

多热源环状热网可靠性 评估方法研究^{*}

广东工业大学 王晓霞[☆]

哈尔滨工业大学 邹平华

摘要 提出了一种基于故障影响分析的多热源环状热网可靠性评估方法,该方法将元件故障概率与热网故障工况水力分析相结合,采用可修复系统模型来评估热网的可靠性。给出了一系列热用户供热可靠性指标和热网系统可靠性指标。对一实际热网进行了可靠性评估和分析,找出了热网的薄弱环节,提高了其可靠性。

关键词 多热源环状热网 可靠性评估 故障影响分析 可修复性

Reliability assessment method of multi-heat source ring-shaped heat-supply networks

By Wang Xiaoxia[★] and Zou Pinghua

Abstract Presents a reliability assessment method based on a failure effect analysis, in which component failure probability is combined with hydraulic analysis under failure conditions and the reliability of heat-supply networks is evaluated with a repairable system model. Sets up a series of reliability indexes for heat users and heat-supply network systems. Assesses and analyses the reliability of an actual heat-supply network, finds the weak part, and thus improves the reliability.

Keywords multi-heat source ring-shaped heat-supply network, reliability assessment, failure effect analysis, repairability

★ Guangdong University of Technology, Guangzhou, China

①

0 引言

集中供热作为现代城市的重要基础设施,其运行可靠与否直接关系着人们的正常生活和生产活动。提高热网可靠性,保证供热质量,降低事故率,是当今市场化大环境下对集中供热提出的更高要求。

以往的热网可靠性评估方法存在以下不足:1) 可靠性计算模型均采用不可修复模型,认为热网故障在当年供暖期或当月不可修复^[1-4]。而笔者对国内四个城市热网故障的统计数据表明,热网元件的故障平均修复时间为十几个小时,若采用以往的不

可修复模型会产生较大误差,因此对热网可靠性的评估应采用可修复模型。2) 计算热网系统可靠性指标时不以故障工况水力分析结果作为判断热用户供热状态的依据,认为未中断供热的热用户均满足最低供热量要求。显然这一做法是有前提的,即热网设计阶段考虑了可靠性要求,循环水泵及管径的选择具有一定的备用余量。而对于已有热网,尤其是我国热网系统在设计阶段基本不进行可靠性

①☆ 王晓霞,女,1975年2月生,博士研究生,讲师
510006 广州大学城广东工业大学建设学院 175 信箱
(0) 13556135687

E-mail: wxxhit@sina.com

收稿日期:2005-11-17

修回日期:2006-09-05

^{*} 国家自然科学基金资助项目(编号:50378029),广东工业大学博士基金资助项目(编号:053025)

设计,多热源环状有备用的系统在故障工况下的备用能力还有待检验。因此,热用户及热网系统处于何种状态应根据全网水力工况分析结果来确定。

3) 可靠性评估指标单一,目前所见到的国内外评价热网系统可靠性的指标只有一个,即系统各种状态下的实际热负荷与设计热负荷之比^[1-4]。显然,只采用该指标不能对研究对象进行全面评估。而且以往热网可靠性研究均只计算系统的可靠性指标,而没有对热用户供热可靠性进行评估。笔者认为热网可靠性的研究应面向用户。

本文采用故障影响分析方法,将元件故障概率与热网故障工况水力分析相结合来研究多热源环状热网的可靠性。采用可修复系统模型,制定了一系列热用户供热可靠性指标和热网系统可靠性指标,包括概率指标、频率指标、时间指标和期望值指标等,从不同侧面全方位地描述研究对象的可靠性。

1 多热源环状热网可靠性研究的特点

1) 由于热网元件发生故障后是可修复或可更换的,因此供热管网属可修复系统;

2) 热网元件发生故障是低概率事件,且修复时间较短,因此,两个元件同时发生故障的概率远小于一个元件发生故障的概率,可以忽略;

3) 热用户在与热源之间存在通路的情况下不一定处于正常工作状态,需进行全网水力工况模拟计算,再根据判据来确定其状态;

4) 由于建筑物具有热惰性,热用户停止正常供热后,房间温度不能马上降至最低允许温度以下,因此允许供热管网暂时停止供热(或限额供热),即供给热用户的热量短时间偏离设计热负荷,不超过一定范围,不认为造成事故^[3-4]。

2 故障影响分析方法的基本原理

2.1 基本原理

故障影响分析方法通过对系统中各元件状态的搜索,建立故障模式表,列出全部可能的系统状态,然后根据所规定的故障判据对系统的所有状态进行检验分析,查清对系统的影响,进而求得系统的可靠性指标。

结合多热源环状热网可靠性研究的特点,基于故障影响分析的热网可靠性评估方法的基本思路为:首先枚举系统元件故障,对相应的状态进行全网故障工况水力模拟,得到元件故障对系统中全部热用户的影响;当所有导致热用户供热不足的事件

确定后,根据该事件集合和相应的影响后果,通过计算这些事件发生的概率及引起的供热不足量等权值,求得热用户供热可靠性评估指标,在此基础上综合计算得到热网系统可靠性评估指标。

2.2 热用户供热不足判据

因热网元件故障而导致热用户供热不足包括两种情况:一是热用户与所有热源之间无通路,即热用户完全中断供热;二是热用户与至少一个热源之间存在通路,但所得热量达不到限额供热要求。第二种情况是对有备用系统而言的,此时需对全网进行水力工况模拟,然后根据热用户供热不足判据判断其是否处于供热不足状态。

热用户供热不足判据可采用限额供热系数或限额流量系数,由于判断多热源环状热网状态前需进行全网流量分配模拟,因此,热用户供热不足判据采用限额流量系数较为方便。

在热网可靠性设计阶段,限额流量系数取值高,热网备用余量大,相应投资也大;取值低,则不能满足限额供热的要求,甚至会导致供热系统失调,不能保证热用户达到室内最低允许温度要求。若限额供热工况下供热系统的供、回水温度与设计工况下相同,则限额流量系数与限额供热系数数值相等。我国城市热力网设计规范对采用不同室外计算温度的热网分别给出了限额供热系数值^[5]。因此热用户供热不足判据为:热用户的流量与设计流量的比值低于给定阈值——限额流量系数。

2.3 热网可靠性评估流程

笔者提出的多热源环状热网可靠性评估流程如图 1 所示。

3 热网可靠性指标

3.1 热用户供热可靠性指标

热用户供热可靠性是供热企业对用户持续供热能力的具体反映。热用户供热可靠性指标包括年供热不足频率、可靠度、可用度、年供热不足时间、供热不足持续时间、供热不足率和供热率等^[6]。

1) 年供热不足频率 λ_y

热用户在供暖期内,平均每年因热网元件故障而处于供热不足状态的次数。计算式如下:

$$\lambda_y = \sum_{i=1}^m \lambda_i \quad (1)$$

式中 λ_i ——第 i 个元件的故障率, a^{-1} ;

m ——导致热用户供热不足的元件个数。

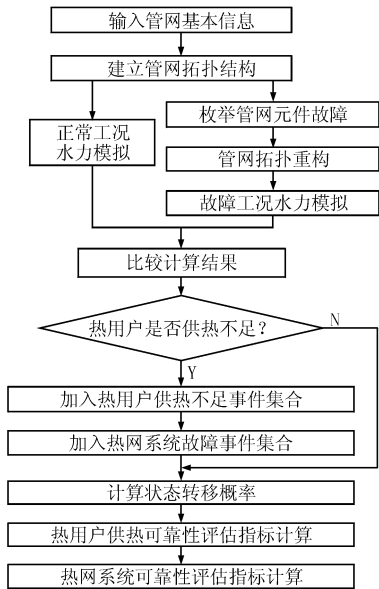


图 1 多热源环状热网可靠性评估流程

各热用户 λ_y 的大小说明了该热用户供热的可靠程度,导致该热用户处于供热不足状态的元件故障越多,则热用户每年处于供热不足状态的次数越多,供热越不可靠。

2) 可靠性 R_y

热用户在供暖期内,不出现供热不足情况的概率。计算式如下:

$$R_y = e^{-\lambda_y \tau} \quad (2)$$

式中 τ ——供暖期延续时间, a。

3) 可用度 A_{y0}

热用户可用度指标可用稳态可用度来表示,其含义为热用户正常工作时间占总供热时间的比值。计算式如下:

$$A_{y0} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i}{\mu_i}} \quad (3)$$

式中 μ_i ——元件的修复率, a^{-1} 。

4) 年供热不足时间 T_y

热用户平均每年在供暖期内处于供热不足状态的总时间。计算式如下:

$$T_y = 8760 \sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i}{\mu_i} \quad (4)$$

式中 8760 为换算系数, h/a。

T_y 值越大,系统对热用户的供热越不可靠。

5) 供热不足持续时间 τ_y

热用户在供暖期内,平均每次从供热不足开始到恢复正常供热的时间。计算式如下:

$$\tau_y = \frac{T_y}{\lambda_y} = \frac{8760 \sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i}{\mu_i}}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} \quad (5)$$

该值在一定程度上说明故障的修复类型,在有备用元件或设备的情况下,停热后修复时间越短,该值也就越小。

6) 供热不足率 $\Delta \dot{Q}_y$

热用户在供暖期内,平均每次处于供热不足状态时的供热不足量与实际热负荷之比。计算式如下:

$$\Delta \dot{Q}_y = \frac{\sum_{i=1}^m \Delta Q_{yi} \lambda_i}{\sum_{i=1}^m Q_{yi} \lambda_i} = \frac{\sum_{i=1}^m \Delta G_{yi} \lambda_i}{G_{y0} \sum_{i=1}^m \lambda_i} \quad (6)$$

式中 ΔQ_{yi} ——由第 i 个元件故障造成的热用户供热量与实际热负荷的差额, kW;

Q_{yi} ——第 i 个元件发生故障时热用户的实际热负荷, kW;

ΔG_{yi} ——由第 i 个元件故障造成的热用户流量与设计流量的差额, t/h;

G_{y0} ——热用户的设计流量, t/h。

7) 供热率 E_y

热用户在供暖期内,所有状态下总供热量与实际热负荷之比。计算式如下:

$$\begin{aligned} E_y &= \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i}{\mu_i}} + \sum_{i=1}^m \left(1 - \frac{\Delta Q_{yi}}{Q_{yi}}\right) \frac{\lambda_i}{\mu_i \left(1 + \sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i}{\mu_i}\right)} \\ &= \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i}{\mu_i}} + \sum_{i=1}^m \left(1 - \frac{\Delta G_{yi}}{G_{y0}}\right) \frac{\lambda_i}{\mu_i \left(1 + \sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i}{\mu_i}\right)} \end{aligned} \quad (7)$$

3.2 热网系统可靠性指标

热网系统故障的判据为:系统中一个或多个热用户处于供热不足状态。即热网系统正常状态的判据是所有热用户均能保证最低供热量。

采用下面的可靠性指标来评估热网系统,它们从不同侧面反映了整个系统的可靠程度。

1) 系统故障率 λ_x

热网系统平均每年在供暖期内的故障次数。计算式如下:

$$\lambda_x = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (8)$$

式中 n ——导致热网系统发生故障的元件总数。

2) 系统稳态可用度 A_{x0}

系统正常供热总时间与要求的总供热时间之比。计算式如下：

$$A_{x0} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}} \tag{9}$$

热网系统的可用度是可修复热网的一种可靠性测度，它与热网元件的可靠性、可维修性和维修保障(后勤支援)等综合状态相联系，不仅与热网故障概率有关，而且与热网修复概率有关。

3) 系统年故障时间 T_x

热网系统每年在供暖期内处于故障状态的总时间。计算式如下：

$$T_x = 8\,760 \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i} \tag{10}$$

4) 系统年供热不足量 Q_x

热网系统每年在供暖期内因故障而导致的供热不足量。计算式如下：

$$Q_x = 0.003\,6 \sum_{i=1}^{N_u} \Delta \dot{Q}_{yi} Q_{0i} T_{yi} \tag{11}$$

式中 N_u ——系统中的热用户总数；

- $\Delta \dot{Q}_{yi}$ ——第 i 个热用户的供热不足率；
- Q_{0i} ——第 i 个热用户的设计热负荷，kW；
- T_{yi} ——第 i 个热用户的年供热不足时间，h/a。

5) 系统供热率 E_x

热网系统在供暖期内，所有状态下总供热量与实际热负荷之比。计算式如下：

$$\begin{aligned} E_x &= \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}} + \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{\Delta Q_i}{Q_i}\right) \frac{\lambda_i}{\mu_i \left(1 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}\right)} \\ &= \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}} + \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{\Delta G_i}{G_0}\right) \frac{\lambda_i}{\mu_i \left(1 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}\right)} \end{aligned} \tag{12}$$

- 式中 ΔQ_i ——由第 i 个元件故障造成的热网系统供热量与实际热负荷的差额，kW；
- Q_i ——第 i 个元件发生故障时热网系统的实际热负荷，kW；
- ΔG_i ——由第 i 个元件故障造成的所有处于供热不足状态的热用户流量与设计流量差额的总和，t/h；

G_0 ——热网系统的设计流量，t/h。

4 应用实例

4.1 工程简介

某集中供热系统预期总供热面积为 763 万 m^2 ，供热能力为 547.7 MW，由 3 个热源联合供热，一级网平面管网形成四环，向 92 个热力站输送热量，平面示意图见图 2。管网中管径大于等于 DN200 的管道总长为 74.8 km，全网共设置阀门 57 对、补偿

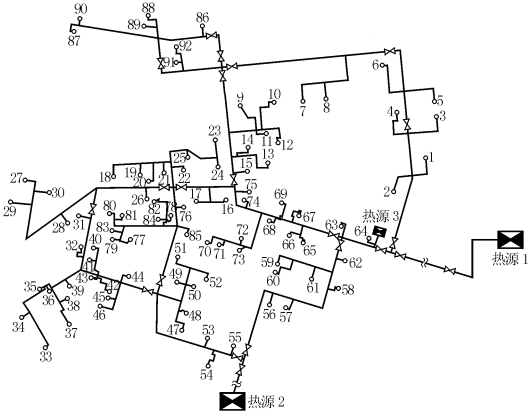


图 2 某热网平面示意图

器 207 对。该地区供暖期为 179 d，所以供暖期延续时间 $\tau=179\text{ d}/(365\text{ d/a})=0.49\text{ a}$ 。根据该地区的室外计算温度，从文献[5]查得热用户供热不足判据为：热用户流量小于正常工况流量的 65%。元件的故障率和修复率数据由笔者对国内四个城市热网进行故障调查和统计得到，见表 1。

表 1 热网元件故障率和修复率

	故障率/a ⁻¹	修复率/a ⁻¹
管道	0.095 3	580
阀门	0.033 6	650
补偿器	0.004 6	804

由于本实例可靠性评估只针对该一级网，热力站即为网络的终端用户，以下称之为热用户。

4.2 计算结果

采用本文介绍的方法，对该集中供热一级网进行热用户供热可靠性指标和热网系统可靠性指标计算，结果如图 3、表 2 和表 3 所示。

表 2 热用户供热可靠性指标均值

供热可靠性指标	均值
年供热不足频率/a ⁻¹	1.81
可靠度	0.46
可用度	0.997 1
年供热不足时间/(h/a)	25.1
供热不足持续时间/h	13.8
供热率	0.998 0
供热不足率	0.75

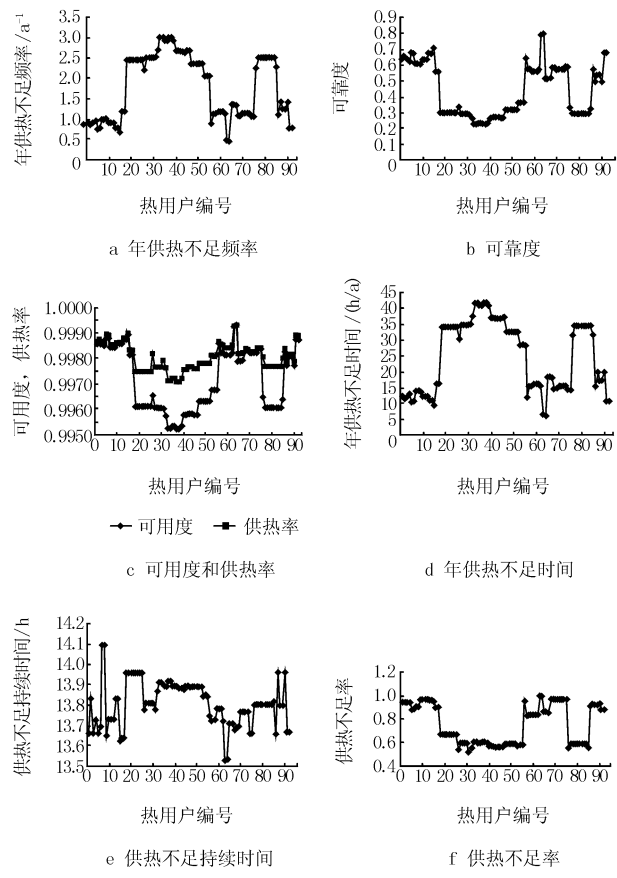


图 3 热用户供热可靠性指标

表 3 热网系统可靠性指标

可靠性指标	数值
系统故障率/a ⁻¹	12.06
系统稳态可用度	0.981 1
系统年故障时间/(h/a)	168.8
系统年供热不足量/(GJ/a)	33 787.5
系统供热率	0.998 1

4.3 结果分析

从图 3 可以看出,各热用户间供热可靠性指标值差别较大,热用户 33~39 的年供热不足频率最高,即最不可靠,年供热不足时间高达 40 h/a 以上。这是由于这些热用户所在的支干线与环线连接处是管网正常工况的水力交汇点。而当管网处于故障工况时,此处容易成为“瓶颈”。且从该工程的设计数据看,该交汇点附近的环线管径确实偏小,为 DN300~DN500,而另外两个大环的环线管径均在 DN600 以上。热用户 63 和 64 的年供热不足频率最低,可靠度最高,这是由于这两个热用户与热源 1 和热源 3 的交汇点距离很近,而且导致其中断供热的元件故障很少。

可靠度偏低的热用户为 18~55 和 76~85,这

些热用户均分布在管网平面示意图的左下区域,为负荷密集区,且环线管径偏小,因此该区域水力工况紧张。

供热不足持续时间最长的热用户是 7 和 8,为 14.1 h,这是由于导致这两个热用户供热不足的元件中管道占有较大比重,而管道的修复率比阀门和补偿器低。

虽然有些热用户的可靠度很低(小于 0.4),但故障后很快就可以通过维修恢复到正常工作状态,其可用度数值还是很高的。可靠度指标仅反映了修复—故障的过程,而可用度指标综合反映了修复—故障—修复的全过程。

从图 3c 中可以看出,各热用户供热率均大于或等于可用度,而热用户 18~55,76~85 两者之间差别较大,说明这些热用户供热不足状态有很大一部分不是完全中断供热,而是供热量不满足限额供热要求,再次表明了该区域水力工况较紧张。因此,该区域即为热网系统的薄弱环节,系统改造时应首先考虑扩大该环线的管道管径。找到了热网系统的薄弱环节并加以改善,系统抵御故障的能力会增强,从而使某些热用户受元件故障的影响减小,整个系统的可靠性提高。

5 结语

基于故障影响分析的方法,将元件故障概率与热网故障工况水力分析相结合,采用可修复系统可靠性模型计算了热用户供热可靠性和热网系统可靠性的多项指标。该方法为不同热网系统之间的可靠性对比和同一系统各热用户供热可靠性的对比提供了有效手段;采用该方法可方便地找出热网系统的薄弱环节,从而找到提高可靠性的途径。

参考文献

[1] Ионин А. А. Надёжность систем тепловых сетей [М]. Москва:Стройиздат,1989

[2] 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

[3] 战泰文,邹平华. 热水供热系统备用水平的确定[J]. 暖通空调,1999,29(1):20-22

[4] 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

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

[6] 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