

第一章 水 工 总 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；它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，其中通过大气循环，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 4.7×10^5 亿 m^3 ，按全球人口计，人均约为 9000 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 2.78×10^4 亿 m^3 ，而按人口平均，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也很不均衡。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。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，水利设施失修，灾害频仍，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 年、1933 年、1935 年、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。

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。经过近 50 年的努力，全国整修和兴建了约 26 万 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；水电站装机容量从 1949 年的 16.3 万 kW 发展到目前的 6000 万 kW；灌溉面积从 2.4 亿亩增至 7 亿亩以上，3.4 亿亩的易涝耕地中有 2/3 得到了初步治理，1.1 亿亩盐碱地已改良 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及其他综合利用效益。

尽管如此，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的能力，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，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。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，水环境保护应是水利建设的组成部分，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产生不利影响（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。

第二节 水利枢纽和水工建筑物

一、基本概念

水工建筑物就是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。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的需要，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，虽同时可能还有其他综合利用效益，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 70 m 以上者为高水头枢纽，30~70 m 者为中水头枢纽，30 m 以下者为低水头枢纽。

因自然因素、开发目标的不同，水利枢纽的组成建筑物可以是各式各样的。图 1-1 为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平面布置图。其主要建筑物包括：

(1) 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

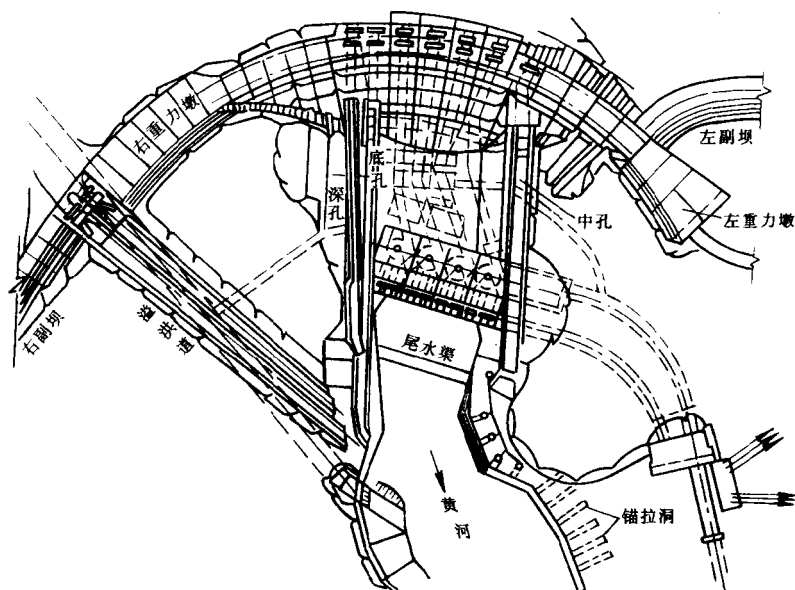


图 1-1 龙羊峡水电站平面布置图

坝从坝基最低开挖高程 2432 m 至坝顶高程 2610 m 最大坝高 178 m 从而使上游可形成一个总库容达 247 亿 m^3 的水库。

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

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

(4) 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 2505 m 和 2480 m，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。

(5) 坝后式水电站。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 1-2 为甘肃省白龙江碧口水电站，其组成建筑物包括：

(1) 心墙土石坝。最大坝高 101 m 用以拦河壅水、蓄水 形成库容 5.16 亿 m^3 的水库。

(2) 溢洪道。用以宣泄水库多余洪水。

(3) 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。

(4) 排沙隧洞。用以排除部分水库泥沙，延长水库寿命。

(5) 水电站引水建筑物。包括引水隧洞、调压井和压力钢管等。

(6) 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 1-2 中未示出）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很大。

图 1-3 为长江干流上著名的葛洲坝水利枢纽平面布置图。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。其主要建筑物包括：

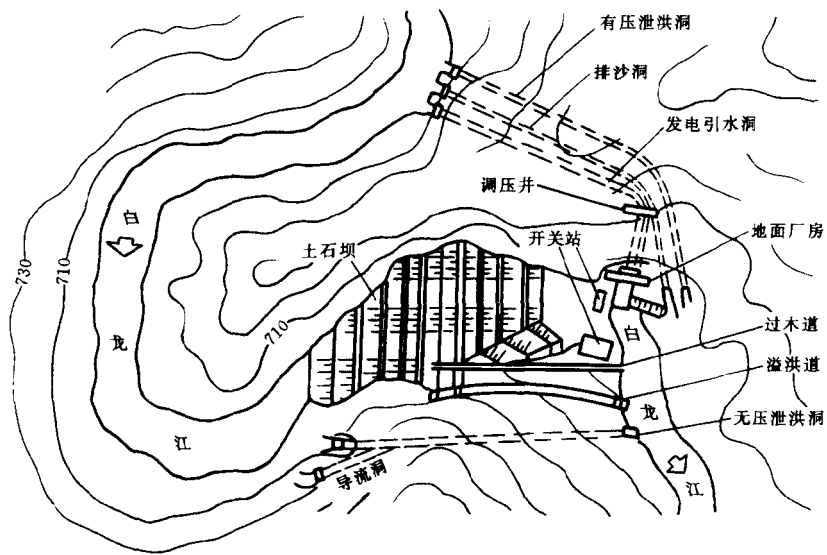


图 1-2 碧口水电站平面布置图

(1) 二江泄水闸。是枢纽控制水流的主要建筑物，共 27 孔，每孔净宽 12 m，高 24 m，弧形闸门控制，闭门时拦截江流，稳定上游水位（库容 15.8 亿 m^3 ，无调洪性能），开门时泄水，排沙防淤，满足河势要求，最大泄流量为 83900 m^3/s 。

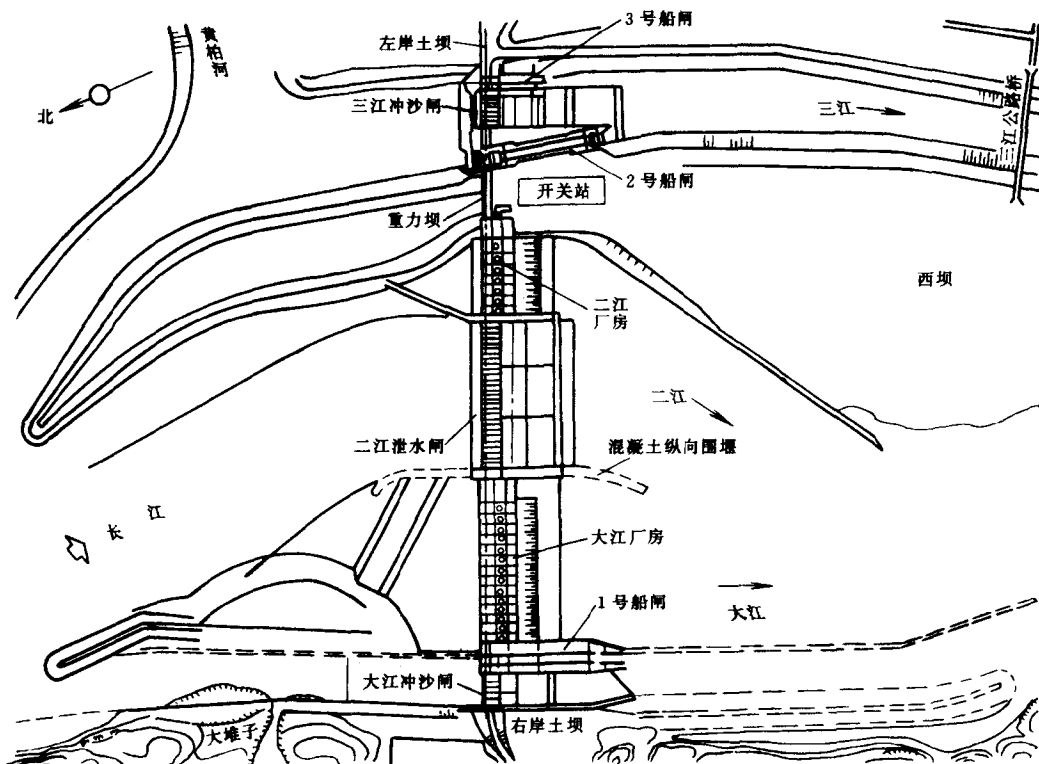


图 1-3 葛洲坝水利枢纽平面布置图

(2) 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 280 m，净宽 34 m，槛上最小水深 5 m，是我国目前最大的船闸。3 号船闸闸室有效长度为 120 m，净宽 18 m，槛上最小水深 3.5 m。1、2 号船闸可通过 1.2 万~1.6 万 t 船队，一次过闸时间 51~57 min；3 号船闸可通过 3000 t 以下船队，一次过闸时间 40 min。

(3) 河床式水电站。设计水头 18.6 m，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。

(4) 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，防止航道淤积。具体运行条件是：通航期间，航道内为静水；汛期、汛末及低水期根据实际航道淤积情况，开闸拉沙、冲沙。实践表明效果良好。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。

下面介绍我国正在建造中的、当今世界最大的水利枢纽工程——长江三峡工程。该工程具有防洪、发电、航运等综合效益，工程的技术经济指标见表 1-1，枢纽布置如图 1-4 所示。

三峡工程坝址位于宜昌市三斗坪，在已建成的葛洲坝水利枢纽上游约 40 km。坝址基岩为坚硬完整的花岗岩，适于建高坝。坝址处河谷较开阔，岸坡较平缓，江中有中堡岛顺江分布，这些条件有利于大流量泄洪坝段、大容量电站坝段

表 1-1 三峡水利枢纽主要指标

项 目 名 称		单 位	指 标	备 注
水库	正常蓄水位	m	175	初期 156
	防洪限制水位	m	145	初期 135
	枯季消落低水位	m	155	初期 140
	设计洪水位	m	175	
	校核洪水位	m	180.4	
	总库容	亿 m ³	393	
	防洪库容	亿 m ³	221.5	
	水库库面面积	km ²	1084	
大坝	型式		混凝土重力坝	
	坝顶高程	m	185	
	最大坝高	m	175	
	轴线全长	m	2309.47	
电站	型式		坝后式	
	装机容量	MW	18200	初期 3600
	保证出力	MW	4990	初期 700
	平均发电量	亿 kW·h	846.8	
	单机容量	MW	700	
	装机台数	台	26	
船闸	型式		双线五级连续梯级	
	闸室尺寸	m	280×34×5	
升船机	型式		单线单级垂直提升式	
	承船厢尺寸	m	120×18×3.5	
水库淹没	耕地(含果园)	10 ³ hm ²	27.82	1992 年调查
	淹没区人口	万人	84.41	1992 年调查
工程施工	土石方开挖	万 m ³	10259	
	土石方填筑	万 m ³	2933	
	混凝土浇筑	万 m ³	2715	
	钢材	万 t	28.08	
	钢筋	万 t	35.43	
	施工总工期	年	17	
	第一批机组发电	年	11	
静态总投资		亿元	900.9	1993 年 5 月价格
其中：枢纽工程		亿元	500.9	1993 年 5 月价格
水库淹没补偿		亿元	400	1993 年 5 月价格

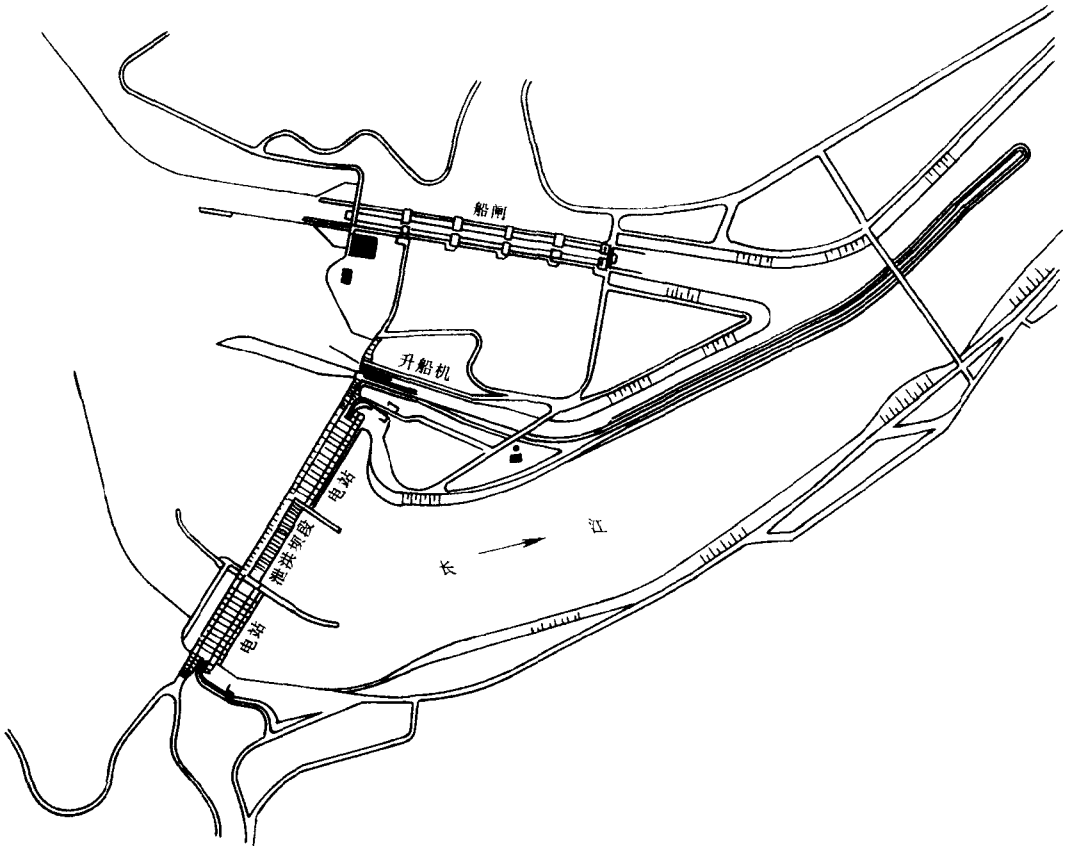


图 1-4 三峡工程枢纽布置图

和大尺寸通航建筑物沿坝轴线并列布置与运行，且便于施工和分期导流。事实上，对施工有利成了选用三斗坪坝址（而非选用地质条件亦佳但有陡岸狭谷的其他坝址，如同坝段的太平溪坝址）的最主要因素。不过也有专家认为，三斗坪这样的枢纽布置使大坝挡水前缘较其上、下游天然河谷还宽，可能导致以后运行中泥沙问题的复杂化。

三峡枢纽的主要建筑物由大坝、水电站、通航建筑物三大部分组成。拦河大坝为混凝土重力坝，坝轴线全长 2309.47 m，坝顶高程 185 m，最大坝高 175 m。大坝的泄洪坝段居河床中部，前缘总长 483 m，共设有 23 个深孔和 22 个表孔。深孔每孔净宽 7 m，高 9 m，进口孔底高程 90 m；表孔每孔净宽 8 m，堰顶高程 158 m，即总净宽 176 m 的溢流重力坝，溢流坝的闸墩厚达 13 m，因为深孔在其下部穿过。深孔在进口闸门控制段下游通过断面突扩成为无压孔，表孔和深孔都采用鼻坎挑流消能，全坝最大泄洪能力为 11.6 万 m^3/s 。

水电站采用坝后式，分设左、右两组厂房。左岸厂房全长 643.6 m，安装 14 台水轮发电机组；右岸厂房全长 584.2 m，安装 12 台水轮发电机组。全电站 26 台机组均为单机容量 70 万 kW 的混流式水轮发电机，总装机容量为 1820 万 kW，年平均发电量为 846.8 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。电站以 500 kV 交流输电线向华中、川东送电，以 ± 600 kV 直流输电线向华东送

电，出线共 15 回。在右岸还留有为后期扩机 6 台（420 万 kW）的地下厂房位置，其进水口与工程同步建成。

通航建筑物包括船闸和升船机。船闸为双线五级连续梯级船闸，单级闸室的有效尺寸为 $280\text{m} \times 34\text{m} \times 5\text{m}$ （长 \times 宽 \times 坎上水深），可通过万吨级船队。升船机为单线一级垂直提升式，承船厢有效尺寸为 $120\text{m} \times 18\text{m} \times 3.5\text{m}$ ，一次可通过一条 3000 t 级的客货轮。施工期设一级临时船闸通航，闸室有效尺寸为 $240\text{m} \times 24\text{m} \times 4\text{m}$ 。

三峡枢纽建成后将有巨大效益。首先是防洪。由于其地理位置优越，控制流域面积可达 100万 km^2 水库防洪库容为 221.5 亿 m^3 ，可使荆江河段防洪标准从 10 年一遇提高到百年一遇；遇千年一遇或更大洪水，配合分洪、蓄洪工程的运用，可防止荆江大堤溃决，减轻中下游洪灾损失和对武汉市的洪水威胁，并为洞庭湖区的根治创造条件。

三峡水电站提供的可靠、廉价、清洁和可再生的能源，每年约可替代原煤 4000 万 ~ 5000 万 t，对其供电地区的经济发展和减少环境污染可起重大作用。

三峡水库将显著改善宜昌至重庆的 660 km 航道，万吨级船队可上达重庆港，航道单向通过能力可由 1000 万 t 提高到 5000 万 t。经水库调节，宜昌下游枯水季最小流量可从 $3000\text{m}^3/\text{s}$ 提高到 $5000\text{m}^3/\text{s}$ 以上，显著改善了通航条件。

三峡水库也确有对环境、生态等不利影响和移民、淹没损失等问题。但权衡利弊，还是利远大于弊。

二、水工建筑物的分类

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。按功用通常可分为以下几类。

1. 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。

2. 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他建筑物安全，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。

3. 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。

4. 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。

5. 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。

6. 专门性水工建筑物

为水利工程中某些特定的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。相对专门性水工建筑物而言，前面 5 类建筑物也可统称为一般性水工建筑物。

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。

水工建筑物按使用期限还可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，水工建筑物具有下列特点。

1. 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，甚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。例如，当水具有侵蚀性时，会使混凝土结构中的石灰质溶解，破坏材料的强度和耐久性；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。

2. 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。例如，规模和效益大致相仿的两座坝，由于地质条件优劣的不同，两者的型式、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

的特征进行，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。

3. 施工建造的艰巨性

在河川上建造水工建筑物，比陆地上的土木工程施工困难、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。

4. 失事后果的严重性

水工建筑物如失事会产生严重后果。特别是拦河坝，如失事溃决，则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与某些自然因素或当时人们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，后者尤应杜绝。

四、现代水工建筑物的发展

由于流体力学、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、建造了装机容量为 66 万 kW 的新安江水电站宽缝重力坝，其最大坝高 102 m，溢流坝与坝后厂房顶溢流式水电站结合，枢纽布置非常紧凑，为我国大型水利工程建设开创了良好的先例。随后，建成了多座坝高 100 m 上下的各型混凝土坝。60 年代，在黄河干流强地震区建成了坝高 147 m 的刘家峡水电站实体重力坝，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宝贵的经验。70 年代，在石灰岩岩溶地区建成了坝高 165 m 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 4400~4800 m³/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了新水平。80 年代我国建造的高坝工程以黄河“龙头”的龙羊峡重力拱坝为代表，其坝高为 178 m，上游可形成 247 亿 m³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。坝高 150 m 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。目前，我国已具有设计和建造各种型式的高坝的能力，坝高超过 200 m 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 240 m。

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，且形式多样，施工方法也多样。无论是通常的碾压式坝，还是水中倒土、水力冲填、定向爆破等特殊筑坝技术，都不乏成功的实例，并且还建成了很多小型的溢流土石坝。我国建成的高土石坝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，两者的坝高分别达 101 m 和 105 m。与

土石坝本身密切相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 44 m，效果很好。

目前世界上 100 m 以上的高坝超过 400 座，差不多是 1950 年以前的 10 倍，其中 200 m 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 300 m 的两座坝都是土石坝，其中前苏联罗贡斜心墙土石坝高达 325 m，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 170 m 深的深孔水泥灌浆和 131 m 深的混凝土防渗墙施工。世界著名的高土石坝还有美国的奥洛维尔土石坝（高 236 m）、加拿大的买加堆石坝（高 242 m）以及印度的特里堆石坝（高 261 m，是目前世界最高的堆石坝）等。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 285 m）、前苏联的英古里拱坝（高 272 m）、加拿大的丹尼尔·约翰逊连拱坝（高 214 m）等。

采用碾压混凝土的高重力坝和高拱坝及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。高坝成套技术中所涉及的难点包含水工新材料、大型设备的研制、高速水流、消能防冲、抗震、高边坡稳定性、安全监控等课题以及一系列设计、计算技术和施工技术，这些都要进行攻关研究，水利科技工作者任重而道远。

第三节 河川水利枢纽对环境的影响

一条河流、一个河段及其周围地区在天然状态下，一般处于某种相对平衡。水利工程的建设会破坏原有的平衡，特别是具有高坝大库的河川水利枢纽的建成运行，对周围的自然和社会环境都将产生重大的影响。规划、设计、建设水利枢纽时，在注意其经济效益的同时，必须注意其对环境的影响，特别是不利的影响，并力争减小这种不利影响。

一、物理影响

河流中筑坝建库后，上下游水文状态将发生变化。如果水库不具有较大的径流调节性能，则变化只表现为上游有一壅水段；如果水库具有季、年或多年调节性能，则上游水位将有很大的变化幅度，这就会造成一片淹没、浸没区，居民要迁移，下游河流水位以及地下水水位都可能下降，甚至带来干旱。

上游水库水深加大，流速降低，河流带入水库的泥沙会淤积下来，逐渐减少水库库容，这实际上最终决定水库的寿命。据美、印等国 130 座水库的调查，每年淤积损失的库容约在 2%~14.33% 范围内。水库的“沉沙池”作用，使过坝调节下放的水流成为“清水”，冲刷能力加大，从而会使下游河床刷深，也可能影响到河势变化乃至河岸稳定。经水库再下泄的水，水质一般有改善，但随着库区不同的条件，也可能受某些盐分污染。深水库底孔下放的水，水温会较原天然状态有所变化。

大面积的水库还会引起小气候的变化，例如可能增加雾天的出现频率，大水库可能诱发地震也是国内外广泛注意的问题。据调查，在已建的坝高超过 100 m 和库容超过 10 亿 m³

的水库中，发生水库地震的达 17%，但烈度不高。

二、生态影响

高坝大库对生态影响问题涉及范围很广，例如，较天然河流大大增加了的水库面积与容积可以养鱼，对渔业有利，但坝对原河鱼的回游成为障碍，任何过鱼设施也难以维持原状，某些鱼类品种因此消失；水库调蓄的水量增加了农作物灌溉的机会，但水温可能不如原来情况更适合作物生长；钉螺、疟蚊等传播疾病的媒介物可能得到新的有利的繁殖条件，从而增加血吸虫病、疟疾等的传染危险性。此外，库水化学成分改变、营养物质浓集导致水的异味或缺氧等，也会对生物带来不利影响。

上述无论物理影响还是生态影响，无疑都转移为对人类本身的影响。同时还要注意，水库蓄水后还可能出现一些规划设计阶段较难预见的影响。例如库岸由于水的渗入，原本稳定的边坡可能失稳坍塌。意大利瓦依昂拱坝上游就曾发生过这种大滑坡，造成高 150 m 的涌浪翻越坝顶，冲毁下游村镇，死亡 3000 人。因此修建水利枢纽，必须充分考虑其对环境的影响，精心研究，慎重对待。

第四节 水利枢纽与水利建筑物的等级划分

一项水利枢纽工程的成败对国计民生有着直接的影响，但不同规模的工程影响程度也不同。为使工程的安全可靠性与其造价的经济合理性统一起来，水利枢纽及其组成建筑物要分等级，即先按工程的规模、效益及其在国民经济中的重要性，将水利枢纽分等，然后对各组成建筑物按其所属枢纽等别、建筑物作用及重要性进行分级。枢纽工程、建筑物的等、级不同，对其规划、设计、施工、运行管理的要求也不同，等级越高，要求也越高。这种分等级、区别对待的方法，也是国家经济政策和技术政策的一种重要体现。

根据《水利水电枢纽工程等级划分及设计标准》，水利水电枢纽工程按其规模、效益和在国民经济中的重要性分为五等，其中山区、丘陵区枢纽分等指标如表 1-2 所示，平原、滨海地区枢纽分等指标如表 1-3 所示，水工建筑物则按表 1-4 分级。

表 1-2 山区、丘陵区水利水电枢纽工程分等指标

工程 等别	工程 规模	分 等 指 标				
		水库总库容 (10^8m^3)	防 洪		灌溉面积 (10^4 亩)	水电站装机容量 (10^4kW)
			保护城镇及工矿区	保护农田面积 (10^4 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 1-3

平原、滨海地区水利水电枢纽工程分等指标

工程等别	工程规模	分 等 指 标						
		水库总库容 (10^8 m^3)	防 洪		排涝面积 (10^4 亩)	灌溉面积 (10^4 亩)	供水 (供给城镇 及矿区)	水电站 装机容量 (10^4 kW)
			保护城镇 及工矿区	保护农田 面积 (10^4 亩)				
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	15~3	5~0.5	一般	2.5~0.05
五	小(2)型	0.01~0.001		<5	<3	<0.5		<0.05

表 1-4 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	

表 1-2 及表 1-3 中总库容系指校核洪水水位以下的水库库容，灌溉面积等则均指设计值。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 1-4 确定水工建筑物级别时，如该建筑物同时具有几种用途，应按最高等别考虑，仅有一种用途时，则按该项用途所属等别考虑。

对于二~五等工程，在下述情况下经过论证可提高其主要建筑物级别：一是水库大坝高度超过表 1-5 中数值者提高一级，但洪水标准不予提高；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、稳定性可靠度、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。

(4) 运行可靠性。如建筑物各部分尺寸裕度及是否设置专门设备等。

表 1-5 需要提高级别的坝高界限

坝 的 原 级 别		2	3	4	5
		90	70	50	30
坝高 (m)	土坝、堆石坝、干砌石坝	130	100	70	40
	混凝土坝、浆砌石坝				

第五节 水利枢纽设计阶段

一、设计阶段的划分

根据国家基本建设管理规定，水利枢纽建设程序大体可分为前后两个阶段，工程开工

建设前以规划、勘测、设计工作为主的前期阶段；工程开工以后至竣工投产的施工阶段。兴建水利枢纽工程应严格按照基本建设程序办事。设计工作应遵循分阶段、循序渐进、逐步深入的原则进行。以往大中型枢纽工程常按三个阶段进行设计，即可行性研究、初步设计和施工详图设计。对于工程规模大，技术复杂而又缺乏设计经验的工程，经主管部门指定，可在初步设计和施工详图设计之间，增加技术设计阶段。

为适应招标投标合同管理体制的需要，并与国家基本建设项目审批程序相协调，缩短设计周期，加快水利水电事业的发展，电力工业部在电计〔1993〕567号文《关于调整水电工程设计阶段的通知》中，对水电工程设计阶段的划分作了如下调整：

(1) 增加预可行性研究报告阶段。在江河流域综合利用规划及河流（河段）水电规划选定的开发方案基础上，根据国家与地区电力发展规划的要求，编制水电工程预可行性研究报告。预可行性研究报告经主管部门审批后，即可编报项目建议书。

(2) 将原有可行性研究与初步设计两阶段合并，统称为可行性研究报告阶段。加深原有可行性研究报告的深度，使其达到原有初步设计编制规程的要求。并以 DL5021—93《水利水电工程初步设计报告编制规程》为准编制可行性研究报告。

(3) 招标设计阶段。暂按原技术设计要求进行勘测设计工作，在此基础上编制招标文件。招标文件分三类：主体工程、永久设备和业主委托的其他工程的招标文件。

(4) 施工详图阶段。配合工程进度编制施工详图。

根据水规计（1994）0006号文的通知，凡1994年1月1日以后进行勘测设计的水电项目，一律按上述文件执行。

二、设计阶段的任务

1. 预可行性研究的任务

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。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。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. 可行性研究的任务

可行性研究的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；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报告

告文件，包括文字说明和设计图纸及有关附件。

3. 招标设计的任务

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，监理工程师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，满足以固定单价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. 施工详图设计的任务

施工详图设计是在招标设计的基础上，对各建筑物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。

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

(1) 社会经济资料。包括枢纽建成后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、过水、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。包括水库和坝区地形图、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。

必须着重指出，工程地质条件直接影响到水利枢纽和水工建筑物的安全，对整个枢纽造价和施工工期有决定性的影响。但是地质构造中的一些复杂问题常由于勘探工作不足而没有彻底查清，造成隐患。有些工程在地基开挖以后才发现地质情况复杂，使地基处理工作十分困难，以致工期一再延长；有的甚至被迫停工或放弃原定坝址，造成严重的经济损失。有些工程由于未发现库区的严重漏水，影响水库蓄水。也有些工程由于库区或坝址的地质问题而失事，产生严重后果。这些都应引起足够的重视。水文资料同样十分重要，如果缺乏可靠的水文资料或对资料缺乏正确分析，就可能导致经济上不合理，例如，错误决定坝的高度或泄洪能力。对多沙河流，如果对泥沙问题估计不足，就有可能在坝建成后不久形成淤积。因此，枢纽设计必须十分重视各项基本资料。

科学试验也往往是大中型水利枢纽设计的重要组成部分。枢纽中有许多重大技术问题常需通过现场或室内试验提出论证。例如，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；多沙河上的库区淤积和河床演变也要借助试验来

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、岩体弹性抗力、地应力、岸坡稳定性等要由现场勘探和室内试验配合提供设计数据；大坝和水电站厂房等主要建筑物的结构强度和稳定性有时也要由静态和动态的结构模型试验来加以分析论证。

第六节 水工结构可靠度设计原理

一、结构设计准则的演变

水工建筑物中闸坝等各种结构，在建造过程中及建成之后，相当长时期内都受到施加于结构的各种集中力、分布力的作用（如自重、水压力等），还可能受到引起结构外加变形或约束变形的其他作用（如温度变化等）。前者称直接作用（或荷载），后者称间接作用。我国工程界以往对两种作用统称荷载，1992年颁布的GB 50153—92《工程结构可靠度设计统一标准》则把各种荷载统称作用；1994年颁布的GB 50199—94《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》，在一般统称作用的同时亦未禁用荷载一词。

水工结构上各种作用使结构产生的位移、变形、内力、应力等统称为作用效应（或荷载效应）；而结构本身的承载能力称为结构抗力。结构设计任务就是将所设计结构受作用产生的效应与该结构相应抗力对比，看后者能否安全而又经济地承担前者；当结构抗力偏小（不安全）或过大（不经济），则可通过改变结构的材料、尺寸甚至型式，重新比较作用效应和结构抗力，直至满意为止，从而最终设定结构。但人们按照这种显而易见的原则所采用的结构设计方法，却有一个演变和进步的历史过程。

早期工程结构设计都采用容许应力法，它要求在荷载作用下，结构或构件某截面的应力 σ 不超过容许应力 σ_s ，即

$$\sigma \leq \sigma_s = R/K \quad (1-1)$$

式中： K 为安全系数； R 为材料强度。

随着结构分析方法的发展及钢筋混凝土等新材料的出现与广泛使用，考虑材料的塑性性质，按破坏阶段设计的方法被普遍采用。例如设计受弯构件时，构件所承受的弯矩 M 乘以安全系数 K 后应不超过构件对弯矩的承载能力 M_p ，即

$$KM \leq M_p \quad (1-2)$$

为考虑设计中有关因素的微小变动，保证结构的安全，上述两种方法中都引入了大于1的安全系数 K ，所以两者也可统称为安全系数法。安全系数 K 是根据经验规定的数值，安全系数法把作用荷载、结构尺寸、材料性能和强度等作为确定性量值计入，最后用一个概略的系数 K 来包容解决各不确定因素可能引起的安全问题。因此，加大结构的安全系数，并不一定能按比例地增加结构的安全度。为克服这些缺点，结构可靠度设计原则以及基于概率论的极限状态设计理论和分项系数设计方法正逐渐取代安全系数法，成为水利水电工程结构设计的统一标准。

二、水工结构可靠度设计总则

结构可靠度是结构在规定的时间内、规定的条件下具有预定功能的概率。

按可靠度设计理论，所有影响可靠度分析计算结果的量都视为随机变量。其中直接影响结构可靠度的一般可量测到的主要随机变量称基本变量（如作用荷载、材料性能、几何参数），而反映计算模式不定性等的随机变量称为附加变量。前述“规定的时间”即指考虑各项基本变量与时间关系预定的结构使用期限，特称设计基准期。按 GB 50199—94 的规定，水工结构设计中，对 I 级壅水建筑物设计基准期应采用 100 年，其他永久性建筑物应采用 50 年。临时建筑物的设计基准期则应根据预定的使用年限和可能滞后的时间确定。但对特大工程壅水建筑物，其结构设计基准期应经专门研究确定。前述“规定的条件下具有预定功能”则指结构在设计基准期内应满足的四项要求：在正常施工和正常使用时，能承受可能出现的各种作用；在正常使用时，具有设计规定的工作性能；在正常维护下，具有设计规定的耐久性；在出现预计的偶然作用时，主体结构仍能保持必需的稳定性。

结构可靠度分析就是对结构满足上述诸要求的结构可靠性（安全性、适用性、耐久性）进行概率度量。结构能完成预定功能的概率称为可靠概率，用 P_s 表示；不能完成预定功能的概率称为失效概率，用 P_f 表示，显然，有

$$P_s + P_f = 1 \quad (1-3)$$

采用适当的分析方法求得 P_s （或 P_f ）值或其相应的指标值（即可靠指标 β 值，见后述），也就定量知道了结构可靠度， P_s 越大、越接近 1，结构的可靠度也愈大。但是要使结构设计达到安全与经济的合理统一，对不同建筑物应有不同的可靠度要求。考虑到以往水工结构设计安全系数有按建筑物级别分三挡的传统，GB 50199—94 规定，水工建筑物的结构安全级别应根据水工建筑物的重要性及其破坏后果的严重性，对应水工建筑物级别（见表 1-4、表 1-5），按表 1-6 划分为三级。

表 1-6 水工建筑物结构安全级别

水工建筑物的结构安全级别	水工建筑物级别
I	1
II	2、3
III	4、5

应当注意表 1-6 所列水工建筑物结构安全级别与该建筑物中某一结构或构件的结构安全级别并非同一概念。GB 50199—94 规定后者可根据其在水工建筑物中的部位、本身破坏对建筑物安全影响的大小，采用相同的水工建筑物结构安全级别或降低一级。但

地基的结构安全级别应与水工建筑物的结构安全级别相同。GB 50199—94 还规定，对有特殊安全要求的水工建筑物，其结构安全级别应经专门研究确定，不受表 1-6 制约。

结构从按安全系数法设计到按可靠度理论设计，有一个过渡阶段，分为水准 I（半概率法）、水准 II（近似概率法）、水准 III（全概率法）三种方法。半概率法是对影响结构可靠度的某些参数进行数理统计分析，并与经验相结合，然后引入一些经验系数进行计算，该法对结构可靠度还不能作出定量估计。近似概率法就是一次二阶矩法，它采用概率的方法近似地对结构可靠度进行计算，是目前结构可靠度设计中应用最多的方法。全概率法是完全基于概率论的精确方法，但此法使问题变得过于复杂，目前还难以直接应用。

三、随机变量的概率统计基础

在结构可靠度计算中，作用荷载、材料性能、几何尺寸等随机变量的特征可通过其分布函数描述，由其均值、方差、变异系数和矩来表示。

(一) 概率密度分布函数

概率密度分布函数用 $f_x(x)$ 表示。图 1-5 是根据某次 27 根钢筋拉伸试验结果作出的直方图，当试验次数足够多，对应的屈服荷载间隔取得足够密时，即可得到图中的连续曲线，进而可得出概率密度函数的数学表达式。

概率密度函数有以下两个性质：

(1) $f_x(x) \geq 0$ ，即概率密度函数 $f_x(x)$ 位于 x 轴上方。

(2) $\int_{-\infty}^{\infty} f_x(x) dx = 1$ ，即概率密度函数曲线与 x 轴所夹的面积为 1。

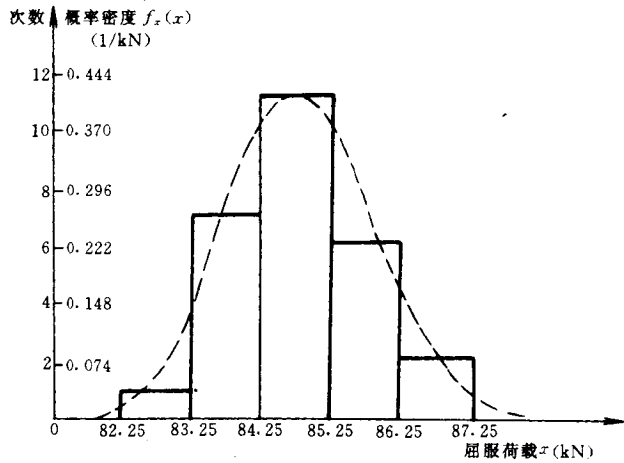


图 1-5 概率密度分布图

(二) 累积概率分布函数

累积概率分布函数用 $F_x(x)$ 表示 它也是描述随机变量概率分布的一种函数，其计算公式为

$$F_x(x) = \int_{-\infty}^x f_x(x) dx \quad (1-4)$$

图 1-6 所示随机变量 x 小于 x_1 的累积概率为

$$F_x(x_1) = P(x_0 < x < x_1) = \int_{x_0}^{x_1} f_x(x) dx = \Omega$$

式中： Ω 为概率分布图中 x ；以左的阴影部分面积。

根据概率理论，公式 $F_x(x)$ 有以下性质：

(1) $F_x(-\infty) = 0$ 。

(2) $F_x(+\infty) = 1$ 。

(3) $F_x(x) \geq 0$ 并且是 x 的增函数。

(4) F_x 是 x 的连续函数。

(三) 均值

如果随机变量 x 是离散的，并已知概率分布律为 $P_x(x_i)$ 则其均值函数就是描述该随机变量的中心，用 $E(x)$ 表示，即

$$E(x) = \sum x_i P(x_i) \quad (1-5)$$

对于概率密度函数为 $f_x(x)$ 的连续随机变量，其均值函数为

$$E(x) = \int_{-\infty}^{\infty} x f_x(x) dx \quad (1-6)$$

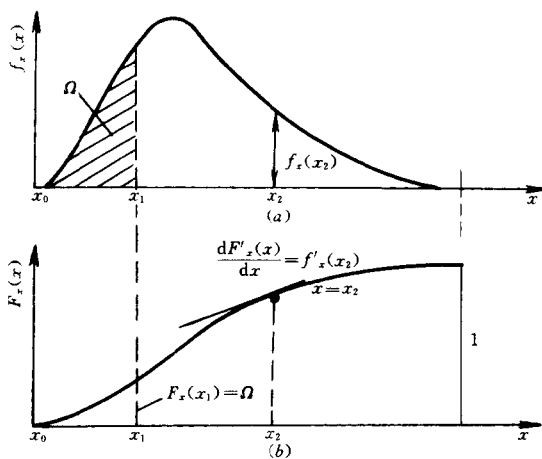


图 1-6 概率分布图

(a) 概率密度分布图；(b) 累积概率分布图