基于集中质-量调节的综合能源系统供能管网管径优化设计方法及系统经济性分析

管　霖[1],江泽涛[1],唐宗顺[1,2]
(1. 华南理工大学 电力学院,广东 广州 510641;2. 广州供电局有限公司,广东 广州 510620)

摘要：供能管网的投资和运行损耗对综合能源系统的工程可行性和经济性有重要的影响,因此提出了一套基于集中质-量调节运行模拟的综合能源系统供能管网管径优化设计方法。运行调节根据当前时刻负荷比最大的用户的负荷情况调节综合能源站的供水流量和温度,较好地贴近总负荷曲线;优化设计方法以等年值总投资最小为目标选择最优管径组合,综合考虑了系统初始投资和长期运行费用,提高了总体经济性。选择广州中新知识城某商住混合区作为算例,验证了所提方法的有效性,并分析了供能调节下的运行成本和综合能源系统供能半径对管网规划的影响。

关键词：综合能源系统；供能管网；集中质量-流量调节；管径优化设计；经济性分析
中图分类号：TM 761　　**文献标识码**：A　　DOI：10.16081/j.issn.1006-6047.2017.06.011

0　引言

面对当前日益严重的能源和环境问题,用户端的电/气/冷/热能源需求综合利用和控制已成为广泛关注的热点问题,也是实现能源互联网的重要环节[1-2]。耦合电、气、热网络的冷热电综合能源系统IES(Integrated Energy System)的优势主要体现在供能技术对能量的高效梯度使用和系统内能量流的优化调度。对于区域型 IES 的规划运行,其供能管网的投资和运行损耗是较大的组成部分,对整个系统的经济效益及投资可行性有显著影响。

目前,国内外对耦合多能源区域 IES 的建模及规划研究已有不少的成果。文献[3]综述了冷热电联供系统的优化运行和规划研究成果。文献[4]提出了综合供能站的两阶段规划方法,将长期运行模拟纳入规划环节。文献[5]用熵权法结合专家评价法,对综合能源站备选方案中各类设备对方案经济性及排放的影响进行评价。在综合能源站运行调节策略方面,2 种传统策略分别是以热定电 FTL(Following the Thermal Load)和以电定热 FEL(Following the Electric Load)[6]。为了更好地匹配负荷,减少运行费用和能量浪费,更多基于上述策略改进的混合运行策略[7-8],以及同时基于负荷预测和实时调节的运行策略[9-10]也被相继提出。

目前,绝大部分针对供冷、供热管网的建模、规划和运行调节研究是面向传统的大规模集中供暖进行的热损失分析和水力计算[11]。近年来,少数文献针对 IES 管网的规划和运行进行了研究[12-14]。文献[12]运用遗传算法优化了冷热传输网络的空间连接方式。文献[13]基于投资和运行费用最低进行区域供冷网整体优化。文献[14]以成本最低为目标进行了运行中的管网最优流量和供给温度优化。文献[15]考虑多个综合供能站间存在热网能量交互情境下的系统规划,但并未考虑实际供给负荷的配热网。由于实际工程中大规模的集中供暖或供冷系统根据气温进行供能调节,不考虑不同建筑类型负荷特性的差异,规划和调节方式都比较粗放,其模型对于新一代小规模、冷热联供的区域型 IES 并不适用。

综合来看,目前对于 IES 的研究主要集中于能源站的规划和运行,对于供能管网的运行和规划研究相对较少,尚未形成通用的、具有良好精细度的管网分析模型。而在实际工程中管网的建设和运行成本对综合供电系统的效益具有突出的影响。本文综合供热管网设计和运行相关成果,提出了适用于 IES 冷热联供运行优化和设计的管网分析模型,该模型基于集中质量-流量调节,可以实现每小时综合能源站出口热(冷)水温度和流量的优化调节。并通过长期运行模拟求解全年运行热(冷)损失和泵电耗费用,实现供能管网的优化运行和管径优化设计。

本文选择广州中新知识城的一个商住混合区的综合能源站优化问题进行了模型应用测试,以年运行费和等年值投资最低为目标,利用多种群遗传算法 MPGA(Multiple Population Genetic Algorithm)进行管径组合寻优,获得了最优 IES 管网方案,验证了模型的有效性;并根据供能调节下的管网运行数据,对比了 IES 供能半径对不同管径设计方案的影响。

收稿日期:2016-12-14;**修回日期**:2017-05-06
基金项目:国家自然科学基金重点项目(51437006)
Project supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China(51437006)

1 传统热网管径设计方法

目前区域IES的供能管网管径设计模型多参考传统集中供热管网建立。集中供热网管径计算方法如下。

a. 获得能源站位置、负荷位置、管网连接方式、负荷信息。

b. 计算每个用户节点 i 的设计流量：

$$G'_{qi}=Q'_{qi}/(c\,|T'_s-T'_r|) \tag{1}$$

其中，T'_s、T'_r 分别为系统设计供水、回水温度；c 为水的比热容；Q'_{qi} 为用户节点 i 的设计负荷，一般取最大负荷或考虑同时率的设计值。

c. 管网流量求解。对于枝状网络，忽略网络水损失，易由负荷设计流量确定管网所有管段设计流量。对于环状网络，以 G'_{qi} 为用户节点 i 流出流量，进行管径未知、忽略网络压降的管网初始流量分配，具体方法有均分法、最小平方和法、最短树法等。其中，考虑管段长度的最小平方和法根据管道损耗与流量的二次方成正比的关系，最小化各管段流量的平方和得到所有管段流量；同时，使初始流量分配尽量循最短路径供给用户。该方法应用较为广泛，可表示为二次优化问题：

$$\begin{cases}\min f=\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}\boldsymbol{G}\\ \text{s.t. } \boldsymbol{A}\boldsymbol{G}=\boldsymbol{G}'_q\end{cases} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{H}=\mathrm{diag}(L_1^h,L_2^h,\cdots,L_N^h) \tag{3}$$

其中，$\boldsymbol{A}$ 为供能管网节点-支路关联矩阵；$\boldsymbol{G}$ 为支路质量流量列向量；矩阵 $\boldsymbol{H}$ 为各管段长度 h 次方的对角阵；N 为管段总数。

d. 由每个管段的设计流量，根据经济比摩阻按照式(4)的计算结果在标准公称管径序列中上下归档来确定管径。工程中管径 D(单位为m)、比摩阻 R(单位为Pa/m)与流量 G(单位为t/h)的实用数学关系为[16]：

$$D=0.387k^{0.0476}G^{0.381}(\rho R)^{-0.19} \tag{4}$$

其中，k 为管壁当量粗糙度，一般取0.0005 m[17]；ρ 为热媒密度，单位为kg/m^3；R 为经济比摩阻，对于主干网一般取 R=30~70 Pa/m。

e. 进行实际水力计算，根据规程要求校核管径设计结果。

传统供热网管径设计方法存在一些不足：用于确定每段管径的经济比摩阻为工程经验值，对于不同管网建设场景及管网中运输热量不同的管段的取值缺乏普适性，同时也难以取得最优值；管网流量分配优化的目标较简单，仅考虑网络约束，难以得到使管网经济最优的网络流量分配；采用给定设计值的规划方法不考虑系统的运行调节，不能综合考虑管网投资和运行的总费用最优进行管径设计。

2 考虑供能调节的IES管网管径优化模型

综合工程实际和相关规程[17]，区域型IES的供能网络由于供能半径和负荷一般都较小，多使用热(冷)水作为供能介质。仅当水处理代价较低，且具有与生活热水热负荷相适应的易得低品位热源时选用开式网络。考虑适用性，本文的IES供能网络模型选用闭式双管热(冷)水网络。

本文针对传统管径设计方法的不足，提出了采用内嵌运行模拟的优化设计方法搜索最优管径，使年运行费用和管网投资等年值构成的等年值总费用达到最低。其中，对于每个给定待评估的管径组合进行运行模拟，应用能源站侧的集中质-量调节方法根据负荷比最大的负荷点的需求调节供水流量和温度2个运行变量，求解典型天每小时的管网运行电、热/冷损耗和运行费用。这样的优化设计方法避免了基于工程经验来确定管径，同时完善了管径设计的经济目标。

2.1 管径优化设计目标函数

以包含年运行费用和管网投资的等年值总费用最小作为管径优化目标：

$$\min C=C_{\mathrm{pipe}}+C_{\mathrm{heatloss}}+C_{\mathrm{pump}} \tag{5}$$

$$C_{\mathrm{pipe}}=\left[\frac{g_i(1+g_i)^m}{(1+g_i)^m-1}+\gamma\right]\sum_{x=1}^{N}f_{\mathrm{pipe}}(D_x)L_x \tag{6}$$

$$C_{\mathrm{heatloss}}=\sum_{t=1}^{8\,760}(cG_{\mathrm{source},t}\,|T_{\mathrm{source},t}-T_{\mathrm{r,source},t}|-Q_{\mathrm{sum},t})C_{\mathrm{h},t} \tag{7}$$

$$C_{\mathrm{pump}}=\sum_{t=1}^{8\,760}\left[C_{\mathrm{e},t}G_{\mathrm{source},t}\left(2\sum_{x\in I_C}\Delta P_{x,t}+\Delta P_{\mathrm{s,l}}\right)\right] \tag{8}$$

其中，C_{pipe}、C_{heatloss} 和 C_{pump} 分别为管网固定投资等年值、年热损失费和年泵电费；管网单位长度固定投资费用与管径呈线性关系，$f_{\mathrm{pipe}}(\cdot)$为管径与单位长度投资的关系，根据文献[18]按一次关系拟合得到；内部收益率 g_i=5%；生产期 m=16 a；折旧率 γ 为8%~10%；D_x、L_x 分别为管段 x 的管径、长度；$C_{\mathrm{h},t}$ 为 t 时刻热、冷耗散费用系数；$G_{\mathrm{source},t}$ 为 t 时刻源总流量；$T_{\mathrm{source},t}$、$T_{\mathrm{r,source},t}$ 分别为 t 时刻源供水、回水温度；$Q_{\mathrm{sum},t}$ 为 t 时刻总负荷；$C_{\mathrm{e},t}$ 为水泵耗电系数；$\Delta P_{x,t}$ 为 t 时刻管段 x 的压力损失；I_C 为最不利供回环路管段集合；$\Delta P_{\mathrm{s,l}}$ 为能源站和用户系统内部压降和。

双管系统中同一管段供回双管的管径、流量都相等，优化变量为每个管段供回双管的管径 D_x。运行费用函数中 $G_{\mathrm{source},t}$、$T_{\mathrm{source},t}$ 为能源站运行控制量，由集中质-量供能调节决定；$T_{\mathrm{r,source},t}$、$\Delta P_{x,t}$ 为给定管网的输入、实时负荷后求解管网水力-热力运行工况得到，详见2.2、2.3节。

2.2 集中质-量供能调节

供能调节的任务是根据用户负荷的变化情况，以小时为时间单位，确定每时刻供水的水温和流量。

常见的调节方式有质调节、量调节、分阶段变流量质调节和质量-流量调节等。在较好地跟随负荷曲线、满足供能需求的前提下,供能调节的目标是降低热损失和泵能耗,简化调节方式。对于采用用户间接连接的管网系统,每个建筑负荷点的换热系统如图 1 所示。

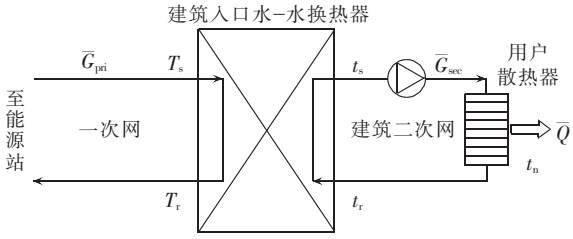


图 1　建筑负荷点换热系统

Fig.1 Heat exchange system of building load node

本文采用在能源站侧集中质量-流量调节,即根据供能网络中负荷比最大的负荷点的热(冷)要求调节能源站对管网的实时供水流量和温度。为防止用户侧出现热力工况和水力工况的失调现象,用户侧采用质调节策略,即定建筑内二次网供水流量,根据负荷和散热器特性调节水温。在一次网规划中,用户侧系统建模可简单采用建筑入口水-水换热器模型,通过用户质调节得到的换热器二次侧水温、流量,根据给定规则求解得到一次侧需求温度和流量,再考虑预估一次网温降(在大型集中供热管网中热损率一般为 5%[17],故在区域型 IES 中考虑此热损率可以满足负荷水温需求)得到能源站侧集中调节供水流量和温度。另外,在负荷曲线全网无负荷的时刻,为不使管道空载,满足用户随开随用需求,调节参数取非零负荷时刻的最低供水流量和供水温度。

a. 用户散热系统质调节模型。

用户散热系统(二次网络)的供水温度 t_s 和回水温度 t_r 满足:

$$\begin{cases} t_s = t_n + \Delta t_s' \overline{Q}^{1/(1+b)} + \Delta t_j' \overline{Q} / (2\overline{G}_{sec}) \\ t_r = t_n + \Delta t_s' \overline{Q}^{1/(1+b)} - \Delta t_j' \overline{Q} / (2\overline{G}_{sec}) \end{cases} \tag{9}$$

$$\begin{cases} \Delta t_s' = 0.5(t_s' + t_r' - 2t_n) \\ \Delta t_j' = t_s' - t_r' \end{cases} \tag{10}$$

其中,$\overline{Q}$ 为相对负荷比,为本节点负荷实时值与设计值的比值;$\overline{G}_{sec}$ 为建筑二次网相对流量比,为本节点流量实时值与设计值的比值,因用户散热系统采用质调节,有 $\overline{G}_{sec}=1$;b 为散热器相关参数,一般取 0.14~0.37[16];$\Delta t_s'$ 为用户散热器平均设计计算温差;$\Delta t_j'$ 为用户供回水温差设计值;t_s'、t_r' 分别为用户散热系统供水、回水温度设计值;t_n 为用户供暖(冷)目标室温。

b. 供能网络(一次网络)质量-流量调节模型。

为描述一次网流量调节占供热调节份额,定义流量优化调节系数 d_p:

$$d_p = \lg \overline{G}_{pri} / \lg \overline{Q} \tag{11}$$

其中,$\overline{G}_{pri}$ 为一次网流量比;$d_p \in [0,1]$,其取值主要受供暖系统管路形式制约,根据双管系统的特点,最佳工况下应取 $d_p=1/3$[16]。根据水-水换热器特性,可得换热器一次侧流量调节方程:

$$\overline{G}_{pri} = \overline{Q}^{1/3} \tag{12}$$

换热器一次侧温度 T_s、T_r 可根据 t_s、t_r 及 $\overline{Q}$ 求解非线性方程组得到:

$$\begin{cases} \overline{Q}^{2/3} = \dfrac{T_s - T_r}{T_s' - T_r'} \\ \overline{Q}^{5/6} = \left\{ \dfrac{(T_s - t_s) - (T_r - t_r)}{\ln[(T_s - t_s)/(T_r - t_r)]} \right\} \Big/ \left\{ \dfrac{(T_s' - t_s') - (T_r' - t_r')}{\ln[(T_s' - t_s')/(T_r' - t_r')]} \right\} \end{cases} \tag{13}$$

其中,T_s'、T_r' 分别为 T_s、T_r 的设计值。

本文的调节策略中,令 t 时刻的负荷比为当前时刻全网最大负荷比:

$$\overline{Q}_t = \max_{1 \leqslant i \leqslant M} (Q_{i,t} / Q_{qi}') \tag{14}$$

其中,$Q_{i,t}$ 为 t 时刻负荷点 i 的实时负荷;M 为负荷节点总数。

由式(9)—(14)和根据前述调节规则,可得 t 时刻的调节变量为:

$$\begin{cases} G_{source,t} = \overline{G}_{pri,t} \sum_{i=1}^{M} G_{qi}' \\ T_{source,t} = (1 \pm 0.05) T_{s,t} \end{cases} \tag{15}$$

其中,$\overline{G}_{pri,t}$ 为 t 时刻的实时一次网流量比;$T_{s,t}$ 为 t 时刻计算得到的负荷比最大的负荷点所需供水温度;$T_{source,t}$ 等式中的 ± 在供冷期取 −。

2.3　管网水力-热力运行工况求解

网状管网与负荷入口的连接如图 2 所示。

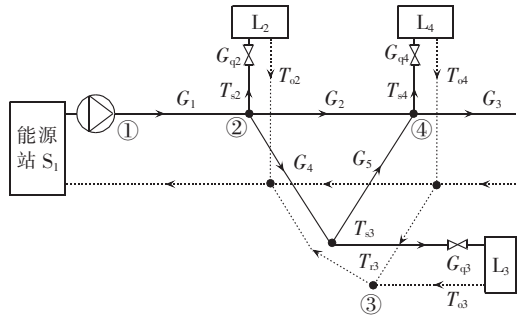


图 2　网状供能管网与负荷入口的连接方式

Fig.2 Connection of mesh-type energy-supply network to loads

a. 水力工况。

水力工况是热力工况求解的基础。双管系统中,供水网和回水网是对偶的,计算水力工况时仅需计算供水网在设计工况下的流量分布,再乘以实时流量比即可得到供水、回水管网实时流量分布。

水流在管网中的流动符合网络基本定律,即节

点连续性方程和环路水压方程：

$$\begin{cases}\boldsymbol{AG}'=\boldsymbol{G}'_{\mathrm{q}}\\ \boldsymbol{BK}\mathrm{diag}(\boldsymbol{G}')\boldsymbol{G}'=0\end{cases}\tag{16}$$

其中，$\boldsymbol{G}'$为支路在设计工况下的质量流量列向量；$\boldsymbol{B}$为供能管网回路矩阵；$\boldsymbol{K}$为支路管段阻力系数对角矩阵。管段x的管段阻力系数计算方法如下：

$$K_x=8L_xf_x/(D_x^5\rho^2\pi^2g)\tag{17}$$

其中，f_x为摩擦阻力系数，在不同的雷诺数下有不同的计算方法；g为重力加速度。

方程(16)为非线性方程组，可用牛顿-拉夫逊法求解。求得管段x的设计流量G'_x后，可得t时刻的实际流量$G_{x,t}$和压力损失$\Delta P_{x,t}$为：

$$G_{x,t}=\overline{G}_{\mathrm{pri},t}G'_x\tag{18}$$

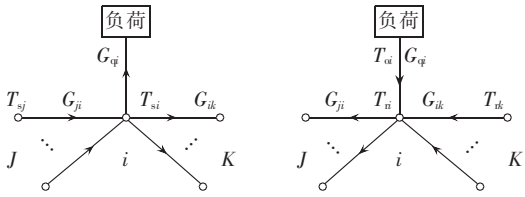
$$\Delta P_{x,t}=K_xG_{x,t}^2\tag{19}$$

节点i的实际负荷输出流量$G_{\mathrm{q}i,t}$为：

$$G_{\mathrm{q}i,t}=\overline{G}_{\mathrm{pri},t}G'_{\mathrm{q}i}\tag{20}$$

b. 热力工况。

供水网和回水网混合水温示意图如图3所示。



(a) 供水网节点混合水温　　(b) 回水网节点混合水温

图3 供回水网节点混合水温

Fig.3 Blended water temperature of supply and return network nodes

考虑单位长度管段的热、冷损失，任意时刻对于每个节点i，其供水温度和回水温度分别满足式(21)和(22)。

$$T_{\mathrm{s}i}=\frac{\sum_{j\in J}G_{ji}[(T_{\mathrm{s}j}-T_{\mathrm{a}})\mathrm{e}^{-\lambda L_{ji}/(cG_{ji})}+T_{\mathrm{a}}]}{G_{\mathrm{q}i}+\sum_{k\in K}G_{ik}}\tag{21}$$

$$T_{\mathrm{r}i}=\frac{G_{\mathrm{q}i}T_{\mathrm{o}i}+\sum_{k\in K}G_{ik}[(T_{\mathrm{r}k}-T_{\mathrm{a}})\mathrm{e}^{-\lambda L_{ik}/(cG_{ik})}+T_{\mathrm{a}}]}{\sum_{j\in J}G_{ji}}\tag{22}$$

其中，J、K分别为节点i的上游、下游节点集合；G_{ji}、L_{ji}分别为节点j和i之间的管段流量、长度，下标为ik时定义类似；$G_{\mathrm{q}i}$为节点i实际负荷供水流量；T_{a}为土壤温度；λ为单位管长度传热系数，反映散热条件，其取值与管道直径、保温层材料及厚度、管道和土壤散热条件有关。传输冷水时也可按式(21)、(22)进行计算。

t时刻节点i建筑入口水-水交换器进水温$T_{\mathrm{s}i,t}$和出水温$T_{\mathrm{o}i,t}$关系见式(23)，供冷期取负号。

$$T_{\mathrm{o}i,t}=T_{\mathrm{s}i,t}\pm\frac{Q_{i,t}}{cG_{\mathrm{q}i,t}}\tag{23}$$

则某时刻在求得管网流量分布的情况下，给定能源站出口供水温度，即可由式(21)—(23)计算满足当前全网负荷的能源站回水温度$T_{\mathrm{r,source}}$。

2.4 约束条件

a. 标准管径约束。

工程实际中管道直径为离散的标准公称管径，故管径变量为标准公称管径序列D_{N}中的元素。

$$D_x\in D_{\mathrm{N}}\tag{24}$$

b. 管流速约束。

为使水力工况稳定，管内水流速需满足：

$$v=\frac{G}{900\pi D^2}\leqslant v_{\max}\tag{25}$$

其中，每个管段流量G的单位为t/h；根据标准CJJ34—2010[17]有$v_{\max}=3.5$ m/s。

c. 相邻管径约束。

在环型环网中，为了保证事故工况的可靠性，水力交汇点附近的相邻管段管径不宜相差过大，有约束：

$$\max_{i,j\in H_n}|n(D_i)-n(D_j)|\leqslant 2\tag{26}$$

其中，H_n为水力交汇点n(不包括源节点)处的管段集合；$n(D_i)$、$n(D_j)$分别为管段i、j管径在管径序列中的编号。

d. 用户压力、水温需求约束。

值得说明的是，由于本规划方法采用基于运行模拟确定能源站供水泵压头的方法，目标函数已经考虑了最不利回路压降及用户压降，自然满足用户压力需求。另外，在供能调节中已将考虑了较大管网热损失裕度的负荷比最大的节点需求供水温度作为能源站供水温度，所有的负荷点的水温需求也可以满足。

3 优化算法及改进

对于上节管径优化问题，本文采用改进MPGA进行优化求解。MPGA相比标准GA具有多种群协同进化、相互移民、共同选择产生精华种群，从而兼顾算法全局和局部搜索的平衡，提高搜索性能的优点，流程如图4所示。

IES的供能管网管径选型是一个约束整数优化问题，针对此问题，本文设计了几个具体的算法改进(图4中⇢所示)。

a. 牛顿-拉夫逊法流量初始点：由于牛顿-拉夫逊法初值要求较严格，可利用最小平方和法产生管网初分流量作为牛顿-拉夫逊法的初值，促进迭代快速收敛。

b. MPGA初始种群：根据初分流量和传统管径设计方法产生初始管径种群，可以使算法在较合理的位置开始搜索可行解，提高算法速度。

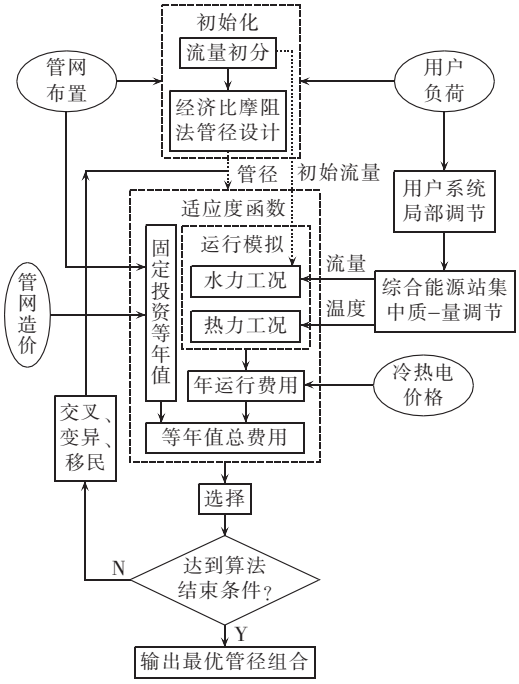


图 4 综合能源系统供能管网管径优化设计算法流程图

Fig.4 Flowchart of optimal diameter sizing for IES piping network

4　中新广州知识城南起步区 IES 供能管网优化设计实例和系统经济性分析

本文对中新广州知识城南起步区 5 号 IES 进行了管网优化设计,其分区类型、负荷预测、管网空间布置等参数来自实际系统。

4.1　算例信息

综合能源站供能区域分区、建筑分布及管线布置情况如图 5 所示。该供能区最长距离为 840 m,总面积 3.123×10^5 m^2,综合能源站位于近中心位置,供能半径小于 500 m。管网采用闭式双管系统,考虑可靠性在同一方向较长的 2 条干线之间设横向连通管线(P_9)[17]。该供能区拟规划二级住宅区、商业区和办公区这 3 种分区,建筑容积率较高,负荷密度较大。根据负荷预测,不同分区一年四季典型天 96 h 的负荷曲线如图 6 所示。各功能分区内各建筑具体负荷由建筑占地面积比例确定。

对该区域采用第 2 节的模型进行管径优化设计。外层优化以式(5)—(8)为目标函数,式(24)—(26)为约束条件。目标函数中的供、回水温度和流量等运行量由式(9)—(23)构成的内层运行模拟模型求解。计算设计流量时取最大负荷同时率为 0.6。

算例中的峰谷电价、冷热价、管道长度及价格信息如下。

a. 峰区时间为 14:00—17:00、19:00—22:00,峰区电价为 1.421 9 元/(kW·h);平区时间为 08:00—14:00、17:00—19:00 和 22:00—24:00,平区电价为

图 5 中新广州知识城南起步区 5 号综合能源系统

Fig.5 IES No.5 of south starting area of Sino-Singapore Guangzhou Knowledge City

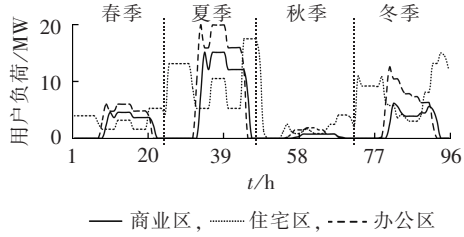


图 6 不同分区四季典型天负荷曲线

Fig.6 Typical daily load curves of different districts for four seasons

0.873 5 元/(kW·h);谷区时间为 00:00—08:00,谷区电价为 0.451 7 元/(kW·h)。

b. 冷、热价分别为 0.5 元/(kW·h)以及 0.15 元/(kW·h)。

c. 典型天代表的天数权重分别为:春季(3 月 1 日—4 月 14 日)典型天数权重为 45,夏季(4 月 15 日—11 月 15 日)典型天数权重为 215,秋季(11 月 16 日—12 月 31 日)典型天数权重为 46,冬季(1 月 1 日—2 月 28 日)典型天数权重为 59。

d. 管道长度和价格分别如表 1、2 所示。

一次管网设计中,建筑换热器及建筑二次散热系统的造价对每个方案都相同,可忽略不计。采用第 3 节的 MPGA 优化算法求解优化问题。

4.2　规划结果分析

本文对比了利用考虑供能调节及运行模拟的优化设计方法与传统的规划运行方法的规划结果。其中传统方法采用工程推荐的经济比摩阻 R = 30~70 Pa/m 进行管径规划,以及最常用的定流量定供水温度运行方式。此外,还利用优化方法对同一算例设计了冷热分管的供能方案,综合对比了各方案的各项经济指标。各方案经济指标对比如表 3、4 所示。

根据表 3,应用本文提出的考虑供能调节的综合能源系统管网管径优化设计方法规划方案(冷热同

表1 算例管网管长

Table 1 Pipe length of IES supply network for case study

管道	管道长度/m	管道	管道长度/m
P_1	100	P_7	120
P_2	110	P_8	100
P_3	80	P_9	200
P_4	100	P_{10}	150
P_5	115	P_{11}	90
P_6	124		

表2 不同公称管径管道单位长度投资

Table 2 Unit length investment of pipes with different nominal diameters

公称管径/mm	单位长度造价/(元/m^{-1})	公称管径/mm	单位长度造价/(元/m^{-1})
50	354.169	450	3250.409
65	429.530	500	3628.949
80	508.544	600	4348.433
100	645.501	700	5294.162
125	765.570	800	6536.487
150	910.679	900	7254.042
200	1259.761	1000	8686.768
250	1518.278	1100	10043.858
300	1940.870	1200	11734.370
350	2430.588	1400	16362.368
400	2784.199		

注:包括土建费用及管道敷设费用。

管)相比于传统管网设计和运行方式能达到更低的等年值总费用,与最经济的传统方案相比可节省约9%。这是因为针对该区域供能半径较小而负荷较大的特点,优化设计方法兼顾固定投资费用和运行费用,选择了较大的平均管径。表3的数据表明,这样虽小幅增加了管网初投资(约增加5%),却显著降低了系统的年运行费用(约降低13%),达到了更高的年收益。

表3对比了本文方法优化设计的冷热同管运输和分管运输2个方案,可见冷热同管运输方案经济性较优,这是因为2套管大幅增大了固定投资。但是,分管运输方式可以降低非主要负荷(如南方地区的供暖负荷等)供给时期的运行损耗。此外,共用管沟等方式可以降低部分土建费用,计及管网生命周期后本文算例的冷热分管方案等年值投资较单管增幅不大。故对于类似本例的供能半径较短、冷热负荷差距大的IES,分管运输方案也是可行的。

表4 冷热分管规划方案的冷、热网经济指标对比

Table 4 Comparison of economic performance between heating and cooling networks of separated network scheme

经济指标	经济指标值/百万元	
	热网	冷网
年泵电耗	0.1153	0.6537
年热/冷损失费	0.0195	0.2404
年运行费	0.1348	0.8942
管网总投资	1.7488	3.4678
管网等年值投资	0.1999	0.3963
等年值总费用	0.3347	1.2905

不同方案等年值总费用的构成比例如图7所示。由图7可以看到,由于本例供能区域较小,不同方案的等年值总费用构成中,固定投资等年值均小于年运行费。冷热分管运输方案的固定投资比例最大,达到37%。另外,设计阶段采用较大的比摩阻,虽然能减小管径,但造成了泵能耗等运行费的上升,降低管网固定投资的效果并不显著。

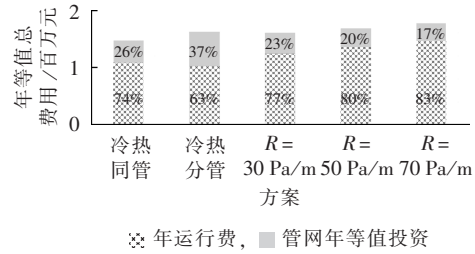


图7 不同方案等年值总费用的构成比例

Fig.7 Proportional composition of equivalent annual total cost for different schemes

4.3 管网运行模拟情况分析

图8为各方案年运行费的构成情况分析。本算例中,管网年运行费中泵电能耗费用比例显著高于热/冷损失费用,两者的比例大约为3:1~4:1。结合表1的数据可见,由于供能调节基于散热器物理特性根据负荷大小调节供水温度和流量,低负荷阶段采用"低流量+低水温(供暖期)/高水温(供冷期)"的运行方式,降低了泵的能耗,减少了管网热媒与环境温差进而减少传热损耗,较大地降低了管网系统的运行费用。此外,现有的定流量定温度运行方法中,设计阶段允许比摩阻越大,管径越小,从而管传热面积

表3 2种供能管网管径设计方法和多种方案的经济指标对比

Table 3 Comparison of economic performance among two pipe diameter sizing methods and different schemes

经济指标	优化方法指标值/百万元		传统方法指标值/百万元		
	冷热同管	冷热分管	R=30 Pa/m	R=50 Pa/m	R=70 Pa/m
年泵电耗	0.8110	0.7691	0.9002	1.0485	1.1758
年热/冷损失费	0.2706	0.2599	0.3334	0.3027	0.2842
年运行费	1.0816	1.0290	1.2336	1.3512	1.4600
管网总投资	3.4098	5.2166	3.2333	2.8749	2.6763
管网等年值投资	0.3897	0.5962	0.3695	0.3286	0.3059
等年值总费用	1.4713	1.6252	1.6031	1.6798	1.7659

减小,热(冷)损减小。但同时,管压降增大,泵能耗增大。本算例中,泵能耗增大幅度更大,使总运行成本上升。

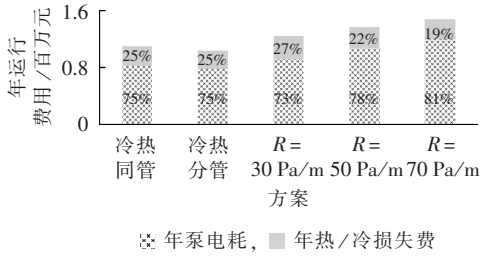


图 8 不同方案年运行费的构成比例

Fig.8 Proportional composition of annual operational cost for different schemes

图 9 给出了典型天各时刻最大负荷比和总负荷比。本文采用负荷比最大的时刻作为供能调节判据可以满足整个系统各个负荷点的供能需求。综合图 6 和 9 可见,在广州地区,供暖负荷明显小于供冷负荷。对于冷热同管情况,考虑到热水设计供、回水温差一般大于冷水,供暖负荷比会更显著地小于供冷负荷比。

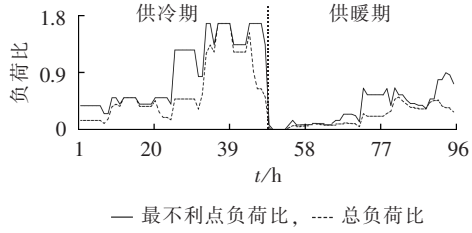


图 9 典型天各时刻实时负荷与设计负荷的负荷比

Fig.9 Ratio of real-time load to design load for typical days

基于最大负荷比负荷点负荷比的集中质-量调节策略下的运行模拟中运行变量的情况如图 10 所示,系统的运行损耗如图 11 所示。图 12 为无供能调节运行损耗情况。可以看到,供能调节在低负荷期(春、秋、冬季)按比例降低了管网供水流量,显著降低了管网的泵能耗。同时,调节了供水温度,即春季提高冷水温度、秋冬降低热水温度,也明显减小了低负荷期的热损耗。夏季供冷期基本上处于满负荷运行状态,运行费用大致与无供能调节的系统相当。以上分析说明,供能调节对于全年负荷极差较大的综

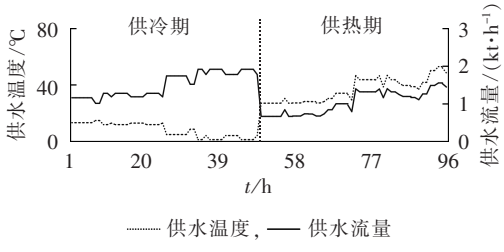


图 10 典型天各时刻供水温度和供水流量

Fig.10 Temperature and quantity of water flow supplied for typical days

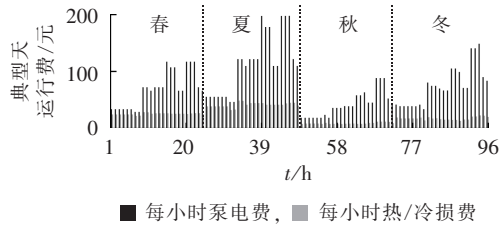


图 11 考虑供能调节运行的典型天运行费

Fig.11 Operational cost under energy-supply regulation for typical days

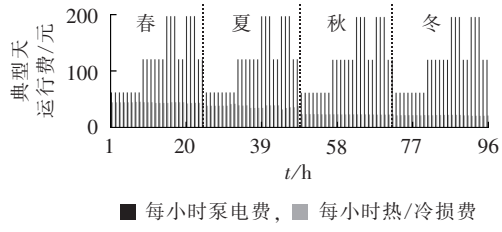


图 12 定流量定温度运行时的典型天运行费(R=50 Pa/m)

Fig.12 Operational cost under fixed temperature and quantity for typical days(R=50 Pa/m)

合能源系统运行具有很好的降损作用。

图 13 对比了冷热同管和分管 2 种传输方案的典型日运行费用。由于广州地区冷负荷占主导,冷热同管方案的设计流量主要由冷负荷决定,因此供冷期同管和分管方案的运行损耗几乎相同,而在供暖期,冷热分管方案的泵能耗和热损耗都小于冷热同管方案。显然根据热负荷决定的热网设计流量更小,更贴合供暖期的低负荷运行情况,损耗更小。

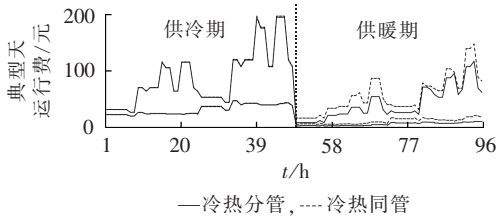


图 13 冷热同管和分管方案典型天的运行费对比

Fig.13 Comparison of operational cost between separated and shared network schemes for typical days

4.4 供能距离对方案选择的影响

综合能源站到最远的建筑换热站的管线长度和为综合能源系统的供能距离。本算例的供能距离为 460 m。为分析供能距离和低负荷密度对供能方案经济性的影响,本节在负荷和分区不变的情况下按比例增大供能距离,并对比各种规划方案的等年值总费用如表 5 所示,等年值管网投资占总费用的百分比如图 14 所示。

由图 14 趋势可见,本文提出的基于供能调节的冷热同管优化设计方案在不同的供能距离下能更好地平衡等年值总费用中管网投资和运行费用的占比,管网投资占比增长较其他方案缓慢,在远距离供能应用中优势更加明显。此外,传统经济比摩阻方

表5 不同供能距离下各种规划方法的等年值总费用

Table 5 Equivalent annual total costs of different schemes and different energy-supply radiuses

供能半径/m	优化方法等年值总费用/百万元		传统方法等年值总费用/百万元		
	冷热同管	冷热分管	$R=$ 30 Pa/m	$R=$ 50 Pa/m	$R=$ 70 Pa/m
460	1.4713	1.6252	1.6031	1.6798	1.7659
920	2.0700	2.3939	2.3391	2.3103	2.5350
1380	2.6306	3.1154	3.0210	2.9402	3.1048
1840	3.1492	3.7878	3.7021	3.5693	3.6740
2300	3.6574	4.4404	4.3824	4.1977	4.2426
2760	4.1149	5.0589	5.0619	4.8254	4.8106

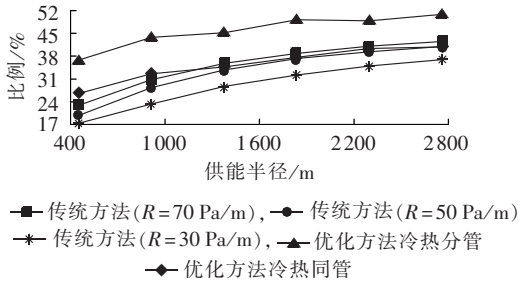


图14 不同供能半径管网的投资等年值占等年值总费用比例

Fig.14 Ratio of equivalent annual pipe network investment to equivalent annual total cost for different energy-supply radiuses

法中,大比摩阻方案可以减小管径,随着管道长度增长经济性逐渐优于小比摩阻方案。冷热分管方案在长距离输送场景下管网投资增长明显,经济性急剧下降。

5 结论

本文针对当前集中供热管网规划方法不适用于冷热联供的区域型IES的问题,提出了一套基于集中质-量调节运行模拟的IES供能管网管径优化设计方法。该调节方式根据当前时刻负荷比最大的用户负荷情况调节综合能源站的供水流量和温度,较好地贴近用户负荷曲线,以运行费和投资等年值为目标选择最优管径组合,综合考虑了系统初投资和长期运行费。以中新广州知识城某区域IES为例,验证了本文优化方法的有效性。对比了不同供能方案的经济性、运行模拟情况及其受供能距离的影响。主要结论如下。

a. 若区域冷负荷大、供能半径短,则等年值总费用中运行费占比较大,因此平均管径较大的方案因其泵电耗低而较有竞争力。随着供能半径增大,管网投资占比迅速增大,小管径方案的经济性显著增大。

b. 管网的年运行费中,泵电费明显大于冷热损失费。采用供能调节可以在低负荷期降低供水流量,调整供水温度,从而显著降低运行损耗。

c. 对无冷热同时供给需求情况,冷热同管传输方案一般情况下更经济。冷热分管传输方案仅在短供能半径、大负荷密度、大冷热负荷差情况下有一定的应用价值,因为其低负荷期运行损耗低于冷热同管传输方案。

参考文献:

[1] 邓建玲. 能源互联网的概念及发展模式[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):1-5.
DENG Jianling. Concept of energy internet and its development modes[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(3):1-5.

[2] 张勇军,陈泽兴,蔡泽祥,等. 新一代信息能源系统:能源互联网[J]. 电力自动化设备,2016,36(9):1-7.
ZHANG Yongjun,CHEN Zexing,CAI Zexiang,et al. New generation of cyber-energy system:Energy Internet[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(9):1-7.

[3] CHO H,SMITH A D,MAGO P. Combined cooling,heating and power:a review of performance improvement and optimization[J]. Applied Energy,2014,136:168-185.

[4] GUO L,LIU W,CAI J,et al. A two-stage optimal planning and design method for combined cooling,heat and power microgrid system[J]. Energy Conversion & Management,2013,74(10):433-445.

[5] 张涛,朱彤,高乃平,等. 分布式冷热电能源系统优化设计及多指标综合评价方法的研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3706-3713.
ZHANG Tao,ZHU Tong,GAO Naiping,et al. Optimization design and multi-criteria comprehensive evaluation method of combined cooling heating and power system[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3706-3713.

[6] LIU M,SHI Y,FANG F. A new operation strategy for CCHP systems with hybrid chillers[J]. Applied Energy,2012,95:164-173.

[7] FANG F,WANG Q H,SHI Y. A novel optimal operational strategy for the CCHP system based on two operating modes[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2012,27(2):1032-1041.

[8] ZHENG C Y,WU J Y,ZHAI X Q. A novel operation strategy for CCHP systems based on minimum distance[J]. Applied Energy,2014,128:325-335.

[9] LUO Z,WANG Z,GU W,et al. A two-stage energy management strategy for CCHP microgrid considering house characteristics[C]// IEEE Power & Energy Society General Meeting. Denver,USA:IEEE,2015:1-5.

[10] BAO Z,ZHOU Q,YANG Z,et al. A multi time-scale and multi energy-type coordinated microgrid scheduling solution—part I:model and methodology[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2015,30(5):2257-2266.

[11] DALLA R A,LI H,SVENDSEN S. Method for optimal design of pipes for low-energy district heating,with focus on heat losses[J]. Energy,2011,36(5):2407-2418.

[12] LI X,DUANMU L,SHU H. Optimal design of district heating and cooling pipe network of seawater-source heat pump[J]. Energy and Buildings,2010,42(1):100-104.

[13] SÖDERMAN J. Optimisation of structure and operation of district cooling networks in urban regions[J]. Applied Thermal Engineering,2007,27(16):2665-2676.

[14] PIROUTI M,BAGDANAVICIUS A,EKANAYAKE J,et al. Energy consumption and economic analyses of a district heating network[J]. Energy,2013,57:149-159.
[15] 王珺,顾伟,陆帅,等. 结合热网模型的多区域综合能源系统协同规划[J]. 电力系统自动化,2016,40(15):17-24.
WANG Jun,GU Wei,LU Shuai,et al. Coordinated planning of multi-district integrated energy system combining heating network model[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(15):17-24.
[16] 贺平. 供热工程[M]. 4 版. 北京:中国建筑工业出版社,2009:243,285,410.
[17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇供热管网设计规范:CJJ34—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
[18] 建设部标准定额研究所. 市政工程投资估算指标 第 8 册 集中供热热力网工程:HGZ47-108—2007[S]. 北京:中国计划出版社,2007.

作者简介:

管　霖

管　霖(1970—),女,湖北孝感人,教授,博士,主要研究方向为电力系统规划与可靠性、电力系统稳定与控制(**E-mail**:lguan@scut.edu.cn);

江泽涛(1993—),男,广东揭阳人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统规划、综合能源系统(**E-mail**:854786970@qq.com);

唐宗顺(1981—),男,江苏扬州人,博士研究生,主要研究方向为电力系统规划、综合能源系统(**E-mail**:10970089@qq.com)。

Optimal diameter sizing based on centralized quality-quantity regulation and economic analysis of IES piping network

GUAN Lin[1],JIANG Zetao[1],TANG Zongshun[1,2]

(1. Electric Power College,South China University of Technology,Guangzhou 510641,China;
2. Guangzhou Power Supply Co. Ltd.,Guangzhou 510620,China)

Abstract: The feasibility and economy of an IES (Integrated Energy System) project is greatly affected by the investment and operational cost of its piping network,for which,a method of optimal diameter sizing based on the centralized quality-quantity regulation is proposed. The temperature and quantity of the water flow supplied by the energy station is regulated according to the load of its user with the maximum load ratio at present moment,in that the total load curve is better matched. With the minimum equivalent annual total cost as its objective,the proposed method selects the optimal combination of pipe diameters to comprehensively consider the initial investment and the long-term operational cost for enhancing the overall economic performance. With the Sino-Singapore Guangzhou Knowledge City as an example,the effectiveness of the proposed method is verified,the operational cost under energy-supply regulation and the influence of IES energy-supply radius on the piping network planning being analyzed.

Key words: integrated energy system; energy-supply network; centralized quality-quantity regulation; optimal pipe diameter sizing; economic analysis