

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230035

横缝水平止水对灯泡贯流式水轮机组流道的影响

李 强, 彭映凡, 张卫东

(湖南省水利水电勘测设计规划研究总院有限公司, 湖南 长沙 410007)

摘要: 为定性定量掌握横缝水平止水的安装高程对灯泡贯流式机组厂房流道各部位结构应力的影响, 以某工程项目的厂房流道结构为例, 建立了三维有限元整体模型, 研究了机组间横缝水平止水在一定安装高度范围内变动时厂房流道各部位结构的应力变化规律。结果表明, 水平止水的安装高度对结构应力影响显著, 合适的水平止水安装高度可改善结构受力, 综合考虑各因素, 最优的水平止水安装高程为可安装区间高度的70%, 为灯泡贯流式水轮机组厂房流道横缝止水结构设计提供参考。

关键词: 灯泡贯流式电站厂房流道; 横缝水平止水; 三维有限元; 应力规律; 结构设计

中图分类号: TV312 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)07-0193-04

1 引言

灯泡贯流式水轮机组水电站无需修建在高山峡谷中, 可广泛适用于丘陵和平原地区, 为低水头电站, 其发电效率不依赖于水头, 与流道的过流能力直接相关, 即过流能力越大, 机组的发电量就越多。为提高机组的过流能力, 则需设计较大尺寸的流道。一旦机组检修, 流道内部放空, 流道机组间横缝仍存在外水压力, 内外水压力的不平衡会对机组的稳定运行不利。目前主要是关于贯流式电站厂房抗震方面^[1,2], 鲜有从止水的安装位置及其对结构应力影响方面进行研究。李守义等^[3]将流道结构简化为平面框架结构, 利用结构力学的方法分析研究了灯泡贯流式电站厂房, 并对比计算了结构的止水、内力和配筋。但该方法存在明显不足, 一是由于流道前后各部位的重量差异较大, 基础的不平衡剪力获取较为困难; 二是流道结构空洞较多, 且多为渐变曲面设计, 简化为平面框架计算会导致配筋量过大, 并不经济。根据《水电站厂房设计规范》^[4]要求止水的布置应有利于结构的受力。为定性定量掌握水平止水安装高度对厂房流道各部位应力的影响建立了三维有限元模型, 研究了不同横缝水平止水安装高度对厂房流道各关键部位应力的影响, 获得了一些有益的结论, 可供同类工程相关结构设计参考。

2 三维有限元模型构建

2.1 基本情况

某工程水电站厂房采用灯泡贯流式发电机组, 厂房的主要结构包括进口底板、进口边墙、进口胸墙、上游防洪墙、流道中段、水轮机井、尾水管、出口底板、出口边墙和下游防洪墙等, 见图1。

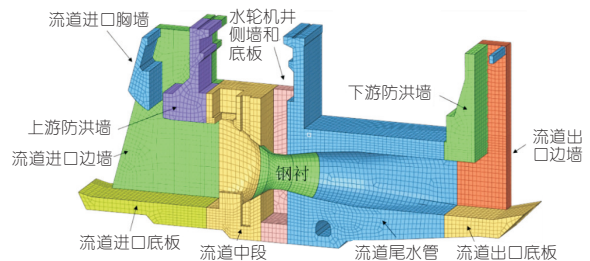


图1 厂房流道各部位示意图

Fig. 1 Diagram of various parts of plant flow channel

2.2 计算工况及荷载组合

根据《水电站厂房设计规范》^[4], 计算考虑正常运行和检修两种工况, 与之对应的荷载组合见表1。正常运行工况时上、下游水位分别为30.61、23.68 m; 检修工况时上游水位与正常工况相同, 下游水位略低于正常运行工况为21.72 m。

2.3 有限元模型和其他条件

有限元计算模型见图2, 单元总数为168 446个, 节点总数为191 808个。厂房结构混凝土为C20, 基岩为弱风化花岗岩, 按无质量基础考虑, 杨氏模量 E 为20.0 GPa, 泊松比 μ 为0.22, 基岩

收稿日期: 2023-01-08, 修回日期: 2023-02-01

作者简介: 李强(1979-), 男, 高级工程师, 研究方向为水工建筑物设计, E-mail: lq202222001@163.com

表 1 荷载组合

Tab. 1 Load combination

工况	结构自重	上部结构及设备重	水重	内水压力	上下游水压力	横缝缝面水压	扬压力	机组作用力
检修	✓	✓				✓	✓	
正常运行	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

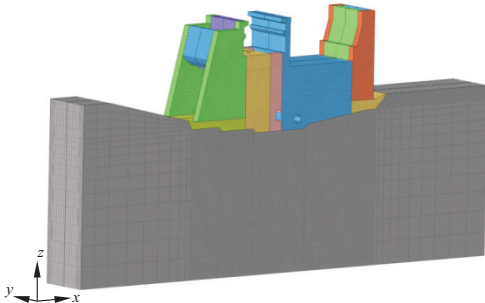


图 2 某工程贯流式厂房流道三维计算网格图

Fig. 2 Finite element calculation model diagram of power house

的边界条件均为法向约束。

2.4 不同止水布设方案

对横缝竖向止水,为保证各工况下内水压力和缝面水压力的平衡,经分析,横缝竖向止水需布置在进出口检修门槽对应处。对横缝水平止水,为定性定量研究其安装位置对结构各关键部位的影响,计算高程分别取 9.0、12.0、15.0、18.0、21.0 m,横缝止水布置见图 3。

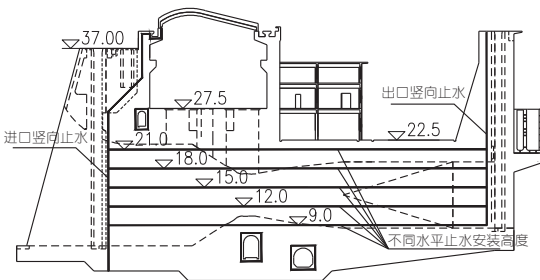


图 3 不同水平止水布设方案示意图(单位:m)

Fig. 3 Installation height diagram of water stop at different levels

3 不同止水安装高度对结构应力的影响

表 2 为不同水平止水安装高度情况下厂房流道各部位最大拉应力计算结果。图 4 为正常运行工况和检修工况下不同止水高度与各部位最大拉应力关系图。由表 2、图 4 可知,止水高度从 18.0 m 升到 21.0 m,结构各部位的拉应力尽管是在减小,但变幅不大,可见当水平止水安装高度到达一定高度后,对结构应力的影响并不明显。

表 2 不同止水安装高度情况下厂房不同部位最大拉应力

Tab. 2 Stress of different parts of the plant under

结构部位	不同止水高度/m									
	9		12		15		18		21	
	正常	检修	正常	检修	正常	检修	正常	检修	正常	检修
进口底板	1.14	0.20	0.84	0.19	0.60	0.19	0.58	0.18	0.57	0.18
进口边墙	0.81	0.06	0.69	0.11	0.50	0.23	0.45	0.26	0.44	0.27
进口胸墙	0.52	0.54	0.47	0.53	0.42	0.51	0.41	0.50	0.40	0.49
上游防洪墙	1.09	0.57	0.97	0.52	0.81	0.46	0.72	0.42	0.68	0.39
流道中段	3.23	0.87	3.04	0.65	2.74	0.41	2.58	0.37	2.53	0.36
水轮机井	0.33	0.35	0.32	0.34	0.31	0.31	0.30	0.30	0.30	0.29
尾水管	1.46	0.93	1.33	0.89	1.14	0.79	1.046	0.73	1.02	0.72
出口底板	0.52	0.31	0.38	0.25	0.36	0.24	0.35	0.24	0.35	0.24
出口边墙	0.15	0.13	0.11	0.14	0.09	0.15	0.07	0.16	0.05	0.17
下游防洪墙	0.81	0.74	0.78	0.71	0.72	0.64	0.68	0.59	0.67	0.58

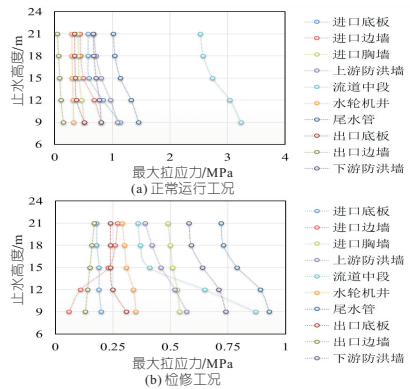


图 4 厂房流道各部位在正常运行工况、检修工况下不同止水高度与第一主应力关系图

Fig. 4 Relationship between different water stop heights and first principal stress of each part under normal working condition and maintenance condition

图 5 为水平止水安装高度 21.0 m 情况下进口底板、进口边墙、进口胸墙和上游防洪墙拉应力

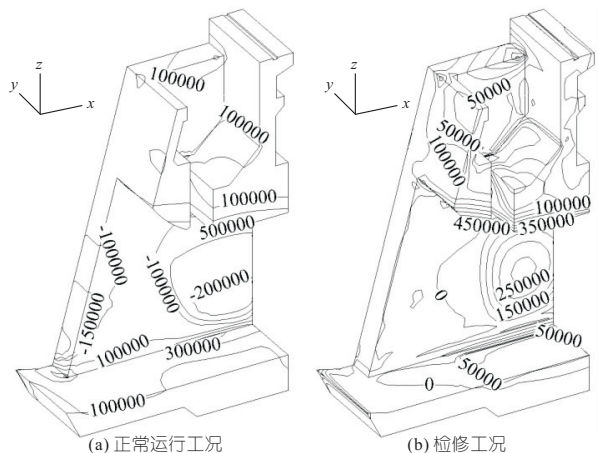


图 5 水平止水安装高度 21.0 m 情况下进口底板、进口边墙、进口胸墙和上游防洪墙第一主应力等值线图(单位:Pa)

Fig. 5 First principal stress contour of inlet bottom plate, inlet side wall, inlet breast wall and upstream flood wall at 21.0 m installation height of horizontal water stop

等值线图。由图 5、表 2 可知,对进口底板,最大拉应力出现在与进口边墙相交处,对正常运行工况水平止水安装高度越高,进口底板的拉应力越低,底板拉应力最大从 1.14 MPa 降到 0.57 MPa,降幅为 50%,对检修工况,由于检修时底板上部的水重和基底的扬压力基本平衡,止水高度对进口底板的影响很小;对进口边墙,最大拉应力出现在进口边墙中下部的的外侧,对正常运行工况水平止水安装高度越高,进口边墙的拉应力越低,底板拉应力最大从 0.81 MPa 降到 0.44 MPa,降幅为 46%,检修工况时刚好相反,检修时最大拉应力出现在进口边墙中下部的的内侧,且随止水高度的增加,拉应力逐渐增大,但整体来看,检修工况进口边墙拉应力水平较低;对进口胸墙,无论是正常运行工况或检修工况,结构的拉应力随止水高度的变化均不明显,主要原因是各工况下结构的内水和外水压力均基本平衡。对厂房上游防洪墙,两工况下均表现为水平止水越高,结构拉应力越低,最大拉应力从 1.09 MPa 降到 0.68 MPa,降幅为 38%。

图 6 为水平止水安装高度 21.0 m 情况下流道中段拉应力等值线图。由图 6 可知,最大拉应力出现在管型座上支柱附近混凝土处,同样表现为水平止水安装高度越高,结构拉应力越低,最大拉应力从 3.23 MPa 下降到 2.53 MPa,降幅达 22%,对检修工况,最大拉应力出现在流道方形断面顶部跨中处,最大值从 0.87 MPa 降到 0.36 MPa,降幅达 59%。

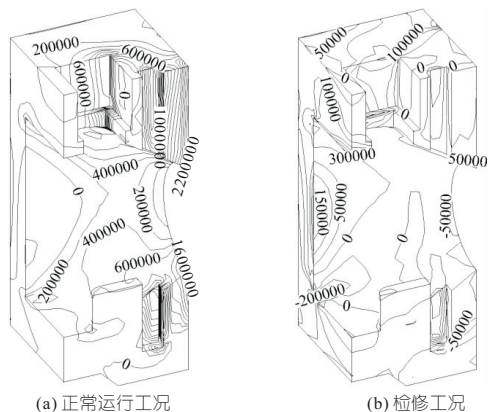


图 6 水平止水安装在 21.0 m 高程情况下流道中段(管型座段)第一主应力等值线图(单位:Pa)

Fig. 6 First principal stress contour in the middle section of flow channel with 21.0 m horizontal water stop installation height

图 7 为水平止水安装高度 21.0 m 情况下尾水管拉应力等值线图。由图 7 可知,在正常运行工况钢衬内水压力的作用下,尾水管进口处出现最大

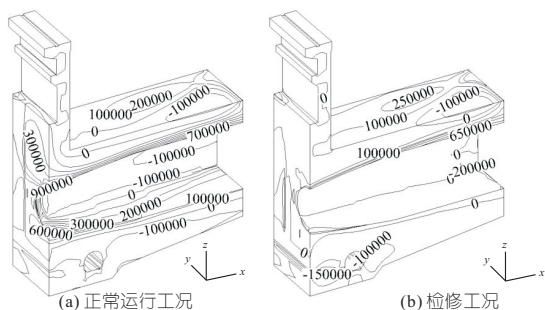


图 7 水平止水安装在 21.0 m 高程情况下尾水管第一主应力等值线图(单位:Pa)

Fig. 7 First principal stress contour of draft tube at 21.0 m installation height of horizontal water stop

拉应力,同样表现为水平止水安装高度越高,结构拉应力越低,拉应力最大从 1.46 MPa 下降到 1.02 MPa,降幅为 30%,对检修工况来说,最大拉应力从 0.93 MPa 下降到 0.72 MPa,降幅为 23%。

图 8 为水平止水安装高度 21.0 m 情况下出口底板、出口边墙和下游防洪墙拉应力等值线图。由图 8、表 2 可知,出口底板,水平止水的安装高度对结构应力的影响不明显,但仍表现为水平止水越高,结构拉应力越低;对出口边墙,基本规律和进口边墙的影响类似,为正常运行工况,水平止水越高越有利,检修工况,水平止水越低越有利;对厂房下游防洪墙,在结构自重的作用下,最大拉应力出现在流道出口顶部跨中,同样表现为水平止水安装高度越高,结构的拉应力越低,拉应力最大从 0.81 MPa 降到 0.67 MPa,降幅为 17%,对检修工况,最大拉应力出现在尾水管末端方形断面顶部跨中处,最大拉应力值从 0.74 MPa 降到 0.58 MPa,降幅为 21%。整体表现为正常运行工

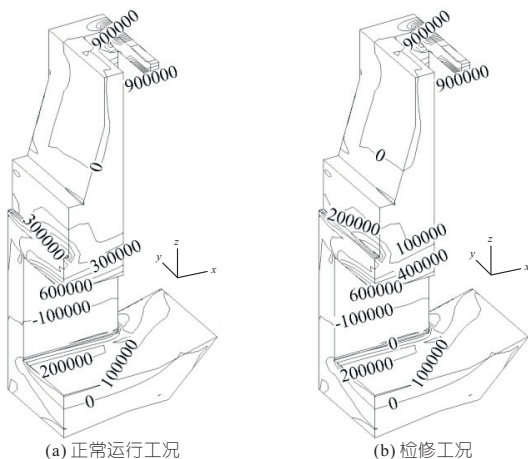


图 8 水平止水安装在 21.0 m 高程情况下出口底板、出口边墙和下游防洪墙最大第一主应力等值线图(单位:Pa)

Fig. 8 First principal stress contour of outlet bottom plate, outlet side wall and downstream flood control wall at 21.0 m installation height of horizontal water stop

况的结果拉应力大于检修工况,原因是检修工况下游水位较低,结构所受浮托力较小。

综上可知,水平止水的安装高度对结构应力影响显著。考虑到过高的水平止水加上局部裂缝可能导致厂房内部潮湿,对控制设备和操作人员不利。交通廊道的环向止水顶高程为 7.5 m,尾水副厂房底高程为 22.5 m,即水平止水的安装高度区间在 7.5~22.5 m 之间,而最优的止水安装高程为 18.0 m,即最优的水平止水安装高程为可安装区间高度的 $(18.0-7.5)/(22.5-7.5)=70\%$ 。

4 结论

a. 对进口底板、进口胸墙、上游防洪墙、流道中段、尾水管、出口底板和下游防洪墙,水平止水的安装高度越高,结构最大拉应力越低,对结构越有利。

b. 对进口边墙和出口边墙,在正常运行工况下,水平止水的安装高度越高,结构越有利,在检修工况下,水平止水的安装高度越高,结构越不利。

c. 综合考虑各方面因素,水平止水安装在可安装区间高度的 70%为最佳。

参考文献:

[1] 苏礼邦,刘云贺,李守义. 灯泡贯流式水电站厂房坝段的抗震分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(7):202-206.

[2] 李永新. 某灯泡贯流式水电站不对称厂房抗震分析[J]. 水电能源科学,2012,30(8):84-86,8.

[3] 李守义,安学民,杨胜,等. 灯泡贯流式水电站厂房水平止水布置研究[J]. 水资源与水工程学报,2009,20(1):68-71.

[4] 中华人民共和国水利部. 水电站厂房设计规范: SL266-2014[S]. 北京:中国水利水电出版社,2014.

Influence of Horizontal Water Stop Layout for Transverse Joint on Stress of Bulb Tubular Unit Power House

LI Qiang,PENG Ying-fan,ZHANG Wei-dong

(Hunan Water Resources and Hydropower Survey, Design, Planning and Research Co., Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: In order to qualitatively and quantitatively grasp the influence of the installation elevation of horizontal water stops at transverse joints on the structural stress of the bulb tubular power house,taking a certain engineering project as an example, a three-dimensional finite element model of the powerhouse was established to analyze the stress of the structure on the condition of the horizontal water stops changing within a certain range. The results show that the installation height of horizontal waterstops has a significant impact on the stress of structure, and an appropriate installation height of horizontal waterstops can improve stress of structure. Taking into account various factors, the optimal horizontal water stop installation height is 70% of the installable height, which can provide a reference for the design of the transverse joint water stop of the bulb tubular power house.

Key words: bulb tubular power house; horizontal water stop of transverse joint; three-dimensional finite element; stress change law; structural design

(上接第 200 页)

Study on Vortex Zone of Draft Tube and Improvement Measures of Francis Turbine

WU Zai-qiang¹, LIN Ya-tao¹, GUAN Ying-bo¹, CHEN Ze-qin¹, XU Jun-hui², ZHENG Yuan³

(1. Fujian Provincial Electric Power Company Limited Electric Research Insititute, Fuzhou 350007, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

3. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Due to the long-term operation in the low-load area, the hydropower unit deviates from the optimal operation area, resulting in large vibration of the unit, poor flow state of water flow, and other adverse consequences, such as cracks in runner blades and serious cavitation of the unit. In view of the complex flow conditions in the draft tube, this paper proposes two improvement schemes. Based on RANS equation, the standard SST $\kappa-\omega$ turbulence model is adopted to calculate the steady and unsteady solutions for three operating conditions of $0.45P_r$ (P_r is rated output), $0.60P_r$, and $0.75P_r$. The results show that the installation of the guiding device can effectively reduce the eccentric vortex band of the draft tube, and greatly reduce the pressure pulsation amplitude, so as to reduce the vibration of the unit. Considering the streamline of draft tube, vortex zone of draft pipe, turbine efficiency and pressure pulsation amplitude, especially the importance of pressure pulsation intensity to the stable operation of the turbine, it is concluded that the symmetrical arrangement of two diversion plates at the inlet of the draft tube has the better improvement effect on the Francis turbine. The results provide a certain theoretical basis for the safe operation of the hydraulic turbine unit under low load.

Key words: Francis turbine; low load; unsteady flow; pressure pulsation; guiding device