

基于遗传算法的空箱式挡土墙多目标优化设计

王丽¹, 徐鹏飞¹, 刘松², 郭瑞¹, 徐昕², 张康³

(1. 淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223001; 2. 淮安市水利工程建设管理服务中心, 江苏 淮安 223005; 3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为高效、准确、自动化地实现空箱结构的优化设计,以空箱式挡土墙为研究对象,基于 Python 语言和 ABAQUS 软件进行参数化建模,实现了结构建模及有限元计算分析全套流程的自动化。结合某水闸工程中的一座空箱式挡土墙结构,以多个强度和稳定性指标的最优化和混凝土体积的最小化为目标,以规范要求的指标阈值、几何尺寸和体积限制为约束条件,采用非支配排序遗传算法 (NSGA-II 算法) 进行空箱式挡土墙多目标优化设计。为进一步提高计算效率,基于人工神经网络算法建立了代理模型,实现了与实际有限元模型的高度近似。结果表明,依据所提出的优化设计方法进行空箱式挡土墙多目标优化设计,可以在有效控制强度和稳定性的前提下尽可能地缩减混凝土用量,具有显著的经济效益。

关键词:空箱式挡土墙; 参数化建模; NSGA-II 算法; 代理模型; 结构优化设计

中图分类号:TV222.2

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)02-0079-08

Multi-objective optimal design of a chamber retaining wall based on genetic algorithm//WANG Li¹, XU Pengfei¹, LIU Song², GUO Rui¹, XU Xin², ZHANG Kang³(1. Huai'an Water Conservancy Survey and Design Institute Co., Ltd., Huai'an 223001, China; 2. Huai'an Water Conservancy Project Construction Management Service Center, Huai'an 223005, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To efficiently, accurately, and automatically achieve the optimized design of hollow structures, a chamber retaining wall was taken as the research object. Parametric modeling based on Python and ABAQUS was carried out, and the automation for the whole process of modeling, finite element calculation and analysis was realized. Combined with a chamber retaining wall in a sluice project, the multi-objective optimization design under multiple constraints was carried out by using non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II algorithm), aiming at the optimal of several strength and stability indexes and the minimization of concrete volume by taking the index threshold, geometric size and volume requirement as constraint conditions. In order to further improve the computational efficiency, a surrogate model was established based on artificial neural network algorithm, which could achieve a highly approximation to the actual finite element model. The results show that the proposed optimization process for chamber retaining walls can minimize concrete usage while effectively controlling strength and stability, and has significant economic benefits.

Key words: chamber retaining wall; parametric modelling; NSGA-II algorithm; surrogate model; structural optimal design

挡土墙作为一种支承土体和分隔水流的常规结构,在水利工程建设中有着十分广泛的应用^[1]。水工挡土墙按结构型式可分为重力式、悬臂式、扶壁式、空箱式、板桩式等,在设计时一般根据工程所在地的地形、地质条件及运行要求等进行结构布置^[2],其中空箱式挡土墙由于其结构质量较轻和易于装配化施工的特点,在松软地基上被广泛应用。

与此同时,空箱式挡土墙内部构件较多、结构形式和运行条件复杂,其内部构件尺寸不仅关乎挡土墙的安全运行,也直接影响工程投资、工期及工程量。因此,为保障空箱式挡土墙的安全运行,尽可能地降低工程造价,有必要对空箱式挡土墙的结构优化设计问题进行深入研究和讨论。目前,对挡土墙结构优化设计的研究主要集中在重力式、悬臂式、衡重式等

基金项目:江苏省水利科技项目(2021015,2022024);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B210202017)

作者简介:王丽(1981—),女,高级工程师,主要从事大中型泵站工程规划设计工作。E-mail:50442537@qq.com

通信作者:张康(1996—),男,博士研究生,主要从事水工结构工程研究。E-mail:zhangkang@hhu.edu.cn

几种更为常见的挡土墙结构形式上。裴尧尧等^[3]以造价最少为目标函数,将结构尺寸限制和稳定性条件作为约束条件,研究了多种元启式算法在挡土墙优化设计中的适用性。叶晨茂等^[4]以重力式挡土墙的截面面积为目标函数,以可靠性指标和截面构造要求为约束条件,采用 LINGO 软件实现了重力式挡土墙的优化设计。陈栋梁等^[5]以重力式挡土墙的截面面积为目标函数,以稳定性条件和地基承载力为约束条件,通过非线性规划理论对重力式挡土墙进行了优化设计。Das 等^[6]根据 Pareto 最优法则实现了悬臂式挡土墙的多目标优化。

计算机技术和数学理论的不断发展和完善,为复杂工程的优化问题求解提供了坚实的技术支撑^[7]。然而,在针对空箱式挡土墙进行结构优化时依然存在以下问题:①不同于其他型式的挡土墙结构,空箱式挡土墙难以通过解析计算的方式进行受力分析,而采用三维有限元软件进行分析时,重复的建模和计算工作需要耗费大量的时间和人力^[8];②优化过程中涉及的设计参数往往较多,不仅需要较为先进的优化算法,还需要大量的迭代次数以避免优化过程陷入局部最优,导致计算效率无法保证;③挡土墙的优化设计大多被视为一个在满足尺寸、强度和稳定性约束条件下追求工程成本最小的单目标优化问题,然而成本的最优通常是以较大限度地牺牲工程的安全性为代价,因此把挡土墙的优化设计视为综合考虑成本、构造要求和安全性指标的多目标优化问题会更为合理。

针对上述问题,本文利用 ABAQUS 软件,基于 Python 语言开发了空箱式挡土墙结构优化模块,实现了计算分析全过程的参数化和自动化,在节省人力的同时提高了计算效率。为了克服多目标优化问题中设计变量维度高、目标函数多和优化过程复杂等关键技术问题,采用多层感知机 (multi-layer perceptron, MLP) 算法建立了与有限元模型高度近似的代理模型来简化计算,在此基础上基于快速非支配排序遗传算法 (non-dominated sorting genetic algorithms- II, NSGA- II) 进行空箱式挡土墙的多目标优化设计。以某水闸工程中的一座空箱式挡土墙为例,以规范要求的各项强度和稳定性指标、构造要求和实际工程的尺寸限制为约束条件,以最小化结构体积和最优化强度和稳定性指标为目标函数,将空箱式挡土墙的各关键部位尺寸参数视为设计变量,对其进行多目标优化设计,在充分发挥材料的力学性能、保障挡土墙安全工作的前提下,达到节约工程投资的目的。

1 参数化建模及计算分析

ABAQUS 是国际通用的大型非线性有限元计算分析软件之一,在许多学科领域都有着广泛的应用。ABAQUS 基于 Python 语言定制开发了脚本接口,主要用于前处理、后处理和自定义模块等,为用户进行参数化建模和批处理提供了可能。当用户使用 ABAQUS 的图形用户界面 (graphical user interface, GUI) 进行模型建立、荷载施加、网格划分和后处理时,ABAQUS/CAE 均会从内部发出与操作内容相对应的 Python 命令,然后将命令传到内核,由内核对命令流进行解读并执行相应操作。换言之,内核是隐藏在 ABAQUS/CAE 后的大脑,而 GUI 界面是用户和内核之间的接口。因此,当直接使用 Python 语言编写命令,通过脚本接口与 ABAQUS/CAE 的内核直接通信,可以跳过 GUI 界面,直接实现自动化的前处理和后处理分析。

ABAQUS 脚本接口在 Python 语言的基础上内置了很多新的对象类型,大幅度提升了使用 Python 语言进行二次开发的便利性。对象一般可分为进程对象 (Session)、模型对象 (Mdb) 和输出数据库对象 (Odb) 3 种^[9],其结构层次见文献^[10],Session 对象一般用于在 GUI 界面中进行视图的变换、数据可视化和图片的生成和导出等工作;Mdb 对象可完成包括模型建立、材料参数赋值、荷载施加、网格划分、提交计算等前处理工作;Odb 对象可针对输出数据库进行后处理工作。对应于本文的空箱式挡土墙参数化建模及计算分析流程,拟基于 Python 语言编写命令流实现空箱式挡土墙建模分析及后处理的全过程,并将优化设计涉及的尺寸参数变量化,对相应变量进行修改即可改变结构尺寸,并且只需嵌套外循环即可实现批量化的自动计算和分析。

2 空箱式挡土墙结构优化设计

2.1 NSGA- II 算法

NSGA 算法是 Srinivas 等^[11]于 1995 年提出的一种非支配排序遗传算法。NSGA 算法在对算子进行选择、交叉和变异操作前基于 Pareto 排序对其进行分层,以保证更好的个体有更大的机会被遗传给下一代,并使用基于拥挤策略的小生境技术对各层的虚拟适应值进行重新指定^[12],使得准 Pareto 面上的个体分布均匀,保证了群体多样性,防止算法陷入局部最优。Deb 等^[13]在 NSGA 算法上进行改进并提出了 NSGA- II 算法,同时引进拥挤度算子代替了原先需要指定共享半径的适应度共享策略来保证种群的多样性,此外还引进了精英保留策略实现算法

的快速收敛,大大提高了算法的计算效率。设多目标优化问题中的目标函数个数为 $K(K>1)$,种群规模为 N ,NSGA-II 算法的具体实现步骤如下:

步骤1 快速非支配排序。①基于每个个体的 K 维目标函数值,对 N 个解进行两两比较,确定个体间的支配与非支配关系,对每个解记录支配它的个体集合。②找到种群中所有未被其他解支配的个体,作为第一层非支配个体集合 F_1 。将 F_1 中的个体隐去,寻找余下个体中未被其他解支配的个体,作为第二层非支配个体集合 F_2 。如此迭代直至完成分级。

步骤2 对父代种群进行选择、交叉、变异操作,生成种群规模为 N 的子代种群。

步骤3 将父代和子代种群进行合并,对新种群进行快速非支配排序。

步骤4 自第一层开始将各层非支配个体集合依次放入下一代父代种群,直至当前层个体不能全部放入为止。对当前层个体进行拥挤度排序,拥挤度测算公式为

$$D_i = \sum_{j=1}^K \left| \frac{f_{j,i+1} - f_{j,i-1}}{f_{j,\max} - f_{j,\min}} \right| \tag{1}$$

式中: $f_{j,i}$ 为第 $i(i=2,3,\cdots,N-1)$ 个个体的第 j 个目标函数值; $f_{j,\max}$ 为种群第 j 个目标函数的极大值; $f_{j,\min}$ 为种群第 j 个目标函数的极小值。 $f_{j,\max}$ 和 $f_{j,\min}$ 对应的个体作为当前层的左右边界 $f_{j,1}$ 和 $f_{j,N}$,边界个体的拥挤度被定义为无穷大。

步骤5 将拥挤度大的个体依次加入下一代父代种群中直至种群规模达到 N ,将余下个体全部淘汰。

步骤6 重复步骤1~5,直至达到最大迭代次数。

2.2 代理模型

虽然本文全程采用 Python 语言进行挡土墙有限元模型的建立、计算和结果分析,但繁复的迭代过程依然会耗费大量的计算时间,因此有必要采取措施对计算过程进行约简。代理模型是一种根据各种抽样方法生成的少量样本点而建立的数学模型,通过对数值分析模型计算结果的拟合以实现数值分析模型的高度近似,能够极大地减少计算成本,本文采用 MLP 网络来建立代理模型。

MLP 网络由输入层、隐含层和输出层组成,每层的神经元与下层神经元全连接。设输入和输出变量的维度分别为 n 和 m ,一个含两个隐含层的 MLP 网络结构如图1所示,图中每个圆圈都表示一个神经元,箭头表示神经元间的连接,每个连接都有一个专用的权重。

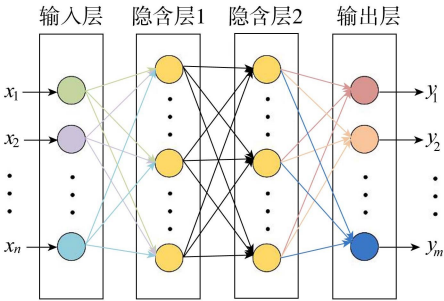


图1 MLP 网络结构示意图

2.3 强度及稳定性约束

鉴于混凝土抗压强度远大于抗拉强度,因此对于承受常规荷载的挡土墙而言,仅需考虑其抗拉强度是否满足要求,即

$$\sigma_{pt} \leq f_t \tag{2}$$

式中: σ_{pt} 为混凝土挡土墙所受的最大主拉应力; f_t 为相应级别混凝土的轴心抗拉强度设计值。

SL 379—2007《水工挡土墙设计规范》(以下简称《规范》)规定,一个合理且安全的挡土墙结构在各种可能发生的荷载组合工况下都应当同时满足抗滑、抗倾覆和抗浮稳定,各稳定性指标计算方法如下:

a. 抗滑稳定性要求。按照《规范》要求,在抗滑稳定性方面,土质和软质岩石地基上的挡土墙应同时满足基底应力和抗滑稳定安全系数两方面的要求。空箱式挡土墙大多设置于松软土质地基上,基底应力的最大值和最小值的比值 $P_{\max}/P_{\min}$ 不应大于 1.50,同时基底不应出现拉应力。基底应力的计算公式为

$$\begin{cases} P_{\max} = \frac{\sum G}{A} + \frac{\sum M}{W} \\ P_{\min} = \frac{\sum G}{A} - \frac{\sum M}{W} \end{cases} \tag{3}$$

式中: G 为作用于挡土墙上所有竖向荷载; A 为挡土墙基底面的面积; M 为作用于挡土墙上的荷载对基底面平行于前墙墙面方向形心轴的合力矩; W 为基底面对平行于前墙墙面方向形心轴的惯性矩。

黏性土地基上挡土墙的抗滑稳定安全系数 K_c 计算公式为

$$K_c = \frac{\tan\varphi_0 \sum G + c_0 A}{\sum H} \tag{4}$$

式中: H 为作用于挡土墙上的荷载在水平方向上的力; φ_0 为挡土墙基底面与土质地基间的摩擦角; c_0 为挡土墙基底面与土质地基间的黏结力。

b. 抗倾覆稳定性要求。土质地基上挡土墙的抗倾覆稳定性是由地基稳定性和基底面上的最大最

小应力比共同决定的,为简化计算本文不考虑地基因素,按《规范》要求当土质地基上的挡土墙满足 $P_{\max}/P_{\min} \leq 1.50$ 时可不进行抗倾覆稳定计算。

c. 抗浮稳定要求。因空箱式挡土墙自重较轻,在检修时应当进行抗浮稳定安全验算,抗浮稳定安全系数 K_f 计算公式为

$$K_f = \sum F_v / \sum F_u \tag{5}$$

式中: F_v 为作用在挡土墙上所有竖向力; F_u 为作用在基底面上的扬压力。

3 案例分析

3.1 工程概况

以某水闸工程中的一座空箱式挡土墙为例进行多目标优化设计。该工程挡土墙工程等级为Ⅲ级,混凝土等级为C30,墙身长25.9 m,宽10 m,高9.6 m,底部高程为0.7 m。为帮助挡土墙维持稳定,临土侧空箱结构内有2 m深填土,临水侧空箱结构内有3.5 m深填土。该挡土墙内部设有2排空箱,每排各7个,以其内部空箱和纵、横隔板等结构的细部尺寸为设计变量,如图2所示。各设计变量的原始设计尺寸如表1所示。

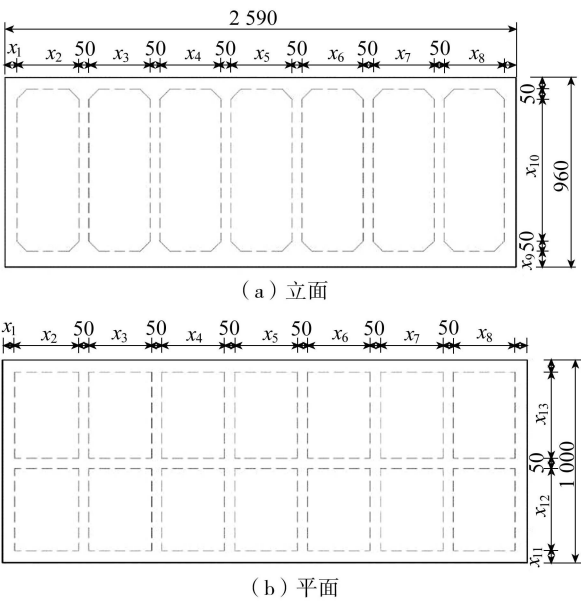


图2 空箱式挡土墙剖面示意图(单位:cm)

3.2 工况及荷载

本文主要开展挡土墙在完建期和运行期的三维有限元数值计算,根据工程资料,该水闸工程在运行期和完建期的特征水位工况如下:①在水闸工程的完建期,该挡土墙所在区域内无水流。②在水闸工程的正常运行期,设计洪水位工况下闸室上游段水位为9.00 m,下游段水位为3.21 m;校核洪水位工

表1 设计变量的原始设计尺寸

参数	含义	初始设计值/m	搜索范围/m
x_1	左侧挡板厚度	0.60	0.40~0.80
x_2	空箱1宽度	3.15	2.75~3.55
x_3	空箱2宽度	3.10	2.70~3.50
x_4	空箱3宽度	3.10	2.70~3.50
x_5	空箱4宽度	3.10	2.70~3.50
x_6	空箱5宽度	3.10	2.70~3.50
x_7	空箱6宽度	3.10	2.70~3.50
x_8	空箱7宽度	3.05	2.65~3.45
x_9	底板厚度	0.80	0.40~1.20
x_{10}	空箱高度	7.20	6.40~7.60
x_{11}	临土侧挡板厚度	0.60	0.40~0.80
x_{12}	临土侧空箱纵深	4.05	3.65~4.45
x_{13}	临水侧空箱纵深	4.25	3.85~4.65

况下闸室上游段水位为9.50 m,下游段水位为2.04 m。

根据挡土墙在施工期和运行期的工作性态,所受荷载概况如下:①挡土墙自身结构所受重力;②墙后填土对挡土墙的土压力按《规范》要求以主动土压力形式施加,主动土压力系数取0.6,不考虑墙后填土的黏结力,水位以上取土体密度 $\rho=1900\text{ kg/m}^3$,水位以下取土的有效密度 $\rho'=960\text{ kg/m}^3$;③空箱内填土对空箱结构侧壁和底板的土压力;④挡土墙侧壁所受的水压力,闸室侧壁与挡土墙间水位考虑为上游水位到下游水位的线性折减;⑤运行期挡土墙底部由渗流产生的扬压力。

3.3 原始设计方案下三维有限元复核

为简化计算,不考虑地基的承载力,仅对空箱挡土墙结构进行建模,挡土墙底部为固端约束,通过计算挡土墙底部的最大静摩擦力与底面的支反力在水平方向上的分力的比值来计算 K_c 。以m为单位建模,在全局坐标系下,模型X方向的坐标范围为0~25.9 m,Y方向的坐标范围为0~9.6 m,Z方向的坐标范围为-5.35~4.65 m。取混凝土密度为 2500 kg/m^3 ,弹性模量为30 GPa,泊松比为0.167,采用线弹性本构模型,基于ABAQUS软件计算挡土墙在各荷载工况下的结构内力,计算结果如图3~5所示。

挡土墙结构在3种工况下的强度和稳定性指标计算结果如表2所示。按《规范》要求,基本荷载组合条件下,即本案例中的完建期工况和设计洪水位工况下,空箱式挡土墙沿基底面的 K_c 不应小于1.25, K_f 不应小于1.10;校核洪水位工况所属的特殊荷载组合条件下, K_c 不应小于1.10, K_f 不应小于1.05。此外,在任何工况下, σ_{pt} 不应大于C30混凝土轴心抗拉强度设计值1.43 MPa。

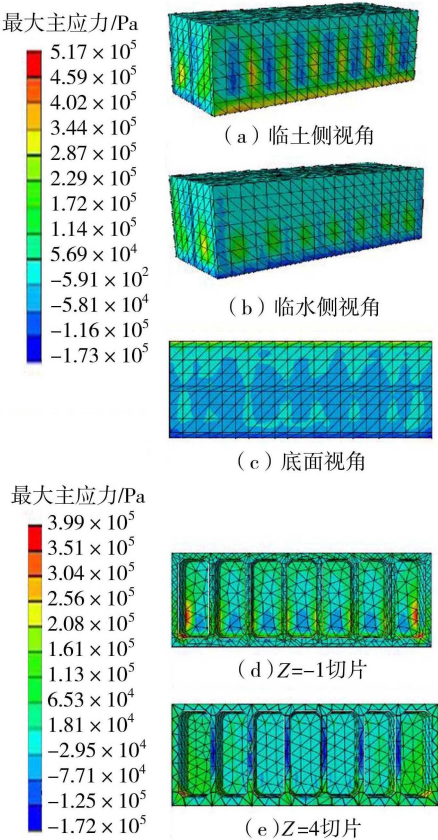


图3 完建期工况下挡土墙最大主应力分布情况

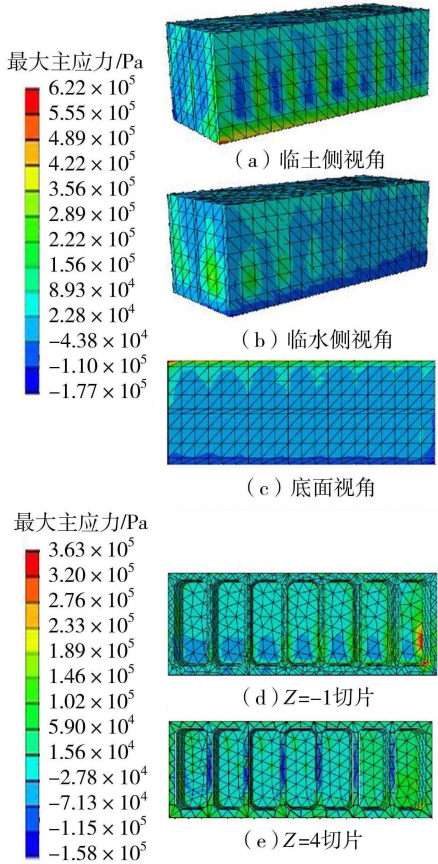


图4 设计水位工况下挡土墙最大主应力分布情况

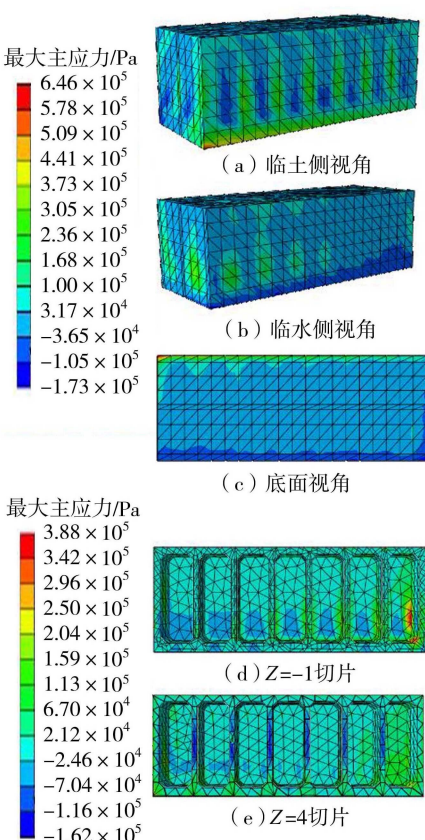


图5 校核水位工况下挡土墙最大主应力分布情况

表2 设计尺寸下挡土墙强度及稳定性计算结果

工况	$P_{\max}/P_{\min}$	K_e	K_f	σ_{pl}/kPa
完建期	1.39	1.51		390.17
设计水位工况	1.35	1.80	4.36	444.13
校核水位工况	1.34	1.83	4.63	462.24

由图3~5和表2可以看出,完建期工况下的 $P_{\max}/P_{\min}$ 和 K_e 指标最不利,设计水位工况下 K_f 指标最不利,而校核水位工况下 σ_{pl} 指标最不利;但总体上看,在设计尺寸下,该挡土墙的强度和稳定性均满足规范要求。

3.4 代理模型建立

各设计变量的尺寸变动范围在表1中给出,为便于实际生产和施工,尺寸变动时以0.05 m为步长,考虑空箱挡土墙各隔板的最小厚度为0.4 m,其在3个维度上的尺寸约束应满足:

$$\begin{cases} x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + 0.5 \text{ m} \times 6 \leq 25.9 \text{ m} - 0.4 \text{ m} \\ x_9 + x_{10} + 0.5 \text{ m} \times 2 \leq 9.6 \text{ m} - 0.4 \text{ m} \\ 2x_{11} + x_{12} + x_{13} \leq 10 \text{ m} - 0.4 \text{ m} \end{cases} \quad (6)$$

式中 $x_1, x_2, \dots, x_{13}$ 的含义见表1。

随机生成10 000组符合尺寸约束的空箱挡土墙尺寸参数,基于Python语言进行空箱式挡土墙的参数化建模、批量计算和后处理,得到10 000种方

案下挡土墙在全部3种水位工况下的抗滑、抗倾覆、不均匀系数和最大拉主应力等参数。以尺寸参数为输入项,强度和稳定性指标为输出项,将前8000组作为训练集,余下2000组为测试集建立代理模型。为了合理评估代理模型的准确性,采用平均绝对误差百分比和均方根误差作为评价指标,评价结果如表3所示。由表3可以看出,代理模型在训练集和测试集上都有着良好的表现,没有出现明显的过拟合现象,从代理模型在测试集上的预测结果可以看出,全部3种工况下4种指标的代理模型预测值与ABAQUS实际计算值间的平均绝对误差百分比均小于6%,因此本文所建立的代理模型可被视为实际有限元模型的高度近似,在后续的尺寸优化进程中,可使用代理模型替代有限元模型来计算不同设计方案下的挡土墙在给定荷载工况下的强度和稳定性指标。

3.5 多目标优化设计

根据上文关于最不利工况的分析结果,本文以完建期工况下的 P_{max}/P_{min} 最小化和 K_e 最大化、校核水位工况下 σ_{pt} 最小化以及优化后挡土墙的混凝土体积最小化为优化目标,将这4个指标分别表示为 y_1 、 y_2 、 y_3 和 V' ,此外设校核水位工况下的 K_e 为 y_4 。本案例中挡土墙的 K_f 远大于规范要求,为简化计算 K_f 在优化进程中不予考虑,本文的多目标优化模型可表示为

$$\begin{cases} \min \{y_1(X), -y_2(X), y_3(X), V'(X)\} \\ \text{s. t. } x_{iL}x_i \leq x_{iU} \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + 0.5\text{ m} \times 6 \leq 25.9\text{ m} - 0.4\text{ m} \\ x_9 + x_{10} + 0.5\text{ m} \times 2 \leq 9.6\text{ m} - 0.4\text{ m} \\ 2x_{11} + x_{12} + x_{13} \leq 10\text{ m} - 0.4\text{ m} \\ y_1(X) \leq 1.50 \\ y_2(X) \geq 1.25 \\ y_3(X) \leq 1.43\text{ MPa} \\ y_4(X) \geq 1.10 \\ V'(X) < V \\ X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}\} \end{cases} \quad (7)$$

式中: x_{iL} 、 x_{iU} 分别为第*i*个设计变量 x_i 的下限和上限; V 为优化前的挡土墙混凝土体积。

同样采用Python语言,设定种群个数为100,最大遗传代数为200,交叉概率为0.9,变异概率为0.1,利用NSGA-II算法对式(7)进行多目标优化求解,求解得到Pareto最优解集如表4所示。对于多目标求解的结果,一般是希望Pareto解集中个体分布是均匀的,在整个目标空间中的分布是广泛的。因此采用超体积指标值HV和分布性指标值Spacing来描述各代Pareto解集的性能^[14],HV越大说明算法的综合性能越好,Spacing越小说明解集中个体的分布越均匀,指标计算结果如图6所示。从图6可以看出,计算一开始,两个指标变化剧烈,迭代次数超过100次以后,NSGA-II算法基本收敛,因此可认为表4中所示的解集是可靠的。

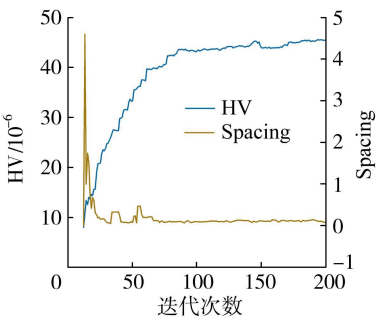


图6 HV及Spacing随迭代过程的变化轨迹

表4中的解均满足式(7),即相较于原始设计方案,这100组方案均能以更少的混凝土用料实现更优的强度和稳定性条件。与常规的单目标优化过程不同的是,使用NSGA-II算法进行多目标优化设计时,考虑的是解之间的支配关系,经过反复迭代后得到的最优解集中的个体往往互不支配。最终的最优解的选取通常是根据问题的具体需求和决策者的偏好,对Pareto最优解集进行直观决策或对目标变量进行主观赋权并计算得到。本文希望在强度和稳定性指标被优化的同时尽可能达到经济性的目的,因此选取表4中混凝土体积最小的一组方案作为最优方案,最优方案下设计变量 X 为{0.40, 2.75, 3.00, 3.05, 3.50, 3.30, 3.40, 3.10, 0.40, 7.60,

表3 代理模型表现

数据集	工况	平均绝对误差百分比/10 ⁻³				均方根误差/10 ⁻³			
		P_{max}/P_{min}	K_e	K_f	σ_{pt}	P_{max}/P_{min}	K_e	K_f	σ_{pt}/kPa
训练集	完建期	4.33	11.52		48.33	7.51	23.92		37530
	设计水位	2.73	7.68	3.24	39.10	4.63	18.13	18.93	26770
	校核水位	2.64	7.71	3.22	41.54	4.44	18.60	19.84	27830
测试集	完建期	4.62	12.63		51.61	8.09	26.51		39980
	设计水位	4.56	13.21	4.05	49.30	7.71	32.82	23.24	34190
	校核水位	4.46	14.02	4.23	58.22	7.54	34.80	25.91	38520

表 4 Pareto 最优解集

方案编号	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}
1	0.45	3.50	3.45	2.70	3.50	3.00	3.25	2.65	0.40	6.95	0.40	4.10	4.65
2	0.45	2.75	3.45	3.00	3.45	3.25	3.40	2.70	0.50	7.60	0.40	4.05	4.60
3	0.40	2.75	3.30	2.70	3.50	3.30	3.45	3.10	0.40	7.55	0.50	4.00	4.50
4	0.45	3.40	3.00	2.75	3.50	3.30	3.40	2.65	0.75	7.40	0.40	4.10	4.65
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
97	0.40	3.50	3.25	2.85	3.50	3.10	3.15	2.70	0.65	7.55	0.40	4.05	4.65
98	0.50	3.40	3.00	2.70	3.50	3.25	3.45	2.65	0.95	7.10	0.40	4.10	4.65
99	0.45	2.75	3.30	2.70	3.50	3.30	3.35	3.05	0.95	7.10	0.60	3.75	4.65
100	0.40	2.75	3.30	2.70	3.50	3.30	3.45	3.05	1.00	7.20	0.60	3.75	4.60

0.40, 4.10, 4.65}。对于这一基于代理模型优化得到的最优方案,本文基于有限元模型对其进行了复核计算,3 种工况下 4 种指标的代理模型预测值和 ABAQUS 实际计算值如表 5 所示。

表 5 最优方案下代理模型预测值和 ABAQUS 计算值对比

模型	工况	$P_{\max}/P_{\min}$	K_e	K_f	σ_{pt}/kPa
代理模型	完建期	1.41	1.42		948.18
	设计水位工况	1.38	1.62	4.19	814.31
	校核水位工况	1.35	1.74	4.58	789.19
有限元模型	完建期	1.38	1.39		892.55
	设计水位工况	1.34	1.70	4.44	807.69
	校核水位工况	1.33	1.73	4.70	864.70

从表 5 可以看出最优方案下由代理模型算得的强度和稳定性指标与由 ABAQUS 计算得到的实际理论值相接近,最大绝对误差百分比出现在对校核洪水位工况下 σ_{pt} 值的预测上,为 8.73%,其他指标预测值的绝对误差百分比处于 0.79%~6.23% 之间。表 3 和表 5 的计算结果表明,本文所建立的代理模型准确可信。

最优方案与原始设计方案下的混凝土用量分别为 854 m³ 和 1038.55 m³,即最优方案下体积减小了约 17.8%,两种方案下的强度和稳定性指标对比结果如表 6 所示。从表 6 可以看出,最优方案下的 $P_{\max}/P_{\min}$ 和 K_f 均优于设计方案,与此同时,指标间的冲突性是无法避免的,较薄的构件厚度和较大的空箱体积也削弱了结构的 K_e ,增大了结构所受内力,但这两项指标尚远小于阈值。因此,就尽可能保证安全性能的前提下缩减工程造价这一优化目标而言,本文提出的基于 NSGA-Ⅱ 算法的优化设计方法

表 6 原始设计方案和最优方案下 ABAQUS 计算结果对比

方案	工况	$P_{\max}/P_{\min}$	K_e	K_f	σ_{pt}/kPa
原始设计方案	完建期	1.39	1.51		390.17
	设计水位工况	1.35	1.80	4.36	444.13
	校核水位工况	1.34	1.83	4.63	462.24
最优方案	完建期	1.38	1.39		892.55
	设计水位工况	1.34	1.70	4.44	807.69
	校核水位工况	1.33	1.73	4.70	864.70

是切实可行的。

4 结 论

a. 基于 Python 语言,通过 ABAQUS 软件的脚本接口,开发并实现了空箱式挡土墙结构的参数化建模、材料属性赋值、荷载和边界条件的施加、网格的划分和计算结果文件的后处理分析,形成了快速高效的空箱式挡土墙结构计算和分析流程。

b. 采用 MLP 算法建立的代理模型能够实现与实际有限元模型间的高度近似,从而以极小的计算成本批量获得有限元模型响应值,大大提高了计算效率。

c. 结合某水闸工程闸室侧的一座空箱式挡土墙,以不利工况下的强度和稳定性指标最优化及体积最小化为目标,在满足强度、稳定性、几何和体积约束的条件下,采用 NSGA-Ⅱ 算法对空箱式挡土墙进行多目标优化。结果表明,本文提出的优化设计方法能够有效权衡多个优化目标,在尽可能保障结构安全性能的前提下有效缩减工程量,具有较显著的工程效益。

参考文献:

[1] 管枫年,薛广瑞. 水工挡土墙设计[M]. 北京:中国水利水电出版社,1996.

[2] 郝明,孙强. 浅谈超高空箱式挡土墙设计与施工[J]. 陕西水利,2016(2):103-105. (HAO Ming, SUN Qiang. Discussion on design and construction of super high altitude box type retaining wall[J]. Shaanxi Water Resources,2016(2):103-105. (in Chinese))

[3] 裴尧尧,罗诗哲,李丽华,等. 基于启发式算法的悬臂式挡土墙尺寸优化[J]. 施工技术,2017,46(增刊2):973-977. (PEI Yaoyao, LUO Shizhe, LI Lihua, et al. Size optimization design of cantilever retaining walls by heuristic algorithm optimization [J]. Construction Technology,2017,46(Sup2):973-977. (in Chinese))

[4] 叶晨茂,汪霏. 基于可靠度的重力式挡土墙断面优化设计[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2014,33

- (5): 95-97. (YE Chenmao, WANG Fei. Optimum design for cross-section of gravity retaining wall based on reliability[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2014, 33(5): 95-97. (in Chinese))
- [5] 陈栋梁, 党进谦. 重力式挡土墙的截面优化设计研究[J]. 岩土力学, 2007(9): 1969-1973. (CHEN Dongliang, DANG Jinqian. Study on optimum cross-section of gravity retaining wall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007(9): 1969-1973. (in Chinese))
- [6] DAS M R, PUROHIT S, DAS S K. Multi-objective optimization of reinforced cement concrete retaining wall [J]. Indian Geotechnical Journal, 2016, 46(4): 354-368.
- [7] ZHU Y, TANG H. Automatic damage detection and diagnosis for hydraulic structures using drones and artificial intelligence techniques [J]. Remote Sensing, 2023, 15(3): 615.
- [8] 张建华, 李静, 林潮宁, 等. U型渡槽参数化有限元建模与智能优化设计研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 75-81. (ZHANG Jianhua, LI Jing, LIN Chaoning, et al. Study on parametric finite element modelling and intelligent optimal design of U-shaped aqueduct [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(5): 75-81. (in Chinese))
- [9] 曹金凤, 王旭春, 孔亮. Python语言在Abaqus中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [10] 张威. 基于ABAQUS二次开发的框架结构有限元分析平台的设计[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- [11] SRINIVAS N, DEB K. Multi objective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms [J]. Evolutionary Computation, 1995, 2(3): 221-248.
- [12] 王勇庆. 改进的含约束NSGA-II算法在货位多目标优化问题中的研究与应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- [13] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [14] FONSECA C M, PAQUETE L, LOPEZ-IBANEZ M, et al. An improved dimension-sweep algorithm for the hypervolume indicator [C]//IEEE Congress on Evolutionary Computation. New York: IEEE, 2006: 1157-1163.

(收稿日期: 2023-03-12 编辑: 骆超)

(上接第60页)

- [29] 苏玉萍, 赖寿辉, 林佳, 等. 富营养化饮用水源地山仔水库限制性营养元素研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(10): 3107-3113. (SU Yuping, LAI Shouhui, LIN Jia, et al. Research on the limiting nutrient in Shanzi Reservoir, an eutrophied drinking water source [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(10): 3107-3113 (in Chinese))
- [30] 翁笑艳, 杨芳, 林志鹏. 福建省山仔水库水质现状及演变趋势分析[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(8): 114-117. (WENG Xiaoyan, YANG Fang, LIN Zhipeng. Water quality evolution of Shanzi Reservoir [J]. Environmental Science and Management, 2011, 36(8): 114-117. (in Chinese))
- [31] 代亮亮, 吕敬才, 周维成, 等. 3种不同营养水平的河流浮游植物群落结构及其与环境因子的相关性[J]. 生态学报, 2021, 41(3): 1242-1250. (DAI Liangliang, LYU Jingcai, ZHOU Weicheng, et al. Phytoplankton's community structure and its relationships with environmental factors in three rivers with different nutrition levels [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(3): 1242-1250. (in Chinese))
- [32] 马廷婷, 范亚民, 李宽意, 等. 基于浮游植物生物完整性指数的太湖主要河口生态健康评价[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(4): 501-508. (MA Tingting, FAN Yamin, LI Kuanyi, et al. Ecological health assessment of main estuaries of Lake Taihu based on phytoplankton index of biotic integrity [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(4): 501-508. (in Chinese))
- [33] WU Zhaoshi, KONG Ming, CAI Yongjiu, et al. Index of biotic integrity based on phytoplankton and water quality index: do they have a similar pattern on water quality assessment? a study of rivers in Lake Taihu Basin, China [J]. Science of The Total Environment, 2019, 658: 395-404.
- [34] 赵晓晨, 张亚娟, 陈基培. 韩江流域河流健康评估中新旧方法差异分析[J]. 水资源开发与管理, 2023, 9(11): 33-42. (ZHAO Xiaochen, ZHANG Yajuan, CHEN Jipei. Differences in new and old methods for river health assessment in the Hanjiang River Basin [J]. Water Resources Development and Management, 2023, 9(11): 33-42. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-01-12 编辑: 雷燕)