

工艺管道流激振动疲劳风险计算分析

陈永涛, 曹 磊, 朱睿峰

(启东中远海运海洋工程有限公司 模块事业部, 江苏 南通 226236)

摘 要: 为了降低工艺管道流体诱发振动导致的疲劳风险, 借鉴英国 HSE EI 指南的方法原理, 综合考虑流体流动状态、物性参数、管道布置等因素, 通过引入疲劳风险值(ROF)量化评估流激振动疲劳风险, 从而确定分析计算工艺管道流体诱发振动导致疲劳风险的评估方法, 并对潜在疲劳风险较大的管线给出对应的优化改进措施, 以减轻及预防流激振动疲劳。

关键词: 工艺管道; 流激振动; 疲劳风险

中图分类号: TU81

文献标识码: A

文章编号: 1671-9891(2018)02-0065-05

0 引言

油气处理工艺模块分布着大量工艺管线, 多用于输送高速油气流体。^[1]目前, 国内传统工艺管道设计多基于静态分析, 尚未考虑流体诱发振动导致的疲劳风险。据英国安全与健康执行局(HSE)发布的“海上石油天然气泄漏数据和分析”数据显示, 在英国北海有超过 20% 的石油天然气泄漏事故, 是由工艺管道振动诱发疲劳破坏导致的。因此本文基于英国 HSE EI 指南方法原理及工艺系统设计方案, 通过计算管道流体诱发振动导致的疲劳风险值, 对工艺管道疲劳风险进行定量判别, 筛选出疲劳风险较大的工艺管道, 并对此提出相应的安全降险措施。

1 流激振动的产生

在实际生产过程中绝大多数工艺管道内流体的流动状态为湍流, 尤其是当高速流体经过设备、调节阀、弯头、斜支管、三通、异径、节流孔板时, 流场中众多小漩涡彼此交叉、混杂、作用, 进而使管子受到随机波动的作用力。一方面, 由于湍流频带较宽, 当频带中的某一频率与管子任一振型的自振频率接近或相等时, 便会导致大幅度的管子振动; 另一方面, 周期性的漩涡脱落也会产生周期性的流体力, 如果漩涡脱落频率与管子的固有频率一致, 管子便会发生共振, 即由此产生的振动称为工艺管道流激振动。^[2-4]

2 流激振动的破坏

管子振动会产生较大的动态应力, 当动态应力达到某一临界水平时, 将导致管道出现疲劳裂纹。如果小裂纹未被平台操作人员及时发现, 裂纹将继续扩大直至管道破裂, 最终导致流体泄漏, 发生火灾或爆炸。此外, 值得特别注意的是, 管道在运用静力学公式分析受力情况时, 其结果与动态生产过程产生的受力情况有所不同, 因为管道静力学公式分析只考虑由重力、压力及其他外力载荷的作用产生的一次应力和由于热胀、冷缩、端点附加位移等位移载荷产生的二次应力。因此, 在设计工艺管道时, 工程师要重点关注流体诱发振动导致的管道疲劳情况。

3 流激振动疲劳风险计算分析

3.1 主管流激振动疲劳风险

(1) 流体动能(E_k)。湍流局部会产生较高的宽频动能, 如图 1 所示。此动能是激发管道振动的主要能量, 动能越大的工艺管线越容易产生振动疲劳损坏。因此, 在分析计算管道流激振动疲劳风险时, 首先要计算筛选出动能较大的管线。通过运用 Aspen HYSYS 模拟计算管道流体的密度 ρ 和流速 v , 使用式(1)得出管道内

收稿日期: 2018-01-09

作者简介: 陈永涛(1987—), 男, 江苏徐州人, 启东中远海运海洋工程有限公司工艺设计师。

流体动能,筛选出流体动能大于 20 kJ 的管道,进行下一步计算。根据 HSE EI 指南,流体动能小于 20 kJ 的管线流激振动疲劳风险小,无须考虑进行流激振动疲劳风险计算。

$$E_k = \rho v^2 \quad (1)$$

式(1)中 ρ 为流体密度,单位是 kg/m^3 ; v 为流速,单位是 m/s 。

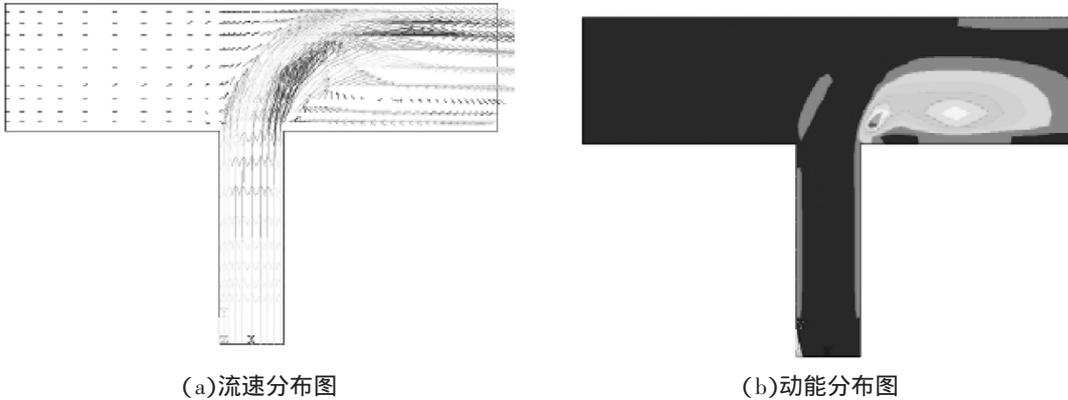


图 1 湍流引起的动能分布

(2) 流体黏度系数(FVF)。湍流的能量在一定程度上取决于流体的黏度,即流体黏度系数。若流体为多相流体和液相流体,则有式(2)成立。

$$FVF = 1 \quad (2)$$

若流体为气体,则有式(3)成立。

$$FVF = \frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{1 \times 10^{-2}}} \quad (3)$$

式(3)中 μ 为气体动力黏度,单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

(3) 支架刚度。根据实际管道走向和布置,量取支架间距 L_{span} ,并将管道外径 D_{ext} 代入表 1 的公式中,判断支架类型。相同外径的管道,支架间距越大,被定义为柔性支架的可能性就越大,流激振动疲劳风险也越高。根据表 1 确定支架类型。

表 1 支架类型表

支架类型	支架间距/m
刚性	$L_{span} \leq -1.2346 \times 10^{-5} D_{ext}^2 + 0.02 D_{ext} + 2.0563$
中刚性	$L_{span} > -1.2346 \times 10^{-5} D_{ext}^2 + 0.02 D_{ext} + 2.0563$
	$L_{span} \leq -1.1886 \times 10^{-5} D_{ext}^2 + 0.025262 D_{ext} + 3.3601$
中性	$L_{span} > -1.1886 \times 10^{-5} D_{ext}^2 + 0.025262 D_{ext} + 3.3601$
	$L_{span} \leq -1.5968 \times 10^{-5} D_{ext}^2 + 0.033583 D_{ext} + 4.429$
柔性	$L_{span} > -1.5968 \times 10^{-5} D_{ext}^2 + 0.033583 D_{ext} + 4.429$

(4) 流激振动系数(F_v)。 F_v 是流激振动系数,由管道外径 D_{ext} 和管道壁厚 T 共同决定, F_v 与疲劳风险值(ROF)成反比。根据表 2 可以确定流激振动系数 F_v 。

(5) 主管流激振动疲劳风险(ROF)。 ROF 的计算如式(4)所示。

$$ROF = \frac{\rho v^2}{F_v} FVF \quad (4)$$

式 4 中 ρ 为流体密度,单位为 kg/m^3 ; v 为流体流速,单位 m/s ; FVF 为流体黏度系数; F_v 为流激振动系数。

ROF 值越大,说明管道流激振动强度越大,因流激振动导致疲劳破损的风险越大。根据式(4)得出主管路 ROF 的大小,依照表 3 采取相应的降险措施。

表 2 F_v 系数计算公式

支架类型	外径范围	F_v	α	β
刚性	60~762	$\alpha \left(\frac{D_{ext}}{T} \right)^\beta$	$446\ 187 + 646D_{ext} + 9.17 \times 10^{-4}D_{ext}^3$	$0.11\ln(D_{ext}) - 1.373\ 9$
中刚性	60~762	$\alpha \left(\frac{D_{ext}}{T} \right)^\beta$	$283\ 921 + 370D_{ext}$	$0.110\ 6\ln(D_{ext}) - 1.501$
中性	60~219	$\alpha \left(\frac{D_{ext}}{T} \right)^\beta$	$150\ 412 + 209D_{ext}$	$0.11\ln(D_{ext}) - 1.373\ 9$
中性	273~762	$e^{\left[\alpha \left(\frac{D_{ext}}{T} \right)^\beta \right]}$	$13.1 - 4.75 \times 10^{-3}D_{ext} + 1.41 \times 10^{-5}D_{ext}^2$	$-0.132 + 2.28 \times 10^{-4}D_{ext} - 3.72 \times 10^{-7}D_{ext}^2$
柔性	273~762	$\alpha \left(\frac{D_{ext}}{T} \right)^\beta$	$42.21D_{ext} + 49\ 397$	$0.081\ 5\ln(D_{ext}) - 1.384\ 2$
柔性	60~219	$e^{\left[\alpha \left(\frac{D_{ext}}{T} \right)^\beta \right]}$	$1.32 \times 10^{-5}D_{ext}^2 - 4.42 \times 10^{-3}D_{ext} + 12.22$	$2.84 \times 10^{-4}D_{ext} - 4.62 \times 10^{-7}D_{ext}^2 - 0.164$

表 3 ROF 判断标准

ROF	推荐措施
$ROF \geq 1.0$	1)主管必须重新设计,重新确定支架位置或采用有限元分析等方法进一步分析 2)使用仪器检测主管工作时的振动情况 3)在主管支架处增加斜撑 4)必须评估小支管处的风险(SBC ROF) 5)对主管连接处、几何形状、支架以及相邻主管振动传递情况进行外观检查
$1 > ROF \geq 0.5$	1)使用仪器检测主管操作时的振动情况 2)在主管支架处增加斜撑 3)评估小支管振动疲劳风险(SBC ROF) 4)对主管连接处、几何形状、支架以及相邻主管振动传递情况进行外观检查
$0.5 > ROF \geq 0.3$	1)评估小支管振动疲劳风险(SBC ROF) 2)对主管连接处、几何形状、支架以及相邻主管振动传递情况进行外观检查
$ROF < 0.3$	对主管连接处、几何形状、支架以及相邻主管振动传递情况进行外观检查

3.2 小支管流激振动疲劳风险

当主管发生流激振动时,会带动小支管一起振动,小支管连接强度最弱,因此最容易发生振动疲劳损坏,如图 2 所示。据 HSE EI 指南要求,主管流激振动疲劳损坏风险 $ROF \geq 0.3$ 时,需要对主管上连接的小支管进行流激振动疲劳损坏风险进行计算。在计算过程中,首先需要进行小支管几何形状风险分析,然后进行小支管开口位置风险分析和小支管流激振动疲劳风险分析。



图 2 小支管疲劳裂纹

(1)小支管几何形状类型。小支管几何形状类型主要分为四种:悬臂型、同主管连续型、跨管带支架型,跨管无支架型,如图 3 所示。

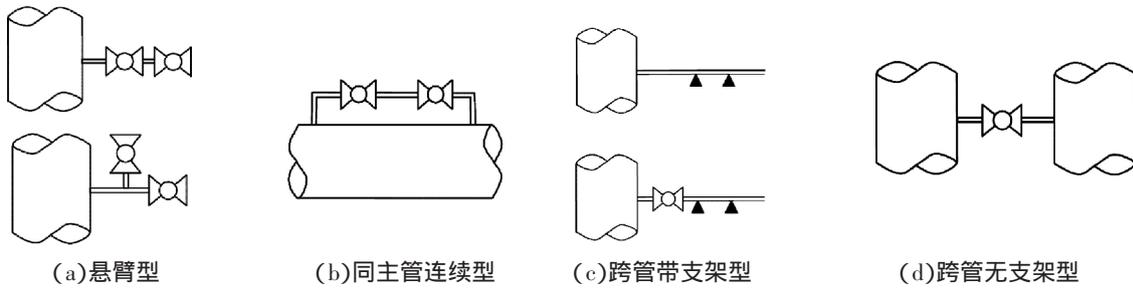


图3 小支管几何形状类型

(2)小支管几何形状风险($SBC ROF_{GEOM}$)。不同的小支管几何形状类型,有其对应的计算流程和公式。本文主要介绍海工平台上最常见的悬臂型小支管的计算。小支管几何形状风险受小支管连接类型、小支管长度、小支管阀门数量、小支管壁厚、小支管尺寸的影响,其对应风险值如表4所示。

表4 小支管几何形状风险

小支管参数	风险分类	风险值	小支管参数	风险分类	风险值	
连接类型	a	对焊连接	壁厚等级	10S	0.9	
		螺纹连接		20S	0.8	
		管座连接		40	d	0.7
长度/mm	b	<200	80		0.5	
		200~400	>160		0.3	
		400~600	0.5"		0.9	
		>600	0.75"		0.8	
		含阀门数	c	0	尺寸	1"
1	1.5"			0.6		
>2	2"			0.5		

依据实际配管情况,根据公式(5)求出小支管几何形状风险 $SBC ROF_{GEOM}$

$$SBC ROF_{GEOM} = \frac{(a + b + c + d + e)}{5} \tag{5}$$

(3)小支管开口位置风险($SBC ROF_{LOC}$)。小支管开口位置风险受小支管与主管连接处最近的主管上的附件类型和主管壁厚等级影响,距小支管最近的管附件分别为阀门、异径、弯头、三通、滑动支架、固定支架时,对应的风险值 f 分别为 0.9、0.9、0.9、0.9、0.6、0.1。主管壁厚等级分别为 10S、20S、40S、80S、160S,大于 160S 时,对应的风险值 g 分别为 0.9、0.8、0.7、0.5、0.3、0.3。

若主管 $ROF \geq 1$ 或未知,有式(6)成立。

$$SBC ROF_{LOC} = 1 \tag{6}$$

若主管 $ROF < 1$,有式(7)成立。

$$SBC ROF_{LOC} = \frac{f + g}{2} \tag{7}$$

(4)小支管流激振动疲劳风险 $SBC ROF$ 。小支管疲劳失效不仅受几何形状及开口位置影响,还与主管路振动效应有关。因此,为了有效评估小支管疲劳风险,本文通过比较上述三个影响因素的等效 ROF 值,进而确定小支管流激振动疲劳风险 $SBC ROF$,如式(8)所示,根据计算评估结果,依照表5采取相应降险推荐措施。

$$SBC ROF = \text{Min}(SBC ROF_{GEOM}, SBC ROF_{LOC}, 1.42 \times ROF) \tag{8}$$

表5 $SBC ROF$ 判断标准

$SBC ROF$	推荐措施
$SBC ROF \geq 0.7$	高风险,重新设计支管,或重新做支架
$0.7 > SBC ROF \geq 0.4$	中等风险,振动检测,或重新设计支管或支架
$SBC ROF < 0.4$	低风险,推荐做外观检查。

4 实例分析

以第七代钻井船试采处理工艺模块工艺管线为例分析计算,如图4所示。相关参数如下:流体密度 $\rho = 80 \text{ kg/m}^3$, 流体流速 $v = 15.02 \text{ m/s}$, 流体相态为两相流, 外径 $D_{ext} = 355.6 \text{ mm}$, 壁厚 $T = 7.92 \text{ mm}$, 最大支架间距 $L_{span} = 6.5 \text{ m}$, 小支管为悬臂型, 对焊连接, 长度为 500 mm , 含阀门数为 1, 小支管壁厚等级 10S, 主管壁厚等级 20S, 小支管尺寸为 1.5 寸, 小支管最近处的管附件为阀门, 计算主管和小支管的 ROF 如表 6 所示。

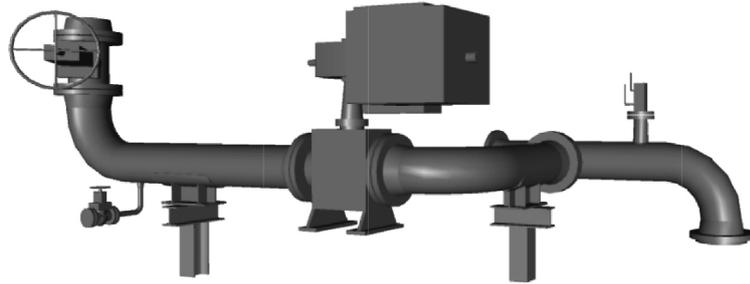


图 4 工艺管线

表 6 某工艺管线 ROF 计算结果

计算项	结果
ρ	21 632 J
FVF	1
支架类型	刚性
FV	35 982.14
主管 ROF 值	0.60
小支管 SBC ROF 值	0.66

根据表 6 可知,该工艺主管线 ROF 值偏高,建议在主管支架处增加斜撑或在适当位置增加支架。通过开展小支管 SBC ROF 计算验证可以得出,该小支管处存在一定疲劳风险,需采取振动检测或重新设计支管、支架等措施,以降低整条工艺管道疲劳损害的风险。

5 结束语

通过工艺管道流体诱发振动疲劳风险的分析,确定了流体诱发振动导致疲劳风险的评估方法,定量判别管路疲劳风险等级,进而提出了有效的降险措施,并得到较好的工程应用。通过分析,得出以下结论。第一,主管流激振动疲劳风险主要和流速、密度、支架间距、管道尺寸、壁厚有关。在设计工艺管道时,管道流速、壁厚的选取不仅要考虑管道摩阻和设计压力,而且也要考虑管内流体的流速以及壁厚是否会导致管道流激振动疲劳损坏风险,此举优化了后续管道设计,避免增加不必要的管道支架和管道补强等措施。第二,小支管流激振动疲劳风险主要和小支管连接类型、长度、阀门数量、壁厚、尺寸、接口位置、主管尺寸有关,应在设计允许范围内尽量选用焊接连接,减小支管长度及阀门数量,增加支管壁厚,选用大尺寸支管,小支管位置靠近支架处。第三,从工程应用角度出发,本文的计算方法适用于设计阶段工艺管道流激振动疲劳风险的计算分析,但尚未考虑实际平台作业海况(风、浪、地震)的影响,因此建议 $ROF \geq 1$ 的管线利用 FEA 或 CFD 等软件继续进行优化分析。

参考文献:

- [1]赵耕贤.FPSO 设计综述[J].船舶,2005,(6):1-5.
- [2]谢芳芳.柔性体流致振动的数值模拟研究[D].杭州:浙江大学,2013.
- [3]孟丹,郭海燕,徐思朋.输流管道的流体诱发振动稳定性分析[J].振动与冲击,2010,(6):80-83.
- [4]练继建.水工结构流激振动响应的反分析[J].水利水电技术,1998,(8):51-54.

(责任编辑:顾力豪)

(下转第 89 页)

3 结束语

顶岗实习作为高职教育的重要环节,是促进校企协同育人,提高学生专业技能的有效途径。高职院校要积极做好学生顶岗实习的思想教育工作,动员学生认真对待顶岗实习的专业学习机会,在顶岗实习管理服务和考核评价上向规范化推进。高职院校需要综合利用信息化管理手段,对学生顶岗实习进行动态管理,了解学生的实习情况,帮助学生解决疑难问题,以保证学生顶岗实习的质量,进一步提高人才培养的水平。

参考文献:

- [1]仇伟.高职院校学生顶岗实习管理的探索与创新[J].重庆电力高等专科学校学报,2014,(5):14-16.
[2]李军雄,曾良骥,黄玲青.地方高职院校学生顶岗实习中存在的问题与对策[J].教育与职业,2010,(3):43-45.

(责任编辑 朱志海)

Research on Countermeasures of Students' Internship Management in Higher Vocational Colleges

WANG Wei¹, XIAO Jin-feng¹, WANG Hui²

(1. Dept. of Navigation, Nantong Vocational & Technical Shipping College, Nantong 226010, China;

2. Dept. of Management Information, Nantong Vocational & Technical Shipping College, Nantong 226010, China)

Abstract: Internship is an important part of practical teaching system in higher vocational education, and also an important route to cultivate advanced technical talents. Presently higher vocational students' internship faces the problems of difficult management of internship sites, the limited role of school's instructors low enthusiasm of enterprise, etc. Therefore, higher vocational colleges should actively carry out ideological education of students' internships, strengthen real-time dynamic management of student internship, and perform well in archiving internship materials and informationalized management, to protect students' rights during the internship, to ensure the quality of students' internship and improve the quality of talent fostering in higher vocational colleges.

Key words: higher vocational colleges; internship; innovative practice

(上接第 69 页)

Calculation and Analysis of Process Piping Fatigue Risk Caused by Flow-induced Vibration

CHEN Yong-tao, CAO Lei, ZHU Rui-feng

(Module Division, COSCO SHIPPING Qidong Offshore Co., Ltd., Qidong 226236, China)

Abstract: In order to reduce the fatigue risk caused by flow-induced vibration of process pipeline, the principle of British HSE EI guidance is applied to comprehensively consider factors such as fluid flow state, physical property parameters, and pipeline layout. Through introducing the Risk of Fatigue (ROF) values to quantify and assess fatigue risk caused by flow induced vibration, the assessment method is determined by analyzing and calculating the fatigue risk caused by flow-induced vibration of process pipeline, which provides corresponding optimization and improvement measures for pipelines with greater potential of fatigue risk to mitigate and prevent flow-induced vibration fatigue.

Key words: process piping; flow-induced vibration; risk of fatigue