

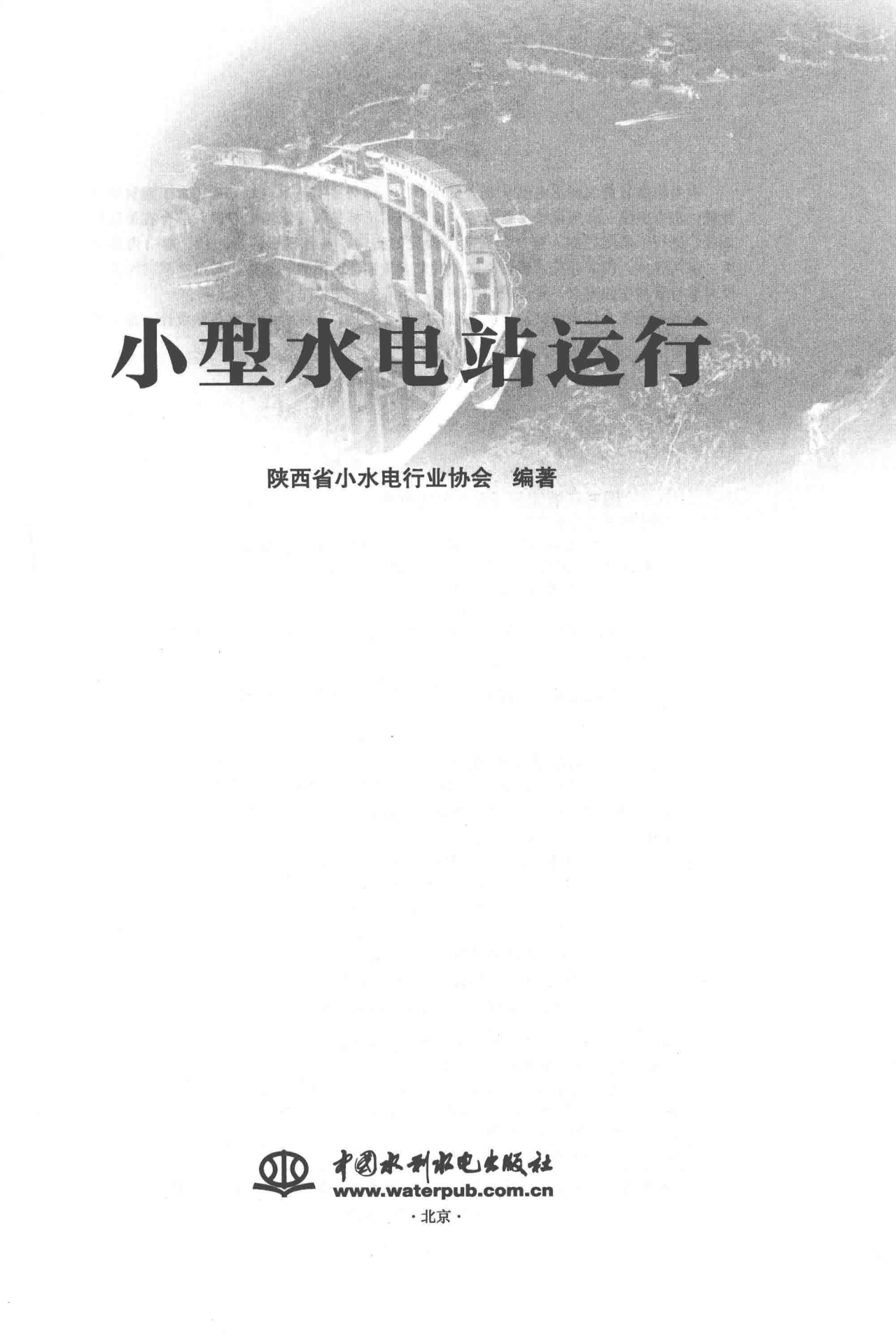


小型水电站运行

陕西省小水电行业协会 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

An aerial photograph of a large concrete dam with multiple buttresses, situated in a mountainous region. A reservoir is visible behind the dam, and the surrounding landscape is hilly with some vegetation.

小型水电站运行

陕西省小水电行业协会 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书根据目前农村水电站从业人员培训工作的需要,从水电站基础、水工建筑物及管理、水力机械、电气设备、检修等部分,介绍了相关的专业基础知识,结合有关规程规范,进行了系统的深入解读,列举了大量的实例,具有很强的操作性。本书内容全面,深入浅出,图文并茂,通俗易懂,附带大量实例、图表、表格,实用性强。尤其是针对运行管理中的难点、要点进行了讲解。

本书适用于农村水电站从业人员培训及学习使用,也适合农村水电站设计、施工等人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

小型水电站运行 / 陕西省小水电行业协会编著. --
北京: 中国水利水电出版社, 2016. 11
ISBN 978-7-5170-4887-9

I. ①小… II. ①陕… III. ①水力发电站—电力系统
运行 IV. ①TV737

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第276255号

书 名	小型水电站运行 XIAOXING SHUIDIANZHAN YUNXING
作 者	陕西省小水电行业协会 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16开本 33.5印张 795千字
版 次	2016年11月第1版 2016年11月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	90.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

编审委员会

顾 问：李永杰

主 任：王凤翔

副 主 任：高富产 贺英鹏

成 员：王正中 程雍涛 戴宗泉 冯万林 傅清林
高秦生 黄章平 刘成军 袁瑞民 唐安庵
张逸军 赵良妙 苏岳峰

主 审：程子勇

主 编：夏建军

编写人员：夏建军 高富产 程子勇 马小文 张羽佳
甘雪峰 王立青 谭剑波 卢 娜

前 言

截至 2014 年年底，全国农村水电站（单站总装机容量 50MW 及以下）总装机已达到 7300 万 kW，年发电量 2200 多亿 kW 时，为全国 1/2 的国土、1/3 的县、1/4 的人口供电，是重要的可再生能源，也是民生工程。但由于各电站建设年代、装机规模、技术状况等差别很大，由于农村水电站装机容量从几十千瓦到 5 万 kW 不等，建设年代从 20 世纪 60~70 年代到现在，产权隶属关系有村、镇、个人、民营企业、国有企业等，因此运行管理的水平也千差万别。加之水电站投资主体多元化，部分私营业主对运行工作重视不够。小水电站一般位置偏僻，待遇偏低，难以留住人才导致运行人员素质偏低，部分电站甚至是农民工在运行。一些电站运行管理人员短缺，缺乏相关专业技术及安全管理知识，无证上岗，存在安全隐患。水电站安全运行事关人民群众生命安全，也与企业效益息息相关，因此加强职工培训，有效提高员工的业务技术素质和处理事故、故障的应变能力成为当务之急。为了进一步提高农村水电站从业人员技术水平，根据多年分段培训经验，结合行业实际编写了这本《小型水电站运行》。本书有四个显著的特点：一是一改以往小水电站培训教材本数多、知识凌乱的缺点，本书实现了一本书基本涵盖了水电站运行的全过程；二是突出了水工建筑物的运行管理，以求改变小型水电站普遍重机电、轻水工的现状，提高水工建筑物运行管理水平，这对保证安全和提高效益具有重要的意义；三是根据目前小型水电站人员越来越少，专业结合越来越紧密，水机与电气、运行与检修的界限越来越模糊的趋势，有机融合各种知识，增强逻辑性，知识不零乱的堆砌，而是章节之间有机联系，科学衔接，形成一个整体，且易于读者接受；四是突出建筑物、设备特点及运行中的注意事项，与运行规程紧密结合，紧贴最新技术、紧贴实际运行，具有可操作性。

本书深度适中，图文并茂，通俗易懂，适合不同文化程度运行人员学习使用。可以作为小水电站从业人员培训用书，也可供大专院校、设计单位、管理单位人员学习参考使用。

本书编写和出版得到了陕西省水利厅有关领导和西北农林科技大学水利与建筑工程学院的支持和指导，西北水电勘测设计研究院原总工傅建臣、陕

西省水电开发有限责任公司原总工王国锋、西北水电勘测设计研究院教高董翠萍对本书提出了宝贵意见，在此一并表示衷心感谢！

由于水平所限，疏漏之处在所难免，敬请批评指正！

本书编审委员会

2016年3月

目 录

前言

第 1 章 水电站基础	1
1.1 中国小水电站发展概况	1
1.2 水电站基础	5
1.3 水电站基本公式及技术术语	15
第 2 章 水电站水工建筑物及其管理	24
2.1 挡水及泄水建筑物	24
2.2 引水式及混合式水电站建筑物	33
2.3 堤坝式水电站建筑物	48
2.4 水工金属结构及维护	51
2.5 水工建筑物的技术管理	61
2.6 水电站水库调度及优化运行	81
第 3 章 水力机械及辅助设备运行	86
3.1 水轮机进水阀	86
3.2 水轮发电机组类型及参数	100
3.3 水轮发电机组构造	118
3.4 水轮发电机组调节	152
3.5 水电站油气水系统	188
3.6 水轮发电机组的运行	222
第 4 章 水电站电气设备及运行	262
4.1 水电站电气设备概述	262
4.2 电气主接线	264
4.3 变压器及其运行	272
4.4 互感器及其运行	292
4.5 开关电器及其运行	309
4.6 水电站厂用电及直流系统运行	329
4.7 防雷保护与接地装置运行	341
第 5 章 水电站继电保护及计算机监控系统	352
5.1 水电站继电保护	352
5.2 电气二次回路	400

5.3	水电站自动化及计算机监控系统	449
5.4	水电站计算机监控系统	451
5.5	计算机监控系统运行	491
第 6 章	水电站机电设备检修	503
6.1	水电站机电设备检修	503
6.2	检修安全管理	521
参考文献		528

第1章 水电站基础

本章主要包括小水电站发展情况，水电站发电原理，水电站组成及水电站基本公式、基本术语等，使读者对小水电有一个整体的认识。

1.1 中国小水电站发展概况

1.1.1 小型水电站（农村水电）的概念

单站总装机 5 万 kW 及以下的水电站为小型水电站（简称“小水电”），又被称为农村水电站。农村水电装机的标准也是随着水电的快速发展不断发展变化而来的：

20 世纪 50 年代，500kW 及以下的水电站被称为农村小水电；

60 年代，单机 500kW、总装机 3000kW 及以下的水电站被称为小水电；

70 年代，单站容量在 1.2 万 kW 及以下的水电站及配套小电网被称为小水电；

80 年代，单站容量在 2.5 万 kW 及以下的水电站和配套小电网被称为小水电；

90 年代，单站总装机在 5 万 kW 及以下的水电站和配套电网统称为农村小水电。

1994 年国家技术监督局、建设部颁布实施的《防洪标准》（GB 50201—94）中，明确总装机 5 万 kW 及以下的水电站为小型水电站，小水电的标准从此基本固定下来。其中，单站总装机容量小于等于 1 万 kW 的为 V 等小（2）型工程，大于 1 万 kW 小于等于 5 万 kW 的为 IV 等小（1）型工程。新的《防洪标准》（GB 50201—2014）中，小型水电站工程不再区分小（1）型、小（2）型。

1.1.2 发展历程及成就

我国小水电水能资源蕴藏量居世界第一位，据 2009 年全国农村水能资源调查评价显示，单站装机在 5 万 kW 及以下的农村水能资源技术可开发量为 1.28 亿 kW，遍及 30 个省（自治区、直辖市）的 1715 个县（市）。西部地区农村水能资源尤其丰富，技术可开发量为 7952.9 万 kW，占全国的 62.1%；中部地区为 2566.8 万 kW，占全国的 20.1%；东部地区为 2283.6 万 kW，占全国的 17.8%。按流域分布，长江流域最丰富。

1912 年，中国大陆兴建了第一座水电站——石龙坝水电站，位于云南省昆明市滇池附近，装机 480kW。到 1949 年，全国共建成大小水电站 36 万 kW，年发电量 7 亿 kW 时。

新中国成立到 20 世纪 70 年代末，广大农村偏远地区缺电。为普及农村用电，中央坚持两条腿走路方针，发挥中央、地方两个积极性，制定了一系列政策，要求各地结合水利工程建设，在有条件的地方开发小水电。这段时间，小水电从 20 世纪 50~60 年代的单站运行、低压输电、就近供用户照明，逐步发展到 70 年代的发供一体，并网运行，形成自

发自供县电网和跨县电网,逐步与大电网联网。80年代以前全国一半以上的县主要由小水电供电,从主要解决农村居民照明用电逐步发展到解决照明、加工、排灌及乡镇企业用电,为地方经济社会发展提供电力。

20世纪80年代至20世纪末,在邓小平同志亲自倡导下,国务院在“七五”“八五”“九五”批复水利部分批组织建设100个、200个、300个初级电气化县。小水电与农村电气化紧密结合,在解决农村用电的同时,还成为促进农村经济发展、增加地方财政收入、加快农民脱贫致富的重要途径。到2000年底,建成了653个农村水电初级电气化县,全国近800个县主要依靠农村水电供电。结合小流域治理,实行梯级滚动开发,建设龙头水库,提高了调节能力;地方电网规模不断扩大,110kV线路普遍成为地方电网的骨干网架。

21世纪以来,随着大电网的延伸及电力体制改革的实施,大部分农村水电站失去电网,从发供一体变为纯发电上网,普及用电的功能有所削弱。相继实施了小水电代燃料生态保护工程、水电新农村电气化县建设、农村水电增效扩容改造,在加强农村基础设施建设、促进节能减排和县域经济发展方面的作用更为显著。农村水电作为可再生能源,吸引了大量社会资金的投入,成为发展最快的时期,农村水电装机从2000年末的3423万kW增加至2014年底的7300万kW,15年间新增3877万kW。

截至2014年底,全国共建成农村水电站4.5万多座,装机容量7300多万kW,年发电量近2200亿kW时,装机容量和发电量约占全国水电的24%。其中装机容量超过100万kW的有四川、湖南、广西、云南、贵州、浙江、福建、江西、广东、湖北、重庆、甘肃、安徽、陕西、新疆等15个省(自治区、直辖市),装机容量在50万~100万kW的有吉林、青海等2个省。

1.1.3 小水电的作用

1. 节能减排作用显著

作为技术成熟、廉价(上网电价远低于风电、太阳能)的可再生能源,农村小水电在推动我国可再生能源发展方面发挥了历史性作用。2014年小水电发电量2281亿千瓦·h,替代7400万t标准煤,减少二氧化碳排放1.9亿t,减少二氧化硫排放178万t。“十二五”前4年,全国农村水电新增装机超过1100万kW,总装机达到7300万kW。仅“十二五”前4年,累计发电量8500多亿kW·h,相当于节约了2.9亿t标准煤,减排二氧化碳7.4亿t。

2. 照亮中国农村

全国2400多个县(市、区、旗)中有近1600个县(市、区、旗)开发了农村小水电,近800个县以小水电供电为主,全国近1/2的地域、1/3的县、1/4的人口主要靠农村水电供电。累计使3亿无电人口用上了电,户通电率从1980年的不足40%提高到2014年的99.9%。水电新农村电气化建设与社会主义新农村建设紧密结合,注重强农惠农、扶贫解困,不断提高农村用电水平,供电质量和可靠性大大提高。仅“十二五”前4年,累计安排中央投资22亿元,开工建设920个水电新农村电气化项目,装机容量310万kW,农村水电装机占我国县及县以下发电设备装机容量的50%左右。

3. 直接促进地方经济发展

全国 2400 多个县(市、区、旗)中有 1700 多个县(市、区、旗)有农村水电资源,其中 832 个国家重点扶贫县中近 80% 的县有农村水能资源,建设了农村小水电站。全国农村水能资源开发程度已经达到 57%,中东部一些省份的开发率有的超过了 80%,小水电的发展把资源优势转化为了经济优势,对这些地区脱贫解困具有明显的促进作用。“十二五”前 4 年,小水电完成投资 1200 多亿元,其中中央投资 124 亿元,中央投入农村水电 1 元钱,带动了地方政府和社会投资 10 元钱,投资拉动效果明显。

4. 实施小水电代燃料工程,揭开了小水电服务社会的新篇章

进入 21 世纪,小水电在继续发挥脱贫致富作用、促进地方经济发展的同时,紧密结合国家可持续发展战略,在改善生态、保护环境、促进农村现代化方面发挥着重要作用。2003 年,国家开始实施小水电代燃料试点工程,旨在通过开发小水电解决山区农村居民的燃料替代问题,减少森林砍伐,巩固退耕还林成果。在试点和扩大试点的基础上,小水电代燃料的规模不断扩大。近年来,与国家退耕还林、“天保”工程、水土流失治理有机结合,整村、整乡、整县集中连片推进,建设了小水电代燃料生态示范县。自 2009 年全面实施以来,已累计开工项目 310 个,装机 89 万 kW,其中 190 个项目投产发电,新增装机 48 万 kW,建成 1330 个代燃料村、60 个代燃料乡,解决了 35 万户、133 万农村居民的生活燃料问题,保护森林面积 500 万亩。

5. 改善农村基础设施条件,显著提高了水资源利用效率

小水电建设坚持治水办电相结合,与防洪、灌溉及流域治理相结合,提高了下游防洪、灌溉能力,在改善与提高防洪、灌溉、供水等方面发挥了积极作用。陕西省渭水河流域建设了马家沟、白果树、狮坝等梯级水电站,其中有中型水库 1 座,小型水库 6 座,通过梯级联合调度,显著提高了下游灌区的灌溉保证率。陕西省宝鸡峡灌区是全国六大灌区之一,灌溉面积 300 多万亩,职工 2500 多人,由于农业灌溉持续下滑,仅靠灌溉收入难以维持,利用渠道建设电站 3 处装机 33600kW,年发电量 1.5 亿 kW 时,收入 4000 多万元,成为灌区重要的经济支柱,发挥了以工补农的作用。民间投资的小水电在为全社会奉献清洁能源的同时,有些还提供了防洪、灌溉、供水等公共公益服务。

6. 引领世界小水电的发展

中国农村小水电装机容量约占世界小水电总装机容量的 30%。由于中国小水电在国际上的广泛影响,由 60 多个国家和地区、150 多个政府和国际组织组成的国际小水电网总部就设在我国杭州。2000 年联合国工发组织在杭州成立了联合国工发组织国际小水电中心。多年来,我国为发展中国家举办了多期国际小水电培训班,来自 70 个国家的 615 位学员参加了培训。中国小水电设备远销全球几十个国家,小水电成为和平友谊的桥梁。2015 年 4 月,习近平主席在对巴基斯坦进行国事访问期间同巴基斯坦总理纳瓦兹·谢里夫共同为“中巴小型水电技术国家联合研究中心”等 8 个中巴合作项目进行揭牌。

1.1.4 困境与未来发展方向

1. 面临的发展困境

目前我国小水电已开发装机容量占可开发容量的 50% 左右,低于发达国家 90% 的开

发水平，仍具有较大的发展潜力。但随着开发程度、难度的提高，建设及运行成本的大幅上升，电价增长缓慢，投资回报偏低，民间资本投资意愿下降。同时由于水电建设，尤其是一些引水式不按规定下泄生态流量，造成厂坝区间部分时段减水严重，甚至脱流，随着梯级开发程度迅速提高，带来了环境、社会、舆论等一系列问题，地方政府发展水电的热情消减。四川省、青海省政府发文原则禁止开发小水电，反映出地方政府对水电行业态度从当初大力支持到限制发展的巨大变化。福建省、青海省对规模较小、环境影响较大、年代久远的小水电站，进行逐步拆除退出。

2. 国家发展水电的方针不变

水电作为可大规模开发的清洁可再生能源，其开发利用可节约和替代大量化石能源，显著减少温室气体排放和污染物，保护当地生态环境，改善当地生产生活条件，有效促进地方经济社会可持续发展以及人与自然的协调发展，国家大力发展水电的方针始终不变。2015年9月，国家主席习近平访美期间，中美两国再度发表《气候变化联合声明》，中国承诺到2017年将启动全国碳排放交易体系。中国政府承诺将拿出200亿元人民币（约31亿美元）支持其他发展中国家应对气候变化。国内碳交易市场万亿空间将被打开，推动清洁能源和节能减排的发展，这对小水电等清洁能源发展带来利好消息。

3. 未来的发展方向

新时期小水电的发展将从重视新建项目，转变为更加注重对原有电站的增效扩容改造和持续利用；从强调水能资源的充分利用，转变为有限、有序、有偿开发水能资源；从强调发电功能，转变为更加重视发挥水电站的综合利用、生态功能和环境效应。扎实推进“民生水电、平安水电、绿色水电、和谐水电”建设，为全面建成小康社会做出新的更大贡献！

根据农村水能资源开发程度和农村水电发展现状，结合当地实际，因地制宜发展。农村水能资源开发率在80%以上的县（市、区、旗），原则上不再新建农村水电站，以老旧电站改扩建为主。积极探索建立农村水电站退出机制，不符合流域规划、安全隐患突出、改造潜力不大的老旧电站可以有序退出。农村水能资源开发率在60%~80%的县（市、区、旗），重点是老旧电站改扩建，可适当考虑新建电站。农村水能资源开发率在60%以下的县（市、区、旗），新建电站和老旧电站改扩建相结合。这些地区多属中西部地区、贫困地区、边远地区，是今后开发建设的重点区域。“十三五”预计新增装机600万kW。

小水电将加快升级换代的步伐。形成绿色水电技术、标准、政策体系，开展水电站生态放流设施改造，加快河流生态修复，探索建立生态补偿机制。推进绿色水电建设，开展绿色水电评价。努力建设生态友好型的绿色大坝、花园式电站，具有旅游开发价值的水电站，旅游开发与水电建设同时规划，统筹考虑。利用水利防汛信息平台，建设生态放流监测系统。逐步建立覆盖各个电站的水电管理信息系统，建立健全科学、有效的上下游联合调度系统和运行制度。结合水电站更新改造工作，全面推广适用于小水电行业的新材料、新技术、新设备，推进集控水电站建设。推行梯级优化调度、厂内优化调度，提高运行管理水平。培育专业检修、试验、运行队伍，引导和培育规模化水电企业，促进集约化经营。

1.2 水电站基础

1.2.1 水能及水能资源

1.2.1.1 水能 (waterpower, hydropower)

水能是以位能、压能和动能等形式存在于江、河、湖、海河川径流等水体中所具有的天然能量资源，是能源的重要组成部分。2006 年颁布的《中华人民共和国可再生能源法》明确水能为可再生能源。

1.2.1.2 水能资源 (waterpower resources, hydropower resources)

指江、河、湖、海中的水能蕴藏量。水能资源理论蕴藏量为河川或湖泊的水能能量（年水量与水头的乘积），以年电量和平均功率（年电量/8760）表示，其量值与是否布置梯级电站无关，与其国土面积、河川径流量和地形高差有关，分河段计算后累积。一般以理论蕴藏量和技术可开发量表示：

$$E = k_g W H \text{ (按电量计)} \text{ 或 } P = E / 8760 \text{ (按功率计)}$$

$$W = 8.64 \times 10^6 \sum_{t=1}^{t=365} q t \text{ 或 } W = 2.628 \times 10^6 \sum_{t=1}^{t=12} q t$$

式中 E ——水能资源理论蕴藏量电量， $\text{kW} \cdot \text{h}$ ；

P ——水能资源理论蕴藏量功率， kW ；

k ——折算系数， $k = 2.778 \times 10^{-4}$ （一年的小时数 8760/一年的秒数 3153.6×10^4 ）；

g ——重力加速度，取 $9.81, \text{m/s}^2$ ；

H ——河段上下断面水位差， m ；

W ——河川或湖泊年水量，河段取上下断面多年平均年径流量的平均值， m^3 ；

q ——为河段上下断面日平均流量的平均值， m^3/s ；

t ——时间，日或月。

技术可开发量指在当前技术水平条件下，可开发利用的水力资源量。经济可开发量指在当前技术、经济条件下，具有经济开发价值的水力资源量。

1.2.1.3 我国水能资源蕴藏量

根据 2005 年 11 月 25 日发布的中华人民共和国水力资源复查成果，我国大陆水力资源理论蕴藏量在 1 万 kW 及以上的河流共 3886 条，理论蕴藏量为 69440 万 kW ，年发电量为 60829 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ；技术可开发装机容量 54164 万 kW ，年发电量 24740 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ；经济可开发装机容量 40180 万 kW ，年发电量 17534 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。截至 2014 年底我国水电装机容量达到 3.0 亿 kW ，已达到技术可开发容量的 55%。由于我国地势西高东低，地形高低悬殊，因此河流落差巨大，虽然我国国土面积、年径流总量小于加拿大和美国等国，但水能蕴藏量居世界首位。全国水能蕴藏量，划分为 10 个流域（片）进行统计，见表 1.2.1。

表 1.2.1 全国各流域水能蕴藏量

流域	理论出力/万 kW	年发电量/（亿 kW·h）
长江	26801.77	23478.4
黄河	4054.8	3552
珠江	3348.37	2933.2
海滦河	294.4	257.9
淮河	144.96	127
东北诸河	1530.6	1340.8
东南沿海诸河	2066.78	1810.5
西南国际诸河	9690.15	8488.6
雅鲁藏布江及西藏其他河流	15974.33	13993.5
北方内陆及新疆诸河	3698.55	3239.9

我国的水能资源还具有以下三大特点：

（1）资源总量十分丰富，但人均资源量并不富裕。以电量计，我国可开发的水电资源约占世界总量的 15%，但人均资源量只有世界均值的 70%左右，并不富裕。到 2050 年左右中国达到中等发达国家水平时，如果人均装机从现有的 0.252kW 加到 1kW，总装机约为 15 亿 kW，即使 6.94 亿 kW（2005 年普查）的水能蕴藏量开发完毕，水电装机也只占总装机的 45%左右。

（2）分布不均衡，与经济现状不匹配。我国水电资源主要集中在长江、黄河的中上游，雅鲁藏布江的中下游，珠江、澜沧江、怒江和黑龙江上游，这 7 条江河最少可开发的大、中型水电资源都在 1000 万 kW 以上，总量约占全国大、中型水电资源量的 90%。全国大中型水电 100 万 kW 以上的河流共 18 条，水电资源约为 4.26 亿 kW，约占全国大、中型资源量的 97%。

按行政区划分，我国水电主要集中在经济发展相对滞后的西部地区。西南、西北 11 个省（自治区、直辖市）包括云、川、藏、黔、桂、渝、陕、甘、宁、青、新，水电资源约为 4.07 亿 kW，占全国水电资源量的 78%，其中云、川、藏三省（自治区）共 2.9473 亿 kW，占 57%。而经济相对发达、人口相对集中的东部沿海 11 省（自治区、直辖市），包括辽、京、津、冀、鲁、苏、浙、沪、穗、闽、琼，仅占 6%。

（3）江河来水量的年内和年际变化大。中国是世界上季风最显著的国家之一，冬季多由北部西伯利亚和蒙古高原的干冷气流控制，干旱少水，夏季则受东南太平洋和印度洋的暖湿气流控制，高温多雨。受季风影响，降水时间和降水量在年内高度集中，一般雨季 2~4 个月的降水量能达到全年的 60%~80%。降水量年际间的变化也很大，长江、珠江、松花江年径流最大与最小比值为 2~3 倍，淮河达 15 倍，海河更达 20 倍之多。根据情况优先建设具有年调节和多年调节水库的水电站，可以显著提高水电的供电质量，增强流域水资源调控能力。

我国及世界上部分国家水能资源开发情况见表 1.2.2。

表 1.2.2 一些国家水能资源开发程度

国家	经济可开发年发电量 / (亿 kW · h)	年发电量 / (亿 kW · h)	年发电量占经济 可开发电量百分比 /%	装机容量 /万 kW	水电装机容量占 总装机容量比重 /%
中国	17534	3952	22.5	11652	22.92
美国	3760	3000	79.8	7820	11.38
加拿大	5360	3530	65.9	6950	60.46
巴西	7635	3368	44.1	6908	77.95
俄罗斯	8520	1670	19.6	4500	20.94
日本	1143	921	80.6	2000	7.45
法国	720	698	97	2547	22.90
挪威	1870	1061	56.7	2770	99.32

1.2.2 水力发电的基本原理及常规水电站发电流程

1.2.2.1 发电原理

“人往高处走，水往低处流”，河道中的水流在地心引力（重力场）的作用下，中高处的水流相对于较低的位置就具有势能，其高差越大，流量越多，势能就越大，做功的能力就越大。如图 1.2.1 所示，在河道上取任意 $L(\text{m})$ 长的河段，其上断面为 1-1 断面，下断面为 2-2 断面，河道的坡降为 i ，其间水面降落的垂直高度（通常称为落差或水头）为 $H_{1-2}(\text{m})$ 。设在 $T(\text{s})$ 时段内有 $\overline{W}(\text{m}^3)$ 的水量通过断面，则两断面间的水体所具有的能量 E_{1-2} 为

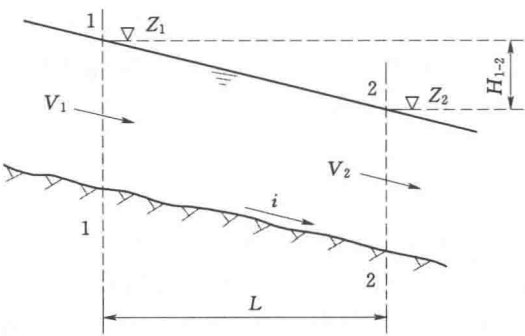


图 1.2.1 河段水能示意图

$$E_{1-2}=g\overline{W}H_{1-2}(\text{N}\cdot\text{m}) \tag{1.2.1}$$

式中 g ——水的容重， $g=9810\text{N}/\text{m}^3$ 。

单位时间内所做的功称为功率，在水力发电工程中通常称为出力，用 N 表示，则该河段的平均出力 N_{1-2} 为

$$N_{1-2}=g\frac{\overline{W}}{T}H_{1-2}=gQH_{1-2}(\text{N}\cdot\text{m}/\text{s}) \tag{1.2.2}$$

式中 $Q=\frac{\overline{W}}{T}$ ，表示时段 $T(\text{s})$ 内的平均流量， m^3/s 。

出力 N 通常以 $\text{kW}(1\text{W}=1\text{J}/\text{s}=1\text{N}\cdot\text{m}/\text{s})$ 表示，则

$$N_{1-2}=9.81QH_{1-2}(\text{kW}) \tag{1.2.3}$$

1-2 河段 t 小时的总做功量为

$$E_{1-2} = N_{1-2}t = 9.81QH_{1-2}t(\text{kW} \cdot \text{h}) \quad (1.2.4)$$

这种水流能量在未被利用以前, 主要分散地消耗在水流对河床的淘刷、挟带泥沙和相互的撞击上。如果利用一系列的水工建筑物和水电站建筑物(水库或动力渠道), 集中河道的落差, 并控制和引导水流通过水轮机, 将水能转变为旋转机械能, 水轮机带动发电机转动, 又将旋转机械能转换为电能, 再经过变电设备升压后送往电力系统, 供给广大用户, 这就是水力发电的原理。水电站就是将河流中蕴藏的水能转变为电能而修建的工程建筑物和机械、电气设备的综合体。

用筑坝集中落差并形成水库, 通过引水建筑物和水轮发电机组引水发电, 则水电站的出力在考虑到引水道的水头损失和水轮机、发电机的效率后可依式(1.2.5)计算为

$$N \leq 9.81QH\eta(\text{kW}) \quad (1.2.5)$$

式中 H ——水电站的工作水头, 它等于水电站的毛水头 H_m (水电站上、下游水位之差) 减去引水系统的水头损失 h_w , 即 $H = H_m - h_w$;

η ——水轮发电机组的效率, 它等于水轮机效率 η_T 和发电机效率 η_f 的乘积, 即

$$\eta \leq \eta_T \eta_f, \text{ 对大中型机组 } \eta_T \leq 0.9 \sim 0.94, \eta_f \leq 0.95 \sim 0.98。$$

在初步估算出力时可应用简化公式为

$$N = KQH(\text{kW}) \quad (1.2.6)$$

K 被称为出力系数。一般, 大型水电站出力系数 K 在 8.5 以上, 中型水电站 $K = 8.0 \sim 8.5$, 小型水电站 $K = 7.5 \sim 8.0$ 。

世界上第一座水电站于 1878 年诞生于法国。我国大陆第一座水电站是云南昆明的石龙坝水电站, 1910 年 7 月开工建设, 1912 年 4 月发电, 装机容量 480kW, 2006 年被国务院批准列入第六批全国重点文物保护单位名单。陕西省第一座水电站为汉中武家沟水电站, 系利用褒惠渠跌水修建, 装机容量 160kW, 于 1945 年开工建设, 1946 年发电。1949 年被炸毁, 后重建, 运行至 1972 年报废。随着电力工业的发展, 水电站的规模和机组容量也越来越大。目前世界上装机容量最大的是长江三峡水电站, 总装机容量达到 2250 万 kW, 年发电量为 1000 多亿 kW·h 左右; 第二是金沙江白鹤滩水电站, 装机容量达到 1600 万 kW; 江西洪屏抽水蓄电站, 总装机容量为 240 万 kW, 与广东惠州抽水蓄能电站并列为世界上装机容量最大的抽水蓄能电站; 最高的大坝是中国锦屏 I 级大坝, 高达 305 米; 单机容量最大的水轮发电机组是向家坝水电站的机组, 其单机容量为 80 万 kW。

1.2.2.2 水电站发电流程

河川的水体通过修建大坝、隧洞(渠道)等水工建筑物来集中水头, 流经压力管道等将压力水输送至厂房, 当机组须运转发电时, 打开主阀(有时), 再开启导叶(实施调节和控制通过机组的水量)使水流驱动水轮机。水轮机后通过连接的主轴带动发电机旋转, 发电机经励磁后, 建立电压, 并在断路器投入后, 开始将产生的电能输送至电力系统。如要调整发电机组的出力, 可以通过调整导叶的开度以增减过流水量来实现, 发电后的水流经由尾水渠(洞)流回到河道。

水电站能量转换流程: 水能→通过水轮机转换为旋转机械能→带动发电机发电将旋转机械能转换为电能→升压站及输电线路→电网→用户。常规水电站发电流程示意图见

图 1.2.2。

1.2.3 水电站主要组成部分

水电站是由各种水工建筑物（挡水建筑物、泄水及消能建筑物、进水建筑物、引水建筑物、平水建筑物及厂房）以及发电、变电、配电、输电等机械、电气设备组成的一个有机综合体，机电设备安装安装在厂房内及各种建筑物上。水电站组成见图 1.2.3。现按照水流方向的顺序介绍如下。

1.2.3.1 挡水建筑物

堤坝式、混合式水电站挡水建筑物主要作用是壅高水位，集中水头，形成水库，并具备一定的调蓄能力。引水式水电站挡水建筑物主要作用是壅高水位以形成引水条件。挡水建筑物形式主要有坝（重力坝、拱坝、土石坝）、闸（拦河闸、翻板闸、橡胶坝）等，河床式水电站厂房既是发电厂房也是挡水建筑物。部分规模较小的水电站也有采用弯道无坝引水的形式。

1.2.3.2 泄水及消能建筑物

泄水建筑物作用是泄放水库容纳不了的来水、来沙或放空水库；消能建筑物主要是消散下泄水流的能量（泄洪功率），确保泄水不危及水工建筑物安全，并使建筑物上下游水位衔接。重力坝、拱坝一般采用坝体泄洪，如坝身泄水表孔、中孔、底孔等，或设在坝体外的泄洪洞等；土石坝坝体一般采用岸边式溢洪道、泄水隧洞等。

消能建筑物结合泄水建筑物布置，是用以消耗下泄水流能量，减轻下游河床冲刷的设施，一般有消力池、消力塘、消力槛、消力墩等型式。消力池是经过开挖而建成在泄水建筑物下游的较深水池，其底板称为护坦。消力槛是设置在护坦末端，高出河底的混凝土槛；消力墩是设置在护坦里的混凝土墩；挑流坎是把下泄水流挑射至下游离坝基较远处的鼻坎（差动式、连续式）。

1.2.3.3 引水建筑物

引水建筑物包括进水建筑物、输水建筑物、平水建筑物。

1. 进水建筑物

进水建筑物作用是从河流或水库取得所需的流量。进水口是水电站水流的进口，按照发电要求将水引入水电站的引水道。进水口应保证水流平顺、对称，流速变化均匀，不发生回流和漩涡，不出现淤积，不聚集污物。设置有拦污、防冰、拦沙及冲沙等设备。

进水口按照水流条件可分为开敞式进水口、浅孔式进水口和深孔式进水口，开敞式进水口又称无压进水口，浅孔式和深孔式属有压进水口。压力引水一般为深式进水口（竖井

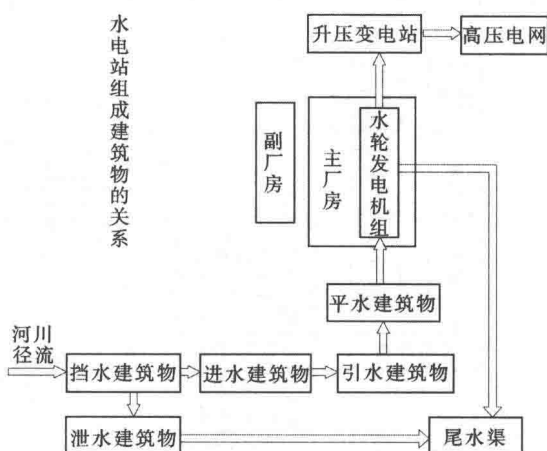
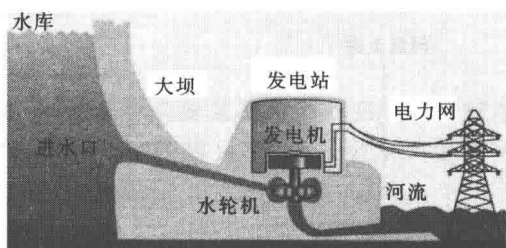


图 1.2.2 发电流程示意图