

供热管网分阶段设计的 可靠性研究方法*

哈尔滨工业大学 王 芃[☆] 周志刚 王 威 邹平华

摘要 在供热管网传统设计流程的基础上,将其分解为拓扑结构设计和管径与循环水泵设计,并相应地进行结构备用和输送能力备用的可靠性研究。基于可靠性分析的需求,增加阀门布局设计阶段。根据各阶段设计条件与内容,提出相应的故障判定原则、可靠性评价指标和分析方法。

关键词 区域供热 可靠性 结构备用 输送能力备用 阀门分布 限额供热

Reliability research on design of district heating network by stages

By Wang Peng[★], Zhou Zhigang, Wang Wei and Zou Pinghua

Abstract Based on the traditional design procedure, divides the design of heating network into two stages, namely, one for topology and the other for diameters and circulating pumps. The corresponding reliability researches are performed for both the structure reservation and transportation capacity reservation. Besides, inserts the design of valve distribution between the above stages to cater for the need of reliability analysis. According to different conditions and design contents during each stage, puts forwards the failure judgment principles, reliability evaluating indicators and analysis methods for each stage.

Keywords district heating, reliability, structure reservation, transportation capacity reservation, valve distribution, quota heating

★ Harbin Institute of Technology, Harbin, China

①

0 引言

长期以来,在供热系统的规划、可研及设计过程中,方案的制定和技术经济的比较很少纳入可靠性设计理念。尽管城镇热负荷不断增加,多热源、环状管网等被公认具有高可靠性的供热系统仍然缺乏完整的、可行的可靠性设计方法、评估指标以及标准。其结果造成供热系统设计的扭曲与极端化,一则不断增加管网中环、阀门的数量,以期获得更高的可靠度,而忽略了经济性和复杂性;或为节省成本而建设过于简单的、未经事故工况验算的多热源环状供热系统,难以达到预期的可靠度,甚至得不偿失。

我国的供热系统可靠性研究自 20 世纪 80 年代开始一直在不断进行中,涉及从元件至系统可靠性研究的多个方面,逐渐形成了基于空间管网模

型^[1],以可靠性理论和图论为支撑的研究模式,主要研究成果涵盖我国供热管网元件故障率统计^[2]、关阀方案^[3]、故障工况水力仿真方法^[4-5]和多样化的可靠性评价模型^[6-8]。尽管成果丰富,但是在实现供热系统可靠性设计之前仍然有大量的研究亟待开展。笔者所在课题组于 2002 年首次开展供热管网可靠性的应用项目,2013 年又分别受到哈尔滨市和吉林市两家热力公司的委托进行供热管网的可靠性分析与评价,逐渐总结出了对既有供热管网改扩建进行可靠性分析的方法,即通过不断地与原系统可靠性比较以寻求最优的解决方案。然而更复杂的是新建管网的设计。面对灵活的设计条

①☆ 王芃,男,1981 年 10 月生,博士研究生,讲师
150090 哈尔滨市南岗区黄河路 73 号哈工大二区市政学院
2651 信箱
(0) 18645041026
E-mail:cahnburg@126.com
收稿日期:2013-11-19

* 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(编号:20132302120071)

件和紧密耦合的多项设计内容,如何有针对性地进行可靠性分析?

1 供热管网分阶段设计与可靠性研究

我国从 1990 年颁布 CJJ 34—90《城市热力网设计规范》开始,经过 2002 年和 2010 年的两次修订,规定了连通管线的设置、多热源和环状管网系统的适用原则、最低供热保障率、备用水泵的选择和事故补水量等可靠性相关条文^[9-11]。然而,根据规范要求构建可靠的供热管网,尚需借助可靠性理论进行深入的研究。

供热管网设计的传统习惯,通常先根据热源和热负荷的分布以及道路敷设条件设计管网路由(即拓扑结构),再通过水力计算确定各管段管径,最后计算循环水泵工作参数。当某些精细设计拟计算供热管网经济比摩阻时,则管段管径与循环水泵配置往往是关联的。供热管网设计的自由性导致可靠性分析的复杂性,同时改变主要设计内容——管网拓扑结构、管径与循环水泵是一项困难的工作。鉴于此,将上述三项设计内容分解为两个设计阶段,即拓扑结构的设计和管径与循环水泵设计,分别借助供热系统可靠性理论中的结构备用和输送能力备用的相关成果进行分析,并优化设计内容^[12-13]。

此外,供热管网中的阀门分布决定了每个故障工况下的故障隔离方案、重建的拓扑结构,并以此为前提条件进而研究输送能力备用。另一方面,面对庞大的管网和错综复杂的管路,如何科学设置阀门以获得更高的可靠性?因此,基于可靠性研究的需要,在上述两个阶段间增加阀门布局设计。

综上,供热管网分阶段设计包括三个阶段:拓扑结构设计、阀门布局设计和管径与循环水泵设计。供热管网的主要设计内容相互剥离,相应地可以对每个设计阶段进行有针对性的可靠性分析,即结构备用研究、阀门布局研究和输送能力备用研究,并为之分别寻求合理的可靠性评价指标。纵观 20 世纪 80 年代以来的研究成果,可靠性评价指标并不缺乏。从更早的前苏联的一系列可靠性评价指标至我国学者提出的改进型指标和其他衍生指标,几乎涵盖了供热管网设计和运行中众多关键部件和工况模式。如何合理使用这些可靠性评价指标是各设计阶段可靠性研究的关键问题。

2 拓扑结构与结构备用研究

2.1 结构备用与故障判定

结构备用一般指供热管网拓扑结构(包括热源分布)的备用。其目的是在故障工况下保障热源与热用户的连通。通俗地说,热源与热用户之间多于一条路时即具备一定的结构备用。如果将热源和热用户抽象为具有坐标属性的节点,拓扑结构设计任务即是设计连接所有节点的管段(即边),而结构备用研究将为其提供可靠性指导,使供热管网的拓扑结构达到要求的可靠度。

结构备用研究中,仅考虑供热管网拓扑结构的特性,正常状态是热源与热用户均连通,而所谓故障即是指热源与热用户之间断开,不能连通。连接与否是结构备用研究的故障判定依据,将被切断热用户发生的事件记为故障。该故障判定原则隐含以下两个条件:

1) 假设每个管段两端均设置阀门,使系统构成完备阀门系统(见 3.1 节)。

2) 故障判定不涉及系统的水力工况。对故障工况下仍然与热源连接的热用户,不计算其得热量,即默认故障工况下的所有连接热用户均可以实现限额供热(见 4.1 节)。

2.2 连通可靠度

空间管网连通可靠度是结构备用的一种评价指标。假设各管段只有正常或失效两种状态,所研究的节点间的连通与否仅由管网拓扑结构以及管段的(正常或失效)状态所决定。空间管网连通可靠度的通用公式^[14]为

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

式中 Z^s, Z^r 分别为供水和回水平面管网中节点间连通问题的逻辑事件集合。根据不同研究的需要,连通问题将针对特定的节点集合——即热源集合与热用户集合,相应的 Z^s 和 Z^r 也有着不同的表达式^[14]。

以图 1 所示的 3 个平面管网示意图为例说明连通可靠度的意义。图中 4×4 阵列分布的 16 个节点表示实际管网中支干线或支线在干线中的连接点,是有热负荷的节点,可称为热用户节点。同时,为简化结构,当热用户节点与其他无热负荷节点相邻时,集总为一个节点(如无特殊说明,文中节点即为热用户节点)。图 1a 为枝状管网,在其基础上通过连接节点 4, 8, 12 和 16 构成环状管网,见图 1b。图 1c 改变了环形干线的范围,形成较图 1b 更

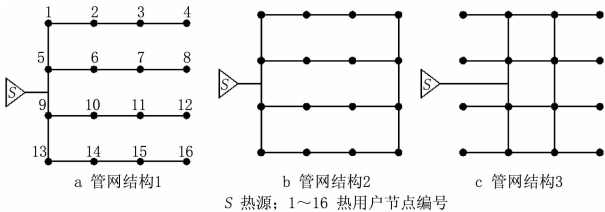


图1 平面管网拓扑结构示意图

小的环。

在已设定的管段长度和故障率参数下,3种管网结构的热源连通可靠度分别为0.214,0.774和0.363。显然环状管网的可靠度高于枝状管网,同时构成较大环形干线的管网结构2的可靠度远高于管网结构3。更多的分析表明,通常应构建更大的环形干线,以提高可靠度^[13]。但是,由于热负荷分布的不均匀性,有可能导致有违上述结论的特例出现。为此确定系统中的重要节点将是降低该风险的有效手段。对图1中3种管网结构热用户连通可靠度(见图2)的研究表明,节点距热源管线距离会影响可靠度,位于干线的节点可靠度往往更高。于是,基于公平的原则,以热负荷的大小确定节点的重要性,那么重要节点(即热负荷较大的节点)位于更可靠的位置(即环形干线上),则系统的可靠度也会相应提高。

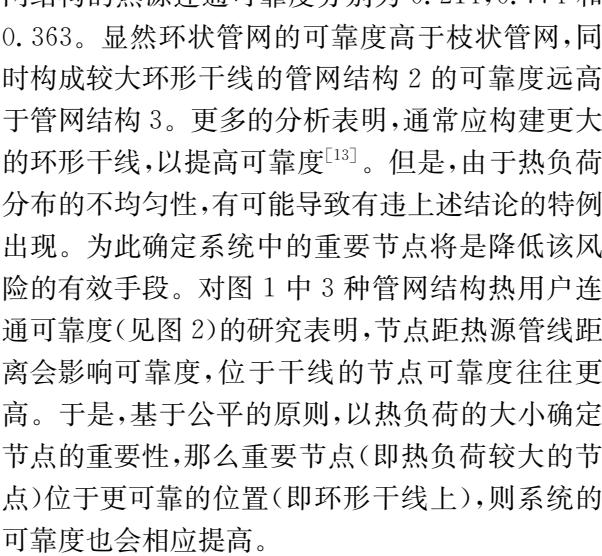


图2 各节点热用户连通可靠度

鉴于供热管网研究的特点,在遵循上述规律和更多的供热系统实例研究成果^[13-14]的基础上,依据连通可靠度具体问题具体分析,是供热管网拓扑结构设计的科学方法。

3 阀门布局设计与可靠性研究

3.1 阀门布局与故障隔离区域

供热管网中无论是分段阀还是支干线和支线的关断阀,在元件故障时,都可关断并隔离故障元件,便于实施抢修。在整个管网中,阀门设置得越密集,意味着可隔离区域越小,将有效缩短维修时的放水 and 充水时间,在某些供热管网中还起到了减小停供范围的作用。

由于阀门本身也是一类故障元件,因此故障隔离区域分为阀门故障隔离区域和非阀门故障隔离区域。某一故障隔离区域内任一元件故障都将导致同样的关阀方案和故障工况,因此故障隔离区域也被称为当量区^[8]。以图3a所示环状供热管网为例说明非阀门故障隔离区域。当管网中仅有阀门 $V_1 \sim V_4$ 时,仅以管段故障研究非阀门故障隔离区域,得到如表1所示的各区域的故障元件统计、关断阀门方案以及所切断的节点信息。

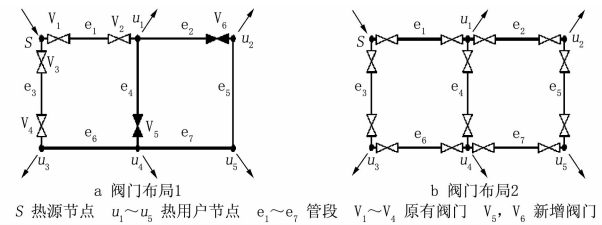


图3 平面管网阀门布局示意图

表1 非阀门故障隔离区域(仅有阀门 $V_1 \sim V_4$)			
故障隔离区域编号	故障区域内的元件	关断阀门	切断节点
A_1	e_1	V_1, V_2	
A_2	e_3	V_3, V_4	
A_3	$e_2, e_4 \sim e_7$	V_2, V_4	$u_1 \sim u_5$

尽管这样的阀门布局最大程度降低了热源出口两根主分支 e_1 和 e_3 的故障对系统的不利影响,但是当其他管段发生故障时,都将造成所有热用户的停供。需要增加阀门以进一步缩小表1中的 A_3 区域。如仅增加图3a中的阀门 V_5 (或者 V_6),该阀门对系统中的任何元件故障都无法实现隔离作用,这类阀门被称作无效阀门^[13]。不仅如此,无效阀门还增加一个故障点。如果同时增加阀门 V_5 和 V_6 ,则两个阀门实现了对 A_3 故障隔离区域的细分,详见表2。

表2 非阀门故障隔离区域(包含阀门 $V_1 \sim V_6$)			
故障隔离区域编号	故障区域内的元件	关断阀门	切断节点
A_1	e_1	V_1, V_2	
A_2	e_3	V_3, V_4	
A'_3	e_2, e_4	V_2, V_5, V_6	u_1
A'_4	$e_5 \sim e_7$	V_4, V_5, V_6	$u_2 \sim u_5$

当不断增设阀门,以致每根管段(可靠性研究中以没有分支的管段作为一根管段)两端均设置阀门时(见图3b),每个节点都将得到最可靠的连接保障,该阀门布局构成完备阀门系统^[13]。此外,展开上述示意图中的热用户节点为支干线或支线,并采用双支线的连接方式和相应的阀门设置亦可保

障各支线不因环形干线上元件的故障而被切断^[15]。

但是大型供热管网管路繁多,往往难以在环状干线上构造理想的完备阀门系统和双支线连接的系统。用较少的阀门实现较高的可靠性,正是阀门布局设计需要解决的问题。

3.2 功能质量指标与故障判定

如上所述,作为故障隔离的阀门,其本身也是系统故障点,且尚有无效阀门的不合理设置。在此前提下,阀门的设置合理与否,可靠性收益多少,都需要可靠性指标作为评价依据。

阀门布局优化的目标可引用前苏联提出的供热管网可靠性评价指标之一——功能质量指标。它是实际系统与理想系统的功能质量之比,如下所示^[16]:

$$R = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{\Delta Q_i}{Q'} \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} (1 - e^{-\sum_{i=1}^n \omega_i t}) \quad (2)$$

式中 R 为功能质量指标; ΔQ_i 为第 i 个故障隔离区域对应故障工况下的供热不足量; Q' 为系统设计热负荷; ω_i 为第 i 个故障隔离区域内所有元件的故障率之和; t 为供暖期延续时间; n 为故障隔离区域的数量。

相对于前一阶段的结构备用研究,阀门布局的可靠性研究中要求必须明确热负荷分布,但是故障判定原则不变,仍然不涉及系统的水力工况,式(2)中 ΔQ_i 即第 i 个故障工况下被切断的热用户热负荷之和。

4 管径和循环水泵设计与输送能力备用研究

4.1 输送能力备用、限额供热与故障判定

建立了具备良好结构备用的供热管网,且拥有合理的阀门分布以限定故障隔离区域的范围,并不意味着在故障工况下,供热系统可以按照我们的意愿向尚连接的热用户提供足够的热量。要满足这一期望,必须分析系统的输送能力备用,以合理设计管径和循环水泵。

输送能力备用是系统在故障工况下向可供热用户(与热源连接的热用户)输送热量的能力。对于既定结构的供热管网和阀门分布,管径的大小和循环水泵的分布与动力决定了输送能力备用的大小。管径越大、循环水泵动力越强,系统的输送能力备用越高,可靠性也越高。为了防止

投资过大,限额供热被用以限制输送能力备用,从而保证一定的经济性。俄罗斯 2003 年出版的供热管网设计规范中对不同室外设计温度、不同蓄热能力的热用户以及不同管径的限额供热系数进行了详细的规定^[17]。文献[11]相应规定了我国最低供热保证率。

限额供热系数(或者最低供热保证率)使管径与循环水泵设计明确了可靠性目标,即实现故障工况限额供热的要求,以保证热用户在故障抢修期间的室内温度不至于降低到所要求的下限值。它是输送能力备用研究的基本要求,同时规定了故障判定原则:故障工况下,连接热用户的供热量达到限额供热要求,不记为故障;而被切断热用户和未实现限额供热的连接热用户都将作为故障。

4.2 管径和循环水泵设计与输送能力备用研究过程

供热系统的输送能力备用是否满足限额供热的要求,需要校核系统中所有可能出现的故障工况。这是 3 个设计阶段和可靠性研究中最复杂的过程,设计水力计算、故障工况仿真与可靠性评价依次进行且不断修正,详见图 4。

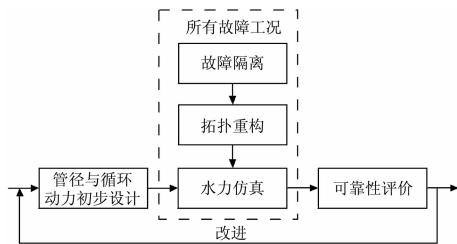


图4 供热管网管径和循环水泵设计与输送能力备用研究流程示意图

依据管网流量分配原理^[16]和对结构备用管网的限额供热要求^[11],初步设计管网中各管段管径以及循环水泵的配置。在经过阀门布局设计后,实际已经完成了故障隔离的任务,但是尚需利用图论的分析方法获得重构管网的拓扑结构,且由于单侧(故障元件所在平面管网侧)与双侧(供水和回水管网)关阀方式的不同,故障工况下的工作管网将分别构成非对称和对称的管网形式^[3]。故障工况水力仿真属于运行工况水力计算范畴,即根据既定的管网结构、管径和循环水泵设置,计算管网中各管段流量和节点压头等参数,进而为可靠性评价提供

直接依据——故障判定依据。

4.3 故障工况水力仿真与故障判定方法

故障工况水力仿真仍然遵循如式(3)所示的供热管网水力计算基本模型^[18],仅管网拓扑结构与正常工况有所差异。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{AG} &= \mathbf{Q} \\ \mathbf{B}_f \Delta \mathbf{H} &= 0 \text{ 或 } \mathbf{A}^T \mathbf{P} = \Delta \mathbf{H} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 $\mathbf{A}$ 为管网基本关联矩阵; $\mathbf{G}$ 为管段流量列向量; $\mathbf{Q}$ 为节点出流量列向量; $\mathbf{B}_f$ 为管网基本回路矩阵; $\Delta \mathbf{H}$ 为管段压降列向量; $\mathbf{P}$ 为节点相对压力列向量。

根据本阶段的故障判定原则,以限额供热系数为热网故障与否的临界值,被切断用户供热量为 0;而连接热用户的实际获得热量将由故障工况水力仿真获得。根据可控性的要求,故障工况下的系统应达到新的水力平衡状态。根据各热用户的特点,将限额供热系数转化为各热用户的限额流量系数^[19]。为简化问题,令各热用户流量比例 x (即实际流量与设计流量之比)相同。则在可控系统中,所有连接热用户的最大流量比例 $x_{\max}$ 达到和超过限额流量系数时不计为故障,低于限额流量系数则判定为故障。

已知各连接热用户设计流量列向量 $\mathbf{Q}_U$ 和热用户一次侧循环水泵扬程列向量 $\mathbf{H}_U$,则可控供热系统在特定故障工况下所能提供的最大流量比例 $x_{\max}$ 应满足:

$$\min[\Delta \mathbf{P}_U - (x_{\max}^2 \mathbf{S}_{v0} | \mathbf{Q}_U | \mathbf{Q}_U - \mathbf{H}_U)] = 0 \quad (4)$$

式中 $\Delta \mathbf{P}_U$ 为系统提供给热用户的资用压头; $\mathbf{S}_{v0}$ 为热用户一次侧阀门全开时的阻力特性系数; $|\mathbf{Q}_U|$ 为由 $\mathbf{Q}_U$ 元素绝对值构成的对角阵。

4.4 限额供热可靠度

本阶段的故障判定条件相对于前两者有了量的概念。在可靠性评价中,即便被判定为故障的连接热用户,也应量化其未实现限额供热的程度。

以限额供热可靠度作为本阶段的可靠性评价指标,定义为系统逼近故障工况限额供热的功能质量指标与限额供热的功能质量指标的比值。对于可控供热系统,限额供热系数为 α 时的可靠度 R_α 为

$$R_\alpha = \frac{1 - \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \min(x_{\max i}, \alpha)}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \right] (1 - e^{-\sum_{i=1}^n \omega_i t})}{1 - (1 - \alpha)(1 - e^{-\sum_{i=1}^n \omega_i t})} \quad (5)$$

式中 $x_{\max i}$ 为第 i 个故障工况下系统的最大流量比例,且总是用 $x_{\max i}$ 与 α 之间的最小值计算逼近限额供热的功能质量指标。当系统中所有故障工况均能满足限额供热要求时,限额供热可靠度等于 1。

图 5 所示为某实际供热管网抽象后的示意图,1~17 为热用户节点。该系统在热源 S 出口分为 a, b 两条干线,经过逐年扩建后分别拥有 8 个和 9 个热用户节点,且末端节点仅相距 256 m。通过管段 c 连接末端节点 8 和 17 可以构成环状管网,且环形干线是完备阀门系统。

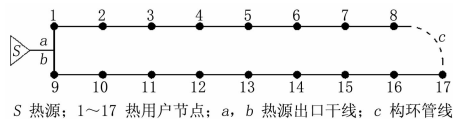


图 5 某构环改建平面管网示意图

定义该系统限额供热系数为 0.65。当管段 c 的管径取相邻管段管径时, $R_{0.65} = 0.805$ 。实际上,由于原干线按枝状管网设计,管段管径由热源端向末端节点逐渐减小,这样构成的环状管网在故障工况下反向供热时很难达到限额供热要求。为此,以最严格的 a, b 管段故障工况满足限额供热的条件重新设计环形干线的管径,得到 $R_{0.65} = 0.909$ 。由于环形干线管径的增加,即管道容量的增加,可靠度提升约 13%。输送能力备用同样可以由循环水泵转速的增加来实现。理论上,在未扩大管径的系统中,如故障工况水泵的转速能提高至正常工况转速的 2.39 倍,仍然能够达到 0.909 的可靠度。

可见,单一扩大管道管径和循环水泵出力都可以提升系统可靠度,但是所付出的代价和获得的效益并不相同。前者投资大,但是减少了正常工况的运行费用;而后者投资较小,却仅为故障工况备用。因此,输送能力备用研究的目的是基于限额供热可靠度优化管道容量与循环水泵配置。

3 个阶段的设计与可靠性研究要素归纳于表 3。

表 3 供热管网分阶段设计与可靠性研究要素

拓扑结构设计		阀门布局设计	管径与循环水泵设计
可靠性研究阶段	结构备用研究	阀门布局的可靠性研究	输送能力备用研究
设计与可靠性研究条件 ¹⁾	路由、管道故障率、热负荷分布 ²⁾	管网拓扑结构、热负荷分布、阀门和其他管件故障率	阀门分布
故障判定	热用户与热源连接与否	热用户与热源连接与否	热用户是否达到限额供热要求
可靠性评价指标	连通可靠度(式(1))	功能质量指标(式(2))	限额供热可靠度(式(5))

1) 设计与可靠性研究条件需累计上一阶段的条件；

2) 结构备用研究中,热负荷分布非必需条件。

5 结论

从拓扑结构的构建到管径与循环水泵的设计,从结构备用到输送能力备用的研究,供热管网分阶段设计的模块化组合更易规范和标准化,而与各阶段一一对应的可靠性研究则为系统的优化提供评价指标。

与可靠性结合的供热管网设计较传统设计工作量庞大,仅凭设计人员经验的方案对比很难实现理想的目标,基于可靠性指标的寻优过程是设计的必需手段,且无论是可靠度的计算、故障工况的拓扑重构和水力仿真均需借助计算机完成。限于篇幅,本文对各设计阶段的可靠性研究作了较系统的概述,可靠度计算、水力仿真和寻优过程中的诸多细节可参考相关文献。

尽管本文提出了适用于新建管网的分阶段设计与可靠性研究方法,可对设计中的主要内容,如拓扑结构、阀门、管径和循环水泵进行有针对性的可靠性评价和优化设计,但是尚未找到一个合理的可靠性“标准”。正如限额供热系数之于输送能力备用,每个设计阶段尚需可供参考的可靠度标准,以维持系统可靠性与经济性的平衡。希望通过本文的论述为可靠性研究在供热管网设计中的应用提供更多的思路,以期寻求供热系统可靠性设计方法。

参考文献:

[1] 周志刚,邹平华,王晓霞. 基于阻抗辨识的复杂空间热网仿真研究[J]. 暖通空调,2006,36(10):19-24

[2] 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[J]. 暖通空调,2004,34(1):15-18

[3] 王晓霞,邹平华,李祥立. 供热管网故障的关阀方案[J]. 煤气与热力,2004,24(8):432-434

[4] 王晓霞,邹平华,谭羽非. 环型热网隔离故障管段方案水力工况研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2005,37(4):473-475,548

[5] Wang Peng, Zou Pinghua. Simulation of distributed pump systems under failure conditions [C] // Proceedings of Second International Conference on Modeling and Simulation. Manchester, England, UK, 2009: 118-123

[6] 蔡启林,刘施玲. 供热系统的可靠性综合评价指标探讨[J]. 煤气与热力,1993,13(5):46-51

[7] 战泰文,邹平华. 供热系统可靠性评价指标的探讨[J]. 煤气与热力,1998,18(6):49-51

[8] 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

[9] 北京市煤气热力工程设计院. CJJ 34—90 城市热力网设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1990

[10] 北京市煤气热力工程设计院. CJJ 34—2002 城市热力网设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002

[11] 北京市煤气热力工程设计院有限公司. CJJ 34—2010 城镇供热管网设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010

[12] 王威. 基于可靠性的热网结构及其输送备用能力的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008

[13] 王芃. 基于图论的供热系统可靠性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010

[14] 王芃,邹平华. 供热管网连通可靠度研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011,43(8):94-97

[15] Антонов Е А. Повышение надёжности тепловых сетей[J]. Теплоэнергетика, 1978(1)

[16] Ионин А А. Обоснование схем и расчёт надёжных систем тепловых сетей [J]. Теплоэнергетика, 1990 (9):16-19

[17] СНиП 41 - 02—2003 Тепловые сети[S]. Москва: Госстрой Р Ф,2004

[18] Хасилева В Я,Меренкова А П. Методы и алгоритмы расчета тепловых сетей[М]. Москва: Энергия, 1978

[19] Ионин А А. Надёжность систем тепловых сетей[М]. Стройиздат, 1989