

引用格式: 唐波, 周生俊, 杨振锦, 等. 在潜器中加装浮力材料以提升水下初横稳心高的敷设位置研究 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(增刊 1): 1–9, 18.
TANG B, ZHOU S J, YANG Z J, et al. Layout research of buoyant material used in submersible to improve its underwater initial transverse metacentric height[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(Supp 1): 1–9, 18.

在潜器中加装浮力材料以提升水下初横稳心高的敷设位置研究



唐波, 周生俊, 杨振锦, 郑明明*, 徐正喜
武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430205

摘 要: [目的] 为了解决在潜器中敷设浮力材料以提升水下初横稳心高尚无定量指导依据的问题, 在推导出浮力材料敷设的临界高度计算公式的基础上, 计算确定浮力材料应敷设的垂向高度, 并据此进一步给出浮力材料和压载铁敷设的纵向位置建议。[方法] 首先, 通过推导敷设浮力材料后的全船初横稳心高函数, 利用偏微分的数学方法得到浮力材料体积、重心等对稳性的影响方式; 然后, 通过等价代换的数学手段得到稳性变化临界情况下浮力材料重心理论高度计算式; 最后, 为了更好地研究和理解这一临界高度计算公式以及其他参数如排水量、敷设前稳心高等的影响, 构建典型浮力材料敷设剖面的数学模型, 并进行多算例对比分析研究。[结果] 结果显示, 所设计算例中初横稳心高最高可提升约 1.8%, 若进一步放开纵横垂向的限制, 或将获得更优结果。[结论] 所做研究可直接指导浮力材料敷设方案, 所得到的一些对工程实际有重要意义、简便实用的浮力材料敷设原则, 可供设计人员参考使用。
关键词: 潜器; 浮力材料; 初横稳心高; 临界高度公式; 敷设原则
中图分类号: U674.941 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19693/j.issn.1673-3185.02579

Layout research of buoyant material used in submersible to improve its underwater initial transverse metacentric height

TANG Bo, ZHOU Shengjun, YANG Zhenjin, ZHENG Mingming*, XU Zhengxi
Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430205, China

Abstract: [Objective] In order to provide a quantitative basis for the layout of buoyant material in a submersible to improve its initial transverse metacentric height, this paper attempts to obtain the critical height equation of buoyant material through analytic derivation, and proposes layout schemes and suggestions on this basis. [Methods] By deriving the initial transverse metacentric height equation after adding buoyant material in combination with the partial derivatives method, such factors as buoyant material volume and gravity center are analyzed, and the buoyant material critical height equation is obtained through equivalent substitution. To gain a better understanding of the critical height equation and other factors that can affect the results such as displacement and transverse metacentric height before the installation of the buoyant material, an equivalent mathematical model of a typical transverse section of a submersible is constructed, and different numerical examples are studied by comparison. [Results] It is concluded that the initial transverse metacentric height of a superior scheme can be 1.8% higher compared to pre-installation conditions. It is also likely that much better initial transverse metacentric height could be achieved if the 3D districts were released. [Conclusions] The results of this study can improve the initial transverse metacentric height of submersibles. The proposed equation is key to a buoyant material layout scheme. In addition, several layout principles are put forward to help designers when incorporating buoyant material into submersible design.
Key words: submersible; buoyant material; initial transverse metacentric height; critical height value equation; layout principle

收稿日期: 2021-11-04 修回日期: 2022-01-23 网络首发时间: 2022-09-22 18:52
作者简介: 唐波, 男, 1991 年生, 硕士, 工程师
周生俊, 男, 1984 年生, 博士, 高级工程师
杨振锦, 男, 1963 年生, 硕士, 研究员
郑明明, 男, 1988 年生, 硕士, 高级工程师
徐正喜, 男, 1963 年生, 硕士, 研究员

*通信作者: 郑明明

0 引言

随着浮力材料,特别是固体浮力材料技术的不断成熟,其展现出的低密度、高强度、耐腐蚀、易施工等优点,使其能够安全可靠地为潜器提供正浮力,因而应用于各型潜器的设计中^[1]。浮力材料密度愈小,质量愈轻,提供潜器的浮力则愈大^[2]。

如在深海无人遥控潜水器(remote operated vehicle, ROV)的应用中,浮力材料一般安置于潜器顶部,并在底部安放重型部件,使得浮力材料的中心与整个潜器的重心分离,提高稳性^[3]。在一些载人科考潜器中,将浮力材料按照潜器顶部的线型加工,以替代轻外壳、减轻质量、提高稳性^[4-5]。这些潜器的浮力材料敷设原则可归纳为:一般布置于潜器的上部,敷设位置尽量高,且在李东梁等^[6]关于某探测载体的设计以及胡俊鹏等^[7]关于潜水钟的设计中,均提到了以上定性原则。而关于载人潜水器的设计,浮力材料已成为船体结构最重要的组成部分之一,在初始的浮力浮心计算书中即完成了敷设高度的指标分配^[2]。总之,这些潜器的构型多以实现特殊的功能、性能为主,浮力材料本身即是初始结构设计的重要组成部分,设计初期便预留了较优的敷设位置和较大的敷设体积,具有充分的敷设自由度。

然而,在另一些潜器中,当完成初始设计或在经历改换装后,发现其初横稳心高较差,需在当前“重力和浮力已平衡”的初始条件下,通过增设浮力材料,同步增设压载铁的方式,来提高潜器初横稳心高。但在受总体边界限制,如外型线、舷间距,与固壳的安全距离等,浮力材料敷设的空间体积和位置选择十分受限。因此,如何在这些潜器中高效地布置浮力材料,提升全船初横稳心高,成为工程中亟待解决的问题。

解决以上问题面临两方面困难:一是缺乏定量要求,具体多少高度对全船稳性有好处,是否存在一临界高度,高于此则有益,低于此则有害,目前尚无指导性的计算公式;二是如何化解高度和体积的矛盾。敷设高度越高,则势必体积越小,两者应如何协调尚需深入研究。

为此,本文将以一一般潜器的水下初横稳性作为研究对象,首先通过推导敷设浮力材料后的全船函数,获得影响该函数的各项变量,并通过偏微分、等价代换等数学手段,得到影响初横稳心高的浮力材料理论临界高度值。在此基础上,构建算例数学模型,提取目标函数和变量边界,研

究这些变量对横稳心高的影响。同时,本文还将对工程中可能遇到的其他浮力材料敷设问题进行讨论和研究,以获取一些对工程实际有重要意义、简便实用的浮力材料敷设原则,供科研和 design 人员参考。

1 公式推导

1.1 敷设后的水下初横稳心高

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,原点为固壳艏艮长度中心点; z 方向为潜器垂向,向上为正,过固壳圆心,原点为轻壳最低点; y 方向为潜器横向,向右舷为正。

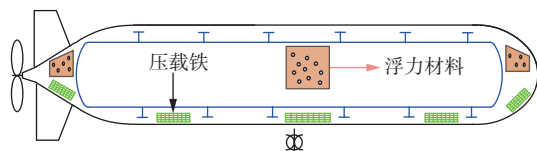


图1 典型双壳体潜器压载铁和浮力材料敷设简化模型

Fig. 1 Typical simplified sketch of a double hull submersible with ballast and buoyant material

在敷设浮力材料前,潜器的固定浮容积为 V_0 ,垂向力臂为 Z_{V0} (浮心),固定浮容积产生的垂向力矩为 $V_0 Z_{V0}$;潜器的重量为 M_0 ,垂向力臂为 Z_{M0} (即重心),重量产生的垂向力矩为 $M_0 Z_{M0}$ 。

设 $\rho_{\text{water}} = 1.0 \text{ t/m}^3$,则敷设浮力材料前有如下平衡关系:

1) 全船重量和浮容积的平衡为

$$M_0 = \rho_{\text{water}} \cdot V_0 = V_0 \quad (1)$$

2) 初横稳心高为

$$r_0 = \frac{V_0 Z_{V0} - M_0 Z_{M0}}{V_0} - c_0 = Z_{V0} - Z_{M0} - c_0 \quad (2)$$

式中: c_0 为内部液舱修正值。

为提升潜器的稳性,对潜器敷设浮力材料。设敷设的浮力材料体积为 V_{Buo} ,重量为 M_{Buo} ,密度为 ρ_{Buo} ,其重心高度为 $Z_{G_{\text{Buo}}}$,浮心高度为 $Z_{B_{\text{Buo}}}$ 。同时,为平衡浮力材料产生的浮力和力矩,需对应增设压载铁,增设的压载铁体积为 V_{Bal} ,重量为 M_{Bal} ,密度为 ρ_{Bal} ,其重心高度为 $Z_{G_{\text{Bal}}}$,浮心高度为 $Z_{B_{\text{Bal}}}$ 。存在如下重量和浮力的平衡关系:

$$\rho_{\text{Bal}} \cdot V_{\text{Bal}} + \rho_{\text{Buo}} \cdot V_{\text{Buo}} = \rho_{\text{water}} \cdot (V_{\text{Bal}} + V_{\text{Buo}}) = V_{\text{Bal}} + V_{\text{Buo}} \quad (3)$$

根据式(3)推导,可得

$$V_{\text{Bal}} = \frac{1 - \rho_{\text{Buo}}}{\rho_{\text{Bal}} - 1} \cdot V_{\text{Buo}} \quad (4)$$

敷设浮力材料后的初横稳心高为

$$r_1 = \frac{V_0 \cdot Z_{V0} + V_{\text{Buo}} \cdot Z_{\text{B_Buo}} + V_{\text{Bal}} \cdot Z_{\text{B_Bal}} - M_0 \cdot Z_{M0} - M_{\text{Buo}} \cdot Z_{\text{G_Buo}} - M_{\text{Bal}} \cdot Z_{\text{G_Bal}}}{V_0 + V_{\text{Buo}} + V_{\text{Bal}}} - c_1 \tag{5}$$

式中： c_1 为自由液面修正值，其随排水量增加而变小，且始终为一小量，为方便后续推导，这里不作讨论。

假设浮力材料是均匀的，且浮力材料完全处于水下状态时重心和浮心位置相同，即

$$Z_{\text{B_Buo}} = Z_{\text{G_Buo}} \tag{6}$$

假设压载铁均位于舷间，处于水下状态时重心与浮心位置也相同，即

$$Z_{\text{B_Bal}} = Z_{\text{G_Bal}} \tag{7}$$

则式(5)可简化为

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{V_0 \cdot (Z_{V0} - Z_{M0}) + V_{\text{Buo}} \cdot Z_{\text{G_Buo}} \cdot (1 - \rho_{\text{Buo}}) + V_{\text{Bal}} \cdot Z_{\text{G_Bal}} \cdot (1 - \rho_{\text{Bal}})}{V_0 + V_{\text{Buo}} + V_{\text{Bal}}} - c_1 = \\ &= \frac{V_0 \cdot (Z_{V0} - Z_{M0}) + V_{\text{Buo}} \cdot Z_{\text{G_Buo}} \cdot (1 - \rho_{\text{Buo}}) - V_{\text{Buo}} \cdot Z_{\text{G_Bal}} \cdot (1 - \rho_{\text{Buo}})}{V_0 + V_{\text{Buo}} + \frac{(1 - \rho_{\text{Buo}})}{(\rho_{\text{Bal}} - 1)} V_{\text{Buo}}} - c_1 = \\ &= (\rho_{\text{Bal}} - 1) \cdot \frac{(Z_{V0} - Z_{M0}) V_0 + (1 - \rho_{\text{Buo}})(Z_{\text{G_Buo}} - Z_{\text{G_Bal}}) V_{\text{Buo}}}{(\rho_{\text{Bal}} - 1) V_0 + (\rho_{\text{Bal}} - \rho_{\text{Buo}}) V_{\text{Buo}}} - c_1 \end{aligned} \tag{8}$$

根据式(8)，敷设浮力材料后，潜器的水下初横稳心高可写为浮力材料敷设的体积、重心高度以及压载铁重心高度等3个变量的函数：

$$r_1 = f(V_{\text{Buo}}, Z_{\text{G_Buo}}, Z_{\text{G_Bal}}) \tag{9}$$

$$\frac{\partial r_1}{\partial V_{\text{Buo}}} = \frac{V_0 (\rho_{\text{Bal}} - 1) [(\rho_{\text{Bal}} - 1)(1 - \rho_{\text{Buo}})(Z_{\text{G_Buo}} - Z_{\text{G_Bal}}) - (\rho_{\text{Bal}} - \rho_{\text{Buo}})(Z_{V0} - Z_{M0})]}{[(\rho_{\text{Bal}} - 1) V_0 + (\rho_{\text{Bal}} - \rho_{\text{Buo}}) V_{\text{Buo}}]^2} \tag{10}$$

对浮力材料重心(浮心) $Z_{\text{G_Buo}}$ 求导，可得

$$\frac{\partial r_1}{\partial Z_{\text{G_Buo}}} = \frac{(\rho_{\text{Bal}} - 1)(1 - \rho_{\text{Buo}}) V_{\text{Buo}}}{(\rho_{\text{Bal}} - 1) V_0 + (\rho_{\text{Bal}} - \rho_{\text{Buo}}) V_{\text{Buo}}} \tag{11}$$

对新增压载铁重心(浮心) $Z_{\text{G_Bal}}$ 求导，可得

$$\frac{\partial r_1}{\partial Z_{\text{G_Bal}}} = (-1) \cdot \frac{(\rho_{\text{Bal}} - 1)(1 - \rho_{\text{Buo}}) V_{\text{Buo}}}{(\rho_{\text{Bal}} - 1) V_0 + (\rho_{\text{Bal}} - \rho_{\text{Buo}}) V_{\text{Buo}}} \tag{12}$$

首先研究 $Z_{\text{G_Buo}}$ 和 $Z_{\text{G_Bal}}$ 对稳性的影响，根据式(11)和式(12)，明显有：在其他变量不变的前提下，浮力材料重心(浮心) $Z_{\text{G_Buo}}$ 越高，对初横稳心高越好；压载铁重心(浮心) $Z_{\text{G_Bal}}$ (浮心)越

1.2 敷设临界高度推导

对影响初横稳心高的3个变量分别求导，以期得到各参数变量的影响。

对浮力材料体积 V_{Buo} 求导，可得

低，对初横稳心高越好。对于 V_{Buo} 的导数，当式(13)成立，即

$$(Z_{\text{G_Buo}} - Z_{\text{G_Bal}}) - \frac{(\rho_{\text{Bal}} - \rho_{\text{Buo}})}{(\rho_{\text{Bal}} - 1)(1 - \rho_{\text{Buo}})} (Z_{V0} - Z_{M0}) > 0 \tag{13}$$

且在其他变量不变的前提下，初横稳心高随着浮力材料的体积 V_{Buo} 增加而变好。

以上分析仅给出了趋势分析，为更好理解水下初横稳心高随敷设浮力材料的变化，将 $r_1 = f(V_{\text{Buo}}, Z_{\text{G_Buo}}, Z_{\text{G_Bal}})$ 的表达式作等价变换，可得

$$r_1 = (\rho_{\text{Bal}} - 1) \cdot \frac{(Z_{V0} - Z_{M0}) V_0 + (1 - \rho_{\text{Buo}})(Z_{\text{G_Buo}} - Z_{\text{G_Bal}}) V_{\text{Buo}}}{(\rho_{\text{Bal}} - 1) V_0 + (\rho_{\text{Bal}} - \rho_{\text{Buo}}) V_{\text{Buo}}} = (Z_{V0} - Z_{M0}) \cdot \frac{V_0 + \frac{(1 - \rho_{\text{Buo}})(Z_{\text{G_Buo}} - Z_{\text{G_Bal}})}{(Z_{V0} - Z_{M0})} V_{\text{Buo}}}{V_0 + \frac{(\rho_{\text{Bal}} - \rho_{\text{Buo}})}{(\rho_{\text{Bal}} - 1)} V_{\text{Buo}}} \tag{14}$$

进一步有

$$\frac{r_1}{r_0} = \frac{V_0 + \frac{(1 - \rho_{\text{Buo}})(Z_{\text{G_Buo}} - Z_{\text{G_Bal}})}{(Z_{V0} - Z_{M0})} V_{\text{Buo}}}{V_0 + \frac{(\rho_{\text{Bal}} - \rho_{\text{Buo}})}{(\rho_{\text{Bal}} - 1)} V_{\text{Buo}}} \tag{15}$$

由式(15)，可较直观地得到式(16)成立时，即当

$$\frac{(Z_{\text{G_Buo}} - Z_{\text{G_Bal}})}{(Z_{V0} - Z_{M0})} > \frac{(\rho_{\text{Bal}} - \rho_{\text{Buo}})}{(\rho_{\text{Bal}} - 1)(1 - \rho_{\text{Buo}})} \tag{16}$$

r_1 将大于 r_0 ，即好于敷设前的初横稳心高。于是，

将式(16)作进一步变换，可得

$$Z_{\text{G_Buo}} > \frac{(\rho_{\text{Bal}} - \rho_{\text{Buo}}) r_0}{(\rho_{\text{Bal}} - 1)(1 - \rho_{\text{Buo}})} + Z_{\text{G_Bal}} \tag{17}$$

式(17)即说明，当浮力材料重心高度大于特定值时，敷设浮力材料可以改善全船初稳心高。值得再次说明的是，式(17)是在 $\rho_{\text{water}} = 1.0 \text{ t/m}^3$ 的前提下推导而来的。

然而，正如前文所述，敷设浮力材料后的初横稳心高是多变量函数，偏导数所研究的各种趋势

也仅在另外 2 个变量不变时,才能获得这一变量对初横稳心高的影响。下文将结合实际情况,对以上函数进行进一步工程简化。

1.3 构建简化数学模型

根据实际情况,对以上初横稳心高进行工程简化主要从两个方面着手:

一是考虑到全船压载铁敷设范围广,调整范围大,新增压载铁重心可根据全船压载铁敷设高度的统计情况进行初步确定,即将 Z_{G_Bal} 确定为一常数,从而缩减一个变量。

二是当较大量敷设浮力材料时,将受到总体边界的约束,可根据这些边界,构建浮力材料体积和重心高度间的函数关系,以进一步缩减变量。

选取一敷设浮力材料的典型剖面,如图 2(a)所示,浮力材料敷设在舷间,其外边界为轻壳体,内边界为浮力材料托板高度,同时,根据吃水高度、压载铁敷设高度等,进一步将该横剖面等效成如图 2(b)所示的数学模型。在图中,将第一象限的轻壳边界表示为函数 $y = G(z)$,托板边界表示为函数 $y = F(z)$ 。

则图 2 中浮力材料所围成的面积可表示为

$$S = 2 \cdot \int_{Z_0}^{h_{WL}} [G(z) - F(z)] dz \tag{18}$$

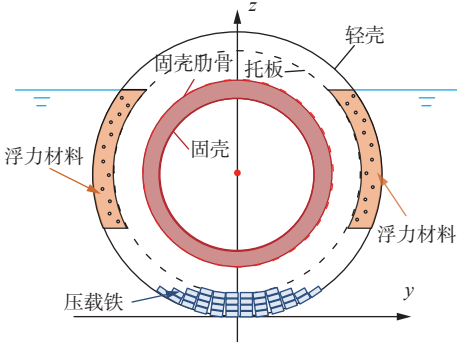
设浮力材料纵向长度为 d ,则所形成的体积为

$$V_{Buo} = S \cdot d \tag{19}$$

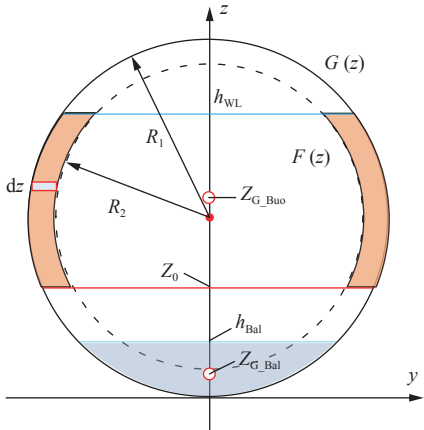
浮力材料的重心高度为

$$Z_{G_Buo} = \frac{2 \cdot \int_{Z_0}^{h_{WL}} [G(z) - F(z)] \cdot z dz}{S} = \frac{2 \cdot d \cdot \int_{Z_0}^{h_{WL}} [G(z) - F(z)] \cdot z dz}{V_{Buo}} \tag{20}$$

如此,便可用同一变量 Z_0 ,表示浮力材料体积



(a) 横剖面示意图



(b) 简化数学模型

图 2 典型双壳体潜器压载铁和浮力材料敷设横剖面示意图和简化数学模型

Fig. 2 Typical simplified mathematic model of a double hull submersible transverse section with ballast and buoyant material

和重心,其取值范围应约束为

$$h_{Bal} \leq Z_0 \leq h_{WL} \tag{21}$$

即高于压载铁最大高度,低于吃水高度。则目标函数为在以上区间求取 r_1 最大值。

2 算例分析

2.1 算例模型

为研究敷设浮力材料对初横稳心高的影响,设计 7 个算例,如表 1 所示。其中以算例 1 为基

表 1 算例模型参数设置

Table 1 Parameter settings of different calculation cases

算例	敷设前排水量/t	敷设前初横稳心高/m	轻壳半径 R_1 /托板半径 R_2 /m	吃水高度/m	压载铁上边缘高度/m	压载铁重心高度/m
1	500	r_0	R_1/R_2	h_{WL}	h_{Bal}	Z_{G_Bal}
2	V_0	$r_0 + 0.15$	R_1/R_2	h_{WL}	h_{Bal}	Z_{G_Bal}
3	V_0	r_0	$R_1/(R_2 - 0.2)$	h_{WL}	h_{Bal}	Z_{G_Bal}
4	V_0	r_0	R_1/R_2	$h_{WL} - 0.9$	h_{Bal}	Z_{G_Bal}
5	V_0	r_0	R_1/R_2	h_{WL}	$h_{Bal} + 0.1$	Z_{G_Bal}
6	V_0	r_0	R_1/R_2	h_{WL}	h_{Bal}	$Z_{G_Bal} + 0.1$
7	$V_0 + 100$	r_0	R_1/R_2	h_{WL}	h_{Bal}	Z_{G_Bal}

础, 其余 6 个算例作为对照, 分别研究不同参数 (排水量、敷设前初稳心高、轻壳半径/托板半径、吃水高度、压载铁上边缘高度、压载铁重心高度) 变化时对敷设浮力材料后全船初横稳心高的影响。

2.2 对比分析

2.2.1 典型算例分析

典型算例(算例 1)参照剖面图(图 2(b)), 在保证浮力材料上限高度(吃水高度)不变的前提下, 研究下限不断升高对初横稳心高的影响。在浮力材料下限由压载铁上表面 h_{Bal} 变化至吃水高度 h_{WL} , 分别计算初横稳心高(相对值)、浮力材料重心、浮力材料体积的变化情况, 如图 3 所示。在上限固定, 下边缘不断上移的过程中, 浮力材

料重心不断提高, 同时体积也不断减小, 如图 3(a)和图 3(b)所示, 这符合一般规律。但图 3(c)中初横稳心高曲线先升高再减小, 则需要重点分析。

1) 浮力材料重心计算值在 A 点, 即 $Z_0 = 0.61\text{ m}$ 时, 浮力材料重心为 $Z_{\text{G_Buo}} = 1.50\text{ m}$, 此时对应初横稳心高相对值为 1, 即说明此时为敷设浮力材料前后稳心高相同, 与预计相符, 与临界点公式 $Z_{\text{G_Buo}} = \frac{(\rho_{\text{Bal}} - \rho_{\text{Buo}})r_0}{(\rho_{\text{Bal}} - 1)(1 - \rho_{\text{Buo}})} + Z_{\text{G_Bal}}$ 一致。在整个浮力材料的重心高于临界点时, 敷设浮力材料有助于提升稳心高, 低于临界点时, 则降低稳心高。

2) 初横稳心高相对值最大在 B 点取得, 此时下边缘 $Z_0 = 1.50\text{ m}$, 其浮力材料重心达到 $Z_{\text{G_Buo}} = 1.9949\text{ m}$ 。此时下边缘 Z_0 正好与重心临界点 $Z_{\text{G_Buo}} = \frac{(\rho_{\text{Bal}} - \rho_{\text{Buo}})r_0}{(\rho_{\text{Bal}} - 1)(1 - \rho_{\text{Buo}})} + Z_{\text{G_Bal}}$ 相等。

为验证是否均在浮力材料下边缘达到 $Z_{\text{G_Buo}} = \frac{(\rho_{\text{Bal}} - \rho_{\text{Buo}})r_0}{(\rho_{\text{Bal}} - 1)(1 - \rho_{\text{Buo}})} + Z_{\text{G_Bal}}$ 时取得最大值的一般性, 按照算式, 计算出重心临界点相同的算例 1, 3, 4, 5, 7, 得到的所有算例均在 $Z_0 = 1.50\text{ m}$ 取得最大值, 如图 4 所示。

经分析, 可这样理解这一规律: 假设一定体积的浮力材料, 其合计的重心正好为临界点。此时, 将这一体积的浮力材料看作离散高度为 dz 的浮力材料单元的积分, 如图 2(b)所示, 若某一单元的纵坐标在临界点以上, 则起到了提高稳性的作用, 反之则起到了降低稳性的作用。可以预见的是, 如果去除掉所有有损稳心高的单元, 剩余所有单元对稳心高都是有益的, 则其积分必然为稳心高最大值, 这也说明为何浮力材料“下边界”为临界点时, 取得稳心高最大值。

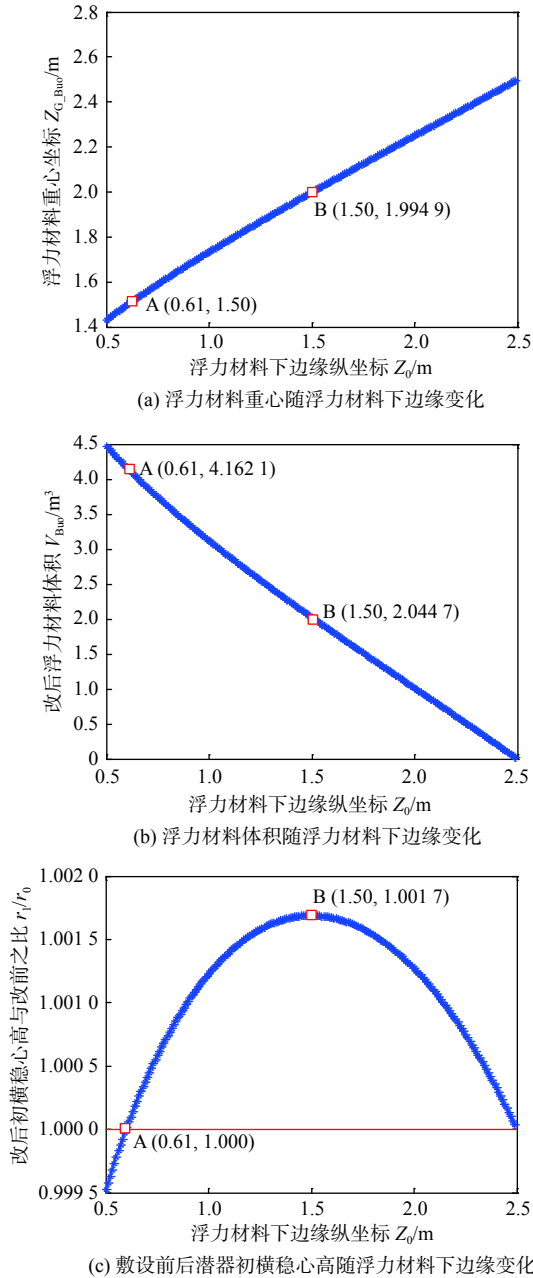


图 3 算例 1 计算结果

Fig. 3 The calculation results of Case 1

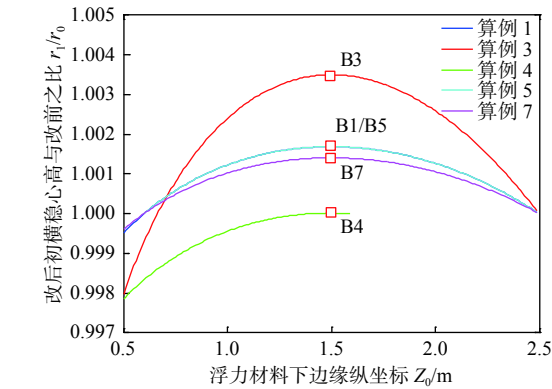


图 4 算例 1, 3, 4, 5, 7 初横稳心高计算结果对比
Fig. 4 Comparison of the initial transverse metacentric height calculation results of Cases 1, 3, 4, 5, 7

2.2.2 敷设前稳心高的影响

通过对比算例 1 和算例 2, 得到不同敷设前水下初横稳心高对浮力材料敷设效果的影响, 如

图 5(a)所示。由图 5 可知,在其他参数相同的条件下:

- 1) 改前水下初横稳心高越小,改善稳心高的浮力材料重心临界垂向位置越低。
- 2) 改前水下初横稳心高越小,改善稳心高效果最好时的浮力材料下边缘垂向位置越低。
- 3) 改前水下初横稳心高越小,改善稳心高的最好效果越好。

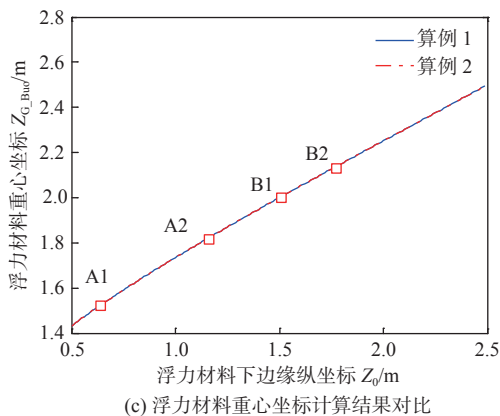
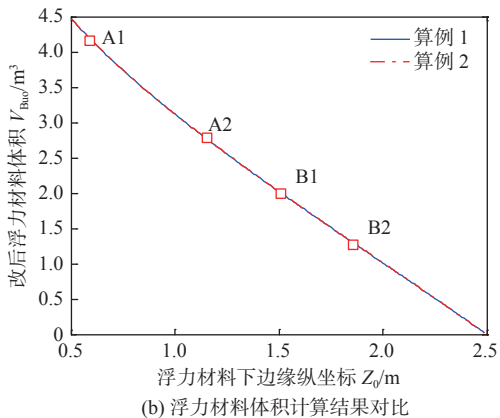
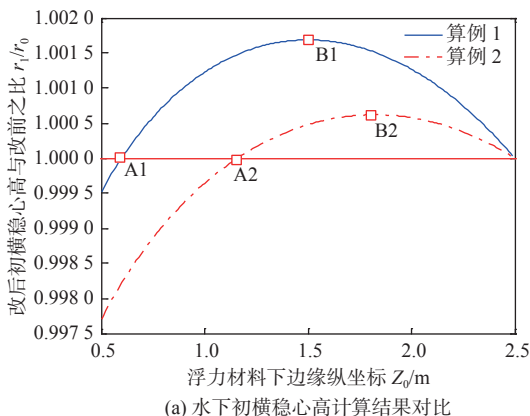


图 5 算例 1, 2 计算结果对比

Fig. 5 Comparison of the calculation results of Cases 1, 2

2.2.3 壳体边界的影响

通过对比算例 1 和算例 3, 得到不同托板边界半径对浮力材料敷设效果的影响, 如图 6(a)所示。由图 6 可知, 在其他参数相同的条件下:

- 1) 改善稳心高的浮力材料重心临界垂向位置相同。

2) 改善稳心高效果最好时, 浮力材料下边缘垂向位置相同。

3) 在相同浮力材料重心高度, 浮力材料体积越大, 改善稳心高的最好效果越好。

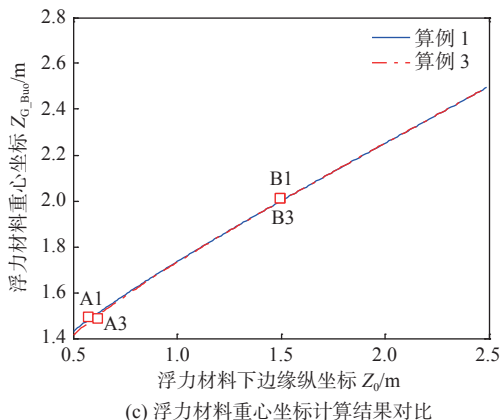
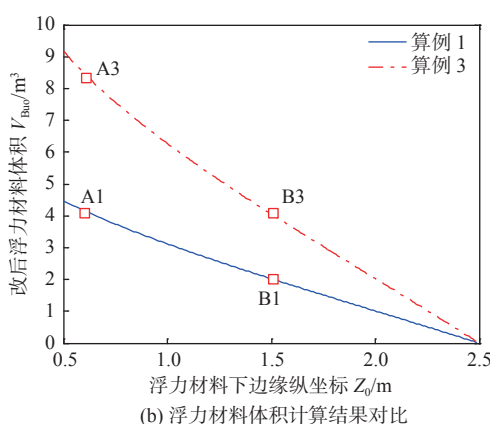
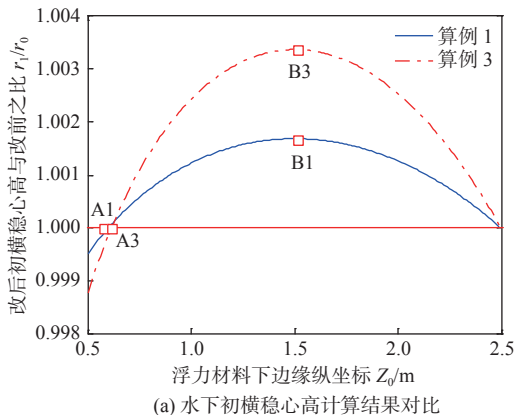


图 6 算例 1, 3 计算结果对比

Fig. 6 Comparison of the calculation results of Cases 1, 3

2.2.4 吃水高度的影响

通过对比算例 1 和算例 4, 得到不同吃水高度(即浮力材料上边缘)对浮力材料敷设效果的影响, 如图 7(a)所示。由图 7 可知, 在其他参数相同的条件下:

- 1) 改善稳心高的浮力材料重心临界垂向位置相同。吃水高度(即浮力材料上边缘)不影响该位置。
- 2) 改善稳心高效果最好时, 浮力材料下边缘

垂向位置相同。吃水高度(即浮力材料上边缘)不影响该位置。

3) 吃水高度越高, 改善稳心高的最好效果越好。

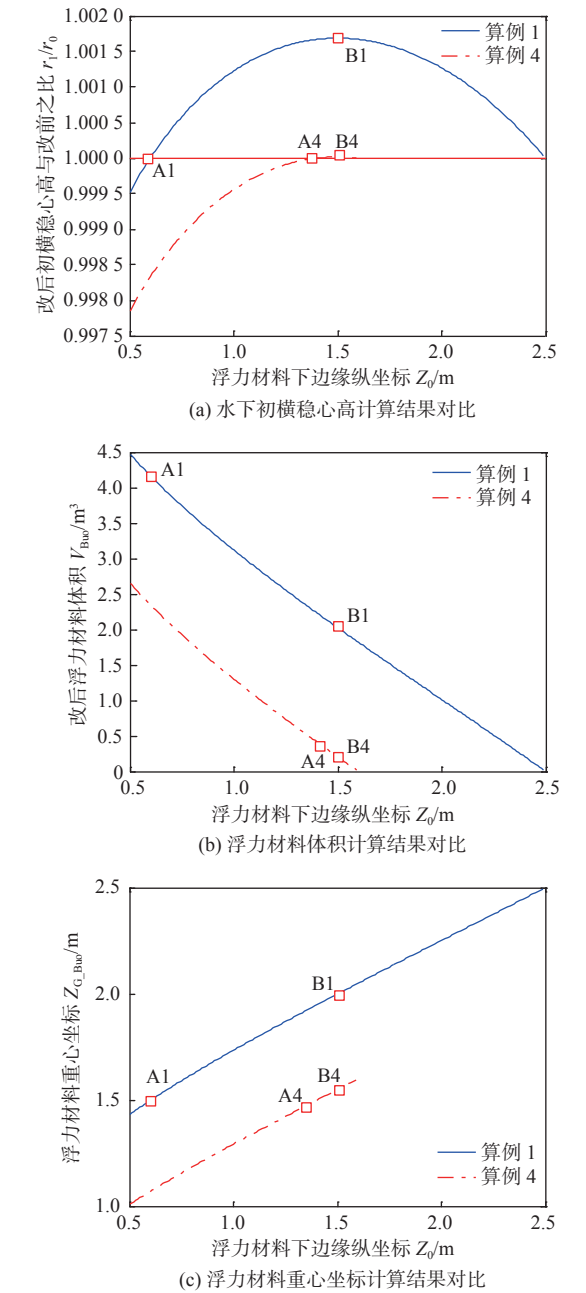


图 7 算例 1, 4 计算结果对比

Fig. 7 Comparison of the calculation results of Cases 1, 4

2.2.5 压载铁上边缘的影响

通过对比算例 1 和算例 5, 得到不同压载铁上边缘高度对浮力材料敷设效果的影响, 如图 8(a) 所示。由图可知, 在其他参数相同的条件下:

- 1) 改善稳心高的浮力材料重心临界垂向位置相同。压载铁上边缘不影响该位置。
- 2) 改善稳心高效果最好时, 浮力材料下边缘垂向位置相同。压载铁上边缘不影响该位置。

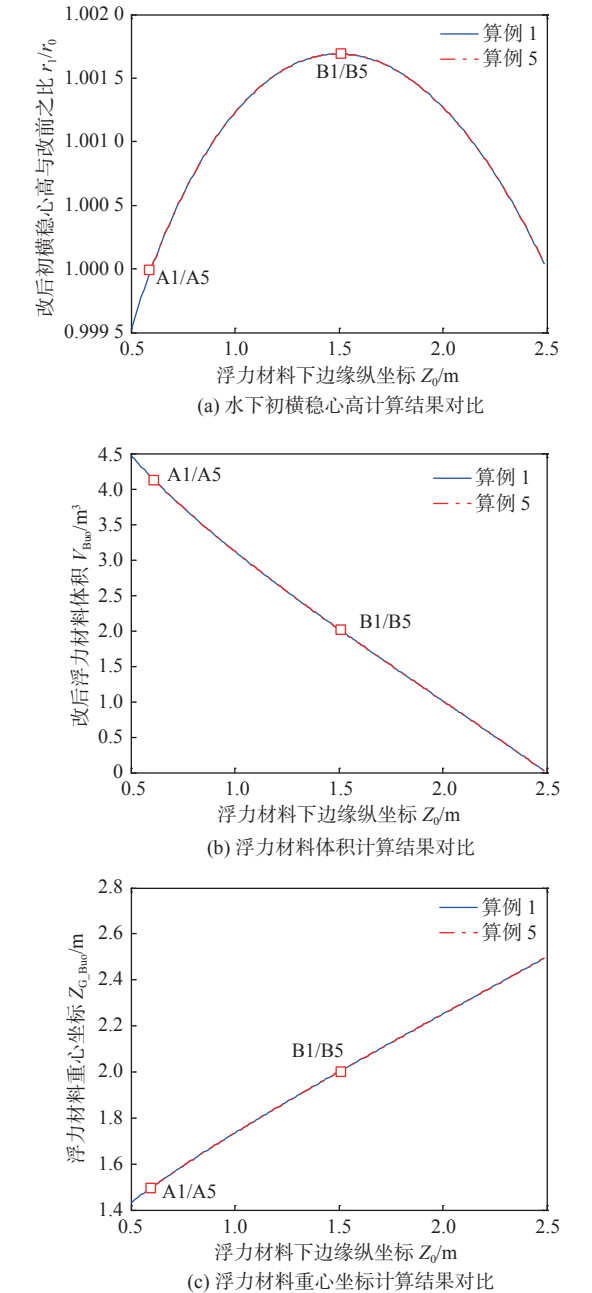


图 8 算例 1, 5 计算结果对比

Fig. 8 Comparison of the calculation results of Cases 1, 5

2.2.6 压载铁重心高度的影响

通过对比算例 1 和算例 6, 得到不同补充的压载铁重心高度对浮力材料敷设效果的影响, 如图 9(a) 所示。由图可知, 在其他参数相同的条件下:

- 1) 补充的压载铁重心越低, 改善稳心高的浮力材料重心临界垂向位置越低。
- 2) 补充的压载铁重心越低, 改善稳心高效果最好时的浮力材料下边缘垂向位置越低。
- 3) 补充的压载铁重心越低, 改善稳心高的最好效果越好。

2.2.7 排水量的影响

通过对比算例 1 和算例 7, 得到不同排水量对浮力材料敷设效果的影响, 如图 10(a) 所示。由

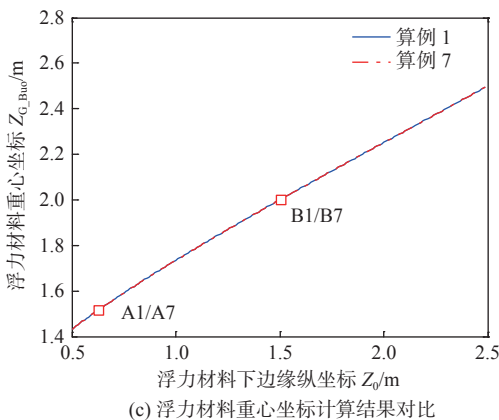
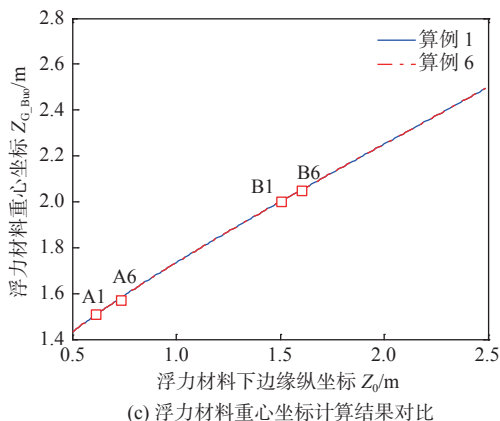
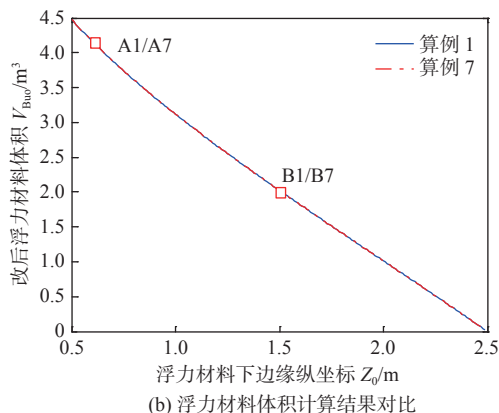
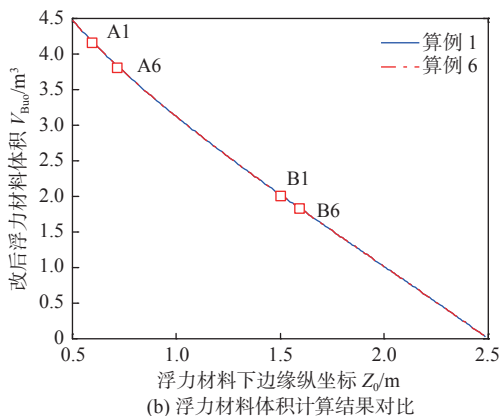
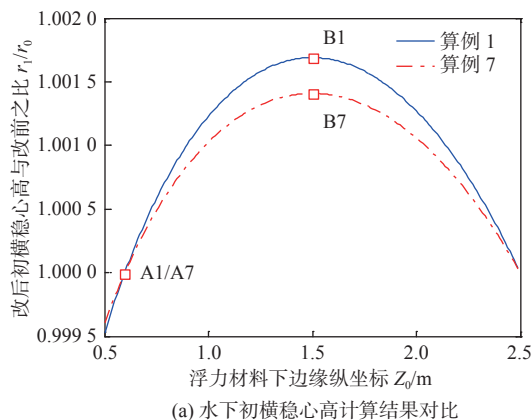
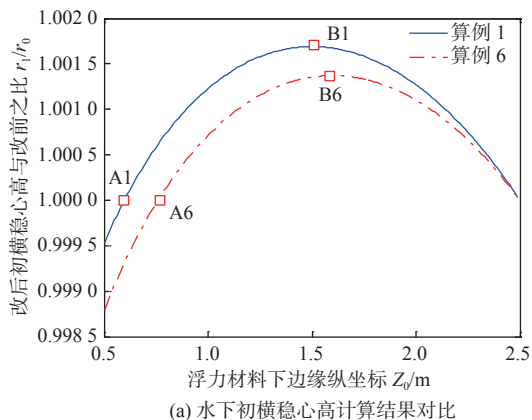


图 9 算例 1, 6 计算结果对比

图 10 算例 1, 7 计算结果对比

Fig. 9 Comparison of the calculation results of Cases 1, 6

Fig. 10 Comparison of the calculation results of Cases 1, 7

图可知,在其他参数相同的条件下:

- 1) 改善稳心高的浮力材料重心临界垂向位置相同。排水量不影响该位置。
- 2) 改善稳心高效果最好时,浮力材料下边缘垂向位置相同。排水量不影响该位置。
- 3) 排水量越小,改善稳心高的最好效果越好。

2.3 关于算例的补充说明

在上述各算例中,敷设材料后,潜器的初横稳性较敷设前有提升,但提升效果仅限于 0.2% 左右,数值相对较小。其主要原因为,算例 1~7 在选取敷设前的初横稳心高参数时,被故意设置为一较大的数,目的是便于观察整个稳心高的变化

曲线,即稳心高相对值“从劣到好”的过程。在实际情况下,敷设前的初横稳心高一般为满足相关国家标准的相对较小值,按此参数设置算例 8,如图 11 所示,在此情况下初横稳心高提高了接近 1.8%,较算例 1 的相对效果提升近 10 倍。

3 讨论和思考

前文重点探讨了在垂向上浮力材料敷设的规律以及效果,下面主要就浮力材料在纵向的敷设位置进行探讨。

3.1 关于敷设纵向位置的思考

关于浮力材料敷设的位置区域,考虑如下:

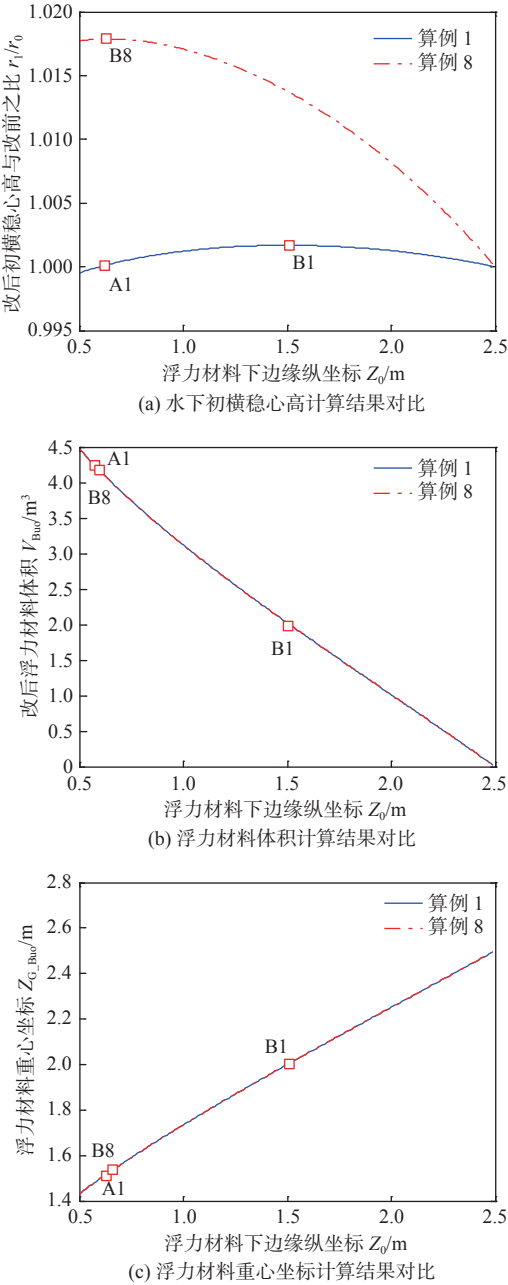


图 11 算例 1, 8 计算结果对比

Fig. 11 Comparison of the calculation results of Cases 1, 8

一是在敷设前, 潜器已处于艏艉力矩平衡的状态, 压载铁敷设也较为平均, 在不希望影响当前全船压载铁布局的前提下, 仅希望通过增设浮力材料, 提升稳性。针对这种情况, 选取的位置应选择在尽量靠船舫的位置, 此时可将由于浮力材料带来的新增压载铁均摊在全船艏艉, 以获得较低的 Z_{G_Bal} 值, 提升稳心高收益。

二是在敷设前, 如果潜器本身存在艏重(艏部船体及设备重量重, 压载铁少)或艉重(艉部船体及设备重量重, 压载铁少)的情况, 在敷设浮力材料提升稳心高的同时, 还希望根据实际情况改善压载铁的总体布置情况, 将浮力材料敷设于艏部或艉部。

3.2 关于以提供浮力为主要目标的敷设位置思考

前文的讨论是基于潜器重力和浮力已平衡的前提下, 通过敷设浮力材料和压载铁来获得更好的初横稳性。但在实际工程中, 往往存在下列情形:

在舷间加装某一装置后, 由于压载铁布置位置和数量的限制, 已无法通过调整压载铁来平衡这一装置新增的重量和重量矩。为此需要通过浮力材料进行平衡。此时, 前面的推导仍然成立, 仅需把前面的压载铁的密度和重心换算成该设备的密度和重心。

但考虑到此时浮力材料的首要目的是力和力矩的平衡, 则仅要求整个浮力材料的重心在临界值以上即可, 而非下边缘也要高于临界值, 这样可以保证足够大的浮力来平衡力。

4 结 论

根据前文的推导和算例研究, 以及具体问题的思考和讨论, 针对增设浮力材料以提高水下初横稳心高的问题, 在潜器垂向(z 方向)和纵向(x 方向)上分别提出建议如下:

- 1) 垂向。
 - (1) 若敷设浮力材料主要目的为提高水下初横稳心高, 则所有浮力材料敷设的下边缘应高于临界值, 该值为 $Z_{\text{Buo_critical}} = \frac{(\rho_{\text{Bal}} - \rho_{\text{Buo}})r_0}{(\rho_{\text{Bal}} - 1)(1 - \rho_{\text{Buo}})} + Z_{G_Bal}$ 。若同时希望避免降低水面稳性, 浮力材料敷设上边缘应低于吃水线, 在此高度区间上“能敷尽敷”。并且, 平衡浮力材料的压载铁应敷设得尽量低。该方案可在敷设最少的浮力材料的条件下, 获得最大的水下初横稳性提升收益。
 - (2) 若敷设浮力材料主要目的为提供浮力, 并兼顾不损害敷设前的稳性, 则可将上述计算公式中压载铁的重心、密度替换为需补充的舷间设备密度、重心。新增的浮力材料只需整体重心不小于临界值即可, 而非下边缘。
- 2) 纵向。
 - (1) 若在敷设压载铁前全船重量分布均匀, 在空间允许的前提下, 则建议浮力材料敷设在靠船舫的位置, 以便于将平衡浮力材料的压载铁全船均布, 降低重心。
 - (2) 若在敷设压载铁前全船重量分布不均, 存在“艏重”或“艉重”情况, 则浮力材料应“艏重敷艏部、艉重敷艉部”。这样在提升稳性的同时, 还可改善全船压载铁的分布, 在平衡重量的同时可降低压载铁垂向力矩。