管道流致振动的定量评估方法研究

高建林[1]　蔡志强[1]　胡京高[2]　闫东军[1]　雷本勇[1]
1. 中国石油工程建设有限公司西南分公司，　四川　成都　610041；
2. 中国石油工程建设有限公司，　北京　100120

摘　要：流致振动现象可能造成管道疲劳破坏，因此在设计和运行过程中，对流致振动的控制至关重要。传统工程设计中，管道都是基于静态分析设计，未考虑管道流致振动带来的疲劳破坏问题，出现问题后才进行分析与整改。详细阐述了在设计阶段对管道流致振动进行定量评估的判定标准及流程，以某天然气净化项目脱硫装置中两相流管道为例进行分析，对风险较高的管道提出整改措施，经验证，整改措施可有效降低流致振动导致管道疲劳破坏的风险。研究成果对降低工程中管道流致振动的影响具有一定借鉴意义。

关键词：流致振动；定量评估；整改措施
DOI：10. 3969 /j. issn. 1006-5539. 2025. 04. 007

Study on quantitative evaluation method of flow-induced vibration in pipelines

GAO Jianlin[1], CAI Zhiqiang[1], HU Jinggao[2], YAN Dongjun[1], LEI Benyong[1]
1. CPECC Southwest Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China;
2. China Petroleum Engineering & Construction Co., Ltd., Beijing, 100120, China

Abstract: Flow-induced vibration (FIV) may lead to fatigue failure in piping systems. Therefore, controlling FIV is crucial during the engineering design and operation stages. Currently, piping design in traditional projects is normally based on static analysis, without considering the fatigue damage caused by flow-induced vibration in pipelines. As a result, vibration analysis and corrective measures are typically conducted only after FIV occurs. This paper details the evaluation criteria and procedures for quantitatively evaluating flow-induced vibration in pipelines at the design stage. Taking a two-phase flow pipeline in a desulfurization unit of a natural gas purification project as a case study, the analysis illustrates the evaluation process, and proposes corrective measures for pipelines with high risk, which proves to reduce the risk of fatigue failure caused by FIV. The research results provide valuable technical references for mitigating the impact of flow-induced vibrations in engineering applications.

Keywords: Flow-induced vibration; Quantitative evaluation; Corrective measures

0　前言

管道流致振动可能造成管道疲劳破坏，进而导致安全事故、产品生产线停产、对环境造成危害等[1-6]。因此，管道设计方及运营方应尽量将发生管道流致振动的可能性降到最低。

收稿日期：2024-07-12
基金项目：中国石油集团工程股份有限公司科学研究与技术开发项目“单列 3 000 × 10^4 Nm^3 /d 天然气处理装置模块化设计建造技术研究”（KY2019-05）
作者简介：高建林（1985-），男，山东蓬莱人，高级工程师，硕士，主要从事压力管道应力分析工作。E-mail：gaojianl_sw@ cnpc. com. cn

英国健康与安全机构公布的海洋工程行业数据显示，英国北海管道系统中 20% 以上的碳氢化合物泄漏事故由振动和疲劳导致。陆地工业设施尚无全面的统计数据，根据个别工程的数据，西欧 10% ~15% 的管道失效是由振动引起的疲劳造成[7-9]。

在传统工程设计中，管道均是基于静态分析设计，未考虑流致振动引起的疲劳破坏问题，主要原因是多数管道设计规范中没有提供管道流致振动问题的解决方法，因此通常只在管道发生流致振动后才分析原因并整改。随着流致振动导致管道疲劳破坏甚至失效的案例越来越多，管道流致振动分析研究也越来越受到重视。

管道振动的诱因主要包括湍流、机械激励、流体脉动、高频声学激励、水锤、气蚀及闪蒸等。基于以上诱因，英国能源局发布了避免流致振动导致管道疲劳破坏的设计导则 *Guidelines for the avoidance of vibration induced fatigue failure in process pipework*（以下简称 EI 导则），EI 导则为管道整个寿命周期内振动诱发疲劳提供了全面的分析方法，包括流致振动、动设备引发振动、脉动、声致振动、水锤诱发的振动、气蚀和闪蒸诱发的振动等振动问题的定性与定量评估[10-11]。

流致振动最早由 Robert Blevins 于 1977 年提出，他是第一位根据流体动力学和结构动力学对现象分类的人，并制定了分析流致振动的基本路线图[12-14]。流致振动是一种大振幅、低频（通常 <100 Hz）的振动，可能发生在输送高速湍流流体的管道系统中，流体流动产生高动能迫使管道振动。流致振动在湍流源附近更为普遍，如弯头、异径管、分支连接、部分关闭的阀门等结构处[15-16]。为避免流致振动的发生，对于高动能流管道系统，当复杂管道结构单元较多时，应对管道系统进行流致振动分析[17-20]。本文基于 EI 导则，以某天然气净化项目脱硫装置中两相流管道为例，研究流致振动的定量评估方法。

1 流致振动定量评估判定准则

本文依据 EI 导则进行流致振动定量评估，风险程度基于失效可能性系数（*LOF*）确定。*LOF* 既不是绝对的失效概率，也不是绝对的失效量度，而是一种利用评分形式筛选存在流致振动风险的管道并确定风险等级的方法。*LOF* 准则见表 1。

表 1 *LOF* 准则表

Tab. 1 *LOF* criterion

LOF 值	风险等级	整改措施
$LOF \geqslant 1$	高	主线需重新设计，支架需重新设计或详细分析，并进行振动监测；必须对主线上的小口径连接管道进行评估；必须进行视觉检查，检查主线的不良施工、空间尺寸、支架以及对相邻管道潜在的振动传播
$1 > LOF \geqslant 0.5$	中	主线需重新设计，支架需重新设计或详细分析，并进行振动监测；应根据需要对整改措施进行检查和应用；必须对主线上的小口径连接管道进行评估；应进行视觉检查，检查主线的不良施工、空间尺寸、支架以及对相邻管道潜在的振动传播
$0.5 > LOF \geqslant 0.3$	低	对主线上的小口径连接管道进行评估；应进行视觉检查，检查主线的不良施工、空间尺寸、支架以及对相邻管道潜在的振动传播
$LOF < 0.3$	安全	应进行视觉检查，检查主线的不良施工、空间尺寸、支架以及对相邻管道潜在的振动传播

2 流致振动定量评估流程

流致振动定量评估通过计算流体动能进行振动风险分级，并对中、高风险管线的 *LOF* 值进行计算。流致振动分析流程见图 1。

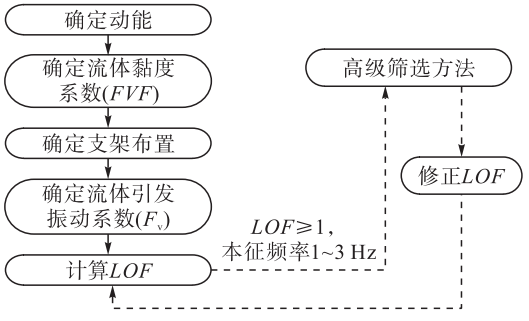

图 1 流致振动分析流程示意图

Fig. 1 Flow-induced vibration analysis process

2.1 确定动能

根据单相流或多相流计算确定动能，见式（1）。

$$\text{动能} = \rho v^2 \tag{1}$$

式中：ρ 为流体密度，kg /m^3，单相流采用流体实际密度，多相流采用流体有效密度；v 为流体流速，m /s，单相流采用流体实际流速，多相流采用流体有效流速。其中：有效密度 = 总质量流量 /总体积流量；有效流速 = 总体积流量 /管道内部横截面积；总质量流量 = Σ（每个相的实际体积流量）×（相密度）；总体积流量 = Σ（每个相的实际体积流量）。

2.2 确定 *FVF*

扰流能量在一定程度上与流体黏度有关，因此需考虑 *FVF*。

对于液相和多相流体，*FVF* = 1。

对于气相系统，计算见式（2）。

$$FVF = \frac{\sqrt{\mu_{gas}}}{\sqrt{10^{-3}}} \quad (2)$$

式中：μ_{gas}为气体运动黏度，Pa·s。

2.3 确定支架布置

通过管道跨距初步判定管道典型的本征频率。支架布置类型判断见表 2。

表 2 支架布置类型判断表

Tab. 2 Support deployment type

支架布置类型	支架跨距标准	典型的本征频率 /Hz
刚性	$L_{span} \leqslant -1.234\,6\times10^{-5}D_{ext}^{2}+0.02D_{ext}+2.056\,3$	14 ~ 16
中等刚性	$L_{span} > -1.234\,6\times10^{-5}D_{ext}^{2}+0.02D_{ext}+2.056\,3$ $L_{span} \leqslant -1.188\,6\times10^{-5}D_{ext}^{2}+0.025\,262D_{ext}+3.360\,1$	7
适中	$L_{span} > -1.188\,6\times10^{-5}D_{ext}^{2}+0.025\,262D_{ext}+3.360\,1$ $L_{span} \leqslant -1.596\,8\times10^{-5}D_{ext}^{2}+0.033\,583D_{ext}+4.429$	4
柔性	$L_{span} > -1.596\,8\times10^{-5}D_{ext}^{2}+0.033\,583D_{ext}+4.429$	1

注：L_{span}为管道支架最大跨距，m；D_{ext}为管道外径，mm。

2.4 确定 F_v

F_v 与支架布置类型有关，计算方法见表 3。α、β 是基于管道外径计算的中间参数。

表 3 F_v 计算方法表

Tab. 3 Flow-induced vibration factor F_v calculation method

支架布置类型	F_v	D_{ext} / mm	α	β
刚性	$\alpha\left(\frac{D_{ext}}{T}\right)^{\beta}$	60 ~ 762	$446\,187+646D_{ext}+9.17\times10^{-4}D_{ext}^{3}$	$0.1\ln(D_{ext})-1.373\,9$
中等刚性	$\alpha\left(\frac{D_{ext}}{T}\right)^{\beta}$	60 ~ 762	$283\,921+370D_{ext}$	$0.110\,6\ln(D_{ext})-1.501$
适中	$\alpha\left(\frac{D_{ext}}{T}\right)^{\beta}$	273 ~ 762	$150\,412+209D_{ext}$	$0.081\,5\ln(D_{ext})-1.326\,9$
适中	$\exp\left[\alpha\left(\frac{D_{ext}}{T}\right)^{\beta}\right]$	60 ~ 219	$13.1-4.75\times10^{-3}D_{ext}^{3}+1.41\times10^{-5}D_{ext}^{2}$	$-0.132+2.28\times10^{-4}D_{ext}-3.72\times10^{-7}D_{ext}^{2}$
柔性	$\alpha\left(\frac{D_{ext}}{T}\right)^{\beta}$	273 ~ 762	$41.21D_{ext}+49\,397$	$0.081\,5\ln(D_{ext})-1.384\,2$
柔性	$\exp\left[\alpha\left(\frac{D_{ext}}{T}\right)^{\beta}\right]$	60 ~ 219	$1.32\times10^{-5}D_{ext}^{2}-4.42\times10^{-3}D_{ext}+12.22$	$2.84\times10^{-4}D_{ext}-4.62\times10^{-7}D_{ext}^{2}-0.164$

注：T 为管道壁厚，mm。

2.5 计算 *LOF*

LOF 计算见式(3)。

$$LOF = \frac{\rho v^{2}}{F_v}FVF \quad (3)$$

2.6 流致振动高级筛选方法

流致振动高级筛选方法仅适用于 1 Hz < 本征频率≤3 Hz 的管道系统。当使用标准评估方法计算出 $LOF \geqslant 1.0$ 时，采用高级筛选方法更重要，因为柔性管道对流体引发的扰流非常敏感。

F_v 取决于管道外径、壁厚和本征频率。1 Hz < 本征频率≤3 Hz 的柔性管道系统，F_v 按照式(4) ~ (5)计算。

管道外径≥273 mm 时，F_v 计算见式(4)。

$$F_v = \alpha\left(\frac{D_{ext}}{T}\right)^{\beta} \quad (4)$$

式中：$\alpha = (41.21D_{ext}+49\,397)(f_n^{0.000\,166\,5D_{ext}+0.846\,15})$；$\beta = 0.081\,5\ln(D_{ext})-1.384\,2+0.019\,1(f_n-1)$；$f_n$ 为本征频率，Hz。

管道外径 <273 mm 时，F_v 计算见式(5)。

$$F_v = \exp\left[\alpha\left(\frac{D_{ext}}{T}\right)^{\beta}\right] \quad (5)$$

式中：$\alpha = (1.317\,5\times10^{-5}D_{ext}^{2}-4.421\,3\times10^{-3}D_{ext}+12.217)[0.052\,9\ln(f_n)+1]$；$\beta = (-4.622\times10^{-7}D_{ext}^{2}+2.835\times10^{-4}D_{ext}-0.164)[-0.140\,7\ln(f_n)+1]$。

3 流致振动整改措施

影响流致振动的主要因素是激发源处的动能水平、主管道的管道参数及流速等。因此流致振动整改措施应从激发源整改和主管道整改两个方面考虑。

3.1 激发源整改

1)减小流体流速:通过增加主管管径、增加运行第二条平行管道或改变运行工况等方式实现。

2)使流体平滑流动:通过使用斜三通替代 90°直角三通、减少管道拐弯次数、使用大曲率半径的弯管或导流板元件等方式实现。

3)降低对流体动能的消耗:采用高恢复系数的阀门(如采用偏心旋塞阀、蝶阀、球阀)或改变阀芯,可使流体动能消耗较少。

3.2 主管道整改

1)整改管道支架布置:管道系统的本征频率增加,流体的湍流能量水平随之迅速下降,所产生的流致振动水平也会下降,应考虑提供足够的支架,缩小 L_{span}。

2)使用黏滞阻尼器:使用黏滞阻尼器可有效减少流致振动,但需要注意的是本征频率 >30 Hz 或窄滞激励时,黏滞阻尼器不适用。

3)使用复合管道包裹物:使用复合管道包裹物可增加管道强度,对抑制管道流致振动有较好效果。

4)改变管道壁厚:通过增加管道壁厚、提高刚度,可有效抑制管道流致振动。

4 工程应用实例

以某天然气处理项目脱硫装置中两相流管道为例,根据工艺参数计算动能,见表 4。

表 4 脱硫装置两相流管道动能计算表

Tab. 4 Determination of kinetic energy for two-phase flow pipes in desulfurization unit

管线号	D_{ext} / mm	T / mm	有效密度 / (kg·m^{-3})	有效流速 / (m·s^{-1})	动能 / (kg·m^{-1}·s^{-2})
1	711	25.40	35.75	8.19	2 397.38
2	711	24.61	978.21	2.27	5 033.12
3	711	6.35	978.21	2.04	4 059.98
4	1 016	7.92	978.21	1.99	3 859.00
5	324	4.57	1 000.80	1.98	3 922.74
6	1 016	7.92	1 086.71	1.81	3 543.78
7	914	7.11	381.14	6.42	15 726.20
8	914	7.11	963.71	2.26	4 938.74
9	1 016	7.92	2.12	42.01	3 746.57
10	711	6.35	2.12	43.09	3 941.70
11	813	6.35	50.04	15.80	12 489.78
12	711	6.35	14.85	19.02	5 375.48

由表 4 可见,2、7、11、12 管道动能 >5 000 kg/m·s^2,其余管线号管道动能 <5 000 kg/m·s^2。根据 EI 导则,动能≤5 000 kg/m·s^2 时可视为振动风险低,无需进行进一步评估;动能 >5 000 kg/m·s^2 应进行进一步评估。管线号 2、7、11、12 号管道均为两相流管道,其 $FVF=1$。结合管道布置确定管道支架布置情况,各管道的 L_{span}、F_v、LOF 见表 5。

表 5 L_{span}、F_v 及 LOF 表

Tab. 5 L_{span}, F_v and LOF of different pipelines

管线号	D_{ext} / mm	T / mm	L_{span} / mm	支架布置类型	α	β	F_v	LOF
2	711	24.61	5 248	刚性	1 235 086.12	−0.717 233	110 660.79	0.045
7	914	7.11	10 500	中等刚性	622 101.00	−0.746 948	16 538.29	0.951
11	813	6.35	5 744	刚性	1 464 151.27	−0.703 827	48 128.21	0.260
12	711	6.35	2 167	刚性	1 235 086.12	−0.717 233	41 881.146	0.128

由表 5 可见,7 号管道的 LOF >0.5,应采取整改措施。采用调整管道支架布置的方式降低 LOF。将 L_{span} 由 10 500 mm 调整至 10 000 mm 以内,支架布置分级将由适中变为中等刚度,管道系统本征频率增加,流致振动水平下降,经计算 LOF 可由 0.951 降至 0.261,LOF 值 <0.3 即可判定管道在安全范围之内,满足设计要求。

5 结论

流体的高流速可能引起管道流致振动,进而引发管道疲劳破坏,应在设计阶段对潜在风险的管道进行主动评估,并根据风险等级采取相应的整改措施,减小运行管道运行中发生管道疲劳破坏的风险。本文基于 EI 导则,并结合工程案例,对管道流致振动定量评估判定准则、评估流程以及整改措施进行说明。研究结果表明,缩小管道支架跨距可提高管道刚度,增加本征频率,有效降低 LOF 值及管道流致振动的风险等级。

参考文献：

[1] 巴士明,徐广玉. 管道振动原因及消除方法简介[J]. 管道技术与设备,1996,4(2):23-30.
BA Shiming, XU Guangyu. Introduction to reasons and elimination methods of pipe vibration [J]. Pipeline Technique and Equipment, 1996, 4 (2): 23-30.

[2] 党锡淇,黄幼玲. 工程中的管道振动问题[J]. 力学与实践,1993,15(4):9-16.
DANG Xiqi, HUANG Youling. Pipe vibration problem in engineering [J]. Mechanics in Engineering, 1993, 15 (4): 9-16.

[3] 谭　平. 输气管道振动分析[J]. 天然气工业,2005,25(1):133-134.
TAN Ping. Analysis on vibration of gas transmission pipelines [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25 (1): 133-134.

[4] 岑　康,温韵巧,魏　星,等. 天然气输气站工艺管线流致振动分析及控制研究[J]. 振动与冲击,2023,42(16):278-283.
CEN Kang, WEN Yunqiao, WEI Xing, et al. Analysis and control on flow-induced vibration of process piping in natural gas transmission stations [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42 (16): 278-283.

[5] 张轶桀,杨　佳,郝　剑,等. 除氧器给水泵入口管道振动评估及治理[J]. 中国特种设备安全,2015,31(9):44-46.
ZHANG Yijie, YANG Jia, HAO Jian, et al. Vibration evaluation and preventive of inlet pipeline of feed water pump in deaerator [J]. China Special Equipment Safety, 2015, 31 (9): 44-46.

[6] 苗碧琪,蒋庆磊,李元姣,等. 基于有限元方法的管道流致振动计算及验证[J]. 化学工程与装备,2024(3):21-25.
MIAO Biqi, JIANG Qinglei, LI Yuanjiao, et al. Calculation and verification of flow induced vibration in pipes based on finite element method [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2024 (3): 21-25.

[7] 王春霞,郝孟江,张苏飞,等. 管道高频声致振动的定量评估方法研究[J]. 石油和化工设备,2021,24(9):111-117.
WANG Chunxia, HAO Mengjiang, ZHANG Sufei, et al. Study on quantitative evaluation method of acoustic induced vibration [J]. Petro & Chemical Equipment, 2021, 24 (9): 111-117.

[8] 王　毅,高建林,代长林,等. 天然气处理工程声致振动管线的初步筛选方法[J]. 天然气与石油,2016,34(1):49-52.
WANG Yi, GAO Jianlin, DAI Changlin, et al. Preliminary screening for acoustically induced vibration pipes in natural gas engineering [J]. Natural Gas and Oil, 2016, 34 (1): 49-52.

[9] 陈永涛,曹　磊,朱睿峰. 工艺管道流激振动疲劳风险计算分析[J]. 南通航运职业技术学院学报,2018,17(2):70-74.
CHEN Yongtao, CAO Lei, ZHU Ruifeng. Calculation and analysis of process piping fatigue risk caused by flow-induced vibration [J]. Journal of Jiangsu Shipping College, 2018, 17 (2): 70-74.

[10] HARK K, BROOK S, EVANS G, et al. Guidelines for the avoidance of vibration induced failure in process pipework [M]. 2nd ed. London: Energy Institute Publication, 2008.

[11] 吴　迎,刘三军,周耀青,等. 化工管道振动分析及对策[J]. 化工设计通讯,2016,42(6):102.
WU Ying, LIU Sanjun, ZHOU Yaoqing, et al. Analysis and countermeasures of vibration of chemical pipelines [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2016, 42 (6): 102.

[12] 赵乙存. 气液两相流管道流致振动特性分析及减振研究[D]. 北京:中国石油大学,2022.
ZHAO Yicun. Study on vibration characteristics and control method of gas-liquid two-phase flow in pipeline [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2022.

[13] 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.
XIE Fangfang. A numerical study on flow-induced vibration of flexible structures [D]. Hanzhou: Zhejiang University, 2013.

[14] 李　炎,李清平,喻西崇. 海底管道内部流动引起的流致振动问题研究进展[J]. 中国海上油气,2021,33(1):208-215.
LI Yan, LI Qingping, YU Xichong, et al. Research progress of flow-induced vibration caused by internal flow in submarine pipeline [J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33 (1): 208-215.

[15] 胡　东. 输气管道声致振动研究与软件开发[D]. 北京:中国石油大学,2022.
HU Dong. Acoustic vibration research and software development of gas pipeline [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2022.

[16] YONEZAWA K, OGAWA R, OGI K, et al. Flow-induced vibration of a steam control valve [J]. Journal of Fluids and Structures, 2012, 35: 76-88.

[17] MORITA R, INADA F, MORI M, et al. Flow induced vibration of a steam control valve in middle-opening condition [C]//Proceedings of 2005 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, 17-21, July, 2005, Denver, Colorado, USA. New York: ASME, 2005.

[18] MIWA S, MORI M, HIBIKI T. Two-phase flow induced vibration in piping systems [J]. Progress in Nuclear Energy, 2015, 78 (1): 270-284.

[19] 苏孝刚. 浅谈锅炉汽水系统管道振动存在问题与解决对策[J]. 中国高新技术企业,2017(8):96-97.
SU Xiaogang. A brief discussion on the problems and aolutions of vibration in boiler steam water system pipelines [J]. China High-Tech Enterprises, 2017 (8): 96-97.

[20] 蔺港归. 压气站复杂管路流致振动研究[D]. 北京:中国石油大学,2022.
LIN Ganggui. Flow-induced vibration of complex gas pipeline in compressor station [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2022.