

结构备用与输送能力备用—— 提高供热管网可靠性的基本途径^{*}

哈尔滨工业大学 周志刚[☆] 邹平华 王 芃 王 威

摘要 介绍了供热系统可靠性评价关键指标、无故障工作概率和限额供热系数的计算方法与评价标准。基于可靠性分析理论和方法分析了哈尔滨市某实际供热管网的改扩建方案。结果表明,设计阶段通过合理增加连通管、调整管线路由以及扩径等手段,可以有效提升供热系统结构备用与输送能力备用特性;发生事故时通过合理关阀等手段对未停止供热用户实现限额供热,可以有效减少和控制停止供热用户的范围。

关键词 供热系统 结构备用 输送能力备用 无故障工作概率 限额供热系数

Structure and transportation ability reservations—Basic ways to improve the reliability of heating pipe network

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

Abstract Presents the calculation method and evaluation standard for key index of reliability evaluation, probability of failure-free operation and limit heating coefficient for heating system. Analyses the reconstruction and expansion scheme of an actual heating pipe network in Harbin based on reliability analysis theory and method. The results show that it can improve the structure and transportation ability reservation characteristics of heating system by reasonably adding crossover pipe, adjusting pipe route and expanding pipe diameter in design process; and that it can effectively reduce and control the range of turned off heating users by reasonably closing valves and so on, to provide limited heat for not turned off heating users when fault occurs.

Keywords heating system, structure reservation, transportation ability reservation, probability of failure-free operation, limit heating coefficient

★ Harbin Institute of Technology, Harbin, China

①

0 引言

近年来,我国集中供热系统发展迅速,供热管网规模不断增大,供热半径相应增大。一些大型供热系统的供热半径已达到几十 km,供热面积达到几千万 m²,管道的最大公称直径达到 1 400 mm,当前甚至在倡导生产直径更大的直埋管道。

集中供热系统的整体技术水平不断提高,但从供热可靠性角度看,供热系统在设计、施工和运行管理各个环节还存在许多问题,使得供热系统的事事故率和发生事故的潜在隐患随之增长。供热事故屡有发生。2012 年 11 月 30 日到 12 月 1 日 2 天时间内在哈尔滨、石家庄和济南 3 个省会城市发生的

严重事故延续多日,造成了重大损失和不良影响,再一次给我们敲响警钟。这些事故表明,对供热可靠性给予更多的重视和投入是非常重要的,提高供热可靠性是一项摆在我们面前的迫切任务。

1 从可靠性角度分析集中供热系统的特点

集中供热系统是一个庞大的能源供应系统,与其他能源供应系统不完全相同。从可靠性角度看,集中供热系统有以下特点:

1) 集中供热系统是一个复杂的、庞大的工程技术系统。主干线管长甚至达到几十 km,连接成

①☆ 周志刚,男,1978 年 9 月生,博士,副教授
150090 哈尔滨市黄河路哈工大二学区 2651 号
(0451) 86283342
E-mail: hit_zzg@163.com
收稿日期:2013-11-05

* 国家自然科学基金资助项目(编号:51208158),国家“十二五”科技支撑计划课题(编号:2011BAJ051304)

千上万个元件和众多用户。如果不采取措施,任何一个部件损坏,都可能导致大面积用户的供热故障或事故。

2) 集中供热系统是一个空间系统。管网布置在城市或城市的一部分,管线随地形延绵起伏。分布空间涉及一个很大的区域,沿线各类因素变化多,实时监控控制困难,随时可能有不利因素产生。

3) 集中供热系统是一个信息量不足、不全的系统。不同管网系统可能建造在不同的年代,管道所经过的地方的地下设施信息缺损。元部件故障和发生事故随机量的分布规律信息不全,只能借助其他供热系统的信息、数据和资料来估计。

4) 集中供热系统能否正常运行不仅取决于自身,而且与周围环境(道路、土壤、其他管线、城市其他因素等)有关。其中有一些因素难于或不能完全预料。

5) 供热管线是城市的生命线,长时间停止供热将给人民的身体健康和社会生活带来重大影响,给国家和企业带来重大财产损失。另外,由于热用户系统——建筑物有热惰性,故允许发生事故时短时间降低供热水平。

6) 集中供热系统是一个对源的稳定性要求比供电系统低的系统。供电设备电压降低时,可能不能工作,因此要求电源稳定、电压稳定。而供热系统的换热设备在水压降低时还可以工作,只是换热量会减少。因此供热系统有不允许发生事故时长时间停止供热和允许短时间降低供热水平两大特点,供热管网不仅可以采用备用,而且可以采用与其他管网不同的备用方法来应对事故和减小损失。

上述特点决定供热系统的安全可靠运行取决于一系列可见和不可见的因素。一方面,供热系统发生事故是自然现象,完全杜绝事故是不可能的。发生供热事故是不能准确预料的随机事件。如果能够准确预报某时、某地会发生供热事故,人们就可以事先采取措施来预防和阻止其发生。供热系统的事故要用随机事件的规律来研究。另一方面,研究事故规律,采取措施增加可靠性,可以减少事故发生的次数和控制其影响范围。采用结构备用与输送能力备用是提高供热管网可靠性的基本途径。

2 供热管网的结构备用

供热系统的各组成部分按可靠性分为不同的级别。热源和供热管网干线的可靠性为高级;各支

干线或支线为低级。对不同级别管线赋予不同的可靠性,可以降低供热管网的总投资。对供热管线系统高可靠性级别的干线赋予备用性能,可以在发生事故时控制影响范围,最大程度地减少损失;对低可靠性级别的支干线或支线可以不赋予备用性能,但要保证发生故障时,不会造成整个系统出现事故和导致大面积用户受损。因此要限制无备用管网的规模。

供热管网的结构备用可以采用设置环形干线(见图1)、连通管(见图2)和三管制(见图3)等措施来实现。

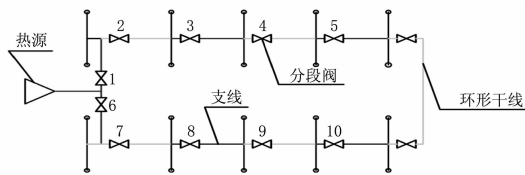


图1 环形供热管网

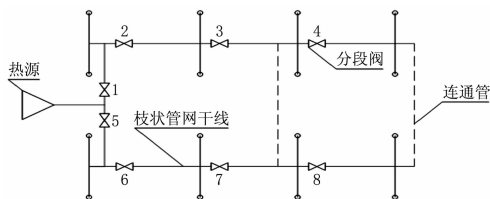


图2 附加连通管的供热管网

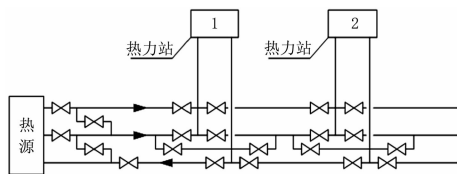


图3 三管制(两供一回)供热管网

设计大型供热管网首先应考虑采用环形管网。为了减少初投资,在建设初期可以先建成枝状管网,但管径要按满足规划期的热负荷进行计算,为远期实现环形管网打下基础,以避免重复建设和减少建成期的总投资。

提高枝状管网可靠性,可采用附加连通管的措施。连通管使枝状管网局部构成环形。连通管的位置和数量不同,可靠性指标和为此增加的费用不同,应进行优化以确立方案。

对于特别重要的管线或既有管网的改造可采用三管制管线。三管制可分为两供一回或一供两回。国外的统计资料显示,供水管比回水管事故率高,采用两供一回式的三管制更有利于减少事故的发生。

供热管网的可靠性评价和计算方法与其他管道系统有重大区别。无论正常工况还是事故工况,评价供热系统的工作质量不能仅用流量,还要用供热量来考量。供热管网事故工况评价要用功能质量指标来评价。它等于各状态供热量的数学期望与设计工况供热量的比值——无故障工作概率指标 $R(t)$ 。无故障工作概率指标 $R(t)$ 采用式(1)计算^[1-2]。

$$R(t) = \frac{\overline{Q}(t)}{Q_0} = 1 - \sum_{j=1}^l \frac{\Delta Q_j}{Q_0} \frac{\omega_j}{\sum \omega_i} (1 - e^{-\sum \omega_i t}) \tag{1}$$

式中 $\overline{Q}(t)$ 为各状态供热量的数学期望,MW; Q_0 为完好状态供热量(完好状态系统功能质量特征函数),MW; ΔQ_j 为故障状态供热量不足量(故障状态系统功能质量特征函数),MW; ω_i 为元件故障流参数, a^{-1} ; t 为时间间隔,a。

我国《城镇供热管网设计规范》没有关于供热可靠性的明确规定。俄罗斯现行供热管网设计规范规定供热管网无故障工作概率指标 $R(t)$ 是供热管网的主要可靠性指标之一,其数值不得小于 0.9,可以借鉴^[3]。如按式(1)计算, $R(t) \geq 0.9$,可认为供热管网的结构备用达到要求。如 $R(t) < 0.9$,则应调整环形管网和分段阀的设置或者调整连通管和分段阀的设置,重新计算,直至 $R(t)$ 满足要求为止。

3 供热管网的输送能力备用

结构备用是提高供热管网可靠性的重要措施,实施输送能力备用是充分发挥结构备用的必要条件。环形管网在事故工况下可以利用分段阀关断事故管段,改变部分管段的流向,从而重新分配流量。可以设想,如果环形干线某一段管道的管径很小,不能满足事故工况下流通能力的要求,环形管网就形同虚设。也就是具备结构备用的构架,而不具备输送能力备用,则达不到备用的目的。因此进行供热管网的输送能力备用计算是实现结构备用非常重要的步骤。

事故工况下热媒流通过程改变,如按 100%的设计流量来考虑备用,则干线的管径和管网系统的投资要增加很多(投资增加甚至达 50%),显然这是不可取的。由于建筑物具有蓄热性能,供热系统允许短时间降低供热水平,在发生事故时可以采取限额供热的策略来减少由于设置备用提高可靠性增加的费用。

限额供热依据限额供热系数(或限额流量系

数)来实现。限额供热系数是事故工况下的供热量与设计供热量的比值,用 K 表示^[1]。

$$K = \frac{Q_s}{Q_0} \tag{2}$$

式中 K 为限额供热系数; Q_s 为供热系统事故工况下的供热量,MW; Q_0 为供热系统设计供热量,MW。

最严重的事故通常发生在最冷天,因此限额供热系数用室外计算温度来规定。限额供热系数的数值除与室外计算温度有关之外,还与事故供热管道的管径和建筑物的热储备系数有关。我国没有限额供热系数的明确规定,可以暂时借鉴俄罗斯的研究成果和其现行热力网设计规范中的数值。如表 1 所示^[3]。

表 1 俄罗斯现行热力网设计规范中的

限额供热系数					%
管径/mm	室外计算温度/℃				
	—10	—20	—30	—40	—50
300	32	50	60	59	64
400	41	56	65	63	68
500	49	63	70	69	73
600	52	68	75	73	77
700	59	70	76	75	78
800~1 000	66	75	80	79	82
1 200~1 400	71	79	83	82	85

计算时根据限额供热系数算出限额流量系数^[1]。在进行输送能力备用计算时,应计算各种事故工况来确定管网的管径。特别是要对最严重的事故工况进行计算。通过计算确定结构备用管网各部分的管径,对于新设计的管网甚至要调整管线的路由,对于既有管网要确定管路的连通位置或者扩径的数值。这是一项烦琐和工作量很大的工作,应由相关计算程序来完成。还必须指出的是,设置监控系统并实施科学合理的事事故工况调度与调节是实现事故工况下限额供热的条件。

4 设置备用在供热管网改扩建中的应用实例

基于可靠性分析理论和方法对哈尔滨市某实际供热管网的改扩建方案进行分析。

该供热管网承担哈尔滨市 2 个主要行政区的供热,是哈尔滨市较大的集中供热系统之一。供热管网现有热力站 207 个,供热面积 2 170 万 m²。包括热源厂一期、热源厂三期与华欣热电厂 3 个热源,地理位置上 3 个热源均集中在供热公司厂区内,其中热源厂一期与三期 2 个热源在厂内通过 DN1000 的连通管并联运行,华欣热电厂热源单独

运行。供热管网由南线、北线与华欣线 3 条大干线组成。供热管网连通示意图见图 4。

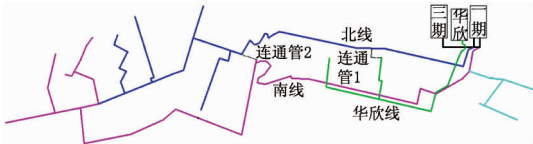


图 4 供热管网连通示意图

该供热管网地处城市繁华区域,管网穿过主要街道,负荷密度较大,且管网所处区域地理环境复杂,地下水位较高、腐蚀性强,一旦发生事故将增加事故损失与维修难度。基于以上原因,利用哈尔滨工业大学开发的供热管网可靠性计算软件与水力工况仿真软件分别对该供热管网从结构备用与输送能力备用角度进行了分析计算,并在此基础上提出了改扩建方案。

4.1 供热管网结构备用与输送能力备用分析

由图 4 可知,供热管网在几何结构上呈狭长形,3 个热源均集中在管网的最东侧。虽然管网共有 3 处连通管,但在实际运行时,连通管 1 与连通管 2 上的阀门均处于关闭状态,整个供热系统分为 2 个独立运行的供热管网(华欣线和南北线),其中区域锅炉房供应华欣线的枝状管网,主干线长 2.4 km。热电厂一期、三期供应南线和北线,其干线长度超过 10 km,管网形式为环状管网。分别计算上述 2 条干线系统的无故障工作概率指标,计算结果如表 2 所示。

表 2 管网解列运行方案结构备用计算结果		
	华欣线系统	南线和北线系统
管网设计热负荷 Q_0 /MW	188.7	1 116.7
阀门总数/个	6	37
管线总长度/km	23.432	137.744
热用户总数	27	209
总故障流参数/ a^{-1}	2.36	16.56
无故障工作概率指标 $R(t)$	0.60	0.93

由表 2 可知,华欣线系统独立运行时为枝状管网,无故障工作概率指标值很小,该管线一旦发生事故,后果严重。开启连通管 1 与连通管 2 阀门后,供热系统将变为多热源联合供热系统,南线和北线与华欣线实现连通。此时,管网的无故障工作概率指标计算结果如表 3 所示。

可见,对于该供热管网,从提高结构备用性角度,事故工况条件下应该开启连通管 1 与连通管 2 阀门,实现供热管网联网运行。

由于实施输送能力备用是充分发挥结构备用的必要条件,因此即使从管网结构上系统联网运行

表 3 管网联网运行方案结构备用计算结果

南线和北线与华欣线联网系统	
管网设计热负荷 Q_0 /MW	1 305.4
阀门总数/个	45
管段总长度/km	161.176
热用户总数	236
总故障流参数/ a^{-1}	16.30
无故障工作概率指标 $R(t)$	0.94

时的可靠性指标值较大,在事故工况条件下能否实现限额供热还要对系统的输送能力备用进行校核,即计算各主干线出口发生故障时(最不利工况),热源循环水泵参数能实现的最大限额供热系数,校核能否满足限额供热要求。

供热管网输送能力校核计算结果如表 4 所示。

表 4 供热管网输送能力校核计算结果	
系统最大限额供热系数/%	
南线出口故障	50
北线出口故障	39
华欣线出口故障	38

如表 1 要求的限额供热系数,对于该热源出口管道管径 DN800~DN1000,应满足 80%的限额供热系数要求。根据表 4 结果可知,供热管网现有的输送备用能力无法满足该指标。

综上,从结构备用与输送能力备用两方面综合考虑,该供热管网无法在事故工况下满足要求的限额供热要求,系统整体可靠性较差。因此,规划供热管网改扩建方案必须经过可靠性分析计算,在满足供热管网规划负荷的前提下,兼顾提高系统的安全可靠性。

4.2 规划供热管网结构备用与输送能力备用分析

在可靠性分析计算的基础上,提出了供热管网改扩建方案。改扩建方案中,在现有热源基础上,在厂区附近新建一座 2 台 116 MW 的调峰锅炉房。厂区内热源内部原有连接关系不变,二期调峰热源通过 DN1000 的连通管与厂内热源系统连通,并从三期引出 1 条新建干线——长春线,从调峰锅炉房引出 1 条新建干线——陶瓷线。在确定长春线、陶瓷线路由时,利用原有支干线新增多条连通管路,以提高管网的结构备用性能,对华欣线连通管的管径进行了校核计算,提出了扩径方案。改造后的供热管网连通结构如图 5 所示。

与原供热管网相比,规划方案中管网形成了多个环路,管网总阻抗将明显减小。经水力工况计算得到,热源水泵扬程至少可降低 10 m 以上。在系统能耗降低的同时,南线与北线管道工作压力亦明

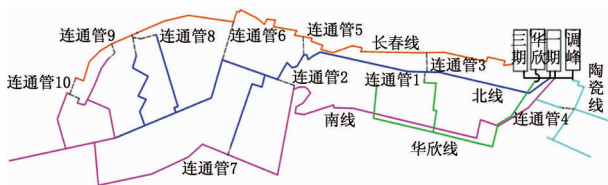


图 5 改造后的供热管网连通示意图

显降低,管道运行安全可靠性能随之增加。

规划方案供热管网无故障工作概率指标计算结果如表 5 所示。

表 5 规划供热管网联网运行方案结构备用计算结果

管网设计热负荷/MW	1 373.4	管段总长度/km	183.696
热用户总数	236	总故障流参数/ a^{-1}	18.62
阀门总数/个	63	无故障工作概率指标 $R(t)$	0.96

从计算结果可知,增加连通管等方案有效地增大了系统的无故障工作概率指标值;供热管网输送能力校核计算结果均达到或超过表 1 中的数值。

综上,在可靠性分析计算基础上,通过合理增加连通管、调整管线线路以及扩径等手段,该规划供热管网从结构备用与输送能力备用两方面均有

明显提升,在事故工况下可满足要求的限额供热要求,系统整体可靠性得到提高。

5 结语

采用结构备用与输送能力备用的供热管网,在发生事故时可以通过分段阀关断故障管段。这些措施可以有效地减少和控制停止供热用户的范围,对其余未停止供热用户实现限额供热。如抢修时间足够快,能在用户室内温度降低到不低于规定的最低允许温度(例如 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$)时恢复供热,能大大地降低和控制事故损失。采用结构备用与输送能力备用是供热管网提高可靠性的基本途径。

参考文献:

- [1] Ионин А. А. Надёжность систем тепловых сетей [М]. Москва: Стройиздат, 1989
- [2] Сеннова Е. В., Смирнов А. В., Ионинидр А. А. Надёжность систем теплоснабжение [М]. Новосибирск: “Наука” Сибирская издательская фирма РАН, 2000
- [3] СНиП 41 - 02—2003 Тепловые сеть [S]. Москва: Госстрой Р Ф, 2004