

环形供热管网小负荷支线当量化方法及对管网可靠性设计的影响^{*}

哈尔滨工业大学 王 威[★] 邹平华 雷翠红

摘要 介绍了对环状管网小负荷支线进行当量化的方法,并以一个算例验证了其正确性。对当量化前后热网的可靠性进行了评价,分析了当量化对管网设计的影响。当量化处理从简化环网结构上入手进行简化计算,以提高运算速度,减少编程计算中的迭代次数,缩短运算时间;同时便于将管网按可靠性进行分级,在保证经济性前提下实现可控环网的结构备用和输送备用。

关键词 环形热网 当量化 可靠性

Equivalentization method for lighter load branch of ring-shaped heat supply network and impact on reliability design

By Wang Wei[★], Zou Pinghua and Lei Cuihong

Abstract Presents the method and verified it by a calculating example. Evaluates the network reliability and analyses its impact on design. This method helps to decrease the iterative times of program while improving the computing efficiency by using simplified network structures, provides convenience in network classification, and accomplishes both the structure and transportation reservations while ensuring economical benefits.

Keywords ring-shaped heat supply network, equivalentence, reliability

★ Harbin Institute of Technology, Harbin, China

①

研究表明,可靠性高而经济的大型热网应具有分级结构。就可靠性而言:干线为高级;支线和用户为低级。不同级别的热网可靠性不同、结构不同、投资不同。大型热网要满足可靠性要求,其干线应具备以下条件:1) 具有备用结构。构成环形管网是主要措施。2) 具有输送能力备用。在任一事故工况下,特别是在最严重事故下能保证大多数用户的限额供热要求。3) 具有可控性。在事故工况下,除能保证特许用户的供热要求之外,还应保证大多数用户的均衡限额供热要求。一般既有大型热网从设计到扩建过程中,干线连接许多小负荷支线,这种状况不利于实现分级结构和提高可靠性热网的经济性,不利于提高大型热网在水力计算和运行管理的各类计算中的速度和实现

控制,为此要对供热干线上的小负荷支线进行当量化。

1 小负荷支线当量化的计算方法

所谓小负荷支线当量化,就是指将若干小负荷支线的负荷用当量化负荷代替,使当量化后的管段阻力损失与当量化前的阻力损失相等。对设计参数确定的管网,在计算时当量化用流量来体现。

研究小负荷支线的当量化,需要确定当两个大负荷节点用户之间连接有若干小负荷时将其当量化的通用公式。图 1 中表示节点 a, b 之间的一

^{*} 国家自然科学基金资助项目(编号:50378029)

①☆ 王威,女,1968 年 7 月生,博士研究生,副教授
150090 哈尔滨工业大学市政环境工程学院
(0451) 86282123
E-mail:ww_jc@163.com
收稿日期:2007-11-28

段供水主干管管线 ab , 在节点 a, b 处分别有大负荷

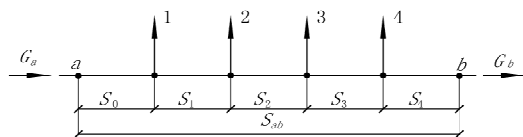


图 1 小负荷支线的当量化示例

节点用户, 其流入管线 ab 的流量为 G_a , 流出管线 ab 的流量为 G_b , 管线 ab 连接有小负荷支线 1, 2, 3, 4, 这些支线称之为沿途用户。管线 ab 的阻抗为 S_{ab} , 管线各管段的阻抗依次为 S_1, S_2, S_3, S_4 。当量化就是要将管线 ab 所连接的小负荷支线 1, 2, 3, 4 的流量用 a, b 两点的当量流量来代替。

b 点当量流量用下式计算:

$$G_{dl} = G_b + \alpha G_i \quad (1)$$

式中 G_{dl} 为 b 点当量化后的流量, m^3/s ; G_b 为流出管线 ab 的流量, m^3/s ; α 为当量化流量系数; G_i 为所有被当量化的小负荷支线流量之和, m^3/s 。

管线所连接的小负荷支线流量为

$$G_i = G_1 + G_2 + \cdots + G_n \quad (2)$$

式中 G_1, G_2, G_n 分别为沿途小负荷支线的热水流量, m^3/s 。

任一管段的压头损失可用下式计算:

$$\Delta H = SG^2 \quad (3)$$

式中 ΔH 为管段的压头损失, Pa ; S 为管段的阻抗, $\text{Pa} \cdot \text{s}^2/\text{m}^6$; G 为热媒流量, m^3/s 。

根据式(2), (3), 可以写出图 1 中管线 ab 的阻力损失:

$$\begin{aligned} \Delta H_{ab} = & S_0(G_b + G_1 + G_2 + G_3 + G_4)^2 + \\ & S_1(G_b + G_2 + G_3 + G_4)^2 + S_2(G_b + \\ & G_3 + G_4)^2 + S_3(G_b + G_4)^2 + S_4 G_b^2 \end{aligned} \quad (4)$$

小负荷支线的流量 G_1, G_2, G_3, G_4 与干线出流流量 G_b 相比, 其数值较小。

定义相对流量 g_k , 相对管段阻抗 ρ_k 分别为

$$g_k = \frac{G_k}{G_b}, \rho_k = \frac{S_k}{S_{ab}} \quad (5)$$

式中 G_k 为小负荷支线 k 的流量; S_k 为小负荷支线 k 到下一个小负荷支线前干线管段的阻抗; S_{ab} 为管线 ab 的总阻抗。

将式(5)代入式(4), 忽略高阶项并保留一次项, 可以将管线 ab 的阻力损失的表达式化简为如下形式:

$$\Delta H_{ab} = S_{ab} G_b^2 \{1 + 2[g_1 \rho_0 + g_2(\rho_0 + \rho_1) + g_3(\rho_0 + \rho_1 + \rho_2) + g_4(\rho_0 + \rho_1 + \rho_2 + \rho_3)]\} \quad (6)$$

另一方面, 根据式(1)和式(3), 可以写出管线 ab 的阻力损失为

$$\begin{aligned} \Delta H_{ab} = & S_{ab}(G_b + \alpha G_i)^2 \\ = & S_{ab} G_b^2 [1 + \alpha(g_1 + g_2 + g_3 + g_4)]^2 \end{aligned} \quad (7)$$

联立式(6)和式(7), 得到管线 ab 的当量化流量系数 α 的计算式:

$$\alpha = \frac{\sqrt{1 + 2[\rho_0(g_1 + g_2 + g_3 + g_4) + \rho_1(g_2 + g_3 + g_4) + \rho_2(g_3 + g_4) + \rho_3 g_4]} - 1}{g_1 + g_2 + g_3 + g_4} \quad (8)$$

根据式(8)可以写出连接 n 个小负荷支线的 管线当量流量系数的通用公式:

$$\alpha = \frac{\sqrt{1 + 2[\rho_0(g_1 + g_2 + \cdots + g_n) + \rho_1(g_2 + g_3 + \cdots + g_n) + \cdots + \rho_{n-1} g_n]} - 1}{g_1 + g_2 + \cdots + g_n} \quad (9)$$

从式(9)可以看出, 中括号内为各管段的相对管道阻抗与该管段下属小负荷相对流量之和的乘积相加, 而分母为各个小负荷支线的相对流量之和。这种当量化方法是基于将连接在相邻大负荷节点之间的小负荷支线负荷重新分配, 干线的总负荷和总阻力损失保持不变, 有足够的精度。笔者进一步研究和分析了改变相对流量比的数值对支线负荷当量化计算误差的影响。在四种小负荷支线不同变化的情况下计算简化公式的相对误差, 得出在小负荷支线的相对流量和小于 0.36~0.44 时, 即可保证简化后的公式相对误差在 5% 以

内^[1], 见图 2。可见根据当量负荷的定义, 即使合并中等流量的用户, 也不会导致管网压头损失产生很大误差^[2], 而这一点在图 2 的计算结果中也得以验证。

根据基尔霍夫第一定律(流量平衡原理), 当量化后 a 点的流量为

$$G_{a,dl} = G_a + (1 - \alpha) G_i \quad (10)$$

对于供热系统来说, 供回水管道是相互对应的。以上研究的是供水管线, 同样还可以计算回水管道的小负荷支线的流量当量化系数。图 1 表示的是供水管道的情况, 沿热媒流动方向计算流

算。取用如下可靠性数据:热力管路故障流参数 $\omega_{gl} = 0.1 (\text{km} \cdot \text{a})^{-1}$, 阀门的故障流参数 $\omega_{fa} = 0.002 \text{ a}^{-1}$, 连续供暖时间为 0.5 a (以哈尔滨为例)。从主干线引出的支管上靠近环线干线侧设置关断阀。可靠性指标采用下述公式^[3]。

$$R_{xt}(t) = 1 - \sum_{j=1}^i \frac{\Delta Q_j}{Q_0} \frac{\omega_j}{\sum \omega_j} (1 - e^{-\sum \omega_j t}) \quad (11)$$

式中 ΔQ_j 为故障状态下被切断的负荷, MW; Q_0 为热源的总负荷, MW; ω_j 为第 j 个元件的故障流参数; t 为热网运行时间, 哈尔滨地区取 $t = 0.5 \text{ a}$ 。

在计算时, 针对该环形热网可提出如下前提: 两个热网元部件同时发生故障的事件为极小概率事件, 不必考虑。

3.1 当量化前算例管网的可靠性指标计算

图 3 所示的热网, 因分段阀各节点的故障引起的事故次数为 6 次; 支管阀门各节点引起的事故次数为 24 次; 环形干线分段阀间的管段故障引起的

$$R_{xt}(t) = 1 - \sum_{j=1}^i \frac{\Delta Q_j}{Q_0} \frac{\omega_j}{\sum \omega_j} (1 - e^{-\sum \omega_j t}) = 1 - (1 - e^{-2.528 \text{ a}^{-1} \times 0.5 \text{ a}}) \times$$

$$\frac{160 \text{ MW} \times 4 \times 0.004 \text{ a}^{-1} + 80 \text{ MW} \times (24 \times 0.004 \text{ a}^{-1} + 2 \times 0.004 \text{ a}^{-1} + 6 \times 0.4 \text{ a}^{-1}) + 480 \text{ MW} \times 0.008 \text{ a}^{-1}}{480 \text{ MW} \times 2.528 \text{ a}^{-1}} = 0.864。$$

3.2 当量化后算例管网的可靠性指标计算

当量化后, 热网的元部件数量大大减少。从图 4 可以看出, 因分段阀各节点的故障引起的事故次数为 6 次; 支管阀门各节点引起的事故次数

$$\sum \omega = 6 \times 0.004 \text{ a}^{-1} + 12 \times 0.004 \text{ a}^{-1} + 6 \times 0.4 \text{ a}^{-1} + 1 \times 0.008 \text{ a}^{-1} = 2.48 \text{ a}^{-1}。$$

$$R_{xt}(t) = 1 - \sum_{j=1}^i \frac{\Delta Q_j}{Q_0} \frac{\omega_j}{\sum \omega_j} (1 - e^{-\sum \omega_j t}) = 1 - (1 - e^{-2.48 \text{ a}^{-1} \times 0.5 \text{ a}}) \times$$

$$\frac{480 \text{ MW} \times 0.008 \text{ a}^{-1} + 160 \text{ MW} \times 4 \times 0.004 \text{ a}^{-1} + 80 \text{ MW} \times (12 \times 0.004 \text{ a}^{-1} + 2 \times 0.004 \text{ a}^{-1}) + 80 \text{ MW} \times 6 \times 0.4 \text{ a}^{-1}}{480 \text{ MW} \times 2.48 \text{ a}^{-1}} = 0.879。$$

可见当量化后可靠性指标略有提高, 而且当量化后环形管网的事事故次数减少了 32%。以上数据是依据前苏联某地区管道和阀门的故障流参数得出的。而我国在 2001 年进行的北京、沈阳、牡丹江、哈尔滨四个大中城市集中供热阀门的故障流参数调查统计发现, 各个城市的故障流参数相差很悬殊, 新投入的及管理水平的热网, 阀门故障流参数与运行十几年的管网相比相差 10 多倍^[4-5]。如果故障流参数的数值改变, 当量化前后

事故次数为 6 次, 每管段长 2 km ; 热源出口阀门 a 和 e 引起的事故次数为 1 次。以上共计 37 次。热网元部件的故障流参数 ω 的值为:

$$\text{环形干线分段阀间的各管段, } \omega = 2 \times 2 \text{ km} \times 0.1 (\text{km} \cdot \text{a})^{-1} = 0.4 \text{ a}^{-1};$$

$$\text{热网始端闸阀节点, } \omega = 2 \times 2 \times 0.002 \text{ a}^{-1} = 0.008 \text{ a}^{-1};$$

$$\text{各阀门节点, } \omega = 2 \times 0.002 \text{ a}^{-1} = 0.004 \text{ a}^{-1}。$$

$$\text{系统故障流的总和 } \sum \omega = 6 \times 0.004 \text{ a}^{-1} + 24 \times 0.004 \text{ a}^{-1} + 6 \times 0.4 \text{ a}^{-1} + 1 \times 0.008 \text{ a}^{-1} = 2.528 \text{ a}^{-1}。$$

各用户关断阀和分段阀间管段的每一次故障导致被切断的热功率为 80 MW ; 环形干线分段阀 b, c, f, g 的每一次故障导致被切断的热负荷为 160 MW ; 分段阀 d, h 的每一次故障导致被切断的热负荷为 80 MW ; 热源出口阀门 a, e 事故导致被切断的热负荷为 480 MW 。

则热网的可靠性指标可计算如下:

为 12 次; 环形干线分段阀间管段引起的事故次数为 6 次; 热源出口闸阀引起的事事故次数为 1 次。共计 25 次。

系统故障流的总和:

可靠性指标的计算值会随之改变。

3.3 当量化对环形管网设计的影响

大型现代化热网的设计要具有严格的结构备用, 发生事故时管网是可控的、系统的备用附加投资最小。在给定设备和管网走向的条件下, 热网的可靠性取决于备用性能, 即结构备用和输送备用。在计算输送备用时, 管网的备用部分需要考虑是否可控, 即环形干线上的各用户是否可以控制调节。如果是可控系统, 事故工况时则可实现

限额供热,设备和管线按限额供热指标对应的流量设计,在保证可靠性指标不变的条件下可以使整个管网的造价最低。

如果管网在事故工况下不可控,那么其输送备用在任何事故工况下都按 100% 流量运行,这将导致很大的附加投资费用。不可控系统的特点是所有用户连接到环形干线上,无法实现控制调节,整个管网有着统一的不可控的水力工况。即使每个用户安装了保证流量的自控装置,事故工况下,对于远离热源的用户也很难保证设计供热量,不能实现事故工况时满足 100% 供热要求的设计初衷。

由此可见,管网应按照用户负荷的大小、集中和分散的程度及重要程度分配不同的可靠性指标^[6]。即大负荷、重要的、一旦发生事故影响范围大并造成的损失严重的用户应设计成可靠程度高的具有备用结构的环形管网或三管制系统形式。而小负荷用户或事故工况下不会造成很大损失的用户可以设计成非备用结构,即管网具有分级的结构形式。在具有分级结构的系统中,事故工况下备用部分可通过限额供热实现管网的运行。在分级结构的热网中,要求系统由较小的自控装置就可实现可靠性和经济性均满足要求的最优结构。同时可控系统对高级的、现代化热网设计是非常重要的。

(上接第 22 页)

6 结论

6.1 夏季空调工况下,第三时段系统只释不蓄的运行模式能有效地降低夏季空调工况前期蓄冷量的冷损失,使得本文中所述系统的土壤季节损失率仅为 27.64%。

6.2 该集成系统成功地达到了降低白天高峰空调用电量、利用夜间低谷电力以移峰填谷的目的。空调工况第二、三时段白天空调总运行功耗为 4 609.22 MJ,与传统土壤源热泵夏季空调运行方式总耗功量 16 716.362 MJ 相比,降低了 12 107.142 MJ,降幅达到 72.427%,即采用当前运行方式将白天空调用电转移了 72.427% 到夜间低谷电力时段,达到了移峰填谷的目的。

6.3 土壤蓄冷与土壤耦合热泵集成系统全年运行后,土壤的全年净能量交换为 3 715.6 MJ 冷量,占全年总冷量的 2.28%,大大减轻了建筑冬夏负

为实现上述管网的设计模式,当量化是不可缺少的设计环节。当量化在一定程度上通过减少热用户的数量降低了管网备用部分的造价,便于实现分级结构,应该在管网设计和改造过程中加以重视。

4 结语

当量化的计算方法是简化热网设计和计算的一个重要手段。通过当量化可以将小支线负荷合并,大大减少故障发生的次数。同时对实现分级结构和事故工况下限额供热的可控系统及保证热网高的可靠性前提下的最小投资具有重要意义。

参考文献:

- [1] 李祥立,孙宗宇,邹平华. 多热源环状热水管网的水力计算与分析[J]. 暖通空调, 2004, 34(7): 97-101
- [2] Ионин А. А. Надёжность систем тепловых сетей [M]. М: Стройиздат, 1989: 194
- [3] 约宁 А. А. 供热学[M]. 尚雷,译. 北京: 中国建筑工程出版社, 1986: 215
- [4] 张华杉,王晓霞,邹平华,等. 基于热网调研的供热管网元件故障率统计与频谱分析[M]. 暖通空调, 2004, 34(1): 15-18
- [5] 张华杉. 热网故障流分析及建筑物蓄热能力对可靠性影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003: 17-26
- [6] 芮延年,傅戈雁. 可靠性设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 156-159

荷不平衡造成的土壤温度逐年升高或降低问题。

参考文献:

- [1] 余延顺. 土壤蓄冷与土壤耦合热泵集成系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004
- [2] 范蕊,马最良. 双功能地下管群换热器的管间距分析[J]. 建筑热能通风空调, 2006, 25(1): 11-14
- [3] 地质矿产部地下水动态监测研究中心. 全国地下水位年鉴[M]. 北京: 中国大地出版社, 1984: 447-487
- [4] Yian Gu, O'Neal D L. Development of an equivalent diameter expression for vertical U-tube used in ground-coupled heat pumps[G]// ASHRAE Trans, 1998, 104(2): 347-355
- [5] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 81, 483-487
- [6] 范蕊. 土壤蓄冷与热泵集成系统热渗耦合理论及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [7] 付祥钊. 夏热冬冷地区建筑节能技术[J]. 新型建筑材料, 2000(6): 13-17