

# 砂质海床条件下海底电缆埋深研究

王亚东<sup>✉</sup>, 伍林伟, 高彬, 曾二贤

(中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 武汉 430071)

**摘要:** [目的] 为了得到海底电缆在砂质海床条件下的安全埋深, 确保海底电缆免受船锚威胁, 给出了海砂海床条件下的船锚的安全埋深的建议。[方法] 为了建议验证埋深的合理和安全性, 依托于海南联网一回工程, 通过对船锚在典型砂质海床中的拖锚全过程进行数值仿真, 建立了典型霍尔锚部件的三维有限元模型, 同时建立了基于有限元-光滑粒子流 (FEM-SPH) 的三维砂质海床土体数值模型。对拖锚全过程进行模拟, 得到不同船锚在砂质海床中的拖拽曲线, 并分析船锚质量以及砂质海床土体本构参数等因素对船锚贯入深度、船锚拖拽力的影响。[结果] 仿真结果表明: 不同土质的砂质海床条件下海缆埋深不宜小于 0.35 m。[结论] 利用研究成果, 能为砂质海床条件下的海底电缆保护设计工作提供了理论依据和技术支撑, 能够对砂质海床条件下海底电缆的埋设深度进行优化。

**关键词:** 海底电缆; 埋设深度; 船锚; 砂质海床; 光滑粒子流

中图分类号: TK89; P756.1

文献标志码:

文章编号: 2095-8676(2020)03-0081-08

开放科学(资源服务)二维码:



## Research on the Burial Depth of Submarine Cable in Sandy Seabed

WANG Yadong<sup>✉</sup>, WU Linwei, GAO Bin, ZENG Erxian

(Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** [Introduction] In order to obtain the safe burial depth of the submarine cable under the conditions of the sandy seabed and to ensure that the submarine cable is not threatened by the anchor, the safe burial depth of the anchor under the conditions of the sea sand seabed is given. [Method] In order to verify of the reasonableness and safety of the buried depth, based on the South China & Hainan power grid interconnection project I, the process of dragging anchor in sandy seabed was simulated, and the 3D finite element model of Hall's anchor was established. The 3D sandy seabed numerical model based on Finite Element Method and Smooth Particle Hydrodynamics (FEM-SPH) was established. The process of dragging anchor was simulated and the drag curve of anchor in sandy seabed was obtained. The influence of mass of anchor, constitutive parameter and other factor to the penetration depth and drag force was analyzed. [Result] The simulation results show that the buried depth of the submarine cable should not be less than 0.35 m under the condition of sandy seabed with different soil quality. [Conclusion] Our results can provide theoretical basis and technical support for the design of submarine cable protection under sandy seabed conditions, and also can optimize the buried depth of submarine cables under sandy seabed conditions.

**Key words:** submarine cable; burial depth; anchor; sandy seabed; smooth particle hydrodynamics

海底电缆工程在国际输电工程中起到了越来越重要的作用<sup>[1-2]</sup>。随着海底电缆线路数量的不断增加, 海底电缆在近海区域由于船锚钩挂造成的故障越来越严重。海底电缆一旦故障, 其修复时间长, 维修费用昂贵, 且会对该地区电力和通信造成影响

响, 因此在海缆工程中保护是非常重要的环节<sup>[3-4]</sup>。

锚害是海缆受到破坏最主要的原因<sup>[5-6]</sup>。锚害对海底电缆的威胁主要是: 一是从海缆上方垂直下落, 砸向海缆, 破坏海缆上方的土体, 从而破坏海缆, 二是拖锚随着船锚贯入深度的增加导致船锚锚冠低于海缆, 在船锚拖动过程中将海缆钩断。为解决该现状, 海底电缆常用保护措施是冲埋保护, 船锚在拖锚过程中的最大贯入深度是冲埋保护深度的

收稿日期: 2020-01-10 修回日期: 2020-05-06

基金项目: 中南电力设计院有限公司科技项目“砂质海床条件下海底电缆保护技术研究”(40-1A-KY201519-T02)

控制因素,在进行电缆埋深设计时,针对粘性土海床,已经有国外文献<sup>[7]</sup>进行了海缆埋深研究。但针对砂质海床,国内外规范并没有给出确定的埋深建议值,也没有进行砂质海床条件下海底电缆保护技术的研究。设计师往往根据经验来确定电缆埋深,若埋深设定较深,则会对后期施工造成不便,并且带来工期和成本的增加,若埋深设定较浅,电缆的保护效果必将打折扣。

本文结合海南联网工程实践经验,建立典型霍尔锚部件的三维有限元模型和基于有限元-光滑粒子流(FEM-SPH)耦合的三维砂质海床土体数值模型,运用有限元、光滑粒子流等方法,对典型霍尔锚部件在砂质海床中拖锚的全过程进行数值仿真模拟,分析对于不同型号船锚在不同条件下的砂质海床中船锚的贯入深度,并研究影响拖锚贯入深度的因素。从而指导砂质海床条件下,海底电缆埋深的设计。

## 2 砂质海床的物理特性

在砂质海床土体各向同性的条件下,由三轴试验或单轴压缩试验可以测量得到土体的剪切模量和体积模量。由于土体的弹性模量 $E$ 难以测定,在实际工程地质勘测报告中,一般采用压缩模量 $E_s$ 来表征海床土质的弹性常数,根据土力学与基础工程理论<sup>[8]</sup>,弹性模量与压缩模量有关系如(1)所示。

$$E = E_s \left(1 - \frac{1 - 2\nu^2}{1 - \nu}\right) \quad (1)$$

由于本项目土体实际所受动荷载和存在大变

形,因此大变形采用塑性理论计算。

剪切模量 $G$ 是剪切应力和剪切应变之间的关系,剪切模量是拉梅常数之一,通常在材料力学中剪切模量为弹性模量 $E$ 和泊松比 $\nu$ 的函数,表示为:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2)$$

在选择参数时,必须考虑这些材料常数之间的相互关系,应与实际情况相符。

砂土的抗剪强度与孔隙水的影响密切相关。当土体受到冲击载荷时,若砂土的渗透率较低,孔隙水未流动,则孔隙中的水会产生一个附加应力。采用标准的土力学方法模拟孔隙水对抗剪强度的影响<sup>[9]</sup>,用土体的总应力 $P$ 减去孔隙水压力 $u$ ,便得到“有效应力” $P'$ :

$$P' = P - u \quad (3)$$

应变硬化指随着应变增大,材料的屈服极限随之增加。为了模拟土体的应变关系,定义土体的摩擦角 $\phi$ 是关于有效塑性应变 $\varepsilon_{\text{effpl}}$ 的函数:

$$\Delta\phi = E_i \left(1 - \frac{\phi - \phi_{\text{init}}}{A_n \phi_{\text{max}}}\right) \Delta\varepsilon_{\text{effpl}} \quad (4)$$

式中: $A_n$ 是硬化开始时峰值强度内摩擦角分数,且 $0 < A_n < 1$ ,参数 $E_i$ 为硬化率。如果不存在应变硬化(即峰值前不考虑非线性),那么 $\phi_{\text{max}} = \phi_{\text{init}} = \phi$ 。

结合LS DYNA的MAT\_FHWA\_SOIL模型分析了土壤材料的本构模型,确定出了三维FEM-SPH仿真程序中五种不同砂质海床土体材料的本构参数,分别为松散的细砂,中密的细砂,中密粗砂和中密粉土。关键参数设置如表1所示。

表1 砂质土体材料本构参数  
Tab. 1 Constitutive parameters of sandy soil

VARIABLE	EPSMAX/%	RO/(g·cm <sup>-3</sup> )	SPGRAV	G	K	PHIMAX	GOH	MCONT	PWKSK
变量	断裂应变	土密度	比重	剪切模量	体积模量	摩擦角	内聚力	孔隙率mc	考虑孔隙压力的K
细砂(松)	0.8	1.89×10 <sup>-9</sup>	2.64	2.1	4.5	0.436	0.005	0.261	0.036
细砂(中)	0.8	1.91×10 <sup>-9</sup>	2.64	5.1	11.1	0.523	0.008	0.250	0.088
细砂(密)	0.8	1.88×10 <sup>-9</sup>	2.62	5.8	12.7	0.611	0.01	0.241	0.102
粗砂(中)	0.8	1.91×10 <sup>-9</sup>	2.63	4.3	9.5	0.366	0.015	0.213	0.076
粉土(中)	0.8	1.88×10 <sup>-9</sup>	2.70	2.1	4.5	0.523	0.015	0.322	0.036

## 3 拖锚过程数值仿真

### 3.1 船锚模型的建立

船锚的几何形状及重量对拖锚过程有显著影

响。根据中华人民共和国国家标准《霍尔锚》(GB/T 546—1997)的规定相关参数,选用A型霍尔锚作为数值仿真中的代表性几何模型(如图1所示)。

本文分析三种不同尺寸船锚对砂质海床抗锚能



图1 霍尔锚三维立体有限元模型及网格

Fig. 1 3D finite element model and mesh of Holzer anchor

力的影响, 其重量分别取为 1 t (anchor-1)、1.60 t (anchor-2) 及 2.1 t (anchor-3)。

在数值模型的边界条件中, 通常采用位移加载和力加载方式。由于船锚在运动的过程中锚链所受到的力与船的行驶速度、海底水流扰动等多个因素相关, 锚链所受的力是不断变化的, 且最大力未知。若在数值模拟中采用恒定力加载, 取值不当则无法真实反映船锚的真实受力情况, 但采用位移加载, 则可以实时得到锚链受力随时间变化情况, 亦能更好的反映船锚实际运动情况, 且模拟结果为最不利情况, 能够得到最大贯入深度。此外, 为了模拟实际情况, 船锚在接触 SPH 土体之前有一个落体速度, 并贯入土体中一定深度。船锚在水中自由落体后, 随着水阻力影响, 达到一定深度之后下落速度趋于恒定, 且该速度与船锚几何尺寸及质量有关, 根据实际情况, 本数值仿真中设置的船锚下落到海床底部的竖向速度如表 2 所示。

表2 船锚最终下落速度

Tab. 2 Final fall speed of anchor

船锚	质量/t	下落速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
Anchor-1	1.00	2.9
Anchor-2	1.60	3.15
Anchor-3	2.10	3.3

船锚触底后, 对船锚施加 0.2 m/s 的匀速运动, 模拟船锚水平刚体位移 (忽略冲击和速度效应)。用无反射边界条件来模拟海床土体的无限远场。

### 3.2 拖锚过程模拟

当船舶抛锚时, 船锚落到海床垂直贯入一段距离。在初始贯入的过程中, 由于落锚的冲击, 海床会产生弹性震动。之后随着船舶的惯性漂移, 锚链逐渐绷紧并牵引锚轴, 直到船锚锁住。锚链对船锚的牵引致使锚爪穿透土体, 即拖锚过程开始。

船锚在海床被拖拽前进的过程, 也就是船锚抓底的过程, 如图 2 所示。对于某一型号船锚在特定砂质海床条件下, 船锚运动的过程主要包括以下 6 个阶段: (1) 船锚垂直下落达到恒定速度; (2) 船锚竖向贯入海床; (3) 横向拖拽船锚、砂质海床土体发生大变形阶段; (4) 船锚继续贯入及土体产生破坏阶段; (5) 土体不断被开挖直到船锚贯入深度达到最大; (6) 船锚拖拽力达到最大, 土体堆积高度达到最大, 随着所受阻力不断变化, 船锚运动的方向不断改变。砂质海床土体的最大主应力云图演化如图 3 所示。

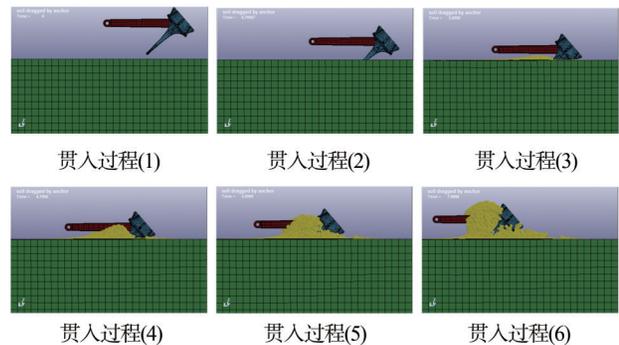


图2 典型的船锚拖拽及贯入土体物理全过程

Fig. 2 The typical physical process of dragging and penetration of anchors

船锚贯深-时程曲线如图 4~图 8 所示。

从拖锚过程曲线中可以发现, 当船锚与海床开始接触时, 发生了细微的弹性震动, 之后逐渐达到稳定。此外由于受到土体水平阻力, 船锚在拖拽全过程中会在水平向产生轻微的波动。之后随着船锚的水平运动, 其所受到的土体阻力不断增加, 拖拽力不断上升。随着船锚不断向下贯入, 船锚所受阻力不断增加, 船锚所受的拖拽力同时逐渐增加, 达到峰值。

船锚在拖拽时, 在给定速度下, 船锚的贯入深度不断加大直至稳定。拖锚的初始阶段, 由于船锚落体与海床接触面积较小, 应力集中, 贯入速度较快 (曲线的斜率大), 而随着拖锚过程的不断发展, 船锚贯入深度不断增加, 砂土在拖拽的过程中不断堆积, 与船锚接触面积不断增大, 船锚所受阻力不断增大, 贯入速度逐渐减缓, 最终达到最大贯入深度, 船锚运动轨迹为曲率不断变化的曲线。

表 3 对比了不同砂质海床条件下船锚的最大贯入深度。

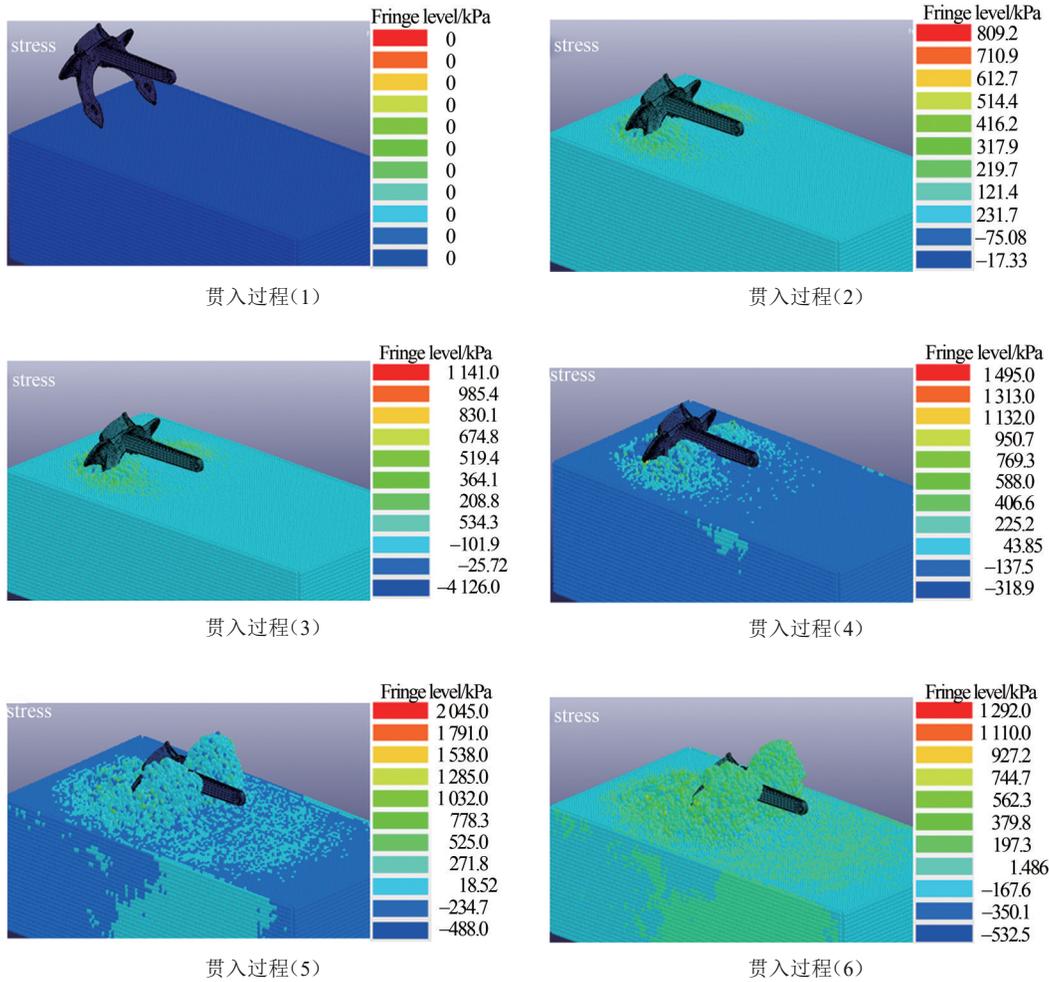


图 3 海床最大主应力云图的演化过程

Fig. 3 Evolution process of the maximum principal stress cloud chart of seabed

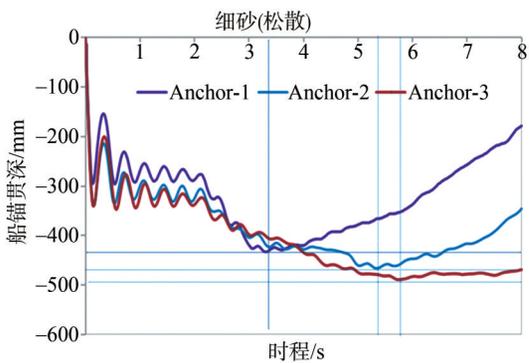


图 4 船锚重量对贯深-时程曲线的影响(细砂松散)

Fig. 4 Influence of ship anchor weight on penetration depth time history curve (fine sand loose)

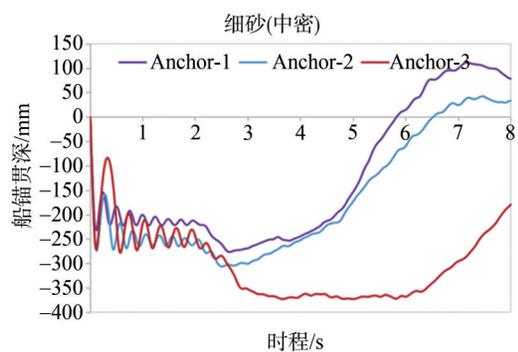


图 5 船锚重量对贯深-时程曲线的影响(细砂中密)

Fig. 5 Influence of ship anchor weight on penetration depth time history curve (medium fine sand)

根据工程实际施工经验,建议从上表模拟结果中考虑 1.5 倍安全系数,因此本文推荐的砂纸海床条件下的海缆埋深如表 4 所示。

### 3.3 数值模拟结果验证

为了验证上述数值模拟结果的可靠性及准确性,通过查阅文献,获取相关砂质土体的试验值,

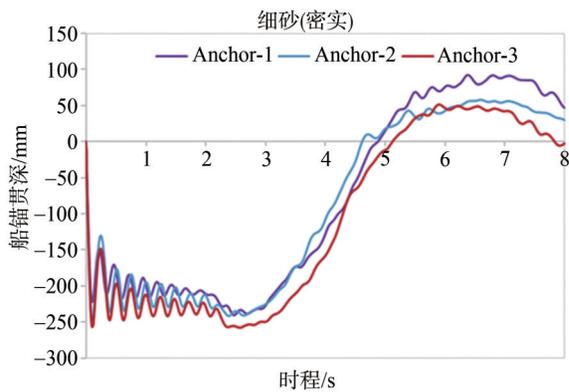


图6 船锚重量对贯深-时程曲线的影响(细砂密实)

Fig. 6 Influence of ship anchor weight on penetration depth time history curve (dense fine sand)

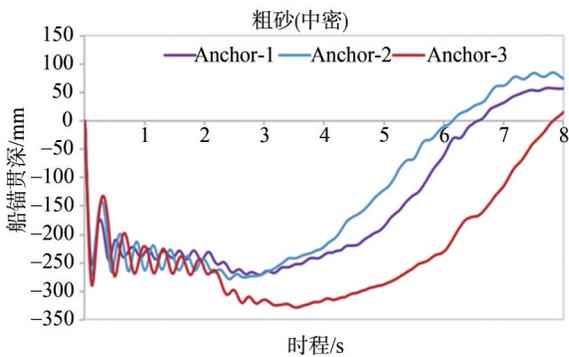


图7 船锚重量对贯深-时程曲线的影响(粗砂中密)

Fig. 7 Influence of ship anchor weight on penetration depth time history curve (medium coarse sand)

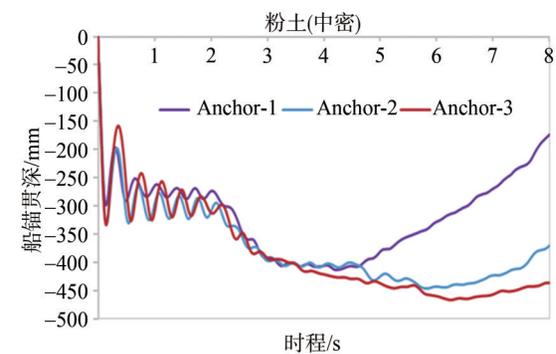


图8 船锚重量对贯深-时程曲线的影响(粉土中密)

Fig. 8 Influence of ship anchor weight on penetration depth time history curve (medium silt)

并将本项目的拖锚贯入数值模拟计算得到的深度与试验值进行对比。

张磊<sup>[10]</sup>在《基于船舶应急抛锚的海底管道埋深及保护研究》, Allan P G<sup>[11-12]</sup>在“Risk Assessment Methodology and Optimisation of Cable Protection for Existing and Future Projects”及“The Selec-

表3 船锚的最大贯入深度

Tab. 3 Maximum penetration depth of anchor mm			
海床土质	anchor-1(1.0 t)	anchor-2(1.6 t)	anchor-3(2.1 t)
	最大贯入深度	最大贯入深度	最大贯入深度
细砂(松)	433	465	488
细砂(中)	275	305	372
细砂(密)	237	241	258
粗砂(中)	270	277	327
粉土(中)	413	445	467

表4 推荐的海缆埋深表

Tab. 4 Recommended cable depth mm			
海床土质	anchor-1	anchor-2	anchor-3
	(1.0 t)	(1.6 t)	(2.1 t)
	推荐埋深	推荐埋深	推荐埋深
细砂(松)	650	698	732
细砂(中)	413	458	558
细砂(密)	356	362	387
粗砂(中)	405	416	491
粉土(中)	620	668	701

tion of Appropriate Burial Tools and Burial Depths”中针对砂质土体的落锚贯深进行了试验, 并按照锚的质量大小排列, 介绍了国外投锚试验的试验结果, 王迎松<sup>[13]</sup>在《锚泊贯入量的研究中》通过理论计算, 模拟了船锚在砂土中的贯入量(船锚触底速度为9 m/s), 将上述文献中有关砂质海床的试验或理论计算结果总结如表5所示。

表5 船锚贯入深度

Tab. 5 Penetration depth of anchor			
序号	锚重/t	底质	参考文献贯入量/mm
1	0.5	砂	50
2	1.0	砂	450
3	1.5	砂	750
4	1.75	砂(含淤泥)	250
5	2.0	砂土(松散)	800

从表5可以看出, 重量为1~2 t船锚在砂质海床中贯入深度在0.4~0.8 m之间, 上述结果与本文结果基本吻合, 最大误差0.1 m。

### 3.4 拖锚影响因素分析

#### 3.4.1 船锚重量

对比不同重量船锚的最大贯入深度及最大拖拽力。可以发现对于同一种类型砂质海床, 随着锚重增加, 船锚贯入深度增加, 船锚拖拽力也随之增

大；对于同一种锚重，随着砂质海床密实度的增加，船锚的贯入深度逐步降低，船锚的拖拽力逐步增大，但最大拖拽力均小于锚链的拉断力。船锚重量与贯入深度、峰值拖拽力的关系分别如图9和图10所示。

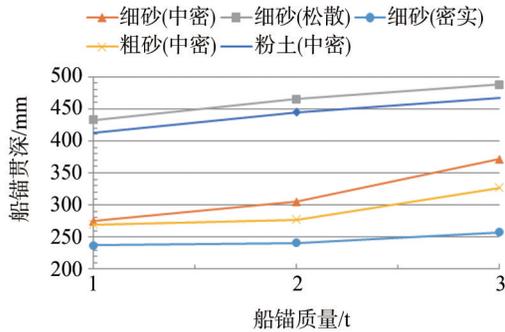


图9 船锚重量与最大贯入深度的关系

Fig. 9 Relationship between anchor weight and maximum penetration depth

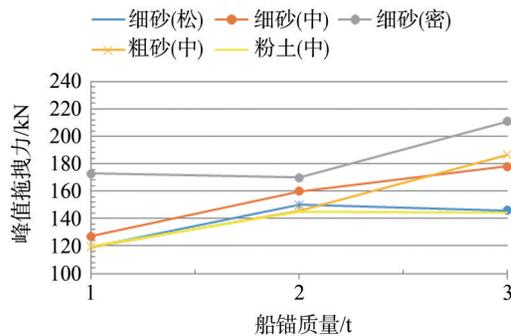


图10 船锚重量与峰值拖拽力的关系

Fig. 10 Relationship between anchor weight and peak drag force

### 3.4.2 土体材料参数

如图11~图13所示，三种重量的船锚在细砂（松散）、细砂（中密）、细砂（密实）、粗砂（中密）以及粉土（中密）五种不同砂质海床条件下的

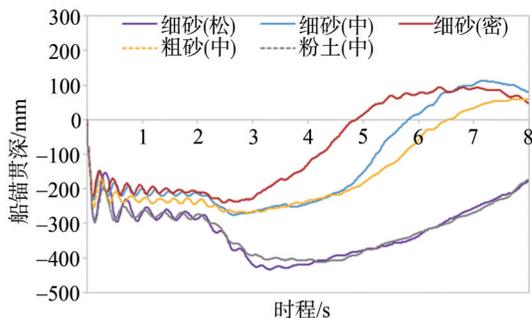


图11 船锚质量为1.0 t(anchor-1)

Fig. 11 Anchor weight 1.0 t(anchor-1)

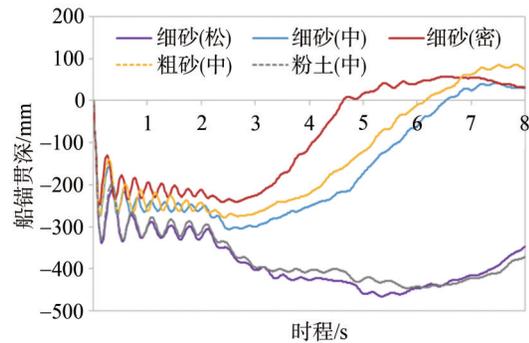


图12 船锚质量为1.6 t(anchor-2)

Fig. 12 Anchor weight 1.6 t(anchor-2)

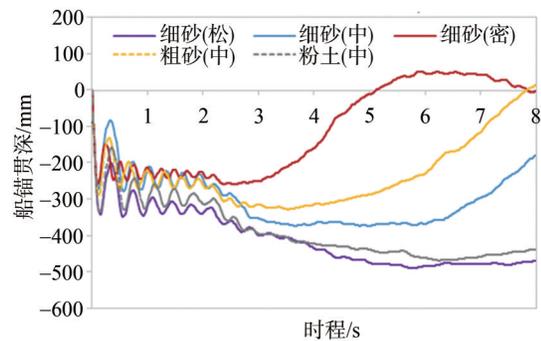


图13 船锚质量为2.1 t(anchor-3)

Fig. 13 Anchor weight 2.1 t(anchor-3)

贯入深度-时间曲线。

分析图中船锚贯入深度-时间曲线可以看出，在细砂条件下，对于相同重量的船锚来说，随着密实度从松散增加到密实，船锚的最大贯入深度逐渐减小，且减小幅度较大。影响拖锚最终深度主要的砂地质参数为：砂土密实度、弹性常数（压缩模量、剪切模量）以及破坏准则参数（内聚力、摩擦角）。砂土密实度越高，压缩模量越大，剪切模量越大，船锚的贯入深度越小。

### 3.4.3 拖拽速度影响

实际工程中，由于船锚在水中所受阻力和土质类别的不同，人为不确定性等因素，使得船锚的拖拽速度不一。如图14所示为不同拖拽速度对船锚贯深-时程全曲线的数值模拟结果。船锚拖拽速度分别设定为0.15 m/s、0.3 m/s和0.45 m/s。海床土体采用细砂，此处船锚质量固定为3.06 t。从图中可以发现，拖拽速度越快，船锚达到最大锚深的时间越短，且贯深减小的速度随拖拽速度的增加不断加快。这是因为拖拽速度越快，由于应变率效应，船锚所受堆积砂土的阻力越大，这时为了与稳定的拖

拽力平衡, 必须减小船锚与堆积砂土的接触面积, 从而导致了贯深的减小。值得一提的是, 拖拽速度的变化对船锚的最大贯深的影响不明显。随着速度从 0.15 m/s 至 0.45 m/s, 速度提高三倍之后, 其对应的最大贯深仅仅从 598 mm 变化为 614 mm, 贯深增幅仅为 2%。但拖拽力提高幅度较大, 分别较 0.15 m/s 速度时提高约 20% 和 28%。

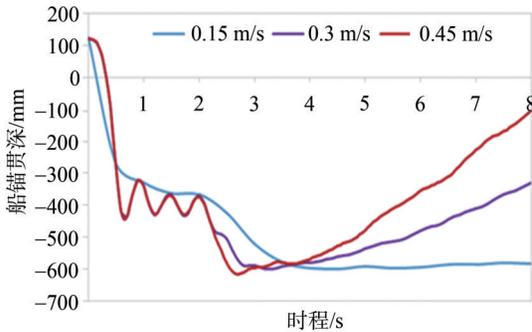


图 14 拖拽速度对贯深-时程曲线的影响

Fig. 14 Influence of drag speed on penetration depth time history curve

### 3.4.4 触底速度

从已有文献<sup>[14-15]</sup>经验来看落锚的触底速度直接影响着初始贯穿深度的大小。如图 15~图 17 分别显示了三种重量的船锚在不同触底速度下的贯深-时程曲线, 触底速度分别设置为 2.9 m/s、4.2 m/s 和 6.9 m/s。

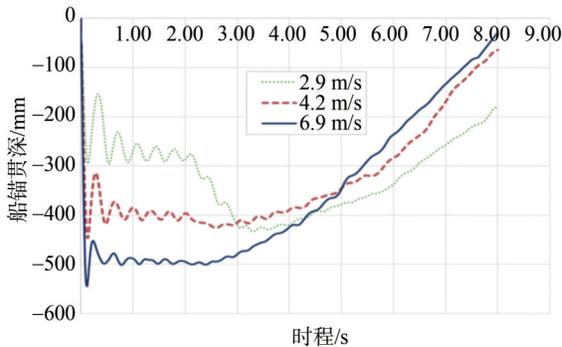


图 15 不同触底速度时的贯深-时程曲线(anchor-1)

Fig. 15 Influence of bottom velocity on penetration depth time history curve (anchor-1)

从图中可以看出, 随着船锚触底速度增大, 最大贯深由 340 mm 增大为 558 mm。由此看出, 船锚贯入深度随触底速度的增大而增大, 但是随着船锚质量的增加, 后期的贯深-时程曲线越平缓。值得一提的是, 实际中当抛锚水深超过 25 m 时, 往往

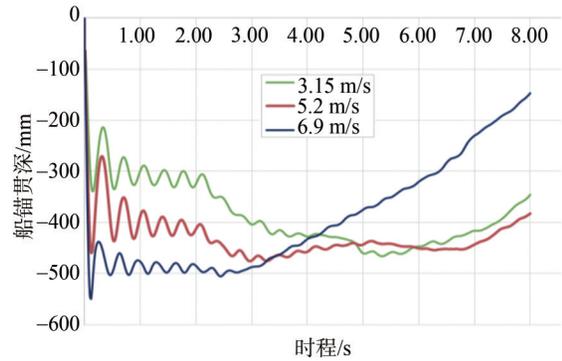


图 16 不同触底速度时的贯深-时程曲线(anchor-2)

Fig. 16 Influence of bottom velocity on penetration depth time history curve (anchor-2)

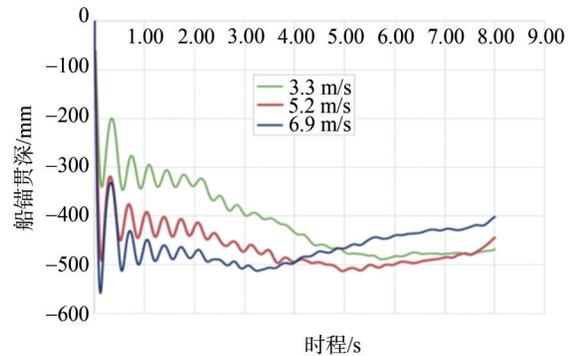


图 17 不同触底速度时的贯深-时程曲线(anchor-3)

Fig. 17 Influence of bottom velocity on penetration depth time history curve (anchor-3)

会采用刹车来控制下锚速度, 船锚的触底速度是受人为控制的, 通常不会超过 3 m/s<sup>[13]</sup>。

## 4 结论

本文建立了典型霍尔锚部件的三维有限元模型, 同时建立了基于有限元-光滑粒子流 (FEM-SPH) 的三维砂质海床土体数值模型, 并对船锚在不同土质的砂质海床中的落锚和拖锚过程进行数值仿真, 以船锚最终的贯入深度作为衡量海底电缆埋深的主要指标, 主要结论如下:

- 1) 船锚重量对拖锚全过程运动曲线有明显的影响, 随着船锚重量的增加, 最大贯入深度不断提高。
- 2) 落锚的触底速度直接影响着初始贯穿深度的大小, 船锚触底速度越大, 初始落锚贯穿深度明显增大。影响落锚速度的因素主要有船锚质量和船锚几何尺寸。
- 3) 通过对不同锚重在不同砂质海床中的全过

程仿真,得到船锚的最大贯入深度。对于砂质海床,一般可按照1.0 t船锚重量进行设计,推荐海缆在密实砂土中埋深不宜小于0.35 m,在中密砂土埋深中不宜小于0.46 m,在松散砂土中埋深不宜小于0.65 m。对于船锚重量为2.1 t时,推荐海缆在密实砂土中埋深不宜小于0.40 m,在中密砂土埋深中不宜小于0.60 m,在松散砂土中埋深不宜小于0.80 m。对于船锚重量大于2.1 t时,应结合实际地质和船锚情况进一步确定海缆埋深。

#### 参考文献:

- [1] 于俊岭,吴海洋,张轶,等. 海底电缆登陆浅滩防冲刷措施研究[J]. 中国电业:(技术版),2014(10):85-88.  
YU J L, WU H Y, ZHANG Y, et al. Research on scour-prevention measure for submarine cable landed shoal [J]. China Electric Power (Technology Edition), 2014(10):85-88.
- [2] 刘晓霞,高强,脱浩虎,等. 海底光电复合缆的落锚撞击试验与仿真研究[J]. 石油机械,2017,45(1):62-69.  
LIU X X, GAO Q, TUO H H, et al. Field test and numerical modeling of submarine photoelectric composite cable under anchor impact [J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(1):62-69.
- [3] 苏荣,元国凯. 海上风电场海底电缆防护方案研究[J]. 南方能源建设,2018,5(2):121-125.  
SU R, YUAN G K. Protection schemes of submarine power cables in offshore wind farm [J]. Southern Energy Construction, 2018, 5(2):121-125.
- [4] 吴庆华,陈建康,郑伟,等. 中国首条500 kV海底电缆线路工程的设计[J]. 中国电业:(技术版),2014(10):46-54.  
WU Q H, CHEN J K, ZHENG W, et al. Design of the first 500 kV submarine cable line project in China [J]. China Electric Power (Technology Edition), 2014(10):46-54.
- [5] 张正祥,曾二贤,吴海洋,等. 海底电缆抛石堤坝洋流稳定性的试验研究[J]. 电力勘测设计,2015(1):49-53+80.  
ZHANG Z X, ZENG E X, WU H Y, et al. Experimental research on stability of jackstone dam under current action for protecting submarine cable [J]. Electric Power Survey & Design, 2015(1):49-53+80.
- [6] WANG Y D, WU H Y, SUN X M. Research on the depth of submarine cable laying in Hainan interconnection project [C]// Anon. China Electric Power Planning and Design Association, Power Transmission and Transformation Expert Committee 2014 Working Meeting, Beijing, China, August 6th, 2014. Beijing: China Electric Power Planning and Design Association, 2014:163-166.
- [7] NORSKE VERITASDET. Trawlboard/anchor penetration study for nexans [R]. Norway: Det Norske Veritas, 2008.
- [8] 高大钊. 土力学与基础工程[M]. 武汉理工大学出版社, 2014.
- [9] 周波. 双轴立式螺旋开沟机工作部件切土性能研究[D]. 武汉:华中农业大学,2012.
- [10] 张磊. 基于船舶应急抛锚的海底管道埋深及保护研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2013.
- [11] ALLAN P G. Selecting appropriate cable burial depths - a methodology [C]//Anon. Submarine Cable Improvement Group, Conference Proceedings of IBC Submarine Communication 1999, Cannes, 1999. Cannes: Submarine Cable Improvement Group, 1999:16-18.
- [12] SLEEGERS J, WURFF A. Hacking discussion in cannes [J]. Vakblad Voor De Bloemisterij, 2013, 68(1):30-31.
- [13] ALLAN P G, COMRIE R J, et al. The selection of appropriate burial tools and burial depths [C]// Anon. Submarine Cable Improvement Group, Conference Proceedings of IBC Submarine Communication 2001, Kyoto, 2001. Kyoto: Submarine Cable Improvement Group, 2001:1-8.
- [14] 王迎松. 锚泊贯入量的研究[D]. 大连:大连海事大学,2015.
- [15] 冯雅萍,李英,吴子昂. 船舶抛锚对浅水区埋置管道的损伤分析[J]. 船海工程,2017,46(4):169-172.  
FENG Y P, LI Y, WU Z A. Analysis of impact on submarine buried pipelines from dropped anchor in shallow water [J]. Ship and ocean engineering, 2017, 46(4):169-172.
- [16] 张鹏杨,王瑛剑,柯超,等. 海缆路由区船锚贯入量的研究分析[J]. 光通信技术,2016,40(10):60-62.  
ZHANG P Y, WANG Y J, KE C, et al. Research and analysis of anchor penetration on submarine cables route area [J]. 2016, 40(10):60-62.

#### 作者简介:



王亚东

王亚东 (通信作者)

1988-, 男, 湖北武汉人, 工程师, 工学硕士, 主要从事输电线路结构和海底电缆保护设计 (e-mail) wyd5678@csepedi.com。

吴海洋

1981-, 男, 湖北随州人, 高级工程师, 工学博士, 主要从事输电线路结构设计 (e-mail) wuhaiyang@csepedi.com。

冯衡

1979-, 男, 湖北武汉人, 高级工程师, 学士, 主要从事输电线路结构设计 (e-mail) fengheng@csepedi.com。

高彬

1988-, 男, 湖北武汉人, 工程师, 工学硕士, 主要从事输电线路结构和海底电缆保护设计 (e-mail) gb5613@csepedi.com。

(责任编辑 李辉)