



顺水流向变高程廊道人字门闸首 结构优化设计

苏超¹, 苏阳¹, 吴云云²

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 吉林省水利水电勘测设计研究院, 吉林 长春 130021)

摘要: 尝试对顺水流向变高程廊道人字门闸首进行结构模型参数化, 并对结构进行优化设计。采用复合形法优化算法, 选取体形控制性参数作为设计变量, 以混凝土方量最小为优化目标函数, 抗滑、抗浮、抗倾覆为约束条件。体形优化后体积比初拟体形体积减小 7.109%, 得到较好效果。

关键词: 优化设计; 参数化; 人字门闸首

中图分类号: U 641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)10-0134-05

Optimal design of miter gate lock head with gradient corridor in flow direction

SU Chao¹, SU Yang¹, WU Yun-yun²

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

2. Jilin Province Water Conservancy and Hydropower Survey Design Institute, Changchun 130021, China)

Abstract: This paper attempts to parameterize the miter gate lock head with gradient corridor in the flow direction and optimize the design. The compound shape method optimization algorithm is used and size controlling parameters are selected as design variables. The minimum volume of concrete is selected as the optimization objective function and constraint conditions are anti-sliding, anti-floating, and anti-overturning. The optimized concrete volume decreased 7.109% in comparison with the initial proposed body type and better results are gotten. Reference is provided for future engineering design.

Keywords: optimal design; parameterization; miter gate lock head

随着国家交通运输事业的大力发展, 依靠我国得天独厚的广阔的内陆河流资源, 航运建设得到大力发展^[1]。作为航运交通建筑物的重要组成部分, 船闸设计和建设工作将迎来新的高峰和挑战^[2]。传统的船闸闸首体形设计采用重复设计法, 即根据已建类似工程的经验和设计者的判断初拟体形方案, 然后进行抗滑、抗倾、抗浮稳定分析计算, 并根据计算成果修改初拟的方案, 对修改后的体形再进行计算分析, 并修改设计方案, 反复进行, 直到得到满意的设计方案为止。这种重复设计方案的缺点是重复工作多、精确度不高,

最终确定的船闸闸首体形方案也不一定是最优的设计方案, 即材料用量过多、造成工程造价高。如果对船闸闸首进行优化设计, 则能够在满足安全条件的前提下, 尽可能地节约材料以求得到更大的经济效益。王鹏等^[3]曾对船闸闸室结构做优化设计, 得出影响闸室结构设计的一些关键因子。苏超等^[4]对有切角三角门船闸闸首结构做过优化设计, 优化后的混凝土方量大大减小。本文尝试对顺水流向变高程廊道人字门闸首结构进行以混凝土方量最小为优化目标的研究, 得到较优体形, 为以后类似的闸首结构设计提供参考。

收稿日期: 2014-03-25

作者简介: 苏超 (1960—), 男, 博士, 教授, 从事水工结构工程、水运工程数值计算方法与试验研究。

1 结构优化设计理论及复合形法优化算法

1.1 结构优化设计基本理论

结构优化设计是相对于传统的结构设计而言的。传统的结构设计实际上指的是结构分析, 其过程可简述为“假设→分析→校核→重新设计”^[5]。结构优化设计与传统的结构设计采用的是相同的基本理论, 使用的是同样的计算公式, 遵守的是同样的设计规范、规程和构造规定, 因而与传统结构设计具有同样的安全度^[6]。结构优化设计则把力学概念和优化技术有机地结合起来, 根据设计要求, 使所有参与计算的结构参数都以变量的形式出现, 形成全部可能的结构方案域, 利用数学手段, 按设计者规定的要求, 从域中选出一个可行且最好的设计方案。结构优化设计以有限单元法为结构分析方法, 以数学规划等各种数学方法为计算手段, 以现代高速计算机为计算工具, 得出最优可行设计方案。结构的优化设计, 其过程可简述为“假设→分析→搜索→最优设计”^[7]。

结构优化设计的数学模型, 是对现实世界的某个特定对象, 为了某种特定目的, 做出一些必要的简化和假设, 运用适当的数学语言和工具, 按某种数学结构来表示各种现象的依存关系^[8]。一般优化设计的数学模型可归纳为:

$$\text{设计变量 } \mathbf{X} = [X_1, X_2, X_3, \dots, X_n]^T \quad (1)$$

$$\text{目标函数 } F(\mathbf{X}) \rightarrow \min \quad (2)$$

$$\text{约束条件 } g_j(\mathbf{X}) \leq 0 \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

式中: \mathbf{X} 为设计变量; n 为设计变量个数; $F(\mathbf{X})$ 为目标函数; $g_j(\mathbf{X})$ 为约束方程; m 为约束方程个数。建立结构的优化数学模型, 即把工程实际问题用数学表达式表示, 包括选定设计变量、选择目标函数、建立约束方程等^[9]。

1.2 复合形法

目前, 在解决非线性约束规划问题中, 复合形法是最常用的最极致的优化方法。复合形法的基本思路^[10]是在 n 维空间的可行域中选取 K 个设计点 (通常取 $n + 1 \leq K \leq 2n$) 作为初始复合形 (多面体) 的顶点。然后比较复合形各顶点目标函

数值的大小, 其中目标函数值最大的点作为坏点, 以坏点之外其余各点的中心为映射中心, 寻找坏点的映射点, 一般说来此映射点的目标函数值总是小于坏点的, 也就是说映射点优于坏点。这时, 以映射点替换坏点与原复合形除坏点之外的其余各点构成 K 个顶点的新的复合形。如此反复迭代计算, 在可行域中不断以目标函数值低的新点代替目标函数值最大的坏点从而构成新复合形, 使复合形不断向最优点移动和收缩, 直至收缩到复合形的各顶点与其形心非常接近、满足迭代精度要求时为止。最后输出复合形各顶点中的目标函数值最小的顶点作为近似最优点。

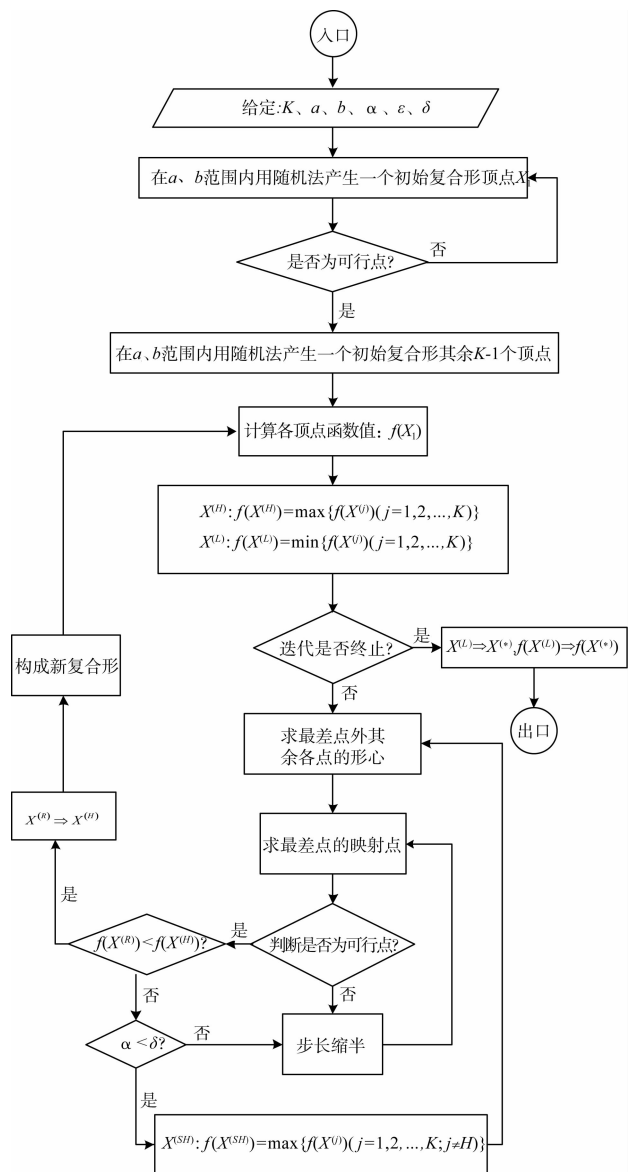


图 1 复合形法流程

2 顺水流向变高程廊道人字门闸首参数化模型

参数化 (Parametric) 技术最早是 CAD 在实际应用工作中提出的课题,它是该应用领域内的一个重要的、正在蓬勃发展的研究课题。参数化是指设计对象的结构形状比较定型,可以用一组参数来确定设计对象,参数与设计对象的控制尺寸有明显的对应关系,从而可使设计的结果受尺寸的驱动^[11-13]。参数化建模是优化设计的重要环节,是用一组参数来描述具体的几何结构。通过选取一些主要结构的决定性的控制参数作为结构优化设计的设计变量。通过优化算法,寻求满足约束条件下的最优一组参数作为最优结构参数,达到结构优化的效果。本文结合现有的人字门闸首工程实例,对顺水流向变高程廊道人字门闸首结构进行参数化研究。

图2给出了顺水流向变高程廊道的人字门闸首平面图和立面图,可将其分解成底板、廊道、分流墩、闸门启闭室、阀门井及阀门启闭室、空箱等6个基本实体,用一系列参数表示各个基本实体。顺水流向变高程廊道的人字门闸首坐标系原点设在下游底板边界中点处, X 向从下游指向上游, Z 向垂直流向指向闸首纵轴线, Y 向垂直向上。底板结构的参数化图解见图3。

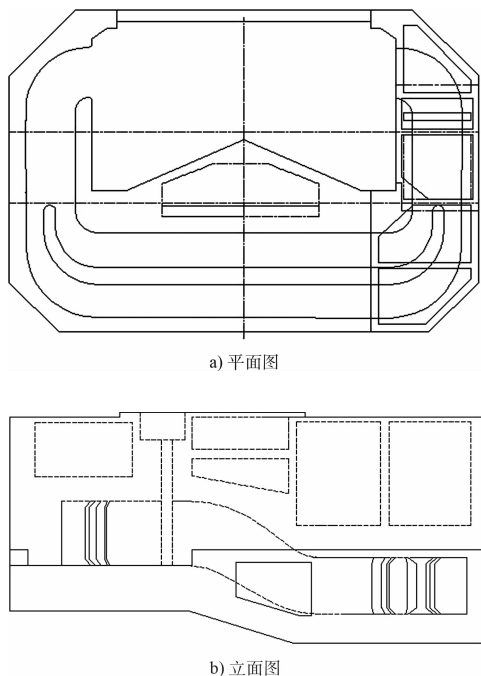


图2 人字门闸首

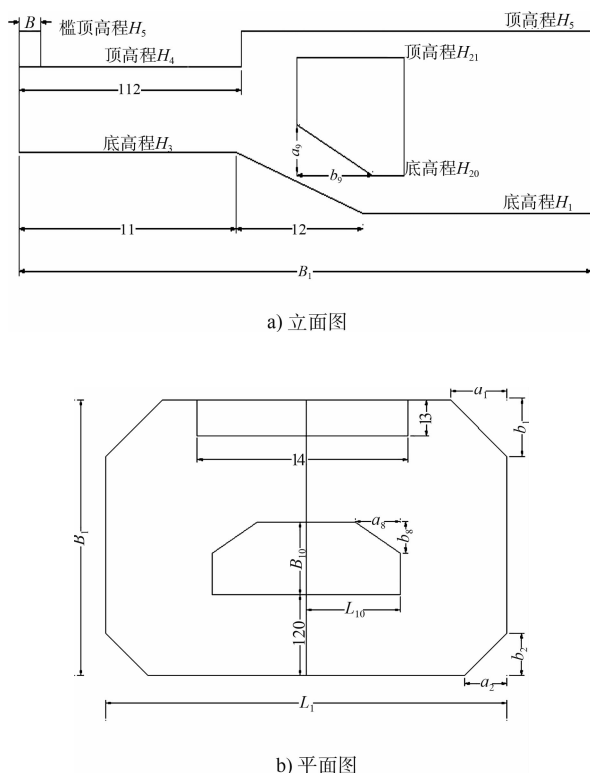


图3 底板

通过对顺河向变高程廊道人字门闸首结构进行参数化,用有限的结构参数可以确定闸首的结构体形。在优化设计中,选取对结构形状影响不大或者可变范围较小的非控制型参数为初始不变量,选取控制型参数作为设计变量进行优化设计,寻求最佳的设计体形。利用网格自动剖分程序^[14],通过闸首结构参数把闸首结构分块,输入各块分份参数和分份的比例,可以得到节点和单元数据,用来做有限元分析。

3 工程应用

3.1 工程概况

某船闸设计最大船舶等级为2000吨级,船闸尺寸为23 m × 260 m × 5 m (口门宽 × 闸室长 × 最小槛上水深),船闸承受单向水头,设计水头3.5 m,校核水头4.5 m。混凝土密度为2.4 t/m³,弹性模量为28 GPa,泊松比0.167。混凝土与地基摩擦系数取0.5。计算工况见表1。

表 1 船闸上闸首计算工况组合

| 水头组合 | 工况 | 上游水位/m | 下游水位/m | 水头/m |
|------|------------|--------|--------|------|
| 基本组合 | 正向水头上闸门关 | 19.33 | 15.83 | 3.5 |
| | 上闸门开 | 19.33 | 19.33 | 0 |
| | 完建工况 | 无水 | 无水 | 无水 |
| 特殊组合 | 上闸门关闭校核洪水位 | 19.83 | 18.83 | 1.0 |
| | 上闸门关闭校核低水位 | 19.33 | 14.83 | 4.5 |

表 2 设计变量及其变化范围

| 设计变量 | 设计变量范围/m |
|--------------------|--------------------------|
| 空箱 1 的长度 L_7 | $6.0 < L_7 < 6.7$ |
| 空箱 1 的宽度 B_7 | $6.0 < B_7 < 6.5$ |
| 空箱 1 顶高程 H_7 | $20.23 < H_7 < 21.03$ |
| 空箱 2 底高程 H_{18} | $15.33 < H_{18} < 16.33$ |
| 空箱 2 顶高程 H_{19} | $18.43 < H_{19} < 19.03$ |
| 空箱 3 的长度 L_9 | $7.7 < L_9 < 8.6$ |
| 空箱 4 的长度 L_2 | $7.7 < L_2 < 8.6$ |
| 空箱 3,4 的底高程 H_6 | $13.43 < H_6 < 15.33$ |
| 底板内部空箱的长度 L_{10} | $7.1 < L_{10} < 8.66$ |
| 底板内部空箱的宽度 B_{10} | $4.8 < B_{10} < 5.75$ |
| 底板内部空箱底高程 H_{20} | $7.03 < H_{20} < 8.83$ |
| 底板内部空箱顶高程 H_{21} | $11.83 < H_{21} < 12.33$ |

3.2 闸首结构优化设计数学模型

3.2.1 设计变量

对于顺水流向变高程廊道的人字门闸首来说, 它的优化设计变量用于描述并且确定闸首形状。整体结构尺寸与现场地质条件有关, 输水系统廊道的各个尺寸是由闸室和引航道的水利条件、已定船闸通过能力以及地形地质条件确定, 闸门启闭室尺寸符合启闭机安置的要求, 所以选取空箱的部分参数作为设计变量。设置设计变量的取值范围时要考虑各个结构之间的相对位置关系, 要保证在取值范围内设计变量无论怎么变化, 顺水流向变高程廊道的人字门闸首网格模型的单元总数不会变, 改变的只是网格的大小。选取的设计变量以及对应的取值范围见表 2。设计变量见图 4。

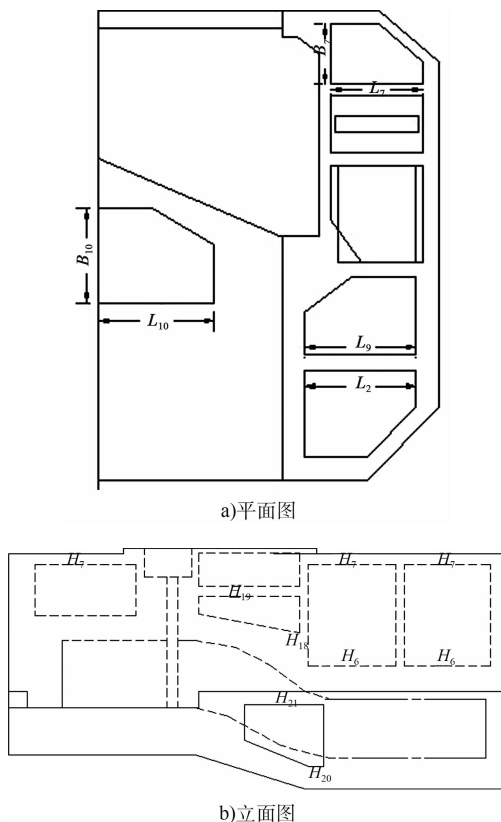


图 4 设计变量

3.2.2 目标函数

本文以经济性指标为目标函数对顺水流向变高程廊道的人字门闸首结构进行优化设计, 即目标函数为船闸闸首混凝土体积。

$$V = \sum_{i=1}^{NK} v_i \quad (4)$$

式中: V 为顺水流向变高程廊道的人字门闸首结构混凝土总体积; v_i 为第 i 个块体的体积; NK 为闸首结构总块体数。

各个块体的节点坐标都是由一系列参数表示的, 因此每个块体的体积由这些参数计算得来。闸首总体积是设计变量的函数, 本文在优化程序中计算目标函数。

3.2.3 约束条件

1) 稳定约束条件。

抗滑稳定按下列公式验算:

$$K_c = \frac{f \sum V}{\sum H} \quad (5)$$

式中: K_c 为土基抗滑稳定安全系数; $\sum V$ 为作用在墙体上全部荷载对滑动面法向投影的总和 (kN); $\sum H$ 为作用于墙体上全部荷载对滑动面切向投影的总和 (kN); f 为抗滑摩擦系数 (由规范规定选用)。

2) 抗倾覆稳定验算。

$$K_0 = \frac{M_R}{M_0} \quad (6)$$

式中： K_0 为土基抗倾稳定安全系数； M_R 为对计算截面前趾的稳定力矩（kN·m）之和，其中包括浮托力产生的力矩； M_0 为对计算截面前趾的倾覆力矩（kN·m）之和，其中包括渗透压力产生的力矩。

3) 抗浮稳定验算。

闸首抗浮稳定按下式计算：

$$K_f = \frac{V}{U} \quad (7)$$

式中： K_f 为土基抗浮稳定安全系数； V 为向下的垂直力总和（kN）； U 为扬压力总和（kN）。

本文中约束条件用 Fortran 语言编写程序计算抗滑、抗浮、抗倾覆安全系数，与规范中规定的容许值比较，每一组设计变量只有满足了约束条件，才计算体积。程序一步步迭代寻优，直到满足迭代终止条件。最后的那次迭代结果就是体积最小即工程造价最低的体形。

3.3 优化结果分析

编写设计变量初值及范围数据文件，用优化程序对顺水流向变高程廊道的人字门闸首结构进行优化，较优体形混凝土方量为 2 923.5 m³，比初设闸首体形混凝土方量减少了 7.109%，优化效果明显。表 3 为闸首优化前后设计变量的值以及目标函数值。

表 3 初始体形与优化体形结果比较

| 设计变量及目标函数 | 初始体形/m | 优化体形/m |
|--------------------|--------|----------|
| 空箱 1 的长度 L_7 | 6.10 | 6.687 9 |
| 空箱 1 的长度 B_7 | 6.12 | 6.465 7 |
| 空箱 1 顶高程 H_7 | 20.23 | 20.854 8 |
| 空箱 2 底高程 H_{18} | 16.33 | 16.183 5 |
| 空箱 2 顶高程 H_{19} | 18.43 | 18.967 2 |
| 空箱 3 的长度 L_9 | 8.40 | 8.486 2 |
| 空箱 4 的长度 L_2 | 8.40 | 8.497 3 |
| 空箱 3,4 的底高程 H_6 | 15.33 | 13.450 0 |
| 底板内部空箱的长度 L_{10} | 7.10 | 8.539 6 |
| 底板内部空箱的宽度 B_{10} | 4.80 | 5.716 5 |
| 底板内部空箱底高程 H_{20} | 8.33 | 7.578 3 |
| 底板内部空箱顶高程 H_{21} | 11.93 | 12.249 3 |

注：目标函数值，初始体形为 3 147.2 m³，优化体形为 2 923.5 m³。

选取上闸门关校核洪水工况的有限元分析结果可以看出，优化后的体形整体呈现为压应力。但受到边墩自重及闸门槽上游较大水压力作用的影响，在廊道进口弧段、闸门启闭室上部机房顶盖表面出现了不同程度的主拉应力集中区，其中，主拉应力极值发生在闸门启闭室上部机房顶盖表面，量值较大，为 3.635 MPa。在拉应力集中区域可以加强配筋来增加强度。量值较大的主压应力集中区范围较小，主要分布在廊道出口边墩与底板上表面连接处、廊道进水口处，主压应力极值发生在廊道进水口转弯处、廊道出口边墩与底板上表面连接处，量值较大，为 -5.371 MPa。

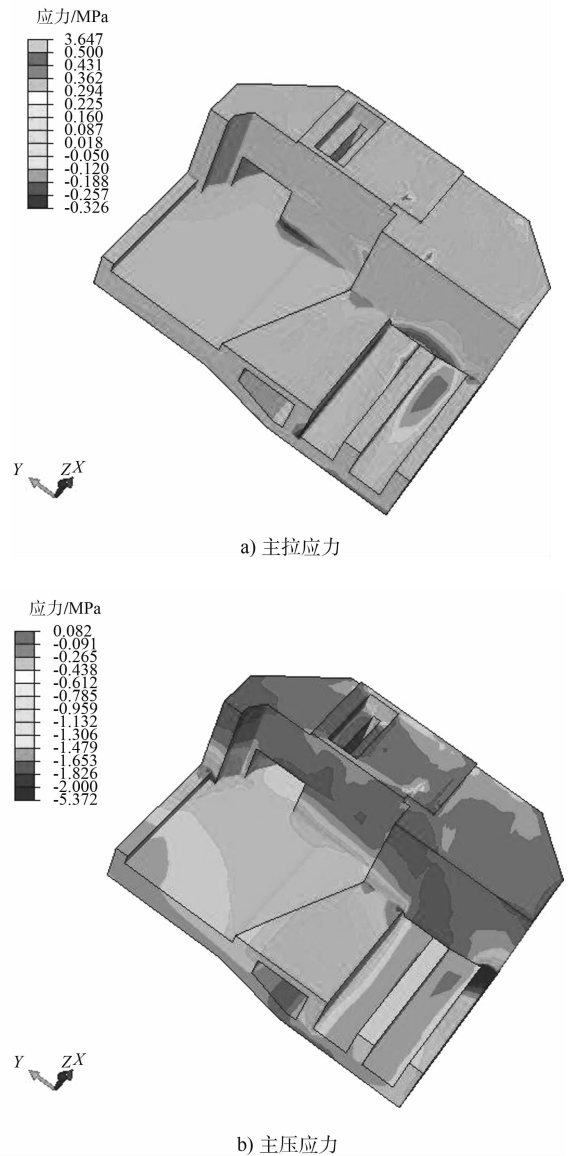


图 5 上闸门关校核洪水工况闸首应力云图