

清华大学水利工程系列教材

Hydropower Structures

水力发电建筑物

李仲奎 马吉明 张 明 编

Li Zhongkui Ma Jiming Zhang Ming



清华大学出版社
北 京

前 言

本教科书系根据清华大学“985”精品课程建设和 2003 年后新修订的教学计划的要求编写的。编者在《水电站建筑物》(第 2 版)(王树人、董毓新主编,清华大学出版社,1992 年)的基础上,结合十几年教学实践,进一步贯彻了少而精的原则,以适应专业课学时减少的情况。但是仍照顾到水力发电站从布置到水力和结构设计,从建筑物到机电设备的系统性,保证了学科体系的完整。编写过程中广泛参考了国内外十几种水电站教材和专业书籍的相关内容,以及有关国家标准或行业规范。

本书主要包括:中国的水能资源及水能规划简介,水电站进口建筑物,输水及尾水建筑物,平水建筑物,钢管设计,引水发电系统中的不稳定流问题,水电站厂区及厂房布置设计,水电站中主要机电设备,以及关于抽水蓄能电站和地下厂房的基本内容。

本书深入浅出、图文并茂,给出了需重点关注的内容,每章后面附有适量的习题及思考题,同时给出了与本课程密切相关的专业英语词汇,适合高等院校水利水电工程专业学生使用。

清华大学刘天雄教授审阅了此书,提出了不少有益的修改建议,特表示衷心感谢。

本书既有要求学生必须掌握的最基本的知识,也有部分反映学科发展前沿的内容,教师可以在教学中适当掌握,有所侧重。书中所附各种资料,因时间所限,会有部分需要更新,仅供参考。由于水平及时间所限,编写中必有错误和不当之处,敬请读者不吝指教。

目 录

第 1 章 水力发电概述	1
1.1 中国的水能资源及其利用	1
1.2 水电站出力和发电量计算	3
1.3 水电站的开发方式、布置及组成	8
1.4 水电站开发中的环境保护与可持续发展	14
小结	16
习题及思考题	16
参考文献	16
第 2 章 水电站进口建筑物	17
2.1 无压进口建筑物	17
2.2 有压进口建筑物	20
2.3 进水口的主要设备	24
习题及思考题	27
参考文献	27
第 3 章 水电站引水道及尾水道	28
3.1 渠道及明流隧洞	28
3.2 压力引水隧洞	34
小结	37
习题及思考题	37
参考文献	37
第 4 章 水电站平水建筑物	38
4.1 前池	38
4.2 调节池	42
4.3 调压室	43
习题及思考题	44
参考文献	45
第 5 章 水电站高压钢管	46
5.1 地面压力管道	46

IV 水力发电建筑物

5.2 地下压力管道	58
5.3 岔管	64
小结	69
习题及思考题	69
参考文献	70
第6章 坝内埋管及坝后背管	71
6.1 坝内埋管	71
6.2 坝后背管	75
小结	78
习题及思考题	78
第7章 水电站水力系统中的非稳定流问题	79
7.1 电力系统及引水系统中的瞬变现象	79
7.2 水击基本方程组及波的传播速度	83
7.3 简单管中最大正、负水击压力的计算	86
7.4 复杂管道水击的简化计算	94
7.5 水击计算的特征线法	96
7.6 调节保证计算	101
习题及思考题	105
参考文献	105
第8章 调压室	107
8.1 调压室的设置条件、类型及布置方式	107
8.2 调压室的涌浪计算及压力叠加	112
8.3 调压室的波动稳定问题	116
8.4 调压室构造与结构设计	120
习题及思考题	122
参考文献	123
第9章 水电站主要机电设备	124
9.1 水轮机	124
9.2 发电机	134
9.3 主变压器	136
9.4 起重设备	137
9.5 油、气、水系统	139
9.6 二次电气设备	141
小结	141

习题及思考题	142
参考文献	142
第 10 章 厂区枢纽及厂房的布置设计	143
10.1 水电站厂房的功用和组成	143
10.2 水电站厂房的类型	147
10.3 厂区枢纽布置	159
10.4 厂房的下部结构及平面尺寸的确定	164
10.5 机组安装高程及厂房立面高程的确定	169
10.6 厂房辅助设备及电气设备的布置	174
10.7 副厂房各种房间的设计要求	179
10.8 厂房受力、传力、分期和分缝	186
10.9 厂房的整体稳定分析	190
10.10 厂房各主要结构物的设计计算	195
小结	207
习题及思考题	207
参考文献	207
第 11 章 抽水蓄能电站及地下厂房	208
11.1 抽水蓄能电站	208
11.2 地下水电站	215
小结	234
习题及思考题	234
参考文献	234

第 1 章

水力发电概述

1.1 中国的水能资源及其利用

1.1.1 人类对水能资源的利用

人类利用水能已经有了悠久的历史。早在 2000 多年前,在埃及、中国、印度和希腊就已出现水轮、水车、水磨和水碓等,利用水能于农业生产。据文字记载,公元前 2 世纪希腊就出现了水磨,我国在东汉时期就有水碓、水排、水磨的记载,利用水激木轮进行磨面、舂米、提水灌溉、加工农产品和鼓风铸铁。欧洲大约在公元四五世纪开始制造这种水力机械。16 世纪,英国制造了铁质水轮桨叶的水车,出现了水轮机的雏形。到了 19 世纪,人们在水车和旧式水轮的基础上研制了水轮机,提高了水能利用的效率。近代型式的水轮机主要是 18 世纪后随着近代工业生产的发展而发展起来的。1754 年瑞士著名科学家欧拉奠定了反击式水轮机的理论基础。1834 年法国的富尔内龙(Fourneyron)造出了第一台功率为 4.5kW 的向心式水轮机。此后,冲击式、混流式等水轮机相继出现。随着工业的发展,18 世纪末这种安装有水轮机的水力站发展成为大型工业的动力,用于面粉厂、棉纺厂和矿石开采。但是推动水能利用大规模发展的,还是电的发明和电力工业的出现。世界电力工业起源于 19 世纪后期。世界上第一台发电机组是 1875 年建于巴黎北火车站的直流发电机,用于照明供电。世界上第一座水力发电站建造于 19 世纪 70 年代。1879 年,美国旧金山实验电厂开始发电,这是世界上最早出售电力的电厂。1882 年,美国纽约珍珠街电厂建成发电,装有 6 台直流发电机,总容量是 900 马力(670kW),以 110V 直流为电灯照明供电。在高压输变电技术出现以后,水力发电才真正成为人类对水能利用的主要方式。随着电力系统的发展,1882 年在瑞士苏黎世的奈特拉诞生了世界上第一座抽水蓄能电站(装机容量 515kW,抽水扬程 153m)。抽水蓄能电站具有上、下水库,利用电力系统多余的电能,把下水库的水抽到上水库内,以位能的形式蓄存,需要时再从上水库放水到下水库进行发电。目前,全世界抽水蓄能电站的装机容量超过 1 亿 kW,发展势头已超过了常规水电站。

分析与思考

1. 什么是水能资源的技术可开发量?

1.1.2 中国水能资源及水电事业的发展

1. 中国的水能资源

中国位于亚洲大陆东部,太平洋西岸,全国面积 960 万 km^2 ,居世界第三位。中国大地,地势高差巨大,地形复杂多样。

重点关注

1. 水电开发中的环境保护与可持续发展。

专业英语词汇

1. 水能资源

water power resources, hydro-power resources

2. 水轮机

turbine

3. 抽水蓄能电站

pumped energy storage power station, pumped storage hydro-power plant

西南部的青藏高原是世界上地势最高的地区,延伸出许多高大山脉,向东逐渐降低。中国北部有阿尔泰山、天山、昆仑山、祁连山、秦岭、阴山、大兴安岭等,南部有喜马拉雅山、横断山、南岭、武夷山等。从高原和山地,发源出众多的大小江河,遍布全国。这些山脉与河流,构成了中国大地的基本形态。

在这片广袤的国土上,河流众多,径流丰沛,落差巨大,蕴藏着非常丰富的水能资源(见图 1-1)。据统计,中国河流水能资源蕴藏量 6.94 亿 $\text{kW}^{\text{①}}$;中国在 20 世纪 70 年代末做了普查,统计了单河理论蕴藏量 0.876 亿 $\text{kW} \cdot \text{h/a}$ 以上的河流 3019 条,总理论蕴藏量为 5.7 万亿 $\text{kW} \cdot \text{h/a}$;加上部分较小河流后,合计为 5.92 万亿 $\text{kW} \cdot \text{h/a}$ 。不论是水能资源蕴藏量,还是年发电量,中国在上居第一位(未统计台湾省水能资源)。

中国河川水能资源的特点有:①资源量大,占世界首位。②分布很不均匀,大部集中在西南地区,其次在中南地区,经济发达的东部沿海地区的水能资源较少。而中国煤炭资源多分布在北部,形成北煤南水的格局。③大型水电站的比重很大,单站规模大于 200 万 kW 的水电站资源量占 50%。1994 年 12 月开工的长江三峡工程的装机容量为 1820 万 kW (另有地下电站 420 万 kW),多年平均年发电量 840 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。2005 年 12 月开工的金沙江溪洛渡水电站装机容量 1260 万 kW ,是目前世界最大的地

注:① 我国水电资源的理论蕴藏总量为 6.94 亿 kW ;技术可开发量为 5.42 亿 kW ;经济可开发量为 4.02 亿 kW 。摘自:汪恕诚.历史跨越,世纪辉煌——祝贺中国水电装机容量突破 1 亿 KW 。北京:水力发电[J],2004(12):1~2

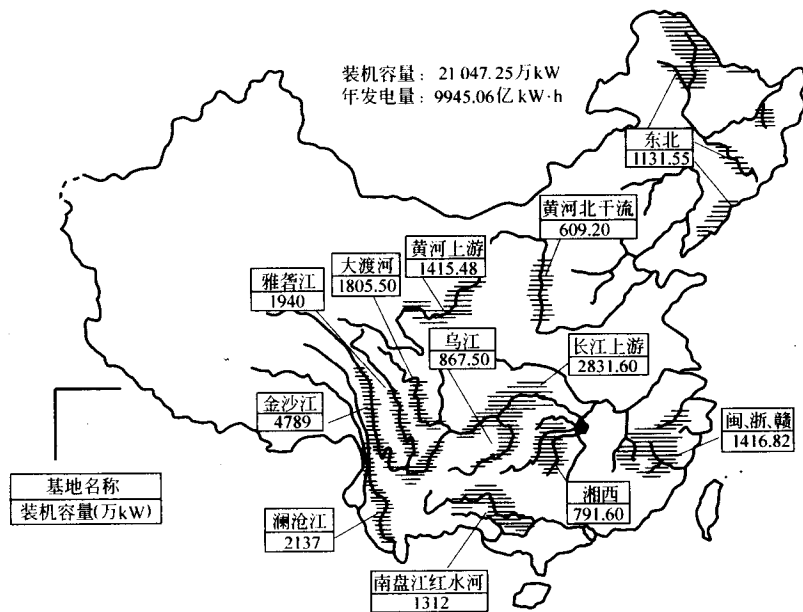


图 1-1 中国水能资源分布及水电开发基地(未包括南海诸岛)

下水电站。位于雅鲁藏布江的墨脱水电站,经查勘研究,其装机容量可达 4380 万 kW,多年平均年发电量 2630 亿 kW·h。

2. 中国的水电装机容量

世界上最早在 19 世纪末至 20 世纪初开始建造一些小型水电站。

我国建造的第一个水电站,是在云南昆明石龙坝的小水电站,建在滇池入金沙江的螳螂川上,1912 年第一期工程完工,装两台各 240kW 的机组。1950 年以前扩建了五次达 2368kW,1950 年以后又扩建两次,目前该电站总装机为 8368kW。

1949 年以前我国水电装机总容量仅 16.3 万 kW,年发电量 7.1 亿 kW·h,分别居世界 25 位和 23 位。新中国建立 20 年后的 1969 年,水电装机总容量达 502 万 kW,是解放前的 30 倍;到 1981 年,水电装机总容量达 2100 万 kW,12 年中翻了两番;建国 50 年后的 1999 年,水电装机总容量已达 8000 万 kW,又翻了两番。2004 年底,我国水电装机总容量已达 1 亿 kW。

3. 中国水电今后的发展趋势

中国水电事业的发展虽然取得了巨大的成就,但发展的过程却是曲折的。由于人们的片面认识和电力主管部门在一段时期中的政策导向,使得水电建设资金短缺、发展缓慢,前期投入减少,工程质量下降,影响了水电建设发展。大量的水力能源白白流入大海。随着世界范围保护环境意识的加强,优先开发水电以及其他绿色能源已经成为各国政府的共识。中国在 20 世纪 90 年代国家“八五”、“九五”发展规划中,把水电作为基础产业,对它赋予了优先发展的地位。从长江三峡工程的开工,到 2003 年第一批机组并网发电,现在已经进入最后的第三期工程阶段。黄河小浪底水电站已经完全竣工,拉西瓦水电站正在建设。广西的龙滩水电站、云南的糯扎渡水电站、金沙江上的溪洛渡、向家坝电站已经相继开工,乌东德、白鹤滩以及金沙江上游的十几座电站正加紧设计。雅砻江、大渡河、澜沧江、红水河等西南地区水力能源富集的大江大河的开发,已经全面启动。水力发电建设事业面临空前高速发展的机遇和巨大的空间。据估算,在今后的 20~30 年中,中国水电装机容量将再增加 2 亿~3 亿 kW。中国水利水电工程的发展进入了它的黄金季节。

分析与思考

1. 我国水能资源有何特点?
2. 如何分析我国今后水电开发的趋势?

专业英语词汇

1. 常规水电站
conventional hydropower station
2. 三峡工程
Three Gorges Project

1.2 水电站出力和发电量计算

1.2.1 水流能量的计算

水流的能量由重力得来。而在水流由高处向低处流动的过程中,又把这些能量消耗在克服水流摩擦阻力、河床阻力、泥沙运移上,白白地浪费掉了。水流的能量

可由水力学公式进行计算。如图 1-2 所示,在河流上分别取两个断面 1-1 和 2-2,设两断面之间既没有源也没有汇,水流满足伯努利方程。两个断面处的水面高程分别为 Z_1 和 Z_2 ,平均流速分别为 v_1 和 v_2 。根据连续原理,流入这个河段和流出这个河段的水量是相等的,均为 W 。设水流流经这一河段的时间为 t 。在断面 1-1 和 2-2 处水流所具有的能量为:

分析与思考

1. 分析式 (1-1) 中各项变量代表的能量类型?

2. 河流中的流速往往很大,为什么说在式 (1-2a) 中流速项可以忽略?

$$\begin{cases} E_1 = \gamma W \left(Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right) \\ E_2 = \gamma W \left(Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right) \end{cases} \quad (1-1)$$

式中, E 为水流具有的能量, $N \cdot m$; Z 为单位水重的位置水头; P/γ 为压力水头; γ 为水的容重; α 为动能系数; g 为重力加速度。

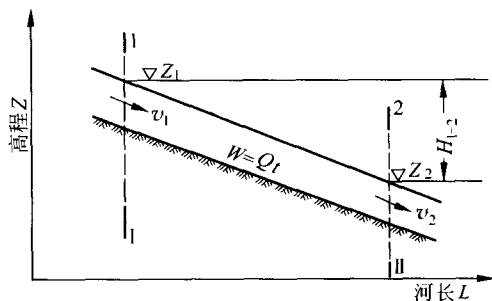


图 1-2 河段水流能量

专业英语词汇

1. 水力学

hydraulics

2. 势能

potential energy

3. 压力能

pressure energy

4. 动能

kinetic energy

两断面水流能量的差就是水体 W 由断面 1-1 到断面 2-2 水流所消耗的能量,也是该河段水流的水能:

$$E = E_1 - E_2 = \gamma W \left(Z_1 - Z_2 + \frac{P_1 - P_2}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2 - \alpha_2 v_2^2}{2g} \right) = \gamma W H_{1-2} \quad (1-2a)$$

式中, H_{1-2} 为两断面单位水重的能量差, m 。

因为通常河流两断面之间的压力水头之差和动能水头之差很小,可以忽略,所以通常以两个断面处的水面高程之差或称落差 ($Z_1 - Z_2$),来代表两断面单位水重的能量差 H_{1-2} 。式 (1-2a) 中的能量 E , 实际上是水量 W 在时间 t 内所做的功。而其功率 N 就是单位时间中 W 所做的功,可以写为:

$$N = E/t = \gamma W H_{1-2}/t = \gamma Q H_{1-2} \quad (1-3a)$$

式中, N 为功率, $N \cdot m/s$; Q 为河段中的流量, m^3/s 。

工程上常把功率称为出力或容量,而单位则用千瓦 (kW) 表示。因为 $1kW = 102 \times 9.81N \cdot m/s$, $\gamma = 1000 \times 9.81N/m^3$, 代入式 (1-3a), 可得河段水流出力为:

$$N = 9.81QH_{1-2} \quad (1-3b)$$

工程上又常用“千瓦时 (kW · h)”或“度 (°)”来作能量的单位,因而式 (1-2a) 可以表示为:

$$E = 0.00272WH_{1-2} \quad (1-2b)$$

1.2.2 水电站容量和发电量计算

水电站的工作原理是,通过水工建筑物将某一河段的天然落差集中起来,形成水头 H_{1-2} ,然后将这种具有水头的水流引入水轮机,推动其桨叶转动,进而带动发电机,将水能转变为电能。如图 1-3 所示,在断面 2-2 处建设大坝和电站,将断面 1-1 至 2-2 的天然落差集中起来,形成水头 H_{1-2} 。

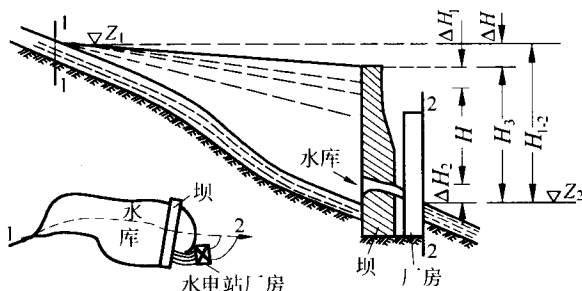


图 1-3 坝式水电站的作用水头

这实际上只有在电站不发电、水库不放水的条件下才能形成。只要水电站发电放水,水库中就会有水流动,就会有水头损失 ΔH ;水流由水库进入水轮机以及从尾水管流到下游河段,也会分别发生水头损失 ΔH_1 和 ΔH_2 。因而真正能够推动水轮发电机发电的水头 H ,应该是从断面 1-1 到水电站下游水位之间的天然落差 H_{1-2} 减去上面提到的三部分损失,称为工作水头:

$$H = H_{1-2} - \Delta H - \Delta H_1 - \Delta H_2 \quad (1-4)$$

如果再考虑水轮发电机的能量转换效率 η ,则水电站实际装机容量和发电量应该为:

$$N = 9.81 \eta QH \quad (1-5)$$

$$E = 0.00272 \eta WH \quad (1-6)$$

式中的 Q 、 H 分别为通过水轮机的流量和作用在水轮机上的工作水头; W 为在时间 t 内通过水轮机的水量。 η 为一个小于 1 的系数,等于水轮机效率与发电机效率的乘积(如果有传动设备,则还应该乘以传动设备的效率)。小型水电站效率一般为 0.65~0.80;中型水电站约为 0.80~0.85;大型水电站一般可达 0.90 以上。

1.2.3 水电站装机容量的选择

以上介绍的水电站装机容量的计算,只是针对某一个特定流量和作用水头的情况。而实际水电站的所在的河流的流量在不同的季节都是不同的,由大坝集中的水头也是变化的。此外水电站装机容量与该电站在整个电网中的作用和所占比例也有密切关系。因此水电站装机总容量的确定,是一个很复杂的问题。解决这个问题

分析与思考

1. 简明叙述水电站的工作原理,并绘出原理图。

专业英语词汇

1. 海拔高程
elevation
2. 水头
water head
3. 桨叶
blade
4. 发电机
generator

是另外一门专业课“水能规划”的任务。它对原始资料要求较高,计算工作量也较大。但在初步估计水电站规模时,或是在规划阶段进行方案比较时,常由于缺乏足够的负荷资料和经济资料,而改用简化方法来初定水电站的装机容量。下面介绍两种常用的近似简化方法。

1. 年利用小时数法

式(1-7)给出了水电站装机容量 N_t 、水电站年利用小时数 n_h 和多年平均年发电量 E_a 的关系:

$$N_t = E_a / n_h \quad (1-7)$$

亦即,如果预先规定水电站的年利用小时数,即可利用式(1-7)求得装机容量,但水电站的多年平均年发电量因装机容量不同而不同,所以要采用试算方法求解。

先假定已知装机容量 N_t ,在水流出力历时曲线上求出相应的多年平均年发电量 E_a (参见《水能规划》,1996),验算是否符合规定的年利用小时数,一般试算 2~3 次即可。

分析与思考

1. 怎样确定水电站的装机容量?

专业英语词汇

1. 装机容量
capacity

2. 机组
unit

3. 效率
efficiency

4. 调节
regulation

关键问题是,难于规定各种情况下水电站的年利用小时数。一般而言,水电站调节性能不同,年利用小时数差别较大。调节性能差,以担负电网中基础负荷电量为主的水电站,其年利用小时数较高;调节性能好,以担负电网中高峰负荷电量为主的水电站,其年利用小时数较低。一般无调节水电站年利用小时数约为 5500~7000h;日调节水电站约为 4500~5500h;年调节水电站约为 3500~4500h;多年调节水电站约为 2500~3500h。应指出,这些数据只是一些地区的经验统计值,使用时可参考下述注意点根据实际情况分析决定:

① 水力资源丰富的地区与水力资源缺乏地区相比,应取较高值;

② 大陆性气候的地区,径流年内分布很不均匀时,应取较低值;

③ 同一电力系统内水电站较多,且已有调节性能好的水电站担负峰荷时,新投入运行的水电站将承担较均匀的负荷,应取较高值;

④ 当日负荷变化剧烈且系统中已有无调节水电站和火电站担负基荷时,新投入运行的水电站将担负峰荷或腰荷的不均匀部分,应取较低值;

⑤ 主要承担备用任务的水电站,应取低值。

2. 总利用率最大法

这里的总利用率是指水电站水能利用率和设备利用率两者的乘积。水能利用率是指在一个代表性时段内,水电站正常运行可能发出的电量与水流总能量之比。设备利用率是指在一个代表性时段内,水电站正常运行发出的电量与全部装机在全时运行条件下发出的电量之比。加大装机容量,水能利用率可提高,而设备利用率将降低。对此,有人建议可以用总利用率最大的原则来定出水电站的装机容量。这种选择装机容量的简化方法只是一种近似的估算方法。下面通过算例来说明这一方法。

例 1-1 某小型年调节水电站,已根据 3 个设计代表年的径流资料,算出每个月的月平均出力列入表 1-1 中,累计三年的水流总能量为 12 937kW·月。试用总利用

率最大法初选水电站的装机容量。

表 1-1 某水电站 3 个设计代表年的水流月平均出力 $N \cdot m/kW$

序号	N_H	序号	N_H	序号	N_H	序号	N_H	序号	N_H	序号	N_H
1	806	7	640	13	376	19	291	25	213	31	176
2	755	8	576	14	347	20	255	26	208	32	174
3	722	9	575	15	324	21	236	27	197	33	166
4	710	10	427	16	312	22	224	28	190	34	159
5	696	11	409	17	308	23	217	29	187	35	153
6	662	12	405	18	298	24	213	30	179	36	151

分析与思考

1. 如何估计水电站年利用小时数?

专业英语词汇

1. 峰荷

peak load,
peak demand

2. 利用率

utilization factor

解 全部计算列入表 1-2 中。

表 1-2 用总利用率最大法初估装机容量计算表

①	②	③	④	⑤
日平均出力/kW	可利用水能*	水能利用率/%	设备利用率/%	总利用率/%
350	9728	75.19	77.19	58.04
400	10 354	80.00	71.90	57.50
375	10 053	77.70	74.50	57.90
300	8987	69.50	83.20	57.80
325	9381	72.51	80.17	58.13

* 这里采用 $kW \cdot 月$ 为单位。

先假定水电站的日平均出力为 350kW, 填入表 1-2 的第①栏。然后统计三年内相应的可利用水能, 凡表 1-1 中出力大于或等于 350kW 的, 按 350kW 计; 小于 350kW 的, 按表 1-1 中所示的数值计, 统计结果得 9728kW·月, 填入表 1-2 的第②栏。因三年的水流总能量为 12 937kW·月, 故此情况下的水能利用率为 $9728/12\ 937 = 75.19\%$, 填入第③栏。日平均出 350kW, 三年内共利用水能 9728kW·月, 相当于每 1kW 在三年中一共工作了 $9728/350 = 27.8$ 个月。三年为 36 个月, 故得相应设备利用率为 $27.8/36 = 77.19\%$, 填入第④栏。将第③、④两栏的水能利用率和设备利用率相乘, 得 $75.19\% \times 77.19\% = 58.04\%$, 这就是日平均出力为 350kW 情况下的总利用率, 填入第⑤栏。至此, 对日平均出力为 350kW 的计算完毕。再假定若干个日平均出力——如表 1-2 中的 400、375、300、325kW 等, 按上述步骤进行计算, 得各栏所示的结果。

由计算结果可知, 相当于日平均出力 325kW 的总利用率为最大, 达 58.13%; 相当于日平均出力 350kW 的总利用率为次大, 达 58.04%。这两个日平均出力可以作为初选装机容量的参考。

为了适应日负荷的变化, 装机容量应当比日平均出力大, 如果水电站是单独运行的, 考虑到日平均出力 N_a 与日最大出力 N_i 之比等于日负荷系数 γ , 故装机容量 N_i 可近似地取等于日平均出力 N_a 除以日负荷系数 γ , 即: $N_i = N_a/\gamma$ 。按照小型电

站的一般经验,取 $\gamma=0.5$,则本水电站的装机容量可取为: $(325\sim350)/0.5=(650\sim700)\text{kW}$ 。如果水电站联网运行的,可根据它所承担负荷的不均匀程度,按某一定比例加大日平均出力,来估算装机容量。

1.3 水电站的开发方式、布置及组成

分析与思考

1. 试分析水电站三种开发方式的优缺点?

在学习水电站的具体设计方法和相关的理论之前,有必要首先对水电站的开发方式,以及它的全貌和大致的组成有个宏观的了解。

1.3.1 水电站的开发方式

专业英语词汇

1. 落差
throw
2. 坡降
slope

这是指水电站采用工程措施集中天然落差形成作用水头的方式。根据河流的水文、地貌、地质条件、人居条件的不同,所采用的工程措施可以分为坝式、引水式和混合式三类。

1) 坝式

在河流上建造拦河坝,将大坝上游的河流落差集中起来,使坝前水位抬高,在大坝上下游形成水头差,直接供给水电站发电,这种方法称为坝式开发方式,如图 1-3 所示。

2) 引水式

在河流坡降较陡的河段上游,建造取水口(采用低坝或堰形成取水条件),通过人工建造的坡降比较平缓的引水道(渠道或隧洞),将水流引至河段末端集中水头,使引水道与河道下游水位之间形成水头差,经过垂直或陡斜布置的高压管道,引水至电站厂房发电,这种方式称为引水式开发方式,如图 1-4 所示。

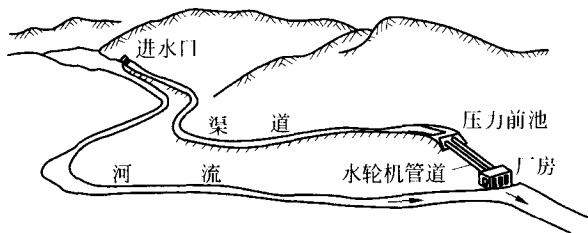


图 1-4 渠道引水式开发方式

3) 混合式

将上述两种集中水头的方式组合起来,即部分水头用筑坝来集中,部分水头用引水道来集中,称为混合式开发方式,如图 1-5 所示。

以下对这几种开发方式的优、缺点和适用条件作一些一般性分析。

坝式水电站的水头取决于坝高,坝越高发电作用水头也越大。

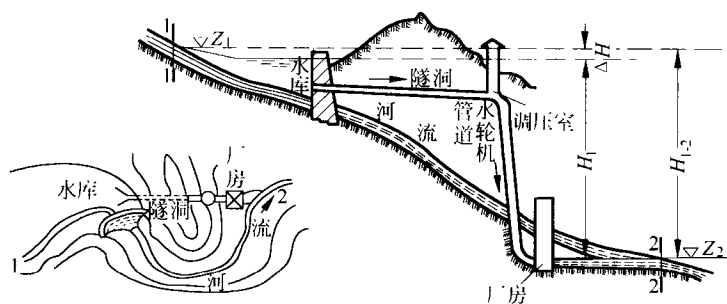


图 1-5 混合式开发方式

这种形式的电站的主要优点是,由于形成比较大的水库,可以调节流量,电站规模一般较大,水能利用程度较高。同时坝式水电站综合效益比较大,除了发电、改善航运等经济效益外,防洪减灾等社会效益也比较大。拦河筑坝来集中水头,不可避免地要引起上游两岸的淹没。我国人多地少,筑坝建库往往受淹没损失的限制,特别在人口较多的地区这一问题更为突出。我国三峡工程并非建在人口集中的地区,但移民总数已经超过百万,这在外国是无法想象的。当上游有大片农田,或有重要的矿藏、工矿企业、交通线路和居民点时,常要放弃用坝来集中水头的方式,或者要限制筑坝的高度。采用引水式开发或混合式开发来集中水头,可以减免库区的淹没。关于淹没损失问题,往往是在拟定集中水头方式时应予首先研究的问题。

某些已建成的水电站,集中水头的方式主要决定于水资源综合利用的要求。例如三峡水电站、小浪底水电站满足长江、黄河中下游防洪的需要是第一位的,都必须筑坝形成水库,用以拦蓄洪水,同时也就为水电站集中了水头,因此它们都是坝式水电站。过去认为坝式开发方式适用于河道坡降较缓,流量较大,有筑坝建库地形和地质条件;河床较宽,有布置电站厂房条件的河段。这种说法对建造地面厂房来说,是正确的。但是对于修建在首部的地下厂房水电站来说,河道坡降较陡,流量很大,有筑坝建库地形和地质条件;河床较窄,两岸山体雄厚,有布置地下电站厂房条件的河段,则同样适于采用坝式开发方式(在首部开发的地下电站的作用水头主要是建坝形成的)。

引水式电站是用引水道集中水头的,它的水头往往较高。目前最大水头已达2030m(意大利劳累斯引水式电站),我国即将开发的墨脱水电站可望达到更高的水头。引水式电站一般引用流量较小,如果没有水库调节,水量利用率较低,综合效益当然也较低。但正因为引用流量小,同样装机容量下,工程量也小,造价低,淹没损失小。选定合理的集中水头方式是非常重要的。从工程量看,一般说来,在流量大、坡降小的平原河流上,比较适宜采用建坝集中水头;对流量小、坡降大的山区河流,比较适于用引水道来集中水头。为什么集中水头方式的选定,同河流的流量和坡降有着这样的一般性关系呢?这主要是因为坝的工程量只同河谷宽狭和坝高有关,而引水道的工程量则是由其长度和过水断面大小决定的。这也就是说,从流量来看,当用坝来集中水头时,坝的工程量并不取决于流量的大小。虽然一般说来,河流流量

分析与思考

1. 我国西南地区的地形、地貌适于修建什么样的水电站?

重点关注

1. 有人建议保留部分河流的自然状态,不再进行开发。你是否同意这种看法?

专业英语词汇

1. 进水口
intake
2. 渠道
canal
3. 厂房
powerhouse

分析与思考

1. 有人认为其实没有纯粹的引水式开发,几乎所有的引水式水电站都是混合式开发。你同意这种看法吗?

重点关注

1. 水电站布置的关键问题是什么?

专业英语词汇

1. 过水断面
active-cross section, water-carrying section
2. 水库
reservoir
3. 径流
runoff
4. 压力隧洞
pressure tunnel
5. 拦污栅
rack, trash rack

大时河谷亦较宽,但是河谷宽狭并不仅是由于河水的冲刷作用,还往往取决于两岸的地质构造。例如黄河刘家峡的流量远远大于北京十三陵水库的流量,但刘家峡坝址处的河宽仅 50 多米,而十三陵水库坝址处的河宽达 600 多米。可见流量大小同坝体工程量没有直接关系。至于如果用引水道来集中水头,则由于过水断面主要因流量而定,流量大小直接影响引水道的过水断面和工程量,流量越大,引水道的工程量也就越大。

从河流坡降来看,为集中某一定水头,河流坡降越大,由于引水道的长度可随之缩短,所以其工程量也就越小。实践证明,对于某一特定河段的开发,如果河流的坡降很大,可以利用的落差很大,当用坝来集中水头时,随着坝高的增加将要使坝体工程量显著增加,因为一般说来坝体工程量是同坝高的 2~3 次方成正比的,而用引水道来集中水头时,并不会因为所集中的水头很大而增加引水道的工程量。在河流坡降非常平缓的情况下(例如长江下游等平原大河的坡降仅几万分之一),若用引水道集中水头不仅是不合理,而且也往往是难于实现的。因此,在流量大、坡降小的平原河流上比较宜于用坝来集中水头;而在流量小、坡降陡的山区河道上,一般比较宜于用引水道来集中水头;但若水量丰富、河谷狭窄,建高坝工程量也不会太大,用坝来集中水头也可以是恰当的选择。

所谓“混合式”开发方式,综合了上述两种开发方式的优点(和缺点),走了一条“中庸之道”。但只要条件合适,混合开发方式往往是更为经济的形式。例如河流的上游部分坡降平缓,宜于用坝集中水头并形成水库;而下游部分坡降较陡,宜于用引水道集中水头,则往往采用混合式开发较为合适。因为在这种条件下,如果全部水头都用坝来集中,将会使坝高及坝的工程量大大增加;如果全部水头都用引水道来集中,引水道长度将要增加很多,而且缺少能调节径流的水库。这时采用混合式开发则可因地制宜,避免这些缺点。例如四川龙溪河上的狮子滩水电站,河段的上游部分坡降平缓,约为 1‰,用坝集中水头约 50m,河段的下半部分坡降较陡,约为 1%,用压力隧洞集中水头 20m 左右,而成为混合式水电站。

1.3.2 水电站的布置及组成

1. 坝式水电站

典型坝式水电站建筑物如水电站厂房、进口建筑物至厂房的高压管道、尾水建筑物和高压开关站等,与坝及泄洪建筑物共同组成水力枢纽。图 1-6 所示是某坝式水电站的枢纽布置。靠左岸为溢流坝段(从上游向下游看),水电站厂房建在靠右岸的坝体后面,称为厂房坝段。坝上游的水,由进水口经埋在坝体内的高压管道,进入厂房内的水轮机。水流转动水轮机后,泄入下游河道。为避免溢流坝下泄的水流对从厂房的尾水发生干扰,两坝段之间设有导流墙将它们互相隔开。在坝上游的进水口处装有闸门和拦污栅,操作这些闸门和拦污栅的启闭机架设在坝顶上。闸门可以用来控制进入水电站厂房的流量,以及当检修高压管道和水轮机时用以截断水流;拦

污栅则用于拦阻漂浮物进入水轮机。高压开关站布置在厂房和坝之间,将发电机发出的电流经过电压升高以后,从这里输入电网。

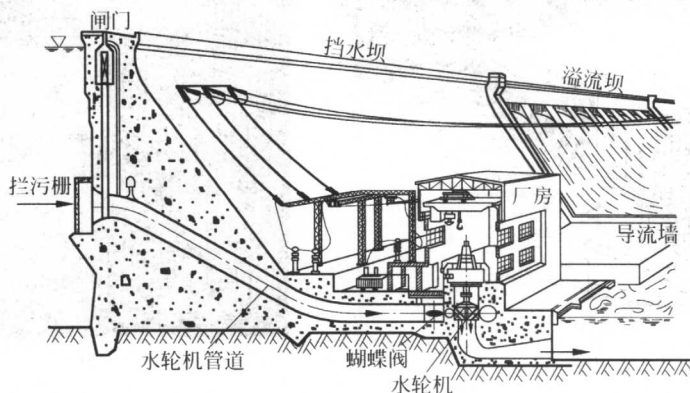


图 1-6 坝后式水电站布置示意图

这种水电站的厂房在布置上有一个重要特点,就是厂房建在坝的后面,上游水压力由坝体承受,不传到厂房上来。对于水头较高的坝式水电站,为了不使厂房承受上游的水压力,一般常采用这种布置方式。

厂房设在坝后,水流经由埋藏于坝体内部、绕过坝体背后或者坝端的引水管道(埋藏于坝体内的常采用钢管,绕过坝端的常采用隧洞)进入厂房。这一类的坝式水电站称为坝后式水电站。举世闻名的三峡电站就是这种水电站,见图 1-7。

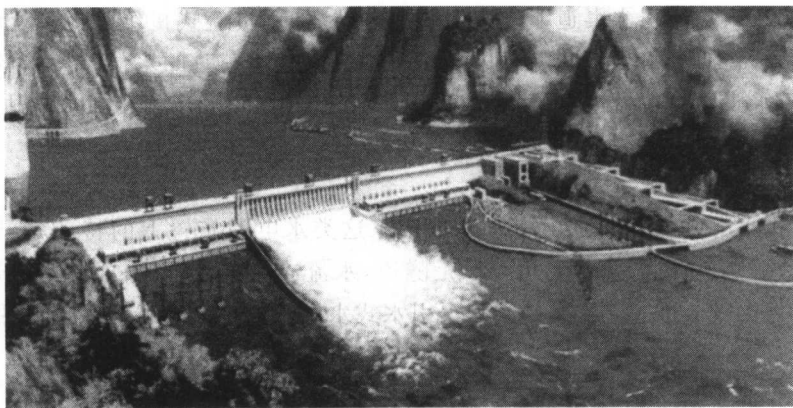


图 1-7 三峡水电站布置鸟瞰图

图 1-8 所示则是另外一类坝式水电站——河床式水电站。这种电站在布置中,使水电站厂房代替一部分坝体作为挡水建筑物,直接承受上游水压力,它没有专门的高压管道,水流由上游进入厂房,转动水轮机后流入下游。由于用厂房挡水,不能承受过高水头,通常水头在 30m 以下,所以一般用在低水头河段上,如河流的中、下游。我国最大的河床式水电站是葛洲坝水电站。

分析与思考

1. 坝后式水电站与河床式水电站的特点。

专业英语词汇

1. 坝后式水电站
power station at the toe of the dam
2. 河床式水电站
power station in river channel

分析与思考

1. 图 1-8 (b) 所示的蜗壳断面是什么形状的? 什么材料的? 为什么可以这样做?
2. 渠道与隧道的区别在哪里?

专业英语词汇

1. 潮汐

tide

2. 明渠

free flow channel

3. 无压隧洞

free level tunnel,

free-flow tunnel

4. 压力隧洞

pressure tunnel

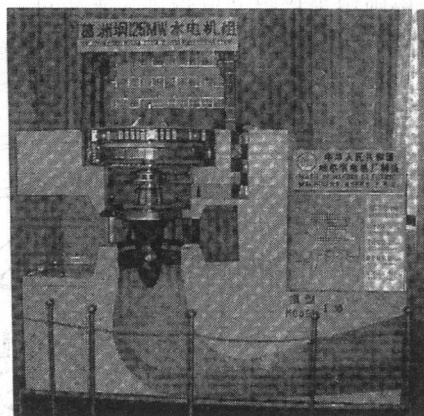
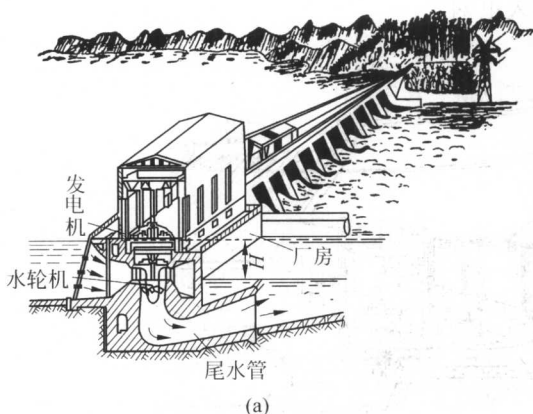


图 1-8 河床式水电站示意图及葛洲坝电站水轮发电机组模型

坝式水电站若厂房紧挨着坝体下游侧修建,就是坝后式电站;若在附近河岸边修建,就是河岸地面式电站;若厂房本身就可以像坝一样起挡水作用,就是河床式水电站。坝式水电站由于建有大坝,尤其是高坝,可形成较大的库容,具有较好的调节性能,电能的保证性好一些。因为有库容调蓄,因此能够发挥综合效益,如防洪、供水、灌溉、航运、漂木等。但是投资、工期、淹没损失、移民费用都比较大。我国许多江河上的关键性控制工程都是修建了大坝的,因此都是坝式水电站。

某些渠道上为了利用跌水而建造的小型水电站,如果是由厂房来承受上游水压力的,如北京永定河引水渠道上的槐柏树水电站,采用贯流式机组,也属于河床式水电站。此外,在海湾筑坝使其与海洋隔开,利用涨潮、落潮时的水位差发电的潮汐水电站,由于水头不高,通常将厂房建成为坝体的一部分,也属于河床式水电站。

2. 引水式水电站

引水式水电站的水头是由引水道形成。这类水电站布置上的特点是具有较长的引水道,引水道可以是渠道,也可以是隧道,水流或者是无压流,或者是有压流,水电站建筑物比较分散。图 1-9 是某明渠引水式水电站的平面布置和纵剖面图。

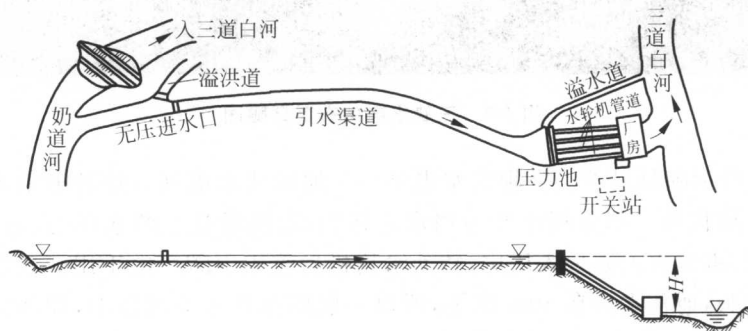


图 1-9 某明渠引水式水电站的平面布置和纵剖面图