

# 砂土基质下落锚深度试验研究及计算方法

杜颖, 陈峰, 徐伟

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** [目的]海底电缆合理的埋置深度是海底电缆保护设计的重要参数之一, 需研究砂土基质条件下海底电缆合适的埋设深度。[方法]针对工程船舶常用的霍尔锚及 AC-14 型锚开展船锚刺入深度研究, 基于砂土的室内模型试验, 采用 4 种重量霍尔锚和 3 种重量 AC-14 锚, 分别在 6 种不同高度下落得到船锚刺入深度试验结果。[结果]试验表明: DNV 规范中对船锚的落深采用了能量法进行计算, 即船锚的能量完全被土体吸收, 本研究基于太沙基极限承载力公式, 运用能量法通过建立了船锚落深的理论算法, 并通过最小二乘法拟合试验数据, 得出计算船锚刺入砂土深度。[结论]所提试验和计算方法是正确并有效的, 可作为海底电缆最小埋深设计依据。

**关键词:** 海底电缆; 能量法; 下落深度; 落锚试验

**中图分类号:** TK89; TE95

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-8676(2018)S1-0222-06

## Experimental Study and Calculation Method of Falling Anchor Depth Under Sand Soil

DU Ying, CHEN Feng, XU Wei

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** [Introduction] The reasonable depth of submarine cable buried is one of the important parameters to protection cable to study the suitable depth of submarine cable under sandy soil conditions. [Method] In this paper, the penetration depth of ship anchor was studied for the commonly used ship anchor Hall and AC-14 type anchor. This study was based on the model test of sand, four weight Hall anchors and three weight AC-14 anchors were used, the anchor penetration depth test results obtained at 6 different heights respectively. [Result] The results show that the DNV code uses the energy method to calculate the depth of the anchor, which the anchor's energy is completely absorbed by the soil. This study is based on the formula of the ultimate bearing capacity, and the energy algorithm is adopted to establish the theoretical algorithm of anchor falling depth. And fitting the test data by least squares method, and getting the accurate formula of falling anchor under sand soil. [Conclusion] We demonstrate the feasibility of the experimental design and calculating method, then this formula can serve as the basis for the minimum burial depth of the submarine cable.

**Key words:** submarine cable; energy method; penetration depth; model test

海底电缆输电工程是跨海域联网工程建设的重要组成部分, 在实现电网国际化、区域电网互联进程中起着重要作用。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。据历史数据统计, 人类活动造成 90% 以上的海底电缆故障, 而其中三分之一是锚害。海底电缆的保护方式主要为直埋保护, 即在海底开挖沟槽后直接敷设海底电缆, 依靠电缆上部覆

土进行保护。

2009 年, 杨秀娟等人<sup>[1]</sup>利用数值模拟软件研究了坠落物体直接作用在裸置于海底的管线时的海底管线的应力分布及变形情况。2010 年, 赵冬岩等人<sup>[2]</sup>结合动能定理及经验公式, 推导出了船锚在水下的最终速度、冲击动能的相关公式, 结合实际进行计算分析。2012 年, 李庆等人<sup>[3]</sup>采用 DNV 规范中的相关规定, 计算船锚在下落过程中的有效冲击能量和落锚的最终贯穿深度。2014 年, 王懿等人<sup>[4]</sup>利用有限元软件采取 CEL 技术对船舶的抛锚入泥的深度进行了研究。

本文根据室内试验成果, 采用太沙基极限承载

收稿日期: 2018-08-14 修回日期: 2018-12-01

基金项目: 中国能建广东院科技项目“海上平台柔性直流输电关键技术和工程应用研究”(EV02931W)

力公式, 拟船锚落锚能量曲线, 推导砂土条件下船锚入土深度, 为海底电缆敷设计埋深提供依据。

### 1 试验条件

#### 1.1 砂土试验场地

砂土落锚试验场地为 4 m × 4 m 的砂土槽, 如图 1 所示。



图 1 砂土落锚试验场地  
Fig. 1 Sand fall anchor test site

#### 1.2 模型锚

本次模型试验共使用两种形式锚, 即霍尔锚<sup>[5]</sup>和 AC-14 型锚<sup>[6]</sup>, 分别如图 2 和图 3 所示, 尺寸如表 1 和表 2 所示。霍尔锚共设计制作 4 种尺寸, 从大到小质量依次为 76.2 kg、31.25 kg、15.4 kg 和 6.45 kg。AC-14 型锚模型共设计制作 3 种尺寸, 从大到小质量依次为 73 kg、25.3 kg、和 4.7 kg。



图 2 不同比尺霍尔锚模型  
Fig. 2 Different scale hall anchor model



图 3 不同比尺 AC-14 型锚模型  
Fig. 3 Different scale AC-14 anchor model

表 1 霍尔锚小比尺模型尺寸

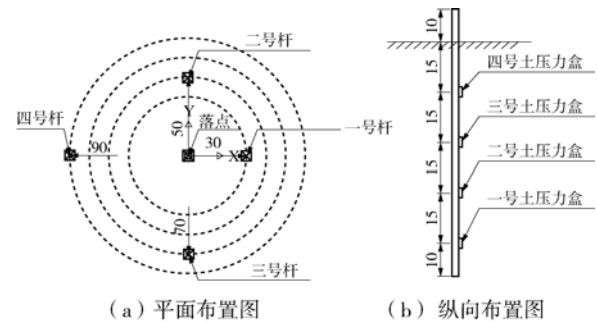
模型质量/kg	H	h	h <sub>1</sub>	L	L <sub>1</sub>	B	B <sub>1</sub>	H <sub>1</sub>	I	J
6.45	263	143	31	203	143	79	93	43	33	10
15.40	386	210	46	298	210	116	138	64	47	14
31.25	517	280	62	399	280	155	184	80	62	18
76.20	772	419	92	596	419	232	276	128	94	28

表 2 AC-14 型锚小比尺模型尺寸

模型质量/kg	B	H	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	h	h <sub>1</sub>	L	L <sub>1</sub>	J
4.70	59	210	34	169	130	37	192	103	9
25.30	122	439	70	352	271	77	400	214	18
73.00	182	656	105	526	405	115	598	320	27

#### 1.3 试验设备

落锚的影响范围和影响深度的测量由土压力盒和数据采集系统组成, 土压力盒埋置位置示意图如图 4 所示。



注: 尺寸单位为 cm。

图 4 土压力盒的布置示意图

Fig. 4 Earth pressure box layout

#### 1.4 试验过程

试验时由起吊设备将模型试验锚起吊至预定高度, 然后让模型试验锚自由下落, 直至贯入土体后停止运动。记录土体中预埋土压力盒指数的变化以及船锚贯入土体的深度。作为探索试验, 进行了 84 组, 具体试验过程如图 5 所示。

## 2 入土深度试验结果

#### 2.1 试验参数

本项研究在进行调研后发现, 国内对于船锚的落锚速度具有规定, 一般认为船锚在与底质接触时, 速度不得大于 2.5 m/s, 因此在对船锚的落深进行研究时, 将 2.5 m/s 作为标准, 具体研究过程

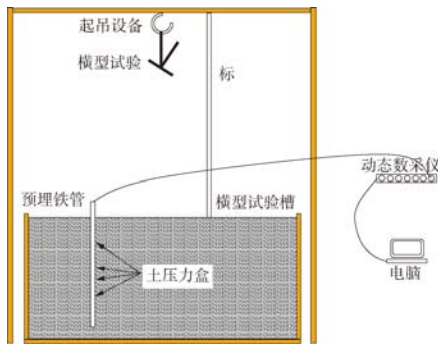


图5 试验过程示意图

Fig. 5 Experimental setup

如下。

针对砂土条件，分别使用了 AC-14 型锚和霍尔锚进行了试验，共进行了 42 组试验，砂土土性如表 3 所示。

表3 落锚试验砂土土性

Tab. 3 Sand soil properties

土质	饱和容重/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	内摩擦角/ ( $^\circ$ )	孔隙比	相对密度
中砂	20.5	33.3	0.61	0.68

### 2.2 霍尔锚落锚试验

共进行了 4 种重量的霍尔锚的试验，每种质量的霍尔锚进行了 6 种不同高度的落锚试验，落锚高度分别为 0.2 m、0.4 m、0.6 m、0.8 m、1.0 m、1.2 m。落锚深度数据如表 4 所示。

表4 霍尔锚落锚试验落深数据

Tab. 4 Hall anchor anchor falling depth data

试验组次	模型锚重量 /kg	落锚高度 /m	入土深度 /cm
1	6.45	0.2	4.7
2	6.45	0.4	5.9
3	6.45	0.6	6.5
4	6.45	0.8	6.7
5	6.45	1.0	6.6
6	6.45	1.2	6.8
7	15.40	0.2	6.5
8	15.40	0.4	7.6
9	15.40	0.6	7.8
10	15.40	0.8	8.5
11	15.40	1.0	8.8
12	15.40	1.2	9.2
13	31.25	0.2	6.2
14	31.25	0.4	7.4
15	31.25	0.6	7.9
16	31.25	0.8	8.4
17	31.25	1.0	8.4

表4(续) 霍尔锚落锚试验落深数据

Tab. 4(Cont.) Hall anchor anchor falling depth data

试验组次	模型锚重量 /kg	落锚高度 /m	入土深度 /cm
18	31.25	1.2	8.5
19	76.20	0.2	7.8
20	76.20	0.4	8.0
21	76.20	0.6	8.5
22	76.20	0.8	8.7
23	76.20	1.0	8.5
24	76.20	1.2	8.7

### 2.3 AC-14 型锚落锚试验

共进行了 3 种重量的 AC-14 型锚的试验，每种质量的 AC-14 型锚共进行了 6 种不同高度的落锚试验，落锚高度分别为 0.2 m、0.4 m、0.6 m、0.8 m、1.0 m、1.2 m。落锚深度数据如表 5 所示。

表5 AC-14 型锚落锚试验入土深度数据

Tab. 5 AC-14 anchor anchoring test soil depth data

试验组次	模型锚重量 /kg	落锚高度 /m	入土深度 /cm
1	4.70	0.2	2.5
2	4.70	0.4	3.2
3	4.70	0.6	3.3
4	4.70	0.8	3.6
5	4.70	1.0	3.4
6	4.70	1.2	3.4
7	25.30	0.2	4.4
8	25.30	0.4	5.7
9	25.30	0.6	6.8
10	25.30	0.8	7.4
11	25.30	1.0	6.7
12	25.30	1.2	7.4
13	73.00	0.2	5.5
14	73.00	0.4	8.3
15	73.00	0.6	8.0
16	73.00	0.8	8.8
17	73.00	1.0	10.0
18	73.00	1.2	9.5

观察所有砂土落锚的试验数据可以发现，在落锚过程中，在相同重量的情况下，随着落锚高度的增加，贯入深度随之增加；在落锚高度相同的情况下，随着船锚重量的增加，贯入深度随之增加。在砂土中，船锚贯入深度是船锚重量和落高共同作用的结果。

### 2.4 砂土试验结果分析

将试验结果绘制成图表，如图 6 和图 7 所示。上文已经总结了船锚落深的规律，即落锚深度随着船锚质量的增大和落距的增加而增长，因此认为落

锚深度与落锚过程中船锚的能量有关, 将船锚能量与相应的落深绘制成图 8 所示。

由图中数据可以得到, 落锚深度随着能量的增加而增大, 但是两者之间不是简单的线性关系。

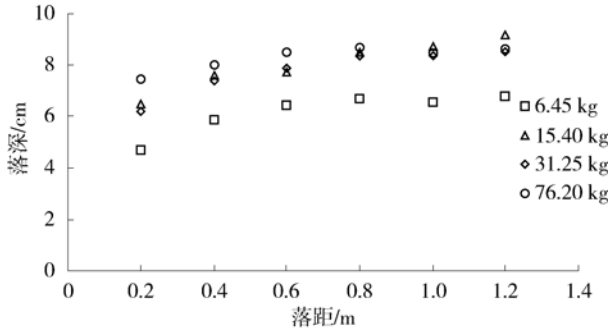


图 6 霍尔锚落深

Fig. 6 Hall anchor drop depth

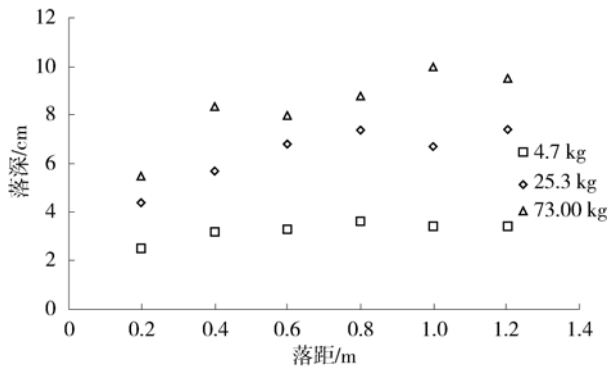


图 7 AC-14 型锚落深

Fig. 7 AC-14 anchor drop depth

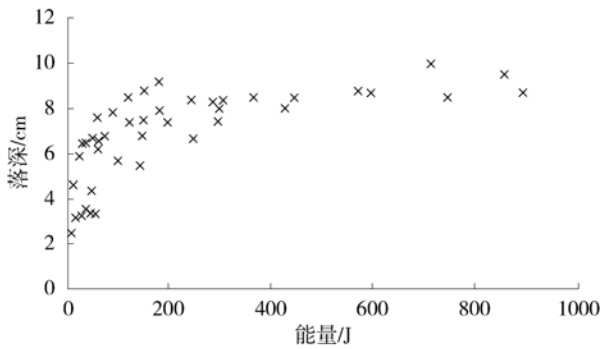


图 8 落锚深度与船锚能量关系图

Fig. 8 Relationship between anchoring depth and anchor energy

### 3 落锚入土深度的理论解

#### 3.1 理论解推导过程及结果

DNV 规范中对船锚的落深采用了能量法进行

计算, 即船锚的能量完全被土体吸收<sup>[7-9]</sup>, 认为土体对船锚的作用力仅为土体的极限承载力, 计算方法采用太沙基极限承载力公式<sup>[10]</sup>, 具体如下:

$$p_u = c \cdot N_c + q \cdot N_q + 0.5D \cdot \gamma \cdot N_\gamma \quad (1)$$

式中:  $N_c$ 、 $N_q$  为无重土承载力系数;  $N_\gamma$  为承载力系数;  $D$  为基础宽度;  $\gamma$  为基底以下土的容重。考虑到船锚与土体接触时, 基础宽度  $D$  随着船锚贯入深度  $z$  的增加而增加, 因此认为  $D$  与  $z$  之间具有线性关系, 即  $D = \alpha \times z$ ,  $\alpha$  为形状系数; 基础长度  $L$  同样随着贯入深度  $z$  的增加而增加, 即  $L = \beta \times z$ ; 边载  $q$  同样随着船锚落深  $z$  的增大而不断增大, 两者之间的关系为  $q = \gamma \times z$ ,  $\gamma$  为土体的容重。因此土体对船锚的作用力可以表示为:

$$F_u = (c \cdot N_c + z \cdot \gamma \cdot N_q + 0.5\alpha \cdot z \cdot \gamma \cdot N_\gamma) \cdot \alpha \cdot \beta \cdot z_2 \quad (2)$$

式中:  $F_u$  表示土体对船锚的作用力; 在船锚撞击土体时, 会存在能量损耗, 用经验系数  $a_0$ ,  $b_0$ ,  $c_0$  来表示能量损耗情况, 此时土体对船锚所做的功  $W$  可以表示为:

$$W = 0.125a_0 \cdot \alpha^2 \cdot \beta \cdot \gamma \cdot N_\gamma \cdot z^4 + 0.25b_0 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot N_\gamma \cdot z^4 + 0.33c_0 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot c \cdot N_c \cdot z^3 \quad (3)$$

由于能量守恒原理, 可以得到土体对船锚所做的功等于船锚在下落过程中的动能, 即  $W = E_v$ , 化简公式(3)中的参数可以得到船锚贯入深度的能量表达式:

$$E_v = A \cdot \gamma \cdot N_\gamma \cdot z^4 + B \cdot \gamma \cdot N_q \cdot z^4 + C \cdot c \cdot N_c \cdot z^3 \quad (4)$$

式中:  $A$  为土重分项系数;  $B$  为边载分项系数;  $C$  为黏聚力分项系数;  $z$  为落深。

试验用砂土的内摩擦角  $\varphi$  为  $34^\circ$ , 黏聚力  $c$  为 0, 可以得到  $N_c = 52.8$ ,  $N_q = 36.6$ ,  $N_\gamma = 36$ 。因为  $c = 0$ , 可以将公式简化为:

$$E_v = A \cdot \gamma \cdot N_\gamma \cdot z^4 + B \cdot \gamma \cdot N_q \cdot z^4 \quad (5)$$

将所有试验数据带入简化公式, 通过最小二乘法可以得到  $A = 8.3$ ,  $B = 1.5$ 。则砂土中落锚能量的拟合公式为:

$$E_v = 8.3\gamma \cdot N_\gamma \cdot z^4 + 1.5\gamma \cdot N_q \cdot z^4 \quad (6)$$

由能量公式可以反推出船锚的落锚深度。

#### 3.2 理论解与试验结果比较

根据最小二乘法拟合出的公式, 与试验结果进行比较, 结果如图 9 所示。

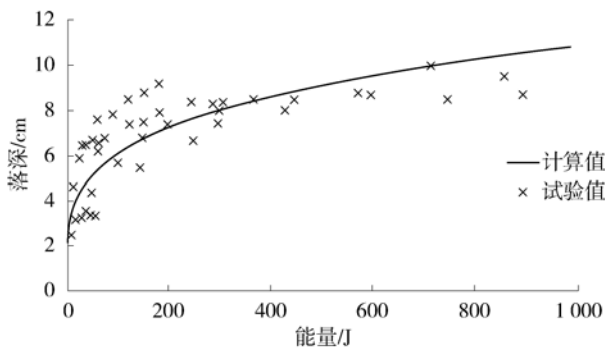
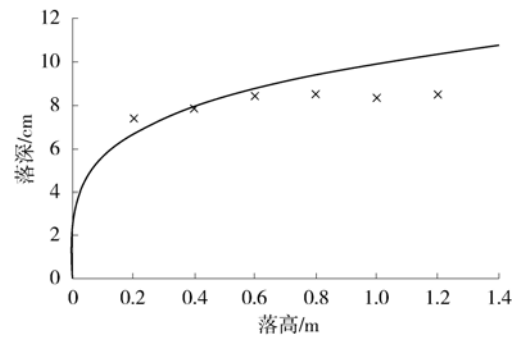


图9 试验结果拟合

Fig. 9 Test results fitting

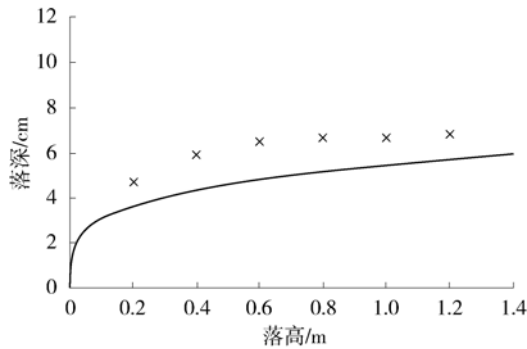
将计算值与不同重量船锚落深的试验值进行比较，可以得到如图10~图11结果。



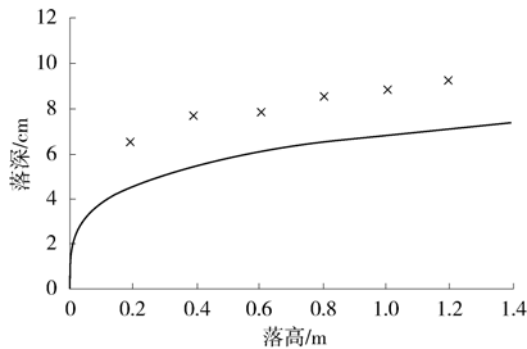
(d) 76.20 kg霍尔锚

图10 不同质量霍尔锚落深计算值与实测值对比

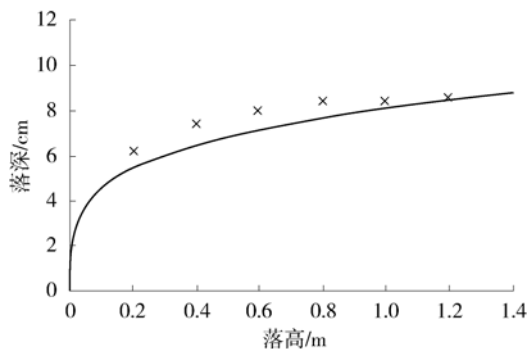
Fig. 10 Compares the calculated and measured values of the drop depths of different hall anchors



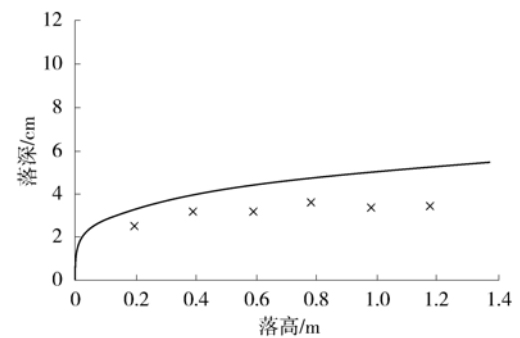
(a) 6.45 kg霍尔锚



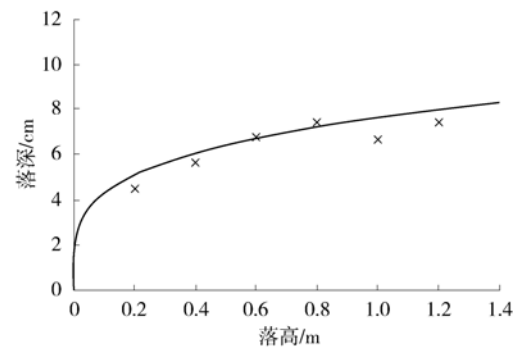
(b) 15.40 kg霍尔锚



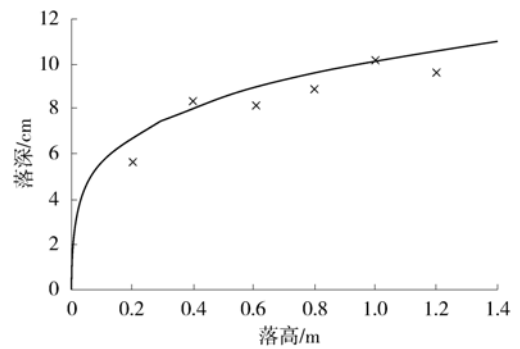
(c) 31.25 kg霍尔锚



(a) 4.70 kg AC-14型锚



(b) 25.30 kg AC-14型锚



(c) 73.00 kg AC-14型锚

图11 不同质量 AC-14 型锚落深计算值与实测值对比

Fig. 11 Compares the calculated and measured values of the drop depths of different AC-14 anchors

由图 10 ~ 图 11 可以得到, 拟合公式完全可以计算出不同类型、不同质量的船锚在不同落锚高度条件下的落深, 并且与实测值拟合良好, 验证了理论公式在砂土条件下的合理性。因此, 可将落锚刺入深度计算结果作为海底电缆最小掩埋深度。

## 4 结论

本文利用物理模型和数值模拟方法对小比尺试验中霍尔锚及 AC-14 型锚共 7 种型锚进行了研究, 每个锚型选取了 6 种不同的落距进行讨论, 具体结论如下。

1) 船锚的贯入深度与船锚的质量及落高均有关, 即随着船锚质量的增加, 贯入深度有一定程度的增大; 随着船锚落高的增加, 贯入深度有一定程度的增加。但随着船锚质量和落高的不断增加, 贯入深度的增幅有所减缓。

2) 船锚贯入深度可以与落锚过程中船锚接触土体时的能量表达, 即随着船锚能量的增大, 船锚的贯入深度不断增大。同样存在随着船锚能量的增加, 贯入深度的增幅有所减缓的情况。

3) 土体对船锚的作用力利用太沙基地基极限承载力公式进行计算, 可以推导出在船锚贯入土体的过程中土体对船锚所做的功, 并通过计算落锚过程中船锚的能量, 计算出船锚贯入土体的最终深度。

### 参考文献:

- [1] 杨秀娟, 修宗祥, 闫相祯, 等. 海底管道受坠物撞击的三维仿真研究 [J]. 振动与冲击, 2009, 28(11): 55-58 + 77 + 210.  
YANG X J, XIU Z X, YAN X Z, et al. 3D simulation of submarine pipeline impacted by dropped objects [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(11): 55-58 + 77 + 210.
- [2] 赵冬岩, 王琮, 罗超, 等. 社会环境因素对海底管道埋设深度的影响 [J]. 中国海上油气, 2010, 22(4): 275-278.  
ZHAO D Y, WANG C, LUO C, et al. Social environmental factors impact on the buried depth of subsea pipeline [J]. China Offshore Oil and Gas, 2010, 22(4): 275-278.
- [3] 李庆, 马坤明, 王凤莲, 等. 穿越航道的海底管道保护设计抗锚害分析研究 [C]//中国造船工程学会. 中国海洋石油总公司第三届海洋工程技术年会, 青岛, 2012-09-20. 北京: 《中国造船》编辑部, 2013: 111-116.  
LI Q, MA K M, WANG F L, et al. Research on anti-anchoring damage analysis of submarine pipeline protection design crossing channel [C]. Chinese Society of Naval Architects and Marine Engineers. Shipbuilding of China, The Third Annual

- Conference of China National Offshore Oil Corporation, Qingdao, Sep. 20. Beijing: Shipbuilding of China, 2013: 111-116.
- [4] 王懿, 贾旭, 黄俊, 等. 基于 CEL 的船舶抛锚入泥深度分析 [J]. 石油机械, 2014, 42(12): 44-47.  
WANG Y, JIA X, HUANG J, et al. Analysis of penetration depth of dropped anchor based on CEL [J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(12): 44-47.
- [5] 国家技术监督局. 霍尔锚: GB/T 546—1997 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.  
The State Bureau of Quality and Technical. Hall anchor: GB/T 546—1997 [S]. Beijing: China Standards Press, 1997.
- [6] 国防科学技术工业委员会. AC-14 大抓力锚: CB/T 3972—2005 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.  
State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense, Proc. AC-14 high holding power anchor CB/T-3972-2005 [S]. Beijing: China Standards Press, 2005.
- [7] DNV. Risk assessment of pipeline protection: DNV-RP-F107 [S]. Norway: Det Norske Veritas, 2010.
- [8] DNV. Submarine pipeline systems: DNV-OS-F101 [S]. Norway: Det Norske Veritas, 2010.
- [9] DNV. On-bottom stability design of submarine pipelines: DNV-RP-F109 [S]. Norway: Det Norske Veritas, 2010.
- [10] 钱家欢. 土工原理与计算 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.  
QIAN J H. Geotechnical principles and calculations [M]. Beijing: China Water & Power Press, 1996.

### 作者简介:



DU Y

杜颖(通信作者)

1982-, 男, 广东肇庆人, 高级工程师, 电气工程专业硕士, 主要从事高压输电线路研究设计工作 (e-mail) duyong@gedi.com.cn。

陈峰

1984-, 男, 福建福安人, 高级工程师, 土木工程专业硕士, 主要从事高压输电线路设计工作 (e-mail) gedichenfeng@163.com。

徐伟

1982-, 男, 山东新泰人, 高级工程师, 电气工程专业硕士, 主要从事高压输电线路研究设计工作 (e-mail) xuwei@gedi.com.cn。

(责任编辑 郑文棠)