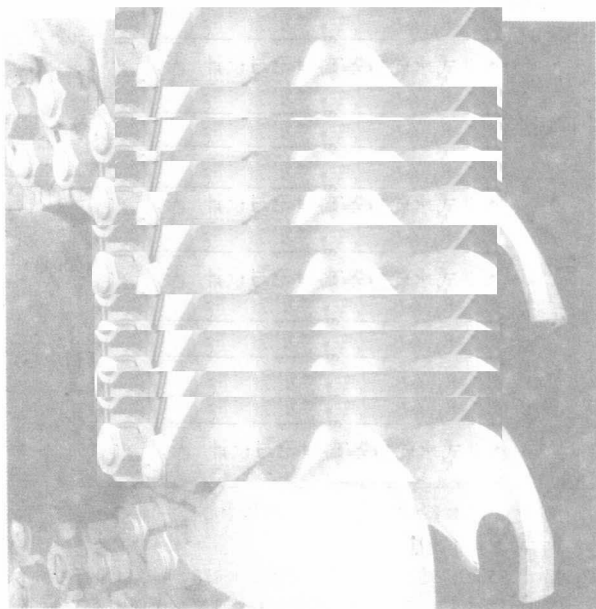


Pelton Turbine
Basic Theory and Design

水斗式水轮机 基础理论与设计

周文桐 周晓泉 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

前言

国内外，人们对冲击式水轮机研究的投入远远小于对反击式水轮机的研究。更为遗憾的是，冲击式水轮机一直笼罩在反击式水轮机的巨大阴影之中。基本理论套用，研究方法照搬，概念混淆；冲击式水轮机的控制理论、控制机构借自反击式水轮机，也基本保持近百年不变……

中华人民共和国的水轮机事业，经半个世纪的艰苦奋斗，硕果累累，从无到有、从小到大，战果辉煌。但今日回首，我们水轮机人，在冲击式水轮机领域里，曾陷入一个又一个误区，走了不少弯路，进展缓慢。

仅以水斗式水轮机设计而言，按照反击式水轮机的套路，将模型试验结果按相似理论设计真机，并给定水斗式水轮机的动力特性——这便是所谓的“能量换算”。由于设计理论的失误，在设计时便“丢失”了水轮机效率。按此，水斗式水轮机几乎不能在其最佳效率下工作。

解决这个问题的关键在于冲击式水轮机的基本理论。1965年，Ю·У·Эдель（埃杰尔）推出其专著《Ковшовые Гидротурбины》（水斗式水轮机），1980年出版了第二版（仍然是本学科的唯一专著）。他在前人的科学研究及试验成果的基础上，将水斗式水轮机理论研究更上一层楼，做出了突出贡献。但是，他在书中仍然写到：“如果说，在反击式水轮机领域，已经有了严谨的理想流体绕流理论的话，那么，在水斗式水轮机，这样的理论还没有找到。”他虽然对水斗式水轮机基本理论进行了多方面论述，但还是明确指出，冲击式水轮机或水斗式水轮机的基础理论有待研究、理顺、完善及深

入拓展。

水斗式水轮机由小型、单机孤立运行的卧式水斗式水轮机发展而来，原来的双调节机构（喷嘴与切流器或偏流器协联并用）堪为经典之作！然而在今天，许多大型、立式、多喷嘴水斗式水轮机发电机组运行于大型电网之中，这种双调节机构现在已不再必要，水斗式水轮机要更新换代了。

本书从冲击式水轮机的基本理论出发，重点详细地探讨了水斗式水轮机的相似理论、模型试验、动力性能、转轮破坏和设计等基础理论和设计理念，并对水斗式水轮机的未来发展进行了前瞻性的展望。本书适合从事水轮机行业的科研、设计、试验的科技人员以及高等院校中流体机械行业的师生阅读，也可供相关专业人员参考。

为了冲击式水轮机乃至水斗式水轮机的技术进步，获取尽可能高的效率，打造更好的技术经济效益，我们需从一个新的视角去认识和研讨冲击式水轮机，还它以公正，给它一个美好的明天。

作 者

2007 年 6 月

符 号 目 录

α_1	射流入射角, 射流进水角	F_U	射流对水斗的作用力在转轮运动方向 U 的分量
α_2	射流出水角	g	重力加速度
β_1	射流相对进水角	H	水轮机工作水头
β_2	射流相对出水角	H_0	冲击式电站毛水头, 以喷嘴口中心为基准的上游高层
γ	水的重度, $=\rho g$	h_w	喷嘴能量损失
ζ	水斗表面摩擦阻力系数	Δh	由上游至喷嘴进口之间压力钢管水头损失
η	效率	k	基本原理模型中出口动能与水斗进口动能的比值
η_j	喷嘴效率	k	模型喷嘴行程比
η_r	转轮效率	Δl	水斗型线的微分段长度
μ	喷嘴能量损失系数	m	水质点的质量
ω	水斗角速度	m	射流直径与喷嘴行程关系函数
ρ	水的容重	n	水轮机转速
τ	时间	n_s	比转速
φ	射流速度系数	n'_1	单位转数
φ^2	喷嘴效率	n'_{10}	最优单位转数
φ'	角度	N	功率、出力
ψ	速度比, 水斗运动速度 U 与射流速度 V_1 的比值	N_i	水机出力
ψ_0	最优速度比	p	压力表测的压强值
∇	夹角	p, P	水斗对射流的反作用力
a	推导摆线时的虚拟圆半径	P	射流段长度
a	加速度	Q	流量
d_0	射流直径		
d_1	喷嘴口直径		
dt	时间微段		
D_1	水轮机直径		
F	射流对水斗的作用力		

Q'_1	单位流量	W	射流相对与水斗的相对速度
Q'_{10}	最优单位流量	W_1	射流的人流相对速度
r	半径, 极坐标位置	W_{1u}	射流入流相对速度在转轮运动方向 U 的分量
S	喷嘴行程	W_2	射流的出流相对速度
t	转轮转角	W_{2u}	射流出流相对速度在转轮运动方向 U 的分量
t	时间	Z_0	喷嘴出口至下游水面的高程
Δt	时间	Z_1	喷嘴进口压力表高程 (相对于喷嘴出口中心)
U	水斗运动速度	Z_0	水斗数
V	喷嘴进口断面流速		
V_1	射流绝对速度, 射流进口绝对速度		
V_2	射流出流绝对速度		
ΔV	射流段体积		

目 录

前言

符号目录

1 冲击式水轮机基本理论	1
1.1 冲击式水轮机类别	1
1.2 水斗式水轮机发电站	5
1.3 水斗式水轮机能量平衡	6
1.4 冲击式水轮机基本原理模型的构建	8
1.5 冲击式水轮机基本原理模型	10
1.5.1 理想射流对固定的理想水斗的作用力	11
1.5.2 原理模型基本方程	13
1.5.3 冲击式水轮机基本原理模型基本方程的数值解	15
1.6 回顾冲击式水轮机基本原理研究	15
1.6.1 射流作用于平板和弯板	16
1.6.2 射流作用于转轮水斗	18
1.7 冲击式水轮机原理模型出口动能	20
1.7.1 冲击式水轮机基本原理模型转轮水斗出水动能	21
1.7.2 冲击式水轮机基本原理模型水斗出水方向	22
1.8 冲击式水轮机基本原理模型效率特性	22
1.9 水斗式水轮机基本原理模型特性	25
1.10 转轮同射流水质点间的相对运动	33
1.10.1 射流相对转轮的运动	33
1.10.2 关于所谓的水斗背面最佳型线	34
1.10.3 转轮水斗相对于射流的运动	35

1.10.4	射流分段进入水斗	37
1.10.5	关于水斗式水轮机的水斗数	39
1.10.6	关于诺莫图	41
1.11	射流	42
1.12	冲击式水轮机基本原理模型水斗型线	44
1.13	实际水斗式水轮机转轮水斗	45
1.13.1	射流直径影响	45
1.13.2	转轮直径影响	46
1.13.3	水斗式水轮机直径比	47
1.13.4	水斗数影响	48
2	关于相似理论及模型试验	49
2.1	水斗式水轮机模型试验	50
2.2	冲击式水轮机单位参数	51
2.2.1	单位流量	51
2.2.2	单位转数	52
2.3	水斗式水轮机模型特性曲线	53
2.3.1	水斗式水轮机的开度线	53
2.3.2	水斗式水轮机等效率线呈卵形	54
2.3.3	未来的水斗式水轮机模型特性曲线	55
2.3.4	最优效率线	55
2.3.5	高转数区等效率线密集	57
2.3.6	水斗式水轮机模型特性曲面	58
2.3.7	特性曲面应是光顺而圆滑的	58
2.4	水斗式水轮机设计	60
2.4.1	水斗式水轮机的转数及转轮直径	60
2.4.2	水斗式水轮机射流直径(或流量)	61
2.5	喷嘴	62
2.6	关于相似理论	64
2.6.1	直径比 $\frac{D_1}{d_0}$ 与比转数	65

2.6.2 关于标准直径、系列型谱	65
3 水斗式水轮机动力性能	67
3.1 水斗式水轮机基本原理模型动力性能	67
3.2 水斗式水轮机最优工况点	68
3.3 水斗式水轮机最优效率线	69
3.4 关于水斗式水轮机的性能换算	70
3.5 关于比例尺效应	72
3.6 水斗式水轮机能量损失	74
4 水斗式水轮机转轮破坏	77
4.1 关于汽蚀理论	77
4.2 水斗式水轮机汽蚀质疑	79
4.3 水斗破坏机理	82
4.3.1 水斗工作面	82
4.3.2 水斗背面破坏	84
4.3.3 水斗侧面	85
4.4 水斗销的断裂及受力面磨损	85
4.5 水斗裂纹及断斗	86
5 水斗式水轮机转轮设计	88
5.1 喷嘴设计	90
5.1.1 水斗式水轮机射流直径	90
5.1.2 喷嘴	90
5.2 转数及转轮直径	91
5.3 内摆线	92
5.4 水斗数目的选择	93
5.4.1 每个水斗每次工作所接受的射流段	93
5.4.2 水斗数	94
5.5 水斗在转轮轮辐上的位置	97
5.6 射流在水斗工作面上的运动	98
5.7 射流间的干扰	99
5.8 水斗的进水边	100

5.9	水斗的出水边	103
5.10	转轮水斗型线	106
5.11	水斗背面	106
5.12	水轮机设计效率的评估	107
6	水斗式水轮机展望	110
6.1	水斗式水轮机的飞逸及其限制	110
6.2	水斗式水轮机的双调节机构	112
6.3	水斗式水轮机的控制机构	113
6.4	水斗式水轮机的机壳	117
	参考文献	120

1 冲击式水轮机基本理论

1.1 冲击式水轮机类别

冲击式水轮机是按动量定理工作的水力原动机。这类水轮机与反击式水轮机截然不同，它们由喷嘴和转轮组成；转轮与喷嘴各司其职，甚至可以说，它们彼此互不干涉。喷嘴将来自压力钢管的水流，经喷嘴口喷入大气之中，形成所谓的射流。射流乃空气中直线自由运动的质点束，射流水质点的所有能量均表现为动能。射流冲击水轮机转轮，便是水质点束对水轮机转轮叶片或水斗的撞击，这同刚体力学别无二致。

冲击式水轮机通常分为：双击式水轮机（见图 1-1），斜击式水轮机（见图 1-2）及水斗式水轮机（见图 1-3）。

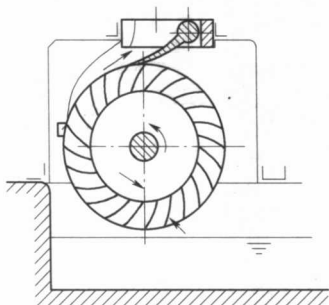


图 1-1 双击式水轮机



图 1-2 斜击式水轮机

（源自《水力机械（第二版）》，西安理工大学金钟之编，1986年6月出版。）

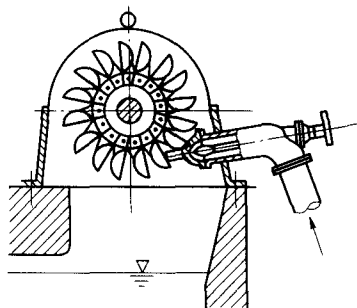


图 1-3 水斗式水轮机

双击式水轮机是一种小型的特殊冲击式水轮机，国内于 20 世纪 60 年代曾有过大量的研制工作。但是，因为其自身的先天缺陷，诸如效率低下、运行不够稳定、不可能用于高水头大出力等，目前已退出工业应用。双击式水轮机的历史已经结束。

斜击式水轮机与水斗式水轮机都是由喷嘴和转轮构成。喷嘴，作为水力元件，可与任何大小的水轮机转轮匹配，所以，在冲击式水轮机中，喷嘴是一独立的组成元件，它为转轮提供射流，而后者与转轮进行能量交换。

喷嘴的种类多种多样，按发展历史，喷嘴可分为手动弯喷嘴（见图 1-4）、液压操作双调节弯喷嘴（见图 1-5）、水操作双调节直喷嘴（见图 1-6）。经过多年时光的洗礼，水操作双调节直喷嘴获得广泛应用。

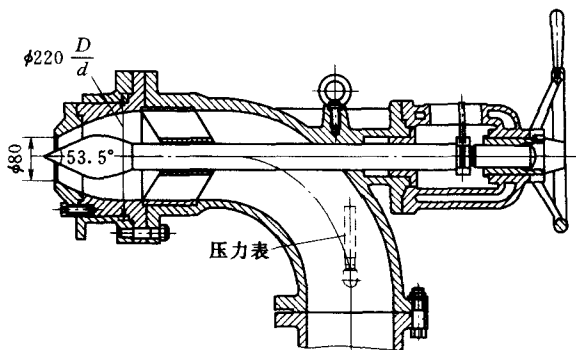


图 1-4 手动弯喷嘴

斜击式水轮机的喷嘴的轴线或射流与水轮机转轮平面相交，其交角为 α_1 ；而水斗式水轮机的射流正好置于水轮机转轮的対

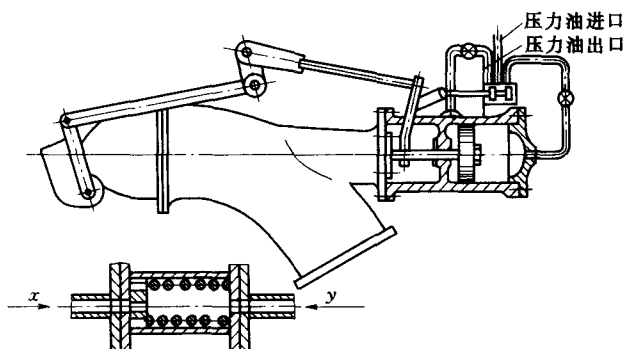


图 1-5 液压操作双调节弯喷嘴

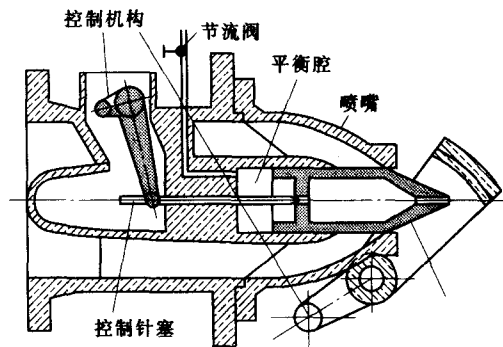


图 1-6 水操作双调节直喷嘴

称面内，即射流的入射角为 0 。

斜击式水轮机与水斗式水轮机转轮分别示于图 1-7、图 1-8、图 1-9。斜击式水轮机与水斗式水轮机，从转轮结构看来，差异甚大，但是理论上，它们之间却完全一样。按冲击式水轮机基本原理模型理论，水斗式水轮机就是射流入射角为 0 的斜击式水轮机，而且水斗式水轮机是所有斜击式水轮机中效率最高者。正因为如此，水斗式水轮机才获得了广泛应用，而所有其他任何斜击式水轮机都将退出历史的舞台。过去的模型试验研究也证明

了上述论点。所以，今后的所谓冲击式水轮机均指的是水斗式水轮机，基本理论的阐述除外。

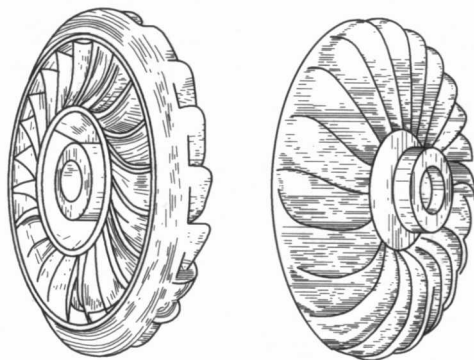


图 1-7 斜击式水轮机转轮

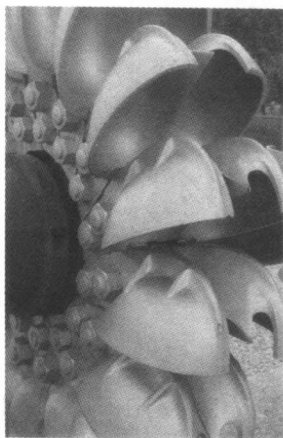


图 1-8 水斗式水轮机转轮

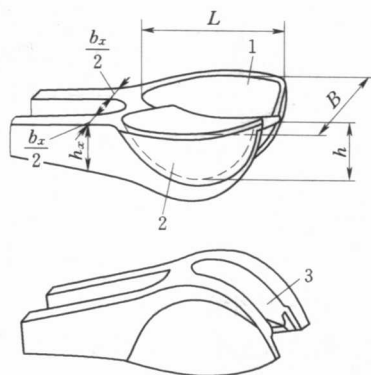


图 1-9 水斗式水轮机水斗

1—工作面；2—侧面；3—背面

从前，对水轮机的分类，大都将冲击式水轮机与反击式水轮机并排列在水轮机名下。这当然是对的，水力原动机都该称为水轮机。但是，回顾历史，也许两大类水轮机的最初的混淆便源于此。研究冲击

式水轮机是一门与研究反击式水轮机完全不同的独立学科,冲击式水轮机必须抛开反击式水轮机的羁绊,沿着自身的发展道理健康发展。

1.2 水斗式水轮机发电站

水斗式水轮机用于高水头、小流量的水力环境,故水电站均处于偏远山区,于山间溪沟筑坝蓄水,经水坝输水至明渠,水流在山间蜿蜒数公里或数十公里抵达电站前池。前池附近设溢流堰,在水轮机出力减小而渠道供水量尚来不及适应时,过量的水便经溢流堰排去。开启前池闸门,水历经压力钢管、水轮机主阀门,进入水轮机喷嘴。如图 1-10 所示。

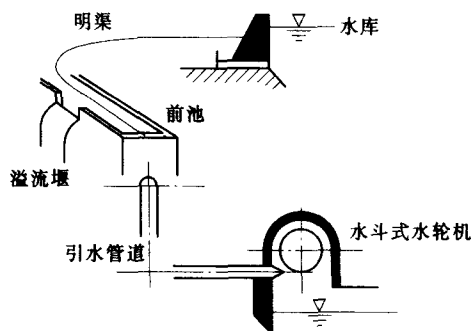


图 1-10 水斗式水轮机发电站示意图

水斗式水轮机运行效率很高,而且效率随流量的变化而升降的幅度很小。目前,水斗式水轮机的运行效率均可达到 90% 以上。就能源利用而言,水斗式水轮机可谓最佳者。此类电站,滴水如金,因此,水斗式水轮发电机组应该在电网中担任基荷。

水斗式水轮机水电站,给水系统特别长。一旦水轮机工况变化、流量平衡被打乱,恢复并建立另一平衡的调节过程比较长。若大幅度减负荷,水轮机可以迅速完成任务。但是,由于明渠来水不能及时减小,而压力钢管输水量却突然降低,则导致前池水位抬高,多余的水量将从溢流堰排去,这将造成巨大的能量损失。若突然大幅度增负荷,水轮机需水量大增,明渠供水可能来

不及迅速补充，或可形成另一事故。这也是水斗式水轮机不适宜调峰的有力论据。

与河床式水电站相比，此等水电站的运行水头的变化是很微小的。水斗式水轮机的使用水头超过 1000m，已不稀奇，即便前池水位或有些许波动，其相对于水轮机工作水头的变化量亦是微小的。正因如此，水斗式水轮发电机组的运行是非常稳定的。

反击式水轮机最高模型效率甚至超过 94%，但这仅仅是一个工况点而已。虽然此类机型的运行范围很宽，但真正在最高效率下运行的几率非常小。相反，冲击式水轮机，却能一直在其最优效率条件下运行，能更好地利用水力资源。

1.3 水斗式水轮机能量平衡

水斗式水轮机是由彼此独立的喷嘴及转轮构成，它们的工作是独立的，它们对水轮机效率的影响也是独立的。设计水斗式水轮机，就是分别设计高效喷嘴及高效转轮，然后将其组合成设计需要的水斗式水轮机。

喷嘴的进口就是水斗式水轮机的进口，其净水头或工作水头 H ，应该定义为喷嘴进口液体相对于喷嘴出口标高的比能。若仿照反击式水轮机，定义冲击式水轮机的毛水头，不但没有实际意义，反而形成某些混淆。喷嘴出口至下游水面间的高程 Z_0 ，诚为水斗式水轮机运行所必须，但这段水头不为水轮机所用、不参与能量交换，故不可纳入水头的论述之中（见图 1-11）。

多喷嘴水斗式水轮机，皆为立式结构，喷嘴水平，呈轴对称布置（见图 1-12）。环形管将高压水流导入各个喷嘴，与喷嘴一起形成水斗式水轮机的引水部件。所以环形管的入口便是立式多喷嘴水斗式水轮机的进口，多喷嘴水斗式水轮机的工作水头应该定义为环形管进口水流（相对于喷嘴轴线标高）的比能。

严格地讲，各个喷嘴进口的比能是不同的（或水头不同），这将不可避免地造成各喷嘴提供的射流的直径或流量的差异。但这一差异是微小的。水斗式水轮机工作水头很高，而喷嘴之间的水头差源于环形管部分管段的水力损失，后者与其工作水头相

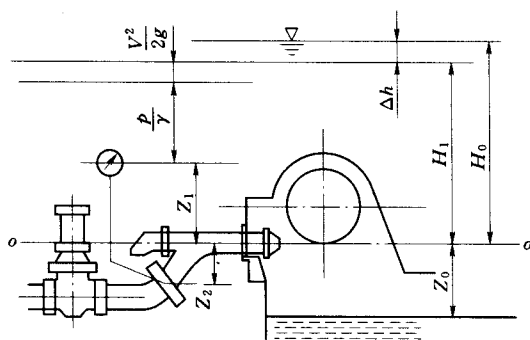


图 1-11 冲击式水轮机水头示意图

比，甚至可以忽略不计。因此，按各喷嘴的流量计算平均水头，从实用角度来看，没有现实意义。事实上，历史经验表明，水斗式水轮机模型试验或真机试验时，水头的测量点总是选定在环形管的进口断面。

冲击式水电站的毛水头 H_0 （以喷嘴口中心为基准的上游或前池高程）（见图 1-11）

$$H_0 = \frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + Z_1 + \Delta h$$

(1-1)

式中： H_0 为水轮机毛水头； p 为喷嘴进口压力表测值； γ 为水的重度（值为 ρg ）； V 为喷嘴进口断面流速； g 为重力加速度； Z_1 为喷嘴进口压力表高程（相对于喷嘴出口中心）； Δh 为由上游至喷嘴进口之间压力钢管水头损失。

水轮机的工作水头（喷嘴进口比能）为

$$H = \frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + Z_1 \quad (1-2)$$

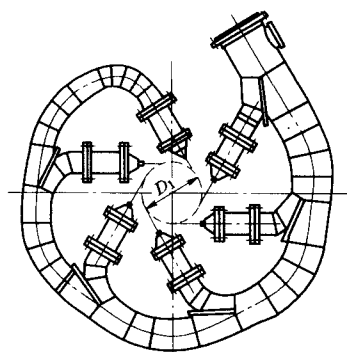


图 1-12 多喷嘴水斗式水轮机示意图

按喷嘴进口及出口的伯努利方程, 得

$$H = \frac{V_1^2}{2g} + h_w = (1 + \mu) \frac{V_1^2}{2g} \quad (1-3)$$

式中: h_w 为喷嘴造成的能量损失; μ 为喷嘴损失系数。

$$\text{从而得射流速度} \quad V_1 = \varphi \sqrt{2gH} \quad (1-4)$$

$$\text{速度系数} \quad \varphi = \sqrt{\frac{1}{1 + \mu}} \quad (1-5)$$

$$\text{喷嘴效率} \quad \varphi^2 = \frac{V_1^2}{2gH} \quad (1-6)$$

式中: H 为水轮机进口比能或工作水头。

喷嘴损失能量 h_w (即 $\mu \frac{V_1^2}{2g}$) 之后, 将射流喷入大气中, 射流投向转轮水斗并做功。射流所具有的能量为单一的动能 $\frac{V_1^2}{2g}$, 它的大小仅取决于水轮机工作水头, 与射流运动方向、射流直径无关 (见图 1-13)。

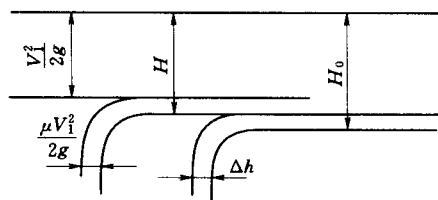


图 1-13 工作水头示意图

对于反击式水轮机, 从蜗壳进口至尾水管出口, 为连续的有压流动空间, 转轮至尾水之间这段高程为水轮机所用, 水轮机的毛水头定义为上、下游水位差, 顺理成章。而水斗式水轮机的毛水头为 H_0 , 它就不应该是上、下游水位之差。

1.4 冲击式水轮机基本原理模型的构建

过去, 在冲击式水轮机的研究上, 总是将水斗式水轮机与斜击式水轮机视为两种不同的水轮机, 正因此, 总是孤立地、