

水力机械试验

苏联 B. II. 古里也夫著

張也影譯 許鎮宇校

水利电力出版社

內 容 提 要

本书系統地总結了各种水力机械在装設地点、制造厂以及实驗室中进行試驗的丰富經驗，介绍了苏联所广泛采用的各种型式的水力机械，并扼要地說明了組織和进行試驗的各种实际方法。

本书供制造或者运用水輪机、水泵和水力傳动的广大工程技术人员之用，也可作为高等工业学校和中等技术学校的学生在学习“水力机械”課程及作实驗时的参考书。

В. П. ГУРЬЕВ

ИСПЫТАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МАШИН

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ МОСКВА 1953

水力机械試驗

根据苏联国立动力出版社1953年莫斯科版翻譯

張也影譯 許鎮宇校

*

22958 157

水利电力出版社出版（北京西郊科学路二里内）

北京市书刊出版业营业許可証出字第105号

水利电力出版社印刷厂排印

新华书店科技发行所发行 各地新华书店經售

*

850×1168 $\frac{1}{32}$ 开本*6 $\frac{1}{4}$ 印張*165千字*定价(第9类)0.81元

1960年2月北京第1版

1960年2月北京第1次印刷(0001—4,270册)

序

苏联共产党第十九次代表大会关于1951~1955年的第五个苏联五年发展计划的指示中把水轮机列入最重要的工业产品，同时规定了五年之内水轮机的生产要增长6.8倍。这些水轮机的生产应能保证扩大水电站的功率约为2倍。

苏联新五年计划中工业生产、运输业、电能生产、燃料开采以及灌溉渠道建筑的史无前例的增长，也促使其他水力机械（水泵和水力传动）的生产要增长几倍。

莫斯科运河及以列宁为名的伏尔加-顿运河上的强大轴流式水泵、谢尔巴科夫-乌格利奇水电站及以列宁命名的第聂泊水电站上的巨大水轮机、用在各工业部门中的各种类型的水泵等等，都证明了苏联水力机械的优良品质，这些机械在各种指标上均超过了最重要的外国公司的产品。

这些成就之所以能取得，是由于生产技术已经达到了高度的水平，也由于在计算、设计及制造中运用了科学及实验研究成果。

对所生产的水力机械预先进行模型或原型试验，在这种机械的生产技术中是一个重要的环节。但是对这些试验的安排和进行方法至今还没有足够的记述，许多企业还未曾对他们所生产的机械进行全面的试验，而工程师、技术人员和机械的使用人员们也并不都懂得怎样安排和进行这些试验。

这种情况使作者产生了编写本书的愿望。书中介绍了水力机械的一般概念，阐述了它们的动作原理，并以苏联某些较好的水力实验室的经验为基础说明了组织与进行水力机械试验的方法，试验所得结果的整理步骤和用明显的特性曲线来表达试验成果的一些方法。

在本书中，綜合地叙述了在实验装置上进行水力机械的研究問題，这样的叙述方式，还是第一次的尝试。书中叙述了組織一般研究和专门研究所需要的、同时也是能以改进水輪机、水泵及水力傳动的运轉的一些最必需的概念。由于在水力机械方面还没有适于教学实验工作的专门教材，所以本书对在高等工业学校和中等技术学校学习水力机械的学生也可能有所裨益。

作者对列宁格勒加里宁工学院水力机械教研室全体同志及該校以沃茲涅森斯基(И.Н.Вознесенский)教授命名的水力机械实验室的全体同志們在本书編写过程中所給予的协助表示感謝。

对本书的一切意見作者希望寄到下列地址：列宁格勒，涅瓦大街28号，列宁格勒国立动力出版社(Ленинград, Невский, 28, Ленгосэнергоиздат)。

作 者

目 录

第一章 水力机械工作的一般概念	4
1. 水力机械的类型及其作用原理	4
2. 水力机械试验的目的和意义	19
3. 水力机械的基本工作方程式	21
4. 水力机械的模型化及相似定律	24
5. 水力机械中的空蚀现象	36
第二章 实验室中的水轮机试验	43
6. 水轮机试验所研究的参数及其装置	43
7. 辐向轴流式及螺旋式水轮机的动力试验	56
8. 转桨式水轮机试验	73
9. 斗叶式水轮机试验	82
10. 水轮机的空蚀试验	87
11. 在空气中作水轮机试验	95
第三章 在实际装置上进行水轮机试验	98
12. 在实际装置上进行水轮机试验的意义和内容	98
13. 水轮机水头、流量、功率及效率的确定	99
第四章 离心式及螺旋式水泵试验	112
14. 水泵的实物试验及模型试验	112
15. 离心式水泵试验	114
16. 轴流(螺旋)式水泵试验	138
17. 水泵的空蚀试验	151
第五章 活塞式及转子式水泵试验	163
18. 试验的内容及其装置	163
19. 试验的进行及其结果的运算	169
第六章 水力传动(水力联轴器及水力转换器)试验	174
20. 试验用的装置及所研究的指标	174
21. 水力联轴器试验	179
22. 水力转换器试验	190
参考书目	196

第一章 水力机械工作的一般概念

1. 水力机械的类型及其作用原理

水力机械根据其功用可分为：动力机械(能量转换器)——水力原动机和水泵；传动机械——水力变矩器和联轴器；及推动机械——螺旋推进器等等。

水力原动机——水轮机等——把进入机械内的液体的机械能改变为由轴或其他执行部件输出的机械能。水泵则相反，把得自原动机的机械能改变为所汲液体的机械能。

传动机械则改变运动的方式。比如水力变矩器就是改变机械工作轴转速的器械。在传动机械中，液体是运动链中的一环，机械要完成功的双重转变过程，即先把机械主动部件的功转变为液体能，然后反过来，把液体能转变为从动部件的功。

推动机械同样也是转变运动方式的，比如螺旋推进器把推进器轴上的力矩转变为使船行驶的推进力。在这种情况下液体也是运动链中的一环，螺旋推进器的机械能变为所排开液流的功能，而推进力就是由于这个液流的反作用力而产生的。

所有的水力机械按其作用原理可分为叶片式及容积式的。在叶片式的机械中，工作过程是在连续运动的液流中也就是在液体射流中完成的。这种类型的机械包括水轮机、离心式及轴流式水泵、水轮等等。在容积式水力机械中，工作过程是周期性地完成的——工作液体处于密闭空间内并与机械的工作部件相互作用。其中包括活塞式及转子式原动机和水泵等。

水力原动机是利用经过机械的液体能量的改变 $E_1 - E_2$ 。根据能量守恒定律，液体单位能量的改变等于：

$$E_1 - E_2 = \frac{p_1 - p_2}{\gamma} + z_1 - z_2 + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g} \quad (1-1)$$

机械入水口及出水口处液体单位能量之差叫作水头 H :

$$H = E_1 - E_2 \quad (1-2)$$

叶片式水轮机及水泵是应用最广的水力机械。我们就首先叙述这种机械。

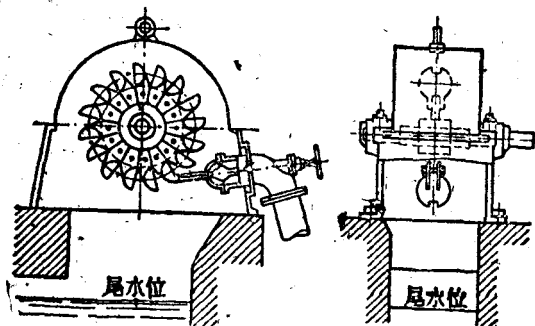


图 1 斗叶式水轮机

图 1 上示出所谓斗叶式水轮机的原动机简图。压力管路的喷嘴把液体引至转轮，转轮是由一个圆盘和许多安装并紧紧固定在其上的斗叶所组成。在带喷嘴的管中安装一个针阀，用手或用传动机构移动此针阀就使喷嘴中的圆孔面积有所增减，于是也就改变了由压力管路流出的液体的流量。由于在水头 H 下从管路喷嘴流出的连续射流的作用，水轮机就旋转起来同时使轴上产生了功率。

由喷嘴流出时水流的全部能量都转化为动能 $\frac{c^2}{2g}$ ，式中 c 是液体由喷嘴流出的平均流速。把所具有的能量传给转轮以后水就自由地落至下游水面 (H_2)。因此，在通常的大气压力下，斗叶式水轮机是利用柏努利 (Д. Бернулли) 方程式 (1-1) 中以流速水头所表示的那部分能量来工作的，这时压力并未参与液流能量的转化。这种水轮机也叫作冲击式水轮机。

斗叶式水轮机可以具有高的能量指标，这要决定于喷嘴和液体射流的形状、斗叶的外形和它距喷嘴的距离；高的能量指标也由于这原因：当水轮机在机壳中旋转时把水甩开，液体的阻尼作

用得以降低。这种型式的现代水轮机效率有达92%的。

斗叶式水轮机可以是横轴式的或立轴式的；后者比较紧凑，并可以减少叶轮与下游水面间的距离，因此可改善水轮机工作水头的利用情况。

横轴斗叶式水轮机有时带几个喷嘴，但试验证明：如每一转轮上所安喷嘴不多于2个，而每一轴上的转轮数目也不超过2个，则水轮机的工作效率较高。立轴斗叶式水轮机在一个转轮上的喷嘴可到4个。

斗叶式水轮机通常用在200米以上的高水头水力装置上。在这种情况下，由喷嘴轴线到下游水面间的损失高度相对来说是很小的，不起什么实际作用。在现有的水电站中采用这种型式水轮机的最大水头是1,742米。但是斗叶式水轮机也可用在低水头水电站和动力站上。为了提高水轮机在低水头和小功率时的效率，出现了再击式水轮机(图2)。它的特点是由喷嘴出来的液体要经过两次转轮的弯曲形叶片，因此也就提高了水流动能的利用。

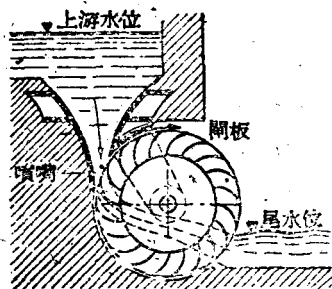


图2 再击式水轮机

图3上示出另一型式的水力原动机——辐向轴流式水轮机的简图。这种型式水轮机的转轮是由许多紧紧固定在轮壳上并用外环包围的弯曲形叶片所构成的。在剖面上叶片按辐向—轴向布置，因此，经过导水翼引入的液体首先成辐向而后成轴向地流动。

导水翼是流量的调节装置，它是用许多可转动的流线型叶片所组成的。利用装在底部的、或更多是装在顶部的调速环使叶片转动。调速环通过连杆和许多拐臂相联，后者又各自连在叶片的轴颈上。由于拉力使调速环转动就可使导水翼上所有的叶片都同时转动同样的角度。

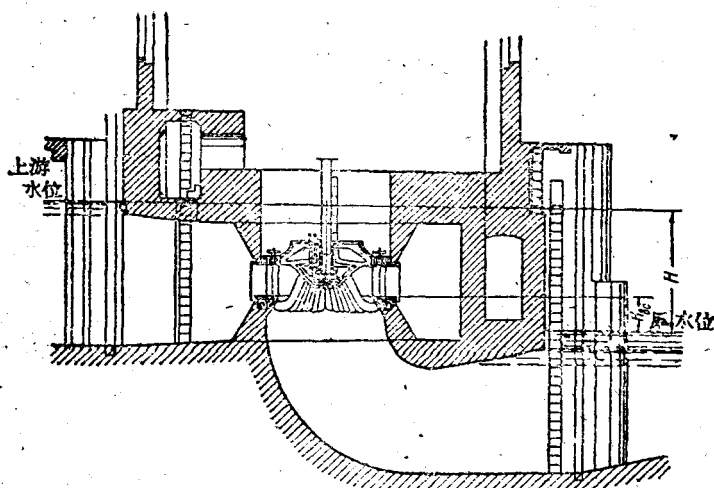


图3 辐向轴流式水轮机

液体由压力管路经过蜗壳(蜗牛壳)而进入导水翼,在高水头时蜗壳用金属制成。在较低的水头(到6~8米)和水轮机尺寸不大时,转轮及导水翼可装在开式水仓之内。

液体进入转轮时的压力比离开时高,因而叶轮也就依靠着作用在叶片上的液体的反作用力旋转起来。转轮叶片在连续的水流中工作不仅利用了水流的动能,而重要的是又利用了水流的势能——压力。因此,辐向轴流式水轮机是利用柏努利方程式中以 $\frac{C^2}{2g}$ 及 $\frac{p}{\gamma}$ 两项表示的液体能量来工作的。这种水轮机不同于冲击式的,有时叫作压力式或反击式水轮机。

用弯管或直管把液体引至下游水面(用弯管是为了减少结构物没入水中的那一部分)。为了减少水流自管中流出时所损耗的绝对流速,管子的末端做成锥形扩张管的型式。小型的水轮机通常都用直的锥形扩张管。当水轮机工作时,由于转轮下面的真空把液体吸入并充满于管中,因此这根管子叫作吸出管。由下游水面到转轮的①高度叫作吸水高度 H_{so} 。由此可见,在这种型式的

① 指至转轮中心的高度。——译者

水輪机中，除去摩擦和其他阻力的损失以外上下游水面差的全部水头 H 都被利用了。由于这种原因反击式水輪机用在低水头及中水头的河流上是特别合适的。

輻向軸流式水輪机应用于水头从1.5~2米到200米的水力装置上，而近年来甚至用于达350米的水头处，在这种情况下它可与斗叶式水輪机相竞争。集体农庄水电站和用水輪机作为原动力而带动其他各种机械及机构的动力站上水头往往是低的。大型輻向軸流式水輪机的效率达93%。比如列宁格勒斯大林金属工厂为德涅泊尔水电站所制的水輪机功率大于100,000馬力，效率在93%以上。小型的水輪机效率达85~87%。

輻向軸流式水輪机可以制成立軸的和橫軸的。大型及中型水輪机都是立軸的。小型水輪机往往都是橫軸的，时常装在具有前方引水装置的罐形外壳中。

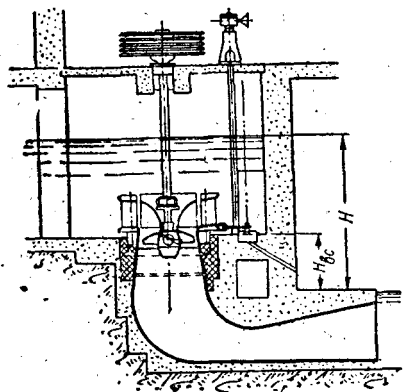


图4 螺桨式水輪机

在大流量时，对于10~35米以下的水头，最好是采用其它型式的压力式水輪机。在水头变化范围不大并且在载荷不变的条件下工作的水电站上采用螺桨式水輪机(图4)。

螺桨式水輪机具有一个轉輪，这种轉輪的叶片为数不多，是沿着輻向牢牢地固定在輪壳上的。設想一圓柱面，其軸綫与回轉軸相重合，假如我們利用此圓柱面將水輪机轉輪的叶片切開，并将此圓柱面展为平面，則叶片断面（也就是叶片輪廓）成飞机翼的形状，在不同半徑的圓柱面上具有不同的长度、曲度和厚度。

水流沿着軸的方向进入轉輪的叶片，因此这种型式的水輪机有时又叫作軸流式水輪机。

导水翼和吸出管的构造及功用和辐向轴流式水轮机的完全一样。在高水头和大尺寸的水轮机中，水流经过蜗壳（一般为混凝土制）进入导水翼及转轮。小型水轮机则装在开式水仓中。

水头和载荷的波动较大时，螺旋式水轮机的工作情况就与设计的工作情况发生差异，同时效率也相应地急剧降低。

为了消除螺旋式水轮机的这种缺点，可以把它的叶片制成可转动的，也就是说，在工作情况改变时利用一种特殊机构使叶片能绕其各自的轴转动。当水头和载荷变化时，它仍能在很大的范围内保持较高的效率，这种水轮机叫做转桨式水轮机。

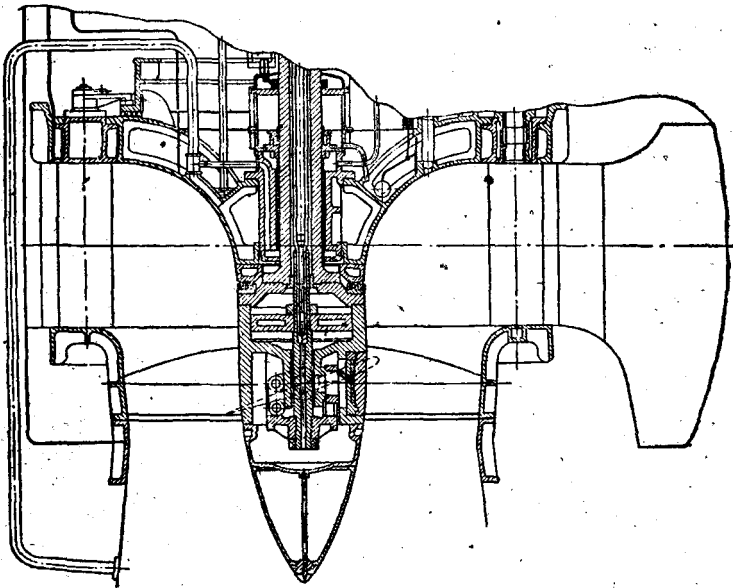


图5 转桨式水轮机转轮的截面图

图5是这种水轮机的截面图，由图上可以看出叶片是如何转动的。每个叶片都具有一个轴颈，轴颈可在轴承中回转，轴颈末端都套上一拐臂，而这些拐臂又用连杆和各叶片所共有的总十字头形成铰链联接。这十字头连于水轮机空心轴中可上下移动的一根钢杆上。钢杆用装在轮壳中的伺服马达带动，后者的活塞是与钢

杆相联的。轉輪叶片的轉动及导水翼的轉动都和調速器相适应，因此水輪机有两个調节机构就保证了不同工作情况下的高效率工作。

这种水輪机的效率达94%。

图6示出各种水輪机效率对载荷变化的比較图，这图綫清楚地說明了轉桨式水輪机的优越性。

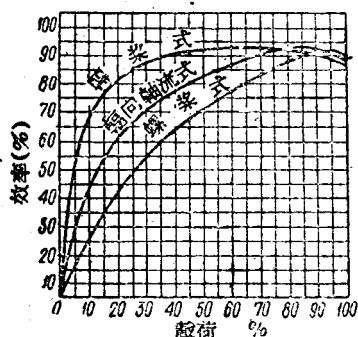


图6 各种主要型水輪机的效率比較

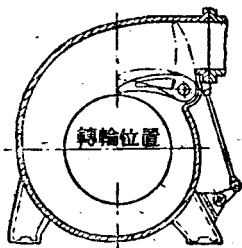


图7 輻向軸流式水輪机的克烏亚特科夫斯基(В.С.Квятковский)式蜗壳調节活門器簡图

轉桨式水輪机带有两套相当复杂而又昂貴的自动調节机构，它用在較大型的水电站上。

集体农庄水电站上則装带一套比較簡單的調节机构的螺桨式水輪机。这种水輪机的叶片有时做成嵌入式的，在不同季节把叶片安在不同轉角的各固定位置上。

压力式或反击式水輪机还有几种变型：带单叶片調节机构的輻向軸流式，带軸向固定导水翼的轉桨式，貫流式等。

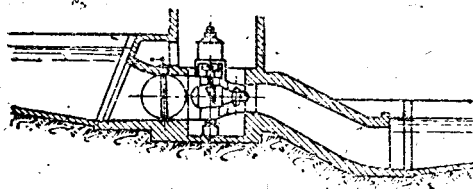


图8 貫流式水輪机的安装图

图7示出克烏亚特科夫斯基教授設計的、用蜗壳內的轉动活門代替导水翼的輻向軸流式水輪机調节器的簡图。

图8上示出貫流式

水輪机的安装簡图，这种水輪机的导水翼是固定式的，轉輪的桨是可以轉动的，发电机是装在外面的。

上面所述的各种水輪机都用在集体农庄的水力装置上的。

水輪是利用方程式 (1-1) 中以符号 z 所表示的位能，也就是利用液体本身重力来工作的水力原动机。图 9 示出盘形而带有水斗的中間注水式水輪。液体流进水斗，并把它充滿，水輪便在液体和水斗的重力的作用下轉动起来。由于昂貴、笨重而效率又低，所以現代技术已把这种机械淘汰了。

以上所述的水力原动机并没有把它們所有的变型包罗无遺。特别是，我們并未談到以低的、变化的速度在高水头下工作的活塞式水力原动机。

水泵的工作过程和水力原动机比較起来恰好是相反的，水泵是把原动机的机械能轉化为水流的能。下面这些水泵是和上述諸型的原动机相对应的：螺旋桨式或离心式水泵和反击式原动机相对应，活塞式水泵和活塞式原动机相对应，升水水輪或鏈式水泵和注水水輪相对应。

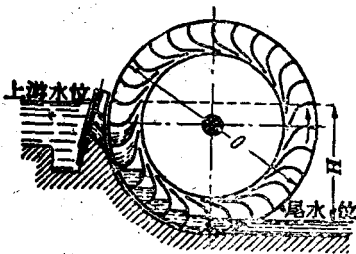


图 9 中間注水式水輪

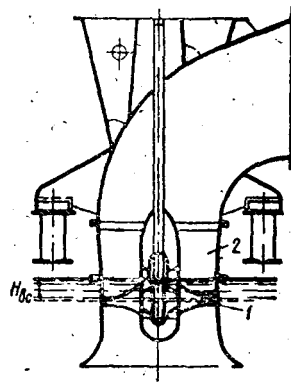


图 10 軸流式水泵

图10中表示出一种水泵的截面，这种水泵是和螺旋桨式水輪机正相反的机械。当原动机所带的水泵轉輪回轉时，叶片与水流相互作用，在叶片的两面发生压力差，并且伴随着回轉运动发生了水流的軸向前进运动，并提高了压力和速度。这样一来，原动机的机械能就轉化为包含势能及动能的水流水力能了。

在这种水泵上，其轉輪的叶片 1 是牢牢地固定在輪壳上的，同时，为了消除水流的螺旋运动，还設有固定叶片式軸向导水翼，这种水泵通常叫作軸流式水泵。

軸流式水泵照例是在原动机轉数恆定和水头不变的情况下工作的，就輸水量來說，它的工作情况是恆定的。水泵的輸水量用装在压力管路上的閘門来調节。

只有在轉輪叶片完全浸沒在液体中时，水泵才能够吸上液体，并經肘管将其压入压力管路中，因此，在水泵启动之前要充水。在沒有專門的启动設備时，应使叶片浸入水中，最少要浸入一半。

所以，如果把水面到叶片軸綫的水平面間的距离作为水泵的吸水高度 H_{sc} ，則为了能够不充水而启动水泵，吸水高度 H_{sc} 应当等于零或者是負数。当 H_{sc} 是負数时水泵是在壅水情况下工作。

軸流式水泵可以作成立軸式的和橫軸式的。橫軸式的多半把帶有軸的肘管和原动机一起放在不漏水的隔墙外面，而吸水管和轉輪則放在水池中，也就是說水泵在負的吸水高度下工作。橫軸式水泵裝置在正的吸水高度下工作在原則上說是可能的，但因為要用液体充入轉輪，所以运用起来要复杂得多。

假如在軸流式水泵轉輪的輪壳中装上一套轉桨式水輪机那样的叶片轉动机构，那么就可能在保持高效率的同时，在很大範圍內調节輸水量和水头。这种水泵通常叫作螺桨軸流式，簡称螺桨式，因为在同一个轉数下，由于叶片的轉动，可以得到若干条螺桨式的工作特性曲綫。

螺桨式和軸流式水泵多用来在較低的揚程下(10~12米以內)汲取大量的液体。在大型热电站上、在給水及灌溉系統上，在水閘設備上等地方这种水泵都获得了广泛的应用。这种水泵的效率甚至在轉輪尺寸不大时，在良好的进水，特别是在良好的出水条件下，可达到很高的数值：85~90%。在莫斯科运河的許多水車站上都装有轉桨式的螺桨水泵，当效率在90%左右时每台水泵可

供水 $25\text{米}^3/\text{秒}$ 。

在图11上示出离心式水泵的装置简图，这种水泵按工作过程来说正与辐向轴流式水轮机相反。水泵的转轮1包括有两个圆盘，二圆盘之间固定着叶片2，通过轮壳把转轮1套在轴上，并加以固定。转轮装在外壳3中，当与水泵轴相连的原动机工作时，转轮就在此壳中自由回轉。水泵外壳通常作成蜗壳4（蜗牛壳）的形状，液体经过转轮而被甩入此壳中。水泵进水是利用管5，此管是利用转轮进水口前所产生的真空来吸水的。为了启动水泵应当往转轮中注入液体；因此在管5末端滤水网6以上的地方要装有单向活门。

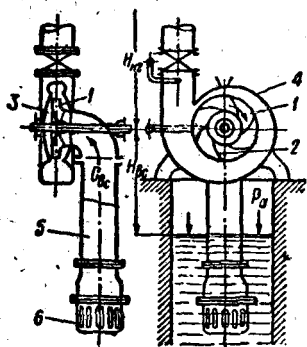


图 11 离心式水泵的装置简图

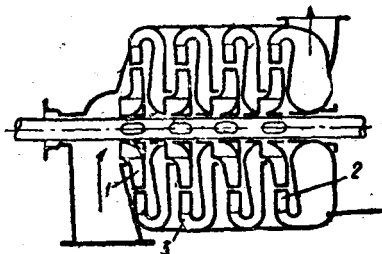


图 12 多級离心式水泵简图

只有一个转轮的(单級的)离心式水泵，多用在揚程低于 $50\sim 60$ 米水柱的情况下。轉数高时可能获得高得多的揚程。在电动机的額定轉数下，对于高揚程，应当采用带两个、三个或更多转轮的多級离心式水泵，因为这时如仍用单級水泵，則能量損失将要增大。

在图12上示出一个四級水泵的簡图，液体在其中順序流經所有的四組轉輪1、固定叶片式的导水翼2及折向通路3。液体沿最末一个轉輪出口經导水翼而进入集水池中，然后再进入压力管路。

离心式水泵無論单級的也無論多級的都可以在相当大的正吸水高度 H_s 下工作，这就是它比螺旋式及軸流式水泵优越的

方。然而在汲取沸騰液体时，离心式水泵却只能在負的吸水高度下也就是在壅水情况下工作。

根据用途、工作液体种类及其温度的不同，离心式水泵有很多的结构型式。拿热电站上的各种水泵为例，就足以說明其结构的多样性。在任何一座现代化的热电站上都装有几十台（連同儲备用的）不同水头和輸水量的离心式水泵：有冷凝器中用以冷却蒸汽的循环水泵、冷凝器水泵、鍋炉供水泵、管路泵、冷却主要设备的鍋炉泵、排水泵、消防水泵、自来水泵、除尘水泵等等。

离心式水泵的各种能量指标取决于水泵的构造以及进水和出水的条件，取决于水泵的輸水量、揚程和其轉数。苏联很多水泵制造工厂目前生产的机械都是效率很高的。比如莫斯科加里宁工厂的离心式循环水泵的效率达 92%，高压水泵的效率达 86~87%。离心式水泵主要是制成橫軸式的。

必須指出介于軸流式和离心式水泵中間的一种特殊型式的水泵，即所謂混流式（螺旋式）水泵。这种水泵的轉輪是由安在外伸軸末端上的 2~3 个螺旋形叶片所組成的。液体以混流方向流过轉輪并經過一个短的扩散室而进入压力圓柱室，然后再进入压力管路中。这种水泵的效率較高（达 85%）。当揚程低、輸水量大并且工作液体中含有粗粒杂质时，采用这种水泵。

活塞式水泵与上述各种水泵不同，它是用挤压原理工作的。图 13 上示出一个立式单作用柱塞（代替活塞）水泵的簡图。当柱塞

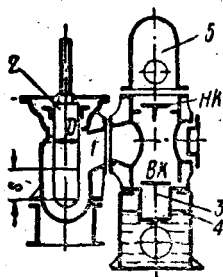


图 13 柱塞式水泵簡图

2 向上运动一行程 s 时，室 1 中产生真空，因此吸水活門 BK 抬起而液体在压力差的作用下沿吸水管 3 进入泵室中。当柱塞向下运动时压力活門 HK 抬起、活門 BK 关闭，液体就被压入压力管路中。

如果没有漏損的話，液体的排泄量可用体积 $V = F s$ 来确定，式中 F 是柱塞断面面积， s 是柱塞行程。

为了提高輸水量可将水泵制成双联的，三联的等等。为使供水比較均匀，水泵的各个柱塞可用曲柄相互差 180° ， 120° 等的曲軸来带动。为了减少吸水及压水管中液体流流速的波动，也就是为了保证水泵的平稳工作，在吸水管及压水管靠近两活門处各装一空气室。

活塞(柱塞)式水泵用在高揚程和很小輸水量的处理清洁液体的装置上，也用于高压直流式鍋炉供水和石油工业中，用蒸汽直接带动的水泵則用于鍋炉设备等处。活塞式水泵的容积效率达到95%和更高些的百分数。近年来，由于构造的改进，活塞式水泵也可以在高轉数(达750~900轉/分)下工作(如全苏水力机械制造科学研究所的水泵)。

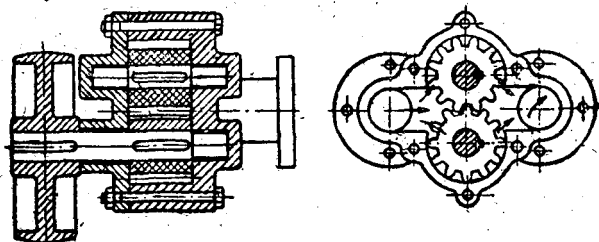


图 14 齿輪式油泵

轉子式水泵也是用挤压原理工作的，其中包括应用最广的齿輪式或牙齒式水泵(图14)。此处是用齿輪的牙齿代替了活塞(柱塞)的作用。在回轉时，脱离嚙合的牙齿上空出来一块体积，体积的大小取决于牙齿的尺寸。这块体积被吸入的液体所充滿，同时液体就被牙齿給挤进压力室中，在压力室中当牙齿又进入嚙合时就把液体压到压力管路中去。这种型式的轉子式泵最适用于处理油液，它用于潤滑和輸送油液到調节装置等地方。用人字齿輪时，所产生的油压可达60大气压。因为液体的漏損很大，所以这种泵的容积效率較低(70%)。列宁格勒斯大林金属工厂以前生产的泵，生产率达25升/秒。

一种新型的轉子式泵——螺杆式泵(图15)現在已获得了广泛