文章编号:1005-9865(2021)03-0042-09

屈曲利用因子约束下船体板架结构优化设计方法

韩 涛[1],汪俊泽[2],王 元[1],易家祥[2],吴嘉蒙[1],程远胜[2],刘 均[2]
(1. 中国船舶及海洋工程设计研究院,上海 200011;2. 华中科技大学 船舶与海洋工程学院,湖北 武汉 430074)

摘 要:船体板架结构在屈曲约束下的优化问题具有变量多和约束多的特点,且屈曲计算需借助有限元分析,属于大规模耗时优化问题,运用常规优化方法求解需要较高的计算成本。这里提出一种适用于屈曲约束下船体板架快速优化方法,该方法利用板格屈曲利用因子具有局部性的特点,对板格厚度自变量空间进行降维处理;利用板格屈曲利用因子对板格厚度具有单调性的特点,采用牛顿迭代方法求解其达到目标值的板格厚度;同时比较板格在相同重量增量下,加筋叠加板厚与仅加板厚对屈曲利用因子改善程度的大小决定是否加筋;通过两阶段的迭代寻优,快速获得最优的板厚以及防屈曲筋布置方案。某油船双层底优化结果显示,该方法能够在 30 步之内完成优化计算,优化效率高;优化方案相比原始方案减重达 17.63%,绝大部分板格屈曲利用因子取值在 0.9~1.0 之间,材料得到充分利用。

关键词:船体板架;屈曲利用因子;优化设计;板格厚度;加筋
中图分类号:U663.2 **文献标志码**:A DOI:10.16483/j.issn.1005-9865.2021.03.005

Optimization of ship grillage structure under constraints of buckling utilization factor

HAN Tao[1], WANG Junze[2], WANG Yuan[1], YI Jiaxiang[2], WU Jiameng[1], CHENG Yuansheng[2], LIU Jun[2]
(1. Marine Design and Research Institute of China, Shanghai 200011, China; 2. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The optimization of a ship grillage structure under the constraints of buckling utilization factor with finite element method for buckling analysis possesses the characteristics of many variables and constraints, which is an expensive large scale optimization issue. It is computationally prohibitive to solve this optimization problem using the conventional optimization method. To this end, a novel fast optimization approach for ship grillage structure under the buckling constraint is proposed. Using the locality of the panel buckling utilization factor, the variable dimensionality can be reduced while using the monotonicity between the buckling utilization factor and the thickness of a buckling panel. The Newton iterative method can be applied to obtain the thickness of buckling panel with the buckling utilization factor reaching the expected value. Meanwhile, the configuration of anti-buckling stiffener is decided by comparing the improvement degrees in the buckling utilization factor of adding anti-buckling stiffener and thickness together with adding thickness only under the same mass condition. Through two-stage iterative optimization, the optimized scheme of the thickness of buckling panel and the anti-buckling stiffener setting can be determined quickly. The optimization results of double bottom structure of an oil tanker show that the optimization can be done in less than 30 steps, which demonstrates the effectiveness of the proposed approach. The weight of optimal scheme is reduced by 17.63% compared with the original scheme, and most of the panel buckling utilization factors of the optimal scheme are between 0.9 and 1.0. Materials are fully utilized.

Keywords: ship grillage; buckling utilization factor; optimization design; thickness of buckling panel; anti-buckling stiffener

船舶结构优化[1]一般是指在满足结构的强度、刚度、稳定性等约束下,寻求重量最轻结构方案。经典优

收稿日期:2020-06-14
作者简介:韩 涛(1991-),男,助理工程师,主要从事船舶结构设计。E-mail:hanhantaotao@yeah.net
通信作者:刘 均,主要从事船舶结构优化、结构振动与冲击方面的研究。E-mail:hustlj@hust.edu.cn

化算法[2]、智能优化算法[3]以及基于代理模型的智能优化算法[4]常用于求解此类问题。

屈曲约束下的船体结构优化涉及到复杂的屈曲利用因子计算。目前各船级社规范都对船体板架的屈曲性能校核方法进行了规定,包括基于描述性计算的屈曲校核和直接计算的屈曲校核。其中基于直接计算的屈曲校核通过有限元方法计算出各个构件的实际应力,然后根据各区域板格的结构尺寸等信息,求解屈曲控制方程,从而校核各处构件的屈曲性能[5]。船体板架结构板格数量成百上千,直接将基于直接计算的屈曲校核嵌套在板架优化过程中是非常耗时的,属于大规模耗时优化设计问题,采用常规优化方法求解完全不能满足实际设计生产的需要。目前,大多数船舶结构优化实例的设计变量个数局限在 30 个以下[6-7],一方面是许多优化设计问题本身规模可以缩减,另一方面是设计变量个数增加会给优化计算带来很多问题,即“维数灾难”[8],如:优化算法的求解能力受限,且计算量大幅增大。如某油船双层底案例设计变量有 190 个,如果采用常规的优化算法(如遗传算法[7])直接求解,假定种群规模为 500,进化 1 000 代,则需要进行约 50×10^4 次有限元计算,每次有限元计算耗时 10 min,则需要约 8×10^4 h,难以承受。

因此,代理模型[9-10]几乎成为大规模耗时优化问题求解的唯一选择,但是在高维环境下代理模型的预测能力也会受限[11]。如果采用代理模型辅助优化算法求解该问题,每个板格均需要建立其应力值的代理模型。假定每个代理模型所需样本点数为 $20d$(d 为自变量个数),则一共需要 190×20×190,即 722 000 个样本点。如果所有代理模型共用一个样本集,也需要 20×190=3 800 个样本点,也即 3 800 次有限元计算,耗时约 633 h。显然,不加处理直接求解此问题所需的计算成本是难以忍受的。另外因为自变量众多,代理模型的预测精度以及优化算法的求解效率也是存疑的。合作协同进化算法[12]被提出用于解决大规模优化问题,虽提高了优化算法的求解效率,但是仍然需要非常多次的目标计算,在耗时优化问题如工程结构优化领域中应用较少[13-14]。

利用板架板格屈曲利用因子与其板格厚度具有单调性以及与周围板格厚度具有局部性(关联较小)的特性,提出一种基于降维的两阶段优化方法,应用于某实船双层底屈曲约束优化设计,能够在极小计算成本下得到屈曲满足规范要求的轻量化方案,适用于实际设计生产的需要。

1　优化设计方法

1.1　板格屈曲利用因子特性分析

船体结构的屈曲性能由屈曲利用因子 η 表示,其基本表达式为 $\eta=W_a/W_u$。其中,W_a 表示船体结构强度校核中各工况下实际受到的压缩载荷,通常用应力表征,由有限元计算等方式计算得到;W_u 表示船体板格不发生屈曲破坏所能承受的极限载荷,通常用板格发生屈曲破坏对应的实际临界应力表征,一般由板格的尺寸以及形式等确定。因此,屈曲利用因子实际表达的是结构实际遇到的压缩载荷和结构发生屈曲破坏所能承受的极限屈曲载荷的比值,一般要求不大于 1。目前对于不满足屈曲要求的板格,主要有两种改进方式,增加板格的板厚或在板格中间增加横向的防屈曲筋。

增加板厚,可以降低板格的工作应力,即减小 W_a,同时由于板格厚度增加,板格自身的屈曲极限承载能力也得到提升,即同时也增大了 W_u,从而降低屈曲利用因子 η;而在板格中间增加防屈曲筋,对工作应力 W_a 几乎没有影响,其主要目的是将板格一分为二,从而降低板格的长宽比,增大 W_u,以此来达到使屈曲利用因子 η 降低的目的。

上述两种结构加强方法各有其优缺点。增加板厚的优点是除了增加板厚的区域外,对其他区域的板格工作应力也有适当降低的作用,但缺点是相比增加防屈曲筋的方式,其对屈曲利用因子的降低作用较小,且考虑到实际的生产设计,板厚仅能以 0.5 mm 为单位进行增厚,对重量的增加也较多。而增加防屈曲筋的优点是能直接将板格的“长宽比”大幅缩减,可以较大幅度的降低屈曲利用因子,同时,由于防屈曲筋几乎不承载,可以选择型材库中规格较小的型材,因此对重量的增加也较少,但缺点是此种方法仅对增加防屈曲筋的板格本身屈曲利用因子有降低作用,对其余板格的屈曲利用因子几乎没有影响,而且筋不能无限增加,一般来说对一块板格仅能增加 1~2 根防屈曲筋。

选定油船双层底模型某目标板格,使其厚度 t 由 5 mm 增加到 24 mm,计算得到整个设计区域的板格屈曲利用因子,计算结果如图 1、图 2 所示。其中图 1 表示所有板格的屈曲利用因子随目标板格板厚变化的结果,图 2 表示以目标板格为中心的 9 个板格屈曲利用因子随目标板格板厚变化的曲线,其中,目标格板编号

为 Panel 0,其余周围格板编号分别为 Panel 1~Panel 8。变换目标板格,曲线变化类似。

分析图 1 和图 2 可知:1) 单个板格板厚变化的影响范围非常有限,目标板格相邻的板格屈曲利用因子变化相对较小,远离目标板格的区域几乎无变化,即屈曲利用因子具有局部性;2) 目标板格的屈曲利用因子变化曲线随其板格厚度增加而单调下降且呈下凸状,即屈曲利用因子具有单调性。

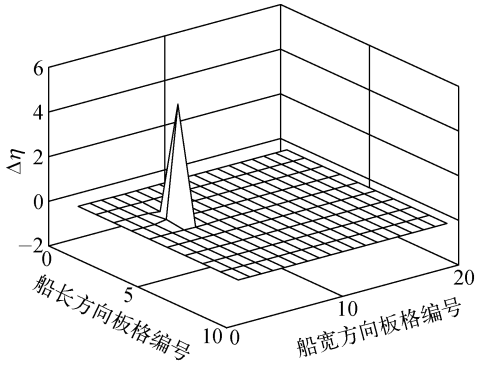

图 1 单个板格厚度变化各板格屈曲利用因子变化量分布

Fig. 1 Variation of the buckling utilization factors of panels when one thickness variable changes

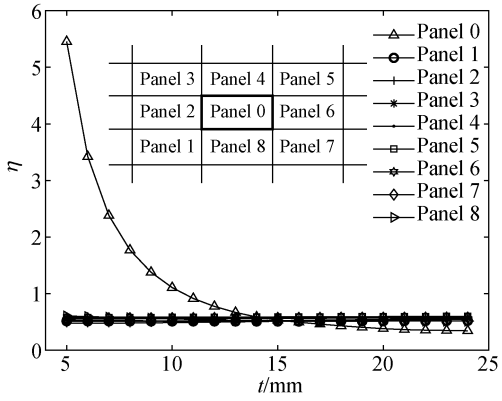

图 2 目标板格及其周围板格屈曲利用因子变化曲线

Fig. 2 Curves of the buckling utilization factors of the target panel and its surrounding panels

1.2 优化设计数学模型

将设计对象每个板格板厚和每个板格是否增加防屈曲筋均作为设计变量,以屈曲利用因子不大于 1 为约束条件,重量最轻为目标函数,建立屈曲约束下板架结构优化数学模型:

$$\begin{aligned}
&\text{find: } X = (x_1, x_2, \cdots\cdots, x_n),\ A = (a_1, a_2, \cdots\cdots, a_n)\\
&\text{minimize: mass}\ (X, A) = \sum_{i=1}^{n} (\rho_i S_i x_i + a_i \rho_a S_A l_i)\\
&\qquad \eta_i(X) \leqslant 1, \qquad i = 1, \cdots\cdots, n\\
&\text{subject to: } x_i \in [x_{iL}, x_{iU}], \quad i = 1, \cdots\cdots, n\\
&\qquad a_i \in \{0, 1\}, \qquad i = 1, \cdots\cdots, n
\end{aligned} \tag{1}$$

其中,n 表示板厚设计变量个数,板格是否加筋变量个数与板厚设计变量个数相等,也为 n;x_i 表示各板厚;a_i 为加筋变量,其为 1 时表示对 x_i 设计变量区域的所有板格加筋,为 0 则表示不加筋;ρ_i 为板材料密度;S_i 表示与 x_i 对应的板格面积;ρ_a 为防屈曲筋材料密度;S_A 为防屈曲筋横截面积;l_i 为筋的长度;η_i 表示 x_i 对应的设计变量区域内所有计算工况下板格屈曲利用因子最大值。

1.3 优化求解方法

1.3.1 两阶段优化求解策略

分析式(1)可知,其设计变量由板格的板厚和板格是否增加防屈曲筋两部分组成,不同数量板厚和防屈曲筋之间的不同排列组合构成了数量庞大的自变量空间。在这两种设计变量中,板厚存在着不同的增量数值(考虑实际设计生产,以 0.5 mm 为最小单位),而防屈曲筋仅有设置与不设置两种状态,因此制定相应的防屈曲筋设置的判断准则,将整个迭代计算流程分为两阶段(如图 3)。第一阶段为单纯板厚迭代,第二阶段为根据防屈曲筋判定准则设置防屈曲筋并重新进行板厚迭代,即先在所有板格不施加防屈曲筋的前提下通过制定的板厚迭代策略找到使所有板格屈曲满足要求的最小板厚,然后根据板厚迭代结果以及防屈曲筋的规格信息等进行防屈曲筋施加判定,确定需要增加防屈曲筋的板格,亦即第一阶段解决每个板格是否应该加筋的问题。最后在增加完防屈曲筋的基础上重新进行板厚迭代,以获得最优的板厚和防屈曲筋配置方案,在第二阶段,有限元模型跟第一阶段一样,并无变化,只是在计算板格屈曲利用因子时,需要根据板格的加筋与否计算板格屈曲利用因子。

1.3.2 板厚迭代求解策略

如前所述,板格屈曲利用因子随着板厚增加而单调减小,而且式(1)所示优化问题对屈曲利用因子的约

束为上限约束,即屈曲利用因子达到约束限界值时,板厚将达到满足约束条件下的最小值,对应结构重量最轻。于是在仅考虑板厚变量的情况下,式(1)的数学模型可转化为式(2),即找到一组设计变量 X,使得所有板格的屈曲利用因子同时达到限界值 1。

$$\begin{aligned}&\text{find}: X = (x_1, x_2, \cdots\cdots, x_n)\\&\text{minimize}: |\eta_i(X) - 1|, \qquad i = 1, \cdots\cdots, n\\&\text{subject to}: \begin{cases}\eta_i(X) \leqslant 1, & i = 1, \cdots\cdots, n\\ x_i \in [x_{iL}, x_{iU}], & i = 1, \cdots\cdots, n\end{cases}\end{aligned} \tag{2}$$

对于板厚,利用前面得到的屈曲利用因子的局部性,当某一板格的屈曲利用因子不满足约束条件时,增大其自身板厚最为高效,且对周边板格的屈曲利用因子的影响基本可以忽略不计。于是可简化为每个板格屈曲利用因子只与其自身板厚相关,由此可以对所有板格进行一次性的并行迭代,从而极大的减少设计变量的组合数量,缩减设计变量空间。

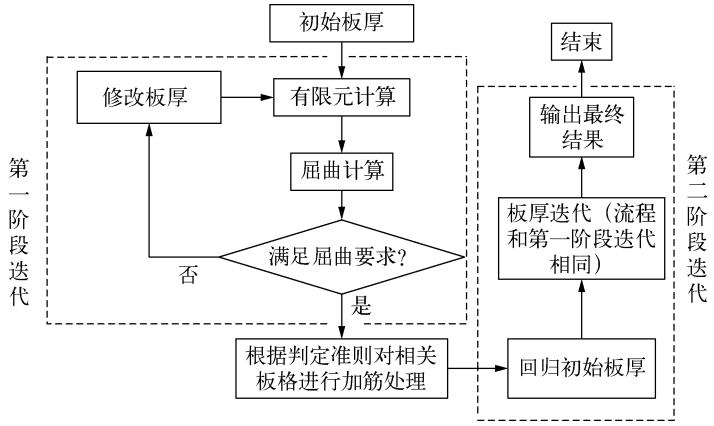

图 3　二阶段优化求解流程

Fig. 3　Flowchart of the two-stage optimization

针对每一块板格的板厚迭代求解,为减少迭代次数,根据 η_i-x_i 曲线的下凸性特点,利用牛顿迭代法[15]找到该曲线与 $\eta_i = 1$ 的交点横坐标,即满足约束条件的设计变量最小值,迭代公式如式(3)所示:

$$(x_i)_{k+1} = (x_i)_k + (\Delta x_i)_{k+1} = (x_i)_k + [1 - (\eta_i)_k] \Big/ \left[\frac{(\eta_i)_k - (\eta_i)_{k-1}}{(x_i)_k - (x_i)_{k-1}}\right] \tag{3}$$

其中,$(x_i)_{k+1}$表示第 k+1 步的 x_i 值,$(\eta_i)_k$ 表示第 k 步计算得到的 x_i 对应的屈曲利用因子,$(\Delta x_i)_{k+1}$表示第 k+1 步变量相对于上一步的增量。

当所有板格都按照这种方式迭代,更新厚度变量后重新进行有限元计算,如式(4)所示,第 k 步计算结果相对于上一步的增量成分包含自身厚度变化带来的收益 $\Delta\eta_{\text{self}}$和其余板格厚度变化带来的额外收益 $\Delta\eta_{\text{rest}}$。由于 $\Delta\eta_{\text{rest}}$量级较小,所以考虑了其他板厚影响的 η_i-x_i 曲线的整体下凸特点和单调递减性质仍然不会改变,即该迭代法仍然能够保持收敛。

$$\Delta\eta = \Delta\eta_{\text{self}} + \Delta\eta_{\text{rest}} \tag{4}$$

为了提高求解的收敛性,可充分利用 η_i-x_i 曲线的下凸性特点,将板厚变量的迭代初值均设为变量取值下限(若无取值下限,则取一个足够小的值,使得屈曲利用因子远大于约束限界值即可),以使得根据式(3)迭代求解过程中各板厚变量保持增加。若板厚取下限值时, 板格的屈曲利用因子都满足上限约束条件,则无需进行迭代求解。

1.3.3　防屈曲筋设置判定准则

判断是否加筋的主要思想为判断板格相同重量的增量下,比较加筋同时加板厚与仅加板厚对于屈曲利用因子的影响程度大小,如果加筋连同加板厚好于仅加板厚则加筋;反之,则不加筋。

如图 4 所示,图中曲线为屈曲利用因子随板厚变化曲线,其中 t_{equ}表示防屈曲筋等效的板格板厚,其表达

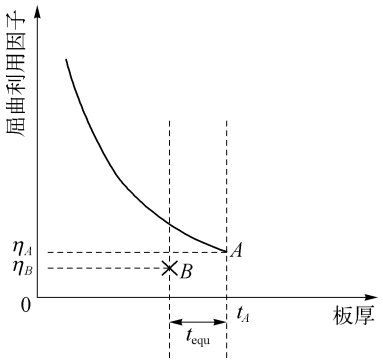

图 4 防屈曲筋施加判定原理示意

Fig. 4 Principle of the decision of adding anti-buckling stiffener

式为 $t_{equ}=V_s/A_s$，其中 V_s 表示为该板格施加的防屈曲筋的体积，A_s 表示板格的面积；A 点表示经过板厚迭代后使屈曲满足要求的板厚值，此时板格的屈曲利用因子为 η_A，板厚为 t_A；B 点表示在板厚为 t_A-t_{equ}，且增加防屈曲筋的情况下的屈曲利用因子的数值，此时的屈曲利用因子为 η_B。

通过比较 η_A 与 η_B 的大小，判断该板格是否需要加筋。若 $\eta_A \leqslant \eta_B$，则表示板厚对降低板格屈曲利用因子的效应大于等于加筋同时加板厚的效应，该板格不做加筋处理；若 $\eta_A > \eta_B$，则表示板厚效应小于加筋同时加板厚的效应，该板格做加筋处理。

板格加筋通过对屈曲板格组成单元定义的修改来模拟，而不改变有限元模型。例如，假设不加筋的屈曲板格由单元 1、2、3、4 组成，4 个单元按照序号依次纵向排列，现在选择对该板格加筋，则将其定义为两个屈曲板格，分别由单元 1、2 和单元 3、4 组成，计算可得到 2 个屈曲利用因子，取其中较大值作为原板格的屈曲利用因子输出。实际计算时采用基于 PATRAN PCL 语言的计算程序实现屈曲板格单元组成的自动化定义和屈曲利用因子的计算。

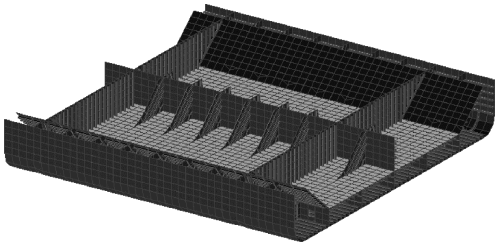

图 5 双层底结构有限元模型

Fig. 5 Finite element model of double bottom structure

2 某油船双层底优化案例

2.1 有限元模型

研究对象为某油船双层底结构，利用 PATRAN \ NASTRAN 软件建立该船的三舱段有限元模型（如图 5），并采用子模型方法进行强度评估。根据 IACS[5] 规范设定由 11 种载荷模式与航行工况（顶浪、顺浪、斜浪）以及波浪工况（中拱、中垂）的组合构成的 45 种载荷工况。通过有限元计算得到结构的工作应力，并计算得到各板格的压缩应力，同时结合板格几何尺寸以及边界条件类型，最终依据规范[5] 计算得到各工况下的屈曲利用因子。

2.2 参数化表征

双层底尺寸参数众多，在此考虑内外底板格厚度变量，将双层底沿船宽方向（横向）分为 19 个独立厚度的板列，如图 6 所示。船长方向 10 个横框架间距每个都按此划分，故共计有 190 个板厚变量，每个设计变量区域包含 1~4 个数量不等的板格。根据此变量设置对有限元模型作参数化处理。另外，由于在板格中设置防屈曲筋也能改善板格的屈曲性能，因此，防屈曲筋设置与否也作为变量设置。

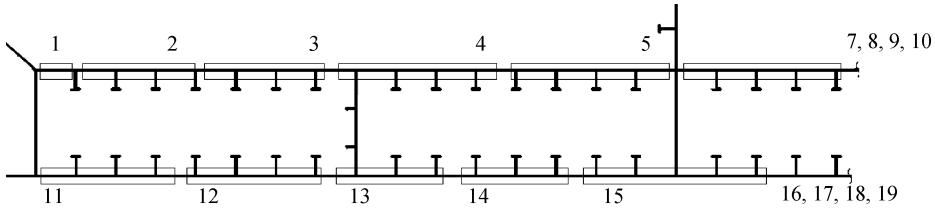

图 6 双层底设计变量划分示意（局部中横剖面）

Fig. 6 Design variable definition of double bottom structure (partial midship transverse cross section plan)

屈曲计算以板格为单位，CSR 设定的板格边界条件和载荷模式组合共 19 种，包括四边刚固、三边刚固一边自由、两边刚固两边简支、一边刚固两边简支一边自由、四边简支、三边简支一边自由；对边均匀受压、对边梯形受压、四边剪切、对边剪切。文中设定的板格计算模型是四边刚固承受对边均匀压缩。每个设计变量区域仅关心其包含的各板格屈曲利用因子最大值。在优化计算时取 45 个工况的各板格屈曲利用因子最大值作为该板列板格的屈曲利用因子。为了表述方便，下文设计变量区域也用板格表示。

双层底板格应力采用有限元建模计算得到,因此,对船底结构并不需要进行特别简化;板格划分方案只影响设计变量的个数和分布,不同区域板格边界的影响已自动在有限元模型中反映,并不影响优化做法。如有需要,也可将船底龙骨腹板厚度等设置为设计变量,不影响优化问题的求解。

2.3　计算结果与分析

2.3.1　第一阶段迭代计算结果

某双层底板格原始方案及其对应的屈曲利用因子见表 1(考虑篇幅,表中仅给出了部分纵向板格编号下的结果),板格均不加防屈曲筋。表中一对数据(t_i,η_i)对应一个板格,t_i 和 η_i 分别表示板格的厚度与屈曲利用因子,其中 i 为纵向板格编号。

表 1　原始板厚方案与屈曲利用因子结果

Tab. 1　Original thickness plan and resultant buckling utilization factor

纵向板格编号		横向板格编号																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	t_1/mm	17.25	15.25	15.25	15.25	15.25	14.25	15.25	15.25	15.25	17.25	15.50	15.50	15.50	15.50	16.50	15.50	15.50	15.50	15.50
	η_1	0.40	0.49	0.50	0.49	0.49	0.53	0.49	0.50	0.49	0.40	0.66	0.65	0.63	0.64	0.61	0.64	0.64	0.65	0.66
3	t_3/mm	17.25	15.25	15.25	15.25	15.25	14.25	15.25	15.25	15.25	17.25	15.50	15.50	15.50	15.50	16.50	15.50	15.50	15.50	15.50
	η_3	0.51	0.57	0.51	0.51	0.51	0.56	0.51	0.51	0.56	0.50	0.86	0.90	0.83	0.77	0.70	0.80	0.87	0.94	0.88
4	t_4/mm	17.25	15.25	15.25	15.25	15.25	14.25	15.25	15.25	15.25	17.25	15.50	15.50	15.50	15.50	16.50	15.50	15.50	15.50	15.50
	η_4	0.55	0.61	0.50	0.52	0.52	0.58	0.51	0.50	0.60	0.54	0.90	0.95	0.85	0.79	0.71	0.83	0.91	1.00	0.93
6	t_6/mm	17.25	15.25	15.25	15.25	15.25	14.25	15.25	15.25	15.25	17.25	15.50	15.50	15.50	15.50	16.50	15.50	15.50	15.50	15.50
	η_6	0.57	0.64	0.51	0.58	0.52	0.59	0.57	0.50	0.63	0.57	0.91	0.96	0.87	0.81	0.72	0.83	0.92	1.00	0.93
8	t_8/mm	17.25	15.25	15.25	15.25	15.25	14.25	15.25	15.25	15.25	17.25	15.50	15.50	15.50	15.50	16.50	15.50	15.50	15.50	15.50
	η_8	0.49	0.61	0.59	0.59	0.58	0.62	0.60	0.60	0.62	0.49	0.75	0.78	0.75	0.72	0.65	0.71	0.76	0.78	0.75
10	t_{10}/mm	17.25	15.25	15.25	15.25	15.25	14.25	15.25	15.25	15.25	17.25	15.50	15.50	15.50	15.50	16.50	15.50	15.50	15.50	15.50
	η_{10}	0.40	0.52	0.54	0.53	0.50	0.54	0.54	0.54	0.52	0.40	0.63	0.62	0.62	0.62	0.59	0.62	0.62	0.62	0.62

注:横向编号 1~10 为内底板,11~19 为外底板,下同。

原始方案绝大部分板格的屈曲利用因子远小于 1.0,如图 7,这表明原始设计方案板厚过大,导致结构重量较大,需要进行优化设计,获得满足设计要求的轻量化方案。为此,将所有板厚的迭代初值设为 5 mm,计算得到此时每个板格的屈曲利用因子均大于 1.0,不满足约束要求。开始厚度迭代计算,共迭代 11 步。其中图 7 为某一板格屈曲利用因子 η 关于厚度的变化曲线,可见该板格经过 8 步迭代计算,板厚由 5 mm 增大到 15.5 mm,最终的屈曲利用因子稳定在 0.95。这说明虽然利用牛顿迭代法总共需要 11 步才能够使得所有板格都满足设计要求,但是对于部分板格少于 11 步就已经达到了设计要求。图 8 为随着迭代次数的增加,整个双层底结构质量的变化,可以直观地看到质量在板厚较小的时候增加较快,后面几次迭代质量变化不大,趋于稳定,说明板厚调整程序已经逐渐收敛。表 2 为经过第一阶段迭代后得到的双层底板厚方案与屈曲利用因子结果。

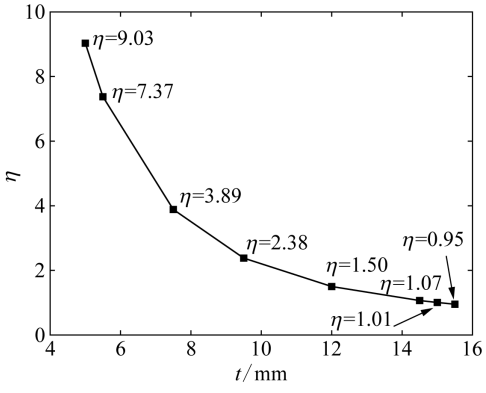

图 7　第一阶段迭代某板格 η-t 曲线

Fig. 7　η-t curve of a panel in the first iterative stage

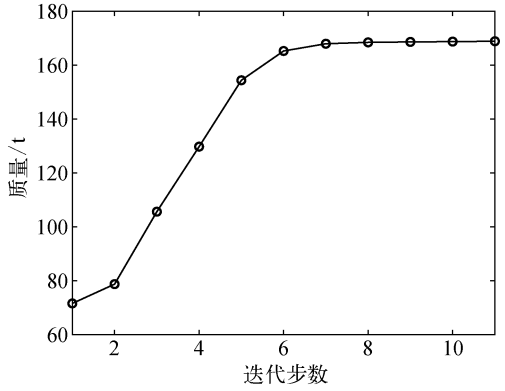

图 8　目标函数质量变化曲线

Fig. 8　Variation histories of objective function

表 2 第一阶段迭代板厚方案与屈曲利用因子结果

Tab. 2 Thickness scheme and resultant buckling utilization factors after the first stage of iteration

纵向板格编号		横向板格编号																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	t_1/mm	8.00	9.00	9.50	9.50	9.50	9.00	9.50	9.50	9.00	8.50	11.50	11.50	11.50	11.50	11.50	11.50	11.50	11.50	11.50
	η_1	0.97	0.96	0.93	0.95	0.91	1.00	0.92	0.92	0.95	0.94	0.93	0.96	0.94	0.93	0.95	0.94	0.96	0.97	0.94
3	t_3/mm	12.00	11.50	10.00	10.50	10.00	10.50	10.00	9.50	11.00	12.00	14.50	14.50	13.50	13.00	12.50	13.50	14.00	15.00	14.50
	η_3	0.97	0.92	0.94	0.95	0.97	0.91	0.96	0.95	0.99	0.96	0.94	0.99	0.99	0.96	0.96	0.94	0.99	0.97	0.96
4	t_4/mm	12.50	11.50	10.00	11.00	10.50	10.50	10.50	10.00	11.50	12.50	15.00	15.00	14.00	13.50	13.00	14.00	15.00	15.50	15.00
	η_4	0.97	1.00	0.97	0.90	0.94	0.96	0.94	0.89	0.98	0.97	0.95	0.99	0.99	0.94	0.94	0.94	0.94	0.99	0.98
6	t_6/mm	8.00	9.00	9.50	9.50	9.50	9.00	9.50	9.50	9.00	8.50	11.50	11.50	11.50	11.50	11.50	11.50	11.50	11.50	11.50
	η_6	0.97	0.96	0.93	0.95	0.91	1.00	0.92	0.92	0.95	0.94	0.93	0.96	0.94	0.93	0.95	0.94	0.96	0.97	0.94
8	t_8/mm	12.00	11.50	10.00	10.50	10.00	10.50	10.00	9.50	11.00	12.00	14.50	14.50	13.50	13.00	12.50	13.50	14.00	15.00	14.50
	η_8	0.97	0.92	0.94	0.95	0.97	0.91	0.96	0.95	0.99	0.96	0.94	0.99	0.99	0.96	0.96	0.94	0.99	0.97	0.96
10	t_{10}/mm	12.50	11.50	10.00	11.00	10.50	10.50	10.50	10.00	11.50	12.50	15.00	15.00	14.00	13.50	13.00	14.00	15.00	15.50	15.00
	η_{10}	0.97	1.00	0.97	0.90	0.94	0.96	0.94	0.89	0.98	0.97	0.95	0.99	0.99	0.94	0.94	0.94	0.94	0.99	0.98

2.3.2 加筋判断结果

对迭代计算得到板厚方案进行加筋判断,选定防屈曲筋截面规格为 FB200×15,密度为 7 850 kg/m^3。计算完成后得到加筋设置见表 3,共加筋 377 根(以最小板格为单位),总质量 6.84 t。可以看出,防屈曲筋主要加在结构的纵向中部,这也是主要的高应力区域。

表 3 加筋判断结果

Tab. 3 Configuration of anti-buckling stiffeners

纵向板格编号	横向板格编号																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0
2	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
4	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
8	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
9	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
10	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0

注:1 表示加筋,0 表示不加筋。

2.3.3 第二阶段迭代计算结果

得到加筋设置后,修改加筋设置,再进行第二阶段板厚迭代,共迭代 18 步,得到最终的优化板厚方案和相应的屈曲利用因子分布见表 4。优化方案与原始方案屈曲利用因子对比如图 9。

内外底板总质量(含防屈曲筋)变化如表 5。仅依靠第一阶段板格厚度迭代计算,内外底板总质量降幅达到 15.54%;第二阶段经过加筋判断优化后重新迭代,总质量进一步降低了 2.09%。从图 9 可以看出,初始方案较多板格屈曲利用因子在 0.5~0.8 之间,设计较为保守,且有个别板格屈曲利用因子超过 1.0。而优化方案对应的板格屈曲利用因子绝大部分取值在 0.9~1.0 之间。

优化方案与原始方案的板厚对比如图 10 所示。为了降低设计难度,原始方案(图 10(a))整体板厚变化不大,取值较为保守,板厚沿纵向不变化,内底板只在靠近舭部(横向编号 1、10)适当增厚,在横向中部(横向编号 6)适当减薄,外底板在横向中部(横向编号 15)适当增厚。第一阶段优化方案(图 10(b))与原始方案

相比板厚大幅下降,其内底板板厚分布特点与原始方案相似,在靠近舭部处较厚,横向中部较薄,而其外底板板厚分布特点与原始方案有所不同,在横向中部反而较薄。最终优化方案(图 10(c))板厚在第一阶段优化方案的基础上进一步下降,内底板板厚变化更加复杂,这与纵向中部区域设置了较多防屈曲筋有关。两个阶段优化方案的板厚沿纵向的变化均较大,说明以原始方案设计策略,仅考虑横截面板厚尺寸分布而忽视纵向的板厚设计,会增大结构重量。从屈曲的角度来看,优化方案显著优于原始方案,材料得到合理分布和充分利用。

表 4　第二阶段迭代板厚方案与屈曲利用因子结果

Tab. 4　Thickness scheme and resultant buckling utilization factors after the second stage of iteration

纵向板格编号		横向板格编号																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	t_1/mm	8.00	9.00	9.00	9.50	8.50	9.00	8.50	9.00	9.00	8.50	11.00	11.00	10.50	10.50	11.50	10.50	10.50	11.50	11.00
	η_1	0.98	0.96	0.98	0.92	0.91	0.99	0.92	0.98	0.96	0.95	0.97	0.99	0.93	0.94	0.93	0.94	0.94	0.92	0.98
3	t_3/mm	11.00	10.50	9.00	9.50	10.00	10.50	9.00	9.50	11.00	11.00	13.00	13.00	12.50	11.50	11.50	12.00	13.00	13.50	14.50
	η_3	0.95	0.92	0.94	0.93	0.95	0.90	0.98	0.94	0.98	0.95	0.94	0.98	0.95	0.98	0.93	0.95	0.94	0.96	0.96
4	t_4/mm	11.00	10.50	9.50	10.00	9.50	10.00	9.50	9.50	10.50	11.00	13.00	13.50	12.50	12.00	11.50	12.00	13.00	14.00	15.00
	η_4	1.00	0.98	0.89	0.90	0.94	0.87	0.96	0.96	0.96	0.99	0.98	0.95	0.99	0.94	0.95	0.99	0.98	0.94	0.97
6	t_6/mm	11.50	11.00	9.50	10.00	9.50	10.00	10.00	9.50	11.00	11.50	13.00	13.50	13.00	12.00	11.50	12.00	13.00	14.00	15.00
	η_6	0.97	0.93	0.95	0.97	0.95	0.88	0.96	0.93	0.92	0.96	0.97	0.95	0.94	0.95	0.96	0.99	0.99	0.94	0.96
8	t_8/mm	11.50	10.00	11.00	11.00	11.00	11.00	10.50	11.00	10.00	11.50	12.50	12.00	12.00	11.50	11.00	11.00	12.50	13.00	13.00
	η_8	0.98	0.98	0.94	0.97	0.94	0.93	0.93	0.96	0.97	0.98	0.99	0.98	0.94	0.93	0.96	0.99	1.00	0.99	0.94
10	t_{10}/mm	8.50	9.50	9.00	9.00	9.50	9.50	9.00	10.00	8.50	8.50	10.50	11.00	10.00	10.00	11.00	10.00	10.00	10.50	10.50
	η_{10}	0.90	0.92	0.95	0.93	0.94	0.98	0.98	0.97	0.94	0.92	0.95	0.92	0.95	0.96	0.94	0.94	0.93	0.99	0.96

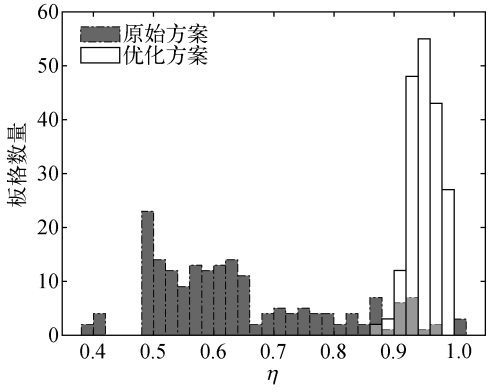

图 9　原始方案与优化方案屈曲利用因子分布对比

Fig. 9　Comparison of the buckling utilization factors between the original scheme and optimized one

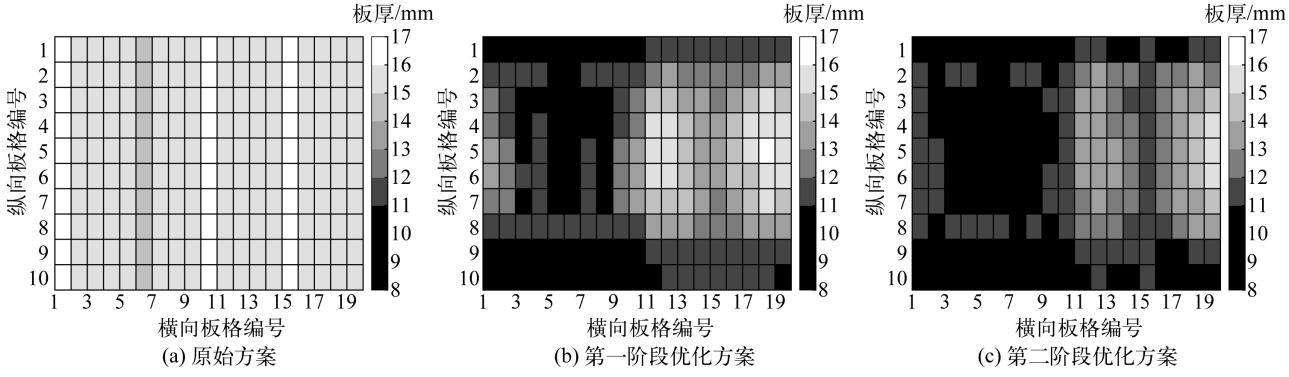

图 10　原始方案与优化方案板厚对比

Fig. 10　Comparison of the plating thickness of original scheme and optimized one

表 5 内外底板总质量变化

Tab. 5 Variation of total mass of inner and outer bottom structures

内外底板质量指标	原始情况	厚度迭代计算	加筋后迭代计算
总质量/t	199.94	168.88	164.70
减小百分比/(%)	–	15.54	17.63

注:加筋后迭代计算后得到的内外底板质量(不含防屈曲筋)为 157.86 t。

3 结 语

分析了双层底板格屈曲利用因子的特性,提出了适用于船体板架屈曲优化的快速优化方法,利用屈曲利用因子的局部性和单调性,将一个大规模优化问题转化为一系列单变量优化问题,并借助牛顿迭代法和加筋判断准则,实现在屈曲利用因子约束下的板厚和防屈曲筋布置的快速寻优,用于某油船的双层底结构优化,效果明显。主要结论如下:

1) 板架板格的屈曲利用因子主要与自身板厚相关,其余板厚变量的影响可以忽略不计,且板格的屈曲利用因子变化曲线随其板格厚度增加而单调下降且呈下凸状;

2) 利用板格屈曲利用因子具有局部性的特性可极大降低原本属于大规模优化问题的板架结构屈曲优化设计的维度,两阶段优化方法可合理考虑板格以及设置防屈曲筋的作用,可以有效地获得板架板厚与加筋优化方案,且优化流程不受板架结构形式和设计变量设置限制,可用于实际船舶板架结构屈曲优化设计;

3) 优化方法能实现在屈曲利用因子约束下的船体板架快速优化。某油船双层底优化案例,能够在 30 次有限元计算之内完成优化设计,优化后方案总质量相比于原始方案减重达 17.63%,板格屈曲利用因子绝大部分取值在 0.9~1.0 之间,材料得到合理分布和充分利用。

参考文献:

[1] 赵留平, 詹大为, 程远胜, 等. 船舶结构优化设计技术研究进展[J]. 中国舰船研究, 2014, 9(4): 1-10. (ZHAO Liuping, ZHAN Dawei, CHENG Yuansheng, et al. Review on optimum design of ship structures[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2014, 9(4): 1-10. (in Chinese))

[2] 刘齐茂, 李微. 基于满应力准则的薄板结构加强筋的设计法[J]. 机械设计与制造, 2007(1): 23-24. (LIU Maoqi, LI Wei. A design method of rib distribution for thin plate structure based on the full stess rule[J]. Machinery Design & Manufacture, 2007(1): 23-24. (in Chinese))

[3] 王元, 王德禹. 考虑晃荡效应的独立 B 型 LNG 液舱结构多目标优化[J]. 海洋工程, 2016, 34(2): 88-94. (WANG Yuan, WANG Deyu. Structural multi-objective optimization of SPB LNG tanks under sloshing pressure[J]. The Ocean Engineering, 2016, 34(2): 88-94. (in Chinese))

[4] 张干锋, 王德禹. 基于分区间泛化 Kriging 近似模型的船舶局部结构形状优化[J]. 海洋工程, 2018, 36(6): 46-57. (ZHANG Ganfeng, WANG Deyu. Shape optimization of ships' local structure with the partition and generalization Kriging approximation model[J]. The Ocean Engineering, 2018, 36(6): 46-57. (in Chinese))

[5] IACS, Common structural rules for bulk carriers and oil tankers[S]. 2019.

[6] 陈杨科, 余恩恩, 骆伟, 等. 内压下矩形耐压舱内部结构优化设计[J]. 中国舰船研究, 2017, 12(6):81-85. (CHEN Yangke, YU Enen, LUO Wei, et al. Optimal design of internal structure of rectangular cabin under internal pressure[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2017, 12(6): 81-85. (in Chinese))

[7] 程远胜,孙莹,闫国强,等. 基于神经网络与遗传算法的潜艇舱壁结构优化[J]. 中国造船, 2008, 49(4): 81-87. (CHENG Yuansheng, SUN Ying, YAN Guoqiang, et al. Structural optimization of a submarine end plane transverse bulkhead based on neural networks and genetic algorithm[J]. Shipbuilding of China, 2008, 49(4): 81-87. (in Chinese))

[8] MAHDAVI S, SHIRI M E, RAHNAMAYAN S. Metaheuristics in large-scale global continues optimization: A survey[J]. Information Sciences, 2015, 295: 407-428.

(下转第 134 页)

Marine Geomorphology[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012. (in Chinese))

[16] 冯琳, 林霄沛. 1945—2006 年东中国海海表温度的长期变化趋势[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2009, 39(1): 13-18. (FENG Lin, LIN Xiaopei. Long-term trend of the East China Sea surface temperature during 1945 to 2006[J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(1): 13-18. (in Chinese))

[17] GRAHAM N E, DIAZ H F. Evidence for intensification of North Pacific winter cyclones since 1948[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82(9): 1869-1893.

[18] 《浙江省海塘工程技术规定》编制小组, 《浙江省海塘工程技术规定》(第一册)编定工作中有关问题说明[S]. 1983. ("Zhejiang Seawall Engineering Technical Regulations" Compilation Group, "Zhejiang seawall engineering technical regulations (Volume I)" compilation work related issues[S]. 1983. (in Chinese))

[19] 张静, 方明强. 1993-2012 中国海海平面上升趋势[J].中国海洋大学学报(自然科学版), 2015(1): 121-126. (ZHANG Jing, FANG Mingqiang. Trend of sea level rise in the China Sea from 1993 to 2012[J]. Journal of Ocean University of China, 2015(1): 121-126. (in Chinese))

[20] 王国栋, 康建成, 刘超, 等. 中国东海海平面变化多尺度周期分析与预测[J]. 地球科学进展, 2011(6): 678-684. (WANG Guodong, KANG Jiancheng, LIU chao, et al. Multi-scale periodic analysis and prediction of sea level change in the East China Sea[J]. Advances in Earth Science, 2011(6): 678-684. (in Chinese))

[21] 左军成, 左常圣, 李娟, 等. 近十年我国海平面变化研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(5): 443-449. (ZUO Juncheng, ZUO Changsheng, LI Juan, et al. Advances in the study of sea level change in China in the past decade[J]. Journal of the Hohai University, 2015, 43(5): 443-449. (in Chinese))

(上接第 50 页)

[9] 夏志, 刘均, 程远胜. 基于代理模型的水下结构物基座阻抗特性快速预报[J]. 中国舰船研究, 2020, 15(3): 81-87. (XIA Zhi, LIU Jun, CHENG Yuansheng. Fast prediction of mechanical impedance of an underwater foundation based on surrogate models[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(3): 81-87. (in Chinese))

[10] PREBEG P, ZANIC V, VAZIC B. Application of a surrogate modeling to the ship structural design[J]. Ocean Engineering, 2014, 84: 259-272.

[11] ZHANG Ning, WANG Peng, DONG Huachao, et al. Shape optimization for blended-wing-body underwater glider using an advanced multi-surrogate-based high-dimensional model representation method[J]. Engineering Optimization, 2020, 52(12): 2080-2099.

[12] POTTER M A, DE JONG K A. A cooperative coevolutionary approach to function optimization[C]//Proceedings of the Third Conference on Parallel Problem Solving from Nature. 1994, 2: 249-257.

[13] YANG P, TANG K, YAO X. A parallel divide-and-conquer-based evolutionary algorithm for large-scale optimization[J]. IEEE Access, 2019, 7: 163105-163118.

[14] REN Z, PANG B, WANG M, et al. Surrogate model assisted cooperative coevolution for large scale optimization[J]. Applied Intelligence, 2019, 49(2): 513-531.

[15] 柳辉. 解非线性方程的牛顿迭代法及其应用[J]. 重庆工学院学报(自然科学版), 2007, 21(8): 95-98. (LIU Hui. Newton iteration method for nonlinear equation solutions and its application[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology, Natural Science Edition, 2007, 21(8): 95-98. (in Chinese))