

国家骨干高职院校建设项目教材

# 水轮机组运行与维护

主 编 李国晓 雷 恒

主 审 陈德新



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

国家骨干高职院校建设项目教材

# 水轮机组运行与维护

主 编 李国晓 雷 恒

副主编 曹明伟 万晓丹 任 岩 杨 斌

主 审 陈德新



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

## 内 容 提 要

《水轮机组运行与维护》教材是根据国务院、教育部对高职高专人才培养规格的要求,以实现“工学结合”、现场“教学做”一体化教学为手段,以培养发展型技术、技能人才为目标而编写。本教材所涉及的课程是高职高专水利机电类专业必修的一门专业核心课程。本教材内容包括水电站动力设备认知、水轮机组的结构、水轮机组的运行、水轮机组的检修与维护、水轮机组选型5个项目,21个典型任务。

本教材可作为高职高专水利机电类专业、水电站动力设备与管理、水电厂机电设备等专业的教材,也可供水电站、水泵站及其他相关单位从事水轮机组/水泵机组安装、运行维护、检修和调试方面工作的有关人员的培训教材或参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

水轮机组运行与维护 / 李国晓, 雷恒主编. -- 北京:  
中国水利水电出版社, 2015. 7  
国家骨干高职院校建设项目教材  
ISBN 978-7-5170-3408-7

I. ①水… II. ①李… ②雷… III. ①水轮发电机—  
发电机组—水轮机运行—高等职业教育—教材②水轮发电  
机—发电机组—电机维护—高等职业教育—教材 IV.  
①TM312

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第163717号

书 名	国家骨干高职院校建设项目教材 <b>水轮机组运行与维护</b>
作 者	主编 李国晓 雷恒
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
刷 印	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 13印张 308千字
版 次	2015年7月第1版 2015年7月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	<b>28.00元</b>

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换  
版权所有·侵权必究

# 前言

高职高专院校水利机电类专业在学习水轮机组课程时，所采用的教材大多沿用了本科《水轮机》教材，教材内容偏重理论，在水轮机组运行与维护方面的内容偏少，未能很好地落实“工学结合”“教学做”等职业教育的理念。

本教材由学校、企业行业专家组成教材编写组合作开发，教材编写组结合水轮发电机组值班员和水轮机检修工等职业标准，以“项目引领、任务驱动”课程模式，对课程教学的内容进行了改革。

本教材共5个项目。

项目1为水电站动力设备认知。主要内容为水电站认知和水轮机基本知识介绍。

项目2为水轮机组的结构。主要内容为混流式、轴流式和冲击式三大机型水轮机组结构介绍，水轮机组引水部件和其他主要部件结构的介绍。

项目3为水轮机组的运行。主要内容为水轮机组运行规程、运行参数与监视、运行中常见故障分析与处理等。

项目4为水轮机组的检修与维护。主要内容为水轮机组日常检查与维护、水轮机空蚀发生及处理、水轮机泥沙磨损处理、水轮机组振动处理和水轮机组检修等。

项目5为水轮机组选型。主要内容为水轮机模型试验条件、水轮机效率换算与单位参数修正、水轮机特性曲线及水轮机组选型等。

本教材由广东水利电力职业技术学院李国晓和黄河水利职业技术学院雷恒担任主编，曹明伟、万晓丹、任岩、杨斌担任副主编。其中项目1（任务1.2），项目2（任务2.1、任务2.2、任务2.6）由广东水利电力职业技术学院李国晓编写；项目2（任务2.5），项目4（任务4.2）黄河水利职业技术学院雷恒编写；项目4（任务4.3、任务4.4、任务4.5）由黄河水利职业技术学院曹明伟编写；项目5（任务5.1、任务5.2、任务5.3），项目2（任务2.3）由黄河水利职业技术学院万晓丹编写；项目1（任务1.1），项目3由中国水电顾

问集团桃源开发有限公司杨斌高级工程师编写；项目 2（任务 2.4），项目 4（任务 2.1），项目 5（任务 5.4）由华北水利水电大学副教授任岩编写。

全书由华北水利水电大学陈德新教授担任主审，并对本书提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

本教材在编写过程中，参考了许多书籍、水轮机厂家及水电厂水轮机组的资料在此对深表感谢。同时也参考了大量的期刊论文和网上资料，对本教材引用和参考的其他书籍和资料的作者也一并表示感谢。

本教材可作为高职高专水利机电类专业、水电站动力设备与管理、水电厂机电设备等专业的教材，也可供水电站、水泵站及其他相关单位从事水轮机组/水泵机组安装、运行维护、检修和调试方面工作的有关人员的培训教材或参考书。

由于编者的水平有限，书中难免有不妥或错误之处，恳请读者批评指正。

**编者**

2015 年 5 月

# 目录

## 前言

项目 1 水电站动力设备认知 .....	1
任务 1.1 水电站的认知 .....	1
1.1.1 水电站的型式与组成 .....	1
1.1.2 水电站动力设备 .....	4
1.1.3 水轮机发展综述 .....	5
1.1.4 我国水电行业的发展历程 .....	8
任务 1.2 水轮机的基本知识 .....	9
1.2.1 水轮机的基本参数 .....	9
1.2.2 水轮机组的类型及应用条件 .....	12
1.2.3 水轮机型号编排 .....	16
1.2.4 水轮机组的装置型式 .....	18
项目 2 水轮机组的结构 .....	23
任务 2.1 混流式水轮机组结构 .....	23
任务 2.2 轴流式水轮机组结构 .....	32
2.2.1 轴流转桨式水轮机转轮结构剖析 .....	32
2.2.2 轴流转桨式水轮机桨叶操作系统结构 .....	37
任务 2.3 贯流式水轮机组结构 .....	41
2.3.1 贯流式水轮机组的特点及布置形式 .....	41
2.3.2 贯流式水轮机的基本结构 .....	44
任务 2.4 冲击式水轮机组结构 .....	48
2.4.1 冲击式水轮机组特点及分类 .....	48
2.4.2 切击式水轮机的基本结构 .....	49
任务 2.5 水轮机组引水部件结构 .....	55
2.5.1 水轮机组埋设部件结构 .....	55
2.5.2 水轮机组导水机构结构 .....	59
2.5.3 反击式水轮机组蜗壳结构剖析及结构设计 .....	68
2.5.4 反击式水轮机组尾水管结构剖析及结构设计 .....	77
任务 2.6 水轮机组其他主要部件的结构 .....	86
2.6.1 水轮机组导轴承结构剖析 .....	86
2.6.2 水轮机组主轴密封结构剖析 .....	89

2.6.3	水轮机组主轴结构剖析	92
2.6.4	水轮机组补气装置结构剖析	93
<b>项目 3</b>	<b>水轮机组的运行</b>	<b>95</b>
任务 3.1	水轮机组的运行规程及运行工况	95
3.1.1	熟悉水轮机组的运行规程	95
3.1.2	水流在水轮机转轮中的运动	96
3.1.3	水轮机的运行工况：最优工况条件及非最优工况	101
任务 3.2	水轮机组运行参数与监视	105
任务 3.3	水轮机组运行效率	108
任务 3.4	水轮机组运行中的故障及事故处理	109
<b>项目 4</b>	<b>水轮机组的检修与维护</b>	<b>111</b>
任务 4.1	水轮机组的日常检查与维护	111
任务 4.2	水轮机空蚀的发生及处理	113
4.2.1	水流的空化	113
4.2.2	水轮机空化与空蚀类型	115
4.2.3	水轮机的空化系数与吸出高度	117
4.2.4	水轮机抗空化的措施	122
任务 4.3	水轮机泥沙磨损及处理	127
4.3.1	水轮机的泥沙磨损原因	127
4.3.2	水轮机防磨损技术措施	128
任务 4.4	水轮机组的振动及处理	129
4.4.1	水轮机组振动的原因及技术指标	129
4.4.2	水轮机组振动的原因分析方法	131
4.4.3	水轮机组振动原因分析及处理	133
任务 4.5	水轮机组检修	137
4.5.1	检修项目及质量标准	137
4.5.2	检修的内容及方法	142
<b>项目 5</b>	<b>水轮机组选型</b>	<b>155</b>
任务 5.1	水轮机模型试验条件	155
5.1.1	水轮机相似原理	155
5.1.2	水轮机单位参数	158
5.1.3	水轮机比转速	160
5.1.4	水轮机的模型试验	163
任务 5.2	水轮机效率换算与单位参数修正	169
5.2.1	水轮机效率换算	169
5.2.2	单位参数的修正	170
任务 5.3	水轮机特性曲线	171

5.3.1	水轮机模型特性曲线	171
5.3.2	水轮机运转特性曲线	176
任务 5.4	水轮机组选型	179
5.4.1	水轮机组的选型设计	179
5.4.2	水轮机选型计算实例	193
附录	水轮机暂行型谱	197
参考文献		199



# 项目 1 水电站动力设备认知

## 任务 1.1 水电站的认知

### 1.1.1 水电站的型式与组成

自然界有多种能源，目前已被开发利用的能源中主要有热能、水能、风能和核能。水能是一种可再生能源。地球上江河纵横，湖泊星罗棋布，海洋辽阔，蕴藏着丰富的水力资源。借助太阳的能量，地球上的水蒸发成水蒸气，在天空中水蒸气又凝聚成雨雪降至大地，通过江河又流入海洋，如此循环不已，永无止境。所以，利用水能发电的电能转换方式与火力发电、核能发电相比有许多的优点，例如成本低、运行管理简单、启动快、消耗少、适于调峰和调频、污染少等。

自然界的河流都具有一定的坡降，水流在重力作用下，沿着河床流动，在高处的水蕴藏着丰富的位能，如果没有把这种水能加以利用，当水流向低处流动时，则所有的能量都消耗在克服水流的黏性、摩阻、冲刷河床和夹带泥沙等方面了。

水电站是借助水工建筑物和机电设备将水能转换为电能的企业。为了利用水流发电，就要将天然落差集中起来，并对天然的流量加以控制和调节（如建造水库），形成发电所需要的水头和流量。

#### 1. 水电站的型式

根据开发方式的不同，水电站主要有坝式、引水式和混合式三种型式。

(1) 坝式水电站按厂房是否承受上游水压又分为坝后式和河床式两大类型，如图 1.1

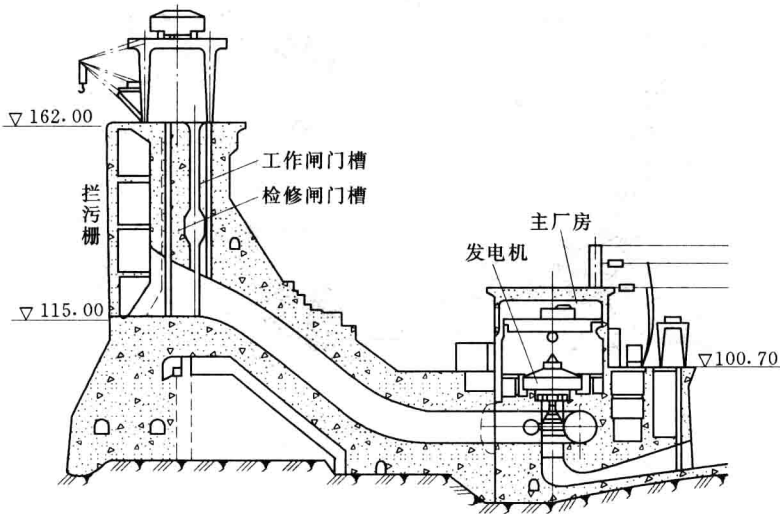


图 1.1 坝后式水电站厂坝横剖面示意图

和图 1.2 所示。坝后式水电站靠坝来集中水头，形成落差，电站规模大，水头较高，厂房本身不承受上游水压力。河床式水电站和坝后式水电站比较，其特点是：位于河床内的水电站厂房本身起挡水作用，成为集中水头的挡水建筑物的一个组成部分，并承受上游水压，故称河床式水电站。

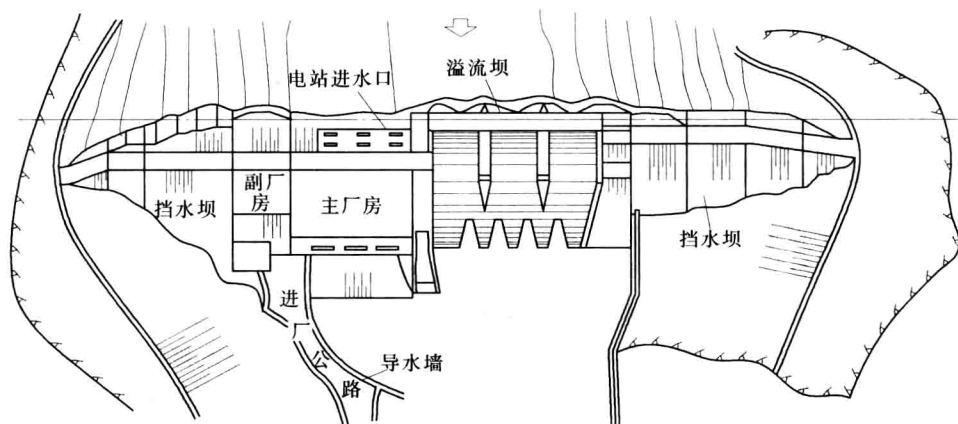


图 1.2 河床式水电站枢纽布置图

(2) 引水式水电站的引水道较长，并用来集中水电站的全部或相当大一部分水头。其特点是靠引水道来集中水头，水头高。根据引水道中的水流是无压流还是有压流，又分为无压引水式和有压引水式水电站（图 1.3）。

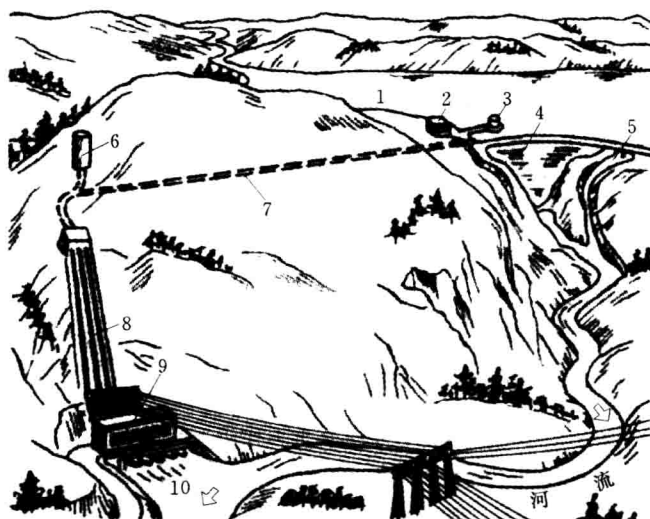


图 1.3 有压引水式水电站示意图

- 1—水库；2—闸门室；3—进水口；4—坝；5—泄水道；6—调压室；7—有压隧道；  
8—压力管道；9—厂房；10—尾水渠



(3) 混合式水电站建筑物的组成和布置型式兼有坝式水电站和引水式水电站的特点。在工程界,常将具有一定长度引水道的混合式电站统称为引水式电站,无论其是否靠坝集中一部分水头,都较少采用混合式水电站这个称谓(图 1.4)。

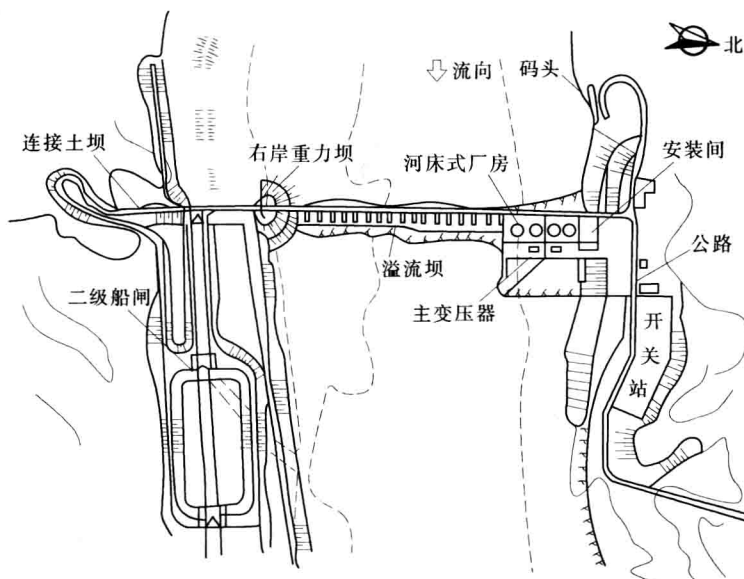


图 1.4 混合式水电站枢纽布置示意图

## 2. 水电站的组成

水电站由挡水建筑物、泄水建筑物、进水建筑物、引水建筑物、平水建筑物、厂区建筑物和枢纽中的其他建筑物等共 7 个部分组成,机电设备则安装在各种建筑物上,主要是在厂房内及其附近。

(1) 挡水建筑物。挡水建筑物是拦截水流、壅高水位、形成水库,以集中落差、调节流量的建筑物,例如坝和闸。

(2) 泄水建筑物。其作用主要是泄放水库容纳不了的来水,防止洪水漫过坝顶,确保水库安全运行,因而是水库中必不可少的建筑物,例如溢流坝、河岸溢洪道、坝下泄水管及隧洞、引水明渠溢水道等。

(3) 进水建筑物。使水轮机从河流或水库取得所需的流量,如进水口。

(4) 引水建筑物。引水建筑物是引水式或混合式水电站中,用来集中落差(对混合式水电站而言,则只是集中落差)和输送流量的工程设施,如明渠、隧洞等。有时水轮机管道也被称为引水建筑物,但严格说来,由于它主要是输送流量的,所以与同时具有集中落差和输送流量双重作用的引水建筑物并不完全相同。有些水电站具有较长的尾水隧洞及尾水渠道,这也属于引水建筑物。

(5) 平水建筑物。其作用是当负荷突然变化引起引水系统中流量和压力剧烈波动时,借以调整供水流量及压力,保证引水建筑物、水轮机管道的安全和水轮发电机组的稳定运行。如引水式或混合式水电站的引水系统中设置的平水建筑物如压力池或高压池。

(6) 厂区建筑物。包括厂房、变电站和开关站。厂房是水电站枢纽中最重要的建筑物之一，它不同于一般的工业厂房，而是水力机械、电气设备等有机地结合在一起的特殊的水工建筑物；变电站是安装升压变压器的场所；而开关站则是安装各种高压配电装置的地方，故也称高压配电场。

(7) 枢纽中的其他建筑物。此类建筑物指对于将水能转变为电能这个生产过程没有直接作用的船闸或升船机、筏道、鱼道或鱼闸以及为灌溉或城市供水而设的取水设施等。为了综合利用水资源，它们在整个水电站枢纽中也是不可分割的一部分，对枢纽的布置和运用也有重要的影响。

将水能转变成电能的生产全过程是在整个水电站枢纽中进行的，而不仅仅是在厂房中进行的。

### 1.1.2 水电站动力设备

水电站里承担电能生产的设备称为水电站动力设备，包括水轮发电机组、水轮机调速器和辅助设备系统等。

#### 1. 水轮发电机组

水轮发电机组是水轮机和发电机两者的合称，是在水能到电能的转换过程中最主要的动力设备。水轮机是水电站的水力原动机，当具有势能和动能的水流通过水轮机时，把水流的能量传给了水轮机转轮，促使水轮机转动，从而形成旋转的机械能。旋转的机械能又通过水轮机主轴带动发电机旋转，励磁后的发电机转子随发电机轴一起旋转，形成一个旋转的磁场，使发电机定子线圈因切割磁力线而产生电能。在水轮机调节系统和发电机励磁系统的控制下，发电机产生的电能以稳定的频率和电压输送到电力系统或电能用户。

#### 2. 水轮机调速器

当系统的负荷发生变化时，应该及时调节机组发出电能的多少，以获得电力系统中发电量与用电量的平衡。如果不能及时调整系统能量的平衡，会导致水轮机转速不稳定，供电频率变化过大，威胁各种用电设备的安全，严重影响工农业生产、社会经济活动和人们的正常生活。为此，必须通过水轮机调速器，根据机组转速的变化，自动地调节进入水轮机的流量，使水轮发电机组不断适应外界负荷的变化。同时，水轮机调速器还担负着开机、停机及调整机组所带负荷的作用。

#### 3. 辅助设备系统

辅助设备系统主要是指水电站的油、水、气系统等的统称，对水电厂的安全运行来说是不可缺少的。油系统的主要作用有：机组转动部分轴承润滑，调速器和进水阀等油压设备操作，电气设备绝缘和灭弧等；水系统包括技术供水和排水两系统，供水系统主要供给机组运行时所需要的冷却、润滑、消防和生活用水，排水系统主要是将厂房和设备的渗漏及生产用过的废水排出厂房，同时完成机组检修时设备内积水的排除；气系统一般包括高压气系统和低压气系统，其中高压气系统主要提供油压装置及开关操作和灭弧用气，低压气系统则主要提供机组制动、主轴及阀门密封、风动工具等用气。



### 1.1.3 水轮机发展综述

#### 1. 古代及近代水力机械的发展

水轮机作为一种水力原动机有着悠久的历史。公元前几世纪，在中国、印度等地人们就已经懂得利用水轮机来带动力磨、水碾等加工机械，公元 2 世纪在欧洲罗马的运河上已建有浸在水中由水轮带动的水磨。这些水轮都是利用水流的重力作用或者借助水流对叶片的冲击而转动，因此他们的尺寸大、转速低、功率小、效率低。

15 世纪中叶到 18 世纪末，水力学的理论开始有了发展，随着工业的进步，要求有功率更大，转速更快，效率更高的水力原动机。1745 年英国学者巴克斯，1750 年匈牙利人辛格聂尔分别提出一种依靠水流反作用力工作的水力原动机（图 1.5），但是其效率只有 50% 左右，原因是转轮进口没有导向部分，存在撞击损失。转轮出口无回收动能的装置，动能未得到充分利用。

1751—1755 年，俄国彼得堡科学院院士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（欧拉方程）。这个方程式直到今天仍被称为水轮机的基本方程。欧拉所建议的原动机（图 1.6），已经有导向部分，但出口流速仍很大，效率仍然不高。

1824 年法国学者勃尔金建议一种水力原动机，并第一次成为水轮机（即水力透平，透平 turbo 是拉丁文陀螺之意），如图 1.7 所示。它有导向部分，转轮改进成由弯板制成的叶道，但由于转轮高度太大，叶道太长，水力损失大，使效率低于 65%。

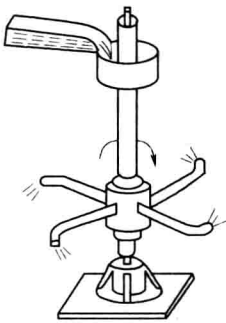


图 1.5 巴克斯和辛格聂尔提出的水力原动机

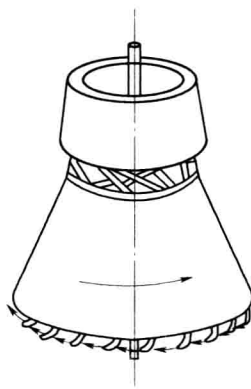


图 1.6 欧拉水力原动机

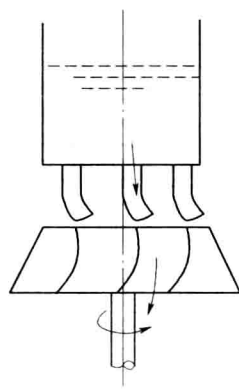


图 1.7 勃尔金水轮机

1827—1834 年，勃尔金的学生富聂隆和俄国人萨富可夫分别提出导叶不动的离心式水轮机（图 1.8），效率可达 70%，直到 20 世纪它一直得到广泛利用。但其缺点是导向机构在转轮内，故转轮直径大，转速低，出口动能损失大。

1837 年的德国的韩施里，1841 年法国的荣华里提出采用吸出管（尾水管）的轴向式水轮机，吸出管是圆柱形，可以使转轮安装在下游水位以上，但还是不能利用转轮出口动能。

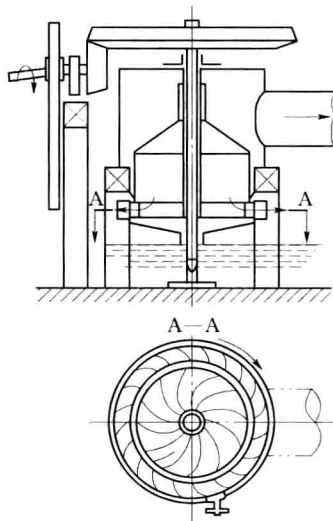


图 1.8 萨富可夫水轮机

直到 1847—1849 年，美国的法兰西斯提出了向心式水轮机（图 1.9），它的转轮装置于导向机构以内，因而尺寸小，转速高。它的吸出管是圆锥形，能利用转轮出口动能。同时转轮叶道是逐渐收缩的，故转轮内水力损失较小。缺点是转轮叶片位于径向，故尺寸仍很大，转速还不够高，导向部分通过插板来调节流量，损失大，效率低。

1877 年，法国人菲康采用转动导向叶片的方法调节流量。以后在实践中对向心式水轮机不断改进和完善，才发展成现代最广泛使用的混流式水轮机。

随着工业技术的发展，人们利用坝和压力钢管能集中越来越高的水头，但是强度和气蚀问题限制了混流式水轮机应用水头的提高。1850 年，施万克鲁格提出了辐向单喷嘴冲击式水轮机，1851 年，希拉尔提出的辐向多喷嘴冲击式水轮机，是最早出现的冲击式水轮机，但它们的斗叶形状不够好，尺寸较大，效率较低。

1880 年美国培尔顿提出了采用双曲面水斗的冲击式水轮机（图 1.10）。在最初的结构中，不是采用针阀调节流量而是用装在喷嘴前的闸门开关，因而水力损失大。经过不断改进和完善才形成今天的切击式水轮机。这种水轮机结构强度优于混流式，在大气中工作，应用水头不受气蚀条件限制，所以适用于高水头电站。缺点是流量小，功率小。

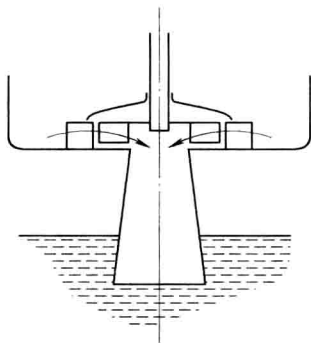


图 1.9 法兰西斯水轮机

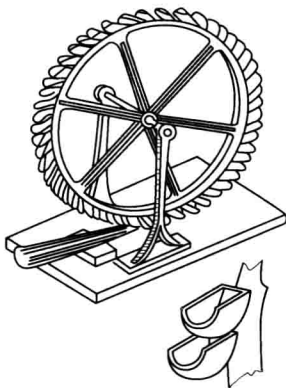


图 1.10 培尔顿所建议的冲击式水轮机

1917 年匈牙利的班克提出双击式水轮机，1921 年英国人仇戈提出斜击式水轮机，它们的结构简单，但效率低于切击式，适用于小型水电站。

1912 年捷克人卡普兰提出一种转轮带有外轮环，叶片固定的螺旋桨式水轮机（图 1.11），这种水轮机把转轮移到轴向位置，大大减少了叶片数，因而过流量加大，转速也提高了。1916 年卡普兰又提出取消外轮环，并采用使叶片转动的机构，进一步提高过流量和平均效率。经过不断完善形成现代的轴流转桨式水轮机。

20 世纪 40 年代为了开发低水头的水力资源，出现了贯流式水轮机。它在轴流式的基



础上取消蜗壳，引水室变成了一条管子，导水机构放到轴向位置，机组改为卧式，使得过流量进一步提高，损失减少，尺寸缩小。

1950 年苏联人 B. C. 克维亚特科夫斯基教授，1952 年瑞士人德列阿兹在英国分别提出斜流式水轮机。由于它具有双重调节，使得适用水头高于轴流式，效率高于混流式等优点，逐步得到推广和应用。第一台斜流式水轮机由德列阿兹研制成功，1957 年在加拿大亚当别克蓄能电站投入运行。近年日本在斜流式水轮机生产上发展很快。

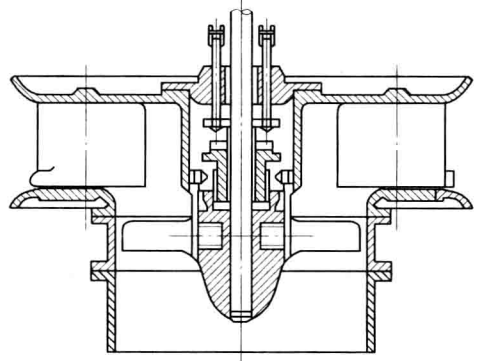


图 1.11 卡普兰提出的转桨式水轮机

## 2. 现代水轮机的发展及趋势

随着计算机的广泛使用，现代水轮机水力设计有了很大的发展，水力性能得到改善，效率最高可达到 95% 左右，同时提高了运行稳定性。20 世纪 80 年代以来计算机技术和流体力学理论的不完善，水轮机过流部件内部水流动力分析取得重大进展，结合传统的经验设计与模型试验结合的方法遴选设计方案的设计经验，逐步形成了一套完整的现代水轮机水力设计方法。这种方法对设计方案进行数据性能预估、优化设计方案、减少模型试验的时间和费用，为获取最佳水力模型提供了有力工具。在水轮机叶型设计方面取得了优秀成果，即采用 X 形叶片。

在制造材料和制造工艺上，现代水轮机也有了长足的发展。从铸铁、铸钢到不锈钢，材料的优选一方面改进了强度，同时又改善了抗空蚀的能力。为了减轻泥沙磨损，采用陶瓷涂层新技术。为了提高水轮机转轮叶片的材质和型线的一致性，减轻铲磨劳动强度采用模压控加工等工艺。除此之外，在转轮焊接和热处理技术及叶片几何型线测量技术以及微焊成型等一系列技术上都有所突破。所有这些都有力地保障了水轮机性能的提高。

现代水轮机发展的趋势是提高单机容量，增大比转速和应用水头。表 1.1 列出了目前世界上已投运的各种水轮机的最大情况。

表 1.1 世界现代已投运各类水轮机的最大情况

类型	最大	单机出力 $N_{\text{单}}$ / 万 kW	转轮标称直径 $D$ / m	应用水头 $H$ / m
混流式		70 美国大古力第三	9.8 中国三峡	1771 奥地利莱塞克
冲击式		31.5 挪威圣西玛	5.5 奥地利基利茨	744 奥地利霍斯林
轴流式		20.0 中国水口	11.3 中国葛洲坝二江	11.3 日本新日向川
斜流式		21.5 前苏联泽雅	6.0 前苏联泽雅	88.0 意大利那门比亚



续表

类型 \ 最大	单机出力 $N_m$ / 万 kW	转轮标称直径 $D$ / m	应用水头 $H$ / m
贯流式	6.58 日本只见	8.2 美国悉尼墨雷	24.3 日本只见
水泵水轮机	45.7 美国巴斯康蒂	8.2 美国史密斯山	701.0 保加利亚茶伊拉

(1) 水轮机应用水头向着较宽的范围发展,以适应不同形式存在的水能的开发。目前,水轮机种类繁多,而每种类型的水轮机又有很多品种,总起来有百种之多,分别适用于不同水头和流量,水头从 1m 到 1000~2000m,都有相应的品种。

(2) 单机容量不断提高。提高单机容量可以降低水轮机单位容量的造价。自 20 世纪 60 年代,世界上第一台 500MW 混流式水轮机在前苏联克拉斯诺亚尔斯克电站投入运行以来,增大水轮机单机容量的风潮在全球兴起,迄今为止 7 座水电站 62 台单机容量超过 50 万 kW。

(3) 能量特性、气蚀特性不断优化。而且比转速也有较大提高。提高水轮机比转速可以增大机组的过流能力,使水轮发电机体积小,重量轻,节省金属材料和制造工艺,从而降低了成本,尤其对大容量的机组更有很大好处;其实,水轮机好的能量特性、空化特性和比转速这三者之间是相互矛盾的,因为水轮机比转速的提高通常会带来效率下降和空化性能变坏,这是由于过流量能力的加大会使水轮机流道中水流相对速度大大提高。水轮机要同时具有良好的能量特性和空化特性以及高的比转速显然是不可能的,这两个指标是矛盾的统一体。因就现代水轮机从设计方法、制造工艺、材料性能等多方面进行了深入的研究,得出了合理解决的方法。

#### 1.1.4 我国水电行业的发展历程

##### 1. 我国的水力资源

我国大陆水力资源理论蕴藏量在 1 万 kW 级以上的河流共 3886 条,水力资源理论蕴藏量年电量为 6082.9TW·h;技术可开发装机容量 541.64GW;经济可开发装机容量 401.8GW。

我国水力资源除理论蕴藏量、技术可开发量、经济可开发量及已建和在建开发量均居世界首位外,还具有三个鲜明的特点:一是在地域分布上极不平衡,西部多、东部少,因此西部水力资源开发除了满足西部电力市场自身需求外,更重要的是要考虑东部市场,实行水电的“西电东送”战略;二是大多数河流年内、年际径流分布不均,需要建设调节性能好的水库,对径流进行调节,缓解水电供应的丰枯矛盾,提高水电的总体供电质量;三是水力资源集中于大江大河,其总装机容量约占全国技术可开发量的 51%,占经济可开发量的 60%,有利于集中开发和规模外送。

目前,我国已经在建投产和正在建设的水电站中,有不少工程在规模、难度和技术方面是世界之最。例如,世界上装机容量最大的三峡水电站已经投产发电,世界上最高的面





板坝——水布垭电站大坝，世界上最高的拱坝——小湾水电站拱坝，世界上最高的碾压混凝土重力坝——龙滩水电站大坝等，都表明我国的水电建设已经跨入世界先进水平行列。

## 2. 抓住机遇，积极开发水电资源

水电是清洁的可再生能源，符合可持续发展、改善生态环境和提高资源利用效率的目标，而且我国近 80% 的水能资源集中在西部，开发西部水电资源有利于实现西部资源优势向经济优势转化，也符合党中央提出的西部大开发战略要求。

根据我国的经济水平，我国目前正处于并将长期处于社会主义初级阶段，人民日益增长的物质文化需要同落后的社会生产之间的矛盾仍然是我国社会的主要矛盾，在这种情况下，大力开发水电，无疑具有非常重要的意义。

第一，大力开发水电，能够促进我国水资源综合利用水平的提高。水电工程的建设可以实现人类对水资源的调节和控制，改变水的时空分配，起到防洪、灌溉、供水、航运、水土保持等作用，有效地提高水资源的综合利用水平，缓解我国水资源短缺的矛盾。

第二，大力开发水电，有利于改善人类生存环境。随着经济的发展，人类社会的进步，人们对环境的要求越来越高，安全、健康、没有污染的环境成为人类努力的目标。水力发电具有不排放污染物和有害气体的特点，从而不会恶化空气质量，有利于改善人类生存的环境。

第三，大力开发水电，有利于提高电网的安全稳定运行水平。水力发电具有起停便捷，可以在电网中承担调峰、调频、调相和旋转备用的特点，随着水电在电网中比例的增加，在我国网架相对薄弱的情况下，对改善电网运行条件，提高电网的安全稳定运行水平具有重要作用。

第四，大力开发水电，有利于带动当地经济发展。水电的开发建设能够带动和促进当地的建筑和劳务市场的繁荣，同时增加地方的财政收入，这一切将有效促进当地经济的发展。因此，大力开发水电是我国当前和今后一个时期电力工业发展的必然选择，可以说我国正处于水电开发的大好时机。

# 任务 1.2 水轮机的基本知识

## 1.2.1 水轮机的基本参数

水轮机的工作参数是表征水流通过水轮机时水流能量转换为转轮机械能过程中的一些特性的数据。水轮机的基本工作参数主要有水头  $H$ 、流量  $Q$ 、出力  $P$ 、效率  $\eta$  和转速  $n$  等。

### 1. 水头 $H$

水轮机的水头  $H$ （亦称工作水头）是指水轮机进口和出口截面处单位重量的水流能量差，单位为  $m$ ，如图 1.12 所示。对反击式水轮机，进口断面取在蜗壳进口处 I—I 断面，出口取在尾水管出口 II—II 断面。根据水轮机工作水头的定义列出水轮机进、出口断面的能量方程，其基本表达式为