

和谐理念下的大渡河水电开发关键技术问题前期论证与研究

段斌 陈刚

(国电大渡河流域水电开发有限公司 成都 610041)

[摘要]: 大渡河水能资源丰富、地质条件差、移民数量多, 环保制约大, 由此造成了大渡河水电开发面临的关键技术问题众多且复杂。针对这些关键技术问题, 国电大渡河流域水电开发有限公司坚持和谐开发理念, 进行了深入、细致的前期论证和研究, 解决了大渡河水电开发面临的关键技术问题, 这不仅促进了水电工程技术进步, 有利于水电开发与环境协调友好、与社会和谐发展。

[关键词]: 和谐; 大渡河; 技术; 前期; 论证

1 引言

我国的水电资源丰富, 总量居世界第一, 理论蕴藏量装机约 6.94 亿 kW^[1]。截止 2011 年底, 全国水电装机约 2.3 亿 kW, 占理论蕴藏量的 33%, 水电开发潜力巨大。从上世纪 90 年代开始, 我国日益成为世界水电开发的中心和前沿, 特别在水力资源特别丰富的西南地区, 正在建设或即将建设一批具有世界水平的水电工程^[2]。在我国西南地区建设水电工程, 面临地形地质条件复杂、工程规模巨大、筑坝施工难度大、移民安置困难、环保要求较高等技术难题。这些技术难题直接挑战着我国现有水电建设, 成功解决这些难题将对确保工程安全, 增强水电建设能力具有重要作用。所以, 水电工程开工前的论证和研究是十分必要和紧迫的。水电工程前期论证涉及范围很广, 工作内容很多, 在前期论证和研究过程中, 采取何种理念和思想来解决这些关键技术问题, 值得大家深入探讨。由于大渡河流域的历史、宗教和民族文化底蕴深厚, 开发条件受到了自然环境和社会环境的极大制约, 在大渡河水电开发的前期论证和研究中, 以和谐水电开发理念为指导, 为科学、合理解决水电开发涉及的关键技术问题进行了有益的探索和实践。

2 大渡河水电开发特点

2.1 水能资源丰富, 开发主体明确

大渡河是长江上游重要支流之一, 干流全长约 1062km, 天然落差 4175m, 年径流量 470 亿 m³, 其干流和主要支流水力资源蕴藏量占四川省水电资源总量的 23.6%, 在我国十二大水电基地中位居第五。根据大渡河干流梯级电站最新的规划和设计成果, 自上而下布置 29 个梯级, 总装机容量达到 2700 万 kW。自 2006 年四川省实行投资多元化以来, 有多家企业参与大渡河水电开发。根据开发规划和实际情况, 大渡河干流由国电大渡河流域水电开发有限公司(以下简称国电大渡河公司)负责开发的 18 个梯级中, 已投产电站为龚嘴、铜街子、瀑布沟、深溪沟, 在建电站为大岗山、猴子岩、枕头坝一级、沙坪二级, 正在开展前期工作的电站为双江口、金川、安宁、巴底、丹巴、枕头坝二级、沙坪一级、老鹰岩一级、老鹰岩二级、老鹰岩三级等, 约占大渡河水电总装机的 2/3。因此, 国

电大渡河公司成为大渡河水电开发的主体。

2.2 地质条件差，工程技术难题多

由于大渡河地形地质条件复杂，存在河床覆盖层深厚、地震烈度高、地质灾害较多等复杂的地质问题，由此导致大渡河梯级电站建设将面临多项世界性的技术难题，如双江口是目前有望建成的世界第一高坝，大岗山是国内高地地震烈度地区上正在修建的最高拱坝，瀑布沟大坝是我国已建成的深厚覆盖层上最高的砾石土心墙堆石坝，丹巴是国内超过 100m 的覆盖层上修建的最高闸坝，猴子岩是在窄河谷、高烈度区建设的国内第二高面板堆石坝，金川是国内首座在厚度超过 50m 的覆盖层且含砂层透镜体地基上修建的面板堆石坝，沙坪二级采用目前国内单机容量最大的灯泡贯流式机组，此外丹巴还有世界罕见的 17 公里软岩成洞问题和减水河段大规模地质灾害等难题，安宁、巴底等项目也是在结构复杂、厚度较大的覆盖层上建坝。由于大渡河梯级电站技术的复杂性和高难度迫切需要在前期论证和研究过程中解决筑坝的各项关键技术问题。

2.3 移民数量多，环保问题制约大

大渡河地处四川腹地，跨越四川“三州两市”，是四川水电的“一环路”。受社会经济条件影响，水电开发引起的淹没损失较大，移民搬迁总量约 14 万，特别是瀑布沟电站移民约 10.5 万，双江口需搬迁藏区移民约 6000 人。同时，大渡河流域沿岸土地后备资源有限，传统的农业安置方案施行难度很大，特别是多个地处藏区的电站，民族宗教问题突出，环境容量十分有限。因此，大渡河水电开发的移民安置难度非常大。另一方面，大渡河梯级电站涉及深溪沟国家级地质公园、丹巴国家级遗产古碉群，贡嘎山自然保护区和风景名胜区，严波则也、墨尔多山、金汤孔玉等自然保护区；涉及泸定桥、安顺场等红军长征遗址；涉及多个城镇、工业区及军工企业等敏感对象；涉及红豆杉、岷江柏、虎嘉鱼等珍稀动植物。因此，在国家越来越重视环保生态的形势下，大渡河水电开发需要在前期论证和研究中制定切实可行、科学合理的环保方案和措施。

2.4 协调难度大，经济指标较差

由于水电开发涉及面广，直接关系企业、移民、地方和国家的利益，在利益分配面前，各种关系十分复杂，协调起来十分困难。同时，由于大渡河梯级电站规模较小，淹没损失较大，关系复杂，这些先天条件使得大渡河梯级电站经济指标总体较差。按照目前的研究成果，大渡河梯级电站的平均单位千瓦动态投资已超过 13000 元/kW 的水平，平均单位电度动态投资已超过 3.0 元/kWh，平均上网电价已超过 0.45 元/kWh；个别项目单位千瓦动态投资甚至超过 18000 元/kW 的水平，单位电度动态投资超过 4.00 元/kWh，上网电价超过 0.6 元/kWh。这些经济指标明显劣于雅砻江、澜沧江、金沙江等同类型流域梯级电站。因此，在大渡河水电开发前期论证与研究工作中，需要高度重视设计优化和技术创新，切实优化电站经济指标。

3 几个典型技术问题的前期论证与研究

3.1 水电开发方式

2003 年审查通过的《四川省大渡河干流水电规划调整报告》指出，部分梯级开发方案还存在一些问题，需要在下阶段工作中进一步研究：一是丹巴梯级仅靠丹巴县城上游，且近坝库岸存在巨型滑坡体，工程地质条件较差；二是老鹰岩梯级除地质条件较差外，将淹没红军安顺场渡口、纪念馆等文物保护单位；三是枕头坝梯级除了涉及大渡河峡谷国家地质公园，库区已建有永乐电站的进水口工程，今后开发需协调好环保、景观和已建电站的关系；四是沙坪梯级涉及淹没成昆铁路 11km，其开发价值和开发方式有待今后进一步研究论证。为了加快水电开发，合理利用水力资源，合理布

置水电梯级，处理好水电开发与水库淹没、生态环境保护、地方经济发展、移民搬迁安置、文物古迹保护等方面的关系，尽可能减少和避开对成昆铁路、重要文物古迹、城镇、自然保护区的影响，并尽量保护库周其它重要影响对象，需要研究大渡河局部河段的水电开发方式。国电大渡河公司组织设计单位开展了规划研究，从水能利用及发电效益、工程地质、建设征地和移民安置、环境影响、枢纽布置及建筑物、工程施工、经济效益等多方面综合比较，金川至丹巴河段（包括原巴底、丹巴梯级）开发方式确定了安宁梯级+巴底梯级坝式开发+丹巴梯级混合式开发方案；龙头石至瀑布沟（包括原老鹰岩梯级）确定了老鹰岩一级+老鹰岩二级+老鹰岩三级开发方案；深溪沟至沙坪河段（包括枕头坝、沙坪梯级）确定了枕头坝一级+枕头坝二级+沙坪一级+沙坪二级开发方案。开发方式完成后的的大渡河梯级布置见图 1。通过开发方式研究，大渡河总体水能利用指标略有下降，经济指标有所降低，水库淹没明显减少，移民安置难度降低，不利的的环境影响显著减小。事实证明，上述开发方式较好地解决了规划遗留的问题，有效地规避了敏感因素，促进了水电开发与经济社会协调发展。

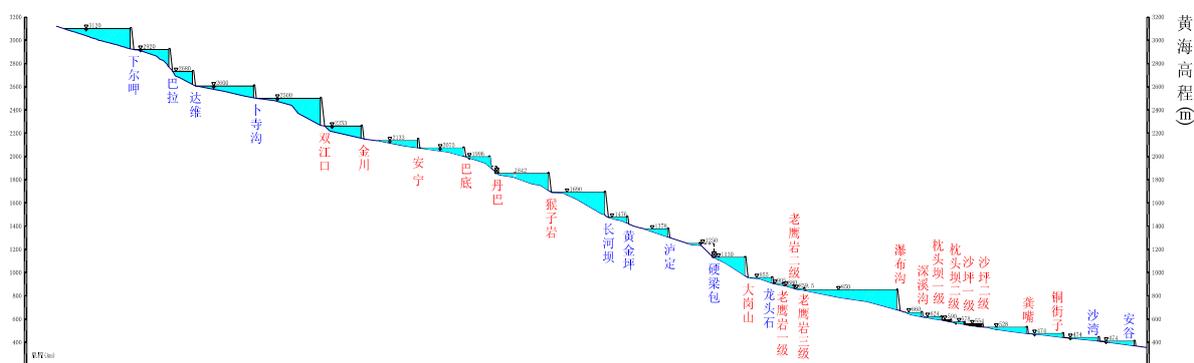


图 1 大渡河干流水电梯级开发方案剖面图

3.2 正常蓄水位与坝址选择

3.2.1 双江口水电站正常蓄水位选择

双江口水电站是大渡河上游控制性水库，具有年调节能力，设计装机容量 200 万 kW，电站建成后对下游梯级电站的补偿调节作用明显，对改善四川电网的电源结构意义重大。由于双江口水电站年调节性能必然要求相应的调节库容，需要提高正常蓄水位；同时由于电站地处四川阿坝嘉绒藏族聚居区，土地资源珍贵，移民安置环境容量有限，库区淹没对电站建设十分敏感，需要适当降低正常蓄水位；因此，需要合理确定双江口水电站正常蓄水位，以使电站的经济效益和淹没损失达到一个合理的平衡点，合理解决多目标决策的难题。在预可行性研究阶段，初选 2510m 作为双江口水电站正常蓄水位。在可行研究阶段，考虑水库淹没、梯级衔接、地质条件、筑坝技术、水能资源利用、调节库容需求及南水北调影响等因素，拟定了多个方案进行正常蓄水位选择。由于库尾淹没影响敏感对象为松岗集镇，它是藏民集中区，也是马尔康县未来重点开发的工业区和旅游区，对地方经济发展具有重要作用。因此，从满足调节库容需要、控制筑坝技术难度、减轻水库淹没和环境影响、促进地方经济发展等方面综合比较，双江口水电站正常蓄水位选定为 2500m，较原方案降低 10m 水头，避开对松岗镇的淹没，减轻了对当地人民群众的影响，获得各方的认可和肯定。

3.2.2 猴子岩水电站坝址选择

猴子岩水电站设计装机容量 170 万 kW，采用最大坝高 223.5m 的面板堆石坝。从水能利用角度，猴子岩大坝坝址应与下游长河坝电站尾水衔接，即采用下坝址，这将淹没下坝址以上的孔玉乡。从减少移民和减轻对周边环境的影响的角度，坝址应往上移，选用上坝址，避开孔玉乡。经过比较研究，下坝址与上坝址相距 3.1km，下坝址较上坝址多利用水头 6.78m，装机容量多 6 万 kW，多年平均发电量多 2.47 亿 kWh，移民多 300 余人，土地多淹没 5000 多亩，投资多 2.8 亿元，从经济指标上看，

下坝址明显优于上坝址，但综合考虑各方面因素，特别是权衡技术、经济、社会和环境等影响因素，在坝址选择时放弃了经济效益较好的下坝址，选定上坝址作为猴子岩电站坝址。

3.3 筑坝技术

3.3.1 双江口 300m 级土质心墙堆石坝关键技术研究

双江口水电站坝址地形为两岸较陡的“V”型河谷，河床覆盖层深厚，最大厚度达 67.8m，大坝设防烈度为Ⅷ度，最大坝高达到 314m，已超过我国现有规范规定，且国外也仅有努列克 300m 级心墙堆石坝的工程经验。因此，开展双江口 300m 级土质心墙堆石坝关键技术研究是十分必要和迫切的。在可行性研究阶段，通过策划和研究，确定了双江口 300m 级土质心墙堆石坝关键技术五大研究课题：一是筑坝材料及坝基覆盖层特性研究，二是静力应力变形分析和稳定分析方法研究，三是坝体结构及分区设计研究，四是坝体动力反应分析及抗震措施研究，五是渗流分析及渗流控制措施研究。国电大渡河公司与设计院组织国内多家科研单位和高校开展了这五大课题和若干子题的研究工作，取得了丰富的研究成果。这些研究成果已运用到双江口工程设计中，解决了制约 300m 级土质心墙堆石坝设计和建设的关键技术难题，目前可行性研究阶段的枢纽设计方案已经完成，得到了国内水电行业技术主管单位的高度认可，进一步推动了我国高土石坝领域的科技进步。双江口坝体典型横剖面图见图 2。

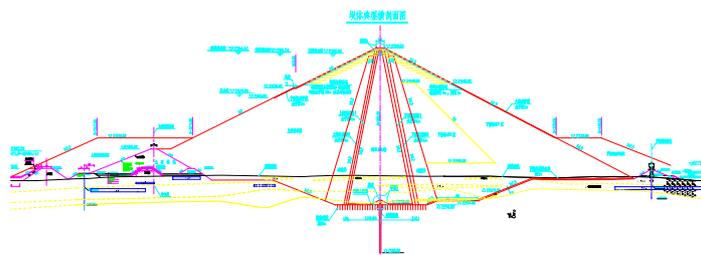


图 2 双江口坝体典型横剖面图

3.3.2 金川混凝土面板堆石坝筑坝关键技术研究

金川水电站设计装机容量 86 万 kW，在预可行性研究阶段，金川水电站采用粘土心墙堆石坝，最大坝高 111.5m。由于金川水电站位于藏区，耕地资源十分有限，而粘土心墙堆石坝所需的土料较多，将占用大量的耕地，使得需要生产安置的人数较多。为了减少耕地占用，降低安置难度，需要选用更为经济、适用的坝型。为了解决坝型选择的难题，在可行性研究阶段，国电大渡河公司与设计院组织国内高水平研究单位对有利于节约耕地、经济性较好的混凝土面板堆石坝进行了科技攻关。由于金川水电站坝址区河床覆盖层深厚，最大厚度为 65m，物质组成复杂，并含有砂层透镜体；同时两岸岩体卸荷强烈，用于坝体填筑的石料岩性软硬相间，此外，由于目前国内外尚无在厚度超过 50m 的覆盖层且含砂层透镜体地基和卸荷岩体上建成混凝土面板堆石坝的工程实例。因此，采用面板堆石坝筑坝的技术难度相当大。为此，有关各方围绕深厚覆盖层和强卸荷岩体利用、坝料特性、坝体应力变形、渗流控制等混凝土面板堆石坝筑坝关键技术问题开展了深入细致的科研工作，取得了大量研究成果，提出了切实可行的工程措施，并运用到工程设计中，获得了水电工程技术主管单位的高度认可，解决了深厚覆盖层上修建混凝土面板堆石坝的技术难题。

3.3.3 大岗山工程抗震关键技术研究

大岗山水电站设计装机容量 260 万 kW，采用最大坝高 210m 的混凝土双曲拱坝，坝址区设计地震加速度为 557.5cm/s^2 ，抗震设防烈度为Ⅸ度。由于大岗山水电站坝高超过 200m，地震设防水平高，已超现行抗震规范，类似工程设计经验较少，大坝在遭遇强烈地震时的抗震安全问题极为重要，抗震难题能否成功解决成为工程设计的控制性关键因素，需要在前期勘测设计工作中，特别是在可行

性研究阶段进行全面系统的工程抗震专题科研，以确保工程安全可靠。围绕大岗山工程抗震难题，国电大渡河公司与设计院组织科研单位开展了外围区域断裂及坝区小断层活动性评价、水库诱发地震危险性预测研究、大坝抗震安全分析与抗震措施研究、大坝非线性地震反应特性及抗震措施研究、大坝整体抗震分析、大坝结构动力模型试验、校核地震作用下双曲拱坝抗震复核等科研工作。通过大量的科研、试验，大岗山水电站工程抗震设计的难题在可行性研究阶段已基本明确，针对抗震问题采取的方案和措施也能够满足工程抗震要求，抗震设计方案通过技术审查。

3.3.4 丹巴高闸坝筑坝和软岩成洞关键技术研究

丹巴水电站设计装机容量 119.66 万 kW，采用混合式开发，电站引水隧洞长约 17km。由于丹巴水电站坝址处河床覆盖层最大厚度为 127.66m、最大坝高约 42m，是目前国内深厚覆盖层上建设的最高闸坝，相关工程经验缺乏；同时由于丹巴水电站引水隧洞长，有约 3km 长的隧洞处于二云英片岩这种软岩中，最大埋深达 1220m，目前国内外特别缺乏对软岩的力学特性、成洞条件、围岩稳定性研究。针对丹巴水电站工程特点，公司联合设计院组织开展了河床深覆盖层及高闸坝基础处理研究、长大深埋软岩引水隧洞及软岩大型调压室稳定性研究两大课题的重大科研工作。这两大课题包括河床深厚覆盖层蠕变特性、砂土液化及动参数研究，坝基高压喷射注浆试验研究，坝基固结灌浆试验研究，闸坝及闸基渗流分析及渗流-应力耦合研究，闸坝及闸基三维静、动力特性研究，深厚覆盖层加固处理前、后强度变化及上坝基稳定试验研究，软岩流变特性研究，洞室软岩变形规律研究，地下洞室软岩工程地质特性及岩体质量工程地质分类研究，长大深埋软岩引水隧洞围岩稳定研究，软岩大型调压室围岩稳定研究等 11 个子题。目前，丹巴水电站重大科研工作进展顺利，将于 2012 年底取得阶段性成果，这必将推动我国水电工程技术不断进步。

3.4 移民安置

瀑布沟水电站是大渡河中游控制性水库，设计装机容量 360 万 kW，是大渡河最大的水电工程，是国家重点工程和西部大开发标志性工程。瀑布沟水电站需搬迁约 10.5 万移民，移民数量不仅是大渡河之最，在我国近期水电工程建设中移民规模仅次于三峡（约 113 万人）、小浪底（约 18.9 万人），且移民数量主要集中在汉源县（约 9.3 万）一个县内，移民搬迁安置难度十分巨大^[3]。因此，为解决好移民搬迁安置工作，非常有必要在实施搬迁安置之前对相关工作开展深入的论证与研究。国电大渡河公司与政府部门、设计院等有关单位一道，系统论证和研究了科学合理的补偿补助制度、严密高效的移民工作管理制度，特别是率先研究了业主主动介入移民工作的管理方式、提高水电工程移民补偿补助标准和范围、实物指标认定、移民安置和后期扶持的程序和方式、移民资金管理等重大技术问题，为规范、有序实施移民搬迁安置奠定了扎实的技术基础。事实证明，瀑布沟移民搬迁安置工作取得了成功，多项成功做法和经验被推广到国内其他水电工程移民搬迁安置工作中，如将耕地年产值补偿标准提高到 16 倍、房屋补偿中考虑装修费用、补偿范围扩大到移民无法带走的实物指标、后扶资金直接发放给移民、业主参与援建移民工程、建立企业与地方的轮值协调会制度等。

3.5 环境保护

大渡河河谷深切，山高坡陡，水土流失严重，生态环境脆弱。为了保护本来就脆弱的生态环境，在大渡河水电开发前期论证与研究过程中，国电大渡河公司组设计院开展了环境保护方面的专项研究，一是为了弄清水电开发对环境的影响，在规划阶段国内率先开展了流域水电规划环评工作；二是系统研究了大渡河水生生物保护方案，制定了大渡河鱼类增殖放养方案，在枕头坝一级、沙坪二级水电站可行性研究中在大渡河上率先设置鱼道，在双江口可研设计中制定了分层取水方案，以利于鱼类繁衍。三是论证和研究了珍稀植物保护措施，在双江口水电站可行性研究中制定了红豆杉、岷江柏等珍惜植物的保护措施。枕头坝一级水电站鱼道效果图见图 3。



图3 枕头坝一级水电站鱼道效果图

4 和谐水电开发理念的涵义与体现

和谐水电开发与我国正在积极倡导的和谐社会建设是一脉相承的。和谐水电开发是指为了水电开发和满足社会经济发展的需要,经过科学论证并能为水电工程的各方利益相关者普遍带来收益或发展机会、促进人与自然整个生态系统和谐发展而开展的^[3]。和谐水电开发应具备以下特征:一是合理开发利用水能资源,二是水电开发与环境协调友好,三是水电开发与社会和谐发展。正是在和谐水电开发理念的指导下,通过前期论证和研究,国电大渡河公司组织有关方面成功解决大渡河水电开发关键技术问题。

4.1 合理开发利用水能资源

在大渡河水电开发关键技术问题的前期论证与研究中,既考虑了国家当前对水电资源的需求,也考虑了地方社会经济发展面临的困难;既考虑了大渡河水电开发的当前利益,也考虑了环境的承载能力,以及水电开发给流域自然环境和社会环境带来的长远影响。对于涉及重要集镇、文物、企业等敏感对象的河段选择了放弃开发或降低水头开发,使得水电开发不单纯追求经济效益,而尽量减少移民搬迁的数量和难度,尽量避免或减少对环境的不利影响,尽量减少对自然和社会环境的扰动,使得大渡河水电开发规划设计理念从原来的“充分开发利用水能资源”转变为“合理开发利用水能资源”。

4.2 水电开发与环境保护协调友好

在大渡河水电开发关键技术问题的前期论证与研究中,国电大渡河公司坚持和谐水电开发理念,使得水电开发与环境保护协调友好。例如,在大渡河环境保护方案和措施的前期论证和研究中,为了保护生态环境,设计了专门的方案和措施,虽然增加了工程投资,但有利于鱼类生存,枕头坝一级、沙坪二级水电站因建设鱼道而增加投资约2亿元。另外,金川混凝土面板堆石坝筑坝关键技术研究不仅解决了制约工程建设和设计难题,面板堆石坝方案的成立还节约了藏区大量珍贵的耕地资源。这些例子充分体现了大渡河水电开发对环境保护的重视,也说明只有在保护环境的基础上才能更有效地进行水电开发,两者必须相辅相成,协调友好。

4.3 水电开发与社会和谐发展

一方面,水电工程曾因技术瓶颈而面临暂时无法开发的窘境,清洁优质的水能资源无法尽早为社会发展服务。随着双江口300m级土质心墙堆石坝、大岗山工程抗震、金川混凝土面板堆石坝筑坝、丹巴高闸坝筑坝和软岩成洞等水电工程关键技术取得突破,使得电站得以早日建成发电,这将为社会发展提供了清洁可再生能源,促进地方经济社会发展。另一方面,水电开发必须充分考虑移

民、环保、土地等因素的影响,切实做好移民搬迁安置和生态环境保护,坚持以人为本的理念,勇于承担社会责任,才能实现各方共赢,才能实现和谐发展。这在瀑布沟移民安置对策措施研究、大渡河水电开发方式研究等工作中得到了充分体现。

5 结论

(1) 大渡河水能资源丰富、地质条件差、移民安置和环境保护难度大,由此造成了大渡河水电开发涉及的关键技术问题众多且复杂。因此,必须用和谐水电开发理念来指导这些关键技术问题的前期论证与研究,才能实现水电开发与环境协调友好、与社会和谐发展。

(2) 和谐水电开发理念已广泛、深入运用到大渡河水电开发前期论证与研究的各个方面,解决了大渡河水电开发面临的关键技术问题,促进了水电工程技术进步。

(3) 和谐水电开发与我国和谐社会建设一脉相承,必将成为我国水电开发的实践方向,但由于现实中重工程、轻发展,重效益、轻保护的落后理念依然存在,这使得和谐水电开发仍然任重道远,需要积极加快探索。

参考文献

- [1] 晏志勇. 对我国水电发展的思考[J].水力发电.2008,,34(12):14~17.
- [2] 陈宗梁. 世界超级高坝[M]. 中国电力出版社.1998.
- [3] 施国庆, 郑瑞强. 社会和谐型水电工程建设探讨[J].人民长江.2007,38(12):114.
- [4] 王春云、严军、程陆军. 瀑布沟水电站移民安置特点及实施管理[J].水力发电. 2010,36(6):20~22.
- [5] 付兴友. 科学开发大渡河建设和谐水电的实践和思考 [J].中国电力.2007,40(1):11~14.
- [6] 段斌, 王春云, 严军, 陈刚. 大渡河梯级水电开发方式科学优化浅析[J].水电能源科学.2012,30(2):155~158.