

文章编号: 1005—8893 (2000) 01—0049—04

给水管网水力瞬变分析 (1)^{*}

孟振虎¹, 陈毅忠¹, 王永忠², 陈坚榕³

(1. 江苏石油化工学院 机械工程系, 江苏 常州 213016; 2. 南京炼油厂, 江苏 南京 210033; 3. 飞创(苏州)电讯产品有限公司, 江苏 苏州 215011)

摘要: 以流体瞬变流理论为基础, 应用特征线法, 导出了供水管网水锤分析数值求解方案, 并采用幂律处理水力摩阻问题以适应输送不同性状液体的管网分析。按文中数值公式编制的计算机程序为包含泵、水池、水塔及多分支管结在内的复杂管网的水力瞬变分析提供了有用的工具。

关键词: 水锤分析; 数值方法; 供水管网

中图分类号: O 352

文献标识码: A

引 言

流量调节、阀门启闭、事故停泵及阀门事故等因素造成液体管道流量波动并导致水锤产生是常见的。严重水锤尤其是空泡水锤造成阀盖破裂甚至炸管事故, 对企业生产和人民生活造成严重影响的事例时有发生^[1]: 73 年 11 月株州某水厂启泵时产生空泡水锤, 巨大压力上升使阀后管道破裂, 水淹泵房, 损失严重。81 年某石化厂由于误操作产生严重水锤, 水管破坏, 造成总厂几个卫星厂停工, 损失严重。83 年北京某水厂一台泵出口止回阀轴磨损, 阀瓣突然脱落, 截断水流, 形成的巨大水锤鼓破了阀盖, 水柱冲高超过 20 m, 造成北京某区停水 10 多小时。国外也有许多类似报道。此外屡见报道的城市供水管道爆裂是否与水锤有一定关系也值得研究。从油品输送来看, 步世界发展进程, 密闭输送将成为我国今后主要输送方式, 密闭输送过程水锤分析及控制是保证管线安全运行前提之一, 一旦由于水锤引起设备和管道毁坏其后果不堪设想。正确进行液体管网水锤计算分析以提供作为采取控制措施依据, 对防止并减轻液体管网水锤破坏

具有重要意义。水锤研究始于 19 世纪, 1850 年 Wilhelm Weber 实测了管壁弹性对水锤波速的影响, 1902 年 Lereuzo Allive 建立了瞬变流基本微分方程, 并于 1913 年创立了图解分析法, 奠定了水锤分析的理论基础。70 年代后随着计算机和动态测量技术的发展, 水锤研究进入了新时代^[1, 2], 有关研究方法、模型和计算结果分析的论文越来越多, 形成了专门的研究领域, 其中尤以 V. L. Streeter 创建的特征线法以它严密的理论性、清晰的物理概念及很高的计算精度而受到广泛的重视, 并使复杂管网的水锤分析成为可能^[3-6]。国内水锤研究起步于 80 年代^[1, 2, 4, 5], 经多年工作已取得长足的进步, 但与国外相比仍有较大差距, 尤其是在管网水锤分析方面。由于实际工程系统瞬变分析的计算模型, 研究方法和应用软件均属知识产权保护范围, 开发研究有关计算软件是我们的重要任务之一。本文应用特征线法, 编制了管网水锤分析程序。为适用于更广泛的情况, 采用了 V^{2-m} 关系处理摩阻问题, 并应用该程序进行了包含泵、水塔及 18 个环在内的供水管网瞬变分析, 有关结论可提供工程实际参考。

* 收稿日期: 1999—10—10

作者简介: 孟振虎 (1950—), 男, 江苏常熟人, 副教授, 硕士, 从事管道强度、断裂及管网分析方面的研究。

1 管网瞬变流基本微分方程^[1-3,7]

以管道轴线为自然坐标 S , 进口位置为坐标原点, 则取定水头基准线后, 以水头 H 表示的管网瞬变流基本微分方程为:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial S} + g \frac{\partial H}{\partial S} + \frac{f}{2D} V |V|^{1-m} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial S} - V \frac{\partial Z}{\partial S} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial S} = 0 \quad (2)$$

式中: V 为管内液体运动速度, D 为管径, g 为重力加速度, m 为流态指数, f 为摩擦系数, Z 为管道轴线在坐标 S 处的标高, 显然 $\frac{\partial Z}{\partial S} = \sin \alpha$ 反映了管网管段高程布置的影响。而 a 为水锤波速, 其值与液体及管道特征有关, 在管内液体不含气泡的情况下有:

$$a^2 = \frac{K/\rho}{1 + C_1 K D / (E \delta)} \quad (3)$$

式中: E 为管材弹性模量, δ 为管道壁厚, ρ 为液体密度, K 为液体体积弹性模量, 而 C_1 为根据管道被约束情况而定的经验系数。(1) 式、(2) 式为非线性双曲形偏微分方程组, 直接积分困难很大, 但由数理方程知, 在该偏微分方程的特征线上, 方程满足全微分条件, 可将其化为常微分方程, 再采用差分方法便可进行数值处理。

2 特征线方程和数值处理

应用拉格朗日算子通过 (1) 式、(2) 式, 按全微分条件得到下述两组方程^[1-3]:

$$C^+: \begin{cases} \frac{dS}{dt} = V + a \approx +a \\ \frac{dV}{dt} + \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} - \frac{g}{a} V \sin \alpha + \frac{f}{2D} V |V|^{1-m} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$C^-: \begin{cases} \frac{dS}{dt} = V - a \approx -a \\ \frac{dV}{dt} - \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{g}{a} V \sin \alpha + \frac{f}{2D} V |V|^{1-m} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$C^+: \begin{cases} \frac{dS}{dt} = V + a \approx +a \\ \frac{dV}{dt} + \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} - \frac{g}{a} V \sin \alpha + \frac{f}{2D} V |V|^{1-m} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$C^-: \begin{cases} \frac{dS}{dt} = V - a \approx -a \\ \frac{dV}{dt} - \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{g}{a} V \sin \alpha + \frac{f}{2D} V |V|^{1-m} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

(5) 式、(7) 式分别为在 (4) 式、(6) 式定义的特征线上成立的相容方程。(4) 式、(6) 式的特征线包含了完整及近似两种情况。略去 V 后的近似特征线成为 $S-t$ 平面上的两族相交直线, 在确定合适的时间步长 Δt 并按 $\Delta S = a \Delta t$ 对管道分段, 则 $S-t$ 平面上的矩形网格形成了差分处理的基础, 因为矩形网格对角线 PA , PB 恰好为 (1) 式、(2) 式的两条特征线 (图 1), 沿特征线以差

分形式表示 (5) 式、(7) 式有:

$$H_j^{(i+1)\Delta t} = C_{j-1}^{i\Delta t} - B V_j^{(i+1)\Delta t} \quad (8)$$

$$H_j^{(i+1)\Delta t} = C_{j+1}^{i\Delta t} + B V_j^{(i+1)\Delta t} \quad (9)$$

$$C_{j-1}^{i\Delta t} = H_{j-1}^{i\Delta t} + (B + \Delta t \sin \alpha) V_{j-1}^{i\Delta t} - R V_{j-1}^{i\Delta t} |V_{j-1}^{i\Delta t}|^{(1-m)} \quad (10)$$

$$C_{j+1}^{i\Delta t} = H_{j+1}^{i\Delta t} - (B - \Delta t \sin \alpha) V_{j+1}^{i\Delta t} + R V_{j+1}^{i\Delta t} |V_{j+1}^{i\Delta t}|^{(1-m)} \quad (11)$$

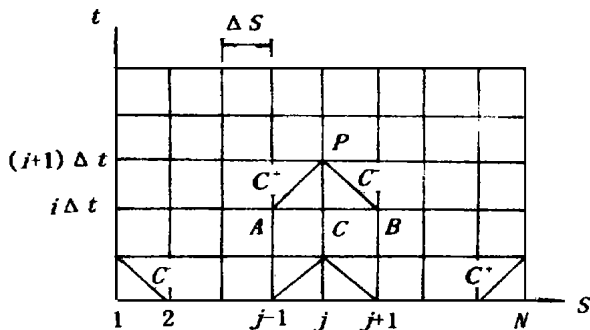


图 1 管道水锤分析的差分网格

式中: $B = \frac{a}{g}$, $R = \frac{f \Delta t a}{2d g}$ 。显然, 在 $i \Delta t$ 时刻管段节点液体运动已知的情况下, 联解 (8) 式、(9) 式可得到 $(i+1) \Delta t$ 时段的管段节点液体运动。取 $i=0$ 为初始状态, 则扰动开始后管内液体运动由上述差分过程可方便得到。由于管内液体含有少量气体或受其它因素影响使 a 值变小时略去 V 会带来较大计算误差, 此时采用完整特征方程是合适的, 但由于 V 的引入使特征线斜率随 S, t 而变, 过 P 点的特征线不再是网格对角直线 (图 2), 而是分别与 AB 线上的 r, l 点相交的曲线, 在沿特征线 C^+, C^- 差分 (5) 式、(7) 式时, 形式与 (8) 式、(9) 式相同, 但 $i \Delta t$ 时刻差分点落于 r, l 处, 联解后的数值表达式为:

$$V_j^{(i+1)\Delta t} = \frac{1}{2B} (C_r^{i\Delta t} - C_l^{i\Delta t}) \quad (12)$$

$$H_j^{(i+1)\Delta t} = \frac{1}{2} (C_r^{i\Delta t} + C_l^{i\Delta t}) \quad (13)$$

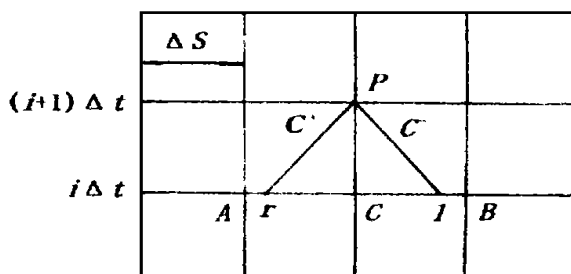


图 2 完整特征线差分的插值处理

其中 $C_r^{i\Delta t}$, $C_l^{i\Delta t}$ 形式与 (10) 式、(11) 式相同, 只需以 r , l 点处流动参数分别代 (10) 式、(11) 式中 $j-1$, $j+1$ 点处参数值即可。为保证仍采用矩形网格法时解的稳定性, 计算网格应按 Courant 条件确定^[1], 即:

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} \geq \max |V + a| \quad (14)$$

实用时为了解决 r , l 点虽接近但不在网格节点带来的不便于整体求解的麻烦, 采用了线性插值处理, 即以网格结点值近似描绘 r , l 点处值:

$$V_r^{i\Delta t} = V_j^{i\Delta t} + a \frac{\Delta t}{\Delta S} (V_{j-1}^{i\Delta t} - V_j^{i\Delta t}) \quad (15)$$

$$H_r^{i\Delta t} = H_j^{i\Delta t} + \frac{\Delta t}{\Delta S} (H_{j-1}^{i\Delta t} - H_j^{i\Delta t}) (a + V_r^{i\Delta t}) \quad (16)$$

$$V_l^{i\Delta t} = V_j^{i\Delta t} + a \frac{\Delta t}{\Delta S} (V_{j+1}^{i\Delta t} - V_j^{i\Delta t}) \quad (17)$$

$$H_l^{i\Delta t} = H_j^{i\Delta t} + \frac{\Delta t}{\Delta S} (H_{j+1}^{i\Delta t} - H_j^{i\Delta t}) (a - V_l^{i\Delta t}) \quad (18)$$

将插值结果代入 $C_r^{i\Delta t}$, $C_l^{i\Delta t}$ 并利用 (12) 式、(13) 式, 在进行适当边界点处理后基于完整特征线条件的管网瞬变流分析便可进行。此即为本文计算程序编制基础。

3 边界点处理

上述处理方案仅限于内结点。对管网而言涉及蓄水池、泵房、阀门、弯头及众多的三通、四通管结, 在这些部位特征线的有效性及其相容方程适应范围都受到限制, 必须专门处理。对局部性变化如弯头、不长的变径管及管道中间设备如流量计、减压阀等, 按当量长度均摊于管段中进行处理, 至于阀门阻力特性在文 (2) 中讨论。上游为高位水池或增压泵情况类似, 此时只有一条特征线及对应相容方程可资利用, 必须补充边界条件联解处理, 对此类边界条件处理直接采用了文献 [1] 方法, 所不同者管段阻力项取 $R|V|^{1-m}$ 。另一种情况是管网管段三通、四通管结, 涉及到不同管径、不同流量及结点供水量, 在按流向确定管结处节点相应的上、下游属性后, 列出相应特征线的差分方程, 结合连续方程及能量方程可得到相应处理方案。以图 3 所示包含节点供水量 Q_p 的三通管结 p 为例, 设 p_1 , p_2 , p_3 分别为管 1、管 2、管 3 首端或末端网格点号, r , l 分别为其左端或右端的网格点号,

则相应的差分方程为:

$$\text{管 1 } (C^+): H_{p1}^{(i+1)\Delta t} = C_{p1,r}^{i\Delta t} - B V_{p1}^{(i+1)\Delta t} \quad (19)$$

$$\text{管 2 } (C^-): H_{p2}^{(i+1)\Delta t} = C_{p2,l}^{i\Delta t} + B V_{p2}^{(i+1)\Delta t} \quad (20)$$

$$\text{管 3 } (C^-): H_{p3}^{(i+1)\Delta t} = C_{p3,l}^{i\Delta t} + B V_{p3}^{(i+1)\Delta t} \quad (21)$$

节点连续方程:

$$V_{p1}^{(i+1)\Delta t} A_1 = V_{p2}^{(i+1)\Delta t} A_2 + V_{p3}^{(i+1)\Delta t} A_3 + Q_p \quad (22)$$

节点能量方程:

$$H_{p1}^{(i+1)\Delta t} = H_{p2}^{(i+1)\Delta t} = H_{p3}^{(i+1)\Delta t} \quad (23)$$

A_1 , A_2 , A_3 分别为管段 1, 2, 3 截面积, 至于式中 $C_{p1,r}^{i\Delta t}$, $C_{p2,l}^{i\Delta t}$, $C_{p3,l}^{i\Delta t}$ 形式同 (10) 式、(11) 式一致, 当然也必须利用类似于 (15) 式至 (18) 式形式进行插值处理。对于四通等其它形式管结处理相仿。

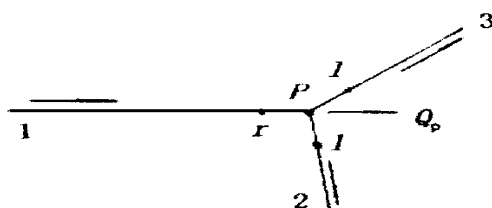


图3 三通管结的边界处理

4 小 结

基于上述分析编制了管网水击分析程序, 并进行了实例计算, 计算结果在文 (2) 中介绍。由于瞬变分析涉及较深的理论, 而管网系统的复杂性增加了分析和编程的难度, 加上时间关系尚未包括水柱分离问题, 而且从差分方法而言, 也存在数值分析精度差异, 这种差异必须通过实测结果加以比较, 由于条件所限, 此方面工作尚未开展, 故目前的工作只能是初步的。虽然如此, 由于计算程序可以定量进行管网水锤分析, 从而可为管网水锤控制提供参考依据。

参 考 文 献

- [1] 王学芳, 叶宏开, 汤荣铭, 等. 工业管道中的水锤 [M]. 北京: 科学出版社, 1995. 1-8, 34-48.
- [2] 浦家宁. 管道水击分析与控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991. 1-11, 32-101.
- [3] Wylie E B, Streeter V L. Fluid Transients [M]. New York: Mc Graw-Hill Book Co. 1979. 12-96.
- [4] 于必录. 含气水锤研究现状及其进展 [J]. 流体工程, 1992, 20 (5): 40-46.

〔5〕 刘光临, 蒋劲, 易钢敏. 泵系统水锤最优阀调节研究〔J〕.

流体工程, 1992, 20 (5): 1—5.

〔6〕 Moody F J. A Survey of Fluid Transients Studies〔J〕. J of Pres-

sure and Vessel Tech ASME, 1991, 113 (5): 228—233.

〔7〕 福克思 J A. 管网中不稳定流动的水力分析〔M〕. 北京: 石

油工业出版社, 1983. 78—94.

Water Hammer Analysis for Water Supply Pipe Networks (1)

MENG Zhen—hu¹, CHEN Yi—zhong¹, WANG Yong—zhong², CHEN Jian—rong³

(1. Department of Mechanical Engineering, Jiangsu Institute of Petrochemical Technology, Changzhou 213016, China; 2. Oil Refinery Nanjing, Nanjing 210033, China; 3. Filtronic Telecommunication Products Co. Ltd, Suzhou 215011, China)

Abstract: Based on the transient flow theory of fluid dynamics, a numerical solution to the water hammer problem of water supply pipe networks was outlined by use of characteristic curve method and computer code has also been programmed. The power rule was utilized to treat fluid flow frictional resistance in the paper so that the numerical simulation could also be implemented if a pipe networks were used to transport other liquids of various behaviors. The code provides a useful tool for performing water hammer analysis of complex ring distribution system which includes pumps, reservoirs, water towers, multiple branch pipe joints and so on.

Key words: hammer analysis; numerical method; water pipe networks

本 刊 声 明

为适应我国信息化建设需要, 扩大作者学术交流渠道, 本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》和“中国期刊网”。作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。如作者不同意将文章编入该数据库, 请在来稿时声明, 本刊将做适当处理。