

流体机械概述

1.1 流体机械的定义

流体机械是指以流体(液体或气体)为工作介质与能量载体的机械设备。流体机械的工作过程是流体的能量与机械的机械能相互转换或不同能量的流体之间能量传递的过程。在大多数的技术和生活领域中都需要输送流体介质或借助于流体进行能量转换,流体机械是一类应用极为广泛的机械设备。

对于流体机械的定义,许多教科书中这样表述:流体机械是指能够将流体能量和机械能量相互转换的机械设备。这种定义强调了流体作为工作介质和能量载体,但并未具体指明能量传递的形式。例如,内燃机利用了流体的化学能,并将其转换成机械能,但它不是流体机械。所以有的教科书这样定义:流体机械是指在流体具有的机械能和机械所做的功之间进行能量转化的机械。对于大多数流体机械,这样的定义是适用的,因此只需考虑流体的动能、位能和做功中体现出来的压力能。广义而言,水轮机、泵、风机、蒸汽轮机和燃气轮机等机械都属于流体机械。但通常将蒸汽轮机与燃气轮机作为动力机械进行深层次的研究。本书将重点介绍水轮机、泵与风机三大类流体机械,其特点是适用于流体不可压的假设条件,一般也不考虑流体的热作用。

1.2 流体机械的分类

流体机械可以按照能量传递方向、流体与机械的相互作用、工作介质等方式进行分类。

1.2.1 按能量传递方向分类

按照能量传递方向,流体机械可分为原动机与工作机。原动机是将流体的能量转换成机械能,用于驱动其他设备,如水轮机、风力机、蒸汽轮机和燃气轮机等。工作机是将机械能转换成流体的能量,将流体输送到位置更高或压力更高的空间,或克服阻力进行远距离输送,如泵、风机

和压缩机等。

此外,流体机械还包括液力传动装置和液力推进装置。液力传动装置装有两种叶轮,分别为泵叶轮和涡轮机(水轮机)叶轮,以压力油为介质传递动力,实现无级变速或传动功能,如液力变矩器(见图 1-1),用于汽车、工程机械和战车,也可用于大型机械的无级变速。液力推进装置利用流体产生的反作用力使物体前进,如船舶中所用的螺旋推进器等。

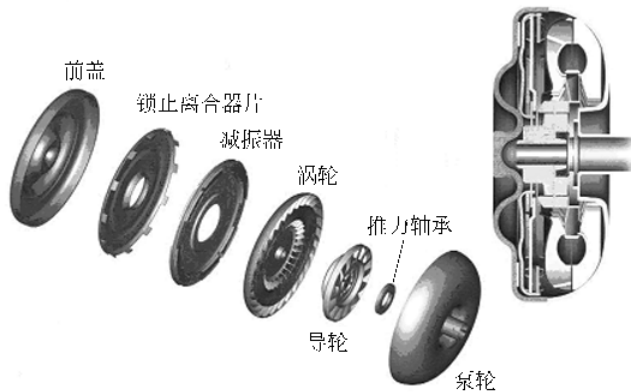


图 1-1 液力变矩器结构图

1.2.2 按流体与机械相互作用分类

按照流体与机械相互作用的特点,流体机械可分为叶片式、容积式及其他形式。

叶片式流体机械中,能量转换是在带有叶片的转子及连续绕流叶片的介质之间进行的。流体对叶片作连续绕流,叶片改变了流体的运动状态,运动的流体与转动的叶片之间产生作用力和反作用力,实现流体与机械的能量转换。

叶片式流体机械可按叶轮转换成流体能量的形式分为反击式和冲击式两类。反击式流体机械中流体的动能与势能均发生变化,流体介质充满流道,进口与出口处速度和压力变化明显。而在冲击式流体机械中,仅流体的动能发生变化,进出口处压力不变,一般为大气压。反击式水轮机可根据流体进出叶轮的方向不同进一步分为径流式、混流式、斜流式与轴流式等。冲击式又可细分为切击式、斜击式与双击式等形式。

容积式流体机械中,能量的交换是通过运动部件和静止部件或者两个运动部件之间的容积的周期性变化来实现的。流体与机械之间的相互作用力为静压力。根据运动方式不同,可分为往复式和回转式两类。

以上两种形式流体机械的原理和结构将在第 2 章中详细介绍。

还有一些不属于以上两类的流体机械,在这些流体机械中,能量主要是在两种具有不同能量的流体之间进行传递。例如在射流泵(见图 1-2)中,高压流体(液体或气体)与低

压流体(液体或气体)在喷射口处开始混合,通过动量交换使压力与速度趋于相同,以达到输送低压流体的目的,属于这一类的流体机械还有水锤泵、内燃泵等。在液环泵(见图 1-3)中,叶片将能量传递给液体工作介质,然后液体介质将能量传递给气体,达到压缩气体的目的。

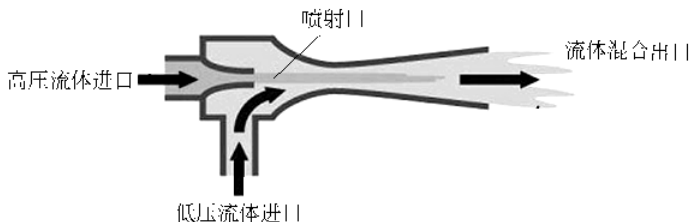


图 1-2 射流泵

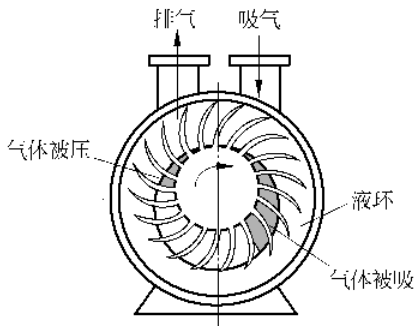


图 1-3 液环泵(液环圆周运动形成真空)

1.2.3 按工作介质分类

按照工作介质,流体机械可分为水力机械和热力机械两类。水力机械以液体为工作介质,热力机械以气体为工作介质。一般地,可认为液体不可压缩,气体可压缩。但要特别注意的是,可压缩性概念是相对的,流体是否可压缩,要视具体情况而定。例如当压力变化极大时(例如在水锤过程中),必须考虑液体的可压缩性;而当压力变化很小的时候(例如在通风机中),也可以不考虑空气的压缩性。

应该指出,还有许多其他的分类方法,例如根据流体机械的用途、结构特点等进行分类和命名,这些内容将在本书后面适当的地方予以介绍。由于流体机械的种类极其繁多,限于篇幅,本书将主要讨论水轮机、水泵这两种流体机械,同时也简单介绍风机的相关知识。

1.3 流体机械在国民经济中的应用

流体机械在国民经济的各部门和社会生活各领域都得到了极广泛的应用,而且技术越发展,流体机械的应用也就越广泛、作用越大。可以说,几乎没有哪一个生活领域没有流体机械。现代电力工业中,绝大部分发电量是由叶片式流体机械(汽轮机和水轮机)承担的,其中汽轮机约占 $3/4$,水轮机约占 $1/4$ 。总用电量中,约 $1/3$ 是用于驱动风机、压缩机和水泵的。而且,随着技术的不断发展,各种应用场合对流体机械的性能和可靠性的要求也越来越高。下面列举几个重要的应用领域。

1.3.1 电力工业

目前的电力生产有三种主要方式:热力发电(火电)、水力发电和核能发电,在这三种发电方式中,流体机械都起着重要的作用。

在火电站和核电站中,除用作主机的汽轮机外,还有许多泵和风机。在火电站的蒸汽动力装置中包括锅炉给水泵、凝结水泵、循环水泵、送风机和引风机等,在燃气动力装置中则要用到空气压缩机等。随着发电机组的大型化,电站用泵也在向大型和高参数方向发展。目前最大的锅炉给水泵的功率已达 49.3MW ,扬程达 3000m 。在核电站中,除了二次蒸汽回路中需要与火电站基本相同的泵以外,一次回路中的主循环泵是一次系统中惟一的回转机械,它工作在高温高压的环境下,是核电站的关键设备之一。此外,核电站的安全系统、容积控制系统、废料处理系统中也都要使用多种类型的泵。

火电站与核电站的厂用电的绝大部分用于驱动水泵、风机等辅机,目前我国热电站的厂用电约占发电量的 12% ,而发达国家的厂用电只占 $4\%\sim 4.5\%$,可见提高辅机的效率对于节能有非常重要的意义。同时,泵与风机的可靠性更为重要,特别是当今,汽轮发电机组不断向大容量、单元制发展,泵和风机等辅机的可靠性与主机有同样的要求。

水轮机作为水力发电的主要设备,在电力工业中占有特殊的地位。由于煤、石油、天然气等燃料的资源有限,又由于大量使用石化燃料对环境有巨大的破坏作用,所以开发清洁可再生能源(水能、太阳能、风能、海洋能等)是实现可持续发展战略的重要条件。目前,水力资源是惟一可以大规模开发的清洁可再生能源,而且开发水力资源还能收到防洪、灌溉、航运、水产养殖和旅游等综合利用的效益。据统计,全世界水力资源的总蕴藏量为 $38\times 10^5\text{MW}$,已开发的仅约 10% 。我国可开发的水力资源蕴藏量为 $3.78\times 10^5\text{MW}$,约占世界总量的 10% ,目前已开发和正在开发的约 25% ,见图 1-4。今后,国家将更加优先开发水力资源。正在建设的长江三峡工程,是世界上最大的水电站,也是我国迄今所进行的最大的工程项目。

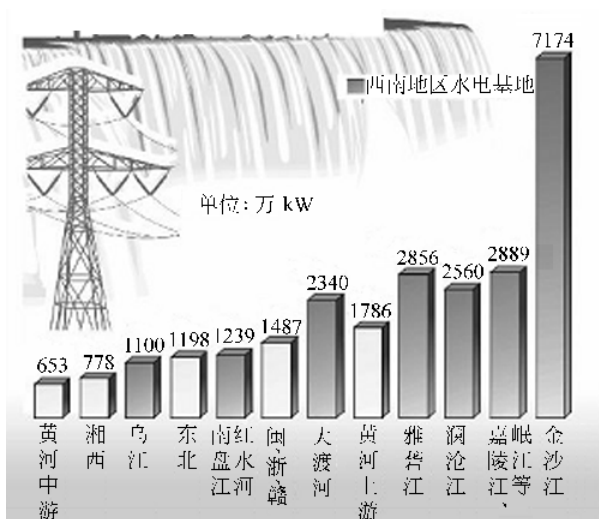


图 1-4 我国十二大水电基地装机容量

水轮发电机组具有功率调节简单快速的特性,因此水电站在电力系统的调节过程中有着特别重要的地位。由于核电站的负荷不便于调节,太阳能、风能、海洋能等新能源具有不稳定的特点,在开发这些能源时,都需要兴建抽水蓄能电站以保证系统的正常运行,蓄能机组研发和生产越来越受到重视。

1.3.2 水利工程

我国的人均水资源占有量只有世界平均水平的 $1/4$,而且时空分布极不均匀,因此水利工程对我国来说尤为重要。水利工程不管是灌溉、排涝还是供水,都需要相应容量的泵。据统计,我国排灌机械的配套功率,在 20 世纪 80 年代已达 57 000 MW。这虽然是一个很大的数字,但距解决我国灌溉和排涝问题的要求差距还很大。

为解决我国的水资源问题,开源和节流同样重要。在节流方面,国家大力发展了节水灌溉技术,如喷灌、滴灌等,其中需要大量的泵。在开源方面,国家已经并将继续建设许多大型水利工程,如引黄灌溉工程、南水北调工程等。其中南水北调工程已进行了长期的规划,工程总体规划推荐西线、中线和东线三条调水线路,如图 1-5 所示,即分别从长江流域上、中、下游调水,以适应西北、华北各地的经济发展需要。预计到 2050 年,三条线路调水总规模为 448 亿 m^3 ,其中东线 148 亿 m^3 ,中线 130 亿 m^3 ,西线 170 亿 m^3 ,必将在很大程度上解决北方水资源短缺的问题,改善水资源南多北少的局面。

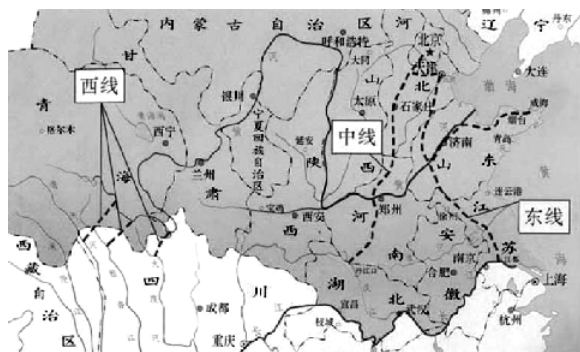


图 1-5 南水北调工程

1.3.3 化学工业

在化工流程中,参与反应的原料、中间产品经常是液体或气体,即便是固体物料,也经常以溶液或熔液的形态参与化学反应,所以输送各种流体的泵和压缩机被称为化工厂的“心脏”。现代化工装置日益大型化,对泵和压缩机的要求也越来越高。化工流程用泵和压缩机经常需要输送特殊的介质,例如高温或低温、高压、易燃、易爆、剧毒、易结晶、易汽化或分解的介质等,对泵和压缩机的设计、制造提出了特殊的要求。

1.3.4 石油工业

在石油和天然气的钻探、开采、运输和加工过程中,泵和压缩机都是重要的设备,其中包括一些为适应特殊使用要求而开发的高技术产品。如油田注水泵用于向油层中注水,可以提高油层压力,实现原油自喷;在海洋油田,注气压缩机用不能直接利用的油田伴生气代替水,注入油层以提高压力。

在海洋和沙漠油田中,由于环境特殊,对设备有着非常特殊的要求。例如,从很深的油井中将原油输送到地面所用到的潜油泵,受井径和原油质量的限制,叶轮直径小且零件耐磨性要求高。

1.3.5 钢铁工业

在钢铁的冶炼过程中需要大量的空气和氧气支持燃烧,需要使用大量的风机,如用于向大型高炉中送风的高炉鼓风机、纯氧顶吹转炉中输送高压氧的氧气压缩机等。冶金技术的进步和设备的大型化,对这些设备不断提出新的要求。另外,生产过程中也需消耗大量的水,在供水和水处理方面使用泵的数量也很多。

1.3.6 其他领域

几乎在任何工程领域都不可缺少流体机械。在动力工程中,水轮机、汽轮机和燃气轮机等广义流体机械是现代最重要的动力装置;在制冷工程中,压缩机和膨胀机可以实现制冷介质物理状态的转变;在环境工程中,水泵和风机是采暖、通风、空调、污水处理、空气净化中必不可少的;在生物医学工程中,小型泵可为人造或衰竭器官提供动力(见图 1-6);在船舶工业中,螺旋桨是船舶的推进装置,直接泵推技术也得到了很大的发展;在轻工和食品工业中,各种不同类型的泵可实现各种浆料和固液混合物的输送;在航空航天工业中,泵是实现飞机、火箭控制系统液压和气动装置正常工作的关键设备,也是关键物料的输送设备等。可以说,凡是需要有气态和液态物质流动的地方,都需要有泵、风机和压缩机等流体机械。

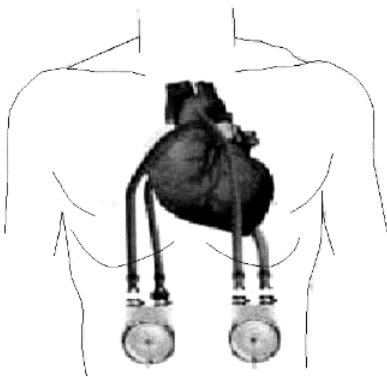


图 1-6 心脏辅助装置

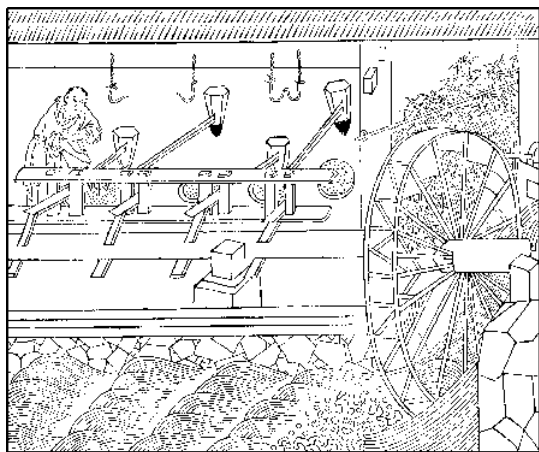
1.4 阅读材料——水轮机发展简史

水轮机作为一种水力原动机有着悠久的历史。远在公元前几世纪,中国、印度等地的人们就已经懂得了利用水轮来带动加工机械。随着工业的不断进步和水力学理论的发展,人们对水力原动机提出了更高的要求。18 世纪中叶,首次出现了具有真正意义的水力原动机。其后经过百余年的发展,水轮机的过流能力与效率不断提高,逐步演变成比较完善的现代水轮机。

1.4.1 我国历史上的水力原动机

1. 碓

碓可能是我国出现的最早的水力机械,西汉时期已经有较广泛的应用。它可以分为两种类型。一种是由水轮将水能转化为动能,通过动力轴拨动推杆而工作,称为水碓(见图 1-7)。《天工开物》中记载“凡水碓,山国之人居河滨者之所为也,攻稻之法省人力十倍,人乐为之”。另一种是直接靠水的势能和自重,用倾斜的木桶作为间歇的平衡物,通过杠杆上下运动而工作,又名槽碓(见图 1-8)。前者动能较大,工作效率高;后者效率较低,多引山溪或泉水。



引自宋应星《天工开物》

图 1-7 水碓



引自王祚《农书》

图 1-8 槽碓

2. 排

据《农书》记载,公元 31 年,杜诗创造了水排,即用流水驱动的冶炼鼓风设备(见图 1-9)。它通过类似曲柄的装置将动力轴的圆周运动转化为工作机的直线往复运动。从那时起,几乎包含所有直线往复运动机械的操作都是通过水力驱动来完成的。从机械结构来看,最初设计的水排很可能是立轮式,后来改为卧轮式,卧式水轮也由此诞生。

3. 筛

筛也逐渐发展成为由水力驱动。《农书》中就描述了一种结合了水轮的摆动筛系统(见图 1-10),它变旋转为往复运动,与水排的运动相似。

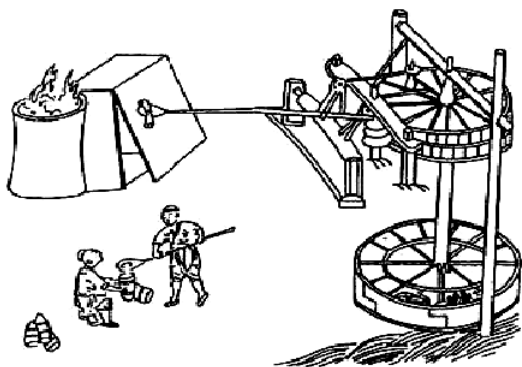


图 1-9 水排

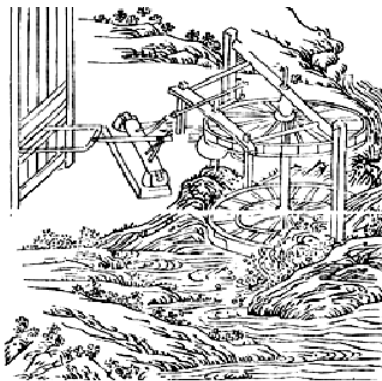


图 1-10 水力筛

4. 磨

水磨是魏晋南北朝水力应用发展的时代标志,诞生于公元1世纪初甚至更早。最早的图解出现在《农书》中,为卧式水磨(见图1-11)。后来又出现了连磨,图1-12为立式水轮驱动连磨,由6~9个磨组成,水轮带动齿轮相互啮合在一起而成。唐朝时,随着我国文化对外的传播与影响,周边国家也相继出现水磨。

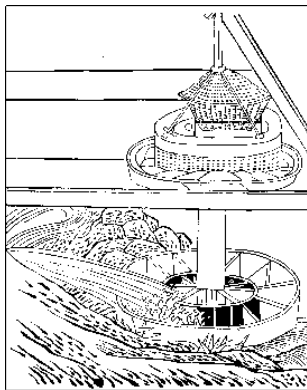


图 1-11 水磨

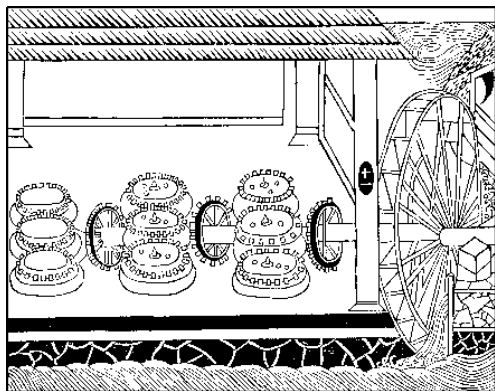


图 1-12 水转连磨

我国关于船磨的记载非常少,但是到唐朝时,船磨的使用已经有很大规模,甚至给水运造成不小的负担。图1-13所示为船磨的比例图,这种船磨位于我国四川涪陵,每个系统都是由两个坚固的踏轮和正交轴齿轮装置组成的。

5. 碾

《天工开物》中记载“凡碾,砌石为之,乘藉、转轮皆用石。牛犊、马驹为人所使”。文字虽没有关于用水力驱动碾的记载,但书中插图表明,水碾已经得到应用,如图1-14所示。

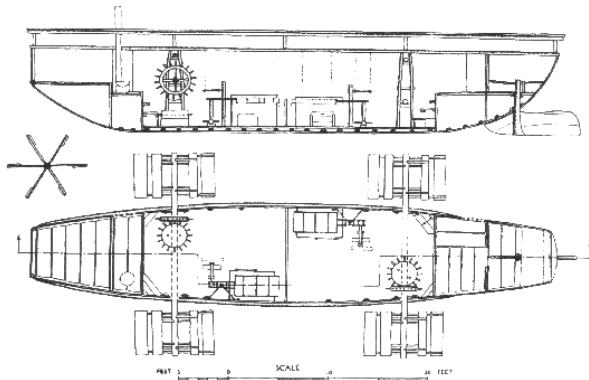


图 1-13 船磨

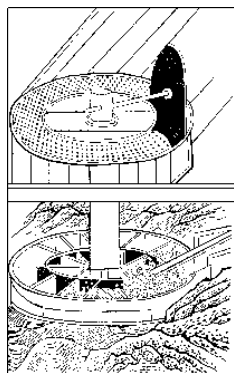


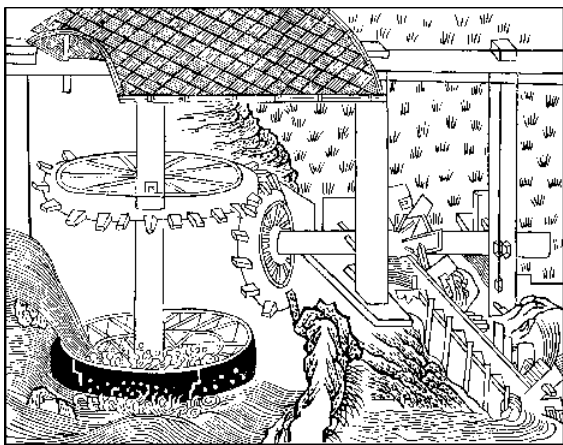
图 1-14 水碾

6. 翻车

翻车是最具我国特色的提水机构,通过一个头尾相连的链条与一系列平板或棘轮将水从低处运到高处。用水力代替人力或畜力的翻车又称为水车,如图 1-15 所示。

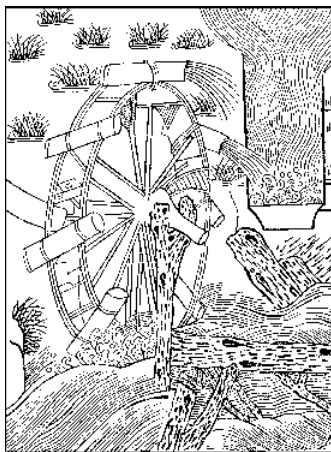
7. 筒车

筒车又被称为戽水车,是 2 世纪左右传入我国的提水机构,如图 1-16 所示。筒车没有链条,它的木桶、罐子和竹筒都直接与单转轮的边缘相连,当处于低处时取水,转到高处时释放。筒车通常装有叶片,可通过水流的力量驱动,也能由人或牲畜推动。



引自王祯《农书》

图 1-15 水车



引自宋应星《天工开物》

图 1-16 筒车

1.4.2 近代水轮机的发展

随着人类对大功率、高效率的不断追求,已有的水力原动机已经无法满足要求。将古老水轮的工作原理引入水电站的水轮机,实现了人类在水力应用方面的又一次飞跃。

英国学者巴克斯和匈牙利人辛格聂尔分别于 1745 年和 1750 年提出了一种依靠水流反作用力工作的水力原动机(见图 1-17)。由于转轮进口没有导向部分,出口无回收动能的装置,因此能量利用率有限,效率只有 50% 左右。

1751—1755 年间,瑞士科学家欧拉首先分析了辛格聂尔水轮的工作过程,发表了著名的叶片式机械的能量平衡方程式,即欧拉方程,这个方程直到今天仍被称为流体机械的基本方程。欧拉所建议的原动机已经有导向部分,但出口流速仍很大,效率仍然不高。

1824 年法国学者勃尔金提出了一种水力原动机(见图 1-18),并第一次称之为水轮机。它有导向部分,转轮改进成由弯板制成的叶道,但效率仍不高。