

文章编号: 0253-2697(2014)01-146-06 DOI:10.7623/syxb201401018

深水钻井隔水管-井口系统涡激疲劳详细分析

畅元江 杨焕丽 刘秀全 刘康

(中国石油大学海洋油气装备与安全技术研究中心 山东青岛 266580)

摘要:提出基于威布尔分布的隔水管-井口系统涡激疲劳详细分析方法,根据海洋环境条件的长期统计分布特征,采用随机变量的威布尔分布理论划分涡激疲劳详细分析的工况,得到具有不同超越概率的流剖面。在此基础上,应用涡激振动疲劳分析程序 SHEAR7 计算各个流剖面对应的涡激疲劳损伤,按照其发生概率折算得出隔水管系统总的疲劳损伤。算例结合南海某油井隔水管系统设计和具体海况参数,给出了上述方法的具体应用。研究表明,采用常规三种单一剖面计算得到的涡激疲劳寿命分别为 1.95 年、0.039 年和 0.012 年,而采用基于威布尔分布的涡激疲劳详细分析得到的疲劳寿命约为 40 年。两种方法相比,由于后者更符合实际的海洋环境条件,预测隔水管-井口涡激疲劳损伤更为合理,从而可以避免过于保守的隔水管钻前设计。推荐涡激疲劳详细分析工况数量为 20~28 个。

关键词:深水钻井;隔水管-井口系统;涡激疲劳;威布尔分布;超越概率

中图分类号:TE22 **文献标识码:**A

Detailed analysis of vortex induced fatigue for deep-water drilling riser-wellhead system

Chang Yuanjiang Yang Huanli Liu Xiuquan Liu Kang

(Centre for Offshore Engineering and Safety Technology, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: A method is detailed for fatigue analysis of vortex-induced vibration (VIV) in deep-water drilling riser-wellhead systems based on the Weibull distribution. According to the long-term statistical distribution of marine environmental conditions, the load cases of detailed VIV fatigue analysis are divided by using the Weibull distribution theory of random variables, and current profiles with different probabilities of exceedance are obtained. Further, VIV fatigue damage corresponding to each current profile is calculated by using the VIV fatigue analysis program SHEAR7, and the total fatigue damage of the riser system is estimated according to the occurrence probability. A case study is then conducted for a specific application of the proposed method by combining the design of riser system and the parameters of sea conditions in an oil well in South China Sea. The results show that VIV-induced fatigue lives calculated from the three single conventional current profiles are only 1.95, 0.039, and 0.012 years, respectively, whereas that obtained by detailed fatigue analysis based on the Weibull distribution is approximately 40 years. Compared with the conventional method, the proposed method is more suitable for predicting VIV-induced fatigue damage in riser-wellhead system as it complies more with the real marine environmental conditions and avoids over-conservative riser pre-drilling design. The number of load cases recommended for detailed fatigue analysis of VIV is 20-28.

Key words: deep-water drilling; riser-wellhead system; vortex-induced vibration; Weibull distribution; exceedance probability

当海流经过处于连接状态的隔水管时往往会在其背后形成涡旋,如果涡旋周期性发放可能使隔水管系统产生涡激振动^[1]。高流速海流引起的漩涡泄放可能激励隔水管发生高阶模态振动并产生严重的疲劳损伤^[2]。涡激振动往往会导致结构共振并发生疲劳破坏,是海洋柔性体结构如隔水管、立管等设计时必须考虑的重要因素^[3]。因此,在隔水管-井口系统钻前设计阶段,需要对整个水下系统的涡激疲劳寿命进行计算,以校核隔水管-井口系统设计的合理性。

隔水管的涡激振动一直是海洋石油装备研究难点^[4]。20 世纪 60 年代, Bishop 和 Hasson 最先提出采用非线性、自激的尾流振子模型来表示作用在圆柱体上的升力^[5]; Hartlen 和 Currie 最早提出了尾流振子模型的数学表达式,以 Van Der Pol 方程的近似形式作为升力系数的控制方程,并同结构的振动方程联合求解^[6]; Benassai 和 Campanile 在 Iwan 模型的基础上加以改进,预测了顶张力立管的横向涡激振动响应^[7-8]; 后来,麻省理工学院的 Vandiver 等人开发了用

基金项目:国家重大科技专项“深水油气田开发钻井工程配套技术”(2011ZX05026-001-05)、教育部长江学者和创新团队发展计划项目(No. RT1086)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(11CX05009A)资助。

第一作者及通信作者:畅元江,男,1974 年 10 月生,1995 年毕业于石油大学(华东)机械制造工艺与设备专业,2008 年获中国石油大学(华东)机械设计及理论专业博士学位,现为中国石油大学(华东)副教授,主要从事深水钻井技术与装备、计算机辅助工程与仿真等方面的研究工作。
Email:changyj@upc.edu.cn

于隔水管疲劳寿命预测的半经验半理论程序 SHEAR7^[9], 至今在海洋钻井隔水管涡激疲劳寿命预测方面得到较多应用。孙友义针对深水钻井隔水管-井口系统涡激振动疲劳进行分析, 提出了涡激振动疲劳详细分析的计算方法^[10]。该方法的局限性在于只考虑单一的流剖面进行计算, 很可能导致计算得到的涡激疲劳过于保守。

考虑海流流速的长期统计特征满足威布尔分布, 笔者采用不同的超越概率对流剖面进行细化后得到具有不同超越概率的流剖面, 用 SHEAR7 程序对细化流剖面分别进行涡激疲劳分析, 计算具有不同超越概率流剖面下的隔水管系统疲劳损伤, 然后将各个流剖面下的疲劳损伤按照其发生概率进行折算, 最终得到隔水管-井口系统详细疲劳寿命。相对于单一剖面下的隔水管涡激疲劳损伤, 笔者提出的方法对预测隔水管-井口涡激疲劳损伤更为合理, 避免了过于保守的隔水管钻前设计, 可为深水钻井隔水管-井口系统的涡激疲劳详细分析提供参考。

1 威布尔分布与超越概率

1.1 威布尔分布

多种随机变量统计分布中, Weibull 分布是最优的分布类型^[11]。威布尔分布有三参数和两参数 2 种形式, 三参数威布尔分布的概率密度函数为:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\beta(x-\alpha)^{\beta-1}}{\theta^\beta} \exp\left[-\left(\frac{x-\alpha}{\theta}\right)^\beta\right] & x \geq \alpha \\ 0 & x < \alpha \end{cases} \quad (1)$$

三参数威布尔分布的累积分布函数为:

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-\alpha}{\theta}\right)^\beta\right] \quad x > \alpha \quad (2)$$

式中: α 为位置参数, 取值范围为 $(0, \infty)$; β 为形状参数, θ 为尺度参数。

1.2 超越概率

设 X 是一随机变量, m 是一实数, 如果 $x > m$ 则称 $X = x$ 是对 m 的一次超越, P_c 为 n 次试验中对 x 超越的概率, 简称为超越概率^[12]。超越概率与 X 累积分布函数 $F(x)$ 的关系为:

$$P_c = P[X > x] = 1 - F(x) \quad (3)$$

威布尔分布下, 超越概率为:

$$P_c = 1 - F(x) = \exp\left[-\left(\frac{x}{\theta}\right)^\beta\right] \quad x > 0 \quad (4)$$

以表面流速为随机变量的超越概率表达式为^[13-14]:

$$P_c = 1 - F(x) = \exp\left[-\left(\frac{v}{\theta}\right)^\beta\right] \quad (5)$$

式中: $v > 0$, 为表面流速, m/s。

100 年一遇的海流, 超越概率 P_c 为:

$$P_c = 1 - F(x) = \exp\left[-\left(\frac{v_h}{\theta}\right)^\beta\right] \quad (6)$$

式中: $v_h > 0$, 表示百年一遇流剖面下的表面流速, m/s。

联合式(5)和(6), 消去尺度参数, 可得超越概率为:

$$\frac{\ln P_c}{\ln P_r} = \left(\frac{v}{v_h}\right)^\beta \quad (7)$$

2 基于威布尔分布的隔水管-井口涡激疲劳详细算法

2.1 Weibull 分布曲线

假定深水钻井所在某海域的环境载荷数据如表 1。

表 1 环境参数

重现期/a	1	10	100
风暴时间/h	3.0	3.0	3.0
表面流速/(m·s ⁻¹)	1.07	1.55	2.02

在 100 年一遇环境载荷中, 平均风暴时间为 3 h, 于是表面速度 v_h 对流速均值的超越概率为: $P_c = 3.0 / (100 \times 365 \times 24) = 3.42 \times 10^{-6}$ 。为分析方便, 暂取 20 组(以 i 表示, $i = 1, 2, \dots, 20$)具有不同超越概率的流剖面作为详细疲劳分析的流剖面, 其中第一组流剖面的表面流速 $v_1 = 0$, 第 20 组流剖面表面流速 $v_{20} = v_h = 2.02$ m/s, 其他流剖面的表面流速按照线性插值进行计算。

根据相关学者研究结果, 可取威布尔分布曲线的形状参数 $\beta = 0.974$ ^[15-17]。根据每组的表面流速 v_i 、100 年一遇 v_h 和 P_c , 由式(7)计算各组流剖面的超越概率。由这 20 组表面流速和超越概率数据画出 weibull 分布曲线, 如图 1 所示。

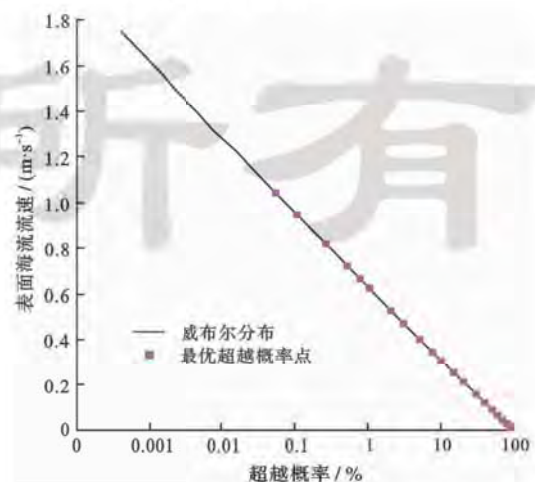


图 1 表面流速与超越概率的 weibull 分布曲线

Fig. 1 Weibull distribution of surface velocity and exceeding probability

2.2 超越流剖面

在 weibull 分布曲线上选取 20 组合适的超越概率值,计算出与这些超越概率相对应的表面流速。采用这 20 组(表面流速-超越概率)数据,并根据 1 年一遇流剖面,分别计算得到具有不同超越概率的流剖面如图 2 所示。

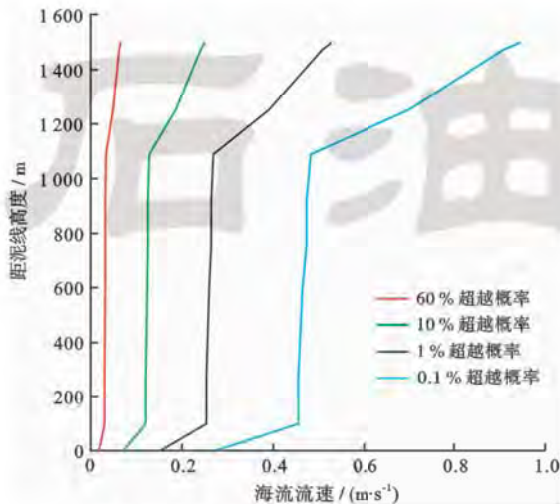


图 2 具有不同超越概率的流剖面

Fig. 2 Exceeding current profiles

2.3 超越流剖面下年度疲劳损伤

基于 20 组不同发生概率的流剖面,分别进行涡激振动分析,每一流剖面导致的疲劳损伤需按其发生概率进行折算,总疲劳损伤为各流剖面导致的疲劳损伤之和。而发生概率与相对应的超越概率有关,发生概率与超越概率各自确定方法为:

如果 $p_i = 0$, 则 $C_i = 0$;

如果 $p_i \neq 0$, 可分为以下 2 种情况: ①若 $i > 1$, 则 $C_i = P_{i-1} - P_i$; ②若 $i = 1$, 则 $C_i = 1 - P_i$ 。

式中: C_i 为发生概率, P_i 为超越概率, $i = 1, 2, \dots, 20$ 。

隔水管系统总年度疲劳损伤为:

$$D = \sum_{i=1}^{20} C_i D_i \quad (8)$$

式中, D 为总的疲劳损伤; D_i 为具有不同超越概率 P_i 的流剖面所对应的疲劳损伤。

上述即为基于威布尔分布的隔水管-井口系统涡激详细疲劳计算算法,据此方法可进行隔水管-井口系统涡激疲劳详细分析。

3 算例分析

3.1 算例描述

基于南海 1500 m 水域相关数据进行隔水管-井口涡激疲劳详细分析(隔水管串排列设计不再详细

给出),并给出常规的采用单一剖面进行计算的结果作为对比。在此基础上,研究流剖面划分数量对疲劳计算结果的影响,并根据分析结果推荐合适的工况数量。

算例所采用的环境参数见表 1,算例中 1500 m 隔水管系统配置见表 2,隔水管系统所施加的张紧力为 4.84 MN。

表 2 1500 m 钻井隔水管系统配置
Table 2 1500 m drilling riser system configuration

名称	数量	单根长度/m	距海底高度/m
分流器	1	3.202	1524.292
上部挠性接头	1	2.913	1521.090
适配短节	1	10.670	1518.177
伸缩节外筒	1	24.384	1507.507
隔水管短节	1	12.192	1473.160
外径 533.4 mm、壁厚 25.4 mm 隔水管裸单根	2	22.860	1460.968
配有最大工作水深为 762 m 浮力块的外径 533.4 mm、壁厚 25.4 mm 隔水管单根	2	22.860	1415.248
配有最大工作水深为 762 m 浮力块的外径 533.4 mm、壁厚 23.8 mm 隔水管单根	16	22.860	1369.528
配有最大工作水深为 1524 m 浮力块的外径 533.4 mm、壁厚 22.2 mm 隔水管单根	33	22.860	1003.768
外径 533.4 mm、壁厚 22.225 mm 隔水管裸单根	8	22.860	249.388
配有最大工作水深为 2286 m 浮力块的外径 533.4 mm、壁厚 22.2 mm 隔水管单根	2	22.860	66.508
隔水管底部总成/防喷器组	1	16.288	20.788
高压井口	1	4.500	4.500

3.2 算例计算结果

采用笔者提出的涡激疲劳详细分析方法对该系统进行计算,得到总的年度疲劳损伤如图 3 所示。图 3 中相对位置是指隔水管柱最底端以上绝对高度与隔水管柱总长的比值,1.0 表示隔水管柱最顶端,0 表示隔水管柱最底端(下同)。

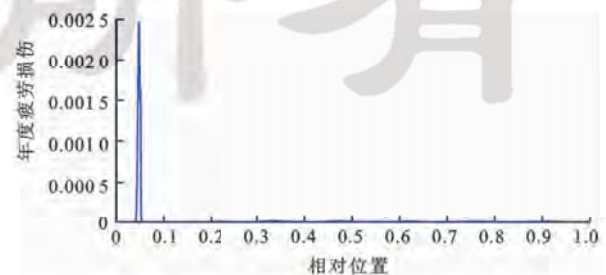


图 3 总的年度疲劳损伤

Fig. 3 Total annual fatigue damage

采用超越概率方法计算隔水管-井口与导管系统的涡激疲劳损伤,由图 3 可知系统的最大年度疲劳损

伤为0.0025,取安全系数为10,则整个水下系统的疲劳寿命最短为 $1/(10 \times 0.0025) = 40$ 年。

若只采用台风情况下1年一遇流剖面(参数见图4)作为涡激疲劳分析的单一剖面,计算得到系统在常规单一剖面下的年度疲劳损伤如图5所示。

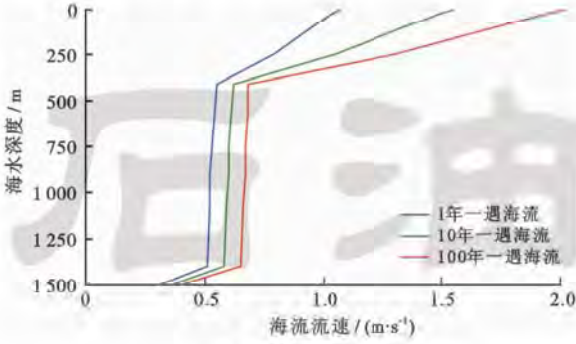


图 4 常规流剖面

Fig. 4 Conventional current profile

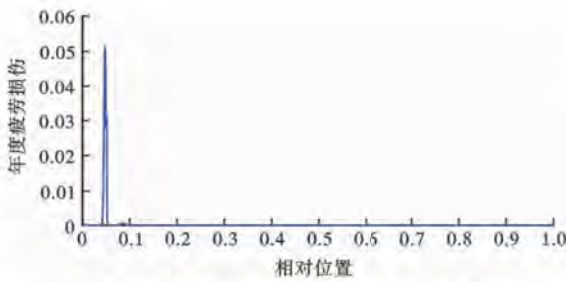


图 5 常规海流 1 年一遇年度疲劳损伤

Fig. 5 Annual fatigue damage under conventional one year return period current

由图5可知,隔水管-井口系统最大年度疲劳损伤为0.0514,取安全系数为10,则系统的疲劳寿命最短仅为 $1/(10 \times 0.0514) = 1.95$ 年。

采用上述计算方法,分别计算常规10年一遇和百年一遇单一剖面下的系统年度疲劳损伤和疲劳寿命。由分析计算结果可知,10年一遇流剖面下的隔水管-井口系统最大年度疲劳损伤为2.57,系统的疲劳寿命最短为 $1/(10 \times 2.57) = 0.039$ 年;100年一遇流剖面下隔水管-井口系统最大年度疲劳损伤为8.59,则系统的疲劳寿命最短为 $1/(10 \times 8.59) = 0.012$ 年。

由上述对比可知,采用笔者提出的基于威布尔分布的涡激疲劳详细计算方法,计算得到的隔水管-井口与导管系统的涡激疲劳寿命约为40.0年,而采用3种不同单一剖面计算的系统疲劳寿命分别是1.95年、0.039年和0.012年。由于这些计算结果过于保守,往往在钻前设计阶段即要求对隔水管管串排列、张紧力等进行重新设计和分析以减小其涡激疲劳损伤预测值。但在实际中,由于海流流速的长期统计特征满足

威布尔分布,故采用超越概率方法计算的涡激疲劳寿命更加符合实际情况,这就避免发生单一剖面情况下计算结果过于保守问题。

3.3 工况数量划分

下面研究流剖面划分数量对涡激疲劳详细分析结果的影响。分别分析流剖面数量为8、12、16、20、24和28个时系统的疲劳损伤,并根据分析结果推荐最优的涡激详细疲劳流剖面划分数量。

分别对上述不同流剖面数量下的隔水管-井口系统涡激疲劳损伤进行详细计算,各个超越概率流剖面按其发生概率进行折算,计算得到系统总的年度疲劳损伤分别如图6至图11所示。

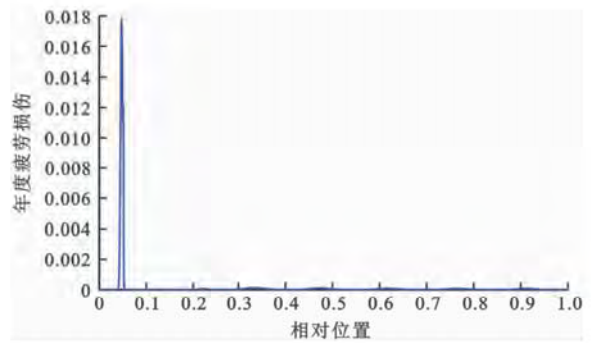


图 6 工况数量为 8 时的疲劳损伤

Fig. 6 Fatigue damage under 8 load cases

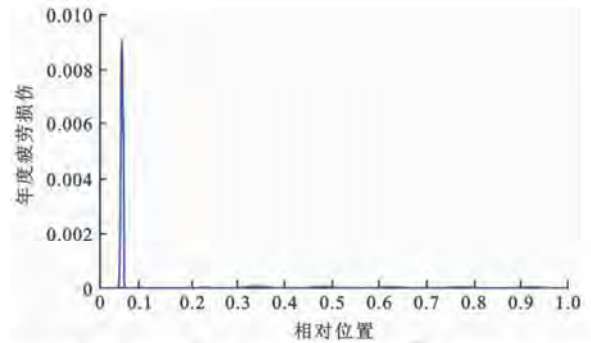


图 7 工况数量为 12 时的疲劳损伤

Fig. 7 Fatigue damage under 12 load cases

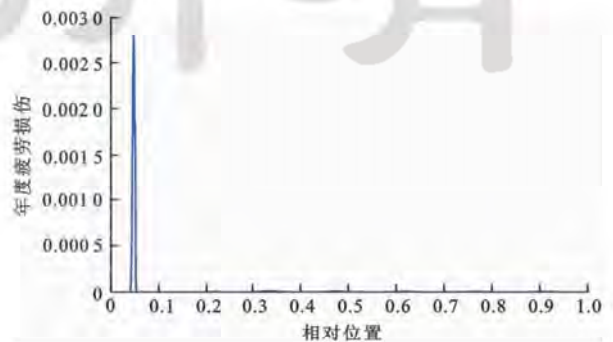


图 8 工况数量为 16 时的疲劳损伤

Fig. 8 Fatigue damage under 16 load cases

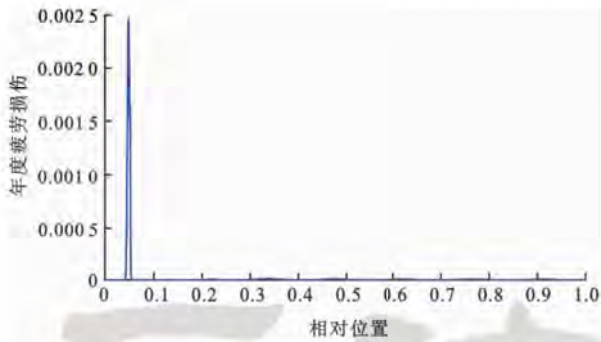


图9 工况数量为20时的疲劳损伤

Fig. 9 Fatigue damage under 20 load cases

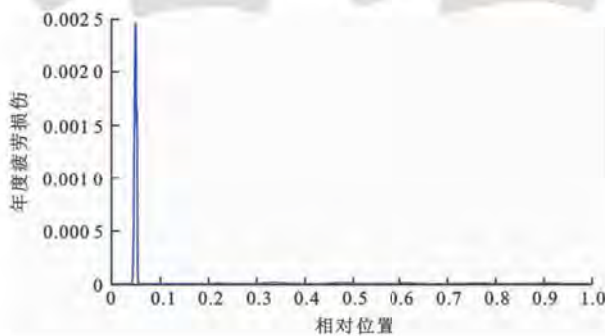


图10 工况数量为24时的疲劳损伤

Fig. 10 Fatigue damage under 24 load cases

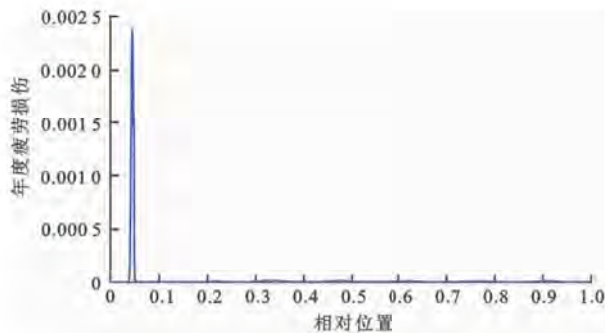


图11 工况数量为28时的疲劳损伤

Fig. 11 Fatigue damage under 28 load cases

根据上述计算结果,可以得出在不同工况数量下的系统疲劳损伤和疲劳寿命对比见表3。

表3 不同工况数量下的疲劳损伤和疲劳寿命

Table 3 Fatigue damage and fatigue life under different numbers of load cases

工况数量/个	年度疲劳损伤	系统疲劳寿命/a
8	0.0179	5.28
12	0.0091	11.00
16	0.0028	35.71
20	0.0025	40.00
24	0.00249	40.16
28	0.0024	41.67

由表3可知,当涡激疲劳工况划分数量小于20时,随着工况数量的增加隔水管-井口系统的涡激疲劳损伤逐渐减小,对应的疲劳寿命逐渐增加,表明计算结果随着疲劳工况数量的增加趋于合理;当工况数量超过20时,隔水管-井口与导管系统的涡激疲劳损伤趋于稳定,疲劳寿命大约为40年。于是根据笔者的研究结果,进行深水钻井隔水管系统涡激疲劳详细分析时,基于威布尔分布考虑不同发生概率的流剖面数量大于20即可,数量太多会造成计算效率低且计算精度并未提高,推荐数量为20~28个。

4 结论

(1) 提出基于威布尔分布的深水钻井隔水管-井口系统涡激疲劳详细分析方法,根据海洋环境条件的长期统计分布特征,采用随机变量的威布尔分布理论划分涡激疲劳详细分析的工况,得到具有不同超越概率的流剖面。应用涡激振动疲劳分析程序 SHEAR7 计算各个流剖面对应的涡激疲劳损伤,按照其发生概率折算得出隔水管系统总的疲劳损伤。

(2) 采用超越概率算法计算得到的隔水管-井口系统涡激疲劳寿命约为40年,而在1年一遇、10年一遇和100年一遇3种不同单一剖面下,其涡激疲劳寿命仅为1.95年、0.039年和0.012年。这是由于海流流速的长期统计特征满足威布尔分布,基于威布尔分布考虑不同超越概率来细化流剖面,形成的详细涡激疲劳计算工况更加符合实际,采用该方法计算涡激疲劳损伤可以避免采用单一剖面导致的隔水管-井口系统钻前设计过于保守的问题。

(3) 当涡激疲劳工况划分数量小于20时,随着工况数量的增加隔水管-井口系统的涡激疲劳损伤减小;当工况数量超过20时,隔水管-井口与导管系统的涡激疲劳损伤趋于稳定。根据笔者的研究结果,在进行深水钻井隔水管-井口系统涡激疲劳详细分析时,流剖面划分数量大于20即可,数量太多会造成计算效率低且计算精度并未提高,推荐数量为20~28个。

参考文献

- [1] 孙友义,陈国明,畅元江.深水铝合金隔水管涡激振动疲劳特性[J].中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(1):110-104.
Sun Youyi, Chen Guoming, Chang Yuanjiang. Vortex-induced vibration fatigue characteristic of deepwater aluminum alloy riser [J]. Journal of China University of Petroleum, Edition of Natural Science, 2008, 32(1): 110-104.
- [2] Peter J D, Robinson R, Metcalfe T J, et al. Fatigue evaluation of drilling risers for harsh environments and ultra deepwater developments to allow optimised riser life and inspection plans[R].

- SPE 92696, 2005.
- [3] 畅元江, 陈国明, 许亮斌, 等. 超深水钻井隔水管设计影响因素[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(4): 523-528.
Chang Yuanjiang, Chen Guoming, Xu Liangbin, et al. Influential factors for the design of ultra-deepwater drilling risers[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(4): 523-528.
- [4] 孙友义. 深水钻井隔水管强度评价方法及应用研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2009.
Sun Youyi. Strength assessment for deepwater drilling riser and engineering application[D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2009.
- [5] Bishop R E D, Hassan A Y. The lift and drag forces on a circular cylinder oscillating in a flowing fluid[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1963, 277(1368): 51-75.
- [6] Hartlen R T, Currie I G. Lift-oscillator model of vortex-induced vibration[J]. Journal of the Engineering Mechanics, 1970, 96(5): 577-591.
- [7] Benassai G, Campanile A. A prediction technique for the transverse vortex-induced oscillations of tensioned risers[J]. Ocean Engineering, 2002, 29(14): 1805-1825.
- [8] 毛国栋, 赵英轩, 戴西行. 深水立管涡激振动非线性响应及疲劳分析[J]. 中国水运, 2010, 10(5): 97-100.
Mao Guodong, Zhao Yingxuan, Dai Xixing. Vortex-induced vibration nonlinear response and fatigue analysis of deepwater risers[J]. China Water Transport, 2010, 10(5): 97-100.
- [9] 谢彬, 段梦兰, 秦太验, 等. 海洋深水立管的疲劳断裂与可靠性评估研究进展[J]. 石油学报, 2004, 25(3): 95-100.
Xie Bin, Duan Menglan, Qin Taiyan, et al. Advance of research on fatigue fracture and reliability assessment of deepwater risers[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(3): 95-100.
- [10] 孙友义, 鞠少栋, 蒋世全, 等. 超深水钻井隔水管-井口系统涡激振动疲劳分析[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 1050-1054.
Sun Youyi, Ju Shaodong, Jiang Shiquan, et al. Fatigue analysis of the vortex-induced vibration in a drilling riser-wellhead system in ultra deepwater[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(5): 1050-1054.
- [11] 谢里阳, 王正, 周金宇, 等. 机械可靠性基本理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
Xie Liyang, Wang Zheng, Zhou Jinyu, et al. Fundamental theory and methods for mechanical reliability [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [12] 赵伟, 杨永增, 于卫东, 等. 长期极值统计理论及其在海洋环境参数统计分析中的应用[J]. 海洋科学进展, 2003, 21(4): 471-475.
Zhao Wei, Yang Yongzeng, Yu Weidong, et al. Long-term extreme value statistics theory and its application to the marine environmental parameter statistics and analysis[J]. Advances in Marine Science, 2003, 21(4): 471-475.
- [13] Bady M, Kato S, Ishida Y, et al. Application of exceedance probability based on wind kinetic energy to evaluate the pedestrian level wind in dense urban areas[J]. Building and Environment, 2011, 46(9): 1834-1842.
- [14] Zhen Bu, Kato S, Ishida Y, et al. New criteria for assessing local wind environment at pedestrian level based on exceedance probability analysis[J]. Building and Environment, 2009, 44(7): 1501-1508.
- [15] 方国清. 三参数 Weibull 分布的参数估计[J]. 海洋科学, 1990(6): 1-8.
Fang Guoqing. Parameter estimation of the weibull distribution with three parameters[J]. Marine Sciences, 1990(6): 1-8.
- [16] 包小庆, 刘志强, 吴水忠, 等. 双参数威布尔分布函数的确定及曲线拟合[J]. 能源与环境, 2007(4): 8-9.
Bao Xiaoqing, Liu Zhiqiang, Wu Yongzhong, et al. Determination and curve fitting function of two parameter Weibull distribution [J]. Energy and Environment, 2007(4): 8-9.
- [17] 张玉斌, 于海春. 潜水电泵机组可靠性研究[J]. 石油学报, 2003, 24(4): 103-107.
Zhang Yubin, Yu Haichun. Reliability of electrical submersible pumping unit[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(4): 103-107.

(收稿日期 2013-07-22 改回日期 2013-11-10 编辑 宋宁)

版权所有