

# 城镇燃气管网的健康评价及规划优化

黄勇<sup>1,2</sup>, 冯洁<sup>1</sup>, 石亚灵<sup>1,3</sup>, 汪洋<sup>4</sup>

(1. 重庆大学 建筑城规学院, 重庆 400030; 2. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400030;  
3. 重庆大学规划设计研究院有限公司, 重庆 400030; 4. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 401331)

**摘要:** 基于社会网络分析原理和方法, 将燃气管网抽象为网络模型. 以晋中市中心城区燃气管网为例, 在 Pajek 平台上构建现状与规划网络图. 构建由网络拓扑结构、管网运行状态与重点个体设施三方面构成的网络健康测评体系, 计算包括网络密度在内的八项指标. 计算可知, 规划管网拓扑结构较优, 现状管网运行状态较优, 提出燃气管网拓扑结构优化策略与物理设施维护方案.

**关键词:** 城乡规划; 社会网络分析; 燃气管网; 健康评价; 规划优化

**中图分类号:** TU981; TU996

**文献标志码:** A

**Key words:** urban planning; social network analysis; gas network; health evaluation; planning optimization

## Health Evaluation and Optimization of Urban Gas Network

HUANG Yong<sup>1,2</sup>, FENG Jie<sup>1</sup>, SHI Yaling<sup>1,3</sup>, WANG Yang<sup>4</sup>

(1. Faculty of Architecture and Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 3. Chongqing University Planning and Design Institute Co. Ltd, Chongqing 400030, China; 4. School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** The gas network can be abstracted as network model by social network analysis (SNA). Taking the gas pipeline of the central city of Jinzhong as an example, this paper constructed the current network and planning network on Pajek. The network structure evaluation system was constructed including the topology structure, operation status and key facilities. Eight indexes including network density were calculated. The results show that the current gas network has a better operation while the planning has a better topology structure. The strategy for the network structure optimization and physical facility maintenance was proposed.

城市燃气管网系统是城镇生命线工程系统的重要组成部分. 因其自身结构及所处环境十分复杂, 内外因素导致的任何一个环节发生问题, 都可能通过与其相连的节点或连线将失效影响扩展到社会服务有效层面, 因此燃气管网能否正常有效运转, 关系着整个城镇的运行与人民群众的生命财产安全. 燃气管网的健康评价与规划优化是其中关键问题.

工程型基础设施的健康程度取决于网络自身的拓扑结构和运行状态<sup>[1]</sup>. 燃气管网拓扑结构研究主要集中于结构优化<sup>[2]</sup>, 脆弱性研究<sup>[3-4]</sup>, 连通可靠性<sup>[5-6]</sup>等. 管网运行状态主要包括管网负荷预测<sup>[7-8]</sup>, 长输管道输差控制<sup>[9]</sup>等. 管网健康与安全研究主要集中于管网风险评价<sup>[10-11]</sup>和灾害与事故研究<sup>[12]</sup>. 一方面, 现有研究较少从整体网络的拓扑结构、运行状态与局部结构的重点个体设施对燃气管网进行多层次健康研究; 另一方面, 燃气管网的安全研究较少落实在特定的城市空间中.

本文以晋中市中心城区燃气管网为研究对象, 运用社会网络分析法(SNA)对城市燃气管网建立拓扑网络模型, 从拓扑结构、运行状态和重点个体设施三个方面对其进行健康评价, 进而在此基础上对其规划布局和运行维护提出优化建议.

## 1 研究靶区

山西省于2010年被批复为国家资源型经济转型综合配套改革试验区, 并开展“全面气化”进程. 晋

收稿日期: 2016-01-06

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2013BAJ13B07); 国家自然科学基金(51308575); 重庆市基础与前沿研究计划(cstc2013jcyjA00012)

第一作者: 黄勇(1976—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为山地人居环境学、城乡规划网络化方法.

E-mail: cqhy2001@126.com

中市位于山西省东部,全市总面积 16 404 km<sup>2</sup>;中心城区位于榆次区中部的晋中盆地,距省会太原 25 km,正逐步发展为山西省重要的交通运输枢纽。

晋中市中心城区是平原地区中等城市快速气化发展的典型城市之一:中心城区现阶段拥有两家燃气供应公司,燃气供应形式主要为焦炉煤气、管道天然气及瓶装液化石油气三种;现状人口 53.32 万人,管道供气普及率为 78.8%,规划 2030 年供气普及率达 100%。由于其燃气管网系统发展建设的典型性,本文选取由次高压环网、中压管网、焦炉煤气管网组成的晋中市中心城区管网系统为研究对象,中心区燃气管网现状图及 2030 年燃气管网规划总图分别如图 1 和图 2 所示。

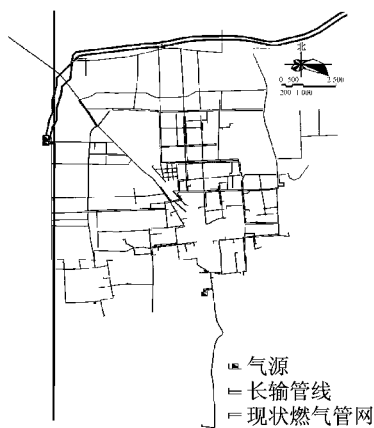


图 1 中心城区燃气管网现状图(2014 年)

Fig.1 Status of gas network of central city in 2014

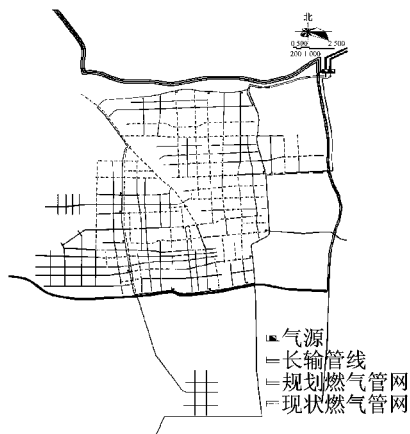


图 2 中心城区燃气管网规划图(2030 年)

Fig.2 Planning of gas network of central city in 2030

## 2 研究框架

### 2.1 技术路线

晋中城区燃气网络特性研究分三个步骤:第一

步,运用网络分析原理,构建现状和规划网络;第二步,根据燃气基础设施健康运行的要求和社会网络分析方法的计算模型,建立计算指标和评价模型;第三步,计算网络结构的相关指标,对比分析计算数据得出结论,提出燃气基础设施规划网络的优化策略。

### 2.2 研究方法

管网在数学上是连通有向图,城市燃气管网由燃气管道及管道交叉口组成。本研究将城市燃气管网抽象成复杂网络模型,以实际的地理空间网络为基础,将管网交叉口节点视为点,管道线路为边,并以管径  $m$  作为关系之间的权值,构建城市燃气管网网络图。点之间存在连接关系,计为  $m$ ;不存在连接关系,则计为 0。

相较于国内外燃气管网常用的遗传算法、BP (back propagation) 神经网络法、函数模型法,社会网络分析方法擅长于网络个体间关联关系的分析,既能表达网络结构的整体特征,也能反映个体在整体的位置,以及描述整体对个体的影响程度,弥补了传统分析方法网络间关联关系分析能力的不足<sup>[13]</sup>。城乡规划领域的社会网络研究多集中于区域结构<sup>[14]</sup>、产业集群结构<sup>[15]</sup>、城市道路与交通<sup>[16-18]</sup>、公共基础设施<sup>[1,19]</sup>等方面,而城镇燃气管网领域研究还较少。网络分析法对管网健康评价与规划优化有较大优势,因此本文采用社会网络分析方法对城市燃气管网建立拓扑网络模型,并挖掘其网络特性。

### 2.3 评价模型与指标

燃气管网的健康程度与管网拓扑结构、运行状态和重点个体设施三大因素有关,而这三大因素又体现为整体层面影响和局部层面的影响。据此,本文从整体网络评价与局部结构分析两层次,对影响燃气网络健康程度的三大因素进行分析。整体网络评价中,以网络完备度、连通度、可靠度及脆弱度测评网络拓扑结构,以运行效率与负载流量测评网络运行状态;局部结构分析中,以节点设施与管线设施测评网络重点个体设施。

网络分析包含大量测度指标,其中网络密度、凝聚子群、聚类系数、点度中心度、中间中心度、平均最短路径、 $k$ -核等被运用于路网、轨道交通网、电网、水网等工程设施网络计算与评价,分析网络脆弱性、连通性等特性<sup>[1,17-20]</sup>。在前期研究的基础上,结合燃气管网特性,选取密度、聚类系数、 $k$ -核、桥、扩散曲线、中间中心势、点度中心度及中间中心度八项测度指标,对网络测评项目予以对应计算。因此,建立评价与结构优化模型如图 3 所示。

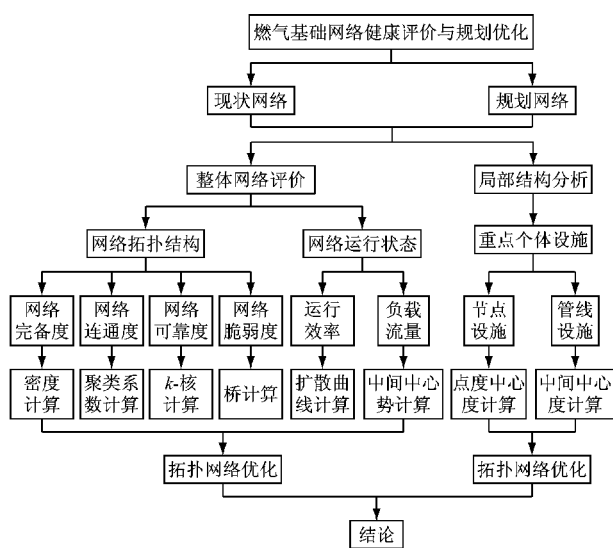


Fig.3 Technical model of gas network health evaluation

### 3 网络结构构建与分析

#### 3.1 社会网络模型构建

根据燃气管网实际地理空间网络转换,在 Pajek 软件平台上构建现状及规划燃气管网拓扑结构形态图(图4和图5)。由图可知,燃气现状管网由三个网络构成,规划管网为一个整体的网络,且规划管网相较于现状更加庞大。

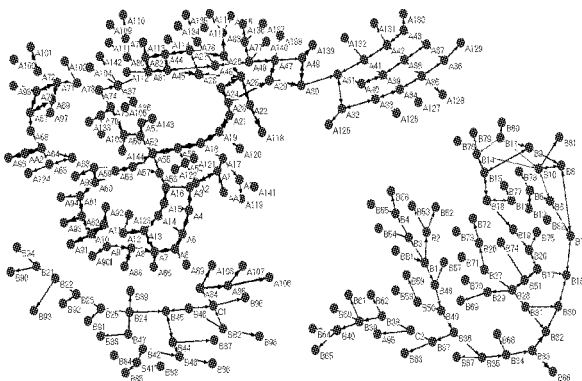


图4 现状燃气管网拓扑结构形态图

Fig.4 Topological structure of status of gas network

#### 3.2 网络拓扑结构评价

##### 3.2.1 网络完备度

网络密度是网络实际存在的连线数量与最大可能连线数量的比值,可以测定网络整体完备程度。其数值越高代表网络密度越大,网络越完备。计算公式为

$$P = \frac{2L}{N(N-1)} \quad (1)$$

式中:  $P$  为网络密度;  $L$  为网络中实际存在的连接数;  $N$  为网络中实际存在的节点数。

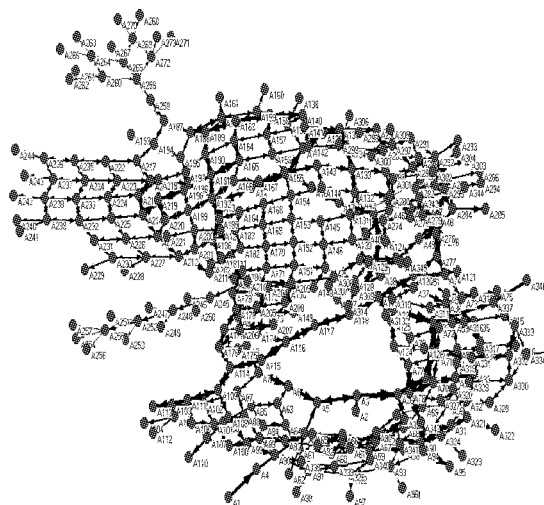


图5 规划燃气管网拓扑结构形态图

Fig.5 Topological structure of planning of gas network

计算可知,现状燃气管网整体完备度为0.69%,规划燃气管网整体完备度为0.83%;现状管网与规划管网密度相差较小,规划管网略优于现状管网。

##### 3.2.2 网络连通度

聚类系数表示网络中节点聚集情况,聚类系数越大,网络连通度越高,计算公式为

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (2)$$

式中:  $C_i$  为节点聚类系数;  $i$  为网络中节点;  $E_i$  为网络实际存在的边数;  $k_i$  为节点  $i$  拥有的边数。

整体网络的聚类系数是网络中所有节点聚类系数的平均值,计算公式为

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i \in G} C_i \quad (3)$$

式中:  $C$  为整体网络聚类系数;  $N$  为网络中实际存在的节点数;  $G$  为网络中节点的集合。

经计算,现状与规划的燃气管网都有着较弱的连通性,现状管网聚类系数为0.0395,规划管网趋近于0。这是因为大部分天然气输送管网建立在网络线型结构的基础上,燃气运输通过线型结构传输完成,三角结构较少<sup>[3]</sup>。

##### 3.2.3 网络可靠度

$k$ -核( $k=1,2,3,\dots$ )表达一个子图中全部点至少与其他子图中的  $k$  个其他点相连,  $k$  值越高  $k$ -核占比越高,则该网络的局部稳定成分越多,网络整体也就越稳定。现状燃气管网中,4-核共有103个,占网络整体的41.87%;规划燃气管网中,4-核共有267个,占网络整体的77.39%。规划燃气管网的  $k$ -核明

显高于现状,网络连通可靠度达到较大的提升(图 6 和图 7)。

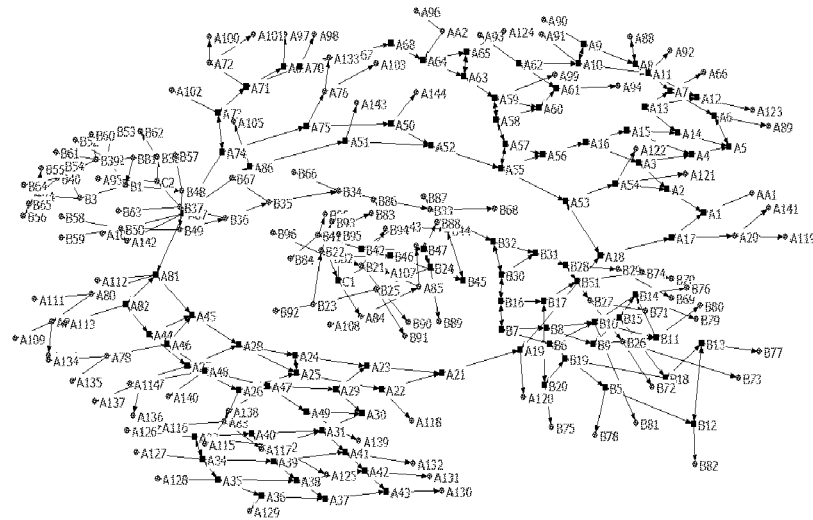


图 6 现状管网  $k$ -核分布图

Fig.6  $k$ -core distribution of status of gas network

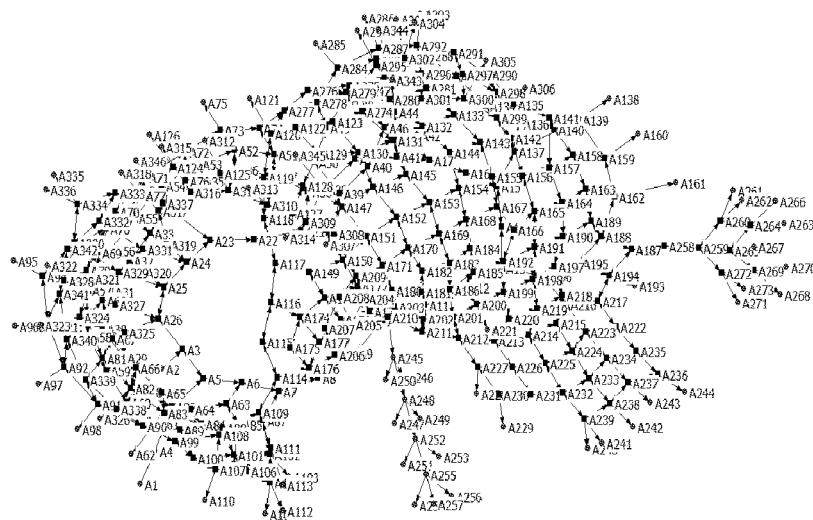


图 7 规划管网  $k$ -核分布图

Fig.7  $k$ -core distribution of planning of gas network

### 3.2.4 网络脆弱度

桥是网络节点间的特殊连线,信息交流的惟一渠道,如果删除连线,网络将会形成独立的几部分。燃气管网网络连线代表输送管道,因此分析桥在网络中的占比,可衡量网络的整体脆弱程度。桥占比越高,不稳定因素越多,整体网络越脆弱。Pajek 计算可知,现状管网桥的数量为 141 个,占总体连线的 36.34%;规划管网桥的数量为 79 个,占总体连线的 17.65%。规划管网桥的数量低于现状,网络脆弱度低,安全性更高。

## 3.3 网络运行状态评价

### 3.3.1 网络运行效率

网络的运行效率可以用 logistic S 扩散曲线来

衡量。燃气从气源点向其他节点传播过程是有方向性、有顺序性的传播过程,在忽略管道管径、长度与压力的理想状态下,该过程可以表示为一条扩散曲线,即 logistic S 型曲线。扩散曲线斜率越高,表示其扩散速度较快,单位时间输送的燃气流量越大;曲线面积越大,表示输送流量越多,运行效率越高。本研究将气源点设为时间节点 1,其邻近点设为时间节点 2,以此类推,得到现状燃气管网与规划燃气管网的顺序传播图,如图 8 和图 9 所示。

通过 Pajek 计算出扩散时间频数频率分布表,制成燃气扩散效率的图表,包括扩散累计百分率图(图 10)与扩散累计频数图(图 11)。由图所知,无论是相对累计百分率还是绝对累计频数,现状管网斜

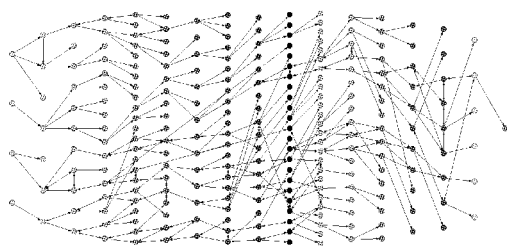


图8 现状管网节点扩散网络

Fig.8 Node diffusion of status gas network

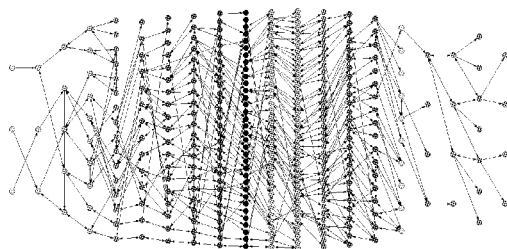


图9 规划管网节点扩散网络

Fig.9 Node diffusion of planning of gas network

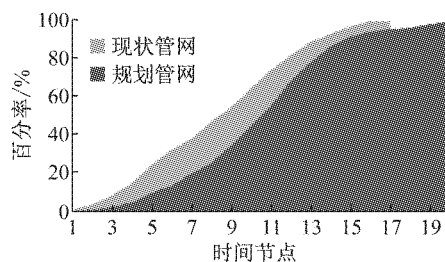


图10 管网节点扩散累计百分率图

Fig.10 Cumulative percentage of gas network node diffusion

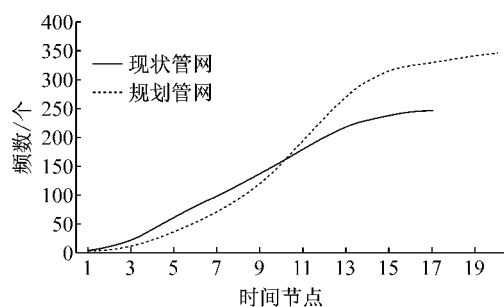


图11 管网节点扩散累计频数图

Fig.11 Cumulative number of gas network node diffusion

率基本不变,规划管网斜率呈由低到高的趋势,现状管网传播速度较为稳定,规划管网速度变化较大.由扩散曲线累计面积可知,现状管网输送流量较多,整体运行效率较高.

### 3.3.2 燃气流量均衡度

中心性用以衡量行动者对资源的控制程度,中间中心度与中间中心势分别用于测度节点与网络.

中间中心度衡量一个点多大程度上位于网络其他节点的中间;中间中心势表示度数最高的节点与其他节点的差距,最高点与其他节点差距越大,表示该网络可能分为多个小团体并过度依赖某一节点传递关系.在燃气管网中,中间中心势越高,反映一个燃气管网流量越偏向某些区域节点集中,易于出现局部失衡问题.中间中心势计算公式为

$$C_B = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{RB\max} - C_{RBi})}{N-1} \quad (4)$$

式中:  $C_{RB\max}$  为网络中各节点中间中心度的最大值;  $C_{RBi}$  为节点  $i$  的中间中心度;  $N$  为网络存在的节点数.

通过计算得知,现状管网中间中心势为 5.92%,规划管网中间中心势为 14.22%,两者数值偏小,均有较好表现.但现状管网优于规划管网,管网燃气流量更均衡.

### 3.4 重点个体设施评价

除燃气管网网络整体结构外,网络的重要节点和边线划分,对网络总体可靠性及运行安全性的提高、管网设施的针对性保护均有重要意义.通过对节点及连线两方面进行计算,从而划分出管网重要节点设施及管线设施.本文采用点度中心度管网节点设施进行划分;采用中间中心度指标对管网管线设施进行划分.

#### 3.4.1 节点设施

点度中心度表示单个节点在网络中占据的核心性,其值越高,越处于网络的中心位置.点入度表示某节点得到的关系数,点出度表示从某节点出发的关系数.燃气管网中,点入度代表燃气向节点输入,点出度表示燃气从节点输出,点度中心度值越高,表示该节点连接的管线越多,枢纽作用越强.点度中心度包括绝对中心度和相对中心度两种,相对中心度是绝对中心度的标准化,适用于不同规模网络的横向比较,相对中心度计算公式为

$$C_{RD}(n_i) = \frac{d_r(n_i) + d_c(n_i)}{2(N-1)} \quad (5)$$

式中:  $C_{RD}(n_i)$  为相对点度中心度;  $d_r(n_i)$  为节点的点入度;  $d_c(n_i)$  为节点的点出度;  $N$  为网络存在的节点数.

通过计算可知,现状中心度较高的点为 A10, A55, A7, A59, A50, A71, A25, A81, A11, A62, A22, A21, A28, A27, A64, A13; 其值分别为 1.306, 1.061, 1.061, 0.980, 0.980, 0.980, 0.980, 0.980, 0.980, 0.898, 0.898, 0.898, 0.898, 0.898, 0.898 和

0.898.

规划管网节点中心度较高的点有 A24, A26, A163, A23, A25, A296, A136, A284, A278, A33, A191, A78, A219; 其值分别为 0.995, 0.839, 0.830, 0.787, 0.787, 0.726, 0.726, 0.726, 0.726, 0.726, 0.726, 0.726 和 0.726.

此外, 计算结果表明规划管网的点度中心度小于现状管网, 表明沿道路“棋盘式”的燃气管网规划方法, 使管网更加均质化, 起到平衡网络、均衡管线交叉点压力的作用, 体现了规划管网拓扑结构的优越性.

### 3.4.2 管线设施

中间中心度衡量一个点多大程度上位于网络其他节点的中间, 中间中心度高的点是网络的咽喉要道, 对信息流通起到重要作用. 其值越高, 流量压力越大. 线的中间中心度, 其测量的是一条线对信息的控制程度, 即两个点之间的关系在整个网络中处于怎样的控制优势. 在燃气管网中, 中间中心度其值越高, 表明该连线需要承载流量压力越大. 将网络导入软件 Ucinet, 可通过 Edge(line)Betweenness 计算连线中心度, 需要指明的是, 软件计算结果为连线的绝对中间中心度, 其数值与网络规模有关, 无法用于网络间横向比较.

通过计算可知, 现状管网比较重要的连线有 A19-A18, A19-A21, A21-A23, A23-A29, A29-A30, A30-A31, A53-A18, A55-A53, A55-A52, A57-A55, A58-A57, A87-A81, 中间中心度值大于 1 000, 如图 12 所示. 由于增加了环城管道, 规划管网中比较重要的连线占比较多, 除环城管道 A3-A5-A6-A7-A8-A9-A10-A11-A12-A13-A14-A15-A16-A17-A41-A40-A39-A308-A21-A22-A23-A24-A25-A26-A3外, 还包括 A7-A87-A88, A13-A196-A216, A13-A196-A195-A188-A187-A258-A259, A179-A10-A204-A209-A210-A211-A212, A39-A50-A51-A52, A74-A277-A120-A119-A128-A147-A15, A119-A125-A76, 119-A118-A117, A210-A245-A248, A50-A49-A278-A277, A27-A5, A137-A15, A185-A12, A180-A171, A77-A78, A114-A109, 其度值大于 2 000, 如图 13 所示.

## 4 结论与讨论

### 4.1 研究结论

通过计算可知, 在网络拓扑结构方面, 晋中城区

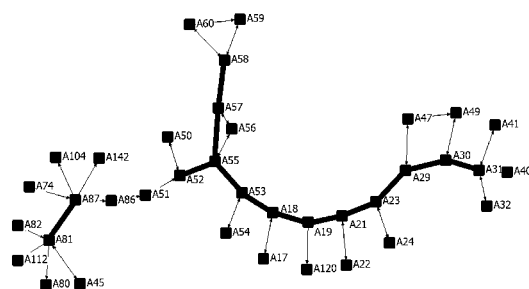


图 12 现状燃气局部网络边线中间中心度  
Fig.12 Edge betweenness centrality of status ego network

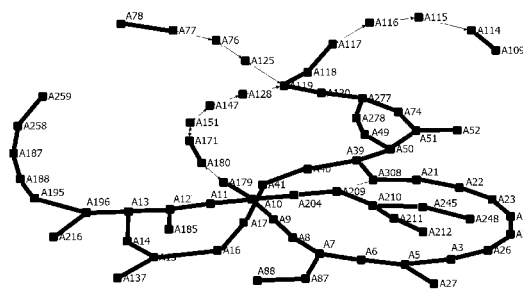


图 13 规划燃气局部网络边线中间中心度  
Fig.13 Edge betweenness centrality of planning ego network

燃气管网设施规划整体优于现状: ①规划管网覆盖率广, 完备性强, 服务范围广; ②规划燃气管网可靠度更强, 网络整体稳定性高, 安全性得以增强; ③规划网络整体更均质, 降低高度值管线交叉点局部集中的概率, 工程技术难度较为统一. 然而, 在管网运行状态方面, 燃气管网设施现状优于规划, 相较于现状管网, 规划燃气管网运行效率较低, 流量均衡度水平较低, 易出现局部流量偏高的情况.

### 4.2 规划优化策略

#### 4.2.1 整体网络优化

规划网络拓扑结构优于现状网络, 但运行效率却较差, 可能由以下原因造成: ①规划管网增加了网络中的 4 核比例, 即增加拥有 4 条管线的节点比例, 管网呈“棋盘式”分布, 在工程技术许可的条件下对交叉点的最大化利用, 不但使管网整体更加完备, 而且使管网更加均质, 可靠性增强. ②相较于现状管网, 规划管网减少了网络中的桥, 即规划管网供气片区间较少以惟一管道相连. 片区网络间相连通道的增加, 降低因某一管道失效引发局部管网失效的可能性, 网络脆弱度显著降低, 稳定性增强. ③相较于现状管网, 规划燃气管网网络半径大, 服务范围广, 而气源点不但减少且全部集中于城北, 使得城南输送效率的偏低影响整个管网的运行效率; 现状管网

气源分散,规划管网气源集中却负担全城燃气的供应,易造成局部网络燃气流量偏高,流量不均衡。④现状管网虽存在诸多问题,但在长期的运营中不断进行局部修缮,管网运行状态更符合城市生活状态;而规划管网较完备的拓扑结构与较低的运行效率,体现了静态规划编制的缺陷。

基于以上影响要素,在管网规划中提出以下优化建议:①增加网络中4-核比例,使管网更趋向于棋盘式分布,可以显著优化管网拓扑结构;②减少燃气管网中桥的数量,即通过增加片区间相连通道或增设备用管道,可降低管网脆弱性;③合理设置气源点,避免气源的过于集中。研究靶区中在城南增设气源点,不仅能使管网整体运行效率增强,并起到均衡气流的作用。

#### 4.2.2 物理设施维护

通过中心度计算可知,某些节点和管线的中心度高,流量过大,应进行重点防护。现状管网如图14所示。中心度较高的节点主要位于大街路各交口、榆次工业片区,其中点A71位于中心繁华区域的锦纶路与顺城路交叉口,周围建设医疗设施;中心度较高的连线主要位于汇通路与魏榆路。这些节点与连线处应采取保护措施,包括:做危险标记,限制重型车辆活动;减少周边建筑施工,尤其是地下公共设施、建筑打桩、工厂建筑等;完善巡线设备,增强巡线频率;并增强清管措施,外防腐全面检测频率等。

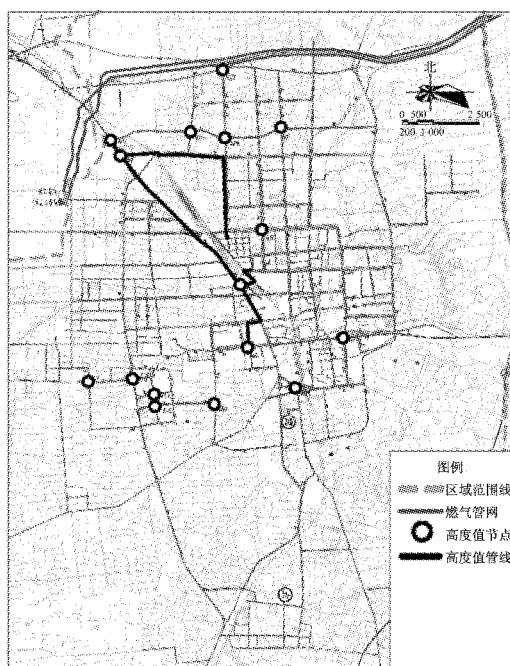


图14 现状重要节点及管线

Fig.14 Major intersection and pipeline of status of gas network

规划管网(图15)所示,中心度较高的节点主要位于创业街、思凤街、汇通南路,其中点A78为规划中心区的龙湖街与经四路的交叉口,周围建有大量商业、文化设施;中心度较高的连线主要位于环城路段、榆次工业片区、安宁西街与顺城西街,其中顺城西街路段是主城中心片区。这些节点与连线在规划建设时应适当增强设计管道壁厚,采用内抗腐蚀性高的内防腐材料,优质外包裹层,降低事故发生可能性。

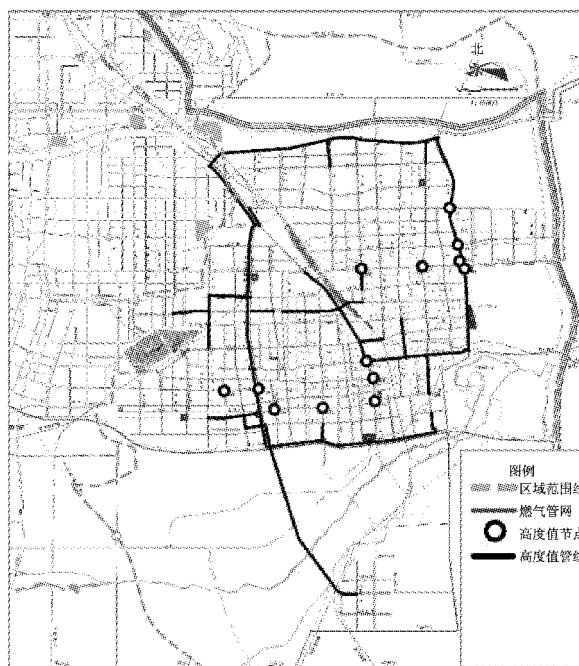


图15 规划重要节点及管线

Fig.15 Major intersection and pipeline of planning of gas network

#### 参考文献:

- [1] 黄勇,肖亮,胡羽. 基于社会网络分析法的城镇基础设施健康评价研究——以重庆万州城区电力基础设施为例[J]. 中国科学:技术科学,2015,45(1):68.  
HUANG Yong, XIAO Liang, HU Yu. Evaluation of urban infrastructure project health based on network analysis: A case of power grid planning of Wanzhou Districts, Chongqing City [J]. Scientia Sinica Technologica, 2015, 45(1):68.
- [2] 张培培. 遗传算法在城市燃气管网优化中的应用[D]. 上海:同济大学,2007.  
ZHANG Peipei. The optimal design of urban gas by genetic algorithm[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [3] 赵玲,易俊,王文和. 城市燃气管网脆弱性评价及其应用[J]. 安全与环境学报,2015,15(1):68.  
ZHAO Ling, YI Jun, WANG Wenhe. Evaluation methods and their application to meet the challenge of the urban gas network vulnerability[J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15

- (1): 68.
- [4] 朱莹. 油气运输管网的拓扑结构及脆弱性分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.  
ZHU Ying. Topological properties and vulnerability analysis of oil and gas pipeline networks[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [5] 赵慧乾, 郭明珠, 翟长达, 等. 基于蒙特卡罗法的城市燃气管网抗震连通可靠性分析[J]. 地震研究, 2015, 38(2): 292.  
ZHAO Huiqian, GUO Mingzhu, ZHAI Changda, *et al.* Analysis of anti-seismic connectivity reliability of city gas pipeline network based on Monte Carlo method [J]. Journal of Seismological Research, 2015, 38(2): 292.
- [6] 王清树, 谭羽非. 具有中介状态的燃气管网连通可靠度[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(2): 102.  
WANG Qingshu, TAN Yufei. The connectivity-reliability analysis of gas pipeline network with intermediate state[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(2): 102.
- [7] 苏欣, 段康, 袁宗明, 等. 城市天然气负荷特点及其预测研究[J]. 油气储运, 2007, 26(1): 5.  
SU Xin, DUAN Kang, YUAN Zongming, *et al.* City natural gas load characteristic and its forecast research[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2007, 26(1): 5.
- [8] 龚承柱, 李兰兰, 杨娟, 等. 基于 EMD-PSR-LSSVM 的城市燃气管网短期负荷预测[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(11): 3001.  
GONG Chengzhu, LI Lanlan, YANG Juan, *et al.* An integrated short-term load forecasting approach for urban gas pipeline network based on EMD, PSR and LSSVM[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2014, 34(11): 3001.
- [9] 王力勇, 宋春慧. 天然气长输管道输差控制与分析[J]. 油气储运, 2007, 26(4): 44.  
WANG Liyong, SONG Chunhui. Control and analysis on measurement shortage for long distance gas transmission pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2007, 26(4): 44.
- [10] 于京春, 解东来, 马冬莲, 等. 城镇燃气管网风险评估研究进展及建议[J]. 煤气与热力, 2007, 27(12): 38.  
YU Jingchun, XIE Donglai, MA Donglian, *et al.* Research progress and propositions on risk assessment of town gas pipe network[J]. Gas & Heat, 2007, 27(12): 38.
- [11] 韩朱旻, 翁文国. 燃气管网定量风险分析方法综述[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(7): 154.  
HAN Zhuyang, WENG Wenguo. An overview of quantitative risk analysis methods for natural gas pipeline [J]. China Safety Science Journal, 2009, 19(7): 154.
- [12] 周伟国, 张中秀, 孔令令. 城市燃气管网的震害分析及减灾对策[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(4): 70.  
ZHOU Weiguo, ZHANG Zhongxiu, KONG Lingling. Seismic damage analysis and disaster mitigation approaches for urban gas piping systems [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(4): 70.
- [13] 毛子骏, 费奇, 欧阳敏, 等. 关联基础设施网络模型研究综述[J]. 计算机科学, 2009, 36(3): 5.  
MAO Zijun, FEI Qi, OUYANG Min, *et al.* Survey of model of interdependent infrastructures [J]. Computer Science, 2009, 36(3): 5.
- [14] 刘辉, 申玉铭, 孟丹, 等. 基于交通可达性的京津冀城市网络集中性及空间结构研究[J]. 经济地理, 2013, 33(8): 37.  
LIU Hui, SHEN Yuming, MENG Dan, *et al.* The city network centrality and spatial structure in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region [J]. Economic Geography, 2013, 33(8): 37.
- [15] 李二玲, 李小建. 基于社会网络分析方法的产业集群研究——以河南省虞城县南庄村钢卷尺产业集群为例[J]. 人文地理, 2007, 22(6): 10.  
LI Erling, LI Xiaojian. Social network analysis approach in the industrial cluster studies: The case study of the steel measuring tape cluster in Nanzhuang [J]. Human Geography, 2007, 22(6): 10.
- [16] 朱桃杏, 吴殿廷, 马继刚, 等. 京津冀区域铁路交通网络结构评价[J]. 经济地理, 2011, 31(4): 561.  
ZHU Taoxing, WU Dianting, MA Jigang, *et al.* Evaluation of rail transportation network within Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Economic Geography, 2011, 31(4): 561.
- [17] 张勇, 杨晓光. 城市路网的复杂网络特性及可靠性仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(2): 464.  
ZHANG Yong, YANG Xiaoguang. Complex network property and reliability simulation analysis of urban street networks [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(2): 464.
- [18] 王志强, 徐瑞华. 基于复杂网络的轨道交通路网可靠性仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(20): 6670.  
WANG Zhiqiang, XU Ruihua. Reliability simulation analysis of urban rail transit networks based on complex network [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(20): 6670.
- [19] 蔡泽祥, 王星华, 任晓娜. 复杂网络理论及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 114.  
CAI Zexiang, WANG Xinghua, REN Xiaona. A review of complex network theory and its application in power system [J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 114.
- [20] 刘忠华, 于华, 杨方廷, 等. 山西大水网工程的网络拓扑性能分析[J]. 计算机工程与应用, 2015(20): 220.  
LIU Zhonghua, YU Hua, YANG Fangting, *et al.* Analysis of topological properties of Shanxi water network [J]. Computer Engineering and Applications, 2015(20): 220.