流固耦合效应对输液管道的振动影响研究

杨大伟,谢敬华,田科

(中南大学现代复杂装备设计与极端制造教育部重点实验室,长沙 410083)

摘要: 压力管道系统中存在流体和结构之间的耦合振动。在考虑流固耦合效应的情况下,应用 ADINA 中流固耦合分析 求解器 ADINA-FSI 建立了输液管道的直管有限元模型,介绍了管壁模型和流体模型的建模过程以及流固耦合计算过 程、压力突变和约束的施加以及模型参数选择等。依据仿真结果,分析了压力突变、管道模型和简支等因素对管道振动 的影响。有压流动对管道横向和轴向振动的影响受到支承条件的影响,固支数量的增多有助于消减压力突变等因素引 起的管道振动,管道及流体参数的合理选取等也对振动有重要影响。

关键词: 输液管道; 流固耦合; 动力学分析; 简支

中图分类号: TTH2 文献标识码: A 文章编号: 1671-3133(2010) 08-0144-05

Effect of the fluid structure interaction for fluid pipeline impact and study

YANG Da-wei XIE Jing-hua ,TIAN Ke

(Key Laboratory of Modern Complex Equipment Design and Extreme manufacturing,

Central South University Ministry of Education Changsha 410083 China)

Abstract: The vibration between fluid and structural were presented in conveying fluid piping system. Based on the Fluid Structure Interaction(FSI) theory a finite element model was established for long straight conveying fluid piping system by using ADI-NA-FSI analysis solver. The processes of pipe modeling and fluid modeling, FSI computing process, pressure jump, the selection of boundary condition and model parameter were considered. According to the result of computer simulation influence factors foregoing were proved: the vibration was effected by the supporting condition on both the axial direction and radial direction; the decrease of pressure jump is accompanied by raising the number of simply supporting; the vibration was impacted with proper selection of the pipe and fluid parameters.

Key words: piping system conveying fluid; fluid structure interaction; dynamics analysis; simply supporting

输液管道中的油击问题越来越引起人们的重视^[12]。油击在管道运行中是时有发生的一种特殊的现象。当阀门突然关闭或开启、负载突然变化或者突然停电、停泵等情况发生时,油液流速和动量会迅速变化,从而引起压力急剧升高或降低的交替变化现象。油液压力作用在管壁上,使管子发生振动。从油击综合实验(在实验台做过相关实验并测得相关数据)中可以看到,油液流动时,当突然受到阻力,流速会发生变化,从而产生油击。这种大幅度的压力波动,往往会引起管道的强烈振动、阀门破坏、管道接头断开和管道爆裂等重大事故,也可能出现这种波动压力与其他周期现象发生共振。同时,由于使用的输液

管道越来越长,压力波行进周期对压力反馈的影响比 较明显^[3,4]。因此,建立长管道液压系统下稳定流的 压力波行进周期和幅值波动仿真模型,分析管道弹 性、液体惯性和压缩性对液控系统稳定性及快速响应 性的影响,将对有压管油击问题的研究有较大的实际 价值。

在管道振动分析中,有限元法的应用也越来越广 泛^[5,6]。本文应用有限元软件 ADINA 中流固耦合分 析求解器 ADINA-FSI,建立有压输液管道振动的有限 元模型 模拟其在不同约束条件下由于阀门作用或负 载突变等因素引起的流固耦合现象^[7,8],进而依据有 限元模拟结果,分析压力突变、管道参数和简支等对

^{*} 国家 973 重点基础研究发展计划项目(2007CB714004)

管道振动的影响。经分析,流固耦合效应对输液管道 系统的运行有重大影响,验证了输液管道考虑流固耦 合的必要性,提出了一些认识和建议。

1 流固耦合的有限元方程

应用在流固耦合界面的基本条件为:

运动学条件 $d_f = d_s$ 动力学条件 $n \tau_f = n \tau_s$ (1)

式中: \underline{d}_{f} 和 \underline{d}_{s} 分别为流体和结构的位移; n为垂直于流 固耦合界面的方向; $\underline{\tau}_{f}$ 和 $\underline{\tau}_{s}$ 分别为流体和结构的应 力,下划线表示这些值只定义在流固耦合界面上。

流体速度条件由运动学条件得到,应用无滑移壁 面条件,则 $v = \dot{d}$,其中v为结构移动速度。

流体和结构的模型是按照下面方法耦合的:流固 耦合界面上流体的节点位置是由运动学条件决定的, 其他节点的位置由程序自动确定以保留初始网格的 质量。根据动力学条件,在流固耦合界面上,流体的 分布力根据式(2)积分为集中力 *F*(*t*)施加到结构节 点上:

 $F(t) = \int h^d \tau_f dS \quad \dots \quad (2)$

式中: h^d为结构节点上的位移; dS 为面积微元。

流体方程为:

 $G_{f}[f,\dot{f}] = 0$

结构方程为:

 $G_s [d, \dot{d}, \dot{d}] = 0$

式中: f为流体变量; d为结构变量。

流体的速度 v 和加速度 a 分别为:

$${}^{\iota+\partial\Delta\iota}\underline{v} \equiv \frac{{}^{\iota+\partial\Delta\iota}\underline{d} - {}^{\iota}\underline{d}}{\Delta t} = {}^{\iota+\Delta\iota}\underline{v}\underline{\partial} + {}^{\iota}\underline{v}(1-\partial) \\ {}^{\iota+\partial\Delta\iota}\underline{a} \equiv \frac{{}^{\iota+\partial\Delta\iota}\underline{v} - {}^{\iota}\underline{v}}{\Delta t} = {}^{\iota+\Delta\iota}\underline{a}\underline{\partial} + {}^{\iota}\underline{a}(1-\partial) \end{cases} \right\} \dots\dots (3)$$

式中: ∂ 为稳定系数;t为时间; Δt 为时间增量。

t+Δt 时刻的速度和加速度可以用位移未知量来 表示。把式(3)及流体和结构方程应用到耦合系统 中 则最终的时间积分格式可以表示为:

式中: b 为加速度导数; ξ 为加速度相关数; μ 为加速度 导数相关数。

相容时间积分的稳定性条件是∂≥1/2,在大多数

应用中 取∂=1。

耦合系统的解向量记为 $X = (X_f, X_s), X_f, X_s$ 分别 为定义在流体和结构节点上的解向量。因此 <u>d</u> _s = <u>d</u> _s(X_s) <u>r</u> _f = <u>r</u> _f(X_f) 。流固耦合系统中的有限元方程 可以表示为:

式中: F_f 和 F_s 分别为与 G_f 和 G_s 相应的有限元方程。

2 流固耦合模型参数选择

管壁厚度为 0.004m,管径为 φ0.025m,管长为 7.5m。管道材料为双线性塑性钢管其参数见表 1;流 体材料为液压油其参数见表 2。管道模型荷载为重力 荷载,流体模型荷载为重力荷载和流体流速、流体压 力,流速从 0 增大到 1m/s,压力从 0 增大到 10MPa,再 增大到 15MPa,具体加载过程将在模型建立中列出。 直管跨距采取均布原则,中间支承为 2~3 个。

表1 固体模型材料参数

杨氏模量/Pa	泊松比	密度/(kg•m ⁻³)
2.07E11	0. 29	7800

表2 流体材料参数

黏滞系数/[kg・(m・s) ⁻¹]	密度/(kg・m ⁻³)
0. 001	890

3 流固耦合模型建立

分别建立两个有限元模型,管道用 ADINA-Structure 建模,流体用 ADINA-CFD 建模,并分别在不同的 AUI 数据库内建立这两个模型,进行瞬态仿真。

3.1 固体模型的建立

几何模型采用 ADINA-Native 建模方式,Native 几 何建模方式是一种从低向高的建模方式,与几乎所有 的 CAD/CAE 系统的几何建模概念相同。分析类型选 取隐式瞬态算法,管道模型为直管,直管入口端采用 固定支承,中间部分采用均布固定支承,出口端采用 简支支承,根据不同的仿真在管道中间施加不同的固 支数量。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,假定管道模型为小变形。网格密 度采用定长值,设定流固耦合边界,并可显示约束与 网格划分情况,固体(直管)模型如图1所示。此时运 行固体模型求解,但不选定 Run ADINA 项,运行后保 存模型。



图1 固体(直管)模型

3.2 流体模型建立

流体采用恒定不可压缩流体,流体单位采用三维 流体单元(3D fluid element)。为仿真能够进行并提高 仿真速度,流体采用4节点的四面体单元。假定流体 模型为大变形,管壁用的是无滑移的流固耦合边界条 件,边界条件设定在流体外表面与管道接触面上。时 间步共50步,每步0.01s。速度加载在入口,压力加 载在出口处,具体加载过程如表3所示。

表 3 速度加载过程和压力加载过程函数

速度加载过程		压力加载过程		
时间/s	载荷比例因子	时间/s	载荷比例因子	
0.00	0	0.00	0	
0.01	0	0.01	0	
0.20	1	0.20	1	
0.50	1	0.40	1	
		0.41	1.5	
		0.50	1.5	

流体模型如图 2 所示。此时运行流体模型求解, 但不选定 Run ADINA-F项,运行后保存模型。



图2 流体模型

4 仿真与结果分析

在固体模型和流体模型都进行求解后,打开流固 耦合求解器 ADINA-FSI,此时必须同时打开固体模型 和流体模型,进行模型耦合求解,即可得出结果。

4.1 仿真结果

变形显示比例初始设置为图形窗口大小的 10%, 可以使变形的形状便于观察,更直观地看出管道哪个 部位受到的影响最大,同时根据不同的变形设置不同 的放大率。此处将求解后的中间两固支的管道应力 云图放大 500 倍,如图 3 所示。将中间三固支的管道 应力云图放大 5000 倍,如图 4 所示。

从图 3 中可以看出: 在时间步 1 时,管道变形不 大,中间部分下凸;时间步 20 到时间步 40 时,位移变 化也不大,中间部上凸;时间步 41 到 45 时,变形逐渐 加大,受压力影响明显,管道轴向(*X*向)和横向(*Z*向)相比,轴向的变形量远小于横向的变形量。同时 管道有支承处所受应力较大,此处管道直径比两支承



图 4 中间三固支管道各步应力云图

之间的管道直径要大。整个过程中轴向位移远小于 横向位移。

4.2 仿真分析

图 3 中 Z 向最大位移是 -1.00234 × 10⁻² m ,X 向 最大位移是 -6.80127 × 10⁻⁴ m。从图 4 可以看出中 间三固支管道的变化趋势与图 3 所示中间两固支管道 相同 ,轴向和横向位移相差不大 ,均处于一个数量级 , 其中 Z 向最大位移是 -2.09739 × 10⁻⁴ m ,X 向最大位 移是 -2.66655 × 10⁻⁴ m。与中间两固支情况相比 ,中 间三固支 Z 向位移减小 97.91% ,X 向位移减小 60.79% ,也说明在这样的压力流速情况下 ,连接耦合 效应小于泊松耦合效应。同时两种情况下管道初始 端都是先下凸 ,这是因为在仿真过程中考虑了管道和 油液所受的重力载荷 ,而仿真中的油液入口处只是提 供了一定的速度 ,没有频率。在图 3 中 ,中间部分的位 移开始是向下凸起 ,而在图 4 ,中间两固支之间的位移 一直向下凸起 ,说明一定压力流速和一定固支条件 下 ,管道可以处于最佳状态。

针对中间两固支(见图 3)的管道做进一步分析。 将管道应力云图进一步放大后各特殊点截图如图 5 所 示。各支点处管道直径明显比支点间的管道直径大, 并且应力云图分布不均,压力差更大。而管道直径各 支点之间则相对较细,且管道内侧(靠近管道初始位 置)压力较大。这是因为由于变形拉伸导致中间部分 较细,而内侧的相对处于压缩状态,则内侧的压力较 之外侧相对较大。

取节点 2682(4.2, -1.39×10⁻², -2.08×10⁻²) (此处位移变形比其他处变化更明显) 处的位移变形 进行分析。图 6 所示为节点 2682 处的位移变形图 X向数值基本变化不大,并且很小,最大时为 -6.80127 ×10⁻⁴m; 而 Z 向从第 1 时间步到第 10 时间步时位移 变化不大,在 -1×10⁻³m 之内; 当压力突然增大到 15MPa 即第 41 时间步之后时(横坐标是时间步,在时 间步 41 的时候压力突然增大到 15MPa) Z 向数值急 剧变化,增大到 1.00234×10⁻²m。

分析: 在压力流速相对较低时(流速为1m/s,压力为10MPa),管道变形不是很明显; 在流速不变时,当压力增大0.5倍,即变压力为15MPa时,管道变形逐渐增大,说明管道变形受压力幅值的影响较大。

比较管道固支处和管道两固支之间的内径,管道 两固支之间内径要相对小一点,说明此处所受压力相 对较小,主要承受拉力作用。

中间三固支与中间两固支时的最大位移相比 Z



图 6 中间两固支管道节点 2682 处的位移

向减小了两个数量级 X 向变化不大,说明固支条件对 管道横向变形起主要影响作用。

5 结语

1) 在本文所设最大压力、最大流速条件下,连接耦 合效应要小于泊松耦合效应,此时以泊松耦合为主,首 要考虑的是如何减小泊松耦合的影响。其中在中间两 固支情况下,压力在0~10MPa之间变化时,管道振动 比较小; 当压力大于10MPa 时,管道振动开始剧烈。

2) 管道中间的固支主要影响管道横向位移变形量,当出现过大的变形时可以适当增加固支数量。同时压力负载突变对管道的影响比较大,在负载突变剧

烈的系统中要考虑适当增加管道的固支数量。

3) 管道固支处所受到的应力负载变化较大,外侧 比内侧所受应力大一些,当不满足要求时,选取适当 的固支方式将会对管道起到保护作用。

4) 压力、流量及固支条件合理的搭配会让管道处 于一个良好的工作状态 是减小管道振动的主要因素。

5) 减小管道振动的措施有:管道自身减振法、外 力减振法和油液减振法。管道自身减振法包括优化 管道参数,对管道形状(尤其是特殊区管道形状)、长 度、径厚比和管材等进行合理选择。外力减振法包括 增加固支数、改变固支方式、改变管道横向受力大小、 施加减振器及改变控制阀的操作方式等。油液减振 法包括合理选择油液、施加蓄能器等。

参考文献:

- [1] 张立翔 杨柯. 流体结构互动理论及其应用[M]. 北 京:科学技术出版社 2004.
- [2] 胡国良. 盾构模拟试验平台电液控制系统关键技术 研究[D]. 杭州: 浙江大学 2006.

- [3] 曹亮. 输流管道流固耦合振动特性分析 [D]. 昆明: 昆明理工大学 2004.
- [4] 邹光胜. 管道流固耦合系统的非线性动力学行为及 振动主动控制研究[D]. 沈阳: 东北大学 2003.
- [5] ADINA R & D ,Inc. 高级非线性及流固耦合计算系统-ADINA 软件简介 [J]. CAD/CAM 与制造业信息化 2006(8).
- [6] 岳戈 陈权 ,等. ADINA 应用基础与实例详解 [M]. 北京:人民交通出版社 2008.
- [7] ADINA R & D Jnc. ADINA Theory and Modeling Guide Volume III: ADINN CFD & FSI ,ADINA R & D ,Inc , 2008.
- [8] ADINA R & D Jnc. ADINA Theory and Modeling Guide Volume]: ADINA ADINA R & D Jnc 2008.
- 作者简介:杨大伟,硕士,主要研究领域为掘进装备动力系统的能 量传递规律研究。

E-mail: yangnai313@163.com 收稿日期: 2009-10-28



本刊集信息、知识、趣味、可读性于一体,以计算机实用技术见长,博采、精选国内外电脑研究、开发与应用的精华。具有军事、兵器控制色彩,军用计算机的开发,将用相当的篇幅刊登企业信息化、信息化建设、信息传输处理与管理方面的信息及文章,关注IT产业。尤其是刊登 Internet、Agent、嵌入式系统、片上系统、构建技术、网格技术、软硬件二次开发、电脑测控、 CORBA、开放式与微内核技术、柔性与敏捷制造等方面的内容,跟踪报道世界最新技术。

And All and the set and the black black the set



本刊为大16开(A4)、80页、8元/期、中央级之月刊。每月5日出版。 全国各地邮局均可订阅,邮发代号: 22-96 国外代号: M4257



联系地址:太原市193信箱 电脑开发与应用编辑部 邮编:030006 电话:(0351)8725025 传真:(0351)8725207 E-mail:DNKF@chinajournal.net.cn