

Briefly describe the fluid vibration analysis method based on the EIG manual

Jie Zhang

Sinopec Petroleum Engineering Design Co., Ltd., Dongying, Shandong, 257026, China

Abstract

Process pipeline systems have traditionally been designed based on static analysis, with little or no attention paid to fatigue caused by vibration. Because most pipeline design specifications consider pipeline vibration as temporary or passive. The vibration analysis report in overseas projects is independent of the stress calculation report, with the aim of identifying vibrating pipelines and providing solutions. The basis for vibration analysis in overseas projects is the Pipeline Vibration Analysis Guidelines of the London Energy Institute. This guide can also provide analysis methods for small diameter pipeline vibration and turbulent pipeline vibration, and provide ideas for solving pipeline analysis. This article briefly describes the causes and influencing factors of pipeline vibration based on the Guidelines for Pipeline Vibration Analysis, and also introduces the analysis methods of fluid vibration. Provide application reference for the determination of pipeline fluid vibration.

Keywords

fluid vibration; Vibration analysis; Process pipeline

基于 EIG 手册简述流体振动分析方法

张婕

中石化石油工程设计有限公司, 中国 · 山东 东营 257026

摘 要

工艺管道系统传统上是在静态分析的基础上设计的, 很少或根本不注意振动引起的疲劳。因为大多数管道设计规范将管道振动被视为临时或被动的。海外项目中振动分析报告独立在应力计算报告外, 目的是识别出振动管道并给出解决措施。海外项目中振动分析依据是伦敦能源研究所的管道振动分析指南。该指南也可以为小口径管线振动、紊流管线振动提供分析方法, 为解决管道分析提供思路。本文依据管道振动分析指南简述管线振动的原因和影响因素外, 还介绍了流体振动的分析方法。为管线流体振动的判定提供应用参考。

关键词

流体振动; 振动分析; 工艺管道

1 引言

管道振动是指输送介质流经管道时, 由于各种原因产生的管道、管支架和管道连接件的振动。管线振动不仅会造成金属疲劳还会引发安全事故。常见的事故包括声音污染、漏水漏气、磨损加剧等。在项目运行过程中, 以下原因是常见的管线振动引发金属疲劳的主要因素: ①管道内的介质进行安全释放, 例如危险或易燃的加压流体的突然释放等。②生产停机时间。③纠正振动管道造成其他管道振动。④环境影响。

通常情况下, 工艺管道系统的设计只是基于静态分析, 很少或根本不考虑振动引起的疲劳。这主要是因为大多数管道设计规范没有有效的方式分析出振动问题。这导致管道振

动被视为临时性或触发性的。

结合石化厂管道系统中与振动相关的疲劳故障发生率越来越高的情况, 发生管线振动大多源于两个方面。一是侵蚀速度限制的放宽, 流速增加, 导致过程系统中流速更高, 湍动能相应更大。二是薄壁管道(如双相不锈钢合金)的应用导致管道柔性增强, 应力集中变高, 振动往往反映在小口径连接处。

为了降低上述问题带来的风险, 伦敦能源研究所编制的管道振动分析指南(Energy Institute Guideline, EIG)针对不同的振动原因各自提供了一套分析方法简单、可操作性强的理论计算公式, 目的是从设计前端开始降低管道的运行中引发的风险。本文将依据伦敦能源研究所的管道振动分析指南^[1]从定量到定性简述流体振动(Flow Induced Vibration, FIV)的分析方法。

【作者简介】张婕(1988-), 女, 中国山东聊城人, 本科, 高级工程师, 从事石化类、力计算、振动分析研究。

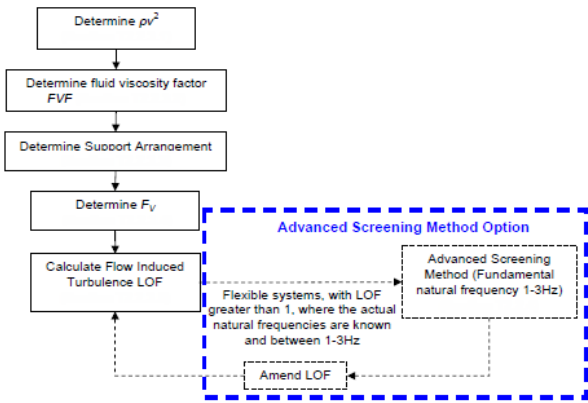


图 1 EIG 提供的 FIV 计算 workflow

2 FIV 分析方法

由于项目运行中遇到的大多数管道系统都会存在湍流。在直管中，它是由管壁处的湍流边界层产生的。大多数情况下，湍流的主要来源是系统中的主要流动不连续性。典型的例子是工艺设备、部分关闭的阀门、短半径或斜接弯头、三通或异径管。针对上述问题，EIG 中提供了针对流体振动的分析方法，即通过对管道密度和流速的计算分析出管道发生振动的可能性，在 EIG 中也称作失效可能性（Likelihood of Failure，LOF）。

在实际项目运行中，由于管道的振动会导致动态应力，如果超过临界水平，可能会导致疲劳裂纹的产生或扩展，详见图 2。如果不加以检查，疲劳裂纹会导致全厚度断裂和随后的破裂，部件的疲劳寿命可能会缩短（在某些情况下为几分钟或几天）。然而，如果振动是间歇性的，则部件的疲劳寿命可能会更长，具体取决于动态应力幅度和振动频率。



图 2 小口径管线连接处发生金属疲劳

疲劳最敏感的位置是与主线和螺孔连接相关的焊接处。通常，小口径连接的疲劳失效发生在与母管的连接处，也有可能发生在小口径管道转向处，疲劳失效可能发生在其他焊接位置。详见图 3。

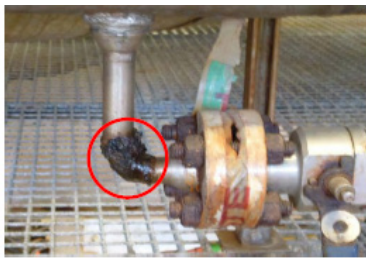


图 3 弯头处金属疲劳

2.1 LOF 的评估方法

管道振动最常见的原因是流动引起的湍流。为了定性井场中的流体振动管线，根据 EIG，LOF 值作为所有管道是否发生振动的筛选标准^[2]。流体振动的 LOF 由以下公式确定：

$$LOF = \frac{\rho v^2}{F_v} FVF$$

ρ ——流体密度， kg/m^3 。

其中 ρv^2 须根据流体是单相流还是多相流确定，如果是单相流：

$$\rho v^2 \text{ (实际密度)} \times \text{(实际速度)}^2$$

如果是多相流：

$$\rho v^2 = \text{(有效密度)} \times \text{(有效速度)}^2$$

2.2 验收标准

2.2.1 LOF 分值及相关措施

LOF 是一种用于最终定性评估的评分形式。目的是根据 LOF 的分值给出对应的纠正措施。

分值	措施
$LOF \geq 1.0$	须纠正措施，并进行应力计算
$1.0 > LOF \geq 0.5$	须纠正措施
$0.5 > LOF \geq 0.3$	须纠正措施
$LOF < 0.3$	无纠正措施

如果管线的 $LOF \geq 1$ 时，必须采取纠正措施，将 LOF 值降至 1 以下。除此之外，该管线必须进行应力计算，复核其各个节点的应力情况是否满足应力要求。

如果 $LOF < 1$ 无法实现，则应将该情况视为“特殊”情况，必须与客户进行进一步讨论。

2.2.2 预筛选标准 ρv^2

在计算 LOF 之前， ρv^2 值可作为 FIV 管线预筛选标准。由于湍流能量的大部分取决于流体的粘度。因此，对于液体和多相流体，FVF 等于 1。但是对于气体，FVF 使用以下公式计算。

$$FVF = \sqrt{\mu_{gas}} / \sqrt{1 \times 10^{-3}}$$

FVF——Fluid Viscosity Factor，流体粘度系数。

μ_{gas} ——Gas dynamic viscosity，气体动态粘度，Pa.s。

分值	分级	结论
$\rho v^2 < 5000 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$	低	无 FIV
$5000 \text{ kg/m} \cdot \text{s} \leq \rho v^2 < 20000$	中	须计算 LOF
$\rho v^2 \geq 20000$	高	须计算 LOF

2.2.3 固有频率验证

为了确认纠正措施的有效性，有必要验证固有频率是否符合应力计算要求。支架跨度根据 EIG 由固有频率确定，固有频率的确定应与应力计算报告一致。进行管道应力分析，以确保达到所需的频率。基本固有频率取自 CAESAR II。

2.2.4 计算流致振动

流致振动系数通常由下表确定。

支架布置	支架跨距判据	固有频率
Stiff	$L_{span} < -1.2346 \times 10^{-5} D_{ext}^2 + 0.02 D_{ext} + 2.0563$	14 to 16 Hz
Medium stiff	$L_{span} > -1.2346 \times 10^{-5} D_{ext}^2 + 0.02 D_{ext} + 2.0563$ $L_{span} < -1.1886 \times 10^{-5} D_{ext}^2 + 0.025262 D_{ext} + 3.3601$	7 Hz
Medium	$L_{span} > -1.1886 \times 10^{-5} D_{ext}^2 + 0.025262 D_{ext} + 3.3601$ $L_{span} < -1.5968 \times 10^{-5} D_{ext}^2 + 0.033583 D_{ext} + 4.429$	4 Hz
Flexible	$L_{span} > -1.5968 \times 10^{-5} D_{ext}^2 + 0.033583 D_{ext} + 4.429$	1 Hz

支架布置	管线外径 mm	F_v	α	β
Stiff	60-762	$\alpha(\frac{D_{ext}}{T})^\beta$	$446187 + 646D_{ext} + 9.17 \times 10^{-4} D_{ext}^3$	$0.1 \ln(D_{ext}) - 1.3739$
Medium stiff	60-762	$\alpha(\frac{D_{ext}}{T})^\beta$	$283921 + 370D_{ext}$	$0.1106 \ln(D_{ext}) - 1.3739$
Medium	273-762	$\alpha(\frac{D_{ext}}{T})^\beta$	$150412 + 209D_{ext}$	$0.0815 \ln(D_{ext}) - 1.3269$
Medium	60-219	$\exp[\alpha(\frac{D_{ext}}{T})^\beta]$	$13.1 - 4.75 \times 10^{-3} D_{ext} + 1.41 \times 10^{-5} D_{ext}^2$	$-0.132 + 2.28 \times 10^{-4} D_{ext} - 3.72 \times 10^{-7} D_{ext}^2$
Flexible	273-762	$\alpha(\frac{D_{ext}}{T})^\beta$	$41.21 D_{ext} + 49397$	$0.0815 \ln(D_{ext}) - 1.3842$
Flexible	60-219	$\exp[\alpha(\frac{D_{ext}}{T})^\beta]$	$1.32 \times 10^{-5} D_{ext}^2 - 4.42 \times 10^{-3} D_{ext} + 12.22$	$2.84 \times 10^{-4} D_{ext} - 4.62 \times 10^{-7} D_{ext}^2 - 0.164$

2.3 高级分析方法

高级分析方法仅适用于固有频率大于 1 Hz 且小于或等于 3 Hz 的管道。此处需要重新计算。

$$F_v = \exp[\alpha(\frac{D_{ext}}{T})^\beta]$$
$$\alpha = (1.3175 \times 10^{-5} D_{ext}^2 - 4.4213 \times 10^{-3} D_{ext} + 12.217)(0.0529 \ln(f_n) + 1)$$
$$\beta = (-4.622 \times 10^{-7} D_{ext}^2 + 2.835 \times 10^{-4} D_{ext} - 0.164)(-0.1407 \ln(f_n) + 1)$$
$$\exp[z] = e^z.$$

2.4 纠正措施

完成 LOF 计算后，还需要对有振动风险的管道进行纠正，以下是常见的纠正措施。

① DN50 以下的管道减振措施：在小口径连接处增加两个方向的斜撑；减少直管段长度；减少阀门或者仪表的重量。

②大口径管道的减振措施：增大管线壁厚；增大管线口径；降低。

3 结语

在项目运行中，工艺管线作为连接各个装置的主要方式，承担着介质输送的重要任务，也是工艺系统的命脉。传统的振动分析通常集中在机械振动源上，比如泵的振动、压缩机的振动。这种振动往往比较明显，容易发现。很多项目在设计初期就提前进行了预分析。因此，连接动设备的管道

往往得到了有效的保护。但是除了机械振动源外，管道内流体造成的振动常常被忽视。在实际工程项目中，有些管道发生振动与动设备没有关联，而是受到了流体振源的影响。管道振动应从振源入手，从根源解除金属疲劳的风险。

流体振动的分析是复杂的。对于工程项目来说，使用一个有效且操作性强的方法可以提高管道应力计算的深度，还能降低管道发生金属疲劳的风险。而 EIG 手册已在海外的工程项目中可是推广应用，该手册从流体密度、流速入手，提供了计算公式和相关联的判据，将流体振动具象化，在工程应用中具有可操作性。值得注意的是 EIG 提供的振动分析只是应力计算的辅助分析。由于振动与固有频率相关，通过振动分析得出的结论必须在 CII 软件中进行验证。也就是说该分析方法不能脱离应力计算独立存在^[3]，不过该方法也为国内的类似振动分析需求提供了参考。

参考文献

[1] ENERGY INSTITUTE, LONDON, Guidelines for the Avoidance of Vibration Induced Fatigue Failure in Process Pipework, 2008.1.

[2] 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.DOI:CNKI:SUN:ZDCJ.0.2010-06-022.

[3] 税朗泉,刘永寿,顾致平,等.轴向周期激励下含脉动流体简支管道横向振动稳定性分析[J].振动与冲击, 2012, 31(7):133-136.