

# 第一章 水工建筑物设计基本理论及发展趋势

## 第一节 水工设计的程序、依据和标准

### 一、水利工程基本建设程序

水利工程修建在河流、湖泊、海岸等水域中，既控制水又承受水的作用。与一般的土木工程相比，具有工作条件复杂、效益显著、施工建造艰难、失事后果严重等特点。相对于其他工程而言规模都较大，牵涉因素较多，因此工程建设须严格遵守基本建设程序和规程规范。根据国家基本建设管理规定，水利工程建设大体可分为前后两个阶段，即工程开工建设前的规划、勘测、设计为主的前期阶段；工程开工建设以后至竣工投产的施工阶段。具体来说，首先是对一条河流或地区的自然和社会状况进行勘查和调查研究，获取必要的资料，编制流域规划或地区水利工程的总体布局，确定合理的开发顺序以及每一项工程的任务和技术经济指标。其次，对确定兴建的某一水利工程，按规范要求分阶段进行勘测、规划、设计和施工在工程施工过程中，设计单位根据工作需要派驻工地设计代表配合施工，负责说明设计意图，解释设计文件，并监督工程质量。工程建成后要组织竣工验收，验收合格后移交管理部门即投入运行。运行时要对各种水工建筑物进行经常的定期的和临时的检查和观测，及时进行养护、维护和加固，保证工程安全，同时须做好水库的调度工作，合理利用水资源。

世界各国水利工程建设的程序与我国大体相似，具体的建设过程大都经过工程招标、工程施工、竣工验收和正式投产等阶段。

### 二、设计阶段及其任务

#### （一）设计阶段的划分

工程设计是水利工程建设过程中的一项非常重要的工作，设计工作应遵循分阶段循序渐进、逐步深入的原则进行。我国以往大中型水利枢纽工程设计常按四个阶段进行，即可行性研究、初步设计、技术设计和施工详图设计。20世纪80年代后，我国水利水电建设体制开始发生变化，为与国际接轨，适应招标投标管理体制的需要，并与国家基本建设项目审批程序相协调，缩短设计周期，加快水利水电事业发展，对水电工程设计阶段的划分调整为：预可行性研究、可行性研究、招标设计、施工详图设计（水利工程为项目建议书、可行性研究、初步设计、施工详图设计）。

世界各国都非常重视可行性研究，美国规定先进行预可行性研究和可行性研究，然后进行方案设计和详细设计；前苏联规定在技术经济调查报告中选定的工程，分期进行初步设计、技术设计和施工图设计；日本则分为初步调查、编制计划、可行性研究和施工图设计等几个阶段。

#### （二）设计阶段的深度和任务

##### 1. 预可行性研究

预可行性研究是在江河流域综合利用规划或河流（河段）水电规划以及电网电源规划

基础上进行的设计阶段。其任务是论证拟建工程在国民经济发展中的必要性、技术可行性、经济合理性。本阶段的主要内容包括：河流概况及水文气象等基本资料的分析；工程地质与建筑材料的评价；工程规模、综合利用及环境影响的论证；初拟坝址、厂址和引水系统线路；初步选择坝型、电站、泄洪、通航等主要建筑物的基本形式与枢纽布置方案；初拟主体工程的施工方法，进行施工总体布置、估算工程总投资，工程效益的分析和经济评价等。具体内容和深度可参阅《水电工程预可行性研究报告编制暂行规定》。预可行性研究阶段的成果，为国家和有关部门作出投资决策及筹措资金提供基本依据。

## 2. 可行性研究

可行性研究阶段的设计任务在于进一步论证拟建工程在技术上的可行性和经济上的合理性，并要解决工程建设中重要的技术经济问题。主要设计内容包括：对水文、气象、工程地质以及天然建筑材料等基本资料作进一步分析与评价；论证本工程及主要建筑物的等级；进行水文水利计算，确定水库的各种特征水位及流量，选择电站的装机容量、机组机型和电气主接线以及主要机电设备；论证并选定坝址、坝轴线、坝型、枢纽总体布置及其他主要建筑物的型式和控制性尺寸；选择施工导流方案，进行施工方法、施工进度和总体布置的设计，提出主要建筑材料、施工机械设备、劳动力、供水、供电的数量和供应计划；提出水库移民安置规划及环境评价；提出工程总概算，进行技术经济分析，阐明工程效益。最后提交可行性研究性报告文件，包括文字说明和设计图纸及有关附件

## 3. 招标设计

招标设计是在批准的可行性研究报告的基础上，将确定的工程设计方案进一步具体化，详细定出总体布置和各建筑物的轮廓尺寸、材料类型、工艺要求和技术要求等。其设计深度要求做到可以根据招标设计图较准确地计算出各种建筑材料的规格、品种和数量，混凝土浇筑、土石方填筑和各类开挖、回填的工程量，各类机械、电气和永久设备的安装工程量等。根据招标设计图所确定的各类工程量和技术要求，以及施工进度计划，可以进行施工规划并编制出工程概算，作为编制标底的依据。编标单位则可以据此编制招标文件，包括合同的一般条款、特殊条款、技术规程和各项工程的工程量表，满足以固定单位合同形式进行招标的需要施工投标单位，也可据此进行投标报价和编制施工方案和技术保证措施。

## 4. 施工详图设计

施工详图设计是在招标设计的基础上，对各建筑物（含机电、金属结构）进行结构和细部构造设计；最后确定地基处理方案，进行处理措施设计；确定施工总体布置及施工方法，编制施工进度计划和施工预算等；提出整个工程分项分部的施工、制造、安装详图。施工详图是工程施工的依据，也是工程承包或工程结算的依据

### （三）设计基本资料

在进行上述各阶段的设计中，必须有与设计精度相适应的勘测调查资料。主要资料有：

（1）社会、经济、环境资料。枢纽建成后对环境生态的影响、库区的淹没范围及移民、房屋拆迁等；枢纽上下游的工业、农业、交通运输等方面的社会经济情况；供电对象的分布及用电要求；灌区分布及用水要求；通航、过木、过鱼等方面的要求；施工过程中的交通运输、劳动力、施工机械、动力等方面的供应情况

（2）勘测资料。水库和坝区地形图、水库范围内的河道纵断面图、拟建建筑物地段的

横断面图等；河道的水位、流量、洪水、泥沙等水文资料；库区及坝区的气温、降雨、蒸发、风向、风速等气象资料；岩层分布、地质构造、岩石及土壤性质、地震、天然建筑材料等的工程地质资料；地基透水层与不透水层的分布情况、地下水情况、地基的渗透系数等水文地质资料。

#### (四) 科学研究

科学研究是大中型水利枢纽设计的重要组成部分枢纽中许多重大技术问题常需通过现场或室内试验以及数值模拟和分析来论证。比如对枢纽布置方案、坝下消能方式以及施工导流方法等往往要进行水工水力学模型试验；多沙河流上的库区淤积和河床演变也要借助试验分析研究；建筑物地基的岩体或土壤的物理力学性质如抗剪强度、渗透特性、弹性模量等要由现场勘探和室内试验配合提供设计数据；大坝、水电站厂房、地下洞室等主要建筑物的结构强度和稳定性有时也要由静、动态的结构模型试验和数值计算来加以分析论证。

### 三、设计依据和设计标准

#### (一) 设计依据

我国规定，大中型水利工程项目必须纳入国家经济计划，遵守先勘测，再设计，后施工的 necessary 程序。工程设计需要有以下资料或设计依据：

(1) 工程建设单位的设计委托书及工程勘察设计合同，说明工程设计的范围、标准和要求。

(2) 经国家或行业主管部门批准的设计任务书

(3) 规划部门、国土部门划准的建设用地红线图。

(4) 地质部门提供的地质勘察资料，对工程建设地区的地质构造、岩土介质的物理力学特性等加以描述与说明。

(5) 其他自然条件资料，如工程所在地的水文、气象条件和地理条件等

(6) 工程建设单位提供的有关使用要求和生产工艺等资料。

(7) 国家或行业的有关设计规范和标准

根据国民经济发展计划要求，参照流域或区域水利规划可建设的水利工程项目及其开发程序，按照建设项目的隶属关系，由主管部门提出某一水利工程的基本建设项目建议书，经审查批准后，委托设计单位进行预可行性研究、可行性研究，编制可行性研究报告。按照批准的可行性研究报告，编制设计任务书，确定建设项目和建设方案（包括建设依据、规模、布置、主要技术经济要求）。设计任务书的内容一般包括：建设的目的和依据；建设规模；水文、气象和工程地质条件；水资源开发利用的规划、水资源配置和环境保护；工程总体布置；水库淹没、建设用地及移民；建设周期；投资总额；劳动安全；经济效益等。任务书是设计依据的基本文件，可按建设项目的隶属关系，由主管部门或省、直辖市、自治区审查批准；大型水利工程或重要的技术复杂的水利工程，则由国家计划部门或国务院批准。有些国家不编制设计任务书，而在投资前，可行性研究后，有一个项目评价和决策阶段，对拟建工程提出评价报告，作为决策，以此作为设计依据。

#### (二) 设计标准

为使工程的安全可靠性与其造价的经济合理性有机地统一起来，水利枢纽及其组成建

建筑物要分等级，即按工程的规模、效益及其在国民经济中的重要性，将水利枢纽分等，而后再将枢纽中的建筑物按其作用和重要性进行分级设计。水工建筑物均需根据规范规定，按建筑物的重要性、级别、结构类型、运用条件等，采用一定的洪水标准，保证遇设计标准以内的洪水时建筑物的安全。水工建筑物的运用条件一般分为正常和非常两种，正常运用采用设计洪水标准，非常运用情况采用校核洪水标准。

我国 SDJ12—78 《水利水电枢纽工程等级划分及设计标准（山区、丘陵部分）》、SDJ217—87《水利水电工程等级划分及设计标准（平原、滨海部分）》的规范中将水利枢纽工程分成 5 等，水工建筑物分为 5 级，详见表 1-1、表 1-2、表 1-3。

表 1 山区、丘陵区水利水电枢纽工程分等指标表

工程等别	工程规模	分 等 指 标				
		水库总库容 (亿 m <sup>3</sup> )	防 洪		灌溉面积 (万亩)	水电站装机容量 (万 kW)
			保护城镇、工矿区	保护农田面积 (万亩)		
一	大(1)型	>10	特别重要城市、工矿区	>500	>150	>75
二	大(2)型	10~1.0	重要城市、工矿区	500~100	150~50	75~25
三	中型	1.0~0.1	中等城市、工矿区	100~30	50~5	25~2.5
四	小(1)型	0.1~0.01	一般城镇、工矿区	<30	5~0.5	2.5~0.05
五	小(2)型	0.01~0.001			<0.5	<0.05

表 1-2 平原、滨海地区水利水电枢纽工程分等指标表

工程等别	工程规模	分 等 指 标						
		水库总库容 (亿 m <sup>3</sup> )	防 洪		排 涝	灌 溉	供 水	水 电 站
			保护城镇及工矿区	保护农田面积 (万亩)	排涝面积 (万亩)	灌溉面积 (万亩)	供给城镇及矿区	装机容量 (万 kW)
一	大(1)型	>10	特别重要	>500	>200	>150	特别重要	
二	大(2)型	10~1.0	重 要	500~100	200~60	150~50	重 要	
三	中型	1.0~0.1	中 等	100~30	60~15	50~5	中 等	25~2.5
四	小(1)型	0.1~0.01	一 般	30~5	15~5	30~5	一 般	2.5~0.05
五	小(2)型	0.01~0.001		<5	<3	<5		<0.05

表 1-3 水工建筑物级别的划分

工程等别	永久性建筑物级别		临时性 建筑物级别
	主要建筑物	次要建筑物	
一	1	3	4
二	2	3	4
三	3	4	5
四	4	5	5
五	5	5	

对于综合利用的工程，如按表中指标分属几个不同等别时，整个枢纽的等别应以其中的最高等别为准。按表 1-3 确定水工建筑物级别时，如该建筑物同时具有几种用途，应按最高级别考虑，仅有一种用途时则按该用途所属级别考虑。

对于二至五等工程，在下述情况下经过论证可考虑提高其主要建筑物级别：一是水

库大坝高度较高时提高一级；二是建筑物的工程地质条件特别复杂，或采用缺少实践经验的新坝型、新结构时提高一级；三是综合利用工程如按库容和不同用途的分等指标有两项接近同一等别的上限时，其共用的主要建筑物提高一级对于临时性水工建筑物，如其失事后果将使下游城镇、工矿区或其他国民经济部门造成严重灾害或严重影响工程施工时，视其重要性或影响程度，应提高一级或两级。对于低水头工程或失事损失不大的工程，其水工建筑物级别经论证可适当降低。

不同级别水工建筑物的不同要求主要体现在以下几方面：

- (1) 抗御洪水能力如洪水标准，坝顶安全超高等
- (2) 强度和稳定性如建筑物的强度、稳定安全系数，抗裂要求及限制变形要求等
- (3) 建筑材料。如选用材料的品种、质量、标号及耐久性等等
- (4) 运行可靠性。如建筑物各部分尺寸裕度和是否设置专门设备等。

## 第二节 工程规划及枢纽布置

### 一、水文、水利计算

#### (一) 水文分析与计算

进行水工设计时，必须通过对工程所在河流水文资料的分析，掌握该河流的暴雨、洪水、径流、泥沙等水文要素的特性，并计算符合设计要求的各水文特征参数及水文过程，为工程的规划设计提供水文依据。

##### 1. 设计年径流的分析与计算

年径流分析计算的主要任务是分析研究年径流量的年际变化和年内分配规律，提供符合工程规划设计要求的来水资料，包括反映年径流变化特性的统计参数、设计年径流量以及设计年径流的年内分配过程。

首先，对实测径流资料进行审查，确认其满足可靠性、一致性、代表性要求然后，划分水文年度，计算各年平均流量再按适线法对年平均流量系列进行频率分析，确定年平均流量的频率曲线及相应的均值、离散系数、偏态系数等统计参数。经对频率分析成果的综合分析并确认其合理性后，即可根据给定的设计枯水年、平水年、丰水年等设计频率，从年平均流量频率曲线上查算相应的设计年径流量。

设计年径流的年内分配过程，可采用典型年法推求，即先按年径流量接近、年内分配对工程不利等原则，从实测年份中选出设计枯、平、丰水年的典型年，并计算典型年各月径流量占全年径流量的百分数；再将已求得的设计年径流量乘以典型年各月的百分数，即得设计年各月径流量的分配过程

##### 2. 设计洪水的分析计算

设计洪水是水利工程防洪设计的依据设计洪水的推求分两大部分，即先推求设计洪峰、洪量，再推求设计洪水过程线

首先，对实测洪水资料进行可靠性、一致性、代表性的审查，使其满足分析计算的要求。再按年最大值法进行“选样”，即从同类型洪水资料中，每年分别选取最大洪峰流量值和不同时段（1天、3天、5天……）的最大洪量值，组成频率计算的样本系列。然后，对

洪峰流量系列及不同时段洪量系列分别用适线法绘制洪峰流量及不同时段洪量的频率曲线最后，根据设计洪水的设计频率，由这些频率曲线查得相应的设计洪峰流量和不同时段的设计洪量。若洪水资料中包含特大洪水，初估统计参数时，可采用矩法、三点法、绘线读点法等进行计算，但最后仍应根据配线成果选定统计参数。

工程上一般采用同倍比放大法或同频率放大法推求设计洪水过程线。先根据设计要求，选择峰高量大、在发生季节、地区组成、洪峰次数、历时长短、峰量关系等方面能代表大洪水的一般特性，且峰型较集中、主洪峰靠后，对工程不利的洪水过程线作为典型洪水过程线。同倍比放大法是用同一个放大系数（“以峰控制”时取设计洪峰流量与典型洪水洪峰流量之比，“以量控制”时取设计时段洪水总量与典型洪水的时段洪水总量之比），将典型洪水过程线放大成设计洪水过程线；同频率放大法是指对典型洪水过程线的洪峰流量和不同时段内的流量采用不同的放大系数进行放大，使放大后洪水过程线的洪峰流量及各计算时段的洪量同时符合设计频率的要求

有关设计暴雨及设计泥沙的资料，一般也采用频率分析的方法进行分析计算。

## (二) 水利计算

### 1. 兴利调节计算

兴利调节计算的主要任务是确定水库兴利库容、保证率及水库的供水水平（调节流量）之间的关系，以及相应的水库运用过程，从而为规划设计工程规模及进行工程效益分析提供依据兴利调节计算依据的基本原理是水库水量平衡原理，计算方法通常采用时历法

依据水量平衡原理，水库供水期调节流量（各用水部门平均综合用水流量）计算公式为

$$Q_d = (W_d - W_{dl} + V_r) / T_d \quad (1-1)$$

式中： $W_d$  表示供水期来水总量（ $m^3$ ）； $W_{dl}$  表示供水期水库蒸发、渗漏等损失水量（ $m^3$ ）； $V_r$  表示水库兴利库容（ $m^3$ ）； $T_d$  表示供水期总历时（ $s$ ）； $Q_d$  表示供水期调节流量（ $m^3/s$ ）

在  $V_r$  给定的前提下，可采用试算法或图解法确定水库调节流量，并可通过逐时段的水量平衡计算，得到相应的水库运用过程。

工程规划设计时，如果具有长期径流资料，可逐年对供水期进行调节计算求得调节流量；再通过频率计算，绘制调节流量与相应频率之间的关系曲线。利用该曲线，即可查得符合设计保证率的调节流量。简化计算时，可只对设计枯水年供水期进行调节计算，求得  $Q_d$ 。

水库非供水期调节计算的基本原理与供水期相同。在理想情况下，蓄水期及不蓄不供期的调节流量  $Q_s$  及  $Q_n$  计算公式分别为

$$Q_s = (W_s - W_{sl} - V_r) / T_s \quad (1-2)$$

$$Q_n = (W_m - W_{ml}) / T_m \quad (1-3)$$

式中： $W_s$ 、 $W$  分别表示蓄水期及不蓄不供期来水总量（ $m^3$ ）； $W_{sl}$ 、 $W_{ml}$  分别表示蓄水期及不蓄不供期损失水量（ $m^3$ ）； $T_s$ 、 $T_m$  分别表示蓄水期及不蓄不供期总历时（ $s$ ）。

### 2. 水电站水能计算

水电站水能计算的主要内容是要计算水电站的出力和发电量。水电站出力及发电量计

算公式为

$$N = AQH \quad (1-4)$$

$$E = NT \quad (1-5)$$

式中： $N$  为水电站的时段平均出力 (kW)； $A$  为水电站出力系数，大型水电站取 8.5，中型水电站取 8~8.5，小型水电站取 6~8.0； $Q$  为水电站引用流量 (m<sup>3</sup>/s)； $H$  为水电站时段平均水头 (m)； $E$  为水电站发电量 (kW·h)； $T$  为计算时段的小时数 (h)。

水电站水能计算可以在兴利调节计算的基础上进行，即根据调节计算确定的各时段水电站发电流量（调节流量）及时段末水库蓄水量，进一步计算确定时段平均水库水位、水电站下游水位及平均水头，并将水电站发电流量及时段平均水头代入水电站出力方程，即可求得时段平均发电出力

(1) 水电站保证出力计算。水电站保证出力是指水电站在长期工作中，符合水电站设计保证率要求的枯水期（供水期）内的平均出力。以年调节水电站为例，其保证出力计算方法如下：

在给定水库正常蓄水位和死水位的条件下，根据长期径流资料，逐年进行兴利调节和水能计算，求出水电站每年供水期各时段平均出力及各供水期的平均出力，在此基础上，绘制供水期平均出力的保证率曲线，该曲线上相应于设计保证率的供水期平均出力值，即作为年调节水电站的保证出力。

在规划设计阶段进行大量方案比较时，为节省计算工作量，可仅对水电站设计枯水年的供水期进行水能计算，并以该供水期的平均出力作为水电站保证出力。

对无调节及日调节水电站，须根据逐日平均流量值及其相应水头，计算日平均出力，并绘制其保证率曲线。曲线上与设计保证率对应的日平均出力，即为水电站保证出力

对多年调节水电站，应在对长系列中各枯水系列进行兴利调节和水能计算的基础上，确定枯水系列平均出力与保证率的关系，再根据设计保证率确定其保证出力。简化计算时，可采用设计枯水系列的平均出力作为保证出力

(2) 水电站多年平均年发电量计算。水电站多年平均年发电量计算是指水电站在多年工作时期内，平均每年所能生产的电能量。由此定义，可根据水电站长系列径流资料，按照水库调度图，逐时段进行水能计算，求出每年的出力变化过程及年发电量，再取全部年发电量数据的平均值，作为水电站多年平均年发电量。

在规划设计阶段，当比较方案较多时，只要不影响方案比较的结果，可采用较为简化的方法进行计算，如设计中水年法、三个代表年（设计丰水年、平水年、枯水年）法、设计平水系列法（适用于多年调节水电站）等。即对设计代表期逐时段进行水能计算，求出水电站在这些年份的年发电量，并取其平均值作为水电站多年平均年发电量计算过程中，若时段平均出力值大于水电站装机容量，则以装机容量值作为该时段平均出力值。

### 3. 水库洪水调节计算

水库洪水调节计算是水库防洪设计的重要工作内容。调洪计算时，入库洪水的大小须根据防洪标准及水工建筑物的设计标准来选定。水库调洪计算的基本原理是描述明渠非恒定流运动规律的圣维南方程组。实际工作中，常采用简化了的近似解法，如瞬态法等瞬态法用于水库调洪计算的实用公式为

$$\left\{ \frac{Q_1 + Q_2}{2} - \frac{q_1 + q_2}{2} \Delta t = \Delta V = V_2 - V_1 \right. \quad (1-6)$$

$$q = f(V) \quad (1-7)$$

式中： $Q_1$ 、 $Q_2$ 分别为时段初、末的入库洪水流量（ $\text{m}^3/\text{s}$ ）； $q_1$ 、 $q_2$ 分别为水库下泄流量（ $\text{m}^3/\text{s}$ ）； $\Delta t$ 为计算时段长度（ $\text{s}$ ）； $V_1$ 、 $V_2$ 分别为时段初、末水库蓄水量（ $\text{m}^3$ ）

根据调洪计算的初始条件，从第一时段起，逐时段联立求解上述二式，即可由各时段的  $V_1$ 、 $q$  求出  $V_2$ 、 $q_2$  两个未知数。具体计算可采用试算法或半图解法

## 二、工程参数选择

工程主要参数的选择是水利水电工程规划设计的重要任务这些参数包括水电站的装机容量以及水库的特征水位。

### （一）水电站装机容量的选择

水电站装机容量（ $N_h$ ）由其最大工作容量（ $N''_{h_{\max}}$ ）、备用容量（ $N_b$ ）及重复容量（ $N_r$ ）等部分组成。

#### 1. 水电站最大工作容量的确定

水电站最大工作容量是指设计水平年电力系统负荷最高时，水电站所能担负的最大发电容量。水电站最大工作容量的大小，与设计水平年电力系统的负荷图、系统内已建成电站在系统负荷图上的工作位置以及拟建水电站的天然来水情况、水库调节性能、经济指标等有关，一般须通过系统电力电量平衡的方法来确定。

对年调节水电站，一般按在枯水年供水期担任系统峰荷的运行方式，进行设计枯水年供水期的电力电量平衡计算，并根据水电站供水期保证电能值，确定其最大工作容量对多年调节水电站，则按在枯水年全年担任系统峰荷的运行方式，进行枯水年全年的电力电量平衡，并根据多年调节水电站的年保证电能值，确定其最大工作容量。日调节水电站在枯水期一般承担电力系统峰荷，据此可根据其保证出力及相应的日保证电能，直接通过电力系统设计水平年冬季典型日的电力电量平衡确定其最大工作容量。无调节水电站由于没有径流调节能力，一般只能担任电力系统的基荷，因此，无调节水电站最大工作容量即等于按历时保证率所求出的保证出力。

#### 2. 水电站备用容量的确定

为保证电力系统的供电质量和供电可靠性，系统中各电站除最大工作容量以外，还须设置一定的备用容量，包括负荷备用容量、事故备用容量和检修备用容量。水电站备用容量是整个电力系统备用容量的一部分。通常，水电站备用容量的确定方法是，先定出电力系统所需的备用容量，再按一定的原则在各电站之间进行合理分配，从而定出水电站承担的备用容量值。通常，无调节水电站不承担系统备用容量

（1）负荷备用容量。负荷备用容量是指用来维持电力系统标准频率和负担计划以外的短时负荷或超过正常最大负荷以外的脉动负荷所需要的容量。根据水利动能设计规范的规定，电力系统的负荷备用容量，可采用系统最大负荷的 5% 左右，大型电力系统可采用较小值。

担任电力系统负荷备用容量的电站，通常称之为调频电站。当系统负荷波动的变幅不大时，可由某一电站担任调频任务，当负荷波动的变幅较大时，尤其是电力系统范围较广、

输电距离较远时，应由分布在不同地区的若干电站分别担任该地区的调频任务。调频电站的选择应以能保证系统周波稳定、运行性能经济为原则。一般靠近负荷中心、具有大水库、大机组的坝后式水电站，应优先选作调频电站。对于引水式水电站，应选择引水道较短者作为调频电站。在选择下游有通航等综合利用要求的水电站作为调频电站时，应考虑下游流量和水位剧烈变化对航运等的不利影响。当系统内缺乏水电站担任调频任务时，亦可由火电站担任，只是由于火电站机组技术特性限制，担任系统的调频任务往往比较困难，且单位电能的煤耗费增加，因而常是不经济的。

(2) 事故备用容量 事故备用容量是指系统内某些机组发生事故时或电站预想出力突然下降时，为避免停电而设置的容量。根据水利动能设计规范，电力系统的事事故备用容量可采用系统最大负荷的 10% 左右，且不得小于系统中最大一台机组的容量。

电力系统的事事故备用容量，应分布在各主要电站上，并尽可能安排在正在运转的机组上。事故备用容量在水、火电站之间的分配，应根据各电站容量的比重、电站机组的可利用情况、系统负荷在各地的分布等因素确定。对于调节性能良好和靠近负荷中心的大型水电站，可多设置一些事故备用容量。初步计算时，一般可按水、火电站工作容量的比例分配。

(3) 检修备用容量。检修备用容量是指电力系统中为保证机组进行计划检修而专门设置的容量。系统检修备用容量的设置及其大小，应按系统电力、电量平衡和容量平衡的要求来确定。当系统年内负荷低落时期不能满足全部机组的年计划检修需要时，即需设置检修备用容量。在进行系统电力、电量平衡和容量平衡时，常按每台机组平均年计划检修所需时间进行安排，根据有关规程规定，水电站每台机组平均年计划检修所需时间为 10~15 天，火电站每台机组为 15~30 天。上述时间中已包括小修停机时间。

系统检修备用容量的设置，应根据电站的实际情况通过技术经济论证确定，一般以设置在火电站上为宜。

### 3. 水电站重复容量的选定

水电站重复容量是在必需容量（最大工作容量与备用容量之和）的基础上额外设置的，其目的是为了利用丰水期的多余水量，增发季节性电能，从而替代系统内火电站发电量，达到节省系统煤耗的目的。但是，在水电站上设置重复容量，就要额外增加水电站的投资和年运行费。因此，必须通过动能经济分析，合理选定经济上有利的水电站重复容量值。一般认为，当所增设的单位重复容量年利用时间大于其经济利用小时数  $h_r$  时，在经济上才是有利的。计算式为

$$h_r \geq k_h [(A/P, i, n) + p_h] / (\alpha f) \quad (1-8)$$

式中： $k_h$  为水电站补充千瓦造价（元/kW）； $(A/P, i, n)$  为年资金回收因子， $i$  为额定资金年收益率， $n$  为重复容量设备的经济寿命（ $n=25$  年）； $p_h$  为水电站补充千瓦容量的年运行费率， $p_h=2\% \sim 3\%$ ； $\alpha$  为系数， $\alpha=1.05$ ，表示水电站发  $1\text{kW} \cdot \text{h}$  电量可替代火电站  $1.05\text{kW} \cdot \text{h}$ ； $f$  为火电站发  $1\text{kW} \cdot \text{h}$  电量所需的燃料费 [元/（ $\text{kW} \cdot \text{h}$ ）]。

据此，应先通过调节计算，求出水电站在必需容量得到充分利用前提下各年的弃水流量及弃水出力过程，再统计各种弃水出力多年平均的年持续时间，并绘制弃水出力持续曲线，进而根据  $h_r$  的数值，确定水电站的重复容量。

#### 4. 水电站装机容量的选择

先计算  $N_{hi} = N''_{hsc} + N_{hs} + N_{sc}$ ，以此作为装机容量的初选值；再参考机组制造厂家的机组系列，根据水电站的水头与出力变化范围，通过方案比较，定出机组的型式、台数、单位容量和电站的装机容量值；然后进行电力系统的容量平衡，以检查装机容量及其机组能否满足设计水平年系统对电站容量及其他方面的要求，以及电站水库下游的灌溉、航运等综合利用要求是否能得到满足。规划阶段一般至少研究设计枯水年和设计平水年两个典型年度的容量平衡，编制相应的容量平衡图或平衡表当系统各方面的要求都得到较好满足时，方可最后定出水电站的装机容量

#### (二) 以发电为主的水库特征水位的选择

##### 1. 水库正常蓄水位的选择

水库正常蓄水位是指水库在正常运用情况下，为满足设计兴利要求，在开始供水前应蓄到的最高水位进行水电站水库工程规划设计时，必须通过全面的技术经济比较和综合的分析评价，选出合理的正常蓄水位方案。大致步骤如下：

(1) 根据设计任务书的要求，在河流规划的基础上，综合分析水库库区的淹没、浸没损失，坝址及库区的地形、地质条件，河流梯级开发规划方案，水库的蒸发、渗漏损失，工程建设所需的人力、物力、财力方面的具体条件，以及各水利部门的最低兴利要求等因素，确定正常蓄水位的上下限，并在此范围内拟定几个比较方案

(2) 对所拟定的每个比较方案，拟定水库的消落深度，进行径流调节计算和水能计算，求出各方案的水电站保证出力、多年平均年发电量、装机容量以及其他水利动能指标（如灌溉面积、城镇供水量等）

(3) 计算各个方案之间水利动能指标的差值，并选择合适的替代方案来补充。

(4) 计算各个方案水利枢纽各部分的工程量、建筑材料消耗量以及所需机电设备情况

(5) 计算各方案的淹没、浸没的实物指标和移民人数，并逐项估算所需费用

(6) 进行水利动能经济计算。计算各方案相应的工程投资和年运行费用，并在各水利部门之间进行投资费用的分摊根据各水利部门的效益指标及其应分摊的投资费用，计算水电站的造价及其在施工期内各年的分配。相应地，计算各替代方案的造价、年运行费和燃料费。在此基础上，计算各个方案的水电站年费用、相应替代方案的补充年费用和电力系统的年费用。

(7) 根据各方案系统年费用的大小，选出经济上最有利的正常蓄水位。最后，从政治、经济、技术、社会、环境等方面进行综合评价，保证所选出的水库规模符合地区经济发展的要求，而且是技术上正确的、经济上合理的、财务上可行的方案。

##### 2. 死水位的选择

死水位是指水库在正常运行情况下允许消落的最低水位一般情况下，水库水位将在正常蓄水位与死水位之间变动，其变幅即为水库消落深度在正常蓄水位与死水位之间的库容即为水库的兴利调节库容在正常蓄水位一定的前提下，死水位的选择，除应考虑各有关经济部门的综合效益外，还要考虑泥沙淤积的影响、水轮机运行情况、闸门制造及启闭机能力等因素，经综合比较后确定对以发电为主的水库，死水位选择的大致步骤如下：

(1) 在已定的正常蓄水位条件下，根据水库库容特性、综合利用要求、地形地质条件、

水工、施工、机电设备等要求，确定死水位的上、下限，并在上下限之间拟定几个死水位方案进行比较

(2) 对各个死水位方案，求出相应的兴利库容和水库消落深度，并对每个方案用设计枯水年或枯水年系列进行径流调节，得出各方案的调节流量及平均水头。

(3) 计算各方案的保证出力、多年平均年发电量，并通过系统电力电量平衡，求出各方案水电站的最大工作容量、必需容量和装机容量

(4) 计算各个方案的水工建筑物和机电设备的投资、年运行费以及各方案的年费用

(5) 为使各个死水位方案同等程度地满足系统对电力、电量的要求，计算各方案替代电站补充的必需容量及补充的年电量，从而求出不同死水位方案替代电站的补充年费用

(6) 根据年费用最小准则，并考虑综合利用要求以及其他因素，最终选出合理的死水位方案

### 3. 水库防洪特征水位的选择

水库防洪特征水位包括防洪限制水位、防洪高水位、设计洪水位及校核洪水位

(1) 防洪限制水位的选择。防洪限制水位是指水库在汛期允许兴利蓄水的上限水位，它是水库汛期防洪运用时的起调水位一般可根据河流的水文特性及汛后来水、供水情况，并结合溢洪道的型式、尺寸比较，确定水库的汛期防洪限制水位

1) 防洪限制水位与正常蓄水位重合。如果在整个汛期内，大洪水随时都可能出现，任何时刻都应预留一定防洪库容；汛期一过，入库来水量又小于水库供水量，水库水位开始消落，这样汛末的防洪限制水位，就是汛后的正常蓄水位。这种情况下，防洪库容与兴利库容完全不结合。

2) 设计洪水位与正常蓄水位重合。如果汛期洪水变化规律较为稳定，或者洪水出现时期虽不稳定，但所需防洪库容较小，则在汛期初，水库只允许蓄到防洪限制水位，到汛末水库再继续蓄到正常蓄水位。这时，可根据汛后蓄水时期内各时段的入库水量及出库水量，逆时序反求汛期的防洪限制水位。这是防洪库容与兴利库容完全结合的情况，水库这部分容积将得到充分的综合利用。

3) 防洪库容与兴利库容部分结合这是介于上述两种情况之间的情况此时，防洪限制水位低于正常蓄水位，设计洪水位比正常蓄水位高可通过必要的方案比较确定防洪限制水位。

此外，实际工作中，还常根据河流洪水发生规律及工程规划设计的要求，研究采用分期防洪限制水位的合理性。

(2) 防洪高水位的选择防洪高水位是指当遇下游防护对象的设计标准洪水时，水库为控制下泄流量而拦蓄洪水，这时在坝前达到的最高水位防洪高水位的选择可通过方案比较法进行。具体来说，先假设若干个下游安全泄流量方案，通过水库调洪计算，求出各方案所需的防洪库容及相应的防洪高水位；然后分别计算各方案由于设置防洪库容所需增加的坝体和泄洪工程的投资、年运行费和年费用，以及各方案相应堤防工程的年费用；再求出总的年费用；最后，根据总的年费用最小的原则，并征求有关部门对堤防工程等方面的意见，经综合分析比较后定出合理的防洪高水位、相应的下游安全泄流量以及相应的水库下游堤防高程。

(3) 设计洪水位及校核洪水位的选择。设计洪水位是指水库遇大坝设计洪水时，在坝前达到的最高水位校核洪水位是指水库遇大坝校核洪水时，在坝前达到的最高水位在防洪限制水位、下游安全泄流量以及溢洪道型式、尺寸均一定的情况下，分别对水库的设计洪水及校核洪水进行调洪计算，即可求出水库的设计洪水位及校核洪水位。

必须指出，水库的防洪限制水位、下游安全泄流量、溢洪道型式、尺寸以及设计洪水位、校核洪水位之间都有着密切的关系，有时需反复调整，反复修改，直至符合各方面的要求。

### 三、环境评价

在水利水电工程的规划设计阶段，必须研究工程建设对环境的影响问题，作出正确的环境影响评价，以便进行方案比选及采取相关对策措施。

水利水电工程的环境影响包括对自然环境和社会环境的影响两个方面其中，对自然环境的影响主要有对水文、气象、土壤、地貌、地质、地震、河道、水质、植物群、动物群的影响等；对社会环境的影响包括对人口、土地利用、交通、风景区、文物古迹的影响以及对人类健康的影响等。

水利水电工程环境影响评价的主要内容包括环境状况调查、环境影响识别、环境影响预测和综合评价等其中，环境状况调查是指对拟建工程影响地区的自然环境和社会环境状况进行调查了解，为分析环境现状和进行环境影响预测、评价提供基础资料和依据

环境影响识别是指在环境状况调查的基础上，选择进行评价的环境组成和环境因子，确定环境组成和环境因子在环境总体中的相对重要程度即从各个环境因子中，通过影响性质和影响程度的识别，筛选出主要环境因子及其组成的各主要环境问题。水利水电工程的环境影响因子很多，对具体工程，应根据工程的功能和特性，结合工程影响地区的环境特点，并参考类似工程环评经验，从众多因子中初选出一部分因子，进行环境影响性质和重要程度的识别。工程对环境的影响性质是多方面的，有有利影响与不利影响、可逆影响与不可逆影响、短期影响与长期影响、直接影响与间接影响等。环境因子的重要程度用环境因子权重来表示。确定环境因子权重，可采用专家评估法、层次分析法、灰色统计法等方法。

环境影响预测是指对已确定评价的环境因子，由于工程实施的结果可能产生的变化进行预测。环境影响预测的方法很多，可分为定性分析法和定量算法两类。应根据环境因子的不同特性，选用不同的方法进行预测。如在水利水电工程建设中，对地貌、地质、土壤、文物古迹等环境因子，往往不可能或不完全可能用定量衡量或描述其变化，只能用定性分析法，对它的未来环境或可能变化情况作叙述性的或非定量的描述。常用的定性分析法有类比法、机理分析法、生态习性分析及专家评估法等。而对有些环境因子，如降水、气温、水温、水质等，其性能或技术指标可以量化描述，因此可用定量算法来预估它们受工程建设影响造成数量上的变化。定量算法有数学模型法、物理模型法、图解模型法等。实际工作中，常常采用定性分析与定量计算相结合，以提高预测的可靠性。

综合评价是在环境因子预测、评价的基础上，将工程建设对各环境因子产生的影响和改变状况，从总体上进行分析和评价，为方案比选提供科学依据。环境影响综合评价的方法也分为定性分析和定量分析两类，其中，常用的定性分析方法有判别法、清单法、矩阵

法、叠图法、网络法等，定量分析方法有分级加权一览表法、矩阵分析法、环境质量指标法、模糊评判法以及灰色关联分析法等此外，扩大的投资-效益分析法也是发展中国家进行环境评价时应用较广的方法之一。采用该法时需对工程建设的各种环境影响深入分析并进行货币化，再进行经济的益本比较但应注意，分析过程中，对一些不能量化或货币化的因子，如人的生命、人群健康等因素，必须保留，最后评价和决策时一并考虑。

#### 四、经济评价

经济评价是水利水电建设项目规划设计工作的重要内容，也是项目优选与科学决策的重要依据，主要包括国民经济评价和财务评价两大部分。

##### （一）国民经济评价

国民经济评价是指从全社会国民经济的角度出发，分析用影子价格计算项目所需投入的费用和可以获得的效益，评价建设项目的经济合理性。为此，经济评价时，不仅应计及项目的直接费用和直接效益，而且还应计及其明显的间接费用和间接效益，以全面准确地反映项目的实际效果

项目的费用应包括项目的固定资产投资、流动资金和年运行费。其中，固定资产投资应包括项目达到设计规模所需由国家、企业和个人以各种方式投入的主体工程和相应配套工程的全部建设费用。流动资金应包括维持项目正常运行所需购买燃料、材料、备品、备件和支付职工工资等的周转资金。年运行费应包括项目运行初期和正常运行期每年所需支出的全部运行费用。项目的效益，按其功能可划分为防洪效益、灌溉效益、城镇供水效益、水力发电效益、航运效益等。其中，水力发电效益应包括水电站容量效益和电量效益。

进行项目的国民经济评价时，应按有关规范规定的原则和方法计算项目的效益和费用，以项目的经济效益费用流程报表反映其在各年的效益、费用和净效益流程，并据以计算其经济内部收益率、经济净现值、经济效益费用比等评价指标，分析其经济合理性。

##### （二）财务评价

财务评价是指从项目财务核算单位的角度出发，分析用财务价格计算项目所需的支出和可以获得的效益，评价建设项目的财务可行性。项目的财务支出应包括建设项目总投资、年运行费、流动资金和税金等费用。项目的财务收入应包括出售水利产品和提供服务所获得的收入。进行项目的财务评价时，应根据现行财税制度和现行财务价格，分析测算项目直接发生的实际收入和支出，编制财务报表，计算财务内部收益率、投资回收期、财务净现值、资产负债率、投资利税率、固定资产投资借款偿还期等评价指标，据以考察项目的盈利能力、清偿能力等财务状况，判别项目的财务可行性。

此外，为了全面比较项目在经济上的各种利弊得失，应在国民经济评价和财务评价的基础上，结合有关单位经济指标（如水电站单位千瓦投资、单位发电量投资、单位电能成本）、单位实物指标（单位装机容量、单位发电量、单位库容、单位灌溉面积、单位供水量的土石方工程量、混凝土工程量、三材耗用量、淹没耕地面积、迁移人口数和所需劳动工日数）等因素进行综合经济评价分析。

##### （三）方案比选

根据水利水电工程的特点，其设计标准和工程规模应通过对各种可能的方案进行全面分析对比，合理选定。方案比选应根据国民经济评价结果确定，并视项目的具体条件和资

金情况，采用差额投资经济内部收益率法、经济净现值法、费用现值法及年费用法等方法进行

一般来说，多方案比较时，经济净现值大的方案经济效果好；当按投资现值由小到大依次两两比较时，若差额投资经济内部收益率大于或等于社会折现率，则投资现值大的方案经济效果好。当各方案的效益相同或基本相同时，应选择其中费用现值较小的方案，或选择其中等额年费用较小的方案。

由于经济分析比较中涉及因素众多，各主要参数及经济指标一般都含有一定的误差，因此，应当对所选最优方案经济效果的稳定程度进行分析，即应在各项计算的基础上，分析研究影响工程经济效果的主要因素，按照其可能的变动范围，进行敏感性分析，并列出的效果指标，供决策时参考

此外，对具有综合利用功能的水利建设项目，在进行方案研究、比较时，应根据项目的各项功能，对项目的投资和年运行费进行分摊，分析项目各项功能的合理性，协调各项功能的要求，合理选择项目的开发方式和开发规模

## 五、枢纽布置

### （一）水利枢纽的分类及布置原则

水利枢纽按承担任务的不同可分为防洪枢纽、灌溉（或供水）枢纽、发电枢纽、航运枢纽等。大多数情况下水利枢纽都是多目标的综合利用枢纽按其作用水头的大小又可分为高水头（ $H > 70\text{m}$ ）、中水头（ $30\text{m} < H < 70\text{m}$ ）和低水头（ $H < 30\text{m}$ ）水利枢纽。按拦河坝的型式还可分为重力坝枢纽、拱坝枢纽、土石坝枢纽及水闸枢纽等水利枢纽布置须充分考虑地形、地质条件，使各种水工建筑物都能布置在安全可靠的地基上，并能满足建筑物的尺度和布置要求以及施工的必需条件。枢纽布置必须使各个不同功能的建筑物在其位置上各得其所，在运用中相互协调，充分有效地发挥所承担的任务；各个水工建筑物单独使用或联合使用的水流条件良好，上下游的河道冲淤变化不影响或少影响枢纽的安全运行，结构强度满足要求，即技术上安全可靠。在满足基本要求的前提下，力求建筑物布置紧凑，一物多用，减小工程量、降低造价；同时要充分考虑运行管理的便利和施工的方便，枢纽的外观与周围环境协调，在可能的情况下尽量考虑美学要求。一个大型水利枢纽工程的总体布置是一项复杂的系统工程，需要按系统工程的分析方法进行论证确定。

### （二）坝址、坝型选择

坝址、坝型选择与枢纽布置密切相关，不同的坝轴线适于采用不同的坝型和枢纽布置，同一坝址也可以有不同的坝型和枢纽布置可供选择通常是选择不同的坝址和相应的坝轴线，作出不同坝型的各种枢纽布置方案，通过技术经济比较择优选出坝轴线位置及相应的合理坝型和枢纽布置。

坝址地质条件是水利枢纽设计的重要依据之一，对坝型选择和枢纽布置往往起决定性作用。理想坝址地质条件是强度高、透水性小、不易风化、没有构造缺陷的岩基但理想的天然地基是很少的。一般来说，坝址在地质上总是存在这样或那样的缺陷。因此，在选择坝址时应从实际出发，针对不同情况采用不同的地基处理方法，以满足工程要求坚实的岩基具有较高的承载力和抵抗冲刷防止渗透的能力，对坝型选择几乎没有什么特别的限制：砾石地基经过充分压实，对土坝、堆石坝和低混凝土坝还是适合的，但要特别注意地

基的渗流控制问题；粉砂、细砂地基如设计适当也可以修建低混凝土重力坝和土坝，其主要问题是防止沉陷及渗流问题；粘土地基适于建土坝，不宜建混凝土坝和堆石坝。在非均质地基上建坝须进行专门的地基处理还可以在枢纽布置和坝型选择上设法适应坝址地质条件，比如沿坝轴线分段选用不同坝型或将坝轴线转折。选择坝址时，不仅要慎重考虑坝基地质条件，还要对库区及坝址两岸的地质情况予以足够的重视。既要使库区及坝址两岸尽量减少渗漏水量，又要使库区及坝址两岸的边坡有足够的稳定性，以防因蓄水而引起滑坡现象。

坝址地形条件与坝型选择和枢纽布置有着密切的关系，地形条件在很大程度上会影响坝址。一般来说，坝址宜选在河谷狭窄地段，坝轴线较短，可以减少坝体工程量；但对一个具体枢纽来说，还要考虑坝址是否便于布置泄洪、发电、通航等建筑物以及是否便于施工导流；枢纽经济与否应由枢纽总造价来衡量。因此需要全面分析，综合考虑，选择最有利的坝址对于多泥沙的河道，要考虑坝址位置是否对取水防沙有利；对有通航要求的枢纽，还要注意布置通航建筑物对河道水流形态的要求，坝址位置要便于上下游引航道与通航过坝建筑物衔接；对于引水灌溉枢纽，坝址位置要尽量接近用水区，缩短引水渠长度，节省引水工程量

此外，坝区建筑材料、施工条件、综合效益及环境保护也是必须详尽考虑的。对不同坝址与相应的坝型选择，要综合考虑防洪、发电、灌溉、航运等各部门的经济效益。还要考虑库区的淹没损失和枢纽上下游的生态影响等，对环境的考虑是设计大坝的一项非常重要的工作。环境保护的要求会影响坝址、坝型的选择，还会使工程的总造价增加。

### （三）枢纽布置的要求

在进行水利枢纽布置时应全面考虑运用、施工、管理、技术经济等问题，一般应进行多方案比较。在保证方便和安全可靠的前提下，力求做到节省工程量、便于施工、缩短工期，优选技术经济效益最佳的方案。具体地说，有下列几方面的要求

#### 1. 运用方面

枢纽布置应首先满足建筑物正常工作的要求，避免各建筑物之间相互干扰，保证在各种工作条件下，都能完成枢纽所担负的任务。灌溉取水建筑物应保证按照水量及水质的需要为灌区提供灌溉用水。溢洪道或泄洪隧洞的布置应保证安全泄洪，进口水流平顺，出口水流最好与原河道主流一致，尽量减小对其他建筑物正常运行的影响。水电站枢纽布置主要应保证电站运用可靠，水头损失较小，因此要求进口水流平顺，尾水通畅。通航建筑物布置应能使船舶顺利航行，有足够的过船能力。船闸的进出口要求水流平顺和水面平稳。如船闸引航道进口有明显的横向流速或泥沙淤积，对船舶航行不利，应设置导墙或导堤，使其与溢流坝或其他泄水建筑物分开，避免相互干扰此外，枢纽对外和内部交通线路也要合理布置，以便满足交通运输的要求。

#### 2. 施工方面

枢纽布置应与施工导流、施工方法和施工进度综合考虑，力求施工方便，程序简单，工期短，劳动力省。施工设计时应尽可能采用在洪水季节不中断施工的导流方案，较好安排各建筑物的施工程序和施工进度，使枢纽中的部分建筑物及早投入运行，尽快发挥效益。

### 3. 环境方面

水利枢纽的兴建会使周围环境发生明显的改变。特别是大型水库的形成成为发展水电、灌溉、供水、养殖、旅游等水利事业和防止洪水灾害创造了有利条件，同时也带来了一些不利的影响。水利枢纽布置要求尽量避免或减轻对周围环境的不利影响，并充分发挥有利的影响。对蓄水枢纽在汛期要充分利用泄水和输水建筑进行排沙，以减少水库淤积，延长水库寿命。布置泄水和输水建筑也要便于配合使用，以减小淹没及浸没损失，降低防洪投资。对于下游衔接在布置上也要采取适当措施，以减轻下游河床冲刷、淤积、回流等对尾水的影响。还要注意建筑的美观，使枢纽的外观与周围环境相协调。

### 4. 经济方面

枢纽布置应在技术可行的条件下，力求经济最优，应在满足建筑物的稳定、强度、运用及远景规划等要求的前提下，使枢纽的总造价和年运转费最低。在不影响运用且互不矛盾的前提下，应尽量发挥各建筑物的综合利用能力。如利用导流洞改建为泄洪洞、尾水洞；导流底孔改建为深式泄水孔，兼起放空水库的作用；利用排沙洞泄洪等。在河床较窄，并列布置溢流坝和水电站厂房有困难时，可以考虑采用坝内式厂房、溢流式厂房或地下厂房等布置形式。要力求缩短枢纽建设工期，考虑提前发电的可能性和分期实施的合理性。大力推广应用新技术、新材料等，也可有效地降低工程造价。

枢纽布置是一项复杂的系统的工作，存在许多非结构性问题，需借助水工专家的实践经验和综合推理，并不是一般确定性算法所能完全解决的，水利枢纽布置专家系统的研究为今后的工作指出了方向。

## 第三节 挡水建筑物及泄水建筑物

### 一、挡水建筑物

常见的挡水建筑物有坝、水闸、堤、海塘等。拦河修建的河床式电站、船闸也可视为挡水建筑物，本书重点讨论坝。

#### (一) 重力坝

重力坝按结构形式分为：实体重力坝、宽缝重力坝和空腹重力坝；按泄水条件可分为非溢流坝和溢流坝。重力坝的坝轴线一般为直线，有时由于地形、地质条件的限制，也可采用折线或曲线。设计要点如下。

##### 1. 坝体断面的拟定

坝顶在最高洪水位上要留有一定的安全超高。坝顶宽视运用和交通的需要而定。坝的上游面通常做成铅直面，或略向上游倾斜，一般坡度  $n=0\sim 0.2$ ；坝的下游面通常为均一的坡度，一般坡度  $m=0.6\sim 0.8$ 。坝底宽，一般为坝高的  $7/10\sim 9/10$ 。坝体断面需根据稳定和应力要求进行优化设计，并考虑布置和运行需要，作某些修正。

##### 2. 溢流坝和泄水孔的布置

在进行坝体布置时，首先要考虑溢流坝和泄水孔口的位置，满足泄洪与放水的需要，并与下游平顺连接，不致淘刷坝基、岸坡和相邻建筑物基础。泄水孔口高程和尺寸应根据水库调洪计算和水力计算，结合闸门和启闭机条件确定。溢流面要求有较高流量系数，同时

不产生空蚀。坝下设置消能工，综合考虑地形、地质、枢纽布置和水流条件，比较选定其形式和尺寸。一般溢流坝段与厂房坝段应分列布置，当河谷狭窄时，也可经厂房顶溢流。

### 3. 稳定分析

抗滑稳定分析主要核算坝体沿坝基面或沿地基深层软弱结构面抗滑稳定的安全度。当岸坡坝段地形陡峭时，还需核算岸坡坝段在三向荷载作用下的抗滑稳定。常用的沿坝基面稳定分析计算方法有以下两种：

(1) 抗剪断强度公式或称剪摩公式：

$$k' = \frac{f' \sum W + C' A}{\sum P} \quad (1-9)$$

(2) 抗剪强度公式或称摩擦公式：

$$k = \frac{f \sum W}{\sum P} \quad (1-10)$$

上两式中： $k$ 、 $k'$ 为安全系数； $\sum W$ 和 $\sum P$ 分别为作用于坝体上的全部荷载对滑动面上的法向分力和切向分力； $f$ 、 $f'$ 和 $C'$ 分别为滑动面上的摩擦系数、抗剪断摩擦系数和抗剪断粘聚力； $A$ 为坝基截面积。

目前美国、独联体国家和日本等国均趋向采用式(1-9)进行计算。在我国，有关技术规范规定：当坝基内不存在可能导致沿坝基岩体内部滑动的软弱结构面时，应按式(1-9)计算沿坝基面的抗滑稳定安全系数，否则按式(1-10)计算抗滑稳定安全系数。 $f$ 、 $f'$ 和 $C'$ 值的选取应根据试验结合经验确定。

### 4. 应力分析

设计的坝体断面需满足规定的应力条件。在基本荷载组合下，重力坝坝基面的最大垂直正应力应小于坝基容许压应力，最小垂直正应力应大于零；在地震情况下，坝基容许出现不大的拉应力。对于坝体应力，在基本荷载组合下，下游面最大主压应力不大于混凝土的容许压应力；上游面的最小主压应力应大于0。应力分析的方法可归纳为理论计算和模型试验两大类。目前常用的模型试验方法有偏光弹性试验、激光全息试验和脆性材料试验。理论计算方法有重力法和有限单元法。

重力法又称材料力学方法，它计算简便、适用范围广，已经过模型试验和工程实践的验证，有一套成熟的应力控制标准。重力法的主要假定是：坝体水平截面上的垂直正应力 $\sigma_y$ 呈直线分布，其计算公式为

$$\sigma_y = \frac{\sum W}{A} \pm \frac{x \sum M}{J} \quad (1-11)$$

式中： $\sum W$ 、 $\sum M$ 分别为作用于坝段上全部荷载的法向力总和及对计算截面形心轴的力矩总和； $A$ 为计算截面面积； $J$ 为计算截面积对形心轴的惯性矩； $x$ 为计算点到形心轴的距离。

有限单元法进行重力坝的应力分析时，一般可采用二维有限元法。属于空间性质的问题，则采用三维有限元法。

对于中、低坝，当地质条件较简单时，可只用材料力学方法计算坝的应力对于高坝，尤其是当地质条件复杂时，除用材料力学方法计算外，宜同时进行模型试验或采用有限元法进行计算。