引文格式：刘峰,王海起,王鑫冉,等. 基于 WebGIS 的天然气管网路由系统研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22(8): 76-80. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.08.017

基于 WebGIS 的天然气管网路由系统研究

刘　峰[1]，王海起[1]，王鑫冉[2]，周啸宇[1]
（1. 中国石油大学（华东）海洋与空间信息学院，山东 青岛 266580；2. 哈尔滨工程大学 计算机科学与技术学院，黑龙江 哈尔滨 150001）

摘　要：随着天然气需求的不断增加，天然气集输管网建设正呈现网络化趋势。然而，天然气管网路由的经济效益分析仍较低，且可视化展示效果不佳。针对上述问题，基于 WebGIS 构建了天然气管网路由系统，实现了天然气管网路由的拓扑绘制、分析和评价。其中，拓扑绘制模块实现了在 Web 下绘制 Svg 格式的天然气集输站点和天然气集输管网图层，并实现了管网和站点的数据管理和其他交互功能。分析和评价模块则采用了 A*算法和辅助网络算法的融合，提出了 A*-Net 算法，实现了最优路由查询、评价方案的生成和可视化。该系统的拓扑绘制和最优路由搭建模型可应用于其他有关拓扑分析的实际问题，而分析和评价模块的应用可以有效帮助相关部门在建设路由时降低成本。

关键词：网络地理信息系统；天然气；辅助网络算法；A*算法；路由；可视化
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）08-0076-05

Research on Routing System for Natural Gas Pipeline Networks Based on WebGIS

LIU Feng[1], WANG Haiqi[1], WANG Xinran[2], ZHOU Xiaoyu[1]
(1. School of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
2. School of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: With the increasing demand for natural gas, the construction of natural gas gathering and transmission networks is moving towards a networked trend. However, the economic analysis of natural gas network routing is still relatively low, and the visual display effect is unsatisfactory. To address these issues, we built a natural gas network routing system based on WebGIS, which could implement the topological drawing, analysis and evaluation of natural gas network routing. The topological drawing module realizes the drawing of natural gas gathering and transmission station and network layers in Svg format under Web and data management and other interactive functions for the network and stations. The analysis and evaluation module combines A* algorithm with the auxiliary network algorithm, proposes the A*-Net algorithm, and realizes the optimal routing query, evaluation scheme generation and visualization. The topological drawing and optimal routing construction model of this system can be applied to other practical problems related to topology analysis, while the analysis and evaluation module can effectively help relevant departments and companies reduce costs when constructing routes.

Key words: WebGIS, gas, auxiliary network algorithm, A* algorithm, routing, visualization

天然气作为污染少、高热值的清洁能源，其社会需求量日益增加，但天然气管网路由的经济效益分析仍较低，且可视化展示效果不佳，所以天然气集输管网系统的构建和最优路由分析及评价具有重要的研究意义。目前天然气集输管网建设的整体发展趋势是集输系统网络化[1]，而网络当中的拓扑结构问题是对点、线等矢量要素间的分布和连接状态进行分析，所以网络的最优拓扑结构[2]可以很好地应用在天然气集输管网上，建立数学模型对天然气集输管进行优化计算。

网络优化计算问题自 1960 年以来就受到了相当大的关注。早期文献[3-5]主要集中在确定性问题上。然而，后来则越来越关注具有随机需求的容量扩展模型。一些学者基于不同的算法结合去进行优化，例如 Tsiotas Dimitrios[6]等以希腊的区域间道路运输网络建模为地理参考的原始图，并从区域经济学的角度讨论了其地理和拓扑特征。宫恩超[7]等提出基于 Bellman-Ford 算法的分布式动态地理路由算法，较传统算法节约计算时间百分比约在 50%到 70%之间。Sadri V[8]等提出了一种简单的综合和改造换热网络的方法，通过考虑压降以及寻找合适的换热器内流道来降低网络的泵送成本。Yang [9]等针对供热路由选择要求，对蚁群系统算法的代价函数和更新策略进行修正，与相应的序列算法相比，算法效率提高了 4.789 倍。范林林[10]等提出了一种改进 A*路径规划算法，基于地表属性、坡度和

收稿日期：2023-04-03。
项目来源：山东省自然科学基金面上项目 （ZR2021MD068）。
第一作者简介：刘峰（1998—），硕士研究生，研究方向为地理信息与机器学习、空间与时空统计分析，E-mail：zszxx2012520@163.com。

高程考虑节点，提高了算法的准确度。

但是上述算法也存在缺点，Bellman-Ford算法、换热网络方法时间复杂度比A*算法高；蚁群系统算法缺点是收敛速度慢，种群多样性与收敛速度的矛盾等，而A*算法不适用于解决路由组合问题。所以本文针对单条路由查找时使用A*算法；针对路由组合查找时，提出A*算法+辅助网络融合的A*-Net算法去搜寻所有的方案，根据天然气的总量和约束条件找出满足条件的最优路由组合，最后对方案进行可视化展示，分为表格展示和建模展示。

1　天然气管网路由分析评价实现

1.1　基于A*算法实现单条路由查找

A*算法是一种启发式搜索算法。启发式搜索是在状态空间中搜索，对每个搜索到的位置进行评估，得到最佳位置，然后从这个位置搜索到目标[11]。这样可以省略大量不必要的搜索路径，提高效率。

A*算法的实现首先将天然气管网的起点添加到Open表中；再遍历Open表，找到最小 $f(n)$ 值的站点，将其视为当前处理节点，并将其添加到Closed表中；接着判断站点的8个相邻网格，如果网格返回FALSE或在Closed表中，则将其忽略，否则就将相邻网格添加到Open表中，并将父节点设置为该节点，如果相邻网格不在Open表中，则计算 $f(n)$，$d(n)$ 和 $h(n)$ 值，如果相邻的网格已经在“打开”表中，并且新的 $d(n)$ 值小于旧的 $d(n)$ 值，则将与网格相邻的父级设置为该节点，并重新计算 $f(n)$ 值；然后重复上述步骤，直到将目标点添加到Open表中；如果Open表为空，则表示没有路径；最后，从目标点开始沿每个节点的父节点追溯。

Open表存储所有已生成但尚未查看的天然气管网站点，Closed表记录已经被访问过的站点，它的优点是能够迅速地找到天然气运输的最优路由，缺点是无法实现路由组合的查找，例如从一个集输管网中的站点向另一个站点运输天然气时，在考虑运输总量及其他约束条件下，单条路由的运输量不足，需要多条路由进行组合运输。

1.2　基于A*-NET算法实现路由组合分析评价

针对A*算法单条路由分析评价不能实现路由组合查找的问题，本文结合A*算法和容量扩展的思想，并利用拓扑网络的结构，提出了A*-NET算法。即在A*算法迭代过程中，动态地构建辅助网络有向图，从而实现对路由组合的查找。

A*-NET算法中的启发式评价函数如等式（1）所示：

$$f(n)=d(n)+h(n) \tag{1}$$

式中，$f(n)$ 为从当前节点到目标节点的估计距离函数；$d(n)$ 为从起始节点到“n”节点的实际距离函数；$h(n)$ 为从“n”节点到目标节点的估计距离。为了找到最佳路径，$h(n)$ 的值必须小于或等于从“n”节点到目标节点的实际距离，$h(n)$ 也称为启发式函数。

估算距离常用的方法有欧氏距离、切比雪夫距离、曼哈顿距离等[12]，根据所耗时间比较，系统使用曼哈顿距离进行计算站点间的实际距离，确定离目标点代价最小的下一个节点。曼哈顿距离就是在固定直角坐标系上两点所形成的线段，对 x，y 轴产生的投影距离总和。例如坐标点 $P_1(x_1,y_1)$ 的与坐标点 $P_2(x_2,y_2)$ 的的曼哈顿距离如公式（2）所示：

$$h(n)=|x_1-x_2|+[y_1-y_2] \tag{2}$$

式中，$h(n)$ 为投影距离总和；x_1，x_2 为对 x 轴产生的投影距离；y_1，y_2 为对y轴产生的投影距离。

A*-NET算法具体的实现步骤如下：

1）传入起点名称、终点名称、总量、距离权重，成本权重，将起点放入Open列表中和辅助网络图有向图中，并生成一个空的Closed列表。

2）若Open列表为空则失败退出，否则根据距计算权重距离，将值最小的节点 n 放入到Closed列表中。

3）判断 n 节点是否为终点，并且路由的运输总量是否满足需求，如果不满足条件，则扩展 n 节点，将其与辅助网络有向图中对应的节点相连，边的容量值为原始网络节点的通行能力，重复上述操作进行迭代。

4）如果满足条件，则根据评价目标对辅助网络有向图中的所有路由的 $f(n)$ 值进行归一化处理[13]，将每一种方案的距离和计算出来除以所有方案的距离和，每一种方案的成本和除以所有方案的成本和，因为距离和运输成本在这里是2个不相关的量，经过归一化后可以把数据映射到0～1范围之内处理，更加便捷快速，还可以把有量纲表达式变为无量纲表达式。归一化公式如（3）所示：

$$Y_i=(x_i-x_{\min})/(x_{\max}-x_{\min}) \tag{3}$$

式中，Y_i 为该方案的目标值归一化后的值；x_i 为该方案的目标值；$x_{\min}$ 和 $x_{\max}$ 分别是目标值中的最小值和最大值。

5）利用主观赋权法分别给与距离和运输成本赋予权重，主观赋权的好处就是给予决策人充分的参与

性和决定性，但客观性较差[14]。如公式（4）所示：

$$W_i = p_1 D_i + p_2 C_i \tag{4}$$

式中，W_i 为该方案的评价目标值；D_i 为该方案的距离值归一化后的值；p_1 为主观赋予 D_i 的权重，在系统中通过设置距离权重获得；C_i 为该方案的运输成本值归一化后的值；p_2 为主观赋予 C_i 的权重，在系统中通过设置成本权重获得；其中 p_1 和 p_2 的和为1，系统中根据经验所得，p_1 和 p_2 初始值为0.6和0.4。

6）最后对所有的路由根据 W_i 值进行排序，再根据天然气运输总量进行筛选，输出所有可行的组合路由。

其中辅助网络有向图的具体构建步骤为：

1）根据原始网络的拓扑结构，构建一个与之对应的有向图，称为辅助网络有向图(auxiliary network directed graph)，其中每个节点表示原始网络中的一个网络节点，每条边表示原始网络中的一条路径。

2）对每条边赋予一个容量值，该容量值等于该路径的最大通行能力，即该路径上最小的容量值。

3）在算法的迭代过程中，当遇到扩展节点时，可以将该节点所在的原始网络节点的所有出边和入边加入到辅助网络有向图中。

4）对于扩展节点所在的原始网络节点，将其与辅助网络有向图中对应的节点相连，边的容量值为原始网络节点的通行能力。

5）算法迭代过程中，利用辅助网络有向图对路径进行查找和优化，使用最大流算法求解最大容量增广路径，将其加入到 A* 算法的开启列表中，直到找到最优解为止。

以虚拟情况（元坝至大牛地）为例，其他节点以字母表示，形成的辅助网络有向图如图1所示，其中 $d(n)$ 分别表示每一条集输管道的属性数据，共设计了3条属性，分别是距离、运输成本、运输能力。

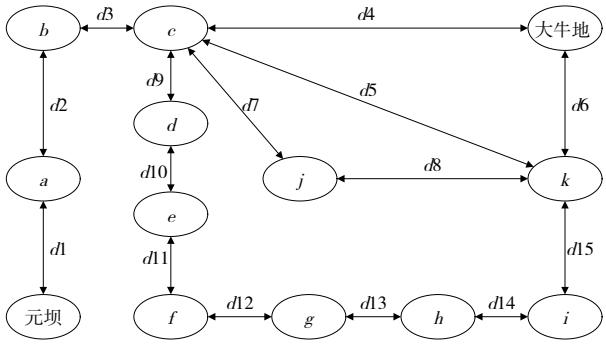


图1 辅助网络有向图

2 天然气管网路由拓扑绘制实现

2.1 可视化系统结构设计

天然气管网路由的可视化系统开发平台为Visual Studio Code，在架构方面，采用了B/S架构，分为数据层、逻辑层、服务层、应用层，如图2所示。

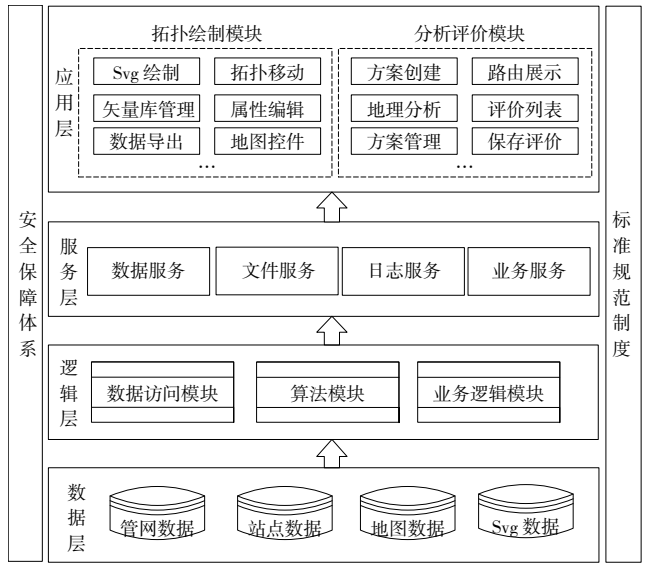


图2 系统体系架构

系统的数据主要有三部分，第一部分是集输管网的底图，调用百度地图的底图和文字注记的API，和GeoServer发布的地图；第二部分是集输管网和集输站点的数据，采用Json格式；第三部分是图标矢量库，图标使用Svg（Scalable Vector Graphics）图片，即可缩放的矢量图形，所以用户可自行调节图标大小[15]，所有集输管网中的Svg图片形成了一个图标矢量库。

2.2 可视化界面的设计和实现

2.2.1 管网拓扑绘制及管理

管网拓扑绘制及管理界面主要分为交互功能菜单栏、数据可视化及交互区、图标矢量库、图标大小设置四个部分。

交互功能菜单栏共包含11个按钮，分别是下载、读取、停止编辑、保存编辑、查询、全部删除、撤销绘制、恢复绘制、拓扑移动、平移移动、属性编辑。

数据可视化及交互区共分为3个部分：地图、地图控件、绘制及交互图层，其中地图使用的是百度地图；地图控件在本系统里添加的有鹰眼控件、缩放刻度控件、缩放到全局控件、全屏展示控件；绘制及交互图层部分是通过传递参数，即图标矢量库和集输管网数据，在数据可视化及交互区进行展示。

2.2.2　集输路径分析及评价

地图控件集输路径分析及评价界面如图3所示，主要分为创建评价方案按钮和方案列表2个部分。方案列表的结构包含方案名称、评价目标、起点、终点、距离权重、成本权重、评价值、操作。



图3　集输路径分析及评价界面

创建评价方案按钮的点击事件会生成modal弹窗，创建评价方案弹窗包含评价目标下拉表，方案名称、起点、终点、总量、距离权重和成本权重，总量和2个权重根据评价目标设置成隐藏或显示。

点击评价按钮会生成评价列表和保存按钮，评价列表的结构包含路径、途径地点、评价值、最优解。点击保存按钮会向方案列表里插入一行数据，在操作里会插入地理信息分析和详情2个文字按钮。点击地理信息分析会生成弹窗，将方案进行可视化处理，在管网拓扑绘制及管理界面建模的基础上，根据起点和终点绘制出所有路由，其中的最优路由或路由组合用红色流动线绘制，其他路由用蓝色流动线绘制（系统中绘制的路由是流动线，有方向且会循环流动）；点击详情会弹出生成评价列表。

2.3　天然气管网系统功能实现

管网拓扑绘制及管理的实现主要包含图标矢量库的点击事件和交互功能菜单栏中按钮触发事件两部分。

图标点击事件中分为集输站点和集输管网绘制，绘制集输管网站点是根据传递的参数，绘制相对应的Svg图标，通过OpenLayers里的draw事件给地图添加了点击事件；绘制集输管网是根据点击矢量图标库中的Svg图标绘制对应的线类型，在系统中线分为4种，分别是拓扑线、方向线、管道线、流动线。

交互功能包含有下载、读取、停止编辑、保存编辑、查询、全部删除、撤销绘制、恢复绘制、拓扑移动、平移移动、属性编辑等，它们之间有功能或者交互上的关联，如表1所示。

表1　交互功能

名称	实现功能
保存、下载和读取	下载建模后的数据，读取数据进行可视化
停止编辑	返回到初始交互状态
查询	查询要素，将其放置在视图中心
全部删除	删除所有要素，方便加载本地Json文件
撤销绘制、恢复绘制	绘制错误时撤销绘制和恢复撤销
拓扑移动、平移移动	要素的移动，其中拓扑移动保留拓扑关系
属性编辑按钮	更改属性数据
滑动条和输入框	设置图标的大小
…	…

3　结果分析评价

以虚拟情况（元坝至大牛地）为例，评价目标分别设置为距离（时间）最优路径、成本最优路径、（距离+成本）分权最优路径、路径组合分权最优，对其结果进行可视化和分析讨论。

3.1　距离（时间）最优路径

距离（时间）最优路径的评价值为每一种方案运输的距离/km，方案的最优解是元坝—>*a* —>*b* —>*c* —>大牛地，距离为1 557.56 km，是4种方案评价值中的最小值，符合预期结果。

3.2　成本最优路径

成本最优路径的评价值为每一种方案的运输成本/万元，最优解是元坝—>*v* —>*b* —>*c* —>*k* —>大牛地，运输成本为0.88万元，是4种方案评价值中的最小值，符合预期结果。

3.3　（距离+成本）分权最优路径

成本最优路径的评价值为每一种方案的运输成本/万元，最优解是元坝—>*a* —>*b* —>*v* —>*k* —>大牛地，运输成本为0.88万元，是4种方案评价值中的最小值，符合预期结果。

3.4　路径组合最优（分权）

路径组合最优评价值为每一种方案的运输能力/km^3，距离权重设置为0.6，成本权重为0.4，总量为500 km^3，方案的最优解是元坝—>*a* —>*b* —>*c* —>大牛地；元坝—>*a* —>*b* —>*c* —>*k* —>大牛地；元坝—>*a* —>*b* —>*c* —>*j* —>*k* —>大牛地，3种路径进行组合，评价值的和为730 km^3，而前2种路径评价值为419 km^3，因目标值是500 km^3，所以调用前3条路径符合目标方案。其生成的评价列表如图4所示。

4　结　语

本文基于WebGIS实现了天然气管网路由的拓扑绘制和分析评价，构建了天然气管网的网络地理信息系统。其中拓扑绘制主要实现了在Web下绘制Svg格式的天然气集输站点、天然气集输管网图层，实现管

路径	途径地点	评价值	最优解
1	元坝—>a—>b—>c—>大牛地	178千方	是
2	元坝—>a—>b—>c—>k—>大牛地	214千方	是
3	元坝—>a—>b—>c—>j—>k—>大牛地	311千方	是
4	元坝—>a—>b—>c—>d—>e—>f—>g—>h—>i—>k—>大牛地	539千方	否

图4 评价列表

网及站点的数据管理和其他交互功能；天然气集输路由分析及评价主要实现了：基于A*算法的单条路由查找、基于A*-NET算法的组合路由查找及方案的可视化。天然气集输路由的分析及评价可以辅助相关部门和公司进行决策，降低建设路由成本；拓扑绘制及最优路由搭建的模型可以应用于其他有关于拓扑分析的现实问题。

单条路由查找及其性能评价中的A*算法是Dijkstra算法和启发式算法的结合，在本系统中Dijkstra算法比较成熟，但应用的启发式算法还比较初级，之后需进一步完善启发式算法从而提高A*算法的速度和准确度。A*-NET算法是结合A*算法和容量扩展的思想，并利用拓扑网络的结构提出的，拓扑网络的结构还可以进一步的完善，未来的方向是在递归构建辅助网络有向图的过程中增加更多的约束条件，优化网络结构，提高算法的速度，减少冗余度。

参考文献

[1] 梁瑞强,刘璟,王大勇.探讨天然气集输管网优化拓扑[J].当代化工研究,2018,11(10):100-101

[2] 韦人玮,吴小芳,杜清运.基于图模型和拓扑约束的管网数据一致性检测[J].地理空间信息,2006,4(1):52-54

[3] Alexopoulos C,Fishman G S. Sensitivity Analysis with Regard to Capacity Expansion in Network Flow Simulation[C]//Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE),1990

[4] Leblanc L J. An Algorithm for the Discrete Network Design Problem[J].Transportation Science, 1975,9(3):183-199

[5] Yan H, Lam W H K. Optimal Road Tolls Under Conditions of Queueing and Congestion[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 1996, 30(5): 319-332

[6] Tsiotas D. Drawing Indicators of Economic Performance from Network Topology:The Case of the Interregional Road Transportation in Greece[J].Research in Transportation Economics,2021,90:101004

[7] 宫恩超.基于GIS地学传感器网络拓扑控制及路由算法的研究[D].上海:上海师范大学,2012

[8] Sadri V, Soltani H, Rahimzadeh S. A Simple Method for Finding Optimal Paths of Hot and Cold Streams Inside Shell and Tube Heat Exchangers to Reduce Pumping Cost in Heat Exchanger Network Problems[J].Chemical and Biochemical Engineering Quarterly,2020,34(3):131-148

[9] Zhang Y, Zhang G, Zhao H, et al. A Convenient Tool for District Heating Route Optimization Based on Parallel Ant Colony System Algorithm and 3D WebGIS[J].ISPRS International Journal of Geo-information,2019,8(5):225-228

[10] 范林林,邱德楠,曹震,等.基于优化A*算法的越野最短路径规划研究[J].地理空间信息,2022,20(6):71-73

[11] Zhang Z, Zhao Z. A Multiple Mobile Robots Path Planning Algorithm Based on A-star and Dijkstra Algorithm[J]. International Journal of Smart Home, 2014, 8(3): 75-86

[12] 李勇军,蔡皖东,王伟,等.基于Manhattan距离的网络拓扑推测方法研究[J].计算机科学,2006,33(11):31-33

[13] 杨寒雨,赵晓永,王磊.数据归一化方法综述[J].计算机工程与应用,2023,59(3):80-83

[14] 宋冬梅,刘春晓,沈晨,等.基于主客观赋权法的多目标多属性决策方法[J].山东大学学报(工学版),2015,45(4):1-9

[15] Chen J, Liu W. Construction and Application of a Graphic Visualization Tool for Important Forage Omics Data[J]. Acta Prataculturae Sinica,2024,33(2):57-59

（上接第58页）

[10] 赖小霞,温家洪.南昌市土地利用变化及其驱动因素分析[J].地理空间信息,2022,20(10):54-60

[11] 李嘉琪,段梦琦,尹建国,等.近10年青岛市土地利用景观格局时空变化特征[J].地理空间信息,2022,20(5):22-26

[12] 陈丽.银川市三区土地利用时空变化研究[J].地理空间信息,2022,20(2):79-83

[13] 孙姣姣,王琦,郑洁,等.大英县2002-2017年土地利用分类动态分析[J].地理空间信息,2022,20(1):56-60

[14] 傅伯杰,陈利顶.景观多样性的类型及其生态意义[J].地理学报,1996,62(5):454-462

[15] 孙逸敏.利用SPSS软件分析变量间的相关性[J].新疆教育学院学报,2007,22(2):120-123

[16] 丁正满,马婷婷.基于土地规划管理与城乡规划的相关性研究[J].农村经济与科技,2021,32(9):270-271