# 基于有限元模型的管道动力学分析

杨凡<sup>1,2,\*</sup>

1.中国飞机强度研究所,陕西西安 710065

2. 全尺寸飞机结构静力/疲劳航空科技重点实验室, 陕西 西安 710065

**摘 要:**管道系统的动力学问题可能直接影响整个工程系统的安全性,本文基于有限元分析软件,利用双向流固耦合方法, 分别建立了较大雷诺数环境中横向流作用下的管道有限元分析模型,通过对不同来流速度下的应变数据分析,发现当来流 速度超过临界流速时,管道的运动轨迹呈"8"字形振荡,其主频与结构固有频率接近时,结构响应幅值最大,即所谓的"锁频" 现象。此外,流场响应与结构相同,也呈周期性变化。

关键词:流致振动,双向流固耦合,数值模拟,数据分析

## 中图分类号:TB123

#### 文献标识码:A

随着现代新工艺、新技术、新材料的不断开发,管道在 航空航天、海洋科学、核电反应堆等众多领域中广泛应用。 第一次世界大战初期,Handley Page轰炸机的尾翼颤振坠 毁促使学术界进行了第一批有目的的气动弹性颤振研究。 航空发动机管路系统用于发动机部件之间以及与飞机间的 流体输送,由于发动机转子及传动组件的激振导致管路系 统振动,会造成管路故障发生,影响到管路系统甚至发动机 构件安全可靠地运行<sup>[1]</sup>。目前对流固耦合问题的研究,国 内外多关注的是柱形结构,这类系统含有丰富的动力学行 为,其物理模型简单,数学方程简洁,具有广泛的工程背景 和工程实用性,又被称为"典型的动力学问题"<sup>[2]</sup>。

管道外的流体等必须将流速控制在一定范围内,否则 会造成结构损坏。改变管道间距及其固有频率,对管道振 动有很大影响。借助数值模拟软件,可以大大提高数值仿 真的效率,并为工程实际应用提供参考。

# 1 双向流固耦合

# 1.1 基本理论

流固耦合问题中的最大难题就是交界面网格扭曲问题,由于结构与流场在交界面产生相对位移,学者们使用任意拉格朗日--欧拉(Arbitrary Lagrangian-Eluerian, ALE)法解决了这一问题<sup>[3-6]</sup>。

## DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2019.06.006

运用 ALE 描述,任意一个求解变量的物质时间导数均 可以利用参考时间的导数和空间梯度表示:

$$\frac{\partial f}{\partial t}\Big|_{\chi} = \frac{\partial f}{\partial t}\Big|_{\chi} + \frac{\partial f}{\partial x}c = \frac{\partial f}{\partial t}\Big|_{\chi} + c \cdot f \tag{1}$$

$$v = \hat{v} + \frac{\partial x}{\partial \chi} w \, \underline{\mathbb{P}} c = v - \hat{v} = \frac{\partial x}{\partial \chi} w \tag{2}$$

式中:c为对流速度。

ALE 描述中的网格可以自由移动,既克服了拉格朗日-欧拉法中网格产生畸变的缺点,又可以对自由表面流动进 行跟踪,有较大潜力,但也使方程的计算复杂化,仍然需要 进一步的研究。

依照流固耦合效应的重点是结构还是流体,存在不同 的分析方法。在采用有限元法求解流固耦合问题时,需要 对固体域和流体域分别通过有限元方法离散,在单元组合 中实现边界条件,则得到简化的耦合方程为:

$$\begin{bmatrix} A_{II}^{f} & A_{IC}^{f} & 0\\ A_{CI}^{f} & A_{CC}^{f} + A_{CC}^{s} & A_{CI}^{s}\\ 0 & A_{IC}^{s} & A_{II}^{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_{I}^{f}\\ \Delta X_{C}^{fs}\\ \Delta X_{I}^{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{I}^{f}\\ R_{C}^{fs}\\ R_{I}^{s} \end{bmatrix}$$
(3)

式中:f = C为流体域和固体域;C = I代表耦合面和内部节 点上的变量;A'和A'为等效质量矩阵; $\Delta X'_{l}, \Delta X'_{l}, \Delta X'_{l}$ 为流体 域、耦合面、固体域的节点未知数矢量; $R'_{l}, R'_{c}, R'_{l}$ 分别为流 体域、耦合面、固体域外力矢量。可以消除内部流体变量, 通过耦合面对结构分析进行求解;也可以消除固体域内部

收稿日期:2019-03-20,退修日期:2019-04-08,录用日期:2019-04-28

\*通信作者.Tel.: 13002989599 E-mail: kikoyang@live.cn



引用格式: Yang Fan.Dynamics Analysis of pipeline using finite element method[J].Aeronautical Science & Technology,2019,30(06);39-44. 杨凡.基于有限元模型的管道动力学分析[J].航空科学技术,2019,30(06);39-44.

变量,通过耦合面对流体分析求解。

#### 1.2 流体力及边界条件

外部流体在管道上的作用力包括升力、附加阻尼及附 加质量<sup>[7]</sup>。其中升力可以表示为:

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho_0 D V^2 \sin \omega_s t \tag{4}$$

$$C_a = r\omega_s \rho_0 D^2 \tag{5}$$

$$M_{a} = \frac{1}{4} \pi D^{2} C_{m} \rho_{0} \tag{6}$$

式中: $C_L$ 为升力系数, $\rho_0$ 为管外流体密度, $\omega_s$ 为涡激频率, 由公式:

$$\omega_s = 2\pi \frac{S_i V}{D} \tag{7}$$

即可得到式(5)中:  

$$r = \frac{C_D}{4\pi S_t}$$
(8)

式中: $C_D$ 为阻力系数, $S_i$ 为Strouhal数。在雷诺数 $Re < 3 \times 10^5$ 时, $S_i$ 数值基本为一常数,约为0.21,取 $C_D = 1.2, C_m$ 为附加质量系数,取 $C_m = 1.0,$ 因此,横向外流下的流体力可以写成:

$$F_f = F_L - M_a \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - C_a \frac{\partial w}{\partial t}$$
<sup>(9)</sup>

### 1.3 CFD 数学模型

本文使用三维黏性、不可压缩的流体,利用大涡模拟方 法求解流体区域。流体服从流体力学基本方程,不考虑热 量交换,遵守质量、动量守恒方程,可表示为:

(1) 连续性方程  
$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$
 (10)

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + v \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial j}$$
(11)

式中: $u_i$ 为速度在 $x_i$ 方向上的分量,t为时间, $\rho$ 为流体密度, p为压力,v为流体的运动系数。

同样,对结构进行有限元离散,某时刻结构的动力学方 程为:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + KX = F(t)$$
(12)

式中:*M*为质量矩阵,*C*为阻尼矩阵,*K*为刚度矩阵,*X*为位移矢量,*F*(*t*)为流体运动引起的载荷。

## 2 模型建立

流体状态发生转变时的雷诺数 Re称为临界雷诺数,在 较大雷诺数下会出现湍流状态,一般管道出现湍流现象时 的临界雷诺数约4000。根据经验公式为:

$$Re = \frac{\rho v l}{\eta} \tag{13}$$

本文选用LES大涡模拟,针对高雷诺数的管外流动模型,湍流密度由式(14)得到:

$$I = 0.16 \times (Re)^{-\frac{1}{8}}$$
(14)

求得*I* = 5%,一般来说,其判定方法为:小于1%为低湍流强度,高于10%为高湍流强度,因此本文选用中等湍流密度。

本文使用如下模型参数:管长*L*=0.5m,外径*D*=0.1m, 内径*d*=0.095m,弹性模量*E*=10GPa,泊松比*v*=0.3,管子的密 度为 $\rho_0$ =6500kg/m<sup>3</sup>,瑞利阻尼 $\alpha$  = 5.098, $\beta$  = 0.000215,流体 为水,密度 $\rho_1$ =998.2kg/m<sup>3</sup>,[动力]黏度 $\mu$ =0.001003Pa·s。

数值模拟使用的流场区域尽量小,以减少计算量,同时 需要使数值模拟结果尽可能准确。为保证简化计算并且使 结果尽可能准确,本文最终选择流场区域尺寸为20D× 10D×50D。

数值计算结果与网格划分关系极为密切,网格越密计 算精度越高,但同时计算量越大,计算周期越长,最终选用 网格如图1所示。





# 3 响应分析

#### 3.1 结构响应

对不同流速下的单管响应情况进行分析,引入无量纲量 x/D和y/D,分别代表管道沿x轴振动位移与直径的比值和y 轴振动位移与直径的比值。得到管的运动轨迹如图2所示。

由图像可以看出,在流速较小时管道保持稳定,然后先沿着y轴方向逐渐开始产生形变,其运动轨迹呈"8"字状的斯特劳哈尔型。随着流速逐渐增大,管的位移先增大,当流体激励与管产生共振时位移达到最大,之后管道振动逐渐减小<sup>[8,9]</sup>。

表1为管的前三阶固有频率,同时对管进行升力、阻力





表1 前三阶固有频率 Table 1 Inherent frequency of the first three order

阶数	结构频率/Hz
1	60.946
2	167.00
3	324.86

频谱特性分析,如图3所示。在锁频范围内,升力主要变化范围为50~61Hz和150~181Hz,与结构固有频率接近,而阻





Fig.3 Lift and drag frequency spectrogram

力的主要变化频率为107~118Hz和234~239Hz。升力方向的振动频率是阻力方向的一半。

#### 3.2 流场响应

双向流固耦合中,管道对流场的影响主要通过压力变 化体现,图4~图6为各个速度下的流场压力云图。当流速 为0.5m/s时,流场压力在短暂变化后保持稳定;随着流速增 大流场压力逐渐增大,当流速增大为2.5m/s时,流场已经产 生周期性变化,并随着流速增大流场压力不断增大。





(b) t = T/4







图 4  $\nu = 0.5$ m/s下流场压力云图 Fig.4 Flow field pressure nephogram while  $\nu = 0.5$ m/s



(a) t=0



(b) t = T/6



(c) t = T/3



(d) t = 2T/3



(e) t = 5T/6



(f) t = T

图5 v=1.5m/s下流场压力云图













(c) t = T/3



(d) t = 2T/3



(e) t = 5T/6



图6 v = 3.5m/s下流场压力云图 Fig.4 Flow field pressure nephogram while v = 3.5m/s

# 4 结论

基于LES大涡模拟模型对不同入口流速下两端固支的 边界条件进行双向流固耦合,实现了两个物理场之间数据 传输和交换。通过对应变数据分析,流场垂直流过单管时, 会导致管道发生涡激振动,x向位移与升力大小变化一致,y 向位移与阻力大小变化一致,横向位移远大于流向位移。 在流速较小时,管道经过微幅振动最终回归稳定;随着流速 的不断增大,管的振动幅值也开始增大,直到管的固有频率 与流体激振产生"锁频"现象;随后流速继续增大,管在升力 方向的位移逐渐减小。

## 参考文献

- 程林. 换热器内流体诱发振动[M]. 北京:科学出版社, 1995.
   Cheng Lin. Fluid-induced vibration in heat exchangers [M].
   BeiJing: Science Press, 1995. (in Chinese)
- [2] 任建亭,姜节胜. 输流管道系统振动研究进展[J]. 力学进展, 2003, 33(3):313-324.

Ren Jianting, Jiang Jiesheng. Research progress on vibration of pipeline system [J]. Mechanics Progress, 2003, 33 (3): 313-324. (in Chinese)

[3] Hirt C W, Amsden A A, Cook J L. An arbitrary Lagrangian-

Eulerian computing method for all flow speeds[J]. Journal of Computational Physics, 1974, 14(3): 227-253.

- [4] DonÃea J. Arbitrary Lagrangian Eulerian finite element methods[Z]. Computational Methods for Transient Analysis, 1983:474-516.
- [5] Liu Z, Huang Y. An arbitrary Lagrangian-Eulerian boundary element method for large-amplitude sloshing problems[J]. Journal of Vibration Engineering, 1993(6):10-19.
- [6] Huang Y, Qian Q. Fluid-structure impact analysis with a mixed method of arbitrary Lagrangian-Eulerian BE and FE[J]. Acta Mechanica Solida Sinica (English Edition), 1993, 6(4): 365-376.
- [7] 曹航.内外流激励下管道系统的流致振动研究[D].成都:西 南交通大学,2012.
   Cao Hang. Flow-induced vibration of pipeline system under

internal and external flow excitation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.(in Chinese)

- [8] 包日东,闻邦椿.水下悬跨输流管道流致振动响应研究[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(3):115-120.
   Bao Ridong, Wen Bangchun. Flow-induced vibration response of underwater suspended pipeline [J]. Seismic Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29 (3): 115-120.(in Chinese)
- [9] 席志德,陈炳德,李朋洲,等. 流致振动研究概述[C]// 全国反应堆结构力学会议.中国力学学会,2007.
  Xi Zhide, Chen Bingde, Li Pengzhou, et al. Overview of flow-induced vibration research [C]// National Conference on Reactor Structural Mechanics. Chinese Society of Mechanics, 2007.(in Chinese)

#### 作者简介

杨凡(1992-) 女,硕士研究生,助理工程师。主要研究方向:飞机结构强度试验设计。 Tel:13002989599 E-mail:kikoyang@live.cn

# Dynamics Analysis of Pipeline Using Finite Element Method

## Yang Fan<sup>1,2,\*</sup>

1. China Aircraft Strength Research Institute, Xi'an 710065, China

2. Aviation Technology Key Laboratory of Full Scale Aircraft Structural Statics / Fatigue Test, Xi'an 710065, China

**Abstract:** Dynamic problems of pipeline system directly affect the safety of the entire engineering system, therefore it has important research significance and value. Based on finite element analysis software, the flow-induced vibration phenomena of pipeline in engineering were studied in this paper. By using the Bi-directional fluid-solid coupling method, the finite element analysis models under the transverse flow in high Reynolds number environment were established. According to the analysis of displacement data, it was found that when the flow velocity exceeds the critical velocity, the trajectory of the tube is "8", and the amplitude of the structural response is largest when the frequency is close to the natural frequency of the structure, that is, the so-called "lock frequency" phenomenon. Furthermore, the flow field is also periodic.

Key Words: flow-induced vibration; bi-directional fluid-solid coupling; numerical simulation; data analysis