

供热管网连通可靠度研究

王 芃, 邹平华

(哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 150090 哈尔滨, hit_wangpeng@yahoo.com.cn)

摘 要: 为了评价供热管网拓扑结构可靠性, 针对空间管网模型, 提出系统中热源与热用户的连通问题, 建立4个连通可靠度指标, 并基于所有热源与所有热用户的连通问题提出了管段的连通重要度; 分析多热源多环供热管网的连通可靠度, 评价了位于热源出口干线、回路和公共管上各管段的连通重要度. 计算结果表明: 多热源、环状的管网结构具有较高的连通可靠度水平; 管段距热源的距离越近, 连通重要度越高; 热源出口干线的管长对热源供热的可靠度有重要的影响. 管网连通可靠度评价有助于优化管网拓扑结构设计.

关键词: 集中供热; 空间管网; 连通可靠度; 连通重要度

中图分类号: TU995

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)08-0094-04

Connectedness reliability of district heating network

WANG Peng, ZOU Ping-hua

(School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology,
Harbin 150090, China, hit_wangpeng@yahoo.com.cn)

Abstract: For evaluating the reliability of topology of district heating network, connectedness between heat sources and heat users was proposed based on spatial network model. Four indices of connectedness reliability were established to describe heat supplying from heat sources and heat flowing into heat users. The connectedness importance of pipe was then put forward on the basis of the connectedness reliability from all heat sources to all users. The connectedness reliability of heating network with multi-sources and multi-loops was analyzed, as well as the connectedness importance of pipes on main pipelines, loops and common pipelines. Analysis shows that the connectedness reliability of heating network with multi-sources and multi-loops was considerable. The closer the distance between pipe and source, the higher the connectedness importance of pipe. The length of the main pipe is important to the system reliability.

Key words: district heating; spatial network; connectedness reliability; connectedness importance

随着城市的发展,集中供热系统的规模也在不断扩大,供热安全可靠越来越受到人们的重视.作为供热系统的重要组成部分,热网承担着热媒输送和输配的重要任务,是连接热源与热用户的专用网络系统.从上世纪60年代开始,前苏联的学者就一直致力于热网可靠性的研究,并取得了可观的一系列成果^[1].随着对系统可靠性研究的深入,环状热网由于可靠性高于枝状热网^[2-4]而被广泛采用.对中国城市热网的调研中发现,某

些热网中的环数甚至超过了30个,局部支线或规模更小的管线构成的环较多,水力工况复杂,增加热网的维护和管理费用^[5-7].因此,迫切需要针对热网拓扑结构进行深入的可靠性研究,一方面评价管网拓扑结构的可靠性水平,为其设计提供理论依据;另一方面确定管网中的重要管线,以有针对性的采取措施提高系统可靠性.

1 空间管网与热源——热用户的连通问题

供热管网是由供水管网和回水管网连接热源和热用户形成的闭式网络.将供热管网抽象为图的模型,为完整描述供水与回水管网的连接关系,

收稿日期: 2010-03-26.

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAJ01A04).

作者简介: 王 芃(1981—),男,讲师;

邹平华(1944—),女,教授,博士生导师.

构建空间管网模型. 空间管网中管段(也称为“边”)由供水管网和回水管网的所有管段以及热源和热用户支路共同构成;节点包含热网中所有连接节点和分支节点^[8].

供热管网中热源与热用户连通,即要求在空间管网模型中热源与热用户支路通过供水和回水管段的连接构成回路,其等价于在供水和回水平面管网中分别存在路连接对应的热源与热用户在供水与回水干线上的连接点^[9].

2 供热管网连通可靠度指标

供热管网的连通可靠度指采暖期内管网中所研究热源与热用户连通的概率. 为研究热网可靠性,假设空间管网中所有的热源支路和热用户支路可靠度等于 1. 供水和回水平面管网中各管段的正常工作与失效是相互独立的事件. 此外,假设在供热管网中划分的每一根管段两端均安装阀门,当管道失效时可以通过适当的阀门隔离故障,缩小故障影响范围;且阀门的可靠度为 1.

本文所研究的供热管网的连通问题,各管段只有正常或失效 2 种状态,且以考察不同连通问题为目的的管网也只有正常或失效 2 种状态;所研究的节点间的连通与否由管网结构以及管段的(正常或失效)状态所决定. 此外,管网中不存在对其可靠性没有影响的管段.

构造基于供水和回水管网逻辑事件 Z^s 和 Z^r , 空间管网连通可靠度为

$$R = P\{Z^s\} \cdot P\{Z^r\}. \quad (1)$$

为表述简洁,本文仅列出用于计算各连通可靠度指标的供水平面管网的逻辑事件 Z^s .

1) 指定热用户与至少一个热源连通的可靠度 R_j . 假设供热系统中共有 n_s 个热源, n_u 个热用户,在供水平面管网 G^s 中, $e_1^s, e_2^s, \dots, e_{n_s}^s$ 表示管段正常工作的事件,其中 n_e^s 是供水平面管网中管段的数量.

由逻辑事件的积之和得到供水平面管网 G^s 中节点 v_{Si} 与 v_j 的最小路集为

$$D_{Si,j}^s = \sum_{k=1}^{n_{Si,j}^s} \prod_{l=1}^{n_{Si,j,k}^s} e_{Si,j,k,l}^s. \quad (2)$$

式中: $n_{Si,j,k}^s$ 为供水平面管网 G^s 中从热源对应节点 v_{Si} 到热用户对应节点 v_j 的第 k 个最小路中管段的数量; $n_{Si,j}^s$ 为供水平面管网 G^s 中从节点 v_{Si} 到 v_j 的最小路的数量.

对热用户节点 v_j 与各热源节点的最小路集求逻辑和,得到指定热用户 v_j 与至少一个热源连通的事件为

$$Z_j^s = \sum_{i=1}^{n_s} D_{Si,j}^s. \quad (3)$$

2) 指定热源与所有热用户连通的可靠度 R_{Si} . 在供水平面管网 G^s 中,令所有热用户构成的节点集合 $v_U = \{v_1, v_2, \dots, v_{n_U}\}$,由最小路集的逻辑积得到热源 v_{Si} 与所有热用户连通的事件为

$$Z_{Si}^s = \prod_{j=1}^{n_U} D_{Si,j}^s. \quad (4)$$

3) 所有热用户与至少一个热源连通的可靠度 R_U . 式(4)所描述的事件也是节点集合 $K = v_U \cup \{v_{Si}\}$ 的所有 K 树集合. 对所有热用户与每个热源构成的 K 树求逻辑和,得到所有热用户与至少一个热源连通的事件为

$$Z_U^s = \sum_{i=1}^{n_s} \prod_{j=1}^{n_U} D_{Si,j}^s. \quad (5)$$

4) 所有热源与所有热用户连通的可靠度 R_{SU} . 对所有热用户与每个热源构成的 K 树求逻辑积,得到所有热用户与所有热源连通的事件为

$$Z_{SU}^s = \prod_{i=1}^{n_s} \prod_{j=1}^{n_U} D_{Si,j}^s. \quad (6)$$

根据式(1),由供水、回水管网的各连通问题的逻辑事件可以计算对应的连通可靠度指标 R_j 、 R_U 、 R_{Si} 和 R_{SU} . 特殊地,单热源供热管网 $n_s = 1$, $R_U = R_S = R_{SU}$ ^[9].

3 基于 R_{SU} 的管段连通重要度

管网中的管段并非同等重要的,如有的部件一旦失效即引起系统失效,有的部件则不然. 对系统中每个管段的重要程度给予定量的描述,对管网设计和失效分析有重要价值. 从可靠性的角度看,管段在系统中的连通重要性不仅依赖于其拓扑结构,还依赖于管段本身的可靠度^[10-11]. 由于所有热源与所有热用户的连通可靠度 R_{SU} 包含供热管网的所有节点,基于 R_{SU} 的管段 e_i 的连通重要度为

$$I_r(e_i) = \frac{\partial R_{SU}}{\partial R_i}, i = 1, 2, \dots, n_s. \quad (7)$$

式中: r_i 为管段 e_i 的可靠度.

4 多热源多环供热管网连通可靠度分析

图 1 为供水、回水管网对称的多热源多环供热管网. 该供热系统共有 3 个热源, S_1 、 S_2 和 S_3 ; 管网上共有 24 个支干线和支线的分支点(简化的热用户节点)和 32 根管段,各管段长度见表 1. 在图 1 中标记 4 个基本回路,记为 I、II、III 和 IV.

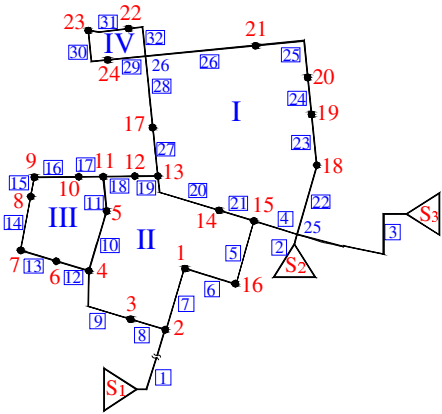


图 1 多热源多环供热平面管网

管道的故障率是热网可靠性的一项基本参数. 根据文献[3]的研究结果,取管道的故障率为 $0.095\ 3\ \text{km}^{-1}\ \text{a}^{-1}$. 假设管段的寿命分布服从指数分布,则管段的可靠度计算公式^[3]为

$$r = e^{-0.095\ 3\bar{n}l}$$

(8)

式中: l 为管段的长度,km; $\bar{n}$ 为采暖期天数与全年天数的比值,本文假设 $\bar{n} = 0.49$.

由式(8)计算得到管段的可靠度见表 1.

表 1 管段长度与可靠度

管段编号	管段长度/km	管段可靠度
1	4.700	0.803
2	0.100	0.995
3	2.600	0.886
4	0.454	0.979
5	0.661	0.970
6	0.538	0.975
7	0.642	0.970
8	0.372	0.983
9	0.798	0.963
10	0.629	0.971
11	0.343	0.984
12	0.343	0.984
13	0.373	0.983
14	0.546	0.975
15	0.199	0.991
16	0.444	0.979
17	0.247	0.989
18	0.317	0.985
19	0.232	0.989
20	0.791	0.964
21	0.366	0.983
22	0.718	0.967
23	0.515	0.976
24	0.371	0.983
25	0.858	0.961
26	1.111	0.949
27	0.488	0.977
28	0.718	0.967
29	0.380	0.982
30	0.477	0.978
31	0.409	0.981
32	0.434	0.980

4.1 连通可靠度

图 2 为各热用户与至少一个热源的连通可靠度 $R_j(j = 1, 2, \cdots, 24)$,它们都处于较高的可靠度水平,最低值 R_{21} 也达到了 0.976. 图 2 中同时用不同的符号区别了位于 4 个回路上的热用户,其中 2 个符号重合的数据点表示位于 2 个回路间公共管段上的热用户. 相对于其他位置的管段,公共管段上的热用户可靠度处于更高的水平;回路 IV 上的热用户远离热源而具有较低的可靠度. 其他连通可靠度指标见表 2. 通过表 2 中指定热源与所有热用户连通可靠度 R_{S1} 、 R_{S2} 和 R_{S3} 的比较可见,热源 S_2 与所有热用户的连通可靠度最高;三者按可靠度从高到低排序为: $R_{S2} > R_{S3} > R_{S1}$. 由于 3 个热源均位于图 1 所示管网的右下侧,其中热源 S_1 和 S_2 在环形干线的连接点一致,热源位置对连通可靠度的影响较小. 由式(8)可知,热源出口干线越长,管段的可靠度越低. 因此,本例中对连通可靠度 R_{Si} 影响较大的是热源的出口干线长度. 与单热源供热系统相比较,由于本例的供热管网中连接 3 个热源,因此所有热用户与至少一个热源的连通可靠度 R_U 达到较高的水平.

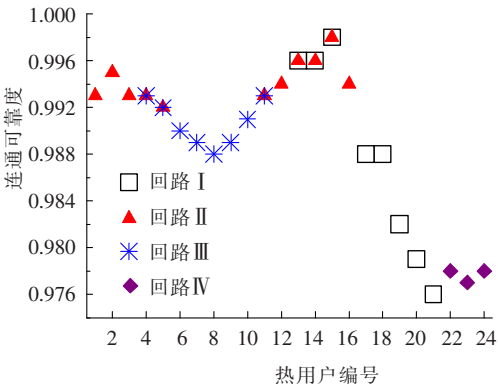


图 2 指定热用户与至少一个热源的连通可靠度

表 2 供热管网连通可靠度指标

管网拓扑情况	可靠度指标
所有热用户与至少一个热源连通	$R_U = 0.920$
指定热源与所有热用户连通, 热源 S_1 连通	$R_{S1} = 0.593$
指定热源与所有热用户连通, 热源 S_2 连通	$R_{S2} = 0.911$
指定热源与所有热用户连通, 热源 S_3 连通	$R_{S3} = 0.721$
所有热源与所有热用户连通	$R_{SU} = 0.461$

为了更准确地说明不同位置热用户的可靠度水平,表 3 中分别列出了全部管网、分别位于 4 个回路上和公共管段上的 R_j 平均值. 以全部管网上热用户连通可靠度 R_j 的平均值为评价基准,则公共管段、回路 II 和回路 III 上的热用户 R_j 高于基准;而回路 I 由于半径过大,使得位于热源远端的热用户 R_j 的水平较低,整个回路 I 上的热用户 R_j 的平均值低于基准;回路 IV 是距离 3 个热源最远的回路,因此其上的热用户 R_j 平均值处于全网的最低水平.

表 3 管网中不同位置热用户与至少一个热源的连通可靠度 R_j 平均值

管段位置	热用户编号	R_j 平均值
全部管网	1 ~ 24	0.989
回路 I	13 ~ 15;17 ~ 21	0.988
回路 II	1 ~ 5;11 ~ 16	0.994
回路 III	4 ~ 11	0.991
回路 IV	22 ~ 24	0.978
公共管段上	4, 5,11;13 ~ 15	0.995

4.2 管段的连通重要度

计算 3 个热源出口管段的连通重要度分别为: $I_{r1} = 0.845, I_{r2} = 0.682, I_{r3} = 0.766$, 远大于管网中其他管段的重要度. 将编号 4 ~ 32 的管段连通重要度绘制于图 3 中, 并用符号区别不同位置的管段. 比较编号 4 ~ 32 的管段连通重要度, 同一位置管段的 I_{ri} 基本维持在一个水平. 计算各位置管段集合的连通重要度平均值 $\bar{I}_{ri}$, 按 $\bar{I}_{ri}$ 从大到小的顺序排列各位置管段集合为: 热源出口管段、回路 I 管段、回路 II 管段、回路 III 管段、回路 IV 管段、回路 I—II 之间的公共管上管段、回路 II—III 之间的公共管上管段.

连通重要度反映了各管段在管网连通性研究中的重要程度. 通过本例可见, 热源出口管段越长, 连通可靠度越低, 而其连通重要度越高. 另外, 回路之间公共管上的管段是管网中平均连通重要度较低的管段.

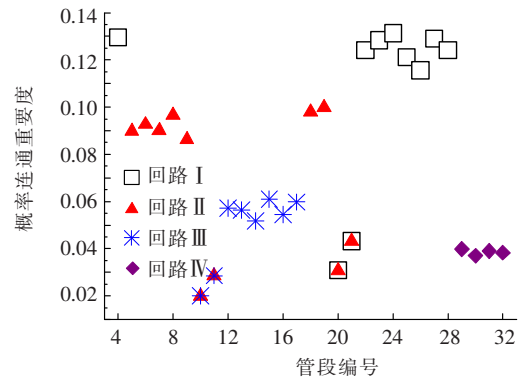


图 3 基于 R_{su} 的 (编号 4 ~ 32) 管段连通重要度

5 结 论

1) 基于空间管网模型研究了供热管网中热源与热用户的连通问题, 提出 4 个描述管网中不同集合热源与热用户节点的连通可靠度指标, 构造了用于求解各项指标的逻辑事件集合. 另外, 基于所有热源与所有热用户的连通给出了管段连通重要度的计算公式.

2) 多热源、环状的管网结构具有较高的连通可靠度水平. 从保障网络所有热用户与所有热源连接的角度看, 除公共管段外, 连通重要度的分布

基本符合这样的规律: 管段距热源的距离越近, 连通重要度越高.

3) 热源出口干线的管长对热源供热的可靠度有重要的影响. 热源出口干线越短, 该热源与所有热用户连通可靠度越高. 出口干线较短的热源宜设置为主热源, 以保证供热的高可靠性; 但是这类热源多位于负荷集中的市区, 难以设置规模较大的主热源, 多为调峰热源. 主热源往往设置在远离市区的位置, 因此导致其出口干线过长, 连通可靠度较低. 此时, 应对主热源的出口干线采取主动或被动措施, 如多根输送干线、多管制系统等.

参考文献:

[1] 邹平华. 借鉴俄罗斯经验积极发展我国集中供热事业[J]. 暖通空调, 2000, 30(4): 33-37.

[2] 战泰文. 供热系统的可靠性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学, 1994.

[3] 王晓霞. 多热源环状热水管网故障工况及可靠性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.

[4] 李祥立. 考虑事故工况限额供热的复杂供热管网优化设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.

[5] 王晓霞, 周志刚, 邹平华. 多热源多环空间热网的水力工况模拟与分析方法[J]. 暖通空调, 2004, 34(11): 131-134.

[6] WANG Peng, ZOU Pinghua. The method of constructing loops in district heating networks for minimizing transporting energy [C]//The Fifth International Workshop on Energy and Environment of Residential Buildings and the Third International Conference on Built Environment and Public Health. Guilin: [s. n.], 2009: 2035-2042.

[7] 王晓霞, 邹平华, 周志刚. 复杂空间热网的拓扑结构及水力过程仿真[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(3): 563-566.

[8] 王晓霞, 邹平华. 多热源环状空间热网拓扑结构研究[J]. 暖通空调, 2009, 39(2): 1-4.

[9] WANG Peng, ZOU Pinghua. Network reliability of district heating systems based on the combined planar network model [C]//Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Hong Kong: IEEE, 2009: 233-236.

[10] 金星, 洪延姬. 工程系统可靠性数值分析方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

[11] 张国志, 杨光, 巩英海. 复杂系统可靠性分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2009.