

基于 ANSYS 的乌东德水电站衬砌钢衬设计及改进

廖湘辉, 赵楚, 丁明

(三峡大学 机械与动力学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 根据乌东德水电站左岸导流隧洞进水口渐变段的结构形式, 设计了一种大型双曲面衬砌钢衬。利用有限元软件 ANSYS 对设计方案进行了静力学分析, 结果表明初始方案的结构应力偏大, 且重量过大, 有必要对方案进行改进。基于 WORKBENCH 的拓扑优化结果, 提出了一种改进方案, 并对改进方案进行了验证。改进方案与初设设计方案相比减轻了 47.0% 的重量, 节约了成本, 且刚度和强度均满足施工要求。可为类似工程提供有效借鉴。

关键词: 衬砌钢衬; ANSYS; WORKBENCH; 拓扑优化; 改进; 乌东德水电站

中图分类号: TV 539; TV 34 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)03-0589-04

Design and improvement of steel liner of Wudongde hydropower station based on ANSYS

LIAO Xiang hui, ZHAO Chu, DING Ming

(College of Mechanical and Power Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: According to the structural form of the transition of the water intake area in the left diversion tunnel of Wudongde hydropower station, a large hyperbolic steel liner was designed. The static analysis of the design scheme was conducted using the finite element software ANSYS. The results showed that the structural stress of the initial design scheme of mold is high and the weight is large, so the design scheme needs to be improved. According to the topological optimization results based on WORKBENCH, an improved design scheme was proposed and verified, which can decrease the weight of mold by 47.0% compared with the original scheme. Meanwhile the cost was saved and the stiffness and strength of the mold satisfied the construction requirement. The research results can provide reference for the similar engineering projects.

Key words: lining steel liner; ANSYS; WORKBENCH; topological optimization; improvement; Wudongde hydropower station

乌东德水电站位于四川会东县和云南禄劝县交界的金沙江河道上, 共设有 5 条导流隧洞, 其中 1 号、2 号导流隧洞布置于左岸地下电站右侧, 洞长分别为 1 713 m 和 1 640 m。这两条导流隧洞的进水口段结构形式相同, 断面均采用中分城门洞型^[1], 总宽 21.5 m, 中墩宽 5 m, 各边孔宽 8.25 m, 边孔的顶部为圆弧形式; 为获得较好的水力特性, 沿水流方向设计为椭圆曲线渐变形式, 进水口段的洞顶为双曲面结构。乌东德水电站采用围堰导流^[2]的方式进行施工, 左岸导流隧洞的进水口段应用了一种双曲面钢衬进行衬砌。该钢衬整体结构庞大, 受力情况复杂。本文拟利用 ANSYS 和 WORKBENCH 软件, 对钢衬进行有限元建模和分析, 对其结构进行拓扑优化设计^[4], 为节约生产成本、提高安全性提供重要参考。

1 钢衬的整体结构

钢衬主要包括 8 组(沿水流方向依次编号为 1 号至 8 号, 见图 1)共 31 榀钢桁架, 一般每组有 4 榀钢桁架, 但 1 组只有 3 榀。钢衬在断面上为左右对称结构, 主要由两侧支撑立柱、中支撑立柱和钢衬主体组成。其中钢衬主体由左右弧形背架、直线段背架及左右模板组成; 左右弧形背架和直线段背架之间通过螺栓连接; 模板焊接在弧形背架的底侧。左右弧形背架及直线段背架均设计为标准部件, 在满足施工要求的前提下减小了加工难度。两侧支撑立柱和中支撑立柱的底部均固定在其对应的埋件上, 顶部则与钢衬主体相连。根据浇筑高程不同, 改变两侧支撑立柱和中支撑立柱的高度, 即可实现钢衬整体沿水流方向高度的变化。

收稿日期: 2014-06-23 修回日期: 2014-08-07 网络出版时间: 2015-05-14

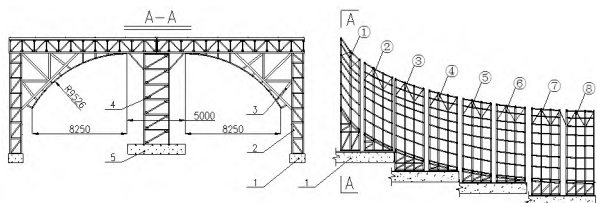
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150514.0837.005.html>

基金项目: 三峡大学研究生科研创新基金

作者简介: 廖湘辉(1964), 男, 湖北宜昌人, 教授, 硕士生导师, 主要从事水电工程施工技术的研究以及与之配套专用施工设备研制工作。

E-mail: 380320975@qq.com

通讯作者: 赵楚(1991-), 男, 湖北黄冈人, 主要从事特种装备与结构设计技术方面的研究。E-mail: 1253098655@qq.com



1. 侧支墩及埋件; 2. 侧支撑立柱; 3. 钢衬主体; 4 中支墩立柱;
5. 中支墩及埋件

图 1 钢衬整体结构

Fig. 1 The overall structure of steel liner

2 基于 ANSYS 的静力学分析

2.1 有限元建模及网格划分

钢衬的整体结构复杂, 顺水流方向跨度大, 但每组钢桁架都能单独承载。为方便计算, 选取承载最大的一组钢桁架进行有限元建模和分析。钢衬衬砌段采用分层浇筑的施工方式, 当模板开始承受混凝土荷载时, 其侧支撑立柱和中支撑立柱都已经浇筑至混凝土内部, 故只需对钢衬主体进行有限元建模和分析。

弧形背架和直线段背架的内外主弦杆、斜腹杆采用 BEAM 188 单元模拟, 竖腹杆采用 LINK 180 单元模拟; 模板的面板采用 SHELL 181 单元模拟, 纵、环筋采用 BEAM188 单元模拟^[5]。定义材料的弹性模量为 2.06×10^6 MPa, 泊松比为 0.3 ^[6]。建立的单组(4 榀)钢衬主体的有限元模型见图 2。

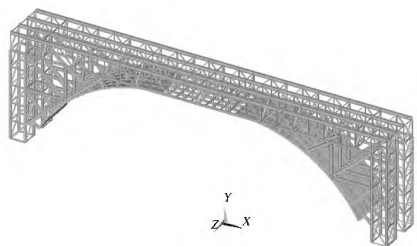


图 2 钢衬整体有限元模型

Fig. 2 The finite element model of steel liner

2.2 边界条件及载荷

根据钢衬主体的实际安装载情况, 对其底侧的 8 个支点施加 X、Y、Z 三个方向的位移约束; 对其与中支撑立柱相连的 8 个中部支点施加 Y 方向上的位移约束。

钢衬弧形面板上不同位置上的混凝土浇筑厚度不同, 最小 2.5 m, 最大 7.26 m, 采用分层浇筑的方法进行施工。在此选取浇筑到最高层的工况(此刻局部面板的混凝土承载厚度达到最大值 7.26 m)进行分析。为方便加载, 将弧形面板沿弧等分为 10 段, 分别计算出每段弧形面板上混凝土自重及侧压力的径向分量, 将径向分量以面载荷的形式加载到对应的弧形面板上。其中混凝土自重按公式 $F = \rho_c H$ 进行计算, 侧压力按公式 $F = 0.22 \rho_c t_0 \beta_1 \beta_2 v^2$ 计算, 振捣和倾倒产生的载荷都取标准值^[7-8]。最终得出从低至高各圆弧段上承受的混凝土径向载荷情况见表 1。

此外, 钢衬的自重通过定义重力加速度 g 与材料密度 ρ 来施加。

表 1 模板不同圆弧段承受的径向载荷

Tab. 1 The radial loads at different arcs of the template

序号	支撑混凝土厚度/m	支撑混凝土自重径向分量/MPa	混凝土侧压力径向分量/MPa	径向总等效载荷/MPa
1	7.263	0.107	0.043	0.150
2	6.427	0.111	0.040	0.151
3	5.652	0.109	0.037	0.146
4	4.947	0.105	0.033	0.138
5	4.319	0.098	0.029	0.127
6	3.776	0.091	0.025	0.116
7	3.324	0.084	0.020	0.104
8	2.966	0.078	0.015	0.093
9	2.708	0.073	0.010	0.083
10	2.552	0.064	0	0.064

2.3 静力学分析结果

钢衬的静力学分析结果见图 3。

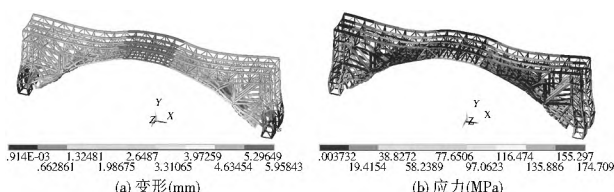


图 3 钢衬的变形云图和应力云图

Fig. 3 The deformation and stress distribution of steel liner

计算结果表明: 钢衬主体的整体最大变形量为 6.0 mm, 发生在模板的中部, 主要是由于承受混凝土的作用力引起的, 符合实际情况且满足刚度要求 (< 10 mm); 钢衬主体的最大应力值为 174.7 MPa, 强度安全因数 $n_s = 235/174.7 = 1.35$, 安全系数较小; 在 ANSYS 中提取单组钢衬主体的重量为 32.8 t, 成本较高; 有必要对钢衬主体的结构形式进行改进。

3 基于 WORKBENCH 的拓扑优化

利用 WORKBENCH 的 DM 模块建立了钢衬主体部分的三维模型, 定义材料的弹性模量为 200 GPa, 泊松比为 0.3。为获得较精确的计算结果, 设置网格单元尺寸为 300 mm, 采用四面体网格划分方式^[9-10]进行网格划分。对钢衬底部沿水流方向的 4 条边界施加固定约束, 中部的 2 条边界施加竖直方向上的位移约束; 在两侧的弧形面上施加面载荷。以减小 60% 的重量作为优化条件^[11], 对钢衬主体进行拓扑优化^[12-14], 结果见图 4(不重要的区域可以根据实际需要进行去除或保留)。进行结构改进时需要根据实际情况进行处理, 不需要完全与优化结果一致^[15]。

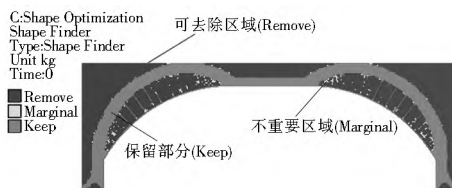


图 4 钢衬主体的拓扑优化结果

Fig. 4 The topological optimization results of the main body of steel liner

由图 4 可知,钢衬主体的主要承力部分呈弧形区域,故可考虑将其断面的结构轮廓由方形改为弧形。结合实际情况,将钢衬主体的断面结构改进为如图 5 所示的结构形式。

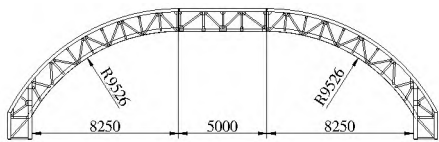


图 5 改进后的钢衬主体断面图

Fig. 5 The sectional view of the improved main body of steel liner

4 基于 ANSYS 的改进方案验算

按图 5 中的结构形式对改进后的钢衬主体进行建模分析。钢衬主体模型的单选类型、载荷分布及边界条件均与改进前相同。求解完成后其静力学结果见图 6。

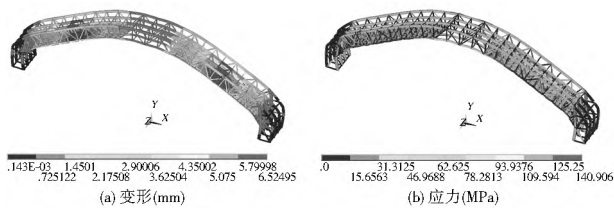


图 6 钢衬的变形云图和应力云图

Fig. 6 The deformation and stress distribution of steel liner

计算结果表明:改进后的钢衬主体的整体最大变形量为 6.5 mm,发生在模板的中部,符合实际情况且满足刚度要求 (< 10 mm);最大应力值为 140.9 MPa,发生在直线段背架与弧形背架相连接的区域,符合实际情况,强度安全因数 $n_s = 235/140.9 = 1.67 > 1.6$,满足施工的强度要求;提取单组钢衬主体的重量为 17.4 t,较初始方案减轻了 47.0%,优化效果较好。

5 结论

(1) 将拓扑优化设计理论应用到钢衬主体结构的设计中,提高了设计效率,且取得了较好的优化效果。

(2) 改进后的钢衬主体的最大应力减小了 19.3%,单组重量减小了 47.0%,提高了整体结构的可靠性,且降低了成本。

(3) 在实际施工中,应尽量保证钢衬的两侧对称浇筑,使钢衬受到的混凝土载荷的切向分量互相抵消。

此双曲面衬砌钢衬已经在乌东德水电站左岸导流隧洞工程中得到成功应用,应用效果良好,可为今后类似工程提供有效借鉴。

参考文献 (References):

[1] 王晓明,黄孝泉,夏露,等.乌东德坝区拱座岩体三维裂隙连通率特征[J].地球科学—中国地质大学学报,2013(3):655-662. (WANG Xiaoming, HUANG Xiaquan, XIA Lu, et al. Characteristics of three dimensional fracture persistence of abutment rock mass in Wudongde dam area[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2013(3):655-662. (in Chinese))

[2] 杨磊,胡志根.滩坑水电站过水围堰堰型修改模型试验研究[J].水力发电学报,2011(1):57-61. (YANG Lei, HU Zhi gen. Experimental study on modification of the overtopped cofferdams for the Thankeng hydropower station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011(1):57-61. (in Chinese))

[3] 李宁,刘波.城门洞型压力隧洞衬砌限裂配筋设计方法研究[J].岩土力学与工程学报,2013(12):2409-2414. (LI Ning, LIU Bo. Research on Lining reinforcement design method by crack width control for rectangular pressure tunnel with arch crown [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013(12):2409-2414. (in Chinese))

[4] 楼力律,刘鹏鹏,王婷婷,等.三峡升船机工作门启闭机架结构拓扑优化与设计改进[J].南水北调与水利科技,2014(1):158-161. (LOU Lili, LIU Peng peng, WANG Tingting, et al. Topological optimization and structural improvement of hoist frame of ship lift work gate in Three Gorges Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014(1):158-161. (in Chinese))

[5] 廖湘辉,刘欢,章成,等.三峡地下电站上弯段双曲面钢模台车加固及分析[J].机械设计与制造,2011(8):168-170. (LIAO Xianghui, LIU Huan, ZHANG Cheng, et al. Reinforcement and analysis of the hyperbolic steel trolley on upper curve section of Three Gorges Underground Power Station[J]. Machinery Design and Manufacture, 2011(8):168-170. (in Chinese))

[6] 付建科,徐亮,卢泽明,等.葛洲坝二江电站小机组排沙底孔工作门有限元分析[J].三峡大学学报:自然科学版,2011(4):29-31. (FU Jianke, XU Liang, LU Zemin, et al. Finite element analysis of sediment bottom sluice gate of Gezhouba Erjiang Power Plant[J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2011(4):29-31. (in Chinese))

[7] 廖湘辉,陈文琛,孙海涛.基于 ANSYS 的钢模台车顶模架拓扑优化设计[J].水力发电,2013(1):46-48. (LIAO Xianghui, CHEN Wenchen, SUN Haitong. ANSYS-based topological optimization on top form frame design of steel trolley[J]. Water Power, 2013(1):46-48. (in Chinese))

[8] 杨启华.建筑施工手册[M].哈尔滨:哈尔滨地图出版社,2003. (YANG Qihua. Building Construction Manual[M]. Harbin: Harbin Map Publishing House, 2003. (in Chinese))

[9] 丁琳,郑源,张福星.基于流固耦合的垂直轴风机受力分析[J].南水北调与水利科技,2013(4):84-88. (DING Lin, ZHENG Yuan, ZHANG Fuxing, et al. Stress analysis of vertical axis wind turbine based on fluid structure coupling[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013(4):84-88. (in Chinese))

[10] 刘坤,王友林,洪晓燕.基于 ANSYS Workbench 的油缸滚压屈服分析[J].煤矿机械,2013(6):97-99. (LIU Kun, WANG Youlin, HONG Xiaoyan. Rolling yield of oil cylinders simulated by means of ANSYS workbench[J]. Coal Mine Machinery, 2013(6):97-99. (in Chinese))

[11] 夏田,马晓钢,张功学.基于 ANSYS Workbench 的 DVG850 滑座的拓扑优化[J].机械设计与制造,2011(1):107-108. (XIA Tian, MA Xiaogang, ZHANG Gongxue. Topological of the slide of DVG850 based on ANSYS Workbench[J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(1):107-108. (in Chinese))

- [12] 雷晓芳, 雷竹峰. 基于 ANSYS Workbench 的卧式深孔珩磨机机座的多目标优化设计[J]. 机床与液压, 2013(20): 5-7. (LEI Xiaofang, LEI Zhufeng. Multi-objective optimization design for tool base of horizontal deep hole honing machine based on ANSYS workbench [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013 (20): 5-7. (in Chinese))
- [13] 高东强, 毛志云, 张功学, 等. 基于 ANSYS Workbench 的 DVG850 工作台拓扑优化[J]. 机械设计与制造, 2011(2): 62-63. (GAO Dongqiang, MAO Zhizhuyun, ZHANG Gongxue, et al. Topological of the worktable of DVG850 based on ANSYS Workbench [J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(2): 62-63. (in Chinese))
- [14] 徐洪斌, 鄢敏丽, 王伟, 等. 基于拓扑优化方法的分动器箱体轻量化设计[J]. 机械传动, 2014(4): 155-158. (XU Hongbin, YAN Minli, WANG Wei, et al. Lightweight design of transfer based on topological optimization method [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2014(4): 155-158. (in Chinese))
- [15] 查太东, 杨萍. 基于 ANSYS Workbench 的固定支架优化设计[J]. 煤矿机械, 2012(2): 28-30. (CHATAI Dong, YANG Ping. Optimization design of fixed support based on ANSYS workbench [J]. Coal Mine Machinery, 2012(2): 28-30. (in Chinese))
- (上接第 584 页)
- [9] 周钟, 唐忠敏. 锦屏一级水电站枢纽总布置[J]. 人民长江, 2009, 40(18): 18-21. (ZHOU Zhong, TANG Zhongmin. General layout of Jinping I Hydropower Station [J]. Yangtze River, 2009, 40(18): 18-21. (in Chinese))
- [10] 李光伟. 组合骨料在锦屏一级水电站高拱坝混凝土中的应用 [A]. 水库大坝建设与管理中的技术进展—中国大坝协会 2012 学术年会论文集 [C]. 郑州, 2012. (LI Guangwei. The application of composite aggregate in the concrete of Jinping I hydropower station high arch dam [A]. Technical progress in dam construction and management the academic papers of China dam association 2012 annual meeting [C]. Zhengzhou, 2012. (in Chinese))
- [11] 张德荣, 刘毅. 锦屏一级高拱坝温控特点与对策[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2009, 7(4): 270-274. (ZHANG Derong, LIU Yi. Features analysis and countermeasures for concrete temperature control in Jinping I high arch dam [J]. Journal of China institute of water resources and hydropower research, 2009, 7(4): 270-274. (in Chinese))
- [12] 刘毅, 张国新, 王继敏, 等. 特高拱坝施工期数字监控方法、系统与工程应用[J]. 水利水电技术, 2012, 43(3): 33-37. (LIU Yi, ZHANG Guoxin, WANG Jimin, et al. Digital monitoring method and system for construction of super high arch dam and its engineering application [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(3): 33-37. (in Chinese))
- [13] 韦林. 锦屏一级水电站高拱坝 4.5 m 分层混凝土施工试验研究[J]. 四川水力发电, 2012, 31(2): 47-51. (WEI Lin. Experimental study on the 4.5 m lift layer concrete construction of Jinping I hydropower station high arch dam [J]. Sichuan Water Power, 2012, 31(2): 47-51. (in Chinese))
- [14] 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院. 雅砻江锦屏一级水电站大坝混凝土施工技术要求 [R]. 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 2009. (China Hydropower Consulting Group Chengdu survey and Design Institute. Construction technique requirements of dam concrete in Jinping I hydropower station [R]. China Hydropower Consulting Group Chengdu survey and Design Institute. 2009. (in Chinese))
- [15] 王继敏, 段绍辉, 郑江. 锦屏一级拱坝建设关键技术问题 [A]. 水库大坝建设与管理中的技术进展—中国大坝协会 2012 学术年会论文集 [C]. 郑州, 2012. (WANG Jimin, DUAN Shaohui, ZHENG Jiang. The critical technical problem in the construction of Jinping I dam [A]. Technical progress in dam construction and management - the academic papers of China dam association 2012 annual meeting [C]. Zhengzhou, 2012. (in Chinese))