文章编号:1000 - 4653(2026)04 - 0175 - 11

CEL 方法在抛锚贯入深度中的应用研究

白响恩[1*], 王晨阳[1], 杜陈天骄[2], 徐笑锋[1], 陈彦臻[3], 孟祥麒[4]
(1. 上海海事大学 商船学院, 上海 201306;
2. 山东交通职业学院 车辆工程系, 山东 潍坊 201206;
3. 中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011;
4. 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘 要:船舶的应急抛锚作业会对海底管道的安全构成严重威胁。现有经验公式和理论模型在复杂地质条件下往往适应性不足,尤其难以刻画土体强度在高速贯入过程中的非线性演化。针对上述问题,以商船广泛使用的霍尔锚为对象,采用耦合欧拉-拉格朗日(CEL)方法在静态条件下研究船舶应急抛锚的贯入行为,模型中引入摩尔-库仑本构和 Einav 应变率软化关系,以反映土体强度的动态衰减;通过罚函数处理锚-土接触界面,并经网格收敛性测试确定 58.6 万单元的欧拉域划分。以某海上风电场工程水域的淤泥质黏土为背景,计算了 2 万 GT LPG 船和 5 万吨级油船应急抛锚的最大贯入深度,分别得到 2.908 m 和 3.033 m。与 DNV 能量法和 Young 公式相比,本方法能更好地反映土体非均质性和大变形特征,将模拟结果与试验数据对比,贯入深度最大误差 13.1%,触底速度最大误差 16.1%,在工程可接受范围内。结果表明,该方法具有较高的可靠性,符合工程实际,可以为海底管线设计、路径规划及抛锚风险控制提供理论与技术支撑。

关键词:水路运输; 抛锚贯入; 有限元分析
中图分类号:U675.922 **文献标志码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1000 - 4653.2026.04.019

Research on the application of the CEL method in anchor penetration depth

Bai Xiang'en[1*], *Wang Chenyang*[1], *Duchen Tianjiao*[2], *Xu Xiaofeng*[1], *Chen Yanzhen*[3], *Meng Xiangqi*[4]
(1. Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 2. Department of Automotive Engineering, Shandong Transport Vocational College, Weifang 201206, China;
3. Marine Design and Research Institute of China, Shanghai 200011, China; 4. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Emergency anchoring operations pose a serious threat to the safety of subsea pipelines. Existing empirical formulas and theoretical models often show limited adaptability under complex geological conditions, particularly in characterizing the nonlinear evolution of soil strength during high-velocity penetration. To address this problem, this study takes the Hall anchor, which is widely used on merchant ships, as the research object and investigates the penetration behavior of ship emergency anchoring under static conditions using the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method. The Mohr-Coulomb constitutive model and the Einav strain-rate softening relationship are introduced to describe the dynamic degradation of soil strength. The anchor-soil contact interface is treated using the penalty function method, and an Eulerian domain with 586 000 elements is determined through a mesh convergence test. Taking the muddy clay in the waters of an offshore wind farm as the engineering background, the maximum penetration depths of emergency anchoring for a 20 000 GT LPG carrier and a 50 000 DWT oil tanker are calculated to be 2.908 m and 3.033 m, respectively. Compared with the

收稿日期:2025-11-15
基金项目:上海市自然科学基金项目(24ZR1454000);中国博士后科学基金项目(2024M762094)资助
第一作者(*通信作者):白响恩(1984—),女,教授,博士,研究方向为通航安全评估,极地航行,(E-mail)xebai@shmtu.edu.cn
引用格式:白响恩,王晨阳,杜陈天骄,等. CEL 方法在抛锚贯入深度中的应用研究[J]. 中国航海,2026,49(4):175 - 185.
Bai X E, Wang C Y, Duchen X J, et al. Research on the application of the CEL method in anchor penetration depth[J]. Navigation of China, 2026, 49(4): 175 - 185. (in Chinese)

DNV energy method and Young's formula, the proposed method can better reflect soil heterogeneity and large-deformation characteristics. The simulation results are further compared with experimental data, showing maximum errors of 13.1% in penetration depth and 16.1% in bottom-impact velocity, both of which are within the acceptable range for engineering applications. The results indicate that the proposed method has high reliability and is consistent with engineering practice, providing theoretical and technical support for subsea pipeline design, route planning, and anchoring risk control.

Key words: waterway transportation; anchor penetration; finite element analysis

在经济快速发展的背景下,管道运输凭借储运高效、安全、低成本的优势,成为海上油气输送的主流方式。海底电缆是海上风电电力输送的核心载体,海底管道作为能源输送的关键通道,二者运行安全至关重要。随着国际航运业扩张和海运基础设施持续增多,海底管线的安全面临严峻挑战。

针对落锚的贯入运动及贯入深度测量的问题,国内外学者通过试验研究、理论分析和数值仿真[1]等方法,对其进行了广泛研究。Dao 等[2]针对下穿锚地段过江隧道工程,依托模型试验预测锚地水域河床极限冲刷深度,为涉水过河建筑物埋深设计提供指导。Ads 等[3]利用透明合成土模拟软海黏土开展试验,深入剖析锚在多种土壤条件下的性能表现,为海洋工程中锚系结构的设计与优化提供重要的理论依据。Yang 等[4]聚焦于霍尔锚贯入深度的预测问题,对比评估4种机器学习模型和3类经验公式的多组性能,具有重要的工程参考意义。Lai 等[5]开展计算试验,分析砂土性质、锚的初始状态和其他锚参数对拖曳埋入锚运动学行为和承载性能的影响,验证了锚体力学作用规律。Fu 等[6]提出基于新型机器学习(Machine Learning, ML)算法的测算方法,该研究为动力安装锚的设计方法提供新视角。蔡新永等[7]结合常规经验公式和耦合欧拉-拉格郎日(coupled Eulerian-Lagrangian, CEL)大变形有限元计算方法开展船舶应急抛锚研究,计算结果可为隧道安全埋深设计提供技术支撑。李延伟等[8]借助 ABAQUS 有限元软件,数值研究锚地海域船舶多次抛锚作业对河床土体的作用,研究结论可为穿越锚地和停泊区水域的水下过河建筑物埋深设计提供技术依据。余博闻等[9]以霍尔锚为研究对象,依托有限元软件,构建可考虑复杂土层、触底水平速度及触底姿态等多因素的抛锚贯入深度数值模拟方法,研究了拖锚对贯入深度的影响。梁鹏等[10]选取霍尔锚为研究载体,分别探究不同地质特征参数对落锚贯入深度的影响,研究结果提供了重要的参考与对比依据。Nakayama 等[11]依托现场实投锚试验,测定霍尔锚在不同底质内的贯入深度,为后续研究提供了重要的实测和理论数据。Brown[12]基于实测统计数据,拟合提出软黏土、粉土和砂土等3类土体中落锚的锚击深度线,量化不同土质条件下锚的贯入极限阈值。Moore 等[13]通过离心机模型试验,探究 AC-14 大抓力锚在砂质海床中的贯入机制,采用不同密度的砂土,测量锚在拖曳过程中的最大贯入深度,给出兼顾船锚尺寸的电缆埋深建议值。Wang 等[14]开展模型试验,对鱼雷锚在黏性土中的自由下落过程进行系统测试,建立适用于无土体分离条件下的穿透深度计算模型。Hossain 等[15]在黏土和淤泥两类土层中开展鱼雷锚贯入试验,分析锚尾翼构型及锚端几何形状对最终贯入效果的影响。Zhu 等[16]通过解析锚在水体及海床底质内的完整运动情况,构建回归方程,用于估计实际复杂情况下的锚体贯入深度。Li 等[17]以 Young 公式为基础,构建综合考虑锚型、锚重、触底速度和底质条件等主要因素影响的船舶锚贯入海床计算模型,简化锚体贯入深度的计算过程,提升极端工况下的计算精度。数值模拟是研究船舶抛锚贯入深度的核心手段,能精准地模拟复杂的锚与土壤相互作用,考虑土壤的非线性特性、应力应变演化过程,实现复杂工况的参数化研究[18-19]。池寅等[20]采用耦合光滑粒子流体动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics,SPH)与有限元(Finite Element Method,FEM)算法,依托 ANSYS LS-DYNA 软件对船舶锚体在砂质海床中的完整运动过程进行模拟。Zhang 等[21]采用任意拉格朗日-欧拉(Arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE)方法,针对霍尔锚在粉质河床土中的穿透行为开展研究,通过求解霍尔锚水下运动的常微分方程,得到不同自重和下落高度下的匀速运动速度、触底速度和无限水深条件下的运动演化特性。

现有研究存在明显局限性:经验公式依赖特定试验数据,大多仅适用于单一工况,对复杂地质条件的适应性差,尚未形成多地质条件下的普适性修正方法;理论模型多忽略土体动态演化过程,且多假设应变率效应呈线性增长,与工程实际中“高速贯入时强度增幅趋缓”的非线性特征不符,致使极端工况下计算偏差较大;数值模拟方法在处理锚-土大变形接触时,易出现网格畸变或能量耗散不合理的问题,且现有研究对触底角度、水流冲刷等实际工况因素的分析仍不完善。为此,本研究针对上述缺陷,采

用 CEL 方法构建三维有限元模型:

1)引入 Einav 等[22]提出的土体应变率和应变软化模型,精准刻画锚贯入过程中土体强度的动态变化规律。

2)通过参数化模拟锚重、触底速度和触底角度等关键影响因素,建立多工况下贯入深度的定量关系模型。同时,结合工程区域实际地质勘察数据与船舶通航特征,将模拟结果与 DNV 能量法、Young 公式等传统理论方法对比,形成兼顾精度与工程适用性的锚体贯入深度预测方法,为抛锚作业提供一定理论支撑。

1 模型的建立

本文选取典型工况进行模拟,土体模型尺寸为 30 m × 30 m × 35 m,模型上方预留 6.6 m 空白区域。土体设置为欧拉体,材料属性通过预定义场分配,网格内材料填充依据单元体积分数(Element Volume Fraction, EVF)指派规则。海床土层简化为理想弹塑性材料,采用 Mohr-Coulomb 模型描述。数值模拟锚型选用 A 型霍尔锚,其主体结构尺寸参考中华人民共和国船舶行业标准《霍尔锚》(GB/T 546—2016)[23]规范确定,霍尔锚几何结构图见图 1。

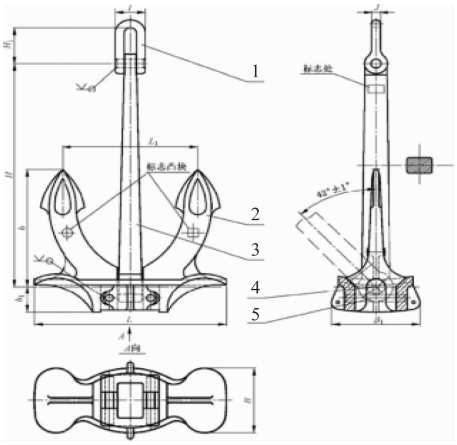


图 1 霍尔锚几何结构图

Fig. 1 Geometric structure diagram of Hall anchor

为提高数值模拟的计算效率和分析精度,通过三维建模软件 Solidworks 构建简化后的霍尔锚几何模型,随后导出 SAT 文件格式并导入 ABAQUS 中开展分析。霍尔锚尺寸参数见表 1。表 1 中:H 为锚的总高度;h 为锚爪高度;h_1 为锚冠高度;L 为锚总长度;L_1 为锚干长度;B 为锚体宽度;B_1 为锚爪宽度;H_1 为锚干高度;I 为锚爪长度;J 为锚爪销直径。将锚体运动约束到参考点,由参考点控制刚体运动。

表 1 霍尔锚尺寸参数

Tab. 1 Dimensions and parameters of Hall anchor

锚重 M_a/kg	霍尔锚尺寸/mm									
	H	h	h_1	L	L_1	B	B_1	H_1	I	J
8 700	3 355	1 816	399	2 585	1 816	1 007	1 195	540	391	117
9 300	3 430	1 857	408	2 643	1 857	1 030	1 222	580	418	124

采用 Geostatic Stress 预定义场进行地应力平衡。设置动态显式分析步,简化锚在水中下落阶段,直接置于土体表面并以 z 方向初速度控制触底速度。土体四周约束法向速度,底部节点完全固定,锚仅释放 z 方向自由度。整体模型施加 z 向重力荷载。落锚 CEL 模型海床土体及锚体边界条件设置示意见图 2。

CEL 分析体系通常采用通用接触算法处理锚体与土体之间的相互作用。法向接触设置为硬接触,允许接触后分离。接触的切向上选择罚函数约束来定义两者之间的接触属性结构表面。黏土与锚的摩擦系数 α 取 0.33。罚函数通过刚度 k 避免强制接触约束,使拉格朗日体单元在欧拉体网格中自由移动,直至与 EVF 非零的单元发生相互作用。此时,拉格朗日体单元边界和表面上会激活种子点,在

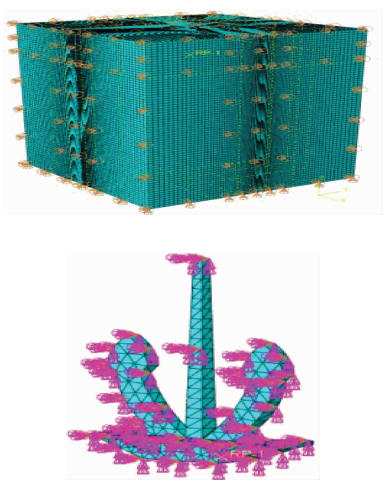


图 2 落锚 CEL 模型海床土体及锚体边界条件设置示意

Fig. 2 Schematic diagram of seabed soil and anchor boundary condition setup for anchor dropping CEL model

欧拉体材料表面上会施加锚点，罚函数接触示意见图 3。接触力 F 施加在种子点和锚点之间，且与穿透距离 x 呈成正比[24]关系，有

$$F = kx \tag{1}$$

土体采用 EC3D8R 单元，锚体采用 C3D10M 单元，接触区域局部加密。落锚 CEL 模型海床土体及锚体网格划分示意见图 4。

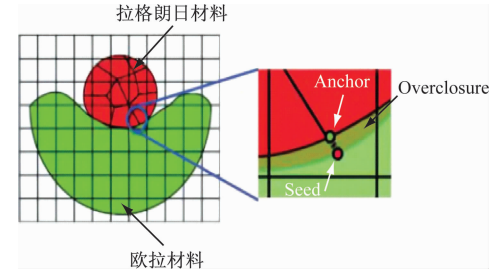


图 3 罚函数接触示意[25]

Fig. 3 Schematic diagram of penalty function contact

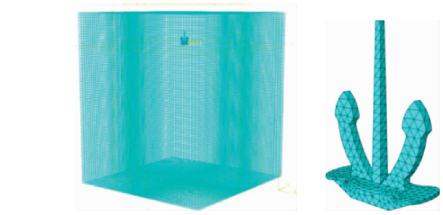


图 4 落锚 CEL 模型海床土体及锚体网格划分示意

Fig. 4 Schematic diagram of mesh generation for seabed soil and anchor in anchor dropping CEL model

网格精度直接影响计算结果。稀疏网格无法捕捉锚-土接触界面应力应变分布，易造成贯入深度偏差；网格划分过细则增加计算成本。选取欧拉域网格数量 13.2 万、31.6 万、47.1 万、58.6 万、83.9 万进行收敛性验证见图 5。

由图 5 所知：网格数量较少时的贯入深度与高密度网格差异显著。随着网格精度的提升，模拟结果的计算准确性提高，当网格数量达到 58.6 万时，其计算的贯入深度变化曲线已与更高精度(83.9 万网格)的结果高度吻合，相对误差仅为 3.2%。故选用 58.6 万网格单元数量作为后续划分数量。

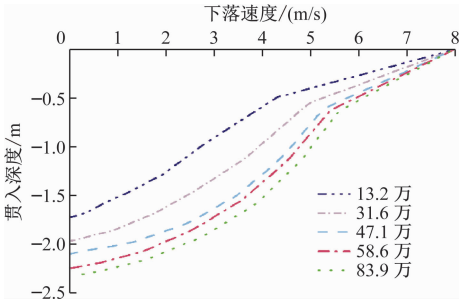


图 5 网格密度对贯入深度的影响

Fig. 5 Influence of mesh density on penetration depth

为验证建立的数值模型的准确性，基于文献[11,26]的土体饱和重度按《港口工程地基规范》计算为

$$\gamma_{s,\mathrm{sat}} = \frac{G_s(1 + 0.01\omega)}{1 + 0.01\omega G_s}\gamma_\omega \tag{2}$$

式(2)：$\gamma_{s,\mathrm{sat}}$ 为土体饱和重度；G_s 为土粒比重；ω 为土壤中水的质量占土颗粒质量的百分比；γ_ω 为液体的单位重度。选取不同土体条件下 6 组不同触底速度工况进行模拟，相关结果对比见图 6。由图 6 可知：CEL 模拟结果与试验数据吻合度较高。投锚试验参数表见表 2，因实际土体条件复杂，模拟输入参数难以完全匹配，最大误差约 13.1%，该误差在可接受范围内，证明所建立的船锚与海床土体三维数值模型具备可靠的计算有效性。

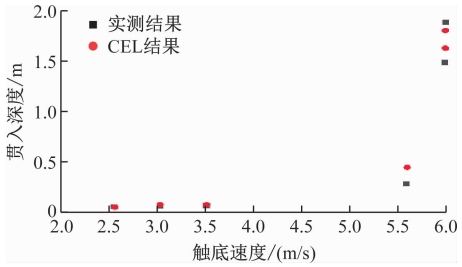


图 6 落锚贯入模型验证

Fig. 6 Verification of anchor dropping penetration model

表 2 投锚试验参数表

Tab. 2 Parameters of anchoring experiment

试验序号	$\gamma_{s,\mathrm{sat}}$/(kN·m^3)	泊松比	内摩擦角 φ/(°)	黏聚力 c/(kPa)	锚重 M_a/t	触底速度 v/(m/s)
T_1						2.56
T_2	15	0.38	32	0	5.7	3.04
T_3						3.52
T_4	17	0.38	32	0	3.4	5.60
T_5	19	0.49	10	14	6.0	6.00
T_6	17	0.30	0	5	2.0	6.00

2 船锚触底速度和落锚贯入深度

2.1 船锚触底速度计算

将锚从抛出至触底的运动分为抛出瞬间至接触水面和入水至接触海床表面两个阶段,受力分析见图 7 。

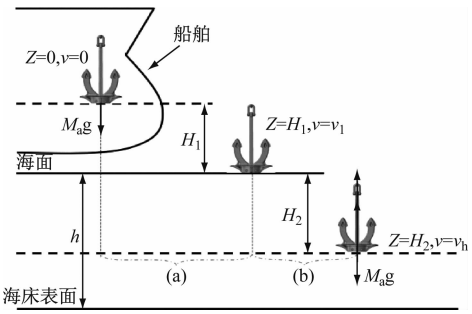


图 7 抛锚运动过程受力分析

Fig. 7 Force analysis of anchor casting motion process

1)抛出瞬间至接触水面阶段:锚近似自由落体,抛出高度 H_1,水面速度 v_1,满足:

$$v_1 = \sqrt{2gH_1} \tag{3}$$

2)入水至接触海床表面阶段:锚在水中受重力、绕流阻力 F_d[27] 和浮力 F_b,根据牛顿第二定律可得

$$(M_a + M_*)\frac{dv}{dt} = M_a g - F_b - F_d \tag{4}$$

$$F_b = \rho_w V g \tag{5}$$

$$F_d = \frac{1}{2}C_d \rho_w A v^2 \tag{6}$$

式(4)~式(6)中:M_a 为锚的质量;M_* 为锚下落时的附加质量,按照式(8)进行计算;v 为锚的下落速度;ρ_w 为水的密度;V 为锚的体积;g 为重力加速度;C_d 为阻力系数,一般认为锚的长细比越大,阻力系数越大;A 为霍尔锚的水平投影面积,富志禹等[28] 对锚的水平投影面积进行估算,得出霍尔锚投影面积与锚质量之间的关系式为

$$A = 2.124\left(\frac{M_a}{\rho_s}\right)^{\frac{2}{3}} \tag{7}$$

$$M_* = C_a \rho_w V \tag{8}$$

式(7)和式(8)中:C_a 为锚的附加质量系数,大小取决于锚的形状和运动方向,取 1;ρ_s 为铸钢密度,取 7 850 kg/m^3 。

设锚在水中下落高度为 h,由链式求导法则,将式(4)转化为

$$(M_a + M_*)v\frac{dv}{dh} = M_a g - \rho_w V g - \frac{1}{2}C_d \rho_w A v^2 \tag{9}$$

令:

$$F_g = M_a g - \rho_w V g \tag{10}$$

$$k = \frac{1}{2}C_d \rho_w A \tag{11}$$

则式(9)简化为

$$\frac{(M_a + M_*)v}{F_g - kv^2}dv = dh \tag{12}$$

对式(12)求积分得

$$-\frac{M_a + M_*}{2k}\ln(F_g - kv^2) = h + C \tag{13}$$

即:

$$h = -\frac{M_a + \rho_w V}{C_d \rho_w A}\ln\left(\frac{M_a g + \rho_w V g}{F_g - kv^2}\right) + C \tag{14}$$

由式(3)可知:当锚从水面上高度 H_1 释放时,速度为 $\sqrt{2gH_1}$ 即:

$$h\,|_{v_1 = \sqrt{2gH_1}} = 0 \tag{15}$$

得到船锚下落至水深 h 处的速度为

$$v(h) = \sqrt{\frac{F_g}{k} - \left(\frac{F_g}{k} - 2gH_1\right)\exp\left(-\frac{C_d \rho_w A h}{M_a + \rho_w V}\right)} \tag{16}$$

由式(16)可知:触底速度 v 与锚的质量 M_a 呈正相关;与锚的水平面投影面积 A 呈负相关。以 16.1 t 的霍尔锚为研究对象,分别计算了 H_1 为 0 m、2.5 m、5.5 m、8.0 m、10.0 m 时的下落过程及最终触底速度,结果见图 8。随着抛锚高度的增加,锚体至水面的速度显著提升。H_1 较大时,锚体减速入水;H_1 较小或趋近于 0 时,锚体加速入水。水深超过 15 m 后,锚体运动速度趋近极限平衡速度 v_{max}。

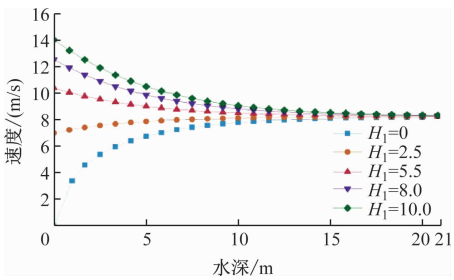


图 8 船锚触底速度随着抛锚高度变化规律

Fig. 8 Variation law of anchor bottom-touching velocity with anchor casting height

极限平衡速度为

$$v_{max} = \sqrt{\frac{2(M_a - \rho_w V)g}{C_d \rho_w A}} \tag{17}$$

采用文献[11]实测数据验证触底速度计算方法,具体参数见表 3。式(16)计算结果与实测结果对比见图 9。最大计算误差为 16.1%,计算结果偏于保守,符合工程可靠性要求。

表3 触底速度计算工况

Tab.3 Calculation conditions for bottom-touching velocity

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
M_a/t	17.8	17.8	16.1	16.1	16.1	6.84	6.84	6.84	1.26	1.26
A/m^2	3.5	3.5	3.3	3.3	3.3	1.90	1.90	1.90	0.60	0.6
H_1/m	6.3	5.0	5.0	2.5	0	6.50	3.40	0	1.60	0
h/m	19.5	19.5	17.2	17.2	17.2	17.00	17.00	17.00	17.70	17.70

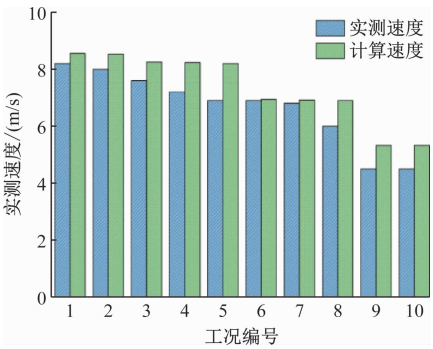


图9 触底速度计算有效性验证

Fig.9 Validation of impact velocity calculation

2.2 落锚贯入深度

以某海上风电场项目为例,结合工程地质与通航数据确定计算参数。工程海域地质主要为淤泥质黏土,土体性质见表4。

通航项目为海上风电场及配套海缆路由工程,无净空通航要求。因此,以当地平均高潮位+1.99 m(1985国家高程基准)作为设计最高通航水位;以当地理论最低潮位-2.1 m作为设计最低通航水位。结合船舶交通流及锚地船型,确定工程海域的代表船型与校核船型,见表5。船型尺寸等参考

表4 工程水域海床土体特征

Tab.4 Characteristics of seabed soil in the engineering waters

土体性质	天然重度 r/(kN/m^3)	比重 G_s	孔隙比 e_0	泊松比	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
取值	17.00	2.74	1.47	0.48	10.70	7.70

表5 工程海域代表船型尺寸及水域参数

Tab.5 Dimensions of representative ship types and water area parameters in the engineer in sea area

航道编号	A_1	A_2	B_1	C_1
设计代表船型	2万GT LPG船	2万GT LPG船	5万吨级油船	5万吨级油船
总长 L/m	180	180	229	229
型宽 B/m	28.4	28.4	32.2	32.2
型深 H/m	18.0	18.0	19.1	19.1
满载吃水 T/m	10.9	10.9	12.8	12.8
锚型	霍尔锚	霍尔锚	霍尔锚	霍尔锚
M_a/t	8.7	8.7	9.3	9.3
锚链直径/mm	84	84	84	84
锚链长度/m	632.5	632.5	660	660
锚链线重/(kg/m)	154	154	154	154
锚链单位湿重/(kg/m)	134.4	134.4	134.4	134.4
航道底高程(m,85高程)	-13.8	-13.8	-15.6	-15.1
v/(m/s)	10.6	10.72	10.58	10.62
备注	代表船型	代表船型	校核船型	校核船型

备注:航道A_1和A_2:船舶横向受风面积压载工况3 100 m^2、满载工况1 870 m^2,纵向受风面积压载工况824 m^2、满载工况604 m^2;船舶所需最小通航水深:压载工况15.79 m,满载工况11.70 m;航道高潮位实际水深15.79 m,低潮位实际水深11.70 m。航道B_1:船舶横向受风面积压载工况2 830 m^2、满载工况1 690 m^2,纵向受风面积压载工况734 m^2、满载工况548 m^2;船舶所需最小通航水深:压载工况17.59 m,满载工况13.50 m;航道高潮位实际水深17.59 m,低潮位实际水深13.50 m。航道C_1:船舶横向受风面积压载工况2 830 m^2、满载工况1 690 m^2,纵向受风面积压载工况734 m^2、满载工况548 m^2;船舶所需最小通航水深:压载工况17.09 m,满载工况13.00 m;航道高潮位实际水深17.09 m,低潮位实际水深13.00 m。

《JTS165—2025 海港总体设计规范》[29]估算,锚链参数依据《钢制海船入级规范》选取 CCS2 级标准。根据调研统计结果,通航水域 5 万吨级油船、2 万吨级 LPG 船多采用斯贝克锚,斯贝克锚是霍尔锚的改进型,而且霍尔锚较斯贝克锚在同情况下,贯入深度偏于保守。因此,本文选用霍尔锚进行分析,锚体参数如表 1 所示。

2.2.1 DNV 能量法

DNV 能量法假定锚体下落总能量全部转化为土体做功,能量关系表达式为

$$E_E = \frac{\sqrt{2}}{4}\gamma' s_\gamma N_\gamma z^4 \tag{18}$$

$$E_E = \frac{1}{2}(M_a + M_*)v^2 \tag{19}$$

式(18)中,γ'为土体有效密度;s_γ取 0.6;N_γ为承载力系数;v 为垂向速度。

2.2.2 Young 公式法[30]

该经验公式适用于土壤、岩石和混凝土等不同介质下,可用于船舶应急抛锚时在河床淤泥中的贯入深度求解,经验公式为

当 $v < 61$ m/s 时,

$$D = 0.000\ 8SN\left(\frac{W}{A}\right)^{0.7}\ln(1 + 2.15v^2 \times 10^{-4}) \tag{20}$$

当 $v \geqslant 61$ m/s 时,

$$D = 0.000\ 018SN\left(\frac{W}{A}\right)^{0.7}\ln(v - 30.5) \tag{21}$$

式(20)和式(21)中:D 为贯穿深度;S 为土壤系数,淤泥底质一般取 10 ~ 20,砂底质可取 6 ~ 9,淤泥和砂混合底质按混合比例内插取值,此处取 15;N 为物体的形状系数,取平均值为 9.61;W 为物体的质量;A 为物体的横截面面积,计算方法如式(7)所示。

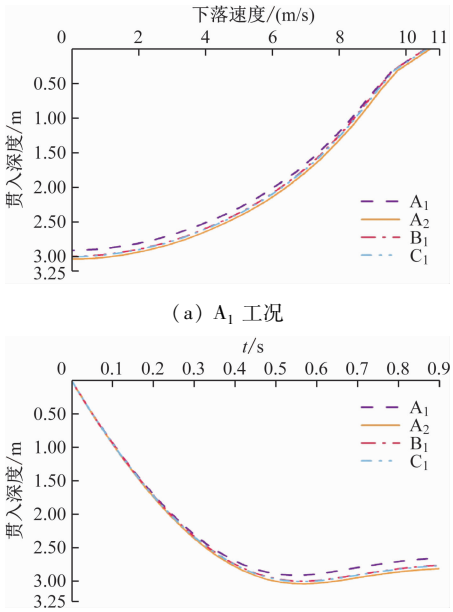
2.2.3 数值模拟方法

数值模拟方法考虑海床土体有效密度,按式(22)计算为

$$\rho' = \frac{m_s - V_s\rho_w}{V} = \rho_w\left(\frac{G_s + e_0}{1 + e_0} - 1\right) = \rho_{sat} - \rho_w \tag{22}$$

式(22)中:m_s 为土体固体颗粒的质量;V 为土的三相总体积;V_s 为土固体颗粒的体积;G_s 为土粒比重;ρ_{sat}为土体的饱和密度;ρ_w 为土体中水的密度;e_0 为孔隙比。

将锚体置于海床表面,在参考点约束锚向下贯入时的初速度,计算获取多组工况下霍尔锚在海床土体中的贯入深度。A_1 工况 ~ C_1 工况落锚贯入深度随下落速度变化曲线见图 10a,贯入深度随时间变化曲线见图 10b;极限最大贯入深度计算结果见图 11。



(a) A_1 工况

(b) C_1 工况

图 10 A_1 工况 ~ C_1 工况落锚贯入深度变化

Fig. 10 Variation of anchor dropping penetration depth under working conditions from A_1 to C_1

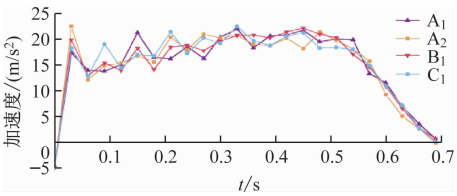


图 11 A_1 工况 ~ C_1 工况落锚贯入加速度响应

Fig. 11 Anchor dropping penetration acceleration response under working conditions from A_1 to C_1

锚重与触底速度越大,土体贯入深度越大。3 种方法计算结果对比见图 12。

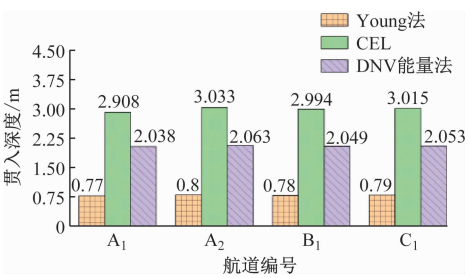


图 12 工程水域落锚贯入深度对比

Fig. 12 Comparison of anchor dropping penetration depth in engineering waters

3 种方法计算得出的贯入深度差异显著。Young 公式中的参数 S 属于经验值,难以精准描述工程实际地质情况且未充分考虑土体物理力学性质

的差异。DNV 能量公式法在非均质土中存在偏差。因此,不同船舶落锚最大贯入深度选取 CEL 数值模拟所获结果为 5 万吨级油船取 3.033 m,2 万 GT LPG 船取 2.908 m。

3 影响因素分析

基于上文对工程水域落锚贯入深度的量化研究,发现实际海况中锚体贯入行为受多重因素耦合影响。

3.1 触底角度影响

本文分别模拟了船锚触底角度为 30°、40°、50°、60°、70°、80°、90°(设锚体垂直下落时与海床土体表面夹角为 90°)情况下霍尔锚在海底黏土中的贯入过程,得到船锚触底夹角与贯入深度关系曲线见图 13。贯入深度随角度倾斜先增后减,不同角度的最大与最小贯入深度差异约为 2.1%,在工程实践中,若锚体倾角处于合理范围内,其对贯入深度的影响可视为次要因素。

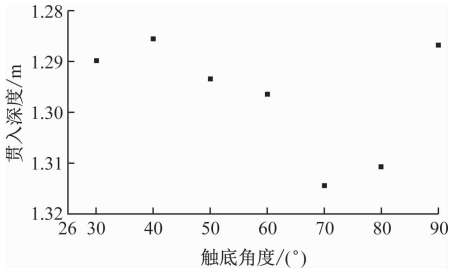


图 13 触底角度对贯入深度的影响

Fig. 13 Influence of bottom-touching angle on penetration depth

3.2 锚体质量影响

模拟锚重为 3.06 t、5.61 t、6.90 t、8.7 t、9.30 t、10.50 t 情况下霍尔锚在海底黏土中的贯入过程,锚重对贯入深度的影响见图 14,不同锚重下的最大贯入深度拟合曲线见图 15。由图 15 可知:贯入深度随锚重的增加而增大,轻锚更加稳定。

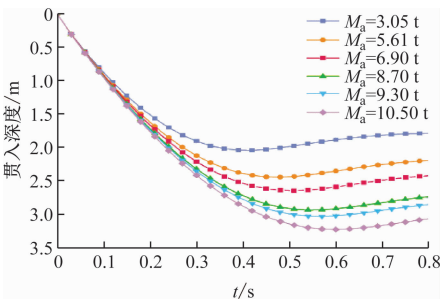


图 14 锚重对贯入深度的影响

Fig. 14 Influence of anchor weight on penetration depth

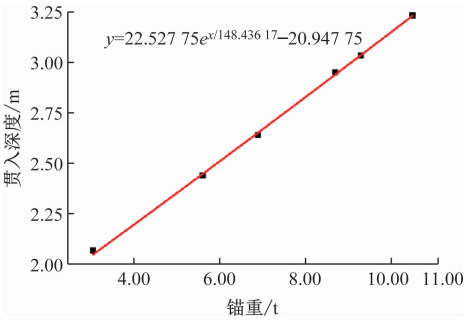


图 15 锚重-贯入深度拟合曲线

Fig. 15 Anchor weight-penetration depth fitting curve

3.3 触底速度影响

分别模拟船锚触底速度为 3.0 m/s、5.0 m/s、7.5 m/s、10.72 m/s、11.5 m/s 的贯入过程,结果见图 16,不同触底速度下的最大贯入深度拟合曲线见图 17。由图 17 可知:贯入深度随速度的增大而递增。

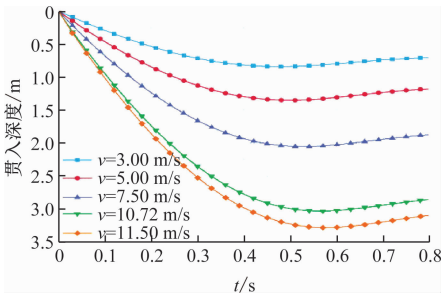


图 16 触底速度对贯入深度的影响

Fig. 16 Influence of impact velocity on penetration depth

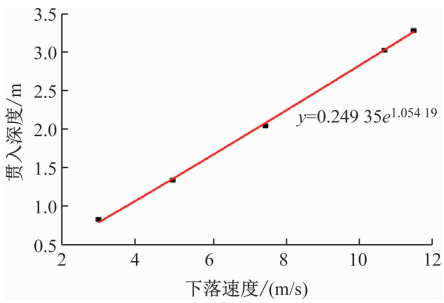


图 17 触底速度-贯入深度拟合曲线

Fig. 17 Impact velocity-penetration depth fitting curve

基于以上内容,选取触底角度、锚体质量和触底速度 3 大核心影响因素开展系统敏感性分析。各因素取值范围见表 6,触底角度、锚体质量和触底速度的敏感性分析结果见表 7 ~ 表 9。多因素极差分析结果见表 10。采取单因素敏感性分析与极差分析相结合的方法,通过计算敏感性系数量化单个因素的影响程度,有

$$S = \frac{\Delta y / y_0}{\Delta x / x_0} \tag{23}$$

表 6 各因素取值范围

Tab. 6 Value ranges of various factors

影响因素	基准值	取值水平	变化幅度/%
触底角度 θ/(°)	90.00	30、50、70、80、90	-66.7 ~ 0
锚体质量 M_a/t	8.70	3.0、5.61、8.7、9.3、10.5	-64.8 ~ +20.7
触底速度 v/(m/s)	10.72	3.0、5.0、7.5、10.72、11.5	-71.9 ~ +7.3

表 7 触底角度敏感性分析结果

Tab. 7 Sensitivity analysis results of bottom contact angle

触底角度/(°)	贯入深度/m	相对基准值变化率/%	敏感性系数 S
30	1.285	-55.8	-0.016
50	1.293	-55.5	-0.015
70	1.312	-54.8	-0.013
80	1.305	-55.1	-0.014
90	1.308	-55.0	0

表 8 锚体质量敏感性分析结果

Tab. 8 Sensitivity analysis results of anchor weight

锚体质量/t	贯入深度/m	相对基准值变化率/%	敏感性系数 S
3.06	1.025	-64.7	0.78
5.61	1.876	-35.5	0.82
8.70	2.908	0	0
9.30	3.033	+4.3	0.85
10.50	3.214	+10.5	0.87

表 9 触底速度敏感性分析结果

Tab. 9 Sensitivity analysis results of anchor bottom contact velocity

触底速度/(m/s)	贯入深度/m	相对基准值变化率/%	敏感性系数 S
3.00	0.842	-71.0	0.92
5.00	1.385	-52.4	0.95
7.50	2.163	-25.6	0.98
10.72	2.908	0	0
11.50	3.056	+5.1	1.03

表 10 多因素极差分析结果

Tab. 10 Range analysis results of multi-factor sensitivity

影响因素	贯入深度最大值/m	贯入深度最小值/m	极差/m	贡献率/%	影响优先级
触底速度 v	3.056	0.842	2.214	62.8	1(主导)
锚体质量 M_a	3.214	1.025	2.189	62.1	2(主导)
触底角度 θ	1.312	1.285	0.027	0.8	3(微弱)

式(23)中:y_0为基准贯入深度;Δy 为因素变化引起的贯入深度变化量;x_0为因素基准值;Δx 为因素变化量;$|S|$越大,表明该因素对贯入深度的影响越显著,通过计算各因素在不同取值水平下贯入深度的极差 R(最大值与最小值之差),排序确定各因素影响优先级;R 越大,对应因素影响程度越高。参考工程水域代表船型 2 万 GT LPG 船及土体特性参数,确定基准工况:锚体质量 M_a = 8.70 t、触底速度 v = 10.72 m/s、触底角度 θ = 90°(垂直贯入),对应的基准贯入深度 y_0 = 2.908 m。

由表 7 ~ 表 10 可知:触底速度和锚体质量是核心因素(贡献率均约 62%),触底角度的影响因霍尔锚的几何结构特性被弱化。该结论与工程实际一致。

4 结 语

本文主要结论如下:

1)验证 CEL 模型的有效性,建立霍尔锚-海床土体三维 CEL 耦合数值模型,结合土体应变率与应变软化模型,模拟锚体贯入全过程。网格收敛性验证表明,欧拉域网格数量达 58.6 万时,计算精度与效率趋于平衡;与实测数据对比,贯入深度误差≤13.1%,触底速度误差≤16.1%,验证了模型的可靠性。

2)推导船锚触底速度理论公式,明确其受抛锚高度、水深、锚体质量和投影面积影响:触底速度随抛锚高度增大而提升,水深超 15 m 后速度收敛至极限平衡速度;以工程水域为例,计算 2 万 GT LPG 船与 5 万吨级油船应急抛锚最大贯入深度分别为

2.908 m、3.033 m。

3)明确关键因素对贯入深度的影响:触底角度30°~90°内,贯入深度先增后减,整体最大差异约为2.1%,工程设计影响微弱;锚重、触底速度分别与贯入深度呈指数、幂函数正相关,锚重越大、速度越高,贯入越深。

本研究以霍尔锚为主要研究对象,结论适用于霍尔锚的场景,研究成果明确了不同工况下船锚的大贯入深度,可为海底管线的埋深设计、路径规划提供理论支撑。本文研究静态抛锚,未考虑船舶运动对抛锚影响,另外,船舶在锚泊过程中并非直上直下,会产生拖航的行为,其运动过程也会对船锚的贯入深度产生影响,本文构建的模型中并未考虑这一动态过程。后续研究将搭建多锚型进行对比并考虑船舶-锚耦合动态分析以及船舶拖航行为,进一步完善抛锚机理的研究框架。

参 考 文 献

[1] Liu J, Bu N, Han C, et al. Numerical modelling on anchor-soil-water interaction for dynamic installation of gravity installed anchors[J]. Ocean Engineering, 2022, 244:110412.

[2] Dao D A, Grabe J. Numerical assessment of ship anchor penetration depth in Baltic Sea Sand: implications for subsea cable burial [J]. Ocean Engineering, 2024, 314:119674.

[3] Ads A, Iskander M, Bless S, et al. Effect of fin width on torpedo anchor penetration and pullout using model tests with transparent soils [J]. Ocean Engineering, 2024,298:117247.

[4] Yang D W, Wang W K, Zhang M X, et al. Prediction of Hall anchor penetration depth using machine learning models[J]. Ocean Engineering, 2025,331:121269.

[5] Lai Y, Chen C, Pan A, et al. Centrifuge modelling and the modified limit equilibrium prediction for drag embedment anchor installation in sand [J]. Applied Ocean Research, 2025, 154: 104390.

[6] Fu Y, Ding K, Han C. Experimental data-centric prediction of penetration depth and holding capacity of dynamically installed anchors using machine learning [J]. Computers and Geotechnics, 2024, 170:106249.

[7] 蔡新永,马希钦.应急抛锚和沉船贯入对过江隧道安全埋深影响[J].中国港湾建设,2025,45(6):39-43.
Cai X Y, Ma X Q. Impact of emergency anchoring and shipwreck penetration depth on the safe burial depth of river-crossing tunnels [J]. China Harbour Engineering, 2025, 45(6): 39-43.

[8] 李延伟,田五六,左殿军,等.锚地船舶反复抛锚作用下的隧道埋深研究[J].中国造船,2024,65(4):103-112.
Li Y W, Tian W L, Zuo D J, et al. Study on tunnel burial depth under the action of repeated anchoring of ships in anchorage areas [J]. Shipbuilding of China, 2024, 65(4): 103-112. (in Chinese).

[9] 余博闻,陈立,刘睿.基于有限元法的船舶抛锚贯入深度探讨[J].水利水运工程学报,2022(3):100-107.
Yu B W, Chen L, Liu R. Discussion of penetration depth of ship anchoring based on finite element method [J]. Journal of Water Resources and Hydropower Engineering, 2022 (3): 100-107. (in Chinese)

[10] 梁鹏,戴国华,苑健康,等.复杂地质条件下船舶落锚贯入深度影响分析[J].浙江海洋大学学报(自然科学版),2021,40(4):356-362.
Liang P, Dai G H, Yuan J K, et al. Analysis of the penetration depth of anchor under complex geological conditions [J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science Edition), 2021, 40(4):356-362. (in Chinese).

[11] Nakayama S, Kiyomiya O. Depth of penetration of anchors into seabottom through anchoring tests [R] Tokyo: Ministry of Transport, Port and Harbor Research Institute, 1975:1-18

[12] Brown R J. How deep should an offshore line be buried for protection[J]. Oil and Gas Journal, 1971, 69: 151-155.

[13] Moore E, Haigh S K, Eichhorn G N. Anchor penetration depth in sandy soils and its implications for cable burial [J]. Ocean Engineering, 2021, 235: 109411.

[14] Wang W, Wang X, Yu G. Penetration depth of torpedo anchor in cohesive soil by free fall [J]. Ocean Engineering,2016,116:286-294.

[15] Hossain M S, O´loughlin C D, Kim Y. Dynamic installation and monotonic pullout of a torpedo anchor in calcareous silt [J]. Géotechnique, 2015, 65 (2): 77-90.

[16] Zhu X, Hao Q, Zhang J. Buried depth of a submarine pipeline based on anchor penetration [J]. Journal of Marine Science and Engineering,2019, 7(8): 257.

[17] Li X, Hou Z, Lu J, et al. Research on calculation model of penetration depth when anchor touches Seabed [J]. Journal of Physics: Conference Series (IOP Conference Series),2021,2006(1):012015.

[18] Song C Y. Fluid-structure interaction analysis and

verification test for soil penetration to determine the burial depth of subsea HVDC cable[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(10): 1453.

[19] Yang Y, Liu H. Theoretical and numerical approaches to analyze gravity installed anchors in multi-layered clays [J]. Ocean Engineering, 2022, 264:112452.

[20] 池寅, 时豫川, 吴海洋, 等. 砂质海床中船锚运动全过程数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(6): 807-814.
Chi Y, Shi Y C, Wu H Y, et al. Numerical simulation of the entire movement process of ship anchors in sandy seabeds[J]. Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2017, 50(6):807-814. (in Chinese)

[21] Zhang L, Li X, Wang J, et al. Mechanical response of dropping a Hall anchor and its penetration depth in riverbed silt [J]. Ocean Engineering, 2023, 281: 114845.

[22] Einav I, Randolph M F. Combining upper bound and strain path methods for evaluating penetration resistance [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2005, 63(14): 1991-2016.

[23] GB/T 546-2016 霍尔锚[S].
GB/T 546-2016 Hall anchor[S]. (in Chinese)

[24] Dassault Systèmes. Abaqus user's manual, version 6.18 [M]. Providence: Dassault Systèmes, 2018.

[25] Grabe J, Qiu G, Wu L. Numerical simulation of the penetration process of ship anchors in sand [J]. Geotechnik, 2015, 38(1):36-45.

[26] 任宇晓. 船舶拖、落锚运动及海底管线防护研究[D]. 天津: 天津大学, 2019:1-285.
Ren Y X, Study on ship towing, anchor dropping motion and submarine pipeline protection[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019:1-285. (in Chinese)

[27] Park M S, Jung Y R, Park W G. Numerical study of impact force and ricochet behavior ofhigh speed water-entry bodies[J]. Computers & Fluids, 2003, 32(7): 939-951.

[28] 富志禹, 于洋. 船用锚水平投影面积估算[J]. 船海工程, 2018, 47(4): 72-76.
Fu Z Y, Yu Y. Estimation of horizontal projection area of marine anchors [J]. Ship & Ocean Engineering, 2018, 47(4): 72-76. (in Chinese)

[29] JTS 165—2025 海港总体设计规范[S].
JTS 165—2025 Design code of general layout for sea ports[S]. (in Chinese)

[30] Young C W. Penetration equation: SAND97-2426/UC-705 [R]. University of California: Sandia National Laboratories, 1997: 4-12.