

高压海底电缆锚害事故风险评估

罗楚军, 李健, 吴庆华, 张胜峰

引用本文:

罗楚军, 李健, 吴庆华, 等. 高压海底电缆锚害事故风险评估[J]. 南方能源建设, 2021, 8(1): 67-73.

LUO Chujun, LI Jian, WU Qinghua, et al. Risk Assessment Method for Anchoring Accident of High Voltage Submarine Cable[J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(1): 67-73.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

砂质海床条件下海底电缆埋深研究

Research on the Burial Depth of Submarine Cable in Sandy Seabed

南方能源建设. 2020, 7(3): 81-88 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.03.010>

砂土基质下落锚深度试验研究及计算方法

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

南方能源建设. 2018, 5(z1): 222-227 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.S1.040>

海上风电场海底电缆防护方案研究

Protection Schemes of Submarine Power Cables in Offshore Wind Farm

南方能源建设. 2018, 5(2): 121-125 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.017>

海底电缆工程多源勘察数据管理及三维可视化研究

Multi-source Survey Data Management and 3D Visualization of Submarine Cable Engineering

南方能源建设. 2020, 7(z1): 72-77 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.S1.014>

海底电力电缆金属护层及铠装返流效果研究及应用

Research and Application on the Reflux Characteristic of Submarine Power Cable's Sheath and Armour

南方能源建设. 2015, 2(z1): 66-70,114 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.S1.014>

高压海底电缆锚害事故风险评估

罗楚军[✉], 李健, 吴庆华, 张胜峰

(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] 锚害事故导致电缆受损断电将会造成较为严重的经济损失和社会影响, 为降低海底电缆面临的锚害事故风险, 提出了一种高压海底电缆锚害事故风险评估方法。[方法] 根据事故发生的原因, 将锚害事故分为抛锚事故和拖锚事故两种情况分别进行建模计算, 并在单根电缆锚害风险研究的基础上, 研究了多根电缆的锚害风险。[结果] 根据模型计算结果, 分析得出锚害事故的重要影响因子为电缆根数、警示距离、船舶速度, 同时随着电缆根数减少、警示距离增加、船舶速度增大, 高压海底电缆锚害事故风险将会有效降低。[结论] 所提模型可有效评估高压海底电缆锚害事故风险, 可以为海底电缆的防护及优化设计工作提供理论指导。

关键词: 风险评估; 高压海底电缆; 锚害事故; 抛锚风险; 拖锚风险

中图分类号: TK89; TM75

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2021)01-0067-07

开放科学(资源服务)二维码:



Risk Assessment Method for Anchoring Accident of High Voltage Submarine Cable

LUO ChuJun[✉], LI Jian, WU Qinghua, ZHANG Shengfeng

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

Abstract: [Introduction] Cable damage and power failure caused by anchoring damage will cause serious economic loss and social impact. In order to reduce the risk of anchor damage accident of submarine cable, a risk assessment method of high-voltage submarine cable anchoring accident is proposed. [Method] According to the cause of the accident, this paper divided the anchor damage accident into two cases: anchor dropping accident and anchor dragging accident, and modeling and calculation were carried out for these two cases respectively. Based on the research of single cable anchor damage risk, the anchor damage risk of multiple cables was studied. [Result] According to the model calculation results, it is concluded that the number of cables, warning distance and ship speed are the important influencing factors of anchor damage accident. Meanwhile, with the decrease of cable number, the increase of warning distance and the increase of ship speed, the risk of high-voltage submarine cable anchoring accident will be effectively reduced. [Conclusion] The proposed model can effectively evaluate the risk of high voltage submarine cable anchor damage accident, and provide theoretical guidance for the protection and optimization design of submarine cable.

Key words: risk assessment; high voltage submarine cable; anchor damage accident; anchor dropping risk; anchor dragging risk

2095-8676 © 2021 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

随着我国经济发展战略的调整, 以及对海洋、海岛资源开发力度的加大, 如何解决跨海电力输送

问题逐渐成为关键。海底电缆, 尤其是超高压海底电缆作为跨海电力联网的重要组成部分, 将会扮演越来越重要的角色。如何准确地评估海底电缆面临的风险水平, 制定出经济可行的保护方案, 对提升海底电缆工程建设质量具有重要意义^[1-3]。

风险评估是海底电缆工程设计的重要环节, 也是实际施工建设过程中用户关注的重点。海底电缆

收稿日期: 2020-09-04 修回日期: 2020-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目“考虑机网相互影响的新一代核电厂和电力系统综合风险模型及协调控制方法”(51307123); 中国电力工程顾问集团科技项目“直接敷设海底电缆的振动特性及防护研究”(DG1-D06-2016); 中南电力设计院有限公司项目“海底电缆锚害风险评估方法研究”(40-1A-KY201419-D04)。

在制造、敷设和运行等阶段都面临着诸多潜在风险。海底电缆的敷设区域往往人为活动频繁,海洋环境复杂,地震、渔业活动、抛锚、拖锚等自然或人为活动都有可能危害海底电缆的安全运行。伴随着全球经济的发展,海上运输活动日益频繁,大型船舶的抛锚和拖锚对海底电缆的威胁也越来越大^[4-7]。根据海南电网第一回联网工程运行经验和对已建海底电缆工程历次威胁事件的统计分析可知,海底电缆由外部损害引起的事故占82%,因内部或者系统原因造成的故障占10.75%,其中,船舶的抛锚和拖锚等锚害风险是海底电缆最主要的风险源^[8-10],同时,IEEE海底电缆敷设规范也将锚害列为破坏海底管线的首要原因。

另一方面,跨海海底电缆工程造价往往较为高昂,并且在电力系统中具有重要的地位和作用,一旦电缆受损断电,将会造成严重的经济损失和后果。此外,海底电缆敷设在深海区域,不仅抢修难度大,且代价高昂^[11]。因此,在工程设计阶段,就需要对海底电缆面临的各项风险进行定性或定量评估,并结合评估结论提出预防或保护措施。然而,目前我国还没有完整、有效的海底电缆风险评估方法。

基于上述背景,本文以已建的南方主网与海南电网联网工程为依托,对海底电缆的抛锚风险和拖锚风险分别进行了建模计算,提出了海底电缆锚害风险评估方法,并对锚害事故的影响因子进行了重要性分析,可以为海底电缆工程设计和建设水平的提高奠定理论基础。

1 抛锚风险

海底电缆抛锚风险与电缆路由区船舶数量、船舶漂移概率、船舶在电缆附近抛锚的概率、抛锚失控概率和落锚击中海缆概率等因素相关。

电缆敷设在海床后,位置固定不变。船舶在水面上运动,位置随机。因此,海底电缆受抛锚击中的概率与传统的固定平台落物击中概率不同,需要推导船舶通过电缆所在海域抛锚击中电缆的计算公式。在获得锚的尺寸、电缆尺寸、海域面积等参数后,可以计算出船舶抛锚后,可能击中电缆的概率。但并不是所有船舶都会抛锚,即所有通过电缆海域的船舶中,只有当船舶失控、漂移且刚好在电缆保护区内抛锚时,才有可能对电缆构成威胁。因

此,某条航道内船舶真正对电缆构成威胁的概率(锚击率)是上述因素的联合概率。

由于各个航道船舶落物是相对独立的事件,则第 x 条航道的抛锚击中电缆年风险表达式如式(1)所示。

$$F_{\text{hit},x} = N_{\text{ship},x} F_{\text{drift}} (1 - P_{\text{human}}) P_{\text{loss}} P_{\text{hit},x} \quad (1)$$

式中: $N_{\text{ship},x}$ 为第 x 条航道内每年通过海底电缆路由区具有锚泊可能且船锚重量大于电缆抗锚等级的船舶数量,根据航道实际统计数据确定; F_{drift} 为船舶漂航概率,一般取为 2×10^{-5} 次/年; P_{loss} 为抛锚时对锚失去控制的概率,船舶小于或等于1 000 t的,落锚时失控概率取值0.1,大于1 000 t时,取值0.2; $P_{\text{hit},x}$ 为单次抛锚击中海底电缆的概率; P_{human} 为不在海底电缆附近抛锚的概率,一般的研究中保守取值为0.1,从历史数据来看,当船舶速度越快,其抛锚的可能性越小,当其速度越小,则抛锚的可能性越大,可用指数分布来拟合抛锚的概率与船速的关系,如公式(2)所示:

$$P_{\text{human}} = 1 - e^{-AV_{\text{ship}}/1.5} \quad (2)$$

$P_{\text{hit},x}$ 与船锚尺寸有关,海底落点与固定点的水平距离服从正态分布,在海底是平的情况下,如图1所示。由相同概率所组成的区域就形成一个个同心圆环。落物落到圆环中的概率就可表示为两个同心圆落物击中的概率之差,击中圆环中某一区块的概率,即可通过比较固定区域与圆环的面积之比得到:

$$P_{\text{hit},x} = L_x(B + D)/A_x \int_{r_0}^{r_1} P(r) dr \quad (3)$$

式中: L_x 为第 x 条航道电缆长度(m); A_x 为第 x 条航道内落锚区域面积(m^2); B 为电缆直径(m); D 为落物的最大宽度(m); r 为距离落物点在海底投影的水平距离(m); $P(r)$ 为海底落点与固定点的水平为 r 时的概率,服从正态分布。

多根电缆时第 x 条航道内锚击中海底电缆的概率表达式如式(4)所示。

$$P_{\text{hit},x} = S_{\text{hit},x}/A_x \quad (4)$$

式中: $S_{\text{hit},x}$ 为锚可能击中电缆的区域面积(m^2)。

在分航道计算出船舶抛锚击中海底电缆概率的基础上,可以得出跨越多条航道的单条电缆抛锚击中电缆年风险。第 x 条航道的电缆不发生抛锚损害的概率为: $1 - F_{\text{hit},1,x}$,那么所有航道,至少发生一次抛锚损害的概率为所有航道的电缆都不发生抛锚

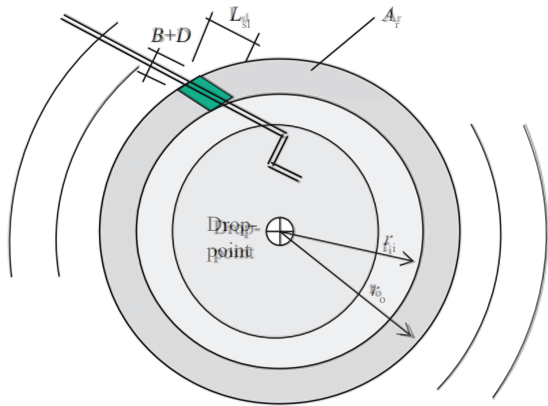


图 1 抛锚击中海缆模型

Fig. 1 Model of anchor hitting submarine cable

损害事件的对立事件, 则多条航道的抛锚击中电缆年风险的计算公式如式 (5) 所示。

$$F_{hit,1} = 1 - \prod_{x=1}^{x=n} 1 - N_{ship,x} F_{drift} [1 - P_{human}] P_{loss} P_{hit,x} \quad (5)$$

2 拖锚风险

船舶除了锚泊固定情况下抛锚, 在紧急失去动力的情况下也会考虑抛锚。通过抛锚, 船锚勾地的阻力和锚链陷入海床后摩擦力使船舶制动消耗掉船舶失去动力后残存的动能, 依据能量守恒关系可得船锚拖动距离如公式 (6) 所示。

$$L_{\alpha} = \frac{1}{2} (m + m_t) v_{ship}^2 / F' \quad (6)$$

式中: m 为船舶的重量; m_t 为船舶的载重; v_{ship} 为船舶残余速度; F' 为锚与锚链的实际产生的阻力, 使船舶停下来。

F' 分为两个部分, 即船锚勾地的阻力和锚链陷入海床的摩擦力。船锚勾地的抓力与锚的重量及水深有关, 锚链陷入海床的摩擦力与海床的地质及锚链卧在海床的长度有关, 如公式 (7) 所示。

$$F' = \lambda_a w_a + \lambda_c w_c l_1 \quad (7)$$

式中: λ_a 为锚的抓力系数, 于水深呈线性关系; w_a 为船锚的重量 (N); λ_c 为锚链陷入海床的摩擦系数, 沙地海床时取 0.75, 泥底海床取 0.5; w_c 为锚链的单位长度重量 (N/m); l_1 为锚链卧在海床的长度 (m), 锚链悬垂受锚链上的力决定, 考虑船在停泊时受力平衡, 故锚链上的力与船舶受的水流风力相等, 而在分析船舶受的水流风力时需要考虑船舶类型。

如果锚的入泥深度大于或等于电缆的埋深, 且

锚拖行的路线与电缆相交, 则会出现锚勾住海底电缆, 形成拖锚损害海底电缆, 故多根电缆时第 x 条航道单次船舶拖锚损坏电缆概率表达式如式 (8) 所示。

$$P_{hook,x} = \begin{cases} \delta L_{\alpha} / (\delta - 1) L_x + L & L_{\alpha} < L_x \\ 1 & L_{\alpha} \geq L_x \end{cases} \quad (8)$$

式中: δ 为电缆根数; L_x 为电缆间距 (m); L 为警示距离 (m)。

结合航道的通航情况, 可以得到单电缆受船舶拖锚年风险的计算公式如式 (9) 所示。

$$F_{hook,x} = N_{ship,x} F_{drift} (1 - P_{human}) L_{\alpha} / (1852 V_{ship}) P_{hook,x} \quad (9)$$

与抛锚击中电缆年风险相同, 拖锚事件发生的概率为所有航道都不发生拖锚事件的对立事件, 则电缆受船舶拖锚风险的计算公式如式 (10) 所示。

$$F_{hook,1} = 1 - \prod_{x=1}^{x=n} 1 - N_{ship,x} F_{drift} (1 - P_{human}) L_{\alpha} / (1852 V_{ship}) P_{hook,x} \quad (10)$$

式中: V_{ship} 为船舶速度 (节/小时); L_{α} 为拖锚长度 (m), 取决于海床状况、船舶及锚的形式; $P_{hook,x}$ 为第 x 条航道单次船舶拖锚损坏电缆概率。

就航道而言, 发生落锚和拖锚是相互独立的, 那么多个航道电缆个锚害年风险为抛锚击中电缆年风险与拖锚年风险之和, 如式 (11) 所示。

$$F_{damage} = F_{hit,1} + F_{hook,1} \quad (11)$$

式中: F_{damage} 为锚害年风险 (次/年); $F_{hit,1}$ 为抛锚击中电缆年风险 (次/年); $F_{hook,1}$ 为拖锚年风险 (次年)。

3 仿真计算

3.1 仿真概述

南方主网与海南电网联网工程是联接南方主网与海南电网的 500 kV 交流输电线路工程, 采用海底电缆跨越琼州海峡。该电缆起点为广东省徐闻县东岭村, 终点为海南省澄迈县林诗岛。第一回联网工程已于 2009 年 6 月投产运行, 该工程共敷设 3 根电缆, 第二回联网工程计划敷设 4 根电缆, 位于第一回联网工程的东侧。单根电缆长度约为 31 km, 电缆间距为水深的 1.5~2 倍。该工程采用全程掩埋的方式对电缆进行保护, 可以抵御 1 t 以下的锚害事故。根据第一回联网工程的运行经验, 船舶抛锚和拖锚事故是危害海底电缆的主要风险。联网工程部分参数包括: 电缆直径为 14 cm, 电缆寿命 40 年,

电缆根数7根, 电缆间距为航道水深1.5倍, 船舶平均航速12节, 双侧警示距离500 m, 电缆抗锚害标准1 t。

3.2 模型有效性分析

琼州海峡2012年到2014年各航道至今未发生锚击事故, 船舶抛锚次数与锚害年风险基本呈正相关, 曲线趋势应该相近, 故采用实际统计的船舶抛锚次数与前面提出的锚害年风险比较, 如图2所示。由对比结果可知, 模型计算的风险走势与实际风险走势基本一致, 仅在北岸附近计算的锚害年风险与船舶抛锚次数存在一点差异。

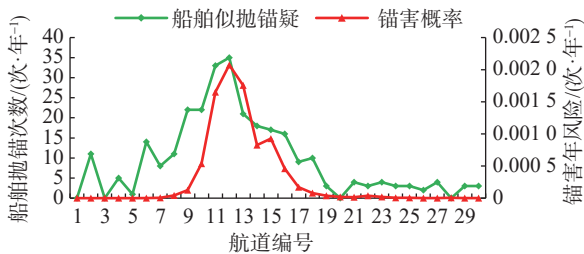


图2 实际锚害次数与模型估算锚害风险比较

Fig. 2 Comparison between actual anchor damage times and anchor damage risk by model estimation

模型计算结果和实际统计结果存在偏差的可能原因如下:

1) 信息误差

由于船舶信息统计的不完善, 有小部分船舶在通过该海峡时可能统计不到, 不知道船舶的具体信息, 比如部分渔船、中小型的客货船等。

2) 设定差异

实际锚害风险次数与实际破坏电缆的锚害次数存在一定的差异。(1) 模型所计算的是以锚与电缆实际接触算为一次事故, 而船舶船速异常及抛锚行为的统计仅依据的是其在警示区范围的行为; (2) 模型所考虑的是电缆抗锚害标准为1 t后的锚害风险, 而统计的风险事件是未加区分的; (3) 锚害次数的统计未区分锚的大小等因素所影响的锚害程度的大小。以抗锚害等级为例, 渔船的长度区间为[13, 43] m, 货船[52, 225] m, 其他类型船舶为[35, 77] m。一般小于45 m船舶船锚的重量一般小于1 t, 根据工程实际情况剔除渔船后, 能更好的评估锚害风险。当然由于其他船型的数据较为有限, 不能很好地区分船舶的锚重, 不能完全排除船舶锚重低于1 t船舶的影响。

3) 统计误差

由于电缆敷设时呈梯形, 电缆总长31 km, 而船舶航道数据以海峡直线切面计算约28.7 km。将航道与电缆结合进行统计可能会出现一定偏差。同时也存在部分统计数据不精确, 导致模型的计算偏差。

4) 模型缺陷

由于模型考虑的相关因素只有十几个, 但实际环境比模型更加复杂。

3.3 影响因子分析

由于海底电缆工程的设计使用年限长达四十年, 因此电缆所处环境可能会发生较大的变化, 通过对各影响因子进行压力测试, 得出影响因子变化对电缆锚害风险的影响, 为未来工程环境发生变化时, 采取有效保护手段和措施提供辅助支撑。影响海底电缆锚害事故的影响因子主要包括: 电缆根数, 电缆间距, 警示距离, 船舶速度, 保护力度和船舶数量, 下面分别进行测试分析。

3.3.1 电缆根数

考虑到工程未来的可拓展性, 本文对路由区敷设不同根数电缆的锚害风险水平进行评估。在其他条件不变的情况下, 改变海峡区域敷设的电缆根数。不同电缆根数下海底电缆的锚害风险如图3所示。

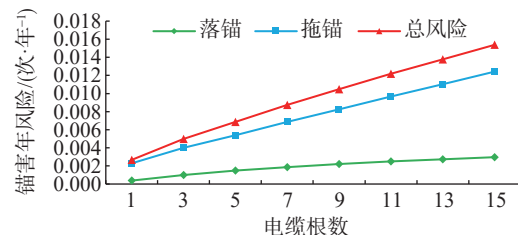


图3 不同电缆根数下海底电缆的锚害风险

Fig. 3 Anchoring risk of submarine cable under different cable number

由测试结果可知, 电缆根数是影响锚害风险的重要因素。随着电缆根数的增多, 电缆的锚害风险也显著增加, 但增加的幅度略小于电缆根数增加的幅度。电缆根数增加至15倍时, 锚害风险增加了6.1倍, 落锚击中风险增加了7.8倍, 拖锚风险增加了5.8倍, 拖锚风险占总风险的权重降低, 但拖锚事故仍然是主要锚害风险, 远大于落锚风险。以电缆的使用年限为参考, 在其他条件不变的情况下该海峡区域敷设的电缆上限为11根, 风险重现年限为81年。

3.3.2 电缆间距

海底电缆敷设时, 电缆间距为水深的 1.5 倍到 2 倍, 通过改变电缆敷设间距, 测试其对锚害风险的影响程度。在其他条件不变的情况下, 改变电缆间距。不同电缆间距下海底电缆的锚害风险如图 4 所示。

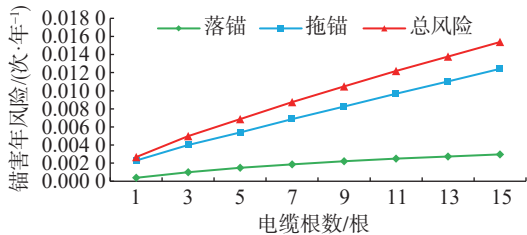


图 4 不同电缆间距下海底电缆的锚害风险

Fig. 4 Anchoring risk of submarine cable with different cable spacing

由测试结果可知, 电缆间距的变化对锚害风险影响较小。随着电缆间距的增加, 锚害风险有轻微的增加。由此可知, 电缆敷设间距对锚害概率影响不大。

3.3.3 警示距离

警示距离是一种人为设置的管控方式, 虽然不能保证在警示距离之前拖锚, 但是可以降低船舶在经过警示海域抛锚的概率, 即让 P_{human} 变大; 同时由公式 (7) 可知当警示距离越大时, 留给船舶在海底拖行裕度更大, 拖锚勾中电缆概率更低, $P_{hook,x}$ 值减小, 故在增大警示距离时, 能一定程度降低锚害风险。但同时海峡面积有限, 警示距离越大对船舶生产作业的影响越大, 管理成本越高。在其他条件不变的情况下, 改变电缆的警示距离, 评估其影响程度。不同警示距离下海底电缆的锚害风险如图 5 所示。

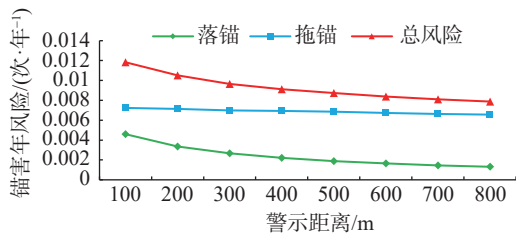


图 5 不同警示距离下海底电缆的锚害风险

Fig. 5 Anchoring risk of submarine cable under different warning distances

由测试结果可知, 警示距离对锚害风险有一定的影响。伴随着警示距离的增大, 锚害风险逐渐降低, 但降低的边际效率递减。特别是警示距离超过

600 m 后, 每增加 100 m, 所增加的抗锚害年限不足 5 年。落锚风险对警示距离相对敏感, 随着警示距离的扩大, 有一定的下降, 但是下降的速率也是递减。拖锚风险对警示距离变化不太敏感, 仅有轻微下降。

3.3.4 船舶航速

船舶航行时, 通过航速可以判断其抛锚的可能性, 同时航速也与船舶通过电缆区域的时间和抛锚后的拖行距离有关。在其他条件不变的情况下, 对通过的船速进行控制。不同船舶速度下海底电缆的锚害风险如图 6 所示。

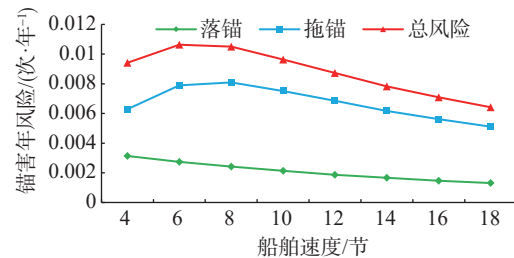


图 6 不同船舶速度下海底电缆的锚害风险

Fig. 6 Anchoring risk of submarine cable under different ship speeds

由测试结果可知, 船舶航速是影响锚害风险的重要因素。随着船舶速度的逐步增大, 锚害风险先增大后减小。船舶航速为 6~8 节时, 风险最大。拖锚风险随着船速的增加, 呈现出先增大后减小的趋势。在其他因素不变情况下, 拖锚风险主要取决于船舶在电缆区域附近落锚的风险以及船舶抛锚后拖行的距离。船速越快, 船舶在电缆区域附近落锚的风险越小, 而抛锚后拖行的距离越远, 风险越大。船速越慢, 船舶在电缆区域附近落锚的风险越大, 而抛锚后拖行的距离越近, 风险越小。当船速大于 8 节时, 船舶在电缆区域附近抛锚可能性的减小对拖锚风险起主要作用, 导致风险降低; 当船速小于 8 节时, 船舶拖行距离的减小对拖锚风险起主要作用, 导致风险降低。当船舶平均速度越大时, 落锚风险越小, 这是由于船舶在电缆区域抛锚的可能性降低。当船速趋近于零时, 拖行距离约等于零, 此时船舶的主要风险为落锚风险, 与上述模拟情况相符合。

由于该海域还可能存在渔船作业, 本模型不能充分评估低速情况下, 船舶的拖锚捕鱼、拖锚减速等情况对漂移概率的影响。船舶低速航行航行状态

下,可能导致该模型的结论不准确。在其他条件不变的情况下,可以通过要求船速尽量高于10节来降低锚害风险概率。但结合社会实际经济效应情况,要保持航道的通行效率,以及通行安全的前提下,要求船舶通过电缆区域的速度尽量高。

3.3.5 保护力度

电缆的抗锚等级按照电缆铠装不受破坏时能承受的最大冲击重量划分。本文假设当船锚的重量大于电缆的抗锚等级时电缆损伤的概率为1,当船锚的重量小于电缆的抗锚等级时电缆损伤的概率为0;那么在统计第 x 条航道内每年通过海底电缆路由区具有锚泊可能的船舶数量 N_{ship} 时,将船锚重量小于电缆抗锚等级的船舶排除,从而降低了锚害风险。

在其他条件不变的情况下,改变海峡区域敷设电缆的抗锚害程度,评估其影响程度。不同保护力度下海底电缆的锚害风险如表1所示。

表1 不同保护力度下海底电缆的锚害风险

Tab. 1 Anchoring risk of submarine cable under different extents of protection effort

等级/kg	落锚风险 $f/(次 \cdot 年^{-1})$	拖锚风险 $f/(次 \cdot 年^{-1})$	总锚害风险 $f/(次 \cdot 年^{-1})$	重现年数 $f/(年)$
0	0.002 071	0.007 041	0.009 100	109.9
1 000	0.001 983	0.006 795	0.008 766	114.1
2 000	0.001 695	0.006 002	0.007 687	130.1
3 000	0.001 326	0.004 936	0.006 256	159.8

由测试结果可知,提高电缆的抗锚害等级能够显著的减低锚害风险,但由于船舶的锚重普遍高于1 t,将抗锚害标准提高到1 t时,总风险降低并不明显。将抗锚害标准提高到2 t以及3 t时,锚害风险有明显的下降。但考虑到电缆的使用年限以及工程投入情况,采取1 t抗锚害标准电缆较为合适。

3.3.6 船舶数量

船舶通航数量与锚害概率的高低有密切的关系,在其他条件不变的情况下,考虑未来船舶数量增加对电缆锚害风险的影响程度。不同船舶数量下海底电缆的锚害风险如图7所示。

由测试结果可知,通航的船舶数量对锚害风险有显著影响,基本呈线性增长。当船舶的通航数量在2010年的基础上增加40%后,电缆锚害风险的重现年限降低为82年。如果船舶数量继续增加,则需要考虑提高电缆抗锚害等级来降低锚害风险。

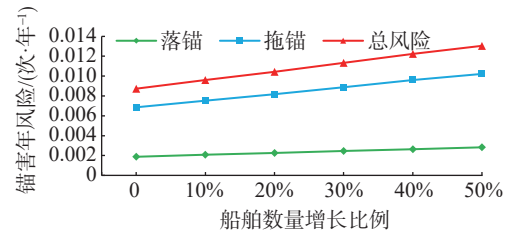


图7 不同船舶数量下海底电缆的锚害风险

Fig. 7 Anchoring risk of submarine cable under different ship number

4 结论

本文针对海底电缆锚害事故,分别对单根电缆和多根电缆的抛锚风险和拖锚风险进行了建模计算,并对锚害事故的影响因素进行了重要性分析,提出了一些控制风险的方法。通过仿真计算可以得出如下结论:

1) 由测试结果可知,海底电缆敷设的根数是影响其锚害风险的重要因素,随着电缆根数的增加,电缆的锚害风险也显著增加。

2) 警示距离是一种人为设置的管控方式,设置合理的可以降低船舶在经过警示海域抛锚的概率,即让 P_{human} 变大,同时当警示距离越大时,留给船锚在海底拖行裕度更大,拖锚勾中电缆概率更低。随着警示距离的增大,海底电缆锚害风险逐渐降低,但降低的边际效率递减。其中,落锚风险对警示距离相对敏感,随着警示距离的扩大,落锚风险逐渐降低,但是下降的速率呈递减趋势。拖锚风险对警示距离变化不太敏感,仅有轻微下降。

3) 随着船舶速度的增大,锚害风险呈现先增加后降低的趋势。船舶航速为6~8节时,电缆锚害风险最大。

参考文献:

- [1] 黄小卫,吴聪,郭强,等. 海南联网工程500 kV海底电缆检测水下遥控机器人的关键功能设计[J]. 南方电网技术,2018,12(7):52-59.
HUANG X W, WU C, GUO Q, et al. Key functions design of remotely operated vehicle used for the inspection of 500 kV submarine cable in hainan interconnection project [J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(7): 52-59.
- [2] 陈果. 浅析我国海底电缆标准的修订方向[J]. 电线电缆, 2020(3):1-5.
CHEN G. A brief analysis of the revision direction of submarine cable standards in China [J]. Electric Wire & Cable, 2020 (3):1-5.

- [3] 王裕霜. 国内外海底电缆输电工程综述 [J]. 南方电网技术, 2012, 6(2): 26-30.
WANG Y S. Review on submarine cable projects for power transmission worldwide [J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(2): 26-30.
- [4] 赵远涛, 罗楚军, 李健, 等. 海南联网工程海底电缆风险分析 [J]. 中国电机(技术版), 2014(10): 70-73.
ZHAO Y T, LUO C J, LI J, et al. Risk analysis of submarine cable in Hainan interconnection project [J]. China Electric Power(Technology Edition), 2014(10): 70-73.
- [5] 陈政, 吕泰龙, 李晓骏, 等. 海南联网工程 500 kV 海底电缆保护区安全分析及船只抛锚信息收集综述 [J]. 机电信息, 2019(33): 32-33.
CHEN Z, LV T L, LI X J, et al. Safety analysis of 500 kV submarine cable protection area in Hainan interconnection project and summary of ship anchoring information collection [J]. Mechanical and Electrical Information, 2019(33): 32-33.
- [6] 李璇, 安晓龙, 刘建申, 等. 海底电缆在线监测技术方案研究 [J]. 机电信息, 2020(6): 61-62.
LI X, AN X L, LIU J S, et al. On line monitoring technology of submarine cable [J]. Mechanical and Electrical Information, 2020(6): 61-62.
- [7] 张振鹏, 蒙绍新, 胡翔翔, 等. 锚害对 500 kV 海底电缆结构层的影响 [J]. 高电压技术, 2020, 46(2): 1-8.
ZHANG Z P, MENG S X, HU L X, et al. Influence of anchor damage on structure layer of 500 kV submarine power cables [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 1-8.
- [8] 陈宏. 海上风电场建设对通航安全影响分析研究 [J]. 福建交通科技, 2020(4): 154-155.
CHEN H. Analysis on the influence of offshore wind farm construction on navigation safety [J]. Fujian transportation technology, 2020(4): 154-155.
- [9] 朱德高, 陈奕航, 高东明, 等. 基于大数据的海底电缆安全运行影响因素多维度分析 [J]. 自动化应用, 2019(12): 128-131.
ZHU D G, CHEN Y K, GAO D M, et al. Multi dimensional analysis on influencing factors of submarine cable safety operation based on big data [J]. Automation Application, 2019(12): 128-131.
- [10] 郝艳捧, 陈云, 阳林, 等. 高压直流海底电缆三维仿真模型简化等效研究 [J]. 南方电网技术, 2017, 11(4): 1-6.
HAO Y P, CHEN Y, YANG L, et al. Study on simplification and equivalence of 3D Simulation model of HVDC submarine cables [J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(4): 1-6.
- [11] 吴文庚. 海底电缆船舶锚害监测技术研究和应用 [D]. 福州: 福州大学, 2017.
WU W G. Research on ship anchoring damage monitoring tech-

nology and application to the submarine cable [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2017.

作者简介:



罗楚军

罗楚军 (通信作者)

1988-, 男, 湖北襄阳人, 华中科技大学硕士, 主要从事架空及电缆线路设计研究 (e-mail) lcj5577@csepedi.com。

李健

1981-, 男, 江西九江人, 副主任工程师, 华中科技大学硕士, 主要从事架空及电缆线路设计研究 (e-mail) lijian@csepedi.com。

吴庆华

1962-, 男, 湖北汉川人, 副总工程师, 主要从事架空及电缆线路研究及技术管理 (e-mail) wuqinghua@csepedi.com。

张胜峰

1993-, 男, 湖北武汉人, 工程师, 武汉大学硕士, 主要从事架空及电缆线路设计研究 (e-mail) Zsf6024@csepedi.com。

项目简介:

项目背景 随着我国国民经济和电网建设水平的不断提升, 海上风电及跨海电力联网发展空间巨大, 海底电缆工程呈现快速发展的特点。高压海底电缆的运行环境复杂, 存在多种影响其安全运行的风险。目前国内缺少规范统一的第三方风险识别、分析、评价的方法, 高压海底电缆的保护缺乏依据。在此背景下开展了《海底电缆锚害风险评估方法研究》。

项目名称 “海底电缆锚害风险评估方法研究”(40-1A-KY201419-D04)

承担单位 中南电力设计院有限公司

项目概述 项目主要对国外其他行业常风险评估方法调研; 研究在海上气象条件、船舶抛锚及拖锚对海底电缆的破坏机理, 形成海缆锚害风险分析评估模型, 基于模型计算仿真结果制定原则, 用以指导海底电缆设计规划, 降低海缆受锚害分析。

主要创新点 (1) 对抛锚击中电缆模型通过微分和全概率公式加以证明, 对拖锚击中的概率进行了理论推导, 使模型更加细化完善, 并将一根电缆被击中拓展到多根电缆, 使模型更具有通用性; (2) 运用风险分析评估模型进行仿真计算, 分析各种风险指标, 研究其内存的联系, 建立通用模型, 以预测非线性的风险指标, 使模型具有较好的通用性, 可根据实际情况, 测算各个影响因素的影响力大小, 方便进行压力测试。

(责任编辑 李辉)