

异型变径高压喷气管的数值模拟

邓燕华^{1,2}, 邓龙龙³, 涂群岚², 徐典⁴, 罗珺²

(1. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082; 2. 江西建设职业技术学院 土木系, 南昌 330200;
3. 江西海航建设科技有限公司, 南昌 330200; 4. 重庆科技学院 建筑工程学院, 重庆 401331)

摘要: 异型变径管近年来得到广泛应用, 但管道复杂的应力分布也为设计和施工带来诸多难题。实际使用中常出现管道开裂现象, 造成停电等诸不利影响, 所以设计和施工前有必要进行计算机仿真分析。利用 FLUENT 有限元分析软件对异型变径管进行模拟, 研究了在常流和非定常流情况下管道内部流体速度和压强的分布情况。模拟结果表明, 定常流变径管中部流体速度最大, 压强最小; 非定常流在入口变径过渡段 1/3 处, 压强最大; 在入口段, 压强是先小后大再小, 出口处是先大后小再大。

关键词: 异型变径管; 高压喷管; 边界条件; 压强分布; 数值模拟

中图分类号: TV 134 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)03-0108-04

Numerical Simulation of High Pressure Jet Tube with Abnormal Shape and Variable Diameter

DENG Yanhua^{1,2}, DENG Longlong³, TU Qunlan², XU Dian⁴, LUO Jun²

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Department of Civil Engineering, Construction Occupation Technical College of Jiangxi, Nanchang 330200, China; 3. The Sea Air Construction Science and Technology Limited Company Jiangxi, Nanchang 330200, China; 4. Architectural Engineering Institute, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: The tube with abnormal shape and variable diameter has been widely used recently, but it has a complex stress distribution in the pipeline which has brought a lot of problems for engineering design and construction. Cracking often occurs in the pipeline in the practical applications, resulting in adverse effects such as cutting off water and electricity supply, so it is necessary to carry out numerical simulation analysis before design and construction. In this paper, the finite element analysis software FLUENT was used to simulate the distribution of fluid velocity and pressure in the tube with abnormal shape and variable diameter under the steady and unsteady flow conditions. The simulation results showed that the middle section of the tube has the maximum fluid velocity and minimum pressure under steady flow conditions, the one third transition section in the entrance has the maximum pressure under unsteady flow conditions, and the pressure varies from small to large to small in the entrance section and varies from large to small to large in the exit section.

Key words: tube with abnormal shape and variable diameter; high pressure jet tube; boundary conditions; pressure distribution; numerical simulation

异型变径管广泛应用于航空、航天和汽车等制造业领域,尤其在近年来得到迅猛发展。传统的异型变径管制造工艺一般是先冲压成形两个半片,再焊接成整体^[1]。由于成形过程中管坯金属的变形行为非常复杂,使得生产周期长、效率低^[2],加上受加工工艺设备和加工水平的限制,所以生产出来的构件较难满足实际生产需要。尤其是对于高压管道来说,管道直径的变化会产生局部高压,在长期反复周期荷载作用下,极易产生开裂,爆炸等,因此有必要在管道设计与

安装前进行计算机模拟,以避免在使用中产生故障或缺陷,保障管道安全^[3]。计算机模拟结果的准确与否取决于数学模型的合理性和求解方法的有效性^[4]。在非稳定数学模型建立和求解方面,大量的文献对此做了研究和介绍,比如文献[5-6]提出气体管网输送的偏微分方程以及模型的有限差分法;文献[7-8]提出了等温条件下管网动态模拟模型;文献[9]在此基础上提出了非等温条件下的管道动态仿真模型;文献[10]对燃气管道的不稳定流动进行了系统的理论研究,

收稿日期: 2013-01-06 修回日期: 2014-04-09 网络出版时间: 2014-05-07

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.024.html>

作者简介: 邓燕华(1975-),男,江西南昌人,高级工程师,主要从事既有建筑鉴定加固与改造研究工作。E-mail: deng3185512@sohu.com

采用了分离变量法讨论了长输管道不稳定流动的理论分析解。纵观国内外学者的研究,虽然取得许多有价值的科研成果,但最终因求解复杂,且受计算机性能限制而无法在实践中得到应用。近十年来,伴随着计算机技术、数值计算技术的发展,CFD(Computational Fluid Dynamics,计算流体动力学)也得到快速发展,从而替代了经典流体力学中的一些近似计算方法和图解法^[11]。因此,本文基于CFD,利用FLUENT有限元分析软件,对一个工程实例中的异型变径高压喷气管道进行了模拟,为工程实践中的管道设计与施工提供支持。

1 有限元模拟的基础理论

根据流体力学知识,自然界所有的流动现象都可以用两个方程来描述,即质量守恒方程和动量守恒方程。按照质量守恒定律,流入的质量与流出的质量之差,应该等于控制体内部流体质量的增量。流体流动的连系性方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dx dy dz + \iint_A \rho v \cdot n dA = 0 \quad (1)$$

式中: V 表示控制体积; A 表示控制面积; n 表示法向量。等式左边第一项表示控制体积内部质量的增量,第二项表示通过控制表面流入控制体的净通量。根据奥-高公式,在直角坐标系下可以将其化为微分形式:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

对于不可压缩均匀流体,密度为常数,则有:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

动量守恒方程:

$$\begin{cases} \rho \frac{du}{dt} = \rho F_{lx} + \frac{\partial p_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zx}}{\partial z} \\ \rho \frac{dv}{dt} = \rho F_{ly} + \frac{\partial p_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zy}}{\partial z} \\ \rho \frac{dw}{dt} = \rho F_{lz} + \frac{\partial p_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zz}}{\partial z} \end{cases} \quad (4)$$

式中: F_{lx} 、 F_{ly} 、 F_{lz} 分别为单位质量流体上的质量力在三个方向上的分量; p_{yz} 是流体的张量的分量。

理论上,如果已知某一时刻流场的参数,将之设置为初值,然后代入这两个方程中求解,即可以求得任意时刻任一地点的流场参数。

2 模拟过程中参数设置

2.1 分析模型的甄别

边界层内流体的流动有层流和湍流两种流态,全部边界层都是层流的称为层流边界层,部分为层流的称为混合边界层或湍流边界层。判断的基本依据是雷诺数 Re :

$$Re_x = \frac{vx}{V} \quad (5)$$

式中: Re_x 为雷诺数; v 为流体在边界层上的速度; V 为流体的运动黏度; x 是距物体前缘点的距离。当 $300 < Re < 3 \times 10^5$ 称为亚临界区,此时壁柱体表面上的边界层为层流,在距离壁面一定距离以后,会逐渐向湍流过渡,根据进出口水流速度,按一定的频率发放旋涡;当雷诺数在 $5 \times 10^5 \sim 3 \times 10^6$

时转变为湍流。除此之外,边界层流态还与管道壁厚度和粗糙程度有关。

实际的流动过程是非常复杂的,迄今为止,并没有关于这一过程的完整观测和数值计算结果。考虑到变径管内是高压高速状态,应按湍流计算。常用的湍流模型有标准 $k-\epsilon$ 模型、重整化群 $k-\epsilon$ 模型,可实现 $k-\epsilon$ 模型、雷诺应力模型和大涡模拟及单方程(Spalart Allmaras)模型^[12]。每种模型都有其各自的特点,由于(Spalart Allmaras)模型是只求一个修正涡黏性输运方程的计算量较少的RANS模型,在修正形式下,近壁区的涡黏性更容易被求解。在含逆压梯度的边界层流动中模拟结果较好,预测低雷诺数模型十分有效。在流动过程中,边界层中黏性影响的区域能被很好处理,对于网格质量较差的工况,在湍流中并不十分精确的计算时将是最好选择,所以本文的工程实例中较适合选用单方程(Spalart Allmaras)模型。该模型求解变量是 v 表征除近壁区域以外的湍流运动黏性系数,其运输方程为:

$$\rho \frac{dv}{dt} = G_v + \frac{1}{\sigma_v} \nabla \cdot \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left((u + \rho v) \frac{\partial v}{\partial x_j} \right) \right] + C_{b2} \left[\frac{\partial v}{\partial x_j} \right] J - Y_v \quad (6)$$

式中: G_v 是湍流黏性产生项; Y_v 是由于壁面阻挡与黏性阻尼引起的湍流黏性的减少; C_{b2} 和 σ_v 是常数; v 是分之运动黏性系数。

2.2 边界条件的确定

文献[11]给出了常物性不可压流体经过一个二维管的控制方程及边界条件(取一半为研究对象):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} &= a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

进口边界条件 u 、 v 和 T 随 y 的分布给定;在固定壁面上, $u=0$ 、 $v=0$ 、 $T=T_w$;在出口边界上 $\frac{\partial(\quad)}{\partial x} = 0$ 。对于进口边界压力总是使用相对值,实际求解的压力并不是绝对值,而是相对进口压力而言。

边界口^[13]:

$$k = \frac{3}{2} (\bar{u}_{ef} T_i)^2; \epsilon = C_\epsilon \bar{u}_{ef}^3 \frac{k^{3/2}}{l}; l = 0.07L; \quad (8)$$

式中: \bar{u}_{ef} 是进口处平均速度; L 为特征长度,可以按照等效管径计算。流出口边界条件梯度为零。

2.3 壁面条件^[14-15]

在壁面区域,流体受壁面流动条件的影响比较明显,壁面区分为黏性底层、过渡层和对数律层。为了描述黏性底层和对数律层内的流动,引入两个无量纲参数 u^+ 和 y^+ ,分别表示速度和距离:

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad (9)$$

$$y^+ = \frac{\Delta y \rho u_\tau}{\mu} = \frac{\Delta y}{\nu} \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (10)$$

式中: u 是流体的速度; u_τ 是壁面摩擦速度; τ_w 是截面切应力。对于光滑壁面, $y^+ < 11.63$ 时湍流处于黏性底层,否则

处于对数律层。

2.4 选择求解器

求解器有分离式求解器和耦合式求解器,前者是先在全部网络上解出一个方程,再解另外一个方程,经过多次迭代后达到收敛,主要应用于不可压流动和微可压流动的模拟计算;后者是同时求解连续方程、动量方程、能量方程及组分运输方程的耦合方程组,用于高度可压流动的模拟计算^[11]。在 CFD 计算过程中,必须设置收敛指标,通常以计算域中敏感位置的物理量或出口处的物理量随迭代不进行继续变化、计算结果的质量和能量守恒;残差满足要求,且残差越小越好,但残差曲线是全场求平均的结果,有时其大小并不能完全代表收敛性,关键看计算结果是否符合物理事实,所以案例计算中不但监测残差,而且对管壁压强、管内速度、和出口断面质量流进行监测,以更好及时掌握计算结果的敛散性。

3 工程实例

高压管道设计和施工前进行计算机仿真分析可达到先知效果,从而极大提高工作效率。现以上述理论为依据,借助 FLUENT 软件来模拟工业管道。如图 1 所示,工业气压交换钢管,进出口直径均为 400 mm,管长 4 000 mm。因生产工艺需要,在管道中部进行缩径处理,气体从入口处进入,经变径段以后从出口排出。

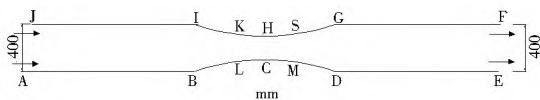


图 1 喷管的几何模型

Fig. 1 Schematic diagram of jet tube

计算时分别考虑了定常流和非定常流两种情况。定常流是指空气在一个大气压的作用下通过平均背压为 0.9 atm (1 atm = 101 325 Pa), 缩放管的情况,非定常流是空气按照背压以正弦波规律进行变化的情况。仿真过程中不考虑材料强度和变形等不利影响。

数值模拟的步骤为:首先利用 GAMBIT 软件进行前处理,然后按工程实际情况建立变径管的数学模型,划分网格后导入 FLUENT 中进行修饰;再设定边界类型(分别选用压强入口和压强出口,壁面选用固壁面);最后,采用耦合隐式求解器,求解控制参数采用二阶迎风格式,出口选择质量流量监视器。

3.1 定常流情况的模拟结果

按照定常边界和定常流进行计算,即进风口和出风口处压强为常数计算,管内压强及风速变化见图 2-图 4。

从图 2 中可以看出,管内部压强从 0.461 MPa 攀升到 0.997 MPa,变化幅度较大,且在管的各段处变化极不均匀。入口至变截面中段,即 AL 段,压强由 0.997 MPa 缓慢降到 0.97 MPa,变化幅度极小,基本保持原始值;随后向变径处衰减,降幅逐渐增大。在 KL 截面时从 0.92 MPa 降到 0.81 MPa,且越靠近缩径口,降幅越大。完全进入缩径段之前(至 KL 截面)已降至 0.67 MPa,至缩径管中部(即 HC 截面)降为最低值 0.46 MPa,并趋于稳定。随后进入出气口,在变径段内,出气口与入气口压强呈现对称分布格局,且两者相差较小。通过变径管段后,压强逐渐增大,距离变径口越远,压

强越大,但压强变化幅度较小。

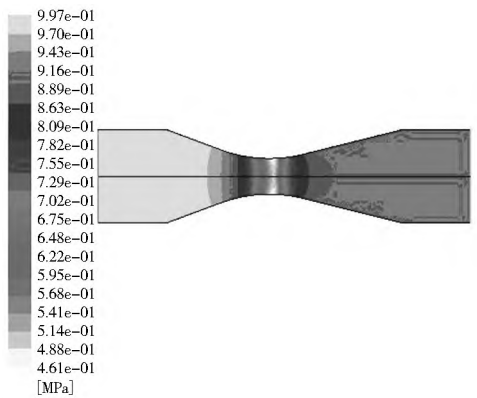


图 2 喷管内压强分布

Fig. 2 Pressure distribution in the jet tube

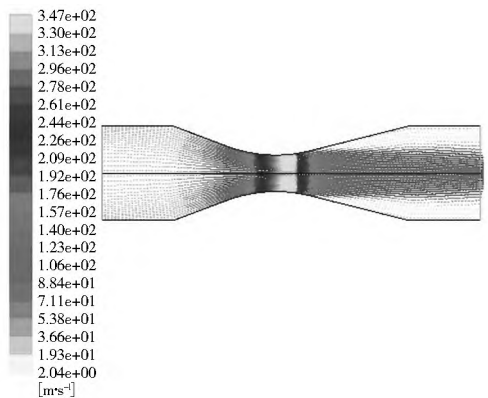


图 3 速度矢量图

Fig. 3 Velocity vector

从图 3 中可以看出,流体入管后,受到壁面影响,风速在 36.6~53.8 m/s 之间波动,随后在变径管中部,即 KL 截面及其附近出现较大风速。在 BL 段风速不断增大,最大达 84.4 m/s,然后变径口处出现急剧升高现象,速度飆升至 175 m/s。进入 LM 段后风速再次攀高,飆升至 347 m/s,此时风速达到最大值,也使其成为管内风速最大部位。进入出口处,管道直径逐渐变大,风速逐渐降低,但风速场分布不均匀。在管中部,即 HC 截面出现顺轴线的强气流,风速在 100~123 m/s 之间波动。在管壁附近,风速较为平稳,速度较小,且与进风口对应部位相差无几。

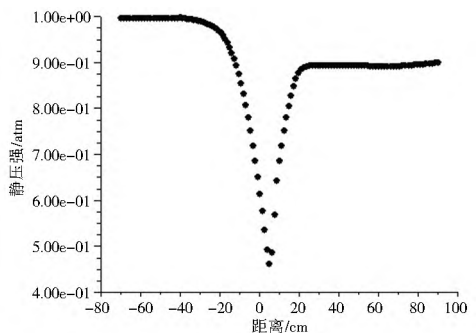


图 4 喷管壁面压强分布

Fig. 4 Pressure distribution in the wall of jet tube

从图 4 中可以看出,在进风口段,距离变径段越远,风压越大,但却越稳定,基本与入口处相同。进入变径段(即

BL段)后,壁面压强开始出现急剧下降,至变径处(即HC截面)出现最低值。进入出风口,管径逐渐变大,出现压强反而急剧上升的现象;在距离HC截面约40cm段后,风压进入平稳状态,其值相对入风口对应部位有所下降,降幅约10%。

综合上述分析可以得出:进风口段风速和压强均匀,变化不大。过渡到变径段后,风速急剧加大,而压强急剧下降。距离变径处(即HC截面)两侧各40cm,进风口段出现管壁压强呈现直线上升趋势,出风口段却出现急剧下降。在HC截面虽然压强最小,但是此处风速却最大。进入出风口,压强开始逐渐增大,随后出现平稳,风速变化较大,管壁附近风速与进风口对应部位相差不大。值得注意的是在管段截面中部出现强风柱流现象,需要引起高度重视。

3.2 非定常流情况的模拟结果

按照非定常流边界设置和非定常流计算,规定出口截面压力变化曲线按照正弦波形方程进行,即出口截面上的压力在前面0.9atm基础上增加一正弦波形压力值。

从图5中可以看出,按照非定常流计算时,各参数计算结果较难稳定,波动较大。在迭代计算23500次迭代以后,渐趋平稳,但相对定常流,其精确度仍旧较低。

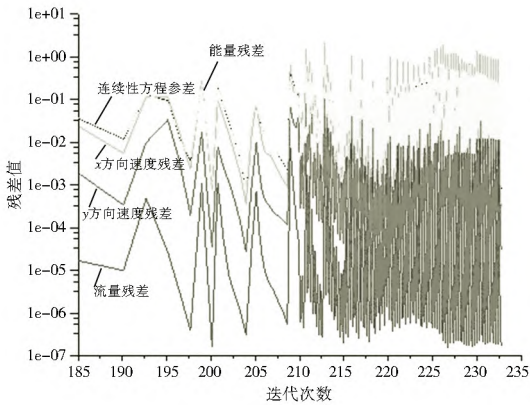


图5 残差动态曲线

Fig. 5 Variation curve of the monitored residual

从图6中可以看出,出口截面质量流出率在1~10kg/s之间波动,幅度较大;且随时间步增长,幅度呈现增大现象。这与变径管处风速和压强的变化是相关的,由于出口处风速变化极大,因此造成了出口截面质量流的变化。

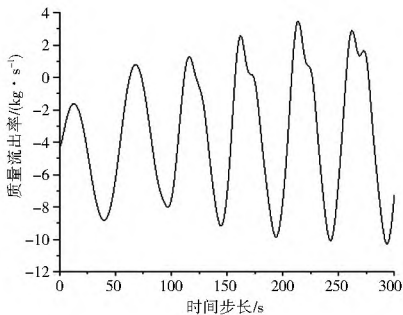


图6 出口断面质量流变化

Fig. 6 Variation of quality flow at the exit section

从图7中可以看出,管内压力分布极不均匀,压强在0.73atm至1.18atm之间变化,进风口至开始变径段(即IB截面),压强基本不变化,保持在0.97atm左右。进入变径

过渡段后压强开始增大,达到0.99atm。在距离开始变径处(即BL段)约1/3处出现压强最大值1.18atm,随后向变径段逐渐降低,但幅度不大,至中部(即HC截面)达到0.95atm。进入排气段后压强出现较大降幅,经变径过渡段后表现为先降后升,最后以0.84atm通过排气口。

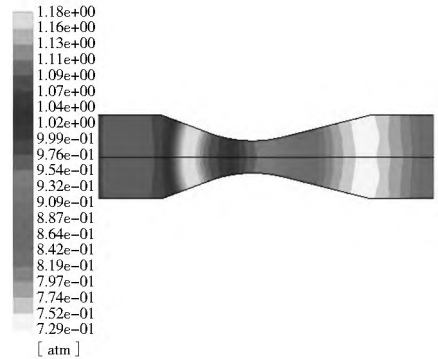


图7 喷管内部压强分布

Fig. 7 Pressure distribution in the jet tube

从图5至图7的分析可知:非定常流计算过程较为复杂,计算精确度较常流低,管道应力分布也较为复杂。比较图2和图7可知:定常流进风口和出风口压强变化不大,变径段压强变化却很大,最小压强出现在变径段中部,但最大风速也出现在此。而非定常流压强变化幅度较大,最大压强发生在距离开始变径段0.33处。

4 结论

(1) 管道内风速与压强不成比例,压强越大的部位并不一定是流体速度越大;对于定常流在变径截面最小处,风速与压强成反比,而非定常流最大压强却发生在开始变径至最小断面段1/3处。

(2) 对于非定常流,流体经过变径段时,压强变化较为复杂,在进口段出现先低后高再低的现象,在出口段出现先高后低再高的现象。

(3) 流体经过变径管道时,无论是流体速度还是管壁压强,在不同段其变化幅度均较大,设计时应根据应力分布情况,采取相应措施。

参考文献(References):

[1] 贺冠雄,赵恒义.壳体等温模锻成形工艺[J].热加工工艺,2003,(2):65. (HE Guor xiong, ZHAO Heng-yi. Forming Technology of Isothermal Model Section on Shell [J]. Thermal Processing Technology, 2003, (2): 65. (in Chinese))

[2] 袁安营,王忠堂.变径管内高压成形有限元模拟[J].机械工程与自动化,2006,(4):1-4. (YUAN An-ying, WANG Zhong-tang. Finite Element Simulation of Shaped Tube of Internal High Pressure [J]. Mechanical Engineering and Automation, 2006, (4): 1-4. (in Chinese))

[3] 中国城镇供水协会.城市供水行业2010年技术进步发展规划及2020年远景目标[R].北京:中国建筑工业出版社,2005. (China Town Water Supply Association. Technological Progress and Development Planning of Water Supply Industry In Urban At 2010 Year and Vision Target at 2020 Year[R]. Beijing: China Institute of Building Press, 2005. (in Chinese))

(下转第126页)

- [32] 谢鉴衡. 河流模拟[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990. (XIE Jianheng. River Simulation[M]. Beijing: Waterpower and Electric Press, 1990. (in Chinese))
- [33] 杨国录. 河流数学模型[M]. 北京: 海洋出版社, 1993. (YANG Guo lu. Mathematical Model of River[M]. Beijing: China Ocean Press, 1993. (in Chinese))
- [34] 陆永军, 张华庆. 平面二维河床变形的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 1993, 8(3): 273-284. (LU Yongjun, ZHANG Qinghua. Numerical Simulation of 2-D River bed Deformation[J]. Journal of Hydrodynamics, 1993, 8(3): 273-284. (in Chinese))
- [35] Nagata N, Hosoda T, Muramoto Y. Numerical Analysis of River Channel Processes with Bank Erosion[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(4): 243-252.
- [36] 钟德钰, 张红武. 考虑环流横向输沙及河岸变形的平面二维扩展数学模型[J]. 水利学报, 2004(7): 14-20. (ZHONG Deyu, ZHANG Hongwu. Extended 2-D Numerical Model for Alluvial River Considering Transverse Transport of Sediment and Bank Erosion Due to Secondary Flow in River Bends[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(7): 14-20. (in Chinese))
- [37] DAI Werr hong. On the Simulation and Prediction of Bed Morphological Adjustments of Equilibrium in Alluvial Meandering Streams[D]. Kingston, Canada: Queen's University, 2008.
- [38] Demuren A O. Development of A Mathematical Model for Sediment Transport in Meandering Rivers[M]. Institute for Hydromechanics, University of Karlsruhe, Germany, 1989.
- [39] Shimizu Y, Yamaguchi H, Itakura T. Three Dimensional Computation of Flow and Bed Deformation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116(9): 1090-1108.
- [40] 陆永军. 三维紊流泥沙数学模型及其应用[D]. 南京: 南京水利科学研究所, 2002. (LU Yongjun. Three dimensional Mathematical Model of Turbulent Flow and Sediment Transport and Its Applications[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2002. (in Chinese))
- [41] 刘诚, 沈永明. 曲线坐标系下考虑植被影响的三维水沙数学模型[J]. 水动力学研究与进展, 2011, 26(5): 551-561. (LIU Cheng, SHEN Yongming. A Three dimensional Water sediment Turbulence Model with the Effect of Vegetation in Curvilinear Coordinates[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2011, 26(5): 551-561. (in Chinese))
- [42] WU Weiming, Rodi W, Wenka T. 3D Numerical Modeling of Flow and Sediment Transport in Open Channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(1): 4-15.
- [43] 沈永明, 刘诚. 弯曲河床中底沙运动和河床变形的三维p-两相湍流模型[J]. 中国科学, 2008, 38(7): 1118-1130. (SHEN Yongming, LIU Cheng. A Three Dimensional p-Two phase Turbulence Model on Meandering River Bedload Movement and Bed Deformation[J]. Science China, 2008, 38(7): 1118-1130. (in Chinese))
- [44] Coulthard T J, Hicks D M, Van De Wiel M J. Cellular Modeling of River Catchments and Reaches: Advantages, Limitations and Prospects[J]. Geomorphology, 2007, 90: 192-207.
- [45] Bhattacharya B, Price R K, Solomatine D P. Machine Learning Approach to Modeling Sediment Transport[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 133(4): 440-450.
- [46] 徐国宾, 杨志达. 基于最小熵产生与耗散结构和混沌理论的河床演变分析[J]. 水利学报, 2012, 43(8): 948-956. (XU Guobin, YANG Zhi Ted. Analysis of River Bed Changes Based on the Theories of Minimum Entropy Production Dissipative Structure and Chaos[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(8): 948-956. (in Chinese))

(上接第111页)

- [4] 李长俊, 曾自强, 江茂泽, 等. 天然气在管道系统中不稳定流动的分析[J]. 天然气工业, 1994, (6). (LI Changjun, ZENG Ziqiang, JIANG Maoze, et al. Instability Flow Analysis on Natural Gas in the Systems of Pipe[J]. Industry of Natural Gas, 1994, (6). (in Chinese))
- [5] J J Guy. Computation of unsteady Gas Flow in Pipe Networks [C]. In: Chem. E. Symp. Ser, 1967.
- [6] G Lappus, Gschmidt. Supervision And Control Gas Transportation And Distribution Systems[C]. In 6th IFA/IFIP Conference on Digital Computer Application to Process Control, Dusseldorf, Germany, 1980.
- [7] S L Ke, H C Ti. Transient Analysis of Isothermal Gas Flow in Pipeline Network[J]. Chemical Engineering Journal, 2000, 76(2): 169-177.
- [8] W O Tao, H C Ti. Transient Analysis of Gas Pipeline Network [J]. Chemical Engineering Journal, 1998, 69(3): 47-52.
- [9] Andrzej J. Osiadacz, Maciej Chaczykowski. Comparison of Isothermal and Non-Isothermal Pipeline Gas Flow Models[J]. Chemical Engineering Journal, 2001, 81(1.3): 41-51.
- [10] 隋元春, 薛世达. 沿途有分输的长输燃气管道不稳定流计算[J]. 燃气与热力, 1988, (4). (SUI Yuan chun, XIE Shi da. Instability Flow Calculation on Long Distance Transportation Gas Pipe of Being Respectively Transportation Along the Road[J]. Gas and Thermal, 1988, (4). (in Chinese))
- [11] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (WANG Furjun. Analysis of Computational Fluid Dynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))
- [12] 江帆, 黄鹏. FLUET 高级应用与实例分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008. (JIANG Fan, HUANG Peng. Advanced Applications and Practical Example Analysis on Fluent[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese))
- [13] W. Rodi. Turbulence Models and Their Applications in Hydraulic A State of the Art Review, IAHR, Delft, The Netherlands, 1980.
- [14] 章梓雄, 董曾南. 粘性流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. (ZHANG Zixiong, DONG Zengnan. Viscous Fluid Dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese))
- [15] H. K. Versteeg, W. Malalasekera. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Wiley, New York, 1995.