

有压管道结构运动对管内水锤压力的影响研究

林毅峰,胡 明

(河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 针对经典水锤理论忽略结构对水锤压力影响的问题,深入研究了管道运动对管内水锤特性的影响,建立了水锤流固耦合数学模型,分别研究了管道轴向运动、横向运动和扭转对水锤压力的影响.通过具体实例,研究了流固耦合对管内水锤压力特性产生影响的程度.

关键词 水锤;管道结构;流固耦合;特征线法

中图分类号 :TU991.36 ;TV134

文献标识码 :A

文章编号 :1000-1980(2003)04-0440-04

经典水锤理论能够比较好地反映强约束管道系统的水锤现象,而对于火电厂、核电厂和化工厂的管道系统往往是悬空的复杂环路系统组成的弱约束管道系统,管道结构的动态特性及运动状态对流体的影响是不容忽略的.同时,水锤波的传播也会改变管道结构的特性,二者将相互作用、相互影响.很多试验和应用已经表明,上述那种将流体与结构割裂开来单独分析的方法在某些场合会引起很大的误差,甚至得出与实际情况截然不同的结果.因此,有必要深入研究有压管道的流体—结构相互作用(Fluid-Structure Interaction,简称 FSI).

1 管道运动对水锤的影响

水锤流固耦合的数学模型包括流体的运动方程和连续性方程,以及管道的运动方程和本构方程.以经典水锤理论的基本方程为基础,考虑管道运动和管壁变形对流体流速和压力的影响,通过修正和添加相应的项,就可以得到考虑流体-结构相互作用的水锤基本方程.通过考虑流体对管道动态特性的影响,可以建立起管道的运动方程和本构方程.

流固耦合分析涉及管道的轴向伸缩、弯曲和扭转对流体的影响,影响因素比较复杂.为此,必须根据研究重点的具体需要来选择算例,以便通过比较,找出管道具体运动方式对流体瞬变的影响.取如图 1 所示的管道单元进行分析,考虑管道轴向运动影响,可推导出轴向耦合 4 方程模型;同时考虑轴向、弯曲和扭转影响,可推导出全耦合的 14 方程模型.

1.1 轴向运动和弯曲对水锤压力影响的比较

如图 2 所示的管道系统, A, B 和 D 端固定不动,弯肘处(C)不受外界约束.管道在 C 处可以产生轴向运动.管道系统如图 2 所示(z_1 表示 CD 的轴向, z_2 表示 BC 的轴向),参数如下:管材密度 $\rho_1 = 8940 \text{ kg/m}^3$, 管材泊松比 $\mu_1 = 0.34$, 管壁厚度 $\delta_1 = 1.27 \text{ mm}$, 管材弹性模量 $E_1 = 117 \text{ GPa}$, 管道内直径 $d_1 = 26 \text{ mm}$. 因阀门瞬时关闭在 D 处引起的轴向耦合和全耦合水锤压力如图 3 所示. 计算结果显示,全耦合模型算得的水锤压力的幅值和频率都很接近轴向耦合相应的计算结果. 这表明,在影响水锤压力的结构运动方式中,轴向运动的影响起支配作用. 管道的横向振动和弯曲对水锤压力的影响很小.

1.2 轴向运动、弯曲和扭转对水锤压力影响的比较

图 4 所示的呈空间布置的管道系统包含 B, C 两个直角弯肘,均不受外界约束. 阀门端 D 被固定. 管道

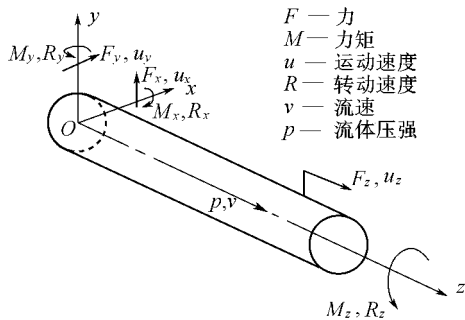


图 1 管道单元
Fig.1 Pipe element

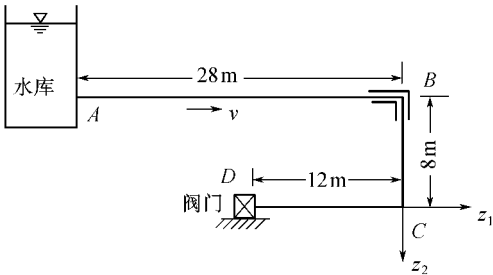


图 2 管道系统 1 示意图
Fig.2 Sketch of pipe system 1

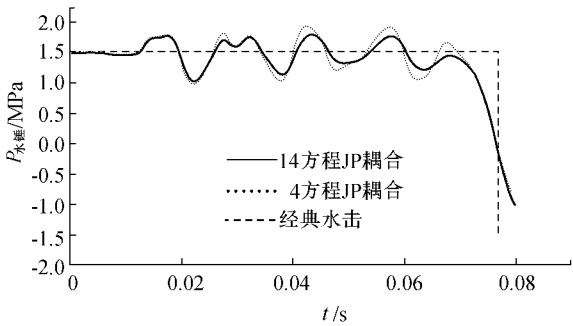


图 3 阀门 D 处水锤压力过程
Fig.3 Water hammer pressure at valve D

参数如下:管道长度 $L_{2AB}=2.0\text{ m}$,管道内直径 $d_2=25\text{ mm}$,管材密度 $\rho_2=8940\text{ kg/m}^3$,a 管道长度 $L_{2BC}=2.0\text{ m}$,管壁厚度 $\delta_2=1.0\text{ mm}$,管材泊松比 $\mu_2=0.34$,b 管道长度 $L_{2CD}=2.0\text{ m}$,管材弹性模量 $E_2=117\text{ GPa}$. 管中水初始流速为 1.0 m/s . 阀门关闭时间为 2.2 ms ,假设流速线性减小. D 处的轴向耦合和全耦合水锤压力如图 5 所示. 14 方程模型算得的弯肘 C 处和阀门 D 处的水锤压力与 4 方程模型的计算结果比较,差别很小. 这说明在考虑流固耦合的时候,管道弯曲和扭转对水锤压力的影响很小.

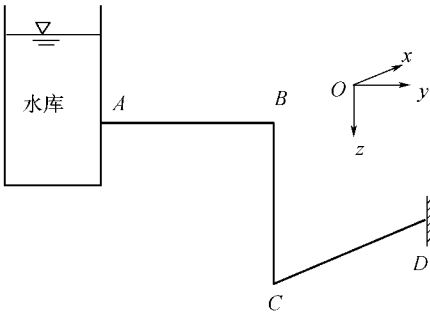


图 4 管道系统 2 示意图
Fig.4 Sketch of pipe system 2

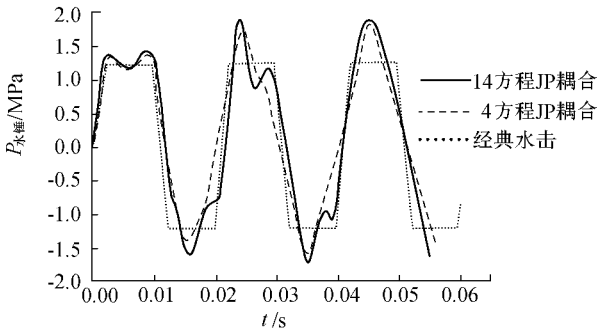


图 5 阀门 D 处水锤压力过程
Fig.5 Water hammer pressure at valve D in a simple pipe system

综上所述,在轴向运动、弯曲和扭转 3 种管道运动方式中,轴向运动对水锤压力的影响是主要的.

2 流固耦合对水锤压力影响程度的判断

前面的分析表明,有压管道流固耦合的各种管道运动形式中,对水锤压力影响最大的是轴向运动. 结构运动对水锤压力的影响,其物理本质是管壁中的应力波与流体中的水锤波共存于管道系统中,由于在系统边界的反射而后叠加,彼此相互作用. 因此,与轴向应力波传播相关的管道轴向自振频率、与水锤波传播相关的水锤波传播周期以及阀门关闭时间是影响有压管道中的流体—结构相互作用的主要因素.

下面应用轴向耦合 4 方程模型,通过具体的算例,研究上述因素对流固耦合的影响,在此基础上给出判断必须考虑流体结构相互作用对水锤压力影响的公式.

2.1 阀门关闭时间 T_s 的影响

定义水锤波的传播周期 $T_w=2L/C_f$,其中 L 为管道长度, C_f 为考虑流固耦合时的水锤波速. 图 6 所示的管道,管中流体为水,初始恒定流速为 1.0 m/s . 假设上游水库端 A 和下游阀门端 C 被固定. 直角弯肘 B 不受外界约束. 管道参数如下:管道直径 $d_3=100\text{ mm}$,管材泊松比 $\mu_3=0.34$,管壁厚度 $\delta_3=5.0\text{ mm}$,管材密度 $\rho_3=8940\text{ kg/m}^3$,管材弹性模量 $E_3=117.0\text{ GPa}$.

可得 $C_f=1322\text{ m/s}$,则 $T_w=0.23\text{ s}$. 假设阀门关闭时间

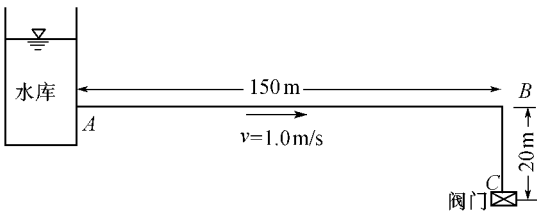


图 6 管道系统 3 示意图
Fig.6 Sketch of pipe system 3

T_s 分别为 0.0 s,0.05 s,0.10 s,0.125 s,0.175 s,0.20 s,0.225 s,0.25 s,0.375 s 和 0.5 s,在阀门关闭过程中流速线性变化.应用轴向耦合 4 方程模型 MOC 法计算管道系统的瞬变响应. 设 $\lambda = \frac{P_{\max} - P_{c\max}}{P_{c\max}} \times 100\%$, $P_{\max}$ 和 $P_{c\max}$ 分别为考虑和不考虑流固耦合时阀门处的最大水锤压力. T_s/T_w 与 λ 的关系如表 1 所示.

表 1 T_s/T_w 与 λ 的关系
Table 1 Relation between T_s/T_w and λ

T_s/T_w	0.00	0.22	0.43	0.54	0.76	0.87	0.98	1.10	1.63	2.17
$\lambda/\%$	35.7	30.7	18.7	15.7	4.0	-3.12	-8.7	-13.4	-14.0	-55.0

根据表 1 用线性拟合得出 λ 与 T_s/T_w 的关系曲线(图 7). 图 7 表明:(a) λ 随 T_s/T_w 的增大而减小;(b) 当 $T_s/T_w < 0.85$ 时,FSI 使水锤压力大于经典值;当 $T_s/T_w > 0.85$ 时,FSI 使水锤压力小于经典值;(c) 当 $T_s/T_w < 0.375$ 时,在 FSI 下 λ 大于 20%,FSI 的影响很显著.

2.2 管道自振周期 T_n 的影响

图 7 所示管道的轴向自振周期为

$$T_n = 4L\sqrt{\frac{\rho_P}{E}}, \frac{4L}{3}\sqrt{\frac{E}{\rho_P}}, \cdots, \frac{4L}{2r-1}\sqrt{\frac{E}{\rho_P}}$$

管道轴向自振的基频所对应的周期为 $T_n = 4L\sqrt{\frac{\rho_P}{E}}$,注意到

$C_p \approx \sqrt{\frac{E}{\rho_P}}$,则 $T_n = \frac{2L}{C_p/2}$,一般情况下有 $C_f < \frac{1}{2} C_p$,所以有 $T_n < T_w$.

对于图 6 所示的管道,在满足 $T_n < T_w$ 和 $T_s < 0.85 T_w$ 的条件下,通过改变管道密度 ρ_P 和弹性模量 E 来改变管道的自振频率,分析 T_n 对耦合水锤压力的影响.应用轴向耦合 4 方程模型 MOC 法分别计算管道系统的瞬变响应.计算方案和结果见表 2.

表 2 T_n 对耦合水锤压力影响的计算方案和结果
Table 2 Calculated results of effect of T_n on coupled water hammer pressure for different schemes

计算方案	$\rho_P/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/GPa	T_n/s	T_s/s	T_n/T_s	弯肘 B 处的 λ 值
①	8940	117	0.19	0.05	3.80	0.45
②	2100	10	0.30	0.125	2.40	0.40
③	2500	15	0.24	0.125	1.92	0.33
④	5000	280	0.09	0.050	1.80	0.30
⑤	8940	117	0.19	0.125	1.52	0.25
⑥	7900	210	0.13	0.125	1.04	0.18
⑦	5000	280	0.09	0.125	0.72	0.03
⑧	3000	280	0.07	0.125	0.56	0.01

计算结果表明, λ 随 T_n/T_s 的增大而增大;当 $T_n/T_s > 1.0$ 时, λ 大于 15%,流固耦合使水锤压力显著增大; $T_n/T_s < 1.0$ 时, λ 接近于零,流固耦合对水锤压力的影响可以忽略.由此认为,当满足 $T_n > T_s$ 时,流固耦合对水锤压力的影响是明显的.

2.3 流固耦合对水锤压力影响程度的判断

综合上面的结论,得到一组判断流固耦合对水锤压力影响程度的关系式:

$$T_s < 0.85 T_w \qquad T_s < T_n \qquad (1)$$
$$T_s < 0.375 T_w \qquad T_s < T_n \qquad (2)$$

当有压管道系统满足公式(1)时,流体—结构相互作用将导致水锤压力的峰值大于经典水锤压力的峰值.当有压管道系统满足公式(2)时,流体—结构相互作用将导致水锤压力的峰值超出经典水锤压力峰值的

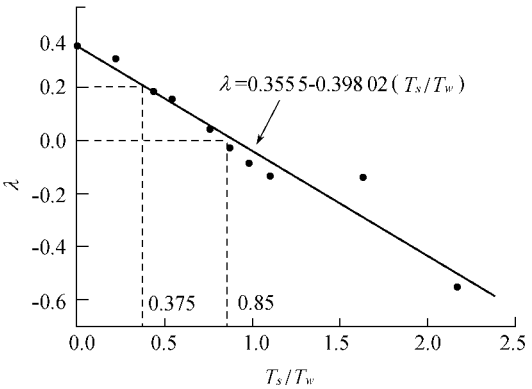


图 7 T_s/T_w 对 FSI 的影响
Fig.7 Effect of T_s/T_w on FSI

20% 以上,此时 FSI 的影响不容忽视.

参考文献：

[1] ROY R, CRAIG Jr. Structure Dynamics[M]. New York :John Wiley & Sons, Inc, 1981. 125—137.
[2] YOUNGDAHL C K, KOT C A, VALENTIN R A. Pressure transient analysis in piping systems including the effect of plastic deformation and cavitation[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1980, 102(1) :49—55.
[3] OTWELL R S. The effect of elbow translation on pressure transients analysis of piping systems[A]. In :ASME, eds. Symposium on Fluid Transients and Fluid-Structure Interaction[C]. Orlando :ASME, 1982. 127—136.
[4] WIGGERT D C, OTWELL R S, HATFIELD F J. The effect of elbow restraint on pressure transients[J]. Journal of Fluids Engineering, 1985, 107(3) :403—406.

Effect of pressure conduit structure movement on water hammer pressure

LIN Yi-feng, HU Ming

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract In consideration of the fact that the effect of conduit structure on water hammer pressure has been ignored in the classical water hammer theory, a mathematical model of water hammer fluid-structure interaction (FSI) is developed to study the effects of conduit movement on the characteristics of water hammer in conduits, and the effects of axial, transversal and torsional motion of conduits on the water hammer pressure are analyzed respectively. Besides, the influences of fluid-structure interaction on the characteristics of water hammer pressure in conduits are also researched by a case study.

Key words water hammer ; pipe structure ; fluid-structure interaction ; characteristic line method

《水利经济》征订启事

《水利经济》是中国水利经济研究会会刊,由中国水利经济研究会与河海大学共同主办,是理论与实践相结合、普及与提高相结合的综合性科技刊物.《水利经济》1983 年创刊,是水利系统优秀期刊,是全国惟一的水利经济研究方面的专业性期刊.经国家科委批准,国内外公开发行.

《水利经济》由邮局发行.邮发代号 28—252,全国各地邮局均可订阅.如未能及时订阅,可向编辑部函索订单,也可直接汇款至编辑部订阅.本刊为双月刊,6.00 元/期,全年 42.00 元(其中含邮寄费 6.00 元).

订阅方法：

(1) 邮局汇款 请将订单第 2 联、第 3 联仔细填好后与汇款单一起寄回本刊编辑部(请注明订阅《水利经济》杂志).

(2) 银行汇款 南京工商银行宁海路分理处,河海大学 4301011409001024513(请注明订阅 2003 年《水利经济》杂志).

编辑部地址 :210098 南京西康路 1 号 河海大学 联系电话 :(025)3786350 联系人 王海

传真 :(025)3787381 E-mail :jj@hhu.edu.cn