

抛锚对海缆的撞击概率分析*

查苗¹,王瑛剑¹,王振宇²

(1. 海军工程大学,湖北 武汉 430033; 2. 中国人民解放军 91883 部队,山西 长治 046011)

摘要:船锚是威胁海缆的一大重要因素,为准确衡量船锚对海缆的威胁大小,提高海缆系统风险评估精准度,针对抛锚威胁的发生概率,提出了运用概率论中正态分布对其进行计算的方法,并给出了计算实例。

关键词:船锚;撞击概率;海缆系统;风险评估

中图分类号: P756.1

文献标识码: A

海缆通信是当今国际通信业务的重要组成部分,其工作状态紧密地联系着人们的正常生活。近年来海缆故障时有发生,又由于海缆维修十分复杂,耗时长达数周甚至更久,严重地影响了国际互联网和国际通话业务的正常运行,给人们生活带来极大不便,所造成的商业损失更是灾难性的。因此为保证海缆在寿命年限内正常工作,需对海缆系统的整体安全性进行有效评估,依据评估结果对海缆进行针对性防护。

影响海缆安全的因素很多,且各自影响程度不同,这就要求对其进行风险评估^[1]时需要分类进行定性或定量分析。船锚撞击损伤是海缆系统安全的主要威胁之一,建立一种合理的计算方式定量分析其影响对整个海缆系统的风险评估具有重要意义。

1 锚泊作业对海缆的威胁及其作业分类

海缆故障中,锚泊作业是其遭受破坏的一个重要因素,海缆对其设防需要相对准确的数据指导。依据风险评估方法^[2],评价锚泊作业对海缆的威胁大小,不仅要考虑锚落入海底土层的深度(风险后果),还需考虑海缆遭受船锚威胁的概率(风险概率)。建立船锚撞击海缆数学模型,可有效得出其风险概率,为风险评估提供重要数据依据。

1.1 锚泊作业对海缆的威胁

锚是船舶上必备的设备之一,其作用主要体现在船舶停泊上。船舶等泊位、遭遇大风或者装卸货物需要固定自身位置时,需将锚设备抛入海中,锚爪能够抓入海底底土,其和卧底锚链抓入底土产生的作用力能抵御水流、风等对船的作用,如此固定住船。锚的作用过程需要啮入海底底土中,且其入土越深,其产生的锚泊力越大,船才能被更好的固定住。而海缆被敷设在底土中,若埋设的深度过浅,就容易被锚损伤。

海缆受锚威胁的形式有两种:1)船锚被抛出到水下后,以一定速度下落,其动能使船

* 收稿日期:2014-10-28

作者简介:查苗(1991-),女,硕士研究生,主要从事海底光缆通信方面研究. E-mail:1074057666@qq.com

(杜素兰 编辑)

锚侵彻海缆上方的淤泥层,直接刺断海缆。船锚大小和形状、下落撞击海缆的速度、各处的海床材料不同,船锚侵彻海底淤泥的深度不同;2)船锚侵彻到海缆周围的海床中,在起锚时钩挂海缆将海缆拖断。

各种船锚在海缆铺设海域内出现的概率各不相同,对海缆造成的损害也不同。研究船锚对海缆的破坏需要考虑两方面问题:1)在海缆敷埋设计中计算海缆的铺设深度,保障海缆一定的安全性;2)对已经敷埋的海缆进行船锚灾害风险评估,指出哪些地点出现哪些尺寸的船锚对海缆构成的威胁最大,以便对一些船只的抛锚和作业海域提出限制要求。

1.2 锚泊作业分类

不同类型船舶,有各自特定的船锚,其在进行锚泊作业时也会各有不同^[3]。为提高精确性,对海缆有威胁的锚泊作业可分为钻井平台的抛锚和常规普通船舶的抛锚。另外,船舶沿正常航道航行和非航道航行,其锚泊作业对海缆的影响有明显区别,海缆敷设区在设计时是避开航道的。因此,需要对这些情形进行详细的分类,分类项如下:

1)钻井平台作业:在海缆敷设区上方或周围附近的作业^[3],细分为两种情况:

(1)施工初期进入工地时,由于操作失误发生的脱锚;(2)项目完工期间,可能发生的锚链断裂。

2)常规性一般船运主要有3种类型:

(1)油轮;(2)供给船;(3)货船、渔船。

3)船舶航行路线:

(1)正常航道航行;(2)非航道航行

2 锚作业撞击海缆的概率分析与计算

根据船舶的分类,分别讨论其概率计算模型^[4]。

1)钻井平台作业^[5]:其周边范围内锚操作频率非常高,且这种情况下的船锚都属于大型的,无论是一般性锚操作还是突发性失误锚链断裂导致锚落入海底,如果此平台附近敷设有海缆,此海缆被锚损伤的概率是非常大的,因此,在海缆工程中,为避免此类锚害威胁,海缆路由选择上会避免此类区域。其损伤概率可忽略。

2)一般类型船运:海缆路由一般会避开航道,保证离锚地一定的距离^[6]。但在特殊情况如船舶发生故障或者遇到极端天气紧急抛锚就有可能损伤海缆。其计算公式如下^[4]:

$$P_{\text{anchor}} = N \cdot P_1 \cdot P_2 \quad (1)$$

式中, P_{anchor} 为船锚撞击海缆总概率; N 为相同类型船锚数量; P_1 为船在海缆区抛锚概率; P_2 为单次抛锚作业撞击海缆的概率。

船在海缆区抛锚的概率 P_1 需通过调查统计得出,其数据随海缆所在地的船只码头、渔业状况等条件不同而有较大差异。

P_2 的计算模型如下:锚落入海底的运动过程,可类比成落物掉入海水中,其轨迹遵行一定的规律,工程上一般将其轨迹假定为是偏差角的正态分布^[7](式(2))。

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\delta}\right)^2} \quad (2)$$

式中, x 为锚在海底的触地点与抛锚点垂直投影的水平距离; $p(x)$ 为锚触地点与抛锚点垂直投影水平距离为 x 时的概率密度; δ 为横向偏移距离,与水深和漂移角度有关^[4],其

具体参考取值如表 1 及图 1 所示。

表 1 不同种类物体的角偏差

Table 1 Angular deviation of different types of body shapes

物体形状	重量/t	角度偏移/°
	<2	15
扁平状或长条状	2~8	9
	>8	5
	<2	10
箱子状或圆形	2~8	5
	>8	3
	>>8	2

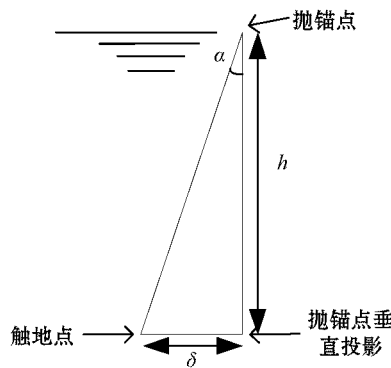


图 1 偏移角度示意图

Fig. 1 Schematic diagram of deviation angle

锚在水中的偏移量 δ 的计算见公式(3)^[3]:

$$\delta = h \cdot \tan \alpha \tag{3}$$

式中, α 为角偏差; h 为海水深度。

以抛锚点垂直投影为圆心, 半径为 r 画圆(图 2), 则锚着陆后落在该圆内的概率用公式(4)表示为

$$p(x \leq r) = \int_{-r}^r p(x) dx \tag{4}$$

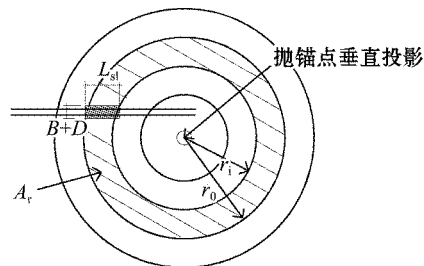


图 2 锚的撞击概率示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the probability of anchor hitting

以抛锚点垂直投影为圆心,将该海底区域划分为相同步长的圆环,锚落入每一圆环内的概率 $P_{hit,r}$ 可通过以下公式(5)得到:

$$P_{hit,r} = p(r_i \leq x \leq r_o) = p(x \leq r_o) - p(x \leq r_i) \quad (5)$$

式中, r_i 为内圆半径; r_o 为外圆半径; $p(r_i \leq x \leq r_o)$ 为锚掉落在内径 r_i 、外径 r_o 圆环内的概率; $p(x \leq r_o)$ 为锚掉落在半径为 r_o 的圆内的概率; $p(x \leq r_i)$ 为锚掉落在径为 r_i 的圆内的概率。

根据上述公式可以求出锚落入各个环形区域内的概率,再用锚落入各环内的概率除以相应环形区域的面积,可以求得各个环形区域内单位面积的撞击概率,见公式(6)^[4]:

$$P_{hit/m^2,r} = \frac{P_{hit,r}}{A_r} \quad (6)$$

式中, $P_{hit/m^2,r}$ 为各个环区单位面积的撞击概率; $P_{hit,r}$ 为锚落入每一圆环内的概率; A_r 为圆环的面积。

得出每环内单位面积受锚撞击的概率 $P_{hit/m^2,r}$ 后,锚对海缆的撞击概率即可用各圆环单位面积的撞击概率乘以该环内海缆的可能撞击面积(式(7))。

$$P_{hit,s,r} = P_{hit/m^2,r} \cdot L_s \cdot (D + B) \quad (7)$$

式中, $P_{hit,s,r}$ 为海缆在每一圆环内受到撞击损害的概率; L_s 为海缆在该圆环内的长度; D 为海缆直径; B 锚宽。

单次在海缆正上方区域抛锚,对该段区域海缆的撞击概率 P_2 可由下式求得:

$$P_2 = \sum_{i=1}^m P_{hit,s,r_i} \quad (8)$$

式中, m 为以入水点的垂直投影为圆心、以 10 m 为间隔所分圆环的数量。

3 计算实例

由锚落点的正态分布规律可知,当船在海缆正上方抛锚对海缆的撞击可能性最大,基于风险保护原则,取撞击可能性最大的情况进行计算。将锚的坠落点选在海缆正上方,如图 3:

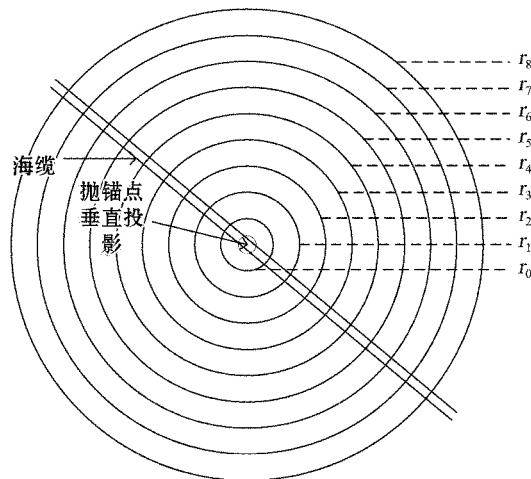


图 3 抛锚撞击海缆示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the threatening of anchor to the submarine cable

取某海域水深 100 m,选取渔船锚为例,船锚 2.1 t,锚宽为 2.02 m,海缆直径为 41 mm,每个圆环半径相差 10 m,根据表 2 偏移角取 10°,则此渔船锚在海水中下落时的侧向偏差 δ 为

$$\delta = h \cdot \tan 10^\circ = 17.63 \text{ m}$$

那么,可以根据公式(5)计算出船锚落在以抛锚点垂直投影点为圆心,10 m 为半径的圆的概率为

$$P_{\text{hit},r_0} = p(0 < x \leq 10) = \int_{-10}^{10} p(x) dx = \int_{-10}^{10} \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x}{\delta})^2} dx = 0.422 \ 94$$

则锚落入该圆内单位面积的概率为

$$P_{\text{hit}/m^2,r_0} = \frac{P_{\text{hit},r_0}}{A_{r_0}} = \frac{0.422 \ 94}{\pi \cdot 10^2} = 1.367 \ 5 \times 10^{-3}$$

锚落到内径为 r_0 ,外径为 r_1 的圆环内的概率 P_{hit,r_1} 为

$$P_{\text{hit},r_1} = p(10 < x \leq 20) - p(x < 10) = \int_{-20}^{20} \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x}{\delta})^2} dx - \int_{-10}^{10} \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x}{\delta})^2} dx = 0.314$$

r_1 环内单位面积撞击概率为

$$P_{\text{hit}/m^2,r_1} = \frac{P_{\text{hit},r_1}}{A_{r_1}} = \frac{0.314}{\pi \cdot 10^2} = 3.33 \times 10^{-4}$$

依次分别算出锚落入各个环内单位面积的概率,结果如表 2 所示。

表 2 各环形区域内单位面积船锚撞击概率

Table 2 The anchor hitting probability per unit area in different ring areas

区域/m	概 率	区域/m	概 率
$0 < x \leq 10$	$1.376 \ 5 \times 10^{-3}$	$40 < x \leq 50$	6.58×10^{-6}
$10 < x \leq 20$	$0.333 \ 3 \times 10^{-3}$	$50 < x \leq 60$	1.16×10^{-6}
$20 < x \leq 30$	$0.106 \ 9 \times 10^{-3}$	$60 < x \leq 70$	0.15×10^{-6}
$30 < x \leq 40$	$0.029 \ 8 \times 10^{-3}$	$70 < x \leq 80$	0

得出各个圆环内单位面积的撞击概率后,结合各圆环内海缆的长度,海缆直径和船锚宽度,利用式(7)可得出各环形区域内船锚撞击海缆的概率,结合式(8)即可得出锚掉落后对该区域海缆的总的撞击概率 P_2 ,结果如表 3 所示:

表 3 各环形区域内海缆受船锚撞击的概率

Table 3 The probability of submarine cables hit by anchor in different ring areas

区域/m	概 率	区域/m	概 率
$0 < x \leq 10$	66.46×10^{-3}	$40 < x \leq 50$	31.98×10^{-5}
$10 < x \leq 20$	16.20×10^{-3}	$50 < x \leq 60$	5.64×10^{-5}
$20 < x \leq 30$	5.20×10^{-3}	$60 < x \leq 70$	0.71×10^{-5}
$30 < x \leq 40$	1.45×10^{-3}	$70 < x \leq 80$	0

由以上公式计算可得出,船在海缆正上方抛锚时,锚撞击到海缆的总概率为 8.969×10^{-2} 。结合该类型船锚在此区域内的抛锚频率,利用式(1)便可得出该区域海缆受此类船锚威胁的总概率。

5 结 语

本文提出了利用概率论中正态分布模型对抛锚撞击海缆进行概率计算的方法,并通过一个计算实例,有效得出了船锚撞击到海缆的总概率的具体数值,为海缆系统风险评估提供了数字依据。该方法提高了评估结果的准确度,对指导海缆是否需要对该类型的船锚进行防护有重要参考价值。

参考文献:

- [1] DNV-RP-F107 Recommended Practice[S]. Norway: Det Norske Veritas, 2001.
- [2] 姚宣德,王梦恕. 地下工程风险评估准则分析与研究[J]. 中国工程科学, 2009, 11(7): 86-91.
- [3] 宣凯. 抛锚作业对海底管线损害研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
- [4] 张磊. 海底管线关于锚泊作业的量化风险评估[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [5] 陶冉冉, 闰相帧, 杨秀娟, 等. 浅析安全评估在海洋平台上的应用[J]. 石油化工安全环保技术, 2011, 27(1): 50-51.
- [6] ALLAN P G. Selecting appropriate cable burial depths[C]// IBC Conference on Submarine Communication, Cannes, France: [s. n.], 1998.
- [7] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.

Probability Analysis of Anchor Hitting to Submarine Cables

ZHA Miao¹, WANG Ying-jian¹, WANG Zhen-yu²

(1. *Naval University of Engineering*, Wuhan 430033, China;

2. *91883 Army of PLA*, Changzhi 046011, China)

Abstract: Anchoring is an important factor threatening submarine cables. In order to measure accurately the threatening of anchor to submarine cables and to improve the accuracy of the risk assessment of submarine cable system, it is proposed that the normal distribution in probability theory can be applied for the calculation of the occurrence probability of anchor threatening. Such a calculation example is presented.

Key words: anchor; hitting probability; submarine cable system; risk assessment