

21 SHIJI
ZHONGGUO
SHUIDIAN
GONGCHENG

21世纪 中国水电工程

彭程 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

86.8
602.1

要 點 容 內

21 SHIJI ZHONGGUO SHUIDIAN GONGCHENG

主 任 李菊根 晏志勇

21世纪中国水电工程

副主编 吴鹤鹤

编 委 安盛勋 张春生 彭程 主编 冯树荣 吕明治

范福平 黄玉乾 王仁坤 陈建苏 黄建添 杜雷功

审 稿 彭程 吴鹤鹤 岳立夫 陈建苏 吴维君 刘更新

王绪源 洪重光 黄一和 刘谋珍

编 写 (按姓氏笔画排序) 王康柱 王绪源 王义祥 王小平 王火青 于忠政 于跃

王康柱 王绪源 王义祥 王小平 王火青 于忠政 于跃

王康柱 王绪源 王义祥 王小平 王火青 于忠政 于跃

王康柱 王绪源 王义祥 王小平 王火青 于忠政 于跃

王康柱 王绪源 王义祥 王小平 王火青 于忠政 于跃

王康柱 王绪源 王义祥 王小平 王火青 于忠政 于跃

王康柱 王绪源 王义祥 王小平 王火青 于忠政 于跃

王康柱 王绪源 王义祥 王小平 王火青 于忠政 于跃

王康柱 王绪源 王义祥 王小平 王火青 于忠政 于跃

王康柱 王绪源 王义祥 王小平 王火青 于忠政 于跃

王康柱 王绪源 王义祥 王小平 王火青 于忠政 于跃

王康柱 王绪源 王义祥 王小平 王火青 于忠政 于跃

王康柱 王绪源 王义祥 王小平 王火青 于忠政 于跃

王康柱 王绪源 王义祥 王小平 王火青 于忠政 于跃

王康柱 王绪源 王义祥 王小平 王火青 于忠政 于跃

王康柱 王绪源 王义祥 王小平 王火青 于忠政 于跃

王康柱 王绪源 王义祥 王小平 王火青 于忠政 于跃



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书旨在全面总结已建、在建水电工程的建设技术、经验和存在问题,为在建和今后建设的水电工程提供设计和施工的方法及思路。本书收集了大量近期建设的工程实例资料,共有 54 项具有代表性的水电工程,这些水电工程代表了我国当代最新的筑坝技术,标志着我国水电工程技术达到了世界领先水平。

本书适用于水利水电勘测、设计、施工人员作为设计手册和施工手册,也适用于科研单位、大专院校作为研究资料,同时可为水利水电工程各项工作提供指导和参考。

图书在版编目(CIP)数据

21 世纪中国水电工程/彭程主编. —北京:中国水利水电出版社, 2005

ISBN 7-5084-3310-6

I. 2... II. 彭... III. ①水利工程—中国②水力发电工程—中国 IV. TV-12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 113409 号

书 名	21 世纪中国水电工程
作 者	彭 程 主 编
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@ waterpub. com. cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
印 刷	北京兴怀印刷厂
规 格	880mm × 1230mm 16 开本 54.5 印张 1539 千字
版 次	2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0000—3000 册
定 价	148.00 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

主 任 李菊根 晏志勇

主 编 彭 程

副主编 吴鹤鹤

编 委 安盛勋 张春生 杨启贵 张宗亮 冯树荣 吕明治

范福平 黄玉乾 王仁坤 陈建苏 黄建添 杜雷功

审 稿 彭 程 吴鹤鹤 岳立夫 陈建苏 吴维君 刘更新

王绪源 洪重光 黄一和 刘瑛珍

编 写 (按姓氏笔画排序)

于忠政 于 跃 于火青 王小毛 王犹扬 王君利

王康柱 王绪源 王义锋 叶发明 石亚龙 冯树荣

龙起煌 刘志明 刘金堂 刘兴宁 刘宗仁 孙保平

李学强 李 冰 李小莘 李 杰 李玲龙 吴海山

肖白云 肖 锋 肖雄辉 何世海 苏 岩 苏 勇

陈祥荣 陈能平 杨启贵 杨泽艳 杨本新 杨志河

杨家修 杨经会 洪永文 俞 兵 胡育林 姜忠见

郑光伟 郑全春 郑齐峰 姚栓喜 段绍辉 钱钢粮

张宗亮 张沁成 徐建强 徐跃明 郝元鳞 郝荣国

梁汉寿 黄彦坤 曹国利 曾雄辉 彭卫军 董绍尧

湛正刚 蔚军耀 廖建强 蔡昌光 熊卫亚 魏永新

序

中国的水电建设正在以史无前例和世无前例的速度迅猛发展，在近二三十年内，中国将成为世界上头号水电大国和水电强国，在全球独领风骚，这一事实，即使国内外对水电有成见或持反对态度的人士，也不能不承认了。

这是历史的选择，国家的选择，人民的选择。中国的发展和民族的振兴需要强大的能源支持。中国石油和天然气资源有限，一次能源主要依靠煤炭，不论从资源、运输、环保……哪一个角度看，中国必须全力发展可再生能源来削减燃煤数量，这是基本国策之一。而在当前条件下，水电是唯一可以大规模商业开发和方便利用的清洁可再生资源。中国还要解决严重的防洪、灌溉、供水……问题，这些都要由大水库来解决。这就是问题的本质。无论开发水电会带来多少负面影响，它的作用是不可替代的，何况负面影响是可以避免、缓解或补偿的。外国也是如此，世界上约有 $1/5$ 的电力供应来自水电，有 24 个国家的水电比重超过 90%，有 $1/3$ 以上国家的电力供应以水电为主，75 个国家主要依靠大坝来控制洪水，全世界有近 40% 的农田依靠水库提供灌溉，世界各国都在重新认识进一步开发水电的问题，就是明证。

特别是中国水能资源得天独厚，居世界首位。中国大陆的水力资源理论蕴藏量为 6.94 亿 kW，技术可开发装机容量为 5.42 亿 kW，年发电量 2.47 万亿 kW·h。水能可无限期利用，即使按利用百年计，水能是中国当前探明的剩余可开采能源的 44.6%，占有半壁江山。2004 年 8 月 1 日，中国水电装机突破 1 亿 kW，这是第一个里程碑。根据中国电力发展规划和“西电东送”的战略目标，到 2010 年和 2020 年，常规水电装机将分别达到 1.94 亿 kW 和 3.28 亿 kW，占水能技术可开发量的 35.8% 和 60.5%，出现第二个和第三个里程碑，前景是何等鼓舞人心啊。

当然，这个前景还要经过艰苦卓绝的努力才能实现。中国的水电建设任重而道远。待开发的水电站主要集中在西部的金沙江、澜沧江、大渡河、雅砻江、怒江和雅鲁藏布江等大江大河上。高山、深谷、急流，工程规模巨大，地质情况复杂，交通气候条件困难，工程建设面临着前

所未有的挑战。我们要建设小湾、锦屏一级、溪洛渡等300m级的高拱坝；要建设坝高超过200m的龙滩等碾压混凝土重力坝和水布垭等高面板堆石坝；要建设坝高超过300m的双江口等高心墙堆石坝，这些都是世界一流的巨型坝工；锦屏二级水电站要在岩溶发达地区开挖长达18km的引水隧洞，埋藏深、地应力高、外水压力大，在设计和施工技术难度都极大。在泄洪消能方面，溪洛渡水电站下泄流量 $52300\text{m}^3/\text{s}$ ，下泄水流功率达1亿kW，居世界第一位。以上等等这些世界级难题都有待中国的水电工作者去攻克，去攀登人类新的工程技术高峰。与此同时，水电的大规模开发，还必须全面研究、妥善解决超远距离输电、特大机组设备制造、全面环境保护、开发性的水库移民工作以及工程经济、运行管理等问题，每个问题都是巨大的挑战。

深入、细致、全面地做好前期工作，是取得胜利的首要保证。为了加强前期工作，国家在电力改革中专门组建了中国水电工程顾问集团公司，这是集中全国最主要的水电技术力量成立的国家级企业集团，也是世界上少有的一支强大技术力量。集团公司从事全国水电发展和重要河流（河段）水电开发规划、水电勘测设计科研和技术咨询、设计审查、工程安全鉴定、工程验收，以及与水电相关产业的开发、投资、经营和管理等业务。集团公司成立以来，做了大量卓有成效的工作，为推动我国水电事业的健康快速发展做出重要贡献，也支援了世界水电的开发。

现在，中国水电工程顾问集团公司集行业之力，组织战斗在第一线的总工程师和项目设计总工程师，编制完成了《21世纪中国水电工程》一书。该书汇集了53项水电工程资料，包括22项在建水电工程、14项设计中的水电工程和17项抽水蓄能工程，这些都是中国当前最重要的在建和设计中的水电工程，代表今后二三十年中国水电建设的整体水平，描绘出中国水电建设的灿烂前景，一定程度上也领引着世界水电建设的发展方向。我相信这本书对今后我国水电工程的建设具有重要的参考和借鉴价值，对推动我国水电工程建设的进一步发展将起到积极作用，也可使外国有关人士了解中国的水电发展大致情况。

希望我国从事水电工程建设的单位和技术同仁，继续发挥聪明才智，群策群力，创精品、铸辉煌，锐意创新，勇攀高峰，共同为我国水电工程建设飞速发展做出新的贡献。

潘家铮

2005年11月

前言

水电是一种可再生的清洁能源,开发水电不但能够经济持续地提供电力,还能获得防洪、灌溉、航运、供水、旅游等综合社会效益,并能促进所在地区的工农业发展,有利于节约石油、煤炭资源,有利于保护环境资源。因此,发达国家都优先开发水电,并几乎达到开发殆尽的程度。

我国水能资源十分丰富,理论蕴藏量为 6.94 亿 kW,年发电量为 60829 亿 kW·h;技术可开发装机容量为 5.42 亿 kW,相应年发电量为 2.47 亿 kW·h,居世界第一位。

21 世纪我国水电建设迎来了一个跨跃式发展的黄金时代。水电是我国的重要的优势资源之一,加快开发西部地区丰富的水能资源,实现“西电东送”的宏伟计划,是我国经济社会可持续发展、减缓对化石能源和进口能源依赖和实施西部大开发战略、促进东中西部地区协调发展的重大举措,为水电大发展提供了政策保障和实践基础。

21 世纪发展水电的重点是开发金沙江、雅砻江、大渡河、乌江、长江上游、南盘江、红水河、澜沧江、黄河上游、怒江、湘西、闽浙赣、东北及黄河北干流等流域(地区)的水力资源,完成 13 个大型水电基地建设。在调峰能力弱、系统峰谷差大的电网,在加强电网调峰规划的基础上,选择优良站址,适当建设抽水蓄能电站。预计到 2010 年、2020 年我国常规水电装机容量分别达到 1.94 亿 kW、3.28 亿 kW,抽水蓄能电站装机容量分别达到 1800 万 kW、5000 万 kW。

21 世纪的水电建设在中国,世界水电技术进步靠中国。21 世纪我国正在和即将建设像三峡、溪洛渡、向家坝、白鹤滩、锦屏一级、锦屏二级、糯扎渡、拉西瓦、虎跳峡等战略性工程,其规模巨大、工程和社会条件复杂、技术难度很大。我国的水电建设,无论是从技术,还是从环境、社会等各个方面,都将面对从未遇到的世界级挑战,同时我国也引领着国际水电建设发展的方向,标志着我国的水电建设正步入世界领先水平。

21 世纪我国将攻克许多世界级难题。研究 200m 级碾压混凝土重力坝、200 ~ 300m 级高混凝土面板堆石坝、300m 级高拱坝配套技术等的高坝筑坝技术;研究不同坝型泄水建筑物合理的布置型式及高水头、大单宽流量的泄水建筑物体型及泄洪消能技术;开发新型抗磨损、抗空蚀材料;研究深厚覆盖层工程特性的勘测和测试技术;研究遥感、物探与测试技术的开发和完善;研究边坡工程地质条件的新型快速勘探技术;研究新型混凝土及掺和料,包括纤维混凝土、掺和料、新型外加剂的

开发等；开展新型防渗止水材料，特别是适合超高面板坝的填缝止水材料和高碾压混凝土上游面防渗材料；研制适用于大孔隙、高地下水流速、细裂隙等特殊地层情况的灌浆材料及相应的施工工艺等；开展转轮叶片水下动态特性、疲劳计算分析及寿命预估、叶道涡及压力脉动、轴系稳定和振动、整机动特性分析和振动分析等大型水电机组的关键技术研究。另外，水电建设对环境影响评价理论与方法、有效地环境保护措施的研究，水库移民的政策与战略性研究和实践，也是极具挑战和开创性工作。

《21世纪中国水电工程》一书收集了大量在建和设计中的工程实例资料（含文字、图纸和工程特性表），共有53项具有代表性的水电工程，包括22项在建水电工程、14项设计中的水电工程、17项抽水蓄能工程，这些工程代表了我国21世纪水电建设的整体水平。

本书为水利水电工程界提供了21世纪中国最具代表性的工程实例。本书适用于水利水电勘测设计单位、施工单位作为工作手册和参考资料，也适用于科研单位、大专院校作为研究资料，同时为水利水电工程各项工作提供指导和参考。

本书由中国水电工程顾问集团公司组织编著，得到了广大设计院的大力支持。北京勘测设计研究院、华东勘测设计研究院、中南勘测设计研究院、西北勘测设计研究院、昆明勘测设计研究院、成都勘测设计研究院、贵阳勘测设计研究院、长江水利委员会勘测规划设计研究院、黄河水利委员会勘测规划设计研究院、广西电力工业勘察设计研究院、广东省水利水电勘测设计研究院、东北勘测设计研究院、新疆水利水电勘测设计研究院、中水北方勘测设计研究有限责任公司等单位积极组织投稿，提供了大量的文献资料，为水利水电工程行业的发展和进步做出了贡献。在此一并表示感谢！

尽管我们在编写过程中做出了很大努力，但受到知识和工程经验的局限，仍难免有不妥之处，热忱欢迎广大读者对本书提出宝贵的意见和建议。

编者

2005年11月

目 录

序

前言

21 世纪中国水电发展综述	1
---------------------	---

在建大型水电工程

三峡水利枢纽工程	11
溪洛渡水电站工程	35
糯扎渡水电站工程	53
龙滩水电站工程	72
拉西瓦水电站工程	87
小湾水电站工程	107
锦屏一级水电站工程	129
瀑布沟水电站工程	146
构皮滩水电站工程	162
水布垭水利枢纽工程	180
景洪水电站工程	195
彭水水电站工程	209
公伯峡水电站工程	225
光照水电站工程	246
三板溪水电站工程	261
长洲水利枢纽工程	277
吉林台一级水电站工程	294
洪家渡水电站工程	310
小天都水电站工程	327
西霞院水利枢纽工程	343
蔺河口水电站工程	360
龙首水电站工程	374

规划设计中的大型水电工程

白鹤滩水电站工程	389
向家坝水电站工程	405
锦屏二级水电站工程	424
虎跳峡水电站工程	439

观音岩水电站工程.....	453
金安桥水电站工程.....	468
大岗山水电站工程.....	485
鲁地拉水电站工程.....	496
龙开口水电站工程.....	511
沙沱水电站工程.....	523
积石峡水电站工程.....	536
桥巩水电站工程.....	554
察汗乌苏水电站工程.....	569
天花板水电站工程.....	584

在建和设计中的大型抽水蓄能工程

惠州抽水蓄能电站工程.....	599
西龙池抽水蓄能电站工程.....	615
桐柏抽水蓄能电站工程.....	629
宝泉抽水蓄能电站工程.....	642
张河湾抽水蓄能电站工程.....	659
宜兴抽水蓄能电站工程.....	675
泰安抽水蓄能电站工程.....	688
白莲河抽水蓄能电站工程.....	705
蒲石河抽水蓄能电站工程.....	719
丰宁抽水蓄能电站工程.....	736
乌龙山抽水蓄能电站工程.....	751
板桥峪抽水蓄能电站工程.....	765
溧阳抽水蓄能电站工程.....	782
蟠龙抽水蓄能电站工程.....	799
黑麋峰抽水蓄能电站工程.....	816
太平峪抽水蓄能电站工程.....	833
呼和浩特抽水蓄能电站工程.....	849

21 世纪中国水电发展综述

彭 程

21 世纪,中国和世界经济发展都翻开了新的一页。经济的快速增长依赖于能源的配套供应。近期国际油价居高不下,国内煤价持续走高,已引起了世界各国和我国政府的高度关注。21 世纪前 20 年到 30 年,是我国工业化发展的重要阶段,根据国际经济发展的经验和我国人口多的国情,能源需求和经济一起快速增长的局面无法改变。

水力资源作为可再生清洁能源,是中国能源的重要组成部分,在能源平衡和能源可持续发展中占有重要地位。国家从经济快速发展、能源供应持续保障和环境保护、西部大开发等方面考虑,制定了优先开发水电的方针。21 世纪,尤其是 21 世纪前叶,水电发展必将进入黄金时期。

一、中国水力资源概况

1. 水力资源总量

中国幅员辽阔,国土面积达 960 万 km^2 ,蕴藏着丰富的水力资源。根据最新水力资源复查结果,我国大陆水力资源理论蕴藏量在 10MW 及以上的河流共 3886 条,水力资源理论蕴藏量年电量为 60829 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,平均功率为 69400 万 kW ;理论蕴藏量 10MW 及以上河流上单站装机容量 0.5MW 及以上水电站技术可开发装机容量 5.42 亿 kW ,年发电量 2.47 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$,其中经济可开发水电站装机容量 401795MW,年发电量 17534 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,分别占技术可开发装机容量和年发电量的 74.2% 和 70.9%。

2. 水力资源在能源结构中的地位

常规能源资源包括煤炭、水能、石油和天然气,我国能源资源探明(技术可开发)总储量约 8450 亿 t 标准煤(其中水能为可再生能源,按使用 100 年计算),探明剩余可采(经济可开发)总储量为 1590 亿 t 标准煤,分别约占世界总量的 2.6% 和 11.5%。我国能源探明总储量的构成为原煤 85.1%、水能 11.9%、原油 2.7%、天然气 0.3%,能源剩余可采总储量的构成为原煤 51.4%、水能 44.6%、原油 2.9%、天然气 1.1%。我国常规能源资源以煤炭和水能为主,水能资源仅次于煤炭,居十分重要的地位。如果按照世界有些国家水力资源使用 200 年计算其资源储量,我国水能剩余可开采总量在常规能源构成中则超过 60%。由此可见水能在我国能源资源中的地位和作用。

能源节约与资源综合利用是我国经济和社会发展的一项长远战略方针。“十一五”期间和今后更长远时期,国家把实施可持续发展战略放在更加突出的位置,可持续发展战略要求节约资源、保护环境,保持社会经济与资源、环境的协调发展。优先发展水电,能够有效地减少对煤炭、石油、天然气等资源的消耗,不仅节约了宝贵的化石能源资源,还减少了环境污染。

3. 水力资源分布

由于我国幅员辽阔,地形与雨量差异较大,因而形成水力资源在地域分布上的不平衡,水力资源分布是西部多、东部少。按照技术可开发装机容量统计,我国西部云、贵、川、渝、陕、甘、

宁、青、新、藏、桂、内蒙古等12个省(自治区、直辖市)水力资源约占全国总量的81.46%,特别是西南地区云、贵、川、渝、藏就占66.70%;其次是中部的黑、吉、晋、豫、鄂、湘、皖、赣等8个省占13.66%;而经济发达、用电负荷集中的东部辽、京、津、冀、鲁、苏、浙、沪、粤、闽、琼11个省(直辖市)仅占4.88%。我国的经济东部相对发达、西部相对落后,因此,西部水力资源开发除了西部电力市场自身需求以外,还要考虑东部市场,实行水电的“西电东送”。

水力资源较集中地分布在大江大河干流上,便于建立水电基地实行战略性集中开发。我国水力资源富集于金沙江、雅砻江、大渡河、澜沧江、乌江、长江上游、南盘江红水河、黄河上游、湘西、闽浙赣、东北、黄河北干流以及怒江等13大水电基地,其总装机容量约占全国技术可开发量的50.9%。特别是地处西部的金沙江中下游干流总装机规模58580MW,长江上游干流33197MW,长江上游的支流雅砻江、大渡河以及黄河上游、澜沧江、怒江的规模都超过20000MW,乌江、南盘江红水河的规模也超过10000MW。这些河流水力资源集中,有利于实现流域、梯级、滚动开发,有利于建成大型的水电基地,有利于充分发挥水力资源的规模效益,实施“西电东送”。

二、水电开发现状及规划

1. 开发现状

新中国成立以来,我国十分重视水电建设。虽然由于历史、资金及体制等因素,水电建设曾出现起伏,呈现波浪式前进的态势,但50多年来水电也获得了可观的发展,为国民经济发展和人民生活提高做出了巨大贡献。

新中国成立初期,水电建设主要集中于经济发展及用电增长较快的东部地区,大型水电站不多。20世纪50年代末,开始在黄河干流兴建刘家峡等大型水电站,但仍以东部地区的开发建设为主,西南地区丰富的水力资源尚未得到大规模开发。水电在电力工业中的比重逐步下降。改革开放以来,国家把开发西部地区水力资源提到重要位置,尤其是提出“西电东送”战略以后,西南地区丰富的水力资源逐步得到开发利用。除长江干流上三峡水电站外,在长江重要支流雅砻江、大渡河、乌江上均已建成或正在建设巨型水电站,黄河上游龙羊峡至青铜峡河段、澜沧江、南盘江、红水河均已建成或正在建成一批百万千瓦以上的骨干水电站。这些河流或河段水力资源的开发,为西部地区大开发和“西电东送”拉开了序幕。

2004年底全国常规水电已开发装机容量10256万kW(水电总装机容量10826万kW,其中抽水蓄能电站570万kW),年发电量3280亿kW·h,占全国技术可开发装机容量的18.9%,占全国总装机容量的23.3%。其中,东北地区的辽吉、华北地区的京津冀、华东地区的闽浙皖鲁赣、中南地区的豫湘粤海等省(直辖市)常规水电开发程度均超过技术可开发量的50%,最大达88.7%,水力资源富集的西南地区川、滇、藏开发程度分别为11.7%、7.5%和0.3%,西北地区陕、甘、青、新开发程度分别为23.8%、36.5%、18.4%和2.7%。

根据目前电源建设进展情况,预计2005年全国常规水电将新增投产容量1170万kW。2005年底全国常规水电开发总装机容量将达到11430万kW。

2004年底全国已建成投产的抽水蓄能电站10座,装机容量达到570万kW。其中包括河北岗南常规水电站上安装的1.1万kW抽水蓄能机组、河北潘家口(其中抽水蓄能机组27万kW)、北京十三陵(80万kW)、广州一期、二期工程(共240万kW,其中60万kW供香港)、浙江溪口(8万kW)、浙江天荒坪(180万kW)、安徽响洪甸(8万kW)、江苏沙河(10万kW)、湖北天堂(7万kW)、西藏羊卓雍湖(9万kW)。

2005年新增投产抽水蓄能电站有吉林白山30万kW、河南回龙12万kW和浙江桐柏一台30万

kW, 2005 年底全国建成投产的抽水蓄能电站装机容量达到 642.1 万 kW (其中 60 万 kW 供香港)。我国已经建成投产的抽水蓄能电站装机容量占全国总发电装机容量的比例约 1.2%, 属于较低水平。

2005 年底在建抽水蓄能电站有 9 座, 装机规模为 930 万 kW。分别是山东泰安 (100 万 kW)、河北张河湾 (100 万 kW)、山西西龙池 (120 万 kW)、浙江桐柏 (装机容量 120 万 kW, 已投产 30 万 kW)、安徽琅琊山 (60 万 kW)、江苏宜兴 (100 万 kW)、河南宝泉 (120 万 kW)、湖北白莲河 (120 万 kW)、湖南黑麋峰 (120 万 kW, 一期 60 万 kW)。

2. 2020 年水电发展目标

按照电力发展规划、“西电东送”的需要、大型河流开发进程、大中型水电项目规划和前期工作深度以及小型水电站合理建设规模等, 制定水电的中长期发展目标。

到 2010 年常规水电装机容量达到 19400 万 kW, 占电力总装机容量的 26.0%, 开发程度达 35%; 到 2015 年常规水电装机容量达到 27100 万 kW, 占电力总装机容量的 28.6%, 开发程度达 50%; 到 2020 年常规水电装机容量达到 32800 万 kW, 占电力总装机容量的 28.5%, 开发程度达 60%。

按规模划分, 大中型常规水电在 2005 年底装机 7636 万 kW 的基础上, “十一五”、“十二五”和“十三五”分别需要投产 6764 万 kW、6450 万 kW 和 4450 万 kW, 到 2010 年、2015 年和 2020 年末, 全国大中型常规水电站总规模将分别达到 14400 万 kW、20850 万 kW 和 25300 万 kW; 小型水电站 (装机容量 50MW 以下电站) 2005 年底装机容量 3794 万 kW, 以后按每年 250 万 kW 左右投产, 到 2010 年、2015 年和 2020 年末, 全国小型水电站总规模将分别达到 5000 万 kW、6250 万 kW 和 7500 万 kW。

按区域划分, 到 2010 年, 在全国水电发展到 19400 万 kW 规模时, 东部地区开发总规模达到 2700 万 kW, 占全国的 13.8%, 其开发程度达 90% 以上; 中部地区总规模为 5800 万 kW, 占全国的 29.8%, 其开发程度达到 78.4%; 西部地区总规模为 10900 万 kW, 占全国的 56.4%, 其开发程度达到 24.9%, 其中四川、云南、贵州的水电开发总规模分别为 3190 万 kW、2090 万 kW 和 1530 万 kW, 开发程度分别为 26.6%、20.5% 和 78.6%。

到 2020 年, 在全国水电发展到 32800 万 kW 规模时, 东部地区开发总规模达到 2900 万 kW, 占全国的 9%, 水力资源基本开发完毕; 中部地区总规模为 7200 万 kW, 占全国的 22%, 其开发程度达到 90% 以上; 西部地区总规模为 22700 万 kW, 占全国的 69%, 其开发程度达到 60.7%, 其中四川、云南、贵州的水电开发总规模分别为 7600 万 kW、6280 万 kW 和 1830 万 kW, 开发程度分别为 63.3%、61.6% 和 94%。

按十三大水电基地划分, 在 2010 年、2015 年和 2020 年十三大水电基地的总体开发程度分别达到 35%、55% 和 70%。其中, 至 2010 年末, 金沙江中下游、雅砻江、大渡河、澜沧江、怒江和长江上游水电基地开发程度分别达到 3.1%、13.4%、25.6%、21.5%、0.8% 和 78.7%; 至 2015 年末, 金沙江中下游、雅砻江、大渡河、澜沧江和怒江水电基地开发程度分别达到 29.1%、57.0%、68.5%、57.4% 和 14.0%; 2020 年末金沙江中下游、雅砻江、大渡河、澜沧江和怒江水电基地开发程度达到 54.9%、72.9%、86.9%、76.4% 和 33.7%。

根据全国水电电源规划及“西电东送”规划研究成果分析, 至 2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年, 初步安排全国水电“西电东送”总容量分别为 1980 万 kW、4440 万 kW、8750 万 kW 和 10650 万 kW, 其中, 南部通道“西电东送”总容量分别为 880 万 kW、1440 万 kW、2430 万 kW 和 3260 万 kW, 中部通道“西电东送”总容量分别为 1100 万 kW、2850 万 kW、6020 万 kW、7090 万 kW, 北部通道“西电东送”总容量分别为 0 万 kW、150 万 kW、300 万 kW、300 万 kW。扣去 2004 年前已有的水电“西电东送”容量约 1470 万 kW (天生桥一级、天生桥二级, 云电外送, 川电外送和三峡、葛洲坝等), 上述各水平年全国水电“西电东送”累计增加外送容量分别为 510 万 kW、2970 万 kW、7280 万 kW 和 9180 万 kW。

3. 2020 ~ 2050 年水电发展展望与藏电外送

至 2020 年, 13 大水电基地规划水电工程绝大部分已开工建设, 结转 2020 ~ 2030 年投产容量约 4000 万 kW。从 2020 年开始, 水电开发的主战场逐渐向金沙江、澜沧江和怒江上游转移, 从而启动具有战略意义的藏电外送工程。

西藏自治区河流众多, 水力资源丰富。根据全国水力资源复查成果, 西藏自治区水力资源理论蕴藏量平均功率 20136 万 kW、年电量 17640 亿 kW·h, 技术可开发装机容量 11000 万 kW、年发电量 5760 亿 kW·h。全区水力资源理论蕴藏量占全国的 29%, 居全国首位, 技术可开发量占全国的 20.3%, 仅次于四川省, 居全国第二位。受工作深度的限制, 在全国水力资源复查成果经济可开发总量 401795MW 中, 西藏仅计列了 8350MW, 随着西藏水电前期工作的加深和形势的发展、科技的进步, 西藏水电开发潜力巨大, 完全有可能成为 2020 年后中国水电建设的主战场。

西藏自治区内水力资源分布较为集中, 按区域划分, 绝大部分分布在藏南的雅鲁藏布江干流曲松至米林河段(约 500 万 kW)、干流大拐弯(约 4800 万 kW)、支流帕隆藏布(约 700 万 kW)和藏东的怒江干流上游河段(1422 万 kW), 澜沧江干流上游河段(636 万 kW), 金沙江干流上游河段(1666 万 kW, 其中川藏界河段 948 万 kW, 属西藏的按界河的 1/2 计为 474 万 kW)。藏东三江顺河而下至云南和四川省, 距离较近, 高程不高。随着三江水电开发向上游推进, 藏东水力资源接续开发较为现实。藏南雅鲁藏布江的开发, 难度要相对大一些, 要依靠水电工程和输电工程的技术创新; 同时还可以根据科技发展水平, 科学地做好规划, 如墨脱水电站(3800 万 kW, 水头达 2000 多 m)采取分级开发; 通过国际合作拓展输电市场或走廊(顺江而下距印度、缅甸平原非常近)。

4. 抽水蓄能电站规划发展目标

根据各电网的负荷特性、电源规划、“西电东送”及联网规划和抽水蓄能规划设计成果, 抽水蓄能电站项目前期工作深度等, 分析测算抽水蓄能电站合理建设规模, 全国在 2010 年、2015 年和 2020 年三个水平年的抽水蓄能装机规模分别达到 1800 万 kW(扣除供香港 60 万 kW 后, 下同)、3400 万 kW 和 5000 万 kW。国家电网在 2010 年、2015 年和 2020 年三个水平年的抽水蓄能装机规模分别达到 1440 万 kW、2800 万 kW 和 4000 万 kW。其中, 华东电网分别达到 576 万 kW、1116 万 kW 和 1516 万 kW; 华北电网分别达到 428 万 kW、718 万 kW 和 1008 万 kW; 东北电网分别达到 90 万 kW、270 万 kW 和 380 万 kW; 华中电网分别达到 319 万 kW、579 万 kW 和 829 万 kW。中国南方电网在 2010 年、2015 年和 2020 年三个水平年的抽水蓄能装机规模分别达到 360 万 kW、600 万 kW 和 1010 万 kW。

2020 年前全国抽水蓄能电站发展以华东最多, 华北、广东次之, 华中、东北又次之。预计到 2010 年、2015 年和 2020 年, 全国抽水蓄能电站装机容量占全国总装机容量的比重分别达到 2.4%、3.7% 和 4.4%。

三、21 世纪中国水电技术发展

根据上述电力发展规划和“西电东送”的战略目标, 待开发的水电站主要集中在西部, 而西部的水电站建设条件非常复杂, 工程规模巨大, 在很多技术方面, 我们要开创人类历史先河, 攀登水电建设的高峰。

从 20 世纪 80 年代开始至 21 世纪初, 我国水电科学技术成果丰硕可观, 科技成果转化率高, 而且创新程度高, 特别是新坝型成果的创新已为国内外同行业人士所借鉴, 其成果所能覆盖的限度大约是 200m 左右的高坝, 这实际上已经是一个令世人瞩目的高指标, 但在中国西部规划和建设中的高坝很多, 不少是在 200 ~ 300m 之间, 有的还超过 300m。建设 300m 级的高坝, 其技术难点很多, 即使是同一个技术概念, 高坝和低坝其内涵也不尽相同。因此应把 200 ~ 300m 的高坝

作为重心,围绕这一重心组织力量,精心安排,系统全面开展科技攻关。

1. 水电工程勘察技术,形成资料采集、分析整理、成图一体化的工程地质综合分析成套技术

遥感、物探与测试技术的开发和完善,研究应用地球物探进行工程物性指标三维空间判释,建立地质调查—物探测试—实验室一体化的工程地质勘测体系。开展水电工程地质问题分析和决策方法研究,依据水电工程的地质数据特征,分类建立各种地质数据库,应用系统科学和决策学的理论和方法,进行工程地质系统的建立,开发水电工程地质专家分析系统,使工程地质问题的决策由目前的定性为主,过渡到定量为主和科学决策的方法上。开展大型水电工程地质环境问题研究,使水电工程的社会环境效益进一步改善。

2. 高坝筑坝技术的研究,形成 300m 级高拱坝、200 ~ 300m 级高堆石坝、200m 级碾压混凝土重力坝等配套技术

在 300m 级高拱坝结构问题方面,以已建高拱坝原型观测资料为基础进行反馈分析,开展高拱坝结构稳定性及抗震安全性,抗滑稳定分析方法及安全系数取值问题研究,提出了合理的高拱坝应力控制标准,在保证坝体应力、变形、安全的条件下,进一步优化体形结构。

在高土石坝筑坝技术方面,重点研究 200m 以上级高土石坝技术,以水布垭高混凝土面板堆石坝(233m)为基础,以糯扎渡心墙坝(261m)、苗家坝等混凝土面板堆石坝(300m)为目标,研究:①堆石料变形和渗透特性,特别是高应力和复杂应力条件下的变形性能以及风化料筑坝变形的长期稳定性研究;②力学参数的选取及坝体应力应变计算方法研究,提出适合超高堆石坝计算分析的方法;③研究和完善超高面板坝上游防渗结构,提出适合高水头变形大的周边缝结构和材料以及抗裂、抗渗性能高、耐久性能好的混凝土配合比;④开展趾板建基面标准研究,提出深厚覆盖层上建趾板技术方法和措施;⑤对于土质心墙坝,重点研究拓宽心墙防渗土料的应用范围。

在研究和完善 200m 级高碾压混凝土筑坝技术方面,主要研究内容有:①对碾压混凝土重力坝,重点研究成层体系混凝土坝的稳定和应力分析方法、层面抗剪断和应力应变特性、坝体防渗、排水技术和相应的处理方案,优化混凝土配合比,完善大仓面连续浇筑的温控计算方法和措施;②开展高碾压混凝土拱坝关键技术问题研究,建立高碾压混凝土拱坝结构设计及计算理论和方法,合理确定坝体细部结构,提出保持拱坝整体性的措施及防裂、抗裂措施。

3. 高水头、大流量的泄洪消能技术研究

优化枢纽布置,研究不同坝型泄水建筑物合理的布置型式及高水头、大单宽流量的泄水建筑物体型,提出过流面平整度控制标准和掺气减蚀措施,解决好消能防冲问题,提高消能效果,控制雾化范围,开发新型抗磨损、抗空蚀材料,开展导流建筑物与永久建筑的结合问题的研究,降低工程造价。

4. 大型地下洞室的稳定技术

主要研究内容有:①综合分析岩体结构面、地应力、渗压以及施工等因素对大型地下洞室群稳定性的影响,研究围岩整体稳定的仿真计算方法、稳定性判别准则与合理的支护方式,优化防渗排水措施;②研究深埋长隧洞的勘探技术、岩爆规律及有害气体的预报和防范措施;③建立大型地下洞室群专家系统信息库,为设计和施工提供依据。

5. 深覆盖层处理技术

(1) 深厚覆盖层工程特性的勘测和测试技术。研究确定和了解覆盖层分布范围、分层特性的经

济、高效的勘探手段和技术,探索联合室内和现场原位试验确定其工程特性的新的途径,改进和完善现有的试验手段和技术,以充分反映深厚覆盖层所处的工程环境条件(如高固结应力、大变形等)。

(2) 研究和开发用于深厚覆盖层静、动力工作性状以及深厚覆盖层与上部建筑物相作用分析方法,建立基于以变形和渗流控制为基础的评价标准体系。

(3) 通过对不同典型渗控措施效果的对比研究,探讨适用于深厚覆盖层工程特点的加固处理方案,开发适用于深厚覆盖层量大面广、工程量巨大的加固处理手段。

6. 高边坡稳定技术

进一步加强水电工程边坡资料的登录工作,为工程设计和施工提供了重要的参考依据。开发边坡工程地质条件的新型快速勘探技术,提高工程地质勘测精度和水平。开展对复杂地质条件下边坡的失稳机理研究,开发和完善适用于不同失稳模式的边坡稳定分析配套软件,尤其是在复杂边界条件下的三维分析软件系统,为分析评价和处理提供依据。进一步研究和探讨边坡加固处理技术,尤其是各种加固处理措施的作用机制和效果,使现有的加固处理方案建立在更为经济合理的基础之上。建立边坡安全监测预警预报系统。

7. 抽水蓄能电站关键技术

在抽水蓄能电站工程结构问题研究方面:①开展地下厂房结构布置和振动特性研究,抽水蓄能机组蜗壳与外围混凝土联合作用分析研究等;②复杂地基上库盆防渗及渗流控制技术研究,包括防渗型式选择、接头处理、水库蓄水对基础及建筑物的影响及相应措施;对高悬水库基础的渗流场进行分析,提出渗流控制标准和相应的渗流控制措施等;③开展井式进/出水口的水力学问题研究;④进一步开展大 PD 值预应力钢筋混凝土高压管道结构及埋藏式钢管管结构受力分析研究,提高我国大 PD 值压力管道的设计水平,降低工程造价。

在抽水蓄能电站机组运行技术研究方面,开展机组起动方式、工况转换及变频起动装置(SFC)谐波分析和预防措施研究;进一步优化水泵水轮机和发电电动机的主要技术参数、机组总体结构及主要机电设备布置形式,提高抽水蓄能电站的运行稳定性。

8. 大型水机组的关键技术

对大型混流式机组,需要解决的重大运行技术问题是:结构优化设计、整机动态应力分析及整机刚度、强度研究;蜗壳钢板和混凝土联合受力的三维计算及真机应用研究;转轮叶片水下动态特性研究,疲劳计算分析及寿命预估;叶道涡及压力脉动的研究;轴系稳定和振动研究,整机动力特性和振动分析的研究;水力机组振动和脉动有关规程规范的研究。

9. 新材料、新工艺应用研究,以及大坝安全监测技术研究

研究新型混凝土及掺和料,包括纤维混凝土的应用研究,掺和料、新型外加剂的开发等;开展新型防渗止水材料,特别是适合超高面板坝的填缝止水材料和高碾压混凝土上游面防渗材料;研制适应于大孔隙、高地下水流速、细裂隙等特殊地层情况的灌浆材料及相应的施工工艺。

四、实现水电可持续发展的战略措施

21 世纪水电建设任务艰巨而富于挑战,中国的水电工作者任重而道远。我们只有采取科学可行的措施,21 世纪水电开发的战略目标才能如期实现。

1. 完善水电科技创新体系,大力实施技术创新

在 20 世纪后 20 年,国家有关部门组织了从“六五”到“九五”的水电重点科技攻关项目,

取得了一大批技术创新程度高、对我国水电建设产生了重大影响的科技成果,充分体现了国家优势和行业总体优势。电力体制的改革,有力地促进了电力工业和水电的发展,但如何保证水电科技创新体系的完整过渡,从而保证科技创新的资金投入和有效管理及使用,已经成为能否实现水电可持续发展的一个重大问题。

水电科技创新具有与特定工程结合紧密的特点,在投资主体多元化的今天,要在政府倡导下,通过市场手段,实现“协力支持、统筹安排、联合攻关、技术跨越、持续发展”的水电科技创新体系。要充分发挥水电企业集团各自的优势和作用,强化科技工作的管理协调。要统一规划,合理布局,营造有序的环境,积极组织具有前瞻性、储备性和实用性的科研攻关。只有这样,才能保障科研与技术创新的良性循环发展、优化科研资源配置、降低成本、提高效率和经济效益,为水电可持续发展提供前瞻性的技术支持。

2. 加强宏观调控与市场规划,保证水电的持续健康发展

四川水电外送和云南水电外送等跨区域“西电东送”,将成为我国 21 世纪初能源平衡的重要手段之一。水电的“西电东送”突出反映出规模大、投产时间较集中、送电河流和电源出力特性与送电特性差异大等特点,必须加强宏观调控与市场规划的力度。要制定水电发展的中长期规划,实现资源优化配置和市场需求及电源规划的有机结合,指导水电的健康发展。要认真研究受电市场的需求水平和需求特性,以能源结构调整和资源优化配置为目标,规划受电水平和受电特性;同时,根据水电的开发进程,认真分析各省(自治区、直辖市)、各流域、各大型电源的外送水平与送电特性,经济合理地规划送受电方案,将水电发展规划超前落实到电力规划特别是受端市场的电力规划中。

在强调规划的同时,要积极开展水电竞争交易的研究和探索,实现长期供电协议与年度、月度、日前、发电权、辅助服务等电力市场交易品种的有机结合,将宏观规划纳入到市场合约的范畴,以市场需求和合理的市场竞争交易规则,引导水电投资和水电的优化运行,充分发挥水电可再生能源的效益。

要总结已建抽水蓄能电站在电力系统中的作用,提高对抽水蓄能电站作用的认识。在目前的超高压、跨区域、大容量输电的背景下,抽水蓄能电站预计也将有较大的发展,有必要开展全国和各大型抽水蓄能电站合理规划布局研究。在选点规划基础上;要根据各电网的负荷发展水平及特性和电源、电网结构等特点,着重解决配置总规模问题、经济合理布局问题、不同抽水蓄能电站作用定位和不同的需能量(满装机发电小时)规划问题。通过研究,一方面优化抽水蓄能电站资源的总体规划利用;另一方面也使抽水蓄能电站从优化电网网架结构和安全经济运行的总体要求出发,成为电源和电网发展规划中的重要战略措施之一,从而实现经济、合理、有序的开发。

3. 大力推进西藏水能资源开发的前期工作,为水电可持续发展储备后劲

西藏水能资源丰富,但相关前期工作几近空白。

开发西藏水能资源,首要的工作是全面开展藏东金沙江、澜沧江、怒江上游河段的规划,规划中要根据河流的地形地质等条件,充分考虑与下游电站接续开发和集约式开发、统一规划电力外送的思想;要充分反映流域社会和环境的要求,从开发方案上体现区域经济社会的快速和谐发展和人与自然的和谐共处。

藏电外送资源中,以藏中南雅鲁藏布江大拐弯和位于大拐弯进口处的支流帕隆藏布江的资源最为集中,首要的问题是要开展相关的工程和送电技术研究、环境的调查分析,探索有关国际合作的方式和可能性。

西藏水能资源的开发,不仅是水电事业可持续发展需要,也是全国能源平衡的重彩之笔,更是西藏社会经济发展发生本质性改变的客观要求。