

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201808033



# 不同散热末端耦合运行调节方法

马佳慧, 王美萍, 田琦

(太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 晋中 030600)

**摘要:** 针对目前集中供热系统热量提供的不准确和用户端的热力失调等问题, 提出 3 种对不同末端用户进行耦合计算的方法. 采用水力失调度和热力失调度作为判断依据, 进而由综合失调度进行分析比较, 并通过具体实例计算分析. 结果表明: 加权值计算方法耦合的一次侧运行调节公式更适合指导供热系统的运行调节.

**关键词:** 供热量; 耦合计算; 水力失调度; 调节公式

**中图分类号:** TU 833

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2019)02-0209-06

## Coupling Operation Regulation Method of Multi-Cooling Terminal

MA Jiahui, WANG Meiping, TIAN Qi

(Environmental Science and Engineering, College Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China)

**Abstract:** At present, the central heating system is operated and adjusted according to the end-user as a type of heat dissipation mode, which leads to the inaccuracy of the system heat supply and the thermal imbalance of the end-user. In this paper, three kinds of coupling ways for the different end-user heating parameters were calculated using hydraulic imbalance degree and thermal imbalance degree as the bases, and then compared through the comprehensive imbalance degree and the calculation analysis results of the examples. The results show that a side operation adjustment formula coupled by the weighted value calculation method is more suitable for guiding the operation of the heating system.

**Keywords:** heating load; coupling calculation; hydraulic imbalance degree; adjustment formula

三北地区集中供热系统因其管网的庞大<sup>[1-3]</sup>、热量输送过程的时间差<sup>[4]</sup>、建筑物的热惯性<sup>[5]</sup>等问题, 目前系统集中运行调控大多处于较为粗放的阶段<sup>[6]</sup>. 随着室外温度变化<sup>[7-8]</sup>, 目前热源、热交换站运行调控往往仅对单一用户进行执行<sup>[9]</sup>, 未对不同末端用户类型进行区别对待<sup>[10-11]</sup>, 各种用户均采用相同的供热参数, 导致系统供热量与用户需热量不符, 用户热舒适性差<sup>[12-13]</sup>, 系统运行能耗大<sup>[14-16]</sup>. 本文针对散热器和地板辐射两种供暖末端用户, 对供热系统一次侧运行调节提出 3 种耦合处理方法.

### 1 不同供暖散热末端运行调节的耦合方法

#### 1.1 不同供暖末端供暖系统模型

不同供暖末端供暖系统为间接连接的集中供热系统、散热器和地暖的热负荷确定比例后, 通过三通

**收稿日期:** 2018-08-23

**通信作者:** 王美萍(1976-), 女, 副教授, 博士, 主要从事集中暖通空调系统节能优化及新能源利用的研究. E-mail: wangmp@126.com.

**基金项目:** “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAJ04B02)

阀门调节流量分配比例,进而调节热量输配的比例.由热源提供热水,再经两个换热站换热,热量一部分提供至散热器的热用户,另一部分提供至地板辐射的热用户.然后,在末端充分放热后流回至换热站,再由热源提供的热水进行换热,以此循环.系统运行模型,如图 1 所示.

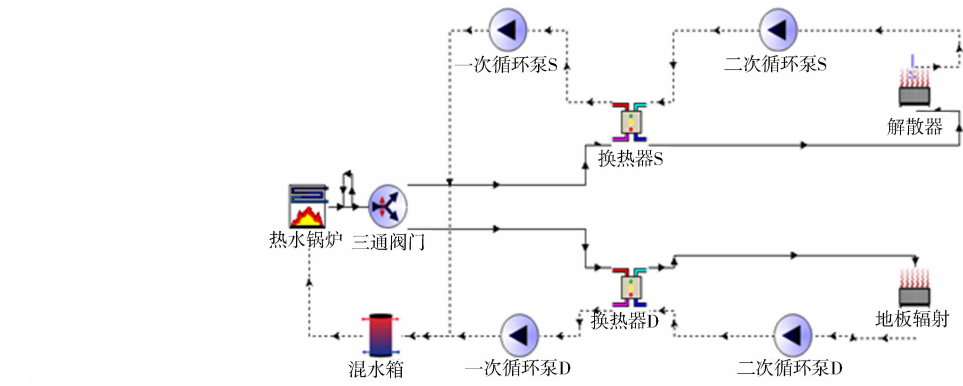


图 1 系统运行模型  
Fig. 1 System operation model

1.2 二次网调节公式

1.2.1 运行调节方式 常见的两种运行调节方式有质调节和量调节.质调节是指在整个供暖期间,随着室外温度的变化,只改变热源处网路的供水温度,而网路的循环流量维持设计流量不变的一种调节方法.量调节是指在整个供暖期间,网路供水温度始终维持设计温度不变,随着室外温度的变化,不断改变热源处网路循环流量以适应热负荷变化的一种调节方法.

1.2.2 散热器末端用户 根据目前应用最广泛的散热器热水供暖用户系统热平衡方程<sup>[17]</sup>,可得如下两种运行调节公式.

1) 二次网为无混水时的质调节的运行调节公式为

$$t_{gS} = t_n + 0.5(t'_{gS} + t'_{hS} - 2t_n)\bar{Q}^{1/(1+b)} + 0.5(t'_{gS} - t'_{hS})\bar{Q}. \tag{1}$$

$$t_{hS} = t_n + 0.5(t'_{gS} + t'_{hS} - 2t_n)\bar{Q}^{1/(1+b)} - 0.5(t'_{gS} - t'_{hS})\bar{Q}. \tag{2}$$

由于供暖系统中各供暖末端用户散热器形式不一,但实际上,供热系统中用户末端多选用柱型和M-132 型散热器.根据相关技术资料<sup>[15]</sup>, $b=0.3,1/(1+b)=0.77$ .

2) 二次网为量调节时的运行调节公式为

$$t_{gS} = t'_{gS}, \tag{3}$$

$$t_{hS} = 2t_n + (t'_{gS} - t'_{hS} - 2t_n)\bar{Q}^{1/(1+b)} - t'_{gS}. \tag{4}$$

式(1)~(4)中: $\bar{Q}$ 为相对供暖负荷比和相对流量比; $t_{gS},t'_{gS}$ 分别为散热器二次网实际运行供水温度和设计供水温度; $t_{hS},t'_{hS}$ 分别为散热器二次网实际运行回水温度和设计回水温度; $t_n$ 为供暖室内设计温度.

1.2.3 地板辐射用户末端 依据地暖热水供暖用户系统热平衡方程<sup>[18]</sup>,可得如下两种运行调节公式.

1) 二次网为无混水的质调节时的运行调节公式为

$$t_{gD} = t_n + (t'_{pj} - t_n)\bar{Q}^{0.969} + (t'_{gD} - t'_{pj})\bar{Q}, \tag{5}$$

$$t_{hD} = t_n + (t'_{pj} - t_n)\bar{Q}^{0.969} + (t'_{hD} - t'_{pj})\bar{Q}. \tag{6}$$

式(5),(6)中:地板辐射供暖的地板表面平均温度计算表达式为  $t_{pj}=t_n+9.82\left(\frac{q}{100}\right)^{0.969}$ ,其中, $q$ 为单位地面面积所需散热量, $W\cdot m^{-2}$ ;  $t_n$ 为室内温度.

2) 二次网为量调节时的运行调节公式为

$$t_{gD} = t'_{gD}, \tag{7}$$

$$t_{hD} = 2t_n - t'_{gD} + 2(t'_{pj} - t_n)\bar{Q}^{0.969} + (t'_{gD} + t'_{hD} - 2t'_{pj})\bar{Q}. \tag{8}$$

式(7)~(8)中: $t_{gD},t'_{gD}$ 分别为地暖二次网实际运行供水温度和设计供水温度; $t_{hD},t'_{hD}$ 分别为地暖二次网实际运行回水温度和设计回水温度; $t'_{pj}$ 为地板辐射供暖的地板表面平均温度.

1.3 不同供暖散热末端运行调节耦合计算方法

针对间接连接供热系统,利用二次侧两种散热类型的运行调节方法,给出一次侧采用质调节时,3 种不同的耦合计算方法.

1.3.1 依据散热末端负荷偏大者的调节 若散热器用户热负荷  $Q_{ns}$  大于地板辐用户热负荷  $Q_{nd}$ ,则一次网供回水温度调节根据二次侧供暖用户末端为散热器确定,即

$$\begin{aligned}\tau_1 &= \tau_{1S}, \\ \tau_2 &= \tau_{2S}.\end{aligned}$$

其中: $\tau_1, \tau_2$  为供暖末端为散热器时一次侧设计工况下的供回水温度. 若  $Q_{ns} < Q_{nd}$ ,则一次网供回水温度调节根据二次侧供暖用户末端为地板辐射确定, $\tau_1 = \tau_{1D}, \tau_2 = \tau_{2D}$ ,其中, $\tau_1, \tau_2$  为供暖末端为地板辐射时,一次侧设计工况下的供回水温度.

1.3.2 依据散热末端的平均值调节 若  $Q_{ns} > Q_{nd}$  或  $Q_{ns} < Q_{nd}$ ,则一次网供回水温度均根据二次侧供暖用户末端为散热器和地板辐射时一次侧设计工况下的供回水温度的平均值决定,即

$$\begin{aligned}\tau_1 &= \frac{\tau_{1S} + \tau_{1D}}{2}, \\ \tau_2 &= \frac{\tau_{2S} + \tau_{2D}}{2}.\end{aligned}$$

1.3.3 依据散热末端的加权平均值的调节 一次侧供回水温度根据供暖用户末端为散热器的计算负荷  $Q_{ns}$  和供暖用户末端为地板辐射的计算负荷  $Q_{nd}$  占总计算负荷  $Q_n$  的比例确定. 假设  $Q_{ns}$  占总计算负荷比例  $Q_n$  为  $a, Q_{nd}$  占总计算负荷比例  $Q_n$  为  $b$ ,即

$$\begin{aligned}\tau_1 &= a\tau_{1S} + b\tau_{1D}, \\ \tau_2 &= a\tau_{2S} + b\tau_{2D}.\end{aligned}$$

其中:

$$\begin{aligned}\tau_{1S} &= \frac{[(\tau'_1 - \tau'_2)\bar{Q} + t_h]e^{D_S} - t_g}{e^{D_S} - 1}; \\ \tau_{1D} &= \frac{[(\tau'_1 - \tau'_2)\bar{Q} + t_h]e^{D_D} - t_g}{e^{D_D} - 1}; \\ \tau_{2S} &= \tau_{1S} - (\tau'_1 - \tau'_2)\bar{Q}; \\ \tau_{2D} &= \tau_{1D} - (\tau'_1 - \tau'_2)\bar{Q}.\end{aligned}$$

$\tau_1, \tau'_1$  分别为耦合后一次网实际运行供水温度和设计供水温度; $\tau_2, \tau'_2$  分别为耦合后一次网实际运行回水温度和设计回水温度; $\tau_{1S}, \tau'_{1S}$  分别为散热器一次网实际运行供水温度和设计供水温度; $\tau_{2S}, \tau'_{2S}$  分别为散热器一次网实际运行回水温度和设计回水温度; $\tau_{1D}, \tau'_{1D}$  分别为地暖一次网实际运行供水温度和设计供水温度; $\tau_{2D}, \tau'_{2D}$  分别为地暖一次网实际运行回水温度和设计回水温度; $D_S, D_D$  均为常数,

$$\begin{aligned}D_S &= [(\tau'_1 - \tau'_2) - (t'_{gS} - t'_{hS})]/\Delta t'_S, \\ \Delta t'_S &= [\tau'_1 - t'_{gS}] - (\tau'_2 - t'_{hS})/\ln \frac{\tau'_1 - t'_{gS}}{\tau'_2 - t'_{hS}}, \\ D_D &= [(\tau'_1 - \tau'_2) - (t'_{gD} - t'_{hD})]/\Delta t'_D, \\ \Delta t'_D &= [(\tau'_1 - t'_{gD}) - (\tau'_2 - t'_{hD})]/\ln \frac{\tau'_1 - t'_{gD}}{\tau'_2 - t'_{hD}}.\end{aligned}$$

利用耦合而得的一次网供回水温度,计算出二次网的供回水温度.

2 供热稳定性判断依据

水力失调是影响系统供热质量的重要原因. 衡量供热系统水力失调的程度用热用户实际流量和规定流量的比值表示<sup>[17]</sup>,即  $x = V_S/V_g$ . 其中, $x$  为水力失调度; $V_S, V_g$  分别为热用户的实际流量和规定流量. 热力失调是最终判断系统供热质量好坏的指标,用热用户实际供热量和规定供热量的比值表示,即  $y = Q_S/Q_g$ . 其中: $y$  为热力失调度; $Q_S, Q_g$  分别为热用户的实际供热量和规定需热量.

当水力失调度或热力失调度等于 1 时,即实际流量等于设计流量、系统供热量等于实际需热量,供

热系统处于稳定的水力工况和热力工况. 当水力失调度或热力失调度与 1 相差越大, 供热系统水力失调与热力失调越严重. 因此, 通过比较用户端的水力失调度 and 热力失调度判断哪种耦合供热参数的方法更适合一次网系统的运行调节.

3 算例分析

以山西省太原市某一热水供热间接连接系统为例, 供暖建筑的面积为 840 万 m<sup>2</sup>, 供暖面积热指标取 50 W · m<sup>-2</sup>. 一次侧设计供回水温度取 120 °C/70 °C. 二次侧用户末端为散热器时, 设计供回水温度取 75 °C/50 °C; 地板辐射采暖时, 取 50 °C/40 °C, 且考虑面层为木板. 一次网、二次网循环流量公式和供暖热负荷公式可参考文献[19]. 设散热器用户负荷占比为 40%, 地板辐射用户负荷占比为 60%. 供热末端为散热器时, 一次网运行调节的公式中常数  $D=1.253$ ; 供热末端为地板辐射时, 一次网运行调节公式中常数  $D=0.847$ . 依照提出的 3 种耦合计算方法, 水力失调度 and 热力失调度, 如表 1~2 所示. 表 1~2 中:  $\bar{Q}$  为相对负荷.

表 1 不同耦合方式下散热器的失调度  
Tab. 1 Imbalance degree of the radiator under different coupling modes

调节方式	项目	失调度	$\bar{Q}$						
			0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
质调节	偏大值	热力失调度	1	1	1	1	1	1	1
		水力失调度	1	1	1	1	1	1	1
	平均值	热力失调度	1	1	1	1	1	1	1
		水力失调度	1	1	1	1	1	1	1
	加权值	热力失调度	1	1	1	1	1	1	1
		水力失调度	1	1	1	1	1	1	1
量调节	偏大值	热力失调度	0.824 60	0.845 80	0.867 60	0.891 30	0.918 80	0.952 90	0.999 70
		水力失调度	1.212 70	1.182 40	1.152 60	1.121 90	1.088 40	1.049 40	1.000 30
	平均值	热力失调度	0.912 29	0.922 86	0.933 78	0.945 66	0.959 40	0.976 47	0.998 85
		水力失调度	1.096 14	1.083 59	1.070 92	1.057 46	1.042 32	1.024 09	1.003 15
	加权值	热力失调度	0.894 76	0.907 44	0.920 54	0.934 80	0.951 28	0.971 76	0.999 81
		水力失调度	1.117 62	1.102 00	1.086 32	1.069 75	1.051 22	1.029 06	1.000 19

表 2 不同耦合方式下地板辐射的失调度  
Tab. 2 Imbalance degree of the floor radiation under different coupling modes

调节方式	项目	失调度	$\bar{Q}$						
			0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
质调节	偏大值	热力失调度	1	1	1	1	1	1	1
		水力失调度	1	1	1	1	1	1	1
	平均值	热力失调度	1	1	1	1	1	1	1
		水力失调度	1	1	1	1	1	1	1
	加权值	热力失调度	1	1	1	1	1	1	1
		水力失调度	1	1	1	1	1	1	1
量调节	偏大值	热力失调度	1.000 00	1.000 00	1.000 00	1.000 00	1.000 00	1.000 00	1.000 00
		水力失调度	1.000 00	1.000 00	1.000 00	1.000 00	1.000 00	1.000 00	1.000 00
	平均值	热力失调度	1.141 83	1.126 48	1.111 32	1.095 11	1.075 82	1.048 94	1.003 05
		水力失调度	0.875 79	0.887 72	0.899 83	0.913 15	0.929 53	0.953 35	0.998 96
	加权值	热力失调度	1.112 84	1.100 75	1.088 89	1.076 28	1.061 41	1.040 86	1.003 81
		水力失调度	0.898 61	0.908 47	0.918 37	0.929 13	0.942 15	0.960 74	0.996 20

由表 1,2 可以得出以下两点主要结论.

1) 当一次网、二次网均采用质调节时, 散热器和地板辐射的水力失调度 and 热力失调度均为 1, 不受末端用户计算方法的影响, 系统的稳定性强, 系统供热量也满足供暖末端实际的需热量, 但单纯质调节运行能耗高, 不利于节能.

2) 当一次网为质调节、二次网采用量调节时,如选用供热参数偏大值,散热器和地板辐射的水力失调度和热力失调度均较大地偏离 1,热力失调度最高可达 18%,水力失调度高达 21%,系统的水力工况不稳定,系统供热量也不满足供暖末端的需热量.如选用供热参数平均值和加权值,散热器和地板辐射的水力失调度和热力失调度均较小地偏离 1,热力失调度低至 0.3%,水力失调度低至 0.1%.

为进一步判断平均值和加权值两种耦合计算方法,引入综合失调度概念,比较结果,如表 3 所示.综合失调度=|散热器失调度-1|+|地板辐射失调度-1|,综合失调度值越高,系统供热量与用户实际需热量偏差越大,反之亦然.

表 3 散热器和地板辐射的综合失调度  
Tab. 3 Comprehensive degrees of the radiator and the floor radiation

项目	失调度	$\bar{Q}$						
		0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
平均值	热力失调度	0.229 54	0.203 62	0.177 54	0.149 44	0.116 42	0.070 75	0.004 20
	水力失调度	0.220 35	0.195 87	0.171 09	0.144 30	0.112 79	0.070 75	0.004 19
加权值	热力失调度	0.218 08	0.193 32	0.168 35	0.141 48	0.110 13	0.069 10	0.004 00
	水力失调度	0.219 02	0.193 54	0.167 95	0.140 62	0.109 07	0.068 32	0.003 99

由表 3 可知:采用加权值的综合失调度较小地偏离 1,系统的稳定性最强,系统供热量与供暖末端的需热量更加接近.因此,通过加权耦合得出指导意义的二次网供回水温度曲线,如图 2 所示.图 2 中: $t$  为温度.

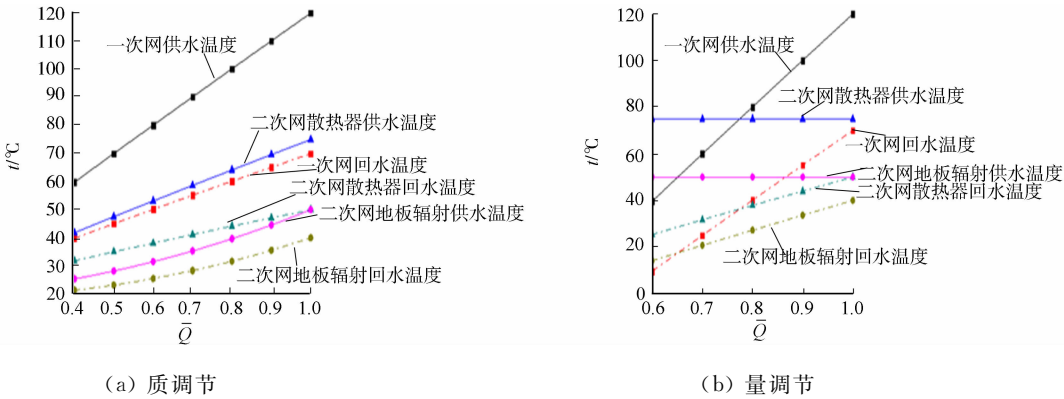


图 2 二次网供回水温度曲线  
Fig. 2 Curve of water supply & return temperature of the secondary network

4 结束语

实际供热系统中既有散热器又有地板辐射末端用户,而常规系统的运行调节仅依赖于单一散热末端进行,导致系统供热量与用户需热量间不匹配问题.文中提出了基于不同用户末端的 3 种耦合计算方法,考虑在一次侧采用质调节情况下,采用综合失调度作为判断供热质量好坏的依据,通过计算实例分析两种散热末端用户在不同分配比下,得出用加权耦合一次侧供热参数的方法,系统供热量与热用户需热量间更加匹配,更符合经济性和节能性要求.

参考文献:

[1] XIAO Tijiao. Hydraulic imbalance of central heating pipe network and its counter measures[J]. Heilongjiang Science, 2016; 7(16): 56-57. DOI: 10. 3969/j. issn. 2095-6630. 2016. 27. 325.

[2] WANG Xiao, LIN Fu, ZHAO Xiling, et al. Thermodynamic analysis of a central heating system combing the urban heat network with geothermal energy[C]// ASME 2013 7th International Conference on Energy Sustainability Collocated with the ASME 2013 Heat Transfer Summer Conference and the ASME 2013 11th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology. [S. l.]: ASME, 2013: 14-19. DOI: 10. 1115/es2013-18285.

[3] 晋娜娜, 田琦, 王美萍, 等. 基于供热调节方式的混水直连模式的适用性[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2014, 35

- (1);72-75. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.01.0072.
- [4] ZHU Xiaojing, MOROOKA S, OKA Y. Numerical investigation of grid spacer effect on heat transfer of supercritical water flows in a tight rod bundle[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2014, 76(2): 245-257. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2013.10.003.
- [5] GU Wei, WU Chenyu, WANG Jun, *et al.* Optimal operation for integrated energy system considering thermal inertia of district heating network and buildings[J]. Applied Energy, 2017, 199(5): 234-246. DOI:10.1016/j.apenergy.2017.05.004.
- [6] 关银俊. 北京建筑大学大兴校区: 区域燃气锅炉房调控运行分析[D]. 北京: 北京建筑大学, 2016.
- [7] CAO Jingfu, LI Mingcai, WANG Min, *et al.* Effects of climate change on outdoor meteorological parameters for building energy-saving design in the different climate zones of China[J]. Energy and Buildings, 2017, 146(4): 65-72. DOI:10.1016/j.enbuild.2017.04.045.
- [8] ZAKHAREVICH A E. The influence of the daily fluctuations of outside air temperature on the indoor climate[J]. 2016, 15(6): 476-480. DOI:10.21122/2227-1031-2016-15-6-476-480.
- [9] 张美玲, 刘曙光. 区域供热系统的热负荷预测方法研究[J]. 山西建筑, 2018, 44(3): 120-121. DOI:10.3969/j.issn.1009-6825.2018.03.065.
- [10] LI Yemao, XIA Jianjun, SU Yingbo, *et al.* Systematic optimization for the utilization of low-temperature industrial excess heat for district heating[J]. Energy, 2018, 144(1): 984-991. DOI:10.1016/j.energy.2017.12.048.
- [11] KANG Zhiqiang, MENG Qin, YANG Xue, *et al.* Analysis of the energy consumption and economic for combined heating supply system based on groundwater heat pump and boiler plant[J]. Procedia Engineering, 2016, 146(6): 530-535. DOI:10.1016/j.proeng.2016.06.391.
- [12] CAO Bin, ZHU Yingxin, LI Min, *et al.* Individual and district heating: A comparison of residential heating modes with an analysis of adaptive thermal comfort[J]. Energy and Buildings, 2014, 78(78): 17-24. DOI:10.1016/j.enbuild.2014.03.063.
- [13] 袁炯炯, 孟庆林, 袁彦峰. 厦门地区典型农村住宅夏季室内热环境实测与分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2017, 38(1): 53-57. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201701010.
- [14] YAN Feng. Heating energy saving control system based on differential evolution algorithm[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2017, 39(3): 328-332. DOI:10.7688/j.issn.1000-1646.2017.03.16.
- [15] 赵蕾, 王嘉, 朱立东, 等. 间接连接区域供热系统动态特性及控制策略仿真[J]. 热科学与技术, 2014(2): 142-149. DOI:10.13738/j.issn.1671-8097.2014.02.005.
- [16] 李静, 杨俊红, 王朴方, 等. 集中供热系统运行能效评价及节能潜力分析[J]. 区域供热, 2017(3): 7-14. DOI:10.16641/j.cnki.cn11-3241/tk.2017.03.002.
- [17] 贺平, 孙刚. 供热工程[M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993: 279-280.
- [18] 王潇. 地温热水地面辐射供暖系统调节的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [19] 李德英. 供热工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.

(责任编辑: 陈志贤      英文审校: 刘源岗)