

中国水利教育协会
高等学校水利类专业教学指导委员会

共同组织



全国水利行业“十三五”规划教材（普通高等教育）

水电站（第2版）

主 编 天 津 大 学 徐国宾
副主编 华北水利水电大学 张 丽
西北农林科技大学 李 凯

非外借



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

中国水利教育协会
高等学校水利类专业教学指导委员会

共同组织



全国水利行业“十三五”规划教材（普通高等教育）

水电站（第2版）

主 编 天 津 大 学 徐国宾

副主编 华北水利水电大学 张 丽

西北农林科技大学 李 凯



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书除绪论外,共分为三篇十三章。第一篇水轮机,内容包括:水轮机类型、结构及工作原理,水轮机蜗壳、尾水管及空化与空蚀,水轮机特性及选型,水轮机调节;第二篇水电站输水系统,内容包括:水电站布置型式及其组成建筑物,水电站进水口及防沙、防污和防冰措施,水电站渠道、压力前池及隧洞,水电站压力管道,水电站水击及调节保证计算,调压室;第三篇水电站厂房,内容包括:水电站厂区及岸边式厂房布置设计,其他类型厂房布置及设计特点,厂房结构设计。

本书主要供本科院校水利水电工程专业师生使用,授课时数为55~70学时。同时也兼顾农业水利工程、水利水电工程管理、动力工程等专业使用,授课内容和时数各专业可根据具体情况进行删减。此外,本书对于专业技术人员也具有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

水电站 / 徐国宾主编. -- 2版. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2017.8
全国水利行业“十三五”规划教材. 普通高等教育
ISBN 978-7-5170-5649-2

I. ①水… II. ①徐… III. ①水力发电站—高等学校—教材 IV. ①TV7

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第210734号

书 名	全国水利行业“十三五”规划教材(普通高等教育) 水电站(第2版) SHUIDIANZHAN
作 者	主 编 天 津 大 学 徐国宾 副主编 华北水利水电大学 张 丽 西北农林科技大学 李 凯
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 (营销中心)
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
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 26.5印张 628千字
版 次	2012年8月第1版第1次印刷 2017年8月第2版 2017年8月第1次印刷
印 数	0001—4000册
定 价	58.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

第 2 版前言

本书第 1 版出版后，承蒙许多兄弟院校使用，并在 2014 年获得教育部高等学校水利类专业教学指导委员会、中国水利教育协会和中国水利水电出版社联合主办的第一届高等学校水利类专业优秀教材奖，但是在使用过程中也发现了一些错误。为此，第 2 版在第 1 版基础上进行了修改，主要修改了第 1 版中的一些错误，同时与时俱进地增删了书中的一些内容，并更新了书中引用的一些设计规范或规程。

本书各章节仍由第 1 版相应章节的作者撰写：绪论、第六章和第九章由天津大学徐国宾教授编写；第一章、第二章由华北水利水电大学王玲花教授编写；第三章、第四章由西北农林科技大学李凯副教授编写；第五章、第七章由天津大学武永新教授编写；第八章、第十三章由天津大学王海军副教授编写；第十章、第十一章由华北水利水电大学张丽教授编写；第十二章由河北农业大学吴现兵副教授编写。

本书如有错误或不当之处，欢迎大家批评指正，请发电子邮件至 xuguob@tju.edu.cn，以便下次再版时订正。

编 者

2017 年 4 月

第 1 版前言

“水电站”是高等院校水利水电类的一门专业课。本书主要供本科院校水利水电工程专业师生使用，授课时数为 55~70 学时。同时也兼顾农业水利工程、水利水电工程管理、动力工程等专业使用，授课内容和时数各专业可根据具体情况进行删减。此外，本书对于专业技术人员也具有一定的参考价值。

本书除绪论外，共分三篇十三章。第一篇水轮机，内容包括：第一章水轮机类型、结构及工作原理；第二章水轮机蜗壳、尾水管及空化与空蚀；第三章水轮机特性及选型；第四章水轮机调节。第二篇水电站输水系统，内容包括：第五章水电站布置型式及其组成建筑物；第六章水电站进水口及防沙、防污和防冰措施；第七章水电站渠道、压力前池及隧洞；第八章水电站压力管道；第九章水电站水击及调节保证计算；第十章调压室。第三篇水电站厂房，内容包括：第十一章水电站厂区及岸边式厂房布置设计；第十二章其他类型厂房布置及设计特点；第十三章厂房结构设计。书中带有星号（※）的章节，各校可根据具体情况安排是否在课堂上讲授，如果不讲授可作为学生课外阅读资料。

在编写过程中，考虑到教材的科学性、系统性、经典性、实践性和先进性，在内容的编排上既保持本课程的主要内容，同时结合我国水电建设的新进展，以及现行的有关规范、规程，与时俱进地增加了一些新的内容，包括新理论、新方法等。为便于学生对理论知识的理解和掌握，在每章的始末分别给出了学习提示和思考题，在各章节也注重给出一些计算例题来帮助学生提高解决工程实际问题的能力。

本书由天津大学曹楚生院士担任技术顾问，天津大学徐国宾教授担任主编，华北水利水电大学张丽教授、西北农林科技大学李凯副教授担任副主编。各章编写分工如下：绪论由天津大学曹楚生院士和徐国宾教授合编；第一章、第二章由华北水利水电大学王玲花教授编写；第三章、第四章由西北农林科技大学李凯副教授编写；第五章、第七章由天津大学武永新教授编写；第六章、第九章由天津大学徐国宾教授编写；第八章、第十三章由天津大学王海军副教授编写；第十章、第十一章由华北水利水电大学张丽教授编写；第十

二章由河北农业大学吴现兵讲师编写。全书各章初稿完成后由上述编写人员对各章节相互审核，最后由徐国宾教授修改统稿，再由张丽教授和李凯副教授分别校核。

本书在编写过程中咨询了许多在设计院工作的同行的意见，并参考了大量的国内外文献资料及教材，在此一并表示衷心的感谢！限于编者的水平，书中难免有错误与不当之处，敬请广大读者批评指正。

编者

2012年2月

目 录

第 2 版前言

第 1 版前言

绪论	1
学习提示	1
第一节 水能利用发展概况	1
第二节 水能开发方式及水力发电的基本原理	2
第三节 水力发电的特点	4
第四节 我国的水能资源及其开发利用	5
第五节 水电站课程的任务和主要内容	14
思考题	15

第一篇 水 轮 机

第一章 水轮机类型、结构及工作原理	16
学习提示	16
第一节 水轮机的主要类型	16
第二节 水轮机的基本工作参数	22
第三节 水轮机的基本结构及装置方式	26
第四节 水轮机的标称直径及型号	33
第五节 水流在反击式水轮机转轮中的运动	35
第六节 水轮机工作的基本方程	37
第七节 水轮机的效率及最优工况	40
思考题	44
第二章 水轮机蜗壳、尾水管及空化与空蚀	46
学习提示	46
第一节 蜗壳的型式及其主要尺寸的确定	46
第二节 尾水管的作用、型式及其主要尺寸的确定	54
第三节 水轮机的空化与空蚀及空化系数	62
第四节 水轮机的吸出高度和安装高程	70
第五节* 水轮机的磨蚀及抗磨蚀措施	73

思考题	75
第三章 水轮机特性及选型	77
学习提示	77
第一节 水轮机的相似理论及单位参数	77
第二节 水轮机的效率换算及单位参数修正	82
第三节 水轮机的比转速	84
第四节 水轮机的模型试验	85
第五节 水轮机的特性曲线及其绘制	88
第六节 水轮机的选型	98
第七节* 计算机辅助水轮机选型设计	117
思考题	121
第四章 水轮机调节	123
学习提示	123
第一节 水轮机调节的任务	123
第二节 水轮机调节系统的特性	125
第三节 调速器的工作原理	128
第四节 调速器的类型及选择	129
第五节 调速器的油压装置及选择	133
思考题	135
第二篇 水电站输水系统	
第五章 水电站布置型式及其组成建筑物	136
学习提示	136
第一节 水电站的布置型式	136
第二节 水电站的组成建筑物	148
思考题	148
第六章 水电站进水口及防沙、防污和防冰措施	149
学习提示	149
第一节 进水口的功用、要求和类型	149
第二节 有压进水口的主要类型及适用条件	150
第三节 有压进水口的位置、高程及轮廓尺寸	152
第四节 有压进水口的主要设备及防沙工程措施	154
第五节 无压进水口及防沙、防污和防冰措施	161
第六节 沉沙池布置及设计	165
思考题	168
第七章 水电站渠道、压力前池及隧洞	169
学习提示	169

第一节	渠道	169
第二节	压力前池及日调节池	174
第三节	隧洞	177
	思考题	181
第八章	水电站压力管道	182
	学习提示	182
第一节	压力管道的功用和类型	182
第二节	压力管道的线路选择和供水方式	184
第三节	压力管道的水力计算和经济直径的确定	186
第四节	钢管的材料、允许应力和管身构造	187
第五节	压力管道的闸门、阀门和附件	189
第六节	明钢管的布置及结构设计	192
第七节	地下压力管道布置及结构设计	207
第八节	坝身压力管道布置及结构设计	212
第九节	分岔管布置及类型	217
第十节*	压力管道有限元计算分析简介	220
	思考题	223
第九章	水电站水击及调节保证计算	225
	学习提示	225
第一节	水电站不稳定工况及研究水击的目的	225
第二节	水击计算的简单公式和水击波传播速度	227
第三节	简单管道水击发展过程	230
第四节	水击计算的基本方程	235
第五节	水击计算的边界条件和水击波的类型	239
第六节	水击计算的解析法	245
第七节	水击计算的特征线方程及有限差分方程	252
第八节	复杂管道水击的简化计算	255
第九节	调节保证计算的概念及转速升高近似计算	259
第十节	水击计算工况和减小水击压力的措施	262
	思考题	264
第十章	调压室	266
	学习提示	266
第一节	调压室的功用、要求及设置条件	266
第二节	调压室的基本布置方式及类型	268
第三节	调压室工作原理及基本方程	273
第四节	调压室水力计算内容及计算工况	275
第五节	简单式及阻抗式调压室水位波动解析计算	277
第六节	水室式、溢流式和差动式调压室水位波动解析计算	280

第七节	调压室水位波动的稳定问题	285
第八节	调压室结构布置及设计原理	292
第九节*	有压引水系统非恒定流计算简介	297
	思考题	303

第三篇 水电站厂房

第十一章	水电站厂区及岸边式厂房布置设计	304
	学习提示	304
	第一节 厂区布置设计	304
	第二节 厂房的功用和基本类型	308
	第三节 厂房的组成	310
	第四节 发电机及其支承结构	315
	第五节 辅助设备的布置	319
	第六节 厂房内部布置	323
	第七节 主厂房各层高程的确定	330
	第八节 主厂房平面尺寸的确定	334
	第九节 厂房布置设计所需资料和设计步骤	338
	思考题	341
第十二章	其他类型厂房布置及设计特点	343
	学习提示	343
	第一节 坝后式厂房	343
	第二节 河床式厂房	348
	第三节 地下式厂房	358
	第四节 溢流式厂房	368
	第五节 坝内式厂房	371
	第六节 冲击式水轮机厂房	373
	第七节 抽水蓄能机组厂房	375
	思考题	378
第十三章	厂房结构设计	379
	学习提示	379
	第一节 水电站厂房的结构特点	379
	第二节 地面厂房的整体稳定和地基应力计算	382
	第三节 发电机支承结构计算	385
	第四节 蜗壳和尾水管结构计算	392
	第五节 吊车梁和排架柱计算	402
	第六节* 垫层蜗壳组合结构三维有限元计算分析简介	406
	思考题	410
	参考文献	411

绪 论

学习提示

内容：介绍水能利用发展概况，水能开发方式及水力发电的基本原理，水力发电的特点，我国的水能资源及其开发利用，水电站课程的任务和主要内容。

重点：水能开发方式及水力发电的基本原理，水力发电的特点，我国的水能资源及其开发利用情况，本课程的任务及主要内容。

要求：建立水力发电的概念，了解水能开发方式及水力发电的特点、我国水能资源的特点及水电事业发展状况；理解本课程的性质，明确本课程的任务。

第一节 水能利用发展概况

人类在很早以前就开始利用水流能量（简称“水能”）。据文字记载，公元前 2 世纪希腊就出现了水磨，利用水力代替人力，减轻人们的体力劳动。我国在东汉、魏晋时期就有关于水碓、水排、水磨等的记载，利用水流的动力冲动木制水车来带动石碓、石碾、石磨等，进行农产品加工。这些都是水力原动机的雏形。16 世纪，英国制成铁质水轮，借水力冲动桨叶汲水上岸，供城市用水。18 世纪，欧洲进行产业革命，水力机械作为原动机在工业生产中得到较大的发展。19 世纪人们在水车和旧式水轮机的基础上制成了第 1 台水轮机。1878 年，世界上第 1 座水电站在法国建成。此后随着机械制造业和电气技术的迅速发展，相继出现了高效率的水轮机和发电机，特别是高压输电技术的出现，为水能利用开辟了广阔的道路。现在水能利用的主要形式是利用水能生产电能，即水力发电。

进入 20 世纪后，水力发电有了更大的发展。尤其是在 20 世纪中后期之后，国内外在建设水电站方面的趋势是：提高单机容量和扩大水电站规模；广泛采用计算机技术，提高水电站自动化程度和运行管理水平；大力发展抽水蓄能电站等。据统计，20 世纪末，世界上共建成装机容量在 100 万 kW 以上的常规水电站 120 座（其中装机容量 400 万 kW 以上的有 10 座），抽水蓄能电站 39 座，合计 159 座。这其中包括我国 17 座常规水电站，2 座抽水蓄能电站。目前，世界上已建成的最大水电站总装机容量达 2250 万 kW，即我国的三峡水电站；第二大水电站是巴西与巴拉圭共建的伊泰普水电站，总装机容量 1400 万 kW。世界上已建或在建的单机容量 70 万 kW 以上的特大型水轮发电机组主要有：伊泰普水电站，委内瑞拉古里水电站，美国大古力水电站和中国三峡、龙滩、小湾、拉西瓦水电站，这些水电站的单机容量均为 70 万 kW；我国完全自主建造的单机容量为 77 万 kW、80 万 kW 和 85 万 kW 的水轮发电机组分别在溪落渡、向家坝和乌东德水电站运行或安装；我国研发的单机容量 100 万 kW 的水轮发电机组，将安装在白鹤滩水电站上。从三峡

水电站，到溪落渡、向家坝和乌东德水电站，再到白鹤滩水电站，国产特大型水轮发电机组的单机容量屡屡刷新世界纪录。

水力发电在世界各国，特别是发达国家的能源结构中扮演了重要角色。这是因为水力发电应用时间超过百年，技术已成熟，并且具有效率高、成本低、运行灵活、管理简单、适于调峰和调频、对环境不造成污染等优点。所以，世界各国的水电容量都在不断增加，水电容量在电力系统中的比重不断提高。截至 20 世纪末，世界上有 24 个国家 90% 的电力来自水电，有 1/3 的国家水电比重超过 50%。发达国家水能资源开发利用程度较高，如法国和瑞士的水能资源开发利用程度已达到 90% 以上。而发展中国家，包括我国水能资源开发利用程度相对较低。尽管自 20 世纪 90 年代以来，我国加快了水能资源开发，建设了一批大型和巨型水电站，但截至 2009 年年底，我国的水能资源开发利用程度还不到 25%，远远低于发达国家平均 70%~80% 的水平。欧洲和日本等国家，在建设大型水电站的同时，也很重视中、小型水电站的建设，特别是从 20 世纪 70 年代石油危机以来，过去认为不经济的小型水电站也被大力提倡。发展中国家更为重视中、小型水电站的建设。因为中、小型水电站的投资少、工期短、收效快，技术也比较简单，因而得到普遍重视。在全球日益关注能源和环境问题的今天，水力发电在调整能源结构、降低二氧化碳排放、减少温室效应、实现可持续发展方面，将会扮演更重要的角色。

第二节 水能开发方式及水力发电的基本原理

水能资源是河川径流所具有的天然资源，水力发电就是利用河流中蕴藏的水能资源来生产电能。河道中水流蕴藏着巨大能量，表现为河水流量 Q 和河段落差 H ，其能量为 $E = \gamma QH$ 。在天然情况下，这些能量消耗在冲刷河床、推移泥沙及克服摩擦阻力中。为了利用天然水能发电，必须首先设法获得足够的水头和流量。但天然河道的落差，除了在瀑布或急滩的河段比较集中外，落差一般是沿河分散的，不便于利用。天然河道的流量是经常变化的，洪水期流量很大，常常用之有余，枯水期流量很小，又不能满足所需。因此，为了最充分、最有效地利用天然水能发电，就必须采取适当的工程技术措施去集中落差和调节径流，尤其是集中落差更为重要。所谓水能开发方式，通常是指采用哪种技术措施来集中落差。就技术措施而言，有坝式、引水式和混合式 3 种开发方式。

(1) 坝式开发。在河流峡谷处拦河筑坝，坝前壅水，在坝址处形成集中落差，这种水能开发方式称为坝式开发。图 0-1 和图 0-2 分别为坝后厂房式水电站和河床式水电站，这两种水电站是坝式开发常见的布置形式。坝式开发的基本原理在于筑坝挡水，聚集水量，形成水库，将分散在天然河段的落差集中起来，在坝址处形成发电水头，再通过压力管道将水流引至水电站厂房内的水轮机，发电后将尾水引至坝下游河道，上、下游水位差即是水电站的发电水头。坝式水电站的水头取决于坝高。显然，坝越高，发电水头就越大。但坝高常常受地形、地质、水库淹没、工程投资等条件的限制。所以，与其他开发方式相比，坝式水电站的发电水头相对较小。目前，坝式水电站的最大发电水头在 300m 左右。坝式开发的显著优点是由于形成容水量较大的水库可以用来调节流量，故坝式水电站引用流量最大，电站规模也大，水能利用程度较充分。目前世界上装机规模超过 200 万 kW 的

巨型水电站大都是坝式水电站。

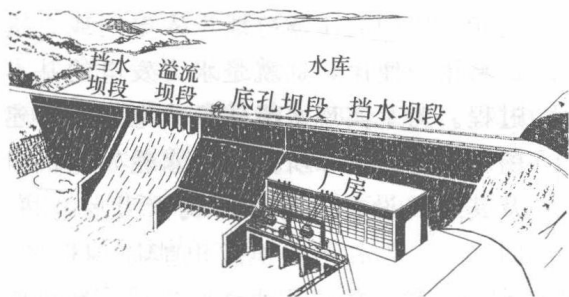


图 0-1 坝后厂房式水电站

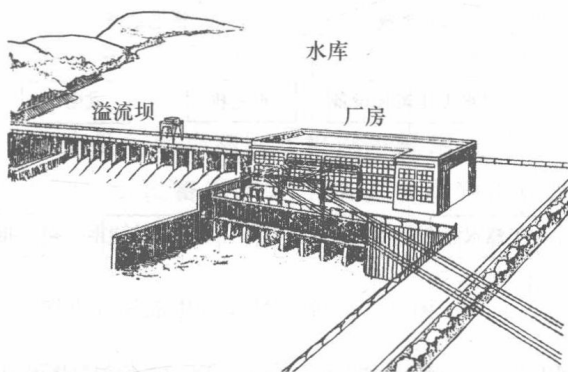


图 0-2 河床式水电站

(2) 引水式开发。在河流坡降陡的河段上游修筑拦河闸或低坝，通过人工修建的引水道（渠道或隧洞）引水到河段下游，集中落差，再经压力管道，引水至厂房。这种用引水道集中水头的电站称为引水式水电站。引水道可以是无压的，也可以是有压的。图 0-3 和图 0-4 分别为无压和有压引水式水电站。与坝式水电站相比，引水式水电站的水头相对较高，目前最大发电水头已达 2000m 以上。但引水式水电站水库不具备相应的调节库容，没有能力调节径流，水量利用率较低，综合利用价值较差。然而，因水库淹没损失小，工程量又较小，所以单位造价也往往较低。引水式开发适用于河道坡降较陡的山区河段，或通过截弯取直引水和跨河流引水来集中落差。

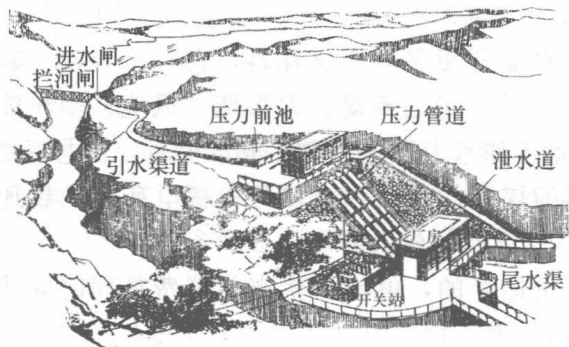


图 0-3 无压引水式水电站

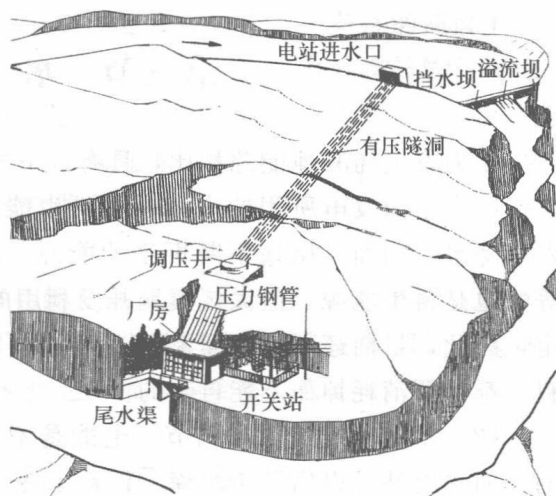


图 0-4 有压引水式水电站

(3) 混合式开发。在一个河段上同时采用坝和有压引水道共同集中落差的开发方式称为混合式开发。坝集中一部分落差后，再通过有压引水道集中坝后河段的另一部分落差，形成电站总水头。这种开发方式的水电站称为混合式水电站。混合式开发因有水库调节径流，具有坝式开发和引水式开发的优点，但必须具备适合的条件。一般来说，河段前部有筑坝建库条件，后部坡降大（如有急滩或大河湾），宜用混合式开发。

利用上述 3 种开发方式，集中落差形成水头，然后将水流引入水轮机，使水轮机转动，将水能转换成旋转机械能，通过水轮机带动发电机，将旋转机械能转换成电能，再用高压输电线送入电网或直接送给用户使用，这就是水力发电的基本过程。为了实现水能转换成电能而修建的水工建筑物和所安装的水轮发电机组及其附属设备的总体，就称为水电站。图 0-5 是水能转换成电能原理框图。

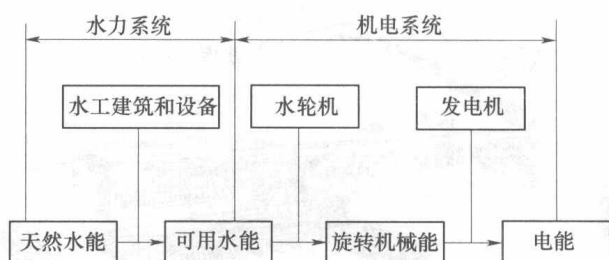


图 0-5 水能转换成电能原理框图

利用水工建筑和设备将天然水能集中成可用水能；利用水轮机将可用水能转换成旋转机械能；利用发电机将旋转机械能转化为电能。

除了上述 3 种常规的水力发电开发方式外，抽水蓄能发电是水能开发利用的另一种形式。它不是为了开发水能资源向电力系统提供电能，而是以水体为储能介质，起调节电能的作用。抽水蓄能式水电站包括抽水蓄能和放水发电两个过程。其建筑物的组成中必须有高低两个水池，与有压引水建筑物相连。蓄能电站厂房位于低水池处。在电力系统负荷低谷时，利用电力系统内其他电厂多余电量，带动水泵水轮机，将低水池中的水抽送到高水池，以水的势能形式储存起来（抽水蓄能过程）；在电力系统负荷高峰时，将高水池中的水放下来带动水轮机发电，以补充电力系统出力的不足（放水发电过程）。抽水蓄能电站宜建在离负荷中心较近的地方，以减少输电线路的投资及电能的损失。抽水蓄能电站安装的水泵水轮机与常规水电站的水轮机不同，是一种可逆式水力机械，既可做水轮机运行又可做水泵运行。

第三节 水力发电的特点

水力发电与其他能源相比，具有以下特点：

(1) 水力发电所用的水能是可再生能源。水能资源是随水文循环（降水—径流—蒸发—降水）周而复始地不断再生的能源，取之不尽，用之不竭。太阳能、风能、潮汐能等，也是再生能源，但大规模地开发利用的技术不如水力发电成熟，成本很高，发电不稳定，因此，目前还不能大量利用。而火电所用的煤炭、石油和天然气，核电所用的铀原料，都是要消耗掉而不能再生的。

(2) 水能可以储蓄和调节。电能是不能大量储存的，电能的生产与消费是同时完成的。而水电站可以借助于水库，储蓄水能，代替储蓄电能，有利于电力系统电量的供求平衡，提高供电的灵活性和经济性。

(3) 水电站综合利用效益大。水是一种资源，具有多方面的使用价值，可以综合利用。如果水电站枢纽具有容量较大的水库，除发电外，还可以兼顾防洪、灌溉、航运、供水、水产养殖、旅游等，发挥综合利用效益。所以，水电站综合利用效益，是任何能源不可替代的，建设水电站可一举多得。河流的水资源还可以梯级开发利用，上游水电站发电后的水流，仍可为下游各级水电站再利用发电。

(4) 水电站运行的灵活性。水轮发电机组具有设备简单，运行操作灵活，易于实现自

动化等优点。机组可以在几分钟内就能从停机状态达到满负荷运行、并网供电，增、减负荷十分方便。因此，水电站最适于承担电力系统的调峰、调频任务和用作负荷、事故备用容量。火电站虽然也可承担这些任务，但因其设备复杂，启动不太灵活，要经常处于热备用状态，浪费一定燃料。

(5) 水电站电能是廉价能源。水电站的生产成本低，效率高。水电站不耗用燃料，运行人员常为火电站的 $1/20 \sim 1/10$ ，又由于水电站的机组设备简单，年维护费用较低，所以通常水电站的电能成本只有火电站的 $1/10 \sim 1/5$ 。水电站的能源利用率也比较高，火电站烧煤的热能效率一般只有 40% 左右，而水电站的水能效率可达 85% 以上。所以，水电站电能是廉价能源。

(6) 水力发电的可逆性。位于高处的水可以通过水轮发电机组，使水能转变为电能；位于低处的水也可以通过抽水机组提送到高处，使电能转变成水能。利用这种可逆性，可以在电力系统内建造抽水蓄能水电站，达到储蓄和调节电能的目的，改善电力系统电能生产的供求关系，提高供电质量和经济效益。

(7) 水电站电能是清洁能源。水电站在生产过程中对环境无污染，既不产生酸雨、烟雾和粉尘，又无废渣、废水，实现了废物的零排放。所以，水电站电能是一种无废物排放的清洁能源。

(8) 水电站电能生产的不均衡性。由于河川径流年内及年际间的变化很大，使水电站的电能生产具有不均衡性。加上水文预报尚不够准确，也影响水电站的计划生产。这些因素都给水电站和电力系统的运行带来一定困难。为了有效利用水能资源和较好地满足用电要求，最好建具有一定调节能力的水库调节径流，以缓和水电站电能生产的不均衡性。

(9) 水电站的建设受自然条件的限制。水电站必须建设在具有一定条件的河段上，受地质、地形、径流等条件限制，有时要造成一定的淹没损失。所以水电站建筑物往往比较复杂，施工也较困难。水电与火电相比，具有工程量大，工期长，投资大的特点。但是实际上，建设水电站是同时完成一次能源（水能）与二次能源（电力）的开发，故应将水电站的投资同建设火电站与相应的开发煤矿、修建铁路等投资、工期计算在内。这样，水电站投资大、工期长的结论便不存在了。

(10) 需要修建昂贵的输变电工程。水电站电能只能就地开发生产，不少地区的水能资源很丰富，但由于当地经济不发达，水电站生产的电能难于充分利用。大部分水电站至负荷中心或与电网连接点有相当远的距离，需要修建昂贵的输变电工程。

第四节 我国的水能资源及其开发利用

一、我国地形与河川径流概述

构成河川径流水能资源的基本条件是地形（水头落差）与河川径流（流量）。流量大，落差大，所包含的能量就大，即蕴藏的水能资源大。

1. 地形

我国地势的特征是西高东低，大致呈阶梯状分布。自西向东按高程明显分为 3 个阶梯。第 1 阶梯：青藏高原，海拔在 4000m 以上；第 2 阶梯：在大兴安岭、太行山脉、巫

山、武陵山及云贵高原东缘以西，海拔 1000~2000m；第 3 阶梯：在大兴安岭、太行山、巫山、武陵山及云贵高原东缘以东，海拔 1000m 以下。地势决定了我国的大部分河流都由西往东流，落差也较大。

2. 河川径流

我国河川径流主要集中在 7 大水系，分别是长江、黄河、淮河、海河、珠江、松花江和辽河。

(1) 长江。我国第一长河，发源于青藏高原的唐古拉山脉各拉丹冬峰西南侧。干流流经青海、西藏、四川、云南、重庆、湖北、湖南、江西、安徽、江苏、上海 11 个省（自治区、直辖市），于崇明岛注入东海，年径流量 9760 亿 m^3 ，流域面积为 180 万 km^2 。干流全长 6380km，长度仅次于非洲的尼罗河和南美洲的亚马孙河，是世界第三长河。长江干流自宜昌以上为上游，长 4500 多 km，落差大，峡谷深，蕴藏着丰富的水能资源。长江水系庞大，流域面积 1 万 km^2 以上的支流就有 49 条，其中雅砻江、岷江、嘉陵江、乌江、沅江、湘江、汉江和赣江等支流的流域面积超过 5 万 km^2 ，这些支流年径流量均超过 500 亿 m^3 。长江水系是我国水能资源最富有的河流。

(2) 黄河。我国第二长河，发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓，流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南及山东 9 省（自治区），于山东省垦利县注入渤海，年径流量 535 亿 m^3 ，流域总面积 79.5 万 km^2 （含内流区面积 4.2 万 km^2 ），干流全长 5464km，水面落差 4480m，沿途汇集了 76 条流域面积大于 0.1 万 km^2 的支流。其中，河口镇以上为黄河上游，干流长约 3472km，区间总落差 3464m，水能资源蕴藏量占全河的 61.6%。黄河以水少沙多而闻名于世。

(3) 珠江。由西江、北江、东江及珠江三角洲诸河等 4 个水系所组成，其中西江是珠江水系的干流，全长 2214km。流域面积为 45.4 万 km^2 ，我国境内面积 44.2 万 km^2 ，另有 1.2 万 km^2 在越南境内。珠江流域水系河流众多，流域面积在 1 万 km^2 以上的支流有 8 条。共有 8 个口门注入南海，年径流量 3360 亿 m^3 ，仅次于长江，位列全国第二。珠江还是我国各大河流中含沙量最小的河流。

(4) 淮河。发源于河南省桐柏山，流经河南、安徽、江苏 3 省，在三江营注入长江，年径流量 621 亿 m^3 ，流域面积为 27 万 km^2 。干流全长 1000km，总落差 200m，上中游支流众多。淮河流域地处我国东部，介于长江和黄河两流域之间。淮河流域以废黄河为界，分淮河及沂沭泗河两大水系，流域面积分别为 19 万 km^2 和 8 万 km^2 。自古以来，淮河就是我国南北方的一条自然分界线。

(5) 海河。干流全长 70 多 km。海河流域包括海河、滦河和徒骇马颊河 3 大水系、7 大河系、10 条骨干河流。其中，海河水系是主要水系，由北部的蓟运河、潮白河、北运河、永定河和南部的大清河、子牙河、漳卫河组成；滦河水系包括滦河及冀东沿海诸河；徒骇马颊河水系位于流域最南部，为单独入海的平原河道。海河流域多年平均入海年径流量为 209 亿 m^3 。

(6) 松花江。黑龙江的最大支流，有南北两源，南源为第二松花江，发源于长白山主峰白头山天池，在扶余县三岔河口与嫩江汇合；北源为嫩江，发源于大兴安岭山脉的伊勒呼里山南麓，在三岔河口与第二松花江汇合后称松花江，在同江市附近注入黑龙江，年径

流量 735 亿 m^3 。松花江自南源计, 全长 1897km; 自北源计, 全长 2308km。流域总面积 55.68 万 km^2 , 占东北 3 省总面积的 60%。松花江流域可开发的水能资源主要分布在第二松花江、牡丹江和嫩江。

(7) 辽河。发源于河北平泉县七老图山脉, 全长 1345km, 流经河北、内蒙古、吉林、辽宁 4 省(自治区), 沿途有多条支流汇入, 在辽宁盘山县注入辽东湾, 年径流量为 150 亿 m^3 , 流域面积 21.9 万 km^2 。辽河流域分为辽河水系和太子河水系。松花江、辽河均属松辽流域。松辽流域主要河流有松花江、辽河、黑龙江、乌苏里江、绥芬河、图们江、鸭绿江以及独流入海河流等。其中黑龙江、乌苏里江、绥芬河、图们江、鸭绿江为国际河流。松辽流域总面积 123.80 万 km^2 。

除了上述 7 大水系之外, 还有东南沿海诸河、西南国际诸河、雅鲁藏布江及西藏其他河流、北方内陆及新疆诸河, 也都蕴藏着丰富的水能资源。

二、我国水能资源的特点

(1) 蕴藏量极为丰富。我国幅员辽阔, 河流众多, 径流丰沛、落差巨大, 水能蕴藏量极为丰富。据 2005 年公布的水力资源普查统计资料, 我国大陆水能资源理论蕴藏量约为 6.94 亿 kW, 折合年发电量约为 6.08 万亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 居世界第一位。其中技术可开发的水电总装机容量为 5.42 亿 kW, 折合年发电量 2.47 万亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$; 经济可开发 4.02 亿 kW, 相应的年发电量 1.75 万亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 均名列世界首位。表 0-1 为世界上主要国家技术可开发和经济可开发的水能资源。

表 0-1 主要国家技术可开发和经济可开发的水能资源 单位: 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$

国 别	技术可开发	经济可开发	国 别	技术可开发	经济可开发
中国	24740	17534	委内瑞拉	2607	1035
巴西	13000	7635	瑞典	1300	900
俄罗斯	16700	6000	墨西哥	1600	800
加拿大	9810	5360	法国	720	715
刚果	7740	4192	意大利	690	540
印度	6600	4436	奥地利	7537	537
美国	5285	3760	西班牙	700	410
挪威	2000	1796	印度尼西亚	4016	400
哥伦比亚	2000	1400	瑞士	410	355
阿根廷	1720	1300	罗马尼亚	400	300
土耳其	2150	1230	德国	250	200
日本	1356	1143			

注 本表根据经济可开发水能资源由大到小排列。有些国家技术可开发水能资源与经济可开发水能资源差距很小, 如法国、意大利、瑞士和德国, 这是由于这些国家的开发条件好; 而有些国家技术可开发水能资源与经济可开发水能资源差距很大, 如奥地利和印度尼西亚两者相差 10 倍以上。表中中国数据不包括台湾地区。

(2) 地区和流域分布不均匀。由于受地形、地势与河川径流量的影响, 我国水能资源在地区和流域上分布极不均衡。总体趋势是, 华北、东北和华东少, 西南、中南和西北