

Engineering Achievements

金沙江白鹤滩水电站工程

张春生

PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, China

1. 工程简介

白鹤滩水电站是世界上装机容量第二大水电站，是实施西电东送的国家重大工程。电站位于四川省宁南县和云南省巧家县境内的金沙江下游河段，坝址控制流域面积为430 300 km²，占金沙江以上流域面积的91%。白鹤滩水电站总库容为206.27亿米³，总装机容量为16 000 MW。枢纽工程在功能上以发电为主，兼顾防洪、航运，并促进地方经济社会发展。

枢纽工程包括拦河坝、泄洪消能设施、地下引水发电系统等主要建筑物。拦河坝为混凝土双曲拱坝，最大坝高289 m，坝顶高程为834 m；泄洪设施由坝身6个表孔、7个深孔和左岸3条泄洪隧洞组成，坝下设水垫塘、二道坝，枢纽最大泄量为42 350 m³·s⁻¹。引水发电系统为全地下式，布置在金沙江两岸的山体内，左右岸各布置8台1000 MW世界单机容量最大的水轮发电机组。图1为白鹤滩水电站枢纽工程全景，图2为白鹤滩水电站枢纽布置图。

白鹤滩水电站前期工作始于20世纪50年代。2010年10月工程开始筹建，2019年4月6日下闸蓄水，2021年6月28日首批机组投产发电，2022年12月20日全部机组投产发电。

白鹤滩水电站技术难度高，主要工程技术难题有[1–2]：

(1) 地质条件复杂，工程区为玄武岩地层，发育有易



图1. 白鹤滩水电站枢纽工程全景。

松弛柱状节理玄武岩，层间层内错动带发育，左岸岩体卸荷强烈；工程场址区的地震基本烈度为Ⅷ度，100年超越概率2%基岩地震动峰值加速度达451 gal (1 gal = 1 cm·s⁻²)，工程抗震要求高。

(2) 双曲拱坝最大坝高289 m，总水推力达到了1650万吨，大坝混凝土浇筑总量为803万米³，由于左右岸地形的不对称，特高拱坝体形不对称性显著。

(3) 枢纽最大泄量达42 350 m³·s⁻¹，坝身最大泄洪落差达220 m，泄洪功率为90 000 MW，不对称拱坝泄洪消能问题突出。

(4) 左右两岸引水发电系统密集布置有364个各种功

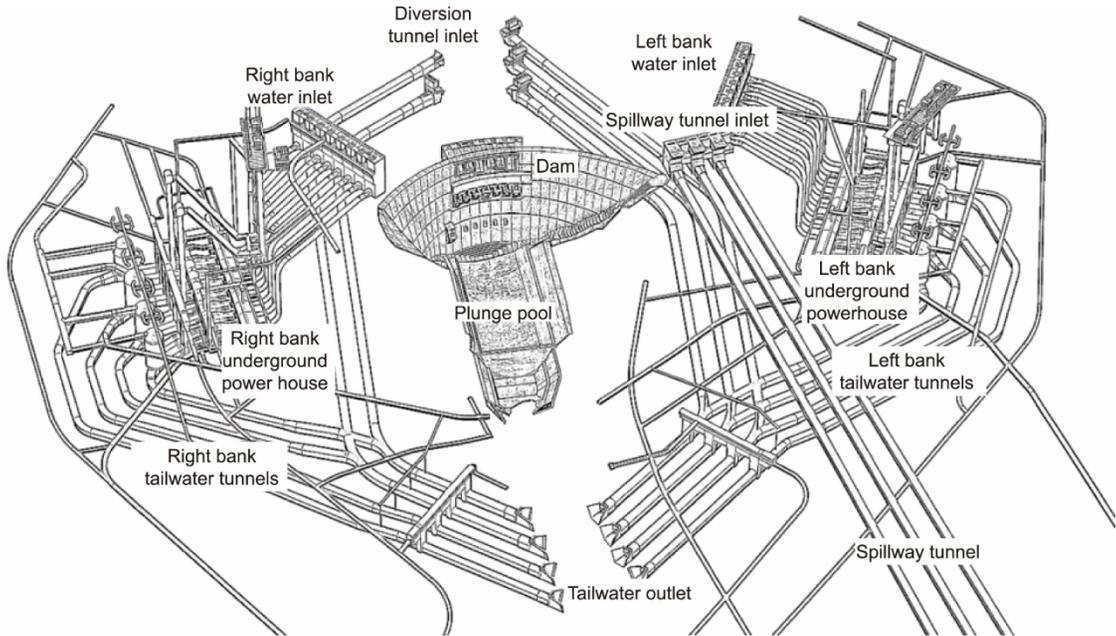


图2. 白鹤滩水电站枢纽布置图。

能地下洞室，地下工程开挖量达2500万 m^3 ，单洞和洞室群规模巨大，稳定控制难度大。

(5) 电站单台机组容量为1000 MW，每2台机组共用一条尾水隧洞，百万千瓦水轮发电机组水力安全要求高。

(6) 近坝区存在多处巨型变形体和特大泥石流沟等高地质风险区，建设期和运行期工程面临安全风险挑战。

2. 工程技术成就

2.1. 特高拱坝与坝基处理

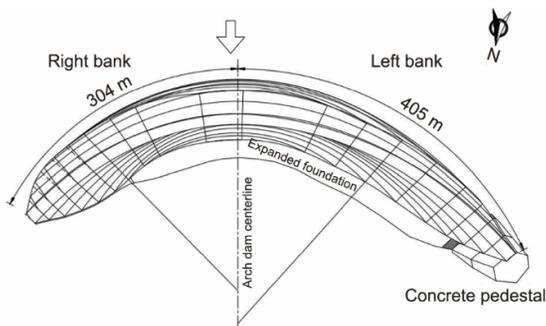
2.1.1. 不对称拱坝的“均衡设计”

白鹤滩坝址右岸地形陡峭完整，左岸为缓坡与陡坡间的台阶地形，左岸坝顶长度为405 m，右岸为304 m，左岸比右岸长出101 m，不对称程度显著，且左岸岩体卸荷深度大于右岸，易松弛柱状节理玄武岩出露范围也大于

右岸，坝基开挖后的地形条件和地质条件均具有明显的不对称性，是目前国内外最不对称的特高拱坝，如图3所示。拱坝体形和拱坝基础承载力的不对称，加剧了作为超静定壳体结构的特高拱坝建设难度[3]。

为了解决不对称拱坝建设难题，创建了不对称拱坝“均衡设计”方法。提出了反映拱坝体形不对称程度的不对称指数，建立了基于拱推力比与中心线平移量、偏转角关系的拱坝均衡系数，为拱坝应力、变形调整提供了依据。基于上述方法，将拱坝中心线与河道中心线分离，调整拱坝中心线向缓坡岸平移约20 m，同时将拱坝中心线逆时针偏转 5° ，将拱坝不对称指数由1.76降为1.42。在此基础上，利用完整性较好的微新角砾熔岩作为河床部位拱坝基础，将易松弛柱状节理岩体的出露面积由55.5%减小到40%左右。

体形设计上，采用两条椭圆曲线相接，并加大左侧曲率半径，均化坝体应力分布；在左坝肩上部设置混凝土垫



(a)



(b)

图3. 白鹤滩双曲拱坝的不对称体形。(a) 结果外形图；(b) 实物图。

座，在坝体中下部及河床部位设置新型扩大基础，进一步改善和适应地形地质不对称状态。实现了拱坝拱推力和变形的均衡协调，拱坝的整体安全度得到提高。

2.1.2. 特高拱坝的抗震

工程场址地震基本烈度为Ⅷ度，拱坝按基准期100年超越概率2%地震动参数进行设计，按基准期100年超越概率1%地震动参数进行校核，地震水平加速度分别为451 gal和534 gal，地震动参数居300 m级高拱坝之首。

白鹤滩拱坝是首座依据《中国地震动参数区划图》(GB18306—2015)和《水电工程水工建筑物抗震设计规范》(NB35047—2015)进行抗震安全设计和评价的特高拱坝。除采用常规方法评价拱坝抗震性能外，采用三维非线性有限元法和地震动力模型试验法开展了全面深入研究，包括坝体横缝张合、地基辐射阻尼、拱坝与垫座及地基相互作用、地基软弱结构面组合块体及渗透压力等因素对拱坝抗震性能的影响等。

鉴于工程重要性和抗震标准高，针对地震响应较大的部位加强了坝体构造设计及基础处理措施，主要包括：强调坝体与扩大基础及垫座的平顺衔接、采用强度等级高的混凝土、上下游坝面均布置抗震钢筋、强化近坝抗力体锚固、增强泄洪表孔顶部大梁的联系、强化横缝止水结构、软弱结构面置换处理和坝基固结灌浆等。

采取上述措施后，设计地震作用下，坝体应力满足要求，拱坝、坝肩位移在震后均基本回复到静态位置；坝踵区开裂深度约为大坝底宽10%，未扩展到大坝帷幕；拱坝横缝开度不超过40 mm，不会破坏横缝止水设施。校核地震作用下，大坝地基系统未出现位移突变，拱坝-地基系统整体稳定。拱坝的地震超载能力受两岸坝肩局部块体的

稳定控制，大坝-地基系统的抗震超载安全系数大于1.7。设计地震作用下的拱坝强度和稳定能够满足抗震设计要求，校核地震作用下的大坝地基系统满足不溃坝的设防目标。

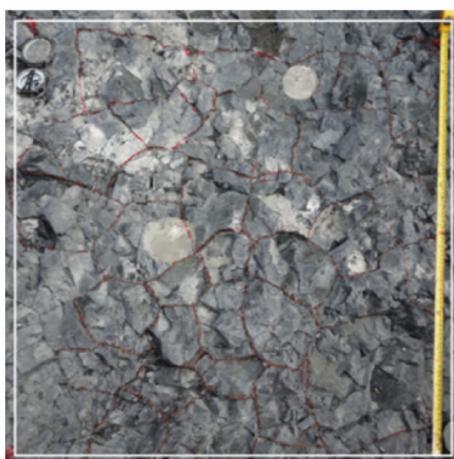
2.1.3. 柱状节理玄武岩坝基的松弛控制

白鹤滩坝址区岩层主要为二叠系上统峨眉山组玄武岩，坝基中低高程出露厚约76 m的柱状节理玄武岩，在80 000 m²拱坝基础面中约占40%，如图4所示。柱状节理柱体长度一般为2~3 m，直径为13~25 cm，柱体内发育微裂隙。试验表明，岩体开挖卸荷后极易松弛，松弛深度通常为2~3 m，局部区域可达4 m，如图5所示。松弛后的岩体变形模量降低约50%，导致坝体应力状态恶化。以往对柱状节理玄武岩工程特性的研究很少，将柱状节理玄武岩作为高坝基础，更是首次。柱状节理玄武岩坝基的松弛控制，是白鹤滩工程的重大技术难题之一。

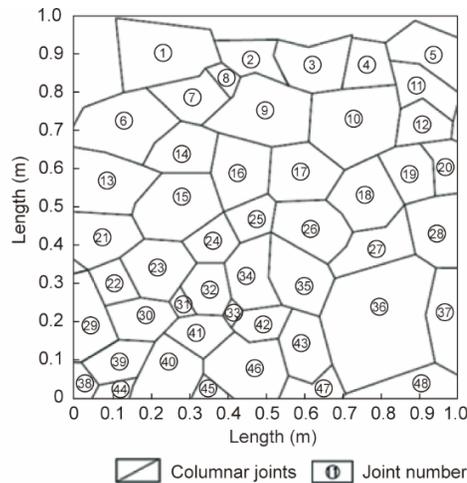
对柱状节理玄武岩特性的全面研究贯穿于工程设计全过程。从柱状节理玄武岩作为特高拱坝坝基可行性、拱坝结构适应性、爆破开挖技术、防松弛保护措施及松弛预测



图4. 坝基柱状节理玄武岩分布范围。



(a)



(b)

图5. 坝基柱状节理玄武岩典型结构。(a) 现场的典型照片；(b) 地质示意图。

方法等方面开展了大量地质勘探、现场试验和分析研究,揭示了其松弛机理和力学特性时空演化规律,建立了相应的岩体质量评价指标体系和松弛岩体利用控制标准,研发了“厚层保护、灌浆固结、深层锚固、精准控制爆破”的松弛控制成套技术,开创了易松弛岩体建造特高坝的先河[4]。

全面采用松弛控制成套技术后,大面积基础开挖引起的岩体松弛深度被有效控制,在1.2~1.4 m范围内,松弛层岩体波速不小于 $4000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,同时维持了原柱状镶嵌结构,达到了与块状玄武岩岩体松弛水平相当的控制效果,从而彻底解决了岩体松弛控制的难题,拱坝建基面岩体质量得到保障。水库蓄水后的监测成果表明,大坝运行安全可靠。

2.2. 狭窄河谷大流量泄洪消能

2.2.1. 不对称碰撞消能

白鹤滩泄洪消能设施包括坝身6个表孔和7个深孔、大坝下游反拱水垫塘和二道坝、左岸3条无压泄洪洞。坝址区河谷枯水期水面宽度仅50~90 m,而枢纽最大泄量为 $42350 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,泄洪落差为205 m,泄洪总功率超90 000 MW,其中坝身最大泄量为 $30100 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,泄洪功率为61 700 MW,反拱水垫塘单位水体消能率为 $17.1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-3}$,明显具有“窄河谷、高水头、巨泄量”特征,单宽泄流量、坝身泄洪功率、单位水体消能率等水力指标为同类工程之最;同时由于两岸地形不对称,坝身泄洪孔口无法对称布置,已有的对称消能技术难以实现安全高效消能。

为确保泄洪安全,深入研究了窄河谷泄洪消能的水力协调问题,解决了近坝区进水口空间分层引流、泄洪消能分区布置、河道允许泄量、冲刷堆丘控制等难题。

研发了直接调整各水舌轨迹的不对称碰撞消能技术[5],通过调整多层泄洪孔口的布置方式和结构体型,纵向利用

大差动分组拉开水舌落点,横向采用平面扩散结构充分利用消能空间,竖向则利用表、深孔水舌搭接碰撞进行消能。调整纵向和横向流量分配,使得水舌之间获得充分碰撞。在同等泄洪条件下,与以往的泄洪孔口对称布置相比,坝后水垫塘动水冲击压强分布更加均化,压强峰值减小了18%。图6为不对称拱坝泄洪消能布置方式,图7为表、深孔水舌碰撞消能。

2.2.2. 无压泄洪洞群

白鹤滩3条泄洪洞并列布置于左岸,为直线型龙落尾无压泄洪洞,单洞长度为2170~2317 m,单洞最大泄量为 $4100 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,单洞泄量和运行水头均达到了最高水平。对长缓坡高流速非掺气条件下的隧洞水力安全、掺气减蚀和通风补气、泄洪洞群出口消能安全、超宽孔口闸门结构等重大关键技术难题开展了深入研究。

长达1908 m的缓坡段最大流速近 $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,洞身最大流速近 $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,水深大、弗劳德数低。为解决高速水流空蚀问题,创建了长缓坡大流量高水头无压泄洪洞水力安全设计方法。为了使底、侧掺气相互协调,提出了平直出流侧收缩掺气结构和三维非同位掺气技术。

创新了大型泄洪洞群掺气坎与洞顶隔离式独立补气技术,解决了洞顶净空补气掺气量小、有效掺气不足等难题。提出了混凝土衬砌不平整度控制标准和防空化分缝连接结构,有效解决了高流速下过流面抗空化难题。研发的横向三支臂支座不均匀变形消除技术和“三点同线”同轴度自适应技术,解决了巨大水推力下的超宽孔口闸门结构安全难题[6]。

2.2.3. 反拱水垫塘结构与安全

在 $30100 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 下泄流量、60 000 MW泄洪功率作用下,白鹤滩水垫塘底板最大脉动上举力已超出自重和锚固



图6. 不对称拱坝泄洪消能布置方式。



图7. 表、深孔水舌碰撞消能。

力总和，常规的平底水垫塘结构难以满足安全要求。为解决这一问题，水垫塘采用了反拱结构型式，由近200块长宽各15 m、厚4 m的混凝土板组成了不连续拱形薄壳结构。模型试验表明，表孔、深孔联合泄洪是水垫塘动水冲击压强和脉动压强的控制工况[7]。各板块承受的动水荷载具有局部性、随机性和不均匀性的特征。受外部荷载作用后，不连续拱形薄壳结构呈“局部拱”性态，从反拱中心到边缘，不同板块的拱效应逐渐递减（由80%递减至20%），锚固力随之发生转化。

为此，提出了反拱底板稳定分析方法——力矩平衡法，快速求解底板的稳定性。基于动水荷载分布规律，以优先发挥板块的拱效应为前提，提出分区锚固原则，创新了反拱底板拱效应与锚固的耦合分析控制技术。同时，为确保反拱水垫塘结构安全和便于运行维护，发明了能够适应挤压变形的水垫塘分缝结构、融合动态监测的柔性止水渗漏处理技术、双向自流排水系统等。

泄洪消能设施已经历四个汛期多次泄洪运行考验，安全运行260多小时。原型观测表明，泄洪流态平顺，各项监控指标正常且变化平稳，泄洪消能建筑物运行性态优良。

2.3. 地下厂房巨型洞室群

2.3.1. 地下洞室群的总体布置

白鹤滩水电站地下厂房基本对称布置于金沙江左、右两岸，左、右岸各布置8台单机容量1000 MW的水轮发电机组。引水发电系统均由引水隧洞、主副厂房洞、主变洞、尾水管检修闸门室、尾水调压室、尾水隧洞及地面出线场等组成，同时要兼顾5条导流洞、3条泄洪洞的布置。受狭窄河谷地形限制，整个地下洞室群的总体布置存在较大难度。

尾水隧洞惯性时间常数 $T_w = 55.96$ s，需要设置尾水调压室。按照稳定断面要求，调压室的最大开挖直径近60 m。

在发育有层间层内错动带、柱状节理的岩体中，开挖如此规模的洞室，难度和安全风险巨大。为此，首先将三台机组共用一座尾水调压室的布置改为两台机组共用一座尾水调压室，同时将传统的3大洞室布置方式（主副厂房洞、主变洞、尾水调压室）改变为4大洞室布置（主副厂房洞、主变洞、尾水管检修闸门室、尾水调压室），如图8所示。该调整使得调压室的开挖直径减小至48 m。

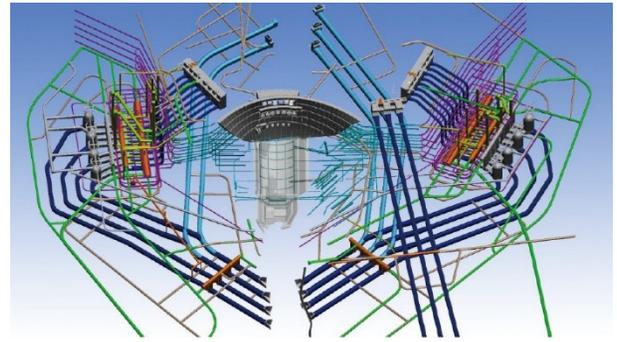


图8. 白鹤滩水电站地下洞室群分布。

同样，在特殊不利地质条件下，为减小洞室群效应对洞室围岩稳定的影响，发挥深层围岩承载力，以围岩破裂度为指标，采用理论分析和数值模拟等深入研究，将主副厂房洞与主变洞间岩柱厚度调整为60.65 m，岩柱厚度与厂房跨度之比为1.96，大于类似工程的1.55~1.70。图9为地下厂房主要洞室的间距控制值。将左岸3条、右岸2条尾水隧洞结合导流隧洞布置，既减小了尾水洞出口边坡开挖范围，又将施工期临时建筑物充分利用，节约了投资。

2.3.2. 地下洞室群围岩稳定控制

白鹤滩厂区构造应力高，实测地应力超过33 MPa，岩石强度应力比(R_b/σ_1)为2.85~5.89，玄武岩隐微裂隙发育，启裂强度低，应力破坏问题突出[8]；发育多条层间、层内错动带，遇水易软化，力学参数低，斜切左、右岸主要洞室，开挖后易引发围岩错动变形；出露于尾调室大型穹顶和尾水隧洞的柱状节理玄武岩各向异性特征明显，开挖易卸荷松弛，甚至出现结构解体破坏。

针对复杂地质条件下超高大跨巨型地下洞群特点[9]，从充分发挥围岩自身承载能力出发，提出了考虑围岩峰后强度的全曲线“强度-应力”设计技术。该技术以围岩破裂度为指标，建立了“宏观总控布局、中观过程控制、微观重点加强”的围岩稳定三层级设计方法。围绕“及时封闭、分期加强、维持围压、抑制破裂”，提出低启裂强度脆性玄武岩卸荷松弛系列控制技术和相应支护体系，保障了高应力条件下巨型地下洞室群围岩稳定性。

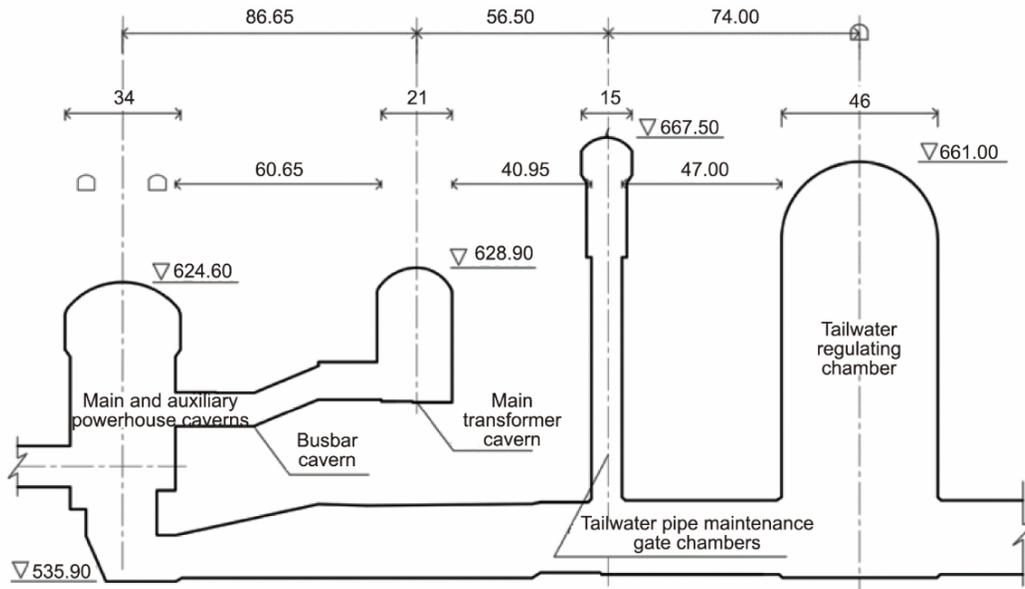


图9. 地下厂房主要洞室的间距控制。

针对斜切地下厂房高边墙的层间错动带，采用“超前置换抑制错动、强锚上盘控制变形”组合抗剪技术，有效控制了错动带错动变形量值及范围，实测错动变形仅38 mm，保证了最高89 m、438 m长的直立高边墙变形稳定。提出“预锚固顶、维持围压、稳步成拱”巨型顶拱成洞技术，在洞室顶拱预设锚固观测洞进行预锚加固，巨型尾水调压室采用“流线型”穹顶体型，洞室分层分块精细开挖，降低开挖卸荷速率，并及时支护、快速维持围压（图10），对跨度达34~48m的超大跨度大型洞室稳定发挥了关键作用。

监测表明，复杂围岩地质条件超高大跨地下洞室群的开挖与支护措施得当，变形控制良好，目前变形均已收敛，地下厂房巨型洞室群围岩稳定安全。

2.4. 百万千瓦机组的水力安全

白鹤滩输水系统主要由进水口、引水上平洞、引水竖井、尾水管、尾水管检修闸门井、尾水调压室、尾水隧洞等组成。引水系统采用单洞单机、尾水系统采用两机合一洞的布置方式。尾水单洞流量为 $1095 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，尾水系统水力惯量达 $2.2 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

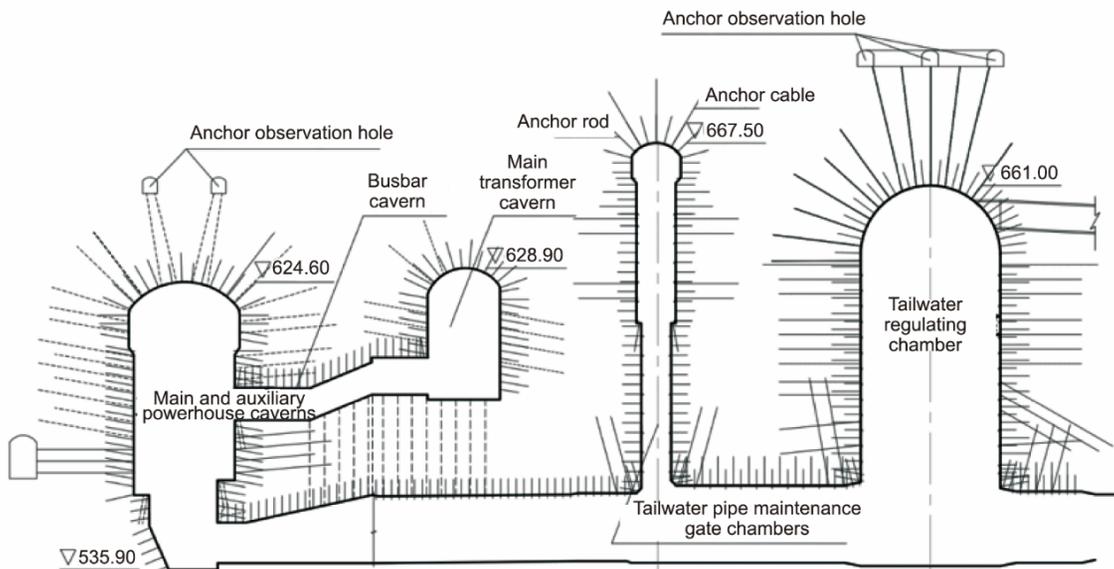


图10. 主要洞室的支护方式。

对于较长的尾水系统，为节约工程投资，通常采用一洞多机的布置型式。但白鹤滩采用百万千瓦机组，单机容量和引用流量大、水力震荡对机组影响大。为减少机组间相互干扰、确保每台机组的稳定运行，应尽量减少单个水力单元连接的机组台数。为此，尾水水力单元采用了两机共用一个调压室和一条尾水隧洞的组合方案，单一水力单元的调压室和尾水隧洞洞室尺寸也得到了控制。

白鹤滩尾水系统水力惯量巨大，对水力安全调控提出了更高的要求。为控制尾水管出口最小压力、尾水调压室波动稳定和涌波水位等，调压室规模异常庞大。为此，采用了尾水管检修闸门井和圆筒调压室分开布置方式，按照“双式差动”调压室联合作用进行设计和水力分析，既有利于洞室稳定又有效加快了水力振荡衰减速度。

基于明满流临界水位分析，采用尾水隧洞底坡三段式布置，确保了明满流作用下的尾水隧洞结构安全。输水发电系统布置格局如图 11 所示，明显改善了明满流水力特性，满足了百万千瓦机组稳定运行要求[10]。

为了控制水力振动，建立了多流态水力系统水力振动分析理论和水力共振评估技术，全面分析了明满流对系统振动特性的影响，建立机组动态特性对系统特征频率影响的分析方法，形成了自由振动和受迫振动多角度的水力共振安全评估技术，解决了百万千瓦机组输水发电系统水力安全评估难题[11]。研发了水力瞬变仿真分析系统，实现了百万千瓦级复杂输水发电系统的全要素、高精度仿真分析。

2.5. 大坝混凝土的温控与防裂

白鹤滩特高拱坝坝身设置 6 个表孔、7 个深孔和 5 个导流底孔，坝体结构复杂。强约束区采用 C₁₈₀40 混凝土，最大浇筑块长度近 100 m（不设纵缝），宽 23 m，远超类似工程规模。坝址地处金沙江干热河谷，高温时段长，秋

冬季温度骤降幅度大、昼夜温差大，大风频繁，增加了大坝混凝土温控防裂难度。

坝体混凝土方量为 $8.03 \times 10^6 \text{ m}^3$ ，经反复研究论证，全坝采用低热硅酸盐水泥混凝土。与中热水泥相比，低热水泥具有早期发热缓慢、水化热温升低的特点，绝热温升降低 4~6 °C，可有效降低混凝土最高温度，提高大坝混凝土抗裂安全度。但低热水泥混凝土早期强度发展缓慢，其温控标准、温控措施及其效果、施工工艺等与中热水泥混凝土有很大差别。

白鹤滩制定了一套适应低热水泥混凝土特性的温度控制指标体系和控制措施。采取“小温差、慢冷却、早保护、长养护”的温控策略，与以往降温措施不同，采用全周期连续降温，如图 12 所示。结合低热水泥混凝土早期发热缓慢的特点，采用最高温度区间控制方法，首次对混凝土最高温度实现上、下限双控制，最高温度控制在 21~27 °C 之间。在温度峰值出现后适度维持较高温度，促进低热水泥水化反应和早期强度发展；优化中期冷却过程，全程均匀连续缓慢降温，将温度梯度控制到最小；中期冷却末设控温段，协调同拱圈同步二期冷却，保障横缝开度，充分减小温降梯度，控制混凝土开裂风险。大坝混凝土温控指标和措施优化调整后，各项温控指标控制保证率大大提高，拱坝混凝土抗裂安全系数由 1.8 提高至 2.0 [12]。

基于低热水泥和低热水泥大坝混凝土特性，建立了低热水泥混凝土专属的浇筑标准化工艺体系，如“冬季延缓拆模、提前保温保湿”技术、可避免横缝面损伤的平行退模工艺、低热水泥混凝土最优冲毛时机与冲毛水压等。采用成套智能温控装备，实现了全过程精准控制通水冷却和混凝土温度。大坝建设全程安全仿真，实时监控不同季节、不同时段温度变化时坝体混凝土产生裂缝的风险。

经全坝全面检查，未发现以往大坝常见的温度裂缝，获取的全世界最长混凝土芯样长达 36.74 m。

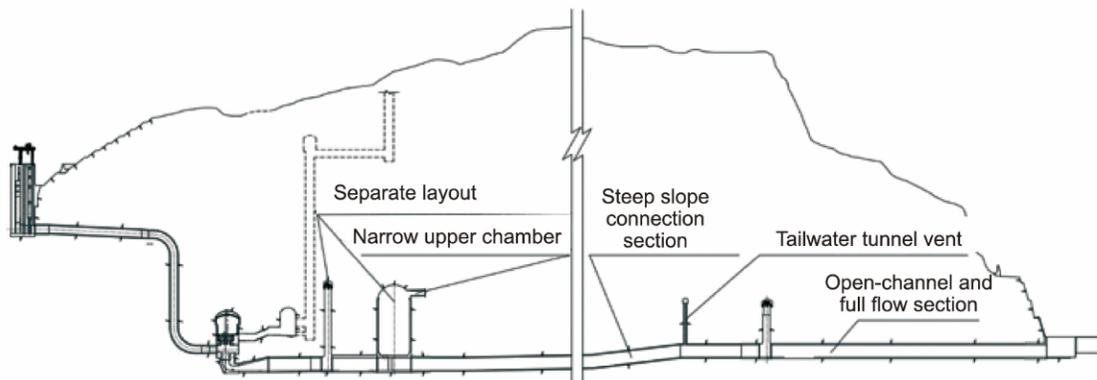


图 11. 输水发电系统布置格局。

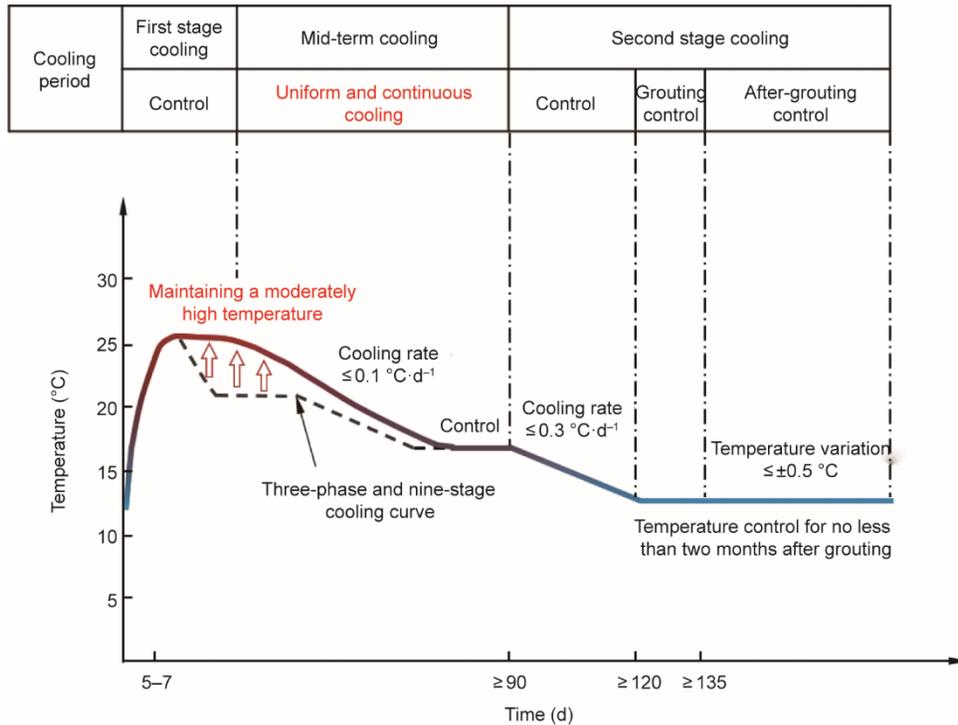


图12. 低热水泥混凝土全周期连续降温模型。

2.6. 大型泥石流沟综合治理技术

白鹤滩水电站枢纽区地处高山峡谷，岩体风化卸荷较强烈，沟谷深切且纵比降大，两岸冲沟多为泥石流沟。近坝的大寨沟、矮子沟、海子沟、延吉沟、白鹤滩沟等5条泥石流沟影响工程建设和运行，其中大寨沟、矮子沟、海子沟都曾发生过大规模泥石流。

右岸的大寨沟紧邻电站进水口上游侧，直接威胁电站进水口长期运行安全。结合大寨沟出口右岸下红岩蠕滑变形体治理，提出了针对多元灾害问题的大寨沟泥石流与下红岩巨型蠕滑变形体综合治理技术，建立了集拦挡、排导、堆渣压坡、抗滑桩于一体的多元化综合治理的系统工程，并兼顾了周边集镇交通、植被恢复、景观需要等。

左岸坝址上游6.1 km的矮子沟沟口布置有总堆渣容量约4000 m³的巨型渣场，矮子沟泥石流的工程防治以拦蓄为主、排导为辅，利用弃渣先期构成拦挡坝，形成数倍于泥石流一次总量的淤积库容，水土分离后，清水由设在堆渣体一侧的排水渠排泄，实现了泥石流停淤排清，避免了特大型泥石流对巨型堆渣场的影响。

左岸的延吉沟位于进水口和大坝上部，由多条泥石流沟组成。针对延吉沟流域坡面型泥石流分散、多分支的特点，提出了“分区多级水平排导+竖向排导”的泥石流高位下泄技术，解决了300 m级落差坡面稀性泥石流高位下泄难题。

发挥现代信息技术优势，在流域源头区域建设雨量监测

系统，研发了泥石流预警系统，建立了遇险快速响应机制，建立了一套完整的水电工程泥石流防灾减灾风险管控体系。

3. 结论与展望

白鹤滩水电站自水库蓄水以来，枢纽工程建筑物运行经历了三个汛期，大坝、泄洪消能设施以及左、右岸输水发电系统等建筑物的各项监测数据均优于设计技术控制指标，整个工程完全达到了技术预期。

白鹤滩水电站的设计和建设攻克了16项世界级工程难题，研发了127项关键技术，大幅提升了我国特高拱坝工程、巨型地下空间和高端装备制造制造能力和水平，推动我国水电工程建设技术水平进一步走在世界最前列。工程设计、建设与机电设备制造和安装全部自主可控，引领了世界水电工程设计、建设和装备制造发展。

未来，我国水电工程建设将面临“极宏观、极微观、极端条件、极综合交叉”的挑战。创新无极限，必须依靠自主科技创新解决重大工程关键技术难题，实现水电工程高质量发展。

References

- [1] Feasibility study report of Baihetan Hydropower Station on Jinsha River. Report. Hangzhou: PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited; 2016. Chinese.

- [2] Zhang C, Xu J, Wu G. Research on the hub layout and key technologies of Baihetan Hydropower Station. *East China Eng Technol* 2021;2:1–11. Chinese.
- [3] Xu J, He M, Zhang W, Wang J. Studies on key technology of designing super high arch dam for Baihetan Hydropower Station. *China Water Resour* 2019;18: 36–8. Chinese.
- [4] Zhang C, Xu J, Ji H, Liu N, Ni S. Mechanical characteristics and relax control of columnar jointed basalt at Baihetan Hydropower Station. *Chin J Rock Mech Eng* 2022;7:1297–307. Chinese.
- [5] Xu J, Gu J, Yan Z, He M, Huang J. Optimization method and application of flood-discharge layout based on inflow distribution of impact jets. *Water Resour Power* 2022;6:139–42. Chinese.
- [6] Xu J, Peng Y, Xue Y, Tao J, Du H. Hydraulic characteristics and innovative design for spillway of Baihetan Hydropower Station. *China Water Resour* 2019;18:110–2. Chinese.
- [7] Xu J, Peng Y, Zhao J, Gu J, Wang Y. Impact pressure distribution characteristics in plunge pool of high arch dam with large discharge. *Water Resour Power* 2020;11:98–100. Chinese.
- [8] Zhang C, Hou J, Xu J, Chen J. Stability analysis and design method of surrounding rock mass of giant underground caverns at Baihetan Hydropower Station. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press; 2019. Chinese.
- [9] Zhang C, Zhu Y, Chu W, Liu N. Mechanical behaviors of basalt at Baihetan Hydropower Station and simulation with Hoek-Brown constitutive model. *Chin J Rock Mech Eng* 2019;10:1964–78. Chinese.
- [10] Chen Y, Cheng W, Zhou J, Yang F, Sun H. Stability analysis on hydraulic disturb in water conveyance and hydropower system of Baihetan Hydropower Station. *Adv Sci Technol Water Resour* 2022;9:78–84. Chinese.
- [11] Li G, Jiang H, Zhang J, Chen S. The explicit solution to calculate maximum upsurge in water chamber surge tank under superposed condition. *App Mech Mater* 2013;427–429:392–5.
- [12] Wu H, Guo C, Xu J, He M, Zhang W. Simulation of crack resistance effect of low heat cement concrete for arch dams. *Adv Sci Technol Water Resour* 2020; 40(5):76–80. Chinese.