

引用格式: 罗文平, 刘维勤, 王红旭, 等. 基于人工蜂群算法和有限元强度计算的集装箱船剖面结构优化 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18(2): 160–167, 217.
LUO W P, LIU W Q, WANG H X, et al. Optimization of the section structure of container ship based on artificial bee colony algorithm and finite element strength calculation[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(2): 160–167, 217.

基于人工蜂群算法和有限元强度计算的集装箱船剖面结构优化



罗文平¹, 刘维勤¹, 王红旭², 杨萌²

1 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 湖北 武汉 430063

2 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

摘 要: [目的] 现有基于有限元强度计算的结构优化研究大多采用改写单元节点信息文件来实现参数化建模的方法, 为解决在船体剖面结构优化过程中难以考虑型材数量变化的问题, 提出一种基于参数化几何建模分析和人工蜂群(ABC)算法的船舳剖面结构优化方法。[方法] 首先, 在 Matlab 平台编写蜂群算法, 并基于 ABAQUS 内核语言 Python 建立能够在其 CAE 模块中生成几何模型的脚本文件; 其次, 建立能够提交有限元计算和读取结果的 Python 脚本文件, 通过将算法每次生成的解改写到脚本对应位置完成几何模型的更新, 后台调用 ABAQUS 并依次运行脚本文件; 最后, 将计算结果返回到 Matlab 平台中进行校核, 完成参数化几何建模与有限元分析。[结果] 以 4600 TEU 集装箱船在总纵弯矩作用下的舱段剖面结构优化为例验证了该方法的可行性, 得到集装箱船舱段结构减重达 18.7%。[结论] 经对比分析, 在设定条件下基于有限元的优化方法比基于规范的优化方法更加充分。
关键词: 人工蜂群算法; 有限元法; 集装箱船; 结构剖面优化; 参数化建模
中图分类号: U661.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19693/j.issn.1673-3185.02520

Optimization of the section structure of container ship based on artificial bee colony algorithm and finite element strength calculation

LUO Wenping¹, LIU Weiqin¹, WANG Hongxu², YANG Meng²

1 School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

2 China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

Abstract: [Objectives] The method of rewriting the element node information file to realize parametric modeling is commonly employed in existing structural optimization based on finite element (FE) strength calculation, but it remains difficult to consider variations of the profile number in hull section structure optimization. To this end, a container ship structure optimization method based on FE strength calculation is proposed using an artificial bee colony (ABC) algorithm and parametric FE modeling method. [Methods] First, the bee colony algorithm is written on the Matlab platform, and a script file which can generate the geometric model in its CAE module is established based on the ABAQUS kernel in the Python language. A Python script file which can submit the FE calculation and read the results is established. The geometric model is updated by rewriting the solution generated by the algorithm to the corresponding position in the script, then ABAQUS is called in the background and the script files are run in turn. Finally, the calculation results are returned to Matlab for verification, and the parametric geometric modeling and FE analysis are completed. [Results] The feasibility of this method is verified by taking the section structure optimization of a 4600 TEU container ship as an example. It is found that the weight reduction of the container ship cabin structure reaches 18.7%. [Conclusions] When the results of the FE strength optimization and code optimization are compared and analyzed, under the set conditions, the FE optimization method is more sufficient than that based on code.
Key words: artificial bee colony algorithm; finite element method; container ship; structural optimization of hull section; parametric modeling

收稿日期: 2021-09-15 修回日期: 2021-11-15 网络首发时间: 2023-04-18 10:00
基金项目: 国防基础科研计划资助项目(JCKY2020206B037)
作者简介: 罗文平, 男, 1997 年生, 硕士生。研究方向: 船舶结构优化。E-mail: important979lw@163.com
刘维勤, 男, 1985 年生, 博士, 副教授。研究方向: 船舶与海洋工程结构物优化。E-mail: liuweiqin_123@sina.com
王红旭, 男, 1984 年生, 高级工程师

*通信作者: 刘维勤

0 引 言

船舶结构优化设计的方法主要包括规范与有限元强度直接计算两种。基于规范的优化研究虽比较成熟,但对经验的依赖程度较高^[1-2]。同时,规范也推荐船长过大的船舶使用有限元法进行强度校核。采用有限元法对大型船舶进行结构优化设计,不仅符合规范要求,也顺应结构优化逐步结合有限元的趋势。由于船舶结构优化过程中的设计变量众多并离散,且有限元模型需要反复更新,因此寻找适宜于船舶结构优化问题的算法以及能够结合有限元法至关重要。

目前,应用有限元进行结构优化设计的方法主要包括:1)利用 iSIGHT 等软件平台将优化软件与有限元软件集成;2)Matlab 直接调用 Nastran;3)Matlab 直接调用 ANSYS。iSIGHT 作为一种通用设计优化软件,本身不含模拟仿真程序,但能同其他软件集成,并驱动其按照一定顺序计算分析,在船舶结构优化中应用较多。李仲伟等^[3]采用 iSIGHT 集成 Nastran 与 OptiStruct,对小水线面双体船进行了尺寸、形状与拓扑优化。何小二等^[4]采用 iSIGHT 集成 Matlab 与 Nastran,将板厚与骨材截面形状作为变量,利用粒子群算法对多用途船进行了结构优化。邵雄飞等^[5]建立了优化平台,首先设计样本对神经网络进行训练,再采用粒子群算法对超大型油船的舱段进行优化设计。由于利用集成平台进行优化是一种间接调用,对于船舶优化中的复杂问题,对操作人员的要求较高,不利于普遍使用。何勇等^[6]提出一种 Matlab 直接调用 Nastran 的方法,通过不断改写 bdf 文件与获取 f06 结果文件实现优化过程,并以甲板板架为对象验证了可行性。值得注意的是,bdf 文件中只能修改节点与单元的属性,不能够改变几何形状与布置。宋宏伟等^[7]提出一种 Matlab 直接调用 ANSYS 的方法,以 txt 文件为中介进行数据交换,并对钢框架结构进行了优化设计以验证可行性。目前,通过 Matlab 调用 ANSYS 优化的方法多针对一些简单模型,暂无在船舶领域的应用。综上,基于有限元强度计算的已有优化研究都是在几何体不产生变化的前提下,通过直接或间接的方式在优化过程中不断改写单元节点信息文本,并未考虑剖面型材数量变化的情况。

人工蜂群算法是一种模仿蜜蜂觅食机制而产生的优化算法。有学者通过将人工蜂群算法与遗传算法、蚁群算法、粒子群算法等做比较,发现人工蜂群算法在收敛性和收敛速度上均有优势^[8]。

随后便有学者将人工蜂群算法应用到船舶各类复杂优化问题中,如对大型舰船概念设计中的主尺度方案的优化^[9]、对船体型线部分特征点的优化^[10]、为提升受损船舶自救能力对扶正方案的优化^[11]、以及对油船舦剖面结构进行的优化等^[12]。上述研究表明,将人工蜂群算法应用于船舶复杂离散的优化问题是成熟可行的,但暂未见将人工蜂群算法与有限元强度计算相结合的相关剖面优化研究。

本文将基于人工蜂群算法和有限元强度直接计算,结合参数化的船体剖面有限元建模手段,提出一种 Matlab 直接调用 ABAQUS 的优化方法,并以 4600 TEU 集装箱船为对象,实现考虑型材数量变化的舦剖面优化设计。首先,在 Matlab 平台编写蜂群算法,并基于 ABAQUS 内核语言 Python 建立能够在其 CAE 模块中生成几何模型的脚本文件;然后,建立能够提交有限元计算和读取结果的 Python 脚本文件,通过将算法每次生成的解改写到脚本对应位置来完成几何模型的更新;其次,在后台调用 ABAQUS 并依次运行脚本文件,将计算结果返回到 Matlab 中进行校核,实现能考虑剖面型材数量变化的参数化几何建模与有限元分析(FEA);最后,在设定条件下比较分析基于规范与有限元强度计算方法的优化结果。

1 人工蜂群算法

人工蜂群算法是为了解决函数优化问题提出的一种新型群集智能优化算法,与遗传算法、差分进化算法和粒子群优化算法相比,其求解质量相对较好^[13]。该算法模拟蜜蜂的采蜜机制,蜂群主要由引领蜂、跟随蜂和侦察蜂组成。在初始状态下,引领蜂会在目标区域内寻找新的蜜源,并将信息传递给跟随蜂;跟随蜂根据概率选择蜜源并在小范围内搜索新的蜜源,若搜寻一定次数后仍未发现更好的蜜源,则该蜜源会被舍弃,相应地,引领蜂转变为侦察蜂,寻找新的蜜源。算法的基本流程如图 1 所示。因此,与其他群体优化算法相比,人工蜂群算法在全局搜索的同时也可局部搜索,并具有跳出局部最优的优势能力^[14]。

1.1 初始化蜜源

最初,引领蜂会在初始蜜源附近寻找新的蜜源,因此初始蜜源的位置决定了收敛速度以及最终解的情况。为了避免局部最优,初始蜜源具有一定随机性。而为在全局范围内寻找优质蜜源,通常采用式(1)~式(3)随机生成初始解。

$$X_{\max} = [X_{\max,1}, X_{\max,2}, \dots, X_{\max,n}]$$

(1)

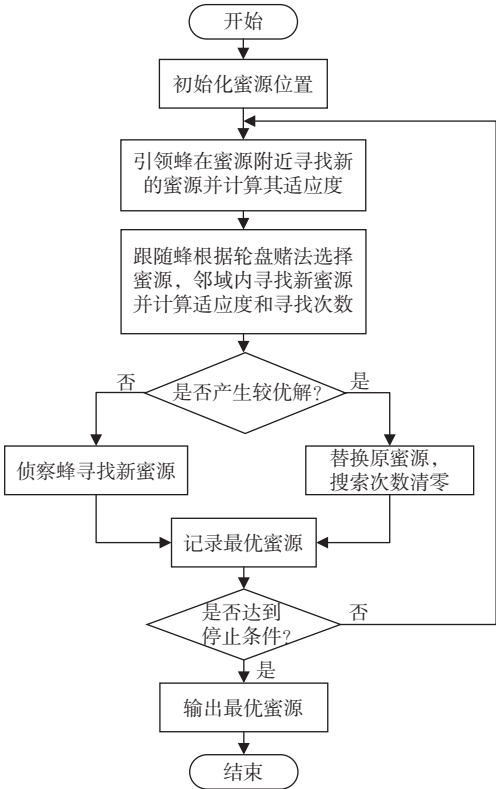


图 1 人工蜂群算法流程

Fig. 1 Flow chart of artificial bee colony algorithm

$$X_{\min} = [X_{\min,1}, X_{\min,2}, \dots, X_{\min,n}] \tag{2}$$

$$X_{i,j} = X_{\min,j} + \text{rand}(0,1) \cdot [X_{\max,j} - X_{\min,j}] \tag{3}$$

式中： $i \in (1,2,\dots,n)$ ， n 为变量个数； $j \in (1,2,\dots,SN)$ ， SN 为引领蜂数量； $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别为变量上、下限； $\text{Rand}(0,1)$ 为产生 0~1 之间的任意数的 Matlab 函数； $X_{i,j}$ 为第 j 个引领蜂为变量 i 找到的初始解，因此 X_i 为原始算法求得的初始解向量。由于船舶结构优化中存在大量的离散数据，且根据实际的生产情况，诸如板厚等数据取值有一定限制，因此本研究通过式(4)和式(5)建立了每个变量的数据库，蜜源从数据库中随机生成。

$$X_i = [X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{im}] \tag{4}$$

$$X_j = [X_1(\text{randperm}(m,1)), X_2(\text{randperm}(m,1)), \dots, X_i(\text{randperm}(m,1))] \tag{5}$$

式中： $\text{randperm}(m,1)$ 表示从矩阵 m 个数据中任取一个的 Matlab 函数； X_j 为本文求得的离散数据的初始解向量。

1.2 概率选择策略

跟随蜂根据引领蜂寻找的蜜源质量，前往按轮盘赌方式选择的蜜源，其选择概率如式(6)所示。

$$P_i = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \tag{6}$$

式中， F_i 为可行解的适应度，适应度较好的蜜源被选中的概率较大，通过式(7)求得。

$$F_i = \begin{cases} \frac{1}{1+f_i} & f_i \geq 0 \\ 1+|f_i| & f_i < 0 \end{cases} \tag{7}$$

式中， f_i 为目标函数值。

1.3 搜索新蜜源策略

跟随蜂和引领蜂均在已发现蜜源附近按式(8)寻找新的蜜源：

$$V_{i,j} = X_{i,j} + \text{rand}(0,1) \cdot (X_{i,j} - X_{k,j}) \tag{8}$$

式中： $i,k \in (1,2,\dots,SN)$ ， $j \in (1,2,\dots,n)$ ， $i \neq k$ ； $V_{i,j}$ 为在 $X_{i,j}$ 领域内寻找的一个蜜源位置，每个蜜源位置代表问题的一个可能解，当发现更好的蜜源时会替换掉原蜜源；反之，引领蜂则转变为侦察蜂按式(9)在全局范围内寻找新的蜜源，以避免陷入局部最优的情况。

$$X_{i,j} = X_{\min,j} + \text{rand}(0,1) \cdot (X_{\max,j} - X_{\min,j}) \tag{9}$$

2 集装箱船剖面优化

基于有限元的已有优化多采用改写包含单元节点信息文本的方法，而单元节点信息要在对几何体进行有限元网格处理后才能得到，因此不能考虑到剖面型材数量等结构布置形式改变引起几何体改变的情况。Matlab 凭借其高效的数据处理能力，已成为各类算法的常用平台。ABAQUS 有限元分析软件包含了从建模到分析的所有功能，并以 Python 作为内核语言，可以在后台运行，使得程序化调用成为可能。

2.1 计算路径

本文优化模型是建立在 Matlab 和 ABAQUS 联合仿真基础上的，人工蜂群算法在 Matlab 环境中运行，基于 ABAQUS 内核语言 Python 建立有限元模型与计算分析。具体流程如图 2 所示：1) 建立能够实现在 ABAQUS 的 CAE 模块中建立船艏艉段模型并提交计算的 Python 脚本文件 1；2) 建立能够读取脚本文件 1 所提交计算完成后所得 odb 格式结果文件的 Python 脚本文件 2；3) 将 Matlab 中生成的蜜源改写到 Python 脚本 1 的对应位置；4) 使用 Matlab 直接后台调用 ABAQUS，在 Matlab 平台运行 Python 脚本文件 1，待脚本文件 1 提交的计算文件在 ABAQUS 计算完毕后，再自动运行脚本文件 2 所提取的结果，并将计算结果返回到 Matlab 中进行校核；5) 重复执行上述 3) 和 4) 步骤，直至迭代结束。

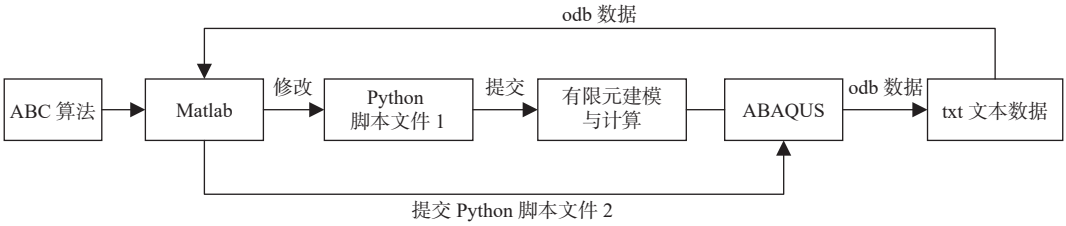


图 2 集装箱船的结构优化计算流程图

Fig. 2 Calculation process of container ship structure optimization

2.2 计算模型

本文基于 4 600 TEU 集装箱船进行剖面优化设计。该船舶总长 260 m, 型宽 37.3 m, 型深 19.6 m, 设计吃水 11.0 m, 方形系数 0.671, 采用 Q235 钢建造。由于船体结构具有较大的长宽比, 导致在波浪载荷作用下船体纵向弯曲尤为严重。因此, 本算例是以总纵强度为设定条件, 分别以规范中总纵强度相关要求 and 有限元直接计算为约束条件, 基于《钢制海船入级规范》^[15] 和相关文献资料^[16], 对舱段模型施加最大波浪弯矩, 在舱段两端施加多点约束(MPC), 仅释放船长方向的位移与转动两个自由度^[16]。以图 3 所示的船舯剖面为设计对象, 虽然理论上横向构件对于总纵强度的贡献较小, 但考虑到结构实际情况, 建立包含若干个强框架长度的有限元舱段模型, 优化舱优化段纵向构件, 舱段的初始重量为 2 116.1 t, 初始最大应力为 153.5 MPa。

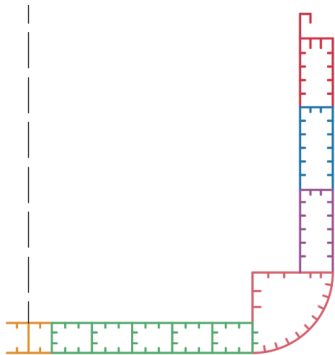


图 3 结构剖面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of structural section

由于设计变量较多不便于阐述, 因此根据集装箱船的剖面结构特点, 将构件归属于不同结构区域进行展示(在建立有限元模型时仍为整体性建模), 主要包括: 上部舷侧、舯部舷侧、下部舷侧、舳部、舯部船底和侧部船底 6 个区域, 分别考虑板厚、型材数量、型材高度以及型材厚度等纵向构件, 共计 38 个变量。考虑到实船结构除了受到总纵弯矩外还受到其他载荷影响, 以规范中各区域最小板厚及型材剖面模数等局部强度要求为基础, 选取的设计变量上、下限如表 1 所示。其

中, nu 为型材数量, t 为板厚, h 为腹板高度, t_1 为型材厚度, l 为面板宽度, t_2 为面板厚度, nu_0 , t_0 , h_0 , t_{10} , l_0 , t_{20} 为其对应参数的初始值。综合考虑到工艺要求, 板厚的步长取 0.5, 其他步长取 1。详细的区域划分可见第 3 节优化结果部分。

表 1 变量范围取值原则

Table 1 Principle for variables selection range

变量	下限	上限
nu	nu_0-2	nu_0+2
t	$0.5t_0$	$1.5t_0$
h	$0.5h_0$	$2h_0$
t_1	$0.5t_{10}$	$1.5t_{10}$
l	$0.5l_0$	$2l_0$
t_2	$0.5t_{20}$	$1.5t_{20}$

2.3 目标函数

集装箱船作为运输船舶, 在保证安全的同时, 需要尽量减少船体自重, 以降低建造成本和提升运输效益, 目标函数如式(10)~式(12)所示。

$$F_{\text{goal}}(x) = A(x) + B(x) \tag{10}$$

$$A(x) = \rho \cdot c \cdot \sum_{j=1}^6 k_j \cdot t_j \tag{11}$$

$$B(x) = \rho \cdot c \cdot \sum_{j=1}^6 (h_j \cdot t_{1j} + l_j \cdot t_{2j}) \tag{12}$$

式中: $A(x)$ 表示 6 个部分的板材重量; $B(x)$ 表示型材重量; k, t, h, t_1, l, t_2 为设计变量; $j \in (1, 2, \dots, 6)$, 代表上部舷侧、舯部舷侧、下部舷侧、舳部、舯部船底和侧部船底 6 个区域; ρ 表示材料密度; c 表示舱段长度。

2.4 约束条件

2.4.1 有限元约束条件

调用有限元能将生成的每一个蜜源进行有限元建模与计算, 得到整个舱段的应力应变情况。由《钢制海船入级规范》可知, 为了达到安全要求, 需满足式(13)~式(16)。

$$[\delta] = 190/K$$

(13)

$$[\tau] = 120/K$$

(14)

$$\delta_{\max} - [\delta] \leq 0$$

(15)

$$\tau_{\max} - [\tau] \leq 0$$

(16)

式中： K 为材料系数； $[\delta]$ 和 $[\tau]$ 为许用应力和许用剪切应力； $\delta_{\max}$ 和 $\tau_{\max}$ 代表舱段的最大应力与最大剪切应力。

2.4.2 规范约束条件

基于规范进行优化时，提取出需要满足其中关于总纵弯矩下的经验约束条件，包括：1)剖面最小惯性矩要求；2)甲板处最小剖面模数及应力要求；3)船底处最小剖面模数及应力要求等。其中，约束条件1)~3)均为总纵强度的规定，用式(17)和式(18)综合表示为：

$$l_p(x) = m_p(x) - r_p(x)$$

(17)

$$l_p(x) \geq 0$$

(18)

式中： $p \in (1, 2, \dots, n)$ ，为不同的经验约束； $m_p(x)$ 表示实际情况； $r_p(x)$ 表示规范的约束值， $l_p(x)$ 用来在算法中表示本次迭代步中的重量与规范阈值的余量。

3 结果分析

根据上节建立的数学模型，以总纵弯矩载荷

为设定条件，将有限元直接计算和规范中与总纵强度相关的要求分别作为约束条件，根据局部强度要求确定变量区间，再进行船舫剖面纵向构件的优化设计。人工蜂群算法的基本参数设置为：变量个数 $n=41$ ，最大迭代次数 $I_{\max}=50$ ，引领蜂与跟随蜂数量相等 ($SN=100$)，搜寻次数上限 $L=60$ 。为确保准确性，由 Matlab 调用 ABAQUS 进行约 1 万次的计算后，得到优化过程如图 4 所示，舱段各个部件优化前后的详细数据及变化率如表 2~表 7 所示。为了校核两种方法的最终优化结果的可靠性，分别建立有限元模型并进行分析得到应力云图，如图 5 所示。在基于规范和基于有限元直接计算的优化设计中，除约束条件不同外，其

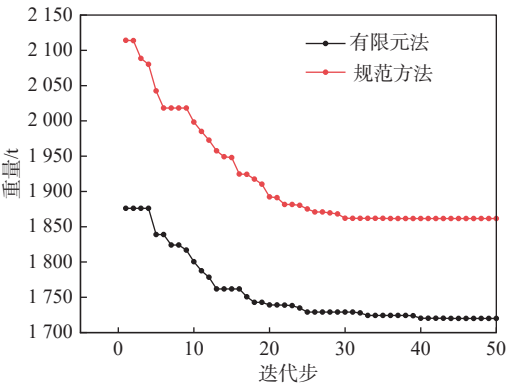


图 4 基于有限元法与规范的优化迭代过程

Fig. 4 Iterative process of FEA and code-based optimization

表 2 舯部船底区域设计变量及优化结果

Table 2 Design variables and optimization results for midship bottom area

设计变量	优化前	规范优化后	变化率/%	有限元优化后	变化率/%
内底板厚/mm	14	11.5	-17.9	11.0	-21.4
上下型材数量/个	1	1	0	1	0
内底型材/mm	160×10.0	140×12.5	+9.4	140×9.5	-16.9
中底桁厚度/mm	13.0	11.5	-11.5	11.0	-15.4
外底板厚/mm	18.0	17.5	-2.8	15.5	-13.9
外底型材/mm	240×10.0	220×12.5	+14.6	220×9.5	-12.9

表 3 侧部船底区域设计变量及优化结果

Table 3 Design variables and optimization results for lateral bottom area

设计变量	优化前	规范优化后	变化率/%	有限元优化后	变化率/%
内底板厚/mm	14	12	-14.3	11	-21.4
上下型材数量/个	2	3	+50.0	3	+50.0
内底型材/mm	260×11	250×10	-12.6	250×10	-12.6
旁底桁厚度/mm	11.5	9.0	-21.7	9.5	-17.4
旁底桁型材数量/个	2	2	0	1	-50.0
旁底桁型材/mm×mm	160×11.5	140×10.0	-23.9	140×10.5	-20.1
外底板厚/mm	16.0	15.5	-3.1	13.5	-15.6
外底型材/mm	300×11	270×10	-18.2	270×10	-18.2

表 4 艏部区域设计变量及优化结果

Table 4 Design variables and optimization results for bilge area

设计变量	优化前	规范优化后	变化率/%	有限元优化后	变化率/%
艏部外板厚/mm	15	11	-26.7	12	-20.0
垂直交叉板厚/mm	8.0	7.5	-6.3	6.5	-18.8
型材数量/个	4	3	-25.0	2	-50.0
竖直板型材/mm	280×11.5	270×10.0	-16.1	260×10.5	-15.2
水平板型材/mm	270×11.0	300×11.0	+11.1	240×9.5	-23.2

表 5 上部舷侧区域设计变量及优化结果

Table 5 Design variables and optimization results for upper side area

设计变量	优化前	规范优化后	变化率/%	有限元优化后	变化率/%
各甲板型材数量/个	2	1	-50.0	1	-50.0
主甲板板厚/mm	20	19	-5.0	19	-5.0
甲板型材/mm	400×11.0	365×11.0	-8.8	380×9.5	-18.0
舷侧外板板厚/mm	16	15	-6.3	13	-18.8
舷侧内板板厚/mm	12.0	12.0	0	11.5	-4.2
舷侧型材数量/个	4	3	-25.0	4	0
舷侧型材/mm	260×13.0	280×10.5	-13.0	240×11.5	-18.3

表 6 舯部舷侧区域设计变量及优化结果

Table 6 Design variables and optimization results for midship side area

设计变量	优化前	规范优化后	变化率/%	有限元优化后	变化率/%
二级甲板板厚/mm	10.0	11.5	+15.0	8.5	-15.0
甲板型材/mm	200×11.0	200×11.0	0	200×9.5	-13.6
舷侧外板板厚/mm	14.0	12.0	-14.3	11.5	-17.9
舷侧内板板厚/mm	11.5	11.5	0	8.5	-26.1
舷侧型材数量/个	5	4	-20.0	4	-20.0
舷侧型材/mm	230×13.0	230×10.5	-19.2	230×11.5	-11.5

表 7 下部舷侧区域设计变量及优化结果

Table 7 Design variables and optimization results for lower side area

设计变量	优化前	规范优化后	变化率/%	有限元优化后	变化率/%
三级甲板板厚/mm	8	10.5	+31.3	9.0	+12.5
甲板型材/mm	270×11.0	300×11.0	+11.1	240×9.5	-23.2
舷侧外板板厚/mm	13.0	11.5	-11.5	12.0	-7.7
舷侧内板板厚/mm	11.5	11.0	-4.3	9.0	-21.7
舷侧型材数量/个	5	5	0	3	-40.0
舷侧型材/mm	220×13.0	230×10.5	-15.6	250×11.5	+0.5

余条件一样(有限元分析以直接计算的材料应力结果为约束,规范以其中关于总纵强度的规定为约束),旨在遵循控制单一变量原则。结果表明,基于有限元的优化结果舱段最大应力为 177.6 MPa,基于规范的优化结果舱段的最大应力为 167.5 MPa。可见,两种方法的优化结果所得应力云图分布规律相近,且均满足强度要求。

基于规范和有限元的优化初始重量一致,如 2.2 节所述,图 4 中的起点代表第 1 次迭代后的最优解,与初始蜜源具有一定随机性相关。由图可知,在同样设置条件以及变量范围内,基于规范和有限元的优化都在 30~40 步之间进入收敛阶段,故也表明该算法具有一定的稳定性。从收敛的最终结果来看,基于有限元的优化方法结构减

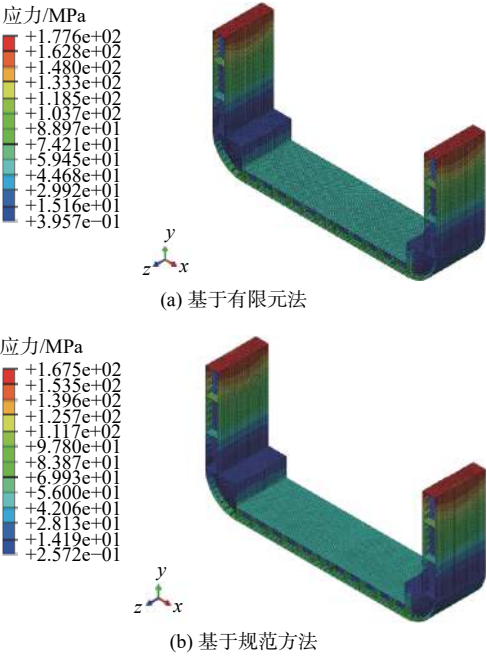


图 5 基于有限元法与规范最终优化结果的舱段校核应力云图
Fig. 5 Stress cloud map of cabin checked with FEA and code-based method according to the final optimization results

重 18.7%，基于规范的优化方法结构减重 12%。可见，仅在总纵强度要求下采用有限元法相比规范方法的结构优化减重更大，表明基于有限元法在设定条件下的优化更充分。此外，虽然优化变量没有包含对纵向强度贡献很小的横向构件，但在有限元优化中为了结构真实性而考虑了横向构

件的作用，分担贡献了小部分强度，对于纵向构件的结构优化更充分也有一定帮助。

根据表 2~表 7 中基于规范与有限元的优化结果不难看出，基于有限元法的结果在侧部船底、舳部、舳部舷侧和下部舷侧区域的型材数量都发生了变化，表明本研究提出的方法可以考虑型材数量变化的情况。其次，采用两种方法优化后各区域的重量都得到了不同程度的减少，但基于有限元优化方法的减重效果都比基于规范优化方法的显著。例如，在船底区域，基于有限元法的减重为 14.8%，基于规范方法的减重为 7.7%；在舳部区域，两种方法减重均有明显的效果，其中前者减重 27%，后者减重 12.7%；在舷侧区域，前者减重 17.9%，后者减重 9.4%。值得注意的是，在上部舷侧区域中，两种方法减重程度均较小，优化后甲板及其型材甚至得到了一定加强处理（相比于原始情况）。为了进一步探究其内在规律，给出两种方法优化过程中包括剖面模数、惯性矩和舱段最大应力等参数的变化图，如图 6 所示。

图 6 中各分图的初始值与图 4 一样，也代表第 1 次迭代的最优解，与初始蜜源有关，并且从中可以看出，基于有限元法与规范的剖面优化设计过程中，各项参数的收敛趋势均与图 4 的目标函数收敛趋势相近。在优化过程中，基于有限元法的剖面模数与惯性矩比基于规范的变化更大，但其舱段最大应力比基于规范的变化要小。

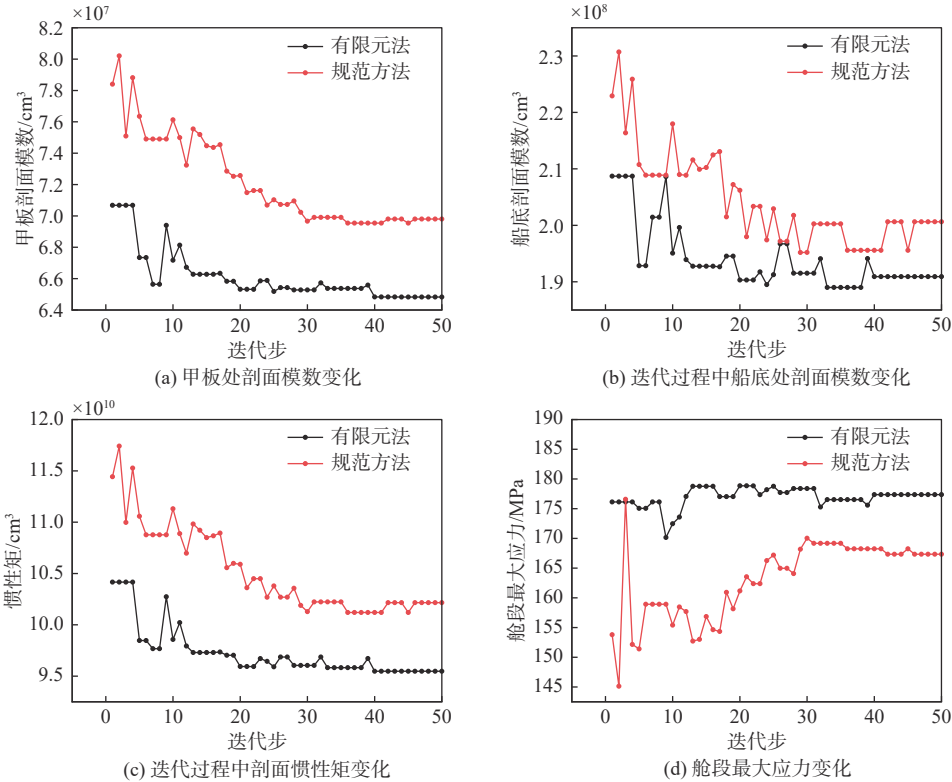


图 6 迭代过程中基于有限元法与规范的相关参数变化

Fig. 6 Variation of related parameters during iteration with FEA and code-based method

对于上述结果, 基于规范所给出的校核条件, 大多是经验性的公式或者定值, 其中就包括剖面模数和惯性矩等, 因此优化过程中会受到其约束并最终向其逐渐靠拢, 不会出现大的波动, 并且在同时接近多个条件时达到收敛。而在实际情况下, 三维舱段模型的内部关系复杂, 最大应力等能直接反映安全状况的各项指标与经验性公式之间是呈现非规律性的, 如图 6(d) 中基于规范的舱段最大应力变化所示, 所以基于经验性的规范对真实三维模型进行剖面优化的最终效果不佳。而基于有限元的剖面优化方法, 每次都会将算法生成的方案进行舱段模型重建并提交计算, 再根据强度直接计算的结果进行安全校核, 所以每一步的迭代都以最大应力等能直接反映安全状况的各项指标为校核目标, 除此之外, 不会受到其他的约束。从最终优化结果来看, 在满足材料安全的基础上基于有限元法的各项指标优化更多。因此, 规范主要用于船舶设计建造的指导, 对于特定条件下的船舶结构优化问题, 结合有限元强度直接计算的方法更加符合实际, 优化更加充分。

本文旨在验证所提优化方法的有效性, 以集装箱船所受载荷的主要成分——总纵弯矩为载荷条件, 通过优化区间考虑局部强度的影响, 优化结果表明, 减重达 18%。而在实际情况下, 船舶还受到波浪下的扭矩、砰击等多重影响, 优化结果不会如此理想, 所以在采用有限元直接计算进行优化时, 需根据研究目标确定合适的载荷条件。

4 结 论

本文基于 Matlab-ABAQUS 的联合仿真和参数化建模方法, 根据有限元强度直接计算结果进行校核, 应用人工蜂群算法对 4 600 TEU 集装箱船总纵弯矩作用下的剖面纵向构件进行优化设计, 并在相同设定条件下对基于规范和有限元法的优化结果进行了比较分析, 主要得到如下结论:

- 1) 基于有限元分析的优化方法可以成功应用于船舶剖面结构优化设计, 结构可减重 18.7%。
- 2) 通过参数化几何建模, 实现了考虑型材数量变化的优化过程, 解决了以往研究中只能通过改变单元属性实现优化的问题, 使得优化效果更加完善。
- 3) 在相同设定载荷条件下, 基于规范的优化方法需人工输入的约束条件较多, 结果保守; 而基于有限元强度直接计算的优化方法综合考虑了结构间的相互影响, 使得优化结果更佳, 采用该方法可以准确得到不同校核标准下的优化结果。

需要指出的是, 为证实本文所提方法的有效性, 研究仅将此方法应用于总纵弯矩载荷下对船舫剖面进行线性范围内优化, 而实际情况下的载荷十分复杂, 优化结果不会如此理想, 因此下一步研究拟考虑复杂载荷及非线性范围内的优化。

参考文献:

[1] 许埔宁, 张崎, 白泽坤. 基于规范计算的油船中剖面优化设计 [J]. 造船技术, 2020(6): 16–22.

XU P N, ZHANG Q, BAI Z K. Oil tanker midship section optimization design based on calculation in rules[J]. Marine Technology, 2020(6): 16–22 (in Chinese).

[2] 朱稣骥, 顾学康, 胡嘉骏. 遗传算法的改进及其在超大型油船结构优化中的应用 [J]. 船舶力学, 2007, 11(2): 237–249.

ZHU S J, GU X K, HU J J. Modification of genetic algorithm and its application in ship structural optimal design of a VLCC[J]. Journal of Ship Mechanics, 2007, 11(2): 237–249 (in Chinese).

[3] 李仲伟, 吴有生, 崔维成. 基于有限元法的小水面双体船结构优化 [J]. 船舶力学, 2005, 9(2): 99–108.

LI Z W, WU Y S, CUI W C. Finite element method based structural optimization for SWATH[J]. Journal of Ship Mechanics, 2005, 9(2): 99–108 (in Chinese).

[4] 何小二, 王德禹, 夏利娟. 基于粒子群算法的多用途船结构优化 [J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(6): 928–931.

HE X E, WANG D Y, XIA L J. Optimization of multi-purpose ship structures based on particle swarm approach [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2013, 47(6): 928–931 (in Chinese).

[5] 邵雄飞, 俞铭华, 郭小东. 基于直接计算法的超大型油船整体舱段结构优化 [J]. 中国造船, 2008, 49(2): 41–51.

SHAO X F, YU M H, GUO X D. Structure optimization for very large oil cargo tanks based on FEM[J]. Shipbuilding of China, 2008, 49(2): 41–51 (in Chinese).

[6] 何勇, 夏利娟. 一种基于 MATLAB 和 Nastran 的船体结构优化程序研究 [J]. 船舶工程, 2011, 33(增刊 2): 132–134, 167.

HE Y, XIA L J. Study on a ship structural optimization program based on MATLAB and Nastran[J]. Ship Engineering, 2011, 33(Supp 2): 132–134, 167 (in Chinese).

[7] 宋宏伟, 刘浩. 基于 MATLAB 与 ANSYS 的结构优化设计 [J]. 大连民族学院学报, 2011, 13(3): 284–287.

SONG H W, LIU H. Optimum structural design based on MATLAB and ANSYS[J]. Journal of Dalian Nationalities University, 2011, 13(3): 284–287 (in Chinese).

[8] KARABOGA D, AKAY B. A comparative study of artificial bee colony algorithm[J]. Applied Mathematics and Computation, 2009, 214(1): 108–132.