

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2018.04.22

# 轴流式机组厂房横缝水平止水布置研究

司政<sup>1</sup>,程帅<sup>2</sup>,李守义<sup>1</sup>,黄灵芝<sup>1</sup>,张倩<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 水利水电学院,陕西 西安 710048; 2. 西安热工研究院有限公司,陕西 西安 710054)

**摘要:**以轴流式机组厂房坝段为研究对象,分析在正常运行和机组检修两种运行工况下不同水平止水布置方案尾水管和蜗壳结构的应力变化规律。研究表明:横缝水平止水布置在尾水管弯肘段范围内时,随着止水的上抬尾水管部位混凝土及内敷钢衬拉应力逐渐减小;横缝水平止水布置在蜗壳高程范围内时,与上游竖直止水连通方案比闭合方案缓解蜗壳附近应力效果更佳。实际工程设计中,建议轴流式机组厂房横缝水平止水布置为:水平止水上游段布置在蜗壳进口断面顶板下表面附近,且与上游竖直止水连通;水平止水下段布置在尾水管扩散段出口顶部高程附近。

**关键词:**轴流式机组厂房;横缝水平止水;尾水管;蜗壳;上游连通

中图分类号:TV314

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2018)04-0132-06

## Study on the horizontal water sealing layout in transverse joint of the axial - flow unit hydropower house

SI Zheng<sup>1</sup>, CHENG Shuai<sup>2</sup>, LI Shouyi<sup>1</sup>, HUANG Lingzhi<sup>1</sup>, ZHANG Qian<sup>1</sup>

(1. Faculty of Water Resources and Hydro - electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Taking the dam section of the axial - flow unit hydropower house as the research object, the stress variation of draft tube and volute structure with different horizontal water sealing under operation and maintenance condition were analyzed. The results show that the tensile stress of the concrete and the steel lining in the draft tube section gradually decreased with the lifting of the water sealing, when the horizontal water sealing in transverse joint was placed in the range of the draft tube elbow section. When the horizontal water sealing in transverse joint was arranged within the volute elevation range, it was more effective than the closed solution to relieve the stress near the volute when connected with the upstream vertical water sealing. In the actual engineering project design, it is suggested that horizontal water sealing of transverse joint of the axial - flow unit hydropower house should be arranged as follows: the horizontal water sealing upstream section is arranged near the lower surface of the roof of the volute imported section and connected with the upstream vertical water sealing, and the horizontal water sealing downstream section is arranged near the top of the outlet of the draft tube divergence section.

**Key words:** axial - flow unit hydropower house; horizontal water sealing in transverse joint; draft tube; volute; upstream connection

## 1 研究背景

轴流式机组厂房内部空腔尺寸大、布局繁琐,厂房结构应力分布较其他型式的更为复杂。横缝止水布置对轴流式机组厂房局部应力影响较大,因此合理的止水布置关系到电站厂房安全运行。目前对水电站厂房

的研究主要集中在厂房结构抗震安全以及机组振动对厂房结构的影响等方面<sup>[1-3]</sup>,而对止水的研究则集中在止水施工工艺、面板坝周边缝止水失效的影响等方面<sup>[4-6]</sup>,对轴流式机组厂房横缝止水布置的相关研究较少。周伟<sup>[7]</sup>以某河床式厂房坝段为研究对象,采用静力计算、动力校核的方法对厂房结构应力进行计算,

收稿日期:2018-03-06; 修回日期:2018-04-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51409207);中国博士后科学基金项目(2015M582765XB)

作者简介:司政(1981-),男,湖北浠水人,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为水工结构应力及温控防裂。

对比分析了3种止水布置方案下厂房结构的应力分布规律,提出了合理的止水布置形式。周炎<sup>[8]</sup>对27座水电站中的11种止水型式效果进行了调查,研究了不同厂房类型下伸缩缝止水结构布置型式,给出了针对河床式、坝后式、引水式电站厂房的伸缩缝止水建议方案。李守义等<sup>[9]</sup>对河床式电站厂房选取3种典型的止水布置形式进行计算分析,发现横缝止水布置对厂房进出口段应力分布影响较大。向功兴等<sup>[10]</sup>借助ABAQUS软件研究了不同止水位置下河床式电站混凝土蜗壳结构受力特性及座环径向柔度,结果表明,正常及检修工况下止水布置在蜗壳流道顶板高程以上位置时有利于结构的受力。

已有研究成果表明,合理的横缝止水布置可改善厂房结构应力,但这些成果都是对确定的止水布置方案进行计算分析,未系统研究止水位置对厂房关键部位应力的影响规律。本文结合实际工程,研究轴流式机组厂房横缝水平止水在一定范围内变动时,厂房蜗壳、尾水管等关键部位的应力变化规律,提出对类似工

程具有通用指导意义的横缝水平止水布置方案,为轴流式机组厂房横缝水平止水设计提供参考。

## 2 工程概况

### 2.1 基本资料

某水利枢纽工程以发电为主,工程等别为II等大(2)型工程。枢纽建筑物包括轴流式机组电站厂房、泄洪闸、导流明渠及左右岸混凝土副坝等。水电站厂房共设3台机组,厂内安装3台轴流转浆式水轮发电机。

### 2.2 荷载组合

根据规范<sup>[11-12]</sup>,轴流式机组厂房选取正常运行情况为基本组合,上游水位为正常蓄水位65.50m,相应下游水位为28.50m;选取机组检修情况为偶然组合,上游为正常蓄水位65.50m,下游检修水位采用两台机运行尾水位25.50m。本文以上述两种工况作为典型情况分析各水平止水布置方案对厂房结构蜗壳、尾水管等部位应力的影响。两种工况所考虑的荷载见表1。

表1 荷载组合表

荷载组合	计算工况	荷载类别								充水情况	
		结构自重	永久设备重	水重	静水压力	扬压力	浪压力	泥沙压力	检修门推力	流道	排沙孔
基本组合	正常运行	√	√	√	√	√	√	√		√	√
偶然组合	机组检修	√	√	√	√	√	√	√	√		√

## 3 计算模型及坐标系

采用大型有限元软件ANSYS进行三维有限元计算分析,计算模型包括厂房坝段整体结构与地基岩体,基岩沿左右岸方向模拟至厂房坝段横缝处,由厂房上下游边界分别向上下游延伸80.0m,沿深度方向由厂房底部最低点向下延伸100m。计算时在基岩底部施加3向约束,在基岩左右侧面及上下游面上施加法向约束<sup>[13]</sup>,厂房左右横缝面及上下游面均为自由面。

整体计算模型单元剖分基本采用八结点六面体Solid45单元,蜗壳及尾水管内敷钢衬采用Shell181壳单元。厂房有限元计算模型如图1所示。

模型整体坐标系原点设在厂房坝段上游底部最右侧与地基相交处,其计算坐标系设置为:顺水流方向为X轴方向,指向下游为正;沿高度方向为Y轴方向,铅直向上为正;左右岸方向为Z轴方向,指向右岸为正。

计算时混凝土、钢衬以及基岩均采用弹性模型,厂房结构采用的混凝土主要为C25,弹模为28.0

GPa,泊松比为0.167;钢衬弹模为210.0GPa,泊松比为0.3;基岩弹模为8.0GPa,泊松比为0.28。

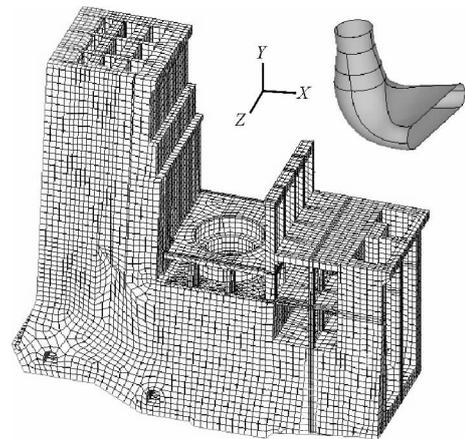


图1 厂房有限元计算模型及时管内敷钢衬体形

## 4 横缝水平止水布置对厂房结构应力的影响

### 4.1 水平止水布置在尾水管弯肘段范围内

#### 4.1.1 止水布置方案 将横缝上游竖向止水布置

在距上游面 $0.7B$ ( $B$ 为厂房坝段上游面至胸墙下游面最小距离)处,横缝下游竖向止水布置在距离下游面 $0.9D$ ( $D$ 为厂房坝段下游面至下游挡墙上游面最小距离)处,可使得轴流式机组厂房进出水口应力均匀<sup>[14]</sup>,因此计算时横缝上下游竖向止水的布置如图2所示。水平止水布置在尾水管弯肘段高程范围内,计算方案取水平止水距离尾水管肘管段底部为 $0.2U$ 、 $0.4U$ 、 $0.6U$ 、 $0.8U$ 及 $1.0U$ ( $U$ 为尾水管肘管段底部与扩散段出口顶部的高差)等5个方案。

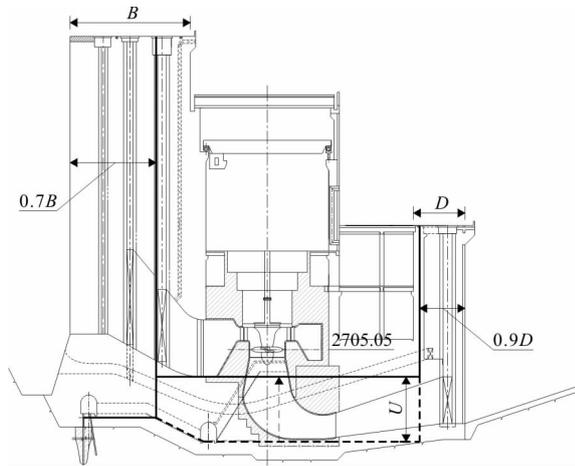


图2 横缝水平止水布置位置示意图(尾水管弯肘段范围内)

4.1.2 对尾水管及钢衬应力的影响 当水平止水布置在尾水管弯肘段范围内时,其布置位置主要影响尾水管部位混凝土及钢衬的应力。尾水管部位混凝土体型复杂,受力方向各不相同,且作为一种脆性材料,通常以断裂的形式失效,适用于第一强度理论,即认为最大拉应力是引起断裂的主要因素<sup>[15-16]</sup>,故主要分析其最大主应力 $\sigma_1$ 和最小主应力 $\sigma_3$ 。尾水管内壁钢衬是一种塑性材料,适用于第四强度理论,即认为当畸变能密度达到钢衬材料的极限值时发生屈服而破坏<sup>[17]</sup>,应力结果常用 Mises 等效应力表达。

选取进口锥管段上部、下部,中间肘管段腹部、背部及侧面,出口扩散段顶板、底板、侧壁作为尾水管典型部位(见图3),着重分析当水平止水分别距离尾水管肘管段底部 $0.2U$ 、 $0.4U$ 、 $0.6U$ 、 $0.8U$ 及 $1.0U$ 时,各方案尾水管混凝土典型部位最大主应力如图4所示。由图4可知,随着水平止水由肘管段底部逐渐上抬至扩散段出口顶部,尾水管部位混凝土的主拉应力整体呈减小趋势。正常运行时,各典型部位的主拉应力随着水平止水的上抬都出现了不同程度的减小,减小率普遍在 $35.6\% \sim 75.0\%$ 之间;检修工况下出口扩散段侧壁的主拉应力减小率

最大,达到 $87.5\%$ 。由此可知,止水的上抬对尾水外围混凝土的主拉应力具有明显的缓解效果。

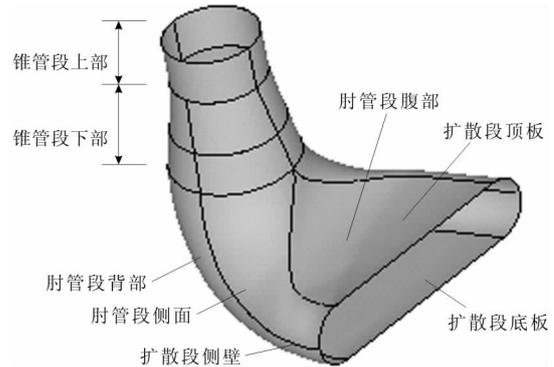


图3 尾水管典型部位示意图

选取进口锥管段上部、下部,中间肘管段腹部、背部及侧面作为内敷钢衬典型部位,分析当水平止水分别布置在距离尾水管肘管段底部 $0.2U$ 、 $0.4U$ 、 $0.6U$ 、 $0.8U$ 及 $1.0U$ 时,内敷钢衬典型部位在电站正常运行及机组检修工况下的 Mises 应力变化,如图5所示。由图5可知,随着水平止水从距离肘管段底部 $0.2U$ 上移至 $1.0U$ 时,在正常和检修工况下,尾水管内敷钢衬的 Mises 应力都出现了不同程度的减小。

正常运行工况下,肘管段背部 Mises 应力减小率为 $18.06\%$ ;检修工况下肘管段背部(底部)的减小效果最为明显,减小率为 $17.12\%$ 。综上所述说明将水平止水在尾水管高程范围内上抬,对降低尾水管内敷钢衬等效应力具有一定效果。

## 4.2 水平止水布置在蜗壳高程范围内(上游闭合)

4.2.1 止水布置方案 由于控制室环境的限制,水平止水的下游段布置于蜗壳进口底板高程处不变,上游段分别设置在距离蜗壳进口断面底板上表面 $0.2H$ 、 $0.4H$ 、 $0.6H$ 、 $0.8H$ 及 $1.0H$ 处( $H$ 为混凝土蜗壳进口断面高度),各方案水平止水与上游竖向止水相交且呈闭合状态,如图6所示。

4.2.2 对蜗壳应力的影响 横缝水平止水在蜗壳高程范围内变化时主要影响蜗壳结构应力,因此针对不同水平止水布置方案对蜗壳内部典型断面( $0^\circ$ 与 $90^\circ$ 断面)应力的影响进行系统研究。蜗壳内部典型断面示意图如图7所示。

以梯形断面A点为应力路径起始点,逆时针依次提取蜗壳 $0^\circ$ 断面顶板、侧壁、底板及圆台斜壁的最大及最小主应力。蜗壳 $0^\circ$ 断面在正常运行及检修工况时混凝土最大主应力随水平止水位置的变化规律如图8所示。

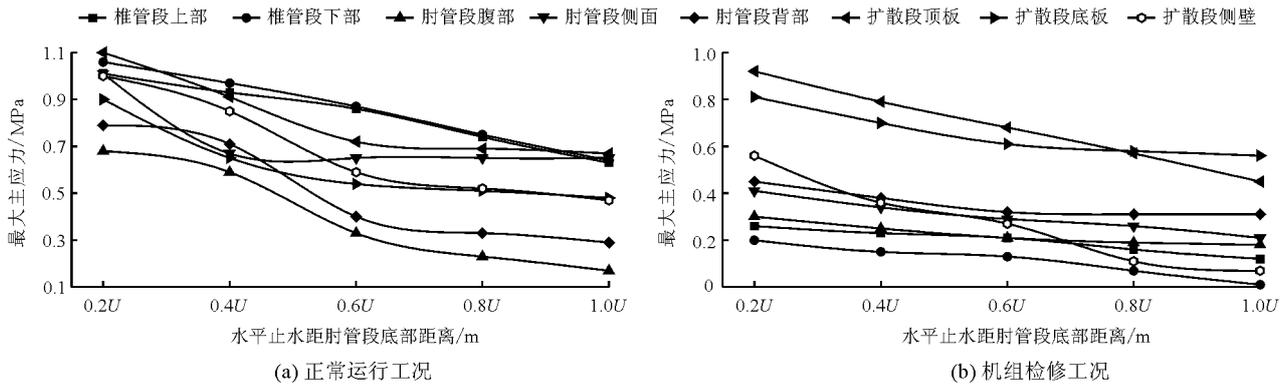


图 4 两种工况各水平止水方案尾水管混凝土典型部位最大主应力

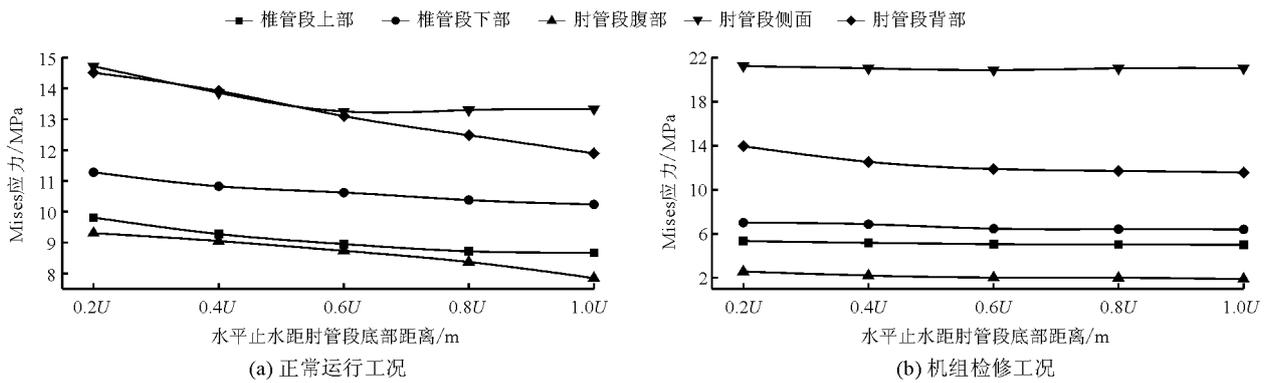


图 5 两种工况各水平止水方案尾水管内敷钢衬典型部位 Mises 应力

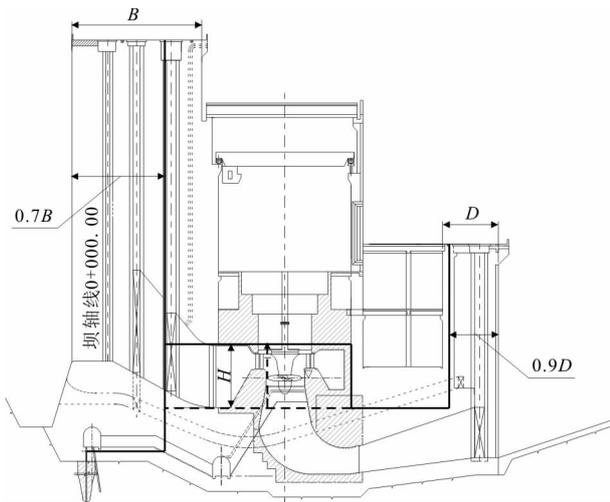


图 6 横缝水平止水布置位置示意图(蜗壳高程范围内)

由图 8 可知,当水平止水上游段布置在不同高程处,蜗壳 0°断面混凝土的主拉应力沿着梯形断面各点的变化规律相同。正常运行时,蜗壳 0°断面各部位混凝土最大主拉应力达 2.41 MPa;检修情况时,蜗壳 0°断面处混凝土主拉应力普遍较小,最大只有 0.44 MPa。正常运行情况下,随着水平止水由

0.2H 上抬至 1.0H 处,0°断面大部分混凝土主拉应力都在逐渐减小,最大减小幅度为 0.45 MPa;机组检修工况下,随着止水的上抬,除 CD 段中间部位主拉应力有所增大外,其他部位混凝土主拉应力也在逐渐减小,最大减小幅度为 0.27 MPa。

随着水平止水上游段逐渐上抬,蜗壳 0°断面处钢衬 Mises 应力大部分都呈减小趋势,限于篇幅,未给出各方案钢衬 Mises 应力的变化规律图。当水平止水位置由距蜗壳进口断面底板 0.2H 上抬至 1.0H 时,正常运行情况下,钢衬 Mises 应力最大减小幅度为 3.15 MPa,机组检修情况时最大减小幅度为 0.76 MPa。

由于蜗壳在 90°断面中 AB 段长度极短,且应力几乎没有变化,故以 90°断面 B 点为应力路径起始点,逆时针依次提取蜗壳 90°断面 BC 段、CD 段、DE 段、EF 段各点应力。蜗壳 90°断面混凝土最大主应力随水平止水位置的变化规律如图 9 所示。

由图 9 可知,当水平止水上游段布置在不同高程处,蜗壳 90°断面混凝土的主拉应力沿着梯形断面各点的变化规律一致,且蜗壳 90°断面处混凝土主拉应力明显小于 0°断面,正常运行时最大主拉应力为 0.73 MPa,检修情况时最大主拉应力为 0.41 MPa。随着水平止水

上游段由 0.2H 处逐渐上抬至 1.0H 时,90°断面各部位混凝土主拉应力都在逐渐减小,正常运行工况下,最大减小幅度为 0.27 MPa;机组检修时,最大减小幅度为 0.22 MPa。无论是正常运行还是机组检修工况,水平

止水上游段的上抬主要影响蜗壳 90°断面 BC 及 CD 段的应力,即水平止水的上抬对缓解蜗壳顶板和侧壁的主拉应力较为有效,对其他部位如底板及圆台斜壁的应力几乎没有影响。

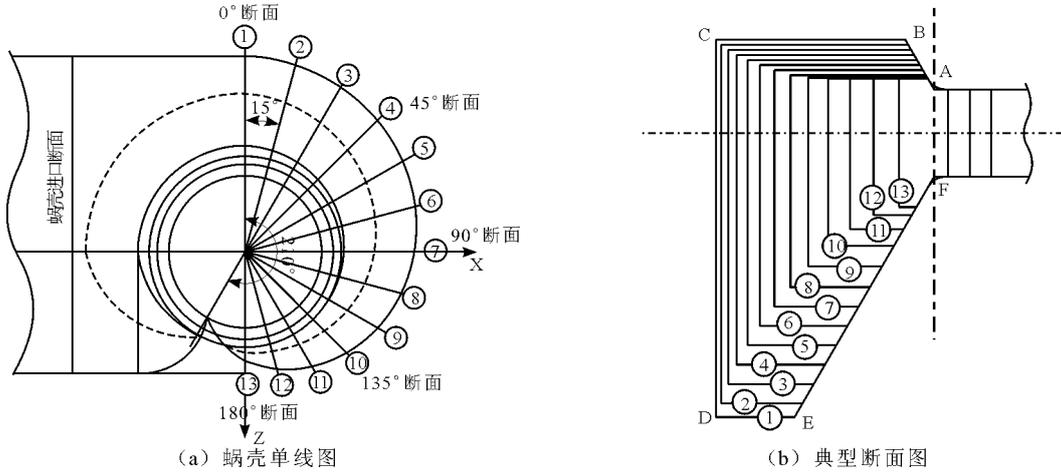


图7 蜗壳内部典型断面示意图

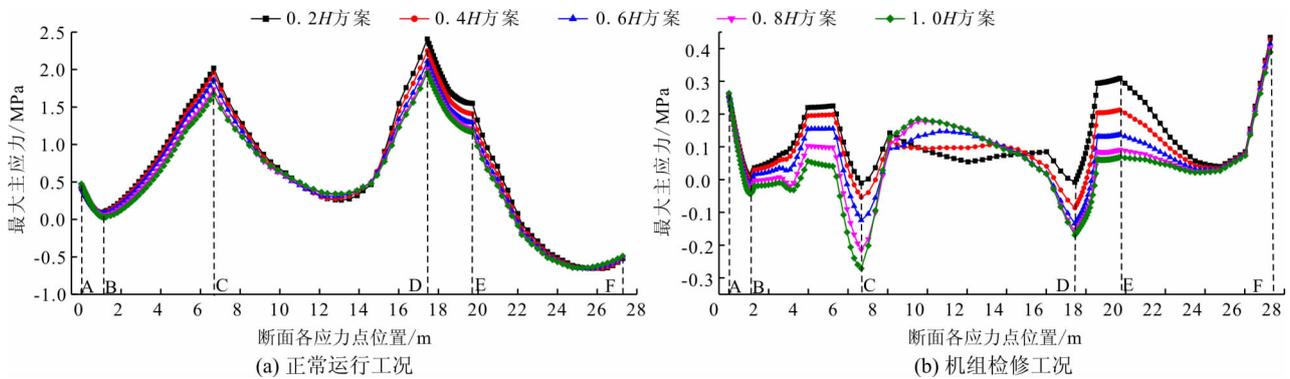


图8 各方案蜗壳 0°断面混凝土最大主应力

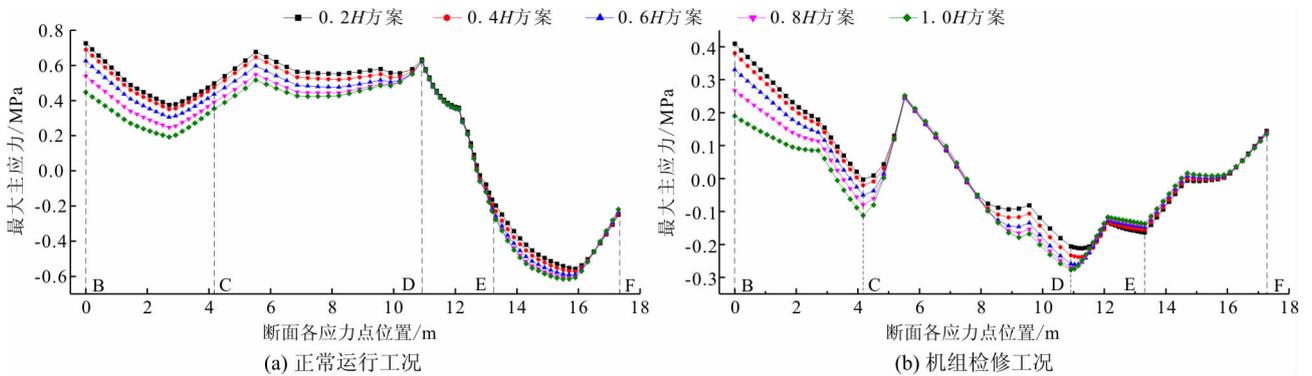


图9 各方案蜗壳 90°断面混凝土最大主应力

随着水平止水上游段逐渐上抬,蜗壳 90°断面处钢衬 Mises 应力大部分都呈减小趋势,限于篇幅,未给出各方案钢衬 Mises 应力的变化规律图。当水平止水位置由距蜗壳进口断面底板 0.2H 上抬至 1.0H 时,正常运行工况下,钢衬 Mises 应力最大减小幅度为 1.94 MPa,机组检修工况时,钢衬各部位 Mises 应力略小于

正常运行时,且最大减小幅度只有 0.76 MPa。

#### 4.3 水平止水布置在蜗壳高程范围内(上游连通)

由以上计算分析可知,横缝水平止水在蜗壳高程范围内逐渐上抬对蜗壳混凝土及内敷钢衬应力改善效果较小,主要是由于水平止水与上游竖直止水相交处呈闭合状态,蜗壳附近厂房横缝面受下游水头作用,而

蜗壳内部受上游水头作用。为进一步减小蜗壳附近部位应力,将水平止水与上游连通布置,如图10所示,设置上部与下部两道水平止水,其中下部水平止水位于蜗壳进口底板上表面高程处不变,并与上、下游竖向止水相接,上部水平止水上游与上游竖向止水连通,下游至蜗壳外围混凝土下游边界,高程分别设置在距离蜗壳进口断面底板上表面 $0.2H$ 、 $0.4H$ 、 $0.6H$ 、 $0.8H$ 及 $1.0H$ 处( $H$ 同上)。

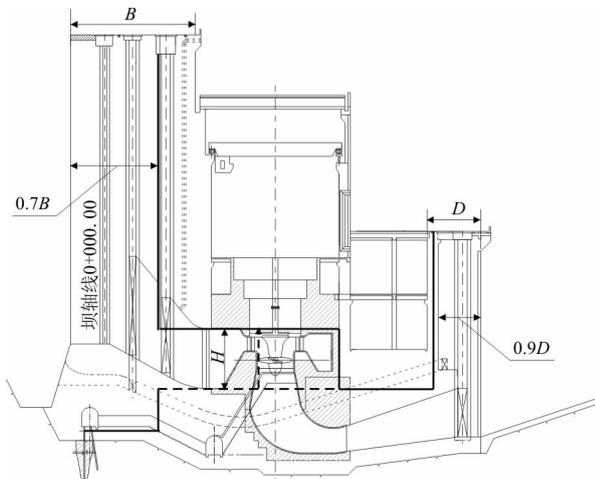


图10 横缝水平止水位置变化示意图  
(蜗壳高程范围内上游连通)

当水平止水由距离蜗壳进口断面底板 $0.2H$ 上抬至 $1.0H$ 时,正常运行工况下,由于上游连通方案中,在蜗壳附近厂房横缝面水压力由上游水头控制,随着上部水平止水的上抬,蜗壳进口断面处混凝土各关键点的主拉应力都在逐渐减小,减小量为 $62.2\% \sim 76.6\%$ ;蜗壳进口断面处钢衬各部位 Mises 应力也都呈减小趋势,最大减小幅度达 $9.45 \text{ MPa}$ 。机组检修工况下,检修门之后的流道内无水,蜗壳进口断面处混凝土各关键点的主拉应力都较小,最大值为 $0.87 \text{ MPa}$ ;蜗壳进口断面处钢衬各部位 Mises 应力最大减小幅度达 $6.56 \text{ MPa}$ 。可见,水平止水与上游连通布置方案中,蜗壳部位混凝土的主应力与钢衬各部位 Mises 应力减小效果较上游闭合方案更为明显。

## 5 结论

本文以轴流式机组厂房坝段为研究对象,考虑正常运行和机组检修两种运行工况,分析不同水平止水布置方案下尾水管和蜗壳结构的应力变化规律,主要研究结论如下:

(1)横缝水平止水布置在尾水管弯肘段范围内时,随着止水的上抬,尾水管部位混凝土及内敷钢衬

拉应力均减小,因此实际工程计设中建议将水平止水下游段布置在尾水管扩散段出口顶部高程附近。

(2)横缝水平止水布置在蜗壳高程范围内时,上游连通方案比上游闭合方案缓解蜗壳附近应力效果更佳,因此实际工程计设中建议水平止水上游段布置在蜗壳进口断面顶板下表面附近,且与上游竖向止水连通。

## 参考文献:

- [1] 张存慧,马震岳,张运良. 三峡右岸电站主厂房结构的振动应力分析[J]. 水力发电学报,2010,29(6):144-148.
- [2] 张启灵,伍鹤皋,李端有. 水电站地面厂房抗震措施研究[J]. 水力发电学报,2012,31(5):184-190.
- [3] 张辉东,王日宣,王元丰. 大型水电站厂房结构地震时程响应非线性数值模拟[J]. 水力发电学报,2007,26(4):96-102.
- [4] 邹金波. 大坝横缝止排水系统施工工艺改进的探讨[J]. 水力发电,2014,40(9):20-21+57.
- [5] JIA Jinsheng, ZHENG Cuiying, HAO Jutao, et al. Studies for the transverse joint waterstops at Xiaowan dam [J]. The international Journal on Hydropower and Dams, 2006, 13(1):50-58.
- [6] HAO Jutao. Adaptability of slab joint waterstops to very high CFRDs [J]. International Journal on Hydropower and Dams, 2010, 17(1):78-83.
- [7] 周伟. 河床式水电站厂房坝段横缝止水布置形式研究[D]. 西安:西安理工大学,2008.
- [8] 周炎. 水电站厂房止水设施效果调查分析之一:厂房止水结构布置型式[J]. 华东水电技术,1990(1):14-20.
- [9] 李守义,肖静. 河床式水电站厂房横缝止水布置形式研究[J]. 水力发电学报,2014,33(5):165-168.
- [10] 向功兴,杨亚军,伍鹤皋,等. 河床式厂房止水布置和混凝土蜗壳座环柔度[J]. 武汉大学学报,2010,43(1):46-50.
- [11] 水电勘测设计标准化技术委员会. 水电站厂房设计规范 NB/T 35011-2013 [S]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [12] 中华人民共和国水利部. 水工建筑物荷载设计规范 SL 744-2016 [S]. 北京:中国水利水电出版社,2016.
- [13] 程帅,李守义,司政,等. 水电站厂房自振频率与影响因素的关联度分析[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(3):190-196+203.
- [14] 程帅. 横缝止水布设对轴流式机组厂房结构的影响研究[D]. 西安:西安理工大学,2017.
- [15] 徐芝纶. 弹性力学简明教程:第四版[M]. 北京:高等教育出版社,2013.
- [16] 龚曙光,边炳传. 有限元基本理论及应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2013.
- [17] 邹建奇,崔健. 材料力学[M]. 北京:清华大学出版社,2015.