文章编号:1671-8844(2009)02-0264-04

基于 ADINA 的压力管道流固耦合分析

冯卫民,宋 立,肖光宇

(武汉大学水力机械过渡过程教育部重点实验室,湖北 武汉 430072)

摘要:压力管道系统中存在流体和结构之间的耦合振动.对压力管道的流固耦合现象进行分析,建立了流固耦合的 有限元数学模型,运用有限元软件 ADINA 模拟阀门开关引起的过渡过程,对直管压力管道在不同约束条件下的流 固耦合现象进行了数值模拟计算,并进行了模态分析.计算结果表明流固耦合作用对压力管道系统的运行有重大 影响,验证了压力管道考虑流固耦合的必要性.

关键词:压力管道;流固耦合;有限元;ADINA

中图分类号:U 173.91 **文献标志码**:A

Coupling analysis of fluid structure interaction in pressure pipes based on ADINA

FENG Weimin, SONGLi, XIAO Guangyu

(MOE Key Laboratory of Hydro Mechanical Transients, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract : There exist coupling vibrations between fluid and pressure pipes. The fluid structure interaction (FSI) in pressure pipes is analyzed. A finite element mathematical model of FSI is establised. The FSI dynamics in straight pressure pipes in different constraints is numerically simulated and analyzed with the FEM software ADINA. At last, the modal analysis is carried out. The numerical simulation results show that the FSI has an important effect on piping system working so as to prove that it is necessary to consider FSI for pressure pipes.

Key words: pressure pipe; fluid-structure coupling; finite elements; ADINA

管道系统作为一种最具有代表性的流体输送系统,在众多的工业领域具有十分广泛的应用,发挥着极其重要的作用.但管路系统工作过程中不可避免地会出现由于各种原因而产生的非定常流动,它会引起系统的振荡,降低系统运行的可靠性、恶化工作环境、影响仪器仪表的精度、导致管道结合部渗漏,严重时使管道爆裂或系统失效而成为大的事故^[11]. 1993 年湖北阳逻电厂输水系统发生 3 次事故,造成冷凝器附近的伸缩节、冷凝器和泵房堵头的变形和破坏.在运载火箭发射过程中也存在流固耦合引起的振动问题,大型液体火箭的结构纵向振动与推进系统相互作用而产生的一种不稳定的闭环自激振动 (通常称之为 PO GO 振动)引起火箭剧烈的低频振动,使整个火箭出现不稳定,导致火箭上仪器设备和卫星的可靠性降低甚至飞行失败^[2].因此探求管道系统流固耦合作用的机理和运动规律、动力学行为,不仅对维护管道系统的运行有十分重要的意义,而且对研究其他结构的流固耦合也具有直接的借鉴作用.

对于有压输水管道,系统操作会诱发水力暂态 过程,严重时产生称为水击或水锤的极端水力现象, 当水击压力以波的形式在管道中运动时,又将其称 为压力涌浪.由于水力暂态而诱发的管道振动在振 动力学中也可称为喘振.作为一种极端的非定常流 动问题,水击产生的压力升高以波的形式在管道系

收稿日期:2008-10-17

作者简介:冯卫民(1958-),男,教授,主要从事流体机械及工程、流体输送及过渡过程控制理论及应用研究, E-mail:wmfeng @whu.edu.cn.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:50879062).

265

统中运动,对于少约束或是弱约束的管道系统来说, 波的运动会诱发管道产生自激振动,甚至大幅振荡, 而振动又会引起新的水力暂态过程,从而造成了在 管道中同时并存有流体运动、压力波动以及管道振 动等多种运动的形式,这些具有不同特性的运动形 式之间的耦合作用称为流体与结构之间的耦合 (Fluid Structure Interaction),或简称为流固耦合 (FSI)^[3].

ADINA 有限元软件具有强大的多物理场耦合 功能,本文首先建立流固耦合有限元模型,然后运用 ADINA 中的 FSI 模型进行流体与管道固体结构的 耦合计算.通过设定管道进口流速,从而准确地模拟 非定常流动,更加精确地模拟流体输送系统过渡过 程,同时也模拟了管道结构的应力、应变和固有频 率,为管道的约束、强度的校核提供了准确的依据.

1 流固耦合的有限元数学模型

1.1 不可压缩粘性流体的有限元方程

不可压缩粘性流体流动的连续方程和 Navier-Stokes 方程为^[4]

 $\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$

 $\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\partial x_i} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nabla^2 u_i \qquad (2)$

将计算域划分为有限多个单元,可以得到相应 于动量方程的单元有限元方程:

式中各下标 , , = 1,2, ..., *r*(*r* 为单元的节点总数),各系数阵的上标和变量的下标 *i*,*j*,*k*=1,2,3, 分别代表空间坐标 *x*,*y*,*z*.

应用相同的方法可以导出关于连续方程的单元 有限元方程:

$$[G^{i}] \{ u^{i} \} = \{ H \}$$
(4)

现将单元有限元方程(3)和(4)按计算域根据一 定的方式迭加起来,便得到了关于求解不可压粘性 流体流动的总体矩阵方程如下:

$$[A]{U} + [B]{U}{U} + [C]{P} + [D]{U} = [E] + [F]$$
(5)
[G]{U} = { H} (6)

1.2 弹性结构体的有限元方程 动态中单元的运动方程为

 $\begin{bmatrix} M \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{c} \\ \end{array} \right\} + \begin{bmatrix} C \rrbracket \left\{ \begin{array}{c} \\ \end{array} \right\} + \begin{bmatrix} K \rrbracket \left\{ \begin{array}{c} \\ \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} R \\ \end{array} \right\}$ (7) 结构整体的运动方程式可以用单元的运动方程 式作为基础按一定方式叠加而得到: $\begin{bmatrix} M \\ c \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} d \\ c \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} k \\ c \end{pmatrix} = \\ R_{s} \end{pmatrix}$ (8) 结构整体的有限元方程为

 $\begin{bmatrix} \mathbf{M} \left\{ \begin{array}{c} \cdot \\ \end{array} \right\} + \begin{bmatrix} \mathbf{d} \left\{ \begin{array}{c} \\ \end{array} \right\} + \begin{bmatrix} \mathbf{k} \\ \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \mathbf{R} \\ \end{array} \right\}$ (9)

1.3 流固耦合的有限元方程

在压力管道流固耦合的区域,流体对管壁的压 力改变了管壁的构形,而后者反过来又影响流场的 分布.在流固交界处流体和弹性体具有相同的速度 和压力,这是进行流固耦合的物理条件.

考虑流体的作用,弹性体在液体中离散后的结 构动力学方程应改写成:

$$\left[\mathbf{M} \right] \left\{ \begin{array}{c} \cdot \\ \end{array} \right\} + \left[\mathbf{C} \right] \left\{ \begin{array}{c} \end{array} \right\} + \left[\mathbf{K} \right] \left\{ \begin{array}{c} \end{array} \right\} = \mathbf{F}(t) + \mathbf{R}_{f}(t)$$
(10)

其中,F(t)为节点外加载荷向量,R_f(t)为流体与结构相互作用而产生的附加节点向量,它们都是压力 P的函数.

所以式(10)可写成:

 $\left[\mathbf{M} \right] \left\{ \begin{array}{c} \mathbf{M} \\ \end{array} \right\} + \left[\mathbf{d} \\ \end{array} \right\} + \left[\mathbf{K} \\ \end{array} \left\{ \begin{array}{c} \mathbf{N} \\ \end{array} \right] = \left\{ \begin{array}{c} \mathbf{P} \\ \end{array} \right\}$ (11)

在动水流场中,求解流体弹性体问题的扰动流 场不仅与弹性体的变形有关,还与初始动水流场的 速度有关.这时扰动水压力不仅产生了附加质量,还 产生了附加阻尼项和附加的刚度项.流固耦合问题 的物理实质是联合求解(5)、(6)、(11),即

$$\begin{cases} [A] \{U\} + [B\{U\} \{U\} + [C] \{P\} + [D\{U\} = [E] + [F] \\ [D\{U\} = [H] \\ [G\{U\}] = [H] \\ [M] \{ \cdot \} + [C] \{ \cdot \} + [K] \{ \cdot \} = \{P\} \end{cases}$$
(12)

2 管道流固耦合动力学分析

本文以有压管路系统的一段直圆管为模型采用 ADINA 进行仿真计算. 管道在输流过程中阀门开 关引起的过渡过程经常见到,通过改变进口速度边 界条件来模拟这一过程. 分别设置流体进口速度在 0.003 s内由 0 m/s升到 2 m/s(开阀)和由 2 m/s 降到 0 m/s(关阀),开、关阀时间按最快速开关阀时 间设定^[5],如图 1 所示.

2.1 管道有限元建模

2.1.1 固体模型的建立

几何模型采用 ADINA-native 建模方式,对管 道采用两种约束方式,一种是只在管壁两端施加 0 位移约束,另一种在管道中间位置也加 0 位移约束. 管道单元采用 9 节点壳单元,单元划分采用 9 节点 规则壳单元,网格密度采用定长值,设定流固耦合边 界,并采用小变形假设,如图 2 所示.



图 2 官理候当

2.1.2 流体模型的建立

266

流体采用4节点的四面体单元,如图3所示,在 管的左端施加一个均匀速度,约束管右端的速度成 均匀速度(如果省略这种约束,施加于流体上的重力 将会引起管出口处的流体流动),假定流体模型为大 变形.管壁的边界条件是流-构之间有相互滑动.

2.2 模型参数选择与仿真结果分析

管段长度为 5 m,管内径为 0.204 m,壁厚为 18



图 3 流体模型定义

mm. 弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3, 密度为 7 800 kg/m³. 管内流体为水,密度为 1 000 kg/m³, 动力粘性为 1.005 ×10⁻³ Pa ·s. 仿真结果如表 1 所 示,其中 P_{max_1} 为流体的最大压力, S_{max_1} 为管道的最大变形, max_1 为管道的最大应力.

对有压直管道流体瞬变过程进行仿真结果分 析,可以得出如下结论:

 1) 管道在流体输送瞬变过程中流体的压力、管 壁的变形位移、应力均有较大的振荡,但随着瞬变量 变为稳定量,压力管道的这些参数很快收敛趋于 稳定.

2) 通过对管道两种约束方式的仿真比较,可 以看出两端及中间加固支约束比只在两端固支约 束管壁变形位移小(1.0%~72.4%)、管壁应力小 (0.9%~13.7%),管内流体的压力也有不同程度 的变化.

3) 流体瞬变对管道影响较大,管壁产生变形,

时间	管道两端固支			管道两端及中间固支			(<i>P</i> _{max₂} -	(S _{max1} -	(_{max1} -
	Pmax.	$S_{\rm max}$	max.	$P_{\rm max_2}$	S _{max}	maxa	$P_{\max_1})/$	$S_{\max_2})/$	_{max2})/
/ s	/ MPa	(10^{-5} m)	/ MPa	/ MPa	(10^{-5} m)	/ MPa	P_{\max_1}	S_{\max_1}	max ₁
	/ 1 111 u	/ (10 11)	/ 1011 u	/ 1011 u	/ (10 111)	/ 1 111 u	/ (%)	/ (%)	/ (%)
01002	230	0.585	1490	1490	231	0.470	1470	0.4	19.7
0.003	373	1.45	2500	375	0.831	2440	0.5	42.7	2.4
0.004	93	0.507	586	89.8	0.192	554	3.4	62.1	5.5
0.005	- 89.4	0.829	635	- 92.3	0.229	601	3.2	72.4	5.4
0.006	- 108	0.234	706	- 105	0.219	674	- 2.7	6.4	4.5
0.007	- 26.8	0.0578	174	- 23.3	0.0838	160	- 13.1	- 45.0	8.0
0.014	4.7	0.182	60.9	5.62	0.629	48.5	19.6	65.4	13.7
0.021	- 336	0.733	2220	- 343	0.705	2210	2.1	3.8	0.5
0.022	- 447	2.25	3030	- 446	0.100	2900	0.2	55.6	4.3
0.023	- 429	1.21	2890	- 423	0.889	2800	1.4	- 26.5	3.1
0.024	- 34	0.103	215	- 30.4	0.104	204	10.6	1.0	5.1
0.025	171	0.402	1140	172	0.381	1130	0.6	5.2	0.9
0.026	123	0.817	820	116	0.245	731	5.7	70.0	10.9
0.040	4.48	0.188	47.0	6.00	0.857	46.0	33.9	54.4	2.1

表1 管道两种约束方式下仿真结果对比

这对管路系统的安全运行有不可忽略的影响,因此 对输流进行流固耦合数值模拟是十分必要的.在工 业中可以通过采用合理管道约束方式和操作方式, 减小压力管道瞬变过程中管壁变形、流体压力振荡、 管壁应力振荡.

3 管道模态仿真分析

模态分析可以确定一个结构的固有频率,固有

频率是承受动态载荷结构设计中的重要参数. 模型 同前,采用 Unsymmetric 法提取模态,分别计算了 考虑流固耦合与否、对管壁在中间加0位移约束与 否4种情况下管道的前5阶固有频率. 仿真结果如 表1所示.影响系数为考虑流固耦合与不考虑流固 耦合的管道固有频率之比^[6],如表2所示.

从上述对管道模态分析的结果,可以得出如下 结论:

表 2 管道固有频率

		管道两端固支		管道两端固支且中间固支			
阶次	考虑流固 耦合/ Hz	不考虑流固 耦合/ Hz	影响 系数	考虑流固 耦合/ Hz	不考虑流固 耦合/ Hz	影响 系数	
1	234.32	296.27	0.791	333.82	504.34	0.662	
2	327.73	387.47	0.846	508.58	633.71	0.803	
3	432.47	481.37	0.898	608.59	734.22	0.829	
4	516.33	611.37	0.844	654.76	753.71	0.869	
5	673.74	783.75	0.860	705.57	888.25	0.794	

 1)不同的约束方式下,考虑流固耦合时管道的 各阶固有频率比不考虑流固耦合时下降,且下降的 百分比不等,因此,管道考虑流固耦合的固有频率的 降低程度,不能简单地乘以一个相同系数来处理,在 实际管路系统中应考虑流固耦合对固有频率带来的 影响,尽量使管路固有频率与激励源频率相差较大, 以避免共振的发生.

2)不同约束方式下管道的固有频率有较大的 差异,因此在工业管路系统设计时可以通过改变管路的约束方式来改变管路的固有频率,以避免管路 共振的发生,因为有时管路系统中激励源的频率并不好改变或者不能改变.

4 结 论

本文对压力管道的流固耦合现象进行了分析, 建立了流固耦合的有限元数学模型,基于有限元软 件 ADINA 对管道流固耦合现象进行了数值模拟计 算.结果表明:

1)管道在流体输送瞬变过程中流体的压力、管壁的变形位移、应力均有较大的振荡,两端及中间加固支约束时管壁变形位移、管壁应力比只在两端固支约束时小,可见管道不同的约束方式下对瞬态过程中管壁的变形程度有影响.因此在工业中应通过采用合理管道约束方式以及操作方式,以减小压力管道瞬变过程中管壁变形、流体压力振荡、管壁应力振荡.

 考虑流固耦合时管道的各阶固有频率比不 考虑流固耦合时低,且下降的百分比不等,因此,管 道考虑流固耦合的固有频率的降低程度,不能简单 地乘以一个相同系数来处理,在实际管路系统中应 考虑流固耦合对固有频率带来的影响,尽量使管路 与激励源频率相差较大,以避免共振的发生;不同约 束方式下管道的固有频率有较大的差异,因此在工 业管路系统设计时通过改变管路的约束方式来改变 管路的固有频率,以避免管路系统共振的发生.

参考文献:

- [1] 张立翔,杨 柯.流体结构互动理论及其应用.北京:科学出版社,2004.
- [2] Tijsseling A T, Vardy A E, Fan D. Fluid structure interaction and cavitation in a single-elbow pipe system
 [J]. Journal of Fluids and Structures. 1996,10:395-420.
- [3] 苏丽杰.流体管道振动问题研究[D].沈阳:东北大学, 2005.
- [4] Otwell R S. The effect of elbow translation on pressure transients analysis of piping systems [C]// Symposium on Fluid Transients and Fluid Structure Interaction. Orlando :ASME,1982:127-136.
- [5] Sreej IB, Jayaraj K, Ganesan N. Finite element analysis of fluid structure interaction in pipeline systems
 [J]. Nuclear Engineering and Design, 2006,227:313-322.
- Yoo Y H, Lee M. A three-dimensional FE analysis of large deformations for impact loadings using tetrahedral elements [J]. Computational Mechanics, 2006,32 (2):96-105.