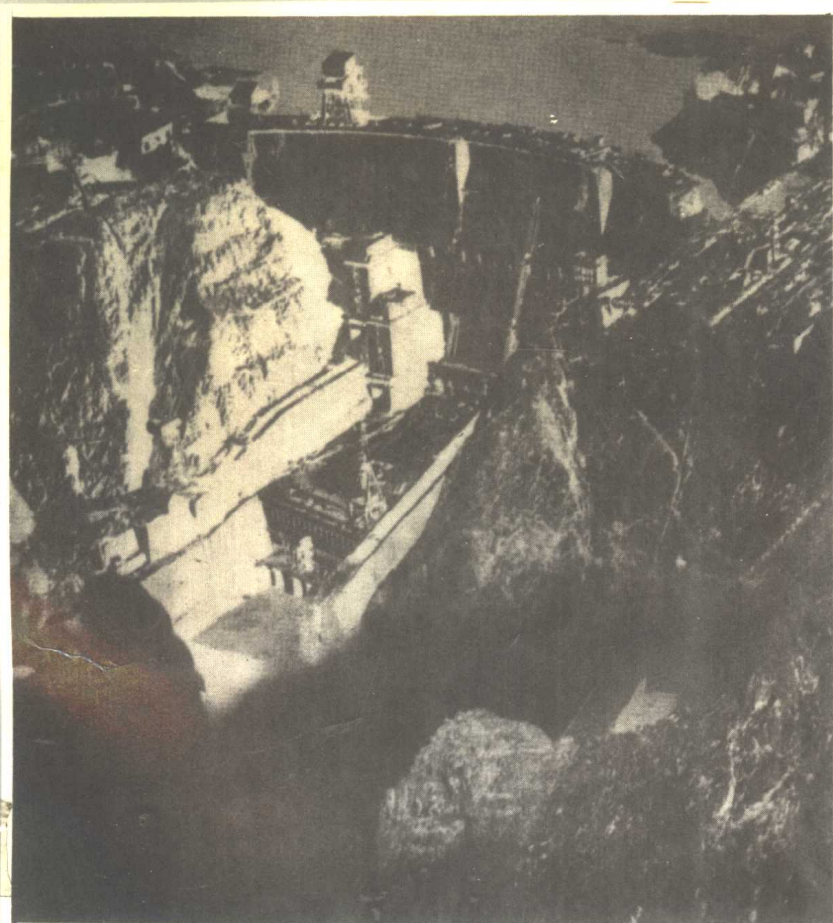


左东后 王世夏 林益才 主编

水工建筑物

上册



河海大学出版社

水 工 建 筑 物

(上 册)

左东启

王世夏 林益才

主 编

河 海 大 学 出 版 社

责任编辑 吴俊燕 张伟
特约编辑 胡明龙

水工建筑物

上册
左东启

王世夏 林益才

主 编

出版发行：河海大学出版社

(南京西康路一号，邮政编码：210024)

经 销：江苏省新华书店

印 刷：河海大学印刷厂

(南京西康路一号，邮政编码：210024)

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 31.75 字数 813 千字

1995 年 7 月第 1 版 1995 年 7 月第 1 次印刷

印数

ISBN 7-

TV · 126

河海版图书若有印刷

TV6
1843
1

内容提要

本书系统阐述各种主要水工建筑物的工作原理、适用条件、设计方法和枢纽布置。内容章节安排的特点是：对各种混凝土溢流坝和坝身泄水孔结合在一章中讲述；对坝型的发展及新型坝列有专章；地下洞室一章包括地下隧洞和地下厂房结构两方面内容；又专设水工现代分析计算一章。每章后均附复习思考题。

全书十六章，分上、下二册。上册包括前十章，下册包括第十一至第十六章。

本书为水利水电类专业教材，也可供其它专业师生及水工科技人员阅读参考。

前 言

本书为水利水电类专业“水工建筑物”课程教材。其它有关专业师生以及水工科技人员也可阅读参考。

编者在河海大学水工教研室多年来历届水工建筑物课程所用讲义、教材基础上力求反映近 10 年本课程的教学实践和国内外水工科技进步,参考了兄弟院校编著的有关出版物,为适应当前专业教学计划需要,由有关教师协作编写成此书。

本书内容较系统地包括各种水工建筑物和水利枢纽的体型布置、工作原理、构造特点、适用条件和安全监控,注意对典型的挡水、泄水和输水建筑物的设计理论与设计方法进行阐述讨论。为突出现代水工建筑技术,便于教学和避免重复,与现有其它水工建筑物教材相比,本书在章节安排上的特点在于:对各种混凝土溢流坝和坝身泄水孔列章集中讲述,对各种坝型的发展以及包括碾压混凝土坝和面板堆石坝在内的新型坝列章专题论述,对包括水工隧洞和地下厂房结构在内的水工地下洞室列章作较深讨论,对水工现代分析计算方法专章概括介绍。每章后附有复习思考题,以利学者小结提高。

全书分 16 章,其中第一、七、八、九、十三章由王世夏撰写,第二、五、十二、十四章由林益才撰写,第三章由董利川撰写,第四、十五章由沈长松撰写,第六章由任旭华撰写,第十、十一章由张敬楼撰写,第十六章由金忠青撰写,该章有关优化设计和可靠度分析部分则分别由王德信和吕泰仁撰写。书稿经左东启、王世夏、林益才统编审订,并经夏颂佑终审后付印。

限于编者水平,书中缺点错误在所难免,敬希读者批评指正。

编者于河海大学

1995 年 1 月

74707/1501

水工建筑物

总目录

- 第一章 绪 论
- 第二章 重力坝
- 第三章 拱 坝
- 第四章 支墩坝
- 第五章 混凝土溢流坝和坝身泄水孔
- 第六章 土石坝
- 第七章 坝型的发展和新型坝
- 第八章 河岸溢洪道
- 第九章 水工地下洞室
- 第十章 水 闸
- 第十一章 水工闸门
- 第十二章 过坝建筑物
- 第十三章 渠首和渠道建筑物
- 第十四章 水利枢纽布置
- 第十五章 水工建筑物安全监控
- 第十六章 水工现代分析计算

上册 目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 水资源与水利建设.....	(1)
第二节 水利枢纽和水工建筑物.....	(2)
第三节 河川水利枢纽对环境的影响.....	(9)
第四节 水利枢纽与水工建筑物的等级划分	(10)
第五节 本门学科的学习方法和研究途径	(11)
第二章 重力坝	(13)
第一节 概 述	(13)
第二节 重力坝的荷载	(17)
第三节 重力坝的稳定分析	(28)
第四节 重力坝的应力分析	(35)
第五节 重力坝的剖面设计	(50)
第六节 重力坝的材料和构造	(55)
第七节 重力坝的地基处理	(71)
第八节 宽缝重力坝与空腹重力坝	(79)
第三章 拱 坝	(85)
第一节 概 述	(85)
第二节 拱坝的荷载与应力控制标准	(96)
第三节 拱坝的布置.....	(103)
第四节 拱坝的应力分析.....	(113)
第五节 拱座稳定分析.....	(129)
第六节 拱坝的构造及地基处理.....	(134)
第四章 支墩坝	(142)
第一节 概 述.....	(142)
第二节 平板坝.....	(146)
第三节 大头坝.....	(150)
第四节 连拱坝.....	(160)

第五章 混凝土溢流坝和坝身泄水孔	(165)
第一节 概 述.....	(165)
第二节 混凝土溢流坝.....	(169)
第三节 坝身泄水孔.....	(184)
第四节 消能与防冲.....	(192)
第六章 土石坝	(208)
第一节 概 述.....	(208)
第二节 土石坝的剖面 and 构造.....	(211)
第三节 土石坝的筑坝材料.....	(222)
第四节 土石坝的渗流分析.....	(227)
第五节 土石坝的稳定分析.....	(240)
第六节 土石坝的裂缝及其控制.....	(250)
第七节 土石坝的地基处理.....	(256)
第八节 堆石坝.....	(263)
第七章 坝型的发展和新型坝	(272)
第一节 坝型的发展综述.....	(272)
第二节 碾压混凝土坝.....	(283)
第三节 面板堆石坝.....	(290)
第八章 河岸溢洪道	(312)
第一节 概 述.....	(312)
第二节 正槽溢洪道.....	(313)
第三节 侧槽溢洪道.....	(342)
第四节 其它型式的溢洪道.....	(347)
第五节 非常泄洪设施.....	(354)
第九章 水工地下洞室	(358)
第一节 概 述.....	(358)
第二节 水工地下洞室的总体布置与选线.....	(360)
第三节 水工地下洞室的进口段.....	(367)
第四节 水工地下洞室的洞身与洞室段.....	(374)
第五节 水工地下洞室的出口段.....	(385)
第六节 地下洞室围岩应力分布和稳定性判别.....	(389)
第七节 水工地下洞室衬砌的荷载.....	(399)
第八节 水工地下洞室衬砌的结构计算.....	(403)
第九节 无衬砌洞室和围岩的喷锚支护.....	(420)

第十章 水 闸	(429)
第一节 概 述.....	(429)
第二节 水闸的孔口设计.....	(432)
第三节 水闸的消能防冲设计.....	(434)
第四节 闸基渗流分析与防渗设施.....	(439)
第五节 闸室的布置与构造.....	(453)
第六节 闸室和闸基的稳定分析.....	(464)
第七节 闸室的结构计算.....	(470)
第八节 水闸与两岸的连接结构.....	(481)
第九节 软基处理和桩基式水闸.....	(491)

第一章 绪 论

第一节 水资源与水利建设

一、水资源

存在于大自然中的水是一种重要的资源，因为它是生命和工农业生产必需的物质，不可须臾或缺；它是发展航运交通以及水产事业必要的介质；它在自然循环过程中是一种可利用的和可再生的重要能源；也是改善环境和发展旅游事业的必要条件。

地球上的总水量很大，约为 $13.86 \times 10^8 \text{ km}^3$ ，但绝大部分是海洋中的咸水，其中通过太阳做功、大气循环，而以降水、径流方式在陆地运行的淡水，相对就很少了，只占 2.5%。全球年径流总量为 $470000 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，按 50 亿人口计平均每人 9400 m^3 ，这是最重要的一部分水。但这部分水在时间和空间上的分布极不均匀。我国幅员辽阔，河流也不少（流域面积超过 1000 km^2 的大河有 1598 条），年径流总量约 $27800 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，而按人口平均则仅约相当于全球平均数的 1/4。所以，从人均意义上说，我国的水资源并不丰富，而降水、径流在时间和地域上的分布相对更不均衡。不同地区之间，南方一日雨量可远超过西北全年降水量，同一地区，一次暴雨可超过多年平均年降水量，这就导致我国各地历史上洪、涝、旱灾频仍。由此可见，大力治水，根除水旱灾害，进而充分开发利用珍贵的水资源是何等重要！

如果说我国水的人均拥有量不算多的话，而由于从青藏高原到海平面之间的巨大落差，我国可用于发电的水能资源却十分丰富。全国水能理论蕴藏量达 $6.8 \times 10^8 \text{ kW}$ ，其中可开发的也达 $3.78 \times 10^8 \text{ kW}$ ，年发电量可达 $19100 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 以上，这些数字均居世界首位。因此，利用我国这一优势，大搞水力发电，对解决四化建设中的能源问题具有决定性意义。

二、水利建设

远古以来，我国人民曾为治理水患、开发水利，进行过长期的英勇奋斗，取得了辉煌的业绩。至今还有一些纪元前修建的水利工程在为我们服务。比如秦代李冰主持修建的岷江都江堰分洪灌溉工程，一直是成都平原农业稳产高产的保证，堪称中华民族的骄傲之一。但由于长期封建统治，特别是 19 世纪中叶以来半封建半殖民地的社会形态，人民群众的力量与智慧受到压抑，生产力低下，科学技术落后，相应地水利失修，灾患频仍，水利事业处于停滞状态。例如 1928 年遍及全国的旱灾，灾民人数占当时全国人口的 1/4；1931、1933、1935、1939 年，江、淮、黄、汉及海河的洪灾，也都使人民生命财产蒙受了极大的损失。

1949 年中华人民共和国成立后，我国的水利建设才有了较大的发展。经过 40 多年的努力，全国整修和兴建了约 170000 km 的堤防；普遍疏浚整治了排水河道，开辟了海河和淮河的排洪通道；兴建了 86000 多座水库，面积 10000 亩以上的灌区 2500 多处；水电站装机容量

量从 1949 年的 163000kW 发展到 1989 年底的 34580000kW, 年发电量达到 1230×10^8 kW·h, 到 1993 年底, 装机容量已增至 45000000kW。这些水利建设的效益表现为: 主要江河的洪水得到初步控制, 黄河保持了多年未决口, 长江、淮河、海河、辽河、松花江、珠江等也多次战胜洪水威胁; 农田水利的发展为农业增产创造了条件, 灌溉面积从 2.4×10^8 亩增至 7×10^8 亩以上, 3.4×10^8 亩的易涝耕地中有 2/3 得到了初步治理, 1.1×10^8 亩盐碱地已改良 1/2 以上; 为城市、工业供水及农牧区人、畜饮水提供了相当数量的水源; 为工农业生产和人民生活提供了电能以及其它综合利用效益。

我们尽管已取得上述一些成就, 但从四化建设的目标来说, 水利建设的差距还很大。首先, 我国大江大河的防洪问题还没有真正解决, 许多中小河流也未根治, 随着河流两岸经济建设的发展, 一旦发生洪灾, 造成的损失将越来越大。第二, 我国农业目前仍在很大程度上受制于自然地理和气候条件, 如不进一步大修水利以提高抗御自然灾害能力, 很难实现逐年增产。第三, 工业和城市用水增长速度比农业更快, 有些沿海城市已出现淡水供应困难, 水利建设不加快, 水源紧缺将日益成为限制我国生产和生活提高的重大障碍。第四, 尤其要指出的, 我国丰富的水能资源已开发量占可开发量的比例还相当低, 与世界上一些发达国家相比差距更为突出。由于水能资源是一种清洁的可再生的能源, 且未开发前又是不可蓄积的能源, 故世界各工业化国家都优先开发水电, 我国也理当如此。

值得指出的是, 目前在某些水利大国 (例如美国、俄国) 出现了一些妨碍和阻止加强水利建设的非常片面的观点与论调, 最突出的是以保护水环境为由来反对开发利用水资源。我们认为这种论点的片面和荒谬之处是把水利建设和环境保护完全对立起来。实际上, 水环境保护本应是水利建设的组成部分, 而且不止保护, 还要大力改善水环境。事实上国内外由于水利建设事业的进展, 合理开发利用水资源的同时大大改善了当地水环境的工程实例比比皆是。当然, 大型水利工程的兴建确也会对水环境有不利影响的方面 (参见本章第三节), 但对此应取正确的态度, 将保护和改善水环境问题作为水利科学技术问题之一进行研究, 以求尽量缩小其不利影响, 充分发挥其有利影响, 而绝不应“因噎废食”, 采取阻碍建设的消极态度。

令人高兴的是, 举世瞩目的三峡水利枢纽工程终于开工兴建, 宏伟的南水北调 (中线) 工程也已提上日程, 许多伟大而艰巨的跨世纪的世界一流的水利建设任务正等待我们去完成。

第二节 水利枢纽和水工建筑物

一、基本概念

任何水利工程, 都要修建在水的静力或动力作用下工作, 并与水发生相互影响的各种建筑物, 这就是水工建筑物。对于开发河川水资源来说, 常须在河流适当地段集中修建几种不同类型与功能的水工建筑物, 以控制水流并便于协调运行和管理, 这一多种水工建筑物组成的综合体就称为水利枢纽。

水利枢纽的规划、设计、施工和运行管理应尽量遵循综合利用水资源的原则。为实现多种目标而兴建的水利枢纽, 建成后能满足国民经济不同部门需要, 称为综合利用水利枢

纽；以某一单项目标为主而兴建的水利枢纽，虽同时可能还有其它综合利用效益，则常冠以主要目标之名，例如防洪枢纽、水力发电枢纽、航运枢纽、取水枢纽等等。水利枢纽随修建地点的地理条件不同，有山区、丘陵区水利枢纽和平原、滨海地区水利枢纽之分；随枢纽上下游水位差的不同，有高、中、低水头之分，一般以水头 70m 以上者为高水头枢纽，30~70m 者为中水头枢纽，30m 以下者为低水头枢纽。

因自然因素、开发目标的不同以及技术经济条件的考虑，水利枢纽的组成建筑物可以是各式各样的，试举例如下：

图 1-1 示黄河干流上以发电为主，兼有防洪、灌溉等综合利用效益的龙羊峡水力发电枢纽的平面布置。其主要建筑物包括：

拦河坝，由重力拱坝（主坝）、左右重力墩（即重力坝）以及左右岸副坝组成，主坝从坝基最低开挖高程 2432m 至坝顶高程 2610m，最大坝高 178m，从而使上游可形成一个总库容达 $247 \times 10^8 \text{m}^3$ 的水库。

溢洪道，位于右岸，溢流堰顶高程为 2585.5m，设 2 孔，每孔净宽 12m，弧形闸门控制。

左泄水中孔，穿过主坝 6 号坝段，进口底部高程 2540m，出口设 8m×9m 弧形闸门控制，与溢洪道共同承担主要泄洪任务。

右泄水深孔和底孔，分别穿过主坝 12 号和 11 号坝段，进口底部高程分别为 2505m 和 2480m，主要用于枢纽初期蓄水时向下游供水、泄洪以及后期必要时放空水库和排沙。

坝后式水电站，装 4 台单机容量 32 万 kW 的水轮发电机组，总装机容量 128 万 kW。

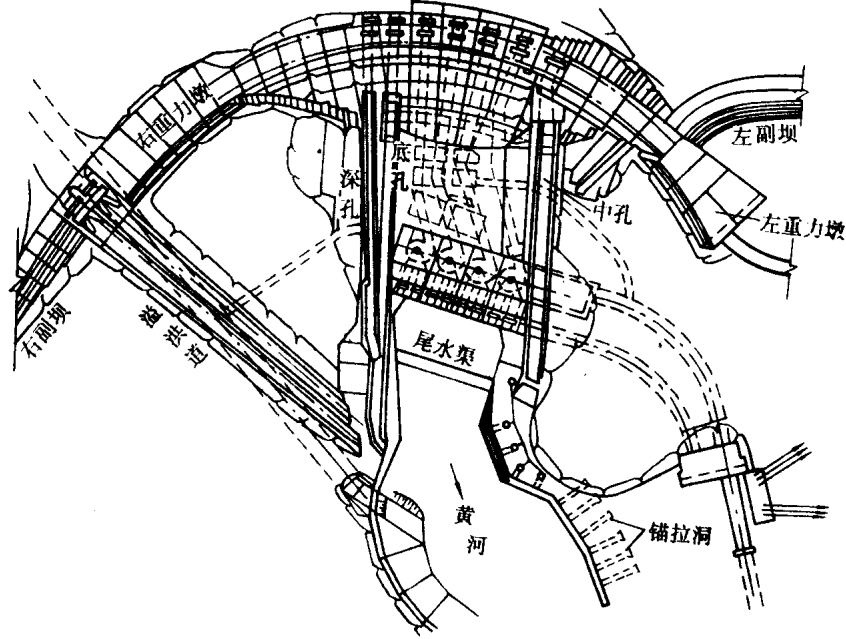


图 1-1 龙羊峡水电站平面布置图

图 1-2 示甘肃省白龙江碧口水利枢纽，其组成建筑物包括：

心墙土石坝，最大坝高 101m，用以拦河壅水、蓄水，形成库容 $5.16 \times 10^8 \text{m}^3$ 的水库。溢洪道，用以宣泄水库多余洪水。

泄洪隧洞，左右岸各有一条，可与溢洪道共同承担泄洪任务，而且可在库水位较低时提前泄洪，其中右岸泄洪洞施工期兼作导流洞。

排沙隧洞，用以排除部分水库泥沙，延长水库寿命。

水电站引水建筑物，包括引水隧洞、调压井和压力钢管等。

水电站厂房，内装单机容量 10 万 kW 的水轮发电机组 3 台，总装机容量 30 万 kW。

此外，还有供木材过坝的过木道以及供右岸农田灌溉的引水管道（图中未示）等。

以上两例都是山区、丘陵区高水头枢纽，但拦河坝及相应各组成建筑物差别还是很大的。

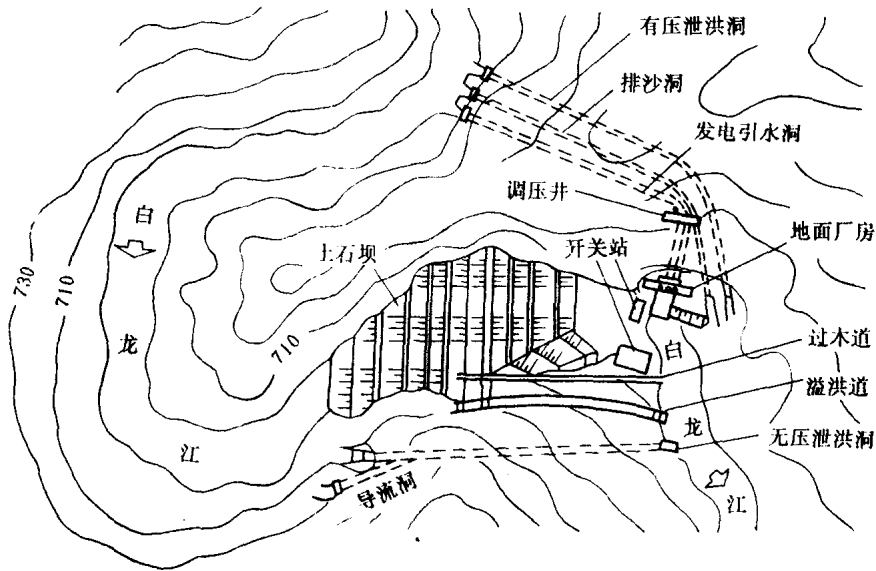


图 1-2 碧口水电站平面布置图

图 1-3 示长江干流上著名的葛洲坝水利枢纽。该处长江中原有两个江心洲（葛洲坝和西坝），分江流为三，右至左依次称大江、二江、三江，枢纽横跨长江及其两洲，便于施工。这是一座低水头大流量的枢纽，兼有径流发电、航运和为上游三峡枢纽进行反调节的综合效益。其组成建筑物包括：

二江泄水闸，枢纽控制水流的主要建筑物，共 27 孔，每孔净宽 12m，高 24m，弧形闸门控制，闭门时拦截江流，稳定上游水位（库容 $15.8 \times 10^8 \text{m}^3$ ，无调洪性能），开门时泄水，排沙防淤，满足河势要求，最大泄流量 $83900 \text{m}^3/\text{s}$ 。

船闸，共有 3 座，以保证长江航运，1 号船闸位于大江，2、3 号船闸位于三江。1、2 号船闸的闸室有效长度均为 280m，净宽 34m，槛上最小水深 5m，是我国目前最大的船闸。3 号船闸闸室有效长度为 120m，净宽 18m，槛上最小水深 3.5m。1、2 号船闸可通过 12000~16000 吨船队，一次过闸时间 51~57 分钟；3 号船闸可通过 3000 吨以下船队，一次过闸时间 40 分钟。

河床式水电站，设计水头 18.6m，分设于泄水闸两侧，其中二江电厂装有单机容量 17 万 kW 的水轮发电机组 2 台和单机容量 12.5 万 kW 的机组 5 台；大江电厂装有单机容量 12.5 万 kW 的机组 14 台；水电站总装机容量 271.5 万 kW，目前是我国最大的水电站。厂

房兼起挡水作用。

冲沙闸，分设于与主流分开后的两条独立人工航道上，其中三江航道设 6 孔，大江航道设 9 孔，采用“静水通航，动水冲沙”的运行方式，以防航道淤积。具体运行条件是：通航期间，航道内为静水；汛期、汛末、低水期，根据实际航道淤积情况，开闸拉沙、冲沙。实践表明效果是良好的。此外在两个电厂的进水口前均设置了导沙坎，在厂房底部还设置了排沙底孔，进一步加强了防沙、排沙效果。

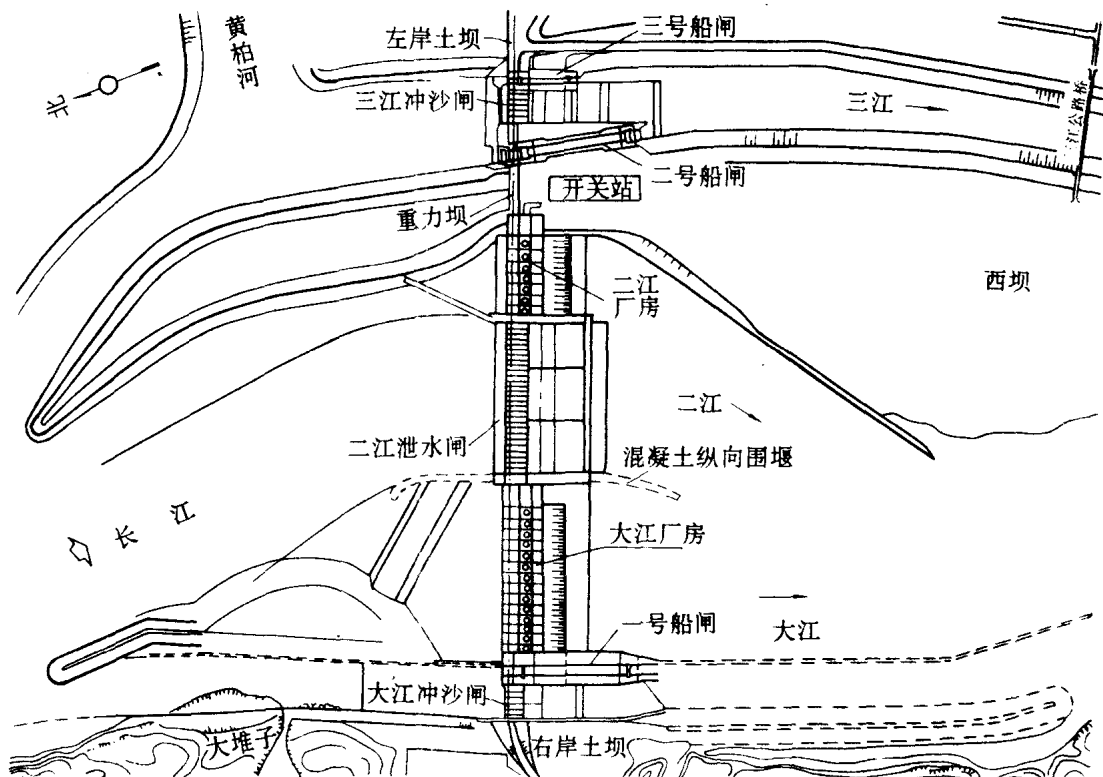


图 1-3 葛洲坝水利枢纽平面布置图

二、水工建筑物分类

上面介绍的水利枢纽实例中，我们虽已提到了多种水工建筑物，但并未包括水工建筑物的全部。事实上，水利工程并不总是以集中兴建于一处的若干建筑物组成的水利枢纽来体现的。有时仅指一个单项水工建筑物，有时又可包括沿一条河流很长范围内或甚至很大面积区域内的许多水工建筑物。即使就河川水利枢纽而言，在不同河流以及河流不同部位所建的枢纽，其组成建筑物也千差万别。通常可按功用分类：

(一) 挡水建筑物

拦截或约束水流，并可承受一定水头作用的建筑物。如蓄水或壅水的各种拦河坝，修筑于江河两岸以抗洪的堤防，施工围堰等。

（二）泄水建筑物

排泄水库、湖泊、河渠等多余水量，以保证挡水建筑物和其它建筑物安全，或为必要时降低库水位乃至放空水库而设置的建筑物。如设于河床的溢流坝、泄水闸、泄水孔，设于河岸的溢洪道、泄水隧洞等。

（三）输水建筑物

为灌溉、发电、城市或工业给水等需要，将水自水源或某处送至另一处或用户的建筑物。其中直接自水源输水的也称引水建筑物。如引水隧洞、引水涵管、渠道、渡槽、倒虹吸管、输水涵洞等。

（四）取水建筑物

引水建筑物的上游首部建筑物。如取水口、进水闸、扬水站等。

（五）整治建筑物

改善河道水流条件，调整河势，稳定河槽，维护航道和保护河岸的各种建筑物。如丁坝、顺坝、潜坝、导流堤、防波堤、护岸等。

（六）专门性水工建筑物

为水利工程中某些特定单项任务而设置的建筑物。如专用于水电站的前池、调压室、压力管道、厂房；专用于通航过坝的船闸、升船机、鱼道、筏道；专用于给水防沙的沉沙池等。与专门性水工建筑物相对，前面 5 类建筑物也可统称为一般性水工建筑物。

应当指出，上述分类也仅是大略划分。实际上，不少水工建筑物的功用并非单一的，如溢流坝、泄水闸都兼具挡水与泄水功能；又如作为专门性水工建筑物的河床式水电站厂房也是挡水建筑物。

水工建筑物还按使用期限分为永久性建筑物和临时性建筑物。永久性建筑物是指工程运行期间长期使用的建筑物，根据其重要性又分为主要建筑物和次要建筑物。前者指失事后将造成下游灾害或严重影响工程效益的建筑物，如拦河坝、溢洪道、引水建筑物、水电站厂房等；后者指失事后不致造成下游灾害，对工程效益影响不大并易于修复的建筑物，如挡土墙、导流墙、工作桥及护岸等。临时性建筑物是指工程施工期间使用的建筑物，如施工围堰等。

三、水工建筑物的特点

水工建筑物，特别是河川水利枢纽的主要水工建筑物，往往是效益大、工程量和造价大、对国民经济的影响也大。与一般土木工程建筑物不同，具有下列特点：

（一）工作条件的复杂性

水工建筑物工作条件的复杂性主要是由于水的作用。水对挡水建筑物有静水压力，其值随建筑物挡水高度的加大而剧增，为此建筑物必须有相应足够的水平抵抗力和稳定性。此

外，水面有波浪，将给建筑物附加波浪压力；水面结冰时将附加冰压力；发生地震时将附加水的地震激荡力；水流经建筑物时也会产生各种动水压力，都必须计及。

建筑物上下游的水头差，会导致建筑物及其地基内的渗流。渗流会引起对建筑物稳定不利的渗透压力；渗流也可能引起建筑物及地基的渗透变形破坏；过大的渗流量会造成水库的严重漏水。为此建造水工建筑物要妥善解决防渗和渗流控制问题。

高速水流通过泄水建筑物时可能出现自掺气、负压、空化、空蚀和冲击波等现象；强烈的紊流脉动会引起轻型结构的振动；挟沙水流对建筑物边壁还有磨蚀作用；挑射水流在空中会导致对周围建筑物有严重影响的雾化；通过建筑物的水流多余动能对下游河床有冲刷作用，乃至影响建筑物本身的安全。为此，兴建泄水建筑物，特别是高水头泄水建筑物时，要注意解决高速水流可能带来的一系列问题，并做好消能防冲设计。

除上述主要作用外，还要注意水的其他可能作用。比如，当水具有侵蚀性时，会使混凝土结构中的石灰质溶解，破坏材料强度和耐久性；与水接触的水工钢结构易发生严重锈蚀；在寒冷地区的建筑物及地基将有一系列冰冻问题要解决。

（二）设计选型的独特性

水工建筑物的型式、构造和尺寸，与建筑物所在地的地形、地质、水文等条件密切相关。比如，规模和效益大致相仿的两座坝，由于地质条件优劣的不同，二者的型式、尺寸和造价都会迥然不同。由于自然条件千差万别；因而水工建筑物设计选型总是只能按各自特征进行，除非规模特别小，一般不能采用定型设计。当然这不排除水工建筑物中某些结构部件的标准化。

（三）施工建造的艰巨性

在河川上建造水工建筑物，比之陆地上的土木工程，施工条件困难复杂得多。主要困难是解决施工导流问题，即必须迫使河川水流按特定通道下泄，以截断河流，便于施工时不受水流的干扰，创造最好的施工空间；要进行很深的地基开挖和复杂的地基处理，有时还须水下施工；施工进度往往要和洪水“赛跑”，在特定的时间内完成巨大的工程量，将建筑物修筑到拦洪高程。

（四）失事后果的严重性

水工建筑物固可为人民造福，但如失事也会产生严重后果。特别是拦河坝如失事溃决，会给下游带来灾难性乃至毁灭性的后果，这在国内外都不乏惨重实例。据统计，大坝失事最主要的原因，一是洪水漫顶，二是坝基或结构出问题，两者各占失事总数的 1/3 左右。应当指出，有些水工建筑物的失事固与某些自然因素或当时人的认识能力与技术水平限制有关，也有些是不重视勘测、试验研究或施工质量欠佳所致，这后者尤应杜绝。

四、现代水工建筑物的发展

随着流体力学、岩土力学、结构理论和计算技术的发展，以及新型材料、大型机械、设备制造能力的提高和施工技术的进步，因此有了以高坝为代表的现代水工建筑物的发展。

在混凝土坝方面，我国于 50 年代即全部依靠自己的力量，设计、施工、建成了装机容量

量 66 万 kW 的新安江水电站的宽缝重力坝,其最大坝高 102m,溢流坝与坝后厂房顶溢流式水电站结合,枢纽布置高度集中紧凑,为我国大型水利工程建设开创了良好的先例。随后,坝高 100m 上下的各型混凝土坝建成了多座。60 年代在黄河干流强地震区建成了坝高 147m 的刘家峡水电站的实体重力坝,在解决高坝技术以及相应高水头泄水建筑物高速水流问题方面取得了相当大的进展和重要的经验。70 年代在石灰岩岩溶地区建成了坝高 165m 的乌江渡拱形重力坝,成功地处理了岩溶地基。80 年代在著名的葛洲坝水利枢纽施工中,在长江流量 $4400\sim 4800\text{m}^3/\text{s}$ 情况下胜利实现了大江截流,保证了我国目前最大装机容量水电站和最大通航船闸的顺利建成,标志着我国水利施工达到的新水平。80 年代我国建造的高坝工程应以黄河“龙头”的龙羊峡重力拱坝为代表,其坝高为 178m,上游可形成 $247\times 10^8\text{m}^3$ 库容的水库。此坝设计、建造过程中成功地解决了坝肩稳定、泄洪消能布置等一系列结构与水流问题。与此同时,坝高 150m 以上的薄拱坝(双曲拱坝),如东江、东风等水电站的高坝建设,也都取得了成功。到目前为止,可以说我国已具有设计和建造各种型式高坝的能力,坝高超过 200m 的高坝在中国也即将出现,如施工中的二滩水电站薄拱坝坝高达 240m。

在土石坝方面,我国可算是建造这种当地材料坝最多的国家,而且型式多样,施工方法也多样。无论是通常的碾压式坝,或是水中倒土、水力冲填、定向爆破等特殊筑坝技术,都不乏成功的工程实例,甚至还建成很多小型的溢流土石坝。我国建成的高土石坝可以甘肃碧口水电站和陕西石头河水库的两座心墙土石坝为代表,二者的坝高分别达 101m 和 105m。与土石坝本身密切有关的深覆盖层地基处理技术也取得了很大的进展,例如碧口土石坝的砂砾石坝基混凝土防渗墙深达 44m,效果很好。相应坝型为高土石坝的情况下,高水头河岸溢洪道和泄洪隧洞的修建也积累了良好的经验。不过,总的说来,我们在高土石坝方面无论从数量和高度来看,与世界水平比,还比较落后。

目前世界上 100m 以上的高坝超过 400 座,差不多是 1950 年以前的 10 倍,其中 200m 以上的高坝超过 25 座。高土石坝在高坝中所占比例越来越大,目前其数量大致相当于混凝土重力坝与混凝土拱坝数之和。这显然与高土石坝设计理论和施工技术的不断改进以及大型施工机械的采用有关。坝高超过 300m 的两座坝都是土石坝,其中苏联罗贡斜心墙土石坝,高达 325m,也是目前世界最高坝。高土石坝的建造技术不但表现在地面以上的坝高,还表现在地面以下的地基处理深度,在冲积层土基内已实现了 170m 深的深孔水泥灌浆和 131m 深的混凝土防渗墙施工。著名的高土石坝还可以举出美国的奥洛维尔土石坝(高 236m),加拿大的买加堆石坝(高 242m)以及印度的特里堆石坝(高 261m,目前世界最高的堆石坝)等。奥洛维尔坝工程量达 $59.64\times 10^6\text{m}^3$,高度机械化施工,工期只用 4 年即在 1968 年建成。坝高名列世界首位的各种混凝土坝包括瑞士的大狄克桑斯重力坝(高 285m),苏联的英古里拱坝(高 272m),加拿大的丹尼尔·约翰逊连拱坝(高 214m)等。美国的德沃克坝混凝土方量达 $4.97\times 10^6\text{m}^3$,仅用 6 年即浇筑到顶。

在今后一二十年的世纪之交,我国将要建造多座 200m 以上乃至 300m 量级的高坝,高坝建设的成套技术必须研究掌握。采用碾压混凝土的高重力坝和高拱坝,采用刚性面板防渗的碾压式堆石坝(而非抛填式堆石坝)将是很有发展前途的新坝型。它们在相当高的情况下已有成功经验,正研究推广到更高的坝工程建设中去。高坝成套技术中所涉及的难点包含了水工新材料、大型设备的研制、高速水流、消能防冲、抗震、高边坡稳定性、安全监