

doi: 10.3724/SP.J.1201.2014.01158

三峡升船机工作门启闭机机架结构拓扑优化与设计改进

楼力律¹, 刘鹏鹏², 王婷婷¹, 徐志峰³, 房 翊³

(1. 河海大学 机电工程学院, 江苏 常州 213022; 2. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098;
3. 江苏武进液压启闭机有限公司, 江苏 常州 213131)

摘要: 三峡升船机下闸首工作门采用液压启闭机启闭。若按照传统方法设计启闭机机架, 虽然安全, 但结构自重大。采用有限元分析软件对机架结构进行静力学分析, 获得结构折算应力的分布情况, 再通过机架的结构拓扑优化, 以结构的自重作为目标函数, 得出了结构刚度最大情况下体积减少 25% 的材料分布伪密度分布。在此基础上, 兼顾结构的制造性要求, 通过改变局部结构形式、增删加强筋、改变板材厚度等手段对机架结构进行了设计改进。改进结果不仅充分满足了强度、刚度要求, 且有效降低了结构的自重。

关键词: 启闭机机架; 结构优化; 拓扑优化; 有限元分析

中图分类号: TV 34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)01-0158-04

Topological Optimization and Structural Improvement of Hoist Frame of Ship Lift Work Gate in Three Gorges Project

LOU Li lv¹, LIU Peng peng², WANG Ting ting¹, XU Zhi feng³, FANG Yi³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Jiangsu Wujin Hydraulic Hoist Co., Ltd, Changzhou 213131, China)

Abstract: Hydraulic hoist is used for the open and close of the lower head work gate of ship lift in Three Gorges Project. The hoist frame is safe if the traditional design method is applied, but it has heavy self weight. The structure of hoist frame was performed static analysis using the finite element software to obtain the distribution of equivalent stress. In order to improve the initial design of hoist frame, the topological optimization of structure was performed. Based on the objective function of self weight, the material distribution pseudo density of the structure was obtained from the maximum structural stiffness with 25% decreasing of volume. On the basis of topological optimization results and requirements for manufacture, the frame structure was improved by the measures such as local structural change, adding or removing reinforcing ribs, and modification of plate thickness. The modified results can not only meet the requirements of strength and stiffness, but also decrease the self weight effectively.

Key words: hoist frame; structural optimization; topological optimization; finite element analysis

由于水利水电工程中闸门的水头越来越高, 闸门启闭机向大型化和专用化发展, 并广泛采用了液压技术。三峡水利枢纽工程中, 在深孔泄洪工作门、导流深孔门、船闸、电站进水口工作门、升船机闸首工作门、输水廊道人字门等处均采用了液压启闭机^[1]。液压启闭机机架金属结构部分通常是参照 GB 50017-2003《钢结构设计规范》进行设计和计算校核。为了满足强度、刚度和稳定性的要求, 启闭机启门力的提升必然使得支撑启闭机的机架金属结构的尺寸增大, 用料增多。

为了降低材料的用量, 减轻机架金属结构的自重, 本文通过分析机架在受到荷载作用后的应力、变形情况, 对其结

构进行一些符合力学原理的改进和优化。

1 三峡升船机下闸首工作门启闭机机架初步设计

1.1 下闸首工作门及其启闭

下闸首设备布置需要满足与船厢的正常对接。根据船闸通航水位变幅以及下游最高水位的运行要求, 布置有下沉式挡水工作闸门、工作门启闭机、检修门、检修门启闭机等设备, 见图 1。三峡升船机下闸首的工作大门采用易于调整门位、带

收稿日期: 2013-06-22 修回日期: 2013-11-08 网络出版时间: 2013-12-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3724/SP.J.1201.2014.01158.html>

作者简介: 楼力律(1973), 男, 浙江湖州人, 副教授, 博士研究生, 主要从事固体力学、水工金属结构方面的研究。E-mail: loull@hhuc.edu.cn

通讯作者: 刘鹏鹏(1989), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 主要从事水工金属结构方面的研究。E-mail: wayne1087@sina.com

卧倒小门的下沉式平板门, 闸门由两台 QPPY II 型 9 000 kN 液压启闭机带压操作^[2]。图 1 中 A 处即为支撑液压启闭机相应的两个油缸机架。启闭力经由吊杆、液压启闭机传递到油缸机架上方的球面支承, 再通过机架传递到两侧的基础上。

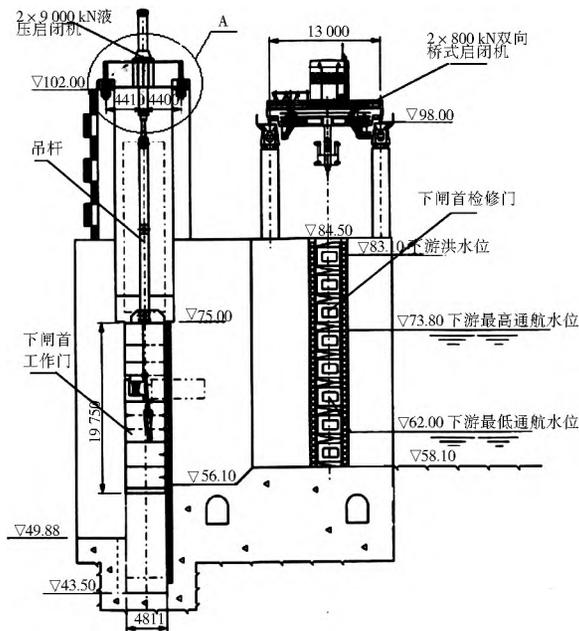


图 1 下闸首设备布置

Fig. 1 Layout of lower head equipment

1.2 工作门启闭机架初步设计

根据规范要求及设计经验, 初步拟定的启闭机油缸机架见图 2。机架主体结构为 20 mm、30 mm、55 mm 的 Q345 钢焊接组合结构。上部机架和下部机架之间通过 16 个 8.8 级 M48 外六角螺栓连接。为抵抗传递的启闭力造成的挤压, 在上部机架的顶端设置了材料为 45 号调质钢的球面支撑和自润滑轴瓦。下部机架与四个底部支架螺栓连接, 底部支架的支撑面为 480×480 的平面, 底部支架通过 16 个 M48 地脚螺栓与基础相连。

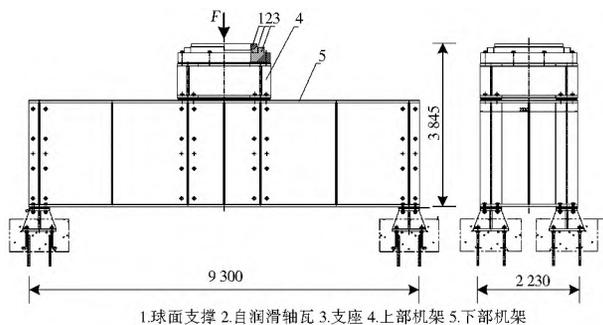


图 2 机架结构初步设计

Fig. 2 Initial design of hoist frame structure

整个机架结构总长约 9.3 m, 高约 3.8 m, 宽约 2.2 m, 总重量达到 64 m。机架顶部球面支撑承受来自正常工作状态的 9 000 kN 压力和和在极限工作状态的 13 500 kN 压力。

2 机架有限元静力分析

根据机架结构的几何模型, 在 Ansys 中对于焊接组合结构的板件采用 SHELL63 单元。不同厚度情况下分别赋予其不同的实常数。对于上部机架顶端的球面支撑、自润滑轴

瓦和支座部分, 采用 Solid45 单元。根据机架实际受力情况, 在底部四个 480×480 支撑面施加全约束。顶部施加的压力经过换算, 在顶部 Φ1 260~Φ1 410 的面域施加面荷载, 同时考虑自重。按照以上方式, 并将计算单元的长度控制在 200 mm, 建立的计算模型有限元网格剖分为 9 868 个节点和 12 065 个单元。限于篇幅, 仅给出结构总体在 13 500 kN 极限工况下的最大折算应力 (Von Mises 应力) 云图和结构总体位移图, 分别见图 3(a)、图 3(b)。

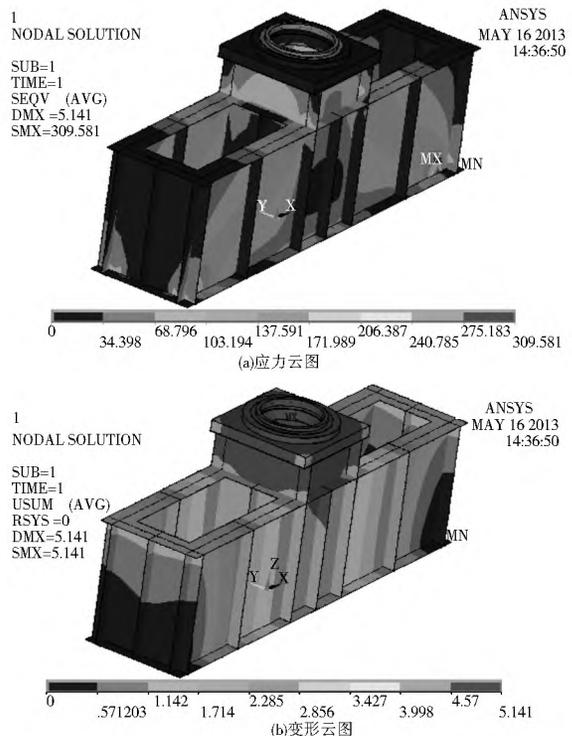


图 3 初步设计的机架有限元 Von Mises

Fig. 3 Finite element V on Mises stress nephogram

(a) and displacement nephogram (b) of initial structural design

有限元的分析结果表明, 结构最大位移 5.141 mm。按照设计规范, 一般最大挠度不超过计算跨度的 1/1 000, 变形满足设计要求; 最大折算应力 (Von Mises 应力) 位于机架腹板与底部支座的连接处, 最大应力值达到 309 MPa (图 3(a) 中标示的 MX 处)。根据应力云图观察可知, 在机架腹板与底部支座连接处的应力变化存在突变, 即在很小的面积内云图颜色由绿色急剧变为红色, 可判定最大折算应力由应力集中引起, 应力集中点附近的折算应力也达到了 240~270 MPa 的水平。若考虑安全系数为 1.5, 则对于 Q345 主材, 其许用应力为 230 MPa, 显然结构局部已经高于许用应力, 最大处折算应力超过许用应力将近 35%。

从应力云图中可以看出, 除了从上部机架到支撑的两个斜方向腹板应力较大以外, 绝大多数的板材的折算应力均处于较低的水平, 基本上不超过 100 MPa。上部球面支撑结构除了球面支撑接触部位以外, 其应力仅在 40 MPa 以下。可见, 按照经验进行的初步结构设计既不符合强度的要求, 也存在大量的材料浪费现象, 因此, 对其结构进行改进是有必要的。

3 机架结构的拓扑结构优化设计

3.1 结构的设计改进及优化方法

根据初始设计的有限元分析, 对机架结构的改进首先要

满足强度、刚度的要求,其次是在满足制造安装方便的基础上,适当减少材料的用量。

根据设计变量的类型,结构优化设计包含尺寸优化、形状优化和拓扑优化三个层次。拓扑结构优化探讨结构构件的相互联接方式^[3],结构内有无空洞、孔洞的数量、位置等拓扑形式,以减轻结构的重量或提高结构的性能。结构拓扑优化往往以根据重量的减少比例作为设计目标使得结构刚度最大,以应力、变形条件作为约束,分析结构材料的布局,其结果更接近于理论上的最优方案。

拓扑结构优化存在着有限元网格依赖、棋盘格问题以及制造性差等方面的缺陷^[4],因此尽管在理论上研究较多,但是实际应用还存在相当的距离。在水工金属结构领域,朱军祚^[9]等人对大型弧门的优化布置采用了拓扑优化的方法,具有一定的代表性。本文将在下文讨论如何在 Ansys 平台下对三峡升船机下闸首启闭机机架进行拓扑结构优化,并分析其结果。

3.2 结构拓扑优化设计

在 Ansys 中设置拓扑结构优化的目标函数是结构的自重,结构的体积设置为约束函数,载荷和约束条件均保持不变。由于拓扑优化程序默认的结构单元为 SHELL93、PLANE2、PLANE82、SOLID92、SOLID95,因此将模型中的面单元改为 SHELL93,实体单元改为 SOLID95 单元。设置结构腹板为可优化区域,考虑到机架的功能要求和结构的整体稳定性要求,上下翼缘、上部支撑结构、横向腹板均设置为不可优化区域。为了达到轻量结构的目的,设置可优化区域优化后结构重量减轻 75%,采用 Ansys 自带的的目标标准逼近(OC)方法做优化计算,每次迭代目标函数精度 0.1%。

拓扑优化结果图是由 0、1 单元伪密度图组成,即结构单元从 0 到 1 编码。若单元伪密度为 0,则该单元可以被删除;相反若单元伪密度为 1,则必须保留。根据精度的要求,可以显示所需精度的单元伪密度图。在此,选择显示的伪密度区间为[0.8, 1]。

优化后所得伪密度云图和应力图见图 4、图 5。从伪密度云图中可以看出,结构外围腹板的优化结构为斜撑结构。整体最大应力处依旧在约束部位,最大应力约为 188 MPa。图 6 为目标函数(结构自重)随迭代步的变化曲线,可以得知,可优化区域的重量减少为原来的 14.06%。

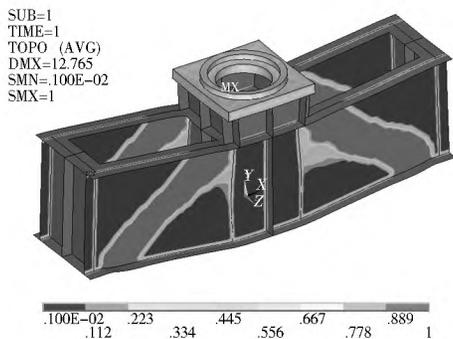


图 4 拓扑优化伪密度云图

Fig. 4 Pseudodensity nephogram of topological optimization

4 机架结构的设计改进与分析

4.1 机架结构的实际设计改进

由于传统设计方法主要根据设计要求,凭经验、直观判断

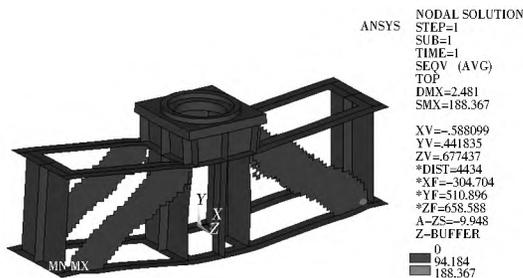


图 5 拓扑优化后最大折算应力

Fig. 5 Maximum equivalent stress after topological optimization

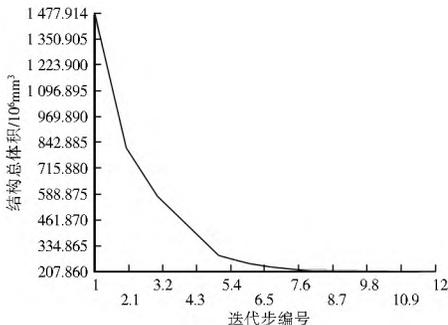


图 6 可优化区域自重随迭代步变化曲线

Fig. 6 Iterative curve of self weight in the optimized region

给出一种较优的设计方案^[9],其优点是直观、明确,缺点是设计结果往往是较优方案,且理论依据不足。而基于 ANSYS 拓扑优化得到的结果并不能直接用于设计与制造,但是其结果为实际结构的优化设计提供了重要的依据。因此,在拓扑优化结果的基础上,考虑机架的功能性和制造性要求,特别是焊接工艺的要求,其实际结构改进措施应是在保持原有设计基本结构不变的基础上,参考结构的拓扑优化分析结果所给出的材料布局设计,通过改变局部结构形式、增加或减少局部板材厚度、设置加强肋和筋板等方法来达到结构改进的目的。基于此,对机架结构主要从三个方面予以了改进。

(1) 去除下部机架垂直方向的加强筋,同时在下部机架自底部支撑至上部机架连接处在内外两侧焊接壁厚为 5 mm 的横截面为 200×200 的方形空心型钢。

(2) 将上部机架球面支撑下方的支座的高度由初始设计的 350 mm 降低为 225 mm;并同时原设计支座内部高度自 225 mm 降低到 150 mm。

(3) 去除机架两端的腹板及加强筋,去除机架跨中的纵向加强筋,跨中腹板处开 1 000×1 000 的方孔。

经过改进后的结构见图 7。

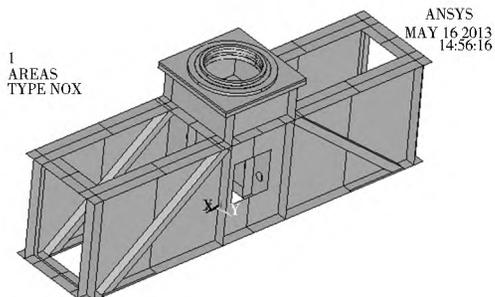


图 7 改进后的机架结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of frame structure of modified design

4.2 改进结构的有限元静力分析

对改进结构进行极限荷载作用下的静力分析,其整体

应力和变形结果见图8。从结果云图中不难看出,结构的最大应力仍然位于机架腹板与底部支座的连接处,但应力水平显著下降,应力集中点的 Von Mises 等效应力降低为 143.3 MPa。结构的最大位移也下降到 2.476 mm。虽然增加了斜向的空心方钢,会在底面焊接位置形成焊接残余应力,但是可以通过焊后热处理或通过局部结构的调整来加以消除。

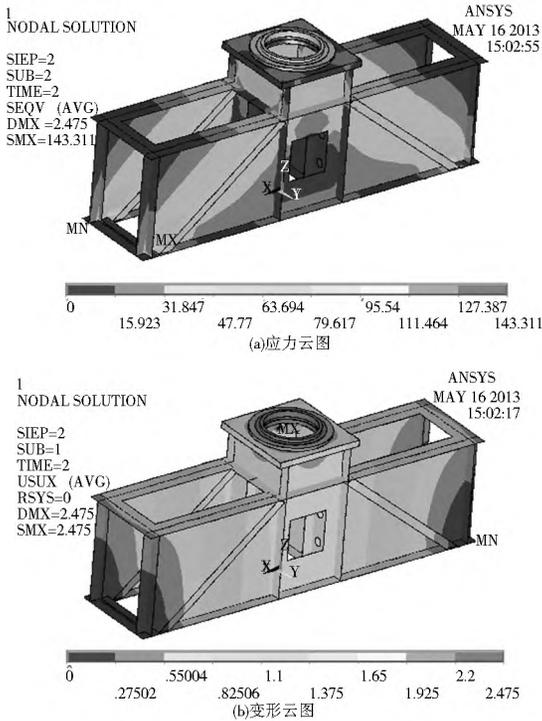


图8 改进设计后的机架有限元 Von Mises 应力与变形云图

Fig. 8 Finite element Von Mises Stress nephogram

(a) and displacement nephogram (b) of modified structural design

由于降低了上部球面支撑支座结构的高度,尽管球面支撑部分的折算应力有所提高,但是分析结果表明结构改进后的球面支撑结构处的最大应力不超过 110 MPa,充分满足强度要求。比较初始设计,不仅在应力水平上得以大幅度的降低,结构的自重也降低到了 53 t,减少了 18.46%。由于采用的改进方案并没有提高制造和装配的复杂程度,简单易行,已经为设计生产厂家所接受,并已中标投入生产。

5 总结

现代设计和制造领域早已提出了轻量化设计^[7]的概念,即在满足结构力学性能要求的前提下,通过结构优化设计,可以减少钢材消耗和钢材生产、加工、运输、搬运和安装等带来的能源消耗、基建耗损,提高整机材料利用效率。但是,目前轻量化设计方法只是在汽车结构设计^[8,9]、起重机结构设计^[10,11]方面应用较多,而我国水工金属结构产品设计则普遍偏于保守,过度重视安全因素,导致安全因数过大,结构自重,对结构机架的结构合理形式的研究也比较少。本文在 ANSYS 平台下,利用有限元分析方法,对三峡升船机下闸首工作门液压启闭设备机架这一大型金属结构进行拓扑结构优化设计和结构改进,为同类大型水工金属结构的轻量化设计提供了一种设计思路和设计方法。拓扑结构优化设计方法可

制造性较差,但将其作为传统直观设计的指导依据,可减少结构试算的时间,同时亦可以评估已设计结构的合理性。至于拓扑结构设计的可制造性问题,还有待于进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 胡友安,楼力律,顾文斌.水工启闭机设计及工程实践[M].北京:中国水利水电出版社,2011:2-4.(HU You an, LOU Li lv, GU Wen bin. Design and Engineering Practice of Gate Hoists[M]. Beijing: China Water Power Press, 2011: 2-4. (in Chinese))
- [2] 朱虹,邓润兴.三峡升船机总体布置设计[J].人民长江,2009,40(23):48-50.(ZHU Hong, DENG Run xing. General Layout of Ship Elevator in Three Gorges Project[J]. Yangtze River, 2009, 40(23): 48-50. (in Chinese))
- [3] 郭旭,赵康.拓扑相关荷载作用下结构拓扑优化的水平集方法[J].工程力学,2005,22(5):69-77.(GU Xu, ZHAO Kang. Topology Optimization with Design Dependent Loads by Level Set Approach[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(5): 69-77. (in Chinese))
- [4] M P Bendsen, O Sigmund. Topology Optimization Theory, Methods and Applications[M]. Berlin: Springer, 2003: 28-31.
- [5] 朱军祚,王正中,方寒梅,等.拓扑优化在大型弧形钢闸门优化布置中的应用[J].人民黄河,2007,29(6):63-64.(ZHU Jun zuo, WANG Zheng zhong, FANG Han mei, et al. Application of Topology Optimization in Large Size Radial Steel Gate Optimal Layout[J]. Yellow River, 2007, 29(6): 63-64. (in Chinese))
- [6] 梁醒培,王辉.基于有限元法结构优化设计原理与工程应用[M].北京:清华大学出版社,2010:1-2.(LIANG Xing pei, WANG Hui. Structural Optimization: Principles and Engineering Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010: 1-2. (in Chinese))
- [7] 克莱恩(陈力禾译).轻量化设计[M].北京:机械工业出版社,2010.(Klein. The Lightweight Design[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2010. (in Chinese))
- [8] 郑松林,王彦生,卢曦,等.基于强度变化特征的汽车结构件轻量化设计方法[J].机械工程学报,2008,44(2):129-133.(ZHENG Song lin, WANG Yan sheng, LU Xi, et al. Weight reduction Design of Auto Structures Based on Strength Features[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(2): 129-133. (in Chinese))
- [9] 龙江启,李毅,俞平,等.基于结构优化的客车骨架轻量化设计研究[J].机械科学与技术,2013,32(4):558-563.(LONG Jiang qi, LI Yi, YU Ping, et al. Study on the Lightweight Design of Coach Skeleton Based on the Structural Optimization Method[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32(4): 558-563. (in Chinese))
- [10] 杨真.桥式起重机金属结构的轻量化设计研究[D].南京理工大学,2011.(YANG Zhen. Research on Lightweight Design of Girder Cranes Nanjing University of Science & Technology[D]. Nanjing University of Science & Technology, 2011. (in Chinese))
- [11] 郭瀚澄.16/3.2吨桥式双梁起重机小车轻量化研究[D].浙江工业大学,2009.(GUO Han cheng. Research of Weight Reduction on 16/3.2 t Overhead Traveling Crane Trolley[D]. Zhejiang University of Technology, 2009. (in Chinese))