

SIMPLIFIED SERIES OF  
CIVIL ENGINEERING

清华大学土木工程系组编

丛书主编 崔京浩

彭守拙 著

# 简明土木工程系列专辑

## 水电站设计的新进展

中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)



知识产权出版社  
[www.cnipr.com](http://www.cnipr.com)



Simplified Series of Civil Engineering

清华大学土木工程系组编

丛书主编 崔京浩

彭守拙 著

简明土木工程系列专辑

水电站设计的新进展

中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn



知识产权出版社  
www.cnipr.com



中国水利水电出版社

地址：北京市西城区百万庄大街2号

## 内容提要

本书是由清华大学土木工程系组编的“简明土木工程系列专辑”中的一本。书中总结了我国改革开放以来作者参与和完成的 40 多项生产课题的部分内容,介绍了我国水电站设计在这一时期所取得的一些进展。通过示例阐明了地下厂房围岩稳定性的判别原则、岩壁吊车梁的承载机理和保安措施;气垫调压室系统的适用条件、设计原则及其大、小波动过程的仿真模拟;提出了预报岩爆的静力判据和数值模拟理论,从而可评估岩爆的喷锚防护效果;对均质隧洞二维渗流流场进行了全面分析,介绍了软岩中不衬砌压力隧洞的应用情况。

本书可供工程技术人员设计参考之用,也可高等院校相关专业的师生提供参考。

**选题策划:** 阳 淼 张宝林 E-mail: yangsanshui@vip. sina. com; z\_baolin@263. net

**责任编辑:** 阳 淼 张宝林

**文字编辑:** 董拯民

## 图书在版编目 (CIP) 数据

水电站设计的新进展 / 彭守拙著. —北京: 中国水利水电

出版社: 知识产权出版社, 2007

(简明土木工程系列专辑. 崔京浩主编)

ISBN 978-7-5084-4445-1

I. 水… II. 彭… III. 水力发电站—建筑设计 IV. TV7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 026322 号

## 简明土木工程系列专辑

## 水电站设计的新进展

彭守拙 著

中国水利水电出版社 出版发行 (北京市西城区三里河路 6 号; 电话: 010-68331835 68357319)  
知识产权出版社 (北京市海淀区马甸南村 1 号; 电话、传真: 010-82000893)

北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643

全国各地新华书店和相关出版物销售网点经销

中国水利水电出版社微机排版中心

北京市兴怀印刷厂印刷

850mm×1168mm 32 开 12.625 印张 340 千字 1 插页

2007 年 4 月第 1 版 2007 年 4 月第 1 次印刷

印数: 0001—3100 册

定价: 25.00 元

ISBN 978-7-5084-4445-1

## 版权所有 侵权必究

如有印装质量问题, 可寄中国水利水电出版社营销中心调换

(邮政编码 100044, 电子邮件: sales@waterpub. com. cn)

土木工程是一个历史悠久、生命力强、投入巨大、对国民经济具有拉动作用、专业覆盖面和行业涉及面极广的一级学科和大型综合性产业，为它编一套集新颖性、实用性和科学性为一体的“简明系列专辑”，既是社会的召唤和需求，也是我们的责任和义务。

**新颖性**——反映新标准、新规程、新规范、新理论、新技术、新材料、新工艺、新方法

**实用性**——深入浅出，让人一看就懂，一懂能用，不是手册，胜似手册

**科学性**——编写内容均有出处

——摘自《简明土木工程系列专辑》总序

清华大学土木工程系组编

## 简明土木工程系列专辑

### 编 委 会

名誉主编 陈肇元 袁 驷

主 编 崔京浩

副主编 石永久 宋二祥

编 委 (按汉语拼音排序)

陈永灿 胡和平 金 峰 李庆斌

刘洪玉 钱稼茹 王志浩 王忠静

武晓峰 辛克贵 阳 森 杨 强

余锡平 张建民 张建平

### 编 辑 办 公 室

主 任 阳 森

成 员 张宝林 董拯民 彭天赦 莫 莉

张 冰 邹艳芳

# 总 序

国务院学位委员会在学科简介中为土木工程所下的定义是：“土木工程（Civil Engineering）是建造各类工程设施的科学技术的统称。它既指工程建设的对象，即建造在地上、地下、水中的各种工程设施，也指所应用的材料、设备和所进行的勘测、设计、施工、保养、维修等专业技术”。土木工程是一个专业覆盖面极广的一级学科。

英语中“Civil”一词的意义是民间的和民用的。“Civil Engineering”一词最初是对应于军事工程（Military Engineering）而诞生的，它是指除了服务于战争设施以外的一切为了生活和生产所需要的民用工程设施的总称，后来这个界定就不那么明确了。按照学科划分，地下防护工程、航天发射塔架等设施也都属于土木工程的范畴。

土木工程是国家的基础产业和支柱产业，是开发和吸纳我国劳动力资源的一个重要平台，由于它投入大、带动的行业多，对国民经济的消长具有举足轻重的作用。改革开放后，我国国民经济持续高涨，土建行业的贡献率达到 1/3；近年来，我国固定资产的投入接近甚至超过 GDP 总量的 50%，其中绝大多数都与土建行业有关。随着城市化的发展，这一趋势还将继续呈现增长的势头。

相对于机械工程等传统学科而言，土木工程诞生得更早，其发展及演变历史更为古老。同时，它又是一个生命力极强的学科，它强大的生命力源于人类生活乃至生存对它的依赖，甚至可以毫不夸张地说，只要有人类存在，土木工程就有着强大的社会需求和广阔的发展空间。

随着技术的进步和时代的发展，土木工程不断注入新鲜血液，呈现出勃勃生机。其中工程材料的变革和力学理论的发展起

着最为重要的推动作用。现代土木工程早已不是传统意义上的砖瓦灰砂石，而是由新理论、新技术、新材料、新工艺、新方法武装起来的为众多领域和行业不可或缺的大型综合性学科，一个古老而又年轻的学科。

综上所述，土木工程是一个历史悠久、生命力强、投入巨大、对国民经济具有拉动作用、专业覆盖面和行业涉及面极广的一级学科和大型综合性产业，为它编写一套集新颖性、实用性和科学性为一体的“简明系列专辑”，既是社会的召唤和需求，也是我们的责任和义务。

清华大学土木工程系是清华大学建校后成立最早的科系之一，历史悠久，实力也比较雄厚，有较强的社会影响和较广泛的社会联系，组编一套“简明土木工程系列专辑”，既是应尽的责任也是一份贡献，但面对土木工程这样一个覆盖面极广的一级学科，我们组编实际起两个作用：其一是组织工作，组织广大兄弟院校及设计施工部门的专家和学者们编写；其二是保证质量的作用，我们有一个较为完善的专家库，必要时请专家审阅、定稿。

简明土木工程系列专辑包括以下几层含义：简明，就是避免不必要的理论证明和繁琐的公式推导，采用简洁明快的表述方法，图文并茂，深入浅出，浅显易懂；系列，指不是一本书而是一套书，这套书力争囊括土木工程涵盖的各个次级学科和专业；专辑，就是以某个特定内容编辑成册的图书，每本书的内容可以是某种结构的分析与计算，某个设计施工方法，一种安装工艺流程，某种监测判定手段，一个特定的行业标准，等等，均可独立成册。

这套丛书不称其为“手册”而命名为“系列专辑”，原因之一是一些特定专题不易用手册的方法编写；原因之二是传统的手册往往“大而全”，书厚且涉及的技术领域多，而任何一个工程技术人员在某一个阶段所从事的具体工作又是针对性很强的，将几个专业甚至一个项目的某个阶段集中在一本“大而全”的手册势必造成携带、查阅上的不方便，加之图书的成本过高，编写机构臃肿，组织协调困难，出书及再版周期过长，以致很难反映现

代技术飞速发展、标准规范规程更新速度太快的现实。考虑到这些弊端，这套系列专辑采用小开本，在选题上尽量划分得细一些，视专业、行业、工种甚至流程的不同，能独立成册的绝不合二为一，每本书原则上只讨论一个专题，根据专题的性质和特点有的书名仍冠以“手册”两字。

这套系列专辑的编写严格贯彻“新颖性、实用性、科学性”三大原则。

新颖性，就是充分反映有关新标准、新规程、新规范、新理论、新技术、新材料、新工艺、新方法，老的、过时的、已退出市场的一律不要。体现强劲的时代风貌。

实用性，就是避免不必要的说理和冗长的论述，尽可能从实用的角度用简洁的语言以及数据、表格、曲线图形来表述；深入浅出，让人一看就懂，一懂能用；不是手册，胜似手册。

科学性，就是编写内容均有出处，参考文献除国家标准、行业标准、地方标准必须列出以外，尚包括引用的论文、专著、手册及教科书。

这套系列专辑的读者对象是比较宽泛的，它包括大专院校师生，土木工程领域的管理、设计、施工人员，以及具有一定阅读能力的建筑工人。它既可作为土建技术人员随身携带及时查阅的手册，又可选作大专院校、高职高专的教材及专题性教辅材料。

崔京浩

2005年10月于清华园

崔京浩，男，山东淄博人。1960年清华大学土建系毕业，1964年清华大学结构力学研究生毕业，1986~1988年赴挪威皇家科学技术委员会做博士后，从事围岩应力分析的研究。先后发表论文150多篇，编著专业书4本，参加并组织编写巨著《中国土木工程指南》，任编辑办公室主任，并为该书撰写绪论；主持编写由清华大学土木工程系组编的“土木工程新技术丛书”和“简明土木工程系列专辑”，并任主编。曾任清华大学土木系副系主任，现为中国力学学会理事，《工程力学》学报主编，享受国务院特殊津贴。



# 前 言

自改革开放后的 20 余年中，我国水电事业蓬勃发展，与 20 世纪 80 年代相比，水电装机容量翻了两番，水力发电技术也取得了新的进展，例如，大跨度高边墙地下厂房、高轮压岩壁吊车梁和高压不衬砌隧洞的建造技术已经深入人心。岩石力学学科也紧密结合实际，应用于水电工程，使对硬岩岩爆的预测、防护以及软岩隧洞的长期稳定性等问题的认识和实践均有所提高。如今，为了保护环境，节约造价，走可持续发展的道路，本着因地制宜、洋为中用的原则，又在我国西南高山地区探索建造气垫调压室的新技术并勇于实践。

在祖国建设事业日新月异、新技术突飞猛进的大好形势下，在谷兆祺教授以及教研组同志们的帮助下，作者有幸在教学的同时，参与和完成了近 40 个项目的科研工作，它们全是由生产实际提出的、迫在眉睫要求解决的横向协作项目。如今，所涉及的一些工程，大部分已经完建和投入运行。回过头来，想想当初接受课题时问题的不可知性和迫切性，再看看如今工程运行监测的实际情况，不仅是有趣的，在水电建设方兴未艾的今天，也是很有工程意义的。本书即是在我国水电工程蓬勃发展和水电站建设技术不断取得新进展的大背景下，总结作者近 20 年来所遇到的一部分较难较新的课题；力求说清道理，观测应证，总结实践，力图总结出易于操作的设计原则和计算方法，希望为读者解决类似问题提供参考并有所借鉴；在总结中努力贯彻“少而精”的原则，不求“全”，但求一定的“系统性”；有关水电站建筑的基础理论，有关设计的全面内容、设计方法、步骤和应该注意的问题，读者可参考教科书和有关的文献。

作者所参加的工作只是沧海一粟，视野极为局限，个人水平

所限，错误和不当之处在所难免，恳请读者批评指正，有关指点和意见请寄清华大学水利水电工程系。在本书的出版和校对工作中，得到了清华大学何德芬同志的帮助，在此致谢。

作者

2007年1月

# 目 录

总序

前言

第1章 绪论..... 1

第1节 水电站的开发方式和环境保护/1

第2节 引水式水电站设计的新思维/8

第3节 水电开发与可持续发展战略/16

第2章 水电站地下厂房 ..... 19

第1节 水电站地下厂房的布置方式和设计特点/19

第2节 地下厂房围岩稳定的计算分析和实践/25

第3节 地下厂房围岩稳定性的判别原则/85

第4节 减少地下厂房跨度的措施和岩壁吊车梁的  
承载机理/97

第5节 首部式地下厂房的渗流影响/120

第3章 气垫调压室..... 128

第1节 水电站调压室的类型和特点/128

第2节 气垫调压室的实践简介和漏气处理实例/130

第3节 围岩的原始应力状态/139

第4节 气垫调压室的设计原则和设计实例/141

第5节 高压堵头设计概述/156

第4章 水电站气垫调压室系统过渡过程的数值模拟..... 162

第1节 引言/162

第2节 调压室系统小幅度过渡过程的理论及算例/162

第3节 气垫调压室涌浪和水击的联合计算/170

第4节 AIRCOM 程序简介及系统运行的初步数值模拟/177

## 第5章 硬岩隧洞和岩爆..... 183

- 第1节 水工隧洞的分类和特点/183
- 第2节 岩爆现象和岩爆的分级/186
- 第3节 花岗岩的强度和变形特性/188
- 第4节 岩爆的静力判据/195
- 第5节 岩爆的数值模拟/209
- 第6节 喷锚支护对岩爆的防护机理/219
- 第7节 喷锚支护防护岩爆的数值分析/229
- 第8节 高压不衬砌隧洞设计概述和覆盖准则/233

## 第6章 隧洞的渗流估算..... 250

- 第1节 渗流的基本方程/250
- 第2节 围岩地下水位高于洞顶的隧洞渗流/254
- 第3节 围岩地下水位远低于洞底的隧洞渗流/259
- 第4节 不同围岩地下水位对隧洞渗流的影响/267
- 第5节 裂隙岩体渗透系数  $k$  的初步评估/284
- 第6节 隧洞衬砌外水压力的实际观测/286
- 第7节 隧洞内水外渗和毗邻山坡稳定性评估的简单方法/293

## 第7章 隧洞的温度计算..... 305

- 第1节 隧洞温度计算的目的/305
- 第2节 圆形隧洞的温度计算/307
- 第3节 圆形隧洞混凝土衬砌和围岩联合作用的近似判别式及冷缩缝隙的粗估/309
- 第4节 城门洞形隧洞充水冷却的温度近似计算/311
- 第5节 城门洞形隧洞衬砌和围岩联合作用的近似判别式/314
- 第6节 渗流体荷载对衬砌围岩联合作用的影响/319

## 第8章 城市长供水道的充水和运行..... 323

- 第1节 长供水道建筑物的组成和充水可能出现的问题/323

|       |                                      |     |
|-------|--------------------------------------|-----|
| 第 2 节 | 充水流量的确定/325                          |     |
| 第 3 节 | 进水口供水、退水流量时程的确定/327                  |     |
| 第 4 节 | 充水及通水的实践/330                         |     |
| 第 5 节 | 供水运行期的运用方式/337                       |     |
| 附录 A  | 水利水电地下工程围岩工程地质分类 .....               | 345 |
| 附录 B  | 压力水道水头损失计算公式 .....                   | 350 |
| 附录 C  | 气垫调压室的涌浪计算程序 (不计水击影响) .....          | 357 |
| 附录 D  | 围岩地下水位高于洞顶时, 实际边界条件模型<br>的渗流解答 ..... | 368 |
| 附录 E  | 无限楔形体冷却公式 (角缘冷却) 的证明 .....           | 375 |
| 参考文献  | .....                                | 381 |
| 出版者的话 | .....                                | 388 |

# 第 1 章 绪论

## 第 1 节 水电站的开发方式和环境保护

据 1981 年汇编的《全国水资源普查成果》，除中国台湾省外，全国水能总蕴藏量为 6.8 亿 kW，折合年发电量 5.9 万亿 kW·h，技术可开发的总装机容量为 3.8 亿 kW，年发电量 1.9 万亿 kW·h，均占世界的首位。我国水能资源在地区分布上是不平衡的，其中西南地区的技术可开发总装机 2.33 亿 kW，这对开发西部形成有利条件。

技术可开发的总装机容量是按式 (1.1) 计算的，即

$$N = 9.81\eta HQ \quad (1.1)$$

式中：N 为发电出力，即总装机，也指功率，kW；H 为水头差，m；Q 为河流的年平均径流，m<sup>3</sup>/s；η 为水轮机效率（0.85～0.96）与发电机效率（0.96～0.98）之积，粗估可用 η ≈ 0.88。

式 (1.1) 为水力发电的基本原理，它说明：构成水力发电的基本要素是河道的落差 H 和径流量 Q。水电站的开发方式就是想办法把河道的落差 H 集中起来，利用河道径流量 Q，通过水轮机和发电机把水能转变为电能。

水电站的开发方式一般是按集中落差的方式区分的，它分为坝式、引水式和混合式三种基本开发方式，现将这三种开发方式及其与社会、经济和环境保护的关系简述如下。

## 1. 坝式水电站

在河流的峡谷地段，筑坝挡水，坝前形成水库，水库壅水水面积的坡降远小于原河道天然水面积的坡降，从而把库区河段分散的落差用大坝集中起来，在坝址处形成集中的水头  $H$ ，如图 1.1 所示，水电站位于坝后，本身不起挡水作用，称为坝后式厂房。图 1.2 为湖北省某重力坝型的坝后式厂房。坝后式厂房的水头决定于坝高，目前世界上的坝高范围大约在  $30 \sim 300\text{m}$  的范围内，当然，大量低于  $30\text{m}$  的坝也可挡水发电，这些就属于小坝了， $100\text{m}$  以上的坝当属于高坝。

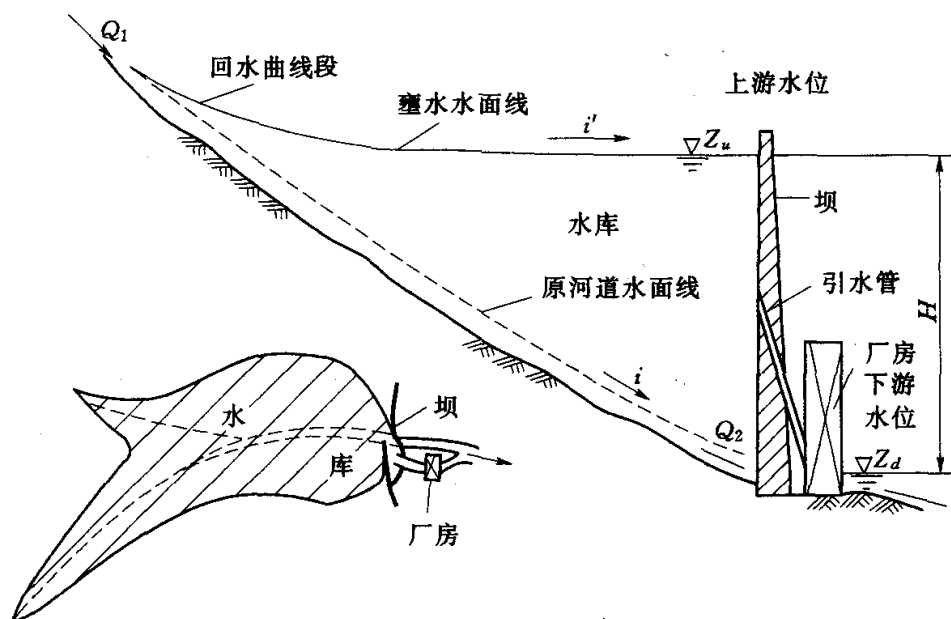


图 1.1 坝后式水电站示意图

大型坝式水电站总是和“高坝大库”联系在一起的，它适于建在流量大、坡降较缓的河段，它应具有“小口大肚”的有利地形条件，才能用坝高换来巨大的库容，拦截危害人类的凶猛洪水，它还必须具有良好的地质条件以利承受巨大的水压力 and 确保安全、经济。

大型坝式水电站在水利枢纽中只起发电作用，而这种“高坝大库”型的水利枢纽往往是以防洪为主要目标的多目标型水利枢

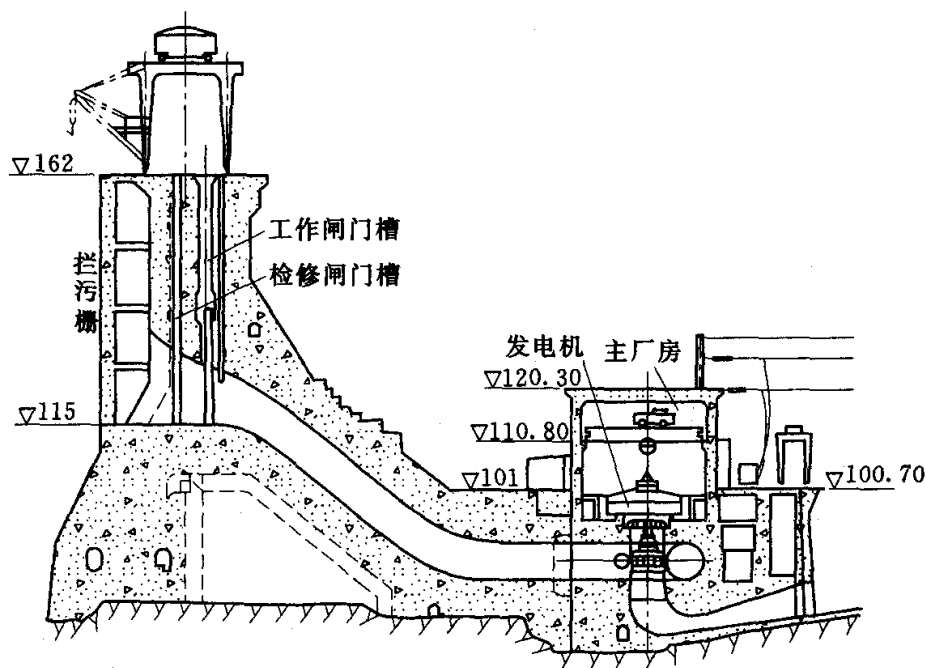


图 1.2 某坝后式水电站厂坝横剖面图案

组，它的优点多，缺点也不少。

由于坝高库大，具有良好的调节性能，所以能够发挥巨大的综合效益，例如，防洪、发电、扩大灌溉面积、改善航运、发展渔业、向下游城市供水、有利于漂木等。三峡就是典型的“高坝大库”，首先，仅防洪一项，就可使中游堤防防洪水平由10年一遇提高到100年一遇水平，若遇到千年一遇洪水，配合其他分洪工程，可降低下游超过12万 $\text{km}^2$ 的7000多万人口的洪水淹没损失；其次，可年发电800多亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，改善宜昌至重庆段的650km航道，且有利于南水北调，功劳是巨大的。

事物总是一分为二的，高坝大库型的坝式水电站的工程量巨大，投资巨大，工期较长，一般单位千瓦投资较高；高坝形成的淹没损失大，库区移民多；它的另一缺点是对环境产生一定影响，带来一些值得注意和必须应对的问题。例如，水库泥沙淤积不但影响水库寿命，而且影响上游城市，黄河三门峡水库泥沙淤积的“翘尾巴”现象，抬高潼关水位，影响渭河两岸即是一个值



得总结的教训；水位抬高还可以加剧两岸滑坡，从而影响两岸人民的生活环境；高坝大库还会改变其上、下游的水文条件及生态环境，甚至对地下水、气候也会有所影响，如处理不当，将会造成水污染和水质恶化。水是生命之源，水污染或水质恶化将危及人类的健康和生存，在“以人为本”的社会主义社会，各级政府必须严肃认真地处理水污染的有关问题。为什么高坝大库，尤其是河道型水库易于引发水污染呢？以三峡水库为例，建库以后，改变了库区河段的水文情势，河段水位抬高了，水位年变幅由50m降为30m，流速大大减小，由建库前的2~3m/s降为枯水期高水位运行时的0.1~1m/s，汛期高水位运行时也只有1~2.5m/s。一方面，流态、流速的变化会改变水环境，影响污染物在水体中的净化过程，减弱其扩散能力和接纳污染负荷的能力；另一方面，库区城镇发展，移民安置都会对水质产生影响。据1991年的调查，仅重庆、涪陵、万县的废污水排放量即为6.28亿t，其中直接排入长江干流的约3.2亿t。我们必须在修建大型坝式水电站的同时，加强环境意识，提出对策，加强水资源的保护和水质治理，严格控制污染源的治理，加强监测、预警和管理，规划设计时，必须有生态与环境的论证。

大型坝式水电站是水利枢纽的一个组成部分，这种高坝水利枢纽的综合效益很大，利用水能的程度也很充分，但也引起一些环境保护的问题，可说它是“两头冒尖”，建造时要谨慎，对其坝高、坝址必须全面综合论证。建造后，在发挥其效益的同时，还必须保证环境的保护，在上游做好水土保持，保护植被，严格控制污染源，确保水质达到可允许的标准，并且，不会对上、下游区域造成较大危害，以造福于人民。我们既不能简单地否定“高坝大库”，也不能不科学审慎地大力提倡，务必因地制宜，用可持续发展的眼光去做好规划设计。

## 2. 引水式水电站

河流上游，坡降较陡，曲折蜿蜒，如能利用合适地形，修建低坝引水或无坝引水，则可通过人工建造的引水道，例如，通过