

# 集中供热管网可靠性评价方法的研究<sup>\*</sup>

哈尔滨工业大学 王威<sup>☆</sup> 屈月月

**摘要** 采用层次分析法确定了热网可靠性影响因素的层次关系,用敏感性分析法对各评价指标权重进行了计算,应用神经网络法对各指标值进行规范化预处理,建立了供热管网指标综合评价期望值体系。

**关键词** 热网可靠性 集中供热 评价指标 评价方法 敏感性分析 层次分析法

## Study on evaluation method of heating network reliability

By Wang Wei<sup>★</sup> and Qu Yueyue

**Abstract** Determines the hierarchical relation of the influencing factors of the heating network reliability by means of analytic hierarchy process. Calculates the weight coefficients of evaluation index using sensitivity analysis. Applies the neural network method to standardized preprocess for each evaluation index value. Establishes the expectation value system of the comprehensive evaluation on the heating network.

**Keywords** heating network reliability, central heating, evaluation index, evaluation method, sensitivity analysis, analytic hierarchy process

★ Harbin Institute of Technology, Harbin, China

①

### 0 引言

国内外对热网可靠性的研究已有相当长的时间,在可靠性指标研究方面也取得了一系列研究成果,但并没有形成一套实际可行的评价方法体系。尤其是随着社会供热需求的增加、人们对热网系统供热质量要求的提高以及热网规模与管网复杂度的增大,对热网可靠性评价方法的研究显得更为重要。建立供热管网可靠性综合评价体系具有广泛的应用前景和长远的社会意义,它不仅可以用来评价供热管网的可靠性,还可以用来分析影响热网可靠性的因素及该因素对热网可靠性的影响程度,找出热网系统运行中的薄弱环节,为提出改进热网可靠性运营的措施提供理论指导。

供热管网可靠性评价涉及概率论、随机过程理论和决策论等多个研究领域,是一个系统工程。确定影响可靠性诸因素之间的层次关系,具有明确的量化指标是一个完善的评价体系必备的条件。

### 1 评价指标的建立

总结分析供热系统可靠性评价指标以及现有可靠性研究成果,不难发现影响热网可靠性的因素

有很多,如热网系统的形式(枝状管网、环状管网)、枝状管网的管径、环状管网的规模及环数、无备用支线的最大管径、限额供热系数、管道故障维修时间、阀门的设置位置和数量、建筑物热储备系数、热用户室内温度要求等<sup>[1]</sup>。总结这些指标可以看出其中一些是在管网的结构形式上影响供热的可靠性的,而另外一些是从供热质量方面影响可靠性的。通过层次分析,本文将这些指标综合归入两个基本指标中:一是热网无故障工作概率指标  $R_i$ ;二是室内最低允许温度  $t_{n,m}$ 。

热用户室内最低允许温度与热网的限额供热系数、热网的室外计算温度、限额供热持续时间(该因素与热网中无备用最大管径密切相关)、热用户建筑物热储备系数有关,是对故障工况下热网满足热用户需热量能力强弱的反映;热网无故障工作概率指标是指热网系统在供暖周期内系统各元部件完好工作的概率<sup>[2]</sup>,受热网系统中元部件的故障流参数、供暖期长短、管网结构形式、元部件故障引起

①☆ 王威,女,1968年7月生,博士,副教授  
150090 哈尔滨工业大学第二校区 2651 信箱  
(0) 13303606306  
E-mail: ww\_jc@163.com  
收稿日期:2013-11-05

\* 国家“十二五”科技支撑计划资助课题“东北严寒地区建筑节能关键技术研究”与示范”(编号:2011BAJ05B04)第四子课题“大型集中供热管网提高可靠性关键技术研究”

的不可靠性投入以及热网系统总设计热负荷等因素的影响。根据室内最低允许温度和热网无故障工作概率指标,运用层次分析法,在上述影响可靠性的因素中将热网的运行数据和运行记录、热网的结构形式及热用户资料等原始数据作为基本指标的基础指标,得到供热管网可靠性评价的基本框架,如图1所示。

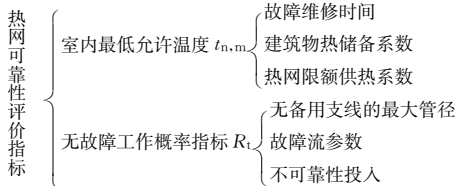


图1 供热管网可靠性评价指标框架

建筑物热储备系数反映了建筑储热能力的大小,也是影响热网可靠性指标的基础因素之一,对变工况下的房间内温度变化规律有直接影响,它等于热容量与建筑物的单位温差热流率之比,常以小时(h)为单位。而限额供热系数是指在故障工况下,热网系统所能提供给热用户的供热量与热网设计工况下热用户计算热负荷的比值,通常用 $\beta$ 来表示。

## 2 评价准则的建立

热网可靠性评价要以科学性、系统性、通用可比性、实用性和目标导向性为原则。评价的目的不是单纯地评出对象的名次及优劣情况,更重要的是引导和鼓励评价对象向正确的或者更优的方向和目标发展。本文依据基础指标的好、中、差、极差4种情况,将热网可靠性指标划分为I, II, III, IV共4个等级,并以此作为分级标准。

### 2.1 综合指标中权重系数的确定

热网可靠性评价研究属于多指标综合评价问题。指标权重作为衡量多目标决策中各评价指标的重要参数,可反映该指标在总目标决策中的相对作用和重要性。它的合理与否不但直接影响到综合评价的结果,而且影响多目标优化决策的效果,是评价工作的基础和前提<sup>[3]</sup>。

在目前的目标决策优化过程中,常用的专家评分法、层次分析法或成对比较法在计算指标权重的过程中都融入了太多决策者的主观思想,这样会使得评价结果受决策者的知识水平及能力等个人因素的影响过大。由于热网可靠性研究水平的限制,采用专家打分计算指标权重是有局限性的,所以采用这类方法来研究热网可靠性指标的权重,得到的

评价结果很难客观地反映热网的实际状况,更难以对实际热网可靠运行体现出指导作用。

本文引入常用于经济性分析中的敏感性分析法来计算热网可靠性指标体系中各指标的权重。该方法在计算指标权重时严格遵循指标与目标函数间的数学关系,能够客观地体现指标对目标函数的贡献大小。另外,决策者可以通过调整权重在一定程度上附加自己的主观要求。

运用敏感性分析法确定热网可靠性各指标权重时,首先要对各评价指标的敏感度进行计算,敏感度的大小体现了各基础指标对基本指标的影响程度。敏感度小的指标对可靠性的影响较小,所以其权重也较小;反之亦然。敏感度大的指标在优化中应重点对待<sup>[4]</sup>。然后将计算中所涉及的所有指标作为一个整体,对已求出的指标敏感度进行归一化处理,即可得到各指标的权重。最后可以根据决策者的相关要求对得出的权重进行微调,完成热网可靠性评判指标权重的计算<sup>[5]</sup>。

### 2.2 数据的规范化处理

综合评价期望值是指影响热网可靠性的各个指标加权求和的最终值,反映了各影响因素综合作用下热网可靠性的高低;也是用来评判某热网系统可靠性好与差的比较值。由于本文指标体系中的各指标具有不同的量纲,不能直接对其进行加权处理得到各级别指标的综合评价期望值,所以,必须先对指标体系中的原始数据进行量纲处理或者规范化处理<sup>[6]</sup>。利用神经网络法对项目进行评价时,首先是将该项目的评价指标值及评价期望值进行规范化处理,使其具有相同的属性,并转化到 $[0, 1]$ 区间内。与传统的处理方法相比,避免了通过专家对各评价指标打分来实现评价体系的规范化方法中的缺陷,使得评价结果与热网可靠性评价体系相一致,更加符合客观实际。

## 3 评价方法

### 3.1 供热管网可靠性评价指标等级的划分

#### 3.1.1 基本指标

室内最低允许温度 $t_{n,m}$ 决定热网系统故障时室内的供热质量,同时它也体现了热网建设的经济性。故障时室内最低允许温度越高,供暖室内供热质量越能得到保证,则要求限额供热系数越大,初投资及运行费用也会随之增加。如果室内最低允许温度取值较低,虽然可以降低投资成本,增加故障维修时

间,但却以牺牲人的舒适性为代价。所以,对住宅、公共建筑在设定室内最低允许温度值时必须综合考虑这两方面的因素,应在确保人的舒适度的前提下尽可能降低投资。已有研究表明,在室内温度低于 10~12℃时,处于这样环境中的人会有明显的不舒适感。而俄罗斯提出居住建筑在故障期间限额供热房间的室内最低允许温度为 12℃,故障期间停止供热的房间室内最低允许温度为 10℃。

由上述分析可知,可靠的供热系统能保证故障期间室内最低允许温度在 12℃,而当室内温度降低到 10℃以下时,则认为该热网系统是不可靠的。当管网故障室内最低温度降到 10~12℃之间时,认为该热网能满足用户的基本供热需求。据此将室内最低温度 10~12℃区间划分为 4 个等级,用以评价管网系统的可靠性水平。12℃是能满足用户需求的基准值,故以此作为第 I 级,每间隔 0.5℃为一个区间。

供热管网无故障工作概率指标是衡量供热管网可靠性的一个非常重要的指标,在俄罗斯 CHиП 41-02—2003《热力网设计规范》中规定了供热管网系统的无故障工作概率指标的最小允许值为 0.90,即为无故障工作概率指标的基准值。由于目前还没有该指标可靠性评价等级划分的权威值,本文暂定以每间隔 0.02 为一个等级区间将其划分为 4 个等级,分别定义为好、中、差、极差。

基本指标的等级划分列于表 1 中。

表 1 基本指标的等级划分

	I	II	III	IV
室内最低允许温度 $t_{n,m}/\text{C}$	12	11.5	11	10.5
无故障工作概率指标 $R_i$	0.90	0.88	0.86	0.84

### 3.1.2 基础指标

在评价室内最低允许温度时参考变量为故障维修时间、建筑物热储备系数、限额供热系数。其中故障维修时间的基准值(即 I 级指标,下同)是根据前苏联管道维修时间与管径研究结果分析拟合出的关系式针对不同管径分别给出的,见表 2。目前国内尚缺少此项数据,待今后进一步深入研究,采用我国的供热管道故障维修时间统计数据则更加符合我国的国情。

表 2 供热管道故障维修时间  $\tau$  基准值 h

基准值	公称直径/mm						
	300	400	500	600	700	800~1 000	1 200~1 400
	15	18	22	26	29	40	≤54

建筑物热储备系数的基础值则是根据我国建筑

气候区划标准<sup>[7]</sup>,将供暖地区的室外计算温度划分出 4 个区间,并以此界定 4 个温度区间供暖地区具有代表性建筑围护结构的热储备系数的基准值,见表 3。

表 3 不同室外温度的建筑物热储备系数  $X$  基准值 h

基准值	供暖室外计算温度 $t_{w,j}/\text{C}$			
	-10	-20	-30	-40
	40	40	40	55

本文中限额供热系数的基准值以俄罗斯 CHиП 41-02—2003《热力网设计规范》为准,见表 4。

表 4 不同管径、不同室外计算温度下的限额供热系数基准值

管径/mm	故障维修时间 $\tau/\text{h}$	限额供热系数 $\beta$			
		$t_{w,j}/\text{C}$			
		-10	-20	-30	-40
300	15	0.32	0.50	0.60	0.59
400	18	0.41	0.56	0.65	0.63
500	22	0.49	0.63	0.70	0.69
600	26	0.52	0.68	0.75	0.73
700	29	0.59	0.70	0.76	0.75
800~1 000	40	0.66	0.75	0.80	0.79
1 200~1 400	≤54	0.71	0.79	0.83	0.82

由于上述基础指标与基本指标——室内最低允许温度  $t_{n,m}$  有严格的数学关系式,如式(1)所示,故上述各基础指标的等级划分是对应室内最低允许温度来进行的。例如当确定故障维修时间  $\tau$  的等级划分时,其他基础指标基准值保持不变,将室内最低允许温度的 II, III, IV 级指标值代入式(1),求得故障维修时间的 II, III, IV 级指标值,由此保证各指标的一致等比关系。

$$t_{n,m} = t_{w,j} + (t_n - t_{w,j})e^{-\frac{\tau}{\lambda}} + \beta(t_n - t_{w,j})(1 - e^{-\frac{\tau}{\lambda}}) \quad (1)$$

式中  $t_n$  为故障发生时的室内温度。

以 300 mm 管径为例,基础指标等级划分结果如表 5 所示。并以此类推至管径 1 200~1 400 mm。

现阶段热网可靠性的研究结果完成了热网无故障概率指标计算程序的编写,该基本指标的层次分析尚未完成,本文直接将计算结果划分等级。

### 3.2 指标的权重计算

在对影响室内最低允许温度指标的各指标进行敏感性分析时,仍以无备用最大管径为 300 mm 的供热管网系统为例进行计算,则各指标基准值的设定见表 5,指标变化率分别取 -5%, -10%, -15%。有关敏感性分析法计算指标权重的计算过程不在此叙述。计算得到不同室外计算温度下各基础指标的权重结果,如表 6 所示。

表 5 供热管道故障维修时间  $\tau$ 、建筑物热储备系数及  
限额供热系数的等级划分

	指标等级				
	I	II	III	IV	
室内最低允许温度 $t_{n,m}/\text{C}$	12	11.5	11	10.5	
故障维修时间 $\tau/\text{h}$	15	17	18	20	
建筑物热储 备系数 $\chi/\text{h}$	室外计算温度 $\geq -30\text{ C}$	40	36	33	30
	室外计算温度 $-40\text{ C}$	55	50	46	42
限额供热系 数 $\beta$	室外计算温度 $-10\text{ C}$	0.32	0.26	0.20	0.14
	室外计算温度 $-20\text{ C}$	0.50	0.45	0.41	0.37
	室外计算温度 $-30\text{ C}$	0.60	0.57	0.53	0.50
	室外计算温度 $-40\text{ C}$	0.59	0.53	0.49	0.46

表 6 不同室外计算温度下各指标权重计算结果

	故障修复 时间	建筑物蓄 热系数	限额供热 系数
室外计算温度 $-10\text{ C}$	0.37	0.41	0.22
室外计算温度 $-20\text{ C}$	0.30	0.33	0.37
室外计算温度 $-30\text{ C}$	0.25	0.28	0.47
室外计算温度 $-40\text{ C}$	0.27	0.29	0.44

管网无故障工作概率指标与故障时室内最低允许温度指标是热网可靠性评价体系中的基本指

$$0.2 \leq \frac{1}{\exp\left[0.1053 + \frac{(1.609 - 0.1053)(x_{\max} - x)}{x_{\max} - x_{\min}}\right]} \leq 0.9 \quad (2)$$

$$0.2 \leq \frac{1}{\exp\left[0.1053 + \frac{(1.609 - 0.1053)(x - x_{\min})}{x_{\max} - x_{\min}}\right]} \leq 0.9 \quad (3)$$

为保证各指标对热网可靠性的作用具有一致性和可比性,对于与可靠性指标成正比的指标,采用式(4)计算;与可靠性指标成反比的指标,采用式(5)计算,其计算结果可直接进行加权求和。

$$x^* = \frac{1}{\exp\left[0.1053 + \frac{(1.609 - 0.1053)(x_{\max} - x)}{x_{\max} - x_{\min}}\right]} \quad (4)$$

$$x^* = \frac{1}{\exp\left[0.1053 + \frac{(1.609 - 0.1053)(x - x_{\min})}{x_{\max} - x_{\min}}\right]} \quad (5)$$

式(2)~(5)中  $x^*$  为指标经非线性转化后的数值; $x_{\max}$  为某指标原始数据中的最大值; $x_{\min}$  为某指标原始数据中的最小值; $x$  为待转化的数值。

对表 8 规范化处理后的每一级别的指标值对应表 7 中各归一化处理后的指标权重值进行加权求和,可得热网可靠性评价各级综合指标期望值,如表 9 所示。

对某一热网系统可靠性进行评价时,首先要根据相关的规定求出该热网系统各评价指标数值,然

标,在本文的研究中认为两者具有同等的重要性,也就是说,在评价供热管网系统可靠性时,这两个指标各占 0.5 的权重。

所以,经归一化处理后就得到系统最大管径为 300 mm 的供热管网可靠性评价指标体系中的各指标权重,结果见表 7。

表 7 管网系统可靠性评价各指标权重

	故障修复 时间	建筑物蓄 热系数	限额供 热系数	无故障工作 概率
室外计算温度 $-10\text{ C}$	0.19	0.20	0.11	
室外计算温度 $-20\text{ C}$	0.15	0.16	0.19	
室外计算温度 $-30\text{ C}$	0.12	0.14	0.24	0.50
室外计算温度 $-40\text{ C}$	0.13	0.15	0.22	

### 3.3 数据的规范化处理

本文通过以下步骤实现对表 5 中数据的非线性规范化处理。考虑数据处理的收敛性,将最终结果转化到  $[0.2, 0.9]$  区间内。由于  $\ln 0.2 = -1.609, \ln 0.9 = -0.1053$ ,可知:

表 8 规范化处理后的供热管网可靠性评价指标体系

	I	II	III	IV	
管道维修时间	0.900	0.551	0.337	0.200	
建筑物蓄热系数	室外计算温度 $\geq -30\text{ C}$	0.900	0.493	0.314	0.200
	室外计算温度 $-40\text{ C}$	0.900	0.505	0.318	0.200
限额供热系数	室外计算温度 $-10\text{ C}$	0.900	0.578	0.340	0.200
	室外计算温度 $-20\text{ C}$	0.900	0.505	0.318	0.200
	室外计算温度 $-30\text{ C}$	0.900	0.573	0.314	0.200
	室外计算温度 $-40\text{ C}$	0.900	0.521	0.302	0.200
无故障工作概率指标	0.900	0.545	0.330	0.200	

表 9 无备用最大管径为 300 mm 热网  
可靠性评价综合指标期望值

	综合指标期望值			
	I	II	III	IV
室外计算温度 $-10\text{ C}$	0.900	0.525	0.333	0.200
室外计算温度 $-20\text{ C}$	0.900	0.521	0.330	0.200
室外计算温度 $-30\text{ C}$	0.900	0.550	0.328	0.200
室外计算温度 $-40\text{ C}$	0.900	0.523	0.327	0.200

后将所求得的指标经式(4),(5)进行规范化处理,再将处理后的指标按表 7 中权重进行加权求和,该值即为这一热网可靠性评价的综合指标值。将该值与表 9 中(此表为无备用最大管径为 300 mm 的数据,其他规格未列出)的综合指标期望值相比较,评出该热网系统可靠性所在等级。

### 4 结语

(上接第 13 页)

本文初步提出了可靠性评价的方法和判据,在热网无故障概率指标的层次分析、热源与热用户的评价方法等方面尚待进一步完善。

### 参考文献:

- [1] 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
- [2] Ионин А А. Надёжность систем тепловых сетей [M]. Стройиздат,1989
- [3] 李冬梅,明世祥,张文哲,等. 基于敏感分析的评判指标权重确定方法及应用研究[J]. 金属矿山,2007

(8): 163-165

- [4] Gama J. Iterative bayes. Theoretical computer science[J]. 2003,292(2):417-430
- [5] Stephen Lumby, Claris Jones. Fundamentals of investment appraisal[M]. Thomson Learning,2001: 241-245
- [6] 孙会君,王新华. 应用人工神经网络确定评价指标的权重[J]. 山东科技大学学报,2001,20(3):84-86
- [7] 中国建筑科学研究院. GB 50178—93 建筑气候区划标准[S]. 北京:中国计划出版社,1993