽然复杂抽象、但更近于实际条件的、也许是较为合理的理论-图解法。用新的方法所获得的斗叶型线精度有所提高，但工作量增加得太多。当然，使用它的可行性问题，还有待实践来检验。

本书全面地修改和补充了与现代水斗式水轮机结构有关的章节。对苏联最大的塔捷夫水电站水斗式水轮机的结构和过流部分，单列一章介绍。

书中引用了列宁格勒金属工厂在水斗式水轮机制造和研究中的丰富经验，以及由该厂委托依·依·勃尔儒诺夫中央锅炉透平研究院设计院，对水斗式水轮机进行研究所取得的成果，及国内外公开发表的资料。

对本书的批评意见，作者表示感谢。

基本代号

a —— 形成弧半径;	p —— 压力; 转轮的换算节距;
B —— 斗叶宽度;	Q —— 流量;
c —— 绝对速度;	S —— 斗叶的浸水表面积;
D_1 —— 转轮的名义直径;	s —— 喷针行程;
$d_{\text{—}}$ —— 喷嘴出口孔的直径;	s' —— 喷针的相对行程;
d_0 —— 射流直径;	u —— 圆周速度;
d'_0 —— 射流径向断面宽度;	z —— 斗叶数; 位能;
E —— 单位重量液体所具有的能 量;	z_0 —— 喷嘴数;
g —— 自由落体的加速度;	ρ —— 密度;
H —— 水头;	ψ —— 速度系数;
h —— 斗叶的深度;	ξ —— 水力损失系数;
L —— 斗叶的长度;	φ —— 喷嘴的流速系数;
N —— 功率;	w —— 相对速度;
n —— 转速;	ω —— 角速度;
	η —— 效率。

目 录

译者的语

原序

基本代号

绪论..... 1

第一章 工作过程.....10

第一节 水力参数.....10

第二节 单位参数.....14

第三节 基本理论.....21

第四节 转轮相对于射流的运动.....25

第五节 射流相对于转轮的运动.....32

第六节 射流微点沿斗叶表面的运动.....34

第七节 作用在转轮上的水动力.....43

第二章 不考虑摩擦时的流体动力学.....47

第八节 斗叶进入射流.....47

第九节 斗叶背面最优的型线.....53

第十节 射流的漏损.....57

第十一节 斗叶数的选择.....63

第十二节 水在斗叶工作面内的流动.....66

第十三节 水在斗叶内流动的试验研究.....70

第十四节 斗叶内水流分析的某些实例.....74

第十五节 排出的水流与相邻斗叶的关系.....77

第十六节 相邻射流对斗叶内流动的影响.....81

第十七节 有限尺寸的射流在斗叶内的流动情况.....89

第三章 考虑摩擦时的流体动力学.....99

第十八节 水流在进水装置内的流动.....99

第十九节 射流.....105

第二十二节 真实流体在斗叶内的流动	107
第二十三节 从转轮中排出的水流	115
第二十四节 风损	118
第二十五节 气蚀	121
第二十六节 能量平衡	129
第二十七节 尺寸效应	132
第四章 试验研究	137
第二十八节 试验项目	137
第二十九节 试验装置	140
第三十节 能量试验	143
第三十一节 气蚀试验	148
第三十二节 力特性试验	158
第三十三节 强度试验和振动试验	164
第五章 确定通流部分的断面尺寸	171
第三十四节 基本参数的确定	171
第三十五节 进水管	186
第三十六节 喷射机构	190
第三十七节 外调节机构	195
第三十八节 转轮	201
第三十九节 机壳	206
第四十节 制动喷嘴	208
第六章 现代的水斗式水轮机	211
第四十一节 塔捷夫水电站	211
第四十二节 苏联其它的水斗式水轮机	240
第四十三节 国外的大型水斗式水轮机	246
第四十四节 水斗式水轮机的发展前景	284
参考文献	296
部分名词和词组的俄中对照表	298

绪 论

水轮机接受水流所携带的机械能，在机组主轴上产生转矩。
按照伯努利方程

$$E = \frac{P}{\rho g} + \frac{c^2}{2g} + z = \text{const} \ominus$$

即单位重量的运动水流所具有的能量 E 可用三部分能量之和表示：压力能 $P/\rho g$ ；位能 z ——势能；动能 $c^2/2g$ 。

水轮机可分为冲击式和反击式，由于它们的转轮不同，其利用液能（通常是水能）的部分将有所不同。当液体进入冲击式水轮机转轮上时，其全部能量均已转换为动能。反击式水轮机既利用水流的动能，又利用压力能。在水轮机的转轮上，位能相对说来变化很小。

可以指出，冲击式水轮机与反击式水轮机相比有下列不同特点：

1. 如果说反击式水轮机（图 1-1 a）过流部分的供水部件（导水机构，涡壳）应当在转轮之前按相应的工况建立一定的水流环量，即一定的速度和压力分布的话，那么冲击式水轮机（图 1-1 b）的喷射机构则是将液体的全部机械能转换为动能，当工况不同时，它改变的仅是流量。故在冲击式水轮机喷射机构与转轮之间，以及从转轮中排出的水流的压力均为恒定值，通常此压力等于大气压。但也有这种情况，即在仔细观察时发现此压力不等于大气压，而是略低一些。这样，在冲击式水轮机的转轮里，液体是做无压运动。

2. 在反击式水轮机的水流中，其变化的压力通常不等于大气压，故在导水机构、转轮及转轮以后的区域内，需要有严格密

⊖ 这里采用符号 const 代表某个常数，以下同——译者注。

闭的流道。在冲击式水轮机里，喷射机构以后的水流的全部能量均已转换为动能，其工作过程是在空气中进行的。因此，冲击式水轮机有时又称为自由射流式水轮机，反击式则称为压流式。

3. 反击式水轮机必须设有尾水管（图1-1 a），以恢复压力和减小出口流速（属相应的出口损失）至最低限度。在设计工况下，水流离开冲击式水轮机转轮时，只具有相对说来很小的流速，并通常是处在大气压之下，因此它不需要尾水管。从另一方面讲，由于没有尾水管，导致冲击式水轮机所利用的水头仅为上游标高与转轮高程之差值，而转轮高程与下游标高间的落差却未被利用。这个未被利用的差值称为转轮的安装高程水头损失。众所周知，反击式水轮机利用的则是上游至下游的整个落差。

4. 通常冲击式水轮机只有部分斗叶工作，即工作水流不是连续落入转轮各斗叶上，它们仅仅是经过射流作用区域时才工作，在其余范围内斗叶不与工作水流发生作用。在原理上可能存在全部转轮斗叶同时过水的水斗式水轮机结构，但它们至今未能得到运用，反击式水轮机在原理上不能局部过水。最广泛采用的冲击式水轮机是水斗式水轮机。

在国外文献中，水斗式水轮机（Becherturbine）有时称为自由射流式（Freistrahlturbine）、脉冲式（Impulsturbine）。

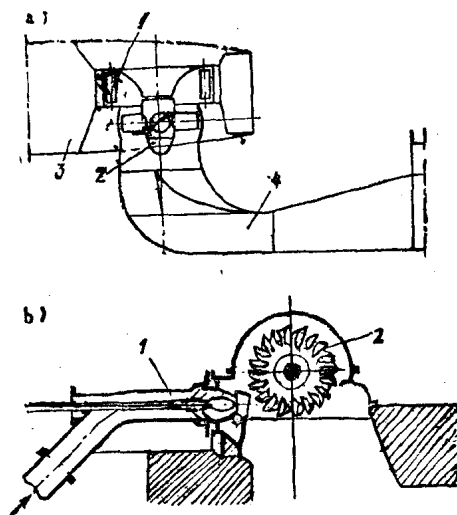


图1-1 水轮机简图

- a) 反击式（转桨式） b) 冲击式（水斗式）
 1—导水机构（反击式）或喷射机构（水斗式）
 2—转轮 3—蜗壳 4—尾水管

切击式或培尔顿式(Pelton Wheels)水轮机。水斗式、混流式和轴流转桨式水轮机作为现代水力发电工程所采用的水轮机的基本类型。众所周知,还有其它类型的冲击式水轮机,例如斜击式(欧尔戈式)、双击式(班克式)等等,但是对大中型水电站,至今它们未获得运用。

水斗式水轮机经过一个很长的发展过程^[39]。它正式诞生的日期被认为是1880年,当时确认了烈斯切拉·培尔顿(1829~1908年)的专利许可证。

水斗式水轮机的过流部分(图1-2),由进水管(主管)8、喷管6、转轮4、机壳(机壳座2和机壳盖3)和排水渠11等组成。转轮固定在水轴15之上。主轴将扭矩传递给发电机转子。由压力输水管10流入的水被输送至喷管,经过喷射机构将水流的全部能量转换为动能,并形成紧密的圆柱形断面射流,沿着与转轮相切的方向射往斗叶。水流在给出其储存的能量之后,以很小的绝对速度离开转轮,并且通常是绕着机壳的内表面流动,最后落入下部的排水渠内。

水斗式水轮机既有卧式,也有立式的。卧式水轮机在一根轴上有一个、两个或3个转轮。每个转轮有一个(图1-1b)或两个喷嘴(图1-2)。立式水轮机每个转轮有几个(多至6个)喷嘴。近些年来已证明,原则上有可能在立式水轮机的一根轴上使用两个或更多的转轮^[38]。

水斗式水轮机的喷射机构由喷管6(图1-2)、外调节机构(此处为分流器)5及它们的操作机构组成。喷嘴是喷管的一部分,它由一个圆形断面的收缩流道(由喷嘴帽和喷嘴口组成)在其内装设有用以调节流量的可移动物体(喷针)组成。在技术文献里,有喷针的喷嘴有时称为朵布里喷嘴。喷针由接力器17推动,故需与位于水流之外的接力器活塞杆相联接。为了从过水的腔体内引出杆件,在喷嘴之前应有一个部件——肘管(图1-2)。针杆对射流水柱的质量产生不良影响。因此,目前常采用不用杆件操作喷针的无杆喷管(直流喷嘴)。这种喷管的接力器布置在顺着水

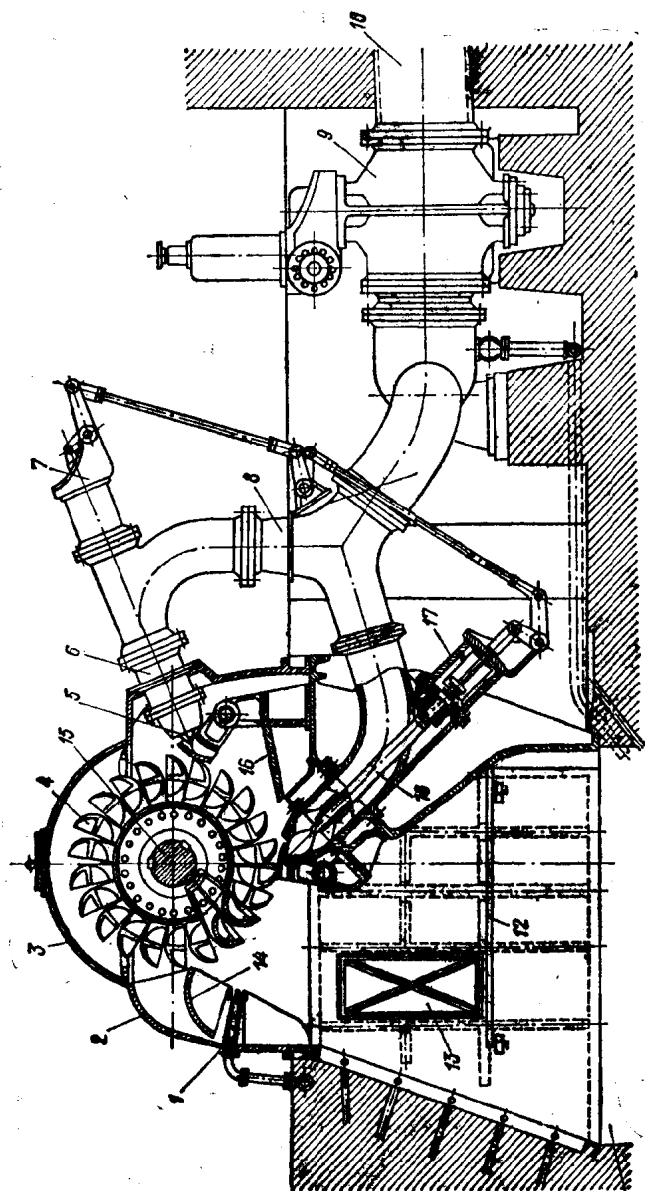


图1-2 第热尔顿水电站的卧式双喷嘴水斗式水轮机

- 1—制动喷嘴 2—机壳座 3—机壳盖 4—转轮 5—外调节机构（折回器）
6—喷嘴 7—喷嘴操作机构 8—进水管 9—球形阀 10—压力输水管 11—
排水泵 12—平水栅 13—进口门 14—防冲板 15—主轴 16—防护板
17—接水器 18—喷嘴杆

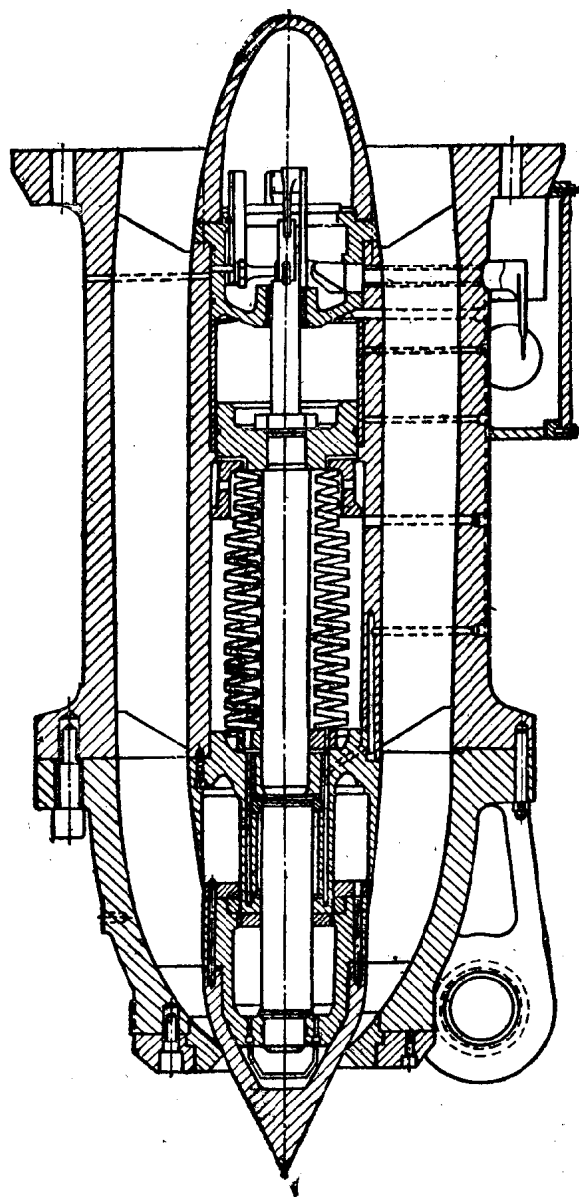


图1-3 “奥罗兰德”水电站水轮机的直流喷嘴

流的壳体之内 (图 1-3), 故减少了水力损失, 改善了射流组织并减小了水轮机的尺寸。

在运行过程中, 当甩部分负荷或甩全部负荷时, 必须避免由于进入转轮内的水流继续做功而造成机组过速。用快速关闭喷嘴的办法来避免过速是不行的, 因为不允许在压力输水管中出现可能导致严重事故的强烈水锤。为了很快地从转轮上引开水流 (比喷嘴关闭快得多), 通常在水斗式水轮机里装设有特殊装置——外调节机构 (折向器或分流器)。折向器 (图 1-4 a) 在需要时可以把整个射流折出转轮之外。由于全部或大部分射流不经过转轮斗叶, 故作用在水轮机主轴上的扭矩减小了。分流器 (图 1-4 b) 的作用不同于折向器, 它一般不是将整个射流, 而是将其大部分或小部分完美地从转轮上引开。实际上, 人们常用的既有折向器, 也有分流器。与分流器相比较, 在引开整个射流时, 折向器仅需较小的位移, 其承受的振动也较小, 在高水头时不会很快损坏。不过, 采用折向器将导致增加由喷嘴口至射流进入转轮斗叶处之间的距离, 这会在某种程度上降低水轮机的能量指标。

水斗式水轮机的转轮 4 (参看图 1-2) 由轮盘及用其悬臂固

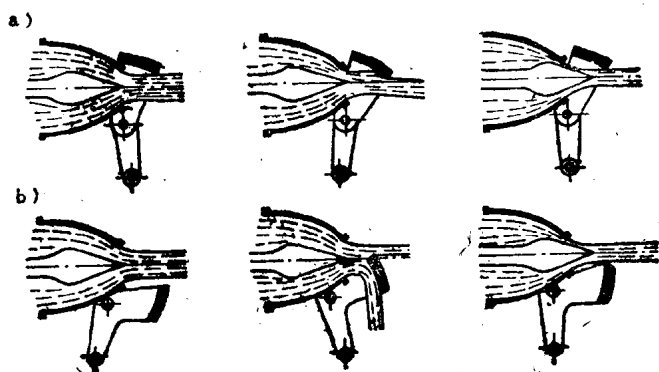


图1-4 外调节机构作用示意图

a) 折向器 b) 分流器

定在轮盘之上的斗叶组成。转轮斗叶的形状是由一条尖锐的脊刃(分水刃)——进水边分开为两个对称的水斗。由切线方向进入斗叶之上的射流被进水边分成两个相等的部分,它们对称地流过斗叶工作面。为使其后的斗叶不进入先前射流作用的区域,并且不妨碍先前的液流,故在斗叶的外缘上预开有特殊的切口。按照射流微滴应全部进入各斗叶之内的条件,转轮斗叶数选择最小值。大多数水轮机转轮上有20~40个斗叶。但是,众所周知,有些高水头水轮机的斗叶数超过50个。

机壳是防水的,用以保护机房。水轮机装在机房内。从水轮机的能量指标观点出发,希望有宽大的机壳,以确保顺利地排出作完功的水。但是,增加机壳尺寸将导致整个水轮机、水电站厂房尺寸和金属消耗量的增加。故机壳通常做成紧凑的、能很快地排出作完功的水的形状,并且还能防止这些水因反射而回落在转轮或射流之上。为此,还设置有特殊的挡板16和防冲板14(参看图1-2)。

冲击式水轮机的基本理论最初是由留拉尔德·欧拉推导出来的[14]。在分析研究细小射流薄层的平面流线时,他第一个指出:当射流沿切向引入时,这种水轮机的斗叶应使流过它的水流回转 180° 角,其移动速度应为射流速度之半。水斗式水轮机工作过程,第一次系统的试验研究工作,曾在1913年进行过[66]。当时曾给出了推荐的转轮尺寸及斗叶数的选择方法。水斗式水轮机详细的基本理论曾在30年代很有价值的水轮机著作[35]及著作[56]中仔细分析过。这个理论通常在一般的水轮机教材中讲述。

巨型水斗式水轮机通常装在水头超过500~600 m处。最高水头的水轮机装在奥地利的列塞克水电站中($H = 1770$ m, $N = 22.8$ MW)。略低于它的是瑞士的萨达琳水电站($H = 1740$ m, $N = 36.8$ MW)。在苏联的水电站中,最高水头约为580 m(塔捷夫水电站)。如果水轮机的运行条件是担负波动很大的负荷、或是其流量变化颇大时,大型水斗式水轮机采用水头200 m左右时也是适当的。因为在上述变化时,水斗式水轮机效率下降较反击式水

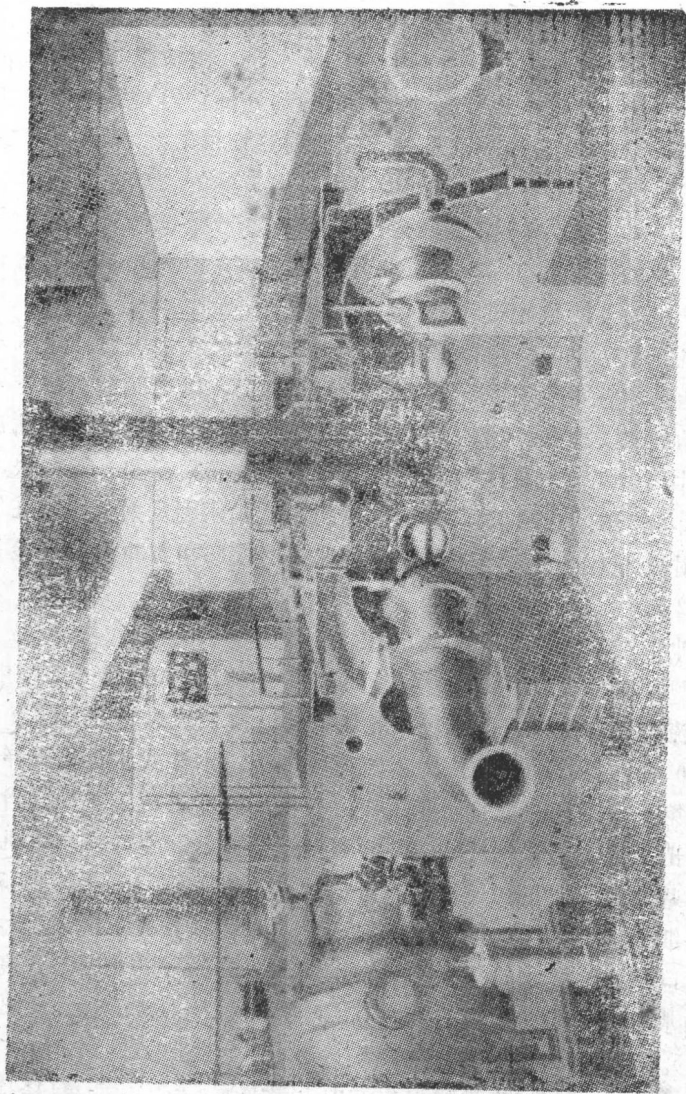


图1-5 塔捷夫水电站立式6喷嘴水斗式水轮机