文章编号: 2096-5125 (2021) 02-0153-10 DOI: 10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2021.02.006 中图分类号: TM 732

文献标志码: A

多能互补的综合能源供热系统工程设计及优化

熊显智^{*},程晓绚,李嘉丰,李天泽,党瑞 (西安西电电力系统有限公司,陕西省 西安市 710065)

Engineering Design and Optimization of Multi-energy Heating Systems

XIONG Xianzhi*, CHENG Xiaoxuan, LI Jiafeng, LI Tianze, DANG Rui

(XIAN XD Power System Co., Ltd., Xi'an 710065, Shaanxi Province, China)

Abstract: Multi-energy complementary integrated energy heating systems can utilize the characteristics of various energy sources to improve energy efficiency and economy. Aiming at the integrated energy heating system, we herein conduct research on the hourly heat load forecast of a building and establish a universal heating equipment parameter optimization method. In accordance with the indoor heat balance equation, the heat transfer model of the building maintenance structure, heat transfer model of the heating terminal, a joint calculation model of the building heat load, indoor temperature, and minimum water supply temperature required at the heating terminal are established. The influence of the maximum designed water supply temperature on the heating system is also discussed herein. Based on the principle of the lowest heating cost at each moment, as well as considering the compatibility of the water supply temperature of different heating equipment with the required water supply temperature at the heating end, a real-time scheduling model of the integrated energy heating system is established. Based on the aforementioned scheduling model, the total annualized cost of the heating system corresponding to the heating equipment having different parameter combinations was calculated using the traversal algorithm. The best parameters of each heating equipment were determined with the goal of the lowest annualized total cost.

Keywords: multi-energy complementary; integrated energy; heating system

摘 要:多能互补的综合能源供热系统能够利用各种能源的 特点,提高能源利用效率及经济性。针对综合能源供热系统, 从建筑物的逐时热负荷预测及建立通用的供热设备参数优化 方法两个方面展开研究。依据室内热平衡方程、建筑物围护 结构传热模型、供热末端传热模型,建立建筑物热负荷、室 内温度及供热末端所需最低供水温度的联合计算模型。以每 个时刻供热成本最低为原则,考虑到不同供热设备供水温度 与供热末端所需供水温度相容性,建立综合能源供热系统实时调度模型。基于前述的调度模型,采用遍历算法,计算不同参数组合的供热设备所对应的供热系统年化总费用,以年化总费用最低为目标确定各供热设备的最佳参数组合。

关键词:多能互补;综合能源;供热系统

0 引言

建筑物供热是一项重大的民生工程,传统的供热 系统以市政集中供热为主。集中供热需要复杂的管 网,管网铺设造价高,维护困难,不易扩展容量,供 热用户需要间接承担管网建设费用。市政集中供热在 运行期间,一般实行两部制收费,总费用包含依据面 积收取的基本费用和依据流量收取的流量费用。当单 位面积平均热功耗越低,基础费用在供热总费用中占 比越高,导致单位热量用热费越高,不利于先进的建 筑节能技术的推广。其次,对于市政集中供热,尽管 供热锅炉的热效率可高达95%,但从全系统看总体运 行效率并不高。主要是因为热量在长距离传输过程 中,循环泵、补水泵等设备需要耗费电能,并且供热 管道中的热量损失也较为严重^[1]。

在工业园区,通过电、气、热多种能源系统的一体化规划设计和运行优化,构建多能互补的综合能 源供热系统^[2-3],已成为降低建设成本、能源供应成 本,提高能源利用效率以及提升环境效益的重要技术 手段。

综合能源供热系统的设计及运行优化已开展了大量研究。文献[4]构建了包含热电联产系统、风机、电锅炉、电储能、热储能和电动汽车等单元的区域电热综合能源系统的经济调度模型,采用改进的混沌粒子

群优化算法对电热能源系统进行调度优化。文献[5]针 对以热电比可调的热电联产机组为核心的综合能源系 统,构建双层优化模型,分别以用能成本最小及用能 效率最大为优化目标,建立机组内部能效特性与外部 能源分配的联系,实现内部机组高效运行和外部能源 经济分配。文献[6]针对电力-热力能源系统,在考虑 了热力网络约束的基础上建立了运行优化模型,并通 过运行方式的改变,提高可再生能源消纳能力。文献 [7]研究了结合热网模型的多区域综合能源系统的规划 问题,在建立考虑节点流量平衡、热流量约束及热损 平衡约束的热网模型的基础上,建立了多区域CCHP 系统容量协同优化配置的混合整数线性规划模型。文 献[8]基于可再生能源技术、节能技术以及电能替代技 术的典型设备模型,建立了以电为核心的综合能源系 统运行约束模型。文献[9]针对区域电力--天然气--热力 综合能源系统,基于能源集线器概念,对以区域混合 能源站为核心的能源耦合环节进行分析,形成了能量 流综合求解模型,并以经济最优为目标,对该模型进 行优化。

上述文献中均直接采用供热期间典型日的热负荷 曲线,不能够充分反映长时间尺度天气变化、工作时 段变化对热负荷的影响,也没有考虑供热设备供水温 度对综合能源系统调度策略的影响。文献[10]针对综 合能源系统,建立与电力系统模型相容的热力系统能 量流模型,根据温度变化预测热负荷。该模型考虑了 换热环节约束(如换热器)、供热管道模型、热用户 模型等,将热能分为存储在墙体内的储热及耗散到外 界环境中的热量。文献[11]针对区域综合能源系统, 基于传热学的基本原理建立了区域热网能量传输通用 模型,推导出热网热损方程,得到热网能量流模型。 上述文献的供热模型都没有考虑建筑物围护结构的非 稳态传热模型,不适用于室内间歇性供热的情况。

本文的主要工作在于针对综合能源供热系统,建 立逐时热负荷预测模型,以及通用的供热设备运行调 度模型。对于逐时热负荷的预测,本文将依据建筑物 室内的热平衡方程、建筑物围护结构的传热模型、供 热末端的传热模型,建立建筑物热负荷、室内温度及 最低供水温度的联合计算模型。将供热设备依其特点 分类,并针对每类供热设备建立通用的运行调度数学 模型。以供热成本最低为目标,考虑供热设备出水温 度及供热末端最低供水温度的相容性,建立综合能源 供热系统运行调度模型。基于运行调度模型,以年化 费用^[12]最低为目标确定各供热设备的最佳匹配参数。

1 综合能源供热系统结构

一个多能互补的综合能源供热系统,由多种能 源、能源转换设备及储能设备组成。能源来源包括太 阳能、空气能、岩石热能等可再生能源,以及来自电 网与可再生资源发电所产生的电能,还包括天然气、 生物质沼气等可燃气体。按照能源输入输出形式,可 以将供热系统的设备分为4类,如图1所示。第一类 是以太阳能集热器^[13]为代表的,热源来源于可再生资 源,运行期间几乎无需其他类型能源的设备;第二 类是以电锅炉、热泵、热干岩供热技术^[14-15]为代表的 以电力作为输入能源的产热设备,或者以电力作为辅 助能源,从其他能源(空气源、水源)获取热能的设 备;第三类是以燃气热电联产机组^[16](CHP)为代表 的,以可燃气体为供给能源,可以同时发电产热的设 备;第四类是以相变蓄热为代表的储热设备。



Tig. T mitograted energy nearing system

园区综合能源供热系统的基本架构设计,需充分 考虑用户侧的用能需求、当地的可再生资源情况、电 力及天然气的价格、各类供热设备的特点、园区的占 地条件、热管连接复杂程度以及政府政策等因素,才 能形成完整的系统框架,并经过参数优化得到适应该 地区的最优供能系统。

2 热负荷预测

对于综合能源供热系统而言,热负荷预测是系 统规划方案比选的基础,其准确度直接影响系统的 配置。

针对不同的供热工况以及不同的围护结构类型, 分别建立建筑围护结构稳态传热模型、非稳态传热模 型,预测建筑物的逐时热负荷。

2.1 稳态传热模型

在持续供热系统中,一般按照稳态传热计算热负 荷。忽略来自照明、人体显热和设备显热等因素,房 间内空气热平衡方程^[17-18]为

$$P_1 + P_2 + P_3 - P_4 + H_1 = V_{\text{air}} c_{\text{air}} \rho_{\text{air}} \frac{\partial t_n}{\partial \tau}$$
(1)

$$P_{1} = \sum F_{1} \alpha (t_{n} - t_{w}) = \frac{t_{n} - t_{w}}{t_{ns} - t_{ws}} P_{10}$$
(2)

$$P_{2} = \sum F\alpha(t_{n} - t_{w}) = \frac{t_{n} - t_{w}}{t_{ns} - t_{ws}} P_{20}$$
(3)

$$P_{3} = \sum Lw(c_{air}\rho_{air})(t_{n} - t_{w}) = \frac{(t_{n} - t_{w})}{t_{ns} - t_{ws}}P_{30}$$
(4)

$$P_4 = \sum \alpha_{\rm a} I_{\rm a} \tag{5}$$

式中: t_n 、 t_w 分别为室内、室外的空气温度; t_{ns} 、 t_{ws} 分 别为室内、室外供热系统的计算温度; P_1 为墙体、地 板等混凝土围护结构的耗热量,这类围护结构的密度 大、比热大、蓄热量大; P_2 为门窗、聚氨酯板等围护 结构的散热量,这类围护结构的密度小、比热小、蓄 热量较小; P_3 为空气通过门窗等缝隙带走的耗热量; P_{10} 、 P_{20} 、 P_{30} 分别为 P_1 、 P_2 、 P_3 在室内温度为 t_{ns} ,室外 温度为 t_{ws} 时的值; P_4 为太阳辐射施加在围护结构上的 热量; a_a 为建筑围护结构对太阳辐射的吸收率; I_a 为 太阳辐射综合强度; H_1 为室内供热量,即所求的热负 荷; V_{air} 、 c_{air} 、 ρ_{air} 分别为室内空气体积、空气比热及 空气密度; τ 为时间。

2.2 非稳态传热模型

若供热区域采用间歇供热,就要针对蓄热量大的 围护结构采用非稳态传热模型^[19]。

建筑通过围护结构向外传热的模型示意图如图2 所示。其传热过程为,热量由室内向室外传热,传热 环节包括:室内环境与室内墙面的对流传热(室内环 境温度t_a未知,室内墙面温度t(0, **r**)未知,对流传热系





数 h_n 已知);室内墙面通过各层平板向室外墙面的导 热(各层平板的厚度 δ_i 、热导率 λ_i 、比热容 c_i 、密度 ρ_i (i=1,2,3,...,k)已知,平板内及各平板的接触面温度 未知);外墙面与室外空气的对流传热(室外空气温 度 t_w 已知,室外墙温 $t(\delta, \tau)$ 未知,对流传热系数 h_w 已 知)。可认为垂直于 x轴的任一平面内温度均匀,因 此可看成是一维非稳态导热问题。

1) 数学模型。

如图所示的一维度导热问题可以用以下微分方程 描述

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \tag{6}$$

式中: $\alpha = \lambda / \rho c$ 为热扩散率,也称导温系数。 2)边界条件。

> 初始条件: $t(x,0) = t_0$ (0 $\leq x \leq \delta$) (7) 室内对流换热条件:

$$h_{\rm n}[t_{\rm n} - t(0,\tau)] = \lambda_{\rm l} \frac{\partial t(x,\tau)}{\partial x} \Big|_{x=0}$$
(8)

室外对流换热条件:

$$h_{w}[t(\sigma,\tau) - T_{w}] = \lambda_{k} \frac{\partial t(x,\tau)}{\partial x}\Big|_{x=\sigma}$$
(9)

考虑太阳热辐射的边界条件:

$$h_{\rm w}[t(\sigma,\tau)-t_{\rm w}] - \alpha_{\rm a}I_{\rm a} = \lambda_{\rm n} \frac{\partial t(x,\tau)}{\partial x}\Big|_{x=\sigma}$$
(10)

式中: T_0 为初始温度; $t(x,\tau)$ 表示x位置处 τ 时刻的温度; δ 为多层平板的总厚度。

在非稳态传热模型中, 围护结构的散热量为

$$P_{1}' = \sum h_{n} A(t_{n} - t(0, \tau))$$
(11)

在非稳态传热模型中,室内空气热平衡关系为

$$P_1' + P_2 + P_3 + H = V_{air} c_{air} \rho_{air} \frac{\partial t_n}{\partial \tau}$$
(12)

2.3 供热末端散热模型

在一个供热建筑物内,散热器、风机盘管、射流 风机等末端装置是热量的"供给者"。本文假定供热 末端选用的是铸铁式柱式散热器。散热器的最大散热 量^[20]H_{smax}为

$$H_{s,max} = KF(\frac{t_{g,max} + t_{h,max}}{2} - t_n)$$

= $KF(t_{g,max} - \frac{\Delta t}{2} - t_n)$ (13)

式中: K为散热器传热系数; F为总散热面积; $t_{g,max}$ 为散热器最高设计供水温度; $t_{h,max}$ 为最高设计供水温 度对应的回水温度; t_n 为室内平均温度; Δt 为供回水 温差。 从式(13)可以看出,只有提高供水温度,才能 提高供热末端的散热能力。因此在计算热负荷时,要 依据最高设计供水温度tg,max所对应的最大散热量H_{s,max}, 来对热负荷进行限幅。

若要向建筑物的提供的供热量为H_g,则需要的最低供水温度t_{g,min}为

$$t_{\rm g,min} = \frac{H_{\rm g}}{KF} + t_{\rm n} + \frac{\Delta t}{2} \tag{14}$$

对上述方程进行离散,通过差分法可以同时求出 热负荷 H_1 、室内温度 t_n 及供热末端所需的最低供水温 度 $t_{g,min}$,具体计算流程如图3所示。图中,在PID控制 器中,以室内设计温度 t_m 为目标,以室内温度 t_n 为负 反馈。





3 综合能源供热系统经济性计算

对于综合能源供热系统,需要从经济效益、环境 污染排放以及能量年消耗量等方面来综合评价,在数 学上为典型的多目标规划问题。实际工程中重点考虑 的是综合能源供热系统的经济性问题,本文以年化总 费用最小求解各设备功率、容量配置的参数。

年化总费用 C_{total} 是年等额投资成本 C_{inv} 和年运行成本 C_{run} 的总和

$$C_{\text{total}} = C_{\text{inv}} + C_{\text{run}} \tag{15}$$

年等额投资成本C_{inv}是系统总投资成本通过等额 分配到运行周期中的每一年的成本值

$$C_{\rm inv} = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i c_i H^i_{\rm max}$$
(16)

式中: *N*为设备的总数目; H_{max}^{i} 为设备的额定容量; c_{i} 为设备的单位投资成本; α_{i} 为设备的年等额投资折算系数。

$$\alpha_{i} = \frac{m(1+m)^{Y}}{(1+m)^{Y}-1}$$
(17)

式中: m为年利率; Y为设备寿命。 设备运行费用表达式为

$$C_{\rm run} = \sum_{h=1}^{H_o} \sum_{i=1}^{N} u_i^h E_i^h$$
(18)

式中: H_o 为设备的年总运行小时数;N为设备的总数目; u_i^h 为第i个设备在第h小时单位热量的制热费用; E_i^h 为 第i个设备在第h小时的使用量。

综合能源供热系统的运行经济性主要受用电价格 u_{ele}、天然气价格u_{gas}的影响。不同地区、时段、工商 业性质的价格都不同。

如前文所述,将供热设备分为四类。对于第一类 设备,其获取可再生资源的热量取暖,运行期间,其 单位热量的制热费用近似为0,即*u*₁=0。

对于第二类设备,其输入能源是电能,输出是热能,若其能效比或者效率为 λ_{II} ,则其单位热量的制热费用为 $u_{II}=u_{ele}/\lambda_{II}$ 。

对于第三类设备,其输入气能,同时输出电能与 热能,将输出电能的价格定为当前电价,用以计算制 热成本。假定在1 h内,机组耗气量为 V_{III} ,发电量为 P_{III} ,机组电热比为 k_{III} ,则其单位热量的制热费用为 $u_{III} = (V_{III} u_{gas} - P_{III} u_{ele})/(k_{III} P_{III})$ 。

对于第四类设备,其制热成本取决于为蓄热装置 输送热量的供热设备的单位热量制热费用 u_{in} ,若蓄热 装置存释热能效率为 λ_{IV} ,则单位热量的用热费用为 $u_{IV} = u_{in} / \lambda_{IV}$ 。

4 运行调度模型及设备参数协同优化

4.1 供热设备运行调度模型

园区综合能源系统运行的基本策略就是每个时刻,优先使用单位热能费用低的供热设备来提供热能,不足部分再由其他设备依次补充。基于该策略,针对各类供热设备,建立其输出热功率的运行调度 模型。

假定共有N种供热设备,每个时刻都按照供热设 备工作的优先次序将设备编号,编号为i。若系统中配 置了CHP机组,假定其优先次序为M。假定当前时刻 热负荷为H₁,电负荷为P₁。对于第i个设备,向供热区 域输送的热功率为Hⁱ,耗费的电能为ΔPⁱ,能效比或 热效率为λⁱ,CHP机组的电热比为kⁱ,供热设备额定 功率为Hⁱmar,最小开启热功率为Hⁱmin,额定热容量为

157

 S^i_{\max} °

对于第一类设备,其集热功率Hⁱ_{col}与当前时刻的 气象条件有关,不持续、不稳定。对于编号为*i*的设 备,因为前面*i*-1个设备已经贡献了部分热量,所以 该设备对供热末端输出的热量Hⁱ为

$$\begin{cases}
H_{\text{coll}}^{i} = \theta H_{\text{max}}^{i} \\
H^{i} = \min\{H_{1} - \sum_{j=1}^{i-1} H^{j}, H_{\text{coll}}^{i}\}
\end{cases} (19)$$

式中: 0是随时间与天气变化的量。

对于第二类设备,其输出热功率Hⁱ不能超过其额 定热功率Hⁱ_{max},对于投入优先级为*i*的设备有

$$\begin{cases} H^{i} = \min\{H_{1} - \sum_{j=1}^{i-1} H^{j}, H_{\max}^{i}\} \\ \Delta P^{i} = H^{i} / \lambda^{i} \end{cases}$$
(20)

对于第三类供热设备,比如CHP机组,考虑经济 性,一般实行"并网不上网"策略,CHP机组的运行 不仅受到当前所需热负荷的限制,还受到当前电负荷 的限制。用电负荷既包括园区的用电负荷P₁,还包含 各类供热设备本身的用电负荷。对于优先级高于CHP 的供热设备,其电负荷ΔP′需与园区用电负荷P₁叠加, 作为CHP机组发电功率的限制条件。对于优先级低于 CHP机组的供热设备,在CHP机组热功率确定后,其 热功率才能确定,进而才能决定其用电负荷;而CHP 供热量的确定又需要用到后续设备的电负荷,两者是 一个相互耦合的过程,需要进行协同优化。假定优先 次序低于CHP机组所有设备的用电功率为ΔP'。对于 投入优先级为*i*的第三类供热设备有

$$H^{i} = \min\{H_{1} - \sum_{j=1}^{i-1} H^{j}, H^{i}_{\max}, k(P_{1} + \sum_{j=1}^{i-1} \Delta P^{j} + \Delta P')\}$$
(21)

对于如相变蓄热设备的第四类供热设备,一般是 容量型设备,输出热量不能超过蓄热设备在此刻所 存储的热量*Sⁱ*,同时输出功率不超过其额定输出功率 *Hⁱ*_{max}。假定计算时间步长为Δ*τ*,对于蓄热设备,蓄热 时功率为负,放热时功率为正。对于编号为*i*的蓄热设 备,当前时刻存储的热量*Sⁱ*为

$$S^{i} = \begin{cases} S^{i}_{\text{pre}} - H^{i} \Delta \tau / \eta_{\text{f}}, & H^{i} > 0\\ S^{i}_{\text{pre}} - \eta_{\text{c}} H^{i} \Delta \tau, & H^{i} < 0 \end{cases}$$
(22)

式中: η_{f} 、 η_{c} 分别为蓄热装置放热效率与存热效率; S_{me}^{i} 为上一时刻存储的热量。

蓄热设备释放的热功率为

$$H^{i} = \min\{H_{1} - \sum_{j=1}^{i-1} H^{j}, H_{\max}^{i}, S^{i} / \Delta \tau\}$$
(23)

对于蓄热设备,要选择费用低的热能为其蓄热。 第一类设备可在集热充足的时段为蓄热设备蓄热;第 二类设备可利用谷电制热蓄热;对于电负荷高于热负 荷的园区,可以选择第三类设备在峰电时段为蓄热设 备蓄热。假定编号为G的供热设备为蓄热设备提供热 源,则提供热源的设备分别为第一类、第二类、第三 类设备时,对于编号为i的蓄热设备的蓄热功率分别为

$$H^{i} = \max\{-(H^{G}_{coll} - H^{G}), -H^{i}_{max}, -(S^{i}_{max} - S^{i}) / \Delta\tau\}$$
(24)

$$H^{i} = \max\{-(H_{\max}^{G} - H^{G}), -H_{\max}^{i}, -(S_{\max}^{i} - S^{i})/\Delta\tau\}$$
(25)

$$\begin{cases} H_{\max,t} = \min\{H_{\max}^{G}, k^{i}(P_{1} + \sum_{j=1}^{i-1} \Delta P^{j} + \Delta P')\} \\ H^{i} = \max\{-(H_{\max,t} - H^{G}), -H_{\max}^{i}, -(S_{\max}^{i} - S^{i}) / \Delta \tau\} \end{cases}$$
(26)

相应地,第G个供热设备的修正热功率 H^{G}_{mod} 为

$$H_{\rm mod}^{G} = H^{G} + \left| H_{x}^{i} \right| \tag{27}$$

对于第*i*个设备,当其输出功率低于设备最小开启 功率*H*^{*i*}_{min}时,需要对其输出热功率进行修正,修正后 的热功率*H*^{*i*}_{mod}为

$$H_{\text{mod}}^{i} = \begin{cases} 0 , & H^{i} < (\frac{1}{2} + \varepsilon) H_{\text{min}}^{i} \\ \\ H^{i}, & H^{i} \ge (\frac{1}{2} + \varepsilon) H_{\text{min}}^{i} \end{cases}$$
(28)

式中: ε为死区参数,可以防止供热设备频繁启停。

上述已经给出了各供热设备输出热功率运行调度 模型,但是供系统不但对供热设备的热功率有要求, 还对供热温度有要求。每个时刻,每个供热区域都已 得到供热末端需要的最低供水温度t_{g,min},热源端的供 水温度应该高于各供热区域t_{g,min}的最大值,出水温度 低于t_{g,min}的供热设备不能被使用。

4.2 供热设备参数优化

综合能源供热系统的设备参数优化方法如图4所 示。供热设备优化参数包括设备额定热功率、设备额 定容量。因为CHP设备、气源热泵、相变蓄热等多数 供热设备都是系列化产品,其额定功率、额定容量是 离散值,故本文采用遍历算法,针对不同参数的供热 设备,在供热季各时刻,按照前述的供热设备运行调 度模型,计算各供热设备的输出热功率,统计得到各 设备的运行费用,结合设备的初始投资,进而得到整 个综合能源供热系统的年化总费用,具体按照公式 (15)计算。最小年化总费用对应的设备配置即为最 佳供热设备配置。





Fig. 4 Flow chart of equipment parameter optimization of integrated energy heating system

5 算例分析

5.1 算例

西安市一工业园区,建立一多能互补综合能源供 热系统。供热建筑包括试验厂房、材料库房、员工宿 舍、员工餐厅。其中,试验厂房及材料库房外墙及屋 面均为聚氨酯板;宿舍、餐厅的墙体及屋面为混凝土 墙,外加石棉板保温。

试验厂房,工作日8:00~18:00,预期温度为16℃, 其余时间保持室内温度不低于5℃,6时开始供热。材 料库房,工作日8:00~18:00,预期温度为12℃,其余 时间保持室内温度不低于5℃,6时开始供热。员工宿 舍温18℃供热。餐厅,工作日7:00~18:00,预期温度 为16℃,其余时间保持室内温度不低于8℃,3时开 始供热。供热末端为铸铁式散热器。

5.2 园区电负荷及热负荷

本项目CHP机组实行"并网不上网"策略,园区 电负荷是CHP机组的限制因素。园区电负荷曲线如图 5所示。因为园区安装有屋顶光伏,所以在非工作日, 园区白天出现向电网送电的情况。

对于热负荷,材料库房以及试验厂房,由于围护 结构没有混凝土墙体,按照稳态传热计算。宿舍室内 恒温供热,所有围护结构传热按照稳态传热计算。员 工餐厅是间歇性供热,并且墙体具有很大的蓄热能 力,按照非稳态传热计算。

根据前文所述方法,同时对各建筑物热负荷、室 内温度、散热器所需最低供水温度进行协同计算。园 区总的采暖季热负荷、元旦前连续5天的各建筑室内 温度与园区需要的最低供水温度(各建筑最低供水温 度的最大值)曲线分别如图6一图8所示。



从图6可以看出,热负荷最高出现在工作日 6:00~8:00,主要是因为试验厂房、材料库房以及餐厅 室内预期温度由保温温度调整为预期工作温之后,为 了使室内的温度快速达到预期值,需要供热设备提供 较大的热功率。当室内温度升高到预期温度后,供热 设备仅提供室内保温的作用,热负荷将会逐渐减小。 中午时段,随着室外气温的升高,热负荷此时最低。 下午时段,室外气温逐步降低,热负荷又会逐渐升 高。夜间及非工作日,除了宿舍,其余厂房皆处于保 温状态,热负荷较低。

从图7可以看出,各建筑的室内温度皆可达到预 期的温度值。从图8可以看出,园区需要的供水温度 与园区热负荷成正相关,热负荷越大,供热末端需要 的供水温度越高。



图 7 元旦前连续5天采暖建筑供热温度曲线





图 8 元旦前连续5天需要的最低供水温度曲线

Fig. 8 The minimum water supply temperature curve required for five consecutive days before New Year's Day

5.3 总体方案设计

根据园区条件,确定选用CHP机组、气源热泵、 相变蓄热罐以及电锅炉4种供热设备联合供热。CHP 机组出水温度可达70~90 ℃,可为相变材料蓄热,但 因为园区的热负荷远高于电负荷,不考虑采用CHP机 组为相变装置蓄热。

综合能源供热系统拟采用两种方案,下面对这两 种方案进行优化计算并进行比较分析。方案一:相变 蓄热罐的相变温度为83 ℃,采用电锅炉在谷电时段为 相变储热罐蓄热,采用出水温度可达55 ℃的普通气源 热泵;方案二:采用高温气源热泵,出水温度可达70 ℃, 相变材料的相变温度为65 ℃,采用气源热泵为相变蓄 热装置蓄热。

5.4 供热费用及供热设备投入次序分析

天然气及市电不同时段的价格有差异,以西安大 工业用电用气为例,峰电、平电、谷电的价格分别为 0.866元/kWh、0.550元/kWh、0.234元/kWh;供热期 间,11月15日~12月31日(元旦前),天然气价格为 2.25元/m³,1月1日~3月15日(元旦后),天然气价格为 2.77元/m³。

假定CHP机组电热比1.1,综合效率72%,气源热 泵平均COP为3,电锅炉效率95%,相变蓄热罐的存释 热效率为90%。按照不同时段的能源价格,可得到前 述各种供热设备产生1 kWh热量所需要的费用,如表1 所示。其中蓄热1,蓄热2分别为方案一、方案二中相 变蓄热的费用。

表 1 不同供热设备单位热量的供热费用

Table 1 Unit heat cost of different heating equipment $\vec{x} \neq w$

						G/ 11 // 11
设备	元旦前			元旦后		
	峰电 时段	平电 时段	谷电 时段	峰电 时段	平电 时段	谷电 时段
CHP机组	-0.124	0.118	0.361	0	0.242	0.486
气源热泵	0.287	0.183	0.077	0.287	0.183	0.077
电锅炉	0.866	0.550	0.234	0.866	0.550	0.234
蓄热1	0.256	0.256	0.256	0.256	0.256	0.256
蓄热2	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085

按照供热费用的高低来决定供热设备的投入优先 级,单位供热费用越低,设备投入优先级越高。

以方案一为例,元旦前的峰电时段,供热设备投 入次序依次为: CHP、相变蓄热、气源热泵、电锅炉; 平电时段,供热设备投入次序依次为: CHP、气源热 泵、相变蓄热、电锅炉。其他时段与此类似分析,不 再赘述。

5.5 供热设备参数优化

按照前述的综合能源供热系统设备参数配置优化 流程,计算年化总费用随气源热泵额定热功率H_q、相 变容量S_x及CHP机组额定电功率的变化情况。方案一 与方案二计算结果,分别如图9、图10所示。其中, CHP机组正常工作于额定功率的80%。

未对电锅炉额定功率进行优化的原因是,电锅炉 的投入次序都是最后的,其额定热功率以整个供热期 需要电锅炉输出热功率的最大值来确定。



图 9 方案一中年化总费用随设备参数的变化图 Fig. 9 The change of the total annualized cost with equipment parameters in scheme 1



图 10 方案二年化总费用随设备参数的变化图 Fig. 10 The change of the total annualized cost with equipment parameters in scheme 2

从图9可以看出,对于方案一,供热系统的最佳 配置为200 kW气源热泵,1400 kWh相变蓄热罐,250 kW CHP机组,700 kW电锅炉,年化总费用为13.34万 元。从图10可以看出,对于方案二,该综合能源供热 系统的最佳配置为300 kW热泵,200 kW CHP机组, 400 kW电锅炉,年化总费用为10.92万元。方案二的 经济性优于方案一,但方案二需要用到高温气源热 泵,产品选择范围小,技术成熟度低。

园区总的年用热量为1944 GJ,采暖面积约为 14200 m²,市政集中供热的年运行费用为19.4万元。不 考虑建设费用的情况下,方案一及方案二的年化总费 用分别为市政集中供热的68.7%、56.2%。

图11、图12分别为方案一、方案二各供热设备, 在元旦前连续5天的热功率曲线图。从图中可以看出, 每个时刻都是费用低的供热设备优先使用,不足部分 才由其他供热设备依次补充,多种设备联合供热,共 同提供与热负荷等值的热功率。验证了本文运行调度 模型的正确性。





Fig. 11 Thermal power curve of each heating equipment for five consecutive days before New Year's Day in scheme 1



图 12 方案二元旦前连续5天供热设备热功率曲线 Fig. 12 Thermal power curve of each heating equipment for five consecutive days before New Year's Day in scheme 2

设备供热,不仅要满足热功率要求,还要满足设备出水温度与供热末端所需要的供水温度的相容性要求。在方案一种,在早间大功率热负荷时段,最低供水温度高于气源热泵的供水温度55℃,此时气源热泵停止工作,而是由电锅炉进行供热;而方案二中,由于使用高温气源热泵,热泵可以全时段工作,因此仅在热泵供热不足时,电锅炉才投入使用。

从算例可见,本文提出的多能互补的综合能源运 行调度模型及参数优化方法可以用于区域供热系统中 设备的出力调度与参数优化。同时表明,对于该算 例,建设区域综合能源供热系统相比于市政集中供 热,具有可观的经济效益。

6 结论

建立多能互补综合能源供热系统是提高能源利用 率及节能减排的重要途径。目前综合能源系统设计优 化,广泛采用典型日热负荷以及混合整数规划算法。 本文建立的逐时热负荷预测模型,考虑了多种类型的 围护结构传热模型,以及供热系统的设计温度与供热 末端散热的影响,使其能够适用于不同类型建筑的间 隙性供热场合,能够提供大时间尺度、全天候工况的 热负荷预测。建立的供热设备调度模型及基于遍历算 法的参数优化方法通用性强,能够适用于各类供热设 备,而且算法复杂度低,适合工程计算,为综合能源 供热系统工程设计与优化提供了新的思路。

未来可研究供热系统能量传输损耗及工程建设费 用对供热设备参数优化的影响,进一步指导综合能源 系统的设计及提升其经济性。

参考文献

- 王春青,王舒展,徐凯,等.集中供热管网热损失实测分析[J].吉林建筑大学学报,2015,32(3):39-42.
 WANG Chunqing, WANG Shuzhan, XU Kai, et al. Heat loss measurement analysis of central heating pipe network[J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2015, 32(3): 39-42(in Chinese).
- [2] 余晓丹,徐宪东,陈硕翼,等.综合能源系统与能源互联 网简述[J].电工技术学报,2016,31(1):1-13.
 YU Xiaodan, XU Xiandong, CHEN Shuoyi, et al. A brief review to integrated energy system and energy Internet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 1-13(in Chinese).
- [3] 耿房,周旭,王志杰.多能源综合供热系统案例分析[J].暖 通空调,2017,47(10):86-89.
 GENG Fang, ZHOU Xu, WANG Zhijie. Case study on multienergy integrated heating system[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2017, 47(10):86-89(in Chinese).
- [4] 刘洪,陈星屹,李吉峰,等.基于改进CPSO算法的区域

电热综合能源系统经济调度[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 193-200.

LIU Hong, CHEN Xingyi, LI Jifeng, et al. Economic dispatch based on improved CPSO algorithm for regional powerheat integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 193-200(in Chinese).

[5] 施锦月,许健,曾博,等.基于热电比可调模式的区域综合能源系统双层优化运行[J].电网技术,2016,40(10): 2959-2966.

SHI Jinyue, XU Jian, ZENG Bo, et al. A Bi-level optimal operation for energy hub based on regulating heat-to-electric ratio mode[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2959-2966(in Chinese).

- [6] 顾泽鹏,康重庆,陈新宇,等.考虑热网约束的电热能源 集成系统运行优化及其风电消纳效益分析[J].中国电机工 程学报,2015,35(14):3596-3604.
 GU Zepeng, KANG Chongqing, CHEN Xinyu, et al. Operation optimization of integrated power and heat energy systems and the benefit on wind power accommodation considering heating network constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3596-3604(in Chinese).
- [7] 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(in Chinese).
- [8] 于波,吴亮,卢欣,等.区域综合能源系统优化调度方法
 [J].电力建设,2016,37(1):70-76.
 YU Bo, WU Liang, LU Xin, et al. Optimal dispatching method of integrated community energy system[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(1):70-76(in Chinese).
- [9] 王伟亮,王丹,贾宏杰,等.考虑运行约束的区域电力-天然气-热力综合能源系统能量流优化分析[J].中国电机工程学报,2017,37(24):7108-7120.

WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Analysis of energy flow optimization in regional electricity-gasheat integrated energy system considering operational constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7108-7120(in Chinese).

- [10] 杨帅,陈磊,徐飞,等. 基于能量流的电热综合能源系统弃 风消纳优化调度模型[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 417-426. YANG Shuai, CHEN Lei, XU Fei, et al. Optimal dispatch model of wind power accommodation in integrated electricalthermal power system based on power flow model[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 417-426(in Chinese).
- [11] 顾伟,陆帅,王珺,等.多区域综合能源系统热网建模及系 统运行优化[J].中国电机工程学报,2017,37(5):1305-1316. GU Wei,LU Shuai, WANG Jun, et al. Modeling of the heating network for multi-district integrated energy system and its operation optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5):1305-1316(in Chinese).
- [12] 周灿煌,郑杰辉,荆朝霞,等.面向园区微网的综合能源系

统多目标优化设计[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1687-1697. ZHOU Canhuang, ZHENG Jiehui, JING Zhaoxia, et al. Multiobjective optimal design of integrated energy system for parklevel microgrid[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1687-1697(in Chinese).

- [13] 邹同华, 涂光备, 申江, 等. 太阳能吸收式制冷的最佳发 生温度及节能分析[J]. 流体机械, 2004, 32(2): 50-53.
 ZOU Tonghua, TU Guangbei, SHEN Jiang, et al. Optimum generation temperature of solar absorption refrigeration and analysis on its saving energy[J]. Fluid Machinery, 2004, 32(2):50-53(in Chinese).
- [14] 于群. 干热岩供热技术的探讨[J]. 建筑工程技术与设计, 2014(32): 813.

YU Qun. The discussion of hot dry rock heating technology[J]. Architectural Engineering Technology and Design, 2014(32): 813(in Chinese).

- [15] 王峡, 亢磊. 干热岩供热技术的应用[J]. 煤气与热力, 2017, 37(10): 1-2.
 WANG Xia, KANG Lei. Application of hot dry rock heating technology[J]. Gas & Heat, 2017, 37(10): 1-2(in Chinese).
- [16] 叶琪超,楼可炜,张宝,等.多能互补综合能源系统设计 及优化[J].浙江电力,2018,37(7):5-12.
 YE Qichao, LOU Kewei, ZHANG Bao, et al. Design and optimization of multi-energy complementary integrated energy system[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(7): 5-12(in Chinese).
- [17] 姚帅,顾伟,陆帅,等.一种考虑建筑物蓄热特性的分布 式冷热电联供系统运行优化方法[J].分布式能源,2018, 3(4):16-23.

YAO Shuai, GU Wei, LU Shuai, et al. An operational optimization method of combined cooling, heating and power system considering heat storage characteristics of buildings[J]. Distributed Energy, 2018, 3(4): 16-23(in Chinese).

 [18] 刘玉香,李风雷. 动态热负荷下的供热调节[J]. 山西能源与 节能,2009(4): 76-78.
 LIU Yuxiang, LI Fenglei. Dynamic heat load of heating under

the regulation[J]. Shanxi Energy and Conservation, 2009(4): 76-78(in Chinese).

- [19] 邵宝力. 多层平板一维非稳态导热问题的数值解法[J]. 山东 化工, 2018, 47(24): 71-72.
 SHAO Baoli. Numerical method for one-dimensional unsteady heat conduction problem of multilayer plates[J]. Shandong Chemical Industry, 2018, 47(24): 71-72(in Chinese).
- [20] 冉春雨. 供热工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.

收稿日期: 2020-10-17; 修回日期: 2020-12-22。

作者简介:



熊显智(1988),男,硕士,工 程师,主要从事微电网及综合能源系 统设计及优化方面的工作,E-mail: xiongxz@xdps.com.cn。

(责任编辑 张鹏)