

中等专业学校教材

水电站

(第二版)

成都水力发电学校 主编

前 言

本教材是根据水利电力部教育司《1983~1987年中等专业学校水利电力类专业教材编审出版规划》，并参照1982年11月颁发的《中专水利水电工程建筑专业教学计划》和《水电站教学大纲》的要求编写的。在编写时，以1980年3月出版的中专《水电站》教材为基础，同时考虑了近几年来的教学实践经验、有关学校和生产单位的建议及水电建设方面的最新科学技术成就，对原教材的编排顺序、章节内容和文字叙述都作了较大的变动，删减了次要的和陈旧的内容，并适当增加了一些新内容，计量单位也全部改用法定计量单位制。编写时力求做到：加强对基础理论的阐述；注意理论联系实际；适当反映国内外在水电建设方面的先进技术和经验；符合“少而精”的原则；注意开发学生智力和能力；适合中专学生水平和便于学生自学。

本书在有关章节中，按照分析问题的规律和实际工作中的设计步骤，编排了一些计算实例，使学生阅读后能加深对基础理论的理解，逐渐熟悉将来的生产工作，并培养其分析问题和解决问题的能力。此外，还选编了一些典型的工程图例，便于学生对课程内容的学习，并提高其识图和绘图能力。

为了适应不同地区学校对教材内容的选择，本书取材较为广泛，但以中型引水式和坝后式水电站及地面式厂房为重点。教师在使用本教材时，可结合地区特点和学生实际情况，对书中内容有所取舍。

本书的绪论及第一、二、三、四、十、十一、十二章由成都水力发电学校胡兰林同志执笔，第五、六章由黄河水利学校陆德民同志执笔，第七、八、九章由湖南省水利学校张叔峰同志执笔，全书由胡兰林同志主编，广西水电学校谷如森同志主审。在编审过程中，曾蒙黑龙江省水利工程专科学校、广西水电学校、黄河水利学校及一些生产单位给予很多帮助，有关同志提出了不少宝贵意见，特在此表示谢意。

编者水平有限，书中缺点错误在所难免，诚恳地希望广大师生和读者提出宝贵意见，以便今后进一步提高教材质量。

编 者

1986年5月

内 容 提 要

本书共十二章。第一章至第四章，主要介绍水能的开发方式、水能计算、动能经济分析和水电站主要参数选择的基本原理和方法；第五章主要介绍水轮机及其调速设备的构造、工作特性及型式选择；第六章至第十二章主要介绍水电站进水口、动力渠道、压力前池、压力钢管、调压室、高压水道、水电站厂房等水电站专用建筑物的布置型式、结构构造、水力计算和结构设计的基本原理和方法。在有关章节中，还附有计算例题和工程图例。

本书主要作为中等专业学校水利水电工程建筑专业《水电站》课程的教材，也可供从事水电站规划、设计、施工和管理工作的工程技术人员参考。

目 录

前言	
绪论	1
第一章 水能及其利用方式	5
第一节 水流的能量和功率	5
第二节 河流水能蕴蓄图的绘制和应用	6
第三节 水电站的生产过程和动能参数	7
第四节 水能的开发方式和水电站的基本类型	10
第二章 水能计算	19
第一节 水能计算的任务、目的和基本公式	19
第二节 水能计算所需要的基本资料	20
第三节 水能计算的方法	20
第四节 水电站的工作保证率	29
第五节 水电站的保证出力、保证电能和多年平均年发电量	30
第三章 电力系统中的水电站	39
第一节 电力系统和电力负荷图	39
第二节 电力系统和水电站的容量组成	44
第三节 水电站在电力系统负荷图中的工作位置	45
第四章 水电站的动能经济计算和主要参数的选择	50
第一节 水电站的动能经济计算	50
第二节 水电站装机容量的选择	61
第三节 水电站正常蓄水位的选择	76
第四节 水电站水库消落深度的选择	81
第五章 水轮机及其调速设备	85
第一节 水轮机的类型和构造	85
第二节 反击式水轮机的进水和出水设备	97
第三节 水轮机的工作原理	112
第四节 水轮机的汽蚀、吸出高度及安装高程	114
第五节 水轮机的特性	119
第六节 水轮机的选型	135
第七节 水轮机的调速设备	147
第六章 水电站的进水建筑物	160
第一节 水电站进水建筑物的功用和要求	160
第二节 水电站的有压进水口	160
第三节 水电站的无压进水口	169
第七章 动力渠道和压力前池	174

第一节 动力渠道的工程特点与水力特性	174
第二节 动力渠道的水力计算	175
第三节 压力前池	182
第八章 水电站的压力水管	188
第一节 压力水管的类型和布置方式	188
第二节 压力水管的水力计算与经济直径	191
第三节 压力钢管的构造及附件	193
第四节 露天式压力钢管的敷设方式与支承结构	200
第五节 露天式压力钢管的结构计算	203
第六节 钢管管概述	224
第九章 水电站的水锤和调节保证计算	228
第一节 水锤现象及其运动规律	228
第二节 水锤的基本方程式和边界条件	232
第三节 水锤计算的解析法	236
第四节 调节保证计算和减小水锤压强的措施	249
第十章 调压室与高压水道	256
第一节 调压室的功用、设置条件和对它的要求	256
第二节 调压室的布置方式和基本类型	260
第三节 调压室的水力计算	270
第四节 调压室结构设计概述	287
第五节 调压室下游的高压水道	289
第十一章 水电站厂房的布置设计	296
第一节 厂房的任务、组成及基本类型	296
第二节 厂区总体布置	310
第三节 立式机组地面厂房的设备布置	316
第四节 立式机组地面厂房尺寸的确定	356
第五节 卧式机组地面厂房的设备布置和尺寸拟定	364
第十二章 地面厂房结构设计	376
第一节 厂房结构设计的任务与要求	376
第二节 厂房的结构组成与构造特点	376
第三节 厂房的稳定和强度计算	379
第四节 厂房上部结构设计	384
第五节 发电机机墩和风罩的结构设计	397
第六节 蜗壳的结构设计	417
第七节 弯肘水管的结构设计	425
第八节 卧轴式机组地面厂房结构设计概述	430

绪 论

在河川水流中、潮汐和海浪里，都蕴藏着巨大的能量，通常称之为水能或水力资源。它是可供人类利用的一种廉价能源，也是一种宝贵的物质财富。河川水能是本课程研究的主要对象。据1974年世界动能会议提出的《能源调查》中统计，全世界可开发的水力资源按年发电量估算约为9.8万亿kW·h，按装机容量估算约为22.7亿kW，其中以亚洲为最丰富，非洲和拉丁美洲次之。天然的河川水能如不加以利用，就会白白消耗在克服水流摩擦、冲刷河床、搬运泥沙等方面，这是一种很大的损失。因此，如何以最有效和最经济合理的方式去开发利用水力资源，兴建各种水电站，将天然水能转变为机械能和电能，用来为发展工农业生产和改善人民的物质生活条件服务，既是人类征服自然和改造自然的一项伟大斗争，也是水电建设者的光荣任务。

（一）水能利用发展概况

人类在生产实践中，很早就知道利用水能了。2000多年前，埃及、印度和我国的劳动人民就发明了可代替人力作工的水车、水磨等简单水力机械。我国最早有关利用上述水力机械的文字记载出现在汉朝，距今已有1900多年。欧洲国家在6世纪左右才开始制造这些水力机械，到15、16世纪，由于手工业的发展，水力的利用日益普遍，并制造出浮动抽水站和水力织布机等水力机械。

在18世纪中末叶，欧洲许多国家先后进行了工业革命，利用水力原动机将水能转变为机械能并直接带动生产机械作工，在当时的工业生产中占有重要地位。但这种水力机械力量小，效率低，又无法将能量输送到较远的地方去，利用水力机械的工厂和作坊都必须靠近水源，因而限制了水力机械的发展。

现代水轮机是在水车和旧式水轮的基础上逐渐发展完善起来的，1751~1755年著名数学家欧拉首先创立了水轮机工作原理的科学理论；1827年法国的富尔涅龙造出了第一台效率较高的金属水轮机；1849年美国的法朗西斯制成了混流式水轮机；1880年培尔顿发明了冲击式（水斗式）水轮机；1918年卡普兰在捷克制造出转桨式水轮机；1957年德里亚齐创造了斜流式水轮机；与水轮机发展的同时，在19世纪中末叶，先后发明了发电机和高压输电技术；从而为水电站的建设奠定了基础。世界上第一座水力发电站于1878年在德国建成，此后，水力发电事业得到了迅速的发展，在全世界电力工业中，水力发电占的地位越来越重要，廉价的水电对当时社会生产力的发展起了巨大的促进作用。

进入20世纪后，水电建设事业的发展速度更快。特别是近30年来，由于电力需要量的迅速增长，各国在解决电力能源问题时，一般多优先考虑建设水电站，这是因为它比火电站和核电站具有下列许多优点：水电站利用的是可以再生不竭的天然水能，不需要消耗昂贵的燃料；厂用电少，设备简单，管理人员少，发电成本低；运用灵活，启动快，能适应负荷的迅速变化，因而适宜在电力系统中担任峰荷；对环境不污染；大多数水电站还具有

综合利用的效益。当然,修建水电站也往往会遇到一些不利因素,如水资源有限;水能资源在时间上和地区上分布不均匀;可能造成较大的淹没损失;工程量大、施工复杂和工期较长;需要较大的基本建设投资等。但在大多数情况下,修建水电站往往是极其有利的,因而发展速度也是很快的。目前,一些工业发达国家的水能资源利用程度按年电量计多数已达40%以上,有些国家达到80~90%。亚、非、拉发展中国家的水能资源约占全世界的95%,过去开发利用较少,但近30年来发展也很快。

随着水电勘测、设计、施工和科研技术水平的提高,现代化施工机械的采用,大型水轮发电机组和超高压远距离输电技术的发展,近年来国外修建的大型水电站愈来愈多,施工速度也愈来愈快。据统计,1950年时装机100万kW以上的大型水电站只有2座,至1985年已建和正在施工的就达120余座(不包括抽水蓄能电站),其中1000万kW以上的有2座。在修建大型水电站的同时,许多国家对兴建中小型水电站也很重视。

国外加快水电建设的措施和经验,主要有以下几点:

(1) 做好河流规划,摸清水力资源及其开发条件,运用“系统工程”理论和电子计算技术尽快选定开发方案和近期开发对象,并对拟建工程在设计和施工中可能遇到的一些重大问题事先进行研究,拟定解决方案。

(2) 加强科学研究,采用最新勘测手段和计算技术,以加快水电站的勘测设计工作。

(3) 对水能资源较丰富的河段或地区进行集中开发,建立施工基地,组织专业化施工队伍,采用现代化施工机械,合理安排施工顺序,进行流水作业,集中力量连续兴建几座水电站。并加速装机,力争在施工期提前发电。

(4) 充分利用水力资源,因地制宜地兴建多种类型的水电站。例如:除首先在河流中、上游兴建有调节水库的水电站外,还在中、下游修建低水头径流式水电站;在兴建大型水电站的同时,也注意发展中小型水电站,有些国家还对原有一些中小型水电站进行改建和增加装机容量,以提高水量利用率;此外,还在原有水利工程上装机发电,进行综合利用;为了充分发挥水电站在电力系统中适宜调峰的特性,近年来兴建的抽水蓄能电站日益增多;利用潮汐水能兴建潮汐电站,在许多国家已取得显著成效;利用海洋中的波浪能进行发电,也正在加紧试验研究中。

(5) 采用大机组,提高水电站自动化运行程度,建设包括各种电站在内的综合电力系统,以提高水电站的经济效益。

(二) 我国的水能资源和水电事业发展概况

我国幅员辽阔,河川纵横,湖泊棋布,海岸线长达11000余km,是世界上水力资源最丰富的国家,有发展水电事业的优越自然条件。根据水电部水力发电建设总局1981年汇编的“全国水资源普查成果”(未统计台湾省),全国水能资源的理论蕴藏量(按多年平均流量计算)按装机容量计为6.76亿kW,按年发电量计为5.9万亿kW·h,其中技术上可开发的分别为3.8亿kW和1.9万亿kW·h/年,分别占全世界水能资源的 $\frac{1}{6}$ 和 $\frac{1}{5}$,均居世界首位。我国各水系水能资源蕴藏量如绪表-1。

绪表-1

全国分水系水能资源统计表

水 系	理 论 水 能 蕴 藏 量			可 开 发 的 水 能 蕴 藏 量		
	装机容量 (万kW)	年发电量 (亿kW·h)	年发电量 占全国百分比 (%)	装机容量 (万kW)	年发电量 (亿kW·h)	年发电量 占全国百分比 (%)
全 国	67604.71	59221.8	100	37853.24	19233.04	100
长 江	26801.77	23478.4	39.6	19724.33	10274.98	53.4
黄 河	4054.80	3552.0	6.0	2800.39	1169.91	6.1
珠 江	3348.37	2933.2	5.0	2485.02	1124.78	5.8
海 滦 河	294.40	257.9	0.4	213.48	51.68	0.3
淮 河	144.96	127.0	0.2	66.01	18.94	0.1
东北诸河	1530.60	1340.8	2.3	1370.75	439.42	2.3
东南沿海诸河	2066.78	1810.5	3.1	1389.68	547.41	2.9
西南国际诸河	9690.15	8488.6	14.3	3768.41	2098.68	10.9
雅鲁藏布江及西藏其他河流	15974.33	13993.5	23.6	5038.23	2968.58	15.4
北方内陆及新疆诸河	3698.55	3239.9	5.5	996.94	538.66	2.8

我国虽有丰富的水力资源，但在解放前很少得到开发利用。我国最早的一座水电站—石笼坝水电站，是1912年在云南省修建的，装机容量为1440kW。至1949年底，全国水电装机容量（包括日伪时期修建的丰满和水丰水电站在内，但不包括台湾）只有36万kW，年发电量只有12亿kW·h，内地最大的一座水电站，装机容量只有3000kW。

新中国的建立，为水电事业的发展开辟了广阔的前途，在蓬勃发展的社会主义建设事业中，电力工业处于“先行官”的地位，而加快水电建设则是解决电力供应问题的重要途径。经过36年来的努力，我国已在水电建设方面取得了许多重大成就。例如：曾先后三次对全国5800多条大小河流的水能资源进行了普查；制定了黄河、红水河及其他许多中小河流的综合利用规划，为加快水电建设提供了宝贵的技术资料；还先后建成了新安江、丹江口、刘家峡、龚嘴、乌江渡、大化、白山、葛洲坝等25万kW以上的大型水电站21座，中型水电站130余座；目前，还有一批大中型水电站如龙羊峡、天生桥、岩滩、东江、万安、鲁布革、安康、铜街子等正在加紧施工。这些水电站一般都具有综合利用的效益，并且都是靠我国自己设计、施工和提供设备的。这标志着我国在水电站的勘测、设计和施工技术上有较高的水平，在水电科学研究和机电设备的制造与安装能力上，也都有了很大提高。

在建设大、中型骨干水电站的同时，农村小型水电站也有了很大的发展。据初步统计，到1985年底，全国已建成农村水电站约7万余座，总装机容量达952万kW，年发电量约226亿kW·h；在沿海地区还建成了数座小型潮汐电站，为利用潮汐水能提供了经验。

据1985年底统计，全国大、中、小型水电站总装机容量已达2600多万kW，年发电量910亿kW·h，分别比1949年增长72倍和76倍；我国水电装机容量已由1949年占世界第25位上升到第5位。这一成就，对于促进工农业生产，改善人民的物质生活条件，巩固社会主义经济基础，都发挥了巨大的作用。我国水电建设虽已取得了很大成就，但与丰富的水力资源相比，目前开发利用程度仍然很低，按装机容量和年发电量计仅分别为6.8%和4.8%，而水电又具有许多突出的优点，因此，加快水电建设，使水力资源早日得到利用，

这对于加快四个现代化的步伐，实现在本世纪末工农业年产值翻两番的宏伟目标，都有着十分重要的意义。但在进行水电建设时，必须注意我国水力资源的以下特点：

(1) 水力资源在地区的分布上很不均衡，如绪表-1。85%以上的水力资源集中在京广线以西，不少电站位于边远山区，施工条件困难，输电距离较远。而京广线以东工农业发达地区的水力资源则相对较少。因此，在开发能源的布局上必须统筹兼顾。

(2) 我国河流主要靠降雨补给，洪枯流量变化较大，故在进行水能开发时，必须注意水量调节和综合利用，但修库筑坝，又易造成淹没损失，必须妥善处理这方面的矛盾。

(3) 我国水力资源相对集中在一些大河上游的高山峡谷地区，如要加以利用，就需要修建许多水头高、流量大、单机容量大的电站，高坝、长隧洞等建筑物较多，给勘测、设计和施工带来许多技术难题，必须加强这方面的水电科研工作。

根据以上特点，我国当前的电力建设方针是：“要因地制宜地发展火电和水电，逐步把重点放在水电上”。只要我们认真贯彻这一方针，充分发挥广大群众的智慧和科学技术的巨大力量，可以预料，今后的水电建设必将以更快的速度、更大的规模和更高的要求向前发展。

(三) 本课程的任务

《水电站》是一门研究如何最有效地利用水力资源和最经济合理地建设水电站的专业课，它与生产实践的关系十分密切。本教材内容共分三大部分：第一部分主要介绍水能的开发方式，水电站的水头、流量、出力和发电量的计算方法，电力系统的概念和水电站的经济运行方式，水电站动能经济计算和主参数选择的基本原理与方法；第二部分主要介绍水轮机及其调速设备的类型、构造、工作原理、工作特性和机型选择；第三部分主要介绍水电站专用建筑物的构造型式、布置方式、尺寸拟定及水力计算和结构计算方法。通过本课程的教学和对本教材的学习，应使学生获得从事水电站的规划、设计、施工和运行管理工作的基本知识和技能。

第一章 水能及其利用方式

第一节 水流的能量和功率

在天然河道的急流险滩地段，往往水声雷鸣，浪花翻滚，河床被刷深，沙石被冲走。这种现象，说明水流由高处向低处流动时具有很大的能量，称为水能。某一河段蕴藏有多少水能，可用水力学中的能量公式进行计算。

如图1-1，设在天然河段AB两端取断面1-1和2-2。两断面相对于某一基准面的水面高程分别为 Z_1 和 Z_2 (m)；水面大气压强分别为 p_1 和 p_2 (Pa)；断面平均流速分别为 v_1 和 v_2 (m/s)；假定在时段 T 秒内，流经断面1-1的平均流量为 Q (m^3/s)，且两断面处的流量不变，则流过的水量为 $W=QT$ (m^3)；再以 γ 表示水的单位重（对于洁净的淡水河流，通常取 $\gamma=1000 \times 9.81=9810 \text{ N/m}^3$ ）；则水流通过断面1-1和2-2时所具有的总能量应分别为

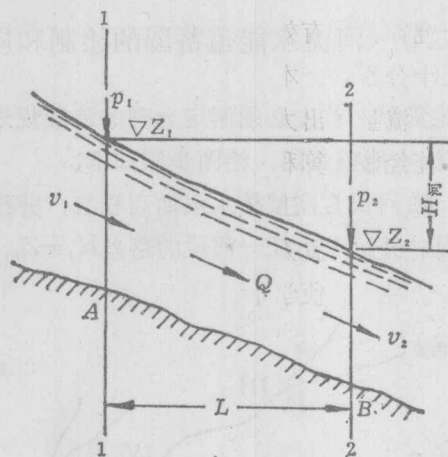


图 1-1 天然河流的水能

$$E_1 = \left(Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right) \gamma W \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

$$E_2 = \left(Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right) \gamma W \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

两断面水流能量之差 E_{1-2} ，即为AB河段的水能蕴藏量，也即在时段 T 内水量 W 由断面1-1流到断面2-2时所消耗的能量。 E_{1-2} 由下式确定

$$E_{1-2} = E_1 - E_2 = \left(Z_1 - Z_2 + \frac{p_1 - p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2 - \alpha_2 v_2^2}{2g} \right) \gamma W \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

上式中括号内的数值为上、下两断面的总水头差。在天然条件下，大气压强差 $p_1 - p_2$ 和动能差 $\frac{\alpha_1 v_1^2 - \alpha_2 v_2^2}{2g}$ 很小，可忽略不计，故通常以两断面的水位差 $Z_1 - Z_2 = H_{\text{河}}$ 代替总

水头差, 工程上常把“ $H_{\text{河}}$ ”称为“落差”。于是上式可写成

$$E_{1-2} = E_1 - E_2 = \gamma W H_{\text{河}} \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (1-1)$$

式(1-1)表明, 水量 W 和落差 $H_{\text{河}}$ 是构成河流水能的两个基本要素, 河中通过的水量愈大, 河段的坡降愈陡, 则蕴藏的水能愈大, 并且二者缺一不可。将式(1-1)两边除以时间 T 秒, 即得所研究河段的水流在时段 T 内的平均功率(或平均出力) N_{1-2} 。即

$$N_{1-2} = \frac{E_{1-2}}{T} = \gamma Q H_{\text{河}} \quad (\text{N} \cdot \text{m/s}) \quad (1-2)$$

电力工业上习惯于用“千瓦”作为功率单位, 用“千瓦·时”或“度”作为能量单位, 而 $1\text{kW} = 102 \times 9.81 \quad (\text{N} \cdot \text{m/s})$, 又令 $t = \frac{T}{3600} \quad (\text{h})$, 则公式(1-2)和(1-1)可分别写成

$$N_{1-2} = \gamma Q H_{\text{河}} / 102 \times 9.81 = 9.81 Q H_{\text{河}} \quad (\text{kW}) \quad (1-3)$$

$$E_{1-2} = \gamma Q H_{\text{河}} T / 102 \times 9.81 \times 3600 = 9.81 Q H_{\text{河}} t \quad (\text{kW} \cdot \text{h}) \quad (1-4)$$

上式中的 N_{1-2} 和 E_{1-2} , 分别表示 AB 河段中的水流在不考虑损失时所具有的全部功率和能量, 通常称为“理论功率”(或理论出力)和“理论水能蕴藏量”。

第二节 河流水能蕴蓄图的绘制和应用

要开发一条河流的水能资源, 首先必须制定合理的流域规划和水能开发方案。为此, 常需绘制如图1-2所示的河流水能蕴蓄图, 绘图步骤如下:

(1) 从河源到河口, 沿河长 L 测量枯水水面高程 Z , 并绘制 $Z-L$ 线。由此线可看出沿河水面落差的变化情况, 并可求出任一河段的落差 $H_i = Z_{i1} - Z_{i2}$ 。

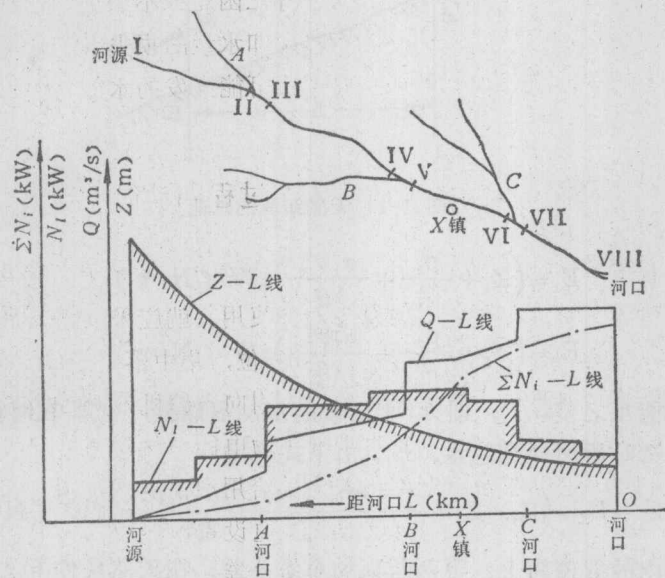


图 1-2 河流水能蕴蓄图

(2) 根据沿河水文测站的流量资料(当缺乏资料或资料不足时,可利用水文学中的方法计算之),计算河流各断面的多年平均或保证率为95%的流量值 Q ,绘制 $Q-L$ 线。由此线可查出任一河段上、下断面的流量 Q_{i1} 和 Q_{i2} 。

(3) 沿河分段计算各河段的水流理论功率 N_i 。应注意在流量有较大变化处(例如支流的汇入处)、河流纵比降有较大变化处(特别是有局部急滩或瀑布处)、优良坝址或有急需开发任务处、有重要城镇或农田不准淹没处划分计算河段。计算河段水流的理论功率 N_i 为

$$N_i = 9.81 \left(\frac{Q_{i1} + Q_{i2}}{2} \right) H_i \quad (\text{kW}) \quad (1-5)$$

(4) 用下式计算各河段单位河长所蕴藏的理论功率即水能密度 N_l ,并绘出 N_l-L 线。

$$N_l = N_i / l_i \quad (\text{kW/km}) \quad (1-6)$$

(5) 将各河段理论功率 N_i 沿河流方向自上而下依次累加,并据以绘出河流水能蕴藏量(以千瓦计)累积曲线 ΣN_i-L 线。该曲线上某处的纵座标表示自上游起算点(图中为河源)至该断面处河流水能的总蕴藏量。绪表-1中所列各河流所蕴藏的理论功率就是这样计算得来的。

从水能蕴蓄图中,可清楚地看出河流的总水能蕴藏量、任一河段的水能蕴藏量和水能密度沿河的变化等特性。水能密度大的河段,表明该处水能集中,通常适于优先开发。利用水能蕴蓄图,再结合当地地形、地质、施工、输电距离、水库淹没、交通运输以及社会经济等条件,就可对河流进行综合利用规划,初步拟定河流的梯级布置方案,选择近期工程和开发顺序。

上述水能蕴蓄图,只表明河流天然水能的蕴藏状况,实际上这些水能并不能全部被利用,有一部分将被丢弃,其主要原因是:由于施工困难或不经济等原因,某些河段上的水能不宜开发利用;在利用水能时总不免要有水头和水量的损失等。从理论水能蕴藏量中扣除这些可能丢弃的部分,就得出绪表-1中各河流可能开发的水能资源。

第三节 水电站的生产过程和动能参数

一、水电站的生产过程

为了将天然河流中的水能转变成电能供用户使用,就应采取人工措施。如图1-3所示,在AB河段末端修建水电站,用坝或闸抬高上游水位,集中落差形成水头 H ,并在上游形成水库,水能即蕴蓄其中。再用压力水管将水流引向水轮机使机组旋转(参看图1-5),先将水能转变为旋转的机械能,再由发电机转变为电能,然后通过母线将电能送至变压器升高电压后,再用高压输电线送入电网或直接送给用户使用,这就是利用水力发电的简单原理和生产过程。水轮机、发电机和其他附属机电设备,一般都布置在一个房间里,这就是水电站厂房,连同变电站以及挡水、取水和输水等建筑物,总称为水电站。水电站是一个生产电能的工厂,“水能”是它的原料,水轮发电机组是它的主要生产设备,而“电能”则是它的产品。在正常情况下,供给的水能越多,水电站的发电能力也就越大。

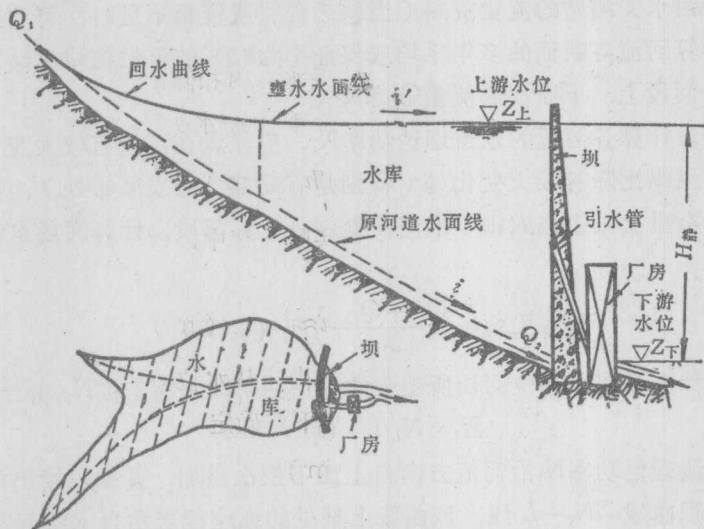


图 1-3 筑坝利用水能示意图

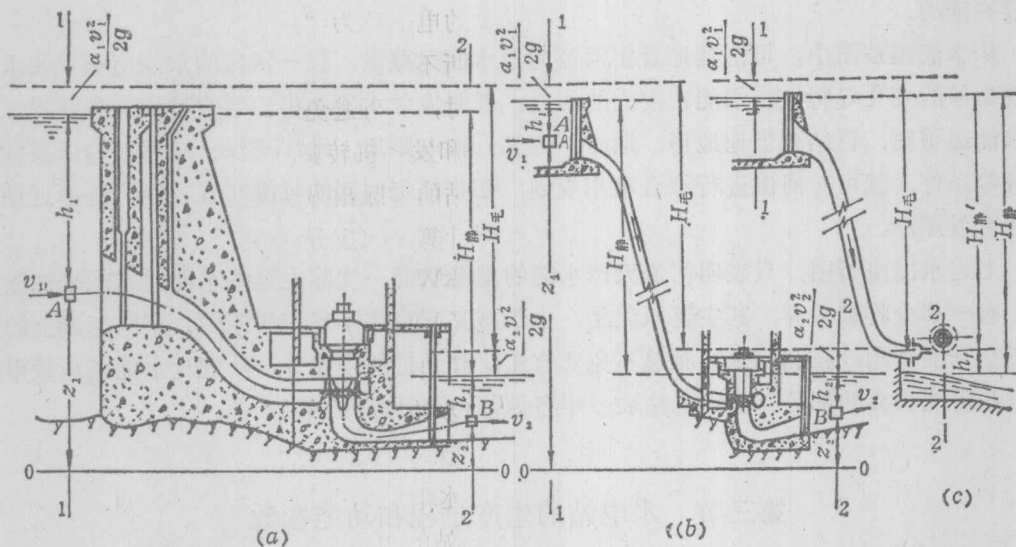


图 1-4 水电站水头的计算

(a)坝式水电站；(b)引水式水电站；(c)装有冲击式水轮机的水电站

二、水电站的动能参数

1. 水电站的水头

天然河流的落差通常是很分散的，如果采取工程措施将天然落差集中起来用于发电，就成为水电站的水头。水电站上游与下游水位的高程差（图1-4），称为水电站的静水头 $H_{静}$ (m)，即

$$H_{静} = Z_{上} - Z_{下} \text{ (m)} \quad (1-7)$$

引水管进口前断面1-1与水轮机尾水管出口断面2-2之间水流的单位能量差，称为水电站的总水头或毛水头 $H_{毛}$ (m)，即

$$H_{\text{毛}} = H_{\text{静}} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \quad (\text{m}) \quad (1-8)$$

水流经过引水系统时，必然要有水头损失，从毛水头内扣除由进口至蜗壳前的沿程和局部水头损失 Δh 后，才是作用于水轮机的有效水头，称为净水头 $H_{\text{净}}$ (m)，即

$$H_{\text{净}} = H_{\text{静}} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} - \Delta h \quad (\text{m}) \quad (1-9)$$

鉴于单位动能差通常不大，可略去不计，故在实际计算中，水电站水轮机的水头 H 可表示为

$$H = H_{\text{静}} - \Delta h = Z_{\text{上}} - Z_{\text{下}} - \Delta h \approx H_{\text{净}} \quad (\text{m}) \quad (1-10)$$

如水电站用的是冲击式水轮机 (图1-4, c)，则尚应从水位差 $H_{\text{静}}$ 中减去射流中心位置高出下游水位的高度 h_f ，在此情况下，水头 H 应按下式确定

$$H = H_{\text{静}} - h_f - \Delta h \quad (\text{m}) \quad (1-11)$$

2. 水电站的出力和发电量

在图1-3中，如果AB河段所蕴藏的水能全部用来对水轮机做功而没有任何损耗，则机组发出的功率称为“理论出力”，在 T 时段内生产的电能称为“理论发电量”，其数值仍可分别用公式 (1-3) 和 (1-4) 计算，但含义则有所不同。

实际上，水流由进水口经引水系统至水轮机前时，不可避免地要有能量损失，其单位能量损失即表现为水头损失 Δh ；水能再经过水轮机和发电机转变为电能时，还将损失一部分能量，通常用机组效率 η 来说明。因此，水电站的实际出力 N 和发电量 E ，总是小于用公式 (1-3) 和 (1-4) 求得的理论值。此时，其计算公式应分别为

$$N = 9.81QH\eta = AQH \quad (\text{kW}) \quad (1-12)$$

$$E = 9.81QHt\eta = AQHt \quad (\text{kW}\cdot\text{h}) \quad (1-13)$$

水电站的出力和发电量一般都是在水轮发电机的出线端上量测的，因此，上式中的 η 应为水轮机和发电机的总效率，即 $\eta = \eta_{\text{机}} \cdot \eta_{\text{电}}$ 。在初步计算时，可取水轮机效率 $\eta_{\text{机}} = 0.8 \sim 0.95$ ，发电机效率 $\eta_{\text{电}} = 0.90 \sim 0.98$ ， η 不仅和机组型式有关，还随水头和流量的变化而变化；式中 $A = 9.81\eta$ ，称为出力系数，对于大中型水电站，可取 $A = 7.5 \sim 8.5$ ，对于直接传动的中小型水电站，可取 $A = 7 \sim 7.5$ ； Q 为水电站的引用流量， H 为水轮机的净水头，它们都随时间而变化。因此，水电站在某时刻的实际出力，应根据该时刻水轮机的引用流量、净水头和机组效率由公式 (1-12) 确定。

在某一河段上规划水电站时，计划引用的最大流量称为设计流量。如果确定了设计流量，估算出相应的净水头，选定了出力系数，就可用公式 (1-12) 初步计算出水电站的可能最大出力。

3. 水电站的装机容量和多年平均年发电量

当水电站的机组选定后，机组的最大出力将受到发电机容量的限制。制造厂家规定的发电机最大允许出力称为额定出力或额定容量，即铭牌出力。一个水电站往往不只安装一台机组，所有水轮发电机组额定出力的总和，称为水电站的装机容量，以 $N_{\text{水装}}$ 表示之，它是水电站全部机组满载运行时所能发出的最大出力值，是一个表示水电站规模和生产能力的

的重要指标。已建成的水电站在实际运行过程中，并不是经常以全部装机容量工作，其出力通常小于装机容量值。

水电站在时段 t 小时内生产的电能数量，称为该时段的发电量，以千瓦·小时或度计。可能发出的最大发电量 E_{max} 可按下式计算

$$E_{max} = N_{\text{水装}} t \quad (\text{kW} \cdot \text{h}) \quad (1-14)$$

在一个相当长的时段 t 内，由于天然流量的变化和用电的不均衡，水电站的出力 N 将随时间而变化，且常小于 $N_{\text{水装}}$ ，故实际发电量 E 将小于 E_{max} ，而应按下式计算

$$E = \int_0^t N dt \quad \text{或} \quad E = \sum_0^t \bar{N} \Delta t \quad (1-15)$$

式中 Δt 为将时段 t 划分成的微小时段； $\bar{N}$ 为 Δt 时段内的平均出力，可用公式(1-12)计算，但其中的 Q 和 H 应采用时段 Δt 内的平均值。

如在公式(1-15)中，分别令 t 代表一日、一月或一年的小时数，则求出的 E 将分别代表水电站的日发电量、月发电量和年发电量。显然，水电站各日、各月和各年的发电量是不相同的。通常采用多年期间水电站年发电量的平均值作为衡量其生产能力和工程效益的一个重要指标，称为多年平均年发电量，以 $\bar{E}_{\text{年}}$ 表示之。一个已建成的水电站，一年内究竟能生产多少电能，只有到年终才能准确地统计出来，在年初只能用公式(1-15)加以估算。一个计划修建的水电站，其将来的年发电量，则只能利用过去的水文资料进行估算，其具体计算方法，将在下一章介绍。

第四节 水能的开发方式和水电站的基本类型

如前所述，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，除了在有瀑布或急滩的河段比较集中外，一般都分散在很长的河段上，不便于利用；天然河道的流量是经常变化的，洪水期很大，可能用之有余，枯水期很小，可能不足所需。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。所谓水能的开发方式，通常主要是指集中落差和获得水头的方式而言。由于天然水能存在的状况不同，开发利用的方式也各异，因此，水电站的型式也是多种多样的。

一、水电站按集中落差的方式分类

(一) 坝式开发和坝式水电站

在拟开发河段的适宜地址，拦河建筑较高的坝或闸，迫使水位壅高并形成水库，将分散的落差集中于坝址处，形成水头 H （如图1-3），再用压力水管将库水引入厂房，通过水轮发电机组发电后，将尾水排回原河道。这种水能开发方式称为坝式开发，用坝集中落差形成水头的水电站称为坝式水电站。

坝式开发的显著优点是：可利用形成的水库进行水量调节和综合利用；引水道很短；水头损失很小；工程比较集中。缺点是：会造成淹没损失，增大投资。因此，在确定坝高和选择坝址时，必须全面考虑。坝式开发一般适用于河道坡降较缓、流量较大、有筑坝建

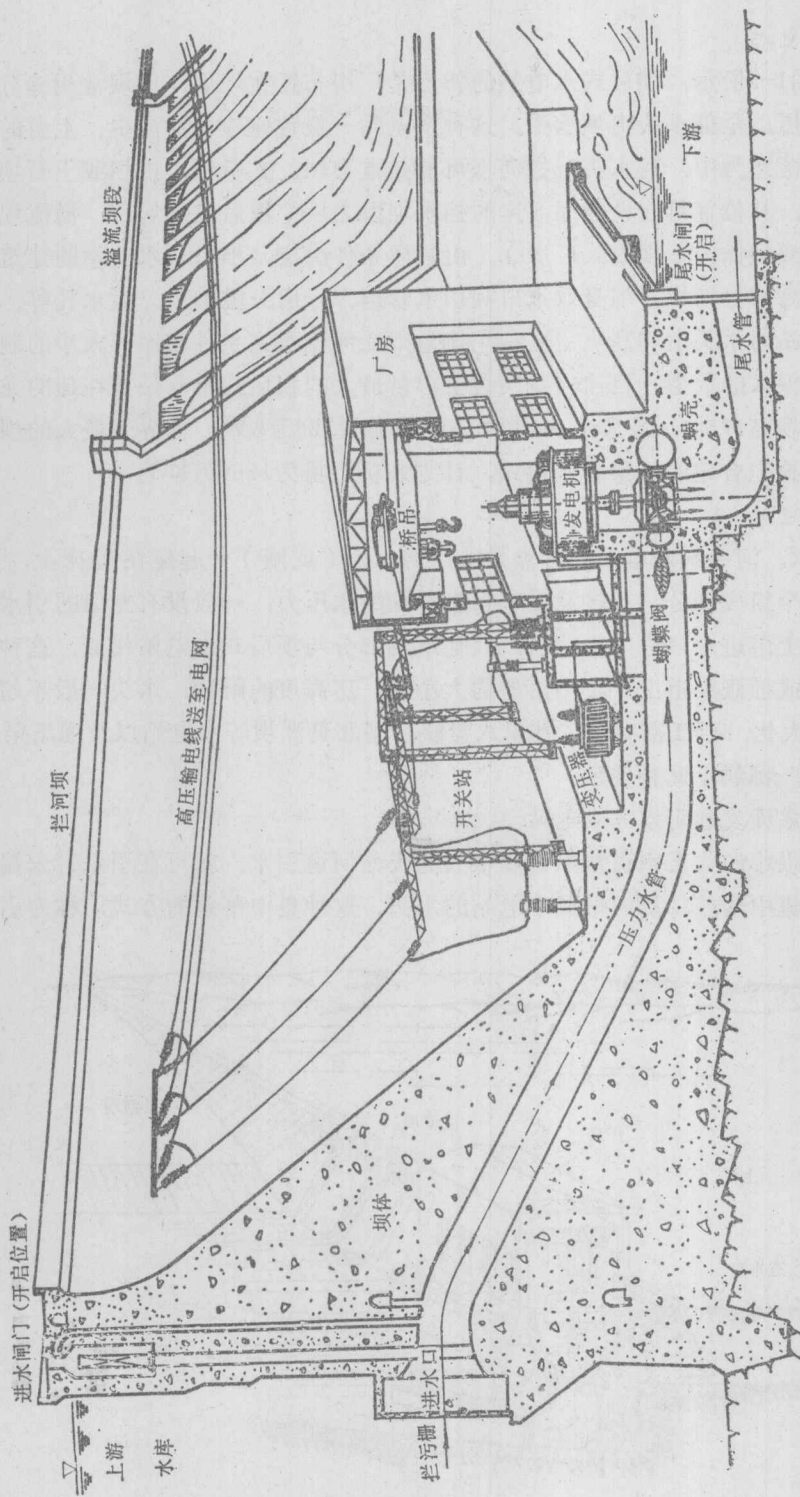


图 1-5 坝后式水电站示意图

库条件的河段。坝式水电站按其厂房在枢纽中的位置不同，又可分为坝后式和河床式两种基本类型。

1. 坝后式水电站

如图1-3和图1-5所示，坝后式水电站的特点是厂房布置在坝后，厂坝常用缝分开，厂房不承受上游水压，全部水头由坝承受。这种水电站一般宜修建在河流中、上游的山区峡谷地段，集中的落差为中、高水头。拦河坝可能是重力坝、支墩坝、拱坝或土石坝；厂房的布置型式很多，其位置可能设在靠河岸的挡水坝段之后（坝后式厂房）、溢流坝段之后（溢流式厂房）或坝体内（坝内式厂房），由具体条件决定。坝后式水电站的建筑物组成一般包括有：较高的拦河坝、坝身取水口和引水管道、厂房、溢洪道、泄水孔等。

坝后式水电站的水头由坝高决定，引用流量则受河流水文条件和库容大小的制约，装机容量可以达到很大的数值。目前，我国装机容量最大的坝后式水电站是在建的龙羊峡水电站，重力拱坝坝高175m，最大水头142m，装机容量128万kW；世界上最大的坝后式水电站是巴西和巴拉圭合建的伊泰普水电站，计划装机容量为1260万kW。

2. 河床式水电站

如图1-6所示，河床式水电站的特点是：厂房与坝（或闸）一起建在河床上，并成为挡水建筑物的一个组成部分，直接承受来自上游侧的水压力；一般没有专门的引水管道，库水直接由厂房上游进水口进入水轮机；其他组成部分与坝后式水电站相似。这种水电站多建在平原河段或灌溉渠道上，集中落差的大小受厂房高度的限制，水头一般不超过30~40m。我国广西大化、浙江富春江、甘肃八盘峡、湖北葛洲坝等水电站以及灌溉渠道上的许多小型水电站，都属于此种类型。

（二）引水式开发和引水式水电站

利用纵比降很小的人工水道从纵比降很大的天然河道引水，就可在引水道末端与下游河水位之间获得集中落差，从而形成水电站的水头。这种集中落差的方式，称为引水式开

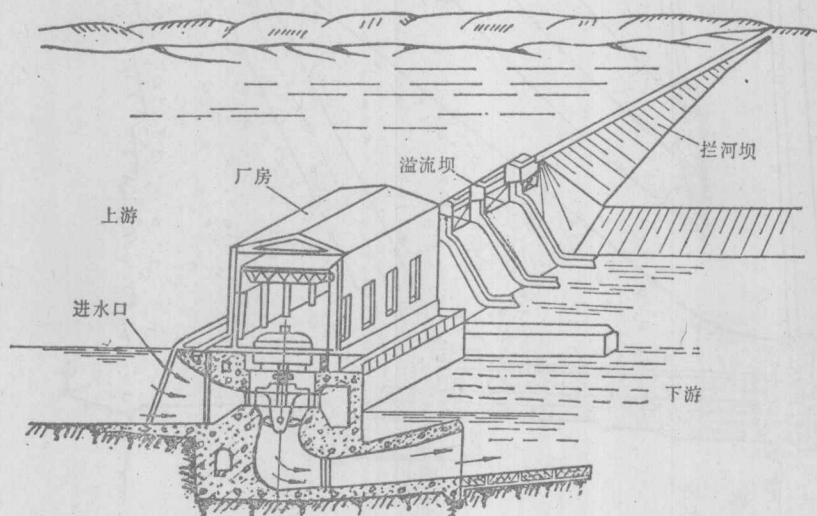


图 1-6 河床式水电站示意图