

近海捕捞作业区海底管线的定量风险评估

孙伟¹, 刘帆², 刘丽丽¹

(1. 青岛黄海学院, 山东 青岛 266427; 2. 海洋石油工程(青岛)有限公司, 山东 青岛 266520)

摘要:海底管线是海洋油气资源开发和利用的生命线。近海捕捞作业区遍布着纵横交错的海底管道网,且不断受到来自近海捕捞渔船的抛锚碰撞、拖网撞击及拖拽威胁,近年来频繁发生近海区海底管线的受损事故。研究近海捕捞作业对海底管线的影响,开展海底管线在捕捞作业方面的风险评估是十分必要的。针对近海捕捞作业对海底管线的两种损伤情况作概率计算和严重度分析,建立风险概率和损害等级的关系,得到风险评估矩阵,探讨近海捕捞作业区海底管线的定量风险评估方法。此方法可探讨的概率和严重度计算方法对近海区海底管线的风险评估具有一定的参考价值。

关键词:海底管线;捕捞作业;撞击;拖拽;风险评估

中图分类号:P754

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2017)04-0067-06

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2017.04.009

我国海洋油气资源开发目前大都集中在近海,海底铺设大量输送油气海底管线,随着海底管线的不断延伸,近海形成了纵横交错的海底管线网络体系,海底管线的安全与否直接影响海洋生物环境和海洋油气生产的安全。海底管线面临的风险主要来源于碰撞、腐蚀、疲劳损伤、管线稳定性等,来自渔区捕捞作业的碰撞是最主要的损伤原因。近海捕捞对海底管线的损伤主要有两个方面:渔船抛锚对海底管线的碰撞;在拖网过程中对海底管线的撞击及拖拽。两种情况都有可能对海底管线造成严重的损伤,甚至造成油气泄露,为保障海底石油管线的安全,有必要对海底管线在捕捞作业方面的风险进行评估。

1 抛锚对海底管线的碰撞

1.1 锚撞击海底管线的概率

渔船进入海底管线上方水域发生事故性抛锚或捕捞作业抛锚都有可能撞击到海底管线,锚撞击管线的概率可以表示为

$$P_{\text{anch}_i} = N_i \times P_{i1} \times P_{i2}, \quad (1)$$

式中, P_{anch_i} 为第 i 个锚脱锚撞击海底管线的概率; N_i 为第 i 个锚的抛锚次数; P_{i1} 为由于误操作第 i 个锚脱锚的概率, $P_{i1} = 2 \times 10^{-4}$; P_{i2} 为第 i 个锚脱锚后掉落在管线上(裸露)或管线上方(填埋)的概率; i 为锚的编号。

P_{i2} 可以采用如下方法计算:先求解渔船抛锚落在一定范围内的概率,再根据该区域内海底管线的布置情况求解撞击管线的概率^[1]。

锚坠落后在海水中发生漂移,设漂移服从正态分布,其概率密度函数:

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x}{\delta})^2}, \quad (2)$$

式中, $P(x)$ 为坠落锚在与入水点垂直投影位置距离为 x 处着陆的概率; x 为海底着陆点与坠落点的水平距

收稿日期:2016-08-28

资助项目:青岛黄海学院校级课题——新型 Spar 平台的水动力性能研究(2015dxkj20)

作者简介:孙伟(1987-),女,硕士,主要从事船舶与海洋工程方面的教学与研究。E-mail:sw_0121@126.com

(陈靖 编辑)

离(m); δ 为侧向偏移量(m); δ 与水深和漂移角有关, $\delta = d \tan \alpha$, 且 α 一般取 5° 。

因此, 坠落锚击中海床上与坠入点垂直投影位置距离小于 r 区域内的概率:

$$P_{(x \leq r)} = \int_{-r}^r P(x) dx \quad (3)$$

以坠落点为圆心, 以 10 m 为步长递增画一系列的同心圆, 如图 1 所示, 将评估区域划分为一系列圆环, 计算出每个环内单位面积的撞击概率, 然后乘以管线在此圆环内的投影面积, 就可以得到坠落锚与此段管线的撞击概率。将所有撞击概率求和, 就可以得到锚坠落后撞击海底管线的概率 P_{i2} [2]。

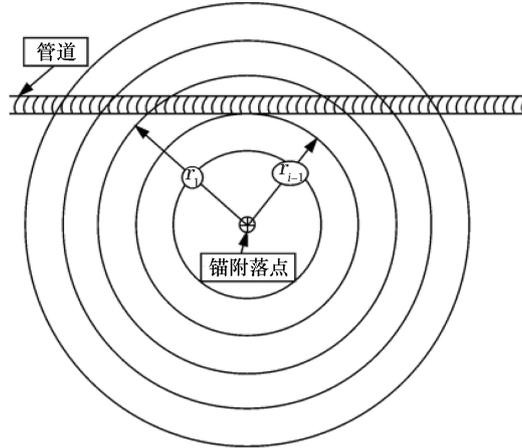


图 1 锚坠落后海底位置分布

Fig.1 Distribution of the positions of anchor falling down to the seafloor

总的撞击概率:

$$P_{\text{anch}} = \sum_{i=1}^n P_{\text{anch}_i} \quad (4)$$

式中, n 为渔船抛锚个数。

1.2 抛锚撞击海底管线的损害程度分析

根据 Ellinas 和 Warker 对海洋损伤石油管线的研究 [3], 可用下面公式表示撞击荷载:

$$P = K \times m_p \times \sqrt{d/D} \quad (5)$$

式中, d 为撞击点处损伤深度; $K = 150$; m_p 为管线壁的塑性瞬时能量; D 为管线直径。

离开撞击点的距离用 x 表示, 损伤的局部深度 d_x 计算公式:

$$d_x = \frac{DP^{2-1.3x/D} e}{(m_p \times K)^2} \quad (6)$$

由试验可知, 自重为 W_a 的锚, 当在深水中不用锚机刹车刹减出链速度的情况下自由抛锚时, 其下降的最高速度即最终触底前速度 v_a 可由试验公式计算 [4]:

$$v_a = 4.7 \times \sqrt[6]{W_a} \quad (7)$$

锚的动能为 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$, 动量 $p = mv$ 。若锚与海底管线做完全非弹性碰撞, 动量将全部转换为管线变形能量, 管线所受的损伤程度可由锚重 W_a 反映。

2 拖网作业对海底管线的撞击及拖拽

拖网作业根据水深不同分为 3 种: 上层拖网、中层拖网和底层拖网。其中只有底层拖网才会对海底管线

造成损伤。

2.1 拖网撞击海底管线的概率

随着捕鱼设备的改进和鱼群的密度变化。拖网撞击管线的概率也在不断变化,但主要还是考虑下面 3 个方面的内容:在相应区域内渔船的密度;相对于海底管线拖网的拉拽走向;不同拖网设备的尺寸。

拖网撞击到海底管线的概率,可以表示为:

$$f_{\text{tmp}} = n_g \times I \times V \times \alpha \times \cos \varphi, \quad (8)$$

式中, f_{tmp} 为每千米管线的年撞击频率; n_g 为每艘渔船拖网板或梁拖的个数; I 为渔船密度; V 为渔船速度; α 为渔区内可能遭受干扰的海底管线的长度与渔区内纵管线的总长之比; φ 为主流航向与管线法线方向的夹角, $\cos \varphi$ 可用统计信息代替。

2.2 拖网撞击海底管线的损害程度分析

拖网板撞击能量可用下式表示^[5]:

$$E_s = R_{fs} \times \frac{1}{2} m_t (C_h V)^2, \quad (9)$$

式中, m_t 为拖网板的质量; C_h 为影响系数; V 为拖船航速; R_{fs} 为折减系数,依赖于管线直径和土壤类型。

另外应该考虑由流体附加质量引起的能量冲击 E_a ,那么海底管线或其防护层所承受的撞击能量保守的估计为 $E_{loc} = \max\{E_a, E_s\}$ 。

2.3 拖网对海底管线产生拖拽的概率

渔船捕捞中的拖网作业对海底管线产生拖拽是上述撞击事件的并发事件,可用下面公式表示:

$$P_{tz} = f_{\text{tmp}} \times \kappa, \quad (10)$$

式中, f_{tmp} 为每千米管线的年撞击频率; κ 是经验系数,与拖网水深 h 、管线直径 D 有关。

2.4 拖网对海底管线产生拖拽的损害分析

拖网对海底管线产生的水平拉力 F_p :

$$F_p = C_F \times V (m_t \cdot k_w)^{1/2}, \quad (11)$$

式中, C_F 为经验系数; k_w 为绞索强度。

拖网拖拽时间:

$$T_p = C_T \times C_F (m_t \cdot k_w)^{1/2} + \delta_p / V, \quad (12)$$

式中, C_T 为拖拽时间系数; δ_p 为位移。

由上述两物理量可求出管线有效轴向力和管线曲率极限。

3 风险评估矩阵

在对渔船抛锚和拖网作业对海底管线产生的概率和损害分析后,进行风险评估综合分析,建立风险概率和损害等级的关系,对近海捕捞区的海底管线进行定量风险评估。

海底管线发生风险的概率等级^[6]见表 1。海底管线发生风险的损害严重程度等级见表 2。建立海底管线风险矩阵见表 3。

表 1 海底管线风险概率等级

Table 1 Risk probability grades of the submarine pipelines

等级值	等级	年频率(POF)	定性描述
1	可忽略	$< 10^{-5}$	频率低至事件可以忽略
2	低	$10^{-5} \sim 10^{-4}$	事件很少发生
3	中度	$10^{-4} \sim 10^{-3}$	事件大约每年一次
4	高	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	事件可能在管道的生命周期里发生 (如百年一遇的风暴)
5	可能失效	$> 10^{-2}$	事件很可能发生

表 2 海底管线风险损害严重程度等级

Table 2 Damage level grades of the submarine pipelines

等级值	损害程度	凹陷/直径	定性描述
1	轻微损伤	$< 5\%$	此类损伤既不需要修理也不会产生泄漏
2	中等损伤	$5\% \sim 10\%$	此类损伤需要修理,但不会导致管线内部物质泄漏
3	严重损坏	$10\% \sim 20\%$	此类损伤会导致管线内部物质泄漏

表 3 海底管线风险矩阵

Table 3 Risk matrix of the submarine pipelines

概 率	严重度(凹陷/直径)/%		
	轻微损伤(< 5)	中等损伤($5 \sim 10$)	严重损坏($10 \sim 20$)
可忽略($< 10^{-5}$)	可接受	可接受	可接受
低($10^{-5} \sim 10^{-4}$)	可接受	合理可行降低区	合理可行降低区
中度($10^{-4} \sim 10^{-3}$)	可接受	合理可行降低区	不可接受
高($10^{-3} \sim 10^{-2}$)	合理可行降低区	不可接受	不可接受
可能失效($> 10^{-2}$)	不可接受	不可接受	不可接受

通过式(2)、式(7)和式(9)可以计算出抛锚拖网的撞击拖拽的概率,通过损伤分析可以得出海底管线发生风险的损害严重程度等级,参照表 3 建立概率与损伤度的关系,得到定量风险矩阵,从而判定近海捕捞作业区海底管线的风险水平是否可以接受。

4 实例计算

4.1 抛锚碰撞计算

以渤海湾附近的捕鱼船为例进行计算,渔船所经过的水域的最大深度为 60 m,最大潮流流速为 2.5 m/s,渔船锚链长度为 120 m,锚重为 8.7 t。据公式(2)计算得:

$$P(x \leq r) = \int_{-r}^r \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x}{\delta})^2} dx = \int_{-r}^r \frac{1}{\sqrt{2} \times 3.14 \times 60 \tan 5^\circ} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x}{60 \tan 5^\circ})^2} dx = \int_{-r}^r 0.076 e^{-0.0184x^2} dx, \quad (12)$$

抛锚点与海底管道的距离越远,锚撞击管道的概率就越小,海底管道受到锚撞击的风险就越小。

取 $r=50$,总的撞击概率 P_{anch} :

$$P_{\text{anch}} = \sum_1^n P_{\text{anch}_i} = 1 \times 1 \times \int_{-50}^{50} 0.076e^{-0.018 \cdot 4x^2} dx < 0.01, \quad (13)$$

认为抛锚撞击管线为小概率事件,概率等级为 4。当 $r \geq 50$ 时,概率趋于 0。

若渔船抛锚能够撞击到管线,其下降的最高速度即最终触底前速度为

$$v_a = 4.7 \times \sqrt[6]{W_a} = 20.94 \text{ m/s}, \quad (14)$$

这时锚具有的动能:

$$E_k = 1/2mv^2 = 0.5 \times 7\,800 \times 20.94^2 = 1\,710.1 \text{ kJ}. \quad (15)$$

在这种情况下若锚与海底管线做完全非弹性碰撞,管线所受的损伤非常大,会造成事故性的严重损伤,根据表 3 可知,当 $P \geq 0.01$ 或产生严重损伤时,都会产生不可接受的风险,根据评估分析可知,应远离管线作业区进行捕鱼,可在管线区 50 m 以内设置警戒线。

4.2 拖网计算

渤海湾捕鱼船所用到最大的拖网板重 3 500 kg,拖行速度为 2.8 m/s,整个管线线路布置范围内渔船密度为每 1 000 km² 住 4 只,主要拖航方向与管线成 70°。全部管线长度内都有可能遭受拖网荷载。拖网撞击速度系数 0.85,折减系数 0.55。海底管线外径 356 mm,壁厚 13 mm。管线钢体材料数据:钢材品质为 X65,额定最小屈服应力 448 N/mm²,防护层为 40 mm 水泥。

每小时撞击 1 km 海底管线的概率为

$$f_{\text{tmp}} = n_g \times I \times V \times \alpha \times \cos \varphi = 2 \times \frac{0.4}{1\,000} \times 2.8 \times 3.6 \times 1 \times \cos(90^\circ - 70^\circ) = 0.007\,5 < 0.01, \quad (16)$$

认为拖网撞击管线事件可能在管道的生命周期里发生,概率等级为 4。

海底管线或其防护层所承受的撞击能量保守的估计为

$$E_s = R_{fs} \times \frac{1}{2} m_t (C_h V)^2 = 0.55 \times \frac{1}{2} \times 3\,500 \times (0.85 \times 2.8)^2 = 5.5 \text{ kJ}. \quad (17)$$

进行动态模拟,模拟分析结果:撞击力 380 kN,能量吸收 3.3 kJ,永久凹陷 2.1%。估计最小撞击次数为 4 次。渔船捕捞中的拖网作业对海底管线产生拖拽的概率 $P_{tz} = f_{\text{tmp}}$,是并发事件。通过上述计算结果和动态分析结果可知,管线最大经受 4 次撞击和拖拽。撞击 4 次概率 $p = 0.000\,033$,为很少发生事件,概率等级为 2。将数据放入表 3 风险矩阵可知,拖网 1 次撞击管线的风险位于合理可行降低区,4 次撞击拖拽管线的风险位于可接受区。

5 结 语

海底管线的安全直接关系到海洋环境和石油生产的安全,利用概率分析和损伤严重度估计的办法可以有效地降低近海捕捞作业对管线的损伤风险。本研究对研究海底管线在近海捕捞作业方面的风险评估有一定的参考价值,同时通过分析可知,合理铺设管线、减少作业区捕鱼、定期维修检测等方法可有效预防风险的发生。

参考文献 (References):

- [1] LIU X T, ZHANG L, GUO Z B. Research on probability of collision assignment to submarine pipeline[J]. Petroleum Engineering Construction, 2005(6): 31-33. 刘学涛,张磊,郭振邦. 锚泊作业对海底管道撞击概率的研究[J]. 石油工程建设, 2005(6): 31-33.
- [2] WANG Z M, MI X L, ZHANG C. Study on the impact of construction ship breaking on submarine pipeline[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2010(6): 93-95. 王再明,米小亮,张超. 施工船舶抛锚作业对海底管道的影响研究[J]. 交通信息与安全, 2010(6): 93-95.

- [3] ELLINAS C P, WALKER A C. Damage on offshore tubular bracing members[J]. [s. n.], 1983, 73(40): 3337-3338.
- [4] TAN J, LI H, TIAN BO. Discussion on damage to submarine pipeline caused by accidental breaking[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2008(1): 142-144.
- [5] XIAO H. Quantitative risk assessment of submarine pipeline for trawling[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. 肖辉. 海底管线关于拖网作业的定量风险评估[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [6] Det Norske Veritas. Cathodic protection of submarine pipelines by galvanic anodes[M/OL]. (2016-08-20). <https://wenku.baidu.com/view/916693eb998fcc22bcd10d40.html>.
- [7] LOU M, M H Q. Analysis of dynamic response of submarine suspended pipeline based on LS-DYNA[J]. *Marine Science Bulletin*, 2015, 17(1): 34-41. 娄敏, 明海芹. 基于 LS-DYNA 海底悬空管道受坠物碰撞动力响应分析[J]. *海洋通报*, 2015, 17(1): 34-41.

Quantitative Risk Assessment of Submarine Pipelines in the Inshore Fishing Areas

SUN Wei¹, LIU Fan², LIU Li-li¹

(1. *Qingdao Huanghai College*, Qingdao 266427, China;

2. *China Offshore Oil Engineerinl (Qingdao) Co., Ltd*, Qingdao 266520, China)

Abstract: Submarine pipelines are the lifeline of development and utilization of marine oil and gas resources. The inshore fishing areas are generally crisscrossed by networks of submarine pipelines and these pipelines are frequently subjected to fishing boat anchoring collision, dragging impact and/or towing threat. Submarine pipeline damage accidents occur frequently in the inshore areas in recent years. It is therefore necessary to study the influences of inshore fishing operations on submarine pipelines and to assess the risks of submarine pipelines in fishing operations. In the present paper, both the probability and the severity are analyzed for two kinds of damage to the submarine pipelines in the inshore fishing operations, and then the relationship between the risk probability and the damage level is establish. Based on these, the risk assessment matrix is obtained and the method for quantitative risk assessment of submarine pipelines in the inshore fishing areas is discussed.

Key words: offshore pipeline; fishing operation; impact; towing; risk assessment

Received: August 28, 2016