Apr. 2022

网络首发地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1755.TJ.20220406.1701.004.html

期刊网址:www.ship-research.com

引用格式: 唐波, 杨坤, 周海波, 等. 基于遗传算法的潜器压载敷设优化方法 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(2): 109-118. TANG B, YANG K, ZHOU H B, et al. Genetic algorithm based optimization method for kentledge laying of submersibles[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(2): 109-118.

基于遗传算法的潜器压载敷设 优化方法



Vol. 17 No. 2

唐波^{*1},杨坤²,周海波¹,周生俊¹,杨振锦¹ 1 武汉第二船舶设计研究所,湖北 武汉 430205 2 中国人民解放军 92578 部队,北京 100161

摘 要: [目的]针对工程实践中潜器固定压载敷设存在工作量大、随机性强、结果不优的难题,考虑将广泛 用于函数寻优的智能算法引入这一领域,提出一种基于遗传算法的潜器固定压载敷设方法。[方法]首先, 对典型潜器固定压载敷设横剖面进行研究,通过有限元方法的逆向思考,构建其等效的简化数学模型,并提 取约束函数和目标函数;然后,结合遗传算法进行寻优计算,得到重心较优的固定压载敷设方案;最后,构建 不同参数的多个算例进行分析验证。[结果]结果显示,在相同条件下,所提的较好的寻优方案相比一般方 案(相当于人工方案)其重心下降约23%,可以很好地同时平衡纵向力矩与横向力矩。[结论]研究表明:所 提的模型简化和寻优方法可以有效提高敷设的工作效率,改善最终方案的重心效果;所总结的敷设原则对工 程实践有参考价值。

关键词:潜器;固定压载;数学模型;遗传算法;压载敷设原则 中图分类号:U662.2 文献标志码:A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02271

Genetic algorithm based optimization method for kentledge laying of submersibles

TANG Bo^{*1}, YANG Kun², ZHOU Haibo¹, ZHOU Shengjun¹, YANG Zhenjin¹

1 Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430205, China 2 The 92578 Unit of PLA, Beijing 100161, China

Abstract: **[Objectives**] Typically, the fixed kentledge laying scheme of a submersible requires a significant amount of work and can often produce unpleasant results in engineering practice. Intelligent algorithms are considered for application in order to optimize the scheme. This paper proposes a genetic algorithm based method to solve the problem. **[Methods**] First, by studying typical transverse sections of kentledge laying in a submersible and reverse-thinking the finite element method, a simplified equivalent mathematic model is constructed. Next, constraint functions and objective functions are extracted from the model. By using a genetic algorithm, improved fixed kentledge laying schemes are acquired with lower centers of gravity. By computing different examples, this method is proven to be effective in gaining good gravity center results with a much smaller workload. **[Results**] The result shows that the gravity center of the improved scheme can be 23% lower compared to the ordinary scheme. This method is also effective in balancing longitudinal moment and lateral moment at the same time. **[Conclusions**] This study shows that the equivalent mathematical model and optimization method are feasible, and can improve both work efficiency and gravity results. Several general principles are also concluded, which can be helpful in engineering practice.

Key words: submersible; fixed ballast; mathematic model; genetic algorithm; general principle of kentledge laying

收稿日期:2021-01-20 修回日期:2021-04-21 网络首发时间:2022-04-07 13:58 作者简介:唐波,男,1991年生,硕士,工程师 杨坤,男,1986年生,博士,工程师 周海波,男,1987年生,硕士,高级工程师 周生俊,男,1984年生,博士,高级工程师 杨振锦,女,1963年生,硕士,研究员

^{*通信作者:唐波}oaded from www.ship-research.com

0 引 言

船舶的初横稳性高是衡量其稳性的重要指标,也是保证船舶正常航行的必要航海性能^[13]。 而潜器作为一类特殊的船舶更是如此,需要同时 考虑水面和水下状态的初横稳性高。此外,初横 稳性高的裕度还直接决定了潜器服役后可进行现 代化改换装的能力。在完成潜器总体布置和各类 载荷的统计后,一般通过敷设固定压载(常用压 载铁⁽⁴⁾)来平衡固定浮容积与各类载荷间的重量 差和重量矩差,并控制初横稳性高。因此,压载的 敷设方案将对潜器的初横稳性高产生重要影响。

传统的压载敷设方法是:首先根据固定浮容 积与各类载荷间的差值计算出需敷设的压载量, 随后根据各舱舷间总体布置情况,通过人为的统 筹分配,在重量、纵向和横向重量矩基本平衡的 前提下,将压载尽可能低位敷设。采用该方法存 在的问题:一是工作繁琐,人工迭代工作量巨大; 二是难以保证敷设后垂向重心高度最优或是较 优。特别是在压载量大、潜器纵向尺寸长、可敷 设肋位多的情况下,上述问题将更加突出。因 此,研究满足压载敷设需求且总体重心较低的优 化方法十分有必要。

现行标准。和工程参考书目规定了固定压载 总量的计算方法,以及试潜定重后调整的要求, 同时还提出了将压载尽量敷设于龙骨底部附近, 压载重心纵向位置应位于船舯前后 1/6 艇长范围 内等原则要求,却未提出全船固定压载敷设的具 体方法与指导方针。陈静等的研究了优化算法在 船舶压载水置换方案中的应用,但压载水置换的 目的(主要为环保)及其数学建模、优化目标等与 潜器的固定压载敷设完全不同,属于不同领域的 问题。黄文华等¹⁷提出了采用压载铅代替压载铁 的技术方向,即利用铅与铸铁的密度差来缩小同 质量压载的体积需求,以获得更好的初横稳性 高,但选用密度更大的压载铅距离将其广泛应用 于潜器还存在一些实际困难,如防腐涂层设计、 铅的毒性影响等,且其对稳性高的具体贡献也有 待详细计算。当然,无论是选用何种材料的固定 压载,工程上迫切需求的仍是一种指导性的方 法,即通过优化压载布置来得到重心较低的敷设 方案。而在该方面,国内外尚无相关的文献资 料,在目前的工程实践中,潜器的固定压载敷设 仍然是依靠大量的人工迭代来获得。

为此,本文将首先研究潜器固定压载敷设的 横剖面特征,构建潜器压载敷设的数学模型,提

取压载敷设的目标函数和约束函数,随后运用智能优化算法得到优化的敷设方案,最后通过计算不同约束参数算例,验证方法的可行性,以获取一些对工程实际具有重要意义的压载敷设原则来 供科研和设计人员参考。

1 计算方法

运用智能优化算法对固定压载进行敷设,其 关键技术包括建立固定压载敷设的数学模型以及 提取压载敷设的目标函数和约束函数这2个方面。

1.1 压载敷设优化数学模型

图 1 所示为简化的潜器模型,其中x方向为潜器纵向,向艏为正,原点为耐压壳体艏艉长度中 心点;z方向为潜器垂向,向上为正,过耐压壳体圆 心,原点为轻壳体最低点;y方向为潜器横向,向 右舷为正。



Fig. 1 Typical simplified model of a double-hull submersible with kentledge

在敷设压载前,潜器的固定浮容积为V₀,固定 浮容积产生的纵向力矩为M_{vx},横向力矩为M_{vy}, 垂向力矩为M_{vz}。除压载外,其他各类载荷产生 的重量为W₀,对应产生的纵向力矩为M_x,横向力 矩为M_y,垂向力矩为M_z。可供敷设的压载共有 N个档位,其中第*i*个档位敷设的压载重量为W_i (空气中重),此档位置处压载合计的重心为纵向X_i, 横向Y_i,垂向Z_i。压载敷设应满足的约束条件包 括重量、纵向力矩和垂向力矩3个方面。在重量 上,压载应平衡固定浮容积与其他载荷的差值:

$$V_0 - W_0 - \frac{(\rho_{\text{YZT}} - 1)}{\rho_{\text{YZT}}} \cdot \sum_{i=1}^N W_i \le \xi_W \tag{1}$$

在纵向上,压载应平衡固定浮容积与其他载 荷产生的纵向力矩的差值:

$$M_{VX} - M_X - \frac{(\rho_{YZT} - 1)}{\rho_{YZT}} \cdot \sum_{i=1}^N W_i X_i \le \xi_X$$
(2)

在横向上,压载应平衡固定浮容积与其他载 荷产生的横向力矩的差值:

w.ship-research.com

$$M_{VY} - M_Y - \frac{(\rho_{YZT} - 1)}{\rho_{YZT}} \cdot \sum_{i=1}^N W_i Y_i \leq \xi_Y$$
(3)

式(1)~式(3)为约束函数,其中ρ_{YZT}为压载密 度,ξ_w,ξ_x,ξ_y均为一小值。 水下初横稳性高 h[®] 为

$$h = r + \frac{M_{VZ} + \frac{1}{\rho_{YZT}} \sum_{i=1}^{N} W_i Z_i}{V_0 + \frac{1}{\rho_{YZT}} \sum_{i=1}^{N} W_i} - \frac{M_X + \sum_{i=1}^{N} W_i Z_i}{W_0 + \sum_{i=1}^{N} W_i} - c \quad (4)$$

式中:r为横稳心半径;c为自由液面修正系数。考虑到敷设压载后压载整体对潜器的浮心和重心均 会产生一定的影响,为简化问题,将目标函数简 化为压载总体重心最低,即目标函数可以写作

$$FitFunc = \frac{\sum_{i=1}^{N} W_i Z_i}{\sum_{i=1}^{N} W_i}$$
(5)

为求得每一档位的重量值Wi和重心高度Zi, 需对压载敷设进行数学简化。每档可敷设压载位 置的横剖面如图2(a)和图3(a)所示,即压载的各 层累积填充于底部或舷间下部区域。通过类比,





图 3 典型双壳体潜器舷间敷设压载简化模型 2



每一块压载相当于有限元法中的"六面体单元", 由于这些"单元"尺寸小,且实际间隙可忽略不 计,采用逆向思考,可将这些离散的"单元"压载 组合看做一个连续的整体或液体,"充满"了可敷 设区域。

压载的上边缘亦有多种情形,需讨论后进行 简化。图4所示为2种情况下的上边缘,其中 图4(a)情形下压载的合计重心高度为G₁,图4(b) 情形下压载的合计重心高度为G₂,考虑到"液体 总是在最低势能处静止",因此,在体积V相同的 前提下,图4(a)中重心G₁较图4(b)中重心G₂更 低。实际上,图4(a)所示顶部水平的情形为重心 最低的唯一情形,后续将在简化模型中采用此上 边缘形式进行计算。

因此,可将压载敷设情况简化为如图 2(b)和 图 3(b)所示的函数模型。其中,图 2(b)为压载边 界上限较低,未超过耐压壳体肋骨下边缘的情 形;图 3(b)为压载边界上限相对较高,超过耐压 壳体肋骨下边缘的情形。在图 2(b)和图 3(b)中, 压载敷设边界区域的横坐标可以表示为垂向坐标 的函数。对于内边界,在y≥0区域,设y=F(z),该 函数代表耐压壳体外肋骨边界的圆弧线,该圆弧





Fig. 4 Gravity center difference of two simplified fixed kentledge models

线的半径为 R_2 ;而在 $y \leq 0$ 区域,y = -F(z)。对于轻 壳体边界,在y≥0区域,设y=G(z),该函数代表轻 壳体边界的圆弧线,该圆弧线的半径为R₁;而在 $y \leq 0$ 区域, $y = -G(z)_{\circ}$

根据以上假设,在图2(b)所示简化模型中, 压载上边缘与轻壳体在第1象限交点的横坐标可 以表示为Yi0 = G(Zi0); 在图 3(b)所示简化模型中, 压载上边缘与耐压壳体肋骨、轻壳体在第1象限 交点的横坐标可以表示为 $Y_{i0} = F(Z_{i0}), Y_{i1} = G(Z_{i0})$ 。

针对图 2(b)中压载部分,其截面积为

$$S_{i} = 2 \cdot \int_{0}^{+Z_{0}} G(z) \mathrm{d}z \tag{6}$$

对应的重心高度为

$$Z_{i} = \frac{2 \cdot \int_{0}^{+Z_{i0}} z \cdot G(z) dz}{S_{i}}$$
(7)

针对图 3(b)中压载部分,其截面积为

$$S_{i} = 2 \cdot \int_{0}^{Z_{h0}} G(z) dz + 2 \cdot \int_{Z_{h0}}^{Z_{h0}} [G(z) - F(z)] dz \qquad (8)$$

$$Z_{i} = \frac{2}{S_{i}} \int_{0}^{Z_{h0}} z \cdot G(z) dz + \frac{2}{S_{i}} \int_{Z_{h0}}^{Z_{h0}} z \cdot [G(z) - F(z)] dz \qquad (9)$$

在特殊情况下,若因总体布置等限制,导致压 载在左右舷不对称敷设(图5),则其在左舷的面 积和重心高度分别为:

$$S_{i\pm} = \int_{0}^{Z_{h0}} G(z) dz + \int_{Z_{h0}}^{Z_{11}} [G(z) - F(z)] dz$$
(10)

$$Z_{i\underline{f_{z}}} = \frac{1}{S_{i}} \int_{0}^{Z_{i0}} z \cdot G(z) dz + \frac{1}{S_{i}} \int_{Z_{i0}}^{Z_{i1}} z \cdot [G(z) - F(z)] dz \quad (11)$$



(a) 敷设压载示意图







Fig. 5 Typical simplified model-3 of a double-hull submersible with kentledge

同时,还需要考虑左舷重心横向位置:

$$Y_{i \not z} = \frac{1}{S_i} \int_{0}^{Z_{i0}} \frac{1}{2} \cdot (-1) \cdot G(z) \cdot G(z) dz + \frac{1}{S_i} \int_{Z_{i0}}^{Z_{i1}} \frac{1}{2} \cdot (-1) \cdot [F(z) + G(z)] \cdot [G(z) - F(z)] dz \quad (12)$$

在右舷,对应的结果分别为:

$$S_{i\neq_{1}} = \int_{0}^{Z_{k0}} G(z) dz + \int_{Z_{k0}}^{Z_{k0}} [G(z) - F(z)] dz$$
(13)

对应的重心高度为 **aded from www.s** np-researcn.com

$$Z_{i\neq i} = \frac{1}{S_i} \int_{0}^{Z_{h0}} z \cdot G(z) dz + \frac{1}{S_i} \int_{Z_{h0}}^{Z_{h0}} z \cdot [G(z) - F(z)] dz \quad (14)$$

$$Y_{i\bar{t}\bar{t}i} = \frac{1}{S_i} \int_{0}^{Z_{b0}} \frac{1}{2} \cdot G(z) \cdot G(z) dz + \frac{1}{S_i} \int_{Z_{b0}}^{Z_{b0}} \frac{1}{2} \cdot [F(z) + G(z)] \cdot [G(z) - F(z)] \cdot dz$$
(15)

则敷设此档位处压载所产生的重量值为:

$$W_i = S_i \cdot d \cdot \rho_{\rm YZT} \tag{16}$$

式中, d为此档位处压载在纵向上的长度尺寸。

1.2 遗传算法

如上节所述,每档位处压载的重量和重心高度并非为连续函数,且考虑到压载敷设的档位较多,拟采用遗传算法来作为寻优的优化算法。遗传算法于1962年由 John Holland 提出,算法中引进了群体、适应值、选择、变异、交叉等基本概念,以应用于函数优化,主要具备以下优点¹⁹:

 1)遗传算法以参数的编码集作为运算对象, 其在搜索的过程中不受优化函数连续性及其导数 求解的限制,因而具有很强的通用性;

2)遗传算法直接使用由目标函数确定的适应度函数信息,以群体为单位执行搜索过程,可以较快地搜索到适应度较好的搜索空间,因而具有较强的全局搜索能力。

遗传算法的流程如图6所示110。

2 计算方法

2.1 算例模型

首先,为验证基于遗传算法的固体压载敷设 优化方法的可行性和普遍适应性,选取了表1中 所示较为宽泛的压载重量、需提供的纵向和横向

ownloaded from



Fig. 6 The flow chart of genetic algorithm

表1 宽范围算例模型参数表

Table 1 The model parameters of examples with wide variation

算例	压载重量/t	需提供的纵 向力矩/(t·m)	需提供的横 向力矩/(t·m)	档位数量/个	备注
1	20	50	10	5	-
2	100	400	-50	11	-
3	200	-1 000	300	21	-
4	200	-1 000	300	41	-

力矩以及档位数量等参数范围来进行仿真计算。

随后,通过控制变量,研究压载重量、需提供 的纵向和横向力矩、档位数量、是否左右对称敷 设等不同参数变化对优化结果的影响,然后通过 观察每一参数的优化趋势,对实际敷设提出指导 性意见。具体的控制变量算例如表2所示。

控制遗传算法的主要参数设置参见表3。

www.ship-research.com

表 2 控制变量算例模型参数表 Table 2 The model parameters of controlling variables for calculation examples

			•	0	-
算例	压载重量/t	需提供的纵向力矩/(t·m)	需提供的横向力矩/(t·m)	档位数量/个	备注
5	50	100	_	5	限定为左右舷对称敷设
6	50	100	-	9	限定为左右舷对称敷设
7	50	10	-	5	限定为左右舷对称敷设
8	50	200	_	5	限定为左右舷对称敷设
9	50	100	-	5	限定为左右舷对称敷设,同时限定最靠艏档位的压载高度
10	50	100	0	5	-
11	50	100	20	5	-
12	50	100	100	5	_

表 3 遗传算法主要参数设置

Table 3 The parameter setting of genetic algorithm

		1	The parameter seeing of genere algorithm
序号	, 项目	参数	说明
1	种群数量/个	3 000	_
2	交叉概率	0.80	_
3	每档位处压载铁敷设高度下限	0.000 1	设定为一小值
4	每档位处压载铁敷设高度上限	$R_1 + R_2$	根据潜器耐压壳体直径和轻壳体直径,设定边界内的一个较高值
5	每一算例优化计算次数	20	每一算例优化计算20次,形成编号为1~20的优化结果
6	每次优化计算采用遗传算法迭代次数	2	每次优化计算使用遗传算法计算2次,将第1次运算得到的最后种群作为第2次运行的初始种群

2.2 结果分析

2.0

1.5

1.0

0.5

0

10

8

6

4

2

0 右舷 左舷30

压载铁最高点 z/m

右舷

左舷

压载铁最高点 z/m

1) 优化方法的可行性分析。

通过构建数学模型,提取目标函数和约束函数,并结合遗传算法进行优化计算,得到表1中各 算例的压载敷设结果如图7所示。由图可见:

(1)在不同压载重量、需提供的纵向和横向 力矩,以及档位数量等参数条件下,采用本文所 提的建模和遗传优化方法均能得到优化结果,且 在不同参数下,优化结果均是以一种"梯度"的趋势去平衡力矩的,证明该方法可行且适用。

(2) 在档位较少的情况下,如算例1,2,3,各 档位"梯度"的一致性较好;在档位较多的情况 下,如算例4,出现了多处局部不符合一致的"梯 度"现象。经分析,档位数的增加即转化为变量 数的增加,需同步增加遗传算法中种群的数量才 能得到更好的结果,但同样也将增加计算时间。









Fig. 7 The optimization results of kentledge laying height at the left/right side in the calculation examples with wide parameter variation

-30

-20

-10

0

xm

10

(c) 算例 3

20

-20

-10

0 x/m

10

20

(a) 算例 1

同时,对表2中控制变量的各算例进行计算, 结果如图8所示。由图可见,在各参数下均能通 过遗传算法得到优化结果。针对每一算例,选取 20次优化计算的最好值进行后续的对比分析。
2)同一算例不同优化结果的原因分析。
如图9所示,针对算例5的20次优化计算结





果,选取最好和最差的结果(相当于一般的人工 迭代方案)进行对比,研究相同约束条件下压载 重心高度的影响因素。由图9(a)可看出,两结果 均呈艉部少、艏部多的敷设规律,这样可以平衡 给定的纵向力矩(在敷设压载前,潜器艉部较 重)。但同时也观察到,较好算例各档位之间梯 度较小,压载重心低;而较差算例的梯度则明显 较大,导致压载重心较高,较好算例的压载重心 比较差算例约低23%。因此,在保证平衡纵向力 矩的前提下,为了降低压载重心,应以较小的"梯 度"去敷设。





Fig. 9 The best and worst left/right side kentledge laying height

results comparison of example 5

3) 敷设档位数量对优化结果的影响分析。

如图 10 所示,选取算例 5 和算例 6 的最好结 果,研究在其他约束相同的条件下,不同敷设档 位数量对压载重心高度的影响。其中算例 6 的敷 设档位较多,共9档,在进行优化时将压载尽量均 摊到了各档位,相较于算例 5 共计 5 档的敷设结 果,其重心高度明显降低。因此,在敷设压载时, 为降低压载重心,应敷设尽量多的档位。



图 10 左右舷压载敷设档位数量对优化结果的影响 Fig. 10 Different amount of laying frames influence on left/right side kentledge laying height optimization

4) 纵向力矩对优化结果的影响分析。

如图 11 所示,选取算例 5、算例 7 和算例 8 的 最好结果,在其他约束相同的条件下,研究不同 平衡纵向力矩对压载重心高度的影响。由图 11(a) 可以看出,算例 7 需要的平衡纵向力矩最小,为 10 t·m,算例 8 需要的平衡纵向力矩最大,为 200 t·m, 优化结果为算例 7 的重心最低,算例 8 的重心最 高。通过观察敷设情况,分析造成此差异的原 因,认为需要的平衡力矩越大,平衡力矩所产生 的各档位的敷设梯度越大,重心也越高。

5) 高度限制对优化结果的影响分析。

如图 12 所示,选取算例 5 和算例 9 的最好结









la

果,在其他约束相同的条件下,研究某档高度限制对压载重心高度的影响。由图12(a)可以看出,对于最靠近艏部的一档,若将其压载敷设高度限制为2米,结果显示,将会导致其他档位需要采用较大梯度的平衡纵向力矩,致使其重心高度明显高于算例5,如图12(b)所示。可见,如果存在高度约束使固定压载敷设无法形成一致的梯度时,压载重心将相应增加。

6) 优化算法平衡横向力矩效果分析。

算例 5~算例 9 在建模时即限制其为左右舷对称敷设,而算例 10 则放开了左右舷敷设高度的限制,通过算法来自行寻找最优解。算例 10 需要平衡的横向力矩为 0,如图 13 所示,故其找寻到的优化解仍为左右舷对称,且其重心也与算例 5 基本相当,说明优化算法可以很好地平衡左右舷力矩。





7) 横向力矩对优化结果的影响分析。

如图 14 所示,选取算例 10、算例 11 和算例 12 的最好结果,在其他约束相同的条件下,研究不 同平衡横向力矩对压载重心高度的影响。由 图 14(a)可以看出,算例 10 需要的平衡横向力矩 最小,为0 tm,算例 12 需要的平衡横向力矩最大,为 100 t·m, 优化结果为算例 10 的重心最低, 算例 12 的重心最高。通过观察敷设情况, 分析造成此差异的原因, 认为需要的平衡横向力矩越多, 左右舷平衡力矩所产生的各档的敷设梯度越大, 重心也就越高。





3 关于应用问题的思考与讨论

压载敷设优化方法在实际工程应用中还面临 着以下2个方面的问题:

 对于排水量小、纵向长度较短的潜器,以 上压载敷设寻优方法可以很好地适用;但对于排 水量大、纵向敷设档位可达上百档的潜器,因变量 数目显著增加,导致计算仿真将消耗大量的时间。

2) 在潜器设计中, 耐压壳体与轻壳体之间的 舷间往往存在一些布置区域限制因素, 如舷间水 道围壁、通海阀围壁等, 在建模仿真时需要予以 考虑。

3.1 多档位敷设优化问题

针对固体压载可敷设档位多,同步计算资源 消耗大的情况,尝试考虑了"先粗分,后细分"的 优化模式,即首先根据舱室或舱段划分10个以内 的简化档位,得到第1轮的重量优化分配后,再对 每个舱室纵向范围内的各档肋位进行第2轮的详 细优化分配。

图 15 所示为进行第1轮的粗分和第2轮细 分后的优化结果。在局部"细分"过程中,每一档 为了得到最低的重心会进行等分,从而使得在全 局上无法得到梯度一致的结果,因此以上方法实 际上是一个"误区"。



综上,针对档位较多的情况,建议仍旧按照每 档建模、统一优化的方式进行计算;而对于优化 结果可能出现的局部梯度不一致的问题,可根据 "最小梯度"经验人为地进行快速调配,以便在消 耗尽量少的计算资源的情况下得到优化结果。

3.2 关于布置区域限制因素

针对有布置区域限制的情况,如图 16(a)所示,在建模时可以简化为分段函数,简化模型参照图 16(b)和图 16(c)。实际上,考虑到分段函数导致的建模的复杂性,其仿真将会消耗更多的计算资源,因此建议在实际应用中,在档位较多的情况下可释放这些限制因素,在计算完成后再自行进行人工调配,这样亦能得到工程上可接受的结果。例如对于图 16(a)所示情况,可直接先按照如图 3(b)所示无布置区域约束的数学模型进行计算,后续再进行调配。

4 结 语

本文基于一种离散模型连续化的逆向思维, 对潜器固体压载敷设进行数学建模,然后提取约 束函数和目标函数并结合遗传算法对固定压载方



图 16 布置区域限制示意图及简化模型 Fig. 16 The area restrict sketch and simplified mathematic model

案进行了寻优。多个算例证明,本文所提方法可 行且有效:在平衡重量、纵向力矩和横向力矩的 前提下,无需人工干预,即可寻找出重心较低的 压载敷设优化方案,得到的较好算例相比较差算 例(相当于人工算例)其重心下降近23%,大幅降 低了人工迭代的工作量。同时,本文对不同参数 条件下优化结果的分析研究,以及有关及实际应 用问题的思考与讨论,可供工程设计人员参考。

参考文献:

[1] 苏玉民, 庞玉杰. 潜艇原理 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大
 学出版社, 2005: 67-68.

SU Y M, PANG Y J. Submarine principles[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2005: 67-68 (in

downloaded from www.ship-research.com

Chinese).

 [2] 马运义, 许建. 现代潜艇设计原理与技术 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2012: 102-103.
 MA Y Y, XU J. Modern submarine design principle and

technology[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2012: 102–103 (in Chinese).

[3] 徐青. 舰船总体设计流程分析 [J]. 中国舰船研究, 2012, 7(5): 1-7.

XU Q. Analysis of the overall warship design process[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2012, 7(5): 1–7 (in Chinese).

- [4] 压载铁: CB 676-1978[S]. 北京: 中华人民共和国第六机 械工业部, 1979.
 Ballast iron: CB 676-1978[S]. Beijing: The People's Republic of China Sixth Ministry of Machinery Industry, 1979 (in Chinese).
- [5] 舰船通用规范: GJB 4000-2000[S]. 北京: 中国人民解放 军总装备部, 2000.

General specifications for naval ships: GJB 4000-2000[S]. Beijing: PLA General Equipment Department, 2000 (in Chinese).

 [6] 陈静,林焰,张明霞,等.改进遗传算法在船舶压载水置 换方案求解中的应用[J].中国造船,2009,50(1): 75-82.

CHEN J, LIN Y, ZHANG M X, et al. Multi-criteria design optimization of ships' ballast water exchange scheme using a genetic algorithm[J]. Shipbuilding of China, 2009, 50(1): 75–82 (in Chinese).

- [7] 黄文华,周海波,倪先胜,等.潜器铅压载应用技术研究[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(9): 108-110.
 HUANG W H, ZHOU H B, NI X S, et al. Research on application technology of lead ballast for submersible[J].
 Ship Science and Technology, 2020, 42(9): 108-110 (in Chinese).
- [8] 邓志纯,陈材侃.潜艇应急上浮稳性研究 [J]. 中国造船, 2004, 45(1): 20-24.

DENG Z C, CHEN C K. Study on submarine stability during emergency surfacing[J]. Shipbuilding of China, 2004, 45(1): 20–24 (in Chinese).

- [9] 崔姗姗. 遗传算法的一些改进及其应用 [D]. 合肥: 中国 科学技术大学, 2010: 1-2.
 CUI S S. Some improvements of the genetic algorithm and their applications[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010: 1-2 (in Chinese).
- [10] 张岩, 吴水根. MATLAB 优化算法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2017: 328–330.
 ZHANG Y, WU S G. MATLAB optimization algorithm[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017: 328–330 (in Chinese).