

# 第一章 概述

## 第一节 水力机械设计特点

### 一、水力机械设计中的主要技术问题

小浪底水电站处于黄河多泥沙河段，径流多年平均含沙量与三门峡水电站相当，达  $37.1\text{kg}/\text{m}^3$  实测最大含沙量  $941\text{kg}/\text{m}^3$ 。虽然工程建成后，依靠水库的调节作用可有效降低过机水流的泥沙含量，特别是工程运用前期的过机沙量，但进入水库的正常运用期后，水库中的泥沙冲淤达到相对平衡，汛期过机水流泥沙含量依然会很高。

黄河三门峡、刘家峡、四川渔子溪、映秀湾等多泥沙水流电站机组的运行实践证明泥沙对机组运行造成的破坏是十分严重的，对电站运行的安全性与经济性有着重要影响。特别是小浪底水电站同时存在高水头、多泥沙、大水头变幅等多重技术难题，在世界水电史上也极其罕见，被国内外水力机械同行专家公认为极具挑战性的技术课题。因此，在工程建设的各个阶段，各级领导与技术主管部门均给予了足够的重视，组织了不同形式的专题研究、论证、攻关等工作。在工程设计的不同阶段，工程设计单位针对水力机械专业所面临的技术课题，开展了有针对性的课题研究，取得了丰硕的成果，并最终成功运用于工程实际当中，为实现机组的安全经济运行创造了条件。

水力机械专业的设计特点主要体现在机组参数的合理选取、有利于抗泥沙磨损的水轮机通流部件结构设计、防护措施的研究、技术供水与排水系统的防淤堵措施等几个方面。

### 二、水轮机设计技术特点

#### （一）合理选择机组参数

水轮机的参数水平的高低直接关系到电站的投资及综合效益。国内已运行同水头段相近单机容量的隔河岩、白山、刘家峡、龙羊峡等工程机组所采用的同步转速为  $125\text{r}/\text{min}$  或  $136.4\text{r}/\text{min}$ 。因小浪底电站具有过机水流泥沙含量高和水头变化幅度大的双重技术难题，其汛期发电的安全性就显得异常重要。

研究认为，机组的磨损强度与相对流速的三次方成正比。适当降低机组参数，有利于降低流道内的相对流速，降低过流部件的磨损强度，增加汛期发电的安全性，延长机组大修周期。而参数转速的降低又受到工艺、价格、效率、运输条件等方面的制约。

经过多年的研究论证认为，小浪底电站水轮机组合理的转速范围为  $107.1 \sim 115.4\text{r}/\text{min}$ ，这样的机组参数水平要较同水头清水条件下低  $15\% \sim 30\%$  最终采用了  $107.1\text{r}/\text{min}$  ( $n_{st} = 162.6\text{m} \cdot \text{kW}$ ,  $K_1 = 1721$ ) 的机组同步转速方案。经过初期几年的运行，证明所

选参数是合理的。

## (二) 优化水力设计

(1) 在小浪底电站水轮机过流部件中，转轮叶片出口及下环内表面将出现最高相对流速，该处的磨损也将是最严重的，其破坏的程度将成为控制机组大修周期的关键。经过大量深入的研究分析，对转轮出口最大相对流速作出了不大于 38m/s 的限制。在机组设计时，应用流量分析和磨损分析软件进行迭代计算，得到转轮进口边和下环进口边的最小相对流速。

(2) 为准确模拟真机实际流态，优化过流部件设计，采用准三元理论进行计算机模拟。

(3) 为保证机组过流部件不产生气蚀破坏，从工程的实际出发，要求水力设计上满足在额定工况下，电站装置气蚀系数  $\sigma_p$  不小于 1.7 倍的模型临界气蚀系数  $\sigma_0$  在整个水头变化范围和水轮机各水头对应的最大预想出力的 80% ~ 100% 范围内，装置气蚀系数  $\sigma_p$  应大于初生气蚀系数  $\sigma_{i0}$ 。

(4) 选定的水轮机最优水头  $H_0$  为 110m，此水头接近正常运用期内电站汛期运行加权平均水头，既考虑了汛期高含沙量的恶劣工作条件，又兼顾到了电站大水头变幅的实际情况。

(5) 为适应大水头变幅的运行需要，最大限度地减小叶片气蚀、叶片进口边脱流和叶片流道内的二次流，还重点进行了叶形优化设计。叶片头部厚度较常规设计加厚，使得水轮机的无脱流运行范围加大。

## (三) 采取有利于抗泥沙破坏与方便检修的结构措施

(1) 为有效降低导水机构区域内的水流速度，减轻导水机构的磨蚀破坏，采取了适当增加导叶高度、加大导叶分布圆直径等措施。将导叶分布圆直径由正常的 7.076m 增加到 7.24m 后，导叶尾部相对流速可减小约 1m/s，相对磨损强度可减小约 9%。将导叶高度由正常的 1.38m 增加到 1.50m，导叶与转轮的磨损强度可减小 3% ~ 5%。

(2) 选择较小的转轮出口直径，以减小转轮流道最高相对流速、减轻磨损。最终所选择的转轮出口直径  $D_2$  为 5.60m (相当于 0.88 $D_1$ )，使得转轮出口最大相对流速控制在 35m/s，这对减轻磨损是非常有效的。

(3) 设置筒形阀。国内中、高水头多泥沙河流水电站机组导水机构的磨蚀破坏一般均较严重，且多由停机状态下的间隙磨蚀破坏引起，导水机构往往成为影响机组大修周期的关键。

在水轮机座环与活动导叶之间设置筒形阀的主要目的是为了防止停机状态下导叶上、下端及立面间隙承受全水头而产生严重的间隙气蚀破坏，同时兼有事故闷阀的作用。筒形阀采用 5 个直缸接力器进行操作，以液压电动机实现同步。水轮机检修时，可利用筒形阀将顶盖提升到一定高度，以实现在机坑内进行易磨损部件的检修更换。

(4) 取消推力释放装置。按常规设计，为减小轴向水推力，混流式水轮机常在转轮上冠设减压孔或另设均压管路系统。取消推力释放装置，是小浪底电站水轮机针对多泥沙的水流条件所采取的一项重要技术措施，为此可免去采用常规设计因气蚀和泥沙磨损所引起的破坏而需对推力释放系统进行的检修维护工作。同时，由于不存在通过上冠的漏水，故减小了容积损失，提高了机组运行效率，也极大地减轻了转轮上止漏环的磨损。另

外，由于减少了转轮上冠与顶盖之间空腔内的泥沙循环运动，有效地防止了泥沙对顶盖和上冠外表面的磨损。

取消推力释放系统后，将使水轮机轴向水推力大幅增加，但水推力值几乎与转轮上止漏环间隙的变化无关，即水推力值不会随着运行时间的延长和止漏环间隙的扩大而增加。而有推力释放系统的常规设计，其转轮上止漏环的磨损必然是相当严重的，机组水推力将随止漏环间隙的扩大而增加，水推力将随着运行时间的延长而急剧增加，因此推力轴承的设计必须充分考虑到泥沙对止漏环磨损的影响。

(5)基础环周围设置环形廊道。为了便于易磨损部件的检修更换，在基础环外围设置了环形廊道，在不拆卸机组的情况下，能在此廊道内进行导水叶下轴套的检修更换。

#### (四) 工艺措施

(1)水轮机主要过流部件如转轮、导水叶、抗磨板、底环、基础环、尾水锥管进口段等均选用了具有良好抗磨蚀性能的不锈钢材料。转轮叶片采用了材料致密性及抗磨性较好的钢板模压成型工艺进行制作。

(2)转轮的制造采取了散件运输至工地，进行现场组装的方案，承包商在工地将整体转轮交付给业主。这样，既方便了运输，又有利于转轮抗磨蚀性能的提高。

(3)为适应过流部件检修、维护频繁的特点，在不移动发电机转子和推力轴承的情况下依靠筒形阀可将顶盖、导叶及其操作机构提升一定高度（最大提升高度 874mm）这样极大地方便了在机坑内进行易磨蚀部件如导水叶、导叶端面密封、导叶轴套、抗磨板、止漏环转轮进口边等的检修和更换。由于不需要进行整台机组的拆卸，可使检修周期大大缩短。

#### (五) 大面积采用 WC 金属抗磨防护涂层

过流部件中预期磨蚀较严重的部位，采用了碳化钨 / 钴高速氧燃料 (HVOF) 火焰喷射涂层进行防护。防护部位包括：导叶上、下端部；导叶正、背面的进、出口边区域和接近上、下端部的区域；上、下抗磨板表面；转轮叶片进、出水边区域和靠近下环的高速水流区域；下环内表面；上、下止漏环表面等。每台机组总防护面积达  $180\text{m}^2$  以上，其中转轮部分约  $125\text{m}^2$ 。

对流速相对较低的固定导叶表面和尾水管进口段采用涂刷聚氨酯弹性涂层的办法进行防护。

上述防护措施的大面积应用，在世界大型水电机组的制造史上尚无先例。

### 三、技术供水系统设计特点

小浪底水电站的水头范围较适合采用自流减压供水方案。由于工程汛期过机水流泥沙含量高，并可能伴有杂草等污物，根据对类似工程的调研情况，泥沙与杂草的联合作用有可能堵塞机组水冷却器管路，给机组汛期安全运行带来隐患。因此，必须研究采用其他合适的水源及采取必要的安全性措施。

按照工程区域内可能使用的地下水情况，经热循环计算，最终采用了库水、清水供水系统并存互补的供水方式。针对不同供水对象的不同用水要求，不同时期采用不同的供水方式。

库水供水采用自流减压供水系统。由机组压力钢管取水，经减压阀减压后自流供给电站技术用水部位。为防止管路系统的淤堵，每台机组均设置了正、反向运行阀组，通过该阀组切换可以实现机组各冷却器的正、反向通流达到防淤、冲淤的目的。

清水供水系统采用地下水。由厂外水源井水泵扬水，经管路送至电站厂房外清水池，再自流供给电站用水部位（冷却器等）根据需要，机组冷却排水除部分泄弃外，剩余部分排至厂内回水池，再由水泵扬水至厂外清水池，与地下水源井提供的补充水混合后循环使用。该系统主要由厂外地下水水源井群、清水池、回水池、回水泵及管路系统等组成。

由于清水供水系统采用了高扬程深井泵及长距离输水管路，对水泵断电工况采取了必要的安全防护措施。

采用了库水、清水两套供水系统，使得机组供水的可靠性得到了保证。但系统的设计、控制及布置均较常规电站要复杂得多。经过初期几年的运行，证明系统的设计是成功的，达到了预期的目的。

## 四、排水系统设计特点

### （一）机组检修排水系统设计特点

多泥沙河流水电站机组检修排水系统的设计重点在于解决好泥沙的淤堵问题。

已运行的类似电站多采用排水廊道集水，水泵集中抽排的间接排水方案。该方案的优点是水泵台数少，布置集中，运行经验多，尾水管中水位下降迅速，易形成尾水门负压密封，减少漏水量等，而且所需水泵扬程变幅小，利于设备的选型，易保证水泵在相对高效区内稳定运行。但是，该方案存在着集水廊道易受泥沙淤积的问题，由于集水廊道在地下厂房的较低位置，淤沙的清理极其困难，将给电站带来非常大的工作量，且对厂房内的环境影响较大，对现代化大型工程而言是不合适的。

经研究比选，小浪底电站机组检修排水系统采用了在不集水的排水廊道中设置全封闭管路及离心泵组集中抽排的直接排水方案。该方案的优点在于管路系统全封闭，水流在管路中的流速相对较大，工作状态下水中的泥沙不易沉积，无水泵吸水坑，水泵台数少，布置也较集中，易于维护。但也存在排水时流道内水位下降较慢，不利于尾水门的密封；水泵扬程变幅大，不利于水泵选型，由于管路较长，泵房布置高程较低，管路及泵体内仍有淤沙的可能等缺点。

针对上述可能存在的问题，采取了下列有效的解决措施。

（1）为适应扬程变幅大的需要，排水泵选择了双吸离心泵与渣浆泵两种泵型。开始排水阶段水质相对较清，使用双吸离心泵排水，后段泥沙含量相对较高，采用渣浆泵排水。

（2）系统设计中采取了如下防淤堵措施：①在尾水管排水口处均设有拦污栅，以防止杂草及较大颗粒的石子进入管道；②排水干管自1号机组端坡向检修排水泵房2‰的坡降采用；③为防止检修排水干管的淤堵，设置了冲淤管网，机组检修完毕，打开控制阀门手动放水，对排水干管进行冲淤；④水泵出水管末端设逆止阀，防止尾水倒灌，在排水管最低处接一放空管，当机组检修完毕，蜗壳及尾水管盘形阀关闭后，可将总排水干管内剩余积水由放空管排至检修排水泵房内的渗漏集水井中，在非检修期间，检修排水总干管保持无水状态。

## （二）厂房渗漏排水系统设计特点

因工程区域地质条件较差，地下厂房围岩渗水性较强，漏水量较大，厂房渗漏排水系统设计时留出了较大余量。但水库蓄水一年后，库水位尚远未达到正常蓄水位的情况下，厂房围岩渗漏水量已超出设计值 1 倍以上，即厂房实际渗水较原预计情况要严重得多。

为了减轻排水系统的负担，利于电站的安全运行，在工程施工后期，将进入主厂房之前的 30 号排水洞渗漏来水（主厂房渗漏水主要来源）的一部分进行了分流。为此，在主厂房外设置了第二套排水设施。

## 第二节 电气设计特点

水电站电气设计包括电气一次设计和电气二次设计两大部分，即通常所说的强电设计和弱电设计。电气一次设计内容包括电站与电力系统的连接、电气主接线、短路电流计算、厂用电和坝用电系统、电气设备选择和布置、过电压保护、接地系统等。电气二次设计内容包括机电设备的运行控制、安全监视、继电保护、通信等内容。具体项目有：电站计算机监控系统、水库闸门控制系统、工程安全监测自动化系统、发电机励磁系统、系统及元件继电保护、直流电源系统、通信系统、火灾报警系统及视频监视系统等。

### 一、电气一次设计特点

电气一次专业设计关系到电厂以至整个枢纽的安全性、可靠性、灵活性和经济性。特别是电气主接线的设计对水电站运行、机电设备的布置、设备的选择、继电保护和控制方式等都有较大影响。小浪底水电站电气一次专业的设计，从 20 世纪 70 年代开始一直到 20 世纪末，历经了初步设计、优化设计、招标设计和施工设计等各个阶段的反复论证。在此期间，由于装机规模、枢纽布置和接入系统等设计条件的变化，设计方案曾做过多次修改。此外，这一时期也正是国内外强电技术迅猛发展的阶段，高新技术突飞猛进，电气设备不断更新换代，设计手段日新月异，给小浪底水电站的工程设计不断优化提供了契机。

概括起来，小浪底水电站电气一次专业设计主要有如下特点。

#### （一）电气主接线设计

（1）电站在电力系统中地理位置重要，是河南电网中不可多得的调峰、调频电站。机组开停机操作频繁，电气主接线出线电压侧采用双母线 4 分段带旁路母线接线，具有较高的供电可靠性和调度灵活性。

（2）6 台机均装设发电机断路器，提高了电站运行的灵活性和可靠性，也提高了电站的整体经济性。同时，在国内外首次利用发电机断路器兼做电制动开关，提高了设备的利用率。

（3）按进出线回路确定分段断路器位置。分段断路器两侧各接入 3 台机。6 回出线也在两侧各接入 3 回，正常情况下，电站发、送电量保持均衡。

（4）小浪底水利枢纽的首要任务是防洪。在厂、坝用电关系上，考虑了电站厂用电源兼做坝用电源的一部分，以提高坝用电的可靠性。

（5）电站为地下厂房布置，主接线的设计考虑了与主要电气设备布置的结合。

## （二）厂用电设计

（1）综合自动化水平高，全站按‘无人值班、少人值守’标准设计，厂用电系统的设计具有较高的自动化水平。

（2）厂用电采用 10kV 和 0.4kV 两级电压供电，保证了供电电压质量。

（3）由于小浪底枢纽设施庞大，厂用电又兼做坝用电备用电源，厂用电设计考虑了供电范围广、负荷性质特殊的实际情况，在厂用电容量选择上也留有了充分的余地。

（4）为了提高机组供电可靠性与节省电缆，采用专设自用电变压器的供电方式，0.4kV 厂用电接线采用机组自用电、全厂公用电和全厂照明用电分开的接线形式，并设置了专用检修用电网络，保证了各类负荷的安全性、可靠性。

## （三）坝用电设计

（1）专设坝用电系统。坝用电包括大坝和泄洪设施用电。小浪底水利枢纽有着极其复杂而庞大的洞群和水工建筑物，坝用电系统要向 10 座进水塔、3 个排沙洞出口闸室、3 个孔板洞中间闸室、正常溢洪道、消力塘等部位供电，负荷多而分散。专设坝用电系统以保证供电的安全性和完整性。

（2）供电可靠性高。鉴于小浪底工程防洪任务的重要性，坝用电设置 4 组外来电源，以保证在任何情况下，供电电源都十分可靠。

（3）采用集中供电、分设动力中心的接线形式。由于坝用电负荷比较分散，按负荷性质及分布区域分设 10 个动力中心，由坝顶控制楼高压配电室的 10kV 母线分别向 10 个动力中心供电。

（4）按统计最大用电负荷设置坝用电容量。对于小浪底这样复杂的水利枢纽，坝用电的最大负荷计算尚无现行规程参考，也没有相似的工程经验可供借鉴。因此，在设计中采用将闸门按分组运行、负荷按不同性质划分的方法统计最大用电负荷，进而确定坝用电容量。

## （四）短路电流计算

采用先进的电力系统短路电流计算软件包，可进行三相短路电流计算、单相短路电流计算，并可准确计算出短路电流的幅值、相角等主要参数。

## （五）设备选型

随着科学技术的发展，电气设备的制造水平不断提高，新产品、新技术层出不穷。为工程设备选型提供了良好的社会条件。小浪底工程电气设备的选型着重于其先进性和可靠性，主要电气设备如水轮发电机、主变压器、发电机断路器、厂用电配电装置等在设备选型、设计方面都有着独到之处和先进特性，为工程的可靠运行提供了技术保证。

## （六）电气设备布置

（1）小浪底水电站主要电气设备按功能和电压等级分区布置，简明清晰。地下按三洞室（主厂房、主变压器洞、尾水闸室）的布置方案，主变压器平行于主厂房且与机组对应排列，开关站则布置在地面。发电机主引出线正对 -Y 方向，离相封闭母线顺向布置，出线最短且顺畅。由于主变压器放在地下洞室内，缩短了机压母线的送电距离，减少了电能损耗，解决了长距离离相封闭母线散热问题。同时也减少了开关站内设备，从而减少了开关站占地面积，这对处于深山峡谷地段的水电站而言是十分有益的。

(2)受枢纽泄水设施总体布置及岩体稳定的影响,布置发电机电压设备的母线洞洞高和洞长均受到限制,设备布置密度大。因此,对母线洞的电气设备采取了紧凑式的布置方式,从总体上达到了安全、集中和节省空间的效果。

(3)主变压器高压侧与 220kV 开关站采用高压电缆连通。为使电缆走径最短,节省电缆投资,分别开挖 2 条高压电缆洞,每条洞布置 3 台机组电缆,并选取合适的进出口位置,减少电缆长度。

(4)220kV 配电装置采用技术可靠和运行管理方便的敞开式改进中型布置,比普通中型布置减少投资,节省占地,在设备安全运行和维护检修方面都具有技术优势。

(5)在地面和地下设置 2 个副厂房。中央控制室设在地面副厂房,改善了运行人员工作环境;而厂用电、机组继电保护等设备布置在地下厂房,缩短了动力和控制电缆的长度,有利于节约投资。

(6)厂用电、坝用电配电装置采用分设动力中心的方式,按区域集中布置。干式变压器与配电盘之间采用封闭式插接母线,既提高了安全可靠性,又节省了宝贵的空间。

### (七) 接地系统设计

(1)采用人工接地体和自然接地体相结合的方式,根据工程水工布置特点,合理安排接地网。

(2)在开关站接地设计中采用了先进的不等间距优化布置方式,借助 GPC 计算机辅助设计程序,使得均压带得到了充分利用,为降低接地装置电位,对开关站接地网采取了分流措施,以减少入地电流。

(3)计算机系统采用与枢纽接地网一点共地的方式。

## 二、电气二次设计特点

由于小浪底工程规模大、技术复杂,在完成初步设计之后,又相继进行了设计优化,以配合土建国际招标设计及机电设备国内外采购询价书的编制。电站主要控制保护设备均采用了招标采购方式选择供货商,其中利用外资采购的设备有电站计算机监控系统、微机调速器、微机励磁装置、机组自动化元件等。

电气二次领域中控制技术发展较快,尤其是计算机技术的广泛应用,加上外资的引入,电气二次专业设计较之初步设计有较大改进,技术水平显著提高,主要表现在以下几个方面:

(1)在电站控制设计中取消了常规控制设备,采用开放式全分布计算机监控系统,中央控制室从地下移至地面副厂房,电站按“无人值班、少人值守”设计。

(2)作为水库调度系统一部分的水库闸门控制采用计算机控制系统,各闸门现地控制采用以可编程序控制器为基础的控制装置。在坝顶控制楼闸门控制室能全面了解各闸门运行情况并进行控制。

(3)工程安全监测自动化系统采用以计算机为基础的现场数据采集单元,坝顶控制楼工程安全监测中心集中监测大坝、泄水建筑物、电站北岸山体等的各观测项目,并进行汇总、分析和预报。

(4)水轮发电机组采用微机调速器和微机励磁装置,提高了机组运行的可靠性。

(5)系统继电保护和元件继电保护广泛采用微机型保护装置,性能可靠,便于运行维护。

(6)直流系统设计采用全密封免维护蓄电池取代传统的铅酸型蓄电池,运行更加安全可靠又节省布置面积。

(7)通信系统设计中调度电话总机采用了程控交换机。

(8)火灾自动报警系统设计更完善,并增设了视频监视系统。

### 第三节 金属结构设计特点

小浪底水利枢纽金属结构共有闸门 62 扇、卷扬启闭机 20 台、液压启闭机 27 套( 45 台油缸 )拦污栅 25 扇、清污机 4 台、门机 2 台、台车式启闭机 1 台 总重量 32 000t 左右。

小浪底水利枢纽金属结构数量大、种类多、技术复杂。其中孔板洞、排沙洞偏心铰弧形闸门及其液压启闭机的设计和研究,经专家评审、鉴定委员会鉴定,确认该项成果达到了国际先进水平 获 2003 年河南省科技进步一等奖;大载荷闸门定轮获 2001 年河南省机械工业科技进步一等奖;5 000kN 固定卷扬启闭机获 1999 年河南省机械工业科技进步一等奖 平面钢闸门计算机辅助设计系统软件 于 2000 年获得全国第六届工程设计优秀软件铜奖、水利部优秀软件银奖。

小浪底工程闸门孔口尺寸大 设计水头高 运用要求严 高水头引起高压、高流速,排沙运用要求闸门频繁地局部开启,这些给闸门设计带来一系列开拓性的研究课题。针对高水头、高含沙高速水流、经常局部开启等设计条件进行设计研究,解决由此产生的一系列难题 实现闸门的安全可靠、经济合理、运行方便 是保证小浪底水利枢纽成功建设和发挥最佳效益的重要环节。

#### 一、深孔弧门

小浪底水利枢纽泄洪系统的深孔弧门,按照水头大小分为两类:一类是水头在 120m 以上的排沙洞和孔板洞工作闸门,选择技术上新颖的偏心铰弧门,解决了高水头多泥沙条件下的止水与支承中的技术难题;另一类是水头在 80m 以下的明流洞工作闸门,选择了顶止水为转铰式止水,其上部设有一套压盖式止水的圆柱铰弧门。

小浪底水利枢纽设有 3 条孔板洞和 3 条排沙洞,在孔板洞中部、排沙洞出口共设置 9 扇偏心铰弧形闸门。其中 1 号孔板洞偏心铰弧门的设计水头达 140m 居国内外同类闸门之首。排沙洞偏心铰弧门由于担负调节下泄流量、排沙排污和调控洞内流速的任务,该门必须在 97 ~ 122m 水头条件下,经常局部开启泄流,局部开启时间长,开度变化频繁,加上在多沙的黄河中运行,泄流时的水力学条件,挡水时止水密封条件、支承条件和闸门结构等,其复杂技术问题为国内外所罕见。1 号明流泄洪洞弧形工作闸门,孔口尺寸 8m × 10m 工作水头 80m 弧面半径 20m 总水压力 75 700kN 是目前国内总水压力最大的常规止水弧门。

在总结国内外高水头深孔弧门的设计运行经验的基础上,结合小浪底工程 140m 高水头、高含沙水流的特点和局部开启开度变化频繁的运行条件,我们进行了大比例尺水力

学模型试验、通气试验、止水试验、闸门流激振动试验等科学试验，深入研究了闸门门型、闸室体形、耐磨抗蚀、闸门防振、偏心铰参数、止水材料等多项关键技术。运用了闸门结构有限元分析、动力稳定分析和启闭力编程计算、弧门几何尺寸计算机解析计算等项先进方法进行设计研究。在国内首次采用闸门动力稳定安全设计，提高了高水头下闸门局部开启运用的安全性，成功地将偏心铰弧门运用到高含沙水流的高水头泄水建筑物上。经过4年来的运行考验，9扇偏心铰弧门操作方便、调控准确、自动化监控水平高，满足工程运用要求，为高水头、高含沙水流的泄水建筑物深孔弧门应用提供了成功的经验，具有较高的推广价值和应用前景。

## 二、事故闸门

小浪底枢纽设有事故闸门23扇，均为平面定轮闸门。按照闸门设计水头分为两类：一类是水头为100m的排沙洞和孔板洞事故闸门，采用设有专用供水系统的液控伸缩式止水，减小启闭阻力和止水磨损；另一类是水头在80m以下的明流洞、发电洞、灌溉洞事故闸门，选择了库压伸缩式止水。

小浪底水利枢纽闸门的止水是在多沙的浑水中工作，为了解决泥沙进入止水伸缩间隙导致止水伸缩失灵的问题，设计单位配合中国水利水电科学研究院，为小浪底枢纽事故闸门研制出了一种短压板无间隙的“山”字形止水。孔板洞、排沙洞事故闸门采用液控式止水和特制的适合多沙河流的止水橡皮，配合由塔顶清水箱、调节泵阀和输水软管等组成的供水系统，通过换向充水阀向止水背压腔充水达到封水的目的，解决了事故闸门在100m水头下，止水橡皮既要止水严密又要减少磨损、延长使用寿命的技术难题，也为百米以上高水头事故闸门提供了一种新的止水方式。

小浪底枢纽事故闸门共有滚轮292个。荷载主要为3300kN、3670kN、4130kN三种。根据闸门结构布置，滚轮的支承方式采用了简支式和轴承座式两种。滚轮轮体采用实体锻制合金钢材料。轮缘形式采用单曲率和双曲率两种。滚轮轴承形式比较了青铜滑动轴承、高分子复合材料滑动轴承和滚动轴承3个方案，最终选用了偏心轴、球面调心滚子轴承和特型密封的滚动轴承方案。

2号明流泄洪洞事故闸门单轮轮压4130kN，在国内首次突破4000kN轮压大关，并首次采用调心滚子轴承，使国内滚轮设计跃上了一个新台阶。该轮进行的模型试验和原型试验的研究及设计成果，在全国许多工程推广，受到了好评，并为国内水利水电工程采用5000kN轮压的滚轮做好了技术准备。

## 三、门槽抗磨蚀措施

黄河洪水峰高沙多、来势迅猛。泄流时，含沙高速水流通过闸门孔口，易引起闸门及导轨磨蚀。三门峡、天桥工程的泄水建筑物经过多年的泄水运用，水流边壁和闸门门件均遭到不同程度的泥沙磨蚀。结合小浪底水库水沙条件、运用要求和工程布置特点，为解决门槽磨蚀采取了：以“不磨蚀流速”确定进口第一道闸门孔口尺寸，降低检修闸门的过门流速，保证该门槽不发生磨蚀；事故闸门采用抗磨蚀可拆卸式轨道，当轨顶受磨蚀影响使用时可进行拆换；改善门槽体形、利用偏心铰弧门突扩掺气等多项技术措施，基本解决了多

沙河流高水头闸门导轨磨蚀的技术难题。

#### 四、闸门防淤系统

黄河干流枢纽及两岸灌排工程，由于泥沙淤堵常发生闸门无法开启和机械、拉杆破坏等事故，严重地影响了工程的安全和工程效益的发挥。为了防止此类现象在小浪底水利枢纽发生，我们研究设计了周密的闸门防淤系统，基本上解决了闸门淤堵问题。

首先根据泥沙运行的规律，科学地进行孔口布置，使各个闸门前均能形成一定的冲刷漏斗，防止运行中将闸门淤死。底坎在设计控制淤沙面以下的挡沙闸门均采用上游面止水。防止在闸门关闭期间泥沙回淤进入门槽，使整个闸门埋在淤沙之中，造成启闭机超载。其次设立泥沙监测报警装置，当发现淤积面高度接近设计规定的高度时，发出警报开门冲淤。另外，在闸门附近的闸墩内，设置高压冲沙系统，发现闸门前淤堵使启闭力超过限值时，立刻启动高压喷嘴冲动泥沙，然后再启门排沙。

### 第四节 启闭机械设计特点

由于高水头的作用及黄河泥沙淤积对闸门启闭力的影响，小浪底工程的启闭机全部为大型或特大型的非标准设备。单吊点启闭机最大启闭容量为5 000kN 双吊点启闭机最大启闭容量为8 000kN 卷扬式启闭机最高工作扬程为120m，液压启闭机最大工作行程为12.5m，缸体内径最大为720mm。这些设备不仅容量大、扬程高而且布置条件和运行工况复杂，多数设备还要求进行计算机远程监控，部分设备的安装条件比较差，这些都给设计工作带来不少困难和挑战。遵照启闭机设计应技术先进、操作可靠、经济合理的基本原则设计人员进行了大量的调研、分析、论证和研究工作 在总结国内外已建电站设计、制造和运行管理经验的基础上，结合小浪底工程的具体布置条件和闸门运行方式，不断对设计进行优化，确定了启闭机设备的总体布置、设备选型、结构型式以及各项技术参数。设计中采用了不少新技术、新材料、新机种和新的布置形式。这些设备的主要技术指标和性能在国内近期建设的同类工程中具有一定的代表性，在一定程度上体现了国内启闭机设计的先进水平。

#### 一、设备的液压化程度较高

在全部64台启闭机设备中有41台采用了液压传动技术，约占启闭机总数的65%。采用液压传动的设备主要有：①工作闸门启闭机；②事故快速闸门启闭机；③自动抓梁；拦污栅清污机。闸门启闭设备的液压化更便于设备的远方集中控制，为提高工程运行管理的自动化、智能化水平奠定良好的基础。

#### 二、采用的技术标准和产品标准较新

启闭机设计规范采用1993年的行业版本，主要成品和部件采用我国20世纪80年代中后期至90年代及以后的新标准如电动机、减速机、制动器、联轴器、轴承、连接件以及液压元器件等均为当时的更新换代产品。这些产品或在使用和安全性能上有所提高，或

为节能产品 或满足了环保的要求。

### 三、对启闭机设备明确提出了消防设计要求

20 世纪 80 年代以前 我国已建的水电工程对启闭机设备消防重视不够 很多启闭机的机房无消防设施和措施。小浪底工程的启闭机设备纳入了整个工程的消防体系，根据启闭机的类型和使用工况，确定出防火等级，并据此采取了相应的消防措施，配置了合适的消防设备。

### 四、液压插装阀技术的采用

液压启闭机的液压系统全部采用插装阀技术，使启闭机的技术性能得到很大提高。插装阀通过插装件和盖板的组合，可以得到方向、流量和压力方面的复合功能，并有效消除传统滑阀的内泄和液压卡紧现象。由于没有遮盖量，所以响应时间很快，并允许快速转接。插装件直接组合在块体上的阀孔内，系统避免了与配管有关的泄漏，其动静压精度以及抗震性能均比传统阀件大大提高，从而提高了可靠性。复合功能的插装阀可以很紧凑地构成系统，使管路简化，减少了配管的尺寸和重量，并可以通过小通径的、成本较低的常规型阀作先导阀来控制高压、大流量的系统。由于压力损失小，系统可以得到较优的特性。

### 五、关键部件大量采用了进口元件

启闭机设计中 高度传感器采用了德国 FM 产品，油缸动密封采用了德国 MARKEL 公司 V 型组合密封圈、意大利 CARCO 公司 V 型组合密封圈和新型 TEX/UG 型密封圈。一些启闭机油缸的上、下吊耳均装配了德国产 SKF 球面自润滑轴承；蓄能器采用美国 VICKERS 公司的产品；用于液压缸体的钢管全部由德国曼内斯曼公司提供；液压系统的主要阀件、油泵、压力继电器等重要器件均采用了欧美进口元件。这些先进元件的采用，极大地增强了启闭机的灵敏性、稳定性、可靠性和安全性。

### 六、大规模采用了折线卷筒多层缠绕技术

有 18 台高扬程卷扬式启闭机共计 22 个卷筒采用了折线卷筒，占启闭机卷筒总数的 71%。多层卷绕的层数最长达 4 层。可以说，小浪底工程是国内第一个大规模采用折线卷筒技术的水电工程，也是目前国内折线卷筒用例中缠绕层数最多的工程。这一新技术的采用，有效地解决了启闭机的高扬程带来的钢丝绳缠绕不均匀、磨损、挤压以及启闭机尺寸庞大等诸多技术问题，为高扬程启闭机的合理设计和安全运行提供了保障，也为其在国内水电行业和其他起重行业的全面推广应用开创了先例。

### 七、新材料在启闭机上的应用

SF 系列复合材料由塑料—青铜—钢背三层复合而成，具有较好的干摩擦与水润滑特性。它不仅摩擦系数小，而且具有较高的抗压强度，无需设置润滑系统，日常维护量小，被广泛用于启闭机的滑轮或其他转动部件的轴套上。

MG 系列工程塑料合金材料是以不同单体共聚高分子为基础，采用合成的稀土金属化合物及多种添加剂改性，通过特殊的合成工艺制造而成的各向同性无界面突变的均质聚合物。它具有摩擦系数小、承载力大、自润滑性好、抗磨损、耐腐蚀且不会剥落等优点，在水中工作时摩擦系数只有 0.02 ~ 0.05。这种材料被用在门式启闭机的部分滑轮和一些抓梁的导向滚轮的轴套上。

液压启闭机的油箱、管路全部采用了 1Cr18Ni9 不锈钢材料，大大提高了启闭机适应潮湿工作环境和抗腐蚀的能力，延长了启闭机的使用寿命。

## 八、新型清污方法与清污机的设计研究

根据黄河污物和泥沙的特点，小浪底电站进口采取的是以机械清污、水力清污为主，人工清污为辅的清污方法。所谓水力清污，是指将拦污栅前潜入水下的大比重污物通过清污机械将其下压至拦污栅底槛下部的泄洪排沙洞口，再由入洞水流带进洞中排至下游的方法。这是一种全新的清污方法，这种清污方法将机械清污与水力清污有机结合起来，为深层污物的清理提供了简捷、高效、省时、省力的有效途径。与传统的清污方法相比，清污的效率较高。设计研究的全跨液压抓斗式清污机是一种新型清污设备，具有抓污、压污、割污、梳理以及利用水力进行水力清污等多种功能。这种清污方式得到用户好评，为高水头、高含沙水流电站的污物治理开发了一条新途径，在清污系统设计的形式、思想理念以及清污设备的设计开发方面较以往均有新的突破。

## 九、气囊式蓄能器在液压启闭机上的应用

在液压启闭机设计中，推出了带有气囊式液压蓄能装置的系统设计方案，通过蓄能装置对油缸自动进行补泄压来防止活塞杆下沉，不但有效阻止了闸门滑落现象，并为闸门锁定提供了一种新形式。小浪底工程中共有 33 套油缸配置了气囊式蓄能器装置。

## 十、陶瓷活塞杆和陶瓷集成测量系统 (CIMS)技术的应用

陶瓷活塞杆和陶瓷集成测量系统 CIMS 是德国力士乐公司的两项专利技术。在 3 孔溢洪道双吊点液压启闭机上共 6 套油缸采用了这种新技术。这两项技术的有机结合，不仅使启闭机的活塞杆具有了优越的耐磨性和抗弯性，而且由于陶瓷良好的非导磁性，使陶瓷集成测量的精度很高，可精确测量液压活塞杆的位置，这就为双吊点启闭机的双缸同步问题提供了精确控制手段，为大跨度的双吊点弧门安全运行提供了保证。

## 十一、完善的安全保护措施与启闭机的远方计算机监控

除移动式启闭机设计为现地控制外，所有的工作闸门和事故闸门启闭机均可在远方进行计算机监控。

卷扬式启闭机的位置保护采用了机械式和电子式双重保护措施，负荷控制根据不同的启闭对象分别设置了“超载”和“欠载”保护。液压启闭机除设置油泵启动保护、泵组故障备用泵的切换、闸门下沉复位保护以及油缸下腔安全锁定阀外，还设置了闸门开度传感器、溢流阀、背压阀、压力继电器、液位保护、油温保护和滤器堵塞报警等各种功能的自动

化控制元件，利用 PLC 可编程控制对采集的信号进行处理，通过系统软件控制启闭机运行。

特别是对 9 台偏心铰弧门启闭机，设计中偏心铰弧门运行过程进行了计算机动画模拟，根据运行轨迹和实测数据对闸门开度测量与显示进行可编程控制，以保证闸门位置控制的准确无误。为防止误操作导致弧门对止水的切搓破坏，启闭机的两套油缸操作顺序通过电气进行连锁。

以上各种信号均传至远方集中控制室，为可靠地实现闸门远方计算机监控和提高工程的智能化管理水平，在硬件的技术上提供了有力的支持。

## 十二、水平反滚轮小车在门机上的应用

将水平反滚轮小车安装在门机上是小浪底工程门机设计的一大特点。这种布置形式比较新颖，其优点是省去了门机上、下游的两个回转吊，门架的外形结构比较简单，用材较省。回转吊的结构较为复杂，传动部件较多，对门架结构的刚性要求也较高。另外，回转吊在回转过程中起动、制动时门架易产生振动，采用水平反滚轮小车后，这种现象可得到改善。

## 十三、门机结构应力和变形的计算机有限元分析计算

进水塔门式启闭机装有 3 套起升机构 不仅是小浪底工程中机构和功能最多、技术条件和运行工况最复杂的启闭机械，也是目前国内水电站中体形尺寸最为庞大的启闭机之一。为使计算结果更加准确和符合实际工况，在结构设计中进行了计算机三维有限元分析计算。根据七种不同的荷载组合，建立了结构计算的数学模型，分别将门架结构的各构件离散化为梁单元和板壳单元 共划分了 1 405 个节点、1 815 个单元 (其中板单元 1 420 个、梁单元 395 个) 利用 Super - SAP 大型结构计算机软件完成了应力和变形的计算机有限元分析，并与常规手工计算进行了对比。

## 十四、新型防水耐压密封插头、插座的应用

小浪底工程的抓梁数量较多 最大的工作水深近百米 且门机主钩操作的 6 套抓梁在使用中需经常拔插接头才能互相更换。因此，抓梁的动力电缆、信号电缆在水下的防水密封要求较高，这是抓梁能否可靠工作的关键所在。为此，在小浪底工程的 9 套液压抓梁上全部采用了这种新型防水耐压密封插头和插座。这种产品是一种更新换代产品，工作环境温度  $-40 \sim +85^{\circ}\text{C}$  耐电压 2 000V 绝缘电阻不小于  $500\text{M}\Omega$  可在 400m 深的水下长期工作。其插针和插孔表面镀金，动力插接的工作电流不小于 20A 信号插接的工作电流可达 10A 插头最多为 16 针 插接寿命不少于 500 次。采用这种产品后，抓梁的工作安全性和可靠性得到了保证。

## 第二章 水轮机及其附属设备

### 第一节 水轮机参数及技术性能研究

#### 一、电站水沙条件

小浪底水利枢纽是以“防洪(包括防凌)减淤为主,兼顾供水、灌溉、发电,蓄清排浑,除害兴利,综合利用”为开发目标的综合水利工程。枢纽位于黄河中游最后一个峡谷出口,电站总装机容量为1800MW,单机容量300MW,装机6台,年平均发电量约51亿kW·h。

水库总库容126.5亿 $m^3$ ,其中防洪库容40.5亿 $m^3$ 、调水调沙库容10.5亿 $m^3$ ,控制着黄河近100%的输沙量,设计年平均入库沙量13.23亿 $m^3$ ,实测最大含沙量达941 $kg/m^3$ 。99%的泥沙集中来自汛期(7~10月)。

#### (一) 水库水位

小浪底水库运行水位见表2-1-1。

表 2-1-1 小浪底水库运行水位

年 序		第1年	第2年	第3年	第4~10年	第11~14年	第15~28年	第28年以后
汛后水库最高蓄水位(m)		265.0	265.0	265.0	275.0	275.0	275.0	275.0
汛期最低运用水位(m)		205.0	205.0	205.0	210.0	230.0	230.0	230.0
水库平均运用 水位(m)	7~9月	212.0	212.0	212.0	230.0	246.0	248.0	246.0
	10月~翌年6月	232.17	232.53	233.56	247.52	259.72	260.51	262.04

#### (二) 尾水位

设计洪水尾水位  $p = 1\%$  ( $Q = 9860m^3/s$ ) 139.30m

校核洪水尾水位  $p = 0.1\%$  ( $Q = 13490m^3/s$ ) 140.60m

最低尾水位 ( $Q = 312m^3/s$ ) 133.64m

#### (三) 电站水头、出力及发电量

小浪底电站按1919~1975年共56年水文系列计算的特征水头、出力、发电量见表2-1-2。水库的运用方式包括初期拦沙运用和后期调水调沙运用两个时期。初期拦沙运用又分三个时段:①起调水位蓄水拦沙阶段;②逐步抬高汛期水位拦沙阶段;③形成高滩深槽拦沙阶段。

表 2-1-2

小浪底电站特征水头、出力、发电量

水库运用时期		初 期						正常运用期
水库运用方式		蓄水拦沙			汛期水位逐步抬高		高滩深槽形成	冲淤平衡
年 序		第 1 年	第 2 年	第 3 年	第 4~10 年	第 11~14 年	第 15~28 年	第 28 年以后
加权平均水头 (m)	7~9 月	74.00	73.92	74.95	91.73	107.22	109.22	107.22
	10 月~翌年 6 月	97.95	98.35	99.48	111.47	123.38	124.06	125.84
保证出力(MW)		239.0	247.0	250.0	308.0	350.0	353.0	355.0
月平均 (MW)	最大出力	646.8	1 255.4	1 564.5	1 566.3	1 620.0	1 620.0	1 620.0
	最小出力	35.7	35.6	36.0	44.3	51.7	52.6	51.7
年发电量(亿 kW·h)		28.55	38.79	42.31	51.15	58.02	58.46	58.64
汛期发电量(亿 kW·h)		5.54	9.25	10.69	14.49	17.57	17.89	17.57
非汛期发电量(亿 kW·h)		23.01	29.54	31.62	36.66	40.45	40.57	41.07

注：1. 水轮机额定水头 112m 其额定出力为 306MW。

2. 水轮机水头  $\geq 117\text{m}$  时 最大出力为 331MW。

3. 正常运用期间瞬时最大水头 141.67m 最小水头 68.0m。

#### (四) 泥沙

河流多年平均含沙量  $37.0\text{kg}/\text{m}^3$

实测河流瞬时最大含沙量  $941\text{kg}/\text{m}^3$

泥沙中值粒径  $d_{50}$   $0.023\text{mm}$

泥沙矿物质成分：

石英 约 90%

长石 约 5%

其他 约 5%

泥沙颗粒形状为多角形和菱形。

根据水库泥沙特性和枢纽建筑物的布置条件，结合黄河上、中游已建电站的运行经验和三门峡水库调度运用的调水调沙试验资料，经分析计算，提出小浪底电站不同运用时期（7~9月）过机泥沙含量及泥沙中值粒径见表 2-1-3。

表 2-1-3

小浪底水库不同运用期（7~9月）过机含沙量及泥沙中值粒径

项 目	时 段				
	第 1~3 年	第 4~10 年	第 11~14 年	第 15~28 年	第 28 年以后
过机含沙量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	7.4	21.5	35.3	64.5	68.6
泥沙中值粒径 $d_{50}$ (mm)	0.008 4	0.011	0.013	0.021	0.021

## （五）电站在电力系统中的作用

河南电网以燃煤火电为主要电源，小浪底水电站为河南电力系统中迄今容量最大的水电站，在系统中承担调峰及调频任务。电站 6 台机组中有 1 台为检修备用机组。电站在系统中处于腰荷位置。

## 二、多沙河流水轮机运行调研分析

研究资料表明，含沙水流条件下水轮机过流表面的磨蚀破坏程度与水流速度的多次方成正比。设计者从降低水轮机流道内相对流速着手，提出了“低参数”的设计思路。然而，20 世纪 80 年代初期，水力机械领域正以提高参数为主要思路，目的在于降低设备重量及工程造价。为了更深入地了解多沙河流电站水轮机磨蚀破坏情况，分析水轮机破坏的原因，掌握运行电站已取得的抗磨蚀有效成果，设计者对国内运行电站开展了广泛的调研工作。

### （一）多沙河流水轮机破坏情况分析

#### 1. 多个水电站水轮机磨蚀破坏对比

（1）同型号、同厂家、同材质的水轮机分别在清水、浑水河流条件下运行破坏特征差异很大。例如，运行在黄河上的盐锅峡电站与运行在潇水上的双牌电站比较，盐锅峡电站水轮机大修周期为 2 年，每次检修消耗焊条 1.0t，双牌电站水轮机大修周期为 4~5 年，每次检修消耗焊条 0.2t。运行在黄河上的天桥电站与运行在融江上的麻石电站比较，天桥电站水轮机运行 4 年（运行时数 25 446h），4 只叶片减少重量 1 100kg，检修消耗焊条 1.71t，麻石电站水轮机运行 10 年，仅在叶片背面发现轻微气蚀痕迹。

（2）同水质、同工况运行的水轮机因设计参数、加工工艺、采用材质的不同，其设备破坏程度也明显不同。例如，同样安装于天桥电站的两台机组进行比较，由芬兰进口的机组设计参数较低（ $n_s = 476\text{m}\cdot\text{kW}$ ），由罗马尼亚进口机组的设计参数较高（ $n_s = 555\text{m}\cdot\text{kW}$ ）。12 年的运行记录证明：芬兰机组比罗马尼亚机组磨蚀破坏的速度慢，强度低（据实际检查，磨蚀破坏强度相差 4 倍）。

同样安装于八盘峡电站的进口机与国产机比较，瑞典 KMW 厂生产的机组水轮机过流部件采用不锈钢整铸，叶片翼型制造误差很小，表面粗糙度高达  $R_a = 1.6$  以上，机组运行 25 000h，叶片表面光亮如初；而哈尔滨厂生产的水轮机叶片母材采用铸 20 号硅锰钢制造，局部铺焊不锈钢，叶片表面粗糙度仅有  $R_a = 12.5$ ，机组运行 7 709h，破坏已相当严重，转轮效率明显降低，需补焊修复。

（3）水轮机导叶间隙的磨蚀破坏随运行水头增高而加大。例如，刘家峡电站额定水头  $H_r = 100\text{m}$ ， $n_s = 190\text{m}\cdot\text{kW}$ ，导叶的磨蚀破坏较为严重。而运行水头较低的八盘峡电站（ $H_r = 18\text{m}$ ， $n_s = 600\text{m}\cdot\text{kW}$ ）、青铜峡电站（ $H_r = 18\text{m}$ ， $n_s = 557\text{m}\cdot\text{kW}$ ）、天桥电站（ $H_r = 18\text{m}$ ， $n_s = 555\text{m}\cdot\text{kW}$ ）等机组的导叶破坏比较轻微。

（4）运行工况的优劣直接影响磨蚀破坏程度。水轮机在非设计工况（如低水头、小负荷）运行时，叶片进口水流冲角加大，必然会产生脱流和改变压力分布情况，加剧局部的空化程度，导致气蚀的产生。而叶片出口处产生的掺气水漩，引起水轮机尾水管内压力脉动的加剧。由于水轮机流道内的水流紊动，亦使水轮机过流部件的气蚀破坏和振动加剧。

在这种紊流状况下，气蚀和磨损联合作用加重了设备的破坏。如三门峡水电站汛期运行水头低，而非汛期又因顶盖漏水，强迫加大叶片转角，加重了水轮机的破坏程度，首台机组投运 10 000h 后，气蚀破坏十分严重，机组效率下降 8%。

(5) 水轮机过流部件的破坏部位和特征，因比转速和转轮型式的差异而不同。黄河上已建的龙羊峡、刘家峡、盐锅峡电站安装的是混流式水轮机，比转速  $n_s$  在 176 ~ 241  $m \cdot kW$  之间，主要磨蚀破坏部位为转轮上冠、下环内表面、顶盖、导叶、迷宫环、尾水锥管里衬等。八盘峡、青铜峡、天桥、三门峡电站安装的是轴流式水轮机，比转速  $n_s$  在 325 ~ 600  $m \cdot kW$  之间，主要磨蚀发生在转轮叶片、转轮室、轮毂体、导叶、底环等部位。

## 2. 采用的抗磨蚀措施

在进行多泥沙河流电站工程枢纽布置设计时，大多设置排沙水工建筑物，以减少过机水流含沙量。例如，刘家峡电站，开启泄水道（泄水道进口底坎较机组进水口低 15m），较不开启泄水道泄水时，过机水流含沙量可以减少 50% ~ 80%。三门峡电站打开底孔排沙，底孔进口较机组进水口底坎低 7m，较不开启底孔泄水时，过机含沙量可减少 50%，粒径大于 0.05mm 的粗颗粒泥沙同比减少 4/5；八盘峡电站在发电引水洞前沿的水库内设置有导向泄水道的挡沙底坎，有效地拦截了大量粗颗粒泥沙，减小了过机水流的泥沙含量；盐锅峡电站由于无排沙设施，虽然水轮机参数不高，河流天然泥沙含量与八盘峡电站相当，但过机泥沙含量却较八盘峡电站要大，机组磨蚀破坏也较严重。这些例子揭示出多泥沙河流水电站水工建筑物的合理布置设计，是减少过机含沙量的有效措施。

为最大限度地减轻过流部件的磨蚀破坏程度，各工程进行了多种不同防护材料的研究试验，得到了一批性能相对优良的防护材料。在金属材料方面，常见的有各种性质的抗磨焊条、金属陶瓷、高强度复合钢、高强度不锈钢等，多采用堆焊、铺焊、喷焊工艺，常用的非金属类材料有复合树脂、复合尼龙、聚氨酯弹性体、铸石等，表面强化工艺有渗碳、渗氮、高频淬火等。这些抗磨蚀材料和工艺广泛运用于已运行电站，如刘家峡电站、盐锅峡电站、天桥电站、三门峡电站等，均取得了一定的效果。

### (二) 解决小浪底电站水轮机磨蚀破坏的设想

小浪底电站设计初期，工程设计人员根据刘家峡、盐锅峡、八盘峡、青铜峡、三门峡、六郎洞、渔子溪等多座电站的运行情况，认识到含沙水流对水轮机的磨蚀破坏是十分严重的。水流中含沙量越大、颗粒越粗、沙粒越硬，对水轮机过流部件的磨蚀破坏就越严重。如三门峡水电站，高含沙水流对水轮机过流部件造成的破坏可谓触目惊心，以至于对三门峡水电站水轮机磨蚀破坏情况有所了解的国内外许多专家，对黄河中游水电开发存有较大疑虑，认为小浪底电站建成后可能会像三门峡电站一样汛期机组不能安全发电运行。为此，在工程设计和水力机械制造方面均面临着严峻的挑战。设计者对高含沙水流可能对水轮机造成的破坏问题给予了高度重视，确定采取综合措施，以减轻泥沙对水轮机的磨蚀破坏。在对已运行的多沙河流水轮机进行全面调研的基础上，对枢纽水工设施布置、排沙措施、水轮机设备的制造加工工艺、过流部件材料的采用、机组大修记录、修补部位和特征、机组的过流含沙量、泥沙特性等一切可能影响磨蚀破坏的因素进行综合分析。调研分析结论是：

(1) 枢纽水工建筑物的布置应设置拦沙排沙设施，以减小水流过机含沙量。