

基于 PowerCAD 的燃气管网水力平差 计算模型研究

毕天平¹, 阙子渊¹, 周 丹²

(1. 沈阳建筑大学管理学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳城市建设学院管理学院, 辽宁 沈阳 110167)

摘 要 目的 建立准确、适用的管网水力平差计算模型, 快速确定管径和材质, 科学解决燃气管道工程的金属耗量和管道投资。方法 以 PowerCAD 为平台, 以用户的收费数据为基础, 利用泰森多边形归算出管网计算所需的节点流量, 基于不同的流态选取不同的摩擦阻力系数公式, 并与节点法相结合构建管网水力平差计算模型, 以沈阳市燃气管网的数据为样本, 运用 C++ 语言编程进行水力平差计算模型求解。结果 笔者提出的模型计算结果与《燃气输配》上的算例非常接近, 方法精确可靠。结论 该模拟方法简化了数据输入, 操作更直观, 可以用于燃气管网工程运用中水力计算, 并且能在 PowerCAD 上直接进行调整, 并可实现计算与规划出图的一体化。

关键词 燃气管网; 水力计算; 泰森多边形; PowerCAD

中图分类号 TU996

文献标志码 A

Research on the Hydraulic Adjustment Calculation Model of Gas Pipeline Network Based on Power CAD

BI Tianping¹, QUE Ziyuan¹, ZHOU Dan²

(1. School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Management, Shenyang Urban Construction University, Shenyang, China, 110167)

Abstract: An accurate and applicable hydraulic adjustment calculation model for the pipeline network is established to quickly determine the pipe diameter and material, and to scientifically solve the metal consumption and pipeline investment of gas pipeline engineering. Using Power CAD as the platform and user fee data as the basis data of node flow reduction a hydraulic adjustment calculation model for pipeline network is constructed by combining friction resistance coefficient with node flow, which the node flow of pipeline network is calculated using Thiessen polygon reduction, and the different friction resistance coefficient formulas are selected based on different flow patterns. The data of Shenyang gas pipeline network as a sample, this hydraulic adjustment calculation model is solved using C++ programming language. The calculation results

收稿日期: 2022-10-11

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(42101260)

作者简介: 毕天平(1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事工程信息化管理等方面研究。

of this model are very close to the examples in "Gas Transmission and Distribution", so this model is accurate and reliable. This model simplifies data input and makes the operation more intuitive. It can be used for hydraulic calculation in gas pipeline network engineering, and can be directly adjusted on PowerCAD, on which the integration of calculation and planning, can achieve.

Key words: gas pipeline network; hydraulic calculation; Thiessen polygon; Power CAD

随着我国经济水平的发展与环保意识的提高,天然气逐步取代传统化石能源成为城市居民的燃料来源。天然气在碳中和背景下的能源转型中具有重要的作用^[1]。城市天然气管道是输送系统的重要组成部分,合理的管网规划设计是燃气管道安全运行不可或缺的前提条件,也是燃气公司运营维护模拟的重要依据^[2-3]。燃气管网水力平差计算是管网规划过程中最重要的环节,随着城市规模不断扩大,管网规模也逐渐扩大,且布置日趋复杂,给管网设计和运营维护带来困难。欧阳曙光^[4]采用节点逼近法并结合 MATLAB 软件进行水力平差计算。田贯三等^[5]基于 SCADA 系统采用非均匀时间间隔建立了在线动态仿真模型。肖蕾^[6]运用柯列勃洛克公式和高斯赛德尔迭代法求解管网线性方程。吴泽鑫等^[7]等利用穷举法并结合 AutoCAD 自带的 Visual Lisp 编辑器开发枝状管网计算模型。周伟国^[8]、赵丹铭等^[9]把管网拆解为对象,按顺序遍历管网,以对象为单位求解燃气管网方程。赵羽等^[10]基于遗传算法与水力计算模型建立管网仿真系统。目前管网平差计算系统尚不完善,仍存在一些不足,例如 A. A. Adamu^[11]提出的系统只能以文本的方式输入和输出,计算时,节点地理位置与节点流量需要手动输入,导致数据精确度较低,无法实现模型计算和成果出图一体化,自动化程度不高。

综合以上研究,笔者利用泰森多边形归算管网计算时所需的节点流量,并基于不同的流态选取不同的摩擦阻力系数计算公式,与节点法相结合建立水力平差计算模型,在此基础上运用 C++ 语言编程进行水力平差计算模型求

解,该模型能够在不同的管段材质、不同的压力级别以及环、枝状管网下进行水力平差计算,最后以 PowerCAD 为平台建立计算模型,实现了计算与设计规划出图的一体化。

1 平差计算数学模型

1.1 计算公式

(1) 连续性方程组

$$\sum Q_i = 0. \tag{1}$$

式中: $\sum Q_i$ 表示节点 i 的气体出入量,假设节点流入量为正,流出量为负,式(1)表示在某一节点处流量代数和为 0。

(2) 压降方程

先判断流态,然后计算雷诺数,并计算摩擦阻力系数;对于不同的流态选取不同的公式进行摩擦阻力系数 λ 的计算。

①柯列勃洛克公式适用于紊流的三个阻力区,对于不同的管材用不同的当量绝对粗糙度来反映。

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\lg\left(\frac{K}{3.7d} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}}\right). \tag{2}$$

式中: λ 为管道的摩擦阻力系数; K 为管径粗糙度;通常钢管 $K = 0.17\text{ mm}$, PE 管 $K = 0.017\text{ mm}$, 铸铁管 $K = 0.2\text{ mm}$; d 为管道内径, mm; Re 为雷诺数,无量纲, $Re = d_1 \times w/\gamma$; d_1 为管道内径, m; w 为燃气流动的断面平均流速, m/s; γ 为运动黏度, m^2/s 。

②阿里特苏里公式适用于钢管及其他光滑管道。

$$\lambda = 0.11\left(\frac{K}{d} + \frac{68}{Re}\right)^{0.25}. \tag{3}$$

③谢维列夫公式适用于新钢管,公式如下(分区):

水力光滑区($\frac{w}{\gamma} < 0.176 \times 10^6$):

$$\lambda = 1.375 \times \frac{0.25}{Re^{0.226}} \tag{4}$$

过渡区($\frac{w}{\gamma} < 2.4 \times 10^6$):

$$\lambda = 1.375 \times 0.23 \frac{(1.9 \times 10^{-6} + \frac{\gamma}{w})^{0.226}}{d^{0.226}} \tag{5}$$

阻力平方区($\frac{w}{\gamma} \geq 2.4 \times 10^6$):

$$\lambda = 1.375 \times \frac{0.0121}{d^{0.226}} \tag{6}$$

在燃气管道中管网的压力不大于 1.2 MPa 的情况下,压缩因子与标准状态下的压缩因子比值取 1。

中压管道的计算公式为

$$\Delta P = P_1^2 - P_2^2 = 1.62 \lambda \rho_0 \left(\frac{Q_0^2}{d^5} \right) p_0 \frac{T}{T_0} L_i \tag{7}$$

低压管道的计算公式为

$$\Delta P = P_1^2 - P_2^2 = 0.81 \lambda \rho_0 \left(\frac{Q_0^2}{d^5} \right) p_0 \frac{T}{T_0} L_i \tag{8}$$

式中: P_1 为管道始端的燃气绝对压力,Pa; P_2 为管道末端的燃气绝对压力,Pa; P_0 为标准大气压; ΔP 为低压燃气管道的压力损失,Pa; Q_{N0} 为标准气压燃气流量, m^3/s ; Q_N 为燃气小时流量, m^3/h ; λ 为摩擦阻力系数; L_i 为管段当量长度,m,中压 $L_i = 1.05 L$,低压 $L_i = 1.10 L$ (系数可以人为修改); L 为管段实际长度,m; d 为管道内径,m; T 为绝对温度,K; T_0 为标准状态气体的绝对温度; $T_0 = 273.15\text{ K}$; ρ_0 为燃气的密度, kg/m^3 。

(3) 能量方程组

$$\sum \Delta p_n = 0 \tag{9}$$

1.2 数学模型

用节点法进行燃气管网平差计算时,需要解节点压降方程组,求出节点相对于基准点的压力降值,有多少个未知压力的节点,便需要解多少个节点方程。对于多气源情况,假如有 x 个节点的压力为确定值,不必逐个求解,只需解 $m - x$ 个方程来求解未知压力节点的压力降值^[12-14]。

对于任何闭合环网,根据图论,管段数、节点数和环数有下列关系:

$$h = (m - 1) + n \tag{10}$$

式中: h 为管段数; m 为节点数; n 为环数。

节点流量的符号规定如下:把离开节点的流量设为负值,流向节点的流量设为正值;压力降值的符号与流量的符号相同;闭合环中以顺时针方向流动的管段的压降定为正值,逆时针方向为负值。在一个管网中,当管径已知时,每条管段有压降和流量两个未知量,总共有 $2h$ 个未知量。

假设 A_0 为完全关联矩阵,是一个 m 行 h 列矩阵,行表示节点,列表示管段。完全关联矩阵的秩为 $m - 1$,因为完全关联矩阵 A_0 的任何一行都可以表示成其余 $m - 1$ 行的线性组合。

根据节点流量平衡方程式 $\sum Q = 0$,节点连续性方程可写成

$$A Q = q \tag{11}$$

式中: A 为连接矩阵; Q 为管段流量列向量; q 为节点流量列向量。

A 是一个 $m - 1$ 行 h 列矩阵,表示节点与管段之间的关系,由完全关联矩阵去掉一行后得到。 $a_{ij} = 0$ 表示节点 i 不在管段 j 上; $a_{ij} = 1$ 表示节点 i 在管段 j 的末端; $a_{ij} = -1$ 表示节点 i 在管段 j 的始端。

环能量方程 $\sum \Delta P = 0$ 可以写成:

$$B \Delta P = 0 \tag{12}$$

式中: B 为回路矩阵; ΔP 为管段压降列向量。

B 是一个 n 行 h 列矩阵,行表示环,列表示管段, B 矩阵表示环与管段之间的关系。 $b_{ij} = 0$ 表示管段 i 不在环 j 上; $b_{ij} = 1$ 表示管段 i 的方向与环 j 的方向相同; $b_{ij} = -1$ 表示管段 i 的方向与环 j 的方向相反。

将连接矩阵 A 转置,再乘上节点压差列向量即等于各管段的压力降:

$$A^T P = \Delta P \tag{13}$$

式中: P 为节点压差,指节点相对于基准点压差; ΔP 为管段压降等于管段始端与末端压

力之差。

将(13)代入(12)中得

$$BA^T P = 0. \tag{14}$$

根据管段压力降计算公式改写为线性关系 $\Delta P = S Q_0^2 = S' Q$;

$$S' = 1.62 \lambda \rho_0 \left(\frac{Q_0^2}{d^5} \right) p_0 \frac{T}{T_0} L_i. \tag{15}$$

$$Q = (1/S') \Delta P = G \Delta P. \tag{16}$$

$$G = 1/S'. \tag{17}$$

式中: S 为阻抗; S' 为对角矩阵; G 为管网的导纳矩阵。

将式(13)代入式(16), (16)代入(11)得到未知量 ΔP 的线性方程组:

$$AGA^T P = Q. \tag{18}$$

令 $Y = AGA^T. \tag{19}$

则

$$Y P = Q. \tag{20}$$

Y 是一个 m 行 m 列系数矩阵, 由式(19)运算形成; Q 是 m 个节点的流量, 为已知数; P 是 m 个节点的压差, 为未知数。

已知数等于未知数, 初始管段流量 Q_s 满足式(11), 计算 S, G , 从方程组式(20)可解出节点压差 P , 从式(13)中解出 ΔP , 再从式(16)中解出 Q , 检验 $Q - Q_s$ 是否满足精度, 如不满足, 则 $Q = (Q + Q_s)/2$, 重新计算阻抗 S, G , 再进行平差计算, 直到满足计算精度为止^[15]。

2 节点流量归算

利用节点法进行平差计算需要手动输入

各节点的流量, 该数据较为庞大, 容易出错。笔者提出的模型流量计算方法是通过对居民用气量进行归算, 由于用户数量巨大, 如果将用户的地理位置以要素点的形式表示到电子地图上, 工作量也十分巨大, 不易在短期内完成。为了简化数据输入, 利用泰森多边形来完成居民用气量到节点流量的归算, 具体做法如下。

(1) 形成小区多边形

计算一个小区的总用气量, 以时间 T 为单位记录从银行缴费接口获取的用户缴费信息, 在燃气用户数据库下通过相同的用户编号可以把缴费用户匹配到对应的居住小区, 所得的缴费金额按收费规则计算即得总用气量。这样, 该小区的地理信息与小区流量结合形成一个小区多边形。小区流量 Q_N 计算公式为

$$Q_N = \frac{Z_N}{T}. \tag{21}$$

式中: Q_N 为燃气小时流量, m^3/h ; Z_N 为小区总用气量, m^3 ; T 为时间, h 。

(2) 以管网节点为中心生成泰森多边形

泰森多边形是由一组连接两相邻点线段的垂直平分线组成的连续多边形^[16-17], 多边形边上的点到相邻节点的距离相等, 通过邻域分析法生成泰森多边形来划分管网节点供给天然气的区域。

(3) 生成叠加多边形

以沈阳市为例, 流量归算如图 1 所示。

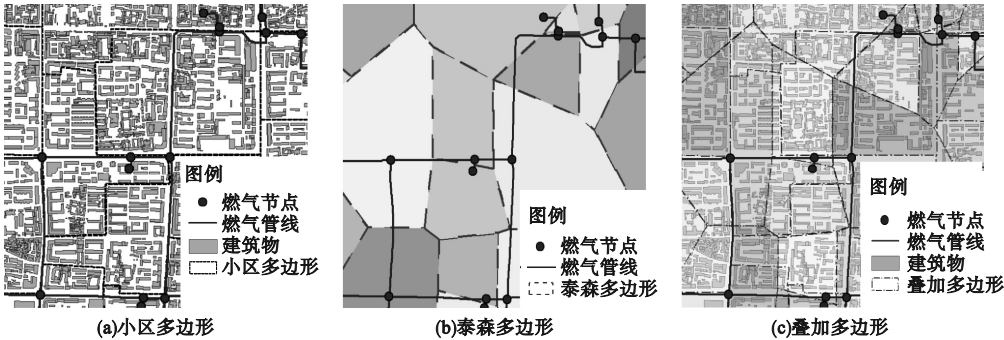


图 1 节点流量归算方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of node flow reduction method

在泰森多边形上叠加小区多边形,利用叠加分析法划分出更小的叠加多边形,叠加多边形中包含小区多边形和泰森多边形的 ID 号,通过 ID 号匹配,计算叠加多边形中各多边形占用小区多边形的面积比例,分配各叠加多边形的用气量,再将叠加多边形的用气量归算到其归属的节点上,得到节点流量。流量归算过程如图 2 所示。

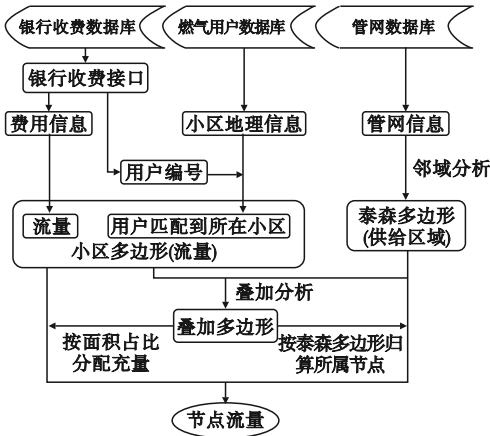


图 2 归算流程图

Fig. 2 Reduction flow chart

3 计算模型验证与应用

3.1 模型验证

为验证构建燃气管网水力平差计算模型的准确性,与《燃气输配》第五版^[14]的算例进行对比验证,环状管网气源为天然气,该环状管网如图 3 所示。

图 3 中标注有管段长度和建筑用地面积 F ,人口密度为 $600\text{ 人}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$,每人每小时的用气量为 0.03 m^3 ;1~9 表示节点编号,①~⑩表示管段编号,I~Ⅲ表示环号;气源点为节点 1,环状管网在节点 3 处有集中用户,其用气量为 $100\text{ m}^3/\text{h}$ 。 $\rho_0=0.75\text{ kg}/\text{m}^3$, $\nu=1.5\times10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$;管网中的计算压力降取 $\Delta p=1\text{ 000 Pa}$ 。

将数据代入以 PowerCAD 为平台的管网水力平差模型进行计算,设置闭合差迭代精度,得到管段流量计算结果,与文献[14]的结果对比如表 1 所示。

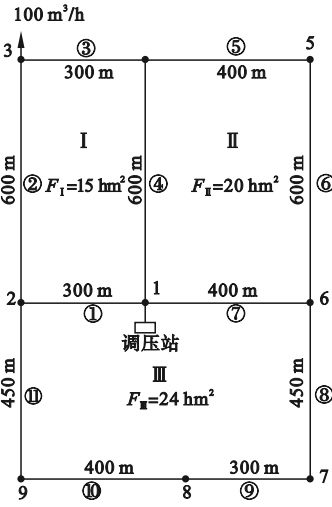


图 3 环状管网计算简图

Fig. 3 Calculation diagram of circular pipeline network

表 1 平差计算方法与文献[14]结果对比

Table 1 Comparison of adjustment calculation results and results in reference [14]

管段编号	文献结果/ ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	计算结果/ ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	相对误差/ %
①	344.95	346.008	0.31
②	97.21	98.049	0.86
③	-77.79	-76.201	-2.04
④	-264.36	-253.056	-4.28
⑤	25.56	32.068	25.46
⑥	-73.44	-83.695	13.96
⑦	-352.69	-362.448	2.77
⑧	111.25	111.052	-0.18
⑨	39.25	39.103	-0.37
⑩	-32.75	-38.315	16.99
⑪	-113.75	-113.659	-0.08

表 1 中管段⑤、⑥结果与文献[14]结果相比差异较大,原因是文献[14]为手工计算,环Ⅱ的闭合差为 7%,平差模型利用计算机优势能追求更小的闭合差,重新分配④、⑦号管段流量,影响下游⑤、⑥管段流量数值,导致⑤、⑥管段计算结果与算例流量数值出入较大。通过表 1 和图 4 可以看出模型构建的水力平差模型结果与算例流向相同,且结

果接近,证明平差模型科学有效。

图4为平差计算模型计算结果与文献[14]的对比图,可看出计算管段流量与算例管段流量趋势相同,数值结果拟合度非常好。

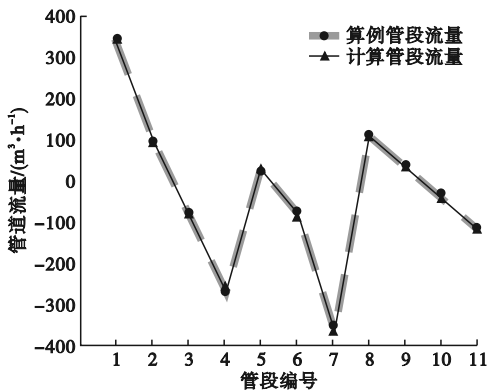


图4 平差计算结果与文献[14]对比

Fig.4 Comparison of adjustment calculation results with results in reference[14]

3.2 模型应用

以沈阳市某时期中压管网为例,应用平差模型对燃气管网进行水力计算。管线总长37.6 km,共计929个管段。按步骤导入管线数据,并接入银行收费数据库,填入气体运动黏度、气体密度、温度、压力类型、需要达到的迭代精度等数据(见图5),选取相应的水力计算公式,软件读取这些数据生成关联矩阵进行平差计算,得出各个管段的流量和压降,部分计算结果如表2所示。待计算完成后,软件可以自动标注出管网内气体的流向,自动读取水力计算结果,并在可视化界面上沿

管段标注流量等信息(见图6)。通过PowerCAD平台,程序能显示异常管段和孤立节点,方便数据检查和纠错,方便管网的规划调整及辅助规划出图。

表2 计算结果列表

Table 2 List of calculation results		
管段编号	流量/(m³·h ⁻¹)	压降/Pa
1-2	58 413.330	143.230
2-3	41 185.920	748.771
3-4	13 253.970	772.550
4-5	-4 694.300	-117.100
5-6	-6 313.980	-407.722
6-7	-11 465.100	-593.212
7-2	-17 163.400	-403.287
7-8	5 586.744	546.253
8-9	5 499.515	231.112
9-10	5 442.654	135.602
⋮	⋮	⋮

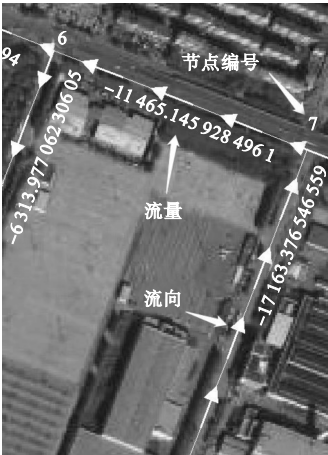


图6 水力计算结果自动标注

Fig.6 Automatic labeling of hydraulic calculation results

4 结 论

- (1) 建立了平差计算模型,并在PowerCAD上进行模拟运算,是将燃气管网水力平差模型与计算机相结合的有效方法。
- (2) 通过结合居民缴费数据并利用泰森多边形进行节点流量归算,该方法简化了数据输入;将平差计算结果与PowerCAD相对



图5 水力计算窗口

Fig.5 Hydraulic calculation window

照,能直观地查看平差结果并且能在PowerCAD上直接进行调整,实现平差计算与规划出图一体化。

参考文献

- [1] 李俊杰.“双碳”目标下天然气发展形势的思考[J].天然气技术与经济,2022,16(1):53-59.
(LI Junjie. Thinking on natural-gas industrial development under the "double carbon" goal [J]. Natural gas technology and economy, 2022,16(1):53-59.)
- [2] 戴菲.城市燃气管道设计中的问题与对策[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(11):30-32.
(DAI Fei. Problems and countermeasures in urban gas pipeline design [J]. China petroleum and chemical standard and quality, 2022, 42(11):30-32.)
- [3] 刘庆宇.城市燃气工程规划设计问题分析[J].工程建设与设计,2021(19):47-49.
(LIU Qingyu. Analysis of problems in planning and design of urban gas projects [J]. Construction & design for engineering, 2021(19):47-49.)
- [4] 欧阳曙光.应用MATLAB进行燃气管网水力计算[J].广州化工,2011,39(24):31-33.
(OUYANG Shuguang. Hydraulic calculation of gas pipe network with MATLAB [J]. Guangzhou chemical industry, 2011, 39(24):31-33.)
- [5] 田贯三,张明光,王明.城镇中压燃气管网的在线动态仿真[J].山东建筑大学学报,2012,27(2):137-140.
(TIAN Guansan, ZHANG Mingguang, WANG Ming. On-line dynamic simulation of city medium pressure gas pipeline network [J]. Journal of Shandong jianzhu university, 2012, 27(2):137-140.)
- [6] 肖蕾.基于AutoCAD的燃气管网水力平差计算软件的研制[J].计算技术与自动化,2014,33(4):110-114.
(XIAO Lei. Development of hydraulic calculation software of gas pipe network based on AutoCAD [J]. Computing technology and automation, 2014, 33(4):110-114.)
- [7] 吴泽鑫,刘卓,邱冬亮,等.庭院枝状燃气管网优化计算程序[J].煤气与热力,2019,39(10):18-21.
(WU Zexin, LIU Zhuo, QIU Dongliang, et al. Optimization calculation program for courtyard branch gas pipe network [J]. Gas & heat, 2019, 39(10):18-21.)
- [8] 周伟国,胡思渊,王海.基于面向对象法的燃气环网水力计算实例分析[J].上海煤气,2015(5):5-8.
(ZHOU Weiguo, HU Siyuan, WANG Hai. Gas pipeline calculation case based on object-oriented method [J]. Shanghai gas, 2015(5):5-8.)
- [9] 赵丹铭,周伟国,黄薇.面向对象法燃气管网水力计算[J].煤气与热力,2020,40(12):17-22.
(ZHAO Danming, ZHOU Weiguo, HUANG Wei. Hydraulic calculation of gas pipeline network based on object-oriented method [J]. Gas & heat, 2020, 40(12):17-22.)
- [10] 赵羽,蔡磊,管延文,等.基于遗传算法的燃气管道阻力系数辨识研究[J].煤气与热力,2022,42(5):1-6.
(ZHAO Yu, CAI Lei, GUAN Yanwen, et al. Research on resistance coefficient identification of gas pipeline based on genetic algorithm [J]. Gas & heat, 2022, 42(5):1-6.)
- [11] ADAMU A A. Software for natural gas pipeline design and simulation(gaspisim)[J]. Global journal of engineering research, 2016, 15(1):47-62.
- [12] SONG Chenhui, XIAO Jun, ZU Guoqiang, et al. Security region of natural gas pipeline network system: Concept, method and application [J]. Energy, 2020, 217:119283.
- [13] CUI Gaochen, JIA Qingshan, GUAN Xiaohong, et al. Data-driven computation of natural gas pipeline network hydraulics [J]. Results in control and optimization, 2020, 1:100004.
- [14] 段常贵.燃气输配[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
(DUAN Changgui. Gas transmission and distribution [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2015.)
- [15] BRKI D. Iterative methods for looped network pipeline calculation [J]. Water resources management, 2011, 25(12):2951-2987.
- [16] LUSTENBERGER P, SCHUMACHER F, SPADA M, et al. Assessing the performance of the european natural gas network for selected supply disruption scenarios using open-source information [J]. Energies, 2019, 12(24):1-28.
- [17] 周建刚.基于DEM的泰森多边形计算[J].广东水利水电,2014(5):23-25.
(ZHOU Jiangang. A calculation method of the thiessen based on DEM [J]. Guangdong water resources and hydropower, 2014(5):23-25.)

(责任编辑:王国业 英文审校:唐玉兰)