

田嘉宁 吴文平 韩 珂 编著



XSJZWTSJ

泄水建筑物体形设计

陕西科学技术出版社

内 容 简 介

本书较系统地介绍了泄水建筑物的规划、布置及体形设计方法，列举了国内外大量工程实例，进一步探讨了有关泄水建筑物体形设计等问题。全书共分七章：泄水建筑物体形设计；泄水建筑物的规划及总体布置；溢洪道及溢流坝进口体形设计；溢洪道槽身及出口体形设计；泄水洞压力进水口体形设计；泄水洞洞身段的体形设计；收缩式消能工体形设计。

本科生可选修部分内容，也可作为研究生教材使用，研究人员、工程设计人员亦可从中获得收益。

前 言

泄水建筑物是用于从水利枢纽中宣泄多余洪水或者为发电、灌溉、工业应用等目的泄放需用水量的建筑物。它不仅是为保证水利枢纽安全，而且也是为达到建造水利枢纽的最终目的所必不可少的建筑物，是水利枢纽工程的重要组成部分。解放后我国修建了大量的水利水电工程，在泄水建筑物的设计、施工、运用、管理方面都积累了丰富的实践经验和宝贵的技术资料。目前大中型水利枢纽的建设日益广泛，水头渐趋增高，泄水建筑物在高速水流作用下对体形研究和技术要求更高。因此，泄水建筑物的体形研究在泄水建筑物的设计中就显得十分重要。

在《水工建筑物》教材中，虽然已学习了水工建筑物方面的有关知识，但可供从事实际设计指导的工程资料很少。大学生在课程设计，特别是在毕业设计中，感到无从下手。为了帮助大学生进一步扩大知识面，能够顺利地进行泄水建筑物体形布置和设计，同时也为从事工程设计的工程技术人员、研究人员进行体形研究提供借鉴，特编写了本书。

本书主要介绍了泄水建筑物布置的工程实例、泄水建筑物的规划及总体布置原则；溢流坝、溢洪道、泄水隧洞体形布置、设计的原理和方法；部分新型消能工程的设计方法；国内外部分工程设计参数、性能、运行效果等，以供设计借鉴。

泄水建筑物体形设计中还有许多问题尚未搞清楚，需要研究的课题还很多。因此，书中提出的一些设计方法，仅供参考。错误之处，请予指正，以便今后进一步修改和补充。

作 者

1999年5月

目 录

计算题、推导题

第一章 泄水建筑物体形设计的意义	(1)
------------------	-------

第一节 泄水建筑物在水利枢纽工程中的地位	(1)
----------------------	-------

第二节 高速水流对泄水建筑物的作用	(2)
-------------------	-------

一、泄水建筑物的空蚀破坏	(3)
--------------	-------

二、水流掺气影响	(7)
----------	-------

三、泄水建筑物的磨损	(10)
------------	--------

第二章 泄水建筑物的规划及总体布置	(13)
-------------------	--------

第一节 泄水建筑物的规划设计	(13)
----------------	--------

一、泄水系统的组成	(13)
-----------	--------

二、泄水建筑物的规模	(16)
------------	--------

三、泄水建筑物的位置和走向	(17)
---------------	--------

四、泄水建筑物的进口高程	(18)
--------------	--------

第二节 泄水建筑物的总体布置及工程实例	(20)
---------------------	--------

一、坝身泄水建筑物	(20)
-----------	--------

二、河岸泄水建筑物	(31)
-----------	--------

第三章 溢洪道及溢流坝进口体形设计	(54)
-------------------	--------

第一节 溢洪道进水口平面布置	(54)
----------------	--------

第二节 溢流堰及堰面曲线	(56)
--------------	--------

一、溢流堰	(56)
-------	--------

二、堰面曲线	(60)
--------	--------

第三节 闸墩	(69)
--------	--------

第四章 溢洪道槽身及出口体形设计	(73)
第一节 溢洪道泄槽的布置和体形	(73)
第二节 泄槽弯道的水力设计	(79)
一、急流弯道的水力计算	(79)
二、弯道上急流冲击波的传播与射	(82)
三、大半径 ($r_0/b > 20$) 弯道壁面的最大水深 及位置	(84)
四、具有纵向底坡的中半径 ($10 \leq r_0/b \leq 20$) 弯道 壁面的最大水深及位置	(85)
五、小半径 ($r_0/b < 10$) 弯道最大水深及位置	(86)
六、弯道上急流冲击波波角及最小中线半径 的经验公式	(87)
七、弯道平衡水深与扰动水深的关系	(88)
第三节 弯道急流冲击波的控制	(89)
一、渠底抬高法	(89)
二、渠底横向扇形抬高法	(90)
三、弯曲导流板法	(91)
四、复合曲线法	(92)
五、斜导流掺气挑坎	(93)
六、局部抬高渠底法	(95)
七、限制弯道半径法	(96)
第四节 泄槽的收缩及扩散	(96)
一、收缩段	(97)
二、扩散段	(105)
第五节 出口段的体形	(107)
一、挑流消能	(107)
二、消力池	(112)
三、消力库	(117)

第五章 泄水洞压力进水口体形设计	(122)
第一节 压力进水口的布置.....	(122)
第二节 压力进水口的体形.....	(127)
一、压力降落系数及真空度.....	(127)
二、进口形式及 C_d 值	(130)
三、粗糙面突体处的流速及脉动压力.....	(134)
四、进口喇叭口体形.....	(135)
五、无压孔洞短管型进水口的布置及体形.....	(143)
第三节 渐变段的体形设计.....	(154)
第四节 平面闸门的门槽形式.....	(157)
第五节 有压进水口的潜没深度.....	(171)
第六章 泄水洞洞身段的体形设计	(174)
第一节 龙抬头曲线及反弧段体形设计.....	(174)
一、“龙抬头”曲线	(175)
二、直线段及反弧段.....	(177)
三、作用在两侧边墙上的压力.....	(190)
第二节 压力弯道的布置及计算.....	(191)
一、压力弯道的布置.....	(191)
二、压力弯道上水流压力及断面流速分布.....	(192)
第三节 岔洞的布置.....	(198)
一、分岔情况.....	(198)
二、分岔处的流速态.....	(199)
三、改善岔尖流态及防空蚀措施.....	(200)
第四节 出水口的体形设计.....	(202)
第七章 收缩式消能工体形设计	(206)
第一节 窄缝式消能工的特性、体形.....	(207)
一、窄缝消能工概况.....	(207)
二、窄缝消能工的体形.....	(213)

三、窄缝消能工的流态及适用条件·····	(219)
四、窄缝消能工的最大冲深估算·····	(223)
五、窄缝消能工的压力计算·····	(224)
第二节 宽尾墩消能工及其体形·····	(228)
一、宽尾墩的提出·····	(228)
二、宽尾墩体形参数选择·····	(230)
三、宽尾墩消能工的水流流态·····	(232)
四、宽尾墩消能工的消能效果·····	(234)
五、宽尾墩消能工的优缺点·····	(235)
参考文献·····	(236)

第一章 泄水建筑物体形设计的意义

第一节 泄水建筑物在水利枢纽工程中的地位

泄水建筑物是水利枢纽中重要的组成部分，它是保证枢纽安全及正常运行的必不可少的重要建筑物。一个水利枢纽工程，如果没有安全可靠的泄水系统，就不能达到除水害、兴水利的目的。

目前，大中型水利枢纽的建设日益广泛，水头渐趋增高，出现了一些巨型水利枢纽工程，泄水建筑物的单宽泄流量因受地形条件等限制，亦突破了工程中常用的界限值。例如西班牙的阿尔台阿达维拉（Aldeadavila）大坝的溢流坝，鼻坎处的单宽流量已达到 $800\text{m}^3/\text{s}$ ，流速超过 40m/s 。现在我国正在修建中的三峡水利枢纽工程，电站总装机 1820万 kW ，最大泄洪能力达到 $11.3\text{万 m}^3/\text{s}$ 。所有这些，都给泄水建筑物体形的研究和技术提出了更科学、更严格的要求。否则可能由于高速水流的作用而使水利枢纽的运行和建筑物遭受破坏，给国民经济建设和人民生命财产带来不可估量的危害。

泄水建筑物的主要作用是：

- 1) 在洪水来临时，根据水库运行、调节要求，向下游宣泄洪水，以保证大坝安全；
- 2) 满足发电、灌溉、航运、排木、工业用水等需求；
- 3) 在多泥沙河流上，向下游排沙，减少水库淤积，延长水库寿命；
- 4) 放空水库进行检修，或应付紧急情况；

5) 施工期导流、渡汛。

对于泄水建筑物所承担的任务,在明确其主要任务的同时,也要考虑多种用途,以获得更佳的经济效益。过去有些工程的设计片面地追求减少工程量和投资,降低洪水设计标准,而在建设或竣工后不得不追加泄水建筑物;有的省去了泄水建筑物中的附属结构,致使出现问题后不能及时检修;有的对泥沙问题认识不足,蓄水后又增建泄水建筑物等。

因此,设计、布置一个合理的泄水系统是一项相当复杂的工程问题。它需要充分研究当地的具体条件和工程任务;泄水建筑物的容量和规模;不同类型泄水建筑物的组成和配合,泄水建筑物的轴线,高程,进口、出口布置,泄水建筑物形式等。

第二节 高速水流对泄水建筑物的作用

作用在泄水建筑物上的水头愈高,下泄水流的流速愈大,水流也就愈难控制。当下泄水流流速在 15m/s 以下时,由水流产生的脉动、掺气、空蚀等现象对泄水建筑物的正常工作不会产生重大影响,因此,设计中一般不考虑上述因素。但当下泄水流流速超过 15m/s 时,为保证泄水建筑物的正常工作,设计中必须考虑高速水流的影响,并采取相应的工程措施加以预防。

在设计高水头泄水建筑物时应考虑的因素有:引起结构疲劳破坏的动水荷载的脉动特性;随着水流边界处压力降低,由空穴引起的空蚀现象;水流中掺入大量空气,使管道封顶而产生振动;泄水建筑物边界改变,形成的扰动波,使动荷加大并使下游水流衔接不利;高含沙水流对建筑物的磨损;下泄水流的巨大余能造成下游的冲刷等问题。

一、泄水建筑物的空蚀破坏

高速水流往往引起泄水建筑物的空蚀破坏，轻者使建筑物边界衬砌剥离，出现麻面；重者可使建筑物部分结构遭到严重破坏，迫使工程停止运行。

空蚀常发生在溢流坝的溢流面及挑流鼻坎附近，泄水隧洞的龙抬头反弧段及其下游部分，管道转弯段及分岔处、平板门槽的下游、消力墩的侧面等。空蚀也发生在局部压力降低的地方，如表面存在着突体、错缝及不平整的地方。

空蚀产生的一般机理是由于各种原因使水流中压力降到某一临界值时，水流内部便出现蒸汽空泡，这样形成的空泡称为空穴。含有空穴的水流称为“空穴流”。空泡随水流移到下游压力较高的区域，因周围水体的压缩，空泡即行溃灭。如空泡溃灭发生于水流边壁附近，空泡溃灭时释放出的巨大能量直接冲击边壁表面，在长时间的高频冲击下，就会使边壁遭受破坏，这就是“空蚀现象”。

1. 泄洪洞和泄水管道中的空蚀破坏

美国鲍尔德（Boulder）水利枢纽中泄洪洞是最早因空蚀破坏的工程之一。该洞直径 15.2m，落差 157m，1941 年在无压状态下宣泄流量 $380\text{m}^3/\text{s}$ ，运行 4 个月后，又连续泄放 $1\,070\text{m}^3/\text{s}$ （相当设计流量的 19%）流量后，经检查反弧处的洞底衬砌、基岩被严重破坏，在基岩中形成一个深 13.7m，宽 9.5m，长 35m 的大坑（图 1-1）。反弧段衬砌下曾用混凝土塞回填，塞厚 7.5m，混凝土龄期已达 7 年。被破坏而带出的混凝土、岩石的体积约 $4\,500\text{m}^3$ 。分析其破坏的原因，是由于衬砌面施工放线不良，出现混凝土突体，并因混凝土存在冷缝、蜂窝等缺陷使反弧发生空蚀破坏。我国刘家峡水电站，1972 年泄水时，也在龙抬头反弧段末发生空蚀，形成的冲坑长 24m，宽 13m，最大冲坑深 3.5m，并卷起了洞身后来加衬的 190m 底板。

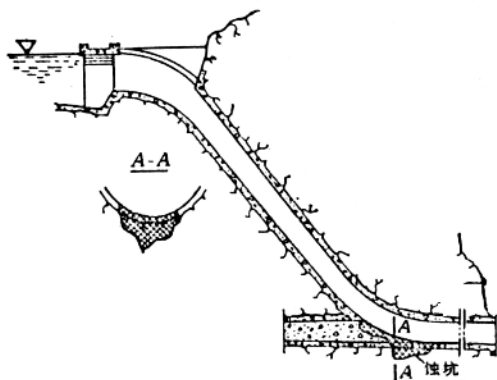


图 1-1 泄洪洞空蚀破坏

隧洞分岔处，流态复杂，泄洪过程中岔尖压力较小，甚至存在负压现象。西大洋输水洞，1959 年利用发电支洞临时泄洪时，洞内发生振动，出口水流不稳定，经事后检查，在分岔管左侧（临时泄洪的一侧）混凝土剥蚀严重，一般深度为 10~20cm，最大深度 30cm，剥蚀面 5 处，最大剥蚀面积达 5m²。事故发生后曾用 6mm 厚钢板镶护，1963 年泄洪洞正式启用，在关闭发电洞时，泄流量为 278m³/s，未发现振动现象，但岔尖右侧镶护的钢板几乎全被揭掉，混凝土冲坑深 5~13cm（图 1-2）。

2. 溢流面和泄槽上的空蚀破坏

葡萄牙米兰德坝水头 74m，溢流堰运行 8 个月后，在深孔出口与溢流堰面的连接部位发生了空蚀破坏（图 1-3）。事后曾对深孔出口的几何形状作了修改，并用厚 10~20mm 的钢板护面，且对该工程进行过两次修复，但每次修复后衬砌仍然撕裂，混凝土受到破坏。

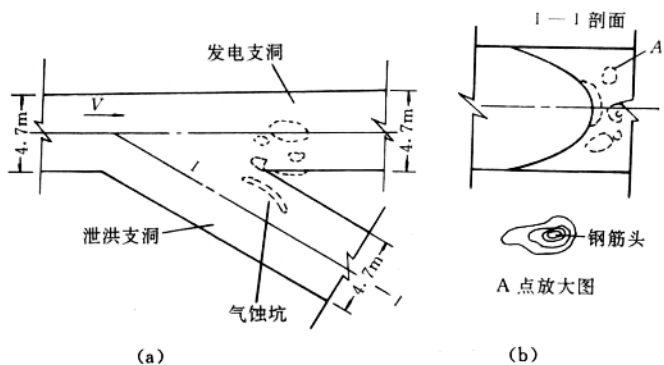


图 1-2 输水洞空蚀破坏

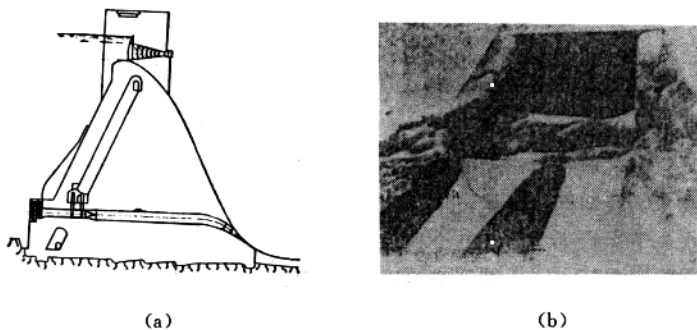
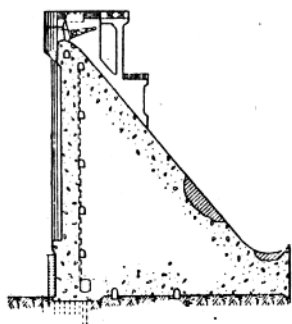


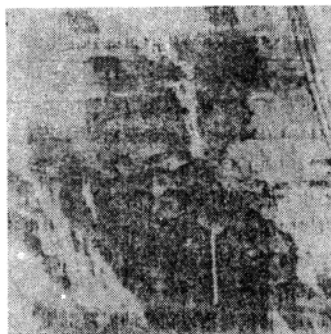
图 1-3 重力坝底孔出口的空蚀破坏

前苏联布拉斯克 (Братский) 水电站的溢流坝, 由于拆除模板时遗留下的突体、突出的键槽, 未填补的施工缝等原因, 在泄水 11 个昼夜后, 其中一孔溢流坝面及反弧处形成 1.2m 深的冲蚀坑, 体积约为 12m^3 。其他孔冲蚀坑深平均为 0.2~0.4m (图 1-4)。

维柳斯克 (Виллюйский) 水利枢纽的泄槽宽 40m, 在泄量



(a)



(b)

图 1-4 溢流坝面空蚀破坏

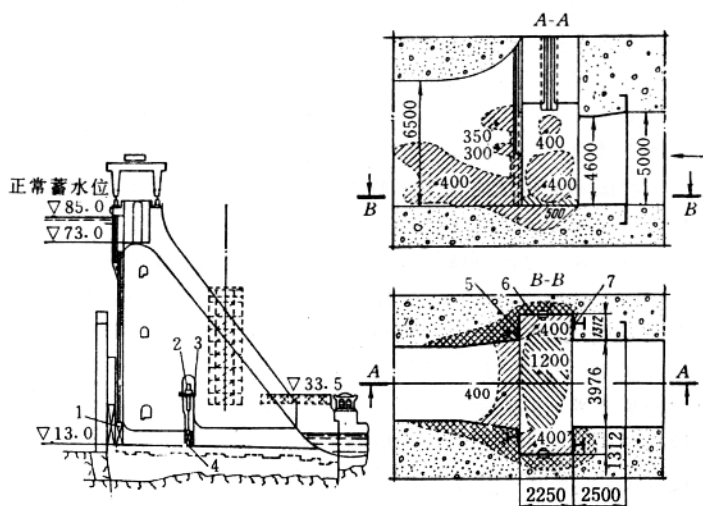
5 000m³/s, 流速 15~20m/s, 水深 3~5m 时, 空蚀范围达到泄槽面积的 35%, 形成的坑深为 0.3~0.5m。

3. 闸门室的空蚀破坏

前苏联布里塔尔明斯克 (Вухтарминская) 坝的 3 个临时底孔其压力段和明流段的尺寸分别为 4m×5m 及 4m×6.5m, 在 54m 水头下运行了 70~250 个昼夜后, 经检查 3 个孔中的闸门埋件及闸门室混凝土同样遭到空蚀破坏, 底坎的金属面已被掀去, 形成 0.4~1.2m 的冲蚀坑, 锚筋拉断, 门槽钢板衬砌破坏, 工作轨道破坏后被水冲走 (图 1-5)。

我国响洪甸有压泄洪洞出口采用平板闸门, 闸门尺寸 3×7m, 门槽为矩形。在水头 58m, 流速为 27m/s, 运行 23h, 门槽下游发生严重空蚀, 后来修复时增加 20mm 厚的钢板衬砌并锚于混凝土内。在水头 54m, 流速 25.7m/s 时, 运行后仍遭破坏。后经水工模型试验, 改变了门槽的体形才得以正常运行。

巴基斯坦塔尔别水利枢纽水头 175m, 泄水隧洞出口段用钢板



(a) 坝的横断面；(b) 闸门段的底孔剖面及平面图

图 1-5 重力坝底孔闸门槽的空蚀破坏

(数字表示冲蚀坑的深度，以毫米计)

1—事故检修闸门；2—油压启闭机；3—密封盖；

4—主闸门；5—轨道；6—钢板护面；7—30号工字钢

和混凝土衬砌。在水库充水过程中，高 14.5m 的孔逐渐关闭，因闸门的埋设部分及中墩遭到破坏，一个闸门发生堵塞只放下 4.7m。为了进行恢复工作，要求放空水库。

二、水流掺气影响

泄水水流掺气也是高速水流的特性之一，当下泄水流流速达到一定值时，水中就会掺入空气，形成水、气两相流。

高速水流掺气可以较好地解决泄水建筑物的空蚀问题，同时

也给建筑物的运行带来不利的影响。例如,对无压流泄水隧洞,由于水流大量掺气,可能会导致封顶现象,对于开敞式溢洪道,需要增加边墙高度,对以挑流方式泄向下游的水流,掺气会使水舌距离减小,并形成水雾,使电站的外部设备运行条件恶化,有时对坝下游两岸较陡的岸坡稳定造成危害。

我国湖北省境内堵河下游的黄龙滩水电站,100年设计洪水 $13\,300\text{m}^3/\text{s}$,500年校核洪水 $16\,600\text{m}^3/\text{s}$ 。电站厂房布置在下游左岸大峡沟入口处的开阔地段,厂前地面高程低于校核洪水位7m,厂房距大坝挑流区100m左右(图1-6)。1980年6月,遇到了相当50年一遇的洪水($11\,500\text{m}^3/\text{s}$)。当大坝在高水位多孔泄流时,高速水历经差动式挑流鼻坎射向空中,在空中碰撞消能时产生大量密集水雾。并在强大气流作用下,沿地形开阔的大峡沟方向扩散,使厂区被水雾笼罩,形成倾盆暴雨,降落在厂房屋顶及厂后山坡上。水流沿厂房与后山坡之间高程175m通道流至厂前,形成集中水流,估计流量为 $3\,600\text{m}^3/\text{h}$,超过厂区排水泵的能力。当水库泄量达到 $4\,330\text{m}^3/\text{s}$ 时,为确保主设备安全,2#、1#机组与电网解列、空转运行。当水库泄量增加到 $7\,670\text{m}^3/\text{s}$ 时,在上游副厂房与护坡间汇集成宽1.8m,深0.6m的水流,涌向厂区,3台水泵被淹。当水库泄量达 $11\,300\text{m}^3/\text{s}$ 时,厂内发电机层积水3.9m深。此次大事故使电站停止发电49d,少发电约2亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,并冲毁了部分农田及2.2km的公路。

在压力管道的个别部位可能从中析出空气,在水流中形成气腔,使过水断面受阻。从压力管道中排出聚集的压缩空气将伴随产生气锤现象。

奥尔托—托科斯克(Орто-Токойский)枢纽的放水道中就曾发生了上述现象。在由水库放水过程中,库水位低于隧洞进口顶板,这时进口的水平段和龙抬头部分为无压流状态。而陡坡段以后的水平部分却处于压力流状态。由于水流自由面上的摩擦力,自掺

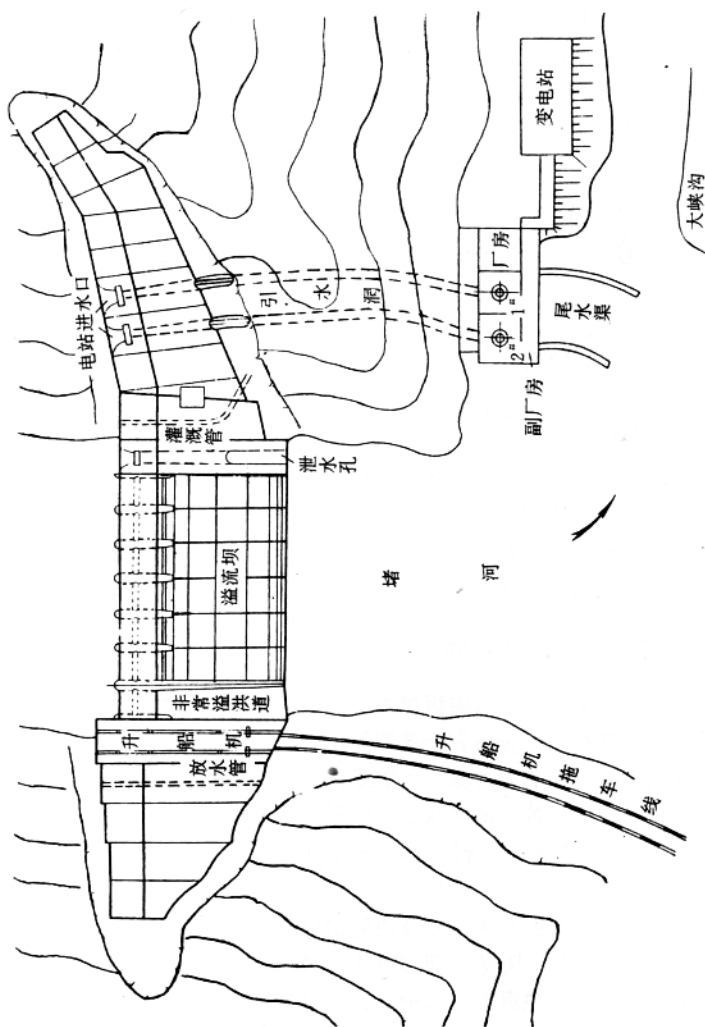


图 1-6 黄龙滩枢纽平面布置

气及挟气，使水流成为两相流，混入水中的气体在有压段中逸出，积聚在隧洞顶部。模型试验表明，在有压段内的个别部位，空气囊占到隧洞断面的40%，导致该部分断面流速增大70%，气囊随水流移动，在锥形阀出口处引起气锤（图1-7）。

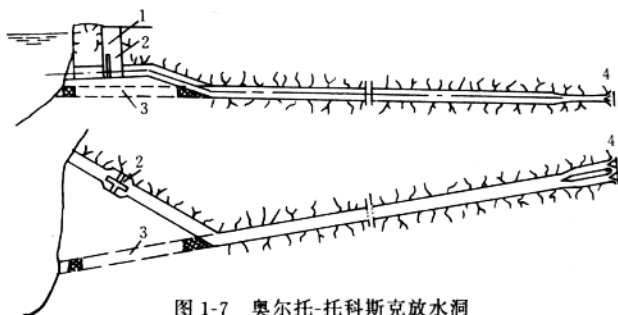


图 1-7 奥尔托-托科斯克放水洞

1—操作竖井；2—事故闸门室；3—导流洞；4—锥形阀

为了避免进口在非淹没情况下带进空气，要求限制锥形阀的开度以减小洞内流速。

三、泄水建筑物的磨损

在高水头枢纽中由溢流坝或位置较高的孔口过水，一般不会受到泥沙磨损，但是当泥沙淤积面较高、达到孔口位置时，就可能受到影响。在北方河流，特别是黄河中上游地区，由于自然生态环境的破坏，黄土高原水土流失严重，平常河水的泥沙含量亦很多，洪水期含沙可达到 $300\text{kg}/\text{m}^3$ ，即是上层溢水孔口也会受到泥沙磨损的影响。

泄水建筑物的过水边界及消能结构的磨损破坏，在许多枢纽中都会看到。在乌斯奇-卡明罗哥尔斯克（Усть-Каменогорская）水电站，设有4孔溢洪道，其中3孔采用鼻坎挑流与下游衔接，另