

燃气管网中大流量用户事故工况下动态模拟及分析

刘晓婧, 周伟国, 王海

(同济大学 机械工程学院, 上海 200092)

摘要: 大型钢铁企业中高炉煤气透平因故突然停机时, 超大的煤气流量突变将使管网压力急剧上升, 可能会发生击穿排水密封罐而外泄煤气等安全事故. 采用可压缩流体的高阶有限容积法(FVM)及其系列改进算法对此典型故障工况进行了动态分析. 这对国内燃气管网动态分析中还在普遍应用的有限差分法和特征线法是更高层次的补充. 利用 FVM 中稳定性较强的求解压力耦合方程半隐式方法(SIMPLE 改进算法), 可以克服管网计算中各管段管径大小不同, 在相连接处流量突变的困难.

关键词: 燃气管网; 超大流量; 动态分析

中图分类号: TU 996

文献标识码: A

Dynamic Simulation and Analysis of Gas Network in Accident Condition of Large Low Gas User

LIU Xiaojing, ZHOU Weiguo, WANG Hai

(College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: When blast furnace gas turbine is suddenly stopped in large iron and steel enterprises due to the fault, gas pressure along the pipeline will steep rise for mutation of extra large gas flow, and this will lead to the security incident of gas leak as a result of water sealing breakdown. This paper presents a dynamic analysis of this typical malfunction condition by using compressible fluid high-order finite volume method(FVM) and its improved algorithm. The FVM method is a higher level supplement on characteristic method and finite difference method usually applied to the dynamic analysis of gas pipeline network. And the improved algorithm of semi-implicit method for pressure-linked equation (SIMPLE) which is more stable in FVM can overcome difficulties such as the great differences in the size of diameter and gas flow mutation at the joint of pipes.

Key words: gas pipeline network; extra large flow;

dynamic analysis

大型钢铁企业中高炉煤气透平由于故障突然停用煤气时, 超大的煤气流量突变将使煤气管网压力急剧上升, 如果不采取相应的措施, 可能会发生击穿排水密封罐而外泄煤气等安全事故, 会造成管网设备和其他用气设备的损坏. 因此为了满足现代管道的设计和管理要求, 管道故障模拟仿真技术能够准确及时地分析出管网在故障情况下的气体流动变化, 才能快速进行有效措施或在设计、改造管网时进行防备性预案.

我国在不稳定流研究方面, 一直落后于国外, 用数值法研究不稳定流问题也是借鉴国外的研究成果^[1]. 哈尔滨建筑大学隋元春等曾对燃气管道的不稳定流动进行了研究^[2], 西南石油学院还开发出了动态仿真软件 EGPNS^[3]和 Gasflow^[4]等, 但此类软件主要考虑城市管网长输管线的输配工况.

目前国外普及运行的管道流动模拟软件主要是集中于管网稳态运行模拟计算方面, 在故障工况下的管网动态模拟计算方面属于高端研发领域^[5-7]. 管道模拟准确与否关键在于所建立的数学模型能否准确、全面地描述管内流动过程以及能否找到求解模型的方法. 目前被认为最好的求解模型的两种方法是特征线法和隐式有限差分法.

在燃气管网需要切断燃气供应的故障工况下, 大量燃气被堵在管道内, 进行管网水力计算时, 必须考虑管路中燃气流动的不稳定性和燃气的可压缩性的要求. 本文采用 SIMPLE 改进算法, 用有限容积法导出的离散方程可以保证具有守恒特性, 而且离散方程系数的物理意义明确. 克服了管网计算文献中普遍采用有限差分法求解管网流动偏微分方程的多种困难. 可以克服管网计算中各管段管径大小不同,

收稿日期: 2009-04-28

作者简介: 刘晓婧(1982—), 女, 博士生, 主要研究方向为热能工程. E-mail: gougou0022504@sina.com

周伟国(1961—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师. 主要研究方向为热能工程. E-mail: tjweiguo@tongji.edu.cn

在相连接处流量突变的困难. 对不同的管段进行长度不同的离散容积, 而不会影响计算结果的连续性和迭代的收敛稳定性. 而传统方法离散时, 为了保证收敛, 必须对长管段网格划分很细密, 导致计算时间很长且无法保证数值解的守恒性.

1 数学模型的建立

1.1 管道数学模型

管道内气体流动特性分析模型由动量方程, 连续性方程, 状态方程三个方程组成^[8], 因故障发生的几十秒内, 管内的温度变化很小, 所以不考虑能量方程. 动态仿真模型如下:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial x} + \\ g(\rho - \rho_a)\sin \alpha + \frac{\lambda}{d} \frac{u^2}{2} \rho = 0 \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \\ P = z\rho RT \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: ρ 为燃气密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; t 为时间, s ; u 为燃气速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; x 为管道轴向坐标, m ; P 为燃气压力, Pa ; g 为重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; ρ_a 为空气密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; α 为管道与水平面夹角; λ 为管道摩擦系数; d 为管道直径, m ; z 为压缩因子; R 为气体常数, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T 为燃气温度, K .

1.2 模型的简化

为了计算过程的可靠性及可行性, 在此工况计算中, 燃气的流量随时间变化很大, 惯性项不能忽略. 而且, 在阀门截止时, 管内流体的速度分布有很大梯度, 必须予以考虑. 同时可对上述模型做如下简化: ①在动量方程中, 对流项 $\partial(\rho u^2)/\partial x$ 只在燃气流速极大(接近声速)时才有意义, 而通常管道中燃气流速不大于 $20 \sim 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 并且在高压管网瞬态变化中, 对流项 $\partial(\rho u^2)/\partial x$ 相对于其他项较小可以忽略^[9]. ②在城市燃气管网中, 标高的差值不太大, 动量方程中的重力项 $g(\rho - \rho_a)\sin \alpha$ 一般忽略不计.

通过上述假设和简化, 可以得到如下动态仿真数学模型:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\lambda}{d} \frac{u^2}{2} \rho = 0 \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \\ P = z\rho RT \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

1.3 摩擦系数

摩擦系数除了与煤气性质、管道材质等因素有关外, 还与煤气流动状态有关. 由于高压气体流动一般情况下均处于紊流状态, 对于紊流摩擦系数计算方法, 可以参照《城镇燃气设计规范》和《输气管道工程设计规范》等.

2 数学模型的求解

在计算这样的气体非稳定流动时, 利用有限体积法一维交错网格将压力-速度耦合方程中不同的变量离散式存储在不同的网格系统, 将方程组(2)中动量方程离散为

$$a_i u_i^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + (p_{I-1}^* - p_I^*) A_i + b_i \quad (3)$$

式中: u_i^* 为 i 节点速度值; u_{nb}^* 为 i 节点周围的各节点速度值; p_I^* 为 I 节点压力值; A_i 为控制容积界面面积; b_i 为方程源项; a_i 为 i 节点离散方程系数; a_{nb} 为 i 节点周围的各节点离散方程系数.

设修正的压力方程为

$$p = p^* + p' \quad (4)$$

式中: p' 为压力修正值.

设修正的速度方程为

$$u = u^* + u' \quad (5)$$

式中, u' 为速度修正值.

由式(3), (5)得:

$$u_i' = \frac{\sum a_{nb} u_{nb}' + (p_{I-1}' - p_I') A_i}{a_i} \quad (6)$$

为简单计算, 略去第一项的影响, 并利用式(5)和式(6)得到速度的改进值为

$$u_i = u_i^* + \frac{A_i}{a_i} (p_{I-1}' - p_I') \quad (7)$$

将速度改进值带入方程组连续性方程中, 并将压力修正量 p' 的系数归一化处理, 就得到压力修正方程:

$$a_I p_I' = a_{I+1} p_{I+1}' + a_{I-1} p_{I-1}' + b_I' \quad (8)$$

其中: $a_I = a_{I+1} + a_{I-1}$; $a_{I+1} = (\rho d A)_{i+1}$; $a_{I-1} = (\rho d A)_{i-1}$; $b_I' = (\rho u^* A)_i - (\rho u^* A)_{i+1}$. 这里 b_I' 只包括 $a_e u_e$ 的上一时刻值 $a_e^0 u_e^0$, A_e 表示节点 e 处的管道截面积. 通过多次迭代修正, 最终 b_I' 应趋于 0, 这可以作为判断迭代过程是否满足要求的判据.

本文在计算这样的气体非稳定流动时, 沿程管道内煤气压力和流速的分布采用双精度 Simple 方法的压力隐式分割算法 (pressure implicit with

splitting of operators, PISO) 模型进行. 即通过压力预测-修正方法, 包括一个预测步骤和两个校正步骤, 不断地修正计算结果, 反复迭代, 最后求出 p, u 的收敛解.

3 程序编制

采用 VB 编写了计算程序, 并对网格参数压力参数内循环迭代计算均采用稳定的快速收敛三对角方程组求解算法 (Tri-diagonal matrix algorithm, TDMA).

4 实际应用与分析

4.1 实际应用

某大型钢铁企业自备电厂是高炉煤气 (blast-furnace gas, BFG) 的主要用户, 也是平衡 BFG 负荷、避免 BFG 放散的重要用户, 其 4# 机组为燃气锅炉发电机组, 于 2008 年初投运, 主要燃料是 BFG, 最大用气量可达 $100 \text{ 万 Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. 在此, 以 4# 发电机组突发故障, 需要紧急关闭 BFG 供应阀进行实际应用与分析. 仿真初始条件: 在 4# 机组的实际进气管段处装有 18 个快速阀门用于快速切断 BFG 气体供应, 完全关闭阀门的时间仅 1s. 管道刚关闭时压力和流速分布为 0 时刻的值: $P_{27}^0 = P_{27}(0)$, 燃气流量 $Q_{27}^0 = Q_{27}(0) = 0$. 由于阀门关闭时间很短, 管网其余管段压力和流量为稳态流动时的压力和流速分布.

4# 机组故障阀门关闭后, 如果无任何缓压作用 (没有开启放散塔, 两个气柜也没有进行储气吸量), 则管网压力上升很快, 如图 1 和图 2 所示, 其中节点 23, 22, 21, 32 为 BFG 的 4 个发生源 (高炉), 节点 27 为电厂 4 号机组, 节点 24, 25 为煤气柜, 节点 35 为煤气燃烧放散塔.

图 1 为无泄压情况下 BFG 管网中主要节点压力变化分析结果. 4# 机组刚切断 BFG 供应时, 管网各节点压力缓慢上升, 各节点压力还有明显的差别, 但随后便迅速上升. 100 s 后, 各节点压力的差别变得越来越小. 21 点在 57 s 时已经达到 22 kPa, 其他各点在 65 s 后也都超过了 22 kPa. 图 2 为管网各节点超出排水密封罐最大压力限值随时间的变化情况. 由图可知, 超压值随时间直线上升. 因此, 如果发生故障需要紧急切断 BFG 供应时, 不采取任何缓压措施, 则管网中的排水密封罐很快就会失去作用, 将导致大量煤气外泄.

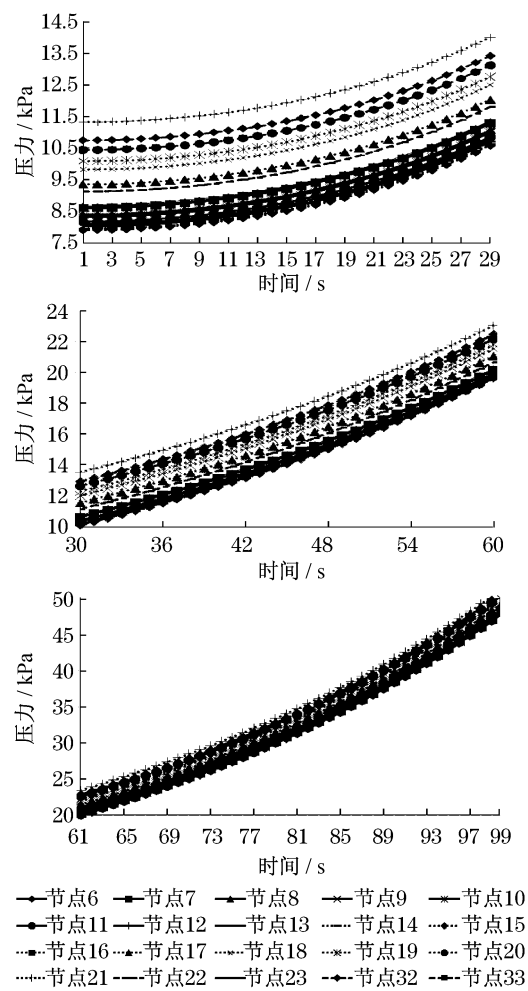


图 1 无泄压下管网中节点压力随时间的变化情况

Fig.1 Change in pressure with time at each point along the pipeline under condition of no pressure relief

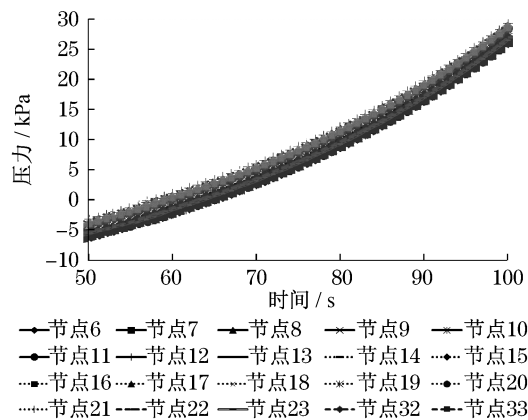


图 2 无泄压下管网中节点压力超过限值的情况

Fig.2 Pressure over the limited value at each point along pipeline under condition of no pressure relief

4.2 实际情况与计算结果对比分析

图 3 为 2008 年电厂 4# 机组在 $70 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 负荷运行时 (其余 $30 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 供应其他发电机组)

一次意外停机,故障阀门1 s 关闭后,四座高炉 BFG 上网点压力的实际变化情况.在 4[#] 机组停运后高炉 BFG 上网点压力迅速上升,但由于在 40s 放散塔完全开启,且随后 4[#] 机组的 BFG 转供其他发电机组,压力又很快下降.

图 4 为计算分析结果图.针对 4[#] 机组在最高负荷 ($100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) 下,发生故障需要紧急停运时,故障阀门 1 s 关闭,25 s 放散阀完全开启,大部分 BFG 通过放散塔(最大放散能力为 $70 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) 燃烧放散,其余(稳定后约有 $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) 储入气柜.

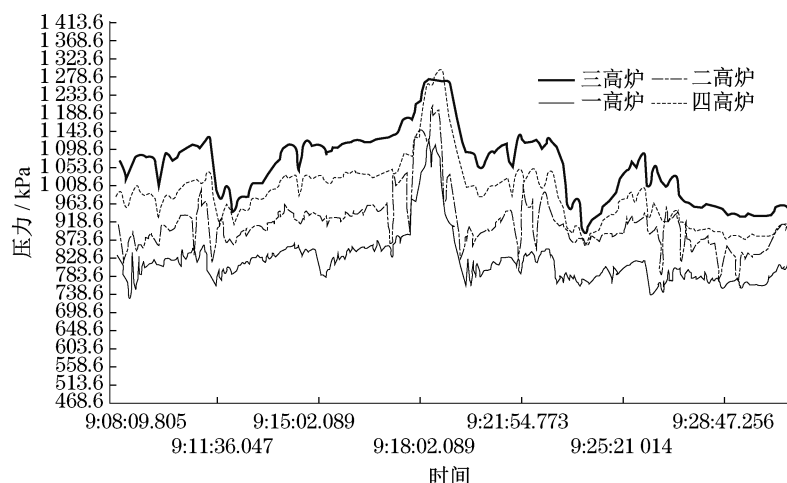


图 3 实际情况下高炉 BFG 上网点的压力变化情况

Fig.3 Real pressure changes at the network point that stand for blast furnace

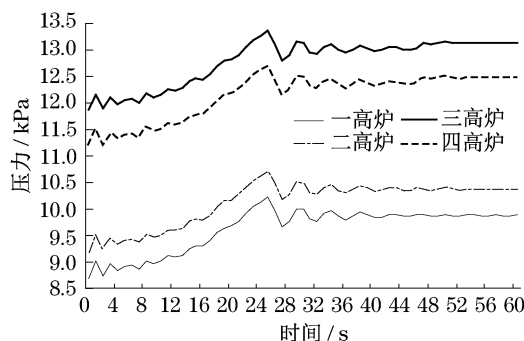


图 4 计算工况下高炉 BFG 上网点的压力变化情况

Fig.4 Calculated pressure changes at the network point that stand for blast furnace

虽然实际工况与计算条件有所不同,存在如下差异:(1)由于实际停用的 BFG 部分转供其他发电机组使用,图 3 中压力上升到最高点后,很快又下降.而计算条件下,实际停用的 BFG 通过气柜储存和放散塔燃烧放散,没有考虑转供其他用户,因此,压力在达到最高点后(此时放散阀完全开启)维持不变.(2)实际中 3[#] 高炉网点正常运行情况下压力高,事故状态下为了抑制过高的升压,在事故发生后采取了相关的措施,因此计算结果和实际工况有差别.

但对比图 3 和图 4 可以看出,实际工况与计算条件下管网压力变化趋势相近.

5 结论

大流量燃气用户因故障突然停用工况下,管网不采取任何措施(包括任何一个气柜也不储气缓压),压力上升迅速,由图 1 可看出,21 点在 57 s 时已经达到 22 kPa,则管网中的排水密封罐很快就会失去作用,会导致大量煤气外泄.且其他各点在 65 s 后也都超过了 22 kPa.

同时采用可压缩流体的高阶有限容积法及算法进行管网的动态分析,可以满足工程上的需要,对于管网的设计和安全控制都有重要的参考价值.

参考文献:

- [1] 江茂泽,曾自强,刘良坚.天然气在复杂枝状管网系统内不稳定流动及其计算机模拟[J].石油学报,1992,13(4):136.
JIANG Maoze, ZENG Ziqiang, LIU Liangjian. Modeling of transient flow in a complex branch-like pipeline network system [J]. Acta Petrolei Sinica, 1992, 13(4): 136.
- [2] 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].煤气与热力,1988,8(4):25.
SUI Yuanchun, XUE Shida. Unsteady simulation of long gas pipeline with the discharge along porous pipe[J]. Gas & Heat, 1988, 8(4): 25.
- [3] 李长俊,曾自强.气体管网系统的仿真[J].油气储运,1997,16(2):21.

(下转第 1254 页)