

龙羊峡水利枢纽志

水电部第四工程局黄河工程志编写组印

一九九〇年七月

龙羊峡水利枢纽

龙羊峡水利枢纽位于青海省海南藏族自治州共和县和贵南县交界处，距青海省省会西宁市147公里。黄河干流沿共和盆地东部边缘流入长达40公里的龙羊峡谷，枢纽即修建在距峡谷进口1.5—2公里处。坝址上距黄河源头1684公里，下至黄河入海口3776公里，控制流域面积131420平方公里，占全流域面积17.5%。多年平均径流量205亿立方米，占全流域多年平均径流量的36%，多年平均流量650立方米/秒，水利动能资源丰富。枢纽拦河大坝座落在印支期花岗闪长岩上，岩性坚硬，但断裂发育、地质构造复杂。谷底河床基岩海拔2432米，水面宽30至40米，峡谷呈“V型”，顶宽200米左右。根据气象资料统计，这里平均气温5.8℃，最高旬平均气温18.2℃，最低旬平均气温-10.28℃，冰冻期长达6个月。年平均降水量270毫米，年蒸发量2030毫米，年平均有6级以上大风80天，最大风速34米/每秒，实测缺氧量27%，属高寒缺氧地区，大陆性气候，施工条件极为困难和艰苦。坝址上游系草原、湖泊、沼泽、雪山地带、植被良好，水土流失轻微，多年平均含沙量1.1公斤/立方米，多年平均输沙量2308万吨，仅占全河年输沙量的1.4%，兼之上游地区无大气与水源污染，水质洁净，实为黄河流域洁净水源区之一。

龙羊峡水利枢纽是1955年第一届全国人民代表大会第二次会议通过的《关于根治黄河水害和开发黄河水利的综合规划决议》中提出的黄河干流阶梯开发计划的第一座梯级电站。原水利电力部（以下简称水电部）北京勘测设计院于1956年开始进行勘测，1960年和1966年曾两次提出初步设计文件。1975年以后，由原水电部第四工程局勘测设计研究院继续进行勘测设计工作，并于1976年10月，1977年8月两次提出黄河龙羊峡水电站补充初步设计文件。1977年11月，水电部以水电规字第91号文正式批准《龙羊峡水电站初步设计补充报告》。1978年以后，改由恢复重建的水电部西北勘测设计院承担勘测设计工作。中共青海省委和水电部对该工程的建设十分重视，1966年和1968年先后两次组织有关单位对设计文件进行审

查讨论。1975年，青海省提出早日兴建该工程以满足工农业生产发展用电的迫切要求。1976年1月28日，经中共中央、国务院批准兴建龙羊峡水电站。2月4日，水电部正式通知下属施工单位第四工程局负责建设任务，并将该工程列为国家重点建设项目之一。该工程是黄河上游干流上一个具有多年调节水库的大型综合利用的枢纽工程，以发电为主，兼顾防洪、灌溉等综合效益。近期开发任务是：“为了适应青海、甘肃省工农业生产发展用电的需要，提高刘家峡工程和兰州市等沿河城镇的防洪标准，更好地发挥刘（刘家峡）、盐（盐锅峡）、八（八盘峡）、青（青铜峡）等枢纽的效益”（引自水电部〔1976〕水电计字第9号文）；远景规划是：为建设西北水电基地奠定基础，将来“西电东送”的任务拟由龙羊峡及其以下新建电站来担任。它的建设对于根治黄河水害、开发黄河上游丰富的水利水电资源，发展西北地区工农牧业生产具有重大和深远的意义。

该工程居于黄河上游第一座梯级电站，有“万里黄河第一坝”美誉，是当时仅次于长江葛州坝的全国第二大水利枢纽工程。总装机容量128万千瓦，单机容量32万千瓦，保证出力50万千瓦，年发电量60.3亿度。拦河大坝为混凝土重力拱坝，最大坝高178米，最大底宽80米，顶宽18.5至23米，前沿总长1226米。主坝长396米，左岸副坝长357米，左岸重力墩57.18米，右岸副坝长341.05米，右岸重力墩103.85米。水库总库容247亿立方米，有效库容193.5亿立方米，回水长度101公里，水库面积383平方公里。水库校核洪水位2607米，坝前正常高水位2600米。泄洪标准按千年一遇洪水7040立方米/秒设计，可能最大洪水10500立方米/秒校核，经水库调蓄后下泄流量分别为4000和6000立方米/秒。电站厂房布置在坝后，4台32万千瓦水轮发电机组呈“一”字型排列。

枢纽工程区域地震基本烈度经国家地震部门鉴定为8度。考虑到龙羊峡工程坝高库大、位置重要，工程主体建筑物抗震设防烈度为9度。

该工程于1976年2月进点筹建，1978年7月导流隧洞主洞开始掘进，1979年12月29日截流，1982年6月28日主坝浇筑第一块混凝土，1986年10月15日下闸蓄水，1987年9月29日第一台机组投产发电，1989年6月4日四台机组全部投产发电。计划至1992年枢纽工程全部竣工。

该工程由水电部西北勘测设计院承担勘测设计，水电部第四工程局承担施工任务。在施工过程中，先后有水电部所属基础处理公司、第九工程局、第十三工程局和中国人

民解放军89349部队、00632部队等单位派出支援队伍，参加了龙羊峡工程建设。龙羊峡水电厂运行管理。中共青海省委、青海省人民政府及青海各族人民给予龙羊峡工程以极大关注和支持。省政府专门成立了支援龙羊峡工程办公室常设机构，协调解决工程建设中的问题。每当工程建设的重要阶段和关键时刻，省党政主要领导即赴工地现场办公，帮助解决建设中所遇到的重大问题和困难。

该枢纽概算总投资：1982年经“五定”批准投资为17.79亿元。由于工程地质条件复杂，当时大坝基础处理、下游消能区防护和近坝库岸滑坡涌浪监测等三项工程设计方案尚未最终审定，1986年经上级审定三项工程概算，核定为2.415亿元，比“五定”概算相应部分暂列投资增加1.254亿元。共核定总概算为19.044亿元。后因工程量加大，工期延长，增加5000万元，追加施工单位基地建设费约1.3亿元，增加物资价差调整10%，1988年最终审定总概算为23.7196亿元。总造价为22.137亿元。单位千瓦投资1761元，单位千瓦造价1729元。单位电度投资0.39元。

龙羊峡水库左岸隶属共和县，右岸隶属贵南县，淹没征迁上述两县所属5个乡，2个劳改农场，国家事业单位及附属农场37个。共淹没耕地8.67万亩，林地1.39万亩，草场6.9万亩。搬迁共和、贵南县28个自然村共29700人。根据工程施工进度和蓄水发电计划，水库移民分为三期五批搬迁。水库淹没处理总投资13069万元，占工程总概算投资的5.5%。由于水库处于荒山峡谷，人口密度较小，库容虽属全国之冠，与全国其它水电工程相比，淹没损失最小，移民最少，耗费最低。

龙羊峡水利枢纽是我国自行设计、自制设备、自己施工的大型水电工程。其大坝高度、水库库容、单机容量均列当时全国水电站之首，体现了我国80年代水电工程建设先进水平。它的建成，是根治黄河，造福人民的一个里程碑。为西北地区铅、铝、锌等电冶金工业、石化盐化工业和农牧业的发展，提供了强大的能源。

第一节 规划与勘测

一、规划

1952年，原燃料工业部水力建设总局和黄河水利委员会联合查勘队，对黄河贵（青海贵德县）宁（宁夏）段进行了查勘，提出龙羊峡谷宜建高坝的意见。1953年，黄

河水利委员会提出《治理黄河初步意见》，拟在龙羊峡修建高坝，作为控制性的水利枢纽。1954年，黄河规划委员会编制的《黄河综合利用规划技术经济报告》将龙羊峡水电站列为黄河开发46个梯级电站之首。1955年，第一届全国人民代表大会第二次会议通过了根治黄河水害开发黄河水利的综合规划，国家正式决定修建龙羊峡水利枢纽。1956年以后，原水电部北京勘测设计院派出勘测队伍进入龙羊峡水电站坝址区，进行调查、勘探、试验工作，并于1960年3月和1966年11月两次提出初步设计报告。水电部组织有关单位对设计文件审查后，于1976年1月向第四工程局勘测设计研究院下达了补充初步设计的任务（当时北京勘测设计院撤销）。第四工程局勘测设计研究院于1976年10月、1977年8月两次提出电站补充初步设计报告，经水电部1977年11月审查批准。1978年后，电站的设计工作由重建的水电部西北勘测设计院承担，至1982年，基本完成了龙羊峡水电站的技术设计工作。枢纽总体布置及工程中的重大技术问题，均由上级审查批准定案，并付诸实施。经过近30年的工作，对龙羊峡水电站的开发任务、枢纽总体布置、正常高水位的选择、水库的运行调度以及综合效益等，都做出了具体规划。

二、坝址勘测

龙羊峡水电站的勘查始于1952年。1954年，黄河规划委员会在龙羊峡、拉西瓦、李家峡和公伯峡河段进行万分之一的地质测绘工作。1956年，原水电部北京勘测设计院地勘十三队进入坝址区，全面开展地质构造、工程地质勘察和地形地貌的测量，至1961年10月。1960年，原水电部西北勘测设计院进行流域规划阶段的勘察、填绘六千分之一的坝段地质图。1964年，北京勘测设计院地勘七队在完成刘家峡水电站补充初设勘测后，陆续转移到龙羊峡。1966年，北京勘测设计院又派出大批工程技术人员到龙羊峡，进行坝址、坝线的选择，坍岸浪击模拟试验和地震机率的测算工作。1975年，水电部第四工程局勘测设计研究院地勘一队，在坝址区和坝前进行勘探，为补充初步设计提供地质资料。

从龙羊峡谷进口到当朗沟长约八公里的河段内，自上而下选择了四个比较坝址。一坝址离峡谷进口最近，施工交通方便，但两岸崖高仅80米左右，不能满足修筑高坝的要求。最后的四坝址，两岸悬崖高达600米，但邻近当朗沟大断裂，断层规模大，山麓堆积层厚，不宜作高坝坝址。中间的二、三坝址地形、地质、水工、施工条件比较优

越，宜建高坝。故1966年前的勘测工作，主要集中在二坝址，初步设计也推荐采用这个坝址。1966年审查时，认为三坝址隐蔽，人防条件较好，又倾向于三坝址，故1967年至1969年，对三坝址全面开展了勘测设计工作。经过进一步查勘，查明三坝址地质条件比二坝址较复杂。1976年3月，坝址选择复核时，根据两个坝址的勘探资料，认为二坝址的断层相对较少，基础处理工程量和枢纽主体工程量也较小；在地形上二坝址河谷两岸有天然凹地，水工枢纽布置具有较大的灵活性。在施工上经方案比较，二坝址总工期可提前两年，节省投资2—3亿元。经过长期地、全面地、反复研究论证，“龙羊峡坝址复审会议”选定了二坝址。

二坝址位于峡谷进口以下1.5至2公里处。在此坝址选择了五个比较坝线。1976年6月和1977年12月两次初步设计讨论会选择了二、四两个坝线，补充地勘工作就围绕这两个坝线展开。在四坝线开挖了65米长的横穿黄河的过河平洞，还进行了补充岩芯钻探，查清了坝基的主要工程地质问题。从坝址基础、枢纽布置、泄水建筑物水流条件和人防条件作了方案比较，最后选定了四坝线。坝基与两岸削坡施工后，根据实际情况，对四坝线又作了调整，称为调整拱四坝线。

1978年以后的技术设计阶段的地勘工作，由重建后的水电部西北勘测设计院承担，除补充必要的地勘与试验，有针对性地查明工程地质和水文地质对水工建筑物的影响外，着重结合防治措施，对主要工程地质问题进行纵深研究。围绕坝肩岩体稳定，近坝断裂带的深层形变（压缩变形、剪切变形等），下游泄水建筑物消能区岩体抗冲刷及岸坡稳定、水库近坝库岸滑坡涌浪，水库诱发地震等问题，继续进行了勘测设计工作。

最后选定的龙羊峡水电站二坝址调整拱四坝线，谷深150米，两岸坡度70—80度，平水期河面宽仅30—40米，谷顶宽200米，岸顶高程2585—2600米，地形平坦，略向上游倾斜。坝址区位于共和盆地东部边缘的瓦里贡山隆起带，由三叠系变质沙岩、夹板岩和少量薄层灰岩，以及呈盐盘状侵入的印支期花岗岩长岩组成。坝基为花岗岩长岩，是印支期瓦里贡山侵入岩的西南边缘部分，在坝线上游和副坝区，还有三叠系变质砂岩夹板岩。主要水工建筑物的地基均为花岗岩长岩，岩性坚硬（弱风化岩石单轴饱和抗压强度1150公斤/厘米³）。坝址岩体经多次构造运动，断裂发育、断层纵横，造成很多大的破碎带、卸荷带，岩石风化程度较强。断层的相互交会、切割，破坏了山体的整体性和坝肩岩体的稳定，特别是左岸有一不稳定三角体，厂坝间的断层沟，对工程处理和水工建筑物的布置造成很大的困难。

本区属高原大陆气候，干旱少雨，地下水不充沛。坝址区第四系堆积物覆盖较薄，不具备储水条件，地下水主要埋藏在深切基岩的断裂带中，水位高于河床，流向基本垂直河谷，在重力的作用下向黄河排泄补水。水质化学类型为氯化钠水和氯化物盐酸钙钠水，对普通硅酸盐水泥有弱硫酸盐侵蚀性。致密坚硬、风化轻微、完整性较好的花岗闪长岩是不透水的。坝基岩体的透水性取决于花岗闪长岩的风化破碎程度，各组断裂的组合交会及其充填物的性质等。据坝址区58个压水钻孔326段压水成果统计，单位吸水量小于0.01升的孔段占83%，属弱透水地层。

龙羊峡水电站初步设计阶段和技术设计阶段，勘测和试验工作量巨大。勘测队的职工，在荒漠的青海高原，顶风沙，冒严寒，爬悬崖，履深谷，战急流，斗恶浪，披星戴月，风餐露宿，克服了重重困难。第一任地质组长伍意宗在察勘地质时摔下悬崖，献出了宝贵的生命，取得了可贵的勘测成果。他们共查勘区域地质构造路线4条约4000公里；绘各种比例尺的地质测绘626平方公里；打岩芯钻探孔173个，总进尺16216米，开挖洞井117个，总进尺5138米；野外和室内岩石和各种建筑材料试验275组（个）；灌浆试验孔5个11段84米。勘测工作查清了坝址区的区域地质构造、工程地质和水文地质情况，提供的地质勘测资料满足了电站各个设计阶段精度和要求。

第二节 枢纽设计

龙羊峡水利枢纽的设计，起初由原水电部北京勘测设计院承担，1960年和1966年曾两次提出初步设计文件。1969年，该院撤销，枢纽设计工作由水电部第四工程局勘测设计研究院接管，曾于1976年提出龙羊峡水电站坝址选择复核报告，1977年完成电站补充初步设计。1978年，水电部重建西北勘测设计院，枢纽的勘测设计任务，改由西北勘测设计院承担。1982年，西北勘测设计院在初步设计的基础上，完成了电站的技术设计，并报上级审查批准。

龙羊峡水利枢纽为一等大Ⅰ型工程。大坝、泄水道、引水系统和厂房均按Ⅰ级建筑物设计。先后担任设计总工程师的有陈飞、李瓚、傅建臣、赵炳祯。西北勘测设计院在龙羊峡工地还成立了设代处。

一、枢纽总体布置

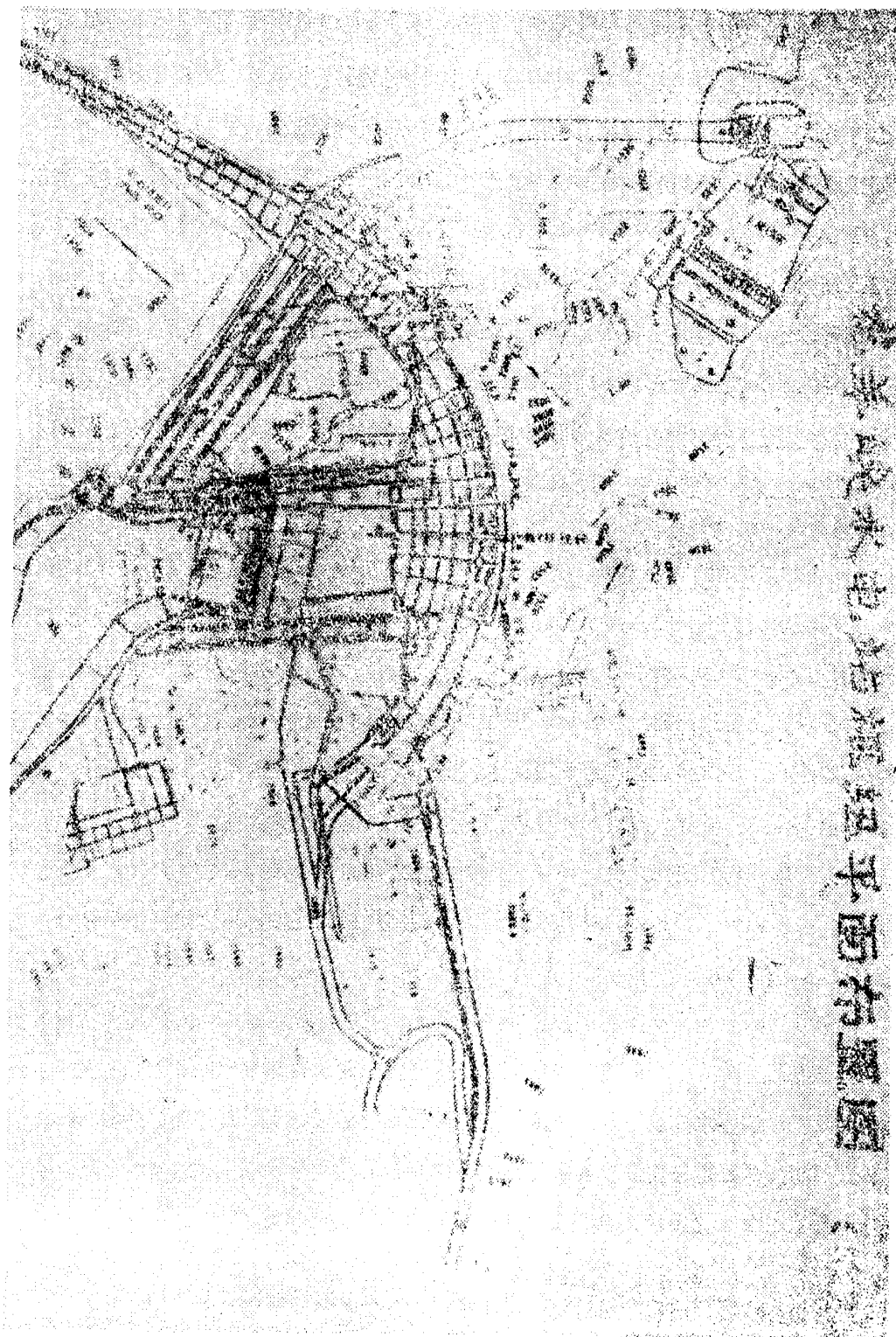
龙羊峡水利枢纽由挡水建筑物、泄水建筑物、引水建筑物、坝后厂房、厂坝支撑结构和副厂房以及厂区交通、330KV出线楼、进厂门厅等组成。挡水建筑物包括混凝土重力拱坝、左右岸混凝土重力墩、左右岸混凝土副坝，前沿总长1226米。泄水建筑物分四层布置，由岸边溢洪道（表孔）、中孔、深孔和底孔泄水道组成，千年洪水位时，总泄洪流量4000立米/秒，可能最大洪水位时，总泄洪流量6000立/秒。水轮机采用单机单管引水系统，四条引水钢管道分别布置在重力拱坝和厂坝段支撑结构内，主厂房呈斜一字型排列，与厂坝支撑结构和副厂房相联结，均布置在坝后70米内的河床上。

鉴于坝线的工程地质条件极为复杂，峡谷地形陡峻，枢纽总体布置把水工建筑物连同其地基岩体作为统一的整体来研究，以协调水工建筑物布置中的相互依存关系。在确保大坝安全和泄水建筑物及其下游消能区防护工程运用状况良好的基础上妥善布置主、副厂房，保证电站安全可靠运行。其它建筑物的布置应适应上述水工建筑物布置的基本格局。枢纽布置力求紧凑并在总体上留有较多的安全储备。

二、水工建筑物设计

水库正常高水位高程为2600米，校核洪水位高程为2607米，防洪限制水位

龙羊峡水电站枢纽平面布置图



高程2594米，死水位高程2530米，上游泥沙淤积高程2510米，河床最低建基高程（计算时采用）2435米，装机高程2448米；泥沙浮容重0.75吨/立米，水容重1.0吨/立米，混凝土容重2.4吨/立米；泥沙内摩擦角12度，混凝土弹性模量2,000,000吨/平米、基岩变形模量在2580—2435米内，左岸为4,000,000—2,200,000吨/平米，右岸为900,000吨—2,200,000吨/平米；混凝土热胀系数为0,00001/C°，混凝土泊桑比为0.2，岩石泊桑比2560米以上为0.32，以下为0.26。

（一）挡水建筑物

混凝土重力拱坝：坝顶高程2610米，主坝前沿长396米，最大坝高178米，最大底宽80米，坝顶宽度18.5—23米（其中实体厚度15米）。上游坝面铅直，下游坝面边坡1:0.4。拱坝中心线方位NW270°10′，立拱夹角85°02′39″，平面拱外半径265米。根据灌浆、排水、观测及交通的需要，分别在2443—2600米高程之内，设置七层纵向廊道，廊道层间距15—30米；在2463.3米、2497米、2530米、2560米等高程处置横向廊道，通向下游坝面1.8米宽的行人平台；在第7、第11坝段设有电梯井，便于竖向交通联系和重物吊运；在电梯井旁侧还有楼梯井。为便于施工，从左至右横向分为18个坝段，纵向又分成三条纵缝。为增加两岸坝肩的稳定性、拱端传力可靠度和改善近拱端断裂构造带的深部变形，两岸拱端均向岸岩适当深插，并对近坝断裂构造带进行专门的基础处理。

左右岸重力墩：因峡谷顶部地形较坝顶高程低，为使上部拱端推力可靠地传向山体，在左右两岸均设重力墩。左岸重力墩沿拱弧方向延伸并逐步扩大，墩底最大宽度58.5米，最低建基标高2580米，最大墩高30米，与拱坝顶同高，前沿长度57.18米，上游面铅直，下游面边坡1:0.4，自左至右共分两个坝段。右岸重力墩呈弧形向右延伸，以外半径285米的圆弧与重力拱坝上游面连结，建基标高2578米，与拱坝顶同高，最大墩高32米，最大底宽44米，上、下游面与左墩相同，共分六个坝段。

左右岸副坝：左岸副坝结合基础处理，坝头与重力拱坝第一坝段相接，为混凝土重力坝。前沿长375米，建基标高2580米，最大坝高30米，最大底宽18.4米，坝顶宽10米（实体厚7米），上游坝面铅直，下游坝面边坡1:0.6，共分

25个坝段。右岸副坝沿右岸重力墩上游弧面的切线方向布置，为混凝土重力坝，建基标高2567米，最大坝高43米，最大底宽30.9米，坝顶宽10米（实体厚度，米），上游坝面铅直，下游坝面边坡1:0.7。共分23个坝段。

（二）泄水建筑物

溢洪道：位于右岸，紧邻右岸重力墩右端布置，与副坝轴线成正交，为水库最高一层泄水设施，由溢流堰、明渠泄槽、差动式窄缝挑流尾坎组成，共两孔泄洪。溢流堰高程2585.5米，单孔净宽12米，中墩厚6米，边墩厚5米，溢流前沿总宽度30米。为避免溢洪产生负压，堰面形状采用肥胖的WES曲线。堰顶设有两道闸门：一道为12×14.5米的平面检修闸门；一道为12×17米的弧形工作闸门，分别由设在堰顶的2×80吨门式起重机和2×80吨固定式起闭机操作。溢流堰闸门的最高挡水位为2607米，在正常高水位时，下泄流量2460立米/秒，可能最大洪水水位时，下泄流量4493立米/秒。明渠泄槽在平面上的中心线是直线型，宽度从堰体后缘两侧向中心线收缩。溢洪道的出流尾坎两孔均为窄缝挑流。这种尾坎经过平面和高程调整，可使从窄缝射出的高速水流，既可纵向拉开，又可横向扩散，起到分散落水能量和改善下游流态的目的。

中孔泄水道：位于左岸，进口底槛高程2540米，过水断面8×9米，其有压段布置在重力拱坝的第6坝段内，由坝内有压段、坝外明渠泄槽及尾坎段组成。泄槽沿左岸岸坡傍山布置，跨越安装间顶拱，尾坎为左转扭鼻坎。在坝内有压段，设置2×11米定轮平板式事故检修闸门一扇，由坝顶500吨门式起重机操作，在坝后出口处设置8×9米弧形工作闸门一扇，由2×200吨固定式起闭机操作。水位2602.25米时泄量为2087立米/秒，水位2607米时泄量为2203立米/秒。

深孔泄水道：位于右岸，过水断面5×7米，其有压段布置在重力拱坝第12坝段内，由坝内有压段、坝外明渠泄槽及尾坎段组成。明渠泄槽沿右岸岸坡傍山布置，尾坎为左转扭鼻坎，并跨越底孔泄槽，坝内有压段进口前沿的上游坝面上设置7.5×9.5米拱形检修闸门一扇，同底孔泄水道共用。在进口椭圆形曲线后，设5×9.5米的链轮平板式事故检修闸门一扇，在有压段出口设偏心铰弧形工作闸门一扇，分别由设在坝后起闭机室内的250吨油缸起闭机和300吨油缸起闭机操作。进水口底槛高程2505米，水位2602.25米泄量为1307立米/秒，水位2607米泄量为1340立米/秒。但水库水位超越2600米时，深孔泄水道一般不参加泄流。

底孔泄水道：位于右岸，过水断面 5×7 米，有压段布置在重力拱坝第11坝段内，由坝内有压段、明渠泄槽、尾坎等组成。泄槽紧靠深孔泄水道的泄槽布置。有压段设三道闸门，其闸门的型式、尺寸及其启闭设备，均与深孔泄水道相同。尾坎为左转扭鼻坎。进水口底槛高程2480米，水位2602.25米泄量为1469立米/秒，水位2607米时泄量为1498立米/秒，但水库水位超过2600米时，底孔泄水道一般不参加泄洪。

泄水建筑物由于水头高、峡谷狭窄、工程地质条件复杂，水库运行水位变化大、泄水流速达40米/秒，故要防止高速水流的气蚀和尾坎挑流消能区的防冲刷问题。水工模型试验和竣工后的验证表明，设计选择的泄流体型和掺气是合适的，流态是良好的。

(三) 引水建筑物

水轮机采用单机单管引水系统。1—4号引水钢管道分别布置在重力拱坝10—7坝段内，进水口底槛高2511.5米。大坝上游坝面伸出10米悬崖牛腿，形成电站进水平台，平台上设置通仓拦污栅。引水钢管的进水口段设有拱型检修闸门（ 8.5×13 米），由坝顶500吨门机操作；在距进口8米处设有平板式事故快速闸门（ 7.5×8.5 米），由固定式800吨油压启闭机操作。在快速闸门的下游侧设有两个直径120厘米的通气孔。引水钢管直径7.5米，至水轮机钢蜗壳之前20米处渐变为6.7米。自坝前进水口至蜗壳进口，1号、2号、3号、4号四条钢管道引水系统总长度分别为195.2米、202.3、207.1米，206.3米。成品总重量4,300吨。

(四) 水电站厂房系统

水电站厂房系统，主要包括主厂房、变压器平台、尾水副厂房、330千伏SF₆全封闭组合电气开关站、安装间、厂坝间副厂房、330千伏出线楼、厂顶330千伏出线平台、厂前区和尾水渠等。

主厂房：由于河床狭窄，两岸坝肩岩体抗滑稳定安全储备较低，为避免由厂房两岸深插劈坡而削弱坝肩岩体的支撑作用，确保大坝安全，主厂房自坝址向下游移60—70米，同时考虑到近坝库岸滑坡涌浪的潜在威胁，主厂房采用全封闭式应力迭合式屋盖结构，呈斜直一字形布置。厂房总长142.5米（含安装间），宽51米（含尾水

平台)，高61.42米。自下而上共九层，即：渗漏排水集水井层、机组检修排水泵房层、排水操作廊道层，尾水管层、蜗壳层、水轮机室与管路廊道层、水轮机层、电缆层、发电机层。水轮机导叶中心线安装高程为244.8米，发电机层、安装间、尾水平台的高程同为246.3.3米，厂房顶高程248.9.7米。主厂房内设有两台500吨桥式起重机。

安装间：紧邻主厂房，采用半窑洞式布置方案。其场地使用面积主要按满足一台水轮发电机组进行扩大性检修的需要确定的。安装间全长47米，净宽23米，净高23.3米；其中地下部分长39.18米，开挖断面为城门洞形，顶拱最大开挖跨度38.19米，边墙开挖跨度28米，最大开挖高度38.85米，与主厂房纵轴方向连成一体，采用整体式圆拱顶直墙衬砌结构。出口段顶拱采用承重钢筋桁架钢模板整体浇筑结构。安装间地下部分的开挖断面，是龙羊峡水电站开挖跨度最大的地下工程。

尾水副厂房：位于主厂房下游侧，利用尾水管顶板以上空间作为副厂房。自下而上分为七层，即：阀门室及事故油池层、供水设备室层、空压机及鼓风机室层、配电室层、主变压器室层、高压电缆层、SF₆开关站层。

厂坝间副厂房：位于重力拱坝与主厂房之间长60—70米的峡谷中。厂坝间副厂房采用厚壁框格结构，顶板厚3米，可承受两岸部分山岩压力，借以提高坝肩稳定的安全裕度。利用246.3.3米高程以上厚壁框格所形成的空腔布置副厂房。副厂房各层的楼板选用预制梁现浇板为主的结构体系，楼板平面刚度较大，对周围的混凝土厚壁墙起支撑作用，形成空间整体受力状态。对于开孔较多的房间，采用现浇混凝土肋形楼板及立柱支撑的框架结构。自主厂房向上游依序布置1、2、3、4号副厂房，用以设置配电装置，控制设备，油、气、水系统设备和其附属设备以及必要的工作用房。中央控制室在1号副厂房内。总建筑面积10840平米。

三、枢纽建筑艺术处理

龙羊峡水电站建筑艺术是力求塑造一个与我们时代相适应的、具备民族特色的水电站建筑形象。首先应反映出龙羊峡大型水电站的特点，同时以民族的建筑形式为出发点，表现现代水电站建筑。建筑总体包括厂区、厂前区、左岸坝头区、水库游览区、左右岸警卫区等五部分。

四、重大技术问题处理

(一) 大坝基础处理

龙羊峡水电站坝高库大，踞黄河上游。为确保下游亿万人民生命财产的安全，要求大坝安全可靠万无一失。但坝址地形陡峻，断裂发育，地质条件复杂，坝肩岩体单薄，地震烈度高，近坝库岸滑坡普遍，天然坝基不能满足坝肩变形、传力、坝体应力、基础岩体应力等方面的要求，需要一个刚劲的人工处理基础。因此，大坝基础处理成为该工程的重大技术问题之一。经反复研究，精心设计，并报上级审查批准，采取以下措施。

1、调整坝型。将原设计的拱型重力坝改为重力拱坝，坝顶中心角由 $44^{\circ}19'$ 调整为 $85^{\circ}2'39''$ ，两端向两岸作适当深插，使拱端推力方向与侧向滑移面近乎成正交，增加了拱座下游支撑岩体的厚度，以解除拱端推力对坝肩岩体稳定的威胁。

2、断层深层处理。按断层分布的位置、范围、规模、性质和受力状况，设置传力槽塞、传力洞塞、网格式混凝土置换墙和抗剪洞塞，对处理结构围岩和近坝断层未处理部分，辅以中、高压固结灌浆（最高压力达 60 公斤/平方厘米），以保证处理效果。

3、防渗、排水工程措施。为尽量降低两岸地下水位，使断裂面的物性不致恶化，采用以“排”为主的封闭式防渗工程。沿坝基前沿设置防渗和排水帷幕，并延至两岸山体内。河床坝基至主厂房之间，布设五道排水幕。两岸顺河方向结合地下工程施工各设一道排水幕，另在右岸沿溢洪道底部再增设一道排水幕，排水孔均通入导流洞内，以拦截右副坝坝基渗流。对危害较大的左岸坝前断裂（G4），用混凝土填角封闭其表面，对断裂及围岩进行中、高压固结灌浆，做斜帷幕堵阻渗水，在断裂处加厚帷幕并辅以化学灌浆拦截渗水，在帷幕后设斜排水幕与坝基和顺河排水幕共同排除渗水（即采取所谓封、固、堵、截、排五项处理措施）。另外，沿坝基及上下游一定范围内进行深度不同的固结灌浆，并做好坝基与坝体的接触灌浆和断层塞，以便有效地传递应力。还利用交通洞、施工洞和地勘洞等增设排水孔，更有效地降低地下水位。

4、对两岸局部不稳定岩体进行加固处理。岸边普遍设置锚杆、锚桩、排水孔或表面衬护，对较大的局部不稳定岩体，视其规模和产状，分别采取预应力锚索或抗剪洞塞予以加固，防止局部不稳定岩体松动坍塌。

5、厂坝间的支撑结构（副厂房）和两岸的泄水道对两岸山体都起了一定的支撑作用，增加了安全储备。

(二) 下游消能区防护工程

消能区位于坝线下游150—500米之间。在这个范围内存在着不少规模较大、纵横交错的断层、泄水建筑物的冲刷坑的位置在宽达100米的断层带内。岩块破碎、风化严重，抗冲刷能力低，工程地质条件很差。泄流巨大能量的冲刷和破坏，直接威胁左岸坝肩下游山体的稳定和各泄水建筑物出流尾坎的安全，必须进行加固和防护。采取的措施是，首先溢洪道设计时采取窄缝出流鼻坎，使出流纵向拉开，避免水舌落水重叠，落水布置防止落水回流，进行封堵。同时根据两岸工程地质条件，加强对左岸的防护。左岸防护工程的水下部分采用深式抗剪竖井，地下锚拉洞与抗冲深墙相结合的综合防护方案；对其水上部分采用由钢筋混凝土网格框架保护山体，并在网格框架的结点处，设置大吨位的预应力深式锚索锚向山体的方案。右岸防护的重点是保护溢洪道、深孔和底孔泄水道的鼻坎基础不受冲刷破坏，从尾水渠末端至南大山水沟内进行混凝土护坡保护。

左岸防护分水下、水上两部分。水下防护以提高河床边坡的抗冲能力和岸边岩体的稳定性为主要目的，其措施是：在河岸高程2464—2468米以下的整个冲刷范围设置钢筋混凝土防冲深墙，墙体厚度3米，基础高程2425—2420米，低于最深冲刷线以下5—10米，最大墙高48米。为使墙体与墙后基岩联成整体，除在墙后垂直岩面内设有系统锚杆外，还在墙后基岩内设有锚拉洞。锚拉洞的间排距均为15米，伸入岩体长15—83米。为阻止断层切割的不稳定岩体滑动，在防冲墙后开挖5个直径6米、深40—45米的抗剪竖井，浇筑成钢筋混凝土阻滑桩（受剪8500吨），通过锚拉洞与防冲深墙联成整体。水上部分防护的措施是：在河水面高程以上布置两排七条穿过断层面的钢筋混凝土抗剪锚拉洞，施加预应力后可有效地起到抗剪和阻滑作用。对河岸以上的山体，采用钢筋混凝土网格框架进行加固，在网格框架的结点处及网格空间打设30—50米深的预应力锚索，对山体进行全面预应锚固。对表面作锚固混凝土护坡处理。通过外包内锚，可以保证左岸河床和山坡的稳定。

右岸防护的重点是保证深、底孔泄水道和溢洪道的鼻坎基础不受淘刷为原则，其主要措施是：在河岸高程2463米以下与左岸基本相同，采用防冲深墙保护，从尾水渠末端开始，绕深孔、底孔泄水道和溢洪道鼻坎基础外侧直护至导流洞出口右侧的南大山水沟内。防冲深墙基高程2435米，墙后设有深入岩面10—15米的钢筋桩，使墙体与山岩联成一体。在河岸高程2463米以上，结合护坡将深孔、底孔和溢洪道的鼻坎尽可

能联成整体，以提高整体稳定性。

本工程的下游防护设计，实际上是泄水建筑物群的总体布置及其各个尾坎体型的总体优化设计。根据消能区的工程地质情况，采取相应的工程处理措施，达到建筑物安全、岸岩稳定和顺利泄洪的目的。

（三）近坝库岸滑坡涌浪问题

龙羊峡水电站近坝库岸，系指黄河南岸自坝前起至上游15.8公里处的地段。以坝上游5公里的南查纳沟为界，上游称6号地段，下游称7号地段。在6、7号地段分布有许多规模大（ 10^6 — 10^8 ）、滑速高、滑距远的滑坡。因此，水库库岸滑坡涌浪问题是龙羊峡工程的重大技术问题之一。

地质、设计部门对龙羊峡水电站近坝库岸的地质构造、水文地质条件、工程地质、历史上的典型滑坡等进行了长期的调查、实验和研究，初步掌握了滑坡发生、发展的机理，提出了滑坡涌浪模型试验成果报告和边坡变形监测工程设计。在枢纽工程设计及水库运行中，都充分地考虑了滑坡涌浪这个因素，并对生活区采取必要的防护措施。

西北勘测设计院承担了近坝库岸滑坡监测工程设计和施工任务，于1986年10月完成了监测工程的土建部分和监测仪器的安装调试工作，经国家验收，被评为全优工程。配合龙羊峡水库的运行和防汛，全面地展开了监测工作。近坝库岸监测工程所采用的遥测新技术，其规模和技术水平，在国内处于领先的地位。这项监测工程的建立和今后监测工作的开展，将有助于龙羊峡水电站的安全运行，并为研究水库高速滑坡问题做出贡献。

（四）观测设计

龙羊峡工程的安全监测系统由大坝、泄水建筑物及其下游防冲工程、厂房系统的工程监测、坝扇工况监测、坝扇山体水文地质情况观测、库岸滑坡涌浪监测、水库诱发地震监测以及重大新构造断裂监测等组成。观测项目和仪器设备按其主要任务又分为：监测安全运行；掌握施工期、蓄水期和运行期工况；防范报警和预报；检查设计与施工的正确性；为科学研究提供资料等，共五类，4000点件。

第三节 工程施工

(一) 筹建工作

1976年1月28日，国务院正式批准兴建龙羊峡水利枢纽工程。2月4日，水电部第四工程局接到水电部正式下达要求该局承担龙羊峡建设任务的通知。当晚，工程局党委连夜召开常委会议，研究部署从甘肃刘家峡向青海龙羊峡转移的有关事项，组成了龙羊峡工程筹建指挥部，由局革命委员会副主任卢积仓任主任，梁益华、罗西北、王宝祥、尹维德、刘海伦、张宝璞、杨树林等为副主任；同时成立了筹建指挥部党委，卢积仓任书记，梁益华任副书记。筹建指挥部人员一行40余人于2月7日由刘家峡启程，2月10日抵达龙羊峡，在峡谷进口处河滩上，修补起原地勘队遗留下的颓垣断壁，开始办公。2月15日，由拌合厂焦宽瑞、潘学振等12人组成的小分队赶到龙羊峡，在茶纳山上搭起帐篷，揭开了龙羊峡工程筹建工作的序幕。

龙羊峡位于青海省省会西宁市西南147公里，在海南藏族自治州首府恰卜恰东南约40公里。施工初期，公路由西宁至恰卜恰后，转行简易公路（有时需穿行无路的河滩地带）才能抵达龙羊峡，施工对外交通运输曾比较过采用由国家铁路干线湟源车站接轨和公路汽车运输两种方案，考虑到前者工程量大、投资多（约3亿元）、工期长，铁路的设计和建设不能满足工程进度要求，最终选定公路运输方案。从湟源火车站经吊庄科至龙羊峡工地，公路全长96.8公里，其中湟源至吊庄科段长35.3公里，系利用原有青藏公路加以适当改建；吊庄科至龙羊峡工地段长61.5公里，为新建成通车。

龙羊峡坝址北岸为北查纳山，全部施工区和生活区设在北查纳山坡上。筹建初期，此处房无一间，树无一棵，荒无人烟。筹建指挥部人员到达龙羊峡时正值严冬季节，大家顶风冒雪，铲平一片山坡，搭起帐篷安家，晚上在帐篷里点起马灯开会学习。没有食堂，在雪地上挖坑，三块石头支锅做饭；没有水就往返六公里，爬越一百五十米高的陡坡，到黄河边挑水；没有煤烧，就挖草根、拣牛粪，生火做饭、取暖。大批职工陆续进点，急需解决住房问题。但是，一缺材料，二缺运输工具。他们以大庆为榜样，发扬艰苦创业精神，因地制宜，就地取材，自己动手修建以“干打垒”为主的房屋，在瓦木