

文章编号:0559-9350(2020)08-0906-09

基于多级闸门联合挡水的高坝大库快速深度放空技术研究

杨家修, 杜帅群, 湛正刚, 李晓彬

(中国电建集团 贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 目前高坝枢纽放空系统存在放空深度有限、放空速度慢、放空时段单一以及放空能力不满足应对突发险情要求的技术难题。本文基于反向水推力和分层流道接力泄水的原理, 提出了连续多级闸门联合挡水的新型放空系统解决方案。该方案的创新之处在于, 只采用常规工程经验范围内的水动力学、结构力学、电气设备等方面设计指标, 即可实现高坝大库工程超深度、汛期及枯季全时段快速放空。此方案满足了高坝大库工程安全、梯级联合运行管理、健康诊断、升级改造、工程事故抢险、防灾应急等放空需求, 可有效提升高坝大库工程运行检修的安全性和各类重大自然灾害及突发事件下的抗风险能力。工程设计案例表明, 此深度放空技术具有可行性, 并可以为国内外高坝工程的设计和改造提供借鉴和参考。

关键词: 高坝工程; 深度放空; 快速放空; 多级闸门; 反向水推力

中图分类号: TV135.2

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20200218

1 研究背景

在水利水电枢纽中, 放空设施可有效降低库水位, 为工程检修、重大灾难应急抢险提供最直接有效的支持^[1-2]。水利水电工程运维经验表明, 放空设施在降低工程事故发生率、减少事故灾害影响、提高工程安全运行保障方面效益显著^[3-5]。如紫坪铺面板坝震损后通过冲沙放空洞和泄洪排沙洞及时降低了大坝上游水位, 为大坝混凝土面板及止水系统破损修复创造了施工条件^[6]。炸开弃用导流洞封堵形成紧急泄水通道为工程放空开辟了一条新途径, 但堵头修复困难^[7]。学者们对高坝深水水库温度分布^[8]、闸门及卷帘门的泄洪振动^[9]和泄洪雾化^[10]研究较多, 但对高坝的深层放空及分层放空技术研究较少, 目前放空能力不足已经成为高坝安全的重要威胁。松林水库运行20年后出现滑坡、坝基渗漏、白蚁病害, 通过新建放空洞保障了老化工程整治的顺利进行^[11]。俄罗斯的萨扬舒申斯克、奥地利的柯尔布莱恩和兹勒格伦特、瑞士的泽齐尔和圣地玛利亚以及西班牙的埃尔阿塔扎等大坝也均在坝踵发生开裂的情况下, 通过放空大坝为工程大修提供了干地施工条件, 极大地降低了溃坝事故风险^[12]。法国已经明确规定, 水库需通过定期放空进行大坝检修维护, 以确保工程枢纽安全运行^[13]。我国的三板溪、白云电站由于没有放空设施, 至今仍带病运行^[6]; 水东混凝土坝也因未设置放空设施, 以致坝体病害得不到彻底根治^[5]。

为满足高坝大库工程安全、梯级联合运行管理、健康诊断、升级改造、工程事故抢险和防灾应急等需求, 放空设施需具备以下功能特性: (1)空间上的垂向位置应尽可能低, 以最大程度放空水库, 为承受水压更高、破损风险更大的枢纽底部结构提供便利的检修维护条件^[14]; (2)放空流量应尽可能大, 以提高放空速度, 缩短放空时长, 进而减小因放空造成的时间消耗及间接发电

收稿日期: 2020-04-02; 网络首发时间: 2020-07-25

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20200723.1025.001.html>

基金项目: 贵州省科技支撑计划科技项目(黔科合支撑[2017]2865); 中国电建科研项目(DJ-ZDXM-2017-05)

作者简介: 杨家修(1963-), 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事水电工程结构及水力学研究。

E-mail: ysnjx@ghidri.com.cn

通讯作者: 杜帅群(1984-), 硕士, 高级工程师, 主要从事水电工程结构及水力学研究。E-mail: dusq66@163.com

效益损失；(3)放空设施的闸门系统在所有蓄水、放水和检修等相应工况下具备长期稳定挡水和必要的启闭条件。

文献[15-16]阐述了闸门无法完全落门并伴随爬行而振动的发生机制。在单闸门放空系统中，受钢闸门最大承载力限制，随着放空洞布置深度的增加，其泄量随之减小。一旦放空泄量小于上游来流量时，放空无法继续。受上述限制，高坝工程放空洞的放空深度一般在120 m左右，仅约高坝的1/3~1/2坝高，且放空流量一般只能大于枯水期特定时段水库来流量，因此放空时段单一。显然，对于高坝而言，单级闸门放空洞的放空深度、放空流量和速度难以与工程规模发展相匹配。我国不仅已建、在建、拟建的高坝数量居世界首位，并处于200 m以上特高坝建设的快速发展阶段^[17]，高坝设计已经超出现行规范的适用范围^[18]，且我国高坝多分布在西部地质灾害高发区^[19]，这显然对放空能力提出了更高的要求，因此与之相关技术瓶颈亟待突破^[20]。

本文提出高坝工程快速深度放空技术^[21]，该技术主要包括两大改进：(1)基于反向水推力平压原理，采用“连续多级闸门挡水”的方法，解除放空深度对钢闸门尺寸制约；(2)通过分层流道接力泄水，实现水库的连续快速放空。理论分析和某案例工程的初步设计表明：该技术相关的水动力学^[22-23]、结构力学、金属结构、电气设备方面的技术指标均在常规工程设计和运行经验范围之内，此设计下放空设施的放空泄量、时段和放空深度满足高坝工程在流域调水、工程结构安全和突发灾害应急处理方面的技术要求。

2 基本原理

2.1 闸门最大承载力对放空设施布置的影响 设闸门压力中心的水头为 h_0 ，放空设施断面面积为 S ，水的容重为 γ ，则闸门承受的水压力为：

$$F = \gamma h_0 S \tag{1}$$

忽略水库行进水头，将能量损失、常系数 $\sqrt{2g}$ 和结构形状系数的影响综合考虑为 k ，则放空流量为：

$$Q = kSh_0^{\frac{1}{2}} = kF\gamma^{-1}h_0^{-\frac{1}{2}} \tag{2}$$

由此可见，在闸门最大承载力 $F=F_{\max}$ 的制约下，放空流量随着放空深度的增加而减小，这便是单级闸门放空系统无法继续加深的关键。

2.2 反向水推力和多级闸门挡水原理 由上文分析可知，钢闸门承受水压力能力有限是不能在库底采用大过水面积闸门的根本原因，而提高过水面积又是提高放空洞泄流能力的必要手段。因此，减小深层放空洞闸门所承受的水压强是最为直接的技术手段和不可回避的关键问题。本文提

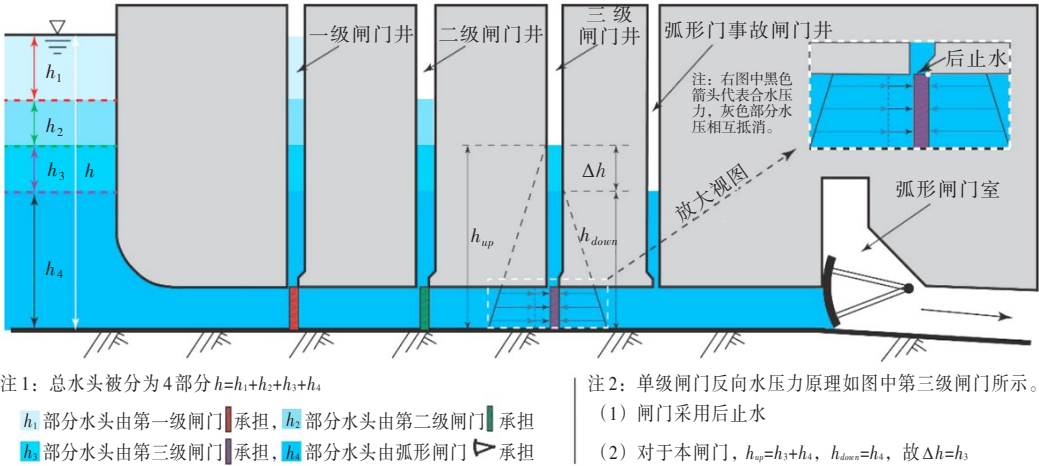


图1 反向水推力和多级闸门挡水原理

出多级闸门分级承担放空洞总水头的方法来减小每一级闸门所承受的水头，其技术原理如图 1 所示。

图 1 以第四层放空洞设计为例，展示了第四层放空洞的第三级闸门利用反向水压力原理消减上游水压力的原理，以及各级闸门利用各自上、下游水位差来分担总水头 h 的原理。相关更具体的说明见图 1 中注 1 和注 2，在此不再赘述。不同层数的放空洞设置和不同闸门的受力情况与图 1 中的原理几乎相同，本文也不再另作说明。在此方案下，只要 h_1 、 h_2 、 h_3 和 h_4 分别满足各自闸门的水推力要求，此套系统就可以承担总水头为 h 的库水位。

应用此原理，在理论上实现了无论总水头 h 多大，均可以通过设置足够多的分级闸门，即满足各级闸门水推力要求来分担总水头 h 。同时，当放空泄量较大，即需要闸门面积较大时，可通过减小单级闸门的挡水水头来满足闸门水推力的要求；再通过增加闸门级数来满足系统承担总水头的要求。此原理实现了随着挡水深度的增加，闸门尺寸仍可根据泄流能力要求自由调整，从根本上解决了放空深度与泄量的矛盾。

2.3 分层流道接力泄水原理 在分级挡水闸门下游设置弧形闸门，即可放水。但是由于弧形闸门的启门水头和水推力受金属结构制作水平限制更严格，所以只有弧形闸门上游水位达到其开启要求时，分级挡水流道才能满足开闸放水过流的要求。这也就意味着每层放空洞只能依靠各自弧形闸门来宣泄其进口底板高程以上一定高度的库水，而更高高程的库水则需要由上一层放空洞来宣泄。

通过合理布置各层流道的垂向位置，使各层流道的高程满足其弧形闸门启闭要求，上述“流道分层+接力放空”的方案即可以全面解决宣泄库水的问题。具体而言，在实际泄水时，各平板闸门根据水位下落依次平压提起，各放空洞中的弧形闸门则在达到设计起门水头时开启泄水，如图 2 所示。

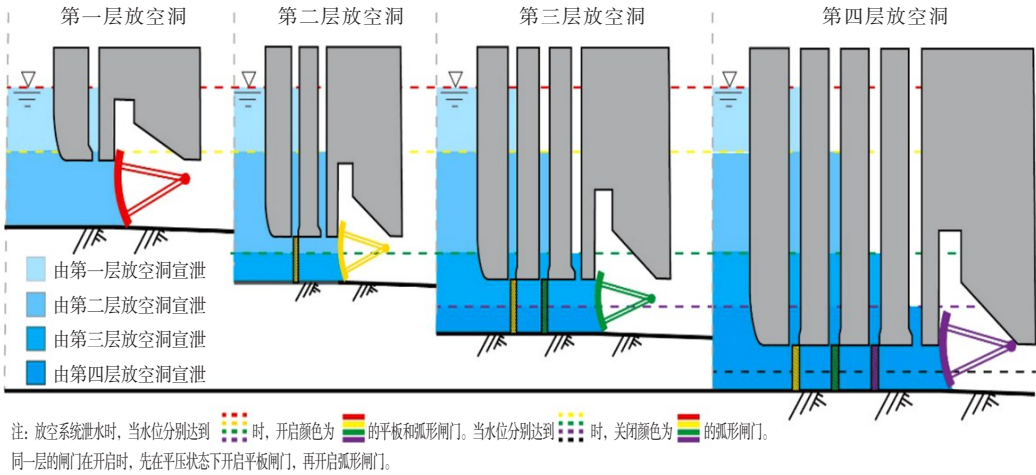


图 2 多级闸门深层放空系统多层流道接力泄水流程

3 深度放空系统设计

与常规的单级闸门放空洞相比，本文提出的多级闸门深层放空系统的设计略显复杂。从宏观设计流程来看，主要存在放空系统层数和各层特征水位的确定、分级挡水系统结构设计、系统操控运行三大部分差异，下文分别进行说明。

3.1 放空系统层数和各层特征水位的确定 放空系统层数主要受放空深度 H 、最小放空流量 $Q_{\min}$ 和闸门承载力 $F_{\max}$ 的影响。在以上三个参数已知的情况下，放空系统层数和特征水位的确定方法如下。

(1)步骤1。依据最小放空流量 $Q_{\min}$ 和闸门承载力 $F_{\max}$ 确定不同孔口尺寸 S 下放空洞的启门水头 h 。

(2)步骤2。根据各层放空洞的结构形状参数确定水头损失系数,进而得到各层放空洞的泄流特性曲线 $Q_{i*}=f(h_{i*})$ (i 表示放空洞的层数),并进而分别计算获得各 S_{i*} 和 h_{i*} 对应的最大放空流量 $Q_{i*,\max}$ 、最小临界放空流量 $Q_{i*,\min}$ 及其对应的最小临界启门水头 $h_{i*,\min}$ 、以及与下级闸门最大重合放水高程 Δh_{i*} 。

(3)步骤3。综合前两步不同的泄流曲线计算结果,以泄流能力最大和同样层数放空洞底板布置的更深为评价原则,进行微调,最终确定第 i 层放空洞的孔口尺寸 S_i 、启门水头 h_i 、最大重合放水高程 Δh_i 、单个放空洞的最大放空深度为 $h_i-h_{i,\min}$ 。

(4)步骤4。假设库水位为 Z_{top} ,且第一层放空洞从库水位即可开闸泄水,则第一层底板高程为 $D_1=Z_{\text{top}}-h_1$,第 i 层放空洞的底板高程 $D_i=Z_{\text{top}}-\left(\sum_{i=1}^i h_i - \sum_{i=1}^{i-1} \Delta h_i\right)$,第 i 层放空洞的启门控制水位 $Z_{(i,i)}=Z_{\text{top}}-\left(\sum_{i=1}^{i-1} h_i - \sum_{i=1}^{i-1} \Delta h_i\right)$ 。则第 i 层放空洞的 k 级平板闸门的上游水位 $Z_{(i,\kappa)\text{up}}=Z_{\text{top}}-\sum_{i=1}^k h_i + \sum_{i=1}^{k-1} \Delta h_i$;下游水位 $Z_{(i,\kappa)\text{down}}=Z_{(i,\kappa+1)\text{up}}=Z_{\text{top}}-\sum_{i=1}^{k+1} h_i + \sum_{i=1}^k \Delta h_i$;挡水水头 $h_{(i,\kappa)}=Z_{(i,\kappa)\text{up}}-Z_{(i,\kappa)\text{down}}=h_{\kappa+1}-\Delta h_{\kappa}$ 。第 i 层放空洞的总挡水水头 $H=Z_{\text{top}}-D_i=\sum_{i=1}^i h_i - \sum_{i=1}^{i-1} \Delta h_i$;当第 i 层放空洞为最低层放空洞时,其总挡水水头即整个深层放空系统的挡水水头。

鉴于各层放空洞在挡水、放空过程中的功能及运行程序均相似;综合考虑各层放空洞设计、检修及金属结构、机电设备的选型替换,一般建议各层放空洞规格应尽量保持一致。则第一层底板高程为 $D_1=Z_{\text{top}}-h$,第 i 层放空洞的底板高程 $D_i=Z_{\text{top}}-ih+(i-1)\Delta h$,第 i 层放空洞的启门控制水位 $Z_i=Z_{\text{top}}-(i-1)h+(i-1)\Delta h$ 。则第 i 层放空洞的 k 级平板闸门的上游水位 $Z_{(i,k)\text{up}}=Z_{\text{top}}-kh+(k-1)\Delta h$;下游水位 $Z_{(i,k)\text{down}}=Z_{(i,k+1)\text{up}}=Z_{\text{top}}-(k+1)h+k\Delta h$;挡水水头 $h_{(i,k)}=Z_{(i,k)\text{up}}-Z_{(i,k)\text{down}}=h-\Delta h$ 。第 i 层放空洞的总挡水水头 $H=Z_{\text{top}}-D_i=ih-(i-1)\Delta h=i(h-\Delta h)+\Delta h$;当第 i 层放空洞为最低层放空洞时,其总挡水水头即整个深层放空系统的挡水水头。

(5)步骤5。当某层放空洞的泄量与放空时段内的上游来流量一致时,库水位停止降低,放空结束,此时的库水位即为该时段的放空高程。

3.2 分级挡水系统结构设计 水电工程运行是一个漫长的过程,放空建筑物的运行要求较为复杂,工程结构布置应综合考虑各种运行需求。

3.2.1 分级挡水闸门设计 以单个第4层放空洞为例,采用四级闸门分级挡水(见图2)。其中前面三级闸门以挡水为主,设置平板工作闸门,考虑各平板工作闸门检修要求,分别在其上游设置平板检修闸门,共用一个闸门井,闸门井根据地形地质条件可以做成岸塔式或竖井式。平板工作闸门运行条件为静水启闭,均为后止水形式。最末一级为具备放水功能的弧形闸门,考虑其启闭过程中卡阻等紧急情况下快速封闭流道的需求,在其上游设置平板事故闸门。弧形闸门运行工况是动水启闭;弧形闸门的事事故门运行工况是动水关闭静水平压开启,一般为前止水形式,采用充压 Ω 型水封和定轮支承型式,当事事故门经历放空和充水过程时,其所在洞段为封闭洞段,需通过充水管和补气管进行充水补、排气。

3.2.2 溢水廊道设计 深层放空各类闸门随着运行时间的推移会因为水封老化、破坏等出现漏水的情况,导致个别闸门井筒内水位升高,放空系统分级挡水的平衡状态被打破。上述问题可通过设置溢水廊道来解决。具体措施是在各层放空洞从第二级(包括第二级)到最后一级闸门井(包括弧形工作门的事事故闸门井)的下游设置溢水廊道。各级溢水廊道能够相互连通,并最终与弧形工作闸门后的无压段联通。廊道进口高程与该级闸门井下游控制水位相同;洞身一般设计为正坡;以保证各级闸门

井筒内的多余水体可以顺利自流溢出。由于事故闸门为前止水，还需要在最后一级平板闸门井和事故闸门井之间设置平压竖井，确保事故闸门关闭时仍有空间为其上游闸门提供反向水推力。不言而喻，事故闸门平压竖井设计水位处也需布置溢水廊道。溢水廊道的工作原理及其中水流流动方向如图3中蓝色箭头所示。

3.2.3 连通管设计 溢水廊道的设置只能维持多级闸门井在挡水、蓄水工作过程中的系统平衡。检修时，由于平板工作闸门、检修闸门、事故闸门均需在平压下启闭；在承压闸门替换过程中，均需通过底部连通管充排工作闸门(事故闸门)井筒内的水体来满足平压要求。因此，底部连通管的高程应低于最后一级平板闸门的下游水位(弧形闸门的挡水水位)，工作过程中可以通过压差从水库中自流充水或者释放某级工作闸门(事故闸门)井筒中的水体至下游。底部连通管的工作方式及其中水流方向如图3中红色箭头所示。

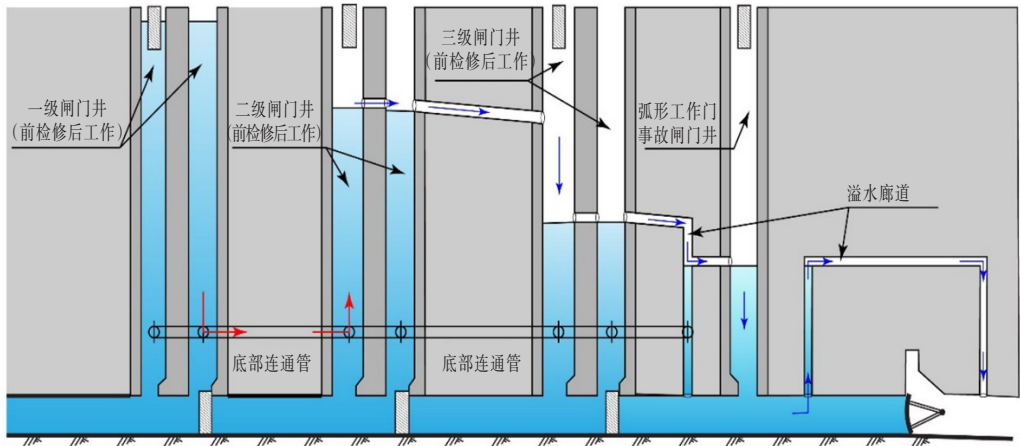


图3 分级挡水结构

3.3 运行控制设计

3.3.1 蓄水 蓄水过程可由上文2.3章节中介绍的放水过程反推。具体操作为先关闭各层放空洞的弧形闸门，然后从最后一层放空洞开始，随着库水位的上升，分别在库水位达到各级闸门下游水位及闸门平压状态下关闭平板闸门。如图4所示。

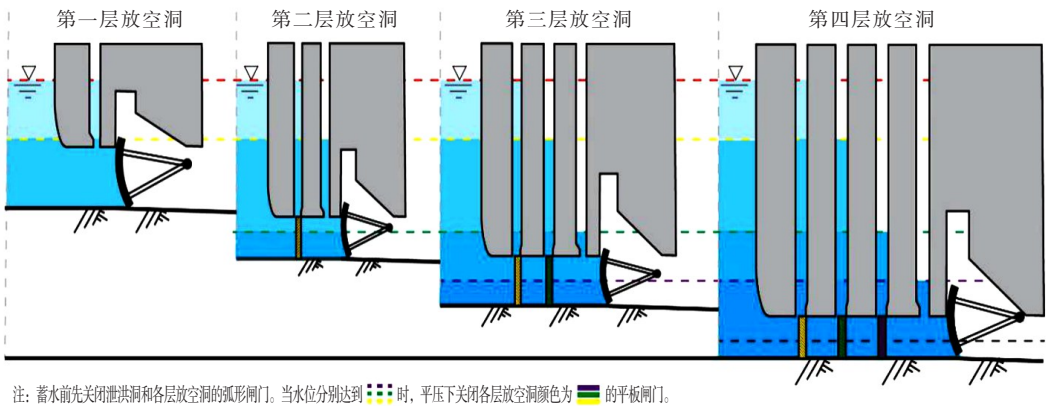


图4 多级闸门深层放空系统蓄水过程

3.3.2 放水 上文2.3节对多层放空洞的接力泄水过程进行了阐述。同时，对于多层流道中的一层放空洞而言(以第四层放空洞为例)，其泄水过程也很简单，即先随着水位的下降，按顺序在特定水位即闸门达到平压状态时依次开启第一、二和第三级平板闸门，3级闸门开启后弧形闸门挡水、放水。整个泄水过程中，溢水廊道和连通管不参与工作。

3.3.3 检修设计 不同闸门运行方式不同，检修方式也略有差异，大体可以分为平板门检修和弧形

门检修。检修过程中，主要涉及底部连通管的充排水和溢水廊道的排水。具体的水流路径与图3中的红色和蓝色箭头相似。

(1)平板门检修。以第四层放空洞第一级工作门检修为例(图3)，首先平压状态下关闭第一级检修闸门；将工作门井筒内的水体通过开启底部连通管排放至第二级井筒，进而通过溢水廊道排向下游无压洞，使第一级工作门达到平压状态；提升工作门检修，完毕后继续平压状态下关闭工作门；开启与第一级检修门井筒相连的连通管阀门从水库为工作闸门井充水，使检修门前后平压后开启检修门；挡水工作交还给工作门承担。

(2)弧形闸门检修。因事故闸门采用前止水需设置上游平压竖井而略有不同。以第四层放空洞弧形闸门检修为例，首先在通气补水平压的条件下关闭第四层事故检修闸门，事故检修门井筒内多余水体通过充排水管(详见图3)与溢水廊道连接流向下流。开启第四层弧形闸门检修，事故检修门与弧形闸室间水体经隧洞流向下流。弧形闸门完成检修并关闭，开启第四层上游的各级平压充排水管充水，对第四层放空洞事故闸门井筒至弧形闸门间空间充水，待事故闸门井筒内水位上升至与第四层放空洞弧形闸门挡水水位一致时，在平压状态下开启第四层放空洞的平板事故检修闸门，该弧形闸门检修完成。

4 工程应用

某工程正常蓄水位为2895.0 m，最大坝高315.0 m，放空通过溢洪道、泄洪洞、第一、二层放空洞接力完成。溢洪道堰顶高程2873.0 m，孔口尺寸为15 m×22 m(宽×高)，可首先通过溢洪道降低库水位至 Z_{top} 。以满足泄放汛期最大月平均流量1567 m³/s作为最小放空流量 Q_{min} 。对于该工程，以常规设计水平的闸门承载力 $F_{max} \leq 120\,000$ kN为条件，拟定多组放空洞的孔口尺寸 S 及启门水头 h 。

根据3.1节步骤4相关内容，分别计算各放空系统的底板高程、弧形闸门启门水位、各级平板门上下游水位、泄流曲线等。通过比较，选择泄流能力最大一组。最终确定弧形工作门尺寸为7 m×13 m(宽×高)，平板门孔口尺寸为7 m×15.5 m(宽×高)，启门水头70 m，相关特性参数见表1。

表1 某工程各层放空洞闸门分级及挡水水头

建筑物名称	进口底板高程/m	开启水位/m	各级闸门挡水水头/m		
			一级(平板门)	二级(平板门)	末级(弧形闸门)
泄洪洞	2827.0	2896.42			69.42
第一层	2786.0	2852.0	44.42		66
第二层	2745.0	2811.0	44.42	41	66

(1)以工程校核水位至最底层放空洞底板高程计算的最高挡水水头达151.42 m，最大放空深度为134.4 m，溢洪洞和泄洪洞共同承担高水位泄洪放空，泄流曲线见图5。各放空洞运行期的单宽流量、出口流速均为正常水平。总泄流曲线中最小流量均大于工程汛期最大月平均流量1567 m³/s，满足汛期、枯期均能放空水库的要求。

(2)通过调洪计算，深度快速放空技术枯期放空平衡水位2760.6 m，历时13 d，放空深度为134.4 m，剩余库容4.96亿 m³，放空库容87%，水位降幅6.87 m/d，死水位以下建筑物检修时段为72 d。汛期放空平衡水位2779.21 m，平均历时28 d，放空深度为115.79 m，平均剩余库容7.28亿 m³，平均放空库容80.92%，平均水位降幅3.4 m/d，平均死水位以下建筑物检修时段为28 d。放空运行满足大坝安全运行要求。

(3)与常规放空方案比较。该工程应用深度快速放空技术后，枯期放空平衡水位降低32.4 m，平均历时也有所减少；汛期平均放空平衡水位降低31.8 m，平均历时仍减少。

(4)深度快速放空技术工程投资主要在闸门井，平压竖井，过水廊道，交通竖井，水平向检修通

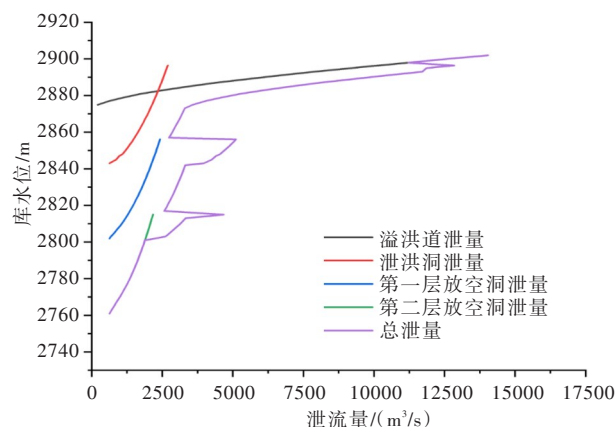


图5 放空系统泄流曲线

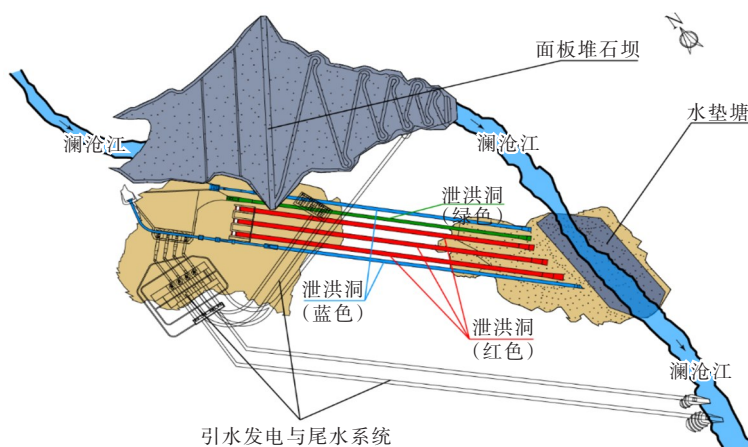


图6 某工程枢纽平面布置

道及检修室等部位，其静态投资较常规放空方案的增量占其静态投资的0.83%；放空效果显著，工程投资可控。

最终，根据坝址处水文、地质等条件，确定工程平面布置如图6所示，深度快速放空系统布置于右岸。第一层深度快速放空系统为泄洪洞，进口底板高程为2827.0 m。第一层放空洞由二级闸门组成，进水口底板高程2786.0 m，其进口布置见图7。

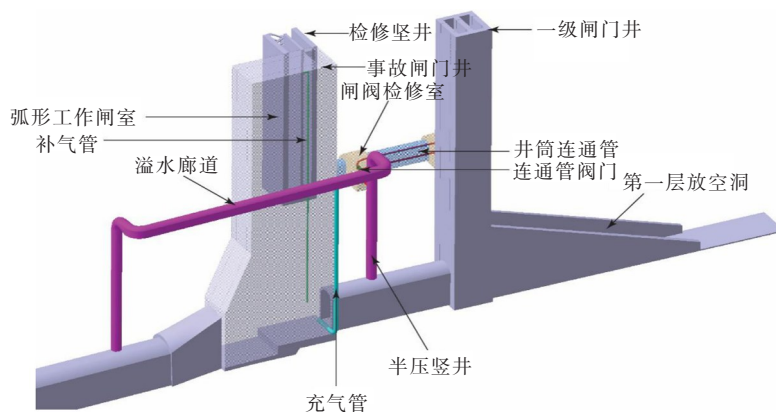


图7 某工程第一层放空洞首部结构布置

第二层放空洞由三级闸门组成，第二层放空系统底板高程2745.0 m，其进口布置见图8。承受水压力最大的为第二层放空洞事故闸门，总水压力约88 600 kN，满足金属结构设计水平要求。

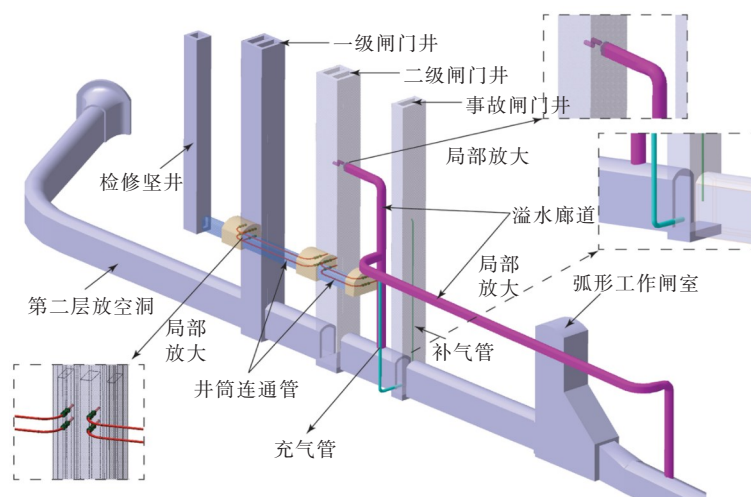


图8 某工程第二层放空洞首部结构布置

5 结论及建议

本文分析了深层放空技术的限制因素，针对放空深度与泄量受闸门水推力限制的这一主要矛盾，提出了“分级挡水分担总水头+流道分层接力放空”的系统解决方案，并结合工程蓄水、放水、检修的实际运行需求，进行工程结构及安全保障体系的具体深化设计，形成了一套完备的工程技术方案。工程设计实践和初步理论计算表明：较传统放空方案，高坝深度快速放空技术在满足金属结构常规运行的前提下，实现了高坝大库的任意时段、大泄量、深层、快速放空。同时，该技术可应用于低层导流洞封堵、深层取水、大泄量水电水利工程中孔、底孔、生态取水设计。对保证梯级电站流域安全意义重大。

工程设计中，放空能力评价指标多样，本文提出的方案虽然在技术上实现了多个放空指标自由选择的可能，但高坝大库工程放空设计是一个多目标优化的过程，且目前尚无相关规范。作者认为未来有必要展开多个工程放空能力对比的横向分析研究，并探索选取单个工程最优放空能力的方法。同时，本文提出的技术在具体工程应用中新引入的双向挡水闸门及水封技术，连续多级门槽的水力学问题也值得深入探索。

致谢：感谢武汉大学周伟和董宗师对本文的指导与帮助。

参 考 文 献：

- [1] SPEERLI J, HAGER W H . Air-water flow in bottom outlets[J] . Canadian Journal of Civil Engineering, 2000, (27): 454-462 .
- [2] 陈世全, 张文倬 . 浅议土石坝工程设计中的若干问题[J] . 水电与新能源, 2011(5): 26-28 .
- [3] BROWN A . Low level outlets 2: risk assessment [J] . Dams and Reservoirs, 2009, 19(1): 11-14 .
- [4] MORRIS R . Upgrading of the bottom outlet facilities at Abberton reservoir[J] . Dams and Reservoirs, 2012, 22(1): 11-18 .
- [5] 聂广明, 邢林生 . 水电站枢纽工程设置降低或放空水库设施的必要性[J] . 大坝与安全, 2004(5): 30-34 .
- [6] 高季章, 郭军 . 关于面板坝设置放空洞的若干问题[J] . 水力发电学报, 2013, 32(5): 179-183 .
- [7] 刘善均, 许唯临, 王伟 . 高坝竖井泄洪洞、龙抬头放空洞与导流洞“三洞合一”优化布置研究[J] . 四川大学学报(工程科学版), 2003, 35(2): 10-14 .
- [8] 练继建, 杜慧超, 马超 . 隔水幕布改善深水水库下泄低温水效果研究[J] . 水利学报, 2016, 47(7): 942-948 .

- [9] 练继建, 郭捷山, 刘昉. 泄洪低频声波诱发房屋卷帘门振动分析研究[J]. 水利学报, 2015, 46(10): 1207-1212.
- [10] 练继建, 刘丹, 刘昉. 中国高坝枢纽泄洪雾化研究进展与前沿[J]. 水利学报, 2015, 46(10): 1207-1212.
- [11] 何进. 松林水库新建放空洞设计探讨[J]. 四川水利, 2006(2): 36-37.
- [12] 贾金生, 李新宇. 高拱坝坝踵开裂问题和新的解决措施[J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1183-1188.
- [13] 普瓦雷尔 A. 水库放空运行管理和环境保护的经验回顾[J]. 水利水电快报, 1995(17): 17-21.
- [14] 刘志明, 温续余. 水工设计手册. 第7卷, 泄水与过坝建筑物[M]. 第2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [15] 王伟, 杨永全, 许唯临, 等. 孔板泄洪洞事故闸门动水下门实验研究[J]. 水利学报, 2003(1): 39-44.
- [16] 梁超, 张金良, 练继建, 等. 高坝泄流诱发事故闸门的爬行振动研究[J]. 水利学报, 2018, 49(12): 1503-1511.
- [17] 周建平, 杨泽艳, 陈观福. 我国高坝建设的现状和面临的挑战[J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1433-1438.
- [18] 周建平, 王浩, 陈祖煜, 等. 特高坝及其梯级水库群设计安全标准研究 I: 理论基础和等级标准[J]. 水利学报, 2015, 46(5): 505-514.
- [19] 周建平, 陈观福, 党林才. 我国高坝抗震安全评价的现状与挑战[J]. 水利学报, 2007, 10(S1): 54-59.
- [20] 王爱玲, 邓正刚. 我国超级高坝的发展与挑战[J]. 水力发电, 2015, 41(2): 45-93.
- [21] 杨家修, 李晓彬, 湛正刚, 等. 一种高坝大库超深层挡水放空系统及其操作方法: 中国, 201510518460.8 [P]. 2016.1.06.
- [22] DARGAHI B. Flow characteristics of bottom outlets with moving gates[J]. Journal of Hydraulic Research, 2010, 48(4), 476-482.
- [23] FAN J. Stratified flow through outlets[J]. Journal of Hydro-environment Research, 2008(2): 3-18.

Rapid deep discharging technology of high dam and large reservoir based on multi-gate combined water retaining

YANG Jiaxiu, DU Shuaiqun, ZHAN Zhenggang, LI Xiaobin

(Power China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China)

Abstract: At present, there are some technical problems in the releasing system of high dams, such as limited releasing depth, slow reservoir releasing speed, monotonous releasing period, and insufficient capacity to cope with sudden emergency situations. A solution called continuous multi-gate flood release tunnel, which makes use of the reverse pressure and multiple gates is proposed in this paper. The novelty of this new solution lies in the achievement of deep and quick releasing at an arbitrary time with the design criterion of hydrodynamics, structural mechanics and electrical equipment remaining within existing ones. The maintenance safety and ability to cope with sudden emergency conditions of high dams can thereby be highly improved. This solution meets the emptying requirements of high-dam reservoirs regarding dam safety, cascade reservoirs operation management, dam health diagnosis, structural renovation, accident rescue, and disaster prevention, hence can effectively improve the maintenance safety and the ability to resist risks under natural disasters and emergencies of high dams. A preliminary example project design shows that this newly designed structure is feasible and can provide some guidance for the design and maintenance of high dam projects in China and abroad.

Keywords: high dams; deep reservoir release; fast reservoir release; multi-gate; reverse hydrostatic force

(责任编辑: 王冰伟)